

ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวาง

นายธเนศน์ วิทยาประภากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFECTS OF AZIMUTHAL CONTROL JETS ON ENTRAINMENT
OF A JET IN CROSSFLOW

Mr. Taned Witayaprapakorn

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 2013
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำ

การผสมของเจ็ดในกระแสมขวาง

โดย

นายณเศน์ วิทยาประภากร

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เลิศนุวัฒน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ วรรณโสภาคย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เวชพงศ์ ชูติชูเดช)

ธเนศน์ วิทยาประภากร: ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสม
ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (EFFECTS OF AZIMUTHAL CONTROL JETS ON
ENTRAINMENT OF A JET IN CROSSFLOW) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รศ.ดร. อติ บุญจิตราดุลย์, 174 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตใน
กระแสลมขวาง ที่มีค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 3.9 และเรโนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแส
ลมขวางเท่ากับ 5,900 การทดลองจะใช้ Steroscopic Particle Image Velocimetry เป็น
เครื่องมือวัดความเร็ว โดยทำการทดลองสามกรณีคือ กรณีไม่ควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ต
ควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ (กรณี I15) และ $\pm 135^\circ$ (กรณี I135) ที่อัตราส่วนเชิงมวลเจ็ต
ควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลักคงที่เท่ากับ 2 % ผลของเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้าง กรณี I15
พบว่าจะทำให้โครงสร้างของเจ็ตขยายตัวออกด้านข้างมากขึ้นและความสูงและขนาดของเจ็ตตาม
แนวตั้งจะลดลง รวมถึงส่งเสริมความปั่นป่วน ในขณะที่ กรณี I135 พบว่าจะไม่ทำให้โครงสร้าง
ของเจ็ตเปลี่ยนไปจากกรณี JICF มากนัก ผลของเจ็ตควบคุมต่อ Circulation กรณี I15 พบว่าจะ
ทำให้เจ็ตมี Circulation มากขึ้น ในขณะที่ กรณี I135 จะไม่ทำให้เจ็ตมี Circulation เปลี่ยนไป
จากกรณี JICF มากนัก ผลของเจ็ตควบคุมต่อเส้นทางเดิน กรณี I15 พบว่าจะทำให้เจ็ตมีเส้นทาง
เดินต่ำลง ในทางตรงกันข้าม กรณี I135 จะทำให้เจ็ตมีเส้นทางเดินสูงขึ้น ผลของเจ็ตควบคุมต่อ
การเหนี่ยวนำการผสม กรณี I15 พบว่าส่งผลให้เจ็ตมีการเหนี่ยวนำการผสมใกล้เคียงกับกรณี
JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 0.75 แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ และ 1.5
พบว่าจะมีการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นจากกรณี JICF ประมาณ 5 % ในขณะที่ กรณี I135 จะ
ทำให้เจ็ตมีการเหนี่ยวนำการเพิ่มขึ้นตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 และมีการเหนี่ยวนำ
การผสมมากที่สุดที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ โดยเพิ่มขึ้นจากกรณี JICF ประมาณ 13 %

ผลศึกษาชี้แนะว่า อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรมีความสัมพันธ์กับระยะ
เจาะทะลุของเจ็ต (penetration depth) ซึ่งนิยามจาก Center of mass ของ Vorticity และ
Circulation

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5370256521: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD: AZIMUTHAL CONTROL JETS / JET IN CROSSFLOW/
VOLUMETRIC ENTRAINMENT RATIO

TANED WITAYAPRAPAKORN: EFFECTS OF AZIMUTHAL CONTROL
JETS ON ENTRAINMENT OF A JET IN CROSSFLOW

ADVISOR: ASSOC. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA, Ph.D., 174 pp.

Effects of azimuthal control jets on the entrainment of a jet in crossflow (JICF) are investigated. The experiment is conducted with the jet with the effective velocity ratio of 3.9 and the crossflow Reynolds number of 5,900. Stereoscopic particle image velocimetry (SPIV) is used for velocity field measurements at the cross planes ranging from $x/rd = 0.5$ to 1.5. In the two controlled cases, a pair of azimuthal control jets are deployed steadily at the azimuthal positions $\pm 15^\circ$ (case I15) and $\pm 135^\circ$ (case I135) and at the mass flow rate ratio of the control jets to the main jet of 2%. For the effects of the control jets on the jet structure and turbulence, it is found that the deployment of the azimuthal control jets in case I15 results in increase in the spanwise extent of the jet but decrease in the height and size of the jet in the traverse direction when compared to the uncontrolled case (case JICF). In addition, it is found that case I15 promotes turbulence. On the other hand, case I135 has relatively little effect on the jet structure and turbulence. For the effects of the control jets on circulation, case I15 results in significant increase in circulation while case I135 has little effect on circulation. For the effects of the control jets on the jet trajectory, it is found that case I15 results in lower jet trajectory; while case I135, higher jet trajectory, when compared to JICF. For the effects of the control jets on the jet entrainment, case I15 results in little change in the jet volumetric entrainment ratio at $x/rd = 0.5$ and 0.75 but, as the jet develops further downstream, results in 5% higher entrainment at $x/rd = 1$ and 1.5 when compared to JICF. On the other hand, case I135 results in higher volumetric entrainment ratio throughout the measurement range, from $x/rd = 0.5$ to 1.5. The highest increase in volumetric entrainment ratio in case I135 occurs at $x/rd = 0.75$, 13% higher than JICF. Finally, the results suggest that the volumetric entrainment ratio of these jets in crossflow depends on two parameters: 1) the jet penetration as defined from the streamwise-vorticity center-of-mass trajectory, and 2) the circulation.

Department: Mechanical Engineering Student's signature.....
Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's signature.....
Academic Year: 2013 Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย ท่านรองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ ซึ่งได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ และช่วยเหลือจัดหาแหล่งเงินทุนให้ผู้วิจัย ตลอดจนโอกาสที่ดีต่างๆ ทั้งที่เป็นประโยชน์อย่างสูงต่อการทำวิจัยและการดำเนินชีวิตของผู้วิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เลิศนุวัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ วรรณโสภาคย์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เวชพงศ์ ชูติชูเดช ที่ได้เอื้อเฟื้อและคำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ในเนื้อหามากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ทุนอุดหนุนโครงการวิจัย เงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556-2557 (งบประมาณแผ่นดิน) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สัญญาเลขที่ GRB_APS_21_56_21_04 ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ . ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณบุคคลซึ่งมีส่วนช่วยให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงดังต่อไปนี้ ครู ไพโรจน์ อนันตะเศรษฐกุล, ชนัตถ์ คุร์พิพัฒน์, ชยากร วิโรจนกฏ, เอษณีย์ เทวานุรักษ์, อภิเชษฐ ศรีเมฆารัตน์, ศุภกร สุวรรณ และธิดา คริสทีน เพ็ชรศิริ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ สุทัศน์ วิทยาประภากร คุณแม่ สะยัน วิทยาประภากร คุณยาย สุวรรณทา นานาแซง และคุณตา จันท์ นานาแซง ที่เห็นความสำคัญของการศึกษา ให้การสนับสนุนและกำลังใจมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีแรงใจในการทำงานและไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้น

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1. เจ็ตในกระแสลมขวาง	1
1.2. แรงจูงใจ	2
1.3. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.4. ปัญหาและแนวทางการวิจัย	3
1.5. ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา	5
2.1. อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล	5
2.2. เรโนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ตและเรโนลด์ส์นัมเบอร์กระแสลมขวาง	5
2.3. เส้นทางเดินของเจ็ต	6
2.4. ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสม	9
2.5. ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสม	10
2.6. กระบวนการเกิดและพัฒนาตัวของ Counter-rotating vortex pair	11
2.7. การปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวาง	13

หน้า

บทที่ 3	เทคนิคและหลักการในการประเมินหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร.....	20
3.1.	ปัญหาการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวาง.....	20
3.2.	เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเพื่อจำแนกบริเวณเจ็ดและกระแสลมขวาง..._	20
3.3.	การประเมินหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร.....	21
บทที่ 4	ชุดทดลองและการทดลอง.....	24
4.1.	ชุดทดลอง.....	24
4.2.	พิกัดการทดลอง.....	26
4.3.	Stereo Particle Image Velocimetry.....	27
4.4.	การสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง Stereo Particle Image Velocimetry.....	28
	กับ Pitot tube	
4.5.	การวัดและเครื่องมือวัด.....	28
4.5.1.	การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวางและเจ็ด.....	28
4.5.2.	การวัดอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวง.....	31
4.6.	การวัดสนามความเร็วเจ็ดเพื่อหาการเหนี่ยวนำการผสม.....	31
4.7.	สรุปพารามิเตอร์สำหรับการทดลอง.....	32
บทที่ 5	การศึกษาเบื้องต้น.....	33
5.1.	วัตถุประสงค์ของการศึกษาเบื้องต้น.....	33
5.2.	สภาวะการทดลอง.....	33
5.3.	ผลการทดลอง.....	33
บทที่ 6	การประเมินการลู่เข้าและสอบทวนผลการทดลอง.....	37
6.1.	การประเมินการลู่เข้า.....	37
6.1.1.	การประเมินการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ย.....	37
6.1.2.	การประเมินการลู่เข้าของอัตราการไหลเชิงปริมาตร.....	39
6.2.	สอบทวนผลการทดลอง.....	40

6.2.1.	การเปรียบเทียบโครงสร้างของเจ็ด.....	40
6.2.2.	เปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมกรณี JICF.....	41
	กับผลการทดลอง Yuan and Street (1998)	
บทที่ 7	ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่พบเจ็ดที่จุดใดๆและความเร็วเฉลี่ยที่ใกล้ขอบ.....	42
7.1.	ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่พบเจ็ดที่จุดใดๆ.....	42
7.2.	ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ดที่ใกล้ขอบ.....	43
บทที่ 8	ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างและเส้นทางเดินของเจ็ด.....	44
8.1.	ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการกระจายตัวปริมาณเฉลี่ยไร้มิติ.....	44
8.2.	ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเส้นทางเดินของเจ็ด.....	52
บทที่ 9	ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ด.....	54
	และ Circulation	
9.1.	ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ด.....	54
9.2.	ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อ Circulation.....	55
บทที่ 10	อภิปรายผลการทดลอง.....	57
10.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเหนี่ยวนำการผสม(E) และเส้นทางเดินของเจ็ด ..	57
10.2	ผลของระยะเจาะทะลุของเจ็ด (y/rd) และ Circulation (Γ).....	58
	ต่ออัตราการเหนี่ยวนำการผสม (E)	
บทที่ 11	สรุปผลการทดลอง.....	63
	ประมวลตาราง.....	68
	ประมวลรูปภาพ.....	98
	รายการอ้างอิง.....	164
	ภาคผนวก.....	167
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	174

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะ ของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....69
ตารางที่ 2.2	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาผลของการติด Tab ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....81
ตารางที่ 2.3	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาผลของการกระตุ้นด้วย Pulse ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....85
ตารางที่ 2.4	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาผลของการกระตุ้น ด้วยการหมุนควง (Swirl) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....87
ตารางที่ 2.5	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาผลของการกระตุ้น ด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimutal control jet) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....93
ตารางที่ 4.1	ความหนาของชั้น Boundary layer ของแต่ละตำแหน่ง ตามแนว Spanwise (z).....95
ตารางที่ 4.2	Spatial resolution การวัดด้วย SPIV.....95
ตารางที่ 4.3	สรุปพารามิเตอร์ในการทดลอง.....95
ตารางที่ 5.1	ค่าการเหนี่ยวนำการผสมการทดลองของการศึกษาเบื้องต้น.....96
ตารางที่ 9.1	ค่าการเหนี่ยวนำการผสมการทดลองของการศึกษาละเอียด.....96
ตารางที่ 9.2	Circulation ไร้มิติของการทดลอง.....97

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1	การประยุกต์ใช้งานเจ็ตในกระแสมขวาง.....99
รูปที่ 2.1	เส้นทางเดินของเจ็ตของความเร็ว 100 (Pratte and Baines, 1967)
รูปที่ 2.2	เส้นทางเดินของความเร็วและอุณหภูมิ..... 100 (Kamotani and Greber, 1972)
รูปที่ 2.3	เส้นทางเดินของ Passive scalar (Smith and Mungal, 1998)..... 101
รูปที่ 2.4	เส้นทางเดินของ Steamline (Yuan and Street, 1998)..... 101
รูปที่ 2.5	Quadratics curve fit ของแต่ละเส้นทางเดินของเจ็ต..... 102 (Muppidi and Mahesh, 2005a)
รูปที่ 2.6	ผลการเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตเสกกล rd และ r^2d 102 (Muppidi and Mahesh, 2005b)
รูปที่ 2.7	เส้นทางเดินเสกกลด้วย h (Muppidi and Mahesh, 2005b)..... 103
รูปที่ 2.8	การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ต (Yuan and Street ,1998)..... 103
รูปที่ 2.9	โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสมขวาง..... 104 (Fric and Rosh, 1994)
รูปที่ 2.10	การลดลงของ C% ของ JICF และ Free เจ็ต บน Near Field บน r^2d 104 (Smith and Mungal, 1998)
รูปที่ 2.11	การลดลงของ C% ของ JICF และ Free เจ็ต บน Near Field บน rd 105 (Smith and Mungal, 1998)
รูปที่ 2.12	Contour ของ Instantaneous spanwise vorticity (ซ้าย)..... 105 และ Contour ของ Scalar concentration (ขวา) บน Centerplane (Yuan and Street, 1998)
รูปที่ 2.13	โครงสร้างของการเกิด CVP (Cortelezzi and Karagozian, 2001). 106
รูปที่ 2.14	การพัฒนาตัวของเจ็ตในกระแสมขวาง 107 (Cortelezzi and Karagozian, 2001)
รูปที่ 2.15	Vortices structure ของเจ็ตในกระแสมขวางบนระนาบสมมาตร..... 108 (Lim <i>et.al.</i> , 2001)
รูปที่ 2.16	การพับตัวของ cylindrical shear layer (Lim <i>et.al.</i> , 2001)..... 108

รูปที่ 2.17	โครงสร้างบริเวณ Near field ของเจ็ตในกระแสลมขวาง..... ซึ่งแสดงเป็น Isosurface ของ Vorticity (Yuan <i>et.al.</i> , 1999)	109
รูปที่ 2.18	โครงสร้างของ Hanging vortices (Yuan <i>et.al.</i> , 1999).....	109
รูปที่ 2.19	Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวขึ้นระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางที่..... บริเวณขอบด้านข้างของเจ็ต (Yuan <i>et.al.</i> , 1999)	110
รูปที่ 2.20	วิวัฒนาการของ Streamlines ในการก่อตัวของ..... Kelvin-Helmholtz roller (Sau <i>et.al.</i> , 2004)	110
รูปที่ 2.21	วิวัฒนาการของ Vortices structure (Sau <i>et.al.</i> , 2004).....	111
รูปที่ 2.22	Contour ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบตั้งฉากสำหรับ $J = 21$ (Zaman and Fross, 1997)	111
รูปที่ 2.23	Contour ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบตั้งฉากสำหรับ $J = 54$ (Zaman and Fross, 1997)	112
รูปที่ 2.24	ความเร็วเฉลี่ยบนหน้าตัดตั้งฉากและ Streamwise vorticity Isosurface สำหรับ $J=21$ (Zaman and Fross, 1997)	112
รูปที่ 2.25	ความเร็วเฉลี่ยบนหน้าตัดตั้งฉากและ Streamwise vorticity isosurface สำหรับ $J=54$ (Zaman and Fross, 1997)	113
รูปที่ 2.26	ผลของการติด Tab ต่อเส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตบนระนาบสมมาตร..... (Zaman and Fross, 1997)	113
รูปที่ 2.27	ผลของการติด Tab ต่อ Circulation distribution ไปตามแนว Downstream (Zaman and Fross, 1997)	114
รูปที่ 2.28	ก) Tab และการติดตั้ง ข) ระบบแกนตั้งฉากกับทิศทางการหมุน..... (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)	114
รูปที่ 2.29	การกระจายตัวของอนุภาคนอกจากการติด Tab กรณีเจ็ตไม่หมุนควง..... (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)	115
รูปที่ 2.30	การกระจายตัวของอนุภาคนอกจากการติด Tab กรณีเจ็ตหมุนควง..... (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)	116
รูปที่ 2.31	ผลการกระตุ้นเจ็ตด้วยลำโพง (M'Closkey <i>et.al.</i> , 2002).....	117

รูปที่ 2.32	ภาพ Instantaneous (Narayanan <i>et.al.</i> , 2003).....	118
รูปที่ 2.33	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวมบนระนาบตั้งฉาก (Wangjiraniran and Bunyajitradulya , 2001)	119
รูปที่ 2.34	ภาพแสดง Contours of line-of-sight integrated mean images ของ Traverses profile ไปตามแนว downstream โดยที่ P แทน Passive และ A แทน Reactive (Yingjaroen <i>et.al.</i> , 2006)	120
รูปที่ 2.35	Instantaneous image ของ mixing structure บนด้าน Top view (Limdumrongtum <i>et.al.</i> , 2009)	120
รูปที่ 2.36	Instantaneous Iso concentration surface (Denev <i>et.al.</i> , 2005).....	121
รูปที่ 2.37	ภาพเฉลี่ยของ Streamline และค่าความเข้มข้น (Denev <i>et.al.</i> , 2005).....	121
รูปที่ 2.38	ชุดเจ็ตควบคุม (Kornsri <i>et.al.</i> , 2009).....	122
รูปที่ 2.39	ผลของเจ็ตควบคุมต่อเส้นทางเดินของความเร็ว (Kornsri <i>et.al.</i> , 2009).....	122
รูปที่ 2.40	การ Penetration ของเส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตที่ตำแหน่ง $x/rd=1.5$ สำหรับมุมที่ ± 15 กับที่ r_m ต่างๆ (Kornsri <i>et.al.</i> , 2009)	123
รูปที่ 2.41	Contour ของความเร็ว (Normalize ด้วย ความเร็วกระแสลมขวาง) เปรียบเทียบระหว่าง ไม่ควบคุมกับควบคุมที่สภาวะเหมาะสมที่ (Kornsri <i>et.al.</i> , 2009)	123
รูปที่ 2.42	แนวคิดกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง..... (Kornsri <i>et.al.</i> , 2009)	124
รูปที่ 3.1	ตัวอย่างสนามความเร็วบนระนาบ yz ที่วัดได้จาก SPIV (ไม่ได้แสดงผลของ V_x)	125
รูปที่ 3.2	การหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรในบริเวณของเจ็ต.....	126
รูปที่ 4.1	ชุดอุโมงค์ลมและหน้าต่างทดสอบ.....	127
รูปที่ 4.2	ชุดเจ็ตควบคุม (Kornsri, 2007).....	127
รูปที่ 4.3	เจ็ตหลักและการใส่อนุภาคร่วมติดตามการไหล.....	128
รูปที่ 4.4	พิกัดการทดลอง.....	128
รูปที่ 4.5	พิกัดอ้างอิงสำหรับตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุม.....	129

	หน้า
รูปที่ 4.6	รูปแบบการติดตั้ง Stereoscopic Particle Image Velocimetry..... 129
รูปที่ 4.7	ภาพถ่ายชุด Stereoscopic Particle Image Velocimetry..... 130
รูปที่ 4.8	เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ (New Wave TM model Solo 200XT)..... 130
รูปที่ 4.9	แขนส่งต่อลำแสงเลเซอร์ (Laser Light Arm, model 610015)..... 131
รูปที่ 4.10	กล้อง CCD (PowerView Plus1 1MP, model 630062)..... 131
รูปที่ 4.11	ชุดควบคุมส่วนกลาง (synchronizer, model 610035)..... 132
รูปที่ 4.12	ภาพถ่ายอนุภาคติดตามการไหลด้วยกล้อง CCD 132
รูปที่ 4.13	เวกเตอร์ความเร็วที่ได้การประมวลผลจากภาพถ่ายอนุภาคติดตามการไหล..... 133
รูปที่ 4.14	เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบเลเซอร์ (ไม่ได้แสดงผลของ V_x)..... 133
รูปที่ 4.15	การกระจายตัวของความเร็วในแนวแกน x (V_x)..... 134
รูปที่ 4.16	ความสม่ำเสมอของความเร็วเฉลี่ย (V_{cf}) ของกระแสลมขวางที่ 135 $x = -9$ cm บริเวณที่หน้าตัดทดสอบของอุโมงค์ลม
รูปที่ 4.16	รูปร่างของชั้นขอบเขต (Boundary layer ; $V_{cf} = 4.3$ m/s)..... 136
รูปที่ 4.18	รูปร่างความเร็วในแนวแกนเจ็ตที่ทางออกของเจ็ต 136
รูปที่ 5.1	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ต (e_q)..... 137 แปรตามจำนวน N_2 สนาม บริเวณ $0 < \phi_y \leq 1$ ของการศึกษาเบื้องต้น
รูปที่ 5.2	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของการศึกษาเบื้องต้น..... 137
รูปที่ 5.3	ประสิทธิภาพของเจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร 138 ของการศึกษาเบื้องต้น
รูปที่ 6.1 ก	ค่าความคลาดเคลื่อนของการรู้เข้าของความเร็วเฉลี่ยต่อจุด (e_v)..... 139 แปรตามจำนวน N_2 สนามกรณี JICF ที่ความน่าจะเป็นที่จะ เป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ต ณ เวลาใดๆ (ϕ_y)
รูปที่ 6.1 ข	ค่าความคลาดเคลื่อนของการรู้เข้าของความเร็วเฉลี่ยต่อจุด (e_v)..... 140 แปรตามจำนวน N_2 สนามกรณี I15 ที่ความน่าจะเป็นที่จะ เป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ต ณ เวลาใดๆ (ϕ_y)

รูปที่ 6.1 ค	ค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยต่อจุด (e_v)..... 141 แปรตามจำนวน N_2 สนามกรณี I135 ที่ความน่าจะเป็นที่จะ เป็นเชิงเวลาที่จะพบ เจ็ด ณ เวลาใดๆ (ϕ_{ij})	141
รูปที่ 6.2	ค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยรวม (e_v)..... 142 ต่อจุดแปรตามจำนวน N_2 สนาม บริเวณ $0 < \phi_{ij} \leq 1$ ของทุกกรณี	142
รูปที่ 6.3 ก	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอัตราการใช้พลังงานเชิงปริมาตรของเจ็ด (e_o)..... 143 แปรตามจำนวน N_2 สนาม กรณี JICF ที่ความน่าจะเป็นที่จะความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะ จะพบเจ็ด ณ เวลาใดๆ (ϕ_{ij})	143
รูปที่ 6.3 ข	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอัตราการใช้พลังงานเชิงปริมาตรของเจ็ด (e_q)..... 144 แปรตามจำนวน N_2 สนาม กรณี I15 ที่ความน่าจะเป็นที่จะความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะ จะพบเจ็ด ณ เวลาใดๆ (ϕ_{ij})	144
รูปที่ 6.3 ค	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอัตราการใช้พลังงานเชิงปริมาตรของเจ็ด (e_q)..... 145 แปรตามจำนวน N_2 สนาม กรณี I135 ที่ความน่าจะเป็นที่จะความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะ จะพบเจ็ด ณ เวลาใดๆ (ϕ_{ij})	145
รูปที่ 6.4	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอัตราการใช้พลังงานเชิงปริมาตรของเจ็ด (e_q)..... 146 แปรตามจำนวน N_2 สนาม บริเวณ $0 < \phi_{ij} \leq 1$ ของทุกกรณี	146
รูปที่ 6.5	การเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง Contour แสดงการกระจายตัว..... 147 ของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x/Vcf) กับผลการทดลองของ Zaman and Foss (1997) กรณี JICF	147
รูปที่ 6.6	การเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง Contour แสดงการกระจายตัว..... 148 ของความเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง (V_{xy}/Vcf) กับผลการทดลองของ Konsri (2007) กรณี JICF	148
รูปที่ 6.7	การเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง Contour แสดงการกระจายตัว..... 149 ของความเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง (V_{xy}/Vcf) กับผลการทดลองของ Konsri (2007) กรณี I15	149
รูปที่ 6.8	การเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม..... 150 เชิงปริมาตรกับผลการทดลองของ Yuan and Street (1998)	150

หน้า

รูปที่ 7.1	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใด.....	151
	กรณี JICF, I15 และ I135	
รูปที่ 7.2	การกระจายตัวของผลรวมความความเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง (V/V_{cf})....	152
	กรณี JICF, I15 และ I135	
รูปที่ 8.1	การกระจายตัวของผลรวมความเร็วต่อกระแสลมขวาง (V/V_{cf}).....	153
	กรณี JICF, I15 และ I135	
รูปที่ 8.2	การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง.....	154
	(V_x/V_{cf}) กรณี JICF, I15 และ I135	
รูปที่ 8.3	การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน y ต่อกระแสลมขวาง.....	155
	(V_y/V_{cf}) กรณี JICF, I15 และ I135	
รูปที่ 8.4	การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน z ต่อกระแสลมขวาง.....	156
	(V_z/V_{cf}) กรณี JICF, I15 และ I135	
รูปที่ 8.5	การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง.....	157
	(V_x/V_{cf}) และเวกเตอร์บนระนาบ xy กรณี JICF, I15 และ I135	
รูปที่ 8.6	การกระจายตัวของ vorticity เฉลี่ยไว้มิติ ($\omega_x d/V_{cf}$).....	158
	กรณี JICF, I15 และ I135	
รูปที่ 8.7	การกระจายของ Turbulent kinetic energy.....	159
	ต่อ Crossflow kinetic energy กรณี JICF, I15 และ I135	
รูปที่ 8.8	CC และ CM ของผลรวมความเร็ว (V) กรณี JICF, I15 และ I135.....	160
รูปที่ 8.9	CC และ CM ของ vorticity (ω_x) กรณี JICF, I15 และ I135.....	160
รูปที่ 9.1	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร.....	161
รูปที่ 9.2.	ประสิทธิภาพของเจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร.....	161
รูปที่ 9.3	การกำหนดเครื่องหมาย Circulation.....	162
รูปที่ 9.3	Circulation ไว้มิติไปตามแนว Downstream.....	162
รูปที่ 10.1	ความสัมพันธ์อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร.....	163
	กับ CM ของ ω_x	

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	พื้นที่หน้าตัดรวมที่ปากทางออกของเจ็ต
A_{jet}	พื้นที่ของเจ็ตบนหน้าตัดใดๆ ตาม Downstream (x)
d	ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเจ็ตหลักที่ปากทางออก
Q_j	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตตามแนว Downstream (x)
Q_o	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ต
E	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่เฉลี่ยตามเวลาทั้งหมด
r	อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล
r_m	อัตราส่วนเชิงมวลเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก
r_v	อัตราส่วนความเร็วเจ็ตหลักต่อกระแสลมขวาง
Re_{cf}	เรย์โนลส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง
Re_j	เรย์โนลส์นัมเบอร์ของเจ็ต
V_j	ความเร็วตามแนวแกนเฉลี่ยแบบพื้นที่ที่ปากเจ็ตหลัก
V_{cf}	ความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง
V_{max}	ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของเจ็ตตามแนวที่ทำกรวัด
v_{cf}	ขนาดความเร็วของกระแสลมขวางที่ตำแหน่งใดๆ
u	ความเร็วเจ็ตเฉลี่ยที่ตำแหน่งใดๆ บนปากทางออกของเจ็ต
V	ผลรวมความเร็วเฉลี่ย
V_x	ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x
V_y	ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน y
V_z	ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน z
x, y, z	ระยะตามแนว Streamwise, Transverse และ Spanwise ตามพิกัด อ้างอิง
y_{cm}	Centroid trajectory
y_{cc}	Center of mass trajectory

อักษรกรีก

$\delta_{0.95}$	ความหนาของชั้นขอบเขตที่ตำแหน่งซึ่งมีความเร็วเป็น 95% ของความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขตของกระแสขวาง
θ	ตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง
ρ_j	ความหนาแน่นของเจ็ต
ρ_{cf}	ความหนาแน่นของกระแสลมขวาง
ω_x	Vorticity
Γ	Circulation
ϕ_{ij}	ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ต ณ จุดใดๆ
η	ประสิทธิภาพผลของเจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

อักษรย่อ

TKE	Turbulent kinetic energy
CKE	Crossflow kinetic energy
CC	Centroid trajectory
CM	Center of mass trajectory
JICF	เจ็ตในกระแสลมขวางกรณีไม่ควบคุม
I15	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$
I45	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 45^\circ$
I90	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 90^\circ$
I135	กรณีฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 135^\circ$

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เจ็ตในกระแสดมขวาง (JICF) คือ กระแสการไหลของเจ็ตที่ถูกฉีดเข้าไปตั้งฉากกับกระแสดมขวาง ซึ่งเป็นการไหลพื้นฐานที่พบในงานทางวิศวกรรมเช่น การฉีดเชื้อเพลิงเข้าผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้ การระบายความร้อนบริเวณผิวของใบพัดของแก๊สเทอร์ไบน์ ด้วยเทคนิค Film cooling การบังคับและควบคุมอากาศยานขึ้นลงในแนวดิ่ง (Vertical Short Take-off and Landing, V/STOL) และการกระจายของมลพิษจากปล่องควันตามโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ดังรูปที่ 1.1

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเจ็ตในกระแสดมขวาง โดยการศึกษาแบ่งออกได้เป็นสองแนวทางหลักดังนี้

กลุ่มแรก การศึกษาคูณลักษณะของเจ็ตในกระแสดมขวาง เช่นการศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสดมขวางโดย (Fric and Roshko, 1994; Sivadas *et al.*, 1997; Haven and Kurosaka, 1997 และ New *et al.*, 2003), การศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ต (Pratte and Baines, 1967; Kamotani and Greber, 1972 ; Muppidi and Mahesh, 2005a และ Muppidi and Mahesh, 2005b), การศึกษาการผสมกันระหว่างเจ็ตกับกระแสดมขวาง (Smith and Mungal , 1998; Chongsiripinyo *et al.*, 2008 และ Watakulsin *et al.*, 2010), การศึกษาเส้นทางเดินและการผสม (Yuan and Street, 1998) และการศึกษาโครงสร้างที่มีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างเจ็ตกับกระแสดมขวาง (Kelso *at el.*, 1998; Yuan *et al.*, 1999; Cortelezzi and Karagozian, 2001; Lim *et al.*, 2001 และ Sau *et al.*, 2004)

กลุ่มสอง การศึกษาการปรับแต่งและการควบคุมเส้นทางเดินและการผสมของเจ็ตในกระแสดมขวางด้วยเทคนิคต่างๆ เช่นการควบคุมด้วย Vortex generator tab (Zaman and Fross, 1997 และ Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005) การควบคุมด้วยวิธีหมุนควง (Kavsaoglu and Schetz, 1989; Yoshizako *et.al.*, 1991; Liscinsky *et al.*, 1995; Niederhaus *et al.*, 1997; Wangjiraniran and Bunyajitradulya, 2001; Bunyajitradulya

and Sathapornnanon, 2005; Limdumrongtum *et al.*, 2009; Denev *et al.*, 2005 และ Denev *et al.*, 2009) การควบคุมด้วย Pulse (M'Closkey *et al.*, 2002 และ Narayanan *et al.*, 2003) และการควบคุมด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Kornsri, 2007; Kornsri *et al.*, 2009 และ Bunyajitradulya, 2011)

1.2 แรงจูงใจ

การที่สามารถควบคุมการผสมให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น จะทำให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีช่วงทำงานที่กว้างขึ้น เมื่อพิจารณาการศึกษาคุณลักษณะและโครงสร้าง Smith and Mungal (1998) พบว่าถึงแม้โครงสร้าง Counter – rotating vortex pair (CVP) จะเป็นกลไกหลักของการผสมใน Far field ก็ตาม แต่ก็ไม่ทำให้การผสมของเจ็ตในกระแสมวลของ (JICF) นั้นดีกว่าเจ็ตอิสระ (Free jet) แต่การก่อตัวของ CVP ที่ Near field ต่างหากที่เป็นกลไกสำคัญ ที่ทำให้การผสมของ JICF นั้นดีกว่า Free jet จากศึกษาของ Yuan *et al.* (1999) และ Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ชี้แนะว่าการก่อตัวของ Large-scale vortical structure มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับ Flow shear layer ที่พัฒนาตัวรอบปากทางออกของเจ็ต

จากการศึกษาเหล่านี้ Kornsri (2007) จึงเกิดแนวคิดที่จะปรับแต่งและควบคุมเส้นทางเดินและการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลของ โดยการกระตุ้นการพัฒนาตัวของ Flow shear layer ที่บริเวณใกล้ปากทางออกของเจ็ตด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง จากผลการศึกษา Kornsri พบว่าเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงบริเวณด้านหน้า จะทำให้เส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตต่ำลง ขณะที่ฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงบริเวณด้านข้างหรือด้านหลัง จะทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตสูงขึ้น และการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม ± 15 มีผลทำให้การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) ของเจ็ตเพิ่มขึ้นในช่วง $x/r_d = 0.75 - 3$

อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยของ Kornsri (2007) ได้มีข้อจำกัดทางด้านเครื่องวัด โดยใช้ Single sensor hot film anemometer ซึ่งไม่สามารถแยกแยะทิศทางความเร็วของสนามการไหล

ออกจากกันได้ ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถหาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดหรืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดได้โดยตรงและถูกต้องเท่าที่ควร

ด้วยข้อจำกัดของ Kornsri (2007) ข้างต้น จึงเกิดเป็นแรงจูงใจของงานวิจัยนี้ กล่าวคือ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะประเมินความมีประสิทธิภาพของการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวาง โดยวัดความเร็วด้วย Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ซึ่งสามารถแยกแยะทิศทางของสนามความเร็วทั้งสามคอมโพเนนต์ได้ และเพื่อให้สามารถหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรในส่วนที่เป็นเจ็ดเท่านั้น จึงใส่อนุภาคติดตามการไหล (Tracer particle) ในเจ็ดหลักเท่านั้น แต่ไม่ใส่ในกระแสมขวาง ดังนี้ จึงทำให้สามารถแยกแยะบริเวณที่เป็นเจ็ดและกระแสมขวางออกจากกันได้ และความเร็วที่วัดได้จึงเป็นความเร็วในบริเวณที่มีองค์ประกอบของอากาศที่มาจากเจ็ดหลักเท่านั้น ดังนี้ จึงสามารถนำความเร็วดังกล่าวมาหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรในส่วนของเจ็ดและอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ดได้

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาผลของการปรับแต่งและควบคุมของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในเชิงปริมาณของเจ็ดในกระแสมขวาง โดยการศึกษาจะมุ่งเน้นผลของการเปลี่ยนมุมฉีดของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงบริเวณรอบ ๆ ปากทางออกของเจ็ดหลัก ด้วยอัตราส่วนการไหลเชิงมวลเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ดหลักคงที่เท่ากับ 2 % ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4

1.4 ปัญหาและแนวทางการวิจัย

การศึกษากการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดกระแสมขวาง จะศึกษาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดในกระแสมขวาง ซึ่งมีความยุ่งยากซับซ้อนและมีความไม่ชัดเจนในกการนิยามบริเวณของเจ็ดออกจากกระแสมขวางในระดับหนึ่ง เพื่อที่จะสามารถศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดโดยตรง และลดความไม่แน่นอนในการแยกแยะบริเวณของเจ็ดออกจากกระแสม

ขวาง เครื่อง SPIV จึงถูกนำมาเป็นเครื่องมือวัดความเร็วของสนามการไหลของเจ็ตในกระแสม ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 3 เรื่อง เทคนิคและหลักการประเมินหาอัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

ผลการศึกษาเชิงวิชาการที่ได้ จะสามารถหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ตในกระแสมขวางได้ และความเข้าใจความสัมพันธ์เชิงปริมาณผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง

ผลการศึกษาเชิงประยุกต์ที่ได้ จะนำมาซึ่งความรู้ความเข้าใจและข้อมูลที่เป็นพื้นฐานในออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์การผสมและการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีช่วงทำงานที่กว้างมากขึ้น

บทที่ 2

งานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity ratio)

อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวางซึ่งนิยามโดย

$$r = \sqrt{\frac{\rho_j V_j^2}{\rho_{cf} V_{cf}^2}} \quad (2.1)$$

เมื่อ ρ_j คือความหนาแน่นของเจ็ต, ρ_{cf} คือความหนาแน่นของกระแสมขวาง, V_j คือความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตหลักที่ปากทางออก และ V_{cf} คือความเร็วกระแสมขวาง

ในกรณีความหนาแน่นของเจ็ตและกระแสมขวางมีค่าเท่ากัน r จะลดรูปเป็นอัตราส่วนความเร็วเจ็ตหลักต่อกระแสมขวาง (Velocity ratio, $r_v = V_j/V_{cf}$) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า r เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวางเช่น เส้นทางเดินของเจ็ต, การผสมและการเหนี่ยวนำการผสม และ Large scale vortical structure เป็นต้น

2.2 เรย์โนลส์นัมเบอร์ของเจ็ตและเรย์โนลส์นัมเบอร์กระแสมขวาง

- เรย์โนลส์นัมเบอร์ของเจ็ต (Jet Reynolds number)

เรย์โนลส์นัมเบอร์ของเจ็ต (Re_j) นิยามเป็น

$$Re_j = \frac{V_j d}{\nu_j} \quad (2.2)$$

เมื่อ ν_j คือ ความหนืดคิเนเมติกของเจ็ต

Re_j เป็นปริมาณบ่งชี้ถึงสภาวะการไหลของเจ็ตหลักเป็นแบบลามินาร์ (Laminar) หรือปั่นป่วน (Turbulent)

- เรโนลด์สข้ามเบอร์ของกระแสลมขวาง (Crossflow Reynolds number)

งานวิจัยที่ผ่านพบว่าเรโนลด์สข้ามเบอร์ของกระแสลมขวาง (Re_{cf}) เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางเช่นเดียวกับ r ซึ่งนิยามโดย

$$Re_{cf} = \frac{V_{cf} d}{\nu_{cf}} \quad (2.3 ก)$$

เมื่อ ν_{cf} คือความหนืดคินเนเมติกของกระแสลมขวาง

Re_{cf} เขียนให้อยู่ในรูปมิติความยาวต่อความยาว

$$Re_{cf} = \frac{d}{\frac{\nu_{cf}}{V_{cf}}} \quad (2.3 ข)$$

จากสมการ 2.3 ข Re_{cf} สามารถเปรียบเทียบได้กับขนาดของเจ็ตหลักที่ไหลกีดขวางการไหลของกระแสลมขวางนั้นมีขนาดมากน้อยเพียงใด

ถ้าความหนาแน่นของเจ็ตและกระแสลมขวางเท่ากัน r , Re_j และ Re_{cf} มีความสัมพันธ์กันดังสมการต่อไปนี้

$$r = \frac{Re_j}{Re_{cf}} \quad (2.4)$$

2.3 เส้นทางเดินของเจ็ต

Pratte and Baines (1967) ได้ศึกษาเส้นทางเดินของความเร็วในช่วง r_v ระหว่าง 5 ถึง 35 โดยที่ปากเจ็ตติดอยู่บริเวณศูนย์กลางของแผ่นราบกลมรัศมี 6 นิ้ว ซึ่งสูงจากระดับพื้น 8 นิ้ว ทำ

ให้ไม่มีผลของ Boundary layer ของผนังที่พื้น และพบความสัมพันธ์ของเส้นทางเดินของความเร็ว ในรูปของ Empirical equation ใน rd – เสกกล ตามความสัมพันธ์

$$y/rd = A(x/rd)^m \quad (2.5)$$

โดยค่าคงที่ (A, m) สำหรับเส้นทางเดินของ Outer boundary เท่ากับ $(2.63, 0.28)$, Centerline เท่ากับ $(2.05, 0.28)$ และ Inner boundary เท่ากับ $(1.35, 0.28)$ (Centerline trajectory คือ ระยะกึ่งกลางระหว่าง Outer และ Inner boundary) รวมทั้งลักษณะข้อมูลที่ได้จากการทดลองดัง รูปที่ 2.1 (จากรูป $\alpha = r_v$)

Kamotani and Greber (1972) ได้ศึกษาเส้นทางเดินของความเร็ว (Center plan maximal velocity trajectory) และเส้นทางเดินของอุณหภูมิ (Center plan maximal temperature trajectory) โดยให้ความร้อนแก่เจ็ตจนมีอุณหภูมิสูงกว่ากระแสลมขวางประมาณ $75 F^0$ และ $320 F^0$ ที่อัตราส่วนโมเมนต์ม $(r_m = \rho_j u_j^2 / \rho_{cf} u_{cf}^2)$ เท่ากับ 15.3 และ 59.3 ดังรูป ที่ 2.2 โดยเส้นทางเดินของความเร็วและอุณหภูมิ นิยามเป็นตำแหน่งของจุดที่มีความเร็วและ อุณหภูมิสูงที่สุดบนระนาบสมมาตร พบว่าที่ r_m เดียวกันเส้นทางของอุณหภูมิต่ำกว่าเส้นทาง ของความเร็ว และยังพบว่า r_m เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและส่งผลต่อเส้นทางเดินของความเร็ว และอุณหภูมิ ในขณะที่อัตราส่วนความหนาแน่น (ρ_j / ρ_{cf}) ไม่ส่งผลต่อเส้นทางเดินของความเร็วจึง แต่ส่งผลต่อเส้นทางเดินของอุณหภูมิต่ำกว่า โดยแสดงความสัมพันธ์ของเส้นทางเดินของความเร็ว และอุณหภูมิดังสมการ

$$\frac{y_U}{d} = 0.89 r_m^{0.47} \left(\frac{x}{d} \right)^{0.36} \quad (2.6)$$

$$\frac{y_T}{d} = 0.73 r_m^{0.52} \left(\frac{\rho_j}{\rho_{cf}} \right)^{0.11} \left(\frac{x}{d} \right)^{0.29} \quad (2.7)$$

Smith and Mungal (1998) ใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) ศึกษาเส้นทางเดินของ Passive scalar concentration ซึ่งนิยามจากเส้นทางเดินของจุดที่มี concentration มากที่สุดบนระนาบสมมาตร โดยศึกษาในช่วง r ระหว่าง 5 ถึง 25 และทำการสเกลผลของการกระจายตัวของ concentration บนระนาบด้วย d, rd, r^2d รูปที่ 2.3 พบว่าเมื่อสเกลเส้นทางเดินของ Passive scalar ด้วย rd จะได้ลักษณะเส้นที่มีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสเกลด้วย d หรือ r^2d บ่งชี้ว่าการสเกลเส้นทางเดิน Passive scalar ควรใช้ rd สเกล

Yuan and Street (1998) ศึกษาเส้นทางเดินและการเหนี่ยวนำการผสม ด้วยการทำการจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบ Large –Eddy Simulation (LES) สำหรับ $r = 2$ และ 3.3 ในประเด็นการศึกษาเส้นทางเดิน รูปที่ 2.5 แสดงถึงเส้นทางเดินบนกราฟ log-log เมื่อสเกลเส้นทางเดินด้วย rd (ในรูป $2.5 X = x/d, R = r$) พบว่าที่ตำแหน่งบริเวณ Downstream เส้นทางเดินของทุกกรณีจะมีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันและเป็นเส้นตรง บ่งชี้ว่าบริเวณนี้มีความสัมพันธ์ของเส้นทางเดินในรูปแบบ Power law Yuan and Street เรียกบริเวณนี้ว่า Power law region

Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) และ Wangjiraniran (2001) ได้ศึกษาเส้นทางเดินอุณหภูมิโดยให้ความร้อนแก่เจ็ต และทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ระนาบตั้งฉาก (Cross plan) สำหรับ r เท่ากับ 4.1 โดยศึกษาเส้นทางเดินอุณหภูมิซึ่งนิยามเช่นเดียวกับการศึกษาของ Kamotani and Greber (1972) รวมถึงศึกษาเส้นทางเดินที่นิยามจาก Centroid temperature พบว่า Centroid temperature trajectory จะอยู่ต่ำกว่า Center plan temperature trajectory เสมอ

Muppidi and Mahesh (2005a) ศึกษาเจ็ตในกระแสลมขวางด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบ DNS แบบ 2 มิติ ผลการศึกษาชี้แนะว่า ที่ภาวะเริ่มต้นเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตจะเป็นเส้นโค้งอันเนื่องมาจากเจ็ตเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ (Pressure driven) และในสภาวะสุดท้ายนั้น เส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตจะเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง อันเนื่องมาจากเจ็ตเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ (Momentum driven) โดยที่ค่าของความเร่งในสภาวะเริ่มต้นและความเร็วในสภาวะสุดท้ายของเจ็ตนั้น จะขึ้นอยู่กับค่า Re_{cf} ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยเมื่อค่า Re_{cf} เพิ่มมากขึ้นจะมีผลให้ความเร่งตามแนวแกน x ในสภาวะเริ่มต้นต่ำ รวมทั้งความเร็วใน

สภาวะสุดท้ายก็จะมีค่าลดต่ำลง ในทางกลับกันหากค่า Re_{cf} ลดลง เจ็ตจะมีความเร่งในสภาวะเริ่มต้นเพิ่มขึ้นรวมทั้งความเร็วในสภาวะสุดท้ายก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

Muppidi and Mahesh (2005b) ศึกษาการเสกกลเส้นทางเดินของเจ็ต รูปที่ 2.6 แสดงถึงเส้นทางเดินเมื่อเสกกลด้วย rd หรือ r^2d พบว่าเส้นทางเดินที่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันที่ไม่ดี Muppidi and Mahesh ได้เสนอพารามิเตอร์ตัวใหม่ (h) ในการเสกกลเส้นทางเดินของเจ็ต ซึ่งนำผลของความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางและรูปร่างความของเจ็ตที่ปากทางออกมาพิจารณาประกอบด้วย ผลการวิเคราะห์พบว่าเส้นทางเดินที่เสกกลด้วยพารามิเตอร์ตัวใหม่มีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันที่ดีขึ้นเมื่อเสกกลด้วยดังรูปที่ 2.7

Limdumrongtum (2007) และ Limdumrongtum *at el.* (2009) ใช้เทคนิค Smoke fluid condensation, Mie scattering และ Laser-sheet visualization techniques เพื่อศึกษา Mixing Structure สำหรับกรณี JICF ที่มี r เท่ากับ 4.1 โดย Concentration field ที่ได้จากเทคนิคนี้จะแสดงในส่วนของเจ็ตที่ผสมเสร็จถึง Stoichiometric ratio แล้วเท่านั้น ซึ่งต่างจากการศึกษาของ Smith and Mungal (1998) ที่ใช้เทคนิค PLIF โดย concentration field ที่ได้จะแสดงถึงทั้งส่วนผสมและไม่ผสม (Passive) จากการศึกษาของ Limdumrongtum (2007) และ Limdumrongtum *at el.* (2009) พบว่า Center of mass scalar trajectory และ Centroid scalar trajectory จะต่างกันเพียงเล็กน้อยที่ r เท่ากัน บ่งชี้ว่าการกระจายตัวของการผสมค่อนข้างสม่ำเสมอบนหน้าตัดของการผสมของเจ็ต

2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสม

Yuan and Street (1998) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางเดินและการเหนี่ยวนำผสมบริเวณ Power law region รูปที่ 2.8 แสดงถึงการเหนี่ยวนำการผสมไปตามแนว Downstream (x) ทุกกรณีเมื่อ Fit curve ด้วยสมการที่เสนอโดย Hasselbrink and Mungal (1996) เขียนเป็น

$$\frac{Q_j}{Q_0} = 1 + \frac{r}{Am} \left(\frac{x}{rd} \right)^{1-m} \quad (2.8)$$

พบว่า m จากการ Fit curve ในรูปที่ 2.8 ด้วยสมการที่ 2.8 จะมีใกล้เคียงกับกับ m จากการ Fit curve เส้นทางเดินด้วย Power law ตามสมการที่ 2.5 ในรูปที่ 2.4 บ่งชี้การเหนี่ยวนำการผสม และเส้นทางเดินมีความสัมพันธ์กัน

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสม

Fric and Roshko (1994) ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ที่เกิดขึ้นในเจ็ตใน กระแสลมขวาง ด้วย Flow visualize โดยเทคนิค Smoke-wire และวัดความเร็วด้วย Hot-wire โครงสร้างของ Vortical structure แบ่งออกเป็น 4 ลักษณะดังรูปที่ 2.9 ได้แก่ 1) Jet shear layer vortices ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ Vortex ring ของ Free jet โดยเกิดจากการแยกตัวของ shear layer บริเวณปากเจ็ต 2) Horseshoe vortices โดยเกิดจากม้วนตัวของกระแสลมขวางในบริเวณ ชั้นขอบเขตที่พื้นที่รอบปากเจ็ต ซึ่งเกิดจากการที่กระแสลมขวางได้รับผลจาก Adverse pressure gradient ที่เกิดจากการกีดขวางการไหลของเจ็ตที่พุ่งออกมา ประกอบกับผลของความหนาของชั้น ขอบเขตของพื้นที่บริเวณปากเจ็ต 3) Wake vortices ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ Wake ของการไหล ผ่านวัตถุทรงกระบอก โดยมีแหล่งกำเนิดจาก Boundary layer ของกระแสลมขวางที่ผนังและ 4) Counter – rotating vortex pair (CVP) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เป็นกลไกสำคัญในการผสม โดยเฉพาะในบริเวณ Far field

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาการลดลงของความเข้มข้น (Passive scalar concentration) ตามแนวแกนเจ็ตสำหรับ r ระหว่าง 5 ถึง 25 จากรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงถึงอัตราการลดลงของความเข้มข้นไปตามแกนเจ็ตเสกด้วย $r^2 d$ พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราการลดลงของความเข้มข้นที่ตำแหน่ง $s/r^2 d = 0.3$ จึงเป็นนิยามเป็นจุดแบ่งเขตระหว่าง Near field และ Far field โดยกำหนดให้ $s/r^2 d < 0.3$ เป็นตำแหน่ง Near Field และที่ $s/r^2 d > 0.3$ เป็น Far field

รูปที่ 2.11 แสดงถึงอัตราการลดลงของความเข้มข้นไปตามแกนเจ็ตเสกด้วย rd พบว่า บริเวณ Near field ความเข้มข้นมีอัตราการลดลงแปรตาม $(s/rd)^{-1.3}$ ซึ่งสูงกว่ากรณีของเจ็ตอิสระที่มีการลดลงแปรตาม $(s/rd)^{-1}$ ในขณะที่บริเวณ Far field มีการลดลงแปรตาม $(s/rd)^{-2/3}$ ซึ่งบ่งชี้ว่าการพัฒนาตัวที่เต็มตัวของ CVP ใน Far field นั้นไม่ทำให้การผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง (JICF) นั้นดีกว่า Free jet แต่การก่อตัวของ CVP ที่ Near field ต่างหากที่เป็นกลไกที่สำคัญของ JICF ที่ทำให้การผสมนั้นดีกว่า Free jet

Yuan *et al.* (1999) ศึกษาโครงสร้างที่มีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างเจ็ตกับกระแสมขวาง รูปที่ 2.12 แสดงถึง Contour ของ Instantaneous spanwise vorticity พบว่าในช่วงต้นของการผสม ($y/d < 3$) โครงสร้างของของ Spanwise roller ที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผิวสัมผัสระหว่างเจ็ตและกระแสมขวาง ทำให้เกิดการผสมในระดับ Large scale ต่อมาในบริเวณที่เจ็ตเริ่มมีการโค้งตัวกระแสมขวางจะถูกดึงเข้าไปในเจ็ต ทำให้เกิดช่องภายในเจ็ต (Gape) ซึ่งจะทำให้เกิดการผสมในระดับ Large scale และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปจนถึงบริเวณ Vortex zone โครงสร้างของ CVP จะเป็นกลไกสำคัญของการผสม โดยกระแสมขวางจะถูกดึงเข้าไปในเจ็ตตามทิศทางการหมุนควงของ CVP

2.6 กระบวนการเกิดและพัฒนาตัวของ Counter-rotating vortex pair

Counter – rotating vortex pair (CVP) เป็น Vortical structure ที่สำคัญต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวางอย่างยิ่ง การเข้าใจถึงกลไกและกระบวนการเกิดของ CVP จึงจำเป็นต่อความรู้พื้นฐาน สำหรับการปรับปรุงและพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านวิศวกรรม การศึกษา กลไกและกระบวนการเกิดของ CVP มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- **Counter – rotating vortex pair (CVP) เป็นผลมาจาก Vortex ring**

Cortelezzi and Karagozian (2001) เสนอกลไกของการเกิด CVP (รูปที่ 2.13) นั้นเริ่มจาก Vortices ที่เกิดขึ้นจากผนังท่อของเจ็ต และก่อตัวเป็นวงแหวนใกล้ปากทางออกของเจ็ตและโค้งตัวตามกระแสลมขวาง ทำให้ Vortex ring เกิดการห่อตัวโดยขอบด้านหลังของ Vortex ring จะยกตัวสูงขึ้นและเชื่อมต่อกับขอบด้านหลังของ Vortex ring อีกตัวที่เกิดขึ้นก่อน และพัฒนาตัวกลายเป็น CVP ที่สมบูรณ์ที่บริเวณ Far field จากรูปที่ 2.14 แสดงถึงกระบวนการเกิดของ Vortical structure เกิดจากการม้วนตัวของเจ็ต Shear layer โดยการพับของขอบ Vortex ring และขอบที่พับตัวจะกระตุ้นทำให้เกิด Vortex ring ตัวใหม่เกิดขึ้น

- **Counter – rotating vortex pair (CVP) เป็นผลมาจาก Vortex loop**

Lim *et al.* (2001) ทำการศึกษา Large scale structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยใช้เทคนิคฉีดสี และ PLIF ในการศึกษา จากรูปที่ 2.15 จะพบ Upstream vortex (A) และ Lee side vortex (B) ซึ่งมีลักษณะเป็น Vortex loop ซึ่งเกิดจากการพัฒนาตัวของ Cylindrical vortex sheet ดังรูปที่ 2.16 แสดงถึง การพัฒนาตัว CVP ซึ่ง Lim *et al.* เชื่อว่า CVP นั้นเกิดจากการพัฒนาตัวของ Vortex loop แทนที่จะเป็น Vortex ring เหมือนเจ็ตอิสระ (Free jet)

- **Counter – rotating vortex pair (CVP) เป็นผลมาจาก Skewed mixing layer**

Yuan *et al.* (1999) ได้เสนอแนะการเกิดของ CVP ว่ามีจุดกำเนิดจาก Hanging vortices (รูปที่ 2.17) ซึ่งเป็น การม้วนตัวของกระแสลมขวางทางเข้ามาในตัวเจ็ต โดยที่แกนการม้วนตามทิศทางผลรวมระหว่างเวกเตอร์ความเร็วเจ็ตและกระแสลมขวาง (\bar{u}_{mean}) ดังรูปที่ 2.18 (ก) ซึ่งโครงสร้างเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วระหว่างเจ็ตกับกระแสลมขวางในทิศตั้งฉากกับ \bar{u}_{mean} (\bar{u}_{nj} และ \bar{u}_{ncf}) หรือที่เรียกว่า Skewed mixing layer ดังรูปที่ 2.18(ข)

รูปที่ 2.19 แสดงถึง Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวขึ้นระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางที่ขอบด้านข้างของเจ็ต โดยการไหลไปตามแนวแกนผ่าน Hanging vortices จะเป็นตัวนำ Transport vortical fluid จาก Boundary layer ที่ติดกับผนังเข้ามายังด้านหลังของลำเจ็ตทำให้ Hanging vortices เกิดการปะทะกับ Adverse pressure gradient เป็นผลให้เกิด Breakdown

ขณะเดียวกัน Vortex จะขยายขนาดและก่อตัวเป็น CVP ที่มีกำลังไม่มากและเอียงตัวตามแนวเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ต

Sue *et al.* (2004) ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field ของเจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยม รูปที่ 2.20 แสดงถึงกลไกของการเกิด CVP จาก Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวจากทางผนังด้านข้างของเจ็ต และพบว่า Kelvin-Helmholtz roller นั้นไม่ได้ก่อตัวเป็น Closed vortex ring และนอกจากนี้แล้ว รูปที่ 2.21 พบ Wake vortical structure ที่ก่อตัวขึ้นทางด้าน Downstream และ Horseshoe ซึ่งก่อตัวขึ้นทางด้าน Upstream เป็นปฏิสัมพันธ์ของ Shear layer ที่พัวพันกับตัวเจ็ต

Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ทำการศึกษาโดยการติด Tab ที่บริเวณปากทางออกของเจ็ต ผลการศึกษาชี้แนะว่าการพัฒนาตัวของ Skewed mixing layer ซึ่งเกิดขึ้นรอบๆปากเจ็ต เป็นผลทำให้เกิดการก่อตัวของ CVP

2.7 การปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวาง

- ผลของการติด Tab ที่ติดตั้งที่ปากทางออกของเจ็ตในกระแสลมขวาง

Zaman and Foss (1997) ศึกษาผลของ Vortex generator แบบ Tab รูปสามเหลี่ยม (Triangular tab) ต่อ Penetration ของเจ็ตในกระแสลมขวาง สำหรับ Momentum-flux ratio (J) เท่ากับ 21.1 และ 54.4 (คิดเป็นค่า r เท่ากับ 4.6 และ 7.4 ตามลำดับ)

รูปที่ 2.22 แสดง Contour ของความเร็วเฉลี่ยที่หน้าตัดตั้งฉากกับแกน Streamwise โดยมี J เท่ากับ 21 พบว่ากรณีที่ไม่ติด Tab บนขอบปากเจ็ตด้าน Windward จะทำให้ Contour ของความเร็วเฉลี่ยอยู่ต่ำกว่ากรณีที่ไม่ติด Tab และ ติด Tab ที่ตำแหน่งอื่นๆ และในทำนองเดียวกันสำหรับ J เท่ากับ 54.4 (รูปที่ 2.23)

รูปที่ 2.24 แสดงรูปผลการทดลองเปรียบเทียบ Contour ของความเร็วเฉลี่ยในหลายๆ หน้าตัด และ Streamwise vorticity isosurface ค่าหนึ่งซึ่งเป็นตัวแทนการพัฒนาตัวของ CVP ระหว่างกรณีที่ไม่มีการติด Tab กับกรณีที่มีการติด Tab ที่ตำแหน่ง Windward โดยทำการทดลองที่ J

เท่ากับ 21 พบว่าเมื่อมีการติด Tab ที่ตำแหน่ง Windward จะทำให้ตำแหน่ง Contour ของความเร็วเฉลี่ยในทุกๆ หน้าตัดลดความสูงลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Penetration depth ลดลงนั่นเอง และจากผลการคำนวณ Streamwise vorticity ที่หน้าตัดต่างๆ ซึ่งเป็นตัวแทน CVP มาทำการสร้าง Isosurface พบว่าในกรณีที่ติด Tab ที่ตำแหน่ง Windward มีผลทำให้ Isosurface มีขนาดเล็กกว่าในกรณีที่ไม่ติด Tab บ่งชี้ว่า CVP มีกำลัง (Strength) น้อยลดลงกว่ากรณีไม่ติด Tab และในทำนองเดียวกันสำหรับ J เท่ากับ 54.4 (รูปที่ 2.25)

รูปที่ 2.26 แสดงถึงเส้นเดินทางเดินของความเร็วบนระนาบสมมาตร พบว่าการติด Tap ที่ตำแหน่ง Windward มีผลทำให้เส้นทางเดินต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ติด Tap ทั้งกรณี J เท่ากับ 21.1 และ 54.4

รูปที่ 2.27 แสดงถึง Circulation ไปตามแนว Downstream พบว่าการติด Tap ที่ตำแหน่ง Windward นั้นมีผลทำให้ Circulation น้อยลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ติด Tap ทั้งกรณี J เท่ากับ 21.1 และ 54.4

Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ได้ศึกษาผลของการติด Tab ต่อการกระจายตัวของเจ็ตร้อนในกระแสลมขวางกรณีที่ไม่หมุนควง (กรณี JICF) และเจ็ตร้อนควง (กรณี SJICF) ที่ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์ โดยทำการทดลอง Swirl ratio (Sr) เท่ากับ 0 สำหรับกรณี JICF และ 0.52 สำหรับกรณี SJICF ที่ r คงที่เท่ากับ 4 โดยใช้ Tab รูปสามเหลี่ยมซึ่งมีขนาดพื้นที่ประมาณ 3 % ของพื้นที่ปากเจ็ตโดยติดตั้งที่ตำแหน่งขอบปากเจ็ตและเลื่อนไปโดยรอบ 8 ตำแหน่งตามรูปที่ 2.28

สำหรับกรณี JICF จากรูปที่ 2.29 พบว่าโครงสร้างการไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อติด Tab บริเวณตำแหน่ง Lateral จนถึง Windward โดยที่เจ็ตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างรูปไต ซึ่งมีลักษณะคล้าย CVP ไปเป็นโครงสร้างรูปจุลภาคโดยที่มีแกนกลางซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าและลอยอยู่บนตำแหน่งที่สูงกว่ากรณีไม่ติด Tab และยังคงรูปร่างแบบจุลภาคจนถึงหน้าตัดสุดท้ายของการวัด

สำหรับกรณี SJICF จากรูปที่ 2.30 พบว่ามีผลคล้ายคลึงกับกรณี JICF แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อแตกต่างกัน กล่าวคือโครงสร้างการไหลของกรณี SJICF จะมีเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งใน

บริเวณที่กว้างกว่ากรณี JICF โดยบริเวณนี้คือจากตำแหน่ง Pressure leeward ไปถึงตำแหน่ง Suction เมื่อเลื่อนตำแหน่งของ Tab ไปตามทิศทางของการหมุน

ซึ่งจะสรุปได้ว่าทั้งกรณี JICF และกรณี SJICF บริเวณที่โครงสร้างการไหลของเจ็ตมีความไวต่อตำแหน่งของการติด Tab มากที่สุด คือตรงกลางระหว่างตำแหน่ง Pressure windward (PW) จนไปถึง Windward (W) จากการทดลองบ่งชี้ถึงโอกาสซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการเกิดโครงสร้างการไหลมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับ Skewed Shear Layer ตามทิศทางการไหลของกระแสลมขวางรอบเจ็ตใกล้กับลำของเจ็ตที่ปากทางออก

- ผลของการกระตุ้นด้วยพัลส์ (Pulse)

M'Closkey *et al.* (2002) ได้มีแนวคิดที่จะปรับเปลี่ยนรูปแบบการไหลโดยทำให้ความเร็วที่ปากทางของเจ็ตให้เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ด้วยการกระตุ้นเป็นจังหวะ โดยทำการขับด้วยลำโพง ซึ่งได้มีการปรับรูปแบบสัญญาณ ความถี่ และอุปกรณ์การควบคุม (filter) แบบที่มี Compensator และ ไม่มี Compensator พบว่าชุดควบคุมที่ประกอบด้วย Compensator ได้ตอบสนองที่มีความเที่ยงตรงมากกว่าในกรณีที่ไม่มี Compensator ซึ่งเปรียบเทียบผลการวัดความเร็วที่ปากทางออกด้วย Hot wire anemometer รูปที่ 2.31 พบว่ากรณีที่กระตุ้นด้วยสัญญาณรูปร่างสี่เหลี่ยม ที่สัดส่วนการการเกิด Vortex shedding ($1/5, 1/4, 1/3$ และ $1/2$) และมี Compensator นั้น เจ็ตจะสามารถพุ่งทะลุ (penetration) และกระจายตัวไปในกระแสลมขวางได้เหมาะสมที่สุด ซึ่งตรงกับคาบของสัญญาณอยู่ในช่วงระหว่าง 2.7-3.0 มิลลิวินาที

Narayanan *et al.* (2003) ศึกษา Dynamic และการควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวางด้วย Spinning valve actuator กระตุ้นด้วยความถี่ระหว่าง 100 ถึง 1,600 Hz ที่ $Re_{cf} = 5,000$, $r = 6$ และ $Re_j = 2.75 \times 10^4$ พบว่าการกระตุ้นที่ความถี่ต่ำ Vortices จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่เจ็ตพุ่งออกและโค้งตัวตามกระแสลมขวาง (รูปที่ 2.32) และกระตุ้นที่ความถี่สูงจะช่วยให้การกระจายตัวของเจ็ตที่ปากทางออกเพิ่มสูงขึ้น

- ผลของการกระตุ้นด้วยการหมุนควง (Swirl)

Niederhaus *et al.* (1997) ได้ศึกษาผลของการหมุนควง (Swirl) ที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสน้ำขวาง โดยการสร้างการหมุนควงโดยใช้ใบพัด ซึ่งทำให้ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสที่ปากเจ็ตมีค่าเป็นศูนย์ โดยศึกษา Scalar concentration ในอุโมงค์น้ำ ด้วยเทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) พบว่าลักษณะของ CVP เปลี่ยนไปจากลักษณะที่สมมาตรในกรณีที่ไม่มีการหมุนควงเป็นลักษณะที่ Vortex ด้านหนึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้นและอีกด้านหนึ่งมีขนาดเล็กลง รวมถึงรูปร่างที่เปลี่ยนไปเป็นจุดภาค นอกจากนี้ยังพบว่าหมุนควงจะผลทำให้ penetrate ของเจ็ตลดลง รวมถึง Maximum concentration จะเกิดในด้าน pressure side

Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) ศึกษาผลกระทบของความเร็วในการหมุนควงซึ่งแสดงโดยค่า Swirl ratio (Sr) ที่มีต่อคุณลักษณะของอุณหภูมิจากการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสน้ำขวาง โดยทำการทดลองที่ค่า Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 จนถึง 0.82 ที่ r คงที่ 4.1 ในช่วง $x/rd = 0.25$ ถึง 2 ซึ่งอยู่ระหว่าง Near field กับ Far field โดยใช้ท่อหมุนในการทำให้เกิดการหมุนควงเป็นผลให้ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์ จากรูปที่ 2.33 แสดงถึงการกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวมบนระนาบตั้งฉาก ซึ่งพบว่าการหมุนควงของเจ็ตจะส่งผลทำให้อุณหภูมิและเกเดียนร์ของอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณด้าน Suction ในขณะที่จะส่งผลทำให้มีอุณหภูมิและเกเดียนร์ของอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณด้าน Pressure เมื่อเปรียบเทียบกับไม่มีการหมุนควง (สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bunyajitradulya and Sathapornnanon , 2005) รวมถึงการหมุนควงยังทำให้โครงสร้างการไหลมีความไม่สมมาตรอีกด้วย อย่างไรก็ตามจากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการหมุนควงนั้นมีอิทธิพลต่อพารามิเตอร์เช่น เส้นทางการเดินและ decay ของเจ็ตในกระแสน้ำน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลของ r

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของ Niederhaus *et al.* กับ Wangjiraniran and Bunyajitradulya พบว่าพารามิเตอร์หลักของการทดลองใกล้เคียงกัน แต่ Initial tangential velocity profile ต่างกัน กลับให้ผลที่ไม่สอดคล้องกันกล่าวคือ Niederhaus *et al.* พบ High concentration ทางด้าน Pressure ในขณะที่ Wangjiraniran and Bunyajitradulya พบ High temperature ทางด้าน Suction

Yingjaroen *at el.* (2006) ศึกษาการวิวัฒนาการของเจ็ตในกระแสมขวางกรณีเจ็ตไม่หมุนควง (กรณี JICF) และกรณีเจ็ตหมุนควง (กรณี SJICF) ที่ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์ โดยใช้ปฏิกิริยากรด-เบส แสดงถึง Reactive mixing และน้ำ-เบส แสดงถึง Passive mixing ในการศึกษา โดยจะทดลองที่ค่า Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.8 ที่ r คงที่เท่ากับ 4 ซึ่งในการศึกษาจะใช้ Contours of line-of-sight integrated mean images แทนปริมาณเชิงคุณภาพของการผสม

จากรูปที่ 2.34 แสดงถึง Contours of line-of-sight integrated mean images พบว่ากรณี JICF Passive outer region mixing จะมีการผสมบริเวณนี้มากที่สุดที่ตำแหน่ง $x/rd < 0.5$ และเมื่อตำแหน่ง x/rd มากขึ้น พบว่าการผสมบริเวณ Passive outer region mixing จะน้อยลง ในขณะที่ Central-region mixing จะมีอัตราการผสมมากขึ้น และ Reactive inner region mixing จะมีการผสมเพียงเล็กน้อยในบริเวณนี้

สำหรับกรณี SJICF พบว่าบริเวณ Outer และ Inner regions จะมีการผสมบริเวณนี้มาก ในขณะที่ Central-region mixing ไม่มีนัยสำคัญต่อการผสม

Limdumrongtum *at el.* (2009) ศึกษา Mixing Structure ในบริเวณ Near field โดยศึกษาโครงสร้างของ Instantaneous และ Mean flow ของเจ็ตในกระแสมขวาง โดยใช้เทคนิคผลรวมของ Combination of smoke fluid condensation, Mie scattering และ Laser-sheet visualization techniques ในการศึกษา โดยทำการทดลองที่ค่า Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.8 ที่ r คงที่เท่ากับ 4 รูปที่ 2.35 แสดงถึง Instantaneous image ของ mixing structure บนด้าน Top view ที่บริเวณ $y/rd < 0.2$ พบว่า Swirl จะไปพัฒนาและส่งเสริม Cascading azimuthal K-H mixing structures บนด้าน Pressure ขณะที่จะไปยับยั้งบนด้าน Suction และที่บริเวณ $y/rd > 0.2$ จะไปพัฒนาและส่งเสริม Vortical roll-ups บนด้าน Pressures ขณะที่จะไปยับยั้งบนด้าน Suction สำหรับการพัฒนาตัวของ Vortical roll-ups บนด้าน Pressures เกิดจากพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่องจาก Cascading azimuthal K-H mixing structures จาก Upstream ในขณะที่ Vortical roll-ups บนด้าน Suction จะเกิดจากพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่องจาก Lee side cusp

Denev *et al.* (2005) ศึกษาโครงสร้างและการผสมของเจ็ตหมุนควงในกระแสลมขวาง โดยศึกษาที่ Swirl number เท่ากับ 0 ถึง 0.6 และใช้วิธี LES ศึกษาสนามการไหล พบว่าการไหลและสนามความเข้มข้นของเจ็ตจะบิดเบี้ยวไปและพบ High concentration ทางด้าน Suction เมื่อมี Swirl ดังในรูปที่ 2.36 และ 2.37 และการศึกษาชี้แนะว่า swirl ไม่ได้ช่วยในการผสมให้ดีขึ้นหรือมีผลน้อยมากต่อการผสม

- ผลของการกระตุ้นด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimutal control jet)

Kornsri *at el.* (2009) ศึกษาผลกระทบของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยที่เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงมีลักษณะดังรูปที่ 2.38 โดยศึกษาผลของพารามิเตอร์ของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงคือ 1) ตำแหน่งเชิงมุมตามแนวเส้นรอบวงปากเจ็ต (θ) 2) ปริมาณอัตราส่วนเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก (r_m) โดยใช้ Single sensor hot film anemometer เป็นเครื่องมือวัดความเร็ว โดยทดลองที่ r เท่ากับ 3.9 และ r_m อยู่ระหว่าง 1.8 ถึง 2.3%

รูปที่ 2.39 แสดงถึงเส้นทางเดินของความเร็วของเจ็ตบนระนาบสมมาตรสำหรับควบคุมและไม่ควบคุม พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$ (กรณี I15) นั้นจะให้เส้นทางเดินต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ควบคุมหรือควบคุมกรณีอื่น สำหรับ r_m คงที่ 2.3%

รูปที่ 2.40 แสดงถึง penetration ของเส้นทางเดินที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ สำหรับกรณี I15 พบว่าการ penetration ของเส้นทางเดินจะลดลง เมื่อ r_m เพิ่มขึ้น โดย Kornsri เลือกสภาวะที่เหมาะสมต่อการควบคุมคือมุมที่ $\theta = \pm 15^\circ$ และปริมาณ r_m เท่ากับ 2 %

รูปที่ 2.41 แสดงถึงกระจายของความเร็ว (V_{xy}) ต่อกระแสลมขวาง พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมกรณี I15 จะทำให้เจ็ตมี Streamwise vertical pair ห่างจากกันตามแนว Spanwise มากขึ้น และจะยับยั้งการเกิด Windward jet shear layer ในขณะที่เจ็ตกับพื้นด้านล่าง (Wall separation) จะน้อยลง (เจ็ตต่ำลง)

Kornsri เสนอแนวคิด Spanwise separation – Mutual blocking และ Wall separation – Wall blocking ต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง ซึ่งนำมาอธิบายกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของกรณี I15 ได้ดังต่อไปนี้ ผลการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนว

เส้นรอบวงกรณี I15 (ดูรูป 2.42 ประกอบ) ทำให้ยับยั้งการเกิด Windward jet shear layer ส่งผลให้ Streamwise vortical structure แยกออกเป็นสองลูกซ้าย-ขวา ที่มีระยะห่างตามแนว Spanwise (Spanwise separation) มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF ซึ่งจะลดการขัดขวางการเหนี่ยวนำการผสมกันเองของ Vortex pairs (Mutual blocking) ในขณะที่เจ็ตมีระยะห่างจากพื้นด้านล่าง (Wall separation) น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF ซึ่งอาจทำให้เกิดการขัดขวางการเหนี่ยวนำการผสมจากบริเวณด้านล่างของเจ็ต (Wall blocking) หากเจ็ตใกล้พื้นเกินไป

ดังนั้นการเหนี่ยวนำการผสมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงกรณี I15 จะประสิทธิผลหรือไม่ จึงขึ้นอยู่กับผลของ Spanwise separation – Mutual blocking และ Wall separation – Wall blocking ว่าปริมาณใดที่ส่งผลต่อการเหนี่ยวนำการผสมมากกว่ากัน

บทที่ 3

เทคนิคและหลักการในการประเมินหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาณ

3.1 ปัญหาการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวาง

การศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวาง จะศึกษาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดในกระแสมขวาง ซึ่งมีความยุ่งยากซับซ้อนและมีความไม่ชัดเจนในการนิยามบริเวณของเจ็ดออกจากกระแสมขวางในระดับหนึ่ง จากงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จึงได้ศึกษาปริมาณที่มีคุณลักษณะเชื่อมโยงกับการเหนี่ยวนำการผสม เช่น Spread rate และ Decay rate ของความเร็วเฉลี่ยและปริมาณความเข้มข้นเกล็ด (Scalar concentration) ซึ่งศึกษาได้โดยสะดวกกว่าการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดโดยตรง

เพื่อที่จะสามารถศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดโดยตรงและลดความไม่ชัดเจนในการแยกแยะบริเวณของเจ็ดออกจากกระแสมขวาง เครื่อง Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) จึงถูกนำมาเป็นเครื่องมือวัดความเร็วของสนามการไหลของเจ็ดในกระแสมขวาง และในงานวิจัยนี้ได้มีการใส่อนุภาคติดตามการไหลในส่วนของเจ็ดหลักเท่านั้น โดยไม่ใส่ในกระแสมขวาง ทำให้ความเร็วที่วัดได้จาก SPIV จึงมาจากส่วนของเจ็ดหลักเท่านั้น ซึ่งสามารถนำความเร็วดังกล่าวมาคำนวณหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดและอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ดได้ ซึ่งปริมาณดังกล่าวจะใช้แทนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวางโดยตรง รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.2 เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเพื่อระบุบริเวณที่เป็นเจ็ดเท่านั้น

การทดลองวัดความเร็วด้วย SPIV โดยทั่วไปนั้นทั้งเจ็ดหลักและกระแสมขวางจะถูกใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งสองส่วน ซึ่งจะมีข้อดีคือสามารถแสดงสนามความเร็วได้อย่างต่อเนื่องจากบริเวณที่เป็นเจ็ดสู่บริเวณที่เป็นกระแสมขวางดังแสดงในรูปที่ 3.1 ก อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้มีความต้องการหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดและอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการ

ผสมเชิงปริมาตรของเจ็ด ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องหาความเร็วในบริเวณที่เป็นเจ็ดเท่านั้น ดังนั้น การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนเจ็ดหลักและกระแสลมขวางจึงไม่เหมาะสม เนื่องจากจะทำให้ไม่สามารถแยกแยะบริเวณเจ็ดและบริเวณกระแสลมขวางออกจากกันอย่างชัดเจน ในงานวิจัยนี้จึงใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดหลักเท่านั้น แต่จะไม่ใส่ในกระแสลมขวาง จึงทำให้สนามความเร็วที่วัดได้ด้วย SPIV เป็นสนามความเร็วในบริเวณเจ็ดเท่านั้น ส่วนความเร็วในบริเวณกระแสลมขวาง SPIV จะวัดได้ว่ามีค่าความเร็วเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่มีอนุภาคติดตามการไหลอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ข

3.3 การประเมินหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่ระนาบตั้งฉากกับกระแสลมขวาง ณ ตำแหน่ง x และเวลาใดๆ นิยามเป็น

$$E = \frac{Q_j}{Q_o} \quad (3.1)$$

เมื่อ Q_j คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรในบริเวณของเจ็ดที่ผ่านระนาบตั้งฉากกับกระแสลมขวาง ณ ตำแหน่ง x และเวลาใดๆ, Q_o คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ด โดยที่ Q_j สามารถหาได้จาก

$$Q_j(x, t) = \int_{A_j(x, t)} V_x(\vec{x}, t) dA \quad (3.2)$$

เมื่อ V_x คือ ความเร็วตามแนวแกน x , $A_j(x,t)$ คือพื้นที่ของเจ็ต โดยระบบแกนพิกัดมีจุดกำเนิดอยู่ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของปากทางออกของเจ็ตหลัก (รูปที่ 4.4) และให้แกน x มีทิศทางตามกระแสลมขวาง, y มีทิศทางตามทิศทางความเร็วของเจ็ตหลักที่ปากทางออก และ z มีทิศทางตามกฎมือขวา

สมการที่ 3.2 เป็นการอินทิเกรตสนามความเร็ว V_x ในบริเวณที่เป็นเจ็ตเท่านั้น ซึ่งในการคำนวณ ถ้าความเร็วที่วัดได้ด้วย SPIV ในบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางไม่เป็นศูนย์ ดังรูปที่ 3.2 ก จะทำให้ต้องกำหนดขอบเขตของเจ็ตขึ้นมาก่อน ซึ่งการกำหนดขอบเขตของเจ็ตนี้ จะมีความยุ่งยาก ซับซ้อนและมีความไม่แน่นอนในนิยาม (arbitrariness) ในระดับหนึ่ง แต่ด้วยเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตหลักอย่างเดียวดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้ความเร็ว V_x ในบริเวณกระแสลมขวางที่วัดได้จาก SPIV จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นเมื่อประยุกต์สมการที่ 3.2 ใช้กับค่าความเร็วที่วัดได้ด้วย SPIV ด้วยเทคนิคการใส่อนุภาคดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้สามารถเขียนสมการที่ 3.2 ใหม่ได้เป็น

$$Q_j(x,t) = \int_{A_j(x,t)} V_x(\vec{x},t) dA = \int_A V_{x,j}(\vec{x},t) dA \quad (3.3)$$

เมื่อ $V_{x,j}$ คือ ความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน x ซึ่งมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อจุดความเร็วอยู่ในบริเวณของกระแสลมขวาง และ A คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดซึ่งรวมถึงบริเวณที่เป็นของเจ็ตและกระแสลมขวาง

อนึ่ง เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตหลักดังกล่าวข้างต้น นอกเหนือจากจะทำให้สามารถกำหนดบริเวณของเจ็ต (A_j) ได้ชัดเจนขึ้นและลดความไม่แน่นอนในการกำหนดขอบเขตของเจ็ตลงได้แล้ว ในเชิงการคำนวณ Q_j จากสมการที่ 3.3 จะคำนวณได้สะดวกมากขึ้นกว่าการคำนวณจากสมการที่ 3.2 เนื่องจากสามารถอินทิเกรตสนามความเร็ว $V_{x,j}$ (ซึ่งจะมีค่าเป็นศูนย์ในบริเวณกระแสลมขวาง) ไปบนพื้นที่ทั้งหมดซึ่งรวมทั้งพื้นที่ของเจ็ตและกระแสลมขวางที่วัดได้ด้วย SPIV ได้เลย ดังรูปที่ 3.2 ข

เมื่อพิจารณาหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตเฉลี่ยตามเวลาทั้งหมด (\bar{Q}_j) จากสมการที่ 3.3 จะได้ว่า

$$\bar{Q}_j(x, t) = \int_A \bar{V}_{x,j}(\vec{x}, t) dA \quad (3.4)$$

เมื่อ $\bar{V}_{x,j}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตเทียบกับเวลาทั้งหมด ดังนั้น จึงสามารถหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ตเฉลี่ยเทียบกับเวลาทั้งหมด (\bar{E}) ได้เป็น

$$\bar{E} = \frac{\bar{Q}_j}{Q_o} \quad (3.5)$$

เมื่อ \bar{Q}_j สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 3.4 อนึ่ง เพื่อความสะดวกจะละเครื่องหมาย $-$ โดยให้เข้าใจว่า $E = Q_j/Q_o$ หมายถึงปริมาณเฉลี่ยเทียบกับเวลาทั้งหมดตามสมการที่ 3.5

อนึ่ง ในการคำนวณ Q_j จากผลการวัดด้วย SPIV ซึ่งจะมีจำนวนเวกเตอร์จำกัดจะคำนวณจาก

$$Q_j = \sum_{ij} (\bar{V}_{ij} \Delta A) \quad (3.6)$$

โดยที่ \bar{V}_{ij} คือความเร็วเฉลี่ยเทียบกับเวลาทั้งหมดที่ตำแหน่ง ij บนเมตริกซ์ของสนามความเร็วที่วัดได้, ΔA คือพื้นที่ของแต่ละอิเลเมนต์ของจุดความเร็ว ij ซึ่งในการทดลองนี้จะมีค่าสม่ำเสมอเท่ากันหมดทุกอิเลเมนต์

บทที่ 4

ชุดการทดลองและการทดลอง

4.1 ชุดทดลอง

ชุดทดลองสำหรับการศึกษานี้ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยชุดทดลองประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ อุโมงค์ลมและชุดหัวเจ็ตควบคุม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- **อุโมงค์ลม (Wind tunnel)**

อุโมงค์ลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีหน้าที่สร้างกระแสลมขวาง โดยแสดงเป็นลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญคือพัดลมหอยโข่ง (Centrifugal blower) ขนาด 15 กิโลวัตต์ ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (Diffuser) ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) ขนาด 100 x 100 ตารางเซนติเมตร ส่วนลดพื้นที่หน้าตัด (Contraction) ที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดทางเข้าต่อด้านทางออกเท่ากับ 4 และหน้าตัดทดสอบ (Test section) สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 50 x 50 ตารางเซนติเมตร ยาว 240 เซนติเมตร

การทำงานของอุโมงค์ลมเริ่มจากอากาศจะถูกจากบรรยากาศของห้องผ่านพัดลมหอยโข่งชนิดแบบ Backward curve airfoil blades ขนาด 15 กิโลวัตต์ ซึ่งมีขนาดทางออก 76 x 76 ตารางเซนติเมตร ซึ่งถูกควบคุมความเร็วรอบด้วยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (ABB™ model ACS401002032, ขนาด 50 Hz, ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz) จากนั้นอากาศผ่านท่อลดแรงสั่นสะเทือน (Flexible duct) หลังจากนั้นอากาศจะถูกส่งผ่านเข้าไปในส่วนขยายพื้นที่หน้าตัดเพื่อลดความเร็วของอากาศ โดยมีลักษณะของหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดของทางเข้าเท่ากับ 78 x 78 ตารางเซนติเมตร ขนาดทางออกเท่ากับ 100 x 100 ตารางเซนติเมตร ยาว 74 เซนติเมตร คิดเป็นอัตราส่วนพื้นที่เท่ากับ 1.64 และมีมุมเอียงรวมเท่ากับ 16.9 องศา โดยที่ภายในส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด ประกอบไปด้วยแผ่นเหล็กเจาะรู (Perforated plate) ที่มีขนาดรูจำนวน 4 แผ่นโดยแต่ละแผ่นมีระยะห่างจากด้านเข้าเท่ากับ 15, 30, 45 และ 60 เซนติเมตรตามลำดับ ทั้งนี้

เพื่อป้องกันการเกิด Separation และให้อากาศกระจายเต็มพื้นที่หน้าตัดของส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด

หลังจากอากาศถูกลดความเร็วในส่วนขยายพื้นที่หน้าตัดแล้ว อากาศจะผ่านเข้าไปยังห้องจัดปรับการไหลที่มีขนาด 100×100 ตารางเซนติเมตร ยาว 125 เซนติเมตร ภายในประกอบด้วยตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh \times SWG เท่ากับ 4×24 ที่ทางเข้าถึงไปเป็นชุดปรับทิศทางการไหล (Honeycomb) ที่ทำจากท่อ PVC ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 15 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตรวางเรียงอยู่เต็มหน้าตัดการไหลถัดจาก Honeycomb จะมีตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh \times SWG เท่ากับ $16 \times 18 \times 31$ จำนวน 7 แผ่น โดยแต่ละแผ่นวางห่างกัน 12.6 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อปรับทิศทางการไหลและทำให้อากาศมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด ต่อจากนั้นอากาศจะไหลผ่านไปยังส่วนลดพื้นที่หน้าตัด ซึ่งมีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดทางเข้าต่อทางออกเท่ากับ 4 โดยมีรูปร่างเส้นโค้งของส่วนลดพื้นที่หน้าตัด นั้นได้ออกแบบตามสมการ Polynomial ดีกรี 4 มีจุดเปลี่ยนความโค้งที่ระยะ $2/3$ เท่าของความยาว 170 เซนติเมตร ซึ่งส่วนลดพื้นที่หน้าตัดจะทำหน้าที่เร่งอากาศให้มีความเร็วสูงขึ้นจนได้ความเร็วที่หน้าตัดทดสอบตามที่ต้องการ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอและลดปริมาณความปั่นป่วนของอากาศก่อนเข้าสู่หน้าตัดทดสอบ บริเวณกึ่งกลางด้านล่างของหน้าตัดทดสอบจะต่อกับเจ็ทหลักและจุดศูนย์กลางของหัวเจ็ทหลักจะห่างจากขอบด้านหน้าของหน้าตัดทดสอบเท่ากับ 85 เซนติเมตร

- **ชุดหัวเจ็ทควบคุม**

ชุดหัวเจ็ทควบคุม (เหมือนกับ Korn Sri, 2007 และ Korn Sri *et al.*, 2009 ทุกประการ) ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักได้แก่ 1) เจ็ทหลักมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 22.5 มิลลิเมตร โดยจะติดตั้งอยู่จุดศูนย์กลางของหัวเจ็ทและ 2) เจ็ทควบคุมตามแนวเส้นรอบวงซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1 มิลลิเมตรและมีความยาว 40 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจำนวนทั้งหมด 24 ตัว ติดตั้งโดยรอบปากทางออกของเจ็ทหลัก โดยมีระยะห่างเชิงมุมระหว่างปากเจ็ทควบคุมแต่ละตัวเท่ากับ 15 องศา และจุดศูนย์กลางของปากเจ็ทควบคุมอยู่ต่ำกว่าระดับปากทางออกของเจ็ทหลักเท่ากับ 3 มิลลิเมตร โดยส่วนประกอบหลักของชุดทดลองในส่วนเจ็ทหลักและเจ็ทควบคุมแสดงในรูปที่ 2.38 และรูปที่ 4.2 รายละเอียดของการทำงานแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

- **ส่วนเจ็ตหลัก (Main jet)**

การทำงานของชุดหัวเจ็ตหลักเริ่มจากอากาศจะถูกดูดจากบรรยากาศของห้องทดลองผ่านพัดลมความดันสูงขนาด 10 แรงม้า (Elprom™) ซึ่งควบคุมความเร็วรอบด้วยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (ABB™ model ACS401002032, ขนาด 50 Hz, ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz) เพื่อควบคุมอัตราการไหลของเจ็ตหลักแล้วอากาศจะถูกส่งผ่านระบบท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และมีการติดตั้ง Six-Jet Atomizer (TSI™ model 9306A) เพื่อทำการฉีดละออง glycerol solution ความเข้มข้น 5% เพื่อทำหน้าที่เป็นอนุภาคติดตามการไหล และท่อจะถูกลดขนาดเป็น 2.5 นิ้ว และลดขนาดท่ออีกครั้งเป็น 3/4 นิ้ว และเชื่อมต่อกับท่ออะลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว ซึ่งเป็นส่วนท่อตรงยาว 44 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเจ็ตเพื่อให้รูปร่างความเร็วที่ปากทางออกเป็นการไหลพัฒนาแบบเต็มที่ (fully developed flow) ดังรูปที่ 4.3

- **ส่วนเจ็ตควบคุม (Control jet)**

การทำงานของส่วนของเจ็ตควบคุม อากาศจะถูกดูดจากบรรยากาศของห้องผ่านเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ (Reciprocating air compressor, PUMA™ ขนาด 0.75 กิโลวัตต์) แล้วส่งผ่านชุดควบคุมแรงดัน (Pressure regulator) ที่กำหนดความดันค่าคงที่เท่ากับ 2 bar ก่อนอากาศจะถูกส่งเข้าแผงควบคุมจำนวนสองชุด ซึ่งแต่ละชุดประกอบด้วยวาล์วของเหลวแบบเข็ม (Needle valve) ขนาด 1/2 นิ้ว แบบ Solenoid และอุปกรณ์วัดและควบคุมอัตราการไหลด้วย Rotameter (Dwyer™ model VA20434, ประเภทลูกกลอยชนิด 316 Stainless steel, ค่าความถูกต้องเท่ากับ $\pm 2\%$ FS) อากาศจากแผงควบคุมแต่ละชุดจะไหลผ่านสายยางขนาด 3/16 นิ้ว และเชื่อมต่อกับแต่ละรูของเจ็ตควบคุมด้วยท่อ PTFE ขนาด 3/16 นิ้ว (รูปที่ 4.2)

4.2 พิกัดการทดลอง

ในการวิจัยนี้ได้กำหนดระบบที่ใช้ในการอ้างอิงจากรูปที่ 4.4 ประกอบด้วยพิกัด x , y และ z กำหนดจุดกำเนิดอยู่ที่ตำแหน่งตรงจุดศูนย์กลางของปากทางออกของเจ็ตหลัก และให้แกน x มีทิศทางตามการไหลของกระแสลมขวาง (Streamwise) ให้แกน y มีทิศทางพุ่งตั้งฉากกับแนวการไหลของกระแสลมขวาง (Traverses) และแกน z มีตั้งฉากกับการไหลของกระแสลมขวาง (Spanwise) ตามกฎมือขวา การกำหนดตำแหน่งมุมของเจ็ตควบคุม ได้กำหนดให้ตำแหน่งของ

เจ็ทควบคุม 0 องศา มีทิศทางเดียวกับกระแสลมขวาง และตำแหน่งมุมทวนเข็มและตามเข็มให้เป็นลบและบวกตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

4.3 Stereo Particle Image Velocimetry

Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) เป็นเครื่องมือวัดความเร็วทั้งสามคอมโพเนนต์บนระนาบของทุกจุดในเวลาเดียวกัน ซึ่ง SPIV ไม่ได้เป็นเครื่องวัดความเร็วของไหลโดยตรง แต่อาศัยการถ่ายภาพอนุภาคติดตามการไหลเพื่อหาความเร็วของอนุภาคติดตาม ซึ่งความเร็วที่ได้วัดจากอนุภาคจะถูกใช้ประมาณความเร็วของไหล การติดตั้ง SPIV สำหรับงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 มีรายละเอียดของส่วนประกอบและการทำงานต่อไปนี้

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ระบบ SPIV ของบริษัท TSI ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ Nd:YAG ยี่ห้อ New Wave™ (model Solo 200XT, รูปที่ 4.8) มีกำลังสูงสุด 200 mJ/pulse ที่ความยาวคลื่น 532 nm โดยลำแสงเลเซอร์จะถูกส่งผ่านแขนส่งต่อลำแสงเลเซอร์ (Laser Light Arm, model 610015, รูปที่ 4.9) ที่ปากทางออกของแขนส่งต่อลำแสงเลเซอร์จะต่อกับชุดเลนส์สร้างแผ่นระนาบเลเซอร์ (Light sheet optics, model 610021-SIL, -25 mm cylindrical and +500 mm spherical) โดยลำแสงเลเซอร์จะออกมาในลักษณะเป็นแผ่นระนาบความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ระนาบแสงเลเซอร์ (Laser sheet) จะให้แสงสว่างแก่ละออง glycerol solution ซึ่งทำหน้าที่เป็นอนุภาคติดตามการไหลในเจ็ทหลัก ซึ่งละออง glycerol solution จะกระเจิงแสงออกมาเมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบ ภาพการกระเจิงแสงจะถูกบันทึกโดยกล้อง CCD (PowerView Plus11MP, model 630062, รูปที่ 4.10) ที่มีความละเอียด 4008 พิกเซล × 2672 พิกเซล, ขนาดพิกเซล 9×9 ตารางไมโครเมตร, ขนาด CCD 36.07×24.05 ตารางมิลลิเมตร, และไดนามิกเรนจ์ 12 บิต จำนวนสองตัว ซึ่งแต่ละตัวจะติดตั้งด้วยเลนส์ ยี่ห้อ Tokina™ (model 100 mm f2.8D Macro) โดยที่จะมีชุดควบคุมส่วนกลาง (synchronizer, model 610035, รูปที่ 4.11) ทำหน้าที่ประสานระบบกล้อง, แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ และคอมพิวเตอร์ให้ทำงานสัมพันธ์กัน สำหรับการบันทึกภาพจะบันทึกภาพด้วยความถี่ 2.07 Hz โดยจะใช้ซอฟต์แวร์ TSI™ Insight 4G ทำการประมวลผลภาพที่ได้จากการบันทึกด้วยกล้อง CCD ทั้งกล้องด้านซ้ายและขวา (รูปที่ 4.12) เพื่อหาเวกเตอร์ความเร็วบนระนาบ CCD (รูปที่ 4.13) โดยเวกเตอร์ความเร็วที่ได้จากระนาบ CCD ทั้งสองกล้องนี้จะถูกนำไปหาความเร็วทั้งสามคอมโพเนนต์บนระนาบเลเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.14

4.4 การสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง Stereo Particle Image Velocimetry กับ Pitot tube

การสอบเทียบ (Calibration) การวัดเร็วด้วย SPIV จะเปรียบเทียบการวัดความเร็ว กระแสลมขวางระหว่าง SPIV กับอุปกรณ์วัดความเร็วมาตรฐานคือ Pitot tube โดยทำการสอบเทียบที่ 2 ความเร็ว คือ 4.3 เมตรต่อวินาที และ 6 เมตรต่อวินาที ซึ่ง SPIV ซึ่งมีติดตั้งตามหัวข้อ 4.3 โดยทำการเปลี่ยนเลนส์เป็น ยี่ห้อ Nikon™ (model AF 50 mm f1.8D) พื้นที่ขนาดหน้าตัดที่วัดด้วย SPIV (Field of view , FOV) มีขนาดประมาณ $2.3rd \times 2.3rd$ หรือ 21×21 ตารางเซนติเมตร ในการประมวลผลเพื่อหาความเร็วจะใช้ Interrogation area เริ่มต้นเท่ากับ $128 \text{ พิกเซล} \times 128 \text{ พิกเซล}$ และสุดท้ายเท่ากับ $64 \text{ พิกเซล} \times 64 \text{ พิกเซล}$ ซึ่ง Interrogation area จะ Overlap กันที่ 50% Spatial resolution ของสนามความเร็วที่ได้จะมีขนาด 4.8×4.8 ตารางมิลิเมตร และ 5.1×5.1 ตารางมิลิเมตร สำหรับความเร็ว 4.3 เมตรต่อวินาทีและ 6 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และจะทำการเก็บสนามความเร็วกรณีละ 500 สนาม (500 คู่ภาพ) เพื่อหาความเร็วเฉลี่ยไปตามเวลา

รูปที่ 4.15 แสดงถึงการกระจายตัวของความเร็วในแนวแกน x (V_x) พบว่าผลการวัดด้วย SPIV ความเร็วเฉลี่ยทั้งเมตริกซ์ที่ได้เท่ากับ 3.7 เมตรต่อวินาที และ 5.2 เมตรต่อวินาทีในกรณีความเร็วที่วัดด้วย Pitot tube ที่ความเร็ว 4.3 เมตรต่อวินาทีและ 6 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่าการวัดความเร็วด้วย SPIV ความเร็วที่วัดได้ จะน้อยกว่า Pitot tube ประมาณ 13.96 % และ 13.33 % ที่ความเร็ว 4.3 เมตรต่อวินาทีและ 6 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ

4.5 การวัดและเครื่องมือวัด

4.4.1 การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวางและเจ็ต

- การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวาง

การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวางประกอบด้วย การวัดความสม่ำเสมอของกระแสลมขวางด้วย SPIV และการวัดความหนาของชั้นขอบเขตที่ผนังพื้นของหน้าตัดทดสอบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การวัดความสม่ำเสมอของกระแสลมขวางด้วย SPIV

การวัดความสม่ำเสมอของกระแสลมขวางภายในหน้าตัดทดสอบ (Test Section) จะทำการวัดที่ระยะ $x/rd = -1$ หรือเทียบเท่า -9 เซนติเมตร ด้วย SPIV ซึ่งมีติดตั้งตามหัวข้อ 4.4 ทุกประการ กำหนดให้ความเร็วเริ่มต้นของการวัดเท่ากับ 4.3 เมตรต่อวินาที (วัดด้วย Pitot tube) พื้นที่ขนาดหน้าตัดที่วัดด้วย SPIV (FOV) มีขนาดประมาณ $2.3rd \times 2.3rd$ หรือ 21×21 ตารางเซนติเมตร ในการประมวลผลเพื่อหาความเร็วจะใช้ Interrogation area เริ่มต้นเท่ากับ 128 พิกเซล \times 128 พิกเซล และสุดท้ายเท่ากับ 64 พิกเซล \times 64 พิกเซล ซึ่ง Interrogation area จะ Overlap กันที่ 50% Spatial resolution ของสนามความเร็วที่ได้จะมีขนาด 4.88×4.88 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็นเมตริกซ์ขนาด 43×43 โดยทำการเก็บสนามความเร็วทั้งหมด 1,000 สนาม เพื่อหาความเร็วเฉลี่ยไปตามเวลา

รูปที่ 4.16 แสดงผลการวัดสภาวะความสม่ำเสมอของความเร็วเฉลี่ย (V_x) ในหน้าตัดทดสอบของอุโมงค์ลมที่ตำแหน่งหน้าปากทางออกของเจ็ตหลัก -9 เซนติเมตร หรือ $x/rd = -1$ พบว่ากระแสลมขวางค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ โดยมีความเร็วเฉลี่ยทั้งเมตริกซ์เท่ากับ 3.7 เมตรต่อวินาที ค่าสองเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เท่ากับ 0.15 เมตรต่อวินาที มีค่าความเร็วสูงสุดเท่ากับ 4.5 เมตรต่อวินาทีและค่าความเร็วต่ำสุดเท่ากับ 3.0 เมตรต่อวินาที

- การวัดความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง

การวัดความหนาของชั้นขอบเขตจะทำการวัดความเร็วในชั้นขอบเขตด้วย Pitot tube ซึ่งทำขึ้นเองจากเข็มฉีดยา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ดัดให้โค้งเป็นมุมฉาก มีระยะจากปลาย Probe ถึงก้านประมาณ 50 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ความดันที่ได้วัดได้จาก Pitot tube จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer ชนิด Differential ยี่ห้อ SETRA™ (model 264) ที่มีช่วงวัดความดันเข้า ± 0.05 นิ้วน้ำ ช่วงแรงดันไฟฟ้าด้านทางออก 0-5 Volts และความถูกต้องเท่ากับ $\pm 0.25\%$ Full scale จากนั้นค่า

แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ดังกล่าวจะถูกอ่านโดยใช้ Digital multimeter ยี่ห้อ FLUKE™ (model 19) โดยจะทำการวัดไปตามแนว Traverse 3 ตำแหน่งคือ $(x,z) = (-1rd, -0.5rd)$, $(-1rd, 0rd)$ และ $(-1rd, 0.5rd)$ ความละเอียดในการวัดอยู่ในช่วง 0.05 มิลลิเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร โดยจะทำการวัดซ้ำทั้งหมด 5 ครั้งในแต่ละการวัดความเร็วของแต่ละ Traverse

รูปที่ 4.17 แสดงถึงร่างของชั้นขอบเขต (Boundary layer) ตามแนว Transverse ซึ่งแสดงโดยค่า $y/\delta_{95\%}$ โดยที่ $\delta_{95\%}$ เป็นความหนาของชั้นขอบเขตซึ่งนิยามจากระยะ y ที่มีความเร็วเป็น 95 % ของความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขต ทั้งนี้ความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขตมีค่าประมาณ 4.3 เมตรต่อวินาที พบว่าชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางทั้ง 3 Traverse สอดคล้องกับผลเฉลยของ Blasius ซึ่งแสดงว่าชั้นขอบเขตของการไหลเป็นแบบ Laminar ค่าเฉลี่ยของความหนาของชั้นขอบเขตมีค่าเท่ากับ 7.4 มิลลิเมตร รายละเอียดความหนาของชั้นขอบเขตแสดงในตารางที่ 4.1

- การวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ต

การวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตมีวัตถุประสงค์เพื่อหารูปร่างที่ปากทางออกของเจ็ตและเพื่อใช้หาความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออก สำหรับเพื่อใช้อ้างอิงของสภาวะการทดลอง สำหรับการวัดการกระจายตัวของความเร็วของเจ็ต จะทำการวัดขณะที่ไม่มีกระแสลมขวาง (Free jet) และกำหนดให้ความเร็วจุดศูนย์กลางเจ็ตประมาณ 20 เมตรต่อวินาที เพื่อใช้เป็นสภาวะเริ่มต้นของการวัด ซึ่งวัดด้วย Pitot tube (เหมือนกับ Pitot tube ที่ใช้ในการวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวางทุกประการ) ความดันที่วัดได้จาก Pitot tube จะถูกอ่านโดย Monometer ยี่ห้อ Dwyer™ (model 424) ซึ่งมีความละเอียดของการวัด 0.2 มิลลิเมตรน้ำ โดยอุณหภูมิห้องที่ทำการวัดจะอยู่ในช่วงประมาณ 29-32 องศาเซลเซียส ซึ่งวัดด้วย Thermometer ยี่ห้อ FLUKE™ (model 52II, ชนิดสาย k type) ตำแหน่งของการวัดความเร็วจะอยู่ในระดับเดียวกับหน้าตัดทดสอบ และจะวัดทั้งตามทิศทาง x (Streamwise) และตามทิศทาง z (Spanwise) โดยมีความละเอียดของการวัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร โดยจะทำการวัดซ้ำทั้งหมด 6 ครั้งในแต่ละการวัดความเร็วของแต่ละ Traverse

รูปที่ 4.18 แสดงผลการวัดการรูปร่างของความเร็วในแนวแกนตามแนวรัศมี (u) ทั้งแนว Streamwise และ Spanwise พบว่ามีรูปร่างของความเร็วของเจ็ตหลักที่ปากทางออกตามแนว Streamwise และ Spanwise เป็นแบบ fully developed turbulent pipe profile และใกล้เคียงกับสมการ Power law ที่มีค่ายกกำลังเท่ากับ $n = 8$

รูปร่างความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออกจะถูกนำมาคำนวณหาความเร็วเฉลี่ย ซึ่งคำนวณได้จากความเร็วตามแนวแกนเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged axial velocity) ที่ปากเจ็ต ซึ่งเขียนเป็น

$$V_j = \frac{1}{A} \int_A u dA \quad (4.1)$$

V_j คือความเร็วตามแนวแกนเฉลี่ยแบบพื้นที่ที่ปากทางออกของเจ็ต, u คือความเร็วตามแนวแกนที่จุดใดๆ บนพื้นที่ปากทางออกของเจ็ตตามแนว Streamwise และ Spanwise และ A คือพื้นที่ปากทางออกของเจ็ต

โดยที่ V_j ในการทดลองจะมีค่าเท่ากับ 16.9 ± 0.8 เมตรต่อวินาที ซึ่งตรงกับเรโนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ตเท่ากับ 23,000

4.4.2 การวัดอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง

เนื่องจากขนาดรูฉีดยาของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงมีขนาดเล็กมาก จึงไม่สามารถวัดรูปร่างความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม ในการออกแบบจึงออกแบบให้รูฉีดยาที่เป็นท่อตรงมีความยาว 40 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน เพื่อให้แน่ใจว่ารูปร่างที่ปากทางออกของเจ็ตควบคุมเป็น fully developed pipe profile สำหรับการวัดและควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมจะใช้ Rotameter

4.6 การวัดสนามความเร็วของเจ็ตเพื่อหาการเหนี่ยวนำการผสม

สนามความเร็วของเจ็ตในกระแสมขวางจะวัดด้วย SPIV ที่ใช้อนุภาคติดตามการไหลในส่วนของเจ็ตหลักเท่านั้น โดยศึกษาแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาเบื้องต้น โดยมีวัตถุประสงค์หาตำแหน่งของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ทำให้เจ็ตมีการเหนี่ยวนำการผสมมากที่สุด รวมถึงประเมินจำนวนภาพที่ใช้เพื่อการคำนวณเบื้องต้นสำหรับใช้เป็นข้อมูลสำหรับการทดลองละเอียดต่อไป โดยทำการวัดสนามความเร็วบนระนาบ yz หรือ Cross plan ซึ่งประกอบด้วยหน้าตัด $x/rd = 0.5$ และ 1.5 โดยจะบันทึกภาพด้วยความถี่ 2.07 Hz เป็นจำนวน 2,000 สนาม

ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาโดยละเอียด หลังจากเลือกตำแหน่งการฉีดของเจ็ดควบคุมที่ทำให้เจ็ดมีการเหนี่ยวนำการผสมมากที่สุดตามการศึกษาเบื้องต้นแล้ว ในส่วนการทดลองนี้จะเพิ่มหน้าตัดของการวัดเป็น $x/rd = 0.5, 0.75, 1$ และ 1.5 เพื่อดูวิวัฒนาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดให้ละเอียดขึ้น

หนึ่ง ในการประมวลเพื่อหาความเร็วของการศึกษาทั้งสองส่วนจะใช้ Interrogation area เริ่มต้นเท่ากับ 64 พิกเซล \times 64 พิกเซล และสุดท้ายเท่ากับ 32 พิกเซล \times 32 พิกเซล ซึ่ง Interrogation area จะ Overlap กันที่ 50% ทุกกรณีจะมีสนามเวกเตอร์ความเร็วของเจ็ดที่วัดได้ไม่ต่ำกว่า $10,000$ เวกเตอร์ โดยที่ Spatial resolution ของสนามความเร็วที่วัดได้สรุปไว้ในตาราง 4.2

4.7 สรุปพารามิเตอร์สำหรับการทดลอง

การทดลองรูปร่างความเร็วของเจ็ดหลักที่ปากทางออกมีรูปร่างเป็น fully developed turbulent pipe profile โดยมีความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกเท่ากับ 16.9 ± 0.8 เมตรต่อวินาที

กระแสลมขวางมีชั้นขอบเขตแบบ laminar และมีความหนาของชั้นขอบเขตประมาณ 7.4 มิลลิเมตร ที่ 95% ของความเร็วที่นอกชั้นขอบเขต โดยมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 4.3 ± 0.2 เมตรต่อวินาที ซึ่งตรงกับอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่า 3.9 ± 0.3 , เรโนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ดประมาณ $23,000$ และเรโนลด์ส์นัมเบอร์กระแสลมขวางเท่ากับ $5,900$ พารามิเตอร์สำหรับการทดลองนี้สรุปไว้ในตารางที่ 4.3

บทที่ 5

การศึกษาเบื้องต้น

5.1 วัตถุประสงค์การศึกษาเบื้องต้น

- เพื่อประเมินจำนวนภาพในการเก็บข้อมูลที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบการทดลองละเอียดต่อไป
- เพื่อหาตำแหน่งของมุมขีดเจ็ทควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่มีผลทำให้เจ็ทมีการเหนี่ยวนำการผสมมากที่สุด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทดลองละเอียดต่อไป

5.2 สภาวะการทดลอง

การศึกษาเบื้องต้นจะทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 3.9 ± 0.3 , เรโนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวางเท่ากับ 5,900 และเรโนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ทเท่ากับ 23,000 โดยเลือกตำแหน่งมุมขีดเจ็ทของเจ็ทควบคุมตามแนวเส้นรอบวงดังต่อไปนี้ $\theta = \pm 15^\circ$ (กรณี I15), $\theta = \pm 45^\circ$ (กรณี I45), $\theta = \pm 90^\circ$ (กรณี I90) และ $\theta = \pm 135^\circ$ (กรณี I135) โดยขีดเจ็ทควบคุมตามแนวเส้นรอบวงด้วยอัตราส่วนการไหลเชิงมวลเจ็ทควบคุมต่อเจ็ทหลักรวม 2 ตัวคงที่เท่ากับ 2 % โดยวัดความเร็วบนระนาบ yz (Cross plan) ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 1.5

5.3 ผลการทดลอง

- การลู่เข้าของอัตราการไหลเชิงปริมาตร

ในการศึกษาเบื้องต้นจะเก็บข้อมูลเพื่อประมวลผลจำนวนสนามความเร็ว 2,000 สนามด้วยความถี่ 2.07 Hz การหาการลู่เข้าของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ท ซึ่งจะประเมินจากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ท (e_q) ซึ่งนิยามเป็น

$$e_q = \left| \frac{Q_j(N_2, \phi_{ij_{N_2}}) - Q_j(N_1, \phi_{ij_{N_1}})}{Q_j(N_1, \phi_{ij_{N_1}})} \right| \times 100 \% \quad (5.1)$$

เมื่อ $Q_j(N, \phi_{ij_N})$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดเฉลี่ยเมื่อใช้สนามความเร็ว N สนามบนบริเวณความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ด ณ จุดใดๆ (ϕ_{ij}) ซึ่ง ϕ_{ij} ซึ่งนิยามเป็น

$$\phi_{ij} = \frac{(N_V)_{ij}}{N} \quad (5.2)$$

เมื่อ $(N_V)_{ij}$ คือระยะเวลาที่พบเจ็ด (หรือพบอนุภาคติดตามการไหลหรือผลรวมความเร็วเจ็ด (V) ไม่เป็นศูนย์สัมบูรณ์) ณ จุด ij และ N คือระยะเวลาที่เฉลี่ยทั้งหมด ในการศึกษาเบื้องต้นจะพิจารณา e_q บริเวณ $0 < \phi_{ij} \leq 1$ เท่านั้น ซึ่งจะแทนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดทั้งหมด

รูปที่ 5.1 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ด (e_q) แปรตามจำนวน N_2 สนาม บริเวณ $0 < \phi_{ij} \leq 1$ เมื่อเฉลี่ยสนามความเร็วที่ 2,000 สนาม พบว่ากรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ จะมี e_q ที่มากกว่า e_q ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ ในนองเดียวกับกรณี I15, I45, I90 และ I135 เมื่อพิจารณาด้วยรวมทุกกรณีและทุกตำแหน่ง พบว่าจะมี e_q ไม่เกิน 0.4% เมื่อเฉลี่ยสนามความเร็วที่ 2,000 สนาม ซึ่งมีค่าที่น้อยและเพียงพอต่อความแม่นยำในการคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ด

- ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสม

รูปที่ 5.2 แสดงอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) พบว่าเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 135^\circ$ จะทำให้เจ็ดมีค่า E มากกว่ากรณีไม่ควบคุม (กรณี JICF) ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 1.5 และในนองเดียวกันกับการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 90^\circ$ ในทางตรงกันข้าม การฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 45^\circ$ พบว่าทำให้เจ็ดมีค่า E น้อยกว่ากรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 1.5 ในขณะที่การฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ พบว่าจะมีค่า E ที่น้อยกว่ากรณี JICF เล็กน้อยที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ แต่จะมากกว่ากรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$

สำหรับกรณีไม่ควบคุมและควบคุมทุกกรณี พบว่าค่า E อยู่ในช่วงประมาณ 2.7 - 3.2 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงประมาณ 5.2 - 5.6 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$

เพื่อประเมินประสิทธิผลของการใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ต จึงนิยามประสิทธิผลนี้เป็น

$$\eta = E_{cJICF} / E_{JICF} = Q_{cJICF} / Q_{JICF} \quad (5.3)$$

โดยที่ subscript cJICF แทนกรณีควบคุมและ subscript JICF แทนกรณีไม่ควบคุม รูปที่ 5.3 แสดงประสิทธิผลของการใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสม (η) พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 135^\circ$ และ $\pm 90^\circ$ ส่งผลให้เจ็ตมีการเหนี่ยวนำการเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ $x/rd = 1.5$ ในทางตรงกันข้ามการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 45^\circ$ ส่งผลให้เจ็ตมีการเหนี่ยวนำการลดลงที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ $x/rd = 1.5$ ในขณะที่การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ พบว่าจะมีเหนี่ยวนำการผสมลดลงเล็กน้อยที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ แต่จะมีการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ การเหนี่ยวนำการผสมของการศึกษาเบื้องต้นนี้ได้สรุปไว้ในตาราง 5.1

งานวิจัยจะให้ความสำคัญการเหนี่ยวนำการผสมช่วงระยะเริ่มต้นของเจ็ตใกล้ปากทางออก จึงได้เลือกการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงกรณี I135 ที่มีการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นมากที่สุด 9 % ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ รวมถึงเลือกการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงกรณี I15 ที่มีการเหนี่ยวนำการผสมน้อยกว่ากรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ แต่จะมีการเหนี่ยวนำการผสมมากกว่ากรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ จากแนวโน้มการเหนี่ยวนำการผสมลดลงและเพิ่มขึ้นของกรณี I15 ผู้วิจัยสันนิษฐานว่าผลของการเหนี่ยวนำการผสมของกรณี I15 อาจจะได้รับผลจาก Spanwise separation - Mutual blocking หรือ Wall separation -

Wall blocking ตามแนวคิดของ Kornsri *et al.* (2009) และ Bunyajitradulya (2011) ซึ่ง
เป็นประเด็นที่น่าสนใจ

บทที่ 6

การประเมินการลู่เข้าและสอบทวนผลการทดลอง

เพื่อให้การคำนวณมีความแม่นยำมากขึ้นในส่วนทดลองละเอียดได้เก็บข้อมูลสนามความเร็วเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 4,000 สนาม และบทนี้จะพิจารณาการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยรวมด้วย

6.1 การประเมินการลู่เข้า

6.1.1 การประเมินการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ย

การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ย จะพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยต่อจุด (e_v) ซึ่งนิยามเป็น

$$e_v = \frac{\sum_{ij} |\bar{V}_{ij}(N_2, \phi_{ij_{N_2}}) - \bar{V}_{ij}(N_1, \phi_{ij_{N_1}})|}{M_1(\phi_{ij_{N_1}})} \quad (6.1)$$

เมื่อ $\bar{V}_{ij}(N)$ คือ ความเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่ง ij เมื่อใช้สนามความเร็ว N สนาม, M_1 คือจำนวนจุดทั้งหมดที่มีความเร็วเฉลี่ยของ N_1 สนาม และ ϕ_{ij} คือความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ต ณ จุดใดๆ ซึ่ง \bar{V}_{ij} คำนวณได้จาก

$$\bar{V}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_{ij,n} \quad (6.2)$$

โดยที่ $V_{ij,n}$ คือความเร็วที่ตำแหน่ง ij ณ เวลา n และ N คือจำนวนสนามความเร็วทั้งหมดภายในเวลาที่เก็บข้อมูล การคำนวณ e_v จะใช้เริ่มต้น N_1 เท่ากับ 200 สนามความเร็วและ N_2 เท่ากับ 400 สนามความเร็ว คำนวณ e_v มีช่วงการคำนวณช่วงละ 200 สนามความเร็ว

รูปที่ 6.1 ก แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยต่อจุด (e_v) แปรตามจำนวน N_2 ที่บริเวณ ϕ_{ij} ต่างๆ สำหรับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่าบริเวณ $0.5 \leq \phi_{ij} < 0.75$ มี e_v มากที่สุด ในขณะที่บริเวณ $0 < \phi_{ij} \leq 0.25$ มีค่า e_v จุดน้อยที่สุด เมื่อเฉลี่ยไปตาม N_2 สนาม และในทำนองเดียวกันของกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.75, 1$ และ

1.5 เมื่อพิจารณาบริเวณ $0.5 \leq \phi_{ij} < 0.75$ ไปตาม Downstream พบว่าจะมีค่า e_v น้อยลงเมื่อ x/rd มากขึ้น และมีแนวโน้มที่เหมือนกันสำหรับ ϕ_{ij} บริเวณอื่น

สรุปได้ว่าเมื่อเฉลี่ยสนามความเร็วที่ 4,000 สนาม กรณี JICF ทุกบริเวณของ ϕ_{ij} ตั้งแต่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 e_v จะมีค่าไม่เกิน 0.10 เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็น 0.02 % ของความเร็วกระแสลมขวาง

รูปที่ 6.1 ข แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่ออกของความเร็วเฉลี่ยต่อจุด (e_v) แปรตามจำนวน N_2 ที่บริเวณ ϕ_{ij} ต่างๆ สำหรับกรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่าบริเวณ $0.5 \leq \phi_{ij} < 0.75$ มี e_v มากที่สุด ในขณะที่บริเวณ $0 < \phi_{ij} \leq 0.25$ มีค่า e_v จุดน้อยที่สุด เมื่อเฉลี่ยไปตาม N_2 สนาม และในทำนองเดียวกันของกรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.75, 1$ และ 1.5 เมื่อพิจารณาบริเวณ $0.5 \leq \phi_{ij} < 0.75$ ไปตาม Downstream พบว่าจะมีค่า e_v น้อยลงเมื่อ x/rd มากขึ้น และมีแนวโน้มที่เหมือนกันสำหรับ ϕ_{ij} บริเวณอื่น

สรุปได้ว่าเมื่อเฉลี่ยสนามความเร็วที่ 4,000 สนาม กรณี I15 ทุกบริเวณของ ϕ_{ij} ตั้งแต่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 e_v จะมีค่าไม่เกิน 0.13 เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็น 0.03 % ของความเร็วกระแสลมขวาง

รูปที่ 6.1 ค แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่ออกของความเร็วเฉลี่ยต่อจุด (e_v) แปรตามจำนวน N_2 ที่บริเวณ ϕ_{ij} ต่างๆ สำหรับกรณี I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่าบริเวณ $0.5 \leq \phi_{ij} < 0.75$ มี e_v มากที่สุด ในขณะที่บริเวณ $0 < \phi_{ij} \leq 0.25$ มีค่า e_v จุดน้อยที่สุด เมื่อเฉลี่ยไปตาม N_2 สนาม

สรุปได้ว่าเมื่อเฉลี่ยสนามความเร็วที่ 4,000 สนาม กรณี I135 ทุกบริเวณของ ϕ_{ij} ตั้งแต่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 e_v จะมีค่าไม่เกิน 0.11 เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็น 0.03 % ของความเร็วกระแสลมขวาง

รูปที่ 6.2 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่ออกของความเร็วต่อจุด (e_v) แปรตามจำนวน N_2 สนาม บริเวณ $0 < \phi_{ij} \leq 1$ ของกรณี JICF, I15 และ I135 พบว่าเมื่อเฉลี่ยสนามความเร็วที่ 4,000 สนาม ทุกกรณี (JICF, I15 และ I135) ตั้งแต่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 e_v จะมีค่าไม่เกิน 0.015 เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็น 0.004 % ของความเร็วกระแสลมขวาง

6.1.2 การประเมินการลู่เข้าของอัตราการไหลเชิงปริมาตร

การประเมินการลู่เข้าของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ต จะประเมินจากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ต (e_q) ซึ่งเป็นนิยามตามสมการ 5.1

$$e_q = \left| \frac{Q_j(N_2, \phi_{jN_2}) - Q_j(N_1, \phi_{jN_1})}{Q_j(N_1, \phi_{jN_1})} \right| \times 100 \% \quad (5.1)$$

เมื่อ $Q_j(N, \phi_{jN})$ คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตเฉลี่ยเมื่อใช้สนามความเร็ว N สนาม บนบริเวณความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ต ณ จุดใดๆ (ϕ_{ij}) การคำนวณ e_q จะใช้เริ่มต้น N_1 เท่ากับ 200 สนามความเร็ว และ N_2 เท่ากับ 400 สนามความเร็ว ค่าของ e_q มีช่วงการคำนวณช่วงละ 200 สนามความเร็ว

รูปที่ 6.3 ก แสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ต (e_q) แปรตามจำนวน N_2 สนาม สำหรับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่า e_q ทุกบริเวณ ϕ_{ij} ที่เฉลี่ย 4,000 สนาม e_q จะมีค่าไม่เกิน 1 % และในทำนองเดียวกับกรณี I15 (รูปที่ 6.3 ข) และกรณี I135 (รูปที่ 6.3 ค)

รูปที่ 6.4 แสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ต (e_q) แปรตามจำนวน N_2 สนาม บริเวณ $0 < \phi_{ij} \leq 1$ ของกรณี JICF, I15 และ I135 พบว่าเมื่อเฉลี่ยสนามความเร็วที่ 4,000 สนาม ทุกกรณี (JICF, I15 และ I135) ตั้งแต่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 e_q จะมีค่าไม่เกิน 0.5 %

จากการประเมินการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยและอัตราการไหลเชิงปริมาตร การคำนวณปริมาณเฉลี่ยทั้งหมดจะใช้จำนวนสนามความเร็วทั้งหมด 4,000 สนาม ซึ่งมีความเพียงพอต่อความถูกต้องและแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้

6.2 สอบทวนผลการทดลอง

ก่อนจะทำการศึกษาคูณลักษณะของเจ็ตโดยละเอียด ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่น ซึ่งมีสภาวะการทดลองที่ใกล้เคียงกันโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.2.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างของเจ็ต

- การเปรียบเทียบโครงสร้างของเจ็ตกรณี JICF กับผลการทดลอง Zaman and Fross (1997)

รูปที่ 6.5 แสดงถึงการเปรียบเทียบผลการทดลอง Contour ของโครงสร้างความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x/V_{cf}) บนระนาบ yz ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 1 พบว่าผลการทดลองของงานวิจัยนี้มี Local peak ด้านบน ซึ่งมีรูปร่างคล้ายคลึงกับผลการทดลองของ Zaman and Fross โดยมีรูปร่างเป็นพระจันทร์เสี้ยว ซึ่ง Local peak ของการทดลองนี้จะมีค่าน้อยกว่าผลทดลองของ Zaman and Fross อยู่ประมาณ 38 % และ 15 % ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 1 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาบริเวณด้านล่างของเจ็ต พบว่าจะมีรูปร่างที่ความแตกต่างกัน กล่าวคือสำหรับการทดลองนี้จะไม่มีการทดลองของ Zaman and Fross ซึ่งอาจเกิดจากพารามิเตอร์และวิธีการวัดที่แตกต่างกัน โดยที่ Zaman and Fross ศึกษา JICF ด้วยเครื่องมือวัด X- hot wire probes ที่อัตราส่วนความเร็วเจ็ตต่อกระแสลมขวางประมาณ 4.58 และรูปร่างความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตเป็น Top hat

- การเปรียบเทียบโครงสร้างของเจ็ตกรณี JICF และ I15 กับผลการทดลอง Kornsri (2007)

- กรณี JICF

รูปที่ 6.6 แสดงถึงการเปรียบเทียบผลการทดลอง Contour ของโครงสร้างความเร็วต่อกระแสลมขวาง (V_{xy}/V_{cf}) บนระนาบ yz ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 1 พบว่าโครงสร้างของเจ็ตที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกับการทดลองของ Kornsri กล่าวคือ Local peak ด้านบน ซึ่งมีรูปร่างพระจันทร์เสี้ยวเช่นเดียวกับผลการทดลองของ Kornsri แต่มีข้อสังเกตความแตกต่างอยู่สองจุด จุดแรก สังเกตว่าผลการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ พบว่าบริเวณด้านล่างของเจ็ตจะไม่มี Local peak ที่เป็นวงปิดที่ชัดเจนเหมือนการทดลองของ Kornsri จุดที่สอง คือไม่พบบริเวณ Wake เหมือนการทดลอง Kornsri เนื่องจากบริเวณนี้เป็นบริเวณกระแสลมขวาง ความเร็วสูงสุดที่วัดได้

ของงานวิจัยนี้จะน้อยกว่า Kornsri อยู่ประมาณ 34 % และ 2 % ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 1 ตามลำดับ

- **กรณี I15**

รูปที่ 6.7 แสดงถึงการเปรียบเทียบผลการทดลอง Contour ของโครงสร้างความเร็วต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_{xy}/V_{cf}) บนระนาบ yz ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 1 พบว่าโครงสร้างของเจ็ตที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกับการทดลองของ Kornsri กล่าวคือมี Local peak สองลูกเรียงตัวตามแนว Spanwise แต่จะไม่พบ Wake structure ที่บริเวณด้านล่างของเจ็ต เนื่องจากบริเวณนี้เป็นบริเวณกระแสลมขวาง ความเร็วสูงสุดที่วัดได้ของงานวิจัยนี้จะน้อยกว่า Kornsri อยู่ประมาณ 15 % และ 3 % ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 1 ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบโครงสร้างความเร็วกับการทดลองของ Zaman and Fross และ Kornsri ซึ่งทั้งสองงานวิจัยใช้ Hot wire เป็นเครื่องมือวัดความเร็ว ความเร็วที่ได้จากวัดสำหรับงานวิจัยนี้ พบว่าจะเบี่ยงเบน (Bias) ไปด้านความเร็วต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปการวัดความเร็วด้วย SPIV จะวัดความเร็วได้ต่ำกว่าความเร็วของไหลจริง เนื่องจากอนุภาคติดตามการไหลกับของไหลมีความเร็วที่ slip กันอยู่ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็ของของไหลและขนาดอนุภาคติดตามการไหล

6.2.2 เปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมกรณี JICF กับผลการทดลอง Yuan and Street (1998)

รูปที่ 6.8 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ระหว่างผลการทดลองกับ Yuan and Street (1998) สำหรับ case 3II พบว่า E ของการทดลองนี้จะมีน้อยกว่า Yuan and Street ในช่วง $x/rd = 1rd$ และ $1.5rd$ อยู่ประมาณ 25 % ซึ่งอาจเกิดมาจากหลักการวิเคราะห์ E , พารามิเตอร์และวิธีการวัดที่แตกต่างกัน โดยที่ Yuan and Street ศึกษา JICF ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Large-eddy Simulation สำหรับ JICF (case 3II) ที่มีอัตราส่วนความเร็วเจ็ตต่อกระแสลมขวางเท่ากับ 3.3 และ $Re_{cf} = 2,100$ และ Yuan and Street นิยามขอบเจ็ตเพื่อนำมาหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตจากระดับของความเข้มข้นของปริมาณสเกล่า (scalar concentration)

บทที่ 7

ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใด ๆ

และความเร็วเฉลี่ยของเจ็ดที่ใกล้ขอบ

7.1 ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใด ๆ

ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ด ณ จุดใด ๆ (ϕ_{ij}) นิยามเป็นอัตราส่วนของระยะเวลาที่พบเจ็ดที่จุดนั้น ๆ ต่อระยะเวลาที่สังเกตทั้งหมด ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น (สมการที่ 5.2)

$$\phi_{ij} = \frac{(N_V)_{ij}}{N} \quad (5.2)$$

เมื่อ $(N_V)_{ij}$ คือระยะเวลาที่พบเจ็ด (หรือพบอนุภาคติดตามการไหลหรือผลรวมความเร็วเฉลี่ย (V) ไม่เป็นศูนย์สัมบูรณ์) ณ จุด ij และ N คือระยะเวลาที่เฉลี่ยทั้งหมด

รูปที่ 7.1 แสดงการกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใด ๆ (ϕ_{ij}) ในกรณี JICF, I15 และ I135 พบว่าทั้งกรณี JICF และ I135 จะมีความน่าจะเป็นที่พบเจ็ดคล้ายกัน คือจะมีค่ามากบริเวณตรงกลางของเจ็ดและจะลดลงและเข้าสู่ศูนย์เมื่อเข้าใกล้ขอบเจ็ด โดยความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดที่มากกว่า 0.5 จะมีพื้นที่ประมาณ 30 - 35 % ของพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของเจ็ดทั้งหมดตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 สำหรับกรณี I15 พบว่าที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ จะมีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดมากบริเวณตรงด้านข้างทั้งสองด้านของเจ็ด ซึ่งเป็น Local peak 2 ลูก แต่เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ ถึง 1.5 จะพบความน่าจะเป็นที่พบเจ็ดมากทั้งบริเวณ Local peak ทั้ง 2 ลูกและบริเวณตรงกลางของเจ็ดที่เชื่อมต่อระหว่าง Local peak ทั้ง 2 ลูก ทำให้บริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดสูงเป็นบริเวณแถบยาวตามแนว Spanwise และจะน้อยลงเมื่อเข้าใกล้ขอบเจ็ด โดยความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดที่มากกว่า 0.5 จะมีพื้นที่ประมาณ 28 - 30 % ของพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของเจ็ดทั้งหมดตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5

7.2 ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตที่ใกล้ขอบ

รูปที่ 7.2 แสดงถึงการกระจายตัวของผลรวมความเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง ($V/V_{cf} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} / V_{cf}$) พบว่าทั้งกรณี JICF, I15 และ I135 เมื่อเข้าใกล้ขอบเจ็ตความเร็วเฉลี่ยไร้มิตินี้จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งผลการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยในการศึกษาในที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตหลักและไม่ใส่ในกระแสลมขวาง จะแตกต่างจากผลการศึกษาอื่นๆ ที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตหลักและในกระแสลมขวาง ในกรณีหลังนี้ จะพบว่าเมื่อเข้าใกล้ขอบเจ็ตผลรวมความเร็วเฉลี่ยจะมีค่าเข้าใกล้ความเร็วของกระแสลมขวางหรือความเร็วเฉลี่ยไร้มิตินี้จะมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง

ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ ในกรณีของการทดลองนี้ ซึ่งใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ตหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง จะพบว่าเมื่อเดินทางจากบริเวณตรงกลางเจ็ตไปสู่ขอบเจ็ต ความน่าจะเป็นเชิงเวลาในการที่จะพบเจ็ต (หรือพบอนุภาคติดตามการไหล) ณ ตำแหน่งใดๆ จะลดลง (less frequent occurrence of jet) และเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเข้าใกล้ขอบเจ็ต ทำให้เมื่อเฉลี่ยความเร็วของเจ็ตไปตามเวลาทั้งหมด จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเข้าใกล้ขอบเจ็ต ถึงแม้ว่าความเร็วขณะใดๆ ของเจ็ต ที่บริเวณขอบเจ็ตอาจมีค่าสูงมากก็ตาม อนึ่ง การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความน่าจะเป็นเชิงเวลาของการพบเจ็ตที่จุดใดๆ ดังรายงานในหัวข้อ 7.1

บทที่ 8

ผลของของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้าง และเส้นทางเดินของเจ็ด

8.1 ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการกระจายตัวปริมาณเฉลี่ยไร้มิติ

- การกระจายตัวของผลรวมความเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง (V/V_{cf}) (รูปที่ 8.1)

รูปที่ 8.1 แสดงถึงกระจายตัวของผลรวมความเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง (V/V_{cf}) กรณี JICF, I15 และ I135 สำหรับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 0.75 พบว่ามี Local peak 2 ลูกที่มีรูปร่างพระจันทร์เสี้ยวเรียงซ้อนกันอยู่ตรงกลางเจ็ดตามแนวตั้ง (Traverse) โดยที่ Local peak บริเวณด้านบนมีค่าสูงกว่า Local peak บริเวณด้านล่าง นอกจากนี้ยังพบว่า Local peak บริเวณด้านบนมีค่ามากกว่าความเร็วกระแสลมขวางประมาณ 1.6 เท่า ในขณะที่ Local peak ที่บริเวณด้านล่างจะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วกระแสลมขวาง เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปถึงตำแหน่ง $x/rd = 1$ พบว่าเจ็ดยังคงมี Local peak บริเวณด้านบนเช่นเดียวกับที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 0.75 แต่จะไม่ปรากฏ Local peak บริเวณด้านล่างที่ชัดเจน และสังเกตว่าที่ระยะ $x/rd = 1$ Local peak บริเวณด้านบนของเจ็ดจะสลายตัว (decay) และมีความเร็วเฉลี่ยใกล้เคียงกับกระแสลมขวางและจะสลายตัวอย่างต่อเนื่องจนถึงตำแหน่ง $x/rd = 1.5$

กรณี I15 ตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่าการกระจายตัวของ V/V_{cf} จะขยายตัวออกทางด้านข้าง (Spanwise) มากขึ้น ในขณะที่ขนาดและความสูงการกระจายตัวของ V/V_{cf} ตามแนว Traverse จะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF นอกจากนี้ยังพบว่ามี Local peak แยกออกเป็น 2 ลูก ซ้าย-ขวาเรียงตัวกันตามแนว Spanwise อย่างชัดเจน และรูปร่างและค่าค่อนข้างสมมาตร นอกจากนี้ยังพบว่า Local peak ของกรณี I15 จะมีค่าสูงกว่า Local peak บริเวณด้านบนของกรณี JICF ประมาณ 20 % เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวต่อไปถึงตำแหน่ง $x/rd = 1$ Local peak ของเจ็ดจะสลายตัวจนมีความเร็วเฉลี่ยใกล้เคียงกับกระแสลมขวางและต่อเนื่องถึงที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ เมื่อพิจารณาการพัฒนาตัวของเจ็ดไปตามแนว Downstream พบว่าเจ็ดจะขยายตัวออกทางด้าน Spanwise มากกว่าแนว Traverse อย่างชัดเจน

กรณี I135 พบว่าโครงสร้างด้วยรวมการกระจายตัวของ V/V_{cf} มีความคล้ายคลึงกับกรณี JICF แต่มีข้อที่แตกต่างคือเจ็ดมีขนาดใหญ่กว่าและลอยตัวสูงกว่ากรณี JICF เล็กน้อย

สรุปผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อกระจายตัวของ V/V_{cf} พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ (I15) จะทำให้โครงสร้างกระจายตัวของ V/V_{cf} เปลี่ยนไปจากกรณีไม่ควบคุม (JICF) อย่างชัดเจน กล่าวคือการกระจายตัวของ V/V_{cf} จะขยายตัวออกด้านข้างมากขึ้น ในขณะที่ขนาดและความสูงการกระจายตัวของ V/V_{cf} ตามแนว Traverse จะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF (สอดคล้องกับผลการทดลองของ Konsri, 2007; Konsri *et al*, 2009 และ Bunyajitradulya, 2011) นอกจากนี้ยังพบว่าค่า V/V_{cf} สูงสุดจะมีค่ามากกว่ากรณี JICF ในขณะที่การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 135^\circ$ (I135) จะไม่ทำให้โครงสร้างกระจายตัวของ V/V_{cf} เปลี่ยนไปจากกรณีไม่ควบคุมมากนัก

- การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x/V_{cf}) (รูปที่ 8.2)

รูปที่ 8.2 แสดงถึงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x/V_{cf}) กรณี JICF, I15 และ I135 สำหรับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่ามี Local peak บริเวณด้านบนของเจ็ต ซึ่งมีรูปร่างเป็นพระจันทร์เสี้ยว โดยที่ค่า Local peak จะมีค่าสูงกว่าความเร็วเฉลี่ยกระแสลมขวางประมาณ 1.3 เท่า และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนว Downstream Local peak จะมีการสลายตัวอย่างต่อเนื่องและมีค่าความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวาง เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ และ 1.5 พบว่าการกระจายตัวของ V_x/V_{cf} มีความคล้ายคลึงกับการกระจายตัวของ V/V_{cf} ซึ่งบ่งชี้ว่า ณ บริเวณตำแหน่ง Downstream $x/rd = 1$ และ 1.5 รูปร่าง V/V_{cf} ได้รับอิทธิพลจาก V_x/V_{cf} ค่อนข้างมาก ในขณะที่ได้รับอิทธิพลของ V_y/V_{cf} (รูปที่ 8.3) และ V_z/V_{cf} (รูปที่ 8.4) น้อยกว่า

กรณี I15 ตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่าการกระจายตัวของ V_x/V_{cf} จะขยายตัวออกทางด้านข้างมากขึ้น ในขณะที่ขนาดและความสูงการกระจายตัวของ V_x/V_{cf} ตามแนว Traverse จะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่าจะมี Local peak แยกออกเป็นสองลูกซ้าย-ขวาเรียงตัวตามแนว Spanwise อย่างชัดเจน และมีรูปร่างและมีค่าค่อนข้างสมมาตร นอกจากนี้ยังพบว่า Local peak ของกรณี I15 จะมีค่าสูงกว่า Local peak ด้านบนของกรณี JICF ประมาณ 20 % และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปในแนว Downstream Local peak จะมีการสลายตัวอย่างต่อเนื่องจนถึงตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ ซึ่งพบว่า Local peak จะมีค่าความเร็วเฉลี่ยใกล้เคียงกับความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวาง เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ และ 1.5 การกระจายตัวของ V_x/V_{cf} มีความคล้ายคลึงกับการกระจายตัวของ V/V_{cf} ซึ่งบ่งชี้ว่า ณ

บริเวณตำแหน่ง $x/rd = 1$ และ 1.5 รูปร่าง V/V_{cf} ได้รับอิทธิพลจาก V_x/V_{cf} ค่อนข้างมาก เช่นเดียวกับกรณี JICF เมื่อพิจารณาการพัฒนาตัวของเจ็ตไปตามแนว Downstream พบว่าเจ็ตจะขยายตัวออกทางด้าน Spanwise มากกว่าแนว Traverse อย่างชัดเจน (เช่นเดียวกับ V/V_{cf})

กรณี I135 พบว่าโครงสร้างโดยรวมของการกระจายตัว V_x/V_{cf} มีความคล้ายคลึงกับกรณี JICF เช่นเดียวกับการกระจายตัว V/V_{cf}

สรุปผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อกระจายตัวของ V_x/V_{cf} พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ (I15) จะทำให้โครงสร้างกระจายตัวของ V_x/V_{cf} เปลี่ยนไปจากกรณีไม่ควบคุม (JICF) อย่างชัดเจน กล่าวคือการกระจายตัว V_x/V_{cf} จะขยายตัวออกด้านข้างมากขึ้น ในขณะที่ขนาดและความสูงการกระจายตัวของ V_x/V_{cf} ตามแนว Traverse จะลดลง และมีค่าความเร็วเฉลี่ยที่บริเวณ Local peak จะมีค่าสูงสุดมากกว่ากรณี JICF ในขณะที่การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 135^\circ$ (I135) จะไม่ทำให้โครงสร้างกระจายตัวของ V_x/V_{cf} เปลี่ยนไปจากกรณีไม่ควบคุมมากนัก

อนึ่ง ในการวิเคราะห์ผลการกระจายของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในเชิงปริมาณ (เช่นเดียวกันสำหรับปริมาณอื่น) ต้องพึงตระหนักว่า เนื่องจากการทดลองนี้มีการใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ตหลักเท่านั้น จะใช้ความเร็วเฉลี่ยเทียบกับเวลาทั้งหมด ดังนั้นค่าของเวกเตอร์ที่จุดใดๆ จะมีความสัมพันธ์ไม่เพียงกับค่าของความเร็วที่จุดนั้นๆ เท่านั้น แต่จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความน่าจะเป็นของการพบเจ็ต ณ จุดนั้นๆ ด้วย

- การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน y ต่อกระแสลมขวาง (V_y/V_{cf}) (รูปที่ 8.3)

รูปที่ 8.3 แสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน y ต่อกระแสลมขวาง (V_y/V_{cf}) กรณี JICF, I15 และ I135 สำหรับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่าโครงสร้างโดยรวมมีลักษณะเป็นวงรีแนวตั้ง โดยมีรูปร่างคล้ายดอกเห็ดซ้อนอยู่ด้านใน และมี Local peak 2 ลูกวางเรียงตัวตามแนว Traverse โดยที่ Local peak ทั้ง 2 ลูกจะมีค่าประมาณ 0.8 เท่าของความเร็วเฉลี่ยกระแสลมขวาง เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนว Downstream พบว่า Local peak บริเวณด้านบนจะเสื่อมสลายเร็วกว่า Local peak บริเวณด้านล่าง จนในที่สุด Local peak ทั้งสองจะยุบตัวรวมกัน (Merge) เหลือ Local peak บริเวณด้านล่างเพียงลูกเดียวที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ และสังเกตว่าที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ และ 1.5 จะมีความเร็วที่มีค่าเป็นลบเล็กน้อยอยู่บริเวณด้านข้างของเจ็ตแต่ละด้าน

กรณี I15 ตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่าการกระจายตัวของ V_y/V_{cf} จะขยายตัวออกทางด้านข้างมากขึ้น ในขณะที่ขนาดและความสูงการกระจายตัวของ V_y/V_{cf} ตามแนว Traverse จะลดลง และมีค่าสูงสุดน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่าจะมี Local peak ทั้งหมด 8 ลูก โดยมี 6 ลูกที่มีค่าเป็นบวกวางตัวอยู่ด้านในของเจ็ต และ 2 ลูกที่มีค่าเป็นลบเล็กน้อยอยู่บริเวณแต่ละข้างของเจ็ต เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปถึงตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ พบว่า Local peak ค่าบวกบริเวณด้านล่างของเจ็ตจะยุบตัวรวมกันเหลือ Local peak เพียงลูกเดียว ในขณะที่ Local peak 2 ลูกบริเวณตรงกลางเจ็ตจะสลายตัวไป และในที่สุดเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปถึง $x/rd = 1.5$ จะปรากฏ Local peak ที่เป็นค่าบวกตรงกลางบริเวณด้านล่างเพียงลูกเดียว และ Local peak ค่าลบที่บริเวณด้านข้างของเจ็ตจะขยายตัวใหญ่ขึ้น สังเกตได้ว่าเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปถึงตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ ขนาดและความสูงของการกระจายตัวของ V_y/V_{cf} ตามแนว Traverse จะยังคงน้อยกว่ากรณี JICF อย่างชัดเจน อีกทั้งขอบด้านล่างของเจ็ตจะอยู่ใกล้พื้นกว่ากรณี JICF ด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าการพัฒนาตัวของเจ็ตไปตามแนว Downstream เจ็ตจะขยายตัวออกทางด้าน Spanwise มากกว่าแนว Traverse อย่างชัดเจน

กรณี I135 พบว่าโครงสร้างโดยรวมของการกระจายตัว V_y/V_{cf} ไม่แตกต่างกับกรณี JICF เท่าไรนัก

สรุปผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อกระจายตัวของ V_y/V_{cf} พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ (I15) จะทำให้โครงสร้างกระจายตัวของ V_y/V_{cf} เปลี่ยนไปจากกรณีไม่ควบคุม (JICF) อย่างชัดเจน กล่าวคือการกระจายตัวของ V_y/V_{cf} จะขยายตัวออกทางด้านข้างมากขึ้น ในขณะที่ขนาดและความสูงการกระจายตัวของ V_y/V_{cf} ตามแนว Traverse จะลดลงและมีค่าสูงสุดน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF ในขณะที่การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 135^\circ$ (I135) จะไม่ทำให้โครงสร้างกระจายตัวของ V_y/V_{cf} เปลี่ยนไปจากกรณีไม่ควบคุมมากนัก

- การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน z ต่อกระแสลมขวาง (V_z/V_{cf}) (รูปที่ 8.4)

รูปที่ 8.4 แสดงถึงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน z ต่อกระแสลมขวาง (V_z/V_{cf}) กรณี JICF , I15 และ I135 สำหรับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่าจะมี Local peak 4 ลูก โดยแบ่งตามแนวระนาบสมมาตร (Center plan, $z = 0$) ได้ข้างละ 2 ลูก โดยแต่ละลูกจะเรียงตัวกันตามแนว Traverse และสังเกตว่าแต่ละข้าง Local peak บริเวณลูกบนและ

ลูกกลางจะมีทิศทางของความเร็วตรงข้ามกัน โดยที่ลูกบริเวณด้านบนจะมีทิศทางพุ่งออกจากระนาบสมมาตร ในขณะที่ลูกบริเวณด้านล่างจะมีทิศทางพุ่งเข้าสู่ระนาบสมมาตร สอดคล้องกับการหมุนควงของ CVP และยิ่งพบอีกว่าขนาดของ gradient ของกระจายตัวตามแนวจุดศูนย์กลาง Local peak แต่ลูกมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี I15 ซึ่งจะอธิบายต่อไป เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนว Downstream พบว่าการกระจายตัว V_z/V_{cf} จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อพิจารณาประกอบความน่าจะเป็นเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ ในรูปที่ 7.1 ซึ่งแนะนำการลดลงของ V_z/V_{cf} มาจากการสลายความเร็ว มากกว่ามาจากความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตน้อยลง

กรณี I15 ตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่าการกระจายตัวของ V_z/V_{cf} จะขยายตัวออกทางด้านข้างมากขึ้น ในขณะที่ขนาดและความสูงการกระจายตัวของ V_z/V_{cf} ตามแนว Traverse จะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่ายังมี Local peak 4 ลูกเช่นเดียวกับกรณี JICF โดยที่ Local peak บริเวณด้านบนจะมีขนาดของความเร็ว (ไม่คิดทิศทาง) มากกว่า Local peak บริเวณด้านล่างของแต่ละข้าง และพบว่าการกระจายตัวของ V_z/V_{cf} ของกรณี I15 จะมีขนาดของค่าสูงสุดและขนาดของ gradient ตามแนวเข้าสู่ศูนย์กลางของ Local peak ของแต่ละลูกมากกว่ากรณี JICF อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาการพัฒนาตัวของเจ็ตไปตามแนว Downstream พบว่าความเร็วเฉลี่ยตามแนว z จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์อย่างรวดเร็วและเมื่อพิจารณาความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ ซึ่งแนะนำเป็นผลมาจากการเสื่อมสลายของความเร็วเช่นเดียวกับกรณี JICF

กรณี I135 พบว่าโครงสร้างโดยรวมของการกระจายตัว V_z/V_{cf} ไม่แตกต่างกับกรณี JICF มากนัก

สรุปผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อกระจายตัวของ V_z/V_{cf} พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ (I15) การกระจายตัวของ V_z/V_{cf} จะขยายตัวออกทางด้านข้างมากขึ้น ในขณะที่ขนาดและความสูงการกระจายตัวของ V_z/V_{cf} ตามแนว Traverse จะลดลง และมีขนาดของค่าสูงสุดและขนาดของ gradient ตามแนวเข้าสู่ศูนย์กลางของ Local peak ของแต่ละลูกมากขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF ในขณะที่การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 135^\circ$ (I135) จะไม่ทำให้การกระจายของ V_z/V_{cf} เปลี่ยนไปจากกรณี JICF มากนัก

- การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x/V_{cf}) และเวกเตอร์บนระนาบ yz (รูปที่ 8.5)

รูปที่ 8.5 แสดงกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x/V_{cf} , แสดงด้วยเส้น contour) และเวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบต่อกระแสลมขวาง ($\vec{V}_{yz}/V_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/V_{cf}$) กรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่าการกระจายตัวของ V_x/V_{cf} จะมี Local Peak รูปร่างเป็นพระจันทร์เสี้ยว (เช่นเดียวกับรูปที่ 8.2) และจะอยู่สูงกว่าจุดหมุนของ \vec{V}_{yz}/V_{cf} และเป็นเช่นนี้ตลอดตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ ถึง 1.5

กรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่าโครงสร้าง V_x/V_{cf} จะแผ่กระจายตัวของออกด้านข้างมากขึ้นในขณะที่ขนาดและความสูงการกระจายตัวของ V_x/V_{cf} ตามแนว Traverse จะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF และจะพบ Local Peak แยกออกเป็นสองลูกซ้าย-ขวาอย่างชัดเจน (เช่นเดียวกับรูปที่ 8.2) โดย Local Peak ของ V_x/V_{cf} จะอยู่สูงกว่าจุดหมุนของ \vec{V}_{yz}/V_{cf} เช่นเดียวกับกรณี JICF และเป็นเช่นนี้ตลอดตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ ถึง 1.5 นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไป Local peak ทั้งสองข้างจะมีระยะห่างตามแนว Spanwise มากขึ้น แต่ระยะห่างของจุดหมุน \vec{V}_{yz}/V_{cf} ยังคงประมาณเท่าเดิม

กรณี I135 พบว่าโครงสร้างโดยรวมของการกระจายตัว V_x/V_{cf} และเวกเตอร์บนระนาบ yz จะไม่แตกต่างจากกรณี JICF เท่าไรนัก

- การกระจายตัวของ Vorticity เฉลี่ยไร้มิติ ($\omega_x d/V_{cf}$) (รูปที่ 8.6)

Vorticity เฉลี่ยนิยามจาก

$$\vec{\omega} = \vec{\nabla} \times \vec{V} \quad (8.1)$$

สำหรับการหมุนรอบแกน x สมการที่ 8.1 จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\omega_x = \frac{\partial V_z}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial z} \quad (8.2)$$

โดยที่ ω_x จะคำนวณมาจาก V_z และ V_y ที่เฉลี่ยไปตามเวลา

รูปที่ 8.6 แสดงถึงการกระจายตัวของ Vorticity เฉลี่ยไร้มิติ ($\omega_x d/V_{cf}$) กรณี JICF, I15 และ I135 สำหรับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่ามีโครงสร้างการหมุนควงหลัก

อยู่ 2 ลูกเรียงตัวกันตามแนว Spanwise โดยมีรูปร่างคล้ายจุลภาค (สอดคล้องกับผลการทดลอง Zaman and Fross, 1997) และมีทิศทางการหมุนสวนทางกัน ลักษณะเกี่ยวกับการหมุนควง CVP ซึ่งโครงสร้างการหมุนควงหลักนั้น มีขนาดและรูปร่างค่อนข้างสมมาตร นอกจากนี้ยังพบว่า Vorticity เฉลี่ยไร้มิติที่มีค่าสูงจะอยู่บริเวณด้านล่างของเจ็ต และเมื่อพิจารณาการวิวัฒนาการของ Vorticity เฉลี่ยไร้มิตินี้ พบว่า Vorticity เฉลี่ยไร้มิติจะเปลี่ยนรูปร่างจากจุลภาคไปเป็นรูปร่างที่ค่อนข้างกลมที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$

กรณี I15 ตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่าการกระจายตัวของ Vorticity เฉลี่ยไร้มิติจะขยายตัวออกทางด้านข้างมากขึ้น ในขณะที่ความสูงและระยะห่างระหว่างการกระจายตัวของ Vorticity เฉลี่ยไร้มิติกับพื้นจะลดลง ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5, 0.75$ และ 1 พบว่า จะมีโครงสร้างการหมุนควงหลักอยู่ 4 ลูก โดยแบ่งตามแนวระนาบสมมาตรได้ข้างละ 2 ลูกเรียงตัวกันในแนว Traverse และโครงสร้างการหมุนควงหลักบริเวณด้านบนและด้านล่างของแต่ละข้าง จะมีทิศทางการหมุนสวนทางกัน (คล้ายคลึงกับ Counter-Rotating ในการทดลองของ Haven and Kurosaka, 1997 ในกรณีเจ็ตไม่ถูกควบคุมแต่มีรูปร่างปากทางออกของเจ็ตมี Aspect ratio ที่สูง) โดยแต่ละข้าง Local peak บริเวณโครงสร้างด้านล่างจะมีขนาดของค่าสูงสุดมากกว่า Local peak บริเวณโครงสร้างด้านบน และการกระจายตัว Vorticity เฉลี่ยไร้มิติของกรณี I15 จะมีขนาดของค่าสูงสุดและขนาดของ gradient ตามแนวเข้าสู่ศูนย์กลางของ Local peak ของแต่ละลูกมากกว่ากรณี JICF อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาการวิวัฒนาการของ Vorticity เฉลี่ยไร้มิติ พบว่า เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปโครงสร้างการหมุนควงหลัก 4 ลูก จะยุบตัวรวมเหลือ 2 ลูกที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$

กรณี I135 จะมีโครงสร้างโดยรวมของการกระจายตัว Vorticity เฉลี่ยไร้มิติไม่แตกต่างกับกรณี JICF เท่าไรนัก

สรุปผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการกระจายตัวของ Vorticity เฉลี่ยไร้มิติ การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ (I15) จะทำให้การกระจายของ Vorticity เฉลี่ยไร้มิติ ขยายตัวออกทางด้านข้างมากขึ้น ในขณะที่ความสูงและระยะห่างระหว่างการกระจายตัวของ Vorticity เฉลี่ยไร้มิติ กับพื้นจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF และจะมีโครงสร้างการหมุนควงหลักอยู่ 4 ลูก โดยแบ่งตามแนวระนาบสมมาตรได้ข้างละ 2 ลูกหมุนสวนทางกันและเรียงตัวกันในแนว Traverse โดยที่การกระจายตัวของ Vorticity เฉลี่ยไร้มิติ มีขนาดของค่าสูงสุดและขนาดของ gradient ตามแนวเข้าสู่ศูนย์กลางของ Local peak ของแต่ละลูกจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF อย่างชัดเจน ในขณะที่การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่

ตำแหน่ง $\pm 135^\circ$ (I135) จะไม่ทำให้กระจายตัวของ Vorticity เฉลี่ยไร้มิติเปลี่ยนแปลงจากกรณี JICF ไปเท่าไรนัก

- การกระจายของ Turbulent kinetic energy (TKE) ต่อ Crossflow kinetic energy (CKE) (รูปที่ 8.7)

รูปที่ 8.7 แสดงถึงการกระจายของ Turbulent kinetic energy ต่อ Crossflow kinetic energy (TKE/CKE) กรณี JICF, I15 และ I135 กรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่ากระจายตัวของ TKE/CKE จะมี Local peak บริเวณด้านบนซึ่งมีรูปร่างเป็นพระจันทร์เสี้ยวโดยมีค่าประมาณ 1.4 เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไป $x/rd = 0.75$ พบว่า Local peak มีค่าเข้าใกล้ 1 และสังเกตว่า TKE/CKE จะเสื่อมสลายลงตามแนว Downstream หนึ่งเมื่อพิจารณาความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ (ϕ_{ij}) ในรูปที่ 7.1 พบว่าการเสื่อมสลายเกิดจากการสลายตัวของ TKE มากกว่าการลดลงของ ϕ_{ij}

กรณี I15 ตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่าการกระจายตัว TKE/CKE จะขยายตัวออกทางด้านข้างมากขึ้น ในขณะที่ขนาดและความสูงกระจายตัว TKE/CKE ตามแนว Traverse จะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 พบว่าจะมี Local peak 2 ลูกแยกออกซ้ายขวาและเรียงตัวกันตามแนว Spanwise อย่างชัดเจน และมีค่าสูงสุดมากกว่า JICF ประมาณ 7% , 35% และ 40% ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5, 0.75$ และ 1 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่าการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ จะส่งเสริมความปั่นป่วน (promote turbulence) เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไป $x/rd = 1.5$ พบว่า Local peak มีค่าเข้าใกล้ 1

กรณี I135 ตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่าค่าการกระจายตัวโดยรวมของ TKE/CKE มีค่าใกล้เคียงกับกรณี JICF ซึ่งบ่งชี้ว่าการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 135^\circ$ จะไม่มีผลต่อความปั่นป่วนเท่าไรนัก อย่างไรก็ตามที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ กรณี I135 จะมีรูปร่างแตกต่างกับกรณี JICF กล่าวคือ จะมี Local peak ทั้งหมด 4 ลูกประกอบด้วย Local peak 3 ลูกที่มีค่าสูงเรียงตัวเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยมี Local peak บริเวณด้านบนมีรูปร่างเป็นพระจันทร์เสี้ยว และมี Local peak 2 ลูกเรียงตัวกันตามแนว Spanwise บริเวณด้านล่าง โดยมี Local peak (Valley) ที่มีค่าต่ำจะอยู่ตรงกลางระหว่างบริเวณ Local

peak 3 ลูกนี้ เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไป $x/rd = 0.75$ พบว่ากระจายตัวของ TKE/CKE จะมีรูปร่างคล้ายคลึงกับกรณี JICF เป็นเช่นนี้ตลอดจนหน้าตัดสุดท้ายของการวัด

สรุปผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อกระจายตัวของ TKE/CKE การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ (I15) พบว่าการกระจายตัวของ TKE/CKE จะขยายตัวออกทางด้านข้างมากขึ้น ในขณะที่ขนาดและความสูงการกระจายตัวของ TKE/CKE ตามแนว Traverse จะลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF และจะทำให้ TKE/CKE มีค่าสูงสุดมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF บ่งชี้ว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ จะส่งเสริมความปั่นป่วน (promote turbulence) ในทางตรงกันข้ามการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง $\pm 135^\circ$ (I135) จะไม่ทำให้ค่าการกระจายของ TKE/CKE เปลี่ยนแปลงไปจากกรณี JICF เท่าไรนัก

8.2 ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเส้นทางเดินของเจ็ต

เส้นทางเดินของเจ็ตของปริมาณ X ใดๆ จะพิจารณาจาก Center of mass trajectory ($y_{cm,X}$) และ Centroid trajectory ($y_{cc,X}$) ซึ่งนิยามเป็น

$$y_{cm,X} = \frac{\int y|X|dA_{jet}}{\int |X|dA_{jet}} \quad (8.3)$$

$$y_{cc,X} = \frac{\int ydA_{jet}}{\int dA_{jet}} \quad (8.4)$$

เมื่อ $|X|$ แทนขนาดของปริมาณ X

- เปรียบเทียบ Centroid trajectory และ Center of mass trajectory ของปริมาณความเร็วเฉลี่ย (V) (รูปที่ 8.8)

รูปที่ 8.8 แสดงถึง Centroid trajectory (CC) และ Center of mass trajectory (CM) ของปริมาณผลรวมความเร็วเฉลี่ย (V) เมื่อพิจารณาทุกกรณี (กรณี JICF , I15 และ I135) พบว่าโดยรวม CC จะอยู่สูงกว่า CM ซึ่งบ่งชี้ว่ากรณี JICF , I15 และ I135 ขนาดความเร็วสูงส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณด้านล่างของเจ็ต

กรณี I15 พบว่า CC และ CM ของกรณี I15 จะต่ำกว่า CC และ CM ของกรณี JICF เสมอตามลำดับ ในทางตรงข้าม กรณี I135 พบว่า CC และ CM ของกรณี I135 จะอยู่สูงกว่า CC และ CM ของกรณี JICF เสมอตามลำดับ

- เปรียบเทียบ Centroid trajectory และ Center of mass trajectory ของปริมาณ Vorticity (ω_x) เฉลี่ย (รูปที่ 8.9)

รูปที่ 8.9 แสดงถึง Centroid trajectory และ Center of mass trajectory ของปริมาณ Vorticity (ω_x) เฉลี่ย เมื่อพิจารณาทุกกรณี (กรณี JICF , I15 และ I135) พบว่าโดยรวม CC จะอยู่สูงกว่า CM ซึ่งบ่งชี้ว่ากรณี JICF , I15 และ I135 ขนาดของ Vorticity เฉลี่ยที่มีค่าสูงส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณด้านล่างของเจ็ต

กรณี I15 พบว่า CC และ CM ของกรณี I15 จะต่ำกว่า CC และ CM ของกรณี JICF เสมอตามลำดับ ในทางตรงข้าม กรณี I135 พบว่า CC และ CM ของกรณี I135 จะอยู่สูงกว่า CC และ CM ของกรณี JICF เสมอตามลำดับ

สรุปผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงเส้นทางเดินของปริมาณ V และ ω_x พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ (I15) จะทำให้ CC และ CM ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF ในทางตรงข้าม การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง $\pm 135^\circ$ (I135) จะทำให้ CC และ CM สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF

บทที่ 9

ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ด และ Circulation

9.1 ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ด

รูปที่ 9.1 แสดงอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่เฉลี่ยตามเวลาทั้งหมด (E) กรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 0.75 พบว่าจะมี E มากกว่ากรณี JICF เล็กน้อย แต่เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ และ 1.5 พบว่าจะมี E มากกว่ากรณี JICF อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่กรณี I135 พบว่ามี E ที่มากกว่ากรณี JICF ตลอดช่วง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 สำหรับกรณีไม่ควบคุมและควบคุมทุกกรณี พบว่าค่า E จะอยู่ในช่วงประมาณ 2.9 - 3.1 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงประมาณ 5.4 - 5.7 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$

เพื่อประเมินประสิทธิภาพผลของการใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ด จึงนิยามประสิทธิภาพ η ดังสมการที่ 5.3

$$\eta = E_{cJICF} / E_{JICF} = Q_{cJICF} / Q_{JICF} \quad (5.3)$$

โดยที่ subscript cJICF แทนกรณีควบคุมและ subscript JICF แทนกรณีไม่ควบคุม

รูปที่ 9.2 แสดงประสิทธิภาพผลของการใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร กรณี I15 พบว่า ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 0.75 การฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ จะทำให้การเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ และ 1.5 พบว่าการเหนี่ยวนำการผสมจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนประมาณ 5 % ในขณะที่กรณี I135 พบว่าตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 การฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 135^\circ$ จะทำให้เจ็ดมีการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และจะมีการเหนี่ยวนำการผสมมากที่สุดประมาณ 13 % ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.75$

สรุปได้ว่าการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 135^\circ$ (I135) จะทำให้เจ็ตมีการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางเข้ามาผสมได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับกรณี JICF และกรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ โดยค่าเหนี่ยวนำการผสมทั้งหมดในการศึกษาได้สรุปไว้ในตาราง 9.1

9.2 ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อ Circulation

Circulation (Γ) รอบเส้นโค้งปิด C ใดๆ นิยามเป็น

$$\Gamma = \oint_C \vec{V} \cdot d\vec{r} \quad (9.1)$$

ซึ่งเมื่อใช้ทฤษฎีของสโตกส์ประยุกต์ลงบนเส้นโค้งปิด C บนระนาบ yz ของหน้าตัดเจ็ต จะสามารถเปลี่ยนอินทิกรัลตามเส้นเป็นอินทิกรัลบนพื้นผิวได้เป็น

$$\Gamma = \int_A \omega_x dA \quad (9.2)$$

โดยที่ ω_x คือ Vorticity เฉลี่ย ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 8.2 โดย Γ จะพิจารณาจากเครื่องหมายของ ω_x ดังแสดงในรูปที่ 9.3 พบว่า Γ ค่าบวกและค่าลบมีความค่าประมาณเท่ากัน ทุกกรณีตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 โดยที่ค่า Γ ไร้มิติ ($\Gamma/V_{cf} d$) ของการทดลองได้สรุปไว้ในตาราง 9.2

รูปที่ 9.4 แสดงถึง Γ ไร้มิติ (ค่าบวก) ไปตามแนว Downstream พบว่าทุกกรณี (JICF, I15 และ I135) Γ ไร้มิติจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องไปตามแนว Downstream เมื่อพิจารณา Vorticity (ω_x) ในรูปที่ 8.6 และความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ (ϕ_{ij}) ในรูปที่ 7.1 จะเห็นว่าการลดลงของ Circulation เกิดจากการลดลงของ ω_x มากกว่าเกิดจาก ϕ_{ij} เมื่อพิจารณาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อ Circulation กรณี I15 พบว่าจะมี Circulation ที่มากกว่ากรณี JICF ตลอดตามแนว Downstream ในขณะที่กรณี I135 พบว่าการ

ฉีดเจ็ดควบคุมจะไม่ทำให้ Circulation แตกต่างกับกับกรณี JICF เท่าไรนัก ตลอดตามแนว Downstream

สรุปได้ว่าการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ (I15) จะทำให้เจ็ดมี Circulation เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกรณี JICF ในขณะที่ การฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 135^\circ$ (I135) จะไม่ทำให้ค่า Circulation เปลี่ยนแปลงไปจากการกรณี JICF เท่าไรนัก

บทที่ 10

อภิปรายผลการทดลอง

10.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเหี่ยวนำการผสม (E) และเส้นทางเดินของเจ็ด

Hasselbrink and Mungal (1996) ได้นำเสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเหี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวาง (E) และเส้นทางเดินของเจ็ดในบริเวณที่เส้นทางเดินของเจ็ดมีความสัมพันธ์เป็นแบบ Power law หรือ บริเวณ Far field ตามสมการ

$$\text{เส้นทางเดิน} \quad \frac{y}{rd} = A \left(\frac{x}{rd} \right)^m \quad (2.5)$$

โดยได้ derive สมการอัตราการเหี่ยวนำการผสม

$$\text{อัตราการเหี่ยวนำการผสม} \quad E = \frac{Q_j}{Q_0} = 1 + \frac{r}{Am} \left(\frac{x}{rd} \right)^{1-m} \quad (2.8)$$

จากสมมติฐานที่ว่า (การเปลี่ยนแปลงของ) เส้นทางเดินของเจ็ดเป็นผลมาจากการเหี่ยวนำการผสมเพียงอย่างเดียว ดังนี้ สัมประสิทธิ์ (A, m) จึงปรากฏในทั้งสองสมการ

ต่อมา Yuan and Street (1998) ได้ทำการจำลองเจ็ดในกระแสมขวางด้วยวิธี LES และได้หาเส้นแนวโน้ม (fit curve) ของอัตราการเหี่ยวนำการผสมของเจ็ด (E) ตามระยะทางการไหล (x/rd) ในบริเวณ Far field นี้ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ m ที่ได้จากเส้นแนวโน้มอัตราการเหี่ยวนำการผสมจะสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ m ที่ได้จากเส้นแนวโน้มเส้นทางเดินของเจ็ด โดยมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย (7%) ดังนี้ จึงเป็นการสนับสนุนความสัมพันธ์อันใกล้ชิดระหว่างอัตราการเหี่ยวนำการผสมและเส้นทางเดิน อย่างน้อยในบริเวณ Far field

ดังนั้น ในการศึกษาจึงได้ทดลองหาเส้นแนวโน้ม (fit curve) อัตราการเหี่ยวนำการผสมของเจ็ด (E) ตามระยะทางการไหล (x/rd) จากผลการทดลองตามแบบจำลองในสมการที่ 2.8 ดังแสดงในรูปที่ 9.1 พบว่า ในทุกกรณี และโดยเฉพาะในกรณีเจ็ดที่ไม่ถูกควบคุม (JICF) อันเป็นที่มา

ของแบบจำลองนี้ เส้นแนวโน้มตามแบบจำลองตามสมการที่ 2.8 จะไม่สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีเท่าไรนัก ความแตกต่างนี้ สามารถอธิบายได้ดังนี้

แบบจำลองตามสมการที่ 2.8 เป็นแบบจำลองสำหรับเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีสมมติฐานว่าเป็นเจ็ตในบริเวณที่เส้นทางเดินเป็นแบบ Power law หรือ บริเวณ Far field ดังนี้ จึงไม่เป็นที่คาดหวังว่าแบบจำลองดังกล่าวจะสามารถอธิบายผลการทดลองในกรณีเจ็ตในกระแสลมขวางที่ถูกควบคุม (I15 และ I135) หรือ ในกรณีเจ็ตในกระแสลมขวางที่ไม่ถูกควบคุม (JICF) ตลอดช่วงบริเวณ Near field ($x/rd = 0.5$ และ 0.75) จนถึงบริเวณ Far field ($x/rd = 1$ และ 1.5) ดังเช่นผลการทดลองในการศึกษานี้ได้ ซึ่งกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในสองบริเวณนี้จะแตกต่างกัน กล่าวคือ ผลการศึกษาของ Smith and Mungal (1998) ชี้แนะว่า ถึงแม้โครงสร้างการไหล Counter-rotating vortex pair (CVP) จะเป็นโครงสร้างการไหลหลักที่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสมในบริเวณ Far field ก็ตาม แต่การก่อตัวของ CVP ต่างหากที่จะเป็นกลไกหลักในการทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสมในบริเวณ Near field

10.2 ผลของระยะเจาะทะลุของเจ็ต (y/rd) และ Circulation (Γ) ต่ออัตราการเหนี่ยวนำการผสม (E)

ผลการศึกษาที่ผ่านมาชี้แนะว่าอัตราการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ต (E) จะขึ้นอยู่กับเส้นทางเดินของเจ็ตดังที่กล่าวไว้ในส่วนที่ 10.1 ข้างต้น เพื่อให้สะดวกต่อการอภิปรายในส่วนนี้จึงจะเขียนสมการอัตราการเหนี่ยวนำการผสม (สมการที่ 2.8) ใหม่โดยใช้สมการเส้นทางเดิน (สมการที่ 2.5) เป็น

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเหนี่ยวนำการผสม} \quad E(x/rd; y/rd) &= 1 + \frac{r}{m} \left(\frac{x/rd}{y/rd} \right) \\ \text{หรือ} \quad E(y/rd) &= 1 + \frac{r}{mA^{1/m}} \left(\frac{y}{rd} \right)^{\frac{1-m}{m}} \end{aligned} \quad (10.1)$$

โดยจะเรียกระยะ y/rd ตามแนวเส้นทางเดินว่าเป็นระยะเจาะทะลุของเจ็ด (penetration depth, y/rd) สมการที่ 10.1 นี้ชี้แนะว่า อัตราการเหนียวนำการผสมของเจ็ด (E) จะขึ้นอยู่กับเส้นทางเดินหรือระยะเจาะทะลุของเจ็ด (y/rd)

$$E(y/rd) \quad (10.2)$$

อย่างไรก็ตาม รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเหนียวนำการผสมของเจ็ด (E) และระยะเจาะทะลุของเจ็ด (y/rd) ที่เฉพาะเจาะจงอาจไม่เป็นดังที่สมการที่ 10.1 ชี้แนะ ดังที่จะเสนอแบบจำลองในเชิงคุณภาพ (Qualitative) ดังนี้

- แบบจำลองกลไกการเหนียวนำการผสมของเจ็ด และ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเหนียวนำการผสม (E) กับระยะเจาะทะลุของเจ็ด (y/rd) และ Circulation ($\Gamma/V_{cf}d$)

ถ้าเราไม่เดลกลไกการเหนียวนำการผสมของเจ็ดในเบื้องต้นก่อนว่า

1) โดยส่วนใหญ่แล้วเกิดจากโครงสร้างวอร์เท็กซ์หลักของเจ็ด ซึ่งสามารถระบุความพยายามในการเหนียวนำการผสมในเชิงปริมาณของโครงสร้างวอร์เท็กซ์หลักนี้ด้วย Circulation ($\Gamma/V_{cf}d$) และ

2) ระยะเจาะทะลุของเจ็ด (y/rd) (หรือ อีกนัยหนึ่ง ระยะเจาะทะลุของโครงสร้างวอร์เท็กซ์หลักของเจ็ด) จะมีผลต่ออัตราการเหนียวนำการผสมของเจ็ด (E) มาก เนื่องจากถ้าเจ็ดมีระยะเจาะทะลุที่น้อย (หรืออีกนัยหนึ่ง เจ็ดอยู่ใกล้พื้นเกินไป) ผลของความใกล้พื้นจะทำให้โครงสร้างวอร์เท็กซ์หลักของเจ็ดคือ CVP ไม่สามารถเหนียวนำกระแสลมขวางจากทางด้านล่างเข้ามาผสมได้ หรือ ที่เรียกว่าเกิด Wall blocking ดังที่ผลการศึกษาของ Korn Sri *et al.* (2009) และ Bunyajitradulya (2011) ชี้แนะ

อย่างไรก็ตาม เป็นที่คาดหวังว่า ถ้าระยะเจาะทะลุของเจ็ด (y/rd) มากขึ้นระดับหนึ่งจนเจ็ดลอยตัวห่างจากผนังมาก ผลของผนัง หรือ Wall blocking ก็จะไม่ลดและระยะเจาะทะลุของเจ็ดก็จะเริ่มมีผลต่ออัตราการเหนียวนำการผสมของเจ็ดน้อยลง จนอาจไม่มีผลในที่สุด

ดังนั้น เมื่อพิจารณาผลของระยะเจาะทะลุของเจ็ด (y/rd) ต่อ อัตราการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ด (E) ก่อน (เนื่องจากต้องการพิจารณาอัตราการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดตั้งแต่เริ่มต้นจากปากเจ็ด ซึ่งเจ็ดจะอยู่ใกล้พื้นมาก ทำให้ระยะเจาะทะลุของเจ็ด (y/rd) จะมีผลมาก) จึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ในเชิงคุณภาพได้ดังสมการที่ 10.2

$$E(y/rd) \quad (10.2)$$

ดังนั้น จึงได้ทดลองพล็อตกราฟระหว่างอัตราการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ด (E) และระยะเจาะทะลุของเจ็ด (y/rd) ซึ่งนิยามจากเส้นทางเดิน Center of mass ของ ω_x เหตุผลที่เลือกระยะเจาะทะลุของเจ็ด (y/rd) ซึ่งนิยามจากเส้นทางเดิน Center of mass ของ ω_x แทนที่จะเป็นเส้นทางเดินของปริมาณอื่น ก็เนื่องมาจากสมมติฐานของกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในข้อ 1 ข้างต้น ที่ว่าโดยส่วนใหญ่แล้วจะเกิดจากโครงสร้างวอร์เท็กซ์หลักของเจ็ด ผลการพล็อตได้แสดงในรูปที่ 10.1

รูปที่ 10.1 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดและระยะเจาะทะลุของเจ็ด กรณี JICF และ I135 พบว่าเมื่อระยะเจาะทะลุของเจ็ดเพิ่มมากขึ้น อัตราการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดจะเพิ่มขึ้นด้วย สอดคล้องในเชิงคุณภาพในเบื้องต้นกับสมมติฐานข้อ 2 เกี่ยวกับผลของ Wall blocking หนึ่ง ความสอดคล้องนี้เป็นเพียงในเบื้องต้นเท่านั้น เนื่องจากเป็นที่ชัดเจนและไม่ได้เป็นที่คาดหวังว่า Wall blocking จะเป็นองค์ประกอบเดียวที่มีผลต่ออัตราการเหนี่ยวนำการผสม เช่นกรณี I15 ดังจะอภิปรายต่อไปด้านล่าง ดังนั้น ระยะเจาะทะลุของเจ็ด (y/rd) สามารถอธิบายอัตราการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ด (E) ในเชิงปริมาณได้ดีพอสมควรกับกรณี JICF และ I135 และสามารถแสดงสมการแนวโน้มสำหรับกรณี JICF และ I135 ได้เป็น

$$E(y/rd) = 1 + 4.09 \left(\frac{y}{rd} \right)^{2.57} \quad (10.3)$$

อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 10.1 กรณี I15 จะพบว่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมจะเพิ่มขึ้นได้ แม้ระยะเจาะทะลุของเจ็ดจะประมาณเท่าเดิมก็ตาม แสดงว่า ระยะเจาะทะลุของเจ็ด (y/rd) ไม่สามารถอธิบายอัตราการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ด (E) ในเชิงปริมาณได้ทั้งหมด

ดังนั้น เมื่อประยุกต์สมมติฐานหลักของแบบจำลองนี้ในข้อที่ 1 จึงสามารถดัดแปลงสมการที่ 10.2 ได้เป็น

$$E(y/rd, \Gamma/V_{cf}d) \quad (10.4)$$

กล่าวคือ ในที่นี้จะเสนอแบบจำลองในเชิงคุณภาพว่า อัตราการเหนียวนำการผสมของเจ็ด (E) จะขึ้นกับพารามิเตอร์หลักของการไหล 2 ตัวคือ 1) ระยะเจาะทะลุของเจ็ด (y/rd) และ 2) Circulation ($\Gamma/V_{cf}d$)

เพื่อสนับสนุนแนวคิดนี้ในเชิงคุณภาพในเบื้องต้น จึงจะนำแนวคิดนี้มาอธิบายผลการทดลองนี้ดังนี้

1. กรณี I135 และ กรณี JICF พบว่าจะมี Circulation ($\Gamma/V_{cf}d$) ประมาณเท่ากัน (รูปที่ 9.4) แต่ ระยะเจาะทะลุของกรณี I135 มากกว่า (รูปที่ 8.9) ส่งผลให้ E ของกรณี I135 มากกว่า (รูปที่ 9.1) เนื่องจากผลของ Wall blocking น้อยกว่า
2. กรณี I15 ระยะเจาะทะลุน้อยกว่ากรณี JICF (รูปที่ 9.4) แต่ Circulation ($\Gamma/V_{cf}d$) ของ I15 มากกว่า (รูปที่ 9.4) ส่งผลให้ E ของ I15 มากกว่า (รูปที่ 9.1) โดยเฉพาะที่ ตำแหน่ง $x/rd = 1$ และ 1.5

จากหลักฐานนี้ ชี้แนะว่า E น่าจะแปรผันตามกับทั้ง Circulation ($\Gamma/V_{cf}d$) และ ระยะเจาะทะลุ y/rd ตามที่เสนอเป็นแบบจำลองและสะท้อนในสมการที่ 10.4 อย่างไรก็ตาม รูปแบบความสัมพันธ์ที่เฉพาะเจาะจงของสมการที่ 10.4 เป็นประเด็นที่จะต้องศึกษาในรายละเอียดต่อไป กระนั้น หลักฐานและแนวคิดของแบบจำลองนี้ ชี้แนะว่ารูปแบบความสัมพันธ์ที่เฉพาะเจาะจงของสมการที่ 10.4 น่าจะมีลักษณะดังนี้

- ที่ $y/rd = 0, E = 1$
- E จะแปรผันตามระยะเจาะทะลุ y/rd แต่อาจไม่ใช่เชิงเส้นตรง กล่าวคือ เมื่อ y/rd มากขึ้น E จะมากขึ้น เนื่องจาก Wall blocking น้อยลง
- เมื่อ y/rd มากขึ้นถึงระดับหนึ่งและเจ็ดอยู่ไกลผนังมาก จน Wall blocking น้อย y/rd ก็จะมีผลต่อ E น้อยลง

- ในบริเวณ Near field ซึ่งเจ็ตอยู่ใกล้ผนังมาก เมื่อเปรียบเทียบผลของ y/rd และ $\Gamma/V_{cf}d$ ต่อ E , y/rd จะมีผลต่อ E มากกว่า $\Gamma/V_{cf}d$
- E จะแปรผันตาม $\Gamma/V_{cf}d$ กล่าวคือ เมื่อ $\Gamma/V_{cf}d$ มากขึ้น E จะมากขึ้น แต่อาจไม่ใช่เชิงเส้นตรง

บทที่ 11

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมุมขวาง โดยมุ่งเน้นศึกษาผลของตำแหน่งเชิงมุมการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ด

เจ็ดหลักที่ใช้ในการศึกษามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในเท่ากับ 22.5 มิลลิเมตรและมีรูปร่างของความเร็วที่ปากทางออกเป็นแบบการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อที่พัฒนาตัวเต็ม (fully developed turbulent pipe profile) ใกล้เคียงกับรูปร่างความเร็วแบบ Power law ที่มีค่ายกกำลังเท่ากับ 8 ($n = 8$) เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1 มิลลิเมตร และอยู่ต่ำกว่าปากทางออกของเจ็ดหลักเท่ากับ 3 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลคงที่เท่ากับ 3.9 เรโนลส์นัมเบอร์ของเจ็ดเท่ากับ 23,000 และเรโนลส์นัมเบอร์ของกระแสมุมขวางซึ่งคิดจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเจ็ดหลักเท่ากับ 5,900 โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องปกติ

การศึกษาเบื้องต้นมีวัตถุประสงค์เพื่อหาตำแหน่งของการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากการเหนี่ยวนำการผสม (entrainment) มากที่สุด โดยเลือกทำการทดลองกรณีไม่ควบคุม (JICF) และกรณีควบคุมที่ตำแหน่งการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงทั้งหมด 4 ตำแหน่งคือ $\pm 15^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$ และ $\pm 135^\circ$ ที่อัตราส่วนเชิงมวลเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ดหลักสองตัวรวมกันคงที่เท่ากับ 2 % และวัดการเหนี่ยวนำการผสมที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 1.5 พบว่าการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 135^\circ$ และ $\pm 90^\circ$ ส่งผลให้เจ็ดมีการเหนี่ยวนำการเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ $x/rd = 1.5$ ในทางตรงกันข้าม การฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 45^\circ$ ส่งผลให้เจ็ดมีการเหนี่ยวนำการลดลงที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ $x/rd = 1.5$ ในขณะที่การฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ พบว่าจะมีเหนี่ยวนำการผสมลดลงเล็กน้อยที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ แต่จะมีการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ สำหรับงานวิจัยจะให้

ความสำคัญการเหนี่ยวนำการผสมช่วงระยะเริ่มต้นของเจ็ตใกล้ปากทางออก จึงได้เลือกการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 135^\circ$ ที่มีการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นจากกรณี JICF มากที่สุดเท่ากับ 9 % ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ (รูปที่ 5.2 และ 5.3) และเลือกการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ เนื่องจากมีการเหนี่ยวนำการผสมใกล้เคียงกับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ แต่จะมีการเหนี่ยวนำการผสมมากกว่ากรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ ซึ่งผู้วิจัยสันนิษฐานว่า ผลของการเหนี่ยวนำการผสมของกรณี I15 อาจจะได้รับผลจาก Spanwise separation – Mutual blocking หรือ Wall separation – Wall blocking ตามแนวคิดของ Kornrsri *et al.* (2009) และ Bunyajitradulya (2011) ซึ่งเป็นประเด็นที่น่าสนใจ

- ความน่าจะเป็นที่พบเจ็ตเชิงเวลาที่จุดใดๆ

กรณี JICF (รูปที่ 7.1) พบว่าจะมีความน่าจะเป็นที่พบเจ็ตมากบริเวณตรงกลางของเจ็ต และจะน้อยลงเมื่อใกล้ขอบเจ็ต โดยความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่มากกว่า 0.5 จะมีพื้นที่ประมาณ 30 - 35 % ของพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของเจ็ตทั้งหมดตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5

กรณี I135 (รูปที่ 7.1) พบว่าจะมีความน่าจะเป็นที่พบเจ็ตคล้ายคลึงกับกรณี JICF

กรณี I15 (รูปที่ 7.1) พบว่าที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ จะมีความน่าจะเป็นที่พบเจ็ตมากบริเวณตรงด้านข้างเจ็ตซึ่งเป็น Local peak สองลูก แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ ถึง 1.5 พบความน่าจะเป็นที่พบเจ็ตมากทั้งบริเวณ Local peak ทั้ง 2 ลูกและบริเวณตรงกลางของเจ็ตเชื่อมระหว่าง Local peak ทั้ง 2 ลูกซึ่งรวมตัวกันเป็นแถบยาวตามแนว Spanwise และจะน้อยลงเมื่อเข้าใกล้ขอบเจ็ต โดยความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่มากกว่า 0.5 จะมีพื้นที่ประมาณ 28 - 30 % ของพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของเจ็ตทั้งหมดตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5

- ผลของของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้าง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของกรณีไม่ควบคุม (JICF) พบว่ากระจายตัวของผลรวมความเร็วเฉลี่ย (V) ไร้มิติ ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 0.75 จะมี Local peak 2 ลูกที่มีรูปร่างพระจันทร์เสี้ยวอยู่ตรงกลางเจ็ดเรียงตัวซ้อนกันตามแนวดิ่ง โดยที่ Local peak บริเวณด้านบนมีค่าสูงกว่า Local peak บริเวณด้านล่าง เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปถึงระยะ $x/rd = 1$ พบว่าเจ็ดยังคงมี Local peak ด้านบนเช่นเดียวกับที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 0.75 แต่จะไม่ปรากฏ Local peak บริเวณด้านล่างที่ชัดเจน และยังพบอีกว่า ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ และ 1.5 รูปร่างผลรวมความเร็วเฉลี่ยได้รับอิทธิพลจากความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ค่อนข้างมาก ในขณะที่ได้รับอิทธิพลของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน y และ z น้อยกว่า (รูปที่ 8.1 ถึง 8.4) นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายตัวของ Vorticity เฉลี่ยไร้มิติ ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ จะมีโครงสร้างการหมุนควงหลักอยู่ 2 ลูกเรียงตัวกันตามแนว Spanwise โดยมีรูปร่างคล้ายจุลภาค และมีทิศทางหมุนสวนทางกัน ลักษณะเดียวกับการหมุน CVP ซึ่งโครงสร้างการหมุนควงหลักนั้นมีขนาดและรูปร่างค่อนข้างสมมาตร

การฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 135^\circ$ (I135) พบว่าจะไม่ทำให้โครงสร้าง $V, V_x, V_y, V_z, \text{Vorticity}$ และ TKE เปลี่ยนจากกรณี JICF ไปมากนัก (รูปที่ 8.1 ถึง 8.7) ในทางตรงข้าม การฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ (I15) จะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปจากกรณี JICF มาก กล่าวคือจะทำโครงสร้างของ $V, V_x, V_y, V_z, \text{Vorticity}$ และ TKE ขยายตัวของด้านข้างมากขึ้นและขนาดและความสูงตามแนว Traverse จะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF (รูปที่ 8.1 ถึง 8.7) และยังพบอีกว่า Vorticity จะมีโครงสร้างหมุนควงหลัก 4 ลูกโดยแบ่งตามแนวระนาบสมมาตร (Center plan, $z = 0$) ได้ข้างละ 2 ลูก โดยมีทิศทางหมุนสวนทางกัน และการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงกรณี I15 จะทำให้ขนาดค่าสูงสุดและขนาดของ gradient ของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน z (V_z) และ Vorticity เฉลี่ยจะมีค่ามากขึ้น (รูปที่ 8.4 และ 8.6) รวมถึงจะช่วยส่งเสริมความปั่นป่วน (promote turbulence) (รูปที่ 8.7) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF

- ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเส้นทางเดินของเจ็ต

ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเส้นทางเดินของปริมาณผลรวมความเร็วเฉลี่ย (V) และ Vorticity (ω_x) พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ (I15) จะทำให้ CC และ CM ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF ในทางตรงข้ามการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง $\pm 135^\circ$ (I135) จะทำให้ CC และ CM สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF (รูปที่ 8.8 และ 8.9)

- ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสม

การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ (I15) ส่งผลให้เจ็ตมีการเหนี่ยวนำการผสมไม่ต่างกับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 0.75 แต่จะมีการเหนี่ยวนำการเพิ่มขึ้นประมาณ 5 % เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ และ 1.5 (รูปที่ 9.1 และ 9.2)

ในขณะที่การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 135^\circ$ (I135) จะส่งผลให้เจ็ตมีการเหนี่ยวนำการผสมมากกว่ากรณี JICF ตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 และจะมีการเหนี่ยวนำการผสมมากที่สุดที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ โดยมีอัตราการเหนี่ยวนำการผสมมากกว่ากรณี JICF ประมาณ 13 % (รูปที่ 9.1 และ 9.2)

- ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อ Circulation

การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 15^\circ$ (I15) จะทำให้เจ็ตมี Circulation เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกรณี JICF ในขณะที่ การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม $\pm 135^\circ$ (I135) จะไม่ทำให้ค่า Circulation เปลี่ยนแปลงไปจากการกรณี JICF มากนัก (รูปที่ 9.4) ตลอดช่วงการทดลอง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5

- ผลของระยะเจาะทะลุของเจ็ต (y/rd) และ Circulation ($\Gamma/V_{cf}d$) ต่ออัตรา
การเหนี่ยวนำการผสม (E)

กรณี I135 พบว่าจะมี Circulation ($\Gamma/V_{cf}d$) ใกล้เคียงกับกรณี JICF แต่ระยะเจาะทะลุ (y/rd , CM ของ ω_x) ของกรณี I135 มากกว่ากรณี JICF ส่งผลให้ E ของกรณี I135 มากกว่ากรณี JICF ตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 เนื่องจากผลของ Wall blocking ที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF ในขณะที่ กรณี I15 ระยะเจาะทะลุน้อยกว่ากรณี JICF แต่ Circulation ($\Gamma/V_{cf}d$) ของ I15 มากกว่ากรณี JICF ส่งผลให้ E ของ I15 มากกว่ากรณี JICF โดยเฉพาะตำแหน่ง $x/rd = 1$ และ 1.5

จากหลักฐานข้างต้น ชี้แนะว่า E น่าจะแปรผันตามกับทั้ง Circulation ($\Gamma/V_{cf}d$) และ ระยะเจาะทะลุ y/rd ตามที่เสนอในรูปแบบสมการที่ 10.4 หลักฐานและแนวคิดของแบบจำลองนี้ ชี้แนะว่ารูปแบบความสัมพันธ์ที่เฉพาะเจาะจงของสมการที่ 10.4 น่าจะมีลักษณะดังนี้

- ที่ $y/rd = 0$, $E = 1$
- E จะแปรผันตามระยะเจาะทะลุ y/rd แต่อาจไม่ใช่เชิงเส้นตรง กล่าวคือ เมื่อ y/rd มากขึ้น E จะมากขึ้น เนื่องจาก Wall blocking น้อยลง
- เมื่อ y/rd มากขึ้นถึงระดับหนึ่งและเจ็ตอยู่ไกลผนังมาก จน Wall blocking น้อย y/rd ก็จะมีผลต่อ E น้อยลง
- ในบริเวณ Near field ซึ่งเจ็ตอยู่ใกล้ผนังมาก เมื่อเปรียบเทียบผลของ y/rd และ $\Gamma/V_{cf}d$ ต่อ E , y/rd จะมีผลต่อ E มากกว่า $\Gamma/V_{cf}d$
- E จะแปรผันตาม $\Gamma/V_{cf}d$ กล่าวคือ เมื่อ $\Gamma/V_{cf}d$ มากขึ้น E จะมากขึ้น แต่อาจไม่ใช่เชิงเส้นตรง

ประมวลตาราง

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
1	Pratte and Baines (1967)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาเส้นทาง, อัตราการลดลงตามแนวแกน และการขยายตัวของเจ็ต ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม ปากเจ็ตอยู่ติดกับแผ่นราบขนาดรัศมี 6 นิ้วชี้และอยู่สูงจากพื้น 8 นิ้ว 	<ul style="list-style-type: none"> $r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 5, 15, 25$ และ 35 $d = 0.158, 0.248$ และ 0.362 นิ้ว 	<ul style="list-style-type: none"> เส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตสามารถยุบรวมเป็นเส้นเดียวกันได้ที่อัตราส่วนความเร็วต่างกันเมื่อสเกลด้วย rd อัตราส่วนของความกว้างต่อความสูงของเจ็ตในบริเวณ Vortex zone เป็นค่าคงที่ที่ประมาณ 1.4 ในแต่ละหน้าตัดตามแนวแกนเจ็ตจะแสดงถึง Similarity ใน Vortex zone อัตราการกระจายจะถูกควบคุมโดย Turbulent mixing และการพาของ Vortex
2	Kamotani and Greber (1972)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาเส้นทางและคุณลักษณะการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วและอุณหภูมิในอุโมงค์ลม ใช้ Hot-wire ในการวัดความเร็วและใช้ Thermocouple ในการวัดอุณหภูมิ 	<ul style="list-style-type: none"> $r_m = \frac{\rho_j u_j^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2} = 15.3$ และ 59.6 $T_j - T_{cf} = 0, 75$ และ 320 °F $Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu} = 2,800-4,200$ 	<ul style="list-style-type: none"> อัตราส่วนโมเมนต์ (r_m) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิ อัตราส่วนความหนาแน่น ($\frac{\rho_j}{\rho_{cf}}$) มีผลต่อเส้นทางของอุณหภูมิเล็กน้อยแต่ไม่ผลต่อเส้นทางของความเร็ว เส้นทางของอุณหภูมิล้อมรอบอยู่ต่ำกว่าเส้นทางของความเร็วที่ r_m ปริมาณ Turbulence ของเจ็ตเพิ่มขึ้นตาม r_m

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง

3	Fric and Roshko (1994)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาโครงสร้างของVortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม ใช้ Smoke-wire ในการศึกษารูปแบบของการไหล และใช้ Hot-wire ในการวัดความเร็ว 	<ul style="list-style-type: none"> $r_v = 2-10$ $Re_j = \frac{u_j d}{\nu} = 76,00-11,400$ $Re_{cf} = 38,00-11,400$ 	<ul style="list-style-type: none"> จำแนกโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง 4 ประเภทได้แก่ <ul style="list-style-type: none"> Horseshoe vortices Jet shear layer vortices Wake vortices Counter - rotating pair (CVP) Wake vortices เกิดจากการโค้งตัวของเจ็ต อากาศทำให้เกิด Adverse pressure gradient ที่พื้นด้านล่างของเจ็ต และเกิด “Separation events” ภายในชั้นขอบเขตของผนังที่พื้น และกลายเป็นโครงสร้างของ Wake ด้านหลังเจ็ต ค่าความถี่ Strouhal ซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนความเร็ว (r_v) นั้น สอดคล้องกับความถี่ที่วัดได้จาก “Separation events”
4	Kelso et.al., (1996)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาโครงสร้างของVortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลมและอุโมงค์น้ำ ใช้การฉีดสีและ Smoke-wire ในการศึกษารูปแบบของการไหลและใช้ Flying-hotwire ในการวัดความเร็ว 	<ul style="list-style-type: none"> $r_v = 2 - 6$ $Re_{cf} = 440 - 6,200$ 	<ul style="list-style-type: none"> CVP เกิดจากการแยกตัวของเจ็ตอากาศภายในท่อ นอกจากนี้การโค้งตัวของ Vortex ring เนื่องจากผลของกระแสลมขวาง และ Vorticity ที่เกิดจากผนังของพื้นต่างเป็นองค์ประกอบที่ช่วยในการเกิด CVP Wake vortices เกิดจากการแยกตัวของชั้นขอบเขตที่ผนังพื้น

5	Smith and Mungal (1998)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาคุณลักษณะเส้นทางเดินและการผสมของเจ็ตใน กระแสลมขวาง ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณ Scalar concentration ในอุโมงค์ลม ใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) 	<ul style="list-style-type: none"> $r = \left(\frac{\rho_j u_j^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2} \right)^{1/2}$ = 5 – 25 Re_j = 8,400 – 41,500 	<ul style="list-style-type: none"> พบว่าเมื่อสเกลเส้นทางเดินด้วย rd จะได้ลักษณะเส้นทางเดินที่มีแนวโน้มเป็นเส้นเดียว (Collapse) กันที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการสเกลด้วย d หรือ r^2d การลดลงของ Scalar concentration บนระนาบสมมาตร (Center plan) แปรตาม $(s/rd)^{-1.3}$ ในบริเวณ Near field และแปรตาม $(s/rd)^{-2/3}$ ในบริเวณ Far field โดยมีจุดแบ่ง (branch point) อยู่ที่ $s = 0.3r^2d$ (s คือระยะทางตามแนวแกนเจ็ตบนระนาบสมมาตร) จุดแบ่งดังกล่าวยังพิจารณาได้จากลักษณะการกระจายของ p.d.f. โดยมีลักษณะ Non-marching ที่ Near field และมีลักษณะ Tilted ที่ Far field การก่อตัว CVP ที่ Near field เป็นกลไกหลักที่ทำให้เจ็ตในกระแสลมขวาง ผสมดีกว่าเจ็ตอิสระ (Free jet)
---	-------------------------	--	--	---

6	Yuan and Street (1998)	<ul style="list-style-type: none"> • ศึกษาเส้นทางเดินและและการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) ของเจ็ตในกระแสมขวาง • ทำ Simulation โดยศึกษาความเข้มข้นสเกลลา(Scalar concentration) • ใช้ Large eddy simulation (LES) 	<ul style="list-style-type: none"> • $r_v = 2$ และ 3.3 • $Re_{cf} = 1,050$ และ 2,100 	<ul style="list-style-type: none"> • เส้นทางเดินของบวระนาบสมมาตร บริเวณห่างจากปากเจ็ตที่ r_v (Velocity ratio) ต่างกัน จะมีลักษณะแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันโดยมีลักษณะเป็น Power law • บริเวณ Power law เส้นทางเดินและการเหนี่ยวนำการผสมมีความสัมพันธ์ โดยมีสมการเป็น $\frac{Q_j}{Q_0} = 1 + \frac{R}{Ab} \left(\frac{x}{R} \right)^{1-b}$ • ปริมาณที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นทางเดินของเจ็ต แบ่งออกเป็นสองบริเวณคือ <ul style="list-style-type: none"> • บริเวณ Upstream ของบริเวณ Power law (ใกล้ที่ปากทางออกของเจ็ต) พบว่า Pressure drag และ Turbulent intensity จะเป็นกลไกสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นทางเดินของเจ็ต • บริเวณ Power law การดึงกระแสมขวางเข้าไปในผสมในเจ็ต (Entrainment) เป็นกลไกสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นทางเดินของเจ็ต
---	------------------------	--	--	--

7	Yuan <i>et al.</i> (1999)	<ul style="list-style-type: none"> • ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field • ทำ Simulation โดยศึกษาปริมาณเฉลี่ยและ Fluctuation • ใช้ Large eddy simulation (LES) 	<ul style="list-style-type: none"> • $r_v = 2$ และ 3.3 • $Re_{cf} = 1,050$ และ 2,100 	<ul style="list-style-type: none"> • พบโครงสร้างของ Vertical structure บริเวณ Near field ได้แก่ Hanging vortices, Spanwise rollers และ Vertical streaks • เสนอว่า CVP เกิดจากการที่ Hanging vortices ซึ่งเกิดขึ้นจาก Skewed mixing layer ที่ขอบเจ็ต ได้รับผลของ Adverse pressure gradient ทำให้เกิดการ Breakdown จนกลายเป็น CVP และพัฒนาตัวตามเส้นทางของเจ็ต
8	Lim <i>et al.</i> (2001)	<ul style="list-style-type: none"> • ทำการทดลองโดยศึกษา Large-scale Structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง • ทำการทดลองโดยใช้เทคนิค Flow Visualization ใช้ dye/alcohol mixture และ Fluorescent disodium dye 	<ul style="list-style-type: none"> • $r_v = 4.6$ • $Re = 1,600$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Large-scale Structure ของ JICF บริเวณของเจ็ต shear layer vortices เป็นลักษณะของ Loops vortex ซึ่งไม่ได้เกิดจากการม้วนตัวของ Vortex rings แต่ Loops vortex เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Cylindrical vortex sheet หรือ Jet column • เชื่อว่า CVP นั้นเกิดจากการพัฒนาตัวของ Vortex loop แทนที่จะเป็น Vortex ring เหมือนเจ็ตอิสระ

9	Cortelezzi and Karagozian (2001)	<ul style="list-style-type: none"> • ศึกษาการก่อตัวและการพัฒนาตัวของ Vortical structure ในสนามการไหล • การทดลองมุ่งเน้นที่การก่อตัวของ CVP • ใช้ 3D vortex element 	<ul style="list-style-type: none"> • $\frac{D}{2}$ = Characteristic length • $\frac{D}{2u_\infty}$ = Characteristic time • $\frac{\delta}{D} = 0.5, 1$ และ 2 • $\frac{u_{jet}}{u_\infty} = 2.5, 5.4$ และ 10.8 	<ul style="list-style-type: none"> • พบว่าที่บริเวณ Near field นั้น Vortical structure มีการม้วนตัวขึ้นเป็น Vortex ring และกลายเป็น CVP ในที่สุด • การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในบริเวณ Far field พบสัดส่วนของกระแสลมขวางที่เพิ่มขึ้นในบริเวณ Downstream เนื่องจาก CVP ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความสามารถในการของเหนี่ยวนำกระแสลมขวางเข้ามาผสมในเจ็ต
10	Sivadas <i>et al.</i> (1997)	<ul style="list-style-type: none"> • ศึกษาผลของรูปร่างของปากเจ็ตที่มีต่อเส้นทางและการขยายตัวของเจ็ต • ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม • ใช้ Laser light sheet visualization และ Image processing 	<ul style="list-style-type: none"> • $r_v = 3.9, 5.9$ และ 7.8 	<ul style="list-style-type: none"> • ปากเจ็ตรูปสี่เหลี่ยมนั้นมีการผสมดีกว่าปากเจ็ตรูปวงกลมโดยเฉพาะเมื่อมีเพิ่มอัตราส่วนรูปร่างสำหรับด้านที่สัมผัสกับกระแสลมขวาง • ไม่พบโครงสร้างของ Horseshoe vortex ในกรณีที่ปากเจ็ตเป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งต่างจากลักษณะของปากเจ็ตเป็นรูปวงกลม

11	Haven and Kurosaka (1997)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของรูปร่างของเจ็ตที่ปากทางออกและ Aspect ratio (AR) ต่อการพัฒนาตัวของ CVP ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วและความเข้มข้นสเกลลาของเจ็ต โดยใช้เทคนิค LIF และ PIV 	<ul style="list-style-type: none"> รูปร่างของเจ็ตเป็นวงกลมและไม่วงกลมเช่น สีเหลี่ยมจัตุรัส, สีเหลี่ยมผืนผ้า. และวงรี $AR = 0.37 - 2.7$ $VR = 0.4 - 2$ 	<ul style="list-style-type: none"> ผลของรูปร่างของเจ็ตที่ปากออกที่ไม่เป็นวงกลมพบว่าเกิด CVP สองคู่ โดยแบ่งเป็นคู่ล่าง (Lower deck) และคู่บน (Upper deck) Lower deck มีโครงสร้างเป็นลักษณะคงตัว (Steady structure) ในขณะที่ (Upper deck) มีโครงสร้างเป็นลักษณะไม่คงตัว (Unsteady structure) Upper deck แบ่งออกตามประเภทการหมุนเป็น <ul style="list-style-type: none"> หมุนตาม Lower deck เรียกว่า Kidney vortices หมุนทวน Lower deck เรียกว่า Anti - kidney vortices Kidney vortices จะพบที่ AR ที่ค่าต่ำ ขณะที่ Anti - kidney vortices จะพบที่ AR ที่ค่าสูง
----	---------------------------	---	--	--

12	New <i>et al.</i> (2003)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ปากทางออกเป็นรูปวงรี โดยใช้เทคนิค LIF และทดสอบโดยใช้อุโมงค์น้ำ ศึกษาผลของ AR ต่อการพัฒนาตัวของ CVP 	<ul style="list-style-type: none"> $AR = 0.3 - 3$ $VR = 1 - 5$ $R_j = 900 - 5,100$ 	<ul style="list-style-type: none"> พบว่า AR จะมีผลกระทบต่อบริเวณ Near field เท่านั้น พบว่า AR ที่ค่าต่ำๆ จะเกิด CVP ชั้น 2 คู่โดยจะเริ่มต้นจากด้านข้างของลำเจ็ตโดย CVP ที่มีกำลังน้อยกว่าจะถูก Entrainment โดย CVP คู่ที่มีกำลังมากกว่า สำหรับที่ AR มีค่ามากนั้นพบว่า CVP เกิดขึ้นเพียงคู่เดียวและก่อตัวขึ้นจากลำเจ็ตแต่ Shear layer กับกระแสน้ำขวาง Interface กันจะพัฒนาตัวเป็น WVP คู่เดียวหรือหลายคู่ขึ้นอยู่กับค่า AR และ VR WVP เกิดขึ้นจากการโค้งตัวของวอร์เทกซ์หรือเว้าเข้าของ Vortex sheet พบว่ารูปร่างของปากทางออกเจ็ตจะมีผลต่อโครงสร้างของเจ็ตที่บริเวณ Near field แต่กลไกหลักๆของการก่อตัวของโครงสร้างที่ Large scale สำหรับเจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปวงรี
----	--------------------------	--	--	--

13	Sau <i>et al.</i> (2004)	<ul style="list-style-type: none"> • ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field ของเจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยม • ใช้ Direct numerical simulation (DNS) 	<ul style="list-style-type: none"> • $R_j = 255$ และ 300 • $r = 2.5$ และ 3.5 • $u = v = w = 0$ ที่ผนัง 	<ul style="list-style-type: none"> • CVP นั้นเกิดจาก Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวจากทางผนังทางด้านข้างของเจ็ตไม่ได้เกิดขึ้นจาก Vortex ring • พบ Wake vortices structure ที่บริเวณ Downstream • Horseshoe vortices ก่อตัวขึ้นทางด้าน Upstream ซึ่งเป็นผลของการปฏิสัมพันธ์ของ Shear layer ที่พื่นกับเจ็ต
14	Muppidi and Mahesh (2005a)	<ul style="list-style-type: none"> • การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ <ul style="list-style-type: none"> • 1) การไหลแบบปั่นป่วนของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ไหลแบบราบเรียบด้วย DNS • 2) Two dimension ถูกใช้ในการแสดงการพัฒนาตัวภายในหน้าตัดของเจ็ตและการเกิด CVP โดยจะกำหนดให้สภาวะเริ่มต้นของการพัฒนาตัวในหน้าตัดของเจ็ตนั้นมี 	<ul style="list-style-type: none"> • การศึกษาส่วนที่ 1 $r_{eff} = \left(\frac{\rho_j}{\rho_\infty} r^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 5.7$ <p>Re = 5,000 $\delta_{80\%} = 1.32d$ ที่ปากทางออก ของเจ็ต</p> $(\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2) = \text{Vorticity magnitude}$ $\frac{y}{r_{eff}d} = 0.1, 0.5 \text{ และ } 1.0$	<ul style="list-style-type: none"> • การศึกษาส่วนที่ 1 • เจ็ตนั้นมีความไม่สมมาตรตาม Center streamline และ Vorticity ที่มีขนาดมากขึ้นนั้น จะอยู่ใกล้กับผนังของท่อและบริเวณลำเจ็ต • พบว่าที่บริเวณทางด้าน Upstream ของเจ็ต จะสังเกตเห็น Vorticity ของ Cross flow fluid นั้นค่อนข้างจะสม่ำเสมอ และ Laminar-boundary layer • ที่บริเวณ Downstream ($0 \leq \frac{x}{d} < 6$) จะปรากฏบริเวณที่มีค่าของ Low Vorticity

		<p>ความเร่งคงที่ (Pressure driven) และสภาวะสุดท้ายจะถูกกำหนดให้มีค่าของความเร็วคงที่ (Momentum driven) และใช้ Pressure เป็นพื้นฐานในการก่อตัวของ CVP</p>	<ul style="list-style-type: none"> การศึกษาส่วนที่ 2 $v = v_j$ $u, w = 0$ $Re = 1,000, 10,000 \text{ และ } 100,000$	<p>การศึกษาส่วนที่ 2</p> <p>เริ่มต้นเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตนั้นจะเป็นเส้นโค้ง ในขณะที่สุดท้ายนั้นจะเปลี่ยนเป็นเส้นตรงซึ่งอธิบายได้ว่าที่สภาวะเริ่มต้นนั้นเจ็ตจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่และในสภาวะสุดท้ายนั้นเจ็ตจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่</p> <ul style="list-style-type: none"> CVP นั้นจะเกิดจาก Vorticity ใน เจ็ต Shear layer และแนะนำว่า ท่อเจ็ตนั้นไม่มีความจำเป็นต่อการก่อตัวของ CVP
15	Muppidi and Mahesh (2005b)	<ul style="list-style-type: none"> การศึกษาผลของรูปร่างความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออกและความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสมขวางต่อเส้นทางการเดินของเจ็ต ศึกษาด้วย DNS (Directional numerical simulation) 	<ul style="list-style-type: none"> $r = 1.52$ และ 5.7 รูปร่างความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออกเป็น Parabolic และ Mean Turbulent $\delta_{80\%} = 0.44d, 1.32d$ และ $6.4d$ 	<ul style="list-style-type: none"> ได้เสนอพารามิเตอร์ตัวใหม่ (h) ในการ Scale เส้นทางการเดินของเจ็ต ซึ่งนำผลของความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสมขวางและรูปร่างความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออกมาพิจารณาประกอบด้วย พบว่าเส้นทางการเดินที่ Scale ด้วยพารามิเตอร์ตัวใหม่มีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันที่ตีขึ้นเมื่อ Scale ด้วย rd หรือ r^2d

16	Chongsiripinyo <i>et al.</i> (2008)	<ul style="list-style-type: none"> • ศึกษา Mixing Structure ในบริเวณ Near field • ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณการผสม (Mixing) ของเจ็ด โดยอาศัยกระบวนการ Product formation • ใช้เทคนิคผลรวมของ Combination of smoke fluid condensation , Mie scattering และ Laser-sheet visualization techniques 	<ul style="list-style-type: none"> • $r = 4$ • $Re_j = 14,000$ • $Re_{cf} = 5,400$ 	<ul style="list-style-type: none"> • พบว่ามี Mixing Structure ในบริเวณ Near field 3 ลักษณะประกอบด้วย <ol style="list-style-type: none"> 1) Cascading azimuthal Kelvin-Helmholtz (K-H) 2) Leeward vortical roll ups (LVR) 3) windward vortical roll ups (WVR) • บริเวณที่ใกล้ Near field มากๆ พบว่าโครงสร้างการผสมจะมีลักษณะ Concentric cylinder ซึ่งเป็นผลมาจาก Cascading azimuthal Kelvin-Helmholtz (K-H) เมื่อเจ็ดพัฒนาต่อไป พบว่าโครงสร้างการผสมจะมีลักษณะ Cascading ellipsoidal ซึ่งเป็นผลมาจาก Leeward vortical roll ups (LVR) และ windward vortical roll ups (WVR)
----	-------------------------------------	--	--	--

17	Watakulsin <i>et al.</i> (2010)	<ul style="list-style-type: none"> • ศึกษาผลของ r ต่อ Mixing Structure ของเจ็ตในกระแสมขวาง • ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณการผสม (Mixing) ของเจ็ต โดยอาศัยกระบวนการ Product formation • ใช้เทคนิคผลรวมของ Combination of smoke fluid condensation , Mie scattering และ Laser-sheet visualization techniques 	<ul style="list-style-type: none"> • $r = 4, 2$ และ 7 • $Re_j = 21,000$ • $Re_{cf} = 14,000, 7,000$ และ 4,000 	<ul style="list-style-type: none"> • สำหรับกรณี $r = 2$ เมื่อพิจารณาจาก Instantaneous mean พบว่าโครงสร้างของเจ็ตรอบๆกับ Mixing core จะเชื่อมต่อกันด้วย Leewardly-connected structure ในขณะที่ $r = 7$ โครงสร้างของเจ็ตรอบๆกับ Mixing core จะเชื่อมต่อกันด้วย Windwardly-connected structure • สำหรับกรณี $r = 4$ พบว่าการเชื่อมระหว่างโครงสร้างของเจ็ตรอบๆกับ Mixing core ในช่วงต้นจะเหมือนกับกรณี $r = 7$ แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไป จะพบว่าการเชื่อมระหว่างโครงสร้างของเจ็ตรอบๆกับ Mixing core จะเหมือนกรณี $r = 2$ • จากการศึกษาสรุปได้ว่ากรณี r ต่ำๆ การพัฒนาตัวของ Lateral skewed mixing layers จะมีอิทธิพลต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวาง ในขณะที่ r สูงๆ Windward jet shear layer จะมีอิทธิพลต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวาง
----	---------------------------------	--	---	---

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
1	Zaman and Foss (1997)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของการติด Vortex generators แบบ Tab รูปสามเหลี่ยมซึ่งฐานติดอยู่กับขอบปากเจ็ต มีมุมยอดเท่ากับ 90° ซึ่งจะติดอยู่บนขอบปากเจ็ตรูปวงกลม โดยปากเจ็ตอยู่ในระดับเดียวกับพื้น Test section ทำการทดลองศึกษาปริมาณความเร็ว และ Vorticity ที่หน้าตัดๆ ซึ่งตั้งฉากกับแนวแกน Streamwise ใช้ hot-wire anemometer ในการวัด 	$J = \left(\frac{\rho_j u_j}{\rho_{cf} u_{cf}} \right)^2$ = 21.1 และ 54.4	การติด Tab รูปสามเหลี่ยมด้านหน้าของปากเจ็ตส่งผลให้ Penetration depth ลดลง เนื่องจากการสันนิษฐานบริเวณด้านหน้าปากเจ็ตมีค่าความดันสถิตยสูง ประกอบกับบริเวณผนังปากเจ็ตด้านในซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ติด Tab เป็นบริเวณที่มี Pressure gradient สูงที่เรียกว่า “ Pressure hill ” อีกด้วย จึงทำให้บริเวณที่ติด Tab นี้เป็น Primary source ของ Streamwise vorticity โดย ในขณะที่การติด Tab ด้านหลังของปากเจ็ตจะไม่ค่อยส่งผลต่อ Penetration depth เนื่องจากบริเวณพื้นด้านหลังของปากเจ็ตมีความดันสถิตยต่ำ

ตารางที่ 2.2 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาผลของการติด Tab ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง

2	<p>Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลกระทบของ Tab ต่อ โครงสร้าง Mean flow ของกรณีเจ็ต ที่ไม่มีการหมุนควงในกระแสลมขวาง (JICF) และ เจ็ตที่มีการหมุนควง (SJICF) ใช้เจ็ตร้อนในการศึกษาโดยทำการ วัดการกระจายตัวของอนุภาคน้ำของ เจ็ตที่หน้าตัดตาม Downstream 	<ul style="list-style-type: none"> $Sr = \frac{w_p}{u_j}$ (Swirl ratio) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.8 $r = 4$ $Re_j = 15,000$ $Re_{cf} = 4,400$ $\frac{\rho_j}{\rho_{cf}} = 0.86$ $Fr = \left[\frac{(\rho_{cf} - \rho_j)gd}{\rho_j u_j^2} \right]^{\frac{1}{2}}$ $= 0.02$ 	<p>กรณีเจ็ตไม่หมุนควง</p> <p>ซึ่งติด Tab ที่ตำแหน่งต่างๆ 8 ตำแหน่งนั้น สามารถสรุปได้ข้อสังเกต 5 ประเด็นดังนี้ 1)กรณี ติด Tab ที่ Sr0-W และ Sr0-L การกระจายตัวของอนุภาคน้ำจะมีรูปร่างคล้ายกับกรณีที่ไม่ติด Tab คือมีลักษณะเป็นรูปไตที่สมมาตร 2)กรณีติด Tab ที่กรณี Sr0-PW(SW) พบว่ามีรูปร่าง แตกต่างไปจากกรณีที่ไม่ติด Tab มีความ คล้ายคลึงกับ CVP น้อยลงมากและไม่มีความ สมมาตรมากขึ้นและผลของการติด Tab ที่ ตำแหน่งนี้มีข้อสังเกตที่สำคัญคือจะมีผลต่อโครงสร้างของเจ็ตโดยรวมเป็นอย่างมากและแบบค่อนข้างถาวร 3) กรณีติด Tab ที่ Sr0-P(S) มีรูปร่าง ขอบเจ็ตนั้นจะคล้ายรูปไตที่ไม่สมมาตรเจ็ตด้านที่ ติด Tab นั้นจะมีอนุภาคน้ำโดยรวมต่ำกว่าและ Lobe จะอยู่ต่ำกว่า Lobe ด้านที่ไม่ติด Tab ซึ่งจะมีอนุภาคน้ำโดยรวมสูงกว่าและจะอยู่สูงกว่ามี ลักษณะของโครงสร้างเป็นรูปจุลภาค</p>
---	--	---	---	---

				<p>4) กรณีติด Tab ที่ SrO-PL(SL)พบว่ารูปร่างของเจ็ดคล้ายกับกรณี SrO-P (S) แต่ขอบด้านล่างของ Lobe ด้านที่ติด Tab นั้นจะอยู่ต่ำกว่าด้านที่ไม่ติดTab 5)กรณีติด Tab ที่ ด้านข้างในทุกกรณีพบว่าจะทำให้รูปร่างของเจ็ดไม่สมมาตร Lobe ด้านที่ติด Tab จะมีอุณหภูมิโดยรวมต่ำกว่าและขอบด้านล่างจะอยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่าLobe ด้านที่ไม่ติด Tab</p> <p>กรณีเจ็ดหมุนควง</p> <p>ซึ่งติด Tab ที่ตำแหน่งต่างๆ 8 ตำแหน่งนั้นสามารถสรุปได้ข้อสังเกต 2 ประเด็นดังนี้ 1) กรณีติดTabที่ตำแหน่ง (P,PW,W,SW) พบว่ามีการพัฒนาตัวในลักษณะที่แตกต่างจากกรณีที่ไม่ติด Tab ค่อนข้างมาก</p> <p>2) กรณีติด Tab ที่ตำแหน่ง (S,SL,LและPL)พบว่าเจ็ดนั้นมีรูปร่างการกระจายตัวคล้ายกับกรณีที่ไม่ติด Tab ทั้งนี้ในกรณีที่ติด Tab ที่ตำแหน่ง S และ SL พบว่ามีรูปร่างคล้ายกันมากและทั้งสอง</p>
--	--	--	--	--

				<p>กรณียังพบลักษณะ Core ที่ลักษณะเป็นสองส่วนในบางหน้าตัดอีกด้วย</p> <ul style="list-style-type: none"> • พบว่าอุณหภูมิสูงจะอยู่ที่ตำแหน่งด้าน Suction • ในบริเวณที่มีความไวต่อโครงสร้างการไหลมากที่สุดก็คือตรงกลางระหว่างตำแหน่ง Pressure windward (PW) ไปจนถึง Windward (W) • แนะนำว่าการพัฒนาตัวของ Skewed mixing layer เป็นผลให้เกิดการก่อตัวของ CVP
--	--	--	--	--

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
1	M'closkey <i>et al.</i> (2002)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาเจ็ตในกระแสลมขวางโดยการกระตุ้นด้วยเสียงจากลำโพง ใช้ Liquid paraffin solution I สำหรับสร้างควันให้กับเจ็ต แสงสว่างสีขาวติดตั้งไว้ด้านบนหน้าตัดทดสอบด้วยกำลังไฟขนาด 500 Watt วิธีการทางภาพถ่ายด้วยกล้องถูกนำมาใช้บันทึกผลการทดลอง 	<ul style="list-style-type: none"> $r_v = 2.58$ $R_e = 1,500$ Frequency = 40 ถึง 1,640 Hz 	<ul style="list-style-type: none"> Random excitation ไม่ได้ช่วยปรับปรุงการผสม ค่า Amplitude สูงสุดของเจ็ตที่มีการตอบสนองจากการกระตุ้นด้วยความถี่ 73.5 Hz และการตอบสนองของการหมุนตัวของเจ็ตจะหยุดหลังจากที่ความถี่เกิน 100 Hz ค่าที่เหมาะสมของการพุ่งทะลุผ่านและการกระจายตัวของเจ็ตในกระแสลมขวางโดยการกระตุ้นด้วย Square wave จะอยู่ที่ Subharmonics ของค่าความถี่ธรรมชาติของ Vortex shedding ของเจ็ต

ตารางที่ 2.3 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาผลของการกระตุ้นด้วย Pulse ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง

2	Narayanan <i>et al.</i> (2003)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษา Dynamic และการควบคุม เจ็ตในกระแสมขวางด้วย Spinning valve actuator กระตุ้น ด้วยความถี่ระหว่าง 100 – 1,600 Hz ปากทางออกเจ็ตเป็นรูปวงกลม ใช้เทคนิค Mie scattering visualization ใช้กล้อง NAC เป็นกล้องที่มีความเร็วสูง (200 Frame/sec) 	<ul style="list-style-type: none"> $Re_j = 5,000$ $r = 6$ $Re_{cf} = 2,75 \times 10^4$ $\frac{\delta}{D_j} < 0.3$ $0.012 < Sr_D < 0.2$ (เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ต) 	<ul style="list-style-type: none"> การกระตุ้นที่ความถี่ต่ำ พบว่า Vortice จะเพิ่มขึ้นในขณะที่เจ็ตที่พุ่งออก และ โค้งตัวตามกระแสมขวางและกระตุ้นที่ความถี่สูงพบว่า จะช่วยให้การกระจายตัวของเจ็ตที่ปากทางออกเพิ่มสูงขึ้น พบว่าการกระตุ้นที่ความถี่ต่ำจะช่วยเพิ่มการผสมระหว่างเจ็ตกับกระแสมขวางสูงกว่าการกระตุ้นที่ความถี่สูง พบว่า Flow จะมีความถี่สูงที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของเจ็ตและ มีความถี่ต่ำที่ระยะห่างจากปากเจ็ตตามทิศทางของกระแสมขวาง กรณีที่กระตุ้นเจ็ตที่ความถี่ 650 และ 1,500 Hz นั้นจะมีการ Entrainment มากกว่าเจ็ตที่ไม่กระตุ้น
---	--------------------------------	--	--	--

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
1	Kavsoglu and Schetz (1989)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลกระทบของ Initial swirl และ High turbulence ที่มีต่อคุณลักษณะการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง ทำการทดลองโดยศึกษาการกระจายของความดันสถิตยที่พื้นผิว Test section บริเวณรอบปากเจ็ตและความเร็ว ที่ระนาบขวางตรงกลาง ที่วางตัวอยู่ตามแนว Streamwise ใช้ Yaw probe ในการวัดความเร็ว ใช้การฉีดอากาศด้านข้างในการทำให้เจ็ตเกิดการหมุนควง 	<ul style="list-style-type: none"> $r_v = 2.2, 4$ และ 8 $Sr = \frac{w_R}{u_j} = 0.4$ และ 0.58 Turbulence = 3% และ 10-16% 	<ul style="list-style-type: none"> เจ็ตที่มี High turbulence มีผลทำให้ความดันสถิตยที่พื้นผิว Test section บริเวณรอบปากเจ็ตต่ำกว่าความดันบรรยากาศ และยังลด Penetration ของ เจ็ตลงอีกด้วย เจ็ตที่มี Swirl เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันสถิตยที่พื้นผิว Test section บริเวณรอบปากเจ็ต มีความไม่สมมาตรเพิ่มขึ้น และ จะลด Penetration ของ เจ็ต ลงอีกด้วย ผลของ Swirl ดังกล่าวจะชัดเจนเมื่อเจ็ตมีอัตราส่วนความเร็วต่ำ , High turbulence และที่บริเวณใกล้ปากเจ็ต

ตารางที่ 2.4 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาผลของการกระตุ้นด้วยการหมุนควง (Swirl) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวาง

2	Yoshizako <i>et.al.</i> (1991)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลการหมุนควงที่มีต่อเจ็ตในกระแสมวลขวาง ในอุโมงค์น้ำ ทดลองหา Velocity vector และ Concentration profile ของ Swirling เจ็ต โดยใช้เทคนิค Image processing วิธีการคือ ปล่อยอนุภาคเล็กๆ เข้าไปพร้อมกับเจ็ต พร้อมกับฉายระนาบของแสงตัดลงไปตรงบริเวณที่ต้องการ แล้วทำการถ่ายรูป ความเร็วกระแสมวลขวาง, $U_{cf} = 50$ mm/s ความเร็วเจ็ต, $V_j = 200$ mm/s เส้นผ่านศูนย์กลางปากเจ็ต = 60 mm. ใช้ Guide vane ที่สามารถปรับมุมได้ ในการทำให้เกิดการหมุนควง 	<ul style="list-style-type: none"> Sw (Swirl number) = 0 , 0.34 0.76 และ 1.54 	<ul style="list-style-type: none"> เมื่อเพิ่ม Swirl number ขึ้นเจ็ตจะมีการกระจายตัวได้มากขึ้นในบริเวณใกล้ปากเจ็ตและ Penetration depth จะลดลง กระแสมวลขวางซึ่งมีลักษณะเป็น Uniform flow จะถูกเร่งเมื่อมีทิศทางสอดคล้องกับทิศทางความเร็วในแนวสัมผัสของ Swirling jet
---	--------------------------------	--	---	---

3	Niederhaus <i>et.al.</i> (1997)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของ Swirl ที่มีต่อคุณลักษณะการผสม ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณ Scalar concentration ในอุโมงค์น้ำ ใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) ใช้ใบพัดกวนเจ็ตอากาศเพื่อให้เกิดการหมุนควง 	<ul style="list-style-type: none"> $r_v = 4.9 - 11.1$ $Sn = \frac{G_\theta}{G_u R} = 0 - 0.17$ $Re_j = 1.3 \times 10^4$ 	<ul style="list-style-type: none"> ลักษณะของ CVP เปลี่ยนจากรูปร่างสมมาตรในกรณีที่ไม่มีการหมุนควงไปเป็นลักษณะที่ Vortex ด้านหนึ่งมีขนาดโตกว่าอีกด้านหนึ่ง ทำให้รูปร่างของ CVP เปลี่ยนจากรูป Kidney เป็นรูปจุดภาค เจ็ตที่มีการหมุนควงทำให้ Penetration ลดลงเล็กน้อย และไม่มีผลต่อการลดลงของ Maximum mean concentration ของเจ็ตในช่วงที่ทดลอง
4	Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001),(2001)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตที่หมุนควงแบบ Non-Zero circulation ทำการทดลองโดยศึกษาคุณลักษณะของการผสมและการพัฒนาตัวของเจ็ต ด้วยการวัดอุณหภูมิเฉพาะหน้าตัด ใช้ Thermocouple ในการวัด 	<ul style="list-style-type: none"> $r = 4.35$ $S_r = \frac{u_\theta}{\bar{u}_j} = 0, 0.17, 0.52$ และ 0.82 $Re_j = 12,000$ $Re_{cf} = 3,400$ 	<ul style="list-style-type: none"> การหมุนควงทำให้ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิบนหน้าตัดไม่สมมาตร อาณาบริเวณที่อุณหภูมิสูงและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่วนใหญ่อยู่ทางด้าน Suction Center of mass temperature trajectory จะอยู่ต่ำกว่า Center plan temperature trajectory เสมอที่ความเร็วประสิทธิผลเท่ากัน

5	Limdumrongtum <i>at el.</i> (2007),(2009)	<ul style="list-style-type: none"> • ศึกษา Mixing Structure ในบริเวณ Near field • ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณการผสม (Mixing) ของเจ็ต โดยอาศัยกระบวนการ Product formation • ใช้เทคนิคผลรวมของ Combination of smoke fluid condensation , Mie scattering และ Laser-sheet visualization techniques 	<ul style="list-style-type: none"> • Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.8 • $r = 4$ 	<ul style="list-style-type: none"> • การหมุนควงจะไปพัฒนาและส่งเสริม Cascading azimuthal K-H mixing structures บนด้าน Suction ขณะที่จะไปยับยั้งบนด้าน Pressures และที่บริเวณ $y/rd > 0.2$ จะไปพัฒนาและส่งเสริม Vortical roll-ups บนด้าน Pressures ขณะที่จะไปยับยั้งบนด้าน Suction • การพัฒนาตัวของ Vortical roll-ups บนด้าน Pressures เกิดจากพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่องจาก Cascading azimuthal K-H mixing structures จาก Upstream ในขณะที่ Vortical roll-ups บนด้าน Suction จะเกิดจากพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่องจาก Lee side cusp
---	---	--	---	---

6	Yingjaroen <i>et al.</i> (2006)	<ul style="list-style-type: none"> • วิวัฒนาการของเจ็ตในกระแสลมขวาง กรณีเจ็ตไม่หมุนควง (JICF) และกรณีเจ็ตหมุนควง (SJICF) ที่ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์ • ใช้ปฏิบัติการ กรด-เบส แสดงถึง Reactive mixing และขีดสีแสดงถึง Passive mixing • ใช้ Contours of line-of-sight integrated mean images แทนปริมาณเชิงคุณภาพของการผสม 	<ul style="list-style-type: none"> • Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.8 • $r = 4$ 	<ul style="list-style-type: none"> • กรณีเจ็ตไม่หมุนควง พบว่าบริเวณตำแหน่ง $x / rd < 0.5$ Passive outer region mixing จะมีการผสมบริเวณนี้มาก และเมื่อตำแหน่ง x/rd มากขึ้น พบว่าการผสมบริเวณ Passive outer region mixing จะมีการผสมน้อยลง ในขณะที่ Central-region mixing จะมีอิทธิพลต่อการผสมมากขึ้น และ Reactive inner region mixing จะมีการผสมเพียงเล็กน้อยในบริเวณนี้ • กรณีเจ็ตหมุนควง พบว่าบริเวณ Outer และ Inner regions จะมีการผสมบริเวณนี้มาก ในขณะที่ Central-region mixing ไม่มีนัยสำคัญต่อการผสม
---	---------------------------------	---	---	---

7	Denev <i>et al.</i> (2005), (2009)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาโครงสร้างและการผสมของเจ็ตหมุนควงในกระแสมขวง ใช้วิธี LES ศึกษาสนามการไหล 	<ul style="list-style-type: none"> Swirl number (s) = $\frac{\int_0^{D/2} \rho U_a U_t r^2 dr}{\frac{D}{2} \int_0^{D/2} \rho U_a^2 r dr} = 0-0.6$ $Re = 2,100$ $r_v = 3.3$ 	<ul style="list-style-type: none"> การหมุนควงทำให้การไหลและสนามความเข้มจะบิดเบี้ยวไป จากการศึกษาพบว่าการหมุนมีผลต่อการผสมเพียงเล็กน้อย
---	------------------------------------	---	--	--

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
1	Konsri(2007), Konsri <i>et al.</i> (2009)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม ใช้ Single hot filme anemometer เป็นเครื่องมือวัดความเร็ว กำหนดขอบเจ็ตที่ Turbulent intensity 12 % 	<ul style="list-style-type: none"> $r = 3.87$ $Re_{cf} = 5,900$ $Re_j = 23,500$ 	<ul style="list-style-type: none"> การฉีดเจ็ตควบคุมบริเวณด้านหน้า มีผลทำให้เส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตบนระนาบสมมาตรต่ำลงและต่ำสุดที่ตำแหน่งการฉีด ± 15 (กรณี I15) ในขณะที่การฉีดเจ็ตควบคุมบริเวณด้านข้างหรือด้านหลังจะทำให้เส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตสูงขึ้น พบว่ากรณี JICF (ไม่ฉีดเจ็ตควบคุม) และ กรณี I15 การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ต ที่ตำแหน่ง 4rd ทั้งสองกรณีมีการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตที่ดิ่งกระแสลมขวางเข้ามาผสมมีค่าน้อยลง (เจ็ตคายอากาศออก) ซึ่งไม่น่าจะเกิดขึ้นสำหรับการไหลในลักษณะนี้ เป็นไปได้ว่าการกำหนดขอบเจ็ตด้วย Turbulent intensity 12 % อาจไม่เหมาะสม

ตารางที่ 2.5 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาผลของการกระตุ้นด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimutal control jet) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง

2	Bunyajitradulya (2011)	<ul style="list-style-type: none"> • ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวาง • ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม • ใช้ Single hot filme anemometer เป็นเครื่องมือวัดความเร็ว • กำหนดขอบเจ็ตที่ Turbulent intensity 6 % 	<ul style="list-style-type: none"> • $r = 3.87$ • $Re_{cf} = 5,900$ • $Re_j = 23,500$ 	<ul style="list-style-type: none"> • ผลของเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างและเส้นทางเดินของเจ็ต ได้ผลเช่นเดียวกับ Konsri (2007) และ Konsri <i>et al.</i> (2009) • พบว่าการกำหนดขอบเจ็ตที่ Turbulent intensity 6 % ทั้งกรณี JICF และ I15 เจ็ตไม่มีการคายอากาศออกตลอดแนวของการวัด $0.25rd - 4rd$ • การฉีดเจ็ตควบคุมกรณี I15 มีผลทำให้การเหนี่ยวนำการผสมดีขึ้นประมาณ 10 % ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ และ 20 % ที่ตำแหน่ง $x/rd = 4$
---	------------------------	---	---	---

ตำแหน่ง (x, z)	ความหนาของชั้นขอบเขต (mm)
$-1rd, -0.5rd$	7.2
$-1rd, 0rd$	7.5
$-1rd, 0.5rd$	7.6

ตารางที่ 4.1 ความหนาของชั้น Boundary layer ของแต่ละตามแนว Spanwise (z)

x/rd	การศึกษเบื้องต้น	การศึกษละเอียด
	Spatial resolution	Spatial resolution
0.5	1.09 mm \times 1.09 mm	1.07 mm \times 1.07 mm
0.75	ไม่ได้ทดลอง	1.30 mm \times 1.30 mm
1	ไม่ได้ทดลอง	1.34 mm \times 1.34 mm
1.5	1.27 mm \times 1.27 mm	1.35 mm \times 1.35 mm

ตารางที่ 4.2 Spatial resolution การวัดด้วย SPIV

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์
ความเร็วเจ็ตเฉลี่ย (V_j) [m/s]	16.9 ± 0.8
ความเร็วของกระแสลมขวาง (V_{cf}) [m/s]	4.3 ± 0.2
อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r)	3.9 ± 0.3
Reynolds number ของเจ็ต	23,000
Reynolds number ของกระแสลมขวาง	5,900
อัตราส่วนเชิงมวลเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m , %)	2.0

ตารางที่ 4.3 สรุปพารามิเตอร์ในการทดลอง

		$x/rd = 0.5$	$x/rd = 1.5$
JICF	E	2.93	5.36
I15	E	2.89	5.56
	η	0.99 ± 0.03	1.04 ± 0.04
I45	E	2.71	5.22
	η	0.92 ± 0.03	0.97 ± 0.04
I90	E	2.97	5.48
	η	1.01 ± 0.03	1.03 ± 0.04
I135	E	3.20	5.49
	η	1.09 ± 0.04	1.02 ± 0.04

ตารางที่ 5.1 ค่าการเหนี่ยวนำการผสมการทดลองของการศึกษาเบื้องต้น

x/rd	JICF	I15		I135	
	E	E	η	E	η
0.5	2.88	2.90	1.01 ± 0.03	3.08	1.07 ± 0.04
0.75	4.00	4.00	1.00 ± 0.04	4.52	1.13 ± 0.04
1	4.80	5.05	1.05 ± 0.04	5.06	1.05 ± 0.04
1.5	5.39	5.67	1.05 ± 0.04	5.72	1.06 ± 0.04

ตารางที่ 9.1 ค่าการเหนี่ยวนำการผสมการทดลองของการศึกษาละเอียด

x/rd	JICF		I15		I135	
	$+\Gamma/V_{cf}d$	$-\Gamma/V_{cf}d$	$+\Gamma/V_{cf}d$	$-\Gamma/V_{cf}d$	$+\Gamma/V_{cf}d$	$-\Gamma/V_{cf}d$
0.5	3.88	-3.88	4.83	-4.83	3.82	-3.82
0.75	3.49	-3.49	4.61	-4.61	3.55	-3.55
1	2.93	-2.93	4.30	-4.30	2.83	-2.83
1.5	2.40	-2.40	3.12	-3.12	2.25	-2.25

ตารางที่ 9.2 ค่า Circulation ไร้มิติของการทดลอง

ประมวลรูปภาพ

ก



<http://www.earthreport.com/site/majority-of-co2-comes-from-10-countries/smokestack/>

ข



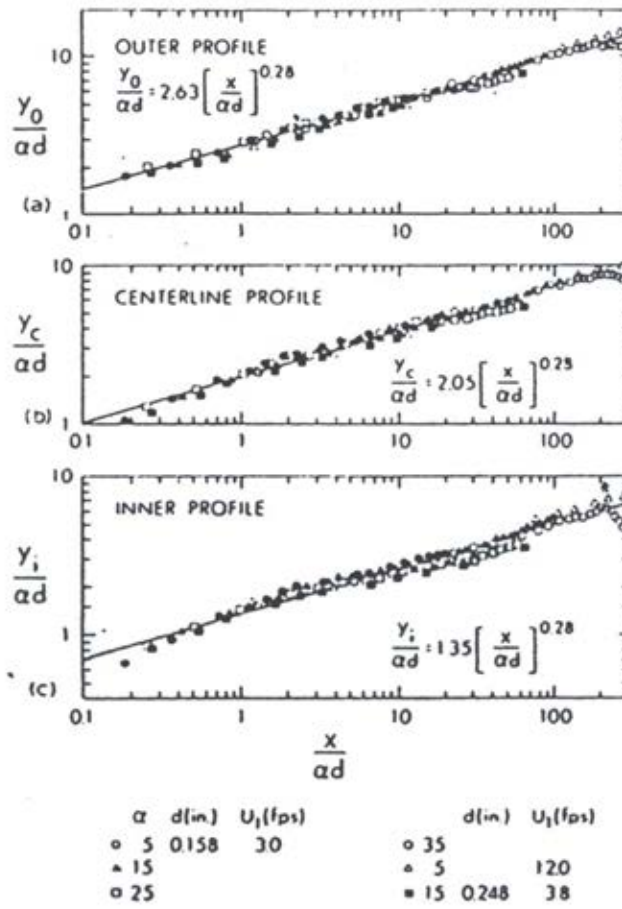
<http://www.yxlon.com/Resources/Applications/>

ค

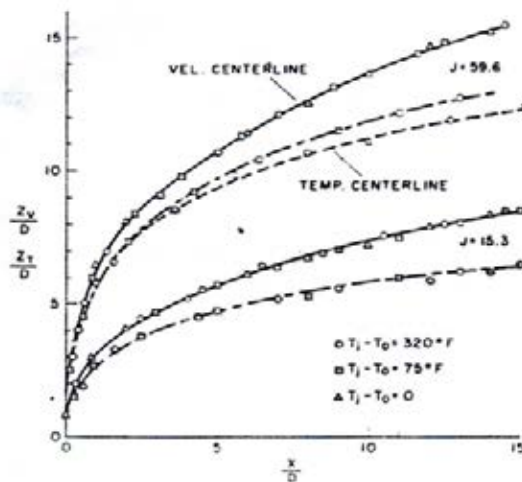


<http://www.hightech-edge.com/wp-content/uploads/av-8b-harrier-ii.jpg/>

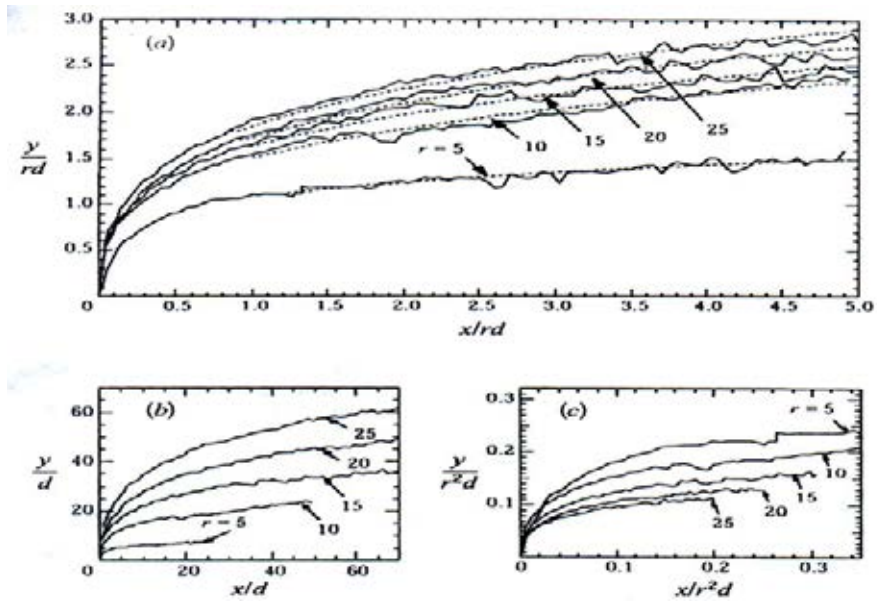
- รูปที่ 1.1 การประยุกต์ใช้งานเจ็ตในกระแสมขวาง
- ก) การไหลแบบเจ็ตในกระแสมขวางที่เกิดจากการระบายอากาศเสียจากปล่องควัน
 - ข) การระบายความร้อนบริเวณผิวของใบพัดของแก๊สเทอร์ไบน์
 - ค) การบังคับควบคุมอากาศยานขึ้นลงในแนวตั้ง V/STOL (Vertical Short Take Off and Landing)



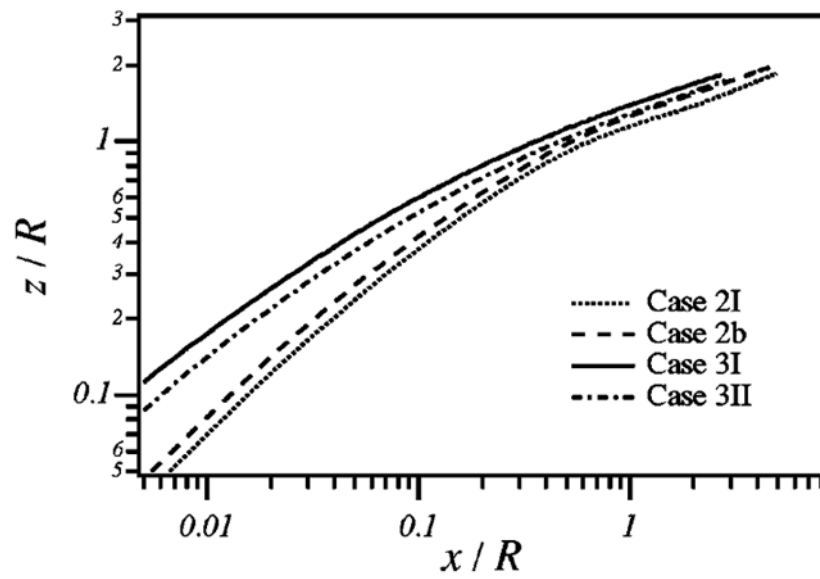
รูปที่ 2.1 เส้นทางเดินของความเร็วจ (Pratte and Baines, 1967)



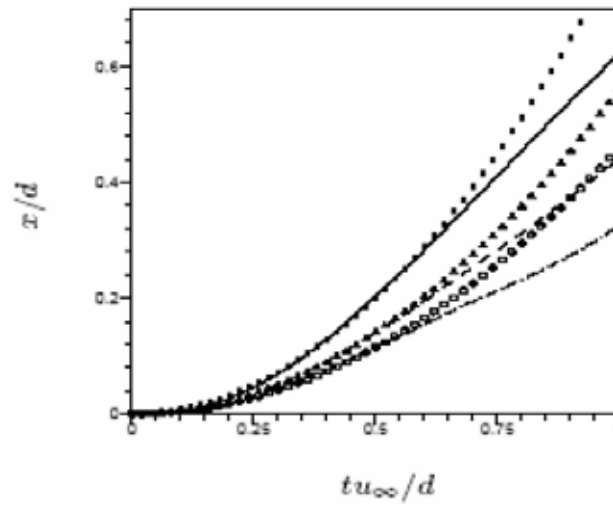
รูปที่ 2.2 เส้นทางเดินของความเร็วจและอุณหภูมิ (Kamotani and Greber, 1972)



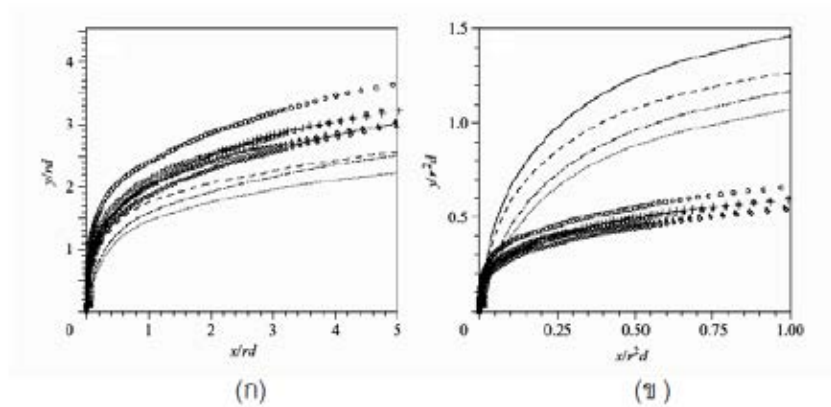
รูปที่ 2.3 เส้นทางเดินของ Passive scalar (Smith and Mungal, 1998)



รูปที่ 2.4 เส้นทางเดินของ Steamline (Yuan and Street, 1998)



รูปที่ 2.5 Quadratics curve fit ของแต่ละเส้นทางเดิน (Muppidi and Mahesh, 2005a)

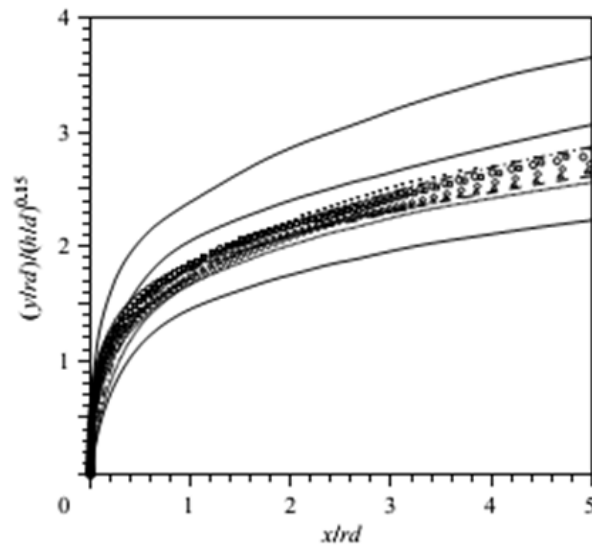


—, I; ---, II; - - - - , III; ·····, IV; □, V; △, VI; +, VII; ○, VIII; ○, IX.

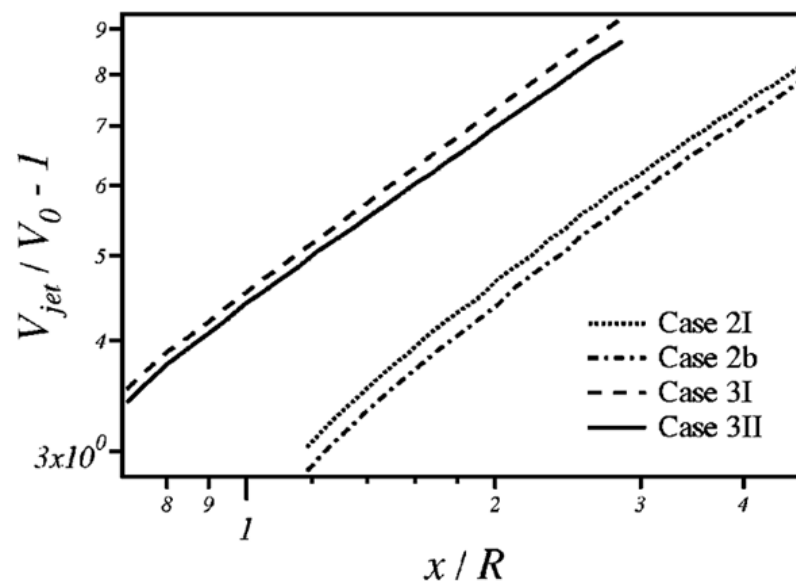
Case	Velocity ratio r	Jet inlet profile	Crossflow boundary layer $\delta_{99\%}$
I	1.52	Parabolic	1.32d
II	1.52	Mean-turbulent	1.32d
III	1.52	Parabolic	0.44d
IV	1.52	Mean-turbulent	0.44d
V	5.7	Parabolic	1.32d
VI	5.7	Mean-turbulent	1.32d
VII	5.7	Parabolic	0.44d
VIII	5.7	Mean-turbulent	0.44d
IX	5.7	parabolic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

TABLE I. Conditions for the various simulations performed.

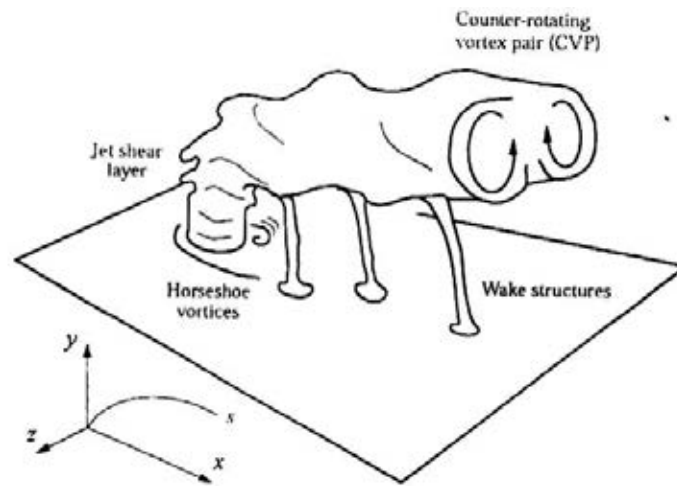
รูปที่ 2.6 ผลการเปรียบเทียบเส้นทางเดินเสกกลด้วย โดย (ก) rd และ (ข) $r^2 d$ (Muppidi and Mahesh, 2005b)



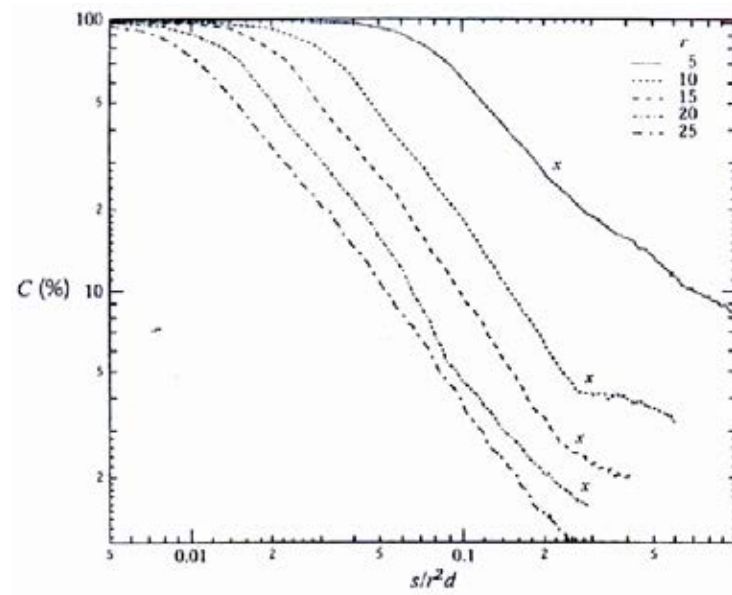
รูปที่ 2.7 เส้นทางเดินเสกกลด้วย h (Muppidi and Mahesh, 2005b)



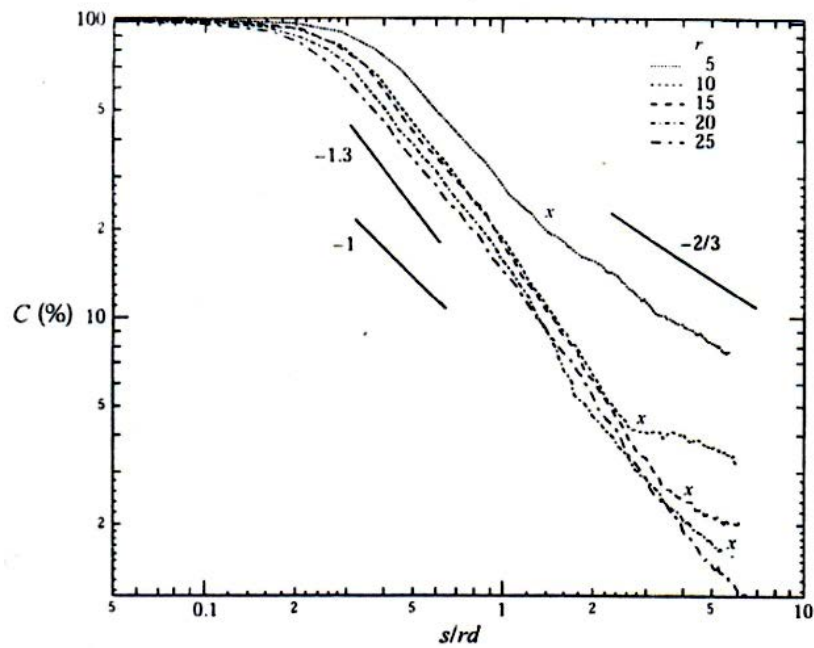
รูปที่ 2.8 การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ต (Yuan and Street, 1998)



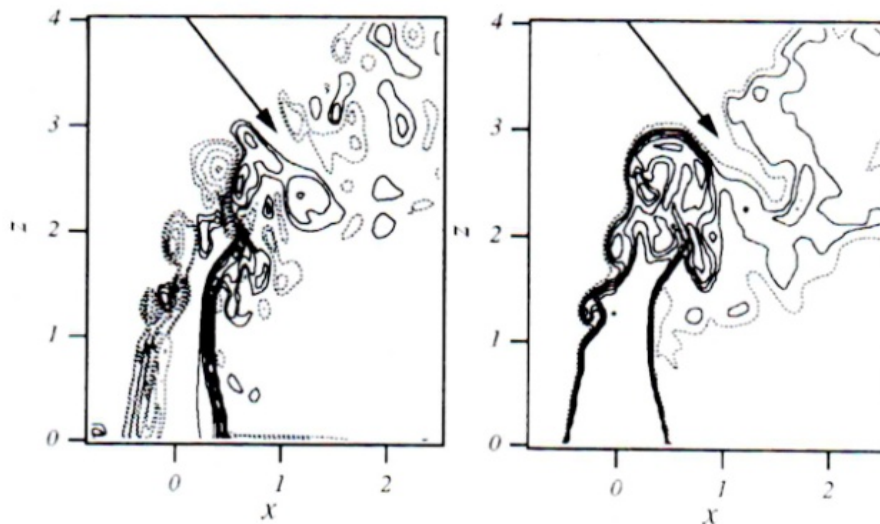
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Fric and Rosh, 1994)



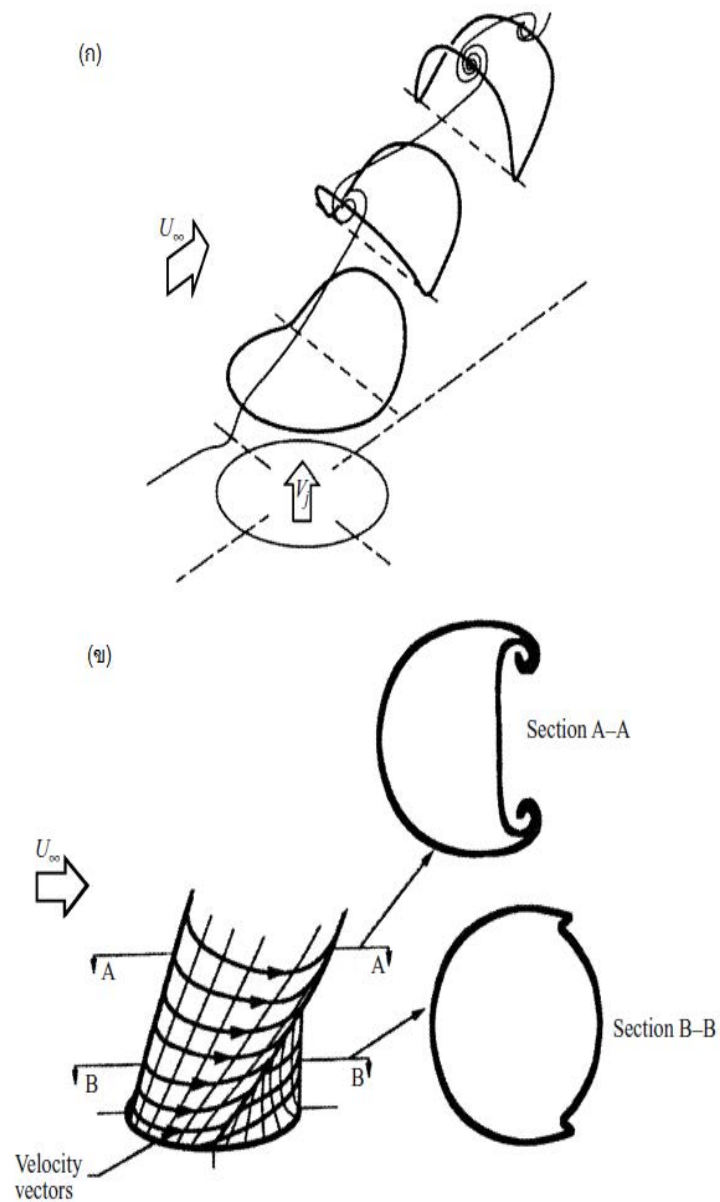
รูปที่ 2.10 การลดลงของ C % ของ JICF และ Free เจ็ต บน Near Field บน $r^2 d$ (Smith and Mungal, 1998)



รูปที่ 2.11 การลดลงของ $C\%$ ของ JICF และ Free เจ็ต บน Near Field บน rd (Smith and Mungal, 1998)



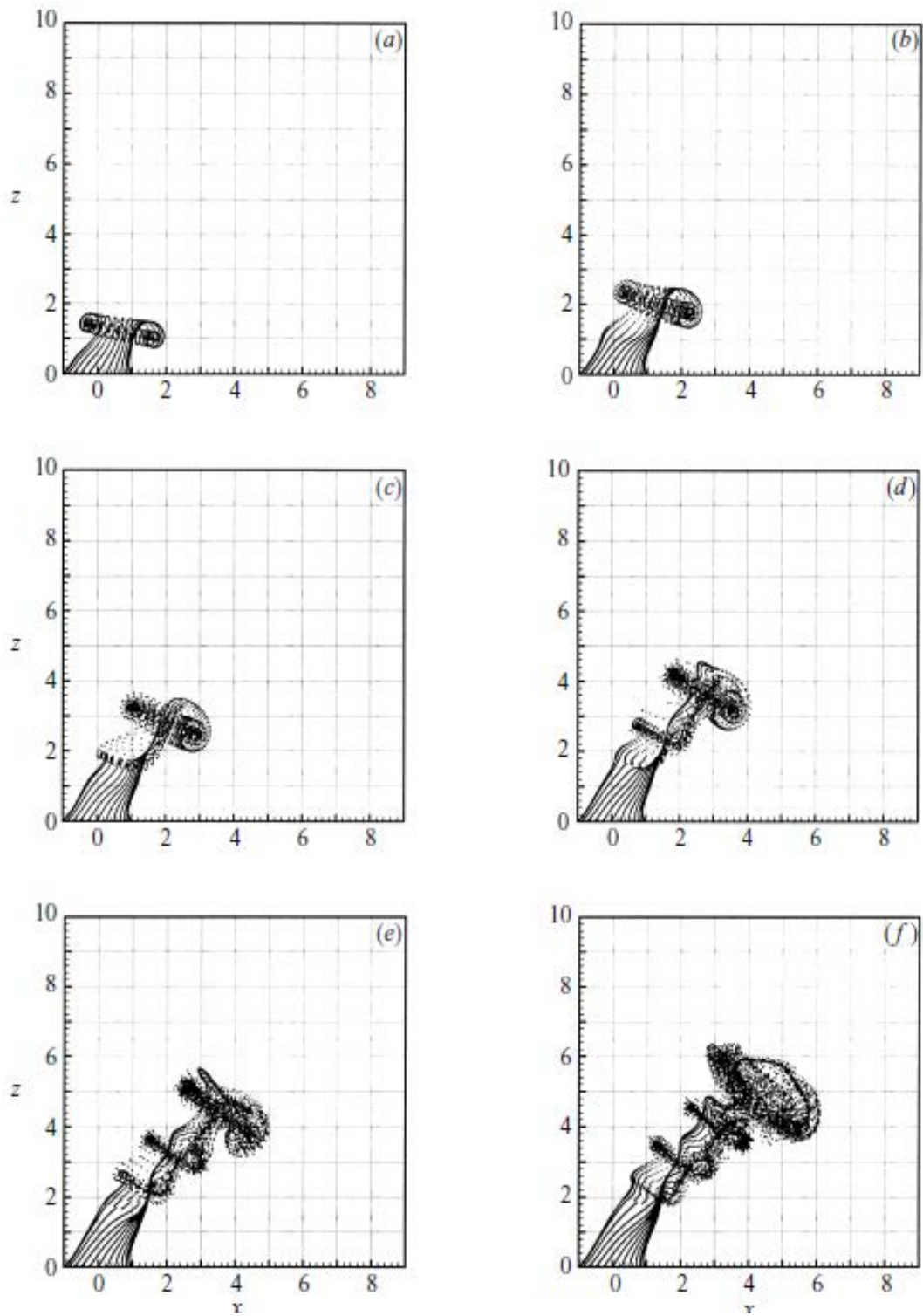
รูปที่ 2.12 Contour ของ Instantaneous spanwise vorticity (ซ้าย) และ Contour ของ Scalar concentration (ขวา) บน Centerplane (Yuan and Street, 1998)



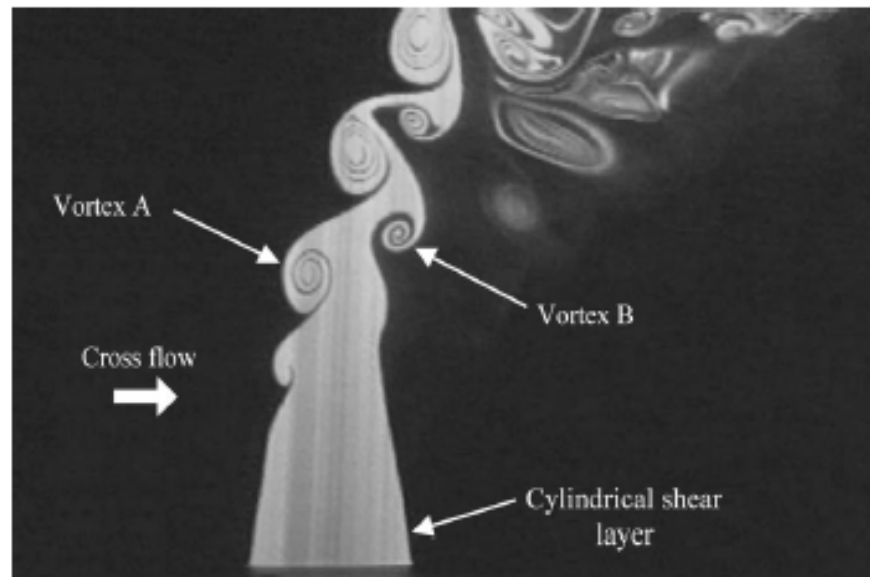
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของการเกิด CVP (Cortelezzi and Karagozian, 2001)

ก) Isometric ของเจ็ต Shear layer vortex ring

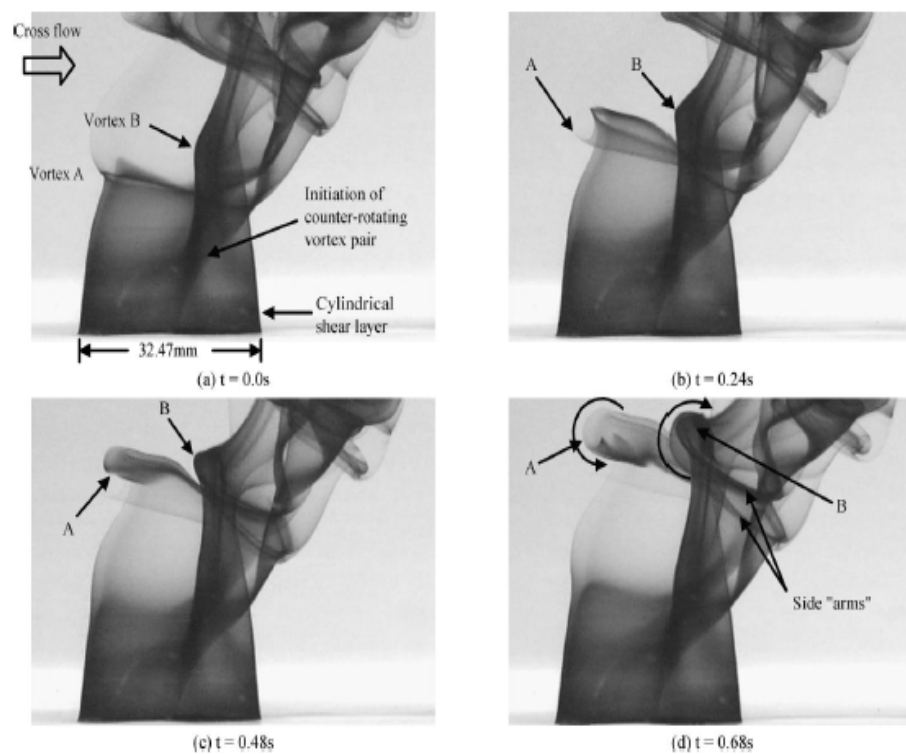
ข) Schematic diagram ของการเปลี่ยนตำแหน่งของ Shear layer



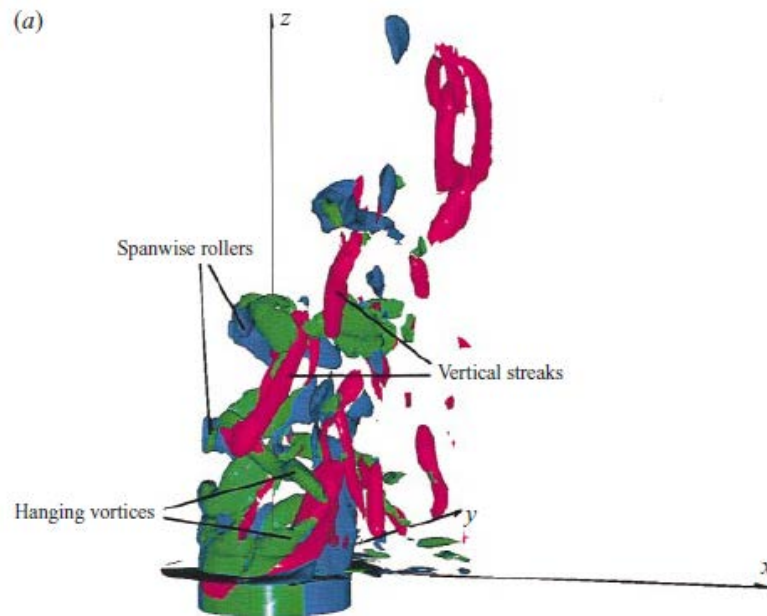
รูปที่ 2.14 การพัฒนาตัวของเจ็ตในกระแสมขวาง (Cortelezzi and Karagozian, 2001)



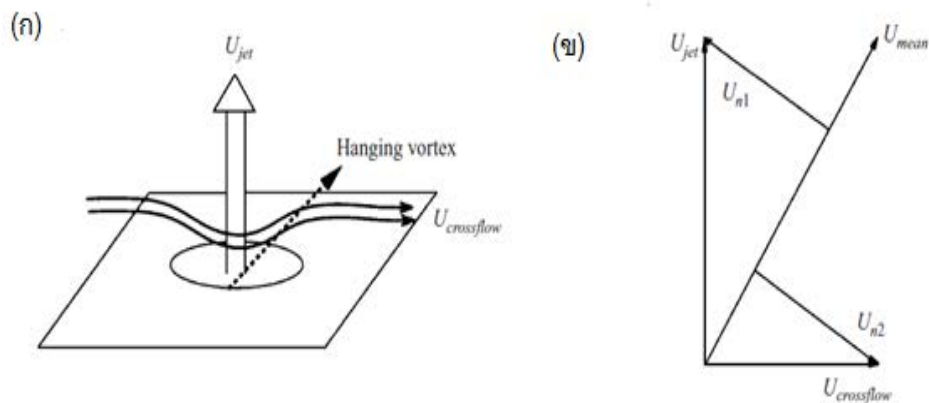
รูปที่ 2.15 Vortices structure ของเจ็ตในกระแสลมขวางบนระนาบสมมาตร (Lim *et.al.*, 2001)



รูปที่ 2.16 การพับตัวของ cylindrical shear layer (Lim *et.al.*, 2001)



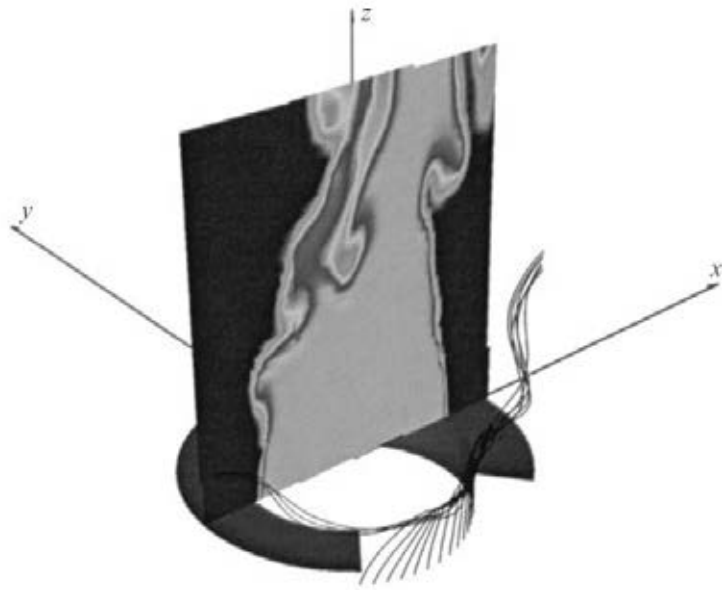
รูปที่ 2.17 โครงสร้างบริเวณ Near field ของเจ็ตในกระแสลมขวาง ซึ่งแสดงเป็น Isosurface ของ Vorticity (Yuan *et.al.*, 1999)



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของ Hanging vortices (Yuan *et.al.*, 1999)

ก) รูป Schematic ของ Hanging vortices

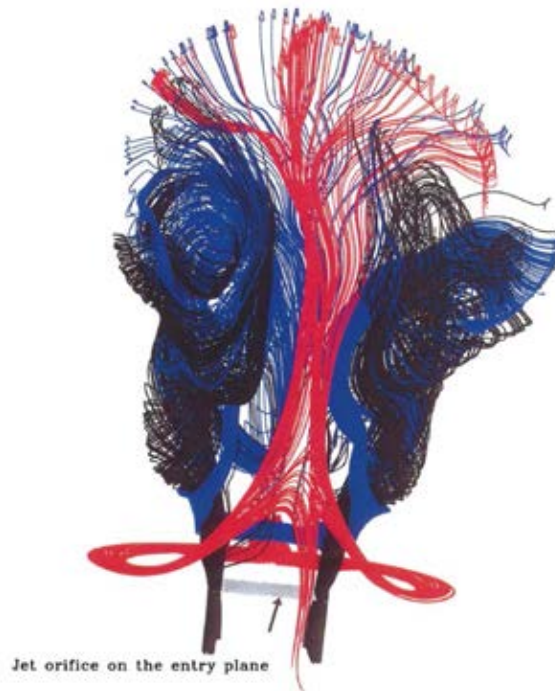
ข) Vector ความเร็วซึ่งแสดงกลไกของการเกิด Hanging vortices



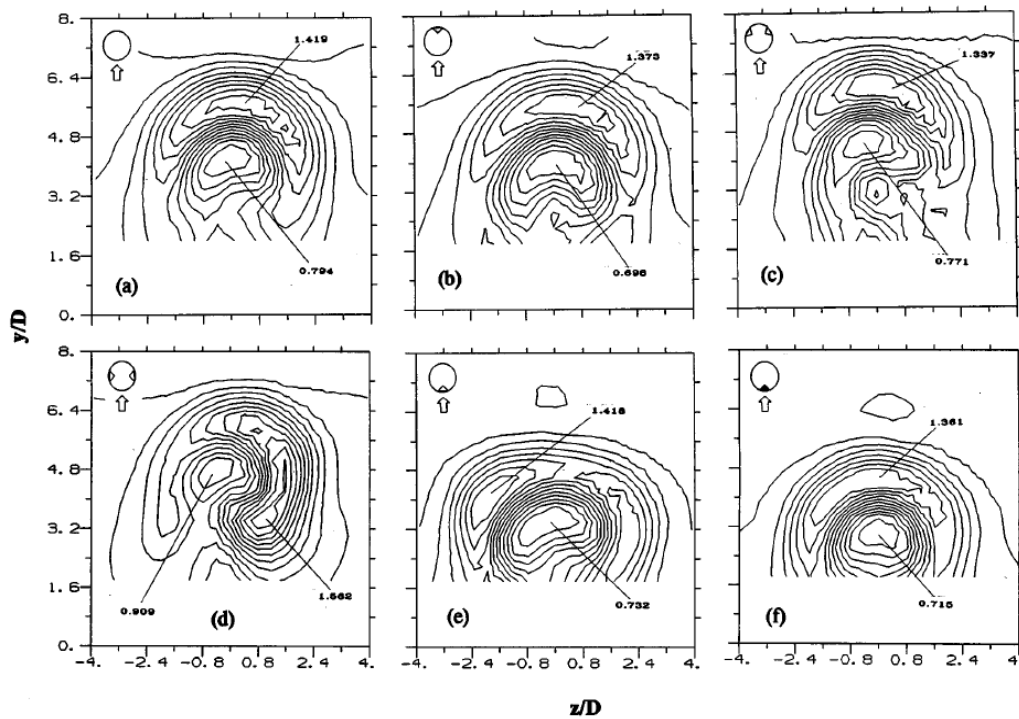
รูปที่ 2.19 Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวขึ้นระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางที่บริเวณขอบด้านข้างของเจ็ต (Yuan *et.al.*, 1999)



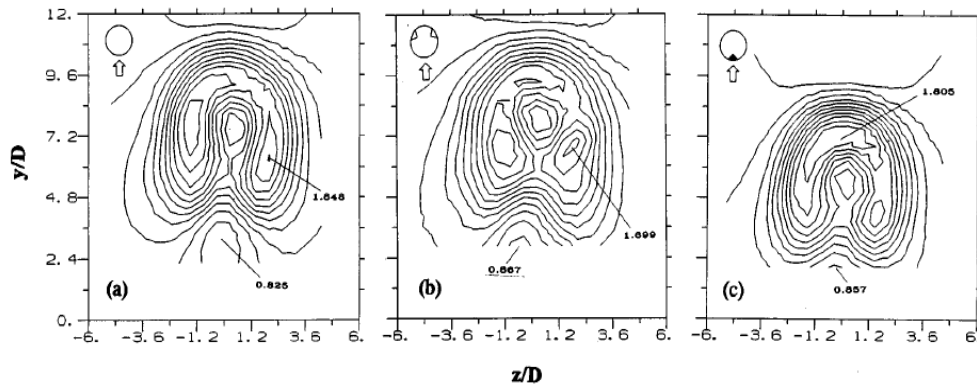
รูปที่ 2.20 วิวัฒนาการของ Streamlines ในการก่อตัวของ Kelvin-Helmholtz roller (Sau *et.al.*, 2004)



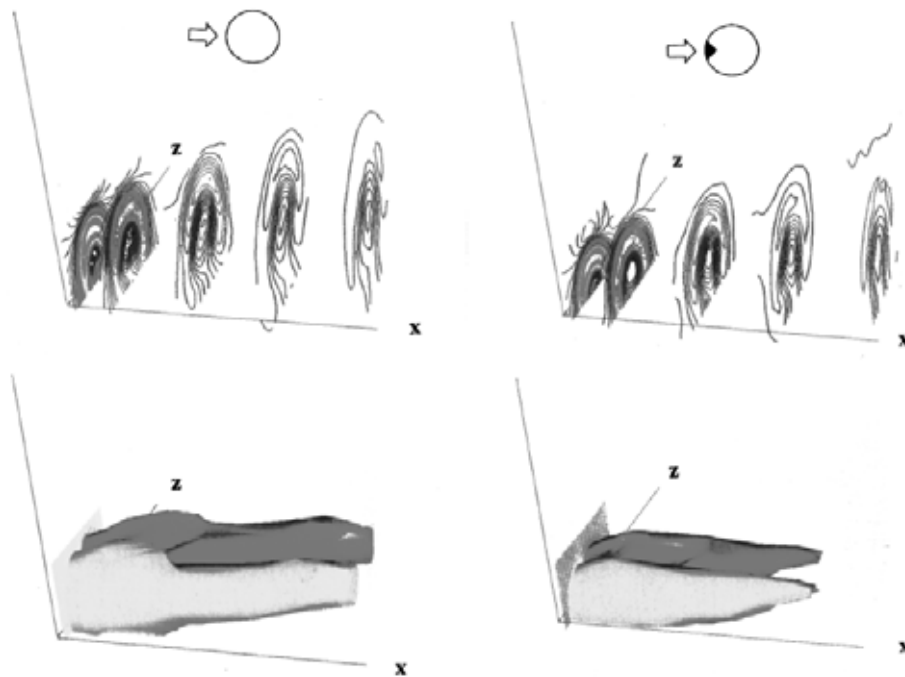
รูปที่ 2.21 วิวัฒนาการของ Vortices structure (Sau *et.al.*, 2004)



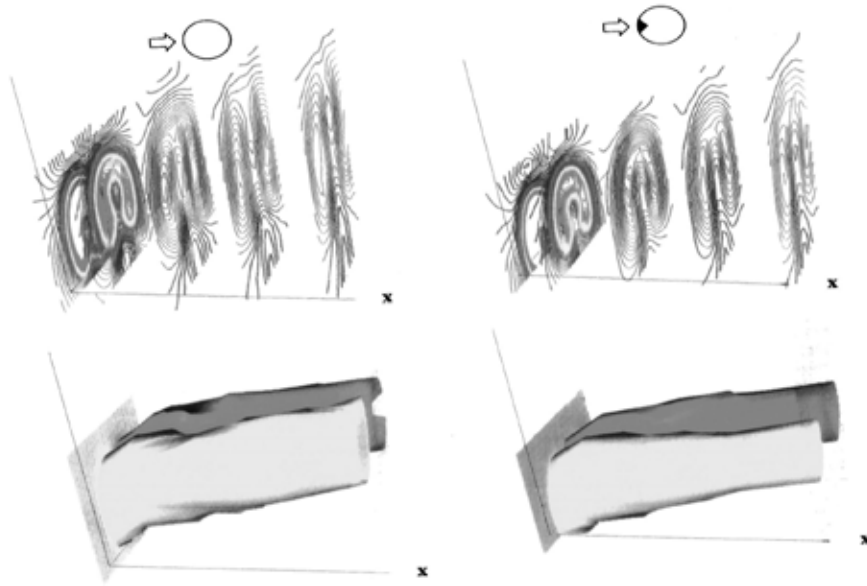
รูปที่ 2.22 Contour ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบตั้งฉากสำหรับ $J = 21$ (Zaman and Fross, 1997)



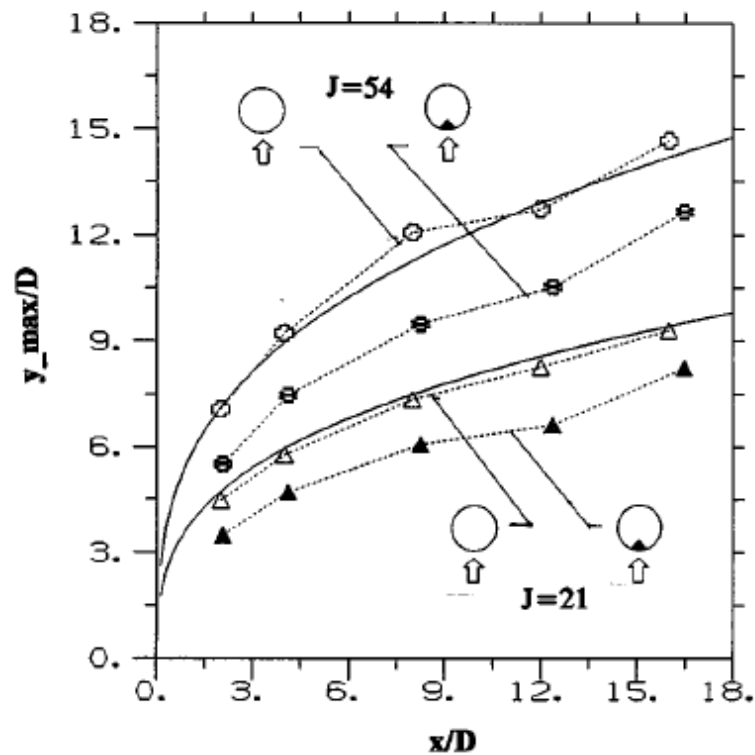
รูปที่ 2.23 Contour ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบตั้งฉากสำหรับ $J = 54$
(Zaman and Fross, 1997)



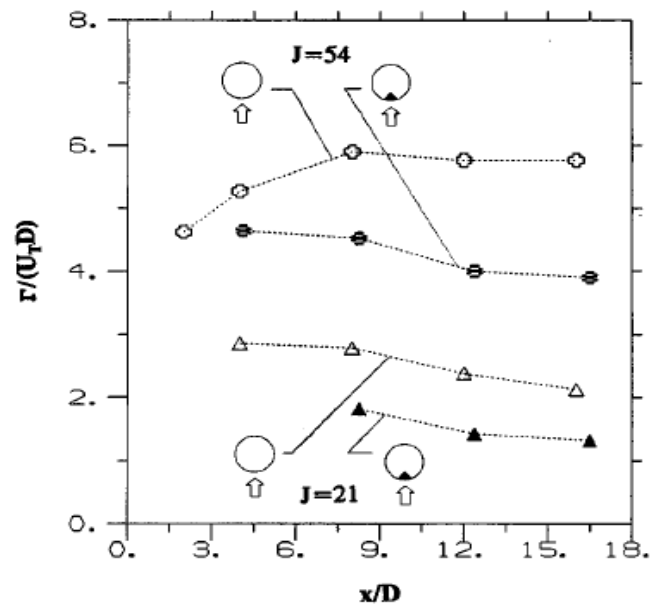
รูปที่ 2.24 ความเร็วเฉลี่ยบนหน้าตัดตั้งฉากและ Streamwise vorticity isosurface
สำหรับ $J=21$ (Zaman and Fross, 1997)



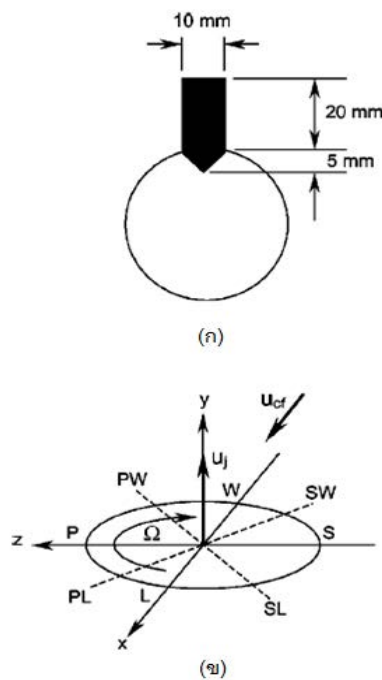
รูปที่ 2.25 ความเร็วเฉลี่ยบนหน้าตัดตั้งฉากและ Streamwise vorticity isosurface สำหรับ $J=54$ (Zaman and Fross, 1997)



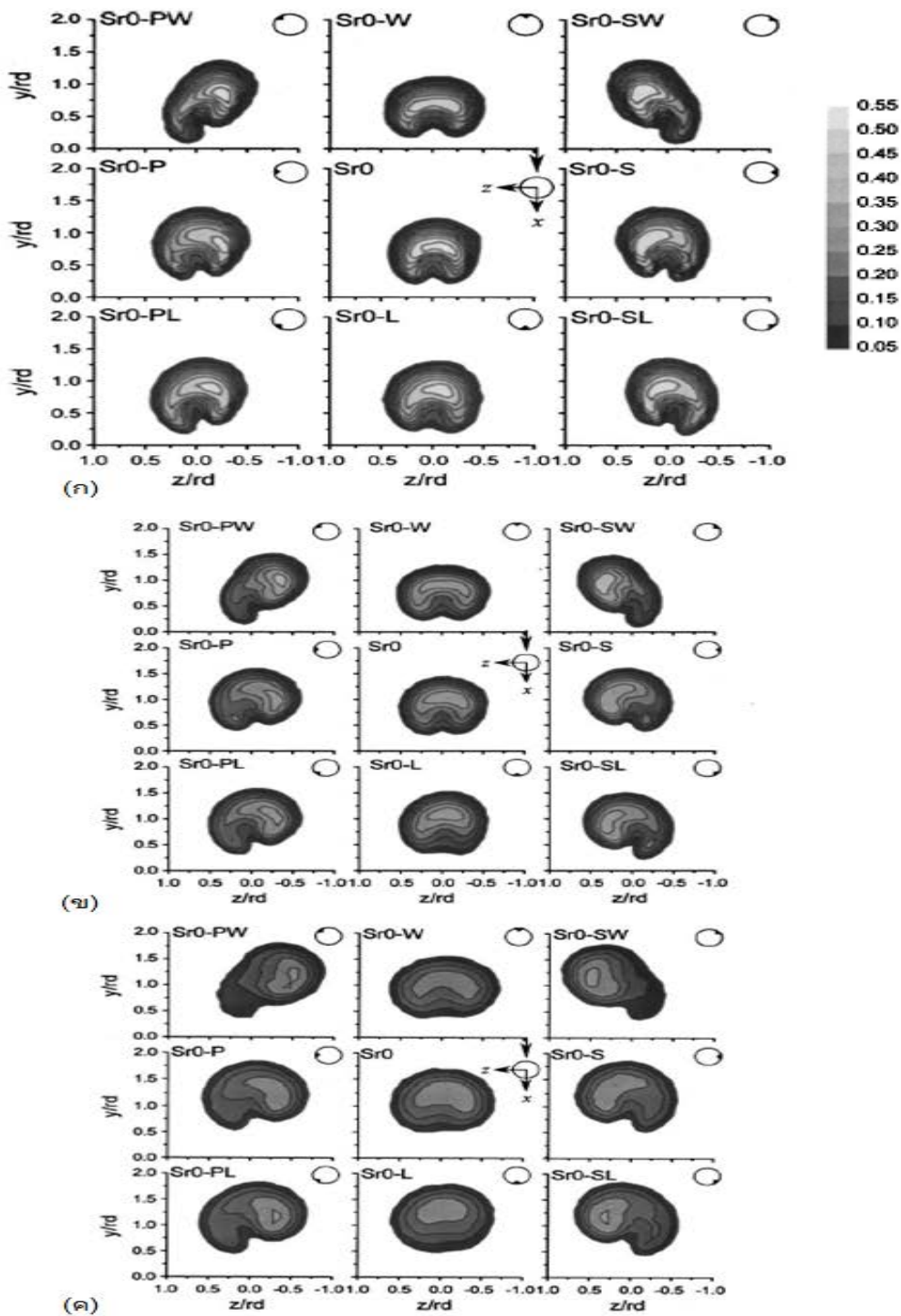
รูปที่ 2.26 ผลของการติด Tab ต่อเส้นทางเดินของความเร็วนระนาบสมมาตร (Zaman and Fross, 1997)



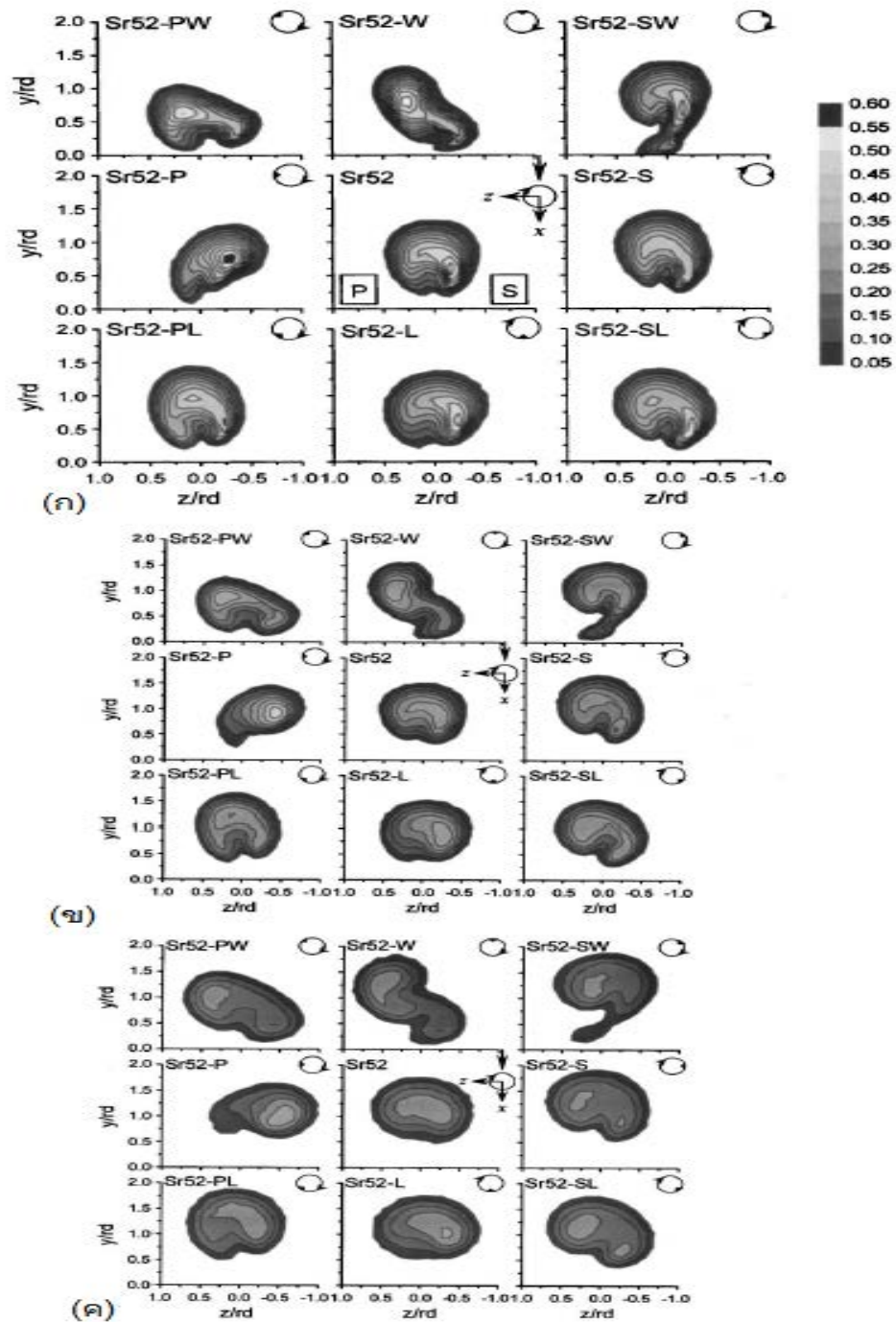
รูปที่ 2.27 ผลของการติด Tab ต่อ Circulation ไปตามแนว Downstream (Zaman and Fross, 1997)



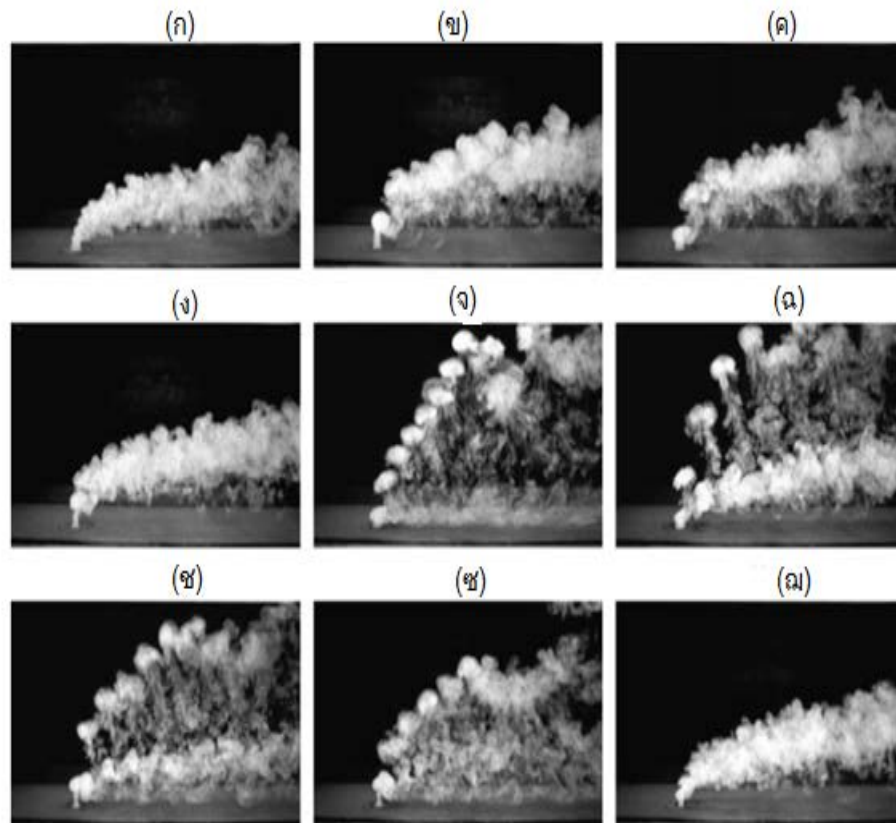
รูปที่ 2.28 ก) Tab และการติดตั้ง
ข) ระบบแกนตั้งฉากกับทิศทางการหมุน
(Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)



รูปที่ 2.29 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการติด Tab กรณีเจ็ตไม่หมุนควง
 (ก) $x/rd=0.25$ (ข) $x/rd=0.5$ (ค) $x/rd=1$
 (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)

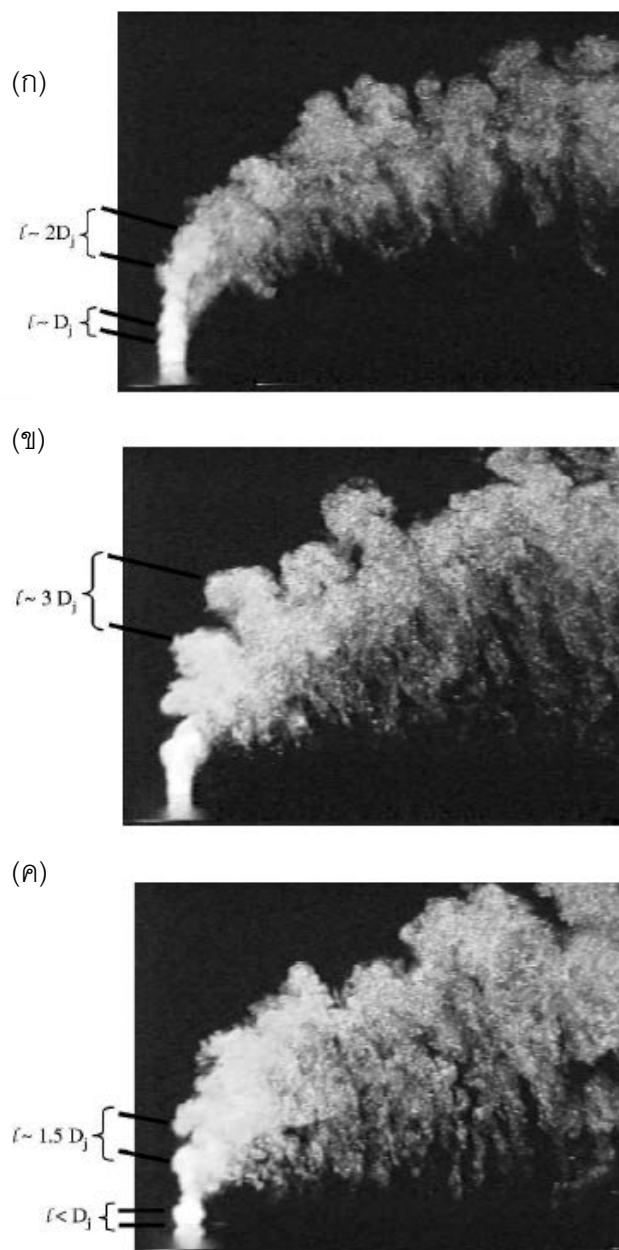


รูปที่ 2.30 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการติด Tab กรณีเจ็ทหมุนควง
 (ก) $x/rd=0.25$ (ข) $x/rd=0.5$ (ค) $x/rd=1$
 (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)

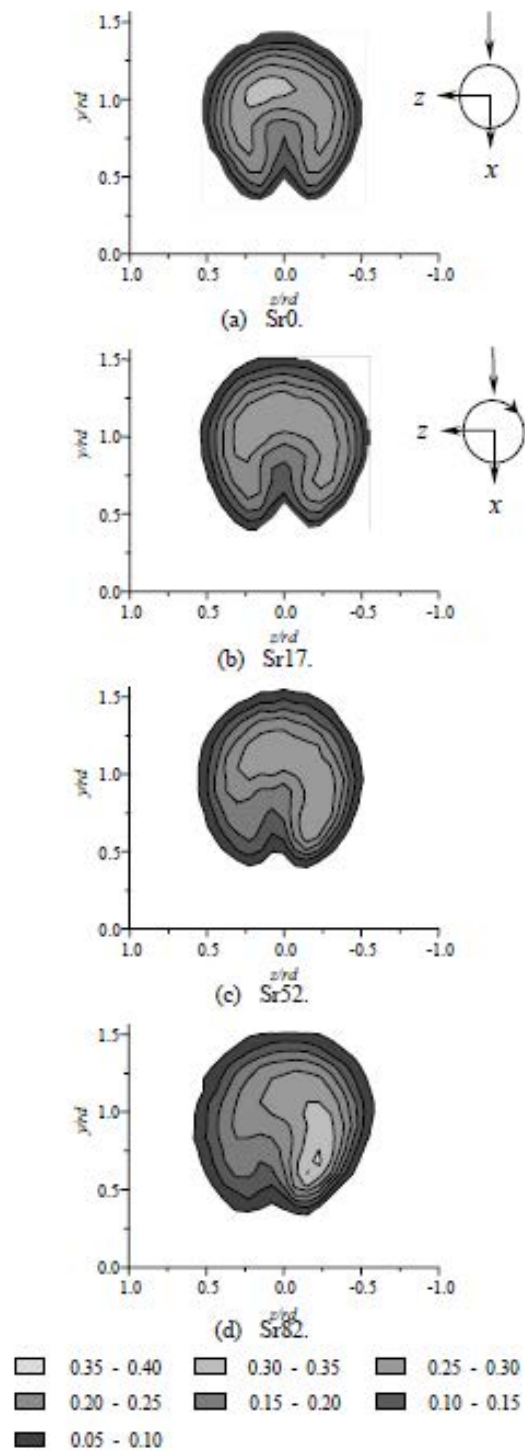


รูปที่ 2.31 ผลการกระตุ้นเจ็ตด้วยลำโพง (M'Closkey *et.al.*, 2002)

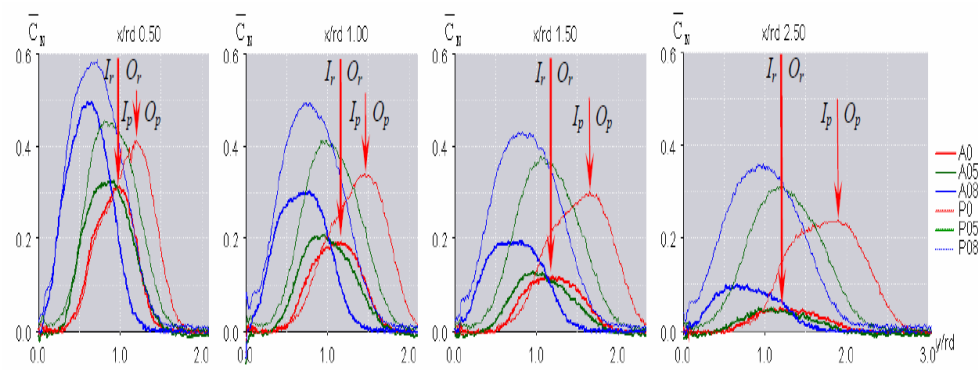
- (ก) ยังไม่กระตุ้นเจ็ต
- (ข) Uncompensated กระตุ้นด้วย Sine wave ที่ความถี่ 73.5 Hz
- (ค) Compensated กระตุ้นด้วย Sine wave ที่ความถี่ 73.5 Hz
- (ง) Uncompensated กระตุ้นด้วย Square wave ที่ความถี่ 110 Hz duty cycle 31 %
- (ฉ) Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ที่ความถี่ 110 Hz duty cycle 31 %
- (ช) Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ที่ความถี่ 55 Hz duty cycle 15 %
- (ช) Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ที่ความถี่ 73.5 Hz duty cycle 22 %
- (ช) Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ที่ความถี่ 85 Hz duty cycle 24 %
- (ม) Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ที่ความถี่ 220 Hz duty cycle 62 %



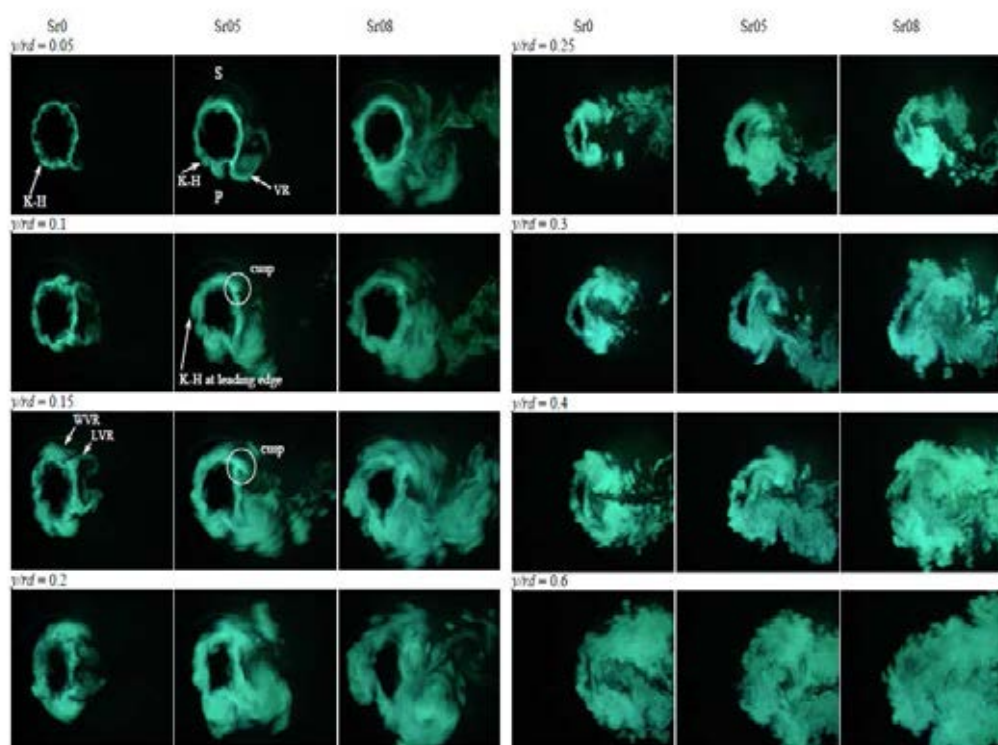
รูปที่ 2.32 ภาพ Instantaneous (ก) กรณีเจ็ตไม่มีการควบคุม, (ข) กรณีที่กระตุ้นด้วยความถี่ต่ำ (680 Hz และค่า Sr D ประมาณ 0.085) และ (ค) กรณีกระตุ้นด้วยความถี่สูง (1500 Hz และค่า Sr D ประมาณ 0.19) (Narayanan *et.al.*, 2003)



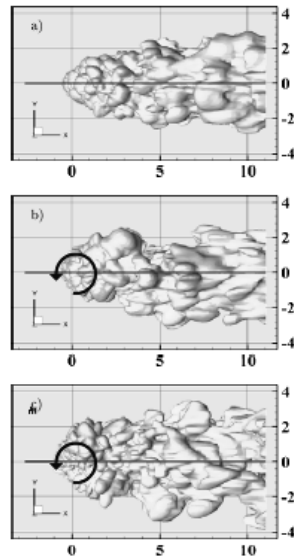
รูปที่ 2.33 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวมบนระนาบตั้งฉาก (Wangjiraniran and Bunyajitradulya , 2001)



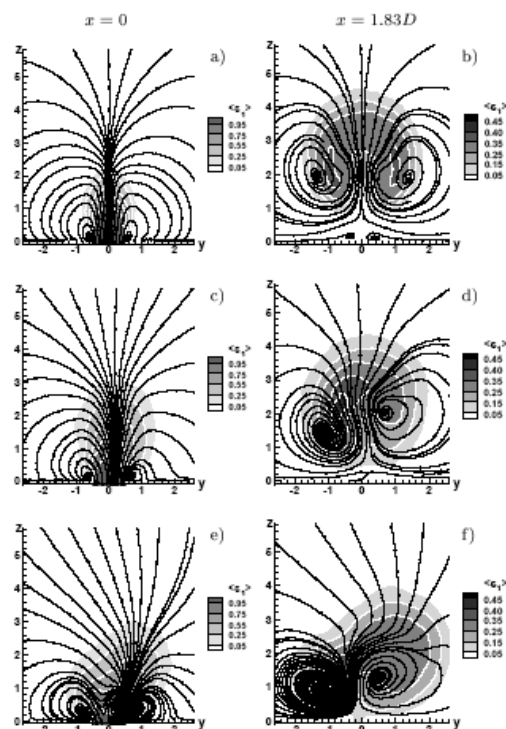
รูปที่ 2.34 ภาพแสดง Contours of line-of-sight integrated mean images ของ Traverses profile ไปตามแนว downstream โดยที่ P แทน Passive และ A แทน Reactive (Yingjaroen *et.al.*, 2006)



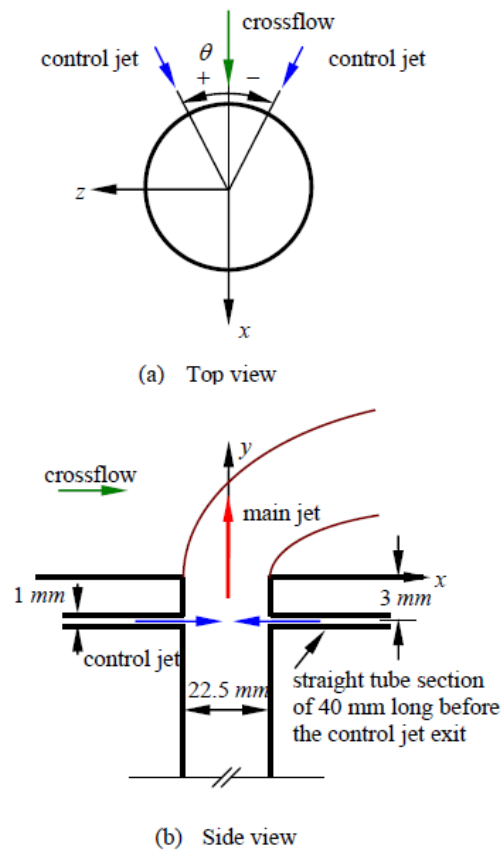
รูปที่ 2.35 Instantaneous image ของ mixing structure บนด้าน Top view (Limdumrongtum *et.al.*, 2009)



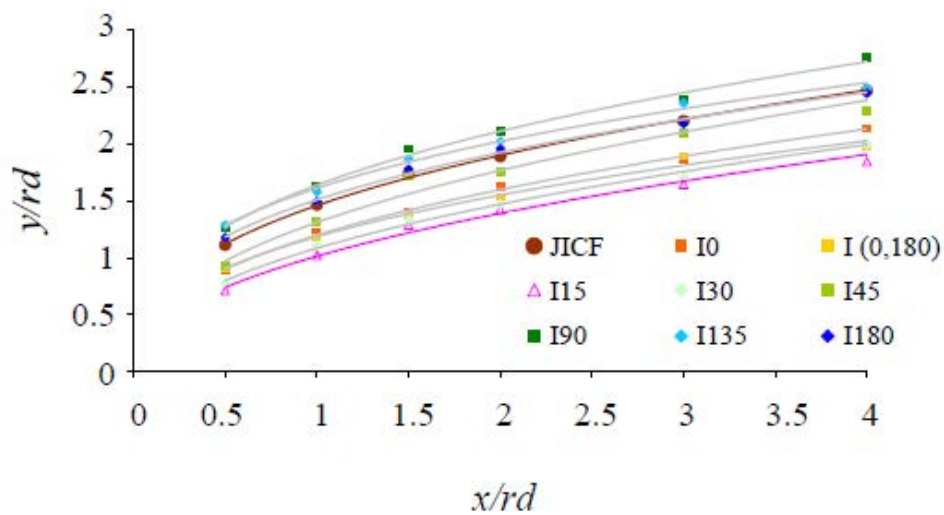
รูปที่ 2.36 Instantaneous Iso concentration surface โดย $S1 = 0.1$, Top view ก) $S=0$, ข) $S=0.4$, ค) $S=0.6$ (Denev *et.al.*, 2005)



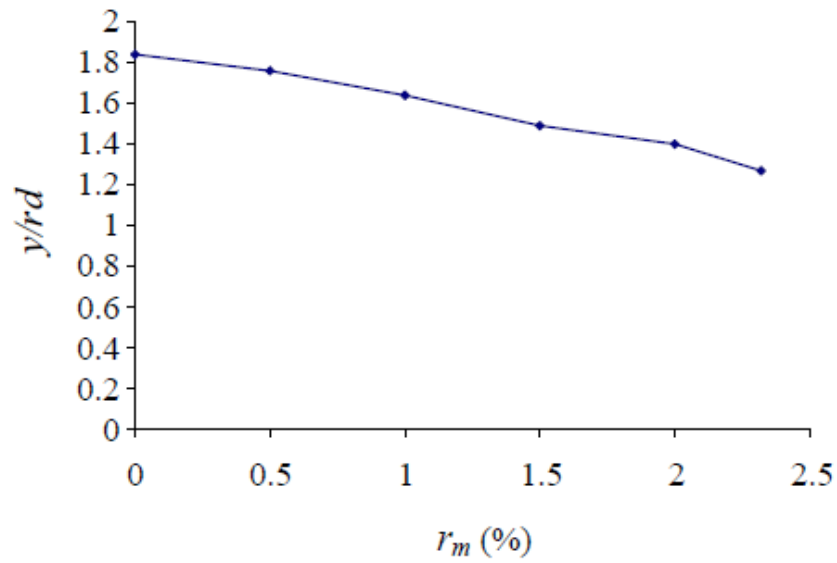
รูปที่ 2.37 ภาพเฉลี่ยของ Streamline และค่าความเข้มข้นที่ $x=0$ และ $x=1.83D$ Top view ก) $S=0$, ข) $S=0.4$, ค) $S=0.6$ (Denev *et.al.*, 2005)



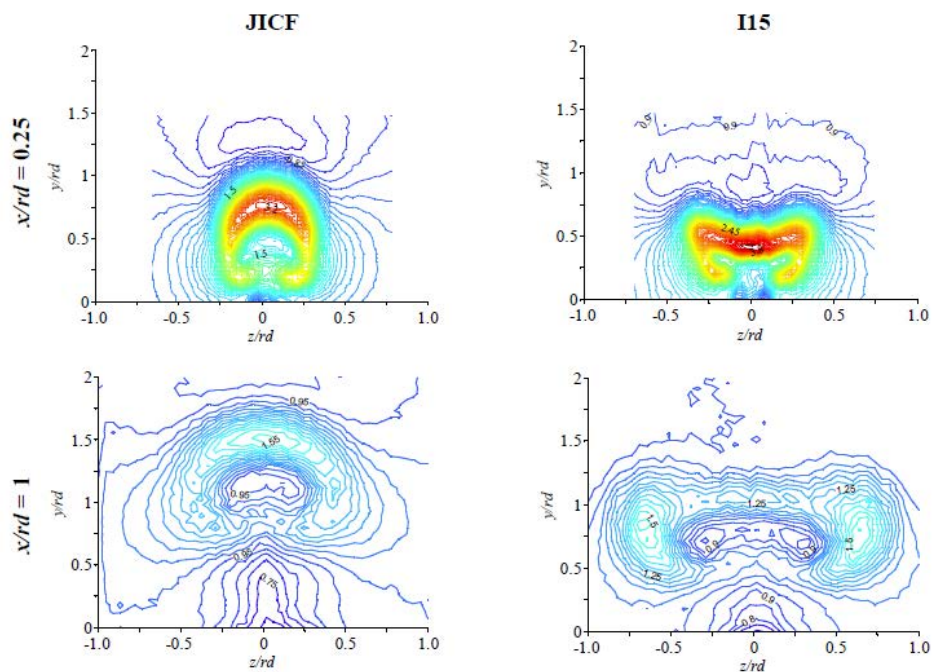
รูปที่ 2.38 ชุดเจ็ตควบคุม (Kornsri *et.al.*, 2009)



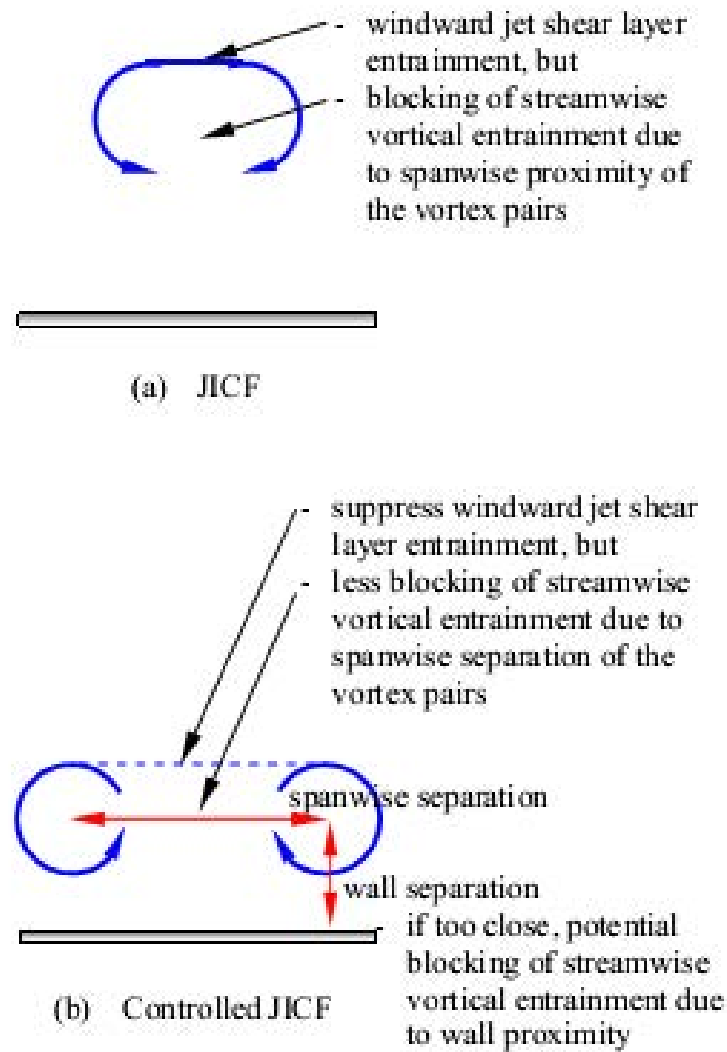
รูปที่ 2.39 ผลของเจ็ตควบคุมต่อเส้นทางการเดินทางของความเร็วจ (Kornsri *et.al.*, 2009)



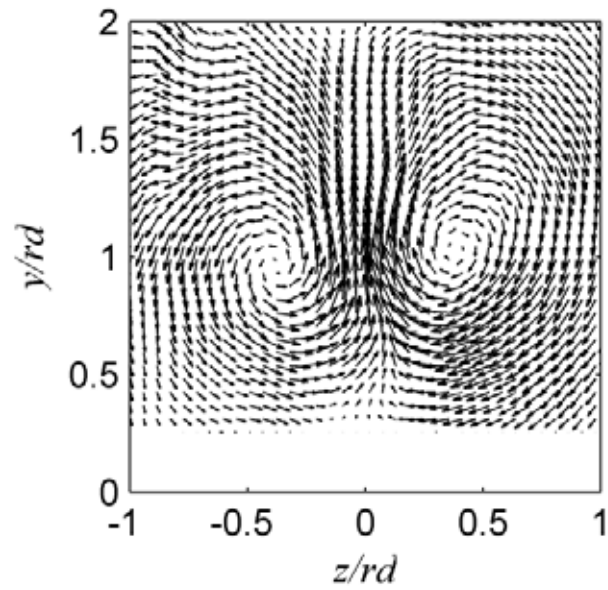
รูปที่ 2.40 การ Penetration ของเส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตที่ตำแหน่ง $x/rd=1.5$ สำหรับมุมที่ ± 15 กับที่ r_m ต่างๆ (Kornsri *et.al.*, 2009)



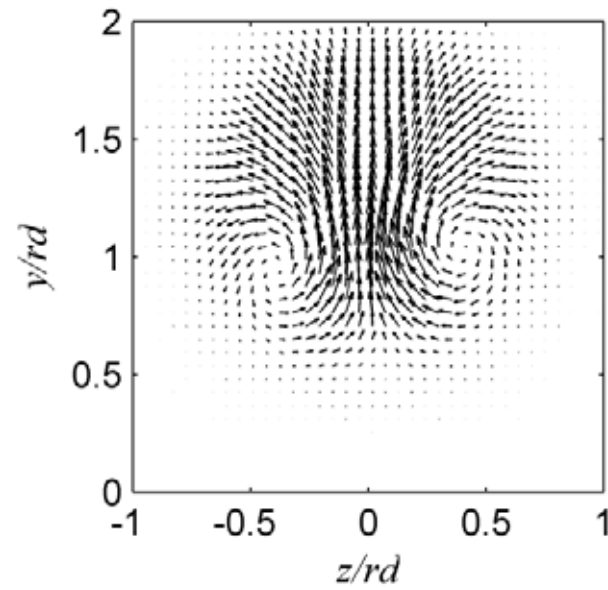
รูปที่ 2.41 Contour ของความเร็ว (Normalize ด้วย ความเร็วกระแสลมขวาง) เปรียบเทียบระหว่าง ไม่ควบคุมกับควบคุมที่สภาวะเหมาะสมที่เหมาะสม (Kornsri *et.al.*, 2009)



รูปที่ 2.42 แนวคิดกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Kornsri *et.al.*, 2009)



ก

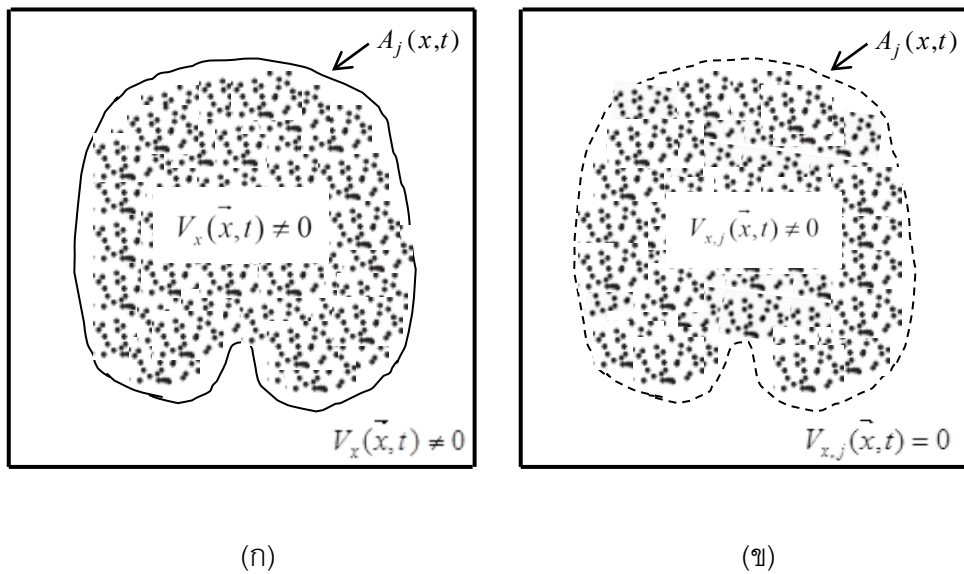


ข

รูปที่ 3.1. ตัวอย่างสนามความเร็วบนระนาบ yz ที่วัดได้จาก SPIV (ไม่ได้แสดงผลของ V_x)

เมื่อ ก) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตหลักและในกระแสลมขวาง

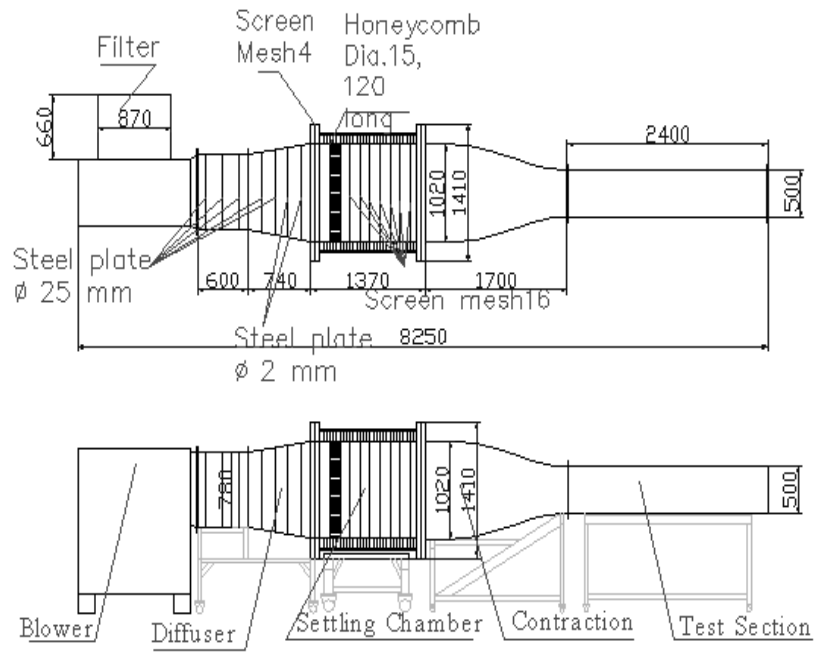
ข) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตหลักเท่านั้น



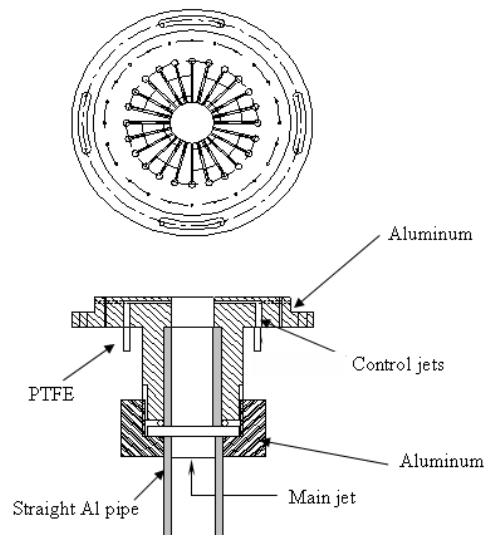
รูปที่ 3.2 การหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรในบริเวณของเจ็ต ด้วย

เมื่อ ก) อินทิเกรตสนามความเร็ว V_x ในบริเวณที่เป็นเจ็ตเท่านั้น

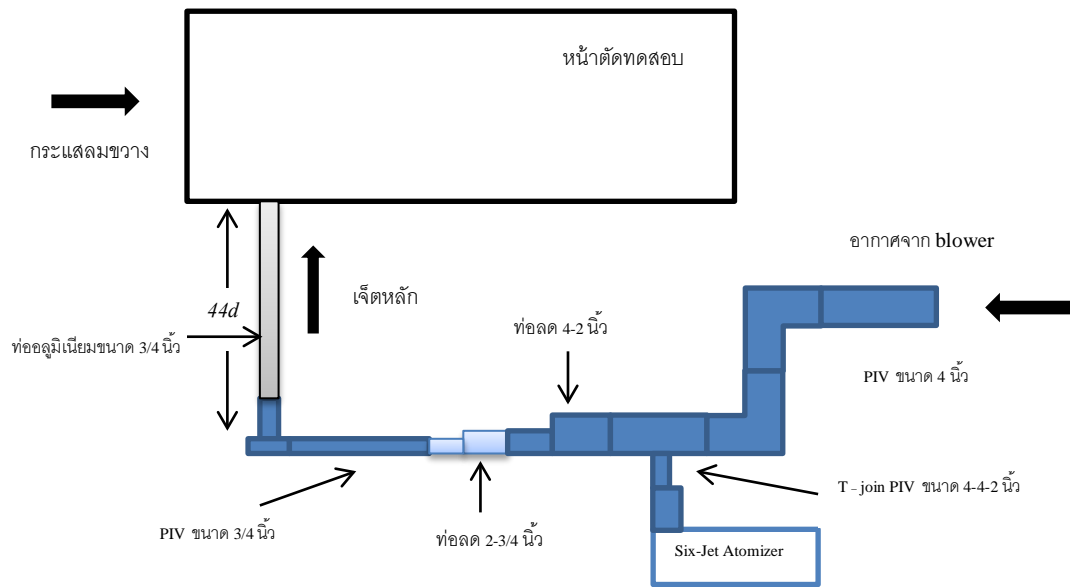
ข) อินทิเกรตสนามความเร็ว $V_{x,j}$ ไปบนพื้นที่ทั้งหมดซึ่งรวมทั้งพื้นที่
ของเจ็ตและกระแสลมขวาง



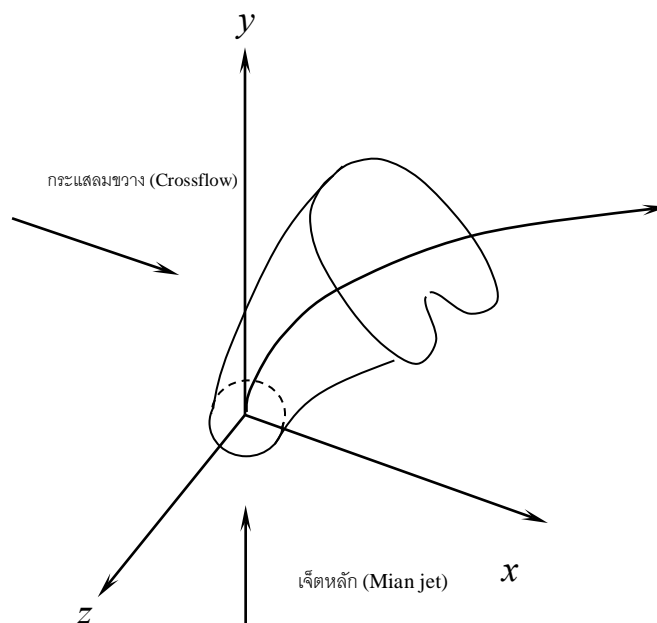
รูปที่ 4.1 ชุดอุโมงค์ลมและหน้าตัดทดสอบ



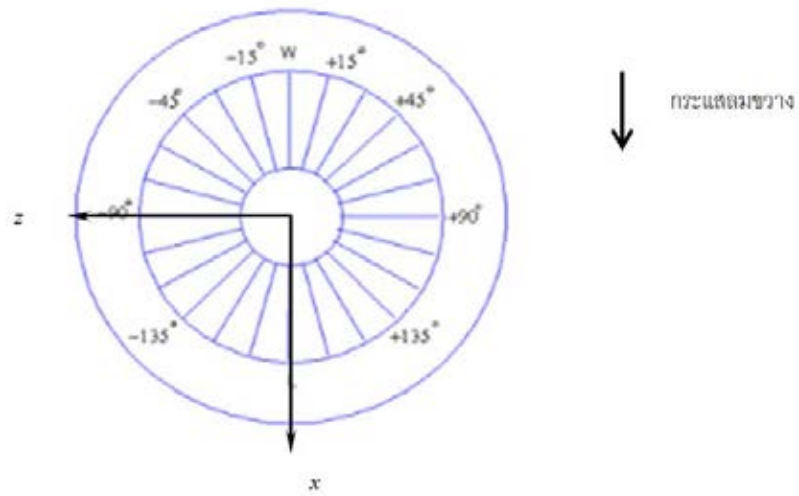
รูปที่ 4.2 ชุดหัวเจ็ตควบคุม (Kornsri, 2007)



รูปที่ 4.3 เจ็ตหลักและการใส่อนุภาคร่วมติดตามการไหล

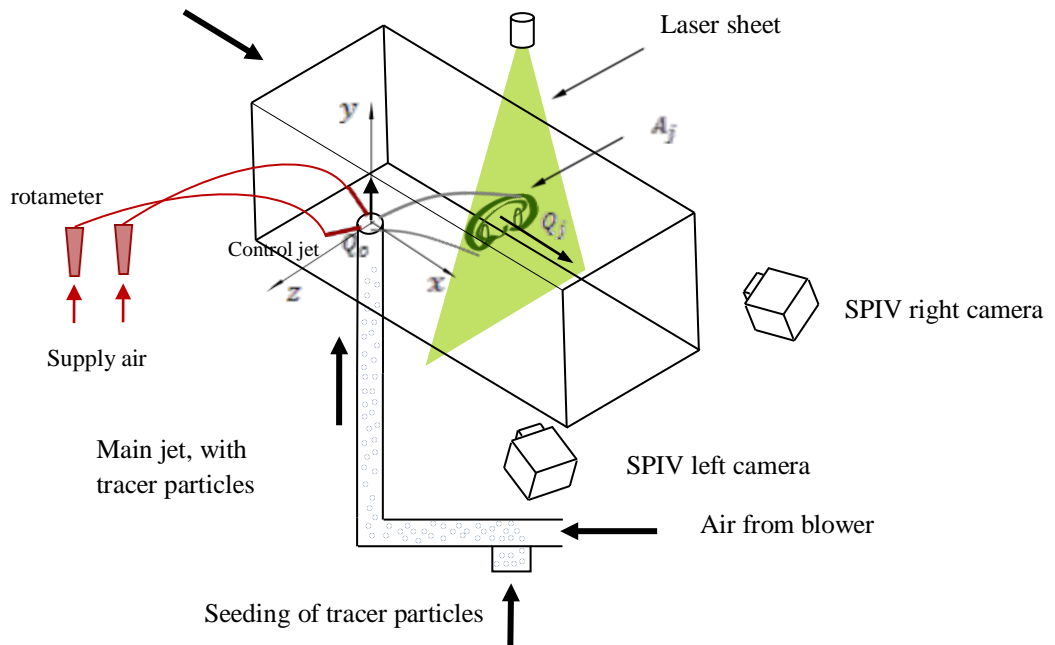


รูปที่ 4.4 พิกัดการทดลอง

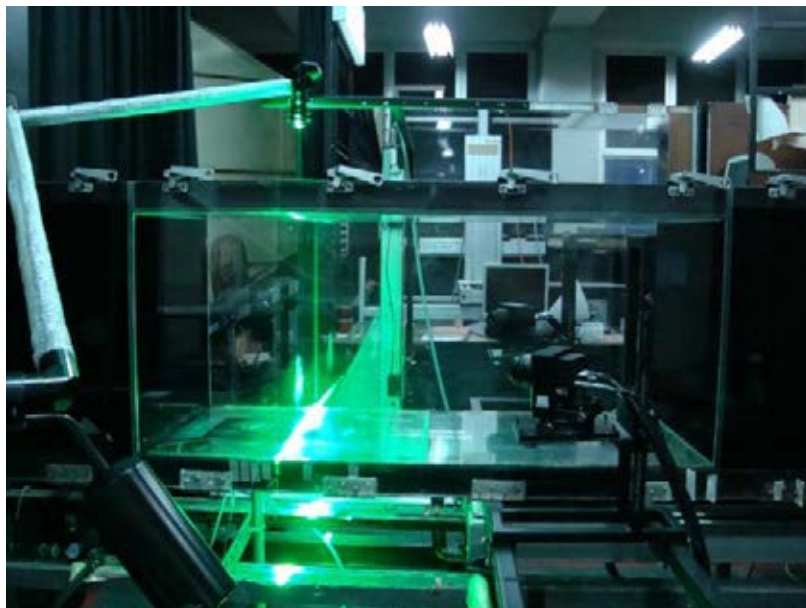


รูปที่ 4.5 พิกัดอ้างอิงสำหรับตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุม

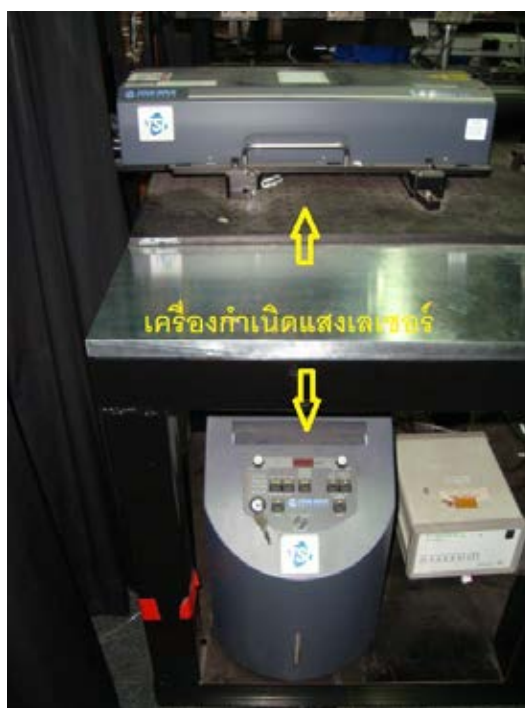
Crossflow, without tracer particles



รูปที่ 4.6 รูปแบบการติดตั้ง Stereoscopic Particle Image Velocimetry



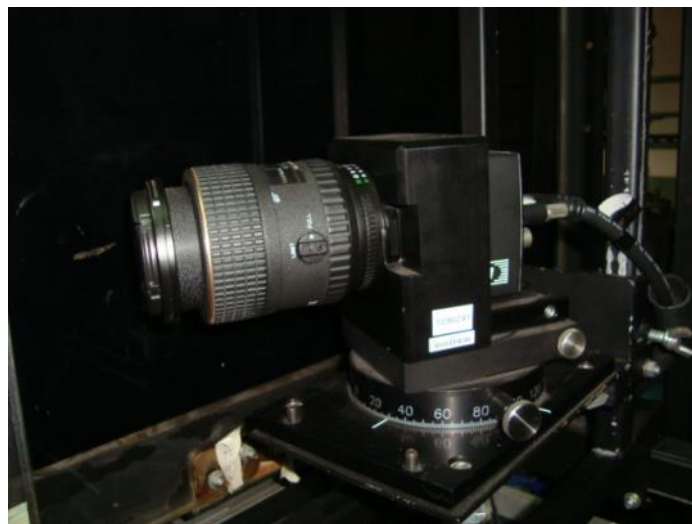
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายชุด Stereoscopic Particle Image Velocimetry



รูปที่ 4.8 เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ (New Wave™ model Solo 200XT)



รูปที่ 4.9 แขนส่งต่อลำแสงเลเซอร์ (Laser Light Arm, model 610015)



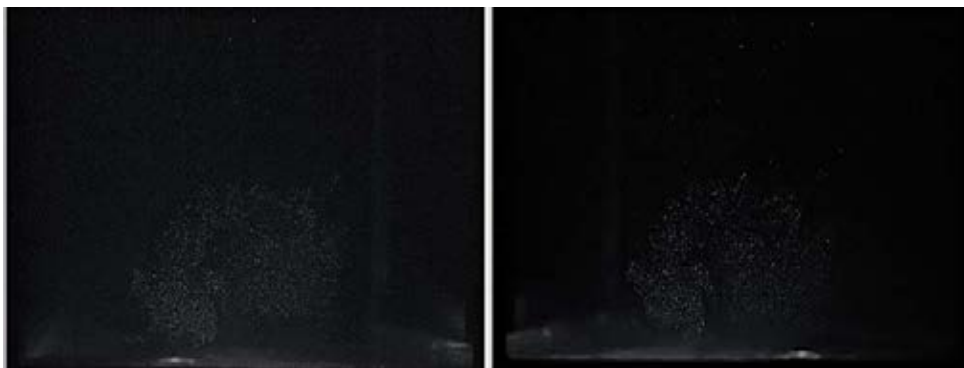
รูปที่ 4.10 กล้อง CCD (PowerView Plus11MP, model 630062)



รูปที่ 4.11 ชุดควบคุมส่วนกลาง (synchronizer, model 610035)

กล้องซ้าย Frame A

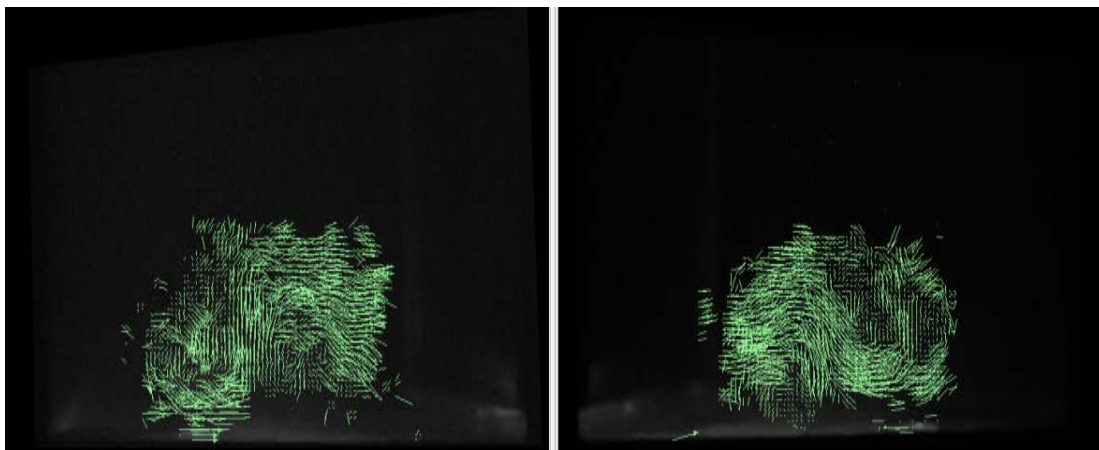
กล้องขวา Frame A



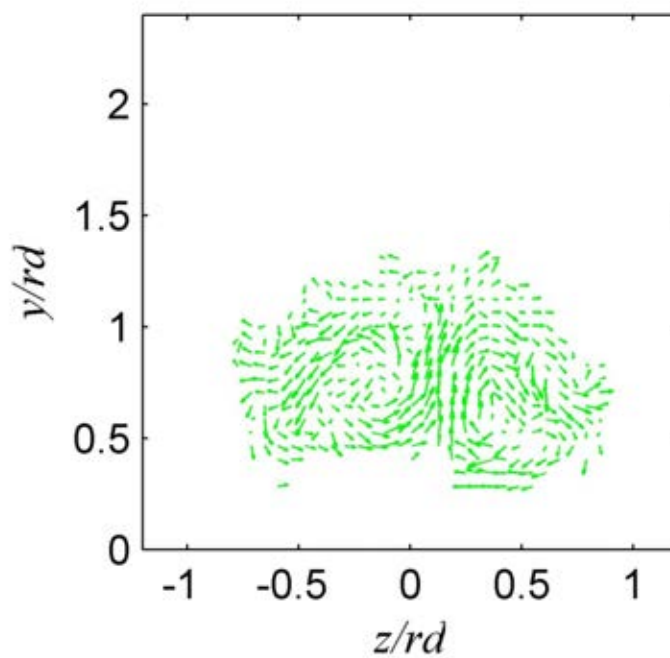
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายอนุภาคติดตามการไหลด้วยกล้อง CCD

กล้องซ้าย

กล้องขวา

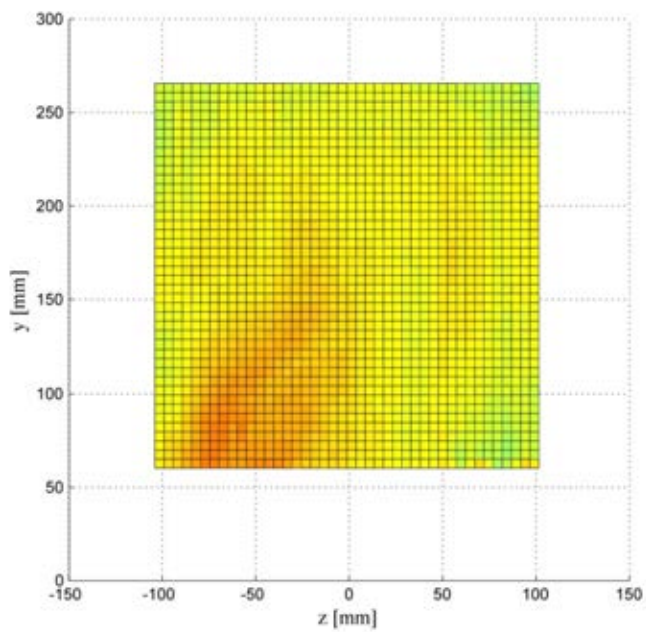


รูปที่ 4.13 เวกเตอร์ความเร็วที่ได้การประมวลผลจากภาพถ่ายอนุภาคติดตามการไหล

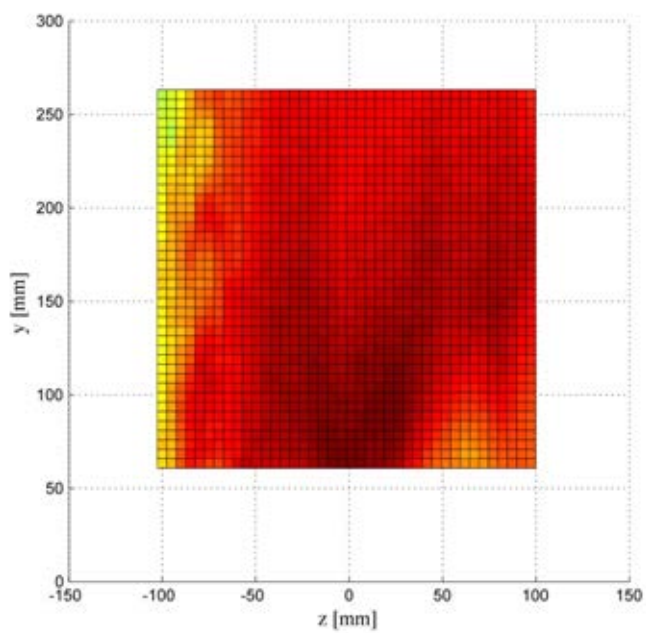


รูปที่ 4.14 เวกเตอร์ความเร็วบนระนาบเลเซอร์ (ไม่ได้แสดงผลของ V_x)

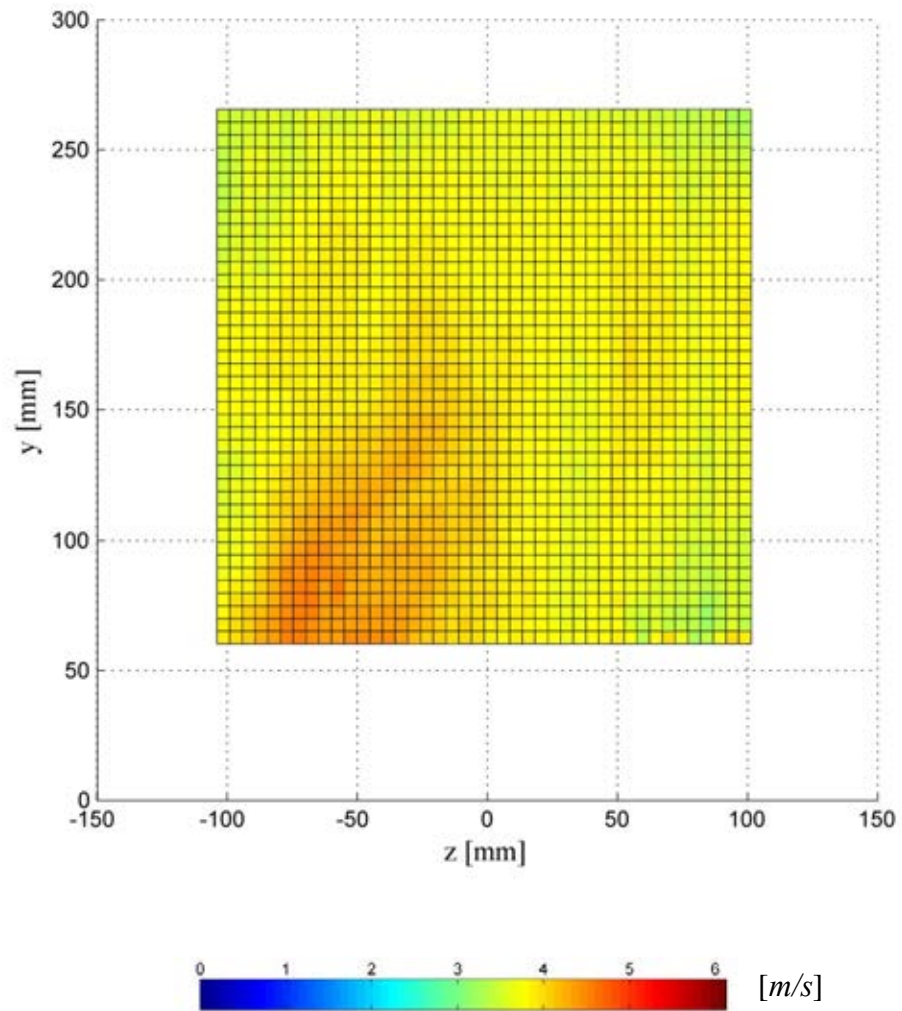
4.3 m/s



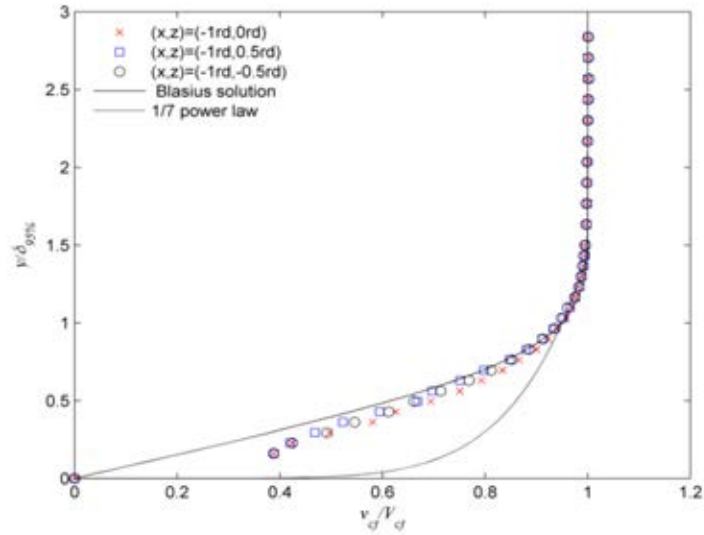
6 m/s



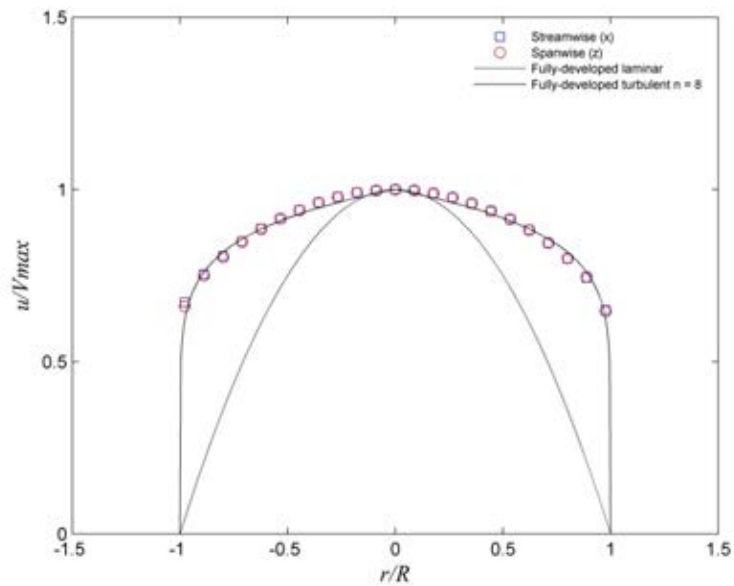
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของความเร็วในแนวแกน x (V_x)



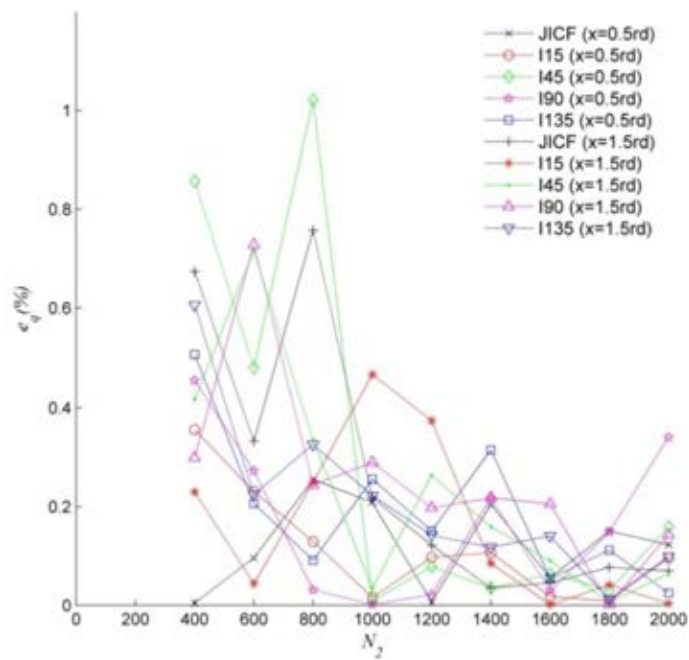
รูปที่ 4.16 ความสม่ำเสมอของความเร็วเฉลี่ย (V_{cf}) ของกระแสลมขวางที่ $x = -9$ cm
บริเวณหน้าตัดทดสอบของอุโมงค์ลม



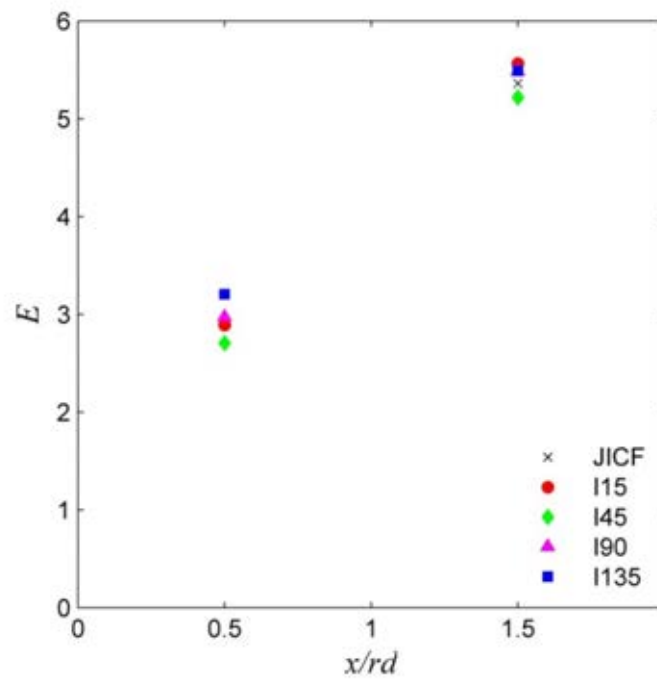
รูปที่ 4.17 รูปร่างของชั้นขอบเขต (Boundary layer ; $V_{cf} = 4.3$ m/s)



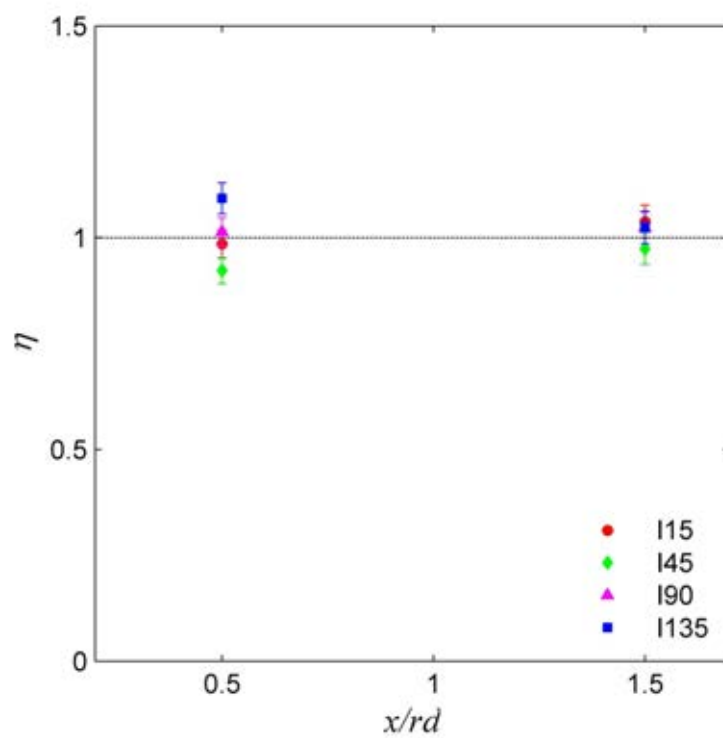
รูปที่ 4.18 รูปร่างความเร็วในแนวแกนเจ็ตที่ทางออกของเจ็ต



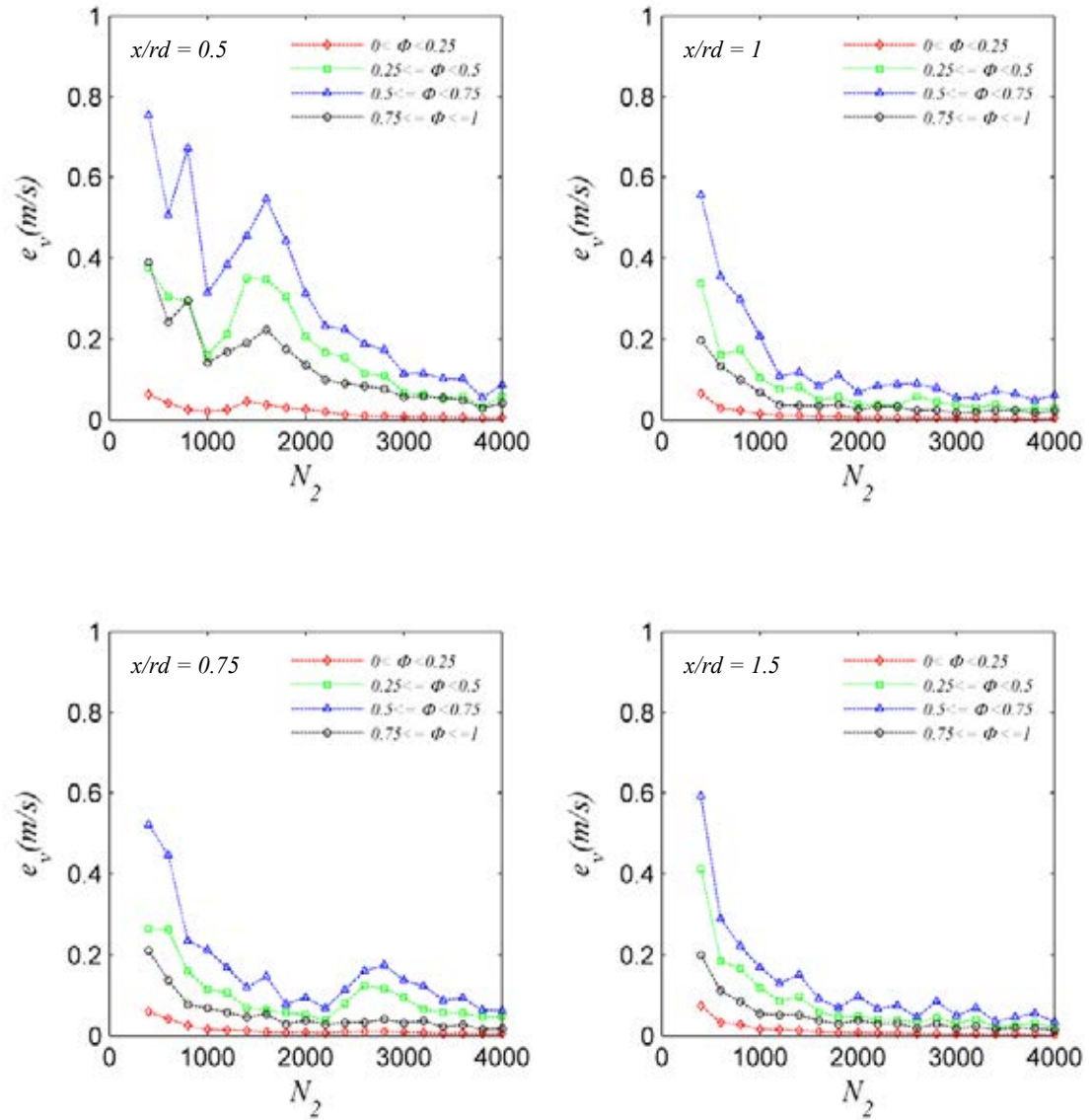
รูปที่ 5.1 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ต (e_q) แปรตามจำนวน N_2 สนาม บริเวณ $0 < \phi_{ij} \leq 1$ ของการศึกษาเบื้องต้น



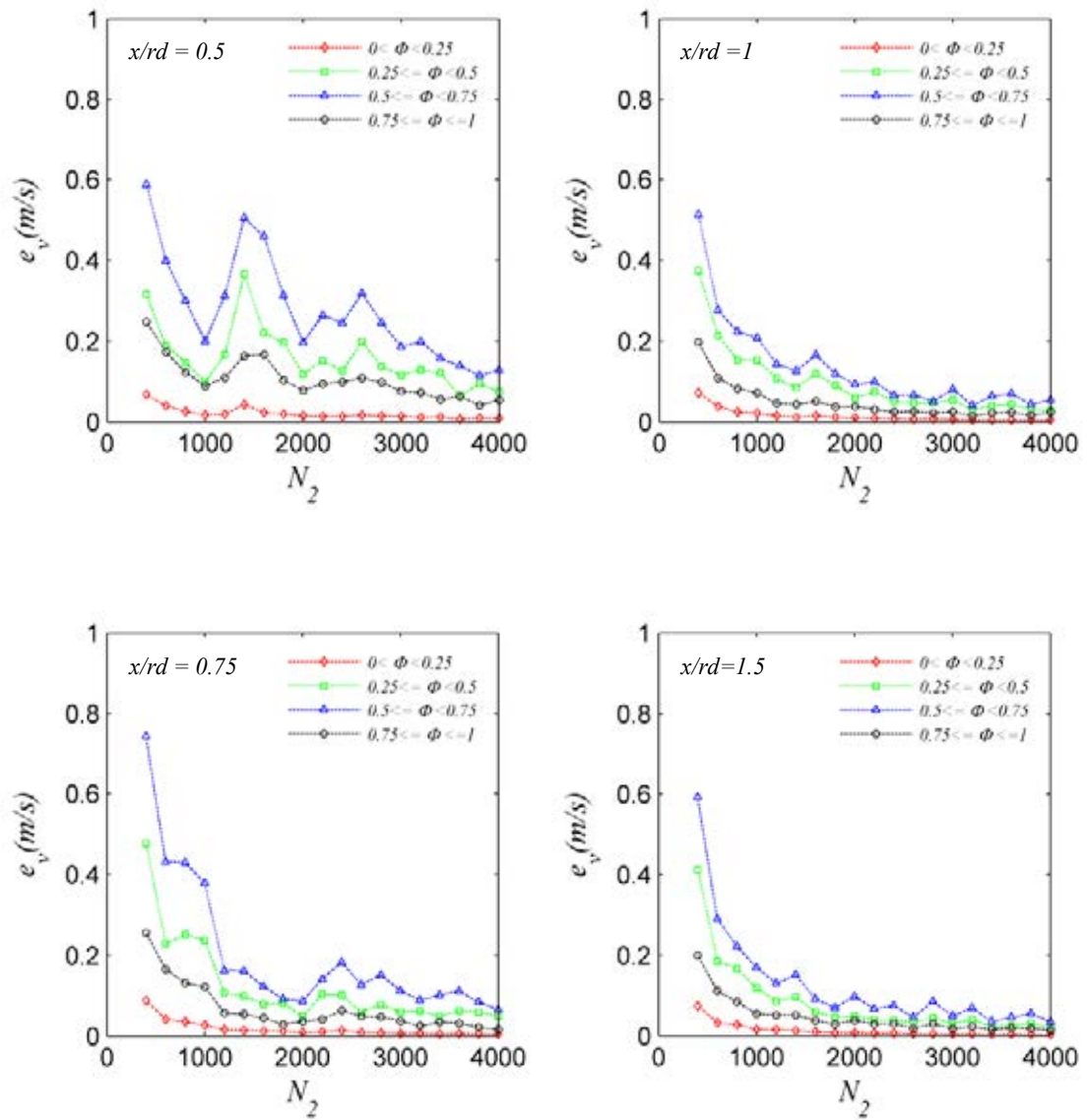
รูปที่ 5.2 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของการศึกษาเบื้องต้น



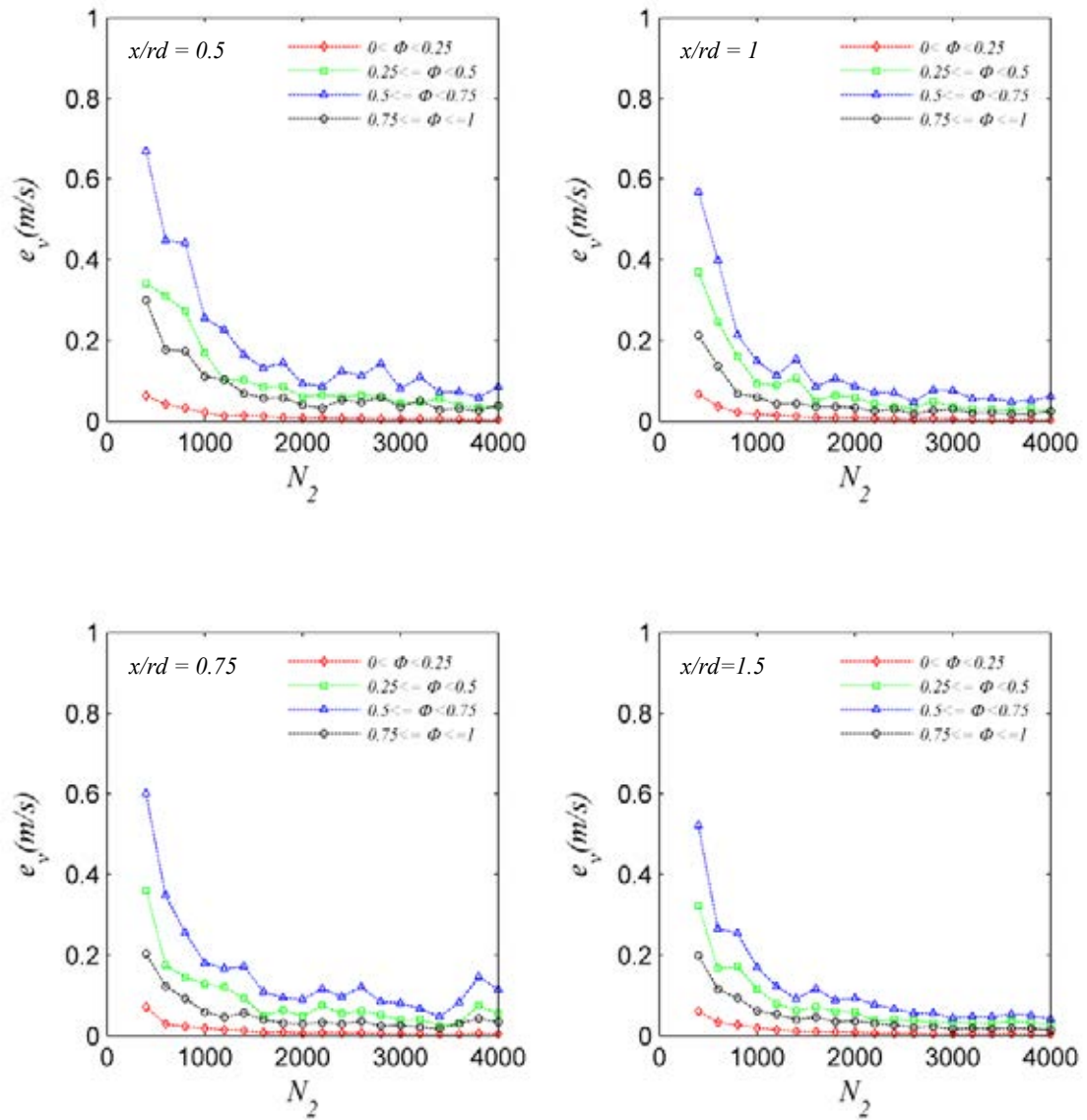
รูปที่ 5.3 ประสิทธิภาพของเจ็ดควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของการศึกษาเบื้องต้น



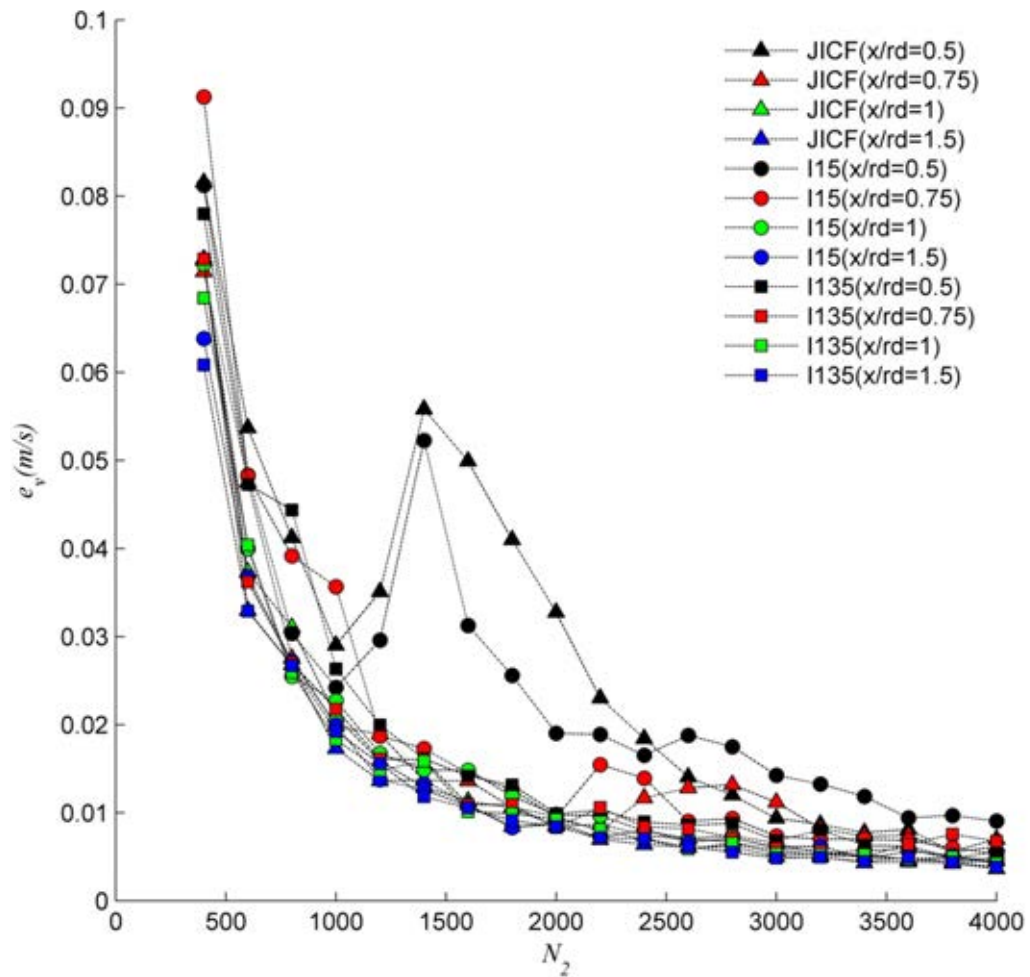
รูปที่ 6.1 ก ค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยต่อจุด (e_v) แปรตามจำนวน N_2 สนามกรณี JICF ที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ณ เวลาใดๆ (ϕ_{ij})



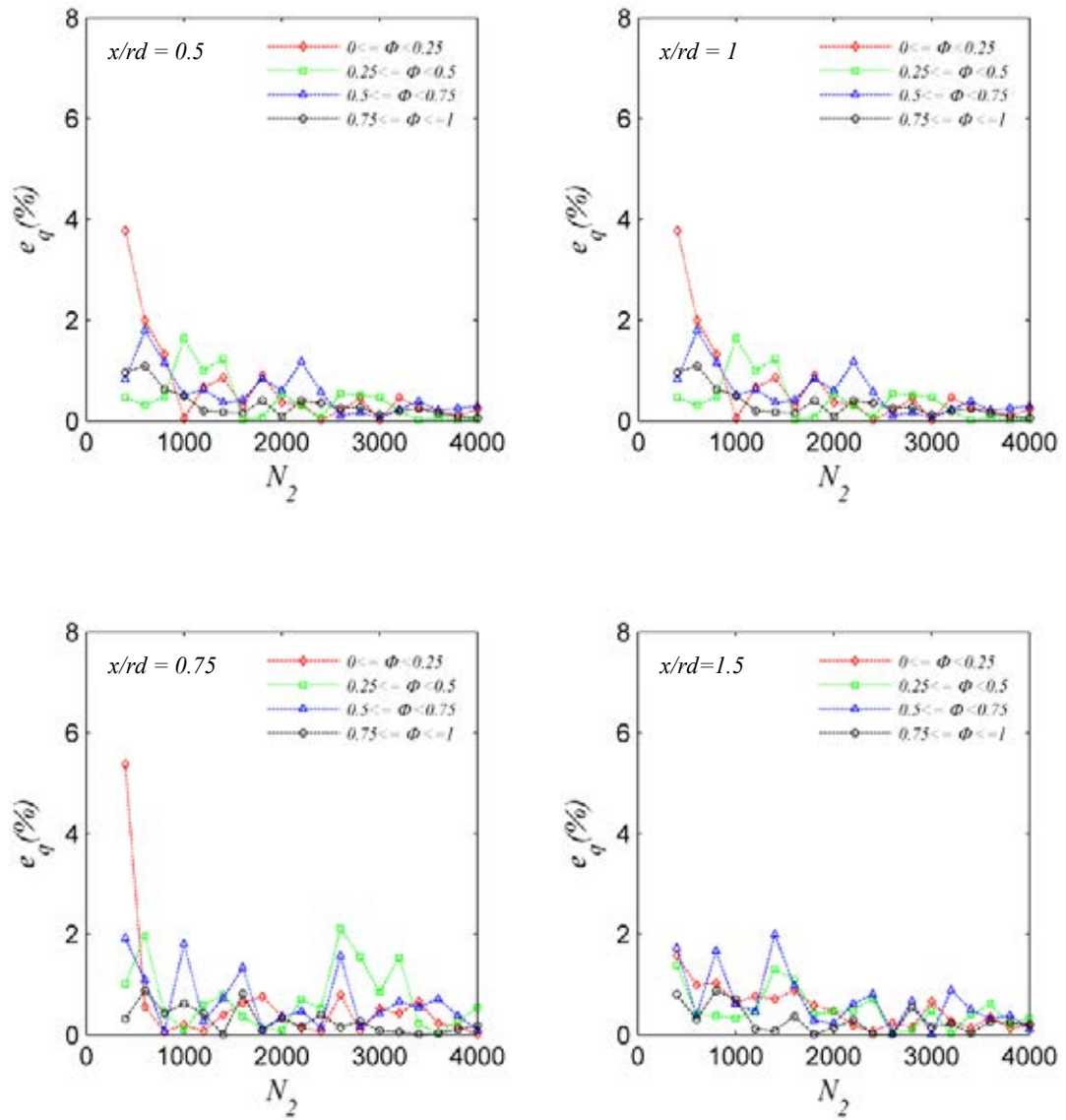
รูปที่ 6.1 ข ค่าความคลาดเคลื่อนของการดูเ้าของความเร็วเฉลี่ยต่อจุด (e_v) แปรตามจำนวน N_2 สนามกรณี I15 ที่ความน่าจะเป็นจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ต ณ เวลาใดๆ (ϕ_j)



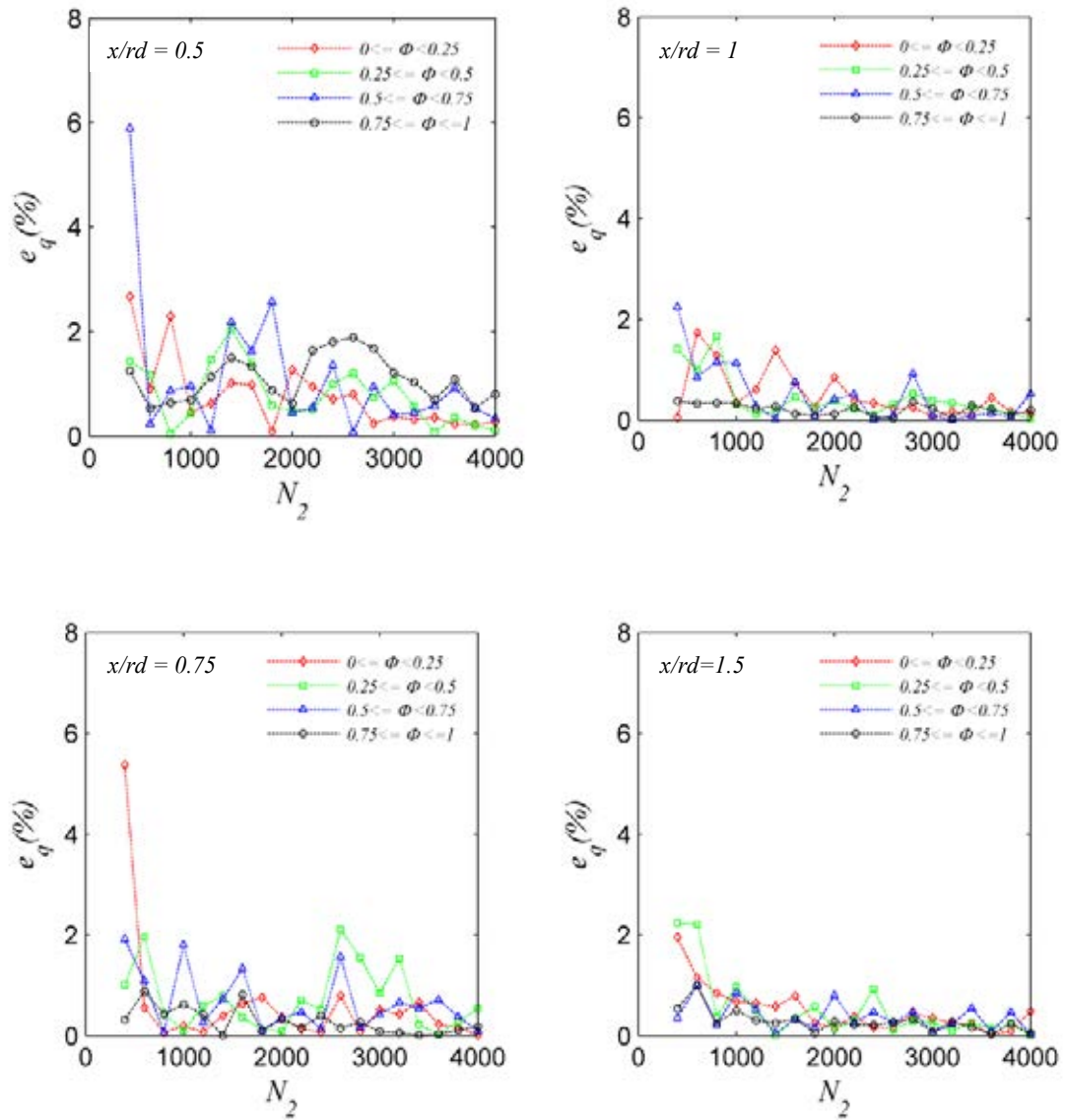
รูปที่ 6.1 ค ค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยต่อจุด (e_v) แปรตามจำนวน N_2 สนามกรณี I135 ที่ความน่าจะเป็นจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ด ณ เวลาใดๆ (ϕ_{ij})



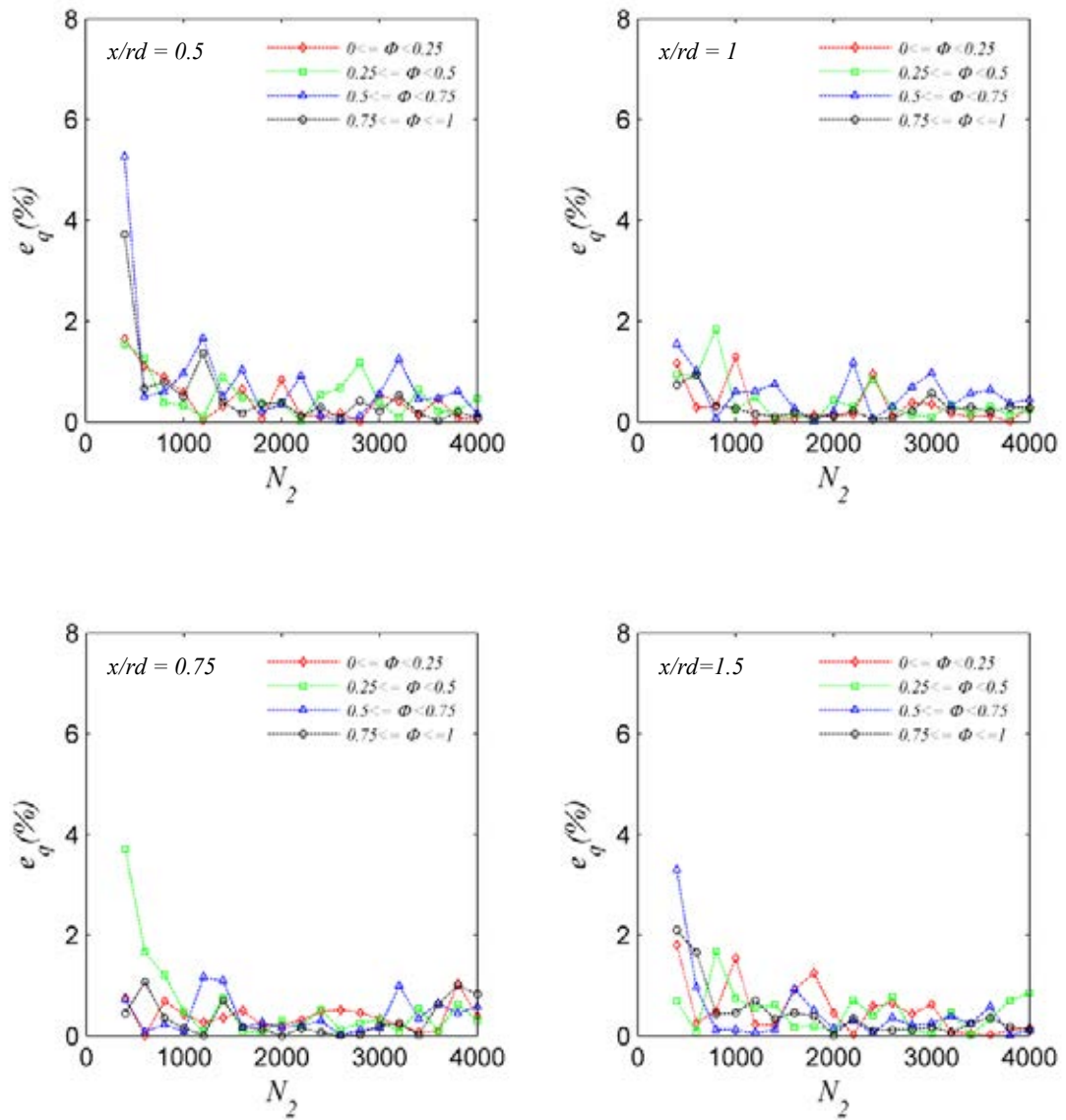
รูปที่ 6.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่อเข้าของความเร็วต่อจุด (e_v) แปรตามจำนวน N_2 สนาม บริเวณ $0 < \phi_{ij} \leq 1$ ของกรณี JICF, I15 และ I135



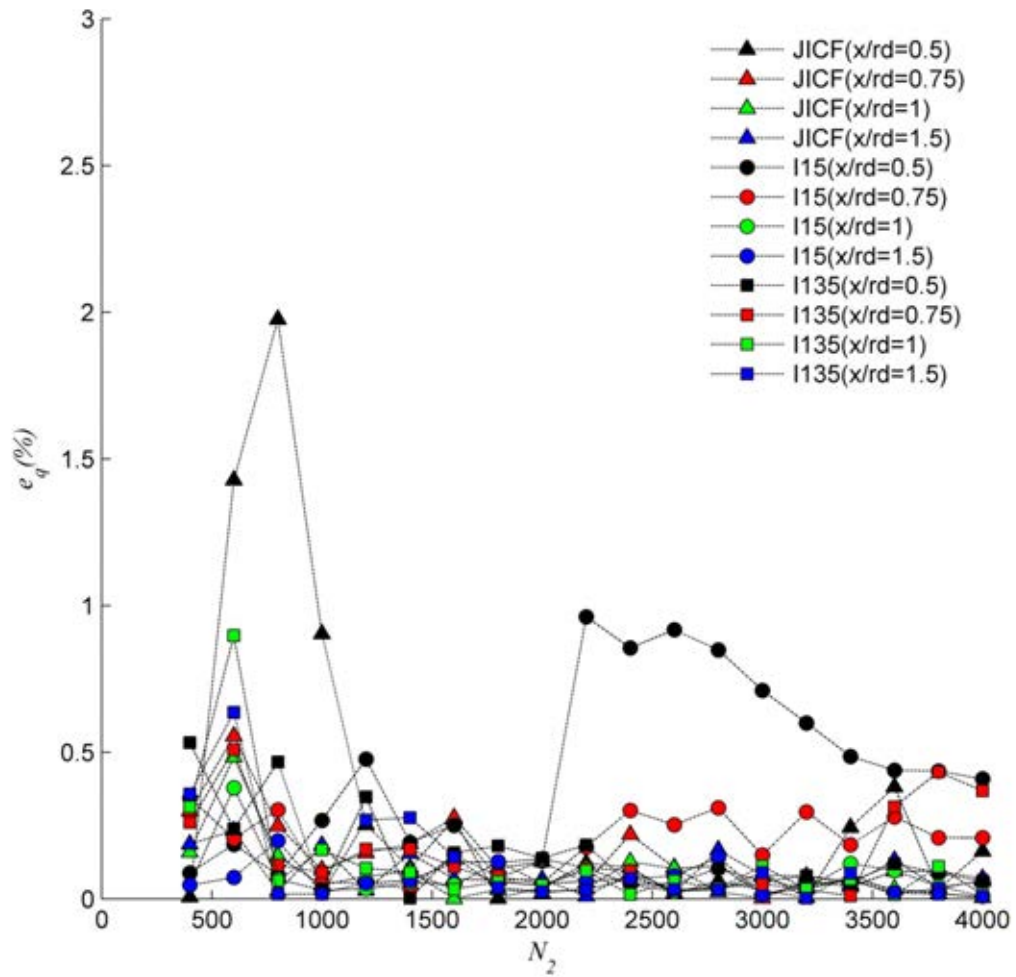
รูปที่ 6.3 ก เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ต (e_q) แปรตามจำนวน N_2 สนาม กรณี JICF ที่ความน่าจะเป็นที่จะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ต ณ เวลาใดๆ (ϕ_{ij})



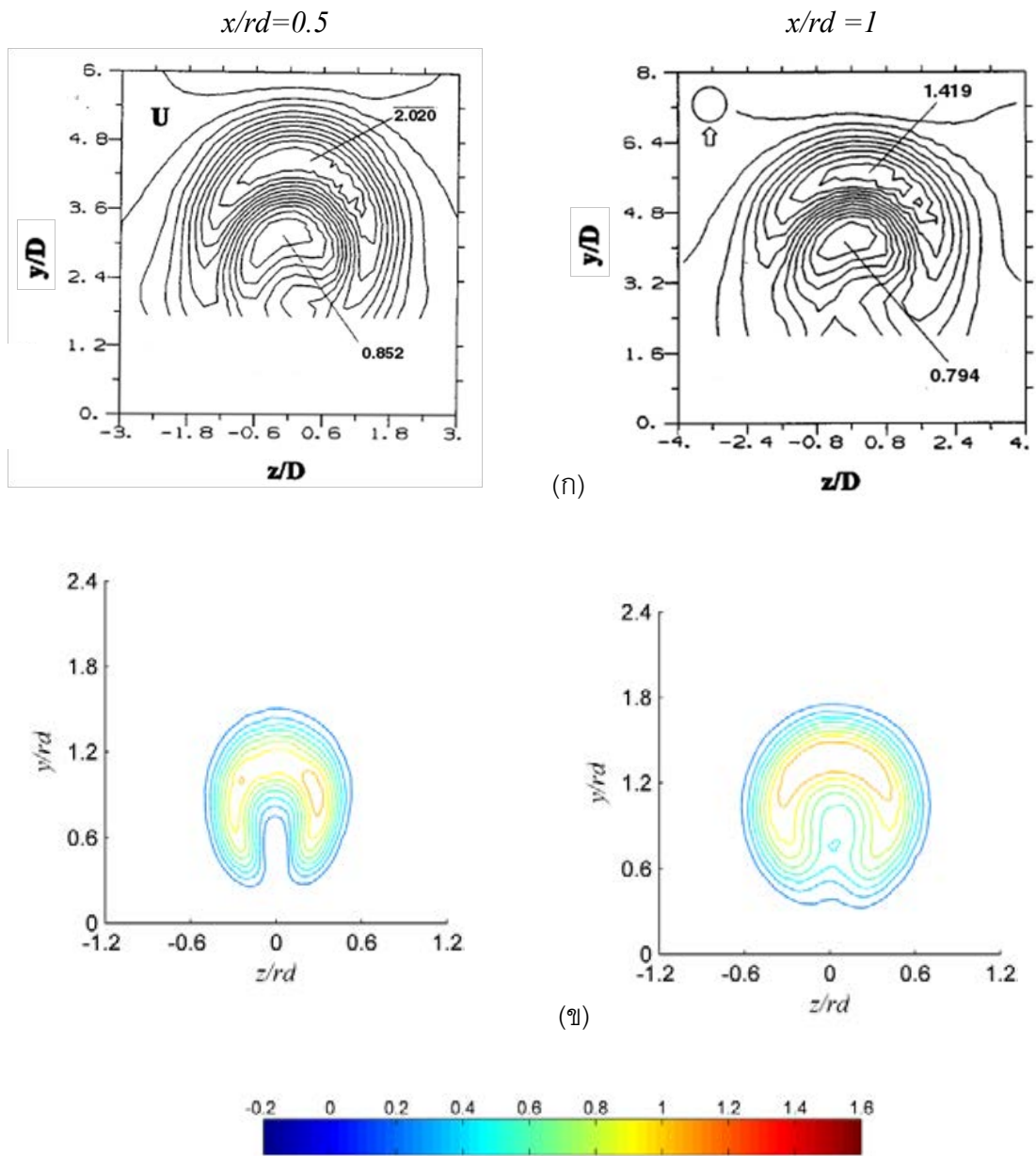
รูปที่ 6.3 ข เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของอัตราการใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของเจ็ด (e_q) แปรตามจำนวน N_2 สนาม กรณี I15 ที่ความน่าจะเป็นที่จะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ด ณ เวลาใดๆ (ϕ_{ij})



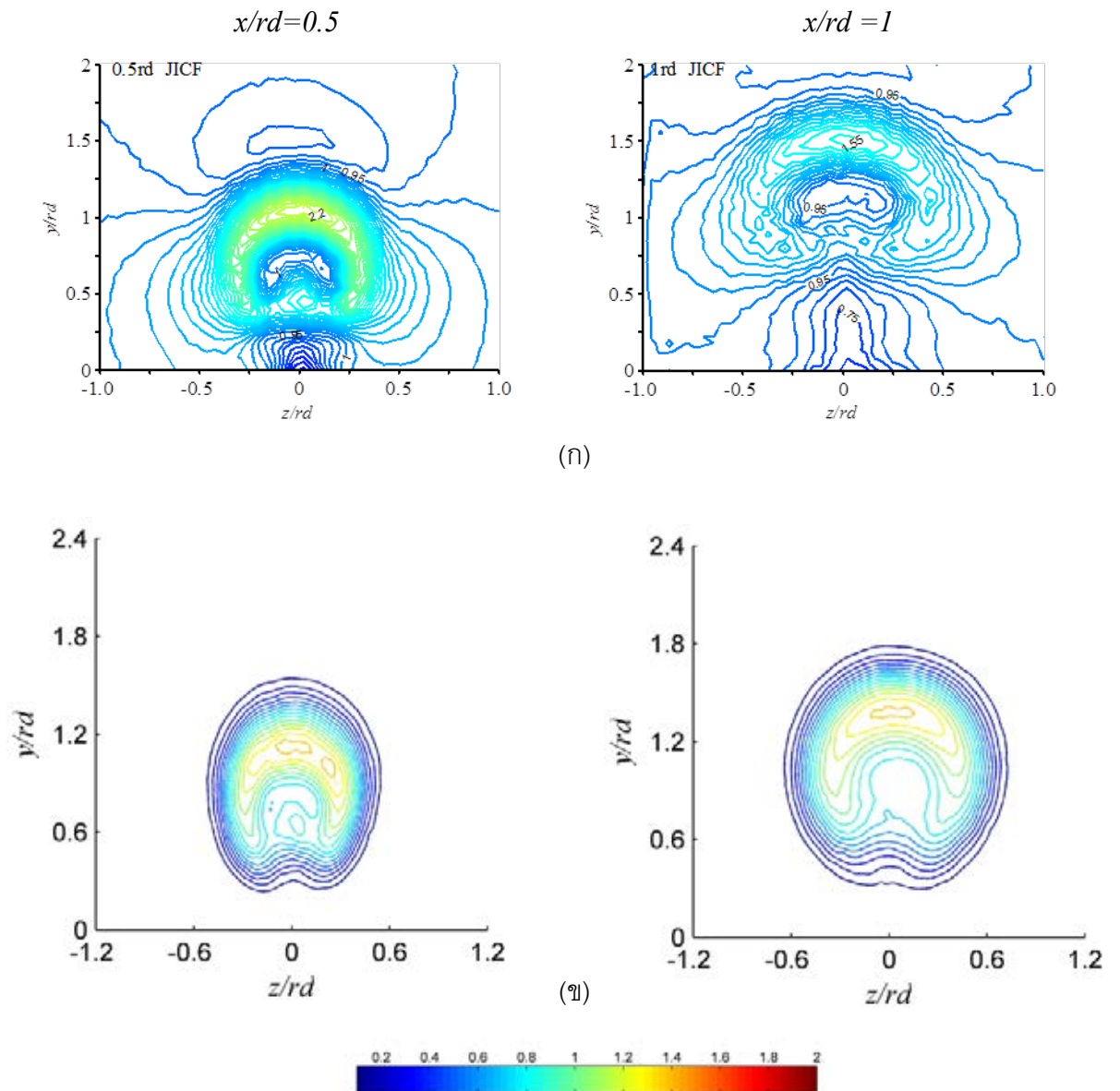
รูปที่ 6.3 ค เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ต (e_q) แปรตามจำนวน N_2 สนาม กรณีสนาม I135 ที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ณ เวลาใดๆ (ϕ_{ij})



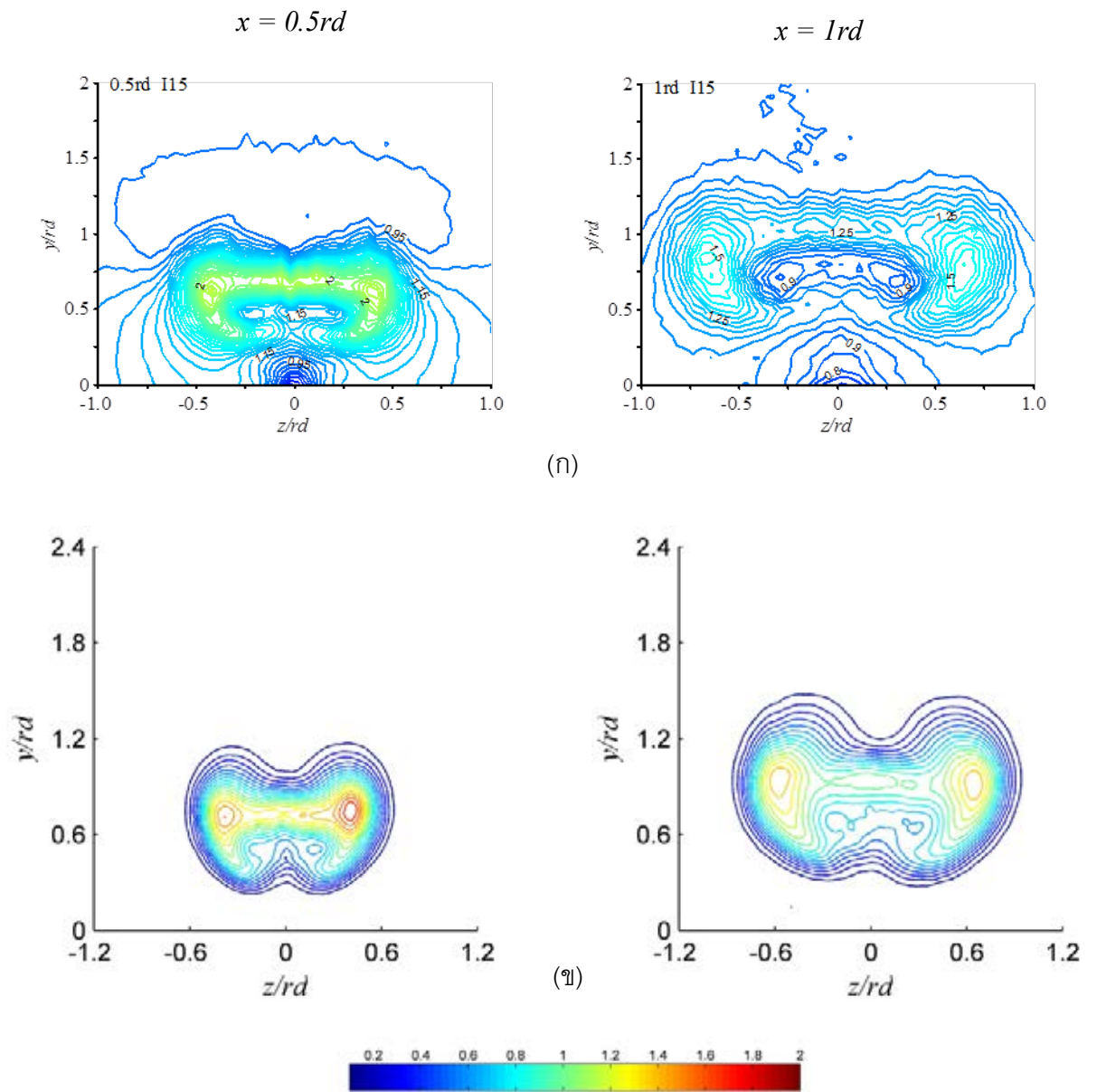
รูปที่ 6.4 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ต (e_q) แปรตามจำนวน N_2 สนาม บริเวณ $0 < \phi_{ij} \leq 1$ ของกรณี JICF, I15 และ I135



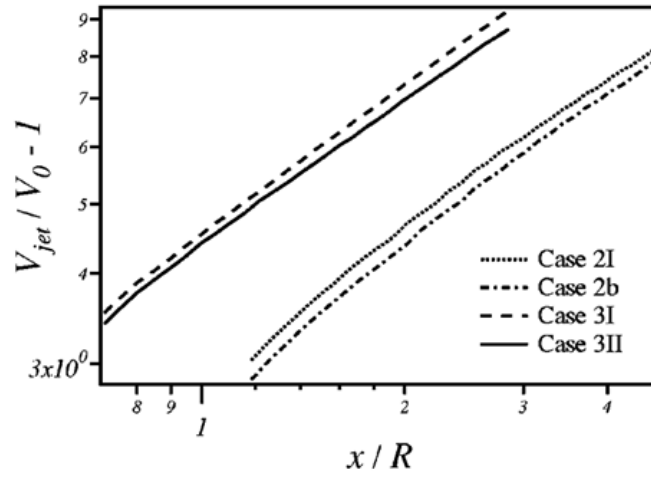
รูปที่ 6.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง Contour แสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ต่อกระแสมขวาง (V_x/V_{cf}) กับผลการทดลองของ Zaman and Foss (1997) กรณี JICF โดยที่ ก) Zaman and Foss (1997) ข) สำหรับงานวิจัยนี้



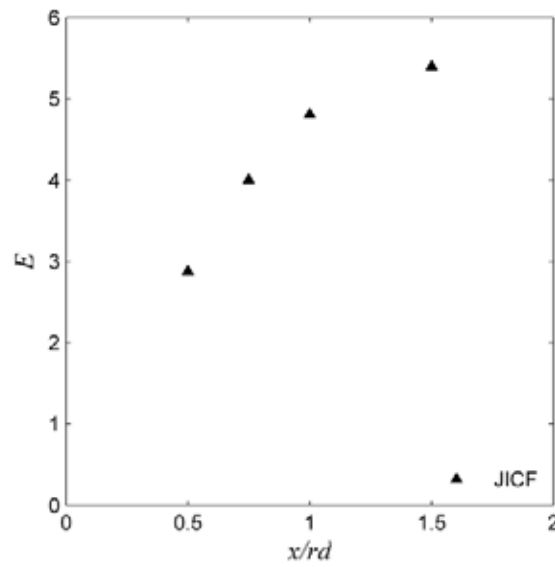
รูปที่ 6.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง Contour แสดงการการกระจายตัวของ ความเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง (V_{xy}/V_{cf}) กับผลการทดลองของ Konsri (2007) กรณี JICF โดยที่ ก) Konsri (2007) ข) สำหรับงานวิจัยนี้



รูปที่ 6.7 การเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง Contour แสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง (V_{xy}/V_{cf}) กับผลการทดลองของ Konsri (2007) กรณี I15 โดยที่ ก) Konsri (2007) ข) สำหรับงานวิจัยนี้

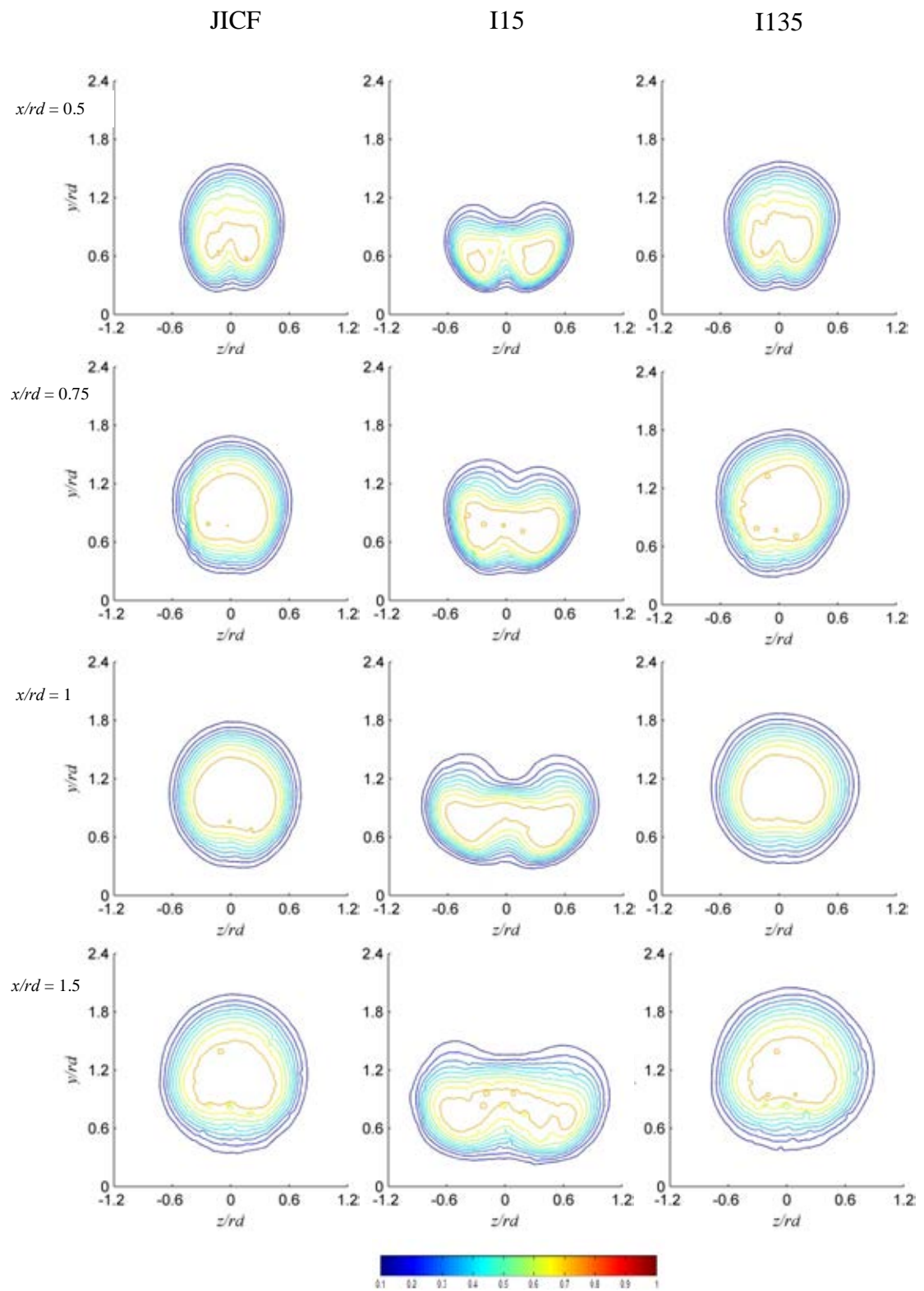


(ก)

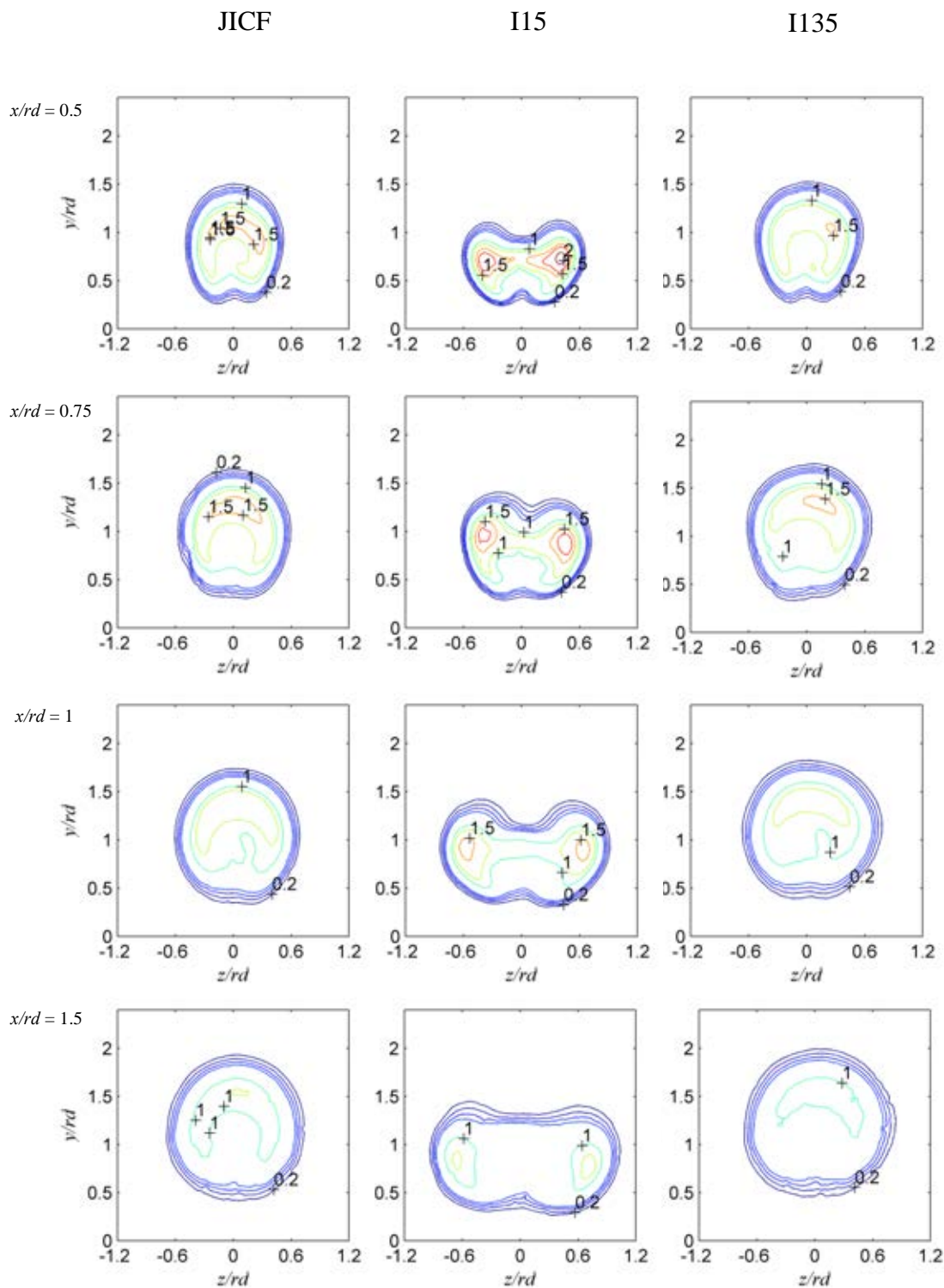


(ข)

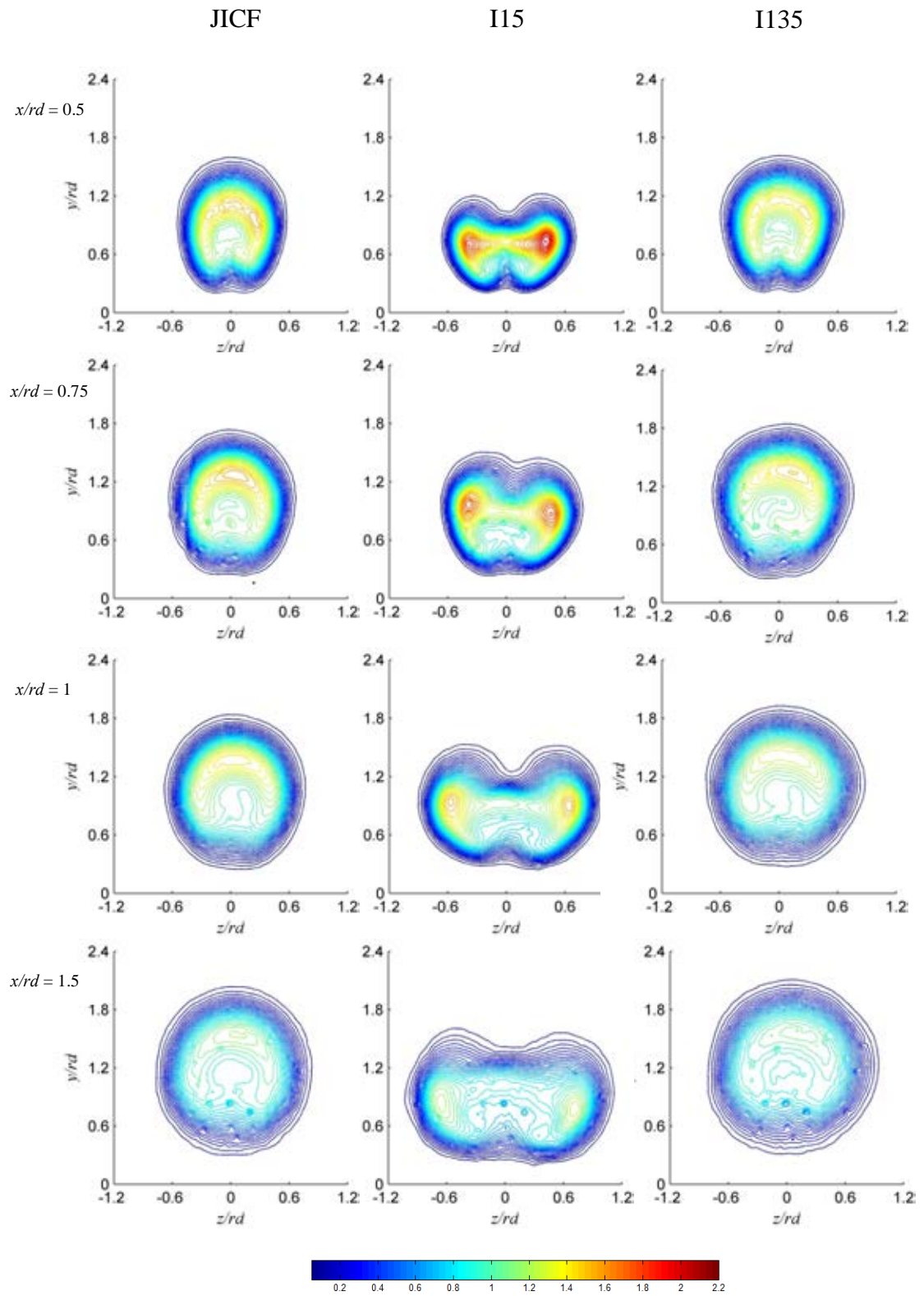
รูปที่ 6.8 การเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร กับผลการทดลองของ Yuan and Street (1998) case 3II กรณี JICF โดยที่ ก) Yuan and Street (1998) ข) สำหรับงานวิจัยนี้



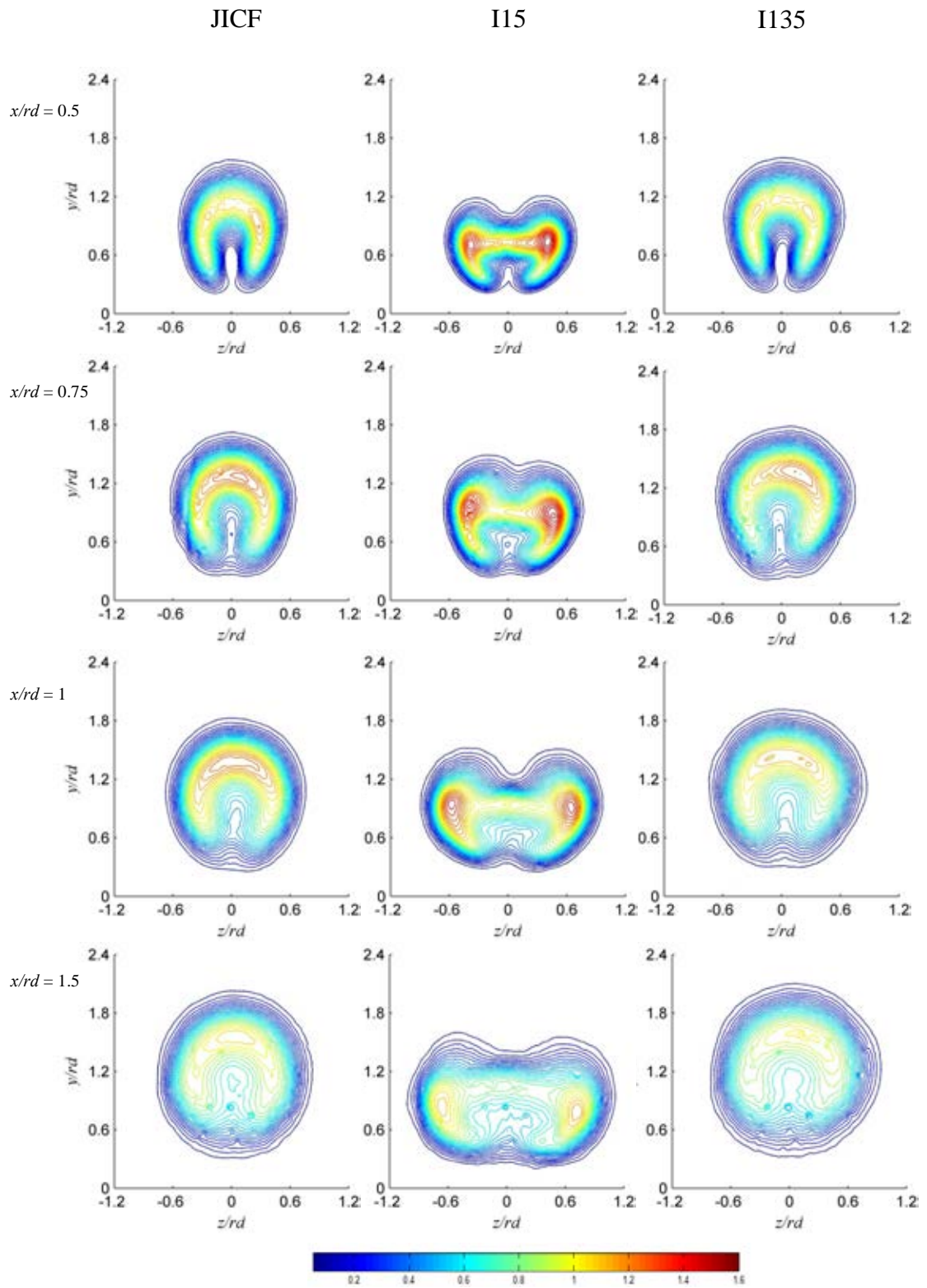
รูปที่ 7.1 การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใด กรณี JICF , I15 และ I135



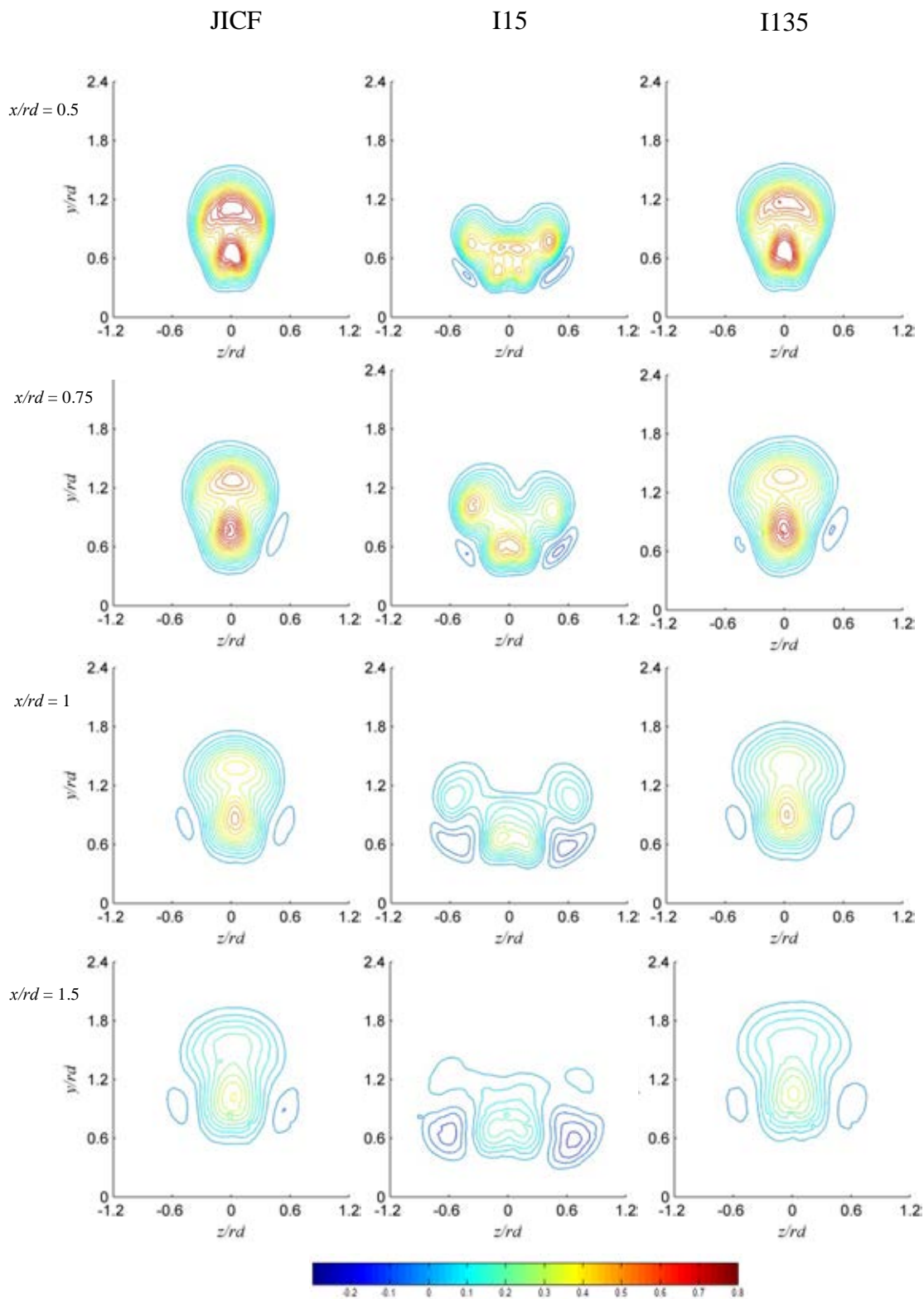
รูปที่ 7.2 การกระจายตัวของผลรวมความความเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง (V/V_{cf})
กรณี JICF, I15 และ I135



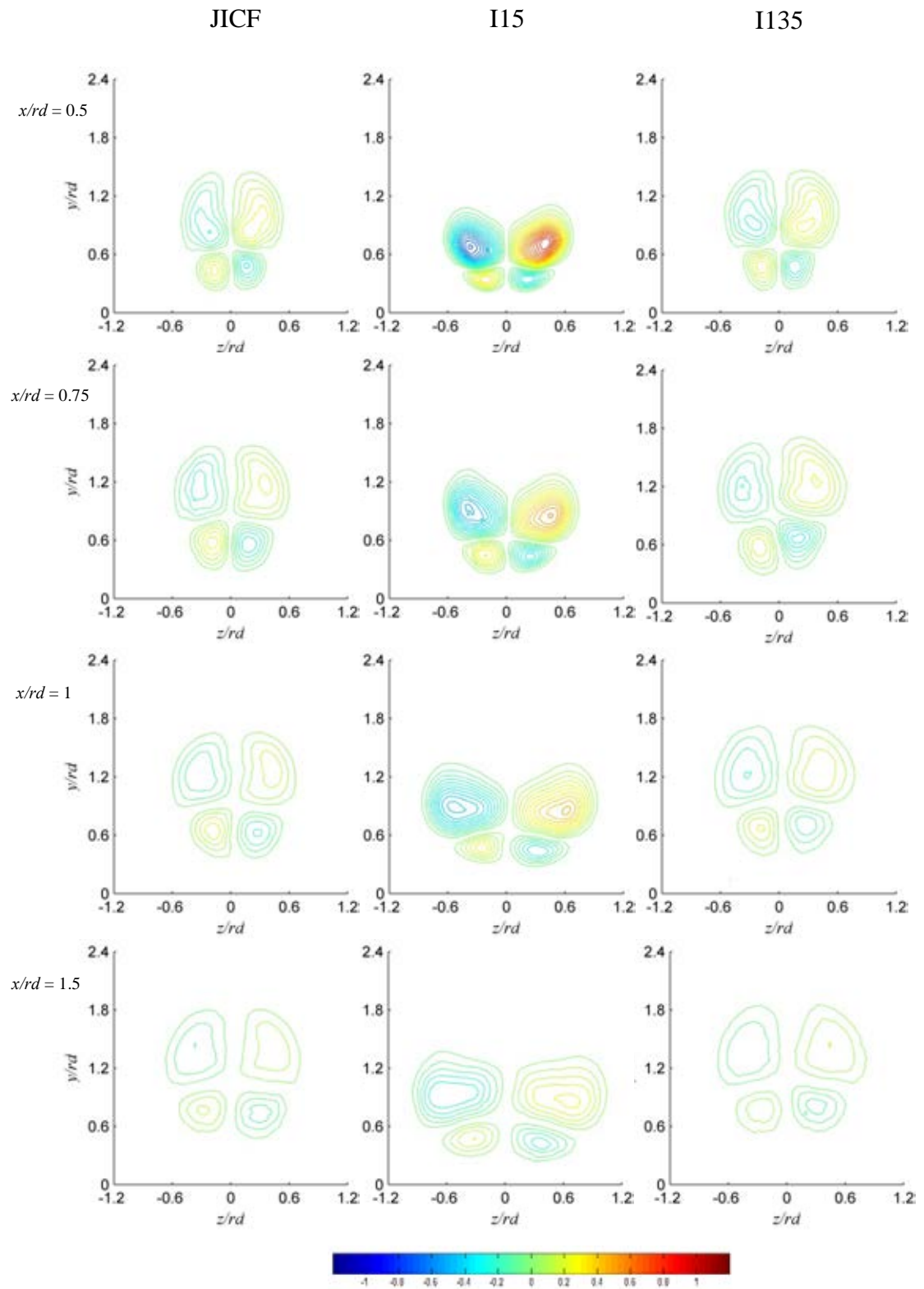
รูปที่ 8.1 การกระจายตัวผลรวมความเร็วต่อกระแสลมขวาง (V/V_{cf}) กรณี JICF, I15 และ I135



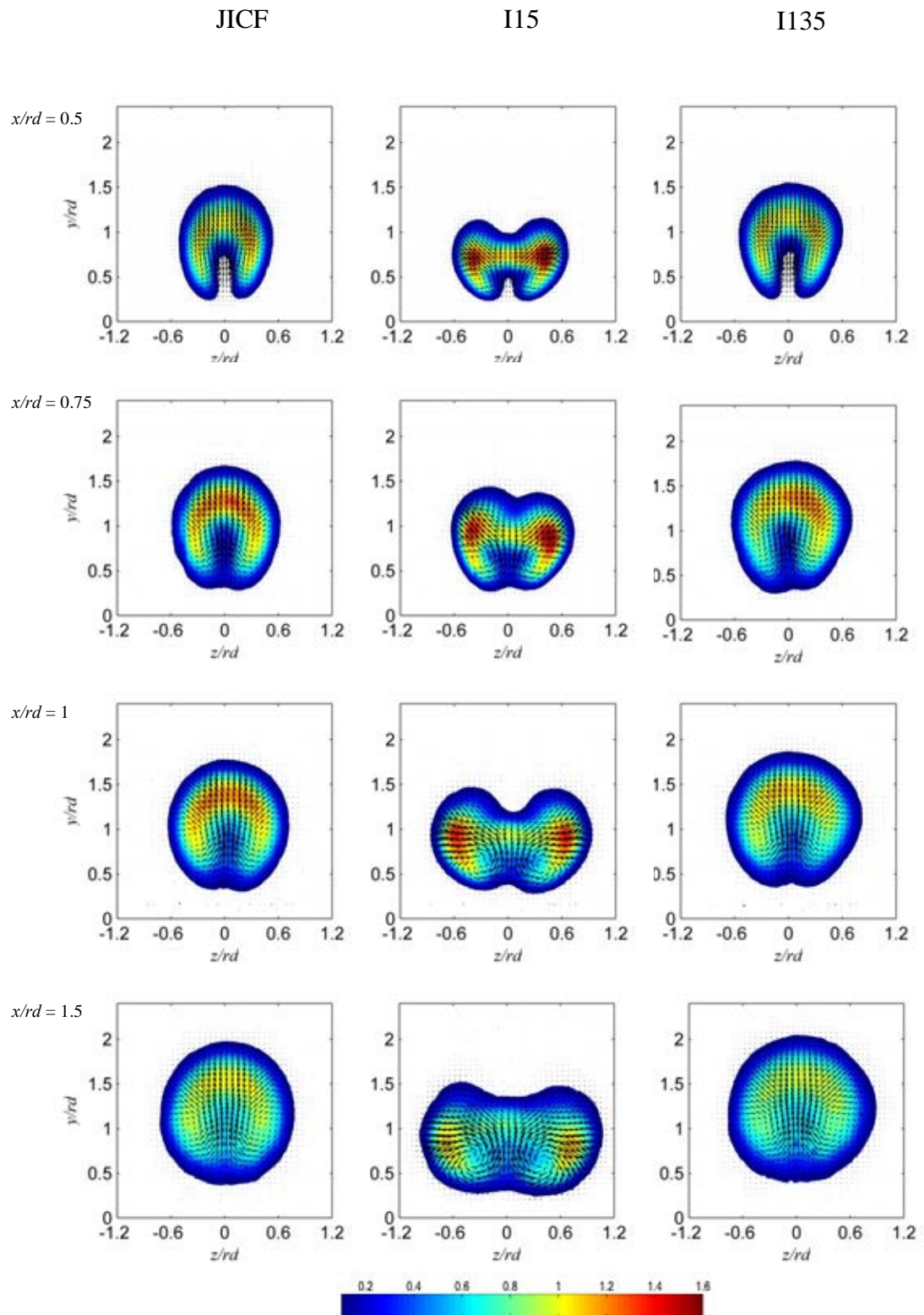
รูปที่ 8.2 การกระจายตัวความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสมขวาง (V_x/V_{cf}) กรณี JICF, I15 และ I135



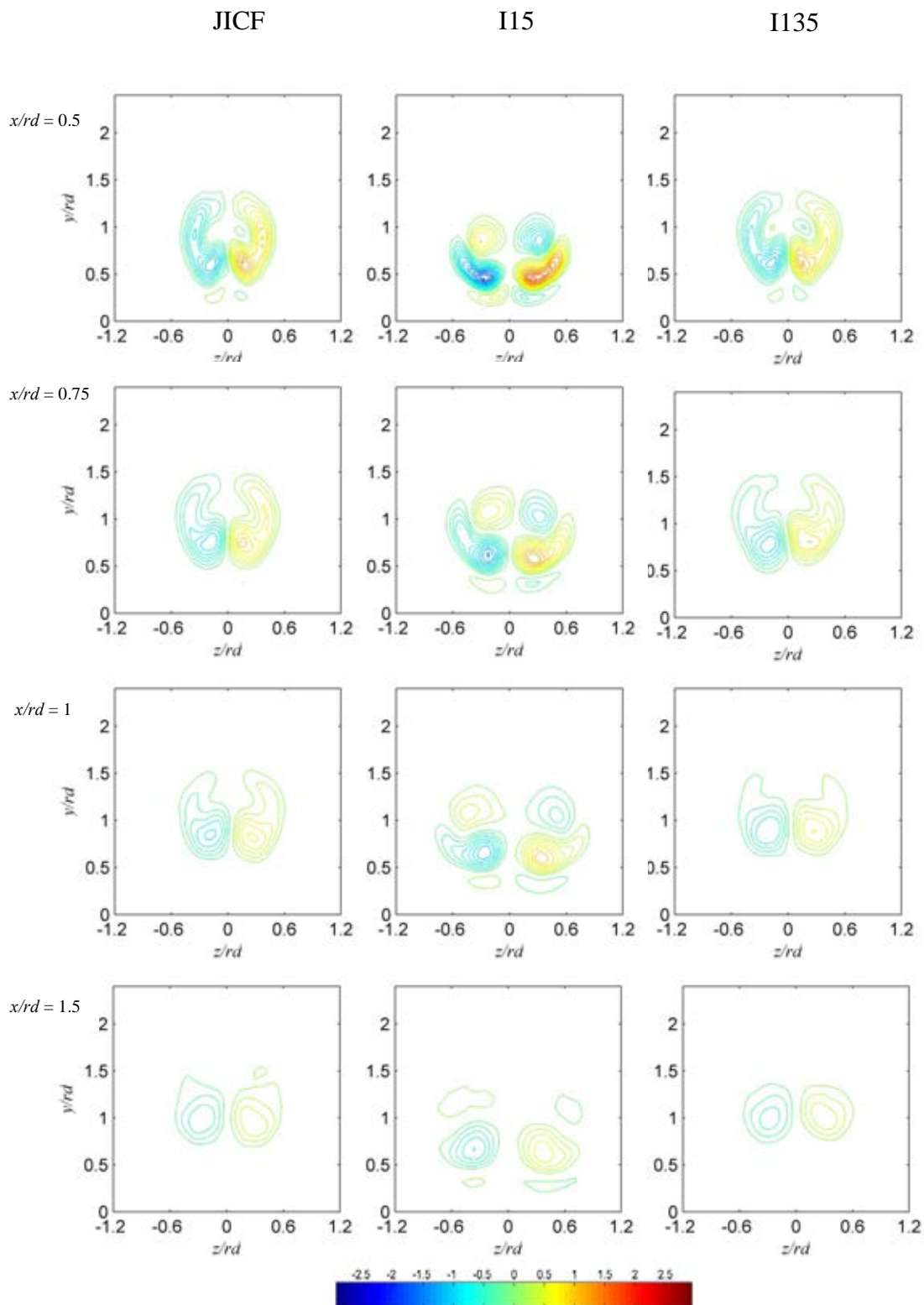
รูปที่ 8.3 การกระจายตัวความเร็วตามแนวแกน y ต่อกระแสมขวาง (V_y/V_{cf}) กรณี JICF, I15 และ I135



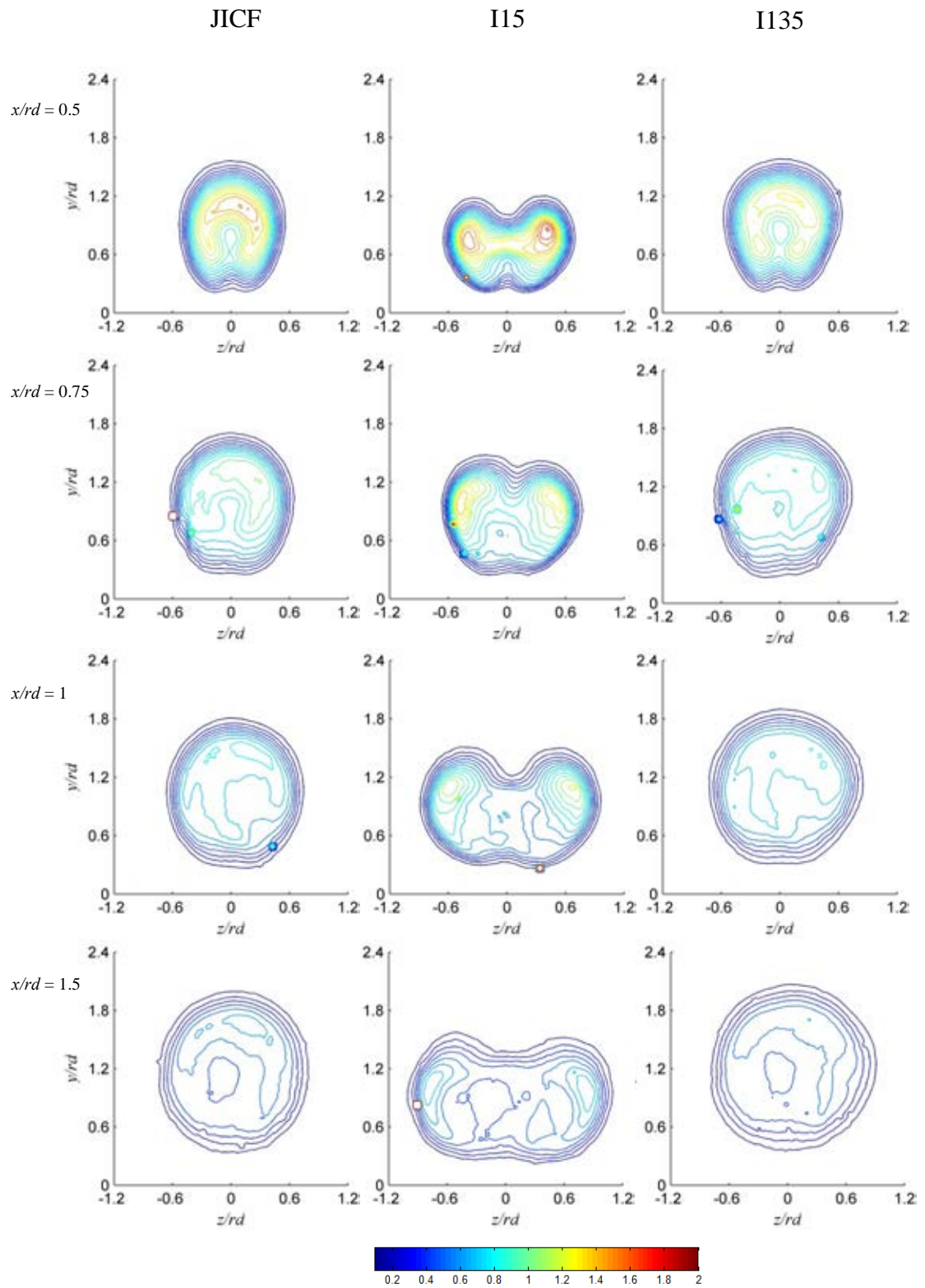
รูปที่ 8.4 การกระจายตัวความเร็วตามแนวแกน z ต่อกระแสลมขวาง (V_z/V_{cf}) กรณี JICF, I15 และ I135



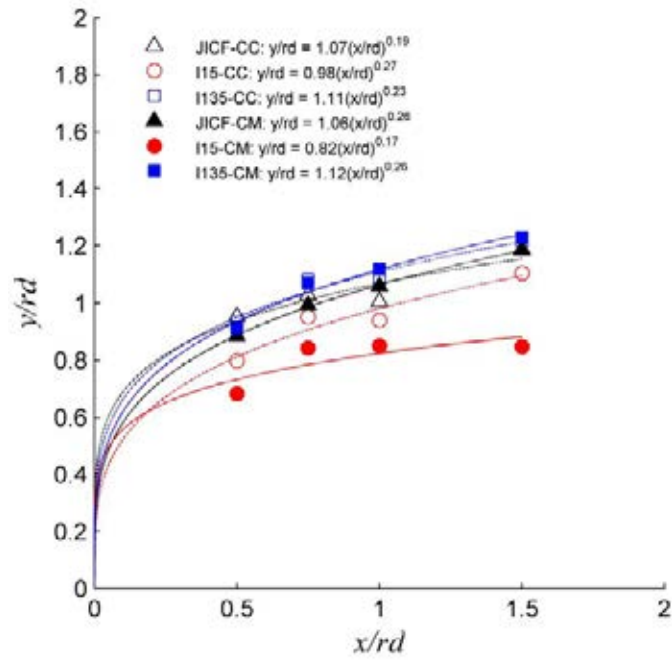
รูปที่ 8.5 การกระจายตัวความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสมขวาง (V_x/V_c) และ
เวกเตอร์บนระนาบ yz กรณี JICF, I15 และ I135



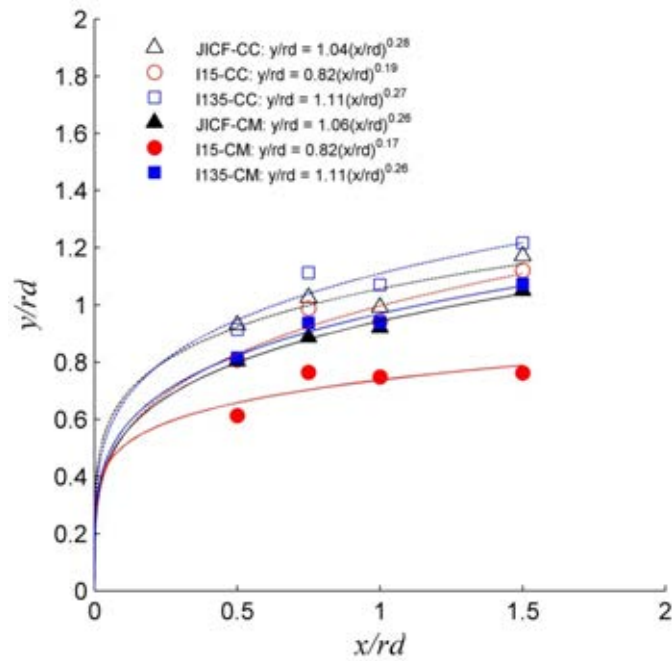
รูปที่ 8.6 การกระจายตัวของ vorticity เฉลี่ยโรมิติ ($\omega_x d/V_{cf}$) กรณี JICF, I15 และ I135



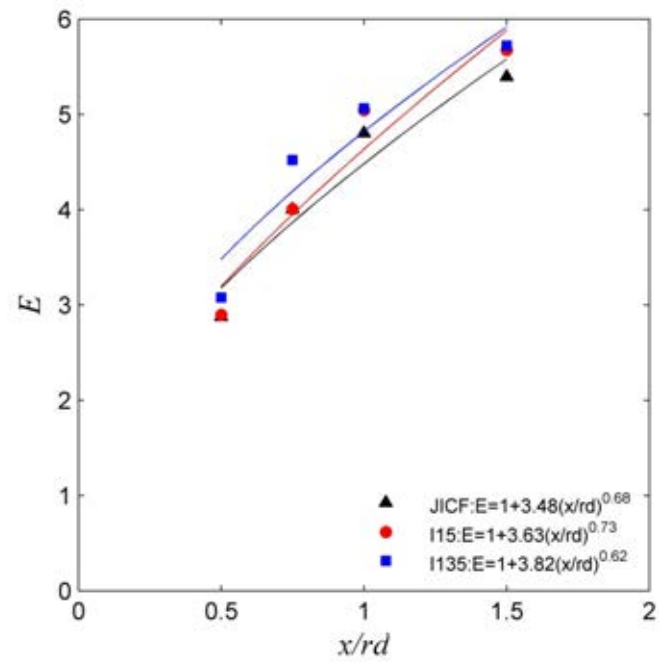
รูปที่ 8.7 การกระจายของ Turbulent kinetic energy ต่อ Crossflow kinetic energy กรณี JICF, I15 และ I135



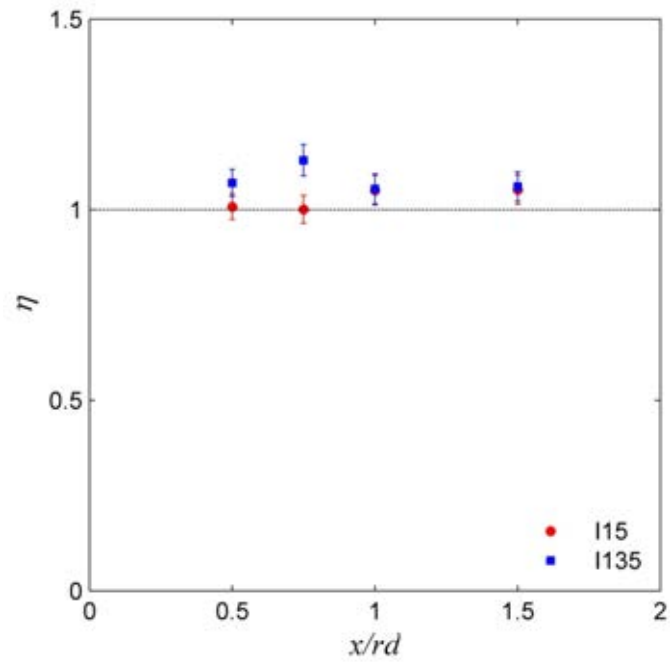
รูปที่ 8.8 CC และ CM ของผลรวมความเร็ว (V) กรณี JICF, I15 และ I135



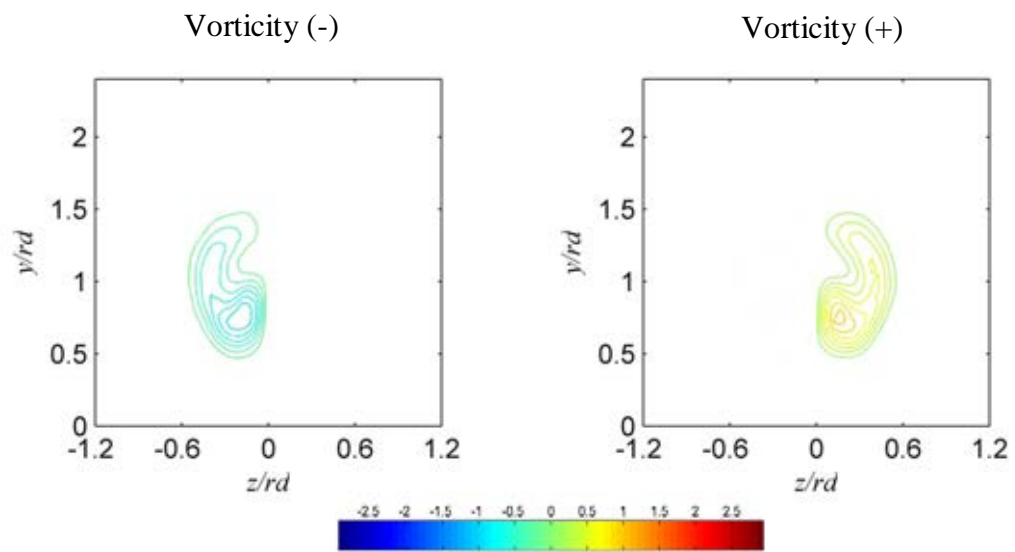
รูปที่ 8.9 CC และ CM ของ vorticity (ω_x) กรณี JICF, I15 และ I135



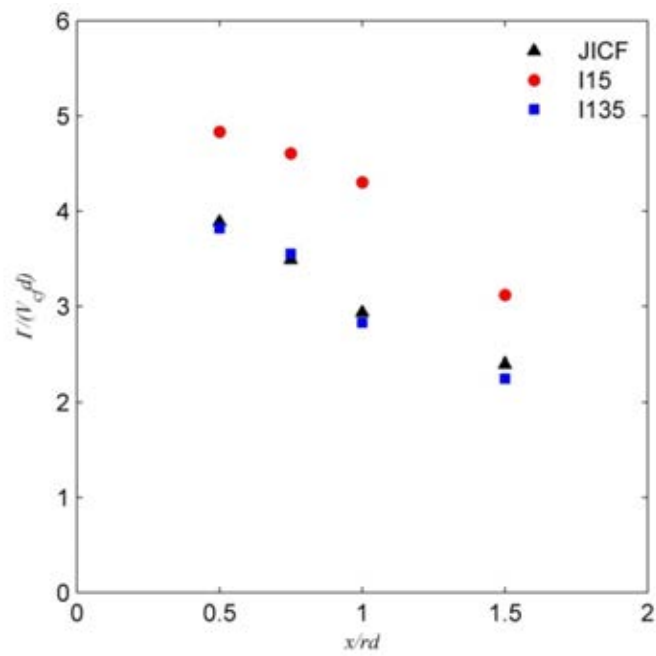
รูปที่ 9.1 อัตราส่วนการเหนียวต่อการผสมเชิงปริมาตร



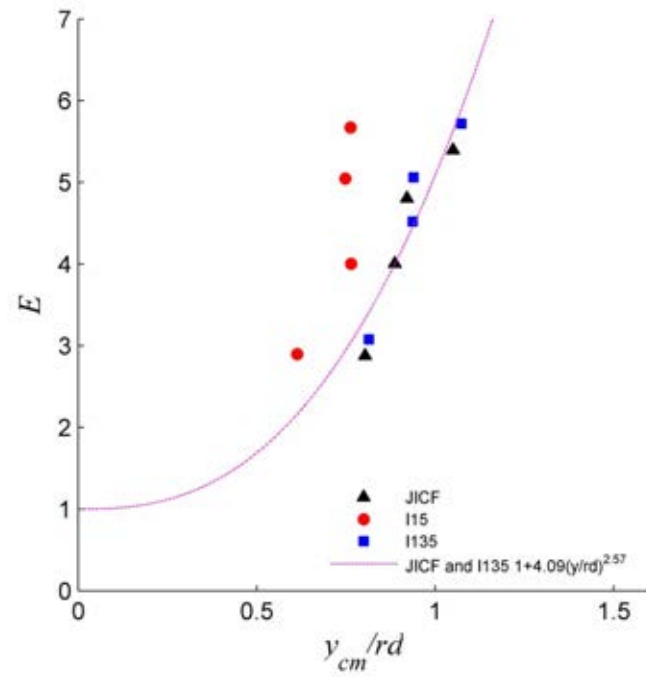
รูปที่ 9.2 ประสิทธิภาพของเจ็ดควบคุมต่อการเหนียวต่อการผสมเชิงปริมาตร



รูปที่ 9.3 การกำหนดเครื่องหมาย Circulation



รูปที่ 9.4 Circulation ไร้มิติไปตามแนว Downstream



รูปที่ 10.1 ความสัมพันธ์อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกับ CM ของ ω_x

รายการอ้างอิง

- Pratte, B. D., and Baines, W. D. Profiles of round turbulent jet in cross flow. J. Hydraulics Division Vol. 93 (November 1967) : 53-64.
- Kamotani, Y., and Greber, I. Experiments on a turbulent jet in a cross flow. AIAA J Vol. 10 No. 11 (November 1972) : 1425-1429.
- Fric, T.F., and Roshko, A. Vortical structure in the wake of a transverse jet. J. Fluid Mech Vol. 279 (November 1994) : 1-47.
- Kelso, R. M., Lim, T. T., and Perry, A. E. An experimental study of round jets in cross-flow. J. Fluid Mech Vol. 306 (January 1996) : 111-144.
- Smith, S. H., and Mungal, M. G. Mixing, structure and scaling of the jet in Crossflow. J. Fluid Mech Vol. 357 (February 1998) : 83-122.
- Yuan, L. L., and Street, R. L. Trajectory and entrainment of a round jet in Crossflow. Physics of Fluids Vol. 10 No. 9 (September 1998) : 2323-2335.
- Yuan, L. L., Street, R. L., and Ferziger, J. H. Large-eddy simulations of a round jet in Crossflow. J. Fluid Mech Vol. 379 (January 1999) : 71-104.
- Lim, T. T., New, T. H., and Lou, S. C. On the development of large-scale structures of a jet normal to a cross flow. Phys. Fluids Vol. 13 No. 3 (March 2001) : 770-775.
- Cortelezzi, L., and Karagozian, A. R. On the formation of the counter-rotating vortex pair in traverse jets. J. Fluid Mech Vol. 446 (November 2001) : 347-373.
- Sivadas, V., Pani, B.S., Butefisch, K.A., and Meier, G.E.A. Flow visualisation studies on growth of area of deflected jets. Exp. Fluids Vol. 13 (June 1997) : 105-112.
- Haven, B. A., and Kurosaka, M. Kidney and anti-kidney vortices in crossflow jets. J. Fluid Mech Vol. 352 (December 1997) : 27-64.
- New, T.H., Lim, T.T., and Luo, S.C. Elliptic jets in cross flow. J. Fluid Mech Vol. 494 (November 2003) : 119-140.
- Sau, A., Sheu, W.H., Hwang, R., and Yang, W.C. Three dimensional simulation of square jets in Crossflow. Phys. Rev. E Vol. 69 CID 066302 (January 2004)
- Muppidi, S., and Mahesh, K. Velocity field of around turbulent transverse jet. Proceedings fourth international symposium on turbulent and shear flow phenomena. Williamsburg Virginia. Paper TSFP4-197 (June 2005a) : 829 – 834.
- Muppidi, S., and Mahesh, K. Study of trajectories of jets in crossflow using direct numerical simulations. J. Fluid Mech Vol. 530 (May 2005b) : 81-100.
- Chongsiripinyo, K., Limdumrongtum, P., Pimpin, A., and Bunyajitradulya, A. Investigation of mixing structure in the near field of a jet in crossflow, Proceedings of The Twenty-Second Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 15-17 October 2008, Thammasat University, Rangsit Campus, Pathum Thani, Thailand.
- Watakulsin, P., Woraboot, G., Saengnumpong, W., Sangnimnuan, A., Pimpin, A., and Bunyajitradulya. Effect of Effective Velocity Ratio on the Near - Field Mixing Structures of a Jet in Crossflow, The First TSME International Conference on Mechanical Engineering, 20-22 October 2010, Ubon Ratchathani, Thailand.

- Zaman, K.B.M.Q., and Foss, J.K. The effect of vortex generators on a jet in a cross- flow. Phys. Fluids 9 (January 1997) : 106-114.
- Bunyajitradulya, A. and Sathapornnanon, S. Sensitivity to tab disturbance of the mean flow structure of nonswirling jet and swirling jet in Crossflow. Phys. Fluids 17 (March 2005) 045102.
- M'Closkey, R.T., King, J. M., Cortelezzi, L., and Karakozian, A. R. Activity controlled jets in Crossflow. J. Fluid Mech Vol. 452 (February 2002) : 325-335.
- Narayanan, S., Barooah, P., and Cohen, J.M. Fluid dynamics of highly pitched and yawed Jets in Crossflow. AIAA Journal Vol. 41 (December 2003) : 2316-2330.
- Kavsaoğlu, M.S., and Schetz, J.A. Effects of swirl and high intensity turbulence on a jet in a Crossflow. Journal of Aircraft Vol.26 No.6 (January 1989) : 539-546.
- Yoshizako, H., Yoshida, K., and Akiyama, I. Diffusion of a Jet Injected Perpendicularly into Uniform Crossflow. JSME (B) No.90-0442 B (1991) : 354-359.
- Niederhaus, C.E., Champagne, F.H., and Jacobs, J.W. Scalar transport in a swirling transverse jet. AIAA Journal Vol.35 No.11 (November 1997) : 1697-1704.
- Wangjiraniran, W. Effects of Swirl Number on Mixing Characteristics of A Heated Swirling Jet in Crossflow. Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2001.
- Wangjiraniran, W., and Bunyajitradulya, A. Temperature Distribution in Non-Zero Circulation Swirling Jet in Crossflow. Proceedings of The Fifteenth Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand, TF104-TF116. 28-30 November 2001 Vol. 1, Bangkok, Thailand
- Limdumrongtum, P. Swirling jet in crossflow: A flow visualization study, Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2007.
- Limdumrongtum, P., Chongsiripinyo, K., Nontiwatwanich, P., Pimpin, A., and Bunyajitradulya, A. Investigation of mixing structure in the near field of swirling jets in Crossflow. Proceedings of The Twenty-Third Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand, 4-7 November 2009, Chiang Mai.
- Yingjaroen, T., Pimpin, A., and Bunyajitradulya, A. Evolution of Mixing Regions in Jet and Swirling Jet in Crossflow: An Experimental Study. Proceedings of The Twentieth Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand, 18-20 October 2006, Nakhon Ratchasima, Thailand
- Denev, J., Fröhlich, J., and Bockhorn, H. Structure and mixing of a swirling transverse jet into a Crossflow. In Humphrey *et al.*(eds.), Procs. Of 4th Int. Symp. On Turbulent Shear Flow Phenomena: Williamsburg. 1255-1260 27-29 June 2005
- Denev, J. A., Fröhlich, J., and Bockhorn, H. Large eddy simulation of a swirling transverse jet into a crossflow with investigation of scalar transport. Phys. Fluids 21 015101 (January 2009)
- Kornsri, P. Effects of Control Jet on Characteristics of A Jet in Crossflow. Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2008.

- Hasselbrink, E. F., and Mungal, M. G. An analysis of the time - averaged properties of the far field of the transverse jet. in 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 96-0201 15-18 January 1996, AIAA, Reno
- Bunyajitradulya, A. Manipulation and Control of The Entrainment of A Jet in Crossflow. TRF RMU5080047 Research Project Report, Thailand Research Fund, 2011

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของ

ก.1.1 ค่าความไม่แน่นอนของการกระจายของความเร็วต่อกระแสลมขวาง

ความเร็วโรมิติตามแนวแกน x เขียนเป็น

$$V_{xn} = \frac{V_x}{V_{cf}}$$

จากสมการ UPE ความไม่แน่นอนของ V_{xn} เขียนได้ดังนี้

$$U_{V_{xn}}^2 = \left(\frac{\partial V_{xn}}{\partial V_x} \right)^2 U_{V_x}^2 + \left(\frac{\partial V_{xn}}{\partial V_{cf}} \right)^2 U_{V_{cf}}^2 + 2 \left(\frac{\partial V_{xn}}{\partial V_{cf}} \right) \left(\frac{\partial V_{xn}}{\partial V_x} \right) C_{B_{V_x} B_{V_{cf}}} + 2 \left(\frac{\partial V_{xn}}{\partial V_{cf}} \right) \left(\frac{\partial V_{xn}}{\partial V_x} \right) C_{P_{V_x} P_{V_{cf}}} \quad (\text{ก.1.1})$$

โดยมีข้อสมมุติฐานดังนี้

1. ความไม่แน่นอนของการวัดมาจาก Bias เพียงอย่างเดียว

- $U_{V_x} \approx B_{V_x}$ และ $U_{V_{cf}} \approx B_{V_{cf}}$
- $C_{P_{V_x} P_{V_{cf}}} \approx 0$

สมการที่ ก.1 เขียนใหม่ได้ว่า

$$U_{V_{xn}}^2 = \left(\frac{\partial V_{xn}}{\partial V_x} \right)^2 B_{V_x}^2 + \left(\frac{\partial V_{xn}}{\partial V_{cf}} \right)^2 B_{V_{cf}}^2 + 2 \left(\frac{\partial V_{xn}}{\partial V_{cf}} \right) \left(\frac{\partial V_{xn}}{\partial V_x} \right) C_{B_{V_x} B_{V_{cf}}} \quad (\text{ก.1.2})$$

แต่

$$\frac{\partial V_{xn}}{\partial V_x} = \frac{1}{V_{cf}} \quad (\text{ก.1.3})$$

$$\frac{\partial V_{xn}}{\partial V_{cf}} = -\frac{V_x}{V_{cf}^2} \quad (\text{ก.1.4})$$

$$C_{B_{V_x} B_{V_{cf}}} = \overline{B_{V_x} B_{V_{cf}}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N B_{V_x,k} B_{V_{cf},k} = \frac{1}{N} B_{V_x} B_{V_{cf}} N = B_{V_x} B_{V_{cf}} \quad (\text{ก.1.5})$$

แทนในสมการที่ ก.2 เขียนใหม่ได้ว่า

$$U_{V_{xn}}^2 = \left(\frac{1}{V_{cf1}}\right)^2 B_{V_x}^2 + \left(-\frac{V_x}{V_{cf}^2}\right)^2 B_{V_{cf}}^2 + 2\left(\frac{1}{V_{cf}}\right)\left(-\frac{V_x}{V_{cf}^2}\right) B_{V_x} B_{V_{cf}}$$

จัดรูปให้อยู่ Fraction Form

$$\left(\frac{U_{V_{xn}}}{V_{xn}}\right)^2 = \left(\frac{B_{V_x}}{V_x}\right)^2 + \left(\frac{B_{V_{cf}}}{V_{cf}}\right)^2 - 2\left(\frac{1}{V_x V_{cf}}\right) B_{V_x} B_{V_{cf}} \quad (\text{ก.1.6})$$

จัดรูปใหม่จะได้ว่า

$$\left(\frac{U_{V_{xn}}}{V_{xn}}\right)^2 = \left(\frac{B_{V_x}}{V_x}\right)^2 + \left(\frac{B_{V_{cf}}}{V_{cf}}\right)^2 - 2\left(\frac{B_{V_x}}{V_x}\right)\left(\frac{B_{V_{cf}}}{V_{cf}}\right) \quad (\text{ก.1.7})$$

ในทำนองเดียวกับ ความเร็วโรติตามแนวแกน y และ z

$$\left(\frac{U_{V_{yn}}}{V_{yn}}\right)^2 = \left(\frac{B_{V_y}}{V_y}\right)^2 + \left(\frac{B_{V_{cf}}}{V_{cf}}\right)^2 - 2\left(\frac{B_{V_y}}{V_y}\right)\left(\frac{B_{V_{cf}}}{V_{cf}}\right) \quad (\text{ก.1.8})$$

$$\left(\frac{U_{V_{zn}}}{V_{zn}}\right)^2 = \left(\frac{B_{V_z}}{V_z}\right)^2 + \left(\frac{B_{V_{cf}}}{V_{cf}}\right)^2 - 2\left(\frac{B_{V_z}}{V_z}\right)\left(\frac{B_{V_{cf}}}{V_{cf}}\right) \quad (\text{ก.1.9})$$

โดยมีข้อสมมุติฐาน

$$\frac{B_{V_y}}{V_y} = \frac{B_{V_y}}{V_y} = \frac{B_{V_y}}{V_y} \approx 0.1333 \text{ จากการสอบเทียบ PIV ที่ 6 เมตรต่อวินาที}$$

$$\frac{B_{V_{cf}}}{V_{cf}} \approx 0.1396 \text{ จากการสอบเทียบ PIV ที่ 4 เมตรต่อวินาที}$$

ฉะนั้น

$$\frac{U_{V_{ny}}}{V_{ny}} = \frac{U_{V_{ny}}}{V_{ny}} = \frac{U_{V_{ny}}}{V_{ny}} \approx 0.01$$

ก.2 ค่าความไม่แน่นอนของประสิทธิภาพของเจ็ดควบคุมต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

ประสิทธิภาพของเจ็ดควบคุมต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (η) นิยามเป็น

$$\eta = \frac{Q_{cJICF}}{Q_{JICF}} = \frac{Q_2}{Q_1}$$

ความไม่แน่นอนของ η เขียนได้ดังนี้

$$U_\eta^2 = \left(\frac{\partial \eta}{\partial Q_2}\right)^2 U_{Q_2}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial Q_1}\right)^2 U_{Q_1}^2 + 2\left(\frac{\partial \eta}{\partial Q_1}\right)\left(\frac{\partial \eta}{\partial Q_2}\right) C_{B_{Q_1}B_{Q_2}} + 2\left(\frac{\partial \eta}{\partial Q_1}\right)\left(\frac{\partial \eta}{\partial Q_2}\right) C_{P_{Q_1}P_{Q_2}} \quad (\text{ก.2.1})$$

โดยมีข้อสมมุติฐานดังนี้

1. ในระบบนั้นความไม่แน่นอนของการวัดมาจาก Bias เพียงอย่างเดียว
2. Bias จะคิดจากผลความคลาดเคลื่อนของ PIV

สมการที่ ก.2.1 เขียนใหม่ได้ว่า

$$B_\eta^2 = \left(\frac{\partial \eta}{\partial Q_2}\right)^2 B_{Q_2}^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial Q_1}\right)^2 B_{Q_1}^2 + 2\left(\frac{\partial \eta}{\partial Q_1}\right)\left(\frac{\partial \eta}{\partial Q_2}\right) C_{B_{Q_1}B_{Q_2}} \quad (\text{ก.2.2})$$

แต่

$$\frac{\partial \eta}{\partial Q_2} = \frac{1}{Q_1} \quad (\text{ก.2.3})$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial Q_1} = -\frac{Q_2}{Q_1^2} \quad (\text{ก.2.4})$$

$$C_{B_{Q_1} B_{Q_2}} = \overline{B_{Q_1} B_{Q_2}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N B_{Q_1,k} B_{Q_2,k} = \frac{1}{N} B_{Q_1} B_{Q_2} N = B_{Q_1} B_{Q_2} \quad (\text{ก.2.5})$$

แทนในสมการที่ ก.2.2 เขียนใหม่ได้ว่า

$$B_\eta^2 = \left(\frac{1}{Q_1}\right)^2 B_{Q_2}^2 + \left(-\frac{Q_2}{Q_1^2}\right)^2 B_{Q_1}^2 + 2\left(\frac{1}{Q_1}\right)\left(-\frac{Q_2}{Q_1^2}\right) B_{Q_1} B_{Q_2}$$

จัดรูปให้อยู่ Fraction Form

$$\left(\frac{B_\eta}{\eta}\right)^2 = \left(\frac{B_{Q_2}}{Q_2}\right)^2 + \left(\frac{B_{Q_1}}{Q_1}\right)^2 - 2\left(\frac{1}{Q_1 Q_2}\right) B_{Q_1} B_{Q_2} \quad (\text{ก.2.6})$$

แต่

$$Q_2 = \sum_{ij} \bar{V}_{ij,2} A$$

$$Q_1 = \sum_{ij} \bar{V}_{ij,1} A$$

ใช้ UPE

$$\left(\frac{B_{Q_2}}{Q_2}\right)^2 = \frac{1}{\sum_{ij} \bar{V}_{ij,2}} \sum_{ij} \bar{V}_{ij,2} \left(\frac{B_{\bar{V}_{ij,2}}}{\bar{V}_{ij,2}}\right)^2 \quad (\text{ก.2.7})$$

$$\left(\frac{B_{Q_1}}{Q_1}\right)^2 = \frac{1}{\sum_{ij} \bar{V}_{ij,1}} \sum_{ij} \bar{V}_{ij,1} \left(\frac{B_{\bar{V}_{ij,1}}}{\bar{V}_{ij,1}}\right)^2 \quad (\text{ก.2.8})$$

จาก

$$\bar{V}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{ij} V_{ij}$$

Bias จากความเร็ว

$$\delta \bar{V}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{ij} \delta V_{ij} = \frac{N_V}{N} \sum_{ij} \delta V_{ij} = \phi \sum_{ij} \delta V_{ij}$$

ประมาณได้ว่า

$$\frac{B_{\bar{V}_{ij}}}{\bar{V}_{ij}} \approx \phi \frac{B_{V_{ij}}}{V_{ij}}$$

สมการที่ ก.2.7 และ ก.2.8 เขียนใหม่ได้ว่า

$$\left(\frac{B_{Q_2}}{Q_2} \right)^2 = \frac{1}{\sum_{ij} \bar{V}_{ij,2}} \sum_{ij} \bar{V}_{ij,2} \left(\phi \frac{B_{V_{ij,2}}}{V_{ij,2}} \right)^2 \quad (\text{ก.2.7})$$

$$\left(\frac{B_{Q_1}}{Q_1} \right)^2 = \frac{1}{\sum_{ij} \bar{V}_{ij,1}} \sum_{ij} \bar{V}_{ij,1} \left(\phi \frac{B_{V_{ij,1}}}{V_{ij,1}} \right)^2 \quad (\text{ก.2.8})$$

เขียนสมการ ก.2.6 ใหม่

$$\left(\frac{B_{\eta}}{\eta} \right)^2 = \frac{1}{\sum_{ij} \bar{V}_{ij,2}} \sum_{ij} \bar{V}_{ij,2} \left(\phi_2 \frac{B_{V_{ij,2}}}{V_{ij,2}} \right)^2 + \frac{1}{\sum_{ij} \bar{V}_{ij,1}} \sum_{ij} \bar{V}_{ij,1} \left(\phi_1 \frac{B_{V_{ij,1}}}{V_{ij,1}} \right)^2 - 2 \left(\frac{1}{Q_1 Q_2} \right) B_{Q_1} B_{Q_2}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$B_{Q_1} B_{Q_2} = A^2 \sum \phi_1 \partial V_{ij,1} \phi_2 \partial V_{ij,2}$$

จะได้ว่า

$$\left(\frac{B_\eta}{\eta}\right)^2 = \frac{1}{\sum_{ij} \bar{V}_{ij,2}} \sum_{ij} \bar{V}_{ij,2} \left(\phi_2 \frac{B_{V_{ij,2}}}{V_{ij,2}}\right)^2 + \frac{1}{\sum_{ij} \bar{V}_{ij,1}} \sum_{ij} \bar{V}_{ij,1} \left(\phi_1 \frac{B_{V_{ij,1}}}{V_{ij,1}}\right)^2 - 2\left(\frac{1}{Q_1 Q_2}\right) A^2 \sum \phi_1 \partial V_{ij,1} \phi_2 \partial V_{ij,2} \quad (\text{ก.2.9})$$

สมการ ก.2.9 สามารถคำนวณด้วยโปรแกรม Matlab

จากการสอบเทียบ SPIV กำหนดให้

$$\frac{B_{V_{ij}}}{V_{ij}} \approx 0.01396 \text{ เมื่อ } V_{ij} \text{ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 เมตรต่อวินาที}$$

$$\frac{B_{V_{ij}}}{V_{ij}} \approx 0.01333 \text{ เมื่อ } V_{ij} \text{ มากกว่า 4 เมตรต่อวินาที}$$

ซึ่งผลการคำนวณสรุปได้ตารางดังต่อไปนี้

x/rd	I15	I135
	$\frac{B_\eta}{\eta}$	$\frac{B_\eta}{\eta}$
0.5	0.0328	0.0327
0.75	0.0400	0.0363
1	0.0371	0.0370
1.5	0.0371	0.0368

ตาราง ก.2.1 ความไม่แน่นอนของประสิทธิภาพของเจ็ดควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสม

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณนศน์ วิทยาประภากร เกิดวันที่ 2 มกราคม พ.ศ.2529 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2553