

การวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ดในกระแสมขวางที่มีการฉีตเจ็ดควบคุมโดยใช้ POD



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF STRUCTURES OF A CONTROLLED JET IN CROSSFLOW WITH POD

Mr. Apichet Srimekharat



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 2014
Copyright of Chulalongkorn University

อภิเชษฐ์ ศรีเมฆารัตน์ : การวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมโดยใช้ POD (ANALYSIS OF STRUCTURES OF A CONTROLLED JET IN CROSSFLOW WITH POD) อ.ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อศิ บุญจิตราดุลย์, 207 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุดของเจ็ตในกระแสลมขวาง ที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 3.9 และตัวเลขเรย์โนลส์ของกระแสลมขวางเท่ากับ 5,900 โดยจะวัดความเร็วสนามการไหลด้วย Stereoscopic Particlae Image Velocimetry ที่มีการฉีดอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเพื่อที่จะวิเคราะห์โครงสร้างส่วนที่เป็นเจ็ตหรือส่วนผสมของเจ็ตไม่รวมกระแสลมขวางได้อย่างชัดเจน และการฉีดอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางเพื่อทำการเปรียบเทียบ โดยทำการทดลองกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ (กรณี I15) และ (กรณี I135) ที่อัตราส่วนเชิงมุมการไหลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลักคงที่เท่ากับ 2 % และศึกษาในช่วงระยะทางการไหลที่ตำแหน่ง $x/r_d = 0.5$ ถึง 1.5 โดยจะวิเคราะห์โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุดด้วยเทคนิค Proper Orthogonal Decomposition (POD) จากการศึกษาพบว่า 1) โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญของกรณี JICF ที่บริเวณ Near field ($x/r_d = 0.5$ ถึง 1) จะเป็นโครงสร้างการก่อตัวของ Counter-rotating vortex pair (CVP) ในขณะที่บริเวณ Far field ($x/r_d = 1.5$) จะเป็นโครงสร้าง Jet shear layer ซึ่งเป็นโครงสร้างของเจ็ต และโครงสร้าง Wake vortices ซึ่งเป็นโครงสร้างของกระแสลมขวาง (Wake vortices) นี้จะพบเฉพาะในกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง แต่จะไม่พบในกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ต) ในขณะที่เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมในกรณี I15 พบว่าโครงสร้างจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่มีการขยายตัวออกด้านข้างเจ็ตมากขึ้นแต่มีขนาดในแนวตั้งลดลงและยังคงโครงสร้างลักษณะคล้ายเดิมไปตลอดระยะทางการไหล ในขณะที่กรณี I135 ที่บริเวณ Near field จะพบโครงสร้างการก่อตัวของ CVP คล้ายกับกรณี JICF แต่มีการขยายตัวออกทั้งด้านข้างและในแนวตั้ง และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไป Far field พบว่าโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญจะเป็นโครงสร้าง CVP 2) เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนพบว่า กรณี JICF การกระจายตัวของระดับพลังงานจะมีลักษณะ กว้าง-เตี้ย แสดงว่าระดับพลังงานจะกระจายตัวไปตามโครงสร้างต่างๆในระดับใกล้เคียงกัน แต่เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมพบว่ากรณี I15 การกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนจะเปลี่ยนเป็น ผอม - สูง หรืออีกนัยหนึ่ง ผลของการฉีดเจ็ตควบคุมจะทำให้โครงสร้างที่มีพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุดมีพลังงานเพิ่มขึ้นโดดเด่นกว่าโครงสร้างอื่นๆรองลงมา แสดงว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ จะส่งเสริมโครงสร้างพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุดให้โดดเด่นกว่าโครงสร้างอื่นๆ ในขณะที่กรณี I135 พบว่าการกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนจะอยู่ระหว่างกรณี JICF และ I15 ที่ตำแหน่ง $x/r_d = 0.5$ ถึง 1.5 แสดงว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ จะช่วยส่งเสริมโครงสร้างพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุดแต่ยังส่งเสริมน้อยกว่ากรณี I15 และ 3) เมื่อทำการฉีดเจ็ตควบคุม (ทั้งกรณี I15 และ กรณี I135) พบว่าเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะทางการไหล โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและการกระจายตัวของระดับพลังงานยังคงมีลักษณะคล้ายเดิมไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่าโครงสร้างใหม่ที่เกิดจากการฉีดเจ็ตควบคุมนั้นมีเสถียรภาพอย่างน้อยในขอบเขตของระยะทางตามแนวการไหลที่ศึกษา

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5670457621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: AZIMUTHAL CONTROL JETS / JET IN CROSSFLOW / PROPER ORTHOGONAL DECOMPOSITION (POD) / MOST ENERGETIC STRUCTURE / ENERGY DISTRIBUTION

APICHET SRIMEKHARAT: ANALYSIS OF STRUCTURES OF A CONTROLLED JET IN CROSSFLOW WITH POD. ADVISOR: ASSOC. PROF ASI BUNYAJITRADULYA, 207 pp.

Effects of azimuthal control jets on the most energetic flow structures of a jet in crossflow (JICF) are investigated by Proper Orthogonal Decomposition (POD) analysis. The experiment is conducted with the effective velocity ratio of 3.9 and the crossflow Reynolds number of 5,900. The velocity field in the cross plane is measured by Stereoscopic Particle Image Velocimetry. In order to instantaneously and clearly identify and differentiate the jet region and structure from the pure crossflow region, only the main jet fluid – and not the crossflow fluid – is seeded with tracer particles. However, in order to make a comparison, the cases in which both fluids are seeded are also investigated. For the cases of controlled jets in crossflow, a pair of azimuthal control jets are deployed steadily at the azimuthal positions (case I15) and (case I135) at the control jets to the main jet mass flow rate ratio of 2%. The results show that 1) For JICF, in the near field, the most energetic structure of JICF is the formation of the counter-rotating vortex pair (CVP). In the far field, they are the jet shear layer – which is originated from the jet, and the wake vortices - which are originated from the crossflow. When the the azimuthal control jets are deployed in case I15, it is found that the most energetic jet structure penetrates less into the crossflow; and while its extent in the spanwise direction increases, in the transverse direction decreases, when compared to JICF. Furthermore, it is found that the structure remains relatively unchanged as the jet develops downstream. For I135, in the near field, the most energetic jet structure is the formation of CVP; in the far field, it is the CVP that dominates over the jet shear layer and the wake vortices. 2) For the energy distribution among POD modes, it is found that JICF has a broad and low-profile energy distribution. This indicates that the energy is distributed relatively evenly among the first few modes. However, when the azimuthal control jets are applied in case I15, the energy distribution becomes narrow and high-profile. This indicates that the most energetic jet structures are promoted over other less energetic ones. For I135, its energy distribution resides between JICF and I15, indicating similar trend as I15, but with less effect. 3) For the cases of controlled jets in crossflow (both I15 and I135), it is found that when the jet develops downstream, both the most energetic jet structures and the energy distributions remain relatively unchanged. This indicates that the deployment of the azimuthal control jets not only promotes the most energetic jet structures over the less energetic ones, but also makes them more stable, at least within the downstream distance investigated.

Department: Mechanical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ประสิทธิประสาทความรู้และกระบวนการความคิดเชิงวิศวกรรม อีกทั้งโอกาสมากมายที่มีให้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย ท่านรองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ ซึ่งได้ประสิทธิประสาทความรู้ และช่วยเหลือจัดหาแหล่งเงินทุนให้ผู้วิจัย ตลอดจนความรู้และโอกาสที่ดีต่างๆ ทั้งที่เป็นประโยชน์อย่างสูงต่อการทำวิจัยและการดำเนินชีวิตของผู้วิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เลิศนุวัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ วรรณโสภากย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เวชพงศ์ ชูติชูเดช ที่ได้เอื้อเฟื้อและคำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ในเนื้อหามากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยจากโครงการตรี-โท 5 ปี เงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาลประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556-2557 (งบประมาณแผ่นดิน) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สัญญาเลขที่ GRB_APS_21_56_21_04 ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณบุคคลซึ่งมีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงดังต่อไปนี้ ครู ไพโรจน์ อนันตเศรษฐกุล, ธเนศน์ วิทยาประภากร, ชนัตต์ คุร์พิพัฒน์, ชยากร วิโรจนกุล, เอษณีย์ เทวานุรักษ์, กิตติคุณ วงศ์ทองศิริ, เศรษฐสิทธิ์ ชัยเกษตรสิน, อธิภัทร์ สุชีวกุล, ปิยพันธ์ ภาณุสิทธิกร, สุภัค ดาวยก และ ศุภกร สุวรรณ

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยชี้แนะ อบรม สั่งสอน และให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ ซึ่งเล็งเห็นความสำคัญของการศึกษา อีกทั้งยังคงคอยเป็นกำลังใจให้ไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคต่างๆ และเป็นแรงผลักดันตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ถ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 แรงจูงใจ.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.4 ปัญหาและแนวทางการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	7
2.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity ratio).....	7
2.2 ตัวเลขเรย์โนลส์ของเจ็ตและตัวเลขเรย์โนลส์ของกระแสมขวาง	7
2.3 การศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวาง.....	8
2.4 การปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสมขวาง.....	14
2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวาง.....	20
บทที่ 3 เทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวาง	21
3.1 เทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางด้วย POD.....	21
3.1.1 กระบวนการหา POD Mode และ Energy.....	22

3.1.2 กระบวนการย้อนกลับ (Reconstruction)	24
บทที่ 4 รายละเอียดการทดลองและอุปกรณ์การทดลอง.....	26
4.1 ชุดการทดลอง.....	26
4.2 พิกัดการทดลอง.....	29
4.3 Stereoscopic Particle Image Velocimetry	29
4.4 การวัดสถานะการทดลอง.....	31
4.4.1 การวัดสถานะเริ่มต้นของกระแสลมขวาง	31
4.4.2 การวัดรูปแบบความเร็วและสถานะเริ่มต้นของเจ็ต.....	32
4.4.3 การวัดอัตราการไหลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง.....	33
4.5 การสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง SPIV กับ Pitot tube	33
4.6 การวัดค่าความเร็วของเจ็ตเพื่อวิเคราะห์ โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง	35
4.7 สรุปพารามิเตอร์สำหรับการทดลอง	35
บทที่ 5 แนวทางการวิเคราะห์และตีความผลการทดลองอันเนื่องมาจากการใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ตเท่านั้น.....	36
5.1 ข้อแตกต่างและผลของการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต และ การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง	36
บทที่ 6 การประเมินการลู่เข้าและสอบทวนผลการทดลอง.....	40
6.1 การนิยามบริเวณที่เป็นเจ็ตในเชิงความน่าจะเป็น	40
6.2 การประเมินการลู่เข้า.....	40
6.3 การสอบทวนผลการทดลอง	42
6.3.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างของเจ็ต	43
6.3.2 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ.....	43
บทที่ 7 ผลของเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุดของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....	45

7.1	โครงสร้างการกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหล กรณีการ ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต	46
7.2	ผลของเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานการไหลปั่นป่วนสูง ที่สุด ของเจ็ตในกระแสมหาสมุทรกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต	47
7.2.1	โครงสร้างความเร็วเฉลี่ย	47
7.2.2	โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานสูงสุดของกรณี JICF, I15 และ I135 (โครงสร้างที่ถูกวิเคราะห์ด้วย POD)	49
7.2.3	การเปรียบเทียบผลของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ	55
7.2.4	การกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน	56
7.2.5	ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสม	58
7.3	ผลของเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานการไหลปั่นป่วนสูง ที่สุด ของเจ็ตในกระแสมหาสมุทรกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสมหาสมุทร ..	58
7.3.1	โครงสร้างความเร็วเฉลี่ย	58
7.3.2	โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญของ JICF, I15 และ I135 (โครงสร้างที่ถูกวิเคราะห์ด้วย POD) 60	
7.3.3	การเปรียบเทียบผลของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ	64
7.3.4	การกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน	65
7.3.5	ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสม	66
7.4	การเปรียบเทียบโครงสร้างและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนของเจ็ตในกระแสมหาสมุทร ระหว่างกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต กับ ฉีดอนุภาคติดตามการไหลทั้ง เจ็ตและกระแสมหาสมุทร	66
บทที่ 8	การตรวจสอบผลการทดลองด้วยกระบวนการย้อนกลับ	74
บทที่ 9	ผลของจำนวนภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย POD	76
บทที่ 10	สรุปผลการทดลอง	78
	ประมวลตาราง	88

ญ

หน้า

ประมวลรูปภาพ	111
รายการอ้างอิง	198
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	207



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2. 1	สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง 89
ตารางที่ 2. 2	สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการติด Tab ต่อคุณลักษณะของเจ็ต ในกระแสลมขวาง..... 98
ตารางที่ 2. 3	สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการกระตุ้นด้วย Pulse ต่อ คุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง 101
ตารางที่ 2. 4	สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการกระตุ้นด้วยการหมุนควง (Swirl) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง 102
ตารางที่ 2. 5	สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการกระตุ้นด้วยเจ็ตควบคุมตามแนว เส้นรอบวง (Azimutal control jet) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง . 105
ตารางที่ 2. 6	สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลม ขวางด้วย Proper orthogonal decomposition (POD)..... 107
ตารางที่ 4. 1	ความหนาชั้นขอบเขต (Boundary layer) ของแต่ละตำแหน่งตามแนว Spanwise (z)..... 108
ตารางที่ 4. 2	Spatial resolution ของการวัดด้วย SPIV ในแต่ละตำแหน่งการทดลอง..... 108
ตารางที่ 4. 3	พารามิเตอร์ที่สำคัญของงานวิจัยนี้ 109
ตารางที่ 6. 1	พารามิเตอร์ที่สำคัญของการสอบเทียบผลการทดลองระหว่างงานของ Meyer <i>et al.</i> (2007) และการทดลองเพื่อการสอบเทียบของงานวิจัยนี้ 110

สารบัญรูป

รูปที่ 1. 1	โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางและคุณลักษณะที่สำคัญ : การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) และ เส้นทางเดินของเจ็ต (Trajectory)	112
รูปที่ 1. 2	การประยุกต์ใช้เจ็ตในกระแสมขวางในงานเชิงวิศวกรรม	113
รูปที่ 2. 1	เส้นทางเดินของความเร็ว (Pratte and Baines, 1967).....	114
รูปที่ 2. 2	เส้นทางเดินความเร็วและอุณหภูมิ (Kamotani and Greber, 1972)	114
รูปที่ 2. 3	เส้นทางเดิน Passive scalar (Smith and Mungal, 1998).....	115
รูปที่ 2. 4	เส้นทางเดิน steamline (Yuan and Street, 1998).....	115
รูปที่ 2. 5	Quadratics curve fit ของแต่ละเส้นทางเดิน (Muppidi and Mahesh, 2005a)..	116
รูปที่ 2. 6	ผลการเปรียบเทียบเส้นทางเดินที่สเกลด้วย (ก) rd และ (ข) r^2d	116
รูปที่ 2. 7	เส้นทางเดินสเกลด้วยพารามิเตอร์ตัวใหม่ h (Muppidi and Mahesh, 2005b)	117
รูปที่ 2. 8	โครงสร้าง Vortical structure ของเจ็ตในกระแสมขวาง.....	117
รูปที่ 2. 9	ลดลงของ C% ของ JICF และ Free Jet บน Near Field บน r^2d	118
รูปที่ 2. 10	Contour ของ Instantaneous spanwise vorticity (ซ้าย) และ Contour.....	118
รูปที่ 2. 11	โครงสร้างบริเวณ Near field ของเจ็ตในกระแสมขวาง ซึ่งแสดงเป็น	119
รูปที่ 2. 12	โครงสร้างของ Hanging vortices (Yuan <i>et al.</i> , 1999).....	119
รูปที่ 2. 13	โครงสร้างของการเกิด CVP (Cortelezzi and Karagozian, 2001)	120
รูปที่ 2. 14	การพัฒนาตัวของเจ็ตในกระแสมขวาง (Cortelezzi and Karagozian, 2001).....	121
รูปที่ 2. 15	Vortices structure ของเจ็ตในกระแสมขวางบนระนาบสมมาตร	122
รูปที่ 2. 16	การพับตัวของ Cylindrical shear layer (Lim <i>et al.</i> , 2001)	122
รูปที่ 2. 17	วิวัฒนาการของ Streamlines ในการก่อตัวของ Kelvin-Helmholtz roller.....	123

รูปที่ 2. 18	วิวัฒนาการของ Vortices structure (Sau <i>et al.</i> , 2004).....	123
รูปที่ 2. 19	Contour ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบตั้งฉาก (Zaman and Fross, 1997).....	124
รูปที่ 2. 20	ความเร็วเฉลี่ยบนหน้าตัดตั้งฉากและ Streamwise vorticity	125
รูปที่ 2. 21	ผลของการติด Tab ต่อเส้นทางเดินของความเร็วบนระนาบสมมาตร.....	126
รูปที่ 2. 22	การติด tab ตามแนวเส้นรอบวง.....	126
รูปที่ 2. 23	การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันจากการติด Tab กรณีเจ็ทไม่หมุนควง	127
รูปที่ 2. 24	การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันจากการติด Tab กรณีเจ็ทหมุนควง	128
รูปที่ 2. 25	ผลการกระตุ้นเจ็ทด้วยลำโพง (M'Closkey <i>et al.</i> , 2002).....	129
รูปที่ 2. 26	ภาพ Instantaneous (Narayanan <i>et al.</i> , 2003).....	130
รูปที่ 2. 27	การกระจายของสัมประสิทธิ์อนุภาคน้ำมันรวมบนระนาบตั้งฉาก	131
รูปที่ 2. 28	Instantaneous Iso concentration surface โดย $S1=0.1$, Top view.....	132
รูปที่ 2. 29	ภาพเฉลี่ยของ Streamline และค่าความเข้มข้นที่ $x = 0$ และ $x = 1.83D$ Top.....	132
รูปที่ 2. 30	Instantaneous image ของ mixing structure บนด้าน Top view	133
รูปที่ 2. 31	ชุดเจ็ทควบคุม (Kornsri <i>at el.</i> , 2009).....	133
รูปที่ 2. 32	ผลของเจ็ทควบคุมต่อเส้นทางเดินของความเร็ว (Kornsri <i>at el.</i> , 2009).....	134
รูปที่ 2. 33	Contour ของความเร็ว (Normalize ด้วย ความเร็วกระแสลมขวาง).....	134
รูปที่ 2. 34	ประสิทธิภาพของเจ็ทควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมปริมาตร	135
รูปที่ 2. 35	โครงสร้างที่มีระดับพลังงานสูงที่สุดของเจ็ทในกระแสลมขวางโดยที่ $r = 3.3$	135
รูปที่ 4. 1	Schematic แสดงชุดการทดลอง	136
รูปที่ 4. 2	อุโมงค์ลมและหน้าตัดทดสอบ.....	136
รูปที่ 4. 3	พัลลมหายใจของอุโมงค์ลม	137
รูปที่ 4. 4	พัลลมให้กำเนิดเจ็ทหลัก	137
รูปที่ 4. 5	Six-jet Atomizer.....	138

รูปที่ 4. 6	ชุดหัวเจ็ทควบคุม (Konsri, 2007).....	138
รูปที่ 4. 7	เครื่องอัดลมแบบลูกสูบ แบบ Single acting/ Single stage	139
รูปที่ 4. 8	Rotameter และ Flow meter.....	139
รูปที่ 4. 9	พิกัดการทดลอง	140
รูปที่ 4. 10	พิกัดอ้างอิงตำแหน่งมุมฉีดของเจ็ทควบคุม.....	140
รูปที่ 4. 11	Schematic แสดงการติดตั้ง Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV).....	141
รูปที่ 4. 12	เครื่องให้กำเนิดแสงเลเซอร์ Nd:YAG (New Wave™ model Solo 200XT)	142
รูปที่ 4. 13	แขนส่งต่อลำแสงเลเซอร์ (Laser Light Arm, model 610015).....	142
รูปที่ 4. 14	กล้อง CCD (PowerView Plus11MP, model 630062).....	143
รูปที่ 4. 15	ชุดเชื่อมระบบการทำงาน (Synchronizer, model 610035)	143
รูปที่ 4. 16	ภาพ Instantaneous ของเจ็ทในกระแสลมขวางจากกล้องช้าและขวบนระนาบ CCD	144
รูปที่ 4. 17	ภาพเวกเตอร์ความเร็วที่ได้จากการประมวลผลภาพ Instantaneous.....	144
รูปที่ 4. 18	Wiring Diagram ของ SPIV	145
รูปที่ 4. 19	ความสม่ำเสมอของความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวาง ที่ตำแหน่ง.....	146
รูปที่ 4. 20	รูปร่างของชั้นขอบเขต (Boundary layer) ตามแนว Tranverse ซึ่งแสดงโดยค่า $y/\delta_{95\%}$ โดยที่ $V_{cf} = 4.3 \text{ m/s}$	147
รูปที่ 4. 21	รูปร่างความเร็วของเจ็ทที่ปากทางออก ในแนว Streamwise และแนว Spanwise. 147	
รูปที่ 4. 22	กราฟแสดงผลการสอบเทียบความเร็วที่วัดด้วย SPIV กับ Pitot tube.....	148
รูปที่ 5. 1	แสดงภาพอนุภาคติดตามการไหล ณ เวลาใดๆ, สนามความเร็ว ณ เวลาใดๆ, ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหล และ สนามความเร็วเฉลี่ย	149
รูปที่ 5. 2	แสดงความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหล กรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ทและกระแสลมขวาง	150

รูปที่ 6. 1 บริเวณที่เป็นเจ็ต (Jet region) ที่มีความน่าจะเป็นที่พบเจ็ตไม่เกิน ϕ 151

รูปที่ 6. 2 ความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไร้มิติต่อจุด ($e_{v_i/v_{ij}}$) ในกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ สำหรับจำนวนภาพทั้งหมด 2,000 ภาพ โดยคำนวณทุกๆ 50 ภาพสำหรับ บริเวณที่เป็นเจ็ต (R_ϕ) ที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต (ϕ) ไม่เกิน 0.01 ถึง 1 สำหรับกรณี JICF 151

รูปที่ 6. 3 ความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไร้มิติต่อจุด ($e_{v_i/v_{ij}}$) ในกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ สำหรับจำนวนภาพทั้งหมด 4,000 ภาพโดยคำนวณทุกๆ 50 ภาพ สำหรับ บริเวณที่เป็นเจ็ต (R_ϕ) ที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต (ϕ) ไม่เกิน 0.01 ถึง 1 สำหรับกรณี JICF 152

รูปที่ 6. 4 การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบพิกัดจากความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ย ไร้มิติต่อจุด 153

รูปที่ 6. 5 การลู่เข้าจากความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสลมขวางต่อจุด..... 156

รูปที่ 6. 6 การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์ความเร็วของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบ $y-z$ ต่อ กระแสลมขวาง ($\vec{V}_{yz} / u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z) / u_{cf}$) 159

รูปที่ 6. 7 แสดงการเปรียบเทียบ POD mode 1, 2, และ 3 พร้อมด้วยระดับพลังงานกำกับ ในแต่ละ POD mode ระหว่างผลการทดลองของ 160

รูปที่ 7. 1 การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่พบความเร็วเจ็ต ณ จุดใดๆ ของกรณี JICF, I15 และ I135 โดยแสดงค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95..... 161

รูปที่ 7. 2 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บนระนาบ $y - z$ ($\vec{V}_{yz} / u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z) / u_{cf}$) กรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะใน เจ็ต 162

รูปที่ 7. 3 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ ($\vec{V}_{yz} / u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z) / u_{cf}$) และ POD Mode 1, 2

และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานกำกับสำหรับกรณี JICF เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ด .. 163

รูปที่ 7. 4 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บรรณานาบ $y-z$ และ POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานกำกับสำหรับกรณี I15 เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ด..... 164

รูปที่ 7. 5 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บรรณานาบ yz และ POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานกำกับสำหรับกรณี I15 เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ด 165

รูปที่ 7. 6 โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ POD mode 1,2 และ 3 ของกรณี JICF, I15 และ I135 166

รูปที่ 7. 7 การกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ของ POD mode 1 ถึง 10 สำหรับกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5, 0.75, 1$ และ 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ด..... 169

รูปที่ 7. 8 การกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ของ POD mode สำหรับกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5, 0.75, 1$ และ 1.กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ด..... 170

รูปที่ 7. 9 ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสม (Accumulative mode energy) ในแต่ละจำนวน Modes สำหรับกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5, 0.75, 1$ และ 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ด 171

รูปที่ 7. 10 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บรรณานาบ $y - z$ กรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ดและกระแสลมขวาง..... 172

รูปที่ 7. 11 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บรรณานาบ yz และ POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานกำกับสำหรับกรณี JICF เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ดและกระแสลมขวาง..... 173

รูปที่ 7. 12	การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้ง ทั้งเวกเตอร์บนระนาบ yz และ POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงาน กำกับสำหรับกรณี I15 เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง.....	174
รูปที่ 7. 13	การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้ง ทั้งเวกเตอร์บนระนาบ yz และ POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงาน กำกับสำหรับกรณี I135 เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง.....	175
รูปที่ 7. 14	โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ POD mode 1,2 และ 3 ของกรณี JICF, I15 และ I135	176
รูปที่ 7. 15	การกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ของ POD mode 1	179
รูปที่ 7. 16	ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสม (Accumulative mode energy) ในแต่ ละจำนวน Modes สำหรับกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง	180
รูปที่ 7. 17	เปรียบเทียบโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตในกระแสลมขวางขวาง	181
รูปที่ 7. 18	โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1) กรณี JICF ที่ตำแหน่ง x/rd $= 0.5$ ถึง 1.5.....	184
รูปที่ 7. 19	โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1) กรณี I15 ที่ตำแหน่ง x/rd $= 0.5$ ถึง 1.5.....	185
รูปที่ 7. 20	โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1) กรณี I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5.....	186
รูปที่ 7. 21	การกระจายตัวของพลังงานการไหลปั่นป่วนของกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5.....	187
รูปที่ 7. 22	การกระจายตัวของพลังงานการไหลปั่นป่วนระหว่างกรณีที่ฉีดอนุภาคติดตามการ ไหลเฉพาะเจ็ต และกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลม ขวางของกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5.....	188

รูปที่ 7. 23	การกระจายตัวของพลังงานการไหลปั่นป่วนระหว่างกรณีที่ฉีดย้อนภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ต และกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางของกรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5	189
รูปที่ 7. 24	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของพลังงานการไหลปั่นป่วนระหว่างกรณีที่ฉีดย้อนภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ต และกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางของกรณี I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5	190
รูปที่ 7. 25	ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสมในแต่ละปริมาณร้อยละของPOD Mode ใดๆ ของกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5	191
รูปที่ 7. 26	อัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร.....	192
รูปที่ 8. 1	การกระจายตัวของความเร็วผันผวนตามแนวแกน x และเวกเตอร์ความเร็วผันผวนบนระนาบ $y-z$ ของกรณี JICF, I15 และ I135 ของภาพที่ 1,000 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ พร้อมทั้งภาพต้นฉบับ.....	194
รูปที่ 8. 2	ความคลาดเคลื่อนของพลังงานการไหลปั่นป่วนที่ระดับพลังงานรวมต่างๆ.....	194
รูปที่ 9. 1	ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนในแต่ละ POD mode ของกรณี JICF สำหรับจำนวนภาพต่างๆกัน.....	195
รูปที่ 9. 2	ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนในแต่ละ POD mode ของกรณี I15 สำหรับจำนวนภาพต่างๆกัน.....	195
รูปที่ 9. 3	ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนในแต่ละ POD mode ของกรณี I135 สำหรับจำนวนภาพต่างๆกัน.....	196
รูปที่ 9. 4	ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนในแต่ละเปอร์เซ็นต์ของ POD mode ของกรณี JICF สำหรับจำนวนภาพต่างๆกัน.....	196
รูปที่ 9. 5	ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนในแต่ละเปอร์เซ็นต์ของ POD mode ของกรณี I15 สำหรับจำนวนภาพต่างๆกัน.....	197
รูปที่ 9. 6	ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนในแต่ละเปอร์เซ็นต์ของ POD mode ของกรณี I135 สำหรับจำนวนภาพต่างๆกัน.....	197

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

อักษรโรมัน

A	พื้นที่ปากทางออกเจ็ต
A^i	บทที่ 3, eigenvector
d	เส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออกเจ็ต
N	จำนวนภาพถ่ายที่ใช้
r	อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล
r_m	อัตราส่วนการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก
r_v	อัตราส่วนความเร็วเจ็ตหลักต่อกระแสลมขวาง
R_ϕ	บริเวณของเจ็ตที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตมากกว่า 0 ถึง ϕ
Re_{cf}	ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของกระแสลมขวาง
Re_j	ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ต
U	บทที่ 3, เมทริกซ์ของ Fluctuation ของความเร็วในแต่ละส่วนของทุกภาพ
u	บทที่ 4, ความเร็วเฉลี่ย ณ ตำแหน่งใดๆตามแนวรัศมีบนปากทางออกเจ็ต
u_{cf}	ความเร็วกระแสลมขวาง
u_j	ความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกเจ็ต
u_j^n	บทที่ 3, Fluctuation ของความเร็วตามแนว Streamwise ณ ตำแหน่งใดๆที่ภาพใดๆ
v_j^n	บทที่ 3, Fluctuation ของความเร็วตามแนว Transverse ณ ตำแหน่งใดๆที่ภาพใดๆ
w_j^n	บทที่ 3, Fluctuation ของความเร็วตามแนว Spanwise ณ ตำแหน่งใดๆที่ภาพใดๆ

x, y, z	พิกัดอ้างอิง
x/rd	ระยะตามแนว Streamwise ที่ถูก normalized, $x/(rd)$
y/rd	ระยะตามแนว Transverse ที่ถูก normalized, $y/(rd)$
z/rd	ระยะตามแนว Spanwise ที่ถูก normalized, $z/(rd)$
อักษรกรีก	
λ^i	บทที่ 3, eigenvalue
$\delta_{95\%}$	ความหนาชั้นขอบเขตที่ตำแหน่งซึ่งมีความเร็วเป็น 95% ของความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง
φ	บทที่ 3, POD mode
ϕ	บทที่ 5, 6 ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ต
θ	ตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง
ρ_{cf}	ความหนาแน่นของกระแสลมขวาง
ρ_j	ความหนาแน่นของเจ็ต
v_{cf}	ความหนืดคิเนแมติกของกระแสลมขวาง
v_j	ความหนืดคิเนแมติกของเจ็ต
อักษรย่อ	
CVP	Counter – rotating vortex pair
IVP	Initial velocity profile ของเจ็ตหลัก
I15	กรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ $\pm 15^\circ$
I135	กรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ $\pm 135^\circ$
JICF	เจ็ตในกระแสลมขวางกรณีที่ไม่ถูกควบคุม
POD	Proper orthogonal decomposition
SPIV	Stereoscopic particle image velocimetry

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เจ็ตในกระแสลมขวาง (Jet in Crossflow, JICF) คือ กระแสการไหลของเจ็ตที่ถูกปล่อยให้เคลื่อนที่ตั้งฉากกับกระแสลมขวางดังรูปที่ 1.1 โดยเมื่อเจ็ตเจอกับกระแสลมขวางจะทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางทำให้เจ็ตเกิดการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางเข้ามา เรียกว่า การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) และเมื่อเจ็ตเหนี่ยวนำกระแสลมขวางเข้ามาจะทำให้เกิดการผสม (Mixing) ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง นอกจากนี้เจ็ตในกระแสลมขวางยังมีคุณลักษณะที่สำคัญ คือ เส้นทางการเดินของเจ็ต (Trajectory) ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สามารถนิยามได้หลากหลาย เช่น เส้นทางการเดินของเจ็ตที่นิยามจากอุณหภูมิสูงสุดบนระนาบตั้งฉาก เป็นต้น โดยจะสามารถพบเจ็ตในกระแสลมขวางในงานเชิงวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น การฉีดเชื้อเพลิงเพื่อผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้ การระบายความร้อนของกังหันแก๊ส หรือ การปล่อยควันออกจากปล่องควันของโรงงานดังรูปที่ 1.2 เป็นต้น ด้วยเหตุนี้องค์ความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและบทบาทของโครงสร้างนั้นๆของเจ็ตในกระแสลมขวาง จะช่วยในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ในงานวิศวกรรมเหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเจ็ตในกระแสลมขวางอย่างแพร่หลาย โดยแนวทางการศึกษาจะแบ่งออกได้เป็นสองแนวทางหลักดังนี้

กลุ่มแรก เป็นการศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะต่างๆ ของเจ็ตในกระแสลมขวาง เช่น การศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Fric and Roshko 1994, Haven and Kurosaka 1997, Sivadas, Pani et al. 1997, New, Lim et al. 2003) การศึกษาเส้นทางการเดินของเจ็ต (Pratte 1967, Kamotani and Greber 1972, Muppidi and Mahesh 2005a, Muppidi and Mahesh 2005b) การศึกษาการผสมระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง (Smith and Mungal 1998, Chongsiripinyo, Limdumrongtum et al. 2008, Watakulsin, Gimjaiyen et al. 2010) โดย

Smith and Mungal (1998) ชี้ให้เห็นว่า แม้ Counter rotating vortex pairs (CVP) จะมีบทบาทสำคัญต่อการผสมของเจ็ตที่บริเวณ Far field แต่ไม่ทำให้เกิดการผสมดีไปกว่า Free jet ในขณะที่การเริ่มก่อตัวของ CVP ที่บริเวณ Near field จะมีผลให้เกิดการผสมของเจ็ตและกระแสลมขวางดีกว่า Free jet, การศึกษาโครงสร้างที่มีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง (Kelso, Lime et al. 1996, Yuan, Street et al. 1999, Cortelezzi and Karagozian 2001, Lim, New et al. 2001, Sau, Sheu et al. 2004) จากการศึกษาพบว่า การก่อตัวของ CVP มีความสัมพันธ์กับ Flow shear layer ที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของเจ็ต (Yuan, Street et al. 1999, Bunyajitradulya and Sathapornnanon 2005) และการศึกษาโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและระดับพลังงานสูงสุดของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Meyer, Pederson et al. 2007)

กลุ่มที่สอง เป็นการศึกษากการปรับแต่งและควบคุมเส้นทางเดินและการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น การควบคุมด้วย Vortex generator tab (Zaman and Foss 1997, Bunyajitradulya and Sathapornnanon 2005) การฉีดเจ็ตหมุนควง (Swirling) (Kavsaoglu and Schetz 1989, Yoshizako, H., Yoshida et al. 1991, Niederhaus, Champagne et al. 1997, Wangjiraniran and Bunyajitradulya 2001, Bunyajitradulya and Sathapornnanon 2005, Yingjareon, Pimpin et al. 2006, Denev, Fröhlich et al. 2009, Limdumrongtum, Chongsiripinyo et al. 2009) การฉีดเจ็ตที่ถูกกระตุ้นอย่างเป็นจังหวะ (Pulsing) (Hermanson, Wahba et al. 1998, Eroglu and Breidenthal 2001, M'Closkey, King et al. 2002, Narayanan, Barooah et al. 2003) และการฉีดเจ็ตควบคุมตามเส้นรอบวง (Azimuthal control jets) (Kornsri, Pimpin et al. 2009, Witayaprapakorn 2013) พบว่าการฉีดที่มีการควบคุมบริเวณใกล้ปากทางออกของเจ็ต อาทิ การติด Tab และการฉีดเจ็ตควบคุมตามเส้นรอบวง การควบคุมด้าน Windward ส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ตต่ำลง ในทางกลับกันด้าน Leeward เส้นทางเดินของเจ็ตจะสูงขึ้น (Zaman and Foss 1997, Bunyajitradulya and Sathapornnanon 2005, Kornsri, Pimpin et al. 2009, Witayaprapakorn 2013) สำหรับการฉีดเจ็ตหมุนควง พบว่า การฉีดเจ็ตหมุนควงมีผลต่อโครงสร้างเจ็ตโดยทำให้โครงสร้างมีความไม่สมมาตร และมีผลเล็กน้อยต่อการเหนี่ยวนำการผสมและการผสม (Niederhaus, Champagne et al. 1997, Wangjiraniran and Bunyajitradulya 2001) สำหรับการฉีดเจ็ตที่ถูกกระตุ้นอย่างเป็น

จังหวัด พบว่าการกระตุ้นเจ็ตอย่างเป็นจังหวัด จะส่งผลต่อการแทรกซึม (Penetration) และโครงสร้างของเจ็ต (M'Closkey, King et al. 2002)

สำหรับการฉีดเจ็ตควบคุมตามเส้นรอบวงนั้น นอกจากที่กล่าวมาข้างต้น Kornsri, Pimpin et al. (2009) พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ $\theta = \pm 15^\circ$ จะให้ผลดีที่สุดโดย จะส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ตต่ำสุด และลดการพัฒนาตัวของ Windward jet shear layer ในทางกลับกันก็จะเพิ่มการพัฒนาตัว Lateral skewed mixing layers ซึ่งพัฒนาตัวกลายเป็น CVP ต่อไป

1.2 แรงจูงใจ

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการก่อตัวของ CVP เป็นกลไกสำคัญที่ทำให้การผสมของเจ็ตในกระแสมขวางดีกว่า Free jet ในบริเวณ Near field ซึ่งการก่อตัวของ CVP หรือ Large-scale vortical structure มีความสัมพันธ์กับโครงสร้าง Flow shear layer ที่ปากทางออกเจ็ต งานวิจัยของ Kornsri, Pimpin et al. (2009) จึงเกิดแนวคิดที่จะปรับแต่งและควบคุมเส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสม โดยกระตุ้นการพัฒนาตัวของ Flow shear layer ที่บริเวณใกล้ปากทางออกเจ็ตด้วยการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง และจากงานของ (Witayaprapakorn (2013)) การฉีดเจ็ตควบคุมด้วยอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) เท่ากับ 2 % ที่ตำแหน่งมุมฉีดเท่ากับ $\pm 15^\circ$ และ $\pm 135^\circ$ จะส่งผลให้มีการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรดีกว่า JICF โดยการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งมุมฉีดเท่ากับ $\pm 135^\circ$ ส่งผลให้การเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 13 % ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ และจะสูงกว่ากรณีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งมุมฉีดเท่ากับ $\pm 15^\circ$

ในการศึกษาโครงสร้างเจ็ตในกระแสมขวางที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมก่อนหน้านี้ (Kornsri, Pimpin et al. 2009, Witayaprapakorn 2013) ได้ศึกษาโครงสร้างจากโครงสร้างเฉลี่ย ซึ่งไม่สามารถระบุโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ จึงก่อให้เกิดแรงจูงใจในงานวิจัยนี้ที่จะศึกษาถึงโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญที่ส่งผลให้เจ็ตในกระแสมขวางที่มีการฉีดเจ็ตควบคุม มีอัตราการเหนี่ยวนำการผสมดีกว่ากรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุมโดยจะใช้เทคนิค Proper orthogonal decomposition

(POD) ในการวิเคราะห์โครงสร้างซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 3 งานวิจัยนี้การวิเคราะห์โครงสร้างเจ็ดในกระแสมขวาง จะวัดสนามความเร็วที่ด้วยเทคนิค Stereoscopic particle image velocimetry (SPIV) และเพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างส่วนที่เป็นเจ็ดหรือส่วนผสมของเจ็ดโดยไม่รวมผลของกระแสมขวางได้อย่างชัดเจน ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้จึงได้ใส่อนุภาคติดตามการไหลเข้าไปเฉพาะในส่วนที่เป็นเจ็ดเท่านั้นไม่ใส่ในกระแสมขวาง ซึ่งอนุภาคติดตามการไหลจะเป็นส่วนหนึ่งใน SPIV ด้วยวิธีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดจะมีข้อดีคือสามารถวิเคราะห์โครงสร้างส่วนที่เป็นเจ็ดได้อย่างชัดเจนอย่างไรก็ตามข้อด้อยคือไม่สามารถสังเกตปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ดและกระแสมขวางได้

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลของการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวง ต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนมากที่สุดของเจ็ดในกระแสมขวางโดยใช้ POD และสามารถสรุปได้ตาม ความสัมพันธ์เป็น

$$Mode, Energy = f(x/rd ; \theta ; r, Re_{cf}, IVP, Re_j = Re_{cf} \times r, \rho_j / \rho_{cf} = 1, r_m)$$

โดยที่

<i>Mode, Energy</i>	คือ โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและระดับพลังงานของโครงสร้างจากการวิเคราะห์ด้วย POD ซึ่งกล่าวต่อไปในบทที่ 3
x/rd	คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางปากทางออกเจ็ดตามแนวกระแสมขวางแบบไร้มิติ
θ	คือ ตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวง
r	คือ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล

Re	คือ ค่า ตัวเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number)
IVP	คือ รูปร่างความเร็วเริ่มต้น (Initial velocity profile) ของเจ็ตหลัก
ρ	คือ ความหนาแน่น
j	เป็นตัวห้อยแสดงถึงคุณลักษณะของเจ็ต
cf	เป็นตัวห้อยแสดงถึงคุณลักษณะของกระแสลมขวาง
r_m	คือ อัตราส่วนการไหลของมวล ของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก

1.4 ปัญหาและแนวทางการวิจัย

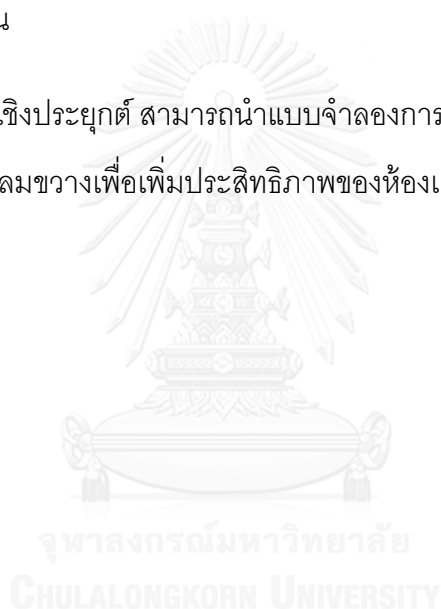
การศึกษาถึงโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานสูงสุดของเจ็ตในกระแสลมขวาง ในกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุมและกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุม มีเทคนิคที่ช่วยในการศึกษาที่หลากหลายอย่างไรก็ตาม สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิค Proper orthogonal decomposition (POD) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่มีความแม่นยำในการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางโดย POD จะหาเซตของฟังก์ชันพื้นฐาน (หรือ Mode) ที่ให้ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) มากที่สุดเมื่อเทียบกับเซตของฟังก์ชันพื้นฐานอื่นๆด้วยจำนวนฟังก์ชันที่เท่ากัน ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 3 และเพื่อที่จะวิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะส่วนที่เป็นเจ็ต โดยแยกแยะออกจากส่วนที่เป็นกระแสลมขวางซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ในการวัดความเร็วด้วย SPIV จะใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้นไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ส่งผลให้ความเร็วที่ได้จะมาจากส่วนของเจ็ตหรือบริเวณที่มีส่วนผสมของเจ็ตของไหล (Jet fluid) เท่านั้น ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือ จะสามารถวิเคราะห์โครงสร้างของส่วนที่เป็นเจ็ตได้อย่างเดียวได้อย่างชัดเจน ในทางกลับกันในงานวิจัยนี้อีกส่วนหนึ่งในการวัดความเร็วด้วย SPIV จะใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือ จะสามารถวิเคราะห์โครงสร้างของส่วนที่เป็นทั้งเจ็ตและกระแสลมขวางและจะ

เห็นปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างเจ็ดและกระแสมขวาง ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในบทที่ 5 แนวทางการวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการศึกษาเชิงวิชาการ จะสามารถนำความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญของเจ็ดในกระแสมขวางไปสร้างเป็นแบบจำลองการไหลของเจ็ดในกระแสมขวางได้ดียิ่งขึ้น และจะเป็นแนวทางในการหาเทคนิคที่จะปรับแต่งและควบคุมเจ็ดในกระแสมขวางให้มีการผสมและการเหนี่ยวนำการผสมดียิ่งขึ้น

ผลการศึกษาในเชิงประยุกต์ สามารถนำแบบจำลองการไหลที่ได้ไปเป็นเครื่องมือหนึ่งที่จะช่วยพัฒนาเจ็ดในกระแสมขวางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของห้องเผาไหม้ให้สูงขึ้น



บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นการศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวาง การปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสมขวาง และการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตและกระแสมขวาง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity ratio)

อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะที่สำคัญของเจ็ตในกระแสมขวาง อาทิ เส้นทางการเดินของเจ็ต (Trajectory), การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) และการผสม (Mixing) และ Large scale vortical structure เป็นต้น ซึ่งนิยามมาจาก อัตราส่วนโมเมนตัมฟลักซ์ของเจ็ตต่อโมเมนตัมฟลักซ์ของกระแสมขวางดังสมการที่ 2.1

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

เมื่อ ρ_j คือ ความหนาแน่นของเจ็ตของไหล, ρ_{cf} คือ ความหนาแน่นของกระแสมขวาง, u_j คือ ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตที่ปากทางออก และ u_{cf} คือ ความเร็วของกระแสมขวาง

อย่างไรก็ตามในกรณีที่ความหนาแน่นของเจ็ตมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของกระแสมขวาง อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) จะสามารถลดรูปเหลือเพียงอัตราส่วนความเร็วเจ็ตต่อความเร็วกระแสมขวาง (Velocity ratio, $r_v = u_j / u_{cf}$)

2.2 ตัวเลขเรย์โนลด์สของเจ็ตและตัวเลขเรย์โนลด์สของกระแสมขวาง

- ตัวเลขเรย์โนลด์สของเจ็ต (Jet Reynolds number)

ตัวเลขเรย์โนลด์สของเจ็ต (Re_j) นิยามเป็น

$$\text{Re}_j = \frac{u_j d}{\nu_j} \quad (2.2)$$

เมื่อ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ต และ ν_j คือ ความหนืดคินเนติกของเจ็ต

ซึ่ง Re_j เป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงสภาวะการไหลของเจ็ตว่าเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) หรือปั่นป่วน (Turbulent)

- ตัวเลขเรย์โนลด์สของกระแสลมขวาง (Crossflow Reynolds number)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่านอกจากอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลแล้วตัวเลขเรย์โนลด์สของกระแสลมขวาง (Re_{cf}) ยังเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางซึ่งนิยามโดย

$$\text{Re}_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu_{cf}} \quad (2.3)$$

เมื่อ ν_{cf} คือ ความหนืดคินเนติกของกระแสลมขวาง อย่างไรก็ตามในกรณีที่เจ็ตและกระแสลมขวางอยู่ในสถานะเทอร์โมไดนามิกส์เดียวกัน ($\rho_j = \rho_{cf}$ และ $\nu_j = \nu_{cf}$) r , Re_j และ Re_{cf} จะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$r = \frac{\text{Re}_j}{\text{Re}_{cf}} \quad (2.4)$$

2.3 การศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง

- เส้นทางเดินของเจ็ตในกระแสลมขวาง

ในการศึกษาที่ผ่านมา นั้น ผลการศึกษาของเส้นทางเดินของเจ็ตในกระแสลมขวางมักจะถูกแสดงโดยสมการสหสัมพันธ์ (Correlation)

Pratte and Baines (1967) ได้ศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากความเร็วในช่วงอัตราส่วนความเร็วเจ็ตหลักต่อกระแสลมขวาง r , ระหว่าง 5 ถึง 35 ดังรูปที่ 2.1 โดยปากทางออกของเจ็ตติดอยู่สูงจากระดับพื้น 8 นิ้ว ซึ่งทำให้ไม่มีผลของ Boundary layer ของผนังพื้น และพบ

ความสัมพันธ์ของเส้นทางการเดินของความเร็วในรูปของ Empirical equation ใน rd - สเกล ตามความสัมพันธ์

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

โดยค่าคงที่ (A, m) สำหรับเส้นทางการเดินของขอบเจ็ทด้านบน (Outer boundary) เท่ากับ (2.63, 0.28), เส้นทางการเดินกึ่งกลาง (Centerline) เท่ากับ (2.05, 0.28) และเส้นทางการเดินขอบเจ็ทด้านล่าง (Inner boundary) เท่ากับ (1.35, 0.28)

Kamotani and Greber (1972) ได้ศึกษาเส้นทางการเดินของเจ็ทที่นิยามมาจากความเร็ว (Center plane maximal velocity trajectory) และเส้นทางการเดินเจ็ทที่นิยามจากอุณหภูมิ (Center plane maximal temperature trajectory) ซึ่งมีการให้ความร้อนแก่เจ็ทจนมีอุณหภูมิสูงกว่า กระแสลมขวาง ($T_j - T_0$) ประมาณ 75°F และ 320°F ที่อัตราส่วนโมเมนต์ ($J = \rho_j U_j^2 / \rho_{cf} U_{cf}^2$) เท่ากับ 15.3 และ 59.6 ตามลำดับดังรูปที่ 2.2 โดยเส้นทางการเดินของเจ็ทที่นิยามจากความเร็วจะนิยามจากจุดที่มีความเร็วสูงสุดบนระนาบสมมาตร (Center plane) ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ที่มีการสเกลด้วย rd เป็น

$$\frac{y_u}{rd} = 0.89r^{0.3} \left(\frac{x}{rd} \right)^{0.36} \quad (2.6)$$

และสำหรับเส้นทางการเดินของเจ็ทที่นิยามจากอุณหภูมินั้นจะนิยามจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดบนระนาบสมมาตรซึ่งเขียนความสัมพันธ์ที่มีการสเกลด้วย rd เป็น

$$\frac{y_T}{rd} = 0.73r^{0.33} \left(\frac{\rho_j}{\rho_{cf}} \right)^{0.11} \left(\frac{x}{rd} \right)^{0.29} \quad (2.7)$$

ผลการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนโมเมนต์ (r_m) เดียวกันนั้น เส้นทางการเดินของเจ็ทซึ่งนิยามมาจากอุณหภูมิจะอยู่ต่ำกว่าเส้นทางการเดินของเจ็ทที่นิยามจากความเร็ว โดยอัตราส่วนโมเมนต์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ส่งผลต่อเส้นทางการเดินของเจ็ทในทั้ง 2 กรณี ในขณะที่อัตราส่วนความ

หนาแน่น (ρ_j/ρ_{cf}) จะไม่มีผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากความเร็ว แต่จะส่งผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามมาจากอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอัตราส่วนโมเมนต์มดงสมการที่ 2.6 และ 2.7 ที่กล่าวไว้ข้างต้น

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาเส้นทางของ Scalar concentration ซึ่งนิยามจากเส้นทางเดินของจุดที่มี concentration มากที่สุดบนระนาบสมมาตร โดยใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) ในช่วงอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ตั้งแต่ 5 ถึง 25 โดยในการแสดงความสัมพันธ์จะใช้ Length scale เป็น d , rd และ r^2d โดยพิจารณาตามแกน x ดังรูปที่ 2.3 พบว่าการสเกลด้วย rd จะทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตมีแนวโน้มซ้อนทับเป็นเส้นเดียวกันมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่สเกลด้วย d หรือ r^2d บ่งชี้ให้เห็นว่าเส้นทางเดิน Scalar concentration ควรใช้ rd สเกล

Yuan and Street (1998) ศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสม ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ในรูปแบบของ Large-Eddy Simulation (LES) ในกรณีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 2 และ 3.3 ดังรูปที่ 2.4 พบว่าเมื่อแสดงเส้นทางเดินของเจ็ตบนกราฟ log-log ที่สเกลด้วย rd (ในรูปที่ 2.4 $X = x/d$, $R = r$) ที่ตำแหน่งบริเวณ Downstream เส้นทางเดินของเจ็ตในทุกกรณีจะมีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันและเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในบริเวณนี้ความสัมพันธ์ของเส้นทางเดินของเจ็ตและตำแหน่งมีลักษณะเป็น Power law ด้วยเหตุนี้ Yuan and Street จึงเรียกบริเวณนี้ว่า Power law region

Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) และ Wangjiraniran (2001) ได้ศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากอุณหภูมิ โดยการให้ความร้อนแก่เจ็ตที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4.1 โดยวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ระนาบตั้งฉาก และนิยามเส้นทางเดินของเจ็ตในทำนองเดียวกับการศึกษาของ Kamotani and Greber (1972) และยังคงศึกษาถึงเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามมาจากจุดศูนย์กลางอุณหภูมิบนระนาบตั้งฉาก (Centroid temperature trajectory) พบว่าเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากจุดศูนย์กลางเรขาคณิตของการกระจายตัวของอุณหภูมิจะอยู่ต่ำกว่าเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามมาจากอุณหภูมิ (Center plane temperature

trajectory) ซึ่งให้เห็นว่าการกระจายตัวของอนุภาคสูงจะอยู่บริเวณด้านล่างของเจ็ทบนระนาบสมมาตรใดๆ

Muppidi and Mahesh (2005a) ศึกษาเจ็ทในกระแสมขวางโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบ DNS แบบ 2 มิติ ผลการศึกษาบ่งชี้ว่า สามารถแบ่งการเคลื่อนที่ของเจ็ทออกเป็นสองช่วง ที่สภาวะเริ่มต้น เส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ทจะเป็นเส้นโค้งอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ด้วยความแรงคังที่ของเจ็ท (Pressure driven) และในสภาวะหลังนั้น เส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ทจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคังที่ (Momentum driven) โดยปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแรงคังที่ในสภาวะเริ่มต้นและความเร็วคังที่ในสภาวะหลัง คือ Re_{cf} ดังแสดงในรูป 2.5 พบว่าเมื่อค่า Re_{cf} เพิ่มขึ้นจะมีผลให้ความแรงคังที่ตามแนวแกน x ในสภาวะเริ่มต้นมีค่าลดลง รวมถึงความเร็วในสภาวะหลังก็จะมีค่าลดลง ในทางกลับกันหากค่า Re_{cf} ลดน้อยลง ความแรงคังที่ของเจ็ทในสภาวะเริ่มต้นจะสูงขึ้นรวมถึงความเร็วในสภาวะหลังก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย

Muppidi and Mahesh (2005b) ศึกษาผลของการสเกลเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ทด้วยค่าต่างๆ ดังรูปที่ 2.6 พบว่าเมื่อสเกลเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ทด้วย rd หรือ r^2d เส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ทที่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันที่ไม่ดี จึงได้เสนอพารามิเตอร์ตัวใหม่ h ในการสเกลเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ทซึ่งพารามิเตอร์ตัวใหม่นี้จะคำนึงถึงผลของความหนาแน่นชั้นขอบเขตของกระแสมขวางและรูปร่างความเร็วที่ปากทางออกเจ็ทมาพิจารณาประกอบด้วย และผลการสเกลด้วยพารามิเตอร์ตัวใหม่พบว่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ทมีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันที่ดีขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.7

Limdumrongtum (2007) และ Limdumrongtum *et al.* (2009) ใช้เทคนิค Smoke fluid condensation, Mie scattering และ Laser-sheet visualization techniques เพื่อศึกษาโครงสร้างการผสมของเจ็ทในกระแสมขวางที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4.1 โดย Concentration field ที่ได้จากเทคนิคนี้ จะแสดงถึงส่วนของเจ็ทที่มีปริมาณการผสมถึงระดับ Stoichiometric ratio เท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากงานของ Smith and Mungal (1998) ซึ่งใช้เทคนิค PLIF ซึ่ง Concentration field ที่ได้จะแสดงถึงส่วนที่มีการผสม และยังไม่มีการผสม (Passive) พบว่า เส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ทที่นิยามจากจุดศูนย์กลางมวลการผสม (Center of mass reactive

scalar trajectory) และ เส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากจุดศูนย์กลางเรขาคณิตของการผสม (Centroid scalar trajectory) มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยที่ r เท่ากัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการกระจายตัวของการผสมค่อนข้างสม่ำเสมอบนหน้าตัดการผสมของเจ็ต

- โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง

Fric and Roshko (1994) ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ที่เกิดขึ้นในเจ็ตในกระแสลมขวางด้วย Flow visualize โดยเทคนิค smoke-wire และวัดความเร็วด้วย Hot – wire ได้สรุปถึง Vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวางโดยแบ่งเป็น 4 ลักษณะดังรูปที่ 2.8 ได้แก่ 1) Jet shear layer vortices ซึ่งมีลักษณะคล้าย Vortex ring ของ Free jet ซึ่งเกิดจากการแยกตัวของ shear layer บริเวณปากทางออกของเจ็ต 2) Horseshoes vortices เกิดจากการม้วนตัวของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางที่บริเวณปากทางออกเจ็ตซึ่งเป็นผลมาจากที่กระแสลมขวางได้รับผลของ Adverse pressure gradient ที่เกิดจากการกีดขวางการไหลโดยลำเจ็ตซึ่งพุ่งออกมา 3) Wake vortices มีลักษณะคล้ายกับ Wake ของการไหลผ่านวัตถุทรงกระบอก แต่มีแหล่งกำเนิดมาจากชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางที่ผนังพื้น และ 4) Counter-rotating vortex pair (CVP) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เป็นกลไกการผสมที่สำคัญของเจ็ตในกระแสลมขวางที่บริเวณ Far field

Smith and Mungal (1998) พบว่าเมื่อแสดงอัตราการลดลงของความเข้มข้นตามเส้นทางเดินของเจ็ตที่สเกล r^2d จะพบว่าเกิด Branch point ที่จุด $r^2d = 0.3$ โดยช่วง $S/r^2d < 0.3$ เรียกว่า Near field และในช่วง $S/r^2d > 0.3$ เรียกว่าบริเวณ Far field ดังรูปที่ 2.9 และยังพบว่าในบริเวณ Near field จะเกิดการก่อตัวของ Counter Rotating Vortex Pair (CVP) ทำให้ความเข้มข้นสูงสุดของสัญญาณลดลงด้วยอัตรา $S^{-1.3}$ ซึ่งมากกว่าในกรณีของ free jet ซึ่งลดลงด้วยอัตรา S^{-1} ส่วนในบริเวณ Far field พบว่าการพัฒนาตัวอย่างสมบูรณ์ของ CVP ทำให้ความเข้มข้นสูงสุดของสัญญาณลดลงด้วยอัตรา $S^{-2/3}$ ซึ่งน้อยกว่ากรณีของ Free jet ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แม้ CVP จะเป็นกลไกการผสมหลักในบริเวณ Far field แต่ก็ไม่ทำให้การผสมดีกว่า Free jet ในทางกลับกันพบว่าการก่อตัวของ CVP ในบริเวณ Near field ต่างหากที่ทำให้เกิดการผสมดีกว่า Free jet

Yuan *et al.* (1999) พบว่ากลไกการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง ได้รับผลจากการเคลื่อนที่และเปลี่ยนแปลงของ Large coherent structure ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการเกิด Turbulent mixing และจากรูปที่ 2.10 ผลการศึกษาพบว่าในบริเวณ Near field โครงสร้าง Spanwise roller ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผิวสัมผัสระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง ทำให้เกิดการผสมในระดับ Large-scale และในบริเวณที่เจ็ตเริ่มเอียงตัว จะเกิดการดึงกระแสลมขวางเข้ามาผสมเข้าไปในเจ็ตในบริเวณช่องว่าง (Gaps) ซึ่งทำให้เกิดการผสมระดับ Large scale และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปจนถึงบริเวณ Vortex zone โครงสร้างของ CVP จะเป็นกลไกสำคัญในการผสม โดยการเคลื่อนที่ของ CVP จะม้วนรวมเอากระแสลมขวางเข้าไปผสม

- การก่อตัวและการพัฒนาตัวของ Counter-rotating vortex pair (CVP)

Yuan *et al.* (1999) ศึกษาการก่อตัวโดยใช้เทคนิค Large-eddy simulation ได้เสนอแนะว่า การก่อตัวของ CVP มีจุดกำเนิดมาจาก Hanging vortices ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งเกิดการม้วนรวมกระแสลมขวางเข้ามาในตัวเจ็ต โดยแกนการม้วนตัวจะมีทิศทางตามผลรวมของเวกเตอร์ความเร็วเจ็ตและกระแสลมขวาง (\bar{u}_{mean}) ดังรูปที่ 2.12 (ก) ซึ่งโครงสร้างเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วระหว่างเจ็ตกับกระแสลมขวางในทิศตั้งฉากกับทิศของ \bar{u}_{mean} , (\bar{u}_{nj} และ \bar{u}_{ncf}) ดังรูปที่ 2.12 (ข) หรือที่เรียกว่า Skewed mixing layer ซึ่งพัฒนาตัวขึ้นระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางที่ขอบด้านข้างของเจ็ต โดยการไหลไปตามแนวแกนผ่าน Hanging vortices จะเป็นตัวนำ Vortical fluid จาก Boundary layer ที่ติดกับผนังเข้ามายังด้านหลังของลำเจ็ตทำให้ Hanging vortices เกิดการปะทะกับ Adverse pressure gradient เป็นผลทำให้เกิด Breakdown ขณะเดียวกัน Vortex จะขยายขนาดและก่อตัวเป็น CVP ที่มีกำลังไม่มาก และเอียงตัวไปตามแนวเส้นทางเคลื่อนที่ของเจ็ต

Cortelezzi and Karagozian (2001) ศึกษาการก่อตัวและพัฒนาตัวของ CVP ในสนามการไหล โดยใช้เทคนิค 3D vortex element จากการศึกษาดังรูป 2.13 แสดงถึงโมเดลของกลไกการเกิด CVP โดยเริ่มต้นจากการที่ Vortices ที่เกิดขึ้นจากผนังภายในท่อของเจ็ต และพัฒนาตัวเป็นวงแหวนใกล้ปากทางออกเจ็ต และเอียงตัวไปตามทิศทางของกระแสลมขวาง ซึ่งทำให้เกิดลักษณะเป็น Vortex ring ห่อตัวล้อมด้านหลัง โดยขอบของ Vortex ring จะยกตัวสูงขึ้นและเชื่อม

กับขอบของ Vortex ring ที่เกิดขึ้นก่อน และพัฒนาตัวกลายเป็น CVP ที่สมบูรณ์ที่บริเวณ Far field ซึ่งแสดงการเกิด Vortical structure ซึ่งเกิดจากการม้วนตัวของ Jet shear layer พับกับขอบของ Vortex ring และขอบที่พับตัวจะกระตุ้นให้เกิด Vortex ring ตัวใหม่ขึ้นดังรูป 2.14

Lim *et al.* (2001) ได้ศึกษา Large scale structure ในเจ็ตในกระแสลมขวางโดยใช้เทคนิคฉีดสี (dye) และเทคนิค PLIF จากรูปที่ 2.15 จะพบโครงสร้าง Upstream vortex (A) และ Leaside vortex (B) ซึ่งมีลักษณะเป็น Vortex loop ซึ่งเกิดจากการพัฒนาตัวของ Cylindrical vortex sheet ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งแสดงถึงการพัฒนาตัวของ CVP จึงเชื่อว่า CVP นั้นเกิดจากการพัฒนาตัวของ Vortex loop แทนที่จะเป็น Vortex ring เหมือนกับ Free jet ตามที่เสนอโดย Cortelezzi and Karagozian (2001)

Sue *et al.* (2004) ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ที่บริเวณ Near field โดยปากทางออกเจ็ตมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 2.17 โดยเสนอแนวคิดตามแนวคิดของ Yuan *et al.* (1999) ที่เสนอว่า การก่อตัวของ CVP เกิดการ Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวมาจากปฏิสัมพันธ์ของเจ็ตและผนังด้านข้าง และพบว่าโครงสร้าง Kelvin-helmholtz roller นั้นไม่ได้พัฒนาตัวเป็น Closed vortex ring มากไปกว่านั้น จากรูปที่ 2.18 พบว่า โครงสร้าง Wake vortice ที่ก่อตัวขึ้นที่บริเวณ Downstream และโครงสร้าง Horseshoe ที่ก่อตัวขึ้นบริเวณ Upstream นั้นเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่าง โครงสร้าง Shear layer ที่พื่นกับตัวเจ็ต

Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ได้ทำการศึกษาเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยการติด Tab ที่บริเวณปากทางออกเจ็ต ผลการศึกษาชี้แนะว่าการพัฒนาตัวของ Skewed mixing layer ที่เกิดขึ้นรอบปากเจ็ต เป็นผลทำให้เกิดการก่อตัวของ CVP

2.4 การปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวาง

งานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีความพยายามที่จะปรับแต่งและควบคุมการผสม การไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง ซึ่งแบ่งลักษณะการควบคุมเป็น 2 ประเภท คือ การควบคุมโดยไม่ใช้พลังงานกระตุ้น (Passive control) เช่น การติด Tab ที่ปากทางออกเจ็ต การติด Vortex generator tab และประเภทที่สองคือ การควบคุมโดยใช้พลังงานกระตุ้น (Active control) เช่น การกระตุ้นแบบ

เป็นจังหวะ (Pulsing), การกระตุ้นด้วยเจ็ตหมุนควง (Swirling) และการกระตุ้นโดยการฉีดเจ็ตควบคุม (Control jet) เป็นต้น

- ผลของการกระตุ้นโดยการติด Tab ที่ปากทางออกของเจ็ต

Zaman and Fross (1997) ศึกษาผลของ Vortex generator แบบ Tab ชนิดรูปสามเหลี่ยมที่บริเวณปากทางออกเจ็ต ที่มีผลต่อการ Penetration และ Spreading ของเจ็ตในกระแสมวลว่าง สำหรับ Momentum-flux ratio (J) เท่ากับ 21.1 และ 54.4 (คิดเป็นค่า r เท่ากับ 4.6 และ 7.4 ตามลำดับ) พบว่าการติด Tab ที่ด้าน Windward ส่งผลให้ contour ของความเร็วเฉลี่ยอยู่ต่ำกว่ากรณีไม่ติด Tab และเกิดความไม่สมมาตรเมื่อเทียบกับการไม่ติด Tab แสดงดังรูปที่ 2.19 (ก) และ 2.19 (ข) ทั้งสำหรับ J เท่ากับ 21.1 และ 54.4 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าการติด Tab ที่ตำแหน่ง Windward ส่งผลให้ Penetration depth ลดลง และขนาด Streamwise vorticity isosurface ซึ่งเป็นค่าตัวแทนแสดงการพัฒนาตัวของ CVP จะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ติด tap แสดงดังรูปที่ 2.20 (ก) และ 2.20 (ข) ทั้งสำหรับ J เท่ากับ 21.1 และ 54.4 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงเส้นทางการเดินของเจ็ต จากรูปที่ 2.21 พบว่า การติด Tab ที่ด้าน Windward ส่งผลให้เส้นทางการเดินของเจ็ตต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ติด Tab สำหรับทั้งค่า J เท่ากับ 21.1 และ 54.4

Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ได้ทดลองศึกษาผลของ tab ต่อการกระจายตัวของเจ็ตร้อนที่ไม่หมุนควง (JICF) และเจ็ตหมุนควง (SJICF) โดยทำการทดลองที่ Swirl ratio (Sr) เท่ากับ 0 และ 0.52 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4 โดย tab ที่ใช้มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมและมีพื้นที่ประมาณ 3% ของพื้นที่ปากทางออกเจ็ต โดยติดตั้ง tab ตามเส้นรอบวงเป็นจำนวน 8 ตำแหน่งดังรูปที่ 2.22 พบว่าในกรณีที่เจ็ตไม่หมุนควง โครงสร้างการไหลจะมีความไวมากที่สุดเมื่อติด tab ที่ตำแหน่ง Lateral จนถึง Windward โดยโครงสร้างจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างคล้ายรูปไตซึ่งคล้ายกับ CVP ไปเป็นโครงสร้างรูปจุลภาค (Comma) โดยมีแกนกลางอยู่บนตำแหน่งที่สูงกว่ากรณีที่ไม่ติด tab และรูปร่างแบบจุลภาคยังคงพบเห็นจะถึงระนาบสุดท้ายของการวัดดังรูปที่ 2.23

ในการทดลองกรณีที่มีเจ็ตหมุนควง จากรูปที่ 2.24 พบว่าผลที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีที่ไม่หมุนควง อย่างไรก็ตามก็มีความแตกต่างกันให้เห็นสำหรับสองกรณีนี้โดย กรณีที่เจ็ตหมุนควงนั้น โครงสร้างการไหลจะมีพื้นที่ที่มีความไวกว้างกว่าเจ็ตไม่หมุนควง โดยบริเวณดังกล่าวคือบริเวณ Pressure leeward ไปจนถึง Suction เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งการติด tab ไปตามทิศทางการหมุน

จากผลการศึกษาดังกล่าวจึงสรุปได้ว่า บริเวณที่มีความไวต่อการกระตุ้นโดยการติด tab มากที่สุดหรือมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการไหลมากที่สุด คือตำแหน่ง Pressure windward (PW) จนถึง Windward (W) สำหรับทั้งกรณีเจ็ตไม่หมุนควงและเจ็ตหมุนควง และยังชี้แนะให้เห็นว่าการเกิดโครงสร้างการไหลมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับ Skewed shear layer ตามทิศทางการไหลของกระแสลมขวางรอบลำเจ็ต ใกล้กับลำเจ็ต ณ ตำแหน่งปากทางออกเจ็ต

- ผลของการกระตุ้นอย่างเป็นจังหวะ (Pulsing)

M'Closkey *et al.* (2002) ได้มีแนวคิดที่จะปรับแต่งรูปแบบการไหลของเจ็ต โดยการกำหนดให้ความเร็วที่ปากทางออกเจ็ต มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับเวลา โดยการใช้ การกระตุ้นเจ็ตอย่างเป็นจังหวะ (Temporal pulse) ด้วยลำโฟง ซึ่งได้มีการปรับรูปแบบสัญญาณขาเข้า ความถี่และอุปกรณ์ควบคุม (Filter) แบบที่มี Compensator และไม่มี Compensator พบว่าชุดควบคุมที่ประกอบด้วยตัว compensator นั้นจะมีการตอบสนองได้เที่ยงตรงกว่า ซึ่งเปรียบเทียบผลโดยการวัดความเร็ว ณ ปากทางออกเจ็ตโดย Hot-wire anemometer จากรูปที่ 2.25 พบว่ากรณีที่มีการกระตุ้นด้วยสัญญาณขาเข้าเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม และมี Compensator เจ็ตจะมีความพุ่งทะลุ (Penetration) และการกระจายตัวเข้าไปในกระแสลมขวางได้เหมาะสมที่สุด ซึ่งตรงกับคาบของสัญญาณที่อยู่ในช่วงระหว่าง 2.7-3.0 mS

Narayanan *et al.* (2003) ศึกษา Dynamic ของการควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวางด้วย Spining valve actuator ที่กระตุ้นด้วยความถี่ระหว่าง 100 ถึง 1,600 Hz ที่ $Re_{cf} = 5,000$, $Re_j = 2.75 \times 10^4$ และ $r = 6$ พบว่าการกระตุ้นที่ความถี่ต่ำนั้นส่งผลให้ Vortices เพิ่มขึ้น โดยเจ็ตจะ

พุ่งออกและโค้งตัวตามกระแสลมขวาง แสดงดังรูปที่ 2.26 ในขณะที่เมื่อกระตุ้นเจ็ตด้วยความถี่สูงนั้นจะช่วยให้การกระจายตัวของเจ็ตที่ปากทางออกเพิ่มสูงขึ้น

- ผลของการกระตุ้นด้วยเจ็ตหมุนควง (Swirling)

Niederhaus *et al.* (1997) ได้ศึกษาเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีการหมุนควง (Swirling) โดยจะสร้างเจ็ตหมุนควงด้วยใบพัด ซึ่งทำให้ความแนวตามเส้นสัมผัสที่ปากทางออกเจ็ตมีค่าเป็นศูนย์ โดยศึกษา Scalar concentration ในอุโมงค์น้ำ ด้วยเทคนิค Planar laser induced fluorescene (PLIF) พบว่า เจ็ตหมุนควงส่งผลให้ CVP เปลี่ยนจากลักษณะสมมาตรเป็นลักษณะที่มี Vortex ด้านหนึ่งใหญ่ขึ้นในขณะที่อีกด้านหนึ่งเล็กลง รวมถึงการที่รูปร่างเปลี่ยนไปเป็นรูปจุลภาค (Comma) นอกจากนี้ยังพบว่าเจ็ตหมุนควงยังส่งผลให้ Penetration depth ของเจ็ตลดลง และทำให้ Maximum concentration เกิดขึ้นที่ด้าน Pressure side

Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) ศึกษาเจ็ตหมุนควง โดยศึกษาถึงผลของความเร็วมุมควง ซึ่งแสดงโดย Swirl ratio (Sr) ที่มีต่ออุณหภูมิจากการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยทดลองที่ค่า Sr ตั้งแต่ 0 จนถึง 0.82 ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4.1 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.25 - 2$ ซึ่งอยู่ภายใต้บริเวณ Near field และ Far field โดยการหมุนควงจะเกิดจากการหมุนท่อนก่อนจะถึงปากทางออกเจ็ต ส่งผลให้ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์ จากรูปที่ 2.27 แสดงถึงการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิตามระยะห่าง พบว่าการหมุนควงของเจ็ตส่งผลให้อุณหภูมิและความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำบริเวณด้าน Suction ในขณะที่จะส่งผลให้อุณหภูมิและความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำบริเวณด้าน Pressure เมื่อเทียบกับกรณีเจ็ตไม่หมุนควง มากไปกว่านั้นเจ็ตหมุนควงยังส่งผลให้โครงสร้างการไหลเกิดความไม่สมมาตรอีกด้วย อย่างไรก็ตามผลของเจ็ตหมุนควงต่อพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น เส้นทางเดินของเจ็ตและการถดถอย (Decay) ของเจ็ตในกระแสลมขวาง มีอิทธิพลน้อยกว่าผลของอัตราส่วนประสิทธิผล

Denev *et al.* (2005) ศึกษาโครงสร้างและการผสมของเจ็ตหมุนควงในกระแสลมขวาง ที่ค่า Swirl number เท่ากับ 0 ถึง 0.6 โดยในการศึกษานี้จะใช้วิธี LES ศึกษาสนามการไหล พบว่า

เจ็ดหมุนควงส่งผลให้สนามความเข้มข้นมีรูปร่างบิดเบี้ยว และพบ High concentration ที่ด้าน Suction ดังรูปที่ 2.28 และ 2.29 ซึ่งชี้แนะว่าเจ็ดหมุนควงไม่ส่งผลให้เกิดการผสมดีขึ้น หรือมีผลน้อยมากต่อการผสม

Yingjareon *et al.* (2006) ศึกษาการวิวัฒนาการของเจ็ดในกระแสมขวง กรณีเจ็ดหมุนควงซึ่งมีความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสที่ปากทางออกเจ็ดไม่เท่ากับศูนย์ และกรณีเจ็ดไม่หมุนควง โดยใช้ปฏิกิริยา กรด - เบส แสดงถึง Reactive mixing และการฉีดสีซึ่งแสดงถึง Passive mixing โดยทดลองที่ค่า Sr ตั้งแต่ 0 - 0.8 ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4 ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้ Contours of line-of-sight integrated mean images แทนปริมาณเชิงคุณภาพของการผสม แสดงดังรูปที่ 2.29 พบว่ากรณีเจ็ดไม่หมุนควงบริเวณตำแหน่ง $x/rd < 0.5$ Passive outer region mixing จะมีการผสมที่บริเวณนี้มาก และที่ตำแหน่ง x/rd มากขึ้นพบว่าการผสมบริเวณ Passive outer region mixing จะมีการผสมน้อยลงในขณะที่ Central-region mixing จะมีอิทธิพลต่อการผสมมากขึ้น และ Reactive inner region mixing จะมีการผสมเพียงเล็กน้อยในบริเวณนี้ และกรณีเจ็ดหมุนควงพบว่า บริเวณ Outer และ Inner regions จะมีการผสมบริเวณนี้มากในขณะที่ Central-region mixing ไม่มีนัยสำคัญต่อการผสม

Limdumrongtum *et al.* (2009) ได้ศึกษา Mixing structure ในบริเวณ Near field โดยศึกษาโครงสร้างของ Instantaneous และ Mean flow ของเจ็ดในกระแสมขวงที่มีการหมุนควงและไม่หมุนควง โดยใช้เทคนิคผลรวมของ Smoke fluid condensation, Mie scattering, และ Laser-sheet visualization techniques โดยทำการทดลองที่ค่า Sr ตั้งแต่ 0 - 0.8 ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4 จากรูปที่ 2.30 แสดงถึง Instantaneous image ของ Mixing structure ตาม Top view ที่ตำแหน่ง $y/rd < 0.2$ พบว่าการหมุนควง (Swirl) จะไปช่วยพัฒนาและสนับสนุนการเกิด Cascading azimuthal K-H mixing structures ที่ด้าน Pressure ขณะที่จะไปยับยั้งการเกิดที่ด้าน Suction และที่ตำแหน่ง $y/rd > 0.2$ พบว่าการหมุนควงจะไปช่วยพัฒนาและสนับสนุนการเกิด Vortical roll-ups บนด้าน Pressure และยับยั้งการเกิดที่ด้าน Suction โดยการพัฒนาดังกล่าวของ Vortical roll-ups บนด้าน Pressure นั้นเป็นผลมาจากการพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่องมาจาก Cascading azimuthal K-H mixing structures จาก

Upstream ในตรงการข้าม Vortical roll-ups บนด้าน Suction นั้นเป็นผลมาจากการพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่องมาจาก Lee side cusp

- ผลของการกระตุ้นด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jet)

Kornsri *et al.* (2009) ได้ทดลองศึกษาปรับแต่งและควบคุมการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วยการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jets) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.31 โดยใช้ Single sensor hot film anemometer เป็นอุปกรณ์วัดความเร็ว โดยในการศึกษานี้จะศึกษาถึงผลของ ตำแหน่งการฉีดเชิงมุมตามแนวเส้นรอบวง (θ) และอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะของการควบคุมที่ส่งผลให้มีอัตราการเหนี่ยวนำการผสมดีที่สุด โดยพิจารณาจากเส้นทางเดินของความเร็วเจ็ตบนระนาบสมมาตรที่มีเส้นทางเคลื่อนที่ต่ำที่สุด โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4 และ ที่อัตราส่วนการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลักระหว่าง 0 – 2.3 % จากรูปที่ 2.32 แสดงถึงเส้นทางเดินของความเร็วเจ็ต ในกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม และการฉีดเจ็ตควบคุมที่มุมต่างๆ ที่อัตราส่วนการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลักคงที่เท่ากับ 2.3 % พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ด้าน Leeward จะส่งผลให้เส้นทางเดินของความเร็วเจ็ตสูงขึ้น ในขณะที่การฉีดเจ็ตควบคุมที่ด้าน Windward จะส่งผลให้เส้นทางเดินของความเร็วเจ็ตต่ำลงโดยการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ $\pm 15^\circ$ (I15) จะทำให้เส้นทางเดินของความเร็วเจ็ตต่ำที่สุดในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาถึง โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง จากรูปที่ 2.33 ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของความเร็ว (V_{xy}) ต่อกระแสลมขวาง จะเห็นได้ว่า การฉีดเจ็ตควบคุมในกรณี I15 จะส่งผลให้เจ็ตมี Streamwise vortical pair ห่างจากกันตามแนว Spanwise มากขึ้น และจับไปยังการเกิด Windward jet shear layer ในขณะที่ระยะห่างระหว่างเจ็ตกับพื้นด้านล่าง (Wall separation) จะน้อยลง ซึ่งสัมพันธ์กับการที่เจ็ตเตี้ย

Witayaprapakorn and Bunyajitradulya (2013) ได้ศึกษาผลของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่ออัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ซึ่งวัดสนามความเร็วโดยใช้ Stereoscopic particle image velocimetry (SPIV) โดยเพื่อที่จะหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรใน

ส่วนของเจ็ตหลักเท่านั้น จึงใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตหลักเท่านั้น ทั้งนี้จึงสามารถแยกส่วนเจ็ตหลักออกจากกระแสลมขวางได้อย่างชัดเจน จากรูปที่ 2.34 พบว่า ที่อัตราส่วนการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) เท่ากับ 2% การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ $\pm 15^\circ$ (I15) ส่งผลให้การเหนี่ยวนำการผสมไม่ต่างกับกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 0.75 แต่จะมีการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ และ 1.5 ในขณะที่เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ $\pm 135^\circ$ (I135) จะส่งผลให้การเหนี่ยวนำการผสมสูงกว่ากรณี I15 และกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม โดยมีการเหนี่ยวนำการผสมมากกว่ากรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุมสูงสุดถึงประมาณ 13% ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.75$

2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง

Meyer *et al.* (2007) ศึกษาโครงสร้างของเจ็ตโดยวัดความเร็วเจ็ตด้วยเทคนิค Particle image velocimetry (PIV) โดยรูปแบบเริ่มต้นของเจ็ตเป็น Fully developed และมี Reynolds number ซึ่งนิยามจากความเร็วกระแสลมขวางและเส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออกเจ็ตเท่ากับ 2,400 โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (R) เท่ากับ 3.3 และ 1.3 และวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตจากหลายมุมมอง (Side view, Top view และ End view) โดยใช้ Proper orthogonal decomposition (POD) จากรูปที่ 2.35 พบว่าสำหรับกรณีที่ $R = 3.3$ โครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับ Wake vortices เป็นโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุด โดยโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer เป็นโครงสร้างที่มีบทบาทและพลังงานการไหลปั่นป่วนรองลงมา อย่างไรก็ตามกรณี $R = 1.3$ (ไม่มีภาพประกอบ) กลับพบว่าโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer เป็นโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุด แทนที่โครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับ Wake vortices ซึ่งมีบทบาทสำคัญรองลงมา บ่งชี้ว่า โครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer จะไม่มีบทบาทควบคู่ไปกับโครงสร้างที่คล้ายกับ Wakevortic

บทที่ 3

เทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวาง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคนิคและหลักการในการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวาง โดยในเบื้องต้นนั้นงานวิจัยนี้ได้วัดสนามความเร็วโดยใช้เทคนิค Stereoscopic particle image velocimetry (SPIV) อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะวิเคราะห์โครงสร้างของส่วนที่เป็นเจ็ตหรือบริเวณที่มีส่วนผสมของเจ็ตของไหล (Jet fluid) ซึ่งแยกแยะออกจากส่วนที่เป็นกระแสมขวางล้วนได้อย่างชัดเจนนั้น ในส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้จึงได้ใส่อนุภาคติดตามการไหลเข้าไปในส่วนของเจ็ตหลักเท่านั้น โดยไม่ใส่ในกระแสมขวาง และเพื่อที่จะวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางนั้น ได้ใช้เทคนิคที่เรียกว่า Proper orthogonal decomposition (POD) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ ซึ่งจะกล่าวต่อไป

3.1 เทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางด้วย POD

ในการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางได้ใช้เทคนิค POD ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณที่มีความปั่นป่วนซึ่งในที่นี้คือ โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางบนสนามความเร็ว โดยจะทำการแยกลักษณะโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางออกมาเป็นโครงสร้างย่อยๆ (POD modes) หลายโครงสร้าง และมีระดับพลังงาน (Energy) ของแต่ละ POD modes นั้นๆ (ระดับพลังงานในที่นี้ก็คือ พลังงานการไหลปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy, TKE)) ซึ่งคล้ายคลึงกับอนุกรมฟูเรียร์ อย่างไรก็ตามความแตกต่างระหว่างเทคนิค POD และอนุกรมฟูเรียร์นั้นคือ การใช้อนุกรมฟูเรียร์ในการแยกวิเคราะห์สัญญาณนั้น ฟังก์ชันพื้นฐานจะถูกกำหนดตายตัวตั้งแต่แรกเป็นฟังก์ชันไซน์ (Sine) แต่จุดเด่นที่สำคัญของการใช้เทคนิค POD คือในการแยกวิเคราะห์สัญญาณนั้นจะไม่ได้ถูกกำหนดฟังก์ชันพื้นฐานเอาไว้ แต่กระบวนการของ POD จะวิเคราะห์หาเซตของฟังก์ชันพื้นฐานที่ให้พลังงานรวมสูงสุด ในจำนวน Mode ที่เท่ากัน เมื่อเทียบกับเซตของฟังก์ชันพื้นฐานอื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย POD กับการวิเคราะห์โครงสร้างจากความเร็วเฉลี่ย จุดเด่นของเทคนิค POD คือสามารถแยกโครงสร้างออกมาเป็นโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญที่สุด (POD modes) และพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุด นอกจากนี้ยังสามารถหาโครงสร้างที่มีบทบาทรองลงมาได้ พร้อมทั้งแสดงพลังงานการไหลปั่นป่วนสำหรับแต่ละโครงสร้างซึ่งบ่งบอกถึงระดับความสำคัญ ในทางกลับกันการวิเคราะห์โครงสร้างจากความเร็วเฉลี่ยนั้นจะสามารถเห็นโครงสร้างโดยรวม แต่จะไม่

สามารถเปรียบเทียบบทบาทของโครงสร้างต่างๆที่มีระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนต่างกัน (เทียบเท่าเป็น POD modes) ได้อย่างชัดเจน

3.1.1 กระบวนการหา POD Mode และ Energy

โดยการใช้วิธีการ POD กับสนามความเร็วในสามมิติที่ได้จาก SPIV นั้น จะใช้วิธีการคำนวณจาก (Meyer, Pederson et al. 2007) ในหัวข้อ POD analysis โดยเริ่มจากการหาสนามความเร็วเฉลี่ย (การเฉลี่ยในที่นี้คือการเฉลี่ยตามเวลา (Time-averaged) ซึ่งเป็นการเฉลี่ยในช่วงเวลาทั้งหมดโดยไม่สนใจว่าช่วงเวลานั้นจะมีความเร็วหรือไม่ โดยจะแตกต่างจากการเฉลี่ยตามสภาวะ (Conditional-averaged) ซึ่งเป็นการเฉลี่ยเฉพาะช่วงเวลาที่พบความเร็วการไหล) โดยสนามความเร็วเฉลี่ยที่ได้จะแยกส่วนเป็นความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x , y และ z ซึ่งสนามความเร็วเฉลี่ยนี้จะถือว่าเป็น POD mode 0 ของกระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย POD และจากสนามความเร็วเฉลี่ยเมื่อนำไปลบออกจากสนามความเร็วในเวลาใดๆ (Instantaneous velocity field) ก็จะได้สนามความเร็วผันผวน (Fluctuation velocity field) จากนั้นจะจัดเรียงสนามความเร็วผันผวนให้อยู่ในลักษณะของ Column vector โดยจะแยกส่วนความเร็วในทั้ง 3 แนวแกนออกเป็นกลุ่ม (u_j^n, v_j^n, w_j^n) ซึ่ง u, v , และ w แสดงถึง ความเร็วผันผวนของในแกน x, y และ z ตามลำดับ j แสดงถึงตำแหน่งบนระนาบสนามความเร็วผันผวน และ n แสดงถึงสนามความเร็วผันผวนที่เวลาใดๆ จนถึงเวลา N (เวลาในที่นี้จะสัมพันธ์กับจำนวนภาพในการวัดความเร็วด้วย SPIV) และจะจัดเรียง Column vector ของสนามความเร็วผันผวนในแต่ละแกน (U^m) ในช่วงเวลาทั้งหมดเป็นแมทริกซ์ U ในดังนี้

$$\mathbf{U} = [\mathbf{U}^1 \quad \mathbf{U}^2 \quad \dots \quad \mathbf{U}^N] = \begin{bmatrix} u_1^1 & u_1^2 & \dots & u_1^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_j^1 & u_j^2 & \dots & u_j^N \\ v_1^1 & v_1^2 & \dots & v_1^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_j^1 & v_j^2 & \dots & v_j^N \\ w_1^1 & w_1^2 & \dots & w_1^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_j^1 & w_j^2 & \dots & w_j^N \end{bmatrix}_{3J \times N}$$

} ความเร็วผันผวนในแนวแกน x
 } ความเร็วผันผวนในแนวแกน y
 } ความเร็วผันผวนในแนวแกน z

} สนามความเร็วผันผวนที่เวลา n ใดๆ

} สนามความเร็วผันผวนในช่วงเวลา N

(3.1)

จากนั้นจะหา Autocovariance แมทริกซ์ จาก

$$\tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{U}^T \mathbf{U} \quad (3.2)$$

ทำให้แมทริกซ์ Autocovariance ($\tilde{\mathbf{C}}$) มีขนาดเป็น $[N \times N]$

จะหา Eigenvalue (λ^i) และ Eigenvector (\mathbf{A}^i) จาก

$$\tilde{\mathbf{C}} \mathbf{A}^i = \lambda^i \mathbf{A}^i \quad (3.3)$$

โดย Eigenvector (\mathbf{A}^i) จะเป็น Column vector ขนาด $[N \times 1]$ ในขณะที่ Eigenvalue จะมีลักษณะเป็น แมทริกซ์เส้นทแยงมุม (Diagonal matrix) ซึ่งมีขนาดเป็น $[N \times N]$

$$\begin{bmatrix} \lambda^1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda^N \end{bmatrix}_{N \times N}$$

สำหรับค่า Eigenvalue ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ Eigenvector นั้น จะถูกเรียงลำดับใหม่ให้มีค่า Eigenvalue จากมากไปหาน้อย

$$\begin{bmatrix} \lambda^1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda^N \end{bmatrix} \quad \text{โดยที่ } \lambda^1 > \lambda^2 > \lambda^3 > \dots > \lambda^N = 0 \quad (3.4)$$

และนำ Eigenvector ที่ได้จากสมการ 3.3 มาเรียงให้สอดคล้องกับสมการ 3.4 และนำไป

คำนวณหา POD mode ($\boldsymbol{\varphi}$) ได้จาก

$$\varphi^i = \frac{\mathbf{U}\mathbf{A}^i}{\|\mathbf{U}\mathbf{A}^i\|} = \frac{\sum_{n=1}^N A_n^i \mathbf{U}^n}{\left\| \sum_{n=1}^N A_n^i \mathbf{U}^n \right\|}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, I = N \quad (3.5)$$

เมื่อ $[\mathbf{U}]_{3J \times N}$, $[\mathbf{A}^i]_{N \times 1}$, $[\varphi^i]_{3J \times 1}$

หรือในรูปของแมทริกซ์

$$\boldsymbol{\varphi} = \frac{\mathbf{U}\mathbf{A}}{\|\mathbf{U}\mathbf{A}\|}, \quad [\mathbf{U}]_{3J \times N}, [\mathbf{A}]_{N \times N}, [\boldsymbol{\varphi}]_{3J \times N} \quad (3.6)$$

3.1.2 กระบวนการย้อนกลับ (Reconstruction)

สำหรับแต่ละภาพที่ถูกแยกออกมาด้วย POD modes นั้นจะมีสัมประสิทธิ์ β_i สำหรับแต่ละ POD mode i ซึ่งสามารถเรียกได้ว่าเป็น สัมประสิทธิ์ POD ซึ่งเกิดจากการ แดกเข้าแกนของ สนามความเร็วผันผวนไปยัง POD modes ดังสมการที่ 3.6

$$\boldsymbol{\beta}^n = \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{U}^n \quad (3.7)$$

หรือในรูปของแมทริกซ์

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{U} \quad (3.8)$$

เมื่อ $\boldsymbol{\psi} = [\boldsymbol{\varphi}^1 \ \boldsymbol{\varphi}^2 \ \dots \ \boldsymbol{\varphi}^N]_{3J \times N}$, $[\boldsymbol{\beta}^n]_{N \times 1}$, $\mathbf{B} = [\boldsymbol{\beta}^1 \ \boldsymbol{\beta}^2 \ \dots \ \boldsymbol{\beta}^N]_{N \times N}$ โดยสนามความเร็วผันผวนของแต่ละแนวแกน ที่เวลา n (ภาพที่ n) จาก POD modes หาได้ดังสมการที่ 3.8

$$\mathbf{U}^n = \sum_{i=1}^N \beta_i^n \boldsymbol{\varphi}^i = \boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\beta}^n \quad (3.9)$$

หรือในรูปของแมทริกซ์

$$\mathbf{U} = \boldsymbol{\psi} \mathbf{B} \quad (3.10)$$

จะเห็นได้ว่า POD modes (ϕ) เป็นฟังก์ชันของ Eigenvector ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ Eigenvalue ซึ่งเป็นตัวแทนของระดับพลังงาน และจากการเรียงตัวของ Eigenvalue และ POD modes จะแสดงให้เห็นว่า Modes ที่สำคัญที่สุดในเชิงของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน คือมีระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุดนั้นจะถูกเรียงลำดับจากมากไปน้อยเป็น Mode 1, Mode 2, ... ดังนั้นในการวิเคราะห์เจ็ตในกระแสมขวางนั้น โครงสร้างที่เป็นโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุดจะถูกแสดงออกมาด้วย POD mode ที่ 1 และในกระบวนการคำนวณเพื่อหา POD Modes และ Energy นั้นจะคำนวณโดยใช้โปรแกรม MATLAB และใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์



บทที่ 4

รายละเอียดการทดลองและอุปกรณ์การทดลอง

4.1 ชุดการทดลอง

ชุดการทดลองในงานวิจัยนี้ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดง Schematic ได้ดังรูปที่ 4.1 ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ อุโมงค์ลม, ชุดเจ็ตหลัก, และชุดเจ็ตควบคุม โดยมีหลักการทำงานคือ Blower จะสร้างเจ็ตหลักไหลออกมาโดยระหว่างทางการไหลจะมีการฉีดอนุภาคติดตามการไหลด้วย Six-Jets Atomizer โดยเจ็ตหลักที่ผสมด้วยอนุภาคติดตามการไหลจะไหลออกมาในทิศทางที่ตั้งฉากกับกระแสลมขวางที่ถูกสร้างโดยอุโมงค์ลมในบริเวณทดสอบ (Test section) ทำให้เกิดการผสมระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางขึ้น โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วนเป็นดังนี้

- **อุโมงค์ลม (Wind tunnel)**

อุโมงค์ลมมีหน้าที่สร้างกระแสลมขวาง ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ คือ พัดลมแบบหอยโข่ง (Centrifugal blower) ขนาด 15 กิโลวัตต์, ท่ออ่อน (Flexible duct), ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (Diffuser), ห้องจัดปรับการไหล (Setting chamber) ขนาด 100 x 100 ตารางเซนติเมตร, ส่วนลดพื้นที่หน้าตัด (Contraction) ที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดขาเข้าต่อทางออกเท่ากับ 4, และบริเวณทดสอบ (Test section) สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 50 x 50 ตารางเซนติเมตร และมีความยาว 240 เซนติเมตร

การทำงานของอุโมงค์ลมเริ่มจากอากาศภายนอกถูกดึงผ่านพัดลมแบบหอยโข่งชนิด Backward curve airfoil blades ขนาด 15 kW ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งมีขนาดทางออก 76 x 76 ตารางเซนติเมตร มีหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของกระแสลมขวางโดยการควบคุมความเร็วรอบด้วยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (ABB™ model ACS401002032, ขนาด 50 Hz, ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz) กระแสลมขวางที่ควบคุมอัตราการไหลแล้วจะไหลผ่านท่ออ่อนเพื่อลดแรงสั่นสะเทือน และผ่านไปส่วนขยายพื้นที่หน้าตัดเพื่อลดความความเร็วของอากาศซึ่งจะช่วยลด

ความสูญเสียที่จะเกิดขึ้นในห้องจัดปรับการไหล โดยส่วนขยายพื้นที่หน้าตัดจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดขาเข้าเท่ากับ 78×78 ตารางเซนติเมตร ขนาดขาออกเท่ากับ 100×100 ตารางเซนติเมตร ยาว 74 เซนติเมตร คิดเป็นอัตราส่วนพื้นที่เท่ากับ 1.64 และมีมุมเอียงรวมเท่ากับ 16.9 องศา โดยภายในส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด ประกอบด้วยแผ่นเหล็กเจาะรู (Perforated plate) จำนวน 4 แผ่น โดยแต่ละแผ่นมีระยะห่างจากทางเข้าเท่ากับ 15, 30, 45 และ 60 เซนติเมตร โดยแผ่นเจาะรูจะมีหน้าที่ป้องกันการเกิด Separation และช่วยให้อากาศมีการกระจายเต็มพื้นที่หน้าตัดของส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด

หลักจากอากาศไหลผ่านส่วนขยายพื้นที่หน้าตัดเพื่อลดความเร็วแล้ว อากาศจะไหลผ่านไปยังห้องจัดปรับการไหลซึ่งมีขนาด 100×100 ตารางเซนติเมตร ยาว 125 เซนติเมตร ภายในจะมีการติดตั้ง ตาข่ายอลูมิเนียม (Screen) อยู่ 2 ตำแหน่ง ตำแหน่งแรกจะติดตั้งบริเวณส่วนต้นของห้องจัดปรับการไหล ซึ่งมีขนาด Mesh \times SWG เท่ากับ 4×24 และส่วนที่สองจะติดตั้งส่วนท้ายของห้องจัดปรับการไหล ซึ่งมีขนาด Mesh \times SWG เท่ากับ $(16 \times 18) \times 31$ จำนวน 7 แผ่น โดยระหว่างตาข่ายอลูมิเนียม ทั้ง 2 ชุด จะมี Honey comb ซึ่งทำจาก PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร วางเรียงตัวอยู่เต็มหน้าตัดการไหลซึ่งจะคอยช่วยปรับทิศทางการไหล และเมื่ออากาศไหลผ่านตาข่ายอลูมิเนียมส่วนท้ายแล้ว จะทำให้อากาศมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด จากนั้นอากาศจะผ่านส่วนลดพื้นที่หน้าตัดซึ่งมีอัตราส่วนทางเข้าต่อทางออกเท่ากับ 4 โดยเส้นโค้งของส่วนลดพื้นที่หน้าตัดได้ถูกออกแบบตามสมการ Polynomial ดีกรี 4 ที่มีจุดเปลี่ยนความโค้งที่ระยะ $2/3$ เท่าของความยาวส่วนลดพื้นที่หน้าตัดซึ่งยาวเท่ากับ 170 เซนติเมตร โดยส่วนลดพื้นที่หน้าตัดจะช่วยเร่งให้อากาศมีความเร็วเพิ่มขึ้นจนมีความเร็วตามต้องการในบริเวณทดสอบ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอและลดความปั่นป่วนของอากาศที่บริเวณทดสอบ จากนั้นกระแสลมขวางจะผ่านไปบริเวณทดสอบ มีหน้าตัดขนาด 50×50 ตารางเซนติเมตร ยาว 240 เซนติเมตร ผนังทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 15 มิลลิเมตร โดยบริเวณด้านข้างของบริเวณทดสอบสามารถเปิดปิดได้แบบหน้าต่างบานพับ และสำหรับชุดเจ็ตและชุดเจ็ตควบคุมจะต่อเข้าทางผนังด้านล่างของบริเวณทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางของบริเวณทดสอบ โดยจุดศูนย์กลางของเจ็ตห่างจากขอบด้านหน้าของบริเวณทดสอบเท่ากับ 85 เซนติเมตร

- **ชุดเจ็ทหลัก (Main Jet)**

ชุดเจ็ทหลักทำหน้าที่สร้างเจ็ทหลักมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในปากทางออกเจ็ทเท่ากับ 22.5 มิลลิเมตร โดยการทำงานของเจ็ทหลักเริ่มจากอากาศจะถูกดูดจากบรรยากาศของห้องทดลองผ่านพัดลมความดันสูงขนาด 10 แรงม้าดังรูปที่ 4.4 โดยใช้มอเตอร์ Elprom เป็นตัวขับ ซึ่งควบคุมความเร็วรอบด้วยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (ABB™ model ACS401002032, ขนาด 50 Hz, ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz) เพื่อควบคุมอัตราการไหลของเจ็ทหลัก ต่อจากนั้นอากาศจะถูกส่งผ่านระบบท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ยาว 367 และมีการติดตั้ง Six-Jet Atomizer (TSI™ model 9306A) เพื่อฉีดอนุภาคติดตามการไหลสารละลายกลีเซอริน ดังรูปที่ 4.5 จำนวน 1 ตัว ที่บริเวณด้านบนของท่อขนาด 4 นิ้วซึ่งต่อเข้ากับท่ออ่อนโดยรอยต่อจะอยู่ห่างจากปลายท่อขนาด 4 นิ้ววัดจากด้านอุโมงค์ลมเป็นระยะ 17 เซนติเมตร จากนั้นระบบท่อจะลดขนาดจนเหลือ 2.5 นิ้ว และ 3/4 นิ้ว ตามลำดับ ซึ่งท่อขนาด 2.5 นิ้ว ยาว 15 เซนติเมตร และ 3/4 นิ้วยาว 42 เซนติเมตร จากนั้นเจ็ทหลักที่ผสมด้วยอนุภาคติดตามการไหลจะไหลตั้งฉากกับท่อ PVC ขนาด 1 นิ้วขึ้นไปผ่านท่ออลูมิเนียม ขนาด 3/4 นิ้ว ยาว 97 เซนติเมตร (ประมาณ 44 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในปากทางออกเจ็ทซึ่งเท่ากับ 22.5 มิลลิเมตร) ซึ่งการไหลผ่านท่อตรงขนาด 44 เท่านี้จะทำให้รูปร่างความเร็วที่ปากทางออกเจ็ทเป็นแบบพัฒนาตัวเต็มที่ (Fully developed initial velocity profile)

- **ชุดเจ็ทควบคุม (Control Jet)**

ชุดเจ็ทควบคุมนั้นจะมีหน้าที่ควบคุมเจ็ทหลักโดยการฉีดเจ็ทเข้าไปในเจ็ทหลัก โดยเจ็ทควบคุมนั้นประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ เครื่องอัดลมแบบลูกสูบแบบ Single acting/Single Stage ยี่ห้อ PUMA ขนาด 0.75 กิโลวัตต์ ชุดมาตรวัดและควบคุมอัตราการไหลแบบ Rotameter และ หัวเจ็ทควบคุมซึ่งเจ็ทควบคุมจะมีโครงสร้างร่วมกับชุดเจ็ทซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6 โดยจะติดตั้งเจ็ทควบคุมไปตามแนวเส้นรอบวงต่ำกว่าปากทางออกเจ็ทหลักเท่ากับ 3 มิลลิเมตร โดยเจ็ทควบคุมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และมีความยาวเท่ากับ 40 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน มีจำนวน 24 ตัว เรียงตัวตามแนวเส้นรอบวง แต่ละตัวห่างกัน 15 องศาเทียบกับจุดศูนย์กลางของปากเจ็ทหลัก โดยเจ็ทควบคุมแต่ละตัวสามารถเปิด-ปิด หรือ ปรับ

อัตราการไหลเป็นอิสระจากกัน การทำงานของเจ็ทควบคุมเริ่มจากเครื่องอัดลมแบบลูกสูบ (Reciprocating air compressor, PUMA™ ขนาด 0.75 กิโลวัตต์) ดังรูปที่ 4.7 จะดึงอากาศภายในห้องแล้วอัดอากาศส่งไปที่ชุดควบคุมแรงดัน (Pressure regulator) ที่กำหนดความดันคงที่เท่ากับ 2 bar ส่งอากาศผ่านสายยาง แล้วแยกออกเป็นสองชุด ซึ่งแต่ละชุดประกอบด้วยวาล์วทองเหลืองแบบเข็ม (Needle valve) ขนาด 1/2 นิ้วแบบ Solenoid หลังจากนั้นจะผ่านมาตรวัดและควบคุมอัตราการไหลด้วย Rotameter (Dwyer™ model VA20434, ประเภทลูกลอยชนิด 316 stainless steel, ค่าความถูกต้องเท่ากับ $\pm 2\%$ FS) ดังรูปที่ 4.8 และอากาศแต่ละชุดจะไหลผ่านสายยางขนาด 3/16 นิ้ว ซึ่งต่อเข้ากับปากทางเข้าของแต่ละรูเจ็ทควบคุมด้วยท่อ PTFE ขนาด 3/16 นิ้ว

4.2 พิกัดการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะใช้พิกัดอ้างอิง แสดงดังรูปที่ 4.9 ประกอบไปด้วยพิกัด x , y และ z ซึ่งมีจุดกำเนิดที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ทหลัก โดยให้แกน x มีทิศทางตามการไหลของกระแสลมขวาง (Streamwise) ให้แกน y มีทิศทางพุ่งตั้งฉากกับแนวการไหลของกระแสลมขวาง (Traverse) และ แกน z มีทิศตั้งฉากกับแนวการไหลของกระแสลมขวาง (Spanwise) โดยสัมพันธ์กับกฎมือขวา และในการกำหนดมุมอ้างอิงของตำแหน่งการฉีดเจ็ทควบคุมจะกำหนดมุมเริ่มต้น 0 องศาให้อยู่ตำแหน่งที่ปะทะแนวของกระแสลมขวางและมีทิศทางเดียวกัน และตำแหน่งของมุมในทิศทวนเข็มและตามเข็มนาฬิกาให้เป็นลบและบวกตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10

4.3 Stereoscopic Particle Image Velocimetry

Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) เป็นเครื่องมือที่สามารถวัดความเร็วทั้งสามแนวแกนของทุกจุดบนระนาบในเวลาเดียวกัน (สนามความเร็ว) ซึ่ง SPIV ไม่ได้เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความเร็วของไหลได้โดยตรง แต่จะวัดความเร็วของอนุภาคติดตามการไหลโดยอาศัยระยะทางเคลื่อนที่ของอนุภาคติดตามการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งระยะที่เคลื่อนที่ไปได้จะเกิดจากการถ่ายภาพ 2 ภาพในสองเวลาติดต่อกัน ซึ่งความเร็วของอนุภาคติดตามการไหลจะใช้ในการประมาณความเร็วของของไหลการติดตั้งเครื่องมือในการวัดความเร็วด้วย

SPIV สำหรับงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งจะมีรายละเอียดของอุปกรณ์และการทำงานดังต่อไปนี้

ในงานวิจัยนี้จะใช้ระบบ SPIV ของบริษัท TSI ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องให้กำเนิดเลเซอร์ Nd:YAG ยี่ห้อ New Wave™ (model Solo 200XT, รูปที่ 4.12) มีกำลังสูงสุด 200 mJ/pulse ที่ความยาวคลื่น 532 nm โดยแสงเลเซอร์จะถูกส่งผ่านแขนส่งผ่านลำแสงเลเซอร์ (Laser Light Arm, model 610015, รูปที่ 4.13) ที่ปลายทางออกของแขนส่งผ่านลำแสงเลเซอร์จะต่อเข้ากับชุดเลนส์สร้างระนาบเลเซอร์ (Laser sheet optics, model 61021-SIL, -25 mm cylindrical and +500 mm spherical) ซึ่งเมื่อผ่านชุดสร้างระนาบแล้วจะได้ระนาบเลเซอร์ที่มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ระนาบเลเซอร์ (Laser sheet) จะเป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยเมื่ออนุภาคสารละลายกลีเซอริน ซึ่งทำหน้าที่เป็นอนุภาคติดตามการไหล มีแสงเลเซอร์ตกกระทบอนุภาคจะกระเจิงแสงออกมาไปยังกล้อง CCD ซึ่งจะบันทึกภาพการกระเจิงของแสงไว้ ในงานวิจัยนี้จะใช้กล้อง CCD (PowerView Plus11MP, model 630062, รูปที่ 4.14) ที่มีความละเอียด 4,008 พิกเซล × 2,672 พิกเซล, ขนาดแต่ละพิกเซลเท่ากับ 9×9 ตารางไมโครเมตร, ขนาด CCD 36.07×24.05 ตารางมิลลิเมตร, และไดนามิกเรนจ์ 12 บิต จำนวนสองตัว ซึ่งแต่ละตัวจะประกอบเข้ากับเลนส์ ยี่ห้อ Tokina™ (model 100 mm f2.8D Macro) โดยจะมีชุดเชื่อมระบบการทำงาน(Synchronizer, model 610035 รูปที่ 4.15) ทำหน้าที่ประสานการทำงานของระบบกล้อง, แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ และ คอมพิวเตอร์ประมวลผล ให้ทำงานสัมพันธ์กัน สำหรับการบันทึกภาพของสนามการไหลนั้น จะบันทึกภาพด้วยความถี่ 2.07 Hz โดยจะใช้ซอฟต์แวร์ TSI™Insight 4G ทำการประมวลผลภาพที่ได้จากกล้องทั้งด้านซ้ายและขวา (รูปที่ 4.16) เพื่อหาเวกเตอร์สนามความเร็วบนระนาบของ CCD (รูปที่ 4.17) และเวกเตอร์ความเร็วที่ได้บนระนาบ CCD ของกล้องทั้งสองตัวจะถูกนำไปประมวลผลเป็นความเร็วในทั้งสามแนวแกนบนระนาบเลเซอร์ และจะบันทึกความเร็วในแต่ละแนวแกนในรูปแบบของ text ไฟล์.v3D

4.4 การวัดสภาวะการทดลอง

4.4.1 การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวาง

การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวางจะประกอบไปด้วยสองส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นการวัดความสม่ำเสมอของกระแสลมขวางด้วย SPIV และการวัดความหนาของชั้นขอบเขตที่ผนังพื้นของหน้าตัดทดสอบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- การวัดความสม่ำเสมอของกระแสลมขวางด้วย SPIV

การวัดความสม่ำเสมอของกระแสลมขวางภายในหน้าตัดทดสอบ (Test section) จะทำการวัดที่ตำแหน่ง $x/rd = -1$ หรือประมาณ 9 เซนติเมตร ด้วย SPIV กำหนดให้ความเร็วเริ่มต้นของการวัดเท่ากับ 3.9 เมตรต่อวินาที (วัดด้วย Pitot static tube) โดยมีขนาดพื้นที่ของการวัดด้วย SPIV ประมาณ $2.3rd \times 2.3rd$ หรือ ประมาณ 21 x 21 ตารางเซนติเมตร โดยในการประมวลผลเพื่อหาเวกเตอร์ความเร็วจะใช้ Interrogation area เริ่มต้นเท่ากับ 128 พิกเซล x 128 พิกเซล และสุดท้ายเท่ากับ 64 พิกเซล x 64 พิกเซล และมีการ Overlap กัน 50 % ซึ่งจะทำให้ได้ Spatial resolution ของเวกเตอร์ความเร็วมีขนาดเท่ากับ 32 พิกเซล x 32 พิกเซล หรือ 4.88 x 4.88 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งทำให้บริเวณที่ทำการวัดเป็นเมตริกซ์ของเวกเตอร์ที่มีขนาด 43 x 43 โดยทำการเก็บสนามความเร็วทั้งหมด 1,000 สนาม เพื่อหาความเร็วเฉลี่ยตามเวลา

รูปที่ 4.19 แสดงผลการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวาง ที่ตำแหน่ง $x/rd = -1$ หรือประมาณ 9 เซนติเมตร ด้วย SPIV พบว่ากระแสลมขวางค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ โดยมีความเร็วเฉลี่ยทั้งพื้นที่ของการวัดประมาณ 3.7 เมตรต่อวินาที มีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 4.5 เมตรต่อวินาที ความเร็วต่ำสุดเท่ากับ 3 เมตรต่อวินาที โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เท่ากับ 0.075 เมตรต่อวินาที

- การวัดความหนาชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง

การวัดความหนาชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางจะวัดความเร็วโดยใช้ Pitot tube ที่ทำมาจากเข็มฉีดยา ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร โดยมีความยาวของเข็ม

ประมาณ 50 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน โดยความดันที่วัดได้จาก Pitot tube จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer ชนิด Differential ยี่ห้อ SETRA™ (model 264) ที่มีช่วงความดันขาเข้า ± 0.05 นิ้วน้ำ และมีช่วงแรงดันไฟฟ้าขาออก 0-5 Volts และมีความถูกต้องในช่วง $\pm 0.25\%$ Full scale output จากนั้นจะวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้โดยใช้ Digital multimeter ยี่ห้อ FLUKE™ (model 19) ซึ่งจากแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จะถูกแปลงเป็นความเร็ว

ในการวัดจะวัดความเร็วตามแนว Transverse โดยมีความละเอียดการวัด 0.5 มิลลิเมตร ในช่วงความหนาชั้นขอบเขต ตั้งแต่ 0.5-10 มิลลิเมตร และมีความละเอียดการวัด 1 มิลลิเมตร ที่นอกความหนาชั้นขอบเขตตั้งแต่ 10-20 มิลลิเมตร โดยจะวัดที่ตำแหน่ง (x, z) เท่ากับ $(-1rd, -0.5rd)$, $(-1rd, 0rd)$ และ $(-1rd, 0.5rd)$ โดยแต่ละจุดจะวัดความเร็วทั้งหมด 5 ครั้ง

รูปที่ 4.20 แสดงรูปร่างของชั้นขอบเขต (Boundary layer) ตามแนว transverse ซึ่งแสดงโดยค่า $y/\delta_{95\%}$ โดย $\delta_{95\%}$ เป็นความหนาของชั้นขอบเขตที่มีความเร็วเท่ากับ 95 % ของความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขต ซึ่งมีค่าประมาณ 3.9 เมตร ต่อวินาที พบว่ารูปร่างชั้นขอบเขตตามแนว Transverse ของทั้ง 3 ตำแหน่ง มีความสอดคล้องกับผลเฉลยของ Blasius ซึ่งบ่งชี้ว่าชั้นขอบเขตของกระแสมขวางเป็นแบบ Laminar โดยมีความหนาของชั้นขอบเขตเฉลี่ยเท่ากับ 7.4 มิลลิเมตร รายละเอียดของความหนาของชั้นขอบเขตแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

4.4.2 การวัดรูปแบบความเร็วและสภาวะเริ่มต้นของเจ็ต

การวัดรูปแบบความเร็วของเจ็ตจะวัดขณะที่ ไม่มีการฉีดอนุภาคติดตามการไหลและไม่มีกระแสมขวาง และไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม โดยพารามิเตอร์ที่วัดคือ ความเร็วของเจ็ต โดยตั้งค่าความถี่เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Invertor) ไว้ที่ 14.2 Hz สำหรับ Blower ที่เป็นตัวให้กำเนิดเจ็ตหลัก และใช้ Pitot tube ที่มีปลายอีกด้านหนึ่งต่อสายยางเข้ากับมานอมิเตอร์ยี่ห้อ Dwyer™ (model 424) ซึ่งมีความละเอียดเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตรน้ำ โดยอุณหภูมิห้องที่ทำการวัดจะอยู่ในช่วง 29-32 องศาเซลเซียส ซึ่งวัดด้วย Thermocouple ยี่ห้อ FLUKE™ (model 52II, ชนิดสาย k type) โดยตำแหน่งของการวัดจะอยู่ที่ปากทางออกเจ็ต โดยจะวัดความเร็วตามแนวรัศมีตั้งแต่ 0 มิลลิเมตร ถึง 11 มิลลิเมตร ตามแนวแกน x (Streamwise) และตามแนวแกน z (Spanwise) โดย

มีความละเอียดการวัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร โดยจะทำการวัดความเร็วทั้งหมด 6 ครั้ง ในแต่ละตำแหน่ง

รูปที่ 4.21 แสดงถึงผลการวัดความเร็วตามแนวรัศมีตามแนว Streamwise และ Spanwise พบว่ามีรูปร่างความเร็วทั้ง 2 แนวแกนเป็นแบบ Fully developed turbulent pipe profile และใกล้เคียงกับสมการ Power law ที่มีเลขยกกำลังเท่ากับ 8

จากผลการวัดความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออกเจ็ตจะนำมาคำนวณหาความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกเจ็ตจากการคำนวณความเร็วเฉลี่ยตามพื้นที่ (Area-averaged axial velocity) ที่ปากทางออกของเจ็ต ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4.1

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

U_j คือ ความเร็วเฉลี่ยตามพื้นที่ที่ปากทางออกของเจ็ต, u คือ ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกนที่จุดใดๆตามแนวรัศมี และ A คือ พื้นที่ปากทางออกเจ็ต

โดยความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกเจ็ตของงานวิจัยนี้จะมีค่าเท่ากับ 16.9 ± 0.8 เมตรต่อวินาที ซึ่งสัมพันธ์กับตัวเลขเรย์โนลส์ของเจ็ตเท่ากับ 23,000

4.4.3 การวัดอัตราการไหลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง

เนื่องจากขนาดของปากทางออกของเจ็ตควบคุมมีขนาดเล็กมาก จึงไม่สามารถวัดความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตควบคุมได้โดยตรง อย่างไรก็ตามได้มีการควบคุมอัตราไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมแต่ละตัวด้วย Rotameter ในการทดลองนี้ใช้อัตราไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตหลักมีค่าประมาณ 403.1 ลิตรต่อนาที เมื่อพิจารณาให้ความหนาแน่นของเจ็ตหลักประมาณเท่ากับความหนาแน่นของเจ็ตควบคุม และเพื่อที่จะให้ได้อัตราส่วนเชิงมวลการไหลรวมเท่ากับ 2 % เจ็ตควบคุมแต่ละตัวจะถูกควบคุมให้มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรประมาณ 4.031 ลิตรต่อนาที

4.5 การสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง SPIV กับ Pitot tube

การสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง SPIV กับ Pitot tube จะทำการสอบเทียบการวัด

ความเร็วที่ตำแหน่ง $x/rd = -1$ หรือประมาณ 9 เซนติเมตร โดยวิธีการสอบเทียบความเร็วจะทำการเปิดความถี่ของพัดลมกระแสลมขวางเท่ากัน แล้ววัดความเร็วเปรียบเทียบกับระหว่างการใช้ SPIV กับ Pitot tube โดยในการสอบเทียบจะใช้ความถี่ของพัดลมกระแสลมขวางเท่ากับ 2, 2.2, 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 6, 7, 8, 8.6 (ความถี่ที่ใช้สำหรับการทดลองจริงสำหรับกระแสลมขวาง), 10, 15, 20, 25, 30, 35, และ 40 Hz โดยคิดเป็นความเร็วตั้งแต่ 0.28 – 19.62 m/s (วัดด้วย Pitot tube)

สำหรับการวัดความเร็วด้วย Pitot tube จะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงการวัด ช่วงแรกความเร็วตั้งแต่ 0 – 4.2 m/s (ความถี่ 0 – 8.6 Hz) ความดันที่วัดได้จาก Pitot tube จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer ชนิด Differential ยี่ห้อ SETRA™, model 264 (ตัวเดียวกับที่ใช้วัดความหนาชั้นขอบเขต) ที่มีช่วงความดันขาเข้า ± 0.05 นิ้วน้ำ ช่วงที่สองความเร็วตั้งแต่ 4.3 – 13 m/s (ความถี่ 10 – 25 Hz) โดยความดันที่วัดได้จาก Pitot tube จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer ชนิด Differential ยี่ห้อ SETRA™ (model 264) ที่มีช่วงความดันขาเข้า ± 0.5 นิ้วน้ำ และช่วงสุดท้ายความเร็วตั้งแต่ 14 – 20 m/s (ความถี่ 30 – 40 Hz) ปลายอีกด้านหนึ่งของ Pitot tube ต่อสายยางเข้ากับมานอมิเตอร์ยี่ห้อ Dwyer™, model 424 (ตัวเดียวกับที่ใช้วัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ต)

สำหรับการวัดความเร็วด้วย SPIV ขนาดพื้นที่ของการวัดด้วย SPIV ประมาณ $2.3rd \times 2.3rd$ หรือ ประมาณ 21 x 21 ตารางเซนติเมตร และใช้พารามิเตอร์ของการตั้งค่า เช่นเดียวกับการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วกระแสลมขวาง โดยทำการเก็บสนามความเร็วทั้งหมด 100 สนาม ทั้งหมด 4 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยของความเร็วทั้งพื้นที่ของการวัด

จากรูปที่ 4.22 เป็นกราฟแสดงผลการสอบเทียบความเร็วที่วัดด้วย SPIV กับ Pitot tube (Calibration curve) พบว่า สามารถแบ่งช่วงของกราฟแสดงผลการสอบเทียบความเร็วออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกตั้งแต่ความเร็ว 0.28 – 3.83 m/s จะได้กราฟแสดงผลการสอบเทียบความเร็วที่มีสมการกำกับเป็น สมการ Polynomial กำลัง 2 ซึ่งแสดงในรูป ช่วงที่สองตั้งแต่ความเร็ว 3.83 – 19.62 m/s จะได้กราฟแสดงผลการสอบเทียบความเร็วที่มีสมการกำกับเป็น สมการเส้นตรง ดังแสดงไว้ดังรูป อย่างไรก็ตามจากรูปพบว่า ความแตกต่างระหว่างความเร็วที่วัดด้วย SPIV และ

Pitot tube มีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่ได้ปรับแก้สนามความเร็วที่วัดด้วย SPIV ด้วย Calibration curve

4.6 การวัดค่าความเร็วของเจ็ตเพื่อวิเคราะห์ โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง

ในงานวิจัยนี้จะวัดสนามความเร็วของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วย SPIV โดยจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ ฉีดอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของส่วนที่เป็นเจ็ตได้อย่างชัดเจน และฉีดอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางเพื่อที่จะสามารถเห็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง ซึ่งทั้งสองส่วนจะวัดสนามความเร็วที่ตำแหน่งเดียวกันและมีการประมวลผลเพื่อให้ได้เวกเตอร์ด้วยพารามิเตอร์ที่เหมือนกัน

ในการประมวลผลเพื่อหาสนามความเร็วของการศึกษาทั้งสองส่วนจะใช้ Interrogation area เริ่มต้นเท่ากับ 64 พิกเซล x 64 พิกเซล และสุดท้ายเท่ากับ 32 พิกเซล x 32 พิกเซล ซึ่ง Interrogation area จะ Overlap กัน 50 % ลดลงเหลือ 16 พิกเซล x 16 พิกเซล ส่วน Spatial resolution นั้นจะปรับให้เหมาะสมกับตำแหน่งของการทดลอง เพื่อที่จะทำให้สนามเวกเตอร์ความเร็วของเจ็ตที่วัดได้ไม่ต่ำกว่า 5,000 เวกเตอร์ ซึ่งจะสรุป Spatial resolution ของแต่ละตำแหน่งไว้ในตารางที่ 4.2 โดยในการศึกษาเบื้องต้นจะเก็บภาพทั้งหมด 2,000 ภาพ และเพิ่มเป็น 4,000 ภาพ สำหรับการทดลองจริง

4.7 สรุปพารามิเตอร์สำหรับการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะมีสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตที่ปากทางออกเป็น Fully developed turbulent pipe profile โดยมีความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกเท่ากับ 16.9 ± 0.8 เมตรต่อวินาที

กระแสลมขวางมีชั้นขอบเขตแบบ Laminar โดยมีความหนาของชั้นขอบเขตประมาณ 7.4 มิลลิเมตร ที่ 95% ของความเร็วนอกชั้นขอบเขต โดยมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 4.3 ± 0.2 เมตรต่อวินาที ซึ่งทำให้ได้อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 3.9 ± 0.3 ตัวเลขเรย์โนลด์สของเจ็ตประมาณ 23,000 และตัวเลขเรย์โนลด์สของกระแสลมขวางประมาณ 5,900 โดยจะใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเฉพาะในเจ็ต และใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง พารามิเตอร์สำหรับงานวิจัยนี้สรุปไว้ในตารางที่ 4.3

บทที่ 5

แนวทางการวิเคราะห์และตีความผลการทดลองอันเนื่องมาจากการใส่อนุภาค ติดตามการไหลในเจ็ตเท่านั้น

ในงานวิจัยส่วนหนึ่งนั้น ได้ทดลองวัดความเร็วของเจ็ตในกระแสลมขวางโดยการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะส่วนที่เป็นเจ็ตเท่านั้น ซึ่งจะแตกต่างกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง ในบทนี้จึงกล่าวถึงรายละเอียดคุณลักษณะที่สำคัญและพารามิเตอร์ต่างๆ อันเป็นผลมาจากการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น (ไม่ได้ใส่อนุภาคติดตามการไหลในกระแสลมขวาง)

5.1 ข้อแตกต่างและผลของการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต และการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง

จากที่กล่าวไว้ข้างต้น ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ได้ใส่ในกระแสลมขวางสำหรับการวัดความเร็วด้วย SPIV เพื่อที่จะแยกแยะบริเวณและโครงสร้างที่อย่างน้อยมีส่วนผสมของ เจ็ตของไหล (Jet fluid) ออกจากบริเวณที่มีแต่กระแสลมขวางล้วน (ไม่มีส่วนผสมของเจ็ตของไหล) อย่างชัดเจน ด้วยเหตุนี้จึงเกิดข้อแตกต่างและผลในหลาย ๆ ด้านระหว่างกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต และการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 5.1 ก. แสดงอนุภาคติดตามการไหลบนระนาบ ณ เวลาใด ๆ, สนามความเร็ว ณ เวลาใด ๆ, การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหล (ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ต) และ ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบ ของกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต พบว่าบริเวณที่อย่างน้อยมีส่วนผสมของเจ็ตนั้นจะพบอนุภาคติดตามการไหล ส่วนบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางล้วนจะไม่พบอนุภาคติดตามการไหล และเมื่อคำนวณหาเวกเตอร์ความเร็ว ณ เวลาใด ๆ พบว่าบริเวณที่อย่างน้อยมีส่วนผสมของเจ็ตนั้นจะพบเวกเตอร์ความเร็วหรือความเร็วไม่เท่ากับศูนย์สัมบูรณ์ ($\vec{V} \neq \vec{0}$) ส่วนบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางล้วนจะไม่พบเวกเตอร์ความเร็วหรือความเร็วเป็นศูนย์สัมบูรณ์ ($\vec{V} = \vec{0}$) อย่างไรก็ตามเนื่องจากเจ็ตมีความปั่นป่วนและความไม่

แน่นอนจะสังเกตเห็นว่า ณ จุดใดๆบนระนาบที่เวลาหนึ่งอาจจะพบส่วนผสมที่เป็นเจ็ดซึ่งมีความเร็วการไหลของเจ็ด แต่ในเวลาต่อมาอาจจะไม่พบส่วนผสมที่เป็นเจ็ดซึ่งก็ว่าจะไม่มีความเร็วการไหลของเจ็ด (SPIV วัดความเร็วการไหลการไหลได้เท่ากับ $\bar{0}$) ดังนั้นจะนิยามความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหล หรือความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดจุดใดๆ (ϕ_{ij}) (สำหรับกรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในบริเวณเจ็ดเท่านั้น) เป็นอัตราส่วนของ ระยะเวลาที่จะพบความเร็ว ณ จุดใดๆ ต่อระยะเวลาทั้งหมด ซึ่งเปรียบได้กับอัตราส่วนของจำนวนภาพที่มีความเร็วการไหลต่อจำนวนภาพทั้งหมดสำหรับการวัดความเร็วด้วย SPIV โดยสามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

$$\phi_{ij} = \frac{(N_v)_{ij}}{N} \quad (5.1)$$

เมื่อ $(N_v)_{ij}$ คือ ระยะเวลาที่พบความเร็วการไหล ($\bar{V} \neq \bar{0}$) ณ ตำแหน่ง ij ใดๆบนระนาบ หรือจำนวนภาพที่พบความเร็วการไหลที่ตำแหน่งนั้นๆ และ N คือ ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเฉลี่ย หรือ จำนวนภาพทั้งหมดที่ใช้สำหรับการวัดความเร็วด้วย SPIV โดยพบว่าที่บริเวณที่อย่างน้อยมีส่วนผสมของเจ็ดนั้นจะมี ค่าความน่าจะเป็นมากกว่า 0 ($\phi_{ij} > 0$) โดยบริเวณตรงกลางเจ็ดจะมีค่าความน่าจะเป็นสูงและน้อยลงไปยังบริเวณขอบเจ็ด เนื่องจากบริเวณขอบเจ็ดนั้นมีความปั่นป่วนสูงด้วยเหตุนี้จึงมีค่าความน่าจะเป็นน้อย และจะมีค่าเท่ากับศูนย์ที่บริเวณที่เป็นกระแสลมขวางล้วน และเมื่อหาความเร็วเฉลี่ยซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการเฉลี่ยตามเวลา (Time-averaged) โดยจะหาความเร็วเฉลี่ยในแต่ละแนวแกนได้ดังนี้

$$\bar{V}_{x,ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_{x,ij,n} \quad (5.2ก.)$$

$$\bar{V}_{y,ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_{y,ij,n} \quad (5.2ข.)$$

$$\bar{V}_{z,ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_{z,ij,n} \quad (5.2ค.)$$

และอัตราเร็วเฉลี่ยตามเวลาคำนวณได้จาก

$$\bar{V}_{ij} = \sqrt{\bar{V}_{x,ij}^2 + \bar{V}_{y,ij}^2 + \bar{V}_{z,ij}^2} \quad (5.3)$$

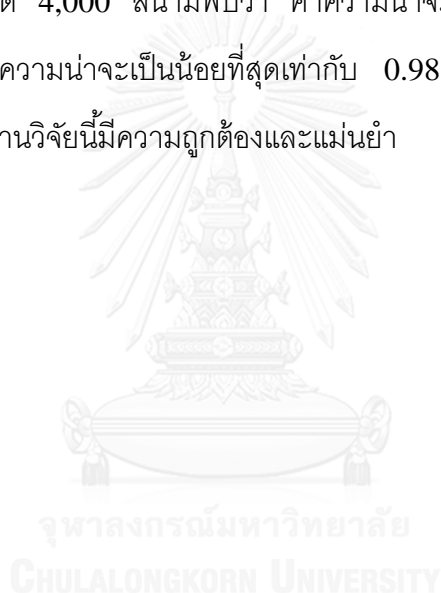
จะพบว่าบริเวณที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตสูงความเร็วเฉลี่ยบนระนาบ

($\bar{V}_{yz,ij} = \bar{V}_{y,ij} + \bar{V}_{z,ij}$) จะมีค่ามาก (บริเวณตรงกลางเจ็ต) ในทางกลับกันบริเวณที่มีค่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตต่ำความเร็วเฉลี่ยบนระนาบก็จะมีค่าน้อย (บริเวณขอบเจ็ต) และจะมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ที่บริเวณที่เป็นกระแสลมขวางล้วน ด้วยเหตุนี้จึงสามารถแยกแยะบริเวณที่อย่างน้อยมีส่วนผสมของเจ็ตออกจากบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางล้วนได้อย่างชัดเจนสำหรับกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต

รูปที่ 5.1 ข. แสดงอนุภาคติดตามการไหลบนระนาบ ณ เวลาใดๆ, สนามความเร็ว ณ เวลาใดๆ, การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหล และ ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบ ของกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง พบว่าจะพบอนุภาคติดตามการไหล ณ เวลาใดๆ ทั้งบริเวณที่เป็นเจ็ตและกระแสลมขวางโดยไม่สามารถแยกบริเวณที่เป็นเจ็ตออกจากกระแสลมขวางล้วนได้อย่างชัดเจน และเมื่อนำมาคำนวณหาเวกเตอร์ความเร็วก็จะพบเวกเตอร์ความเร็ว ($\vec{V} \neq \vec{0}$) ทั้งส่วนที่เป็นเจ็ตและกระแสลมขวาง ณ เวลาใดๆ และเมื่อพิจารณาถึงค่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหลจุดใดๆ ไม่ว่าจะบริเวณที่เป็นเจ็ตหรือบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางนั้น ในทางทฤษฎี ค่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหลจะเท่ากับหนึ่ง ($\phi_{ij} = 1$) เนื่องจากการที่เราใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง เพราะฉะนั้นความเร็วการไหลถ้าไม่ได้มาจากเจ็ตก็ต้องมาจากกระแสลมขวาง ดังนั้นในกรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางที่จุดใดๆ SPIV จะวัดความเร็ว $\vec{V} \neq \vec{0}$ ได้เสมอ และเมื่อหาความเร็วเฉลี่ยบนตามเวลาบนระนาบจะพบความเร็วเฉลี่ยทั้งบริเวณที่เป็นเจ็ตและกระแสลมขวาง โดยถ้านำสนามความเร็วเฉลี่ยบนระนาบของกรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตมาซ้อนทับกับกรณีสนามความเร็วเฉลี่ยของกรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง จะเห็นได้ว่าบริเวณขอบเจ็ต กรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง ความเร็วจะไม่ได้มีค่าน้อยเหมือนกรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต เนื่องจากกรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง ไม่มีผลของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหล ดังนั้นแล้วความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหลจึงเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่สำคัญที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างกรณีที่ใส่อนุภาคติดตาม

การไหลเฉพาะในเจ็ตและกรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง โดยจะมีผลต่อสนามความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตในกระแสลมขวาง

จากที่กล่าวมาข้างต้นว่ากรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง จะมีค่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหล ณ จุดใดๆ เท่ากับหนึ่ง ($\phi_{ij} = 1$) ในทางทฤษฎี แต่ในความเป็นจริงอาจมีความคลาดเคลื่อนได้อันเป็นผลมาจากเครื่องมือที่ใช้ในการวัดสนามความเร็ว โดยรูปที่ 5.2 แสดงค่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหล ณ จุดใดๆ ของกรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง ที่คำนวณได้จากสนามความเร็วที่วัดด้วย SPIV ทั้งหมด 4,000 สนามพบว่า ค่าความน่าจะเป็นจะไม่เท่ากับหนึ่ง แต่จะมีค่าใกล้เคียงหนึ่งมากโดยค่าความน่าจะเป็นน้อยที่สุดเท่ากับ 0.98 เป็นการยืนยันว่า การวัดสนามความเร็วด้วย SPIV ในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องและแม่นยำ



บทที่ 6

การประเมินการลู่เข้าและสอบทวนผลการทดลอง

เพื่อให้แสดงความแม่นยำของการทดลองจึงได้พิจารณาการลู่เข้าเพื่อยืนยันความเหมาะสมของจำนวนภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งกรณีที่ฉีดอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ต และฉีดอนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง นอกจากนี้ยังสอบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่ผ่านมา

6.1 การนิยามบริเวณที่เป็นเจ็ตในเชิงความน่าจะเป็น

ในงานวิจัยนี้จะนิยามบริเวณที่เป็นเจ็ตในเชิงความน่าจะเป็น (R_ϕ) เป็นบริเวณของเจ็ตที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตมากกว่า 0 จนถึง ϕ ($0 < R_\phi \leq \phi$) แสดงดังรูปที่ 6.1

6.2 การประเมินการลู่เข้า

การประเมินการลู่เข้านั้นจะประเมินการลู่เข้าตามบริเวณที่เป็นเจ็ตในเชิงความน่าจะเป็น (R_ϕ) ที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตมากกว่า 0 ถึง ϕ (ไม่เกินค่า ϕ) แสดงดังรูปที่ 6.1

โดยจะประเมินจากความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไร้มิติต่อจุด (e_{v/V_j}) นิยามเป็น

$$e_{v/V_j} = \frac{\sum_{ij} \left| \bar{V}_{ij}(N_2) \Big|_{R_{\phi,N_2}} - \bar{V}_{ij}(N_1) \Big|_{R_{\phi,N_1}} \right|}{M_2 \Big|_{R_{\phi,N_2}}} \quad (6.1)$$

เมื่อ $\bar{V}_{ij}(N_i)$ คือ อัตราเร็วเฉลี่ย (Mean speed) ที่ตำแหน่ง ij ใดๆ

($\bar{V}_{ij} = \sqrt{\bar{V}_{x,ij}^2 + \bar{V}_{y,ij}^2 + \bar{V}_{z,ij}^2}$) เมื่อใช้สนามความเร็ว N_i สนาม และ M_2 คือ จำนวนจุดทั้งหมดที่มีความเร็วของสนามความเร็วที่เฉลี่ยมาจาก N_2 จากรูปที่ 6.2 แสดงตัวอย่างความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไร้มิติต่อจุด (e_{v/V_j}) แปรตามจำนวนสนามความเร็ว N_2 สนาม ในกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ สำหรับจำนวนภาพทั้งหมด 2,000 ภาพ (ซึ่งเป็นผลการทดลองเบื้องต้นโดยรายละเอียดจะอยู่ใน ภาคผนวก ก.) สำหรับบริเวณที่เป็นเจ็ตในเชิงความน่าจะเป็น (R_ϕ) ที่มี

ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่พบเจ็ด (ϕ) เท่ากับ 0.01, 0.02, 0.05, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 พบว่าที่ $\phi = 1.00$ หรือทุกบริเวณที่เป็นเจ็ด จะมีการลู่เข้าเร็วที่สุด และเมื่อ ค่า ϕ ลดลง การลู่เข้าจะลู่เข้าสู่ค่าที่สูงขึ้น และสูงที่สุดที่กรณี $\phi = 0.01$ หรือหมายความว่ายิ่งบริเวณเข้าใกล้ขอบเจ็ด การลู่เข้าของความเร็วก็จะยิ่งช้าลง โดยกรณีที่ $\phi = 0.01$ และ 0.02 ที่จำนวนภาพเท่ากับ 2,000 ภาพ ค่า e_{v/V_j} มีค่าสูงกว่า 0.05 หรือตีความหมายได้ว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไว้มิติต่อจุดสูงกว่า 5 % ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างเห็นได้ชัด ดังนั้นเพื่อที่จะลดความคลาดเคลื่อนอันเป็นผลจากจำนวนภาพที่ใช้จึงได้เก็บผลการทดลองเพิ่มจากเดิม 2,000 ภาพ เป็น 4,000 ภาพ โดยแสดงความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไว้มิติต่อจุด (e_{v/V_j}) ที่ตำแหน่งและกรณีเดียวกันแต่เพิ่มจำนวนภาพเป็น 4,000 ภาพ ดังรูปที่ 6.3 พบว่าที่จำนวนภาพเท่ากับ 4,000 ภาพ ทุกๆค่า ϕ นั้นค่าความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไว้มิติต่อจุดมีค่าน้อยกว่า 0.03 หรือต่ำกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนที่น้อยและเนื่องด้วยข้อจำกัดด้านเวลา เนื่องจากสำหรับการประมวลผลเพื่อหาสนามความเร็วจากภาพถ่าย ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการวัดความเร็วด้วย SPIV นั้น สำหรับจำนวนภาพ 4,000 ภาพ จะใช้เวลาในกระบวนการผลถึง 11 วัน ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้สนามความเร็วทั้งหมด 4,000 สนามในแต่ละกรณี เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ที่โครงสร้างของเจ็ดในกระแสมขวาง

จากรูปที่ 6.4 แสดงถึงความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไว้มิติต่อจุด (e_{v/V_j}) แปรตามจำนวนสนามความเร็ว N_2 สนาม ในกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5, 0.75, 1$ และ 1.5 สำหรับจำนวนภาพทั้งหมด 4,000 ภาพ สำหรับบริเวณที่เป็นเจ็ดในเชิงความน่าจะเป็น (R_ϕ) ที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่พบเจ็ด (ϕ) เท่ากับ 0.01, 0.02, 0.05, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 ผลการวิเคราะห์การลู่เข้าพบว่าสำหรับทุกกรณีของการทดลอง (JICF I15 และ I135) และทุกบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ด พบว่าความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไว้มิติต่อจุด จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ ความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนภาพมากขึ้น โดยที่จำนวนภาพเท่ากับ 4,000 นั้น สำหรับทุกกรณีจะมีความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไว้มิติต่อจุดน้อยกว่า 0.03 หรือ คิดได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ โดยกรณีที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดมีค่าไม่เกิน 1 หรือ ทุกบริเวณที่เป็นเจ็ด จะมีการลู่เข้าเร็วที่สุด และค่าความ

คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.02 โดยเมื่อความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตลดลง พบว่าการลู่เข้าจะช้าลง และจะมีความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไว้มิติต่อจุดสูงขึ้น โดยจะมีค่าสูงที่สุดที่บริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตไม่เกิน 0.01 ($0 < \phi \leq 0.01$) หรือเทียบเป็นบริเวณขอบเจ็ต

นอกจากนี้ยังวิเคราะห์การลู่เข้าจากความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสลมขวางต่อจุด (e_v / u_{cf}) ดังสมการที่ 6.2

$$e_v / u_{cf} = \frac{1}{u_{cf}} \frac{\sum_{ij} \left| \bar{V}_{ij}(N_2) \Big|_{R_{\phi, N_2}} - \bar{V}_{ij}(N_1) \Big|_{R_{\phi, N_1}} \right|}{M_2 \Big|_{R_{\phi, N_2}}} \quad (6.2)$$

จากรูปที่ 6.5 พบว่า ค่าคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสลมขวางต่อจุด จะมีแนวโน้มของกราฟคล้ายคลึงกับ ค่าความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไว้มิติต่อจุด โดยมีสิ่งที่แตกต่างกันคือ การลู่เข้าที่วิเคราะห์จากค่าคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสลมขวางต่อจุดนั้น ในแต่ละจำนวนของภาพที่ใช้ บริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตไม่เกิน 0.01 จะมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด โดยเมื่อความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตสูงขึ้นพบว่าการลู่เข้าจะช้าลง และจะมีความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยต่อจุดสูงขึ้น โดยจะสูงที่สุดที่บริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่พบเจ็ตไม่เกิน 0.75 อย่างไรก็ตามสำหรับ ทุกบริเวณที่เป็นเจ็ต (ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตไม่เกิน 1) จะมีค่าความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสลมขวางต่อจุดอยู่ระหว่าง ค่าสูงสุดและต่ำสุดโดยจะมีค่าค่อนข้างสูงที่สุด โดยสำหรับทุกกรณีของการทดลอง (JICF I15 และ I135) และทุกบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ที่จำนวนภาพที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 4,000 ภาพนั้น จะมีค่าความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสลมขวางต่อจุดน้อยกว่า 0.001

6.3 การสอบทวนผลการทดลอง

ก่อนที่จะวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางโดยละเอียด ในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยของ Meyer *et al.* (2007) เพื่อสอบเทียบการทำการทดลอง ผู้วิจัยจะทดลองที่สภาวะใกล้เคียงกับงานของ Meyer *et al.* (2007) ให้มากที่สุดเพื่อจะ

เปรียบเทียบการวัดความเร็วและการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย POD (สภาวะสำหรับการทดลองเปรียบเทียบมีความแตกต่างจากสภาวะในการทดลองจริงของงานวิจัยนี้) ด้วยรายละเอียดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 6.1 โดยจะมีผลการทดลองเปรียบเทียบดังนี้

6.3.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างของเจ็ต

รูปที่ 6.6 แสดงการเปรียบเทียบกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์ความเร็วของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบ $y-z$ ต่อกระแสลมขวาง ($\vec{V}_{yz} / u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z) / u_{cf}$) ระหว่างผลการทดลองของ Meyer *et al.* (2007) และงานวิจัยนี้ในกรณีที่ใช้อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง พบว่า โครงสร้างความเร็วเฉลี่ย มีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งความแตกต่างโครงสร้างเพียงเล็กน้อยอาจจะเป็นผลมาจากพารามิเตอร์ที่ต่างกันดังตารางที่ 6.1 อย่างไรก็ตามสิ่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนคือ ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถวัดสนามความเร็วที่ใกล้พื้นมาก ๆ ได้โดยจะวัดสนามความเร็วที่สูงจากพื้นอย่างน้อย 20 mm. เนื่องจากผลของแสงสะท้อนที่พื้น ในทางกลับกันงานของ Meyer *et al.* (2007) สามารถวัดสนามความเร็วที่สูงจากพื้นเพียง 5 mm. ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จะวัดสนามความเร็วที่บริเวณด้านล่างเจ็ตได้น้อยกว่างานของ Meyer *et al.* (2007)

6.3.2 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ

รูปที่ 6.7 แสดงการเปรียบเทียบ POD mode 1, 2, และ 3 พร้อมด้วยระดับพลังงานกำกับในแต่ละ POD mode ระหว่างผลการทดลองของ Meyer *et al.* (2007) และงานวิจัยนี้ในกรณีที่ใช้อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง พบว่า POD mode 1 มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด โดยงานของ Meyer *et al.* (2007) จะเห็นเป็นลักษณะ Lobe 2 lobe บริเวณตรงกลางของเจ็ต แต่งานวิจัยนี้จะเห็นเป็นโครงสร้างบริเวณ Jet shear layer อย่างไรก็ตามสำหรับ POD mode 2 และ 3 พบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ POD mode 2 มีลักษณะโครงสร้างเกิดขึ้นบริเวณ Wake vortices และ POD mode 3 มีลักษณะโครงสร้างเกิดขึ้นที่บริเวณ Jet shear layer ในขณะที่เมื่อพิจารณาถึงระดับพลังงานพบว่า ระดับพลังงานมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยงานของ Meyer *et al.* (2007) จะมีระดับพลังงานสูงกว่า

จากความแตกต่างระหว่างของ Meyer *et al.* (2007) และงานปัจจุบัน สันนิษฐานว่า เป็นผลจากพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ซึ่งพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่แตกต่างอย่างชัดเจน คือ ความหนาชั้นขอบเขต (แสดงในตารางที่ 6.1) ที่งานของ Meyer *et al.* (2007) มี ความหนาชั้นขอบเขต สูงกว่างานวิจัยนี้ประมาณ 7 เท่า ซึ่งจะงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ความหนาชั้นขอบเขต มีผลต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวาง (Muppidi and Mahesh (2005b)) นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดของการเก็บข้อมูลที่วัดสนามความเร็วที่บริเวณใกล้พื้นได้น้อยกว่างานของ Meyer *et al.* (2007)



บทที่ 7

ผลของเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานการไหลปั่นป่วน สูงที่สุดของเจ็ตในกระแสลมขวาง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางและพลังงานการไหลปั่นป่วน โดยในงานวิจัยนี้สิ่งที่แตกต่างจากงานวิจัยอื่นคือ การวิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะส่วนที่เป็นเจ็ต โดยการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตสำหรับการวัดความเร็วด้วย SPIV ซึ่งส่งผลให้บริเวณที่อย่างน้อยมีส่วนผสมของเจ็ตจะพบอนุภาคติดตามการไหล และสามารถหาความเร็วการไหลได้ ($\vec{V} \neq \vec{0}$) และมีความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหล (ความเร็วเจ็ต) ณ จุดใดๆ ($0 < \phi_{ij} \leq 1$) ในขณะที่บริเวณที่เป็นกระแสลมขวางล้วนจะไม่พบอนุภาคติดตามการไหล ไม่สามารถหาความเร็วการไหลได้ ($\vec{V} = \vec{0}$) และมีค่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วเจ็ต ณ จุดใดๆ เท่ากับศูนย์ ($\phi_{ij} = 0$) อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังได้วิเคราะห์โครงสร้างของส่วนที่เป็นทั้งเจ็ตและกระแสลมขวางโดยการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง ซึ่งส่งผลให้ทั้งบริเวณที่อย่างน้อยมีส่วนผสมของเจ็ต และบริเวณกระแสลมขวางล้วน พบอนุภาคติดตามการไหล และสามารถหาความเร็วการไหลได้ นอกจากนี้ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหลในทางทฤษฎีจะเท่ากับหนึ่ง ($\phi_{ij} = 1$) ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นข้อแตกต่างระหว่างกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต และ กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในบทที่ 5

ทั้งนี้ทั้งนั้นในการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานการไหลปั่นป่วนด้วย POD กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานการไหลปั่นป่วนนั้นจะมาจากเจ็ตเท่านั้น ในทางกลับกันกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนจะมาจากทั้งส่วนที่เป็นเจ็ตและกระแสลมขวาง

7.1 โครงสร้างการกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหล กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหล กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต หรือ ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วเจ็ต เป็นคุณลักษณะที่สำคัญของ กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต ที่มีความแตกต่างจากกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางที่มีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับหนึ่ง ซึ่งความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วเจ็ตจะส่งผลสำคัญต่อการหาความเร็วเฉลี่ยตามเวลา (Time-averaged) โดยจะส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยที่บริเวณตรงกลางเจ็ตมีค่าสูงและจะลดลงไปยังขอบเจ็ตที่มีความเร็วเฉลี่ยน้อย และจะมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ที่บริเวณที่เป็นกระแสลมขวางล้วน ด้วยเหตุนี้เองจึงได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างการกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วเจ็ต

รูปที่ 7.1 แสดงการกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วเจ็ต ณ จุดใดๆ (ϕ_{ij}) ของกรณี JICF, I15 และ I135 โดยแสดงค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95 พบว่ากรณี JICF และ I135 จะมีการกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วเจ็ตคล้ายกัน คือบริเวณตรงกลางเจ็ตจะมีค่าความน่าจะเป็นสูง และลดลงไปยังขอบเจ็ตและเข้าใกล้ศูนย์ที่ขอบเจ็ต สำหรับกรณี I15 พบว่าที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ บริเวณที่มีค่าความน่าจะเป็นสูงจะมีลักษณะเป็น Local peak 2 ลูก อยู่ด้านข้างของเจ็ต และจะมีค่าลดลงไปยังขอบเจ็ต แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream พบว่าบริเวณที่มีค่าความน่าจะเป็นสูงจะเชื่อมต่อกันที่ตรงกลางเจ็ตส่วนลให้มีลักษณะเป็น ความน่าจะเป็นสูงอยู่ตรงกลางเจ็ตและลดลงไปยังขอบเจ็ต

7.2 ผลของเจ็ดควบคุมต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุดของเจ็ดในกระแสมขวางกรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ด

7.2.1 โครงสร้างความเร็วเฉลี่ย

รูปที่ 7.2 แสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามเวลาของเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์ของความเร็วเฉลี่ยตามเวลาของเจ็ดบนระนาบ $y-z$ ต่อกระแสมขวาง ($\vec{V}_{yz} / u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z) / u_{cf}$) ของกรณี JICF, I15 และ I135 สำหรับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่าการกระจายตัวของ V_x / u_{cf} จะมี Local peak บริเวณตรงกลางค่อนข้างไปทางด้านบนของเจ็ดและมีลักษณะคล้ายกับพระจันทร์เสี้ยว และที่บริเวณด้านล่างของเจ็ดจะมีโครงสร้างที่มีความเร็วตามแนวแกน x น้อยกว่าศูนย์แสดงว่ามีการไหลย้อนกลับในบริเวณที่ด้านล่างของเจ็ด สำหรับ \vec{V}_{yz} / u_{cf} จะมีทิศ $+y$ ที่แกนกลางของ Local peak และมีจุดหมุนด้านล่างของ Local peak เรียงตัวตามแนว Spanwise ข้างละ 1 โครงสร้าง

กรณี I15 พบว่าโครงสร้างของเจ็ดจะแตกต่างจากกรณี JICF อย่างชัดเจน โดยเจ็ดจะขยายตัวออกด้านข้างมากขึ้น โดยจะมีลักษณะเป็น Local peak แยกออกเป็นซ้าย - ขวา เรียงตัวตามแนว Spanwise แต่จะมีระยะเจาะทะลุ (Penetration depth) และมีขนาดตามแนว Traverse ลดลง และความเร็วสูงสุดตามแนวแกน x ของ Local peak จะมีค่าสูงกว่า ความเร็วสูงสุดในกรณี JICF แต่กรณีนี้จะไม่พบโครงสร้างที่มีความเร็วน้อยกว่าศูนย์ที่บริเวณด้านล่างของเจ็ด แสดงว่าเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งนี้จะไม่พบโครงสร้างการไหลย้อนกลับ สำหรับ \vec{V}_{yz} / u_{cf} จะเรียงตัวในลักษณะเดียวกับ Local peak ของ V_x / u_{cf} แต่จุดหมุนจะอยู่ต่ำกว่า Local peak และมีการทิศทางเคลื่อนที่ของเวกเตอร์บนระนาบเป็นวงกลมชัดเจนกว่ากรณี JICF

กรณี I135 พบว่าโครงสร้างโดยรวมจะคล้ายคลึงกับกรณี JICF แต่กรณี I135 จะมีขนาดเจ็ดที่ใหญ่กว่าทั้งในแนว Spanwise และ Traverse และลอยตัวสูงจากพื้นมากกว่าเล็กน้อย และลักษณะของ \vec{V}_{yz} / u_{cf} จะมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณี JICF และพบโครงสร้างการไหลย้อนกลับเช่นเดียวกันกับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$

เมื่อเจ็ดของทั้ง 3 กรณี พัฒนาตัวไปตาม Downstream พบว่าโครงสร้างของเจ็ดจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อพิจารณาเฉพาะกรณี I15 พบว่า เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 0.75

จะสังเกตได้ว่าเจ็ทมีขนาดเพิ่มขึ้นตามแนว Traverse อย่างชัดเจนมากกว่าเมื่อเทียบกับขนาดที่เพิ่มขึ้นตามแนว Spanwise ในทางกลับกันเมื่อเจ็ทพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ ไปยัง 1.5 จะเห็นได้ว่าเจ็ทจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามแนว Spanwise อย่างชัดเจนมากกว่าขนาดที่เพิ่มขึ้นตามแนว Traverse และเมื่อพิจารณาบริเวณ Local peak ซึ่งแสดงบริเวณที่มีความเร็วสูงที่สุด พบว่าค่าความเร็วสูงสุดจะลดลง (Local peak สลายตัวไปตาม Downstream) และ Local peak จะขยายห่างออกจกกันมากขึ้นเมื่อเจ็ทพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 ในขณะที่สำหรับกรณี JICF และ I135 พบว่าเมื่อเจ็ทพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 0.75 ความเร็วสูงสุดจะมีค่าสูงขึ้น ในทางกลับกันเมื่อเจ็ทพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ ไปยัง 1.5 ความเร็วสูงสุดจะลดลง หรือ Local peak สลายตัวไปตาม Downstream ส่วนโครงสร้างการไหลย้อนกลับของกรณี JICF และ I135 นั้นจะพบแค่เพียงที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ โดยเมื่อเจ็ทพัฒนาตัวไปตาม Downstream บริเวณที่มีการไหลย้อนกลับนี้จะหายไป สำหรับความเร็วบนระนาบ $y-z$ (\vec{V}_{yz} / u_{cf}) ในทั้ง 3 กรณี จะมีจุดหมุนอยู่ในตำแหน่งสูงขึ้นและจะเวกเตอร์ความเร็วบนระนาบจะเคลื่อนที่หมุนวนชัดเจนขึ้นเมื่อเจ็ทพัฒนาตัวไปตาม Downstream

สรุปผลของเจ็ทควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างของเจ็ทในกระแสลมขวางจากการวิเคราะห์โครงสร้างจากการกระจายตัวความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x (V_x / u_{cf}) และเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ (\vec{V}_{yz} / u_{cf}) พบว่าเมื่อฉีดเจ็ทควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ $\pm 15^\circ$ (I15) จะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปจากกรณี JICF อย่างชัดเจน โดยจะมีโครงสร้างขยายตัวออกด้านข้างมากขึ้นแต่ระยะเจาะทะลุและขนาดตามแนว Traverse จะลดลงและค่าความเร็วของบริเวณ Local peak จะมีค่าสูงกว่ากรณี JICF ในขณะที่เมื่อฉีดเจ็ทควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ $\pm 135^\circ$ (I135) จะไม่ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปจากกรณี JICF มากนัก และเมื่อเจ็ทพัฒนาตัวไปยัง Downstream จะเห็นลักษณะของ Vortex ที่มีขนาดขยายตัวขึ้นในทั้ง 3 กรณี

7.2.2 โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานสูงสุดของกรณี JICF, I15 และ I135 (โครงสร้างที่ถูกวิเคราะห์ด้วย POD)

ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุดจะวิเคราะห์จาก POD modes และ Energy โดยองค์ประกอบที่ตั้งฉากกับระนาบ $y-z$ (แกน x) จะถูกแสดงด้วย Contour พล็อต (POD mode จาก Fluctuation ของความเร็วตามแนวแกน x) และองค์ประกอบที่อยู่บนระนาบ $y-z$ นั้นจะถูกแสดงด้วย Vector พล็อต (POD mode จาก Fluctuation ของความเร็วตามแนวแกน y และ z) โดยในแต่ละรูปจะมีระดับพลังงาน (Energy) ซึ่งเป็น % ของพลังงานทั้งหมดกำกับไว้ในแต่ละ Mode และในแต่ละกรณีจะมีการแสดงโครงสร้างจากความเร็วเฉลี่ยโดยแสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์ความเร็วของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบ $y-z$ (ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน y ต่อกระแสลมขวาง และ แกน z ต่อกระแสลมขวาง)

- **กรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)**

จากรูปที่ 7.3 แสดงถึงโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ (POD mode 1, 2 และ 3) โดยเรียงตามระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ของกรณี JICF เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 และจากที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 POD mode 1 คือ โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุด และ POD mode 2 และ 3 จะมีระดับพลังงานรองลงมาตามลำดับ จากการวิเคราะห์โครงสร้างในแต่ละ POD mode พบว่า

POD mode 1 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ โครงสร้างจะมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe ด้านข้างและมี Lobe 2 lobe ขนาดเล็กกว่าด้านใน เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ พบว่าโครงสร้างจะมีการพัฒนาตัวโดย Lobe 2 lobe ที่อยู่ด้านนอกจะลดขนาดตามแนว Traverse เหลือเป็นเพียงโครงสร้างที่อยู่ด้านล่างของเจ็ต ส่วน Lobe 2 lobe ด้านในจะขยายตัวขึ้นโดยจะขยายตัวตามแนว Traverse อย่างชัดเจน ส่งผลให้โครงสร้างของเจ็ตมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe ด้านล่างเจ็ต และ Lobe 2 lobe ตรงกลางเจ็ต สำหรับเวกเตอร์บนระนาบจะมีการเคลื่อนที่หมุนวน (Vortex) ที่มีจุดหมุนอยู่บริเวณตรงกลางเจ็ต

เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1$ พบว่า Lobe 2 lobe ตรงกลางเจ็ต มีการพัฒนาตัวอย่างชัดเจนจนมีโครงสร้างครอบคลุมถึงบริเวณด้านบนของเจ็ต ในขณะที่ Lobe 2 lobe ด้านล่างจะมีการขยายขนาดเล็กน้อย สำหรับเวกเตอร์บนระนาบพบว่าเห็น Vortex ชัดเจนขึ้น ซึ่งให้เห็นว่าโครงสร้างที่บริเวณด้านบนของเจ็ตมีความสัมพันธ์กับ Vortex บนระนาบ $y-z$ และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ โครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนโดยจะมีโครงสร้างคล้ายกับ Jet shear layer และเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ จะมีทิศ $+y$ ที่บริเวณโครงสร้าง Jet shear layer

POD mode 2 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ โครงสร้างมีลักษณะเป็น Lobe 4 lobe เรียงตัวที่บริเวณขอบเจ็ต และเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ จะมีลักษณะเป็น Vortex 2 ลูกหมุนทวนกันเรียงตัวในแนว Traverse โดยจะมีจุดหมุนอยู่ตรงกลางและด้านบนของเจ็ต เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ โครงสร้างจะมีการพัฒนาตัวโดยพบว่า Lobe 2 lobe ด้านล่างจะมีขนาดเล็กลง (สลายตัว) และเชื่อมกับ Lobe 2 lobe ด้านบนซึ่งมีการขยายตัว นอกจากนี้ที่บริเวณตรงกลางเจ็ตพบ Lobe 2 lobe ขนาดเล็กเป็นโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นมา ส่งผลให้โครงสร้างของเจ็ตมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe ด้านข้างเจ็ตเรียงตัวบริเวณขอบเจ็ต และมี Lobe 2 lobe ขนาดเล็ก ภายใน สำหรับเวกเตอร์บนระนาบยังคงมีลักษณะเป็น Vortex 2 ลูก เรียงตัวในแนว Traverse เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1$ พบว่าโครงสร้างของเจ็ตมีลักษณะคล้ายกับที่ตำแหน่งก่อนหน้าแต่มีการขยายตัวขึ้น และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ พบว่าโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงโดยจะมีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้าง POD mode 1 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ แต่จะเห็นเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ เคลื่อนที่หมุนวนอย่างชัดเจนที่ตรงกลางของเจ็ต

POD mode 3 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 พบว่าโครงสร้างของเจ็ตจะมีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer และจะขยายตัวเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream และเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ มีทิศทางตามแนว Traverse (มีลักษณะเช่นเดียวกับ POD mode 1 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$) และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ โครงสร้างกลับ

มีลักษณะคล้ายคลึงกับโครงสร้าง POD mode 2 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ คือ เป็น Lobe 4 lobe เรียงตัวบริเวณขอบเจ็ต

จากการวิเคราะห์ POD mode ของกรณี JICF พบว่าจากตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ ถึง 1 โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญจะมีการพัฒนาตัวจากโครงสร้างตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ แสดงว่าที่บริเวณตำแหน่งนี้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญจะมีการพัฒนาตัวไปตาม Downstream โดยสำหรับ POD mode 1 และ 2 นั้นมีโครงสร้างอยู่ทั่วบริเวณเจ็ต และมีการเคลื่อนที่หมุนวนของเวกเตอร์บนระนาบ สันนิษฐานว่าเป็นโครงสร้างที่มีความสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP ซึ่งจะพัฒนาไปเป็น CVP ที่บริเวณ Far field ในทางกลับกัน POD mode 3 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 โครงสร้างจะมีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer ซึ่งระบุว่าที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 หรือบริเวณ Near field โครงสร้างที่มีความสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP มีบทบาทสำคัญต่อเจ็ตในกระแสผสมขวางและพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงกว่าโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ หรือบริเวณ Far field โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญจะมีการเปลี่ยนแปลง โดยพบว่าโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer มีบทบาทสำคัญต่อเจ็ตในกระแสผสมขวางมากกว่าโครงสร้าง CVP

- กรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$ (I15)

จากรูปที่ 7.4 แสดงถึงโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ (POD mode 1, 2 และ 3) โดยเรียงตามระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ของกรณี I15 เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 จากการวิเคราะห์โครงสร้างในแต่ละ POD mode พบว่า

POD mode 1 จากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่าโครงสร้างจะมีการพัฒนาตัวในลักษณะคล้ายเดิมตลอด แสดงว่าโครงสร้าง Mode 1 มีเสถียรภาพเมื่อเจ็ตมีการพัฒนาตัวไปตาม Downstream โดยจะมีลักษณะเป็นเป็น Lobe 4 lobe กระจายอยู่ด้านข้างของเจ็ตข้างละ 2 lobe โดย Lobe 2 lobe ด้านบนจะมีขนาดใหญ่กว่าด้านล่าง

และเมื่อพิจารณาเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ พบว่าจะเห็นการเคลื่อนที่หมุนวน ที่ด้านข้างของเจ็ต ซึ่งมีทิศทางการหมุนไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อพิจารณาการขยายตัวของโครงสร้างจะพบว่าเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 0.75 เจ็ตจะมีการขยายตัวในแนว Traverse มากกว่าแนว Spanwise ในทางกลับกันเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ ไปยัง 1 กลับพบว่า โครงสร้างจะมีการขยายตัวในแนว Spanwise มากกว่าในแนว Traverse

POD mode 2 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ โครงสร้างจะมีลักษณะคล้ายกับ POD mode 1 คือ โครงสร้างจะกระจายอยู่ด้านข้างของเจ็ต สำหรับ POD mode 2 จะมี Lobe ที่ชัดเจนอยู่ 2 lobe ซ้าย-ขวา อยู่ตรงกลางของเจ็ต และด้านบน-ล่าง ของแต่ละ lobe จะมี lobe ขนาดเล็ก เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ โครงสร้างมีลักษณะใกล้เคียงกับตำแหน่งก่อนหน้า โดย Lobe ทั้ง 2 lobe ที่บริเวณตรงกลางเจ็ตจะขยายตัว และเคลื่อนที่ไปยังในแต่ข้างของเจ็ตมากขึ้น ในขณะที่ Lobe ด้านบนขยายตัวจนมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่เนื่องด้วยอยู่ใกล้กันจึงมีลักษณะที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งให้เห็นว่าการที่เจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง 0.5 มาถึง 0.75 แล้วเห็นการขยายตัวในแนว Traverse น่าจะเป็นผลมาจากการที่โครงสร้างด้านข้างของเจ็ตพับตัวเข้าหากัน อย่างไรก็ตามเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวมาถึงตำแหน่ง $x/rd = 1$ โครงสร้างจะมีลักษณะกระจายตัว ซ้าย-ขวา อย่างชัดเจนคล้ายกับที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ แต่จะเห็นว่า Lobe 2 lobe ด้านบนของเจ็ตจะขยายตัวอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ พบว่า บริเวณตรงกลางของเจ็ตจะพบโครงสร้างขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ โดยจะมี Local peak อยู่ด้านบนขวาเจ็ต

จากการวิเคราะห์ POD mode ของกรณี I15 พบว่า โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุด) จะยังคงมีโครงสร้างที่เป็นลักษณะเดิม แม้ว่าเจ็ตจะพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 ซึ่งให้เห็นว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$ ส่งผลให้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุดเกิดความเสถียร

- กรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 135^\circ$ (I135)

จากรูปที่ 7.5 แสดงถึงโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ (POD mode 1, 2 และ 3) โดยเรียงตามระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ของกรณี I15 เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 จากการวิเคราะห์โครงสร้างในแต่ละ POD mode พบว่า

POD mode 1 จากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 โครงสร้างจะมีการพัฒนาตัวในลักษณะคล้ายเดิม คือจากโครงสร้างที่มีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe ด้านข้าง และมี Lobe 2 lobe ขนาดเล็กกว่าด้านในที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปใน Downstream พบว่า Lobe 2 lobe ด้านนอกจะมีการขยายตัวที่ด้านบนของแต่ละ lobe ในทางกลับกันกลับพบว่า Lobe 2 lobe ด้านใน จะสลายตัวเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ พบว่า Lobe ด้านนอกจะเหลือเพียงโครงสร้างที่อยู่บริเวณด้านบนของเจ็ต โดยโครงสร้างของ lobe ด้านข้างในแต่ละ lobe จะสลายตัว นอกจากนี้ Lobe 2 lobe ด้านในก็สลายตัวด้วยเช่นกัน

POD mode 2 จากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ โครงสร้างมีลักษณะเป็น Lobe 4 lobe เรียงตัวกันเป็นวงกลมที่บริเวณขอบเจ็ต และมี Lobe ขนาดเล็ก 2 lobe อยู่ด้านล่างของเจ็ต และเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ จะมีลักษณะหมุนวน (Vortex) ที่บริเวณตรงกลางของเจ็ต เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ โครงสร้างจะมีลักษณะคล้ายที่ตำแหน่งก่อนหน้า โดย Lobe 2 lobe ด้านบนเจ็ตจะขยายตัวขึ้น และ Lobe 2 lobe ขนาดเล็กที่อยู่บริเวณด้านล่างเจ็ตก็ขยายตัวขึ้นด้วยเช่นกัน และเวกเตอร์บนระนาบยังคงมีลักษณะหมุนวนตรงบริเวณตรงกลางเจ็ต และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1$ พบว่า Lobe 2 lobe ด้านบนของเจ็ตเชื่อมต่อกันจนมีลักษณะเป็นพระจันทร์เสี้ยวซึ่งคล้ายกับโครงสร้าง Jet shear layer อย่างไรก็ตามยังคงมีการพัฒนาตัวของโครงสร้างที่บริเวณด้านล่างเจ็ต ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นโครงสร้างที่มีความสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP บ่งชี้ว่า ที่ตำแหน่งนี้ โครงสร้างที่มีบทบาทต่อเจ็ตคือ ทั้งโครงสร้างที่มีลักษณะเป็น Jet shear layer และการก่อตัวของ CVP และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ เจ็ตจะมีโครงสร้างคล้าย

กับ CVP ที่บิดเบี้ยว คือมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe ด้านนอกและมี Lobe 2 lobe ขนาดเล็กด้านใน

POD mode 3 จากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 พบว่าโครงสร้างของเจ็ตจะมีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer และจะขยายตัวเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream และเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ มีทิศทางตามแนว Traverse (มีลักษณะเช่นเดียวกับ POD mode 2 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$) และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ โครงสร้างกลับมีลักษณะคล้ายคลึงกับโครงสร้าง POD mode 2 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ คือ มีทั้งโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer และโครงสร้างที่มีความสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP

จากการวิเคราะห์ POD mode ของกรณี I135 พบว่าเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุด (POD mode 1) โครงสร้างจะมีการพัฒนาตัวในลักษณะคล้ายกัน แสดงว่าเมื่อเจ็ตเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งนี้จะทำให้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญเกิดความเสถียรเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream โดยสันนิษฐานว่าโครงสร้างนี้มีความสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP สำหรับบริเวณ Near field ($x/rd = 0.5$ ถึง 1) และ CVP สำหรับบริเวณ Far field ($x/rd = 1.5$) และยังพบว่าโครงสร้างจะมีการพัฒนาตัวที่บริเวณด้านบนของเจ็ตเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream สำหรับโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญรองลงมาพบว่าจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ โครงสร้างที่มีความสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP มีบทบาทสำคัญต่อเจ็ตในกระแสลมขวาง มากกว่าโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer อย่างไรก็ตามสำหรับ POD mode 2 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ พบโครงสร้างที่มีลักษณะผสมกันระหว่าง Jet shear layer และการก่อตัวของ CVP และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ จะไม่พบโครงสร้าง Jet shear layer โดย POD mode 2 จะพบโครงสร้าง CVP ในขณะที่ POD mode 3 จะพบโครงสร้างที่มีลักษณะผสมกันระหว่าง Jet shear layer และ CVP แสดงว่าที่ตำแหน่งนี้

CVP มีบทบาทสำคัญและพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงกว่าโครงสร้าง Jet shear layer แสดงว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งนี้จะช่วยส่งเสริมโครงสร้าง CVP ที่บริเวณ Far field

7.2.3 การเปรียบเทียบผลของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ รูปที่ 7.6 ก-ค. แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ (POD mode 1, 2 และ

3) โดยเรียงตามระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ของกรณี JICF, I15 และ I135 จากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่าเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$ (I15) ทำให้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญเปลี่ยนไปจากกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) อย่างเห็นได้ชัด โดยกรณี I15 นั้น โครงสร้างจะกระจายตัวในแนว Spanwise มากกว่ากรณี JICF ซึ่งโครงสร้างจะกระจายตัวทั่วบริเวณเจ็ต มากไปกว่านั้นพบว่ากรณี I15 จะไม่พบโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer ในโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญซึ่งพบในกรณี JICF ซึ่งแนวทางการฉีดเจ็ตควบคุม ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$ จะไปพัฒนาตัวโครงสร้างในแนว Spanwise และจะไปยับยั้งโครงสร้างในแนว Traverse โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer

เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 135^\circ$ (I135) พบว่า โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมีความคล้ายคลึงกับกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ที่บริเวณ Near field คือเป็นโครงสร้างที่มีความสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP แต่เมื่อพัฒนาตัวไปยัง Far field หรือที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ กรณี JICF โครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer จะมีบทบาทสำคัญต่อเจ็ตในกระแสลมขวางมากกว่าโครงสร้างของ CVP ในทางกลับกัน กรณี I135 โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุดจะเป็น CVP และจะไม่พบโครงสร้าง Jet shear layer ซึ่งแนวทางการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 135^\circ$ จะไปส่งเสริมโครงสร้างที่มีของ CVP ในบริเวณ Far field ให้ยังคงมีบทบาทสำคัญต่อเจ็ตในกระแสลมขวางมากที่สุด

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1) สำหรับกรณี JICF แม้ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 (บริเวณ Near field) โครงสร้างจะมีลักษณะคล้ายเดิม แต่เมื่อพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ (บริเวณ Far field) โครงสร้างจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ในขณะที่กรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมทั้งกรณี I15 และ I135 พบว่า โครงสร้างที่มี

บทบาทสำคัญสูงสุดที่ยังคงมีลักษณะคล้ายคลึงกันเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream บ่งชี้ว่าการฉีดเจ็ตควบคุมส่งผลให้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมีความเสถียรมากกว่ากรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม

7.2.4 การกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน

รูปที่ 7.7 แสดงการกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ของ POD mode 1 ถึง 10 พบว่ากรณี JICF จะมีการกระจายตัวของระดับพลังงานในลักษณะ กว้าง - เตี้ย หมายความว่าโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1) มีบทบาทสำคัญว่าโครงสร้างที่มีบทบาทรองลงมาเพียงเล็กน้อยแสดงว่ามีการกระจายตัวพลังงานการไหลปั่นป่วนไปตามโครงสร้างหลายโครงสร้าง บ่งชี้ว่าโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญต่อเจ็ตในกระแสมุมขวางมีหลายโครงสร้างรวมกัน โดยไม่มีโครงสร้างใดโครงสร้างหนึ่งโดดเด่นเป็นพิเศษ

กรณี I15 พบว่าการกระจายตัวของระดับพลังงานจะแตกต่างจากกรณี JICF (และ I135) อย่างชัดเจน โดยจะเปลี่ยนจากการกระจายตัวในลักษณะ กว้าง-เตี้ย เป็น ผอม – สูง โดยโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1) จะมีพลังงานการไหลปั่นป่วนประมาณเป็น 2 เท่าของกรณี JICF และประมาณเป็น 1.5 เท่าของกรณี I135 แสดงว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$ (I15) จะไปส่งเสริมโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1) โดยพลังงานการไหลปั่นป่วนของ POD mode 1 กรณี I15 นั้นจะสูงกว่า POD mode 2 ถึง 3 เท่า โดยโครงสร้างที่มีบทบาทรองลงมา (POD mode 2) ของกรณี I15 จะมีระดับพลังงานน้อยกว่า กรณี JICF และ I135) และการกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนมีลักษณะใกล้เคียงกันเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream บ่งชี้ว่า โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญที่สุดในกรณี I15 จะมีบทบาทต่อเจ็ตมากกว่าโครงสร้างรองลงมาอย่างชัดเจนมากกว่าเมื่อเทียบกับกรณี JICF และ I135 แสดงว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งนี้จะไปพัฒนาตัวโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด และระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุดให้มีความโดดเด่นกว่าโครงสร้างอื่นๆ และยังคงความโดดเด่นนี้ไว้แม้ว่าเจ็ตจะพัฒนาตัวไปตาม Downstream แสดงว่าโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุดมีความเสถียรภาพเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream

กรณี I135 พบว่าการกระจายตัวของระดับพลังงานอยู่ระหว่างกรณี JICF และ I15 โดยการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งนี้จะไปส่งเสริมโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1) ให้มีพลังงานการไหลปั่นป่วนมากกว่ากรณี JICF แต่ยังคงน้อยกว่ากรณี I15 แสดงว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งนี้จะส่งเสริมโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญแต่มีการส่งเสริมน้อยกว่ากรณี I15 เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของระดับพลังงานไปตาม Downstream พบว่าที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 กรณี I135 การกระจายตัวของระดับพลังงานจะมีลักษณะ ผอม – สูง กว่า กรณี JICF อย่างชัดเจน แต่เมื่อพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ จะเห็นได้ว่ากรณี I135 จะมีการกระจายตัวของระดับพลังงานใกล้เคียงกับกรณี JICF แสดงว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 135^\circ$ (I135) จะไปส่งเสริมโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ และเพิ่มความเสถียรภาพเมื่อเทียบกับกรณี JICF แต่ยังคงส่งเสริมบทบาทสำคัญและความเสถียรภาพน้อยกว่ากรณี I15

จากการวิเคราะห์ผลของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อการกระจายตัวของระดับพลังงานพบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมจะไปส่งเสริม โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุด (POD mode 1) โดยกรณี I15 นั้นการฉีดเจ็ตควบคุมจะส่งเสริม POD mode 1 มากกว่ากรณี I135 นอกจากนี้การฉีดเจ็ตควบคุมส่งผลให้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น

รูปที่ 7.8 แสดงการกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนของ POD mode 1-4,000 ใน Log-Log สเกล พบว่าสำหรับที่ทุกตำแหน่ง การฉีดเจ็ตควบคุมจะส่งผลให้ระดับพลังงานการไหลในช่วง POD mode แรกๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากกรณี JICF อย่างเห็นได้ชัด และส่งผลต่อพลังงานการไหลปั่นป่วนใน POD mode หลังๆ เพียงเล็กน้อย บ่งชี้ว่าการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงนั้นส่งผลต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและระดับพลังงานสูง

เมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของระดับพลังงานไปตาม Downstream ของกรณี JICF และ I135พบว่า ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 (บริเวณ Near field) จะมีการกระจายตัวของระดับพลังงานที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ (บริเวณ Far field) ซึ่งโครงสร้าง Jet shear layer จะมีบทบาทสำคัญขึ้นเมื่อเทียบกับบริเวณ Near field จะมีการกระจายตัวของระดับพลังงานที่เปลี่ยนไปโดยจะมีลักษณะ กว้าง – เตี้ย มากขึ้นเมื่อเทียบกับบริเวณ Near

field ซึ่งเน้นว่าการพัฒนาตัวของโครงสร้าง Jet shear layer ส่งผลให้พลังงานการไหลปั่นป่วนลดลง ซึ่งสัมพันธ์กับการที่ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนของกรณี I15 มีการกระจายตัวแบบ ผอม – สูง เนื่องจากกรณี I15 จะไม่พบโครงสร้าง Jet shear layer ว่าเป็นโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ

7.2.5 ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสม

รูปที่ 7.9 แสดงระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสม (Accumulative mode energy) ในแต่ละ % ของปริมาณ Modes พบว่า สำหรับทุกกรณีจะมีแนวโน้มของระดับพลังงานรวมสะสม คล้ายคลึงกันโดยช่วงแรกจะมีการเพิ่มขึ้นของระดับพลังงานรวมสูงทำให้ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสมมีค่าเท่ากับ 50 % เมื่อใช้ปริมาณ Modes ไม่ถึง 10 % ของจำนวน Modes ทั้งหมด

7.3 ผลของเจ็ดควบคุมต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุดของเจ็ดในกระแสมขวางกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ดและกระแสมขวาง

ในกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง โครงสร้างจะมาจากทั้งส่วนที่เป็นเจ็ดและกระแสมขวาง และเมื่อวิเคราะห์โครงสร้างและพลังงานการไหลปั่นป่วนด้วย POD นั้น พลังงานการไหลปั่นป่วนจะมาจากทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง อย่างไรก็ตามความเร็วผันผวน (Fluctuation) ในกระแสมขวางนั้นไม่ได้เป็นการไหลปั่นป่วน (Turbulence) ที่แท้จริงเพราะตัวกระแสมขวางนั้นไม่มีความปั่นป่วน แต่ความเร็วผันผวนในกระแสมขวางจะเกิดจากการเหนี่ยวนำจากความปั่นป่วนของเจ็ด ทั้งนี้ทั้งนั้นจากการที่พลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ในการวิเคราะห์ POD ได้คำนวณมาจากความเร็วผันผวน ดังนั้นพลังงานการไหลปั่นป่วนในกรณีนี้ที่มาจากส่วนของกระแสมขวางไม่ใช่พลังงานการไหลปั่นป่วนที่แท้จริง

7.3.1 โครงสร้างความเร็วเฉลี่ย

รูปที่ 7.10 แสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์ความเร็วของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบ $y-z$ ต่อกระแสมขวาง

($\vec{V}_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/u_{cf}$) กรณี JICF, I15 และ I135 (บริเวณที่เป็นสีขาวเป็นบริเวณที่อยู่นอก Field of view ของการถ่ายภาพ) สำหรับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่าการกระจายตัวของ V_x/u_{cf} จะมี Local peak บริเวณตรงกลางค่อนข้างไปทางด้านบนของเจ็ตและมีลักษณะคล้ายกับพระจันทร์เสี้ยว และที่บริเวณด้านล่างของเจ็ตจะมีโครงสร้างที่มีความเร็วตามแนวแกน x น้อยกว่าศูนย์แสดงว่ามีการไหลย้อนกลับในบริเวณที่ด้านล่างของเจ็ต (สอดคล้องกับกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต) สำหรับ \vec{V}_{yz}/u_{cf} จะมีทิศ +y ที่แกนกลางของ Local peak และมีจุดหมุนด้านล่างของ Local peak เรียงตัวตามแนว Spanwise ข้างละ 1 โครงสร้าง

กรณี I15 พบว่าโครงสร้างของเจ็ตจะแตกต่างจากกรณี JICF อย่างชัดเจน โดยเจ็ตจะขยายตัวออกด้านข้างมากขึ้น โดยจะมีลักษณะเป็น Local peak แยกออกเป็นซ้าย - ขวา เรียงตัวตามแนว Spanwise แต่จะมีระยะเจาะทะลุ (Penetration depth) และมีขนาดตามแนว Traverse ลดลง และความเร็วสูงสุดตามแนวแกน x ของ Local peak จะมีค่าสูงกว่า ความเร็วสูงสุดในกรณี JICF แต่กรณีนี้จะไม่พบโครงสร้างที่มีความเร็วต่ำกว่าศูนย์ที่บริเวณด้านล่างของเจ็ต แสดงว่าเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งนี้จะไม่พบโครงสร้างการไหลย้อนกลับ (สอดคล้องกับกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต) สำหรับ \vec{V}_{yz}/u_{cf} จะเรียงตัวในลักษณะเดียวกับ Local peak ของ V_x/u_{cf} แต่จุดหมุนจะอยู่ต่ำกว่า Local peak และมีการทิศทางการเคลื่อนที่ของเวกเตอร์บนระนาบเป็นวงกลมชัดเจนกว่ากรณี JICF

กรณี I135 พบว่าโครงสร้างโดยรวมจะคล้ายคลึงกับกรณี JICF แต่กรณี I135 จะมีขนาดเจ็ตที่ใหญ่กว่าทั้งในแนว Spanwise และ Transverse และลอยตัวสูงจากพื้นมากกว่าเล็กน้อย และลักษณะของ \vec{V}_{yz}/u_{cf} จะมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณี JICF และที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ จะพบโครงสร้างการไหลย้อนกลับเช่นเดียวกันกับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$

เมื่อเจ็ตของทั้ง 3 กรณี พัฒนาตัวไปตาม Downstream พบว่าโครงสร้างของเจ็ตจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและเมื่อพิจารณาบริเวณ Local peak ซึ่งแสดงบริเวณที่มีความเร็วสูงที่สุด พบว่าค่าความเร็วสูงสุดจะลดลง (Local peak สลายตัวไปตาม Downstream) พิจารณาเฉพาะกรณี I15 พบว่า เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 0.75 จะสังเกตได้ว่าเจ็ตมีขนาดเพิ่มขึ้นตาม

แนว Traverse อย่างชัดเจนมากกว่าเมื่อเทียบกับขนาดที่เพิ่มขึ้นตามแนว Spanwise ในทางกลับกันเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ ไปยัง 1.5 จะเห็นได้ว่าเจ็ตจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามแนว Spanwise อย่างชัดเจนมากกว่าขนาดที่เพิ่มขึ้นตามแนว Traverse และ Local peak จะขยายห่างออกจากกันมากขึ้นเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 ในขณะที่สำหรับกรณี JICF และ I135 พบว่าโครงสร้างการไหลย้อนกลับนั้นจะพบแค่เพียงที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ โดยเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream จะไม่พบโครงสร้างการไหลย้อนกลับ โดยความเร็วการไหลย้อนกลับนั้นจะมีความเร็วสูงขึ้นซึ่งก็คือความเร็วจะเข้าสู่ศูนย์และเป็นบวก (มีการไหลตามแนวทางการไหล) ในที่สุดโดยจะส่งผลให้ความบริเวณนี้จากที่มีการไหลย้อนกลับจะเป็นเพียงบริเวณที่มีความเร็วต่ำ สำหรับความเร็วบนระนาบ y-z (\bar{V}_{yz} / u_{cf}) ในทั้ง 3 กรณี จะมีจุดหมุนอยู่ในตำแหน่งสูงขึ้นแต่และเวกเตอร์ความเร็วบนระนาบจะเคลื่อนที่หมุนวนชัดเจนขึ้นเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream

7.3.2 โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญของ JICF, I15 และ I135 (โครงสร้างที่ถูกวิเคราะห์ด้วย POD)

ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุดจะวิเคราะห์จาก POD modes และ Energy โดยองค์ประกอบที่ตั้งฉากกับระนาบ y-z (แกน x) จะถูกแสดงด้วย Contour พล็อต (POD mode จาก Fluctuation ของความเร็วตามแนวแกน x) และองค์ประกอบที่อยู่บนระนาบ y-z นั้นจะถูกแสดงด้วย Vector พล็อต (POD mode จาก Fluctuation ของความเร็วตามแนวแกน y และ z) โดยในแต่ละรูปจะมีระดับพลังงาน (Energy) ซึ่งเป็น % ของพลังงานทั้งหมดกำกับไว้ในแต่ละ Mode และในแต่ละกรณีจะมีการแสดงโครงสร้างจากความเร็วเฉลี่ยโดยแสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์ความเร็วของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบ y-z (ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน y ต่อกระแสลมขวาง และ แกน z ต่อกระแสลมขวาง)

- กรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)

จากรูปที่ 7.11 แสดงถึงโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ (POD mode 1, 2 และ 3) โดยเรียงตามระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ของกรณี JICF เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 และจากที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 POD mode 1 คือโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุด และ POD mode 2 และ 3 จะมีระดับพลังงานรองลงมาตามลำดับ จากการวิเคราะห์โครงสร้างในแต่ละ POD mode พบว่า

POD mode 1 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 0.75 โครงสร้างจะมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe ด้านข้างของเจ็ตค่อนไปทางด้านล่างของเจ็ต โดยเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ จะมีลักษณะเป็น Vortex ตรงกลางเจ็ต เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1$ พบว่าโครงสร้างยังคงมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe แต่จะเคลื่อนตัวไปอยู่ด้านล่างของเจ็ตแทน ซึ่งส่วนหนึ่งของโครงสร้างจะอยู่ในบริเวณที่เป็นกระแสลมขวาง ซึ่งโครงสร้างที่ตำแหน่งนี้อาจจะเกี่ยวเนื่องกับ Wake vortices อย่างไรก็ตามทิศทางของเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ ยังคงมีลักษณะเดิม

POD mode 2 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 โครงสร้างมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe คล้ายกับ POD mode 1 อย่างไรก็ตามที่ด้านล่างของแต่ละ Lobe นั้นจะมีโครงสร้างขนาดเล็ก โดยเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream จากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ นั้นพบว่า Lobe 2 lobe จะยกตัวสูงขึ้น และโครงสร้างด้านล่างจะพัฒนาตัวขึ้น เมื่อพิจารณาเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ จะมีลักษณะเป็นการเคลื่อนที่หมุนวนอยู่ตรงบริเวณระหว่าง Lobe 2 lobe ด้านบนและโครงสร้างด้านล่างโดยจะมีลักษณะเป็นวงรี

POD mode 3 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่าโครงสร้างของเจ็ตจะมีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer และจะขยายตัวเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream และเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ มีทิศทางตามแนว Traverse (มีลักษณะเช่นเดียวกับ POD mode 1 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$)

จากการวิเคราะห์ POD mode ของกรณี JICF พบว่า โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1) จะพัฒนาตัวจาก โครงสร้างการก่อตัวของ CVP ในบริเวณ

Near field เป็น โครงสร้าง Wake vortices ในบริเวณ Far field ในขณะที่โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญรองลงมา (POD mode 2 และ POD mode 3) จะยังคงมีลักษณะคล้ายคลึงเดิมแม้ว่าเจ็ตจะพัฒนาตัวไปตาม Downstream โดยจาก POD mode 1 และ 2 พบว่าเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream โครงสร้างด้านล่าง หรือ Wake vortices จะมีบทบาทมากขึ้น โดยโครงสร้าง Wake vortices นี้มีบทบาทสำคัญมากกว่าโครงสร้าง Jet shear layer (เป็นโครงสร้างของ POD mode 3) ที่ทุกตำแหน่ง ซึ่งเน้นว่าการติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง ซึ่งทำให้สามารถเห็นโครงสร้างที่มาจากกระแสลมขวาง บ่งชี้ว่า กระแสลมขวางมีบทบาททำให้เกิดโครงสร้าง Wake vortices

- **กรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$ (I15)**

จากรูปที่ 7.12 แสดงถึงโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ (POD mode 1, 2 และ 3) โดยเรียงตามระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ของกรณี I15 เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 จากการวิเคราะห์โครงสร้างในแต่ละ POD mode พบว่า

POD mode 1 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นลักษณะเดียวกันจะมีลักษณะเป็น Lobes 4 lobes กระจายอยู่ด้านข้างของเจ็ตข้างละ 2 lobe เรียงตัวตามแนว Spanwise และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ พบว่าโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญจะมีโครงสร้างอยู่ด้านล่างของเจ็ต ซึ่งน่าจะเป็นโครงสร้างที่มีความสัมพันธ์กับ Wake vortices และบริเวณตรงกลางเจ็ตและด้านข้างเจ็ตจะพบโครงสร้างเช่นเดียวกัน

POD mode 2 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 โครงสร้างจะมีลักษณะกระจายตัวทั่วบริเวณเจ็ต และมีลักษณะโครงสร้างแบบ Small-scale มากกว่า POD mode 1 เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1$ ถึง 1.5 พบว่าโครงสร้าง POD mode 2 จะคล้ายกับ

POD mode 1 คือมีลักษณะเป็น Lobe 4 lobe เรียงตัวตามแนว Spanwise ข้างละ 2 lobe และมีโครงสร้างขนาดเล็กด้านล่างของเจ็ตในบริเวณที่เป็นกระแสลมขวาง

POD mode 3 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 จะมีลักษณะเป็นโครงสร้าง Small-scale กระจายตัวทั่วบริเวณที่เป็นเจ็ต และพบโครงสร้างด้านล่างเจ็ต ซึ่งเป็นบริเวณของกระแสลมขวาง

จากการวิเคราะห์ POD mode ของกรณี I15 พบว่า โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุด) จะยังคงมีโครงสร้างที่เป็นลักษณะเดิมที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1 และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยัง $x/rd = 1.5$ จะเห็นโครงสร้างด้านล่างซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความสัมพันธ์กับ Wake vortices ซึ่งน่าจะกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง จะทำให้เห็นโครงสร้าง Wake vortices สำหรับกรณีเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$

- กรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 135^\circ$ (I135)

จากรูปที่ 7.13 แสดงถึงโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ (POD mode 1, 2 และ 3) โดยเรียงตามระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ของกรณี I135 เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 จากการวิเคราะห์โครงสร้างในแต่ละ POD mode พบว่า

POD mode 1 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 โครงสร้างจะมีลักษณะคล้ายกันคือมีลักษณะเป็น Lobe 2 อยู่บริเวณตรงกลางของเจ็ต ซึ่งถ้าเป็นบริเวณ Near field โครงสร้างนี้น่าจะสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP ในขณะที่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยัง Far field โครงสร้างนี้น่าจะสัมพันธ์กับ CVP ส่วนการเคลื่อนที่ของเวกเตอร์บนระนาบจะมีลักษณะการเคลื่อนที่หมุนวนตรงกลางเจ็ต

POD mode 2 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 จะมีโครงสร้างคล้ายกัน คือ มี Lobe 2 lobe อยู่ตรงกลางเจ็ดคล้ายกับ POD mode 1 และ โครงสร้างขนาดเล็กด้านบน และ ด้านล่าง ของ Lobe 2 lobe นั้น โดยเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม Downstream พบว่า โครงสร้างขนาดเล็กที่อยู่ด้านบนจะสลายตัว ในทางกลับกัน โครงสร้างที่อยู่ด้านล่างจะ ขยายตัว ซึ่งแนวทางการขยายตัวของโครงสร้างด้านล่าง น่าจะสัมพันธ์กับการพัฒนาตัวของ Wake vortices

POD mode 3 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่าโครงสร้างของเจ็ดจะมี ลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer และจะขยายตัวเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม Downstream และเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ มีทิศทางตามแนว Traverse

จากการวิเคราะห์ POD mode ของกรณี I135 พบว่าที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุด (POD mode 1) จะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือเป็นโครงสร้างที่สันนิษฐานว่ามีความสัมพันธ์กับการก่อ ตัวของ CVP ที่บริเวณ Near field และกลายเป็น CVP ที่บริเวณ Far field ซึ่งแสดงว่า เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งนี้จะทำให้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญเกิดความเสถียร ในขณะที่โครงสร้างที่มีบทบาทรองลงมา คือ Wake vortices และ Jet shear layer ตามลำดับ

7.3.3 การเปรียบเทียบผลของการฉีดเจ็ดควบคุมต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ รูปที่ 7.14 ก-ค. แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ (POD mode 1, 2 และ

3) โดยเรียงตามระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ของกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ดและกระแสลมขวาง พบว่าเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$ (I15) ทำให้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ เปลี่ยนไปจากกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) อย่างเห็นได้ชัด โดยกรณี I15 นั้น โครงสร้างจะ กระจายตัวในแนว Spanwise มากกว่ากรณี JICF ซึ่งโครงสร้างจะกระจายตัวทั่วบริเวณเจ็ด มาก

ไปกว่านั้นพบว่ากรณี I15 จะไม่พบโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer ในโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญซึ่งพบในกรณี JICF ซึ่งแนวทางการฉีดเจ็ตควบคุมตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$ จะไปส่งเสริมโครงสร้างในแนว Spanwise และจะไปยับยั้งโครงสร้าง Jet shear layer สอดคล้องกับงานของ Konsri *et al.*, 2007 อย่างไรก็ตามกลับพบว่าทั้งกรณี JICF และ I15 นั้นที่บริเวณ Far field จะสังเกตเห็นโครงสร้างด้านล่างเจ็ตซึ่งน่าจะมีความสัมพันธ์กับ Wake vortices

เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 135^\circ$ (I135) พบว่า โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมีความคล้ายคลึงกับกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) อย่างไรก็ตามสิ่งที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดคือที่บริเวณ Far field (ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ ถึง 1.5) กรณี I135 แม้โครงสร้าง Wake vortices จะมีบทบาทมากขึ้น แต่ก็ยังคงมีบทบาทความสำคัญน้อยกว่าโครงสร้าง CVP ในขณะที่กรณี JICF ที่ตำแหน่งนี้ โครงสร้าง Wake vortices จะมีบทบาทสำคัญมากที่สุด อย่างไรก็ตามสิ่งที่เหมือนกันของทั้งกรณี JICF และ I135 คือ โครงสร้าง Jet shear layer จะมีบทบาทสำคัญน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ โครงสร้างการก่อตัวของ CVP และ Wake vortices

จากทุกกรณีจะพบว่าที่บริเวณ Far field หรือที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ ถึง 1.5 นั้นโครงสร้าง Wake vortices จะมีบทบาทต่อเจ็ตในกระแสลมขวางทั้งกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง หรือกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง ซึ่งโครงสร้าง Wake vortices น่าจะมีความสัมพันธ์กับ กระแสลมขวางเนื่องจาก ไม่พบโครงสร้างนี้ในกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต

7.3.4 การกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน

รูปที่ 7.15 แสดงการกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ของ POD mode 1 ถึง 10 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5, 0.75, 1$ และ 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง พบว่าทุกกรณี (JICF, I15 และ I135) นั้นจะมีการกระจายตัวของระดับพลังงานใกล้เคียงโดยกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ จะมีลักษณะ ผอม-สูง กว่ากรณีอื่นๆ และกรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ จะมีลักษณะ เตี้ย-กว้าง กว่ากรณีอื่นๆ บ่งชี้ว่าการฉีดเจ็ตควบคุมมีผลน้อยต่อระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนที่มาจากทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง

7.3.5 ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสม

รูปที่ 7.16 แสดงระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสม (Accumulative mode energy) ในแต่ละ % ของปริมาณ Modes พบว่า สำหรับทุกกรณียกเว้นกรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ จะมีแนวโน้มของระดับพลังงานรวมสะสมคล้ายคลึงกันโดยช่วงแรกจะมีการเพิ่มขึ้นของระดับพลังงานรวมสูงทำให้ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสมมีค่าเท่ากับ 50 % เมื่อใช้ปริมาณ Modes ไม่ถึง 10 % ของจำนวน Modes ทั้งหมด ในขณะที่ กรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ พบว่าระดับพลังงานรวมจะน้อยกว่ากรณีอื่นๆ ทั้งหมด อย่างเห็นได้ชัด โดยเพื่อที่จะให้ได้ระดับพลังงานรวมมีค่าเท่ากับ 50 % นั้น ต้องใช้ปริมาณ Mode ถึง 15 % แสดงว่าพลังงานการไหลปั่นป่วนของกรณีนี้จะไปกระจายตัวอยู่ที่ POD mode ท้ายๆ

7.4 การเปรียบเทียบโครงสร้างและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนของเจ็ตในกระแสลมขวางระหว่างกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต กับ ฉีดอนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง

- การเปรียบเทียบโครงสร้างจากโครงสร้างความเร็วเฉลี่ย

รูปที่ 7.17 ก.-ค. แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างความเร็วเฉลี่ย (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บนระนาบ $y - z$ ของเจ็ตในกระแสลมขวางระหว่างกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต กับ กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง ของกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต จะพบบริเวณที่มีความเร็วเท่ากับศูนย์ซึ่งคือบริเวณที่ไม่ใช่เจ็ต หรือก็คือบริเวณที่เป็นกระแสลมขวาง ในทางกลับกันกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง นั้นจะพบความเร็วทั้งบริเวณที่เป็นเจ็ตและกระแสลมขวาง

นอกจากนี้ยังพบว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต บริเวณที่มีความเร็วเฉลี่ยสูงสุด (Local peak) จะมีค่าความเร็วต่ำกว่าความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง การที่ความเร็วของกรณีนี้ที่ฉีดอนุภาคติดตามการไหลมีค่าน้อยกว่าเป็นผลมาจากโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยของกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตนั้นเกิดจากการเฉลี่ยตามเวลา ซึ่งจะมีความน่าจะเป็นที่จะพบความเร็วของเจ็ตจะมีค่าน้อย

กว่าหนึ่ง ซึ่งต่างจากกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง ที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตเท่ากับหนึ่ง หรือพบอนุภาคติดตามการไหลทุกช่วงเวลา (แม้ว่าเจ็ตจะมีความปั่นป่วนสูง อย่างไรก็ตามเวลาที่ไม่มีพบอนุภาคเจ็ตก็ยังมีพบอนุภาคของกระแสลมขวาง) ดังที่กล่าวไว้ในตอนต้นของบทนี้

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเจ็ตในกระแสลมขวางทั้ง 3 กรณี ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ จะพบว่ากรณีที่ฉีดอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางนั้นจะมีโครงสร้างด้านล่างเจ็ต (สำหรับกรณี JICF และ I135 คือโครงสร้างที่มีการไหลย้อนกลับ) ชัดเจนกว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต ซึ่งโครงสร้างด้านล่างของเจ็ตแสดงถึงโครงสร้าง Wake vortices ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันว่า โครงสร้าง Wake vortices เป็นโครงสร้างที่มีความสัมพันธ์กับกระแสลมขวางมากกว่าเจ็ต สอดคล้องกับผลของ Frick and Roshko, 1994 ที่กล่าวว่า Wake vortices เป็นโครงสร้างที่เกิดจากชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง แสดงว่า Wake vortices เป็นโครงสร้างที่มีความสัมพันธ์กับ กระแสลมขวาง

เมื่อพิจารณาเวกเตอร์บรรณาบ $y-z$ พบว่าสำหรับกรณี JICF และ I135 (รูปที่ 7.17 ก. และ ค. ตามลำดับ) พบว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตนั้นจะเห็นการเคลื่อนที่หมุนวนไม่ครบรอบซึ่งจะพบการเคลื่อนที่หมุนวนในบริเวณที่เป็นเจ็ต ในขณะที่กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางนั้นจะสังเกตเห็นการเคลื่อนที่หมุนวนครบรอบโดยการเคลื่อนที่หมุนวนส่วนหนึ่งจะอยู่ในบริเวณเจ็ตและอีกส่วนหนึ่งอยู่ในบริเวณกระแสลมขวาง ซึ่งแนวว่าการเคลื่อนที่หมุนวนบรรณาบนั้นเกิดขึ้นในส่วนทั้งที่เป็นเจ็ตและกระแสลมขวางหรือทั้งเจ็ตและกระแสลมขวางโดยการหมุนของเจ็ตจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดการหมุนในกระแสลมขวาง

ในขณะที่กรณี I15 (รูปที่ 7.17 ข.) พบว่าที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 นั้นสำหรับกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตจะพบการเคลื่อนที่หมุนวนไม่ครบรอบ และสำหรับกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางนั้นจะพบการเคลื่อนที่หมุนวนครบรอบโดยส่วนหนึ่งจะอยู่ในบริเวณเจ็ตและอีกส่วนหนึ่งอยู่ในบริเวณกระแสลมขวาง (คล้ายกับกรณี JICF และ I135) อย่างไรก็ตามกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง

นั้นพบว่าการเคลื่อนที่ที่หมุนวนจะอยู่ในบริเวณกระแสลมขวางน้อยลงเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream จนเมื่อถึงตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ พบว่าการเคลื่อนที่ที่หมุนวนอยู่ในบริเวณที่เป็นเจ็ตเท่านั้น ซึ่งสัมพันธ์กับที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตที่พบการเคลื่อนที่ที่หมุนวนครบรอบ บ่งชี้ว่ากรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 การเคลื่อนที่ที่หมุนวนบนระนาบเกิดขึ้นในส่วนทั้งที่เป็นเจ็ตและกระแสลมขวางหรือ แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ พบว่าบริเวณเจ็ตเท่านั้นที่เป็นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ที่หมุนวนบนระนาบ

- การเปรียบเทียบโครงสร้างจากโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1) ของกรณี JICF, I15 และ I135

รูปที่ 7.18 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1) ระหว่างกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตและกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางของกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตนั้นโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 โดยจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างกระจายตัวทั่วหน้าตัดเจ็ตซึ่งอาจจะสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญสูงที่สุดจะเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer ในขณะที่กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางพบว่าโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 0.75 โดยมีโครงสร้างที่บริเวณตรงกลางเจ็ตซึ่งอาจจะสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream ไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1$ จะพบโครงสร้างที่ด้านล่างของเจ็ตซึ่งสัมพันธ์กับ Wake vortices และจะพบโครงสร้างในลักษณะนี้ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ บ่งชี้ว่าที่บริเวณ Near field โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญต่อเจ็ตในกระแสลมขวางจะสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังบริเวณ Far field เจ็ตจะไปพัฒนาตัวโครงสร้าง Jet shear layer ในขณะที่กระแสลมขวางจะไปพัฒนาตัวโครงสร้าง Wake vortices

รูปที่ 7.19 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1)

ระหว่างกรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตและกรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางของกรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่าโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญของเจ็ตในกระแสลมขวางกรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต และกรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางนั้นมีโครงสร้างคล้ายกัน คือมีลักษณะโครงสร้างเรียงตัวในแนว Spanwise อย่างไรก็ตามกรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางนั้นที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ ถึง 1.5 นั้นจะพบโครงสร้างด้านล่างของเจ็ตซึ่งน่าจะเป็นโครงสร้างที่มีความสัมพันธ์กับ Wake vortices บ่งชี้ว่าที่บริเวณ Far field กระแสลมขวางจะไปพัฒนาตัวโครงสร้าง Wake vortice ของเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ $\pm 15^\circ$

รูปที่ 7.20 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1) ระหว่างกรณีที่ฉีดอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตและกรณีที่ฉีดอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางของกรณี I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่ากรณีที่ฉีดอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตนั้นโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 โดยจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างกระจายตัวทั่วหน้าตัดเจ็ตซึ่งอาจจะสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP ที่บริเวณ Near field และเป็นโครงสร้างของ CVP ที่บริเวณ Far field โดยจะไม่พบโครงสร้างของ Jet shear layer เหมือนกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ และสำหรับกรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางพบว่าโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 โดยมีโครงสร้างที่บริเวณตรงกลางเจ็ตซึ่งอาจจะสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP ที่บริเวณ Near field และเป็นโครงสร้างของ CVP ที่บริเวณ Far field โดย และไม่พบโครงสร้างที่มีความสัมพันธ์กับ Wake vortices ซึ่งเกิดขึ้นในกรณี JICF ที่บริเวณ $x/rd = 1$ ถึง 1.5 บ่งชี้ว่าบริเวณ Near field โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญต่อเจ็ตในกระแสลมขวางจะสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP และโครงสร้างของ CVP ที่บริเวณ Far field โดยจะมีบทบาทสำคัญมากกว่าทั้งโครงสร้าง Jet shear layer และ Wake vortices

- การเปรียบเทียบการกระจายตัวของพลังงานการไหลปั่นป่วน

รูปที่ 7.21 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของพลังงานการไหลปั่นป่วนระหว่างกรณี ที่ฉีดอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ต และกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและ กระแสลมขวางของกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่ากรณีการใส่ อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตนั้น ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนของแต่ละกรณี (JICF, I15 และ I135) จะแตกต่างกันชัดเจน โดยการกระจายตัวของกรณี JICF จะมีลักษณะ กว้าง – เตี้ย ในขณะที่กรณี I15 จะมีลักษณะ ผอม – สูง และกรณี I135 จะอยู่ระหว่างกลาง ในทางกลับกันกรณี การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางนั้นพบว่า การกระจายตัวของระดับ พลังงานจะใกล้เคียงกันสำหรับทุกกรณี โดยกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ จะมีลักษณะ ผอม- สูง กว่ากรณีอื่นๆ (รวมถึงกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหล เฉพาะในเจ็ต) และกรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ จะมีลักษณะ เตี้ย-กว้าง กว่ากรณีอื่นๆ (รวมถึง กรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต) ซึ่งน่าจะกระแส ลมขวางจะทำให้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญในแต่ละกรณี มีระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนเทียบ กับระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมใกล้เคียงกันสำหรับทุกกรณี

รูปที่ 7.22 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของพลังงานการไหลปั่นป่วนระหว่างกรณี ที่ฉีดอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ต และกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและ กระแสลมขวางของกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการ ไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางจะมีการกระจายตัวของระดับพลังงานที่มีลักษณะผอม-สูง มากกว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต ซึ่งน่าจะกระแสลมขวางมีผลต่อระดับ พลังงานการไหลปั่นป่วนของโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญโดยจะส่งผลให้มีระดับพลังงานเมื่อเทียบ กับพลังงานทั้งหมดสูงขึ้น (พลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ใน POD mode ต้นๆ ของกรณีการ ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางมีค่าเปอร์เซ็นต์สูงขึ้นกว่ากรณีการใส่ อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต)

รูปที่ 7.23 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของพลังงานการไหลปั่นป่วนระหว่างกรณี ที่ฉีดอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ต และกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและ กระแสลมขวางของกรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการ

ไหลเฉพาะในเจ็ต และกรณีที่มีการฉีดอนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง มีการกระจายตัวของระดับพลังงานใกล้เคียงกัน โดยกรณีที่ฉีดทั้งเจ็ตและกระแสลมขวางจะมีระดับพลังงานงานต่ำกว่าเล็กน้อย ซึ่งคาดว่ากระแสลมขวางจะส่งผลให้พลังงานการไหลปั่นป่วนของโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญต่อระดับพลังงานรวมทั้งหมด เพียงเล็กน้อย (พลังงานการไหลปั่นป่วนใน POD mode ต้นๆ ของกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางมีค่าเปอร์เซ็นต์ใกล้เคียงกับกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต)

รูปที่ 7.24 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของพลังงานการไหลปั่นป่วนระหว่างกรณีที่ฉีดอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ต และกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางของกรณี I135 ที่ตำแหน่ง $x/r_d = 0.5$ ถึง 1.5 พบว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางจะมีการกระจายตัวของระดับพลังงานที่มีลักษณะผอม-สูงมากกว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต อย่างไรก็ตามค่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนอันเป็นผลมาจากกระแสลมขวางนั้นมีสัดส่วนการเพิ่มขึ้นที่น้อยกว่ากรณี JICF ซึ่งคาดว่ากระแสลมขวางมีผลต่อระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนของโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญโดยจะส่งผลให้มีระดับพลังงานเมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดสูงขึ้น (พลังงานการไหลปั่นป่วน (Energy) ใน POD mode ต้นๆ ของกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางมีค่าเปอร์เซ็นต์สูงขึ้นกว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต)

- **การเปรียบเทียบระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวม**

รูปที่ 7.25 แสดงการเปรียบเทียบระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมในแต่ละปริมาณร้อยละของ POD Mode ใดๆ ของกรณี JICF, I15 และ I135 ระหว่างกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต และฉีดอนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง พบว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตนั้น ที่ปริมาณร้อยละของ POD mode ใดๆ ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมใกล้เคียงกันสำหรับทุกกรณี ในขณะที่กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางนั้นพบว่าที่ร้อยละของ POD mode ใดๆ ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมจะมีความแตกต่างในแต่ละกรณีมากกว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต แสดงว่ากระแสลมขวางส่งผลทำให้เกิดพลังงานการไหลปั่นป่วนไม่เท่ากันในแต่ละกรณี อย่างไรก็ตามต้อง

ตระหนักว่า พลังงานการไหลปั่นป่วนในส่วนของกระแสลมขวางนั้นไม่ได้เกิดจากตัวกระแสลมขวางเอง แต่เกิดจากการเหนี่ยวนำจากเจ็ต และเมื่อพิจารณาพลังงานรวมในแต่ละตำแหน่งไปตามระยะทางการไหลพบว่า สำหรับกรณี JICF ที่ปริมาณร้อยละของ POD mode เท่ากัน ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ จะมีพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสูงที่สุด และพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมจะลดลงไปตาม Downstream โดยกรณี I15 และ I135 จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณี JICF แสดงว่ากระแสลมขวางจะมีผลทำให้เกิดพลังงานการไหลปั่นป่วนที่บริเวณใกล้ปากทางออกเจ็ตและจะมีผลลดลงไปตาม Downstream หรืออีกนัยหนึ่งเจ็ตจะมีการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางให้มีความปั่นป่วนที่ใกล้ปากทางออกเจ็ตแต่การเหนี่ยวนำจะอ่อนแรงลงเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream

7.5 โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

จากรูปที่ 7.26 แสดงอัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Entrainment, E) ของกรณี JICF, I15 และ I135 ของกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ต พบว่า กรณี I135 จะมีอัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรสูงกว่ากรณี JICF โดยที่บริเวณ Near field พบว่าแม้ กรณี JICF และ I135 จะมีโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญคล้ายคลึงกันซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP แต่สำหรับกรณี I135 พบว่าโครงสร้างจะมีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างของกรณี JICF และกรณี I135 จะมีโครงสร้างที่เด่นชัดอยู่ที่บริเวณด้านบนของเจ็ต ในขณะที่กรณี JICF โครงสร้างที่เด่นชัดจะอยู่ที่ตรงกลางและด้านล่างของเจ็ต (รูปที่ 7.6 ก.) ซึ่งเห็นว่าโครงสร้างที่อยู่ด้านบนของเจ็ตของกรณี I135 น่าจะส่งผลให้เจ็ตในกระแสลมขวางที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 135^\circ$ มีอัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม ในขณะที่กรณี I15 จากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 0.75 กรณี I15 มีการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรไม่ค่อยแตกต่างจากกรณี JICF แม้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญจะแตกต่างกันอย่างชัดเจน (รูปที่ 7.6 ก.) แสดงว่า โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญที่แตกต่างกันระหว่างกรณี JICF และ I15 ที่ตำแหน่งนี้ไม่ส่งผลให้อัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรแตกต่างกัน ในขณะที่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ ถึง 1.5 กรณี I15 มีการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรสูงกว่ากรณี JICF สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากการที่โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญของกรณี I15 มีการ

ขยายตัวในแนว Spanwise มากกว่าโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญของกรณี JICF และกรณี I15 ยังมีโครงสร้างที่ด้านบนของเจ็ตเด่นชัดอีกด้วย (รูปที่ 7.6 ก.)



บทที่ 8

การตรวจสอบผลการทดลองด้วยกระบวนการย้อนกลับ

ในกระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย POD จะมีวิธีการตรวจสอบการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการย้อนกลับ (Reconstruction) ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการนี้กับ POD mode ก็จะได้ผลออกมาเป็นความเร็วผันผวน (Fluctuation) โดยจะมีกระบวนการคำนวณแสดงไว้ดังสมการที่ 3.6- 3.7

ในงานวิจัยนี้จะแสดงผลของกระบวนการย้อนกลับของกรณี JICF, I15 และ I135 ของภาพที่ 1,000 ที่ตำแหน่ง $x/r_d = 1$ โดยในการคำนวณกระบวนการย้อนกลับ จะใช้จำนวน POD mode เพื่อให้ได้ระดับพลังงานรวม (Accumulative energy) เท่ากับ 25%, 50%, 75% และ 100% ทั้งนี้จะเปรียบเทียบกับภาพต้นฉบับอีกด้วย

รูปที่ 8.1 แสดงการกระจายตัวของความเร็วผันผวนตามแนวแกน x และเวกเตอร์ความเร็วผันผวนบนระนาบ $y-z$ ของกรณี JICF, I15 และ I135 ของภาพที่ 1,000 ที่ตำแหน่ง $x/r_d = 1$ พร้อมทั้งภาพต้นฉบับ พบว่าการใช้จำนวน POD mode น้อย (ซึ่งส่งผลให้ระดับพลังงานรวมน้อย) โครงสร้างจะมีลักษณะเป็น Large-scale structure อย่างเห็นได้ชัดโดยจะมี Small-scale structure น้อยสะท้อนให้เห็นว่าพลังงานการไหลปั่นป่วนส่วนใหญ่มาจาก Large-scale structure และเมื่อใช้จำนวน POD mode มากขึ้น หรือ พลังงานรวมสูงขึ้น จะพบโครงสร้าง Small-scale structure มากขึ้นและมีความใกล้เคียงภาพต้นฉบับมากขึ้น และเมื่อใช้ทุก POD mode หรือ ระดับพลังงานรวมเท่ากับ 100% จะพบว่า การกระจายตัวของความเร็วผันผวนจะเหมือนกับภาพต้นฉบับ

นอกจากจะพิจารณาถึงโครงสร้างแล้วจะพิจารณาถึงระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy, TKE) โดยจะวิเคราะห์ถึงความคลาดเคลื่อนของพลังงานการไหลปั่นป่วนจากการทำกระบวนการย้อนกลับ ซึ่งจะหาความคลาดเคลื่อนดังสมการที่ 1

$$e = \frac{\sum_{ij} |TKE_{reconstruction} - TKE_{original}|}{\sum_{ij} TKE_{original}} \times 100\% \quad (8.1)$$

เมื่อ	e	คือ	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพลังงานการไหลปั่นป่วน
	$TKE_{reconstruction}$	คือ	พลังงานการไหลปั่นป่วนของกระบวนการย้อนกลับที่ระดับพลังงานรวมต่างๆกัน
	$TKE_{original}$	คือ	พลังงานการไหลปั่นป่วนของภาพต้นฉบับ (ภาพที่ 1,000)

รูปที่ 8.2 แสดงความคลาดเคลื่อนของพลังงานการไหลปั่นป่วนที่ระดับพลังงานรวมต่างๆ พบว่าสำหรับทุกกรณี (JICF, I15 และ I135) ที่ระดับพลังงานรวมน้อยๆ ความคลาดเคลื่อนจะสูง และความคลาดเคลื่อนจะลดลงเมื่อระดับพลังงานรวมสูงขึ้น และจะมีความคลาดเคลื่อนเข้าใกล้ศูนย์ที่ระดับพลังงานรวมเท่ากับ 100% ซึ่งแสดงว่าไม่มีความคลาดเคลื่อน และเมื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของแต่ละกรณี พบว่าที่ระดับพลังงานรวมไม่ถึง 10 % นั้น ความคลาดเคลื่อนของกรณี JICF, I15 และ I135 จะแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยกรณี I135 จะมีค่ามากที่สุด กรณี JICF จะมีค่ารองลงมา และ กรณี I15 จะมีค่าน้อยที่สุด และที่ระดับพลังงานรวมเท่ากับ 10 % เป็นต้นไป นั้น ความคลาดเคลื่อนของกรณี I15 และ I135 มีความใกล้เคียงกัน ส่วนกรณี JICF จะมีความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกับอีก 2 กรณี ที่ระดับพลังงานรวมตั้งแต่ 10% ถึง 30% และจะมีความคลาดเคลื่อนลดลงจากอีก 2 กรณี อย่างเห็นได้ชัดที่ระดับพลังงานรวม 30% ถึง 90 % และหลังจากนั้นความคลาดเคลื่อนจะกลับมาใกล้เคียงกับกรณี I15 และ I135

บทที่ 9

ผลของจำนวนภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย POD

ในงานวิจัยนี้ในแต่ละกรณีจะวิเคราะห์โครงสร้างด้วย POD จากทั้งหมด 4,000 ภาพ อย่างไรก็ตามได้เกิดข้อคำถามว่า เมื่อใช้จำนวนภาพแตกต่างกันจะมีผลต่อการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย POD อย่างไร หัวข้อนี้จึงได้หาผลของจำนวนภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย POD จากจำนวนภาพ 1,000, 2,000, 3,000 และ 4,000 ภาพ ของกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/r_d = 1$ โดยจะเปรียบเทียบผลของจำนวนภาพจากระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน และเพื่อที่จะได้เห็นระดับพลังงานอย่างชัดเจน จะใช้วิธีพล็อต แบบ log-log เพื่อที่จะเห็นระดับพลังงานใน Mode หนึ่งๆ อย่างชัดเจนเนื่องจากที่ Mode หนึ่งๆจะมีพลังงานใกล้เคียงกันมาก

รูปที่ 9.1 แสดงระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนในแต่ละ POD mode ของกรณี JICF สำหรับจำนวนภาพต่างๆกัน พบว่าในช่วง POD mode 1 – 10 จำนวนภาพจะส่งผลกระทบต่อระดับพลังงานเพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาที่ POD mode ทั่วๆไป จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนภาพเพิ่มขึ้นระดับพลังงานจะลดลงที่ POD mode เดียวกัน บ่งชี้ว่า การเพิ่มจำนวนภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย POD ระดับพลังงานใน POD mode ต้นๆยังมีลักษณะคล้ายเดิม แต่ที่ POD mode ทั่วๆไป การเพิ่มจำนวนภาพจะไปกระจายระดับพลังงานสู่ POD mode ทั่วๆไป ที่เพิ่มขึ้นมาส่งผลให้ระดับพลังงานที่ POD mode ทั่วๆไปมีค่าน้อยลง ซึ่งผลของจำนวนภาพต่อระดับพลังงานยังคงมีลักษณะเป็นเช่นเดิมสำหรับกรณี I15 และ I135 (รูปที่ 9.2 และ รูปที่ 9.3 ตามลำดับ)

รูปที่ 9.4 แสดงระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนในแต่ละเปอร์เซ็นต์ของ POD mode ของกรณี JICF สำหรับจำนวนภาพต่างๆกัน พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของระดับพลังงานจะคล้ายคลึงเดิม เมื่อจำนวนภาพเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจะพบว่า การกระจายตัวของระดับพลังงานจะเลื่อนไปด้านซ้ายอย่างเห็นได้ชัดเมื่อจำนวนภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 1 เนื่องจาก POD mode ต้นๆที่ POD mode เดียวกันจะมีระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนใกล้เคียงกัน ดังนั้นที่ตำแหน่ง POD mode ที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับจำนวนภาพทั้งหมดเท่ากัน จึงส่งผลให้มีค่าระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนไม่เท่ากัน (เช่น POD mode 1 ของจำนวนภาพ 1,000 ภาพ เป็นเปอร์เซ็นต์ของ

POD mode ที่ 0.1 แต่ POD mode 1 ของจำนวน 4,000 ภาพ จะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ POD mode ที่ 0.025) เนื่องด้วยการเลื่อนไปทางซ้ายของการกระจายตัวระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน ส่งผลให้ที่เปอร์เซ็นต์ของ POD mode เท่ากัน เมื่อเพิ่มจำนวนภาพมากขึ้น ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนจะลดลง ซึ่งผลของจำนวนภาพต่อระดับพลังงานยังคงมีลักษณะเป็นเช่นเดิมสำหรับกรณี I15 และ I135 (รูปที่ 9.5 และ รูปที่ 9.6 ตามลำดับ)



บทที่ 10

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของเจ็ดควบคุมต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุดด้วย POD โดยสิ่งทีงานวิจัยนี้แตกต่างจากงานวิจัยอื่นๆ คือส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้จะเป็นการมุ่งเน้นไปยังการศึกษาโครงสร้างของส่วนที่เป็นเจ็ดเท่านั้น

เจ็ดหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในปากทางออกเจ็ดเท่ากับ 22.5 มิลลิเมตร และมีรูปร่างความเร็วปากทางออกเจ็ดเป็นแบบการไหลปั่นป่วนภายในท่อที่พัฒนาตัวเต็มที (Fully developed turbulent pipe profile) ที่มีลักษณะรูปร่างความเร็วแบบ Power law ที่มีเลขยกกำลังเท่ากับ 8 ($n = 8$) เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1 มิลลิเมตร และเจ็ดควบคุมอยู่ต่ำกว่าปากทางออกเจ็ดหลัก 3 มิลลิเมตร ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาเจ็ดในกระแสลมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพเท่ากับ 3.9 ตัวเลขเรย์โนลส์ของเจ็ดเท่ากับ 23,000 และ ตัวเลขเรย์โนลส์ของกระแสลมขวางซึ่งคิดเทียบจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเจ็ดหลักมีค่าเท่ากับ 5,900 ที่อุณหภูมิและความดันห้องปกติ ส่วนการฉีดเจ็ดควบคุมจะฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งมุมเชิงมุมเท่ากับ $\pm 15^\circ$ และ $\pm 135^\circ$ ด้วยอัตราส่วนเชิงมวลการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลักเท่ากับ 2 % และจะวัดสนามความเร็วการไหลด้วย Stereoscopic particle image velocimetry (SPIV) ซึ่งต้องการอนุภาคติดตามการไหลในการวัดความเร็ว

ในงานวิจัยนี้ส่วนหนึ่งเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ดเท่านั้น (ไม่มีส่วนของกระแสลมขวาง) จะทำการวัดสนามความเร็วโดยการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ด ส่งผลให้แยกบริเวณที่เป็นเจ็ดออกจากกระแสลมขวางอย่างชัดเจน และอีกส่วนหนึ่งของงานวิจัยจะศึกษา

โครงสร้างส่วนที่เป็นทั้งเจ็ตและกระแสลมขวางโดยการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง

- **ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหล**

รูปที่ 5.1 แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบความเร็วการไหลกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต และกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง พบว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตนั้น บริเวณที่อย่างน้อยมีส่วนผสมของเจ็ตจะมีความเร็วการไหล ($\vec{V} \neq \vec{0}$) และความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วเจ็ตจะไม่เท่ากับศูนย์ ($0 < \phi_j \leq 1$) ส่วนบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางล้วนจะไม่พบความเร็วการไหล ($\vec{V} = \vec{0}$) และจะมีค่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตเท่ากับศูนย์ ($\phi_j = 0$) จากรูปที่ 7.1 พบว่าบริเวณตรงกลางของเจ็ตจะมีค่าความน่าจะเป็นสูงที่สุดและค่าความน่าจะเป็นจะลดลงเมื่อเข้าใกล้ขอบเจ็ต และจะเป็นศูนย์ที่กระแสลมขวาง ทำให้สามารถแยกบริเวณที่เป็นเจ็ตออกจากกระแสลมขวางได้อย่างชัดเจน ในทางกลับกันกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางจะมีค่าความน่าจะเป็นที่จะพบความเร็วการไหลเท่ากับหนึ่งในทางทฤษฎี และไม่สามารถแยกบริเวณเจ็ตออกจากกระแสลมขวางได้

- **ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างและพลังงานการไหลปั่นป่วนกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต**

ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางจากการวิเคราะห์โครงสร้างจากการกระจายตัวความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x (V_x / u_{cf}) และเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ ($\vec{V}_{yz} / u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z) / u_{cf}$) กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต (รูปที่ 7.2) พบว่ากรณี JICF จะมีการไหลย้อนกลับที่ด้านล่างของเจ็ตที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream โครงสร้างการไหลย้อนกลับจะหายไป เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ $\pm 15^\circ$ (I15) จะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปจากกรณี JICF อย่างชัดเจน โดยจะมีโครงสร้างขยายตัวออกด้านข้างมากขึ้น แต่ระยะเจาะทะลุและขนาดตามแนว Traverse จะลดลงและค่าความเร็วของบริเวณ Local peak จะมีค่าสูงกว่ากรณี JICF ในขณะที่เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ $\pm 135^\circ$ (I135) เจ็ตจะขยายขนาดทั้งในแนว Spanwise และ

Traverse และลอยตัวสูงจากพื้นมากกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณี JICF และลักษณะของ \bar{V}_{yz} / u_{cf} จะมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณี JICF และพบโครงสร้างการไหลย้อนกับเช่นเดียวกันกับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ (เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream โครงสร้างการไหลย้อนกลับจะหายไป)

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างจากโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ (การวิเคราะห์โครงสร้างด้วย POD) สำหรับกรณี JICF (รูปที่ 7.3) พบว่าโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุดและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุดที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1 หรือ บริเวณ Near field จะมีความสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ หรือบริเวณ Far field โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญจะเปลี่ยนแปลงไปโดยจะมีลักษณะเป็น Jet shear layer

จากการวิเคราะห์ POD mode ของกรณี I15 (รูปที่ 7.4) พบว่า โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุดและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุด จะยังคงมีโครงสร้างที่เป็นลักษณะเดิมเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream โดยโครงสร้างจะมีลักษณะกระจายตัวในแนว Spanwise ซึ่งให้เห็นว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$ ส่งผลให้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุดเกิดความเสถียร บ่งชี้ว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$ จะไปส่งเสริมโครงสร้างในแนว Spanwise และยับยั้งโครงสร้าง Jet shear layer

จากการวิเคราะห์ POD mode ของกรณี I135 (รูปที่ 7.5) พบว่าเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุดและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุด จะมีลักษณะคล้ายคลึงกันแสดงว่าเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งนี้จะทำให้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญเกิดความเสถียร สันนิษฐานว่าโครงสร้างนี้มีความสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP สำหรับบริเวณ Near field ($x/rd = 0.5$ ถึง 1) และ CVP สำหรับบริเวณ Far field ($x/rd = 1.5$) โดยที่โครงสร้าง Jet shear layer ที่ Near field จะมีบทบาทรองจากโครงสร้างการก่อตัวของ CVP แต่เมื่อพัฒนาตัวไปยัง Far field จะเป็นเพียงโครงสร้างที่ผสมกับโครงสร้าง CVP ซึ่งกลายเป็นโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญรองลงมาจากโครงสร้าง CVP ซึ่งแนะนำว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 135^\circ$ จะไปส่งเสริมโครงสร้างการก่อตัวของ CVP และโครงสร้าง CVP และทำให้เจ็ตมีขนาดใหญ่ขึ้น

เมื่อพิจารณาจากพลังงานการไหลปั่นป่วน ซึ่งในกรณีนี้เป็นพลังงานการไหลปั่นป่วนเฉพาะของส่วนที่เป็นเจ็ตพบว่า กรณี JICF จะมีการกระจายตัวแบบ กว้าง – เตี้ย แสดงว่าพลังงานการไหลปั่นป่วนกระจายตัวในโครงสร้างต่างๆ ใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการฉีดเจ็ตควบคุม การกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนจะเปลี่ยนไปโดยกรณี I15 จะทำให้การกระจายตัวพลังงานการไหลปั่นป่วนเปลี่ยนจาก กว้าง – เตี้ย เป็น ผอม – สูง และมีการกระจายตัวของระดับพลังงานมีความใกล้เคียงกันไปตาม Downstream (รูปที่ 7.7) บ่งชี้ว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$ จะไปส่งเสริมโครงสร้างพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุดให้โดดเด่นกว่าโครงสร้างที่มีบทบาทรองลงมา และส่งผลให้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมีเสถียรภาพแม้ว่าเจ็ตจะพัฒนาตัวไปตาม Downstream ในขณะที่กรณี I135 การกระจายตัวของระดับพลังงานจะอยู่ระหว่างกรณี JICF และ I15 และมีการกระจายตัวของระดับพลังงานมีความใกล้เคียงกันไปตาม Downstream (รูปที่ 7.7) บ่งชี้ว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 135^\circ$ จะส่งเสริมพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุดของโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด แต่ว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งนี้จะส่งเสริมพลังงานการไหลปั่นป่วนน้อยกว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$ อย่างไรก็ตามการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งนี้ก็ยังคงส่งผลให้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญสูงที่สุดมีความเสถียรภาพมากกว่ากรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม

เมื่อพิจารณาพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสม (รูปที่ 7.9) พบว่า สำหรับทุกกรณี ใช้ปริมาณ POD mode เพียง 10 % จะสามารถได้พลังงานการไหลปั่นป่วนรวมถึง 50 %

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร และ โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ พบว่าการที่กรณี I135 มีอัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรสูงกว่ากรณี JICF (รูปที่ 7.26) ที่บริเวณ Near field เป็นผลมาจากการที่โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญของกรณี I135 มีโครงสร้างเด่นชัดที่บริเวณด้านบนของเจ็ต ในขณะที่กรณี JICF โครงสร้างเด่นชัดจะอยู่ด้านล่างของเจ็ต แสดงว่าการก่อกวนของ CVP ที่มีโครงสร้างเด่นชัดที่ด้านบนของเจ็ต จะส่งผลให้อัตราการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้น ในขณะที่กรณี I15 จะมีอัตราการเหนี่ยวนำการผสมใกล้เคียงกับกรณี JICF แม้ว่าโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญจะแตกต่างกันอย่างชัดเจนที่ตำแหน่ง $x/r_d = 0.5$ ถึง 0.75

แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง $x/rd = 1$ ถึง 1.5 พบว่า โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญที่มีลักษณะขยายตัวไปยังด้านข้างเจ็ตจะทำให้มีอัตราการเหนี่ยวนำการผสมดีกว่ากรณี JICF

- ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างและพลังงานการไหลปั่นป่วนกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง

ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางจากการวิเคราะห์โครงสร้างจากการกระจายตัวความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x (V_x / u_{cf}) และเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ (\vec{V}_{yz} / u_{cf}) กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง (รูปที่ 7.10) พบว่ากรณี JICF จะมีการไหลย้อนกลับที่ด้านล่างของเจ็ตที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream โครงสร้างการไหลย้อนกลับจะหายไป เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ $\pm 15^\circ$ (I15) จะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปจากกรณี JICF อย่างชัดเจน โดยจะมีโครงสร้างขยายตัวออกด้านข้างมากขึ้น แต่ระยะเจาะทะลุและขนาดตามแนว Traverse จะลดลงและค่าความเร็วของบริเวณ Local peak จะมีค่าสูงกว่ากรณี JICF ในขณะที่เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ $\pm 135^\circ$ (I135) เจ็ตจะขยายขนาดทั้งในแนว Spanwise และ Transverse และลอยตัวสูงจากพื้นมากกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณี JICF และลักษณะของ \vec{V}_{yz} / u_{cf} จะมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณี JICF และพบโครงสร้างการไหลย้อนกลับเช่นเดียวกันกับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ โดยทั้งกรณี JICF และ I135 แม้ว่าบริเวณที่มีโครงสร้างการไหลย้อนกลับจะหายไปเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream อย่างไรก็ตามบริเวณดังกล่าวจะมีความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน x (V_x / u_{cf}) น้อยกว่าบริเวณรอบข้าง

เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจาก $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 สำหรับทั้ง 3 กรณี บริเวณ Local peak จะมีความเร็วลดลง และเมื่อพิจารณาเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ พบว่า จะเห็นลักษณะของ Vortex ที่มีขนาดขยายตัวขึ้นในทั้ง 3 กรณี

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างจากโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ (การวิเคราะห์โครงสร้างด้วย POD) สำหรับกรณี JICF (รูปที่ 7.11) พบว่า กรณี JICF โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุดและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุดจะพัฒนาตัวจาก โครงสร้างการก่อตัวของ CVP ใน

บริเวณ Near field เป็น โครงสร้าง Wake vortices ในบริเวณ Far field โดย Jet shear layer จะเป็นโครงสร้างที่มีบทบาทรองลงมาในทุกตำแหน่ง

จากการวิเคราะห์ POD mode ของกรณี I15 (รูปที่ 7.12) พบว่า โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุดและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุด จะยังคงมีโครงสร้างที่เป็นลักษณะเดิมที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 โดยโครงสร้างจะมีลักษณะกระจายตัวในแนว Spanwise และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยัง $x/rd = 1.5$ จะเห็นโครงสร้างด้านล่างซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความสัมพันธ์กับ Wake vortices แสดงว่ากระแสลมขวางในกรณี I15 ทำให้เกิดโครงสร้าง Wake vortices ที่ด้านล่างของเจ็ต

จากการวิเคราะห์ POD mode ของกรณี I135 (รูปที่ 7.13) พบว่าที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุดและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงที่สุดจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม Downstream คือเป็นโครงสร้างที่สันนิษฐานว่ามีความสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP ที่บริเวณ Near field และกลายเป็น CVP ที่บริเวณ Far field ซึ่งแสดงว่าเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งนี้จะทำให้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญเกิดความเสถียร ในขณะที่โครงสร้างที่มีบทบาทรองลงมา คือ Wake vortices และ Jet shear layer ตามลำดับ

จากที่กล่าวไว้ข้างต้นพบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$ จะไปส่งเสริมโครงสร้างในแนว Spanwise และยับยั้งโครงสร้าง Jet shear layer สอดคล้องกับงานของ Konsri *et al.*, 2007 ในขณะที่การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 135^\circ$ จะไปส่งเสริมโครงสร้างการก่อตัวของ CVP ที่ Near field และโครงสร้าง CVP ที่ Far field ให้มีบทบาทสำคัญมากกว่า Wake vortices ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญสำหรับกรณี JICF ที่บริเวณ Far field นอกจากนี้การฉีดเจ็ตควบคุมทั้ง 2 ตำแหน่งนั้นส่งผลให้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมีเสถียรภาพอย่างน้อยไปตามแนวการไหล

เมื่อพิจารณาจาพลังงานการไหลปั่นป่วนพบว่าทุกกรณี (รูปที่ 7.15) นั้นจะมีการกระจายตัวของระดับพลังงานใกล้เคียง บ่งชี้ว่าการฉีดเจ็ตควบคุมมีผลน้อยต่อระดับพลังงานการไหล

ปั่นป่วนที่มาจากทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสมทุกกรณีจะมีระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสม (รูปที่ 7.16) ใกล้เคียงกันโดยจะพลังงานรวมสะสมเท่ากับ 50 % เมื่อใช้ปริมาณ Modes ไม่ถึง 10 % ของจำนวน Modes ทั้งหมด ยกเว้นกรณี กรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ พบว่าระดับพลังงานรวมจะน้อยกว่ากรณีอื่นๆ ทั้งหมดอย่างเห็นได้ชัด โดยเพื่อที่จะให้ได้ระดับพลังงานรวมมีค่าเท่ากับ 50 % นั้น ต้องใช้ปริมาณ Mode ถึง 15 % แสดงว่าพลังงานการไหลปั่นป่วนของกรณีนี้จะไปกระจายตัวอยู่ที่ POD mode ท้ายๆ

- การเปรียบเทียบโครงสร้างและระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนของเจ็ตในกระแสลมขวางระหว่างกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต กับ จิตอนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง

พบว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต จะพบบริเวณที่มีความเร็วการไหลไม่เท่ากับศูนย์ ($\bar{V} \neq 0$) คือบริเวณที่อย่างน้อยมีส่วนผสมของเจ็ตของไหล ในขณะที่บริเวณที่มีความเร็วการไหลเท่ากับศูนย์ ($\bar{V} = 0$) คือบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางล้วนในทางกลับกันกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง นั้นจะพบความเร็วการไหลไม่เท่ากับศูนย์ ($\bar{V} \neq 0$) ทั้งบริเวณที่เป็นเจ็ตและกระแสลมขวาง (รูปที่ 7.18) นอกจากนี้ยังพบว่ากรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต บริเวณที่มีความเร็วเฉลี่ยสูงสุด (Local peak) จะมีค่าความเร็วน้อยกว่าความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง เนื่องจากกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตนั้น จะมีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตน้อยกว่าหนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากที่บางช่วงเวลาอาจจะไม่พบความเร็วเจ็ต ส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดตามเวลานั้น มีค่าน้อยกว่าความเร็วเฉลี่ยสูงสุดของกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง ซึ่งพบความเร็วการไหลในทุกช่วงเวลา

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาโครงสร้างเจ็ตในกระแสลมขวางทั้ง 3 กรณี (JICF, I15 และ I135) เพิ่มเติมพบว่า กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต จะไม่พบโครงสร้างด้านล่างหรือ Wake vortices ในทางกลับกันกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง จะพบโครงสร้าง Wake vortices ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Fric and Roshko, 1994 ที่กล่าวว่า

Wake vortices เป็นโครงสร้างที่เกิดจากชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง แสดงว่า Wake vortices เป็นโครงสร้างที่มีความสัมพันธ์กับกระแสลมขวางและอยู่ในบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางล้วน

เมื่อพิจารณาเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ พบว่าสำหรับกรณี JICF และ I135 (รูปที่ 7.17 ก. และ ค. ตามลำดับ) พบว่ากรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตนั้นจะเห็นการเคลื่อนที่หมุนวนไม่ครบรอบซึ่งจะพบการเคลื่อนที่หมุนวนในบริเวณที่เป็นเจ็ต ในขณะที่กรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางนั้นจะสังเกตเห็นการเคลื่อนที่หมุนวนครบรอบโดยการเคลื่อนที่หมุนวนส่วนหนึ่งจะอยู่ในบริเวณเจ็ตและอีกส่วนหนึ่งอยู่ในบริเวณกระแสลมขวาง ซึ่งแนวว่าการเคลื่อนที่หมุนวนบนระนาบนั้นเกิดขึ้นในส่วนทั้งที่เป็นเจ็ตและกระแสลมขวางหรือทั้งเจ็ตและกระแสลมขวางโดยการหมุนของเจ็ตจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดการหมุนในกระแสลมขวางและอาจนำมาสู่กลไกการเหนี่ยวนำการผสม

เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบวิเคราะห์โครงสร้างจากโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ (การวิเคราะห์โครงสร้างด้วย POD) สำหรับกรณี JICF (รูปที่ 7.18) พบว่า ที่บริเวณ Near field โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญต่อเจ็ตในกระแสลมขวางกรณีการไหลเฉพาะในเจ็ตและกรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางจะคล้ายคลึงกัน โดยจะสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังบริเวณ Far field เจ็ตจะไปพัฒนาตัวโครงสร้าง Jet shear layer ในขณะที่กระแสลมขวางจะไปพัฒนาตัวโครงสร้าง Wake vortices แสดงว่าการก่อตัวของ CVP จะเป็นโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญในบริเวณ Near field แต่ที่บริเวณ Far field เจ็ตจะทำให้เกิดโครงสร้าง Jet shear layer ในขณะที่ กระแสลมขวาง จะทำให้เกิดโครงสร้าง Wake vortices ซึ่งจะเห็นได้ว่าโครงสร้าง Jet shear layer จะไม่มีความสัมพันธ์กับโครงสร้าง Wake vortices สอดคล้องกับงานของ Meyer *et al.*, 2007

เมื่อพิจารณากรณี I15 (รูปที่ 7.19) พบว่าโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญต่อเจ็ตในกระแสลมขวางกรณีการไหลอนุภาคการไหลเฉพาะในเจ็ตโครงสร้างเรียงตัวในแนว Spanwise ในขณะที่กรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญยังคงมีการเรียงตัวในแนว Spanwise นอกจากนี้ยังพบโครงสร้างด้านล่างเจ็ตหรือ Wake vortices (ไม่พบในกรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต) ซึ่งมีการพัฒนาไปตาม Downstream แสดงว่า

กระแสลมขวางจะทำให้เกิดโครงสร้าง Wake vortices และโครงสร้างนี้จะอยู่ในบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางล้วน

เมื่อพิจารณากรณี I135 (รูปที่ 7.20) พบว่า ที่บริเวณ Near field โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญต่อเจ็ตในกระแสลมขวางกรณีการไหลอนุภาคการไหลเฉพาะในเจ็ตและกรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางจะคล้ายคลึงกัน โดยจะสัมพันธ์กับการก่อตัวของ CVP และที่ Far field แม้ว่าเจ็ตจะไปพัฒนาตัว Jet shear layer ให้มีบทบาทสำคัญมากขึ้นแต่ก็ยังมีบทบาทสำคัญน้อยกว่าโครงสร้าง CVP ในขณะที่กรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง กระแสลมขวางจะพัฒนาตัว Wake vortices ให้มีบทบาทสำคัญมากขึ้นแต่ก็ยังมีบทบาทสำคัญน้อยกว่าโครงสร้าง CVP แสดงว่าการจัดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 135^\circ$ ส่งผลให้โครงสร้าง CVP มีบทบาทสำคัญที่บริเวณ Far field มากกว่ากรณีที่ไม่มีการจัดเจ็ตควบคุม

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (รูปภาพที่ 7.21) พบว่า กรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตนั้น การกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนจะแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างกรณี JICF, I15 และ I135 โดยกรณี JICF จะมีลักษณะ กว้าง – เตี้ย ส่วนกรณี I15 จะมีลักษณะ ผอม – สูง และกรณี I135 จะอยู่ระหว่าง 2 กรณีนี้ แต่กรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง การกระจายตัวของระดับพลังงานจะใกล้เคียงกันทั้ง 3 กรณี ซึ่งระบุว่ากระแสลมขวางจะทำให้โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญในแต่ละกรณีมีระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนเทียบกับระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวม (Energy (%)) ใกล้เคียงกันสำหรับทุกกรณี และเมื่อพิจารณาพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสม (รูปที่ 7.25) พบว่า กรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต ที่ปริมาณของ % Mode เท่ากัน จะมีระดับพลังงานรวมสะสมใกล้เคียงกันในแต่ละกรณี (JICF, I15 และ I135) มากกว่ากรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง แสดงว่ากระแสลมขวางส่งผลทำให้เกิดพลังงานการไหลปั่นป่วนไม่เท่ากันในแต่ละกรณี (เจ็ตเป็นตัวเหนี่ยวนำกระแสลมขวางให้เกิดการไหลปั่นป่วน) และเมื่อพิจารณาพลังงานรวมในแต่ละตำแหน่งไปตามระยะทางการไหลพบว่า สำหรับกรณี JICF ที่ปริมาณร้อยละของ POD mode เท่ากัน ที่ตำแหน่ง $x/r_d = 0.5$ จะมีพลังงานการไหลปั่นป่วนรวม

สูงที่สุด และพลังงานการไหลบ้นปวนรวมจะลดลงไปตาม Downstream โดยกรณี I15 และ I135 จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณี JICF แสดงว่ากระแสลมขวางจะมีผลทำให้เกิดพลังงานการไหลบ้นปวนที่บริเวณใกล้ปากทางออกเจ็ตและจะมีผลลดลงไปตาม Downstream หรืออีกนัยหนึ่งเจ็ตจะมีการเหนี่ยวนำกระแสขวางให้มีการไหลบ้นปวนที่ใกล้ปากทางออกเจ็ตแต่การเหนี่ยวนำจะอ่อนแรงลงเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามDownstream



ประมวลตาราง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2.1 สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาคูณลักษณะของเจ็ทในกระแสผสมขวาง

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลการศึกษา
1	Pratte and Baines (1967)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ทที่นิยมมาจากความเร็ว ปากทางออกเจ็ทอยู่สูงจากพื้น 8 นิ้ว ซึ่งทำให้ไม่มีผลของ Boundary layer 	$r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 5, 15, 25$ <p style="text-align: center;">และ 35</p>	<ul style="list-style-type: none"> เส้นทางเดินความเร็วของเจ็ทสามารถรวมเป็นเส้นเดียวกันได้เมื่อสเกลด้วย rd แสดงความสัมพันธ์ของเส้นทางเดินของเจ็ทได้ตาม $y/rd = A(x/rd)^m$ ใน Vortex zone อัตราการกระจายจะถูกควบคุมโดย Turbulent mixing และการพาของ Vortex
2	Kamotoani and Greber (1972)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ทที่นิยมมาจากความเร็วและอุณหภูมิ ใช้ Hot-wire ในกาารวัดความเร็ว และใช้ Thermocouple ในการวัดอุณหภูมิ 	<ul style="list-style-type: none"> $r_m = \sqrt{\rho_j V_j^2 / \rho_{cf} V_{cf}^2} = 15.3$ และ 59.3 $\Delta T (T_j - T_{cf}) = 0, 75$ และ $320^\circ F$ $Re_{cf} = 2,800 - 4,200$ 	<ul style="list-style-type: none"> อัตราส่วนโมเมนต์ (r_m) เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ทที่นิยมจากความเร็วและอุณหภูมิ ที่อัตราส่วนโมเมนต์เดียวกัน เส้นทางเดินของเจ็ทที่นิยมจากอุณหภูมิจะอยู่ต่ำกว่าเส้นทางเดินของเจ็ทที่นิยมจากความเร็ว อัตราส่วนความหนาแน่น ($\frac{\rho_j}{\rho_{cf}}$) ไม่มีผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ทที่นิยมจากความเร็ว แต่จะส่งผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ทที่นิยมจากอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอัตราส่วนโมเมนต์

3	Fric and Roshko (1994)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาโครงสร้าง Vortical structure ของเจ็ตในกระแสผสมขวาง ในการศึกษาใช้วิธี Flow visualize ด้วยเทคนิค smoke-wire และวัดความเร็วด้วย Hot-wire 	<ul style="list-style-type: none"> $Re_j = 2 - 10$ $Re_j = \frac{u_j d}{\nu}$ = 7,600 – 11,400 $Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu}$ = 3,800 -11,400 	<ul style="list-style-type: none"> จำแนกโครงสร้างที่สำคัญของเจ็ตในกระแสผสมขวางออกเป็น 4 โครงสร้าง <ol style="list-style-type: none"> Horseshoe vortices Jet shear layer vortices Wake vortices Counter-rotating vortex pair (CVP) Wake vortices ไม่ได้เกิดจากเจ็ต แต่เกิดจากอากาศที่ทำให้เกิด Adverse pressure gradient ที่พื้นด้านล่างของเจ็ตและเกิด Separation events ภายในชั้นขอบเขตของผนัง ค่าความถี่ Strouhal ที่เกิดขึ้นที่ Wake นั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเร็ว (U_j) และยังคงคล้องกับความถี่ที่เกิดจากบริเวณที่เกิด Separation events
4	Kelso et. al., (1996)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure จากปฏิสัมพันธ์ระหว่าง Vortex และโครงสร้างของเจ็ตในกระแสผสมขวาง ทำการทดลองและศึกษาในอุโมงค์น้ำอุโมงค์ลม ใช้เทคนิคการฉีดสี (Dye) สำหรับอุโมงค์น้ำ และใช้ Smoke – wire flow visualize สำหรับอุโมงค์ลม โดยใช้ Flying –hotwire ในการวัดความเร็ว 	<ul style="list-style-type: none"> $Re_j = 2 - 10$ $Re_{cf} = 440 - 6,200$ 	<ul style="list-style-type: none"> การแยกตัวของอากาศ (Separation) ภายในท่อเป็นจุดกำเนิดการก่อตัวของ CVP นอกจากนั้นการโค้งตัวของ Vortex ring อันเป็นผลมาจากกระแสผสมขวาง และ Vorticity ที่เกิดขึ้นที่บริเวณผนังของพื้นต่างเป็นองค์ประกอบที่ช่วยก่อให้เกิด CVP สำหรับกรณีที่ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าสูงมาก ๆ ลักษณะของ Wake จะเปลี่ยนไปใน 3 ลักษณะ คือ Von Karman vortex street, Mushroom-like upright vortex และ Alternative mushroom-like upright vortex

5	Smith and Mungal (1998)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาเส้นทางการเดินทางของเจ็ตโดยศึกษาจากผลของการสเกลตัวยวี่ที่แตกต่างกัน ศึกษาการผสมของเจ็ตในกระแสแสดงขวางโดยศึกษาจากปริมาณ Scalar concentration ใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) 	<ul style="list-style-type: none"> $r = \sqrt{\frac{\rho_j u_j^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2}}$ = 5 – 25 $Re_j = 8,400 - 41,500$ 	<ul style="list-style-type: none"> พบว่าการศึกษาเส้นทางการเดินทางด้วย rd จะทำให้ลักษณะเส้นทางการเดินทางของเจ็ตมีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกัน (Collapse) ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาสเกลด้วย d หรือ r^2d ในบริเวณ Near field ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการก่อตัวของ CVP การลดลงของ Scalar concentration บนระบบสมมาตร ลดลงด้วยอัตรา $S^{-1/3}$ ซึ่งมากกว่าในการของ free jet ซึ่งลดลงด้วยอัตรา S^{-1} ส่วนในบริเวณ Far field ซึ่งเป็นบริเวณที่ CVP พัฒนาตัวสมบูรณ์ สัญญาณลดลงด้วยอัตรา $S^{-2/3}$ ซึ่งน้อยกว่ากรณีของ Free jet การก่อตัวของ CVP ที่บริเวณ Near field เป็นกลไกหลักที่ทำให้ เจ็ตในกระแสผสมขวางดีกว่า Free jet
6	Yuan and Street (1998)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาเส้นทางการเดินทางของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) ของเจ็ตในกระแสผสมขวาง ศึกษาโดยใช้ Large eddy simulation (LES) โดยใช้เทคนิคการศึกษาจากปริมาณ Scalar concentration 	<ul style="list-style-type: none"> $r_v = 2$ และ 3.3 $Re_{cf} = 1,050 - 2,100$ 	<ul style="list-style-type: none"> เส้นทางการเดินทางของเจ็ตบนระนาบสมมาตร ที่บริเวณห่างจากปากทางออกของเจ็ตหรือ Far field ที่ r_v (Velocity ratio) ต่างกัน ลักษณะของเส้นทางการเดินทางจะมีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันเมื่อพล็อตด้วย log-log จึงเรียกบริเวณนี้ว่า Power law ปริมาณที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นทางการเดินทางของเจ็ต แบ่งออกเป็น 2 บริเวณคือ <ol style="list-style-type: none"> บริเวณ Upstream พบว่า Pressure drag และ Turbulence intensity ส่งผลให้เกิดการโค้งตัวของเส้นทางการเดินทางของเจ็ต บริเวณ Power law การเหนี่ยวนำการผสมจะส่งผลต่อเส้นทางการเดินทางของเจ็ต

7	Yuan <i>et al.</i> (1999)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาโครงสร้าง Vortical structure บริเวณ Near field ศึกษาโดยใช้ Large eddy simulation (LES) โดยศึกษาปริมาณเฉลี่ย และ Fluctuation 	<ul style="list-style-type: none"> $r_v = 2$ และ 3.3 $Re_{cf} = 1,050 - 2,100$ 	<ul style="list-style-type: none"> พบโครงสร้าง Vortical structure บริเวณ Near field อันได้แก่ Hanging vortices, Spanwise rollers และ Vortical streaks CVP ที่เกิดจาก Hanging vortices นั้นมีการพัฒนาตัวมาจาก Skewed mixing layer ที่ขอบเขตที่ได้รับผลของ Adverse pressure gradient ทำให้เกิดการ Breakdown กลายเป็นการก่อตัวของ CVP และพัฒนาตัวต่อไปเป็น CVP ตามเส้นทางเดินของเจ็ต
8	Lim <i>et al.</i> (2001)	<ul style="list-style-type: none"> ทดลองศึกษา Large-scale structure ของเจ็ตในกระแสผสมขวาง ศึกษาจาก Flow Visualization โดยใช้เทคนิคการฉีดสี dye/alcohol mixture และ Fluorescein disodium dye 	<ul style="list-style-type: none"> $r_v = 4.6$ $Re = 1,600$ 	<ul style="list-style-type: none"> Large-scale Structure ของเจ็ตในกระแสผสมขวางในบริเวณ Shear layer vortices มีลักษณะเป็น Loops vortex ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างของ Cylindrical vortex sheet ชี้แนะว่า CVP เกิดจากการพัฒนาตัวของ Vortex loop แทนที่จะเป็น Vortex ring เช่นเดียวกับ Free jet
9	Cortelezzi and Karagozian (2001)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาการก่อตัว และการพัฒนาตัวของ Vortical structure มุ่งเน้นศึกษา CVP โดยใช้ 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"> พบว่า Vortices ที่เกิดภายในหนึ่งท่อเจ็ต พัฒนาตัวเป็นวงแหวนใกล้ปากทงออกเจ็ตและเอียงตัวไปตามทิศทางของกระแสผสมขวาง กลายเป็น Vortex ring เกิดขึ้นที่ Near field และพัฒนาตัวไปเป็น CVP ที่สมบูรณ์ในบริเวณ Far field การเหนี่ยวนำกระแสผสมขวางเข้ามาผสมในบริเวณ Far field จะเพิ่มขึ้นตาม Downstream เนื่องจาก CVP จะช่วยเพิ่มความสมารถในการเหนี่ยวนำกระแสผสมขวางเข้ามาผสมในเจ็ต

10	Sivadas <i>et al.</i> (1999)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของรูปร่างปากทางออกเจ็ตที่มีผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ตและการขยายตัวของเจ็ต ใช้เทคนิค Laser light sheet visualization และ Image processing 	<ul style="list-style-type: none"> $r_j = 3.9, 5.9$ และ 7.8 	<ul style="list-style-type: none"> ปากทางออกเจ็ตที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมทำให้การผสมดีกว่าปากทางออกเจ็ตรูปร่างกลมโดยเฉพาะเมื่อเพิ่มอัตราส่วนรูปร่างโดยเพิ่มขนาดด้านที่สัมผัสกับกระแสลมขวาง ไม่พบโครงสร้างของ horseshoe vortex ในกรณีที่ปากทางออกเจ็ตเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งต่างจากกรณีที่ปากทางออกเจ็ตเป็นรูปวงกลม
11	Haven and Kurosaka (1997)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของรูปร่างปากทางออกของเจ็ตและ Aspect ratio (AR) ต่อการพัฒนาตัวของ CVP ศึกษาปริมาณความเร็วโดยใช้เทคนิค Particle image velocimetry (PIV) และความเข้มข้นสเกลาของเจ็ตโดยใช้เทคนิค Laser-induced fluorescence (LIF) 	<ul style="list-style-type: none"> รูปร่างปากทางออกเจ็ตแบบวงกลม วังรี และ สี่เหลี่ยม $AR = 0.37 - 2.7$ $VR = 0.4 - 2$ 	<ul style="list-style-type: none"> ผลของรูปร่างปากทางออกเจ็ตที่ไม่ใช่วงกลมพบว่า จะเกิด CVP สองคู่ โดยแบ่งเป็น คู่ล่าง (Lower deck) และคู่บน (Upper deck) กรณีที่เป็น CVP คู่ล่างนั้นจะมีลักษณะโครงสร้างแบบคงตัว (Steady structure) ในทางกลไกกับ CVP คู่บน จะมีลักษณะโครงสร้างแบบไม่คงตัว (Unsteady structure) สามารถแบ่งลักษณะ CVP คู่บนตามประเภทการหมุนออกเป็น <ol style="list-style-type: none"> มีทิศทางการหมุนตาม CVP คู่บน เรียกว่า Kidney vortices มีทิศทางการหมุนสวน CVP คู่บน เรียกว่า Anti-Kidney vortices Kidney vortices จะพบที่ค่า AR ที่มีค่าต่ำ ในขณะที่ Anti-kidney vortices จะพบที่ค่า AR ที่มีค่าสูง

12	New et al. (2003)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ปากทางออกเจ็ตเป็นรูปวงรีโดยใช้เทคนิค LIF และศึกษาจากอุโมงค์น้ำ ศึกษาผลของ AR ต่อการพัฒนาตัวโครงสร้าง 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 จะมีส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงในบริเวณ Near field เท่านั้น ที่ AR ค่าต่ำๆ จะเกิด CVP สองคู่ที่พัฒนาตัวมาจากด้านข้างของลำเจ็ต โดย CVP คู่ที่มีกำลังน้อยกว่าจะถูกเขย่งเข้าไประวมกับ CVP คู่ที่มีกำลังมากกว่า ที่ AR ค่าสูงๆ จะเกิดขึ้นเพียงคู่เดียว แต่จะมีโครงสร้าง Shear layer พัฒนาตัวไปตามด้าน Windward ของเจ็ตการเป็นโครงสร้างแบบ Small-scale เรียกว่า Windward vortex pair (WVP) ซึ่งมีคู่เดียวหรือหลายคู่ขึ้นอยู่กับค่า AR และ VR พบว่าแม้ AR ของปากทางออกเจ็ตจะมีผลต่อโครงสร้างในบริเวณ Near field แต่ปัจจัยที่มีผลต่อกลไกหลักของการพัฒนาตัวโครงสร้างแบบ Large-scale คือปากทางออกเจ็ตที่เป็นรูปวงรี
13	Sau et al. (2004)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ที่บริเวณ Near field ของเจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยใช้ 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"> เสนอแนะว่า CVP เกิดจาก Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวมาจากด้านข้างของเจ็ตที่ปากทางออก โดย CVP ไม่ได้เกิดขึ้นจาก Vortex ring พบว่าโครงสร้าง Wake vortices ที่บริเวณ Downstream Horseshoe vortices ก่อตัวขึ้นในบริเวณ Upstream ซึ่งเกิดจากปฏิสัมพันธ์ของ Shear layer ที่พื้นและเจ็ต

<p>14</p>	<p>Muppidi and Mahesh (2005a)</p>	<p>แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน</p> <ul style="list-style-type: none"> ศึกษาการไหลแบบปั่นป่วนของเจ็ตในกระแสมวลขวางที่ไหลแบบราบเรียบด้วยวิธี DNS ใช้ Two dimension ในการแสดงการพัฒนาคิวภายในหน้าตัดเจ็ตและการก่อตัวของ CVP โดยกำหนดให้สภาวะเริ่มต้นให้มีความเร่งคงที่ (Pressure driven) และสภาวะสุดท้ายจะถูกกำหนดให้มีความเร็วคงที่ (Momentum driven) และใช้ Pressure เป็นพื้นฐานในการก่อตัวของ CVP 	<p>การศึกษาส่วนที่ 1</p> <ul style="list-style-type: none"> $r_{eff} = \left(\frac{\rho_j}{\rho_{cf}} r^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 5.7$ Re = 5,000 $\delta_{80\%} = 1.32d$ ที่ปากทางออกเจ็ต Vorticity magnitude = $(\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2)$ $\frac{y}{r_{eff} d} = 0.1, 0.5$ และ 1.0 <p>การศึกษาส่วนที่ 2</p> <ul style="list-style-type: none"> $v = v_j = 0$ $u, w = 0$ Re = 1,000, 10,000 และ 100 	<p>การศึกษาส่วนที่ 1</p> <ul style="list-style-type: none"> เจ็ตมีความไม่สมมาตรตาม Center streamline และ Vorticity ที่มีขนาดมากจะอยู่ใกล้กับผนังของท่อและบริเวณลำเจ็ต พบว่าที่บริเวณ Upstream ของเจ็ตจะเห็น Vorticity ของกระแสมวลขวางค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีชั้นขอบเขตแบบราบเรียบ ที่บริเวณ Downstream ($0 \leq x/d < 6$) จะเป็นบริเวณที่ปรากฏค่า Vorticity ที่มีค่าต่ำ <p>การศึกษาส่วนที่ 2</p> <ul style="list-style-type: none"> ในช่วงต้นเส้นทางการเดินของเจ็ตจะเป็นเส้นโค้งบ่งชี้ว่าเจ็ตเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ในขณะที่ช่วงหลังเส้นทางการเดินของเจ็ตเป็นเส้นตรงบ่งชี้ว่า เจ็ตเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ CVP นั้นเกิดจาก Vorticity ใน Jet shear layer และชี้แนะว่า ท่อเจ็ตไม่มีความจำเป็นต่อการก่อตัวของ CVP
-----------	-----------------------------------	--	---	---

15	Muppidi and Mahesh (2005b)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของรูปร่างความเร็วเริ่มต้นที่ปากทางออกเจ็ตและความหนาชั้นขอบเขตของกระแสความยาวต่อเส้นทางเดินของเจ็ต ศึกษาด้วยวิธี DNS 	<ul style="list-style-type: none"> $r^* = 1.52$ และ 5.7 รูปร่างความเร็วเริ่มต้นที่ปากทางออกเจ็ตเป็น Parabolic และ Mean Turbulent $\delta_{80\%} = 0.44d$, $1.32d$ และ $6.4d$ 	<ul style="list-style-type: none"> ได้เสนอพารามิเตอร์ตัวใหม่ (h) ในการสเกลเส้นทางเดินของเจ็ต โดยนำผลของความหนาชั้นขอบเขตของกระแสความยาวและรูปร่างความเร็วเริ่มต้นที่ปากทางออกมาเป็นปัจจัยในการพิจารณา พบว่าเส้นทางเดินเจ็ตที่สเกลด้วย h มีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันมากขึ้นเมื่อสเกลด้วย rd หรือ r^*d
16	Chongsripinyo et al. (2008)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษา Mixing structure ในบริเวณ Near field ศึกษาปริมาณการผสม (Mixing) ของเจ็ตโดยอาศัยหลักการ Product formation ใช้ผลรวมจากการใช้เทคนิค 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"> พบโครงสร้างใน Mixing structure ในบริเวณ Near field อยู่ 3 ลักษณะประกอบไปด้วย <ol style="list-style-type: none"> Cascading azimuthal Kelvin – Helmholtz (K-H) Leeward vortical roll ups (LVR) Windward vortical roll ups (WVR) ที่บริเวณช่วงต้นของ Near field พบว่าโครงสร้างการผสมจะมีลักษณะแบบ Concentric cylinder ซึ่งเป็นผลมาจาก Cascading azimuthal Kelvin – Helmholtz (K-H) โดยเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยัง Downstream จะพบโครงสร้างการผสมที่มีลักษณะแบบ Cascading ellipsoidal ซึ่งเป็นผลมาจาก LVR และ WVR

17	Watakulsin <i>et al.</i> (2010)	<ul style="list-style-type: none"> • ศึกษาผลอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (F^*) ต่อ Mixing structure ของเจ็ตในกระแสผสมขวาง • ศึกษาปริมาณการผสม (Mixing) ของเจ็ตในกระแสผสมขวางโดยอาศัยหลักการ Product formation • ใช้ผลรวมจากการใช้เทคนิค Combination of smoke fluid condensation, Mie scattering และ Laser-sheet visualization techniques 	<ul style="list-style-type: none"> • $F^* = 2, 4$ และ 7 • $Re_j = 21,000$ • $Re_{cf} = 4,000, 7,000$ และ $14,000$ 	<ul style="list-style-type: none"> • เมื่อพิจารณาจาก Instantaneous mean ในกรณี $F^* = 2$ พบว่า โครงสร้างของเจ็ตรอบๆ Mixing core จะเชื่อมต่อกันด้วย Leewardly-connected structure • ในขณะที่ $F^* = 7$ พบว่า โครงสร้างของเจ็ตรอบๆ Mixing core จะเชื่อมต่อกันด้วย Windwardly-connected structure • สำหรับกรณี $F^* = 4$ พบว่าในช่วงต้นจะมีการเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างในลักษณะเดียวกับกรณี $F^* = 7$ อย่างไรก็ตามเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปพบว่า การเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างจะมีลักษณะเดียวกับกรณี $F^* = 2$ • ที่ F^* ต่ำๆ การพัฒนาตัวของ Lateral skewed mixing layers จะมีอิทธิพล ต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสผสมขวาง ในขณะที่ F^* สูงๆ Windward jet shear layer จะมีอิทธิพลต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสผสมขวาง
----	---------------------------------	---	---	--

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการติด Tab ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสผสมขวาง

1	Zaman and Foss (1967)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของการติด Vortex generators แบบ Tab รูปสามเหลี่ยมที่มีฐานติดอยู่กับขอบปากทางออกเจ็ตรูปวงกลม โดยปากทางออกเจ็ตอยู่ในระดับเดียวกับ Test section ทดลองและศึกษาปริมาณความเร็ว และ Vorticity ที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับแกนที่วัดทิศทางตามกระแสผสมขวาง (Streamwise) วัดความเร็วโดยใช้ Hot-wire anemometer 	<ul style="list-style-type: none"> $J = \left(\frac{\rho_j u_j}{\rho_{cf} u_{cf}} \right)^2$ = 21.1 และ 54.4 	<ul style="list-style-type: none"> การติด Tab รูปสามเหลี่ยมที่ด้านหน้าของปากทางออกเจ็ตส่งผลให้ Penetration depth ลดลง โดยสันนิษฐานว่าบริเวณด้านหน้าเป็นบริเวณที่มีความดันสถิตย์สูง ประกอบกับผนังปากเจ็ตด้านในของตัวที่ติด Tab เป็นบริเวณที่มี Pressure gradient สูงที่เรียกว่า "Pressure hill" จึงส่งผลให้บริเวณนี้เป็น Primary source ของ Streamwise vorticity โดยขณะที่การติด Tab ด้านหลังของปากทางออกเจ็ตจะส่งผลน้อยต่อ Penetration depth เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความดันสถิตย์ต่ำ
---	-----------------------	--	---	--

<p>2</p>	<p>Buyajitradulya and Sathapomnanon (2005)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของการติด Tab ต่อโครงสร้าง Mean flow ของกรณีเรตต์ไร้กระแสแลมบ์ขวางที่ไม่มีกระแสหมุนวน และเรตต์ในกระแสแลมบ์ขวางที่มีการหมุนวน (SICF) ศึกษาจากเรตต์ร่อนโดยทำการวัดการกระจายตัวของอนุภาคของหน้าเรตต์เรตต์ไปตามตำแหน่งตาม Downstream 	<ul style="list-style-type: none"> $Sr = \frac{w_p}{u_j}$ (Swirl ratio) = 0 – 8 $r = 4$ $Re_j = 15,000$ $Re_{cf} = 4,400$ $\frac{\rho_j}{\rho_{cf}} = 0.86$ $Fr = \left[\frac{(\rho_{cf} - \rho_j)gd}{\rho_j \bar{u}_j^2} \right]^{-1/2}$ = 0.02 	<p>กรณีเรตต์ไม่หมุนวน</p> <ul style="list-style-type: none"> จากการติด Tab รอบปากเรตต์ 8 ตำแหน่งสามารถสรุปได้ดังนี้ <ol style="list-style-type: none"> กรณี Sr0-W และ Sr0-L การกระจายตัวของอนุภาคจะมีรูปร่างคล้ายกับกรณีที่ไม่ติด Tab คือ ลักษณะคล้ายรูปไตที่สมมาตร กรณี Sr0-PW(SW) พบว่ามีรูปร่างแตกต่างกันไปจากกรณีที่ไม่ติด Tab และมีความคล้ายคลึง CVP น้อยลงมาก และเกิดความไม่สมมาตรขึ้น โดยข้อสังเกตที่สำคัญคือ การติด Tab ที่ตำแหน่งนี้จะส่งผลต่อโครงสร้างของเรตต์โดยรวมเป็นอย่างมากและค่อนข้างถาวร กรณี Sr0-P(S) พบว่ารูปร่างจะคล้ายรูปไตที่ไม่สมมาตรโดยบริเวณด้านที่ติด Tab จะมีอนุภาคมีโดยรวมน้อยกว่า และ Lobe จะอยู่ต่ำกว่า Lobe ของด้านที่ไม่ติด Tab ซึ่งมีอนุภาคมีโดยรวมที่สูงกว่า และมีลักษณะของโครงสร้างเป็นรูปอุลภาค (comma)
----------	--	--	---	--

			<p>4. กรณี S10-PL(SL) พบว่ารูปร่างของเจ็ตคล้ายคลึงกับกรณี S10-P(S) แต่ขอบด้านข้างของ Lobe ด้านที่ติด Tab นั้นจะอยู่ต่ำกว่าด้านที่ไม่ติด Tab</p> <p>5. กรณีที่ติด Tab ที่ด้านข้างในทุกกรณีพบว่าทำให้รูปร่างของเจ็ตไม่สมมาตร Lobe ด้านที่ติด Tab จะมีอนุภาคนิวเคลียสโดยรวมน้อยกว่าและขอบด้านข้างจะอยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่า Lobe ด้านที่ไม่ติด Tab</p> <p>กรณีเจ็ตหมุนควง</p> <ul style="list-style-type: none"> ● จากการติด Tab รอบปากเจ็ต 8 ตำแหน่งสามารถสรุปได้ดังนี้ <ol style="list-style-type: none"> 1. กรณีติด Tab ที่ตำแหน่ง P,PW,W และ SW พบว่าการพัฒนาตัวรูปร่างของเจ็ตจะมีลักษณะที่แตกต่างจากกรณีที่ไม่ติด Tab อย่างเห็นได้ชัด 2. กรณีติด Tab ที่ตำแหน่ง S,SL,L และ PL พบว่าเจ็ตจะมีรูปร่างการกระจายตัวคล้ายคลึงกับกรณีที่ไม่ติด Tab นอกจากการติด Tab ที่ตำแหน่ง S และ SL ส่งผลให้รูปร่างคล้ายกันมากและทั้งสองกรณียังพบลักษณะ Core ที่ขาดออกเป็นสองส่วนในบางหน้าตัดอีกด้วย ● การกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสจะอยู่ที่ด้าน Suction ● บริเวณที่มีความไว (Sensitivity) ต่อโครงสร้างการไหลมากที่สุดคือ บริเวณ Pressure Windward (PW) ไปจนถึง Windward (W) ● ชี้แนะว่าการพัฒนาตัวของ Skewed mixing layer นำไปสู่การก่อตัวของ CVP
--	--	--	---

ตารางที่ 2. 3 สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการกระตุ้นด้วย Pulse ต่อคุณลักษณะของเจ็ทในกระแสผสมขวาง

1	M closkey <i>et al.</i> (2002)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาเจ็ทในกระแสผสมขวางที่มีการกระตุ้นด้วยสัญญาณคลื่นจากลำโพง ใช้ Liquid paraffin solution 1 เป็นสารในการสร้างควันให้กับเจ็ท แสงสว่างสีขาวติดตั้งไว้ด้านหลังหน้าตัดทดสอบด้วยกำลังไฟขนาด 500 Watt บันทึกผลการทดลองจากภาพถ่าย 	<ul style="list-style-type: none"> $r_v = 2.58$ $R_e = 1,500$ Frequency = 40 -1,640 Hz $U_j = 3.1$ m/s $U_m = 1.2$ m/s 	<ul style="list-style-type: none"> Random excitation ไม่ส่งผลต่อการปรับปรุงการผสม ค่า Amplitude สูงสุดของเจ็ทที่มีการตอบสนองอื่นเนื่องมาจากการกระตุ้นด้วยความถี่ 73.5 Hz และการตอบสนองของการหมุนตัวของเจ็ทจะหยุดหลังจากที่ความถี่ของลำโพงมีค่าเกิน 100 Hz พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ส่งผลให้เจ็ทในกระแสผสมขวางที่มีการพ่นทะลุผ่านและการกระจายตัว คือ การกระตุ้นด้วย Square Wave ที่ความถี่ Subhamonics ของความถี่ธรรมชาติของ Vortex shedding ของเจ็ท
2	Narayanan <i>et al.</i> (2003)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษา Dynamic และการควบคุมเจ็ทในกระแสผสมขวางด้วย Spinning valve actuator ที่กระตุ้นด้วยความถี่ 100 – 1,600 Hz ปากทางออกเจ็ทมีรูปร่างเป็นวงกลม ใช้เทคนิค Mie scattering visualization ใช้กล้อง NAC เป็นกล้องที่มีความเร็วสูง (200 Frame/sec) 	<ul style="list-style-type: none"> $Re_j = 5,000$ $r = 6$ $Re_{cf} = 2.75 \times 10^4$ $\frac{\delta}{D_j} < 0.3$ $0.012 < Sr_b < 0.2$ 	<ul style="list-style-type: none"> การกระตุ้นที่ความถี่ต่ำส่งผลให้ Vortices เพิ่มขึ้นในขณะที่เจ็ทที่พุ่งออกและโค้งตัวตามกระแสผสมขวาง ส่วนการกระตุ้นที่ความถี่สูงส่งผลให้การกระจายตัวของเจ็ทที่ปากทางออกเพิ่มสูงขึ้น การกระตุ้นด้วยความถี่ต่ำจะช่วยเพิ่มการผสมระหว่างเจ็ทและกระแสผสมขวางมากกว่าการกระตุ้นด้วยความถี่สูง Flow จะมีความถี่สูงที่บริเวณใกล้ปากทางออกของเจ็ทและ มีความถี่ต่ำที่ระยะห่างจากปากเจ็ทไปตามทิศทางของกระแสผสมขวาง การกระตุ้นเจ็ทด้วยความถี่ 650 และ 1,500 Hz ส่งผลให้มีการเหนี่ยวนำการผสมมากกว่าเจ็ทที่ไม่ถูกกระตุ้น

ตารางที่ 2.4 สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการกระตุ้นด้วยการหมุนควง (Swirl) ต่อคุณลักษณะของเจ็ทในกระแสลมขวาง

1	Kavsoglu and Schetz (1989)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของ Initial swirl และ High turbulence ที่มีต่อ คุณลักษณะการผสมของเจ็ทในกระแสลมขวาง ทำการทดลองศึกษาการกระจายตัวของความดันสถิตที่พื้นผิว Test section บริเวณรอบปากทางออกเจ็ทและความเร็ว ที่ระนาบขวางตรงกลางที่วางตัวอยู่ตามแนว Streamwise ใช้ Yaw probe ในการศึกษาความเร็ว ใช้การวัดอากาศด้านข้างในการทำให้เกิดเจ็ทหมุนควง 	<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"> High turbulence ส่งผลให้ความดันสถิตที่พื้นผิว Test section บริเวณรอบปากเจ็ทต่ำกว่าความดันบรรยากาศ และยังลด Penetration ของเจ็ทลงอีกด้วย การเพิ่มขึ้นของ Sr ส่งผลให้ความดันสถิตที่พื้นผิว Test section บริเวณรอบปากเจ็ท มีความไม่สมมาตรเพิ่มขึ้น และจะลด Penetration ของเจ็ทลงอีกด้วย ผลของ Swirl จะชัดเจนมากขึ้นเมื่อเจ็ทมีอัตราส่วนความเร็วน้อยๆ, High turbulence และที่บริเวณใกล้ปากทางออกของเจ็ท
2	Yoshizako et al. (1991)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของ Swirl ต่อเจ็ทในกระแสลมขวาง ในอุโมงค์น้ำ ทดลองศึกษา Velocity vector และ Concentration profile ของ Swirling เจ็ท โดยใช้เทคนิค Image processing ซึ่งวิธีการคือ บดลอนขนาดเล็กลงไปพร้อมกับเจ็ท พร้อมฉายระนาบของแสงตัดผ่านบริเวณที่ต้องการ แล้วถ่ายภาพ ใช้ Guild vane ที่สามารถปรับมุมได้ ในการทำให้เจ็ทเกิดเจ็ทหมุนควง 	<ul style="list-style-type: none"> Sw (Swirl number) = 0, 0.34, 0.76 และ 1.54 $U_{ef} = 50$ mm/s $V_j = 200$ mm/s $d = 60$ mm 	<ul style="list-style-type: none"> Sw เพิ่มขึ้นส่งผลให้เจ็ทจะมีการกระจายตัวได้มากขึ้น ในบริเวณใกล้ปากทางออกเจ็ท และ Penetration depth จะลดลง กระแสลมขวางซึ่งมีลักษณะเป็น Uniform flow จะถูกเร่งให้มีความเร็วสูงขึ้นเมื่อมีทิศทางสอดคล้องกับทิศทางของความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทหมุนควง

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) ใช้ใบพัดกวนเจ็ดเพื่อให้เกิดเจ็ดหมุนวน 	<ul style="list-style-type: none"> $r_v = 4.9 - 11.1$ $Sn = \frac{G_\theta}{G_r R} = 0 - 0.17$ $Re_j = 1.3 \times 10^4$ 	<ul style="list-style-type: none"> ลักษณะของ CVP เปลี่ยนจากรูปรางสมมาตรในกรณีเจ็ดหมุนวนไปเป็นลักษณะที่ Vortex ด้านหนึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอีกด้านหนึ่งทำให้รูปราง CVP เปลี่ยนจากรูปราง Kidney เป็นรูปจุดภาค การหมุนวนของเจ็ดส่งผลให้ Penetration depth ลดลงเล็กน้อย และไม่มีผลต่อการลดลงของ Maximum mean concentration ของเจ็ดในช่วงของการทดลอง
4	Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาคุณลักษณะของเจ็ดหมุนวนแบบ Non-Zero circulation ทำการทดลองโดยศึกษาคุณลักษณะของการผสมและการพัฒนาตัวของเจ็ด ด้วย การวัดอุณหภูมิเฉพาะหน้าตัด 	<ul style="list-style-type: none"> $r = 4.35$ $S_r = \frac{u_\theta}{u_j} = 0, 0.17, 0.52$ และ 0.82 $Re_j = 12,000$ $Re_{cf} = 3,400$ 	<ul style="list-style-type: none"> การหมุนวนส่งผลให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิบนหน้าตัดไม่สมมาตร บริเวณที่มีอุณหภูมิสูง และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่วนใหญ่อยู่ทางด้าน Suction Center of mass temperature trajectory จะอยู่ต่ำกว่า Center plane temperature trajectory เสมอที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเดียวกัน
5	Yingjaeroen <i>et al.</i> (2006)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาวิวัฒนาการของเจ็ดในกระแสดมขวางกรณีเจ็ดไม่หมุนวน (JICF) และกรณีเจ็ดหมุนวน (SICF) ที่มีความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ดไม่เท่ากับศูนย์ ใช้ปฏิกิริยา กรด-เบส แสดงถึง reactive mixing และฉีดสีแสดงถึง Passive mixing ใช้ Contours of line-of-sight integrated mean images แทนปริมาณเชิงคุณภาพของการผสม 	<ul style="list-style-type: none"> $r = 4$ Swirl ratio (S_r) ตั้งแต่ 0 ถึง 8 	<ul style="list-style-type: none"> กรณีเจ็ดไม่หมุนวน พบว่าบริเวณตำแหน่ง $x/rd < 0.5$ Passive outer region mixing จะมีการผสมบริเวณนี้มาก และที่ตำแหน่ง x/rd มากขึ้น พบว่า Passive outer region mixing จะมีการผสมน้อยลง ในขณะที่ Central-region mixing จะมีอิทธิพลต่อการผสมมากขึ้น และ reactive inner region mixing จะมีการผสมเพียงเล็กน้อยในบริเวณนี้ กรณีเจ็ดหมุนวน พบว่า Outer และ Inner regions จะมีการผสมบริเวณนี้มาก ในขณะที่ Central-region mixing ไม่มีนัยสำคัญต่อการผสม

6	Limdumrongtum et al. (2007), (2009)	<ul style="list-style-type: none"> • ศึกษา Mixing Structure ในบริเวณ Near field • ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณการผสม (Mixing) ของเจ็ด โดยอาศัยกระบวนการ Product formation • ใช้เทคนิค Combination of smoke fluid condensation, Mie scattering และ Laser-sheet visualization techniques 	<ul style="list-style-type: none"> • $r = 4$ • Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 ถึง 8 	<ul style="list-style-type: none"> • การหมุนควงจะไปพัฒนาและส่งเสริม Cascading azimuthal K-H mixing structures บนด้าน Suction ขณะที่จะไปยังบนด้าน Pressure และที่บริเวณ $y/rd > 0.2$ จะไปพัฒนาและเสริม Vortical roll-ups บนด้าน Pressures ขณะที่จะไปยังบนด้าน Suction • การพัฒนาตัวของ Vortical roll-ups บนด้าน Pressures เกิดจากการพัฒนาตัวและขยายตัวอย่างต่อเนื่องจาก Cascading azimuthal K-H mixing structures จาก Upstream ในขณะที่ Vortical roll-ups บนด้าน Suction จะเกิดจากการพัฒนาตัวและขยายตัวอย่างต่อเนื่องจาก Lee side cusp
7	Denev et al. (2005), (2009)	<ul style="list-style-type: none"> • ศึกษาโครงสร้างและการผสมของเจ็ดหมุนควงในกระแสผสมขวาง • ใช้วิธี LES ศึกษาการไหล 	<ul style="list-style-type: none"> • Swirl ratio (S) = $\frac{\int_0^{D/2} \rho U_a U_r r^2 dr}{\frac{D}{2} \int_0^{D/2} \rho U_a^2 r dr} = 0-6$ • $Re = 2,100$ • $r_v = 3.3$ 	<ul style="list-style-type: none"> • การหมุนควงส่งผลให้สนามความเข้มข้นเบี่ยงไป • การหมุนควงมีผลต่อการผสมเล็กน้อย

ตารางที่ 2.5 สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการกระตุ้นด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimutal control jet) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง

1	Konsri (2007), Konsri <i>et al.</i> (2009)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง ทำการทดลองศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม ใช้ Single hot film anemometer เป็นเครื่องมือวัดความเร็ว กำหนดขอบของบริเวณที่เป็นเจ็ตที่ Turbulent intensity 12 % 	<ul style="list-style-type: none"> $r = 3.87$ $Re_j = 23,500$ $Re_{cf} = 5,900$ 	<ul style="list-style-type: none"> การฉีดเจ็ตควบคุมที่บริเวณด้านหน้า ส่งผลให้เส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตบนระนาบสมมาตรต่ำลงและต่ำที่สุดที่ตำแหน่งมุมฉีด $\pm 15^\circ$ (กรณี 115) ในขณะที่การฉีดเจ็ตควบคุมบริเวณด้านข้างหรือด้านหลังจะทำให้เส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตสูงขึ้น กรณี JICF และกรณี 115 จะมีการเหนี่ยวนำการผสมลดลงเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวมากยิ่งขึ้น $x/rd = 4$ เมื่อเทียบกับตำแหน่งก่อนหน้า ซึ่งหมายความว่าเจ็ตดึงเอาระยะลมขวางเข้ามาผสมน้อยลง (เจ็ตคายอากาศออก) จึงเป็นไปได้ว่าการกำหนดขอบเจ็ตด้วย Turbulent intensity 12 % อาจไม่เหมาะสม
2	Bunyajitradulya (2011)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง ทำการทดลองศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม ใช้ Single hot film anemometer เป็นเครื่องมือวัดความเร็ว กำหนดขอบของบริเวณที่เป็นเจ็ตที่ Turbulent intensity 6 % 	<ul style="list-style-type: none"> $r = 3.87$ $Re_j = 23,500$ $Re_{cf} = 5,900$ 	<ul style="list-style-type: none"> ผลของเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างและเส้นทางเดินของเจ็ตได้ผลในทำนองเดียวกันกับผลของ Konsri (2007) และ Konsri <i>et al.</i> (2009) พบว่าการกำหนดขอบเจ็ตจาก Turbulent intensity 6 % ทั้งกรณี JICF และ 115 จะไม่เกิดปรากฏการเจ็ตคายอากาศออก (การเหนี่ยวนำการผสมลดลงเมื่อเจ็ตพัฒนาตัว) ตลอดช่วงของการวัดตั้งแต่ตำแหน่ง $x/rd = 0.25 - 4$ กรณี 115 จะส่งผลให้การเหนี่ยวนำการผสมสูงขึ้นประมาณ 10 % ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ และสูงที่สุดถึง 20 % ที่ตำแหน่ง $x/rd = 4$

2	Bunyajitradulya (2011)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อคุณลักษณะของเจ็ดในกระแสดมขวาง ทำการทดลองศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม ใช้ Single hot film anemometer เป็นเครื่องมือวัดความเร็ว กำหนดขอบของบริเวณที่เป็นเจ็ดที่ Turbulent intensity 6 % 	<ul style="list-style-type: none"> $r = 3.87$ $Re_j = 23,500$ $Re_{cf} = 5,900$ 	<ul style="list-style-type: none"> ผลของเจ็ดควบคุมต่อโครงสร้างและเส้นทางเดินของเจ็ดได้ผลในทำนองเดียวกันกับผลของ Konsri (2007) และ Konsri <i>et al.</i> (2009) พบว่าการกำหนดขอบเจ็ดจาก Turbulent intensity 6 % ที่กรณี JICF และ 115 จะไม่เกิดปรากฏการเจ็ดคายอากาศออก (การเหนี่ยวนำการผสมลดลงเมื่อเจ็ดพัฒนาตัว) ตลอดช่วงของการวัดตั้งแต่ตำแหน่ง $x/rd = 0.25 - 4$ กรณี 115 จะส่งผลให้การเหนี่ยวนำการผสมสูงขึ้นประมาณ 10 % ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ และสูงสุดถึง 20 % ที่ตำแหน่ง $x/rd = 4$
---	------------------------	--	---	---

ตารางที่ 2. 6 สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสผสมขวางด้วย **Proper orthogonal decomposition (POD)**

1	Meyer <i>et al.</i> (2007)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาผลโครงสร้างของเจ็ตในกระแสผสมขวาง วิเคราะห์โครงสร้างโดย Proper orthogonal decomposition (POD) จากมุมมอง (View) ต่างๆ ทำการทดลองศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม ใช้ Stereoscopic particle image velocimetry (SPIV) ในการวัดสนามความเร็ว จับอนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสผสมขวาง 	<ul style="list-style-type: none"> $r = 1.3$ และ 3.3 $Re_{cf} = 2,400$ 	<ul style="list-style-type: none"> กรณี r เท่ากับ 3.3 ผลจากการศึกษาในหลายระนาบบ่งชี้ว่า โครงสร้างของ Wake vortices มีบทบาทสำคัญต่อเจ็ตในกระแสผสมขวางมากกว่า Jet shear-layer กรณีที่ r เท่ากับ 1.3 ในทางกลับกัน โครงสร้างแบบ Jet shear-layer มีบทบาทสำคัญต่อเจ็ตในกระแสผสมขวางมากกว่า Wake vortices โครงสร้างแบบ Jet shear-layer ไม่สัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับโครงสร้างแบบ Wake vortices
---	----------------------------	--	---	---

ตารางที่ 4.1 ความหนาชั้นขอบเขต (Boundary layer) ของแต่ละตำแหน่งตามแนว Spanwise (z)

ตำแหน่ง (x,z)	ความหนาชั้นขอบเขต (mm.)
-1 rd, -0.5 rd	7.2
-1 rd, 0 rd	7.5
-1rd, 0.5rd	7.6

ตารางที่ 4.2 Spatial resolution ของการวัดด้วย SPIV ในแต่ละตำแหน่งการทดลอง

x/rd	Spatial resolution (16 x 16 pixel)
0.5	1.07 mm. x 1.07 mm.
0.75	1.30 mm. x 1.30 mm.
1	1.34 mm. x 1.34 mm.
1.5	1.35 mm. x 1.35 mm.

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญของงานวิจัยนี้

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์
ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตที่ปากทางออก (U_j) [m/s]	16.9 ± 0.8
ตัวเลขเรย์โนลด์ของเจ็ต	23,000
รูปร่างความเร็วเจ็ตที่ปากทางออก	Fully developed turbulent pipe profile
ความเร็วเฉลี่ยของกระแสมขวาง (U_{cf}) [m/s]	4.3 ± 0.2
ตัวเลขเรย์โนลด์ของกระแสมขวาง	5,900
อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r)	3.9 ± 0.3
อัตราส่วนเชิงมวลการไหลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก ($r_m, \%$)	2.0

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญของการสอบเทียบผลการทดลองระหว่างงานของ Meyer *et al.* (2007) และการทดลองเพื่อการสอบเทียบของงานวิจัยนี้

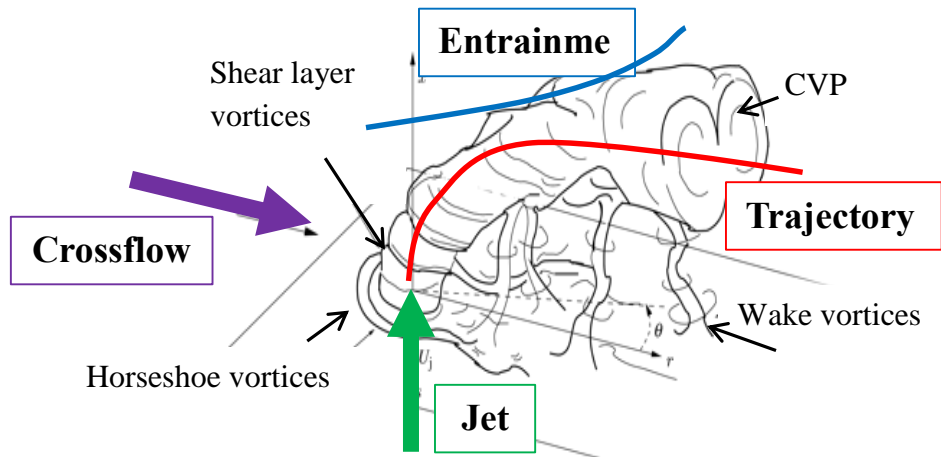
พารามิเตอร์	งานของ Meyer <i>et al.</i> (2007)	การทดลองเพื่อการสอบทวนของงานวิจัยนี้
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในปากทางออกเจ็ต [mm.]	24	22.5
ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตที่ปากทางออก (U_j) [m/s]	4.95	4.95
ตัวเลขเรย์โนลด์สของเจ็ต	7,900	7,000
รูปร่างความเร็วเจ็ตที่ปากทางออก	Fully developed turbulent pipe profile	
ตัวเลขเรย์โนลด์สของกระแสมขวาง	2,400	2,400
ความเร็วเฉลี่ยของกระแสมขวาง (U_{cf}) [m/s]	1.5	1.7
อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r)	3.3	2.9
Boundary layer thickness ($\delta_{99\%}$) [mm.]	70	10
ตำแหน่งการวัดสนามความเร็ว	$x/rd = 1$	
เครื่องมือที่ใช้วัดสนามความเร็ว	Stereoscopic particule image velocimetry	



ประมวลรูปภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

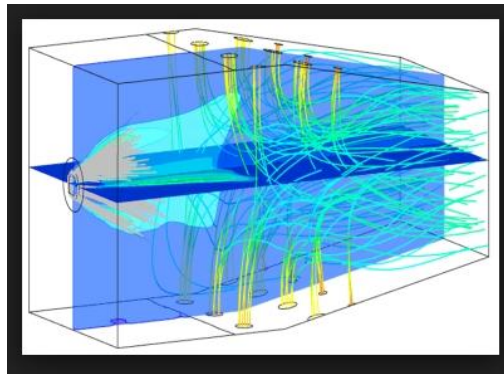


<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/366/1876/2729/F1.large.jpg>

รูปที่ 1. 1

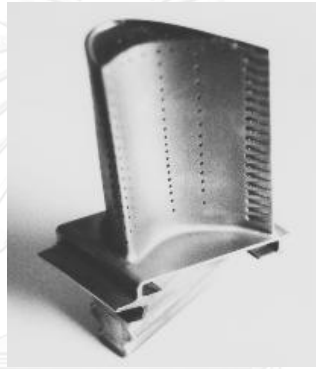
โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางและคุณลักษณะที่สำคัญ : การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) และ เส้นทางเดินของเจ็ต (Trajectory)

ก.



http://www.dlr.de/vt/en/desktopdefault.aspx/tabid-3082/4659_read-6800/

ข.



<http://www.me.umn.edu/labs/tcht/measurements/what.html>

ค.



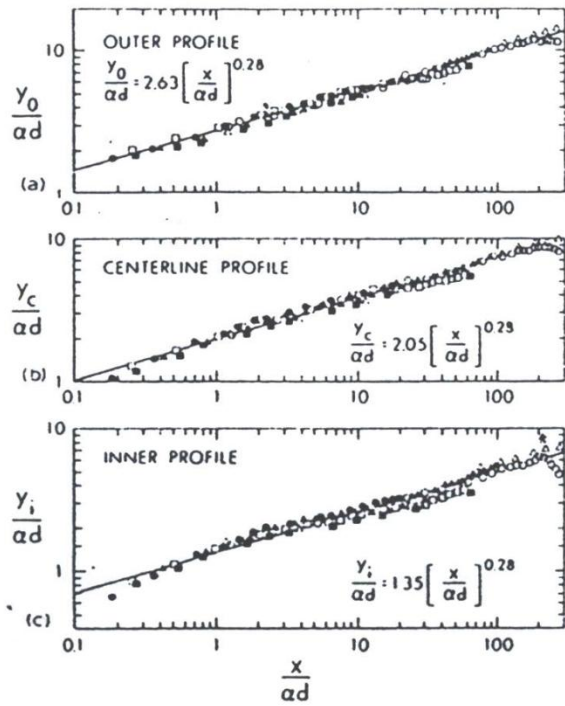
http://blog.enn.com/?attachment_id=40

รูปที่ 1. 2

การประยุกต์ใช้เจ็ตในกระแสมขวางในงานเชิงวิศวกรรม

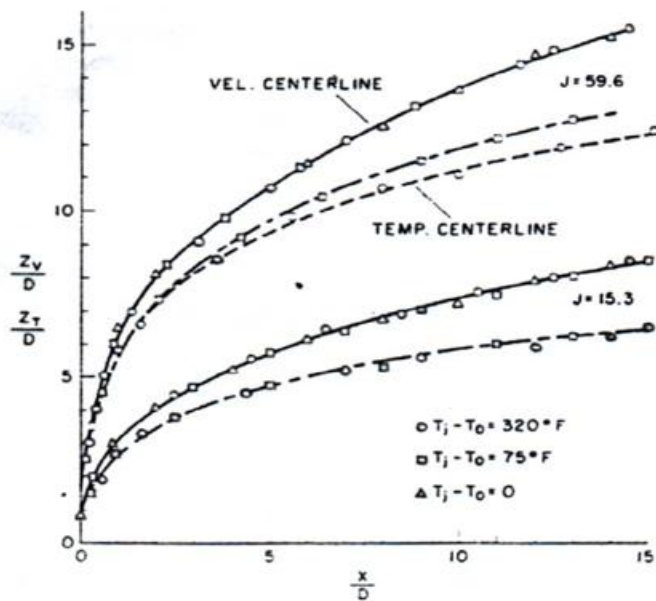
- ก. การฉีดเชื้อเพลิงเพื่อผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้
- ข. การระบายความร้อนของกังหันแก๊ส
- ค. การปล่อยควันออกจากปล่องควันของโรงงาน

บทที่ 2

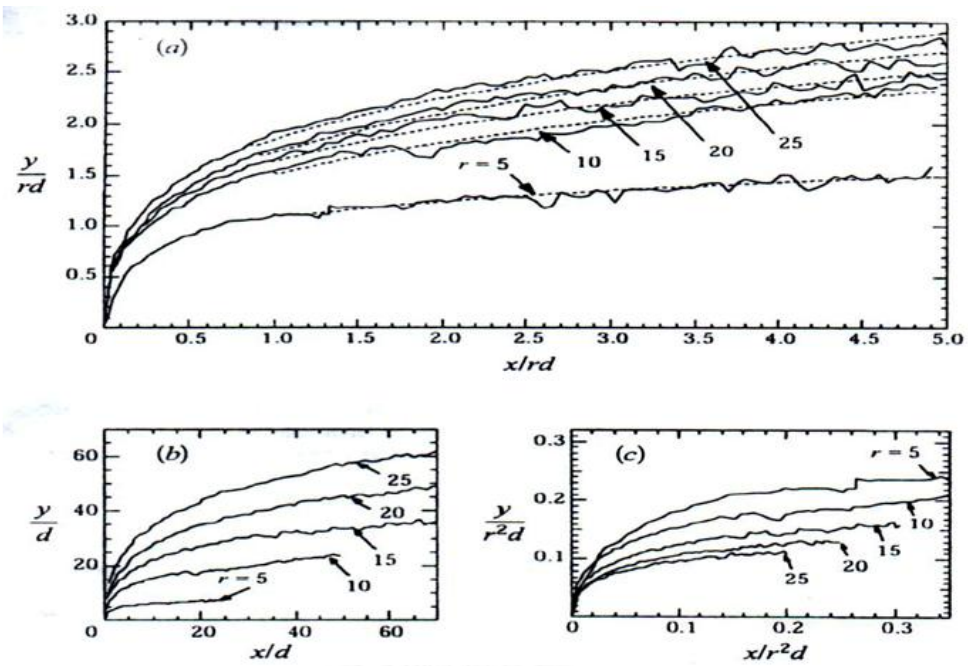


α	d (in.)	U_1 (fps)	d (in.)	U_1 (fps)
○	5	0.158	30	
△	15		5	120
□	25		15	0.248

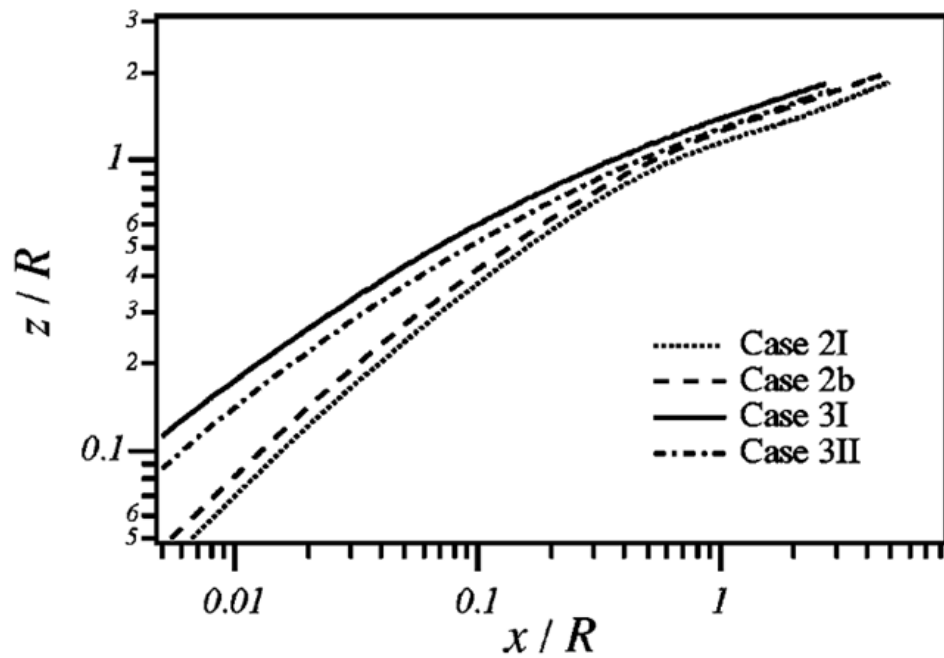
รูปที่ 2.1 เส้นทางเดินของความเร็ว (Pratte and Baines, 1967)



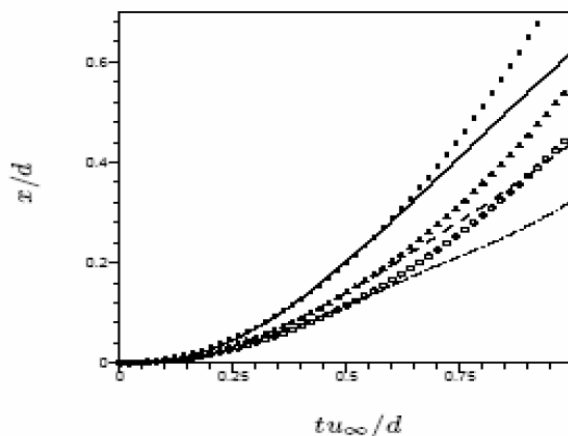
รูปที่ 2.2 เส้นทางเดินความเร็วและอุณหภูมิ (Kamotani and Greber, 1972)



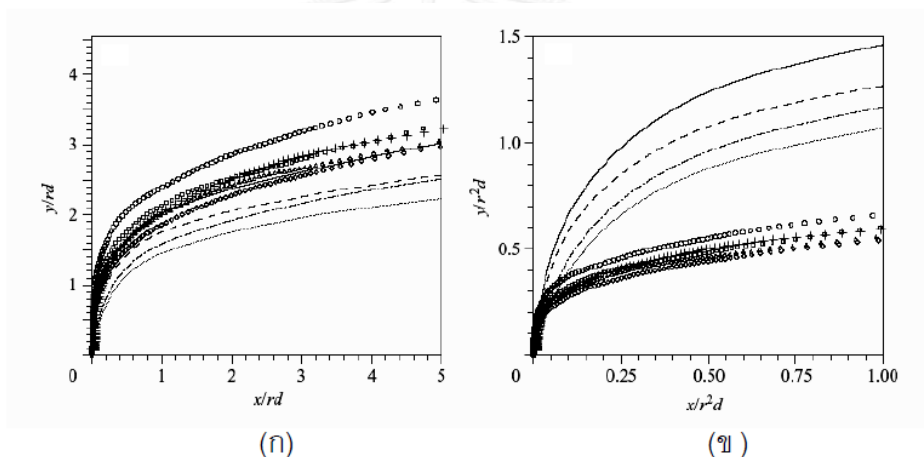
รูปที่ 2.3 เส้นทางเดิน Passive scalar (Smith and Mungal, 1998)



รูปที่ 2.4 เส้นทางเดิน steamline (Yuan and Street, 1998)



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

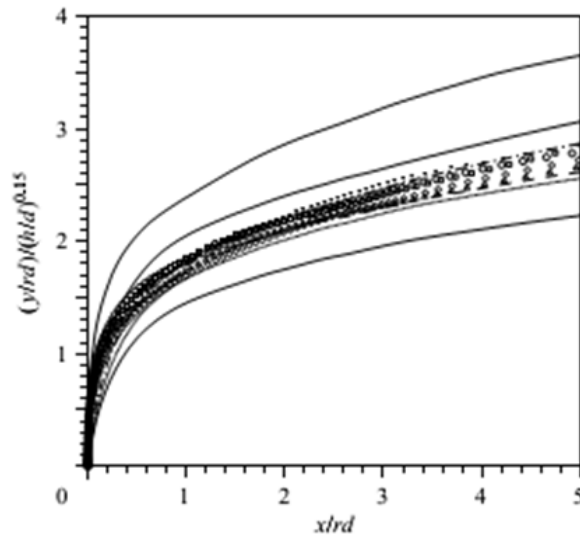


—, I; ----, II; — — —, III; ·····, IV; □, V; △, VI; +, VII; ◇, VIII; ○, IX.

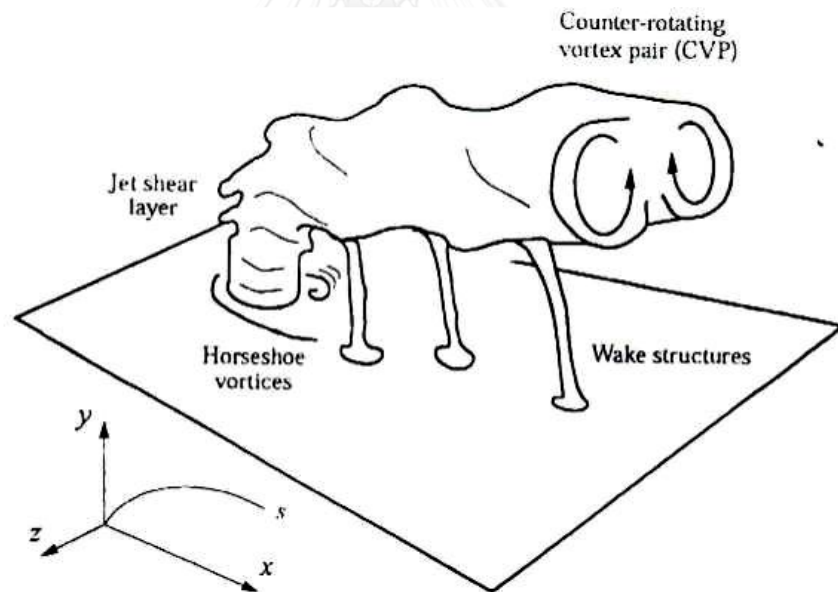
Case	Velocity ratio r	Jet inlet profile	Crossflow boundary layer $\delta_{99\%}$
I	1.52	Parabolic	$1.32d$
II	1.52	Mean-turbulent	$1.32d$
III	1.52	Parabolic	$0.44d$
IV	1.52	Mean-turbulent	$0.44d$
V	5.7	Parabolic	$1.32d$
VI	5.7	Mean-turbulent	$1.32d$
VII	5.7	Parabolic	$0.44d$
VIII	5.7	Mean-turbulent	$0.44d$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

TABLE 1. Conditions for the various simulations performed.

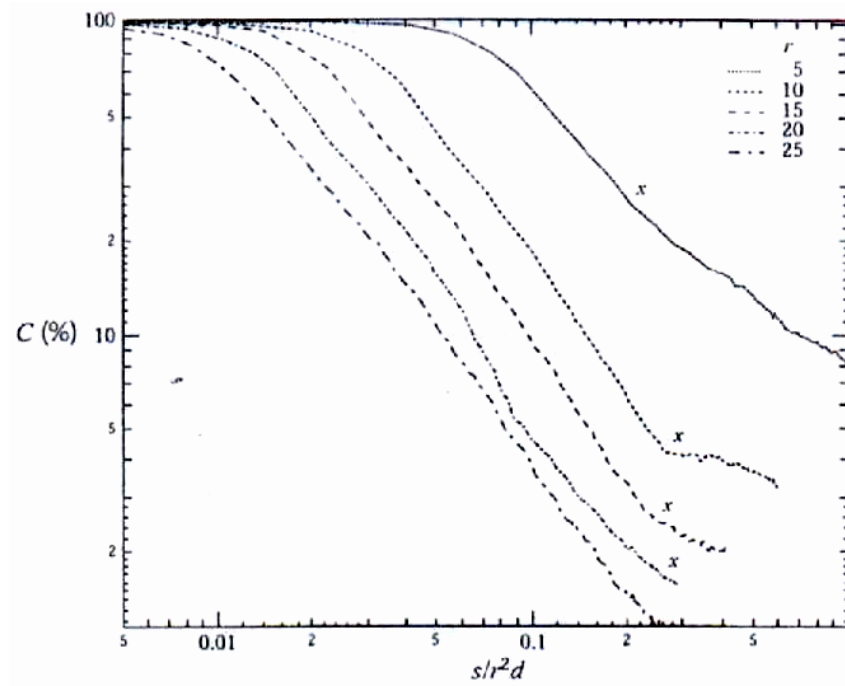
รูปที่ 2.6 ผลการเปรียบเทียบเส้นทางเดินที่สเกลด้วย (ก) rd และ (ข) r^2d (Muppidi and Mahesh, 2005b)



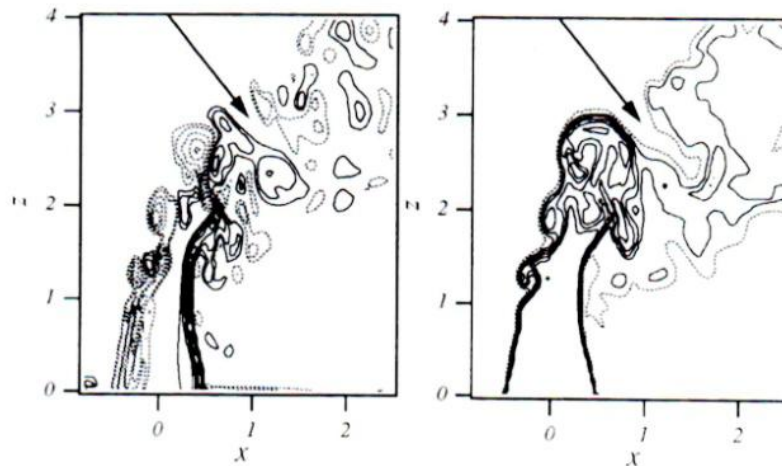
รูปที่ 2.7 เส้นทางเดินสเกลด้วยพารามิเตอร์ตัวใหม่ h (Muppidi and Mahesh, 2005b)



รูปที่ 2.8 โครงสร้าง Vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Fric and Roshko, 1994)

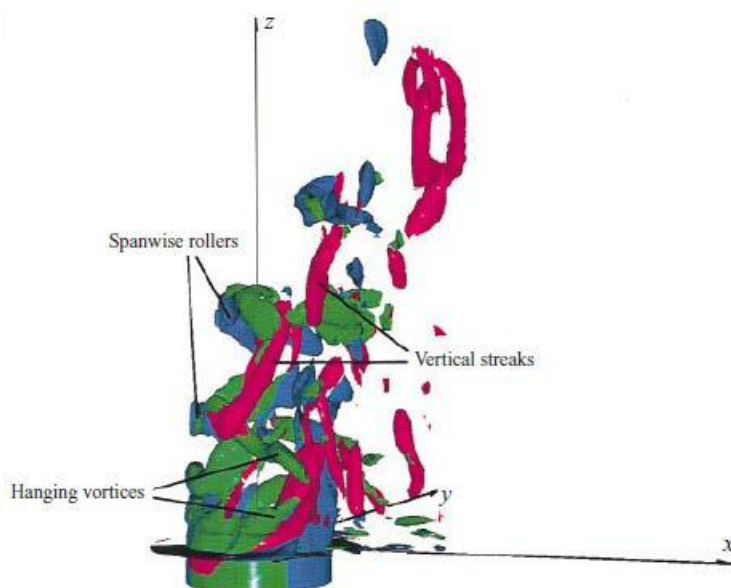


รูปที่ 2.9 ลดลงของ C% ของ JICF และ Free Jet บน Near Field บน r^2d (Smith and Mungal, 1998)



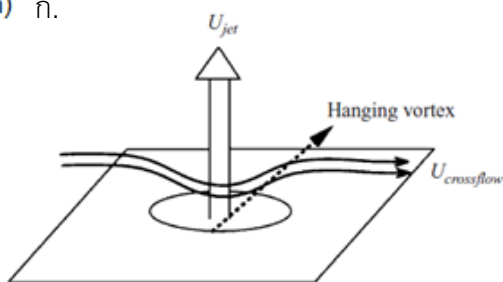
รูปที่ 2.10 Contour ของ Instantaneous spanwise vorticity (ซ้าย) และ Contour ของ Scalar concentration (ขวา) บน Centerplane

(Yuan *et al.*, 1999)

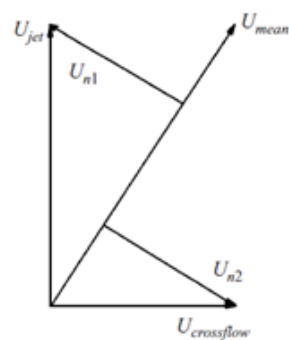


รูปที่ 2. 11 โครงสร้างบริเวณ Near field ของเจ็ตในกระแสลมขวาง ซึ่งแสดงเป็น Isosurface ของ Vorticity (Yuan *et al.*, 1999)

(ก) ก.



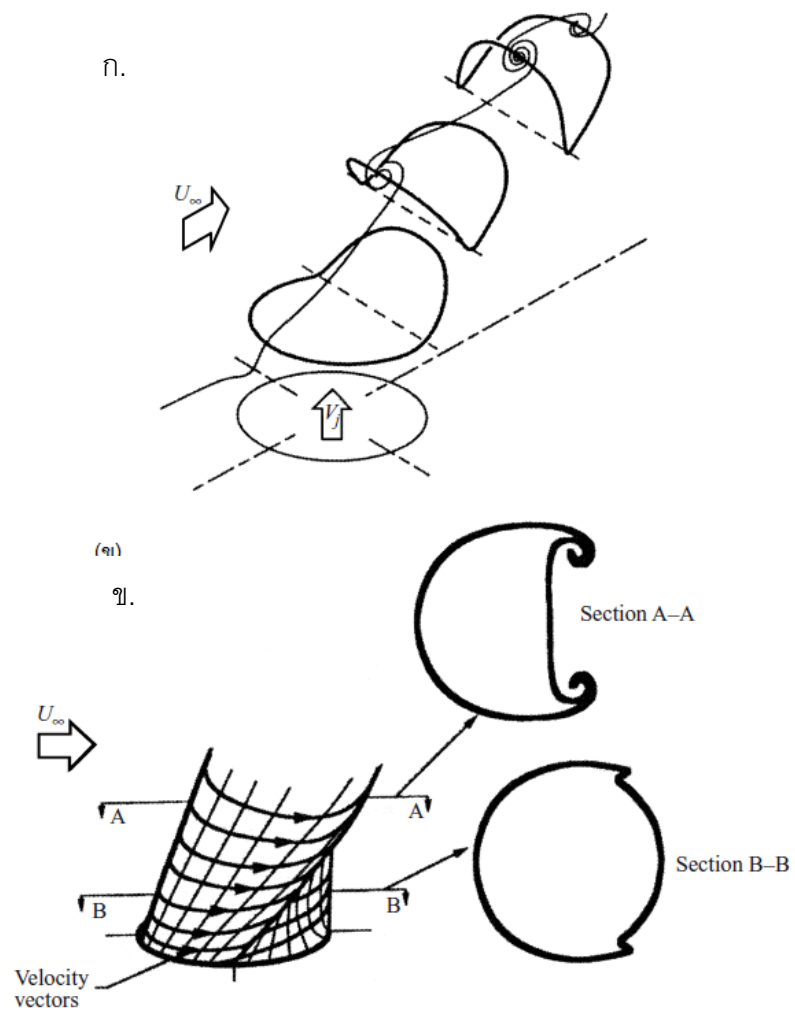
(ข) ข.



รูปที่ 2. 12 โครงสร้างของ Hanging vortices (Yuan *et al.*, 1999)

ก. รูป Schematic ของ Hanging vortices

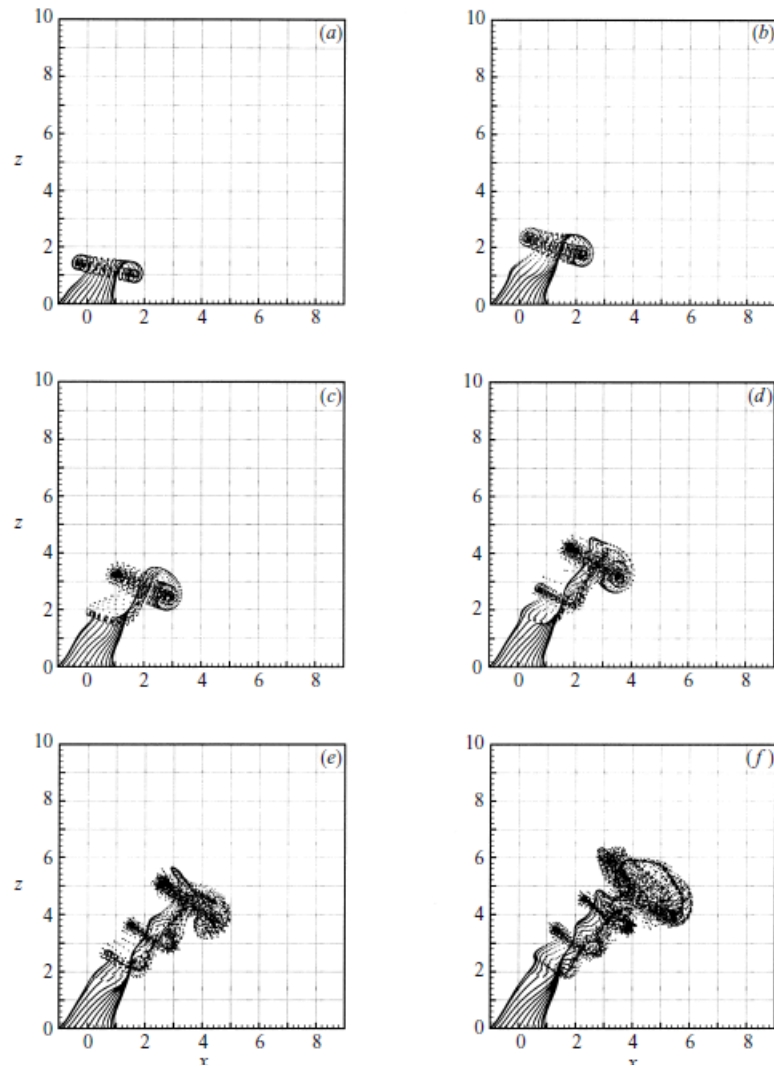
ข. Vector ความเร็วซึ่งแสดงกลไกของการเกิด Hanging vortices



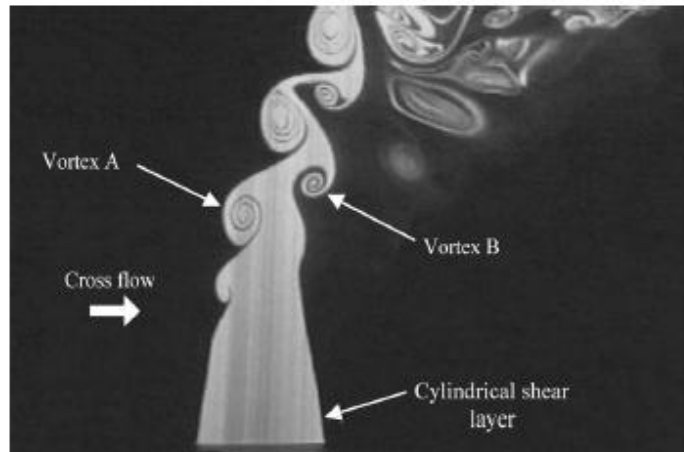
รูปที่ 2. 13 โครงสร้างของการเกิด CVP (Cortezzi and Karagozian, 2001)

ก. Isometric ของ Jet shear layer vortex ring

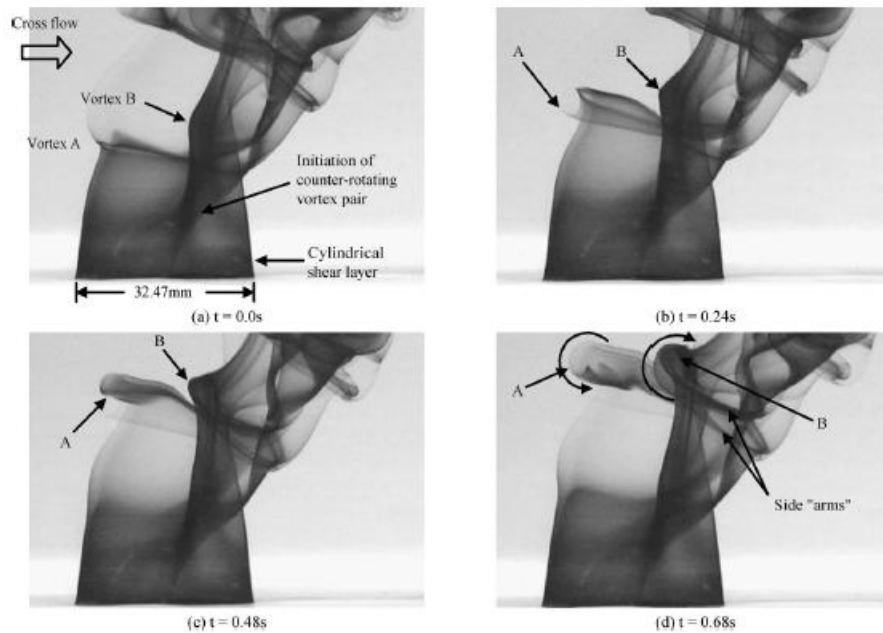
ข. Schematic diagram ของการเปลี่ยนตำแหน่งของ Shear layer



รูปที่ 2. 14 การพัฒนาตัวของเจ็ดในกระแสมขวาง (Cortelezzi and Karagozian, 2001)



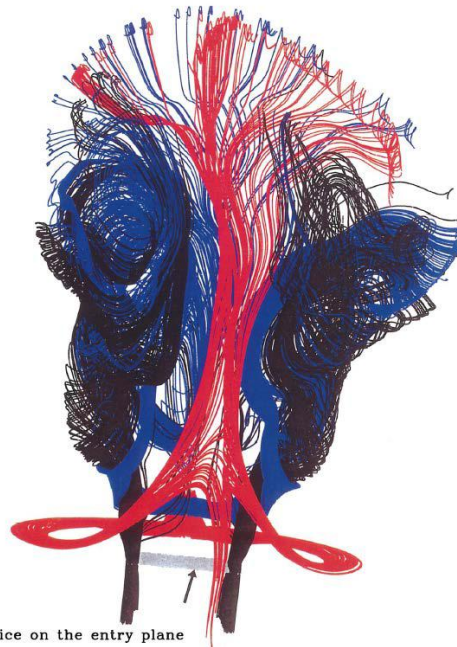
รูปที่ 2.15 Vortices structure ของเจ็ตในกระแสลมขวางบนระนาบสมมาตร (Lim *et al.*, 2001)



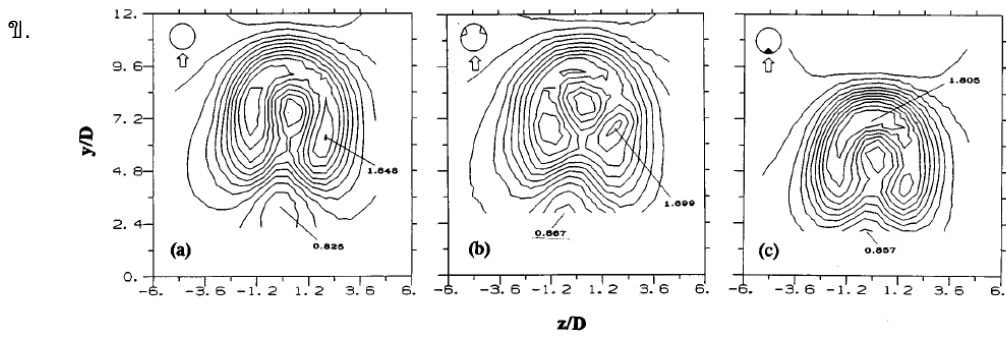
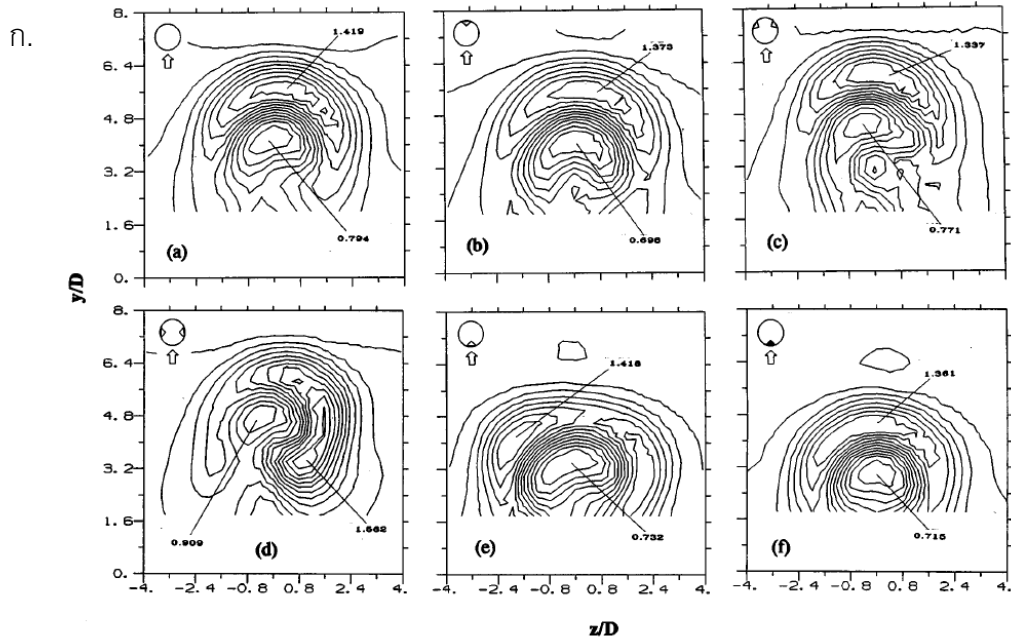
รูปที่ 2.16 การพับตัวของ Cylindrical shear layer (Lim *et al.*, 2001)



รูปที่ 2. 17 วิวัฒนาการของ Streamlines ในการก่อตัวของ Kelvin-Helmholtz roller
(Sau *et al.*, 2004)



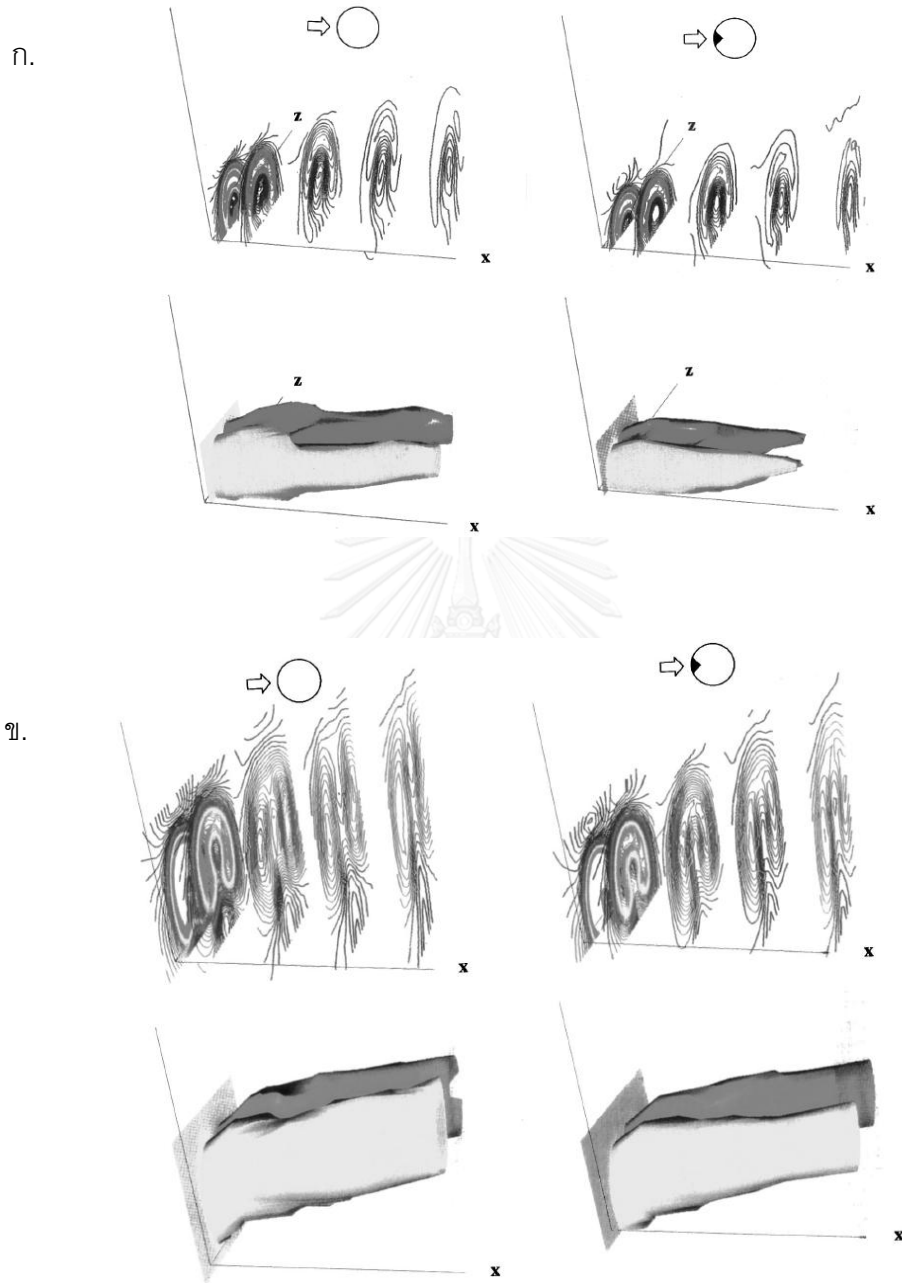
รูปที่ 2. 18 วิวัฒนาการของ Vortices structure (Sau *et al.*, 2004)



รูปที่ 2.19 Contour ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบตั้งฉาก (Zaman and Fross, 1997)

ก. $J = 21.1$

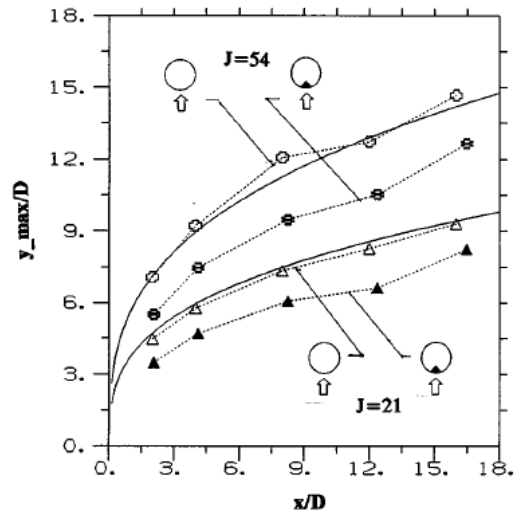
ข. $J = 54.4$



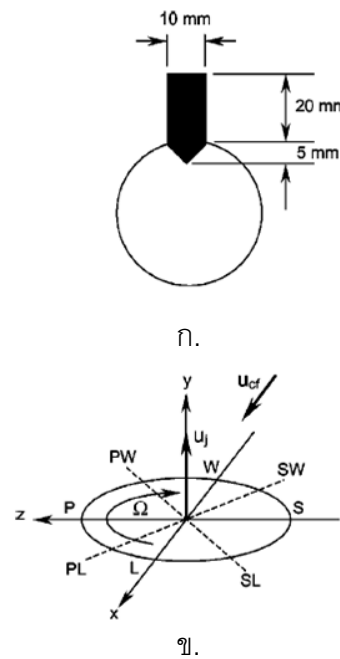
รูปที่ 2. 20 ความเร็วเฉื่อยบนหน้าตัดตั้งฉากและ Streamwise vorticity Isosurface (Zaman and Fross, 1997)

ก. $J = 21.1$

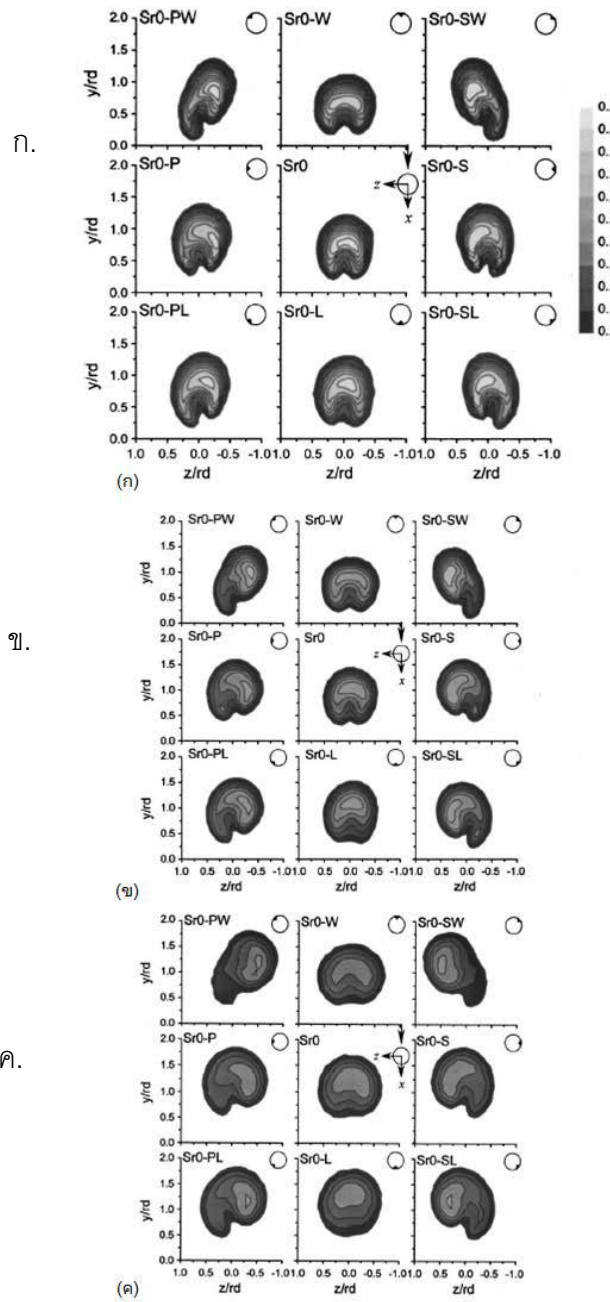
ข. $J = 54.$



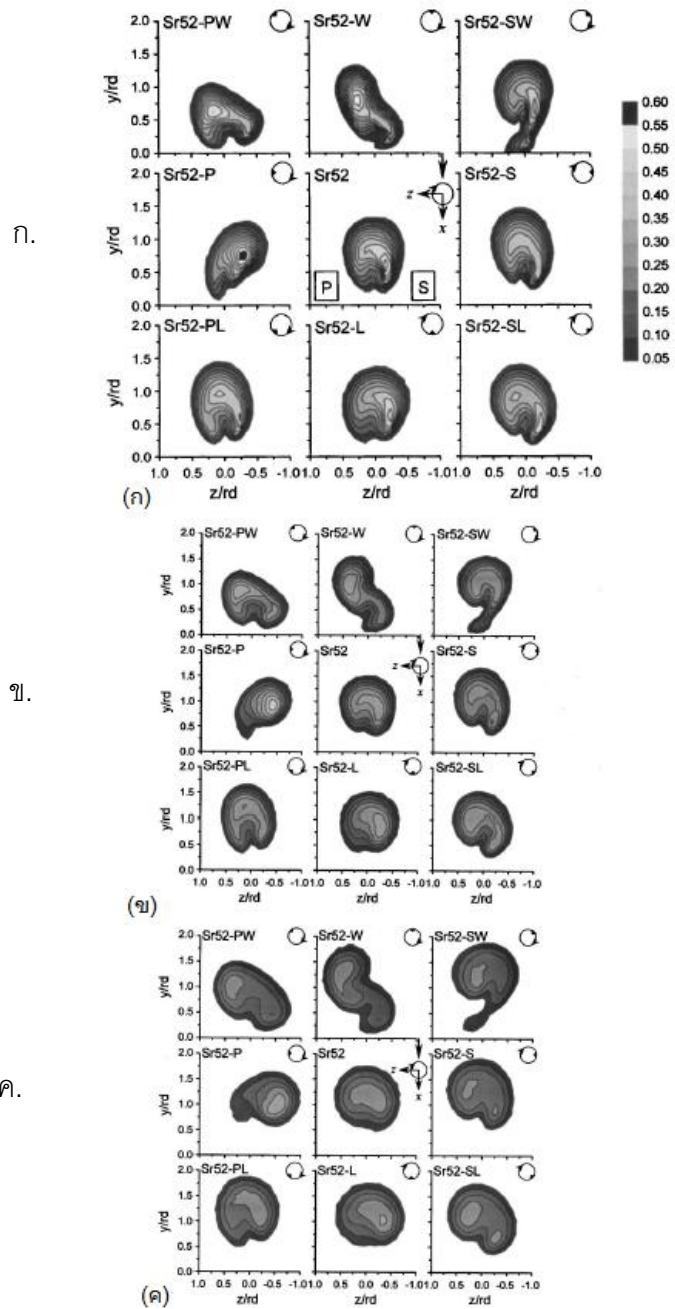
รูปที่ 2. 21 ผลของการติด Tab ต่อเส้นทางการเดินทางของความเร็วนระนาบสมมาตร (Zaman and Fross, 1997)



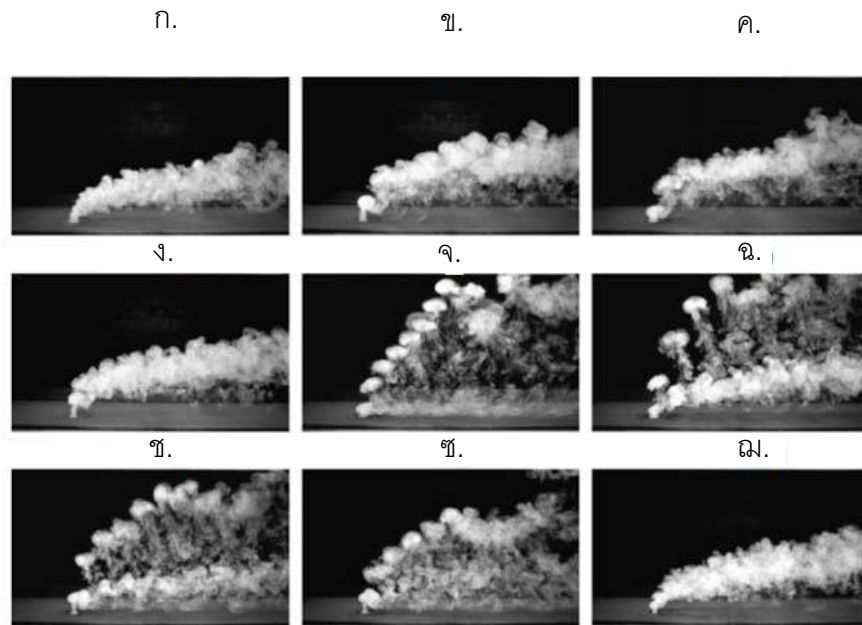
รูปที่ 2. 22 การติด tab ตามแนวเส้นรอบวง
 ก. Tab และการติดตั้ง
 ข. ระบบแกนตั้งฉากกับทิศทางการหมุน
 (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)



รูปที่ 2. 23 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการติด Tab กรณีเจ็ตไม่หมุนควง
 ก. $x/rd = 0.25$ ข. $x/rd = 0.5$ ค. $x/rd = 1$
 (Bunjajitradulya and Sathapornnanon, 2005)



รูปที่ 2. 24 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการติด Tab กรณีเจ็ทหมุนควง
 ก. $x/rd = 0.25$ ข. $x/rd = 0.5$ ค. $x/rd = 1$
 (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)



รูปที่ 2. 25

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

ก. ยังไม่กระตุ้นเจ็ต

ข. Uncompensated กระตุ้นด้วย Sine wave ความถี่ 73.5 Hz

ค. Compensated กระตุ้นด้วย Sine wave ความถี่ 73.5 Hz

ง. Uncompensated กระตุ้นด้วย Square wave ความถี่ 110 Hz
Duty cycle 31 %

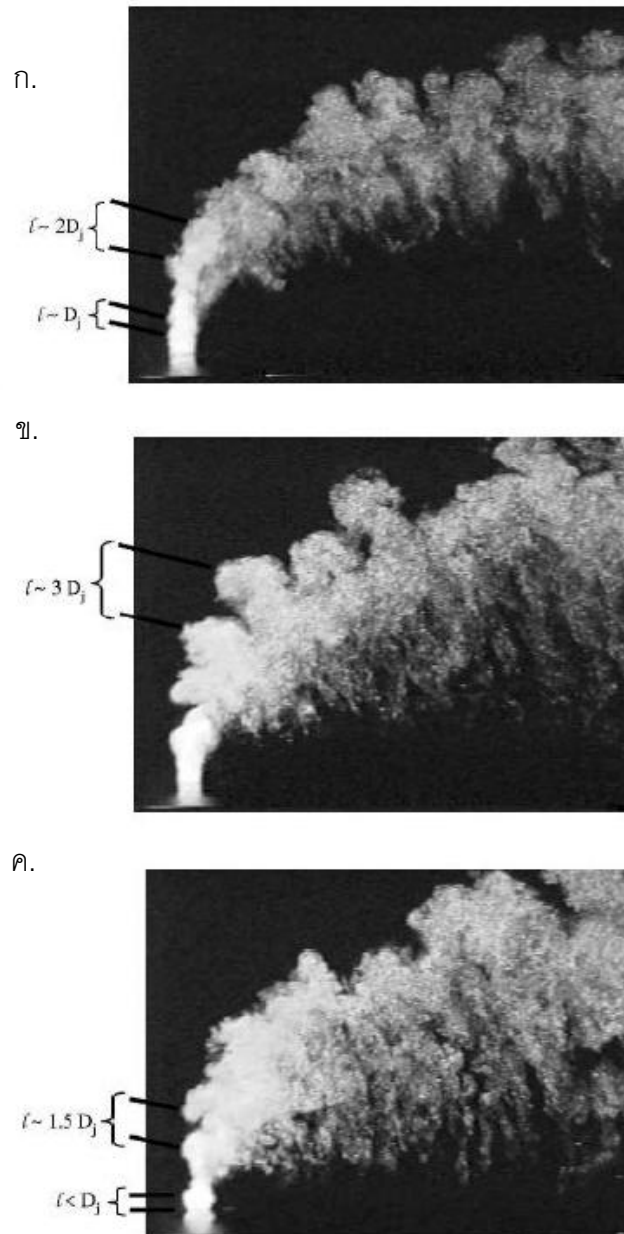
จ. Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ความถี่ 110 Hz
Duty cycle 31 %

ฉ. Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ความถี่ 55 Hz
Duty cycle 15 %

ช. Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ความถี่ 73.5 Hz
Duty cycle 22 %

ซ. Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ความถี่ 85 Hz
Duty cycle 24 %

ณ. Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ความถี่ 220 Hz
Duty cycle 62 %



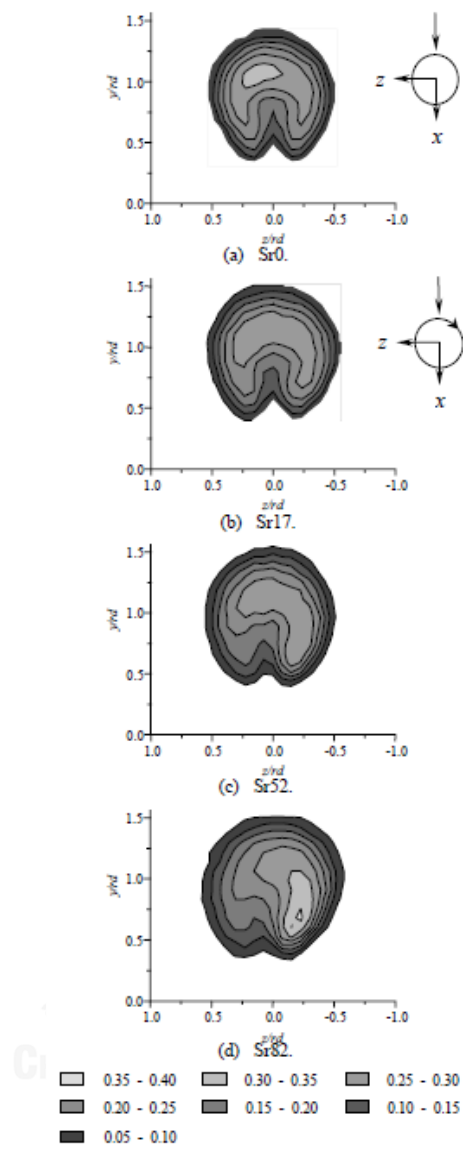
รูปที่ 2. 26

ภาพ Instantaneous (Narayanan *et al.*, 2003)

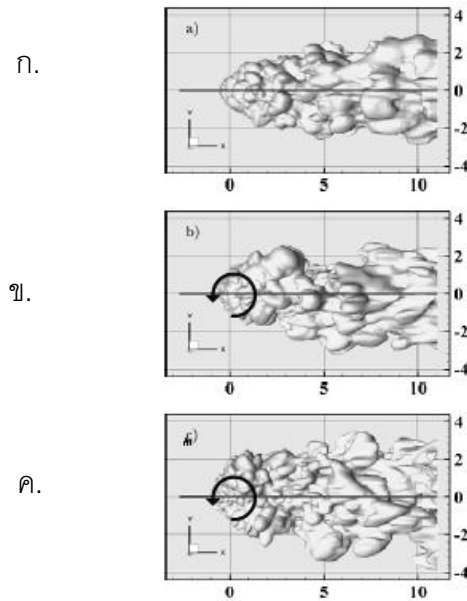
ก. กรณีที่เจ็ตไม่มีการควบคุม

ข. กรณีที่กระตุ้นที่ความถี่ต่ำ (680 Hz และ ค่า Sr D ประมาณ 0.085)

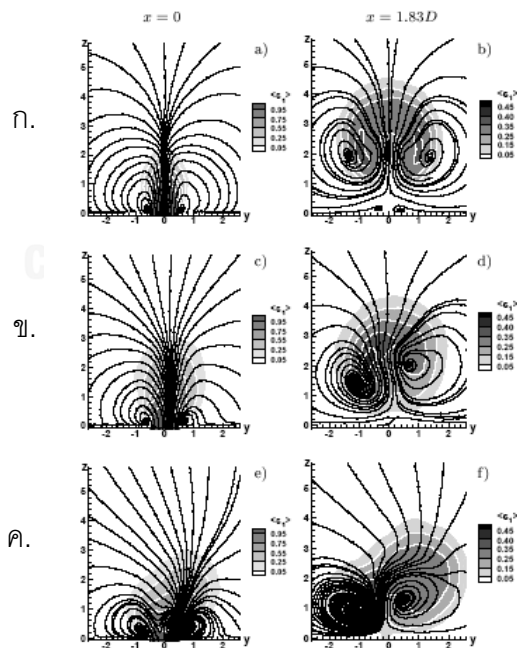
ค. กรณีที่กระตุ้นที่ความถี่สูง (1500 Hz และ ค่า Sr D ประมาณ 0.19)



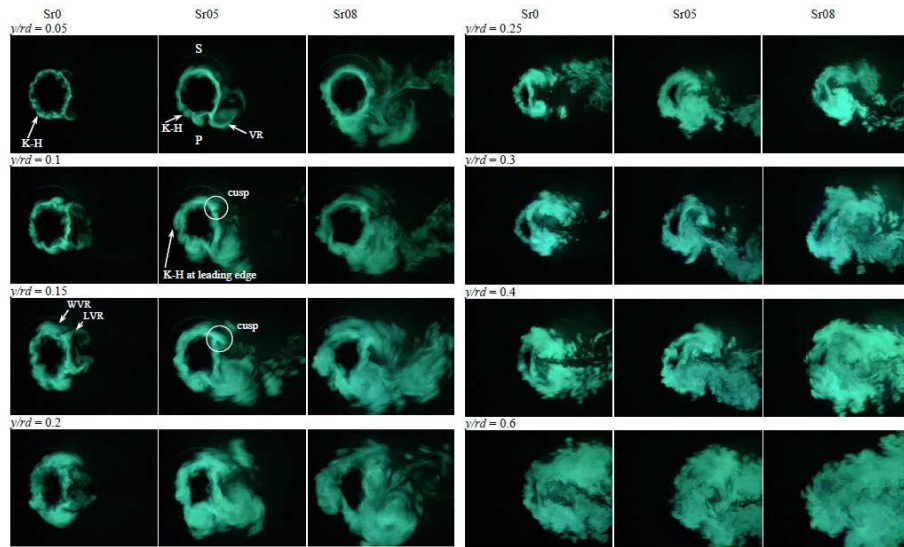
รูปที่ 2. 27 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวมบนระนาบตั้งฉาก (Wangjiraniran and Bunyajitradulya, 2001)



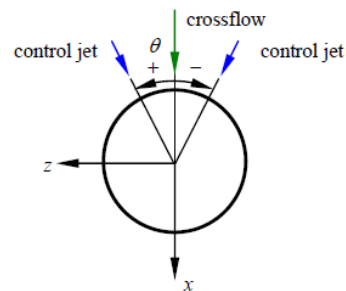
รูปที่ 2. 28 Instantaneous Iso concentration surface โดย $S1=0.1$, Top view
 ก. $S = 0$ ข. $S = 0.4$ ค. $S = 0.6$
 (Denev *et al.*, 2005)



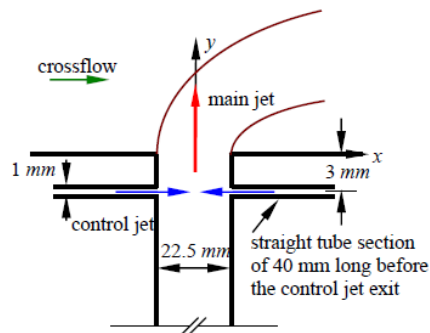
รูปที่ 2. 29 ภาพเฉลี่ยของ Streamline และค่าความเข้มข้นที่ $x = 0$ และ $x = 1.83D$ Top View (Denev *et al.*, 2005)
 ก. $S = 0$ ข. $S = 0.4$ ค. $S = 0.6$



รูปที่ 2. 30 Instantaneous image ของ mixing structure บนด้าน Top view (Limdumrongtum *at el.*, 2009)

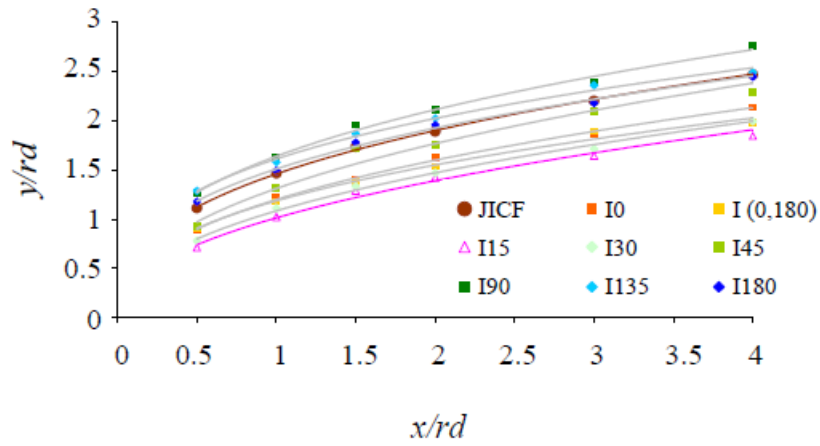


(a) Top view

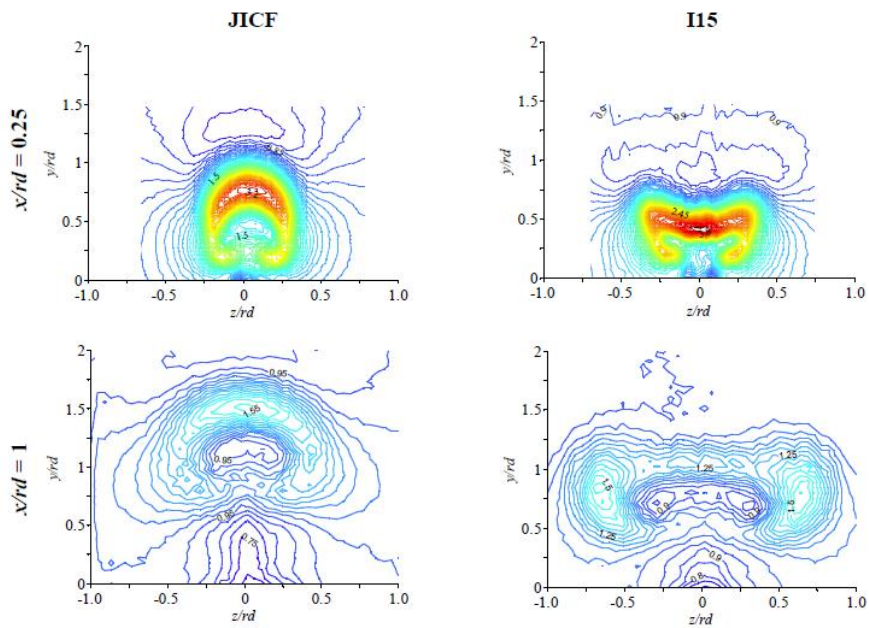


(b) Side view

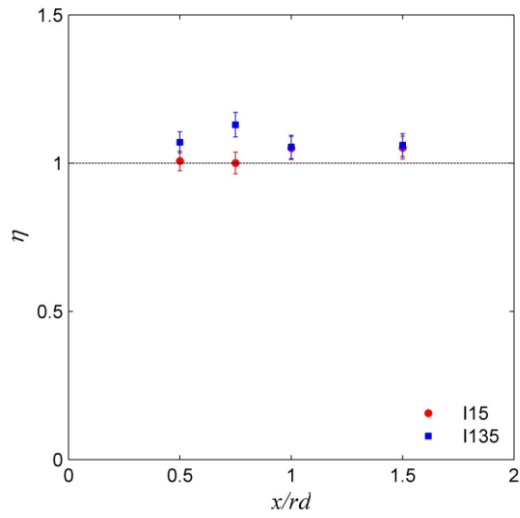
รูปที่ 2. 31 ชุดเจ็ตควบคุม (Kornsri *at el.*, 2009)



รูปที่ 2.32 ผลของเจ็ตควบคุมต่อเส้นทางเดินของความเร็ (Kornsri *at el.*, 2009)



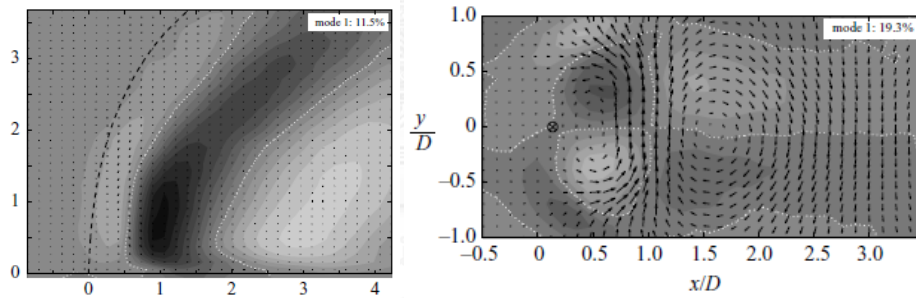
รูปที่ 2.33 Contour ของความเร็ว (Normalize ด้วย ความเร็วกระแสลมขวาง) เปรียบเทียบระหว่าง ไม่ควบคุมกับควบคุมที่สภาวะเหมาะสม (Kornsri *at el.*, 2009)



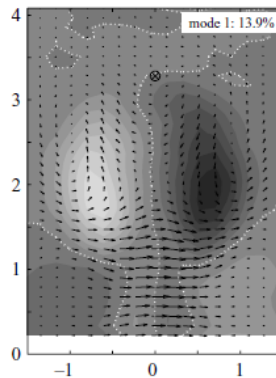
รูปที่ 2. 34 ประสิทธิภาพของเจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมปริมาตร (Witayaparakorn and Bunyajitradulya, 2013)

ก.

ข.



ค.



รูปที่ 2. 35 โครงสร้างที่มีระดับพลังงานสูงที่สุดของเจ็ตในกระแสลมขวางโดยที่ $r=3.3$

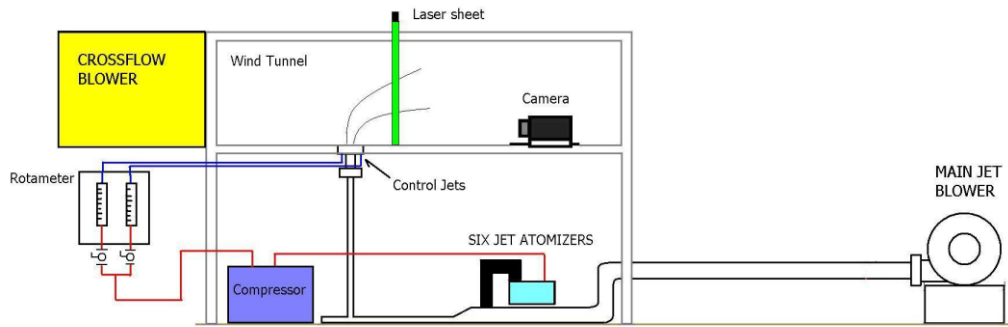
ก. Side view

ข. Top view

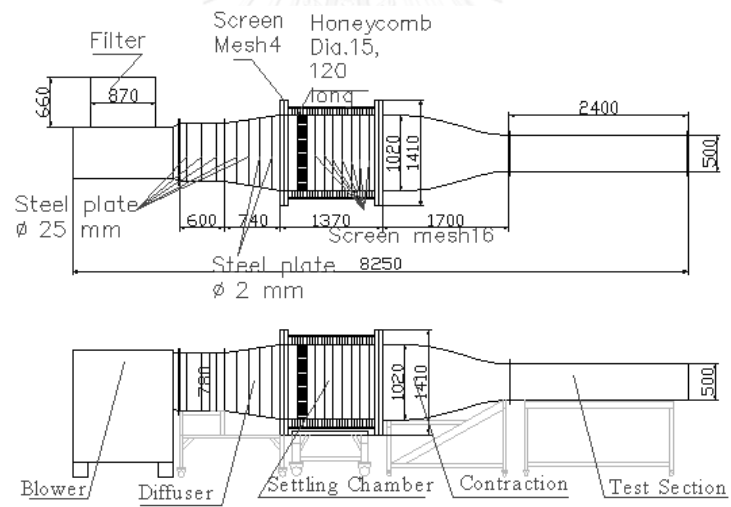
ค. End view

(Meyer *et al.*, 2007)

บทที่ 4



รูปที่ 4. 1 Schematic แสดงชุดการทดลอง



รูปที่ 4. 2 คู่มือคํลมและหน้าตัดทดสอบ



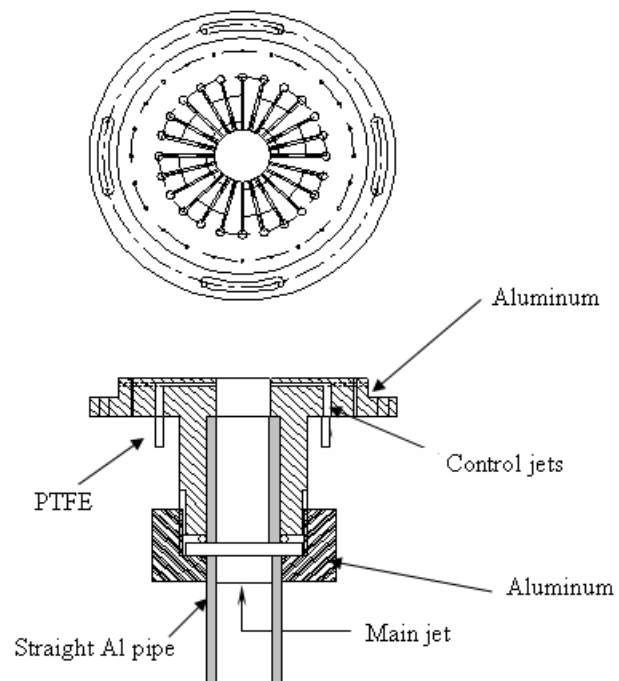
รูปที่ 4.3 พัดลมหอยโข่งของอุโมงค์ลม



รูปที่ 4.4 พัดลมให้กำเนิดเจ็ตหลัก



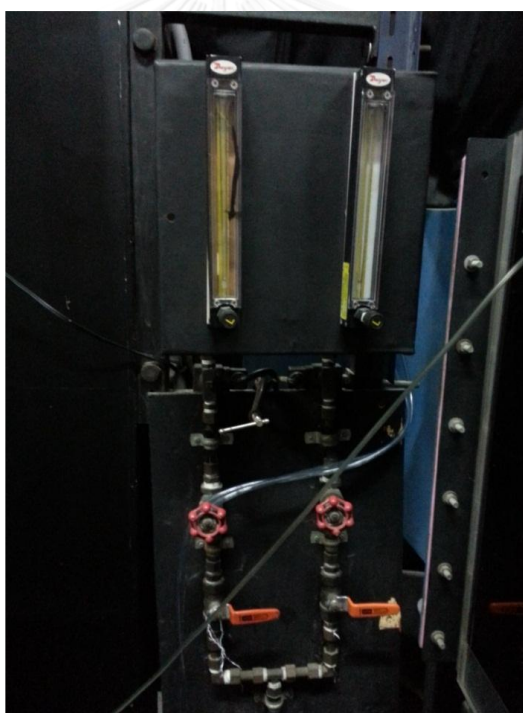
รูปที่ 4.5 Six-jet Atomizer



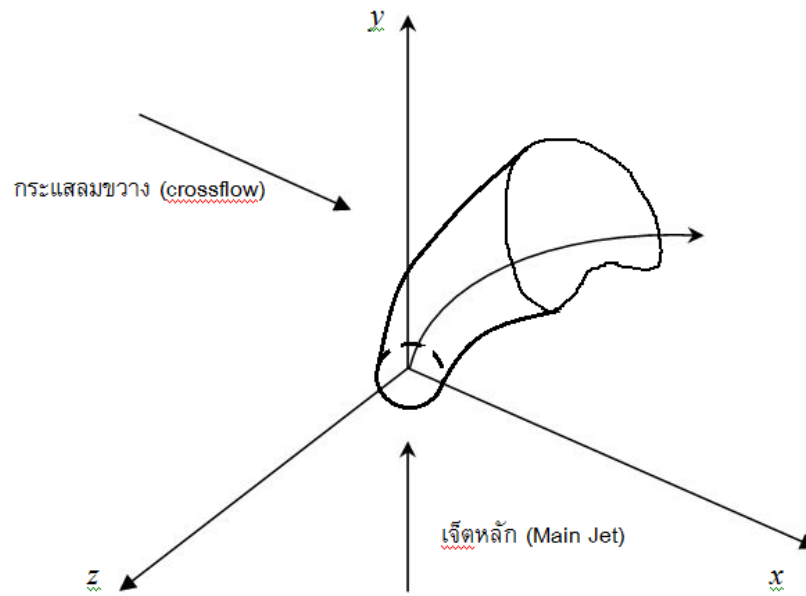
รูปที่ 4.6 ชุดหัวเจ็ตควบคุม (Konsri, 2007)



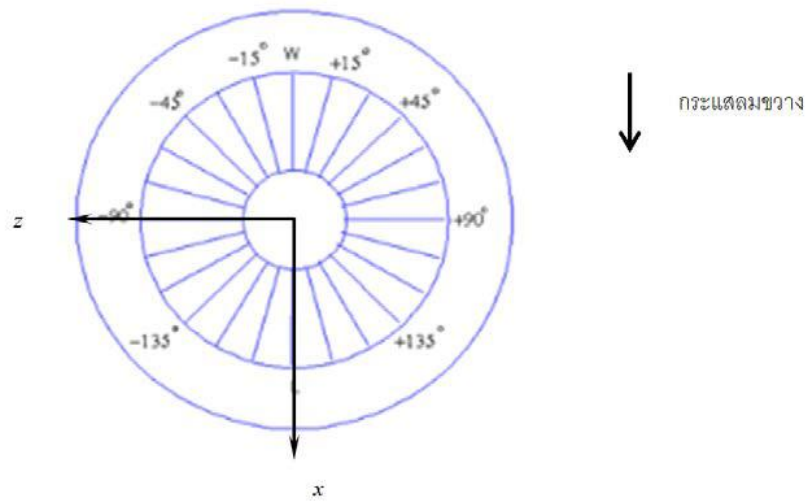
รูปที่ 4. 7 เครื่องอัดลมแบบลูกสูบ แบบ Single acting/ Single stage



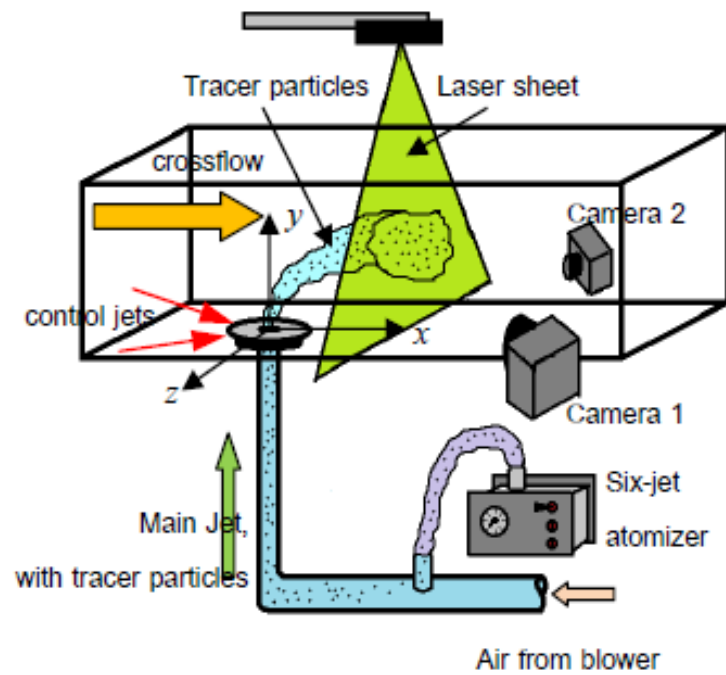
รูปที่ 4. 8 Rotameter และ Flow meter



รูปที่ 4.9 พิกัดการทดลอง



รูปที่ 4.10 พิกัดอ้างอิงตำแหน่งมุมชนิดของเจ็ตควบคุม



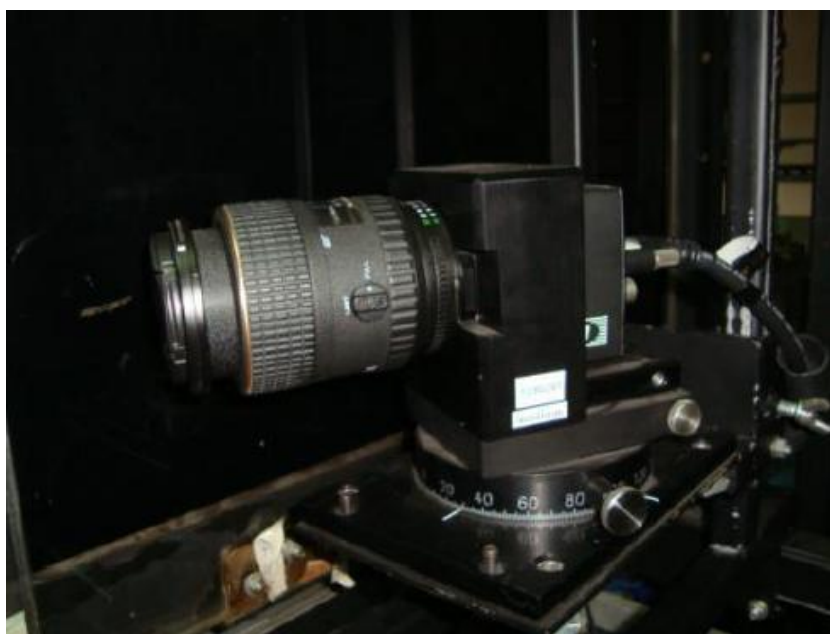
รูปที่ 4. 11 Schematic แสดงการติดตั้ง Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV)



รูปที่ 4. 12 เครื่องให้กำเนิดแสงเลเซอร์ Nd:YAG (New Wave™ model Solo 200XT)



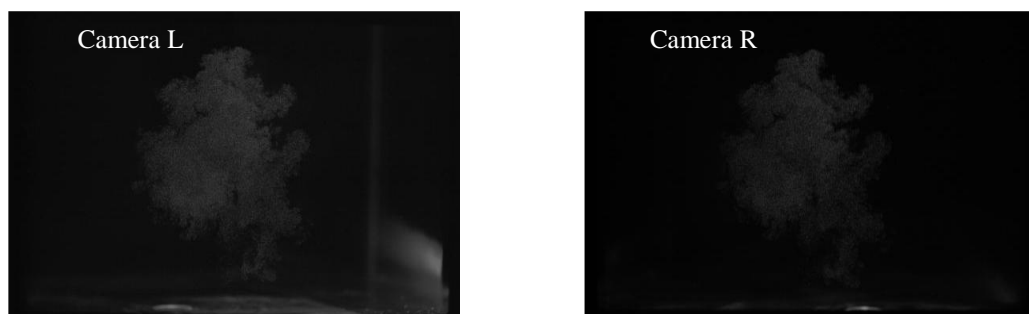
รูปที่ 4. 13 แขนส่งต่อลำแสงเลเซอร์ (Laser Light Arm, model 610015)



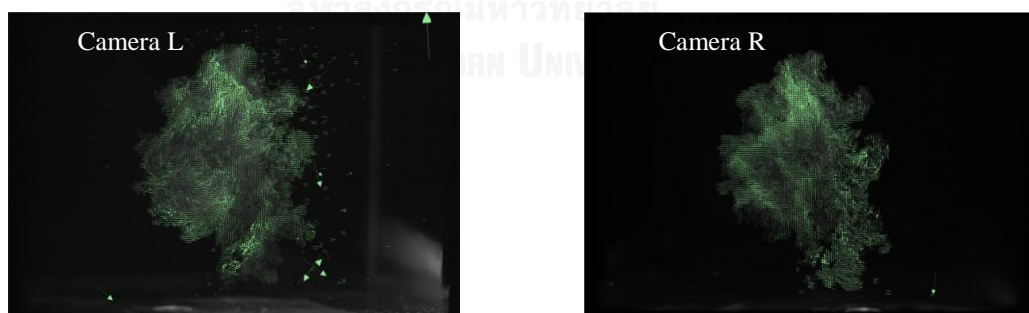
รูปที่ 4. 14 กล้อง CCD (PowerView Plus11MP, model 630062)



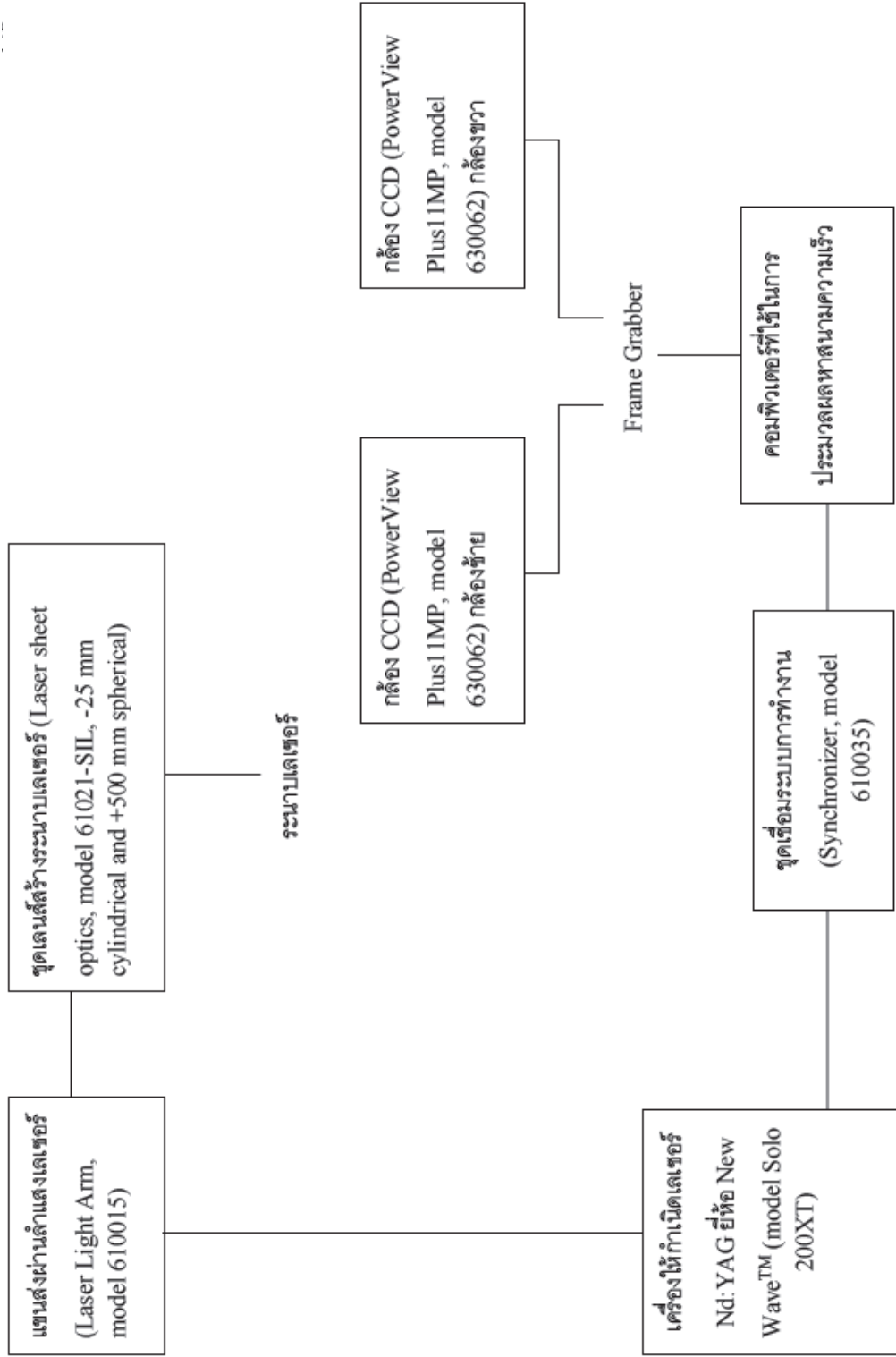
รูปที่ 4. 15 ชุดเชื่อมระบบการทำงาน (Synchronizer, model 610035)



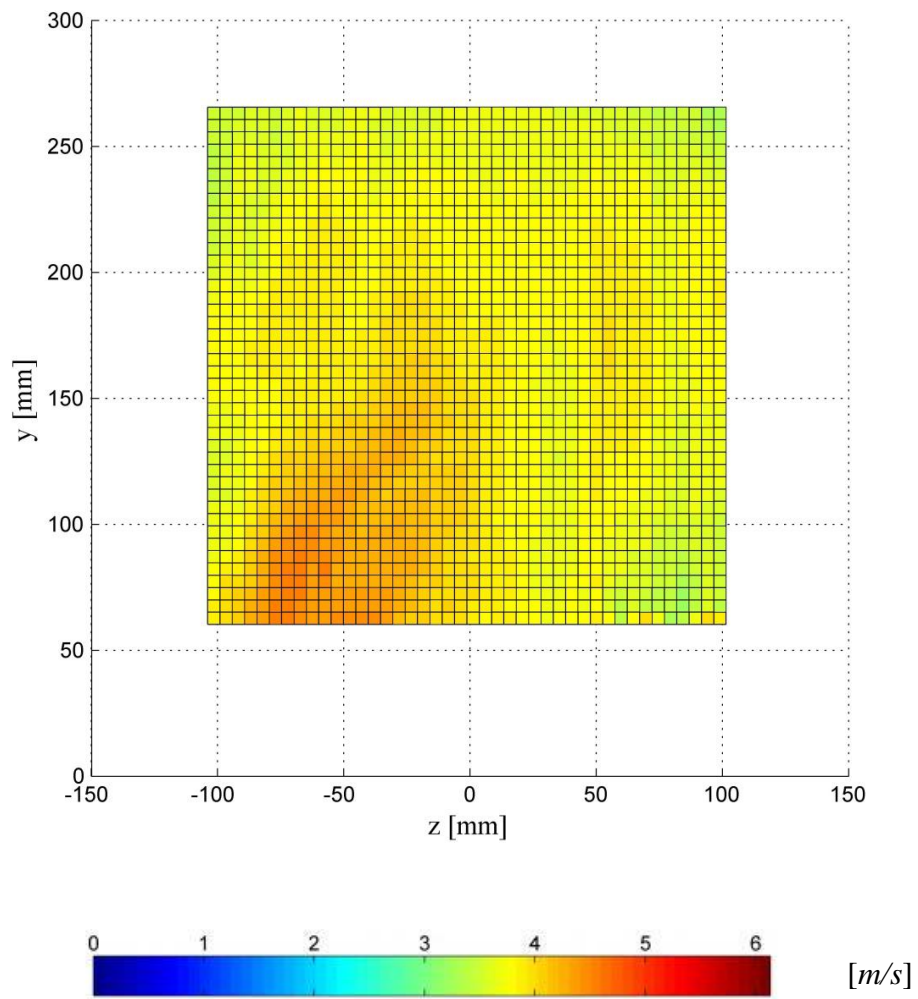
รูปที่ 4. 16 ภาพ Instantaneous ของเจ็ตในกระแสมขวางจากกล้องซ้ายและขวาบนระนาบ
CCD



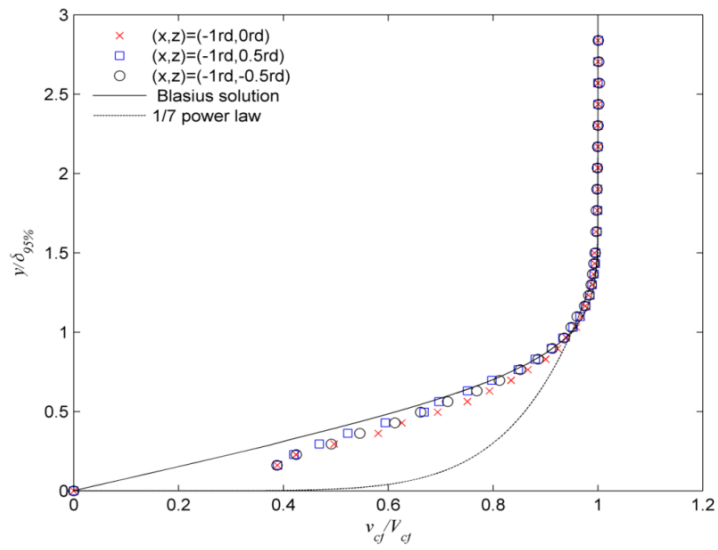
รูปที่ 4. 17 ภาพเวกเตอร์ความเร็วที่ได้จากการประมวลผลภาพ Instantaneous



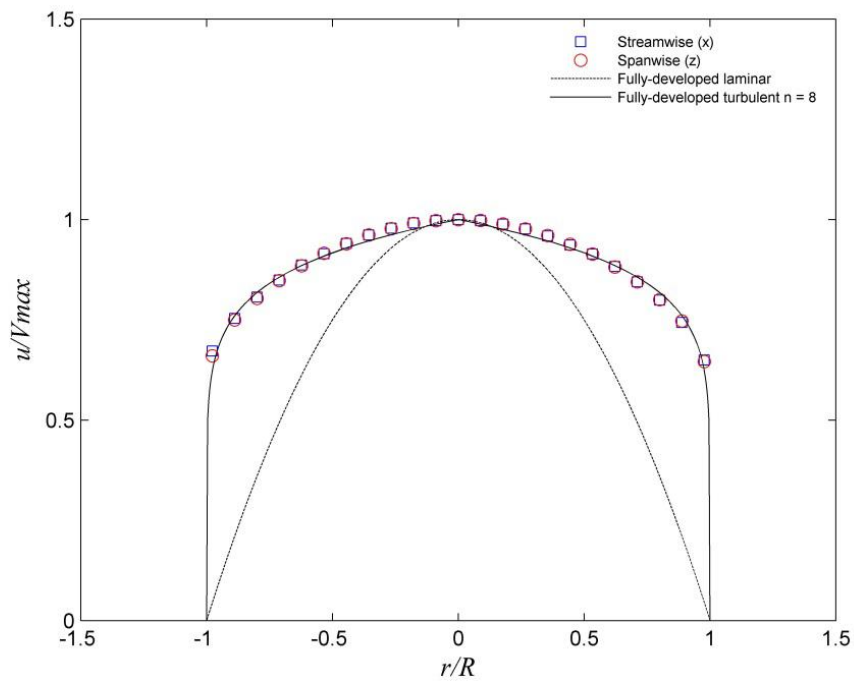
รูปที่ 4. 18 Wiring Diagram ของ SPIV



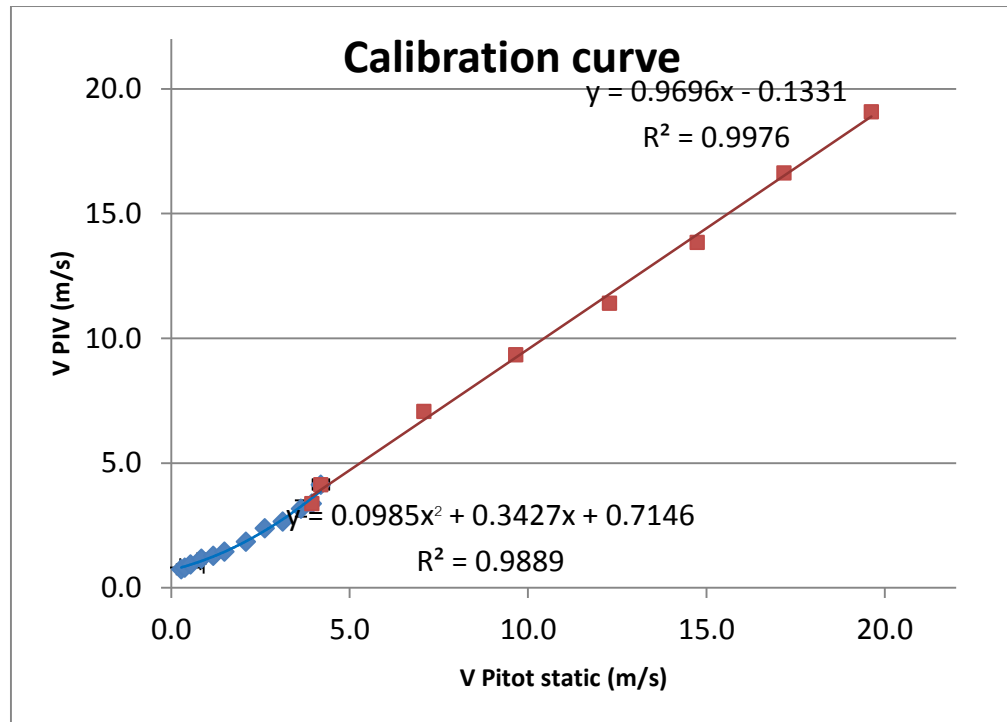
รูปที่ 4. 19 ความสม่ำเสมอของความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวาง ที่ตำแหน่ง $x/rd = -1$ หรือประมาณ 9 เซนติเมตร ด้วย SPIV



รูปที่ 4. 20 รูปร่างของชั้นขอบเขต (Boundary layer) ตามแนว Transverse ซึ่งแสดงโดยค่า $y/\delta_{95\%}$ โดยที่ $V_{cf} = 4.3 \text{ m/s}$

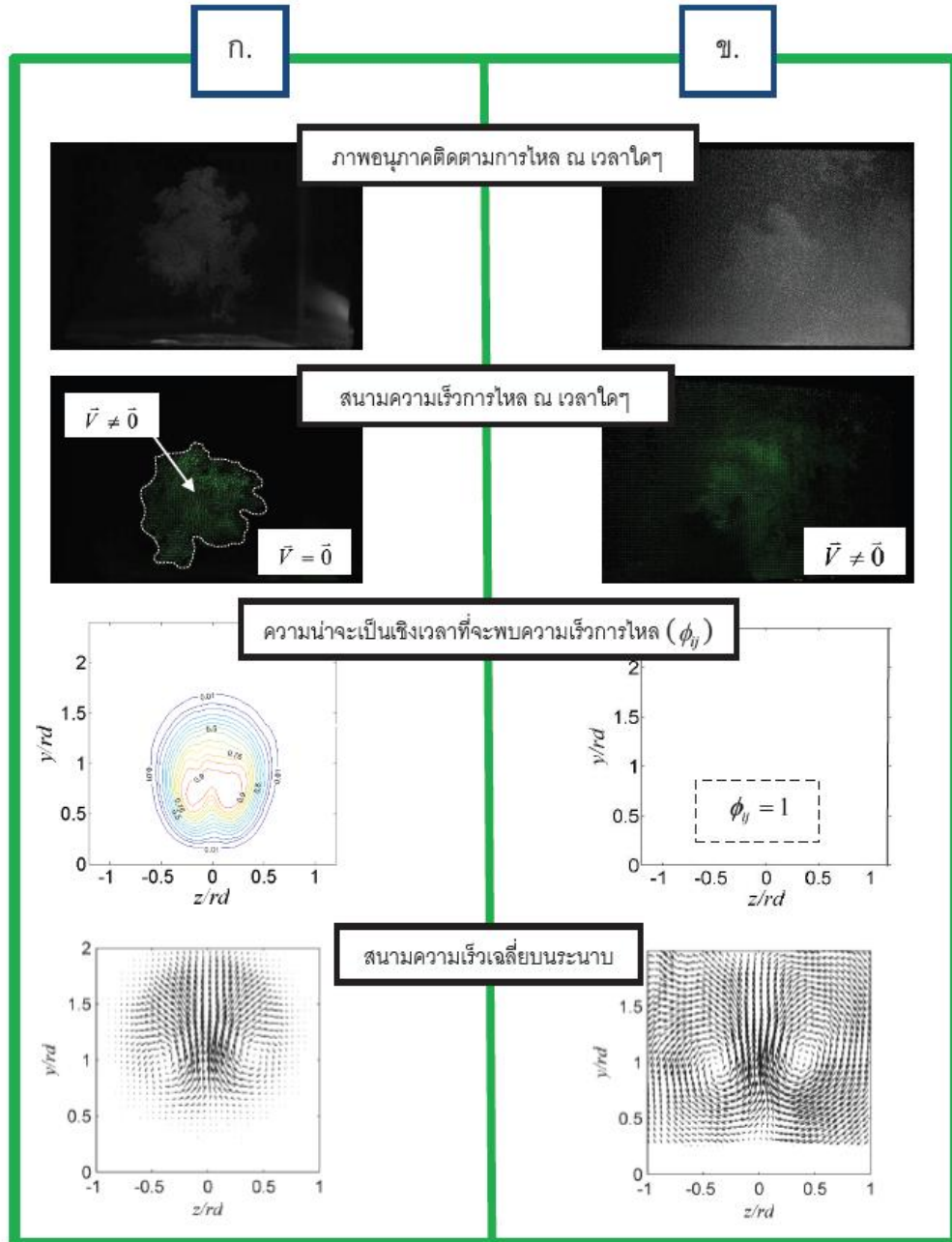


รูปที่ 4. 21 รูปร่างความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออก ในแนว Streamwise และแนว Spanwise



รูปที่ 4. 22 ภาพแสดงผลการสอบเทียบความเร็วที่วัดด้วย SPIV กับ Pitot tube
(Calibration curve) ตั้งแต่ความเร็ว 0.28 – 19.62 m/s (วัดด้วย Pitot tube)

บทที่ 5

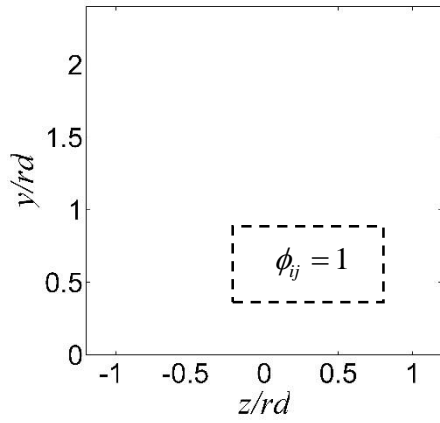


รูปที่ 5.1 แสดงภาพอนุภาคติดตามการไหล ณ เวลาใดๆ, สนามความเร็ว ณ เวลาใดๆ, ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหล และ สนามความเร็วเฉลี่ย

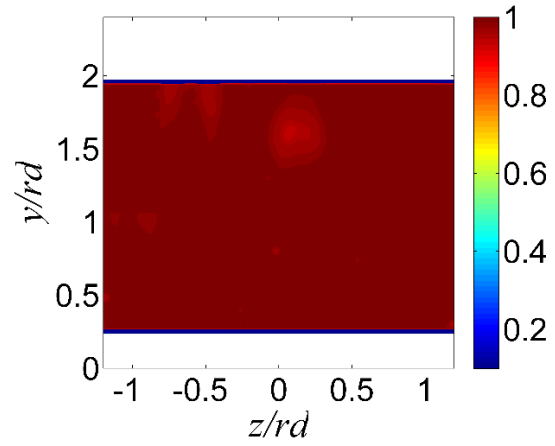
ก. กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต

ข. กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสมขวาง

ก.



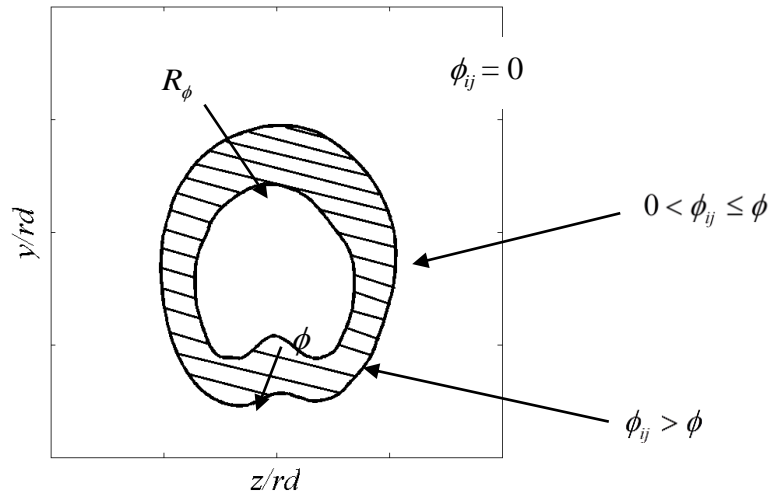
ข.



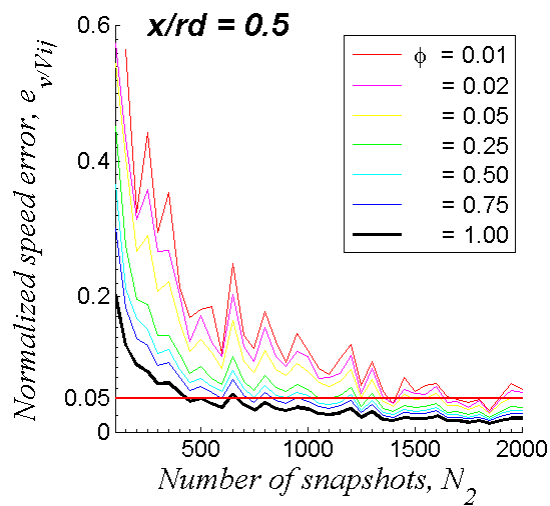
รูปที่ 5. 2 แสดงความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วการไหล กรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง

- ก. ค่าความน่าจะเป็นในทางทฤษฎีซึ่งเท่ากับหนึ่งตลอด
- ข. ค่าความน่าจะเป็นที่ได้จากการวัดความเร็วด้วย SPIV

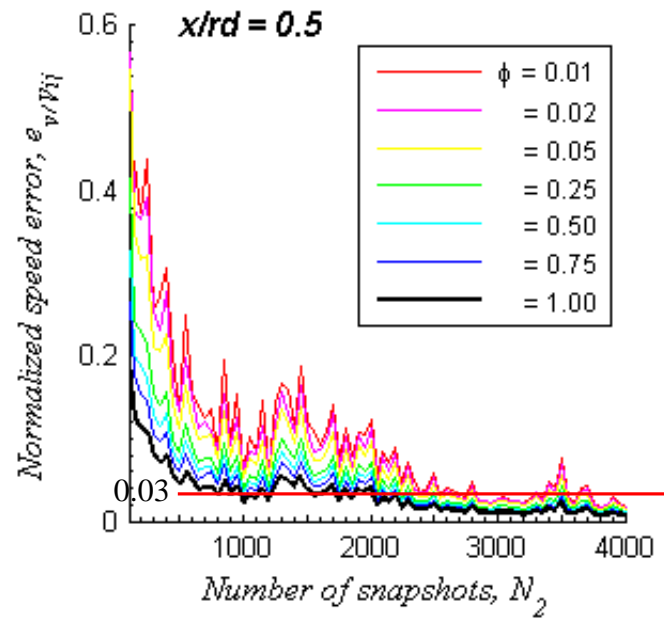
บทที่ 6



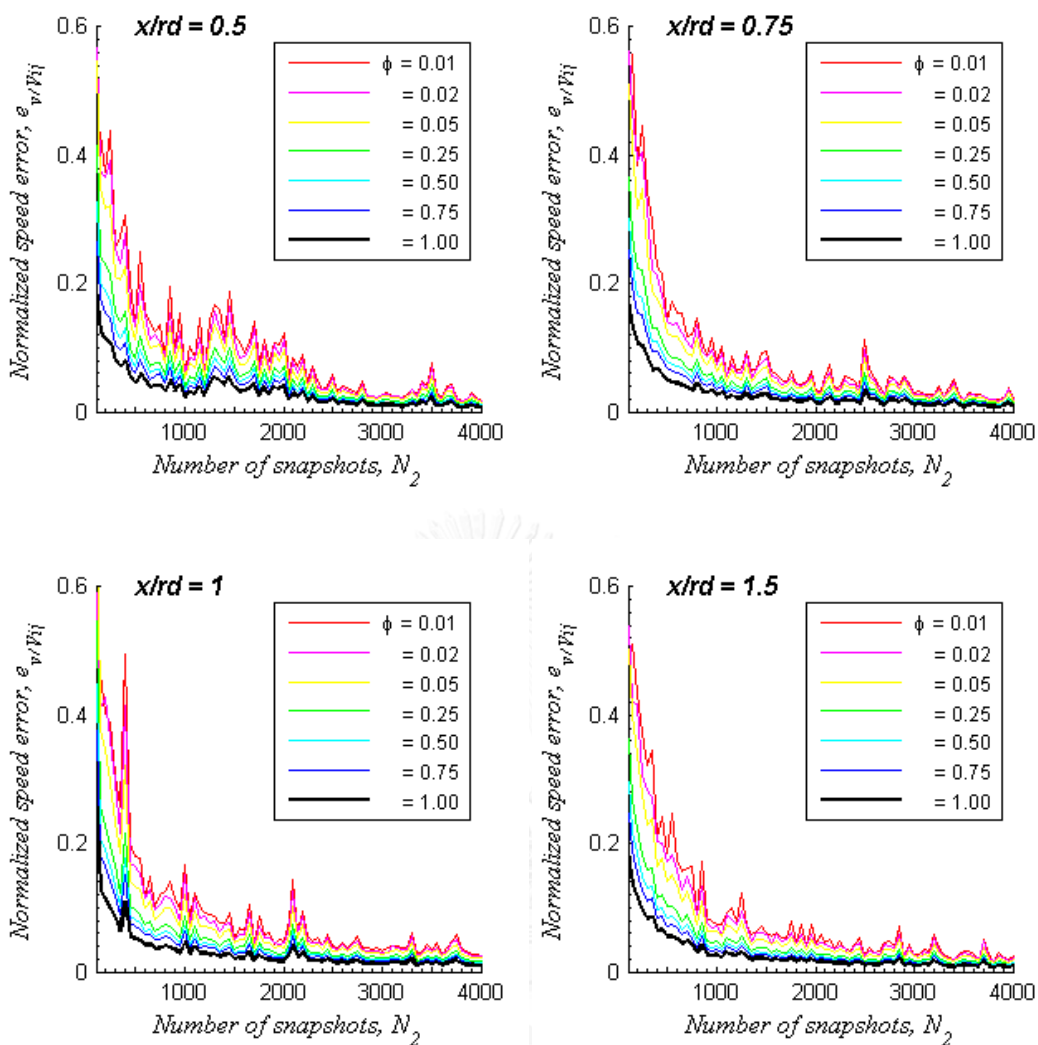
รูปที่ 6. 1 บริเวณที่เป็นเจ็ต (Jet region) ที่มีความน่าจะเป็นที่พบเจ็ตไม่เกิน ϕ ($0 < R_\phi \leq \phi$)



รูปที่ 6. 2 ความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไร้มิติต่อจุด ($e_{v/V_{ij}}$) ในกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ สำหรับจำนวนภาพทั้งหมด 2,000 ภาพ โดยคำนวณทุกๆ 50 ภาพ สำหรับบริเวณที่เป็นเจ็ต (R_ϕ) ที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต (ϕ) ไม่เกิน 0.01 ถึง 1 สำหรับกรณี JICF

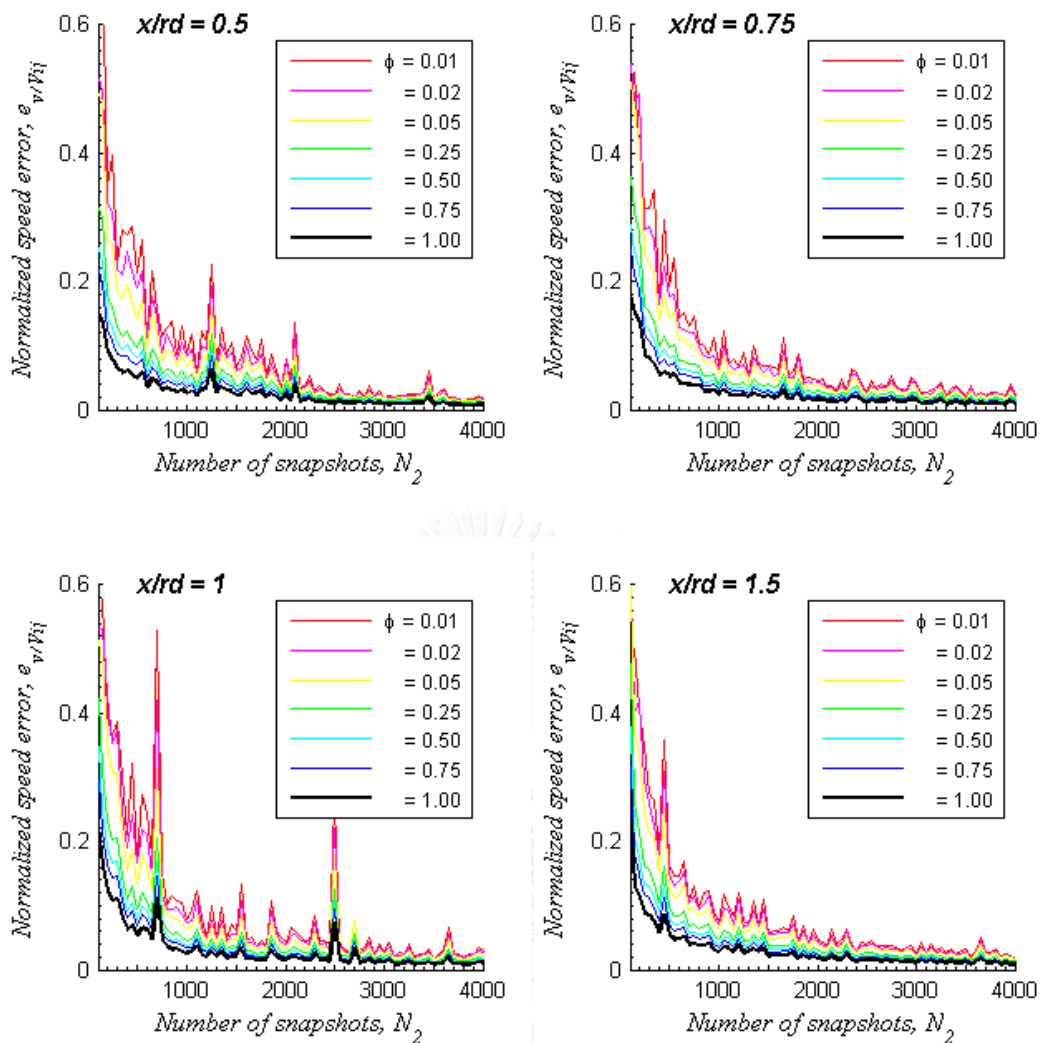


รูปที่ 6. 3 ความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไว้มิติต่อจุด (e_{v/v_i}) ในกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ สำหรับจำนวนภาพทั้งหมด 4,000 ภาพโดยคำนวณทุกๆ 50 ภาพ สำหรับบริเวณที่เป็นเจ็ต (R_ϕ) ที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต (ϕ) ไม่เกิน 0.01 ถึง 1 สำหรับกรณี JICF



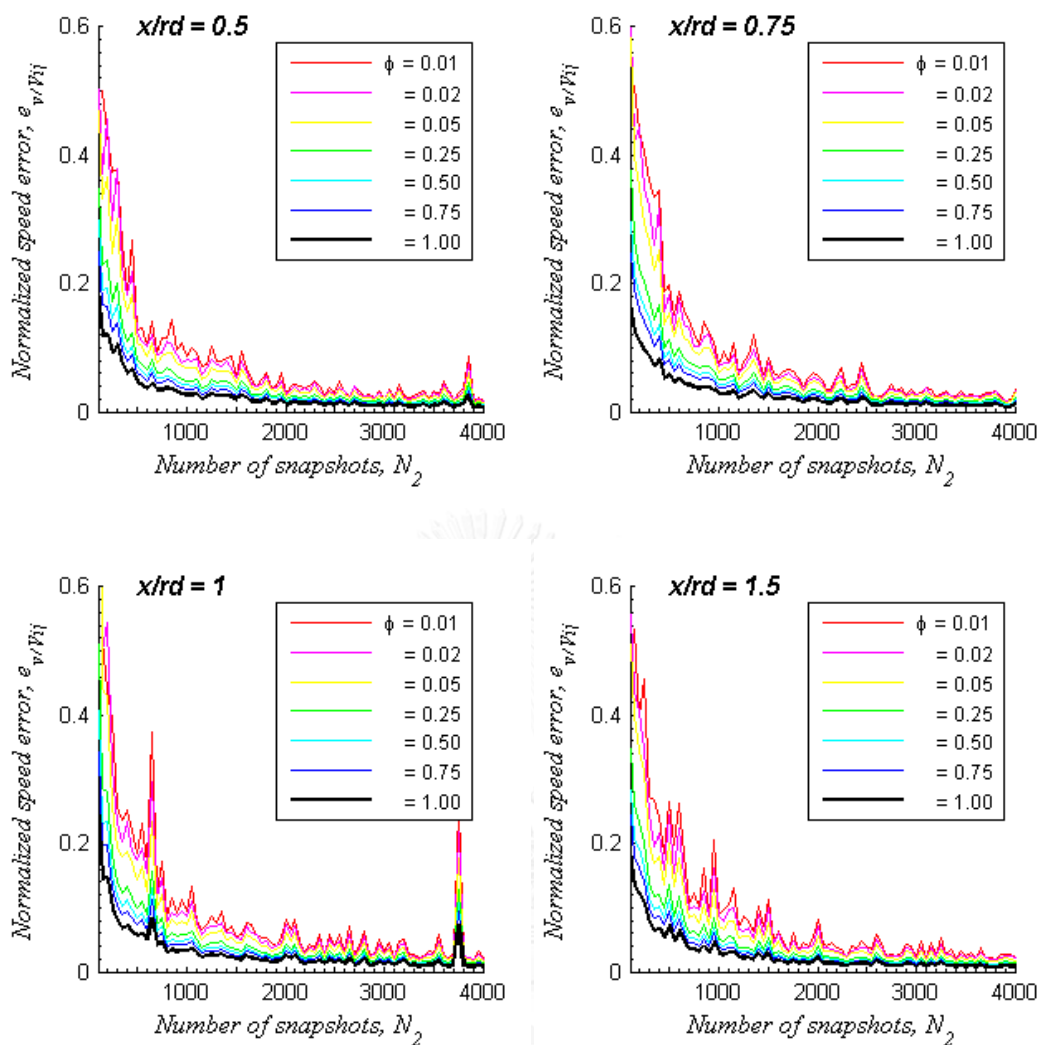
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 6.4 ก การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบพิกัดจากความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไว้มิติต่อจุด ($e_{v/v_{ij}}$) แปรตามจำนวนภาพตั้งแต่ 100 – 4,000 ภาพ โดยคำนวณทุกๆ 50 ภาพ สำหรับบริเวณที่เป็นเจ็ต (R_ϕ) ที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต (ϕ) ไม่เกิน 0.01 ถึง 1 สำหรับกรณี JICF



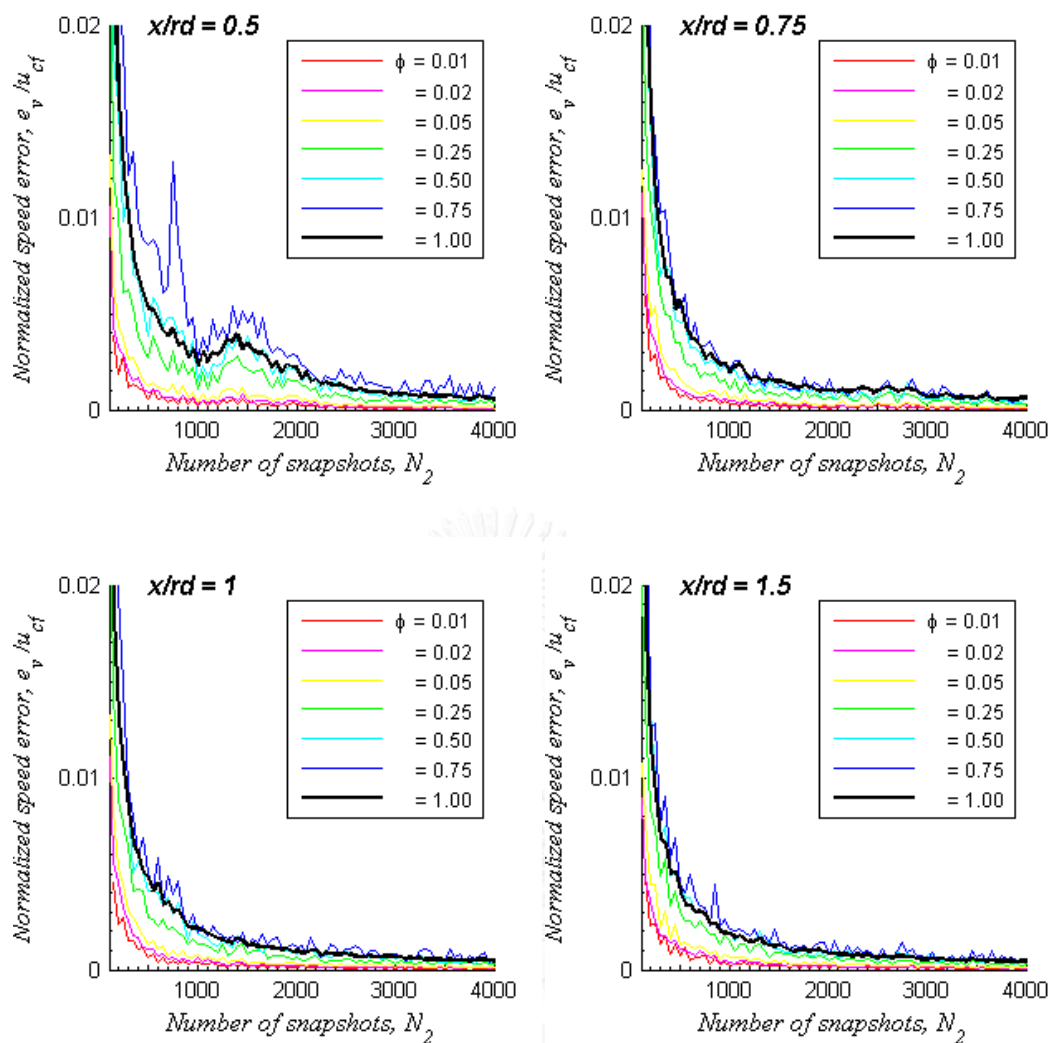
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 6.4 ข การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบพิกัดจากความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไร้มิติต่อจุด ($e_{v/v_{ij}}$) แปรตามจำนวนภาพตั้งแต่ 100 – 4,000 ภาพ โดยคำนวณทุกๆ 50 ภาพ สำหรับบริเวณที่เป็นเจ็ต (R_ϕ) ที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต (ϕ) ไม่เกิน 0.01 ถึง 1 สำหรับกรณี I15

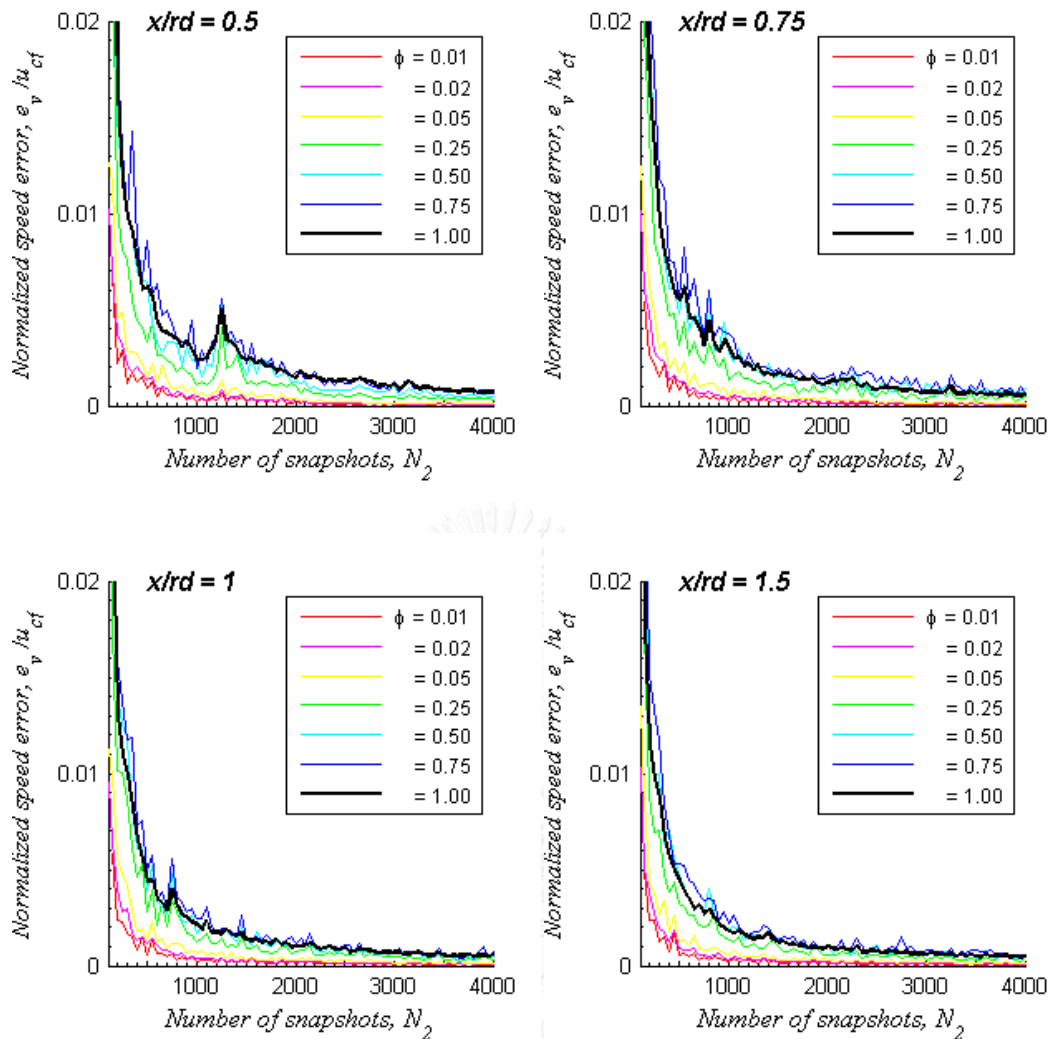


CHULALONGKORN UNIVERSITY

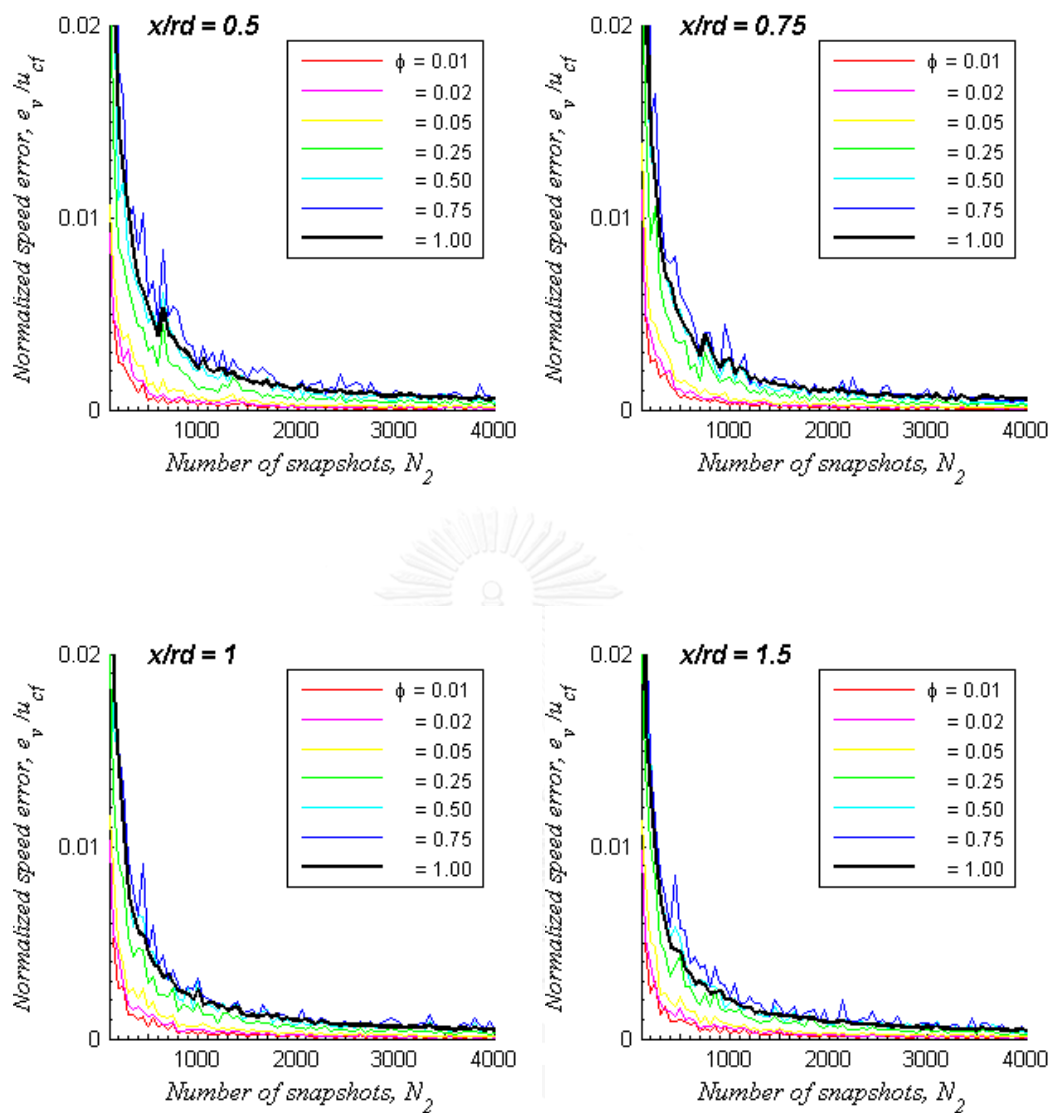
รูปที่ 6.4 ค ลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบพิกัดจากความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยไร้มิติต่อจุด ($e_{v/v_{ij}}$) แปรตามจำนวนภาพตั้งแต่ 100 – 4,000 ภาพ โดยคำนวณทุกๆ 50 ภาพ สำหรับบริเวณที่เป็นเจ็ต (R_ϕ) ที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต (ϕ) ไม่เกิน 0.01 ถึง ไม่เกิน 1 สำหรับกรณี I135



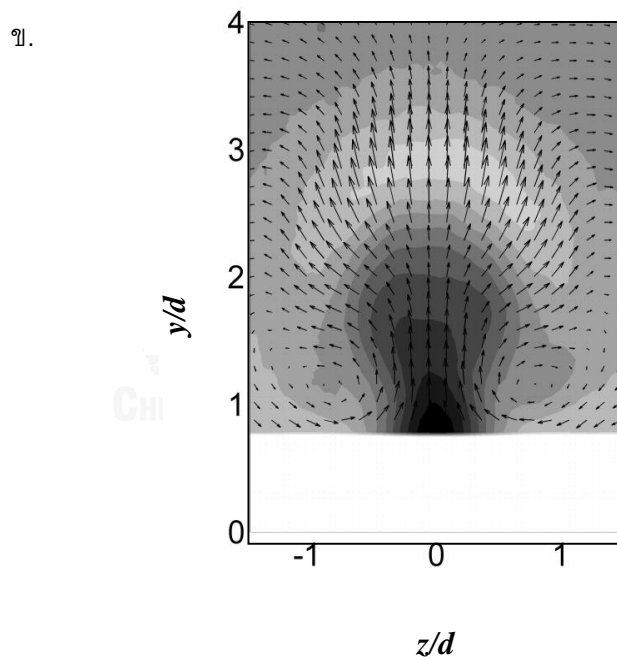
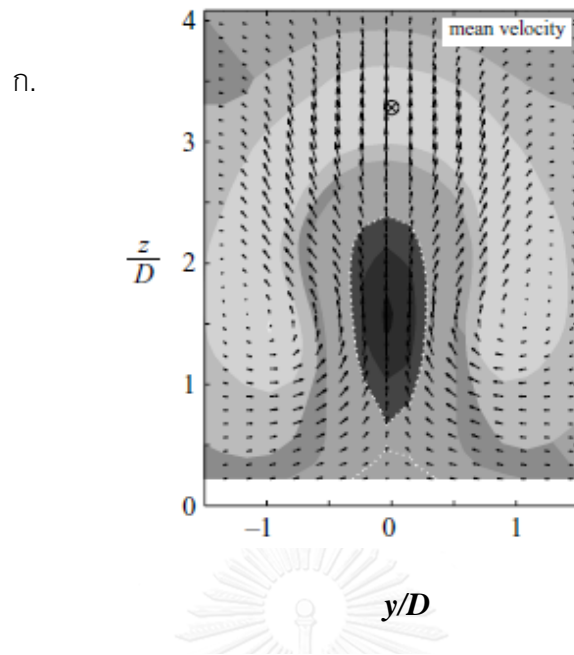
รูปที่ 6.5 ก การลู่เข้าจากความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสลมขวางต่อจุด (e_v / u_{cf}) แปรตามจำนวนภาพตั้งแต่ 100 – 4,000 ภาพ โดยคำนวณทุกๆ 50 ภาพ สำหรับบริเวณที่เป็นเจ็ต (R_ϕ) ที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต (ϕ) ไม่เกิน 0.01 ถึง 1 สำหรับกรณี JICF



รูปที่ 6.5 ข การลู่เข้าจากความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสลมขวางต่อจุด (e_v / u_{cf}) แปรตามจำนวนภาพตั้งแต่ 100 – 4,000 ภาพ โดยคำนวณทุกๆ 50 ภาพ สำหรับบริเวณที่เป็นเจ็ต (R_ϕ) ที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต (ϕ) ไม่เกิน 0.01 ถึง 1 สำหรับกรณี I15



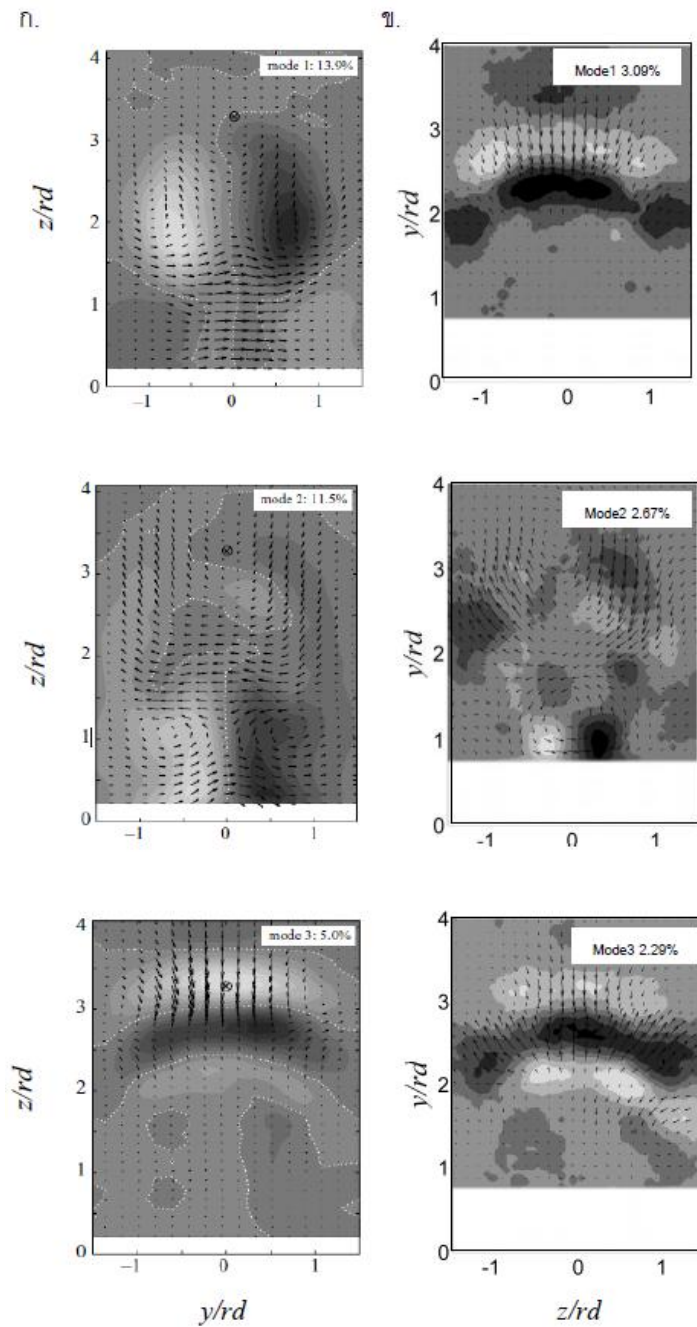
รูปที่ 6.5 ค การลู่เข้าจากความคลาดเคลื่อนความเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสลมขวางต่อจุด (e_v / u_{cf}) แปรตามจำนวนภาพตั้งแต่ 100 – 4,000 ภาพ โดยคำนวณทุกๆ 50 ภาพ สำหรับบริเวณที่เป็นเจ็ต (R_ϕ) ที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต (ϕ) ไม่เกิน 0.01 ถึง 1 สำหรับกรณี I135



รูปที่ 6. 6 การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์ความเร็วของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบ $y-z$ ต่อกระแสลมขวาง ($\vec{V}_{yz} / u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z) / u_{cf}$)

ก. Meyer *et al.* (2007)

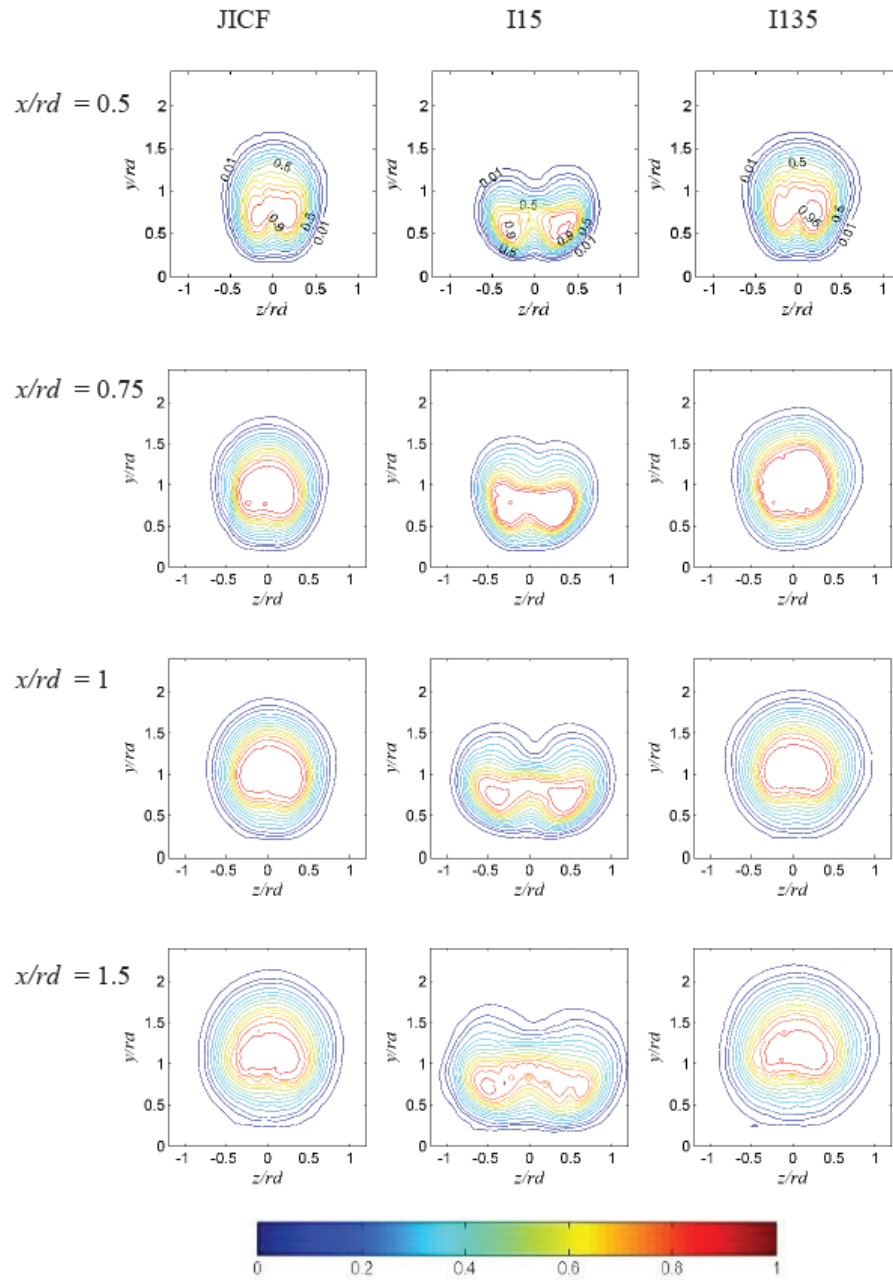
ข. การทดลองเพื่อการสอบทวนของงานวิจัยนี้ในกรณีที่ไม่อนุญาตติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง



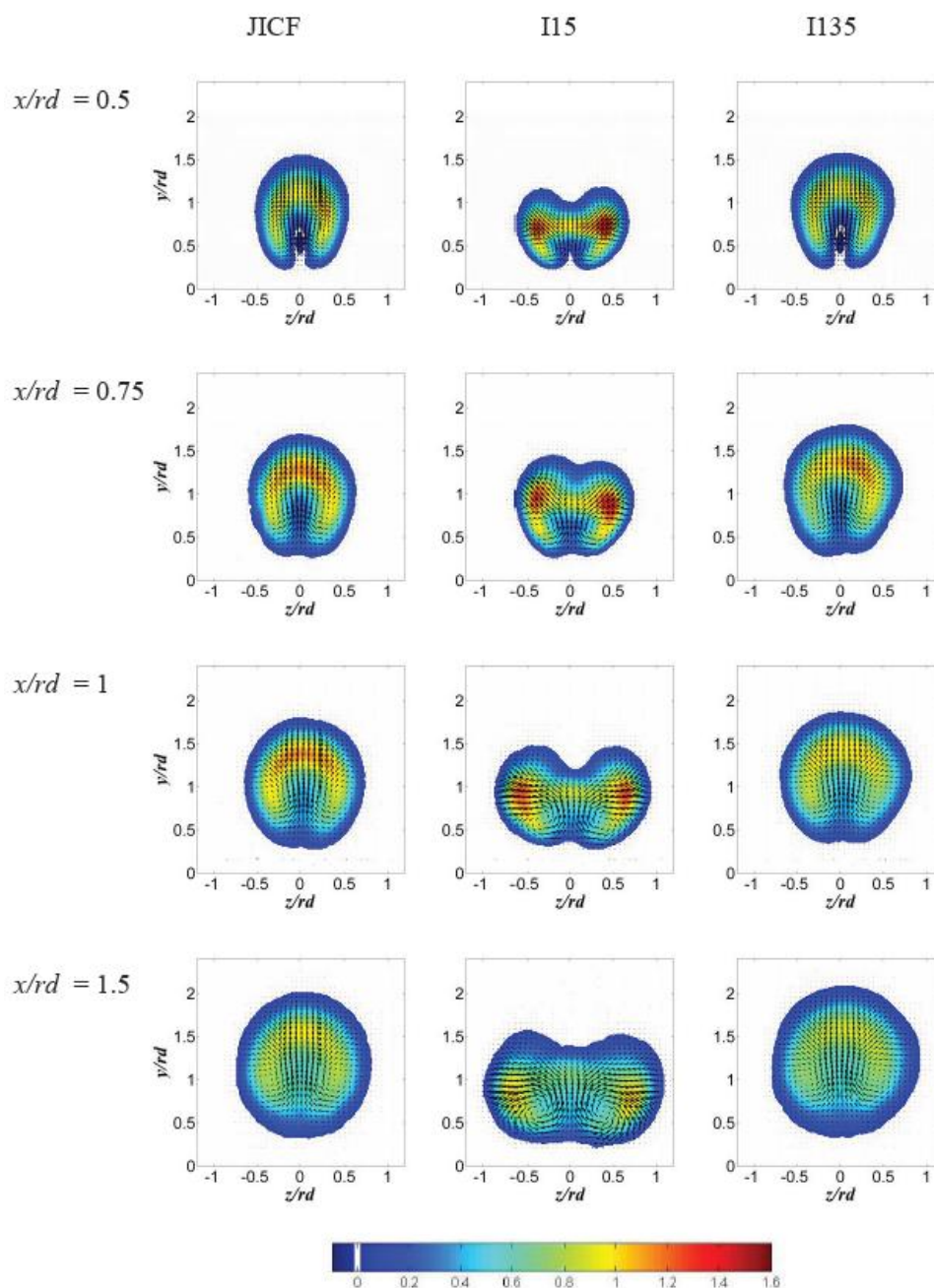
รูปที่ 6. 7 แสดงการเปรียบเทียบ POD mode 1, 2, และ 3 พร้อมด้วยระดับพลังงานกำกับในแต่ละ POD mode ระหว่างผลการทดลองของ

- ก. Meyer *et al.* (2007)
- ข. การทดลองเพื่อทดสอบทวนของงานวิจัยนี้ในกรณีที่ไม่อนุญาตติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง

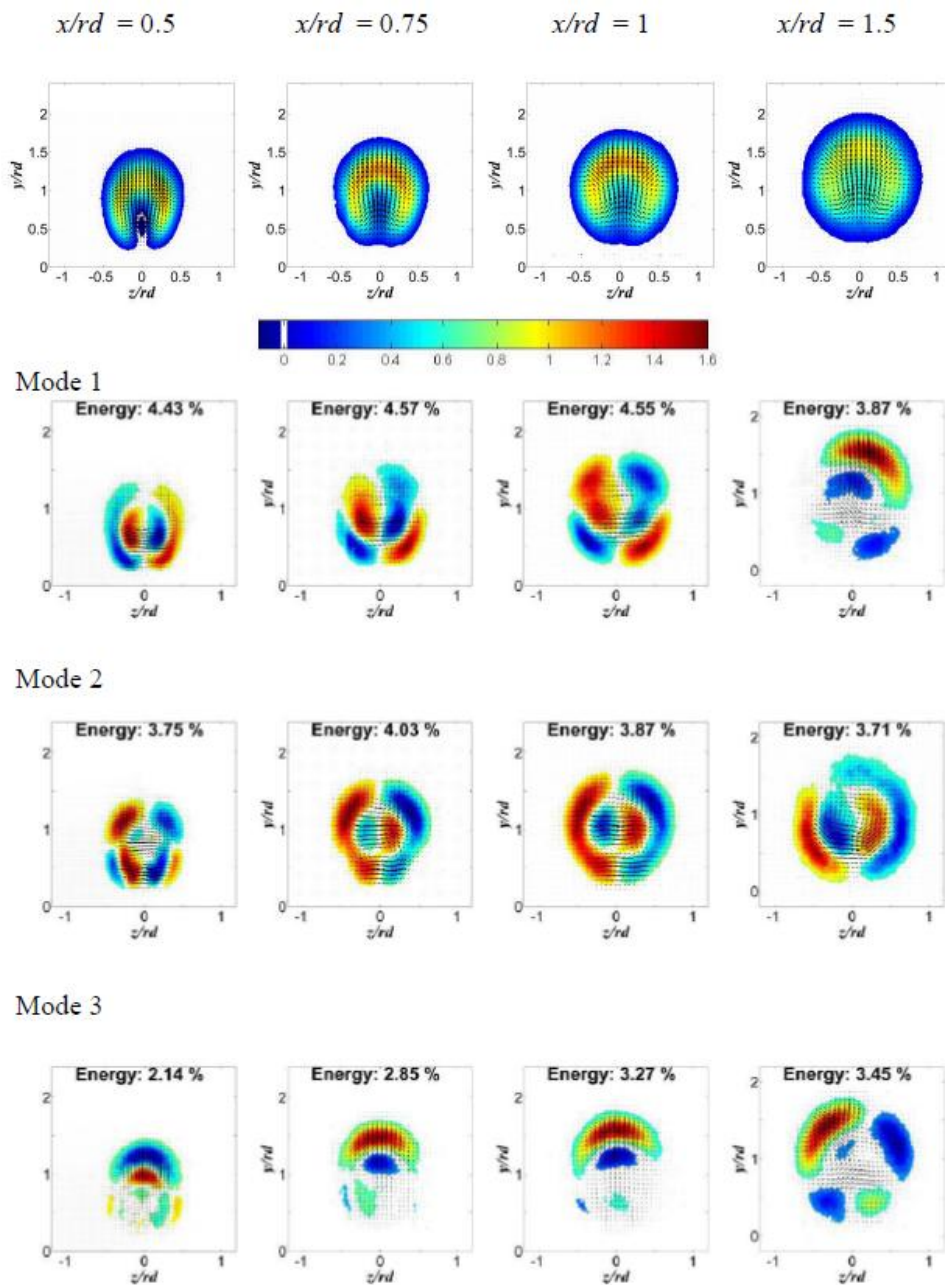
บทที่ 7



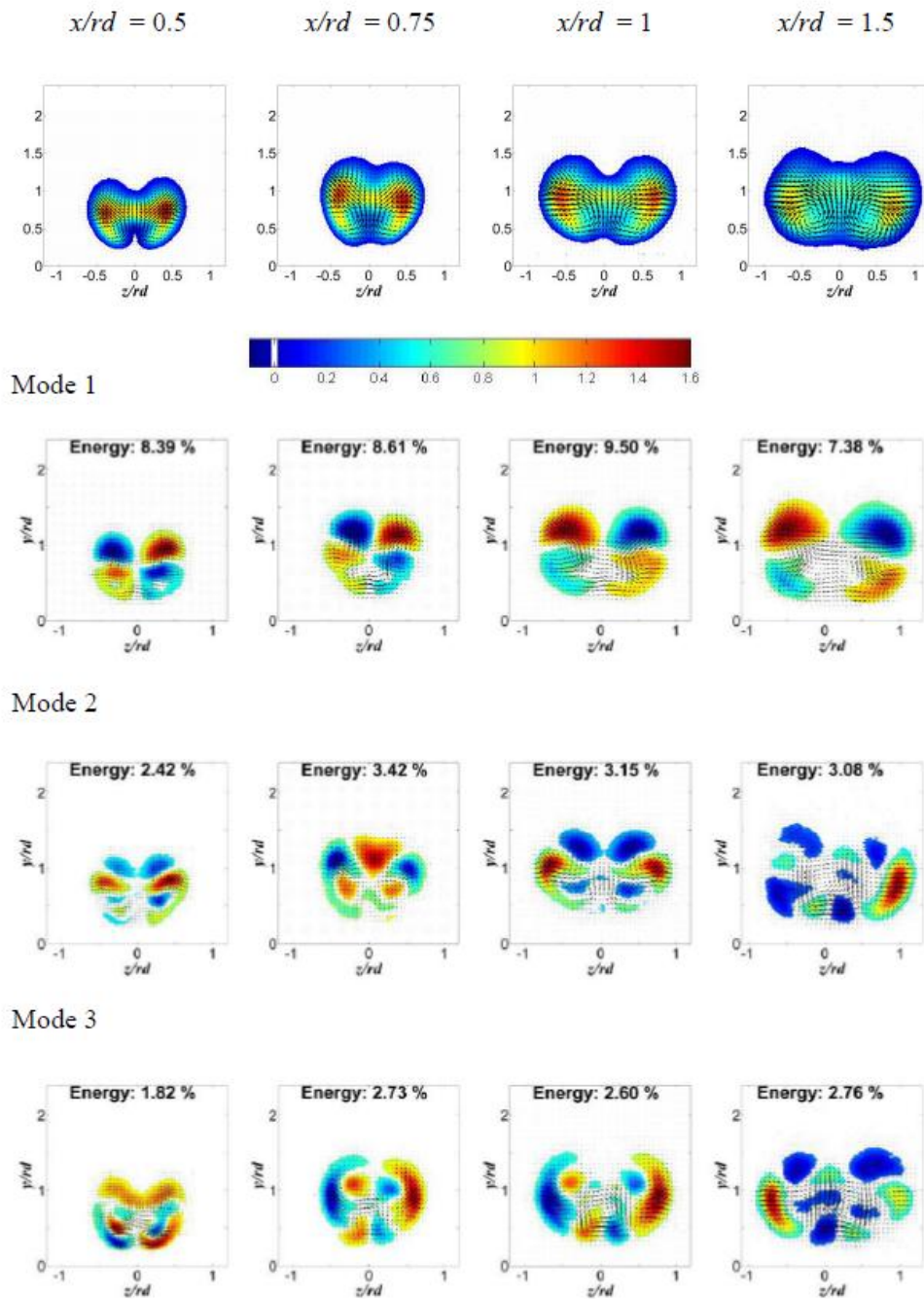
รูปที่ 7.1 การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่พบความเร็วเจ็ด ณ จุดใดๆ ของกรณี JICF, I15 และ I135 โดยแสดงค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95



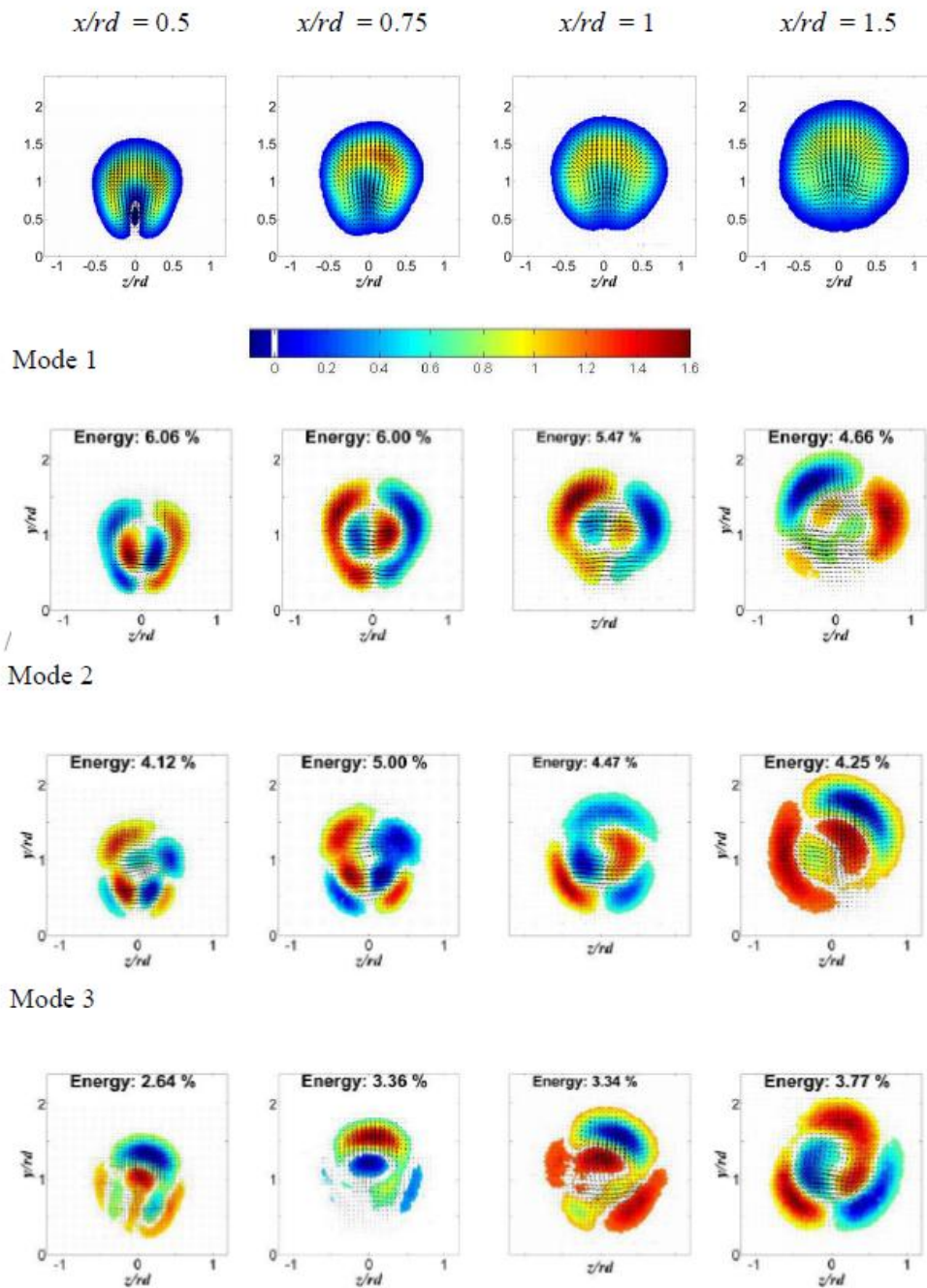
รูปที่ 7.2 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสมขวาง (V_x/u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ ($\vec{V}_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/u_{cf}$) กรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต



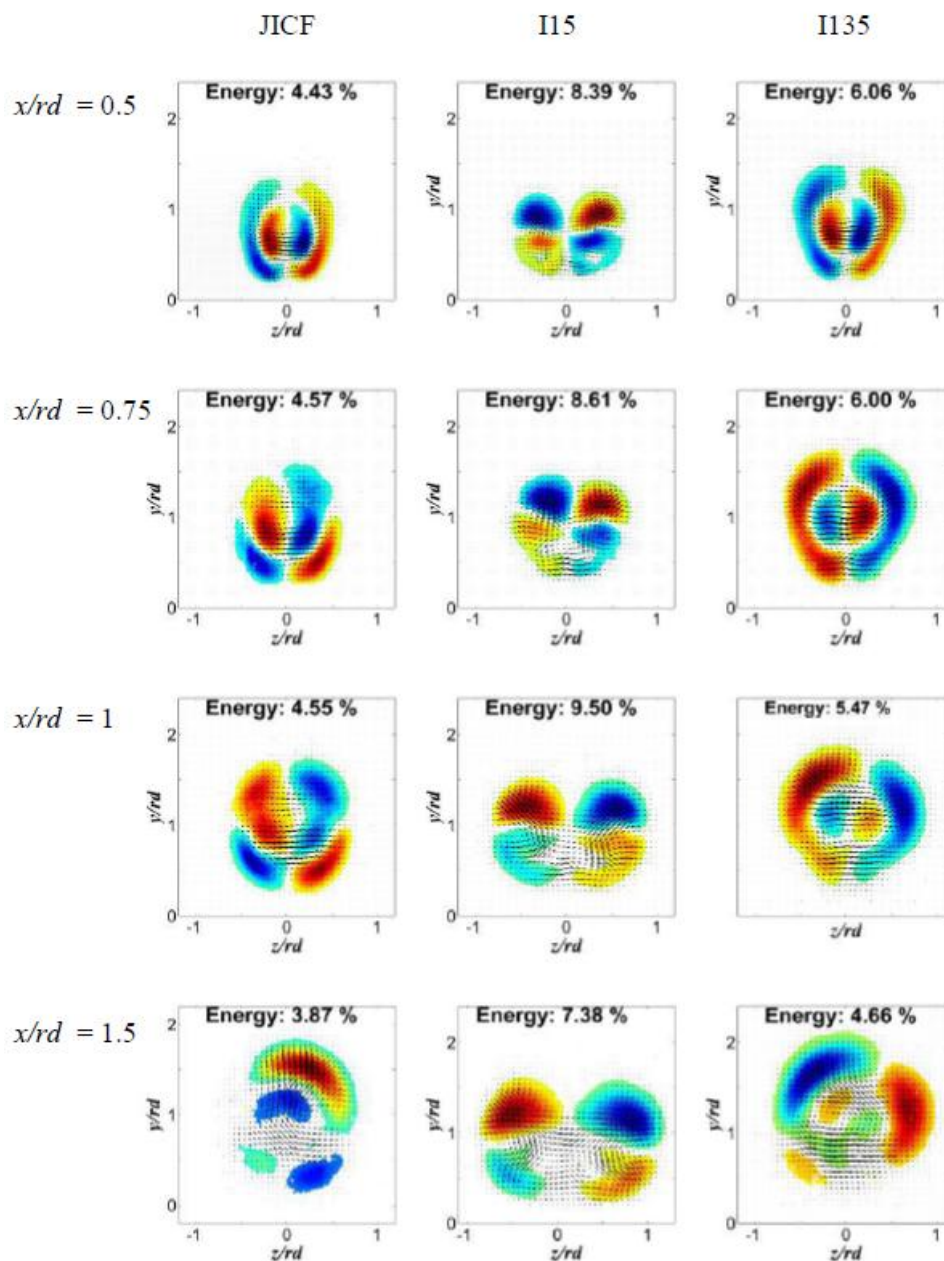
รูปที่ 7.3 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ ($\vec{V}_{yz} / u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z) / u_{cf}$) และ POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานกำกับสำหรับกรณี JICF เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต



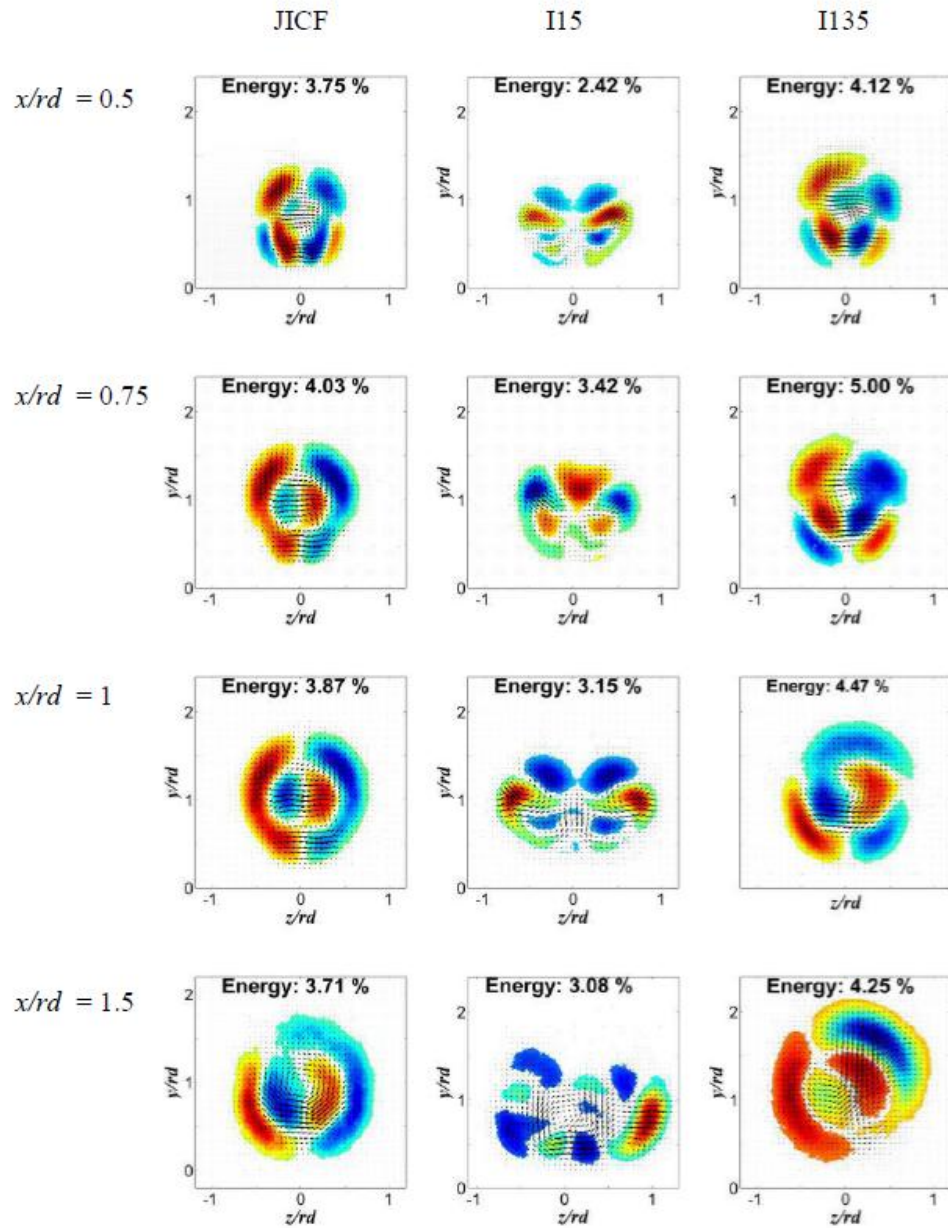
รูปที่ 7.4 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บนระนาบ $y-z$ และ POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งทั้งระดับพลังงานกำกับสำหรับกรณี I15 เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต



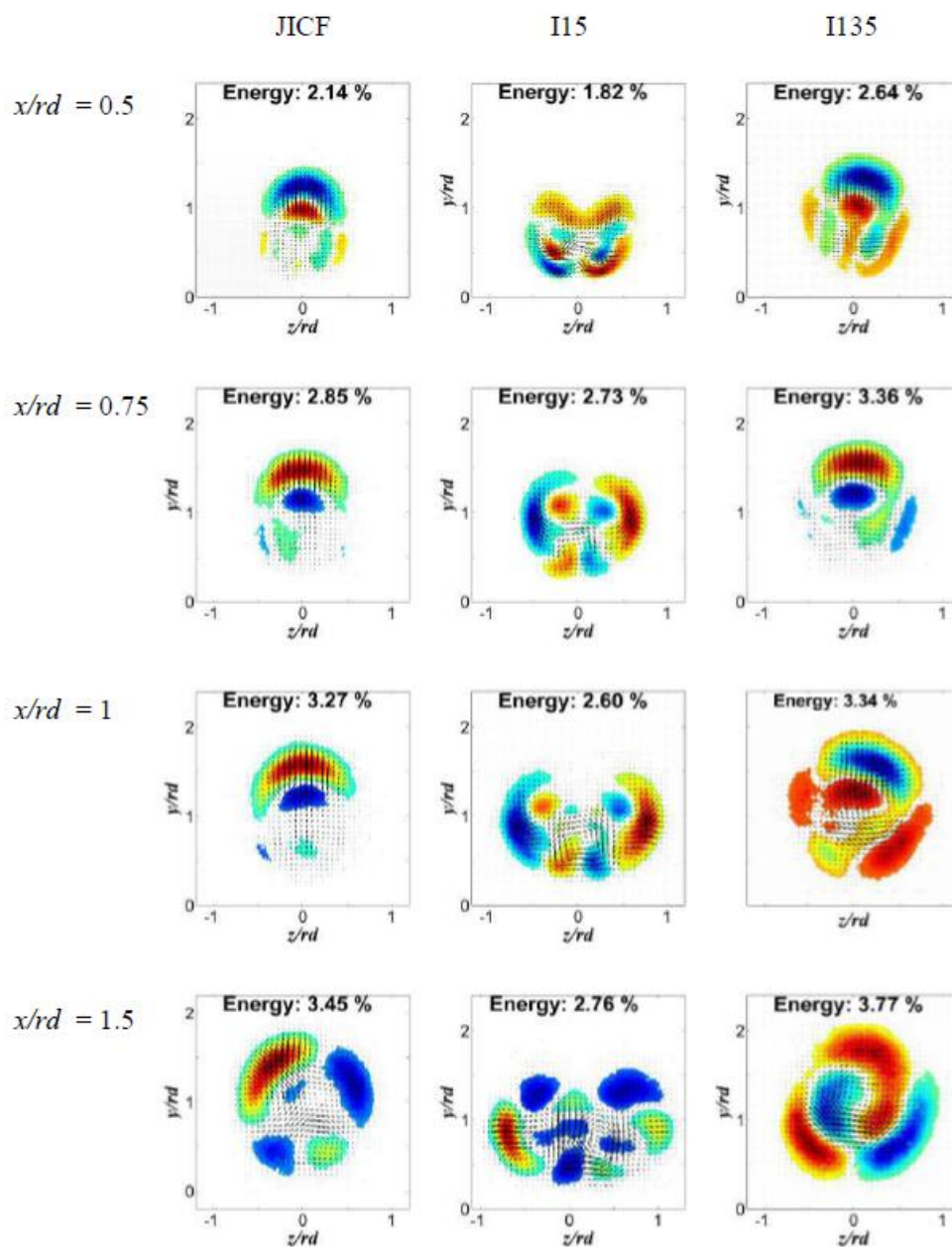
รูปที่ 7.5 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกะแผลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บนระนาบ yz และ POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานกำกับสำหรับกรณี I15 เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 กรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต



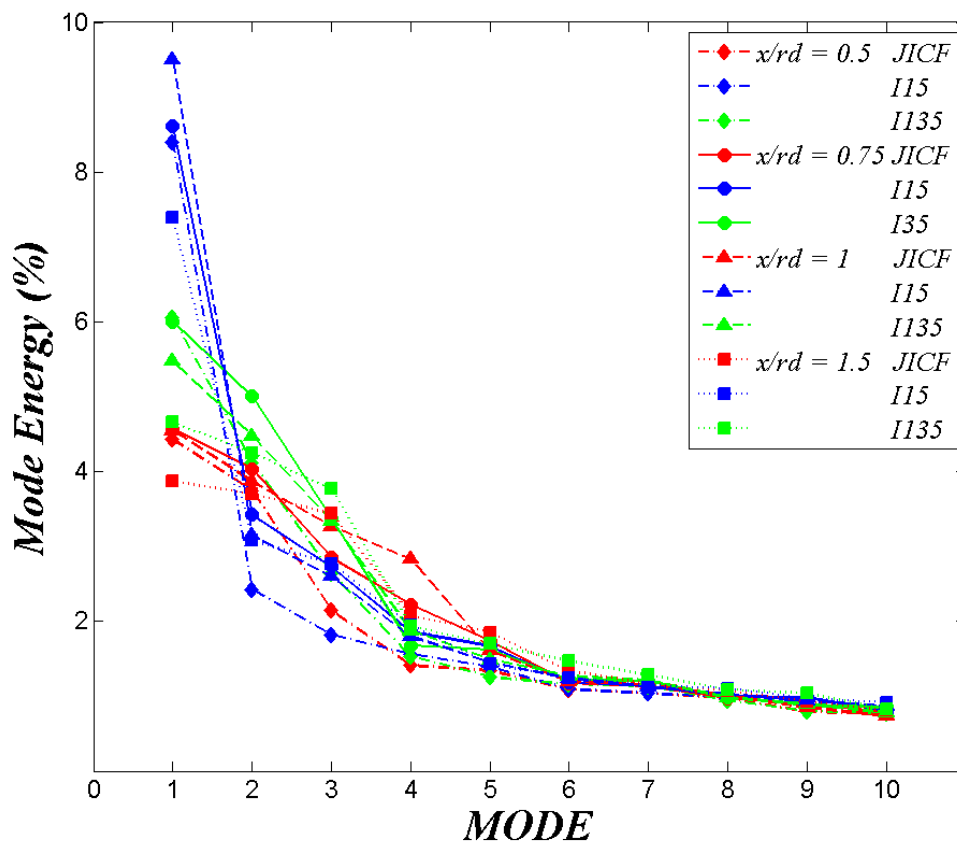
รูปที่ 7.6 ก โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ POD mode 1 ของกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/r_d = 0.5$ ถึง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต



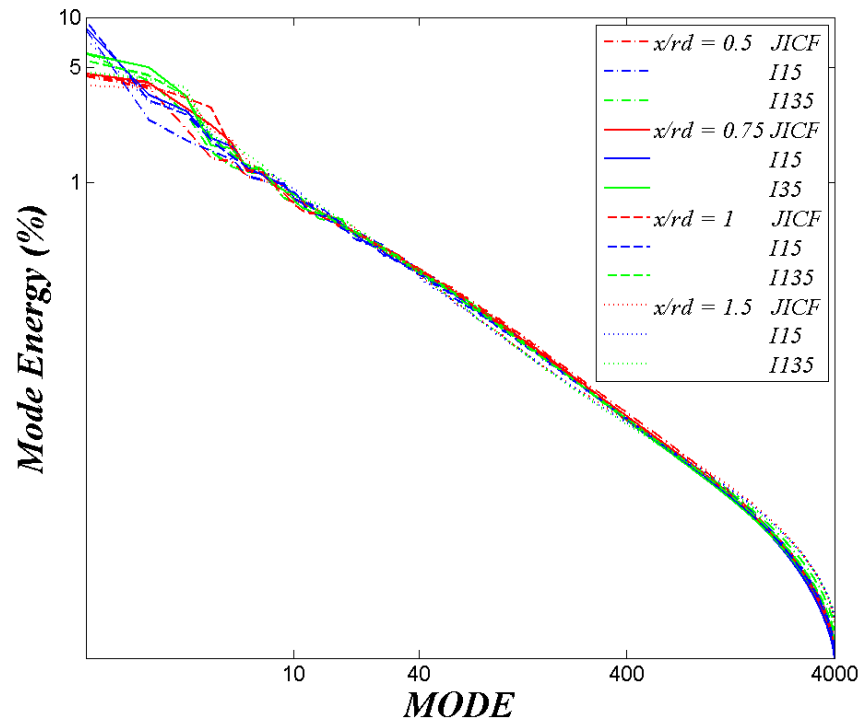
รูปที่ 7.6 ข โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ POD mode 2 ของกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต



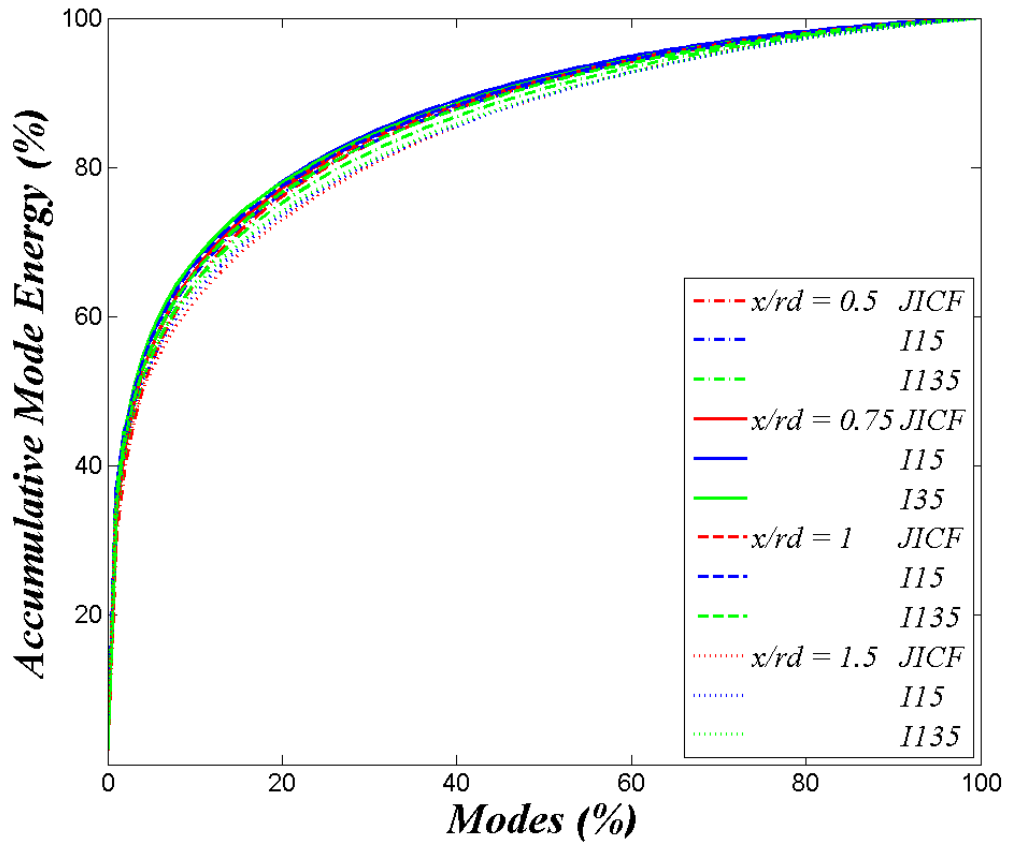
รูปที่ 7.6 ค โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ POD mode 3 ของกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/r_d = 0.5$ ถึง 1.5 กรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต



รูปที่ 7.7 การกระจายตัวของระดับพลังงานไหลปั่นป่วน (Energy) ของ POD mode 1 ถึง 10 สำหรับกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5, 0.75, 1$ และ 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต

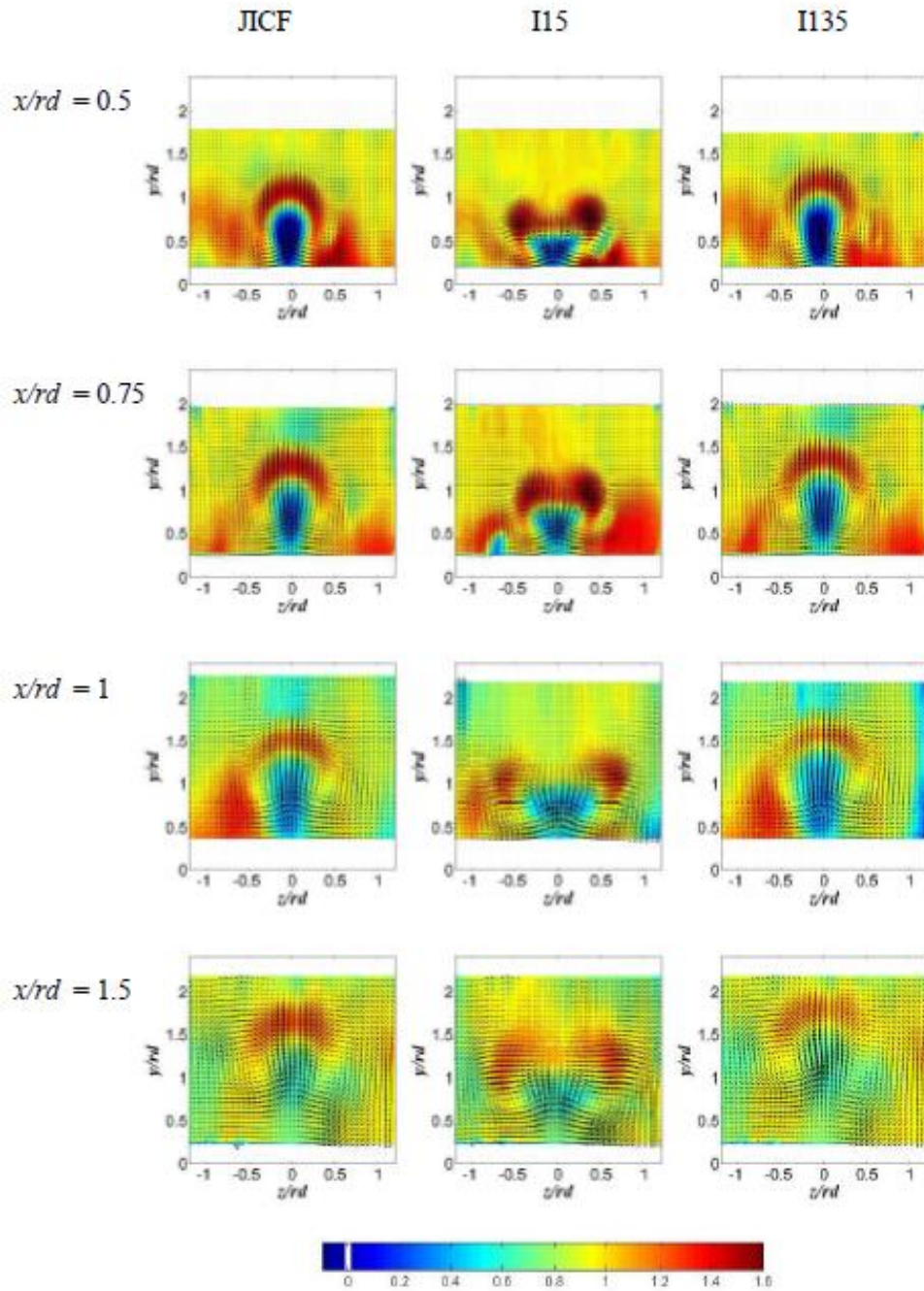


รูปที่ 7. 8 การกระจายตัวของระดับพลังงานไหลปั่นป่วน (Energy) ของ POD mode สำหรับกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5, 0.75, 1$ และ 1. กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต

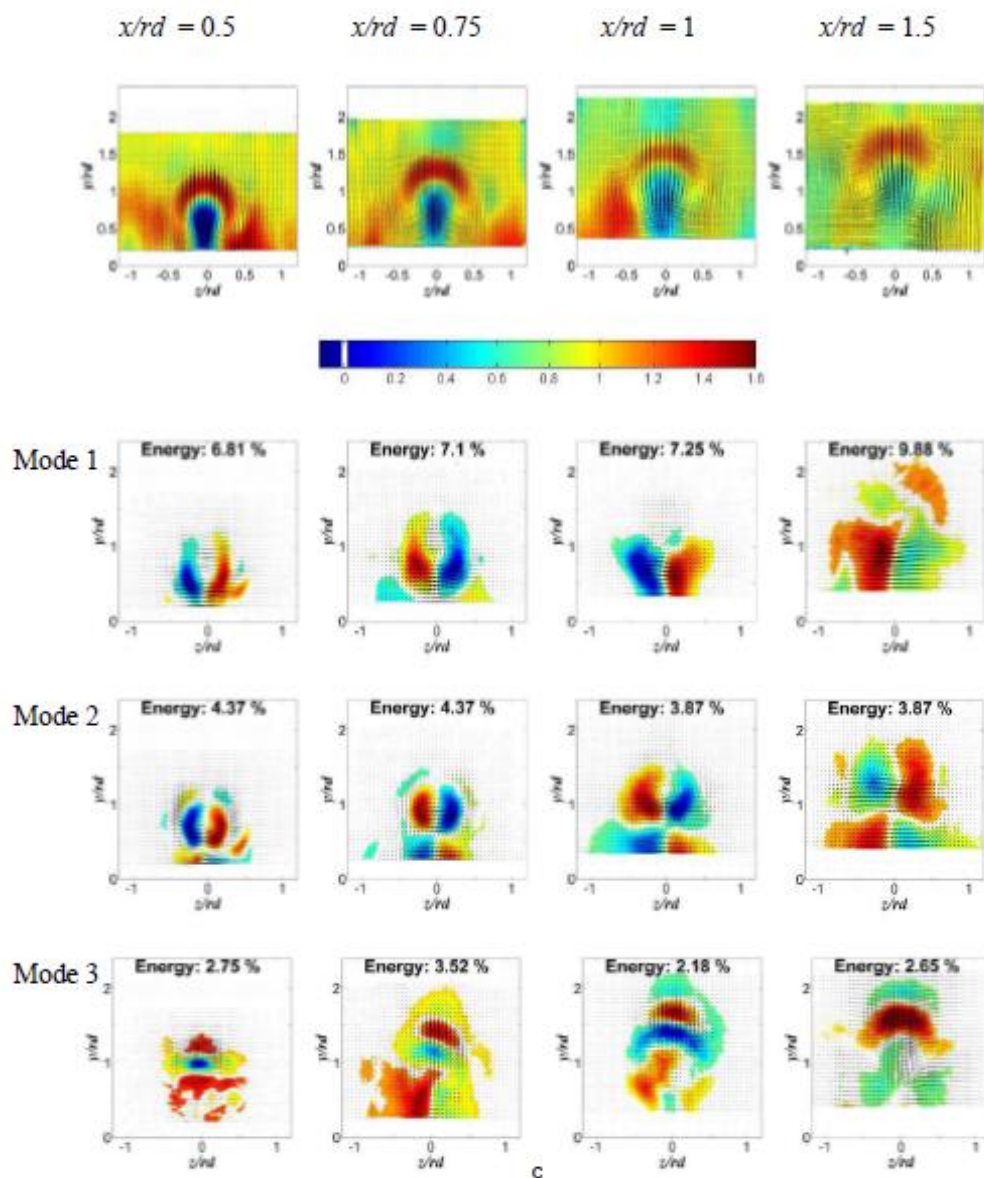


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

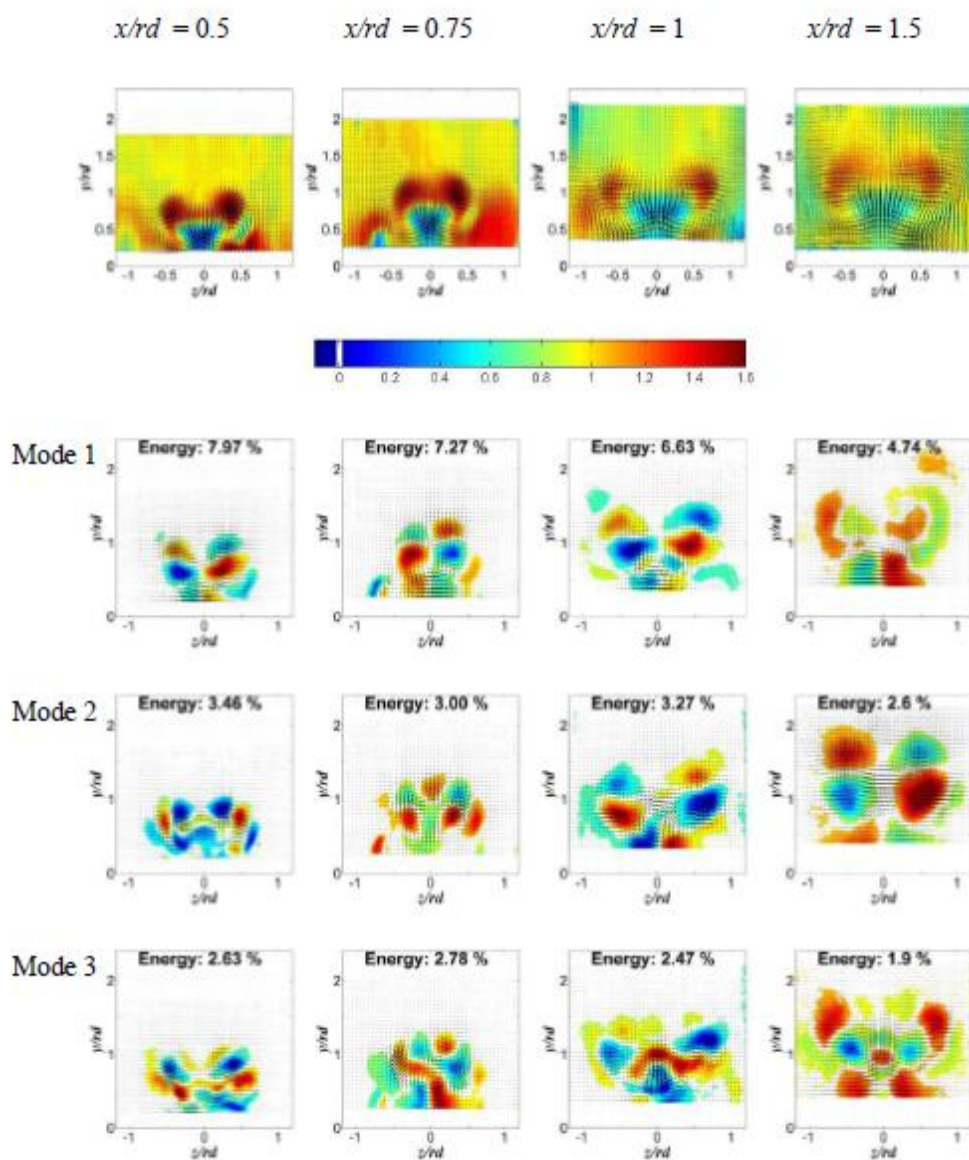
รูปที่ 7. 9 ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสม (Accumulative mode energy) ในแต่ละจำนวน Modes สำหรับกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$, 0.75 , 1 และ 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต



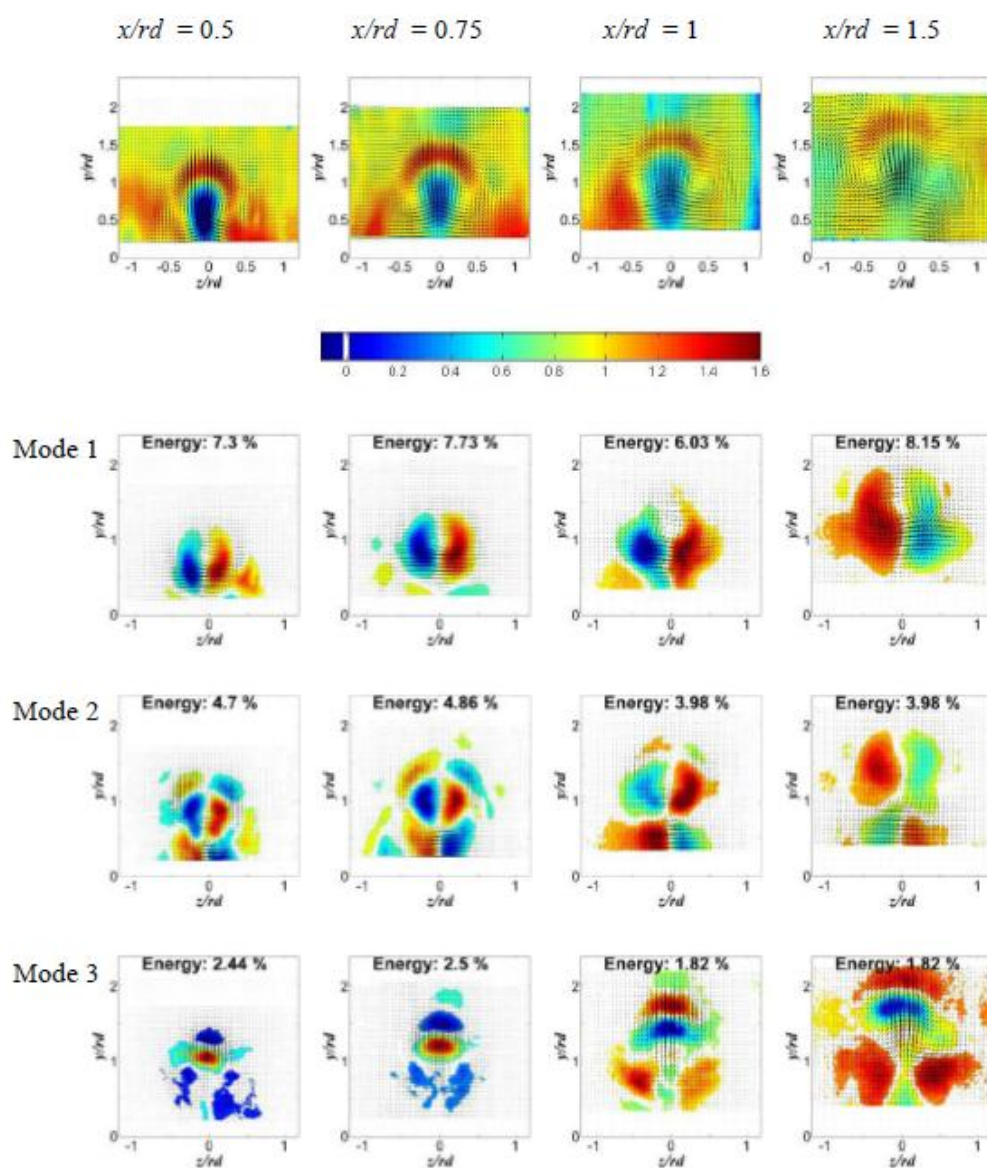
รูปที่ 7. 10 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บนระนาบ $y - z$ กรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสมขวาง



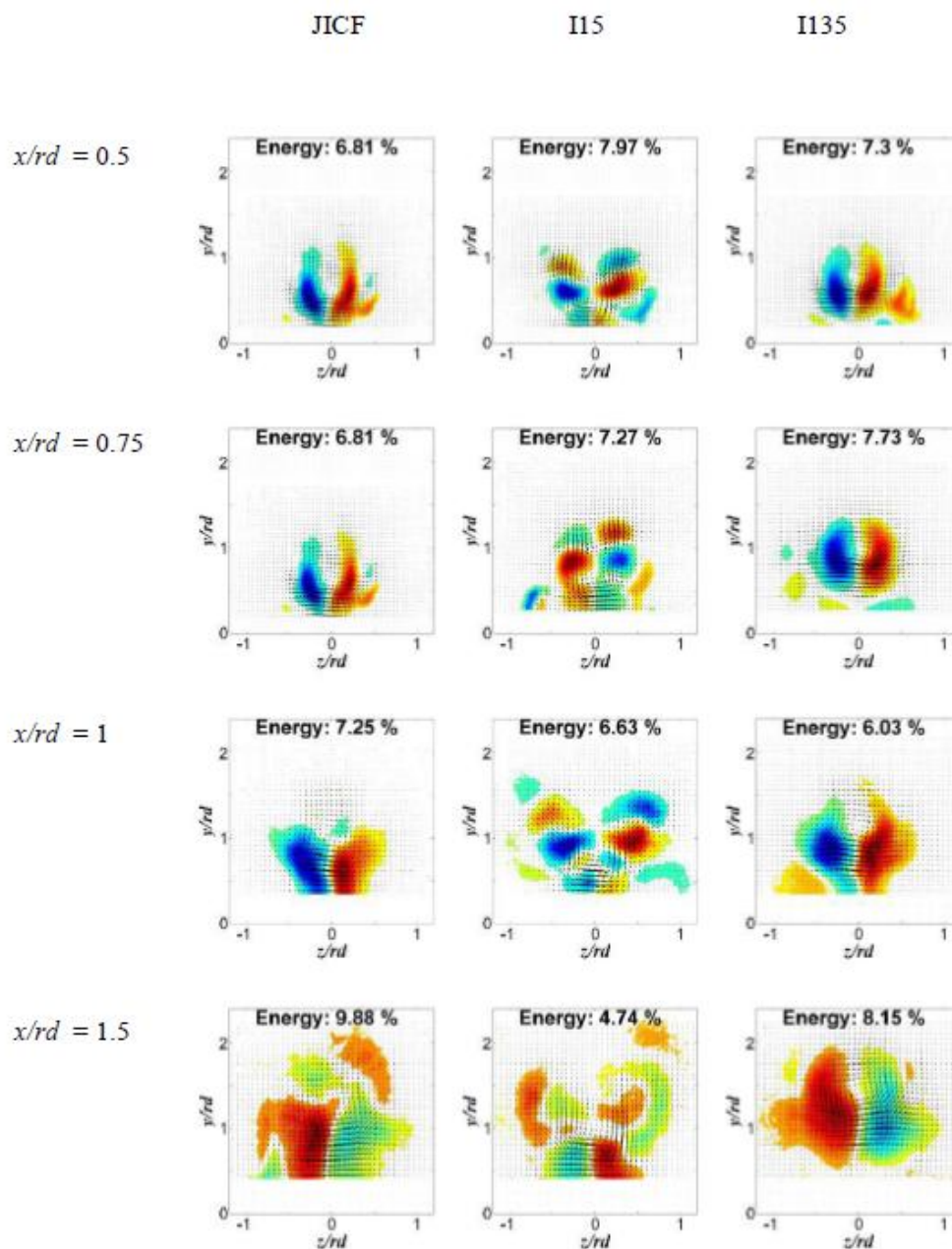
รูปที่ 7.11 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บนระนาบ yz และ POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานกำกับสำหรับกรณี JICF เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง



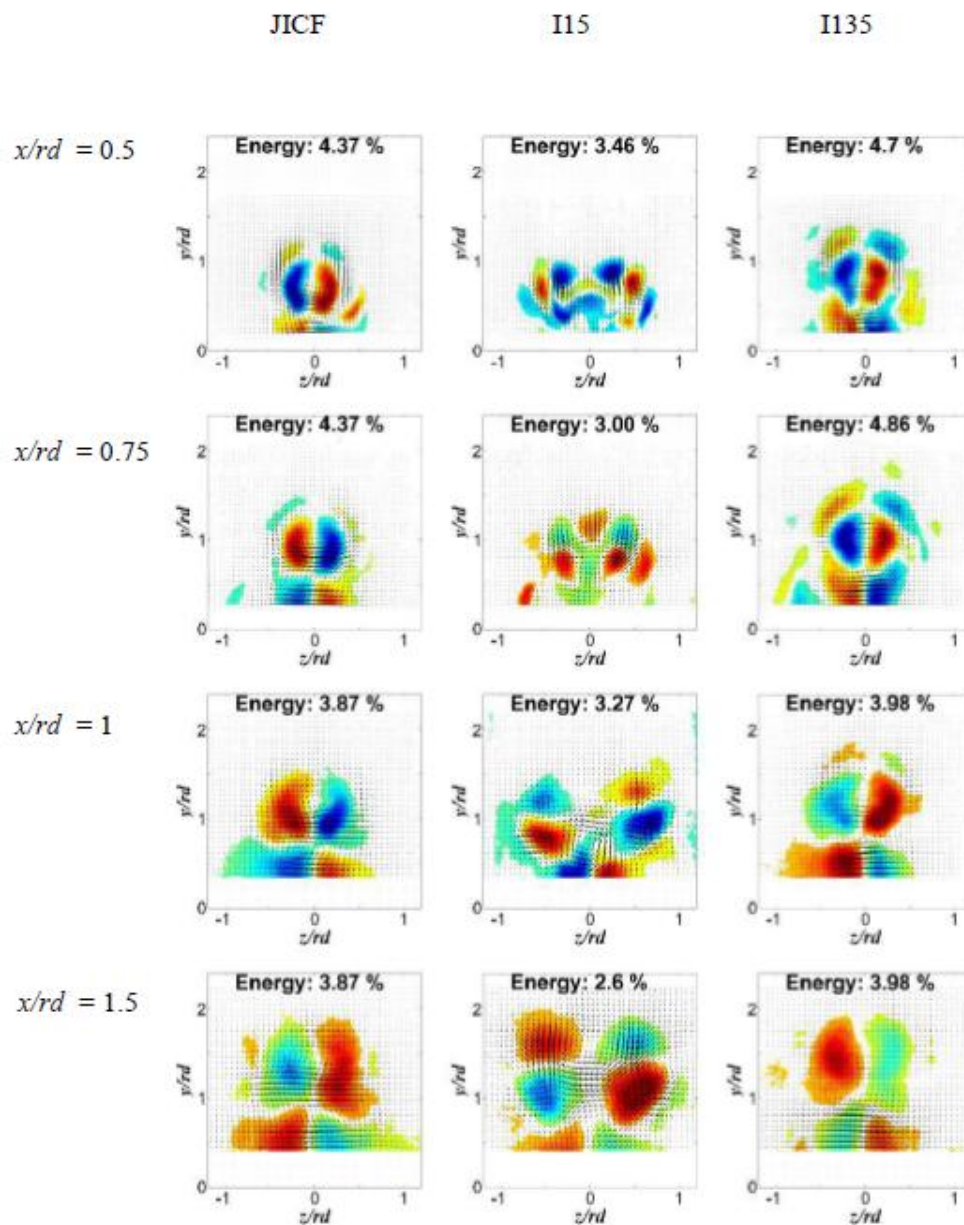
รูปที่ 7. 12 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์รับนระนาบ yz และ POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานกำกับสำหรับกรณี I15 เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 กรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง



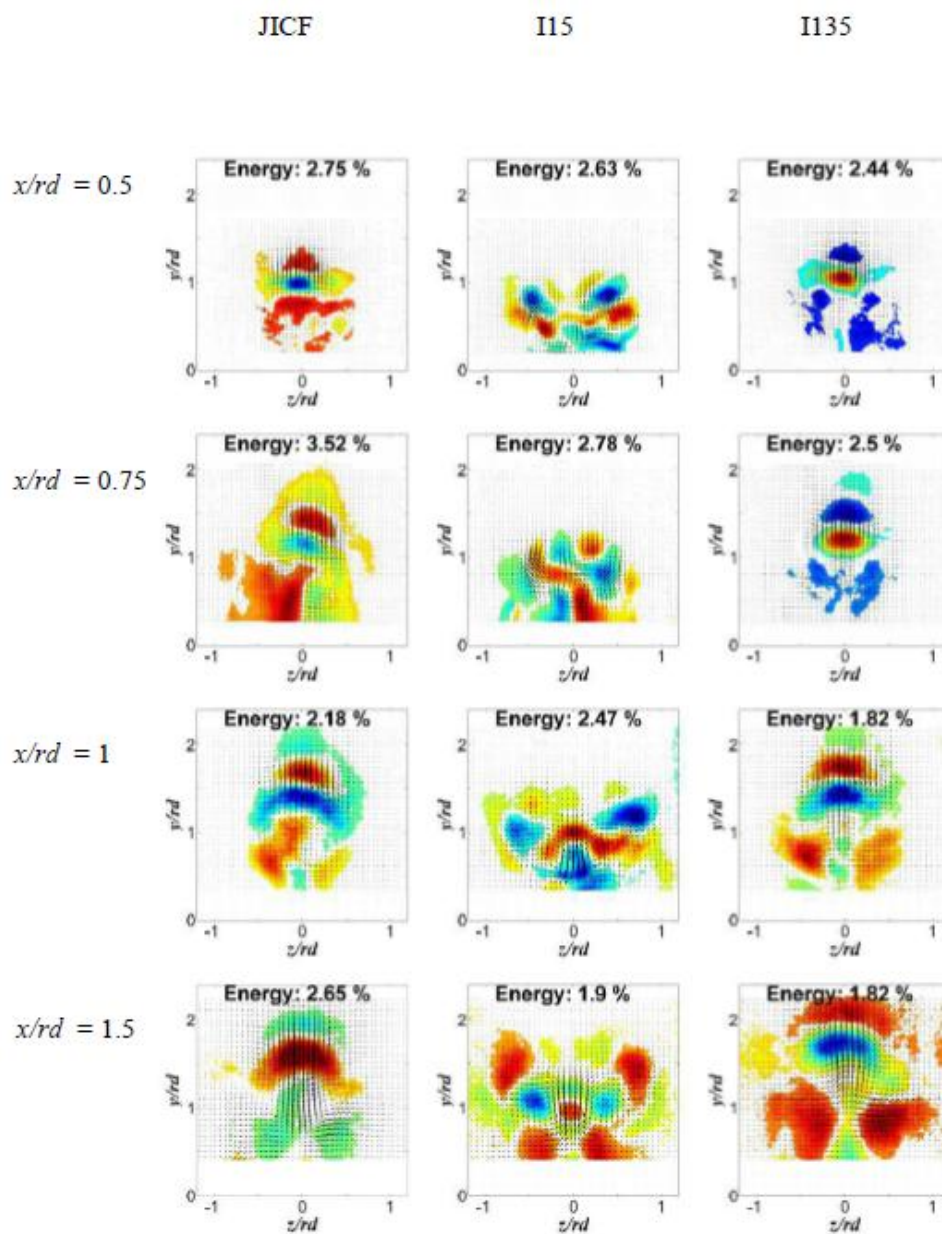
รูปที่ 7.13 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ต่อกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บนระนาบ yz และ POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานกำกับสำหรับกรณี I135 เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ไปยัง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง



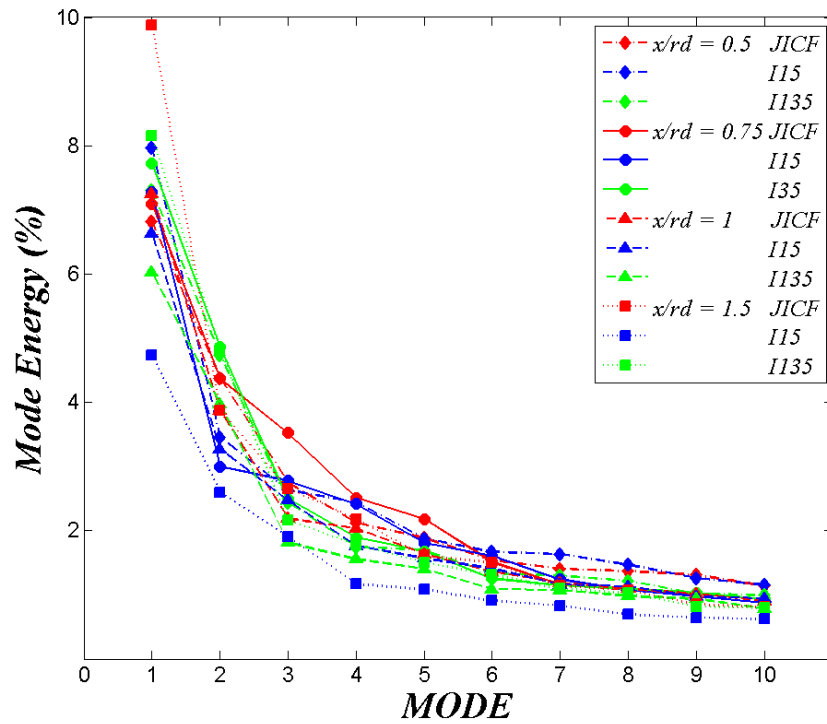
รูปที่ 7.14 ก โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ POD mode 1 ของกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสมขวาง



รูปที่ 7.14 ข โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ POD mode 2 ของกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง

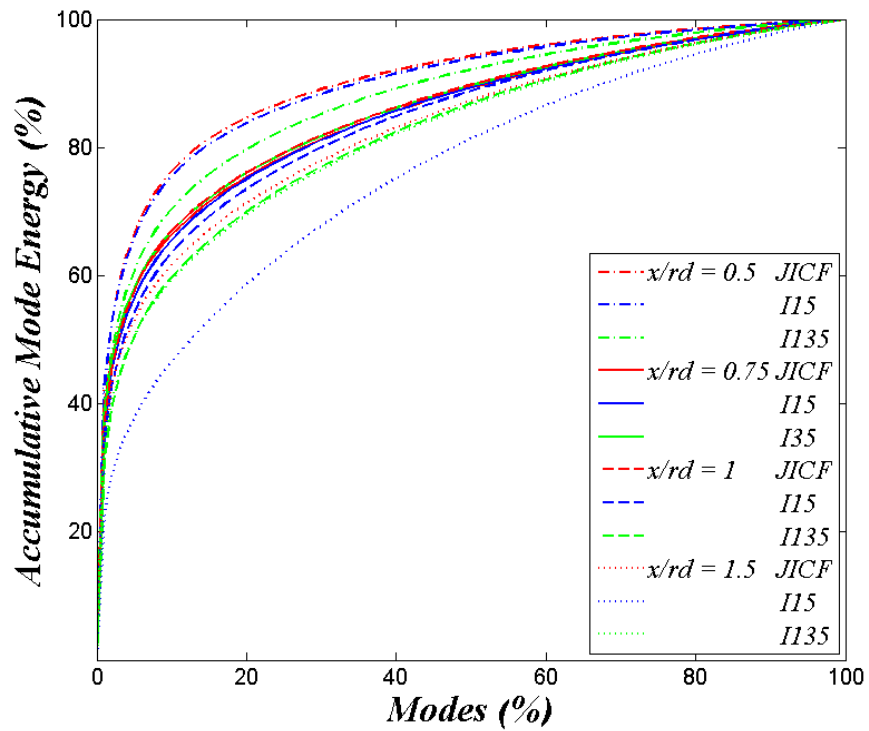


รูปที่ 7.14 ค โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ POD mode 3 ของกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง



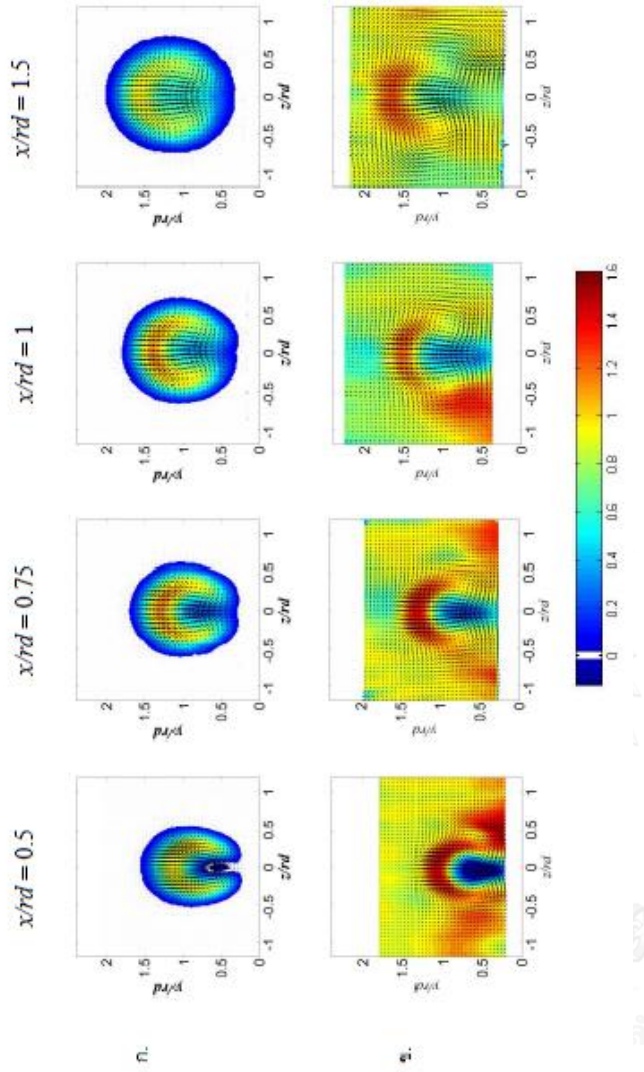
รูปที่ 7. 15

การกระจายตัวของระดับพลังงานไหลปั่นป่วน (Energy) ของ POD mode 1 ถึง 10 สำหรับกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 กรณีการฉีดอนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 7. 16 ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสม (Accumulative mode energy) ในแต่ละจำนวน Modes สำหรับกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสมขวง

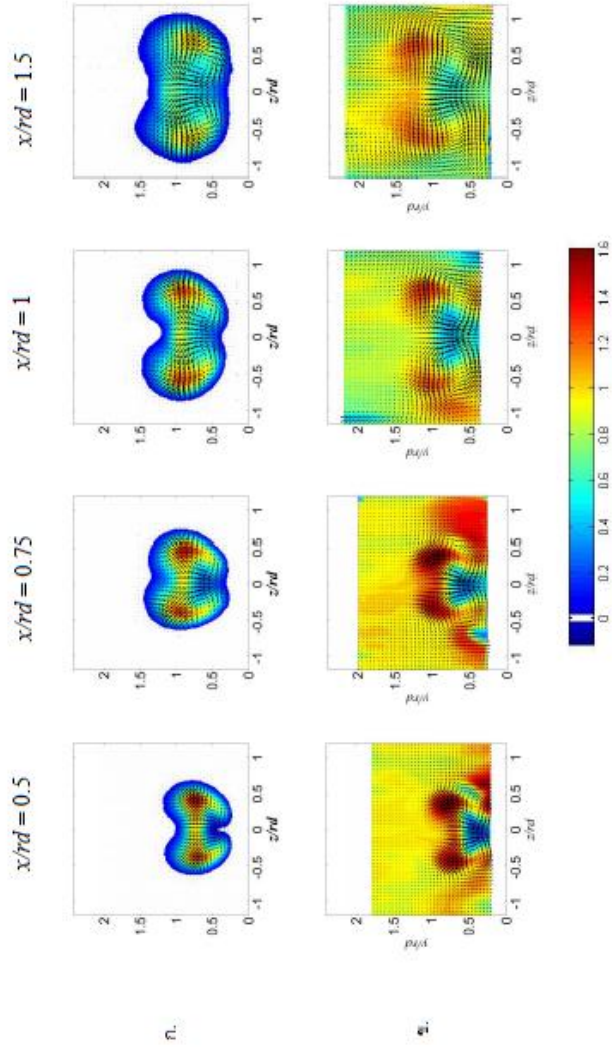


รูปที่ 7.17 ก. โครงสร้างความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตในกระแสผสมขวางขวาง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บนระนาบ $y - z$

กรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5

ก. กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต

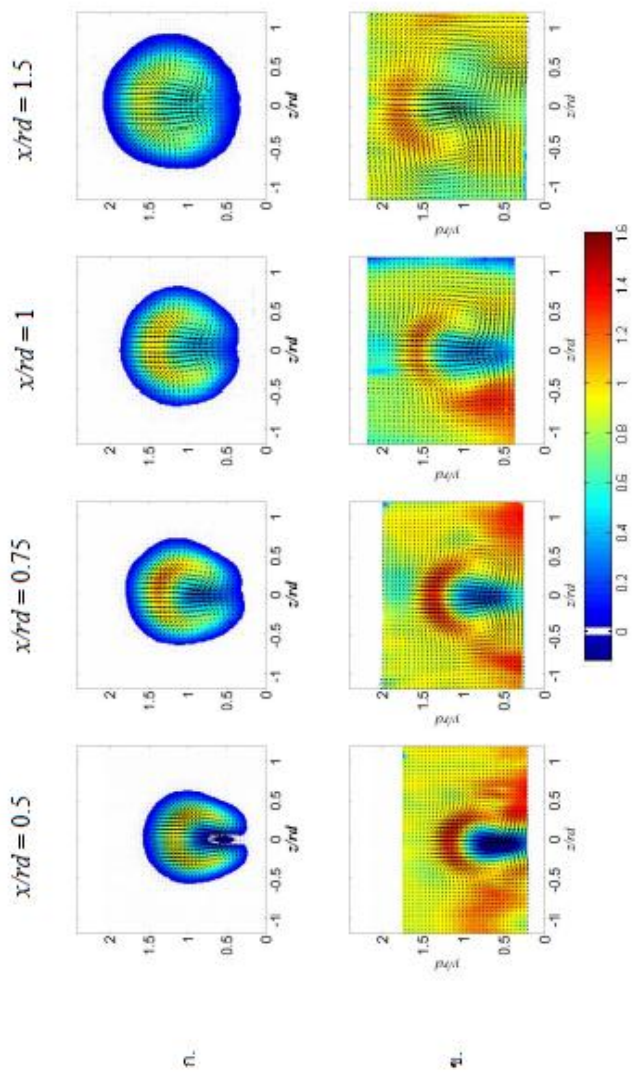
ข. กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสผสมขวาง



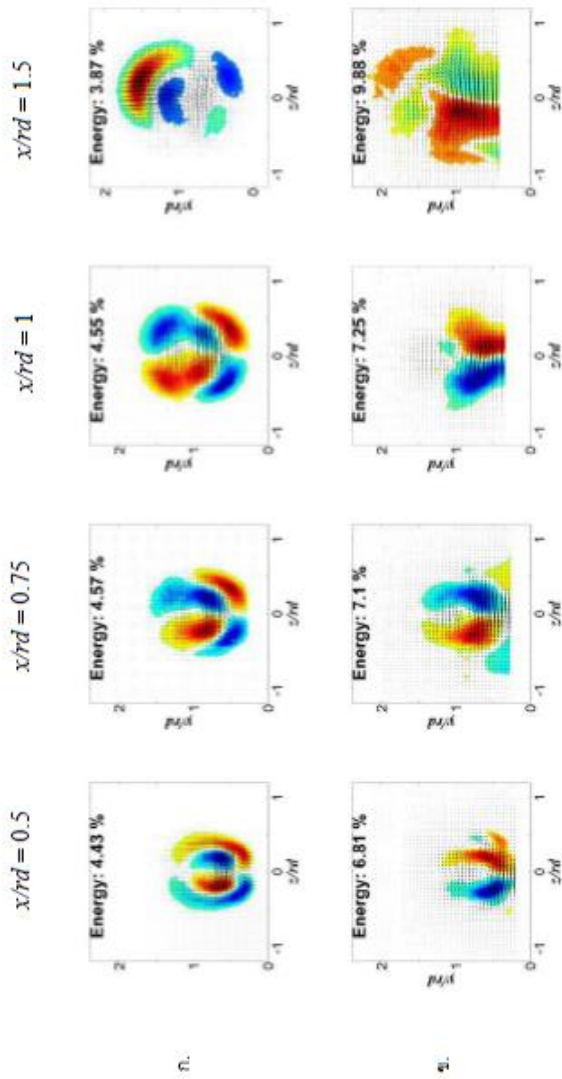
รูปที่ 7.17 ข โครงสร้างความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตในกระแสผสมขวางของ (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บนระนาบ $y - z$

กรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5

- ก. กรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต
- ข. กรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสผสมขวาง

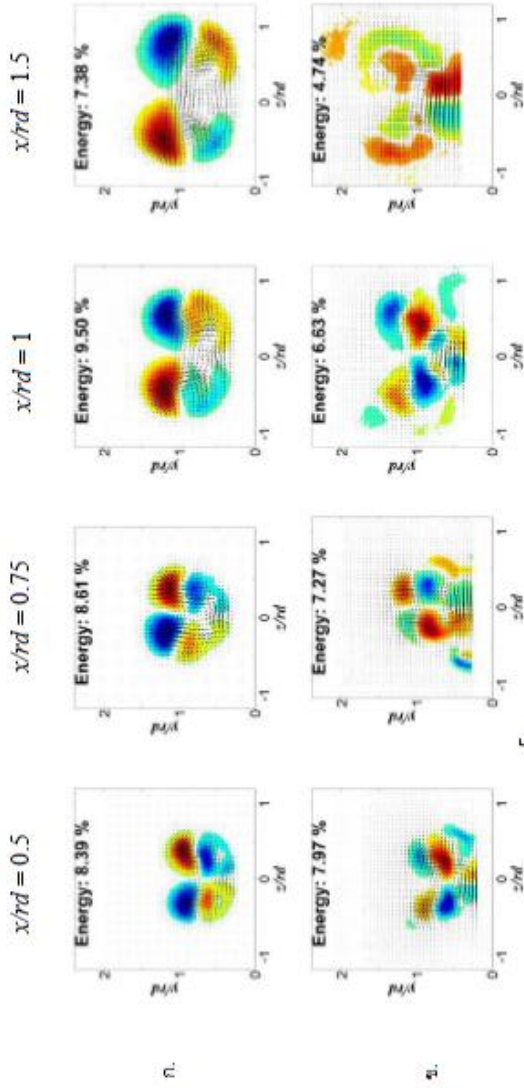


รูปที่ 7.17 ค. โครงสร้างความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตในกระแสมุมของวง (V_x / u_{cf}) พร้อมทั้งเวกเตอร์บนระนาบ $y - z$
 กรณี I135 ที่ตำแหน่ง $x/r_d = 0.5$ ถึง 1.5
 ก. กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต
 ข. กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสมุมของวง



รูปที่ 7. 18 โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1) กรณี JCF ที่ตำแหน่ง $x/r_d = 0.5$ ถึง 1.5

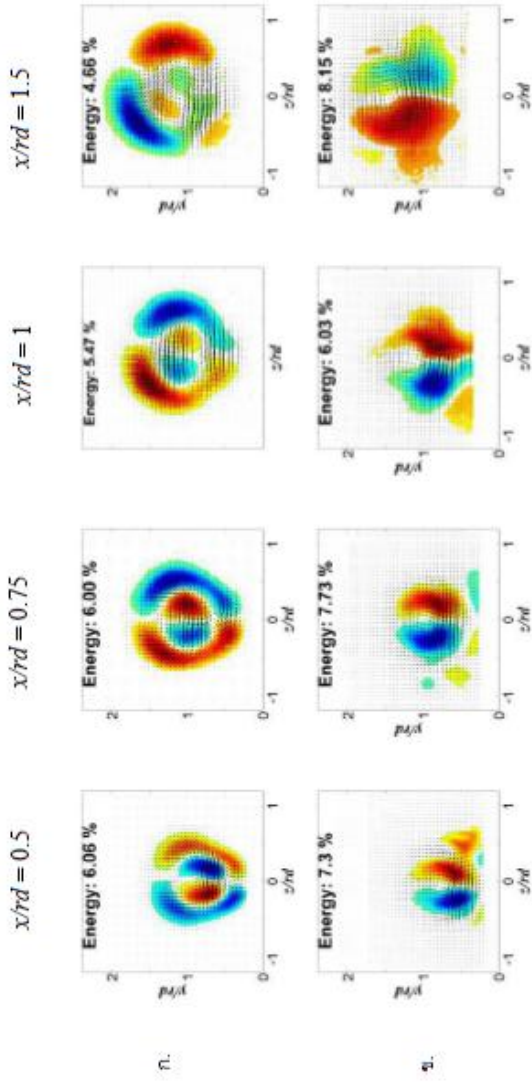
- ก. กรณีการใช้สมภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต
- ข. กรณีการใช้สมภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง



5

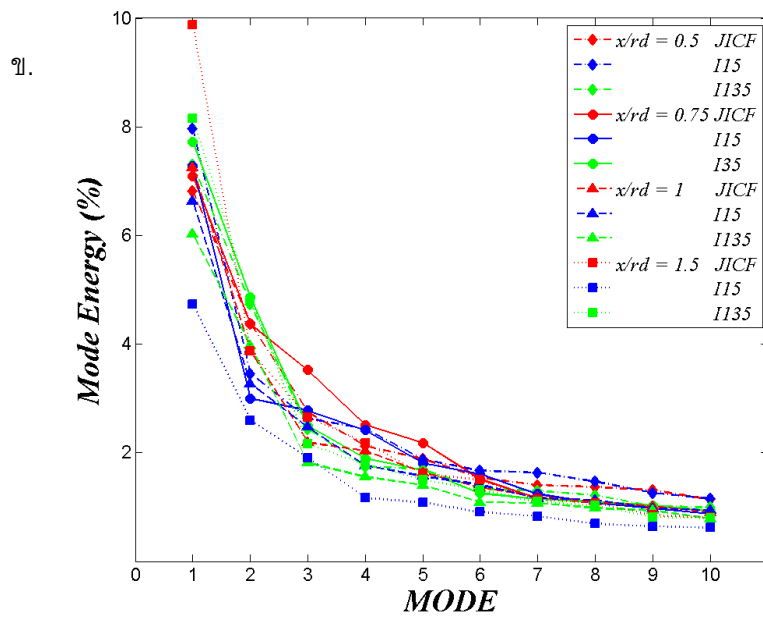
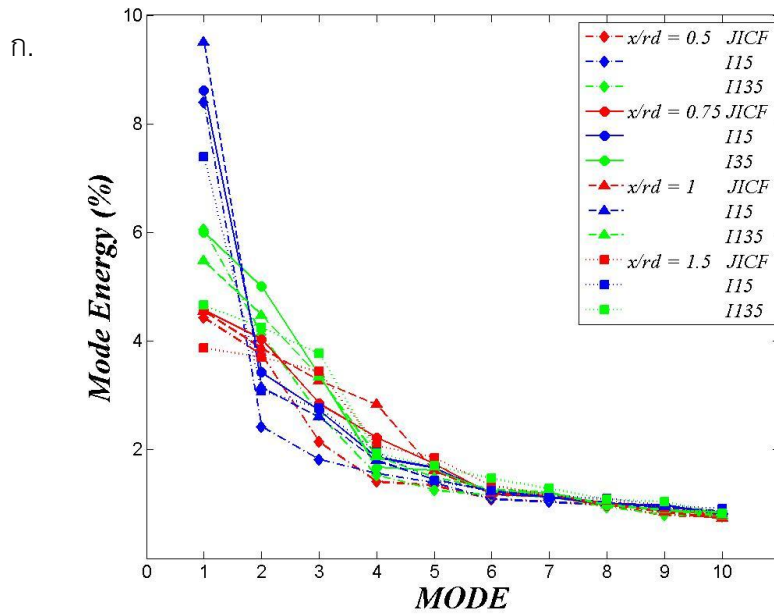
รูปที่ 7. 19 โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1) กรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/r_d = 0.5$ ถึง 1.5

- ก. กรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต
- ข. กรณีการไหลอนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง



รูปที่ 7. 20 โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด (POD mode 1) กรณี I135 ที่ตำแหน่ง $x/r_d = 0.5$ ถึง 1.5

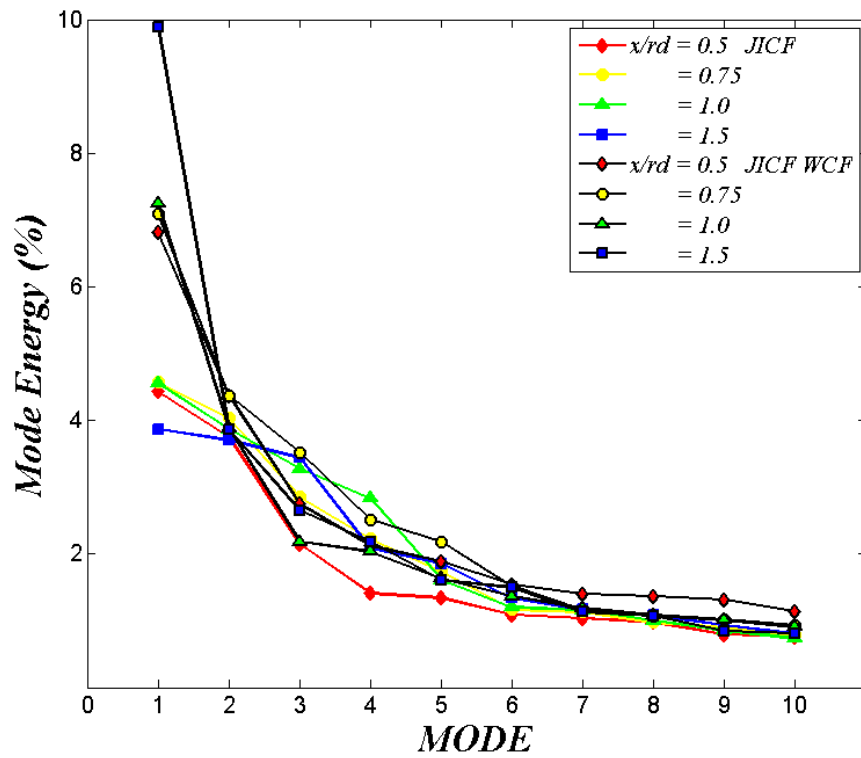
- ก. กรณีการไหลวนภาคตัดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต
- ข. กรณีการไหลวนภาคตัดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง



รูปที่ 7. 21 การกระจายตัวของพลังงานการไหลปั่นป่วนของกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5

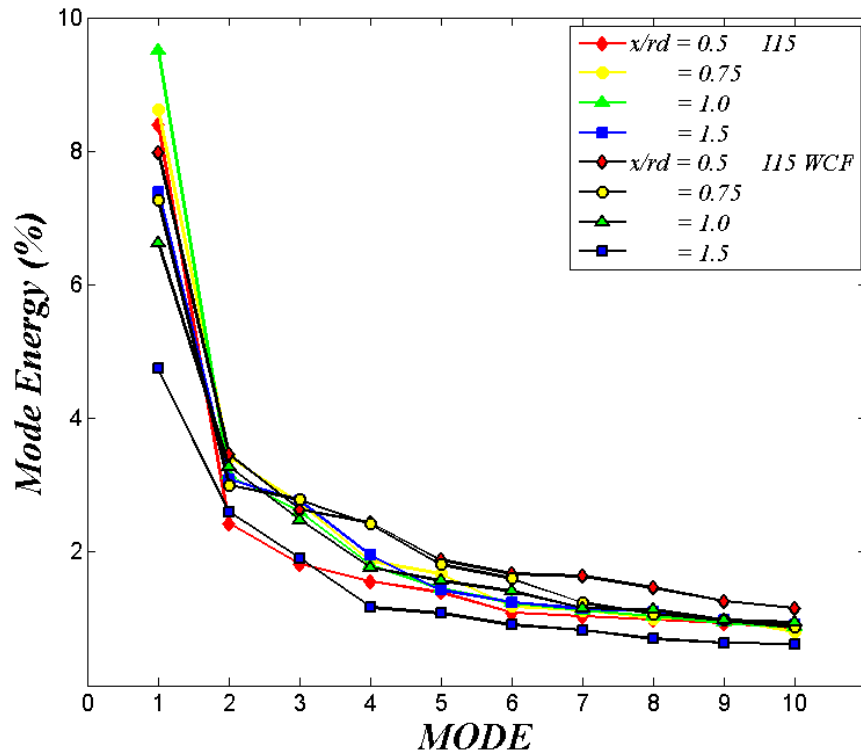
ก. กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต

ข. กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง

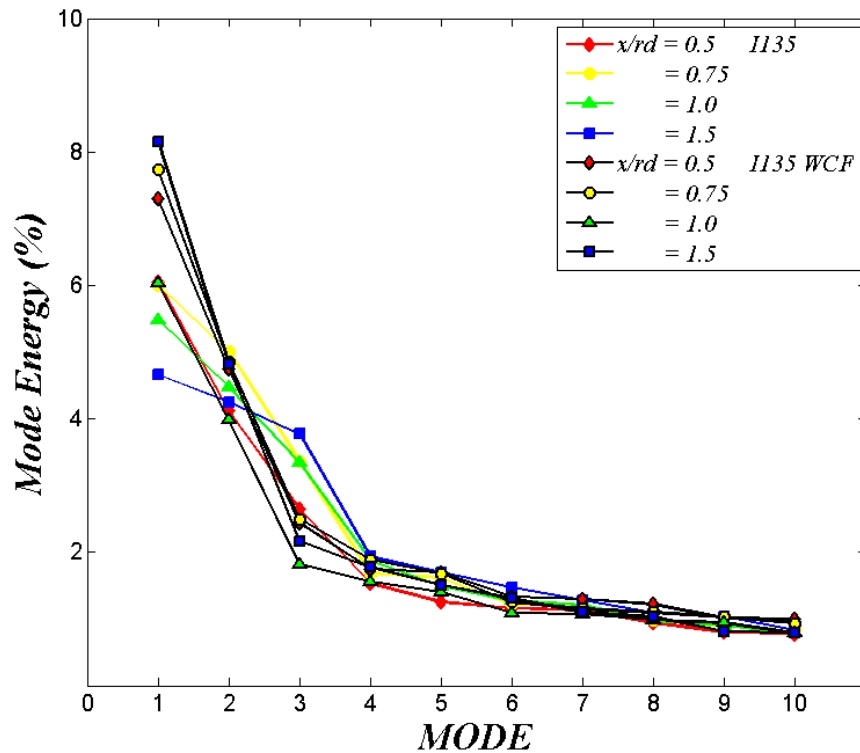


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

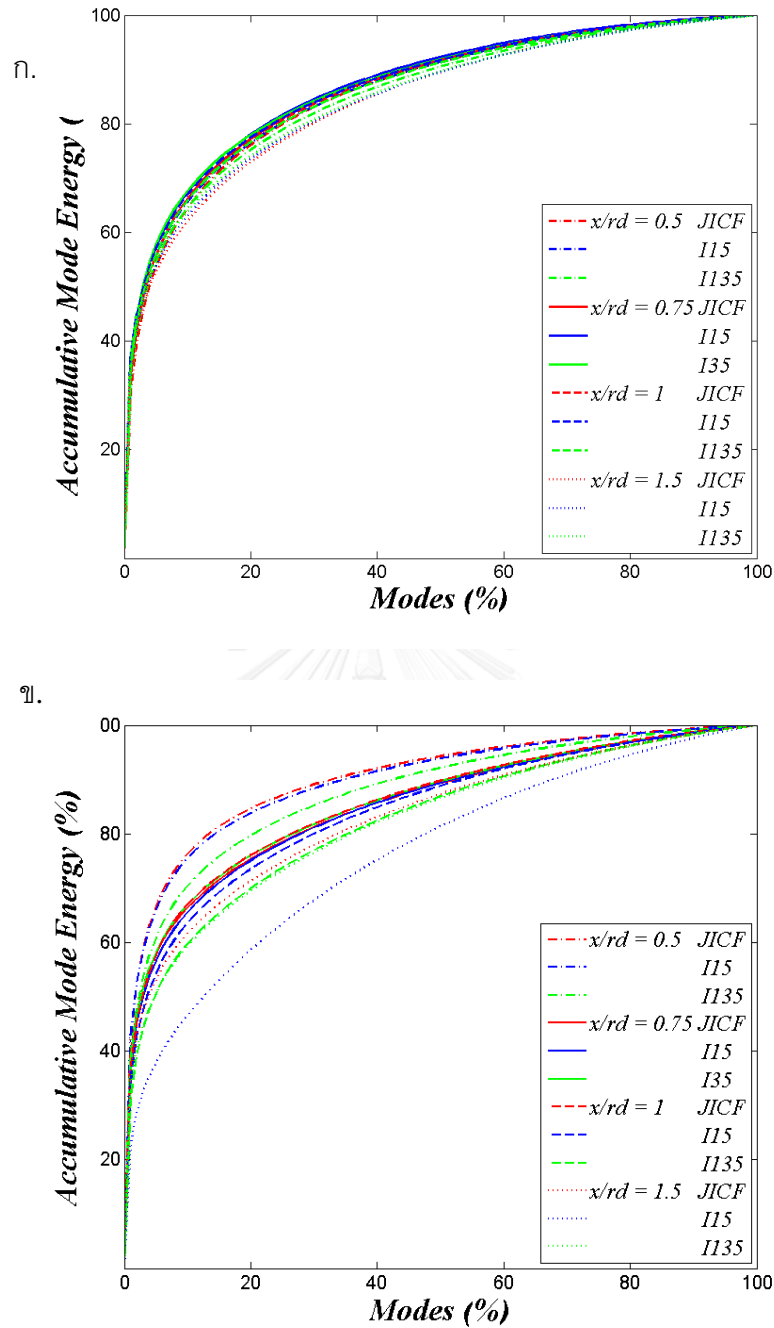
รูปที่ 7. 22 การกระจายตัวของพลังงานการไหลปั่นป่วนระหว่างกรณีที่ดีดอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ต และกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางของกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5



รูปที่ 7. 23 การกระจายตัวของพลังงานการไหลปั่นป่วนระหว่างกรณีที่ยึดอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ต และกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางของกรณี I15 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5



รูปที่ 7. 24 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของพลังงานการไหลปั่นป่วนระหว่างกรณีที่ฉีดอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ต และกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางของกรณี I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5

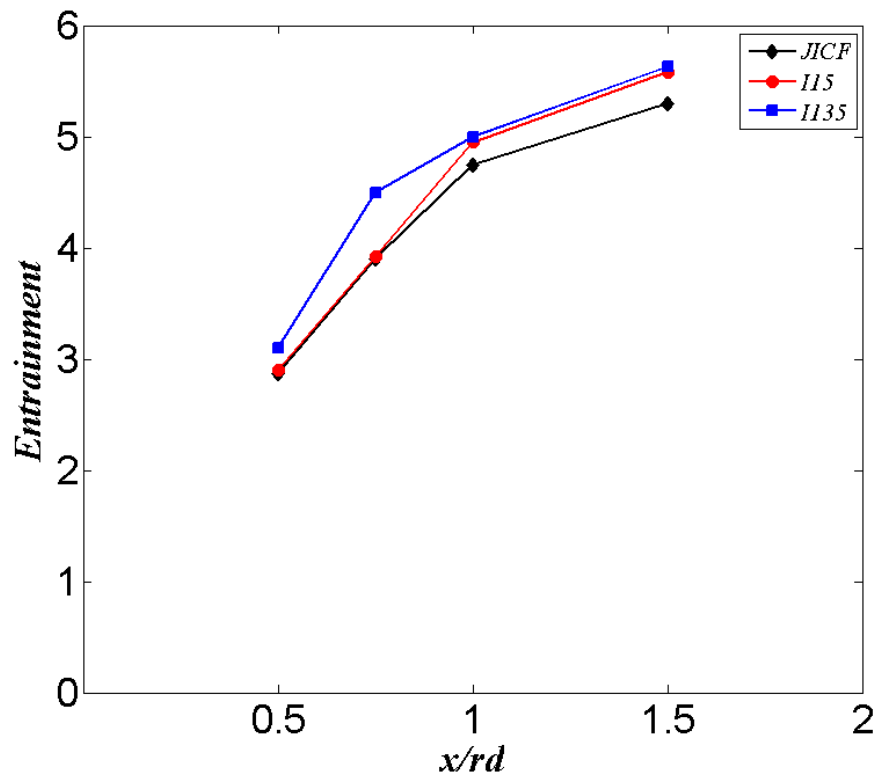


รูปที่ 7.25

ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสมในแต่ละปริมาณร้อยละของ POD Mode ใดๆ ของกรณี JICF, I15 และ I135 ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5

ก. กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต

ข. กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง



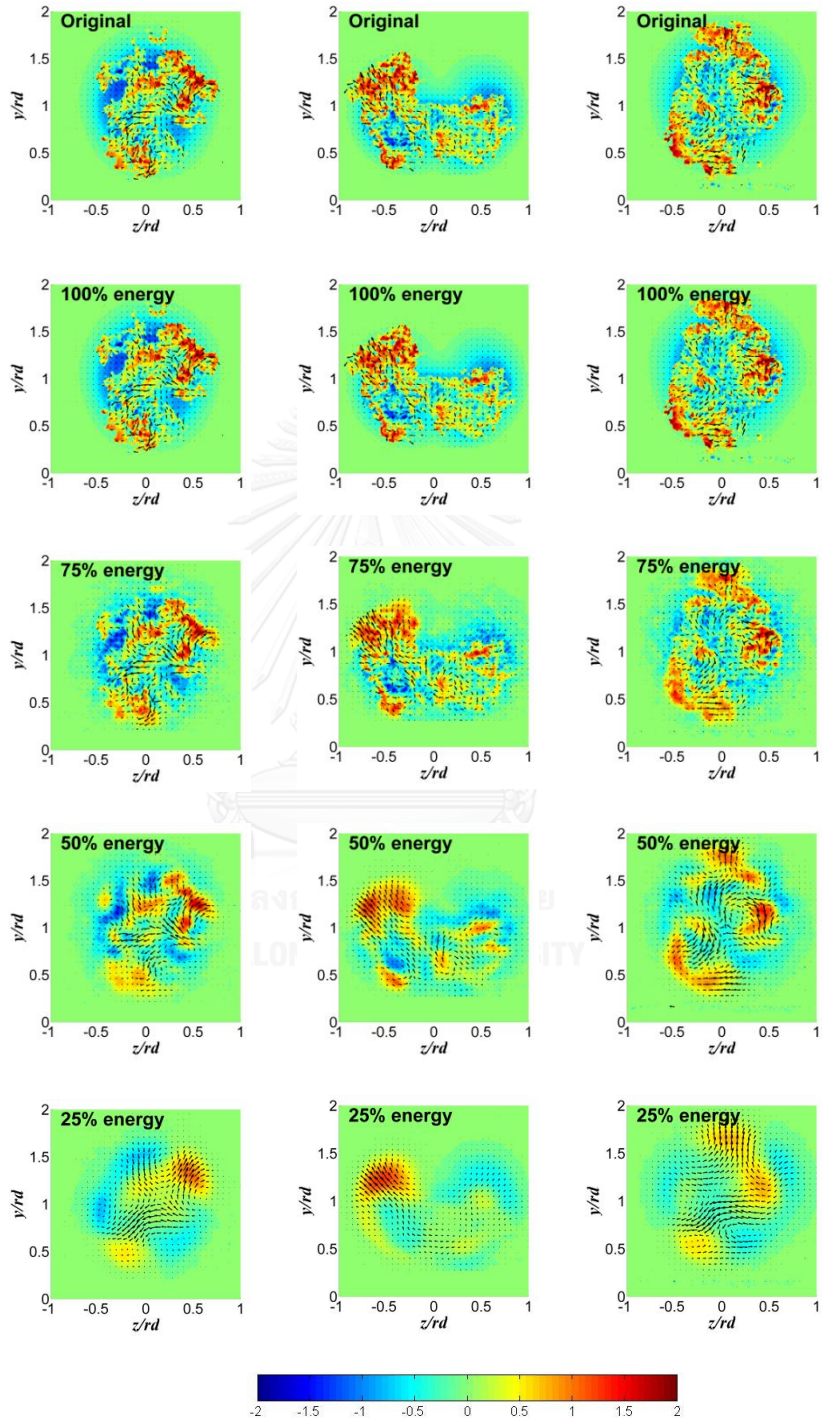
รูปที่ 7.26 อัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

บทที่ 8

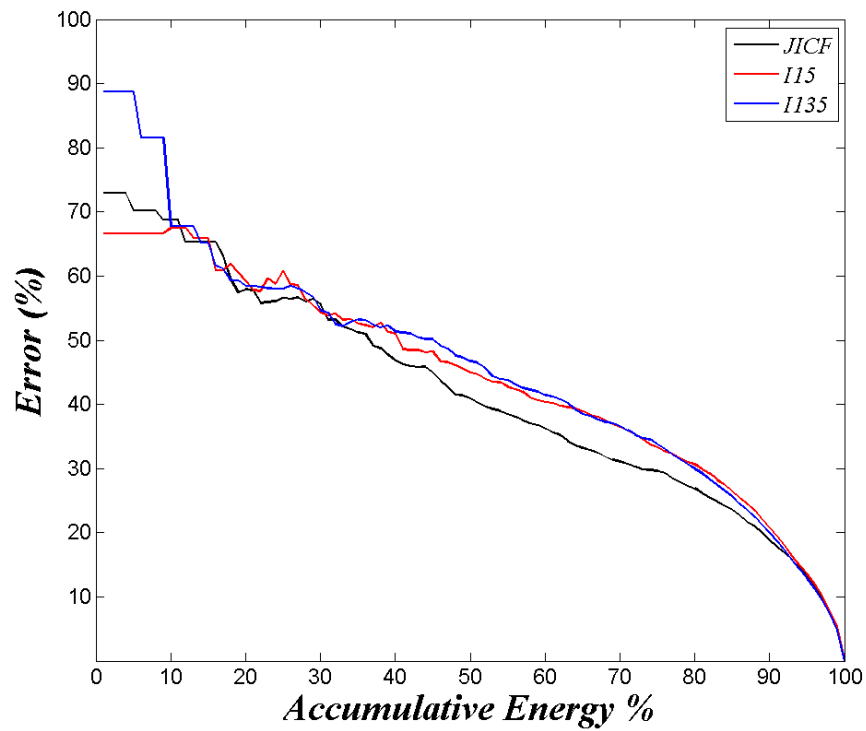
JCF

I15

I135

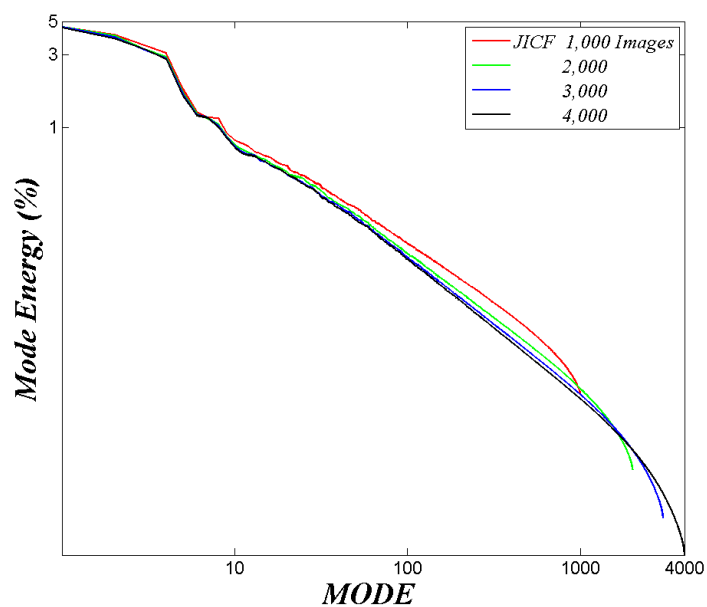


รูปที่ 8. 1 การกระจายตัวของความเร็วผันผวนตามแนวแกน x และเวกเตอร์ความเร็วผันผวนบนระนาบ y - z ของกรณี JICF, I15 และ I135 ของภาพที่ 1,000 ที่ตำแหน่ง $x/r_d = 1$ พร้อมทั้งภาพต้นฉบับ

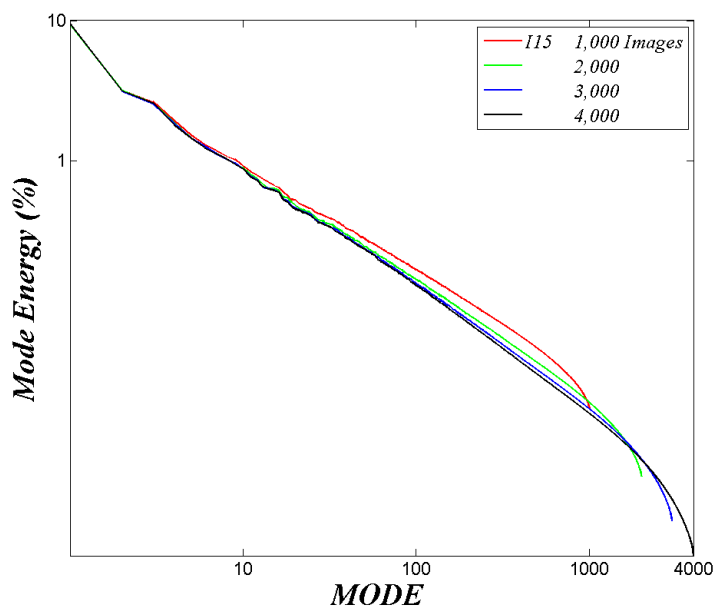


รูปที่ 8. 2 ความคลาดเคลื่อนของพลังงานการไหลปั่นป่วนที่ระดับพลังงานรวมต่างๆ

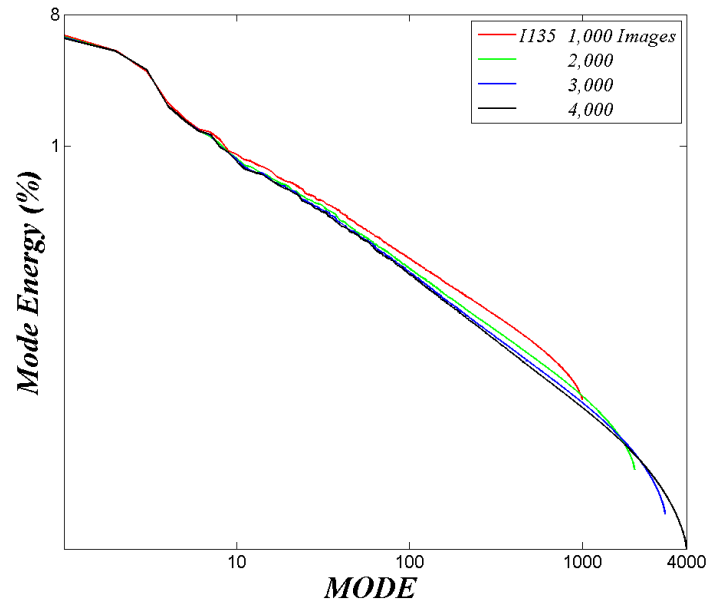
บทที่ 9



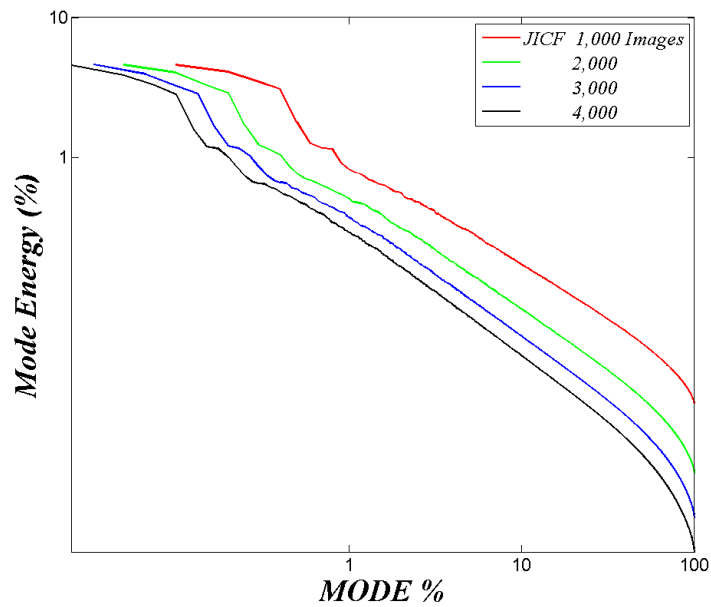
รูปที่ 9.1 ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนในแต่ละ POD mode ของกรณี JICF สำหรับจำนวนภาพต่างๆกัน



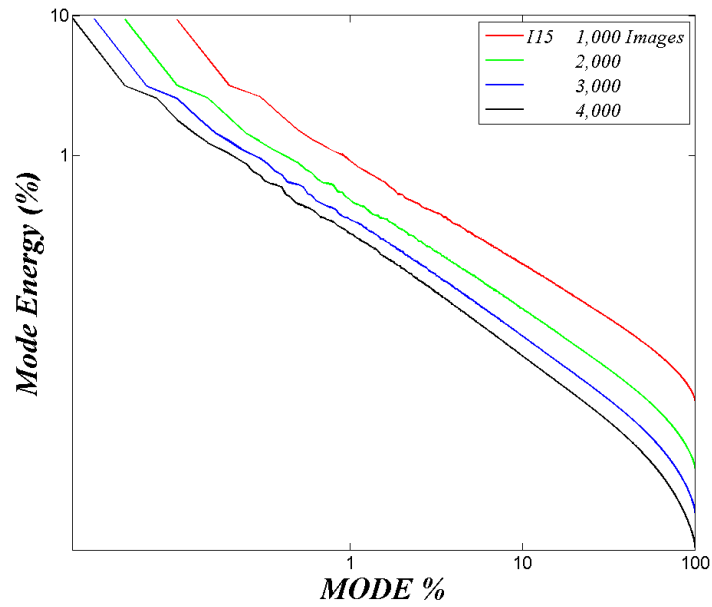
รูปที่ 9.2 ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนในแต่ละ POD mode ของกรณี I15 สำหรับจำนวนภาพต่างๆกัน



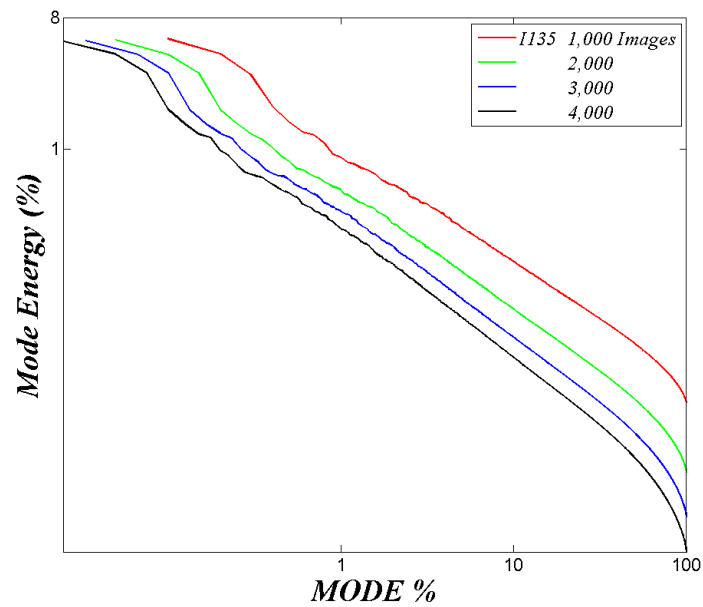
รูปที่ 9.3 ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนในแต่ละ POD mode ของกรณี I135 สำหรับจำนวนภาพต่างๆกัน



รูปที่ 9.4 ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนในแต่ละเปอร์เซ็นต์ของ POD mode ของกรณี JICF สำหรับจำนวนภาพต่างๆกัน



รูปที่ 9.5 ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนในแต่ละเปอร์เซ็นต์ของ POD mode ของกริด I15 สำหรับจำนวนภาพต่างๆกัน



รูปที่ 9.6 ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนในแต่ละเปอร์เซ็นต์ของ POD mode ของกริด I135 สำหรับจำนวนภาพต่างๆกัน

รายการอ้างอิง

- Bunyajitradulya, A. and S. Sathapornnanon (2005). "Sensitivity to tab disturbance of the mean flow structure of non swirling jet and swirling jet in crossflow." Phys. Fluids 17(045102).
- Chongsiripinyo, K., et al. (2008). Investigation of mixing structure in the near field of a jet in crossflow. The Twenty-Second Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Thammasat University, Rangsit Campus, Pathum Thani, Thailand.
- Cortelezzi, L. and A. R. Karagozian (2001). "On the Formation of the Counter-Rotating Vortex Pair in Transverse Jets." J. Fluid Mech. **Vol.** 437: pp. 175-202.
- Denev, J. A., et al. (2009). "Large eddy simulation of a swirling transverse jet into a crossflow with investigation of scalar transport." Phys. Fluids 21(015101).
- Eroglu, A. and R. E. Breidenthal (2001). "Structure, penetration, and mixing of pulsed jets in crossflow." AIAA J. **Vol.** 39(No. 3): pp. 417-423.
- Fric, T. F. and A. Roshko (1994). "Vortical structure in the wake of a transverse jet." J. Fluid Mech. **Vol.** 279: pp 1-47.
- Haven, B. A. and M. Kurosaka (1997). "Kidney and anti-kidney vortices in crossflow jets." J. Fluid Mech. **Vol.** 352 (**December** 1997): 27-64
- Hermanson, J. C., et al. (1998). "Duty-cycle effects on penetration of fully modulated, turbulent jets in crossflow." AIAA J. **Vol.** 36(No. 10): 1935-1937.
- Kamotani, Y. and I. Greber (1972). "Experiments on a Turbulent Jet in a Cross Flow." AIAA J. **Vol.** 11: pp. 1425-1429.
- Kavsaoglu, M. S. and J. A. Schetz (1989). "Effects of swirl and high intensity turbulence on a jet in a cCrossflow." Journal of Aircraft **Vol.** 26(No. 6 (January 1989)): 539-546.
- Kelso, R. M., et al. (1996). "An experiment study of round jets in cross-flow." J. Fluid Mech. **Vol.** 306 (**January** 1996): 111-144.
- Kornsri, P., et al. (2009). A scheme for the manipulation and control of a jet in crossflow: The use of azimuthal control jets. . The Twenty-Third

- Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, Chiang Mai.
- Lim, T. T., et al. (2001). "On the development of large scale structures of a jet in a crossflow." J. Fluid Mech. **Vol.** 306: pp. 111-144.
- Limdumrongtum, P., et al. (2009). Investigation of mixing structure in the near field of swirling jets in crossflow. The Twenty-Third Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand, Chiang Mai.
- M'Closkey, R. T., et al. (2002). "The actively controlled jet in crossflow." J. Fluid Mech., **Vol.** 452: pp. 325-335.
- Meyer, K. E., et al. (2007). "A turbulent jet in crossflow analysed with proper orthogonal decomposition." J. Fluid Mech. **Vol.** 583: pp. 199-227.
- Muppidi, S. and K. Mahesh (2005a). Velocity field of around turbulent transverse jet. Proceedings fourth international symposium on turbulent and shear flow phenomena, Williamsburg Virginia.
- Muppidi, S. and K. Mahesh (2005b). "Study of trajectories of jets in crossflow using direct numerical simulations." J. Fluid Mech. **Vol.** 530 (**May 2005b**): 81-100.
- Narayanan, S., et al. (2003). "Fluid dynamics of highly pitched and yawed Jets in Crossflow." AIAA J. **Vol.** 41 (**December 2003**): 2316-2330.
- New, T. H., et al. (2003). "Elliptic jets in cross flow." J. Fluid Mech. **Vol** 494 (**November 2003**): 119-140.
- Niederhaus, C. E., et al. (1997). "Scalar transport in a swirling transverse jet." AIAA J. **Vol.** 35(No. 11): pp. 1697-1704.
- Pratte, B. D. a. B., W. D. (1967). "Profiles of round turbulent jet in cross flow." J. Hydraulics Division **Vol.** 93 (**November 1967**): 53-64.
- Sau, A., et al. (2004). "Three dimensional simulation of squar jets in Crossfliw." Phy. Rev. E **Vol.** 69(CID 066302 (January 2004)).
- Sivadas, V., et al. (1997). "Flow visualisation studies on growth of area of deflected jets." Exp. Fluids **Vol.** 13 (**June 1997**): 105-112.
- Smith, S. H. and M. G. Mungal (1998). "Mixing, structure and scaling of the jet in crossflow." J. Fluid Mech. **Vol.** 357: pp. 83-122.

- Wangjiraniran, W. and A. Bunyajitradulya (2001). Temperature distribution in non-zero circulation swirling jet in crossflow. The Fifteenth Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand, Bangkok, Thailand.
- Watakulsin, P., et al. (2010). Effect of effective velocity ratio on the near-field mixing structures of a jet in crossflow. The First TSME International Conference on Mechanical Engineering, Ubon Ratchathani, Thailand.
- Witayaprapakorn, T. (2013). Effects of azimuthal control jets on entrainment of a jet in crossflow. Department of Mechanical Engineering. Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. **Master of Engineering Program in Mechanical Engineering**: 174.
- Yingjareon, T., et al. (2006). Evolution of Mixings Regions in Jet and Swirling Jet in Crossflow: An Experimental Study. The Twentieth Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand, Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Yoshizako, H., et al. (1991). "Diffusion of a Jet Injected Perpendicularly into Uniform Crossflow." JSME (B) No. 90-0442 **B** (1991): 354-359.
- Yuan, L. L., et al. (1999). "Large-eddy simulation of a round jet in crossflow." J. Fluid Mech. **Vol.** 379: pp. 71-104.
- Zaman, K. B. M. Q. and J. K. Foss (1997). "The effect of vortex generators on a jet in a crossflow." Phys. Fluids **Vol.** 9: pp. 106-114.

ภาคผนวก ก

การศึกษาเบื้องต้น

ก.1 สภาวะการทดลองเบื้องต้น

การศึกษาเบื้องต้นจะทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 3.9 ± 0.3 , ตัวเลขเรย์โนลด์สของกระแสลมขวางเท่ากับ 5,900 และตัวเลขเรย์โนลด์สของเจ็ตเท่ากับ 23,000 โดยกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมจะฉีดที่ตำแหน่ง $\theta = \pm 15^\circ$ (กรณี I15) โดยฉีดเจ็ตควบคุมด้วยอัตราการไหลเชิงมวลเจ็ตควบคุมทั้ง 2 ตัวต่อเจ็ตหลักคงที่เท่ากับ 2 % โดยวัดความเร็วบนระนาบ yz (Cross plane) ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 1 โดยวัดสนามความเร็ว 2,000 สนาม (2,000 ภาพ)

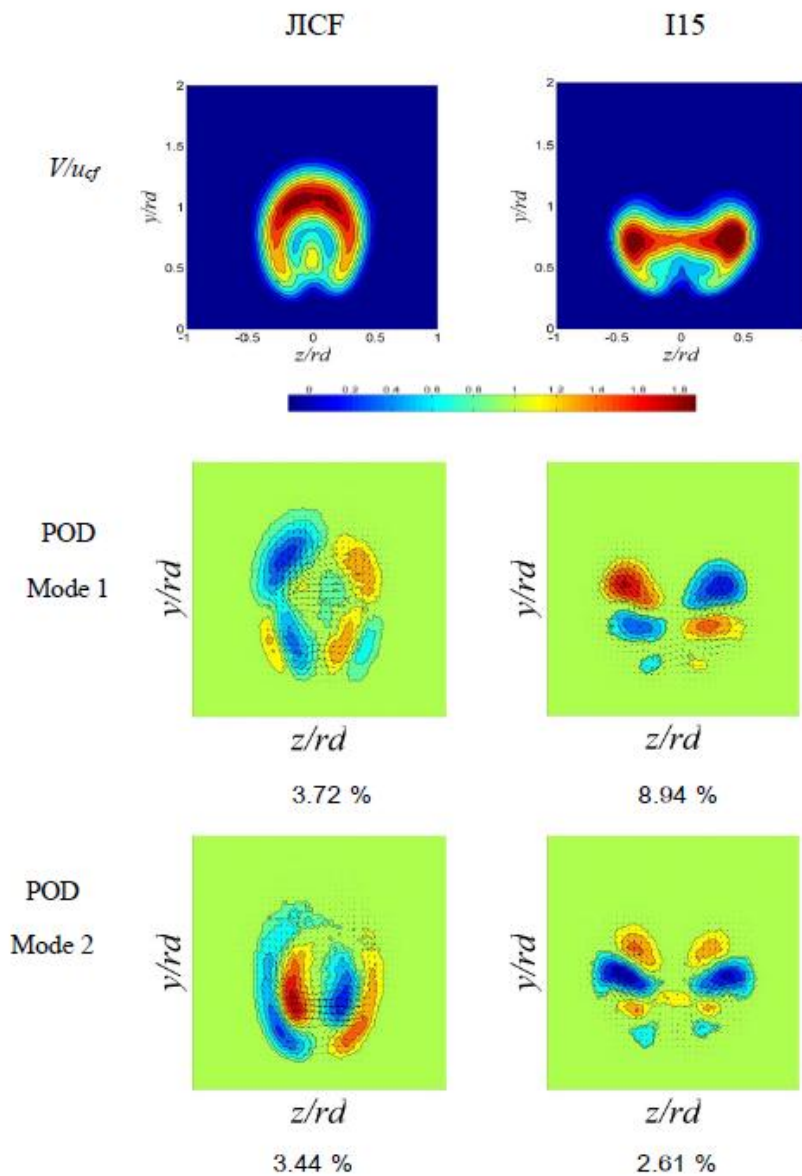
ก.2 ผลการทดลองเบื้องต้น

ในเบื้องต้นจะแสดงผลการวิเคราะห์เจ็ตในกระแสลมขวางด้วย POD ที่ตำแหน่ง x/rd เท่ากับ 0.5 และ 1 โดยกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมจะฉีดเจ็ตควบคุมที่มุมฉีด $\theta = \pm 15^\circ$ โดยในการพล็อต POD modes นั้น องค์ประกอบที่ไม่ได้อยู่บนระนาบจะใช้วิธี contour พล็อต และองค์ประกอบที่อยู่บนระนาบนั้นจะใช้วิธี vector พล็อต โดยในแต่ละรูปจะมีระดับพลังงาน (mode energy) กำกับไว้ในแต่ละ mode โดยในแต่ละกรณีจะมีการแสดงถึงภาพของความเร็วเฉลี่ยที่ถูกหารด้วยความเร็วกระแสลมขวาง $\bar{V}/u_{cf} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}/V_{cf}$

ก.2.1 POD modes ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ทั้งกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมและไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม

จากรูปที่ ก.1 พบว่า เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง จะทำให้โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลง โดยความสูงของเจ็ตจะมีขนาดลดลง แต่ความกว้างของเจ็ตจะมีขนาดเพิ่มขึ้น โดยกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม POD mode 1 และ POD mode 2 จะมีลักษณะแตกต่างกัน โดย POD mode 1 จะมีลักษณะเป็น lobe อยู่ทั้ง 2 ด้านของส่วนที่เป็นเจ็ต แต่ใน POD mode 2 จะมี lobe ขนาดเล็ก 2 lobe อยู่ภายใน lobe ขนาดใหญ่ทั้ง 2 lobe และระดับพลังงานของ ทั้ง 2 mode ไม่แตกต่างกันมาก

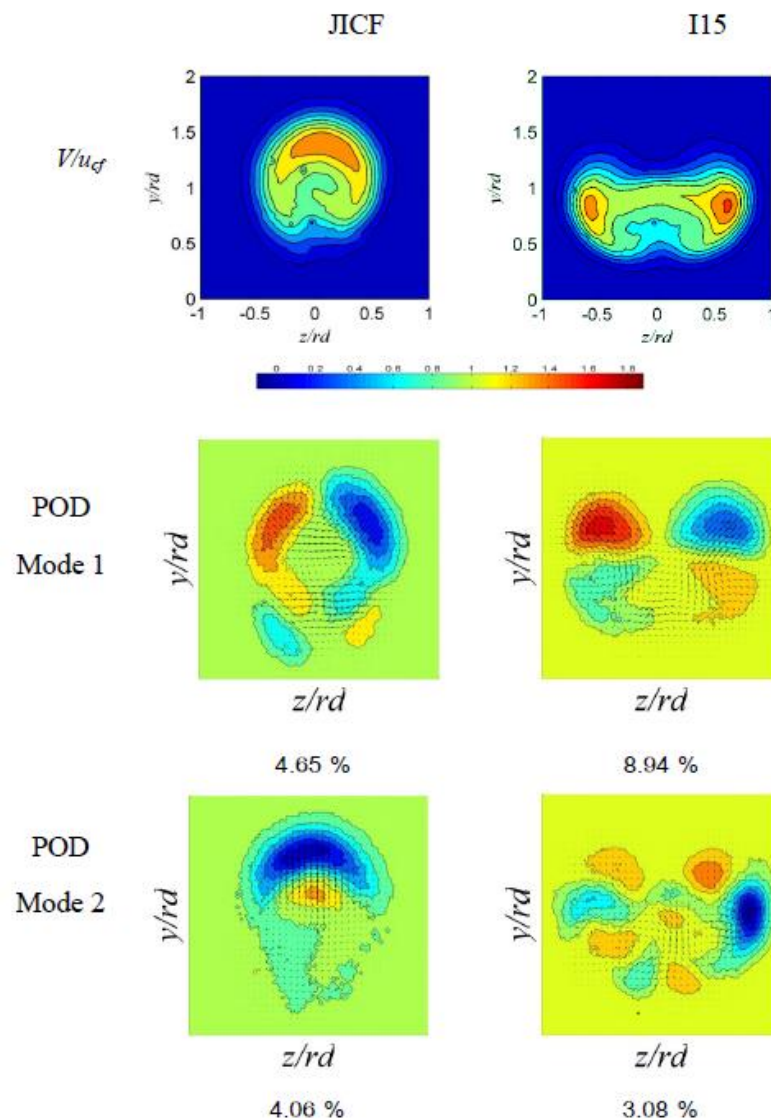
ในทางกลับกันกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุม POD mode 1 และ POD mode 2 มีลักษณะใกล้เคียงกันโดยจะเห็น lobe กระจายตัวด้านซ้ายและขวาของเจ็ต แต่ใน POD mode 2 จะมีโครงสร้างขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ระดับพลังงานของทั้ง 2 mode แตกต่างอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ ก.1 ความเร็วเฉลี่ย และ POD modes ที่ตำแหน่ง $x/r_d = 0.5$ ทั้งกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งมุมฉีดเท่ากับ $\theta = \pm 15^\circ$ และไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม

ก.2.2 **POD modes** ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ ทั้งกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมและไม่มี
การฉีดเจ็ตควบคุม

จากรูปที่ ก.2 พบว่า เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง จะทำให้โครงสร้างมีการ
เปลี่ยนแปลง โดยความสูงของเจ็ตจะมีขนาดลดลง แต่ความกว้างของเจ็ตจะมีขนาดเพิ่มขึ้น โดย



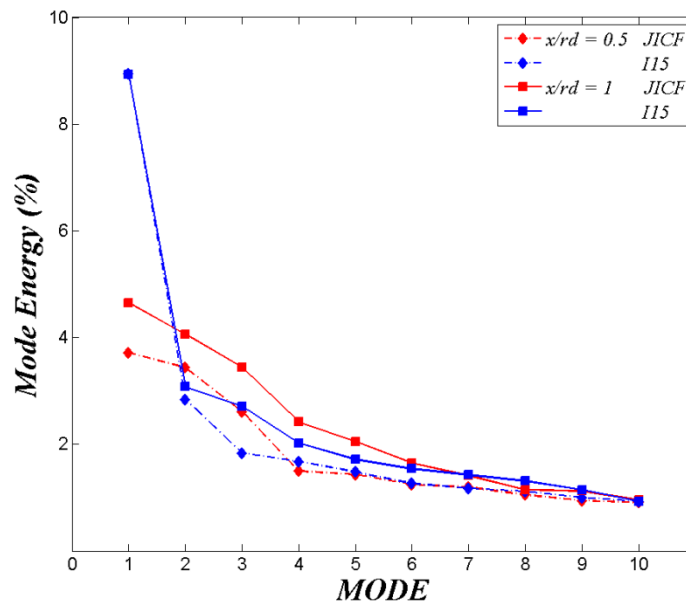
รูปที่ ก.2 ความเร็วเฉลี่ย และ POD modes ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.0$ ทั้งกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งมุมฉีดเท่ากับ $\theta = \pm 15^\circ$ และไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม

กรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม POD mode 1 และ POD mode 2 จะมีลักษณะแตกต่างกัน โดย POD mode 1 จะมีลักษณะเป็น lobe อยู่ทั้ง 2 ด้านของส่วนที่เป็นเจ็ตมีลักษณะเช่นเดียวกันกับ POD mode 1 ของกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ แต่ใน POD mode 2 จะมี lobe ขนาดใหญ่เกิดขึ้นบริเวณด้านบนของเจ็ตซึ่งมีตำแหน่งใกล้เคียงกับส่วนที่เป็น jet shear layer

ในทางกลับกันกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุม POD mode 1 และ POD mode 2 มีลักษณะแตกต่างกัน โดย POD mode 1 จะมีลักษณะคล้ายกับ POD mode 1 ของกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ในขณะที่แม้ลักษณะ POD mode 2 จะแตกต่างจาก POD mode 1 แต่ข้อสังเกตที่เหมือนกันกับที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างขนาดเล็กมีเพิ่มมากขึ้น และระดับพลังงานของทั้ง 2 mode แตกต่างอย่างเห็นได้ชัด

ก.2.3 การกระจายตัวของระดับพลังงานในแต่ละ mode

จากรูปที่ ก.3 แสดงตัวถึงการกระจายตัวของระดับพลังงานในแต่ละ mode ในกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุมการกระจายตัวจะมีลักษณะ เตี้ย-กว้าง โดย พลังงานในแต่ละ mode ไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่กรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุม การกระจายตัวของระดับพลังงานจะมีลักษณะ ผอม-สูง โดย mode 1 และ mode 2 นั้นจะมีระดับพลังงานที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยระดับพลังงานใน mode 1 ของกรณี

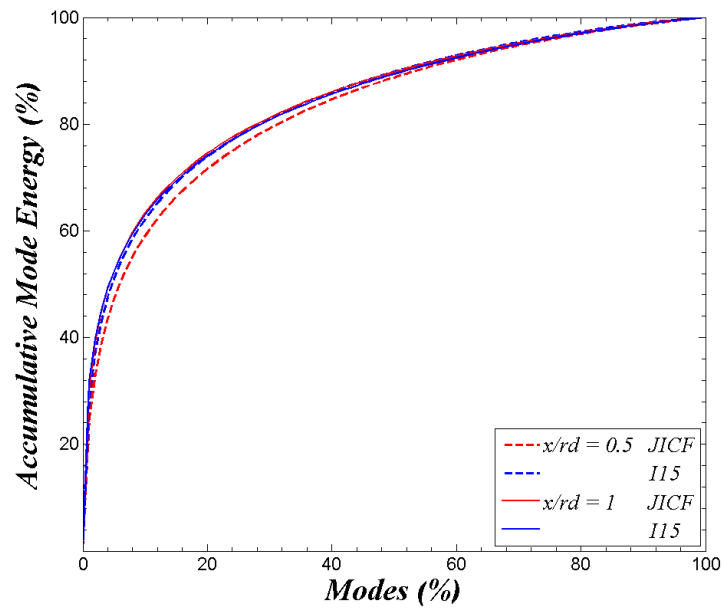


รูปที่ ก.3 การกระจายตัวของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนในแต่ละ Mode

ที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมนั้นจะมีค่าสูงกว่าระดับพลังงานใน mode 1 ของกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม ในทางกลับกัน ระดับพลังงานใน mode 2 ของกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุมจะสูงกว่า

ก.2.4 ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมสะสม

จากรูปที่ ก.4 แสดงถึงระดับพลังงานรวมสะสมเมื่อปริมาณรวมของจำนวน mode แรกๆ เพิ่มมากขึ้น จะเห็นได้ว่าสำหรับทุกกรณีนั้น จะมีระดับพลังงานรวมใกล้เคียงกันที่ปริมาณรวมของจำนวน mode แรกๆ เพิ่มมากขึ้น โดยสังเกตเห็นว่า ที่ระดับพลังงานรวมเท่ากับ 50 % ใช้ปริมาณรวมของ mode แรกๆ เพียง 5 % หรือสามารถสรุปได้ว่า พลังงานครึ่งหนึ่งของพลังงานทั้งหมดจะถูกแสดงโดย 5% แรกของจำนวน mode ทั้งหมด



รูปที่ ก.4 ระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนรวมของแต่ละปริมาณจำนวน Mode

ผลการศึกษาเบื้องต้นได้ถูกตีพิมพ์ใน The 4th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 16-18 October 2013, Pattaya, Chonburi ในชื่อเรื่อง Effect of Azimuthal Control Jets on the structures of a Jet in Crossflow by Mean of Proper Orthogonal Decomposition

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอภิเชษฐ์ ศรีเมฆารัตน์ เกิดวันที่ 13 มกราคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดตรัง สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2556

