

ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้เหล็กเชิงมวลของเจีตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจีตหลัก  
ต่อโครงสร้างการผสมของเจีตในกระแสมขวางโดยใช้ POD



นายสุภัค ดาวยก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

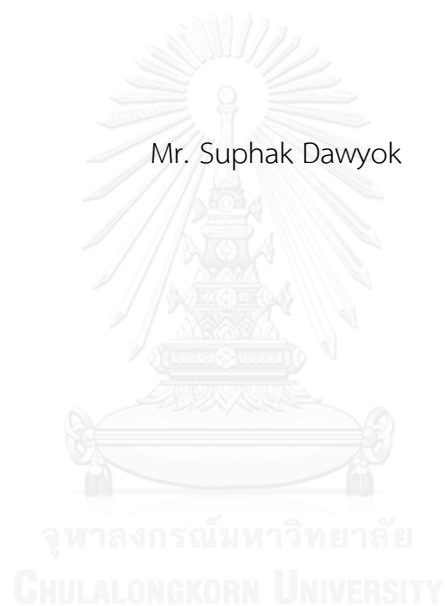
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF THE AZIMUTHAL CONTROL JETS TO MAIN JET MASS FLOWRATE RATIO  
ON THE FLOW STRUCTURES OF A JET IN CROSSFLOW VIA POD

Mr. Suphak Dawyok



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

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์  
ตามแนวเส้นรอบวงต่อเชื้อเพลิงต่อโครงสร้างการผสมของ  
เชื้อเพลิงในกระแสมหาชนโดยใช้ POD  
โดย นายสุภัค ดาวยก  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.อศิ บุญจิตราดุลย์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เลิศนุวัฒน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อศิ บุญจิตราดุลย์)

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

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เวชพงศ์ ชูติชูเดช)

สุภัค ดาวยก : ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลักต่อโครงสร้างการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางโดยใช้ POD (EFFECTS OF THE AZIMUTHAL CONTROL JETS TO MAIN JET MASS FLOWRATE RATIO ON THE FLOW STRUCTURES OF A JET IN CROSSFLOW VIA POD) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อศิ บุญจิตราดุลย์, 187 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ ) ที่มีต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วยกระบวนการ Proper Orthogonal Decomposition (POD) การวัดสนามความเร็วขณะใด ๆ ในระนาบจะใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) โดยใส่อนุภาคติดตามการไหล 2 วิธี คือ 1) วิธีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ทำให้สามารถระบุและแยกแยะบริเวณที่มีส่วนผสมของเจ็ตและโครงสร้างของเจ็ตออกจากบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ดังนั้นด้วยวิธีการใส่อนุภาคนี้ไม่เพียงแต่สามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่มีส่วนผสมของเจ็ตได้อย่างชัดเจนเท่านั้น แต่ยังสามารถประเมินหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมได้โดยตรง และยังสามารถประเมินหาความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต ณ จุดใด ๆ ได้ 2) วิธีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง ด้วยวิธีนี้ ประกอบกับวิธีใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ตเท่านั้น ทำให้สามารถวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างส่วนผสมของเจ็ตและกระแสลมขวางบริสุทธิ์ได้ชัดเจนมากขึ้น โดยทดลองกรณีเจ็ตในกระแสลมขวาง (JICF) ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) เท่ากับ 4.2 ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของกระแสลมขวางเท่ากับ 5,700 และกรณีเจ็ตควบคุมโดยฉีดยิ่งที่ตำแหน่ง  $\pm 135^\circ$  ที่ปริมาณ  $r_m$  2 ปริมาณ คือ 2% และ 4% จากผลการศึกษาของวิธีใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ตเท่านั้นซึ่งจะเป็นโครงสร้างที่มีส่วนผสมของเจ็ตเท่านั้น พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% จะไปกระตุ้นให้โครงสร้างที่มีส่วนผสมของเจ็ตทั้ง POD Mode 1, 2 และ 3 มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน และมีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนว downstream เมื่อเทียบกับการฉีดเจ็ตควบคุมที่  $r_m = 2\%$  และกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) จากการพิจารณาโครงสร้าง POD Mode 1, การกระจายตัวของระดับพลังงาน และโครงสร้างความเร็วเฉลี่ย ที่ได้จากทั้ง 2 วิธีการใส่อนุภาค พบว่า โครงสร้างที่มีส่วนผสมของเจ็ต กล่าวโดยเฉพาะเจาะจงคือ โครงสร้าง CVP จะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในบริเวณด้านล่างของเจ็ตให้เกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนหรือเริ่มมีส่วนร่วมกับการไหลปั่นป่วนของเจ็ต และจะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางจากบริเวณด้านล่างของเจ็ตนี้ขึ้นไปผสมกับตัวเจ็ตผ่านทางช่องแนวตั้ง (vertical channel) ที่มีความเร็วในแนว traverse ทิศพุ่งขึ้นสูง ที่อยู่ระหว่างคู่ vortex ของ CVP โดย CVP จะเป็นตัวเหนี่ยวนำและขับเคลื่อนทำให้ช่องแนวตั้งนี้ยังคงอยู่ได้ เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนว downstream ผลการศึกษาชี้แนะว่า กลไกการเหนี่ยวนำของ CVP ที่ทำให้เกิดช่องแนวตั้งที่มีความเร็วในแนว traverse ทิศพุ่งขึ้นสูงนำของไหลในกระแสลมขวางที่บริเวณด้านล่างของเจ็ตขึ้นไปผสมกับตัวเจ็ตนี้ น่าจะเป็นกลไกการเหนี่ยวนำการผสมหลักกลไกหนึ่งของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบตัดขวาง ท้ายสุด จากผลการศึกษา พบว่า เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นถึง 45% ที่ตำแหน่ง  $x/r_d = 0.5$  เมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม สันนิษฐานว่าการเพิ่มขึ้นของการเหนี่ยวนำการผสมของกรณี  $r_m = 4\%$  มีสาเหตุหนึ่งมาจากการทะลุทะลวงที่สูงกว่าของ CVP ในกรณีนี้ทำให้ผลกระทบจากการจำกัดการเหนี่ยวนำการผสมโดยผนังที่พื้น (wall blocking) น้อยลงเมื่อเทียบกับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  และกรณีที่ไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5770339321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: JET IN CROSSFLOW / PROPER ORTHOGONAL DECOMPOSITION (POD) / STABILITY OF ENERGETIC STRUCTURES / ENTRAINMENT MECHANISM

SUPHAK DAWYOK: EFFECTS OF THE AZIMUTHAL CONTROL JETS TO MAIN JET MASS FLOWRATE RATIO ON THE FLOW STRUCTURES OF A JET IN CROSSFLOW VIA POD. ADVISOR: ASSOC. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA, Ph.D., 187 pp.

Effects of the azimuthal control jets to main jet mass flowrate ratio on the flow structures of a jet in crossflow are investigated by proper orthogonal decomposition (POD). The instantaneous velocity fields in various cross planes are measured by Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) with two PIV tracer particles seeding schemes. 1) The first seeding scheme is the jet-fluid only – and not the crossflow fluid – seeding scheme. This seeding scheme allows us to instantaneously and clearly identify and differentiate the jet-fluid mixture region and structures from the pure crossflow fluid region. As a consequence, this seeding scheme does not only allow us to investigate the jet-fluid mixture structure more clearly but also allows us to determine jet entrainment more directly and to be able to determine the probability of finding jet-fluid mixture at a point. 2) The second seeding scheme is both jet and crossflow fluids seeding scheme. This seeding scheme, together with the jet-fluid only seeding scheme, allows us to analyze the interaction between the jet-fluid mixture structure and the surrounding pure crossflow fluid more clearly. The experiment is conducted for the baseline jet in crossflow (JICF) with effective velocity ratio ( $r$ ) of 4.2 and crossflow Reynolds number ( $Re_{cf}$ ) of 5,700. For the cases of controlled jet in crossflow, a pair of azimuthal control jets are deployed steadily at the azimuthal position of  $\pm 135^\circ$ . Two cases of the control jets to main jet mass flowrate ratio ( $r_m$ ) are experimented,  $r_m$  of 2% and 4%. The results from the jet-fluid only seeding scheme – which emphasizes only the jet-fluid mixture structure - show that as  $r_m$  increases to 4%, the jet-fluid mixture structures of POD Mode 1, 2 and 3 significantly change and are more stable in the downstream direction when compared to the case of lower  $r_m$  and JICF. Consideration of the results of POD Mode 1, energy distribution, and mean velocity structure from both seeding schemes also shows that the jet-fluid mixture structure, specifically the counter-rotating vortex pair (CVP), induces the surrounding pure crossflow in the region under the jet to start participating in its turbulent motion and entrains the crossflow from underneath through a vertical channel of high upward transverse velocity. This vertical channel of high upward transverse velocity is located between the vortex pair and is induced, fueled, and sustained in the downstream direction by the CVP itself. This is found to be one of the entrainment mechanisms of the jet in crossflow in the cross plane. Finally, the results show that as  $r_m$  increases to 4%, the entrainment significantly increases to 45% at  $x/d = 0.5$  when compared to JICF. Further investigation suggests that the increase in entrainment in the case of  $r_m = 4\%$  is due to higher penetration of the CVP, which lessens the wall blocking of entrainment of crossflow fluid underneath the jet when compared to the cases of  $r_m = 2\%$  and baseline JICF.

Department: Mechanical Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Mechanical Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งในทุก ๆ ด้านจาก ท่าน รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำในเรื่องต่าง ๆ งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงที่ท่านได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ถ่ายทอดประสบการณ์ในการทำงาน กระบวนการคิดวิเคราะห์ การสื่อสาร การเขียน อย่างเป็นระบบ รวมถึงการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ และสิ่งต่าง ๆ ที่สำคัญในอาชีพวิศวกรที่จะเป็นประโยชน์ในการดำเนินชีวิตของผู้วิจัยในอนาคต

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เลิศบุญวัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ วรรณโสภากย์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. เวชพงศ์ ชูติชูเดช ที่ได้เอื้อเฟื้อคำแนะนำต่าง ๆ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ในเนื้อหามากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยจากโครงการตรี-โท 5 ปี เงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาลประจำปีงบประมาณ 2556 ตามสัญญาเลขที่ GRB\_APS\_๒๑\_๕๖\_๒๑\_๐๔ และประจำปีงบประมาณ 2557 ตามสัญญาเลขที่ GRB\_APS\_๒๓\_๕๗\_๒๑\_๐๑ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบคุณบุคคลซึ่งมีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีดังต่อไปนี้ นาย เศรษฐสิทธิ์ ชัยเกษตรสิน และ นายกิตติคุณ วงศ์ทองศิริ ที่ได้ฝ่าฟันอุปสรรคตลอดการทำงานมาด้วยกัน

ขอขอบคุณ นางสาว จิตรพร สืบวัฒนะ ที่ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการทำงานและผ่านพ้นอุปสรรคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นไปได้ และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของผู้วิจัยที่คอยอบรมสั่งสอน ชี้แนะ ให้การสนับสนุนในด้านต่าง ๆ มาโดยตลอด ท้ายสุดผู้วิจัยขออุทิศความสำเร็จทั้งหมดนี้แด่มารดาของผู้วิจัย

## สารบัญ

หน้า

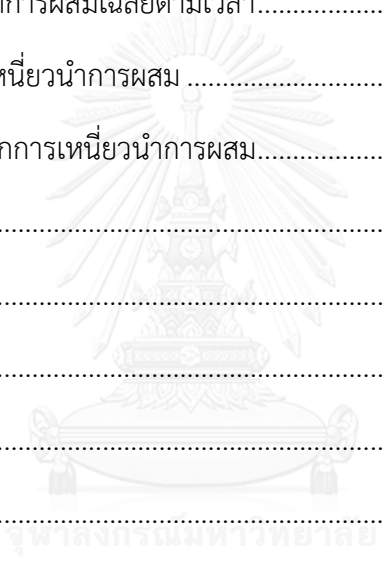
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ถ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 แรงจูงใจ .....	3
1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย .....	4
1.4 ปัญหาและแนวทางการวิจัย .....	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	7
บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	8
2.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญของเจ็ตในกระแสมขวาง .....	8
2.1.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล .....	8
2.1.1 ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ตและกระแสมขวาง .....	9
2.2 การศึกษาคุณลักษณะและโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวาง.....	9
2.2.1 เส้นทางเดินของเจ็ต.....	9
2.2.2 โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวาง .....	11
2.2.3 การก่อตัวและพัฒนาตัวของโครงสร้าง Counter-rotating vortex pair (CVP) .....	12
2.3 การปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสมขวาง .....	14

2.3.1 การกระตุ้นด้วยการติด Tab ที่ปากทางออกของเจ็ต .....	14
2.3.2 การกระตุ้นเจ็ตเป็นจังหวะ (pulsing).....	15
2.3.3 การกระตุ้นด้วยเจ็ตหมุนควง (swirling).....	16
2.3.4 การกระตุ้นด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jets) .....	17
2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วย POD .....	19
บทที่ 3 การวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วย POD .....	21
3.1 กระบวนการหา POD Mode และ Energy ของสนามความเร็วปั่นป่วน .....	22
3.2 กระบวนการย้อนกลับ (Reconstruction) ของสนามความเร็วปั่นป่วนขณะใด ๆ.....	25
บทที่ 4 รายละเอียดและอุปกรณ์การทดลอง .....	27
4.1 ชุดทดลองและ SPIV .....	27
4.2 การวัดสภาวะการทดลอง .....	29
4.2.1 การวัดความสม่ำเสมอของกระแสลมขวาง .....	29
4.2.2 การวัดความหนาชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง .....	30
4.2.3 การวัดรูปแบบความเร็วเริ่มต้นของเจ็ต .....	30
4.2.4 การวัดอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก.....	32
4.3 การสอบเทียบ SPIV กับ pitot static tube .....	33
4.4 สรุปรามิเตอร์ในการทดลอง.....	35
บทที่ 5 โครงสร้างของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต.....	36
5.1 ข้อแตกต่างของการใส่อนุภาคติดตามการไหลในแต่ละวิธี .....	37
5.2 ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ ( $\phi_{ij}$ ).....	40
5.3 บริเวณของความน่าจะเป็นสะสมที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต ( $R_\phi$ ).....	41
บทที่ 6 การสอบทวนผลการทดลอง .....	42



6.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง (JICF) กับผลการทดลองของ Meyer et al. (2007).....	42
6.1.1 เปรียบเทียบโครงสร้างเฉลี่ย.....	42
6.1.2 เปรียบเทียบโครงสร้าง POD mode 1, 2 และ 3.....	42
6.2 ตรวจสอบการคำนวณ POD ด้วยกระบวนการย้อนกลับ (reconstruction).....	43
6.2.1 กระบวนการย้อนกลับของความเร็วปั่นป่วนขณะใด ๆ.....	43
6.2.2 Turbulent kinetic energy (กระบวนการย้อนกลับของทุกสนามความเร็วปั่นป่วน).....	44
บทที่ 7 ผลของอัตราส่วนอัตราการผลิตเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ ) ต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง กรณีสี่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น.....	47
7.1 ผลของ $r_m$ ต่อโครงสร้างความเร็วเฉลี่ย (POD Mode 0).....	47
7.2 การพัฒนาตัวของโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญของกรณี JICF, $r_m = 2\%$ และ $r_m = 4\%$ .....	48
7.3 ผลของ $r_m$ ต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ.....	50
7.4 ผลของ $r_m$ ต่อการกระจายตัวของระดับพลังงาน.....	51
7.5 ผลของ $r_m$ ต่อพลังงานสะสม (Accumulative energy).....	52
บทที่ 8 ผลของอัตราส่วนอัตราการผลิตเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ ) ต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง กรณีสี่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง.....	54
8.1 ผลของ $r_m$ ต่อโครงสร้างความเร็วเฉลี่ย (POD Mode 0).....	54
8.2 การพัฒนาตัวของโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญของกรณี JICF, $r_m = 2\%$ และ $r_m = 4\%$ .....	55
8.3 ผลของ $r_m$ ต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ.....	56
8.4 ผลของ $r_m$ ต่อการกระจายตัวของระดับพลังงาน.....	57
8.5 ผลของ $r_m$ ต่อพลังงานสะสม (Accumulative energy).....	57
บทที่ 9 การเปรียบเทียบโครงสร้างและระดับพลังงานระหว่างกรณีสี่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้นกับกรณีสี่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง.....	59

9.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญที่สุด (POD Mode 1).....	59
9.2 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของระดับพลังงาน.....	61
9.3 การเปรียบเทียบพลังงานสะสม .....	61
บทที่ 10 ผลของ $r_m$ ต่อการเหนี่ยวนำการผสมและกลไกการเหนี่ยวนำการผสม .....	63
10.1 การนิยามการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment, $E$ ).....	63
10.1.1 ปัญหาของการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....	64
10.1.2 การเหนี่ยวนำการผสมเฉลี่ยตามเวลา.....	64
10.2 ผลของ $r_m$ ต่อการเหนี่ยวนำการผสม .....	65
10.3 แนวคิดเกี่ยวกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสม.....	66
บทที่ 11 สรุปผลการทดลอง.....	68
รายการอ้างอิง .....	73
ประมวลตาราง .....	76
ประมวลรูปภาพ .....	92
ภาคผนวก.....	164
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	187



## สารบัญตาราง

### บทที่ 2

ตารางที่ 2.1	สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาคุณลักษณะและโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....	74
ตารางที่ 2.2	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการติด Tab ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....	78
ตารางที่ 2.3	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการกระตุ้นเจ็ตเป็นจังหวะ (pulse) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....	80
ตารางที่ 2.4	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการกระตุ้นด้วยเจ็ตหมุนควง (Swirl) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....	81
ตารางที่ 2.5	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการกระตุ้นด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (azimuthal control jet) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....	83
ตารางที่ 2.6	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วย POD.....	85

### บทที่ 4

ตารางที่ 4.1	Spatial resolution ของสนามความเร็วจาก SPIV ที่ตำแหน่ง $x/rd$ ต่าง ๆ ของกรณี JICF, $r_m = 2\%$ และ $r_m = 4\%$ .....	86
ตารางที่ 4.2	ความหนาชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง ที่ตำแหน่ง $x/d = -2$ ตามแนว spanwise ( $z$ ).....	86
ตารางที่ 4.3	สรุปพารามิเตอร์ในงานวิจัยนี้.....	87

### บทที่ 6

ตารางที่ 6.1	พารามิเตอร์ที่สำคัญในการสอบทวนผลการทดลองระหว่างการทดลองในงานวิจัยของ Meyer <i>et al.</i> (2007) และการทดลองสอบทวนในงานวิจัยนี้.....	88
--------------	---	----

### บทที่ 10

ตารางที่ 10.1	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (entrainment) ที่ตำแหน่ง $x/rd$ ต่าง ๆ ของกรณี JICF, $r_m = 2\%$ และ $r_m = 4\%$ .....	88
---------------	---	----

## สารบัญรูปภาพ

### บทที่ 1

รูปที่ 1.1	เจ็ตในกระแสมวล (ภาพถ่ายจากห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์ของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).....	90
รูปที่ 1.2	การไหลลักษณะเจ็ตในกระแสมวลที่พบในงานวิศวกรรม.....	90
รูปที่ 1.3	โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสมวล (Fric and Roshko, 1994).....	91

### บทที่ 2

รูปที่ 2.1	เส้นทางเดินของความเร็ว (Pratte and Baines, 1967).....	92
รูปที่ 2.2	เส้นทางเดินของความเร็วจุดและอุณหภูมิ (Kamotani and Greber, 1972).....	92
รูปที่ 2.3	เส้นทางเดินของ Passive scalar บนสเกลต่าง ๆ (Smith and Mungal, 1998).....	93
รูปที่ 2.4	เส้นทางเดินของ Streamline บนสเกล $rd$ (Yuan and Street, 1998).....	93
รูปที่ 2.5	Center-plane trajectory ของอุณหภูมิ ( $y_T$ ) และ Centroid trajectory ของอุณหภูมิ ( $\bar{y}_T$ ) (Wangjiraniran, 2001).....	93
รูปที่ 2.6	Quadratics curve fit ของแต่ละเส้นทางเดิน (Muppidi and Mahesh, 2005a).....	94
รูปที่ 2.7	ผลการเปรียบเทียบเส้นทางเดินด้วยสเกลต่าง ๆ (Muppidi and Mahesh, 2005b).....	94
รูปที่ 2.8	การลดลงของ scalar concentration ของเจ็ตในกระแสมวลและเจ็ตอิสระที่สเกลต่าง ๆ (Smith and Mungal, 1998).....	95
รูปที่ 2.9	โครงสร้าง Spanwise rollers ซึ่ง contour แสดงวอร์ทิซิตีตามแนวแกน spanwise ขณะใด ๆ โดยเส้นประแสดงค่าลบและเส้นทึบแสดงค่าบวก (Yuan et al., 1999).....	95
รูปที่ 2.10	โครงสร้างของการเกิดเป็น CVP (Cortelezzi and Karagozian, 2001).....	96
รูปที่ 2.11	การพัฒนาตัวของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสมวล (Cortelezzi and Karagozian, 2001).....	96
รูปที่ 2.12	Vortices structure ของเจ็ตในกระแสมวล (Lim et. al., 2001).....	97
รูปที่ 2.13	การพัฒนาตัวของ Cylindrical shear layer (Lim et. al., 2001).....	97
รูปที่ 2.14	โครงสร้างบริเวณ Near field ของเจ็ตในกระแสมวล ซึ่งแสดงเป็น Isosurface ของ Vorticity (Yuan et al., 1999).....	97
รูปที่ 2.15	โครงสร้างของ Hanging vortices (Yuan et al., 1999).....	98
รูปที่ 2.16	Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวขึ้นระหว่างเจ็ตและกระแสมวลที่บริเวณขอบด้านข้างของปากทางออกเจ็ต (Yuan et. al., 1999).....	98

รูปที่ 2.17	วิวัฒนาการของ Streamlines ในการก่อตัวของ Kelvin-Helmholtz roller (Sau et. al., 2004)	98
รูปที่ 2.18	Contour ของความเร็วเฉื่อยบนระนาบตั้งฉากกับกระแสลมขวาง (Zaman and Foss, 1997)	99
รูปที่ 2.19	Contour ของความเร็วเฉื่อยบนระนาบตั้งฉากกับกระแสลมขวาง และ Streamwise vorticity isosurface (Zaman and Foss, 1997)	100
รูปที่ 2.20	ผลของการติด Tab (Zaman and Foss, 1997)	100
รูปที่ 2.21	การติด Tab (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)	100
รูปที่ 2.22	การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการติด Tab กรณีเจ็ตไม่หมุนควง (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)	101
รูปที่ 2.23	การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการติด Tab กรณีเจ็ตหมุนควง (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)	102
รูปที่ 2.24	ผลการกระตุ้นเจ็ตอย่างเป็นจังหวะด้วยลำโพง (M'Closkey et al., 2002)	103
รูปที่ 2.25	ภาพถ่าย Instantaneous (Narayanan et. al., 2003)	104
รูปที่ 2.26	การกระจายตัวของอุณหภูมิตั้งฉาก $x/rd = 0.5$ (Wangjiraniran and Bunyajitradulya, 2001)	104
รูปที่ 2.27	Contours of line-of-sight integrated mean images ของ Transverse profile โดยที่ P แทน Passive และ A แทน Active (Yingjaroen et. al., 2006)	105
รูปที่ 2.28	ภาพถ่าย Instantaneous ของ mixing structure บนด้าน Top view (Limdumrongtum et. al., 2009)	105
รูปที่ 2.29	isoconcentration surface ขณะใด ๆ ด้าน Top view (Denev et. al., 2005)	106
รูปที่ 2.30	ภาพเฉื่อยของ streamlines ด้าน End view (Denev et. al., 2005)	106
รูปที่ 2.31	ชุดเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Kornsri et. al., 2009)	107
รูปที่ 2.32	ผลของเจ็ตควบคุมต่อเส้นทางเดินของความเร็วเจ็ต (Kornsri et. al., 2009)	107
รูปที่ 2.33	ผลของปริมาณ $r_m$ ต่อการ Penetration ของเส้นทางเดินของความเร็วเจ็ตที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ ที่ตำแหน่งมุม $\theta = \pm 15^\circ$ (Kornsri et. al., 2009)	107
รูปที่ 2.34	Contour ของความเร็วเฉื่อย ( $w/U_{cf}$ ) เปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมกับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่มุม $\theta = \pm 15^\circ$ , $r_m = 2\%$ (Kornsri et. al., 2009)	108
รูปที่ 2.35	แนวคิดกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Kornsri et. al., 2009)	108
รูปที่ 2.36	ประสิทธิภาพผลของเจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Witayapapakorn, 2013)	109
รูปที่ 2.37	ประสิทธิภาพผลของเจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสม (Chaikasetzin et al., 2014)	109

รูปที่ 2.38	โครงสร้างของความเร็วเฉลี่ยและ POD modes ของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ $r = 3.3$ ในระนาบ $y = 0$ (Meyer et al., 2007).....	110
รูปที่ 2.39	โครงสร้างของความเร็วเฉลี่ยและ POD modes ของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ $r = 1.3$ ในระนาบ $y = 0$ (Meyer et al., 2007).....	111
รูปที่ 2.40	ผลของการฉีดเจ็ตควบคุม (Srimekharat and Bunyajitradulya, 2013).....	112
<b>บทที่ 4</b>		
รูปที่ 4.1	อุโมงค์ลม (ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).....	113
รูปที่ 4.2	เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า.....	113
รูปที่ 4.3	พิกัดในการทดลอง.....	113
รูปที่ 4.4	ชุดเจ็ตหลัก (main jet).....	114
รูปที่ 4.5	ชุดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (azimuthal control jet).....	114
รูปที่ 4.6	หัวเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง.....	114
รูปที่ 4.7	ชุด Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV).....	115
รูปที่ 4.8	เครื่องให้กำเนิดแสงเลเซอร์ ND:YAG.....	115
รูปที่ 4.9	Laser light arm.....	115
รูปที่ 4.10	กล้อง CCD PowerView Plus 11 MP.....	115
รูปที่ 4.11	Synchronizer.....	115
รูปที่ 4.12	ความสม่ำเสมอของความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวาง ที่ตำแหน่ง $x/d = -5$ หรือ ประมาณ 6 เซนติเมตร โดยวัดด้วย SPIV.....	116
รูปที่ 4.13	รูปร่างชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางรัศมีที่ตำแหน่ง $x/d = -2 : z/d = 0, \pm 2$ โดยเป็นรูปร่าง turbulent ประมาณด้วยสมการ $1/5.2$ power law.....	116
รูปที่ 4.14	ลักษณะการวัดรูปแบบความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออก.....	117
รูปที่ 4.15	รูปแบบความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออกตามแนว streamwise ( $x$ ) และ spanwise ( $z$ ) โดยเป็นรูปร่าง Fully-developed turbulent pipe flow.....	117
รูปที่ 4.16	ความไม่สมมาตรของเจ็ตที่ปากทางออก.....	117
รูปที่ 4.17	ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน $x$ ที่จำนวนภาพต่าง ๆ.....	118
รูปที่ 4.18	ความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน $x$ เมื่อจำนวนภาพมากขึ้น.....	118
รูปที่ 4.19	กราฟการสอบเทียบระหว่าง SPIV และ pitot static tube.....	119

**บทที่ 5**

รูปที่ 5.1 อนุภาคติดตามการไหลและเวกเตอร์ความเร็วขณะใด ๆ ณ เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  (ก) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง (ข) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น.....120

รูปที่ 5.2 ความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไร้มิติตามแนวแกน streamwise ( $x$ ) (ก) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง (ข) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น.....121

รูปที่ 5.3 การกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น.....122

รูปที่ 5.4 ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วที่จุดใด ๆ กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง (ก) ในทางทฤษฎี (ข) จากการวัดความเร็วด้วย SPIV.....123

รูปที่ 5.5 บริเวณ  $R_\phi$  ของความน่าจะเป็นสะสมที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต  $\phi$ .....124

**บทที่ 6**

รูปที่ 6.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน  $x$  ไร้มิติ ( $V_x/u_{cf}$ ) และ โครงสร้างความเร็วเฉลี่ยบนระนาบ  $yz$  ไร้มิติ ( $\vec{V}_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/u_{cf}$ ) (ก) Meyer *et al.* (2007) (ข) การทดลองเพื่อการสอบทวนในงานวิจัยนี้.....125

รูปที่ 6.2 การเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงาน (ก) Meyer *et al.* (2007) (ข) การทดลองเพื่อการสอบทวนในงานวิจัยนี้.....126

รูปที่ 6.3 การย้อนกลับของความเร็วปั่นป่วนไร้มิติ ณ ภาพที่ 2,000 ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$   
 (ก) การใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ตเท่านั้น.....127  
 (ข) การใส่อนุภาคทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง.....128

รูปที่ 6.4 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของระดับพลังงาน TKE ณ ภาพที่ 2,000 ที่ได้จากการคำนวณการย้อนกลับ ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$ .....129

รูปที่ 6.5 การกระจายตัวของ TKE ไร้มิติ ที่คำนวณได้จากกระบวนการย้อนกลับของสนามความเร็วปั่นป่วนทั้งหมด ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$   
 (ก) การใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ตเท่านั้น.....130  
 (ข) การใส่อนุภาคทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง.....131

รูปที่ 6.6 เปอร์เซนต์ของ TKE ที่คำนวณจากกระบวนการย้อนกลับเทียบกับ TKE ที่คำนวณจากการวัดจริง ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$ .....132

**บทที่ 7**

รูปที่ 7.1 การกระจายตัวของความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลาไร้มิติ โดยเส้น contour แสดง  $V_x/u_{cf}$  และเวกเตอร์ในระนาบ แสดง  $(\vec{V}_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/u_{cf})$  ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น.....133

รูปที่ 7.2 การพัฒนาตัวของโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงาน สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น ของกรณี

(ก) JICF .....134

(ข)  $r_m = 2\%$  .....135

(ค)  $r_m = 4\%$  .....136

รูปที่ 7.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างระหว่างกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น

(ก) POD Mode 1.....137

(ข) POD Mode 2.....138

(ค) POD Mode 3.....139

รูปที่ 7.4 การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของระดับพลังงาน ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น.....140

รูปที่ 7.5 การพัฒนาตัวของพลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น.....141

รูปที่ 7.6 พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ของทุกกรณี สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น.....142

**บทที่ 8**

รูปที่ 8.1 การกระจายตัวของความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลาไร้มิติ โดยเส้น contour แสดง  $V_x/u_{cf}$  และเวกเตอร์ในระนาบ แสดง  $(\vec{V}_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/u_{cf})$  ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง.....143

รูปที่ 8.2 การพัฒนาตัวของโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงาน สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง ของกรณี

(ก) JICF .....144

(ข)  $r_m = 2\%$  .....145

(ค)  $r_m = 4\%$  .....146



รูปที่ 8.3	การเปรียบเทียบโครงสร้างระหว่างกรณี JICF, $r_m = 2\%$ และ $r_m = 4\%$ สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง	
	(ก) POD Mode 1.....	147
	(ข) POD Mode 2.....	148
	(ค) POD Mode 3.....	149
รูปที่ 8.4	การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของระดับพลังงาน ของกรณี JICF, $r_m = 2\%$ และ $r_m = 4\%$ สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง.....	150
รูปที่ 8.5	การพัฒนาตัวของพลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ของกรณี JICF, $r_m = 2\%$ และ $r_m = 4\%$ สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง.....	151
รูปที่ 8.6	พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ของทุกกรณี สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง.....	152
<b>บทที่ 9</b>		
รูปที่ 9.1	การเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 1 พร้อมทั้งระดับพลังงาน ระหว่างกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น กับ การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง ของกรณี	
	(ก) JICF .....	153
	(ข) $r_m = 2\%$ .....	154
	(ค) $r_m = 4\%$ .....	155
รูปที่ 9.2	การเปรียบเทียบการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของระดับพลังงาน ระหว่างกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น กับ การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง ของกรณี JICF, $r_m = 2\%$ และ $r_m = 4\%$ .....	156
รูปที่ 9.3	การเปรียบเทียบการพัฒนาตัวของพลังงานสะสมที่เปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ระหว่างกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น กับ การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง ของกรณี JICF, $r_m = 2\%$ และ $r_m = 4\%$ .....	157
<b>บทที่ 10</b>		
รูปที่ 10.1	การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ของกรณี JICF, $r_m = 2\%$ และ $r_m = 4\%$ .....	158
รูปที่ 10.2	โครงสร้างความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไร้มิติระหว่างกรณี JICF ทุกตำแหน่ง $x/rd = 0.5 - 1.5$ ของการใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง โดยเส้น contour แสดง $V_x / u_{cf}$ และเวกเตอร์ในระนาบ แสดง $\vec{V}_{yz} / u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z) / u_{cf}$ .....	159

บทที่ 10.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติระหว่างกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ที่ตำแหน่ง  $x/rd=1$  ของการใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง โดยเส้น contour แสดง  $V_x/u_{cf}$  และเวกเตอร์ในระนาบ แสดง  $\vec{V}_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/u_{cf}$  .....160



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

### อักษรโรมัน

$A$	พื้นที่
$A_j$	พื้นที่หน้าตัดของเจ็ต
$A^m$	บทที่ 3, eigenvector
$c$	ตัวแปรคงที่ (constant parameters) ใน $y = f(x; p; c)$
$d$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ปากทางออกของเจ็ต
$e_g / u_{cf}$	ค่าความคลาดเคลื่อนไรมิตีของค่าเฉลี่ยตามเวลาของปริมาณ $g$ ต่อจุดบนระนาบ
$e_\phi$	ค่าความคลาดเคลื่อนของความน่าจะเป็นสะสมต่อจุดบนระนาบ
$E$	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการการผสมเชิงปริมาตรขณะใด ๆ หรือ เฉลี่ยตามเวลา
$m_j$	อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตหลัก
$m_{cj}$	อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (รวมทุกรู)
$n$	ดัชนีเวลาของสนามความเร็ว ลำดับภาพสนามความเร็ว
$N$	จำนวนสนามความเร็ว หรือ จำนวนภาพ (snapshots) ทั้งหมด
$p$	บทที่ 1, ตัวแปรที่ผันแปรได้ (variable parameters) ใน $y = f(x; p; c)$
$p$	บทที่ 3, ตำแหน่งของจุดความเร็วปั่นป่วนบนระนาบที่อยู่ในรูป column vector
$Q$	อัตราการไหลเชิงปริมาตร
$Q_j$	อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ไหลผ่านหน้าตัดที่มีส่วนผสมของเจ็ต
$Q_o$	อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ต
$Q_{cj}$	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (รวมทุกรู)
$r$	อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล
$r_m$	อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก
$Re_{cf}$	ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของกระแสลมขวาง, $Re_{cf} = u_{cf} d / \nu_{cf}$
$Re_j$	ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ต, $Re_j = u_j d / \nu_j$
$R_\phi$	บริเวณของเจ็ตที่ $0 < \phi_{ij} \leq \phi$
$u_{cf}$	ความเร็วของกระแสลมขวาง
$u_j$	ความเร็วของเจ็ต
$u, v, w$	บทที่ 3, ความเร็วปั่นป่วนขณะใด ๆ (Instantaneous fluctuation velocity)
$V$	อัตราเร็ว
$V_x, V_y, V_z$	บทที่ 7, ความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลา (time-mean jet velocity)
$V_x, V_y, V_z$	บทที่ 8, ความเร็วสนามเฉลี่ยตามเวลา (time-mean field velocity)

$V'_x, V'_y, V'_z$	บทที่ 6, ความเร็วปั่นป่วนขณะใด ๆ (Instantaneous fluctuation velocity)
$\bar{V}$	เวกเตอร์ความเร็วสนาม
$\bar{V}_j$	เวกเตอร์ความเร็วเจ็ต
$x$	บทที่ 2, ตัวแปรอิสระ (independent variables) ใน $y = f(x; p; c)$
$\bar{x}$	เวกเตอร์ตำแหน่ง (position vector)
$x, y, z$	พิกัดอ้างอิง
$x / rd$	พิกัดตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ
$y$	บทที่ 2, ตัวแปรตาม (dependent variable) ใน $y = f(x; p; c)$
$y / rd$	พิกัดตามแนวแกน transverse ไร้มิติ
$z / rd$	พิกัดตามแนวแกน spanwise ไร้มิติ

### อักษรกรีก

$\lambda^m$	บทที่ 3, eigenvalue
$\beta^n$	บทที่ 3, สัมประสิทธิ์ของการย้อนกลับของสนามความเร็วปั่นป่วน ณ เวลาที่ $n$
$\phi^m$	บทที่ 3, POD Mode $m$
$\phi_{ij}$	บทที่ 5, ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ
$\delta$	ความหนาชั้นขอบเขต
$\theta$	ตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง
$\nu$	ความหนืดคิเนเมติก
$\nu_{cf}$	ความหนืดคิเนเมติกของกระแสลมขวาง
$\nu_j$	ความหนืดคิเนเมติกของเจ็ต
$\rho$	ความหนาแน่น
$\rho_{cf}$	ความหนาแน่นของกระแสลมขวาง
$\rho_j$	ความหนาแน่นของเจ็ต
$\psi_{bl}$	รูปร่างชั้นของเขตของกระแสลมขวาง
$\psi_{jp}$	รูปร่างความเร็วเริ่มต้นที่ปากทางออกของเจ็ต

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

เจ็ตในกระแสลมขวาง (Jet in Crossflow : JICF) คือ การฉีดเจ็ตเข้าสู่กระแสลมขวางในทิศทางที่ตั้งฉากกัน ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งสามารถพบเจ็ตในกระแสลมขวางในงานเชิงวิศวกรรม เช่น การฉีดเชื้อเพลิงเพื่อผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้ การระบายอากาศเสียออกจากปล่องควัน และการระบายความร้อนของใบพัดในกังหันแก๊สด้วยเทคนิค Film cooling เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างของเจ็ตในกระแสลมขวางเหล่านี้แสดงดังรูปที่ 1.2 เมื่อเจ็ตและกระแสลมขวางมาเจอกันจะเกิดปฏิสัมพันธ์ทำให้เกิดโครงสร้างการไหล (flow structures) และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม (entrainment) ซึ่งเป็นการที่โครงสร้างการไหลของเจ็ตได้ม้วนเอากระแสลมขวางที่อยู่รอบ ๆ เข้ามาผสมกับตัวเจ็ต โดยโครงสร้างการไหลมีรูปแบบต่าง ๆ แต่ที่สำคัญจะมีอยู่ 4 โครงสร้างตามการศึกษาของ Fric and Roshko (1994) คือ Horseshoe vortices, Jet shear layers, Wake structures และ Counter rotating vortex pairs (CVP) ดังรูปที่ 1.3 โครงสร้างเหล่านี้จะมีผลต่อคุณลักษณะที่สำคัญของเจ็ต อาทิเช่น เส้นทางเดินของเจ็ต (jet trajectory), การเหนี่ยวนำการผสม (entrainment) และการผสม (mixing) เนื่องจากอุปกรณ์และกระบวนการต่าง ๆ ในงานวิศวกรรมดังกล่าวมาข้างต้นนั้นขึ้นกับประสิทธิภาพของการเหนี่ยวนำการผสมและการผสมของของไหลระหว่างเจ็ตกับกระแสลมขวาง ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีพลังงานปั่นป่วนสูงสุดและมีบทบาทสำคัญ (most energetic structure) ของเจ็ตในกระแสลมขวางนั้นจะช่วยให้มีความรู้ความเข้าใจถึงโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางดียิ่งขึ้น ซึ่งนำมาสู่การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ในงานวิศวกรรมเหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาเป็นแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อหาวิธีการและเทคนิคการควบคุมการไหล (flow manipulation and control) ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลของการเหนี่ยวนำการผสมและการผสมที่มากขึ้นหรือที่ต้องการได้ ประกอบกับยังสามารถนำมาทำโมเดลแบบน้อยมิติ (low-dimensional model) ของการไหลได้

เจ็ตในกระแสลมขวางนั้นมีลักษณะโครงสร้างการไหลที่หลากหลาย ซึ่งมีการศึกษาในอดีต เช่น Smith and Mungal (1998) พบว่า แม้ว่าโครงสร้าง CVP จะเป็นโครงสร้างหลักของการผสมที่บริเวณ far field ก็ตาม แต่ไม่ทำให้การผสมของ JICF นั้นดีไปกว่า Free jet ในขณะที่การก่อตัวของ CVP ที่บริเวณ Near field ต่างหากที่มีผลทำให้การผสมของ JICF นั้นดีกว่า Free jet และสำหรับการศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ตนั้นควรจะสเกลด้วย  $rd$  ต่อมา Yuan *et al.* (1999) ได้จำลองการไหลด้วย Large-Eddy Simulation (LES) พบว่า CVP เกิดจาก Hanging vortices ที่พัฒนาตัวมาจาก Skewed mixing layer ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางบริเวณรอบปากเจ็ต นอกจากนี้ Yuan and Street (1998) อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเหนี่ยวนำการผสมและเส้นทางเดินของเจ็ตว่าการเหนี่ยวนำการผสมนั้นมีผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ตโดยเฉพาะในบริเวณ far field

นอกจากนี้ยังได้มีความพยายามในการปรับแต่งและควบคุมคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง เช่น การติด Tabs บริเวณปากเจ็ต (Liscinsky *et al.*, 1995; Zaman and Foss, 1997 และ Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005) การกระตุ้นอย่างเป็นจังหวะ (pulsing) (Hermanson *et al.*, 1998; Eroglu and Breidenthal, 2001 และ M'Closkey *et al.*, 2002) การฉีดเจ็ตหมุนควง (swirling) (Kavsaoğlu and Schetz, 1989; Liscinsky *et al.*, 1995; Niederhaus *et al.*, 1997; Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005; Yingjaroen *et al.*, 2006; Denev *et al.*, 2009 และ Limdumrongtum *et al.*, 2009) สำหรับการติด Tab ไม่ว่าจะเป็นแบบ passive control หรือ active control ลักษณะของ Tab นั้นจะเกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนทางกลทำให้ของไหลที่มีอุณหภูมิสูงที่ไหลผ่าน Tab นั้นสามารถเป็นอันตรายต่อชิ้นส่วน Tab ได้ ดังนั้น Tab ที่มีประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ นั้นอาจมีความซับซ้อนทั้งในเรื่องของวัสดุการสร้างและการซ่อมบำรุง สำหรับการกระตุ้นอย่างเป็นจังหวะหรือการฉีดเจ็ตหมุนควงนั้นสามารถใช้เป็นแบบ active control ได้ อย่างไรก็ตามสองวิธีนี้ต้องใช้พลังงานค่อนข้างมาก ขณะที่การฉีดเจ็ตหมุนควงนั้นจะก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการเหนี่ยวนำการผสมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (Niederhaus *et al.*, 1997; Yingjaroen *et al.*, 2006 และ Denev *et al.*, 2009)

ด้วยข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบข้างต้น Kornsri *et al.* (2009) จึงใช้การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (azimuthal control jets) (Kornsri *et al.*, 2009; Bunyajitradulya, 2011; Witayaprapakorn and Bunyajitradulya, 2013; Witayaprapakorn, 2013; Srimekharat and Bunyajitradulya, 2013; Chaikasetsin *et al.*, 2014) โดยการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงนี้มีข้อดี คือ 1) สามารถเป็น active control ได้ 2) ใช้พลังงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น 3) ง่ายต่อการบำรุงรักษาและการใช้งาน

Kornsri *et al.* (2009) ศึกษาผลของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างของเจ็ตพบว่า เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งด้าน windward จะทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตต่ำกว่าในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม ในขณะที่ฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งด้าน leeward จะทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตสูงกว่าในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม นอกจากนี้เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 15^\circ$  ที่อัตราส่วนเชิงมวลเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ ) คงที่ เท่ากับ 2% มีผลไปยังยั้งการพัฒนาตัวของโครงสร้าง windward jet shear layer ในทางกลับกันจะไปส่งเสริมการพัฒนาตัวของโครงสร้าง lateral skewed mixing layer ซึ่งโครงสร้างนี้จะพัฒนาตัวต่อไปเป็น CVP

ในการวิเคราะห์หาโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญหรือโครงสร้างหลักของเจ็ตในกระแสลมขวาง Meyer *et al.* (2007) ใช้ Proper orthogonal decomposition (POD) กับสนามความเร็ว พบว่าเจ็ตในกระแสลมขวาง (JICF) ที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพ (effective velocity ratio,  $r$ ) เท่ากับ 3.3 โครงสร้างของการไหลจะเป็นผลมาจาก Wake vortices เสียส่วนใหญ่ ในขณะที่  $r = 1.3$  โครงสร้างของการไหลจะเป็นผลมาจาก Jet shear-layer vortices เสียส่วนใหญ่

## 1.2 แรงจูงใจ

Witayaprapakorn and Bunyajitradulya (2013) ศึกษาผลของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jets) ต่อการเหนี่ยวนำการผสม โดยใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ในการวัดสนามความเร็วและใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น (ไม่ฉีดในกระแสลมขวาง) พบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 15^\circ$  ที่อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ ) เท่ากับ 2% มีผลทำให้การเหนี่ยวนำการผสมลดลงที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 0.75$  ในขณะที่มีการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปในแนว downstream และเพิ่มมากที่สุดถึง 9% ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.0$  เมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

ต่อมา Witayaprapakorn (2013) พบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 135^\circ$  ที่  $r_m$  เท่ากับ 2% มีผลทำให้การเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มมากที่สุดเท่ากับ  $13 \pm 5\%$  ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  เมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

หลังจากนั้น Chaikasetin *et al.* (2014) ศึกษาผลของ  $r_m$  ต่อการเหนี่ยวนำการผสม พบว่า เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 135^\circ$  และเพิ่มปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นจาก 2% เป็น 4% (Witayaprapakorn, 2013 ทดลองที่ 2%) ทำให้การเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นอย่างมากถึง 61% ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  เมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

ในการวิเคราะห์โครงสร้างการไหลที่มีพลังงานสูงสุด Srimekharat and Bunyajitradulya (2013) ศึกษาผลของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางโดยใช้ POD ในการวิเคราะห์โครงสร้างการไหล ซึ่งใช้ SPIV ในการวัดสนามความเร็วและใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตหลักเท่านั้น (ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง) เพื่อที่สามารถแยกแยะและวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตที่ไม่ใช่ส่วนของกระแสลมขวางได้อย่างชัดเจน พบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 15^\circ$  ที่  $r_m = 2\%$  ทำให้โครงสร้างที่มีพลังงานปั่นป่วนสูงสุด (POD Mode 1) เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม อีกทั้งยังทำให้การกระจายตัวของระดับพลังงานที่โหมดต่าง ๆ เปลี่ยนจากลักษณะเตี้ยกว้างในกรณีที่ไม่ฉีดเจ็ตควบคุมเป็นลักษณะสูงแคบในกรณีที่ฉีดเจ็ตควบคุมอีกด้วย จากผลข้างต้นนี้ชี้ให้เห็นว่าการฉีดเจ็ตควบคุมทำให้โครงสร้างที่มีพลังงานปั่นป่วนสูงสุดมีระดับพลังงานเพิ่มขึ้นโดดเด่นกว่าโครงสร้างในโหมดอื่น ๆ

ต่อมา Srimekharat (2014) ทดลองใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางเพื่อทำการเปรียบเทียบ พบว่า โครงสร้างที่มีพลังงานปั่นป่วนสูงสุดของกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.0$  นั้นจะเป็นโครงสร้างการก่อตัวของ CVP ในขณะที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  จะเป็นโครงสร้าง Jet shear layer ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เกิดจากเจ็ต และโครงสร้าง Wake vortices ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เกิดจากกระแสลมขวาง เนื่องจาก Wake vortices จะพบเมื่อใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง แต่ไม่พบ Wake vortices เมื่อใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตอย่างเดียว

จากการศึกษาของ Chaikasetsin *et al.* (2014) พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 135^\circ$  ที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นจาก 2% เป็น 4% นั้นมีผลต่อการเหนี่ยวนำการผสมอย่างมาก และทำให้การเหนี่ยวนำการผสมมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมถึง 61% อีกทั้ง Srimekharat และ Bunyajitradulya (2013) พบว่าวิธีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น (ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง) จะช่วยให้สามารถแยกแยะและวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตที่ไม่รวมส่วนของกระแสลมขวางด้วยวิธี POD ได้ชัดเจนขึ้น จึงเป็นแรงจูงใจของงานวิจัยนี้ กล่าวคือ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลของ  $r_m$  ต่อโครงสร้างของการไหล (ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของการเหนี่ยวนำการผสมอย่างมาก) ผู้วิจัยจึงศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ ) ต่อโครงสร้างการไหลของการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 135^\circ$  โดยใช้วิธีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตหลักเท่านั้น (ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง) เพื่อสามารถแยกแยะและวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตที่ไม่รวมส่วนของกระแสลมขวางได้อย่างชัดเจนและวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี POD นอกจากนั้นจะใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวางเพื่อทำการเปรียบเทียบและดูผลจากส่วนของกระแสลมขวาง

### 1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลักต่อโครงสร้างที่มีพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุด (most energetic turbulent structures, turbulent kinetic energy) ของเจ็ตในกระแสลมขวาง เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม โดยใช้เครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า POD ในการวิเคราะห์หาโครงสร้างดังกล่าว และสามารถสรุปเป็น functional form ได้ดังนี้

$$\text{POD Mode, Energy} = f(x/rd ; r_m, \text{seeding scheme} ; \theta, r, \text{Re}_{cf}, \psi_{jp}, \psi_{bl}, \delta/d, \rho_j / \rho_{cf} = 1, \text{Re}_j = \text{Re}_{cf} \times r) \quad (1.1)$$

และในงานวิจัยนี้ยังมีวัตถุประสงค์ย่อยต่าง ๆ โดยสามารถสรุปเป็น functional form ดังนี้

$$\text{Energy} = f(\text{POD Mode} ; x/rd, r_m, \text{seeding scheme} ; \theta, r, \text{Re}_{cf}, \psi_{jp}, \psi_{bl}, \delta/d, \rho_j / \rho_{cf} = 1, \text{Re}_j = \text{Re}_{cf} \times r) \quad (1.2)$$

$$\text{Accumulative Energy} = f(\text{Percent of Mode} ; x/rd, r_m, \text{seeding scheme} ; \theta, r, \text{Re}_{cf}, \psi_{jp}, \psi_{bl}, \delta/d, \rho_j / \rho_{cf} = 1, \text{Re}_j = \text{Re}_{cf} \times r) \quad (1.3)$$

ซึ่งใช้เครื่องหมายอฒภาค “ ; ” ใน functional form เพื่อที่จะแยกบทบาทของตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลอง มีนิยามดังนี้



$$y = f(x ; p ; c) \quad (1.4)$$

Functional form ในสมการที่ (1.4) นี้มีความหมายว่า “ผลของ  $x$  ต่อ  $y$  ภายใต้เงื่อนไขของ  $p$  และค่าคงที่  $c$ ” โดยที่

- $y$  คือ ตัวแปรตาม (dependent variable)  
 $x$  คือ ตัวแปรอิสระ (independent variables)  
 $p$  คือ ตัวแปรที่ผันแปรได้ (variable parameters) ซึ่งสอดคล้องกับการทำการทดลองในกรณีต่างๆ  
 $c$  คือ ตัวแปรคงที่ (constant parameters) หรือเป็นตัวแปรที่มีค่าคงที่ตลอดการทำการทดลอง

โดยในแต่ละสมการ (1.1) ถึง (1.3) ตัวแปรต่าง ๆ มีรายละเอียดดังนี้

สมการที่ (1.1) ตัวแปรต่างๆ คือ

- $y$  คือ POD Mode, Energy หมายถึง โครงสร้างย่อยและระดับพลังงานของโครงสร้างย่อยโดยคำนวณมาจากวิธีการ POD ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไปในบทที่ 3  
 $x$  คือ  $x/r_d$  หมายถึง ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางปากทางออกของเจ็ตตามแนวระแสมขวางแบบไร้มิติ  
 $p$  คือ  $r_m$  หมายถึง อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก ( $r_m = \dot{m}_{cj} / \dot{m}_j$ ) และ seeding scheme หมายถึง วิธีในการใส่อนุภาคติดตามการไหล ซึ่งแบ่งเป็น 2 วิธี ดังนี้
1. การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น
  2. การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและระแสมขวาง
- $c$  คือ ตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง  $\theta$ , อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล  $r$ , ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ระแสมขวาง  $Re_{cf}$ , สภาวะเริ่มต้นของเจ็ตแบบไร้มิติ  $\psi_{jp}$ , รูปแบบชั้นขอบเขตของระแสมขวางแบบไร้มิติ  $\psi_{cf}$ , ความหนาชั้นขอบเขตของระแสมขวางแบบไร้มิติ  $\delta/d$ , ความหนาแน่นของเจ็ตต่อระแสมขวาง  $\rho_j / \rho_{cf} = 1$  และตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ต  $Re_j = Re_{cf} \times r$

สมการที่ (1.2) ตัวแปรต่างๆ คือ

- $y$  คือ Energy มีความหมายเช่นเดียวกับในสมการที่ (1.1)  
 $x$  คือ POD Mode มีความหมายเช่นเดียวกับในสมการที่ (1.1)  
 $p$  คือ  $x/rd$ ,  $r_m$  และ seeding scheme มีความหมายเช่นเดียวกับในสมการที่ (1.1)  
 $c$  มีตัวแปรเช่นเดียวกับในสมการที่ (1.1) ทุกประการ

สมการที่ (1.3) ตัวแปรต่างๆ คือ

- $y$  คือ Accumulative Energy หมายถึง ระดับพลังงานสะสม  
 $x$  คือ Percent of Mode หมายถึง เปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode รวม  
 $p$  คือ  $x/rd$ ,  $r_m$  และ seeding scheme มีความหมายเช่นเดียวกับในสมการที่ (1.1)  
 $c$  มีตัวแปรเช่นเดียวกับในสมการที่ (1.1) ทุกประการ

ค่าของตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้จะกล่าวในบทที่ 4 หัวข้อสรุปพารามิเตอร์ของการทดลอง สำหรับขอบเขตของงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

1. ทำการทดลองเจ็ตในกระแสมขวางที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล  $r$  เท่ากับ 4.2
2. ในกรณีที่มีเจ็ตควบคุมจะฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 135^\circ$  และทดลองที่อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก  $r_m$  เท่ากับ 2% และ 4%
3. ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของกระแสมขวาง  $Re_{cf}$  เท่ากับ 5,700
4. รูปร่างความเร็วของเจ็ตหลักที่ปากทางออกมีรูปร่างเป็น fully-developed turbulent pipe flow
5. วัดสนามความเร็วทั้งสามแกนด้วยเทคนิค SPIV โดยวัดในระนาบตั้งฉากกับกระแสมขวาง  $x/rd$  เท่ากับ 0.5, 0.75, 1.0 และ 1.5 โดยทำการทดลองทั้งกรณีที่มีเจ็ตควบคุมและไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

#### 1.4 ปัญหาและแนวทางการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เลือกการวิเคราะห์โครงสร้างการไหลจากการวัดสนามความเร็วโดยใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ซึ่งจะสามารถวัดสนามความเร็วได้ทั้งสามแกนในระนาบได้ การวัดสนามความเร็วในเทคนิคนี้จะเป็นการถ่ายภาพการไหลขณะใดขณะหนึ่ง (snapshot) ดังนั้นสนามความเร็วที่ได้จะรวมผลของความปั่นป่วน (fluctuation) ไปด้วยเนื่องจากเป็นการไหลแบบปั่นป่วน อีกทั้งอาจจะเป็นสนามความเร็วที่เกิดจากการซ้อนทับ (superposition) กันของหลาย ๆ โครงสร้างอีกด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือทางสถิติเข้ามาช่วยวิเคราะห์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิค Proper orthogonal decomposition (POD) ซึ่งเป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์หนึ่งที่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดการคำนวณต่อไปในบทที่ 3

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ประโยชน์ในเชิงความรู้ทางวิชาการ และประโยชน์ในเชิงประยุกต์ใช้ทางวิศวกรรม

ประโยชน์เชิงความรู้ทางวิชาการ มีความรู้ความเข้าใจและข้อมูลโครงสร้างที่มีพลังงานปั่นป่วนสูงสุดหรือมีบทบาทสำคัญของเจ็ตในกระแสลมขวาง และผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ ) ต่อโครงสร้างการไหล

ประโยชน์เชิงประยุกต์ใช้ทางวิศวกรรม นำความรู้ความเข้าใจและข้อมูลโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ ) มาเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคนิคการปรับแต่งหรือควบคุมและพัฒนารอกแบบอุปกรณ์ทางวิศวกรรมให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

## บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา

ในบทนี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญของเจ็ตในกระแสลมขวาง และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยในแต่ละงานวิจัยอาจจะศึกษาหลายเรื่อง ซึ่งในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ 1) การศึกษาคุณลักษณะและโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง 2) การปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวาง 3) การวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วย POD สำหรับรายละเอียดสำคัญต่าง ๆ คือ รายละเอียดของการศึกษา, พารามิเตอร์ของการทดลอง รวมไปถึงผลสรุปที่ได้ของแต่ละงานวิจัยจะกล่าวโดยสรุปในตารางที่ 1

### 2.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญของเจ็ตในกระแสลมขวาง

#### 2.1.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล

อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity ratio,  $r$ ) นิยามจากรากที่สองของอัตราส่วนโมเมนตัมฟลักซ์ของเจ็ตต่อกระแสลมขวาง ดังนี้

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

โดยที่  $\rho_j$  คือ ความหนาแน่นของไหลของเจ็ต,  $\rho_{cf}$  คือ ความหนาแน่นของไหลของกระแสลมขวาง,  $u_j$  คือ ความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของเจ็ต และ  $u_{cf}$  คือ ความเร็วของกระแสลมขวาง ในกรณีที่ความหนาแน่นของไหลของเจ็ตและกระแสลมขวางมีค่าเท่ากัน อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) จะลดรูปเป็นอัตราส่วนความเร็วของเจ็ตต่อความเร็วของกระแสลมขวาง ( $r_v = u_j / u_{cf}$ ) และการศึกษาในอดีตพบว่า อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) มีผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง เช่น เส้นทางเดินของเจ็ต, การเหนี่ยวนำการผสม และ Large-scale vortical structure เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

### 2.1.1 ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ตและกระแสลมขวาง

ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ต ( $Re_j$ ) นิยามจากความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของเจ็ตและเส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออกของเจ็ต คือ  $Re_j = u_j d / \nu_j$  โดยที่  $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออกของเจ็ต และ  $\nu_j$  คือ ความหนืดคินเนเมติกส์ของเจ็ต และ

ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของกระแสลมขวาง ( $Re_{cf}$ ) นิยามจากความเร็วของกระแสลมขวางและเส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออกของเจ็ต คือ  $Re_{cf} = u_{cf} d / \nu_{cf}$  โดยที่  $\nu_{cf}$  คือ ความหนืดคินเนเมติกส์ของกระแสลมขวาง อย่างไรก็ตามในกรณีที่เจ็ตและกระแสลมขวางอยู่ในสถานะเทอร์โมไดนามิกส์เดียวกัน ( $\rho_j = \rho_{cf}$  และ  $\nu_j = \nu_{cf}$ ) พบว่า  $r$ ,  $Re_j$  และ  $Re_{cf}$  มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = \frac{Re_j}{Re_{cf}} \quad (2.2)$$

## 2.2 การศึกษาคุณลักษณะและโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง

### 2.2.1 เส้นทางเดินของเจ็ต

Pratte and Baines (1967) ได้ศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ต โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพควันทิ้งจากเจ็ต ในช่วงอัตราส่วนความเร็วของเจ็ตต่อกระแสลมขวาง ( $r_v = u_j / u_{cf}$ ) ตั้งแต่ 5 ถึง 35 และปากทางออกของเจ็ตอยู่บริเวณศูนย์กลางของแผ่นราบกลมรัศมี 6 นิ้ว สูงจากระดับพื้น 8 นิ้ว เพื่อให้ไม่มีผลจากชั้นขอบเขตของผนังที่พื้น สำหรับเส้นทางเดินของเจ็ตในงานวิจัยนี้ คือ เส้นทางของขอบเจ็ต (outer profile และ inner profile) จะนิยามจากตำแหน่งขอบของควันทิ้งรูปถ่ายและสำหรับเส้นทางของกึ่งกลางเจ็ต (centerline profile) นิยามจากตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างเส้นทางของขอบเจ็ต พบว่า เส้นทางเดินของเจ็ตมีความสัมพันธ์กับสเกล  $rd$  ดังนี้

$$y/rd = A(x/rd)^m \quad (2.3)$$

โดยค่าคงที่  $A$  เท่ากับ 2.63, 2.05 และ 1.35 สำหรับเส้นทางเดิน outer profile, centerline profile และ inner profile ตามลำดับ และค่าคงที่  $m$  เท่ากับ 0.28 เท่ากันหมดทั้ง 3 เส้นทางเดิน ดังรูปที่ 2.1 จากรูป  $\alpha$  คือ อัตราส่วนความเร็วของเจ็ตต่อกระแสลมขวาง ( $r_v$ )

Kamotani and Greber (1972) ศึกษาเส้นทางเดินของและเส้นทางเดินของอุณหภูมิ โดยให้ความร้อนแก่เจ็ตจนมีอุณหภูมิสูงกว่ากระแสลมขวางประมาณ 75 °F และ 320 °F ที่อัตราส่วนโมเมนตัม ( $J = \rho_j u_j^2 / \rho_{cf} u_{cf}^2$ ) เท่ากับ 15.3 และ 59.3 ดังรูปที่ 2.2 โดยเส้นทางเดินของความเร็วและอุณหภูมิ นิยามจากตำแหน่งของจุดที่มีความเร็วและอุณหภูมิสูงที่สุดบนระนาบสมมาตร พบว่าที่อัตราส่วนโมเมนตัมเดียวกัน เส้นทางเดินของอุณหภูมิอยู่ต่ำกว่าเส้นทางเดินของความเร็ว และยังพบว่าอัตราส่วนโมเมนตัมเป็น

พารามิเตอร์ที่สำคัญและส่งผลต่อเส้นทางเดินของความเร็วและอุณหภูมิ ในขณะที่อัตราส่วนความหนาแน่น ( $\rho_j / \rho_{cf}$ ) ไม่ส่งผลต่อเส้นทางเดินของความเร็วของเจ็ต แต่จะส่งผลต่อเส้นทางของอุณหภูมิเล็กน้อย โดยแสดงความสัมพันธ์ของเส้นทางเดินของความเร็วและอุณหภูมิดังสมการ

$$\frac{y_U}{d} = 0.89J^{0.47} \left( \frac{x}{d} \right)^{0.36} \quad (2.4)$$

$$\frac{y_r}{d} = 0.73J^{0.52} \left( \frac{\rho_j}{\rho_{cf}} \right)^{0.11} \left( \frac{x}{d} \right)^{0.29} \quad (2.5)$$

Smith and Mungal (1998) ศึกษาเส้นทางของ Scalar concentration โดยใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) ในช่วงความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) ตั้งแต่ 5 ถึง 25 ซึ่งเส้นทางเดินของเจ็ตจะนิยามจากเส้นทางเดินของจุดที่มี concentration มากที่สุดบนระนาบสมมาตร และทำการสเกลผลของกระจายตัวของ concentration บนระนาบด้วย  $d$ ,  $rd$  และ  $r^2d$  ดังรูปที่ 2.3 พบว่า เมื่อสเกลเส้นทางเดินของ passive scalar ด้วย  $rd$  จะได้ลักษณะเส้นที่มีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสเกลด้วย  $d$  หรือ  $r^2d$  บ่งชี้ว่าการสเกลเส้นทางเดินของ passive scalar ควรใช้ เป็นสเกล  $rd$

Yuan and Street (1998) ศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ตโดยใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบ Large-Eddy simulation (LES) ในช่วงอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) เท่ากับ 2 และ 3.3 รูปที่ 2.4 แสดงเส้นทางเดินที่สเกลด้วย  $rd$  บนกราฟ log-log (ในรูปที่ 2.4 สำหรับ coordinate  $x$  และ  $z$  จะสเกลด้วย  $d$  อยู่แล้ว ดังนั้น  $x/R = x/rd$  นั่นเอง) พบว่า ที่ตำแหน่งในบริเวณ downstream ( $x/rd > 0.8$ ) เส้นทางเดินของทุกกรณีจะมีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันและเป็นเส้นตรง บ่งชี้ว่าบริเวณนี้ความสัมพันธ์ของเส้นทางเดินในรูป power law และจะเรียกบริเวณนี้ว่า power law region

Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) และ Wangjiraniran (2001) ได้ศึกษาเส้นทางเดินของอุณหภูมิโดยให้ความร้อนแก่เจ็ตและวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ระนาบตั้งฉาก (cross plane) ที่ความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) เท่ากับ 4.1 โดยเส้นทางเดินอุณหภูมิมิมีนิยามเช่นเดียวกับการศึกษาของ Kamotani and Greber (1972) รวมถึงศึกษาเส้นทางเดินที่นิยามจาก Centroid temperature พบว่า Centroid temperature trajectory จะอยู่ต่ำกว่า Maximum center plane temperature trajectory เสมอดังรูปที่ 2.5

Muppidi and Mahesh (2005a) ชี้แนะว่าในภาวะเริ่มต้นนั้นเส้นทางเดินของเจ็ตจะเป็นเส้นโค้ง เนื่องจากเจ็ตเคลื่อนที่ด้วยความแรงคงที่ (pressure driven) และในสภาวะสุดท้ายเส้นทางเดินของเจ็ตจะเปลี่ยนเป็นเส้นตรงเนื่องจากเจ็ตเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ (momentum driven) โดยที่ค่าของความแรงในสภาวะเริ่มต้นและความเร็วในสภาวะสุดท้ายของเจ็ตจะขึ้นอยู่กับตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ตดังรูปที่ 2.6 โดย

เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ตเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความเร่งตามแนวแกน streamwise ( $x$ ) ในสภาวะเริ่มต้นต่ำลงรวมไปถึงความเร็วในสภาวะสุดท้ายก็จะมีค่าต่ำลงเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ตลดลงจะทำให้ความเร่งตามแนวแกน streamwise ( $x$ ) ในสภาวะเริ่มต้นเพิ่มขึ้นและความเร็วในสภาวะสุดท้ายก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

Muppidi and Mahesh (2005b) ศึกษาการสเกลเส้นทางเดินของเจ็ต โดยชี้แนะว่ารูปแบบความเร็วเริ่มต้นของเจ็ตและความหนาแน่นขอบเขตของกระแสลมขวางมีอิทธิพลต่อเส้นทางเดินของเจ็ตอย่างมากใน near field อีกทั้งยังเสนอการสเกลเส้นทางเดินของเจ็ตโดยในรูปที่ 2.7(ก)-(ข) แสดงเส้นทางเดินเมื่อสเกลด้วย  $rd$  และ  $r^2d$  พบว่า เส้นทางเดินที่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันที่ไม่ดี จึงเสนอพารามิเตอร์ตัวใหม่ ( $h$ ) ในการสเกลเส้นทางเดินของเจ็ต ซึ่งนำผลของความหนาแน่นขอบเขตของกระแสลมขวางและรูปร่างความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออกมาพิจารณาประกอบด้วยดังรูปที่ 2.7(ค) จะเห็นว่าเส้นทางเดินนั้นมีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันที่ดีขึ้น

### 2.2.2 โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง

Fric and Roshko (1994) ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วย flow visualize โดยใช้เทคนิค Smoke-wire และวัดความเร็วด้วย Hot-wire พบว่า โครงสร้างของ Vortical structure แบ่งออกเป็น 4 ลักษณะดังรูปที่ 1.3 ได้แก่ 1) Jet shear layer vortices ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ Vortex ring ของ Free jet โดยเกิดจากการแยกตัวของ shear layer บริเวณปากเจ็ต 2) Horseshoe vortices โดยเกิดจากการม้วนตัวของกระแสลมขวางในบริเวณชั้นขอบเขตที่พื้นที่บริเวณรอบปากเจ็ต ซึ่งเกิดจากการที่กระแสลมขวางได้รับผลจาก Adverse pressure gradient ที่เกิดจากการกีดขวางการไหลของเจ็ตที่พุ่งออกมา ประกอบกับผลของความหนาแน่นขอบเขตของพื้นที่บริเวณปากเจ็ต 3) Wake vortices ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ Wake ของการไหลผ่านวัตถุทรงกระบอก โดยมีแหล่งกำเนิดจาก Boundary layer ของกระแสลมขวางที่ผนังพื้น 4) Counter - rotating vortex pair (CVP) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เป็นกลไกสำคัญในการผสมโดยเฉพาะในบริเวณ far field

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาการลดลงของความเข้มข้น (passive scalar concentration) โดยใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) ที่ความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) ระหว่าง 5 ถึง 25 รูปที่ 2.7(ก) แสดงอัตราการลดลงของความเข้มข้นตามแนว downstream โดยสเกลด้วย  $r^2d$  พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราการลดลงของความเข้มข้นที่ตำแหน่ง  $s/r^2d = 0.3$  จึงนิยามจุดแบ่งเขตระหว่าง near field และ far field โดยที่  $s/r^2d < 0.3$  เป็นบริเวณ near field และที่  $s/r^2d > 0.3$  เป็นบริเวณ far field และเมื่อสเกลด้วย  $rd$  ดังรูปที่ 2.7(ข) พบว่า บริเวณ near field ความเข้มข้นมีอัตราการลดลงแปรตาม  $(s/rd)^{-1.3}$  ซึ่งสูงกว่ากรณีเจ็ตอิสระ (Free jet) ที่มีการลดลงแปรตาม  $(s/rd)^{-1}$  ในขณะที่บริเวณ far field มีการลดลงแปรตาม  $(s/rd)^{-2/3}$  ซึ่งน้อยกว่ากรณีเจ็ตอิสระ บ่งชี้ว่าการพัฒนาตัวที่เต็มตัวของ CVP ในบริเวณ far field นั้นไม่ทำให้การผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง

นั้นดีกว่าเจ็ตอิสระ แต่การก่อตัวของ CVP ที่บริเวณ near field ต่างหากที่เป็นกลไกที่สำคัญของเจ็ตใน กระแสลมขวางที่ทำให้การผสมนั้นดีกว่าเจ็ตอิสระ

Yuan *et al.* (1999) ศึกษาโครงสร้างของการปฏิสัมพันธ์กันระหว่างเจ็ตกับกระแสลมขวาง รูปที่ 2.8 แสดง contour ของวอร์ทิซิตีตามแนวแกน spanwise ขณะใด ๆ พบว่า โครงสร้างของ spanwise roller ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผิวสัมผัสระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง จึงเกิดการผสมในระดับ Large scale ต่อมาในบริเวณที่เจ็ตเริ่มมีการโค้งตัวเกิดช่องภายในเจ็ต (gap) ทำให้กระแสลม ขวางถูกดึงเข้าไปในเจ็ต ซึ่งจะทำให้เกิดการผสมในระดับ Large scale และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปจนถึงบริเวณ Vortex zone โครงสร้างของ CVP จะเป็นกลไกสำคัญของการผสม โดยกระแสลมขวางจะถูกดึงเข้าไปใน เจ็ตตามทิศทางการหมุนควงของ CVP

Limdumrongtum (2007) และ Limdunrongtum *at. el.* (2009) ศึกษา Mixing structure โดยใช้เทคนิค Smoke fluid condensation, Mie scattering และ Laser-sheet visualization techniques โดยมีความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) เท่ากับ 4.1 โดย concentration field ที่ได้จากเทคนิคนี้จะ แสดงในส่วนของเจ็ตที่ผสมเสร็จถึง Stoichiometric ratio เท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาของ Smith and Mungal (1998) ที่ใช้เทคนิค PLIF โดย concentration field ที่ได้จะแสดงถึงทั้งส่วนที่ผสมและที่ไม่ ผสม (passive) จากการศึกษาของ Limdumrongtum (2007) และ Limdunrongtum *at. el.* (2009) พบว่า center of mass scalar trajectory และ centroid scalar trajectory จะต่างกันเพียงเล็กน้อยที่ ความเร็วประสิทธิผลเท่ากัน บ่งชี้ว่าการกระจายตัวของการผสมค่อนข้างสม่ำเสมอบนหน้าตัดของการผสม ของเจ็ต

### 2.2.3 การก่อตัวและพัฒนาตัวของโครงสร้าง Counter-rotating vortex pair (CVP)

Counter – rotating vortex pair (CVP) เป็น Vortical structure ที่สำคัญของเจ็ตในกระแสลม ขวางอย่างยิ่ง เช่น CVP นั้นช่วยให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม ดังนั้นการเข้าใจถึงกลไกและกระบวนการเกิด ของ CVP จึงจำเป็นต่อความรู้พื้นฐานสำหรับการปรับปรุงและพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านวิศวกรรม การศึกษา กลไกและกระบวนการเกิดของ CVP นั้นยังคงเป็นประเด็นที่ยังหาข้อสรุปไม่ได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- **CVP เป็นผลมาจาก Vortex ring**

Cortelezzi and Karagozian (2001) ศึกษาการก่อตัวและพัฒนาตัวของ CVP โดยใช้เทคนิค 3D vortex element รูปที่ 2.9 แสดงกลไกของการเกิด CVP นั้นเริ่มจาก Vortices ที่เกิดขึ้นจากผนังท่อของ เจ็ตและก่อตัวเป็นวงแหวนใกล้ปากทางออกของเจ็ต ต่อมาจะโค้งตัวตามกระแสลมขวาง ทำให้ Vortex ring เกิดการห่อตัวโดยขอบด้านหลังของ Vortex ring จะยกตัวสูงขึ้นและเชื่อมต่อกับขอบด้านหลังของ Vortex ring อีกตัวที่เกิดขึ้นก่อนและพัฒนาตัวกลายเป็น CVP ที่สมบูรณ์ที่บริเวณ Far field จากรูปที่ 2.10 แสดง



การพัฒนาตัวของ Vortical structure ซึ่งเกิดจากการม้วนตัวของ Jet shear layer โดยการพับของขอบ Vortex ring และขอบที่พับตัวจะกระตุ้นทำให้เกิด Vortex ring ตัวใหม่เกิดขึ้น

- **CVP เป็นผลมาจาก Vortex loop**

Lim *et al.* (2001) ทำการศึกษา Large scale structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยใช้เทคนิคฉีดสีและ PLIF จากรูปที่ 2.11 จะพบ Upstream vortex (A) และ Lee side vortex (B) มีลักษณะเป็น Vortex loop ซึ่งเกิดจากการพัฒนาตัวของ Cylindrical vortex sheet ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งผู้วิจัยเชื่อว่า CVP นั้นเกิดจากการพัฒนาตัวของ Vortex loop แทนที่จะเป็น Vortex ring เหมือนเจ็ตอิสระตามที่เสนอโดย Cortezzi and Karagozian (2001)

- **CVP เป็นผลมาจาก Skewed mixing layer**

Yuan *et al.* (1999) ศึกษาการก่อตัวของ CVP โดยใช้เทคนิค Large-eddy simulation (LES) ได้เสนอแนะว่าการก่อตัวของ CVP มีจุดกำเนิดจาก Hanging vortices ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นการม้วนตัวของกระแสลมขวางทางด้านข้างเข้ามาในตัวเจ็ต โดยที่แกนการม้วนมีทิศทางตามผลรวมระหว่างเวกเตอร์ความเร็วเจ็ตและกระแสลมขวาง ( $U_{mean}$ ) ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วระหว่างเจ็ตกับกระแสลมขวางในทิศตั้งฉากกับ  $U_{mean}$  นั่นคือ  $U_{n1}$  และ  $U_{n2}$  ตามลำดับ หรือที่เรียกว่า Skewed mixing layer

รูปที่ 2.15 แสดง Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวขึ้นระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางที่บริเวณขอบด้านข้างของเจ็ต โดยการไหลไปตามแนวแกนผ่าน Hanging vortices จะเป็นตัวนำ Vortical fluid จากชั้นขอบเขตที่ติดกับผนังเข้ามายังด้านหลังของลำเจ็ตทำให้ Hanging vortices เกิดการปะทะกับ Adverse pressure gradient เป็นผลให้เกิด breakdown ขณะเดียวกัน vortex จะขยายขนาดและก่อตัวเป็น CVP ที่มีกำลังไม่มากและเอียงตัวตามแนวเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ต

Sau *et al.* (2004) ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field ของเจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยม รูปที่ 2.16 แสดงกลไกของการเกิด CVP จาก Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวจากทางผนังด้านข้างของเจ็ต และพบว่า Kelvin–Helmholtz roller นั้นไม่ได้ก่อตัวเป็น Closed vortex ring

Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ทำการศึกษาโดยการติด Tab ที่บริเวณปากทางออกของเจ็ต ผลการศึกษาชี้แนะว่า การพัฒนาตัวของ Skewed mixing layer ซึ่งเกิดขึ้นบริเวณรอบ ๆ ปากเจ็ต เป็นผลทำให้เกิดการก่อตัวของ CVP

## 2.3 การปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสมขวาง

สำหรับการปรับแต่งและควบคุมในที่นี้ คือ การปรับแต่งและควบคุมคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวาง เช่น เส้นทางเดินของเจ็ต (ทำให้สูงขึ้น/ต่ำลง), การเหนี่ยวนำการผสมและการผสม (ทำให้ผสมดีขึ้น/แย่ลง) ซึ่งหลังจากได้ศึกษาโครงสร้างต่าง ๆ ของเจ็ตในกระแสมขวาง พบว่า โครงสร้างหนึ่งที่สำคัญต่อการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง คือ CVP และจากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสรุปได้ว่า การก่อดตัวของ CVP ที่บริเวณ Near field มีผลทำให้การผสมนั้นดีกว่าเจ็ตอิสระ ซึ่งการก่อดตัวของ CVP นั้นเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสมขวางบริเวณรอบปากทางออกของเจ็ต ดังนั้นงานวิจัยต่าง ๆ จึงมีแนวคิดในการปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสมขวางที่บริเวณปากทางออกเจ็ต โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่หนึ่งเป็นการกระตุ้นโดยไม่ใช้พลังงานและไม่สามารถปรับเปลี่ยนตามเวลา (passive control) เช่น การติด Tab ที่บริเวณปากทางออกของเจ็ต และประเภทที่สองเป็นการกระตุ้นโดยใช้พลังงานและสามารถปรับเปลี่ยนตามเวลา (active control) เช่น การกระตุ้นอย่างเป็นจังหวะ (pulsing), การฉีดเจ็ตหมุนควง (swirl) และ การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (azimuthal control jets) เป็นต้น

**ประเภทที่ 1** การกระตุ้นโดยไม่ใช้พลังงานและไม่สามารถปรับเปลี่ยนตามเวลา (Passive control)

### 2.3.1 การกระตุ้นด้วยการติด Tab ที่ปากทางออกของเจ็ต

Zaman and Foss (1997) ศึกษาผลของ Vortex generator แบบ Tab รูปสามเหลี่ยมที่มีต่อ Penetration depth ของเจ็ตในกระแสมขวางที่มีอัตราส่วนโมเมนต์พลังค์ ( $J$ ) เท่ากับ 21.1 และ 54.4 (คิดเป็นค่าความเร็วประสิทธิภาพ ( $r$ ) เท่ากับ 4.6 และ 7.4 ตามลำดับ รูปที่ 2.17 แสดง contour ของความเร็วเฉลี่ยที่หน้าตัดตั้งฉากโดย  $J$  เท่ากับ 21 และ 54.4 ตามลำดับ พบว่ากรณีที่ติด Tab ด้าน Windward จะทำให้ contour ของความเร็วเฉลี่ยอยู่ต่ำกว่ากรณีที่ไม่ติด Tab และติด Tab ที่ตำแหน่งอื่นเมื่อพิจารณาที่หลาย ๆ หน้าตัด ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งแสดง contour ของความเร็วเฉลี่ยที่หลาย ๆ หน้าตัด และ streamwise vorticity isosurface ที่เป็นตัวแทนการพัฒนาตัวของ CVP ระหว่างกรณีที่ไม่มีการติด Tab กับกรณีที่มีการติด Tab ที่ตำแหน่ง Windward โดย  $J$  เท่ากับ 21 และ 54.4 ตามลำดับ พบว่า เมื่อมีการติด Tab ที่ตำแหน่ง Windward จะทำให้ตำแหน่ง contour ของความเร็วเฉลี่ยในทุกๆ หน้าตัดลดความสูงลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Penetration depth ลดลงนั่นเอง และจากผลการคำนวณ streamwise vorticity ที่หน้าตัดต่าง ๆ ซึ่งเป็นตัวแทน CVP มาทำการสร้าง isosurface พบว่า ในกรณีที่ติด Tab ที่ตำแหน่ง Windward มีผลทำให้ isosurface มีขนาดเล็กกลงกว่าในกรณีที่ไม่ติด Tab บ่งชี้ว่า CVP มีกำลังน้อยลดลงกว่ากรณีที่ไม่ติด Tab เมื่อพิจารณาผลของการติด Tab ต่อเส้นทางเดินของความเร็วดังรูปที่ 2.19(ก) พบว่าการติด Tab ที่ตำแหน่ง Windward มีผลทำให้เส้นทางเดินต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ติด Tab ทั้งกรณี  $J$  เท่ากับ 21.1 และ 54.4 อีกทั้งยังมีผลทำให้ Circulation น้อยลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ติด Tab ทั้งกรณี  $J$  เท่ากับ 21.1 และ 54.4 ดังรูปที่ 2.19(ข)

Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ได้ศึกษาผลของการติด Tab ต่อการกระจายตัวของเจ็ตร้อนในกระแสลมขวางกรณีที่เกิดไม่หมุนควง (JICF) และเจ็ตร้อนหมุนควง (SJICF) ที่ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ตร้อนไม่เท่ากับศูนย์ โดยทำการทดลอง Swirl ratio ( $Sr$ ) เท่ากับ 0 สำหรับกรณี JICF และ 0.52 สำหรับกรณี SJICF ที่ ( $r$ ) เท่ากับ 4 โดยใช้ Tab รูปสามเหลี่ยมซึ่งมีขนาดพื้นที่ประมาณ 3% ของพื้นที่ปากเจ็ตร้อนโดยติดตั้งที่ตำแหน่งขอบปากเจ็ตร้อนต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.20

สำหรับกรณี JICF ดังรูปที่ 2.21 พบว่าโครงสร้างการไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อติด Tab บริเวณตำแหน่ง Lateral จนถึง Windward โดยที่เจ็ตร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างรูปไต (kidney-shaped) ซึ่งมีลักษณะคล้าย CVP ไปเป็นโครงสร้างรูปจูลภาคโดยที่มีแกนกลางซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าและลอยอยู่บนตำแหน่งที่สูงกว่ากรณีที่ไม่ติด Tab และยังคงรูปร่างแบบจูลภาคจนไปถึงหน้าตัดสุดท้ายของการวัด

สำหรับกรณี SJICF ดังรูปที่ 2.22 พบว่ามีผลคล้ายคลึงกับกรณี JICF แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อแตกต่างกัน กล่าวคือ โครงสร้างการไหลของกรณี SJICF จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งในบริเวณที่กว้างกว่ากรณี JICF โดยบริเวณนี้คือจากตำแหน่ง Pressure leeward ไปถึงตำแหน่ง Suction เมื่อเลื่อนตำแหน่งของ Tab ไปตามทิศทางของการหมุน

ซึ่งจะสรุปได้ว่าทั้งกรณี JICF และ SJICF บริเวณที่โครงสร้างการไหลของเจ็ตร้อนมีความไวต่อตำแหน่งของการติด Tab มากที่สุด คือ ตรงกลางระหว่างตำแหน่ง Pressure windward (PW) ไปจนถึง Windward (W) จากการทดลองบ่งชี้ถึงกลไกซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการเกิดโครงสร้างการไหลที่มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับ Skewed shear layer ตามทิศทางการไหลของกระแสลมขวางรอบเจ็ตร้อนใกล้กับลำของเจ็ตร้อนที่ปากทางออก

## ประเภทที่ 2 การกระตุ้นโดยใช้พลังงานและสามารถปรับเปลี่ยนตามเวลา (active control)

### 2.3.2 การกระตุ้นเจ็ตร้อนเป็นจังหวะ (pulsing)

M'Closkey *et al.* (2002) มีแนวคิดที่จะปรับเปลี่ยนรูปแบบการไหลโดยทำให้ความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตร้อนให้เปลี่ยนไปตามเวลา จึงศึกษาเจ็ตร้อนในกระแสลมขวางโดยการกระตุ้นด้วยเสียงจากลำโพง โดยใช้เทคนิคทางภาพถ่ายจากกล้อง NAC ซึ่งเป็นกล้องความเร็วสูง ซึ่งได้มีการปรับรูปแบบสัญญาณความถี่ และอุปกรณ์การควบคุม (filter) แบบที่มี Compensator และไม่มี Compensator พบว่า ชุดควบคุมที่ประกอบด้วย Compensator ได้ตอบสนองที่มีความเที่ยงตรงมากกว่าในกรณีที่ไม่มี Compensator ซึ่งเปรียบเทียบผลการวัดความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตร้อนด้วย Hot wire anemometer รูปที่ 2.23 พบว่า กรณีที่กระตุ้นด้วยสัญญาณรูปร่างสี่เหลี่ยม ที่สัดส่วนการเกิด Vortex shedding (1/5, 1/4, 1/3 และ 1/2) และมี Compensator นั้น เจ็ตร้อนจะสามารถฟุ้งทะลุและการกระจายตัวไปในกระแสลมขวางได้เหมาะสมที่สุด ซึ่งตรงกับคาบของสัญญาณอยู่ในช่วงระหว่าง 2.7 – 3.0 มิลลิวินาที

Narayanan *et al.* (2003) ศึกษา Dynamic และการควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวางด้วย Spinning valve actuator กระตุ้นด้วยความถี่ระหว่าง 100 ถึง 1,600 Hz ที่  $Re_{cf} = 5,000$ ,  $r = 6$  และ  $Re_j = 2.75 \times 10^4$  พบว่า การกระตุ้นที่ความถี่ต่ำ Vortices จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่เจ็ตพุ่งออกและโค้งตัวตามกระแสลมขวาง (รูปที่ 2.24) และกระตุ้นที่ความถี่สูงจะช่วยให้การกระจายตัวของเจ็ตที่ปากทางออกเพิ่มขึ้น

### 2.3.3 การกระตุ้นด้วยเจ็ตหมุนควง (swirling)

Niederhaus *et al.* (1997) ได้ศึกษาผลของการหมุนควง (swirl) ที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสน้ำขวาง โดยการสร้างการหมุนควงโดยใช้ใบพัด ซึ่งทำให้ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสที่ปากเจ็ตมีค่าเป็นศูนย์ โดยศึกษา Scalar concentration ในอุโมงค์น้ำ ด้วยเทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) พบว่า ลักษณะของ CVP เปลี่ยนไปจากลักษณะที่สมมาตรในกรณีที่ไม่มีการหมุนควงเป็นลักษณะที่ Vortex ด้านหนึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้นและอีกด้านหนึ่งมีขนาดเล็กลง รวมไปถึงรูปร่างที่เปลี่ยนไปเป็นจุลภาคนอกจากนั้นยังพบว่า การหมุนควงมีผลทำให้ Penetration ของเจ็ตลดลง รวมถึง Maximum concentration จะเกิดในด้าน pressure side

Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) ศึกษาผลกระทบของความเร็วในการหมุนควงซึ่งแสดงโดยค่า Swirl ratio (Sr) ที่มีต่อคุณลักษณะของอุณหภูมิจัดและการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยทำการทดลองที่ค่า Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 จนถึง 0.82 ที่ความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) เท่ากับ 4.1 ในช่วง  $x/rd$  ระหว่าง 0.25 ถึง 2 โดยใช้ท่อหมุนในการทำให้เกิดการหมุนควงเป็นผลให้ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์ จากรูปที่ 2.25 แสดงการกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวมบนระนาบตั้งฉาก พบว่า การหมุนควงของเจ็ตจะส่งผลทำให้อุณหภูมิและเกรเดียนต์ของอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณด้าน Suction ในขณะที่จะส่งผลทำให้มีอุณหภูมิและเกรเดียนต์ของอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณด้าน Pressure เมื่อเปรียบเทียบกับไม่มีการหมุนควง (สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005) รวมถึงการหมุนควงยังทำให้โครงสร้างการไหลมีความไม่สมมาตรอีกด้วย อย่างไรก็ตามจากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการหมุนควงนั้นมีอิทธิพลต่อพารามิเตอร์ เช่น เส้นทางการเดินของเจ็ต และ decay ของเจ็ตในกระแสลมขวางน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลของ  $r$

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของ Niederhaus *et al.* (1997) กับ Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) พบว่าพารามิเตอร์หลักของการทดลองใกล้เคียงกัน แต่ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ตต่างกันกลับให้ผลที่ไม่สอดคล้องกัน กล่าวคือ Niederhaus *et al.* (1997) พบ High concentration ทางด้าน Pressure ในขณะที่ Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) พบ High temperature ทางด้าน Suction

Yingjaroen *et al.* (2006) ศึกษาการวิวัฒนาการของเจ็ตในกระแสมวลขวางกรณีเจ็ตไม่หมุนควง (JICF) และกรณีเจ็ตหมุนควง (SJICF) ที่ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์ โดยใช้ปฏิกิริยา กรด – เบส แสดงถึง Reactive mixing และน้ำ – เบส แสดงถึง Passive mixing ในการศึกษา โดยจะทดลองที่ค่า Swirl ratio ( $Sr$ ) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.8 ที่  $r$  เท่ากับ 4 ซึ่งในการศึกษาจะใช้ Contours of line-of-sight integrated mean images แทนปริมาณเชิงคุณภาพของการผสม รูปที่ 2.26 แสดงถึง Contours of line-of-sight integrated mean images พบว่า กรณี JICF Passive outer region mixing จะมีการผสมบริเวณนี้มากที่สุดที่ตำแหน่ง  $x/rd < 0.5$  และเมื่อตำแหน่ง  $x/rd$  มากขึ้น พบว่า การผสมบริเวณ Passive outer region mixing จะน้อยลง ในขณะที่ Central-region mixing จะมีอิทธิพลต่อการผสมมากขึ้น และ Reactive inner region mixing จะมีการผสมเพียงเล็กน้อยในบริเวณนี้ และสำหรับกรณี SJICF พบว่าบริเวณ Outer และ Inner regions จะมีการผสมบริเวณนี้มาก ในขณะที่ Central-region mixing ไม่มีนัยสำคัญต่อการผสม

Limdumrongtum *et al.* (2009) ศึกษา Mixing structure ในบริเวณ Near field โดยศึกษาโครงสร้างขณะใด ๆ และโครงสร้างเฉลี่ยของเจ็ตในกระแสมวลขวางโดยใช้เทคนิค Combination of smoke fluid condensation, Mie scattering และ Laser-sheet visualization techniques โดยทำการทดลองที่ค่า Swirl ratio ( $Sr$ ) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.8 ที่  $r$  เท่ากับ 4 รูปที่ 2.27 แสดงภาพถ่ายขณะใด ๆ ของ mixing structure บนด้าน Top view ที่บริเวณ  $y/rd < 0.2$  พบว่า Swirl จะไปพัฒนาและส่งเสริม Cascading azimuthal K-H mixing structure บนด้าน Pressure ขณะที่จะไปยับยั้งบนด้าน Suction และที่บริเวณ  $y/rd > 0.2$  จะไปพัฒนาและส่งเสริม Vortical roll-ups บนด้าน Pressure ขณะที่จะไปยับยั้งบนด้าน Suction สำหรับการพัฒนาตัวของ Vortical roll-ups บนด้าน Pressure เกิดจากการพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่องจาก Cascading azimuthal K-H mixing structure จาก Upstream ในขณะที่ Vortical roll-ups บนด้าน Suction จะเกิดจากการพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่องจาก Lee side cusp

Denev *et al.* (2005) ศึกษาโครงสร้างและการผสมของเจ็ตหมุนควงในกระแสมวลขวาง โดยศึกษาที่ Swirl ratio ( $Sr$ ) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.6 แลใช้วิธี LES ศึกษาสนามการไหล พบว่า การไหลและสนามความเข้มข้นของเจ็ตจะบิดเบี้ยวไป และพบ High concentration ทางด้าน Suction เมื่อมีการหมุนควง ดังในรูปที่ 2.28 และ 2.29 และการศึกษาชี้แนะว่าการหมุนควงนั้นไม่ได้ช่วยให้การผสมดีขึ้นหรือมีผลน้อยมากต่อการผสม

### 2.3.4 การกระตุ้นด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jets)

Kornsri *et al.* (2009) ศึกษาผลกระทบของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมวลขวาง โดยที่เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงมีลักษณะดังรูปที่ 2.30 โดยศึกษาผลของพารามิเตอร์ของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง คือ 1) ตำแหน่งเชิงมุมตามแนวรัศมี ( $\theta$ ) 2) อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ ) โดยใช้ Single sensor hot film anemometer เป็นเครื่องมือวัด

ความเร็ว โดยทดลองที่  $r$  เท่ากับ 3.9 และ  $r_m$  อยู่ระหว่าง 1.8% ถึง 2.3% รูปที่ 2.31 แสดงเส้นทางเดินของความเร็วเจ็ตบนระนาบสมมาตรสำหรับกรณีฉีดเจ็ตควบคุม และไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) พบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม  $\theta = \pm 15^\circ$  (กรณี I15) นั้นจะให้เส้นทางเดินต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมหรือฉีดเจ็ตควบคุมกรณีอื่น สำหรับ  $r_m$  คงที่เท่ากับ 2.3%

รูปที่ 2.32 แสดงถึง Penetration ของเส้นทางเดินที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  สำหรับกรณี I15 พบว่า Penetration ของเส้นทางเดินจะลดลง เมื่อ  $r_m$  เพิ่มขึ้น โดยผู้วิจัยเลือกสภาวะที่เหมาะสมต่อการควบคุม คือ การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม  $\theta = \pm 15^\circ$  และปริมาณ  $r_m$  เท่ากับ 2%

รูปที่ 2.33 แสดงการกระจายของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติ ( $w/u_{cf}$ ) พบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมกรณี  $\theta = \pm 15^\circ$  (กรณี I15) จะทำให้เจ็ตมี Streamwise vortical pair ห่างจากกันตามแนว Spanwise มากขึ้น และจะยับยั้งการเกิด Windward jet shear layer ในขณะที่เจ็ตกับพื้นด้านล่าง (Wall separation) จะน้อยลง (เจ็ตต่ำลง)

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้เสนอแนวคิด Spanwise separation – Mutual blocking และ Wall separation – Wall blocking ต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง ซึ่งนำมาอธิบายกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของกรณี I15 ได้ดังต่อไปนี้ ผลการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง กรณี  $\theta = \pm 15^\circ$  (กรณี I15) (ดูรูป 2.34 ประกอบ) ทำให้ยับยั้งการเกิด Windward jet shear layer ส่งผลให้ Streamwise vortical structure แยกออกเป็นสองลูกซ้าย-ขวา ที่มีระยะห่างตามแนว Spanwise (Spanwise separation) มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF ซึ่งจะลดการขัดขวางการเหนี่ยวนำการผสมกันเองของ Vortex pairs (Mutual blocking) ในขณะที่เจ็ตมีระยะห่างจากพื้นด้านล่าง (Wall separation) น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF ซึ่งอาจทำให้เกิดการขัดขวางการเหนี่ยวนำการผสมจากบริเวณด้านล่างของเจ็ต (Wall blocking) หากเจ็ตใกล้พื้นเกินไป ดังนั้นการเหนี่ยวนำการผสมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงกรณี  $\theta = \pm 15^\circ$  (กรณี I15) จะประสิทธิผลหรือไม่ จึงขึ้นอยู่กับผลของ Spanwise separation – Mutual blocking และ Wall separation – Wall blocking ว่าปริมาณใดที่ส่งผลต่อการเหนี่ยวนำการผสมมากกว่ากัน

Witayaprapakorn (2013) ได้ศึกษาผลของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ซึ่งวัดสนามความเร็วโดยใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) เท่ากับ 4 สำหรับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมทดลองที่  $\theta = \pm 15^\circ$  และ  $\theta = \pm 135^\circ$  ที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  โดยในการหาอัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรนี้จำเป็นต้องใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตหลักเท่านั้น เพื่อที่จะสามารถระบุขอบเขตเจ็ต ณ เวลาใด ๆ ได้ พบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 15^\circ$  ส่งผลให้อัตราการเหนี่ยวนำการผสมไม่ต่างกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  และ  $x/rd = 0.75$  แต่มีอัตราการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยังที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1$  และ  $x/rd = 1.5$  ในขณะที่เมื่อฉีด

เจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 135^\circ$  จะส่งผลให้อัตราการเหนี่ยวนำการผสมสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมและกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 15^\circ$  ทุกตำแหน่ง  $x/rd$  ดังรูปที่ 2.35

Chaikasetsin *et al.* (2014) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ ) ต่อโครงสร้างการผสมและการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ซึ่งวัดสนามความเร็วโดยใช้เทคนิค SPIV ทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) เท่ากับ 4.1 และฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 135^\circ$  ที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  และ  $4\%$  โดยใช้วิธีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตหลักเท่านั้นเช่นเดียวกับการศึกษาของ Witayaprapakorn (2013) พบว่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลักมีผลต่อ โครงสร้างของเจ็ต, เส้นทางเดินของเจ็ต, circulation และการเหนี่ยวนำการผสม โดยที่อัตราส่วนเชิงมวลเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลักที่สูงขึ้น มีแนวโน้มทำให้ความเร็วเจ็ตในแนว streamwise ลดลง และทำให้เจ็ตทะลุเข้าไปในกระแสลมขวางได้มากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้การเหนี่ยวนำการผสมสูงขึ้น โดยที่  $r_m = 4\%$  ทำให้เจ็ตทะลุเข้าไปในกระแสลมขวางมากขึ้น เส้นทางเดินของเจ็ตสูงขึ้น มี circulation มากขึ้น และมีการเหนี่ยวนำการผสมมากขึ้นเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมถึง 61% ในตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  และเมื่อเทียบกับกรณีฉีดที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 15^\circ$  ที่  $r_m = 2\%$  (ในกรณีของ Witayaprapakorn และ Bunyajitradulya, 2013) มีการเหนี่ยวนำการผสมสูงขึ้นถึง 54% ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  ดังรูปที่ 36

#### 2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วย POD

Meyer *et al.* (2007) ศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางโดยวัดความเร็วด้วยเทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) โดยรูปแบบความเร็วเริ่มต้นของเจ็ตเป็น Fully-developed turbulent pipe flow และ  $Re_{cf} = 2,400$  โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) เท่ากับ 3.3 และ 1.3 และวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตโดยใช้ความเร็วปั่นป่วนผ่านกระบวนการ Proper Orthogonal Decomposition (POD) จากการวิเคราะห์โครงสร้าง POD mode ต่างๆ ในระนาบ  $y = 0$  พบว่า สำหรับกรณีที่  $r = 3.3$  ดังรูปที่ 37 บ่งชี้ว่าโครงสร้างในโหมดที่ 1 และโหมดที่ 2 มีความโดดเด่นมากกว่าโหมดอื่นๆ เนื่องจากมีระดับพลังงานประมาณ 10% ของระดับพลังงานทั้งหมด ในขณะที่โครงสร้างในโหมดที่ 3, 4 และ 5 นั้นมีระดับพลังงานแค่ 3% เท่านั้น สำหรับโครงสร้างใน 2 โหมดแรกแสดงถึงความเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างมากในทิศทางตั้งฉากกับระนาบซึ่งสลับระหว่างความเร็วค่าบวกและค่าลบซึ่งเป็นโครงสร้าง Wake vortices สำหรับโครงสร้างในโหมดที่ 3, 4 และ 5 ความเร็วในระนาบจะมีความโดดเด่นกว่าความเร็วในทิศตั้งฉากกับระนาบแทน โดยโครงสร้างในโหมดที่ 4 และ 5 นั้นบ่งชี้ถึงโครงสร้าง vortical ซึ่งแสดงถึง shear-layer vortices หรือ โครงสร้าง Jet shear layer นั้นเอง อย่างไรก็ตามสำหรับกรณี  $r = 1.3$  ดังรูปที่ 38 โครงสร้างในโหมดที่ 1, 2, 3 และ 4 นั้นแตกต่างกับกรณี  $r = 3.3$  อย่างเห็นได้ชัด นั่นคือความเร็วในระนาบจะโดดเด่นกว่าความเร็วในทิศตั้งฉากกับระนาบ ซึ่งแสดงถึงโครงสร้าง Jet shear layer ในขณะที่ความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับระนาบจะเริ่มมีความโดดเด่นขึ้นในโหมดต่อมา และมีความ

โดดเด่นกว่าความเร็วในระนาบอย่างเห็นได้ชัดในโหมดที่ 8 ซึ่งเป็นโครงสร้างของ Wake vortices สรุปได้ว่ากรณี  $r$  เท่ากับ 3.3 โครงสร้าง Wake vortices เป็นโครงสร้างหลักหรือมีบทบาทสำคัญของเจ็ตในกระแสมขวาง และโครงสร้าง Jet shear layer เป็นโครงสร้างที่มีบทบาทน้อยกว่า ในทางกลับกันสำหรับกรณีที่  $r$  เท่ากับ 1.3 โครงสร้าง Jet shear layer เป็นโครงสร้างหลัก ในขณะที่โครงสร้าง Wake vortices เป็นโครงสร้างที่มีบทบาทน้อยกว่า

Strimekharat and Bunyajitradulya (2013) ศึกษาผลของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางโดยใช้ POD ซึ่งวัดสนามความเร็วโดยใช้เทคนิค SPIV ทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) เท่ากับ 3.9 และฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 15^\circ$  ที่  $r_m = 2\%$  โดยใช้วิธีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตหลักเท่านั้นเช่นเดียวกับการศึกษาของ Witayaprapakorn (2013) เพื่อที่สามารถแยกแยะและวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตออกจากส่วนของกระแสมขวางได้อย่างชัดเจน พบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมทำให้โหมดที่มีพลังงานปั่นป่วนสูงสุด (POD Mode 1) เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเปรียบเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม ดังรูปที่ 39(ก) อีกทั้งการฉีดเจ็ตควบคุมนั้นยังทำให้การกระจายตัวของระดับพลังงานที่โหมดต่างๆเปลี่ยนจากลักษณะเตี้ยกว้างในกรณีของไม่ฉีดเจ็ตควบคุมเป็นลักษณะสูงแคบ ดังรูปที่ 39(ข) จากผลข้างต้นนี้ชี้ให้เห็นว่าการฉีดเจ็ตควบคุมนั้นจะไปกระตุ้นโครงสร้าง POD Mode 1 ให้โดดเด่นกว่าโครงสร้างใน Mode อื่น ๆ



### บทที่ 3

#### การวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางด้วย POD

ในบทนี้จะกล่าวถึงการคำนวณและการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ซึ่งการไหลแบบปั่นป่วนนี้ทำให้การไหลนั้นมีโครงสร้างที่อาจจะเกิดจากการซ้อนทับ (superposition) กันของหลาย ๆ โครงสร้าง ดังนั้นวิธี Proper orthogonal decomposition (POD) ถือเป็นเครื่องมือทางสถิติหนึ่งที่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางที่มีการไหลแบบปั่นป่วนนี้

Proper orthogonal decomposition (POD) เป็นกระบวนการหนึ่งทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ ซึ่งสัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างในงานวิจัยนี้ คือ สนามความเร็วปั่นป่วน (velocity fluctuation) กระบวนการ POD จะทำการแยกลักษณะโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางออกมาเป็นโครงสร้างย่อย ๆ (POD Mode) หลายโครงสร้างและมีระดับพลังงาน (Energy) ของแต่ละโครงสร้างย่อยนั้น ๆ ซึ่งระดับพลังงานจะขึ้นอยู่กับสัญญาณที่ใช้วิเคราะห์ โดยระดับพลังงานของสนามความเร็วปั่นป่วนทั้งสามทิศทาง คือ เปรอร์เซ็นต์ Turbulent kinetic energy ของโครงสร้างย่อยนั้นต่อ Turbulent kinetic energy ของโครงสร้างย่อยทั้งหมด

กระบวนการทาง POD ที่แยกโครงสร้างออกเป็นโครงสร้างย่อย ๆ และระดับพลังงานนั้นมีความคล้ายเคียงกับอนุกรมฟูเรียร์ แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่การใช้อนุกรมฟูเรียร์ในการวิเคราะห์แยกสัญญาณจะมีฟังก์ชันพื้นฐานที่ถูกกำหนดก่อนล่วงหน้าตายตัว ไม่ขึ้นกับสัญญาณที่ถูกวิเคราะห์ซึ่งในกรณีฟูเรียร์นี้ คือ ฟังก์ชันไซน์ (sine) ในขณะที่การใช้เทคนิค POD ในการวิเคราะห์แยกสัญญาณนั้นจะมีฟังก์ชันพื้นฐานที่ไม่ได้ถูกกำหนดล่วงหน้าตายตัว แต่จะขึ้นกับสัญญาณที่จะวิเคราะห์เอง กล่าวคือ กระบวนการของ POD จะวิเคราะห์หาเซตของฟังก์ชันพื้นฐานที่เหมาะสมที่สุดให้ (optimum) ซึ่งเซตของฟังก์ชันพื้นฐานที่เหมาะสมที่สุดในที่นี้ คือ เซตของฟังก์ชันพื้นฐานที่ให้พลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุดในจำนวน Mode ที่เท่ากัน เมื่อเทียบกับเซตของฟังก์ชันพื้นฐานที่หาจากวิธีอื่น ๆ ดังเช่น อนุกรมฟูเรียร์

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยค่าเฉลี่ยของปริมาณต่าง ๆ เช่น ปริมาณความเร็วเฉลี่ย จะได้เป็นโครงสร้างโดยรวมหรือเป็นโครงสร้างที่เกิดจากโครงสร้างย่อย ๆ หลายโครงสร้างรวมกัน ในขณะที่เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างด้วย POD จะสามารถแยกโครงสร้างออกมาเป็นโครงสร้างย่อย ๆ รวมไปถึงระบุหาโครงสร้างที่มีระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุด หรือโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญที่สุดได้

### 3.1 กระบวนการหา POD Mode และ Energy ของสนามความเร็วปั่นป่วน

POD กับสนามความเร็วขณะใด ๆ ในสามมิติที่วัดได้จากเทคนิค SPIV จะอ้างอิงวิธีการคำนวณจาก Meyer *et al.* (2007) ในหัวข้อ POD analysis โดยเริ่มจากการหาสนามความเร็วเฉลี่ย และการเฉลี่ยในที่นี้ คือ การเฉลี่ยตามเวลาที่จุดใด ๆ บนสนามความเร็ว (time-averaged) เป็นการเฉลี่ยจุดใด ๆ ในสนามความเร็วในช่วงเวลาทั้งหมดโดยไม่สนใจว่า ณ เวลาหนึ่งจุดนั้นจะพบความเร็วหรือไม่ สำหรับการเฉลี่ยตามเวลานั้นจะแตกต่างจากการเฉลี่ยตามสภาวะ (conditional-averaged) ซึ่งเป็นการเฉลี่ยที่จุดใด ๆ ในสนามความเร็วเฉพาะช่วงเวลาจุดนั้นพบความเร็วเท่านั้น

สนามความเร็วเฉลี่ยตามเวลานี้ถือเป็น POD Mode 0 และจะนำสนามความเร็วเฉลี่ยนี้ไปลบออกจากสนามความเร็วขณะใด ๆ (instantaneous velocity field) ได้เป็นสนามความเร็วปั่นป่วนขณะใด ๆ (instantaneous fluctuation velocity field) ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปเมทริกซ์แยกตามแต่ละแกนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1j} & \cdots & u_{1I} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ u_{i1} & & u_{ij} & & u_{iI} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{I1} & \cdots & u_{Ij} & \cdots & u_{II} \end{bmatrix}_{I \times J}^n \begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1j} & \cdots & v_{1I} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ v_{i1} & & v_{ij} & & v_{iI} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{I1} & \cdots & v_{Ij} & \cdots & v_{II} \end{bmatrix}_{I \times J}^n \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1j} & \cdots & w_{1I} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ w_{i1} & & w_{ij} & & w_{iI} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{I1} & \cdots & w_{Ij} & \cdots & w_{II} \end{bmatrix}_{I \times J}^n$$

โดยที่  $u$ ,  $v$  และ  $w$  คือ ความเร็วปั่นป่วนขณะใด ๆ ในแต่ละแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามลำดับ  
 $ij$  คือ ตำแหน่งของจุดความเร็วปั่นป่วนบนระนาบ  
 $n$  คือ ดัชนีเวลาของสนามความเร็วปั่นป่วนขณะใด ๆ ( $N$  คือ ช่วงเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสนามความเร็ว ซึ่งเวลาในที่นี้จะสัมพันธ์กับลำดับภาพสนามความเร็ว หรือ snapshot ของการวัดความเร็วด้วย SPIV หรืออีกนัยหนึ่ง  $N$  คือ จำนวนภาพสนามความเร็วทั้งหมด)

จากนั้นนำความเร็วปั่นป่วนขณะใด ๆ ณ เวลาที่  $n$  ทั้งสามแกนมาจัดเรียงให้อยู่ในลักษณะของ column vector  $\mathbf{u}^n$  ดังนี้

$$\mathbf{u}^n = \begin{bmatrix} u_1^n \\ \vdots \\ u_P^n \\ v_1^n \\ \vdots \\ v_P^n \\ w_1^n \\ \vdots \\ w_P^n \end{bmatrix}_{3IJ \times 1} \left\{ \begin{array}{l} \text{ความเร็วปั่นป่วน ณ เวลาที่ } n \text{ ในแนวแกน } x \\ \text{ความเร็วปั่นป่วน ณ เวลาที่ } n \text{ ในแนวแกน } y \\ \text{ความเร็วปั่นป่วน ณ เวลาที่ } n \text{ ในแนวแกน } z \end{array} \right. \quad (3.1)$$

โดยที่  $p$  คือ ตำแหน่งของจุดความเร็วปั่นป่วนบนระนาบที่อยู่ในรูป column vector ( $P = I \times J$ ) เพราะฉะนั้นสำหรับเวลาทั้งหมดหรือจำนวนภาพทั้งหมด  $N$  จะได้เป็นเมทริกซ์  $\mathbf{U}$  ดังนี้

$$\mathbf{U} = [\mathbf{u}^1 \quad \mathbf{u}^2 \quad \dots \quad \mathbf{u}^n \quad \dots \quad \mathbf{u}^N] = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} 1^{\text{st}} \text{ snapshot} & N^{\text{th}} \text{ snapshot} \\ \downarrow & \downarrow \end{array} \\ \begin{bmatrix} u_1^1 & u_1^2 & \dots & u_1^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_P^1 & u_P^2 & \dots & u_P^N \\ v_1^1 & v_1^2 & \dots & v_1^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_P^1 & v_P^2 & \dots & v_P^N \\ w_1^1 & w_1^2 & \dots & w_1^N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_P^1 & w_P^2 & \dots & w_P^N \end{bmatrix}_{3IJ \times N} \end{array} \quad (3.2)$$

จากนั้นจะหาเมทริกซ์ autocovariance ( $\tilde{\mathbf{C}}$ ) จาก

$$\tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{U}^T \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}^{1T} \\ \mathbf{u}^{2T} \\ \vdots \\ \mathbf{u}^{nT} \\ \vdots \\ \mathbf{u}^{NT} \end{bmatrix}_{N \times 3I} \begin{bmatrix} \mathbf{u}^1 & \dots & \mathbf{u}^n & \dots & \mathbf{u}^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}^{1T} \mathbf{u}^1 & \mathbf{u}^{1T} \mathbf{u}^2 & \dots & \mathbf{u}^{1T} \mathbf{u}^n & \dots & \mathbf{u}^{1T} \mathbf{u}^N \\ \mathbf{u}^{2T} \mathbf{u}^1 & \mathbf{u}^{2T} \mathbf{u}^2 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{u}^{nT} \mathbf{u}^1 & \dots & \mathbf{u}^{nT} \mathbf{u}^n & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{u}^{NT} \mathbf{u}^1 & \dots & \mathbf{u}^{NT} \mathbf{u}^2 & \dots & \dots & \mathbf{u}^{NT} \mathbf{u}^N \end{bmatrix}_{N \times N}$$

สามารถหา eigenvalue ( $\lambda^m$ ) และ eigenvector ( $\mathbf{A}^m$ ) จาก

$$\tilde{\mathbf{C}} \mathbf{A}^m = \lambda^m \mathbf{A}^m \quad m = 1, \dots, M = N$$

เนื่องจากเมทริกซ์  $\tilde{\mathbf{C}}$  เป็นเมทริกซ์จัตุรัสขนาด  $[\tilde{\mathbf{C}}]_{N \times N}$  เพราะฉะนั้นจะมี eigenvector และ eigenvalue จำนวน  $M = N$  หรือหมายความว่ามีความถี่ Mode เท่ากับจำนวนภาพสนามความเร็วทั้งหมด โดยที่  $\mathbf{A}^m$  คือ eigenvector ของ  $\tilde{\mathbf{C}}$  ซึ่งเป็น column vector ขนาด  $[\mathbf{A}^m]_{N \times 1}$  และ  $\lambda^m$  คือ eigenvalue ของ  $\tilde{\mathbf{C}}$  ซึ่งเป็นเมทริกซ์เส้นทแยงมุม (Diagonal matrix) ขนาด  $[\lambda^m]_{N \times N}$

$$\lambda^m = \begin{bmatrix} \lambda^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda^{M=N} \end{bmatrix}_{N \times N}$$

โดยสำหรับ eigenvalue ( $\lambda^m$ ) ซึ่งคู่กับ eigenvector ( $\mathbf{A}^m$ ) นั้นจะนำมาเรียงลำดับใหม่โดยยึดจากค่าของ eigenvalue จากมากไปน้อย ดังนี้

$$\lambda^1 > \lambda^2 > \dots > \lambda^m > \dots > \lambda^{M=N} = 0$$

$$\mathbf{A}^1 > \mathbf{A}^2 > \dots > \mathbf{A}^m > \dots > \mathbf{A}^{M=N}$$

สังเกตว่าค่า eigenvalue ของ  $\lambda^{M=N}$  หรือ eigenvalue ตัวสุดท้ายจะมีค่าเท่ากับ 0 จากนั้นนำ eigenvector ( $\mathbf{A}^m$ ) ไปคำนวณหา POD Mode  $m$  ( $\phi^m$ ) ซึ่งคือ ผลรวมเชิงเส้นไว้มิติ (normalized linear combination) ของความเร็วปั่นป่วน ณ เวลาที่  $n$  ( $\mathbf{u}^n$ ) ซึ่งมี eigenvector อันดับที่  $m^{\text{th}}$  ( $\mathbf{A}^m$ ) เป็นสัมประสิทธิ์ของผลรวมเชิงเส้นนี้ ดังนี้

$$\phi^m = \frac{\mathbf{U}\mathbf{A}^m}{\|\mathbf{U}\mathbf{A}^m\|} = \frac{\sum_{n=1}^N A_n^m \mathbf{u}^n}{\left\| \sum_{n=1}^N A_n^m \mathbf{u}^n \right\|} \quad [\mathbf{U}]_{3IJ \times N}, [\mathbf{A}^m]_{N \times 1}, [\phi^m]_{3IJ \times 1} \quad m=1, \dots, M=N$$

โดยที่  $\|\cdot\|$  มีนิยามคือ  $\|y\| = \sqrt{y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_M^2}$  และกำหนดให้เมทริกซ์ POD Mode ( $\Phi$ ) ซึ่งมีขนาด  $[\Phi]_{3IJ \times N}$  คือ  $\Phi = [\phi^1 \ \phi^2 \ \dots \ \phi^N]_{3IJ \times N}$

### 3.2 กระบวนการย้อนกลับ (Reconstruction) ของสนามความเร็วปั่นป่วนขณะใด ๆ

กระบวนการย้อนกลับ (Reconstruction) คือ การนำ POD Mode มาคำนวณย้อนกลับหาสนามความเร็วปั่นป่วนขณะใด ๆ ณ เวลาที่  $n$  โดยในตอนแรกต้องหาสัมประสิทธิ์การย้อนกลับ (coefficient of reconstruction) ของสนามความเร็วปั่นป่วน ณ เวลาที่  $n$  ( $\beta^n$ ) ซึ่งเป็น column vector ขนาด  $[\beta^n]_{N \times 1}$  สัมประสิทธิ์การย้อนกลับนี้เป็นผลรวมเชิงเส้น (linear combination) ของทรานสโพสเมทริกซ์ของ POD Mode ( $\Phi^T$ ) ซึ่งมีสนามความเร็วปั่นป่วน ณ เวลาที่  $n$  หรือภาพที่  $n$  ที่เป็น column vector ( $\mathbf{u}^n$ ) ดังสมการที่ 3.1 เป็นสัมประสิทธิ์ของผลรวมเชิงเส้นนี้ ดังนี้

$$\beta^n = \Phi^T \mathbf{u}^n = \begin{bmatrix} \phi^{1T} \\ \phi^{2T} \\ \vdots \\ \phi^{3T} \end{bmatrix}_{N \times 3IJ} \begin{bmatrix} u_1^n \\ \vdots \\ u_P^n \\ v_1^n \\ \vdots \\ v_P^n \\ w_1^n \\ \vdots \\ w_P^n \end{bmatrix}_{3IJ \times 1} \quad (3.3)$$

หรือเขียนในรูปเมทริกซ์ของที่ทุกเวลาหรือทุกภาพ  $N$  ได้  $\mathbf{B} = \Phi^T \mathbf{U}$

เมื่อ  $\mathbf{B} = [\beta^1 \ \beta^2 \ \dots \ \beta^{M=N}]_{N \times N}$ ,  $[\Phi^T]_{N \times 3IJ}$ ,  $\mathbf{U} = [\mathbf{u}^1 \ \mathbf{u}^2 \ \dots \ \mathbf{u}^N]_{3IJ \times N}$

จากนั้นจะนำสัมประสิทธิ์การย้อนกลับของสนามความเร็วปั่นป่วน ณ เวลาที่  $n$  ( $\beta^n$ ) และเมทริกซ์ของ POD Mode ( $\Phi$ ) ไปหาสนามความเร็วปั่นป่วน ณ เวลาที่  $n$  หรือภาพที่  $n$  ( $\mathbf{u}^n$ ) ได้โดยเขียนในรูปผลรวมเชิงเส้น (linear combination) ของเมทริกซ์ของ POD Mode ( $\Phi$ ) ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การย้อนกลับ ( $\beta^n$ ) เป็นสัมประสิทธิ์ของผลรวมเชิงเส้นนี้ ดังนี้

$$\mathbf{u}^n = \Phi \beta^n = [\phi^1 \quad \phi^2 \quad \dots \quad \phi^N]_{3IJ \times N} [\beta^n]_{N \times 1} \quad (3.4)$$

หรือเขียนในรูปเมทริกซ์ของที่ทุกเวลาหรือทุกภาพ  $N$  ได้  $\mathbf{U} = \Phi \mathbf{B}$

เมื่อ  $[\mathbf{U}]_{3IJ \times N}$  ,  $[\Phi]_{3IJ \times N}$  ,  $[\mathbf{B}]_{N \times N}$

จะเห็นได้ว่าค่าระดับพลังงาน หรือ eigenvalues ที่ได้จากความปั่นป่วนของความเร็วนั้นเป็นตัวแทนของแต่ละ POD Modes ( $\phi$ ) หรือ eigenvectors ซึ่งจากการจัดเรียงตัวของค่า eigenvalue และ POD Modes นั้นแสดงให้เห็นว่า Mode ที่มีบทบาทสำคัญที่สุดหรือมีระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุด จะเรียงลำดับจากค่าระดับพลังงานมากไปน้อยโดย Mode 1 จะมีระดับพลังงานสูงที่สุด ในขณะที่ Mode 2, Mode 3, ... , Mode  $N$  จะมีระดับพลังงานที่ลดหลั่นลงมา ซึ่งระดับพลังงานในแต่ละ Mode ในกรณีที่คำนวณ POD จากสนามความเร็วปั่นป่วน จะหมายถึง เปอร์เซ็นต์ของ Turbulent kinetic energy ใน Mode นั้นเทียบกับ Turbulent kinetic energy ของจำนวน Mode ทั้งหมด ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมวลที่เป็นโครงสร้างบทบาทสำคัญหรือโครงสร้างที่มีพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุดนั้น จะถูกแสดงใน Mode 1

## บทที่ 4

### รายละเอียดและอุปกรณ์การทดลอง

บทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของชุดทดลอง, Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) รวมไปถึงการวัดสภาวะการทดลองต่าง ๆ และในส่วนสุดท้ายจะสรุปพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทดลองของงานวิจัยนี้

#### 4.1 ชุดทดลองและ SPIV

ชุดทดลองของงานวิจัยนี้ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประกอบด้วย อุโมงค์ลม ชุดเจ็ตหลัก ชุดเจ็ตควบคุม และ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ซึ่งเป็นชุดอุปกรณ์สำหรับวัดสนามความเร็วทั้ง 3 แกนในระนาบ โดยรายละเอียดของส่วนประกอบมีดังนี้

อุโมงค์ลม (wind tunnel) มีหน้าสร้างกระแสลมขวาง ดังรูปที่ 4.1 เริ่มจากอากาศถูกดูดโดยพัดลมเหวี่ยง (centrifugal blower) ขนาด 15 กิโลวัตต์ ซึ่งมีเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้าหรืออินเวอร์เตอร์ (ABB™ model ACS401002032 ขนาด 50 เฮิร์ตซ์, ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 เฮิร์ตซ์) ดังรูปที่ 4.2 เพื่อปรับความเร็วลมในหน้าตัดทดสอบ จากนั้นอากาศจะไหลผ่านท่อลดแรงสั่นสะเทือน (flexible duct) และส่งผ่านเข้าไปในส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (diffuser) เพื่อลดความเร็วของอากาศ และไปที่ห้องจัดปรับการไหล (settling chamber) ขนาด 100 เซนติเมตร x 100 เซนติเมตร เพื่อให้อากาศมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด จากนั้นจะไหลเข้าสู่ส่วนลดพื้นที่หน้าตัด (contraction) ที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดทางเข้าต่อด้านทางออกเท่ากับ 4 เพื่อเร่งอากาศให้มีความเร็วสูงขึ้นจนได้ความเร็วที่หน้าตัดทดสอบตามที่ต้องการ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอและลดปริมาณความปั่นป่วนของอากาศก่อนเข้าสู่หน้าตัดทดสอบ (test section) สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 50 เซนติเมตร x 50 เซนติเมตร ยาว 240 เซนติเมตร และมีพิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 4.3 คือ จุดกำเนิดอยู่ที่จุดศูนย์กลางปากทางออกของเจ็ตหลัก และให้แกน  $x$  มีทิศทางเดียวกับการไหลของกระแสลมขวาง (streamwise) แกน  $y$  มีทิศทางเดียวกับการไหลของเจ็ตหลัก (transverse) และแกน  $z$  มีทิศทางตามกฏมือขวา (spanwise)

ชุดเจ็ตหลัก (main jet) ทำหน้าที่ฉีดอากาศออกมาในทิศทางตั้งฉากกับกระแสลมขวาง ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งปากทางออกของเจ็ตหลักมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ( $d$ ) เท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร เริ่มจากอากาศถูกดูดโดยพัดลมเหวี่ยง (Elprom™) ขนาด 10 แรงม้า ซึ่งความเร็วของอากาศจะถูกควบคุมด้วยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (ABB™, model ACS401002032 ขนาด 50 เฮิร์ตซ์, ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 เฮิร์ตซ์) จากนั้นอากาศจะถูกส่งผ่านระบบท่อ โดยที่ส่วนสุดท้ายจะเป็นท่อตรงก่อนถึงปากทางออกของเจ็ตหลักมีความยาว 45 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ตเพื่อให้ได้รูปร่างความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตเป็นการไหลแบบพัฒนาเต็มที่ (fully-developed turbulent pipe flow) และท่อตรงนี้จะต่อกับส่วนหัวเจ็ตหลัก

และเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง ซึ่งจะต่อกับพื้นด้านล่างของหน้าตัดทดสอบ โดยจุดศูนย์กลางปากทางออกเจ็ตหลักจะอยู่บริเวณกึ่งกลางของหน้าตัดทดสอบและห่างจากทางออกของส่วนลดพื้นที่หน้าตัด 85 เซนติเมตร

สำหรับชุดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (azimuthal control jet) มีหน้าที่ฉีดอากาศผ่านรูเล็ก ๆ ในทิศทางตั้งฉากกับเจ็ตหลัก ดังรูปที่ 4.5 โดยอากาศจะถูกส่งจากเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ (reciprocating air compressor, ยี่ห้อ PUMA ขนาด 0.75 กิโลวัตต์) ผ่านชุดควบคุมแรงดัน (pressure regulator) จากนั้นจะแยกออกเป็นสองชุด โดยแต่ละชุดจะผ่านวาล์วเข็มแบบโซลินอยด์ (solenoid needle valve) ขนาด 1/2 นิ้ว จากนั้นจะผ่านไปสู่อุปกรณ์การวัดและควบคุมอัตราการไหลชนิดโรตาริเมตร (Dwyer™, model VA20434, มีช่วงการวัด 0 - 4,562 มิลลิลิตร/นาที, ความแม่นยำ (accuracy)  $\pm 2\%$  Full scale output) จากนั้นอากาศจะไหลผ่านเกจวัดความดัน (ASAHIT™, มีช่วงวัด 0-100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, มีความละเอียด 2 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และต่อผ่านสายยางไปที่รูฉีดเจ็ตควบคุมซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร สำหรับการอ้างอิงตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมนั้นได้กำหนดให้ตำแหน่ง 0 องศา อยู่ที่ด้าน upstream ของปากทางออกของเจ็ตและตำแหน่งมุมตามเข็มและทวนเข็มให้เป็นบวกและลบตามลำดับ สำหรับรายละเอียดหัวเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุมแสดงดังรูปที่ 4.6

สำหรับการวัดสนามความเร็วในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ซึ่งสามารถวัดความเร็วทั้งสามแกนบนระนาบได้ ณ เวลาเดียวกัน อย่างไรก็ตาม SPIV นั้นไม่ได้เป็นการวัดความเร็วของไหลโดยตรง แต่เป็นการวัดความเร็วของอนุภาคติดตามการไหล (tracer particles) โดยอาศัยการถ่ายภาพของอนุภาคติดตามการไหลเพื่อหาระยะทางการเคลื่อนที่ที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลาหนึ่งของอนุภาคติดตามการไหล จากนั้นความเร็วที่ได้วัดจากอนุภาคจะถูกใช้ประมาณเป็นความเร็วของไหล โดยชุดวัดสนามความเร็ว SPIV ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของบริษัท TSI™ ดังแสดงเป็นแผนภาพและภาพถ่ายดังรูปที่ 4.7 โดยส่วนประกอบต่าง ๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ เริ่มจากชุดให้กำเนิดแสงเลเซอร์ ND:YAG (New Wave Research™, model Solo 200XT) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ให้กำลังสูงสุด 200 มิลลิจูล/พัลส์ ที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร โดยลำแสงเลเซอร์นี้จะถูกส่งผ่านโดยอุปกรณ์ส่งลำแสงเลเซอร์ (laser light arm, model 610015) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เพื่อให้ลำแสงเลเซอร์ถูกส่งไปที่บริเวณหน้าตัดทดสอบ และอุปกรณ์ส่งลำแสงเลเซอร์นี้จะต่อกับชุดเลนส์สร้างแผ่นระนาบเลเซอร์ (laser sheet optics, model 610021-SIL, -25 mm cylindrical and +500 mm spherical lenses) เพื่อให้ลำแสงเลเซอร์กลายเป็นระนาบเลเซอร์ (laser sheet) หนาประมาณ 2-3 มิลลิเมตร และไปตกกระทบกับอนุภาคติดตามการไหลทำให้กระเจิงแสงออกมา จากนั้นภาพอนุภาคจะถูกบันทึกด้วยกล้อง CCD จำนวนสองตัว (PowerView Plus 11 MP, model 630062) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งมีความละเอียด 4,008 พิกเซล x 2,672 พิกเซล ขนาดแต่ละพิกเซลเท่ากับ 9 ไมโครเมตร x 9 ไมโครเมตร ขนาด CCD เท่ากับ 36.07 มิลลิเมตร x 24.05 มิลลิเมตร และไดนามิกเรนจ์ 12 บิต ซึ่งกล้องแต่ละตัวจะติดตั้งเลนส์มาโครที่มีความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร (Tokina™, model 100 mm f2.8D Macro) สุดท้ายจะมีอุปกรณ์เชื่อมระบบการ



ทำงาน (synchronizer, model 610035) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ทำหน้าที่ประสานการทำงานระหว่างระบบ กล้อง, ชุดให้กำเนิดแสงเลเซอร์ และคอมพิวเตอร์ให้ทำงานสัมพันธ์กันในการบันทึกภาพอนุภาค ณ เวลาใด ๆ

สำหรับอนุภาคติดตามการไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ สารละลายกลีเซอริน โดยกรณีใส่งูภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตใช้ความเข้มข้นเท่ากับ 5% โดยปริมาตร แต่กรณีใส่งูภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ต และกระแสลมขวาง ในส่วนของกระแสลมขวางใช้ความเข้มข้นเท่ากับ 50% โดยปริมาตร และในส่วนของ เจ็ตใช้ 5% โดยปริมาตร

สำหรับการเก็บข้อมูลใช้ความถี่เท่ากับ 1.04 เฮิร์ตซ์ ในการเก็บข้อมูลสนามความเร็วทั้งหมดจำนวน 4,000 สนาม หรือ 4,000 ภาพ (snapshot) ซึ่งกล้องแต่ละตัวต้องเก็บภาพทั้งหมด 4,000 คู่ภาพ โดย จำนวนภาพ 4,000 ภาพ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากการพิจารณาการลู่เข้าของปริมาณต่าง ๆ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในภาคผนวก ก และใช้ซอฟต์แวร์ TSI<sup>TM</sup> Insight 4G สำหรับการเก็บภาพและการประมวลผลจาก คู่ภาพเพื่อให้ได้เป็นสนามเวกเตอร์ความเร็วขณะใด ๆ ทั้งสามแกนบนระนาบ โดยการประมวลผลจะใช้ Interrogation area เริ่มต้นเท่ากับ 64 พิกเซล x 64 พิกเซล และลดเหลือ 32 พิกเซล x 32 พิกเซล โดยมีการ Overlap กัน 50% สุดท้ายจะได้ Interrogation area เท่ากับ 16 พิกเซล x 16 พิกเซล สำหรับการ Spatial resolution ของการทดลองนี้สรุปไว้ในตารางที่ 4.1 และทุกกรณีจะมีจำนวนเวกเตอร์ความเร็วต่อ สนามสูงกว่า 5,000 เวกเตอร์

## 4.2 การวัดสภาวะการทดลอง

### 4.2.1 การวัดความสม่ำเสมอของกระแสลมขวาง

การวัดความสม่ำเสมอของกระแสลมขวางจะทำโดย SPIV ที่ใส่งูภาคติดตามการไหลและเปิดพัด ลมเฉพาะส่วนของกระแสลมขวางเท่านั้น โดยตั้งค่าความถี่ของเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้าไว้ที่ 15.3 เฮิร์ตซ์ เพื่อให้ได้ความเร็วของกระแสลมขวางที่หน้าตัดทดสอบประมาณ 7.2 เมตรต่อวินาที ( $Re_{cf} = 5,700$ ) ที่ ตำแหน่ง  $x/d = -5$  หรือประมาณ 6 เซนติเมตร ก่อนถึงจุดศูนย์กลางปากทางออกของเจ็ต โดยกำหนด ขอบเขตพื้นที่ในการวัดประมาณ  $30d \times 30d$  หรือเท่ากับ 12 เซนติเมตร x 12 เซนติเมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่ ครอบคลุมเจ็ตทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองนี้ โดยในการประมวลผลจะใช้ Interrogation area เริ่มต้นเท่ากับ 64 พิกเซล x 64 พิกเซล และลดเหลือ 32 พิกเซล x 32 พิกเซล โดยมีการ Overlap กัน 50% สุดท้ายจะได้ Interrogation area เท่ากับ 16 พิกเซล x 16 พิกเซล สำหรับการเก็บข้อมูลสนามความเร็วจะเก็บทั้งหมด 1,000 สนาม

รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน  $x$  ของกระแสลมขวาง ซึ่งมีความเร็ว เฉลี่ยต่อจุดบนระนาบเป็น 7.26 เมตรต่อวินาที และค่าสองเท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไร้มิติ ( $2S_{u_{cf}} / u_{cf}$ ) เท่ากับ 0.05 กล่าวคือ 95% ของจุดทั้งหมดบนระนาบจะมีความเร็วต่างจากความเร็วเฉลี่ยไม่ เกิน  $\pm 0.05$  เมตรต่อวินาที

#### 4.2.2 การวัดความหนาชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง

การวัดความหนาชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางจะทำโดยการวัดความเร็วในบริเวณของความหนาชั้นขอบเขตด้วย Pitot tube ซึ่งทำขึ้นเองจากเข็มฉีดยาและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 0.8 มิลลิเมตร โดยทำการตัดให้ได้มุมฉากซึ่งมีระยะจากปลาย Probe จนถึงมุมฉากประมาณ 50 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความดันที่วัดได้จาก Pitot tube นี้จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าจาก Pressure transducer ชนิด Differential (Setra™, model 264, มีช่วงการวัดขาเข้า  $\pm 0.5$  นิ้วน้ำ, ช่วงแรงดันขาออก 0.05 - 5.05 โวลต์, ความแม่นยำ  $\pm 1\%$  Full scale output) และแรงดันไฟฟ้านี้จะถูกอ่านด้วย Digital multimeter (Fluke™, model 19) โดยจะทำการวัดที่ตำแหน่ง  $x/d = -2$  และแบ่งตามแนว spanwise 3 ตำแหน่ง คือ  $z/rd = -5, 0$  และ 5 ความละเอียดในการวัดอยู่ในช่วง 0.5 มิลลิเมตรในบริเวณของความหนาชั้นขอบเขตและ 1, 2.5 มิลลิเมตรในบริเวณที่อยู่ด้านนอกของความหนาชั้นขอบเขต สำหรับการวัดในแต่ละจุดจะวัดซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง

รูปที่ 4.13 แสดงรูปร่างของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางที่ตำแหน่ง Transverse ต่าง ๆ รวมไปถึงถึงรูปร่าง laminar Blasius solution และรูปร่าง turbulent ที่มี  $n = 5.2, 7$  ตามลำดับ พบว่า รูปร่างของชั้นขอบเขตในการทดลองนี้ที่ตำแหน่ง  $x/d = -2$  เป็นแบบ turbulent ที่มี  $n = 5.2$  และมีความหนาชั้นขอบเขตไร้มิติเท่ากับ  $\delta_{99\%} / d = 1.6$  สำหรับรายละเอียดความหนาชั้นขอบเขตต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.2

#### 4.2.3 การวัดรูปแบบความเร็วเริ่มต้นของเจ็ต

การวัดรูปแบบความเร็วเริ่มต้นของเจ็ตมีจุดประสงค์เพื่อหารูปร่างความเร็วเริ่มต้นของเจ็ต, ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ต และความสมมาตรของเจ็ต โดยใช้ Pitot tube ที่ทำขึ้นเองเช่นเดียวกับการทดลองในการวัดความหนาชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง ซึ่งจะต่อสายยางเข้ากับมานอมิเตอร์ (Dwyer™, model 424, มีช่วงการวัด 0 - 50 มิลลิเมตรน้ำ มีความละเอียดเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตรน้ำ และช่วงการวัด 50 - 250 มิลลิเมตรน้ำ มีความละเอียดเท่ากับ 2 มิลลิเมตรน้ำ) ในขณะที่ทำการวัดจะไม่มีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสลมขวาง และจะเปิดพัดลมเฉพาะส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง โดยตั้งค่าความถี่ของเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้าไว้ที่ 23.4 เฮิร์ตซ์ มีตำแหน่งในการวัดที่ปากทางออกเจ็ตและวัดตามแนวรัศมีตั้งแต่ 0 มิลลิเมตร (จุดศูนย์กลางเจ็ต) ถึง 6 มิลลิเมตร ตามแนวแกน  $x$  (streamwise) และแกน  $z$  (spanwise) ดังรูปที่ 4.14 โดยกำหนดความละเอียดในการวัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ที่ระยะจากจุดศูนย์กลางเจ็ตเท่ากับ 0 - 4 มิลลิเมตร และความละเอียดเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ที่ระยะจากจุดศูนย์กลางเจ็ตเท่ากับ 4 - 6 มิลลิเมตร เนื่องจากตำแหน่งใกล้ขอบเจ็ตจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วมากเนื่องจากผลของชั้นขอบเขตที่ผนังท่อเจ็ต สำหรับการวัดในแต่ละจุดจะวัดซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง

รูปที่ 4.15 แสดงรูปแบบความเร็วเริ่มต้นของเจ็ตใรริมิตตามแกน  $x$  (streamwise) และแกน  $z$  (spanwise) พบว่า รูปแบบความเร็วเริ่มต้นของเจ็ตเป็นแบบ Fully-developed turbulent pipe flow โดยประมาณใกล้เคียงกับสมการ power law

$$\frac{u(r)}{u_c} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} \quad (4.1)$$

ที่มีเลขยกกำลัง  $n$  เท่ากับ 7.3 และ  $R^2 = 0.97$  ซึ่งได้จากวิธี curve fitting โดยที่  $u_c$  คือ ความเร็วที่จุดศูนย์กลางปากทางออกของเจ็ต อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการทดลองนี้จะแตกต่างจากค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการ

$$n = -1.7 + 1.8 \log_{10}(\text{Re}_{u_c}), \quad (\text{Re}_{u_c} > 2 \times 10^4) \quad (4.2)$$

โดยที่  $\text{Re}_{u_c} = u_c d / \nu$  คือตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ตที่นิยามจากความเร็วที่จุดศูนย์กลางปากทางออกเจ็ต ( $u_c$ ) และค่า  $n$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 (Fox *et al.*, 2012, following Hinze, 1975) นี้มีค่าเท่ากับ 6.36 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 13% เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยสมการ power law ดังสมการที่ 4.1

สำหรับการคำนวณความเร็วเฉลี่ยที่ปากทางออกของเจ็ตจะทำโดยเฉลี่ยตามพื้นที่ (Area-averaged) ดังนี้

$$u_j = \frac{1}{A} \int_A u(r) dA \quad (4.3)$$

โดยที่  $u_j$  คือ ความเร็วเฉลี่ยตามพื้นที่ที่ปากทางออกของเจ็ต

$u(r)$  คือ ความเร็วเฉลี่ยตามแนวรัศมีที่จุดใด ๆ

$A$  คือ พื้นที่ปากทางออกของเจ็ต

ดังนั้นจะได้ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตตามพื้นที่ที่ปากทางออกของเจ็ตมีค่าเท่ากับ 30.5 เมตรต่อวินาที หรือ ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ต ( $\text{Re}_j = u_j d / \nu_j$ ) เท่ากับ 24,000 อีกทั้งยังคำนวณหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ต ( $Q_j = \int_A u(r) dA$ ) ได้เท่ากับ 0.00374 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งจะนำไปใช้คำนวณหาอัตราการไหลของเจ็ตควบคุมที่ต้องการต่อไป

รูปที่ 4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์ความไม่สมมาตรของเจ็ตเทียบกับความเร็วเฉลี่ยของแต่ละรัศมี มีนิยามคือ  $\text{Unsymmetry} = \frac{u_{\max}(r) - u_{\min}(r)}{\bar{u}(r)} \times 100\%$  และเปอร์เซ็นต์ความไม่สมมาตรของเจ็ตเทียบกับ

ความเร็วที่จุดศูนย์กลางของเจ็ต มีนิยาม คือ  $Unsymmetry = \frac{u_{max}(r) - u_{min}(r)}{u_c} \times 100\%$  พบว่าในกรณีนี้ที่เทียบกับความเร็วเฉลี่ยมีเปอร์เซ็นต์ความไม่สมมาตรไม่เกิน 3.5% ในขณะที่เมื่อเทียบกับความเร็วที่จุดศูนย์กลางของเจ็ตมีเปอร์เซ็นต์ความไม่สมมาตรไม่เกิน 2.5%

นอกจากนี้ยังได้คำนวณค่าแกมมา ( $\gamma$ ) มีนิยาม คือ  $\gamma = u_j / u_c$  ซึ่งในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 0.802 โดยค่านี้ใช้เป็นค่าในการคำนวณความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ตในการวัดความเร็วเจ็ตที่จุดศูนย์กลางปากทางออกของเจ็ตในการทดลองครั้งต่อไป

#### 4.2.4 การวัดอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก

อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ ) ในการทดลองนี้ โดยสมมติให้ความหนาแน่นของอากาศของเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุมเท่ากัน ( $\rho_j = \rho_{cj}$ ) มีนิยามดังนี้

$$r_m = \frac{\dot{m}_{cj}}{\dot{m}_j} = \frac{\rho_{cj} Q_{cj}}{\rho_j Q_o} = \frac{Q_{cj}}{Q_o} \quad (4.7)$$

โดย  $\dot{m}_{cj}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (รวมทุกรู)  
 $\dot{m}_j$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลที่ปากทางออกของเจ็ต  
 $Q_{cj}$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (รวมทุกรู)  
 $Q_o$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ต

สำหรับการปรับอัตราการไหลของเจ็ตควบคุมจะทำได้โดยการปรับวาล์วของโรตารีเมเตอร์ จากค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตหลักเท่ากับ 0.00374 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที คิดเป็น 224.4 ลิตร/นาที่ สำหรับกรณี  $r_m$  เท่ากับ 2% และ 4% อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตควบคุมรวมทั้ง 2 หัวสำหรับแต่ละกรณีจะเป็น 4.488 ลิตร/นาที่ (2.244 ลิตร/นาที่ ต่อ 1 หัว) และ 8.976 ลิตร/นาที่ (4.488 ลิตร/นาที่ ต่อ 1 หัว) ตามลำดับ ทั้งนี้การคำนวณหาอัตราการไหลของเจ็ตควบคุมนั้นจะต้องดูระดับความสูงของลูกลอยที่อ่านได้จากโรตารีเมเตอร์เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าอัตราการไหลจากตารางของผู้ผลิต (ซึ่งตารางของผู้ผลิตที่ให้จะเป็นค่าที่ working pressure = 0 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จึงจำเป็นต้องอ่านค่าความดันจากเกจวัดความดันเพื่อหา working pressure สำหรับคำนวณตัวปรับแก้ (correction factor) เพื่อนำไปปรับแก้หาอัตราการไหลที่แท้จริง โดยในกรณี  $r_m = 2\%$  ซึ่งมีอัตราการไหลที่ต่ำ working pressure ที่อ่านได้จะเป็น 0 จึงสามารถปรับวาล์วได้โดยไม่ต้องแก้ค่าอัตราการไหลโดยระดับความสูงของลูกลอยอยู่ที่ 64.5 มิลลิเมตร สำหรับกรณี  $r_m = 4\%$  จะมี Working pressure ประมาณ 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ทั้ง 2 หัว ดังนั้นจึงต้องปรับแก้ค่าอัตราการไหลซึ่งจะได้ระดับความสูงของลูกลอยประมาณ 70 มิลลิเมตร

### 4.3 การสอบเทียบ SPIV กับ pitot static tube

เนื่องจาก SPIV วัดสนามความเร็วได้จากอนุภาคติดตามการไหลซึ่งไม่ได้เป็นการวัดความเร็วของการไหลโดยตรง ดังนั้นจึงทำการสอบเทียบระหว่างความเร็วที่วัดได้จาก SPIV เทียบกับความเร็วที่วัดได้จาก pitot static tube เพื่อให้ได้ค่าความเร็วที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยในการสอบเทียบนี้จะใช้ SPIV วัดความเร็วของกระแสลมขวางเท่านั้น (เปิดพัคลมเฉพาะส่วนของกระแสลมขวางเท่านั้น) จึงใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของกระแสลมขวาง โดยวัดที่ตำแหน่ง  $x/d = -5$  และใช้เลนส์มาโครที่มีความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร (Tokina™, model 50 mm f1.8D Macro) สำหรับการประมวลผลจะใช้ Interrogation area เริ่มต้นเท่ากับ 128 พิกเซล x 128 พิกเซล และลดเหลือ 64 พิกเซล x 64 พิกเซล โดยมีการ Overlap กัน 50% สุดท้ายจะได้ Interrogation area เท่ากับ 32 พิกเซล x 32 พิกเซล โดยในขั้นตอนแรกจำเป็นต้องหาจำนวนภาพที่เหมาะสมในการสอบเทียบนี้ก่อน คือ ถ้าจำนวนภาพน้อยไปจะทำให้ความเร็วที่วัดได้จาก SPIV นั้นมีความคลาดเคลื่อนสูง แต่ถ้าจำนวนภาพมากเกินไปก็จะทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลนาน ซึ่งจะพิจารณาจากการลู่เข้าของความเร็วเมื่อใช้จำนวนภาพที่มากขึ้น

การประเมินการลู่เข้านี้จะพิจารณาจาก 2 ปริมาณ คือ 1) ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน  $x$  ต่อจุดเมื่อใช้จำนวนภาพ  $N$  ต่าง ๆ มีนิยามดังนี้

$$\bar{V}_x = \frac{1}{M(N)} \sum_{ij \in M(N)} \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_{x,ij,n} \right) \quad (4.8)$$

โดยที่  $V_{x,ij,n}$  คือ ความเร็วตามแนวแกน  $x$  ที่ลำดับภาพที่  $n$  และ  $M(N)$  คือ จำนวนจุดทั้งหมดที่พบความเร็วเมื่อใช้จำนวนภาพ  $N$  ดังนั้น  $\bar{V}_x$  คือ ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน  $x$  ต่อจุด และ 2) ความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน  $x$  ต่อจุด ( $e_{\bar{V}_x}$ ) เมื่อใช้จำนวนภาพมากขึ้น มีนิยามดังนี้

$$e_{\bar{V}_x} = \frac{|\bar{V}_x(N_2) - \bar{V}_x(N_1)|}{\bar{V}_x(N_1)} \times 100\% \quad (4.9)$$

โดยที่  $\bar{V}_x(N)$  คือ ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน  $x$  ต่อจุดเมื่อใช้จำนวนภาพเท่ากับ  $N$

ในการประเมินการลู่เข้านี้จะทดลองที่ความเร็ว 5 m/s จำนวน 1,000 ภาพ โดยแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ 1) 2 - 20 ภาพ โดยเพิ่มทีละ 2 ภาพ 2) 20 - 100 ภาพ โดยเพิ่มทีละ 10 ภาพ 3) 100 - 1,000 ภาพ โดยเพิ่มทีละ 100 ภาพ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่า เมื่อใช้จำนวนภาพน้อยกว่า 100 ภาพ ความเร็วเฉลี่ยจะมีความปั่นป่วนในระดับหนึ่ง ในขณะที่ใช้จำนวนภาพตั้งแต่ 100 ภาพ ขึ้นไป ความเร็วเฉลี่ย

จะเริ่มคงที่โดยมีค่าเท่ากับ  $4.235 \pm 0.05$  m/s ดังนั้นการสอบเทียบ SPIV กับ pitot static tube นี้จะใช้จำนวนภาพ 100 ภาพสำหรับการเก็บข้อมูลสนามความเร็วจาก SPIV และทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

การสอบเทียบ SPIV กับ pitot static tube จะอ้างอิงจากความถี่ที่ปรับได้ของพัดลมของกระแสลมขวางโดยทำการทดลองทั้งหมด 16 ความถี่ คือ 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 6, 7, 8, 8.6, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 เฮิร์ตซ์ โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงตามความถี่ที่วัดได้จาก pitot static tube เพื่อให้มีความแม่นยำในการวัดความเร็วมากยิ่งขึ้น ดังนี้

ช่วงที่ 1 คือ 2 - 8.6 เฮิร์ตซ์ ความถี่ที่วัดในช่วงนี้ได้ถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าด้วย Pressure transducer ชนิด Differential (Setra™, model 264, มีช่วงการวัดขาเข้า  $\pm 0.05$  นิ้วน้ำ, ช่วงแรงดันขาออก 0.05 - 5.05 โวลต์, ความแม่นยำ (accuracy)  $\pm 1\%$  Full scale output) และแรงดันไฟฟ้านี้จะถูกอ่านด้วย Digital multimeter (Fluke™, model 19)

ช่วงที่ 2 คือ 10 - 25 เฮิร์ตซ์ ความถี่ที่วัดได้ในช่วงนี้ถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าด้วย Pressure transducer ชนิด Differential (Setra™, model 264, มีช่วงการวัดขาเข้า  $\pm 0.05$  นิ้วน้ำ, ช่วงแรงดันขาออก 0.05 - 5.05 โวลต์, ความแม่นยำ  $\pm 1\%$  Full scale output) และแรงดันไฟฟ้านี้จะถูกอ่านด้วย Digital multimeter (Fluke™, model 19)

ช่วงที่ 3 คือ 30 - 40 เฮิร์ตซ์ ความถี่ที่วัดได้ในช่วงนี้ถูกแปลงเป็นความสูงของน้ำจากมาโนมิเตอร์ (Dwyer™, model 424, มีช่วงการวัด 0 - 50 มิลลิเมตรน้ำ มีความละเอียดเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตรน้ำ และช่วงการวัด 50 - 250 มิลลิเมตรน้ำ มีความละเอียดเท่ากับ 2 มิลลิเมตรน้ำ)

รูปที่ 4.19 แสดงผลของการสอบเทียบ SPIV กับ pitot static tube พบว่า สามารถแบ่งช่วงความเร็วออกได้เป็น 3 ช่วง ดังสมการ

$$V_{pitot} = \begin{cases} -0.2092(V_{PIV})^2 + 2.2225(V_{PIV}) - 1.3383 & ; V_{PIV} \geq 3.833 \text{ m/s} \\ 1.0288(V_{PIV}) + 0.1636 & ; 0.6408 \leq V_{PIV} < 3.833 \text{ m/s} \\ V_{PIV} & ; V_{PIV} < 0.6408 \text{ m/s} \end{cases} \quad (4.10)$$

จะเห็นว่าช่วงความเร็วที่ต่ำกว่า 0.6408 เมตรต่อวินาทีนั้นจะให้  $V_{pitot} = V_{PIV}$  เนื่องจากความเร็วในช่วงนี้ ค่าแรงดันที่อ่านได้จาก Digital multimeter (Fluke™, model 19) ค่อนข้างกว้างหรือไม่สามารถวัดความเร็วได้อย่างถูกต้องแม่นยำ สันนิษฐานว่าน่าจะเป็นเพราะสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (noise) ที่เกิดขึ้นในระบบการวัดในช่วงความเร็วนี้ ดังนั้นความเร็วที่วัดได้ในช่วงความเร็วที่ต่ำกว่า 0.6408 เมตรต่อวินาที (รวมถึงช่วงความเร็วที่น้อยกว่าศูนย์หรือไหลย้อนกลับ) จะให้ความเร็วเท่ากับความเร็วที่วัดได้จาก SPIV เลย

โดยค่าความเร็วที่วัดได้จาก SPIV (raw data) นั้นก่อนผ่านกระบวนการคำนวณใด ๆ ก็ตามในงานวิจัยนี้ เช่น กระบวนการ POD และการประเมินอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม เป็นต้น จะต้องผ่านสมการที่ 4.10 ก่อนเสมอ

#### 4.4 สรุปพารามิเตอร์ในการทดลอง

การทดลองเจ็ตในกระแสมขวางในงานวิจัยนี้ทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) เท่ากับ 4.2 ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของกระแสมขวาง ( $Re_{cf}$ ) เท่ากับ 5,700 และตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ต ( $Re_j$ ) เท่ากับ 24,000 อัตราส่วนความหนาแน่นของเจ็ตต่อกระแสมขวาง ( $\rho_j/\rho_{cf}$ ) เท่ากับ 1 (ไม่คิดผลของอนุภาคติดตามการไหล) รูปแบบความเร็วเริ่มต้นที่ปากทางออกของเจ็ตเป็นแบบ Fully-developed turbulent pipe flow ใกล้เคียงกับรูปร่างความเร็วแบบ  $1/n$  power law ที่มี  $n$  ประมาณ 7 ความไม่สม่ำเสมอของกระแสมขวาง ( $2S_{u_{cf}}/u_{cf}$ ) วัดที่ตำแหน่ง  $x/d = -5$  เท่ากับ 0.05 สำหรับความหนาชั้นขอบเขตของกระแสมขวางซึ่งวัดที่ตำแหน่ง  $x/d = -2$  เป็นแบบ turbulent ที่มี  $n = 5.2$  และมีความหนาชั้นขอบเขตไร้มิติ ( $\delta_{99\%}/d$ ) เท่ากับ 1.6 สำหรับกรณีเจ็ตควมคุมจะฉีดที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 135^\circ$  ที่ปริมาณ  $r_m$  เท่ากับ 2% และ 4% โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ JICF ในการอ้างอิงถึงกรณีไม่ฉีดเจ็ตควมคุม,  $r_m = 2\%$  สำหรับกรณีฉีดเจ็ตควมคุมตำแหน่ง  $\theta = \pm 135^\circ$  ที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับกรณีฉีดเจ็ตควมคุมตำแหน่ง  $\theta = \pm 135^\circ$  ที่ปริมาณ  $r_m = 4\%$  ซึ่งสนามความเร็วในงานวิจัยนี้วัดโดยใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry ที่ใส่อนุภาคติดตามการไหล 2 วิธี คือ 1) ใส่เฉพาะเจ็ตเท่านั้น เพื่อสามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่มาจากเจ็ตเท่านั้นได้อย่างชัดเจน และ 2) ใส่ทั้งเจ็ตและกระแสมขวาง เพื่อทำการเปรียบเทียบและดูผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตกับกระแสมขวาง พารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับงานวิจัยนี้สรุปไว้ในตารางที่ 4.3

## บทที่ 5

### โครงสร้างของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาหาโครงสร้างการไหลที่มาจากเจ็ตเท่านั้น ไม่รวมส่วนที่มาจากกระแสลมขวาง งานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง เพื่อที่จะสามารถระบุขอบเขตหน้าตัดเจ็ตและแยกแยะบริเวณที่อย่างน้อยมีส่วนผสมของของไหลที่มาจากเจ็ต (jet-fluid mixture) ออกจากบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางบริสุทธิ์ (pure crossflow) ณ ขณะใด ๆ ได้อย่างชัดเจนและตลอดเวลา ซึ่ง “บริเวณเจ็ต” ในงานวิจัยนี้จะนิยามจากบริเวณที่อย่างน้อยมีส่วนผสมของของไหลที่มาจากเจ็ตหรือพบอนุภาคติดตามการไหล โดยบริเวณเจ็ตนี้จะมีส่วนผสมของกระแสลมขวางบางส่วนด้วยเนื่องจากเจ็ตเหนี่ยวนำกระแสลมขวางเข้ามาผสมกับตัวเจ็ต อย่างไรก็ตามบริเวณเจ็ตนี้จะไม่รวมบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางบริสุทธิ์ นอกจากนั้นแล้ววิธีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตทำให้สามารถหาความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ ( $\phi_{ij}$ ) ได้อีกด้วย

สำหรับการวัดสนามความเร็วในระนาบด้วย PIV ที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสลมขวางนั้นเป็นการวัดสนามความเร็วของเจ็ตในกระแสลมขวางในอดีตที่ผ่านมาอยู่แล้ว เช่น งานวิจัยของ Meyer *et al.* (2007) ซึ่งวิธีนี้มีข้อดี คือ เห็นผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามด้วยการใส่อนุภาคติดตามการไหลวิธีนี้จะไม่สามารถระบุขอบเขตเจ็ตและแยกแยะบริเวณที่อย่างน้อยมีส่วนผสมของของไหลที่มาจากเจ็ตออกจากบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ณ ขณะใด ๆ ได้อย่างชัดเจน

เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์โครงสร้างเจ็ตและโครงสร้างที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ของเจ็ตและกระแสลมขวาง ในงานวิจัยนี้จึงใช้เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้ง 2 วิธี คือ 1) ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น และ 2) ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง ดังนั้นในหัวข้อที่ 5.1 จะกล่าวถึงรายละเอียดของข้อแตกต่างของการใส่อนุภาคติดตามการไหลในแต่ละวิธี และสำหรับผลที่ได้จากการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น คือ ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ ( $\phi_{ij}$ ) จะกล่าวในหัวข้อที่ 5.2 และสุดท้ายจะนิยามบริเวณของความน่าจะเป็นสะสมที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต ( $R_\phi$ ) ในหัวข้อที่ 5.3



### 5.1 ข้อแตกต่างของการใส่อนุภาคติดตามการไหลในแต่ละวิธี

จากที่กล่าวข้างต้นว่าในส่วนหนึ่งของการทดลองในงานวิจัยนี้จะใช้ PIV ที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเจ็ตเท่านั้น ไม่ได้ใส่ในส่วนของกระแสลมขวาง เพื่อที่จะแยกแยะบริเวณที่อย่างน้อยมีส่วนผสมของของไหลที่มาจากเจ็ตออกจากบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ณ ขณะใด ๆ ได้อย่างชัดเจนและตลอดเวลา นอกจากนี้ยังใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวางอีกด้วย เพื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเจ็ตเท่านั้น อีกทั้งยังเห็นผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางได้อย่างชัดเจน ด้วยเหตุนี้จึงเกิดข้อแตกต่างและผลในหลาย ๆ ด้านระหว่างการใช้อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้นและการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง ดังนี้

- **ความเร็วสนาม (field velocity) และ ความเร็วเจ็ต (jet velocity)**

ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค PIV ในการวัดสนามความเร็ว ณ ขณะใด ๆ บนระนาบ ซึ่งเป็นการวัดความเร็วจากอนุภาคติดตามการไหล ดังนั้นสำหรับวิธีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง PIV จะวัดความเร็วได้ไม่เท่ากับศูนย์ทั้งในบริเวณเจ็ตและบริเวณกระแสลมขวาง สรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$\vec{V}_{PIV}(\vec{x}, t) = \vec{V}(\vec{x}, t) \quad \begin{array}{l} \text{เมื่อ } \vec{x} \text{ อยู่ในบริเวณเจ็ตหรือในบริเวณกระแส} \\ \text{ลมขวางบริสุทธิ์} \end{array} \quad (5.1)$$

โดยที่  $\vec{V}(\vec{x}, t)$  คือ ความเร็วสนาม (field velocity) ซึ่งเป็นสนามความเร็วที่มีความเร็วไม่เท่ากับศูนย์ทั้งในบริเวณเจ็ตและบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์

อย่างไรก็ตามสำหรับวิธีการใส่อนุภาคติดตามเฉพาะเจ็ตเท่านั้น PIV จะวัดความเร็วได้ไม่เท่ากับศูนย์ในบริเวณเจ็ตหรือบริเวณที่อย่างน้อยมีส่วนผสมของของไหลที่มาจากเจ็ต และวัดความเร็วได้เท่ากับศูนย์ในบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางบริสุทธิ์หรือบริเวณที่ไม่พบอนุภาคติดตามการไหล สรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$\vec{V}_{PIV}(\vec{x}, t) = \begin{cases} \vec{V}(\vec{x}, t) = \vec{V}_j(\vec{x}, t) & \text{เมื่อ } \vec{x} \text{ อยู่ในบริเวณเจ็ต (บริเวณที่มีส่วน} \\ & \text{ผสมของของไหลที่มาจากเจ็ต} \\ 0 & \text{เมื่อ } \vec{x} \text{ อยู่ในบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์} \end{cases} \quad (5.2)$$

โดยที่  $\vec{V}_j(\vec{x}, t)$  คือ ความเร็วเจ็ต (jet velocity) ซึ่งเป็นสนามความเร็วที่มีความเร็วไม่เท่ากับศูนย์ในบริเวณเจ็ต และมีความเร็วเท่ากับศูนย์ในบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์

จะเห็นว่าการใช้ PIV ที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสลมขวางทำให้ไม่สามารถแยกแยะบริเวณเจ็ตออกจากบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ได้อย่างชัดเจน และสนามความเร็วบนระนาบที่วัดได้จะเรียกว่า “ความเร็วสนาม (field velocity)” ซึ่งแตกต่างกับการใช้ PIV ที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น ซึ่งทำให้สามารถระบุขอบเขตเจ็ตและแยกแยะบริเวณเจ็ตออกจากบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ณ ขณะใด ๆ ได้อย่างชัดเจนและตลอดเวลา และสนามความเร็วบนระนาบที่วัดได้จะเรียกว่า “ความเร็วเจ็ต (jet velocity)” นอกจากนี้แล้วการวิเคราะห์ความเร็วเฉลี่ยตามเวลา (time-averaged velocity) ในแต่ละวิธีการใส่อนุภาคติดตามการไหลก็ให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน คือ กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้นจะเป็นความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลา (time-averaged jet velocity,  $\bar{V}_j(\bar{x})$ ) แต่กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวางจะเป็นความเร็วสนามเฉลี่ยตามเวลา (time-averaged field velocity,  $\bar{V}(\bar{x})$ ) ซึ่งจะอธิบายในส่วนถัดไป

- **ความเร็วสนามขณะใด ๆ (instantaneous field velocity) และ ความเร็วเจ็ตขณะใด ๆ (instantaneous jet velocity)**

รูปที่ 5.1(ก) แสดงอนุภาคติดตามการไหลและความเร็วสนามขณะใด ๆ (instantaneous field velocity,  $\vec{V}(\bar{x}, t)$ ) ณ เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  ของกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง จะเห็นได้ว่า PIV วัดความเร็วได้ไม่เท่ากับศูนย์ไม่ว่า  $\bar{x}$  จะอยู่ในบริเวณเจ็ตหรือบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ตลอดเวลา (ทั้งที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$ ) หรือได้เป็นความเร็วสนาม  $\vec{V}(\bar{x}, t)$  ดังสมการที่ 5.1 ทำให้ไม่สามารถแยกแยะบริเวณเจ็ตออกจากบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามรูปที่ 5.1(ข) แสดงอนุภาคติดตามการไหลและความเร็วเจ็ตขณะใด ๆ (instantaneous jet velocity,  $\vec{V}_j(\bar{x}, t)$ ) ณ เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  ของกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น จะเห็นว่า PIV วัดความเร็วได้ไม่เท่ากับศูนย์เฉพาะ  $\bar{x}$  ที่อยู่ในบริเวณเจ็ตและวัดความเร็วได้เท่ากับศูนย์เมื่อ  $\bar{x}$  อยู่ในบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ นั่นคือ วัดได้เป็นความเร็วเจ็ต  $\vec{V}_j(\bar{x}, t)$  ดังสมการที่ 5.2 ทำให้สามารถระบุขอบเขตเจ็ตและแยกแยะบริเวณเจ็ตออกจากบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ณ ขณะใด ๆ ได้อย่างชัดเจนและตลอดเวลา นอกจากนั้นยังพบว่า ณ จุดหนึ่ง และ ณ เวลาหนึ่ง ( $t_1$ ) จะพบความเร็วเจ็ต (PIV วัดความเร็วได้ไม่เท่ากับศูนย์หรือพบอนุภาคติดตามการไหล) ในขณะที่เวลาต่อมา ( $t_2$ ) ไม่พบความเร็วเจ็ต (PIV วัดความเร็วได้เท่ากับศูนย์หรือไม่พบอนุภาคติดตามการไหล) ดังที่ วิธีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตนั้นจะทำให้สามารถหาค่าความน่าจะเป็นที่จะพบอนุภาคหรือส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ ได้ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในส่วนถัดไป อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวางจะมีค่าความน่าจะเป็นที่จะพบอนุภาคติดตามการไหลเป็น 1 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ตำแหน่ง  $\bar{x}$  ใด ๆ ถ้าไม่พบของไหลที่มาจากเจ็ตก็จะพบของไหลที่มาจากกระแสลมขวางบริสุทธิ์อย่างแน่นอนนั่นเอง

- **ความเร็วสนามเฉลี่ยตามเวลา (time-averaged field velocity) และ ความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลา (time-averaged jet velocity)**

รูปที่ 5.2(ก) แสดงความเร็วสนามไร้มิติตามแนวแกน streamwise ( $x$ ) เฉลี่ยตามเวลา (time-averaged streamwise field velocity,  $\bar{V}_x(\bar{x})/u_{cf} = \bar{V}_x(\bar{x})/u_{cf}\hat{i}$ ) ในกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง จากที่ PIV วัดได้เป็นความเร็วสนามขณะใด ๆ ดังนั้นเมื่อคำนวณค่าเฉลี่ยตามเวลา จะได้เป็นความเร็วสนามเฉลี่ยตามเวลา ( $\bar{V}(\bar{x})$ ) และตำแหน่ง  $\bar{x}$  ที่เข้าใกล้ขอบเจ็ต (หรือเข้าใกล้บริเวณของกระแสลมขวางบริสุทธิ์) จะมีค่าเข้าใกล้ความเร็วของกระแสลมขวาง อย่างไรก็ตามในรูปที่ 5.2(ข) แสดงความเร็วเจ็ตไร้มิติตามแนวแกน streamwise ( $x$ ) เฉลี่ยตามเวลา (time-averaged streamwise jet velocity,  $\bar{V}_{j,x}(\bar{x})/u_{cf} = \bar{V}_{j,x}(\bar{x})/u_{cf}\hat{i}$ ) ในกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น จากที่ PIV วัดได้เป็นความเร็วเจ็ตขณะใด ๆ ดังนั้นเมื่อคำนวณค่าเฉลี่ยตามเวลาจะได้เป็นความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลา ( $\bar{V}_j(\bar{x})$ ) และตำแหน่ง  $\bar{x}$  ที่เข้าใกล้ขอบเจ็ต (หรือเข้าใกล้บริเวณของกระแสลมขวางบริสุทธิ์) นั้นจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งแตกต่างจากกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง สำหรับค่าความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลาที่เข้าใกล้ศูนย์เมื่อเข้าใกล้บริเวณขอบเจ็ตนั้นสาเหตุมาจากเจ็ตมีความปั่นป่วน (turbulence) และความไม่คงตัว (unsteadiness) ทำให้ความเร็วเจ็ตขณะใด ๆ บริเวณใกล้ขอบเจ็ตอาจจะมีค่าสูงหรือบางที่สูงกว่าความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ แต่ระยะเวลาที่ตำแหน่ง  $\bar{x}$  บริเวณใกล้ขอบเจ็ตจะอยู่ในบริเวณเจ็ตน้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาที่ตำแหน่ง  $\bar{x}$  นั้นอยู่ในบริเวณของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ หรืออีกนัยหนึ่งคือแม้ว่าความเร็วเจ็ตขณะใด ๆ จะมีค่าสูงที่ตำแหน่งบริเวณใกล้ขอบเจ็ต แต่ค่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่ตำแหน่งบริเวณใกล้ขอบเจ็ตนั้นมีค่าน้อยและน้อยลงเรื่อย ๆ จนมีค่าเป็นศูนย์เมื่อตำแหน่งนั้นอยู่ในบริเวณของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ดังนั้นเมื่อคิดค่าเฉลี่ยตามเวลาจึงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์นั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความเร็วสนามเฉลี่ยตามเวลาที่จุดใด ๆ และความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลาที่จุดใด ๆ พบว่าความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลาที่จุดใด ๆ จะมีค่าแปรผันตามค่าความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ ด้วย

สรุปได้ว่าเมื่อพิจารณาอนุภาคติดตามการไหลขณะใด ๆ , ความเร็วเจ็ตขณะใด ๆ และความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลา (กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น) PIV วัดความเร็วได้เท่ากับศูนย์ในบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถระบุขอบเขตเจ็ตและแยกแยะบริเวณเจ็ตออกจากบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ณ ขณะใด ๆ ได้อย่างชัดเจนและตลอดเวลา

- **ความเร็วสนามปั่นป่วน (field velocity fluctuation) และ ความเร็วเจ็ตปั่นป่วน (jet velocity fluctuation)**

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการ POD ในการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง ซึ่งใช้ความเร็วปั่นป่วนในการคำนวณในกระบวนการดังกล่าว ดังนั้นกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวางจะนำความเร็วสนามขณะใด ๆ ลบความเร็วสนามเฉลี่ยตามเวลาได้เป็น “ความเร็วสนาม

ปั่นป่วน (field velocity fluctuation)” ในขณะที่กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้นจะนำความเร็วเจ็ตขณะใด ๆ ลบความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลาได้เป็น “ความเร็วเจ็ตปั่นป่วน (jet velocity fluctuation)” ซึ่งจะมีความแตกต่างกัน คือ เมื่อตำแหน่ง  $\bar{x}$  เข้าใกล้บริเวณขอบเจ็ต (หรือเข้าใกล้บริเวณของกระแสลมขวางบริสุทธิ์) ความเร็วเจ็ตปั่นป่วนจะมีค่าสูงกว่าค่าความเร็วสนามปั่นป่วน มีสาเหตุมาจาก “ค่าความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลา” ที่บริเวณขอบเจ็ตนั้นจะมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับ “ค่าความเร็วสนามเฉลี่ยตามเวลา” ที่บริเวณขอบเจ็ต (มีค่าเข้าใกล้ความเร็วกระแสลมขวาง) ดังนั้นแล้วเมื่อนำความเร็วเจ็ตปั่นป่วนไปผ่านกระบวนการ POD จะทำให้สามารถเห็นโครงสร้างในบริเวณใกล้ขอบเจ็ตได้ แสดงว่า การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้นทำให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่มาจากเจ็ตได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น

## 5.2 ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ ( $\phi_{ij}$ )

จากที่กล่าวข้างต้นสำหรับกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น ณ เวลาหนึ่ง จะพบความเร็วเจ็ต ในขณะที่เวลาต่อมาอาจจะไม่พบความเร็วเจ็ตทำให้สามารถหาความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ ( $\phi_{ij}$ ) ได้ และความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลาที่จุดใด ๆ นั้นก็มีค่าแปรผันตามค่าความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ นี้อีกด้วย ดังนั้นค่าความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ จึงมีความสำคัญและสามารถนิยามได้เป็น

$$\phi_{ij} = \frac{N_{v,ij}}{N} \quad (5.3)$$

โดยที่  $N_{v,ij}$  คือ ระยะเวลาที่พบความเร็วเจ็ตที่ไม่เป็นศูนย์ที่จุดใด ๆ หรือจำนวนสนามความเร็วขณะใด ๆ (snapshot) ที่พบความเร็วเจ็ตที่ไม่เป็นศูนย์ที่จุดใด ๆ  
 $N$  คือ ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเก็บข้อมูล หรือจำนวนสนามความเร็วทั้งหมดที่เก็บข้อมูลได้จาก SPIV ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเก็บข้อมูลทั้งหมด 4,000 ภาพ

เมื่อนิยามความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ แล้วก็จะทำให้สามารถหาความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่จุดใด ๆ ( $\phi_{cf}$ ) ได้ด้วย เนื่องจากเป็นคอมพลิเมนต์ซึ่งกันและกันโดยมีค่าเท่ากับ  $1 - \phi_{ij}$  ซึ่งจะเห็นว่าในบริเวณเจ็ตจะมีส่วนผสมของกระแสลมขวางบางส่วนด้วยเนื่องจากเจ็ตเหนี่ยวนำกระแสลมขวางเข้ามาผสมกับตัวเจ็ต

รูปที่ 5.3 แสดงการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ ( $\phi_{ij}$ ) กรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น ซึ่งแสดงในลักษณะ contour โดยมีค่าตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.95 และระยะห่างระหว่างเส้นเท่ากับ 0.05 (ยกเว้นเส้นนอกสุดจะมีค่า 0.01) เมื่อพิจารณาค่า  $\phi_{ij}$  พบว่า ทุกกรณีไม่ผิดเจ็ตควบคุม (JICF) ,กรณีผิดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ

$r_m = 2\%$  และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 4\%$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd$  จะมีค่า  $\phi_{ij}$  สูงที่บริเวณกึ่งกลางเจ็ด และมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเข้าใกล้บริเวณขอบเจ็ด จนมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่ออยู่ในบริเวณของกระแสลมขวางบริสุทธ์ และเมื่อพิจารณาโครงสร้างความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด พบว่าโครงสร้างโดยรวมของกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) จะมีลักษณะคล้ายกันทุกตำแหน่ง  $x/rd$  และเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  พบว่า โครงสร้างโดยรวมในแต่ละตำแหน่ง  $x/rd$  ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) มากนัก อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% ทำให้โครงสร้างโดยรวมยกตัวสูงขึ้นในแนว *transverse* อย่างชัดเจน และยังมีโครงสร้างบริเวณด้านล่างของเจ็ดเพิ่มขึ้นมา นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามแนว *downstream* ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  จะพบค่าความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดในโครงสร้างบริเวณด้านล่างสูงถึง 0.5 การที่อยู่ในบริเวณนี้มี  $\phi_{ij}$  ประมาณ 0.5 หมายความว่า ในช่วงเวลาหนึ่งโอกาสที่จะเจอส่วนผสมของเจ็ดมีค่าพอ ๆ กับโอกาสที่จะเจอส่วนผสมของกระแสลมขวาง ประเด็นนี้ชี้แนะว่า  $r_m = 4\%$  ส่งเสริมให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ดกับกระแสลมขวางที่บริเวณด้านล่างของเจ็ดมากขึ้นด้วย

นอกจากนั้นยังพบว่า  $\phi_{ij} + \phi_{cf} = 1$  หรือค่าความน่าจะเป็นที่จะพบอนุภาคติดตามการไหลที่จุดใด ๆ ของกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสลมขวางในทางทฤษฎีนั้นจะมีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากเวลาหนึ่งถ้าไม่พบของไหลที่มาจากเจ็ด ก็จะมีของไหลที่มาจากกระแสลมขวางบริสุทธ์ แต่ในความเป็นจริงอาจมีความคลาดเคลื่อนอันเป็นผลมาจากเครื่องมือที่ใช้ในการวัด โดยรูปที่ 5.4(ข) แสดงค่าความน่าจะเป็นที่จะพบอนุภาคติดตามการไหลที่จุดใด ๆ ของกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสลมขวางที่วัดได้จาก SPIV พบว่า ความน่าจะเป็นจะไม่เท่ากับ 1 แต่จะมีค่าใกล้เคียง 1 มาก โดยค่าความน่าจะเป็นน้อยที่สุดมีค่าประมาณ 0.99 เป็นการยืนยันว่า การวัดสนามความเร็วด้วย SPIV ในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องแม่นยำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 5.3 บริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ )

จากที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าการรู้เข้าของปริมาณต่าง ๆ จะพิจารณาจากบริเวณเจ็ดทั้งหมดรวมไปถึงบริเวณเจ็ดที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดค่าต่าง ๆ ดังนั้นจะนิยามบริเวณ  $R_\phi$  ตามความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด  $\phi$  คือ บริเวณที่มีค่าความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่จุดใด ๆ ( $\phi_{ij}$ ) มากกว่า 0 แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\phi$  ( $0 < \phi_{ij} \leq \phi$ ) ดังนี้

$$R_\phi = \{ (i, j) \mid 0 < \phi_{ij} \leq \phi \} \quad (5.4)$$

ซึ่งถ้า  $\phi = 1$  หรือ  $R_{\phi=1}$  จะหมายถึงบริเวณเจ็ดทั้งหมด ในขณะ  $\phi = 0$  หรือ  $R_{\phi=0}$  จะหมายถึงบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธ์ ดังรูปที่ 5.5 สำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) นี้จะนิยามเฉพาะในกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น

## บทที่ 6

### การสอบทวนผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสอบทวนผลการทดลอง ประกอบด้วย การเปรียบเทียบโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางกับผลการทดลองของ Meyer *et al.* (2007) และการตรวจสอบการคำนวณ POD ด้วยกระบวนการย้อนกลับ

#### 6.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง (JICF) กับผลการทดลองของ Meyer *et al.* (2007)

ในการสอบทวนผลการทดลองนั้น ผู้วิจัยได้ทำการทดลองทดลองเพิ่มเติมที่สภาวะใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Meyer *et al.* (2007) ให้มากที่สุด โดยรายละเอียดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้จะแตกต่างกับงานวิจัยของ Meyer *et al.* (2007) ในบางส่วนซึ่งแสดงดังตารางที่ 6.1 ในการสอบทวนนี้จะทำการเปรียบเทียบโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยและโครงสร้าง POD mode 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

##### 6.1.1 เปรียบเทียบโครงสร้างเฉลี่ย

รูปที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน  $x$  ไร้มิติ ( $V_x/u_{cf}$ ) และโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยบนระนาบ  $yz$  ไร้มิติ ( $\vec{V}_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/u_{cf}$ ) ระหว่างผลการทดลองของ Meyer *et al.* (2007) และงานวิจัยนี้กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง พบว่าโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน  $x$  ไร้มิติ และโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยบนระนาบ  $yz$  ไร้มิติ ในงานวิจัยนี้มีความคล้ายคลึงกับ Meyer *et al.* (2007) คือ พบการไหลย้อนกลับ (ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน  $x$  น้อยกว่าศูนย์) และด้านบนของบริเวณที่เกิดการไหลย้อนกลับนั้นมีรูปร่างคล้ายเกือกม้า (horseshoe) เช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาความเร็วบนระนาบจะเห็นว่ามัลักษณะเป็น Vortex 2 ลูกหมุนสวนทางกันคล้าย CVP เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามสิ่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถวัดสนามความเร็วในบริเวณที่ใกล้พื้นมาก ๆ เช่นเดียวกับ Meyer *et al.* (2007) ได้ เนื่องจากผลของแสงสะท้อนจากแสงเลเซอร์ระนาบที่ตกกระทบที่พื้นหน้าตัดทดสอบ

##### 6.1.2 เปรียบเทียบโครงสร้าง POD mode 1, 2 และ 3

รูปที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานระหว่างผลการทดลองของ Meyer *et al.* (2007) และงานวิจัยนี้กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง พบว่า โครงสร้างของ POD Mode 1, 2 และ 3 แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดย POD Mode 1 ในงานของ Meyer *et al.* (2007) จะเป็นลักษณะ Lobe 2 lobe บริเวณตรงกลางของเจ็ต และ POD Mode 2 จะเป็น Lobe 2 lobe อยู่ในบริเวณด้านล่างของตัวเจ็ตหรือบริเวณ Wake และสำหรับ POD

Mode 3 จะเป็นลักษณะคล้าย Jet shear layer แต่ในงานวิจัยนี้โครงสร้างทั้ง POD Mode 1 และ POD Mode 2 จะเห็นเป็นโครงสร้างคล้าย Jet shear layer ซึ่งแตกต่างจาก Meyer *et al.* (2007) อย่างชัดเจน สำหรับ POD Mode 3 ก็แตกต่างเช่นเดียวกัน และระดับพลังงานของ POD Mode 1, 2 และ 3 ก็มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเช่นเดียวกัน คือ ในงานวิจัยนี้มีระดับพลังงานที่ต่ำกว่า Meyer *et al.* (2007) โดยเฉพาะที่ POD Mode 1 และ 2

ความแตกต่างทั้ง POD Mode 1, 2 และ 3 รวมถึงระดับพลังงานในงานวิจัยนี้ที่แตกต่างจาก Meyer *et al.* (2007) น่าจะเป็นผลมาจากพารามิเตอร์ที่ต่างกัน ซึ่งพารามิเตอร์ไร้มิติตัวหนึ่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ ความหนาชั้นขอบเขตไร้มิติ (รายละเอียดพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 6.1) โดยในงานของ Meyer *et al.* (2007) มีความหนาชั้นขอบเขตไร้มิติ ( $\delta_{99\%} / d$ ) เท่ากับ 2.9 ในขณะที่งานวิจัยนี้เท่ากับ 1.6 ซึ่งจากงานวิจัยในอดีต Muppidi and Mahesh (2005b) พบว่า ความหนาชั้นขอบเขตนั้นมีผลต่อคุณลักษณะต่าง ๆ และโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ไม่สามารถวัดสนามความเร็วในบริเวณที่ใกล้พื้นมาก ๆ อีกด้วย

## 6.2 ตรวจสอบการคำนวณ POD ด้วยกระบวนการย้อนกลับ (reconstruction)

กระบวนการย้อนกลับถือเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถตรวจสอบการคำนวณของกระบวนการ POD ได้ ซึ่งในที่นี้จะแสดงกระบวนการย้อนกลับของสนามความเร็วปั่นป่วนขณะใด ๆ และกระบวนการย้อนกลับของทุกสนามความเร็วปั่นป่วนเพื่อนำไปหา Turbulent kinetic energy

### 6.2.1 กระบวนการย้อนกลับของความเร็วปั่นป่วนขณะใด ๆ

จากที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 หัวข้อกระบวนการย้อนกลับ (reconstruction) ของสนามความเร็วปั่นป่วนขณะใดขณะหนึ่ง คือ การนำ POD Mode มาคำนวณย้อนกลับหาสนามความเร็วปั่นป่วนขณะใดขณะหนึ่ง ซึ่งในที่นี้จะเลือกเฉพาะภาพที่ 2,000 ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ที่ตำแหน่ง  $x / rd = 0.75$  และสำหรับทั้งวิธีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้นและวิธีที่ใส่ทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง โดยในกระบวนการย้อนกลับนี้สามารถเลือกใช้จำนวน Mode รวมแตกต่างกันเพื่อให้ได้ระดับพลังงานรวมค่าต่าง ๆ โดยในกระบวนการย้อนกลับนี้ผู้วิจัยเลือกใช้จำนวน Mode รวมที่ให้ระดับพลังงานสะสมเป็น 25%, 50%, 75% และ 100%

รูปที่ 6.3(ก) - (ค) และ รูปที่ 6.4(ก) - (ค) แสดงการกระจายตัวของความเร็วปั่นป่วนไร้มิติที่ได้จากกระบวนการย้อนกลับด้วยระดับพลังงานสะสม 25%, 50%, 75% และ 100% รวมไปถึงภาพต้นฉบับที่วัดได้จาก SPIV (*original*) ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  (ก) - (ค) ตามลำดับ ที่ตำแหน่ง  $x / rd = 0.75$  ณ เวลาหรือภาพที่ 2,000 สำหรับวิธีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น (รูปที่ 6.3) และวิธีที่ใส่ทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง (รูปที่ 6.4) โดยเส้น contour แสดงความเร็วปั่นป่วนไร้มิติในแนวแกน  $x$  ( $V'_x / u_{cf}$ ) และเวกเตอร์ในระนาบแสดงความเร็วปั่นป่วนไร้มิติในแนวแกน  $y$  และ  $z$

$(\bar{V}'_{yz}/u_{cf} = (\bar{V}'_y + \bar{V}'_z)/u_{cf})$  พบว่า เมื่อใช้จำนวน Mode ที่มากขึ้นเพื่อให้ระดับพลังงานสะสมที่มากขึ้นนั้นจะทำให้โครงสร้างโดยรวมของความเร็วปั่นป่วนจากกระบวนการย้อนกลับจะมีความคล้ายคลึงกับโครงสร้างต้นฉบับหรือโครงสร้างที่วัดได้จาก SPIV มากขึ้น โดยที่จำนวน 4,000 Mode หรือระดับพลังงานสะสม 100% โครงสร้างโดยรวมจะแตกต่างจากโครงสร้างต้นฉบับน้อยมากหรือถือว่าไม่แตกต่างกันเลย นอกจากนั้นเพื่อที่จะหาค่าของความเร็วปั่นป่วนไร้มิติที่ได้จากกระบวนการย้อนกลับนั้นแตกต่างจากต้นฉบับไปเท่าไร จึงนิยามเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเป็น

$$error = \frac{\sum_{ij} [V_x'^2 + V_y'^2 + V_z'^2]_{reconstruct} - [V_x'^2 + V_y'^2 + V_z'^2]_{original}}{\sum_{ij} [V_x'^2 + V_y'^2 + V_z'^2]_{original}} \times 100\% \quad (6.1)$$

โดยที่  $V'_x$ ,  $V'_y$  และ  $V'_z$  คือ ความเร็วปั่นป่วนตามแนวแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามลำดับ ดังนั้น  $[V_x'^2 + V_y'^2 + V_z'^2]_{reconstruct}$  คือ ระดับพลังงาน Turbulent kinetic energy (TKE) ณ ภาพที่ 2,000 ที่ได้จากกระบวนการย้อนกลับที่ระดับพลังงานสะสมต่าง ๆ และ  $[V_x'^2 + V_y'^2 + V_z'^2]_{original}$  คือ ระดับพลังงาน (TKE) ณ เวลาหรือภาพที่ 2,000 ที่ได้จาก SPIV ดังนั้น  $error$  คือ เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระดับพลังงาน (TKE) ณ ภาพที่ 2,000 ที่ได้จากกระบวนการย้อนกลับเทียบกับที่วัดได้จาก SPIV ของภาพที่ 2,000

รูปที่ 6.5(ก) - (ข) แสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระดับพลังงาน Turbulent kinetic energy (TKE) ณ ภาพที่ 2,000 ที่ได้จากกระบวนการย้อนกลับที่ระดับพลังงานสะสมต่าง ๆ เทียบกับที่วัดได้จาก SPIV ณ ภาพที่ 2,000 ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  สำหรับทั้งวิธีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้นและวิธีที่ใส่ทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง ตามลำดับชี้ให้เห็นว่าทุกกรณีมีแนวโน้มที่เป็นเส้นตรง โดยมีความชันประมาณ  $-1$  กล่าวคือ สมมติความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 20% แสดงว่ากระบวนการย้อนกลับนั้นมีระดับพลังงานเท่ากับ 80% ส่วนสาเหตุที่ไม่เป็นเส้นตรงความชันเท่ากับ  $-1$  พอดี เพราะระดับพลังงานใน POD Mode ต่าง ๆ จะแสดงถึงค่าเฉลี่ยของทุกสนามความเร็วปั่นป่วนขณะใด ๆ ทั้งหมด 4,000 ภาพ ไม่ใช่เฉพาะภาพใดภาพหนึ่ง

## 6.2.2 Turbulent kinetic energy (กระบวนการย้อนกลับของทุกสนามความเร็วปั่นป่วน)

ในหัวข้อที่แล้วเป็นการนำ POD Mode มาคำนวณย้อนกลับหาสนามความเร็วปั่นป่วนขณะใด ๆ ณ เวลาหรือภาพที่ 2,000 ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  โดยใช้จำนวน Mode สะสมแตกต่างกันเพื่อให้ได้ระดับพลังงานสะสมเป็น 25%, 50%, 75% และ 100% ซึ่งถ้า



POD Mode มาคำนวณย้อนกลับหาสนามความเร็วปั่นป่วนทุกเวลาหรือทุกภาพนั้นจะสามารถนำไปหา Turbulent Kinetic Energy ( $TKE$ ) ของทุกภาพได้ โดยที่  $TKE$  มีนิยามเป็น

$$TKE = \frac{1}{2} \sum_{ij} \left[ (\overline{v'_x v'_x})_{ij} + (\overline{v'_y v'_y})_{ij} + (\overline{v'_z v'_z})_{ij} \right] \quad (6.2)$$

$$(\overline{v'_x v'_x})_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (v'_{x,ij,n})^2 \quad (6.3)$$

โดยที่  $v'_{x,ij,n}$  คือ ความเร็วปั่นป่วนในแนวแกน  $x$  (streamwise fluctuation velocity) ที่จุดใด ๆ ณ เวลาหรือภาพที่  $n$  สำหรับ  $(\overline{v'_y v'_y})_{ij}$  และ  $(\overline{v'_z v'_z})_{ij}$  ก็คำนวณเช่นเดียวกับสมการที่ 6.3 นอกจากนั้นจะนิยาม Crossflow kinetic energy ( $CKE$ ) ด้วยคือ  $CKE = 1/2 \times u_{cf}^2$

รูปที่ 6.6(ก) – (ค) และ 6.7(ก) – (ค) แสดงการกระจายตัวของ Turbulent Kinetic Energy ไร้มิติ ( $TKE / CKE$ ) ที่คำนวณได้จากกระบวนการย้อนกลับของสนามความเร็วปั่นป่วนทั้งหมด (4,000 ภาพ) ด้วยระดับพลังงานสะสม 25%, 50%, 75% และ 100% รวมไปถึง  $TKE$  ที่ได้จากการคำนวณผ่านสนามความเร็วปั่นป่วนทั้งหมด (4,000 ภาพ) ที่วัดได้จาก SPIV (*original*) ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  สำหรับทั้งวิธีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น (รูปที่ 6.6) และวิธีที่ใส่ทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง (รูปที่ 6.7) พบว่า การกระจายตัวของ  $TKE$  ที่ได้จากกระบวนการย้อนกลับนั้นมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกระบวนการย้อนกลับของสนามความเร็วปั่นป่วนขณะใด ๆ ในหัวข้อที่แล้ว กล่าวคือ เมื่อใช้จำนวน Mode ที่มากขึ้นเพื่อให้ระดับพลังงานสะสมที่มากขึ้นนั้นจะทำให้โครงสร้างโดยรวมของ  $TKE$  จากกระบวนการย้อนกลับจะมีความคล้ายคลึงกับโครงสร้างต้นฉบับหรือโครงสร้างที่วัดได้จาก SPIV มากขึ้น โดยที่จำนวน 4,000 Mode หรือระดับพลังงานสะสม 100% โครงสร้างโดยรวมจะแตกต่างจากโครงสร้างต้นฉบับน้อยมากหรือถือว่าไม่แตกต่างกันเลย และเมื่อนำ  $TKE$  ที่ได้จากกระบวนการย้อนกลับมาเทียบกับ  $TKE$  ที่ได้จากการวัดจริง ดังนี้

$$energy = \frac{TKE_{reconstruct}}{TKE_{original}} \times 100\% \quad (6.4)$$

โดยที่  $TKE_{reconstruct}$  คือ  $TKE$  ที่คำนวณได้จากกระบวนการย้อนกลับของสนามความเร็วปั่นป่วนทั้งหมด (4,000 ภาพ) ที่ระดับพลังงานสะสม 25%, 50%, 75% และ 100% และ  $TKE_{original}$  คือ  $TKE$  ได้จากการคำนวณผ่านสนามความเร็วปั่นป่วนทั้งหมด (4,000 ภาพ) ที่วัดได้จาก SPIV (*original*) ดังนั้น  $energy$  คือ เปอร์เซนต์ของ  $TKE$  ที่คำนวณจากกระบวนการย้อนกลับเทียบกับ  $TKE$  ที่คำนวณจากการวัดจริง

รูปที่ 6.8(ก) - (ข) แสดงเปอร์เซ็นต์ของ  $TKE$  ที่คำนวณจากกระบวนการย้อนกลับเทียบกับ  $TKE$  ที่คำนวณจากการวัดจริงของกรณี  $TKE$ ,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  สำหรับทั้งวิธีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้นและวิธีที่ใส่ทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง ตามลำดับ พบว่า ค่า  $TKE$  ที่คำนวณจากกระบวนการย้อนกลับที่ระดับพลังงานสะสมต่างๆ (25%, 50%, 75% และ 100%) เมื่อนำมาเทียบกับค่า  $TKE$  ที่คำนวณจากการวัดจริง จะมีค่าเท่ากับระดับพลังงานสะสมนั้น ๆ เช่น  $TKE$  ที่คำนวณจากกระบวนการย้อนกลับที่ระดับพลังงานสะสม 25% เมื่อนำมาเทียบกับค่า  $TKE$  ที่คำนวณจากการวัดจริงก็จะมีค่าเท่ากับ 25% ด้วยเช่นกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าระดับพลังงาน (*energy*) ของแต่ละ Mode ในกรณีที่คำนวณ POD จากสนามความเร็วปั่นป่วนนั้น หมายถึง เปอร์เซ็นต์ Turbulent kinetic energy ของ Mode นั้นต่อ Turbulent kinetic energy ของจำนวน Mode ทั้งหมด



## บทที่ 7

### ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ )

#### ต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง

#### กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ ) ต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางในกรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง จากที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.1 ข้อแตกต่างของการใส่อนุภาคติดตามการไหลในแต่ละวิธี คือ การวัดสนามความเร็วด้วย SPIV ที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้นทำให้สนามความเร็วที่วัดได้นั้นเป็นความเร็วเจ็ต (jet velocity) ซึ่งเป็นสนามความเร็วที่มีความเร็วไม่เท่ากับศูนย์ในบริเวณเจ็ตและส่วนผสมของเจ็ต และมีความเร็วเท่ากับศูนย์ในบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ดังสมการที่ 5.2 และเมื่อพิจารณาความเร็วปั่นป่วนในกรณีนี้จะเป็น ความเร็วเจ็ตปั่นป่วน ดังนั้นโครงสร้างและระดับพลังงานที่ได้จากกระบวนการ POD จะเป็นเฉพาะส่วนที่มาจากเจ็ตเท่านั้น ไม่รวมส่วนของกระแสลมขวาง สำหรับรายละเอียดของเนื้อหาในบทนี้ในหัวข้อ 7.1 จะกล่าวถึงผลของ  $r_m$  ต่อโครงสร้างความเร็วเฉลี่ย (POD Mode 0) และสำหรับหัวข้อ 7.2 ถึง 7.5 จะกล่าวถึงผลของ  $r_m$  ต่อโครงสร้างและระดับพลังงานที่ได้จากกระบวนการ POD

### 7.1 ผลของ $r_m$ ต่อโครงสร้างความเร็วเฉลี่ย (POD Mode 0)

รูปที่ 7.1 แสดงการกระจายตัวของความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลาไร้มิติ โดยเส้น contour แสดงความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลาไร้มิติตามแนวแกน  $x$  ( $V_x/u_{cf}$ ) และเวกเตอร์ในระนาบแสดงความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลาไร้มิติตามแนวแกน  $y$  และ  $z$  ( $\vec{V}_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/u_{cf}$ ) ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ ในการวิเคราะห์โครงสร้างความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน  $x$  ( $V_x/u_{cf}$ ) ในที่นี้จะเรียกว่า “โครงสร้างของ  $V_x$ ” เช่นเดียวกับโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยในระนาบ ( $\vec{V}_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/u_{cf}$ ) ในที่นี้จะเรียกว่า “โครงสร้างของ  $V_{yz}$ ”

กรณี JICF ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  พบว่า โครงสร้างของ  $V_x$  จะมี Local peak ลักษณะคล้ายโครงสร้างรูปไต (kidney shape) (ซึ่งต่อไปถ้าอ้างอิงถึงโครงสร้างรูปไตจะหมายถึงโครงสร้างในบริเวณ Local peak ของ  $V_x$ ) และพบบริเวณที่ความเร็วน้อยกว่า 0 (จากรูป คือ บริเวณในวงรีสีขาว) หรือเกิดการไหลย้อนกลับ (reversed flow) ในบริเวณที่อยู่ใต้โครงสร้างรูปไต สำหรับโครงสร้างของ  $V_{yz}$  จะมีลักษณะคล้าย CVP และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่  $x/rd = 0.75-1.5$  พบว่า โครงสร้างโดยรวมของทั้ง  $V_x$  และ  $V_{yz}$  ยังคงมีลักษณะคล้ายเดิม คือ ยังคงเป็นลักษณะโครงสร้างรูปไต และ CVP ตามลำดับ อย่างไรก็ตามที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75-1.5$  จะไม่พบบริเวณที่เกิดการไหลย้อนกลับ

เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  พบว่า โครงสร้างโดยรวมของทั้ง  $V_x$  และ  $V_{yz}$  ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับ JICF คือ โครงสร้างโดยรวมของทั้ง  $V_x$  และ  $V_{yz}$  ยังคงมีลักษณะคล้ายเดิม คือ โครงสร้างรูปไต และ CVP ตามลำดับ นอกจากนี้ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  ก็พบบริเวณที่เกิดการไหลย้อนกลับเช่นเดียวกัน

เมื่อเพิ่มปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  พบว่า โครงสร้างของ  $V_x$  จะยกตัวสูงขึ้นในแนว transverse อย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  อีกทั้งยังพบโครงสร้างที่มีความเร็วต่ำเพิ่มขึ้นมาในบริเวณด้านล่างของเจ็ดด้วย สำหรับโครงสร้างของ  $V_{yz}$  ยังคงมีลักษณะเป็น CVP เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  แต่มีสิ่งที่แตกต่างกัน คือ โครงสร้างของ  $V_x$  จะยกตัวสูงกว่า รวมถึงจุดศูนย์กลางของ vortex ก็ยกตัวสูงกว่า หรือ CVP มีการทะลุทะลวงสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  อย่างไรก็ตามที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  ก็พบบริเวณที่เกิดการไหลย้อนกลับเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream โครงสร้างรูปไตในโครงสร้างของ  $V_x$  นั้นจะสลายตัวไปเร็วกว่าเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$

## 7.2 การพัฒนาตัวของโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญของกรณี JICF, $r_m = 2\%$ และ $r_m = 4\%$

จากที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ว่าการวิเคราะห์โครงสร้าง POD Mode และระดับพลังงาน (Energy) ที่ได้จากการบวนการ POD คือ การวิเคราะห์ความเร็วปั่นป่วน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ความเร็วเฉลี่ยนั้นถูกลบออกไปแล้ว โดยที่ POD Mode 1 คือ โครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญและมีระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุด และ POD Mode 2 และ 3 มีระดับพลังงานรองลงมาตามลำดับ

สำหรับการพล็อตกราฟแสดง POD Mode มีรายละเอียดดังนี้คือ contour แสดง องค์ประกอบตามแนวแกน  $x$  (POD Mode จากความปั่นป่วนของความเร็วตามแนวแกน  $x$ ) และ เวกเตอร์ในระนาบแสดง องค์ประกอบตามแนวแกน  $y$  และ  $z$  (POD Mode จากความปั่นป่วนของความเร็วตามแนวแกน  $y$  และ  $z$ ) โดยในแต่ละ POD Mode จะมีระดับพลังงาน (Energy) กำกับซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ Turbulent kinetic energy ของ Mode นั้นต่อ Turbulent kinetic energy ของจำนวน Mode ทั้งหมด และการวิเคราะห์โครงสร้างจาก POD Mode ในที่นี้จะเน้นส่วนที่เป็นรูปร่างของ Mode (Mode shape) เป็นหลัก และเพื่อให้เห็นรูปร่างของ Mode ในแต่ละระนาบชัดเจนที่สุดจึงใช้สเกลสีของ contour แตกต่างกันในแต่ละกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  และแต่ละตำแหน่ง  $x/rd$  ดังนั้นบริเวณที่เป็นสีเข้ม (น้ำเงินเข้มหรือแดงเข้ม) จะมีความโดดเด่นกว่าบริเวณที่เป็นสีอ่อน นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ถ้ากล่าวถึง โครงสร้างของ POD Mode มีเสถียรภาพ จะหมายถึง รูปร่างของ Mode มีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงไปตลอดแนว downstream (ตั้งแต่ตำแหน่ง  $x/rd$  เท่ากับ 0.5 ถึง 1.5) รูปที่ 7.2(ก) - (ค) แสดงการพัฒนาตัวของ

โครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น

▪ กรณีที่ไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) รูปที่ 7.2(ก)

POD Mode 1 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  โครงสร้างมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe บริเวณตรงกลางเจ็ตและมี Lobe 2 lobe เล็กอยู่บริเวณด้านล่าง เมื่อเจ็ตพัฒนาไปที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  พบว่า หางของ Lobe 2 lobe เล็กที่อยู่บริเวณด้านล่างนั้นขยายขนาดยืดสูงขึ้นในแนว transverse จนมีลักษณะล้อมรอบ Lobe 2 lobe บริเวณตรงกลางเจ็ต และเมื่อพัฒนาไปที่  $x/rd = 1$  พบว่า หางของ Lobe 2 lobe นั้นสลายไป ในขณะที่ Lobe 2 lobe บริเวณตรงกลางนั้นขยายตัวสูงขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  พบว่า โครงสร้างโดยรวมยังคงมีลักษณะเช่นเดิม

POD Mode 2 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  โครงสร้างมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe ใหญ่ล้อมรอบ Lobe 2 lobe เล็ก เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  พบว่า โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน คือ เปลี่ยนมาเป็นโครงสร้างลักษณะคล้าย Jet shear layer

POD Mode 3 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1$  โครงสร้างมีลักษณะเป็น Jet shear layer ในขณะที่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวมาที่  $x/rd = 1.5$  พบว่า โครงสร้างเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนโดยจะมีลักษณะคล้ายกับ Mode 2 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  และ  $x/rd = 1$

▪ กรณีที่ฉีดเจ็ตควบคุม  $r_m = 2\%$  รูปที่ 7.2(ข)

POD Mode 1 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  โครงสร้างมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe บริเวณตรงกลางเจ็ตและมี Lobe 2 lobe เล็กอยู่บริเวณด้านล่าง โดยที่ Lobe บริเวณตรงกลางและบริเวณด้านล่างนั้นโดดเด่นพอ ๆ กัน ในขณะที่เมื่อเจ็ตพัฒนาไปที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  พบว่า Lobe 2 lobe บริเวณด้านล่างนั้นจะโดดเด่นน้อยกว่า Lobe ที่อยู่บริเวณตรงกลาง อย่างไรก็ตามตลอดตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  โครงสร้างโดยรวมของ POD Mode 1 ยังคงมีลักษณะคล้ายเดิม ไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก แสดงว่า เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  ทำให้ POD Mode 1 เริ่มมีความเสถียรภาพ

POD Mode 2 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1$  โครงสร้างมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe ใหญ่ล้อมรอบ Lobe 2 lobe เล็ก เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  พบว่า โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน คือ เปลี่ยนมาเป็นโครงสร้าง Jet shear layer

POD Mode 3 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1$  โครงสร้างมีลักษณะเป็น Jet shear layer ในขณะที่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวมาที่  $x/rd = 1.5$  พบว่า โครงสร้างเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนโดยจะมีลักษณะคล้ายกับ Mode 2 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1$

- กรณีที่ฉีดเจ็ตควบคุม  $r_m = 4\%$  รูปที่ 7.2(ค)

POD Mode 1 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  โครงสร้างมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe ใหญ่ล้อมรอบ Lobe 2 lobe เล็ก และเมื่อฉีดพัฒนาไปที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75 - 1.5$  โครงสร้างยังคงมีลักษณะคล้ายเดิมหรือไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก แสดงว่า โครงสร้าง POD Mode 1 มีเสถียรภาพ โดยที่มีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$

POD Mode 2 ตลอดตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  โครงสร้างมีลักษณะเป็น Jet shear layer แสดงว่า โครงสร้าง POD Mode 2 มีเสถียรภาพ

POD Mode 3 ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  โครงสร้างไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปมากนัก แสดงว่า โครงสร้าง POD Mode 3 มีเสถียรภาพ

จากการพิจารณาการพัฒนาตัวของโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สรุปได้ว่า เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  ทำให้โครงสร้าง POD Mode 1 เริ่มมีเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% นอกจากจะทำให้โครงสร้าง POD Mode 1 มีเสถียรภาพมากขึ้น และยังทำให้ POD Mode 2 และ 3 มีเสถียรภาพอีกด้วย

### 7.3 ผลของ $r_m$ ต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ

รูปที่ 7.3(ก) - (ค) แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของ POD Mode 1, 2 และ 3 ตามลำดับระหว่างกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการไหลในภาคตัดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น

พิจารณาการเปรียบเทียบโครงสร้างของ POD Mode 1 รูปที่ 7.3(ก) เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  พบว่า โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% พบว่า โครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจนทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  เมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) คือ เปลี่ยนจากโครงสร้าง Lobe 2 lobe บริเวณตรงกลางและ Lobe 2 lobe บริเวณด้านล่างเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe ใหญ่ล้อมรอบ Lobe 2 lobe เล็ก

พิจารณาการเปรียบเทียบโครงสร้างของ POD Mode 2 รูปที่ 7.3(ข) เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  พบว่า โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) เล็กน้อย ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1$  พบว่า โครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน คือ เปลี่ยนจากโครงสร้าง Lobe 2 lobe ใหญ่ล้อมรอบ Lobe 2 lobe เล็กเป็นโครงสร้างลักษณะ Jet shear layer อย่างไรก็ตามที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  การฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  และ 4% นั้นไม่ได้ทำให้โครงสร้าง POD Mode 2 เปลี่ยนแปลงไปมากนัก คือ เป็นลักษณะคล้าย Jet shear layer เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)

พิจารณาการเปรียบเทียบโครงสร้างของ POD Mode 3 รูปที่ 7.3(ค) เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  พบว่า โครงสร้างไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) มากนัก คือ ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1$  โครงสร้างจะมีลักษณะคล้าย Jet shear layer และที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  โครงสร้างจะมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe ใหญ่ล้อมรอบ Lobe 2 lobe เล็ก ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% พบว่า โครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน คือ ทุกตำแหน่ง  $x/rd$  จะเปลี่ยนมาเป็นโครงสร้างที่กระจายทั่วหน้าตัดเจ็ต

จากการพิจารณาการเปรียบเทียบโครงสร้างของ POD Mode 1, 2 และ 3 ระหว่างกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สรุปได้ว่า โดยทั่วไปแล้วเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 4\%$  จะไปกระตุ้นให้โครงสร้างทั้ง POD Mode 1, 2 และ 3 มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  และกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) โดย POD Mode 1 จะเปลี่ยนจากโครงสร้างที่มี Lobe 2 lobe บริเวณตรงกลางและ Lobe 2 lobe บริเวณด้านล่างเป็นโครงสร้าง Lobe 2 lobe ใหญ่ล้อมรอบ Lobe 2 lobe เล็ก โดยหางของ Lobe 2 lobe ใหญ่จะยาวลงมาถึงบริเวณด้านล่างของเจ็ต สำหรับ POD Mode 2 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1$  จะเปลี่ยนจากโครงสร้างที่เป็น Lobe 2 lobe ล้อมรอบ Lobe 2 lobe เล็กบริเวณตรงกลางเป็นโครงสร้าง Jet shear layer และสำหรับ POD Mode 3 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1$  จะเปลี่ยนจากโครงสร้าง Jet shear layer เป็นโครงสร้างที่กระจายอยู่ทั่วเจ็ต นอกจากนั้นแล้วที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1$  ของกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  โครงสร้าง Jet shear layer จะเป็นโครงสร้างใน POD Mode 3 ในขณะที่เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% ทำให้โครงสร้าง Jet shear layer นี้เปลี่ยนมาเป็นโครงสร้างใน POD Mode 2 แทน แสดงว่า การฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 4\%$  จะไปส่งเสริม (promote) โครงสร้าง Jet shear layer ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1$  ให้โดดเด่นมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  และกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)

#### 7.4 ผลของ $r_m$ ต่อการกระจายตัวของระดับพลังงาน

รูปที่ 7.4 แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของระดับพลังงานเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น พบว่า กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  โดยส่วนใหญ่ระดับพลังงานของแต่ละ Mode ในช่วง Mode 1-10 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่น ๆ แสดงว่า ที่ตำแหน่งนี้ระดับพลังงานจะกระจายไปใน Mode หลัง ๆ มากกว่าเมื่อเทียบกับตำแหน่งใน downstream อื่น ๆ หรือในอีกนัยหนึ่งคือ เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไป Mode แรก ๆ จะโดดเด่นมากขึ้น ซึ่งจะเห็นความชัดเจนมากขึ้นเมื่อพิจารณาการพัฒนาตัวของพลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ในส่วนถัดไป อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่  $r_m = 4\%$  ทำให้การกระจายตัวของระดับพลังงานไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปตลอดตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่

ปริมาณ  $r_m = 4\%$  จะทำให้การกระจายตัวของระดับพลังงานมีเสถียรภาพเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream เมื่อเทียบกับการฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  และกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ซึ่งให้ผลสอดคล้องเช่นเดียวกับเสถียรภาพของโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 ของกรณี  $r_m = 4\%$  ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 7.2

### 7.5 ผลของ $r_m$ ต่อพลังงานสะสม (Accumulative energy)

รูปที่ 7.5(ก) – (ค) แสดงการพัฒนาตัวของพลังงานสะสม (Accumulative energy) ต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น พบว่า ในกรณีที่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) รูป 7.5(ก) พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 0.75$  จะมีความชันน้อยกว่าที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1 - 1.5$  แสดงว่า ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 0.75$  ระดับพลังงานจะกระจายไปใน Mode หลัง ๆ หรือ มีโครงสร้าง POD Mode หลายโครงสร้างที่โดดเด่นเมื่อเทียบกับที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1 - 1.5$  ซึ่งน่าจะมาจากที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 0.75$  เป็นตำแหน่งที่ไม่ได้ห่างจากปากทางออกของเจ็ตมากนักทำให้โครงสร้างของเจ็ตเพิ่งจะเริ่มก่อตัวดังนั้นจึงมีหลายโครงสร้างที่โดดเด่นในตำแหน่งนี้ เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  รูปที่ 7.5(ข) พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ก็มีลักษณะไม่แตกต่างจากกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมมากนัก (JICF) คือที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 0.75$  จะมีความชันน้อยกว่าที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1 - 1.5$  เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% รูปที่ 7.5(ค) จะทำให้พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ต่างจากกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่  $r_m = 2\%$  คือ ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode มีความชันใกล้เคียงกัน แสดงว่า เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% จะทำให้พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode มีเสถียรภาพเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream

จากการพิจารณาการพัฒนาตัวของพลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode สรุปได้ว่า กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  จะมีพลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนว downstream อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% จะทำให้พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนว downstream หรือ พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode มีเสถียรภาพเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream นั่นเอง

รูปที่ 7.6 แสดงพลังงานสะสม (Accumulative energy) ต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  และทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น พบว่า พลังงานสะสมของทุกกรณีมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode แรก ๆ เช่น ทุกกรณีที่ 50% ของพลังงานสะสม ใช้จำนวน Mode เพียงแค่ 5% ของ



จำนวน Mode ทั้งหมด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ พลังงานครึ่งหนึ่งของพลังงานทั้งหมดจะถูกแสดงโดย 5% แรกของจำนวน Mode ทั้งหมด นั่นคือ กระบวนการ POD สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในเรื่องของการทำ โมเดลแบบน้อยมิติ (low-dimensional model) ได้



## บทที่ 8

### ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ )

#### ต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง

#### กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ ) ต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางในกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง จากที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.1 ข้อแตกต่างของการใส่อนุภาคติดตามการไหลในแต่ละวิธี คือ การวัดสนามความเร็วด้วย SPIV ที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้นทำให้สนามความเร็วที่วัดได้นั้นเป็นความเร็วสนาม (field velocity) ซึ่งเป็นสนามความเร็วที่มีความเร็วไม่เท่ากับศูนย์ทั้งในบริเวณเจ็ตและในบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ดังสมการที่ 5.1 และเมื่อพิจารณาความเร็วปั่นป่วนในกรณีนี้ คือ ความเร็วสนามปั่นป่วน ดังนั้นโครงสร้างและระดับพลังงานที่ได้จากกระบวนการ POD จะเป็นทั้งส่วนที่มาจากเจ็ตและส่วนที่มาจากกระแสลมขวาง อย่างไรก็ตามความเร็วปั่นป่วนในกระแสลมขวางนั้นไม่ได้เป็นการไหลปั่นป่วน (turbulence) ในแง่ที่ว่าไม่มี random fluctuation ของวอร์ทิซิตี ดังนั้นพลังงานการไหลปั่นป่วนในกรณีนี้ที่มาจากส่วนของกระแสลมขวางจะไม่ใช่พลังงานการไหลปั่นป่วนที่แท้จริง สำหรับรายละเอียดของเนื้อหาในบทนี้ในหัวข้อ 8.1 จะกล่าวถึงผลของ  $r_m$  ต่อโครงสร้างความเร็วเฉลี่ย (POD Mode 0) และสำหรับหัวข้อ 8.2 ถึง 8.5 จะกล่าวถึงผลของ  $r_m$  ต่อโครงสร้างและระดับพลังงานที่ได้จากกระบวนการ POD

#### 8.1 ผลของ $r_m$ ต่อโครงสร้างความเร็วเฉลี่ย (POD Mode 0)

รูปที่ 8.1 แสดงการกระจายตัวของความเร็วสนามเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติ โดยเส้น contour แสดงความเร็วสนามเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติตามแนวแกน  $x$  ( $V_x/u_{cf}$ ) และเวกเตอร์ในระนาบแสดงความเร็วสนามเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติตามแนวแกน  $y$  และ  $z$  ( $\vec{V}_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/u_{cf}$ ) ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง

กรณี JICF ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  พบว่า โครงสร้างของ  $V_x$  จะมี Local peak คล้ายโครงสร้างรูปไต (kidney shape) และบริเวณที่อยู่ใต้โครงสร้างรูปไตนี้จะเป็นบริเวณที่มีความเร็วต่ำ อีกทั้งยังพบบริเวณที่ความเร็วต่ำกว่า 0 (จากรูป คือ บริเวณในวงรีสีขาว) หรือมีการไหลย้อนกลับในบริเวณที่อยู่ใต้โครงสร้างรูปไต สำหรับโครงสร้างของ  $V_{yz}$  จะมีลักษณะคล้าย CVP และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่  $x/rd = 0.75-1.5$  พบว่า โครงสร้างโดยรวมของทั้ง  $V_x$  และ  $V_{yz}$  ยังคงมีลักษณะคล้ายเดิม คือ โครงสร้างรูปไต และ CVP ตามลำดับ อย่างไรก็ตามที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75-1.5$  จะไม่พบบริเวณที่เกิดการไหลย้อนกลับ

เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  พบว่า โครงสร้างโดยรวมของทั้ง  $V_x$  และ  $V_{yz}$  ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) คือ โครงสร้างโดยรวมของทั้ง  $V_x$  และ  $V_{yz}$  ยังคงมีลักษณะคล้ายเดิม โดยยังคงเป็นโครงสร้างรูปไต และ CVP ตามลำดับ นอกจากนี้ที่  $x/rd = 0.5$  ก็พบบริเวณที่เกิดการไหลย้อนกลับเช่นเดียวกัน

เมื่อเพิ่มปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  พบว่า โครงสร้างโดยรวมของ  $V_x$  จะยกตัวสูงขึ้นในแนว transverse อย่างชัดเจน และสำหรับโครงสร้างของ  $V_{yz}$  จะมีลักษณะเป็น CVP เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  เพียงแต่โครงสร้างของ  $V_x$  จะยกตัวสูงกว่า รวมถึงจุดศูนย์กลางของ vortex ก็ยกตัวสูงกว่า หรือ CVP มีการทะลุทะลวงสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  อย่างไรก็ตามจะพบบริเวณที่เกิดการไหลย้อนกลับเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream โครงสร้างรูปไตในโครงสร้างของ  $V_x$  นั้นจะสลายตัวไปเร็วกว่าเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$

## 8.2 การพัฒนาตัวของโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญของกรณี JICF, $r_m = 2\%$ และ $r_m = 4\%$

การวิเคราะห์โครงสร้าง POD Mode และระดับพลังงาน (Energy) รวมไปถึงการพล็อตกราฟของกรณีสื่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวางจะมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีการสื่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น อย่างไรก็ตามจากที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า โครงสร้างและระดับพลังงานจะรวมทั้งส่วนที่มาจากเจ็ตและส่วนที่มาจากกระแสลมขวาง โดยระดับพลังงานในที่นี้ คือ เปอร์เซ็นต์ Turbulent kinetic energy ของทั้งเจ็ตและกระแสลมขวางของ Mode นั้นต่อ Turbulent kinetic energy ของทั้งเจ็ตและกระแสลมขวางของจำนวน Mode ทั้งหมด รูปที่ 8.2(ก) - (ค) แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ สำหรับการสื่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตกระแสลมขวาง

### ▪ กรณีที่ไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) รูปที่ 8.2(ก)

POD Mode 1 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  โครงสร้างมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe บริเวณตรงกลางเจ็ตและมี Lobe 2 lobe เล็กอยู่บริเวณด้านล่าง โดยที่ Lobe บริเวณตรงกลางเจ็ตจะโดดเด่นกว่า Lobe บริเวณด้านล่าง เมื่อเจ็ตพัฒนาไปที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  พบว่า Lobe บริเวณตรงกลางเจ็ตพัฒนาตัวมีขนาดใหญ่ขึ้นและขยายออกตามแนว spanwise มากขึ้น และสำหรับ Lobe เล็กที่อยู่บริเวณด้านล่างนั้นก็พัฒนาตัวขยายขนาดใหญ่ขึ้นเช่นเดียวกันอีกทั้งยังมีความโดดเด่นเช่นเดียวกับ Lobe บริเวณตรงกลางเจ็ต

POD Mode 2 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  โครงสร้างโดยรวมมีลักษณะคล้ายโครงสร้างใน Mode 1 คือ Lobe 2 lobe บริเวณตรงกลางเจ็ตและมี Lobe 2 lobe เล็กอยู่บริเวณด้านล่าง โดยที่ Lobe บริเวณตรง

กลางเจ็ทจะโดดเด่นกว่า Lobe บริเวณด้านล่าง และเมื่อเจ็ทพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  พบว่า Lobe บริเวณตรงกลางเจ็ทพัฒนาตัวมีขนาดใหญ่ขึ้น และสำหรับ Lobe เล็กที่อยู่บริเวณด้านล่างก็พัฒนาตัวให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นเดียวกันอีกทั้งยังมีความโดดเด่นเช่นเดียวกับ Lobe บริเวณตรงกลางเจ็ทอีกด้วย

POD Mode 3 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  โครงสร้างมีลักษณะเป็น Lobe 1 lobe อยู่บริเวณตรงกลาง และเมื่อเจ็ทพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  โครงสร้างจะเริ่มมีลักษณะคล้าย Jet shear Layer

- **กรณีที่มีเจ็ทควบคุม  $r_m = 2\%$  รูปที่ 8.2(ข)**

โดยรวมของโครงสร้างทั้ง POD Mode 1, 2 และ 3 ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  โครงสร้างมีลักษณะคล้ายกับกรณีไม่เจ็ทควบคุม (JICF)

- **กรณีที่มีเจ็ทควบคุม  $r_m = 4\%$  รูปที่ 8.2(ค)**

POD Mode 1 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  โครงสร้างมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe ใหญ่บริเวณตรงกลางเจ็ท และมี Lobe 2 lobe เล็กอยู่บริเวณด้านล่าง โดยที่ Lobe บริเวณตรงกลางเจ็ทจะโดดเด่นกว่า Lobe ที่อยู่บริเวณด้านล่าง เมื่อเจ็ทพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  พบว่า ทั้ง Lobe บริเวณตรงกลางและด้านล่างนั้นพัฒนามีขนาดใหญ่ขึ้น อีกทั้ง Lobe บริเวณด้านล่างเริ่มมีความโดดเด่นมากขึ้นเมื่อเทียบกับ Lobe บริเวณตรงกลางเจ็ท อย่างไรก็ตามโครงสร้างโดยรวมมีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักตลอดตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  แสดงว่าโครงสร้าง POD Mode 1 นี้มีเสถียรภาพเมื่อเจ็ทพัฒนาตัวไปตาม downstream

### 8.3 ผลของ $r_m$ ต่อโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญ

รูปที่ 8.3(ก) - (ค) แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างของ POD Mode 1, 2 และ 3 ตามลำดับระหว่างกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการไหลในภาคตัดตามการไหลทั้งเจ็ทและกระแสลมขวาง

พิจารณาโครงสร้างของ POD Mode 1 รูปที่ 8.3(ก) เมื่อมีเจ็ทควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  พบว่า โครงสร้างโดยรวมมีลักษณะคล้ายกัน คือ มี Lobe 2 lobe บริเวณตรงกลางเจ็ทและมี Lobe 2 lobe บริเวณด้านล่าง

พิจารณาโครงสร้างของ POD Mode 2 รูปที่ 8.3(ข) เมื่อมีเจ็ทควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  พบว่า โครงสร้างไม่ได้เปลี่ยนแปลงจากกรณีไม่มีเจ็ทควบคุม (JICF) ไปมากนัก ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น  $4\%$  พบว่า โครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน คือ เปลี่ยนเป็นโครงสร้างลักษณะคล้ายกับ Jet shear layer ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  และ  $x/rd = 1 - 1.5$

#### 8.4 ผลของ $r_m$ ต่อการกระจายตัวของระดับพลังงาน

รูปที่ 8.4 แสดงการกระจายตัวของระดับพลังงาน ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง พบว่า กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  โดยส่วนใหญ่ระดับพลังงานของแต่ละ Mode ในช่วง Mode 1-10 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่น ๆ แสดงว่า ที่ตำแหน่งนี้ระดับพลังงานจะกระจายไปใน Mode หลัง ๆ มากกว่าเมื่อเทียบกับตำแหน่งใน downstream อื่น ๆ ซึ่งจะเห็นความชัดเจนมากขึ้นเมื่อพิจารณาการพัฒนาตัวของพลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ในส่วนถัดไป

#### 8.5 ผลของ $r_m$ ต่อพลังงานสะสม (Accumulative energy)

รูปที่ 8.5(ก) – (ค) แสดงการพัฒนาตัวของพลังงานสะสม (Accumulative energy) ต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode เมื่อฉีดพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง พบว่า ในกรณีที่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) รูป 8.5(ก) พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  จะมีความชันน้อยกว่าที่ตำแหน่งอื่น ๆ ใน downstream ( $x/rd = 0.75-1.5$ ) แสดงว่า ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  ระดับพลังงานจะกระจายไปใน Mode หลัง ๆ หรือมีโครงสร้าง POD Mode หลายโครงสร้างที่โดดเด่นในตำแหน่งนี้เมื่อเทียบกับที่ตำแหน่งอื่น ๆ ชี้แนะได้ว่าน่าจะมีสาเหตุมาจากที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  เป็นตำแหน่งที่ไม่ได้ห่างจากปากทางออกของเจ็ดมากนักทำให้โครงสร้างของเจ็ดเพียงจะเริ่มก่อตัวตั้งนั้นจึงมีหลายโครงสร้างที่โดดเด่นในตำแหน่งนี้ และเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  รูปที่ 8.5(ข) พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ก็มีลักษณะไม่แตกต่างจากกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมมากนัก (JICF) คือที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  จะมีความชันน้อยกว่าที่ตำแหน่งอื่น ๆ ใน downstream ( $x/rd = 0.75-1.5$ ) เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% รูปที่ 8.5(ค) จะทำให้พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ต่างจากกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่  $r_m = 2\%$  คือ ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5-1.5$  พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode มีความชันใกล้เคียงกัน แสดงว่า เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% จะทำให้พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode มีเสถียรภาพเมื่อฉีดพัฒนาตัวไปตาม downstream

จากการพิจารณาการพัฒนาตัวของพลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode สรุปได้ว่า กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  จะมีพลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode เปลี่ยนแปลงไป เมื่อฉีดพัฒนาตัวไปตามแนว downstream แต่เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% ทำให้พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปเมื่อฉีดพัฒนาตัวไปตามแนว downstream หรือ พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode มีเสถียรภาพเมื่อฉีดพัฒนาตัวไปตาม downstream นั่นเอง

รูปที่ 8.6 พลังงานสะสม (Accumulative energy) ต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode กรณี JICF ,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  และทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง พบว่า พลังงานสะสมของทุกกรณีมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode แรก ๆ เช่น ทุกกรณีที่ 50% ของพลังงานสะสม ใช้จำนวน Mode เพียงแค่ 5% ของจำนวน Mode ทั้งหมด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ พลังงานครึ่งหนึ่งของพลังงานทั้งหมดจะถูกแสดงโดย 5% แรกของจำนวน Mode ทั้งหมด นั่นคือ กระบวนการ POD สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในเรื่องของการทำโมเดลแบบน้อยมิติ (low-dimensional model) ได้



## บทที่ 9

### การเปรียบเทียบโครงสร้างและระดับพลังงานระหว่างกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหล เฉพาะเจ็ตเท่านั้นกับกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 1 รวมถึงระดับพลังงานระหว่างกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้นกับกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง โดยที่ความแตกต่างของแต่ละกรณี มีดังนี้ สำหรับกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง จะทำให้โครงสร้าง POD Mode 1 และระดับพลังงานที่ได้จากกระบวนการ POD นั้นมาจากเจ็ตเท่านั้น ไม่รวมกระแสลมขวาง ในขณะที่กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง จะทำให้โครงสร้าง POD Mode 1 และระดับพลังงานที่ได้นั้นมาจากทั้งส่วนของเจ็ตและกระแสลมขวาง รวมอยู่ด้วย นอกจากนั้นแล้วเมื่อตำแหน่ง  $x$  เข้าใกล้บริเวณขอบเจ็ต (หรือเข้าใกล้บริเวณของกระแสลมขวางบริสุทธิ์) ความเร็วเจ็ตปั่นป่วน (กรณีใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ตเท่านั้น) จะมีค่าสูงกว่าค่าความเร็วสนามปั่นป่วน (กรณีใส่อนุภาคทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง)

การพล็อตกราฟสำหรับโครงสร้าง POD Mode 1 ในบทนี้ก็มีลักษณะเช่นเดียวกับบทที่ผ่านมา กล่าวคือ บริเวณที่เป็นสีเข้ม (น้ำเงินเข้มหรือแดงเข้ม) จะมีความโดดเด่นกว่าบริเวณที่เป็นสีอ่อน นอกจากนั้นจะเลือกแสดงความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต ( $\phi_{ij}$ ) เป็นเส้น contour สีดำทั้งหมด 4 เส้นด้วยกัน คือ  $\phi_{ij}$  เท่ากับ 0.01, 0.25, 0.50 และ 0.75

#### 9.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างที่มีบทบาทสำคัญที่สุด (POD Mode 1)

รูปที่ 9.1(ก) แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 1 พร้อมทั้งระดับพลังงานของกรณี JICF ระหว่างการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น (ซ้าย) กับกรณใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง (ขวา) เมื่อพิจารณาโครงสร้าง POD Mode ตามแนวแกน  $x$  พบว่า ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  โครงสร้างมีลักษณะคล้ายกันทั้ง 2 กรณี คือ มี Lobe 2 lobe อยู่บริเวณตรงกลางและมี Lobe 2 lobe อยู่บริเวณด้านล่าง นอกจากนั้นยังพบว่า กรณีใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ตเท่านั้น Lobe บริเวณด้านล่างจะมีความโดดเด่นใกล้เคียงกับ Lobe บริเวณตรงกลาง ในขณะที่กรณีใส่อนุภาคทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง Lobe บริเวณด้านล่างจะโดดเด่นน้อยกว่า Lobe บริเวณตรงกลาง แสดงว่า โครงสร้าง Lobe บริเวณด้านล่างนี้ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  จะมาจากเจ็ตเป็นหลัก อย่างไรก็ตามเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  พบว่า ในกรณีใส่อนุภาคทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง Lobe บริเวณด้านล่างจะโดดเด่นพอ ๆ กับ Lobe บริเวณตรงกลางเจ็ต แสดงว่า เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream กระแสลมขวางทำให้โครงสร้าง Lobe บริเวณด้านล่างมีความโดดเด่นมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างระหว่างกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหล พบว่า โครงสร้างโดยรวมยังคงมีลักษณะคล้ายกันตลอดตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  คือ มี Lobe 2 lobe อยู่บริเวณตรงกลางและมี Lobe 2 lobe อยู่บริเวณด้านล่าง อย่างไรก็ตามมีสิ่งที่แตกต่างกัน คือ Lobe

บริเวณด้านล่างของกรณีใสนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสลมขวางจะมีขนาดใหญ่กว่าจนบางส่วนนั้นอยู่ในบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ เพื่อความเข้าใจในแง่มุมนี้มากขึ้นจะสมมติเหตุการณ์ว่าถ้าไม่มีเจ็ด มีแต่กระแสลมขวางบริสุทธิ์ โครงสร้างของ POD Mode ก็จะไม่เห็นโครงสร้างใด ๆ เนื่องจากกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไม่มีการปั่นป่วนของความเร็ว ดังนั้นเมื่อมีเจ็ดแล้วเห็นโครงสร้าง POD Mode ในส่วนที่อยู่นอกบริเวณเจ็ดดังเช่น Lobe บริเวณด้านล่างของ POD Mode 1 ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  ของกรณีใสนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสลมขวาง แสดงว่า เจ็ดเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางในบริเวณด้านล่างของเจ็ดเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนหรือเริ่มมีส่วนร่วมกับการไหลปั่นป่วนของเจ็ด ซึ่งน่าจะเกี่ยวข้องกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสมซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 10

เมื่อพิจารณาเวกเตอร์ในระนาบที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  พบว่า กรณีใสนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้นเวกเตอร์ในระนาบบริเวณด้านล่าง (บริเวณด้านล่างของ  $\phi_{ij}$  ระหว่าง 0.01 และ 0.75) จะโดดเด่นน้อยกว่าเวกเตอร์ในบริเวณตรงกลางเจ็ด ในขณะที่กรณีใสนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสลมขวาง เวกเตอร์บริเวณด้านล่าง (บริเวณ  $\phi_{ij}$  ระหว่าง 0.01 และ 0.75) จะมีความโดดเด่นขึ้นมาใกล้เคียงกับเวกเตอร์บริเวณตรงกลางเจ็ด แสดงว่า เวกเตอร์ในระนาบบริเวณด้านล่างที่ตำแหน่งนี้จะมาจากกระแสลมขวางเป็นหลัก และเมื่อเจ็ดพัฒนาไปที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  พบว่าเวกเตอร์ในระนาบบริเวณด้านล่างยังคงมาจากกระแสลมขวางเป็นหลักเช่นเดียวกับที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  ซึ่งน่าจะเกี่ยวข้องกับประเด็นข้างต้น คือ เจ็ดเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางที่บริเวณด้านล่างของเจ็ดเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนหรือเริ่มมีส่วนร่วมกับการไหลปั่นป่วนของเจ็ด

รูปที่ 9.1(ข) แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 1 พร้อมทั้งระดับพลังงานของกรณี  $r_m = 2\%$  ระหว่างการใสนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น (ซ้าย) กับการใสนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสลมขวาง (ขวา) พบว่า มีลักษณะเช่นเดียวกับกรณี JICF คือ 1) ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  โครงสร้างมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe บริเวณตรงกลางเจ็ดและ Lobe 2 lobe บริเวณด้านล่างทั้งกรณีใสนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้นและกรณีใสนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสลมขวาง 2) เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream กระแสลมขวางทำให้โครงสร้าง Lobe บริเวณด้านล่างมีความโดดเด่นมากขึ้น 3) เวกเตอร์ในระนาบบริเวณด้านล่างจะมาจากกระแสลมขวางเป็นหลักตลอดตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  4) เจ็ดเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางที่บริเวณด้านล่างของเจ็ดเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนหรือเริ่มมีส่วนร่วมกับการไหลปั่นป่วนของเจ็ด

รูปที่ 9.1(ค) แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 1 พร้อมทั้งระดับพลังงานของกรณี  $r_m = 4\%$  ระหว่างการใสนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น (ซ้าย) กับการใสนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสลมขวาง (ขวา) ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  จะเห็นได้ว่า โครงสร้างมีลักษณะที่แตกต่างกัน คือ กรณีใสนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้นจะมีโครงสร้างลักษณะเป็น Lobe 2 lobe ใหญ่ล้อมรอบ Lobe 2 lobe เล็กบริเวณตรงกลาง ในขณะที่กรณีใสนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสลมขวางโครงสร้าง Lobe 2 lobe ใหญ่ที่ล้อมรอบนั้นมีความโดดเด่นน้อยมากเมื่อเทียบกับ Lobe 2 lobe ที่อยู่บริเวณตรงกลางและ Lobe 2 lobe ที่อยู่บริเวณ



ด้านล่าง (ในรูปที่ 9.3 คือ คล้ายกับว่า Lobe 2 lobe ใหญ่ที่ล้อมรอบหรือโครงสร้างในบริเวณเส้น contour  $\phi_{ij}$  ระหว่าง 0.25 และ 0.75 นั้นหายไป) แสดงว่า โครงสร้าง Lobe 2 lobe ที่โดดเด่นน้อยมากของวิธีการใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสมขวางนี้ในกรณีนี้ ชี้แนะได้น่าจะเป็นโครงสร้างที่มาจากเจ็ดเป็นหลัก โดยโครงสร้างที่คล้ายว่าหายไปนี้น่าจะมีสาเหตุมาจาก ความเร็วปั่นป่วนของแต่ละกรณีนั้นมีความแตกต่างกัน ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 5 คือ เมื่อจุดใด ๆ บนระนาบเข้าใกล้บริเวณขอบเจ็ด (หรือเข้าใกล้บริเวณของกระแสมขวางบริสุทธิ์) ความเร็วเจ็ดปั่นป่วน (กรณีใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้น) จะมีค่าสูงกว่าค่าความเร็วสนามปั่นป่วน (กรณีใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง) เป็นเหตุให้กรณีใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้นในบริเวณของความน่าจะเป็นสะสมระหว่าง 0.25 กับ 0.75 นั้นมีความเร็วเจ็ดปั่นป่วนสูงเมื่อเทียบกับกรณีใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง ดังนั้นโครงสร้าง Lobe ในบริเวณนี้จึงมีความโดดเด่นขึ้นมา (ในกรณีของใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้น) อีกทั้งยังแสดงว่า การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้นนอกจากจะได้โครงสร้างของ POD Mode และระดับพลังงานที่มาจากเจ็ดเท่านั้น ยังทำให้สามารถเห็นโครงสร้างที่มาจากเจ็ดได้อย่างชัดเจนอีกด้วย นอกจากนั้นแล้วยังพบประเด็นลักษณะเช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  คือ 1) เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream กระแสมขวางทำให้โครงสร้าง Lobe บริเวณด้านล่างมีความโดดเด่นมากขึ้นและ 2) เจ็ดเหนี่ยวนำให้กระแสมขวางที่บริเวณด้านล่างของเจ็ดเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนหรือเริ่มมีส่วนร่วมกับการไหลปั่นป่วนของเจ็ด

## 9.2 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของระดับพลังงาน

รูปที่ 9.2(ก) – (ค) การเปรียบเทียบการพัฒนาตัวของกระจายตัวของระดับพลังงานระหว่างการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้นกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวางของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ พบว่า ทุกกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ระดับพลังงานใน Mode 1 ของกรณีใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้นจะมีค่าน้อยกว่ากรณีใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง เป็นผลมาจากระดับพลังงานของกรณีใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสมขวางจะรวมพลังงานที่เกิดจากความปั่นป่วนทั้งส่วนของเจ็ดและส่วนของกระแสมขวางด้วย แสดงว่า ในโครงสร้าง POD Mode 1 เจ็ดเหนี่ยวนำให้กระแสมขวางที่บริเวณด้านล่างของเจ็ดเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนจึงเป็นสาเหตุให้ระดับพลังงานสูงขึ้นใน Mode 1 เมื่อเทียบกับกรณีใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้น ซึ่งจะสอดคล้องกับการวิเคราะห์โครงสร้าง POD Mode 1 ในหัวข้อที่ 9.1

## 9.3 การเปรียบเทียบพลังงานสะสม

รูปที่ 9.3 แสดงการเปรียบเทียบการพัฒนาตัวของพลังงานสะสม (Accumulative energy) ที่เปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ต่าง ๆ ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ ระหว่างการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้นกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง พบว่า กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  พลังงานสะสมมีการ

เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream ทั้งกรณีใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้นและกรณีใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง อย่างไรก็ตามเมื่อคิดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% ทำให้พลังงานสะสมไม่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream ทั้งกรณีใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้นและกรณีใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง แสดงว่า การคิดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 4%$  ทำให้ระดับพลังงานใน Mode ต่าง ๆ นั้นมีเสถียรภาพเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream ทั้งกรณีจากระดับพลังงานมาจากความปั่นป่วนของเจ็ดเท่านั้นและกรณีจากระดับพลังงานมาจากความปั่นป่วนของทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง



## บทที่ 10

### ผลของ $r_m$ ต่อการเหนี่ยวนำการผสมและกลไกการเหนี่ยวนำการผสม

เนื่องจากแรงจูงใจส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ คือ การวิเคราะห์ผลของ  $r_m$  ต่อโครงสร้างการไหลเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของการเหนี่ยวนำการผสมอย่างมากจากการศึกษาในอดีต ดังนั้นในบทนี้จึงกล่าวถึง 10.1 การนิยามและการประเมินหาการเหนี่ยวนำการผสม รวมถึงปัญหาของการหาการเหนี่ยวนำการผสมในอดีตที่ผ่านมา 10.2 ผลของ  $r_m$  ต่อการเหนี่ยวนำการผสม 10.3 กลไกการเหนี่ยวนำการผสม

#### 10.1 การนิยามการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment, $E$ )

อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (volumetric entrainment ratio) ของเจ็ตในกระแสมวลขวางเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงความสามารถของเจ็ตที่เหนี่ยวนำกระแสมวลขวางรอบข้างเข้ามาผสมกับตัวเจ็ตเมื่อเจ็ตพัฒนาไปในตำแหน่งตาม downstream ใด ๆ ซึ่งจะนิยามจากอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรขณะใด ๆ (instantaneous) ของส่วนผสมของของไหลที่มาจากเจ็ตหรือส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) ที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางใด ๆ ( $Q_j$ ) และอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ต ( $Q_o$ ) ดังนี้

$$E = \frac{Q_j}{Q_o} \quad (10.1)$$

ซึ่งในกรณีฉีดเจ็ตควบคุมนั้น  $Q_o$  จะรวมอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตควบคุมด้วย ( $Q_{cj}$ ) นั่นคือ  $E = Q_j / (Q_o + Q_{cj})$  โดยที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรขณะใด ๆ ของส่วนผสมของเจ็ตที่หน้าตัดใด ๆ ( $Q_j$ ) สามารถหาได้จากอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ไหลผ่านเฉพาะหน้าตัดที่มีส่วนผสมของเจ็ต ( $A_j$ ) ในระนาบตัดขวาง  $x$  ใด ๆ ดังสมการ

$$Q_j(x, t) = \int_{A_j(x, t)} V_x(\vec{x}, t) dA \quad (10.2)$$

โดยที่  $Q_j(x, t)$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรขณะใด ๆ ในระนาบตัดขวาง  $x$  เฉพาะที่ไหลผ่านหน้าตัดที่มีส่วนผสมของเจ็ต ซึ่งจะไม่รวมอัตราการไหลเชิงปริมาตรในบริเวณที่เป็นกระแสมวลขวางบริสุทธิ์ (หรือบริเวณที่ไม่พบส่วนผสมของเจ็ต) และ  $V_x(\vec{x}, t)$  คือ สนามความเร็วตามแนวแกน  $x$  ขณะใด ๆ ( $\vec{x}$  หมายถึงเวกเตอร์ตำแหน่ง (position vector)) และ  $A_j(x, t)$  คือ พื้นที่ขณะใด ๆ ที่มีส่วนผสมของเจ็ตในระนาบตัดขวาง  $x$

เนื่องจากเจ็ตเป็นการไหลที่มีลักษณะปั่นป่วน (turbulence) และไม่คงตัว (unsteadiness) ดังนั้นขอบเขตของเจ็ตและพื้นที่ที่มีส่วนผสมของเจ็ต ( $A_j$ ) มีความไม่คงตัวด้วยเช่นเดียวกัน เป็นเหตุให้  $A_j(x, t)$  ในสมการที่ 10.2 จึงมีความซับซ้อนในการหาหรือระบุทั้งในด้านการนิยามและการทดลอง

### 10.1.1 ปัญหาของการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง

จากที่กล่าวมาข้างต้นว่า  $A_j(x, t)$  ในสมการที่ 10.2 มีความซับซ้อนและไม่ชัดเจนทั้งในด้านการนิยามและการทดลอง งานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาสำหรับการศึกษาเรื่องการเหนี่ยวนำการผสมจึงใช้ปริมาณทางกายภาพอื่น ๆ มาอ้างอิงถึงความสามารถของการเหนี่ยวนำการผสมแทน เช่น อัตราการลดลง (decay rate) ของปริมาณสเกลาร์ คือ ความเข้มข้นของสาร, อัตราการลดลงของความเร็วหรืออุณหภูมิ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการวัดวิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องกำหนดค่า threshold หรือการใช้ปริมาณต่าง ๆ เช่น ปริมาณ turbulence intensity, ปริมาณวอร์ทิสิตี, ความเข้มข้นของปริมาณสเกลาร์ ในการระบุบริเวณเจ็ตหรือขอบเขตของเจ็ต ( $A_j$ ) หรือเพื่อแยกบริเวณเจ็ตออกจากบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ทำให้ผลการวิเคราะห์การเหนี่ยวนำการผสมที่ได้จะแตกต่างกันโดยขึ้นกับการเลือกค่าของ threshold เป็นเหตุให้ค่าการเหนี่ยวนำการผสมที่ได้จะไม่ถูกต้องแม่นยำนัก

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ใช้ SPIV โดยเลือกใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ทำให้สามารถระบุขอบเขตเจ็ตและแยกแยะบริเวณเจ็ตออกจากบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ณ ขณะใด ๆ หรือ  $A_j(x, t)$  ได้อย่างชัดเจนและตลอดเวลาดังที่กล่าวโดยละเอียดในบทที่ 5

### 10.1.2 การเหนี่ยวนำการผสมเฉลี่ยตามเวลา

เนื่องจาก SPIV ที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง วัดความเร็วในระนาบได้เป็นความเร็วเจ็ต ดังสมการที่ 5.2 ทำให้อัตราการไหลเชิงปริมาณขณะใด ๆ ของส่วนผสมของเจ็ตที่หน้าตัดใด ๆ  $Q_j(x, t)$  ในสมการที่ 10.2 จะเปลี่ยนเป็น

$$Q_j(x, t) = \int_{A_j(x, t)} V_x(\vec{x}, t) dA = \int_{A(x)} V_{j,x}(\vec{x}, t) dA \quad (10.3)$$

และในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะค่าเฉลี่ยตามเวลา ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned}
\bar{Q}_j(x) &= \frac{1}{T} \int_0^T Q_j(t) dt \\
&= \frac{1}{T} \int_0^T \left( \int_{A(x)} V_{j,x}(\bar{x}, t) dA \right) dt \\
&= \int_{A(x)} \left( \frac{1}{T} \int_0^T V_{j,x}(\bar{x}, t) dt \right) dA \\
\bar{Q}_j(x) &= \int_{A(x)} \bar{V}_{j,x}(\bar{x}) dA \tag{10.4}
\end{aligned}$$

โดยที่  $\bar{(\cdot)} = \frac{1}{T} \int_0^T (\cdot) dt$  คือ การเฉลี่ยตามเวลา ดังนั้น  $\bar{V}_{j,x}(\bar{x})$  คือ ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน  $x$  เฉลี่ยตามเวลา และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเฉลี่ยตามเวลาจะได้เป็น

$$\bar{E}(x) = \frac{\bar{Q}_j(x)}{Q_o} \tag{10.5}$$

โดยที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ต  $Q_o$  สมมติให้เป็นการไหลแบบคงตัว (steady) และสำหรับกรณีที่ไม่ดีเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงจะต้องรวมอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตควบคุมด้วยเป็น

$$\bar{E}(x) = \frac{\bar{Q}_j(x)}{Q_o + Q_{cj}} \tag{10.5}$$

ซึ่ง  $Q_{cj}$  จะขึ้นกับปริมาณ  $r_m$  ด้วยดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.4

## 10.2 ผลของ $r_m$ ต่อการเหนี่ยวนำการผสม

รูปที่ 10.1 แสดงการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $E$ ) ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  เมื่อเจ็ตพัฒนาไปตามแนว downstream พบว่า โดยทั่วไปของทุกกรณี จะมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนว downstream เนื่องจากเจ็ตได้เหนี่ยวนำกระแสลมขวางที่อยู่รอบข้างเข้ามาผสมกับตัวเจ็ต นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  จะมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่เจ็ตควบคุม (JICF) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีไม่เจ็ตควบคุม (JICF) โดยเพิ่มขึ้นถึง 45% ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  เมื่อ

เทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) โดยค่าการเหนี่ยวนำการผสมของแต่ละกรณีในแต่ละตำแหน่งสรุปไว้ในตารางที่ 10.1

### 10.3 แนวคิดเกี่ยวกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสม

รูปที่ 10.2 แสดงโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไร้มิติระหว่างกรณี JICF ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  ของการใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสลมขวาง โดย contour แสดงความความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไร้มิติตามแนวแกน  $x$  ( $V_x/u_{cf}$ ) และเวกเตอร์ในระนาบแสดงความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไร้มิติตามแนวแกน  $y$  และ  $z$  ( $\vec{V}_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/u_{cf}$ ) และมีเส้น contour สีดำ แสดง ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด  $\phi_{ij}$  เท่ากับ 0.01, 0.25, 0.50 และ 0.75

พิจารณาความเร็วในระนาบที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  ในบริเวณระนาบสมมาตร  $z/rd = 0$  จะเห็นว่าความเร็วมีทิศ  $+y$  สูง หรือเป็นบริเวณที่มีความเร็วสูงในทิศทางพุ่งขึ้นลักษณะคล้ายกับเป็นช่อง ดังนั้นจะเรียกบริเวณนี้ว่า “ช่องแนวตั้ง (vertical channel)” กล่าวคือ บริเวณที่มีความเร็วพุ่งขึ้นมาจากบริเวณขอบเจ็ดด้านล่างหรือบริเวณที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด  $\phi_{ij}$  ต่ำ (บริเวณที่จะพบส่วนผสมของกระแสลมขวาง  $\phi_{cf}$  สูง) ทะลุขึ้นไปสู่ตัวเจ็ดในบริเวณที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด  $\phi_{ij}$  สูง หรือ กระแสลมขวางในบริเวณด้านล่างของเจ็ดจะพุ่งขึ้นไปตามช่องแนวตั้งเข้าไปผสมกับตัวเจ็ด นอกจากนี้ยังพบว่า ช่องแนวตั้งจะอยู่ในตำแหน่งระหว่างคู่ของ vortex แสดงว่า ช่องแนวตั้งนี้เป็นผลมาจากโครงสร้างของ CVP โดย CVP จะหมุนเอากระแสลมขวางรอบข้างเข้ามาผ่านบริเวณด้านล่างของเจ็ด และนำเข้าไปสู่ช่องแนวตั้งทะลุผ่านขึ้นไปผสมกับตัวเจ็ด และเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามแนว downstream พบว่า ช่องแนวตั้งยังคงมีตลอดตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  แสดงว่า CVP จะเป็นตัวเหนี่ยวนำและขับเคลื่อนทำให้ช่องแนวตั้งนี้ยังคงอยู่ได้เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามแนว downstream

เมื่อประกอบกับการพิจารณาการเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 1 ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  (รูปที่ 9.1(ก)) จากที่กล่าวในหัวข้อ 9.1 คือ เจ็ดเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางที่บริเวณด้านล่างของเจ็ดเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนหรือเริ่มมีส่วนร่วมกับการไหลปั่นป่วนของเจ็ด และจากการกระจายตัวของระดับพลังงาน (รูปที่ 9.2(ก)) จะเห็นว่าระดับพลังงานของการใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสลมขวางมากกว่ากรณีใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้น แสดงว่า ระดับพลังงานที่สูงขึ้นนี้มาจากความปั่นป่วนของกระแสลมขวางในบริเวณด้านล่างของเจ็ด ชี้แนะได้ว่า CVP จะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางในบริเวณด้านล่างของเจ็ดให้เกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนหรือเริ่มมีส่วนร่วมกับการไหลปั่นป่วนของเจ็ด และ CVP จะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางในบริเวณด้านล่างของเจ็ดนี้ขึ้นไปผสมกับตัวเจ็ดผ่านทางช่องแนวตั้ง (บริเวณที่มีความเร็วในแนว traverse ทิศพุ่งขึ้นสูง) ซึ่งกลไกการเหนี่ยวนำของ CVP ที่ทำให้เกิดช่องแนวตั้งที่มีความเร็วในแนว traverse ทิศพุ่งขึ้นสูงนำของไหลในกระแสลมขวางที่บริเวณด้านล่างของเจ็ดขึ้นไปผสมกับตัวเจ็ดนี้ น่าจะเป็นกลไกการเหนี่ยวนำการผสมหลักกลไกหนึ่งของเจ็ดในกระแสลมขวางในระนาบตัดขวาง

รูปที่ 10.3 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติระหว่างกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1$  ของการใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสมุมขวาง โดย contour แสดงความความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติตามแนวแกน  $x$  ( $V_x/u_{cf}$ ) และเวกเตอร์ในระนาบแสดงความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติตามแนวแกน  $y$  และ  $z$  ( $\vec{V}_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/u_{cf}$ ) และมีเส้น contour สีดำ แสดง ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด  $\phi_{ij}$  เท่ากับ 0.01, 0.25, 0.50 และ 0.75 พบว่า เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% จะทำให้โครงสร้างโดยรวมยกตัวสูงขึ้นในแนว transverse หรือกล่าวโดยเฉพาะเจาะจง คือ จุดศูนย์กลางของ CVP จะยกตัวสูงกว่า หรือ CVP ทะลุทะลวงขึ้นไปสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  ทำให้ผลกระทบจากการจำกัดการเหนี่ยวนำการผสมโดยผนังที่พื้น (wall blocking) น้อยลงเมื่อเทียบกับกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  และกรณีที่ไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $E$ ) ของกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 4\%$  สูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$



## บทที่ 11

### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ดหลัก ( $r_m$ ) ที่มีต่อโครงสร้างที่มีพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุด (most energetic turbulent structures, turbulent kinetic energy) ของเจ็ดในกระแสมวลขวางโดยใช้ POD

การทดลองเจ็ดในกระแสมวลขวางในงานวิจัยนี้ทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) เท่ากับ 4.2 ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของกระแสมวลขวาง ( $Re_{cf}$ ) เท่ากับ 5,700 และตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ด ( $Re_j$ ) เท่ากับ 24,000 รูปแบบความเร็วเริ่มต้นที่ปากทางออกของเจ็ดเป็นแบบ Fully-developed turbulent pipe flow ใกล้เคียงกับรูปร่างความเร็วแบบ  $1/n$  power law ที่มี  $n$  ประมาณ 7.3 ความไม่สม่ำเสมอของกระแสมวลขวาง ( $2S_{u_{cf}}/u_{cf}$ ) วัดที่ตำแหน่ง  $x/d = -5$  เท่ากับ 0.05 สำหรับชั้นขอบเขตของกระแสมวลขวางซึ่งวัดที่ตำแหน่ง  $x/d = -2$  เป็นแบบ turbulent ที่มี  $n = 5.2$  และมีความหนาชั้นขอบเขตไร้มิติ ( $\delta_{99\%}/d$ ) เท่ากับ 1.6 สำหรับกรณีเจ็ดควบคุมจะฉีดที่ตำแหน่ง  $\theta = \pm 135^\circ$  ที่ปริมาณ  $r_m$  เท่ากับ 2% และ 4% ซึ่งสนามความเร็วในงานวิจัยนี้วัดโดยใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV)

เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ดหรือโครงสร้างที่มีส่วนผสมของเจ็ด ไม่รวมส่วนที่มาจากกระแสมวลขวางบริสุทธิ์ และโครงสร้างที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ของเจ็ดและกระแสมวลขวาง ในงานวิจัยนี้จึงใช้เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้ง 2 วิธี คือ 1) ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น และ 2) ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมวลขวาง

นอกจากนั้นแล้วการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมวลขวาง ทำให้สามารถระบุขอบเขตเจ็ดและแยกแยะบริเวณเจ็ดออกจากบริเวณกระแสมวลขวางบริสุทธิ์ ณ ขณะใด ๆ ทำให้สามารถประเมินอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากกว่าวิธีการในอดีตที่ผ่านมาอีกด้วย รวมไปถึงสามารถหาความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่จุดใด ๆ ( $\phi_{ij}$ ) ได้

#### ▪ ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่จุดใด ๆ ( $\phi_{ij}$ )

การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้นทำให้สามารถหาความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่จุดใด ๆ ได้ ซึ่งเมื่อหาความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่จุดใด ๆ แล้วก็จะทำให้สามารถหาความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสมวลขวางบริสุทธิ์ที่จุดใด ๆ ( $\phi_{cf}$ ) ได้ด้วย เนื่องจากเป็นคอมพลีเมนต์ซึ่งกันและกันโดยมีค่าเท่ากับ  $1 - \phi_{ij}$

จากการพิจารณาโครงสร้างความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่จุดใด ๆ (รูปที่ 5.3) จะเห็นว่า ทุกกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/d$  จะมีค่า  $\phi_{ij}$  สูงที่บริเวณกึ่งกลางเจ็ด และมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเข้าไปใกล้บริเวณขอบเจ็ด จนมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่ออยู่ในบริเวณของกระแสมวลขวาง



บริสุทธิ์ อย่างไรก็ตามสำหรับโครงสร้างความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด สรุไปได้ว่า เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% จะทำให้โครงสร้างโดยรวมยกตัวสูงขึ้นในแนว transverse เมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  นอกจากนั้นยังพบโครงสร้างในบริเวณด้านล่างของเจ็ดที่เพิ่มขึ้นมา และยังคงเสริมให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ดกับกระแสลมขวางที่บริเวณด้านล่างของเจ็ดมากขึ้นด้วย

#### ▪ ผลของ $r_m$ ต่อโครงสร้างเฉลี่ย (POD Mode 0)

จากการพิจารณาโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยสำหรับการไหลอนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้น (รูปที่ 7.1) กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  พบว่า มีโครงสร้างของ  $V_x$  เป็นลักษณะคล้ายโครงสร้างรูปไต และโครงสร้างของ  $V_{yz}$  จะมีลักษณะคล้าย CVP อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  พบว่า โครงสร้างของ  $V_x$  จะยกตัวสูงขึ้นในแนว transverse อย่างชัดเจน อีกทั้งยังพบโครงสร้างที่มีความเร็วต่ำเพิ่มขึ้นมาในบริเวณด้านล่างของเจ็ดด้วย และเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream โครงสร้างรูปไตจะสลายตัวไปเร็วกว่าเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  สำหรับโครงสร้างของ  $V_{yz}$  ยังคงมีลักษณะเป็น CVP เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  แต่มีสิ่งที่แตกต่างกัน คือ จุดศูนย์กลางของ vortex จะยกตัวสูงขึ้น หรือโครงสร้าง CVP จะยกตัวสูงกว่าหรือทะลุทะลวงขึ้นไปสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  โดยกรณีที่ไหลอนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสลมขวางก็ให้ผลสนับสนุนในลักษณะเช่นเดียวกัน (รูปที่ 8.1)

#### ▪ ผลของ $r_m$ ต่อโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3

จากการพิจารณาการพัฒนาตัวของโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการไหลอนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้น (รูปที่ 7.2) ซึ่งจะเป็นโครงสร้างที่มีส่วนผสมของเจ็ดเท่านั้นหรือโครงสร้างที่มีพลังงานปั่นป่วนมาจากเจ็ดเท่านั้น สรุไปได้ว่า เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  ทำให้โครงสร้าง POD Mode 1 เริ่มมีเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% นอกจากจะทำให้โครงสร้างทั้ง POD Mode 1 มีเสถียรภาพมากขึ้นแล้วยังทำให้ POD Mode 2 และ 3 มีเสถียรภาพอีกด้วย

จากการพิจารณาการเปรียบเทียบโครงสร้างของ POD Mode 1, 2 และ 3 ระหว่างกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการไหลอนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้น (รูปที่ 7.3) สรุไปได้ว่า โดยทั่วไปแล้วเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 4\%$  จะไปกระตุ้นให้โครงสร้างทั้ง POD Mode 1, 2 และ 3 มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ

$r_m = 2\%$  โดย POD Mode 1 จะเปลี่ยนจากโครงสร้างที่มี Lobe 2 lobe บริเวณตรงกลางและ Lobe 2 lobe บริเวณด้านล่างเป็นโครงสร้าง Lobe 2 lobe ใหญ่ล้อมรอบ Lobe 2 lobe เล็ก โดยทางของ Lobe 2 lobe ใหญ่จะยาวลงมาถึงบริเวณด้านล่างของเจ็ต สำหรับ POD Mode 2 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5-1$  จะเปลี่ยนจากโครงสร้างที่เป็น Lobe 2 lobe ล้อมรอบ Lobe 2 lobe เล็กบริเวณตรงกลางเป็นโครงสร้าง Jet shear layer และสำหรับ POD Mode 3 ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5-1$  จะเปลี่ยนจากโครงสร้าง Jet shear layer เป็นโครงสร้างที่กระจายอยู่ทั่วเจ็ต ซึ่งจะเห็นว่าโครงสร้าง Jet shear layer ของกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  จะอยู่ใน POD Mode 3 แต่กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 4\%$  โครงสร้าง Jet shear layer จะเปลี่ยนเป็น POD Mode 2 แสดงว่า การฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 4\%$  จะส่งเสริม (promote) โครงสร้าง Jet shear layer ให้โดดเด่นมากขึ้น

#### ▪ ผลของ $r_m$ ต่อระดับพลังงาน

จากการพิจารณาการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของระดับพลังงาน สำหรับการใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ตเท่านั้น (รูปที่ 7.4) กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  มีการกระจายตัวของระดับพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนว downstream อย่างไรก็ตาม เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% ทำให้การกระจายตัวของระดับพลังงานไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนว downstream หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เมื่อเพิ่มปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% จะทำให้การกระจายตัวของระดับพลังงานมีเสถียรภาพเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream ซึ่งให้ผลสอดคล้องเช่นเดียวกับเสถียรภาพของโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 ของกรณี  $r_m = 4\%$

จากการพิจารณาการพัฒนาตัวของพลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode สำหรับการใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ตเท่านั้น (รูปที่ 7.5) สรุปได้ว่า กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  มีพลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนว downstream อย่างไรก็ตาม เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% ทำให้พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนว downstream หรืออีกนัยหนึ่งคือ เมื่อเพิ่มปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% จะทำให้พลังงานสะสมต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode มีเสถียรภาพเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream ซึ่งให้ผลสอดคล้องเช่นเดียวกับเสถียรภาพของการกระจายตัวของระดับพลังงานและเสถียรภาพของโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 ของกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ตเท่านั้น

- ผลของการเปรียบเทียบ POD Mode 1 ระหว่างการใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้นกับการใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง

จากการพิจารณาการเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 1 พร้อมทั้งระดับพลังงานของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ระหว่างการใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้นกับการใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง (รูปที่ 9.1(ก) – (ค) ตามลำดับ) สรุปได้ว่า กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  ของทั้ง 2 วิธีการใส่อนุภาค มีโครงสร้าง POD Mode 1 ลักษณะคล้ายกัน คือ เป็น Lobe 2 lobe อยู่บริเวณตรงกลางและ Lobe 2 lobe อยู่บริเวณด้านล่าง และเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream กระแสมขวางจะทำให้โครงสร้าง Lobe บริเวณด้านล่างโดดเด่นมากขึ้น นอกจากนี้เวกเตอร์ในระนาบบริเวณด้านล่างจะมาจากกระแสมขวางเป็นหลักตลอดช่วง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% จะทำให้โครงสร้าง POD Mode 1 ของวิธีการใส่อนุภาคเฉพาะเจ็ดเท่านั้น มีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe ใหญ่ที่ล้อมรอบ lobe บริเวณตรงกลาง ในขณะที่โครงสร้าง POD Mode 1 ของวิธีการใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง จะมีลักษณะเป็น Lobe 2 lobe บริเวณตรงกลาง และ Lobe 2 lobe บริเวณด้านล่าง ซึ่งจะเห็นว่า Lobe 2 lobe ใหญ่ที่ล้อมรอบ lobe บริเวณตรงกลางจะโดดเด่นน้อยมากเมื่อเทียบกับ Lobe ที่อยู่บริเวณตรงกลางและด้านล่าง จึงชี้แนะได้ว่า Lobe ที่ล้อมรอบนั้นจะเป็นโครงสร้างที่มาจากเจ็ดเป็นหลัก

นอกจากนั้นแล้วยังพบว่า ทุกกรณี (JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$ ) เจ็ดเหนี่ยวนำให้กระแสมขวางในบริเวณด้านล่างของเจ็ดเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนหรือเริ่มมีส่วนร่วมกับการไหลปั่นป่วนของเจ็ดชี้แนะได้ว่าน่าจะเกี่ยวข้องกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสม

#### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- กลไกการเหนี่ยวนำการผสมและผลของ  $r_m$  ต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

จากการพิจารณาโครงสร้าง POD Mode 1 (รูปที่ 9.1), การกระจายตัวของระดับพลังงาน (รูปที่ 9.2) และโครงสร้างความเร็วเฉลี่ย (รูปที่ 10.2) ที่ได้จากทั้ง 2 วิธีการใส่อนุภาค พบว่า โครงสร้างที่มีส่วนผสมของเจ็ด กล่าวโดยเฉพาะเจาะจงคือ โครงสร้าง CVP จะเหนี่ยวนำกระแสมขวางบริสุทธิ์ในบริเวณด้านล่างของเจ็ดให้เกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนหรือเริ่มมีส่วนร่วมกับการไหลปั่นป่วนของเจ็ด และจะเหนี่ยวนำกระแสมขวางจากบริเวณด้านล่างของเจ็ดนี้ขึ้นไปผสมกับตัวเจ็ดผ่านทางช่องแนวตั้ง (vertical channel) ที่มีความเร็วในแนว traverse ทิศพุ่งขึ้นสูง ที่อยู่ระหว่างคู่ vortex ของ CVP โดย CVP จะเป็นตัวเหนี่ยวนำและขับเคลื่อนทำให้ช่องแนวตั้งนี้ยังคงอยู่ได้เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามแนว downstream ผลการศึกษาชี้แนะว่า กลไกการเหนี่ยวนำของ CVP ที่ทำให้เกิดช่องแนวตั้งที่มีความเร็วในแนว traverse ทิศพุ่งขึ้นสูงนำของไหลในกระแสมขวางที่บริเวณด้านล่างของเจ็ดขึ้นไปผสมกับตัวเจ็ดนี้ น่าจะเป็นกลไกการเหนี่ยวนำการผสมหลักกลไกหนึ่งของเจ็ดในกระแสมขวางในระนาบตัดขวาง

จากการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $E$ ) ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  (รูปที่ 10.1) สรุปได้ว่า เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m$  สูงขึ้นเป็น 4% จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  สันนิษฐานว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 4\%$  นั้นมีสาเหตุหนึ่งมาจากโครงสร้าง CVP ของกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 4\%$  ทะลุทะลวงขึ้นไปสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$  (รูปที่ 10.3) ทำให้ผลกระทบจากการจำกัดการเหนี่ยวนำการผสมโดยผนังที่พื้น (wall blocking) น้อยลงเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ปริมาณ  $r_m = 2\%$



## รายการอ้างอิง

- [1] Bunyajitradulya, A. (2011). Manipulation and control of the entrainment of a jet in crossflow, TRF RMU5080047 Research Project Report, Thailand Research Fund (TRF).
- [2] Bunyajitradulya, A. and Sathapornnanon, S. (2005). Sensitivity to tab disturbance of the mean flow structure of nonswirling jet and swirling jet in crossflow, *Physics of Fluids*, Vol. 17, No. 4, pp. 045102.
- [3] Chaikasetsin, S., Sushewakhul, T., Panusittikorn, P. and Bunyajitradulya, A. (2014). Effects of azimuthal control jets to main jet mass flowrate ratio on the entrainment of a jet in crossflow, The Fifth Thai Society of Mechanical Engineers International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 5), 17-19 December 2014, The Empress, Chiang Mai, Thailand.
- [4] Cortelezzi, L. and Karagozian, A. R. (2001). On the formation of the counter-rotating vortex pair in transverse jet, *J. Fluid Mech.*, Vol. 446, No. 11, pp. 347-373.
- [5] Denev, J. A., Fröhlich, J. and Bockhorn, H. (2009). Large eddy simulation of a swirling transverse jet into a crossflow with investigation of scalar transport, *Physics of Fluids*, Vol. 21, pp. 015101.
- [6] Eroglu, A. and Breidenthal, R. E. (2001). Structure, penetration, and mixing of pulsed jets in crossflow, *AIAA J.*, Vol. 39, No. 3, pp. 417-423.
- [7] Fric, T. F. and Roshko, A. (1994). A Vortical structure in the wake of a transverse jet, *J. Fluid Mech.*, Vol. 279, No. 11, pp. 1-47.
- [8] Kamotani, Y. and Greber, I. (1972). Experiments on a turbulent jet in a cross flow, *AIAA J.*, Vol. 10, No. 11, pp. 1425-1429.
- [9] Kavsaoglu, M. S. and Schetz, J. A. (1989). Effects of swirl and high turbulence on a jet in a crossflow, *J. Aircraft*, Vol. 26, No. 6, pp. 539-546.
- [10] Korn Sri, P., Pimpin, A. and Bunyajitradulya, A. (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 (ME-NETT 23), 4-7 November 2009, Chiang Mai.
- [11] Lim, T. T., New, T. H. and Luo, S. C. (2001). On the development of large-scale structures of a jet normal to a cross flow, *Physics of Fluids*, Vol. 13, No. 3, pp. 770-775.
- [12] Limdumrongtum, P. (2007). Swirling jet in crossflow: A flow visualization study, Master thesis. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.
- [13] Limdumrongtum, P., Chongsiripinyo, K., Nontiwatwanich, P., Pimpin, A. and Bunyajitradulya, A. (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 (ME-NETT 23), 4-7 November 2009, Chiang Mai.
- [14] Liscinsky, D. S., True, B. and Holdeman, J. D. (1995). Effects of initial conditions on a single jet in crossflow, *AIAA Paper No. 95-2998*.

- [15] M'Closkey, R. T., King, J. M., Cortelezzi, L. and Karagozian, A. R. (2002). The actively controlled jet in crossflow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 452, pp. 325-335.
- [16] Meyer, K. E., Pedersen, J. M. and ÖZcan, O. (2007). A turbulent jet in crossflow analysed with proper orthogonal decomposition, *J. Fluid Mech.*, Vol. 583, pp. 199-227.
- [17] Muppidi, S. and Mahesh, K. (2005a). Velocity field of a round turbulent transverse jet, Proceedings of, Williamsburg, Virginia, pp. 829-834
- [18] Muppidi, S. and Mahesh, K. (2005b). Study of trajectories of jets in crossflow using direct numerical simulations, *J. Fluid Mech.*, Vol. 530, pp. 81-100.
- [19] Narayanan, S., Barooah, P. and Cohen, J. M. (2003). Fluid dynamics of highly pitched and yawed Jets in Crossflow, *AIAA J.*, Vol. 41, No. 12, pp. 2316-2330.
- [20] Niederhaus, C. E., Champagne, F. H. and Jacobs, J. W. (1997). Scalar transport in a swirling transverse jet, *AIAA J.*, Vol. 35, No. 11, pp. 1697-1704.
- [21] Pratte, B. D. and Baines, W. D. (1967). Profiles of round turbulent jet in crossflow, *J. Hydraulics Division*, Vol. 93 (November 1967), pp. 53-64.
- [22] Sau, A., Sheu, T., Hwang, R. and Yang, W. (2004). Three-dimensional simulation of square jets in cross-flow, *Phys. Rev. E*, Vol. 69, CID 066302.
- [23] Smith, S. H. and Mungal, M. G. (1998). Mixing, structure and scaling of the jet in crossflow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 357, pp. 83-122.
- [24] Srimekharat, A. and Bunyajitradulya, A. (2013). Effects of Azimuthal Control Jets on the structures of a Jet in Crossflow by Means of Proper Orthogonal Decomposition, The Fourth Thai Society of Mechanical Engineers International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 4), 16-18 October 2013, Pattaya, Chonburi, Thailand.
- [25] Wangjiraniran, W. (2001). Effects of the swirl number on mixing characteristics of a heated swirling jet in crossflow, Master thesis. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.
- [26] Wangjiraniran, W. and Bunyajitradulya, A. (2001). Temperature distribution in Non-zero circulation swirling jet in crossflow, Proceedings of The Fifteenth Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand, Bangkok, Thailand, 28-30 November 2001, Vol. 1, pp. TF104-TF116
- [27] Witayaprapakorn, T. (2013). Effects of azimuthal control jets on the entrainment of a jet in crossflow, Master thesis. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
- [28] Witayaprapakorn, T. and Bunyajitradulya, A. (2013). Effects of azimuthal control jets on structure and entrainment of a jet in crossflow, The Twenty-Seventh Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 27), 16-18 October 2013, Pattaya, Chonburi, Thailand.
- [29] Yingjaroen, T., Pimpin, A. and Bunyajitradulya, A. (2006). Evolution of mixing regions in jet and swirling jet in crossflow: An experimental study, Proceedings of The Twentieth Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand, Nakhon Ratchasima, Thailand, 18-20 October 2006, pp. TSF032
- [30] Yuan, L. L. and Street, R. L. (1998). Trajectory and entrainment of a round jet in crossflow, *Physics of Fluids*, Vol. 10, No. 9, pp. 2323-2335.

- [31] Yuan, L. L., Street, R. L. and Ferziger, J. H. (1999). Large-eddy simulation of a round jet in crossflow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 379, pp. 71-104.
- [32] Zaman, K. B. M. Q. and Foss, J. K. (1997). The effect of vortex generators on a jet in a crossflow, *Physics of Fluids*, Vol. 9, pp. 106-114.





ประมวลดาราง

จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์ในการทดลอง	ผลที่ได้
1	Pratte and Baines (1967)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาเส้นทาง, อัตราการลดลงตามแนวแกน และการขยายตัวของเจ็ต</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม</li> <li>ปากเจ็ตอยู่ติดกับแผ่นราบขนาดรัศมี 6 นิ้ว และสูงเหนือพื้น 8 นิ้ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r_v = \frac{u_j}{u_{cf}}</math> เท่ากับ 5, 15, 25 และ 35</li> <li><math>d</math> เท่ากับ 0.158, 0.248 และ 0.362 นิ้ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>เส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตสามารถมีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันได้ถ้าอัตราส่วนความเร็วต่าง ๆ กันเมื่อสเกลด้วย <math>rd</math></li> <li>อัตราส่วนของความกว้างต่อความสูงของเจ็ตในบริเวณ Vortex zone เป็นค่าคงที่ที่ประมาณ 1.4 ในแต่ละหน้าตัดตามแนวแกนเจ็ต ซึ่งแสดงถึง Similarity</li> <li>ใน Vortex zone อัตราการกระจายจะถูกรบกวนโดย Turbulent mixing และการพาของ Vortex</li> </ul>
2	Kamotani and Greber (1972)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาเส้นทาง และคุณลักษณะการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วและอุณหภูมิในอุโมงค์ลม</li> <li>ใช้ Hot-wire ในการวัดความเร็วและใช้ Thermocouple ในการวัดอุณหภูมิ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r_m = \frac{\rho u_j^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2}</math> เท่ากับ 15.3 และ 59.6</li> <li><math>T_j - T_{cf}</math> เท่ากับ 0, 75 และ 320 °F</li> <li><math>Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu}</math> เท่ากับ 2,800 - 4,200</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>อัตราส่วนโมเมนต์ (<math>r_m</math>) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิ</li> <li>อัตราส่วนความหนาแน่น (<math>\rho_j / \rho_{cf}</math>) มีผลต่อเส้นทางของอุณหภูมิเล็กน้อยแต่มีผลต่อเส้นทางของความเร็ว</li> <li>เส้นทางของอุณหภูมิอยู่ต่ำกว่าเส้นทางของความเร็วที่ <math>r_m</math> เดียวกัน</li> <li>ปริมาณ Turbulence ของเจ็ตเพิ่มขึ้นตาม <math>r_m</math></li> </ul>
3	Fric and Roshko (1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม</li> <li>ใช้ Smoke-wire ในการศึกษารูปแบบของการไหล และใช้ Hot-wire ในการวัดความเร็ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 2 - 10</math></li> <li><math>Re_j = \frac{u_j d}{\nu}</math> เท่ากับ 7,600 - 11,400</li> <li><math>Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu}</math> เท่ากับ 3,800 - 11,400</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>จำแนกโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง 4 ประเภท ได้แก่ Horseshoe vortices, jet shear layer vortices, Wake vortices และ Counter-rotating pair (CVP)</li> <li>Wake vortices เกิดจากการโค้งตัวของเจ็ต ทำให้เกิด Adverse pressure gradient ที่พื้นด้านข้างของเจ็ตและเกิด "Separation events" ภายในชั้นขอบเขตของผนังที่พื้น และกลายเป็นโครงสร้างของ Wake ด้านหลังเจ็ต</li> </ul>

ตารางที่ 2.1 สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาคุณลักษณะและโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์ในการทดลอง	ผลที่ได้
4	Kelso <i>et al.</i> (1996)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาโครงสร้าง Vortical structure ของเจ็ตในกระแสผสมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลมและอุโมงค์น้ำ</li> <li>ใช้การวัดสีและ Smoke-wire ในการศึกษารูปแบบของการไหลและใช้ Flying-hotwire ในการศึกษาความเร็ว</li> </ul>	$r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 2 - 6$ $\text{Re}_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu}$ เท่ากับ 440 - 6,200	<ul style="list-style-type: none"> <li>ค่าความถี่ Strouhal Number (St) ซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนความเร็ว (<math>r_v</math>) นั้นสอดคล้องกับความเร็วที่ได้จาก "Separation events"</li> <li>CVP เกิดจากการแยกตัวของเจ็ตภายในท่อ นอกจากนี้การโค้งตัวของ Vortex ring เนื่องจากผลของกระแสผสมขวาง และ Vorticity ที่เกิดจากผนังของท่อต่างเป็นองค์ประกอบที่ช่วยในการเกิด CVP</li> <li>Wake vortices เกิดจากการแยกตัวของเจ็ตที่ผนังท่อ</li> </ul>
5	Smith and Mungal (1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาคุณลักษณะเส้นทางการผสมของเจ็ตในกระแสผสมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณ Scalar concentration ในอุโมงค์ลม</li> <li>ใช้เทคนิค Planar Laser-induced fluorescence (PLIF)</li> </ul>	$r_m = \left( \frac{\rho_j u_j^2}{\rho_d u_{cf}^2} \right)^{1/2}$ เท่ากับ 5 - 25 $\text{Re}_j = \frac{u_j d}{\nu}$ เท่ากับ 8,400 - 41,500	<ul style="list-style-type: none"> <li>เมื่อสเกลเส้นทางการเดินด้วย <math>rd</math> จะได้ลักษณะเส้นทางการเดินที่มีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกัน (Collapse) ที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการสเกลด้วย <math>d</math> หรือ <math>r^2 d</math></li> <li>Near field และ Far field มีจุดแบ่ง (branch point) อยู่ที่ <math>s = 0.3r^2 d</math> โดยที่ <math>s</math> คือ ระยะทางตามแนวแกนเจ็ตบนระนาบสมมาตร</li> <li>การก่อตัวของ CVP ใน Near field เป็นกลไกสำคัญที่ทำให้เจ็ตในกระแสผสมขวางผสมดีกว่าเจ็ตอิสระ (free jet)</li> </ul>
6	Yuan and Street (1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาเส้นทางการเดินและการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) ของเจ็ตในกระแสผสมขวาง</li> <li>ทำ Simulation โดยใช้ Large eddy simulation (LES) ในการศึกษา Scalar concentration</li> </ul>	$r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 2, 3, 3$ $\text{Re}_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu}$ เท่ากับ 1,050 และ 2,100	<ul style="list-style-type: none"> <li>เส้นทางการเดินของเจ็ตบนระนาบสมมาตรบริเวณห่างจากปากเจ็ตที่ <math>r_v</math> ต่างกัน มีลักษณะแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันโดยมีลักษณะเป็น Power law</li> <li>ปริมาณที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นทางการเดินเจ็ตแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ คือ           <ol style="list-style-type: none"> <li>บริเวณ Upstream ของบริเวณ Power law (ใกล้ปากทางออกของเจ็ต) พบว่า Pressure drag และ Turbulent intensity จะเป็นกลไกสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นทางการเดินเจ็ต</li> </ol> </li> </ul>

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์ในการทดลอง	ผลที่ได้
7	Yuan <i>et al.</i> (1999)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ใน Near field</li> <li>ทำ Simulation โดยใช้ Large eddy simulation (LES) ในการศึกษาปริมาณเฉลี่ย (mean) และผันผวน (fluctuation)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 2, 3, 3</math></li> <li><math>Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu}</math> เท่ากับ 1,050 และ 2,100</li> </ul>	<p>2. บริเวณ Power law พบว่า การดึงกระแสผสมขวางเข้าไปผสมในเจ็ตเป็นกลไกสำคัญที่มีหรือพลต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นทางเดินของเจ็ต</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>พบโครงสร้างของ Vertical structure ใน Near field ได้แก่ Hanging vortices, Spanwise vortices และ Vertical streaks</li> <li>เสนอว่า CVP เกิดจากการที่ Hanging vortices (ซึ่งเกิดจาก Skewed mixing layer ที่บริเวณขอบปากทางออกของเจ็ต) ได้รับผลของ Adverse pressure gradient ทำให้เกิดการ Breakdown จนกลายเป็น CVP และพัฒนาตัวตามเส้นทางเดินของเจ็ต</li> <li>Large-scale structure ของ JICF บริเวณ Jet shear layer vortices เป็นลักษณะของ Loops vortex ซึ่งไม่ได้เกิดจากการหมุนตัวของ Vortex rings แต่ Loop vortex เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Cylindrical vortex sheet หรือ Jet column</li> <li>ถือว่า CVP นั้นเกิดจากการพัฒนาตัวของ Vortex loop แทนที่จะเป็น Vortex ring เหมือนกับเจ็ตอิสระ</li> </ul>
8	Lim <i>et al.</i> (2001)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำการทดลองโดยศึกษา Large-scale structure ของเจ็ตในกระแสผสมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยใช้เทคนิค Flow visualization ซึ่งใช้ dye/alcohol mixture และ Fluorescent disodium dye</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 4.6</math></li> <li><math>Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu}</math> เท่ากับ 1,600</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ใน Near field นั้น Vortical structure มีการหมุนตัวขึ้นเป็น Vortex ring และกลายเป็น CVP ในที่สุด</li> <li>การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสผสมขวางใน Far field พบว่า สัดส่วนของกระแสผสมขวางที่เพิ่มขึ้นในบริเวณ downstream นั้นมาจาก CVP ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการเหนี่ยวนำกระแสผสมขวางเข้ามาผสมในเจ็ต</li> </ul>
9	Cortezzi and Karagozian (2001)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาก่อตัวและการพัฒนาตัวของ Vortical structure ซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่การก่อตัวของ CVP</li> <li>ใช้ 3D vortex element</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>D/2</math> เป็น Characteristic length</li> <li><math>D/2u_\infty</math> เป็น Characteristic time</li> <li><math>\delta/D = 0.5, 1, 2</math></li> <li><math>u_{jet}/u_\infty</math> เท่ากับ 2.5, 5.4 และ 10.8</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CVP นั้นเกิดจาก Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวจากผนังทางด้านข้างของปากทางออกของเจ็ต ไม่ได้เกิดขึ้นจาก Vortex ring</li> <li>พบ Wake vortices ในบริเวณ downstream</li> </ul>
10	Sau <i>et al.</i> (2004)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ใน Near field ของเจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยม</li> <li>ใช้ Direct numerical simulation (DNS) ในการทดลอง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>R_j = 255, 300</math></li> <li><math>r = 2.5, 3.5</math></li> <li><math>u = v = w = 0</math> ที่ผนัง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CVP นั้นเกิดจาก Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวจากผนังทางด้านข้างของปากทางออกของเจ็ต ไม่ได้เกิดขึ้นจาก Vortex ring</li> <li>พบ Wake vortices ในบริเวณ downstream</li> </ul>

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์ในการทดลอง	ผลที่ได้
11	Muppidi and Mahesh (2005a)	<ul style="list-style-type: none"> <li>การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ <ol style="list-style-type: none"> <li>การไหลแบบปั่นป่วนของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ไหลแบบราบเรียบด้วย DNS</li> <li>Two dimension ถูกใช้ในการแสดงการพัฒนาตัวภายในหน้าตัดของเจ็ตและการเกิด CVP โดยจะกำหนดให้สภาวะเริ่มต้นของการพัฒนาตัวในหน้าตัดของเจ็ตนั้นมีความแรงดันที่ (Pressure driven) และสภาวะสุดท้ายจะถูกกำหนดให้มีความเร็วคงที่ (Momentum driven) และใช้ Pressure เป็นพื้นฐานในการก่อตัวของ CVP</li> </ol> </li> </ul>	<p>การศึกษาส่วนที่ 1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>r_{eff} = \left(\frac{\rho_j}{\rho_\infty}\right)^{1/2}</math> เท่ากับ 5.7</li> <li><math>Re = 5,000</math></li> <li><math>\delta_{80\%} = 1.32d</math> ที่ปากทางออกของเจ็ต</li> <li><math>(\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2)</math> คือ Vorticity magnitude</li> <li><math>\frac{y}{r_{eff}d}</math> เท่ากับ 0.1, 0.5 และ 1.0</li> </ul> <p>การศึกษาส่วนที่ 2</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>v = v_j</math></li> <li><math>u = w = 0</math></li> <li><math>Re</math> เท่ากับ 1,000, 10,000 และ 100,000</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Horseshoe vortices ก่อตัวขึ้นทางด้าน upstream ซึ่งเป็นผลของการปฏิสัมพันธ์ของ Shear layer ที่พื้นที่กับเจ็ต</li> <li>การศึกษานี้มีความไม่สมมาตรตาม Center streamline และค่า Vorticity สูงนั้นอยู่ใกล้กับผนังของท่อและบริเวณลำเจ็ตบริเวณทางด้าน upstream ของเจ็ตจะสังเกตเห็น Vorticity ของกระแสลมขวางค่อนข้างสม่ำเสมอ</li> <li>บริเวณทางด้าน downstream จะปรากฏบริเวณที่มีค่าของ Vorticity ต่ำ</li> <li>การศึกษานี้ส่วนที่ 2 <ul style="list-style-type: none"> <li>เริ่มต้นเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ตนั้นจะเป็นเส้นโค้ง ในขณะที่สุดท้ายนั้นจะเปลี่ยนเป็นเส้นตรง ซึ่งอธิบายได้ว่าที่สภาวะเริ่มต้นนั้นเจ็ตจะเคลื่อนที่ด้วยความแรงดันที่ และในสภาวะสุดท้ายนั้นเจ็ตจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่</li> <li>CVP นั้นเกิดจาก Vorticity ใน Jet shear layer และแนวระนาบของเจ็ตนั้นไม่มีผลต่อการก่อตัวของ CVP</li> </ul> </li> </ul>
12	Muppidi and Mahesh (2005b)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลของรูปร่างความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออก และความหนาชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางต่อเส้นทางการของเจ็ต</li> <li>ศึกษาด้วย Direct numerical simulation (DNS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r = 1.52, 5.7</math></li> <li>รูปร่างความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออก คือ Parabolic และ Mean Turbulent</li> <li><math>\delta_{80\%}</math> เท่ากับ 0.44d, 1.32d และ 6.4d</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>เสนอพารามิเตอร์ตัวใหม่ในการสเกลเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ต คือ <math>h</math> ซึ่งนำผลของความหนาชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง และรูปร่างความเร็วที่ปากทางออกเชิงคณิตศาสตร์มาพิจารณาประกอบด้วย พบว่าเส้นทางการเคลื่อนที่สเกลด้วย <math>h</math> นั้นมีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันที่ตีความการสเกลด้วย <math>rd</math> หรือ <math>r^2d</math></li> </ul>

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์ในการทดลอง	ผลที่ได้
1	Zaman and Foss (1997)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลของการติด Vortex generators แบบ Tab รูปสามเหลี่ยมซึ่งฐานติดอยู่ที่ขอบปากเจ็ทมีมุมยอดเท่ากับ 90° โดยปากเจ็ทอยู่ในระดับเดียวกับพื้นของหน้าตัดทดสอบในอุโมงค์ลม</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วและ Vorticity ที่หน้าตัดตั้งฉากกับแนว Streamwise</li> <li>ใช้ Hot-wire anemometer ในการวัดความเร็ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>J = \left( \frac{\rho_j u_j^2}{\rho_d u_{cf}^2} \right)^2</math> เท่ากับ 2.1.1 และ 54.4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การติด Tab ด้านหน้าของปากเจ็ท จะส่งผลให้ Penetration depth ลดลง สันนิษฐานว่าเนื่องจากที่ด้านหน้าของปากเจ็ทมีความดันสถิตสูง ประกอบกับบริเวณผนังปากเจ็ทด้านในซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ติด Tab นั้นเป็นบริเวณที่มี Pressure gradient สูงที่เรียกว่า “Pressure hill” อีกด้วย จึงทำให้บริเวณที่ติด Tab นี้เป็น Primary source ของ Streamwise vorticity</li> <li>การติด Tab ด้านหลังของปากเจ็ท ไม่ค่อยส่งผลต่อ Penetration depth เนื่องจากบริเวณพื้นด้านหลังของปากเจ็ทมีความดันสถิตต่ำกว่ากรณีเจ็ทไม่หมุนควง (JICF)</li> </ul>
2	Bunyajitradulya and Sathapornmanon (2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลกระทบของการติด Tab ต่อโครงสร้าง Mean flow ของกรณีเจ็ทที่ไม่มีการหมุนควง (JICF) และกรณีเจ็ทที่มีการหมุนควง (SJICF) ของเจ็ทในกระแสแลมบ์ดา</li> <li>ใช้เจ็ทร้อนในการศึกษาโดยทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิของเจ็ทที่หน้าตัดตามตำแหน่งในแนว downstream</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>Sr = \frac{w_p}{u_j}</math> (Swirl ratio) เท่ากับ 0-0.8</li> <li><math>r = 4</math></li> <li><math>Re_j = 15,000</math></li> <li><math>Re_{cf} = 4,400</math></li> <li><math>\frac{\rho_j}{\rho_d} = 0.86</math></li> <li><math>Fr = \left[ \frac{(\rho_d - \rho_j)gd}{\rho_j \mu_j^2} \right]^{1/2}</math> เท่ากับ 0.02</li> <li>ติด Tab ที่ตำแหน่งรอบปากเจ็ท ทั้งหมด 8 ตำแหน่ง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>กรณีติด Tab ที่ Sr0-W และ Sr0-L การกระจายตัวของอุณหภูมิมีรูปร่างคล้ายกับกรณีที่ไม่ติด Tab คือ มีลักษณะเป็นรูปใบพัดที่สมมาตร</li> <li>กรณีติด Tab ที่ Sr0-PW(SW) พบว่า มีรูปร่างแตกต่างไปจากกรณีที่ไม่ติด Tab ซึ่งคล้ายคลึงกับ CVP น้อยลงมาก และความสัมพันธ์สูงขึ้นไปนอกจากนั้นการติด Tab ที่ตำแหน่งนี้จะส่งผลต่อโครงสร้างเจ็ทโดยรวมเป็นอย่างมากและค่อนข้างถาวร</li> <li>กรณีติด Tab ที่ Sr0-P(S) มีรูปร่างคล้ายรูปใบพัดที่ไม่สมมาตรและเจ็ทด้านที่ติด Tab นั้นจะมีอุณหภูมิโดยรวมต่ำกว่าและ Lobes จะอยู่ต่ำกว่า Lobes ด้านที่ไม่ติด Tab ซึ่งจะมีอุณหภูมิโดยรวมสูงกว่าและจะอยู่สูงกว่ามีลักษณะของโครงสร้างเป็นรูปจุดภาค</li> </ul>

ตารางที่ 2.2 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการติด Tab ต่อคุณลักษณะของเจ็ทในกระแสแลมบ์ดา

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์ในการทดลอง	ผลที่ได้
				<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ กรณีติด Tab ที่ <b>Sr0-PL(SL)</b> พบว่ามีรูปร่างคล้ายกับกรณี <b>Sr0-P(S)</b> แต่ขอบด้านกลางของ Lobe ด้านที่ติด Tab นั้นจะอยู่ต่ำกว่าด้านที่ไม่ติด Tab</li> <li>▪ กรณีติด Tab ที่ด้านข้างในทุกกรณี พบว่า จะทำให้รูปร่างของเงาไม่สมมาตร และ Lobe ด้านที่ติด Tab จะมีอนุกรมโดยรวมต่ำกว่า และขอบด้านกลางจะอยู่ตำแหน่งที่ต่ำกว่า Lobe ด้านที่ไม่ติด Tab</li> </ul> <p>กรณีเจ็ดหมื่นควง (SJCF)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ กรณีติด Tab ที่ <b>P,PW,W,SW</b> พบว่ามีการพัฒนาตัวในลักษณะที่แตกต่างจากกรณีไม่ติด Tab ค่อนข้างมาก</li> <li>▪ กรณีติด Tab ที่ <b>S,SL,L,PL</b> พบว่าเจ็ดหมื่นมีรูปร่างการกระจายตัวคล้ายกับกรณีไม่ติด Tab ทั้งนี้กรณีนี้ที่ติด Tab ที่ตำแหน่ง <b>S,SL</b> พบว่ามีรูปร่างคล้ายกันมากและทั้งสองกรณียังพบลักษณะ Core ที่ผิดปกติเป็นสองส่วนในบางหน้าตัดอีกด้วย</li> </ul>

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์ในการทดลอง	ผลที่ได้
1	M'closkey <i>et al.</i> (2002)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาเจ็ตในกระแสผสมขวางโดยการกระตุ้นเป็นจังหวะ (pulsing) ด้วยเสียงจากลำโพง</li> <li>ใช้ Liquid paraffin solution 1 ในการสร้างควันให้กับเจ็ต</li> <li>แสงสว่างสีขาวติดตั้งไว้ด้านบนหน้าตัดทดสอบด้วยกำลังไฟขนาด 500 Watt</li> <li>ใช้กล้องในการถ่ายภาพเพื่อบันทึกผลการทดลอง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r_j = 2.58</math></li> <li><math>R_c = 1,500</math></li> <li>ความถี่ เท่ากับ 40-1,640 Hz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Random excitation ไม่ได้ช่วยปรับปรุงการผสม</li> <li>ค่า Amplitude สูงสุดของเจ็ตที่มีการตอบสนองจากการกระตุ้นด้วยความถี่ 73.5 Hz และการตอบสนองของแกว่งมีมันตัวของเจ็ตจะหยุดหลังจากที่ความถี่นั้นเกิด 100 Hz</li> <li>ค่าที่เหมาะสมของการพุ่งทะลุผ่านจากการกระจายตัวของเจ็ตในกระแสผสมขวางโดยการกระตุ้นด้วย Square wave จะอยู่ที่ Subhamonics ของค่าความถี่ธรรมชาติของ Vortex shedding ของเจ็ต</li> </ul>
2	Narayanan <i>et al.</i> (2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษา Dynamic และการควบคุมเจ็ตในกระแสผสมขวางด้วย Spinning valve actuator กระตุ้นด้วยความถี่ระหว่าง 100-1,000 Hz</li> <li>ใช้เทคนิค Mie scattering visualization</li> <li>ใช้กล้อง NAC ที่มีความเร็วสูง (200 Frame/sec)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r = 6</math></li> <li><math>Re_j = 5 \times 10^3</math></li> <li><math>Re_{sf} = 2.75 \times 10^4</math></li> <li><math>\delta / D &lt; 0.3</math></li> <li><math>0.012 &lt; Sr_D &lt; 0.2</math> (เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การกระตุ้นที่มีความถี่ต่ำ พบว่า Vortice จะเพิ่มขึ้นในขณะที่เจ็ตที่พุ่งออกและได้คงตัวตามกระแสผสมขวาง และสำหรับการกระตุ้นที่มีความถี่สูงจะช่วยให้เกิดการกระจายตัวของเจ็ตที่ปากทางออกเพิ่มสูงขึ้น</li> <li>การกระตุ้นที่มีความถี่ต่ำจะช่วยให้การผสมระหว่างเจ็ตกับกระแสผสมขวางสูงกว่าการกระตุ้นที่มีความถี่สูง</li> <li>Flow จะมีความถี่สูงที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของเจ็ต และมีความถี่ต่ำลงที่ระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ตตามทิศทางกระแสผสมขวาง</li> <li>กรณีการกระตุ้นด้วยความถี่ 650 Hz และ 1,500 Hz นั้นจะมีการ Entrainment มากกว่าเจ็ตที่ถูกกระตุ้น</li> </ul>

ตารางที่ 2.3 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการกระตุ้นเจ็ตเป็นจังหวะ (pulse) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสผสมขวาง

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์ในการทดลอง	ผลที่ได้
1	Kavsoğlu and Schetz (1989)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลของ Initial swirl และ High Turbulence ที่มีต่อคุณลักษณะการผสมของเจ็ตในกระแสผสมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาการกระจายตัวของความดันสถิตยที่พื้นผิวหน้าตัดทดสอบ บริเวณรอบปากทางออกของเจ็ต และปริมาณความเร็วที่ระนาบตัดขวางตามแนว Streamwise</li> <li>ใช้ Yaw probe ในการวัดความเร็ว</li> <li>ใช้การฉีดอากาศเข้าด้านข้างในการทำให้เจ็ตเกิดการหมุนควง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r_j = 2.2, 4, 8</math></li> <li><math>Sr = \frac{w_k}{u_j} = 0.4, 0.58</math></li> <li>Turbulence เท่ากับ 3% และ 10-16%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>เจ็ตที่มี High Turbulence มีผลทำให้ความดันสถิตยที่พื้นผิวของหน้าตัดทดสอบบริเวณรอบปากทางออกของเจ็ตต่ำกว่าความดันบรรยากาศ และยังลด Penetration ของเจ็ตอีกด้วย</li> <li>เจ็ตที่มี Swirl เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันสถิตยที่พื้นผิวของหน้าตัดทดสอบบริเวณรอบปากทางออกของเจ็ต มีความไม่สมมาตรเพิ่มขึ้น และจะลด Penetration ของเจ็ตอีกด้วย</li> <li>ผลของ Swirl ดังกล่าวจะชัดเจนเมื่อเจ็ตมีอัตราส่วนความเร็วต่ำ, High Turbulence</li> </ul>
2	Niederhaus <i>et al.</i> (1997)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลของ Swirl ที่มีต่อคุณลักษณะการผสมของเจ็ตในกระแสผสมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณ Scalar concentration ในอุโมงค์น้ำ</li> <li>ใช้เทคนิค Planar Laser-induced fluorescence (PLIF)</li> <li>ใช้ใบพัดกวาดอากาศเพื่อให้เกิดการหมุนควง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r_j = 4.9 - 11.1</math></li> <li><math>Sn = \frac{G_\theta}{G_u R} = 0 - 0.17</math></li> <li><math>Re_j = 1.3 \times 10^4</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ลักษณะของ CVP เปลี่ยนจากรูปร่างสมมาตรรูป kidney ในกรณีที่ไม่มีการหมุนควง เป็นลักษณะรูปคล้ายลูกศร</li> <li>เจ็ตที่มีการหมุนควงทำให้ Penetration ลดลงเล็กน้อย และไม่มีผลต่อการลดลงของ Maximum mean concentration ของเจ็ตในช่วงที่ทำการทดลอง</li> </ul>
3	Wangjiramanian and Bunyajitradulva (2001)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตที่หมุนควงแบบ Non-Zero circulation</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาคุณลักษณะของการผสม และการพัฒนาตัวของเจ็ตด้วยการวัดปริมาณอุณหภูมิในแนวและหน้าตัดตามแนว downstream</li> <li>ใช้ Thermocouple ในการวัดอุณหภูมิ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r = 4.35</math></li> <li><math>Sr = \frac{u_\theta}{u_j}</math> เท่ากับ 0, 0.17, 0.52 และ 0.82</li> <li><math>Re_j = 12,000</math></li> <li><math>Re_{cf} = 3,400</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การหมุนควงทำให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิบนหน้าตัดไม่สมมาตร อามาบริเวณที่อุณหภูมิสูงและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่วนใหญ่อยู่ทางด้าน Suction</li> <li>เส้นทางเดินของ Center of mass temperature จะอยู่ต่ำกว่าเส้นทางเดินของ Center plane temperature เสมอที่ความเร็วประสิทธิผล (<math>r</math>) เท่ากัน</li> </ul>
4	Lindumrongtum <i>et al.</i> (2007, 2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษา Mixing structure ในบริเวณ Near field</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r = 4</math></li> <li><math>Sr = 0 - 0.8</math> (Swirl ratio)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การหมุนควงจะไม่พัฒนาและส่งเสริม Cascading azimuthal K-H mixing structures บนด้าน Suction ในขณะที่จะไม่ใช่</li> </ul>

ตารางที่ 2.4 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการกระตุ้นด้วยเจ็ตหมุนควง (Swirl) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสผสมขวาง



ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์ในการทดลอง	ผลที่ได้
5	Yingjiao <i>et al.</i> (2006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปฏิกิริยาการผสม (Mixing) ของเจ็ดโดยอาศัยกระบวนการ Product formation ใช้เทคนิค Combination of smoke fluid condensation, Mie scattering และ Laser-sheet visualization</li> <li>ศึกษาวิวัฒนาการของเจ็ดในกระแสมวลขวาง กรณีเจ็ดไม่หมุนควง (JICF) และกรณีเจ็ดหมุนควง (SJICF) ที่ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ดไม่เท่ากับศูนย์</li> <li>ใช้ปฏิกิริยากรด - เบส แสดงถึง Reactive mixing และจัดสีแสดงถึง Passive mixing</li> <li>ใช้ Contours of line-of-sight integrated mean images แทนปริมาณเชิงคุณภาพของการผสม</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r = 4</math></li> <li><math>Sr = 0 - 0.8</math> (Swirl ratio)</li> </ul>	<p>ขั้วยังบนด้าน Pressure และที่บริเวณ <math>y/rd &gt; 0.2</math> จะไม่พัฒนาและส่งเสริม Vortical roll ups บนด้าน Pressure ในขณะที่จะไม่ขั้วยังบนด้าน Suction</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>การพัฒนาตัวของ Vortical roll ups บนด้าน Pressure เกิดจากการพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่องจาก Cascading azimuthal K-H mixing structures จาก upstream ในขณะที่ Vortical roll ups บนด้าน Suction จะเกิดการพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่องจาก Lee side cusp</li> <li>กรณีเจ็ดไม่หมุนควง (JICF) พบว่า บริเวณตำแหน่ง <math>x/rd &gt; 0.5</math> Passive outer region mixing จะมีการผสมบริเวณนี้มาก และที่ตำแหน่ง <math>x/rd</math> มากขึ้น พบว่าการผสมบริเวณ Passive outer region mixing จะมีการผสมน้อยลง ในขณะที่ Central region mixing จะมีอัตราการผสมมากขึ้น และ Reactive inner region mixing จะมีการผสมเพียงเล็กน้อยในบริเวณนี้</li> <li>กรณีเจ็ดหมุนควง (SJICF) พบว่า บริเวณ Outer และ Inner จะมีการผสมบริเวณนี้มาก ในขณะที่ Central region mixing ไม่มีนัยสำคัญต่อการผสม</li> </ul>
6	Denev <i>et al.</i> (2005,2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาโครงสร้างและการผสมของเจ็ดหมุนควงในกระแสมวลขวาง</li> <li>ใช้ simulation ด้วย Large-eddy simulation (LES) ในการศึกษาศาสนาการไหล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Swirl number (s) <math display="block">\frac{D/2}{2} \int_0^{D/2} \rho U_a^2 r^2 dr</math> เท่ากับ 0 - 0.6</li> <li><math>r_s = 3.3</math></li> <li><math>Re = 2,100</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การหมุนควงจะทำให้การไหลและสนามความเร็วเชิงขั้วบิดเบี้ยวไป</li> <li>การหมุนควงมีผลต่อการผสมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น</li> </ul>

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์ในการทดลอง	ผลที่ได้
1	Komsri (2007), komsri <i>et al.</i> (2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสผสมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอิมพัลส์</li> <li>ใช้ Single hot film anemometer เป็นเครื่องมือในการวัดสนามความเร็ว</li> <li>กำหนดขอบเขตที่ค่า Turbulent intensity = 12%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r = 3.9</math></li> <li><math>Re_{cf} = 5,900</math></li> <li><math>Re_j = 23,000</math></li> </ul>	<p><b>ผลที่ได้</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>การฉีดเจ็ตควบคุมบริเวณด้านหน้า มีผลทำให้เส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตบนระนาบสมมาตรต่ำลง และต่ำที่สุดเมื่อฉีดที่ตำแหน่ง <math>\theta = \pm 15^\circ</math> ในขณะที่เมื่อฉีดบริเวณด้านข้างหรือด้านข้างล่าง ทำให้เส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตนั้นสูงขึ้น</li> <li>กรณีที่มีเจ็ตเจ็ตควบคุม (JCF) และกรณี 115 ที่ตำแหน่ง <math>x/rd = 4</math> นั้นมีการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตที่ตึงเอากะแสลมขวางเข้ามาผสมมีค่าน้อยลง (เจ็ตคายอากาศออก) ซึ่งไม่น่าจะเกิดขึ้นสำหรับการไหลในลักษณะนี้ เป็นไปได้ว่าการกำหนดขอบเขตด้วยค่า Turbulent intensity = 12% นั้นอาจไม่เหมาะสม</li> </ul>
2	Bunyajitraduluya (2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสผสมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอิมพัลส์</li> <li>ใช้ Single hot film anemometer ในการวัดความเร็ว</li> <li>กำหนดขอบเขตที่ Turbulent intensity = 6%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r = 3.9</math></li> <li><math>Re_{cf} = 5,900</math></li> <li><math>Re_j = 23,000</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ผลของเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างและเส้นทางเดินของเจ็ตนั้นได้ผลเช่นเดียวกับ Komsri (2007) และ Komsri <i>et al.</i> (2009)</li> <li>การกำหนดขอบเขตที่ Turbulent intensity = 6% ทั้งกรณี JCF และ 115 ไม่พบการคายอากาศออกตลอดแนวของการวัด</li> <li><math>x/rd = 0.25-4</math></li> <li>การฉีดเจ็ตควบคุมกรณี 115 มีผลทำให้การเหนี่ยวนำการผสมดีขึ้นประมาณ 10% ที่ตำแหน่ง <math>x/rd = 1.5</math> และ 20% ที่ตำแหน่ง <math>x/rd = 4</math></li> </ul>

## ตารางที่ 2.5

สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของการการกระตุ้นด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jet) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสผสมขวาง

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์ในการทดลอง	ผลที่ได้
3	Witayaprapakorn (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลของการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม</li> <li>ใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) เป็นเครื่องมือในการวัดสนามความเร็วในระนาบ</li> <li>ได้อนุมาคิดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r = 3.9</math></li> <li><math>Re_{cf} = 5,900</math></li> <li><math>Re_j = 23,000</math></li> <li>ชั้นขอบเขตของกระแสผสมขวาง</li> <li>เป็นลักษณะ Laminar</li> <li>กรณีฉีดเจ็ดควบคุม</li> <li><math>\theta = \pm 15^\circ</math> และ</li> <li><math>\theta = \pm 135^\circ</math> ที่ปริมาตร</li> <li><math>r_m = 2\%</math> ทั้งสองกรณี</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง <math>\theta = \pm 15^\circ</math> ส่งผลให้อัตราการเหนี่ยวนำการผสมไม่ต่างกับกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง <math>x/rd = 0.5</math> และ <math>x/rd = 0.75</math> แต่มีอัตราการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปยังตำแหน่ง <math>x/rd = 1</math> และ <math>x/rd = 1.5</math></li> <li>การฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง <math>\theta = \pm 135^\circ</math> จะส่งผลให้อัตราการเหนี่ยวนำการผสมสูงกว่ากรณีฉีดเจ็ดควบคุมและกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง <math>\theta = \pm 15^\circ</math> ทุกตำแหน่ง <math>x/rd</math></li> </ul>
4	Chaikasetsin <i>et al.</i> (2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการใช้เจ็ดเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ดหลัก (<math>r_m</math>) ต่อโครงสร้างการผสมและการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม</li> <li>ใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) เป็นเครื่องมือในการวัดสนามความเร็วในระนาบ</li> <li>ได้อนุมาคิดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r = 4</math></li> <li><math>Re_{cf} = 5,600</math></li> <li><math>Re_j = 23,000</math></li> <li>ชั้นขอบเขตของกระแสผสมขวาง</li> <li>เป็นลักษณะ Laminar</li> <li>กรณีฉีดเจ็ดควบคุม</li> <li><math>\theta = \pm 135^\circ</math> ที่ปริมาตร</li> <li><math>r_m = 2\%, 4\%</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r_m</math> มีผลต่อ โครงสร้างของเจ็ด , เส้นทางเดินของเจ็ด , circulation และการเหนี่ยวนำการผสม</li> <li><math>r_m</math> สูงขึ้น มีแนวโน้มทำให้ความเร็วเจ็ดในแนว streamline ลดลง และทำให้เจ็ดทะลุเข้าไปในกระแสผสมขวางได้มากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้การเหนี่ยวนำการผสมสูงขึ้น</li> <li><math>r_m = 4\%</math> ทำให้เจ็ดทะลุเข้าไปในกระแสผสมขวางมากขึ้น เส้นทางเดินของเจ็ดสูงขึ้น มี circulation มากขึ้น และมีการเหนี่ยวนำการผสมมากขึ้นเทียบกับกรณีฉีดเจ็ดควบคุมถึง 61% ในตำแหน่ง <math>x/rd = 1.5</math></li> </ul>

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์ในการทดลอง	ผลที่ได้
1	Meyer <i>et al.</i> (2007)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสผสมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม</li> <li>ใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) เป็นเครื่องมือในการวัดสนามความเร็วในระนาบ</li> <li>ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสผสมขวาง</li> <li>วิเคราะห์โครงสร้างด้วยกระบวนการ Proper Orthogonal Decomposition (POD)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r = 1.3, 3.3</math></li> <li><math>Re_{cf} = 2,400</math></li> <li>Fully developed turbulent pipe flow</li> <li>ชั้นขอบเขตของกระแสผสมขวาง</li> <li>เป็นลักษณะ Turbulent</li> <li><math>\delta_{99\%} / d = 1.6</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>กรณีความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 3.3 พบว่า โครงสร้าง Wake vortices มีบทบาทสำคัญ</li> <li>กรณีความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 1.3 พบว่า โครงสร้าง Jet shear layer มีบทบาทสำคัญ</li> </ul>
2	Srinakharat and Bunyajitradulaya (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลของการฉีดเจ็ตความเร็วตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสผสมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม</li> <li>ใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) เป็นเครื่องมือในการวัดสนามความเร็วในระนาบ</li> <li>ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น</li> <li>วิเคราะห์โครงสร้างด้วยกระบวนการ Proper Orthogonal Decomposition (POD)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r = 3.9</math></li> <li><math>Re_{cf} = 5,900</math></li> <li><math>Re_j = 23,000</math></li> <li>กรณีฉีดเจ็ตความเร็ว <math>\theta = \pm 15^\circ</math> และ <math>\theta = \pm 135^\circ</math> ที่ปริมาณ <math>r_m = 2\%</math> ทั้งสองกรณี</li> <li>ชั้นขอบเขตของกระแสผสมขวาง</li> <li>เป็นลักษณะ Laminar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>การฉีดเจ็ตความเร็วทำให้โหมดที่มีพลังงานเป็นส่วนใหญ่สุด (POD Mode 1) เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเปรียบเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ต</li> <li>การฉีดเจ็ตความเร็วทำให้การกระจายตัวของระดับพลังงานที่โดดเด่นต่างๆเปลี่ยนจากลักษณะเดียวกับในกรณีของไม่ฉีดเจ็ต</li> <li>ความเร็วเป็นลักษณะสูงแคบ</li> </ul>

ตารางที่ 2.6 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตในกระแสผสมขวางด้วย Proper Orthogonal Decomposition (POD)

$x/rd$	SPIV Spatial resolution (mm × mm)		
	$JICF$	$r_m = 2\%$	$r_m = 4\%$
0.5	60.70 x 60.70	60.70 x 60.70	60.25 x 60.25
0.75	59.19 x 59.19	59.19 x 59.19	58.96 x 58.96
1.0	57.94 x 57.94	57.94 x 57.94	58.08 x 58.08
1.5	62.18 x 62.18	62.18 x 62.18	60.81 x 60.81

ตารางที่ 4.1 Spatial resolution ของสนามความเร็วจาก SPIV ที่ตำแหน่ง  $x/rd$  ต่าง ๆ ของกรณี  $JICF$ ,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$

ตำแหน่ง ( $x/d, z/d$ )	ความหนาชั้นขอบเขต (mm)	
	$\delta_{95\%}$	$\delta_{99\%}$
-2, 5	15	20
-2, 0	15	20
-2, -5	14	20

ตารางที่ 4.2 ความหนาชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางที่ตำแหน่ง  $x/d = -2$  ตามแนว Spanwise ( $z$ )

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในปากทางออกของเจ็ต ( $d$ , mm)	12.5
ความเร็วกระแสลมขวาง ( $u_{cf}$ , m/s)	7.2
ความเร็วเจ็ตเฉลี่ยที่ปากทางออก ( $u_j$ , m/s)	30.5
อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ )	4.2
ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของกระแสลมขวาง ( $Re_{cf}$ )	5,700
ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ต ( $Re_j$ )	24,000
รูปแบบความเร็วเริ่มต้นที่ปากทางออกของเจ็ต ( $\psi_{jp}$ )	Fully-developed turbulent pipe flow จาก สมการ $1/n$ power law มี $n$ ประมาณ 7
ความไม่สม่ำเสมอของกระแสลมขวาง	$2S_{u_{cf}} / u_{cf} = 0.05$
ชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง ( $\psi_{bl}$ )	Turbulent ที่มี $n = 5.2$
ความหนาของชั้นขอบเขตไร้มิติ ( $\delta_{99\%} / d$ )	1.6
อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุม ต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ )	2% และ 4%
ตำแหน่งมุมฉีดเจ็ตควบคุม ( $\theta$ )	$\pm 135^\circ$ .
ตำแหน่งระนาบตัดขวาง ( $x / rd$ )	0.5, 0.75, 1, 1.5

ตารางที่ 4.3      สรุปพารามิเตอร์ในงานวิจัยนี้ตาม objective functional form ในสมการ  
ที่ 1.1-1.3

พารามิเตอร์	Meyer <i>et al.</i> (2007)	งานวิจัยนี้
<b>พารามิเตอร์ไร้มิติ (dimensionless parameters)</b>		
อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ )	3.3	
ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของกระแสลมขวาง ( $Re_{cf}$ )	2,400	
ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ต ( $Re_j$ )	7,900	
รูปแบบความเร็วเริ่มต้นที่ปากทางออกของเจ็ต ( $\psi_{jp}$ )	Fully-developed turbulent pipe flow	
ชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง ( $\psi_{bl}$ )	Turbulent	
ความหนาชั้นขอบเขตไร้มิติ ( $\delta_{99\%}/d$ )	2.9	1.6
<b>พารามิเตอร์ที่มีมิติ (dimension parameters)</b>		
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ปากทางออกของเจ็ต ( $d, \text{mm}$ )	24	12.5
ความเร็วกระแสลมขวาง ( $u_{cf}, \text{m/s}$ )	1.50	3.07
ความเร็วเจ็ตเฉลี่ยที่ปากทางออก ( $u_j, \text{m/s}$ )	4.95	10.04
ความหนาชั้นขอบเขต ( $\delta_{99\%}, \text{mm}$ )	70	20

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการสอบทวนผลการทดลองระหว่างการทดลองในงานวิจัยของ Meyer *et al.* (2007) และการทดลองสอบทวนในงานวิจัยนี้

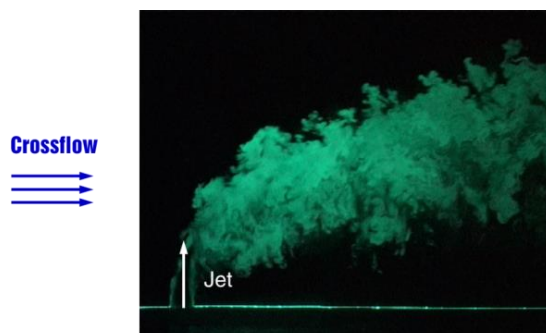
$x/rd$	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Entrainment)		
	JICF	$r_m = 2\%$	$r_m = 4\%$
0.5	3.2219	3.6724	4.6898
0.75	4.5460	5.1335	5.4720
1.0	5.4342	6.4616	7.3611
1.5	7.1234	7.2883	8.3387

ตารางที่ 10.1 ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Entrainment) ที่ตำแหน่ง  $x/rd$  ต่าง ๆ ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$

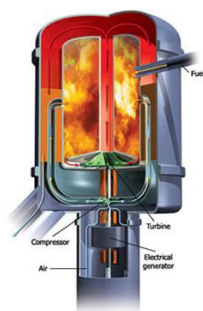




## บทที่ 1



รูปที่ 1.1 เจ็ตในกระแสลมขวาง (ภาพถ่ายจากห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์ของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)



(ก) <http://www.wbdg.org/resources/microturbines.php?r=research>

(ข) <http://www.glogster.com/boxter/industrial-revolutionproject/g6mgf0cnnvn3vgibot7va0>



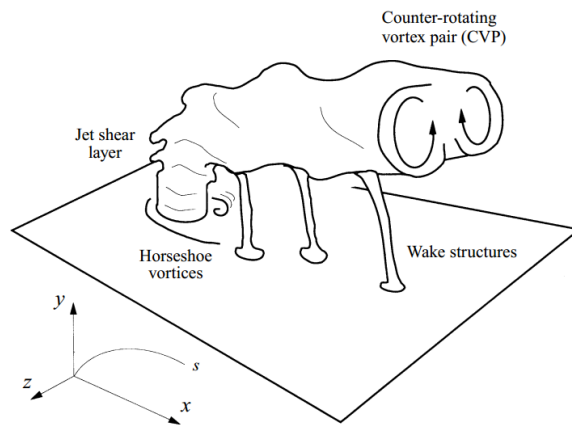
(ค) <http://www.mmsonline.com/articles/improved-break-out-detection-for-small-hole-edm>

รูปที่ 1.2 การไหลลักษณะเจ็ตในกระแสลมขวางที่พบในงานวิศวกรรม

(ก) การฉีดเชื้อเพลิงเพื่อผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้

(ข) การระบายอากาศเสียออกจากปล่องควัน

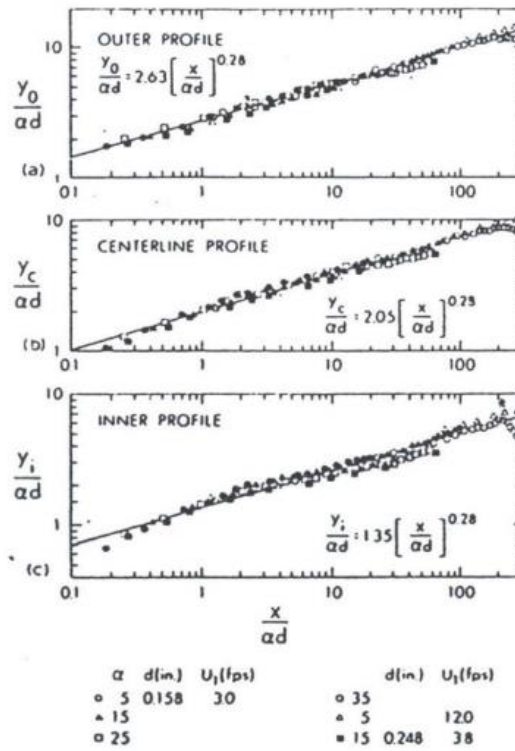
(ค) การระบายความร้อนของใบพัดในกังหันแก๊สด้วยเทคนิค Film cooling



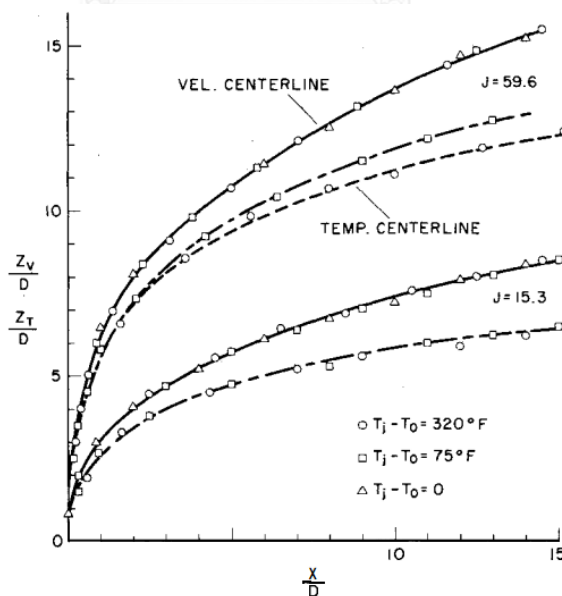
รูปที่ 1.3 โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Fric and Roshko, 1994)



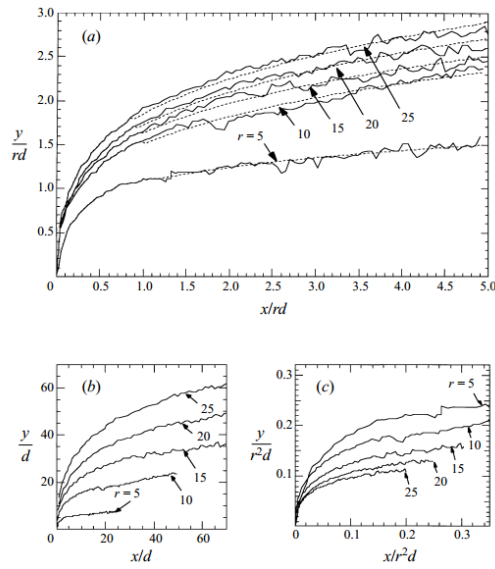
บทที่ 2



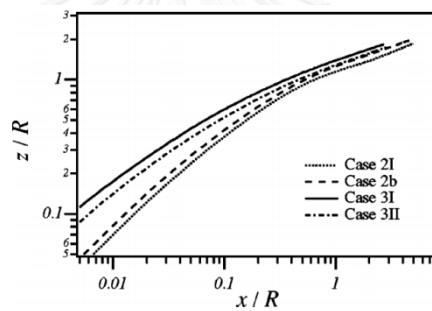
รูปที่ 2.1 เส้นทางเดินของความเร็ (Pratte and Baines, 1967)



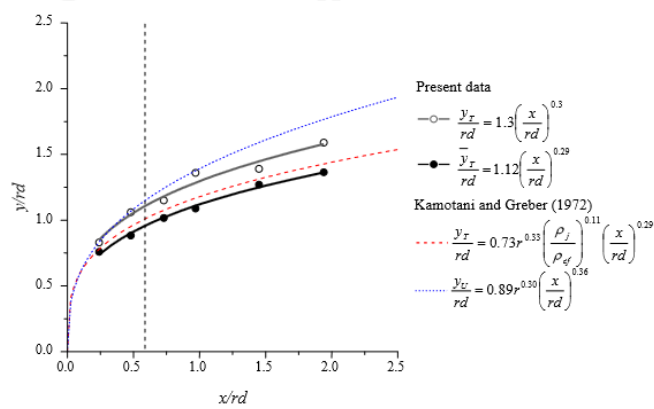
รูปที่ 2.2 เส้นทางเดินของความเร็และอุณหภูมิ (Kamotani and Greber, 1972)



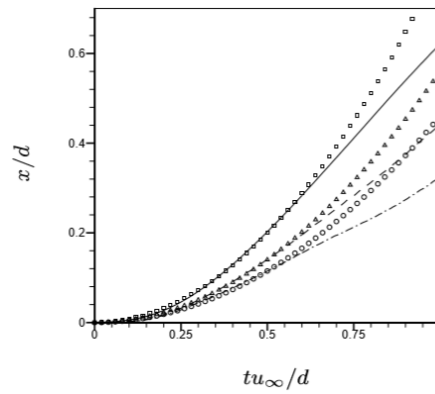
รูปที่ 2.3 เส้นทางเดินของ Passive scalar บนสเกลต่าง ๆ (Smith and Mungal, 1998)



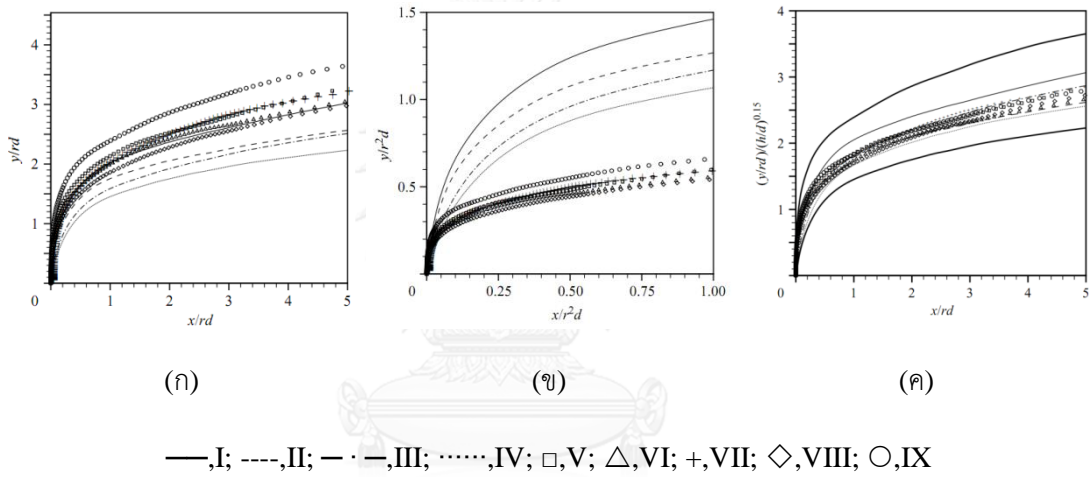
รูปที่ 2.4 เส้นทางเดินของ streamline บนสเกล rd (Yuan and Street, 1998)



รูปที่ 2.5 Center-plane trajectory ของอนุหภูมิ ( $y_T$ ) และ Centroid trajectory ของอนุหภูมิ ( $\bar{y}_T$ ) (Wangjiraniran, 2001)



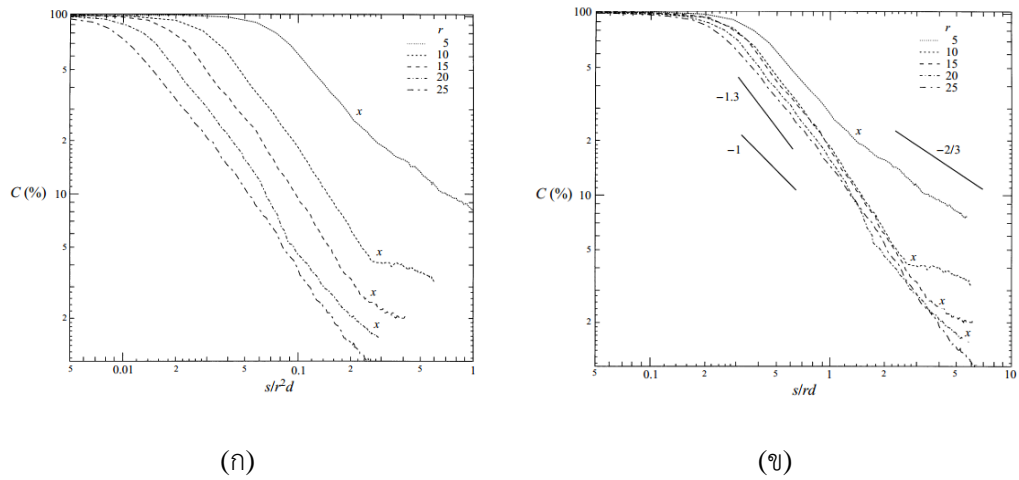
รูปที่ 2.6 Quadratics curve fit ของแต่ละเส้นทางเดิน — : Re = 1000; ---- : Re = 10000; - · - : Re = 100000 (Muppidi and Mahesh, 2005a)



Case	Velocity ratio $r$	Jet inlet profile	Crossflow boundary layer $\delta_{80\%}$
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.

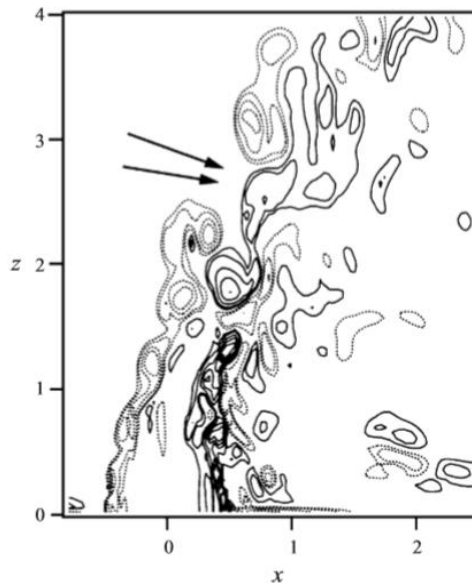
รูปที่ 2.7 ผลการเปรียบเทียบเส้นทางเดินสเกลโดย (ก)  $rd$  (ข)  $r^2d$  (ค)  $h$  (Muppidi and Mahesh, 2005b)



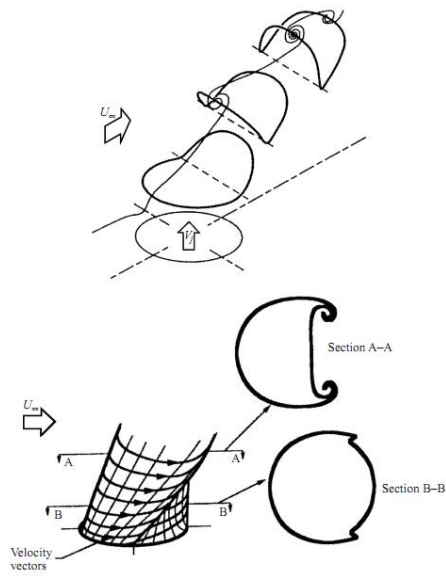
รูปที่ 2.8 การลดลงของ scalar concentration ของเจ็ดในกระแสมขวางและเจ็ดอิสระที่สเกลต่าง ๆ (Smith and Mungal, 1998)

(ก)  $r^2 d$

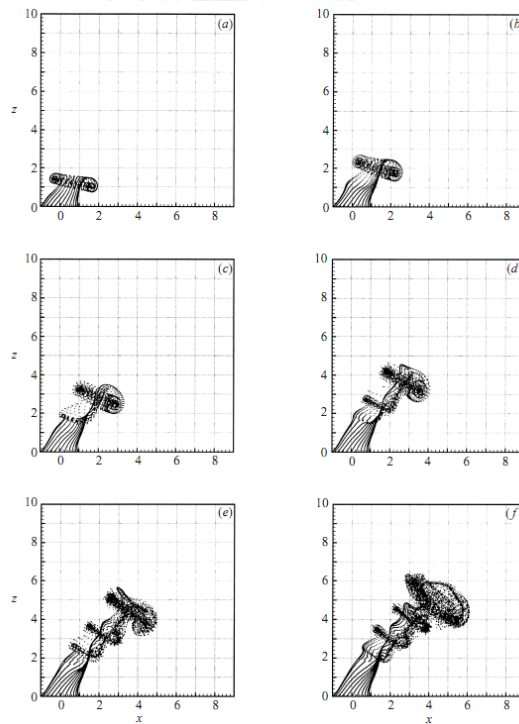
(ข)  $rd$



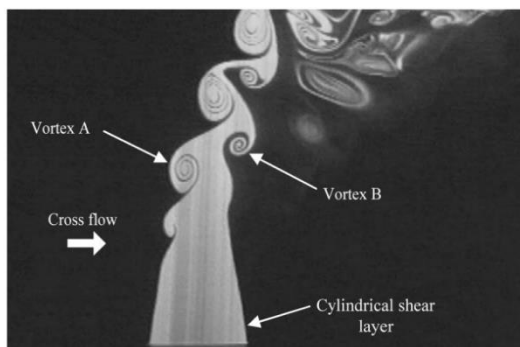
รูปที่ 2.9 โครงสร้าง spanwise rollers ซึ่งแสดงเป็น contour ของวอร์ทิซิตีตามแนวแกน spanwise ขณะใด ๆ โดยเส้นประแสดงค่าลบและเส้นทึบแสดงค่าบวก (Yuan et al., 1999)



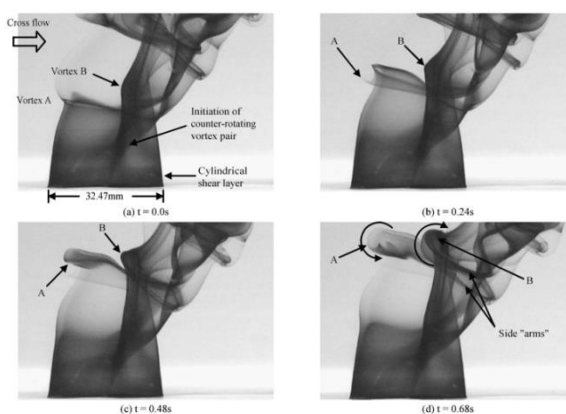
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของการเกิดเป็น CVP (Cortezzi and Karagozian, 2001)  
 (ก) มุมมอง Isometric ของ Jet shear layer vortex ring  
 (ข) Schematic diagram ของการเปลี่ยนตำแหน่งของ shear layer vorticity



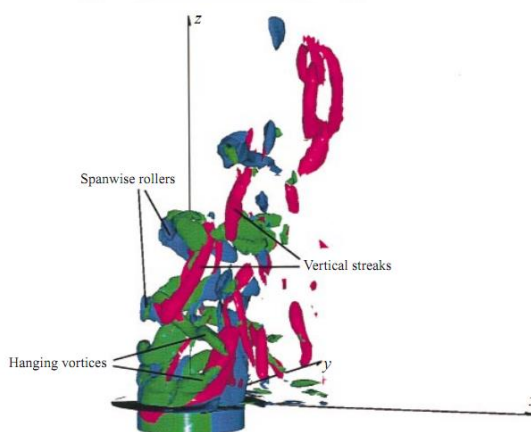
รูปที่ 2.11 การพัฒนาตัวของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Cortezzi and Karagozian, 2001)



รูปที่ 2.12 Vortices structure ของเจ็ตในกระแสมวงบนระนาบสมมาตร (Lim *et. al.*, 2001)

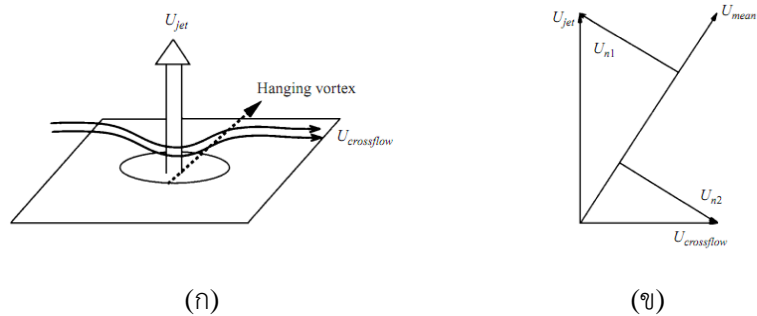


รูปที่ 2.13 การพับตัวของ Cylindrical shear layer (Lim *et. al.*, 2001)

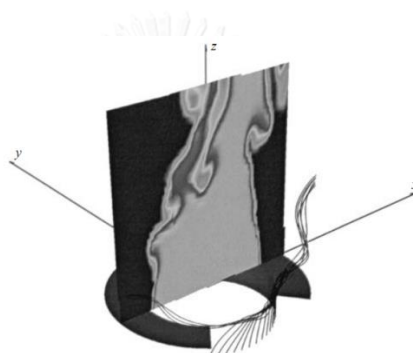


รูปที่ 2.14 โครงสร้างบริเวณ Near field ของเจ็ตในกระแสมวง ซึ่งแสดงเป็น Isosurface ของ Vorticity (Yuan *et al.*, 1999)

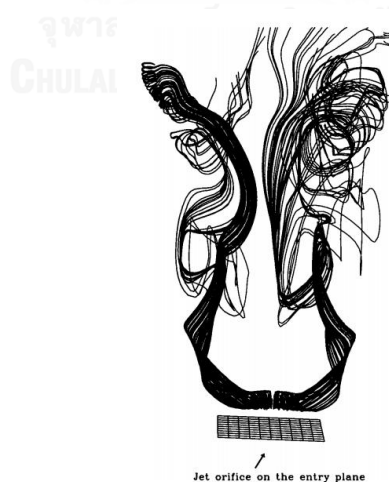




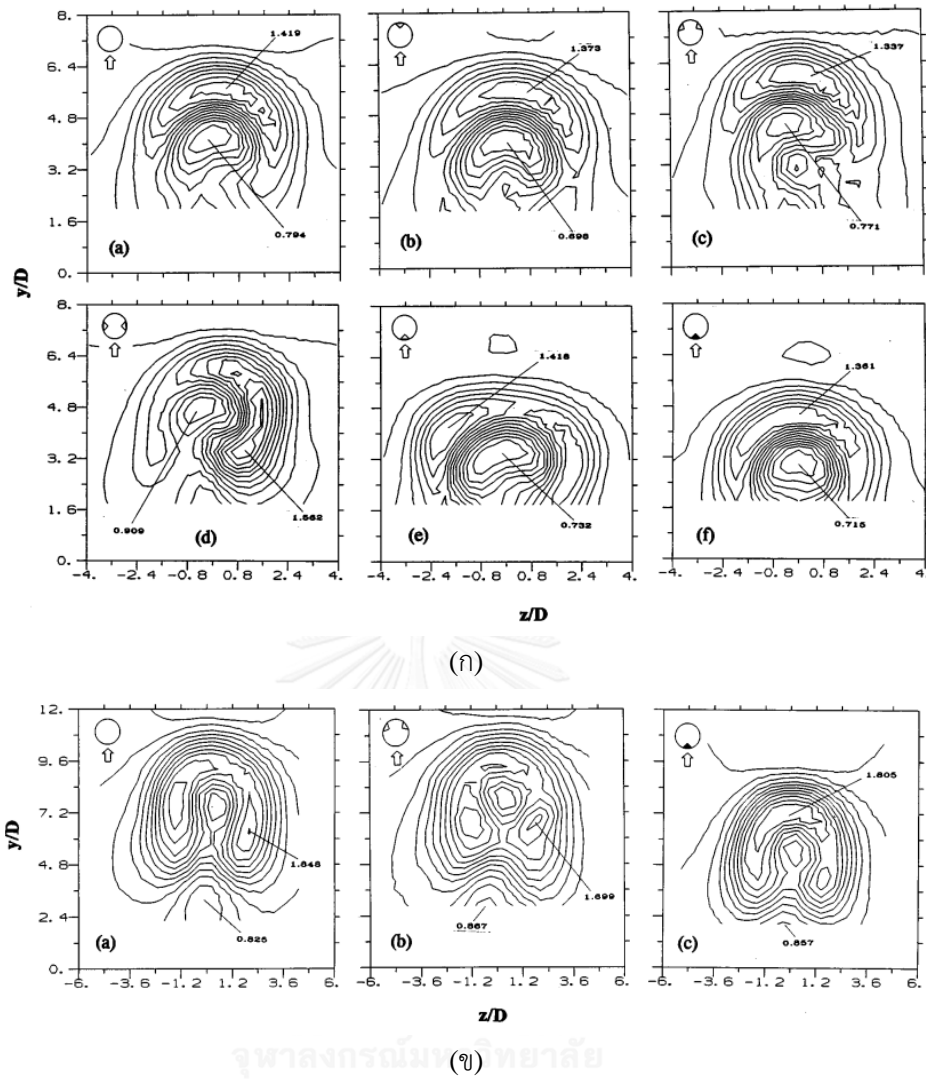
- รูปที่ 2.15 โครงสร้างของ Hanging vortices (Yuan *et al.*, 1999)  
 (ก) Schematic diagram ของ Hanging vortices  
 (ข) Vector ความเร็วซึ่งแสดงกลไกของการเกิด Hanging vortices



- รูปที่ 2.16 Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวขึ้นระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางที่บริเวณขอบด้านข้างของปากทางออกเจ็ต (Yuan *et al.*, 1999)



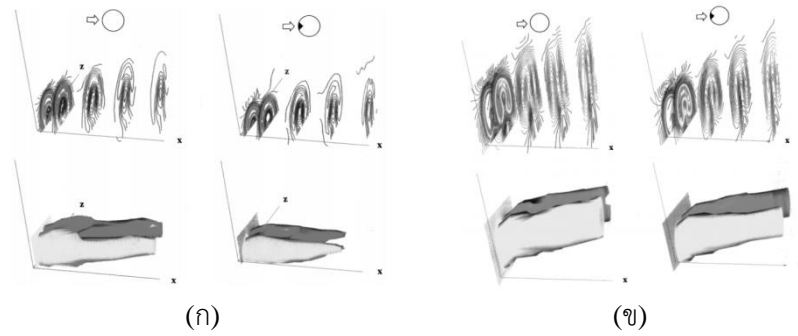
- รูปที่ 2.17 วิวัฒนาการของ streamlines ในการก่อตัวของ Kelvin-Helmholtz roller (Sau *et al.*, 2004)



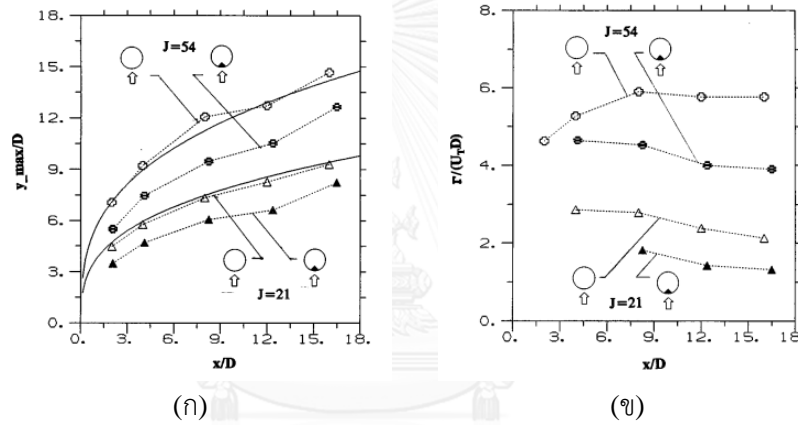
รูปที่ 2.18 Contour ของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบตั้งฉากกับกระแสลมขวาง (Zaman and Foss, 1997)

(ก)  $J = 21.1$

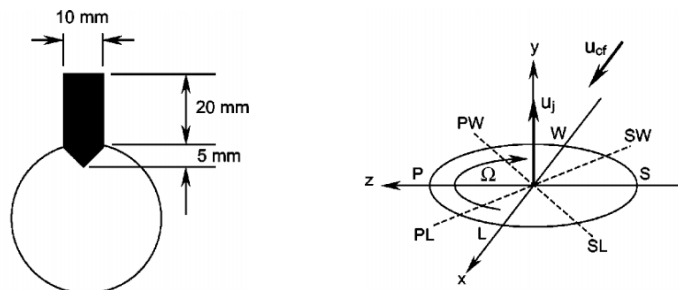
(ข)  $J = 54.4$



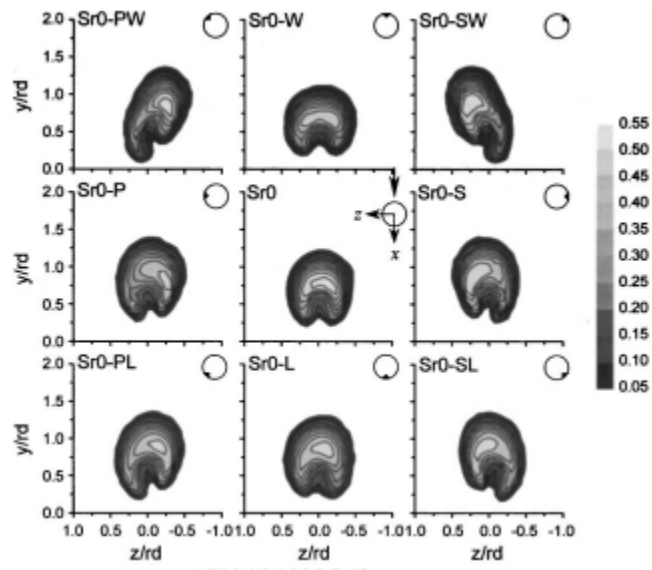
รูปที่ 2.19 Contour ของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบตั้งฉากกับกระแสลมขวาง และ Streamwise vorticity isosurface (Zaman and Foss, 1997)  
 (ก)  $J = 21.1$   
 (ข)  $J = 54.4$



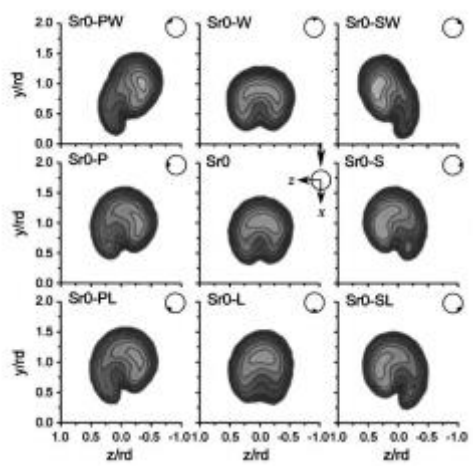
รูปที่ 2.20 ผลของการติดตั้ง Tab (Zaman and Foss, 1997)  
 (ก) ต่อเส้นทางเดินของความเร็วบนระนาบสมมาตร  
 (ข) ต่อ Circulation ตามแนว downstream



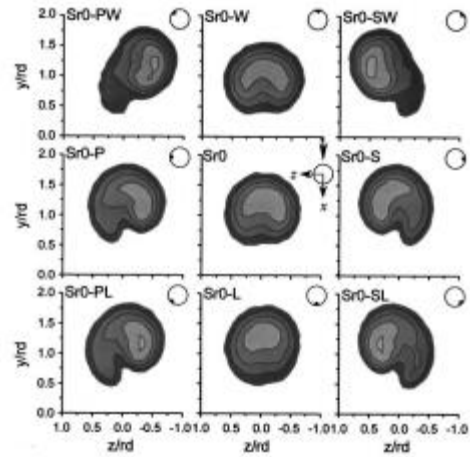
รูปที่ 2.21 การติดตั้ง Tab ตามแนวเส้นรอบวง (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)



(ก)



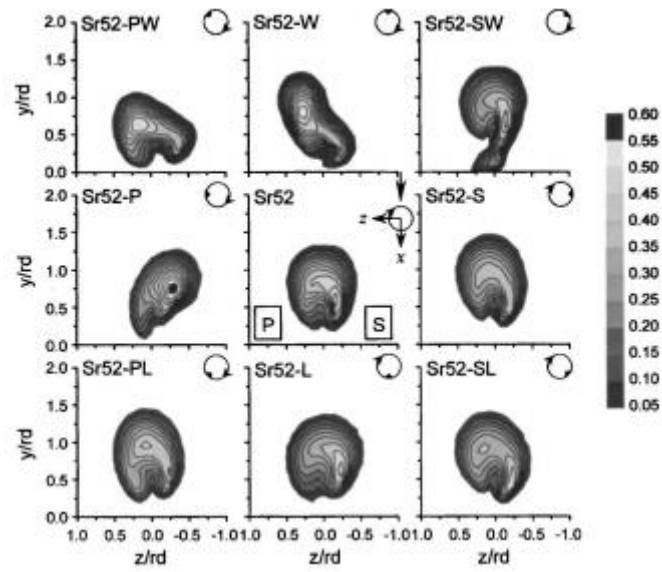
(ข)



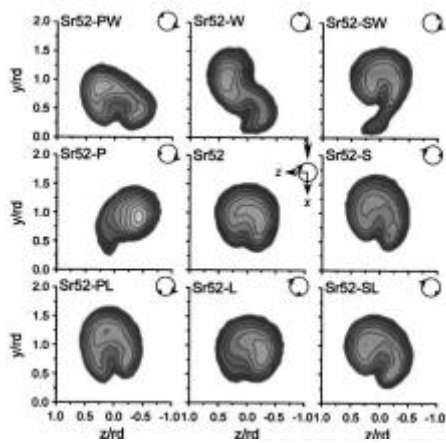
(ค)

รูปที่ 2.22 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการติด Tab กรณีเจ็ดไม่หมุนควง (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)

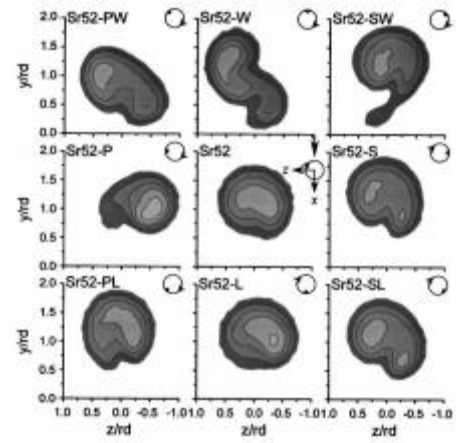
(ก)  $x/rd = 0.25$     (ข)  $x/rd = 0.5$     (ค)  $x/rd = 1.0$



(ก)



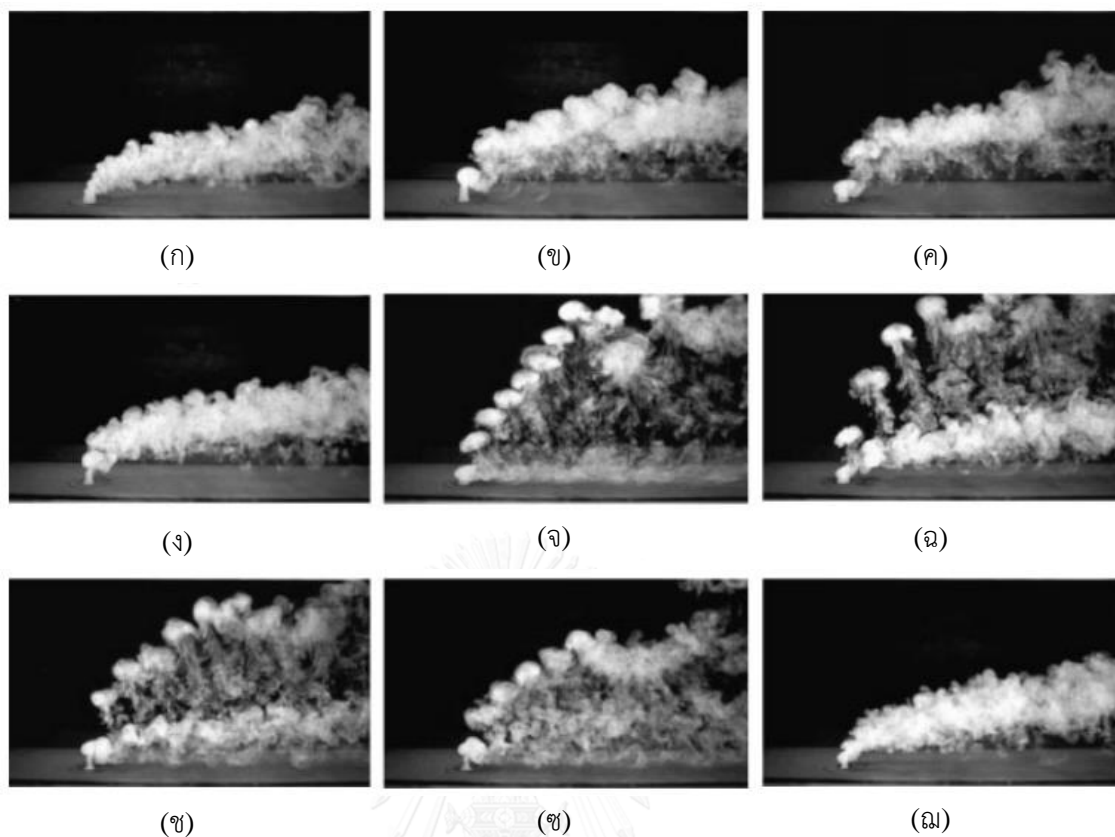
(ข)



(ค)

รูปที่ 2.23 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการติด Tab กรณีเจ็ตหมุนควง (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)

(ก)  $x/rd = 0.25$     (ข)  $x/rd = 0.5$     (ค)  $x/rd = 1.0$



รูปที่ 2.24 ผลการกระตุ้นเจ็ตอย่างเป็นจังหวะด้วยลำโพง (M'Closkey *et al.*, 2002)

(ก) ยังไม่กระตุ้นเจ็ต

(ข) Uncompensated กระตุ้นด้วย Sine wave ที่ความถี่ 73.5 Hz

(ค) Compensated กระตุ้นด้วย Sine wave ที่ความถี่ 73.5 Hz

(ง) Uncompensated กระตุ้นด้วย Square wave ที่ความถี่ 110 Hz duty cycle 31%

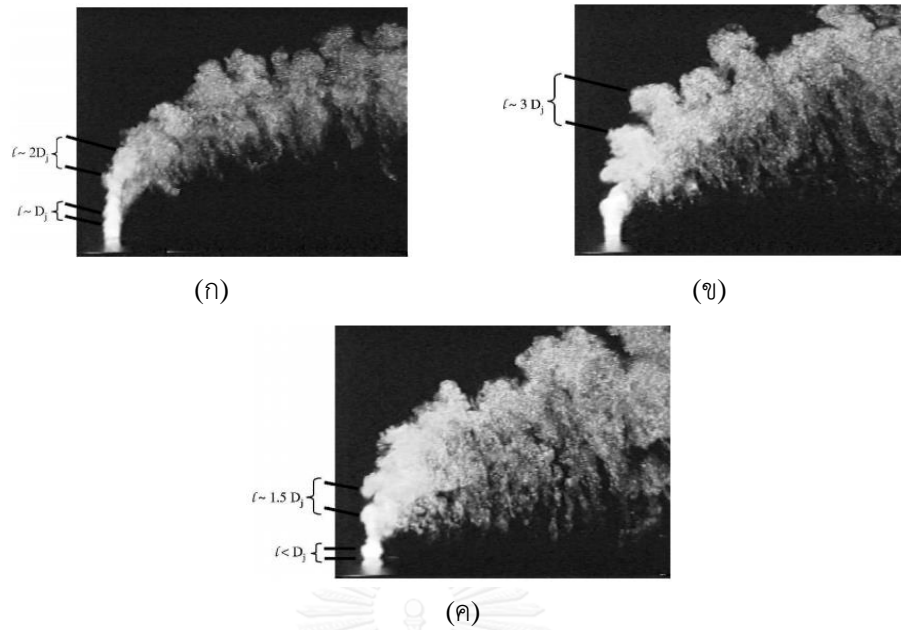
(จ) Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ที่ความถี่ 110 Hz duty cycle 31%

(ฉ) Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ที่ความถี่ 55 Hz duty cycle 15%

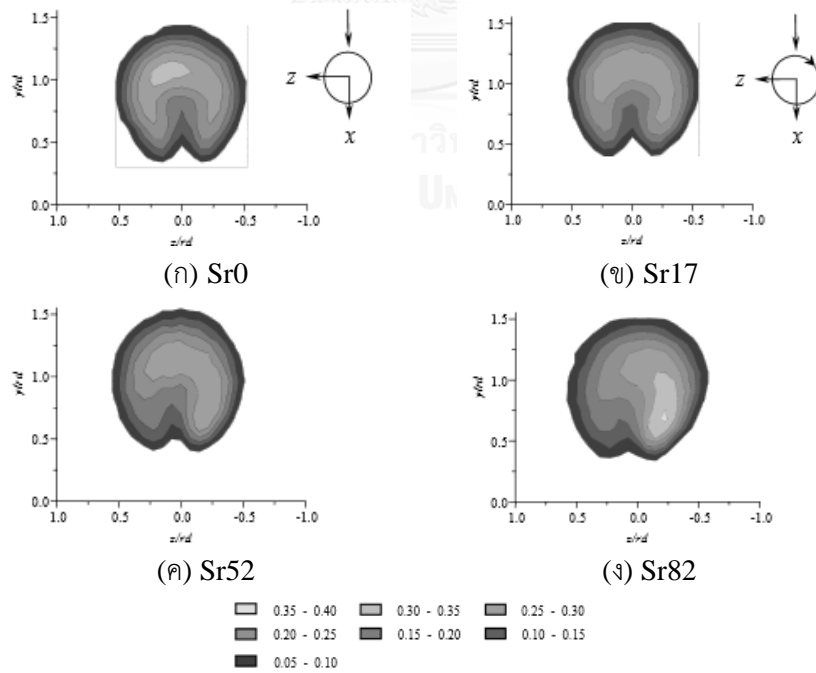
(ช) Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ที่ความถี่ 73.5 Hz duty cycle 22%

(ซ) Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ที่ความถี่ 85 Hz duty cycle 24%

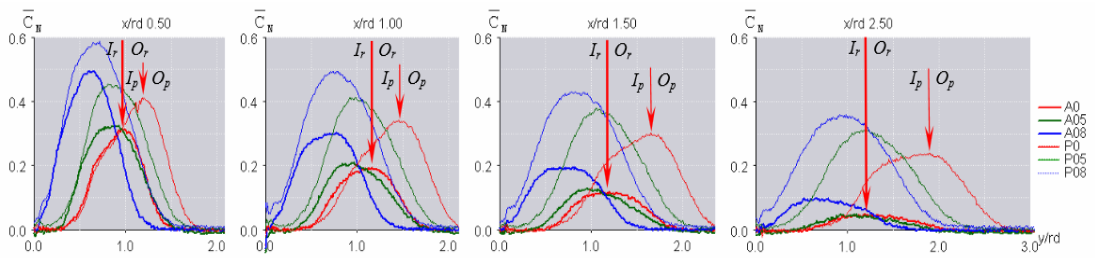
(ม) Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ที่ความถี่ 220 Hz duty cycle 62%



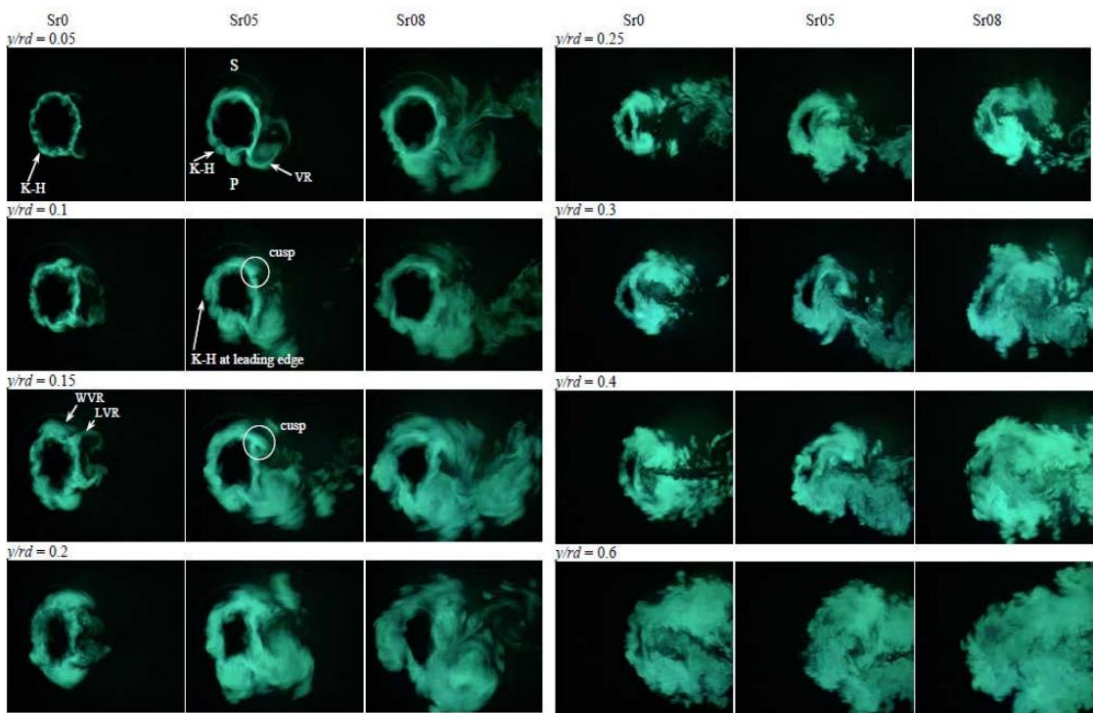
รูปที่ 2.25 ภาพถ่าย Instantaneous (Narayanan *et. al.*, 2003)  
 (ก) กรณีเจ็ตไม่มีการควบคุม  
 (ข) กรณีที่กระตุ้นที่ความถี่ต่ำ (680 Hz และค่า  $Sr_D$  ประมาณ 0.085)  
 (ค) กรณีที่กระตุ้นที่ความถี่สูง (1,500 Hz และค่า  $Sr_D$  ประมาณ 0.19)



รูปที่ 2.26 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ระนาบตั้งฉาก  $x/rd = 0.5$  (Wangjiraniran and Bunyajitradulya, 2001)

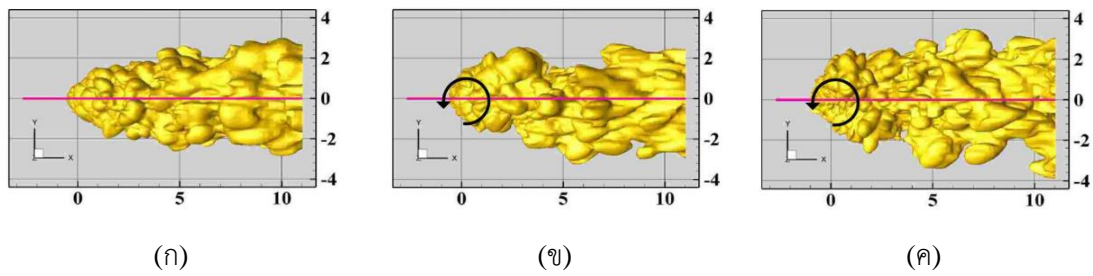


รูปที่ 2.27 Contours of line-of-sight integrated mean images ของ Transverse profile โดยที่ P แทน Passive และ A แทน Active (Yingjaroen *et. al.*, 2006)

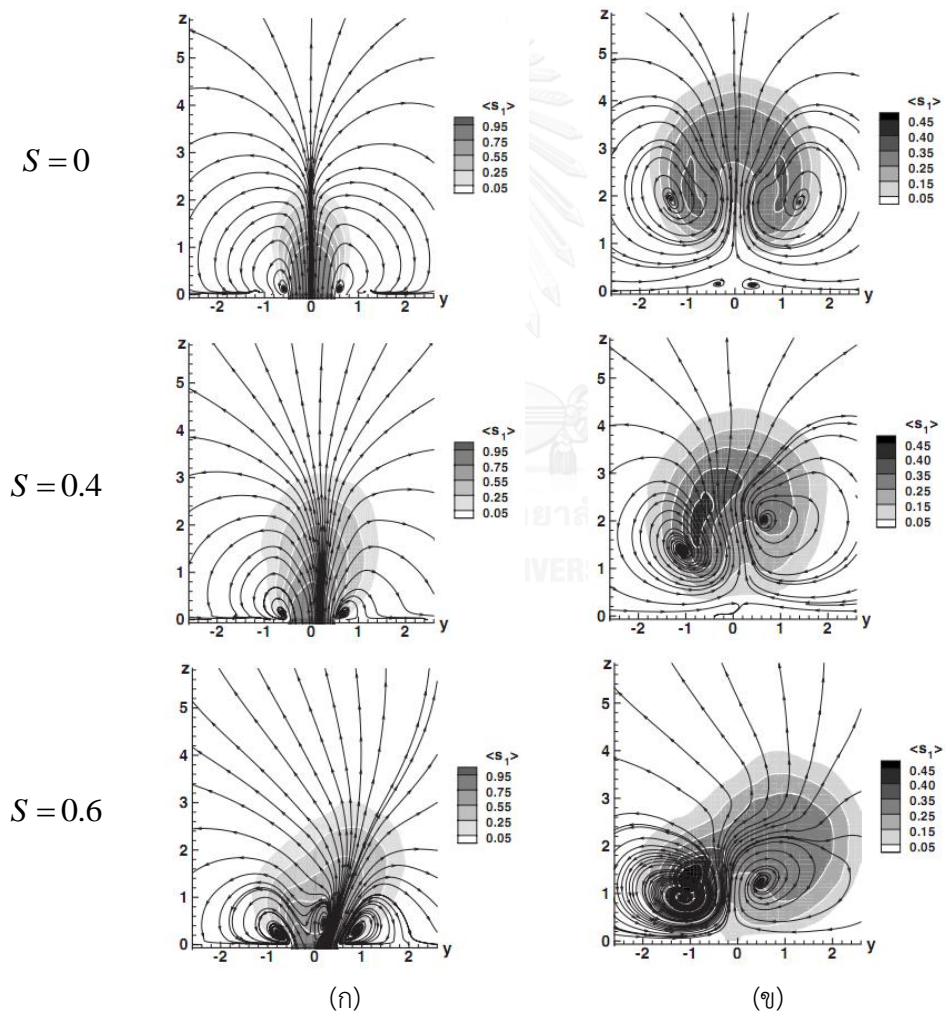


รูปที่ 2.28 ภาพถ่าย Instantaneous ของ mixing structure บนด้าน Top view (Limdumrongtum *et. al.*, 2009)

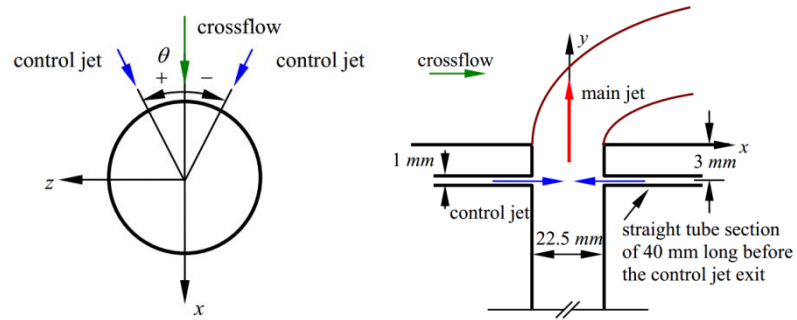




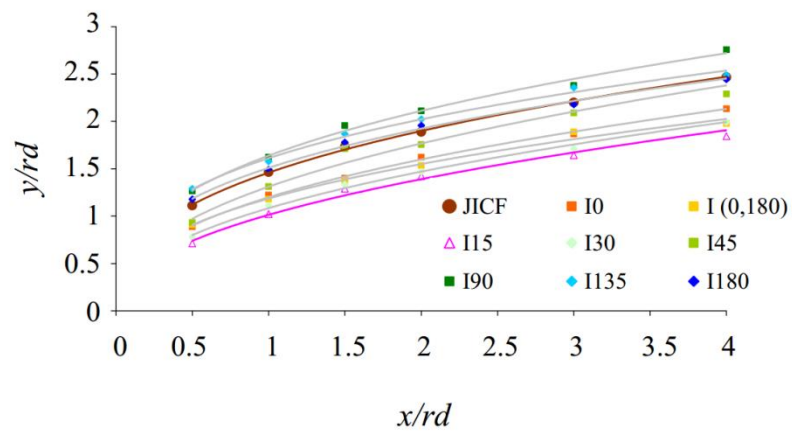
รูปที่ 2.29 Instantaneous isoconcentration surface โดย  $s_1$  บนด้าน Top view (Denev *et. al.*, 2005)  
 (ก)  $S = 0$     (ข)  $S = 0.4$     (ค)  $S = 0.6$



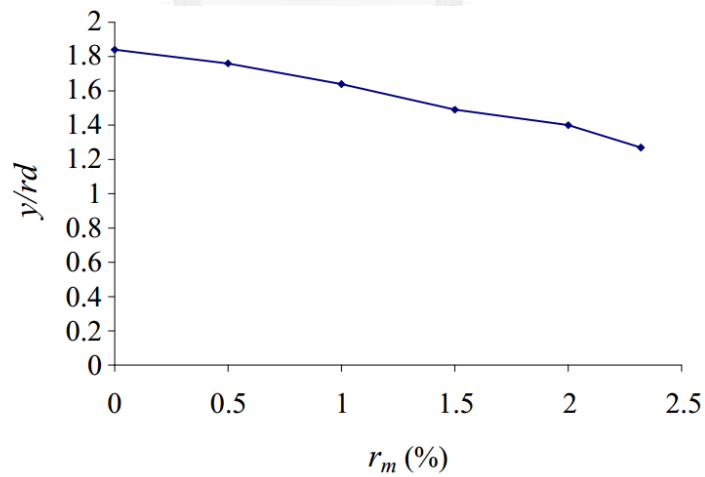
รูปที่ 2.30 ภาพเฉลี่ยของ streamlines และค่าความเข้มข้น บนด้าน End view (Denev *et. al.*, 2005)  
 (ก)  $x/D = 0$     (ข)  $x/D = 1.83$



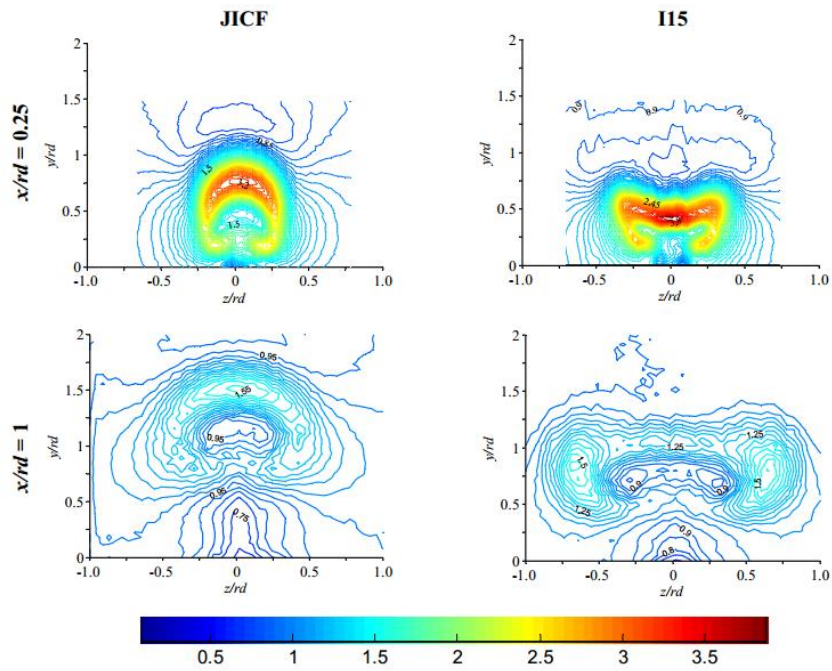
รูปที่ 2.31 ชุดเจ็ทหลักและเจ็ทควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Kornsri et. al., 2009)



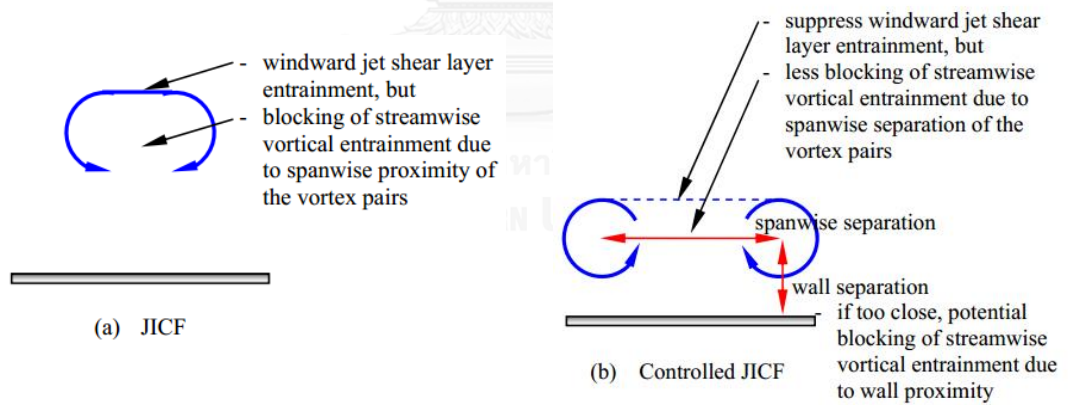
รูปที่ 2.32 ผลของเจ็ทควบคุมต่อเส้นทางเดินของความเร็วเจ็ท (Kornsri et. al., 2009)



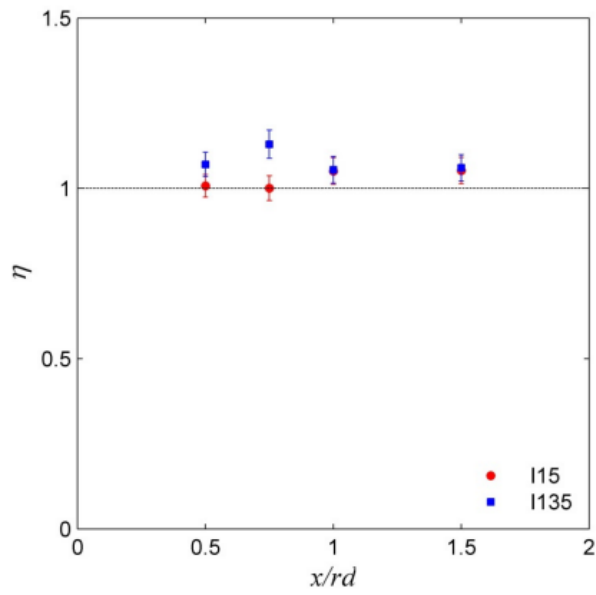
รูปที่ 2.33 ผลของปริมาณ  $r_m$  ต่อการ Penetration ของเส้นทางเดินของความเร็วเจ็ทที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1.5$  ที่ตำแหน่งมุม  $\theta = \pm 15^\circ$  (Kornsri et. al., 2009)



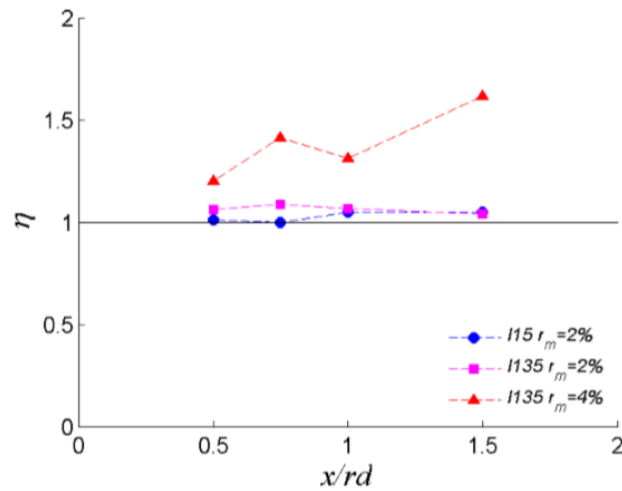
รูปที่ 2.34 Contour ของความเร็วเฉลี่ย ( $w/U_{cf}$ ) เปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม กับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่มุม  $\theta = \pm 15^\circ$ ,  $r_m = 2\%$  (Kornsri *et. al.*, 2009)



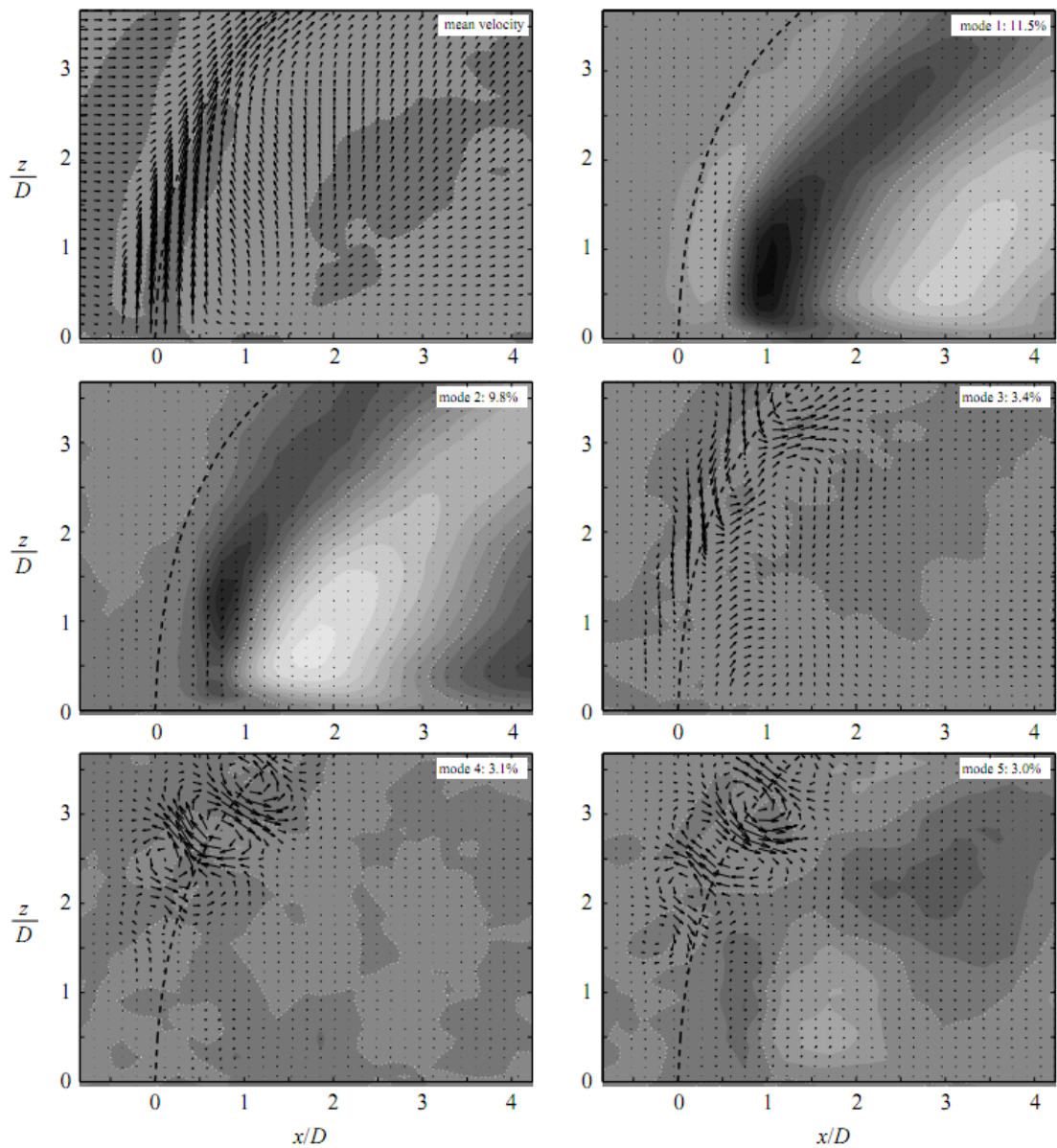
รูปที่ 2.35 แนวคิดกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Kornsri *et. al.*, 2009)



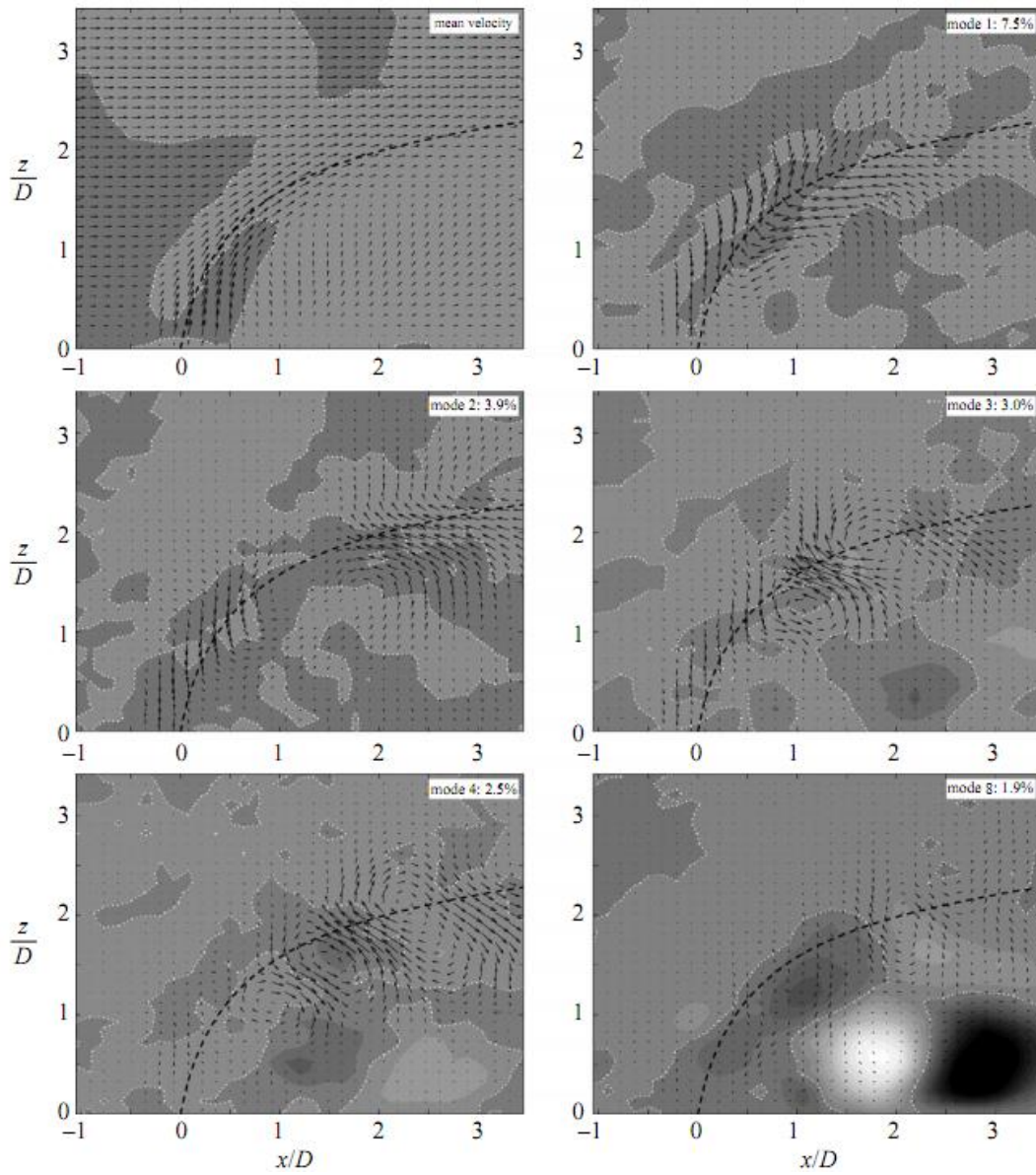
รูปที่ 2.36 ประสิทธิภาพของเจ็ดควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Witayaprapakorn, 2013)



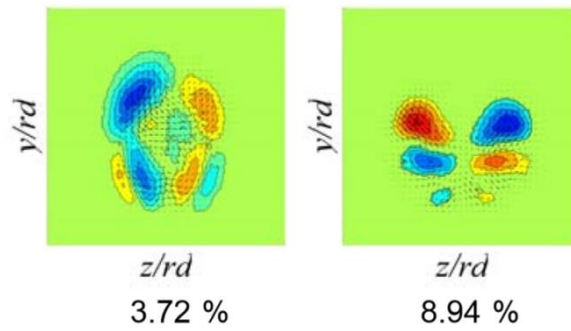
รูปที่ 2.37 ประสิทธิภาพของเจ็ดควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Chaikasetzin *et al.*, 2014)



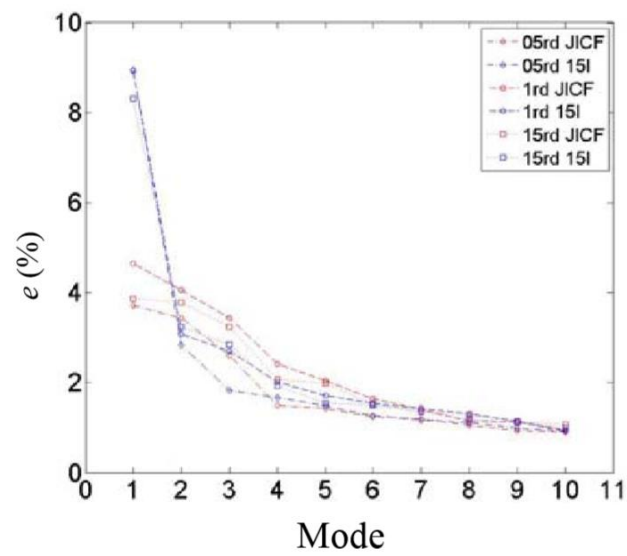
รูปที่ 2.38 โครงสร้างของความเร็วเฉลี่ยและ POD modes ของเจ็ตในกระแสมวงที่  $r = 3.3$  ในระนาบ  $y = 0$  (Meyer *et al.*, 2007)



รูปที่ 2.39 โครงสร้างของความเร็วเฉลี่ยและ POD modes ของเจ็ตในกระแสมวงที่  $r = 1.3$  ในระนาบ  $y = 0$  (Meyer *et al.*, 2007)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.40 ผลของการฉีดเจ็ตควบคุม (Srimekharat and Bunyajitradulya, 2013)  
 (ก) ต่อโครงสร้างที่มีพลังงานการไหลปั่นป่วนสูงสุด (POD Mode 1)  
 (ข) ต่อการกระจายตัวของระดับพลังงาน

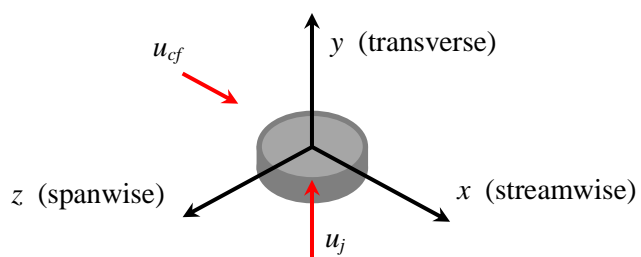
## บทที่ 4



รูปที่ 4.1 อุโมงค์ลม (ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

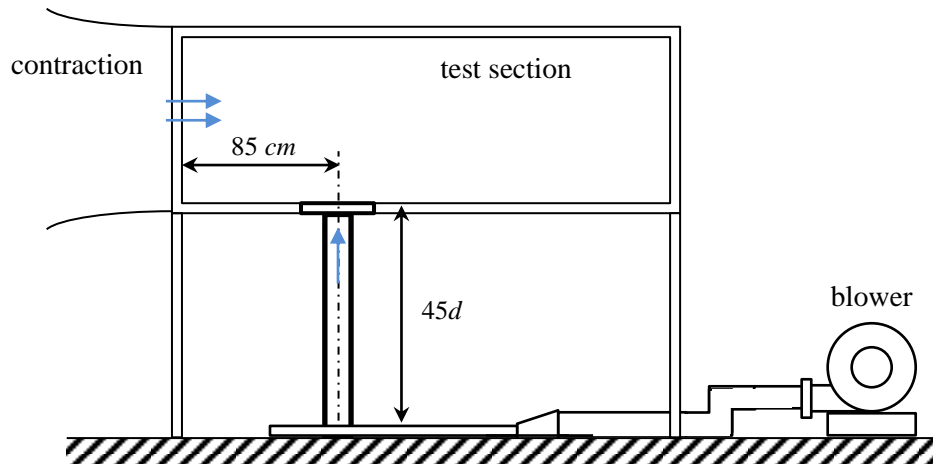


รูปที่ 4.2 เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า

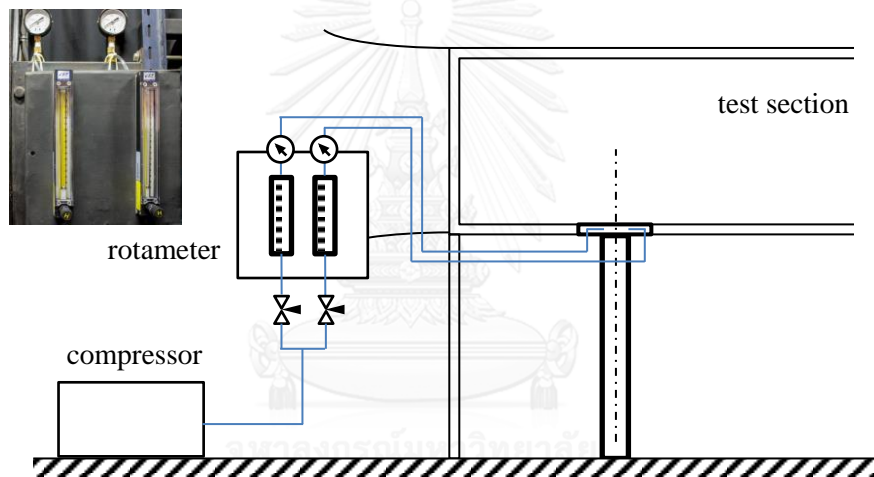


รูปที่ 4.3 พิกัดในการทดลอง

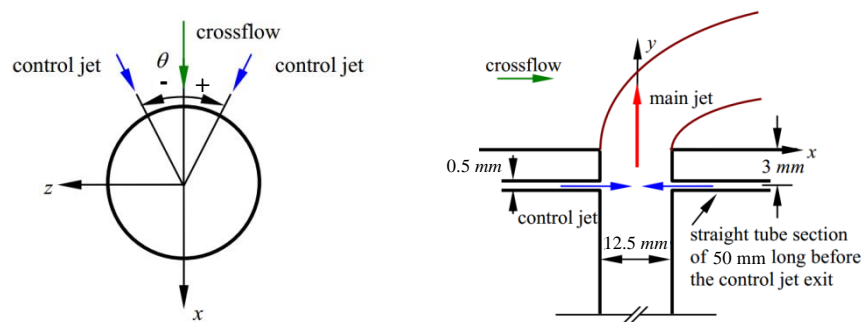




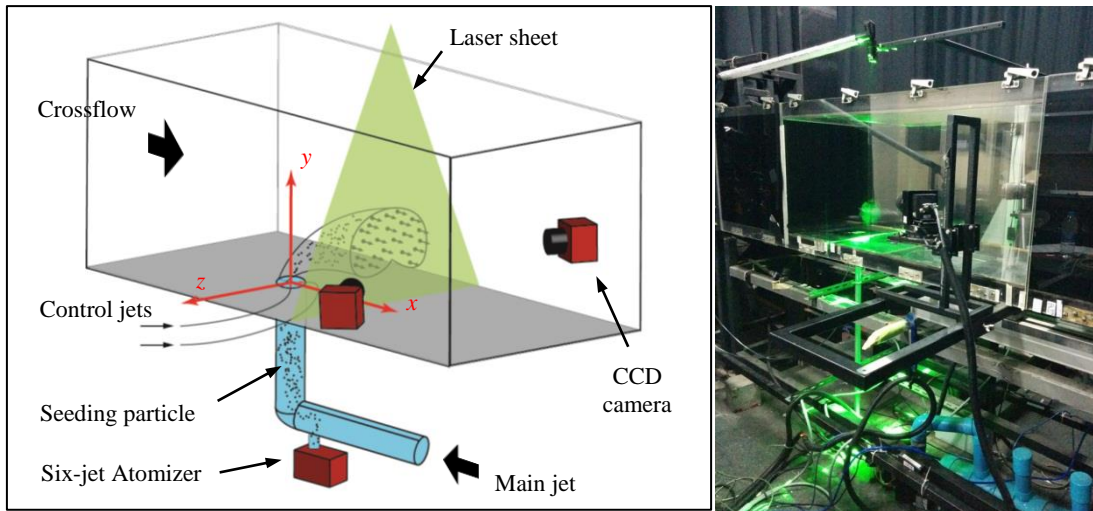
รูปที่ 4.4 ชุดเจ็ตหลัก (main jet)



รูปที่ 4.5 ชุดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (azimuthal control jet)



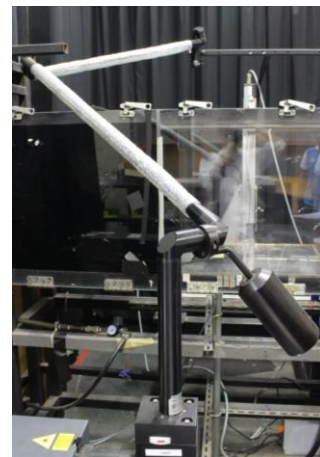
รูปที่ 4.6 หัวเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง



รูปที่ 4.7 ชุด Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV)



รูปที่ 4.8 เครื่องให้กำเนิดแสงเลเซอร์ ND:YAG



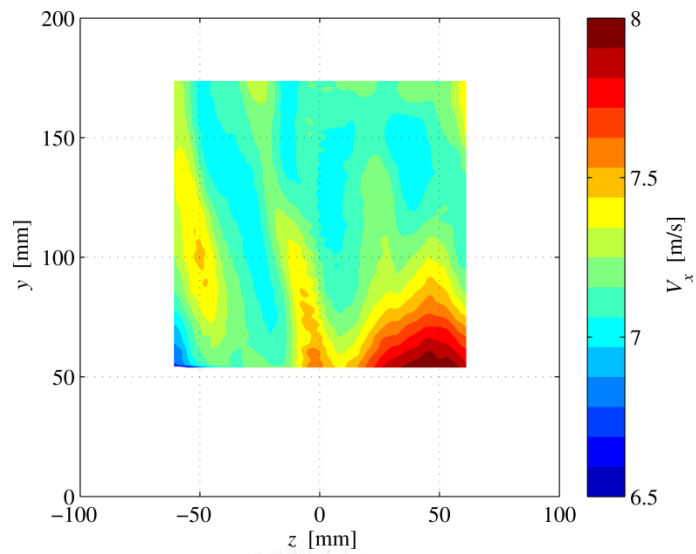
รูปที่ 4.9 Laser light arm



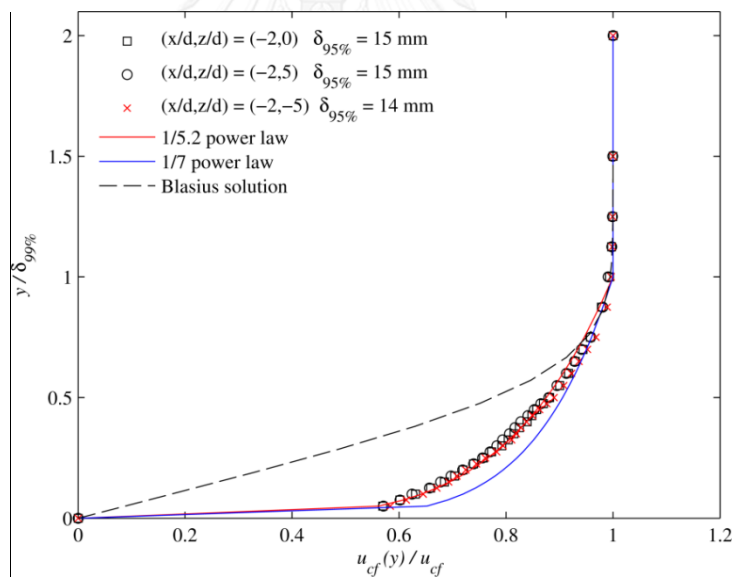
รูปที่ 4.10 กล้อง CCD PowerView Plus 11 MP



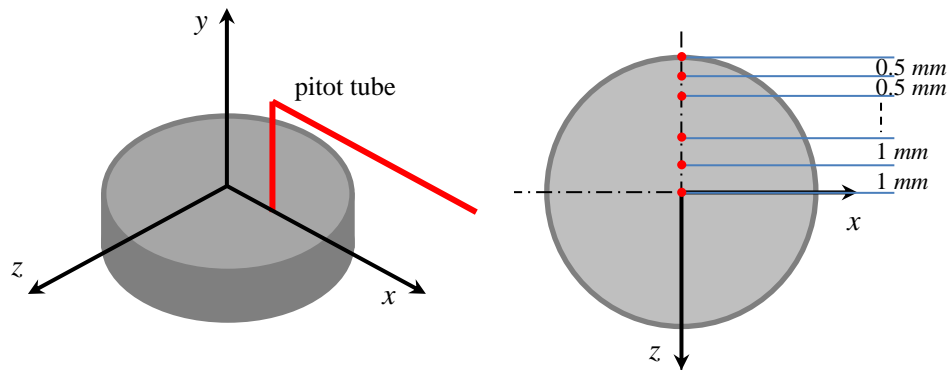
รูปที่ 4.11 Synchronizer



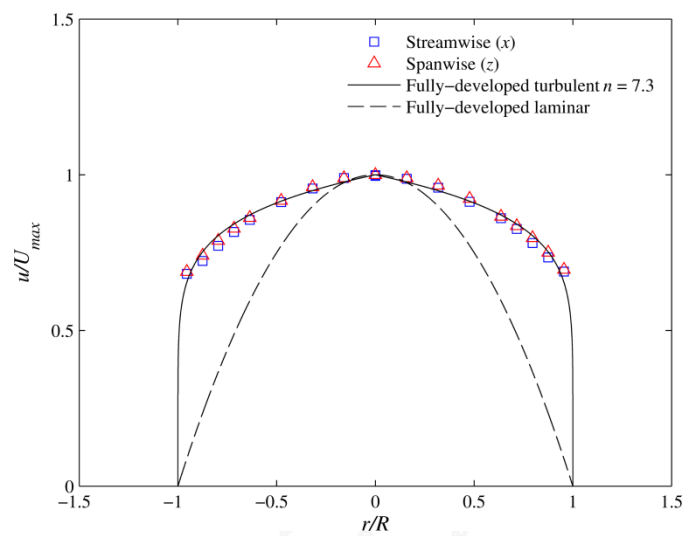
รูปที่ 4.12 ความสม่ำเสมอของความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวางที่ตำแหน่ง  $x/d = -5$  โดยวัดด้วย SPIV ซึ่งความไม่สม่ำเสมอ  $(2S_{u_{cf}}/u_{cf})_{PIV}$  มีค่าเท่ากับ 0.05



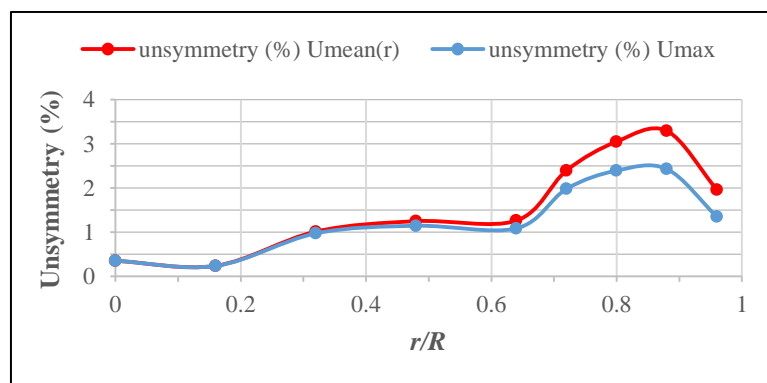
รูปที่ 4.13 รูปร่างชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางไร้มิติที่ตำแหน่ง  $x/d = -2 : z/d = 0, \pm 5$  โดยเป็นรูปร่าง turbulent ประมาณด้วยสมการ 1/5.2 power law



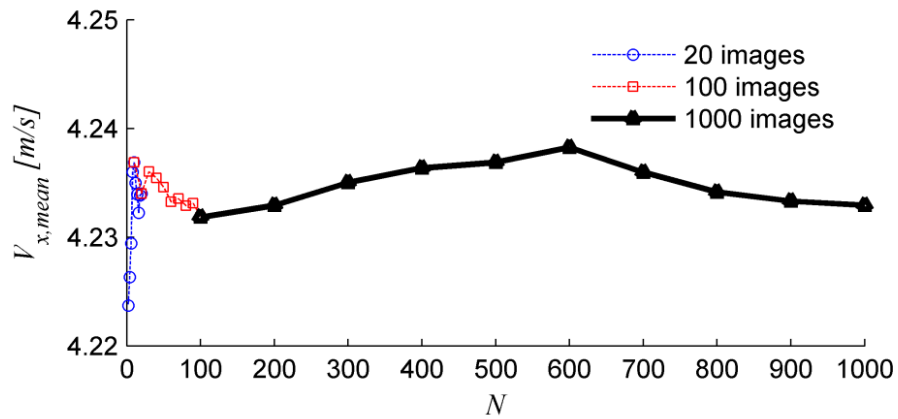
รูปที่ 4.14 ลักษณะการวัดรูปแบบความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออก



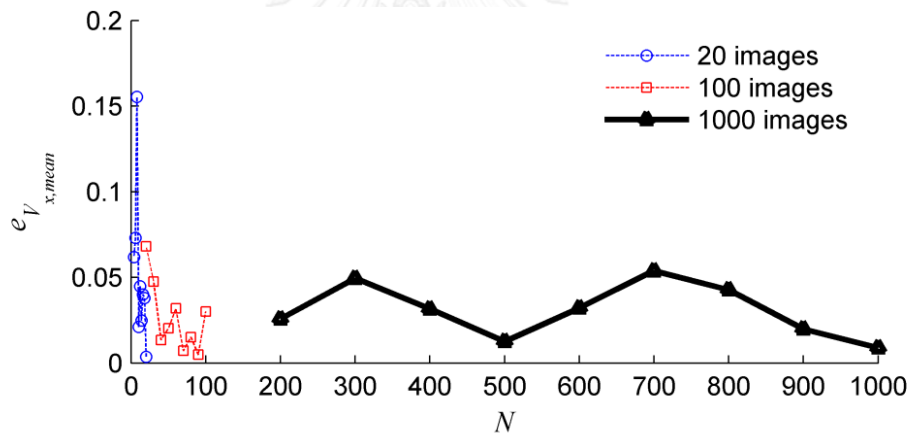
รูปที่ 4.15 รูปแบบความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออกตามแนว streamwise (x) และ spanwise (z) โดยเป็นรูปร่าง Fully-developed turbulent pipe flow



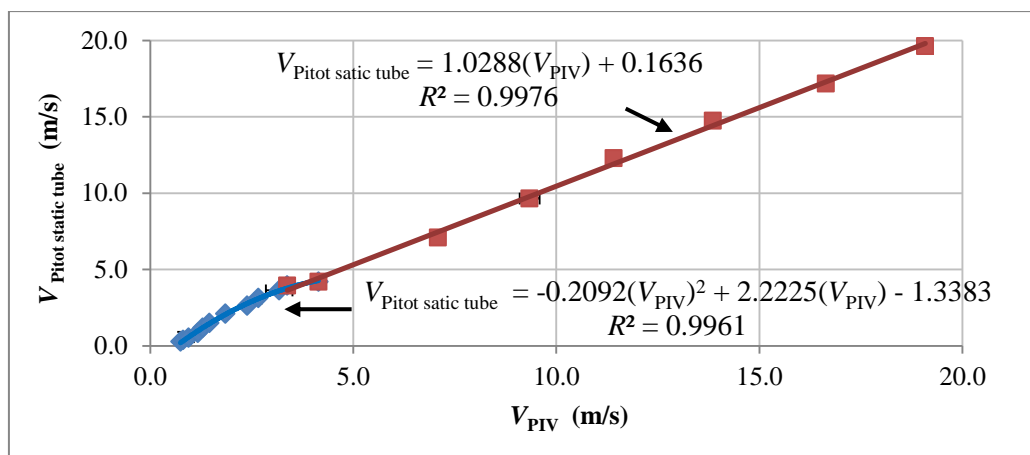
รูปที่ 4.16 ความไม่สมมาตรของเจ็ตที่ปากทางออก



รูปที่ 4.17 ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน  $x$  ที่จำนวนภาพต่าง ๆ โดยการคำนวณจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ 1) ช่วงสีฟ้า 2 - 20 ภาพ โดยเพิ่มทีละ 2 ภาพ 2) ช่วงสีแดง 20 - 100 ภาพ โดยเพิ่มทีละ 10 ภาพ 3) ช่วงสีดำ 100 - 1,000 ภาพ โดยเพิ่มทีละ 100 ภาพ



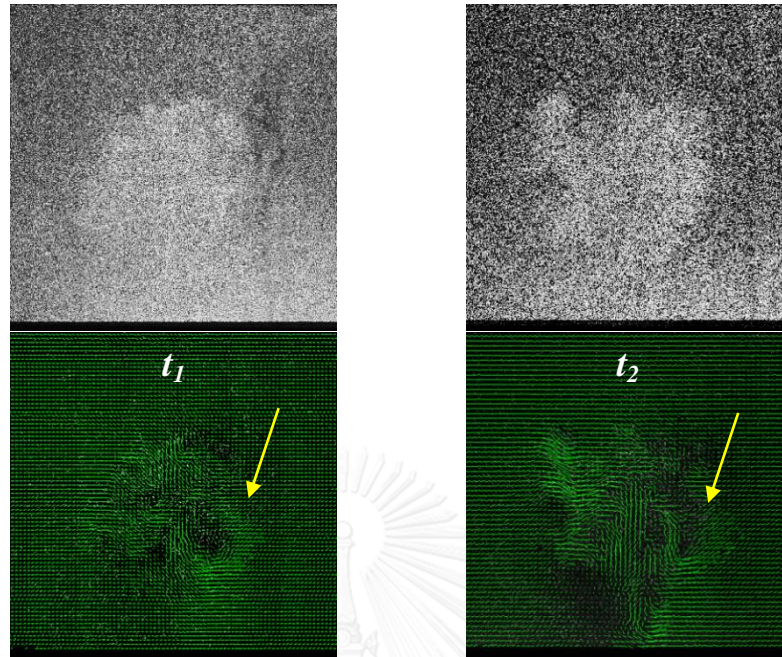
รูปที่ 4.18 ความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน  $x$  เมื่อใช้จำนวนภาพที่มากขึ้น โดยการคำนวณจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ 1) ช่วงสีฟ้า 2 - 20 ภาพ โดยเพิ่มทีละ 2 ภาพ 2) ช่วงสีแดง 20 - 100 ภาพ โดยเพิ่มทีละ 10 ภาพ 3) ช่วงสีดำ 100 - 1,000 ภาพ โดยเพิ่มทีละ 100 ภาพ



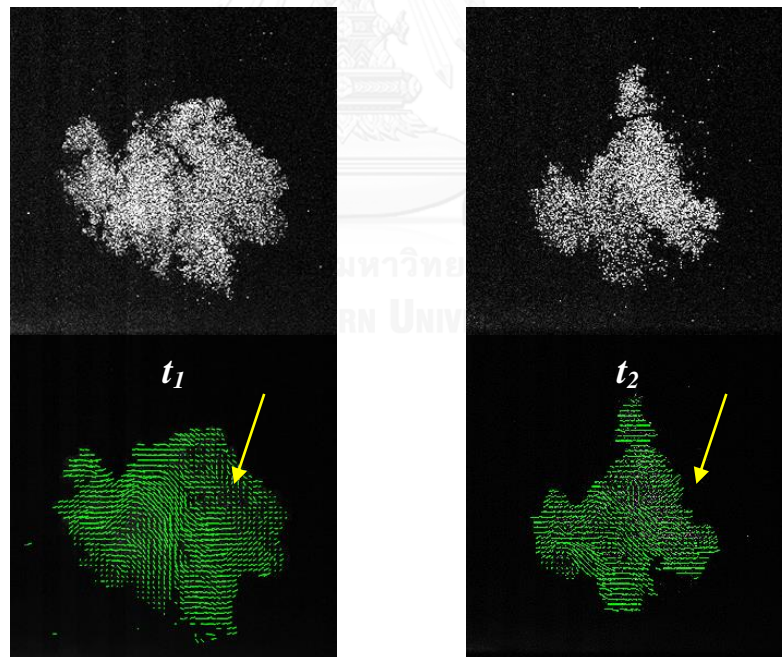
รูปที่ 4.19 กราฟการสอบเทียบระหว่าง SPIV และ pitot static tube โดยที่แบ่งความเร็วออกเป็น 2 ช่วง คือ 1) ช่วงสีฟ้าเป็นช่วงความเร็วต่ำและ 2) ช่วงสีแดงเป็นช่วงความเร็วสูง



## บทที่ 5

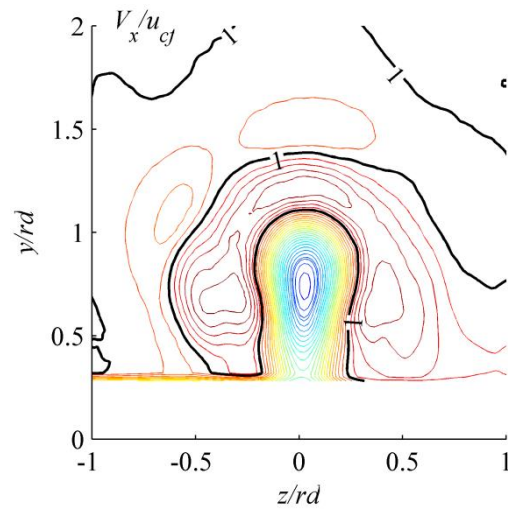


(ก) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง

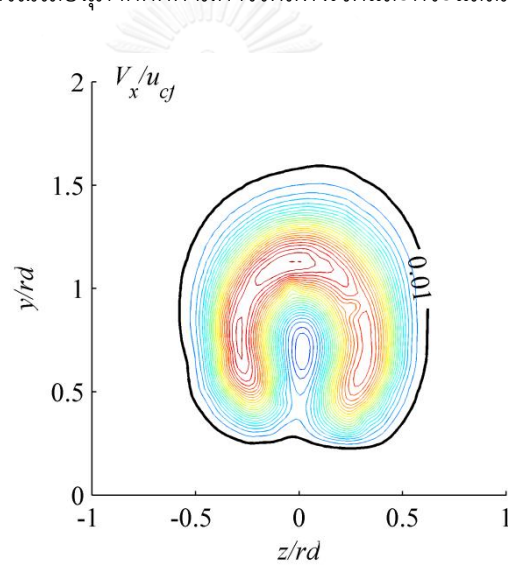


(ข) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น

รูปที่ 5.1 อนุภาคติดตามการไหลและเวกเตอร์ความเร็วขณะใด ๆ ณ เวลา  $t_1$  และ  $t_2$   
 (ก) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง  
 (ข) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น



(ก) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ทและกระแสมขวาง



(ข) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ทเท่านั้น

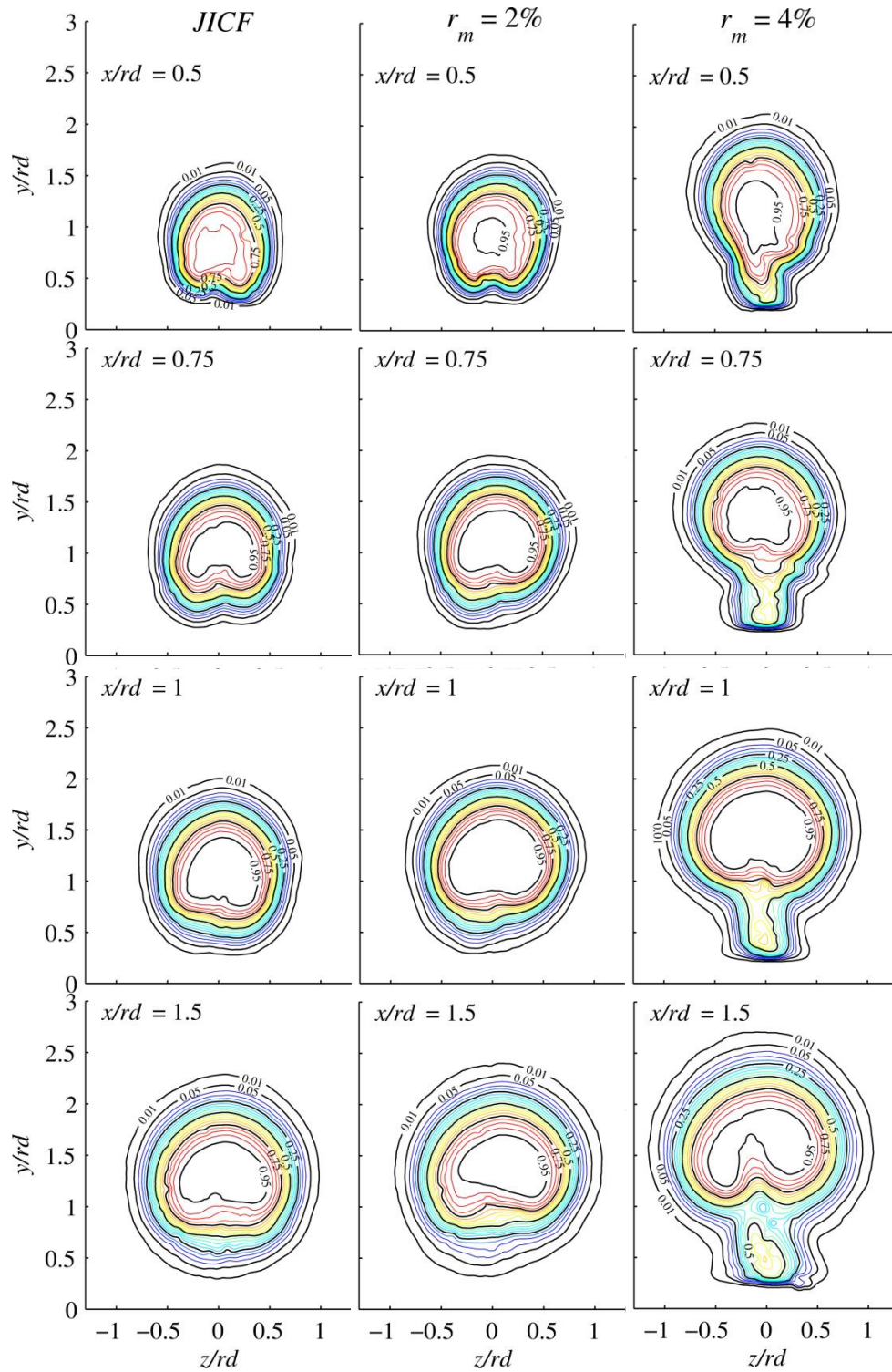
รูปที่ 5.2

ความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติตามแนวแกน streamwise ( $x$ )

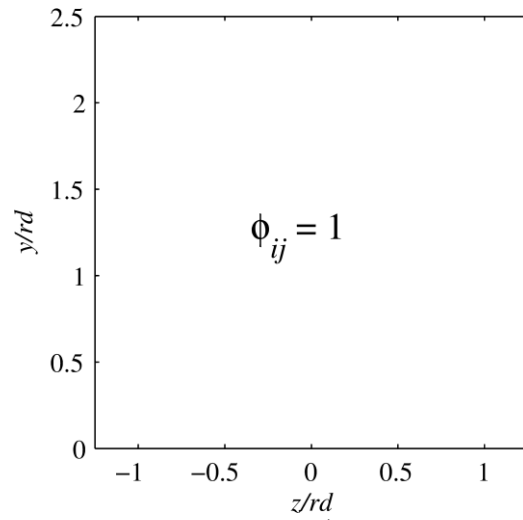
(ก) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ทและกระแสมขวาง

(ข) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ทเท่านั้น

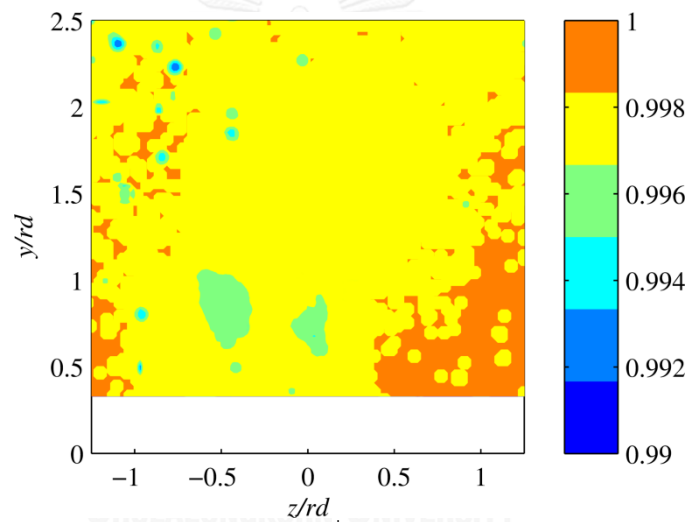




รูปที่ 5.3 การกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่จุดใด ๆ ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น

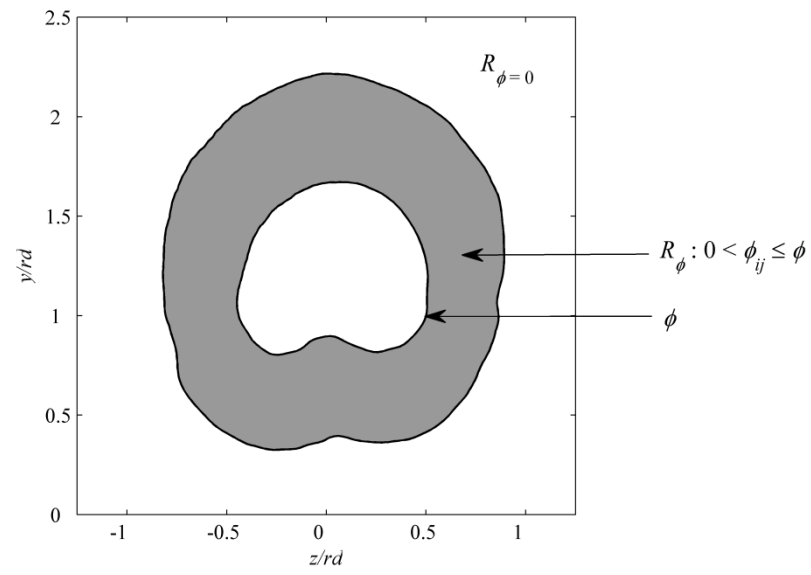


(ก) ค่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาในทางทฤษฎี



(ข) ค่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่ได้จากการวัดความเร็วด้วย SPIV

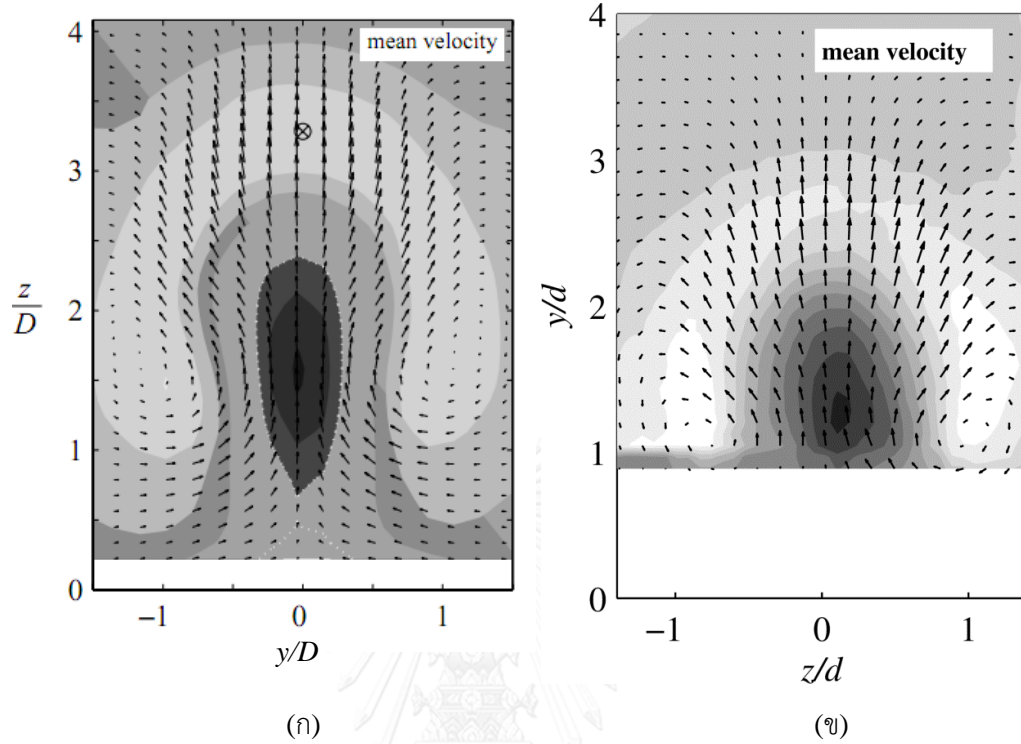
- รูปที่ 5.4 ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบความเร็วที่จุดใด ๆ  
 กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสน้ำขวาง  
 (ก) ในทางทฤษฎี  
 (ข) จากการวัดความเร็วด้วย SPIV



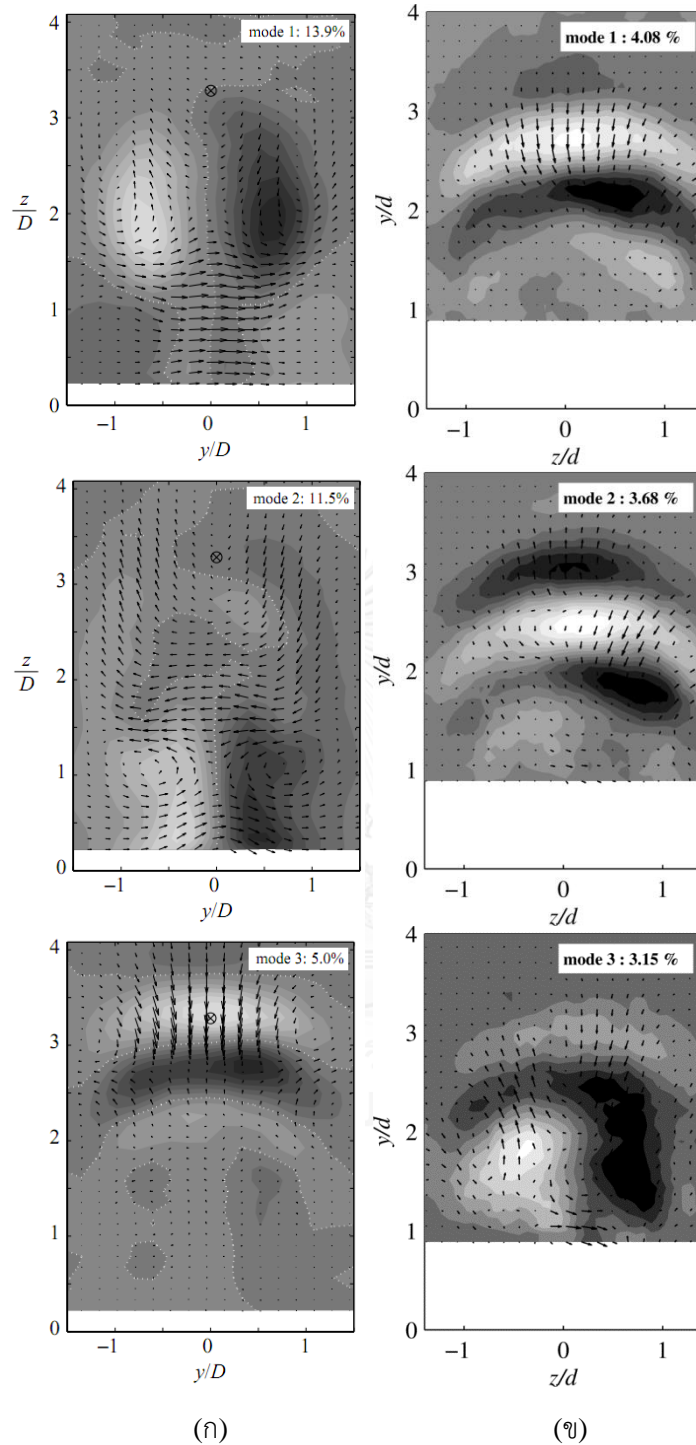
รูปที่ 5.5 บริเวณ  $R_{\phi}$  ของความน่าจะเป็นสะสมที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด  $\phi$



## บทที่ 6



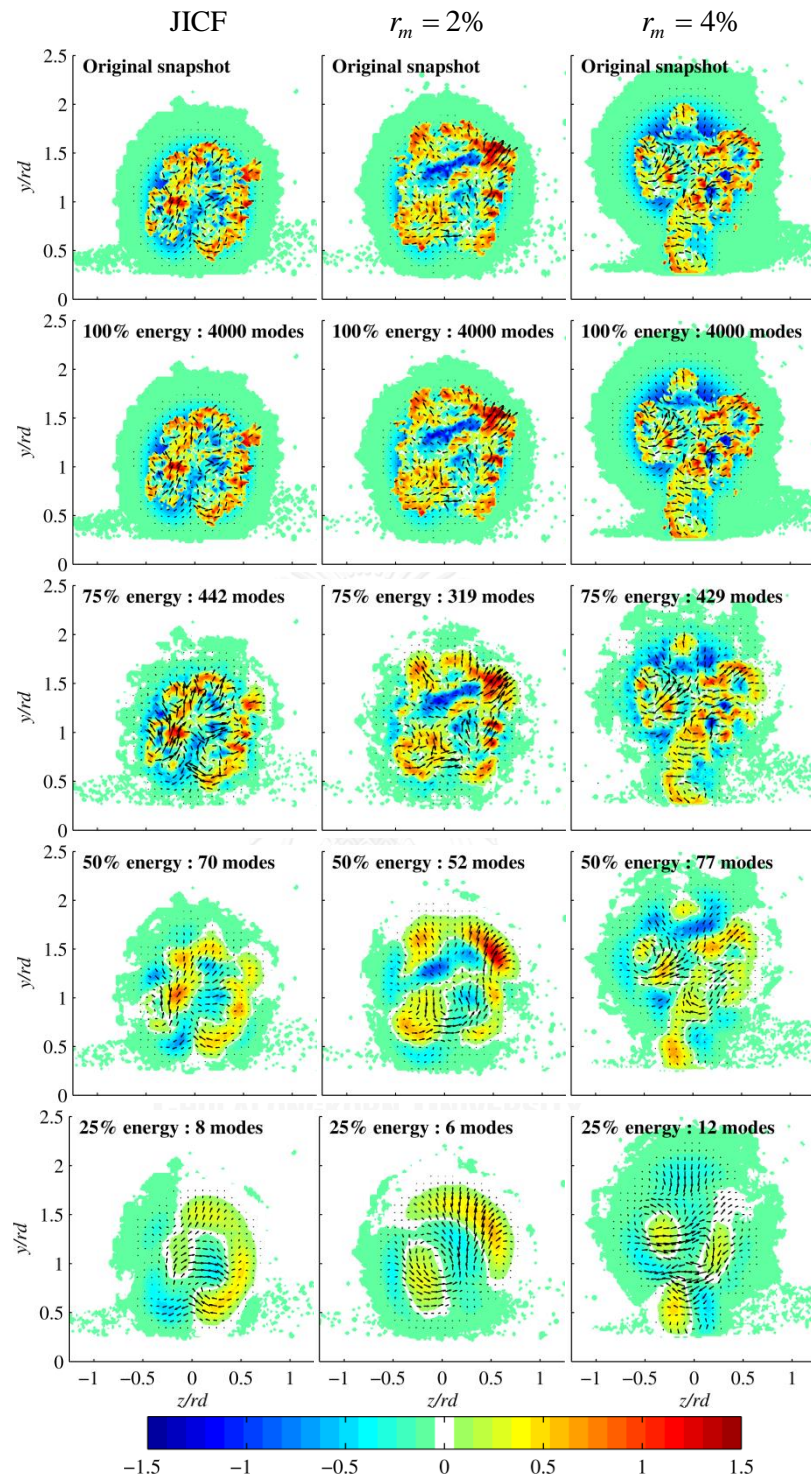
รูปที่ 6.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน  $x$  ไร้มิติ ( $V_x/u_{cf}$ ) และ โครงสร้างความเร็วเฉลี่ยบนระนาบ  $yz$  ไร้มิติ ( $\vec{V}_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/u_{cf}$ ) (สเกลการพล็อตไม่เหมือนกัน)  
 (ก) Meyer *et al.* (2007)  
 (ข) การทดลองเพื่อการสอบทวนในงานวิจัยนี้



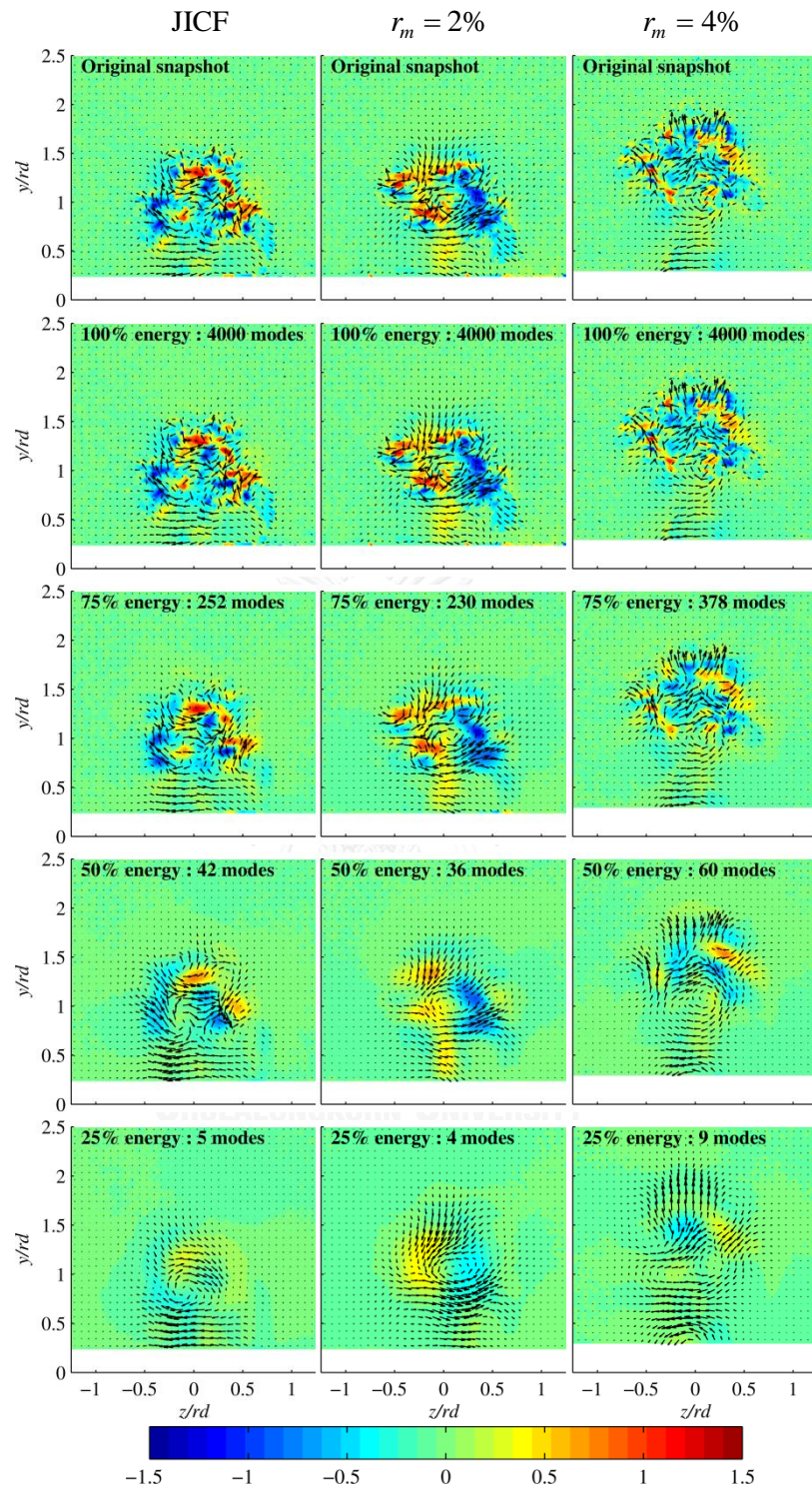
รูปที่ 6.2 การเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงาน (สเกลการพล็อตไม่เหมือนกัน)

(ก) Meyer *et al.* (2007)

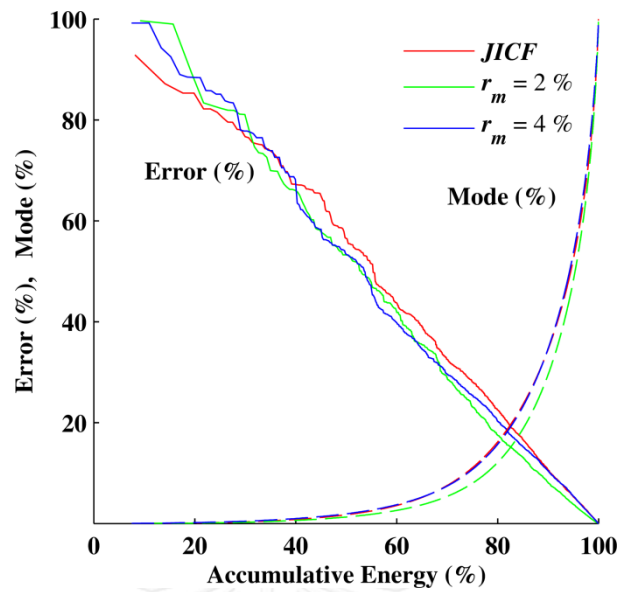
(ข) การทดลองเพื่อการสอบทวนในงานวิจัยนี้



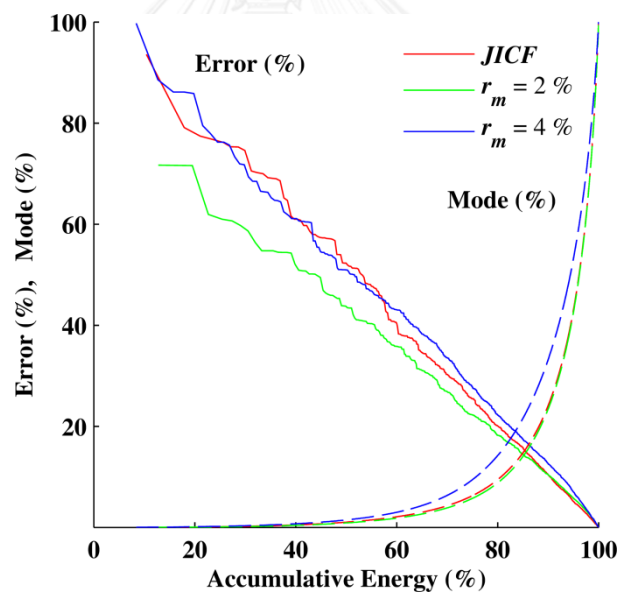
รูปที่ 6.3(ก) กระบวนการย้อนกลับของความเร็วปั่นป่วนไร้มิติ ณ ภาพที่ 2,000 ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตำแหน่ง  $x/r_d = 0.75$  ที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น ซึ่งใช้จำนวน Mode เทียบเท่ากับระดับพลังงานรวม 25%, 50%, 75% และ 100% โดย contour แสดง  $V'_x/u_{cf}$  และเวกเตอร์บนระนาบแสดง  $\vec{V}'_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}'_y + \vec{V}'_z)/u_{cf}$



รูปที่ 6.3(ข) กระบวนการย้อนกลับของความเร็วปั่นป่วนไร้มิติ ณ ภาพที่ 2,000 ของกรณี JICF ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  ที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง ซึ่งใช้จำนวน Mode เทียบเท่ากับระดับพลังงานรวม 25%, 50%, 75% และ 100% โดย contour แสดง  $V'_x/u_{cf}$  และเวกเตอร์บนระนาบแสดง  $\vec{V}'_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}'_y + \vec{V}'_z)/u_{cf}$



(ก) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น

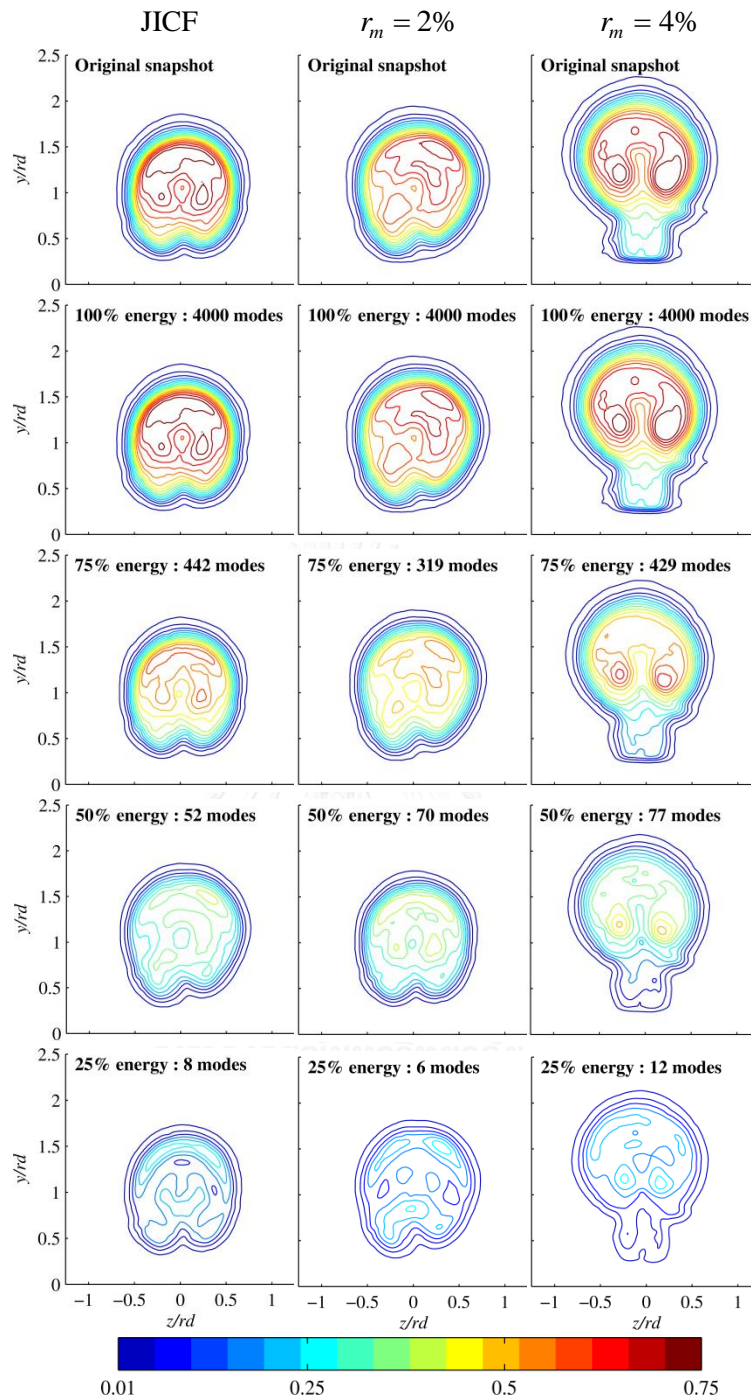


(ข) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง

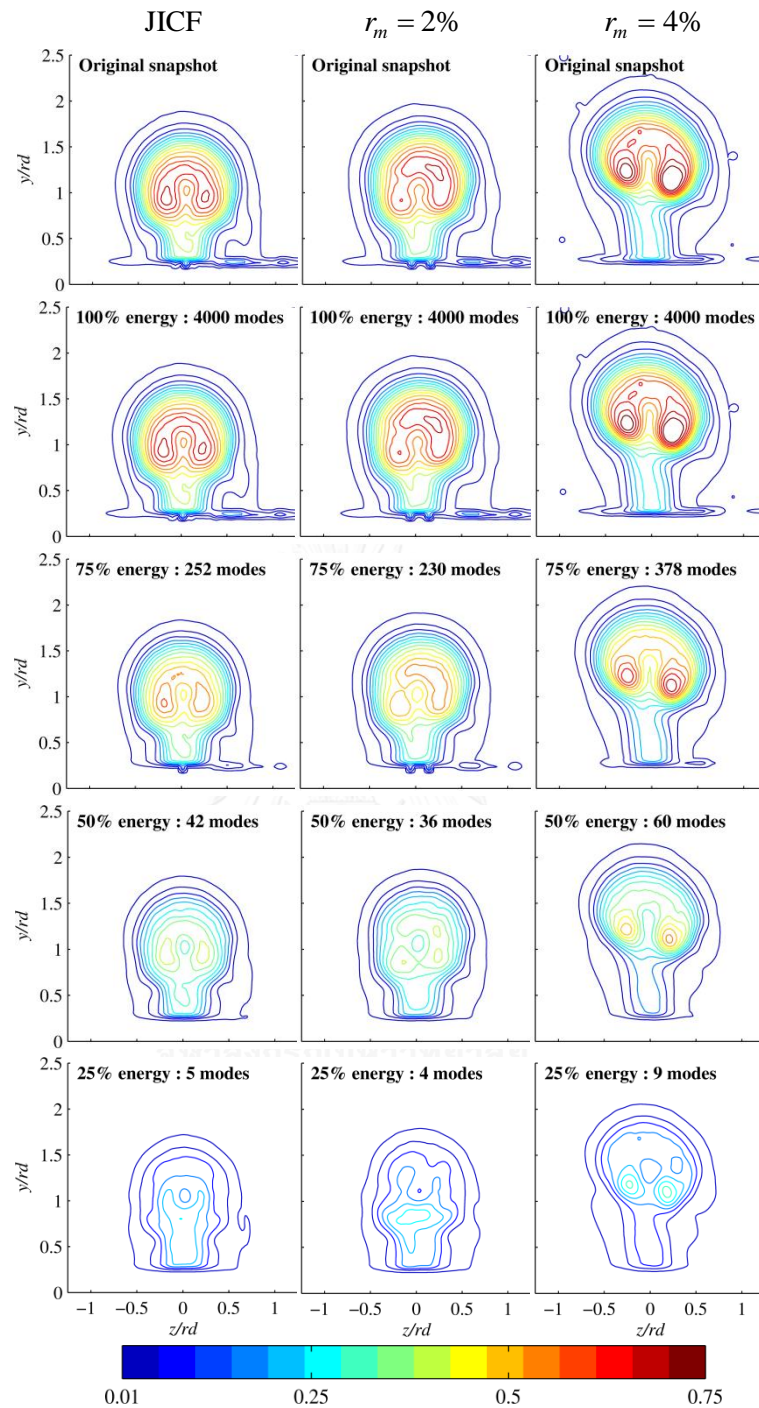
รูปที่ 6.4

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระดับพลังงาน Turbulent kinetic energy (TKE) ณ ภาพที่ 2,000 ที่ได้จากกระบวนการย้อนกลับที่ระดับพลังงานสะสมต่าง ๆ เทียบกับที่วัดได้จาก SPIV ณ ภาพที่ 2,000 ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  รวมไปถึงเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode สะสม โดยคำนวณเพิ่มทีละ 1 Mode

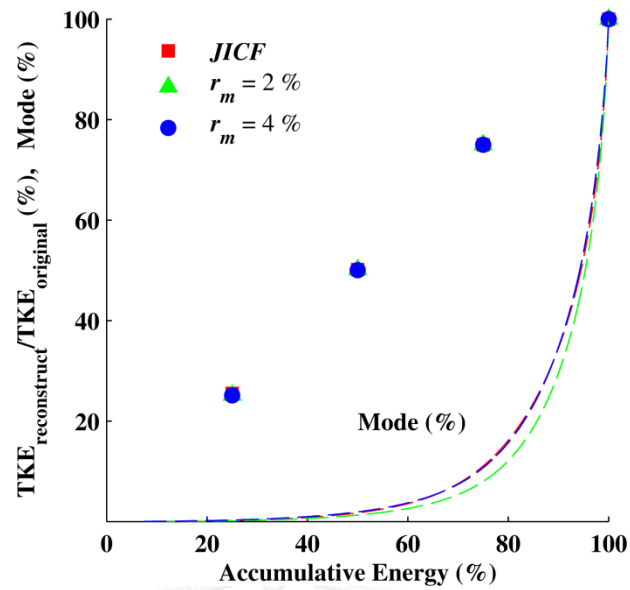




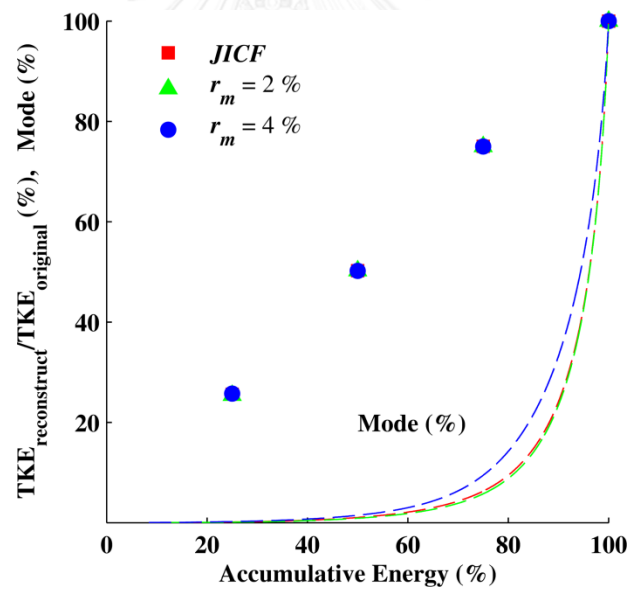
รูปที่ 6.5(ก) การกระจายตัวของ Turbulent kinetic Energy ไร้มิติ ( $TKE / CKE$ ) ที่คำนวณได้จากกระบวนการย้อนกลับของสนามความเร็วปั่นป่วนทั้งหมด (4,000 ภาพ) ด้วยระดับพลังงานสะสม 25%, 50%, 75% และ 100% รวมไปถึง  $TKE$  ที่ได้จากการคำนวณผ่านสนามความเร็วปั่นป่วนทั้งหมด (4,000 ภาพ) ที่วัดได้จาก SPIV (original) ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ที่ตำแหน่ง  $x / rd = 0.75$  สำหรับวิธีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น



รูปที่ 6.5(ข) การกระจายตัวของ Turbulent kinetic Energy ไร้มิติ ( $TKE / CKE$ ) ที่คำนวณได้จากกระบวนการย้อนกลับของสนามความเร็วปั่นป่วนทั้งหมด (4,000 ภาพ) ด้วยระดับพลังงานสะสม 25%, 50%, 75% และ 100% รวมไปถึง  $TKE$  ที่ได้จากการคำนวณผ่านสนามความเร็วปั่นป่วนทั้งหมด (4,000 ภาพ) ที่วัดได้จาก SPIV (original) ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ที่ตำแหน่ง  $x / rd = 0.75$  สำหรับวิธีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสนวมขวาง

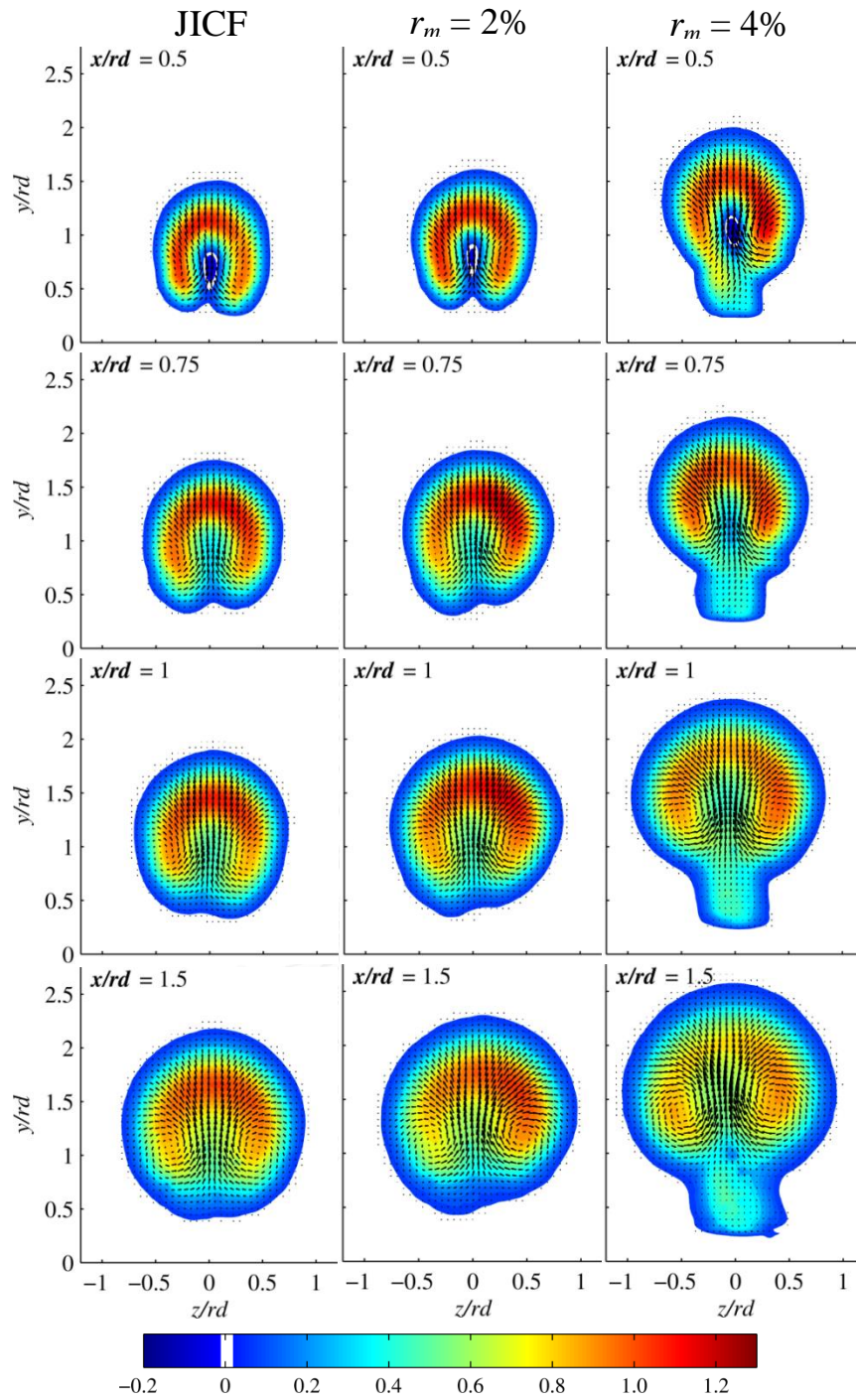


(ก) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น

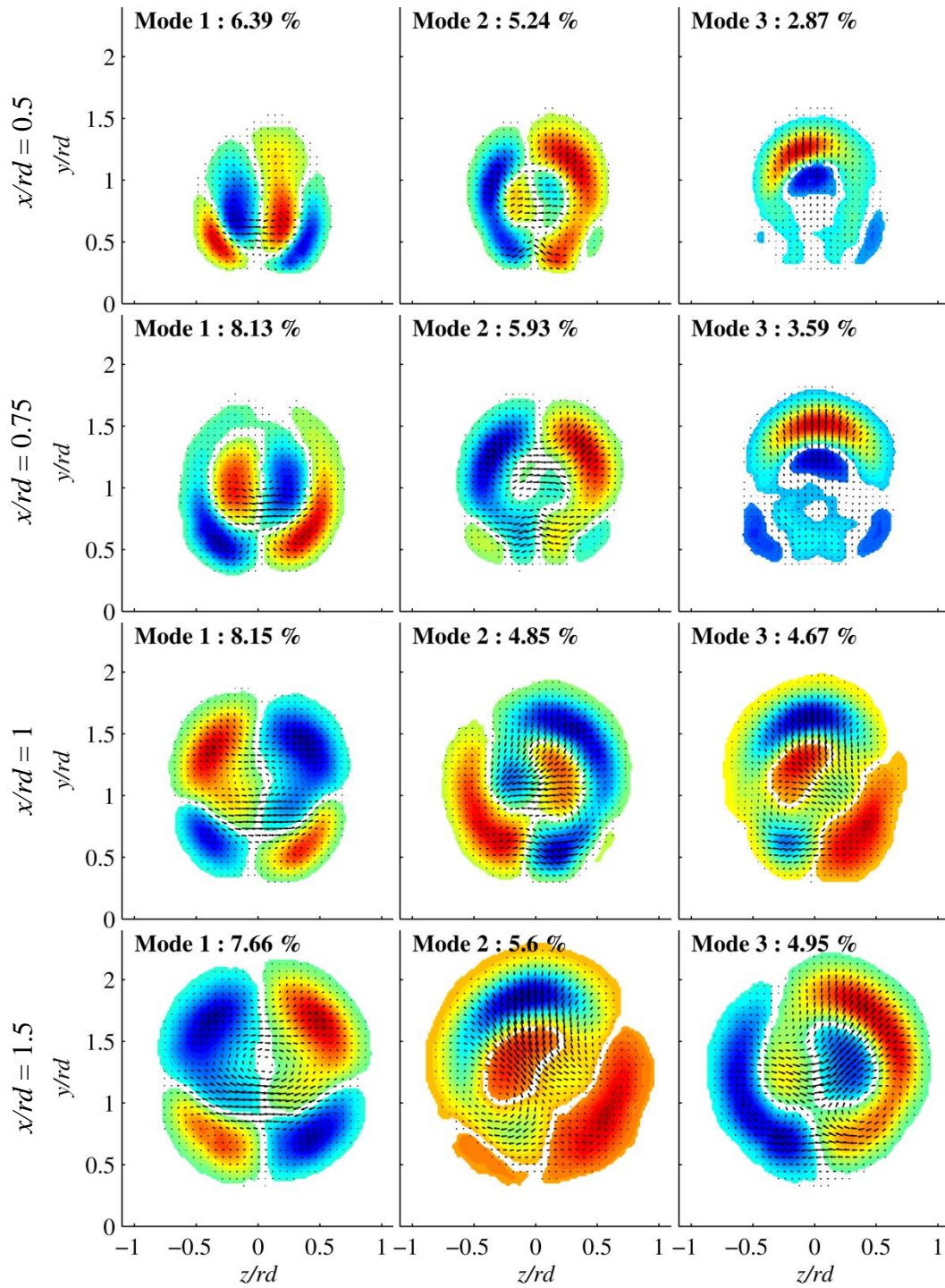


(ข) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง

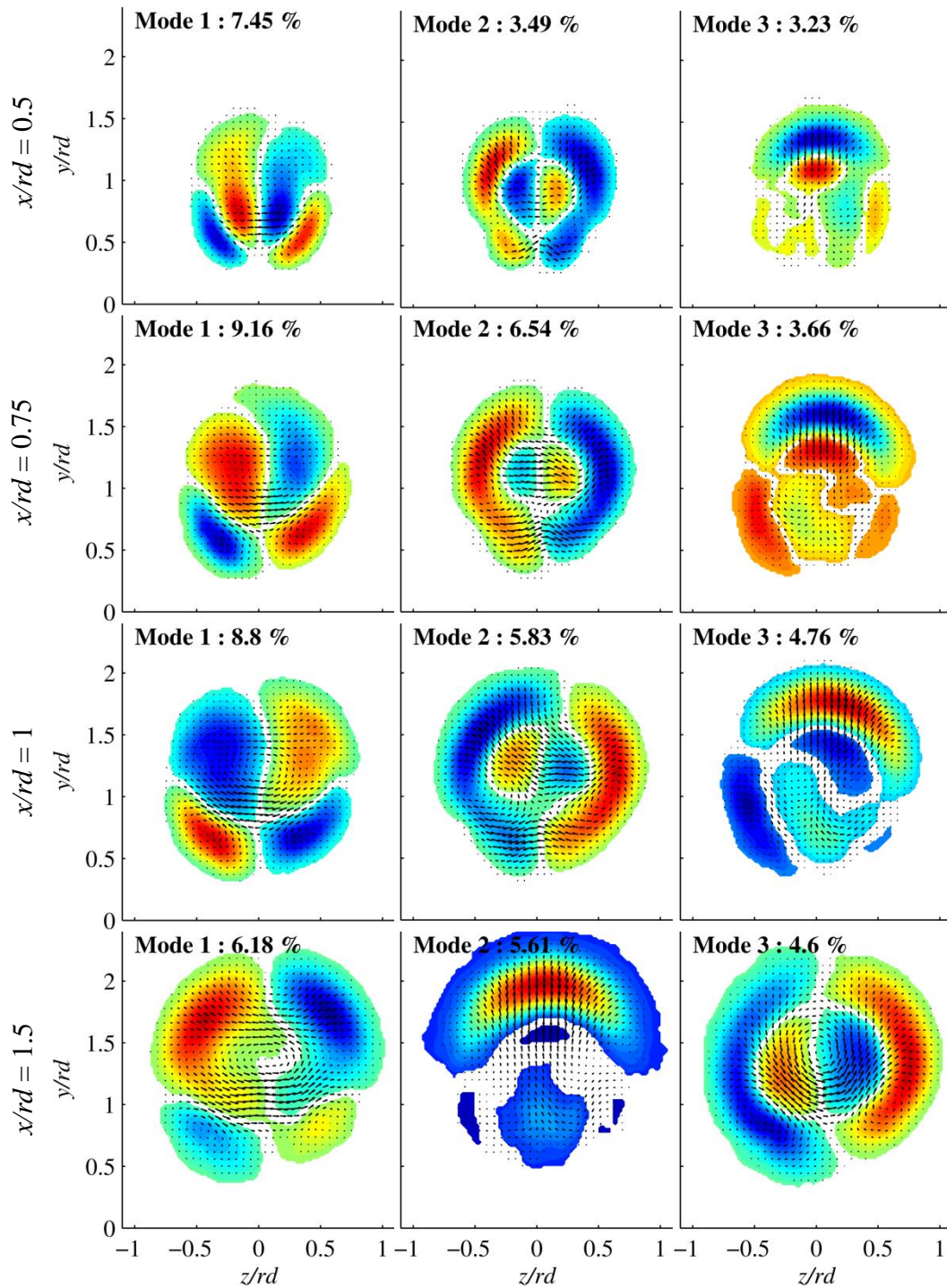
รูปที่ 6.6 เปรอ์เซ็นต์ของ  $TKE$  ที่คำนวณจากกระบวนการย้อนกลับเทียบกับ  $TKE$  ที่คำนวณจากการวัดจริงของกรณี  $JICF$ ,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.75$  รวมไปถึงเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode สะสม สำหรับเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode สะสมจะคำนวณโดยเพิ่มทีละ 1 Mode



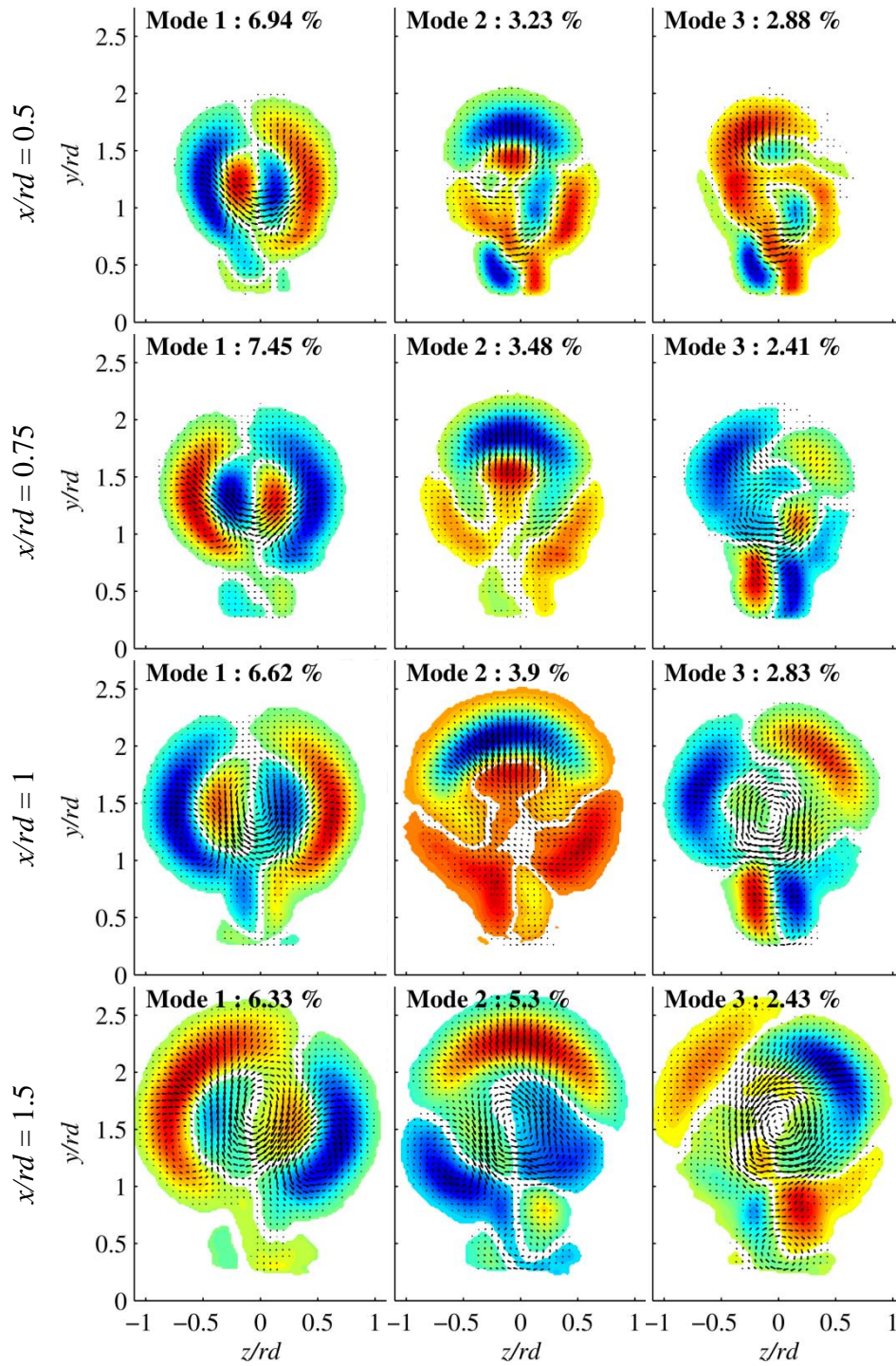
รูปที่ 7.1 การกระจายตัวของความเร็วเจ็ตเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติ โดยเส้น contour แสดงความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติตามแนวแกน  $x$  ( $V_x/u_{cf}$ ) และเวกเตอร์ในระนาบแสดงความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติตามแนวแกน  $y$  และ  $z$  ( $\bar{V}_{yz}/u_{cf} = (\bar{V}_y + \bar{V}_z)/u_{cf}$ ) ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น



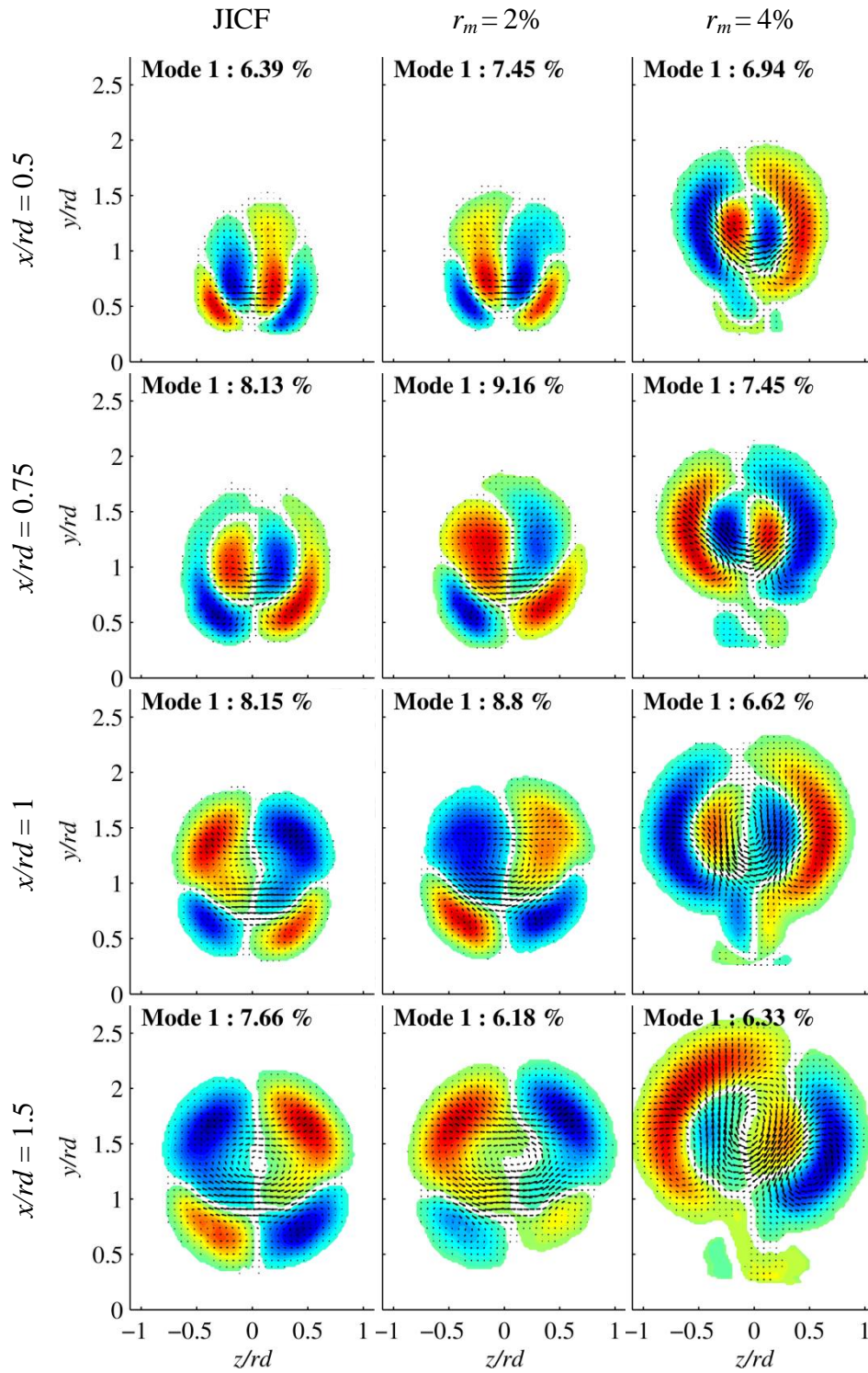
รูปที่ 7.2(ก) การพัฒนาตัวของโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานของกรณี JICF สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น



รูปที่ 7.2(ข) การพัฒนาตัวของโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานของกรณี  $r_m = 2\%$  สำหรับการไหลวนภาคตัดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น

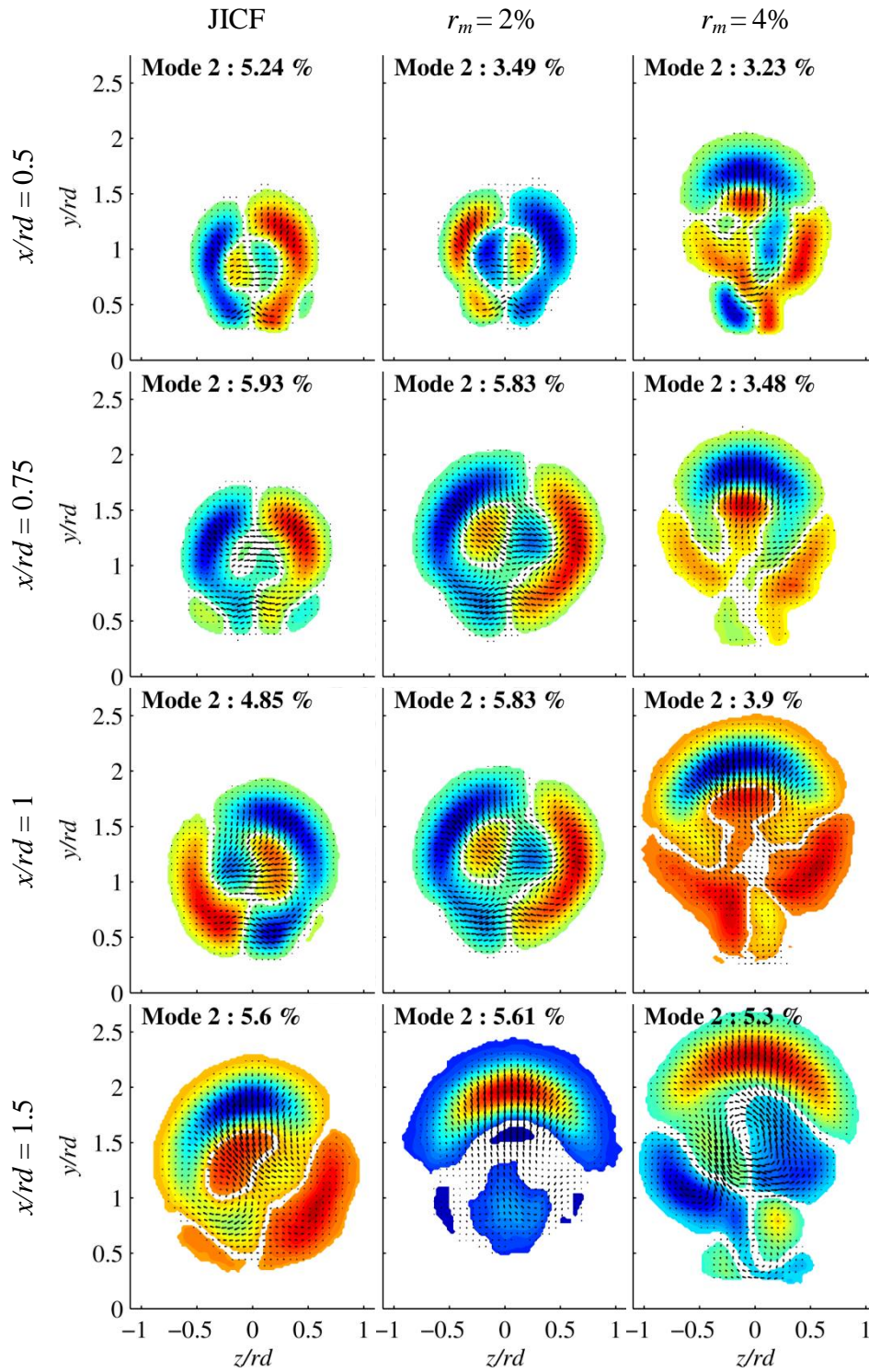


รูปที่ 7.3(ค) การพัฒนาตัวของโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานของกรณี  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น

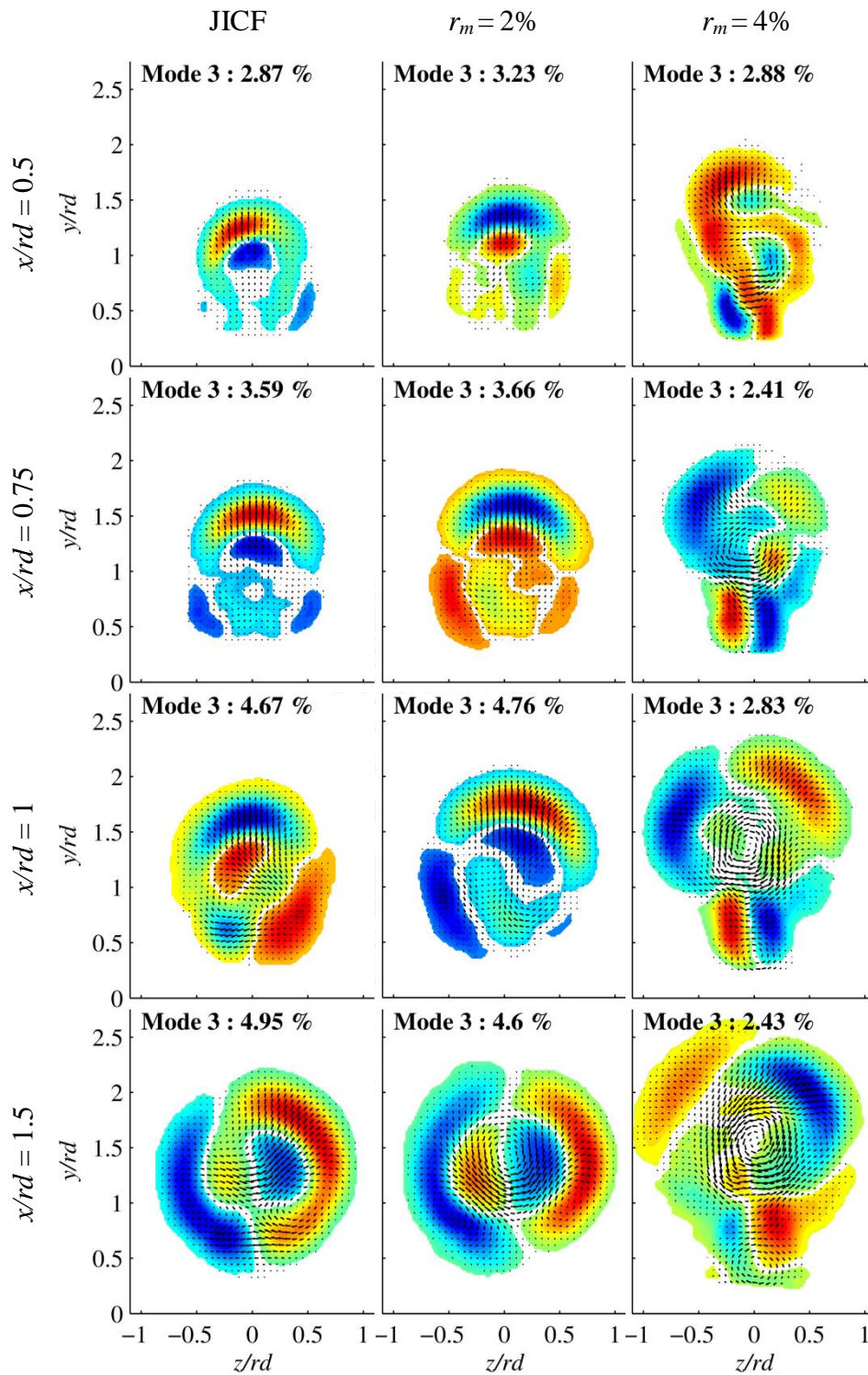


รูปที่ 7.3(ก) การเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 1 ระหว่างกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น

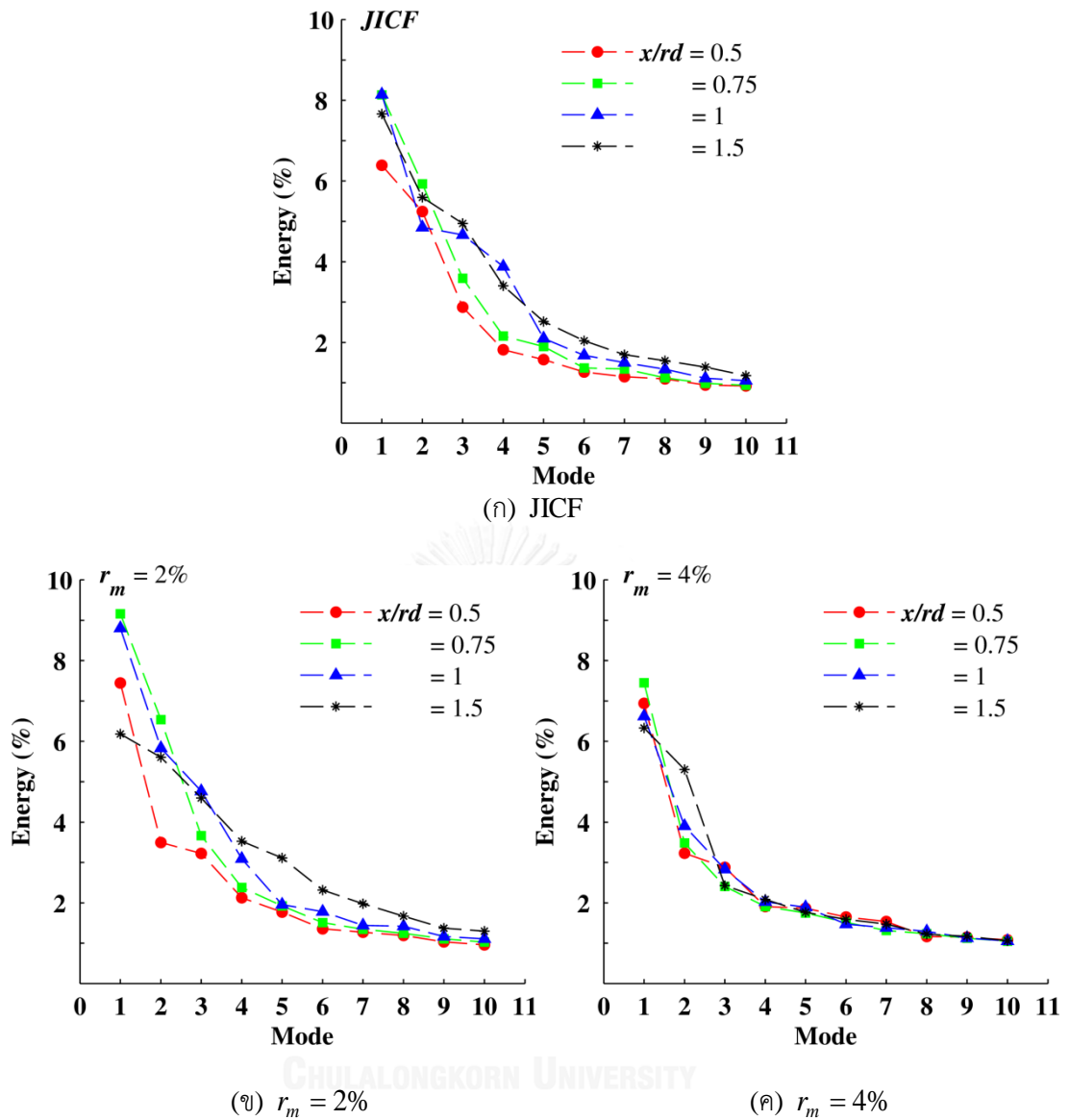




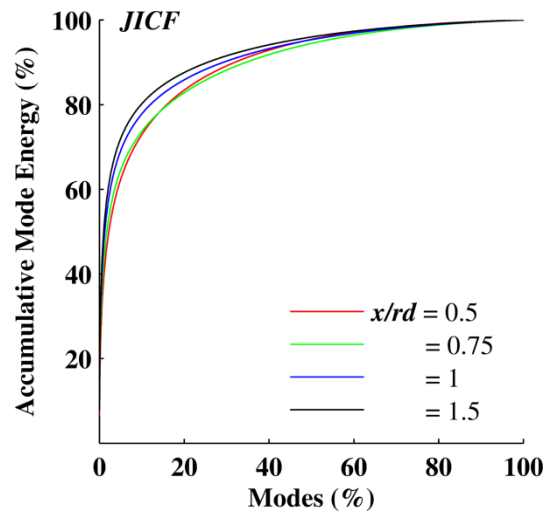
รูปที่ 7.3(ข) การเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 2 ระหว่างกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น



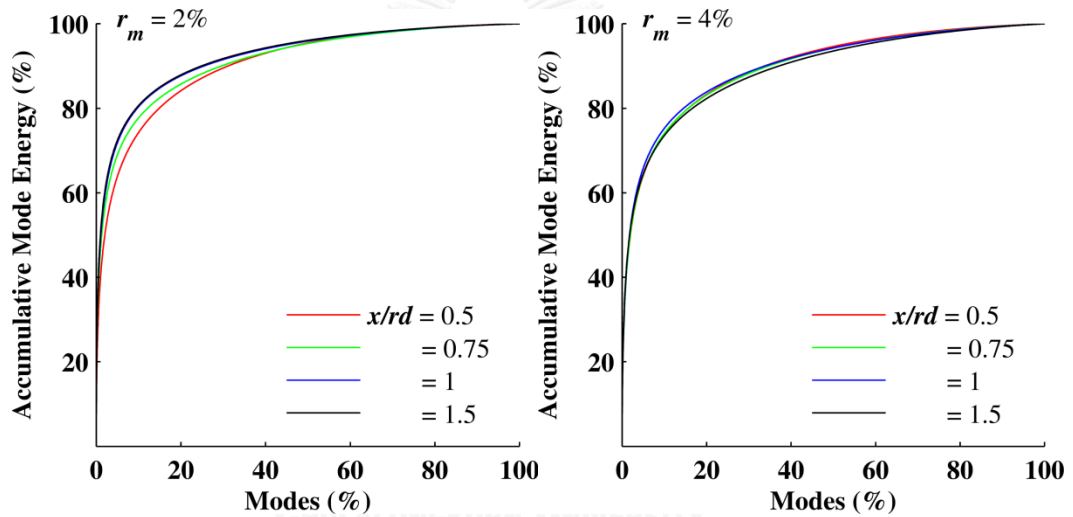
รูปที่ 7.3(ค) การเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 3 ระหว่างกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น



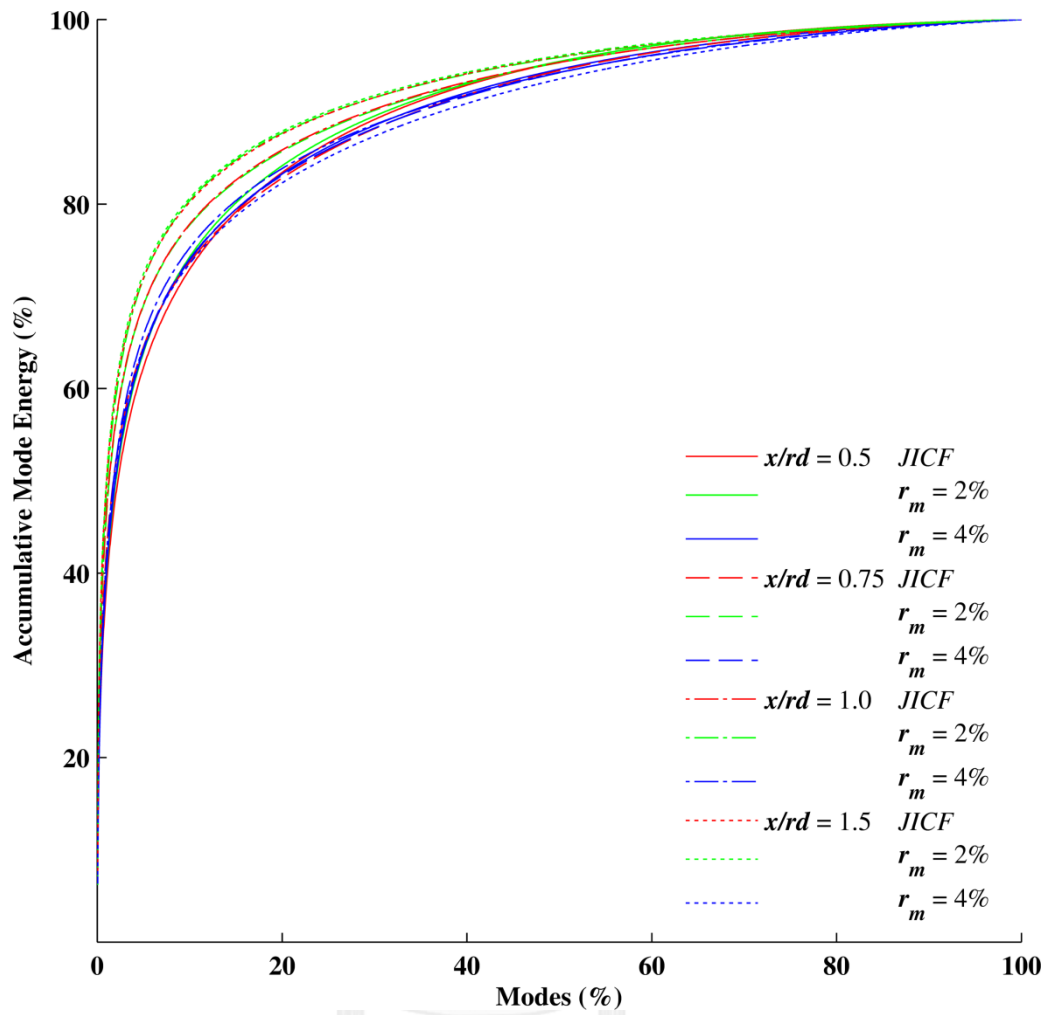
รูปที่ 7.4 การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของระดับพลังงานเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น



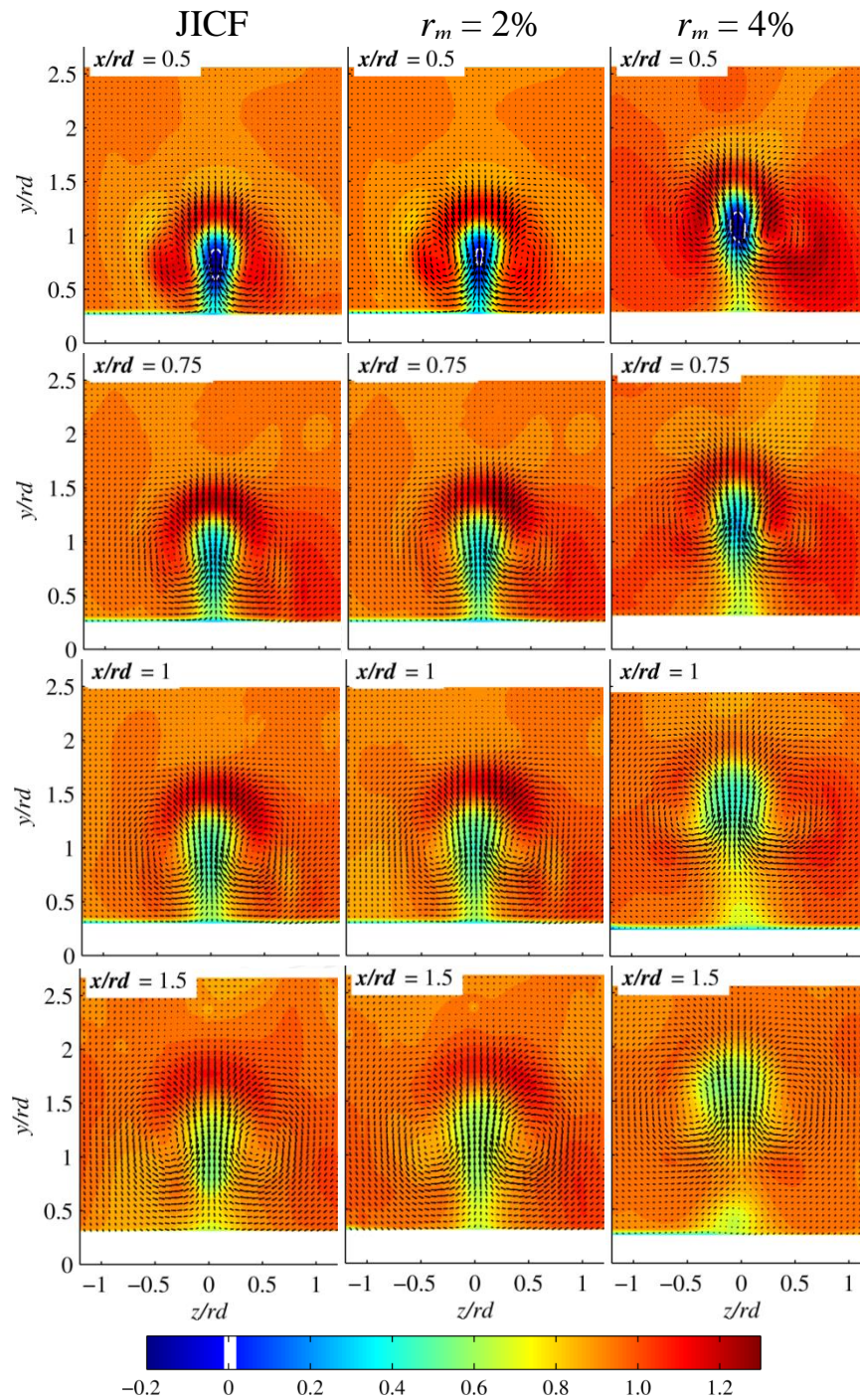
(ก) JICF

(ข)  $r_m = 2\%$ (ค)  $r_m = 4\%$ 

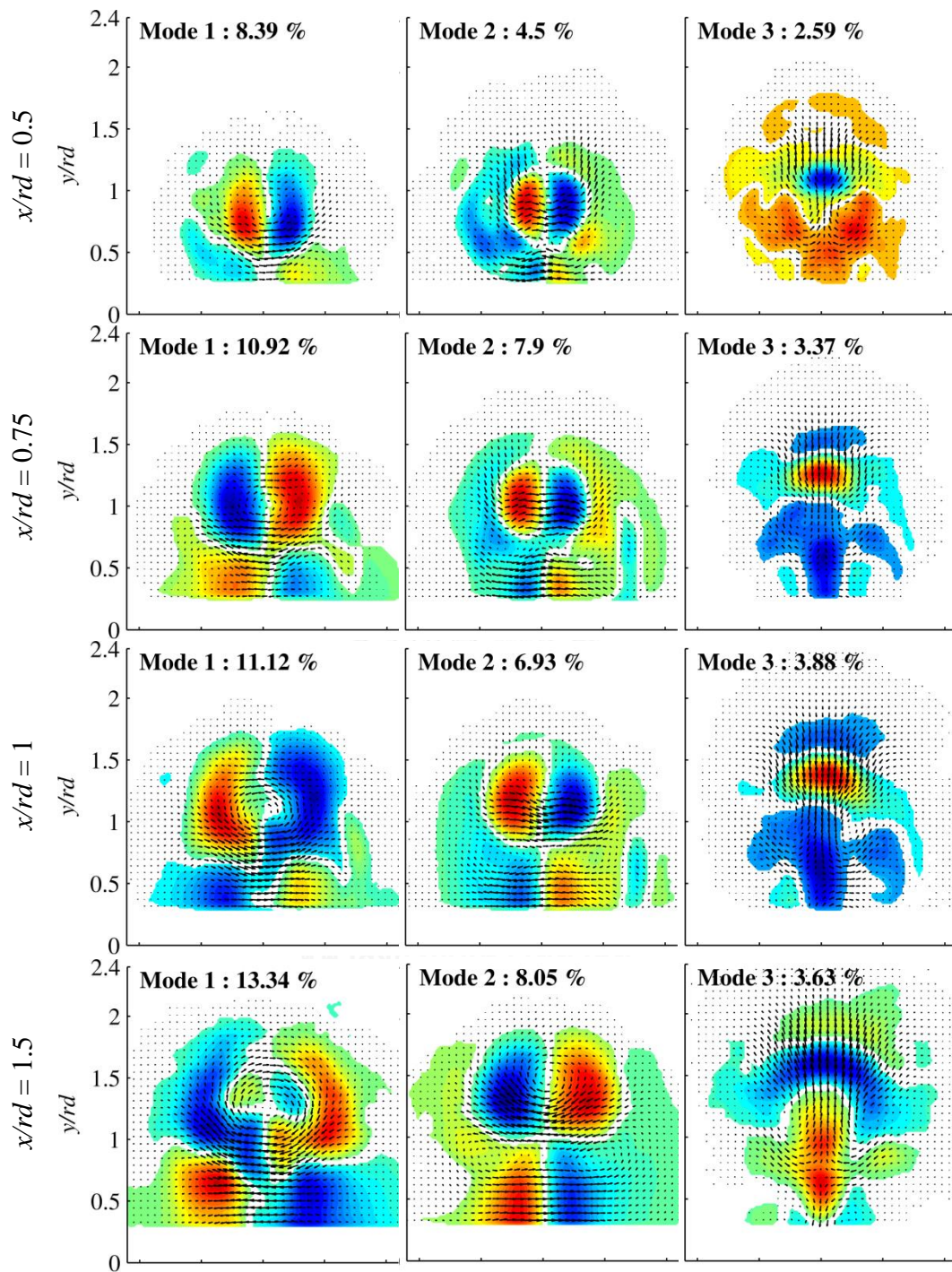
รูปที่ 7.5 การพัฒนาตัวของพลังงานสะสม (Accumulative energy) ต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น โดยคำนวณเพิ่มทีละ 1 Mode



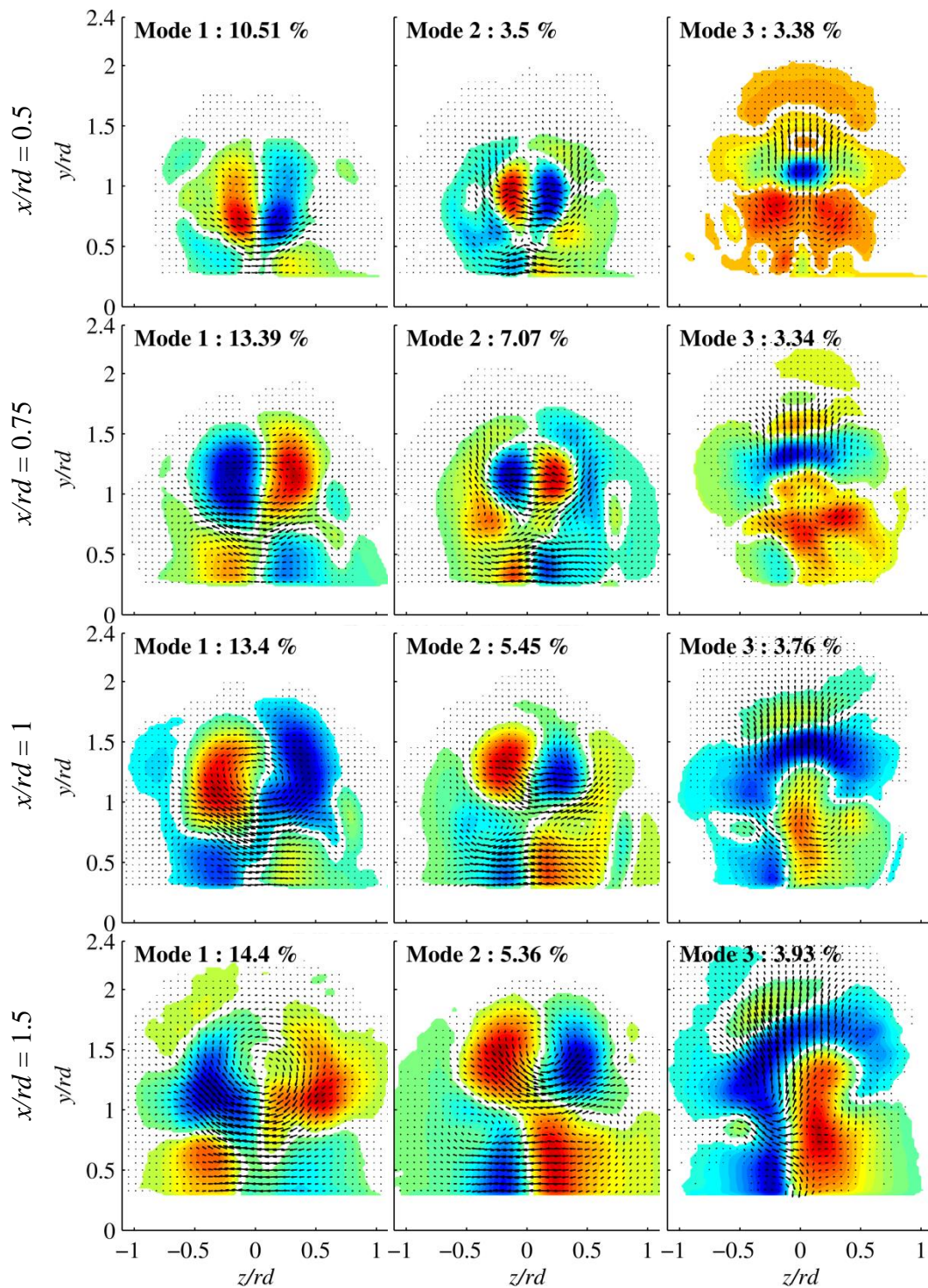
รูปที่ 7.6 พลังงานสะสม (Accumulative energy) ต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode กรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  และทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น โดยคำนวณเพิ่มทีละ 1 Mode



รูปที่ 8.1 การกระจายตัวของความเร็วสนามเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติ โดยเส้น contour แสดงความ  
 ความเร็วสนามเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติตามแนวแกน  $x$  ( $V_x/u_{cf}$ ) และเวกเตอร์ใน  
 ระนาบแสดงความเร็วสนามเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติตามแนวแกน  $y$  และ  $z$   
 ( $\bar{V}_{yz}/u_{cf} = (\bar{V}_y + \bar{V}_z)/u_{cf}$ ) ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$   
 ตามลำดับ สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง

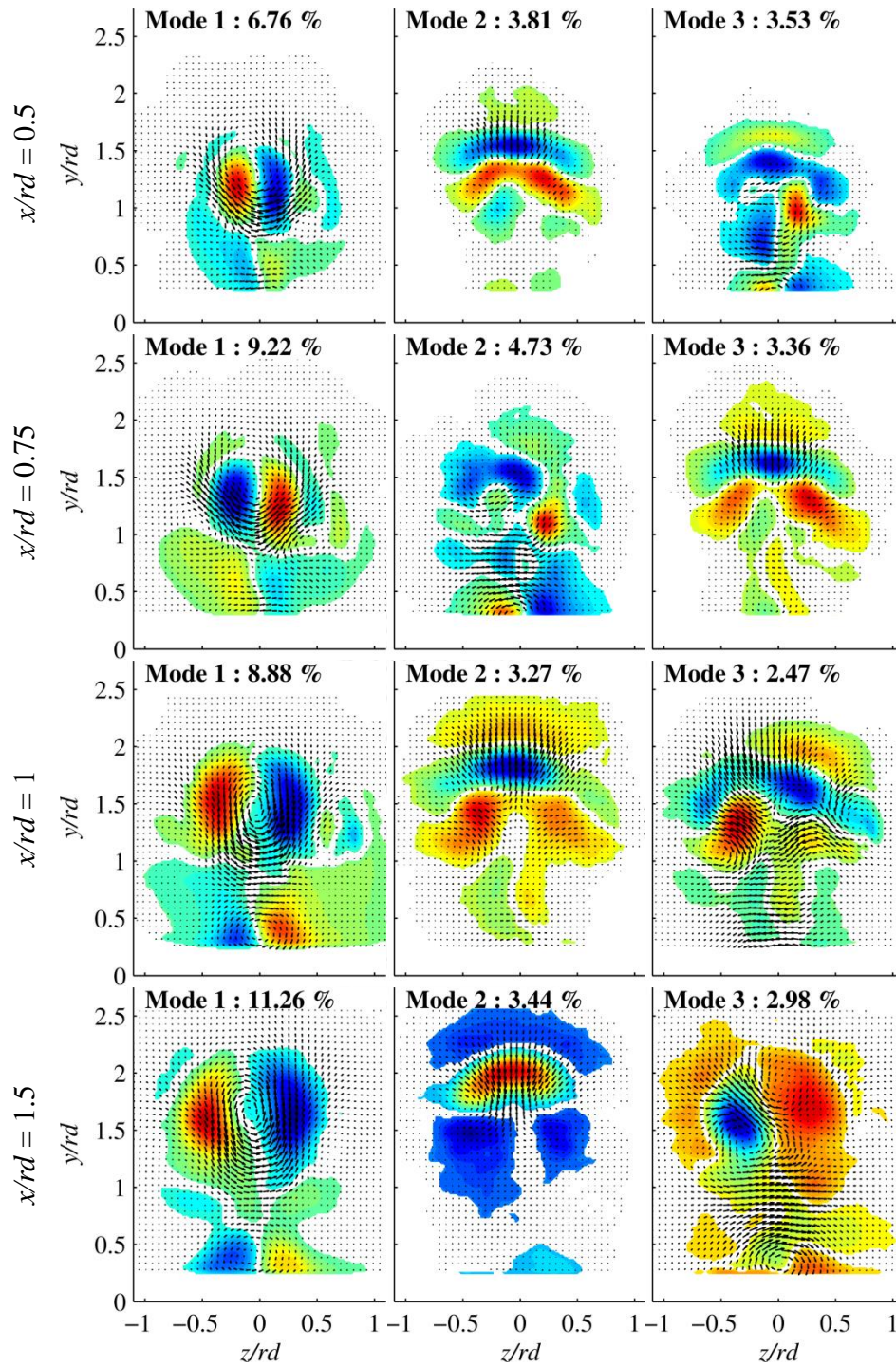


รูปที่ 8.2(ก) การพัฒนาตัวของโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานของกรณี JICF สำหรับการไหลที่ติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง

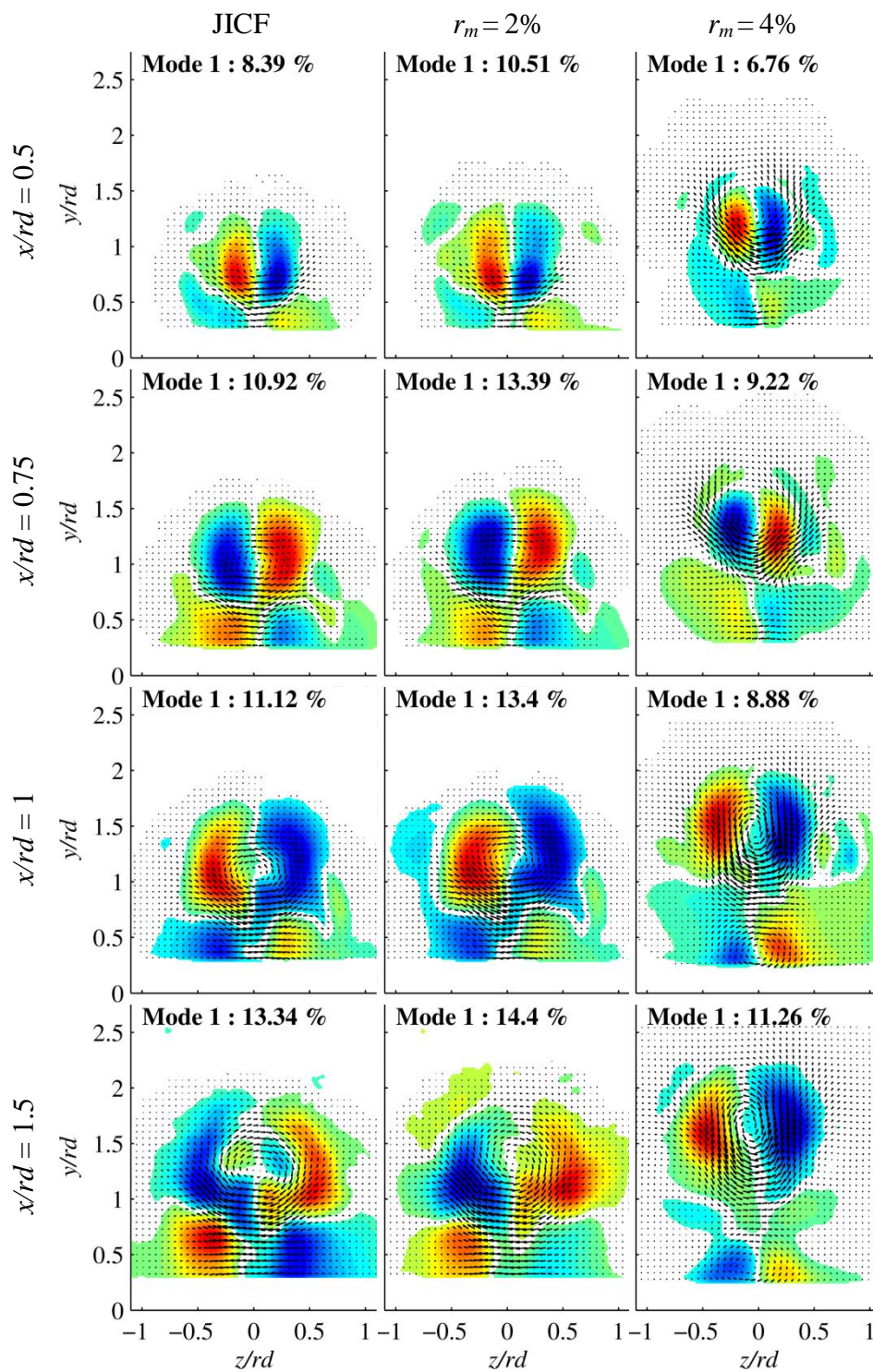


รูปที่ 8.2(ข) การพัฒนาตัวของโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานของกรณี  $r_m = 2\%$  สำหรับการไหลวนภาคตัดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง

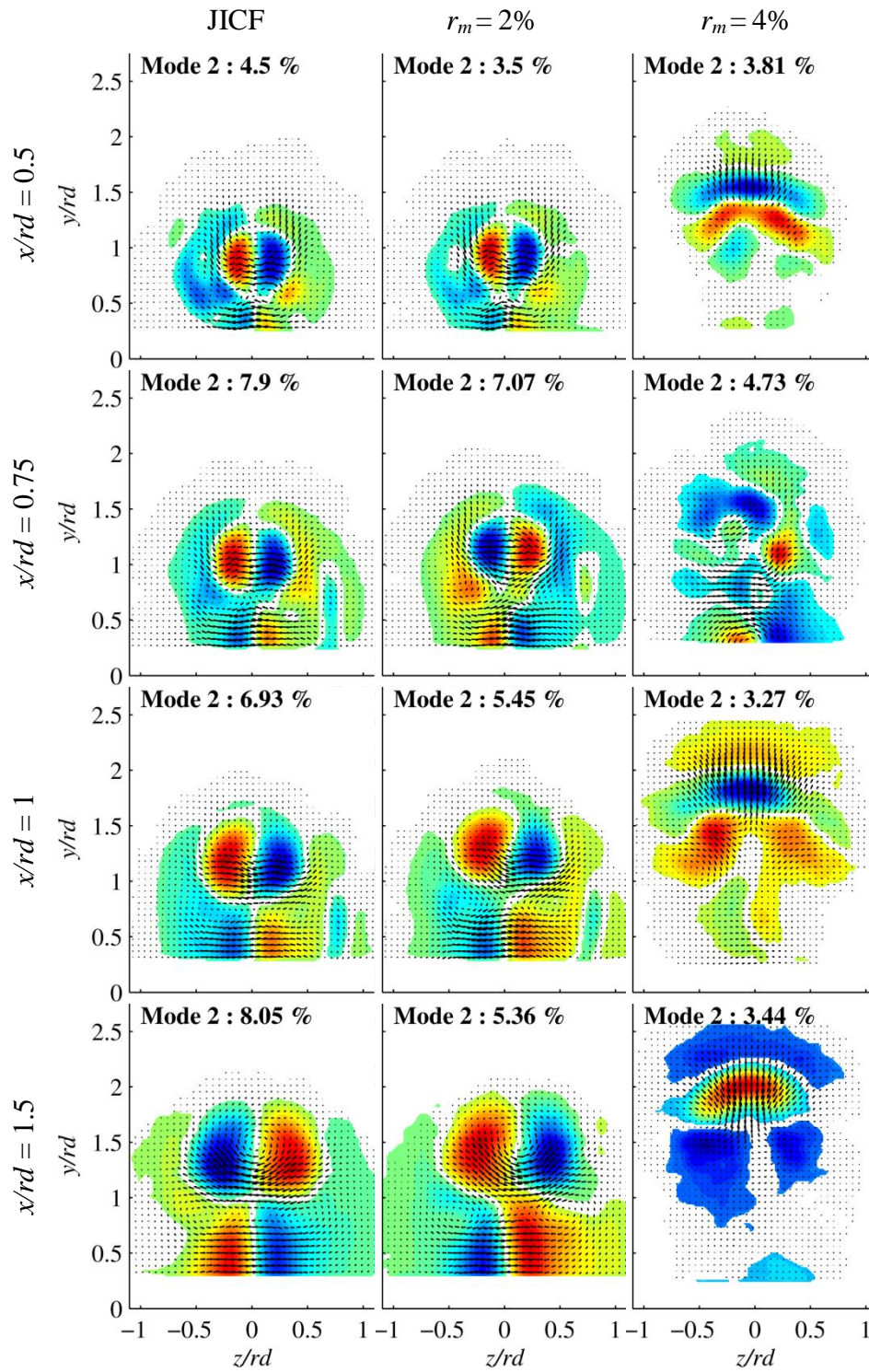




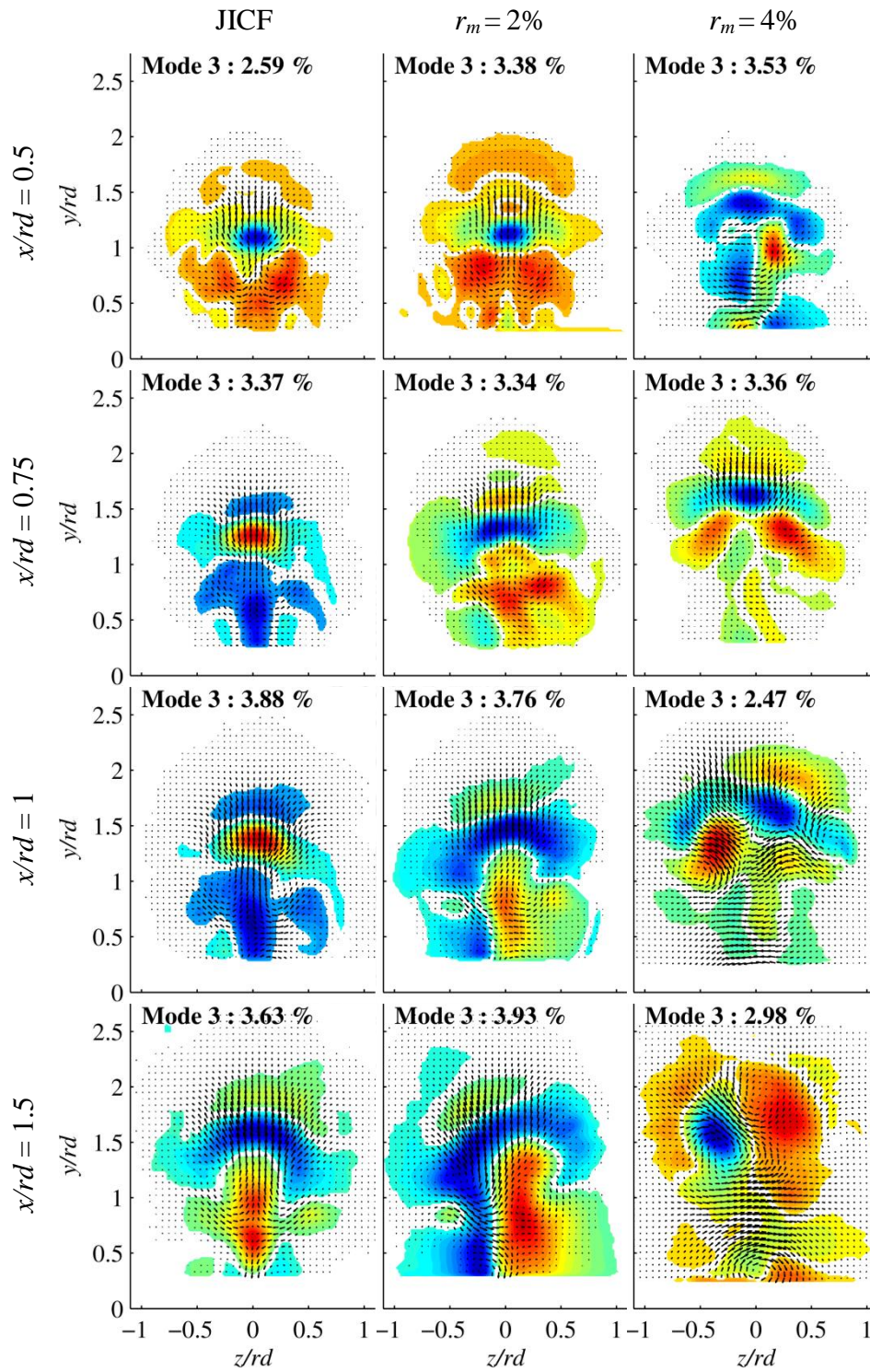
รูปที่ 8.2(ค) การพัฒนาตัวของโครงสร้าง POD Mode 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งระดับพลังงานของกรณี  $r_m = 4\%$  สำหรับการไหลที่ติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง



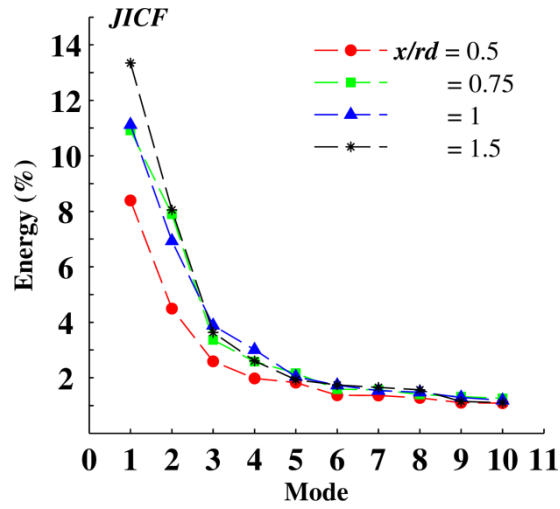
รูปที่ 8.3(ก) การเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 1 ระหว่างกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง



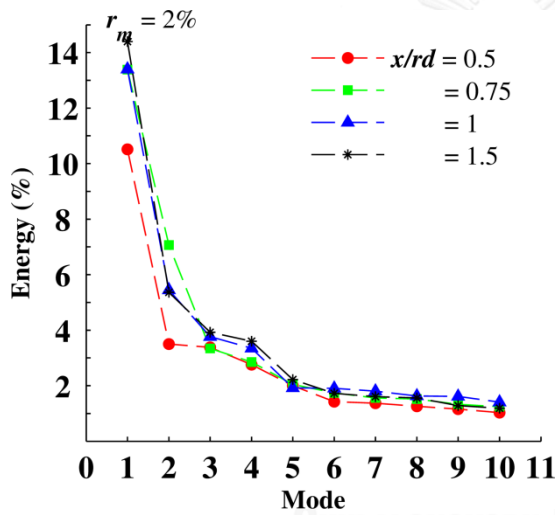
รูปที่ 8.3(ข) การเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 2 ระหว่างกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง



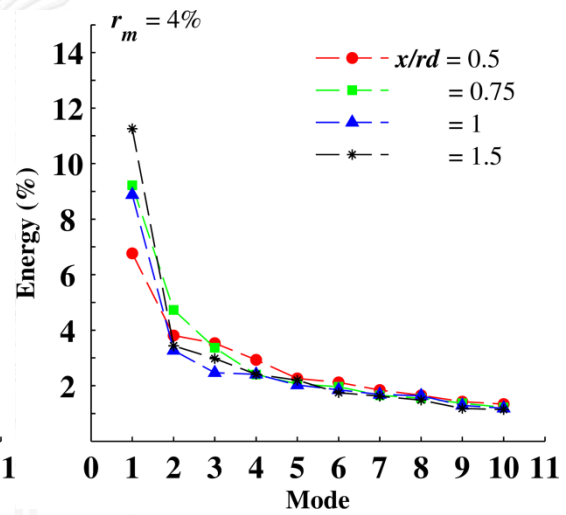
รูปที่ 8.3(ค) การเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 3 ระหว่างกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ทและกระแสลมขวาง



(ก) JICF

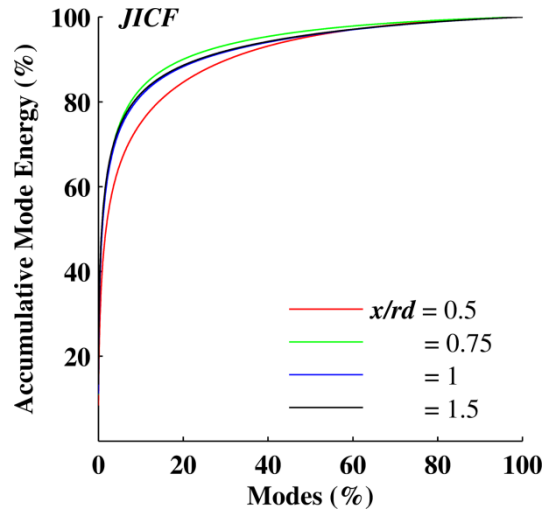


(ข)  $r_m = 2\%$

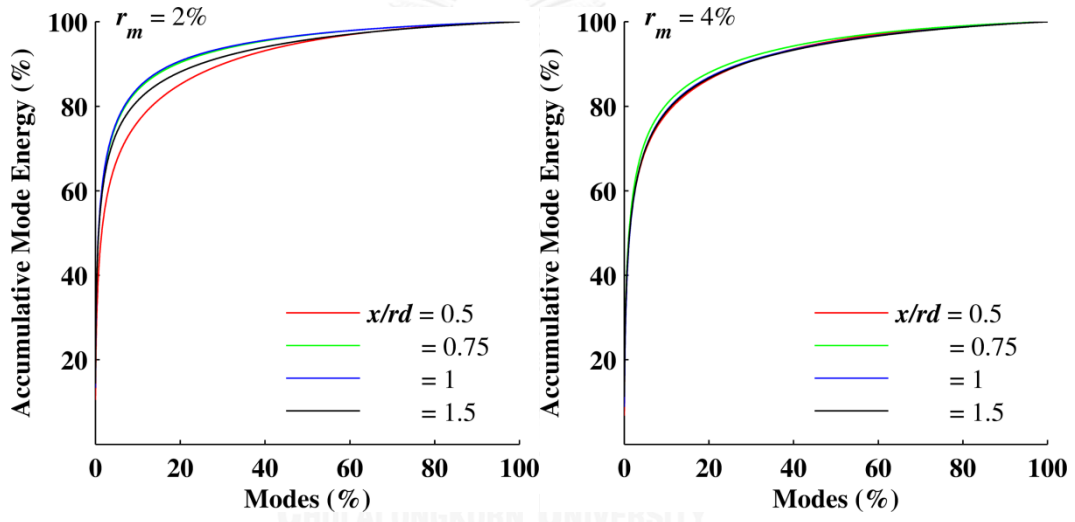


(ค)  $r_m = 4\%$

รูปที่ 8.4 การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของระดับพลังงานเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง



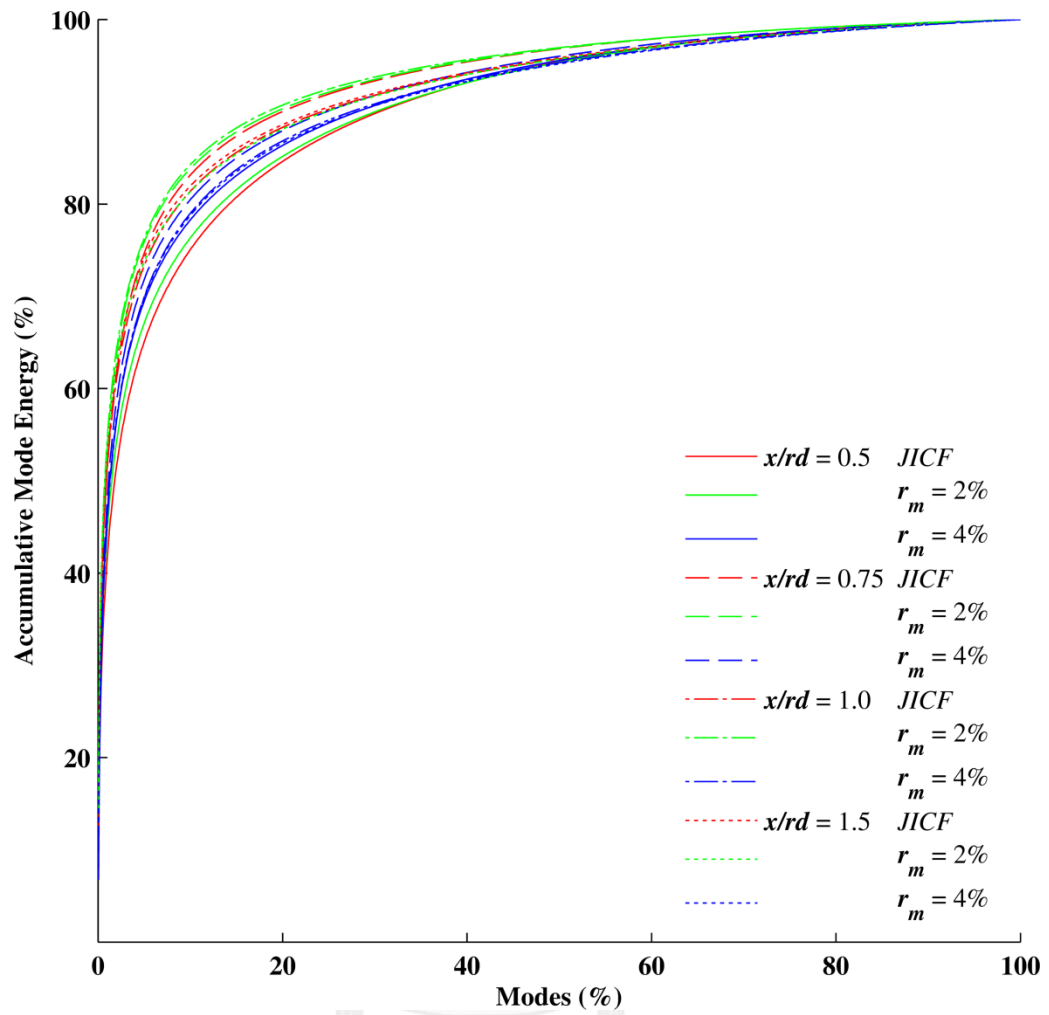
(ก) JICF



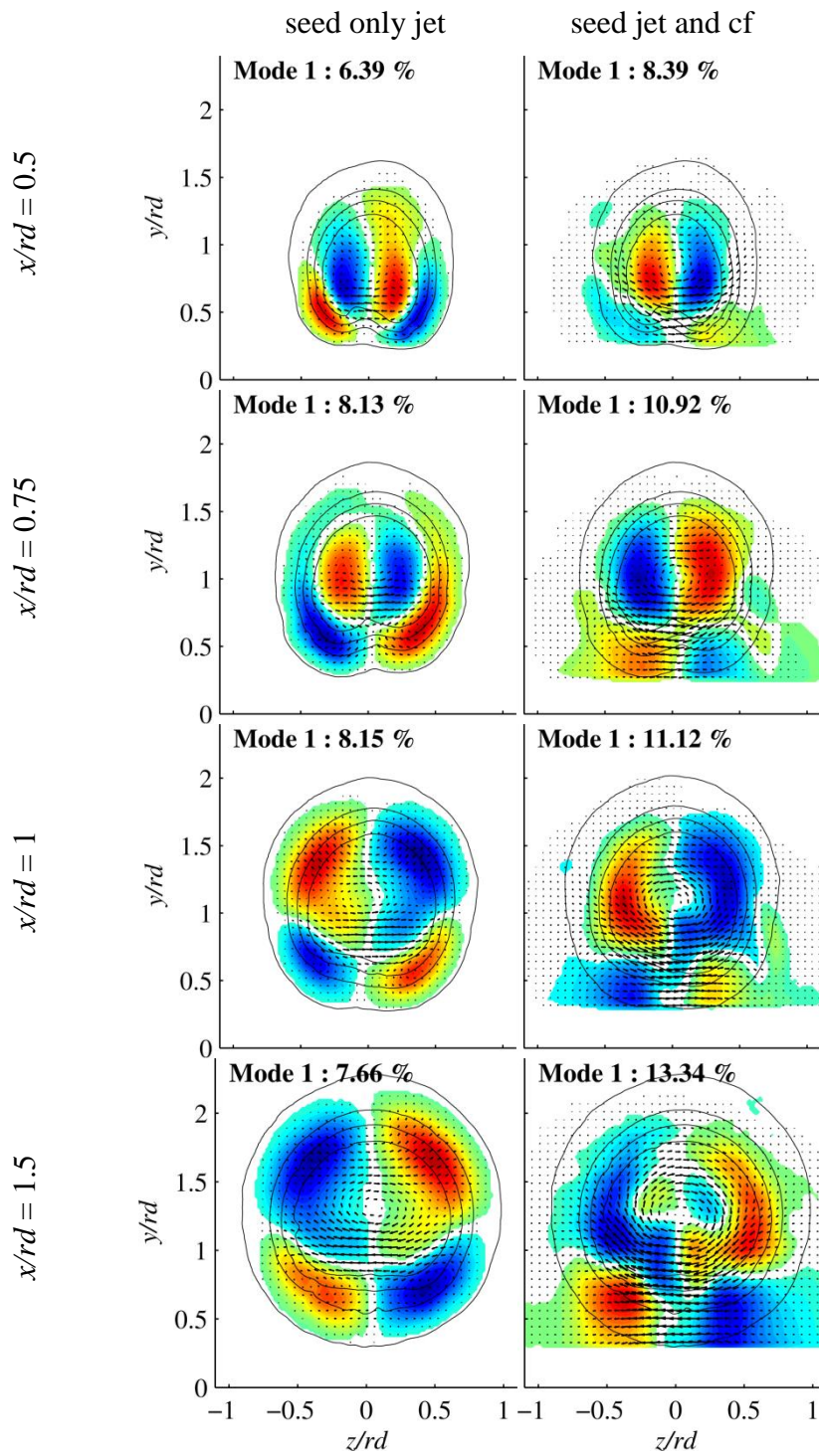
(ข)  $r_m = 2\%$

(ค)  $r_m = 4\%$

รูปที่ 8.5 การพัฒนาตัวของพลังงานสะสม (Accumulative energy) ต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสนวนข้าง โดยคำนวณเพิ่มทีละ 1 Mode

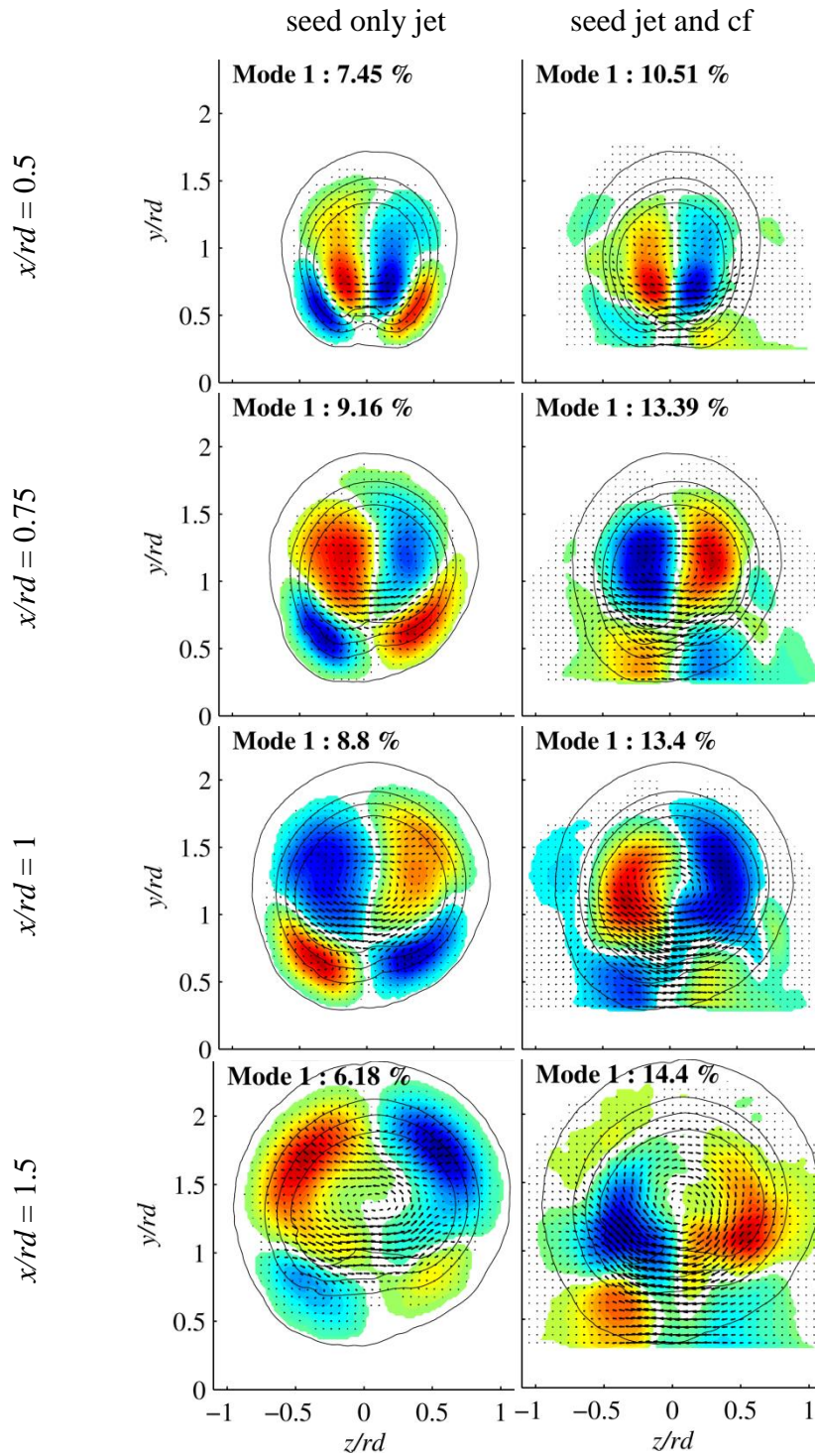


รูปที่ 8.6 พลังงานสะสม (Accumulative energy) ต่อเปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode กรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  และทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสนวนว่าง โดยคำนวณเพิ่มทีละ 1 Mode

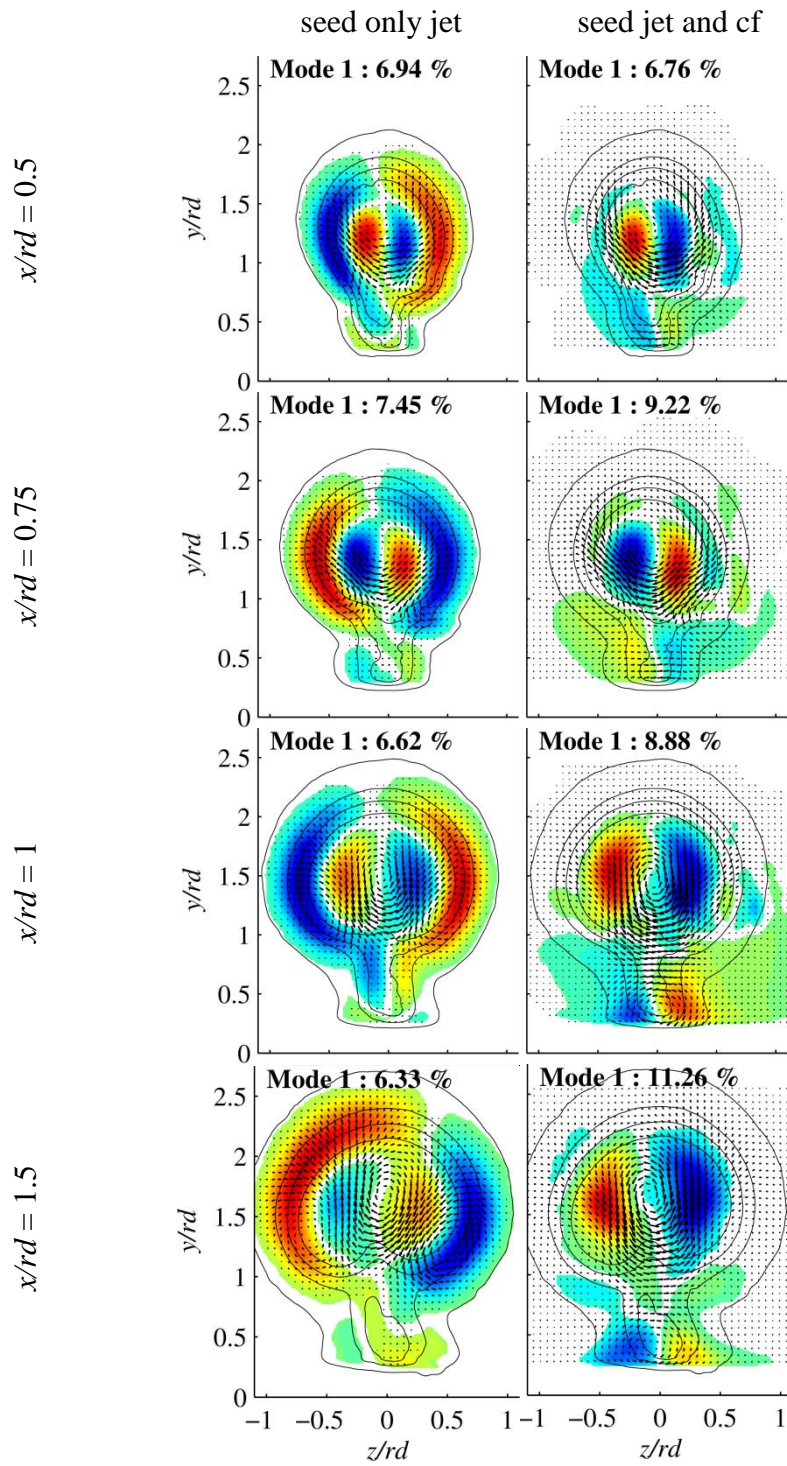


รูปที่ 9.1(ก) การเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 1 พร้อมทั้งระดับพลังงานของกรณี JICF ระหว่างการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น (ซ้าย) กับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง (ขวา) โดยจะมีความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตแสดงเป็นเส้น contour สีดำโดยที่  $\phi_{ij}$  เท่ากับ 0.01, 0.25, 0.50 และ 0.75

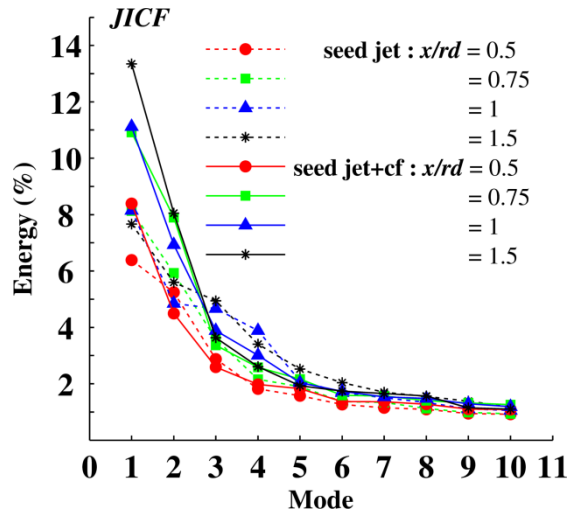




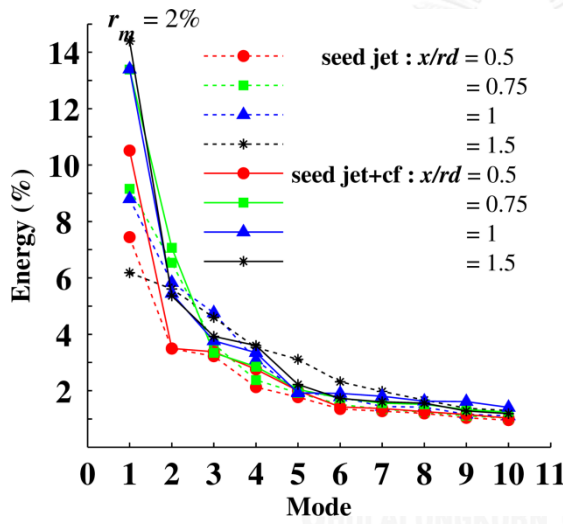
รูปที่ 9.1(ข) การเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 1 พร้อมทั้งระดับพลังงานของกรณี  $r_m = 2\%$  ระหว่างการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น (ซ้าย) กับ การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสมขวาง (ขวา) โดยจะมีความ น่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตแสดงเป็นเส้น contour สีดำโดยที่  $\phi_i$  เท่ากับ 0.01, 0.25, 0.50 และ 0.75



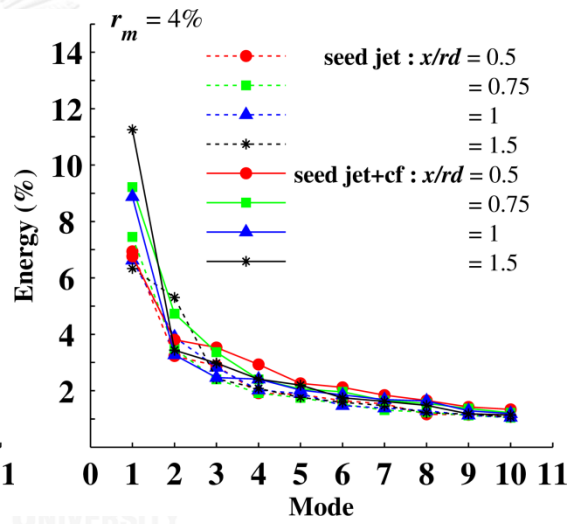
รูปที่ 9.1(ค) การเปรียบเทียบโครงสร้าง POD Mode 1 พร้อมทั้งระดับพลังงานของกรณี  $r_m = 4\%$  ระหว่างการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น (ซ้าย) กับ การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสมขวาง (ขวา) โดยจะมีความ น่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตแสดงเป็นเส้น contour สีดำโดยที่  $\phi_i$  เท่ากับ 0.01, 0.25, 0.50 และ 0.75



(ก) JICF

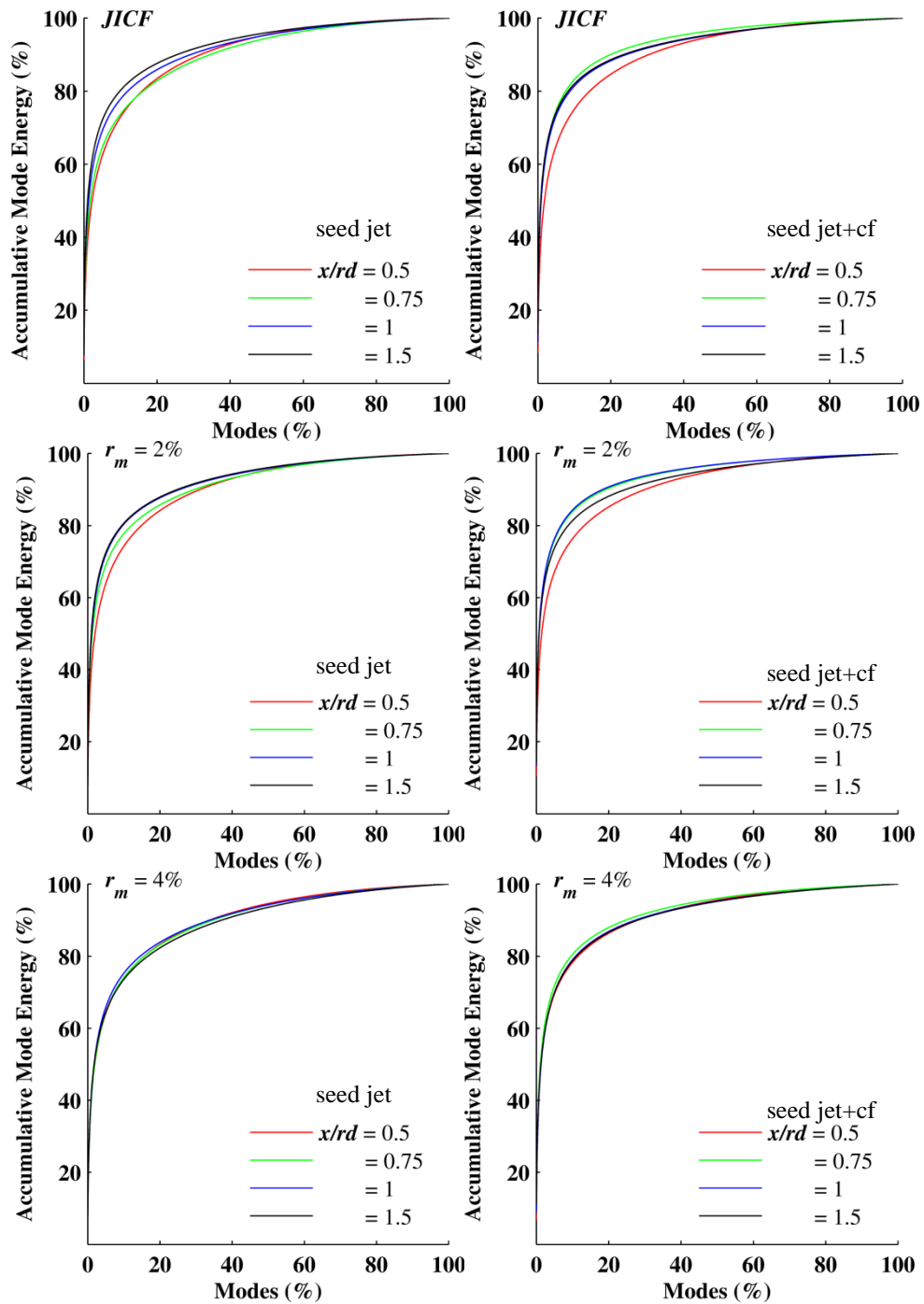


(ข)  $r_m = 2\%$

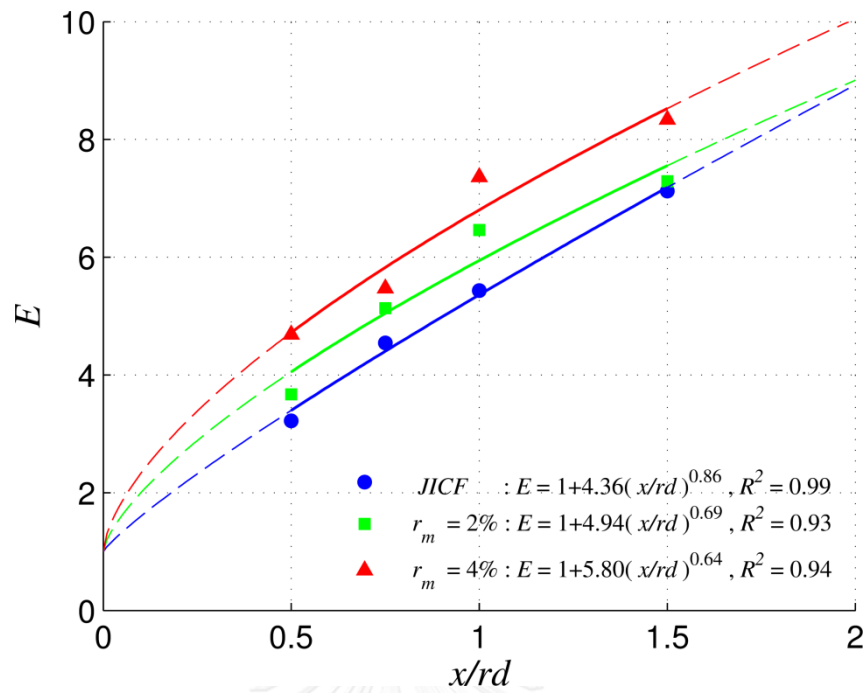


(ค)  $r_m = 4\%$

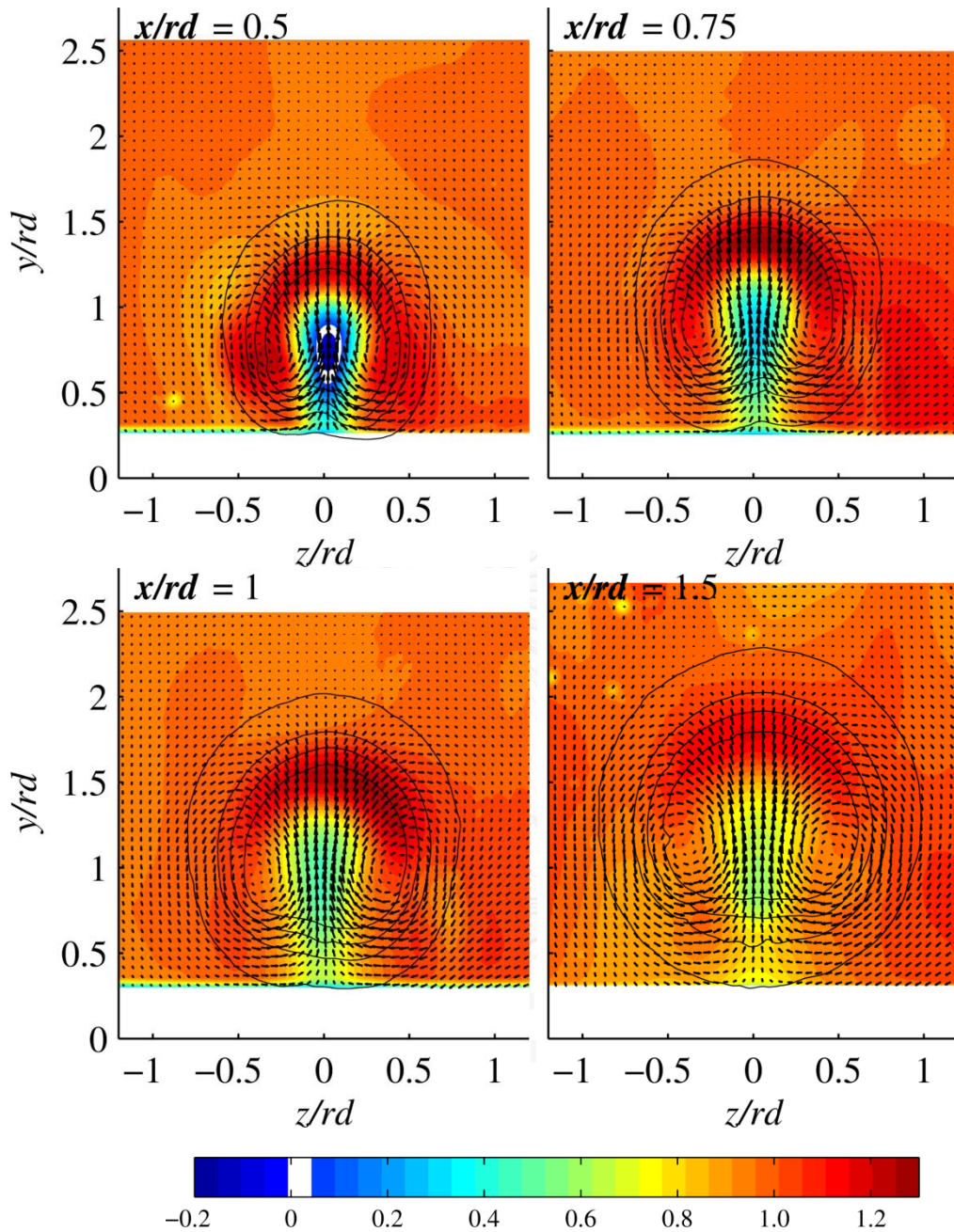
รูปที่ 9.2 การเปรียบเทียบการพัฒนาตัวของกระจายตัวของระดับพลังงานระหว่างการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้นกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ



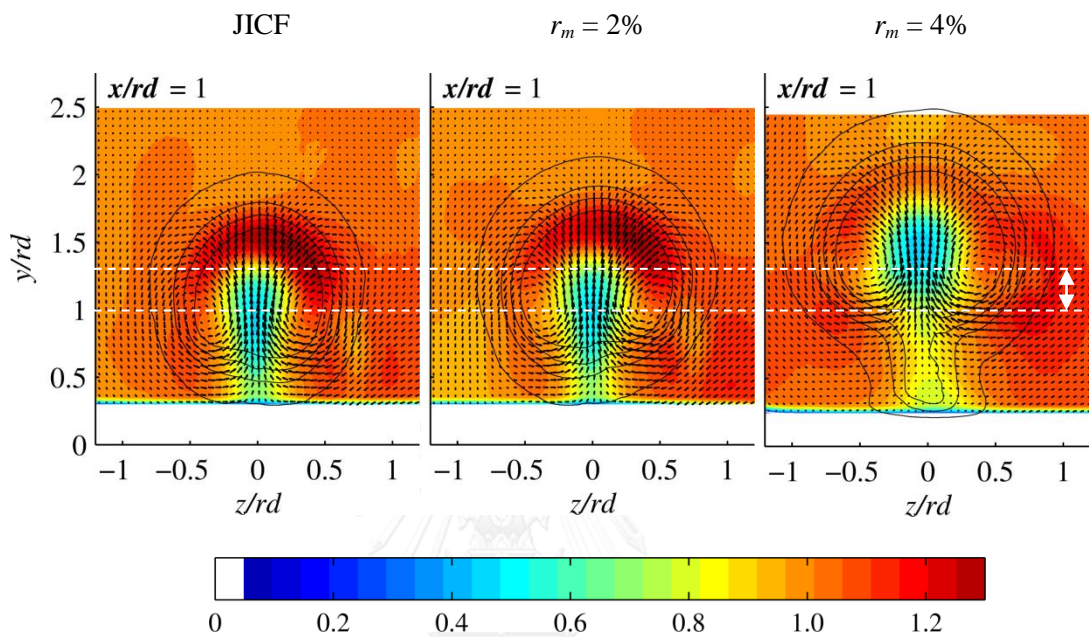
รูปที่ 9.3 การเปรียบเทียบการพัฒนาตัวของพลังงานสะสม (Accumulative energy) ที่เปอร์เซ็นต์ของจำนวน Mode เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ ระหว่างการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น (ซ้าย) กับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง (ขวา) โดยคำนวณเพิ่มขึ้นที่ละ 1 Mode ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ



รูปที่ 10.1 การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $E$ ) ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  เมื่อเจ็ดพัฒนาไปตามแนว downstream พร้อมทั้งการประมาณด้วยสมการ power law



รูปที่ 10.2 โครงสร้างความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติระหว่างกรณี JICF ทุกตำแหน่ง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  ของการใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสลมขวาง โดย contour แสดง ความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติตามแนวแกน  $x$  ( $V_x/u_{cf}$ ) และเวกเตอร์ในระนาบ แสดงความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติตามแนวแกน  $y$  และ  $z$  ( $\vec{V}_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/u_{cf}$ ) และมีเส้น contour สีดำ แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบ ส่วนผสมของเจ็ด  $\phi_{ij}$  เท่ากับ 0.01, 0.25, 0.50 และ 0.75



รูปที่ 10.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติระหว่างกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1$  ของการใส่อนุภาคทั้งเจ็ดและกระแสมวลขวาง โดย contour แสดงความความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติตามแนวแกน  $x$  ( $V_x/u_{cf}$ ) และ เวกเตอร์ในระนาบแสดงความเร็วเฉลี่ยตามเวลาไว้มิติตามแนวแกน  $y$  และ  $z$  ( $\vec{V}_{yz}/u_{cf} = (\vec{V}_y + \vec{V}_z)/u_{cf}$ ) และมีเส้น contour สีดำ แสดง ความน่าจะเป็นที่จะพบ ส่วนผสมของเจ็ด  $\phi_{ij}$  เท่ากับ 0.01, 0.25, 0.50 และ 0.75





ภาคผนวก ก  
การลู่เข้าของปริมาณต่าง ๆ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการพิจารณาการลู่เข้าของปริมาณต่าง ๆ เพื่อที่จะหาจำนวนสนามความเร็วหรือจำนวนภาพ (snapshots) จาก SPIV ที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้

**ก.1 การลู่เข้าของปริมาณต่าง ๆ สำหรับวิธีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น**

ในหัวข้อนี้จะหาจำนวนภาพที่เหมาะสมในการทดลองโดยพิจารณาจากการลู่เข้าของปริมาณต่าง ๆ ในบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต ( $R_\phi$ ) เมื่อใช้จำนวนภาพที่มากขึ้นสำหรับวิธีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น ดังนี้

▪ **การลู่เข้าของค่าความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ**

การลู่เข้าของค่าความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ ในบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต ( $R_\phi$ ) เมื่อใช้จำนวนภาพที่เพิ่มขึ้นจาก  $N_1$  เป็น  $N_2$  โดยจะพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสม ( $e_\phi$ ) ต่อจุดบนระนาบในบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต ( $R_\phi$ ) บริเวณต่าง ๆ ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$e_\phi = \frac{\sum_{ij \in R_{\phi \cup}} |\phi_{ij}(N_2) - \phi_{ij}(N_1)|}{M(R_\phi(N_2))} \quad (ก.1)$$

โดยที่  $\phi_{ij}(N)$  คือ ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ เมื่อใช้จำนวนภาพ  $N$  ภาพ

$R_\phi(N)$  คือ บริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต เมื่อใช้จำนวนภาพ  $N$  ภาพ

$R_{\phi \cup}$  คือ  $R_{\phi \cup} = R_\phi(N_2) \cup R_\phi(N_1)$

$M(R_\phi)$  คือ จำนวนจุดทั้งหมดที่พบความเร็วเจ็ตในบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต ( $R_\phi$ )

ดังนั้น  $|\phi_{ij}(N_2) - \phi_{ij}(N_1)|$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ เมื่อใช้จำนวนภาพที่เพิ่มขึ้นจาก  $N_1$  เป็น  $N_2$  และเนื่องจากบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต ( $R_\phi$ ) ที่จำนวนภาพ  $N_1$  อาจจะแตกต่างจาก  $R_\phi$  ที่จำนวนภาพ  $N_2$  เพราะฉะนั้นในการคำนวณจึงต้องรวมบริเวณ  $R_\phi$  ทั้ง 2 บริเวณ นั่นคือ  $R_{\phi \cup} = R_\phi(N_2) \cup R_\phi(N_1)$  ดังนั้น  $e_\phi$  ในสมการที่ 5.4 แสดงถึงค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใด ๆ ต่อจุดบนระนาบในบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต ( $R_\phi$ ) เมื่อใช้จำนวนภาพเพิ่มขึ้นจาก  $N_1$  เป็น  $N_2$

รูปที่ ก.1 (ก) – (ค) แสดงการลู่เข้าของค่าความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่จุดใด ๆ เมื่อใช้จำนวนภาพเพิ่มขึ้นจาก  $N_1$  เป็น  $N_2$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd$  ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนของความน่าจะเป็นสะสม ( $e_\phi$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นสะสมที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  สำหรับ  $\phi = 1$  จะแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของความน่าจะเป็นสะสมของบริเวณเจ็ดทั้งหมดต่อจุดบนระนาบ ในการคำนวณนี้จะใช้จำนวนภาพ  $N_2$  ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ พบว่า ทุกกรณี (JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$ ) ที่ทุกบริเวณ  $R_\phi$  และทุกตำแหน่ง  $x/rd$  มีค่าความคลาดเคลื่อนของความน่าจะเป็นสะสม ( $e_\phi$ ) ลดลงเมื่อใช้จำนวนภาพมากขึ้น โดยที่เมื่อใช้จำนวนภาพทั้งหมด 4,000 ภาพ จะทำให้ที่ทุกบริเวณ  $R_\phi$  และทุกตำแหน่ง  $x/rd$  มีค่าความคลาดเคลื่อนของความน่าจะเป็นสะสมน้อยกว่า 0.0014 (กรณี JICF), 0.0012 (กรณี  $r_m = 2\%$ ) และ 0.0011 (กรณี  $r_m = 4\%$ ) และสำหรับบริเวณเจ็ดทั้งหมด ( $R_{\phi=1}$ ) ค่าความคลาดเคลื่อนจะน้อยกว่า 0.0007 (กรณี JICF), 0.0004 (กรณี  $r_m = 2\%$ ) และ 0.0006 (กรณี  $r_m = 4\%$ )

■ การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติและความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกนต่าง ๆ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการลู่เข้าความเร็วเฉลี่ยไร้มิติ ( $V/u_{cf}$ ) และความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกนต่าง ๆ ( $V_x/u_{cf}, V_y/u_{cf}, V_z/u_{cf}$ ) ในบริเวณของความน่าจะเป็นสะสมที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) เมื่อใช้จำนวนภาพที่เพิ่มขึ้นจาก  $N_1$  เป็น  $N_2$  โดยจะพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติ ( $e_V/u_{cf}$ ) และความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกนต่าง ๆ ( $e_{V_x}/u_{cf}, e_{V_y}/u_{cf}, e_{V_z}/u_{cf}$ ) ต่อจุดบนระนาบ ในบริเวณของความน่าจะเป็นสะสมที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) บริเวณต่าง ๆ ซึ่งมีนิยามดังนี้ (นิยามเช่นเดียวกับสมการที่ ก.1)

$$\frac{e_g}{u_{cf}} = \frac{1}{u_{cf}} \left[ \frac{\sum_{ij \in R_\phi} |\bar{g}_{ij}(N_2) - \bar{g}_{ij}(N_1)|}{M(R_\phi(N_2))} \right] \quad (ก.2)$$

โดยที่  $\bar{g}_{ij}(N)$  คือ ค่าเฉลี่ยตามเวลาของความเร็ว  $V$  หรือ ค่าเฉลี่ยตามเวลาของความเร็วตามแกนต่าง ๆ  $V_x, V_y$  หรือ  $V_z$  ที่จุดใด ๆ เมื่อใช้จำนวนภาพ  $N$  ภาพ และค่าเฉลี่ยตามเวลาที่จุดใด ๆ มีนิยามเป็น

$$\bar{g}_{ij}(N) = \left( \sum_{n=1}^N g_{ij,n} \right) / N \quad (ก.3)$$

โดยที่  $n$  คือ ดัชนีของภาพหรืออันดับของภาพที่ถ่ายด้วย SPIV และ  $N$  คือจำนวนภาพทั้งหมดที่ใช้เก็บข้อมูล สำหรับความเร็วขณะใด ๆ ที่จุดใด ๆ มีนิยาม คือ  $V_{ij,n} = \sqrt{V_{x,ij,n}^2 + V_{y,ij,n}^2 + V_{z,ij,n}^2}$  และความเร็วเฉลี่ยนั้นจะนิยามเช่นเดียวกับสมการที่ ก.3 ในอีกนัยหนึ่งคือจะคำนวณความเร็วขณะใด ๆ ก่อน

จากนั้นจึงหาค่าเฉลี่ยตามเวลา ซึ่งไม่ได้คำนวณจากรากที่สองของค่าเฉลี่ยตามเวลาของความเร็วในแกนต่าง ๆ หรือ  $V_{ij} \neq \sqrt{V_{x,ij}^2 + V_{y,ij}^2 + V_{z,ij}^2}$  สำหรับ  $R_\phi(N)$ ,  $R_{\phi\cup}$  และ  $M(R_\phi)$  มีนิยามเช่นเดียวกับสมการ ก.1 ดังนั้น  $e_g$  ในสมการที่ ก.2 แสดงถึงค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของปริมาณที่เฉลี่ยตามเวลา  $g$  ที่จุดใด ๆ ต่อจุดบนระนาบในบริเวณของความน่าจะเป็นสะสมที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) เมื่อใช้จำนวนภาพเพิ่มขึ้นจาก  $N_1$  เป็น  $N_2$

รูปที่ ก.2 - ก.4 (ก) - (ง) แสดงการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติและความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกนต่าง ๆ เมื่อใช้จำนวนภาพเพิ่มขึ้นจาก  $N_1$  เป็น  $N_2$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd$  ของกรณี JICF (รูปที่ ก.2),  $r_m = 2\%$  (รูปที่ ก.3) และ  $r_m = 4\%$  (รูปที่ ก.4) ตามลำดับ โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติและความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกนต่าง ๆ ( $e_v/u_{cf}$ ,  $e_{v_x}/u_{cf}$ ,  $e_{v_y}/u_{cf}$ ,  $e_{v_z}/u_{cf}$  (ก) - (ง) ตามลำดับ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นสะสมที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01 - 1$  ในการคำนวณนี้จะใช้จำนวนภาพ  $N_2$  ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ พบว่า ทุกกรณี (JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$ ) ที่ทุกบริเวณ  $R_\phi$  และทุกตำแหน่ง  $x/rd$  มีค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติและความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกนต่าง ๆ ลดลงเมื่อใช้จำนวนภาพมากขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าความคลาดเคลื่อนของความน่าจะเป็นสะสม ( $e_\phi$ ) เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติ ( $e_v/u_{cf}$ ) รูปที่ ก.2 - ก.4 (ก) พบว่า เมื่อใช้จำนวนภาพ 4,000 ภาพ สำหรับทุกบริเวณ  $R_\phi$  และทุกตำแหน่ง  $x/rd$  จะมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.0023 (กรณี JICF), 0.0016 (กรณี  $r_m = 2\%$ ) และ 0.0014 (กรณี  $r_m = 4\%$ ) และสำหรับบริเวณเจ็ดทั้งหมด ( $R_{\phi=1}$ ) ค่าความคลาดเคลื่อนจะน้อยกว่า 0.0011 (กรณี JICF), 0.0006 (กรณี  $r_m = 2\%$ ) และ 0.0007 (กรณี  $r_m = 4\%$ ) สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกนต่าง ๆ ( $e_{v_x}/u_{cf}$ ,  $e_{v_y}/u_{cf}$ ,  $e_{v_z}/u_{cf}$  รูปที่ ก.2 - ก.4 (ข) - (ง) ตามลำดับ) พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มเช่นเดียวกับ  $e_\phi$  และ  $e_v/u_{cf}$

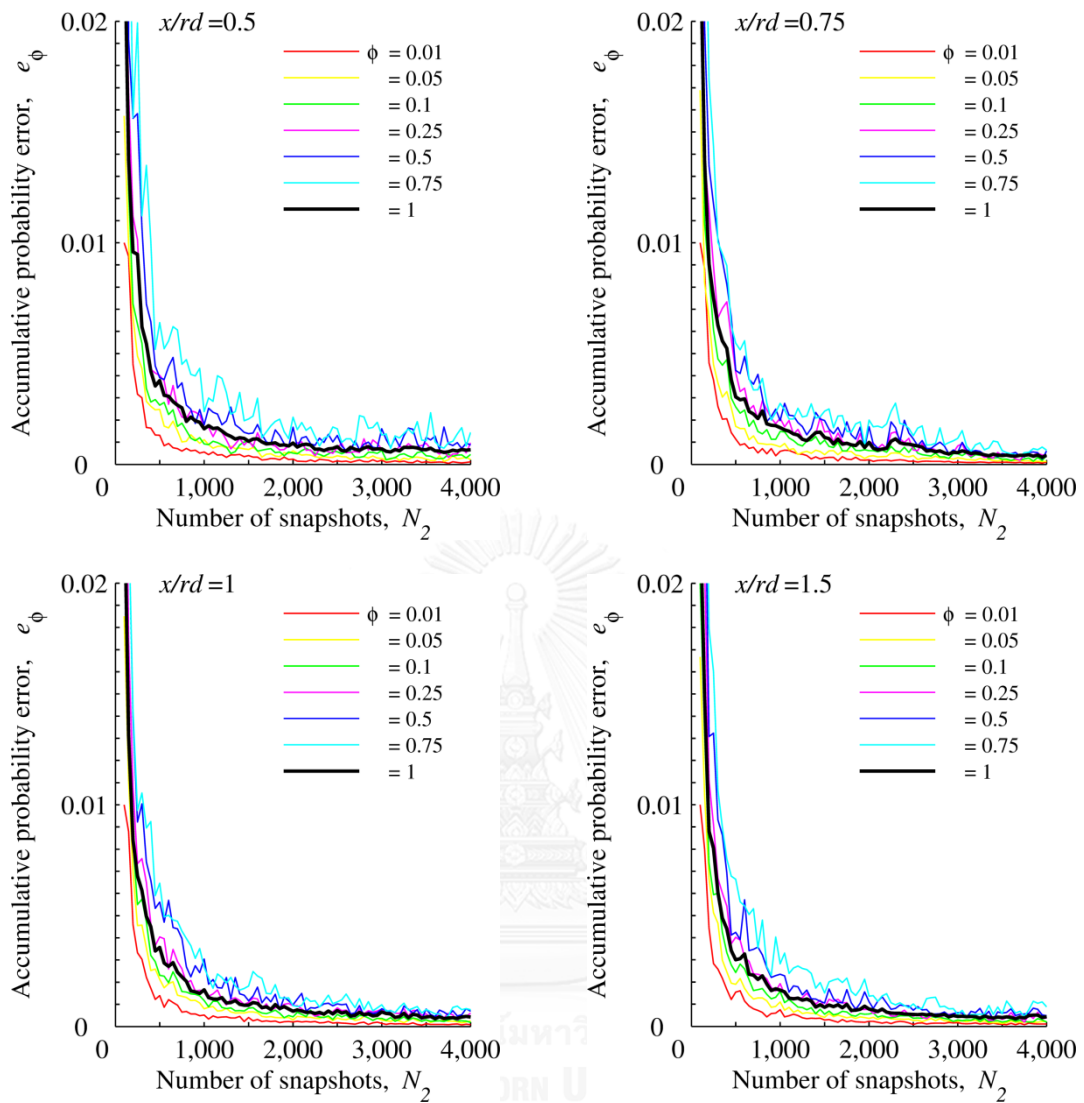
## ก.2 การลู่เข้าของปริมาณต่าง ๆ สำหรับวิธีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง

สำหรับการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติ ( $V/u_{cf}$ ) และความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกนต่าง ๆ ( $V_x/u_{cf}$ ,  $V_y/u_{cf}$ ,  $V_z/u_{cf}$ ) ของกรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวางนั้นจะคำนวณจากสมการที่ 5.3 เช่นเดียวกัน เพียงแต่มีข้อแตกต่าง คือ จะไม่มีบริเวณของความน่าจะเป็นสะสมที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) เนื่องจากที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าค่าความน่าจะเป็นที่จะพบอนุภาคที่จุดใด ๆ ของกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวางจะมีค่าใกล้เคียง 1 มาก เนื่องจาก ณ เวลาหนึ่งถ้าไม่พบของไหลที่มาจากเจ็ด ก็จะมีของไหลที่มาจากกระแสมขวางบริสุทธิ์

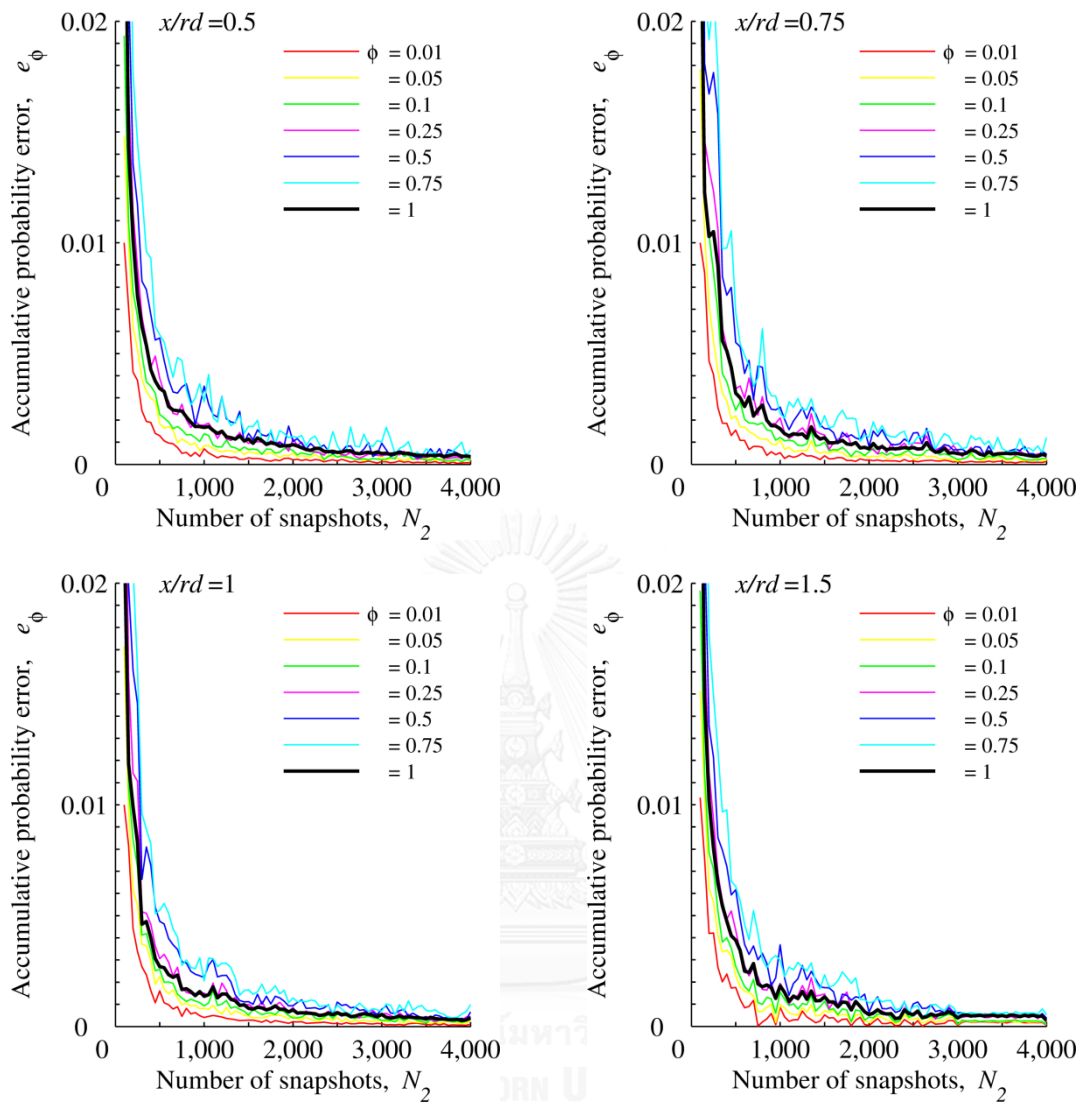
รูปที่ ก.5 (ก) - (ค) แสดงการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติและความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกนต่าง ๆ เมื่อใช้จำนวนภาพเพิ่มขึ้นจาก  $N_1$  เป็น  $N_2$  ที่ทุกตำแหน่ง  $x/rd$  ของกรณี JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$  ตามลำดับ สำหรับวิธีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง พบว่า ทุกกรณี (JICF,  $r_m = 2\%$  และ  $r_m = 4\%$ ) และทุกตำแหน่ง  $x/rd$  มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.00038

จากการพิจารณาการลู่เข้าของปริมาณต่าง ๆ ทั้งกรณีใส่อุณหภูมิติดตามการไหลเฉพาะจุดเท่านั้น และใส่ทั้งจุดและกระแสลมขวาง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้จำนวนภาพในการทดลองทั้งหมด 4,000 ภาพ

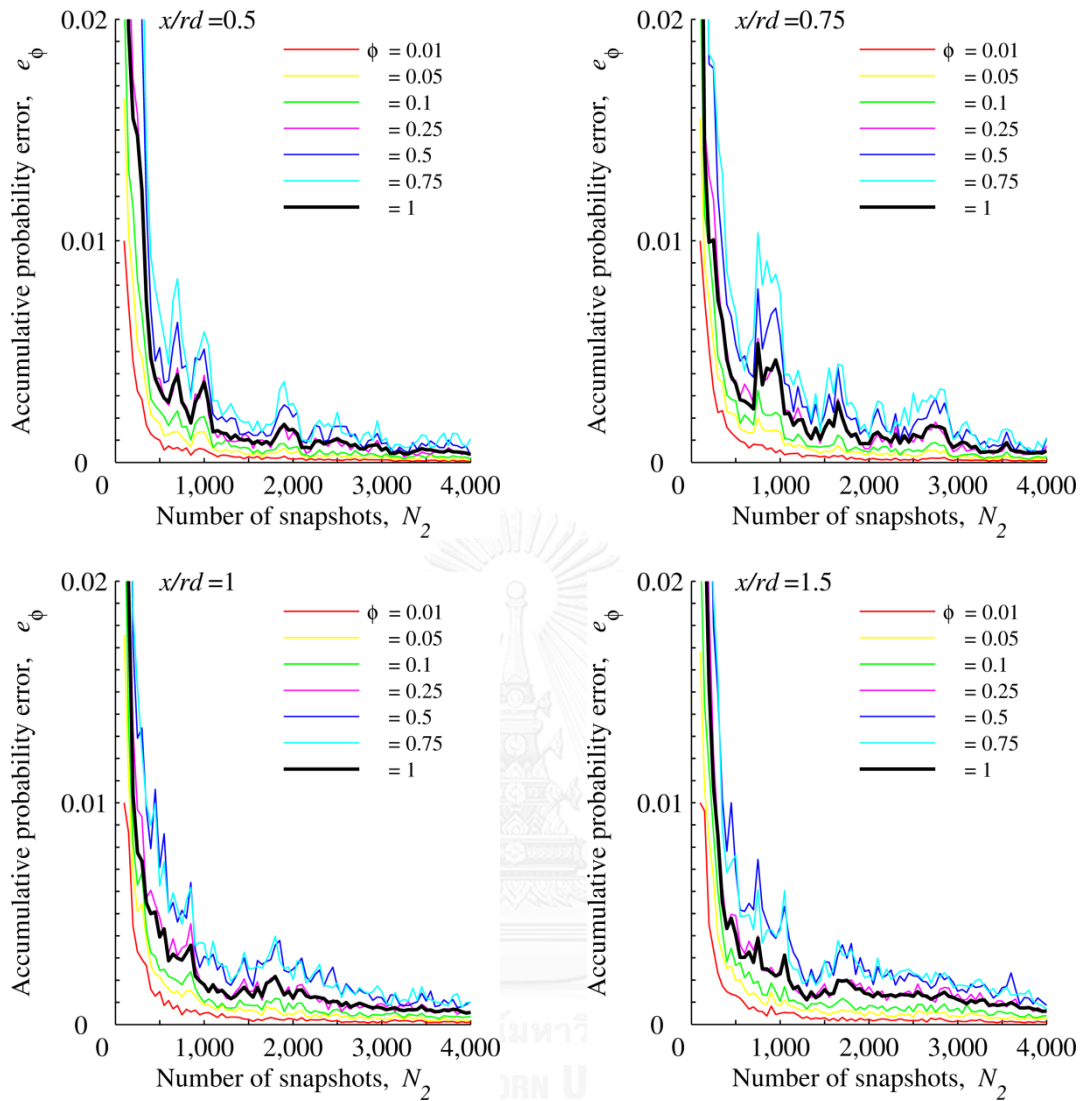




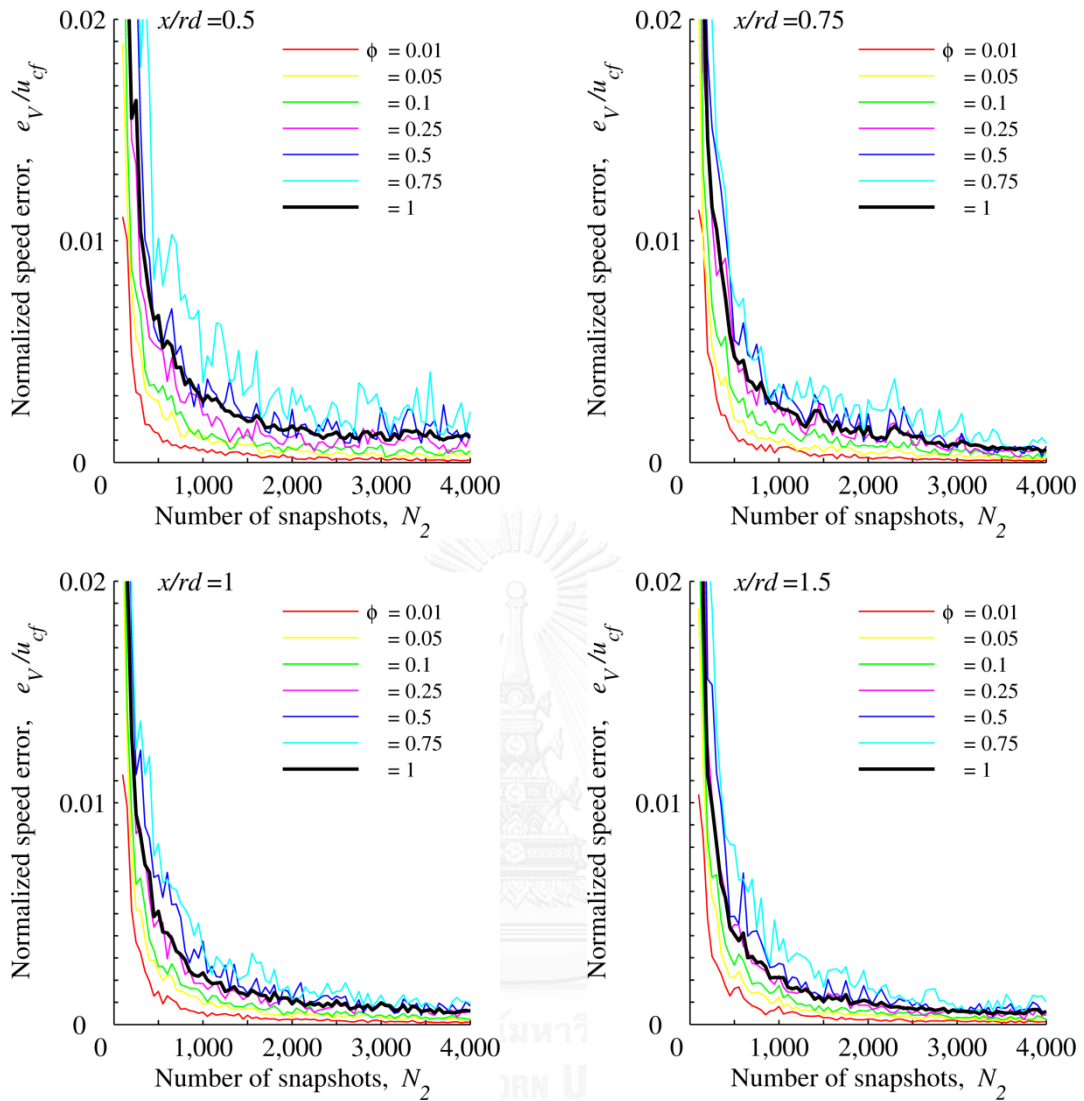
รูปที่ ก.1(ก) การลู่เข้าของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดโดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความน่าจะเป็นสะสม ( $e_\phi$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี JICF



รูปที่ ก.1(ข) การลู่เข้าของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดโดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความน่าจะเป็นสะสม ( $e_\phi$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี  $r_m = 2\%$

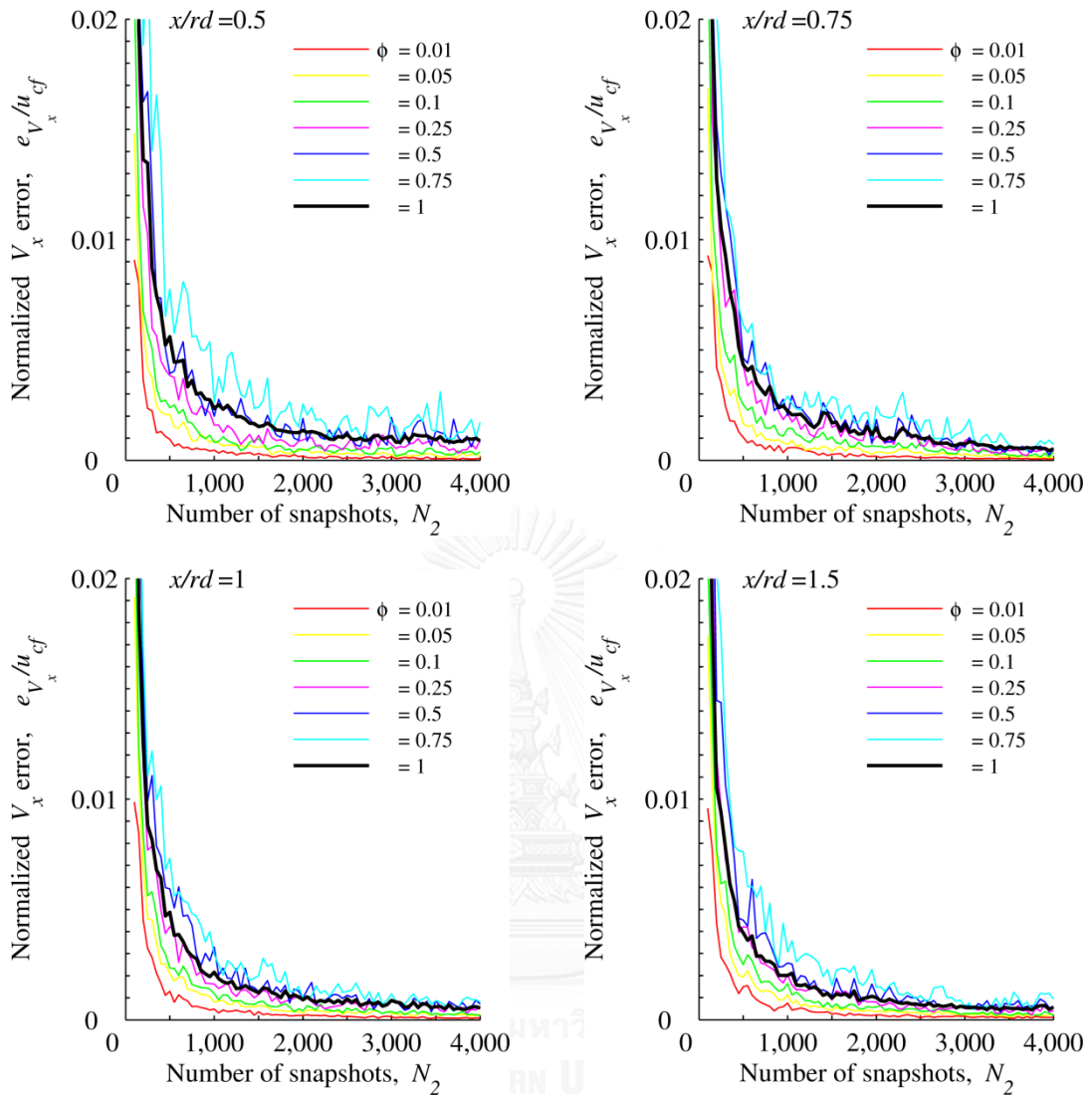


รูปที่ ก.1(ค) การลู่เข้าของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดโดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความน่าจะเป็นสะสม ( $e_\phi$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี  $r_m = 4\%$

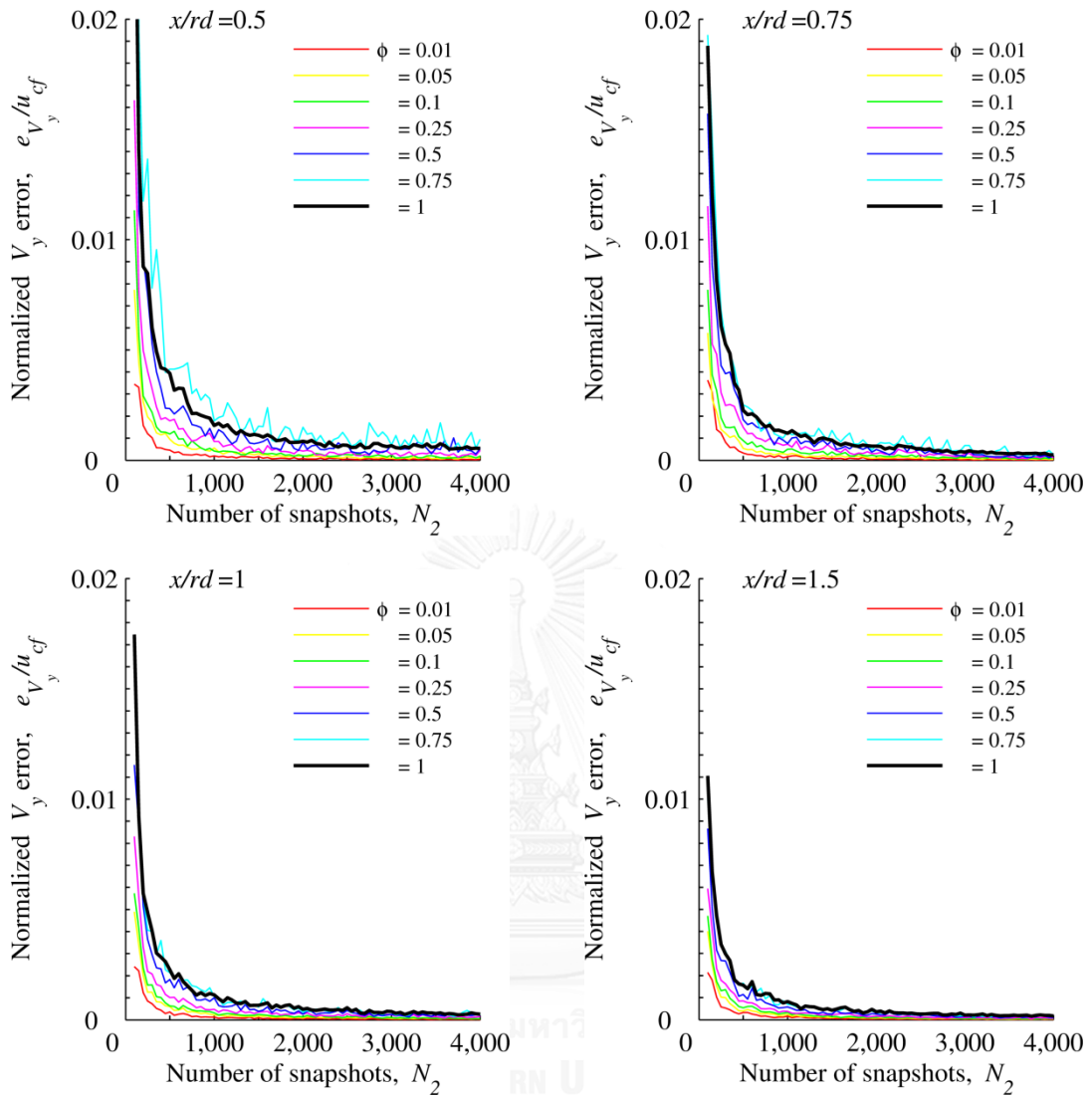


รูปที่ ก.2(ก) การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติโดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติ ( $e_V/u_{cf}$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี JICF

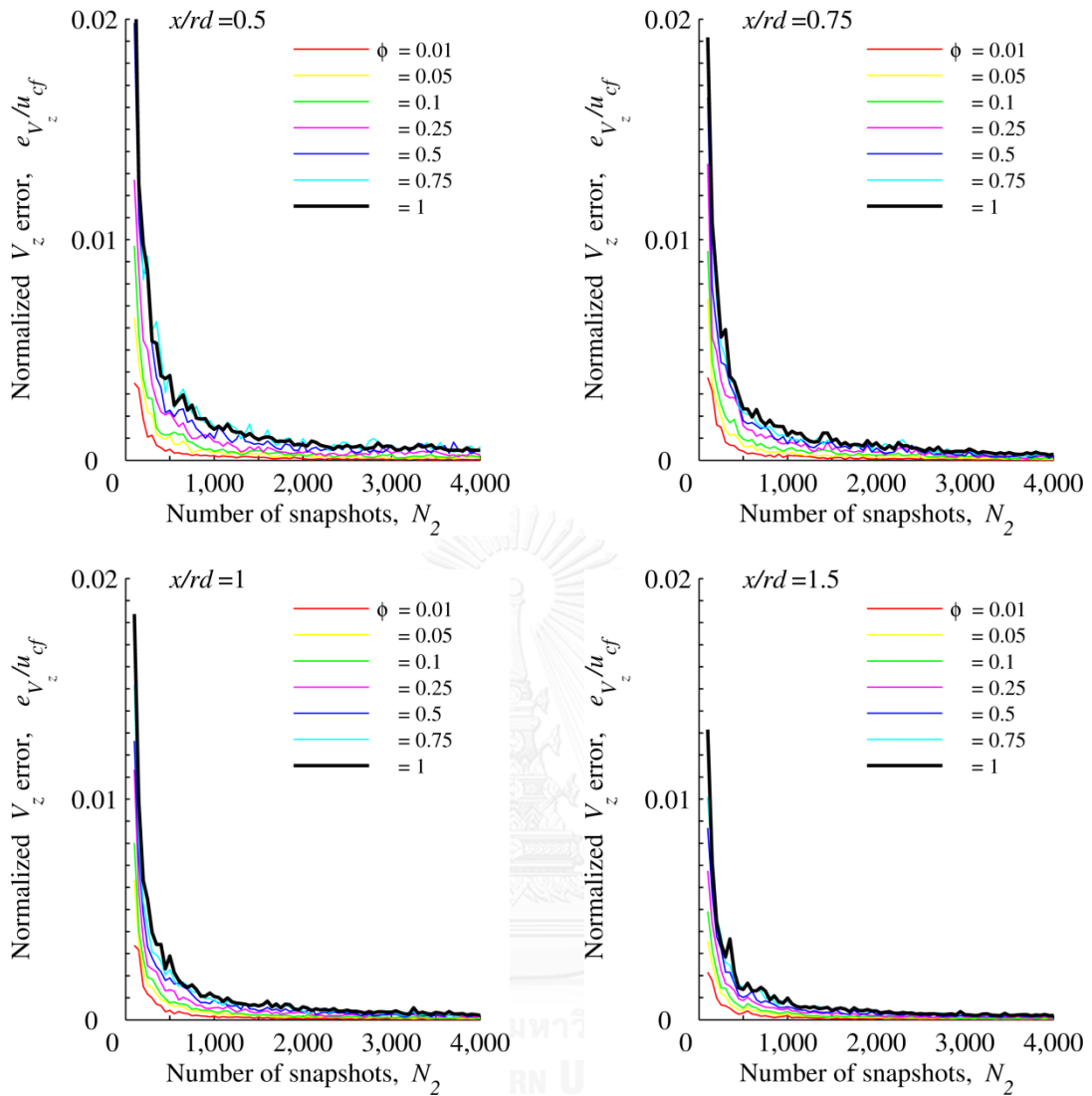




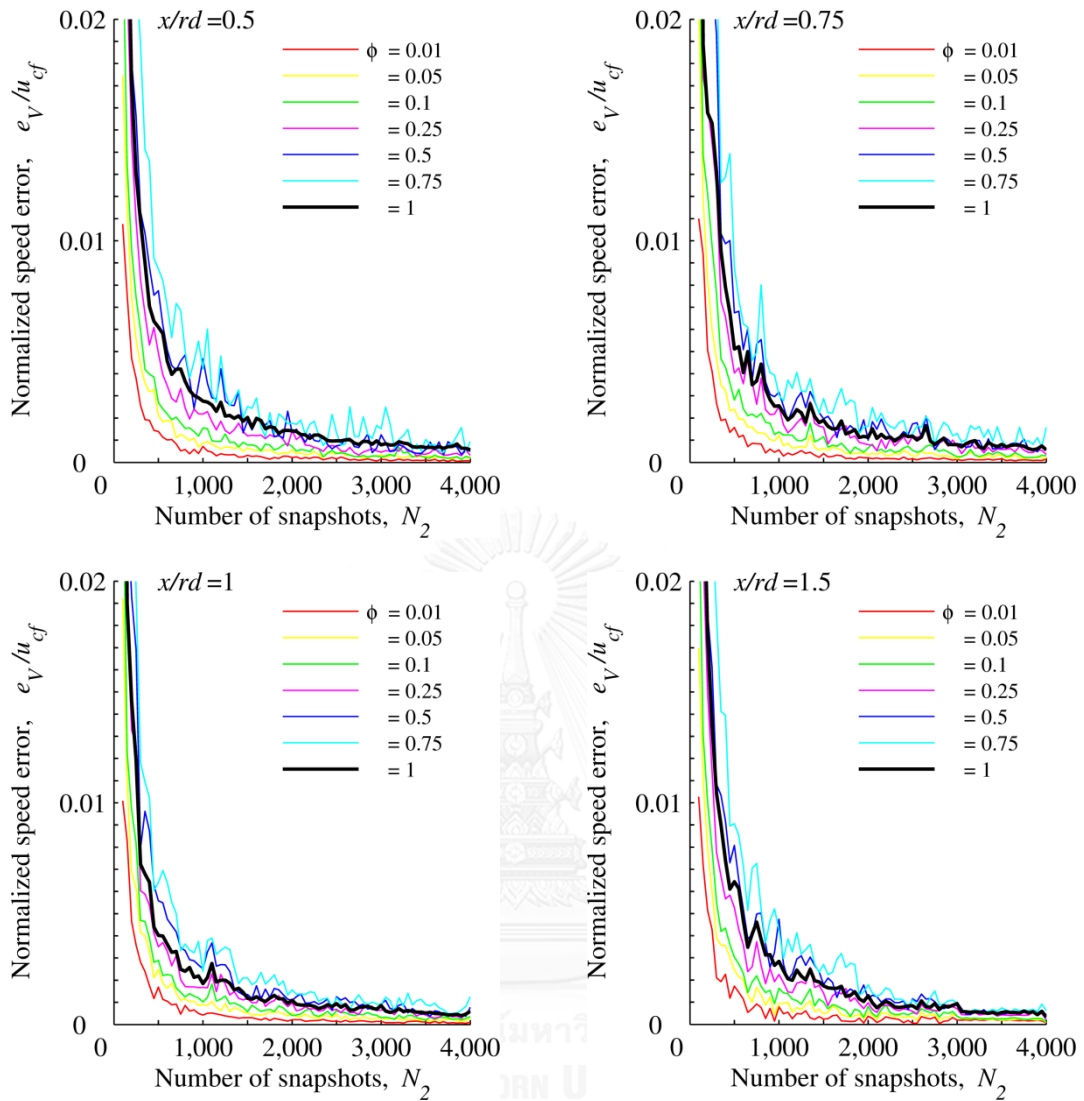
รูปที่ ก.2(ข) การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $x$  โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $x$  ( $e_{V_x}/u_{cf}$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี JICF



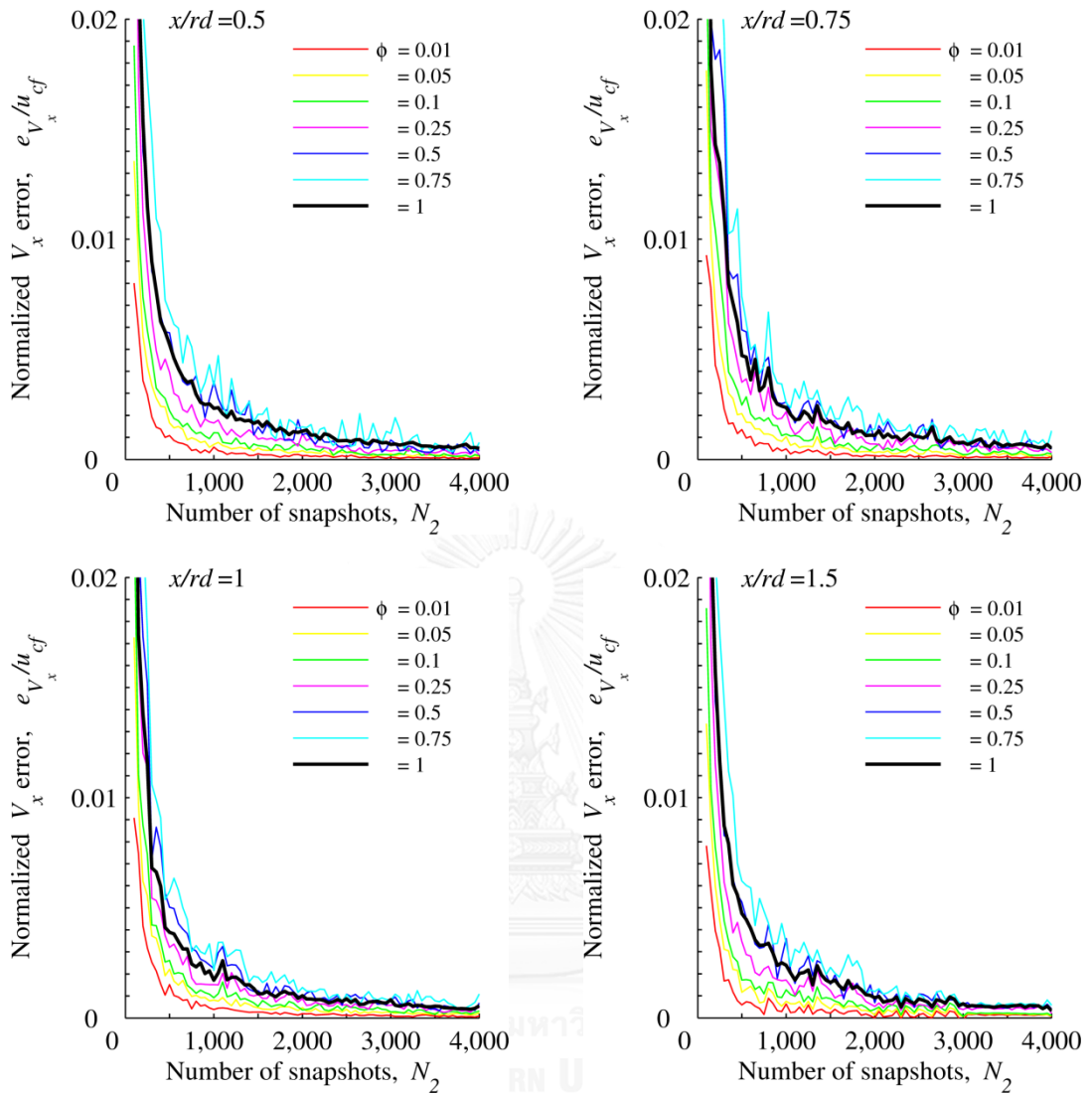
รูปที่ ก.2(ค) การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $y$  โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $y$  ( $e_{V_y}/u_{cf}$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี JICF



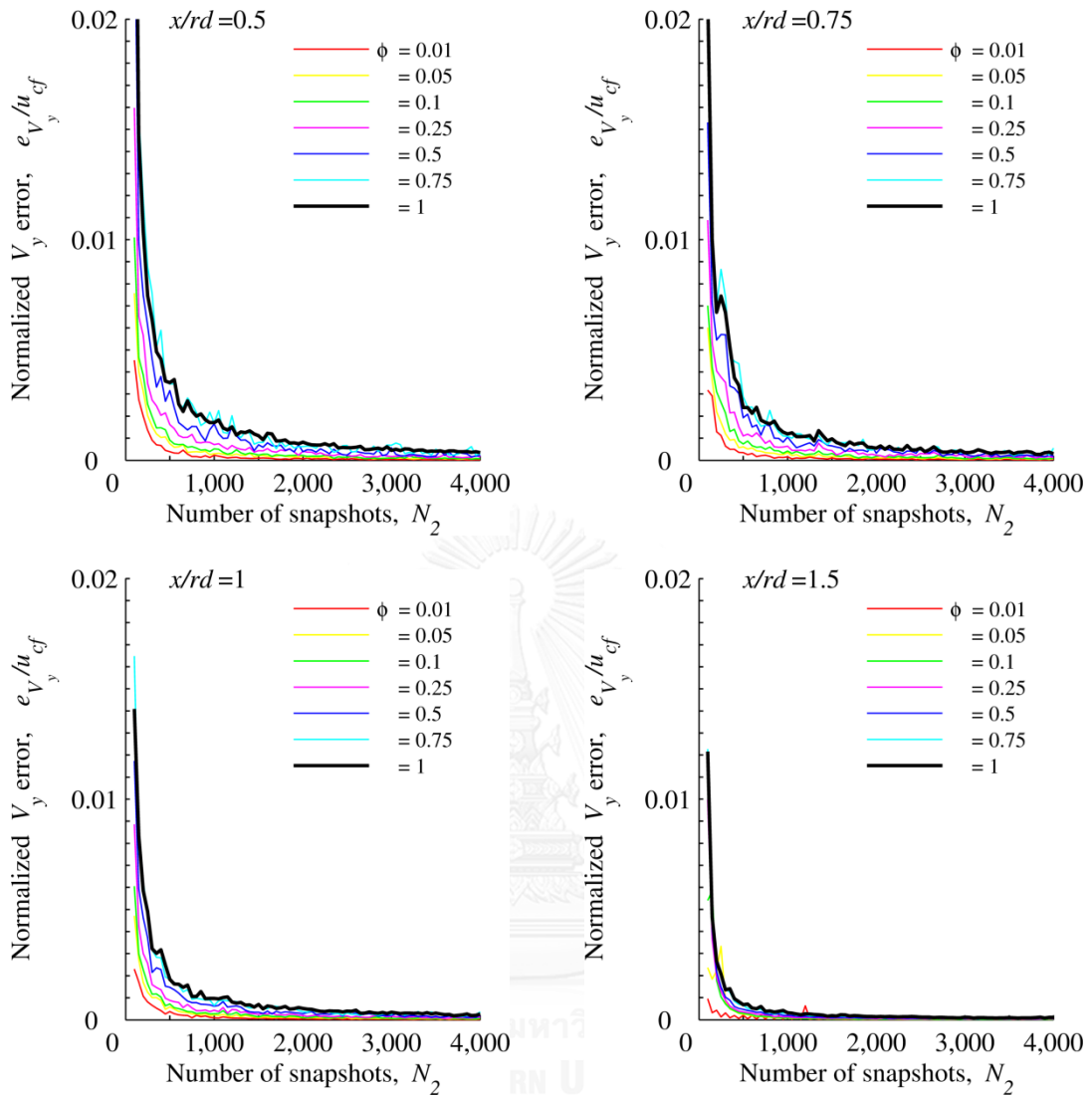
รูปที่ ก.2(ง) การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $z$  โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $z$  ( $e_{V_z}/u_{cf}$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี JICF



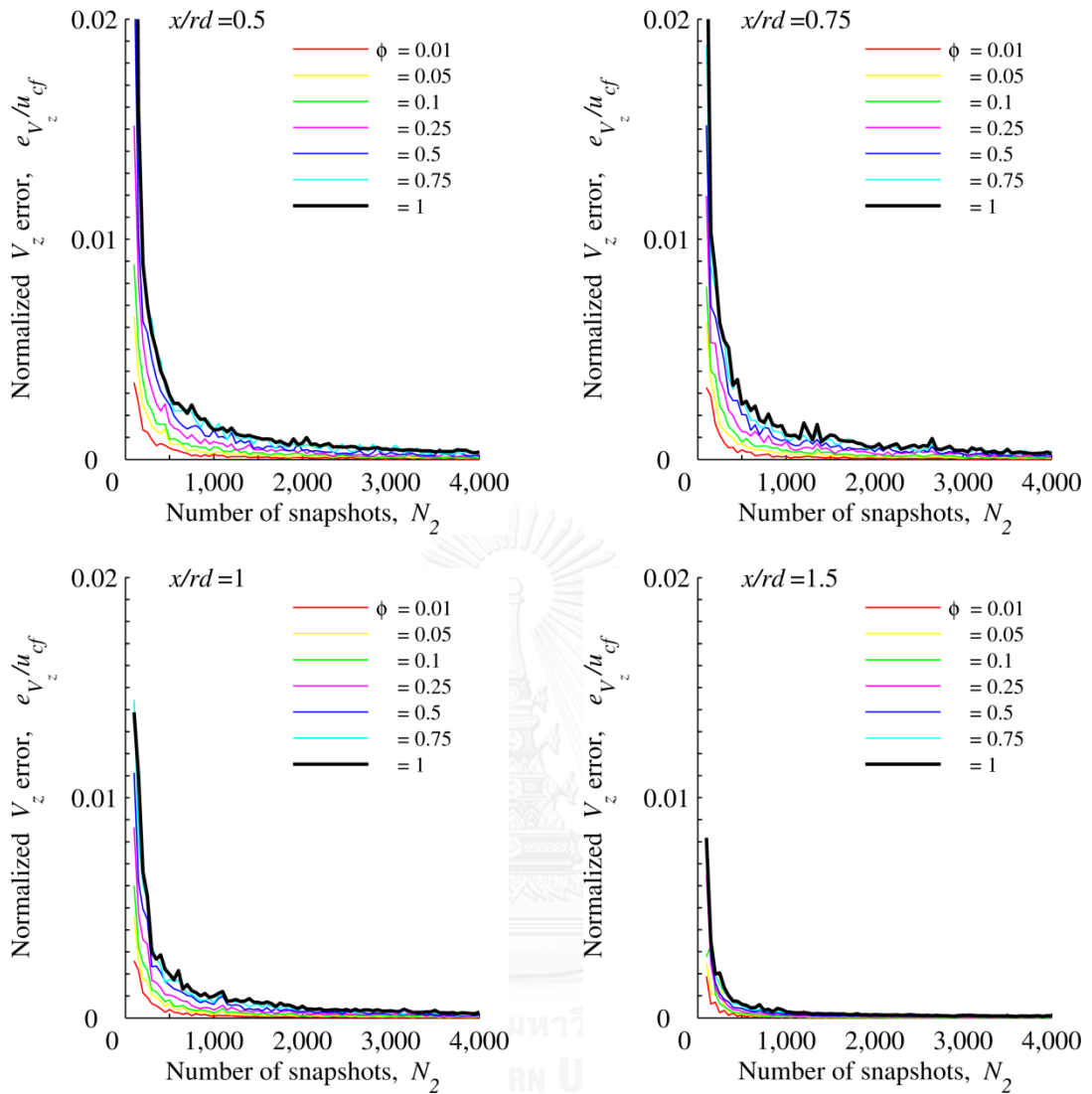
รูปที่ ก.3(ก) การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติโดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติ ( $e_V/u_{cf}$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี  $r_m = 2\%$



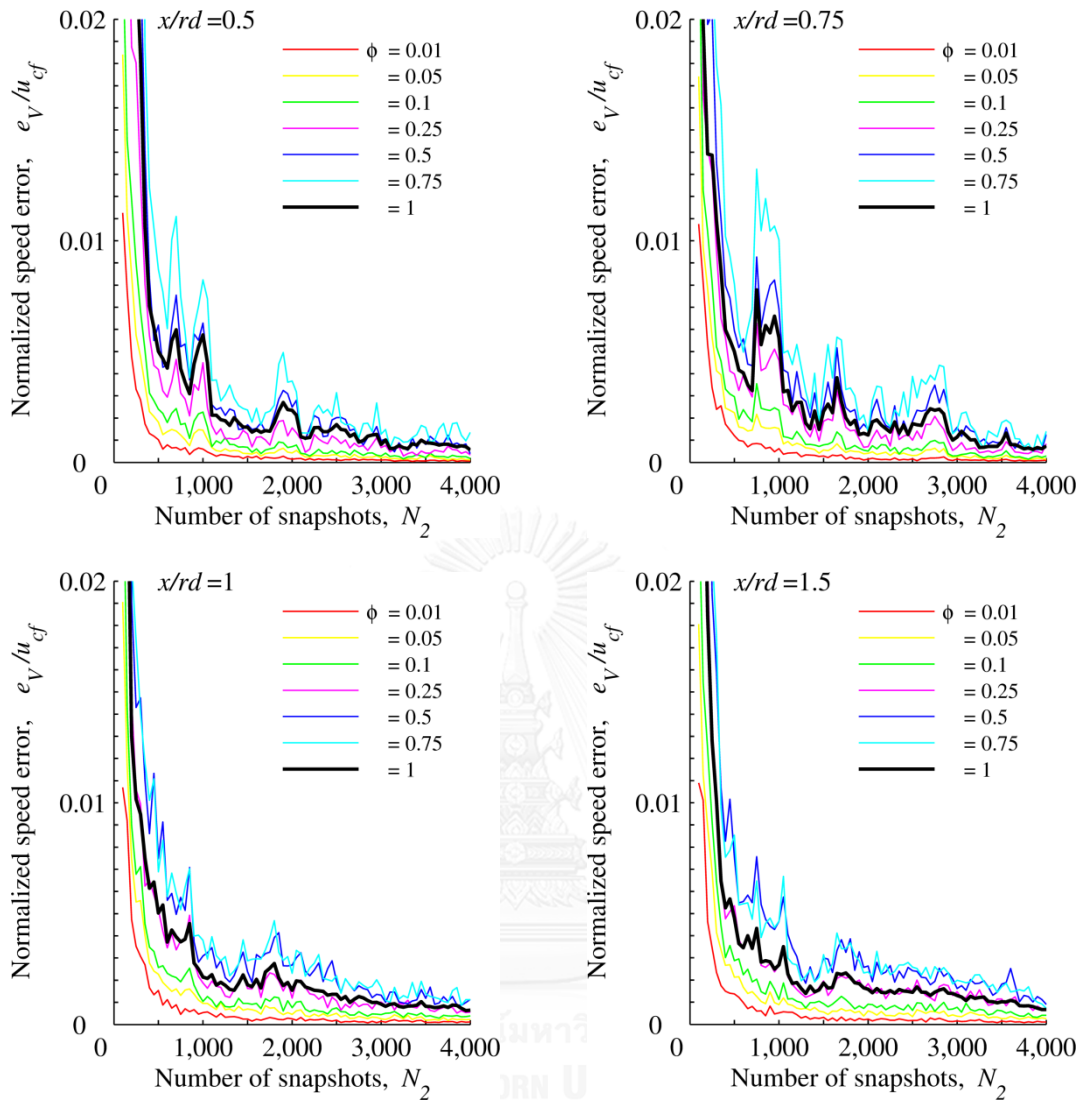
รูปที่ ก.3(ข) การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $x$  โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $x$  ( $e_{V_x}/u_{cf}$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี  $r_m = 2\%$



รูปที่ ก.3(ค) การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $y$  โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $y$  ( $e_{V_y}/u_{cf}$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี  $r_m = 2\%$

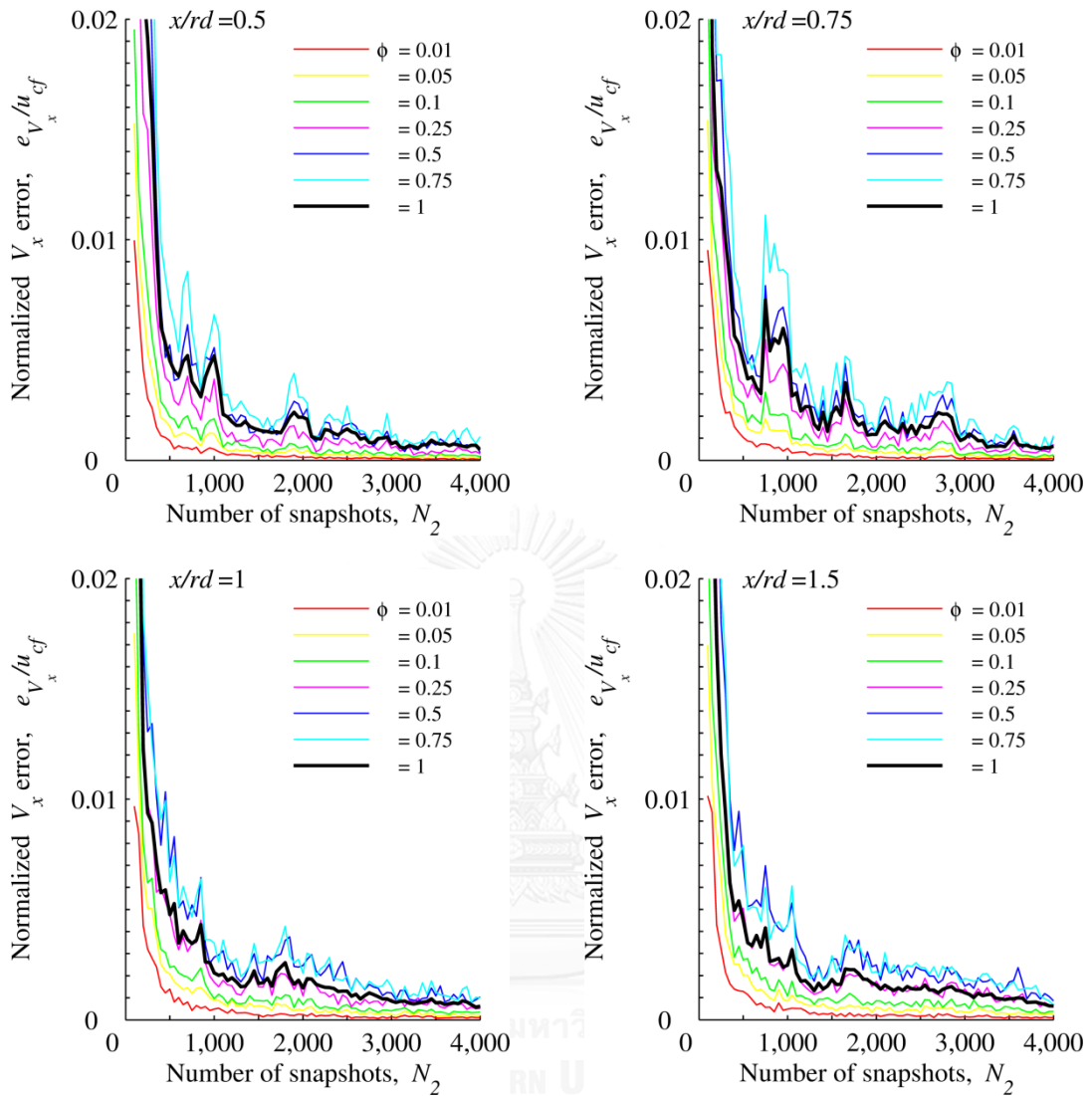


รูปที่ ก.3(ง) การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $z$  โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $z$  ( $e_{V_z}/u_{cf}$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี  $r_m = 2\%$

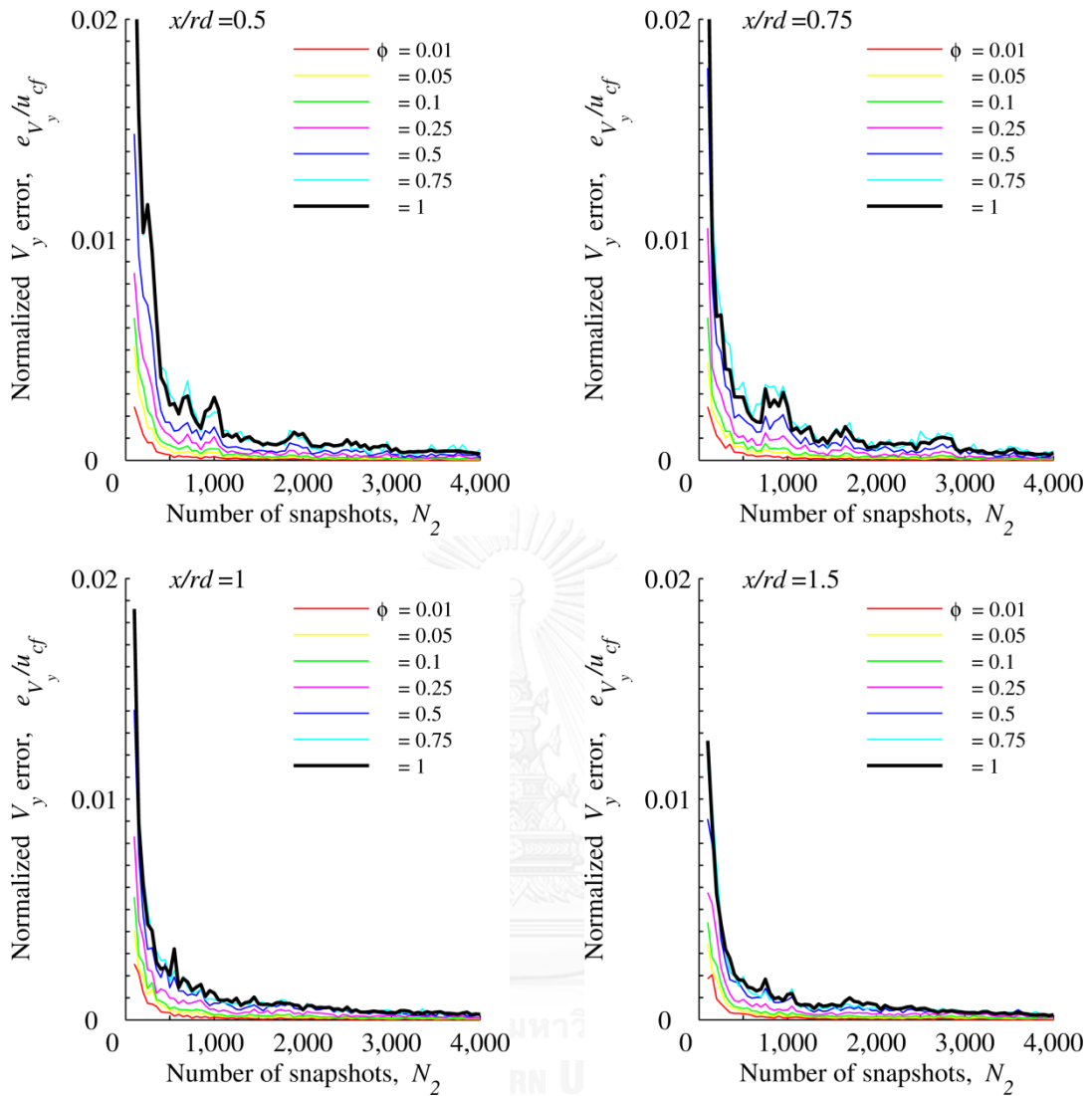


รูปที่ ก.4(ก) การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติโดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติ ( $e_V/u_{cf}$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี  $r_m = 4\%$

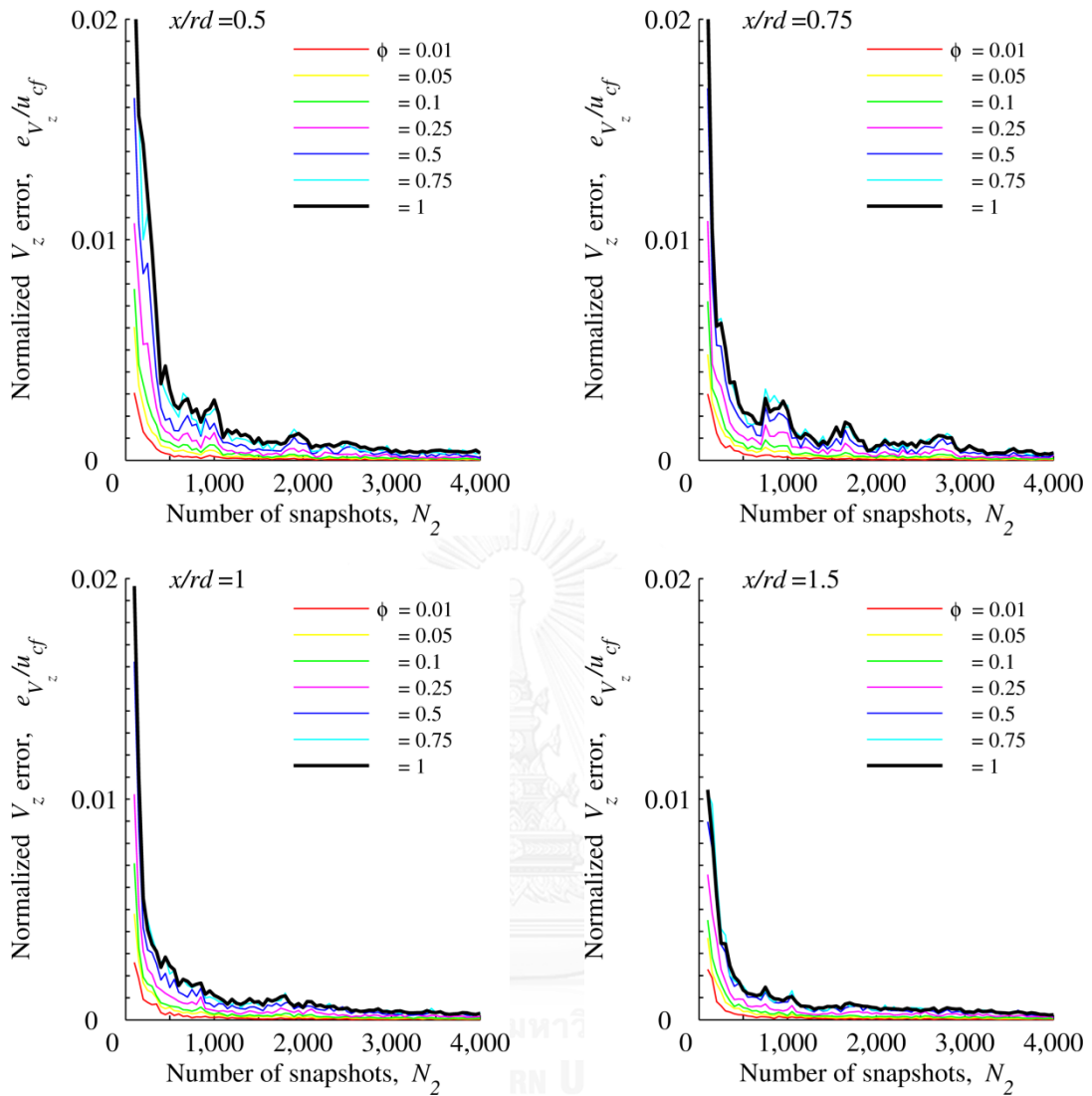




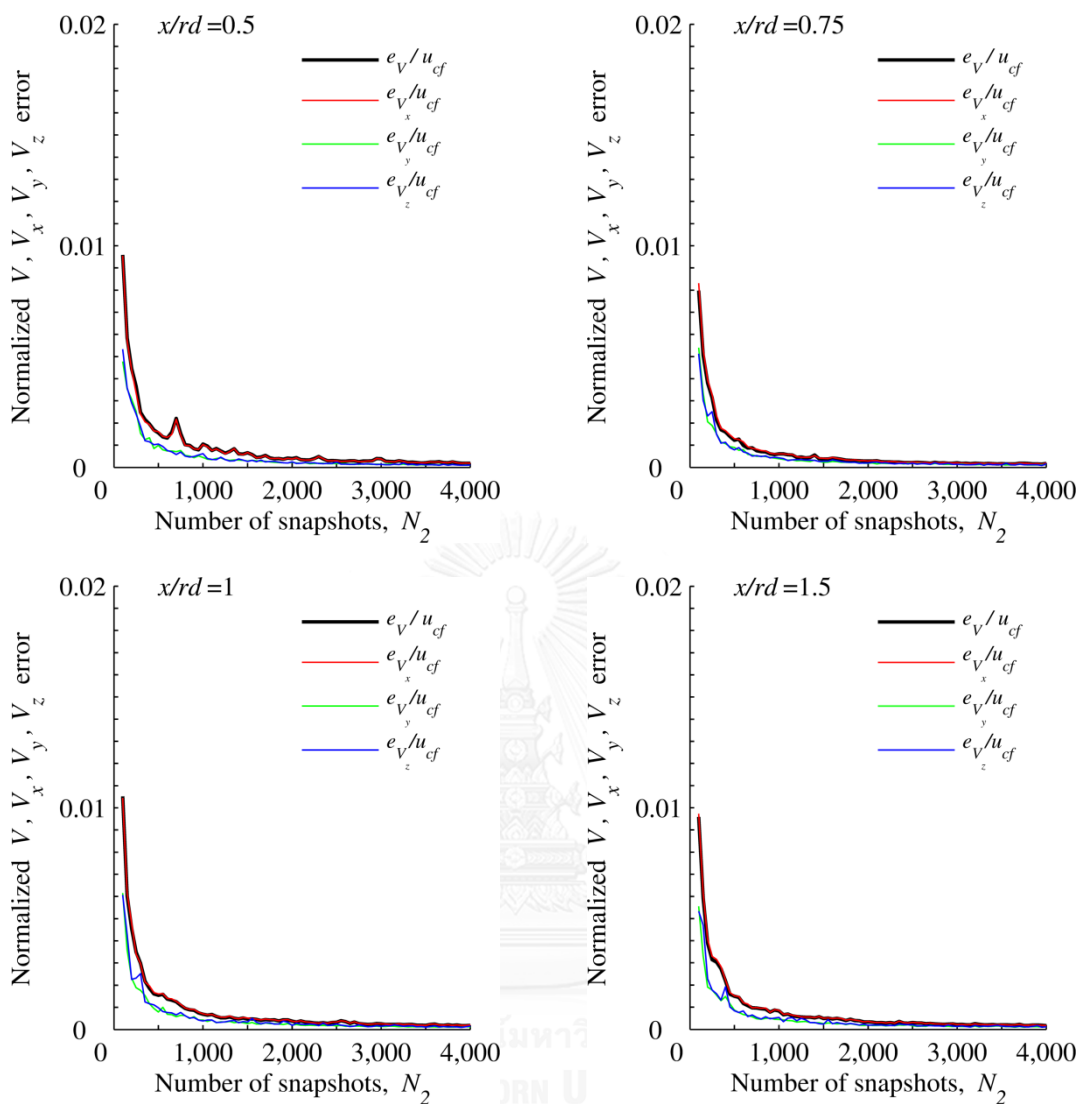
รูปที่ ก.4(ข) การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $x$  โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $x$  ( $e_{V_x}/u_{cf}$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี  $r_m = 4\%$



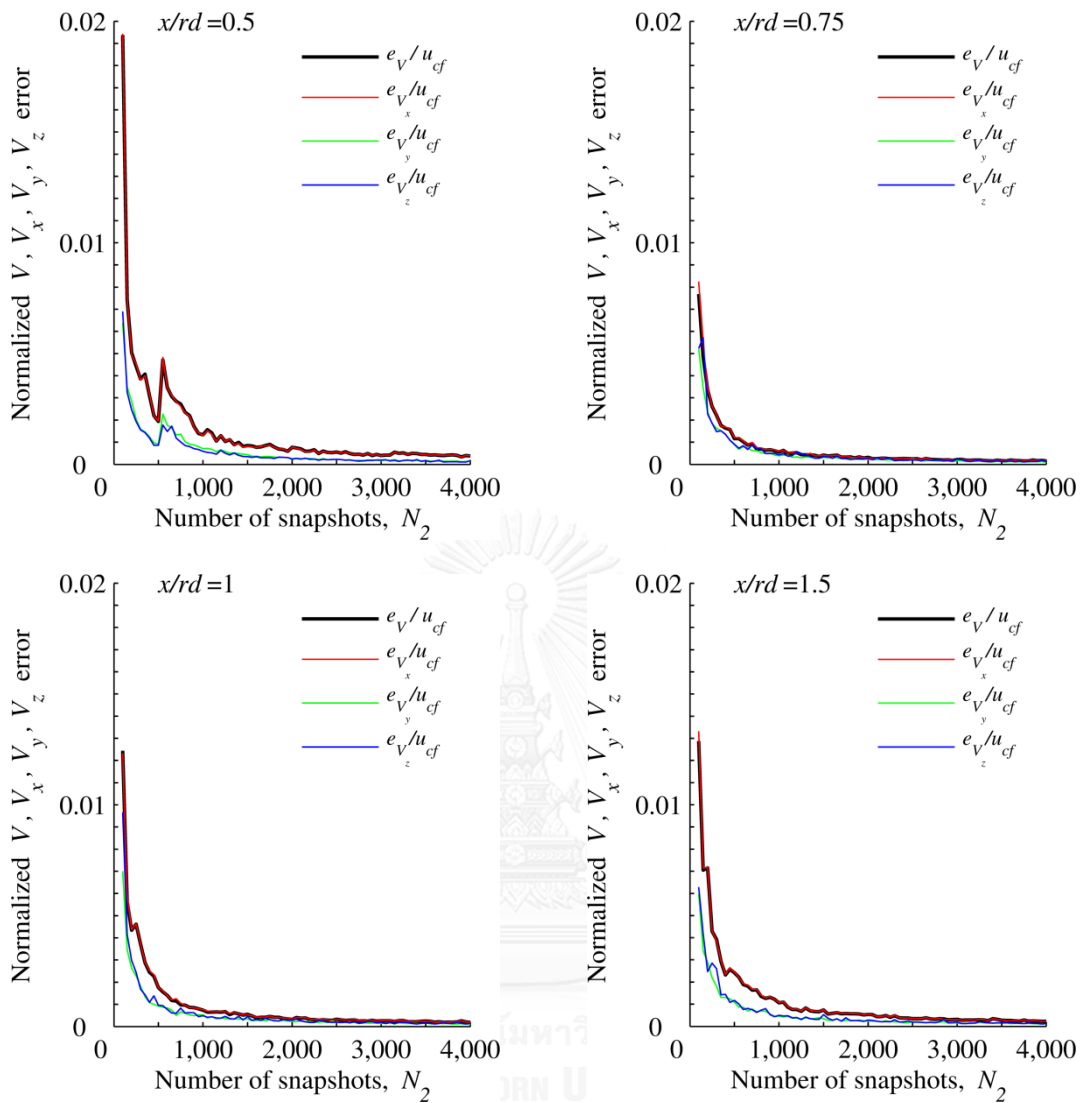
รูปที่ ก.4(ค) การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $y$  โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $y$  ( $e_{V_y}/u_{cf}$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี  $r_m = 4\%$



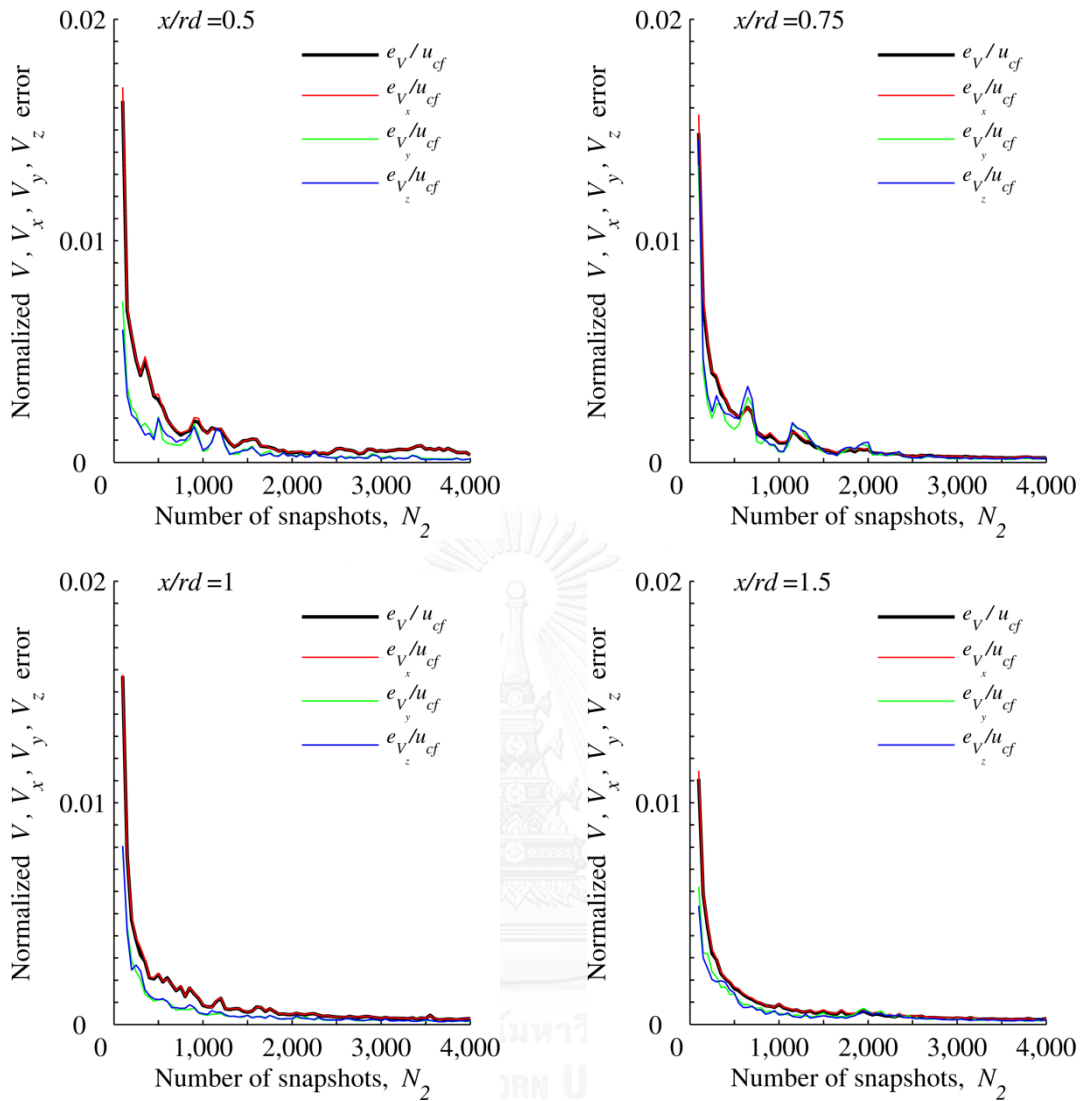
รูปที่ ก.4(ง) การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $z$  โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน  $z$  ( $e_{V_z}/u_{cf}$ ) ต่อจุดบนระนาบสำหรับบริเวณของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด ( $R_\phi$ ) ตั้งแต่  $\phi = 0.01-1$  แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี  $r_m = 4\%$



รูปที่ ก.5(ก) การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติปริมาณต่าง ๆ  $V$ ,  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมวงโดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติของปริมาณต่างๆ ต่อจุดบนระนาบ แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี JICF



รูปที่ ก.5(ข) การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติปริมาณต่าง ๆ  $V, V_x, V_y, V_z$  กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสมขวางโดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติของปริมาณต่างๆ ต่อจุดบนระนาบ แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี  $r_m = 2\%$



รูปที่ ก.5(ค) การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติปริมาณต่าง ๆ  $V, V_x, V_y, V_z$  กรณีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ดและกระแสนวนขวางโดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติของปริมาณต่างๆ ต่อจุดบนระนาบ แปรตามจำนวนภาพ ( $N_2$ ) ตั้งแต่ 100 ภาพ ถึง 4,000 ภาพ โดยเพิ่มจำนวนภาพทีละ 50 ภาพ สำหรับกรณี  $r_m = 4\%$

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุภัค ดาวยก เกิดวันที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2557

