

ผลกระทบของการกระตุ้นด้วยเจ็ดควบคุมต่อคุณลักษณะของเจ็ดในกระแสมขวาง



นายพรชัย กรศรี

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF CONTROL JETS ON CHARACTERISTIC OF A JET IN  
CROSSFLOW



Mr. Pornchai Kornsri


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

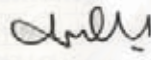
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของการกระตุ้นด้วยเจ็ดควบคุมต่อคุณลักษณะของเจ็ดใน  
กระแสมขวาง  
โดย นายพรชัย กรศรี  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์

---

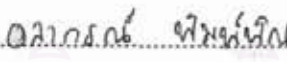
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนรินทร์วงศ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(อาจารย์ ดร. อลงกรณ์ พิมพ์พิณ)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพบุลย์ ศรีกากร)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เลิศนวัฒน์)

พรชัย กรศรี: ผลกระทบของการกระตุ้นด้วยเจ็ตควบคุมต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง (EFFECTS OF CONTROL JETS ON CHARECTERISTIC OF A JET IN CROSSFLOW) อ.ที่ปรึกษา: รศ. ดร. อธิ บุญจิตราคุลย์, อ.ที่ปรึกษาร่วม: อ. ดร. อลงกรณ์ พิมพ์พัฒน์, 143 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของเจ็ตควบคุมต่อคุณลักษณะและโครงสร้างความเร็วของเจ็ตในกระแสลมขวาง (JICF) ที่ค่าความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 3.87 เรโนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 23,500 โดยมีเป้าหมายเพื่อลดความสูงของเส้นทางเดินของเจ็ตและเพื่อเพิ่มการเหนี่ยวนำการผสม การศึกษานี้ได้ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาดำแหน่งเชิงมุมรอบปากเจ็ตและอัตราส่วนเชิงมวล ( $r_m$ ) ของเจ็ตควบคุมที่เหมาะสม โดยพบว่า ภายใต้ขอบเขตของการทดลองที่ศึกษา ตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมที่เหมาะสมคือ  $\pm 15$  องศา และอัตราส่วนเชิงมวลที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ยังพบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมที่บริเวณด้านปะทะลม (windward) จะมีผลทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตต่ำลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งด้านหลังลม (leeward) จะมีผลทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF

ผลการศึกษาพบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเหมาะสมข้างต้น จะทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตต่ำลง และ การเหนี่ยวนำการผสมดีขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การฉีดเจ็ตควบคุมนั้น จะลดบทบาทและการพัฒนาตัวของ windward jet shear layer ในทางตรงกันข้าม จะช่วยเพิ่มบทบาทและส่งเสริมการพัฒนาตัวของ lateral skewed mixing layers เป็นผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสมที่ดีขึ้นที่บริเวณด้านข้างของเจ็ต (suppress windward jet shear layer, promote lateral skewed mixing layers) นอกจากนี้แล้ว ยังส่งเสริมให้เกิดความปั่นป่วน (promote turbulence) ที่บริเวณ lateral skewed mixing layer นี้ด้วย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล .....ลายมือชื่อนิสิต ..... พรชัย กรศรี  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล .....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ปีการศึกษา ..... 2550 .....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... อ.อลงกรณ์ พิมพ์พัฒน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4770590121: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD: CONTROL JETS/ JET IN CROSSFLOW/ VELOCITY DISTRIBUTION

PORNCHAI KORNSRI: EFFECTS OF CONTROL JETS ON CHARACTERISTIC OF A JET IN CROSSFLOW

THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA, Ph.D.,

THESIS COADVISOR: ALONGKORN PIMPIN, Ph.D., 143 pp.

Effects of azimuthal control jets on a jet in crossflow (JICF) are investigated. The goals of this study are in two folds: 1) finding the optimum azimuthal positions ( $\theta$ ) of the control jets as well as the mass flowrate ratio of the control jet to the main jet ( $r_m$ ) such that the controlled JICF has lower trajectory and better entrainment, and 2) under this optimum condition of the control jets, investigating the effects of the controlled jets on the JICF. The experiment is conducted for the JICF with the effective velocity ratio of 3.87 and the jet Reynolds number of 23,500.

The first part of this experimental investigation, which is conducted with a limited range of the two control parameters, shows that the optimum values of the azimuthal positions of the control jets and the mass flow rate ratio are  $\pm 15$  degree and 2 per cents, respectively. In addition, the experiment also shows that, when the control jets are deployed on the windward side, the trajectory of the controlled JICF is lower than the uncontrolled JICF. On the other hand, when the control jets are deployed on the leeward side, the trajectory of the controlled JICF is higher than the uncontrolled counterpart.

In the second part of the experiment, the effects of the control jets at the formentioned optimum condition ( $\theta = \pm 15^\circ$ ,  $r_m = 2\%$ ) on the JICF are investigated in more details. The result shows that, when the controlled jets are deployed, the controlled JICF has lower trajectory and better entrainment than the uncontrolled counterpart. This can be attributed to the effects of the control jets in suppressing (the development of) the windward jet shear layer while promoting (the development of) the lateral skewed mixing layers, later developing into two dominant lateral vortical structures – one on each lateral side. These result in better overall entrainment as well as higher turbulence at the locations of the two lateral vortical structures.

Department ..... Mechanical Engineering ..... Student's signature ..... มรรีจ คอรส์  
 Field of study ..... Mechanical Engineering ..... Advisor's signature ..... ASI B  
 Academic year ..... 2007 ..... Co-advisor's signature ..... Alongkorn Pimpin

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่อาจสำเร็จลุล่วงไปได้ ถ้ามิรับคำแนะนำ และความช่วยเหลือจาก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย ท่านรองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ และ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย ท่านอาจารย์ ดร. อลงกรณ์ พิมพ์พิณ ซึ่งได้ประสิทธิภาพ ศาสตร์ความรู้ ตลอดจนโอกาสที่ดีต่างๆ ทั้งที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย และการดำเนินชีวิตของผู้วิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพบุลย์ ศรีภคากร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เลิศนุวัฒน์ ที่ได้เอื้อเฟื้อและคำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากกองทุน 90 ปีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ . ที่นี้ด้วย

ตลอดระยะเวลาที่ผู้วิจัยศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ผู้วิจัยได้รับคำแนะนำ ความช่วยเหลือ และน้ำใจจากพี่ เพื่อน และน้อง สมาชิกห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณ พี่ธีรวิภา ยิ่งเจริญ ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ประสบการณ์ และให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณ ปราโมทย์ ลิ้มดำรงธรรม ที่ได้เอื้อเฟื้อน้ำใจและฝ่าฟันอุปสรรคต่างๆ มาด้วยกันโดยตลอด นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น การุญจงศิริภิญโญ วรเดช มโนสร้อย ที่ได้เอื้อเฟื้อน้ำใจและให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย อีกทั้งขอขอบพระคุณ ครูไพโรจน์ อนันตะเศรษฐกุล พี่โกวิทย์ โกพล พี่สุบิณ ชันติ ที่คอยชี้แนะการใช้เครื่องมือต่างๆ ในการสร้างอุปกรณ์ทดลอง รวมทั้งบุคลากรทุกๆ คนซึ่งไม่สามารถยกมากล่าวในที่นี้ได้ทั้งหมด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวของผู้วิจัยที่ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน อีกทั้งยังคอยส่งกำลังใจมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการทำงานและไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคต่างๆ ที่เกิดขึ้น สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขออุทิศความสำเร็จทั้งหมดแต่บิดาและมารดาผู้ซึ่งเสียสละความสุขและความสบายในชีวิตเพื่อผู้วิจัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	12
1.4 แนวทางการทำวิจัย.....	12
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	13
บทที่ 2 ชุดทดลองและการทดลอง.....	14
2.1 ชุดทดลอง.....	14
2.2 อุปกรณ์วัดความเร็วและการใช้งาน.....	16
2.3 พิกัดอ้างอิงที่ใช้การทดลอง.....	17
2.4 สภาวะของการทดลอง.....	18
2.5 วิธีการทดลอง.....	18
บทที่ 3 ผลการทดลอง.....	22
3.1 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้น.....	25
3.1.1 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวาง.....	25
3.1.2 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ต.....	26
3.2 การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง.....	26

3.2.1	การกำหนดตำแหน่งของการฉีดเจ็ตควบคุม .....	26
3.2.2	การกำหนดอัตราส่วนเชิงมวลของการฉีดเจ็ตควบคุม .....	28
3.3	การเปรียบเทียบผลกรณี JICF กับ กรณี I15	
	ตามแนว Downstream ( $x/rd= 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3$ และ 4) .....	29
•	การเปรียบเทียบผลการทดลองกรณี JICF กับผลการทดลองของ Zaman and Fross (1997) .....	30
•	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเทียบกับความเร็วของกระแสลมขวาง ( $w/U_{cf}$ ) ใน กรณี JICF เปรียบเทียบ กับ กรณี I15 .....	30
•	การกระจายตัวของ สัมประสิทธิ์ความเร็วรวม ( $C_{UG}$ ) ในกรณี JICF เปรียบเทียบ กับกรณี I15 .....	33
•	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความเร็วเฉพาะหน้าตัด ( $C_{UL}$ ) ในกรณี JICF เปรียบเทียบ กับ กรณี I15 .....	35
•	การกระจายตัวของ Fluctuation velocity เทียบกับความเร็วของกระแสลมขวาง ( $w_{rms}/U_{cf}$ ) กรณี JICF เปรียบเทียบ กับกรณี I15 .....	38
•	การกระจายตัวของ Turbulent intensity ( $w_{rms}/w$ ) กรณี JICF เปรียบเทียบกับกรณี I15 .....	39
•	Centroid trajectory ( $\bar{y}_c, \bar{z}_c$ ) และ Center of mass trajectory ( $\bar{y}_m, \bar{z}_m$ ) ของความเร็วบนระนาบสมมาตร .....	41
•	รูปร่างของความเร็ว ตามแนว Traverse บน Center plane ของเจ็ต .....	44
•	Maximum decay ของความเร็วบน Center plane ตามแนว Downstream (x) .....	44
•	Velocity trajectory .....	45
บทที่ 4	อภิปรายผลการทดลอง .....	48
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง .....	49
	ประมวลตาราง .....	53
	ประมวลรูปภาพ .....	73



รายการอ้างอิง.....	131
ภาคผนวก.....	133
ภาคผนวก ก.....	134
ภาคผนวก ข.....	136
ภาคผนวก ค.....	139
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	143



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะของเจ็ท ในกระแสมขวาง.....54
ตารางที่ 1.2	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาผลของTab ที่มีต่อ คุณลักษณะของเจ็ทในกระแสมขวาง.....64
ตารางที่ 1.3	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาผลของการควบคุมเจ็ท ในกระแสมขวางโดยใช้ พลังงาน.....68
ตารางที่ 2.1	พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการ Set Hot film .....71
ตารางที่ 3.1	รายละเอียดพารามิเตอร์ในการทดลองและความคลาดเคลื่อน.....71
ตารางที่ 3.2	ความหนาของชั้น Boundary layer ของแต่ละตำแหน่ง ตามแนว Spanwise (z).....71
ตารางที่ 3.3	ตารางแสดงค่า $A$ และ $m$ .....72
ตารางที่ 3.4	เปรียบเทียบกับ ค่า $A$ และ $m$ ของ Center of mass และ Centroid trajectory.....72
ตารางที่ 3.5	ตารางแสดงค่า Entrainment ของเจ็ท .....72

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1	การประยุกต์ใช้งานเจ็ตในกระแสมขวาง ..... 74
รูปที่ 1.2	โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวาง (Fric and Roshko,1994)..... 75
รูปที่ 1.3	โครงสร้างของเจ็ต บริเวณ Near field (Yuan <i>et al.</i> , 1999)..... 75
รูปที่ 1.4	โครงสร้างของ Hanging vortices (Yuan <i>et al.</i> , 1999)..... 76
รูปที่ 1.5	โครงสร้างของ Laminar เจ็ต (Lim <i>et al.</i> , 2003)..... 76
รูปที่ 1.6	โครงสร้างการเกิด CVP (Cortelezzi and Karagozian., 2001)..... 77
รูปที่ 1.7	การพัฒนาตัวของเจ็ต (Cortelezzi and Karagozian., 2001)..... 77
รูปที่ 1.8	โครงสร้างการไหล ของLaminar jet (Lim <i>et al.</i> , 2001)..... 78
รูปที่ 1.9	Vortical Structure ของเจ็ต (Sau <i>et al.</i> , 2004)..... 78
รูปที่ 1.10	การพัฒนาตัวของการเกิด CVP (Muppidi and Mesh , 2005b)..... 79
รูปที่ 1.11	เส้นทางเดินของความเร็วและอุณหภูมิของเจ็ต (Kamotani and greeber, 1972)..... 79
รูปที่ 1.12	เส้นทางเดินของเจ็ต (Muppidi and Maheash, 2005a)..... 80
รูปที่ 1.13	การเปรียบเทียบเส้นทางเดินของเจ็ตโดยการ Scale ด้วย $rd$ และ $r^2 d$ (Muppidi and Maheash, 2005a)..... 80
รูปที่ 1.14	การ Scale เส้นทางเดินเจ็ตด้วย $h$ (Muppidi and Maheash, 2005)..... 81
รูปที่ 1.15	เส้นทางเคลื่อนที่ของ Concentration บน Centerline ของเจ็ต (Smith and Mungal, 1998)..... 81
รูปที่ 1.16	การลดลงของ Concentration ตามแนวแกนเจ็ต ( $s$ ) (Smith and Mungal, 1998)..... 82
รูปที่ 1.17	Contour ของ Spanwise vorticity (Yuan <i>et al.</i> , 1998)..... 82
รูปที่ 1.18	โครงสร้างของ Laminar เจ็ต (New <i>et al.</i> , 2003)..... 83
รูปที่ 1.19	การพัฒนาตัวของ Streamlineในการก่อตัวของ Kevin-Helmholt (Sau <i>et al.</i> , 2004)..... 83
รูปที่ 1.20	การพัฒนาตัวของ Streamline (Sau <i>et al.</i> , 2004)..... 84
รูปที่ 1.21	Contour แสดงผลของ Tab ต่อโครงสร้างของความเร็ว ( $J=21$ ) (Zaman and Foss , 1997)..... 84

รูปที่ 1.22	Contour แสดงผลของ Tab ต่อโครงสร้างของความเร็ว ( $J=54$ ) (Zaman and Foss, 1997).....	85
รูปที่ 1.23	แสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยและ Streamwise vorticity ( $J=21$ ) (Zaman and Foss, 1997).....	85
รูปที่ 1.24	แสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยและ Streamwise vorticity ( $J=54$ ) (Zaman and Foss, 1997).....	86
รูปที่ 1.25	Tab และการติดตั้ง (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005).....	86
รูปที่ 1.26	Contour ของการกระจายตัวของของอุณหภูมิจาก (C <sub>TG</sub> ) กรณีไม่หมุนควง(Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005).....	88
รูปที่ 1.27	Contour ของการกระจายตัวของของอุณหภูมิจาก (C <sub>TG</sub> ) กรณีไม่หมุนควง (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005).....	90
รูปที่ 1.28	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของการผสมระหว่างเจ็ตกับ กระแสลมขวาง กรณี Unforced กับ Forced (Gogineni and Roquemore, 1998).....	91
รูปที่ 1.29 (ก)	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจาก (C <sub>TG</sub> ) (Wangiraniran, 2001).....	92
รูปที่ 1.29 (ข)	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจากเฉพาะหน้าตัด (C <sub>TL</sub> ) (Wangiraniran, 2001).....	93
รูปที่ 1.30 (ก)	การตอบสนองของค่าความถี่ที่ใช้กระตุ้นเจ็ต (M'closky et al., 2002).....	94
รูปที่ 1.30 (ข)	ภาพขณะใดๆแสดงผลของการกระตุ้นเจ็ตด้วยลำโพง (M'closky et al., 2002).....	94
รูปที่ 1.31	การกระตุ้นเจ็ตด้วย Spining valve (Narayanan et al, 2003) .....	95
รูปที่ 2.1	Schematic อุโมงค์ลม.....	96
รูปที่ 2.2 (ก)	Schematic หน้าตัดทดสอบ.....	96
รูปที่ 2.2 (ข)	ร่องสำหรับใช้วัดความเร็วบนหน้าตัดทดสอบ.....	97
รูปที่ 2.3	รูปถ่ายหน้าตัดทดสอบ.....	97
รูปที่ 2.4	Schematic ของชุดทดลอง.....	98
รูปที่ 2.5	ชุดหัวเจ็ต.....	98
รูปที่ 2.6	Schematic การต่อชุดอุปกรณ์การวัด (Hot film).....	99
รูปที่ 2.7 (ก)	พิกัดอ้างอิงสำหรับการทดลอง.....	99

รูปที่ 2.7 (ข)	พิกัดอ้างอิงสำหรับตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุม .....	100
รูปที่ 2.8	ตำแหน่งของการวัดการกระจายตัวของความเร็วบน Center plane .....	100
รูปที่ 2.9	ตำแหน่งของการวัดรูปร่างของชั้นขอบเขต .....	101
รูปที่ 3.1	Contour แสดงค่าความสม่ำเสมอของ กระแสลมขวาง .....	102
รูปที่ 3.2	รูปร่างของชั้นขอบเขต .....	102
รูปที่ 3.3	รูปร่างของความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ต .....	103
รูปที่ 3.4	รูปร่างของ Fluctuation velocity ที่ปากทางออกของเจ็ต .....	104
รูปที่ 3.5	รูปร่างของ Turbulence intensity ที่ปากทางออกของเจ็ต .....	105
รูปที่ 3.6	เปรียบเทียบรูปร่างของ Fluctuation velocity และ Turbulence intensity .....	106
รูปที่ 3.7	เปรียบเทียบรูปร่างของความเร็วที่ Center plane สำหรับกำหนดตำแหน่งมุมการฉีดที่เหมาะสม .....	107
รูปที่ 3.8	การเปรียบเทียบเส้นทางการเดินของเจ็ตที่ตำแหน่งมุม ของการฉีดเจ็ตควบคุมต่างๆ .....	108
รูปที่ 3.9	การเปรียบเทียบรูปร่างของความเร็วบน Center plane สำหรับกำหนดค่า $r_m$ .....	108
รูปที่ 3.10	เส้นทางการลดลงของความเร็วที่ค่า $r_m$ ต่างๆ	
รูปที่ 3.11	Schematic แสดงหลักการพิจารณาเลือกค่า $r_m$ Optimum .....	109
รูปที่ 3.12	การเปรียบเทียบ Contour ของความเร็วกับผลการทดลอง ของ Zaman and Fross (1997) .....	110
รูปที่ 3.13	การเปรียบเทียบค่าความเร็วเฉลี่ย กรณี JICF กับ I15 ( $w/U_{cf}$ ) .....	111
รูปที่ 3.14	การเปรียบเทียบค่าความเร็วเฉลี่ย กรณี JICF กับ I15 ( $C_{UG}$ ) .....	113
รูปที่ 3.15	การเปรียบเทียบค่าความเร็วเฉลี่ย กรณี JICF กับ I15 ( $C_{UL}$ ) .....	115
รูปที่ 3.16	การเปรียบเทียบค่าความเร็วเฉลี่ยกรณี JICF กับ I15 ( $w_{rms}/U_{cf}$ ) .....	117
รูปที่ 3.17	การเปรียบเทียบค่าความเร็วเฉลี่ยกับค่า Velocity fluctuation .....	119
รูปที่ 3.18	การเปรียบเทียบ 3D surface กรณี JICF กับ กรณี I15 .....	120
รูปที่ 3.19	การเปรียบเทียบค่า Turbulent intensity กรณี JICF กับ I15 .....	121
รูปที่ 3.20	การเปรียบเทียบ Centroid Trajectory ของความเร็วบน ระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_{c,w}$ ) กรณี JICF กับ I15 .....	123

รูปที่ 3.21	การเปรียบเทียบ Center of mass Trajectory ของความเร็วบน ระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_{m,w}$ ) กรณี JICF กับ I15 .....	123
รูปที่ 3.22	การเปรียบเทียบ Centroid Trajectory ของความเร็วบน ระนาบสมมาตร ( $\bar{z}_{c,w}$ ) กรณี JICF กับ I15.....	124
รูปที่ 3.23	การเปรียบเทียบ Center of mass Trajectory ของความเร็วบน ระนาบสมมาตร ( $\bar{z}_{m,w}$ ) กรณี JICF กับ I15.....	124
รูปที่ 3.24 ก	Centroid and Center of mass Trajectory ของความเร็วบน ระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_{c,CUG}$ ) กรณี JICF .....	125
รูปที่ 3.24 ข	Centroid and Center of mass Trajectory ของความเร็วบน ระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_{c,CUG}$ ) กรณี I15 .....	125
รูปที่ 3.25 ก	การเปรียบเทียบ Centroid Trajectory ของความเร็วบน ระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_{c,CUG}$ ) กรณี JICF กับ I15 .....	125
รูปที่ 3.25 ข	การเปรียบเทียบ Center of mass Trajectory ของความเร็วบน ระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_{m,CUG}$ ) กรณี JICF กับ I15 .....	125
รูปที่ 3.26	การเปรียบเทียบ Centroid Trajectory ของความเร็วบน ระนาบสมมาตร ( $\bar{z}_{c,CUG}$ ) กรณี JICF กับ I15 .....	126
รูปที่ 3.27	การเปรียบเทียบ Center of mass Trajectory ของความเร็วบน ระนาบสมมาตร ( $\bar{z}_{m,CUG}$ ) กรณี JICF กับ I15 .....	126
รูปที่ 3.28	การเปรียบเทียบรูปร่างของความเร็วที่ Center plane ความเร็วบน Traverseกรณี JICF กับ I15 .....	127
รูปที่ 3.29	เปรียบเทียบการลดลงของความเร็วเจ็ตที่ Center plane ตามแนว Downstream กรณี JICF กับ I15.....	128
รูปที่ 3.30	เปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของความเร็ว ของเจ็ตบน Center planeกรณี JICF กับ I15.....	129
รูปที่ 3.31	Schematic แสดงการ Entrainment .....	129
รูปที่ 3.32	เปรียบเทียบค่าการเหนี่ยวนำการผสม.....	130

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A$	พื้นที่หน้าตัดรวมที่ปากทางออกของเจ็ต
$A_{jet}$	พื้นที่ของเจ็ตบนหน้าตัดใดๆ ตาม Downstream ( $x$ )
$C_{UG}$	ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วรวม (Global coefficient of velocity)
$C_{UL}$	ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วเฉพาะหน้าตัด (Local coefficient of velocity)
$d$	ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต
$Q_j$	Volume flux ของเจ็ตเทียบกับระยะทาง ตามแนว Downstream ( $x$ )
$Q_o$	Volume flux ของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ต
$r$	อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity Ratio)
$r_m$	อัตราส่วนเชิงมวลระหว่างมวลของเจ็ตควบคุมต่อมวลของเจ็ต
$r_v$	อัตราส่วนความเร็วระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง (Velocity ratio)
$Re_{cf}$	เรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ (Reynolds Number) เทียบกับความเร็วในแนวแกนของกระแสลมขวาง
$Re_j$	เรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ (Reynolds Number) เทียบกับความเร็วในแนวแกนของเจ็ต
$r_m$	อัตราส่วนเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ต
$T_i$	Turbulent intensity
$U$	ความเร็วตามแนวแกนเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged axial velocity) ที่ปากเจ็ต
$U_{cf}$	ความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง
$U_m$	ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของเจ็ตตามแนวที่ทำการวัด
$u_{cf}$	ขนาดความเร็วของกระแสลมขวางที่ตำแหน่งใดๆ
$u$	ความเร็วเจ็ตเฉลี่ยที่ตำแหน่งใดๆ บนปากทางออกของเจ็ต
$u_{rms}$	Fluctuation velocity ที่ปากทางออกของเจ็ต
$w$	ความเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่งใดๆ บนหน้าตัดตามแนว Downstream
$w_m$	ความเร็วเฉลี่ยสูงสุด บนหน้าตัดตามแนว Downstream
$w_{rms}$	Fluctuation velocity ที่ตำแหน่งใดๆ บนหน้าตัดตามแนว Downstream
$w/U_{cf}$	การกระจายตัวความเร็วเฉลี่ยเทียบกับความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวาง
$w_{rms}/U_{cf}$	การกระจายตัวของ Fluctuation velocity เทียบกับความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวาง
$x, y, z$	ระยะตามแนว Downstream, Transverse และ Spanwise ตามพิกัดอ้างอิง
$\bar{y}_c$	Centroid trajectory ของความเร็วบนระนาบสมมาตร (ระนาบ $x$ - $y$ )
$\bar{z}_c$	Centroid trajectory ของความเร็วบนระนาบแนวนอน (ระนาบ $x$ - $z$ )

$\bar{y}_m$	Center of mass trajectory ของความเร็วบนระนาบสมมาตร (ระนาบ $x$ - $y$ )
$\bar{z}_m$	Center of mass trajectory ของความเร็วบนระนาบแนวนอน (ระนาบ $x$ - $z$ )

### อักษรกรีก

$\delta$	ค่าความไม่แน่นอนในการทดลอง (Uncertainty)
$\delta_{0.95}$	ความหนาของชั้นขอบเขตที่ตำแหน่งซึ่งมีความเร็วเป็น 95% ของความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง
$\theta$	ตำแหน่งมุมของการฉีดเจ็ตควบคุม
$\lambda$	อัตราส่วนระหว่าง Volume flux ของเจ็ตที่หน้าตัดใดเทียบกับปากเจ็ต
$\rho_j$	ความหนาแน่นของเจ็ต
$\rho_{cf}$	ความหนาแน่นของกระแสลมขวาง

### อักษรย่อ

CC	Centroid trajectory
CM	Centroid of mass trajectory
JICF	เจ็ตในกระแสลมขวาง
I0	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง 0
I180	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง 180
I(0,180)	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง (0,180)
I15	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 15$
I30	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 30$
I45	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 45$
I90	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 90$
I135	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 135$



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การไหลของเจ็ตในกระแสมขวาง (JICF) นั้นสามารถพบเห็นได้ในงานทั่วไปไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ในงานด้านวิศวกรรมเช่นการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้, การระบายความร้อนให้กับใบพัดในเครื่องยนต์ Gas turbine นอกจากนั้นแล้วยังพบได้ในงานด้านอากาศยานด้วยเช่นการควบคุมการขึ้นลงในแนวดิ่งของเครื่องบินแบบ V/STOL รวมทั้งงานที่มีความเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมและมลภาวะเช่นการปล่อยควันออกจากปล่องควันของโรงงานอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 1.1

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวางมากมายโดยสามารถแบ่งกลุ่มงานวิจัยได้คือ

กลุ่มงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะและโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางเช่น การศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางโดย Fric and Roshko (1994), การศึกษาเส้นทางเคลื่อนที่ของเจ็ต (Jet trajectory) โดย Kamotani and Greber (1972) และ Muppidi and Mahesh (2005a) การผสมกันและการเหนี่ยวนำการผสม โดย Yuan and Street (1998) และ การศึกษาการผสมกันระหว่างเจ็ตกับกระแสมขวาง โดย Smith and Mungal (1998)

กลุ่มงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการปรับแต่งและควบคุมของเจ็ตในกระแสมขวางสามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่มคือ 1) การปรับแต่งและควบคุม JICF โดยไม่ใช้พลังงาน (Passive control) เช่นการติด Vortex generator ในลักษณะต่างๆ รอบปากทางออกของเจ็ตโดย Zaman and Foss (1997); Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) และ 2) การปรับแต่งและควบคุม JICF โดยใช้พลังงาน (Active control) เช่น Wangjiraniran (2001); M'closkey *et al.* (2002); Narayanan *et al.* (2003)

งานวิจัยที่ผ่านมาของ Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) พบว่าโครงสร้างการไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงและมีความไวมากที่สุดเมื่อติดตั้ง Tab บริเวณตำแหน่ง Pressure windward ไปจนถึง Windward (PW to W) โดยเจ็ตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างรูปไตซึ่งมีลักษณะโครงสร้างการไหลแบบ Counter rotating Vortex Pair (CVP) เป็นรูปคล้ายจุลภาค จากผลการศึกษาข้างต้นจึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะกระตุ้นและควบคุมเจ็ตในกระแสมขวางด้วยเจ็ตควบคุม (Control jets) ทั้งนี้การที่เราสามารถควบคุมโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางได้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาการออกแบบอุปกรณ์การผสมและการเผาไหม้ต่างๆ ให้มีช่วงการทำงานที่กว้างขึ้นและมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น รวมทั้งงานด้านสิ่งแวดล้อมที่ต้องการควบคุมการกระจายของมลพิษทั้งในน้ำและอากาศ

อนึ่งในการศึกษาเบื้องต้น พบว่า เจ็ดควบคุมสามารถนำมาใช้ในการปรับแต่งและควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ดและแนะว่า Entrainment และ Mixing เพิ่มขึ้น

## 1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

การศึกษาเจ็ดในกระแสลมขวางมีผู้ศึกษาคุณลักษณะและโครงสร้าง (Flow structure) ของเจ็ดในกระแสลมขวางเช่น Fric and Roshko (1994), เส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ด (Trajectory) เช่น Kamotani and Greber (1972), การผสม (Mixing and entrainment) เช่น Yuan and Street (1998) และการลดลงของปริมาณความเข้มข้น (Concentration) ตามแนวแกนเจ็ด (Decay rate) เช่น Smith and Mungal (1998) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อคุณลักษณะดังกล่าว โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความเร็วของเจ็ดต่อกระแสลมขวาง ( $r_v$ ) เช่น การศึกษาของ Pratte and Baines (1967)

## PART I การศึกษาคุณลักษณะและโครงสร้างของเจ็ดในกระแสลมขวาง (JICF)

### 1.2.1 โครงสร้างของเจ็ดในกระแสลมขวาง

Fric and Roshko (1994) เสนอแนะโดยสรุปโครงสร้างของ Vortices ที่เกิดขึ้นในเจ็ดในกระแสลมขวางโดยแบ่งเป็น 4 ลักษณะ ดังรูปที่ 1.2 ได้แก่ 1) เจ็ด Shear layer vortices ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ Vortex ring ของเจ็ด โดยเกิดจากการแยกตัว (Separation) ของ Shear layer บริเวณปากเจ็ด 2) Horseshoe vortices โดยเป็นการม้วนตัวของกระแสลมขวางในบริเวณชั้นขอบเขตที่พื้นรอบปากเจ็ดซึ่งเกิดจากการที่กระแสลมขวางได้รับผลของ Adverse pressure gradient ที่เกิดจากการกีดขวางการไหลโดยเจ็ดที่พุ่งออกมา ประกอบกับผลของความหนาของชั้นขอบเขตของพื้นบริเวณปากเจ็ด 3) Wake vortices ซึ่งมีลักษณะคล้าย Wake ของการไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกโดยที่ Reynolds number สูงและได้ชี้แนะว่า Wake Vortices มีแหล่งกำเนิดมาจาก Boundary layer ของกระแสลมขวางที่ผนังพื้นและ 4) Counter-rotating vortex pair (CVP) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เป็นกลไกสำคัญในการผสมโดยเฉพาะในบริเวณ Far field

นอกจากนี้ Yuan *et al.* (1999) ได้พบโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field 3 ลักษณะดังรูปที่ 1.3 ได้แก่ 1) Hanging vortices ซึ่งเป็นการม้วนตัวของกระแสลมขวางทางด้านข้างเข้ามาในตัวเจ็ด โดยมีแกนการม้วนตัวตามทิศทางของผลรวมระหว่างเวกเตอร์ความเร็วเจ็ดและกระแสลมขวาง ( $\bar{u}_{mean}$ ) (รูปที่ 1.4 ก) ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วระหว่างเจ็ดกับกระแสลมขวางในทิศทางตั้งฉากกับ  $\bar{u}_{mean}$  ( $\bar{u}_{nj}$  และ  $\bar{u}_{ncf}$ ) หรือที่เรียกว่า Skewed mixing layer (รูปที่ 1.4 ข) ประกอบกับการได้รับผลของการพา (Convection) จาก  $\bar{u}_{mean}$  2) Spanwise rollers ซึ่งมีลักษณะเดียวกับการม้วนตัวของ Vortex

ring ของเจ็ตอิสระแต่เนื่องจากผลของกระแสลมขวางทำให้คุณสมบัติตามเส้นรอบวงที่ขอบเจ็ตไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะด้านข้างเจ็ตซึ่งความเร็วของกระแสลมขวางจะถูกเร่งและหน่วงเมื่อผ่านตัวเจ็ตทำให้พบลักษณะของ Spanwise rollers เฉพาะด้านหน้าและด้านหลังเจ็ต (รูปที่ 1.3) และ 3) Vertical streaks ซึ่งมีแกนการหมุนตัวในแนวตั้ง โดยเกิดจากการเปลี่ยนทิศทางของ Spanwise rollers ด้านหน้าเนื่องจากผลของ Perturbation และ Gradient ของความเร็วในแนวตั้งตามแนว Downstream ( $\partial v/\partial x$ )

ในการศึกษาการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางประเด็นหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจศึกษาคือ ลักษณะโครงสร้างและกลไกในการเกิด CVP เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีผลต่อคุณลักษณะต่างๆ ของเจ็ตอย่างมาก โดยที่ผ่านมามีแนวคิดหลักเกี่ยวกับต้นกำเนิดของ CVP สอดคล้องกันคือเกิดจาก Shear layer ของเจ็ต อย่างไรก็ตามรายละเอียดเกี่ยวกับกลไกในการเกิด CVP ยังมีความแตกต่างกัน โดย Haven (1996) เสนอว่า CVP เกิดจาก Vorticity ที่ขอบเจ็ตด้านข้างได้รับผลของ Gradient ของความเร็วในแนวตั้งทำให้ Vorticity ดังกล่าวเปลี่ยนทิศทางและพัฒนาตัวเป็น CVP, Kelso *et al.* (1996) เสนอว่า CVP เกิดจากการหมุนตัวของ Shear layer ของเจ็ต โดยผ่านกลไกของการเกิด Vortex breakdown และ Yuan *et al.* (1999) เสนอว่า CVP เกิดจากการที่ Hanging vortices ซึ่งเกิดจาก Skewed mixing layer ที่ขอบเจ็ตด้านข้างได้รับผลของ Adverse pressure gradient ทำให้เกิด Vortex breakdown และพัฒนาตัวกลายเป็น CVP

- กลไกการเกิดของ Counter rotating vortex pairs (CVP)

ที่ผ่านมามีการศึกษาการเกิดของ CVP เพราะมีหลักฐานชี้แนะว่า CVP ช่วยให้เกิดการ Entrainment และ การผสมที่บริเวณ Far field โดยที่ผ่านมามีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับ CVP ทั้ง โครงสร้างและกลไกของการเกิดเป็น CVP จากการศึกษาส่วนของโครงสร้างพบว่า CVP นั้นจะมีจุดกำเนิดอยู่ที่บริเวณ Near field ซึ่งเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตกับกระแสลมขวางและพัฒนาตัวเป็น CVP แบบสมมาตร โดยมีลักษณะเป็น Kidney shape ที่บริเวณ Far field แต่กลไกของการเกิด CVP นั้นยังคงเป็นประเด็นที่ยังหาข้อสรุปไม่ได้ และมีความพยายามที่อธิบายกลไกดังกล่าว เช่น CVP เกิดจาก Vortex ring, Vortex loop และ Skewed mixing layer

Lim *et al.* (1998) เสนอแนะว่าเกิดแรงเฉือนบริเวณที่สัมผัสกันระหว่างเจ็ตกับกระแสน้ำขวาง (รูปที่ 1.5) สังเกตว่าการปฏิสัมพันธ์ของเจ็ตกับกระแสน้ำขวางมีความซับซ้อนเป็นผลให้เกิดการโค้งตัวของเจ็ตตามทิศทางกระแสน้ำขวาง โดยที่ด้าน Upstream มีการบิดเบี้ยวของ Shear layer อย่างรวดเร็วและเกิดการหมุนตัวที่มีลักษณะคล้ายกับ Ring vortices ที่ขอบด้านหลังพร้อมกับการโค้งตัวของเจ็ตตามทิศทางของกระแสน้ำขวาง

Cortelezzi and Karagozian (2001) เสนอแนะกลไกของการเกิด CVP ดังรูปที่ 1.6 เริ่มจาก Vortices ที่เกิดขึ้นจากผนังท่อของเจ็ต และก่อตัวเป็นวงแหวนใกล้กับปากทางออกของเจ็ต

และโค้งตัวตามกระแสลมขวางทำให้ Vortex ring เกิดการห่อตัวโดยขอบด้านหลังของ Vortex ring จะยกตัวสูงขึ้นและเชื่อมต่อกับขอบด้านหลังของ Vortex ring อีกตัวที่เกิดขึ้นก่อน และพัฒนาตัวกลายเป็น CVP แบบสมบูรณ ที่บริเวณ Far field (รูปที่ 1.7) ซึ่งแนวกระบวนการเกิดของ Vortical structure เกิดจากการม้วนตัวของเจ็ต Shear layer โดยการพับตัวของขอบ Vortex ring และขอบที่พับตัวจะกระตุ้นทำให้เกิด Vortex ring ตัวใหม่เกิดขึ้น

Yuan *et al.* (1999) เสนอแนะการเกิด CVP ดังรูปที่ 1.3 และรูปที่ 1.4 CVP มีจุดกำเนิดที่ Hanging vortices ซึ่ง Vortices เกิดจาก Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวขึ้นระหว่างเจ็ตกับ Crossflow fluid ที่ขอบด้านข้างของเจ็ต โดยการไหลตามแนวแกนผ่าน Hanging vortices จะ Transport vortical fluid จาก Boundary layer ที่ติดกับผนังเข้ามายังด้านหลังของลำเจ็ตทำให้ Hanging vortices เกิดการปะทะกับ Adverse pressure gradient เป็นผลให้เกิด Breakdown -ขณะเดียวกัน Vortex จะขยายขนาดและก่อตัวเป็น CVP ที่มีกำลังไม่มากและเอียงตัวตามแนวเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ต (Trajectory)

Lim *et al.* (2001) เสนอแนะว่า Large-scale Structure ของเจ็ตในกระแสลมขวางในบริเวณของเจ็ต Shear layer vortices เป็นลักษณะของ Loops vortex (รูปที่ 1.8) ซึ่งไม่ได้เกิดจากการม้วนตัวของ Vortex rings แต่ Loops vortex เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Cylindrical vortex sheet หรือ Jet column

New *et al.* (2003) ศึกษาโครงสร้างของ เจ็ตในกระแสลมขวางที่ปากทางออกเป็นรูปวงรี เสนอแนะว่า Aspect ratio ที่ค่าต่ำๆจะเกิด CVP ขึ้น 2 คู่ โดยจะเริ่มต้นจากด้านข้างของลำเจ็ต โดย CVP ที่มีกำลังน้อยกว่าจะถูก Entrainment โดย CVP คู่ที่มีกำลังมากกว่า สำหรับที่ Aspect ratio มีค่ามากนั้นพบว่า CVP เกิดขึ้นเพียงคู่เดียวและก่อตัวขึ้นจากลำเจ็ตเนื่องจาก Shear layer กับกระแสน้ำขวาง Interface กันและพัฒนาตัวเป็น WVP คู่เดียวหรือหลายคู่ขึ้นอยู่กับค่า AR และ VR

Sau *et al.* (2004) ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field ของเจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยม (รูปที่ 1.9) เสนอแนะว่า CVP นั้นเกิดจาก Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวจากทางผนังด้านข้างของเจ็ตไม่ได้เกิดขึ้นจาก Vortex ring

Muppidi and Mahesh (2005a) เสนอแนะว่า CVP เกิดจาก Vorticity ในเจ็ต Shear layer (รูป 1.10) และชี้แนะว่าท่อเจ็ตนั้นไม่มีความจำเป็นต่อการก่อตัวของ CVP

Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ศึกษาโดยใช้ Tab ติดที่ปากทางออกของเจ็ตกรณีเจ็ตไม่มีการหมุนควงโดยการติด Tab ที่ปากทางออกของเจ็ตผลการทดลองชี้แนะว่าการพัฒนาตัวของ Skewed mixing layer เป็นผลให้เกิดการก่อตัวของ CVP

## 1.2.2 เส้นทางเคลื่อนที่ของเจ็ตในกระแสลมขวาง

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเส้นทางของเจ็ตในกระแสลมขวางค่อนข้างมาก โดยมีความแตกต่างกันทั้งวิธีการศึกษาและผลการศึกษาซึ่งส่วนมากแสดงเป็นสมการของความสัมพันธ์ (Correlation) Margason (1968) ได้สรุปผลการศึกษาและแสดงความสัมพันธ์ (Correlation) ของเส้นทางเคลื่อนที่ในรูปของ  $rd$  สเกล

$$\frac{y}{rd} = A \left( \frac{x}{rd} \right)^m \quad (1.1)$$

โดย  $A$  และ  $m$  เป็นค่าคงที่ของสมการ มีค่าประมาณ 1.6 และ 1/3 ตามลำดับ  $d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ตและ  $r$  เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity ratio) ซึ่งนิยามโดย

$$r = \left( \frac{\rho_j u_j^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2} \right)^{1/2} \quad (1.2)$$

โดย  $u_j$  คือความเร็วของเจ็ตอากาศ

$u_{cf}$  คือความเร็วของกระแสลมขวาง

$\rho_j$  คือความหนาแน่นของเจ็ตอากาศ

$\rho_{cf}$  คือความหนาแน่นของกระแสลมขวาง

Kamotani and Greber (1972) ได้ศึกษาเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิของเจ็ต โดยให้ความร้อนกับเจ็ตจนมีอุณหภูมิสูงกว่ากระแสลมขวางประมาณ 75 °F และ 320 °F ที่อัตราส่วนโมเมนตัม ( $r_m = \rho_j u_j^2 / \rho_{cf} u_{cf}^2$ ) เท่ากับ 15.3 และ 59.3 ดังรูปที่ 1.11 โดยเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมินิยามเป็นตำแหน่งของจุดที่มีความเร็วและอุณหภูมิสูงที่สุดบนระนาบสมมาตร พบว่าที่อัตราส่วนโมเมนตัมเดียวกัน เส้นทางของอุณหภูมิลู่ต่ำกว่าเส้นทางของความเร็วและยังพบว่าอัตราส่วนโมเมนตัมเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อเส้นทางเดินของความเร็วและอุณหภูมิ ในขณะที่อัตราส่วนความหนาแน่นไม่ส่งผลกระทบต่อเส้นทางของความเร็วของเจ็ตแต่ส่งผลกระทบต่อเส้นทางของอุณหภูมิล็กน้อย โดยแสดงความสัมพันธ์ของเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิดังสมการ

$$\frac{y_U}{d} = 0.89 r_m^{0.47} \left( \frac{x}{d} \right)^{0.36} \quad (1.3)$$

$$\frac{y_T}{d} = 0.73 r_m^{0.52} \left( \frac{\rho_j}{\rho_{cf}} \right)^{0.11} \left( \frac{x}{d} \right)^{0.29} \quad (1.4)$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปของผลคูณระหว่างความเร็วประสิทธิผลและเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต ( $rd$ -scale) ได้เป็น

$$\frac{y_U}{rd} = 0.89r^{0.3} \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.36} \quad (1.5)$$

$$\frac{y_T}{rd} = 0.73r^{0.33} \left( \frac{\rho_j}{\rho_{cf}} \right)^{0.11} \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.29} \quad (1.6)$$

Muppidi and Mahesh (2005a) ชี้แนะว่าที่ภาวะเริ่มต้นเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตจะเป็นเส้นโค้งอันเนื่องมาจากเจ็ตเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ (Pressure driven) และในสภาวะสุดท้ายนั้นเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตจะเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง อันเนื่องมาจากเจ็ตเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ (Momentum driven) โดยที่ค่าของความเร่งในสภาวะเริ่มต้นและความเร็วในสภาวะสุดท้ายของเจ็ตนั้นจะขึ้นอยู่กับค่า Reynolds number (รูปที่ 1.12) ของเจ็ต โดยเมื่อค่า Reynolds number ของเจ็ตเพิ่มมากขึ้นจะมีผลให้ความเร่งตามแนวแกน  $x$  ในสภาวะเริ่มต้นต่ำรวมทั้งความเร็วในสภาวะสุดท้ายก็จะมีค่าลดลง ในทางกลับกันหากค่า Reynolds Number ลดลงเจ็ตจะมีความเร่งในสภาวะเริ่มต้นเพิ่มขึ้นรวมทั้งความเร็วในสภาวะสุดท้ายก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

Muppidi and Mahesh (2005b) ชี้แนะว่า Trajectory ได้รับอิทธิพลอย่างมากจาก Near field ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ Jet velocity profile และ Crossflow boundary layer thickness และเสนอแนะอีกว่า Trajectory ที่ Scale ด้วย  $rd$  นั้นไม่ Collapse (รูป 1.13 ก) โดย รูปที่ 1.3 (ก และ ข) เป็นการเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ต Scale ด้วย  $rd$  กับ  $r^2d$  พบว่า Scale ด้วย  $rd$  จะดีกว่า  $r^2d$  แต่การ Scale ด้วย  $rd$  ก็ยังคง Scatter ซึ่ง Muppidi and Mahesh ยังได้เสนอแนะพารามิเตอร์ตัวใหม่ในการ Scale trajectory โดยผลการวิเคราะห์พบว่าสามารถ Collapse trajectory ได้ดีขึ้น (รูปที่ 1.14)

### 1.2.3 การผสมของเจ็ตในกระแสมวลขวาง

การศึกษาการผสมสำหรับเจ็ตในกระแสมวลขวางมีความซับซ้อนค่อนข้างมากเนื่องจากการไหลมีลักษณะเป็น 3 มิติ โดยการดึงกระแสมวลขวางเข้าไปในตัวเจ็ต (Entrainment) จะเป็นกลไกสำคัญในการผสม ซึ่งการศึกษาที่ผ่านมาจะพิจารณาจากปริมาณบ่งชี้ต่างๆ ได้แก่ การขยายตัวของเจ็ต (Spread rate) และการลดลง (Decay rate) ของปริมาณต่างๆตามแนวแกนเจ็ตไม่ว่าจะเป็น ความเร็ว, อุณหภูมิ และ Scalar concentration ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีความเชื่อมโยงกับการผสม

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาเส้นทางของ Scalar concentration โดยใช้ Planar laser-induced fluorescence (PLIF) ในช่วงอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) ตั้งแต่ 5 ถึง 25 โดยการศึกษาจะเป็นลักษณะปากเจ็ตอยู่ที่พื้นของ Test section ซึ่งต่อกับ Contraction โดยตรง และใช้ Length scale เป็น  $d$ ,  $rd$  และ  $r^2d$  โดยพิจารณาตามแนวแกน  $x$  ดังรูปที่ 1.15 แสดงเส้นทางของ Scalar concentration ซึ่งนิยามจากตำแหน่งของจุดที่มี Concentration มากที่สุดบนระนาบสมมาตรพบว่าจากการสเกลด้วย  $rd$  ปรากฏเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตที่ค่า  $r$  ต่างกันมีแนวโน้มเข้าใกล้กันมากกว่าสเกลด้วย  $d$  และ  $r^2d$  ยกเว้น  $r$  เท่ากับ 5 รูปที่ 1.16 (ก) แสดงผลของ Center line concentration decay แปรตาม  $s/rd$  ของ JICF พบว่ากรณีของเจ็ตอิสระ (Free jet) แปรตาม  $(s/rd)^{-1}$  ซึ่งแสดงว่า JICF สามารถ Entrain อากาศรอบข้างได้ดีกว่าเจ็ตอิสระ ในขณะที่กรณีของ JICF พบว่าที่ Near field แปรตาม  $(s/rd)^{-1.3}$  แต่ที่ Far field แปรตาม  $(s/rd)^{-2/3}$  ซึ่งแสดงว่า JICF สามารถ Entrain อากาศได้น้อยกว่าเจ็ตอิสระส่วน รูปที่ 1.16 (ข) แสดง Branch point กรณี  $r = 10$  ถึง 25 ซึ่งนิยามว่าเป็นจุดแบ่งเขตระหว่าง Near field และ Far field ที่  $s/r^2d$  เท่ากับ 0.3 อย่างไรก็ตามสำหรับกรณี  $r = 5$  มีสภาวะแตกต่างจากกรณีอื่น Smith and Mungal จะวัดให้ระยะ  $r = 5$  เป็น JICF ในอีกตระกูลหนึ่งจึงกำหนดให้  $s/r^2d > 0.3$  เป็น Far field และ Near field ที่  $s/r^2d < 0.3$

Yuan *et al.* (1999) พบว่ากลไกของการผสมสำหรับเจ็ตในกระแสลมขวางนั้นได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงของ Large coherent structure ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการเกิด Turbulent mixing โดยจากรูปที่ 1.17 ในช่วงต้นของการผสม ( $y/d < 3$ ) โครงสร้างของ Spanwise rollers ที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผิวสัมผัส (Interface) ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง ทำให้เกิดการผสมในระดับ Large scale ต่อมาในบริเวณที่เจ็ตเริ่มมีการโค้งตัว กระแสลมขวางจะถูกดึงเข้าไปในเจ็ตอากาศ (Entrainment) ทำให้เกิดช่องว่างภายในเจ็ตอากาศ (Gap) ซึ่งจะทำให้เกิดการผสมในระดับ Large scale เช่นเดียวกันและเมื่อเจ็ตอากาศพัฒนาตัวไปจนถึงบริเวณ Vortex zone โครงสร้างของ CVP จะเป็นกลไกสำคัญของการผสม โดยกระแสลมขวางจะถูกดึงเข้าไปในตัวเจ็ต (Entrainment) ตามทิศทางการหมุนวนของ CVP

## PART II การปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวาง (JICF)

### 1.2.4 การปรับแต่งและควบคุม JICF โดยไม่ใช้พลังงาน (Passive control)

- ผลของรูปร่างของปากทางออกเจ็ตในกระแสลมขวาง

New *et al.* (2003) ศึกษาโครงสร้างของ เจ็ตในกระแสน้ำขวางที่ปากทางออกเป็นรูปร่างรูปที่ 1.18 แสดงโครงสร้างของเจ็ต ( $AR=0.3$  และ  $VR=3$ ) สังเกตว่า Vortices ทางด้าน Lee side

จะก่อตัวขึ้นทางด้าน Downstream. ของขอบด้านหน้าของ Vortex ตัวแรกยังพบอีกว่า Aspect ratio ที่ค่าต่ำจะเกิด CVP ขึ้น 2 คู่ โดยเริ่มต้นจากด้านข้างของลำเจ็ตของ CVP ที่มีกำลังน้อยกว่า ซึ่งจะถูกรวมโดย CVP คู่ที่มีกำลังมากกว่าแต่ที่ Aspect ratio มีค่ามากพบว่ามี CVP เกิดขึ้นเพียงคู่เดียวและก่อตัวขึ้นจากลำเจ็ตที่ Shear layer กับกระแสหน้าขวาง Interface กันและ พัฒนาตัวเป็น WVP คู่เดียวหรือหลายคู่ขึ้นอยู่กับค่า AR และ VR แนะนำว่า Aspect ratio จะมีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเฉพาะบริเวณ Near field แต่ Far field รูปร่างของเจ็ตจะขึ้นอยู่กับ Gross jet geometry หนึ่งกลไกหลักของการก่อตัวของโครงสร้าง Large scale ที่ Far field สำหรับเจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปวงรีทุกกรณีมีลักษณะเช่นเดียวกับเจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปวงกลม

Sau *et al.* (2004) ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ที่บริเวณ Near field โดยปากทางออกเจ็ตเป็นรูปสี่เหลี่ยมและเสนอแนะตามแนวความคิดของ Yuan *et al.* (1999) ว่า CVP เกิดจาก Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวจากทางผนังด้านข้างของเจ็ตโดยรูปที่ 1.19 แสดง Kelvin – Helmholtz roller ไม่ได้ก่อตัวขึ้นเป็น Closed Vortex ring อีกประการแนะนำ Wake vortice structure ปรากฏขึ้นที่บริเวณ Downstream และ Horse shoe ก่อตัวขึ้นทางด้าน Upstream ซึ่งเป็นปฏิสัมพันธ์ของ Shear layer ที่พื่นกับเจ็ต (รูป 1.20)

- ผลของ Tab ที่ติดตั้งที่ปากทางออกของเจ็ตในกระแสลมขวาง

Zaman and Foss (1997) ได้ทำการทดลองศึกษาผลกระทบของ Vortex generator แบบ Tab รูปสามเหลี่ยมที่มีต่อ Penetration depth ของเจ็ตในกระแสลมขวาง จากผลการทดลองพบว่า Tab ที่วางบนขอบปากเจ็ตด้านที่ปะทะกับกระแสลมขวาง (Windward) จะทำให้ Penetration depth ลดลงอย่างชัดเจนทั้งในกรณีที่มีค่าของ Momentum-flux ratio เท่ากับ 21.1 และ 54.4 (คิดเป็นค่า Effective jet to crossflow momentum ratio) หรืออัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพเท่ากับ 4.6 และ 7.4 ตามลำดับโดยจากการวัดค่าความเร็วเฉลี่ยบนหน้าตัดต่างๆที่ตั้งฉากกับแกน Streamwise จะได้ผลการทดลองดังนี้

รูปที่ 1.21 และ รูปที่ 1.22 แสดง Contour ของความเร็วเฉลี่ย ที่หน้าตัดตั้งฉากกับแกน Streamwise โดยมี Momentum-flux ratio เท่ากับ 21 และ 54 ตามลำดับพบว่ากรณีติดตั้ง Delta tab หรือ Triangular Tab บนขอบปากเจ็ตด้าน Windward จะทำให้ Contour ของความเร็วเฉลี่ยอยู่ต่ำกว่ากรณีที่ไม่ติด Tab และ ติด Tab ที่ตำแหน่งอื่นๆ

รูปที่ 1.23 และ รูปที่ 1.24 แสดงรูปผลการทดลองเปรียบเทียบ Contour ของความเร็วเฉลี่ยในหลายๆ หน้าตัดและ Streamwise vorticity isosurface ค่าหนึ่งซึ่งเป็นตัวแทนการพัฒนาตัวของ CVP ระหว่างกรณีที่ไม่มีการติด Tab กับกรณีที่มีการติด Triangular Tab ที่ตำแหน่ง Windward โดยทำการทดลองที่ Momentum-flux ratio เท่ากับ 21 และ 54 ตามลำดับพบว่า



เมื่อมีการติด Triangular tab ที่ตำแหน่ง Windward จะทำให้ตำแหน่ง Contour ของความเร็วเฉลี่ยในทุกๆ หน้าตัดลดความสูงลงซึ่งแสดงให้เห็นว่า Penetration depth ลดลงนั่นเอง และจากผลการคำนวณ Streamwise vorticity ที่หน้าตัดต่างๆ แล้วนำเฉพาะค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่งซึ่งสามารถเป็นตัวแทน CVP ได้ในหลายๆ หน้าตัด มาทำการสร้าง Isosurface จะพบว่าในกรณีที่ติด Tab นั้น Isosurface จะมีขนาดเรียวยาวเล็กลงมากกว่าในกรณีที่ไม่ติด Tab ซึ่งหมายความว่า CVP มีกำลัง (Strength) น้อยกว่าและลดลงเร็วกว่านั่นเอง

จากผลการทดลองข้างต้นซึ่งพบว่า Tab ทำให้กำลังของ CVP ลดลง และเนื่องจากการที่ได้ทราบมาก่อนแล้วว่า CVP มีต้นกำเนิดมาจาก Vortices บริเวณขอบปากเจ็ต ดังนั้นจึงได้ตั้งสมมติฐานว่า Vortices ที่เป็นต้นกำเนิดของ CVP น่าจะถูกลดกำลังลงก่อนที่จะเกิดการพัฒนาตัวเป็น CVP โดยกลไกที่เป็นตัวลดกำลัง Vortices นี้คือ Pair of vortices ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากการติด Tab ที่ปากเจ็ตโดยจะมีทิศทางการหมุนตรงกันข้ามกับ Vortices ที่เป็นต้นกำเนิดของ CVP

Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ Tab ต่อการกระจายตัวของเจ็ตร้อนและเจ็ตร้อนที่หมุนควงในกระแสมขวาง (รูปที่ 1.25) ในการทดลองได้ทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยเฉลี่ยบนระนาบหน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางไหลของกระแสมขวางทั้งนี้ได้ทำการทดลองที่ค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) คงที่ประมาณ 4.0 โดยมีค่าเสวริล ( $Sr$ ) เท่ากับ 0 ในกรณีเจ็ตไม่หมุนควงและเท่ากับ 0.52 กรณีที่เจ็ตหมุนควง ที่ค่า Reynolds number ของเจ็ตประมาณ 15,000 และกระแสมขวางประมาณ 4,400 โดยใช้ Tab รูปเหลี่ยมซึ่งมีขนาดพื้นที่ประมาณ 3.0 % ของพื้นที่ปากเจ็ตวางอยู่กับที่บนขอบปากเจ็ตและเลื่อนไปโดยรอบ 8 ตำแหน่ง

สำหรับผลการทดลองในกรณีเจ็ตไม่หมุนควงในกระแสมขวางดังรูปที่ 1.26 พบว่าโครงสร้างการไหลจะมีความไวมากที่สุดเมื่อติด Tab บริเวณตำแหน่ง Lateral ไปจนถึง Winward โดยเจ็ตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างรูปไตซึ่งมีลักษณะโครงสร้างการไหลแบบ Counter – Rotating Vortex Pair (CVP) ในกรณีไม่ติด Tab ไปเป็นโครงสร้างรูปจุดภาคและยังคงรูปร่างเช่นนี้อยู่จนถึงหน้าตัดสุดท้ายที่ทำการวัด

สำหรับผลการทดลองในกรณีที่เจ็ตมีการหมุนควงในกระแสมขวางดังรูปที่ 1.27 พบว่ามีผลคล้ายกับกรณีเจ็ตไม่หมุนควงแต่อย่างไรก็ตามยังคงมีความแตกต่างกัน กล่าวคือโครงสร้างการไหลของกรณีเจ็ตหมุนควงจะมีความไวต่อตำแหน่งของ Tab ในบริเวณที่กว้างกว่ากรณีเจ็ตไม่หมุนควง โดยบริเวณนี้คือจากตำแหน่ง Pressure leeward ไปจนถึงตำแหน่ง Suction เมื่อเลื่อนตำแหน่งของ Tab ไปตามทิศทางหมุนของเสวริล อย่างไรก็ตามบริเวณที่มีความไวต่อโครงสร้างการไหลมากที่สุดก็คือตรงกลางระหว่างตำแหน่ง Pressure windward (PW) ไปจนถึง Windward (W) โดยโครงสร้างการไหลจะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งที่ติด Tab ในบริเวณนี้อีก

ทั้งโครงสร้างการไหลดังกล่าวยังมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีที่ไม่ติด Tab เป็นอย่างมากและยังคงอยู่ที่ตำแหน่งหน้าตัดสุดท้าย ที่ทำการวัดอีกเช่นเดียวกัน

จากผลการทดลองบ่งชี้ว่ากลไกซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการเกิดโครงสร้างการไหลทั้งในกรณีเจ็ตไม่หมุนควงและกรณีเจ็ตหมุนควงในกระแสลมขวางนั้นน่าจะเกี่ยวเนื่องอย่างใกล้ชิดกับบริเวณดังกล่าวข้างต้นอีกทั้งยังได้ชี้แนะว่ากลไกการเกิดโครงสร้างการไหลน่าจะเกี่ยวเนื่องอย่างใกล้ชิดกับการพัฒนา Skewed Shear Layer รอบเจ็ตตามทิศทางการไหลของกระแสลมขวางรอบเจ็ตใกล้กับลำของเจ็ตที่ปากทางออก

### 1.2.5 การปรับแต่งและควบคุม JIF โดยใช้พลังงาน (Active control)

Gogineni and Roquemore (1998) ศึกษาการผสมและการ Interaction กันระหว่างเจ็ตกับกระแสลมขวางโดยใช้วิธี Reactive Mie scattering และใช้ Laser sheet ตัดเพื่อศึกษาลักษณะของการผสมระหว่างเจ็ตกับกระแสลมขวาง โดยที่เจ็ตใช้  $TiCl_4$  ขณะที่กระแสลมขวางใช้ไอน้ำเมื่อสารทั้งสองชนิดมาปะทะกันจะเกิดการผสมทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกลายเป็น  $TiO_2$  ซึ่งสามารถ Scatter แสงได้โดยที่การทดลองจะใช้เจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมี Equivalent diameter เท่ากับ 1.72 เซนติเมตร และทดลองที่ อัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 1 โดยมี Reynolds number ของเจ็ตเท่ากับ 700 และ 8,775 สำหรับกระแสลมขวาง และมีการควบคุมเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ต โดยใช้ Piezoelectric actuator ทั้งหมด 4 ตัว ติดรอบปากทางออกของเจ็ต และพบว่าการกระตุ้นเจ็ตตามแนว Spanwise และ Streamwise ช่วยทำให้การผสมกันระหว่างเจ็ตกับกระแสลมขวางมากขึ้นโดยจะสังเกตได้จาก Potential core ของเจ็ตสั้นลง ดังรูปที่ 1.28 และพบว่าการกระตุ้นตามแนว Streamwise จะมีผลต่อการผสมของเจ็ตที่บริเวณ ปากทางของเจ็ตมากกว่า การกระตุ้นเจ็ตตามแนว Spanwise

Wangjiraniran (2001) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของความเร็วในการหมุนควงซึ่งแสดงโดยค่า Swirl ratio ( $Sr$ ) ที่มีต่อคุณลักษณะของอุณหภูมิจากการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยทดลองที่ค่า Swirl ratio ( $Sr$ ) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.82 ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลลงที่ 4.1 ในช่วง  $x/r_d = 0.25-2$  ซึ่งอยู่ระหว่างบริเวณ Near field และ Far field โดยใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) ในการทำให้เกิดการหมุนควง ซึ่งมีผลรวมของค่า Circulation รอบเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์ (Non-zero circulation) ในขณะที่วิธีการทำให้เกิดการหมุนควงอื่นๆ เช่น ใช้ใบพัดควงเจ็ตอากาศ (Niederhaus *et al.*, 1997) และการฉีดของไหลจากด้านข้าง (Kavsaoglu and Schetz, 1989) จะมีผลรวมของค่า Circulation รอบปากเจ็ตเท่ากับศูนย์ (Zero circulation)

รูปที่ 1.29 (ก-ข) แสดงการกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม ( $C_{TG}$ ) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ ( $C_{TL}$ ) ตามลำดับ พบว่าการหมุนควงทำให้ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิมบนหน้าตัดตั้งฉากกับแนวแกนการไหลมีความไม่สมมาตร เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการหมุนควง

โดยจะพบบริเวณที่มีอุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงทางด้านที่ความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ตอากาศมีทิศทางเดียวกับความเร็วของกระแสลมขวาง (ด้าน Suction) ในขณะที่พบบริเวณที่มีอุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่ำทางด้านที่ความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ตอากาศมีทิศทางตรงกันข้ามกับความเร็วของกระแสลมขวาง (ด้าน Pressure)

นอกจากนี้ยังพบว่าความไม่สมมาตรดังกล่าวเพิ่มขึ้นตามความเร็วในการหมุนควง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการหมุนควงจะมีผลต่อลักษณะของความไม่สมมาตรภายในเจ็ต แต่การหมุนควงดังกล่าวไม่มีผลต่อตำแหน่ง และรูปร่างภายนอกของเจ็ตซึ่งแสดงโดยเส้นขอบเขตของบริเวณระดับอุณหภูมิที่รอบเจ็ต อีกทั้งยังพบว่า ในช่วงของพารามิเตอร์ที่ศึกษานั้น การหมุนควงส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อคุณลักษณะโดยรวมของเจ็ต เช่น การขยายตัวของเจ็ต (Spread rate) และรูปร่างและตำแหน่งของขอบเจ็ตดังกล่าวข้างต้น และส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อคุณลักษณะบนระนาบสมมาตรแนวตั้ง (ระนาบ  $x-y$ ) ดังจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของเส้นทางของอุณหภูมิสูงสุดบนระนาบสมมาตร (Centerplane trajectory), เส้นทางของจุดศูนย์กลางอุณหภูมิ (Centroid trajectory) และการลดลงของอุณหภูมิสูงสุดบนระนาบสมมาตร (Centerplane decay) และการลดลงของอุณหภูมิสูงสุด (Maximum decay) ในทางตรงกันข้าม พบว่าการหมุนควงส่งผลที่มีนัยสำคัญต่อคุณลักษณะของเจ็ตบนระนาบแนวนอน (ระนาบ  $x-z$ ) ดังจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของเส้นทางของจุดศูนย์กลางอุณหภูมิมบนระนาบแนวนอน ซึ่งพบการเบี่ยงเบนออกจากแนวของระนาบสมมาตรแนวตั้งมากขึ้น เมื่อความเร็วในการหมุนควงเพิ่มมากขึ้น

M'closkey *et al.* (2002) ศึกษาเจ็ตในกระแสลมขวางโดยการกระตุ้นด้วยเสียงจากลำโพงทดลองที่ค่า  $R = 2.58$  และ  $Re = 1,500$  ด้วยวิธีการทางภาพถ่ายด้วยกล้อง NAC ซึ่งเป็นกล้องที่มีความเร็วสูงและยังพบอีกว่า Random excitation ไม่ได้ช่วยปรับปรุงการผสมและเสนอแนะต่อว่า Amplitude สูงสุดของเจ็ตที่ยังคงมีการตอบสนองต่อการกระตุ้นอยู่ในช่วงความถี่ 73.5 Hz และยังพบอีกว่าการตอบสนองของการหมุนตัวของเจ็ตจะหยุดหลังจากที่ความถี่เกิน 100 Hz ดังรูปที่ 1.30 (ก) และ (ข) ซึ่งค่าที่เหมาะสมของการพุ่งทะลุผ่านและการกระจายตัวของเจ็ตในกระแสลมขวางโดยการกระตุ้นด้วย Square wave จะอยู่ที่ Subharmonics ของค่าความถี่ธรรมชาติของ Vortex shedding ของเจ็ตโดยที่ค่าสูงสุดของเจ็ตที่พุ่งทะลุผ่านและการกระจายตัวของเจ็ตในกระแสลมขวางจะสอดคล้องกับการกระตุ้นด้วย Square wave และ Duty cycle จะเป็นค่าเฉพาะ ซึ่งมีความกว้าง  $\tau$  ประมาณ 2.7-3.0 ms

Narayanan *et al.* (2003) ศึกษา Dynamic และการควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวางด้วย Spinning valve actuator กระตุ้นด้วยความถี่ระหว่าง 100 ถึง 1,600 Hz ที่  $Re_j = 5,000$ ,  $r = 6$  และ  $Re_{cf} = 2.75 \times 10^4$  พบว่าการกระตุ้นที่ความถี่ต่ำ Vortices จะเพิ่มขึ้นในขณะที่เจ็ต

พุ่งออกและโค้งตัวตามกระแสลมขวาง (รูปที่ 1.31) และกระตุ้นที่ความถี่สูงจะช่วยให้การกระจายตัวของเจ็ตที่ปากทางออกเพิ่มสูงขึ้น

ผลการเสนอแนะของ Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) พบว่าโครงสร้างการไหลจะมีความไวมากที่สุดเมื่อติด Tab บริเวณตำแหน่ง PW จนถึง W ได้นำมาสู่ความพยายามที่จะควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวางด้วยการกระตุ้น JICF ด้วยเจ็ตควบคุม โดยการฉีดแบบสม่ำเสมอที่ Skewed mixing shear layer และจะมุ่งศึกษาโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของสนามความเร็วที่หน้าตัดของเจ็ต และ Center plane ของเจ็ต

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยและขอบเขต

ศึกษาผลกระทบของการกระตุ้นด้วยเจ็ตควบคุมต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยอาศัยการวัดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของความเร็วของเจ็ตในกระแสลมขวางโดยงานวิจัยจะศึกษามุ่งเน้นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งต่างๆกันตามแนวเส้นรอบวงด้วยอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลของเจ็ตคงที่

### 1.4 แนวทางการวิจัย

สำหรับช่วงต้นของการวิจัยได้ทำการศึกษาเบื้องต้นเพื่อพิจารณาค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทดลองคือตำแหน่งของมุมฉีดเจ็ตควบคุมและปริมาณการฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลคงที่เท่ากับ 4 โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิต้องปกติ โดยใช้ Hot film แบบ Sensor เดียวในการวัดความเร็ว

สำหรับการเลือกตำแหน่งการฉีดที่เหมาะสมโดยจะเลือกทำการฉีดทั้งหมด 8 ตำแหน่งคือ 0, 180, (0,180),  $\pm 15$ ,  $\pm 30$ ,  $\pm 45$ ,  $\pm 90$ ,  $\pm 135$  และจะพิจารณาจากเส้นทางเดินของความเร็วของเจ็ตเส้นที่ต่ำที่สุด ซึ่งเส้นทางเดินของเจ็ตจะนิยามจากความเร็วสูงสุดบน Center line ของเจ็ตแต่ละตำแหน่งตาม Down stream ( $x$ ) ( $x/rd = 0.5, 1, 1.5, 2, 3$  และ 4) จากนั้นจะกำหนดปริมาณการฉีดที่เหมาะสมโดยจะพิจารณาจากการลดลงของความเร็วของเจ็ต (Velocity decay) ซึ่งจะนิยามจากค่าความเร็วสูงสุดบน Center line ของเจ็ตโดยฉีดที่ตำแหน่งที่เหมาะสมและวัด Center line ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณการฉีดเจ็ตทั้งหมด 5 ค่าโดยคิดเป็นอัตราส่วนเชิงมวล ( $r_m$ ) เท่ากับ 0.5, 1, 1.5, 2, 2.32 โดยที่  $r_m$  จะนิยามจากอัตราส่วนระหว่างมวลของเจ็ตควบคุมต่อมวลของเจ็ต เมื่อได้ตำแหน่งการฉีดและปริมาณการฉีดเจ็ตที่เหมาะสมแล้วจึงทำการวัดการกระจายตัวของความเร็วบนหน้าตัดที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนว Downstream ทั้งหมด 7 หน้าตัดคือ  $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3$  และ 4 และเปรียบเทียบกับกรณี JICF

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

ผลการศึกษาเชิงวิชาการที่ได้จะนำมาซึ่งความรู้ความเข้าใจและข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบของเจ็ดควบคุมต่อคุณลักษณะของเจ็ดในกระแสลมขวาง โดยเฉพาะผลกระทบต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ดในกระแสลมขวางโดยความรู้ความเข้าใจและข้อมูลที่ได้จะเป็นแนวทางในการควบคุมเจ็ดในกระแสลมขวาง (Flow control)

ผลการศึกษาเชิงประยุกต์ความรู้และความเข้าใจดังกล่าวจะเป็นพื้นฐานในการประยุกต์ใช้กับการควบคุมการไหลของเจ็ดในกระแสลมขวางในการพัฒนาอุปกรณ์การผสมและการเผาไหม้ต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นรวมถึงการออกแบบระบบเพื่อการลดการฟุ้งกระจายของฝุ่นละอองที่ปล่อยออกจากปล่องควัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ชุดทดลองและการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยการฉีดเจ็ตควบคุมแบบต่อเนื่อง ที่บริเวณขอบด้านในของปากทางออกของเจ็ตในกระแสลมขวาง ด้วยอัตราส่วนเชิงมวลระหว่างเจ็ตหลักต่อเจ็ตควบคุมคงที่ และทำการทดลองที่ค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางคงที่เท่ากับ 3.87 โดยค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลนิยามเป็น  $(\rho_j U_j^2 / \rho_{cf} U_{cf}^2)^{1/2}$  โดย  $\rho_j, \rho_{cf}$  เป็นความหนาแน่นของเจ็ตและกระแสลมขวางตามลำดับ และ  $U_j, U_{cf}$  เป็นความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตและกระแสลมขวางตามลำดับ สำหรับบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของชุดทดลองและวิธีการทำการทดลองในส่วนต่าง ๆ

#### 2.1 ชุดทดลอง

ชุดทดลองสำหรับการศึกษานี้ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยชุดทดลองประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ อุโมงค์ลมและชุดหัวเจ็ตควบคุม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 2.1.1 อุโมงค์ลม (Wind tunnel)

อุโมงค์ลมมีหน้าที่สร้างกระแสลมขวางโดยแสดงเป็นลักษณะภาพจำลอง ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญคือพัดลมหอยโข่ง ขนาด 15 kW ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) ขนาด 100 x 100 ตารางเซนติเมตร (อ้างอิงข้อมูลได้จาก Uppathamnarakorn (2001)) และท่อส่วนทดสอบ (Test section) สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 50 x 50 ตารางเซนติเมตร ยาว 240 เซนติเมตร ทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 15 มิลลิเมตร โดยที่ผนังด้านหนึ่งมีการเจาะร่องขนาด 12 มิลลิเมตร จำนวน 13 ร่อง สำหรับการสอด Sensor probe เข้าไปวัดความเร็ว ดังแสดงภาพจำลองของการสอดเครื่องมือวัด และระยะของการเจาะร่องในรูปที่ 2.2 (ก) - (ข) และรูปถ่ายหน้าตัดทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3

สำหรับตำแหน่งของการเชื่อมต่อระหว่างชุดหัวเจ็ตควบคุมกับท่อส่วนทดสอบนั้นชุดหัวเจ็ตจะต่อเข้าทางผนังด้านบนของหน้าตัดทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหน้าตัดทดสอบ และจุดศูนย์กลางของหัวเจ็ตควบคุมห่างจากขอบด้านท้ายของหน้าตัดทดสอบเท่ากับ 165 เซนติเมตร

##### 2.1.2 ชุดหัวเจ็ตควบคุม

รายละเอียดของชุดหัวเจ็ตควบคุม ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักได้แก่ 1) เจ็ตหลัก (Main jet) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 22.5 มิลลิเมตร โดยจะติดตั้งอยู่จุดศูนย์กลางของหัวเจ็ต

และ 2) เจ็ดควบคุมซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 มิลลิเมตร จำนวน 24 ตัว ติดตั้งโดยรอบปากทางออกของเจ็ดหลัก โดยมีระยะห่างระหว่างปากเจ็ดควบคุมแต่ละตัวเท่ากับ 15 องศา และจุดศูนย์กลางของปากเจ็ดควบคุมอยู่สูงกว่าระดับปากทางออกของเจ็ดหลักเท่ากับ 3 มิลลิเมตร โดยส่วนประกอบหลักของชุดทดลองในส่วนเจ็ดหลักและเจ็ดควบคุมแสดงในรูปที่ 2.4 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ส่วนเจ็ดหลัก

การทำงานของชุดหัวเจ็ดเป็นดังต่อไปนี้ อากาศจะถูกดูดจากบรรยากาศของห้องทดลองผ่านพัดลมความดันสูงขนาด 10 แรงม้า (ใช้มอเตอร์ยี่ห้อ Elprom) ควบคุมความเร็วรอบด้วยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (ABB, ขนาด 50 Hz, ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz) เพื่อควบคุมอัตราการไหลของเจ็ดหลักแล้วอากาศจะถูกส่งผ่านท่ออ่อนเพื่อลดการสั่นสะเทือนไปยังส่วนอื่นๆ ของชุดทดลอง และผ่านระบบท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ต่อจากนั้นขนาดท่อจะลดเป็น 2.5 นิ้ว เพื่อต่อเข้ากับ Gate valve แล้วท่อจะถูกลดขนาดเป็น 3/4 นิ้ว ก่อนเข้าสู่อุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบลูกกลอย (Tokyo, รุ่น R-101-E) ซึ่งมีค่าความละเอียดในการวัดอัตราการไหลเท่ากับ 1 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว เพื่อเข้าสู่ถังผลิตควันขนาด 30x30x60 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งได้ออกแบบไว้สำหรับการทดลองอีกส่วนหนึ่งและไม่ได้ใช้งานในการศึกษานี้ เมื่ออากาศไหลออกจากถังผลิตควัน อากาศจะไหลต่อเข้าสู่ระบบท่อเหล็กชุบสังกะสีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้วและท่ออะลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว ซึ่งเป็นส่วนต่อตรงยาว 80 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ดหลักก่อนไหลเข้าสู่ชุดหัวเจ็ดควบคุม

- ส่วนเจ็ดควบคุม

ส่วนของเจ็ดควบคุมประกอบด้วย เครื่องอัดลมแบบลูกสูบแบบ Single acting/Single state ยี่ห้อ PUMA ขนาด 0.75 กิโลวัตต์ และอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของเจ็ดควบคุม โดยที่เจ็ดควบคุม สามารถควบคุมเวลาสำหรับการเปิดปิดได้ด้วย ชุด Solenoid valve (Parker, ZB099W)

การทำงานของเจ็ดควบคุมเป็นดังต่อไปนี้ อากาศจะถูกดูดจากบรรยากาศของห้องผ่านเครื่องอัดอากาศ แล้วส่งผ่านชุดควบคุมแรงดันที่กำหนดค่าประมาณ 1.5 bar ก่อนที่อากาศจะไหลผ่านสายยางขนาด 1/2 นิ้ว แล้วถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนผ่านเข้าสู่แผงควบคุมซึ่งประกอบด้วยวาล์วทองเหลืองแบบเข็ม (Needle valve) ขนาด 1/2 นิ้ว วาล์วแบบ Solenoid และอุปกรณ์วัด/ควบคุม

อัตราการไหล (Dwyer, ประเภทลูกกลอยชนิด 316 Stainless steel, ค่าความถูกต้องเท่ากับ  $\pm 2\%$  FS) แล้ววากาศทั้งสองส่วนจะไหลผ่านระบบท่อของเหล็กขนาด 1/2 นิ้วและเชื่อมต่อกับรูเจ็ทควบคุมด้วยท่อ PTFE ขนาด 3/16 นิ้ว ก่อนไหลออกสู่ปากทางออกของเจ็ทควบคุมต่อไป และรายละเอียดของส่วนปลายปากเจ็ทของชุดเจ็ทควบคุมแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 ซึ่งทำจากวัสดุ Aluminum มีขนาดปากเจ็ทหลักเท่ากับ 22.5 มิลลิเมตร โดยปลายอีกด้านหนึ่งได้เตรียมไว้สำหรับเสียบท่ออะลูมิเนียมขนาด 3/4 นิ้ว ซึ่งมีการกลึงผิวด้านในเพื่อให้พอดีกับขนาดปากเจ็ทหลัก โดยการยึดส่วนชุดหัวเจ็ทกับท่ออะลูมิเนียมได้ใช้ฝ้ายึดซึ่งทำจากวัสดุชนิดเดียวกับที่ใช้ทำชุดหัวเจ็ทควบคุม และใช้ O-ring และ ซีลโคลนทนความร้อนสำหรับป้องกันการรั่วซึม

## 2.2 อุปกรณ์วัดความเร็วและการใช้งาน

นอกจากการใช้ Pitot probe ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดความเร็วที่วัดค่าความเร็วเฉลี่ยแล้วนั้น ในการศึกษาจะใช้ Hot film anemometer (CTA) ยี่ห้อ Dantec เพื่อวัดค่าความเร็ว Instantaneous โดยใช้เซนเซอร์ชนิด Fiber film แบบเส้นลวดเดี่ยวรุ่น 55R05 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $70\mu\text{m}$  และยาวทั้งหมดเท่ากับ 3 มิลลิเมตร โดยมีฉนวนหุ้มที่ปลายของเส้นลวดทั้ง 2 ข้าง เหลือส่วนที่เป็น Element sensing ยาว 1.25 มิลลิเมตร ทำจาก Quartz fibers และเคลือบด้วยนิเกิลหนาประมาณ  $0.1\mu\text{m}$  และยึดกับก้าน Probe รุ่น 55H21 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 มิลลิเมตร โดยใช้สายสัญญาณยาว 4 เมตร และมีเซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิของอากาศด้วย โดยที่ค่าความถูกต้องของการวัดค่าความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ  $\pm 5.2\%$  ของค่าความเร็วสูงสุดที่วัดได้ โดยรายละเอียดที่สำคัญได้สรุปไว้ในตารางที่ 1.1 ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้ได้จากการทำการสอบเทียบและข้อมูลทั้งหมดสามารถอ้างอิงได้จากภาคผนวก ข (1) และรูปที่ 2.6 แสดงไดอะแกรมสำหรับการต่อส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์การวัดเข้าด้วยกัน

สำหรับการเลื่อนตำแหน่งของ Hot film จะใช้ Traverse controller (Dantec, แบบ 2D) แบบเลื่อน 2 ทิศทาง ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ค่าความละเอียดสูงสุดสำหรับระยะห่างของการวัดเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร

ในส่วนของความถี่ในการเก็บข้อมูลของความเร็วและอุณหภูมิ ผู้ทำการทดลองจะสามารถกำหนดค่าความถี่ในการเก็บข้อมูล (Sampling frequency) ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล (Sampling interval) รวมทั้งการทำงานของ Traverse controller ได้โดยผ่านโปรแกรม Streamline Streamware ของ Dantec โดยที่ขั้นตอนการปฏิบัติงานโปรแกรมมี 3 ส่วนหลักคือ

ส่วนที่ 1 คือ “Define device and System configuration” ในส่วนนี้โปรแกรมจะให้กำหนดชนิดของ A/D board ที่ติดตั้งในคอมพิวเตอร์ซึ่งการทดลองนี้ใช้บอร์ดรุ่น PCI-MIO-16E-4 และส่วนของ Configuration โปรแกรมจะให้กำหนดชนิดของ Wire sensor, Probe support,



Probe cable, Temperature sensor และ CTA frame (อ้างอิงได้จากหนังสือคู่มือ Streamline Streamware Vol.2 หน้า 7.5- 2)

ส่วนที่ 2 คือ “*Hardware setup*” เป็นส่วนของการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้ร่วมกับกับอุปกรณ์การวัดแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการกำหนด Overheat ratio ส่วนที่ 2 เป็นการกำหนด Square wave test ซึ่งต้องกำหนดค่าของ Frequency response และส่วนที่ 3 เป็นการกำหนด Signal conditioning ซึ่งต้องกำหนดค่าของ Voltage output ของ CTA ที่ค่าความเร็วลมสูงสุดของการทดลอง สำหรับการทดลองนี้จะเลือกกำหนดค่า Overheat ratio เท่ากับ 0.8 และค่า Frequency response เท่ากับ 4.7 KHz และ Voltage output จาก CTA มีค่าไม่เกิน 4 volt (อ้างอิงได้จากหนังสือคู่มือ Streamline Streamware Vol.2 หน้า 7.6-2)

ส่วนที่ 3 คือ “*Run Experiment*” เป็นส่วนของการลำดับขั้นตอนการทำงานของ Hardware รวมทั้งกำหนดคุณสมบัติต่างๆในการเก็บข้อมูล เช่น Sampling frequency, Sampling interval, Temperature correction รวมทั้งการกำหนดเลือก Calibration data สำหรับเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นความเร็วลม รวมไปถึงการกำหนดการทำงานของ Traverse controller อีกด้วย (อ้างอิงได้จากหนังสือคู่มือ Streamline Streamware Vol.2 หน้า 7.8-10)

หลังจากกำหนดค่าต่าง ๆ ในทั้งสามขั้นตอนแล้ว ผู้ทำการทดลองก็สามารถเริ่มการทำงานของเครื่องมือวัดได้ หลังจากการวัดสิ้นสุดลง ผู้ทดลองสามารถเลือกบันทึกค่าการวัดที่จุดใดๆ หรือเลือกบันทึกค่าการวัดของทุกๆจุดก็ได้มาไว้ในหน่วยความจำอื่นเพื่อนำค่าไปคำนวณและวิเคราะห์ต่อไป จากคำสั่ง Export บนแถบเมนูใน Streamline Streamware หรือหากต้องการคำนวณค่าทางสถิติต่างๆ เช่น ค่าเฉลี่ย, ค่าความแปรปรวน และค่าการปั่นป่วน ผู้ทดลองก็สามารถคำนวณได้จากคำสั่ง Data reduction บนแถบเมนูคำสั่งใน Streamline Streamware (อ้างอิงได้จากหนังสือคู่มือStreamline Streamware Vol.2 หน้า 7.8-11)

### 2.3 พิกัดอ้างอิงสำหรับการทดลอง

พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลองและลักษณะตำแหน่งการวัดแสดงในรูปที่ 2.7 (ก) ซึ่งแสดงพิกัด  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ที่เป็นพิกัดอ้างอิงเทียบกับหน้าตัดทดสอบ โดยกำหนดให้ตำแหน่งจุดกึ่งกลางที่ปากทางออกของเจ็ตหลักเป็นจุดเริ่มต้น ส่วนการกำหนดตำแหน่งของเจ็ตควบคุมนั้น ได้กำหนดให้ตำแหน่งของเจ็ตควบคุมตัวที่มีทิศเดียวกับกระแสลมขวาง เป็นเจ็ตที่ 0 องศา และตัวที่ทำมุมไปทางด้านตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกาเป็นองศาบวกและลบตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ข)

## 2.4 ความเร็วกระแสลมขวางและความเร็วเจ็ต

การทดลองนี้ใช้ความเร็วของกระแสลมขวาง ( $U_{cf}$ ) แบบสม่ำเสมอ และมีค่าเท่ากับ  $4 \pm 0.2$  เมตรต่อวินาที สำหรับความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตซึ่งพิจารณาจากค่าเฉลี่ยแบบพื้นที่ โดยนิยามจาก

$$U = \frac{1}{A} \int_A u dA \quad (2.1)$$

โดย  $U$  ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกนบนพื้นที่ปากทางออกของเจ็ต  
 $u$  ความเร็วตามแนวแกนที่จุดใดๆ บนพื้นที่ปากทางออกของเจ็ต  
 $A$  พื้นที่ปากทางออกของเจ็ต

ในการทดลองนี้ค่า  $U_j$  มีค่าประมาณ  $16 \pm 0.83$  เมตรต่อวินาทีซึ่งคิดเป็นอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ  $0.00738$  kg/s และมีความเร็วที่จุดศูนย์กลางเจ็ตเท่ากับ  $20 \pm 1$  เมตรต่อวินาที

เนื่องจากคุณสมบัติของเจ็ตและกระแสลมขวางเท่ากับคุณสมบัติห้อง ด้วยความเร็วเจ็ตและกระแสลมขวางดังกล่าวข้างต้นจะทำให้อัตราส่วนความเร็วระหว่างเจ็ตหลักกับกระแสลมขวาง ( $r_v = U_j / U_{cf}$ ) มีค่าประมาณ  $4 \pm 0.3$  และมีค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ต ( $Re_j = U_j d / \nu$ ) ประมาณเท่ากับ 24,000 โดย  $d$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกของเจ็ตหลัก และ  $\nu$  เป็นค่าความหนืดจลน์ของอากาศที่อุณหภูมิที่ทำการทดลอง และค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง ( $Re_{cf} = U_{cf} d / \nu$ ) มีค่าประมาณ 6,000

## 2.5 วิธีการทดลอง

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือส่วนที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อวัดสภาวะเริ่มต้น ได้แก่ ความสม่ำเสมอของความเร็วของกระแสลมขวางความหนาของ Boundary layer ของกระแสลมขวาง การกระจายความเร็วบนหน้าตัดที่ปากทางออกของเจ็ตหลัก และอัตราการไหลของเจ็ตควบคุม

การทดลองส่วนที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อหาสภาวะที่การควบคุมมีผลมากที่สุด ซึ่งเป็นการหาพารามิเตอร์ที่สำคัญ 2 อย่างคืออัตราส่วนมวลระหว่างการไหลของเจ็ตควบคุมและเจ็ตหลัก และมุมที่ใช้ในการฉีดเจ็ตควบคุมโดยการทดลองส่วนนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของเจ็ตควบคุม และมุมในการฉีดต่าง ๆ กัน แล้วทำการวัดการกระจายความเร็วบนหน้าตัดกึ่งกลางเจ็ตตามลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.8

สำหรับการเลือกสภาวะที่การควบคุมมีผลมากที่สุดนั้น จะพิจารณาจากกรณีที่ทำให้การเคลื่อนที่ของเจ็ตเข้าใกล้ผนังมากที่สุด เพราะว่าวัตถุประสงค์หลักอันหนึ่งของการควบคุมคือ การเพิ่มการผสมกันระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางซึ่งหมายถึงการ Entrainment ที่เพิ่มมากขึ้น โดยที่

การ Entrainment ของเจ็ตมีความสัมพันธ์กับเส้นทางเดินของเจ็ต ซึ่งจากการการคำนวณของ Yuan and Street (1998) ชี้แนะว่าเส้นทางเดินของเจ็ตจะต่ำลงเมื่อ Entrainment เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพารามิเตอร์ในการทดลองนี้ น่าจะทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตต่ำลงเมื่อเทียบกับการฉีดที่ตำแหน่งอื่นๆ

สำหรับการทดลองในส่วนที่ 3 เป็นการวัดการกระจายตัวของความเร็วบนหน้าตัดของเจ็ตอย่างละเอียดและและรูปร่างความเร็วบน Center plane เปรียบเทียบกันระหว่างกรณีที่เป็นเจ็ตในกระแสลมขวางที่ไม่มีการควบคุมและเมื่อมีการควบคุมตามพารามิเตอร์ที่กำหนดจากการทดลองในส่วนที่ 2 โดยรายละเอียดของการทดลองแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

### 2.5.1 การวัดสภาวะเบื้องต้นของการทดลอง

การวัดสภาวะเริ่มต้นจะวัดทั้งของเจ็ตและกระแสลมขวางโดยใช้ Hot-film anemometer แต่ในการวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตควบคุมจะอ่านค่าจากเครื่องมือวัดอัตราการไหล แทน เนื่องจากในการทดลองนี้ได้ทำการสอบเทียบ Hot-film anemometer ที่ความเร็วสูงสุดได้เพียงแค่ 20.5 เมตรต่อวินาที อันเนื่องมาจากขีดจำกัดของอุโมงค์ลม แต่สำหรับความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตควบคุมที่ใช้มีค่าสูงสุดถึงประมาณ 80 เมตรต่อวินาที (ที่การฉีดเจ็ตควบคุมด้วยค่าอัตราส่วนเชิงมวลเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์) ทำให้ไม่สามารถใช้ Hot-film anemometer วัดได้

ดังนั้นในส่วนนี้จะกล่าวถึงเฉพาะรายละเอียดของการวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตและกระแสลมขวาง ซึ่งเป็นดังต่อไปนี้ โดยที่ผลการวัดจะกล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

#### • การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวาง

การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวางได้ทำการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วบนหน้าตัดทดสอบ และการวัดความหนาของชั้นขอบเขตที่ผนังด้านปากทางออกเจ็ต

สำหรับการวัดค่าความสม่ำเสมอของความเร็วภายในหน้าตัดทดสอบจะวัดเป็นเมตริกซ์ขนาด 41 จุด x 41 จุด โดยมีความละเอียดในการวัดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ที่ระยะ  $x/rd = -1$  ในขณะที่ยังไม่มีเจ็ตและเจ็ตควบคุม และจะทำการทดลองที่อุณหภูมิตั้งปกติ (ความหนาแน่นของกระแสลมขวางเท่ากับ  $1.16 \text{ kg/m}^3$  ในช่วงความเร็วบนหน้าตัดทดสอบเท่ากับ  $4 \pm 0.3 \text{ m/s}$  ในการวัดนี้จะใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 10 kHz นาน 5 วินาที ซึ่งได้ข้อมูลทั้งหมด 50,000 ข้อมูลต่อหนึ่งจุด หลังจากนั้นจะหาค่าของความเร็วเฉลี่ยและ Fluctuation velocity

สำหรับการวัดความหนาของชั้นขอบเขตจะวัดด้วย Hot-film ตามแนว Traverse 7 ตำแหน่ง ตามตำแหน่งในรูปที่ 2.9 (แสดง Top view) ซึ่งมีระยะดังนี้คือ  $(x,z) = (-4d, -1.5d), (-4d,-1d), (-4d,-0.5d), (-4d,0d), (-4d, 0.5d), (-4d,1d)$ , และ  $(-4d,1.5d)$  ตามลำดับ โดย

ใช้ความละเอียดในการวัดเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร และกำหนดค่าความถี่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 10 kHz ด้วยระยะเวลาสำหรับการเก็บข้อมูลเท่ากับ 5 วินาที

- การวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ต

การวัดการกระจายตัวของความเร็วของเจ็ตจะวัดขณะที่ไม่มีทั้งกระแสลมขวางและไม่มีเจ็ตควบคุมที่ความเร็วจุดศูนย์กลางเจ็ตเท่ากับ  $20 \pm 1$  เมตรต่อวินาที โดยการทดลองจะวัดที่อุณหภูมิตั้งแต่ที่ซึ่งมีอุณหภูมิตั้งอยู่ระหว่าง 30-33 องศาเซลเซียส สำหรับตำแหน่งของการวัดความเร็วจะอยู่ห่างจากปากทางออกของเจ็ตคงที่เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร และจะวัดทั้งทางด้าน Streamwise (ตามทิศทาง  $x$ ) และทางด้าน Spanwise (ตามทิศทาง  $z$ ) โดยมีความละเอียดของการวัดเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร

ทั้งนี้ในการเก็บข้อมูลของความเร็วจะใช้ความถี่ในการวัดเท่ากับ 10 kHz นานต่อเนื่อง 30 วินาที ซึ่งจะได้ข้อมูลทั้งหมด 300,000 ข้อมูลต่อหนึ่งจุด แล้วจะคำนวณหาค่าของความเร็วเฉลี่ยและค่าของ Fluctuation velocity ต่อไป

## 2.5.2 การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการควบคุม

การหาพารามิเตอร์ที่การควบคุมมีผลมากที่สุดจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน การหามุมของการฉีดเจ็ตควบคุมและอัตราส่วนเชิงมวลระหว่างเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลักที่เหมาะสม

ในส่วนแรกเป็นการหามุมของการฉีดเจ็ตควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งจะกำหนดจากการเปรียบเทียบ Velocity trajectory ซึ่งนิยามจากค่าของความเร็วสูงสุดบน Center plane สำหรับตำแหน่งมุมของการฉีดต่าง ๆ กัน และเลือกมุมของการฉีดที่ทำให้ Velocity trajectory ต่ำที่สุด ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการฉีดเจ็ตควบคุมทั้งหมด 8 แบบ คือ จุดเดียวที่ 0 องศา, จุดเดียวที่ 180 องศา, สองจุดที่ 0 และ 180 องศา, ที่  $\pm 15$ , ที่  $\pm 30$ , ที่  $\pm 45$ , ที่  $\pm 90$ , และที่  $\pm 135$  องศา โดยกำหนดให้อัตราส่วนเชิงมวลระหว่างเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลักคงที่เท่ากับ 2.32%

ส่วนที่สองคือการกำหนดอัตราส่วนเชิงมวล ( $r_m$ ) ที่เหมาะสม ซึ่งจะกำหนดโดยการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งมุมที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองส่วนแรก ด้วยค่าอัตราส่วนเชิงมวล ( $r_m$ ) เท่ากับ 0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.32% แล้วเลือกกรณีที่ทำให้ค่าความเร็วสูงสุดบน Center line ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  มีค่าความเร็วต่ำสุด สำหรับเหตุผลของการเลือกหน้าตัด  $x/rd = 1.5$  ดังกล่าวเพราะว่า ที่หน้าตัดดังกล่าวยังมีผลของเจ็ตควบคุมมากอยู่และสามารถแยกแยะการเปลี่ยนแปลงความเร็วของแต่ละกรณีได้ชัดเจน

สำหรับในการทดลองส่วนนี้จะใช้ Hot film anemometer แบบเซนเซอร์เดี่ยววัดความเร็วและจะจัดเซนเซอร์ให้อยู่ในระนาบ  $y-z$  (วางเส้นลวดขนานกับแกน  $Z$ ) ซึ่งเป็นการวัดความเร็วรวม

บนระนาบ  $y-z$  เป็นหลัก สำหรับเหตุผลที่จัดเซนเซอร์ในระนาบ  $y-z$  คือ ความเร็วตามแนวแกน  $x$  กับ  $y$  เนื่องจากความเร็วในทิศทางดังกล่าวมีอิทธิพลต่อโครงสร้างของความเร็วของการไหลลักษณะนี้

สำหรับผลการทดลองในส่วนนี้อย่างละเอียดจะแสดงในบทที่ 3 ซึ่งจากพารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นมาในการศึกษานี้เราพบว่ามุมสำหรับการฉีดเจ็ตควบคุมและอัตราส่วนเชิงมวลที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 15 และ 2 % ตามลำดับ ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว พารามิเตอร์ที่เหมาะสมอาจจะมีค่าที่แตกต่างไปจากผลการทดลองนี้ได้

### 2.5.3 การวัดการกระจายตัวของความเร็วเปรียบเทียบระหว่างกรณีเจ็ตในกระแสมวลขวางที่ไม่มีการควบคุมและมีการควบคุม

ในการทดลองส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วของกรณีเจ็ตในกระแสมวลขวางแบบธรรมดาและแบบที่มีการควบคุมด้วยมุมสำหรับการฉีดและอัตราส่วนเชิงมวลที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 15 องศา และ 2 % ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่หาได้จากการทดลองในส่วนที่แล้ว สำหรับการวัดการกระจายตัวของความเร็วจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือการวัดการกระจายตัวของความเร็วบนหน้าตัด End view และรูปร่างความเร็วบน Center plane ตามลักษณะหน้าตัดการวัดในรูปที่ 2.7 (ก) และรูปที่ 2.8 ตามลำดับ ด้วย Hot-film โดยใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 10 kHz และระยะเวลาในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 5 วินาทีทั้งหมด สำหรับการทดลองทั้งสองกรณีนี้จะจัดเซนเซอร์ให้อยู่ในระนาบ  $x-y$  ซึ่งเป็นการวัดความเร็วรวมบนระนาบ  $x-z$  เป็นหลัก

ในส่วนแรกการวัดการกระจายตัวของความเร็วบนหน้าตัด End view จะทำการวัดที่ตำแหน่งตามแนว Streamwise ทั้งหมด 7 ตำแหน่งคือ  $x/r_d = 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3$  และ 4 โดยที่ตำแหน่ง  $x/r_d = 0.25$  จะวัดเป็นเมตริกซ์ ขนาด 46 จุด x 46 จุดด้วยความละเอียดในการวัดเท่ากับ 3 มิลลิเมตรและที่ตำแหน่ง  $x/r_d = 0.5, 0.75$  และ 1 จะวัดเป็นเมตริกซ์ ขนาด 46 จุด x 46 จุดด้วยความละเอียดในการวัดเท่ากับ 4 มิลลิเมตร สำหรับที่ตำแหน่ง  $x/r_d = 2$  จะวัดเป็นเมตริกซ์ ขนาด 31 จุด x 31 จุดด้วยความละเอียดในการวัดเท่ากับ 7 มิลลิเมตร และตำแหน่ง  $x/r_d = 3$  และ 4 จะวัดเป็นเมตริกซ์ขนาด 28 จุด x 28 จุดด้วยความละเอียดในการวัดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร

สำหรับการวัดรูปร่างของความเร็วบน Traverse ที่ Center plane ของเจ็ตจะวัดที่ตำแหน่งตามแนว Streamwise ทั้งหมด 10 ตำแหน่งคือ  $x/r_d = 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5,$  และ 4 ด้วยความละเอียดในการวัดเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ส่วนการเก็บข้อมูลของความเร็วจะใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 10 kHz ต่อเนื่อง 5 วินาที

### บทที่ 3

#### ผลการทดลอง

สำหรับในการทดลองนี้จะกำหนดสัญลักษณ์เพื่อใช้อธิบายดังต่อไปนี้

$A_{jet}$	พื้นที่หน้าตัดเจ็ตที่ตำแหน่งใดตามแนว Downstream(x)
$C_{UG}$	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความเร็วรวมของเจ็ต
$C_{UL}$	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความเร็วเฉพาะหน้าตัดของเจ็ต
CC	Centroid trajectory
CM	Center of mass trajectory
JICF	เจ็ตในกระแสลมขวาง
I 0	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง 0
I 180	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง 180
I (0,180)	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง (0,180)
I 15	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 15$
I 30	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 30$
I 45	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 45$
I 90	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 90$
I 135	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 135$
$r_m$	อัตราส่วนเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ต
$T_i$	Turbulent intensity ( $w_{rms}/w$ )
$w$	ค่าความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตบนหน้าตัดตาม Downstream(x)
$w_m$	ค่าความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของเจ็ตบนCenter plane ตามแนว Downstream(x)
$w/U_{cf}$	การกระจายตัวความเร็วเฉลี่ย ของเจ็ตเทียบกับความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวาง
$w_{rms}/U_{cf}$	การกระจายตัวของ Fluctuation velocity ของเจ็ต เทียบกับความเร็วเฉลี่ยของกระแส ลมขวาง

การวัดความเร็วด้วย Hot film สำหรับการทดลองนี้ ซึ่งเป็นการวัดความเร็วของเจ็ตใน 3 มิติ ด้วย Hot film แบบเส้นลวดเดี่ยวและวางให้แนวแกนของเส้นลวดขนานกับแนว Spanwise (z) ซึ่งอยู่บนระนาบ y-z ดังนั้นค่าความเร็วที่วัดได้จึงเป็นผลรวมของค่าความเร็วตามแนว Streamwise (x) และความเร็วตามแนว Traverse (y) เป็นหลัก ดังสมการ

$$w = \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad (3.1)$$

และ

$$w_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (w - w_i)^2} \quad (3.2)$$

- โดยที่
- $w_x$  ความเร็วเจ็ตในทิศทางตามแนว Downstream (x)
  - $w_y$  ความเร็วของเจ็ตในทิศทางตามแนว Traverse (y)
  - $w_i$  ความเร็วของเจ็ตขณะเวลาใดๆ ซึ่งเป็นผลรวมของความเร็วในแนว Downstream (x) กับ ความเร็วในแนว Traverse (y)
  - $N$  จำนวน Sample ในการวัดความเร็วภายใน 1 วินาที ซึ่งในการทดลองนี้ มีค่าเท่ากับ 300,000 Sample กรณีวัดความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ต และ 50,000 Sample สำหรับ กรณีวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวางและกรณีวัดการกระจายตัวของความเร็วของเจ็ต

เนื่องจากการไหลเป็นแบบ 3 มิติ ดังนั้นการวัดความเร็วด้วยวิธีนี้จึงมีค่าความผิดพลาด (Error) ของการวัดเกิดขึ้นและค่าความผิดพลาดดังกล่าวสำหรับการทดลองจะนิยามโดยผลต่างของค่าความเร็วจริงกับค่าความเร็วที่อ่านได้จาก Hot film ซึ่งประมาณได้โดยสมการของ Jorgensen relation โดยสมการมีรูปแบบดังนี้

$$U_{eff}^2 = k^2 U_T^2 + U_N^2 + h^2 U_B^2 \quad (3.3)$$

เพื่อให้สอดคล้องกับการพิจารณาค่าความผิดพลาดของการวัดความเร็วด้วย Hot film สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังนี้

$$U_{eff}^2 = k^2 U_T^2 + U_N^2 + h^2 U_B^2 = U_N'^2 + U_B'^2 \quad (3.4)$$

- เมื่อ
- $U_{eff}$  ค่าความเร็วที่อ่านได้จาก Hot film
  - $U_T$  ค่าความเร็วจริงที่ขนานกับ Wire
  - $U_N$  ค่าความเร็วจริงที่ตั้งฉากกับ Wire ซึ่งมีทิศทางขนานกับแนว Streamwise (x)
  - $U_B$  ค่าความเร็วจริงที่ตั้งฉากกับ Wire มีทิศทางขนานกับแนว Traverse (y)

$U_N'^2 + U_B'^2$  ค่าความเร็วที่อ่านได้จาก Hot film

ซึ่งจากการคำนวณพบว่าการวัดความเร็วด้วยวิธีดังกล่าวจะมีค่าความผิดพลาดประมาณเท่ากับ 5.2 เปอร์เซ็นต์ของค่าความเร็วสูงสุด โดยรายละเอียดของการคำนวณค่าความผิดพลาดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค (1)

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

### 3.1 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้น

3.1.1 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวาง (รูปที่ 3.1 – 3.2)

3.1.2 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ต (รูปที่ 3.3 -3.6)

### 3.2 การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง (Optimum)

3.2.1 การกำหนดตำแหน่งของการฉีดเจ็ตควบคุม (รูปที่ 3.7-3.8)

3.2.2 การกำหนดอัตราส่วนเชิงมวลของการฉีดเจ็ตควบคุม (รูปที่ 3.9-3.11)

### 3.3 การเปรียบเทียบผลกรณี JICF กับ กรณี I15 ตามแนว Downstream

( $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3$  และ  $4$ )

- การเปรียบเทียบผลการทดลองกรณี JICF กับผลการทดลองของ Zaman and Foss (1997) (รูปที่ 3.12)
- การกระจายตัวความเร็วเฉลี่ยเทียบกับความเร็วของกระแสลมขวาง ( $w/U_{cf}$ ) ในกรณี JICF เปรียบเทียบ กับ กรณี I15 (รูปที่ 3.13)
- การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความเร็วรวม ( $C_{UG}$ ) ในกรณี JICF เปรียบเทียบกับ กรณี I15 (รูปที่ 3.14)
- การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความเร็วเฉพาะหน้าตัด ( $C_{UL}$ ) ในกรณี JICF เปรียบเทียบกับกรณี I15 (รูปที่ 3.15)
- การกระจายตัวของ Fluctuation velocity เทียบกับความเร็วของกระแสลมขวาง ( $w_{rms}/U_{cf}$ ) กรณี JICF เปรียบเทียบ กับ กรณี I15 (รูปที่ 3.16-3.18)
- การกระจายตัวของ Turbulent intensity ( $w_{rms}/w$ ) กรณี JICF เปรียบเทียบกับ กรณี I15 (รูปที่ 3.19)
- Center of mass trajectory ( $\bar{y}_{m,w}, \bar{z}_{m,w}$ ) และ Centroid trajectory ( $\bar{y}_{c,w}, \bar{z}_{c,w}$ ) ของความเร็วบนระนาบสมมาตร โดยการพิจารณาค่าความเร็วเฉลี่ย ( $w$ ) (รูปที่ 3.20 – 3.23)



- Center of mass trajectory ( $\bar{y}_{m,CUG}, \bar{z}_{m,CUG}$ ) และ Centroid trajectory ( $\bar{y}_{c,CUG}, \bar{z}_{c,CUG}$ ) ของความเร็วบน ระนาบ สมมาตร โดยการพิจารณาจาก  $CUG$  (รูปที่ 3.24 – 3.27)
- รูปร่างของความเร็วของเจ็ตบน Center plane ตามแนว Traverse ของเจ็ต (รูปที่ 3.28)
- Maximum decay ของความเร็วบน Center plane ตามแนว Downstream ( $x$ ) (รูปที่ 3.29 ก และ ข)
- Velocity trajectory (รูปที่ 3.30)
- การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) (3.31 -3.32)

### 3.1 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้น

#### 3.1.1 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวาง

รูปที่ 3.1 ผลการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วเฉลี่ย ( $U_{cf}$ ) บนหน้าตัดทดสอบของอุโมงค์ลม ที่ตำแหน่งก่อนถึงปากเจ็ต 9 เซนติเมตร ( $x/d = -4.1$  หรือ  $x/rd = -1$ ) ที่ความเร็วประมาณ 4.05 เมตรต่อวินาที โดยการวัดทั้งหน้าตัดทดสอบของอุโมงค์ลม ได้ทำการวัดเป็นเมตริกซ์ขนาด 41 จุด  $\times$  41 จุด และมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 1 เซนติเมตร  $\times$  1 เซนติเมตร นอกชั้นขอบเขตของผนัง Test section โดยกรอบเส้นที่บ แสดงผนังของหน้าตัดทดสอบทั้ง 4 ด้าน ดังรูปที่ 3.1 จากการวัดพบว่ามีความเร็วเฉลี่ย ( $U_{cf}$ ) ประมาณ 4.05 เมตรต่อวินาทีโดยมีค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของการวัดเท่ากับ  $\pm 0.21$  เมตรต่อวินาที โดยที่จะกำหนดให้ค่าความไม่แน่นอนของการวัดมีค่าเท่ากับ 5.2 % ของค่าความเร็วสูงสุด (ภาคผนวก ค (1)) และมีค่าความไม่สม่ำเสมอ (Non-uniformity) ซึ่งจะนิยามจากค่าความแตกต่างของความเร็วลมระหว่างจุดบนหน้าตัดทดสอบ ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 0.3\%$  ของความเร็วเฉลี่ย

รูปที่ 3.2 รูปร่างของชั้นขอบเขต (Boundary layer,  $u_{cf}/U_{cf}$ ) ตามแนว Transverse ซึ่งแสดงโดยค่า  $y/\delta_{0.95}$  โดยที่  $\delta_{0.95}$  เป็นความหนาของชั้นขอบเขตซึ่งนิยามจากระยะ  $y$  ที่มีความเร็วเป็น 95% ของความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขต ทั้งนี้ความเร็วเฉลี่ยมีค่าประมาณ  $4.05 \pm 0.21$  เมตรต่อวินาที โดยวัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางบนพื้นหน้าตัดทดสอบ ก่อนถึงปากเจ็ตเท่ากับ 9 เซนติเมตร ( $x, z$ ) =  $(-4.1d, 0)$  และที่ตำแหน่งด้านข้างอีกข้างละสามตำแหน่งห่างจากกึ่งกลางออกไปด้านละ 1.1 เซนติเมตร ( $x, z$ ) =  $(-4.1d, -1.5d), (-4.1d, -1d), (-4.1d, -0.5d), (-4.1d, 0.5d), (-4.1d, 1d), (4.1d, 1.5d)$  โดยผลการวัดดังกล่าวได้เปรียบเทียบกับผลเฉลยของ Blasius สำหรับชั้นขอบเขตแบบ Laminar และผลเฉลยในรูปแบบ 1/7 power law สำหรับชั้นขอบเขตแบบ Turbulent

จากผลการวัดพบว่าชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง สอดคล้องกับผลเฉลยของ Blasius ซึ่งแสดงว่าชั้นขอบเขตของการไหลเป็นแบบ Laminar โดยที่บริเวณตรงแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของปากเจ็ตตาม Downstream ( $x$ ) ก่อนถึงปากเจ็ตประมาณ  $4.1d$  มีความหนาของชั้นขอบเขต ( $\delta_{0.95}$ ) ประมาณ 7.8 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งด้านข้างมีความหนาของชั้นขอบเขต ( $\delta_{0.95}$ ) แสดงดังตารางที่ 3.2 โดยมีค่าเฉลี่ยของความหนาของชั้นขอบเขตประมาณ 8 มิลลิเมตร

### 3.3.2 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ต

สำหรับสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตได้ทำการวัดการกระจายของความเร็วในแนวแกนเจ็ต ( $u$ ) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 3.3 (ก) และ (ข) ผลการวัดการรูปร่างของความเร็วในแนวแกน ( $u$ ) ตามแนวรัศมีทั้งแนว Streamwise และ Spanwise พบว่าในแต่ละกรณีมีขนาดของความเร็วแตกต่างกันเล็กน้อย โดยมีความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged) ประมาณ  $15.65 \pm 0.81$  เมตรต่อวินาที และมีค่า Reynolds number ( $Re_j = Ud/\nu$ ) ของเจ็ตเท่ากับ 23,500 และเมื่อพิจารณารูปที่ 3.3(ข) พบว่ามีรูปร่างของความเร็วที่ปากทางออก เป็นแบบ Fully developed turbulent pipe profile และมีลักษณะค่อนข้างสมมาตรและเมื่อเปรียบเทียบรูปร่างของความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตกับรูปร่างของความเร็วตามสมการ Power law ซึ่งแสดงรูปร่างความเร็วของ Fully developed turbulent pipe profile พบว่ามีลักษณะคล้ายกัน โดยที่รูปร่างความเร็วที่ได้จากการทดลองนั้นค่อนข้าง Perfect เมื่อเทียบกับรูปร่างของความเร็วตามสมการ Power law

เมื่อพิจารณา ค่า Fluctuation velocity ( $u_{rms}$ ) ตามแนวรัศมีทั้งแนว Streamwise และ Spanwise ของเจ็ต (รูปที่ 3.4) พบว่า  $u_{rms}$  มีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบของเจ็ตและมีค่าต่ำสุดที่บริเวณตรงจุดศูนย์กลางของเจ็ตซึ่งเมื่อสังเกตรูปร่างของ  $u_{rms}$  พบว่ามีรูปร่างค่อนข้างสมมาตรขณะที่รูปร่างของ Turbulent intensity ที่ปากทางออกของเจ็ต ดังรูปที่ 3.5 และมีค่าสูงอยู่ที่บริเวณขอบของเจ็ต แต่มีค่าต่ำที่บริเวณจุดศูนย์กลางของเจ็ตคล้ายกับค่า Fluctuation velocity และมีรูปร่างของ Profile คล้ายกับรูปตัวอักษร 'U' และค่อนข้างสมมาตร จากนั้นทำการเปรียบเทียบรูปร่างของ Fluctuation velocity และ Turbulent intensity ดังรูปที่ 3.6 โดยการ Normalize ด้วยค่าตรงกลางเจ็ตซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าต่ำสุดพบว่าทั้ง 2 มีรูปร่างคล้ายกับกรณีที่ Normalize ด้วยค่าความเร็วที่ขอบปากเจ็ตคือมีค่าสูงที่บริเวณขอบเจ็ตและมีค่าต่ำที่บริเวณตรงกลางเจ็ต

## 3.2 การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง (Optimum point)

### 3.2.1 การกำหนดตำแหน่งของการฉีดเจ็ตควบคุม

การกำหนดค่าความเหมาะสมสำหรับการทดลอง (Optimum) จะพิจารณาจากการเปรียบเทียบ Velocity trajectory ซึ่ง Velocity Trajectory =  $f(\theta; r_m, r, x, y, d)$  โดยที่  $\theta$  แสดงตำแหน่งมุมของการฉีดเจ็ตควบคุม สำหรับการหา  $\theta$  ที่เหมาะสมนั้นจะทำการทดลองเบื้องต้นด้วยการเปลี่ยนค่า  $\theta$  และควบคุมตัวแปรอื่นๆ คือ 1) ฉีดเจ็ตควบคุมด้วยอัตราส่วนเชิงมวลที่ค่าสูงสุด 2) อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลคงที่เท่ากับ 3.87 3) เส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ตคงที่เท่ากับ 22.5 มิลลิเมตร และ 4) กำหนดตำแหน่งของการวัดความเร็วบน Center plane ที่ตำแหน่งต่างๆตาม Downstream ( $x$ ) โดยที่ Velocity trajectory ที่ใช้กำหนดตำแหน่งของ Optimum จะนิยามจากค่าความเร็วสูงสุด ( $w_{max}$ ) บน Center plane ที่ตำแหน่งมุมของการฉีดต่างๆ กันและเลือกตำแหน่งมุมของการฉีดที่ทำให้ Velocity trajectory ต่ำที่สุด ซึ่งวิธีพิจารณาเลือกจุด Optimum จะอาศัยผลการชี้แนะของ Yuan and Street (1998) ซึ่งแนะนำการ Entrainment ของเจ็ตมีผลทำให้ Trajectory ต่ำลง

รูปที่ 3.7 รูปร่างของความเร็วบน Center plane ของเจ็ตที่ตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมต่างๆ กัน ด้วย  $r_m$  คงที่เท่ากับ 2.32 % โดยการทดลองจะทำเปลี่ยนตำแหน่งมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง 0, 180, (0,180),  $\pm 15$ ,  $\pm 30$ ,  $\pm 45$ ,  $\pm 90$ ,  $\pm 135$  องศาและกรณี JICF จากการทดลองพบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วบน Center plane ของเจ็ต โดยเมื่อพิจารณา Peak ของความเร็ว ( $w$ ) ที่หน้าตัด  $x/rd = 0.5$  ยังพบอีกว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $\pm 90$ , 180 และ  $\pm 135$  องศา นั้นปรากฏตำแหน่ง Peak ของค่าความเร็วจะอยู่สูงกว่ากรณี JICF เปรียบเทียบตามแนว Traverse และเมื่อเปรียบเทียบกับการฉีดที่ตำแหน่งอื่นๆ แล้วพบว่าทั้ง 3 ตำแหน่งเป็นตำแหน่งที่มีค่า Peak อยู่ในตำแหน่งที่สูงสุดตามแนว Traverse โดยเฉพาะการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $\pm 90$  จะสังเกตว่าตำแหน่งของค่า Peak ของความเร็วจะอยู่สูงสุด ตามแนว Traverse ในทางตรงกันข้ามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $\pm 15$  นั้นจะสังเกตว่า จุด Peak ของความเร็วจะอยู่ต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1, 1.5, 2, 3$  และ 4 พบว่า Peak ของความเร็วจะพัฒนาลอยตัวสูงขึ้นตามระยะทางตาม Downstream

รูปที่ 3.8 เส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตที่ตำแหน่งมุมต่างๆของการฉีดเจ็ตควบคุมด้วย  $r_m$  คงที่เท่ากับ 2.32 % โดยการทดลองจะทำการฉีดเจ็ตควบคุมด้วยอัตราส่วนเชิงมวลคงที่ และเปลี่ยนตำแหน่งมุมของการฉีดที่ 0, 180, (0,180),  $\pm 15$ ,  $\pm 30$ ,  $\pm 45$ ,  $\pm 90$ ,  $\pm 135$  องศา และกรณี JICF พบว่าที่ตำแหน่งมุมของการฉีด  $\pm 15$  องศา นั้นจะทำให้ Velocity trajectory ต่ำที่สุด ดังนั้นจึงกำหนดให้มุม  $\pm 15$  องศา เป็นตำแหน่งมุมของการฉีดที่เหมาะสม และเมื่อสังเกตเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตที่ตำแหน่งมุมฉีดอื่นๆพบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง (Leeward)  $\pm 90$  จนถึง  $\pm 135$  องศา จะมีผลทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของความเร็วสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีของ

JICF และการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง (Windward) 0 จนถึง  $\pm 45$  องศาพบว่า จะมีผลทำให้เส้นทางเดินของความเร็วต่ำลงเมื่อเทียบกับกรณีของ JICF

### 3.2.2 การกำหนดอัตราส่วนเชิงมวลของการฉีดเจ็ตควบคุม ( $r_m$ )

การพิจารณาเลือกอัตราส่วนเชิงมวลสำหรับการทดลองจะนิยามโดยการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง Optimum ด้วยค่าอัตราส่วนเชิงมวล ( $r_m$ ) แล้วทำให้ค่าความเร็วสูงสุดบน Center line ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  มีค่าต่ำสุด

รูปที่ 3.9 แสดงรูปร่างของความเร็วบน Center plane ของเจ็ตที่ตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $\pm 15$  องศา ด้วยอัตราส่วนเชิงมวลเท่ากับ 0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.32 เปอร์เซนต์ พบว่าอัตราส่วนเชิงมวลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของค่าความเร็วบน Center plane ของเจ็ต โดยสังเกตว่าตำแหน่งของค่าความเร็วสูงสุดบน Center plane เมื่อพิจารณาตามแนว Traverse จะต่ำลงเมื่อค่าของอัตราส่วนเชิงมวลเพิ่มขึ้น โดยที่จะสังเกตว่าตำแหน่งของค่าความเร็วสูงสุดจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณการฉีดโดยจะเรียงจากตำแหน่งที่สูงสุดไปยังตำแหน่งที่ต่ำที่สุดคือ 0.5, 1, 1.5, 2, และ 2.32 ซึ่งลำดับต่อไปจะทำการกำหนดปริมาณของการฉีดเจ็ตควบคุมที่เหมาะสมโดยจะนำตำแหน่งของค่าความเร็วสูงสุดของการฉีดเจ็ตควบคุมด้วยอัตราส่วนอัตราเชิงมุม ต่างๆกัน มาแสดงในลักษณะของการลดลงของความเร็วบน Center plane ของเจ็ตประกอบการพิจารณาเลือกค่า  $r_m$  ที่เหมาะสม

รูปที่ 3.10 ก และ ข เส้นทางลดลงของความเร็วบน Center plane ของเจ็ตที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  ที่ตำแหน่งมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมคงที่  $\pm 15$  องศา ด้วยการเปลี่ยนอัตราส่วนเชิงมวล ( $r_m$ ) ในการฉีดเท่ากับ 0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.32 เปอร์เซนต์ พบว่าที่อัตราส่วนเชิงมวลเท่ากับ 2.32 เปอร์เซนต์ทำให้ค่าของความเร็วสูงสุดบน Center plane ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  ลดลงต่ำที่สุด แต่เมื่อพิจารณา  $r_m$  เท่ากับ 2 เปอร์เซนต์ สังเกตว่าค่าของความเร็วที่ลดลงนั้นมีค่าใกล้เคียงกับ  $r_m$  เท่ากับ 2.32 เปอร์เซนต์ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันประมาณ 0.03 เปอร์เซนต์ของค่าความเร็วที่  $r_m$  เท่ากับ 2.32 เปอร์เซนต์ และเมื่อพิจารณาในมุมมองของการใช้พลังงานในการกระตุ้นเจ็ตควบคุมประกอบจึงเลือก ค่าอัตราส่วนเชิงมวลเท่า 2 เปอร์เซนต์ สำหรับการทดลอง

รูปที่ 3.11 Schematic แสดงวิธีการกำหนดตำแหน่ง Optimum และแสดงให้เห็นว่าการเลือกค่าอัตราส่วนของการฉีดเจ็ตควบคุมจะเลือกพิจารณา 2 ค่า คือ 2 และ 2.32 เปอร์เซนต์ ซึ่งค่า Optimum สูงสุดสำหรับการฉีดที่ตำแหน่ง  $\pm 15$  องศา อาจจะมีค่ามากกว่านี้ แต่อย่างไรก็ตามจะถือว่าค่าของการฉีดเจ็ตควบคุมที่พิจารณาเลือกค่าจากค่าใดค่าหนึ่งใน 2 ค่าดังกล่าวนี้ถือว่าเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้

### 3.3 การเปรียบเทียบผลกรณี JICF กับ กรณี I15 ตามแนว Downstream ( $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3$ และ 4)

การศึกษารูปแบบการพัฒนาดัชนีและการเปรียบเทียบผลต่างๆ ในงานวิจัยนี้จะแสดงผ่านทางการกระจายของความเร็วบนหน้าตัดโดยพิจารณาจาก  $w/U_{cf}$  ซึ่งจะแสดงขอบเขตของเจ็ต อีกทั้งยังแสดงถึงการเปลี่ยนแปลง Velocity ratio เฉพาะหน้าตัดและยังมีการศึกษาคุณลักษณะของการกระจายของความเร็วจากค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วรวม(Global coefficient of Velocity) ซึ่งนิยามเป็น

$$C_{UG} = \frac{w - U_{cf}}{U - U_{cf}} \quad (3.5)$$

โดยค่า  $C_{UG}$  ดังกล่าวจะแสดงระดับของความเร็วเกิน (Excess velocity) ที่ตำแหน่งใดๆ เทียบกับระดับความเร็วเกินที่ปากเจ็ต ซึ่งเป็นพารามิเตอร์รวม (Global parameter) ของการไหล นอกจากนี้ค่า  $C_{UG}$  ยังแสดงถึงคุณลักษณะของการลดลงของความเร็วบนหน้าตัดเทียบกับความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตอีกด้วย

นอกจากนั้นแล้วยังพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วเฉพาะ (Local coefficient of temperature;  $C_{UL}$ ) ซึ่ง นิยามเป็น

$$C_{UL} = \frac{w - U_{cf}}{w_m - U_{cf}} \quad (3.6)$$

โดย	$w$	ความเร็วที่ทำกรวัด ( $w = \sqrt{w_x^2 + w_y^2}$ )
	$w_x$	ความเร็วตามแนว Downstream (x)
	$w_y$	ความเร็วตามแนว Traverse (y)
	$w_m$	ความเร็วสูงสุดในแต่ละหน้าตัด
	$U$	ความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ ที่ปากเจ็ต
	$U_{cf}$	ความเร็วของกระแสลมขวาง

โดยค่า  $C_{UL}$  จะแสดงระดับของความเร็วเกิน (Excess velocity) ที่ตำแหน่งใดๆ เทียบกับระดับของความเร็วเกินสูงสุดในหน้าตัดนั้น  $C_{UL}$  จึงเป็นพารามิเตอร์เฉพาะที่หน้าตัดใดๆ (Local parameter) ของการไหล และสามารถนำมาเปรียบเทียบรูปร่างของการกระจายตัวของความเร็วที่หน้าตัดต่างๆ ได้ และ ในส่วนของการศึกษารูปแบบการกระจายของการ Fluctuation ของความเร็ว นั้น จะพิจารณาจาก  $w_{rms}/U_{cf}$  และ Turbulent intensity บนแต่ละหน้าตัดเพื่อเปรียบเทียบกัน ซึ่งใน

ลำดับต่อไปก่อนที่จะเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างกรณี JICF กับ กรณี I15 นั้น จะทำการเปรียบเทียบกรณี JICF กับผลการทดลองของ Zaman and Foss (1997)

- การเปรียบเทียบผลการทดลองกรณี JICF กับผลการทดลองของ Zaman and Foss (1997)

รูปที่ 3.12 แสดงการเปรียบเทียบความเร็ว 3 หน้าตัดคือที่  $x/rd = 0.5, 1$  และ  $2$  โดยมีเงื่อนไขที่แตกต่างกันระหว่างการทดลองของ Zaman and Foss (1997) กับกรณี JICF คือการทดลองของ Zaman and Foss (1997) มีสภาวะของการทดลองดังนี้ 1) รูปร่างของความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ต เป็น Top hat 2) Velocity ratio เท่ากับ  $4.58$  และ 3) Contour ของความเร็วเป็นความเร็วในทิศทางตามแนว Downstream ( $x$ ) ขณะที่การทดลองกรณี JICF นั้น จะมีสภาวะของการทดลองคือ 1) รูปร่างของความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ต เป็น Fully developed turbulent pipe profile 2) Velocity ratio เท่ากับ  $3.87$  และ 3) Contour ของความเร็วเป็นความเร็ว ( $w$ ) บนระนาบ  $y-z$  ซึ่งนิยามว่าเป็น ผลรวมของความเร็วในแนว Downstream ( $x$ ) กับความเร็วตามแนว Traverse ( $y$ ) โดยพบว่ามีลักษณะคล้ายกันคือปรากฏ Local peak ซ้อนกันอยู่ตรงกลางเจ็ตตามแนว Traverse โดยสังเกตว่า Local peak ที่อยู่ด้านบนจะมีความเร็วสูงกว่า Local peak ที่อยู่ด้านล่าง และเมื่อเปรียบเทียบค่าของ Local peak ทั้งสองตำแหน่งของ Zaman and Foss (1997) กับ กรณี JICF ของแต่ละหน้าตัดพบว่ามีความแตกต่างประมาณ  $14-16$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งชี้แนะว่าความเร็วในแนว Downstream ( $x$ ) นั้นจะมีอิทธิพลต่อโครงสร้างของความเร็วเจ็ตมากกว่าความเร็วตามแนว Traverse ( $y$ )

- การกระจายตัวความเร็วเฉลี่ยเทียบกับความเร็วของกระแสลมขวาง ( $w/U_{cf}$ ) ในกรณี JICF เปรียบเทียบ กับ กรณี I15

รูปที่ 3.13 เมื่อพิจารณาการพัฒนาตัวของรูปร่างของเจ็ตและการกระจายตัวของความเร็วบนหน้าตัดเทียบกับกระแสลมขวางของกรณี JICF จะสังเกตว่าเจ็ตจะขยายตัวออกทางด้านข้าง (Spanwise) เมื่อพิจารณาโครงสร้างของเจ็ตที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75$  และ  $1$  จะปรากฏ Local peak ซ้อนกันอยู่ตรงกลางเจ็ตตามแนว Traverse โดยมี Local peak ที่มีค่าความเร็วสูงจะอยู่ด้านบนขณะที่ Local peak ที่มีค่าความเร็วต่ำจะอยู่ด้านล่างและเมื่อสังเกตค่าของ Local peak ที่มีค่าความเร็วต่ำพบว่าที่  $x/rd = 0.5$  จะมีค่าความเร็วเท่ากับความเร็วของกระแสลมขวางขณะที่  $x/rd = 0.75$  และ  $1$  จะมีค่าความเร็วต่ำกว่ากระแสลมขวางและสังเกตว่า ที่ระยะ  $x/rd = 2, 3, 4$  เจ็ตเริ่มสลายตัวและมีความเร็วใกล้เคียงกับกระแสลมขวาง นอกจากนี้ที่ ตำแหน่ง  $x/rd = 0.25, 0.5$  ยังพบ Local peak ความเร็วต่ำอยู่ที่ตำแหน่งด้านบนของตัวเจ็ตตามแนว

Traverse โดยที่  $x/rd = 0.25$  จะปรากฏ Local peak เพียง 1 วง ขณะที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  นั้น จะปรากฏ Local peak 2 วงซ้อนทับกันอยู่ที่ตำแหน่งด้านบนของตัวเจ็ดตามแนว Traverse ( $y/rd = 1.5$ ) เมื่อพิจารณาที่ ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  และ 1 พบว่า Local peak เริ่มสลายตัว และที่ตำแหน่ง  $x/rd = 2, 3$  และ 4 จะไม่ปรากฏ Local peak

สำหรับการพัฒนาตัวของเจ็ดกรณี JICF นั้นจะสังเกตว่าเจ็ดนั้นจะขยายตัวออกทางด้านข้างตามแนว Spanwise (z) มากกว่าแนว Traverse(y) นอกจากนั้นเมื่อสังเกต Local peak ค่าความเร็วสูงพบว่าจะอยู่ตรงกลางด้านบนของเจ็ดขณะที่ Local peak ค่าความเร็วต่ำจะปรากฏที่บริเวณตรงกลางด้านล่างของเจ็ด และสังเกตว่าที่หน้าตัดตั้งแต่  $x/rd = 0.75$  จนถึง 4 นั้นจะปรากฏ Local peak ที่มีค่าความเร็วต่ำกว่ากระแสลมขวาง

เมื่อพิจารณากรณีของ I15 พบว่าเจ็ดจะขยายตัวออกทางด้านข้าง (Spanwise) และยุบตัวต่ำลง โดยสังเกตที่หน้าตัด  $x/rd = 0.25$  พบว่า Local peak ค่าความเร็วสูงจะปรากฏตรงกลางเจ็ด และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  พบว่าเจ็ดจะขยายตัวในแนว Spanwise โดยที่ Local peak ค่าความเร็วสูงจะยึดตัวออกทางด้านข้าง (Spanwise) ทำให้เกิดบริเวณ Local peak ความเร็วสูงขึ้น 3 บริเวณ คือบริเวณตรงกลางเจ็ดและที่ด้านข้างทั้งสองข้างของเจ็ดแต่สังเกตว่าพบ Local peak ค่าความเร็วต่ำที่บริเวณด้านล่างตรงกลางเจ็ดและเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  และ 1 พบว่า Local peak ค่าความเร็วสูงแบ่งออกเป็น 2 ส่วนและขยายตัวออกทางด้านข้างโดยมีลักษณะรูปร่างค่อนข้างสมมาตร นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาที่  $x/rd = 0.75$  ยังสังเกตว่า Local peak ค่าความเร็วต่ำเกิดการแยกตัวออกเป็น 2 บริเวณโดยมีค่าของความเร็วเจ็ดเท่ากับความเร็วของกระแสลมขวางโดยที่เมื่อสังเกต รูปร่างของ Local peak ค่าความเร็วต่ำยังพบอีกว่ามีรูปร่างที่ไม่สมมาตร ขณะที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1$  นั้นจะปรากฏค่าของ Local peak ค่าความเร็วต่ำมีค่าน้อยกว่ากระแสลมขวางแต่ที่บริเวณนี้พบว่าลักษณะของรูปร่างของ Local peak ค่าความเร็วต่ำจะค่อนข้างสมมาตรและเมื่อพิจารณาต่อที่ตำแหน่ง  $x/rd = 2, 3$  และ 4 นั้นเจ็ดจะถูกแยกออกเป็น 3 มีส่วนโดยมีโครงสร้างคล้ายกับรูปไตอยู่บริเวณด้านข้าง (Spanwise) ของเจ็ดโดยที่มี Local peak ค่าความเร็วสูงอยู่ตรงกลางโครงสร้างรูปไตทั้งสองข้าง และนอกจากนั้นยังปรากฏอีก 1 โครงสร้างที่บริเวณตรงกลางของเจ็ดและปรากฏ Local peak ของค่าความเร็วต่ำ 2 บริเวณ ทางด้านข้างซ้ายและข้างขวาของโครงสร้างโดยที่จะกำหนดให้ฝั่งซ้ายของเจ็ด โดยที่ค่าของความเร็วที่บริเวณนี้จะมีค่าต่ำกว่าความเร็วของกระแสลมขวางนอกจากนี้ที่ ตำแหน่ง  $x/rd = 0.25, 0.5$  ยังพบ Local peak ค่าความเร็วต่ำอยู่ที่ตำแหน่งด้านบนของตัวเจ็ดตามแนว Traverse โดยที่  $x/rd = 0.25$  จะปรากฏ Local peak 2 วงซ้อนทับกันอยู่ที่ตำแหน่งด้านบนของตัวเจ็ดตามแนว Traverse ขณะที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  และ 0.75 นั้น จะปรากฏ Local peak เพียง 1 วง และที่ตำแหน่ง  $x/rd = 2, 3$  และ 4 จะไม่ปรากฏ Local peak

สำหรับการพัฒนาตัวของเจ็ตกรณี I15 สังเกตว่าเจ็ตนั้นจะขยายตัวออกทางด้านข้างตามแนว Spanwise (z) มากกว่าแนว Traverse (y) อย่างเห็นได้ชัด นอกจากนั้นเมื่อสังเกต Local peak ค่าความเร็วสูงพบว่าจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วนและแบ่งเป็นฝั่งซ้ายและขวาของเจ็ต ขณะที่ Local peak ค่าความเร็วต่ำจะถูกแยกเป็น 2 ฝั่งคล้ายกับ Local peak ค่าความเร็วสูง และสังเกตว่าที่หน้าตัดตั้งแต่  $x/rd = 1$  ถึง 4 นั้นจะปรากฏ Local peak ที่อยู่ด้านล่างจะมีค่าความเร็วต่ำกว่ากระแสลมขวาง

การเปรียบเทียบการกระจายตัวความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตเทียบกับความเร็วของกระแสลมขวาง ( $w/U_{cf}$ ) กรณี JICF กับ กรณี I15 พบว่าที่หน้าตัด  $x/rd = 0.25$  พบว่ารูปร่างของเจ็ตกรณี JICF จะปรากฏโหนกด้านบนเพียงโหนกเดียวขณะที่กรณี I15 นั้นจะปรากฏโหนกด้านบนเจ็ต 2 โหนกโดยบริเวณตรงกลางหัวเจ็ตจะยุบตัวต่ำลงเมื่อพิจารณาการขยายตัวของเจ็ตพบว่ากรณี I15 เจ็ตจะขยายตัวออกด้านข้างมากกว่ากรณี JICF เมื่อพิจารณา Local peak ค่าความเร็วสูง พบว่ากรณี JICF จะปรากฏอยู่ด้านบนของเจ็ตและมี Local peak ค่าความเร็วต่ำอยู่ด้านล่าง ขณะที่กรณี I15 นั้น จะปรากฏ Local peak ค่าความเร็วสูง ตรงกลางเจ็ตและ เมื่อพิจารณาดำแหน่งของ Local peak ค่าความเร็วสูง ตามแนว Traverse พบว่า กรณี JICF จะอยู่สูงกว่า กรณี I15 และที่หน้าตัด  $x/rd = 0.5, 0.75$  และ 1 พบว่ากรณี JICF นั้น Local peak ค่าความเร็วสูง จะอยู่ด้านบนและปรากฏ Local peak ค่าความเร็วต่ำอยู่ด้านล่าง ขณะที่กรณี I15 Local peak ค่าความเร็วสูงของเจ็ตจะแยกเป็น 2 ส่วนและกระจายตัวออกสู่ด้านข้างแยกเป็น 2 ฝั่ง (Spanwise) และที่ตำแหน่ง  $x/rd = 2, 3$  และ 4 พบว่ากรณี JICF Local peak ค่าความเร็วสูง จะอยู่ตรงกลางเจ็ต ขณะที่กรณี I15 เจ็ตจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนโดยที่โครงสร้างที่อยู่ด้านข้างของเจ็ตมีลักษณะเป็นรูปไตโดยมี Local peak ค่าความเร็วสูงอยู่ตรงกลางไตทั้งสองข้าง และอีก 1 โครงสร้างอยู่ตรงกลางเจ็ต โดยสังเกตว่า Local peak ที่อยู่ตรงกลางของโครงสร้างดังกล่าวจะมีค่าน้อยกว่า Local peak อยู่ตรงกลางไตทั้งสองข้าง และเมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งของ Local peak ตามแนว Traverse พบว่า กรณี JICF จะอยู่สูงกว่ากรณี I15

สำหรับความแตกต่างระหว่าง กรณี JICF กับ กรณี I15 สามารถแยกเป็น 2 ส่วนหลักคือ 1) ลักษณะของโครงสร้างและการขยายตัวโดยพบว่าโครงของเจ็ตทั้งสองกรณีมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด โดยที่รูปร่างของเจ็ต กรณี JICF จะปรากฏโหนกด้านบนเพียงโหนกเดียว ขณะที่กรณี I15 นั้นจะปรากฏโหนกด้านบนเจ็ต 2 โหนกและเมื่อพิจารณาการขยายตัวของเจ็ตจะพบว่า กรณี I15 นั้นเจ็ตจะขยายตัวออกด้านข้างมากกว่ากรณี JICF 2) Local peak พบว่ากรณี JICF Local peak ค่าความเร็วสูงจะอยู่ตรงกลางเจ็ตขณะที่กรณี I15 Local peak ค่าความเร็วสูงแยกตัวออกเป็นสองฝั่งคือด้านซ้ายและขวาของเจ็ต และเมื่อพิจารณา Local peak ค่าความเร็วต่ำ



พบว่ากรณี JICF จะอยู่ตำแหน่งด้านล่างตรงกลางเจ็ต ขณะที่กรณี I15 จะมีลักษณะคล้ายกับ Local peak ที่มีค่าสูงคือจะถูกแยกออกเป็นสองฝั่งด้านซ้ายและขวาของเจ็ต

ผลการทดลองยังชี้แนะว่าที่ Windward jet shear layer จะพัฒนาตัวข้างลง และในทางตรงกันข้ามกลับมีการพัฒนาตัวของ Lateral skew mixing layer สูงขึ้น และเพื่อให้เห็นขอบของเจ็ตชัดเจนรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของ Local peak ชัดเจนขึ้นจึงพิจารณาการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความเร็วรวม ( $C_{UG}$ )

- การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความเร็วรวม ( $C_{UG}$ ) ในกรณี JICF เปรียบเทียบกับ กรณี I15

รูปที่ 3.14 การพัฒนาตัวของเจ็ตกรณี JICF พบว่ามีลักษณะคล้ายกับการกระจายตัวความเร็วเฉลี่ยเทียบกับความเร็วของกระแสลมขวาง ( $w/U_{cf}$ ) คือ เจ็ตจะขยายตัวออกทางด้านข้าง (Spanwise) มากกว่าแนว Traverse และเมื่อพิจารณาที่บริเวณหน้าตัด  $x/rd = 0.25, 0.5$  และ  $0.75$  พบว่าที่  $x/rd = 0.25$  มี Local peak 4 บริเวณ โดยที่ Local peak ที่อยู่ด้านบน (ตำแหน่งที่ 1) ซึ่งเป็นตำแหน่งของ Windward jet shear layer และจะมีความเร็วสูงกว่า Local peak ที่อยู่ด้านล่างตรงกลางเจ็ต (ตำแหน่งที่ 3) และ Local peak ที่อยู่ด้านล่างฝั่งซ้าย (ตำแหน่งที่ 2L) และฝั่งขวา (ตำแหน่งที่ 2R) ของเจ็ต ซึ่งเป็นตำแหน่งของ Hanging vortex และที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  สังเกตว่ามี Local peak 2 บริเวณคือ Local peak (ตำแหน่งที่ 1) ที่มีความเร็วสูงจะอยู่ด้านบน และ Local peak (3R) ความเร็วต่ำที่อยู่ด้านล่างตรงกลางเจ็ตและเมื่อพิจารณา Local peak ความเร็วต่ำพบว่าจะขยายตัวใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัด  $x/rd = 0.25$  และเมื่อพิจารณาการหายไปของ Local peak ความเร็วต่ำที่อยู่ฝั่งด้านซ้ายและขวาของเจ็ตน่าจะเกิดจาก Merge กันระหว่าง Local peak ที่อยู่ด้านบนกับ Local peak ที่อยู่ด้านข้างทั้งสองของเจ็ต และที่หน้าตัด  $x/rd = 0.75$  จะปรากฏ Local peak 2 บริเวณซ้อนกันอยู่ตรงกลางเจ็ตตามแนว Traverse โดยที่ Local peak ค่าความเร็วสูงจะอยู่ด้านบนขณะที่ Local peak ค่าความเร็วต่ำจะอยู่ด้านล่างและขยายตัวออกด้านข้าง และพบว่าปรากฏ บริเวณ Local peak ที่มีค่าความเร็วติดลบ ซึ่งสอดคล้องกับการพิจารณาการกระจายตัวความเร็วเฉลี่ยเทียบกับความเร็วของกระแสลมขวาง ( $w/U_{cf}$ ) และเมื่อพิจารณาบริเวณหน้าตัด  $x/rd = 1$  เจ็ตเริ่มสลายตัวและปรากฏ Local peak ที่มีค่าความเร็วสูงอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางด้านบนของเจ็ตและที่หน้าตัด  $x/rd = 2, 3$  และ  $4$  เจ็ตจะสลายตัวหมด

เมื่อพิจารณาโดยรวมจะเห็นได้ว่าการพัฒนาตัวของเจ็ตนั้นจะขยายตัวตามแนว Spanwise มากกว่าตามแนว Traverse และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของความเร็วเจ็ตสังเกตว่าความเร็วที่มีค่ามากจะอยู่ตรงกลางเจ็ตและมีค่าความเร็วต่ำสุดที่ขอบของเจ็ต และเมื่อพิจารณา Local

peak พบว่ามี Merge กันระหว่าง Local peak ความเร็วสูงกับ Local peak ความเร็วต่ำที่อยู่ด้านข้างทั้ง 2 ของเจ็ต ในลำดับต่อไปจะพิจารณาการพัฒนาตัวของเจ็ต กรณี I15

การพัฒนาตัวของเจ็ตกรณี I15 โดยที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.25$  พบว่ามีลักษณะคล้ายกับการกระจายตัวความเร็วเฉลี่ยเทียบกับความเร็วของกระแสลมขวาง ( $w/U_{cr}$ ) คือเจ็ตจะขยายตัวออกทางด้านข้างตามแนว Spanwise มากกว่าแนว Traverse และโครงสร้างเจ็ตจะยุบตัวต่ำลงและปรากฏบริเวณของ Local peak 3 บริเวณโดยที่ Local peak ค่าความเร็วสูงจะอยู่บริเวณตรงกลางเจ็ต และ Local peak ที่มีความเร็วต่ำปรากฏที่บริเวณด้านล่างของเจ็ต และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  พบว่า Local peak ความเร็วสูงจะยืดตัวออกทางด้านข้าง (Spanwise) ทำให้เกิดบริเวณ Local peak ความเร็วสูงขึ้น 3 บริเวณคือบริเวณตรงกลางเจ็ตและที่ด้านข้างทั้งสองข้างของเจ็ต ขณะที่ตำแหน่งดังกล่าวจะไม่ปรากฏ Local peak ค่าความเร็วต่ำ ซึ่งการหายไปของ Local peak ความเร็วต่ำน่าจะเกิดจากการ Merge กันระหว่าง Local peak ค่าความเร็วต่ำกับ Local peak ความเร็วสูงและที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  และ 1 Local peak จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนและแยกตัวกันอยู่ด้านข้างของเจ็ตตามแนว Spanwise และมีลักษณะรูปร่างค่อนข้างสมมาตร นอกเหนือจากนั้นยังปรากฏ Local peak ที่มีค่าติดลบเกิดขึ้นที่บริเวณตรงกลางของเจ็ตซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่บริเวณดังกล่าวมีค่าของความเร็วน้อยกว่าความเร็วของกระแสลมขวาง เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x/rd = 2$  และ 3 พบว่าเจ็ตเริ่มสลายตัวแต่ยังคงปรากฏเจ็ตที่แยกขาดออกจากกันและกระจายตัวแยกกันอยู่ด้านข้างของเจ็ต (Spanwise)

สำหรับกรณี I15 พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมมีผลทำให้โครงสร้างของเจ็ตแยกตัวห่างออกจากกันและยังส่งผลต่อ Local peak ความเร็วสูงเป็นผลให้เกิดการแยกตัวของ Local peak ความเร็วสูง และยังส่งผลทำให้เกิดการ Merge กันระหว่าง Local peak ความเร็วสูงและ Local peak ความเร็วต่ำ ซึ่งเป็นผลให้ Local peak ความเร็วต่ำหายไป และลำดับต่อไปจะแสดงการเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นผลของการฉีดเจ็ตควบคุมได้ชัดเจนขึ้น

การเปรียบเทียบการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ของความเร็วมรวม ( $C_{UG}$ ) กรณี JICF กับกรณี I15 โดยเมื่อพิจารณาที่หน้าตัด  $x/rd = 0.25$  พบว่า กรณี I15 เจ็ตจะขยายตัวออกด้านข้างมากกว่ากรณี JICF ซึ่งคล้ายกับการกระจายตัวความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตเทียบกับความเร็วของกระแสลมขวาง ( $w/U_{cr}$ ) นอกจากนั้นจะสังเกตว่าเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมแล้วจะเป็นผลให้จำนวน Local peak ลดลงจาก 4 เหลือ 3 และ เมื่อพิจารณา Local peak ที่หน้าตัด  $x/rd = 0.5, 0.75$  และ 1 สังเกตว่ากรณี JICF นั้น Local peak จะอยู่ด้านบน ขณะที่กรณี I15 Local peak ของเจ็ตจะแยกเป็น 2 ส่วนและกระจายตัวไปอยู่ด้านข้างของเจ็ตและเมื่อพิจารณาตำแหน่งของ Local peak ตามแนว Traverse ยังพบอีกว่ากรณี I15 จะอยู่ระดับต่ำกว่ากรณี JICF ขณะที่  $x/rd = 3$  นั้น เจ็ตจะ

สลายตัว โดยที่ กรณี JICF จะปรากฏเจ็ตเพียงกลุ่มเดียว ขณะที่กรณี I15 นั้นจะปรากฏเจ็ต 2 กลุ่มและกระจายตัวออกเป็น 2 ฝั่งทางด้านข้างของเจ็ต (Spanwise)

เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบ กรณี JICF กับ กรณี I15 โดยรวม พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุม มีผลต่อการขยายตัวของโครงสร้างของความเร็วเป็นผลทำให้เจ็ตขยายตัวออกทางด้านข้าง (Spanwise) มากกว่ากรณี JICF นอกจากนั้นแล้วยังมีผลต่อจำนวนของ Local peak ซึ่งพบว่า เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมแล้วจะทำให้ Local peak ลดจำนวนลง และเมื่อพิจารณาการแยกตัวของ Local peak จะพบว่า Local peak ความเร็วสูงถูกแยกตัวออกเป็น 2 ส่วน ขณะที่ Local peak ความเร็วต่ำ นั้นจะหายไปเมื่อระยะทางตาม Downstream ( $x$ ) เพิ่มมากขึ้น และเพื่อให้ผลของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดได้ชัดเจนยิ่งขึ้นจึงแสดงการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความเร็วเฉพาะหน้าตัด ( $C_{UL}$ )

- การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความเร็วเฉพาะหน้าตัด ( $C_{UL}$ ) ในกรณี JICF เปรียบเทียบกับ กรณี I15

รูปที่ 3.21 การพัฒนาตัวของสัมประสิทธิ์ความเร็วเฉลี่ย ( $C_{UL}$ ) เฉพาะหน้าตัดตาม Downstream ของเจ็ตกรณี JICF พบว่าเจ็ตจะขยายตัวออกทางด้านข้าง (Spanwise) ซึ่งคล้ายกับการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความเร็วรวม ( $C_{UG}$ ) และที่บริเวณหน้าตัด  $x/rd = 0.25$  พบว่ามี Local peak 3 บริเวณ คือ 1) บริเวณที่อยู่ด้านบนของเจ็ต 2) บริเวณที่อยู่ด้านข้างทางฝั่งขวาของเจ็ตซึ่งเป็นตำแหน่งของ Hanging vortice และ 3) บริเวณด้านล่างตรงกลางเจ็ต โดย Local peak ที่อยู่ด้านบนจะมีความเร็วสูงกว่า Local peak ที่อยู่ด้านล่างและด้านขวาของเจ็ต และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  สังเกตว่าปรากฏ Local peak 3 บริเวณซึ่งเรียงซ้อนกันตรงกลางเจ็ตตามแนว Traverse โดยที่ด้านบนของเจ็ตนั้นจะเป็นบริเวณที่มีค่าความเร็วสูงสุดและที่ตรงกลางเจ็ตนั้นจะมีค่าความเร็วต่ำสุด และยังพบอีกว่า Local peak ที่อยู่ตรงกลางเจ็ตจะขยายตัวใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.25$  และสังเกตว่า Local peak ที่ตำแหน่งของ Hanging vortice นั้นหายไป ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่า Local peak ที่บริเวณดังกล่าวถูก Merge ด้วย Local peak ความเร็วสูงที่ตำแหน่งของ Jet shear layer และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  ปรากฏว่า Local peak ที่อยู่ด้านล่างจะถูก Merge ด้วย Local peak ที่อยู่ตรงกลางเจ็ต จึงปรากฏ Local peak 2 บริเวณ เรียงซ้อนกันตรงกลางเจ็ตตามแนว Traverse นอกจากนั้นยังพบว่าเกิดบริเวณที่มีค่าติดลบที่บริเวณตรงกลางเจ็ต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่งดังกล่าวมีค่าความเร็วน้อยกว่าความเร็วของกระแสลมขวางและที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1, 2, 3, 4$  นั้นจะปรากฏ Local peak ที่มีค่าติดลบอยู่บริเวณตรงกลางเจ็ต และยังคงปรากฏ Local peak ค่าความเร็วสูงอยู่ด้านบนของเจ็ต โดยที่ จะสังเกตว่า ที่หน้าตัด  $x/rd = 1$  จะเห็นว่าบริเวณด้านล่างของเจ็ตจะแยก

ขาดออกจากกันมีลักษณะเป็นแขน 2 ข้างซึ่งต่อไปจะเรียกส่วนนี้ว่า Side arm และเมื่อพิจารณาที่หน้าตัดห่างออกไปตามแนว Downstream ( $x/rd = 2, 3$  และ  $4$ ) พบว่าระยะห่างระหว่าง Side arm นั้นเพิ่มมากขึ้นตามระยะทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตตามแนว Downstream( $x$ )และนอกจากนั้นยังสังเกตว่าบริเวณที่มีค่าติดลบนั้นยังขยายตัวใหญ่ขึ้นตามแนว Downstream ( $x$ )

เมื่อสังเกตโดยรวมพบว่าเจ็ตจะขยายตัวตามแนว Spanwise มากกว่าแนว Traverse และนอกจากนั้นเมื่อพิจารณาที่หน้าตัดห่างออกไปตามแนว Downstream พบว่าเกิดการ Merge กันระหว่าง Local peak ความเร็วสูงซึ่งอยู่บริเวณ Jet shear layer กับ Local peak ที่อยู่ที่ตำแหน่งของ Hanging vortices

เมื่อพิจารณาการพัฒนาตัวของสัมประสิทธิ์ความเร็วเฉลี่ย เฉพาะหน้าตัด ( $C_{UL}$ ) ของกรณี I15 พบว่าเจ็ตจะขยายตัวออกทางด้านข้าง (Spanwise) เมื่อพิจารณาโครงสร้างเจ็ตพบว่าที่ด้านบนตรงกลางของเจ็ต ตามแนว Traverse( $y$ ) เจ็ตจะยุบตัวต่ำลงและเมื่อสังเกตที่หน้าตัด  $x/rd = 0.25$  พบว่า Local peak ค่าความเร็วสูงจะปรากฏตรงกลางเจ็ต แต่ไม่ปรากฏ Local peak ค่าความเร็วต่ำและที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  พบว่า Local peak ที่มีค่าความเร็วสูงจะยืดตัวออกทางด้านข้าง (Spanwise) ทำให้เกิดบริเวณ Local peak ขึ้น 3 บริเวณ คือ บริเวณตรงกลางเจ็ตและที่ด้านข้างทั้งสองข้างของเจ็ต นอกจากนี้ยังพบว่าที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  และ  $1$  Local peak จะถูกออกเป็น 2 ส่วนและแยกตัวออกเป็น 2 ฝั่งอยู่ด้านข้างของเจ็ตและมีลักษณะรูปร่างค่อนข้างสมมาตรและยังพบว่าที่บริเวณตรงกลางเจ็ตจะปรากฏ Local peak ที่มีค่าติดลบแสดงว่าที่บริเวณดังกล่าวมีค่าความเร็วต่ำกว่าความเร็วของกระแสลมขวางซึ่งผลดังกล่าวสนับสนุนผลการพิจารณาการกระจายตัวของความเร็วเจ็ตแบบ  $w/U_{cf}$  และ  $C_{UG}$  และที่ตำแหน่ง  $x/rd = 2, 3$  และ  $4$  พบว่าเจ็ตนั้นถูกฉีกขาดออกเป็นสองส่วนและแยกตัวออกเป็น 2 ฝั่ง อยู่ด้านข้างของเจ็ต (Spanwise) โดยมีลักษณะโครงสร้างของเจ็ตคล้ายกับรูปไตและมี Local peak ค่าความเร็วสูงอยู่ตรงกลางไตทั้งสองข้าง

เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วพบว่าการศึกษาการฉีดเจ็ตควบคุมมีผลทำให้โครงสร้างของความเร็วแยกออกเป็น 2 ส่วนนอกจากนั้นเมื่อพิจารณาบริเวณ Local peak ความเร็วสูงพบว่าเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมแล้วทำให้เกิดการแยกตัวของ Local peak ความเร็วสูงออกเป็น 2 ส่วนโดยที่จะพบค่า Local peak ความเร็วสูงอยู่บริเวณตรงกลางของโครงสร้างที่แยกตัวออกจากกัน ขณะที่เมื่อพิจารณา Local peak ความเร็วต่ำ ที่อยู่ตำแหน่งตรงกลางเจ็ตพบว่าค่าความเร็วจะลดลงจนมีค่าติดลบโดยเริ่มสังเกตพบที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  ซึ่งแสดงว่าที่บริเวณดังกล่าวมีความเร็วน้อยกว่าความเร็วของกระแสลมขวางและในส่วนต่อไปจะแสดงการเปรียบเทียบผลของกรณี I15 กับกรณี JICF เพื่อแสดงผลของการฉีดเจ็ตควบคุมที่มีต่อโครงสร้างของการไหลเฉพาะหน้าตัด

การเปรียบเทียบการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความเร็วเฉพาะหน้าตัด ( $C_{UL}$ ) ของกรณี I15 กับกรณี JICF พบว่ามีลักษณะคล้ายกับการพิจารณาการกระจายตัวของความเร็วเจ็ตแบบ  $w/U_{cf}$  และ  $C_{UG}$  โดยพบว่ากรณี I15 เจ็ตจะขยายตัวออกด้านข้างมากกว่ากรณี JICF เมื่อพิจารณา Local peak ค่าความเร็วสูง พบว่ากรณี JICF จะปรากฏอยู่ด้านบนของเจ็ตและ Local peak ค่าเร็วต่ำอยู่ด้านล่าง ขณะที่กรณี I15 นั้น จะปรากฏเฉพาะ Local peak ค่าความเร็วสูงตรงกลางเจ็ต และ เมื่อพิจารณาดำแหน่งของ Local peak ค่าความเร็วสูง ตามแนว Traverse พบว่ากรณี JICF จะอยู่สูงกว่า กรณี I15 และ ที่หน้าตัด  $x/rd = 0.5, 0.75$  และ 1 พบว่ากรณี JICF นั้น Local peak ค่าความเร็วสูง จะอยู่ด้านบนขณะที่กรณี I15 Local peak ค่าความเร็วสูง ของเจ็ต จะแยกเป็น 2 ส่วนและกระจายตัวออกสู่ด้านข้างของเจ็ต (Spanwise) ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 2, 3$  และ 4 พบว่า กรณี JICF โครงสร้างของความเร็วจะยึดตัวออกทางด้านข้างของเจ็ตแต่ยังคงมีโครงสร้างเดียวและปรากฏ Local peak ค่าความเร็วสูงอยู่ตรงกลางเจ็ต ขณะที่กรณี I15 โครงสร้างของความเร็วเจ็ตจะแยกออกเป็น 2 ส่วนมีลักษณะเป็นรูปไตและกระจายตัวไปอยู่ด้านข้างของเจ็ต Spanwise โดยมี Local peak อยู่ตรงกลางไตทั้งสองข้าง และเมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งของ Local peak ค่าความเร็วสูง ตามแนว Traverse พบว่ากรณี I15 จะอยู่ต่ำกว่ากรณี JICF

จากการเปรียบเทียบผลของกรณี I15 กับ กรณี JICF พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของความเร็วโดยพบว่ากรณีฉีดเจ็ตควบคุมนั้นส่งผลทำให้การยึดตัวของเจ็ตตามแนว Spanwise มากกว่ากรณีที่ไม่ฉีดเจ็ตควบคุมนอกจากนั้นยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง Local peak โดยจะสังเกตว่าเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมแล้วจะทำให้ Local peak ความเร็วสูงแยกตัวออกเป็น 2 ส่วนและแยกตัวอยู่ทางฝั่งซ้ายและขวาของเจ็ต ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะมีผลทำให้ค่าของความเร็วที่อยู่บริเวณ Center plane ลดลง

- การกระจายตัวของ Fluctuation velocity เทียบกับความเร็วของกระแสลมขวาง ( $w_{rms}/U_{cf}$ ) กรณี JICF เปรียบเทียบกับกรณี I15

รูปที่ 3.16 การกระจายตัวของ Fluctuation velocity เทียบกับความเร็วของกระแสลมขวางกรณี JICF สังเกตว่า Fluctuation velocity จะขยายตัวออกทางด้านข้าง (Spanwise) และที่บริเวณตรงกลางเจ็ตจะมีค่า Fluctuation velocity มากขณะที่บริเวณขอบเจ็ตจะมีค่าน้อย โดยเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.25$  พบว่า Local peak ซึ่งมีค่าสูงจะซ้อนกันอยู่ตรงกลางเจ็ตตามแนว Traverse (y) และมีอาณาบริเวณครอบคลุมไปจนถึงด้านข้างของเจ็ต (Spanwise) ซึ่งจะสังเกตพบว่า Fluctuation velocity จะสูงบริเวณตรงกลางเจ็ต ขณะที่บริเวณขอบเจ็ตจะมีค่าต่ำ และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  พบว่า Local peak จะแยกตัวออกเป็น ส่วน ตามแนว Spanwise(x) แต่ยังคงอยู่ที่บริเวณแกนกลางของเจ็ต และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง 2 คือ  $x/rd =$

0.75, 1 พบว่า Local peak ที่มีค่าสูงจะอยู่บริเวณตรงกลางเจ็ดและมีอาณาบริเวณครอบคลุมไปจนถึงด้านข้างของเจ็ด (Spanwise) และที่ตำแหน่ง  $x/rd = 2, 3$  และ 4 พบว่าเจ็ดเริ่มสลายตัวแต่ยังคงปรากฏ Local peak อยู่ที่บริเวณตรงกลางของเจ็ด

เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วพบว่าที่บริเวณตรงกลางเจ็ดจะมีค่า Fluctuation velocity สูงซึ่งบ่งชี้ถึงบริเวณที่มี Activity สูงและมีค่าต่ำที่บริเวณขอบของเจ็ดและเมื่อพิจารณาค่า Maximum Fluctuation velocity พบว่าจะมีค่าลดลงตามระยะทางตามแนว Downstream ( $x$ ) โดยลำดับต่อไปจะแสดงการพัฒนาตัวของของค่า Fluctuation velocity กรณีที่มีการฉีดเจ็ดควบคุมที่หน้าตัดต่างๆ ตาม Downstream ( $x$ )

การพัฒนาตัวของ Fluctuation velocity เทียบกับความเร็วของกระแสลมขวาง ( $w_{rms}/U_{cf}$ ) กรณี I15 พบว่าเจ็ดจะขยายตัวออกทางด้านข้าง (Spanwise) ที่หน้าตัด  $x/rd = 0.25$  สังเกตว่า Local peak จะปรากฏตรงกลางเจ็ด เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  พบว่าเจ็ดจะขยายตัวในแนว Spanwise ( $z$ ) และพบว่า Local peak จะยึดตัวออกทางด้านข้าง (Spanwise) และที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  และ 1 พบว่า Local peak จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนและแยกตัวออกเป็น 2 ฟันทางด้านข้างของเจ็ดและเมื่อพิจารณาที่บริเวณขอบเจ็ดจะพบค่าของ Fluctuation velocity จะต่ำกว่าบริเวณตรงกลางเจ็ดและที่ตำแหน่ง  $x/rd = 2, 3$  และ 4 เจ็ดยังคงขยายตัวออกทางด้านข้างแต่มีค่าของ Fluctuation velocity ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่า Fluctuation velocity ที่หน้าตัดใกล้ๆ

เมื่อพิจารณาการพัฒนาตัวของ Fluctuation velocity กรณีฉีดเจ็ดควบคุมโดยรวมพบว่าโครงสร้างของเจ็ดจะขยายตัวออกทางด้านข้าง Spanwise ( $z$ ) และพบว่าที่บริเวณตรงกลางเจ็ดจะมี Activity สูง ขณะที่บริเวณขอบเจ็ดจะมีค่า Activity ต่ำ และสังเกตว่า Local peak ของค่า Fluctuation velocity ที่มีค่าสูงจะแบ่งตัวออกเป็น 2 ส่วน จะอยู่ด้านข้างของเจ็ด ในลำดับต่อไปจะพิจารณาเปรียบเทียบกับกรณี I15 กับ กรณี JICF

การเปรียบเทียบการกระจายตัวของ Fluctuation velocity กรณี I15 กับกรณี JICF ที่หน้าตัด  $x/rd = 0.25$  กรณี I15 เจ็ดจะขยายตัวออกด้านข้างมากกว่ากรณี JICF เมื่อพิจารณา Local peak พบว่า กรณี JICF จะปรากฏอยู่บริเวณ ตรงกลางเจ็ดคล้ายกับ กรณี I15 แต่มีรูปร่างที่แตกต่างกันโดยที่รูปร่างของ Local peak กรณี JICF จะโค้งตัวลงขณะที่กรณี I15 จะโค้งตัวขึ้นและเมื่อพิจารณาตำแหน่งของ Local peak ตามแนว Traverse พบว่า กรณี JICF จะอยู่ระดับความสูงเดียวกับ กรณี I15 และที่หน้าตัด  $x/rd = 0.5, 0.75$  และ 1 พบว่ากรณี JICF นั้น รูปร่างของ Local peak จะโค้งต่ำลงขณะที่ กรณี I15 นั้น Local peak จะแยกเป็น 2 ส่วน และกระจายตัวอยู่ด้านข้างตามแนว Spanwise ( $z$ ) และที่ตำแหน่ง  $x/rd = 2, 3$  และ 4 พบว่ากรณี I15 เจ็ด

จะขยายตัวออกด้านข้าง (Spanwise) มากกว่ากรณี JICF ขณะที่ บริเวณ Local peak ทั้งสองกรณีจะอยู่บริเวณตรงกลางเจ็ต

เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบโดยรวมพบว่าเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมแล้วส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเจ็ตโดยเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมแล้วพบว่าโครงสร้างของเจ็ตยืดตัวออกทางด้านข้างและเมื่อพิจารณา Local peak พบว่าจะมีค่าสูงอยู่บริเวณตรงกลางเจ็ต แสดงว่าที่บริเวณดังกล่าวมี Activity สูง ซึ่งแตกต่างจากกรณีที่ฉีดเจ็ตควบคุมพบว่า Local peak จะแยกตัวออกเป็นสองฝั่งตามแนว Spanwise ( $z$ ) และสังเกตพบว่าค่าของ Fluctuation velocity ที่บริเวณ Local peak สำหรับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมจะมีค่ามากกว่ากรณี JICF ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการฉีดเจ็ตควบคุมนั้นจะเป็นผลให้ Fluctuation velocity มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อพิจารณาประกอบกับค่าความเร็วเฉลี่ยดังรูปที่ 3.17 แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณของตำแหน่งของค่าความเร็วเฉลี่ยสูงสุดเป็นบริเวณเดียวกันกับบริเวณที่มีค่า Fluctuation velocity สูงสุดซึ่งอยู่บริเวณตรงกลางเจ็ต และจากรูปที่ 3.18 แสดงลักษณะของ Local peak 3 หน้าตัดคือ  $x/rd = 0.5, 0.75$  และ 1 แสดงให้เห็นว่า Local peak ที่มีความเร็วสูงจะอยู่ด้านบนของเจ็ตขณะที่ Local peak ที่มีความเร็วต่ำจะอยู่ด้านล่างของเจ็ต และ ในการพิจารณาลำดับต่อไปจะทำการเปรียบเทียบผลของการฉีดเจ็ตควบคุมที่มีต่อการกระจายตัวของ Turbulent intensity

- การกระจายตัวของ ( $w_{rms}/w$ ) กรณี JICF เปรียบเทียบกับกรณี I15

รูปที่ 3.19 การพัฒนาตัวของ Turbulent intensity บนแต่ละหน้าตัดของเจ็ตตามแนว Downstream ( $x$ ) ของกรณี JICF พบว่าลักษณะการกระจายตัวของ Turbulent intensity จะมีลักษณะคล้ายกับ Fluctuation velocity คือจะขยายตัวออกทางด้านข้างตามแนว Spanwise( $z$ ) และพบว่าที่บริเวณขอบของเจ็ตจะมีค่า Turbulent intensity ต่ำกว่าบริเวณตรงกลางเจ็ตเมื่อพิจารณาที่หน้าตัด  $x/rd = 0.25$  พบว่ามี Local peak ที่มีค่า Turbulent intensity สูงอยู่ 2 บริเวณซ้อนกันอยู่ตรงกลางเจ็ตตามแนว Traverse ที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของเจ็ตและมีอาณาบริเวณครอบคลุมไปจนถึงด้านข้างของเจ็ต เมื่อพิจารณาที่หน้าตัด  $x/rd = 0.5, 0.75$  และ 1 จะสังเกตว่า Local peak จะอยู่บริเวณตรงกลางเจ็ตแต่จะเริ่มแยกตัวออกเป็น 2 ส่วนตามแนว Spanwise ( $z$ ) และมีรูปร่างค่อนข้างสมมาตร โดยที่เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x/rd = 2, 3$  และ 4 พบว่าเจ็ตนั้นเริ่มสลายแต่ยังคงปรากฏบริเวณที่มีค่า Turbulent intensity สูงอยู่ที่บริเวณตรงกลางเจ็ตและสังเกตพบว่าที่ตำแหน่ง  $x/rd = 2$  พบว่าเกิดการแบ่งตัวของ Local peak ออกเป็น 2 ส่วนและอยู่ซ้อนกันตามแนว Traverse ( $y$ ) และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x/rd = 3$  พบว่าจะปรากฏ Local peak เพียงบริเวณเดียวซึ่งอยู่บริเวณตรงกลางเจ็ตนอกจากนี้ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 4$  พบว่าเกิดการแบ่งตัวของ Local peak ออกเป็น 2 ส่วนตามแนว Spanwise ( $z$ )

เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วพบว่า Turbulent intensity จะมีค่าสูงที่บริเวณตรงกลางเจ็ต และเมื่อพิจารณาที่หน้าตัด  $x/rd = 0.25$  จะปรากฏ Local peak ค่าสูงที่ตำแหน่ง Jet shear layer ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่หน้าตัดห่างออกไปกลับพบว่าตำแหน่งของ Local peak ค่าสูงนั้นจะปรากฏที่บริเวณ Hanging vortice แทน และสังเกตต่อว่า Local peak ค่าสูง ที่บริเวณ Jet shear layer นั้นจะสลายตัวค่อนข้างเร็วและในขั้นต่อไปจะแสดงการพัฒนาตัวของ Turbulent intensity บนแต่ละหน้าตัดของเจ็ตตาม Downstream ( $x$ ) ของกรณี I15 ก่อนที่จะนำไปสู่ในส่วนของ การเปรียบเทียบผลของการฉีดเจ็ตควบคุมกับกรณี JICF

การพัฒนาตัวของ Turbulent intensity บนแต่ละหน้าตัดของเจ็ตตาม Downstream ของกรณี I15 พบว่ามีลักษณะรูปร่างคล้ายกับ Fluctuation velocity ของกรณี I15 ซึ่งมีการขยายตัวออกทางด้านข้างตามแนว Spanwise ( $z$ ) และสังเกตว่าที่บริเวณขอบของเจ็ตนั้นจะมีค่า Turbulent intensity ต่ำกว่าบริเวณตรงกลางเจ็ต โดยที่หน้าตัด  $x/rd = 0.25$  จะปรากฏ Local peak ค่า Turbulent intensity สูงอยู่ตรงกลางเจ็ต ขณะที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5, 0.7$  และ 1 สังเกตว่า Local peak จะแยกออกเป็น 2 ส่วนและขยายตัวออกทางด้านข้างและที่บริเวณตำแหน่ง  $x/rd = 2, 3$  และ 4 เจ็ตยังคงขยายตัวออกทางด้านข้างและปรากฏ Local peak แยกออกเป็น 2 ส่วนตามแนว Spanwise ( $z$ )

เมื่อสังเกตโดยรวมพบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมนั้นจะคล้ายกับ Velocity fluctuation ที่พิจารณาในหัวข้อที่ผ่านมาคือมีค่าสูงที่บริเวณตรงกลางเจ็ตและที่ขอบเจ็ตจะมีค่าต่ำและการขยายตัวของเจ็ตพบว่าจะมีการขยายตัวตามแนว Spanwise ( $z$ ) มากกว่าแนว Traverse ( $y$ ) นอกจากนี้ยังสังเกตว่าการฉีดเจ็ตควบคุมจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ Turbulent intensity ที่หน้าตัดใกล้ๆปากทางออกของเจ็ต และค่า Turbulent intensity จะลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้น

การเปรียบเทียบการกระจายตัวของ Turbulent intensity ( $w_{rms}/w$ ) กรณี JICF กับกรณี I15 พิจารณาที่หน้าตัด  $x/rd = 0.25$  พบว่า กรณี I15 เจ็ตจะขยายตัวออกด้านข้างมากกว่ากรณี JICF เมื่อพิจารณา Local peak พบว่า กรณี JICF จะปรากฏอยู่บริเวณ 2 บริเวณซ้อนกันอยู่ตามแนว Traverse ขณะที่กรณี I15 จะปรากฏ Local peak 2 บริเวณและมีค่า Turbulent สูงกว่ากรณี JICF และเมื่อพิจารณาตำแหน่งของ Local peak ในแนว Traverse พบว่า Local peak ทั้งสองอยู่ระดับเดียวกัน และที่หน้าตัด  $x/rd = 0.5, 0.75$  และ 1 เมื่อพิจารณา Local peak พบว่า กรณีของ JICF กับ กรณี I15 นั้นมีลักษณะที่คล้ายกันคือ Local peak จะแยกเป็น 2 ส่วน และกระจายตัวอยู่ด้านข้างตามแนว Spanwise ( $z$ ) และที่ตำแหน่ง  $x/rd = 2, 3$  และ 4 พบว่ากรณี I15 เจ็ตจะขยายตัวออกด้านข้าง (Spanwise) มากกว่ากรณี JICF ขณะที่ บริเวณ Local peak ทั้งสองกรณีจะอยู่บริเวณตรงกลางเจ็ต โดยเมื่อสังเกตโดยรวมพบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมจะมีผลทำให้เจ็ตนั้นยืดตัวออกทางด้านข้างมากกว่ากรณี JICF นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมจะ



ส่งผลให้ Turbulent intensity เพิ่มขึ้นที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของเจ็ตแต่เมื่อพิจารณาที่หน้าตัดไกลออกไปพบว่าทั้ง 2 กรณีมีค่า Turbulent intensity ใกล้เคียงกันซึ่งแสดงให้เห็นว่าการฉีดเจ็ตควบคุมนั้นจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ Turbulent intensity ที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของเจ็ต

- Center of mass trajectory ( $\bar{y}_{m,w}, \bar{z}_{m,w}$ ) และ Centroid trajectory ( $\bar{y}_{c,w}, \bar{z}_{c,w}$ ) ของความเร็ว บนระนาบสมมาตรโดยพิจารณาจากค่าความเร็วเฉลี่ย ( $w/U_{cf}$ )

สำหรับการนิยามเส้นทางเดินของเจ็ตจากค่าความเร็วเฉลี่ยสามารถแสดงในรูปสมการดังนี้

$$\bar{y}_{m,w} = \frac{\int_{A_{jet}} y \frac{w}{U_{cf}} dA_{jet}}{\int_{A_{jet}} \frac{w}{U_{cf}} dA_{jet}} \quad (3.7)$$

$$\therefore \bar{y}_{m,w} = \frac{\int_{A_{jet}} y w dA_{jet}}{\int_{A_{jet}} w dA_{jet}}$$

$$\bar{z}_{m,w} = \frac{\int_{A_{jet}} z \frac{w}{U_{cf}} dA_{jet}}{\int_{A_{jet}} \frac{w}{U_{cf}} dA_{jet}} \quad (3.8)$$

$$\therefore \bar{z}_{m,w} = \frac{\int_{A_{jet}} z w dA_{jet}}{\int_{A_{jet}} w dA_{jet}}$$

และใช้เส้นทางของเจ็ตในกระแสมขวางซึ่งจะพิจารณาดำแหน่งจุดศูนย์กลางรูปร่าง Contour ของความเร็ว (Centroid trajectory (CC):  $\bar{y}_{c,w}, \bar{z}_{c,w}$ ) โดยจุดนี้นิยามจาก

$$\bar{y}_{c,w} = \frac{\int_{A_{jet}} y dA_{jet}}{\int_{A_{jet}} dA_{jet}} \quad (3.9)$$

$$\bar{z}_{c,w} = \frac{\int z dA_{jet}}{\int dA_{jet}} \quad (3.10)$$

- โดย  $\bar{y}_{m,w}$  ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางความเร็วตามแนวแกน y  
 $\bar{z}_{m,w}$  ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางความเร็วตามแนวแกน z  
 $\bar{y}_{c,w}$  ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของรูปร่างของ Contour ของความเร็วตามแนวแกน y  
 $\bar{z}_{c,w}$  ตำแหน่งของ จุดศูนย์กลางของรูปร่างของ Contour ของความเร็วตามแนวแกน z  
 $A_{jet}$  พื้นที่หน้าตัดของเจ็ตโดยกำหนดขอบเขตของพื้นที่ของเจ็ตสำหรับการคำนวณเท่ากับ 10 % ของค่าสูงของ w บนหน้าตัดใดๆ

รูปที่ 3.20 Centroid trajectory ของความเร็วบนระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_{c,w}$ ) เปรียบเทียบกันในกรณี JICF กับกรณี I15 พบว่ากรณี I15 จะต่ำกว่ากรณี JICF ตลอดทั้งหน้าตัดการวัด เมื่อเปรียบเทียบค่า A และ m (ตารางที่ 3.3) พบว่ามีค่าแตกต่างกัน ซึ่งน่าจะเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมแล้ว เป็นผลให้โครงสร้างของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตต่ำลง

รูปที่ 3.21 Center of mass (CM) trajectory ของความเร็วบนระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_{m,w}$ ) เปรียบเทียบกันกรณี JICF กับกรณี I15 พบว่ากรณี I15 จะต่ำกว่ากรณี JICF ซึ่งน่าจะเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมจะส่งผลให้ตำแหน่งของค่าความเร็วสูงสุดต่ำลง

รูปที่ 3.22 Centroid trajectory (CC) ของความเร็วบนระนาบสมมาตร ( $\bar{z}_{c,w}$ ) เปรียบเทียบกันกรณี JICF กับกรณี I15 พบว่าการกระจายตัวของ ของทั้งสองกรณี จาก Center Plane (ระนาบ x-y) เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

รูปที่ 3.23 Centroid trajectory (CM) ของความเร็วบนระนาบสมมาตร ( $\bar{z}_{m,w}$ ) เปรียบเทียบกันกรณี JICF กับกรณี I15 พบว่าการกระจายตัวของ Center of mass คล้ายกับ Centroid trajectory โดยพบว่าทั้งสองกรณีมีการกระจายตัวจาก Center Plane (ระนาบ x-y) เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

- Center of mass trajectory ( $\bar{y}_{m,CUG}$ ,  $\bar{z}_{m,CUG}$ ) และ Centroid trajectory ( $\bar{y}_{c,CUG}$ ,  $\bar{z}_{c,CUG}$ ) ของความเร็วบนระนาบสมมาตรโดยพิจารณาจากคุณลักษณะโดยรวม ( $C_{UG}$ )

สำหรับการศึกษาคูณลักษณะของเส้นทางเดินของเจ็ตนั้นจะนิยามจาก 3 ปริมาณคือ 1) ค่าความเร็วสูงสุดบน Center plane 2) Center of mass trajectory และ 3) Centroid of trajectory เริ่มต้นโดยการศึกษาคุณลักษณะโดยรวมซึ่งอาศัยการพิจารณาดำเนินการจุดศูนย์กลางของ

ความเร็วสร้างเป็นเส้นทางการเดินของเจ็ต(Center of mass trajectory (CM):  $\bar{y}_{m,CUG}, \bar{z}_{m,CUG}$ ) โดยนิยามจาก

$$\bar{y}_{m,CUG} = \frac{\int y C_{UG} dA_{jet}}{\int C_{UG} dA_{jet}} \quad (3.11)$$

$$\bar{z}_{m,CUG} = \frac{\int z C_{UG} dA_{jet}}{\int C_{UG} dA_{jet}} \quad (3.12)$$

และใช้เส้นทางการเดินของเจ็ตในกระแสมวงซึ่งจะพิจารณาดำแหน่งจุดศูนย์กลางรูปร่าง Contour ของความเร็ว (Centroid trajectory (CC):  $\bar{y}_{c,CUG}, \bar{z}_{c,CUG}$ ) โดยจุดนี้นิยามจาก

$$\bar{y}_{c,CUG} = \frac{\int y dA_{jet}}{\int dA_{jet}} \quad (3.13)$$

$$\bar{z}_{c,CUG} = \frac{\int z dA_{jet}}{\int dA_{jet}} \quad (3.14)$$

โดย  $\bar{y}_{m,CUG}$  ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางความเร็วตามแนวแกน y  
 $\bar{z}_{m,CUG}$  ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางความเร็วตามแนวแกน z  
 $\bar{y}_{c,CUG}$  ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของรูปร่างของ Contour ของความเร็วตามแนวแกน y  
 $\bar{z}_{c,CUG}$  ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของรูปร่างของ Contour ของความเร็วตามแนวแกน z  
 $A_{jet}$  พื้นที่หน้าตัดของเจ็ตโดยกำหนดขอบเขตของพื้นที่ของเจ็ตสำหรับการคำนวณเท่ากับ 0.1 ของค่าสูงของ  $C_{UG}$  บนหน้าตัดใดๆ

รูปที่ 3.24 ก เมื่อพิจารณา CC trajectory กับ CM Trajectory ของกรณี JICF พบว่าเส้นทางการเดินอยู่ระดับใกล้เคียงกัน (รูปที่ 3.24ก) ซึ่งบ่งชี้ว่าการกระจายตัวของความเร็วเจ็ตในกรณีของ JICF นั้นค่อนข้างสม่ำเสมอ (Uniform)

รูปที่ 3.24 ข เมื่อพิจารณา CC trajectory กับ CM Trajectory ของกรณี I15 กลับพบว่าเส้นทางเดินของ CM จะอยู่ต่ำกว่า CC ซึ่งบ่งชี้ว่าจะมีการกระจายตัวของความเร็วสูงที่ด้านล่างของบริเวณเจ็ต (ตัวเจ็ต)

รูปที่ 3.25 ก Centroid trajectory ของความเร็วบนระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_{c,CUG}$ ) เปรียบเทียบกันในกลุ่มกรณี JICF กับกรณี I15 พบว่ากรณี I15 จะต่ำกว่ากรณี JICF ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่า A และ m (ตารางที่ 3.3) พบว่ามีค่าแตกต่างกันและเมื่อพิจารณาร่วมกับค่า  $C_{UG}$  พบว่าเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมแล้วเป็นผลให้โครงสร้างของเจ็ตต่ำลงเมื่อเทียบกับ กรณี JICF

รูปที่ 3.25 ข Center of mass (CM) trajectory ของความเร็วบนระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_{m,CUG}$ ) เปรียบเทียบกันในกลุ่มกรณี JICF กับกรณี I15 พบว่ากรณี I15 จะต่ำกว่ากรณี JICF บ่งชี้ว่าจะมีการกระจายตัวของค่าความเร็วสูงที่บริเวณด้านล่างของเจ็ต

รูปที่ 3.26 Centroid trajectory (CC) ของความเร็วบนระนาบสมมาตร ( $\bar{z}_{c,CUG}$ ) เปรียบเทียบกันในกลุ่มกรณี JICF กับกรณี I15 พบว่าการกระจายตัวของ ทั้งสองกรณี จาก Center Plane (ระนาบ x-y) เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

รูปที่ 3.27 Centroid trajectory (CM) ของความเร็วบนระนาบสมมาตร ( $\bar{z}_{m,CUG}$ ) เปรียบเทียบกันในกลุ่มกรณี JICF กับกรณี I15 พบว่าการกระจายตัวของ Center of mass คล้ายกับ Centroid trajectory โดยพบว่าทั้งสองกรณีมีการกระจายตัวจาก Center Plane (ระนาบ x-y) เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

- รูปร่างของความเร็วบน Center plan ตามแนว Traverse ของเจ็ต เปรียบเทียบกรณี JICF กับ กรณี I15

รูปที่ 3.28 เปรียบเทียบรูปร่างของความเร็วตามแนว Traverse บน Center plane ของเจ็ตที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5$  และ 4 พบว่ากรณี JICF จะปรากฏ Peak ของความเร็วสูงและความเร็วต่ำขณะที่กรณี I15 นั้นจะปรากฏเฉพาะ Peak ของความเร็วและยังสังเกตว่าเมื่อเปรียบรูปร่างการลดลงของ Peak ของความเร็วสูงจะพบว่าการลดลงเร็วกว่ากรณี JICF และเมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงรูปร่างพบว่า Peak ของความเร็วจะลอยสูงตัวสูงขึ้นตามระยะทางตาม Downstream (x) และเปลี่ยนรูปร่างเป็นเส้นตรงโดย พบว่ากรณี I15 จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เร็วกว่ากรณี JICF

- Maximum decay ของความเร็วบน Center plane ตามแนว Downstream (x)

รูปที่ 3.29(ก)และ(ข) การลดลงของ Maximum velocity บน Center plane เปรียบเทียบกรณี JICF กับกรณี I15 พบว่าการลดลงของ Maximum velocity บน Center plane ของกรณี

I15 นั้นจะลดลงเร็วกว่ากรณี JICF ในช่วง  $x/rd = 0.25$  ถึง 1.5 และพบว่าหลังจากตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  ไปแล้วนั้นการลดลงของ Maximum velocity บน Center plane ของทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน

- Velocity trajectory

รูปที่ 3.30 เปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของความเร็วของเจ็ตบน Center plane เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF กับ สมการแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของความเร็วของ Kamotani and Greber (1972) พบว่ากรณี JICF จะอยู่สูงกว่าของ Kamotani and Greber (1972) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF กับเส้นทางการเคลื่อนที่ของ Wanngiraniran (2001) พบว่ากรณี JICF เส้นทางการเคลื่อนที่จะอยู่สูงกว่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของ Wanngiraniran (2001) และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF กับกรณี I15 พบว่ากรณี I15 เส้นทางการเคลื่อนที่ของความเร็วเจ็ตจะอยู่ต่ำกว่ากรณี JICF และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกรณี I15 กับ ผลการทดลองของ Kamotani and Greber (1972) พบว่ากรณี I15 จะเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตจะอยู่ต่ำกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Wangiraniran (2001) พบว่าในช่วง  $x/rd = 0.25$  จนถึง 1.5 กรณี I15 จะอยู่ต่ำกว่า ขณะที่  $x/rd$  มากกว่า 1.5 กลับพบว่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของกรณี I15 จะอยู่สูงกว่า

ในลำดับต่อไปจะพิจารณาการเหนี่ยวนำการผสมจากการคำนวณโดยใช้สมการของ Yuan and Street (1998) เปรียบเทียบกับการคำนวณโดยตรงจากค่าความเร็วเฉลี่ยที่วัดได้ซึ่งการคำนวณแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังต่อไปนี้คือ

1) การ Simulate ของ Yuan and Street (1998) เน้นว่าการต่ำลงของเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตเป็นผลมาจากการเหนี่ยวนำการผสมที่เพิ่มมากขึ้น (Entrainment) โดยเมื่อนำพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองมาแทนค่าในสมการของการ Entrainment ที่เสนอโดย Yuan and Street (1998) โดยที่การคำนวณนี้จะใช้ Velocity trajectory ที่นิยามจากค่าความเร็วสูงสุดบน Center plane ซึ่งมีรายละเอียด (รูปที่ 3.31) และวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

สมการของการ Entrainment ที่เสนอโดย Yuan and Street (1998) คือ

$$\frac{Q_j}{Q_0} = 1 + \frac{R}{Ab} \left( \frac{x}{R} \right)^{1-b} \quad (3.15)$$

$$\frac{z_c}{R} = A \left( \frac{x}{R} \right)^b \quad (3.16)$$

โดยที่  $Q_j$  Volume flux ของเจ็ตเทียบกับระยะทางตามแนว Downstream ( $x$ )

$Q_0$  Volume flux ของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ต

$R$  Velocity ratio  $\left( R = \frac{U_j}{U_\infty} \right)$

$U_j$  ค่าความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออก

$U_\infty$  ค่าความเร็วของกระแสลมขวาง

ค่า  $A$  และ  $b$  ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

$x$  ระยะทางตาม Downstream

$z_c$  ระยะทางตามแนว Traverse

เมื่อนำสมการข้างต้นมาใช้ในการทดลองนี้โดยการจัดรูปของสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของ  $RD$  Scale ได้ดังนี้

$$\frac{Q_j}{Q_0} = 1 + \frac{RD}{Ab} \left( \frac{x}{RD} \right) \frac{1}{\left( \frac{x}{RD} \right)^b}$$

แทนค่า  $A \left( \frac{x}{RD} \right)^b$  ด้วย  $\frac{z_c}{RD}$

$$\frac{Q_j}{Q_0} = 1 + \frac{R}{b} \left( \frac{x}{RD} \right) / \left( \frac{z_c}{RD} \right)$$

จัดรูปสมการโดยเปลี่ยนสัญลักษณ์ใหม่เพื่อให้สอดคล้องกับการทดลองนี้

$$\lambda = 1 + \frac{r}{m} \left( \frac{x}{rd} \right) / \left( \frac{y}{rd} \right) \quad (3.17)$$

โดยที่

$$b = m$$

$$D = d$$

$$z_c = y$$

$$\lambda = \frac{Q_j}{Q_0}$$

2) การคำนวณการ Entrainment โดยการ Integrate ปริมาตรการไหลบนแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) ซึ่งวิธีนี้จะต้องกำหนดขอบเจ็ตเพื่อกำหนดพื้นที่สำหรับการนำมาคำนวณโดยเริ่มต้นของการพิจารณาขอบเจ็ตนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงวิธีที่จะแยกเจ็ตออกจาก

กระแสลมขวางซึ่งมีหลักการในการพิจารณาจากคุณลักษณะของ flow กล่าวคือในบริเวณกระแสลมขวางจะมีค่า Turbulence intensity ต่ำกว่าในบริเวณเจ็ต ดังนั้นจึงใช้ Turbulence intensity เป็นค่าสำหรับการกำหนดขอบเจ็ตซึ่งการคำนวณจะกำหนดค่า Turbulence intensity เท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ และแสดงสมการสำหรับการคำนวณได้ดังนี้

$$\frac{Q_j}{Q_0} = \frac{\int_{A_{jet}} w dA_{jet}}{A_j U_j} \quad (3.18)$$

- โดยที่  $A_{jet}$  พื้นที่ของเจ็ตที่หน้าตัดใดๆ โดยที่ขอบเจ็ตจะมีค่า Turbulence intensity เท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์
- $A_j$  พื้นที่ที่ปากทางออกของเจ็ต
- $U_j$  ค่าความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตที่ปากทางออกมีค่าเท่ากับ 15.65 เมตรต่อวินาที
- $w$  ค่าความเร็วเฉลี่ยที่หน้าตัดใดๆ

รูปที่ 3.32 เมื่อเปรียบเทียบการ Entrainment ของกรณี JICF กับกรณี I15 ตามสมการของ Yuan and Street (1998) พบว่าที่ตำแหน่ง  $x/rd$  เดียวกันกรณี I15 จะ Entrainment Crossflow ได้มากกว่ากรณี JICF ในช่วง  $x/rd = 0.25, 0.5$  และ  $0.75$  แต่เมื่อพิจารณาที่  $x/rd = 1, 1.5, 2, 2.5, 3,$  และ  $4$  กลับพบว่า กรณี I15 จะมีค่า Entrainment ต่ำกว่ากรณี JICF โดยค่า Entrainment ที่  $x/rd$  ต่างๆ ได้แสดงไว้ดังในตารางที่ 3.5 ในขณะที่เมื่อพิจารณาค่าการเหนี่ยวนำการผสมจากการคำนวณโดยตรงจากความเร็วเฉลี่ยที่วัดได้กลับพบว่าค่าการ Entrainment ของกรณี I15 จะมีค่ามากกว่ากรณี JICF ตลอดช่วงของการวัด ซึ่งผลของความแตกต่างกล่าวจะอภิปรายไว้ในบทต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### อภิปรายผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) จากสมการ Entrainment ของ Yuan and Street (1998) พบว่าการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) จะดีกว่ากรณี JICF ที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของเจ็ตแต่จะด้อยกว่าที่บริเวณไกลจากปากทางออกของเจ็ต และในทางตรงกันข้ามเมื่อพิจารณาการเหนี่ยวนำการผสมจากค่าความเร็วที่วัดได้พบว่ากรณี I15 นั้น จะมีการเหนี่ยวนำการผสมดีกว่ากรณี JICF เกือบทั้งบริเวณการวัด โดยเริ่มต้นจะพิจารณาสมการของ Yuan and Street (1998) ซึ่งสมการดังกล่าวเป็นสมการที่นิยามจาก Stream line trajectory แต่เรานำมา Modify เพื่อนำมาใช้กับ Maximum velocity trajectory ในขณะที่ การคำนวณโดยการ Integrate volume flux บนหน้าตัดนั้นจะกำหนดขอบเจ็ตสำหรับการคำนวณ โดยใช้ค่า Turbulent intensity เท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ จากความแตกต่างดังกล่าวเราค่อนข้างเชื่อผลที่ได้จากการคำนวณค่าความเร็วเฉลี่ยโดยการ Integrate volume flux บนหน้าตัดมากกว่าผลที่คำนวณได้จากสมการของ Yuan and Street (1998)

เมื่อพิจารณาการ Entrainment ของการคำนวณโดย Integrate volume flux บนหน้าตัด พบว่าที่ระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ตมากกว่า  $3rd$  การเหนี่ยวนำการผสมจะลดลงซึ่งจากการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ถึงสาเหตุของการลดลงของการ Entrainment อาจเกิดจาก 1) เจ็ตคลายกระแสมขวางที่เหนี่ยวนำเข้าในช่วงต้นคืนกลับให้กับกระแสมขวาง ซึ่งประเด็นนี้เราคิดว่าไม่น่าจะเกิดขึ้นกับการไหลแบบนี้ และ 2) อาจเป็นเพราะรูปแบบของการไหลสำหรับการทดลองนี้อาจจะไม่มี Self similarity ซึ่งหมายความว่าในช่วงของการพิจารณาดังกล่าว Flow นั้น ยังคงมีการส่งถ่ายค่าของความเร็วเฉลี่ยออกจากขอบเจ็ตยังคงมีค่าสูงอยู่จึงเป็นสาเหตุให้ Volume flux ที่หน้าตัดไกลจากปากทางออกเจ็ต (มากกว่า  $3rd$  ) ลดลง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของเจ็ดควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของความเร็วเจ็ดในกระแสมขวาง โดยมุ่งศึกษา 2 ประเด็นคือ

ประเด็นที่ 1 หาพารามิเตอร์ที่สำคัญ 2 ตัวคือตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ดควบคุม และ อัตราส่วนเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลักที่ทำให้การผสมของเจ็ดในกระแสมขวางดีขึ้น (Optimum) โดยทดลองแบบสังเขป

ประเด็นที่ 2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะและโครงสร้างของความเร็วของเจ็ดในกระแสมขวางเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง Optimum เปรียบเทียบกับกรณี ไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF)

เจ็ดที่ใช้ในการศึกษามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 22.5 มิลลิเมตรและมีรูปร่างของความเร็วที่ปากทางออกเป็นแบบ Fully developed turbulent pipe profile ส่วนเจ็ดควบคุมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 มิลลิเมตรและอยู่ต่ำกว่าปากทางออกของเจ็ดเท่ากับ 3 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็ว ( $r$ ) คงที่เท่ากับ 3.87 Reynolds number ของเจ็ดเท่ากับ 23,500 และ Reynolds number ของกระแสมขวางซึ่งคิดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของปากเจ็ดเท่ากับ 6,100 โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องปกติ

การหาตำแหน่งของการฉีดเจ็ดควบคุมที่เหมาะสม (Optimum) มีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกโดยอาศัยการวิเคราะห์จากผลของ Yuan and Street (1997) ที่ชี้แนะว่าการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ดต่ำลง ดังนั้นในการศึกษานี้จะกำหนดตำแหน่งของการฉีดเจ็ดควบคุมที่ทำให้เส้นทางเดินของเจ็ดต่ำที่สุดเป็นตำแหน่งที่เหมาะสม (Optimum) โดยเส้นทางเดินของเจ็ดสำหรับการทดลองนี้จะนิยามจากค่าความเร็วสูงสุดบน Center plane ตามแนว Downstream ( $x$ ) ซึ่งการหาตำแหน่งของการฉีดเจ็ดควบคุมที่เหมาะสมนั้นจะพิจารณาเลือกจากผลการทดลองที่ตำแหน่งของการฉีดเจ็ดควบคุมทั้งหมด 8 ตำแหน่งคือ 0, 180,  $\pm 15$ ,  $\pm 30$ ,  $\pm 45$ ,  $\pm 90$ ,  $\pm 135$  องศา ด้วยค่าอัตราส่วนเชิงมวล ( $r_m$ ) คงที่ เท่ากับ 2.32 เปอร์เซนต์ พบว่าการฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง  $\pm 15$  องศา จะส่งผลทำให้เส้นทางเดินของเจ็ดต่ำที่สุด (รูปที่ 3.8) ดังนั้นจึงเลือกตำแหน่งการฉีดเจ็ดควบคุมที่  $\pm 15$  องศาเป็นตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ดที่เหมาะสม

หลังจากนั้นทำการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนเชิงมวลที่เหมาะสมสำหรับการฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม  $\pm 15$  องศา โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนเชิงมวลทั้งหมด 5 ค่า คือ 0.5, 1, 1.5, 2 และ 32 เปอร์เซนต์ แล้วพิจารณาอัตราส่วนเชิงมวลที่ทำให้ตำแหน่งตามแนว Traverse ของจุดที่มีความเร็วสูงสุดบน Center plane ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  ต่ำสุด จากการ

ทดลองพบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมด้วย อัตราส่วนเชิงมวลเท่ากับ 2.32 เปอร์เซนต์ จะส่งผลให้ ตำแหน่งดังกล่าวต่ำสุด (รูปที่ 3.10) นอกจากนี้ การฉีดเจ็ตควบคุมที่อัตราส่วนเชิงมวลเท่ากับ 2.32 เปอร์เซนต์จะมีผลทำให้ค่าความเร็วสูงสุดลดลงด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณา เปรียบเทียบกับการฉีดเจ็ตควบคุมด้วยอัตราส่วนเชิงมวลเท่ากับ 2 เปอร์เซนต์พบว่า ทั้งสอง ใกล้เคียงกัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาในแง่มุมของการใช้พลังงานในการกระตุ้นเจ็ตประกอบจึงเลือกค่า อัตราส่วนเชิงมวลของการทดลองนี้เท่ากับ 2 เปอร์เซนต์เป็นค่าที่เหมาะสม

จากผลการทดลองในประเด็นที่ 1 ข้างต้น ในการทดลองเพื่อศึกษาประเด็นที่ 2 จึงเลือกฉีด เจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $\pm 15$  องศา ด้วยอัตราส่วนเชิงมวลคงที่เท่ากับ 2 เปอร์เซนต์ (กรณี I15)

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในประเด็นที่ 1 เพื่อหา ตำแหน่งเชิงมุมและอัตราส่วนเชิงมวลที่ เหมาะสม พบว่า 1) ตำแหน่งดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ซึ่งพบว่า โครงสร้างของเจ็ตมีความไวต่อการติด Tab ที่บริเวณ Windward มากที่สุด และ 2) การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง Windward (ในช่วง  $-45$  ไปถึง  $+45$  องศา) ส่งผลให้เส้นทางเดินของความเร็วเจ็ตต่ำลง ในทางตรงกันข้าม การฉีดเจ็ตควบคุมที่ ตำแหน่ง Leeward (ช่วง  $-90$  จนถึง  $+90$  องศา) จะส่งผลให้เส้นทางเดินของความเร็วเจ็ตสูงขึ้น

ส่วนของการทดลองในประเด็นที่ 2 จะทำการทดลอง 2 กรณี คือ JICF และกรณี I15 โดย วัดการกระจายตัวของความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ ตามหน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของ กระแสลมขวาง (Cross plane) ตามแนว Downstream ( $x$ ) 7 หน้าตัด ( $x/r_d = 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3$  และ  $4$ )

### คุณลักษณะและโครงสร้างการกระจายตัวของค่าความเร็วของเจ็ตบนหน้าตัดตามแนว Downstream สำหรับกรณี JICF

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอัตราส่วนความเร็วต่อความเร็วกระแสลมขวาง ( $w/U_{cf}$ ) สำหรับการพัฒนาตัวของเจ็ต จะพบว่า JICF นั้นจะขยายตัวออกทางด้านข้างตามแนว Spanwise ( $z$ ) มากกว่าแนว Traverse ( $y$ ) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x/r_d = 0.25$  จนถึง 2 ยัง พบว่าค่าของความเร็วเฉลี่ยมีค่าสูงอยู่ที่บริเวณ Windward jet shear layer (รูปที่ 3.13)

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของ Turbulent intensity (รูปที่ 3.19) พบว่า ที่หน้าตัดใกล้ปากเจ็ต ( $x/r_d = 0.25$ ) จะปรากฏ Local peak ค่าสูงที่ตำแหน่ง Windward jet shear layer ในขณะที่ ที่หน้าตัดห่างออกไป ( $x/r_d = 0.5$  จนถึง 1) Local peak กลับปรากฏที่ บริเวณด้านข้างของเจ็ตซึ่งเป็นบริเวณเดียวกับ Hanging vortices และ CVP และ ยังพบว่า Local peak ค่าสูงที่บริเวณ Windward jet shear layer นั้นจะสลายตัวค่อนข้างเร็ว ผลประเด็น นี้ชี้แนะว่าในบริเวณใกล้ปากเจ็ต ( $x/r_d = 0.25$ ) นั้น Windward jet shear layer จะเป็น โครงสร้างการไหลที่มีบทบาทสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวต่อไป (ตั้งแต่  $x/r_d = 0.5$

จนถึง 1) พบว่า Hanging vortices และ CVP จะเป็นโครงสร้างการไหลที่มีบทบาทที่สำคัญแทน

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความเร็วเฉลี่ยรวม ( $C_{UG}$ ) พบว่ามี Local peak ที่เด่นชัด 4 ตำแหน่ง ที่หน้าตัดใกล้กับปากทางออกของเจ็ต (รูปที่ 3.14  $x/rd = 0.25$ ) และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวต่อไปถึงตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  จะพบว่าเหลือ Local peak ที่เด่นชัดเพียง 2 ตำแหน่ง ประเด็นนี้ชี้แนะว่า มีปฏิสัมพันธ์ (Interaction) และการรวมตัวกัน (Merge) ของโครงสร้างบริเวณ Windward jet shear layer กับ โครงสร้างบริเวณ Hanging vortices และ CVP

### คุณลักษณะและโครงสร้างการกระจายตัวของค่าความเร็วของเจ็ตบนหน้าตัดตาม แนว Downstream เปรียบเทียบกรณี JICF กับ กรณี I15

เมื่อพิจารณาผลของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ Turbulent intensity พบว่าเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมแล้วมีผลทำให้ค่า Turbulent intensity เพิ่มสูงขึ้นที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของเจ็ต และมีค่าสูงอยู่บริเวณ Hanging vortices และ CVP (รูปที่ 3.19  $x/rd = 0.25$ ) เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความเร็วเฉลี่ยรวม ( $C_{UG}$ ) พบว่าเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมแล้วมีผลทำให้ Local peak ที่หน้าตัด ลดลงจาก 4 ตำแหน่ง ในกรณี JICF เหลือ 3 ตำแหน่ง ในกรณี I15 (รูปที่ 3.14  $x/rd = 0.25$ ) ผลนี้ชี้แนะว่าการฉีดเจ็ตควบคุมนั้นจะก่อให้เกิด ปฏิสัมพันธ์ (Interaction) และการรวมตัวกัน (Merge) ของโครงสร้างในบริเวณ Windward jet shear layer และ Hanging vortices

นอกจากนั้น ยังพบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมจะมีผลทำให้โครงสร้างความเร็วสูงในบริเวณ Windward jet shear layer สลายตัวไป และทำให้เกิดโครงสร้างของคู่ Lateral vortical structure ที่บริเวณด้านข้างอย่างชัดเจน โดยเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวต่อไปโครงสร้างดังกล่าวจะแยกตัวห่างจากกัน เมื่อเปรียบเทียบกับ กรณี JICF (รูปที่ 3.13) ผลการทดลองนี้ชี้แนะว่าการฉีดเจ็ตควบคุมนั้นจะลดบทบาทและการพัฒนาตัวของ Windward jet shear layer ในทางตรงกันข้าม จะช่วยเพิ่มบทบาทและส่งเสริมการพัฒนาตัวของ Lateral skewed mixing layers เป็นผลทำให้เกิดการผสมที่ดี ที่บริเวณด้านข้างของเจ็ต (suppress windward jet shear layer, promote lateral skewed mixing layers)

### เส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสม ( Trajectory and Entrainment)

เมื่อพิจารณาเส้นทางเดินของ CC และ CM ของกรณี JICF พบว่าเส้นทางเดินทั้งสองอยู่ระดับใกล้เคียงกัน (รูปที่ 3.24ก) ซึ่งบ่งชี้ว่าการกระจายตัวของความเร็วเจ็ต ในกรณีของ JICF นั้นค่อนข้างสม่ำเสมอ (Uniform, เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี I15 ที่จะกล่าวถึงต่อไป)

เมื่อพิจารณาเส้นทางเดินของ CC กับ CM ของกรณี I15 กลับพบว่าเส้นทางเดินของ CM จะอยู่ต่ำกว่า CC (รูปที่ 3.24ข) ซึ่งบ่งชี้ว่าจะมีการกระจายตัวของความเร็วสูงที่ด้านล่างของบริเวณเจ็ต (ตัวเจ็ต)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเส้นทางเดินของ CC กรณี JICF และ กรณี I15 พบว่าเส้นทางเดินใกล้เคียงกัน (รูปที่ 3.25ก) ซึ่งบ่งชี้ว่าความสูงของบริเวณเจ็ตกรณี JICF และ กรณี I15 อยู่ระดับใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเส้นทางเดินของ CM พบว่าเส้นทางเดินของกรณี I15 จะอยู่ต่ำกว่ากรณี JICF (รูปที่ 3.25 ข) ซึ่งบ่งชี้ว่ากรณี I15 จะมีการกระจายตัวของความเร็วสูงที่บริเวณต่ำกว่ากรณี JICF

เมื่อนำพารามิเตอร์ของเส้นทางเดินของเจ็ตที่ได้จากการทดลองมาใส่ในสมการของการเหนี่ยวนำการผสมของ Yuan and Street (1998) พบว่าการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) กรณี I15 จะดีกว่ากรณี JICF ที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของเจ็ต ( $x/rd = 0.25$  จนถึง 1) แต่จะด้อยกว่าที่บริเวณไกลจากปากทางออกของเจ็ต (รูปที่ 3.32) ในทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาการเหนี่ยวนำการผสมจากการ อินทิเกรต หาอัตราการไหลจากความเร็วที่วัดได้ที่หน้าตัดใดๆ พบว่ากรณี I15 นั้นจะมีการเหนี่ยวนำการผสมที่ดีกว่ากรณี JICF เกือบทั้งบริเวณการวัด (รูปเดียวกัน)

จากผลการศึกษาในงานวิจัยนี้โดยรวม พบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมจะส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ตต่ำลง และ การเหนี่ยวนำการผสมดีขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การฉีดเจ็ตควบคุมนั้น จะลดบทบาทและการพัฒนาตัวของ Windward jet shear layer ในทางตรงกันข้าม จะช่วยเพิ่มบทบาทและส่งเสริมการพัฒนาตัวของ Lateral skewed mixing layers เป็นผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสมที่ดีขึ้นที่บริเวณด้านข้างของเจ็ต (suppress windward jet shear layer, promote lateral skewed mixing layers) นอกจากนั้นแล้ว ยังส่งเสริมให้เกิดความปั่นป่วน (promote turbulence) ที่บริเวณ Lateral skewed mixing layer นี้ด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประมวลตาราง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
1	Pratte and Baines (1967)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาเส้นทาง, อัตราการลดลงตามแนวแกน และการขยายตัวของเจ็ต</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม</li> <li>ปากเจ็ตอยู่ติดกับแผ่นราบขนาดรัศมี 6 นิ้วซึ่งอยู่สูงจากพื้น 8 นิ้ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 5, 15, 25, 35</math></li> <li><math>d = 0.158, 0.248, 0.362</math> นิ้ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>เส้นทางของความเร็วสามารถถูกรวมเป็นเส้นเดียวกันได้ที่อัตราส่วนความเร็วต่างๆกันเมื่อสเกลด้วย <math>rd</math></li> <li>อัตราส่วนของความกว้างต่อความสูงของเจ็ตในบริเวณ Vortex zone เป็นค่าคงที่ประมาณ 1.4 ในแต่ละหน้าตัดตามแนวแกนเจ็ตแสดงถึง Similarity</li> <li>ใน Vortex zone อัตราการกระจายจะถูกควบคุมโดย Turbulent mixing และการพาของ Vortex</li> </ul>

ตารางที่ 1.1 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะเจ็ตในกระแสลมขวาง

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
2	Kamotani and Greber (1972)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาเส้นทางและคุณลักษณะการผสม</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วและอุณหภูมิในอุโมงค์ลม</li> <li>ปากเจ็ตอยู่ติดกับแผ่นราบซึ่งอยู่สูงจากผนังพื้น 2.5 นิ้วและอยู่ห่างจากขอบด้านหน้าของแผ่นราบ 2 นิ้ว</li> <li>ใช้ Hot-wire ในการวัดความเร็วและ ใช้ Thermocouple ในการวัดอุณหภูมิ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>J = \frac{\rho_j U_j^2}{\rho_0 U_0^2} = 15.3, 59.6</math></li> <li><math>T_j - T_0 = 0, 75, 320 \text{ }^\circ\text{F}</math></li> <li><math>Re_0 = \frac{U_0 D}{\nu} = 2,800 - 4,200</math></li> <li><math>\frac{\rho_j}{\rho_0} = 0.73</math></li> <li>สำหรับ <math>0 \leq \frac{x}{D} \leq 20</math></li> <li><math>\bar{u} = ((U) - U_o) / ((U)_{\max} - u_o)</math></li> <li><math>\bar{\theta} = ((T) - T_0) / ((T)_{\max} - T_0)</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>อัตราส่วนโมเมนต์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับเส้นทาง ของความเร็ว และ อุณหภูมิ</li> <li>อัตราส่วนความหนาแน่นมีผลต่อเส้นทางเดินของอุณหภูมิเล็กน้อยแต่ไม่ผลต่อเส้นทางของความเร็ว</li> <li>เส้นทางเดินของอุณหภูมิต่ำกว่าเส้นทางเดินของความเร็วที่อัตราส่วนโมเมนต์เดียวกัน</li> <li>ปริมาณ Turbulence ของเจ็ตเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโมเมนต์</li> <li>สรุปความสัมพันธ์ของเส้นทางการเคลื่อนที่ของความเร็วและอุณหภูมิดังนี้</li> </ul> $\frac{Z_V}{D} = a_v \left( \frac{X}{D} \right)^{b_v}$ สำหรับกรณีของความเร็ว

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
3	Smith and Mungal (1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ศึกษาคุณลักษณะการผสมของเจ็ตในกระแสดมขวาง</li> <li>• ทำการทดลองโดยศึกษา ปริมาณ Scalar concentration ในอุโมงค์ลม</li> <li>• ใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>r = \left( \frac{\rho_j u_j^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2} \right)^{1/2}</math> = 5 - 25</li> <li>• <math>Re_j = \frac{u_j d}{\nu}</math> = 8,400 - 41,500</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• การลดลงของ Scalar concentration บนระนาบสมมาตรแปรตาม <math>(s/rd)^{-1.3}</math> ในบริเวณ Near field และแปรตาม <math>(s/rd)^{-2/3}</math> ในบริเวณ Far field โดยมีจุดแบ่ง (branch point) อยู่ที่ <math>s = 0.3r^2d</math> (<math>s</math> คือระยะทางตามแนวแกนเจ็ตบนระนาบสมมาตร)</li> <li>• จุดแบ่งดังกล่าว ยังพิจารณาได้จากลักษณะการกระจายของ p.d.f โดยมีลักษณะ Non-marching ที่ Near field และมีลักษณะ Tilted ที่ Far field</li> </ul>



ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
4	Yuan and Street (1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ตและ การ Entrainment ของเจ็ต ใน Cross flow</li> <li>• ทำ Simulation โดยศึกษา Scalar concentration</li> <li>• ใช้ Large eddy simulation (LES)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>r = \frac{u_j}{u_{cf}}</math>, <math>r = 2, 3.3</math></li> <li>• <math>Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu}</math></li> <li>• <math>Re_{cf} = 1,050; 2,100</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trajectory ของ Center plane บริเวณห่างจาก ปาก เจ็ต ที่ Velocity ratio ต่างกัน Collapse เป็นเส้นเดียวโดยมีลักษณะเป็น Power law</li> <li>• ในบริเวณ Power law การดึง Cross flow fluid เข้าไปในเจ็ต Fluid (Entrainment) เป็นกลไก สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทาง ของ เจ็ต ส่วนบริเวณปากเจ็ต (บริเวณ Upstream ของ บริเวณ Power law) Pressure drag</li> <li>• สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการ Entrainment กับเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ต <math display="block">\frac{V_{jet}}{V_0} = 1 + \frac{R}{Ab} \left( \frac{x}{R} \right)^{1-b}</math></li> <li>• การโค้งตัวของเจ็ตในบริเวณ Near field เกิดจาก Pressure drag ส่วน Far field เกิดจากการ Entrainment ของเจ็ตในกระแสลมขวาง</li> </ul>

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
5	Yuan <i>et al.</i> (1999)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field</li> <li>ทำ Simulation โดยศึกษาปริมาณเฉลี่ยและ Fluctuation</li> <li>ใช้ Large eddy simulation (LES)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 2, 3.3</math></li> <li><math>Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu} = 1,050; 2100</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>พบโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field ได้แก่ Hanging vortices, Spanwise rollers และ Vertical streaks</li> <li>CVP เกิดจากการที่ Hanging vortices ซึ่งเกิดขึ้นจาก Skewed mixing layer ที่ขอบเจ็ตได้รับผลของ Adverse pressure gradient ทำให้เกิดการ Breakdown จนกลายเป็น CVP และพัฒนาตัวตามเส้นทางของเจ็ต</li> </ul>
6	Lim <i>et al.</i> (2001)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำการทดลอง โดยศึกษา จากการทำ Large-scale Structure ของเจ็ตใน กระแสลมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยใช้เทคนิคของ Flow Visualization ใช้ dye/alcohol mixture และ Fluorescein disodium dye</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>Re = 1,600</math></li> <li><math>R_v = 4.6</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Large-scale Structure ของเจ็ตในกระแสลมขวางในบริเวณของเจ็ต Shear layer vortices เป็นลักษณะของ Loops vortex ซึ่งไม่ได้เกิดจากการม้วนตัวของ Vortex rings แต่ Loops vortex เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Cylindrical vortex sheet หรือ Jet column</li> </ul>

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
7	Cortelezzi and Karagozian (2001)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาการก่อตัว และ การพัฒนาตัว ของ Vortical structure ในสนามการไหลโดยเฉพาะ CVP โดยใช้ 3D vortex element</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\frac{D}{2}</math> = Characteristic length</li> <li><math>\frac{D}{2u_\infty}</math> = Characteristic time</li> <li><math>\frac{\delta}{D} = 0.5, 1, 2</math></li> <li><math>\frac{u_{jet}}{u_\infty} = 2.5, 5.4, 10.8</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>พบว่าที่บริเวณ Near field นั้น Vortical structure มีการม้วนตัวขึ้นเป็น Vortex ring และกลายเป็น CVP ในที่สุด</li> <li>การ Entrain crossflow ในบริเวณ Far field พบสัดส่วนของ Crossflow fluid ที่เพิ่มขึ้นในบริเวณ Downstream เนื่องจาก CVP ซึ่งจะช่วยให้มีความสามารถในการ Entrainment ของ Crossflow fluid เข้ามาผสมในเจ็ต</li> </ul>

ดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
8	New <i>et al.</i> (2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางที่ปากทางออกเป็นรูปวงรีโดยใช้เทคนิค LIF และทดสอบโดยใช้อุโมงค์น้ำ</li> <li>• ศึกษาผลของ Aspect ratio ต่อการพัฒนาตัวของ CVP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>AR = 0.3 - 3.0</math></li> <li>• <math>VR = 1 - 5</math></li> <li>• <math>R_j = 900 - 5100</math></li> <li>• <math>M_R = \frac{\int \rho_{jet} V_{jet}^2 dA}{\rho_{\infty} U_{\infty}^2 A_{jet}}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• พบว่า Aspect ratio จะมีผลกระทบต่อบริเวณ Near field เท่านั้น</li> <li>• พบว่า Aspect ratio ที่ค่าต่ำๆ จะเกิด CVP ขึ้น 2 คู่โดยจะเริ่มต้นจากด้านข้าง ของลำเจ็ตโดย CVP ที่มีกำลังน้อยกว่าจะถูก Entrainment โดย CVP คู่ที่มีกำลังมากกว่า สำหรับที่ Aspect ratio มีค่ามากนั้นพบว่า มี CVP เกิดขึ้นเพียงคู่เดียวและก่อตัวขึ้นจากลำเจ็ตแต่ Shear layer กับกระแสน้ำขวาง Interface กันจะพัฒนาตัวเป็น WVP คู่เดียวหรือหลายคู่ขึ้นอยู่กับค่า AR และ VR</li> <li>• WVP เกิดขึ้นจากการโค้งตัวนูนออกหรือเว้าเข้าของ Vortex sheet</li> <li>• พบว่ารูปร่างของปากทางออกเจ็ตจะมีผลต่อโครงสร้างของเจ็ตที่บริเวณ Near field แต่กลไกหลักๆของการก่อตัวของโครงสร้างที่ Large scale สำหรับเจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปวงรีทุก</li> </ul>

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
9	Sau <i>et al.</i> (2004)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field ของเจ็ตที่มีปากทางออก เป็นรูปสี่เหลี่ยมใช้ Direct numerical simulation (DNS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Re = 255 และ 300</li> <li><math>r=2.5</math> และ <math>3.5</math> (อัตราส่วนของความเร็วประสิทธิผล)</li> <li><math>u = v = w = 0</math> ที่ผนัง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>โดยที่ CVP นั้นเกิดจาก Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวจากทางผนังทางด้านข้างของเจ็ตไม่ได้เกิดขึ้นจาก Vortex ring</li> <li>พบ Wake vortice structure ที่บริเวณ Downstream</li> <li>Horse shoe ก่อตัวขึ้นทางด้าน Upstream ซึ่งเป็นผลของการปฏิสัมพันธ์ของ Shear layer ที่พื่นกับเจ็ต</li> </ul>

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
10	Muppidi and Mahesh (2005)	<p>การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ</p> <p>1) การไหลแบบปั่นป่วนของเจ็ตในกระแสมวงที่ไหลแบบราบเรียบด้วย DNS (Directional numerical simulation) โดยใช้สภาวะการทดลองเดียวกับ Su and Mungal (2004)</p> <p>2) Two dimension ถูกใช้ในการแสดงการพัฒนาตัวภายในหน้าตัดของเจ็ตและการเกิด CVP โดยจะกำหนดให้สภาวะเริ่มต้นของการพัฒนาตัวในหน้าตัดของเจ็ตนั้นมี</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การศึกษาส่วนที่ 1</li> </ul> $r_{eff} = \left( \frac{\rho_j}{\rho_\infty} r^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 5.7$ <p>Re = 5,000</p> <p><math>\delta_{80\%} = 1.32d</math> ที่ปากทางออกของเจ็ต</p> <p><math>(\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2) = \text{Vorticity magnitude}</math></p> <p><math>\frac{y}{r_{eff}d} = 0.1, 0.5 \text{ และ } 1.0</math></p>	<p>การศึกษาส่วนที่ 1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>เจ็ตนั้นมีความไม่สมมาตรตาม Center streamline และ Vorticity ที่มีขนาดมาก ๆ นั้นจะอยู่ใกล้กับผนังของท่อและบริเวณลำเจ็ต</li> <li>พบว่าที่บริเวณทางด้าน Upstream ของเจ็ตจะสังเกตเห็น Vorticity ของ Cross flow fluid นั้นค่อนข้างจะสม่ำเสมอ และ Laminar -boundary layer</li> <li>ที่บริเวณ Downstream (<math>0 \leq \frac{x}{d} &lt; 6</math>) จะปรากฏบริเวณที่มีค่าของ Low Vorticity</li> </ul>

(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
		<p>ความเร่งคงที่ Pressure riven) และสภาวะสุดท้ายจะถูกกำหนดให้มีค่าของความเร่งคงที่ (Momentum driven) และใช้ Pressure เป็นพื้นฐานในการก่อตัวของ CVP</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การศึกษาส่วนที่ 2</li> </ul> $v = v_j$ $u, w = 0$ $Re = 1,000; 10,000, 100,000$	<p>การศึกษาส่วนที่ 2</p> <p>เริ่มต้นเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตนั้นจะเป็นเส้นโค้ง ในขณะที่สุดท้ายนั้นจะเปลี่ยนเป็นเส้นตรงซึ่งอธิบายได้ว่าที่สภาวะเริ่มต้นนั้นเจ็ตจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่และในสภาวะสุดท้ายนั้นเจ็ตจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>CVP นั้นจะเกิดจาก Vorticity ใน เจ็ต Shear layer และแนะนำว่า ที่เจ็ตนั้นไม่มีความจำเป็นต่อการก่อตัวของ CVP</li> </ul>

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
11	Zaman and Foss (1997)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลของการติด Vortex generators แบบ Tab รูปสามเหลี่ยมซึ่งติดอยู่บนขอบปากเจ็ตรูปวงกลม โดยปากเจ็ตอยู่ในระดับเดียวกับพื้น Test section ทำการทดลองศึกษาปริมาณความเร็ว และ Vorticity ที่หน้าตัดๆ ซึ่งตั้งฉากกับแนวแกน Streamwise โดยใช้ hot-wire anemometer ในการวัด</li> <li>ความเร็ว กระแสลมขวาง <math>U_T = 6.77, 4.18</math> m/s</li> <li>ความเร็วเจ็ต, <math>V_j = 31</math> m/s</li> <li>Tabรูปสามเหลี่ยมซึ่งฐานติดอยู่กับขอบปากเจ็ตมีมุมยอดเท่ากับ <math>90^\circ</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>J = \left( \frac{\rho_j u_j}{\rho_{cf} u_{cf}} \right)^2 = 21.1, 54.4</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การติด Tab รูปสามเหลี่ยมด้านหน้าของปากเจ็ตส่งผลให้ Penetration depth ลดลง เนื่องจากการสันนิษฐานบริเวณด้านหน้าปากเจ็ตมีค่าความดันสถิตย์สูง ประกอบกับบริเวณผนังปากเจ็ตด้านในซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ติด Tab เป็นบริเวณที่มี Pressure gradient สูงที่เรียกว่า “ Pressure hill ” อีกด้วย จึงทำให้บริเวณที่ติด Tab นี้เป็น Primary source ของ Streamwise vorticity โดย</li> <li>ในขณะที่การติด Tab ด้านหลังของปากเจ็ตจะไม่ค่อยส่งผลต่อ Penetration depth เนื่องจากบริเวณพื้นด้านหลังของปากเจ็ตมีความดันสถิตย์ต่ำ</li> </ul>

ตารางที่ 1.2 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะของเจ็ต(JICF)ในกระแสลมขวางที่มีการติด Tab บริเวณปากทางออก



ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
12	Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลกระทบของ Tab ต่อโครงสร้าง Mean flow ของกรณีเจ็ตที่ไม่มีการหมุนควงในกระแสลมขวาง (JICF) และ เจ็ตที่มีการหมุนควง (SJICF)</li> <li>ใช้เจ็ตร้อนในการศึกษาโดยทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิของเจ็ตที่หน้าตัดตาม Downstream. ซึ่ง จะทำการวัดจนถึงระยะ <math>\frac{x}{rd} = 1.0</math></li> </ul>	$d = 32mm$ $\frac{x}{rd} = 0.25, 0.5, 1.0$ $u_{cf} = 2.2 \pm 0.01 \frac{m}{s}$ $\bar{u}_j = 9.5 \pm 0.3 \frac{m}{s}$ <i>crossflow temperature</i> = $29.7 \pm 1.8c^\circ$ $T_j = 77.8 \pm 1.7c^\circ$ $r = \left[ \frac{(\rho_j u_j^2)}{\rho_{cf} u_{cf}^2} \right]^{\frac{1}{2}} = 4$ $\frac{\rho_j}{\rho_{cf}} = 0.86$ $Re_j = 15000$ $Re_{cf} = 4400$ $Fr = \left[ \frac{(\rho_{cf} - \rho_j)gd}{\rho_j u_j^2} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.02$ $Sr = \frac{w_p}{u_j}$ $C_{TG} = \frac{(T - T_{cf})}{(T_j - T_{cf})}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>กรณีเจ็ตไม่หมุนควงซึ่งติด Tab ที่ตำแหน่งต่างๆ 8 ตำแหน่งนั้นสามารถสรุปได้ข้อสังเกต 5 ประเด็นดังนี้ 1) กรณีติด Tab ที่ Sr0-W และ Sr0-L การกระจายตัวของอุณหภูมิจะมีรูปร่างคล้ายกับกรณีที่ไม่ติด Tab คือมีลักษณะเป็นรูปไตที่สมมาตร 2) กรณีติด Tab ที่กรณี Sr0-PW (SW) พบว่ามีรูปร่างแตกต่างไปจากกรณีที่ไม่ติด Tab มีความคล้ายคลึงกับ CVP น้อยลงมากและไม่มี ความสมมาตรมากขึ้นและผลของการติด Tab ที่ตำแหน่งนี้มีข้อสังเกตที่สำคัญคือจะมีผลต่อโครงสร้างของเจ็ตโดยรวมเป็นอย่างมากและแบบค่อนข้างถาวร 3) กรณีติด Tab ที่ Sr0-P (S) มีรูปร่างขอบเจ็ตนั้นจะคล้ายรูปไตที่ไม่สมมาตรเจ็ตด้านที่ติด Tab นั้นจะมีอุณหภูมิโดยรวมต่ำกว่าและ Lobe จะอยู่ต่ำกว่า Lobe ด้านที่ไม่ติด Tab ซึ่งจะมีอุณหภูมิโดยรวมสูงกว่าและจะอยู่สูงกว่ามีลักษณะของโครงสร้างเป็นรูปจุลภาค</li> </ul>

(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
				<p>4) กรณีติด Tab ที่ Sr0-PL(SL)พบว่ารูปร่างของเจ็ดคล้ายกับกรณี Sr0-P (S) แต่ขอบด้านล่างของ Lobe ด้านที่ติด Tab นั้นจะอยู่ต่ำกว่าด้านที่ไม่ติด Tab 5)กรณีติด Tab ที่ ด้านข้างในทุกกรณีพบว่าจะทำให้รูปร่างของเจ็ดไม่สมมาตร Lobe ด้านที่ติด Tab จะมีอุณหภูมิโดยรวมต่ำกว่าและขอบด้านล่างจะอยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่า Lobe ด้านที่ไม่ติด Tab</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• กรณีเจ็ดหมุนควงซึ่งติด Tab ที่ตำแหน่งต่างๆ 8 ตำแหน่งนั้นสามารถสรุปได้ข้อสังเกต 2 ประเด็น ดังนี้ 1)กรณีติด Tab ที่ตำแหน่ง (P,PW,W,SW) พบว่ามีการพัฒนาตัวในลักษณะที่แตกต่างจากกรณีที่ไม่ติด Tab ค่อนข้างมาก</li> </ul>

(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
				<p>2) กรณีติด Tab ที่ตำแหน่ง (S,SL,LและPL)พบว่าเจ็ทนั้นมีรูปร่างการกระจายตัวคล้ายกับกรณีที่ไม่ติด Tab ทั้งนี้ในกรณีที่ติด Tab ที่ตำแหน่ง S และ SL พบว่ามีรูปร่างคล้ายกันมากและทั้งสองกรณียังพบลักษณะ Core ที่ฉีกขาดเป็นสองส่วนในบางหน้าตัดอีกด้วย</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• พบว่าอุณหภูมิสูงจะอยู่ที่ตำแหน่งด้าน Suction</li> <li>• ในบริเวณที่มีความไวต่อโครงสร้างการไหลมากที่สุดก็คือตรงกลางระหว่างตำแหน่ง Pressure windward (PW) ไปจนถึง Windward (W)</li> <li>• แนะนำว่าการพัฒนาตัวของ Skewed mixing layer เป็นผลให้เกิดการก่อตัวของ CVP</li> </ul>

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
13	M'closkey <i>et al.</i> (2002)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาเจ็ตในกระแสลมวางโดยการกระตุ้นด้วยเสียงจากลำโพง</li> <li>ใช้ Liquid paraffin solution สำหรับสร้างควันให้กับเจ็ต</li> <li>แสงสว่างสีขาวติดตั้งไว้ด้านบนหน้าตัดทดสอบด้วยกำลังไฟขนาด 500 Watt</li> <li>วิธีการทางภาพถ่ายด้วยกล้องถูกนำมาใช้บันทึกผลการทดลอง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>d_j = 0.75\text{cm}</math></li> <li><math>R = 2.58</math></li> <li><math>R_e = 1500</math></li> <li>Frequency=40 ถึง 1,640 Hz</li> <li><math>U_j = 3.1\text{m/s}</math>, <math>U_\infty = 1.2\text{m/s}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Random excitation ไม่ได้ช่วยปรับปรุงการผสม</li> <li>ค่า Amplitude สูงสุดของเจ็ตที่มีการตอบสนองจากการกระตุ้นด้วยความถี่ 73.5 Hz และการตอบสนองของการม้วนตัวของเจ็ตจะหยุดหลังจากที่ความถี่เกิน 100 Hz</li> <li>ค่าที่เหมาะสมของการพุ่งทะลุผ่านและการกระจายตัวของเจ็ตในกระแสลมวางโดยการกระตุ้นด้วย Square wave จะอยู่ที่ Subharmonics ของค่าความถี่ธรรมชาติของ Vortex shedding ของเจ็ต</li> </ul>

ตารางที่ 1.3 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลกระทบของการควบคุมเจ็ต (JICF) ในกระแสลมวาง

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
14	Han and Mungal (2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาเส้นทางและคุณลักษณะของการผสม โดยการปรับตำแหน่งมุมในการฉีดของเจ็ต</li> <li>การศึกษาคือจะอาศัยเทคนิค Mie - scattering และ Image-processing และใช้ Alumina เป็น Dye ในการ Seeding</li> <li>ปากเจ็ตจะอยู่ห่างจากผนังพื้น 10 เซนติเมตร โดยท่อของเจ็ตนั้นจะยึดติดกับท่อยึดหยุ่น</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\theta = -45</math> ถึง <math>45</math></li> <li><math>r = \left( \frac{\rho_j V_j}{\rho_\infty V_\infty} \right)^{\frac{1}{2}}</math> <math>= 5 - 20</math></li> <li><math>d = 4.6</math> มิลลิเมตร</li> <li><math>Re = 10.3 \times 10^3 - 5.2 \times 10^3</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>มุมของการฉีดเจ็ตที่ตำแหน่งมุมเป็นลบ (ด้าน Upstream) จะมีโครงสร้างของเจ็ตที่ใหญ่กว่าที่ตำแหน่งมุมทางด้านบวก (Down stream) โดยกำหนดให้ทิศทางที่ตั้งฉากกับกระแสลมขวางเท่ากับศูนย์</li> <li>เส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตจะสเกลเทียบกับ <math>rd</math> พบว่าที่ <math>r=10</math> และ <math>20</math> นั้น จะมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยที่ <math>r=5</math> นั้นจะให้ผลที่แตกต่าง</li> <li>คุณลักษณะของการผสมที่มีประสิทธิภาพสูงจะอยู่ที่ตำแหน่งมุมฉีดเป็นลบ</li> </ul>

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
15	Narayanan <i>et al.</i> (2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ศึกษา Dynamic และการควบคุมเจ็ตในกระแสมขวางด้วย Spinning valve actuator กระตุ้นด้วยความถี่ระหว่าง 100 – 1,600 Hz</li> <li>• ปากทางออกเจ็ตเป็นรูปวงกลม</li> <li>• ใช้เทคนิค Mie scattering visualization</li> <li>• ใช้กล้อง NAC เป็นกล้องที่มีความเร็วสูง (200 Frame/sec)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>Re_j = 5,000</math></li> <li>• <math>r = 6</math></li> <li>• <math>Re_{cf} = 2.75 \times 10^4</math></li> <li>• <math>\frac{\delta}{D_j} &lt; 0.3</math></li> <li>• <math>0.012 &lt; Sr_D &lt; 0.2</math> (เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ต)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• การกระตุ้นที่ความถี่ต่ำ พบว่า Vortice จะเพิ่มขึ้นในขณะที่เจ็ตที่พุ่งออก และ โค้งตัวตามกระแสมขวางและกระตุ้นที่ความถี่สูง พบว่าจะช่วยทำให้การกระจายตัวของเจ็ตที่ปากทางออกเพิ่มสูงขึ้น</li> <li>• พบว่าการกระตุ้นที่ความถี่ต่ำจะช่วยเพิ่มการผสมระหว่างเจ็ตกับกระแสมขวางสูงกว่าการกระตุ้นที่ความถี่สูง</li> <li>• พบว่า Flow จะมีความถี่สูงที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของเจ็ตและ มีความถี่ต่ำที่ระยะห่างจากปากเจ็ตตามทิศทางของกระแสมขวาง</li> <li>• กรณีที่กระตุ้นเจ็ตที่ความถี่ 650 และ 1,500 Hz นั้นจะมีการ Entrainment มากกว่าเจ็ตที่ไม่กระตุ้น</li> </ul>

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
Over heat ratio	0.8
Output voltage range	0-5 volt
$k^2$	0.056 (จากการสอบเทียบ)
$h^2$	1.047 (จากการสอบเทียบ)
Velocity uncertainty	5.2%

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับ Hot-film sensor

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์
ความเร็วเจ็ตเฉลี่ย ( $U_{j,m/s}$ )	$15.65 \pm 0.8$
ความเร็วเจ็ตที่จุดศูนย์กลางเจ็ต ( $m/s$ )	$19.4 \pm 1$
ความเร็วของกระแสลมขวาง ( $U_{cf}, m/s$ )	$4.05 \pm 0.21$
อัตราส่วนความเร็ว ( $r_v$ )	$3.87 \pm 0.28$
Reynolds number ของเจ็ต	23,500
Reynolds number ของกระแสลมขวาง	6,100
อัตราส่วนเชิงมวล ( $r_m, \%$ )	2.0

ตาราง 3.1 รายละเอียดพารามิเตอร์ในการทดลองและค่าความคลาดเคลื่อน

ตำแหน่ง (x,z)	ความหนาของชั้นขอบเขต (mm)
-4.1d, -1.5d	8.1
-4.1d, -1.d	7.4
-4.1d, -0.5.d	8.6
-4.1d, 0.5.d	7.1
-4.1d, 1.d	8.1
-4.1d, 1.5d	7.9

ตาราง 3.2 ความหนาของชั้น Boundary layer ของแต่ละ ตำแหน่งตามแนว Spanwise (z)

กรณี	ค่า $A$	ค่า $m$
JICF	1.46	0.37
I15	1.03	0.51
Kamotani and Greeber (1972) (Velocity trajectory)	1.33	0.36
Wangiraniran (2005) กรณี $Sr0$ (Temperature trajectory)	1.12	0.29

ตาราง 3.3 เปรียบเทียบค่า  $A$  และ  $m$  ของ CC และ CM

ค่า	กรณี	CC		CM	
		ค่า $A$	ค่า $m$	ค่า $A$	ค่า $m$
$w$	JICF	1.17	0.46	1.14	0.45
	I15	0.77	0.36	0.77	0.35
$C_{UG}$	JICF	1.13	0.63	1.26	0.6
	I15	0.92	0.77	0.78	0.44

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบกับ ค่า  $A$  และ  $m$  ของการทดลอง กับ ผลการทดลองของ Kamotani and Greeber (1972) และ Wangiraniran (2005)

$x/rd$	JICF	I15	JICF	I15	$\lambda$
	$y/rd$	$y/rd$	$\dot{V}_j / \dot{V}_0$	$\dot{V}_j / \dot{V}_0$	
0.25	0.876	0.489	3.99	4.88	0.22
0.5	1.11	0.711	5.71	6.34	0.11
0.75	1.378	0.956	6.69	6.95	0.04
1	1.44	1.022	8.26	8.42	0.02
1.5	1.711	1.267	10.17	9.98	-0.02
2	1.867	1.422	12.20	11.67	-0.04
2.5	2.089	1.644	13.52	12.54	-0.07
3	2.178	1.844	15.41	13.35	-0.13
3.5	2.33	1.911	16.71	14.90	-0.11
4	2.4	2.044	18.43	15.85	-0.14

ตารางที่ 3.5 ค่า การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) ของการทดลองที่ ระยะต่างๆ ตามแนว Downstream ( $x$ )





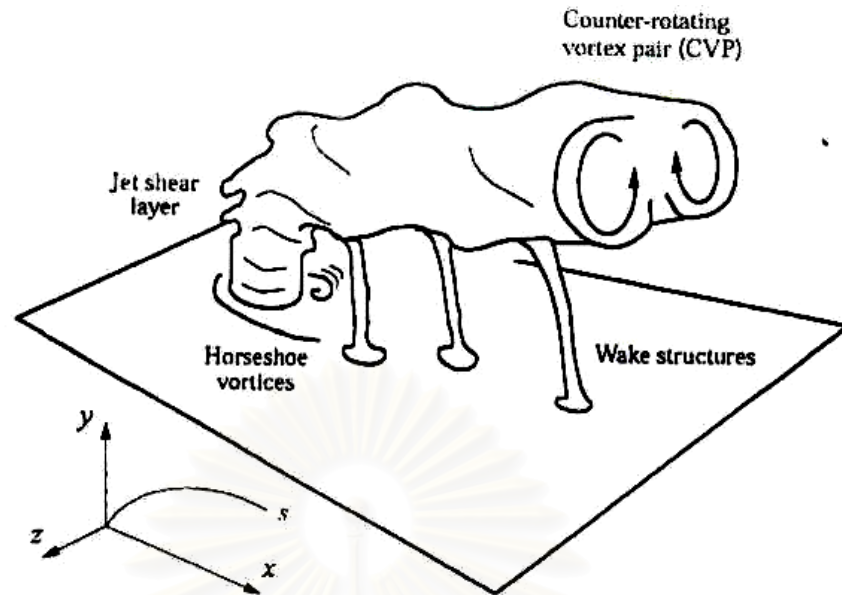
## ประมวลรูปภาพ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

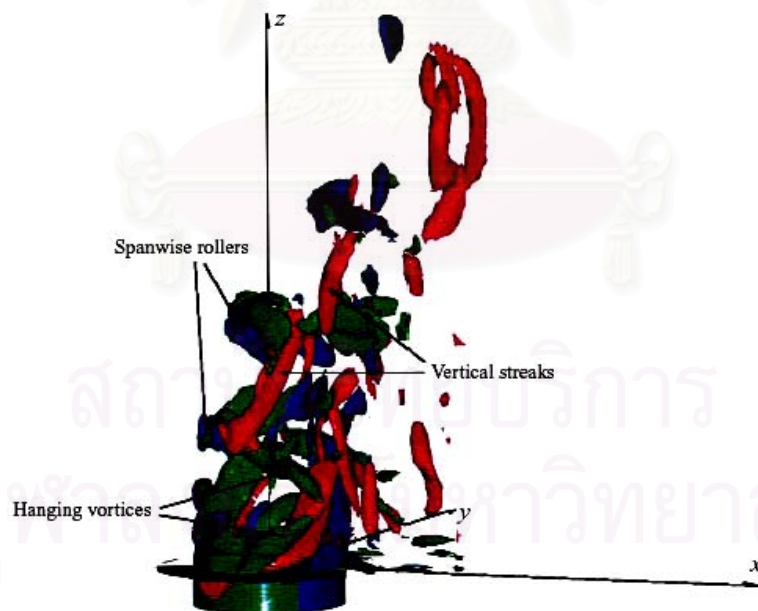


รูปที่ 1.1 การไหลแบบเจ็ทในกระแสลมขวางที่เกิดจากการระบายอากาศเสียจากปล่องควัน และการระบายความร้อนที่ผิวของ Turbine blade

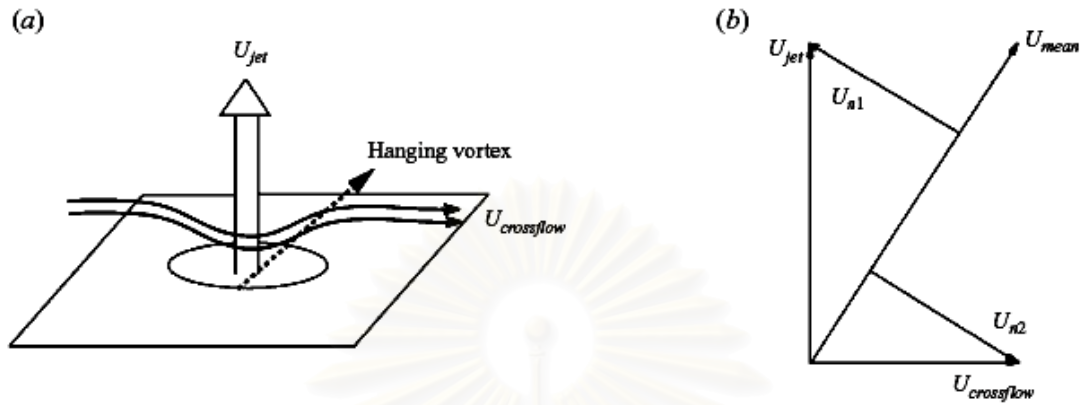
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ทในกระแสดม  
ขวาง (Fric and Roshko, 1994)



รูปที่ 1.3 โครงสร้างของ Turbulent jet บริเวณใกล้ปากทางออกของเจ็ท  
(Yuan *et al.* 1999)



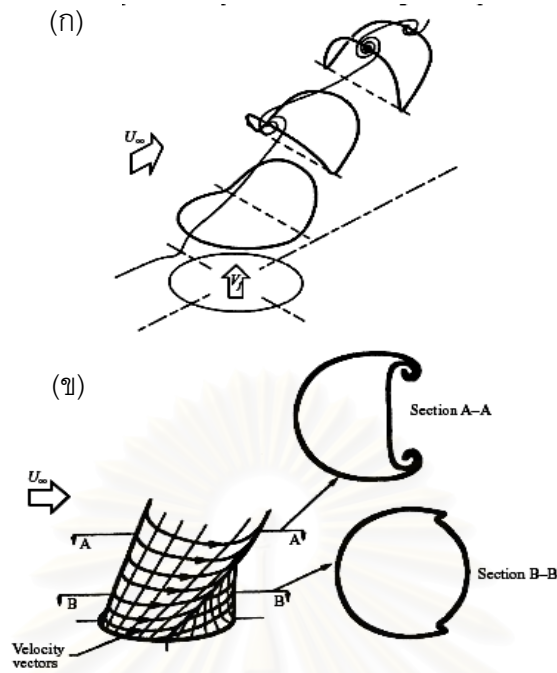
รูปที่ 1.4 โครงสร้างของ Hanging vortices (Yuan *et al.* 1999)

(ก) Schematic ของ Hanging vortices

(ข) Vector ความเร็วซึ่งแสดงกลไกของการเกิด Hanging vortices



รูปที่ 1.5 ภาพ Flow pattern ที่ได้จากการใส่ Trace ที่บริเวณผนังเจ็ต (Lim *et al.* 2003)

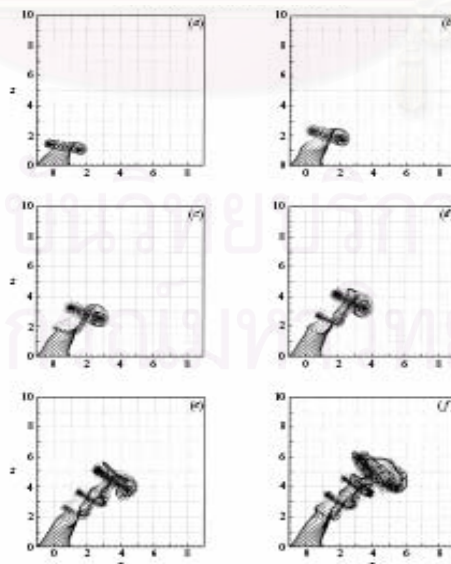


รูปที่ 1.6 โครงสร้างของการเกิด CVP ( Vortex ring )

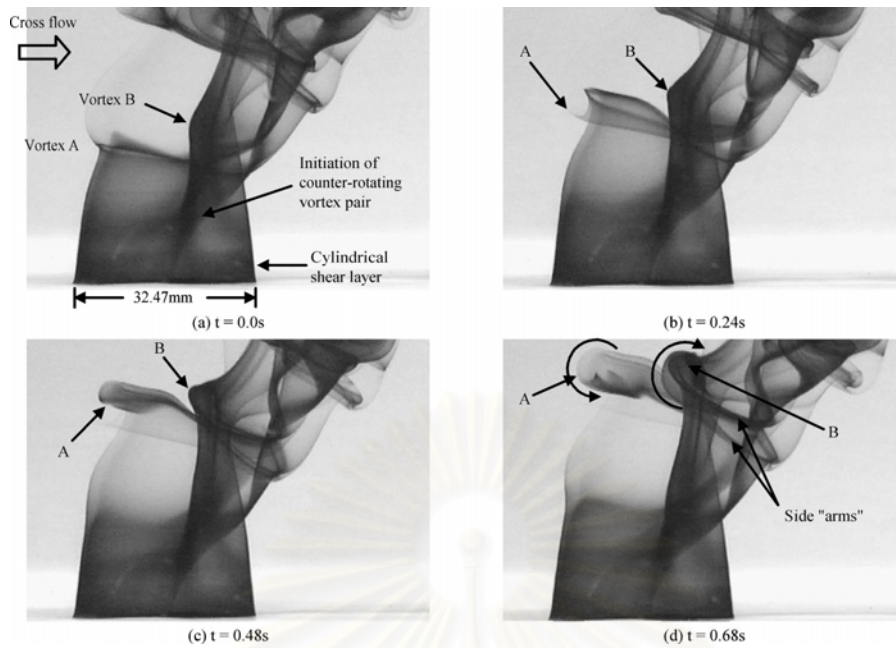
ก) Isometric ของเจ็ต Shear layer vortex ring

ข) Schematic diagram ของการเปลี่ยนตำแหน่ง  
ของ Shear layer vorticity

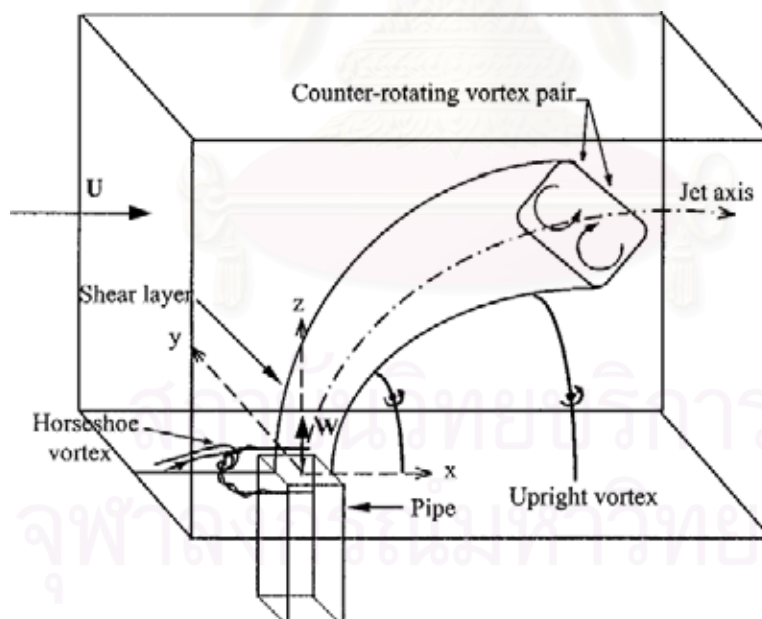
(Cortelezzi and Karagozian, 2001 after Kelso *et al.* 1996)



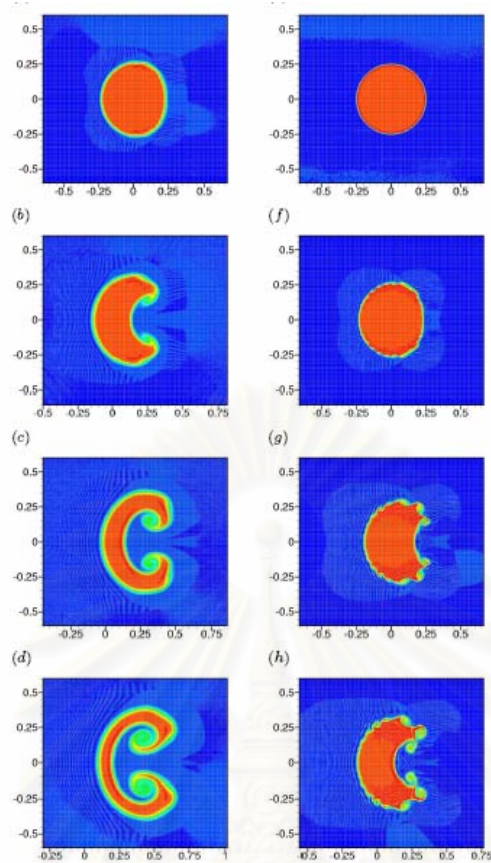
รูปที่ 1.7 ภาพด้านข้างของการพัฒนาตัวของเจ็ตใน กระแสลมขวาง ที่  $U_{jet} / U_\infty = 5.4$  (Cortelezzi and Karagozian, 2001)



รูปที่ 1.8 Sequent ของการ พับตัวของ Cylindrical shear layer (Lim *et al.* 2001)



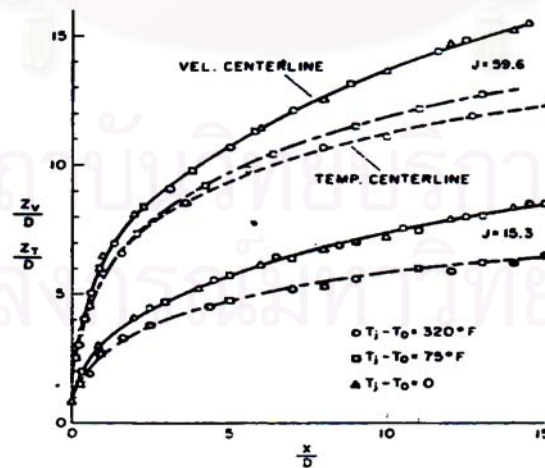
รูปที่ 1.9 Schematic diagram ของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Sau *et al.* 2004)



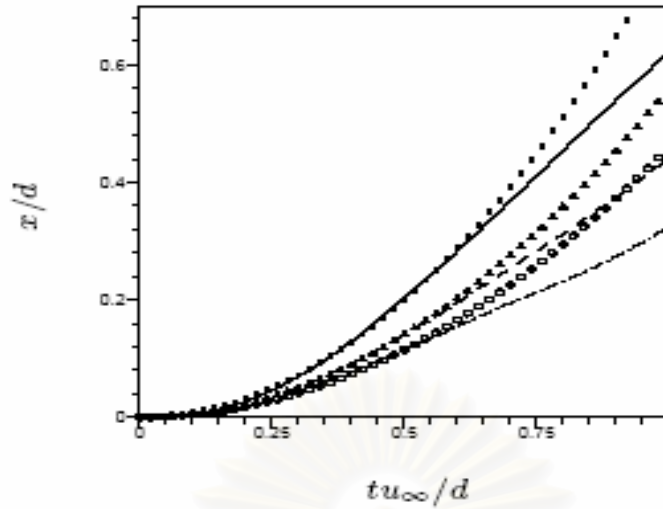
รูปที่ 1.10 การพัฒนาตัวของ CVP (Muppidi and Mahesh, 2005a)

(ก)  $Re = 1,000$

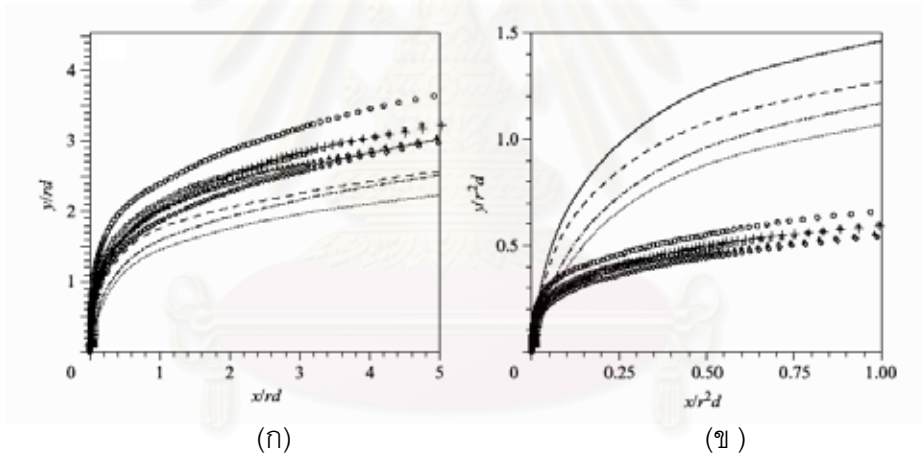
(ข)  $Re = 10,000$



รูปที่ 1.11 Trajectory ของความเร็วและอุณหภูมิในกรณี  $T_j - T_0 = 0$ ,  $T_j - T_0 = 75$  F และ  $T_j - T_0 = 320$  F (Kamotani and Greber, 1972)



รูปที่ 1.12 Quadratics curve fit ของแต่ละ Trajectory โดย (Muppidi and Mahesh, 2005a)  
 : Re=1,000 - - - - - : Re =10,000 - · - - - : Re = 100,000



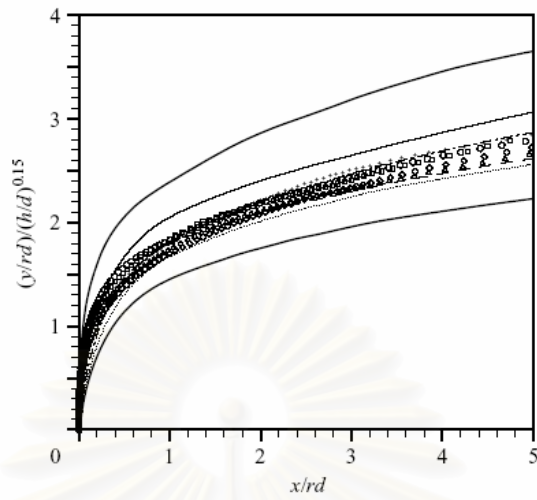
—, I; - - - - , II; — · —, III; ·····, IV; □, V; △, VI; +, VII; ◇, VIII; ○, IX.

Case	Velocity ratio $r$	Jet inlet profile	Crossflow boundary layer $\delta_{99\%}$
I	1.52	Parabolic	1.32d
II	1.52	Mean-turbulent	1.32d
III	1.52	Parabolic	0.44d
IV	1.52	Mean-turbulent	0.44d
V	5.7	Parabolic	1.32d
VI	5.7	Mean-turbulent	1.32d
VII	5.7	Parabolic	0.44d
VIII	5.7	Mean-turbulent	0.44d
IX	5.7	parabolic	6.4d

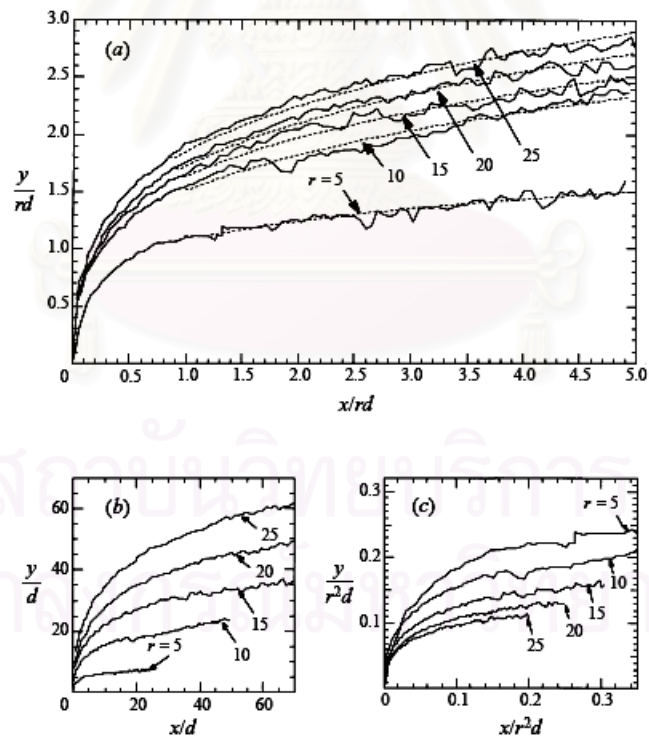
TABLE 1. Conditions for the various simulations performed.

รูปที่ 1.13 ผลการเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ต Scale โดย (ก)  $rd$  และ (ข)  $r^2d$  (Muppidi and Mahesh, 2005b)

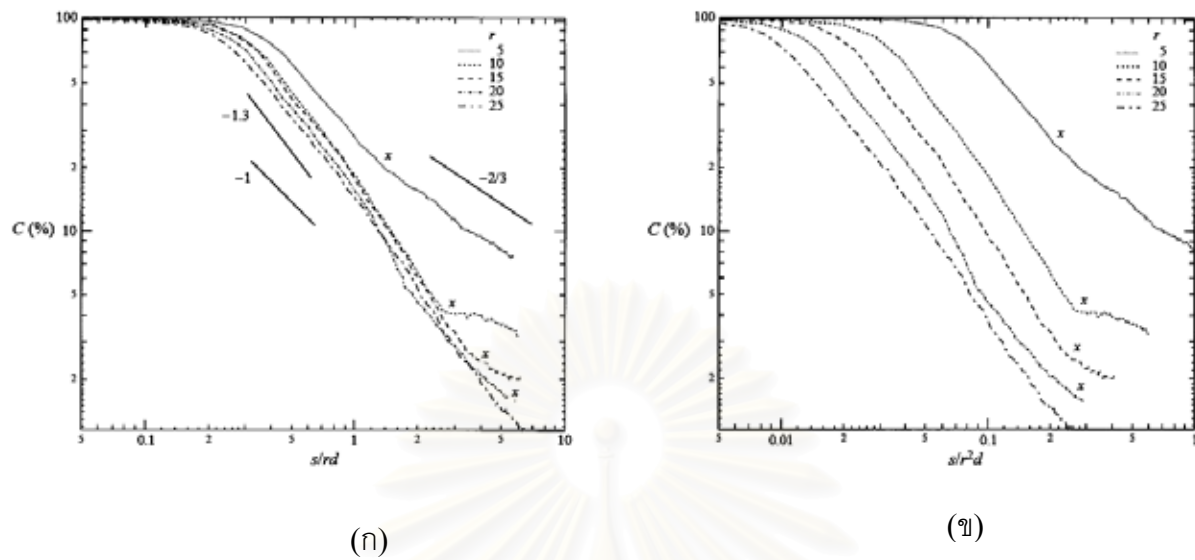




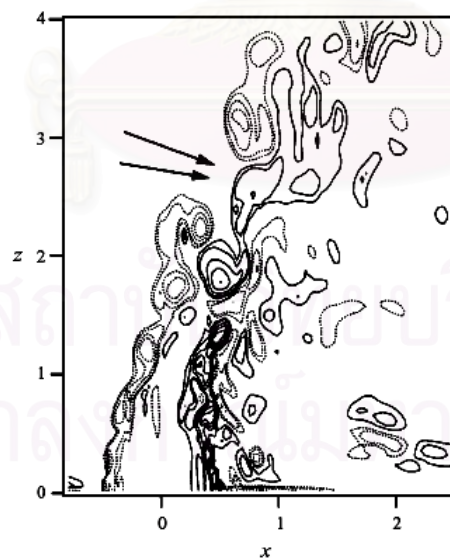
รูปที่ 1.14 Scale เส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตด้วย “ $h$ ” (Muppidi and Mahesh, 2005b)



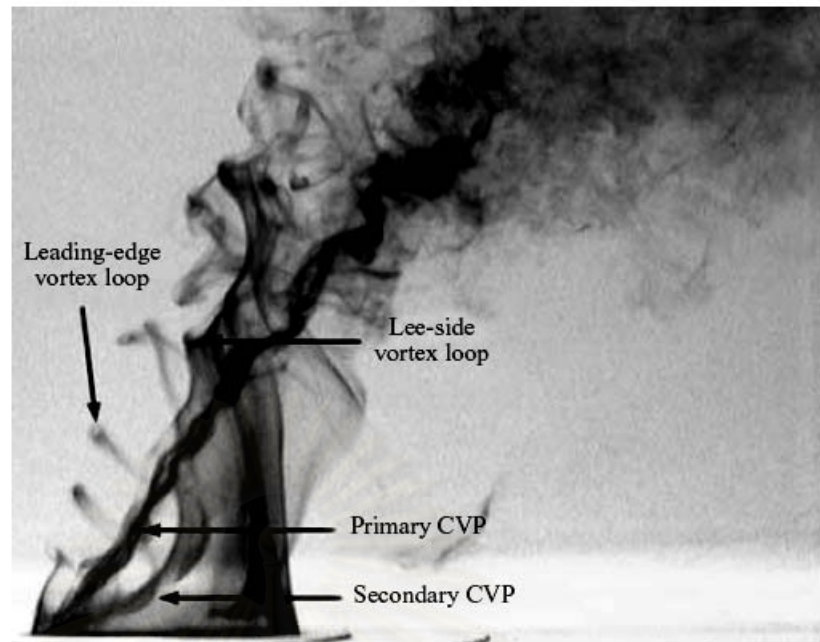
รูปที่ 1.15 Centerline concentration trajectory (Smith and Mungal, 1998)



รูปที่ 1.16 เส้นทางของ Centerline concentration decay ตามแนว  $S$   
 (ก) กรณีสเกลด้วย  $s/rd$  และ (ข) กรณีสเกลด้วย  $s/r^2d$  (Smith and Mungal, 1998)



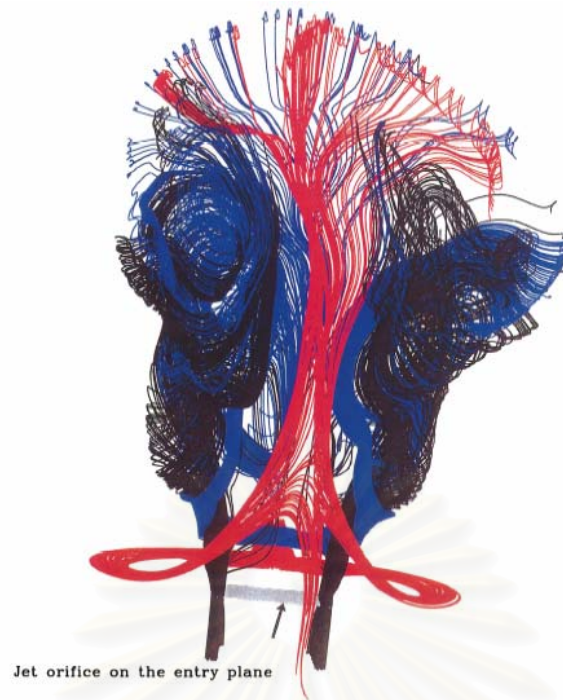
รูปที่ 1.17 โครงสร้างของ Spanwise rollers ซึ่งแสดงเป็น Instantaneous contour ของ Spanwise vorticity ( $\omega_z$ ) โดยเส้นประแสดงค่าลบ (Yuan *et al.* 1999)



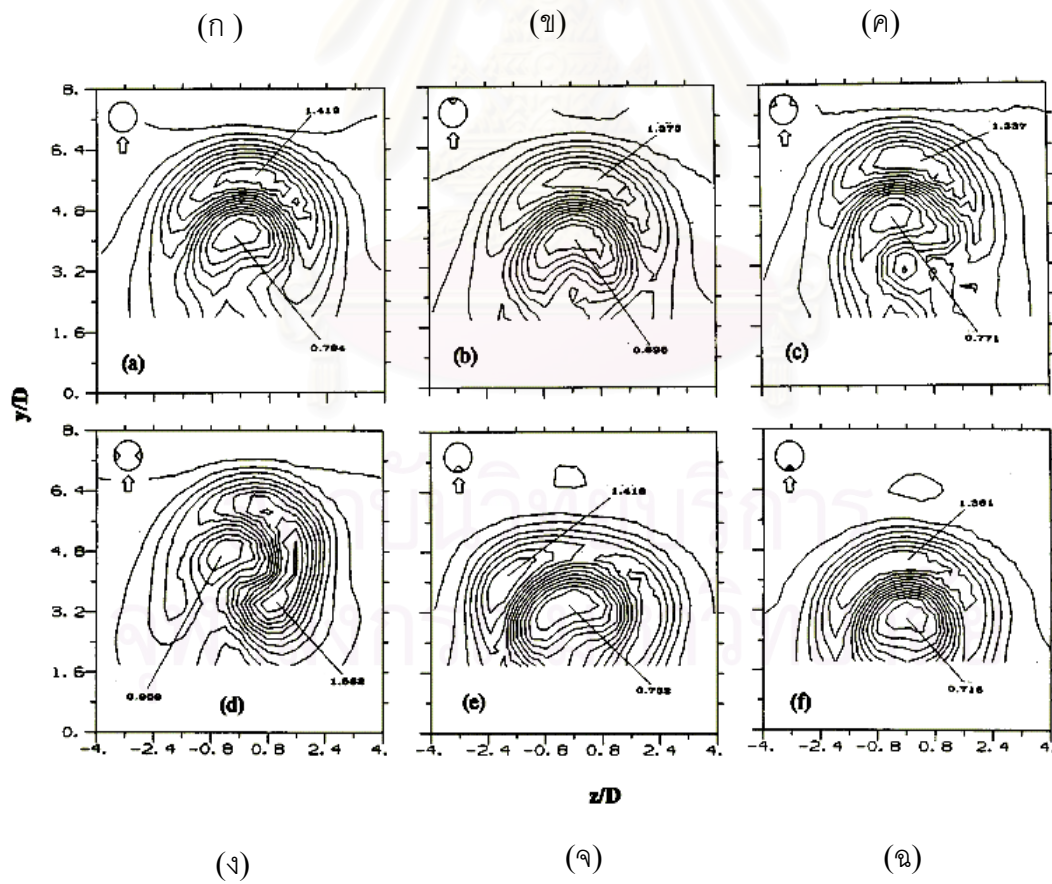
รูปที่ 1.18 โครงสร้างของ Laminar jet โดยการฉีดสีใกล้ปากทางออกของเจ็ต (New *et al.*, 2003)



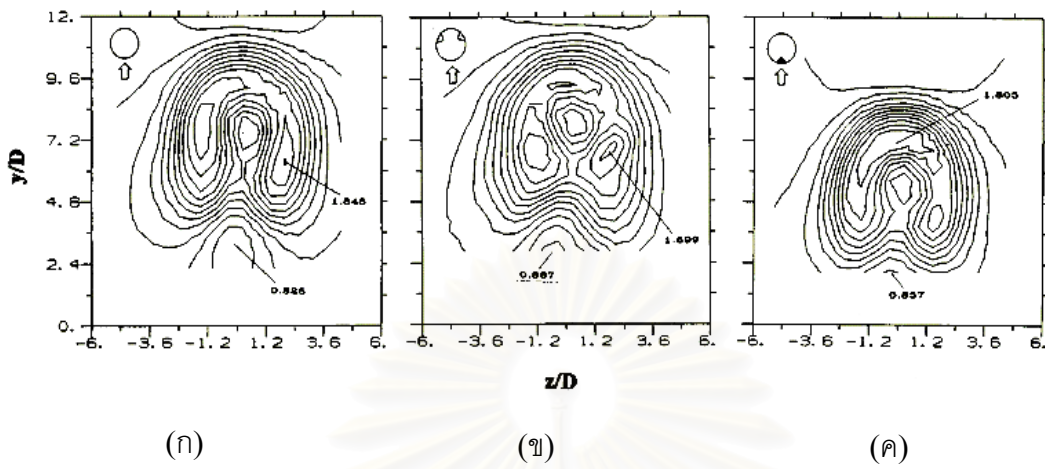
รูปที่ 1.19 วิวัฒนาการของ Streamlines ในการก่อตัวของ Kelvin – Helmholtz Vortex ที่  $t = 21.0$ ,  $Re = 225$  และ  $R = 2.5$  (Sau *et al.* 2004)



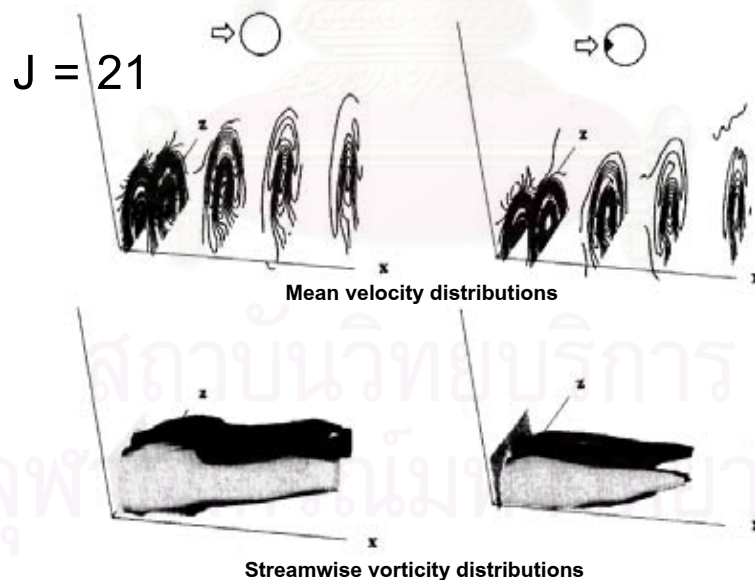
รูปที่ 1.20 วิวัฒนาการใน 3D ของ Instantaneous ของ Streamlines (Sau *et al.* 2004)



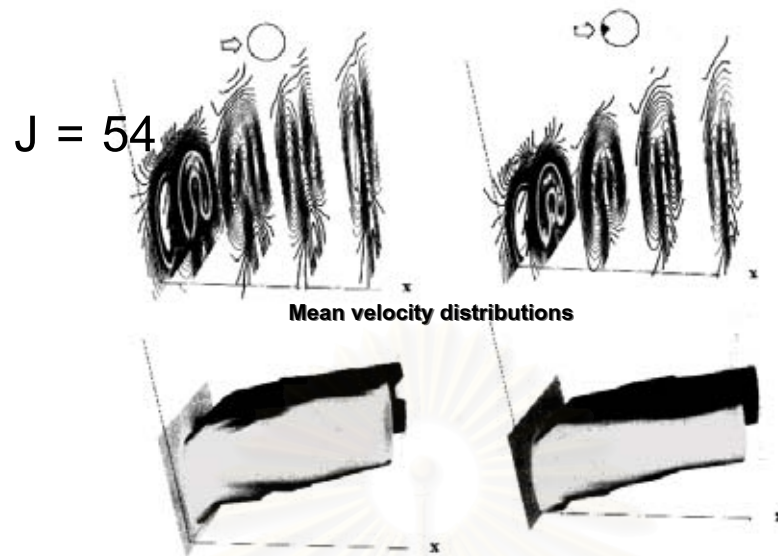
รูปที่ 1.21 รูปทางด้านบนแสดง Contour ของความเร็วเฉลี่ย ( $U/U_T$ ) ที่หน้าตัด  $x/D = 4$  โดยมีค่า momentum-flux ratio,  $J = 21$  ในกรณีที่ติดตั้ง Delta tab (รูป ก - จ) และ Triangula tab (รูป ฉ) (Zaman and Foss, 1997)



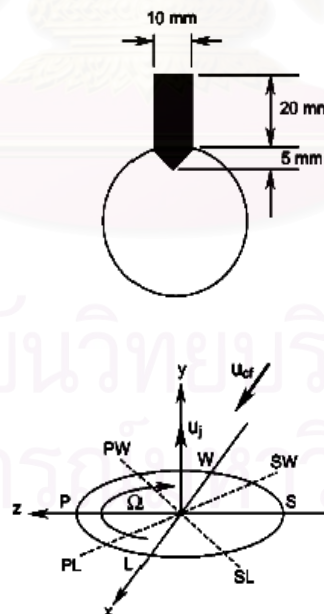
รูปที่ 1.22 รูปทางด้านบนแสดง Contour ของความเร็วเฉลี่ย ( $U/U_T$ ) ที่หน้าตัด  $x/D = 4$  โดยมีค่า momentum- flux ratio,  $J = 54$  ในกรณีที่ไม่ติด Delta tab (รูป ก และ ข) และ Triangular tab (รูป ค) (Zaman and Foss, 1997)



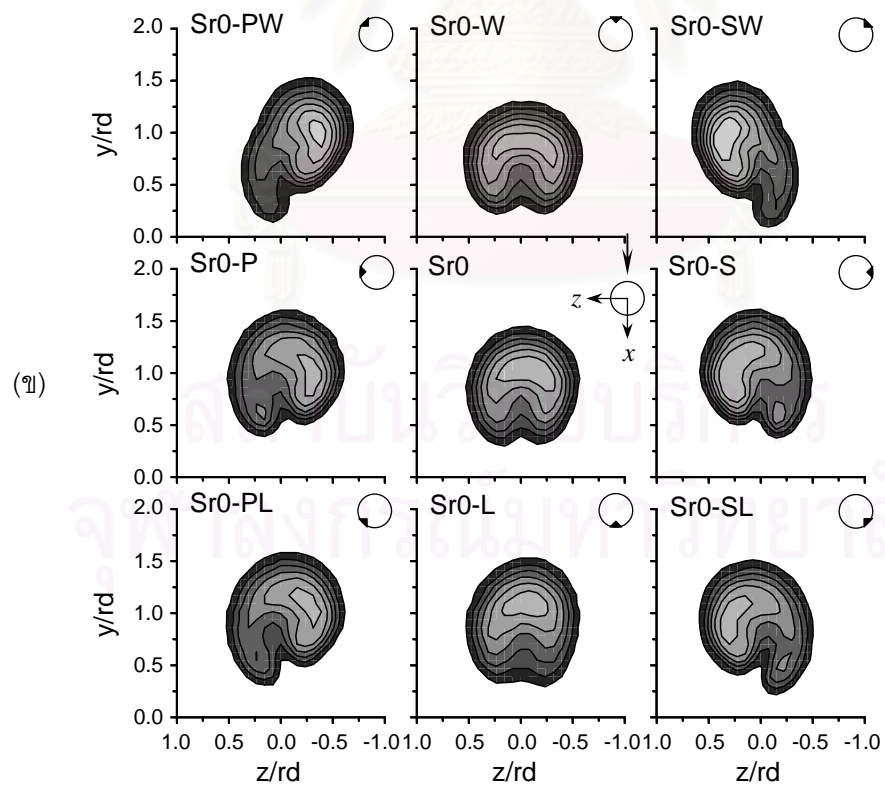
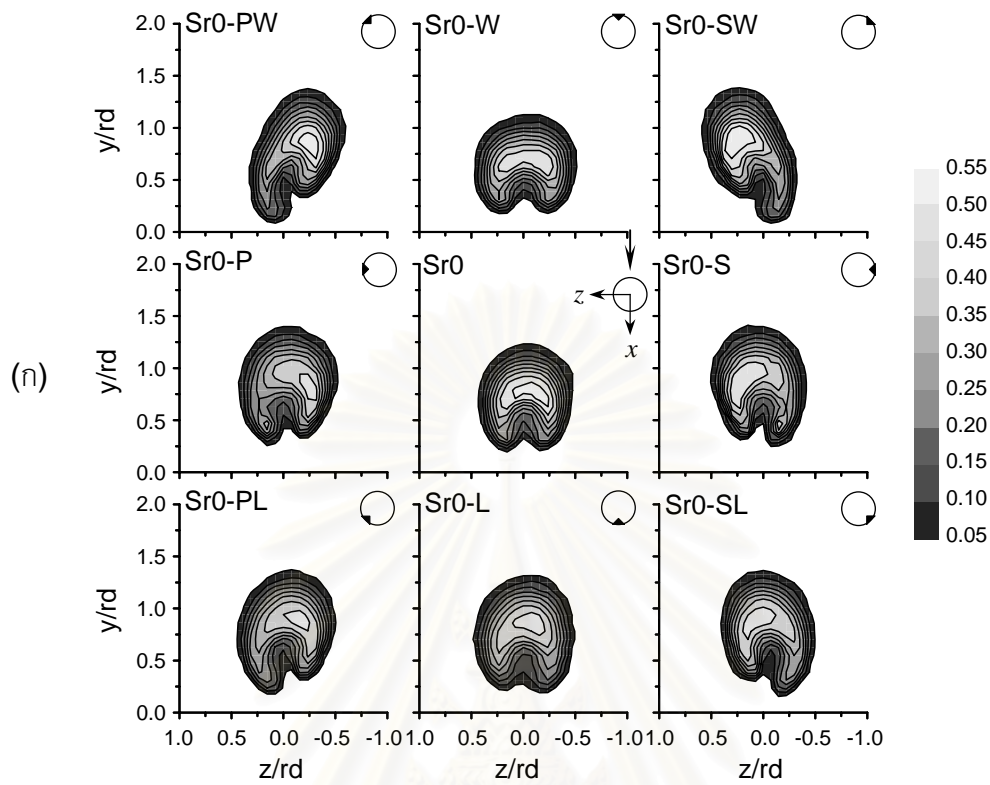
รูปที่ 1.23 การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยและ Streamwise vorticity แบบ Perspective view ที่หน้าตัด  $x/D = 2, 4, 8, 12$  และ  $16$  ในกรณีที่ไม่ติด Tab และติด Triangular tab ที่ ด้าน Windward ตามลำดับ (Zaman and Foss, 1997)

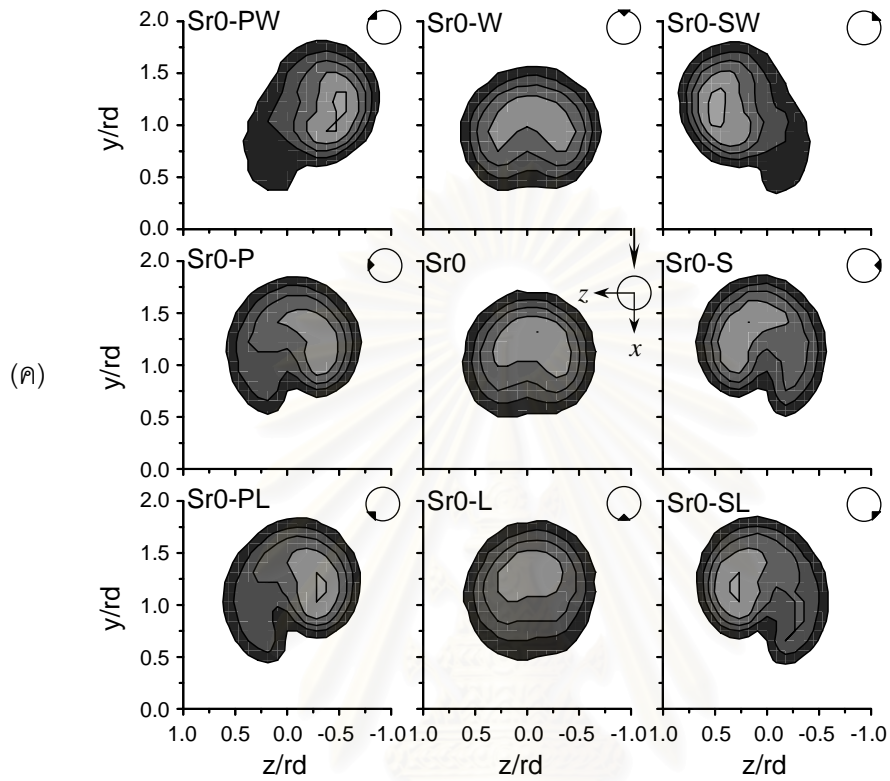


รูปที่ 1.24 แสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยและStreamwise vorticity แบบ Perspective view ที่หน้าตัด  $x/D = 2, 4, 8, 12$  และ  $16$  ในกรณีที่ไม่ติด Tab และติด Triangular tab ที่ด้าน Windward ตามลำดับ (Zaman and Foss, 1997)



รูปที่ 1.25 (ก) Tab และการติดตั้ง Tab (ข) ระบบแกน ตั้งฉากกับทิศทางการหมุน (Bunjajitradulya and Sathapornnanon, 2005)

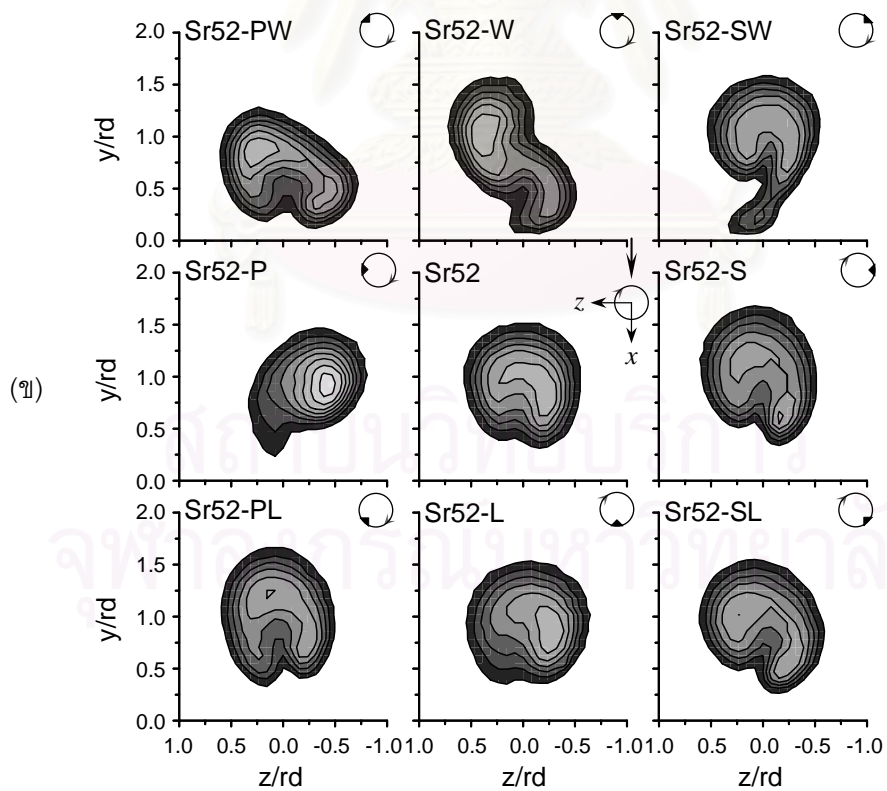
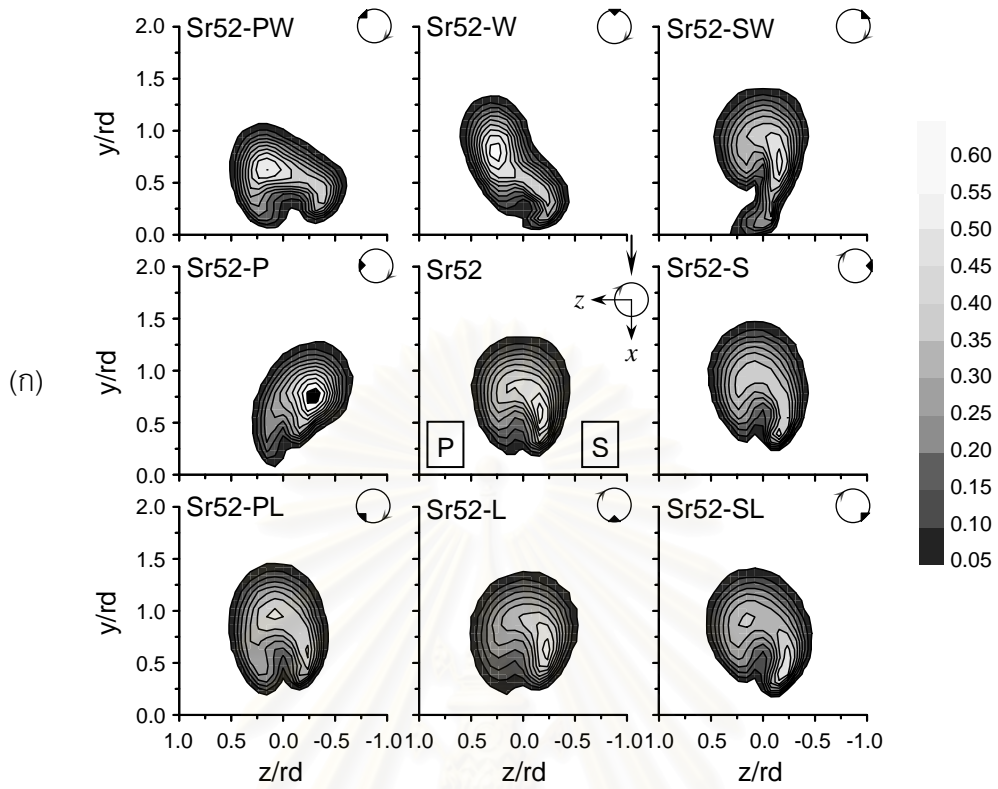


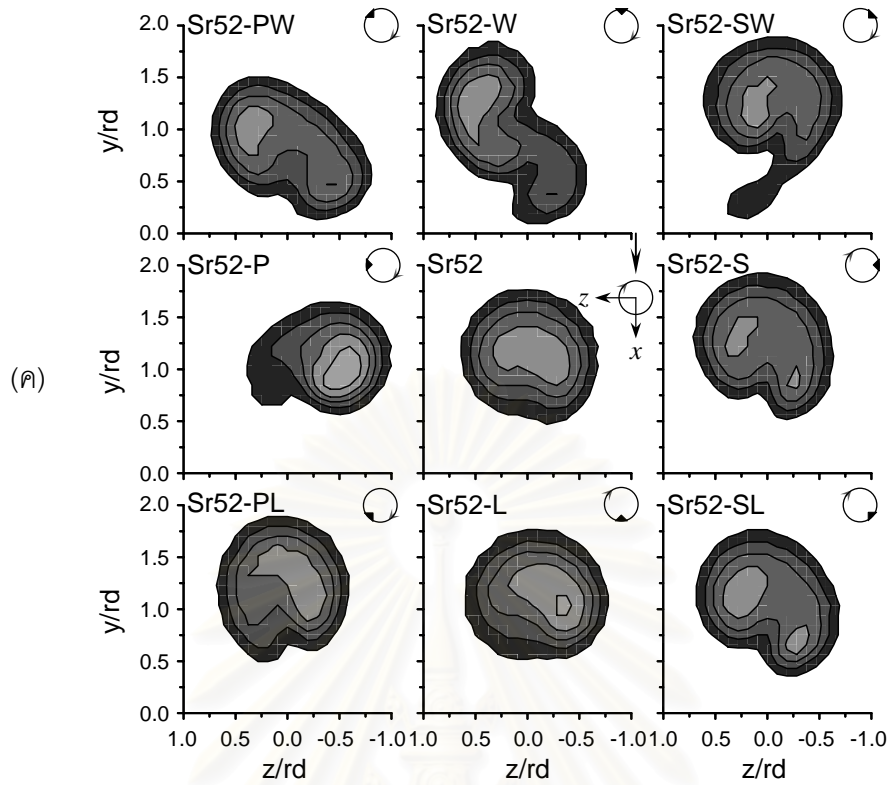


รูปที่ 1.26 การกระจายตัวของอนุกรม  $C_{TG}$  ใน Crossplane ตามทิศทาง Downstream ที่ ปาก ทางออกของเจ็ตรถไฟไม่หมุนควงที่ระยะ  $x/rd =$  (ก) 0.25, (ข) 0.5, (ค) 1.0 ( Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005 )

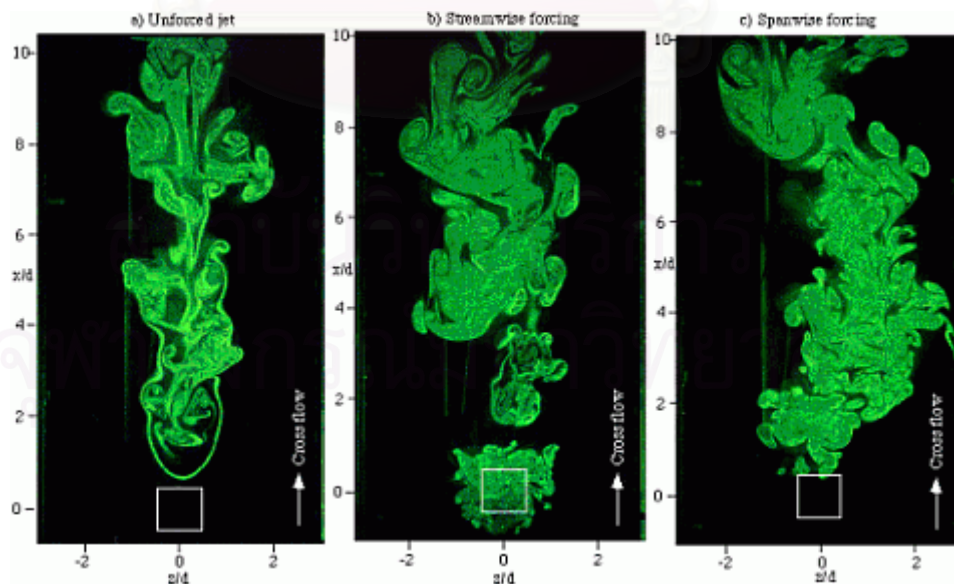
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



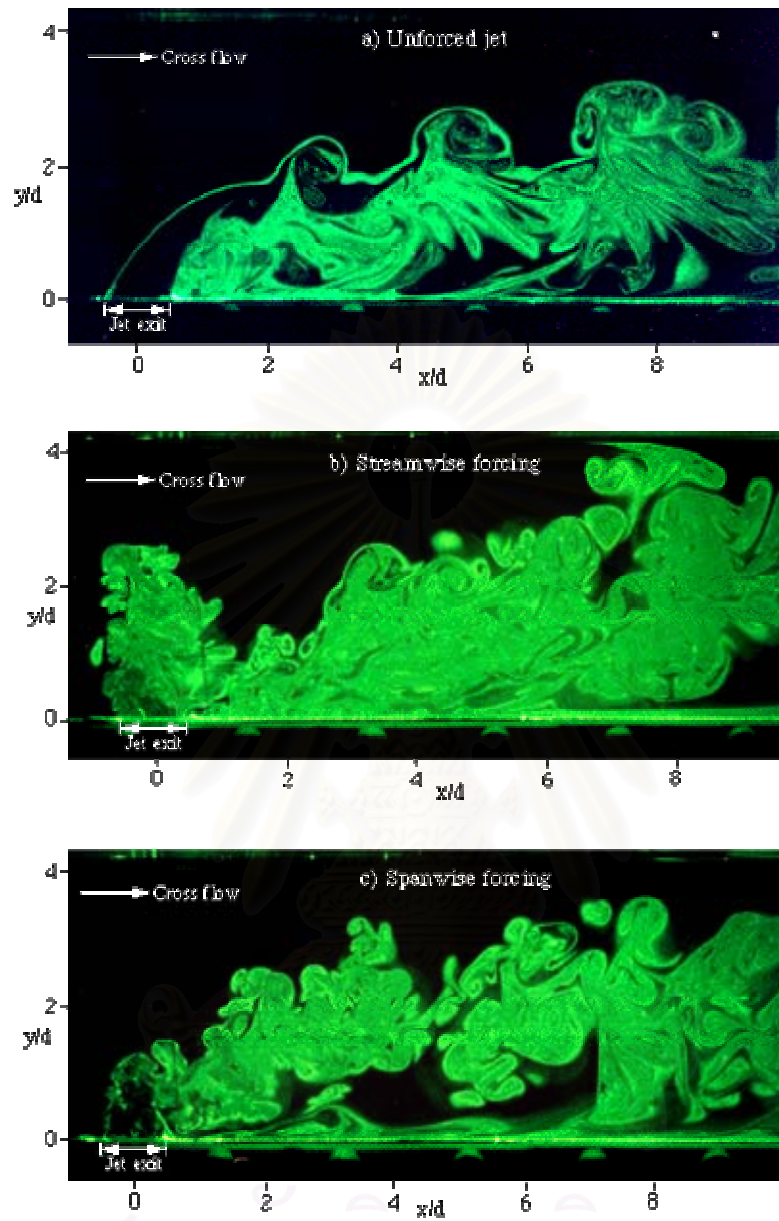




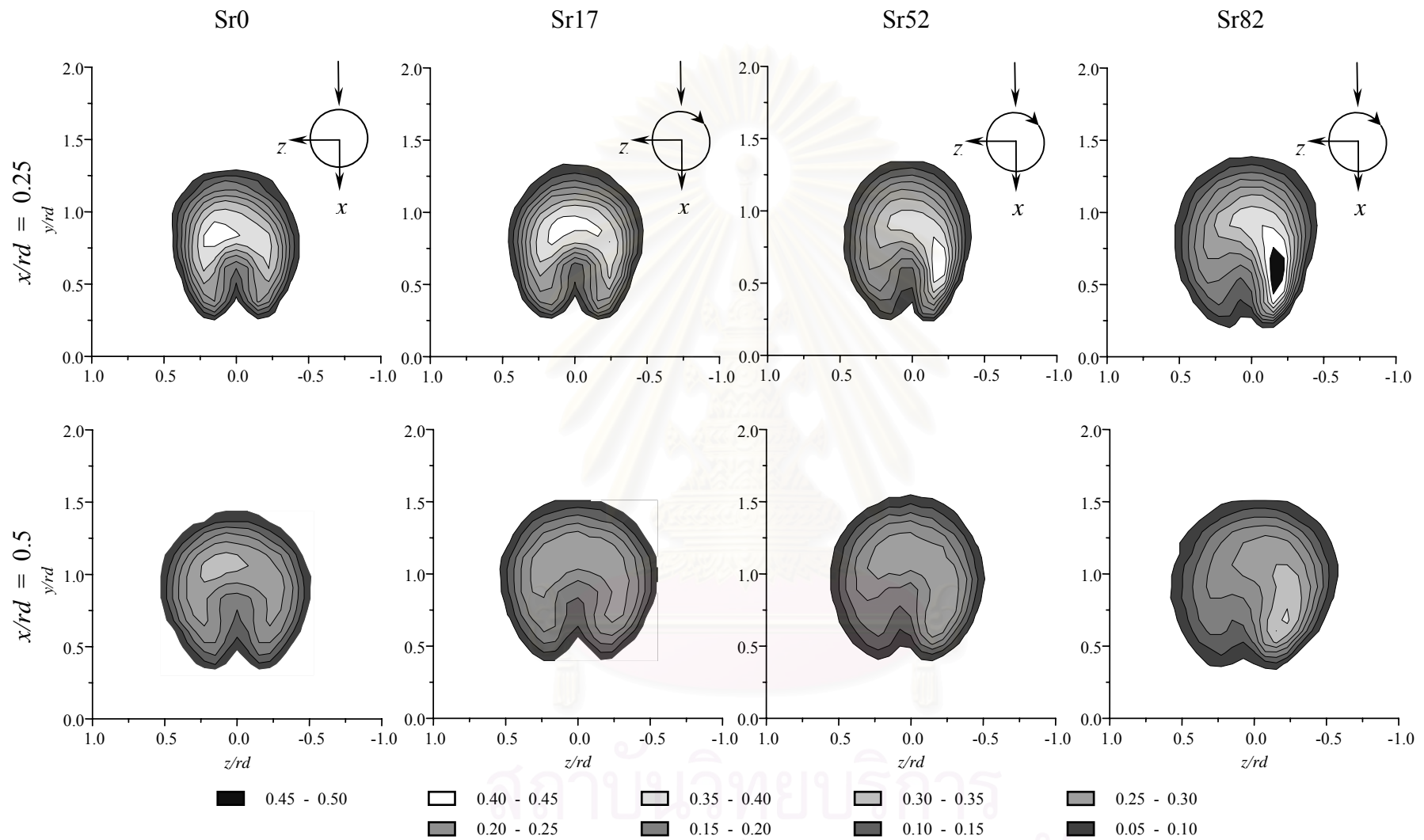
รูปที่ 1.27 การกระจายตัวของอนุกรม  $C_{TG}$  ใน Cross plane ตามทิศทาง Down stream ที่ปากทางออกของเจ็ตกรณีน้หมุนควงที่ระยะ  $x/rd =$  (ก) 0.25, (ข) 0.5, (ค) 1.0 (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)



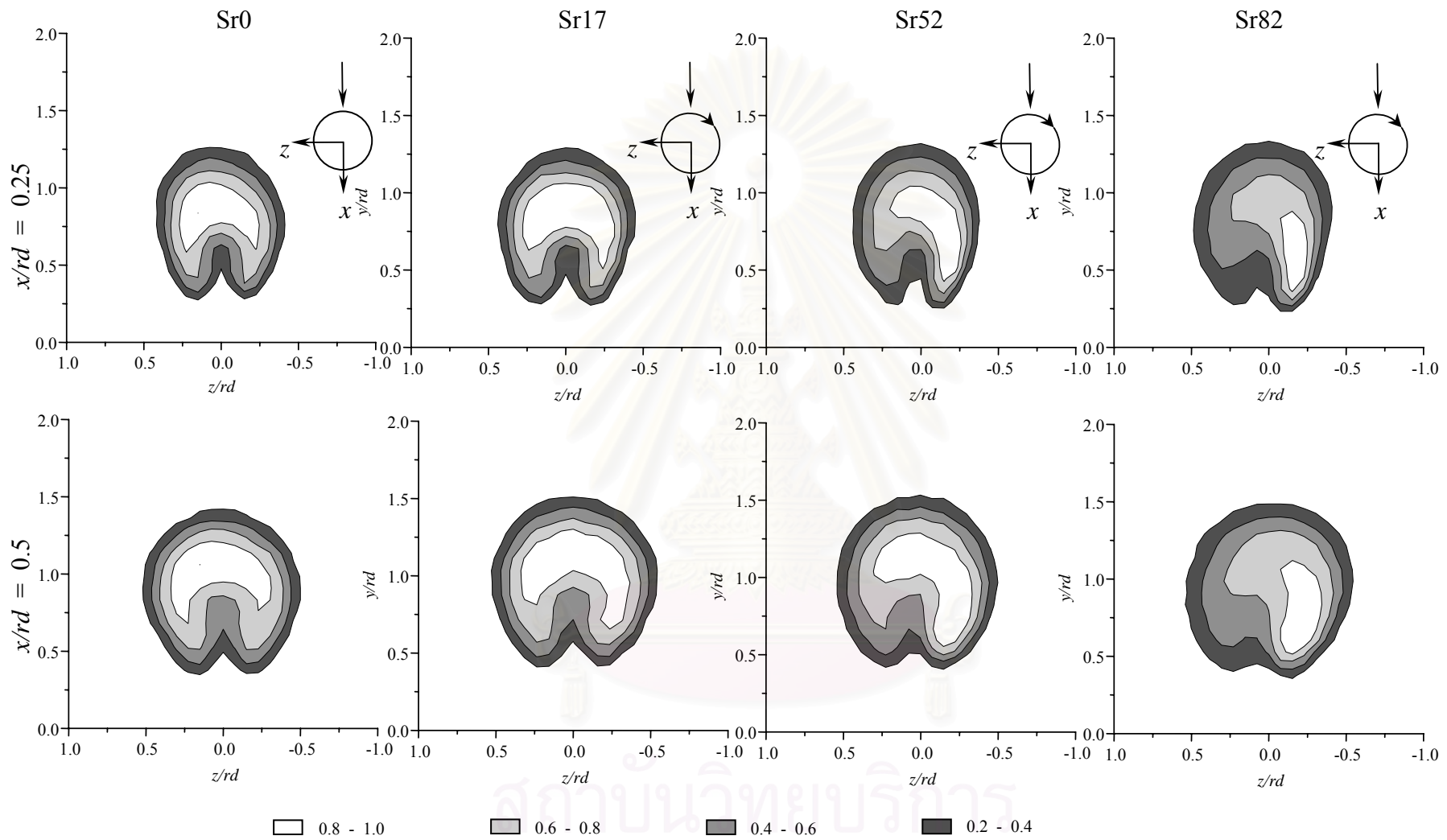
(ก) ภาพ Top view



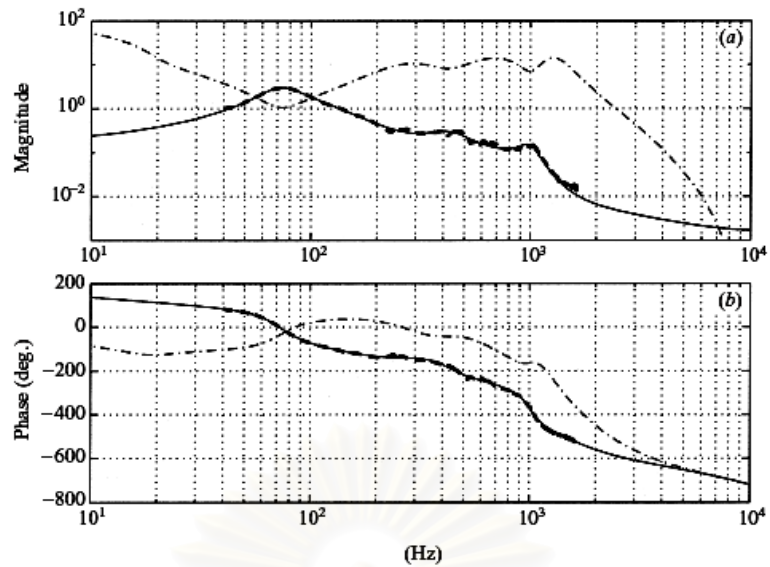
รูปที่ 1.28 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของการผสมระหว่างเจ็ตกับ กระแสลมขวาง  
กรณี Unforced กับ Forced ก) ภาพ Top view ข) ภาพ Side view  
(Gogineni and Roquemore, 1998)



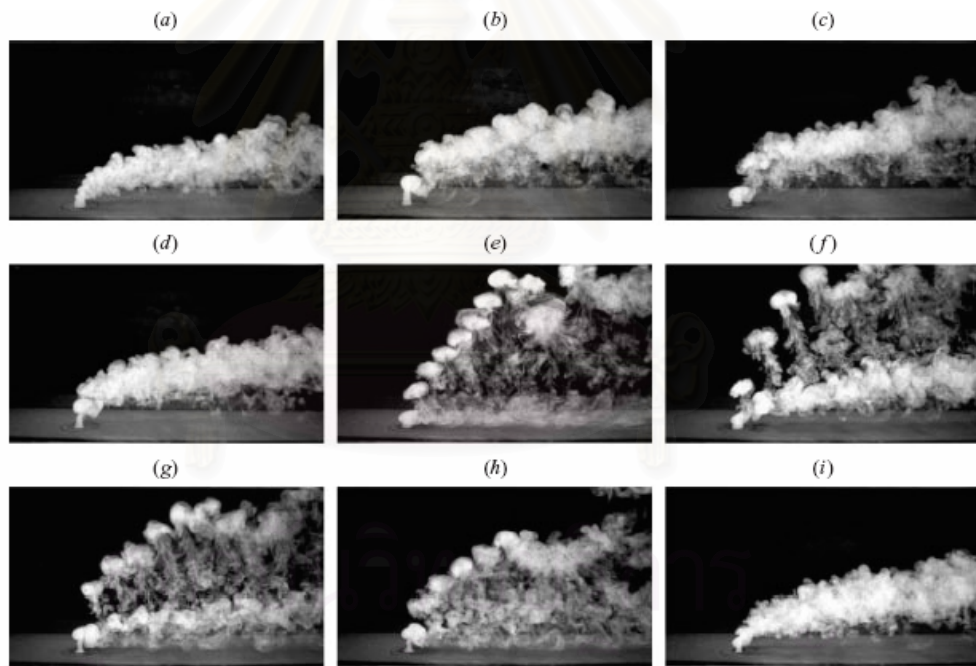
รูปที่ 1.29 (ค) การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม ( $C_{TG}$ ) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่  $x/rd = 0.25$  และ  $0.5$  (Wangiraniran, 2001)



รูปที่ 1.29 (จ) การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรรวม ( $C_{TL}$ ) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่  $x/rd = 0.25$  และ  $0.5$  (Wangiraniran, 2001)

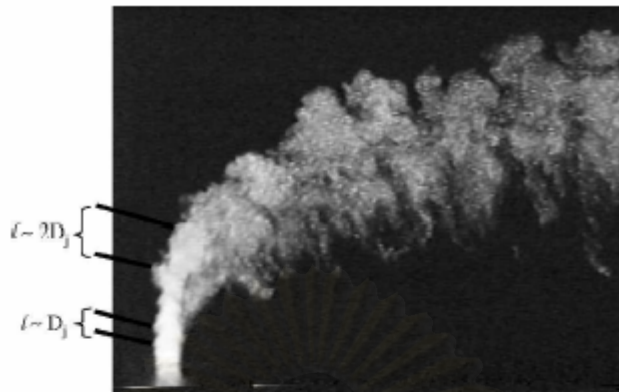


รูปที่ 1.30 (ก) Bode diagram อธิบายค่าความถี่ในการตอบสนองจากการทดลอง ของเจ็ตกับ Actuator ที่ปากทางออกเจ็ต ( M'closkey *et al.* 2002)

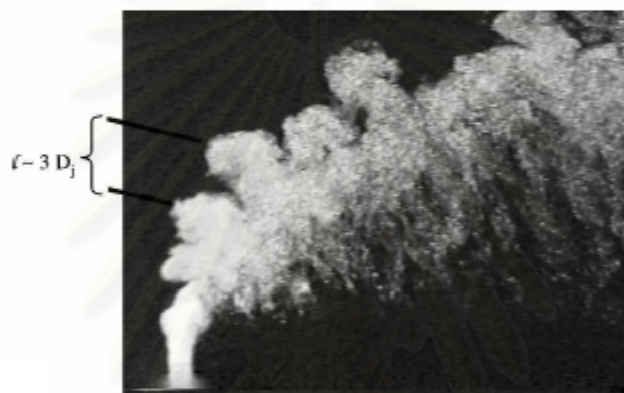


รูปที่ 1.30(ข) ภาพ Instantaneous Smoke visualization ของเจ็ตในกระแสมุมขวางที่มีค่าความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 2.58 a) กรณียังไม่กระตุ้นเจ็ต, b) กรณี Uncompensated c) กรณี compensated d)กรณี Uncompensated และกระตุ้นเจ็ตด้วย Squarewave) กรณี compensated และกระตุ้นเจ็ตด้วย Square wave f) กรณี compensated และกระตุ้นเจ็ตด้วย Square wave g) กรณี compensated และกระตุ้นเจ็ตด้วย Square wave h) กรณี compensated และกระตุ้นเจ็ตด้วย Square wave i) กรณี compensated และกระตุ้นเจ็ตด้วย Square wave ( M'closkey *et al.*, 2002)

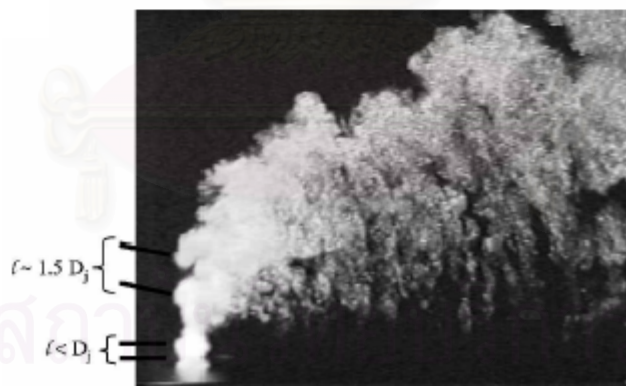
(ก)



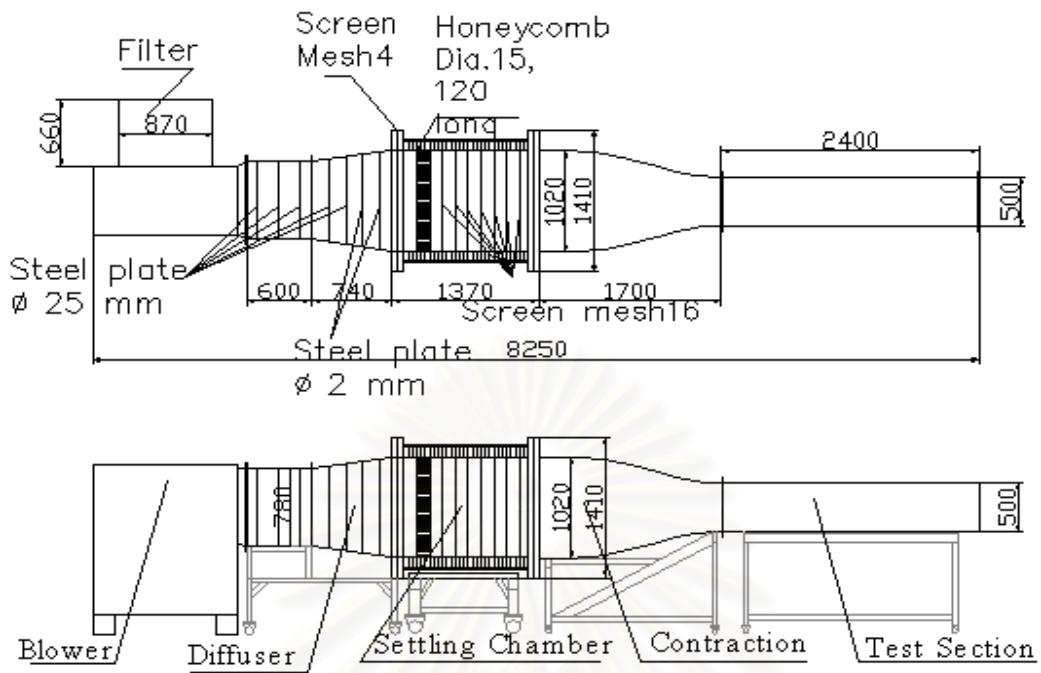
(ข)



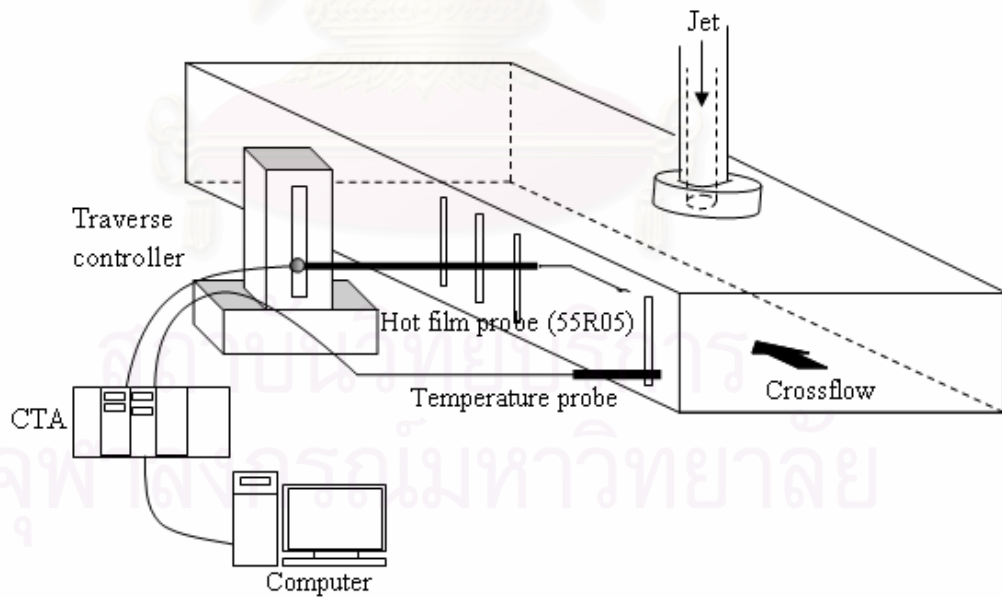
(ค)



รูปที่ 1.31 ภาพ Instantaneous (ก) กรณีเจ็ตไม่มีการควบคุม, (ข) กรณีที่กระตุ้นที่ความถี่ต่ำ (680 Hz และค่า  $Sr_D$  ประมาณ 0.085) และ (ค) กรณีกระตุ้นที่ความถี่สูง (1500 Hz และค่า  $Sr_D$  ประมาณ 0.19) (Narayanan *et al.* 2003)

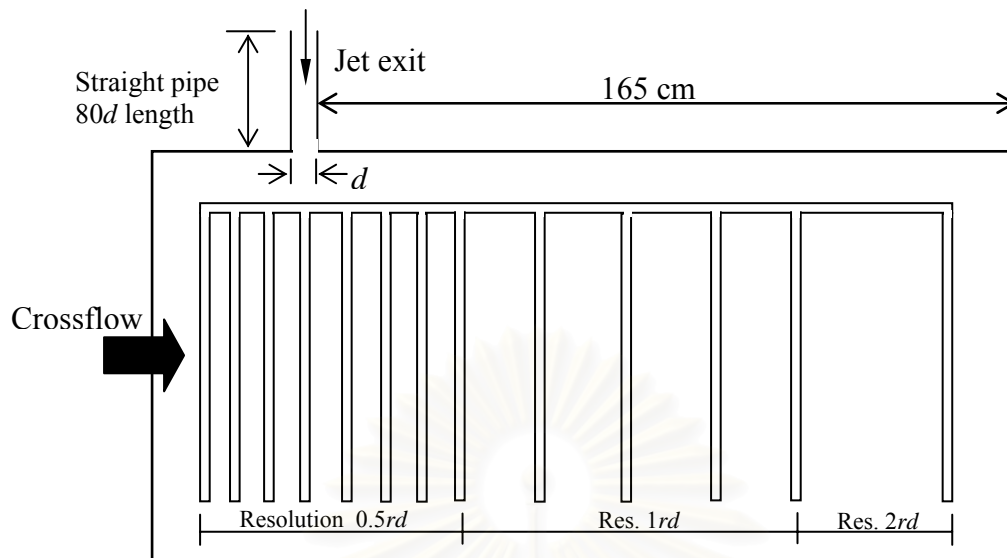


รูปที่ 2.1 ชุดอุโมงค์ลมและหน้าตัดทดสอบ

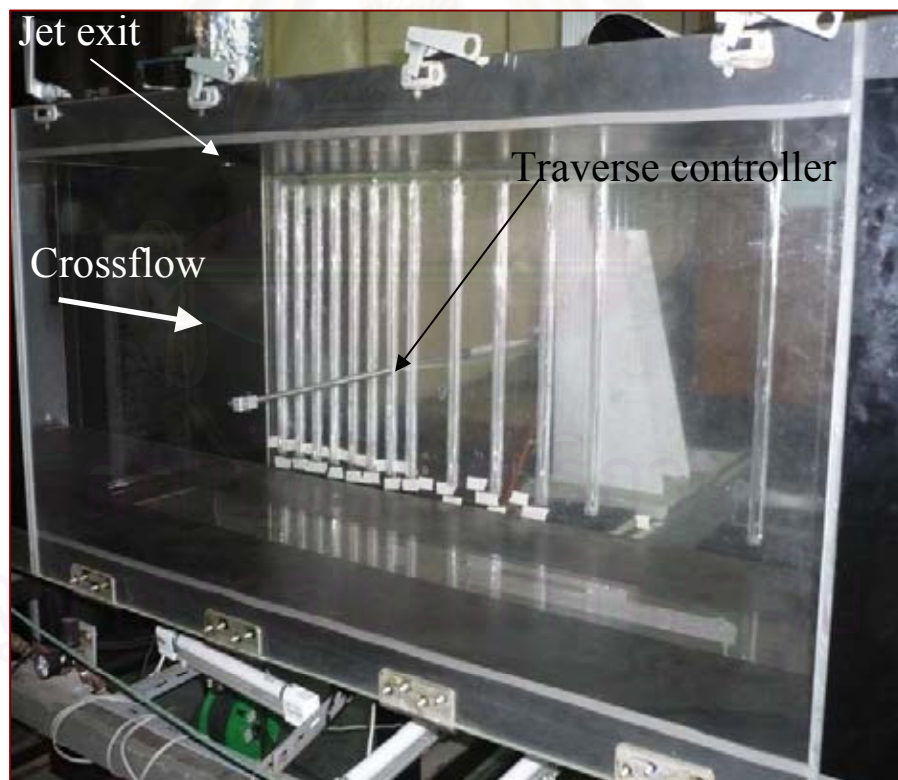


รูปที่ 2.2 (ก) ภาพจำลองการทดลองและการใช้เครื่องมือวัด

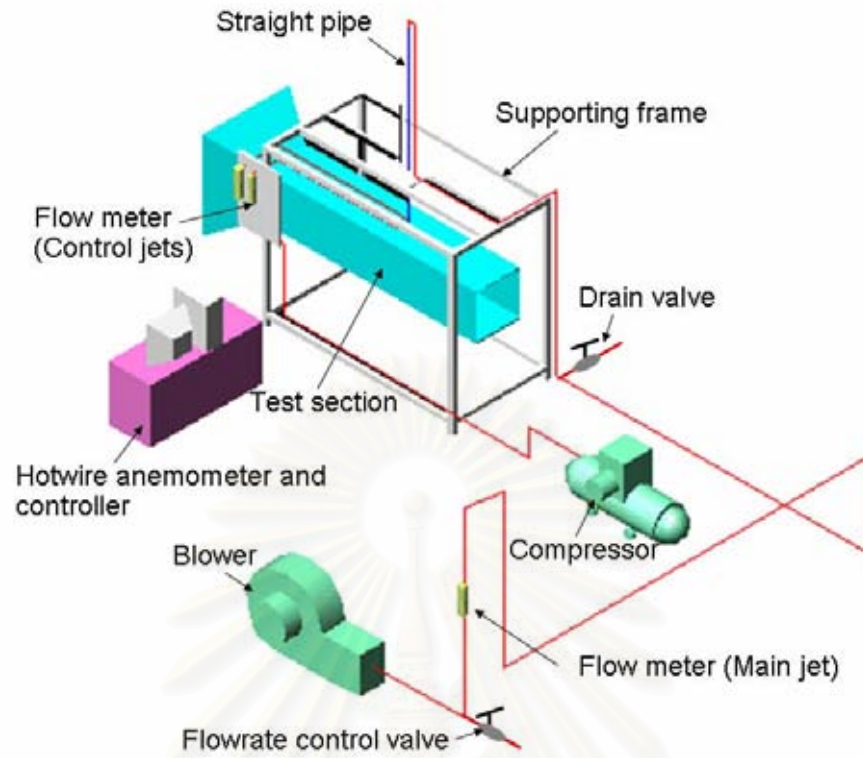




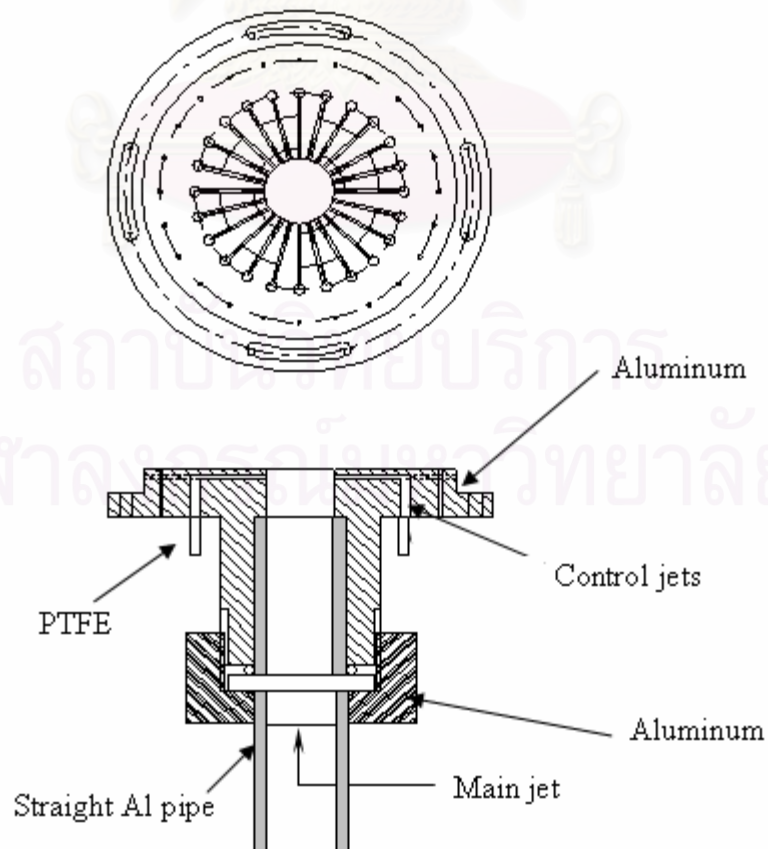
รูปที่ 2.2 (ข) ร่องบนผนังหน้าต่างทดสอบ



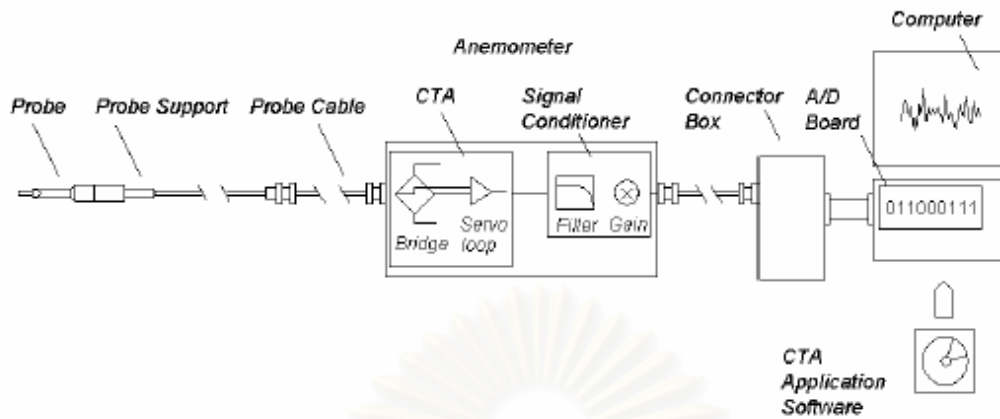
รูปที่ 2.3 รูปถ่ายชุดหน้าต่างทดสอบ



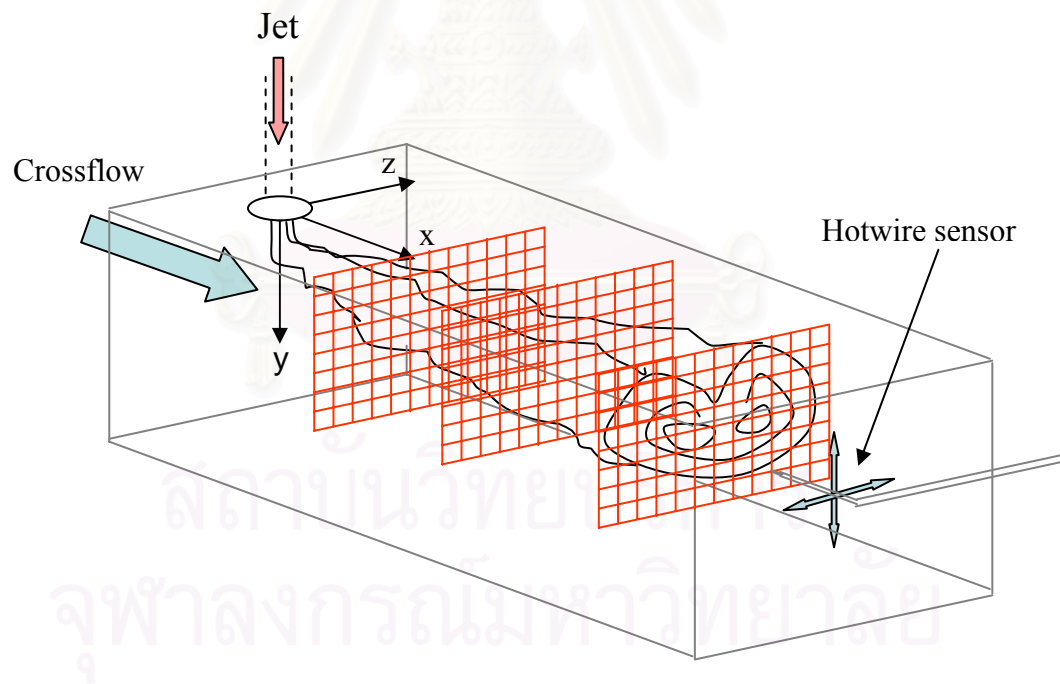
รูปที่ 2.4 ภาพจำลองของทดลองหัวเจ็ตควบคุมประกอบด้วยเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุม



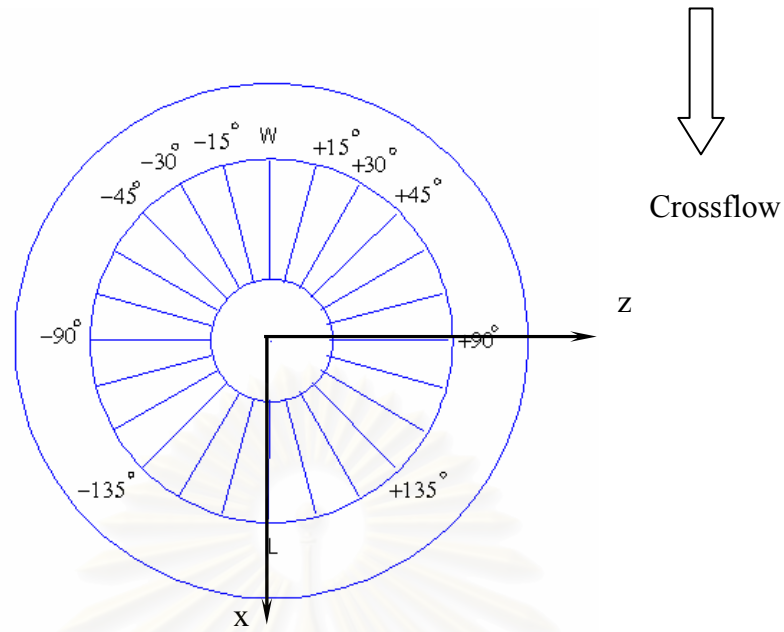
รูปที่ 2.5 ชุดหัวเจ็ตควบคุม



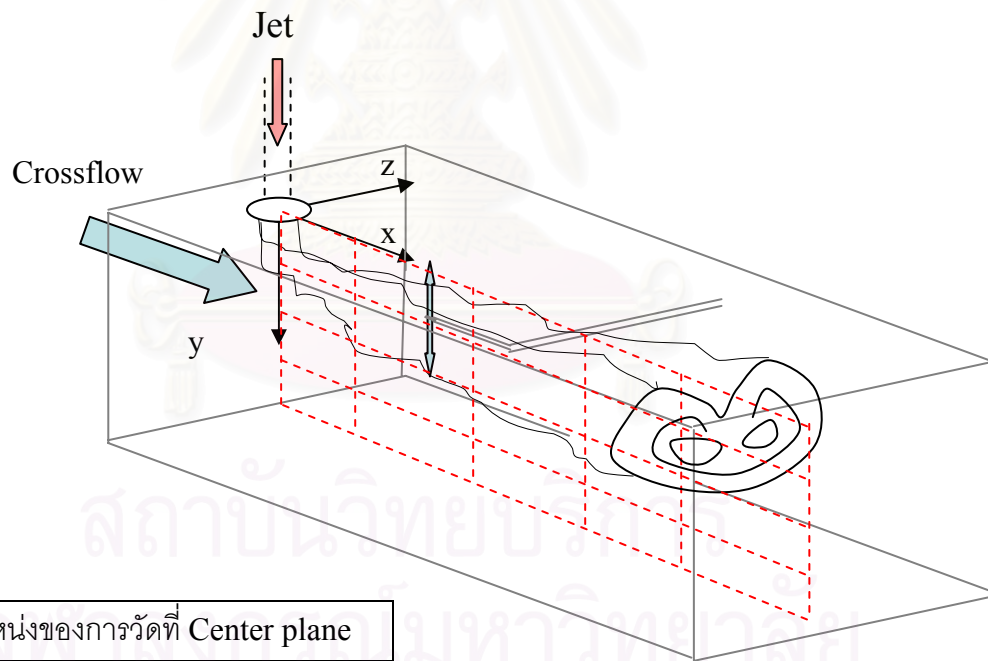
รูปที่ 2.6 ภาพจำลองการต่อชุดอุปกรณ์การวัด Hot-film sensor



รูปที่ 2.7 (ก) พิกัดอ้างอิงสำหรับการทดลอง และหน้าตัดการวัดการกระจายความเร็ว

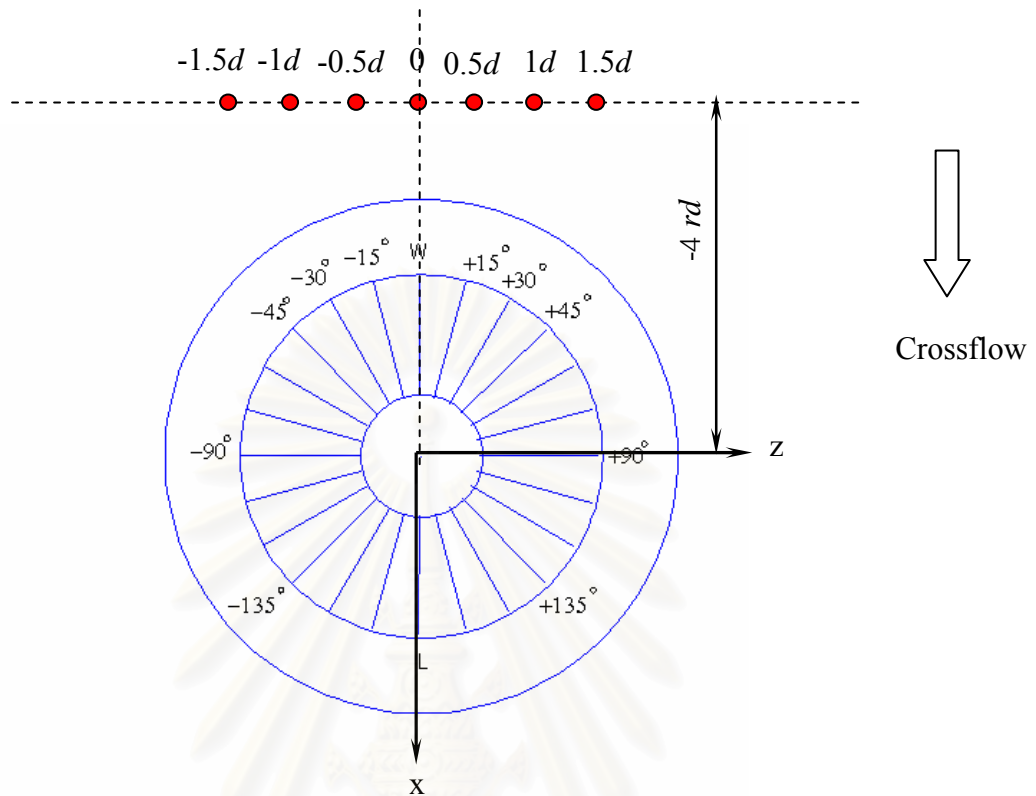


รูปที่ 2.7 (ข) พิกัดอ้างอิงสำหรับตำแหน่งการวัดความเร็ว



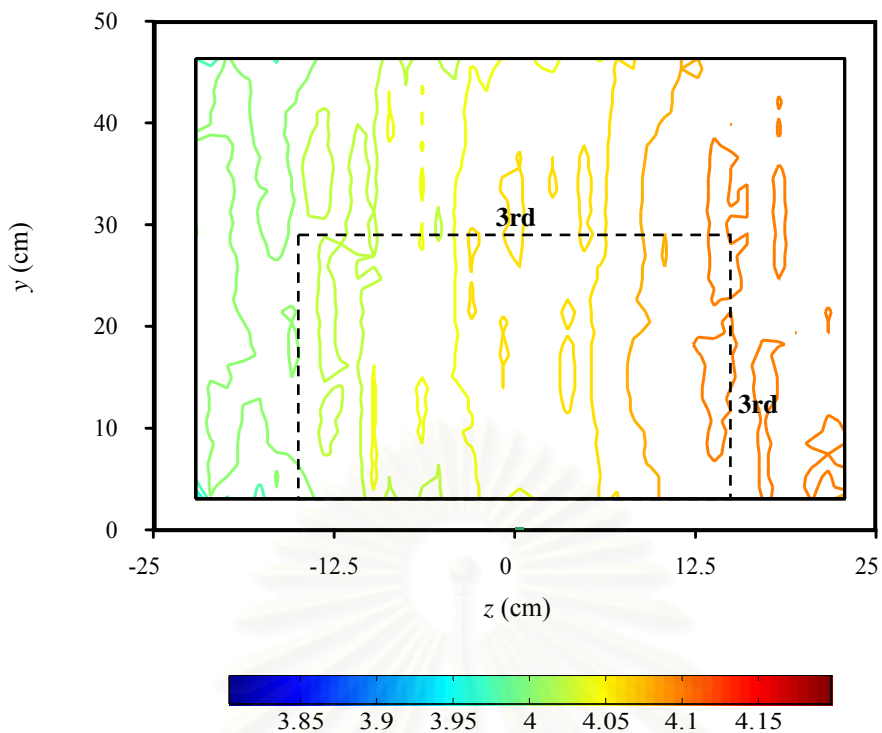
ตำแหน่งของการวัดที่ Center plane					
$x/r_d$	0.5	1	2	3	4
$y/r_d$	0-2	0-2	0-2	0-3	0-3

รูปที่ 2.8 ตำแหน่งของการวัดการกระจายตัวของความเร็วบน Center plane

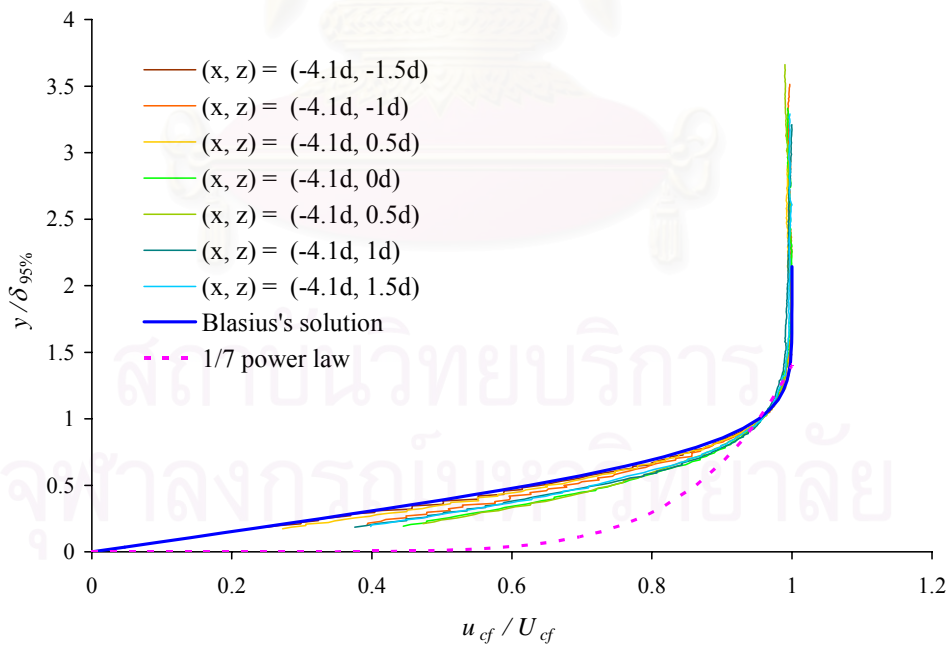


รูปที่ 2.9 ตำแหน่งของการวัดรูปร่างของชั้นขอบเขต 7 ตำแหน่ง

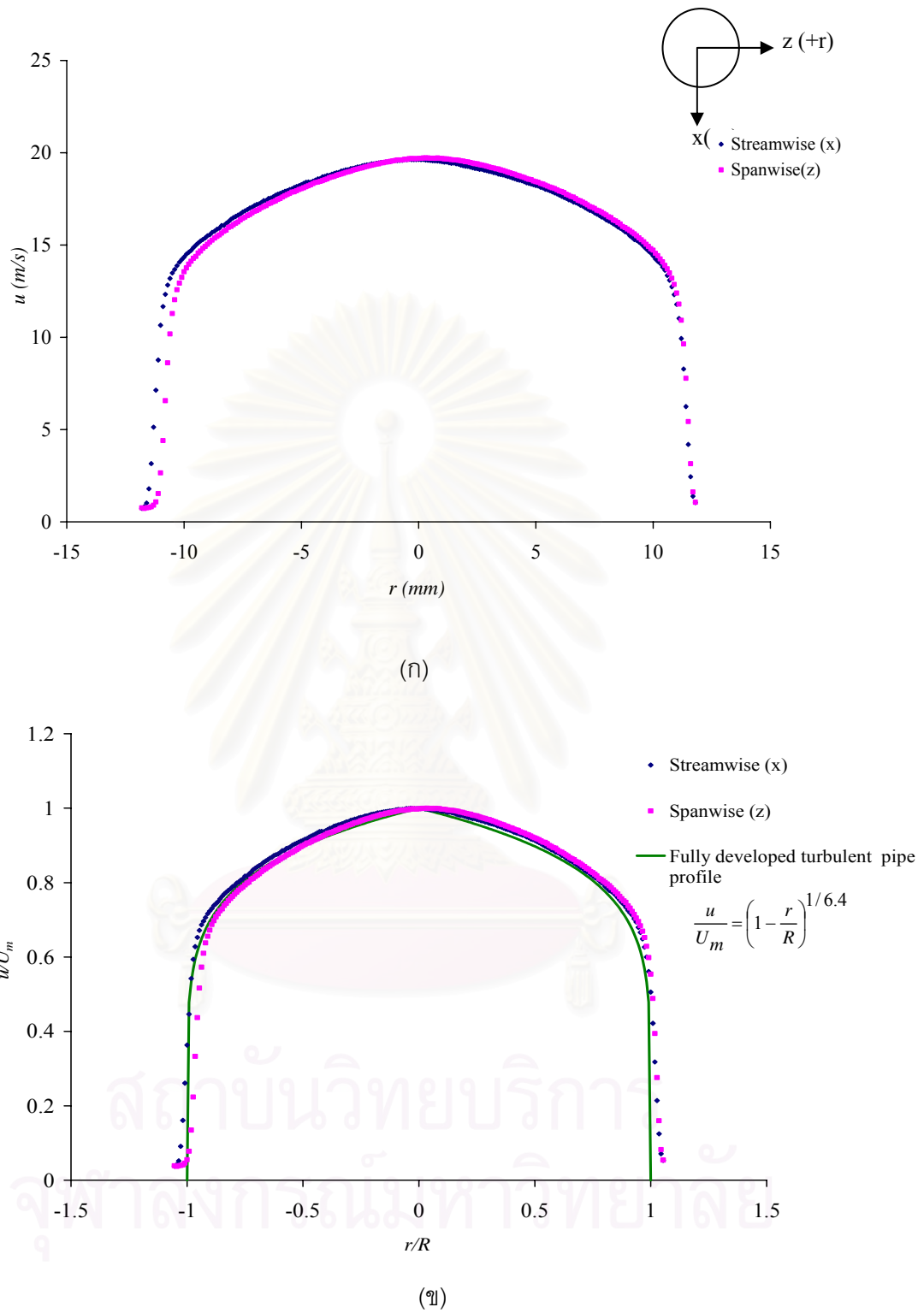
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



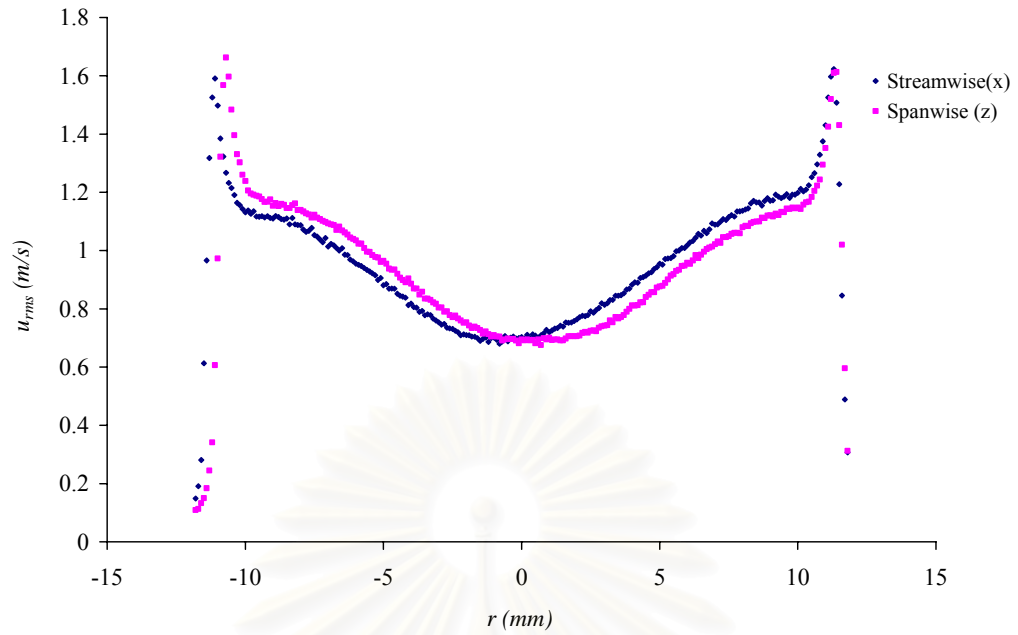
รูปที่ 3.1 ความสม่ำเสมอของความเร็วเฉลี่ย ( $u_{cf}$ ) ของกระแสลมขวางที่  $x = -9$  cm บริเวณ ผนังตัดทดสอบของอุโมงค์ลม



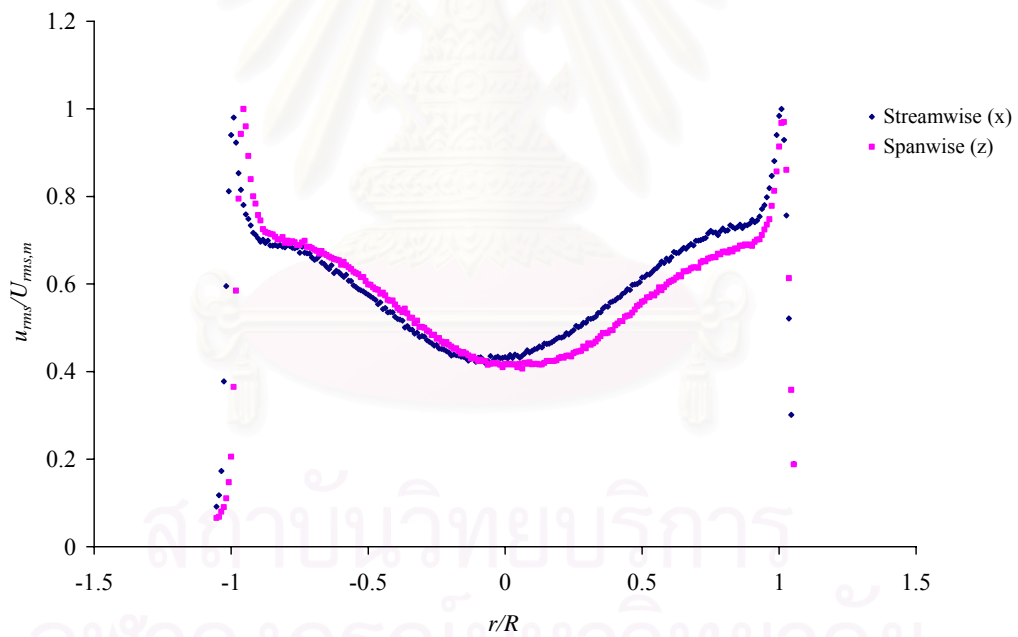
รูปที่ 3.2 รูปร่างของชั้นขอบเขต (Boundary layer ;  $U_{cf} = 4.05$  m/s)



รูปที่ 3.3 รูปร่างความเร็วในแนวแกนเจ็ตที่ทางออกของเจ็ต (ก)  $u$  (ข)  $u/U_m$



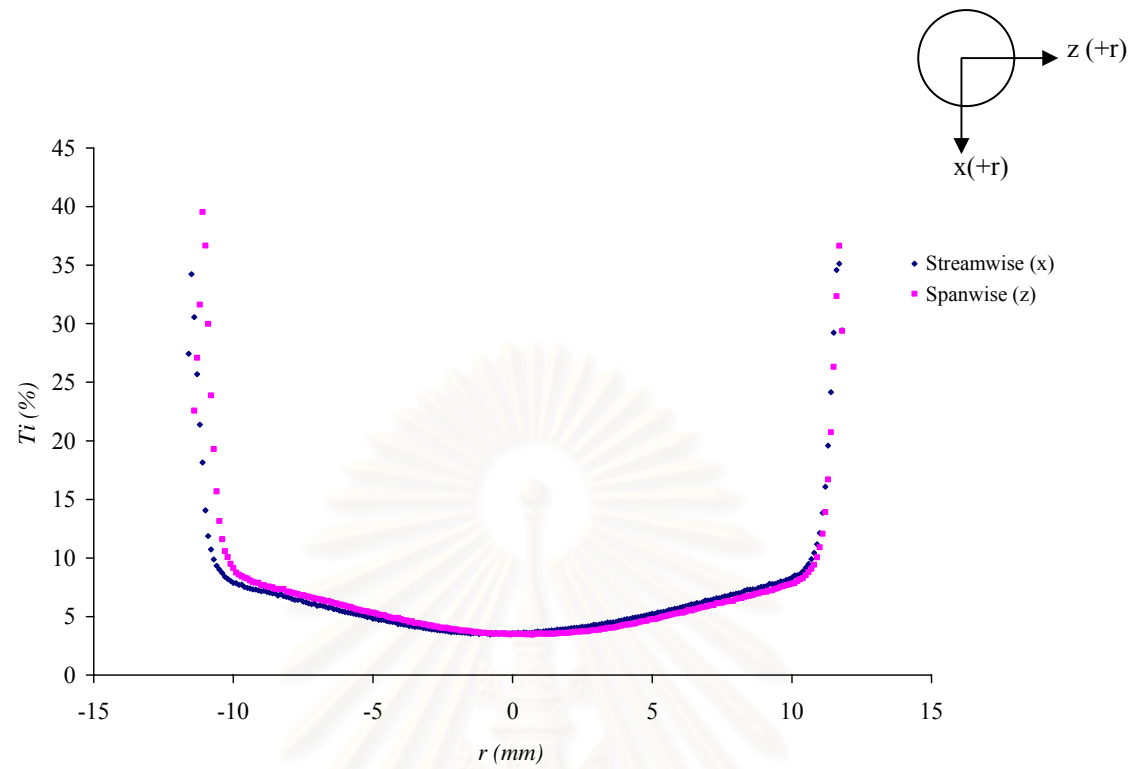
(ก)



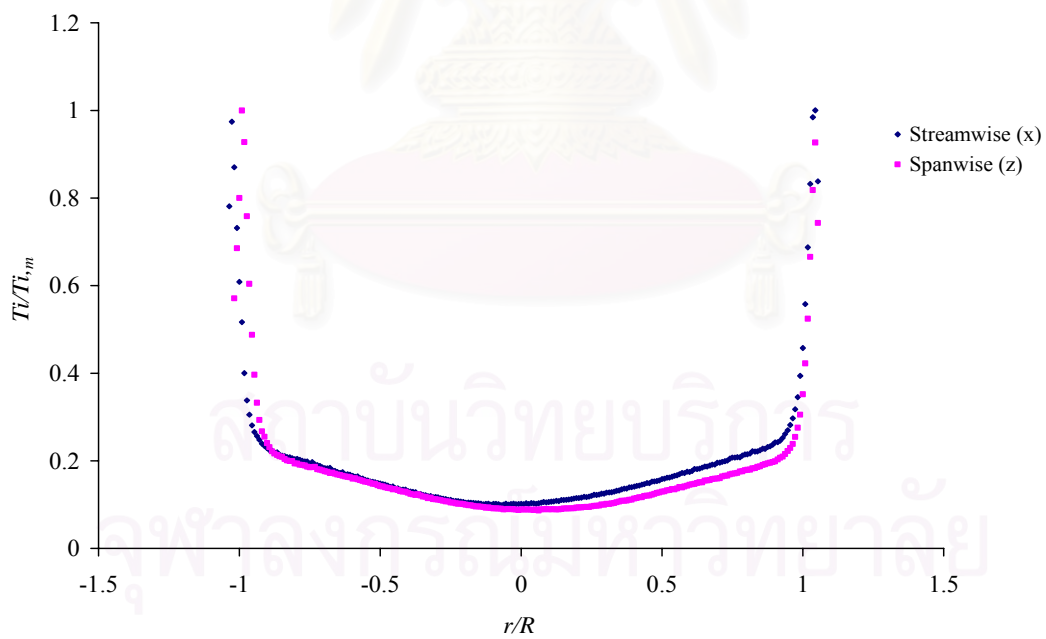
(ข)

รูปที่ 3.4 รูปร่าง Velocity fluctuation ในแนวแกนเจ็ตที่ทางออกของเจ็ต  
(ก)  $u_{rms}$  (ข)  $u_{rms}/U_{rms,m}$



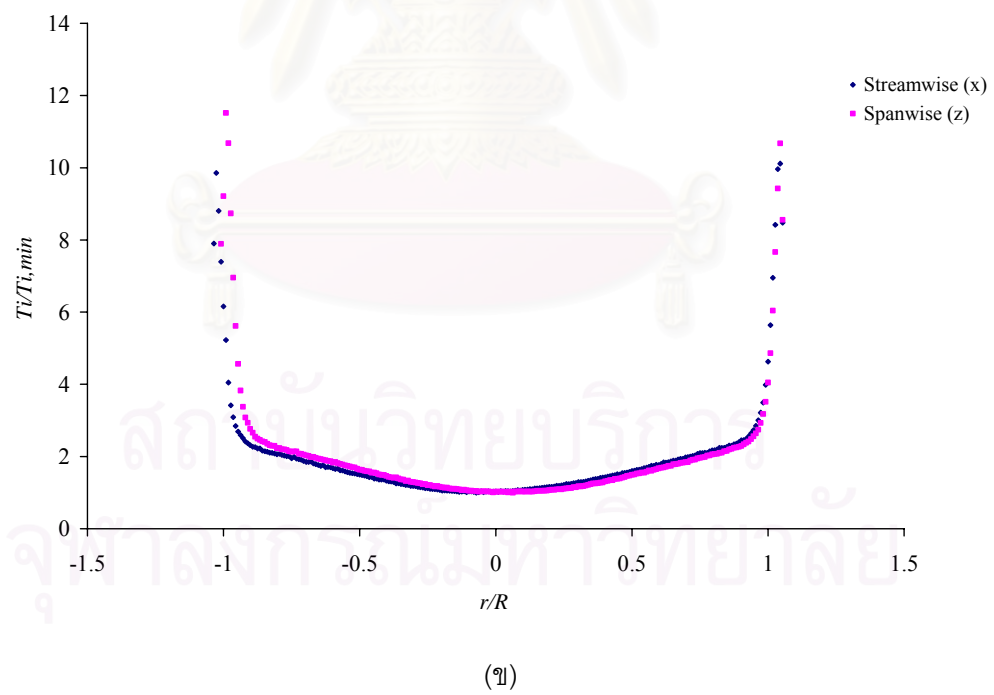
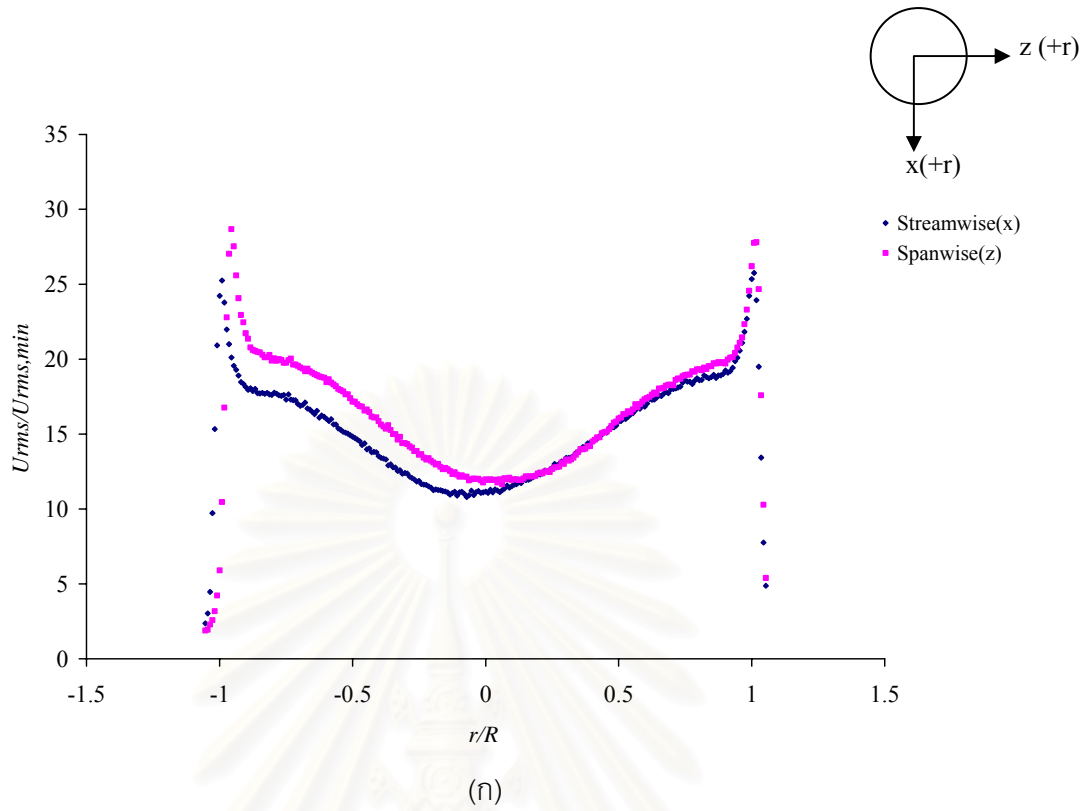


(ก)



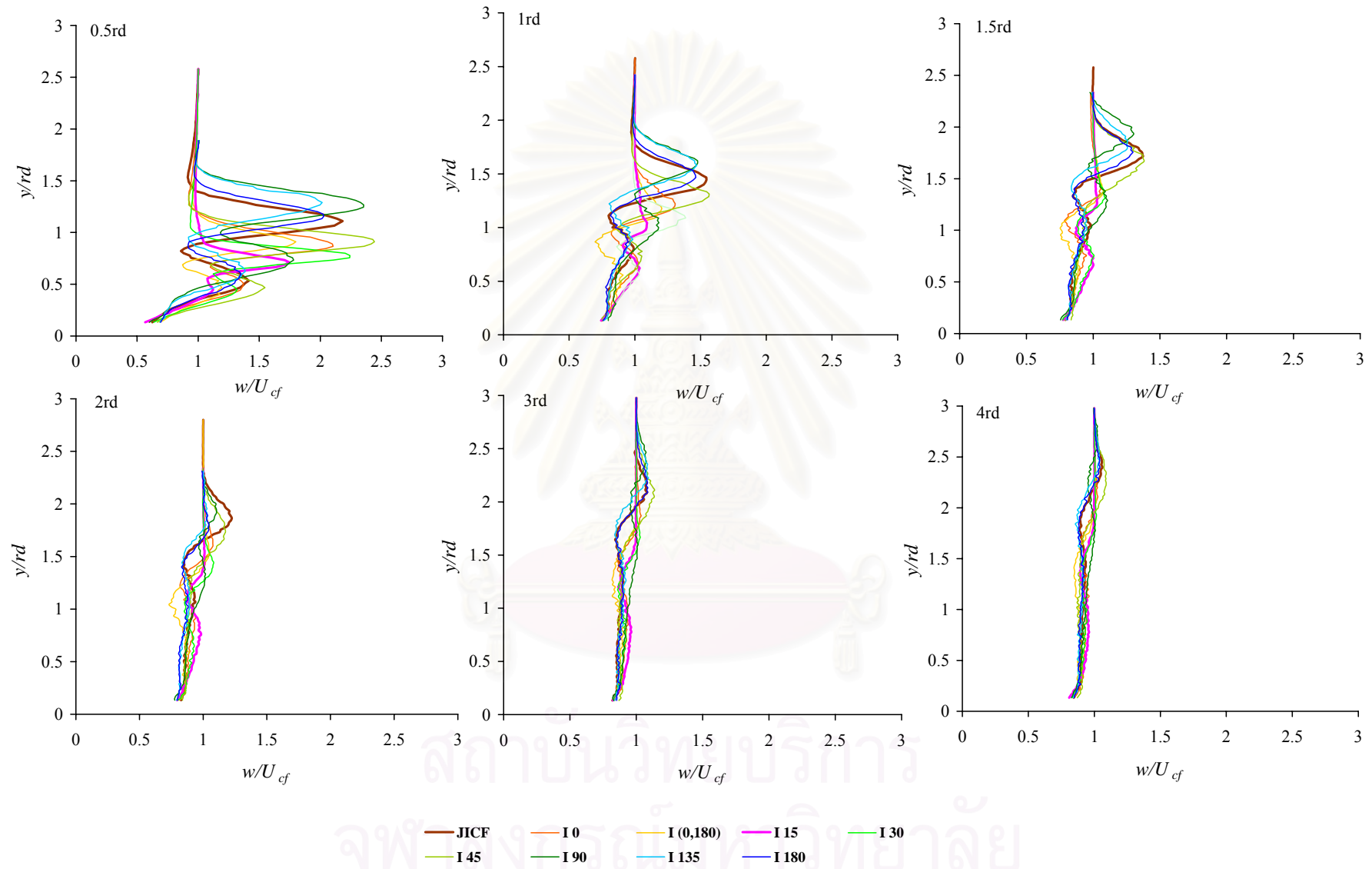
(ข)

รูปที่ 3.5 รูปร่าง Turbulent intensity ของเจ็ตที่ทางออกของเจ็ต  
(ก)  $T_i$  (ข)  $T_i/T_{i,m}$

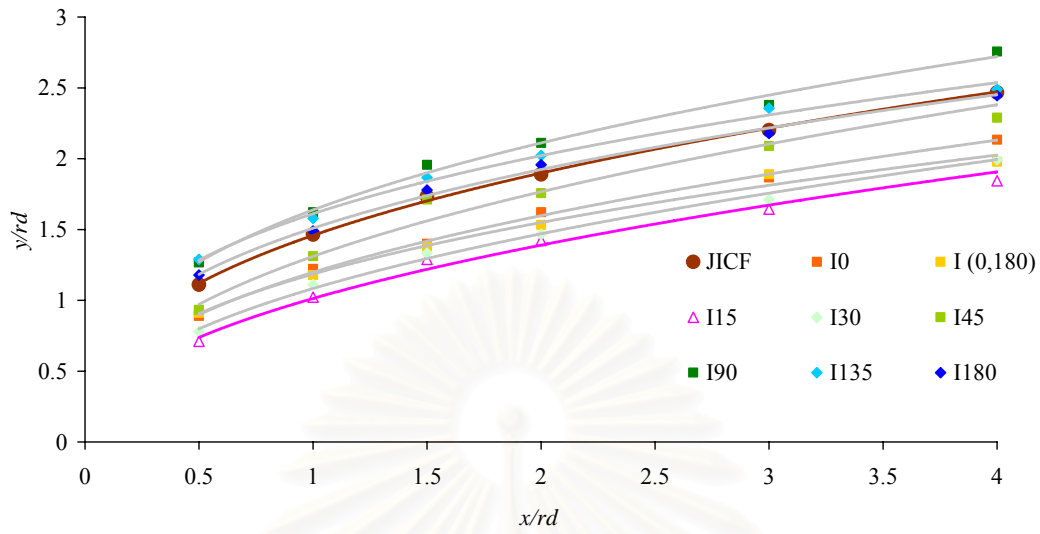


รูปที่ 3.6 รูปร่าง Velocity fluctuation และ Turbulent intensity ในแนวแกนเจ็ตที่ทางออกของเจ็ต

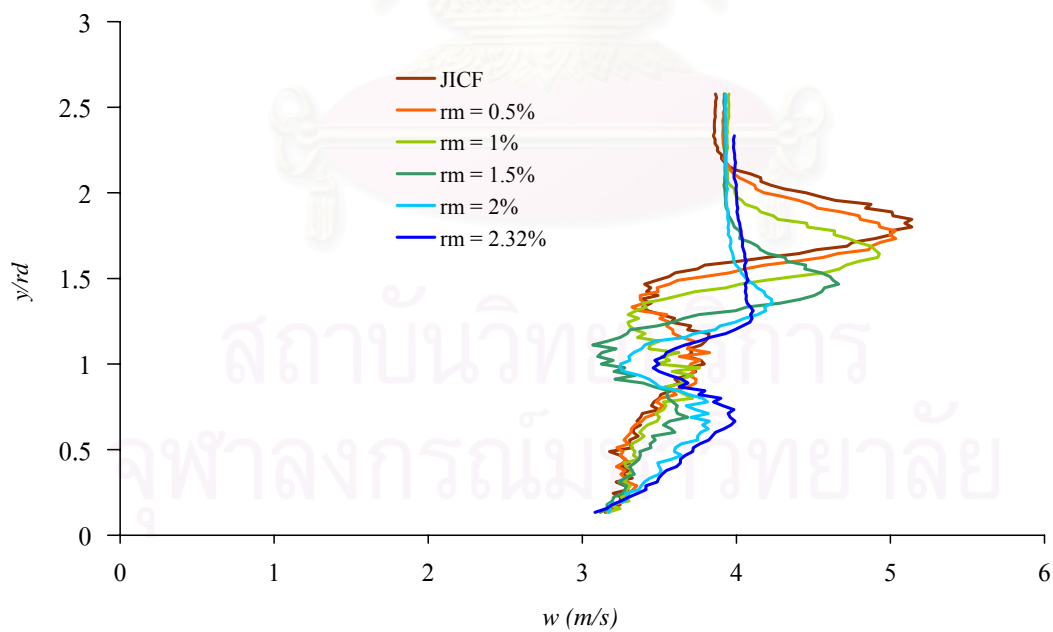
(ก)  $u_{rms}/U_{rms,min}$  (ข)  $T_i/T_{i,min}$



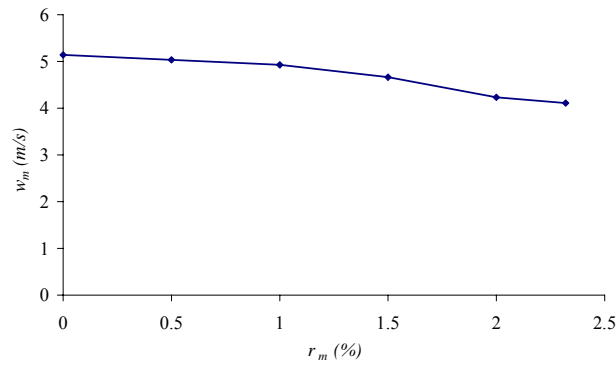
รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบรูปร่างของความเร็วที่ Center plane เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่มุมต่างๆ ด้วยอัตราส่วนเชิงมวลคงที่เท่ากับ 2.32 เปอร์เซนต์



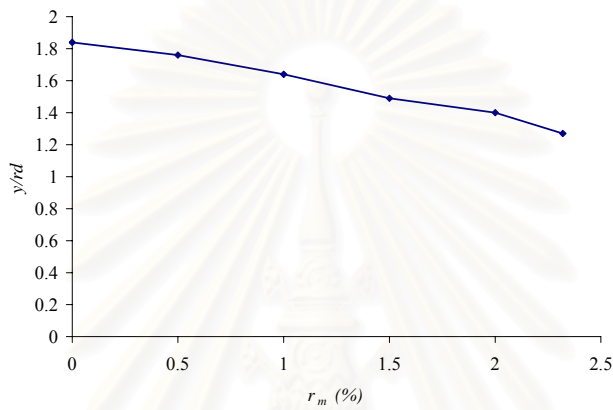
รูปที่ 3.8 เส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ดที่ตำแหน่งของมุมการฉีดเจ็ดควบคุมต่างๆ ด้วย  $r_m$  คงที่ เท่ากับ 2.32 %



รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบรูปร่างของความเร็วจึงที่ Center plane เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่มุม  $\pm 15$  องศา ด้วยอัตราส่วนเชิงมวลต่างๆ

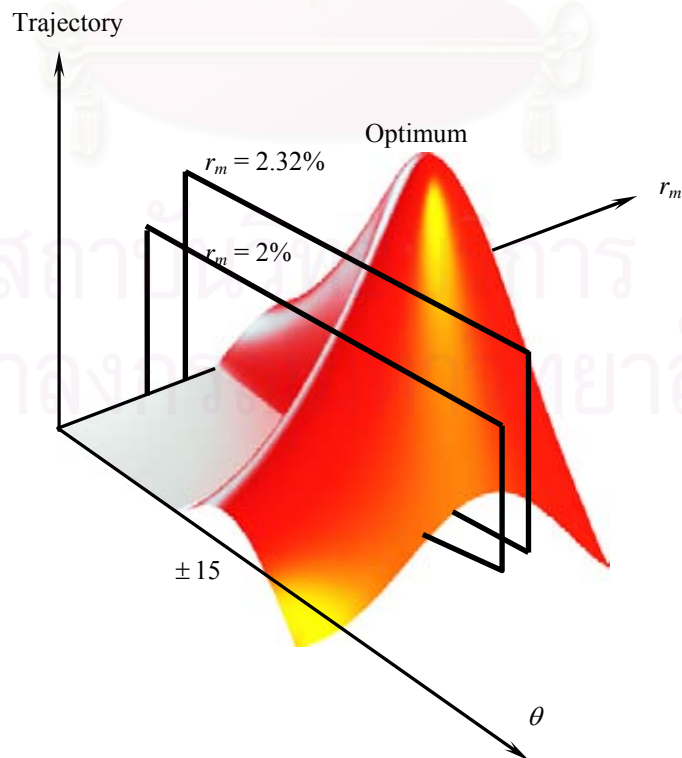


(ก)

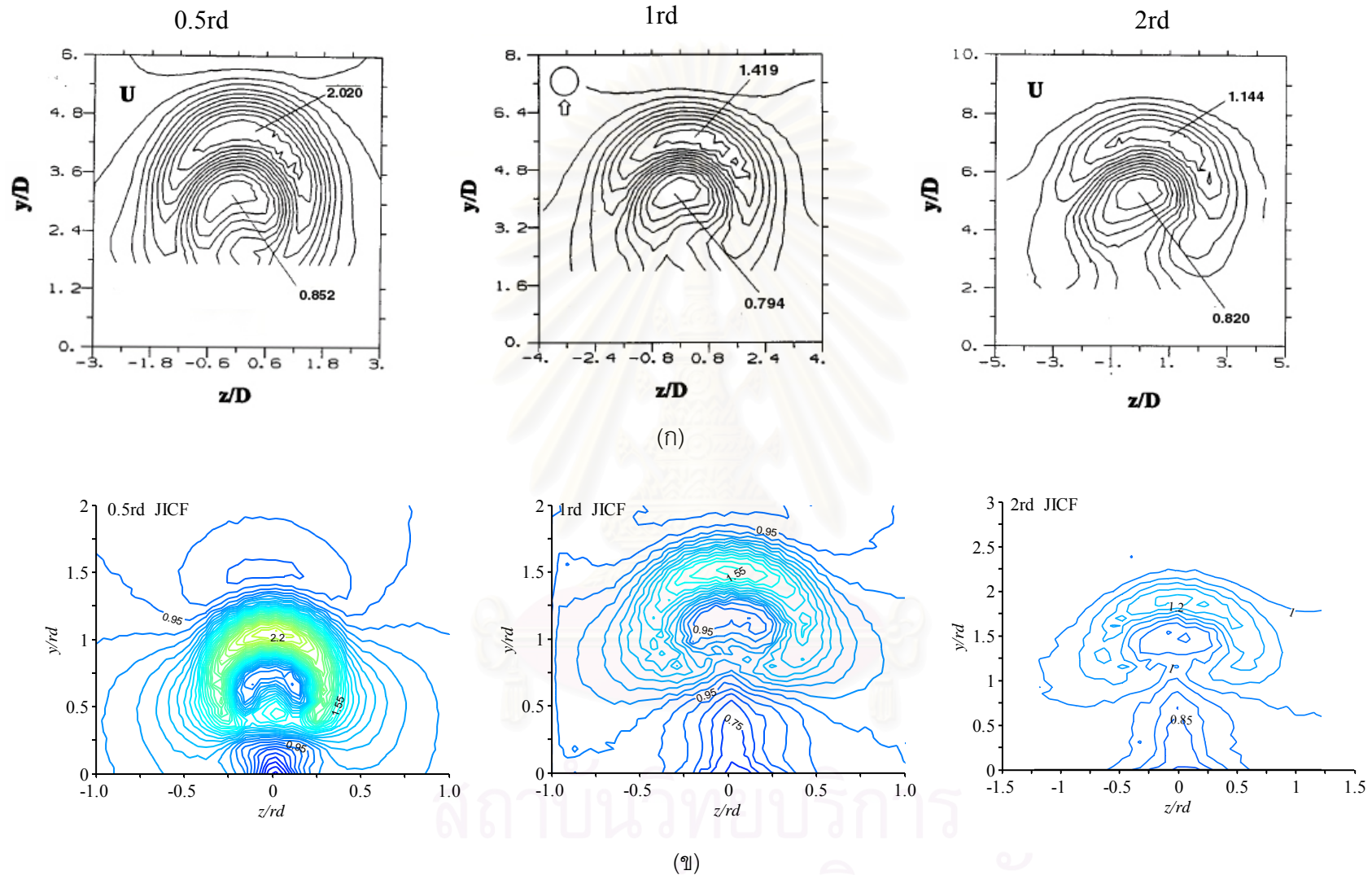


(ข)

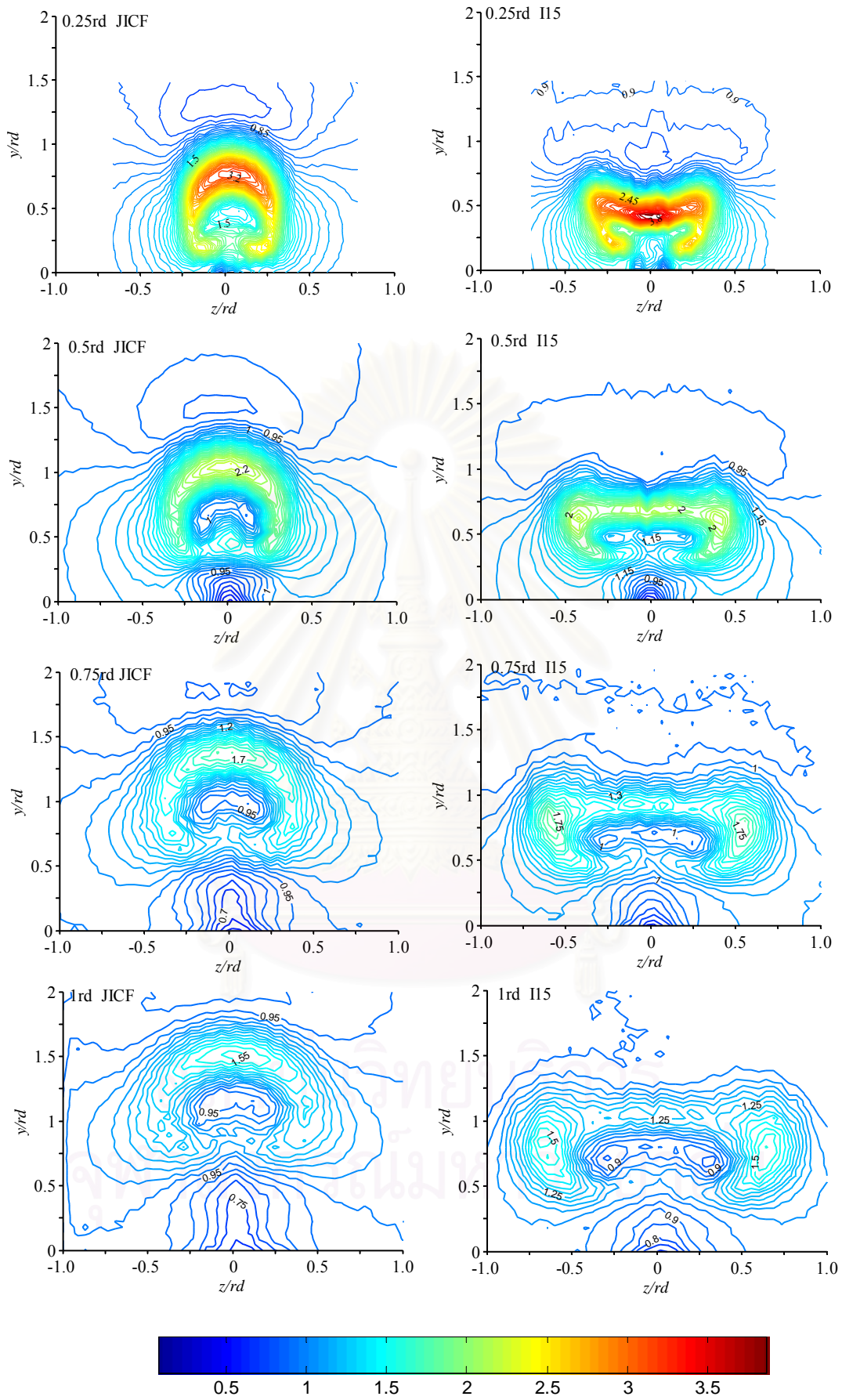
รูปที่ 3.10 เส้นทางการลดลงของความเร็ว ที่ ค่า  $r_m$  ต่างๆ ที่ตำแหน่ง มุมขีด  $\pm 15$  องศา ที่หน้าตัด  $x/rd=1.5$  ก) ค่า  $w_m$  ข) ตำแหน่งของ  $w_m$



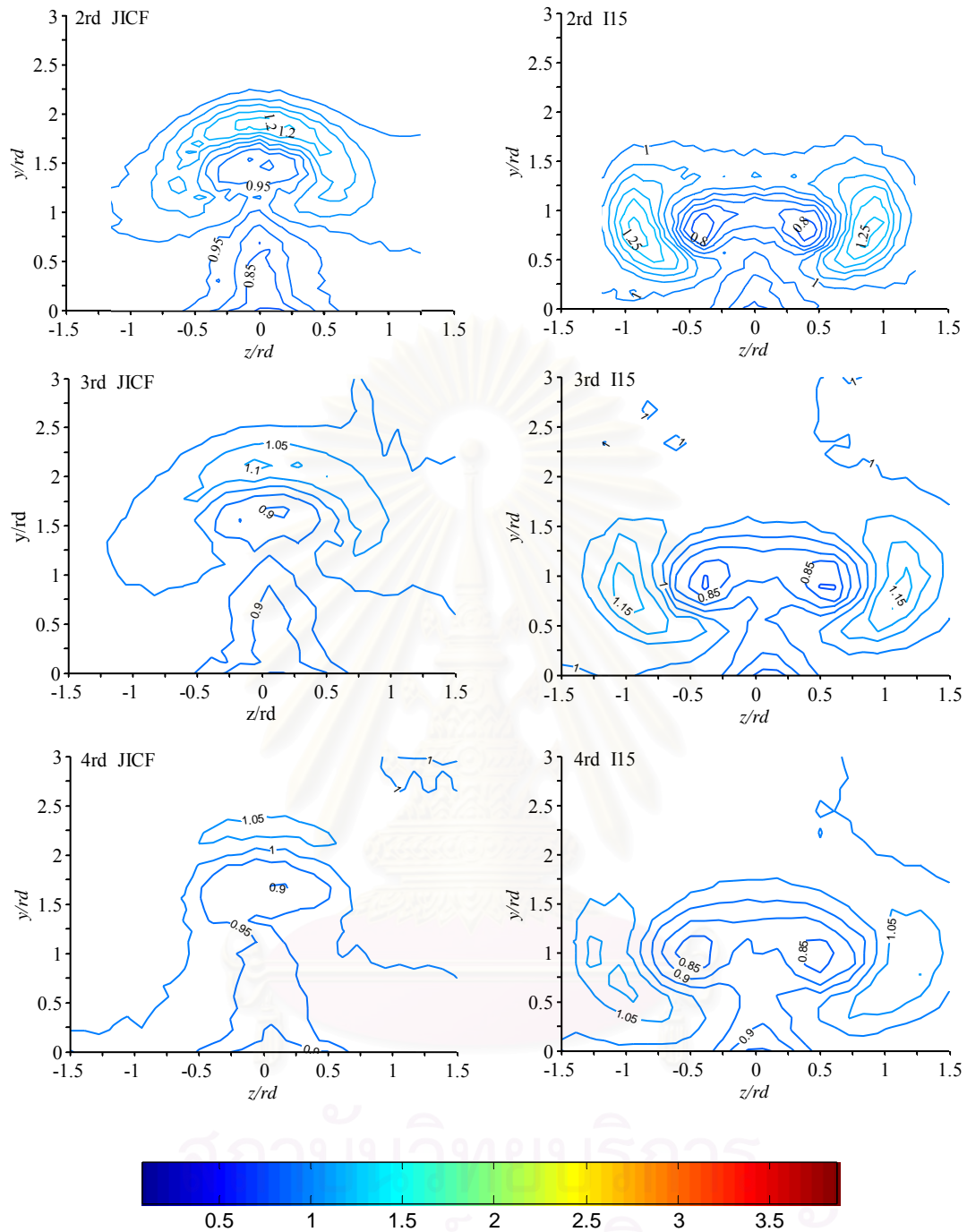
รูปที่ 3.11 Schematic แสดงหลักการสำหรับการกำหนดค่า Optimum



รูปที่ 3.12 การเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง Contour แสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ย ( $w/U_{cf}$ ) กับผลการทดลองของ Zaman and Foss (1997) กรณี JICF ที่หน้าตัดตามตำแหน่ง Downstream (x) โดยที่ ก) ผลการทดลองของ Zaman and Foss (1997) และ ข) กรณี JICF

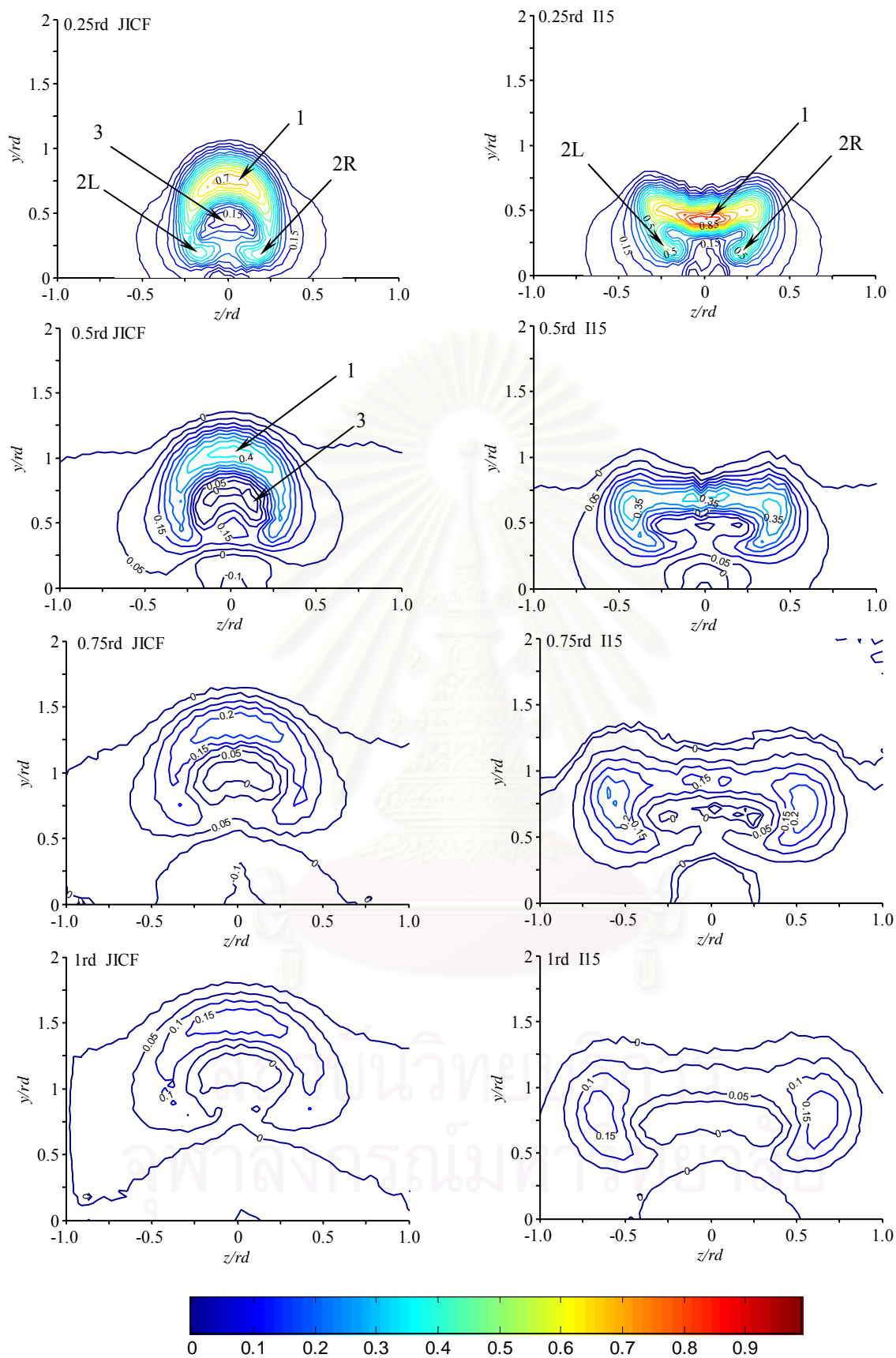


รูปที่ 3.13 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ย ( $w/U_{cf}$ ) บน แต่ ละหน้า ตัดของเจ็ต ตาม Downstream ( $x$ ) กรณี JICF และ กรณี I15

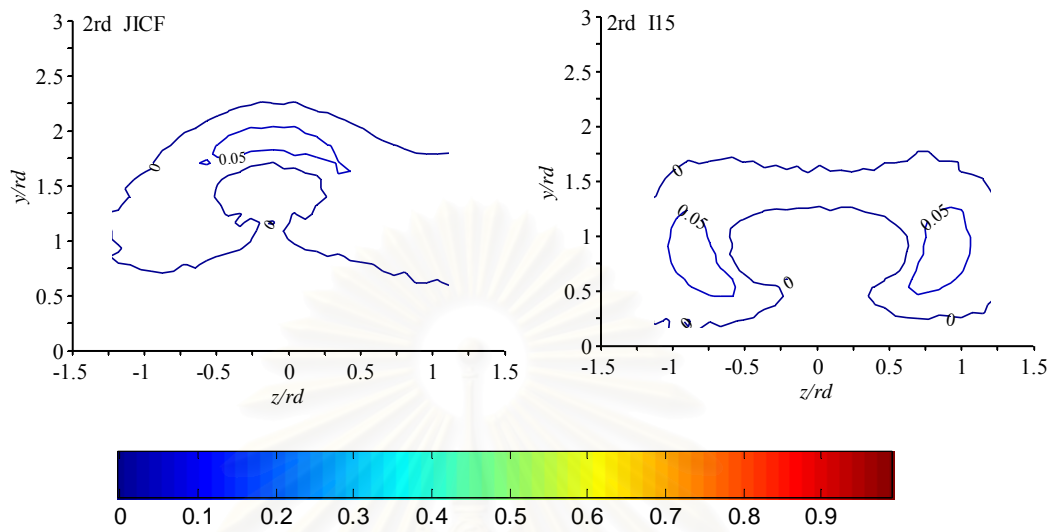


รูปที่ 3.13 (ต่อ) การเปรียบเทียบการกระจายตัวของของความเร็วเฉลี่ย ( $w/U_{cf}$ ) บนแต่ละหน้า ตัดของ เจ็ตตาม Downstream ( $x$ ) กรณี JICF และ กรณี I15



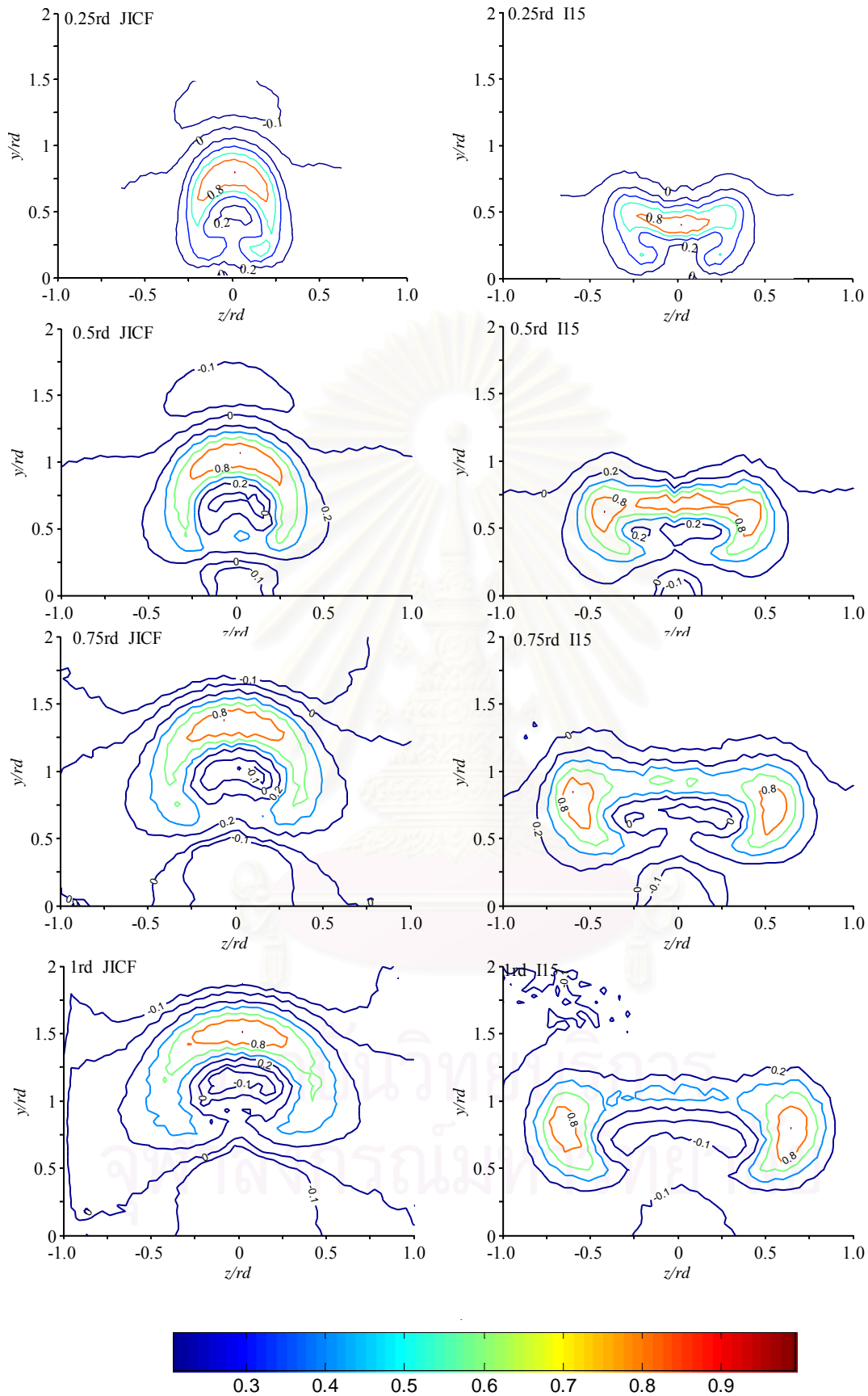


รูปที่ 3.14 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ของความเร็วเฉลี่ย ( $C_{UG}$ ) รวมบนแต่ละหน้าตัดของเจ็ตตัดของเจ็ตตาม Downstream ( $x$ ) กรณี JICF และ กรณี I5

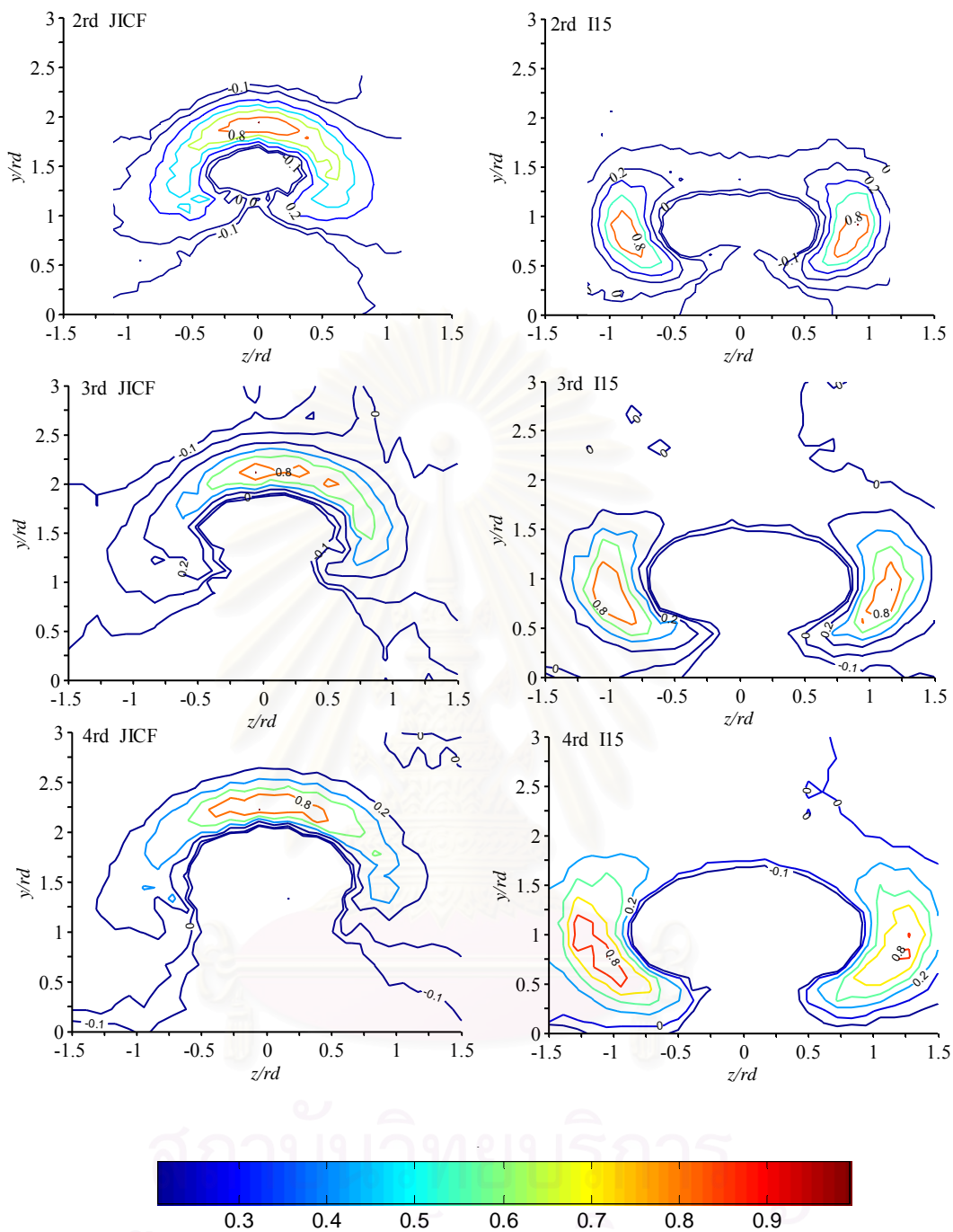


รูปที่ 3.14 (ต่อ) การเปรียบเทียบการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ของความเร็วเฉลี่ย ( $C_{UG}$ ) รวมบนแต่  
 ละหน้า ตัดของเจ็ตตัดของเจ็ตตาม Downstream (x) กรณี JICF และ กรณี I15

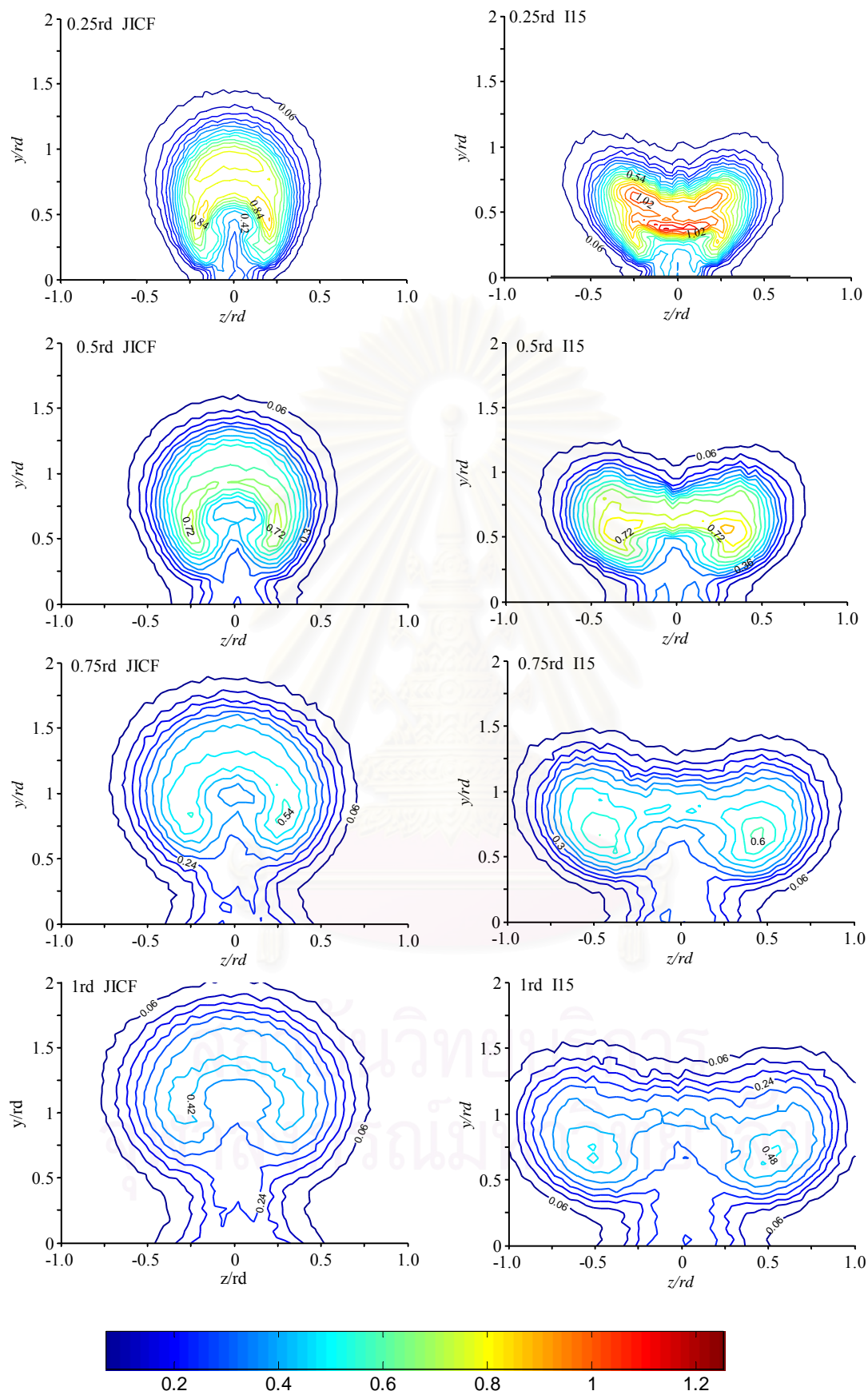
สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



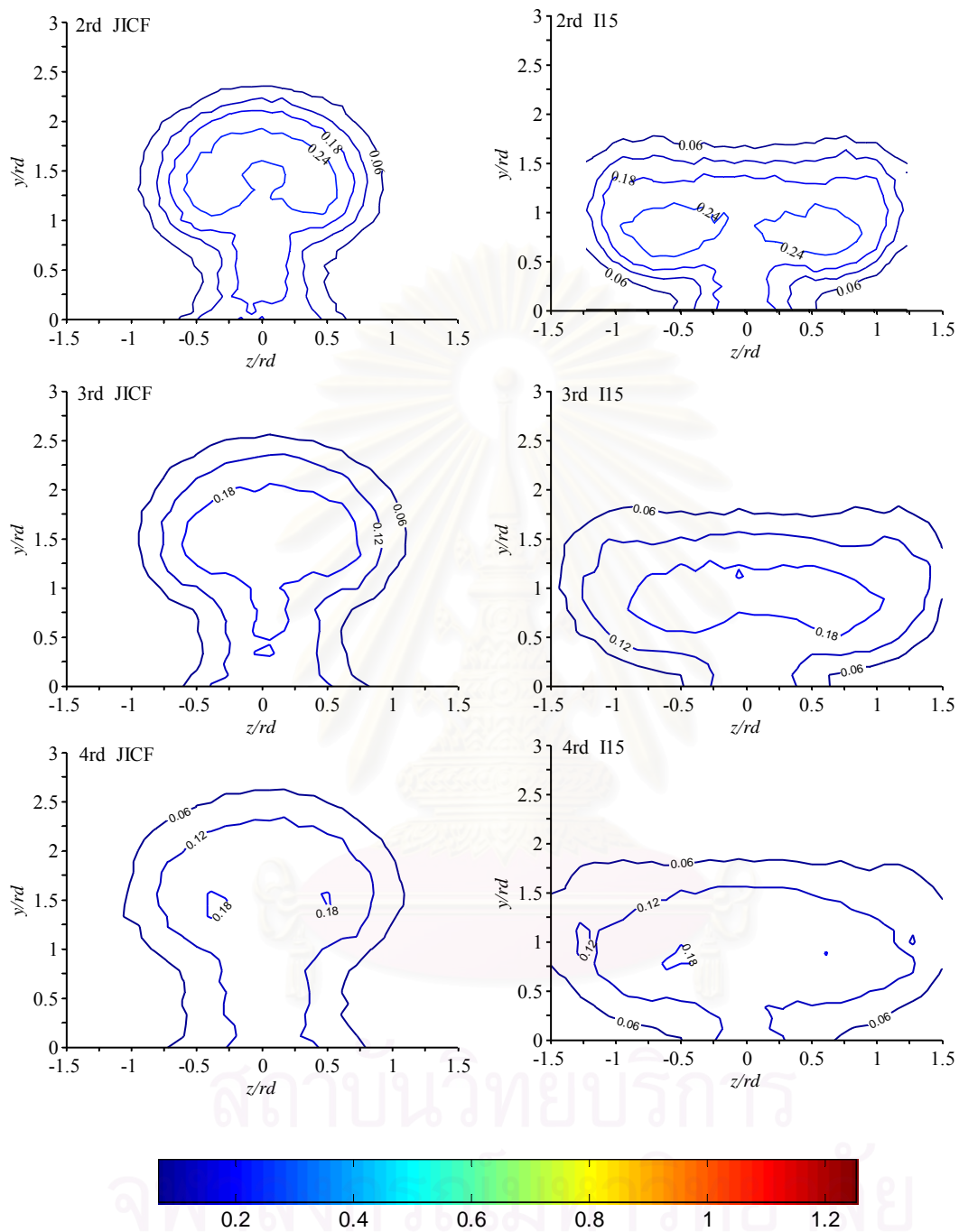
รูปที่ 3.15 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ของความเร็วเฉลี่ย ( $C_{UL}$ ) เฉพาะบน แต่ละหน้า ดของเจ็ตตาม Downstream ( $x$ ) กรณี JICF และกรณี I15



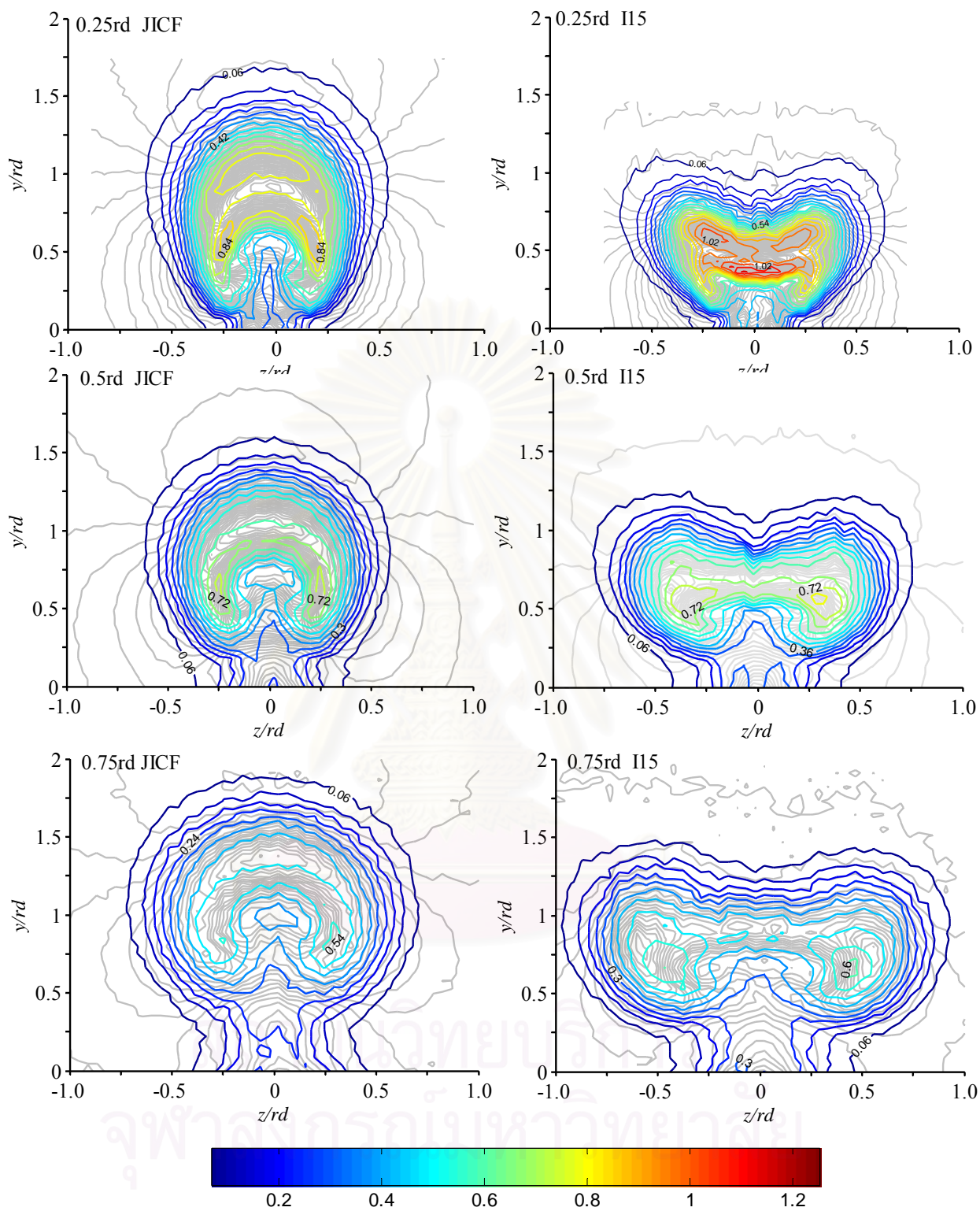
รูปที่ 3.15 (ต่อ) การเปรียบเทียบ การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ของความเร็วเฉลี่ย ( $C_{UL}$ ) เฉพาะ บนแต่ละหน้าตัดของเจ็ตตาม Downstream ( $x$ ) กรณี JICF และ กรณี I15



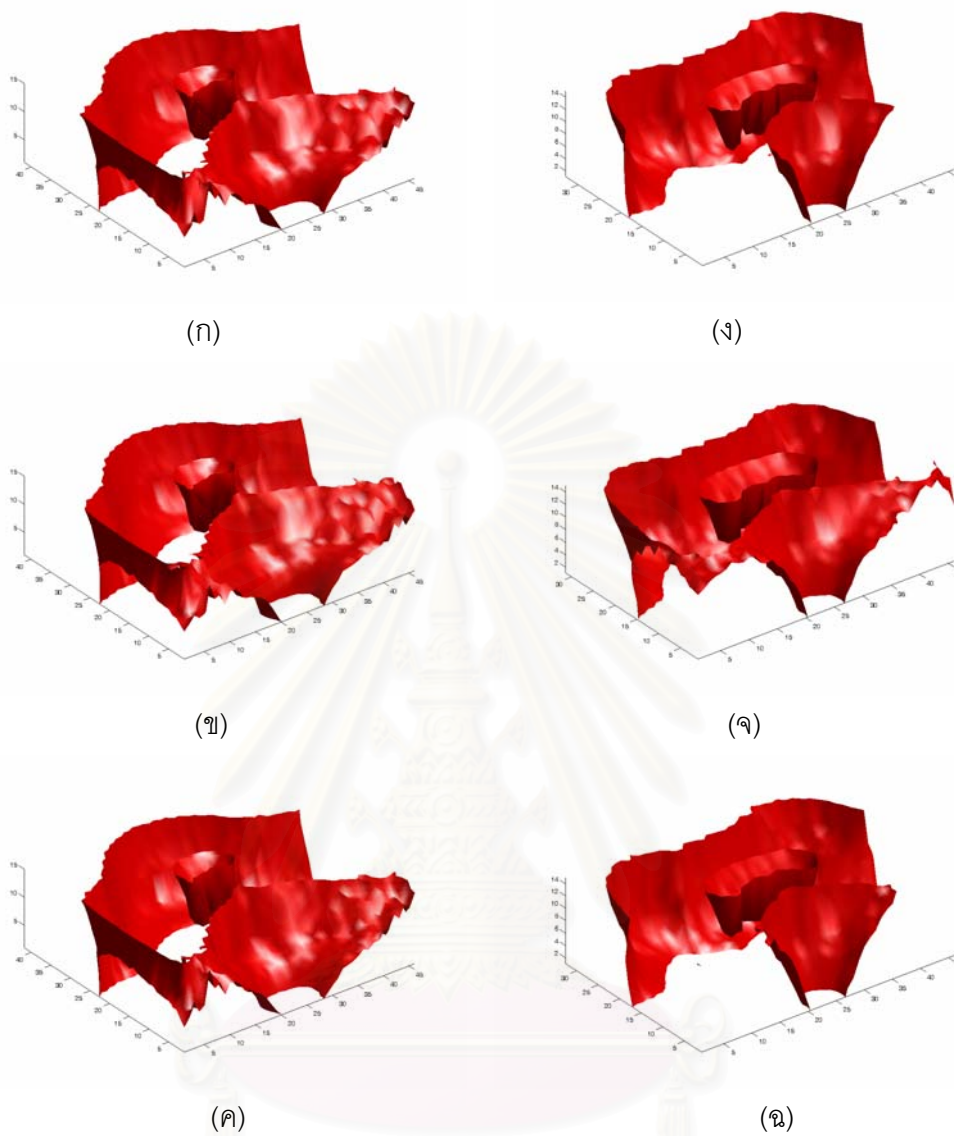
รูปที่ 3.16 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของ Fluctuation velocity ( $w_{rms}/U_{cf}$ ) บนแต่ละหน้าตัด ของเจ็ตตาม Downstream ( $x$ ) กรณี JICF และ กรณี I15



รูปที่ 3.16 (ต่อ) การเปรียบเทียบการกระจายตัวของ Fluctuation velocity ( $w_{ms}/U_{cf}$ ) บน แต่ละหน้าตัดของเจ็ตตาม Downstream (x) กรณี JICF และกรณี I15



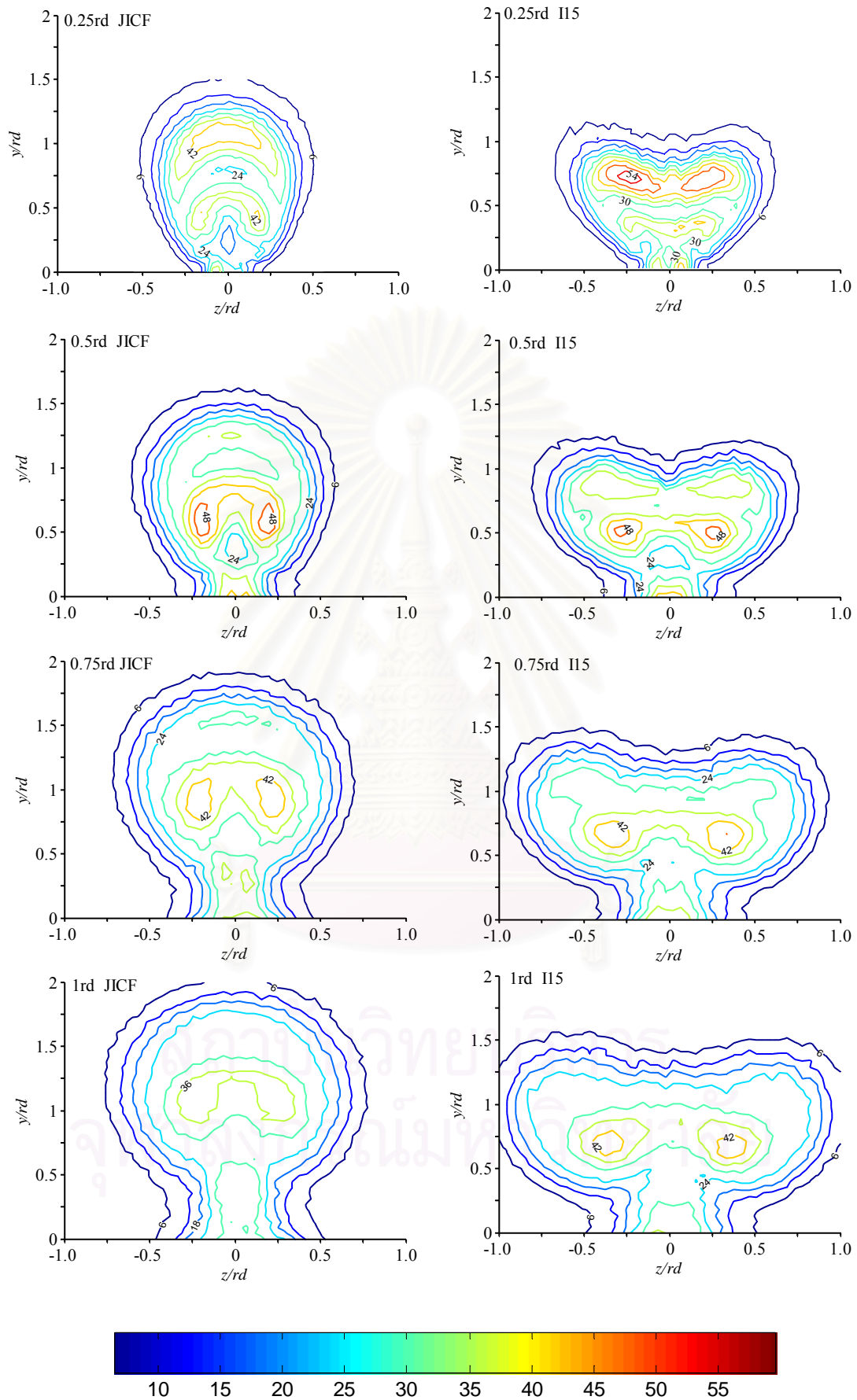
รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบพัฒนาตัวของ  $(w_{rms}/U_{cf})$  กับ ความเร็วเฉลี่ย  $(w/U_{cf})$  บนหน้าตัด  $x/rd = 0.25, 0.5$  และ  $0.75$  กรณี JICF



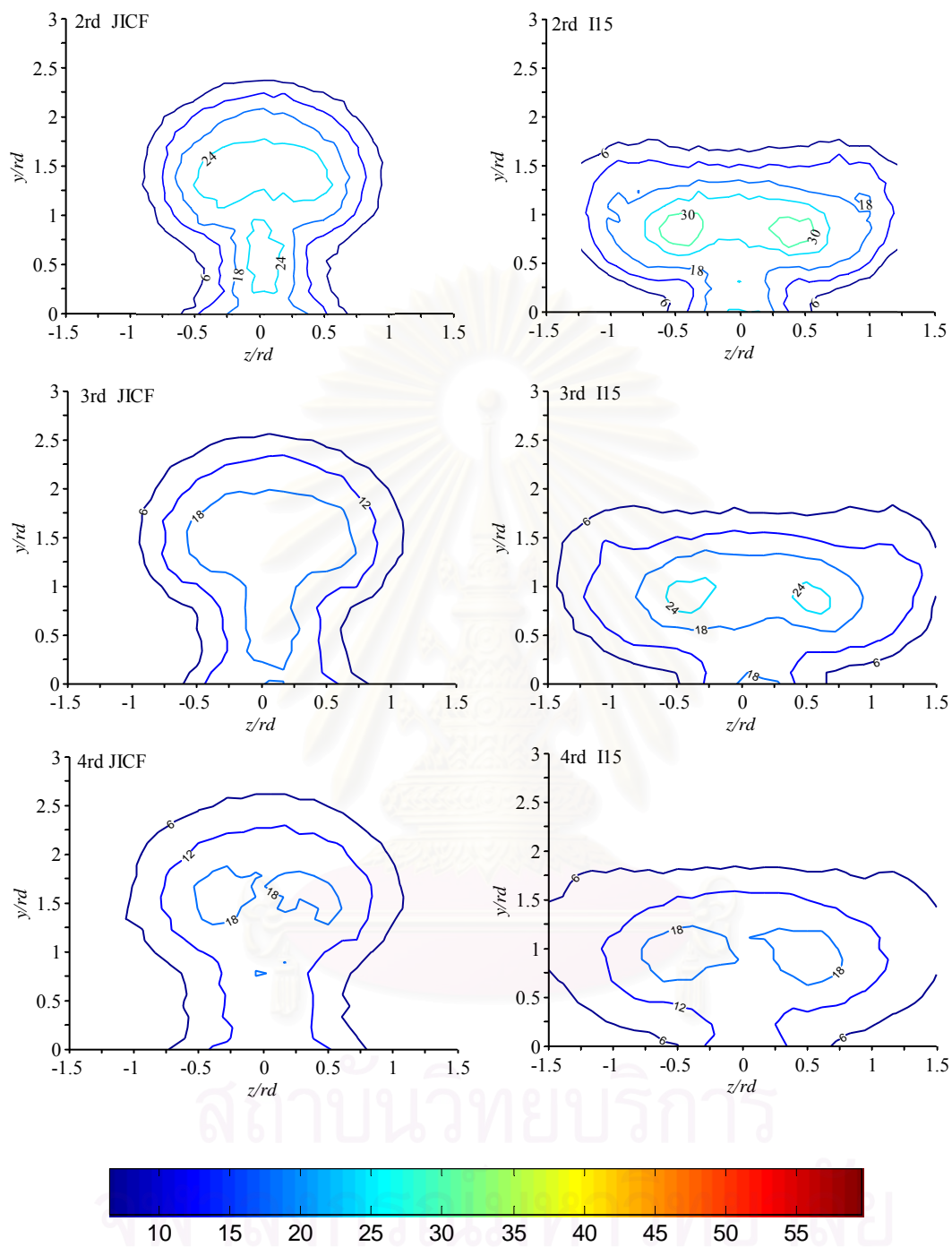
รูปที่ 3.18 การเปรียบเทียบลักษณะ 3D Surface กรณี JICF(ก-ค) กับกรณี I15 (ง-ฉ)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

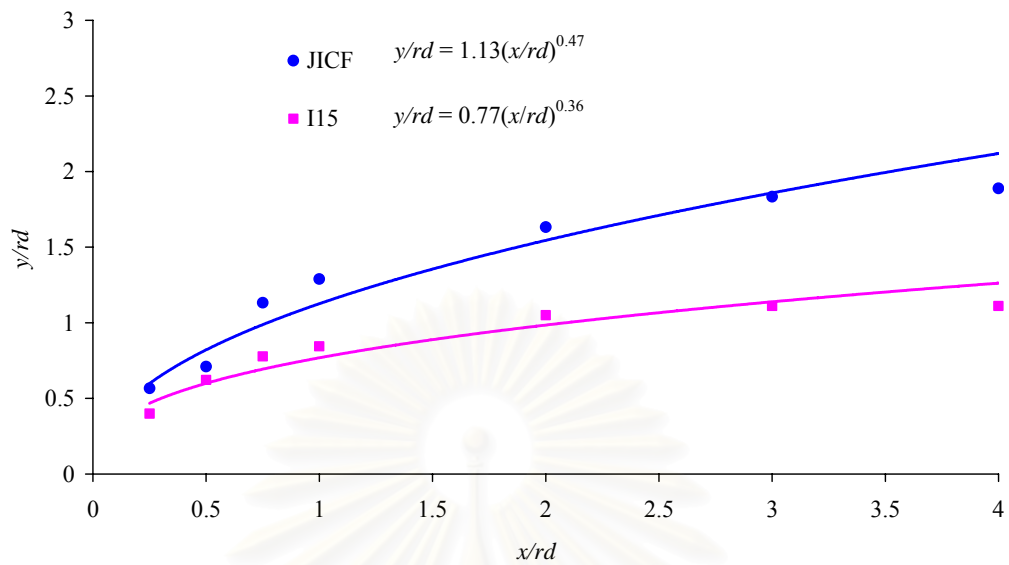




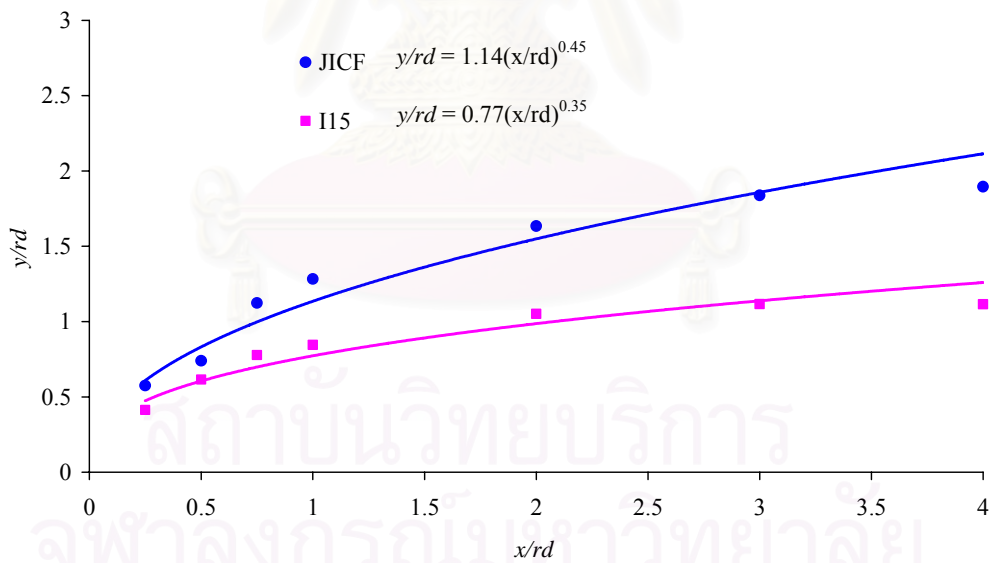
รูปที่ 3.19 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของ Turbulent intensity บนแต่ละหน้าตัดของเจ็ตตาม Downstream (x) กรณี JICF และ กรณี I15



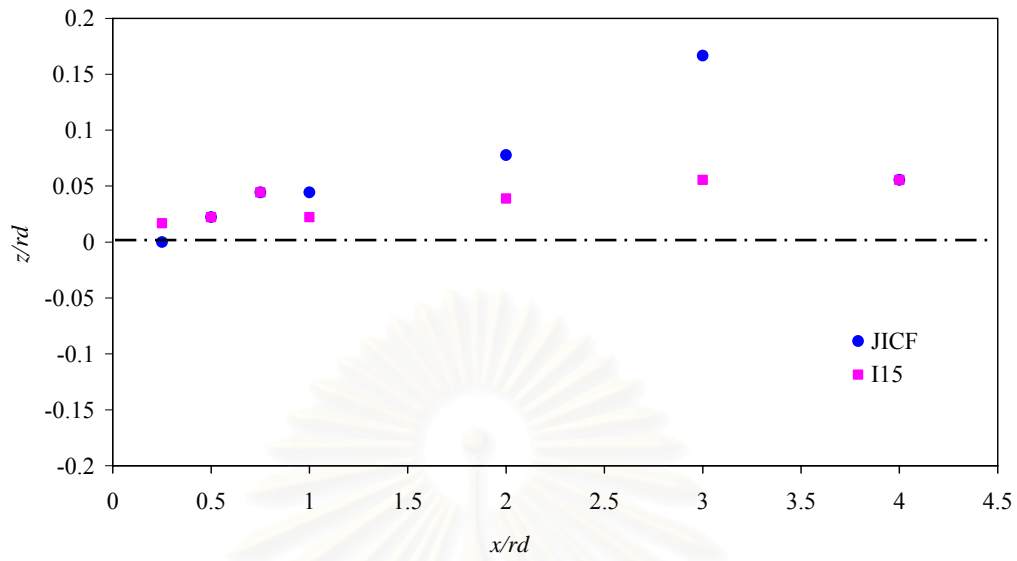
รูปที่ 3.19 (ต่อ) การเปรียบเทียบการกระจายตัวของ Turbulent intensity บนแต่ละหน้าตัดของ เจ็ต ตาม Downstream (x) กรณี JICF และกรณี I15



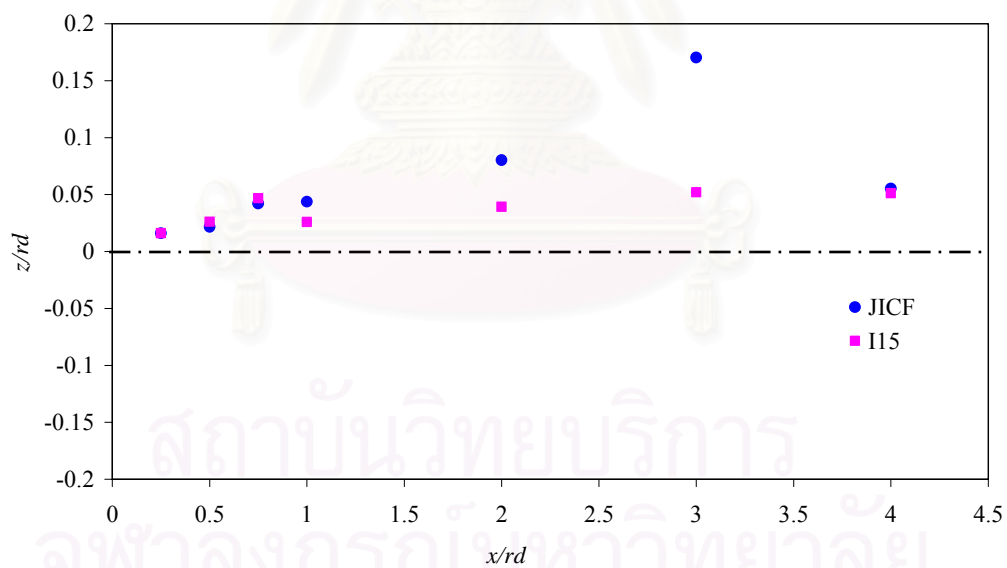
รูปที่ 3.20 เปรียบเทียบ Centroid trajectory ของความเร็วบนระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_{c,w/U_{cf}}$ ) กรณี JICF กับ กรณี I15



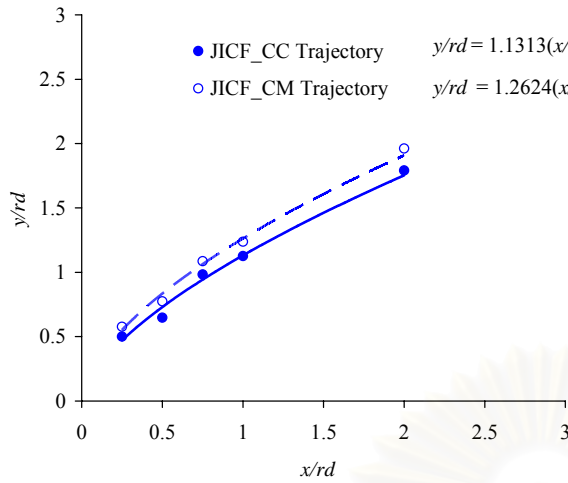
รูปที่ 3.21 เปรียบเทียบ Center of mass trajectory ของความเร็วบนระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_{m,w/U_{cf}}$ ) กรณี JICF กับ กรณี I15



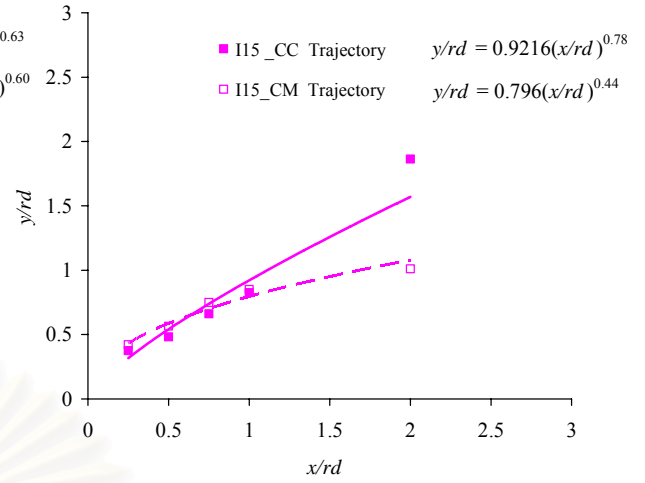
รูปที่ 3.22 เปรียบเทียบ Centroid trajectory ของความเร็วบนระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_{c,w}$ ) กรณี JICF กับ กรณี I15



รูปที่ 3.23 เปรียบเทียบ Center of mass trajectory ของความเร็วบนระนาบสมมาตร ( $\bar{z}_{m,w}$ ) กรณี JICF กับ กรณี I15

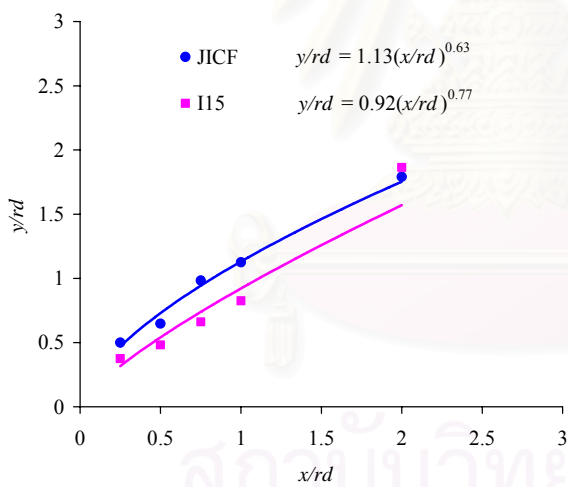


(ก)

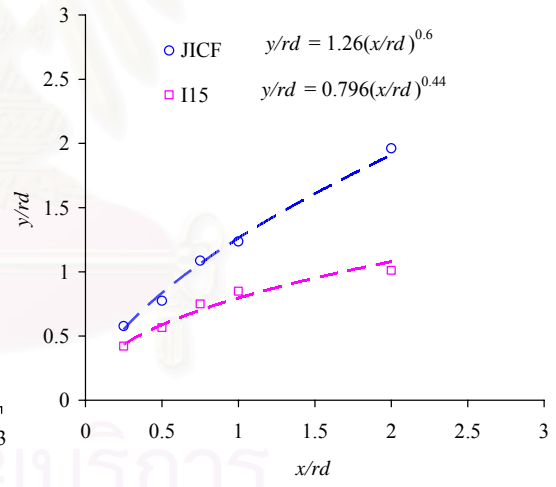


(ข)

รูปที่ 3.24 Trajectory ของ CC และ CM บนระนาบสมมาตร ก) กรณี JICF ข) กรณี I15

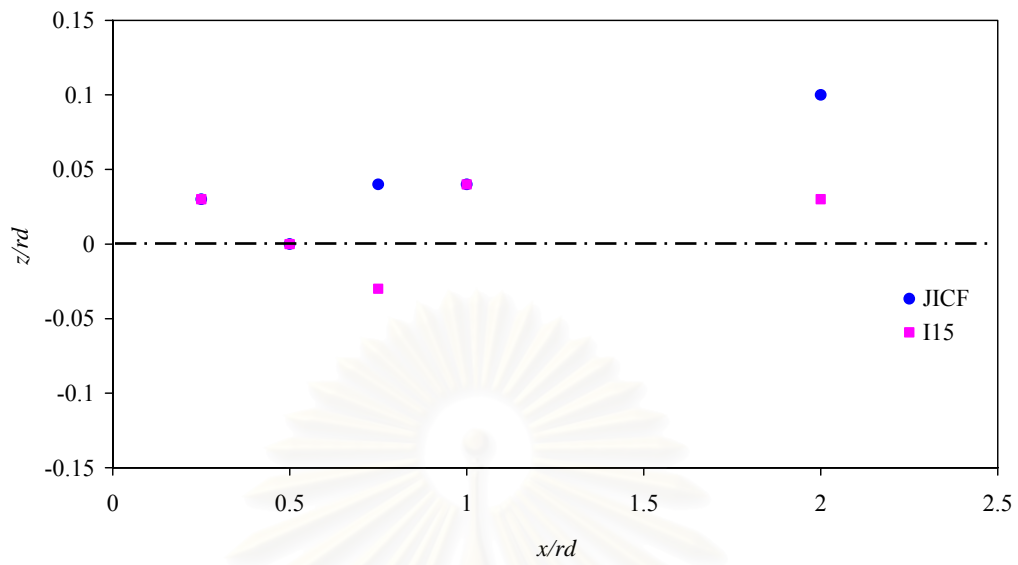


(ก)

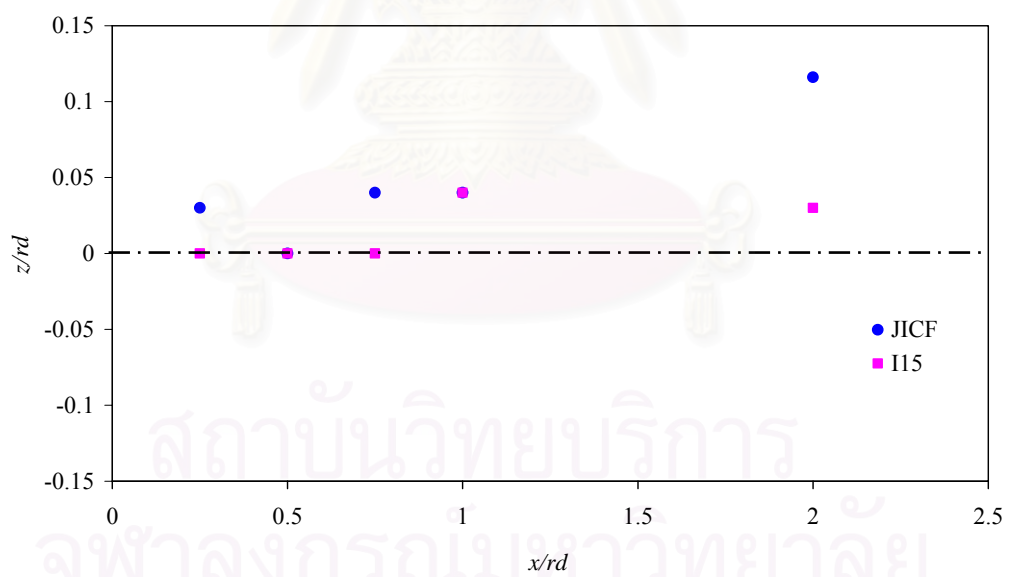


(ข)

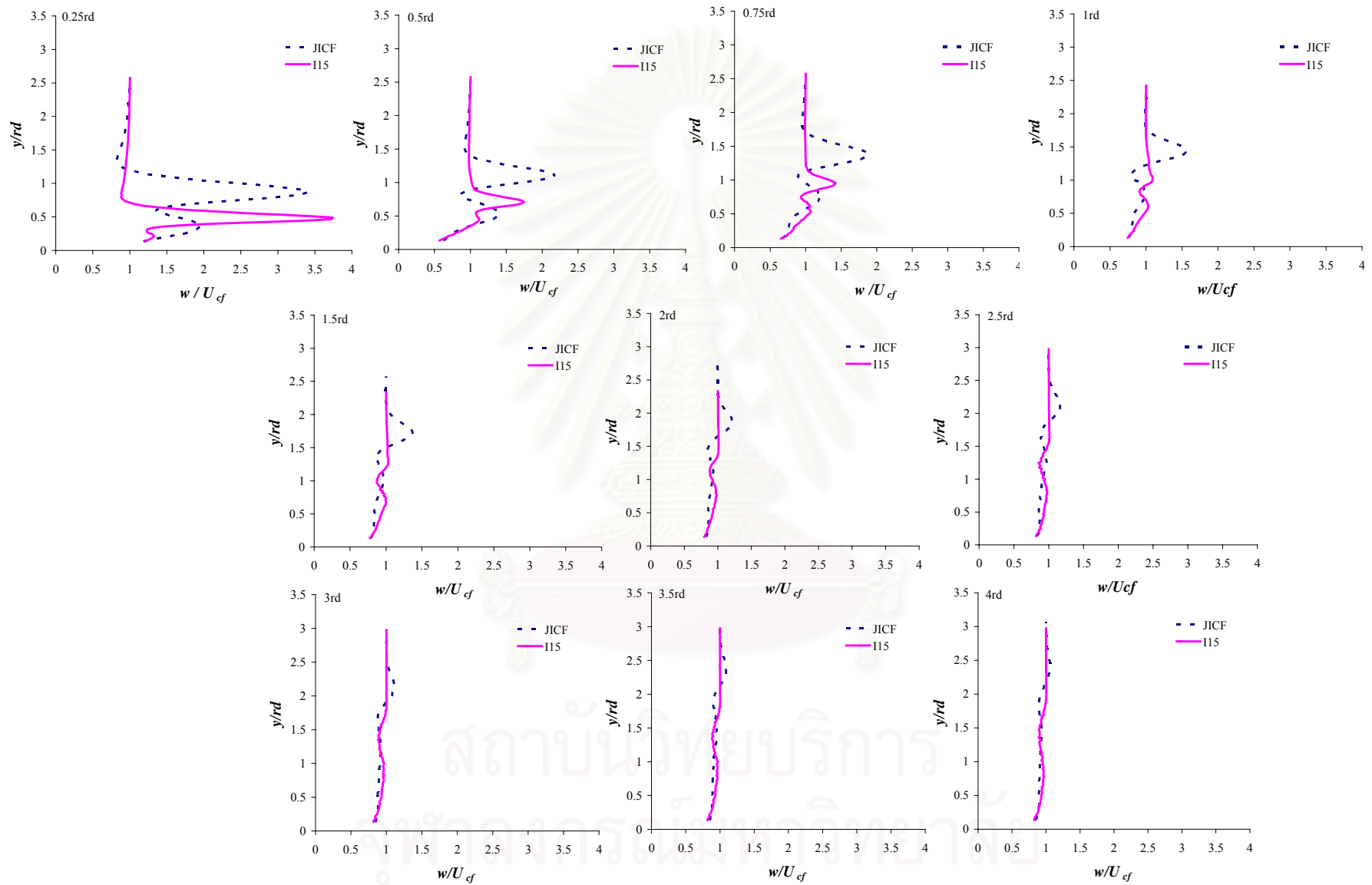
รูปที่ 3.25 เปรียบเทียบ trajectory ของ สำหรับกรณี JICF กับ กรณี I15 บนระนาบสมมาตร  
ก) CC ข) CM



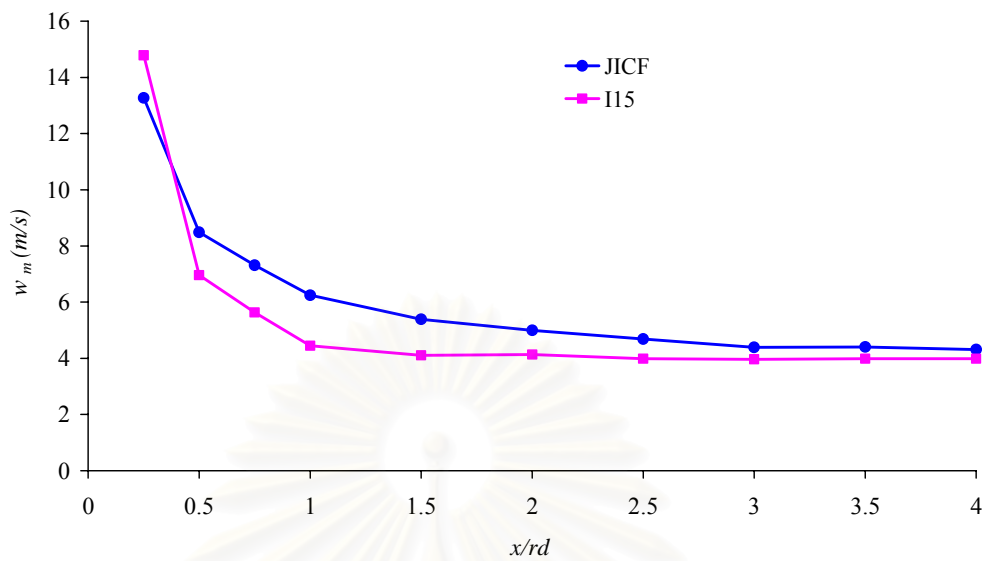
รูปที่ 3.26 เปรียบเทียบ Centroid trajectory ของความเร็วบนระนาบสมมาตร ( $\bar{z}_{c,CUG}$ ) กรณี JICF กับ กรณี I15



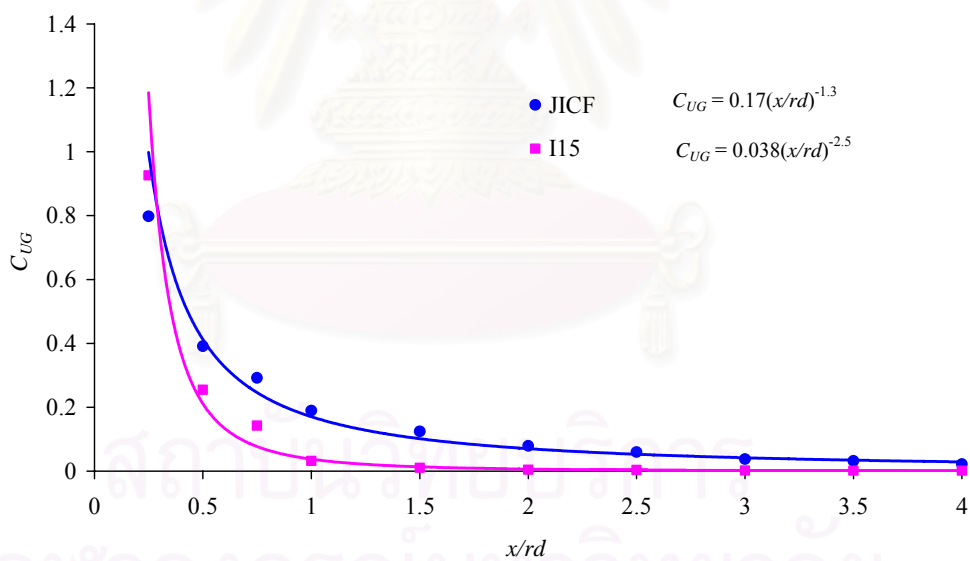
รูปที่ 3.27 เปรียบเทียบ Center of mass trajectory ของความเร็วบนระนาบสมมาตร ( $\bar{z}_{m,CUG}$ ) กรณี JICF กับ กรณี I15



รูปที่ 3.29 ที่การเปรียบเทียบรูปร่างความเร็วที่ Center plane ของเจ็ตตามแนว Downstream ( $x$ ) กรณี JICF กับ กรณี I15



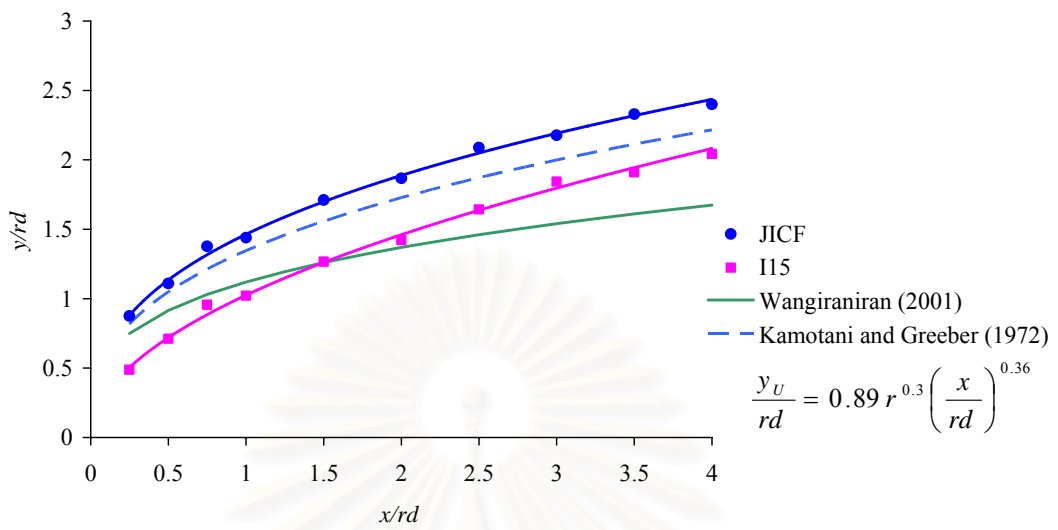
(ก)



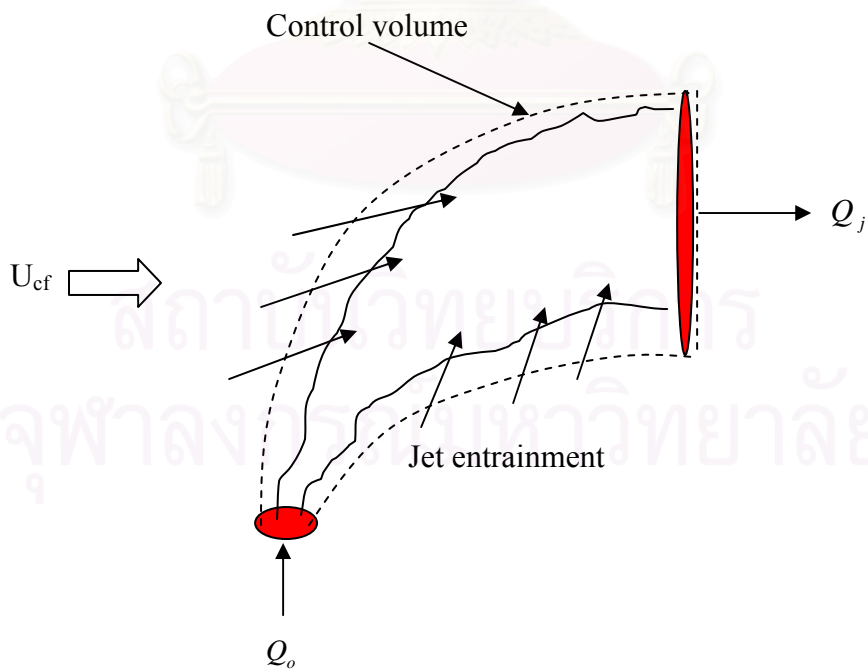
(ข)

รูปที่ 3.29 เปรียบเทียบการลดลงของความเร็วเจ็ทบน Center plane ตาม Down stream ( $x$ ) กรณี JICF กับ กรณี I15 ก)  $U_{max}$  และ ข)  $C_{UG}$

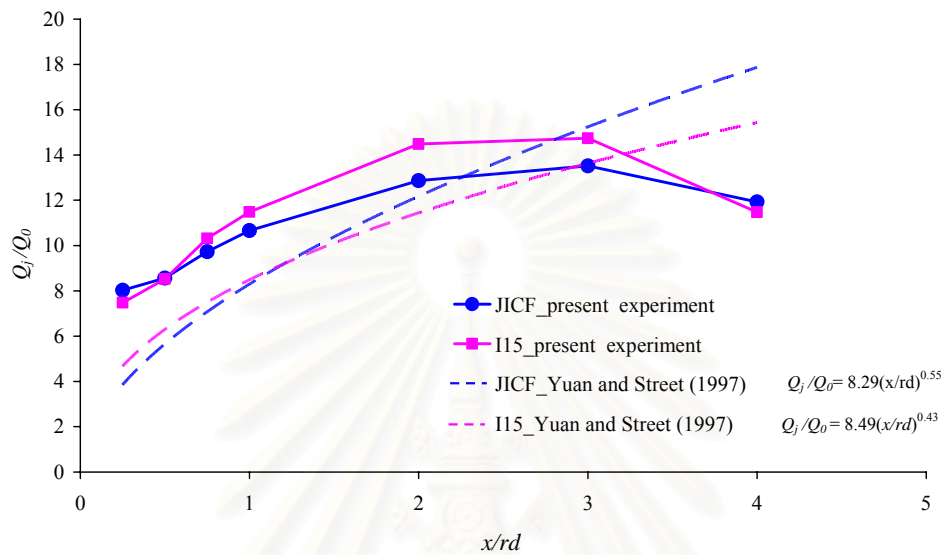




รูปที่ 3.30 แสดงการเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของความเร็วบน Center plane ของ เจ็ต ที่ตำแหน่งตาม Down stream (x) กรณี JICF เปรียบเทียบกับ กรณี I15



รูปที่ 3.31 Schematic ของการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment)



รูปที่ 3.32 การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตกรณี JICF เปรียบเทียบกับกรณี I15 ที่ตำแหน่งตาม Downstream ( $x$ )

## รายการอ้างอิง

- Bunyajitradulya, A., and Sathapornnanon, S. (2005). Sensitivity to tab disturbance of the mean flow structure of nonswirling jet and swirling jet in crossflow. *Phys. Fluids* 17, 045102.
- Dantec(2000). Instruction manual. Stream line Streamware.
- S. Gogineni, L. Goss and M. Roquemore.(1998). Manipulation of a jet in cross flow. *Exp. Thermal Fluid Sci.* 16 (3): 209–219.
- Fric, T.F., and Roshko, A., (1994). Vortical structure in the wake of a transverse jet. *J. Fluid Mech.* 279: 1-47.
- Han,D., and Mungal,M.G. (2003). Simultaneous measurements of velocity and CH distribution .Part 2 deflect jets flames. *Combustion and flame.* 133: 1-17.
- Kamotani, Y., and Greber, I. (1972). Experiments on a Turbulent Jet in a Cross Flow. *AIAA Journal.* 11: 1425 –1429.
- Kelso, R.M., Lim, T.T., and Perry, A.E. (1996). An experimental study of round jets in cross-flow. *J. Fluid Mech.* 17: 770-775.
- Lim, T.T., New ,T.H.,and Luo, S.C. (2001). On the development of large scale structures of a jet in a crossflow. *J. Fluid Mech.* 306: 111-144.
- Margason, R. J. (1968). The path of a jet directed at large angles to a subsonic freestream. *Technical Report TN D-4919, NASA.*
- M'Closkey, R.T.,King, J. M., Cortelezzi, L., and Karakozian, A. R. (2002). Activity controlled jets in crossflow. *J. Fluid Mech.* 452: 325-335.
- Milanovic, Ivana M., and Zaman, K.B.M.Q. (2004). Fluid dynamics of highly pitchedand yawed Jets in Crosssflow. *AIAA Journal.* 42: 874-882.
- Muppidi, S., and Mahesh, K. (2005a). Velocity field of around turbulent transverse jet. Proceedings fourth international symposium on turbulent and shear flow phenomena. Williamsburg. Virginia.Paper TSFP4-197: 829 – 834.
- Muppidi,S .,and Mahesh, K. (2005b). Study of trajectories of jets in crossflow using direct numerical simulations. *J. Fluid Mech.* 530: 81-100.
- Narayanan, S., Barooah, P., and Cohen, J.M. (2003). Fluid dynamics of highly pitchedand yawed Jets in Crosssflow. *AIAA Journal.* 41: 2316-2330.
- New, T.H., Lim, T.T., and Luo, S.C. (2003). Elliptic jets in cross flow . *J. Fluid Mech.* 494: 119-140.
- Pratte, B.D., and Baines, W.D. (1967). Profiles of the round turbulent jets in a cross flow. Proc. A.S.C.E. *J. Hydraul. Div.* 92: 53-64.
- Smith, S.H., and Mungal, M.G. (1998). Mixing, structure and scaling of the jet in crossflow. *J. Fluid Mech.* 357: 83-122.
- Sau, A., Sheu, W.H., Hwang, R., and yang, W.C. (2004). Tree dimensional simulation of square jets in crossflow. *Physical Review.*E69. 066302.
- Wangjiraniran, W., and Bunyajitradulya, A.(2001). Effects of Swirl Number on Mixing Characteristics of A Heated Swirling Jet in Crossflow. Master Thesis, Departmentof Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,Chulalongkorn University,Thailand.
- Yuan, L.L., and Street, R.L.(1998). Trajectory and entrainment of a round jet in crossflow. *Phys. Fluids.* 10(9): 2323-2335.
- Yuan, L.L., Street, R.L., and Ferziger, J.H. (1999). Large-eddy simulations of a round jet in crossflow. *J. Fluid Mech.* 379: 71-104.

Zaman, K.B.M.Q., and Foss, J.K. (1997). The effect of vortex generators on a jet in a cross-flow. *Phys. Fluids*. 9: 106-114.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

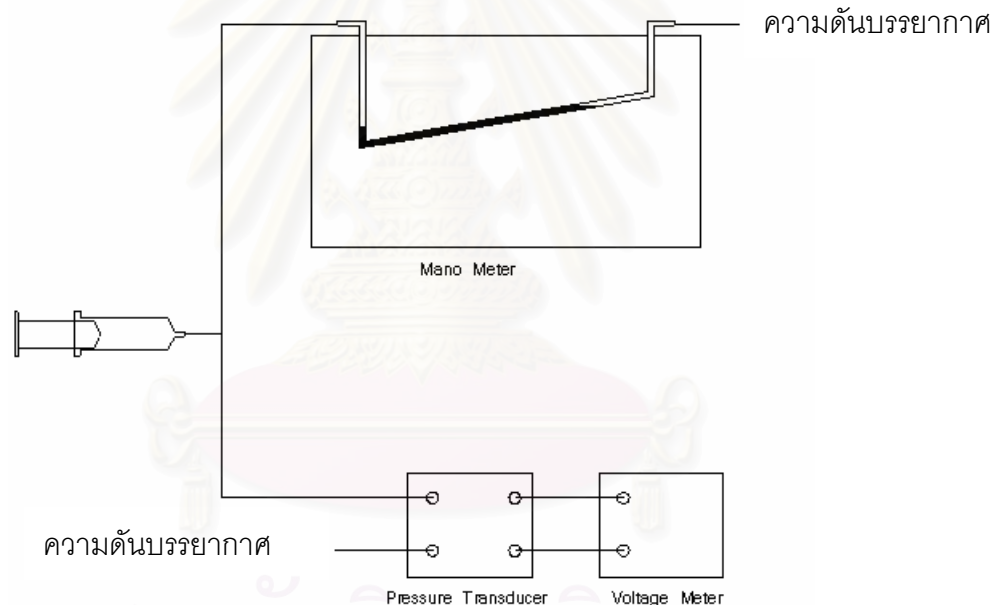
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### การสอบเทียบ Pressure transducer

สำหรับการวัดความเร็วของการทดลองนี้ จะใช้ Hot film anemometer ในการวัดความเร็วของเจ็ต ในเบื้องต้นทำการสอบเทียบ Hot film กับ ความเร็วที่วัดได้จาก Pitotube สืบเนื่องจากความเร็วที่ได้อ่านค่าจาก Pressure transducer ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสอบเทียบ Pressure transducer กับเครื่องมือวัดมาตรฐานซึ่งการทดลองนี้เลือกใช้ Incline manometer เป็นอุปกรณ์มาตรฐานสำหรับการสอบเทียบ

Pressure transducer ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันทางกลเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า สำหรับการทำงานนั้นจะอาศัยหลักการของ Capacitance และลำดับต่อไปจะแสดงการสอบเทียบซึ่งมีวิธีการดังนี้



รูปที่ ก (1) Scheme ของการสอบเทียบ Pressure transducer

เริ่มต้นจากอากาศถูกอัดด้วยหลอดเข็มฉีดยาเพื่อให้อากาศไหลต่อไปยังด้านแรงดันสูงของ Incline manometer และด้านแรงดันสูงของ Pressure transducer ขณะที่ด้านแรงดันต่ำของอุปกรณ์ทั้ง 2 จะปล่อยออกสู่บรรยากาศดังรูปที่ ก(1) เป็นผลให้ระดับของเหลวใน Incline manometer เปลี่ยนแปลงระดับ จนถึงระดับที่กำหนด สำหรับการสอบเทียบนี้จะกำหนดค่าความละเอียดเท่ากับ  $1\text{mm}_w$  จากนั้นอ่านค่า แรงเคลื่อนที่ Pressure transducer จากโวลต์มิเตอร์จนถึงค่า ของความดันที่ระบุเป็นค่าสูงสุดของการใช้งานจากผู้ผลิต Pressure transducer โดยที่การสอบเทียบนั้นจะทำการทดลองทั้งหมด 2 ครั้ง (ขึ้น-ลง) จากนั้นจะหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง

ความสูงของน้ำกับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ Pressure transducer ที่อ่านได้จากดิวอลต์มิเตอร์  
ซึ่งจะได้ สัมการความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังนี้

$$V = 0.21H + 2.557 \quad \text{สำหรับ Pressure transducer ขนาด } 0.5 \text{ in}_w$$

$$V = 0.073H + 3.0 \quad \text{สำหรับ Pressure transducer ขนาด } 1 \text{ in}_w$$

โดยที่ V แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Volt)

H ความสูงของน้ำ (mm<sub>w</sub>)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

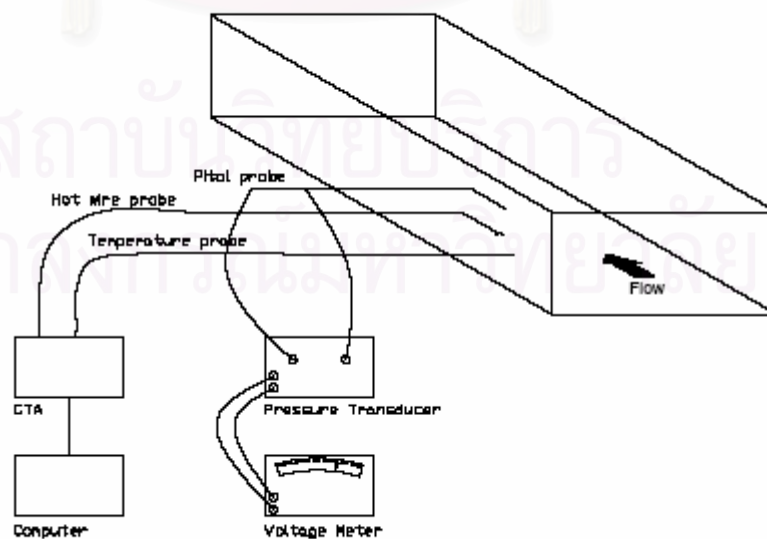
### การสอบเทียบขนาดและทิศทางสำหรับการวัดความเร็วด้วย Hot film

#### ข.1 ลักษณะและรายละเอียดของ Hot film anemometer

Hot film เป็นอุปกรณ์วัดความเร็วลมได้โดยอาศัยหลักการของ Convection heat transfer เมื่อมีอากาศไหลผ่านเส้นลวดเป็นผลเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนเส้นลวดซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะทำให้ความต้านทานและแรงเคลื่อนตกคร่อมของเส้นลวดเปลี่ยนแปลงตามด้วย ซึ่งในการวัดจะอาศัยการวัดแรงเคลื่อนตกคร่อมที่เส้นลวดและสามารถหาค่าของความเร็วลมได้โดยอาศัยโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับแรงเคลื่อนที่ตกคร่อมตาม King ' law

#### ข.2 การสอบเทียบ Hot film anemometer

การสอบเทียบ (Calibration) แรงเคลื่อนที่อ่านค่าจาก Hot film กับอุปกรณ์มาตรฐานคือ Pitotube โดยอาศัยความเร็วลมของอุโมงค์ลมสอบเทียบ ดังรูป ข.2(ก) และทำการสอบเทียบความเร็วลมตั้งแต่ 0 จนถึง 20.5 เมตรต่อวินาที และได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับแรงเคลื่อนเป็นแบบ เชิงเส้น ( Polynomial order 4 ) และกำหนดให้ Program ชดเชยค่าความเร็วที่อ่านจาก Hot film เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิที่สอบเทียบไว้ ซึ่ง Hot film ที่จะนำมาวัดความเร็วสำหรับการทดลองนี้ได้ทำการสอบเทียบทั้งขนาด (Volt - Velocity) และทิศทาง (K- h) โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้



รูปที่ ข.2 (ก) Schematic ของการสอบเทียบ Hot film

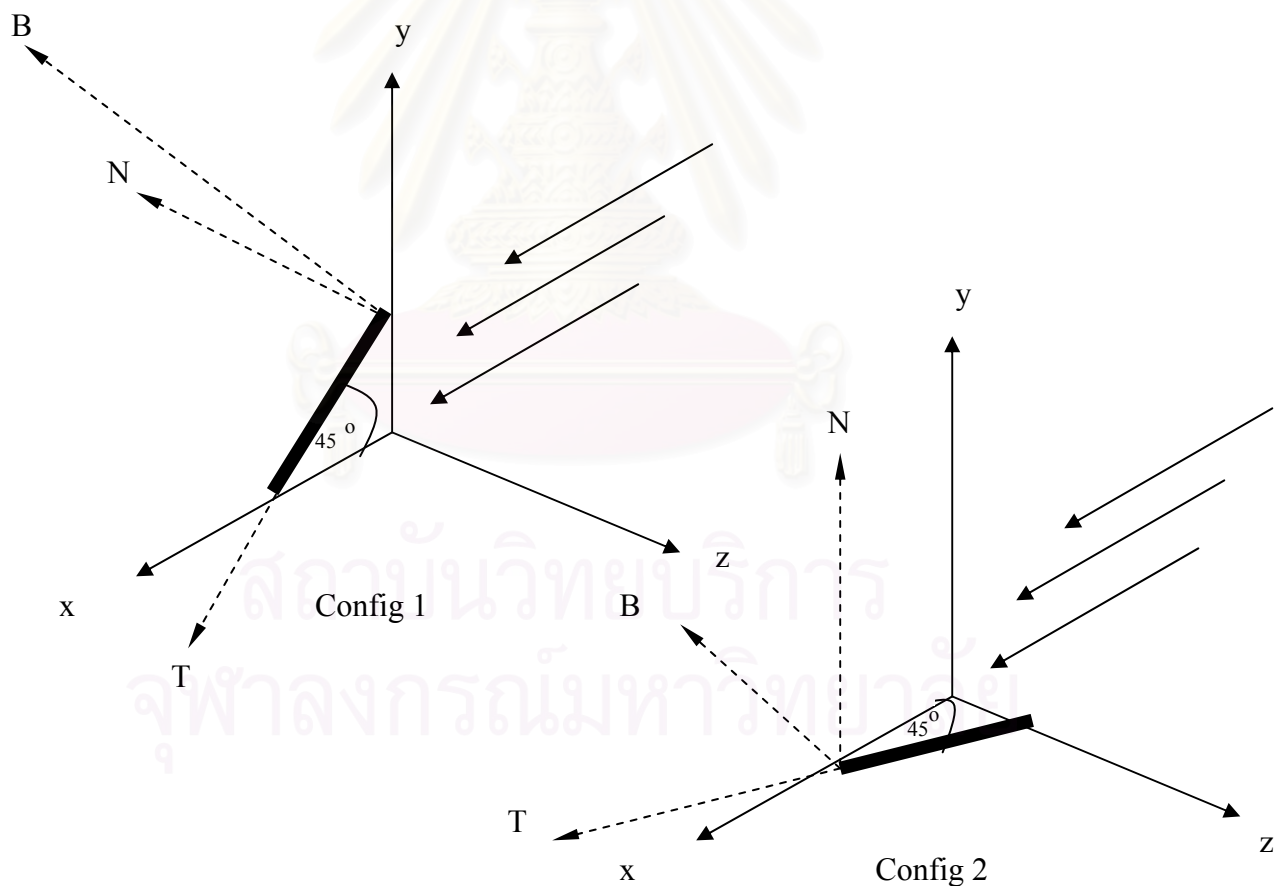


### 1. การสอบเทียบขนาดของความเร็ว

การสอบเทียบสำหรับการทดลองนี้จะทำการสอบเทียบช่วงความเร็วลมตั้งแต่ 0 –20.5 เมตรต่อวินาทีซึ่งในการสอบเทียบจะทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมและบันทึกค่าแรงเคลื่อนที่และอุณหภูมิที่ Hot film อ่านค่าได้โดยใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 10 KHz และเก็บนาน 5 วินาที โดยในการสอบเทียบจะเปลี่ยนแปลงความเร็วลมทั้งหมด 11 ค่า จากนั้นจะนำค่าแรงเคลื่อนที่และอุณหภูมิที่บันทึกไว้มาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละค่าของความเร็วลม จากนั้นนำค่าความเร็วเฉลี่ย, อุณหภูมิเฉลี่ย และความเร็วลมมาสร้างความสัมพันธ์โดยใช้การคำนวณของโปรแกรม Streamline Stream ware ของ Dantec

### 2. การสอบเทียบทิศทาง (k-h)

การสอบเทียบหาค่า k- h นั้นจะทำการสอบเทียบโดยการกำหนดมุมระหว่างเส้นลวดที่กระทำกับทิศทางของ Flow คงที่เท่ากับ 45 องศา ดังรูป ข.2 (ข)



รูปที่ ข.2 (ข) Schematic ของการสอบเทียบ k-h

สำหรับการทดลองนี้จะทำการสอบเทียบความเร็วทั้งหมด 4 ค่า คือ 4, 8, 12, 16 เมตรต่อวินาที และสามารถหา ค่า  $k$ -  $h$  ได้จากสมการ ของ Jorgensen relation ดังนี้

$$U_{eff}^2 = k^2 U_T^2 + U_N^2 + h^2 U_B^2 \quad \text{ข.1}$$

*config1*

$$k^2 = \frac{U_{eff1}^2 - U_N^2}{U_T^2}$$

$$k^2 = \frac{U_{eff}^2 - U_{cf}^2 (\sin^2 45)}{U_{cf}^2 \cos^2 45}$$

$$k^2 = \frac{2U_{eff}^2}{U_{cf}^2} - 1 \quad \text{ข.2}$$

*config2*

$$U_{eff}^2 = k^2 U_T^2 + U_N^2 + h^2 U_B^2$$

$$h^2 = \frac{U_{eff}^2 - k^2 U_T^2}{U_B^2}$$

$$h^2 = \frac{U_{eff}^2 - k^2 U_{cf}^2 \cos^2 45}{U_{cf}^2 \sin^2 45}$$

$$h^2 = \frac{2U_{eff}^2}{U_{cf}^2} - k^2 \quad \text{ข.3}$$

แทนค่าความเร็ว 4, 8, 12, 16 เมตรต่อวินาที ลงสมการ ข.2 และ ข.3 คำนวณค่า  $k$  -  $h$  ของแต่ละความเร็วจากนั้นนำค่า  $k$  -  $h$  มาเฉลี่ยเพื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของการวัดความเร็วลม สำหรับการสอบเทียบสำหรับการทดลองนี้ได้ค่า  $k_{avg}^2 = 0.056$ ,  $h_{avg}^2 = 1.047$

## ภาคผนวก ค

### การคำนวณค่าความไม่แน่นอน

#### ค.1 ค่าความไม่แน่นอนของความเร็ว

##### ค.1.1 ความไม่แน่นอนของความเร็วจากการวัดด้วย Hot film

การคำนวณความเร็วของการไหลด้วย Hot film ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\begin{aligned}U_{\text{off}}^2 &= k^2 U_T^2 + U_N^2 + h^2 U_B^2 = U_N'^2 + U_B'^2 \\ &= k^2 U_T^2 + (U_N^2 + U_B^2) + (h^2 - 1)U_B^2 = (U_N'^2 + U_B'^2)\end{aligned}$$

เมื่อ	$U_{\text{eff}}$	ความเร็วที่อ่านได้จาก Hot film
	$U_T$	ความเร็วจริงที่ขนานกับ Wire
	$U_N$	ความเร็วจริงที่ตั้งฉากกับ Wire บนทิศทางที่ 1
	$U_B$	ความเร็วจริงที่ตั้งฉากกับ Wire บนทิศทางที่ 2
	$V$	ความเร็วลมรวม

กำหนดให้

$$\begin{aligned}U_n^2 + U_B^2 &= V^2 \\ U_n'^2 + U_B'^2 &= V'^2 \\ \delta &= (V' - V)\end{aligned}$$

โดยมีข้อสมมุติฐานดังนี้

1.  $U_T \approx U_B$
2.  $\delta \ll V$
3.  $U_B \approx V$
4.  $V \approx U_{\text{max}}$

ประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดได้จาก

$$\begin{aligned}
 (V'-V)(V'+V) &= (K^2 + h^2 - 1)U_B^2 \\
 \delta(2V + \delta) &= (K^2 + h^2 - 1)U_B^2 \\
 2V\delta &= (K^2 + h^2 - 1)U_B^2 \\
 \frac{\delta}{V} &= \frac{(K^2 + h^2 - 1)\left(\frac{U_B}{V}\right)^2}{2} \\
 &= \frac{0.0564 + 1.047 - 1}{2} \\
 \frac{\delta}{V} &= 0.0517 \approx 0.052
 \end{aligned}$$

ความไม่แน่นอนของค่าความเร็วจากการวัดด้วย Hot film มีค่าประมาณ  $\pm 0.052$  ของค่า

ความเร็วที่วัดได้ (V) เมื่อพิจารณา ค่าความไม่แน่นอนของ  $\frac{u}{U_{cf}} \approx \frac{\delta / U_{ef}}{V / U_{ef}} \approx 0.052$

### ค.1.2 ความไม่แน่นอนของความเร็ว Fluctuation velocity ( $w_{rms}$ )

เมื่อ  $w_i$  ความเร็วที่เวลาใด

$w$  ค่าของความเร็วเฉลี่ย

$$\begin{aligned}
 w_{rms} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i - w)^2}{n-1}} \\
 &\approx \sqrt{\frac{n(w_i - w)^2}{n-1}} \\
 &\approx (w_i - w) \left(\frac{n}{n-1}\right)^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned}$$

จากการประมาณค่าความไม่แน่นอนโดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ

$u_{rms}$  ได้จาก

$$\delta_{w_{rms}} = \sqrt{\left(\frac{\partial w_{rms}}{\partial w_i} \delta w_i\right)^2 + \left(\frac{\partial w_{rms}}{\partial w} \delta w\right)^2}$$

$$\begin{aligned}
 \text{โดยที่} \quad \delta_{w_{rms}} &\approx \sqrt{\delta_p^2 + \left(\sum_1^4 w_{rms}\right)^2} \approx \pm 0.06 m/s \\
 \delta_{w_{rms}} &\approx 0.052 V
 \end{aligned}$$

ความไม่แน่นอนของค่าความเร็ว Fluctuation velocity มีค่าประมาณ 0.061 – 0.196 m/s โดยงานวิจัยนี้จะระบุค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่  $\delta w_{rms}$  สูงสุดไม่เกิน 0.2 m/s

### ค.1.3 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วรวม ( $C_{UG}$ )

ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วรวม ( $C_{UG}$ ) นิยามโดย

$$C_{UG} = \frac{w - U_{cf}}{U - U_{cf}} = C_{UG}(w, U, U_{cf})$$

จากการประมาณค่าความไม่แน่นอนโดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{UG}$  ( $\delta C_{UG}$ ) ได้จากความสัมพันธ์

$$\delta C_{UG} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_{UG}}{\partial w} \delta w\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{UG}}{\partial U} \delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{UG}}{\partial U_{cf}} \delta U_{cf}\right)^2}$$

แทนค่า  $C_{UG}$  จะได้

$$\therefore \delta C_{UG} = \sqrt{\left(\frac{1}{U - U_{cf}} \delta w\right)^2 + \left(\frac{-(w - U_{cf})}{(U - U_{cf})^2} \delta U\right)^2 + \left(\frac{-(U - U_{cf}) + (w - U_{cf})}{(U - U_{cf})^2} \delta U_{cf}\right)^2}$$

จากการคำนวณพบว่าค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{UG}$  ( $\delta C_{UG}$ ) ในการทดลองอยู่ในช่วง 0.022-0.047 โดยงานวิจัยนี้จะระบุค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่  $\delta C_{UG}$  สูงสุดไม่เกิน 0.05

### ค.1.4 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วเฉพาะหน้าตัด ( $C_{UL}$ )

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะหน้าตัด ( $C_{UL}$ ) นิยามโดย

$$C_{UL} = \frac{w - U_{cf}}{w_{max} - U_{cf}} = C_{UL}(w, w_{max}, U_{cf})$$

จากการประมาณค่าความไม่แน่นอนโดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{UL}$  ( $\delta C_{UL}$ ) ได้จากความสัมพันธ์

$$\delta C_{UL} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_{UL}}{\partial w} \delta w\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{UL}}{\partial w_{max}} \delta w_{max}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{UL}}{\partial U_{cf}} \delta U_{cf}\right)^2}$$

แทนค่า  $C_{UL}$  ได้

$$\therefore \delta C_{UL} = \sqrt{\left(\frac{1}{w_{\max} - U_{cf}} \delta w\right)^2 + \left(\frac{-(w - U_{cf})}{(w_{\max} - U_{cf})^2} \delta w_{\max}\right)^2 + \left(\frac{-(w_{\max} - U_{cf}) + (w - U_{cf})}{(w_{\max} - U_{cf})^2} \delta U_{cf}\right)^2}$$

จากการคำนวณพบว่าค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{UL}$  ในการทดลองอยู่ในช่วง 0.05-0.19 งานวิจัยนี้ได้ระบุค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่  $\delta C_{UL}$  ประมาณ 0.2



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย พรชัย กรศรี เกิดวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดตาก สำเร็จการศึกษา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี  
ราชมงคล ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขา  
วิศวกรรมเครื่องกลจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย