

ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร  
และโครงสร้างของเจ็ดในกระแสมขวาง



นายกิตติคุณ วงศ์ทองศิริ

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 effective velocity ratio on entrainment and structure of a jet in crossflow

Mr. Kittikun Wongthongsiri



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 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราส่วนการ  
เหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรและโครงสร้างของเจ็ดใน  
กระแสมวลขวาง  
โดย นายกิตติคุณ วงศ์ทองศิริ  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

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

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เวชพงศ์ ชูดีชูเดช)

กิตติคุณ วงศ์ทองศิริ : ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรและโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Effects of effective velocity ratio on entrainment and structure of a jet in crossflow) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. อติ บุญจิตราดุลย์, 193 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อโครงสร้างและอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $E$ ) ของเจ็ตในกระแสลมขวาง ด้วย Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) เพื่อให้สามารถระบุขอบเขตของเจ็ตและแยกบริเวณที่เป็นส่วนผสมของเจ็ตออกจากบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางบริสุทธิ์ได้อย่างชัดเจน ณ ขณะใดๆ ซึ่งนำไปสู่การหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ จึงได้อธิบายการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้นไม่ใส่ในกระแสลมขวาง โดยศึกษาที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) เท่ากับ 4, 8 และ 12 เรย์โนลด์ส นัมเบอร์ของกระแสลมขวางเท่ากับ 3,100 รูปร่างของความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตเป็นแบบ fully-developed turbulent pipe flow จากการศึกษาพบว่าใน  $rd$  scale และในช่วงบริเวณ near field เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้น โครงสร้างของปริมาณต่าง ๆ คือ ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต, อัตราเร็วเฉลี่ย, ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise, ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse และ vorticity มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น อีกทั้งโครงสร้างของทุกปริมาณข้างต้นของกรณี  $r = 4$  มีรูปร่างที่แตกต่างจากกรณี  $r = 8$  และ 12 อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่กรณี  $r = 8$  และ 12 มีโครงสร้างที่คล้ายกัน จึงชี้แนะว่าในช่วง near field กรณี  $r = 4$  เจ็ตมีรูปแบบการไหลที่แตกต่างจากกรณี  $r = 8$  และ 12 และชี้แนะว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นผลมาจาก wall blocking เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่บริเวณ far field ผลของ  $r$  ต่อโครงสร้างของทุกปริมาณข้างต้นลดลง สำหรับคุณลักษณะของเจ็ตใน  $rd$  scale พบว่าเมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้น เส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise และเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจาก vorticity ตามแนวแกน streamwise สูงขึ้น อีกทั้งเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากอัตราเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise จะมีอยู่สูงกว่าเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจาก vorticity ตามแนวแกน streamwise เสมอ ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้น circulation ( $\Gamma$ ) และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $E$ ) เพิ่มขึ้น ผลของ  $r$  ต่อคุณลักษณะของเจ็ตใน  $rd$  scale นี้แสดงให้เห็นว่า  $r$  ยังคงมีผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตใน  $rd$  scale ดังนั้นเพื่อให้สามารถรวมผลของ  $r$  ต่อคุณลักษณะของเจ็ตได้ดีขึ้น การศึกษานี้จึงหา scaling ที่เหมาะสมต่อคุณลักษณะของเจ็ตใหม่ จากการศึกษาพบว่าสามารถรวมผลของ  $r$  ให้ ทุกกรณีของ  $r$  collapse เป็นความสัมพันธ์เดียวได้ เมื่อ scale เส้นทางเดินของเจ็ตด้วย  $r^{1.3}d$ , circulation ด้วย  $ru_c d$  และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรด้วย  $r^{0.7}$  เมื่อพล็อตเทียบกับ  $x/rd$  นอกจากนี้ด้วยเทคนิคไดอะแกรมการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้นไม่ใส่ในกระแสลมขวางทำให้สามารถวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นที่พบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใดๆ ( $\phi_j$ ) ได้ โดยพบว่า บริเวณที่มีความน่าจะเป็นสะสมที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตต่ำ ( $\phi_j < 0.1$ ) ถึงแม้จะมีพื้นที่ถึงประมาณครึ่งหนึ่งของเจ็ต (50-60% ของพื้นที่เจ็ตทั้งหมด) แต่บริเวณดังกล่าวนี้ให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (2-3% ของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรทั้งหมดบนหน้าตัดเจ็ต) ในขณะที่บริเวณที่มีความน่าจะเป็นสะสมที่จะพบเจ็ตสูง ( $\phi_j > 0.9$ ) ซึ่งมีพื้นที่เพียงเล็กน้อย (10-25%) กลับให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรมากกว่าครึ่ง (40-70%) ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าผลของ  $r$  ต่อความสัมพันธ์ของ jet fractional area ratio ( $A_\phi/A$ ) และ jet fractional entrainment ratio ( $E_\phi/E$ ) กับความน่าจะเป็นสะสมที่จะพบเจ็ต  $\phi$  ลดลงเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนว downstream สุดท้าย ผลการทดลองชี้แนะถึงหนึ่งในกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางว่าเป็นผลมาจากการเหนี่ยวนำของ CVP ที่ทำให้เกิดและคงอยู่ของ vertical channel ของความเร็วตามแนวแกน traverse ที่สูงที่อยู่ระหว่างคู่ออร์เท็กซ์ของ CVP โดย CVP จะเหนี่ยวนำเอากระแสลมขวางจากบริเวณด้านล่างของเจ็ตให้ไหลขึ้นผ่าน vertical channel นี้เข้าไปผสมกับตัวเจ็ต

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5770119621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: JET IN CROSSFLOW / EFFECTIVE VELOCITY RATIO / VOLUMETRIC ENTRAINMENT

KITTIKUN WONGTHONGSIRI: Effects of effective velocity ratio on entrainment and structure of a jet in crossflow. ADVISOR: ASSOC. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA, 193 pp.

The effects of effective velocity ratio ( $r$ ) on structures and volumetric entrainment ( $E$ ) of a jet in crossflow (JICF) are investigated by Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV). In order to be able to instantaneously and clearly identify and differentiate the jet-fluid mixture region and structures from the pure crossflow region and consequently to determine the volumetric entrainment ratio of the jet more accurately, only the jet fluid – and not the crossflow fluid - is seeded with PIV tracer particles. The experiment is conducted for a jet in crossflow with effective velocity ratio ( $r$ ) of 4, 8, and 12. The crossflow Reynold number is 3,100 and the initial jet velocity profile is fully-developed turbulent pipe flow. The results show that in  $rd$ -scale and in the near field as  $r$  increases, the structures of probability of finding jet-fluid mixture, mean speed, streamwise velocity, traverse velocity, and streamwise vorticity have height to width ratio increase. In addition, the jet structures in the case of  $r$  of 4 are quite different from cases of  $r$  of 8 and 12 while the jet structures of  $r$  of 8 and 12 are similar. This suggests that JICF at  $r$  of 4 belongs to different flow regime from  $r$  of 8 and 12, at least in the near field. Furthermore, the results also suggest that this is due to wall blocking effect. As the jet develops downstream into the far field, however, the effect of  $r$  diminishes. For jet characteristics in  $rd$  scale, it is found that as  $r$  increases, the jet trajectories as defined by the magnitude of streamwise velocity and streamwise vorticity increase; the velocity trajectory is always higher than the vorticity trajectory. In addition, as  $r$  increases, the jet circulation ( $\Gamma$ ) and entrainment ( $E$ ) also increase. These results in  $rd$ -scale show that these jet characteristics still depend on  $r$  in the  $rd$ -scale. In order to unify the results at various  $r$  further, we therefore investigate more appropriate scaling laws for these jet characteristics and find that the results of various  $r$  are well collapsed onto one unifying relation, i.e., no longer depend on  $r$ , when both jet velocity and vorticity trajectories are scaled instead by  $r^{1.3}d$ , circulation by  $ru_{c,d}$  and entrainment by  $r^{0.7}$  when plotted against  $x/rd$ . Furthermore, due to the jet-fluid only seeding scheme, the probability of finding jet-fluid mixture at a point  $\phi_{ij}$  can also be determined. The results show that the jet region with low probability of finding the jet-fluid mixture  $\phi_{ij} < 0.1$ , while contributes about half (50-60%) of the jet cross sectional area, contributes minimal (2-3%) to the jet entrainment at the cross section. On the other hand, the jet region with high probability of finding the jet fluid mixture  $\phi_{ij} > 0.9$ , while contributes relatively little (10-25%) to the jet cross sectional area, contributes approximately more than half (40-70%) to the jet entrainment. In addition, the diminishing effect of  $r$  in the downstream direction is also observed in the relations of the jet fractional area ratio ( $A_{\phi}/A_j$ ) and the jet fractional entrainment ratio ( $E_{\phi}/E_j$ ) with the accumulative probability of finding jet-fluid mixture  $\phi$ . Finally, the results also suggest to one of the entrainment mechanisms of JICF being due to a vertical channel of high upward transverse flow located between the vortex pair of the counter-rotating vortex pair (CVP). This vertical channel of high upward transverse flow is induced, fueled, and sustained in the downstream direction by the CVP. It channels crossflow fluid from underneath the jet to rise up and be entrained into the jet.

Department: Mechanical Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Mechanical Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ประสิทธิประสาทความรู้ และกระบวนการคิดทางวิศวกรรม อีกทั้งโอกาสมากมายที่มีให้

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่คอยให้คำแนะนำ แนวทางของโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วง ตลอดจนจนความรู้ วิธีคิด กระบวนการวิเคราะห์ การแก้ไขปัญหาต่างๆ ทั้งในแง่วิชาการและการทำงาน เพื่อให้มีความรู้ ความสามารถ และประสบการณ์ที่จะเป็นพื้นฐานเวลาทำงานในฐานะวิศวกรที่ดีต่อไป

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัย และทดลองกลศาสตร์ของไหล สถานที่ปฏิบัติงานโครงการนี้ (Fluid Mechanics Research Laboratory : FMRL) ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ และอุปกรณ์ต่างๆที่ช่วยให้โครงการนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณกลุ่มบุคคลที่มีส่วนช่วยในโครงการนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นายธเนศน์ วิทยาประภากร และ นายอภิเชษฐ์ ศรีเมฆารัตน์ ฟินิสิตปริญญาโทที่คอยให้คำแนะนำ และช่วยเหลือในการทดลองโครงการนี้, นายเศรษฐสิทธิ ชัยเกษตรสิน นายธีรภัทร์ สุขิวกุล นายปิยพนธ์ ภาณสิทธิกร นายสุภัค ดาวยก เพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการที่คอยช่วยกันทำการทดลอง และแก้ไขปัญหาต่างๆ จนโครงการต่างๆสำเร็จ

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

สุดท้ายขอกราบขอบคุณ บิดา มารดา ที่คอยเลี้ยงดู ชี้แนะ และให้ความสนับสนุนในด้านต่างๆ โดยเฉพาะด้านการศึกษาที่เห็นความสำคัญ และให้การสนับสนุนตลอดมา อีกทั้งคอยให้กำลังใจให้ไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคต่างๆ เป็นแรงผลักดันเสมอมา

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 แรงจูงใจ.....	3
1.3 วัตถุประสงค์.....	5
1.4 ขอบเขตของโครงการ.....	6
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	8
2.1 ปริมาณที่สำคัญและโครงสร้างพื้นฐานของเจ็ดในกระแสมขวาง.....	8
2.1.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล.....	8
2.1.2 เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ดและเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวาง.....	8
2.1.3 โครงสร้างพื้นฐานของเจ็ดในกระแสมขวาง.....	9
2.2 การเหนี่ยวนำการผสมและผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล.....	10
2.2.1 การหาการเหนี่ยวนำการผสม.....	10
2.2.2 การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment).....	12
2.2.3 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล.....	14
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อเจ็ดในกระแสมขวาง.....	15

2.3.1	เส้นทางเดินของเจ็ต .....	15
2.3.2	การก่อตัว และพัฒนาตัวของ Counter – rotating vortex pair (CVP) .....	18
2.3.3	ผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวางต่อเจ็ตในกระแสลมขวาง .....	19
2.3.4	การปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวาง .....	20
2.3.5	โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางเมื่อพิจารณาจาก POD .....	24
บทที่ 3 หลักการ และทฤษฎี .....		25
3.1	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร .....	25
3.2	ปัญหาของการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง .....	26
3.3	เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหล .....	26
3.4	การประเมินอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร .....	27
บทที่ 4 ชุดการทดลอง และการทดลอง .....		29
4.1	ชุดการทดลอง .....	29
4.1.1	อุโมงค์ลม .....	29
4.1.2	ชุดหัวเจ็ต .....	30
4.2	พิกัดการทดลอง .....	31
4.3	ชุดเครื่องมือวัดความเร็ว Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) .....	31
4.3.1	หลักการทำงาน .....	31
4.3.2	ชุด SPIV .....	32
4.4	การวัดความเป็นระเบียบของกระแสลมขวาง .....	34
4.5	การวัดความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง .....	34
4.6	การวัดสถานะเริ่มต้นของเจ็ต .....	35
4.7	การสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง SPIV กับ Pitot static tube .....	37
4.7.1	การลู่เข้าของความเร็วที่ใช้ในการสอบเทียบ .....	37



4.7.2 การสอบเทียบ.....	38
4.8 สรุปเงื่อนไขการทดลอง .....	39
บทที่ 5 ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ .....	40
บทที่ 6 การประเมินการลู่เข้า.....	42
6.1 การประเมินการลู่เข้าของความเร็วตามแนวแกน Streamwise.....	42
6.2 การประเมินการลู่เข้าของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร .....	44
บทที่ 7 ผลการทดลอง.....	46
7.1 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อการกระจายตัวของปริมาณเฉลี่ยไร้มิติและ โครงสร้างของเจ็ต .....	46
7.1.1 การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง.....	46
7.1.2 การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง.....	48
7.1.3 การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสลมขวาง.....	50
7.1.4 การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise ต่อกระแสลมขวาง .....	52
7.1.5 การกระจายตัวของ normalized vorticity ตามแนวแกน streamwise.....	52
7.1.6 การกระจายตัวของ turbulent kinetic energy (TKE) ต่อ crossflow kinetic energy (CKE).....	54
7.1.7 โครงสร้างความเร็วที่โดดเด่นของเจ็ตในกระแสลมขวาง .....	56
7.1.8 โครงสร้างความเร็วของเจ็ตในกระแสลมขวางและความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุด ใดๆ.....	57
7.1.9 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางและ CVP.....	57
7.2 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตบน $rd$ scale .....	59
7.2.1 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อเส้นทางการเดินของเจ็ตบน $rd$ scale.....	59
7.2.2 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อ circulation ไร้มิตินบน $rd$ scale.....	60

7.2.3 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิง ปริมาตรบน $rd$ scale .....	61
7.3 มาตรฐานต่อคุณลักษณะของเจ็ต .....	63
7.4 การกระจายตัวของพื้นที่ของเจ็ตและอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรต่อความ น่าจะเป็นเชิงเวลาสะสมที่จะพบเจ็ต .....	65
บทที่ 8 อภิปรายผลการทดลอง .....	66
บทที่ 9 สรุปผลการทดลอง .....	68
ประมวลตาราง .....	74
บทที่ 4.....	75
บทที่ 7.....	76
บทที่ 8.....	78
ประมวลรูปภาพ .....	79
บทที่ 1.....	80
บทที่ 2.....	83
บทที่ 3 .....	120
บทที่ 4.....	122
บทที่ 5.....	133
บทที่ 6 .....	135
บทที่ 7 .....	142
บทที่ 8.....	166
รายการอ้างอิง.....	169
ภาคผนวก ก Data Reduction Diagram.....	172
ก.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร .....	172
ก.2 ความเร็วที่วัดได้จาก pitot static tube.....	173

ก.3 ระยะตามแนว downstream.....	174
ก.4 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล .....	175
ก.5 เรย์โนลด์ส์สัมพันธ์ของกระแสมขวาง .....	176
ภาคผนวก ข ความไม่แน่นอน.....	177
ข.1 ค่าความไม่แน่นอนของค่าความเร็ว .....	177
ข.2 ค่าความไม่แน่นอนของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร.....	181
ภาคผนวก ค พารามิเตอร์ในการทดลอง .....	185
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	193



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1	ความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางแต่ละตำแหน่งตามแนว spanwise.....	75
ตารางที่ 7.1	พารามิเตอร์ที่สำคัญในเส้นทางการเดินของเจ็ตที่นิยามจากความเร็ว เฉลี่ยตามแนวแกน streamwise.....	76
ตารางที่ 7.2	พารามิเตอร์ที่สำคัญในเส้นทางการเดินของเจ็ตที่นิยาม vorticity ตามแนวแกน streamwise.....	76
ตารางที่ 7.3	พารามิเตอร์ที่สำคัญของ circulation.....	77
ตารางที่ 7.4	พารามิเตอร์ที่สำคัญของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร.....	77
ตารางที่ 8.1	พารามิเตอร์ที่สำคัญที่แตกต่างกันของการทดลองนี้กับการทดลองของ Witayaprapakorn (2013) และ Dawyok (2015).....	78

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1	ลักษณะโดยสังเขปของเจ็ตในกระแสลมขวาง .....	80
รูปที่ 1.2	การประยุกต์การใช้งานของเจ็ตในกระแสลมขวาง .....	81
รูปที่ 1.3	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม JICF และ I15 (Kornsri et al., 2009).....	82
รูปที่ 2.1	โครงสร้าง vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Fric and Rosh, 1994) .....	83
รูปที่ 2.2	การลดลงของความเข้มข้น %C ของ JICF และ free jet บน $r^2 d$ scale (Smith and Mungal, 1998) .....	83
รูปที่ 2.3	การลดลงของความเข้มข้น %C ของ JICF และ free jet บน $rd$ scale (Smith and Mungal, 1998) .....	84
รูปที่ 2.4	contour ของ instantaneous spanwise vorticity และ scalar concentration (Yuan and Street, 1998) .....	84
รูปที่ 2.5	การพัฒนาตัวของเจ็ตที่มุมมอง top view (Watakulsin et al., 2010) .....	85
รูปที่ 2.6	กลไกการเหนี่ยวนำการผสม (entrainment) ของ JICF และ I15 (Kornsri et al., 2009).....	86
รูปที่ 2.7	การลดลงของอุณหภูมิต่อระยะทาง (Karmatoni and Greber, 1972).....	86
รูปที่ 2.8	การกระจายตัวของ mass flux (Karmatoni and Greber, 1972).....	87
รูปที่ 2.9	ความยาวของการเผาไหม้ที่ $r$ ต่างๆกัน (แกน $x$ เป็นส่วนกลับของ $r$ ) (Broadwell and Breidenthal, 1984).....	87
รูปที่ 2.10	การเหนี่ยวนำการผสมของ JICF (Yuan and Street, 1998) .....	88
รูปที่ 2.11	การกระจายตัวของอุณหภูมิ (Karmatoni and Greber, 1972).....	88
รูปที่ 2.12	Circulation ของเจ็ตที่ด้านหนึ่งของแกนสมมาตร (Zaman and Foss, 1997).....	89
รูปที่ 2.13	ผลของ $r$ ต่อความไม่สมมาตรของเจ็ต (Smith and Mungal, 1998).....	89
รูปที่ 2.14	การคงอยู่ของเจ็ตที่ผนัง (Smith and Mungal, 1998).....	90
รูปที่ 2.15	มุมมองด้านข้างของเจ็ตที่ $r$ ต่างๆกัน (Smith and Mungal, 1998) .....	90

รูปที่ 2.16	เส้นทางการไหลของความเร็ว และอุณหภูมิ (Karmatoni and Greber, 1972)....	91
รูปที่ 2.17	การสเกลเส้นทางการเดินของเจ็ต (Smith and Mungal, 1998) .....	91
รูปที่ 2.18	ผลของ $Re_{cf}$ และ $r$ เส้นทางการเดินของเจ็ต (Yuan and Street, 1998).....	92
รูปที่ 2.19	เส้นทางการเดินของเจ็ตที่ collapse เข้าด้วยกัน (Yuan and Street, 1998) .....	92
รูปที่ 2.20	ผลการเปรียบเทียบเส้นทางเดินเสกกล (Muppidi and Mahesh, 2005b) .....	93
รูปที่ 2.21	เส้นทางการไหลของเจ็ต scale ด้วย $h$ (Muppidi and Mahesh, 2005b) .....	93
รูปที่ 2.22	โครงสร้างบริเวณ near field ของ JICF จาก isosurface ของ vorticity (Yuan et al., 1999) .....	94
รูปที่ 2.23	โครงสร้างของ hanging vortices (Yuan et al., 1999) .....	94
รูปที่ 2.24	การพัฒนาตัวของ skewed mixing layer (Yuan et al., 1999) .....	95
รูปที่ 2.25	โครงสร้างการเกิด CVP (Cortelezzi and Karagozian, 2001) .....	95
รูปที่ 2.26	การพัฒนาตัวของ JICF (Cortelezzi and Karagozian, 2001) .....	96
รูปที่ 2.27	Vortex Structure ของ JICF (Lim et al., 2001) .....	97
รูปที่ 2.28	การพับตัวของ cylindrical shear layer (Lim et al., 2001) .....	97
รูปที่ 2.29	ผลของ $Re_{cf}$ ต่อการผสม (Yuan and Street, 1998) .....	98
รูปที่ 2.30	เจ็ตที่ End view (Muppidi and Mahesh, 2006) .....	98
รูปที่ 2.31	เจ็ตที่ end view เมื่อเสถียรแล้ว (Muppidi and Mahesh, 2006) .....	99
รูปที่ 2.32	ผลของ $r$ และ $Re_{cf}$ ต่อเส้นทางการเดินของเจ็ต (Muppidi and Mahesh, 2006) .....	99
รูปที่ 2.33	ผล $Re_{cf}$ ต่อ $u_{final}$ และ $u_{induced}$ (Muppidi and Mahesh, 2006).....	100
รูปที่ 2.34	ผลของ $Re_{cf}$ ต่อความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ (Wongthongsiri and Bunyajitradulya, 2014) .....	100
รูปที่ 2.35	ผลของ $Re_{cf}$ ต่อความเร็วตามแนวการไหล (Streamwise velocity) (Wongthongsiri and Bunyajitradulya, 2014) .....	101

รูปที่ 2.36	ผลของ $Re_{cf}$ ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (Wongthongsiri and Bunyajitradulya, 2014).....	101
รูปที่ 2.37	ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ ต่อพื้นที่ และ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (Wongthongsiri and Bunyajitradulya, 2014).....	102
รูปที่ 2.38	เส้นทางการไหลของเจ็ตที่มีการติด tab (Zaman and Foss, 1997).....	103
รูปที่ 2.39	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจากการติด tab (Wangjiraniran and Bunyajitradulya, 2001).....	104
รูปที่ 2.40	ผลของการกระตุ้นด้วย Pulse (M'Closkey et. al., 2002).....	105
รูปที่ 2.41	ตำแหน่ง tab และระบบแกน (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005).....	106
รูปที่ 2.42	การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการติด tab กรณีเจ็ตไม่หมุนควง (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005).....	107
รูปที่ 2.43	การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการติด tab กรณีเจ็ตหมุนควง (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005).....	108
รูปที่ 2.44	ลักษณะของเจ็ตควบคุม (Azimuthal control jets) (Kornsri et al., 2009).....	109
รูปที่ 2.45	ผลของมุมที่ฉีดเจ็ตควบคุม (Azimuthal control jets) ต่อเส้นทางการเดินของ เจ็ต โดยที่ $I0 =$ ฉีดที่มุม $\pm 0$ จาก windward side, $I15 =$ ฉีดที่มุม $\pm 15$ ,.....	109
รูปที่ 2.46	ผล $r_m$ ต่อเส้นทางการเดินของเจ็ตที่ตำแหน่ง $x = 1.5 rd$ ของกรณี I15 (Kornsri et al., 2009).....	110
รูปที่ 2.47	โครงสร้างของ JICF และ I15 ด้วย contour plot ของ $V_j / u_{cf}$ ที่ตำแหน่ง.....	110
รูปที่ 2.48	โครงสร้างของเจ็ตที่พิจารณาจากการกระจายตัวความเร็วตามแนวแกน x (streamwise) ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x / u_{cf}$ ) (Witayaprapakorn, 2013).....	111
รูปที่ 2.49	ผลของใช้เจ็ตควบคุมต่อ circulation ไร้มิติตามแนว downstream (Witayaprapakorn, 2013).....	112
รูปที่ 2.50	ผลของใช้เจ็ตควบคุมต่อ CC และ CM ของผลรวมความเร็ว (V) (Witayaprapakorn, 2013).....	112

รูปที่ 2.51	ผลของใช้เจ็ตควบคุมต่อ entrainment ที่ระนาบและกรณีต่างๆ (Witayaprapakorn, 2013).....	113
รูปที่ 2.52	โครงสร้างของเจ็ตที่พิจารณาจากการกระจายตัวความเร็วตามแนวแกน x (streamwise) ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x / u_{cf}$ ) (Chaikasetsin et al., 2014).....	113
รูปที่ 2.53	ผลของ $r_m$ ต่อเส้นทางการไหลของเจ็ต (Chaikasetsin et al., 2014) .....	114
รูปที่ 2.54	ผลของ $r_m$ ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (Chaikasetsin et al., 2014)..	114
รูปที่ 2.55	โครงสร้างที่มีพลังงานปั่นป่วนสูงสุด (POD mode 1) และระดับพลังงานของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Meyer et al. 2007).....	115
รูปที่ 2.56	โครงสร้างที่มีพลังงานปั่นป่วนสูงสุด 2 โหมดแรก (POD mode 1 and 2) ของกรณี JICF และ I15 (Srimekharat and Bunyajitradulya, 2013).....	116
รูปที่ 2.57	การกระจายตัวของระดับพลังงานในแต่ละโหมดที่ระนาบ $x / rd = 0.5, 1.0, 1.5$ (Srimekharat and Bunyajitradulya, 2013) .....	117
รูปที่ 2.58	โครงสร้างที่มีพลังงานปั่นป่วนสูงสุด (POD mode 1) ของกรณี JICF และ I15 ที่ $r_m = 2 - 4\%$ (Dawyok and Bunyajitradulya, 2013).....	118
รูปที่ 2.59	การกระจายตัวของระดับพลังงานในแต่ละโหมด 10 โหมดแรก ของกรณี JICF และ I15 ที่ $r_m = 2 - 4\%$ (Dawyok and Bunyajitradulya, 2013).....	119
รูปที่ 3.1	โครงสร้างโดยสังเขปของ JICF และ $Q_j, Q_0$ .....	120
รูปที่ 3.2	รูปที่ SPIV ถ่ายได้ และเมื่อผ่านการประมวลผลหาเวกเตอร์เมื่อใส่อนุภาคติดตามการไหล.....	121
รูปที่ 4.1	โครงสร้างโดยสังเขปของชุดการทดลอง.....	122
รูปที่ 4.2	อุโมงค์ลม .....	122
รูปที่ 4.3	พัดลมหอยโข่งแบบ backward curve airfoil blades .....	123
รูปที่ 4.4	พัดลม Elprom <sup>TM</sup> .....	123
รูปที่ 4.5	พิกัดการทดลอง.....	124
รูปที่ 4.6	แผ่น calibration .....	124
รูปที่ 4.7	เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์.....	125



รูปที่ 4.8	light Arm.....	125
รูปที่ 4.9	light sheet optics .....	125
รูปที่ 4.10	six-jet atomizer.....	126
รูปที่ 4.11	กล้อง powerview plus11MP 630062.....	126
รูปที่ 4.12	เลนส์ Tokina 100 mm. Micro f/2.8 mounting.....	126
รูปที่ 4.13	เลนส์ Nikon <sup>TM</sup> (model AF 50 mm f1.8D).....	127
รูปที่ 4.14	Traverse.....	127
รูปที่ 4.15	ความสม่ำเสมอของความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวาง .....	128
รูปที่ 4.16	รูปร่างของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง .....	128
รูปที่ 4.17	ตำแหน่งในการวัดความเร็วที่สภาวะเริ่มต้นของเจ็ต .....	129
รูปที่ 4.18	เปอร์เซ็นต์ความไม่สมมาตรของเจ็ตเมื่อเทียบกับความเร็วเฉลี่ยที่แต่ละรัศมี กรณี $r = 4, 8, 12$ .....	130
รูปที่ 4.19	ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตตามแนวแกน $y$ ที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีต่างๆ.....	131
รูปที่ 4.20	แสดงผลความเร็วเฉลี่ยที่จำนวนภาพแตกต่างกัน.....	131
รูปที่ 4.21	แสดงผลความคลาดเคลื่อนของการสุ่มเข้าของความเร็วเฉลี่ยที่จำนวนภาพ แตกต่างกัน .....	132
รูปที่ 4.22	แสดงผลการสอบเทียบที่ความเร็วต่างๆ และ Curve fitting โดยที่แบ่งเป็น 2 ช่วง คือสีฟ้าที่เป็นช่วงความเร็วต่ำ และสีแดงที่เป็นช่วงความเร็วสูง .....	132
รูปที่ 5.1	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ.....	133
รูปที่ 5.2	บริเวณของเจ็ตที่นิยามด้วย $R_\phi$ ซึ่งเท่ากับ บริเวณของเจ็ตที่ $0 < \phi_j \leq \phi$ .....	134
รูปที่ 6.1	ความคลาดเคลื่อนของการสุ่มเข้าของความเร็วตามแนวแกน streamwise ต่อจุด ( $e_{v,x}$ ) ที่แต่ละจำนวนรูป กรณี $r = 4$ ที่ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่ จุดใดๆ ( $\phi$ ) ที่แต่ละตำแหน่ง $x/rd$ .....	135
รูปที่ 6.2	ความคลาดเคลื่อนของการสุ่มเข้าของความเร็วตามแนวแกน streamwise ต่อจุด ( $e_{v,x}$ ) ที่แต่ละจำนวนรูป กรณี $r = 8$ ที่ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่ จุดใดๆ ( $\phi$ ) ที่แต่ละตำแหน่ง $x/rd$ .....	136

รูปที่ 6.3	ความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วตามแนวแกน streamwise ต่อจุด $(e_{v,x})$ ที่แต่ละจำนวนรูป กรณีนี $r = 12$ ที่ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ $(\phi)$ ที่แต่ละตำแหน่ง $x/rd$ .....	137
รูปที่ 6.4	ความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของค่าเหนี่ยวนำการผสม $(e_E)$ ที่แต่ละจำนวนรูป กรณีนี $r = 4$ ที่ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ $(\phi)$ ที่แต่ละตำแหน่ง $x/rd$ .....	138
รูปที่ 6.5	ความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของค่าเหนี่ยวนำการผสม $(e_E)$ ที่แต่ละจำนวนรูป กรณีนี $r = 8$ ที่ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ $(\phi)$ ที่แต่ละตำแหน่ง $x/rd$ .....	139
รูปที่ 6.6	ความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของค่าเหนี่ยวนำการผสม $(e_E)$ ที่แต่ละจำนวนรูป กรณีนี $r = 12$ ที่ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ $(\phi)$ ที่แต่ละตำแหน่ง $x/rd$ .....	140
รูปที่ 6.7	ความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของค่าเหนี่ยวนำการผสม $(e_E)$ ที่แต่ละจำนวนรูป กรณีนี $r = 4, 8, 12$ และ $\phi = 1$ ที่แต่ละตำแหน่ง $x/rd$ .....	141
รูปที่ 7.1	การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ย $(V/u_{cf})$ ต่อกระแสมขวางที่ระนาบ $x/rd = 0.25$ .....	142
รูปที่ 7.2	การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อกระแสมขวาง $(V/u_{cf})$ .....	143
รูปที่ 7.3	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสมขวาง $(V_x/u_{cf})$ ที่ระนาบ $x/rd = 0.25$ .....	144
รูปที่ 7.4	การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสมขวาง $(V_x/u_{cf})$ .....	145
รูปที่ 7.5	การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสมขวาง $(V_y/u_{cf})$ ที่ระนาบ $x/rd = 0.25$ .....	146
รูปที่ 7.6	การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสมขวาง $(V_y/u_{cf})$ .....	147
รูปที่ 7.7	การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise ต่อกระแสมขวาง $(V_z/u_{cf})$ .....	148

รูปที่ 7.8	การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของ normalized vorticity ตามแนวแกน streamwise ( $\omega_x d / u_{cf}$ ) ที่ระนาบ $x / rd = 0.25$ .....	149
รูปที่ 7.9	การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของ normalized vorticity ตามแนวแกน streamwise ( $\omega_x d / u_{cf}$ ) .....	150
รูปที่ 7.10	การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของ Turbulent kinetic energy (TKE) ต่อ Crossflow kinetic energy (CKE) ที่ระนาบ $x / rd = 0.25$ .....	151
รูปที่ 7.11	การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของ Turbulent kinetic energy (TKE) ต่อ Crossflow kinetic energy (CKE).....	152
รูปที่ 7.12	การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง ( $V / u_{cf}$ ) ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x / u_{cf}$ ) และความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสลมขวาง ( $V_y / u_{cf}$ ) ที่ระนาบ $x / rd = 0.25$ .	153
รูปที่ 7.13	การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง ( $V / u_{cf}$ ) ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x / u_{cf}$ ) และความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสลมขวาง ( $V_y / u_{cf}$ ) ที่ระนาบ $x / rd = 1.5$ .....	154
รูปที่ 7.14	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x / u_{cf}$ ) ที่พล็อตซ้อนทับกับความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ และของความเร็วตามแนวแกน traverse และ spanwise (เวกเตอร์บิระนาบ) ที่ระนาบ $x / rd = 0.25$ และ $1.5$ .....	155
รูปที่ 7.15	การกระจายตัวของ normalized vorticity ตามแนวแกน streamwise ( $\omega_x d / u_{cf}$ ) ที่พล็อตซ้อนทับกับเวกเตอร์ของความเร็วตามแนวแกน traverse และ spanwise (เวกเตอร์บิระนาบ) ที่ระนาบ $x / rd = 0.25$ และ $1.5$ .....	156
รูปที่ 7.16	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสลมขวาง ( $V_y / u_{cf}$ ) ที่พล็อตซ้อนทับกับเวกเตอร์ของความเร็วตามแนวแกน traverse และ spanwise (เวกเตอร์บิระนาบ) ที่ระนาบ $x / rd = 0.25$ และ $1.5$ .....	157
รูปที่ 7.17	Center of mass trajectory ของปริมาณความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise และ vorticity ตามแนวแกน streamwise .....	158
รูปที่ 7.18	ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อ circulation ไรมิตี ( $\Gamma / u_{cf} d$ ) .....	159

รูปที่ 7.19	ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร.....	160
รูปที่ 7.20	Center of mass trajectory ของปริมาณความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise และ vorticity ตามแนวแกน streamwise เมื่อ scaling ด้วย $r^{1.3}d$ .....	161
รูปที่ 7.21	Circulation เมื่อ scaling ด้วย $ru_{cf}d$ .....	162
รูปที่ 7.22	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อ scaling ด้วย $r^{0.7}$ .....	163
รูปที่ 7.23	เปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อ scaling ด้วย $r^{0.7}$ ของการทดลองนี้กับการทดลองของ Kulpiyavaja (2015) และ Wangkiat (2015).....	164
รูปที่ 7.24	ความสัมพันธ์ระหว่าง area ratio–probability, $A_\phi / A_j(\phi)$ และ entrainment ratio–probability relation, $E_\phi / E_j(\phi)$ ที่ระนาบต่างๆ.....	165
รูปที่ 8.1	เปรียบเทียบ center of mass trajectory ของปริมาณ vorticity ตามแนวแกน streamwise ของการทดลองนี้กับการทดลองของ Witayaprapakorn (2013) และ Dawyok (2015).....	166
รูปที่ 8.2	เปรียบเทียบ circulation ของการทดลองนี้กับการทดลองของ Witayaprapakorn (2013) และ Dawyok (2015) .....	167
รูปที่ 8.3	เปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของการทดลองนี้กับการทดลองของ Witayaprapakorn (2013) และ Dawyok (2015).....	168

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

เจ็ตในกระแสลมขวาง (Jet in Crossflow, JICF) คือ เจ็ตที่ไหลเข้าสู่กระแสลมขวางแบบตั้งฉาก ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งสามารถพบเห็นได้ในงานทางวิศวกรรมทั่วไป เช่น ห้องเผาไหม้ เตาปฏิกรณ์เคมี ปล่องควัน เครื่องบินแบบ V/STOL การระบายความร้อนด้วยเทคนิค film cooling ของใบพัดแก๊สเทอร์โบน์ ดังรูปที่ 1.2 เป็นต้น เจ็ตในกระแสลมขวางมีคุณลักษณะที่สำคัญต่อการประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรม อาทิ เส้นทางเดินของเจ็ต (trajectory) โครงสร้างของเจ็ต (structures) การเหนี่ยวนำการผสม (entrainment) และการผสม (mixing) ดังนั้นความรู้และความเข้าใจในคุณลักษณะต่างๆ ของเจ็ตในกระแสลมขวางเหล่านี้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงสมรรถนะของอุปกรณ์ทางวิศวกรรมที่ใช้เจ็ตในกระแสลมขวางได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเจ็ตในกระแสลมขวางสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ กลุ่มแรกคืองานที่ศึกษาโครงสร้าง และคุณลักษณะของเจ็ต อาทิ Smith and Mungal (1998) พบว่าแม้ Counter rotating vortex pairs (CVP) จะเป็นกลไกการผสมหลักในบริเวณ far field แต่ก็ไม่ได้ทำให้การผสมดีกว่าเจ็ตอิสระ (free jet) ในขณะที่การก่อตัวของ CVP ในบริเวณ near field ต่างหากที่ทำให้เจ็ตในกระแสลมขวางมีการผสมมากกว่าเจ็ตอิสระ นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (effective velocity ratio,  $r$ ) ต่ำ เจ็ตจะมีเส้นทางเดินที่เตี้ยและติดผนัง ซึ่งแตกต่างจากกลุ่มของเจ็ตที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลสูง Smith and Mungal จึงจัดเจ็ตทั้งสองกลุ่มว่าอยู่ในช่วงการไหลที่แตกต่างกัน Yuan and Street (1998) พบว่าการเหนี่ยวนำการผสมมีความสัมพันธ์กับเส้นทางเดินของเจ็ตในกระแสลมขวางในช่วง  $x > 0.8 rd$  ตามความสัมพันธ์แบบ power law ต่อมา Yuan *et al.* (1999) ใช้ Large-Eddy Simulation (LES) จำลองการไหล พบว่า Hanging vortices ซึ่งเกิดจาก skewed mixing layer ในบริเวณ near field เป็นโครงสร้างสำคัญที่นำไปสู่การก่อตัวของ CVP, Muppidi and Mahesh (2005a) พบว่ารูปแบบความเร็วเริ่มต้นของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ต (jet velocity profile) และความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง (crossflow boundary layer thickness) ส่งผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ต, Muppidi and Mahesh (2006) พบว่าการเสียรูปของเจ็ต และการก่อตัวของ CVP เป็นผลจากการที่กระแสลมขวางไปเร่งเจ็ตในทิศการไหลของกระแสลมขวาง และการ

พัฒนาตัวของเจ็ตจะขึ้นกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง และอัตราส่วนความเร็ว ประสิทธิภาพเป็นสำคัญ, Watakulsin *et al.* (2010) พบว่าในบริเวณ near field โครงสร้างการผสมของเจ็ตจะขึ้นอยู่กับการพัฒนาตัวของ lateral skewed mixing layers และ windward jet shear layer, Wongthongsiri and Bunyajitradulya (2014) พบว่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์มีผลต่อการเหนี่ยวนำการผสมโดยเมื่อเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น การเหนี่ยวนำการผสมจะเพิ่มขึ้นในบริเวณ near field แต่จะลดลงในบริเวณ far field อีกทั้งยังพบว่าพื้นที่ของเจ็ตนับจากขอบเจ็ตเข้ามามากกว่าครึ่งของพื้นที่หน้าตัดเจ็ตทั้งหมดจะเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่พบเจ็ตต่ำ และมีผลต่อการเหนี่ยวนำการผสมน้อยมาก

ในขณะที่อีกกลุ่มหนึ่ง คือ งานที่ศึกษาเทคนิคในการปรับแต่ง และควบคุมการเหนี่ยวนำการผสม และการผสมของเจ็ต เช่น Zaman and Foss (1997) ใช้การติด delta tab เพื่อให้เกิด vortex; Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) ใช้วิธีควบคุมด้วย swirling jet ; M'Closkey *et al.* (2002) ใช้การควบคุมด้วย pulsing; Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ใช้ tab และ swirling jet, Kornsri *et al.* (2009), Witayaprapakorn and Bunyajitradulya (2013) และ Chaikasetsin *et al.* (2014) ใช้การควบคุมด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (azimuthal control jets)

จากงานที่ผ่านมาพบว่าการติด delta tab ติดตั้งง่าย และไม่ใช้พลังงาน แต่จะปรับเปลี่ยนการควบคุมเจ็ตได้ลำบาก ในขณะที่ swirling jet และ pulsing ต้องใช้พลังงานมากในการปรับเปลี่ยนการควบคุม ส่วนเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงสามารถควบคุมได้ง่าย และใช้พลังงานในการควบคุมน้อย โดย Chaikasetsin *et al.* (2014) พบว่าถ้าฉีดเจ็ตควบคุมที่มุม  $\pm 135^\circ$  และที่อัตราส่วนเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก  $r_m = 4\%$  แล้ว จะเพิ่มอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมได้สูงถึง 60%

## 1.2 แรงจูงใจ

คุณลักษณะหลักที่สำคัญต่อการประยุกต์ใช้เจ็ตในกระแสลมขวางในงานเชิงวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผสมและการเผาไหม้คือการเหนี่ยวนำการผสม ในอดีตการหาการเหนี่ยวนำการผสมโดยตรงยังเป็นสิ่งที่ทำได้ลำบาก งานวิจัยที่ผ่านมาจึงใช้การอ้างอิงถึงคุณลักษณะอื่นๆที่เกี่ยวข้องในการหาการเหนี่ยวนำการผสม เช่น Kamotani and Greber (1972) ศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมจากการทดลอง โดยอ้างอิงการเหนี่ยวนำการผสมจากอัตราการลดลงของอุณหภูมิ (temperature decay) และฟลักซ์ของมวลเจ็ตที่เพิ่มขึ้นไปตามการไหล (mass flux) โดยที่อัตราการลดลงของอุณหภูมิ หรือฟลักซ์ของมวลเจ็ตที่สูงขึ้นชี้แนะถึงการเหนี่ยวนำการผสมที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองนี้ พบว่าการอ้างอิงการเหนี่ยวนำการผสมด้วยปริมาณทั้ง 2 แบบนั้น ให้ผลที่ตรงข้ามกัน ถึงกระนั้นการอ้างอิงจาก mass flux น่าจะมีความถูกต้องต่อการเหนี่ยวนำการผสมมากกว่า, Smith and Mungal (1998) ศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมจากการทดลอง โดยอ้างอิงจากการลดลงของปริมาณ passive scalar (passive scalar concentration decay) โดยที่รูปแบบการไหลที่มีอัตราการลดลงของความเข้มข้นที่สูงขึ้น ชี้แนะว่าเจ็ตมีการเหนี่ยวนำการผสมที่สูงขึ้น ต่อมามีความพยายามในการหาการเหนี่ยวนำการผสมโดยตรง กล่าวคือ การหาการเหนี่ยวนำการผสมจากนิยาม  $E = Q_j / Q_0$  เมื่อ  $Q_j$  คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ผ่านหน้าตัดของเจ็ตบนระนาบขวางใดๆ เท่านั้น ไม่รวมบริเวณส่วนที่เป็นกระแสลมขวางล้วน และ  $Q_0$  คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรเริ่มต้นที่ปากทางออกของเจ็ต ดังนั้นในการหาการเหนี่ยวนำการผสมโดยตรงจึงจำเป็นต้องสามารถแยกแยะบริเวณส่วนที่เป็นเจ็ตออกจากกระแสลมขวาง ณ เวลาใดๆ ได้อย่างชัดเจน เพื่อให้สามารถหา  $Q_j$  ณ เวลาใดๆ ได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ ก่อนที่จะไปทำการหาค่าเฉลี่ยเทียบกับเวลา ทั้งนี้เนื่องจากการไหลแบบ turbulent นั้น เจ็ตจะมีความไม่คงตัว (unsteady) และปั่นป่วน (random fluctuation) อยู่ ทำให้บริเวณส่วนที่เป็นหน้าตัดเจ็ต (ซึ่งไม่รวมส่วนที่เป็นกระแสลมขวางล้วนๆ) เป็นฟังก์ชันของทั้งตำแหน่งตามแนว streamwise และเวลา ส่งผลให้การระบุบริเวณส่วนที่เป็นเจ็ตโดยตรงแบบ ณ ขณะใดๆ (instantaneous) ทำได้ยาก ด้วยความยากดังที่กล่าวมา งานที่ผ่านมาจึงประเมินหาค่าเฉลี่ย (time mean) ของปริมาณหนึ่งๆ ขึ้นมาก่อน แล้วกำหนดค่าเกณฑ์จากค่าเฉลี่ยนั้นๆ เพื่อระบุขอบเขตของเจ็ตก่อนที่จะนำไปหาการเหนี่ยวนำการผสม อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าที่ใช้เริ่มต้นเป็นปริมาณค่าเฉลี่ยที่ไม่มีค่าคุณลักษณะ (characteristic value) เชื่อมโยงกับขอบเขตของเจ็ต ณ เวลาใดๆ โดยตรง การกำหนดขอบเขตของเจ็ตจากค่าเฉลี่ยนี้ จึงไม่มีหลักเกณฑ์

ชัดเจน ทำให้เกิดปัญหา arbitrariness ในการกำหนดขอบเขตของเจ็ตและการหาค่าการเหนี่ยวนำการผสมขึ้น ตัวอย่างงานที่ใช้เทคนิคนี้ เช่น Yuan and Street (1998) ใช้ Large-eddy Simulation (LES) ในการหาการเหนี่ยวนำการผสม โดยการเลือกระบุค่า mean scalar concentration เป็นเกณฑ์ในการระบุขอบเขตของเจ็ต, Kornsi et al. (2009) ทดลองหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมโดยการวัดสนามความเร็ว และเลือกระบุค่า maximum turbulent intensity เป็น 12% เป็นเกณฑ์ในการระบุขอบเขตของเจ็ต ซึ่งในงานทดลองนี้ได้แสดงให้เห็นว่าการเลือกระบุเกณฑ์จากค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นแบบ arbitrary นั้นให้ผลลัพธ์ที่ผิดพลาดได้ เพราะค่าเกณฑ์ที่เลือกใช้ส่งผลต่อผลลัพธ์อย่างมาก (ในงานทดลองนี้ให้ผลลัพธ์ที่ว่า เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปในบริเวณ far field อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมจะมีค่าลดลง ดังรูปที่ 1.3 ซึ่งหมายความว่าเจ็ตมีการคายกระแสลมขวางออกมา ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในการไหลลักษณะนี้), Berchet et al. (2013) ใช้เทคนิค PLIF และ PIV ร่วมกับ laser scanning ในการเก็บข้อมูลการไหลแบบ 3 มิติ งานนี้ได้เลือกระบุค่า instantaneous concentration แบบ arbitrary เป็นเกณฑ์ในการระบุขอบเขตของเจ็ตเพื่อให้สามารถแยกแยะเจ็ตออกจากกระแสลมขวางได้

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นจึงนำมาสู่แรงจูงใจในงานนี้ ซึ่งประกอบด้วยเหตุผล 2 ประการ คือประการแรกเพื่อให้สามารถหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมโดยตรงจากการทดลองให้มีความถูกต้องและแม่นยำขึ้น ดังนั้นงานนี้จึงใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดสนามความเร็วแบบ 3 มิติ บนระนาบได้แบบ ณ ขณะใดขณะหนึ่ง (instantaneous) ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหล (tracer particle) เฉพาะในเจ็ตเท่านั้น และไม่ใส่ในกระแสลมขวาง(จะกล่าวถึงอย่างละเอียดในบทที่ 3 และ 4) เพื่อให้สามารถแยกแยะบริเวณของเจ็ตออกจากกระแสลมขวางล้วน ณ ขณะใดๆ ได้ อย่างชัดเจน วิธีนี้จึงสามารถที่จะแก้ไขปัญหาในการหาการเหนี่ยวนำการผสมด้วยวิธีการทดลองที่ผ่านมาได้ เพราะนอกจากความเร็วที่วัดได้ด้วยวิธีนี้จะเป็นแบบ instantaneous แล้ว ยังสามารถแยกแยะบริเวณของเจ็ตออกจากส่วนที่เป็นกระแสลมขวางล้วน ณ ขณะใดๆ ได้ ทำให้สามารถหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม ณ ขณะใดๆ และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเฉลี่ยได้โดยไม่ต้องระบุค่าเกณฑ์ของปริมาณเฉลี่ยอย่างไม่มีหลักเกณฑ์เพื่อแยกบริเวณที่เป็นเจ็ตออกจากกระแสลมขวาง

ประการที่สองเนื่องจากพารามิเตอร์หลักของเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตที่สำคัญ คือ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ซึ่งในอดีตมีการศึกษาถึงผลของอัตราส่วน



ความเร็วประสิทธิผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ตมามาก แต่การศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อการเหนี่ยวนำการผสมยังมีน้อยอยู่ และด้วยความยากในการหาการเหนี่ยวนำการผสมโดยตรงดังที่กล่าวไปข้างต้น จึงยังไม่มีการศึกษาใดที่ศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่มีต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมโดยตรง

ด้วยเหตุผลหลักสองข้อข้างต้น จึงเป็นที่มาของแรงจูงใจของงานนี้ ที่มุ่งเน้นศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง โดยหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมโดยตรง จากการวัดความเร็วที่หน้าตัดใดๆ ด้วย SPIV และเลือกใช้เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น และไม่ใส่ในกระแสมขวาง

### 1.3 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร และคุณลักษณะที่สำคัญอื่นๆ ของเจ็ตในกระแสมขวาง ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปของ functional form ได้เป็น

$$E = E\left(\frac{x}{rd}; r; Re_{cf}, Re_j = Re_{cf} \times r, \frac{\rho_j}{\rho_{cf}} = 1, \Psi_{bl}, \Psi_{jp}, \frac{\delta}{d}\right)$$

$$\Gamma, Trajectory, Structure = f\left(\frac{x}{rd}; r; Re_{cf}, Re_j = Re_{cf} \times r, \frac{\rho_j}{\rho_{cf}} = 1, \Psi_{bl}, \Psi_{jp}, \frac{\delta}{d}\right)$$

โดยที่	$E$	คือ	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร
	$\Gamma$	คือ	ค่า Circulation ไร้มิติ
	$Trajectory$	คือ	เส้นทางเดินของเจ็ต
	$Structure$	คือ	โครงสร้างของเจ็ต
	$\frac{x}{rd}$	คือ	ระยะทางตามแนว streamwise ไร้มิติ
	$r$	คือ	อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล
	$Re_{cf}$	คือ	ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวาง
	$Re_j$	คือ	ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ต
	$\frac{\rho_j}{\rho_{cf}}$	คือ	อัตราส่วนความหนาแน่นระหว่างเจ็ตและกระแสมขวาง

$\Psi_{bl}$	คือ	สภาวะเริ่มต้นของชั้นขอบเขตของกระแสมขวางไร้มิติ
$\Psi_{jp}$	คือ	สภาวะเริ่มต้นของเจ็ตไร้มิติ
$\frac{\delta}{d}$	คือ	ความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสมขวางไร้มิติ

โดยที่ให้  $Re_{cf}$  คงที่ แต่จะให้  $Re_j$  แปรไปตาม  $r$  ที่เปลี่ยนไป

#### 1.4 ขอบเขตของโครงการ

- 1.4.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity ratio) เท่ากับ 4, 8 และ 12
- 1.4.2 เรย์โนลด์ส้นัมเบอร์ของกระแสมขวาง  $Re_{cf} = 3,100$
- 1.4.3 ใช้ SPIV วัดสนามความเร็วที่ระนาบ  $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$  และ 1.5
- 1.4.4 Main jet initial velocity profile เป็นแบบ fully developed turbulent pipe flow

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการศึกษาเชิงวิชาการสามารถหาการเหนี่ยวนำการผสมได้โดยตรงและแม่นยำมากขึ้นเพื่อให้เป็นข้อมูลอ้างอิงในอนาคต และทราบถึงผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (เมื่อเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางคงที่) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร และข้อมูลความสัมพันธ์เชิงปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องต่อเจ็ตในกระแสมขวาง

ผลการศึกษาเชิงประยุกต์จะนำมาซึ่งข้อมูล ความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำการผสมและผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อการเหนี่ยวนำการผสมและปริมาณอื่นๆ เพื่อสามารถนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีการประยุกต์ใช้และเจ็ตในกระแสมขวางให้มีสมรรถนะสูงขึ้นได้



## บทที่ 2

### งานวิจัยที่ผ่านมา

#### 2.1 ปริมาณที่สำคัญและโครงสร้างพื้นฐานของเจ็ตในกระแสลมขวาง

##### 2.1.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล

อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity ratio:  $r$ ) เป็นพารามิเตอร์หลักที่กำหนดคุณลักษณะทางกายภาพของเจ็ตซึ่งนิยามโดยอัตราส่วนโมเมนตัมฟลักซ์ของเจ็ตต่อโมเมนตัมฟลักซ์ของกระแสลมขวางดังนี้

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

เมื่อ  $\rho_j$  และ  $\rho_{cf}$  คือความหนาแน่นของเจ็ตและกระแสลมขวางตามลำดับ ในขณะที่  $u_j$  และ  $u_{cf}$  คือความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตและความเร็วของกระแสลมขวางตามลำดับ

เมื่อเจ็ตในกระแสลมขวางที่ความหนาแน่นของเจ็ตและกระแสลมขวางไม่แตกต่างกันมากนัก ( $\rho_{cf} \cong \rho_j$ ) สมการที่ 2.1 สามารถลดรูปเหลือเพียง

$$r = \frac{u_j}{u_{cf}} \quad (2.2)$$

ซึ่งเป็นอัตราส่วนความเร็วของเจ็ตต่อกระแสลมขวางได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอัตราส่วนความเร็วดังกล่าวเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณลักษณะเฉพาะของเจ็ต อาทิ ระยะเจาะทะลุของเจ็ต (jet penetration) large scale vortices structure เป็นต้น

##### 2.1.2 เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ตและเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง

- เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ต (Jet Reynolds number)

เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ต  $Re_j$  นิยามโดย

$$Re_j = \frac{u_j d}{\nu_j} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $u_j$  คือความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ต  $v_j$  คือความหนืดคิเนเมติกของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ต และ  $d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ต โดยเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ตแสดงถึงสภาวะของการไหลของเจ็ตก่อนที่จะออกจากปากเจ็ต ว่าเป็นแบบราบเรียบ (laminar) หรือปั่นป่วน (turbulent) และมีผลต่อสภาวะของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ต

- เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง (Crossflow Reynolds number)

เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง  $Re_{cf}$  นิยามโดย

$$Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu_{cf}} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $u_{cf}$  คือความเร็วของกระแสลมขวางก่อนปะทะกับเจ็ต  $\nu_{cf}$  คือความหนืดคิเนเมติกของกระแสลมขวางก่อนปะทะกับเจ็ต และ  $d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ต สันนิษฐานว่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวางมีผลต่อ wake ของเจ็ตในกระแสลมขวาง คล้ายคลึงกับ wake ของทรงกระบอก

เมื่อของไหลของเจ็ตและกระแสลมขวางเป็นของไหลชนิดเดียวกันที่มีความหนาแน่นและความหนืดไม่แตกต่างกันมากนัก ( $\rho_{cf} \cong \rho_j, \nu_{cf} \cong \nu_j$ ) สมการที่ 2.2 สามารถเปลี่ยนรูปเป็น

$$r = \frac{Re_j}{Re_{cf}} \quad (2.5)$$

### 2.1.3 โครงสร้างพื้นฐานของเจ็ตในกระแสลมขวาง

Fric and Roshko (1994) ศึกษาโครงสร้างของ vortical structure ที่เกิดขึ้นในเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยใช้เทคนิค smoke-wire เป็น flow visualize และใช้ hot-wire เป็นตัววัดความเร็ว พบว่า vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวางประกอบด้วย 4 โครงสร้างดังรูปที่ 2.1 ได้แก่

1. Jet shear layer vortices มีลักษณะคล้าย vortex ring ของ free jet ซึ่งเกิดจากการแยกตัวของ shear layer ที่ปากทางออกของเจ็ต

2. Horseshoes vortices เกิดจากการม้วนตัวของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง (crossflow boundary layer) บริเวณพื้นที่รอบปากทางออกของเจ็ต การม้วนตัวนี้เกิดจากการที่

กระแสลมขวางได้รับผลจาก adverse pressure gradient ที่เกิดจากการกีดขวางการไหลของเจ็ตที่พุ่งออกมา

3. Wake vortices มีลักษณะคล้ายกับ wake ที่เกิดจากการไหลผ่านวัตถุทรงกระบอก ซึ่งเจ็ตที่พุ่งออกมาจากปากทางออกก็มีลักษณะคล้ายวัตถุทรงกระบอกเช่นกัน โดย wake vortices มีแหล่งกำเนิดจากชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง (crossflow boundary layer) ที่ผนังพื้น

4. Counter – rotating vortex pair (CVP) มีลักษณะเป็น vortex 2 ลูกหมุนเข้าหากัน เป็นโครงสร้างที่สำคัญต่อการผสมในบริเวณ far field

## 2.2 การเหนี่ยวนำการผสมและผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล

### 2.2.1 การหาการเหนี่ยวนำการผสม

- การหาการเหนี่ยวนำการผสมทางอ้อม

Kamotani and Greber (1972) ศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมจากการทดลอง โดยอ้างอิงการเหนี่ยวนำการผสมจากอัตราการลดลงของอุณหภูมิ (temperature decay) และฟลักซ์ของมวลเจ็ตที่เพิ่มขึ้นไปตามการไหล (mass flux) โดยที่อัตราการลดลงของอุณหภูมิ หรือฟลักซ์ของมวลที่สูงขึ้นชี้แนะถึงการเหนี่ยวนำการผสมที่สูงขึ้น

Smith and Mungal (1998) ศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมจากการทดลอง โดยอ้างอิงจากการลดลงของปริมาณ passive scalar (scalar concentration decay) ใช้เทคนิค Planar Laser-Induced Fluorescence (PLIF) และใส่ acetone vapour ฉีดเข้าไปในเจ็ตเป็น flow visualization โดยที่รูปแบบการไหลที่มีอัตราการลดลงของความเข้มข้นที่สูงขึ้น ชี้แนะว่าเจ็ตมีการเหนี่ยวนำการผสมที่สูงขึ้น

- การหาการเหนี่ยวนำการผสมทางตรง

Broadwell and Breidenthal (1984) ศึกษาการผสม (mixing) จากความยาวของการเผาไหม้ (flame length) ทดลองด้วยการฉีดสารละลายกรดซัลฟิวริกพร้อม PH indicator สู่น้ำ หากมีความยาวของการเผาไหม้สั้นลงชี้ว่ามีการผสมที่สูงจึงเผาไหม้หมดเร็ว ในที่นี้คือการที่สารละลายกรดผสมน้ำจนเป็นกลาง อย่างไรก็ตามแม้จะเป็นการทดลองการผสมโดยตรง indicator ที่ใช้วัดเป็นการอ้างอิงทางอ้อม

Yuan and Street (1998) ศึกษาการเหนี่ยวนำการผสม โดยใช้ Large-eddy Simulation (LES) โดยการเหนี่ยวนำการผสมนิยามจาก volume flux ของเจ็ต ต่อ volume flux เริ่มต้นของเจ็ต อย่างไรก็ตามการใช้วิธี LES ค่าความเร็วที่ใช้ในการหา volume flux ของเจ็ตจะเป็นค่าเฉลี่ยซึ่งหมายถึงความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวางด้วย ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่สามารถที่จะแยกเจ็ตออกจากกระแสลมขวางได้ งานทดลองนี้จึงเลือกกระบอกค่า mean scalar concentration เป็นเกณฑ์ในการระบุขอบเขตเจ็ตเพื่อใช้แยกแยะพื้นที่ของเจ็ตออกจากกระแสลมขวาง

Kornsri *et al.* (2009) ศึกษาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง (JICF) และเจ็ตควบคุม (I15) ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป โดยการเหนี่ยวนำการผสมนิยามจากอัตราการไหลของเจ็ต ต่ออัตราการไหลเริ่มต้นของเจ็ต ทดลองโดยใช้ single sensor hot film anemometer ความเร็วที่ใช้ในการคำนวณอัตราการไหลของเจ็ตจึงเป็นความเร็วเฉลี่ยแบบเดียวกับงานของ Yuan and Street (1998) แล้วจึงเลือกกระบอกค่า 12% ของ maximum turbulent intensity เป็นเกณฑ์ในการระบุขอบเขตของเจ็ตเพื่อใช้แยกแยะพื้นที่ของเจ็ตออกจากกระแสลมขวาง

Berchet *et al.* (2013) ศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมโดยใช้เทคนิค PLIF และ PIV ร่วมกับ laser scanning ในการเก็บข้อมูลการไหลแบบ 3 มิติ โดยมีการใส่สีและอนุภาคไปที่กระแสลมขวาง(น้ำ)ให้ PLIF และ PIV วัดค่าได้ (ใส่สีและอนุภาคไปที่กระแสลมขวางเท่านั้น ไม่ใช่เจ็ต) การเหนี่ยวนำการผสมนิยามจาก volume flux ที่ไหลผ่าน envelope หรือก็คือ control volume ของเจ็ต อย่างไรก็ตาม envelope ของการทดลองนี้นิยามจากบริเวณที่มีความเข้มข้นของสีน้อยกว่า 0.7 หรือก็คือเลือกใช้ concentration แบบ arbitrary เป็นเกณฑ์ในการแบ่งพื้นที่ของเจ็ตออกจากกระแสลมขวาง อย่างไรก็ตามการใช้วิธีนี้มีข้อจำกัดที่ SNR ของ laser และ sensitivity ของกล้อง ทำให้ไม่สามารถวัดการไหลที่มีความเร็วสูงได้ วิธีนี้จึงใช้ได้กับการไหลที่มีความเร็วต่ำเท่านั้น เนื่องการทดลองนี้ได้ความเร็วเป็นแบบ instantaneous

Witayaprapakorn and Bunyajitradulya (2013) ศึกษาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมซึ่งนิยามจากอัตราการไหลของเจ็ตต่ออัตราการไหลตั้งต้น โดยใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับเทคนิคในการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะที่เจ็ตเท่านั้นแต่ไม่ใส่ที่กระแสลมขวาง ทำให้สามารถที่จะแยกแยะบริเวณของเจ็ตออกจากกระแสลมขวางได้อย่างชัดเจน วิธีนี้จึงสามารถแก้ไขปัญหในการหาการเหนี่ยวนำการผสมที่ผ่านมาได้ เพราะนอกจากความเร็วที่วัดได้ด้วยวิธีนี้จะเป็นแบบ instantaneous แล้วยังสามารถระบุบริเวณ

ของเจ็ต ณ ขณะใด ๆ ได้โดยไม่ต้องระบุค่าเกณฑ์ของปริมาณเฉลี่ย ในการระบุขอบเขตของเจ็ต เพื่อแยกบริเวณที่เป็นเจ็ตออกจากกระแสลมขวาง

## 2.2.2 การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment)

- โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางต่อการเหนี่ยวนำการผสม

Smith and Mungal (1998) ศึกษาการผสมโดยใช้การลดลงของความเข้มข้นของปริมาณ mean scalar (passive scalar concentration decay) โดยใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) และใส่ acetone vapour ฉีดเข้าไปในเจ็ตเป็น flow visualization ทดลองที่  $r = 5 - 25$ ,  $Re_j = 8,400 - 41,500$  พบว่าเมื่อใช้  $r^2 d$  scale ดังรูปที่ 2.2 พบว่าสามารถใช้แบ่งรูปแบบการไหลของเจ็ตเป็น near field และ far field โดยมีจุดแยก (branch point) ที่  $s = 0.3 r^2 d$  ซึ่งในบริเวณ near field ดังรูปที่ 2.3 คือบริเวณที่  $s < 0.3 r^2 d$  จะมีอัตราการลดลงของความเข้มข้นเป็น  $s^{-1.3}$  ซึ่งมากกว่า free jet ( $s^{-1}$ ) และในบริเวณ far field ( $s^{-2/3}$ ) แสดงว่าแม้ CVP ที่พัฒนาตัวเต็มที่แล้วในบริเวณ far field จะเป็นกลไกหลักในการเหนี่ยวนำการผสม แต่ไม่ทำให้การผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางดีไปกว่า free jet แต่การก่อตัวของ CVP ในบริเวณ near field ต่างหากที่เป็นกลไกสำคัญของ JICF ที่ทำให้การผสมดีกว่า free jet

Yuan and Street (1998) ศึกษาโครงสร้างที่มีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง ดังรูปที่ 2.4 พบว่าโครงสร้าง spanwise roller ที่ปะทะกับกระแสลมขวาง จะทำให้เกิดการเสีรูปเปลี่ยนรูปร่างผิวสัมผัสระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางจนเกิดการผสมในระดับ large scale ต่อมาเมื่อเจ็ตเริ่มเอียงตัว กระแสลมขวางจะถูกดึงเข้ามาจนเกิดเป็นช่องว่าง (gape) ให้กระแสลมขวางพุ่งทะลุเข้าสู่เจ็ต กลไกนี้ส่งผลให้การเหนี่ยวนำการผสมสูงขึ้นมากแต่จะเกิดขึ้นได้ก็บริเวณที่มีความโค้งของเส้นทางเดินสูงเท่านั้น เพราะต้องการมุมปะทะที่สูง สำหรับในบริเวณ far field แม้ว่า circulation ของ CVP จะน้อย อย่างไรก็ตามกลไกหลักในการผสมก็คือ CVP โดยจะม้วนกระแสลมขวางเข้ามาผสมที่ด้านล่างของเจ็ต

Watakulsin *et al.* (2010) ศึกษาโครงสร้างการผสมในบริเวณ near field ที่  $r = 2, 4, 7$  โดยใช้เทคนิค smoke fluid condensation, mie scattering และ laser-sheet visualization techniques ทดลองการพัฒนาตัวของเจ็ตที่มุมมอง top view พบว่าที่  $r = 2$  มีการผสมที่ด้านหลัง unmixed core แต่  $r = 7$  กลับมีการผสมที่ด้านหน้า unmixed core ดังรูปที่ 2.5(b)



นอกจากนี้ยังชี้แนะว่าโครงสร้างการผสมของเจ็ตจะขึ้นอยู่กับการพัฒนาตัวของ lateral skewed mixing layers และ windward jet shear layer

Kornsri *et al.* (2009) เสนอแนวคิดเรื่อง spanwise separation – mutual blocking และ wall – separation – wall blocking ต่อการเหนี่ยวนำการผสมดังนี้ เมื่อโครงสร้างแผ่ขยายออกทางด้าน spanwise มากขึ้น จะส่งผลให้ระยะห่างระหว่าง CVP (spanwise separation) มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะช่วยให้การขัดขวางการเหนี่ยวนำการผสมกันเองของ CVP (mutual blocking) ลดลง ดังรูปที่ 2.6 อย่างไรก็ตามหากเส้นทางเดินของเจ็ตที่ต่ำลงจนใกล้พื้นเกินไป ทำให้มี wall separation ต่ำลง อาจส่งผลให้เกิด wall blocking และทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมลดลงได้

- ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) ต่อการเหนี่ยวนำการผสม

Kamotani and Greber (1972) ศึกษาผลของอัตราส่วนโมเมนตัม ( $r_M = \rho_j u_j^2 / \rho_{cf} u_{cf}^2$ ) ต่อการเหนี่ยวนำการผสมซึ่งอ้างอิงจากอัตราการลดลงของอุณหภูมิ (temperature Decay) และฟลักซ์ของมวลเจ็ตที่เพิ่มขึ้นไปตามการไหล (mass flux) ทดลองที่  $r_M = 15.3$  และ  $59.3$  เมื่อพิจารณาการเหนี่ยวนำการผสมโดยอ้างอิงจากการลดลงของอุณหภูมิ (temperature decay) พบว่าที่อัตราส่วนโมเมนตัมสูงกว่าจะมีการลดลงของอุณหภูมิที่ช้ากว่า บ่งชี้ว่ามีการเหนี่ยวนำการผสมที่ช้ากว่า ดังรูปที่ 2.7 แต่หากพิจารณาการเหนี่ยวนำการผสมที่นิยามจาก mass flux กลับให้ผลตรงกันข้าม กล่าวคือที่อัตราส่วนโมเมนตัมสูงกว่าจะมี mass flux ที่สูงกว่าเสมอ ดังรูปที่ 2.8

Broadwell and Breidenthal (1984) ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อการผสมซึ่งอ้างอิงจากความยาวของการเผาไหม้ (flame length) พบว่าเมื่ออัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลมากขึ้น ความยาวของการเผาไหม้มีขนาดที่สั้นลง ดังรูปที่ 2.9 จึงชี้แนะว่ามีการผสมที่ดีขึ้น

Smith and Mungal (1998) ศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมจากการทดลอง โดยอ้างอิงจากการลดลงของปริมาณ passive scalar (scalar concentration decay) โดยที่รูปแบบการไหลที่มีอัตราการลดลงของความเข้มข้นที่สูงขึ้น ชี้แนะว่าเจ็ตมีการเหนี่ยวนำการผสมที่สูงขึ้น ทดลองที่  $r = 5 - 25$ ,  $Re_j = 8,400 - 41,500$  พบว่าที่  $r = 10 - 25$  มีอัตราการลดลงที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่  $r = 5$  มีอัตราการลดลงที่น้อยกว่า ดังรูปที่ 2.3 จึงบ่งชี้ว่ามีการเหนี่ยวนำการผสมที่น้อยกว่า

Yuan and Street (1998) ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อการเหนี่ยวนำการผสม โดยใช้ Large-eddy Simulation (LES) จำลองการทดลองที่  $r = 2-3.3$ ,  $Re_{cf} = 1050-2100$  พบว่าเมื่ออัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลสูงขึ้น การเหนี่ยวนำการผสมจะสูงขึ้นตลอดการไหล ดังรูปที่ 2.10

- ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสม

Yuan and Street (1998) พบว่าเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของเส้นทางเดินของเจ็ตจากสมการที่ 2.6 และการเหนี่ยวนำการผสมจากสมการ 2.7 แล้ว

$$\text{Trajectory:} \quad \frac{y_c}{rd} = A_T \left( \frac{x}{rd} \right)^{b_T} \quad (2.6)$$

$$\text{Entrainment:} \quad E = 1 + \frac{rd}{A_E b_E} \left( \frac{x}{rd} \right)^{1-b_E} \quad (2.7)$$

สัมประสิทธิ์  $A_T \approx A_E$  และ  $b_T \approx b_E$  จึงสรุปว่าเส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสมมีความสัมพันธ์กัน โดยที่จากผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์  $b$  ในสมการ 2.7 มีความแตกต่างจากค่า  $b$  ของสมการ 2.6 เพียง 7% ดังนั้นผลของเส้นทางเดินมีความสัมพันธ์กับการเหนี่ยวนำการผสม ในบริเวณ power law

### 2.2.3 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล

Kamotani and Greber (1972) พบว่าที่อัตราส่วนโมเมนตัมต่ำ การกระจายตัวของอุณหภูมิมีความสมมาตรรอบแกนกลาง ในขณะที่อัตราส่วนโมเมนตัมสูงแม้การกระจายตัวของอุณหภูมียังคงสมมาตรรอบแกนกลางอยู่ แต่ vortical structure มีกำลังมากกว่าจึงเกิด local peak 2 ลูก ดังรูปที่ 2.11

Zaman and Foss (1997) ศึกษาเจ็ตในกระแสมขวางที่อัตราส่วนโมเมนตัมเท่ากับ 21 และ 54 ตามลำดับ พบว่าที่อัตราส่วนโมเมนตัมสูง circulation จะสูงกว่ากรณีที่อัตราส่วนโมเมนตัมต่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.12 และชี้แนะว่าการลดลงของ circulation เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปเป็นผลมาจาก turbulent diffusion

Smith and Mungal (1998) พบว่าที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลสูงเจ็ตจะมีความไม่สมมาตร (asymmetric) มากขึ้นเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไป และการก่อตัวของ CVP จะก่อตัวได้ช้ากว่า ดังรูปที่ 2.13 ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลน้อย คือ  $r = 5$  เจ็ตจะไม่สามารถแยกตัวออกจากผนังได้ ดังรูปที่ 2.14 จึงเสนอว่าที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ำมากๆ จนเส้นทางเดิน

ของเจ็ตติดผนัง จะเป็นช่วงของเจ็ตคนละรูปแบบกับเจ็ตที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลสูง นอกจากนี้ยังพบว่าช่วง  $r = 10 - 15$  เป็นช่วง transition ของการเกิด wake โดยที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลน้อยกว่านี้จะไม่ Wake และอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่มากกว่านี้จะมี wake เสมอ ดังรูปที่ 2.15

Watakulsin *et al.* (2010) พบว่าตำแหน่ง  $0.15 rd$  ที่  $r = 2$  เจ็ตมีการพัฒนาตัวที่เร็วกว่า โดยพบ vortical roll up ที่สมบูรณ์ก่อนกรณีที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลสูง และ lateral vortical roll up ที่มี 2 บริเวณ มีการผสมที่สูงกว่าบริเวณอื่น ในขณะที่  $r = 7$  มีการผสมสูงที่ด้าน windward บริเวณเดียว ยิ่งไปกว่านั้นกรณี  $r = 4$  ในบริเวณ near field จะมีคุณลักษณะเหมือน  $r = 7$  แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปในบริเวณ far field จะมีคุณลักษณะที่เหมือนกับ  $r = 2$  แทน ดังรูปที่ 2.5(a)

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อเจ็ตในกระแสมขวาง

### 2.3.1 เส้นทางเดินของเจ็ต

ในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเส้นทางเดินของเจ็ตในกระแสมขวางสามารถแสดงอยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ (correlation) แบบ power law โดย Margason (1968) แสดงผลของเส้นทางเดินของเจ็ตในกระแสมขวางด้วย  $rd$  scale ดังสมการ

$$\frac{y}{rd} = A \left( \frac{x}{rd} \right)^m \quad (2.8)$$

เมื่อ  $A$  และ  $m$  เป็นสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของสมการซึ่งมีค่าประมาณ 1.6 และ 1/3 ตามลำดับ

Kamotani and Greber (1972) ศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ตซึ่งนิยามจากจุดความเร็วและอุณหภูมิที่มีค่าสูงสุดที่ระนาบสมมาตรใดๆ (centerline plane maximum velocity trajectory, centerline plane maximum velocity trajectory) โดยให้ความร้อนแก่เจ็ตจนมีอุณหภูมิที่สูงกว่ากระแสมขวาง  $75^\circ F$  และ  $320^\circ F$  ที่อัตราส่วนโมเมนตัมเท่ากับ 15.3 และ 59.3 ตามลำดับดังรูปที่ 2.16 พบว่าเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากจุดความเร็วที่มีค่าสูงสุดบนระนาบสมมาตร (center plane) บน  $rd$  scale สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\frac{y_u}{rd} = 0.89 r^{0.3} \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.36} \quad (2.9)$$

ในขณะที่เส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากจุดอุณหภูมิที่มีค่าสูงสุดบนระนาบสมมาตร (center plane) บน  $rd$  scale สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\frac{y_T}{rd} = 0.73 r^{0.33} \left( \frac{\rho_j}{\rho_{cf}} \right)^{0.11} \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.29} \quad (2.10)$$

ผลการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนโมเมนต์ัมเท่ากัน เส้นทางเดินที่นิยามจากจุดอุณหภูมิที่มีค่าสูงสุดบนระนาบสมมาตรจะอยู่ต่ำกว่าเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากจุดความเร็วที่มีค่าสูงสุด และอัตราส่วนโมเมนต์ัมเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อเส้นทางเดินของเจ็ตทั้ง 2 กรณี ในขณะที่อัตราส่วนความหนาแน่นจะไม่มีผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากจุดความเร็วที่มีค่าสูงสุด แต่จะมีผลเล็กน้อยต่อเส้นทางเดินที่นิยามจากจุดอุณหภูมิที่มีค่าสูงสุด

Smith and Mungal (1998) ศึกษาเส้นทางเดินของ mean passive scalar concentration พบว่าเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากจุดที่มีความเข้มข้นสูงสุด (passive scalar) แตกต่างกันไปตามอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล เมื่อใช้  $rd$  scale ดังรูปที่ 2.17(a) แล้ว พบว่าเส้นทางเดินของเจ็ตจะเกิดการ collapsed เข้าด้วยกันมากกว่า  $d$  หรือ  $r^2d$  scale จึงสรุปได้ว่าการสเกลเส้นทางเดินของเจ็ตเมื่อใช้นิยามจาก passive scalar ควรใช้  $rd$  scale

Yuan and Street (1998) ศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ต (trajectory) โดยใช้ Large-eddy Simulation (LES) พบว่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล เรย์โนลด์สันัมเบอร์ของกระแสลมขวาง และแรงลอยตัวล้วนมีผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ตทั้งสิ้นดังรูปที่ 2.18 โดยที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลจะมีผลมากกว่า parameter อื่น และที่บริเวณ downstream ( $x > 0.8 rd$ ) จะพบว่าทุกกรณีจะเข้าสู่เส้นทางเดินเดียวกันดังรูปที่ 2.19 ( $X = x/d, Z = z/d$ ) ซึ่ง Yuan and Street เสนอว่าเส้นทางเดินของเจ็ตนี้สามารถนิยามได้เป็นสมการรูปแบบ power law ดังสมการที่ 2.11 โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์  $A = 1.2 - 1.4$ ,  $b = 0.27 - 0.28$  ตามแต่กรณี ซึ่ง Yuan and Street (1998) เรียกบริเวณนี้ว่า power law region

$$\frac{y_c}{rd} = A \left( \frac{x}{rd} \right)^b \quad (2.11)$$

Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) ศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากอุณหภูมิของเจ็ต และการกระจายตัวของอุณหภูมิของเจ็ตที่ระนาบตั้งฉาก โดยให้ความร้อนแก่เจ็ตที่  $r = 4.1$  นิยามเส้นทางเดินของเจ็ตนี้ตาม Kamotani and Greber (1972) รวมทั้งศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามมาจากจุดศูนย์กลางมวลการกระจายตัวของอุณหภูมิบนระนาบตั้งฉาก (center of mass temperature trajectory) พบว่าเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามมาจากจุด

ศูนย์กลางมวลของการกระจายตัวของอนุภาคมิบนระนาบตั้งฉากจะอยู่ต่ำกว่าเส้นทางการเดินของเจ็ตที่จุดอนุภาคที่มีค่าสูงสุดบนระนาบสมมาตรที่นิยามตาม Kamotani and Greber (1972) เสมอ แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่มีอนุภาคสูงจะกระจายตัวอยู่ที่บริเวณด้านล่างของเจ็ต

Muppidi and Mahesh (2005a) ศึกษาผลของสภาวะเริ่มต้นของเจ็ต (jet velocity profile) และความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง (crossflow boundary layer) ต่อเส้นทางการเดินของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วยวิธี Direct Numerical Simulations (DNS) ที่  $r = 1.5 - 5.7$  พบว่าสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตและความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางมีผลต่อเส้นทางการเดินของเจ็ต เจ็ต โดยที่เจ็ตที่มีลักษณะสภาวะเริ่มต้นที่มีค่าความเร็วที่กลางเจ็ตสูง และความหนาของชั้นขอบเขตที่สูง จะมีความสูงของเส้นทางการเดินของเจ็ตที่สูงกว่าเจ็ตที่มีลักษณะสภาวะเริ่มต้นที่มีค่าความเร็วที่กลางเจ็ตต่ำ และความหนาของชั้นขอบเขตที่ต่ำ ดังรูปที่

2.20 Muppidi and Mahesh จึงได้เสนอ scale ตัวใหม่ คือ  $h$  ดังสมการ

$$\frac{h}{d} = \left\{ \frac{3}{4} \pi C_m r^2 \frac{\delta^2 d_j^2}{d^4} \right\}^{1/3} \quad \text{เมื่อ} \quad h \leq \delta \quad (2.12)$$

$$\frac{h}{d} = \frac{2}{3} \frac{\delta}{d} + \frac{\pi}{4} C_m r^2 \frac{d_j^2}{d^2} \quad \text{เมื่อ} \quad h \geq \delta \quad (2.13)$$

เมื่อ  $C_m$  มีค่าประมาณ 0.05 และ  $d_j$  นิยามจาก

$$\rho_j \int_A u_j^2 dA = \frac{\pi d_j^2}{4} \rho_j \bar{u}_j^2 \quad (2.14)$$

เพื่อให้เส้นทางการเดินของเจ็ต collapse เข้าด้วยกันมากขึ้น ดังรูปที่ 2.21

Muppidi and Mahesh (2005b) ศึกษาเส้นทางการเดินของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วยวิธี DNS แบบ 2 มิติ พบว่าที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของเจ็ต การไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางเป็นเส้นโค้ง เนื่องจากเจ็ตเคลื่อนที่ด้วยความเร่งจากความดัน (pressure driven) แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนวการไหลสุดท้ายเจ็ตจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามกระแสลมขวาง เพราะเจ็ตเคลื่อนที่ด้วยโมเมนตัมจากกระแสลมขวาง (momentum driven)

Limdumrongtum (2007) และ Limdumrongtum *et al.* (2009) ศึกษาโครงสร้างการผสมและเส้นทางการเดินของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยใช้เทคนิค smoke fluid condensation, mie scattering และ laser-sheet visualization technique ที่มี  $r = 4.1$  โดย concentration field ที่ได้จากเทคนิคนี้ จะแสดงผลเฉพาะส่วนของเจ็ตที่มีการผสมถึงระดับ stoichiometric ratio เท่านั้น (reactive scalar ใน near field) ซึ่งแตกต่างจากงานของ Smith and Mungal (1998)

ซึ่งใช้เทคนิค PLIF ซึ่งได้ concentration field (เป็น passive scalar) ที่แสดงทั้งส่วนที่มีการผสม และไม่มีการผสม พบว่าเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากจุดศูนย์กลางมวลการผสม (center of mass reactive scalar trajectory) และเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากจุดศูนย์กลางเรขาคณิตของการผสม (centroid scalar trajectory) มีความแตกต่างกันเล็กน้อย แสดงว่าการกระจายตัวของการผสมมีความสม่ำเสมอแบบสมมาตรที่จุดศูนย์กลางบนหน้าตัดการผสมของเจ็ต

### 2.3.2 การก่อตัว และพัฒนาตัวของ Counter – rotating vortex pair (CVP)

Yuan *et al.* (1999) ศึกษาโครงสร้างการก่อตัวของ large scale structure และค่าปริมาณทางสถิติของ turbulent โดยใช้ Large-Eddy Simulation พบว่าเมื่อพล็อต isosurface ของ vorticity ในบริเวณ near field ดังรูปที่ 2.22 จะพบโครงสร้างหลัก 3 โครงสร้างคือ hanging vortices, spanwise roller และ vertical streaks ซึ่งระบุว่า โครงสร้าง Hanging vortices จะม้วนกระแสมขวางเข้ามาในเจ็ต โดยแกนการม้วนตัวมีทิศทางตามผลรวมของเวกเตอร์ความเร็วของเจ็ต และกระแสมขวาง ( $\bar{u}_{mean}$ ) ดังรูปที่ 2.23(a) ซึ่งโครงสร้างเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วระหว่างเจ็ตกับกระแสมขวางในทิศตั้งฉากกับทิศของ ( $\bar{u}_{mean}$ ) คือ ( $\bar{u}_j$  และ  $\bar{u}_{cf}$ ) ดังรูปที่ 2.12(b) หรือที่เรียกว่า skewed mixing layer

รูปที่ 2.24 แสดงถึง skewed mixing layer เป็นโครงสร้างที่พัฒนาตัวจากขอบด้านข้างของเจ็ต โดยมีการไหลไปตามแนวแกนผ่าน hanging vortices ซึ่งจะเป็นตัวนำให้ vortical fluid จากชั้นขอบเขตของกระแสมขวาง (crossflow boundary layer) เข้ามาที่ด้านหลังของเจ็ต ส่งผลให้ hanging vortices ปะทะกับ adverse pressure gradient จนเกิด breakdown ซึ่งหลังจาก breakdown แล้ว vortex จะมีขนาดใหญ่ขึ้นมาก และก่อตัวเป็น CVP ที่อ่อนกำลังตามมา โดยมีแนวการไหลที่ขนานไปกับเส้นทางเดินของเจ็ต

Cortelezzi and Karagozian (2001) ศึกษาการก่อตัวและพัฒนาตัวของ CVP โดยใช้เทคนิค 3D vortex element พบว่าการก่อตัวของ vortices ที่ผนังภายในท่อเจ็ต จะพัฒนาตัวไปเป็นวงแหวนที่ปากทางออกของเจ็ต และโค้งไปตามกระแสมขวาง ทำให้เกิด vortex ring ที่ห่อตัวล้อมขอบด้านหลัง โดยขอบด้านหลังของ vortex ring จะยกตัวสูงขึ้น เชื่อมต่อกับ vortex ring ที่เกิดขึ้นก่อนหน้า และพัฒนาตัวเป็น CVP ที่สมบูรณ์ในบริเวณ far field ดังรูปที่ 2.25 นอกจากนี้รูปที่ 2.26 แสดงถึงกระบวนการเกิด vortical structure ที่เกิดจากการม้วนตัวของ jet shear layer โดยการพับของขอบ vortex ring และขอบที่พับตัวจะกระตุ้นให้เกิด vortex ring ตัวใหม่ขึ้น

Lim *et al.* (2001) ศึกษา large scale structure ของเจ็ตในกระแสมขวาง โดยใช้เทคนิคการฉีดสี (dye) และ PLIF พบว่า upstream vortex (A) และ leeside vortex (B) มีลักษณะเป็น vortex loop ที่เกิดจากการพัฒนาตัวของ cylindrical vortex sheet ดังรูปที่ 2.27 และจากรูปที่ 2.28 แสดงการพัฒนาตัวของ CVP พบว่า CVP เกิดจากการพัฒนาตัวของ vortex loop แทนที่จะเป็น vortex ring เหมือน free jet

Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ศึกษาผลของการติด tab ที่ปากทางออกของเจ็ตในกระแสมขวาง พบว่าการพัฒนาตัวของ skewed mixing layer ที่เกิดขึ้นรอบปากทางออกของเจ็ตส่งผลต่อการพัฒนาตัวของ CVP

### 2.3.3 ผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางต่อเจ็ตในกระแสมขวาง

Yuan and Street (1998) พบว่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางมีผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสมเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.18 และ 2.29 อีกทั้ง Yuan and Street ชี้แนะว่า turbulent intensity ที่พบในกรณีที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางสูงขึ้น จะส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ตต่ำลงในบริเวณ near field เพราะจะช่วย breakdown การก่อตัวของ coherent vortical structure ที่ jet shear layer ส่งผลให้เจ็ตทะลุเข้าสู่กระแสมขวางได้น้อยลง

Muppidi and Mahesh (2006) ศึกษาเจ็ตในกระแสมขวางด้วย DNS แบบ 2 มิติโดยจำลองการทดลองที่  $Re_{cf} = 1,000 - 10,000$  ที่  $r=1$  พบว่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางที่สูง จะส่งผลให้เจ็ตเสียรูปซ้ากว่าที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางต่ำดังรูปที่ 2.30 นอกจากนี้ยังพบว่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางมีผลต่อความเสถียร (stability) ด้วย ดังรูปที่ 2.31 โดยที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางต่ำ เจ็ตจะมีความเสถียร แต่ที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางสูงพบว่าเจ็ตจะไม่เสถียรและพบ roller ที่รอบเจ็ตอีกด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจะพบว่าเจ็ตจะมีความเสถียรในที่สุดแม้ที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางสูงจะเกิดความเสถียรซ้ากว่าก็ตาม อีกทั้งยังพบว่าค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางมีผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ตดังรูปที่ 2.32 โดยเมื่อเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางสูงจะส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ตต่ำลง เมื่อศึกษา CVP ที่พัฒนาตัวสมบูรณ์แล้วในบริเวณ far field พบว่าแต่ละ vortex แต่ละตัวของ CVP จะ induce ความเร็วตั้งสมการ 2.15

$$u_{induced} = \frac{\Gamma}{2\pi h} \quad (2.15)$$

โดยที่  $\Gamma = \text{circulation}$  ของแต่ละ vortices และ  $h = \text{ระยะระหว่าง vortices}$  จึงเสนอว่า ความเร็วของเจ็ตตามกระแสการไหลของกระแสมขวางนั้น โดยปกติจะถูกเร่งเข้าสู่ความเร็วของกระแสมขวางในบริเวณ far field หากไม่มีผลของ CVP มาเกี่ยวข้อง หากแต่ในกระแสการไหลจริง ความเร็วบางส่วนจะถูก CVP induce ไป ความเร็วปลาย ( $u_{final}$ ) จึงมีค่าต่ำกว่า ความเร็วกระแสมขวางในบริเวณ far field เสมอ ดังแสดงในสมการที่

$$u_{\infty} - u_{induced} = u_{final} \quad (2.16)$$

โดยที่  $u_{\infty} = \text{ความเร็วของกระแสมขวาง}$  และ  $u_{final} = \text{ความเร็วสุดท้ายของเจ็ต}$  เมื่อเจ็ตถูกเร่งด้วยกระแสมขวางจนกระทั่งเท่ากับ  $u_{final}$  แล้ว เจ็ตจึงจะเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วคงที่ และพบว่าเมื่อเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางสูงขึ้น  $u_{induced}$  จะเพิ่มขึ้นและ  $u_{final}$  จะลดลง ดังรูปที่ 2.33 เพราะที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางสูง อัตราการ decay ของ circulation จะต่ำลง ค่า circulation จึงสูง  $u_{induced}$  จึงสูงและ  $u_{final}$  จึงต่ำ

Wongthongsiri and Bunyajitradulya (2014) ศึกษาผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางด้วยวิธี Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหล (tracer particle) เฉพาะที่เจ็ตแต่ไม่ใช้ในกระแสมขวางจึงสามารถแยกเจ็ตออกจากกระแสมขวางได้อย่างชัดเจน และประเมินหาความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใดก็ได้ ทดลองที่  $Re_{cf} = 5,600$  และ  $12,000$  ที่  $r = 4.1$  พบว่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางมีผลต่อโครงสร้างเฉพาะในบริเวณ near field เท่านั้น เมื่อเพิ่มเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวาง บริเวณที่มี peak magnitude และค่าปริมาณทางฟิสิกส์ที่ใช้ระบุโครงสร้างของเจ็ตจะเพิ่มขึ้นทั้งความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ และความเร็วมตามแนวการไหล (streamwise velocity) ดังรูปที่ 2.34 และ 2.35 อีกทั้งยังเพิ่มอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมในบริเวณ near field แต่ให้ผลตรงกันข้ามในบริเวณ far field ดังรูปที่ 2.36 นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ ที่มีค่าน้อย ( $< 20\%$ ) ครอบคลุมบริเวณถึงครึ่งหนึ่งของเจ็ต โดยที่บริเวณดังกล่าวส่งผลต่อการผสมน้อยมาก ดังรูปที่ 2.37

### 2.3.4 การปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสมขวาง

งานศึกษาที่ผ่านมามีความพยายามที่จะปรับแต่ง และควบคุมคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวาง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การควบคุมที่ไม่ใช้พลังงาน (passive control) เช่น การติด tab ที่ปากทางออกของเจ็ต และการควบคุมที่ใช้พลังงาน (active control)



เช่น การใช้เจ็ตหมุนควง (swirling jet), วิธีกระตุ้นอย่างเป็นจังหวะ (pulsing), การใช้เจ็ตควบคุม (azimuthal Control Jets)

Zaman and Foss (1997) ศึกษาผลของ vortex generator แบบ tab รูปสามเหลี่ยม (Triangular tab) ที่บริเวณปากทางออกของเจ็ต พบว่าการติด tab ที่ windward ส่งผลให้ circulation ลดลง และเส้นทางเดินของเจ็ตเตี้ยลง ดังรูปที่ 2.12 และ 2.38

Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) ศึกษาการใช้เจ็ตหมุนควง (swirling jet) โดยวิธีหมุนท่อส่วนที่ก่อนจะถึงปากเจ็ต ส่งผลให้ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ตมีค่าไม่เป็นศูนย์ ใช้ค่า swirl ratio (Sr) ที่ 0 – 0.82 และ  $r = 4.1$  พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิและเกรเดียนท์ของอุณหภูมิจะสูงที่ด้าน suction และต่ำที่ด้าน pressure นอกจากนี้การหมุนควงยังส่งผลให้เจ็ตมีความไม่สมมาตรมากขึ้น ดังรูปที่ 2.39 อย่างไรก็ตามการหมุนควงมีผลน้อยต่อเส้นทางเดินของเจ็ต

M'Closkey *et al.* (2002) ปรับแต่งเจ็ตด้วยวิธีกระตุ้นอย่างเป็นจังหวะ (pulsing) ให้รูปร่างความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ตเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยใช้ลำโพงเป็นตัวกระตุ้น ซึ่งได้มีการปรับรูปแบบสัญญาณ ความถี่ และอุปกรณ์ควบคุม (filter) แบบที่มี compensator และไม่มี compensator พบว่าชุดควบคุมที่มี compensator มีความสามารถในการตอบสนองที่แม่นยำกว่า และกรณีที่มีสัญญาณขาเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยม ที่มี compensator เจ็ตจะมีความสามารถพุ่งทะลุ และกระจายตัวไปในกระแสลมขวางได้ดีที่สุด ดังรูปที่ 2.40

Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ผลของการติด tab ต่อการกระจายตัวของเจ็ตร้อนในกระแสลมขวางกรณีเจ็ตไม่หมุนควง (JICF) และเจ็ตหมุนควง (SJICF) ที่ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์ โดยทำการทดลอง swirl ratio (Sr) เท่ากับ 0 สำหรับกรณี JICF และ 0.52 สำหรับกรณี SJICF ที่  $r = 4$  โดยใช้ tab รูปสามเหลี่ยม ซึ่งมีขนาดพื้นที่ 3% ของพื้นที่ปากเจ็ตโดยติดตั้งที่ตำแหน่งขอบปากเจ็ตและเลื่อนไปโดยรอบ 8 ตำแหน่งตามรูปที่ 2.41

รูปที่ 2.42 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิกรณี JICF พบว่าโครงสร้างการไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อติด tab บริเวณตำแหน่ง lateral จนถึง windward โดยที่เจ็ตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างรูปไต (kidney shaped) ซึ่งมีลักษณะคล้าย CVP ไปเป็นโครงสร้างรูปจุลภาคโดยที่มีแกนกลางซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า และลอยอยู่บนตำแหน่งที่สูงกว่ากรณีที่ไม่ติด tab อีกทั้งยังคงรูปร่างแบบจุลภาคไว้

รูปที่ 2.43 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิกรณี SJICF พบว่ามีผลคล้ายคลึงกับกรณี JICF แต่มีข้อแตกต่างกันคือ โครงสร้างการไหลของกรณี SJICF จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งในบริเวณที่กว้างกว่ากรณี JICF คือจากตำแหน่ง pressure leeward ไปถึงตำแหน่ง suction เมื่อเลื่อนตำแหน่งของ tab ไปตามทิศทางของการหมุน

ดังนั้นทั้งกรณี JICF และ SJICF บริเวณที่โครงสร้างการไหลของเจ็ตมีความไวต่อตำแหน่งของการติด tab มากที่สุด คือ ตรงกลางระหว่างตำแหน่ง pressure windward (PW) ไปจนถึง windward (W) ผลการทดลองบ่งชี้ถึงกลไกที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการเกิดโครงสร้างการไหลที่มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับ skewed shear layer ตามทิศทางการไหลของกระแสลมขวางรอบเจ็ตใกล้กับปากทางออกของเจ็ต

Kornsri *et al.* (2009) ศึกษาการใช้เจ็ตควบคุม (azimuthal Control Jets) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.44 โดยฉีดเจ็ตควบคุมตามตำแหน่ง  $\theta$  ที่ต่าง ๆ กัน มาควบคุมเส้นทางการเดินของเจ็ตเพื่อหาผลของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมต่อไป อีกทั้งมีการนิยามถึงอัตราส่วนเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ ) ดังนี้

$$r_m = \frac{\dot{m}_{cj}}{\dot{m}_j} \quad (2.16)$$

โดยที่  $\dot{m}_{cj}$  = อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุม และ  $\dot{m}_j$  = อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตทดลองโดยใช้ single sensor hot film anemometer วัดความเร็วของเจ็ตที่  $r = 3.9$  และ  $Re_j = 6,000 - 24,000$  พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมด้าน windward side จะให้เส้นทางการเดินของเจ็ตที่ต่ำลงกว่า JICF ซึ่ง I15 (ฉีดเจ็ตควบคุมที่มุม  $\theta = \pm 15^\circ$ ) จะให้เส้นทางการเดินที่ต่ำที่สุดในขณะที่การฉีดด้าน leeward side ให้เส้นทางการเดินที่สูงกว่า JICF ดังรูปที่ 2.45 เมื่อพิจารณาถึงผลของอัตราส่วนเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลักต่อเส้นทางการเดินของเจ็ตดังรูปที่ 2.46 พบว่าที่ตำแหน่ง  $x = 1.5 rd$  ของกรณี I15 การเพิ่มอัตราส่วนเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลักจะทำให้เจ็ตมีเส้นทางการเดินที่ต่ำลง เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างระหว่างกรณี JICF และ I15 ดังรูปที่ 2.47 พบว่ากรณี I15 ทำให้เจ็ต penetration ได้ต่ำลง (เส้นทางการเดินของเจ็ตต่ำลง) โครงสร้างแผ่ขยายออกด้าน spanwise มากขึ้น จึงส่งผลให้ระยะห่างระหว่าง CVP (spanwise separation) มากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการฉีดเจ็ตควบคุมจึงมีผลในการลดการพัฒนาตัวของ windward jet shear layer แต่สนับสนุนการพัฒนาตัวของ lateral skewed mixing layer

Witayaprapakorn and Bunyajitradulya (2013) ศึกษาถึงผลของการใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง นิยามโดย

$$E = \frac{Q_j}{Q_0} \quad (2.17)$$

โดยที่  $Q_j$  คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ผ่านหน้าตัดของเจ็ทบนระนาบขวางใดๆ เท่านั้น ไม่รวมบริเวณส่วนที่เป็นกระแสลมขวาง และ  $Q_0$  คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรเริ่มต้นที่ปากทางออกของเจ็ท ดังนั้นการทดลองนี้จึงใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะที่เจ็ทเท่านั้นแต่ไม่ใช่ที่กระแสลมขวาง เพื่อให้สามารถแยกแยะโครงสร้างของเจ็ทออกจากกระแสลมขวางได้อย่างชัดเจน ทดลองโดยใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) วัดความเร็วของเจ็ทที่  $r = 3.9$  และ  $Re_{cf} = 5,900$  กรณี JICF, I135 และ I15 ที่  $r_m = 2\%$  พบว่าเมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างของเจ็ทที่พิจารณาจากการกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน  $x$  ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x / u_{cf}$ ) ดังรูปที่ 2.48 พบว่ากรณี I15 จะทำให้เจ็ทขยายตัวออกทางด้าน spanwise แต่ขนาดและความสูงด้าน transverse ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ Kornsri *et al.* (2009) สำหรับกรณี I135 จะทำให้โครงสร้างเจ็ทแตกต่างจาก JICF เพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณา circulation ดังรูปที่ 2.49 พบว่ากรณี I15 ส่งผลให้ circulation มากขึ้น ในขณะที่กรณี I135 มีผลต่อ circulation น้อยเมื่อเทียบกับ JICF เมื่อพิจารณาถึงผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ทดังรูปที่ 2.50 พบว่า I15 ส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ทต่ำลง แต่ I135 ส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ทสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ Kornsri *et al.* (2009) เมื่อพิจารณาถึงผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมดังรูปที่ 2.51 พบว่ากรณี I15 ที่ระนาบ  $x/rd = 0.5, 0.75$  อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมใกล้เคียงกับกรณี JICF แต่ที่ระนาบ  $x/rd = 1.0, 1.5$  กลับมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมที่สูงขึ้นจากกรณี JICF ในขณะที่กรณี I135 ส่งผลให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นตลอดช่วง  $x/rd = 0.5 - 1.5$  นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมมีความสัมพันธ์กับระยะเจาะทะลุของเจ็ทซึ่งนิยามจาก CM ของ circulation และ vorticity

Chaikasetsin *et al.* (2014) ศึกษาผลของอัตราส่วนเชิงมวลของเจ็ทควบคุมต่อเจ็ทหลัก ( $r_m$ ) ของเจ็ทควบคุมตามแนวเส้นรอบวงของเจ็ทในกระแสลมขวาง ทดลองโดยใช้ SPIV วัดความเร็วของเจ็ทในกระแสลมขวางที่  $r = 4.1$  และ  $Re_{cf} = 5,600$  กรณี JICF และ I135 โดยที่  $r_m = 2 - 4\%$  พบว่าเมื่อ อัตราส่วนเชิงมวลของเจ็ทควบคุมต่อเจ็ทหลักสูงขึ้นความเร็วตามแนวแกน  $x$  ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x / u_{cf}$ ) จะลดลง เจ็ทมีขนาดใหญ่ขึ้นดังรูปที่ 2.52 และเจ็ทจะพุ่งทะลุเข้าสู่กระแสลมขวางซึ่งนิยามจากจุดศูนย์กลางมวลของความเร็วเฉลี่ยสูงชันดังรูปที่ 2.53 รวมทั้งมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมที่สูงขึ้นอย่างมากดังรูปที่ 2.54 โดยที่มีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่ฉีดเจ็ทควบคุมมากที่สุด 60% ที่ระยะ  $x/rd = 1.5$

### 2.3.5 โครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางเมื่อพิจารณาจาก POD

Meyer *et al.* (2007) ศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางโดยวัดความเร็วด้วยเทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ทดลองที่  $r=1.3$  และ  $3.3$ ,  $Re_{cf} = 2,400$  วิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตโดยใช้ Proper Orthogonal Decomposition (POD) พบว่ากรณี  $r=3.3$  โครงสร้าง wake vortices เป็นโครงสร้างหลัก หรือมีบทบาทสำคัญของเจ็ตในกระแสมขวาง ดังรูปที่ 2.55 และพบว่าโครงสร้าง jet shear layer เป็นโครงสร้างที่มีบทบาทน้อยกว่า ในทางกลับกันกรณีที่  $r=1.3$  โครงสร้าง jet shear layer จะเป็นโครงสร้างหลัก ในขณะที่โครงสร้าง wake vortices เป็นโครงสร้างรอง

Strimekharat and Bunyajitradulya (2013) ศึกษาผลของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตในกระแสมขวาง ทดลองโดยใช้ SPIV วัดความเร็วของเจ็ตที่  $r=3.9$  และ  $Re_{cf} = 5,900$  กรณี JICF และ I15 ที่  $r_m = 2\%$  และวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตโดยใช้ POD พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมส่งผลให้โครงสร้างที่มีพลังงานสูงสุดเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ฉีดเจ็ตควบคุม ดังรูปที่ 2.56 และการกระจายตัวของระดับพลังงานในแต่ละโหมดเปลี่ยนจากเตี้ยกว้างในกรณี JICF เป็นผอมสูงในกรณี I15 ดังรูปที่ 2.57 จึงสรุปได้ว่าการฉีดเจ็ตควบคุมมีผลให้เพิ่มระดับพลังงานในโหมดที่มีระดับพลังงานสูงสุดเพียงไม่กี่โหมด ในกรณีนี้คือโหมดที่ 1

Dawyok and Bunyajitradulya (2014) ศึกษาผลของอัตราส่วนเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก ( $r_m$ ) ของเจ็ตในกระแสมขวาง ทดลองโดยใช้ SPIV วัดความเร็วของเจ็ตที่  $r=4.1$  และ  $Re_{cf} = 5,600$  กรณี JICF และ I135 ที่  $r_m = 2-4\%$  และวิเคราะห์โครงสร้างของเจ็ตโดยใช้ POD พบว่าเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไป ที่  $r_m = 2\%$  การกระจายตัวของระดับพลังงานในแต่ละโหมดเปลี่ยนจากผอมสูงเป็นเตี้ยกว้างเหมือนกรณี JICF ในขณะที่  $r_m = 4\%$  จะยังคงการกระจายตัวของระดับพลังงานในแต่ละโหมดเป็นแบบผอมสูงเสมอ ดังรูปที่ 2.58 แสดงว่าเมื่ออัตราส่วนเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลักเพิ่มขึ้นจาก  $2\%$  เป็น  $4\%$  จะเป็นการกระตุ้นโครงสร้างที่มีพลังงานสูงสุดให้โดดเด่นมากขึ้น และมีความเสถียรมากขึ้นเมื่อเจ็ตมีการพัฒนาตัวไปตามการไหล ดังรูปที่ 2.59

### บทที่ 3

## หลักการ และทฤษฎี

การเหนี่ยวนำการผสม คือ ความสามารถในการเหนี่ยวนำของไหลชนิดหนึ่งให้เข้ามาผสมกับของไหลอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่พบได้มากในอุปกรณ์ทางวิศวกรรม เช่น ห้องเผาไหม้ เตาปฏิกรณ์เคมี ปล่องควัน ดังนั้นการเหนี่ยวนำการผสมจึงเป็นปริมาณที่สำคัญ และควรศึกษามาก

#### 3.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $E$ ) เป็นปริมาณไร้มิติที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการเหนี่ยวนำการผสมของ JICF ที่ระนาบหน้าตัดใดๆ สามารถนิยามได้โดย

$$E = \frac{Q_j}{Q_0} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $Q_j$  คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ผ่านหน้าตัดของเจ็ตบนระนาบขวางใดๆ

$Q_0$  คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรเริ่มต้นที่ปากทางออกของเจ็ต

ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่ง  $Q_j$  ณ เวลาใดๆ นิยามโดย

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

เมื่อ  $V_x(\vec{x},t)$  คือความเร็วที่หน้าตัดในแนวแกน streamwise ในสนามความเร็ว  $V_j(\vec{x},t)$  ที่ตำแหน่ง  $x$  และเวลาใดๆ  $A_j(x,t)$  คือพื้นที่ของเจ็ต ณ ตำแหน่ง  $x$  และเวลาใดๆ

### 3.2 ปัญหาของการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวาง

จากสมการที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าการที่จะหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวางที่หน้าตัดใดๆ จะต้องหาอัตราการไหลของเจ็ดที่หน้าตัดนั้นๆให้ได้ ซึ่งมีความซับซ้อน และไม่ชัดเจนทั้งในด้านการนิยาม และการทดลอง ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาจึงใช้ปริมาณทางกายภาพอื่นๆ มาใช้ เพื่อช่วยในการอธิบายว่า JICF ที่ทดลอง หรือจำลอง (Simulated) นั้นมีความสามารถในการผสมดีหรือไม่ เช่นการใช้ decay rate ของปริมาณทางสเกลาร์ อาทิ ความเร็วเฉลี่ย ความเข้มข้นของสารที่ใส่เข้าไป เป็นต้น ซึ่งศึกษาได้โดยสะดวกกว่าการหาความสามารถในการผสมของ JICF โดยตรง อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวนั้นมีความเป็น arbitrary อยู่สูง ดังนั้นแต่ละการทดลองที่ใช้ปริมาณทางสเกลาร์ดังกล่าวจึงให้ผลการทดลองที่แตกต่างกันไปตามค่า threshold ที่เลือกใช้ในการแยกบริเวณที่เป็นเจ็ดออกจากกระแสมขวาง

### 3.3 เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหล

ในการทดลองทั่วไปของ JICF จะมีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้ง 2 ส่วน คือที่บริเวณเจ็ด และกระแสมขวาง ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถแสดงสนามความเร็วได้อย่างต่อเนื่องจากบริเวณที่เป็นเจ็ดสู่บริเวณที่เป็นกระแสมขวาง ซึ่ง SPIV จะให้ผลดังรูปที่ 3.2.a อย่างไรก็ตามการทดลองนี้ เพื่อที่จะหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรดังสมการที่ 3.1 ต้องการอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดเท่านั้น ดังนั้นการใส่อนุภาคติดตามการไหลที่เจ็ด และกระแสมขวางจึงไม่เหมาะสม เนื่องจากไม่สามารถที่จะแยกแยะระหว่างกระแสมขวาง และเจ็ดได้อย่างชัดเจน การทดลองนี้จึงใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น ซึ่ง SPIV จะให้ผลดังรูปที่ 3.2.b ซึ่งนอกจากสามารถที่จะแยกแยะส่วนที่เป็นเจ็ดออกจากกระแสมขวางได้แล้ว ยังสามารถที่จะตรวจสอบผลของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ และวิเคราะห์ผลความน่าจะเป็นที่มีต่อโครงสร้างของเจ็ดได้

### 3.4 การประเมินอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

เมื่อใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น SPIV จึงจะพบแต่ความเร็วของเจ็ตเท่านั้น ความเร็วของกระแสลมขวางจึงเป็น 0 หรือเป็นฟังก์ชันดังนี้

$$V_j(\vec{x}, t) = V_{SPIV}(\vec{x}, t) = \begin{cases} \vec{V}(\vec{x}, t) \neq \vec{0} & \text{when } x \text{ is in the jet region} \\ \vec{0} & \text{when } x \text{ is in the crossflow region} \end{cases} \quad (3.3)$$

อย่างไรก็ตาม การทดลองนี้มีการสอบเทียบค่าความเร็วตามแนวแกน streamwise ที่ SPIV วัดได้กับ pitot static tube (รายละเอียดเพิ่มเติมใน บทที่ 4 หัวข้อการสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง SPIV กับ pitot tube) ดังนั้นในขั้นตอนี้จึงมีการนำค่าความเร็วที่วัดได้จาก SPIV ผ่านกระบวนการปรับค่าให้เทียบได้กับความเร็วที่วัดได้จาก pitot static tube ก่อนที่จะคำนวณต่อไป

สมการที่ 3.2 สามารถเปลี่ยนจากอินทิเกรตเฉพาะพื้นที่เจ็ต  $A_j(x, t)$  เป็นทั่วทั้งระนาบที่ SPIV วัดได้  $A_{x, PIV}$  ดังนี้

$$Q_j(x, t) = \int_{A(x)} V_{x,j}(\vec{x}, t) dA \quad (3.4)$$

เมื่อพิจารณาหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อเฉลี่ยตามเวลาทั้งหมด (time mean) ซึ่งสามารถจัดรูปได้ใหม่ดังนี้ โดยที่  $(\bullet)$  แสดงถึงตัวแปร  $\bullet$  ที่เฉลี่ยตามเวลา (time mean)

$$\begin{aligned} \bar{Q}_j(x) &= \frac{1}{T} \int_0^T Q_j(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \left( \int_{A(x)} V_{x,j}(\vec{x}, t) dA \right) dt \\ &= \int_{A(x)} \left( \frac{1}{T} \int_0^T V_{x,j}(\vec{x}, t) dt \right) dA \\ \bar{Q}_j(x) &= \int_{A(x)} \bar{V}_{x,j}(\vec{x}) dA \end{aligned} \quad (3.5)$$

อย่างไรก็ตามการวัดความเร็วด้วย SPIV เป็นการวัดความเร็วแบบ discrete ไม่ใช่แบบ continuous จึงต้องเปลี่ยนเครื่องหมายจาก integral form เป็น summation form ดังนี้

$$\bar{Q}_j(x) = \int_{A(x)} \bar{V}_{x,j}(\bar{x}) dA = \sum_{ij} \bar{V}_{ij} A_{ij} \quad (3.6)$$

แต่เนื่องจาก  $A_{ij}$  แต่ละช่องเท่ากันเนื่องจากเป็น spatial resolution จึงให้เท่ากับ  $\Delta A$  การหา  $\bar{Q}_j(x)$  จากสมการที่ 3.6 จึงลดรูปเหลือ

$$\bar{Q}_j(x) = \sum_{ij} \bar{V}_{ij} \Delta A \quad (2.7)$$

ซึ่ง  $V_{ij}$  สามารถหาได้จากภาพถ่าย SPIV แล้วจึงเข้ากระบวนการ process ด้วยโปรแกรม Insight 4G และสามารถหาค่าเฉลี่ยได้จากโปรแกรม MATLAB

ดังนั้นการหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรบนระนาบที่ตั้งฉากกับกระแสลมขวาง เมื่อหาค่าเฉลี่ย แบบ time mean จะได้ว่า

$$\bar{E} = \frac{\bar{Q}_j}{Q_0} \quad (2.8)$$



## บทที่ 4

### ชุดการทดลอง และการทดลอง

#### 4.1 ชุดการทดลอง

ชุดทดลองในการทดลองนี้ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์การไหล และการควบคุมการไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงโครงสร้างโดยสังเขปได้ดังรูปที่ 4.1 ชุดทดลองประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ อุโมงค์ลม และชุดหัวเจ็ต โดยหลักการทำงานคือ blower จะสร้างเจ็ตไหลมาที่ทางออก ซึ่งระหว่างทางจะมีการฉีดอนุภาคติดตามการไหลไปผสมกับเจ็ตด้วย และเมื่อเจ็ตไหลออกมาแบบตั้งฉากกับพื้น ก็将与กับกระแสลมขวางที่บริเวณทดสอบ

##### 4.1.1 อุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมมีหน้าที่สร้างกระแสลมขวาง ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ 6 ส่วน คือ พัดลมแบบหอยโข่ง (centrifugal blower) , ท่ออ่อน (flexible duct), ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (diffuser), ห้องจัดปรับการไหล (setting chamber), ส่วนลดพื้นที่หน้าตัด (contraction) และ บริเวณทดสอบ (test section)

การทำงานของอุโมงค์ลมจะเริ่มจากการดูดอากาศในห้องผ่านพัดลมหอยโข่งแบบ backward curve airfoil blades ขนาด 15 kW ซึ่งมีขนาดทางออก 76 x 76 เซนติเมตร<sup>2</sup> ดังรูปที่ 4.3 สามารถควบคุมอัตราการไหลของกระแสลมขวางได้โดยการควบคุมความเร็วรอบด้วยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (ABB<sup>TM</sup> model ACS401002032, ขนาด 50 Hz, ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz) กระแสลมขวางที่ควบคุมอัตราการไหลแล้วจะไหลผ่านท่ออ่อนเพื่อลดแรงสั่นสะเทือน (flexible duct) และผ่านไปส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (diffuser) ซึ่งมีขนาดทางเข้าเท่ากับ 78 x 78 เซนติเมตร<sup>2</sup> ขนาดทางออก 100 x 100 เซนติเมตร<sup>2</sup> ยาว 74 เซนติเมตร<sup>2</sup> โดยที่ภายในส่วนขยายพื้นที่หน้าตัดประกอบไปด้วยแผ่นเหล็กเจาะรู (perforated plate) จำนวน 4 แผ่นโดยแต่ละแผ่นมีระยะห่างจากด้านเข้าเท่ากับ 15, 30, 45 และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ เพื่อลดความเร็ว เนื่องจากถ้ากระแสลมขวางผ่านห้องจัดปรับการไหล (setting chamber) ที่มี screen ติดตั้งอยู่ภายในด้วยอัตราการไหลสูงจะเกิดความสูญเสียมาก และเมื่อกระแสลมขวางผ่านเข้า

ห้องจัดปรับการไหล ขนาด 100 X 100 เซนติเมตร<sup>2</sup> ยาว 125 เซนติเมตร ภายในประกอบด้วย ตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh x SWG เท่ากับ 4 x 24 ที่ทางเข้าจนถึงชุดปรับทิศทางการไหล (honeycomb) ที่ทำจากท่อ PVC ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 15 มิลลิเมตร หน้า 1 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร วางเรียงอยู่เต็มหน้าตัดการไหล ถัดจาก honeycomb จะมีตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh x SWG เท่ากับ 16 x 18 x 31 จำนวน 7 แผ่น โดยแต่ละแผ่น วางห่างกัน 12.6 เซนติเมตร เพื่อปรับทิศทางการไหลให้มีความสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด ต่อจากนั้นกระแสลมขวางจะไหลผ่านส่วนลดพื้นที่หน้าตัด (diffuser) ซึ่งมีอัตราส่วน 4:1 โดยมี รูปร่างเส้นโค้งของส่วนลดพื้นที่หน้าตัดได้ออกแบบตามสมการ polynomial ดีกรี 4 มีจุดเปลี่ยน ความโค้งที่ระยะ 2/3 เท่าของความยาว 170 เซนติเมตร เพื่อให้กระแสลมขวางมีความเร็ว เพิ่มขึ้นจนมีความเร็วเท่ากับตอนเริ่มต้น และกระแสลมขวางจะผ่านไปบริเวณทดสอบ (test section) มีหน้าตัดขนาด 50 x 50 เซนติเมตร ยาว 240 เซนติเมตร ทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 15 มิลลิเมตร โดยบริเวณด้านข้างของบริเวณทดสอบสามารถเปิดปิดได้แบบหน้าต่างบานพับ และสำหรับชุดเจ็ตจะต่อเข้าทางผนังด้านล่างของบริเวณทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางของบริเวณ ทดสอบ และจุดศูนย์กลางของเจ็ตห่างจากขอบด้านหน้าของบริเวณทดสอบเท่ากับ 85 เซนติเมตร

#### 4.1.2 ชุดหัวเจ็ต

ชุดเจ็ตหลักทำหน้าที่สร้างเจ็ตหลักที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.57 มิลลิเมตร ซึ่ง ทำงานโดยใช้พัดลมความดันขนาด 10 แรงม้า (Elprom<sup>TM</sup>) ดังรูปที่ 4.4 จะดูดอากาศภายในห้อง สามารถควบคุมอัตราการไหลของเจ็ตหลักโดยการควบคุมความเร็วรอบด้วยเครื่องแปลงความถี่ ไฟฟ้า (ABB<sup>TM</sup> model ACS401002032, ขนาด 50 Hz, ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz) จากนั้นอากาศจะถูกส่งผ่านระบบท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ยาว 367 เซนติเมตร โดยมี Six-Jet Atomizer (TSI<sup>TM</sup> model 9306A) จำนวน 1 ตัว ที่บริเวณด้านบนของท่อขนาด 4 นิ้ว ห่างจากปลายท่อขนาด 4 นิ้ว วัดจากด้านอุโมงค์ลมเป็นระยะ 17 เซนติเมตร เพื่อฉีดอนุภาค glycerol solution ความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร จากนั้นท่อจะลดขนาดเป็น 2 นิ้ว และ 1 นิ้ว ตามลำดับ ซึ่งท่อขนาด 2 นิ้ว ยาว 15 เซนติเมตร และ 1 นิ้ว ยาว 42 เซนติเมตร จากนั้นจะผ่าน ท่อ stainless steel ขนาด 5/8 นิ้ว ยาว 97 เซนติเมตร ที่ต่อตั้งฉากกันแล้วไหลไปที่หัวเจ็ต

## 4.2 พิกัดการทดลอง

การทดลองนี้ได้กำหนดพิกัดการทดลองดังรูปที่ 4.5 ประกอบด้วยแกน x (streamwise) เป็นแกนตามทิศการไหลของกระแสลมขวาง , y (traverse) เป็นแกนตามทิศตั้งฉากกับกระแสลมขวางในแนวตั้ง และ z (spanwise) เป็นแกนตามทิศตั้งฉากกับกระแสลมขวางในแนวราบ โดยมีจุด Origin อยู่ที่จุดศูนย์กลางของปากทางออกของเจ็ต

## 4.3 ชุดเครื่องมือวัดความเร็ว Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV)

Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดสนามความเร็วแบบ 3 มิติ บนระนาบใดๆ แต่ไม่ได้วัดความเร็วของการไหลโดยตรง แต่วัดความเร็วของอนุภาคติดตามการไหลที่ใส่ไปในการไหลนั้นๆ ซึ่งหลักการที่ใช้วัดความเร็ว คือ

$$\vec{V} = \frac{\vec{S}}{t} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $\vec{V}$  คือความเร็วของอนุภาคติดตามการไหล ซึ่งเป็นตัวแทนของความเร็วของการไหล ณ ตำแหน่งนั้น

$\vec{S}$  คือระยะทางที่อนุภาคติดตามการไหลที่เคลื่อนที่ไป

$t$  คือระยะเวลาที่อนุภาคติดตามการไหลที่เคลื่อนที่ไป

ในการวัดแต่ละครั้ง laser จะถูกยิงออกมา 2 ครั้งในเวลาที่แตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งกล้องถ่ายรูปจะ synchronize กับการยิง laser จึงถ่ายภาพจังหวะเดียวกับการยิง laser เมื่อได้ภาพทั้ง 2 เวลา มา จะรู้ระยะทางที่กลุ่มอนุภาคเคลื่อนที่ไปในระยะเวลาที่กำหนด จึงทราบความเร็วที่จุดนั้นได้โดยการผ่านกระบวนการที่โปรแกรม Insight 4G ดังนี้

### 4.3.1 หลักการทำงาน

- Calibration

กระบวนการ calibration คือกระบวนการที่ทำการเปรียบเทียบระหว่าง object plane กับ image plane จากแผ่น calibration ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งโปรแกรมจะคำนวณระยะจริงบน object plane ต่อ 1 pixel ของ image plane และการถ่ายภาพใช้กล้อง 2 ตัว ภาพที่ได้จากทั้ง 2 กล้องจึงเลื่อนกันตามมุมของกล้อง ขั้นตอนนี้จึงใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อให้ได้ความเร็วในแกนที่ 3 ให้สนามความเร็วที่วัดได้เป็น 3 มิติอีกด้วย

- Pre – Processing

กระบวนการ pre – processing เป็นกระบวนการเตรียมภาพการทำการ processing ต่อไป โดยใช้วิธี image dewarping ซึ่งเป็นกระบวนการที่ปรับภาพที่ถ่ายได้จากทั้ง 2 กล้องที่แต่ละจุดยังเลื่อมกันอยู่ให้อยู่บนระนาบเดียวกัน และมีขนาดเท่ากันทั้งภาพ

- Processing

กระบวนการ processing คือกระบวนการวิเคราะห์หากลุ่มอนุภาค และระยะทางที่เคลื่อนที่ไป เพื่อที่จะได้เวกเตอร์ความเร็วออกมา

- Post - Processing

กระบวนการ post – processing คือกระบวนการที่จะนำเวกเตอร์ความเร็วของทั้ง 2 ภาพมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาว่าตำแหน่งใดที่มีเวกเตอร์ความเร็วเหมือนกัน แล้วจึงบันทึกเวกเตอร์นั้นเป็นไฟล์ที่มีเวกเตอร์ความเร็วของสนามความเร็วที่ทดลอง เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์จากโปรแกรม Matlab ต่อไป

#### 4.3.2 ชุด SPIV

- ชุดแหล่งกำเนิด Laser

ชุดให้กำเนิดแสงเลเซอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ ซึ่งจะมีหน้าที่กำเนิดแสงเลเซอร์ออกมาเป็นจุด Light arm และ Light sheet optics

เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์รุ่น YAG200-NWL\_532/266 (Solo 200XT) ดังรูปที่ 4.7 มี energy output per pulse เป็น 200 mJ ที่ความยาวคลื่นแสง 532 nm ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการทดลอง และ 30 mJ ที่ความยาวคลื่นแสง 266 nm ทำงานในช่วงอุณหภูมิ 10 – 30 องศาเซลเซียส ต้องการ input Power 1500 W

Light Arm รุ่น 610015 ดังรูปที่ 4.8 มีความยาวสูงสุด 1.8 เมตร น้ำหนัก 7 กิโลกรัม สามารถหมุนได้ 360 องศารอบข้อต่อ ซึ่ง light arm จะหักเหแสงที่ได้จากเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ส่งตรงไปยังจุดปลายของ light arm ออกมาเป็นแสงเลเซอร์แบบจุด

Light Sheet Optics รุ่น 610021-SIL ดังรูปที่ 4.9 มีหน้าที่เปลี่ยนแสงเลเซอร์จากปลาย light arm ให้เป็นระนาบของเลเซอร์ ซึ่งใช้งานในช่วงความยาวคลื่นแสง 240 nm – 500 nm ภายในประกอบด้วย spherical lenses และ cylindrical lenses

- ชุดอุปกรณ์การใส่อนุภาคติดตามการไหล

อุปกรณ์ที่ใช้ใส่อนุภาคติดตามการไหล คือ six-jet atomizer รุ่น 9306A ดังรูปที่ 4.10 มีหลักการทำงานคือใช้ความดันที่สร้างมาจาก compressor เพื่อสร้างเจ็ตความเร็วสูงให้ไหลผ่านรู orifice ขนาด 0.015 นิ้ว ความดันตกจากเจ็ตนี้จะดึงของเหลว ให้ไหลผ่านท่อขนาดเล็กของเหลวจะกลายเป็นหยดขนาดเล็กและเข้าสู่เจ็ตความเร็วสูงออกสู่ main Jet ในรูปของ aerosol ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ของเหลวเป็น สารละลาย glycerol ที่มีความเข้มข้นเชิงปริมาตรเป็น 5%

- ชุดอุปกรณ์การถ่ายภาพ

ชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 4 ชนิดคือ กล้องถ่ายรูป เลนส์กล้อง และขาตั้งกล้อง

กล้องถ่ายรูปทั้ง 2 ตัวที่ใช้เป็นกล้อง Powerview Plus11MP 630062 ดังรูปที่ 4.11 มีความละเอียด 11 MP มี Sensor ขนาด 4008 x 2672 pixels, 12 Bit ADC มี frame Rate = 4.8 FPS ขนาด CCD เท่ากับ 36.07 x 24.05 มิลลิเมตร dynamic range เท่ากับ 12 bit สามารถทำงานได้ในโหมด free run, trigger, frame straddling ทำงานในช่วงอุณหภูมิ 0-40 °c มี mounting ของเลนส์เป็น เลนส์ Nikon แบบ Fx

เลนส์กล้องถ่ายรูปที่ใช้มี 2 ชุด คือเลนส์ Tokina 100 mm. Micro f/2.8 mounting, Nikon ดังรูปที่ 4.12 และเลนส์ Nikon<sup>TM</sup> (model AF 50 mm f1.8D) ดังรูปที่ 4.13 เพื่อให้ครอบคลุมช่วงของการทดลอง เนื่องจากเจ็ตจะมีขนาดที่แตกต่างกันในแต่ละกรณี

ขาตั้งกล้องที่ใช้เป็น โครงเหล็กเชื่อมกัน วางอยู่บน traverse ซึ่งโครงเหล็กจะสามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกน  $x$  ได้บน traverse และฐานตั้งกล้องจะสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งแนวแกน  $z$  และแกน  $y$  ดังรูปที่ 4.14

การเก็บข้อมูลใช้ความถี่ 1.04 Hz ในการเก็บข้อมูล การประมวลผลหาเวกเตอร์ความเร็วใช้ โปรแกรม Insight 4G โดยที่มี interrogation area เริ่มต้นจาก 64 x 64 พิกเซล และสุดท้ายเป็น 32 x 32 พิกเซลซึ่งมีการ overlap 50% สุดท้ายจึงเหลือ 16 x 16 พิกเซล

#### 4.4 การวัดความเป็นระเบียบของกระแสลมขวาง

การวัดความเป็นระเบียบของกระแสลมขวางมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของกระแสลมขวางในอุโมงค์ลม โดยจะวัดความเร็วของกระแสลมขวางที่  $Re = 3,100$  (ความถี่ไฟฟ้า 8.6 Hz ซึ่งค่าค่าที่ใช้ในการทดลอง) ด้วย SPIV ที่ตำแหน่ง  $x = -5d$  และกำหนดให้ขอบเขตในการวัดให้มีขนาด 10 x 18 เซนติเมตร และฐานสูงจากพื้น 10 เซนติเมตร วัดความเร็วบนระนาบจำนวน 1,000 รูป

รูปที่ 4.15 แสดงการกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน streamwise ของกระแสลมขวาง มีความเร็วเฉลี่ยทั้งหมดของพื้นที่เป็น 4.0374 เมตรต่อวินาที ค่า 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.3358 เมตรต่อวินาที คิดเป็น 8.3% ซึ่งสามารถยอมรับได้ว่ามีความเป็นระเบียบเพียงพอสำหรับการทดลองนี้

#### 4.5 การวัดความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง

ความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางเป็นหนึ่งในสภาวะเริ่มต้นที่สำคัญของเจ็ตในกระแสลมขวาง ดังที่ Muppidi and Mahesh (2005a) ได้แสดงไว้ว่าความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางส่งผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ต โดยที่เมื่อความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ตสูงขึ้นดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2

การวัดความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง วัดด้วย pitot tube มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร มีระยะจากปลาย probe ถึงก้าน 50 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายใน ความดันที่วัดได้จาก pitot tube จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าด้วย pressure transducer ชนิด differential ยี่ห้อ SETRA™ (Model 264 - SN 1380235) มีช่วงวัดความดันขาเข้าที่  $\pm 0.05$  นิ้วน้ำ ช่วงแรงดันขาออก 0.05 – 5.05 Volts ความแม่นยำ  $\pm 1\%$  full scale output และถูกอ่านค่าด้วย digital multimeter ยี่ห้อ FLUKE (Model 19) ทำการวัดค่าที่ 3 ตำแหน่งคือ  $(x, z) = (-2d, -5d)$ ,  $(-2d, 0d)$  และ  $(-2d, +5d)$  ตำแหน่งการวัดในแนว traverse คือ

ตั้งแต่ 1 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าสูงจึงต้องวัดถี่ คือเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 มิลลิเมตร จนถึง 10 มิลลิเมตร หลังจากนั้นจึงเพิ่มขึ้นทีละ 1 มิลลิเมตร จนถึง 15 มิลลิเมตร และเพิ่มขึ้นทีละ 2.5 มิลลิเมตร จนถึง 20 มิลลิเมตร แต่ละจุดวัดค่า 5 ครั้ง

รูปที่ 4.16 แสดงร่างของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง (Crossflow boundary layer) ซึ่งแสดงค่าเป็น  $y/\delta_{95\%}$  โดยที่  $\delta_{95\%}$  เป็นความหนาของชั้นขอบเขตที่นิยามจากระยะ  $y$  ที่มีความเร็วเป็น 95% ของความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขต การทดลองนี้พบว่าชั้นขอบเขตทั้ง 3 ตำแหน่งมีลักษณะใกล้เคียงกับ Blasius solution มากกว่า 1/7 power law จึงแสดงว่าชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางมีการไหลที่มีคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกับ laminar มากกว่า turbulence และความหนาของชั้นขอบเขตมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 8 มิลลิเมตร รายละเอียดความหนาของชั้นขอบเขตแสดงในตารางที่ 4.1

#### 4.6 การวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ต

ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ต รูปร่างความเร็ว และความสมมาตรของเจ็ตเป็นสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตที่ควรรู้ก่อนการทดลอง เพื่อความแม่นยำในการทดลอง และเป็นการระบุถึงพารามิเตอร์ควบคุมในการทดลองอีกด้วย การทดลองทำได้โดยใช้ pitot tube ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร มีระยะจากปลาย probe ถึงก้าน 50 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน วัดความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ต (ไม่มีการใส่อนุภาคติดตามการไหลไปในการทดลองนี้) เป็นรูปเครื่องหมายบวกตามแนวแกน  $x$  และ  $z$  โดยตำแหน่งใกล้ขอบเจ็ตจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่มากจึงต้องมีการวัดอย่างละเอียด โดยที่ระยะจากจุดศูนย์กลางเจ็ตเท่ากับ 0 – 4 มิลลิเมตร จะวัดห่างกัน 1 มิลลิเมตร ตำแหน่ง 4 – 6 มิลลิเมตร จะวัดห่างกัน 0.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.17 ความดันที่วัดได้จาก pitot tube จะต่อสายยางไปที่ manometer ยี่ห้อ Dwyer™ (model 424) ที่มีช่วงความดัน 0 – 50 มิลลิเมตรน้ำ มีความละเอียดที่ 0.2 มิลลิเมตรน้ำ และช่วงความดัน 50 – 250 มิลลิเมตรน้ำ มีความละเอียดที่ 2 มิลลิเมตรน้ำ การวัดความเร็วในแต่ละจุดจะวัดทั้งหมด 5 ครั้ง การคำนวณความเร็วเฉลี่ยจะทำโดยการคูณความเร็วของแต่ละจุดกับเศษหนึ่งส่วนสี่ของพื้นที่วงแหวนแล้วนำมารวมกัน หาดด้วยพื้นที่เจ็ตทั้งหมด

รูปที่ 4.18 แสดงเปอร์เซ็นต์ความไม่สมมาตรของเจ็ตเมื่อเทียบกับความเร็วเฉลี่ยของแต่ละรัศมีกรณี  $r = 4, 8, 12$  พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของทุกกรณีในระยะจากจุดศูนย์กลางเจ็ต 0

–  $0.5 \text{ radius} / \text{radius max}$  จะมีค่าน้อยโดยที่ไม่เกิน 3 % ตามลำดับ ในขณะที่ช่วง  $0.5 - 1 \text{ radius} / \text{radius max}$  จะมีค่าค่อนข้างมาก โดยเฉพาะที่ความเร็วสูง ( $r$  สูง) ซึ่งมีค่าไม่เกิน 8%

รูปที่ 4.19 แสดงความเร็วเฉลี่ยของเจ็ดตามแนวแกน  $y$  ที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีมีต่างๆ ซึ่งความเร็วเฉลี่ยของเจ็ดบนพื้นที่หน้าตัดปากเจ็ด กรณี  $r=4$  มีค่าเท่ากับ 16.2 m/s,  $r=8$  มีค่าเท่ากับ 32.1 m/s และ  $r=12$  มีค่าเท่ากับ 49.3 m/s ซึ่งเมื่อนำความเร็วในแต่ละรัศมีมา fit curve ตามสมการ

$$\frac{\bar{v}}{V} = \left(1 - \frac{\text{radius}}{\text{radius max}}\right)^{1/n} \quad (4.2)$$

จะพบว่ากรณี  $r=4$  มีค่า  $n$  เท่ากับ 7.576,  $r=8$  มีค่า  $n$  เท่ากับ 7.614 และ  $r=12$  มีค่า  $n$  เท่ากับ 7.695 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า  $n$  มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 กรณี

นอกจากนี้ยังมีการนิยามพารามิเตอร์  $\gamma$  ซึ่งนิยามโดยความเร็วเฉลี่ยของเจ็ดหารด้วยความเร็วที่จุดศูนย์กลางเจ็ดดังสมการ

$$\gamma = \frac{\bar{V}}{V_{\text{Center}}} \quad (4.3)$$

เพื่อให้การทดลองครั้งต่อไปมีความสะดวกในการหาความเร็วเฉลี่ยเริ่มต้นของเจ็ดได้สะดวกขึ้น ซึ่งกรณี  $r=4$  ค่า  $\gamma$  จะมีค่าเท่ากับ 0.795,  $r=8$  ค่า  $\gamma$  จะมีค่าเท่ากับ 0.796 และ  $r=12$  ค่า  $\gamma$  จะมีค่าเท่ากับ 0.798



#### 4.7 การสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง SPIV กับ Pitot static tube

เพื่อความแม่นยำ และความถูกต้องจากการวัดค่าความเร็วของการไหล SPIV เนื่องจาก SPIV วัดความเร็วของอนุภาคที่ติดตามการไหล ไม่ใช่ความเร็วของการไหลโดยตรง จึงต้องทำการสอบเทียบว่าความเร็วที่วัดได้จากอุปกรณ์ SPIV เมื่อเทียบกับความเร็วที่วัดได้จาก pitot static tube เป็นเท่าใด แล้วจึงนำไปแก้ไข โดยความดันที่วัดได้จาก pitot static tube จะถูกแบ่งเป็น 3 ช่วงตามความถี่ของพัลสมความดันที่ใช้ขับเคลื่อน เพื่อให้มีความแม่นยำในการวัดความเร็วยิ่งขึ้น โดยแบ่งดังนี้ ช่วงที่ 1 คือ 2 – 8.6 Hz ช่วงที่ 2 คือ 10 – 25 Hz และช่วงที่ 3 คือ 30 – 40 Hz ซึ่งความดันที่วัดได้ในช่วงที่ 1 จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าด้วย pressure transducer ชนิด differential ยี่ห้อ SETRA™ (Model 264 - SN 1380235) มีช่วงวัดความดันขาเข้าที่  $\pm 0.05$  นิ้วน้ำ ช่วงแรงดันขาออก 0.05 – 5.05 Volts ความแม่นยำ  $\pm 1\%$  full scale output และถูกอ่านค่าด้วย digital multimeter ยี่ห้อ FLUKE (Model 19) ความดันที่วัดได้ในช่วงที่ 2 จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าด้วย pressure transducer ชนิด differential ยี่ห้อ SETRA™ (Model 264 - SN 1394237) มีช่วงวัดความดันขาเข้าที่  $\pm 0.5$  นิ้วน้ำ ช่วงแรงดันขาออก 0.05 – 5.05 Volts ความแม่นยำ  $\pm 1\%$  full scale output และถูกอ่านค่าด้วย digital multimeter ยี่ห้อ FLUKE (Model 19) ความดันที่วัดได้ในช่วงที่ 3 จะถูกวัดจาก manometer ที่มีช่วงความดัน 0 – 50 มิลลิเมตรน้ำ มีความละเอียดที่ 0.2 มิลลิเมตรน้ำ และช่วงความดัน 50 – 250 มิลลิเมตรน้ำ มีความละเอียดที่ 2 มิลลิเมตรน้ำ การสอบเทียบมีการปรับแต่งพารามิเตอร์ต่างๆ เล็กน้อย SPIV มีการติดตั้งตามหัวข้อ 4.2 แต่มีการเปลี่ยนเลนส์จาก Tokina™ (model 100 mm f2.8D Macro) เป็น Nikon™ (model AF 50 mm f1.8D) เพื่อขนาดของ field of view ให้กว้างขึ้น ใสนุภาคติดตามการไหลเฉพาะกระแสมขวาง ถ่ายภาพที่ระยะ  $-5d$  ในการประมวลผลหาเวกเตอร์ความเร็วใช้บริเวณ  $20 \times 20$  เซนติเมตร<sup>2</sup> หรือบริเวณของแผ่นคาร์ดิเบรต(บริเวณที่จะเป็นเจ็ต) โดยที่ใช้ interrogation area เริ่มต้นจาก  $64 \times 64$  พิกเซล เป็น  $128 \times 128$  พิกเซล และสุดท้ายจาก  $32 \times 32$  พิกเซลเป็น  $64 \times 64$  พิกเซล มีการ overlap 50%

##### 4.7.1 การสูญเสียของความเร็วที่ใช้ในการสอบเทียบ

เนื่องจากควรหาจำนวนภาพที่ต้องการใช้เพื่อที่จะให้ความเร็วที่วัดจาก SPIV สูญเสียก่อนที่จะเริ่มทำการสอบเทียบ เพราะหากจำนวนภาพน้อยเกินไปความเร็วที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อนมาก หรือจำนวนที่มากเกินไปจะเป็นการเสียเวลาในการประมวลผลมากเกินไป

การประเมินการลู่เข้านี้จะพิจารณาจาก 2 ส่วน คือ ความเร็วเฉลี่ย ( $\bar{V}$ ) และความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ย ( $e_v$ ) โดยมีนิยามดังนี้

$$\bar{V} = \frac{1}{N \times i \times j} \sum_{ij} \sum_{n=1}^N V_{ij,n} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $V_{ij,n}$  คือความเร็วที่ตำแหน่ง  $ij$  ที่ลำดับภาพที่  $n$  และ  $N$  คือจำนวนภาพ ในขณะที่ความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ย ( $e_v$ ) มีนิยามดังนี้

$$e_v = \frac{|\bar{V}(N_2) - \bar{V}(N_1)|}{\bar{V}(N_1)} \times 100\% \quad (4.5)$$

เมื่อ  $\bar{V}(N)$  คือความเร็วเฉลี่ยจากจำนวนภาพ  $N$  ซึ่งหาได้จากสมการ 4.1  $N_1$  คือจำนวนภาพที่จะใช้ประเมินการลู่เข้า  $N_2$  คือจำนวนภาพถัดไป

ทดลองที่ความเร็ว 5 m/s จำนวน 1,000 ภาพ หาความเร็วเฉลี่ย และความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ย โดยแบ่งเป็น 3 ช่วง คือช่วง 20 ภาพแรก จำนวน 10 ครั้ง โดยเพิ่มทีละ 2 ภาพ ช่วงที่ 2 จำนวน 10 ครั้ง โดยเพิ่มทีละ 10 ภาพ และช่วงที่ 3 จำนวน 10 ครั้ง โดยเพิ่มทีละ 100 ภาพ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 พบว่าที่จำนวนภาพที่น้อยกว่า 100 ภาพ ความเร็วเฉลี่ยมีความผันผวนในระดับหนึ่ง ในขณะที่ตั้งแต่ 100 ภาพขึ้นไป ความเร็วเฉลี่ยค่อนข้างคงที่ที่  $4.235 \pm 0.05$  m/s ดังนั้นการสอบเทียบจะใช้จำนวนภาพ 100 ภาพ เพราะประเมินว่าความเร็วเฉลี่ยลู่เข้าแล้ว

#### 4.7.2 การสอบเทียบ

การสอบเทียบจะอ้างอิงจากความถี่ที่ปรับได้ของ blower ของกระแสลมขวางทั้งหมด 16 ความถี่ คือ 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 6, 7, 8, 8.6, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 Hz ซึ่งครอบคลุมช่วงความเร็ว 0.537 – 19.624 m/s โดยวัดจาก pitot static tube แต่ละความถี่จะทดลองเก็บภาพจำนวน 100 ภาพซึ่งลู่เข้าแล้วเป็นจำนวน 5 ครั้ง

ผลการสอบเทียบแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าสามารถแบ่งช่วงความเร็วได้เป็น 2 ช่วง คือช่วงความเร็วต่ำ และช่วงความเร็วสูง โดยที่ช่วงความเร็วต่ำ ความเร็วที่วัดได้จาก SPIV จะมีความเร็วที่มากกว่าความเร็วที่วัดได้จาก pitot static tube ในขณะที่ช่วงความเร็วสูง ความเร็วที่วัดได้จาก SPIV จะมีความเร็วที่น้อยกว่าความเร็วที่วัดได้จาก pitot static tube

สำหรับช่วงความเร็วต่ำจะ fit curve ด้วยสมการพาราโบลากำลัง 2 ในขณะที่ช่วงความเร็วสูงจะ fit curve ด้วยสมการเส้นตรงดังนี้

$$V_{Pitot\ static\ tube} = -0.2092 \times (V_{SPIV})^2 + 2.2225 \times V_{SPIV} - 1.3383 \quad (4.6)$$

$$V_{Pitot\ static\ tube} = 1.0288 \times V_{SPIV} + 0.1636 \quad (4.7)$$

สมการการสอบเทียบที่ได้จะนำไปแก้ไขความเร็วที่วัดจาก SPIV ให้เทียบเท่ากับความเร็วที่วัดได้จาก pitot static tube การแก้ไขทำได้โดยนำความเร็วที่วัดได้จาก SPIV ณ ขณะใดๆ เข้าสู่สมการการสอบเทียบ 4.6 และ 4.7 โดยที่ช่วงความเร็วสูง คือความเร็วที่มากกว่า 3.833 เมตรต่อวินาทีจะใช้สมการ 4.6 และช่วงความเร็วต่ำคือความเร็วที่ต่ำกว่า 3.833 เมตรต่อวินาที แต่มากกว่า 0.6408 เมตรต่อวินาที จะใช้สมการ 4.7 ในขณะที่ช่วงความเร็วที่ต่ำกว่า 0.6408 เมตรต่อวินาที หรือความเร็วติดลบนั้น เนื่องจากไม่สามารถที่จะทำการสอบเทียบได้อย่างแม่นยำได้ จึงเลือกใช้ค่าความเร็วที่วัดได้จาก SPIV โดยไม่ต้องสอบเทียบ

#### 4.8 สรุปเงื่อนไขการทดลอง

- ความเร็วประสิทธิผล  $r = 4, 8, 12$
- ความเร็วของเจ็ตหลักกรณี  $r = 4, V_j = 16.2\ m/s$
- ความเร็วของเจ็ตหลักกรณี  $r = 8, V_j = 32.1\ m/s$
- ความเร็วของเจ็ตหลักกรณี  $r = 12, V_j = 49.3\ m/s$
- ความเร็วของกระแสลมขวาง  $V_{cf} = 4.03\ m/s$
- เรย์โนลส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง  $Re_{cf} = 3,100$
- Initial jet velocity profile เป็นแบบ Fully developed

โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแต่ละกรณี แสดงไว้ในภาคผนวก ค

## บทที่ 5

### ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ

เนื่องจากการทดลองนี้ใช้เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเข้าไปในเจ็ตเพียงอย่างเดียวไม่ใส่ในกระแสลมขวาง SPIV จึงจะพบโครงสร้าง และความเร็วเฉพาะส่วนผสมของเจ็ตเท่านั้น (jet fluid mixture) จึงนำเสนอความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ ซึ่งช่วยให้สามารถระบุได้ว่าที่บริเวณใด ๆ มีโอกาสที่จะพบเจ็ตได้มากน้อยเพียงใด และสามารถใช้เป็นนิยามของขอบเจ็ตได้อีกด้วย ซึ่งความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ นิยามได้จาก

$$\phi_{ij} = \frac{N_{v,ij}}{N} \quad (5.1)$$

โดยที่  $\phi_{ij}$  คือ ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุด  $(i, j)$

$N_{v,ij}$  คือ ระยะเวลาที่พบเจ็ตที่จุด  $(i, j)$

$N$  คือ ระยะเวลาทั้งหมด

นอกจากนี้จากความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ ทำให้สามารถหาความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางที่จุดใด ๆ ได้จาก

$$\phi_{crossflow} = 1 - \phi_{jet} \quad (5.2)$$

เนื่องจากความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตต่ำแสดงถึงความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบกระแสลมขวางสูง เพราะต่างก็เป็นส่วนประกอบซึ่งกันและกัน

รูปที่ 5.1 แสดงการกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ โดยมีความน่าจะเป็นในช่วง 0 ถึง 0.95 (ช่วงขอบเขตของแถบสี) พบว่าที่  $x/rd = 0.25$  กรณี  $r = 4$  ขอบเขตของการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมีลักษณะคล้ายวงรีที่มีส่วนหัวเข้าไปจากด้านล่าง มีค่ามากที่สุดตรงกลางเจ็ต และลดลงอย่างต่อเนื่องจนเข้าใกล้ 0 ที่ขอบเจ็ตและมีค่าเป็น 0 ในบริเวณที่มีแต่กระแสลมขวางเท่านั้น แต่ไม่มีจุดใดเลยที่มีค่าเป็น 1 แสดงให้เห็นว่าไม่มีจุดใดเลยในเจ็ตที่มีโอกาสพบเจ็ตได้ตลอดเวลา เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตจะมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น

เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream ที่  $x/rd = 1.5$  กรณี  $r = 4$  พบว่าขอบเขตของการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมีลักษณะคล้ายวงกลม โดยมีส่วนว่าเข้าไปจากทางด้านล่าง เจ็ตสูงขึ้น รวมทั้งขยายตัวใหญ่ขึ้น ซึ่งมีลักษณะคล้ายกันในทุกกรณี เว้นแต่เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นเจ็ตจะสูงขึ้นอย่างมาก และมีขนาดโดยรวมเล็กลงเล็กน้อย

จากข้อมูลในการกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ ทำให้สามารถนิยามพื้นที่ของเจ็ตที่เกี่ยวข้องกับความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตสะสมได้ คือ บริเวณที่เป็นพื้นที่ของเจ็ต ( $R_\phi$ ) ที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตสะสมที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\phi$

$$R_\phi = \text{บริเวณของเจ็ตที่} \quad 0 < \phi_j \leq \phi \quad (5.3)$$

หรือที่แสดงไว้ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งจะให้ตัวแปลแทนพื้นที่ดังกล่าวนี้เป็น  $A_\phi$  ซึ่งถ้าดูจากรูปที่ 5.1 จะเห็นว่าบริเวณ  $R_\phi$  จะมีรูปร่างเป็นวงแหวนที่มีขอบนอกเป็นขอบของเจ็ตที่มีค่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตเท่ากับ 0 และมีขอบในเป็นเส้น contour ที่มีค่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตเท่ากับ  $\phi$  และหากนิยามพื้นที่ทั้งหมดของเจ็ตเป็น  $A_j$  จะได้ว่า  $A_j = A_{\phi=1}$  อย่างไรก็ตาม ค่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่ระนาบใดๆอาจมีค่าไม่ถึง 1 หรือไม่มีจุดใดที่จะพบเจ็ตตลอดเวลา กระนั้น  $A_j$  จะยังคงเท่ากับ  $A_{\phi=1}$  เพราะ  $R_{\phi=\max} = R_{\phi=1}$

## บทที่ 6

### การประเมินการลู่เข้า

เนื่องจากการทดลองนี้ใช้ SPIV ในการหาสนามความเร็วของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ระนาบตัดใดๆ แต่การไหลในการทดลองนี้เป็นแบบ turbulent ซึ่งมีความปั่นป่วนมาก เจ็ตที่พบในระนาบที่ทำการทดลอง ณ เวลาใดๆนั้น จะมีรูปร่าง และความเร็วที่แตกต่างกัน จึงต้องใช้หลักการทางสถิติเข้าช่วย บทนี้จะนำเสนอการลู่เข้าของค่าปริมาณทางกายภาพต่างๆ ที่หาได้จาก SPIV เมื่อสนามความเร็วจะหาได้จาก สนามความเร็วที่เฉลี่ยด้วยเวลา (time-mean velocity field) ซึ่งนิยามจากการนำสนามความเร็วที่เวลาขณะใดขณะหนึ่ง (instantaneous velocity field) จำนวน  $N$  สนาม จากภาพถ่าย  $N$  รูป มาเฉลี่ยด้วยเวลา จึงจำเป็นที่จะต้องประมาณหาจำนวน  $N$  นี้ ซึ่งถ้า  $N$  มีค่ามากจะทำให้ค่าปริมาณทางกายภาพที่วัดได้จะมีความคลาดเคลื่อนน้อย แต่จะต้องใช้เวลาในการประมวลผลที่มากขึ้นตาม ดังนั้นการหาค่า  $N$  ที่มากพอที่จะให้ความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้จึงมีความจำเป็น เพื่อลดระยะเวลาในการประมวลผล

#### 6.1 การประเมินการลู่เข้าของความเร็วตามแนวแกน Streamwise

สนามความเร็วเป็นปริมาณแรกที่วัดได้จาก SPIV โดยตรง ซึ่งสามารถนำไปหาปริมาณทางกายภาพอื่นๆได้ต่อไป และความเร็วตามแนวแกน streamwise เป็นปริมาณที่ใช้ในการประเมินค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมโดยตรง ดังนั้นการประเมินการลู่เข้าของความเร็วตามแนวแกน streamwise จึงเป็นสิ่งแรกๆที่ควรจะทำเมื่อจะประเมินหาการลู่เข้าของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม การลู่เข้าของความเร็วตามแนวแกน streamwise สามารถพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วตามแนวแกน streamwise ต่อจุด ( $e_{v,x}$ ) ซึ่งนิยามได้จาก

$$e_{v,x} = \frac{\sum_{ij} \left| \frac{\overline{V_{x,ij}}(N_2)|_{\phi} - \overline{V_{x,ij}}(N_1)|_{\phi}}{\overline{V_{x,ij}}(N_2)|_{\phi}} \right|}{M(N_2)|_{\phi}} \times 100\% \quad (6.1)$$

เมื่อ  $\phi$  คือ ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ต

$\bar{V}_{x,ij}(N)|_{\phi}$  คือ ความเร็วตามแนวแกน streamwise ณ ตำแหน่ง  $ij$  ที่อยู่ในบริเวณ  $R_{\phi}$  เมื่อใช้สนามความเร็ว  $N$  สนาม

$M(N)|_{\phi}$  คือ จำนวนจุดทั้งหมดที่มีความเร็วเจ็ดไม่เป็นศูนย์ ที่อยู่ในบริเวณ  $R_{\phi}$  เมื่อใช้สนามความเร็ว  $N$  สนาม

โดยที่  $\bar{V}_{x,ij}$  คำนวณได้จาก

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

เมื่อ  $V_{x,ij,n}$  คือความเร็วตามแนวแกน streamwise ที่ตำแหน่ง  $ij$  ที่สนามความเร็วรูปที่  $n$  (เวลาที่  $n$ ) และ  $N$  คือสนามความเร็วทั้งหมดภายในเวลาที่เก็บภาพ โดยที่  $N_1$  คือจำนวนสนามความเร็วเริ่มต้นที่ใช้ในการประเมินการลู่เข้า และ  $N_2$  คือจำนวนสนามความเร็วถัดไปที่ใช้ในการประเมินการลู่เข้า โดยการคำนวณจะเริ่มใช้  $N_1$  เท่ากับ 200 สนามความเร็ว โดยมี  $\Delta N_1 = N_2 - N_1 = 200$  จนถึง 4,000 สนามความเร็ว

รูปที่ 6.1 แสดงความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยต่อจุด ( $e_{v,x}$ ) ที่แต่ละจำนวนรูปกรณิ  $r = 4$  ที่ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ ( $\phi$ ) พบว่าทุกระนาบ  $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5$  บริเวณ  $0 \leq \phi \leq 0.01$  จะมีค่า  $e_{v,x}$  น้อยที่สุด ในขณะที่บริเวณที่มีค่าความน่าจะเป็นสูงขึ้น จะมีค่า  $e_{v,x}$  เพิ่มขึ้น จนเมื่อถึงบริเวณ  $\phi \geq 0.5$  ค่า  $e_v$  จะเริ่มคงที่ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้สนามความเร็วตั้งแต่ 1,600 ค่า  $e_{v,x}$  จะเริ่มลู่เข้า เมื่อใช้สนามความเร็ว 4,000 สนามความเร็ว  $e_{v,x}$  ที่ทุกระนาบและช่วงความน่าจะเป็นจะลู่เข้าซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.2%

รูปที่ 6.2 แสดงความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยต่อจุด ( $e_{v,x}$ ) ที่แต่ละจำนวนรูปกรณิ  $r = 8$  ที่ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ ( $\phi$ ) พบว่าทุกระนาบ  $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5$  บริเวณ  $0 \leq \phi \leq 0.01$  จะมีค่า  $e_{v,x}$  น้อยที่สุด ในขณะที่บริเวณที่มีค่าความน่าจะเป็นสูงขึ้น จะมีค่า  $e_{v,x}$  เพิ่มขึ้น จนเมื่อถึงบริเวณ  $\phi \geq 0.5$  ค่า  $e_v$  จะเริ่มคงที่ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้สนามความเร็วตั้งแต่ 2,400 ค่า  $e_{v,x}$  จะเริ่มลู่เข้า เมื่อใช้สนามความเร็ว 4,000 สนามความเร็ว  $e_{v,x}$  ที่ทุกระนาบและช่วงความน่าจะเป็นจะลู่เข้าซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.4%

รูปที่ 6.3 แสดงความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยต่อจุด ( $e_{v,x}$ ) ที่แต่ละจำนวนรูปกรณิ  $r=12$  ที่ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ ( $\phi$ ) พบว่าทุกระนาบ  $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5$  บริเวณ  $0 \leq \phi \leq 0.01$  จะมีค่า  $e_{v,x}$  น้อยที่สุด ในขณะที่บริเวณที่มีค่าความน่าจะเป็นสูงขึ้น จะมีค่า  $e_{v,x}$  เพิ่มขึ้น จนเมื่อถึงบริเวณ  $\phi \geq 0.5$  ค่า  $e_{v,x}$  จะเริ่มคงที่ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้สนามความเร็วตั้งแต่ 2,400 ค่า  $e_{v,x}$  จะเริ่มลู่เข้า เมื่อใช้สนามความเร็ว 4,000 สนามความเร็ว  $e_{v,x}$  ที่ทุกระนาบและช่วงความน่าจะเป็นจะลู่เข้าซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.4%

## 6.2 การประเมินการลู่เข้าของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $E$ ) เป็นปริมาณที่สามารถบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการผสมของการไหลในแต่ละรูปแบบที่เกี่ยวข้องกับเจ็ตในกระแสลมขวางได้ และเป็นปริมาณที่เป็นจุดประสงค์สำคัญหลักของหัวข้อการทดลองนี้ การประเมินการลู่เข้าของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $E$ ) เพื่อตรวจสอบถึงความแม่นยำในการคำนวณค่าดังกล่าวจึงเป็นสิ่งสำคัญ การประเมินการลู่เข้าของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจะพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของค่าเหนี่ยวนำการผสม ( $e_E$ ) ซึ่งนิยามเป็น

$$e_E = \left| \frac{E(N_2) - E(N_1)}{E(N_1)} \right| \times 100\% \quad (6.3)$$

เมื่อ  $E(N)$  คือ ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร เมื่อใช้สนามความเร็ว  $N$  สนามโดยที่  $N_1$  คือจำนวนสนามความเร็วที่ใช้ประเมินอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเริ่มต้นที่ใช้ในการประเมินการลู่เข้า และ  $N_2$  คือจำนวนสนามความเร็วที่ใช้ประเมินอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรถัดไปที่ใช้ในการประเมินการลู่เข้าโดยที่  $N_1$  คือจำนวนสนามความเร็วเริ่มต้นที่ใช้ในการประเมินการลู่เข้า และ  $N_2$  คือจำนวนสนามความเร็วถัดไปที่ใช้ในการประเมินการลู่เข้า โดยการคำนวณจะเริ่มใช้  $N_1$  เท่ากับ 200 สนามความเร็ว โดยมี  $\Delta N_1 = N_2 - N_1 = 200$  จนถึง 4,000 สนามความเร็ว



รูปที่ 6.4 แสดงความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $e_E$ ) ที่แต่ละจำนวนรูป กรณี  $r = 4$  ที่แต่ละตำแหน่ง  $x/rd$  พบว่าทุกระนาบ  $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5$  ทุกช่วงบริเวณบริเวณ  $\phi$  ที่จำนวน 4,000 รูปจะมีค่า  $e_E$  น้อยกว่าหรือใกล้เคียง 1% ยกเว้นที่ระนาบ  $x/rd = 0.5$  บริเวณ  $\phi = 0.01$  มีค่า  $e_E$  ประมาณ 2%

รูปที่ 6.5 แสดงความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $e_E$ ) ที่แต่ละจำนวนรูป กรณี  $r = 8$  ที่แต่ละตำแหน่ง  $x/rd$  พบว่าทุกระนาบ  $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5$  ทุกช่วงบริเวณบริเวณ  $\phi$  ที่จำนวน 4,000 รูปจะมีค่า  $e_E$  น้อยกว่าหรือใกล้เคียง 1% ยกเว้นที่ระนาบ  $x/rd = 0.25$  บริเวณ  $\phi = 0.01$  มีค่า  $e_E$  น้อยกว่า 2%

รูปที่ 6.6 แสดงความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $e_E$ ) ที่แต่ละจำนวนรูป กรณี  $r = 12$  ที่แต่ละตำแหน่ง  $x/rd$  พบว่าทุกระนาบ  $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5$  ทุกช่วงบริเวณบริเวณ  $\phi$  ที่จำนวน 4,000 รูปจะมีค่า  $e_E$  น้อยกว่าหรือใกล้เคียง 1% ยกเว้นที่ระนาบ  $x/rd = 1.5$  บริเวณ  $\phi = 0.01$  มีค่า  $e_E$  น้อยกว่า 2%

รูปที่ 6.7 แสดงความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $e_E$ ) ที่แต่ละจำนวนรูป กรณี  $r = 4, 8, 12$  และ  $\phi = 1$  (บริเวณเจ็ดทั้งหมด) ที่แต่ละตำแหน่ง  $x/rd$  พบว่าทุกระนาบ  $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5$  ที่จำนวน 4,000 รูปจะมีค่า  $e_E$  น้อยกว่าหรือใกล้เคียง 0.2% ยกเว้นที่ระนาบ  $x/rd = 1.5$  กรณี  $r = 8$  มีค่า  $e_E$  น้อยกว่า 0.4%

สรุปจากการประเมินการลู่เข้าของความเร็วตามแนวแกน streamwise ( $\bar{V}_x$ ) และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $E$ ) พบว่าการใช้สนามความเร็วทั้งหมด 4,000 สนาม ในการทดลอง มีความเพียงพอต่อความถูกต้อง และความแม่นยำอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยมี  $e_E < 0.4\%$  ทุกกรณี

## บทที่ 7

### ผลการทดลอง

#### 7.1 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อการกระจายตัวของปริมาณเฉลี่ยไร้มิติและโครงสร้างของเจ็ต

##### 7.1.1 การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง

รูปที่ 7.1 แสดงการกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง ( $V/u_{cf}$ ) ที่  $x/rd = 0.25$  ซึ่งอัตราเร็ว ณ ขณะใดๆ คำนวณจาก

$$V_{ins}^2 = \sqrt{V_{x,ins}^2 + V_{y,ins}^2 + V_{z,ins}^2} \quad (7.1)$$

โดยที่  $V_{ins}$  คือ อัตราเร็ว ณ ขณะใดๆ

$V_{x,ins}$  คือ ความเร็วตามแนวแกน streamwise ณ ขณะใดๆ

$V_{y,ins}$  คือ ความเร็วตามแนวแกน traverse ณ ขณะใดๆ

$V_{z,ins}$  คือ ความเร็วตามแนวแกน spanwise ณ ขณะใดๆ

แล้วจึงนำอัตราเร็ว ณ ขณะใดๆ มาหาค่าเฉลี่ยเป็นอัตราเร็วเฉลี่ย พบว่า กรณี  $r = 4$  ขอบเขตของเจ็ตมีลักษณะคล้ายวงรีที่ขอบด้านล่างถูกตัด มีโครงสร้างภายในเป็นลักษณะพระจันทร์เสี้ยวคว่ำ โดยที่มีลำดับชั้นของอัตราเร็วที่มากที่สุดอยู่ที่ตรงกลางเจ็ต และลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าใกล้ 0 ที่ขอบนอกสุด มี local peak 2 ที่คือบริเวณตรงกลางบน (top local peak) และตรงกลางล่าง (bottom local peak) โดยที่ top local peak จะมีค่าสูงสุด ซึ่งมากกว่ากระแสลมขวาง 3 เท่า แต่ bottom local peak มีค่าเข้าใกล้กระแสลมขวาง กรณี  $r = 8$  พบว่าเจ็ตมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น บริเวณด้านล่างมีส่วนเว้าเข้าไปในเจ็ตมี local peak เพียง 1 บริเวณคือ top local peak ที่มีค่าสูงสุดมากกว่ากระแสลมขวาง 3 เท่า ซึ่งมี magnitude เช่นเดียวกับ  $r = 4$  สำหรับกรณี  $r = 12$  พบว่าเจ็ตมีโครงสร้างโดยรวมคล้ายกับกรณี  $r = 8$  มี local peak เพียง 1 บริเวณคือ top local peak ที่มีอัตราเร็วสูงสุด ซึ่งมากกว่ากระแสลมขวาง 3.5 เท่า

รูปที่ 7.2 แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง ( $V/u_{cf}$ ) พบว่าเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream ทุกกรณีขอบเขตของเจ็ตจะมีลักษณะกลมขึ้น ในขณะที่เดียวกันเจ็ตจะสูงขึ้น และขยายตัวออก ส่งผลให้การกระจายตัวของอัตราเร็วกระจายออกไปตามเจ็ต อัตราเร็วสูงสุดที่ top local peak จึงลดลง แต่โครงสร้างภายในจะยังคงเดิม โดยที่กรณี  $r=4$  bottom local peak จะหายไป เพราะบริเวณรอบ bottom local peak อัตราเร็วจะสลายตัวจนเท่ากับกระแสลมขวาง เมื่อพัฒนาไปถึง  $x/rd=1.5$  ทุกกรณีโครงสร้างไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นเจ็ตมีขนาดโดยรวมเล็กลงเล็กน้อย

สรุปผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อการกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง พบว่าที่บริเวณ near field กรณี  $r=4$  มีขอบเขตของเจ็ตคล้ายวงรี โครงสร้างภายในเป็นลักษณะพระจันทร์เสี้ยวคว่ำ มี local peak 2 ที่คือ top local peak ที่มีค่าสูงสุด และ bottom local peak ที่มีค่าใกล้ 0 แต่สำหรับกรณี  $r=12$  โครงสร้างมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น และมี local peak เพียง 1 บริเวณคือ top local peak ที่มีค่าสูงสุดที่สูงกว่ากรณี  $r=4$  ในขณะที่กรณี  $r=8$  จะมีค่า local peak ที่ใกล้เคียงกับกรณี  $r=4$  แต่มีรูปร่างโครงสร้างที่คล้ายกับกรณี  $r=12$  เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่บริเวณ far field ผลของ  $r$  มีผลต่อโครงสร้างการกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยน้อยทั้งในแง่รูปร่างและค่า local peak จะเห็นได้ว่าช่วงบริเวณ near field เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นโครงสร้างของอัตราเร็วเฉลี่ยมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น อีกทั้งโครงสร้างของกรณี  $r=4$  มีรูปร่างที่แตกต่างจากกรณี  $r=8$  และ 12 อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่กรณี  $r=8$  และ 12 มีโครงสร้างที่คล้ายกัน จึงชี้แนะว่าในช่วง near field กรณี  $r=4$  เจ็ตมีรูปแบบการไหลที่แตกต่างจากกรณี  $r=8$  และ 12 ในขณะที่ far field ผลของ  $r$  มีผลลดลง

### 7.1.2 การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง

รูปที่ 7.3 แสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x/u_{cf}$ ) ที่  $x/rd = 0.25$  พบว่า กรณี  $r = 4$  โครงสร้างของเจ็ตมีลักษณะคล้ายเกือกม้า โดยที่มีลำดับชั้นของความเร็วที่มากที่สุดที่เกือกม้าชั้นในสุด มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยที่ยังคงรูปร่างไว้จนมีค่าใกล้ 0 ที่ขอบของเกือกม้า และมีค่าติดลบบริเวณที่เกือกม้าล้อมรอบ มี local peak 3 บริเวณ โดยแบ่งเป็น positive local peak 2 บริเวณ และ negative local peak 1 บริเวณ โดยที่ positive local peak 2 บริเวณ คือ บริเวณตรงซ้ายล่าง (left bottom positive local peak) และบริเวณตรงขวาล่าง (right bottom positive local peak) เป็น local peak ที่มีค่าสูงสุด ซึ่งมากกว่ากระแสลมขวาง 1.9 เท่า ในขณะที่มี negative local peak อยู่ที่ตรงกลางล่าง (bottom negative local peak) ซึ่งมีค่าติดลบ กรณี  $r = 8$  พบว่าเจ็ตมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น มี local peak 2 บริเวณ คือ top positive local peak ซึ่งมีค่ามากกว่ากระแสลมขวาง 1.9 เท่า และมี magnitude เช่นเดียวกับ  $r = 4$  และ bottom negative local peak ที่ตรงกลางล่างเหมือนกรณี  $r = 4$  สำหรับกรณี  $r = 12$  พบว่าเจ็ตมีโครงสร้างโดยรวมคล้ายกับกรณี  $r = 8$  มี top positive local peak ที่มีค่ามากกว่ากระแสลมขวาง 1.9 เท่า และมี magnitude เช่นเดียวกับ  $r = 4$  และ 8 อีกทั้งยังพบ bottom negative local peak ที่ตรงกลางล่างเหมือนกรณี  $r = 4$  และ 8 เช่นกัน

รูปที่ 7.4 แสดงการการพัฒนาตัวของกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x/u_{cf}$ ) พบว่าเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream ทุกกรณีขอบเขตของเจ็ตจะมีลักษณะกลมขึ้น ในขณะที่เดียวกันเจ็ตจะสูงขึ้น และขยายตัวออก ส่งผลให้การกระจายตัวของความเร็วกระจายออกไปตามเจ็ต ความเร็วสูงสุดที่ positive local peak จึงลดลง โดยที่กรณี  $r = 4$  ความเร็วจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับกรณีที่  $r$  สูงกว่า นอกจากนี้ negative local peak จะค่อยๆหายไป เพราะบริเวณรอบ negative local peak ความเร็วจะสลายตัวจนเท่ากับกระแสลมขวาง อีกทั้งบริเวณที่มีความเร็วติดลบจะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้ 0 และเพิ่มขึ้นจนเท่ากับกระแสลมขวาง เมื่อพัฒนาไปถึง  $x/rd = 1.5$  ทุกกรณีโครงสร้างไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นเจ็ตมีขนาดโดยรวมเล็กลงเล็กน้อย

สรุปผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง พบว่าที่บริเวณ near field กรณี  $r = 4$  โครงสร้างของเจ็ทมีลักษณะคล้ายเกือกม้า มี local peak 3 บริเวณ คือ left bottom positive local peak, right bottom positive local peak และ bottom negative local peak สำหรับกรณี  $r = 8$  และ 12 โครงสร้างมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น มี local peak เพียง 2 บริเวณคือ top local positive peak และ bottom negative local peak อย่างไรก็ตามทั้ง 3 กรณีมีค่าของ positive local peak ที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเจ็ทพัฒนาตัวไปที่บริเวณ far field ผลของ  $r$  มีผลต่อโครงสร้างการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise น้อยทั้งในแง่รูปร่างและค่า local peak จะเห็นได้ว่าช่วงบริเวณ near field เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นโครงสร้างของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น อีกทั้งโครงสร้างของกรณี  $r = 4$  มีรูปร่างที่แตกต่างจากกรณี  $r = 8$  และ 12 อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่กรณี  $r = 8$  และ 12 มีโครงสร้างที่คล้ายกัน จึงชี้แนะว่าในช่วง near field กรณี  $r = 4$  เจ็ทมีรูปแบบการไหลที่แตกต่างจากกรณี  $r = 8$  และ 12 ในขณะที่ far field ผลของ  $r$  มีผลลดลง

### 7.1.3 การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสลมขวาง

รูปที่ 7.5 แสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสลมขวาง ( $V_y / u_{cf}$ ) ที่  $x/rd = 0.25$  พบว่า กรณี  $r = 4$  ขอบเขตของเจ็ทมีลักษณะคล้ายรูปไข่โดยที่ด้านบนจะกว้างกว่า และทั้ง 2 ข้างมีส่วนที่ความเร็วมีค่าเป็นลบอยู่ โครงสร้างภายในมีลักษณะคล้ายดอกเห็ด 2 ลูกเรียงกันในแนวตั้ง มี local peak 4 บริเวณ โดยแบ่งเป็น positive local peak 2 บริเวณ และ negative local peak 2 บริเวณ โดยที่ positive local peak 2 บริเวณ คือ บริเวณตรงกลางบน (top positive local peak) และตรงกลางล่าง (bottom positive local peak) และมีลำดับชั้นของความเร็วที่มากที่สุดที่ทั้ง 2 positive local peak และลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยที่ยังคงรูปร่างไว้จนมีค่าใกล้ 0 ที่ขอบนอกสุด top positive local peak มีความเร็ว 2.1 เท่าของกระแสลมขวาง และ bottom positive local peak มีความเร็ว 1.7 เท่าของกระแสลมขวาง โดยที่ top positive local peak จะมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงมากกว่า bottom positive local peak นอกจากนี้ยังมี negative local peak 2 บริเวณ อยู่ที่บริเวณซ้าย (left negative local peak) และขวา (right negative local peak) ซึ่งมีค่าติดลบ กรณี  $r = 8$  พบว่าเจ็ทมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น มี local peak เพียง 3 บริเวณ โดยแบ่งเป็น positive local peak 1 บริเวณ และ negative local peak 2 บริเวณ โดยที่ positive local peak คือ top positive local peak ที่มีความเร็ว 2.1 เท่าของกระแสลมขวาง ซึ่งมี magnitude เช่นเดียวกับ  $r = 4$  และมี negative local peak 2 บริเวณ อยู่ที่บริเวณซ้าย (left negative local peak) และขวา (right negative local peak) ซึ่งมีค่าติดลบเหมือนกับกรณี  $r = 4$  สำหรับกรณี  $r = 12$  พบว่าเจ็ทมีโครงสร้างโดยรวมคล้ายกับกรณี  $r = 8$  โดยที่ top positive local peak มีความเร็ว 2.8 เท่าของกระแสลมขวาง

รูปที่ 7.6 แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสลมขวาง ( $V_y / u_{cf}$ ) พบว่าเมื่อเจ็ทพัฒนาตัวไปตาม downstream ทุกกรณีเจ็ทจะมีลักษณะที่สูงขึ้น และกว้างขึ้นที่ด้านบน แต่เจ็ทจะมีการคอดตัวตรงกลาง เพราะ negative local peak บริเวณ 2 ข้างตรงกลางเด่นชัดขึ้น ในขณะที่ top positive local peak จะเสื่อมสลายลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับ bottom positive local peak เมื่อเจ็ทพัฒนาไปถึง  $x/rd = 1.5$  ทุกกรณีโครงสร้างไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นเจ็ทมีขนาดโดยรวมเล็กลงเล็กน้อย

สรุปผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสลมขวาง พบว่าที่บริเวณ near field กรณี  $r=4$  ขอบเขตของเจ็ทมีลักษณะคล้ายรูปไข่โดยที่ด้านบนจะกว้างกว่า และทั้ง 2 ข้างมีส่วนที่ความเร็วมีค่าเป็นลบอยู่ โครงสร้างภายในมีลักษณะคล้ายดอกเห็ด 2 ลูกเรียงกันในแนวตั้ง มี local peak 4 บริเวณ คือ top positive local peak, bottom positive local peak, left negative local peak และ right negative local peak แต่สำหรับกรณี  $r=12$  เจ็ทมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น มี local peak เพียง 3 บริเวณคือ top positive local peak, left negative local peak และ right negative local peak โดยที่ top positive local peak มีค่าสูงกว่ากรณี  $r=4$  ในขณะที่กรณี  $r=8$  จะมีค่า top positive local peak ที่ใกล้เคียงกับกรณี  $r=4$  แต่มีรูปร่างโครงสร้างที่คล้ายกับกรณี  $r=12$  เมื่อเจ็ทพัฒนาตัวไปที่บริเวณ far field ผลของ  $r$  มีผลต่อโครงสร้างการกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse น้อยทั้งในแง่รูปร่างและค่า local peak จะเห็นได้ว่าช่วงบริเวณ near field เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นโครงสร้างของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น อีกทั้งโครงสร้างของกรณี  $r=4$  มีรูปร่างที่แตกต่างจากกรณี  $r=8$  และ 12 อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่กรณี  $r=8$  และ 12 มีโครงสร้างที่คล้ายกัน จึงชี้แนะว่าในช่วง near field กรณี  $r=4$  เจ็ทมีรูปแบบการไหลที่แตกต่างจากกรณี  $r=8$  และ 12 ในขณะที่ far field ผลของ  $r$  มีผลลดลง

#### 7.1.4 การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise ต่อกระแสมขวาง

รูปที่ 7.7 แสดงการกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise ต่อกระแสมขวาง  $(V_z / u_{cf})$  ที่  $x/rd = 0.25$  พบว่ากรณี  $r = 4$  เจ็ตมีลักษณะคล้ายวงรี 4 ลูก ซึ่งสามารถแบ่งตามระนาบสมมาตร  $z = 0$  ได้ข้างละ 2 ลูก โดยแต่ละลูกเรียงตัวกันในแนวตั้ง โดยที่ลูกบนจะมีทิศของความเร็วออกจากระนาบสมมาตร ในขณะที่ลูกล่างจะมีทิศของความเร็วเข้าสู่ระนาบสมมาตรสอดคล้องกับการหมุนของ CVP เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นพบว่าเจ็ตจะมีโครงสร้างคล้ายเดิมแต่มีขนาดโดยรวมเล็กลงเล็กน้อย

เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream พบว่าทุกกรณีเจ็ตจะมีลักษณะกลมขึ้น ในขณะที่เดียวกันเจ็ตจะสูงขึ้น และขยายตัวออก ส่งผลให้การกระจายตัวของความเร็วกระจายออกไปตามเจ็ต ความเร็วสูงสุดที่ local peak จึงลดลง แต่โครงสร้างภายในจะยังคงเดิม เมื่อพัฒนาไปถึง  $x/rd = 1.5$  ทุกกรณีโครงสร้างไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นเจ็ตมีขนาดโดยรวมเล็กลงเล็กน้อย

สรุปผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise ต่อกระแสมขวาง พบว่าทุกกรณีผลของ  $r$  มีผลต่อโครงสร้างการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise น้อยตลอดช่วงการไหล

#### 7.1.5 การกระจายตัวของ normalized vorticity ตามแนวแกน streamwise

Vorticity นิยามจาก

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{V} \quad (7.2)$$

เมื่อพิจารณา vorticity ตามแนวแกน streamwise จะได้ว่า

$$\omega_x = \frac{\partial V_z}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial z} \quad (7.3)$$

ดังนั้นจึง normalized vorticity ตามแนวแกน streamwise เป็น

$$\frac{\omega_x d}{u_{cf}} \quad (7.4)$$



รูปที่ 7.8 แสดงการกระจายตัวของ normalized vorticity ตามแนวแกน streamwise ( $\omega_x d / u_{cf}$ ) ที่  $x / rd = 0.25$  โดยที่ค่าที่เป็น + หมายถึงมีการหมุนทวนเข็มนาฬิกา และ เครื่องหมาย - หมายถึงมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา พบว่ากรณี  $r = 4$  เจ็ดมีโครงสร้างของ vortices 3 คู่ คือ คู่ที่ 1 เป็น vortices คู่หลักอยู่บริเวณกลางเจ็ดที่มีรูปร่างเป็นเครื่องหมาย จุลภาคกลับหัว 2 ลูกที่หันเข้าหากัน มีส่วนที่มีค่า vorticity ที่สูงที่สุดที่ปลายด้านล่าง มีหางโค้งไปตามขอบของเจ็ดขึ้นไปตามแกน traverse มีคู่ที่ 2 คือคู่ที่รองอยู่ด้านล่าง vortices คู่หลัก ซึ่ง หมุนกลับด้านกัน และคู่ที่ 3 อยู่คู่กลางส่วนโค้งของคู่ vortices หลัก กรณี  $r = 8$  พบว่าเจ็ดมี อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น คู่ vortices หลักจึงเปลี่ยนรูปร่างจากเครื่องหมาย จุลภาคเป็นวงรีแทน และคู่ vortices รองทั้ง 2 คู่จะเริ่มถูกบีบเข้าสู่ตรงกลางระหว่าง คู่ vortices หลัก สำหรับกรณี  $r = 12$  พบว่าเจ็ดมีโครงสร้างโดยรวมคล้ายกับกรณี  $r = 8$

รูปที่ 7.9 แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของ normalized vorticity ตาม แนวแกน streamwise ( $\omega_x d / u_{cf}$ ) พบว่าเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream ทุกกรณีหาง ของคู่ vortices หลักจะเริ่มสั้นลงอย่างต่อเนื่อง vortices คู่ที่ 3 จะเริ่มสลายตัวไปก่อน หลังจาก นั้นคู่ที่ 2 จะสลายตัวตามมา เมื่อพัฒนาไปถึง  $x / rd = 1.5$  ทุกกรณีโครงสร้างไม่แตกต่างกัน มากนัก คือเจ็ดมีลักษณะเหลือเพียงวงกลม 2 วงที่หมุนกลับด้านกันเท่านั้น

สรุปผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อการกระจายตัวของ normalized vorticity ตามแนวแกน streamwise พบว่าที่บริเวณ near field กรณี  $r = 4$  เจ็ดมีโครงสร้างเป็น vortices 3 คู่โดยที่ vortices คู่ที่ 1 มีรูปร่างเป็นเครื่องหมายจุลภาคกลับหัว และ vortices คู่ที่ 2 และ 3 เรียงกันในแนวตั้งกับ vortices คู่ที่ 1 แต่สำหรับกรณี  $r = 8$  และ 12 เจ็ดจะมีรูปร่างที่ คล้ายกันคือมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้นกว่ากรณี  $r = 4$  และ vortices คู่ที่ 1 เปลี่ยนรูปร่างเป็นวงรี ในขณะที่ vortices คู่ที่ 2 และ 3 จะปรากฏอยู่ระหว่าง vortices คู่ที่ 1 แทน เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปที่บริเวณ far field ผลของ  $r$  มีผลต่อโครงสร้างการกระจายตัวของ vorticity ตามแนวแกน streamwise น้อย จะเห็นได้ว่าช่วงบริเวณ near field เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้น โครงสร้างของ vorticity ตามแนวแกน streamwise มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น อีกทั้งโครงสร้างของกรณี  $r = 4$  มีรูปร่างที่แตกต่างจากกรณี  $r = 8$  และ 12 อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่กรณี  $r = 8$  และ 12 มีโครงสร้างที่คล้ายกัน จึงชี้แนะว่าในช่วง near field กรณี  $r = 4$  เจ็ดมีรูปแบบการไหลที่แตกต่างจากกรณี  $r = 8$  และ 12 ในขณะที่ far field ผลของ  $r$  มีผลลดลง

### 7.1.6 การกระจายตัวของ turbulent kinetic energy (TKE) ต่อ crossflow kinetic energy (CKE)

TKE สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\text{TKE} = \frac{1}{2} \left( \left( V_x' \right)^2 + \left( V_y' \right)^2 + \left( V_z' \right)^2 \right) \quad (7.5)$$

โดยที่  $V_x'$  คือ Reynolds stress ของความเร็วตามแนวแกน streamwise

$V_y'$  คือ Reynolds stress ของความเร็วตามแนวแกน traverse

$V_z'$  คือ Reynolds stress ของความเร็วตามแนวแกน spanwise

ในขณะที่ crossflow kinetic energy (CKE) จะมีลักษณะคล้ายกับ turbulent kinetic energy (TKE) เพียงแต่เปลี่ยนจาก  $V_{jet}$  เป็น  $u_{cf}$  เท่านั้น คือ

$$\text{CKE} = \frac{1}{2} \left( u_{cf}' \right)^2 \quad (7.6)$$

รูปที่ 7.10 แสดงการกระจายตัวของ turbulent kinetic energy (TKE) ต่อ crossflow kinetic energy (CKE) ที่  $x/rd = 0.25$  พบว่ากรณี  $r = 4$  ขอบเขตของเจ็ตมีลักษณะคล้ายวงกลม โดยมี local peak 2 บริเวณ คือบริเวณตรงกลางบน (top local peak) และตรงกลางล่าง (bottom local peak) โดยที่ top local peak มีลักษณะเป็นพระจันทร์เสี้ยวหัวคว่ำและมีค่าสูงสุด โดยมีค่ามากกว่า CKE 2.3 เท่า ในขณะที่ bottom local peak จะมีค่าเข้าใกล้ 0 กรณี  $r = 8$  พบว่าเจ็ตมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น มี local peak เพียง 1 บริเวณคือ top local peak ที่มีค่ามากกว่า CKE 2.3 เท่าเช่นเดียวกับ  $r = 4$  สำหรับกรณี  $r = 12$  พบว่าเจ็ตมีโครงสร้างโดยรวมคล้ายกับกรณี  $r = 8$  แต่มี local peak เพียง 1 บริเวณคือ top local peak ที่มี TKE มากกว่า CKE ถึง 3.2 เท่า

รูปที่ 7.11 แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของ turbulent kinetic energy (TKE) ต่อ crossflow kinetic energy (CKE) พบว่าเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream ทุกกรณีเจ็ตจะสูงขึ้น ใหญ่ขึ้น และกลมขึ้น ในขณะที่ local peak จะลดลงอย่างรวดเร็ว ยกเว้นกรณี  $r = 8$  ที่  $x/rd = 0.5$  ซึ่ง local peak จะลดลงไม่มากนัก เมื่อเจ็ตพัฒนาไปถึง  $x/rd = 1.5$  ทุกกรณีโครงสร้างไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นเจ็ตมีขนาดโดยรวมเล็กลงเล็กน้อย

สรุปผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อการกระจายตัวของ turbulent kinetic energy (TKE) พบว่าที่บริเวณ near field กรณี  $r=4$  ขอบเขตของเจ็ทมีลักษณะคล้ายวงกลม มี local peak 2 บริเวณคือ top local peak ที่มีค่าสูงสุด และ bottom local peak ที่มีค่าเข้าใกล้ 0 แต่สำหรับกรณี  $r=12$  พบว่าเจ็ทมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น มี local peak เพียง 1 บริเวณคือ top local peak ที่มีค่ามากกว่ากรณี  $r=4$  ในขณะที่กรณี  $r=8$  จะมีค่า local peak ที่ใกล้เคียงกับกรณี  $r=4$  แต่มีรูปร่างโครงสร้างที่คล้ายกับกรณี  $r=12$  ในขณะเมื่อเจ็ทพัฒนาตัวไปที่บริเวณ far field ผลของ  $r$  มีผลต่อโครงสร้างการกระจายตัวของ turbulent kinetic energy (TKE) น้อยทั้งในแง่รูปร่างและค่า local peak จะเห็นได้ว่าช่วงบริเวณ near field เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นโครงสร้างของ TKE มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น อีกทั้งโครงสร้างของกรณี  $r=4$  มีรูปร่างที่แตกต่างจากกรณี  $r=8$  และ 12 อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่กรณี  $r=8$  และ 12 มีโครงสร้างที่คล้ายกัน จึงชี้แนะว่าในช่วง near field กรณี  $r=4$  เจ็ทมีรูปแบบการไหลที่แตกต่างจากกรณี  $r=8$  และ 12 ในขณะที่ far field ผลของ  $r$  มีผลลดลง

เนื่องจากในช่วงบริเวณ near field เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้น โครงสร้างของปริมาณต่าง ๆ คือ ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ท, อัตราเร็วเฉลี่ย, ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise, ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse, vorticity และ TKE มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น อีกทั้งโครงสร้างของทุกปริมาณข้างต้นของกรณี  $r=4$  มีรูปร่างที่แตกต่างจากกรณี  $r=8$  และ 12 อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่กรณี  $r=8$  และ 12 มีโครงสร้างที่คล้ายกัน จึงชี้แนะว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นผลมาจาก wall blocking เมื่อเจ็ทพัฒนาตัวไปที่บริเวณ far field ผลของ  $r$  ต่อโครงสร้างของทุกปริมาณข้างต้นลดลง

### 7.1.7 โครงสร้างความเร็วที่โดดเด่นของเจ็ตในกระแสลมขวาง

เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างการกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยจาก

$$V_{ins}^2 = \sqrt{V_{x,ins}^2 + V_{y,ins}^2 + V_{z,ins}^2} \quad (7.1)$$

ซึ่งโครงสร้างของอัตราเร็วเฉลี่ยมาจากโครงสร้างของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse และความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise รวมกัน อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 7.12 แสดงการกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง ( $V/u_{cf}$ ) ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x/u_{cf}$ ) และความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสลมขวาง ( $V_y/u_{cf}$ ) ที่ระนาบ  $x/rd = 0.25$  พบว่าที่  $r = 4$  โครงสร้างของอัตราเร็วเฉลี่ยเป็นผลมาจากความเร็วเฉลี่ยแนวแกน streamwise และความเร็วเฉลี่ยแนวแกน traverse ที่โดดเด่น ในขณะที่กรณี  $r = 12$  ความเร็วเฉลี่ยแนวแกน traverse จะโดดเด่นมากกว่าอัตราเร็วเฉลี่ยอื่น นอกจากนี้จากรูปที่ 7.13 แสดงการกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง ( $V/u_{cf}$ ) ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x/u_{cf}$ ) และความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสลมขวาง ( $V_y/u_{cf}$ ) ที่ระนาบ  $x/rd = 1.5$  พบว่า ทุกกรณีโครงสร้างของอัตราเร็วเฉลี่ยเป็นผลมาจากความเร็วเฉลี่ยแนวแกน streamwise มากกว่าความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกนอื่น แสดงว่าที่บริเวณ near field เมื่ออัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพสูงขึ้น โครงสร้างของเจ็ตจะได้รับอิทธิพลจากโครงสร้างของความเร็วตามแนวแกน traverse เป็นหลัก แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนว downstream อิทธิพลต่อโครงสร้างของเจ็ตจากโครงสร้างของความเร็วตามแนวแกน streamwise จะเข้ามาแทนที่อิทธิพลจากโครงสร้างของความเร็วตามแนวแกน traverse

### 7.1.8 โครงสร้างความเร็วของเจ็ตในกระแสลมขวางและความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ

รูปที่ 7.14 แสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x / u_{cf}$ ) ที่พล็อตซ้อนทับกับความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ และของความเร็วตามแนวแกน traverse และ spanwise (เวกเตอร์บนระนาบ) ที่ระนาบ  $x/rd = 0.25$  และ 1.5 พบว่าที่บริเวณที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตมาก (บริเวณตรงกลางเจ็ต) สามารถพบบริเวณที่มีความเร็วทั้งสูง ต่ำ และติดลบ แสดงว่าบริเวณดังกล่าว ด้วยความน่าจะเป็นแล้ว บริเวณที่มีความเร็วสูงจะมีโอกาสเจอความเร็วสูงมาก บริเวณที่มีความเร็วต่ำจะมีโอกาสเจอความเร็วต่ำมาก และบริเวณที่มีความเร็วติดลบจะมีโอกาสเจอความเร็วติดลบมาก เช่นกัน ซึ่งแตกต่างจากบริเวณขอบเจ็ตที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตน้อยซึ่ง ณ ขณะใด ๆ อาจมีความเร็วต่ำหรือสูงก็ได้ เนื่องจากการทดลองนี้ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตหลักและไม่ใส่ในกระแสลมขวางนั้น ทำให้บริเวณขอบของโครงสร้างการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยมีค่าเข้าใกล้ 0

### 7.1.9 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางและ CVP

รูปที่ 7.14 แสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x / u_{cf}$ ) ที่พล็อตซ้อนทับกับความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ และของความเร็วตามแนวแกน traverse และ spanwise (เวกเตอร์บนระนาบ) ที่ระนาบ  $x/rd = 0.25$  และ 1.5 พบว่าเวกเตอร์ที่แสดง CVP มีการม้วนเข้าสู่เจ็ตที่บริเวณด้านล่างของเจ็ตซึ่งเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตต่ำจนถึง 0 และเนื่องจากความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตต่ำแสดงถึงความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบกระแสลมขวางสูง เพราะต่างก็เป็นส่วนประกอบซึ่งกันและกัน ดังนั้นเวกเตอร์ส่วนของ CVP ที่ม้วนเข้าสู่เจ็ตที่เริ่มต้นจากบริเวณที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตต่ำ หรือความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบกระแสลมขวางสูงจึงหมายถึงการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางให้เข้าสู่เจ็ตที่บริเวณด้านล่างเจ็ต

รูปที่ 7.15 แสดงการกระจายตัวของ normalized vorticity ตามแนวแกน streamwise ( $\omega_x d / u_{cf}$ ) ที่พล็อตซ้อนทับกับเวกเตอร์ของความเร็วตามแนวแกน traverse และ spanwise (เวกเตอร์บนระนาบ) ที่ระนาบ  $x/rd = 0.25$  และ  $1.5$  จะเห็นได้ว่าที่  $x/rd = 1.5$  พบคู่ vortices เป็นโครงสร้างที่เป็นแกนกลางการหมุนของ CVP และจากรูปที่ 7.9 (หัวข้อ 7.1.5) แสดงให้เห็นว่าคู่ vortices ดังกล่าวคือคู่ vortices หลักที่ไหลมาจาก upstream (คู่ vortices รองสลายตัวไประหว่างที่เจ็ดพัฒนาไป downstream) จึงสรุปได้ว่าคู่ vortices หลักเป็นโครงสร้างที่พัฒนาไปเป็น CVP

รูปที่ 7.16 แสดงการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกะแสมขวาง ( $V_y / u_{cf}$ ) ที่พล็อตซ้อนทับกับเวกเตอร์ของความเร็วตามแนวแกน traverse และ spanwise (เวกเตอร์บนระนาบ) ที่ระนาบ  $x/rd = 0.25$  และ  $1.5$  จะเห็นได้ว่าบริเวณ bottom positive local peak และส่วนที่มีความเร็วติดลบด้านข้างของเจ็ดเป็นผลมาจากการหมุนของ CVP ดังนั้น bottom positive local peak จึงยังคงปรากฏอยู่ที่บริเวณ far field ( $x/rd = 1.5$ ) ในขณะที่ top positive local peak ซึ่งลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream จากรูปที่ 7.6 (หัวข้อ 7.1.3) จึงแสดงถึงผลของโมเมนตัมเริ่มต้นทางแกน traverse ของเจ็ดจากปากทางออกของเจ็ดเพราะไม่มีแหล่งต้นทางของโมเมนตัมทางแกน traverse อื่นที่ปรากฏอีกแล้ว

## 7.2 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อคุณลักษณะของเจ็ทบน $rd$ scale

### 7.2.1 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อเส้นทางการเดินของเจ็ทบน $rd$ scale

เส้นทางการเดินของเจ็ทจะนิยามโดย center of mass trajectory ของปริมาณ  $X$  ใดๆ นิยามโดย

$$y_{cm,X} = \frac{\int y|X|dA}{\int |X|dA} \quad (7.7)$$

เมื่อ  $|X|$  แทนขนาดของปริมาณ  $X$

ในงานนี้จะหาเส้นทางการเดินของเจ็ทจากปริมาณความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ( $V_x$ ) และ vorticity ตามแนวแกน streamwise ( $\omega_x$ ) เพราะ  $V_x$  มีความสัมพันธ์ต่อการหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรโดยตรง ในขณะที่งานวิจัยของ Witayaprapakorn (2013) ชี้แนะว่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรมีความสัมพันธ์กับ circulation ซึ่งสามารถหาได้จาก vorticity ตามแนวแกน streamwise อีกทั้งจากผลของหัวข้อ 7.1.7 รูปที่ 7.14 และ 7.15 ที่แสดงให้เห็นว่า CVP คือกลไกที่เหนี่ยวนำกระแสลมขวางเข้าสู่เจ็ทจากทางด้านล่างของเจ็ท และคู่ vortices หลักคือโครงสร้างที่พัฒนาไปเป็น CVP ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Witayaprapakorn (2013) ดังนั้นจึงสมควรที่จะคำนวณหาเส้นทางการเดินของเจ็ทจาก vorticity เพื่อวิเคราะห์ด้วย

รูปที่ 7.17 แสดง center of mass trajectory ของปริมาณความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise และ vorticity ตามแนวแกน streamwise พบว่า ทุกกรณี center of mass trajectory ของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise จะมีค่าที่สูงกว่า center of mass trajectory ของ vorticity ตามแนวแกน streamwise เสมอที่ทุกระนาบ  $x/rd$  ใดๆ แสดงว่าขนาดของปริมาณความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ที่มีค่าสูงจะอยู่บริเวณด้านบนของเจ็ท ในขณะที่ขนาดของปริมาณ vorticity ตามแนวแกน streamwise ที่มีค่าสูงจะอยู่บริเวณด้านล่างของเจ็ท จึงชี้แนะว่าบริเวณส่วนบนของเจ็ทเป็นส่วนของกลไกที่นำพาเจ็ทเคลื่อนที่ไปตาม downstream ในขณะที่ส่วนล่างของเจ็ทเป็นส่วนของกลไกการผสมของเจ็ท หรือ CVP และเมื่อเจ็ทพัฒนาตัวไปตาม downstream เจ็ทจะสูงขึ้นเสมอ เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นพบว่า center of mass trajectory จะสูงขึ้นกว่ากรณี  $r$  ต่ำเสมอไม่ว่าจะนิยามจากปริมาณความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise หรือ vorticity ตามแนวแกน streamwise ก็ตาม

Yuan and Street (1998) เสนอว่าเส้นทางการเดินของเจ็ตสามารถนิยามได้เป็นสมการรูปแบบ power law คือ

$$\frac{y_c}{rd} = a_T \left( \frac{x}{rd} \right)^{b_T} \quad (2.6)$$

ซึ่งในการทดลองนี้สมการที่ 2.6 สามารถแสดงผลการทดลองของเส้นทางการเดินของเจ็ตได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ค่า magnitude ของตัวแปร  $b_T$  เป็นเลขยกกำลังที่ Yuan and Street (1998) พบคือค่า 0.28 มีค่าแตกต่างจากการทดลองนี้คือ 0.28 - 0.35 อย่างไรก็ตามการทดลองนี้นิยามเส้นทางการเดินของเจ็ต จาก center of mass ของปริมาณทางฟิสิกส์ ในขณะที่ Yuan and Street (1998) นิยามจาก maximum locus point on center plane ซึ่งแตกต่างกัน

ค่าสัมประสิทธิ์  $a_T, b_T$  และค่าความสูงของเจ็ตของแต่ละกรณีได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.1 และ 7.2

### 7.2.2 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อ circulation ไร้มิติบน $rd$ scale

Circulation ( $\Gamma$ ) รอบเส้นโค้งปิด  $c_j(x,t)$  บนระนาบที่ตำแหน่ง  $x$  สามารถนิยามได้โดย

$$\Gamma = \oint_{c_j(x,t)} \mathbf{V} \cdot d\mathbf{r} \quad (7.8)$$

เมื่อประยุกต์ใช้ทฤษฎีของสต็อกส์ลงบนระนาบ  $yz$  ของหน้าตัดเจ็ตที่ระยะ  $x$  จะสามารถเปลี่ยนจากอินทิเกรตบนเส้นโค้งปิด เป็นอินทิเกรตบนพื้นผิวปิด ได้ดังสมการ

$$\Gamma = \oint_{c_j(x,t)} \mathbf{V} \cdot d\mathbf{r} = \int_{A_j(x,t)} \omega_x dA \quad (7.9)$$

โดยที่  $A_j(x,t)$  คือพื้นที่ของเจ็ตที่ระนาบหน้าตัด ที่ระยะ  $x$  เวลา  $t$  และเนื่องจากเทคนิคการส่องนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตของ SPIV จึงสามารถหาค่าเฉลี่ยต่อเวลาของ circulation ได้ดังสมการ

$$\Gamma = \int_{A(x)} \omega_{j,x} dA \quad (7.10)$$

โดยที่  $\omega_{j,x}$  คือ vorticity ตามแนวแกน streamwise ( $\omega_x$ ) ที่เฉลี่ยตามเวลา และ  $A(x)$  คือพื้นที่ของเจ็ตที่ระนาบหน้าตัดที่ระยะ  $x$  ที่มีขนาดใหญ่พอที่จะครอบคลุมเจ็ตได้ ณ เวลาใดๆ



เนื่องจากโครงสร้างของ CVP เป็นโครงสร้างหลักของเจ็ต circulation ที่เป็นค่าบวก และลบจึงมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในงานนี้จึงแสดงผลเฉพาะค่าที่เป็นค่าบวก และเปลี่ยนให้เป็นค่าไร้มิติเป็น  $(+\Gamma/u_{cf}d)$

รูปที่ 7.18 แสดงผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อ circulation ไร้มิติ พบว่าแต่ละกรณีมีค่า circulation ที่แตกต่างกันมากโดยที่เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้น circulation จะมีค่ามากขึ้น เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream ทุกกรณีจะมีค่า circulation จะลดลง เมื่อเทียบผลการทดลองนี้กับ Zaman and Foss (1997) พบว่า circulation มีค่าแตกต่างกันมากทั้งในแง่ของ magnitude และแนวโน้มของกราฟ อย่างไรก็ตาม การนิยาม circulation ของ Zaman and Foss (1997) มีความแตกต่างจากการทดลองนี้ด้วยสาเหตุที่ Zaman and Foss (1997) วัดค่า circulation ของเจ็ตด้วย hot wire probe ดังนั้นค่าที่วัดได้จึงเป็นค่าเฉลี่ยต่อเวลาที่มีผลของกระแสลมขวางด้วย ในขณะที่งานนี้เนื่องจากเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตของ SPIV ทำให้ค่า circulation ไม่มีผลของกระแสลมขวางและสามารถวัดค่าที่เป็นแบบขณะใดๆได้

การทดลองนี้เสนอแนะว่า circulation สามารถแสดงได้จากสมการ power law คือ

$$\frac{\Gamma}{u_{cf}d} = a_c \left( \frac{x}{rd} \right)^{b_c} \quad (7.11)$$

ค่าสัมประสิทธิ์  $a_c$ ,  $b_c$  และค่า circulation ของแต่ละกรณีได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.3

### 7.2.3 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรบน $rd$ scale

จากรูปที่ 7.19 แสดงถึงผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร พบว่าแต่ละกรณีมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่แตกต่างกันมากโดยที่เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจะมีค่ามากขึ้น เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream ทุกกรณีจะมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น

Yuan and Street (1998) เสนอว่าการพัฒนาตัวของการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตสามารถนิยามได้เป็น

$$E = 1 + \frac{rd}{A_E b_E} \left( \frac{x}{rd} \right)^{1-b_E} \quad (2.7)$$

แต่ในการทดลองนี้จะปรับเปลี่ยนเล็กน้อยเป็น

$$E = 1 + a_E \left( \frac{x}{rd} \right)^{b_E} \quad (7.12)$$

เนื่องจากเพื่อให้อยู่ในรูปแบบที่ใกล้เคียงกับสมการของเส้นทางเดินของเจ็ด และ circulation ซึ่งในการทดลองนี้สมการที่ 7.12 สามารถแสดงผลการทดลองของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้แม้ค่า magnitude ของเลขยกกำลังของเส้นทางเดินของเจ็ดจะมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 2 การทดลอง แต่สำหรับค่า magnitude ของเลขยกกำลังของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรแล้ว มีค่า 0.7 ( $1 - b_E = 0.7$ ) ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองนี้ค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามการคำนวณหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของ Yuan and Street (1998) คำนวณจาก volume flux ที่มีการตั้งขอบเขตของเจ็ดอย่างไม่มีหลักเกณฑ์ (arbitrary) จาก scalar concentration ทำให้แตกต่างจากการทดลองนี้ที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดเท่านั้น จึงไม่มีการกำหนดขอบเขตของเจ็ด

ค่าสัมประสิทธิ์  $a_E$ ,  $b_E$  และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของแต่ละกรณีได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.4

### 7.3 มาตรฐานต่อคุณลักษณะของเจ็ต

การกำหนดมาตรฐาน (scaling) ต่อปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์เป็นสิ่งที่น่าสนใจและควรที่จะศึกษา เพราะจะช่วยให้เป็นแนวทางในการศึกษาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ดังกล่าวได้ดียิ่งขึ้น สำหรับเจ็ตในกระแสลมขวางมีงานที่ศึกษาและพยายามในการกำหนดมาตรฐาน เช่น Smith and Mungal (1998) และ Muppidi and Mahesh (2005a) โดยที่ Smith and Mungal (1998) เสนอมาตรฐาน  $rd$  ที่สามารถ collapse เส้นทางการเดินของเจ็ตที่นิยามจาก mean passive scalar concentration ได้ ในขณะที่ Muppidi and Mahesh (2005a) เสนอมาตรฐาน  $h$  ที่นำคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเจ็ตคือ ความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง (crossflow boundary layer) และรูปร่างของสภาวะเริ่มต้นของเจ็ต (jet velocity profile) เข้ามาคำนวณด้วย ซึ่งมาตรฐาน  $h$  นี้สามารถ collapse เส้นทางการเดินของเจ็ต ได้ดีกว่ามาตรฐาน  $rd$  อย่างไรก็ตามมาตรฐาน  $h$  มีความซับซ้อนทางการคำนวณและยุ่งยากต่อการนำไปใช้งาน อีกทั้งทั้ง 2 มาตรฐานไม่สามารถที่จะ collapse เส้นทางการเดินของเจ็ตที่มี  $r$  แตกต่างกันได้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเนื่องด้วยผลของ  $r$  ต่อคุณลักษณะของเจ็ตบน  $rd$  scale (หัวข้อ 7.2) แสดงให้เห็นว่า  $r$  ยังคงมีผลต่อคุณลักษณะของเจ็ต ดังนั้นเพื่อให้สามารถรวมผลของ  $r$  ต่อคุณลักษณะของเจ็ตได้ดีขึ้น การศึกษานี้จึงหา scaling ที่เหมาะสมต่อคุณลักษณะของเจ็ตใหม่

จากรูปที่ 7.17, 7.18 และ 7.19 พบว่าค่าคุณลักษณะของเจ็ตมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่กรณี  $r$  ต่างๆ งานนี้จึงนำ  $r$  มาเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการกำหนดมาตรฐาน โดยเริ่มจากเส้นทางการเดินของเจ็ตก่อน จากรูปที่ 2.17 ของ Smith and Mungal (1998) พบว่าระหว่างมาตรฐาน  $rd$  และ  $r^2d$  ให้ผลลัพธ์ที่ตรงกันข้ามกัน กล่าวคือ กรณีมาตรฐาน  $rd$  เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นเส้นทางการเดินของเจ็ตจะสูงขึ้นกว่ากรณี  $r$  ต่ำ แต่กรณีมาตรฐาน  $r^2d$  เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นเส้นทางการเดินของเจ็ตจะต่ำกว่ากรณี  $r$  ต่ำ ดังนั้นมาตรฐานที่เหมาะสมจึงควรที่จะอยู่ระหว่าง  $rd$  และ  $r^2d$  เพราะจะมีกรณี  $r^n d$  เมื่อ  $n$  เป็นค่าที่เหมาะสมที่อยู่ระหว่าง 1 และ 2 ที่สามารถทำให้เส้นทางการเดินของเจ็ตมาอยู่ซ้อนทับกันได้ หรือก็คือเป็นค่า  $n$  ที่ทำให้เส้นทางการเดินของเจ็ต collapse ได้

รูปที่ 7.20 แสดง center of mass trajectory ของปริมาณความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise และ vorticity ตามแนวแกน streamwise เมื่อ scaling ด้วย  $r^{1.3}d$  พบว่าค่า  $n$  ที่เหมาะสมในการ collapse เส้นทางเดินของเจ็ตคือ 1.3 และสมการเส้นทางเดินของเจ็ตที่ collapse แล้วคือ

$$\text{CM of streamwise velocity } (y_{CM, V_x}) \quad \frac{y}{r^{1.3}d} = 0.767 \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.315} \quad (7.13)$$

$$\text{CM of streamwise vorticity } (y_{CM, \omega_x}) \quad \frac{y}{r^{1.3}d} = 0.689 \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.284} \quad (7.14)$$

สำหรับ circulation และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจะใช้วิธีที่คล้ายกันกับเส้นทางเดินของเจ็ตคือใช้  $r$  เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการกำหนดมาตราส่วน และหา  $n$  ที่เหมาะสมที่ทำให้ collapse ได้

รูปที่ 7.21 แสดง circulation เมื่อ scaling ด้วย  $ru_{cf}d$  พบว่าค่า  $n$  ที่เหมาะสมในการ collapse การพัฒนาตัวของ circulation คือ 1 และสมการ circulation ที่ collapse แล้วคือ

$$\frac{\Gamma}{rV_{cf}d} = 0.8722 \left( \frac{x}{rd} \right)^{-0.572} \quad (7.15)$$

รูปที่ 7.22 แสดงอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อ scaling ด้วย  $r^{0.7}$  พบว่าค่า  $n$  ที่เหมาะสมในการ collapse อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรคือ 0.7 และสมการการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่ collapse แล้วคือ

$$\frac{E}{r^{0.7}} = 2.251 \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.4119} \quad (7.16)$$

รูปที่ 7.23 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อ scaling ด้วย  $r^{0.7}$  ของการทดลองนี้กับการทดลองของ Kulpiyavaja (2015) และ Wangkiat (2015) ซึ่งทั้ง 3 การทดลองนี้ทดลองที่ชุดการทดลองและพารามิเตอร์เดียวกัน พบว่าการ scaling ด้วย  $r^{0.7}$  สามารถ collapse อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจากผลการทดลองของ Kulpiyavaja (2015) และ Wangkiat (2015) ได้ดี

#### 7.4 การกระจายตัวของพื้นที่ของเจ็ตและอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ต่อความน่าจะเป็นเชิงเวลาสะสมที่จะพบเจ็ต

รูปที่ 7.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง area ratio-probability,  $A_\phi / A_j(\phi)$  และ entrainment ratio-probability relation,  $E_\phi / E_j(\phi)$  ที่ระนาบต่างๆ พบว่าที่บริเวณที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาสะสมที่จะพบเจ็ตเข้าใกล้ 0 หรือบริเวณที่เป็นขอบเจ็ตจากรูปที่ 5.1 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของ  $A_\phi / A_j$  อย่างรวดเร็ว และบริเวณที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาสะสมที่จะพบเจ็ตน้อย ( $\phi_{ij} < 0.1$ ) มีพื้นที่ทั้งหมดถึง 50-60% ในขณะที่ผลของ  $r$  ส่งผลต่อ  $A_\phi / A_j$  ที่บริเวณ near field เท่านั้น และอิทธิพลของ  $r$  จะลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream จนส่งผลน้อยเมื่อเจ็ตพัฒนาไปถึงที่ระนาบ  $x/rd = 1.5$  ซึ่งสอดคล้องกับผลของ  $r$  ต่อโครงสร้างของเจ็ตที่ว่าผลของ  $r$  จะลดลงเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ far field

รูปที่ 7.24 ยังพบว่าผลของ  $r$  ส่งผลต่อ  $E_\phi / E_j$  ที่บริเวณ near field เท่านั้น และอิทธิพลของ  $r$  จะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream จนส่งผลน้อยเมื่อเจ็ตพัฒนาไปถึงที่ระนาบ  $x/rd = 1.5$  เหมือนกับที่มีผลต่อ  $A_\phi / A_j$  นอกจากนี้ยังพบอีกว่าบริเวณที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาสะสมที่จะพบเจ็ตน้อย ( $\phi_{ij} < 0.1$ ) ซึ่งมีพื้นที่ทั้งหมดถึง 50-60% นั้น มีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเพียง 2-3% เท่านั้น ในขณะที่บริเวณที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาสะสมที่จะพบเจ็ตสูง ( $\phi_{ij} > 0.9$ ) มีพื้นที่เพียงเล็กน้อยบนหน้าตัดเจ็ต 10-25% แต่บริเวณดังกล่าวนี้มีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรมากกว่าครึ่ง 40-70% ของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรทั้งหมดบนหน้าตัดเจ็ต

## บทที่ 8

### อภิปรายผลการทดลอง

สืบเนื่องจากผลของ Muppidi and Mahesh (2005a) ที่ว่าความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางมีผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ต เมื่อความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางหนาขึ้นจะส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ตสูงขึ้น ในหัวข้อนี้จึงทำการเปรียบเทียบผลการทดลองนี้กับผลการทดลองข้างเคียงที่มีพารามิเตอร์ที่ใกล้เคียงกัน คือ Witayaprapakorn (2013) และ Dawyok (2015) โดยความแตกต่างที่สำคัญแสดงไว้ในตารางที่ 8.1

รูปที่ 8.1 แสดงการเปรียบเทียบ center of mass trajectory ของปริมาณ vorticity ตามแนวแกน streamwise ของการทดลองนี้กับการทดลองของ Witayaprapakorn (2013) และ Dawyok (2015) พบว่าเมื่อเทียบกับกรณีของ Witayaprapakorn (2013) ที่มีความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางที่ต่ำกว่าการทดลองนี้แล้ว การทดลองนี้มีเส้นทางเดินของเจ็ตที่สูงขึ้นโดยเฉพาะที่ far field จึงสอดคล้องกับผลของ Muppidi and Mahesh (2005a) ในขณะที่เมื่อเทียบกับกรณี Dawyok (2015) ทั้ง 2 การทดลองกลับมีเส้นทางเดินของเจ็ตที่ใกล้เคียงกันซึ่งอาจอธิบายได้ดังนี้ เนื่องจากความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางของ Dawyok (2015) มีค่าสูงกว่าจึงทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตสูงขึ้น แต่ปกติแล้วชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางที่เป็น turbulent จะส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ตต่ำกว่ากรณีที่ชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางเป็น laminar ดังนั้นผลของทั้ง 2 อย่างอาจหักล้างกันเองได้

รูปที่ 8.2 แสดงการเปรียบเทียบ circulation ของการทดลองนี้กับการทดลองของ Witayaprapakorn (2013) และ Dawyok (2015) พบว่าเมื่อเทียบกับกรณีของ Witayaprapakorn (2013) การทดลองนี้จะมี circulation ที่สูงกว่าโดยเฉพาะที่ near field แต่จะมีค่าใกล้เคียงกันที่ far field จึงอาจบอกได้ว่าเมื่อความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางสูงขึ้นจะทำให้เจ็ตมี circulation ที่สูงขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับกรณี Dawyok (2015) แล้ว การทดลองนี้มี circulation ที่สูงกว่าเล็กน้อยที่ near field ทั้งที่ Dawyok (2015) มีความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางที่สูงกว่า การที่ชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางที่เป็น turbulent จึงอาจทำให้ circulation ของเจ็ตมีค่าต่ำกว่ากรณีที่ชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางเป็น laminar ได้

รูปที่ 8.3 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของการทดลองนี้กับการทดลองของ Witayaprapakorn (2013) และ Dawyok (2015) พบว่าเมื่อเทียบกับกรณีของ Witayaprapakorn (2013) การทดลองนี้จะมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับข้อชี้แนะของ Witayaprapakorn (2013) ว่าเมื่อเส้นทางเดินของเจ็ตสูงขึ้น (ที่ระนาบเดียวกัน) จะมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่มากขึ้น แต่ก็อาจเป็นผลมาจากการที่ค่า circulation สูงขึ้นด้วย เพราะ circulation เกี่ยวพันโดยตรงกับ vorticity และ CVP ซึ่งส่งผลต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ต ในขณะที่เมื่อเทียบกับกรณี Dawyok (2015) แล้วอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางที่เป็นแบบ turbulent

จากหลักฐานนี้ชี้แนะว่าความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง และรูปแบบการไหลของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางว่าเป็นแบบ laminar หรือ turbulent น่าจะส่งผลต่อเส้นทางการเดินของเจ็ต circulation และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามผลของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางเป็นประเด็นที่จะต้องศึกษาในรายละเอียดต่อไป

## บทที่ 9

### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) ต่อโครงสร้างและอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $E$ ) ของเจ็ตในกระแสมขวาง ด้วย Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) เพื่อให้สามารถระบุขอบเขตของเจ็ตและแยกบริเวณที่เป็นส่วนผสมของเจ็ตออกจากบริเวณที่เป็นกระแสมขวางบริสุทธิ์ได้อย่างชัดเจน ณ ขณะใดๆ ซึ่งนำไปสู่การหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ จึงใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้นไม่ใส่ในกระแสมขวาง โดยศึกษาที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) เท่ากับ 4, 8 และ 12 เรย์โนลด์สสัมเบอร์ของกระแสมขวางเท่ากับ 3,100 รูปร่างของความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตเป็นแบบ fully-developed turbulent pipe flow ทดลองที่ระยะ  $x/rd = 0.5, 0.75, 1.0$  และ  $1.5$  ใช้จำนวนภาพแต่ละกรณี 4,000 ภาพ

- ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ

การกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมีลักษณะคล้ายวงรีที่มีส่วนเว้าเข้าไปจากด้านล่าง มีค่ามากที่สุดตรงกลางเจ็ต และลดลงอย่างต่อเนื่องจนเข้าใกล้ 0 ที่ขอบเจ็ต แต่ไม่มีจุดใดเลยที่มีค่าเป็น 1 แสดงให้เห็นว่าไม่มีจุดใดเลยในเจ็ตที่มีโอกาสพบเจ็ตได้ตลอดเวลา เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตจะมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream การกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมีลักษณะคล้ายวงกลมมากขึ้น เจ็ตสูงขึ้น รวมทั้งขยายตัวใหญ่ขึ้น ซึ่งมีลักษณะคล้ายกันในทุกกรณี (รูปที่ 5.1)



- ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อโครงสร้างของเจ็ต

- การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ย ( $V/u_{cf}$ )

บริเวณ near field กรณี  $r=4$  มีขอบเขตของเจ็ตคล้ายวงรี โครงสร้างภายในเป็นลักษณะพระจันทร์เสี้ยวคว่ำ มี local peak 2 บริเวณคือ top local peak ที่มีค่าสูงสุด และ bottom local peak ที่มีค่าใกล้ 0 แต่สำหรับกรณี  $r=12$  โครงสร้างมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น และมี local peak เพียง 1 บริเวณคือ top local peak ที่มีค่าสูงสุดที่สูงกว่ากรณี  $r=4$  ในขณะที่กรณี  $r=8$  จะมีค่า local peak ที่ใกล้เคียงกับกรณี  $r=4$  แต่มีรูปร่างโครงสร้างที่คล้ายกับกรณี  $r=12$  (รูปที่ 7.1)

- การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ( $V_x/u_{cf}$ )

บริเวณ near field กรณี  $r=4$  โครงสร้างของเจ็ตมีลักษณะคล้ายเกือบสามเหลี่ยม มี local peak 3 บริเวณ คือ left bottom positive local peak, right bottom positive local peak และ bottom negative local peak สำหรับกรณี  $r=8$  และ 12 โครงสร้างมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น มี local peak เพียง 2 บริเวณคือ top local positive peak และ bottom negative local peak อย่างไรก็ตามทั้ง 3 กรณีมีค่าของ positive local peak ที่ใกล้เคียงกัน (รูปที่ 7.3)

- การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ( $V_y/u_{cf}$ )

บริเวณ near field กรณี  $r=4$  ขอบเขตของเจ็ตมีลักษณะคล้ายรูปไข่โดยที่ด้านบนจะกว้างกว่า และทั้ง 2 ข้างมีส่วนที่ความเร็วมีค่าเป็นลบอยู่ โครงสร้างภายในมีลักษณะคล้ายดอกเห็ด 2 ลูกเรียงกันในแนวตั้ง มี local peak 4 บริเวณ คือ top positive local peak, bottom positive local peak, left negative local peak และ right negative local peak แต่สำหรับกรณี  $r=12$  เจ็ตมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น มี local peak เพียง 3 บริเวณคือ top positive local peak, left negative local peak และ right negative local peak โดยที่ top positive local peak มีค่าสูงกว่ากรณี  $r=4$  ในขณะที่กรณี  $r=8$  จะมีค่า top positive local peak ที่ใกล้เคียงกับกรณี  $r=4$  แต่มีรูปร่างโครงสร้างที่คล้ายกับกรณี  $r=12$  (รูปที่ 7.5)

○ การกระจายตัวของ vorticity ตามแนวแกน streamwise ( $\omega_x d / u_{cf}$ )

บริเวณ near field กรณี  $r = 4$  เจ็ตมีโครงสร้างเป็น vortices 3 คู่โดยที่ vortices คู่ที่ 1 มีรูปร่างเป็นเครื่องหมายจุดภาคกลับหัว และ vortices คู่ที่ 2 และ 3 เรียงกันในแนวตั้งกับ vortices คู่ที่ 1 แต่สำหรับกรณี  $r = 8$  และ 12 เจ็ตจะมีรูปร่างที่คล้ายกันคือมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้นกว่ากรณี  $r = 4$  และ vortices คู่ที่ 1 เปลี่ยนรูปร่างเป็นวงรี ในขณะที่ vortices คู่ที่ 2 และ 3 จะปรากฏอยู่ระหว่าง vortices คู่ที่ 1 แทน (รูปที่ 7.8)

○ การกระจายตัวของ turbulent kinetic energy (TKE)

บริเวณ near field กรณี  $r = 4$  ขอบเขตของเจ็ตมีลักษณะคล้ายวงกลม มี local peak 2 บริเวณคือ top local peak ที่มีค่าสูงสุด และ bottom local peak ที่มีค่าเข้าใกล้ 0 แต่สำหรับกรณี  $r = 12$  พบว่าเจ็ตมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น มี local peak เพียง 1 บริเวณคือ top local peak ที่มีค่ามากกว่ากรณี  $r = 4$  ในขณะที่กรณี  $r = 8$  จะมีค่า local peak ที่ใกล้เคียงกับกรณี  $r = 4$  แต่มีรูปร่างโครงสร้างที่คล้ายกับกรณี  $r = 12$  (รูปที่ 7.10)

เนื่องจากในช่วงบริเวณ near field เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้น โครงสร้างของปริมาณต่าง ๆ คือ ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต, อัตราเร็วเฉลี่ย, ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise, ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse, vorticity และ TKE มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างที่มากขึ้น อีกทั้งโครงสร้างของทุกปริมาณข้างต้นของกรณี  $r = 4$  มีรูปร่างที่แตกต่างจากกรณี  $r = 8$  และ 12 อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่กรณี  $r = 8$  และ 12 มีโครงสร้างที่คล้ายกัน จึงชี้แนะว่าในช่วง near field กรณี  $r = 4$  เจ็ตมีรูปแบบการไหลที่แตกต่างจากกรณี  $r = 8$  และ 12 สันนิษฐานว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นผลมาจาก wall blocking โดยเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่บริเวณ far field ผลของ  $r$  ต่อโครงสร้างของทุกปริมาณข้างต้นลดลง (รูปที่ 5.1, 7.2, 7.4, 7.6, 7.9 และ 7.11)

○ โครงสร้างความเร็วที่โดดเด่นของเจ็ตในกระแสลมขวาง

บริเวณ near field เมื่ออัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) สูงขึ้น โครงสร้างของเจ็ตจะได้รับอิทธิพลจากโครงสร้างของความเร็วตามแนวแกน traverse เป็นหลัก แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามแนว downstream อิทธิพลต่อโครงสร้างของเจ็ตจากโครงสร้างของความเร็วตามแนวแกน streamwise จะเข้ามาแทนที่อิทธิพลจากโครงสร้างของความเร็วตามแนวแกน traverse (รูปที่ 7.12 และ 7.13)

○ กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางและ CVP

ผลการวิเคราะห์รูปที่ 7.8, 7.14 และ 7.15 ชี้แนะว่าหนึ่งในกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางเป็นผลมาจาก vertical channel ของความเร็วตามแนวแกน traverse ที่อยู่ระหว่าง CVP (รูปที่ 7.14) โดยที่ vertical channel เป็นช่องทางในการไหลที่กระแสลมขวางจากบริเวณด้านล่างของเจ็ตถูกเหนี่ยวนำให้ไหลขึ้นเข้าสู่เจ็ต นอกจากนี้ยังพบว่า vertical channel นี้เกิดจากการเหนี่ยวนำของ CVP และ CVP ดังกล่าวมีการพัฒนามาจากคู่ vortices หลักที่คงตัวไปตลอดการไหล (รูปที่ 7.8 และ 7.15)

● ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตบน  $rd$  scale

เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นเส้นทางเดินของเจ็ตใน  $rd$  scale จะสูงขึ้น แสดงว่าเส้นทางเดินของเจ็ตจะยังคงขึ้นกับ  $r$  เมื่อพิจารณาใน  $rd$  scale นอกจากนี้เส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจากความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise สมบูรณ์จะอยู่สูงกว่าเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจาก vorticity ตามแนวแกน streamwise สมบูรณ์เสมอที่ทุกระนาบ  $x/rd$  ใดๆ ชี้แนะว่าบริเวณส่วนบนของเจ็ตเป็นส่วนของกลไกที่นำพาเจ็ตเคลื่อนที่ไปตาม downstream ในขณะที่ส่วนล่างของเจ็ตเป็นส่วนของกลไกการผสมของเจ็ต หรือ CVP (รูปที่ 7.17)

เมื่อ  $r$  เพิ่มขึ้นคุณลักษณะของเจ็ตทั้ง circulation และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรใน  $rd$  scale จะเพิ่มขึ้นอย่างมากตลอดช่วงการทดลอง (รูปที่ 7.18 และ 7.19) แสดงว่าปริมาณเหล่านี้จะยังคงขึ้นกับ  $r$  ใน  $rd$  scale

- มาตราส่วนต่อคุณลักษณะของเจ็ต (Scaling)

ผลของ  $r$  ต่อคุณลักษณะของเจ็ตบน  $rd$  scale แสดงให้เห็นว่า  $r$  ยังคงมีผลต่อคุณลักษณะของเจ็ต ดังนั้นเพื่อให้สามารถรวมผลของ  $r$  ต่อคุณลักษณะของเจ็ตได้ดีขึ้น การศึกษานี้จึงหา scaling ที่เหมาะสมต่อคุณลักษณะของเจ็ตใหม่

จากการศึกษาพบว่าสามารถรวมผลของ  $r$  ให้ทุกกรณีของ  $r$  collapse เป็นความสัมพันธ์เดียวได้ เมื่อ scale เส้นทางเดินของเจ็ตทั้งจากนิยามจากความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise สมบูรณ์ และเส้นทางเดินของเจ็ตที่นิยามจาก vorticity ตามแนวแกน streamwise สมบูรณ์ด้วย  $r^{1.3}d$ , circulation ด้วย  $ru_{cf}d$  และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรด้วย  $r^{0.7}$  เมื่อพล็อตเทียบกับ  $x/rd$  (รูปที่ 7.20, 7.21 และ 7.22) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{CM of streamwise velocity } (y_{CM, V_x}) \quad \frac{y}{r^{1.3}d} = 0.767 \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.315} \quad (7.13)$$

$$\text{CM of streamwise vorticity } (y_{CM, \omega_x}) \quad \frac{y}{r^{1.3}d} = 0.689 \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.284} \quad (7.14)$$

$$\frac{\Gamma}{rV_{cf}d} = 0.8722 \left( \frac{x}{rd} \right)^{-0.572} \quad (7.15)$$

$$\frac{E}{r^{0.7}} = 2.251 \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.4119} \quad (7.16)$$

- การกระจายตัวของพื้นที่ของเจ็ต ( $A_\phi / A_j$ ) และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $E_\phi / E_j$ ) ต่อความน่าจะเป็นเชิงเวลาสะสมที่จะพบเจ็ต

บริเวณที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาสะสมที่จะพบเจ็ตน้อย ( $\phi_{ij} < 0.1$ ) มีพื้นที่ประมาณครึ่งหนึ่งของเจ็ต (50-60%) แต่บริเวณดังกล่าวนี้มีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเพียงเล็กน้อย (2-3%) ของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรทั้งหมดบนหน้าตัดเจ็ต ในขณะที่บริเวณที่มีความน่าจะเป็นเชิงเวลาสะสมที่จะพบเจ็ตสูง ( $\phi_{ij} > 0.9$ ) มีพื้นที่เพียงเล็กน้อยบนหน้าตัดเจ็ต (10-25%) แต่บริเวณดังกล่าวนี้มีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรมากกว่าครึ่ง (40-70%) ของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรทั้งหมดบนหน้าตัดเจ็ต (รูปที่ 7.24)

$r$  จะส่งผลต่อ  $A_\phi/A_j$  และ  $E_\phi/E_j$  ที่บริเวณ near field เท่านั้น แต่อิทธิพลของ  $r$  จะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream (รูปที่ 7.24)

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับ Witayaprapakorn (2013) และ Dawyok (2015) ซึ่งระบุว่าความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง และรูปแบบการไหลของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางว่าเป็นแบบ laminar หรือ turbulent น่าจะส่งผลต่อเส้นทางการเดินของเจ็ต circulation และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรค่อนข้างมาก (รูปที่ 8.1, 8.2 และ 8.3) ซึ่งเป็นประเด็นที่จะควรรศึกษาในรายละเอียดต่อไป



## ประมวลตาราง



### บทที่ 4

ตำแหน่ง $(x, z)$	ความหนาของชั้นขอบเขต (mm)
$-2d, -5d$	7.5
$-2d, 0d$	8.0
$-2d, +5d$	8.5

ตารางที่ 4.1 ความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางแต่ละตำแหน่งตามแนว spanwise



### บทที่ 7

$r$	$y/rd$ ที่ตำแหน่ง $x/rd$ ต่างๆ					$a_T$	$b_T$
	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5		
4	0.707	0.938	1.083	1.150	1.311	1.158	0.3299
8	0.951	1.157	1.331	1.464	1.661	1.459	0.3167
12	1.046	1.306	1.451	1.587	1.793	1.589	0.2976

ตารางที่ 7.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญในเส้นทางการเดินของเจ็ตที่นิยามจากความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise

$r$	$y/rd$ ที่ตำแหน่ง $x/rd$ ต่างๆ					$a_T$	$b_T$
	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5		
4	0.596	0.795	0.938	0.998	1.146	1.004	0.3515
8	0.877	1.094	1.219	1.318	1.491	1.324	0.2915
12	0.974	1.222	1.330	1.463	1.626	1.456	0.2802

ตารางที่ 7.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญในเส้นทางการเดินของเจ็ตที่นิยาม vorticity ตามแนวแกน streamwise

สมการกำลังของ trajectory : 
$$\frac{y}{rd} = a_T \left( \frac{x}{rd} \right)^{b_T}$$



$r$	$y/rd$ ที่ตำแหน่ง $x/rd$ ต่างๆ					$a_c$	$b_c$
	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5		
4	8.296	5.185	4.172	3.727	2.407	3.428	-0.6360
8	14.51	9.533	7.925	6.969	6.174	6.994	-0.5145
12	22.92	16.29	12.25	10.84	8.083	10.64	-0.5603

ตารางที่ 7.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญของ circulation

$$\text{สมการกำลังของ circulation : } \frac{\Gamma}{u_{cf}d} = a_c \left( \frac{x}{rd} \right)^{b_c}$$

$r$	$y/rd$ ที่ตำแหน่ง $x/rd$ ต่างๆ					$a_E$	$b_E$
	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5		
4	2.963	4.435	5.671	6.373	6.468	4.880	0.4955
8	4.863	6.321	8.375	9.501	10.95	8.213	0.534
12	6.136	10.03	11.75	14.13	15.20	12.20	0.504

ตารางที่ 7.4 พารามิเตอร์ที่สำคัญของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

$$\text{สมการกำลังของ entrainment : } E = 1 + a_E \left( \frac{x}{rd} \right)^{b_E}$$

### บทที่ 8

การทดลอง	$r$	$Re_{cf}$	ความหนาของชั้น ขอบเขตของกระแส ขวาง (mm)	ประเภทของชั้น ขอบเขตของกระแส ขวาง
การทดลองนี้	4.0	3,100	8	Laminar
Witayaprapakorn	3.9	5,900	7.4	Laminar
Dawyok	4.1	5,600	15	Turbulent

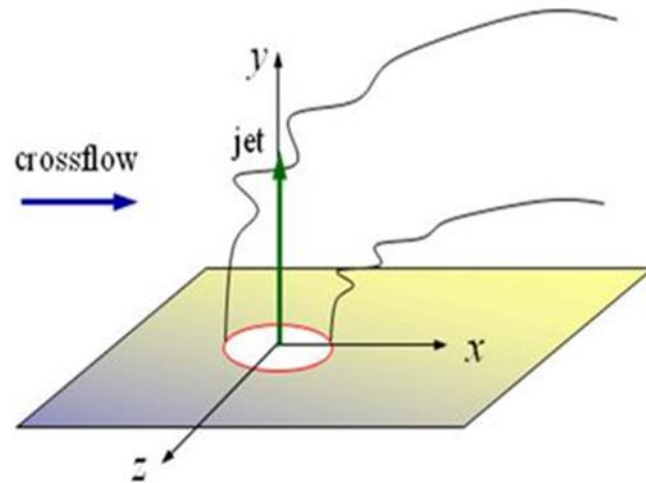
ตารางที่ 8.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญที่แตกต่างกันของการทดลองนี้กับการทดลองของ Witayaprapakorn (2013) และ Dawyok (2015)



**ประมวลรูปภาพ**

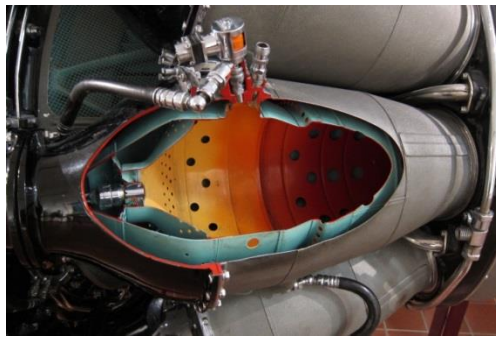


## บทที่ 1



รูปที่ 1.1

ลักษณะโดยสังเขปของเจ็ตในกระแสลมขวาง



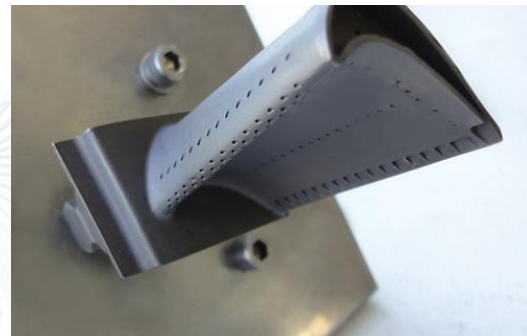
a.



b.



c.

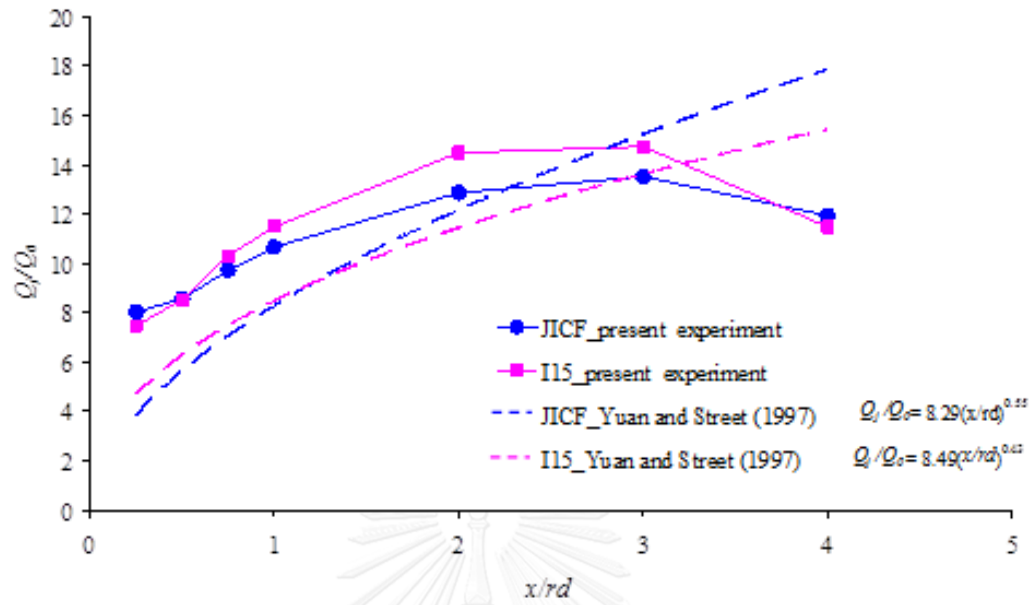


d.

รูปที่ 1.2

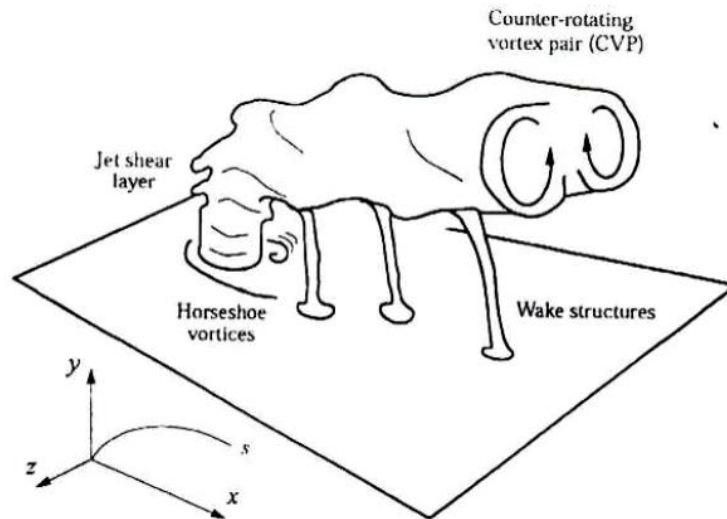
การประยุกต์การใช้งานของเจ็ตในกระแสมขวาง

- a.) หัวฉีดเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้  
[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Combustor\\_on\\_Rolls-Royce\\_Nene\\_turbojet\\_\(2\).jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Combustor_on_Rolls-Royce_Nene_turbojet_(2).jpg)
- b.) การปล่อยควันของปล่องควัน  
[http://interactive.wxvi.org/files/images/highlights/industrial\\_chimney.jpg](http://interactive.wxvi.org/files/images/highlights/industrial_chimney.jpg)
- c.) การบังคับควบคุมบินขึ้นลงในแนวดิ่งของเครื่องบินแบบ V/STOL  
<http://tom.hise.org/blog/wp-content/uploads/2012/07/Air-Show-13.jpg>
- d.) การระบายความร้อนที่ผิวของใบพัดของแก๊สเทอร์ไบน์  
<http://www.practicalmachinist.com/vb/images/articles/mms/2012-march/11.jpg>



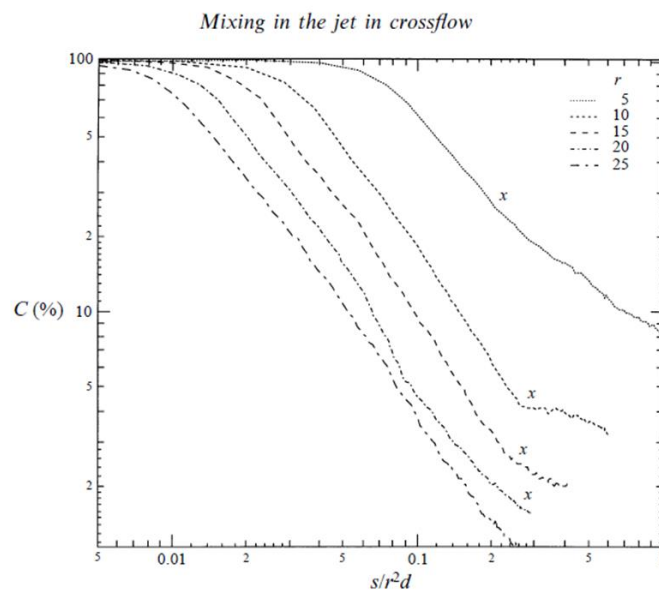
รูปที่ 1.3 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม JICF และ I15 (Kornsri et al., 2009)

## บทที่ 2



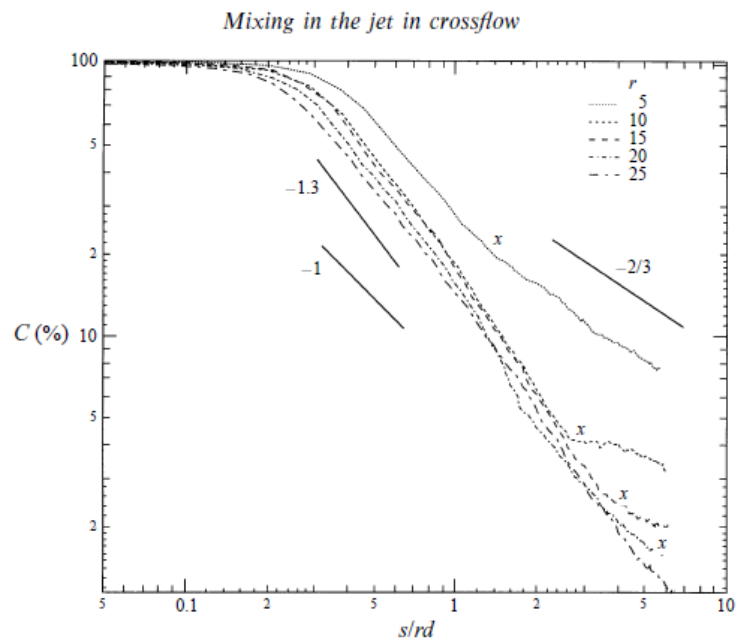
รูปที่ 2.1

โครงสร้าง vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง  
(Fric and Rosh, 1994)

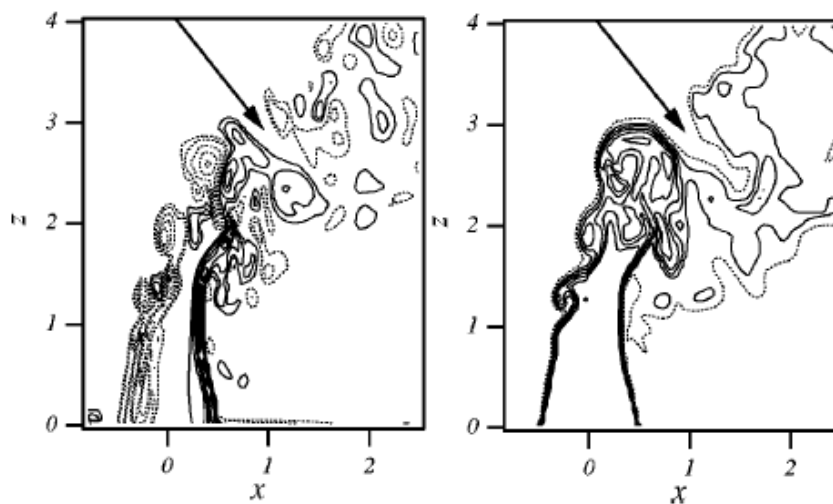


รูปที่ 2.2

การลดลงของความเข้มข้น  $\%C$  ของ JICF และ free jet บน  $r^2 d$  scale  
(Smith and Mungal, 1998)

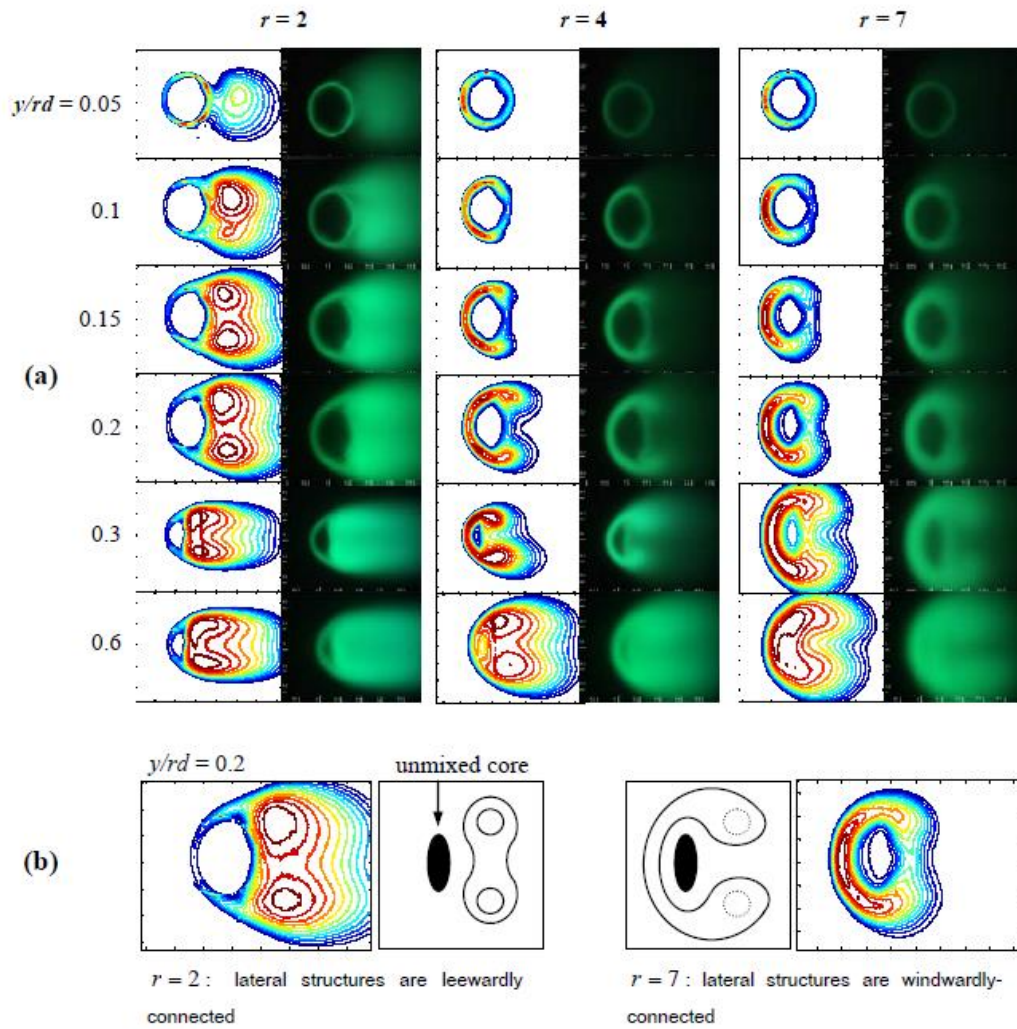


รูปที่ 2.3 การลดลงของความเข้มข้น %C ของ JICF และ free jet บน  $rd$  scale (Smith and Mungal, 1998)



รูปที่ 2.4 contour ของ instantaneous spanwise vorticity และ scalar concentration (Yuan and Street, 1998)





รูปที่ 2.5

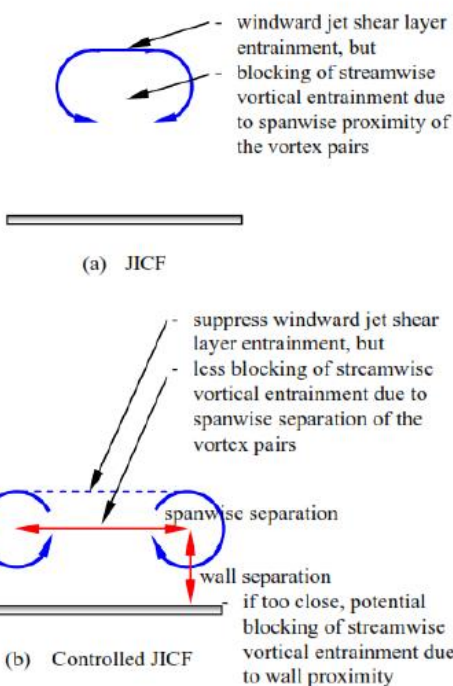
การพัฒนาตัวของเจ็ตที่มีมุมมอง top view (Watakulsin et al., 2010)

a.) ภาพเส้นสีแบบ contour และ ภาพจริง

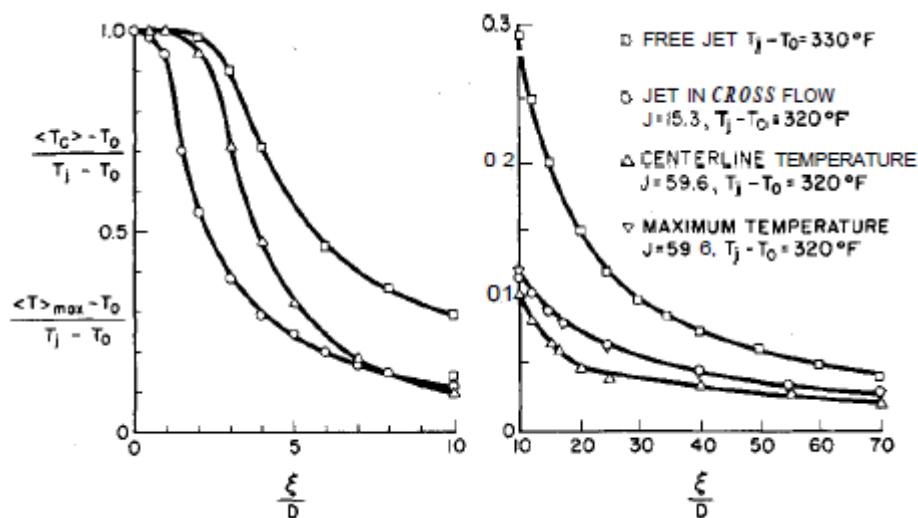
b.) การเชื่อมกันของ lateral vortical roll up ทั้ง 2 ประเภท

$r = 2$  Leewardly-connected

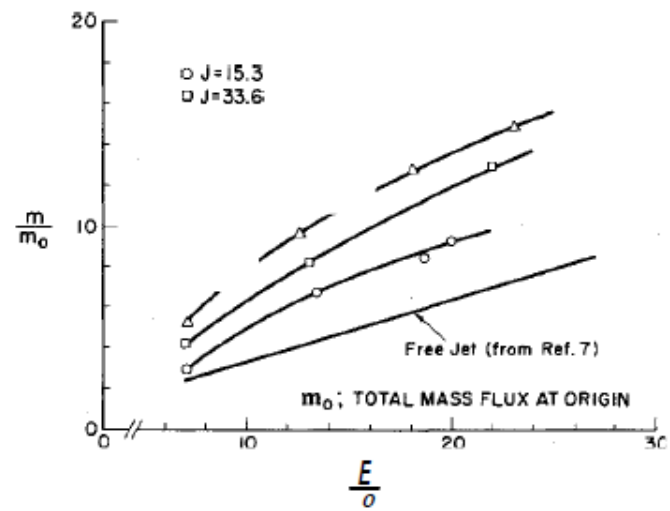
$r = 7$  Windwardly-connected



รูปที่ 2.6 กลไกการเหนี่ยวนำการผสม (entrainment) ของ JICF และ I15 (Kornsri et al., 2009)



รูปที่ 2.7 การลดลงของอุณหภูมิที่ระยะทาง (Karmatoni and Greber, 1972)



รูปที่ 2.8

การกระจายตัวของ mass flux (Karmatoni and Greber, 1972)

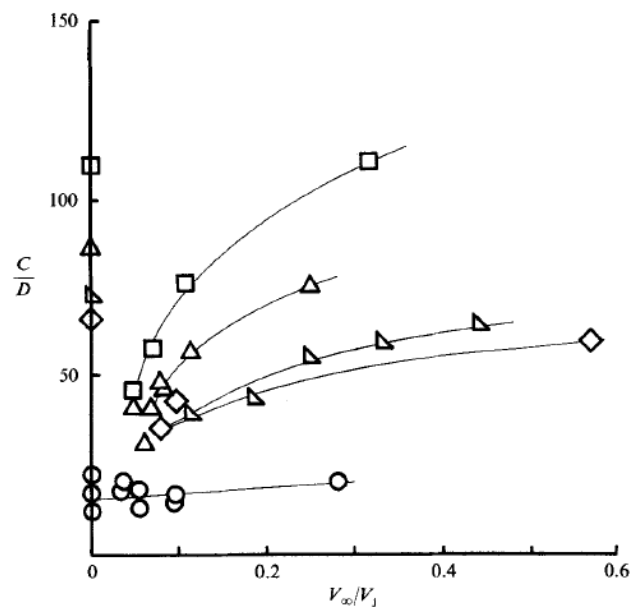


FIGURE 2. Chord length of the 'flame' for various values of equivalence ratio  $\phi = 11$  ( $\square$ ); 8.7 ( $\triangle$ ); 7.3 ( $\diamond$ ); 6.7 ( $\circ$ ); 1.1 ( $\circ$ ).

รูปที่ 2.9

ความยาวของการเผาไหม้ที่  $r$  ต่างๆกัน (แกน  $x$  เป็นส่วนกลับของ  $r$ ) (Broadwell and Breidenthal, 1984)

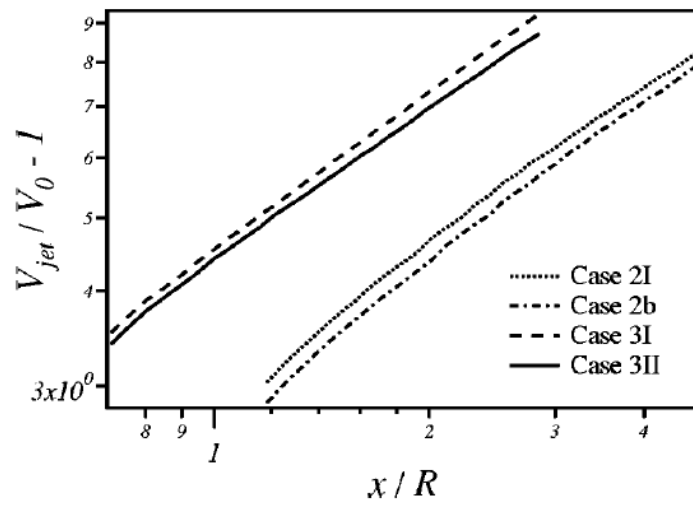
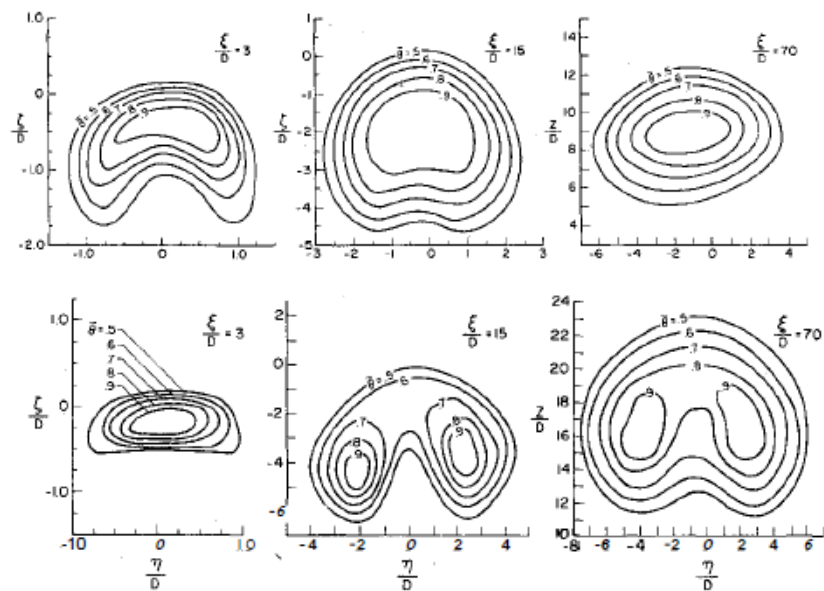


FIG. 21. Rescaled volume fluxes. Case 2I ( $Re_D=2100, R=2.0, Fr=\infty$ ), case 2b ( $Re_D=2100, R=2.0, Fr=10.0$ ), case 3I ( $Re_D=1050, R=3.3, Fr=\infty$ ), case 3II ( $Re_D=2100, R=3.3, Fr=\infty$ ).

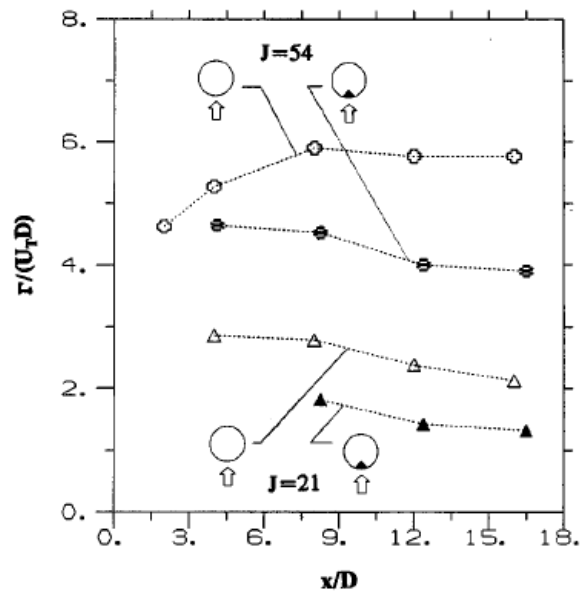
รูปที่ 2.10

การเหนี่ยวนำการผสมของ JICF (Yuan and Street, 1998)  
 Case 2I,2II  $r = 2$                       Case 3I,3II  $r = 3.3$

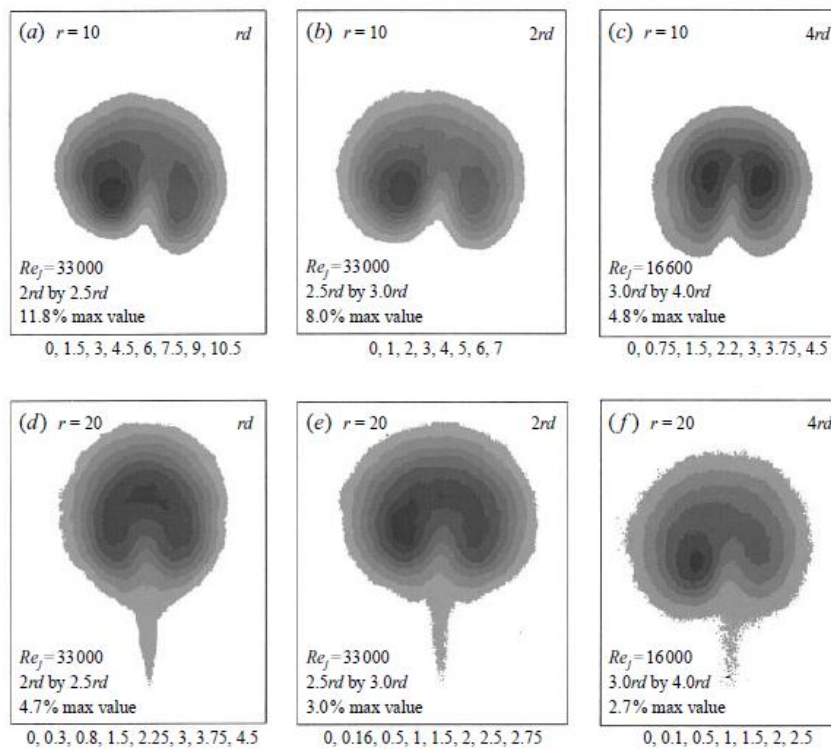


รูปที่ 2.11

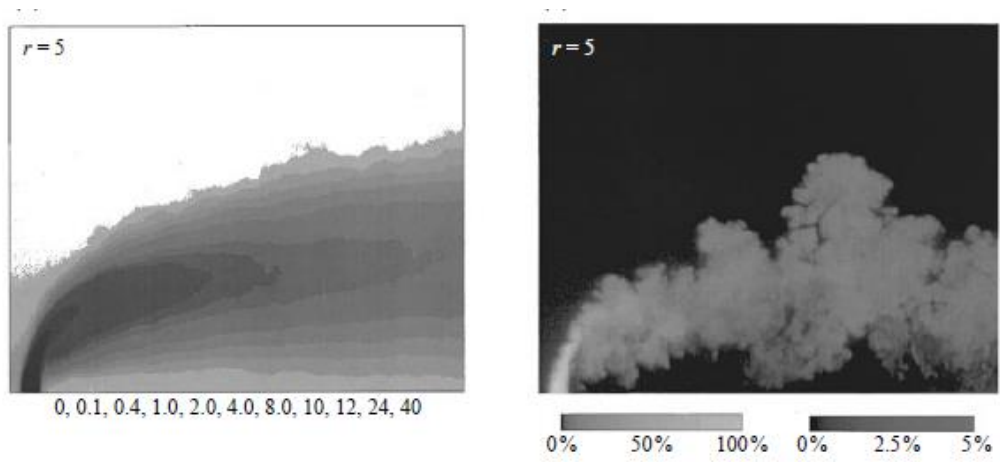
การกระจายตัวของอุณหภูมิ (Karmatoni and Greber, 1972)  
 a)  $r_M = 15.3$                       b)  $r_M = 59.6$



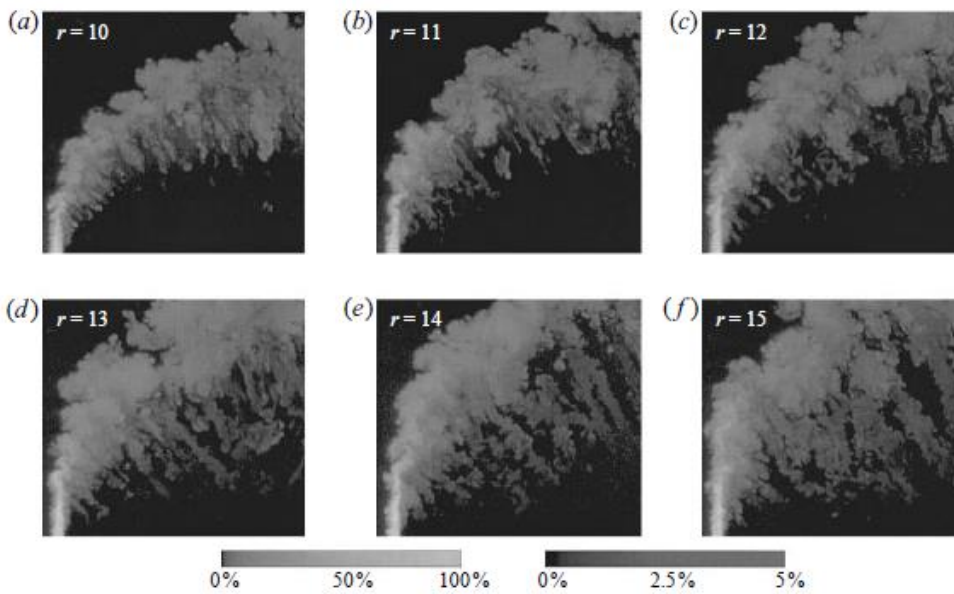
รูปที่ 2.12 Circulation ของเจ็ตที่ด้านหนึ่งของแกนสมมาตร (Zaman and Foss, 1997)  
 a.) เส้นวงกลมบน  $r_m = 21$       b.) เส้นสามเหลี่ยมล่าง  $r_m = 54$



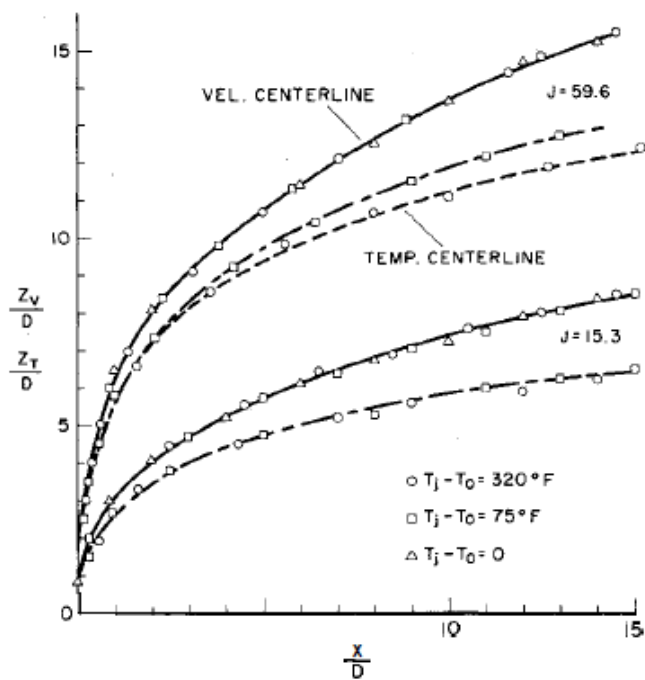
รูปที่ 2.13 ผลของ  $r$  ต่อความไม่สมมาตรของเจ็ต (Smith and Mungal, 1998)



รูปที่ 2.14 การคงอยู่ของเจ็ตที่ผ่นัง (Smith and Mungal, 1998)  
 a) ภาพเฉลี่ย b) ภาพ ณ ขณะใดขณะหนึ่ง



รูปที่ 2.15 มุมมองด้านข้างของเจ็ตที่  $r$  ต่าง ๆ กัน (Smith and Mungal, 1998)



รูปที่ 2.16 เส้นทางการไหลของความเร็ว และอุณหภูมิ (Karmatoni and Greber, 1972)

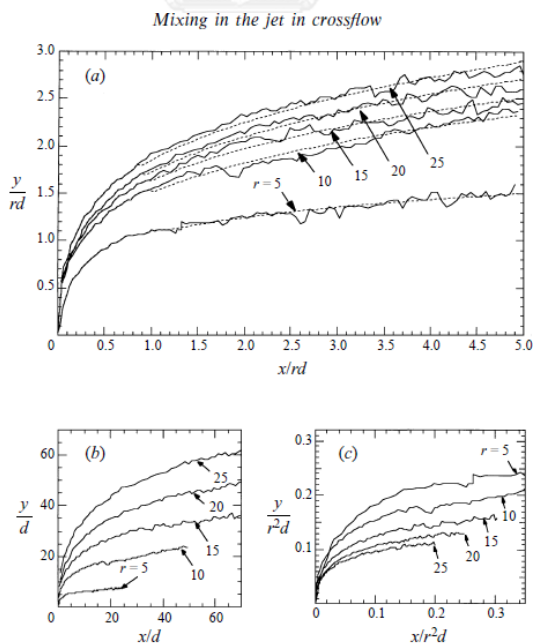


FIGURE 7. Centreline jet trajectory normalized by (a)  $rd$ , (b)  $d$  and (c)  $r^2d$ .

รูปที่ 2.17 การสเกลเส้นทางการเดินของเจ็ต (Smith and Mungal, 1998)  
 (a)  $rd$  scale, (b)  $d$  scale, (c)  $r^2d$  scale

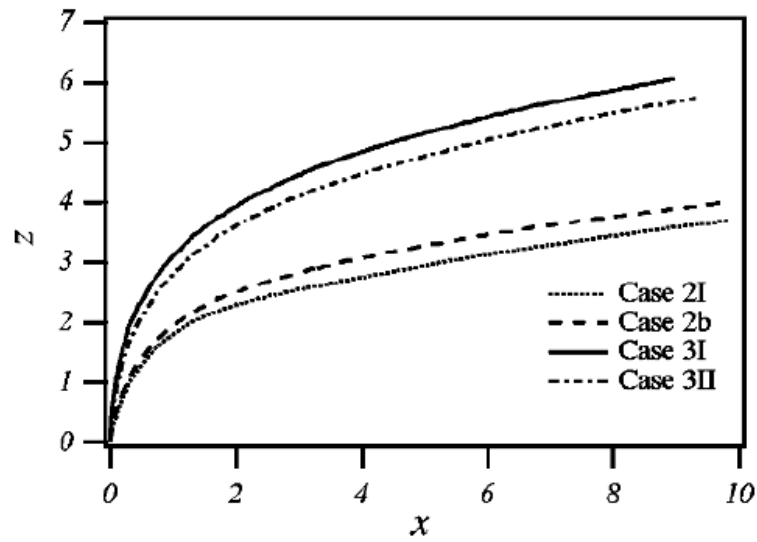
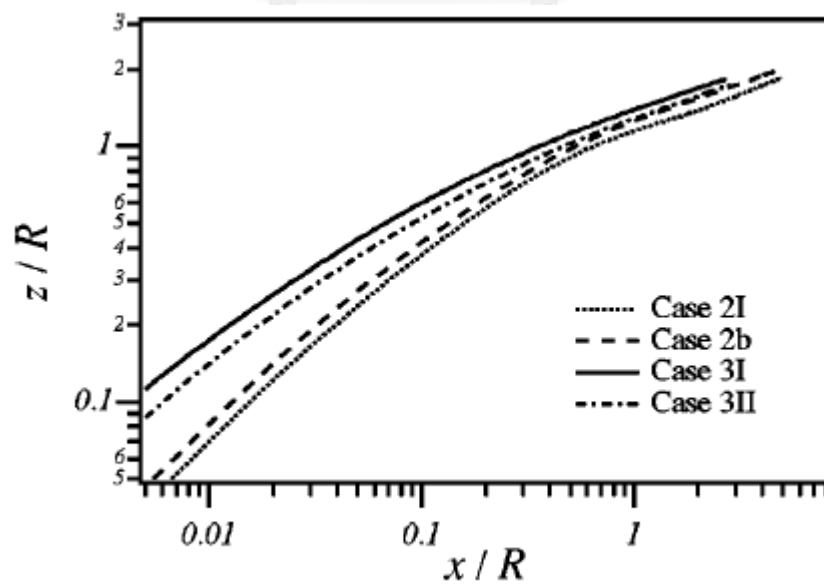


FIG. 5. Streamline jet trajectories. Case 2I ( $Re_D=2100$ ,  $R=2.0$ ,  $Fr=\infty$ ), case 2b ( $Re_D=2100$ ,  $R=2.0$ ,  $Fr=10.0$ ), case 3I ( $Re_D=1050$ ,  $R=3.3$ ,  $Fr=\infty$ ), case 3II ( $Re_D=2100$ ,  $R=3.3$ ,  $Fr=\infty$ ).

รูปที่ 2.18 ผลของ  $Re_{cf}$  และ  $r$  เส้นทางเดินของเจ็ต (Yuan and Street, 1998)



รูปที่ 2.19 เส้นทางเดินของเจ็ตที่ collapse เข้าด้วยกัน (Yuan and Street, 1998)



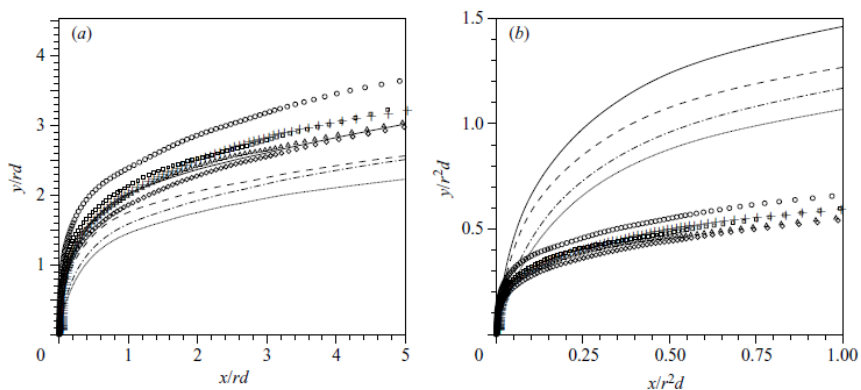


FIGURE 8. Comparison of the time-averaged jet trajectories – axes scaled by (a)  $rd$  and (b)  $r^2d$ : —, I; - - -, II; — — —, III; ·····, IV; □, V; △, VI; +, VII; ◇, VIII; ○, IX. Note the lack of collapse.

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 2.20 ผลการเปรียบเทียบเส้นทางเดินเสกกล (Muppidi and Mahesh, 2005b)

(a)  $rd$  และ (b)  $r^2d$

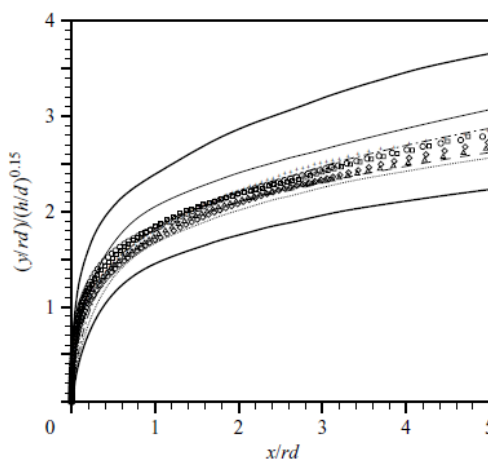
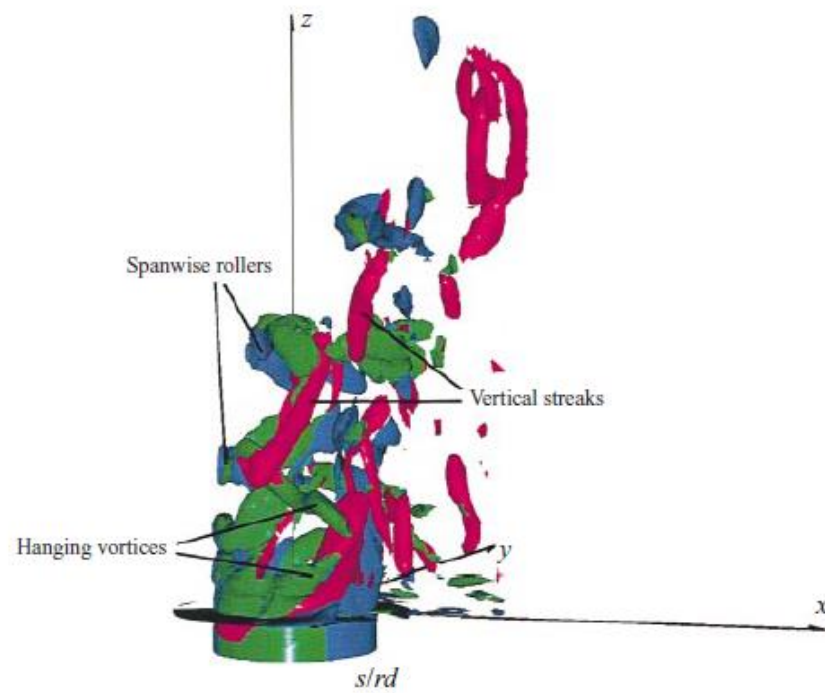
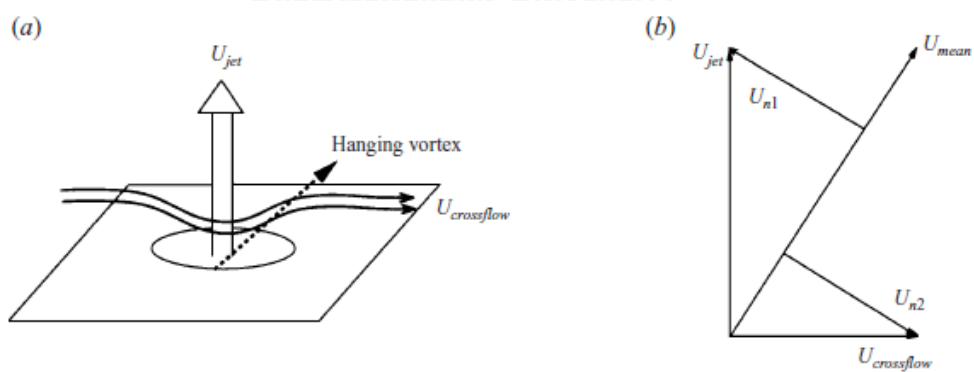


FIGURE 15. Trajectories scaled using  $h$ . Thick lines show the scatter bounds using  $rd$  scaling.  $h$  is computed using a piecewise linear function for  $u_{cf}$  in equation (4.5). Trajectories shown are from all the simulations: —, I; - - -, II; — — —, III; ·····, IV; □, V; △, VI; +, VII; ◇, VIII; ○, IX.

รูปที่ 2.21 เส้นทางกาลไหลของเจ็ต scale ด้วย  $h$  (Muppidi and Mahesh, 2005b)

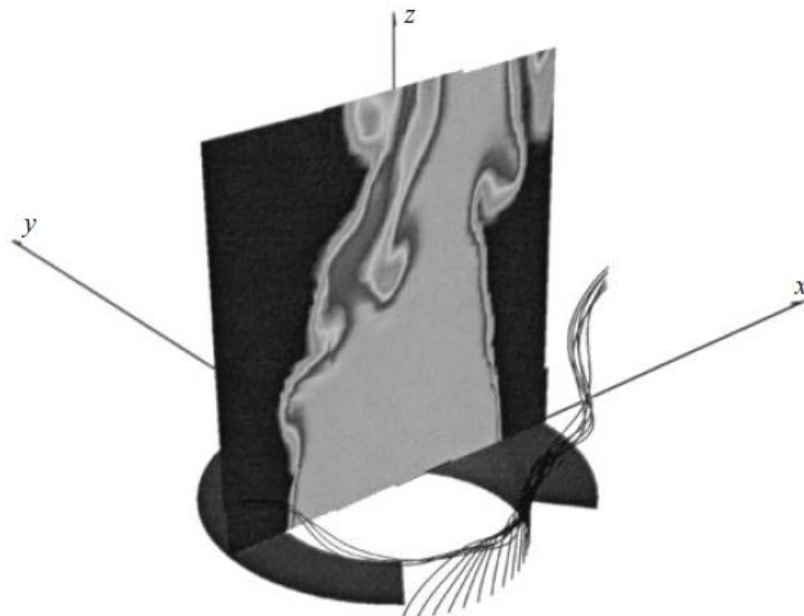


รูปที่ 2.22 โครงสร้างบริเวณ near field ของ JICF จาก isosurface ของ vorticity (Yuan et al., 1999)

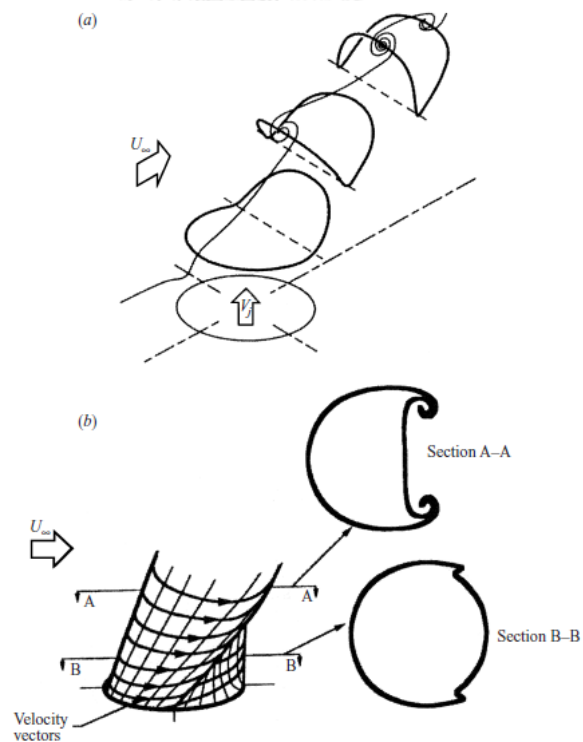


รูปที่ 2.23 โครงสร้างของ hanging vortices (Yuan et al., 1999)

- a.) Schematic ของ hanging vortices
- b.) เวกเตอร์ความเร็วแสดงกลไกการเกิด hanging vortices

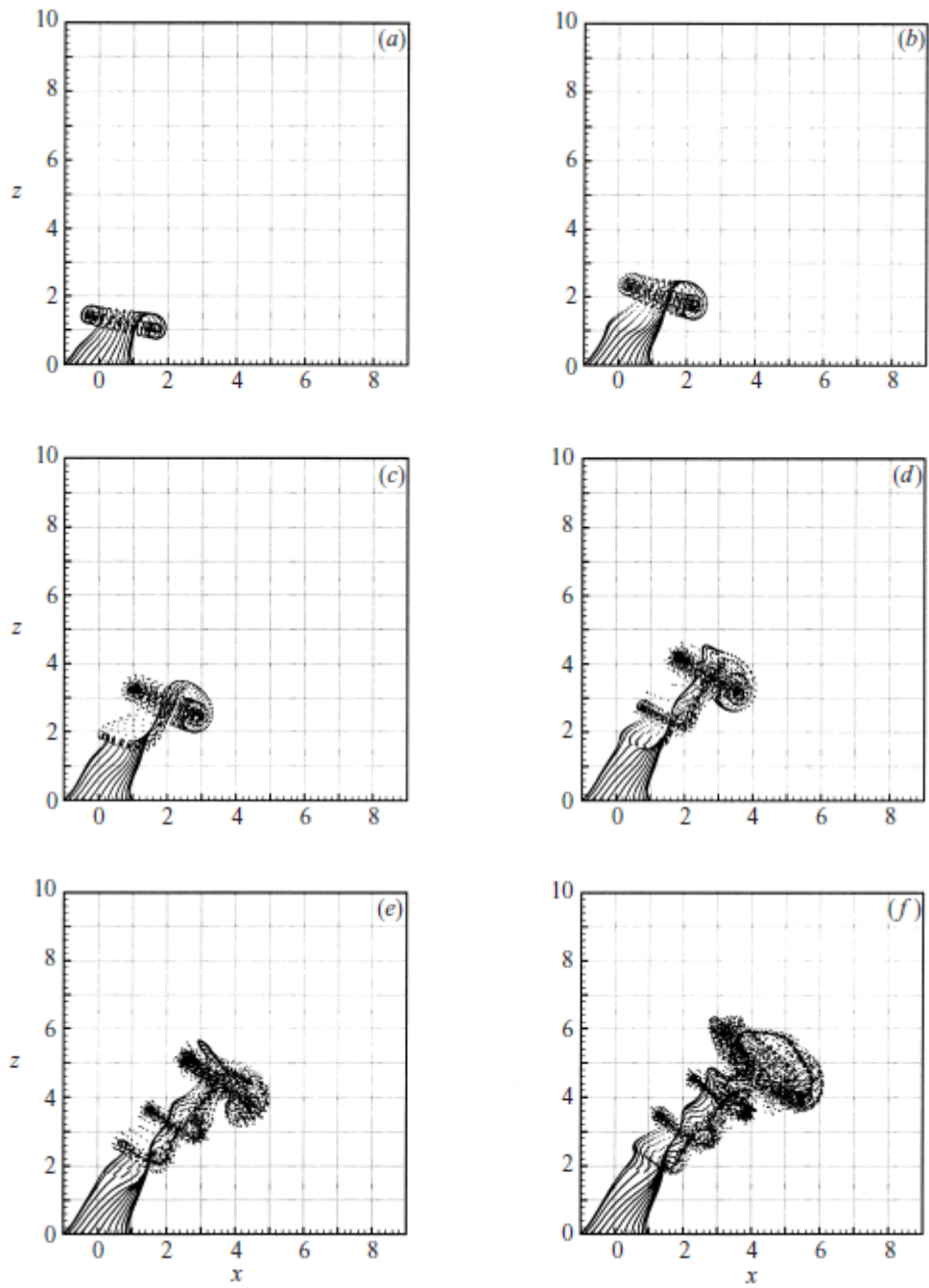


รูปที่ 2.24 การพัฒนาตัวของ skewed mixing layer (Yuan et al., 1999)

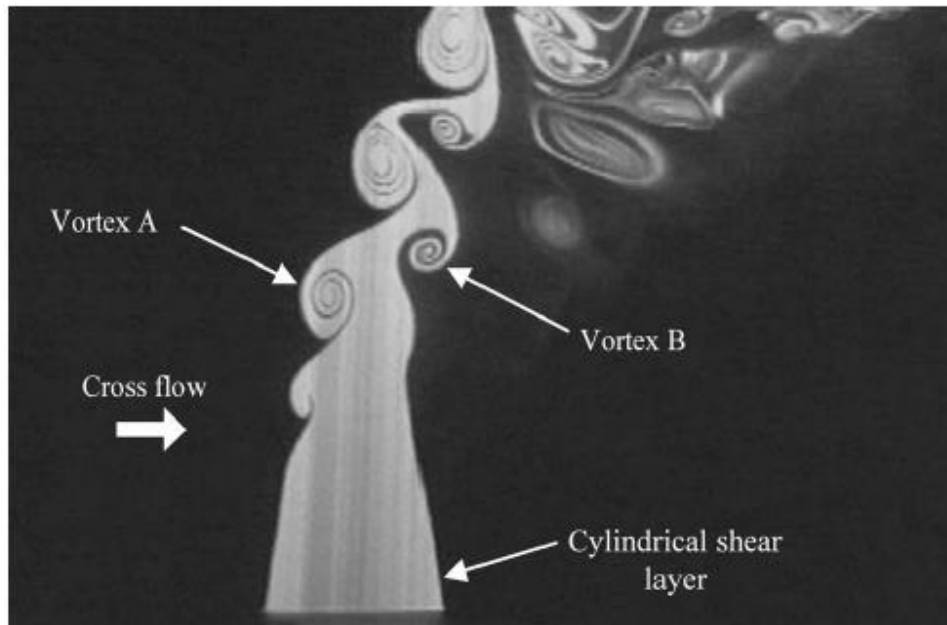


รูปที่ 2.25 โครงสร้างการเกิด CVP (Cortelezzi and Karagozian, 2001)

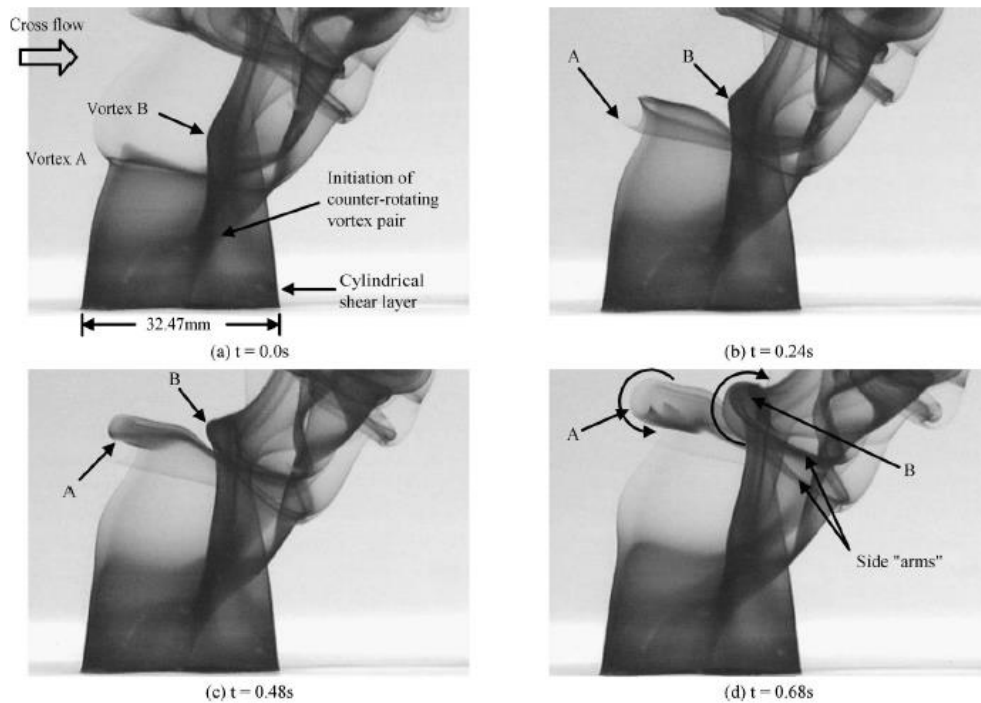
- a.) Isometric ของ jet shear layer vortex ring
- b.) Schematic diagram ของการเปลี่ยนตำแหน่งของ shear layer



รูปที่ 2.26 การพัฒนาตัวของ JICF (Cortelezzi and Karagozian, 2001)



รูปที่ 2.27 Vortex Structure ของ JICF (Lim et al., 2001)



รูปที่ 2.28 การพันตัวของ cylindrical shear layer (Lim et al., 2001)

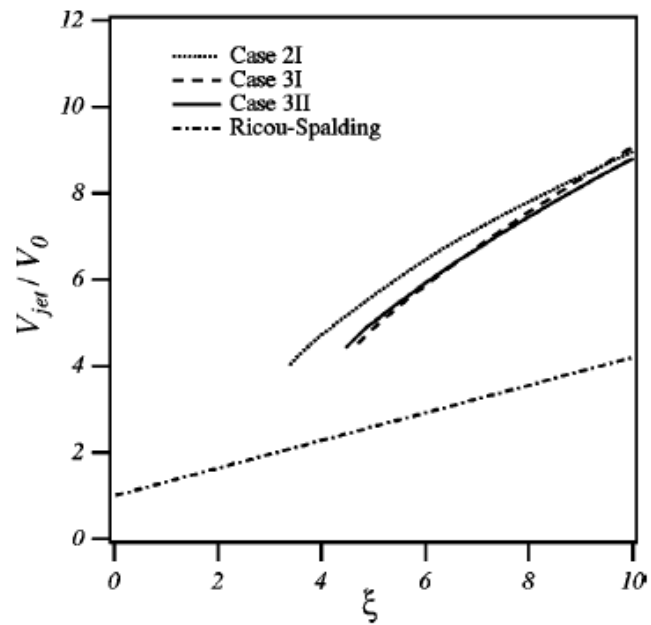
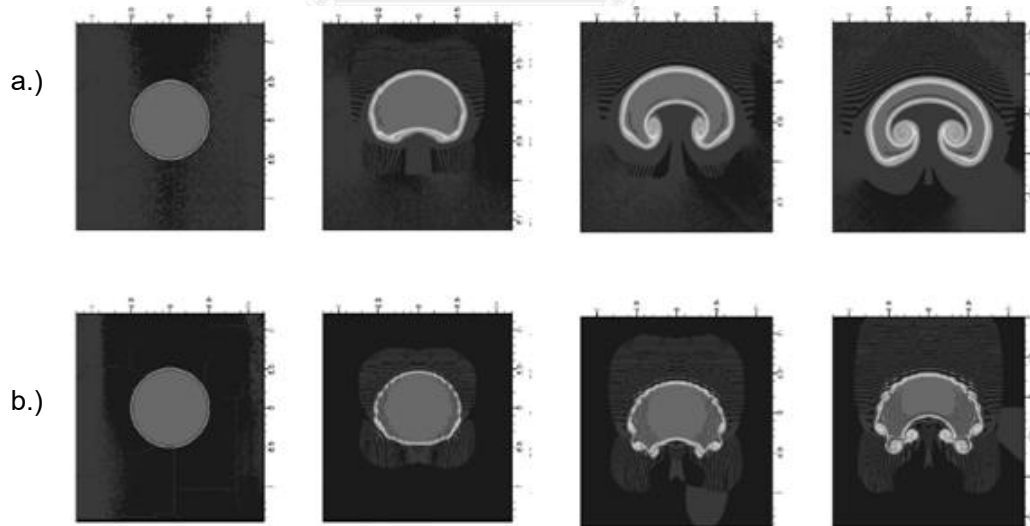


FIG. 11. Volume flux vs distance along trajectory. Case 2I ( $Re_D=2100$ ,  $R=2.0$ ,  $Fr=\infty$ ), case 3I ( $Re_D=1050$ ,  $R=3.3$ ,  $Fr=\infty$ ), case 3II ( $Re_D=2100$ ,  $R=3.3$ ,  $Fr=\infty$ ).

รูปที่ 2.29 ผลของ  $Re_{cf}$  ต่อการผสม (Yuan and Street, 1998)



รูปที่ 2.30 เจ็ตที่ End view (Muppidi and Mahesh, 2006)

a.)  $Re_{cf} = 1,000$

b.)  $Re_{cf} = 10,000$

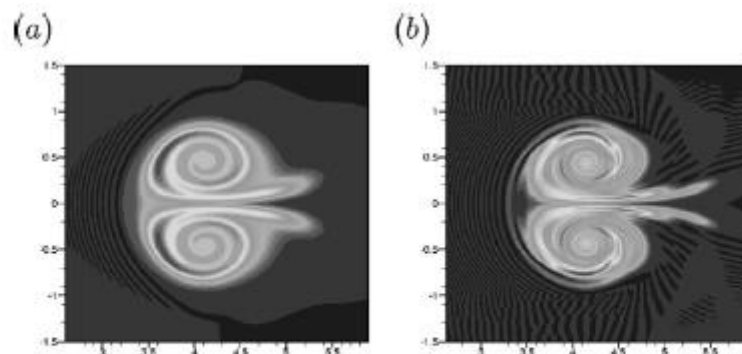


FIG. 4. Final stage in the evolution of the jet in the model problem. (a)  $Re=1000$  and (b)  $Re=10\,000$ . The counter-rotating vortex pair is clearly seen.

รูปที่ 2.31

เจ็ตที่ end view เมื่อเสถียรแล้ว (Muppidi and Mahesh, 2006)

a.)  $Re_{cf} = 1,000$

b.)  $Re_{cf} = 10,000$

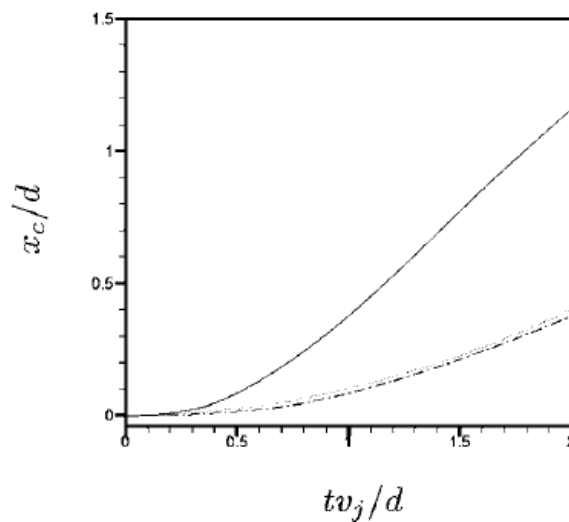


FIG. 8. Position of the jet plotted against the time. —,  $r=1.0$  and  $Re_{cf}=10\,000$ ; ..... ,  $r=2.0$  and  $Re_{cf}=5000$ ; -·-,  $r=2.0$  and  $Re_{cf}=10\,000$ .

รูปที่ 2.32

ผลของ  $r$  และ  $Re_{cf}$  ต่อเส้นทางการเดินของเจ็ต

(Muppidi and Mahesh, 2006)

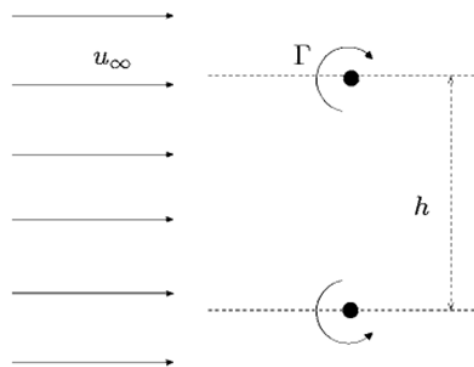
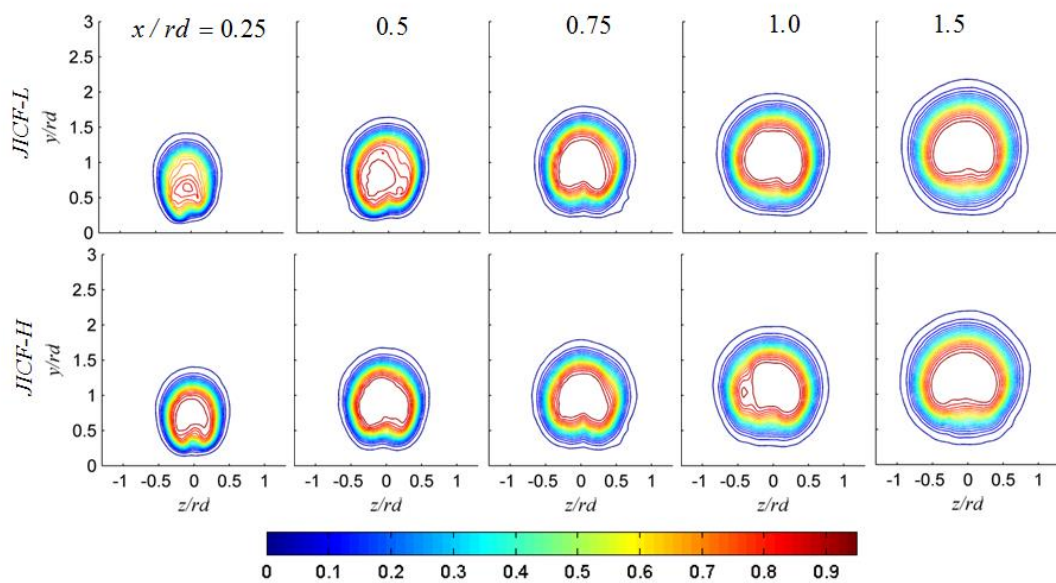


FIG. 16. Schematic of the flow in the far field, dominated by the counter-rotating vortex pair.

TABLE I. Variation of translation velocity ( $u_{final}$ ) in the constant-velocity regime with Reynolds number.

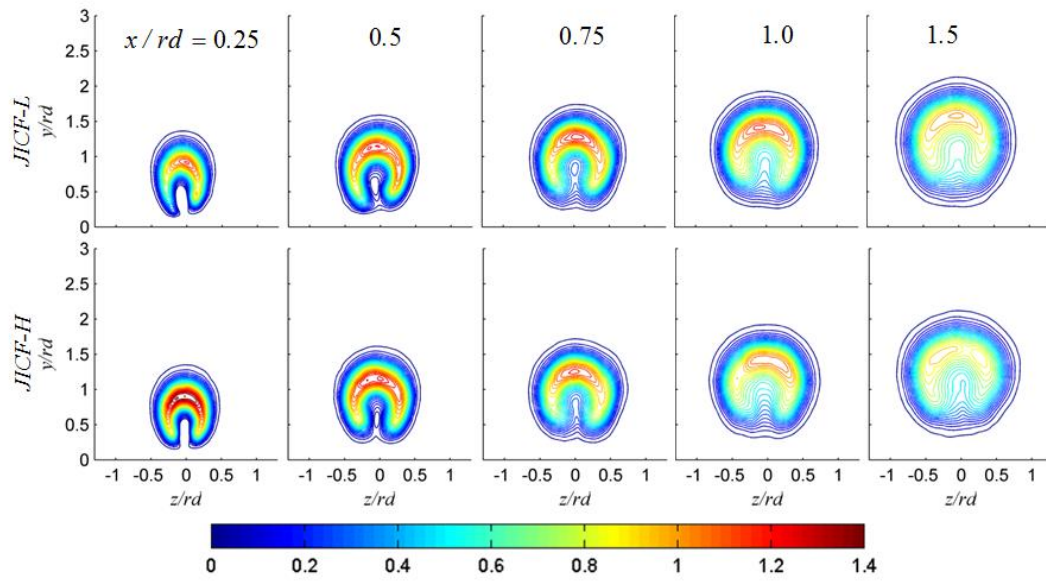
$v_j/u_\infty$	Re	$u_{final}/u_\infty$	$u_{induced}/u_\infty$
1	1000	0.784	0.2160
1	10000	0.684	0.3160
1	100000	0.488	0.5120

รูปที่ 2.33 ผล  $Re_{cf}$  ต่อ  $u_{final}$  และ  $u_{induced}$  (Muppidi and Mahesh, 2006)

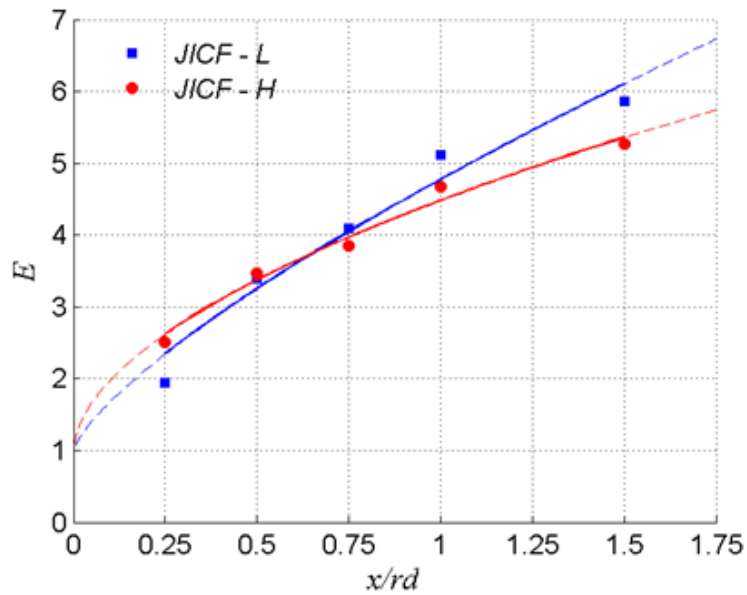


รูปที่ 2.34 ผลของ  $Re_{cf}$  ต่อความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ (Wongthongsiri and Bunyajitradulya, 2014)

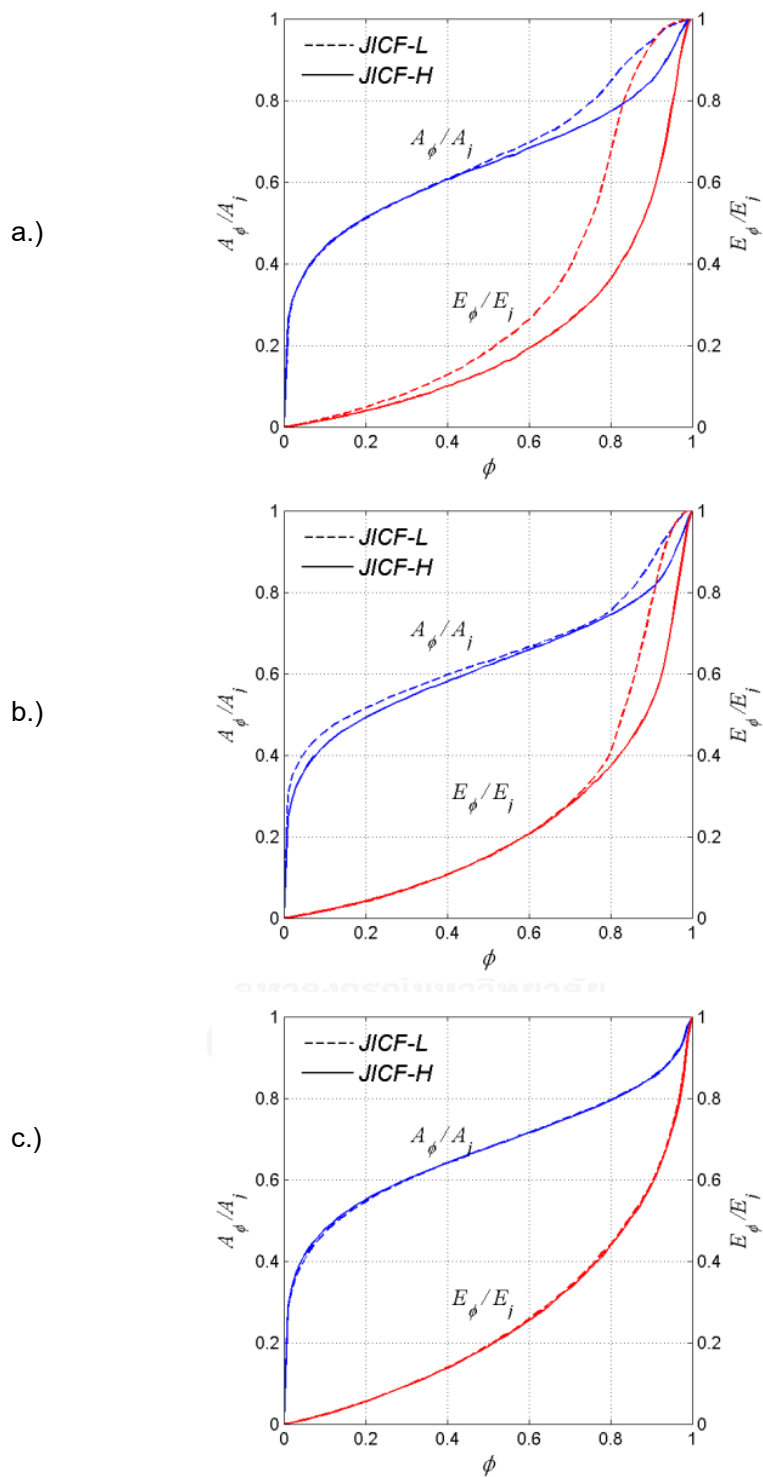




รูปที่ 2.35 ผลของ  $Re_{cf}$  ต่อความเร็วตามแนวการไหล (Streamwise velocity) (Wongthongsiri and Bunyajitradulya, 2014)



รูปที่ 2.36 ผลของ  $Re_{cf}$  ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (Wongthongsiri and Bunyajitradulya, 2014)

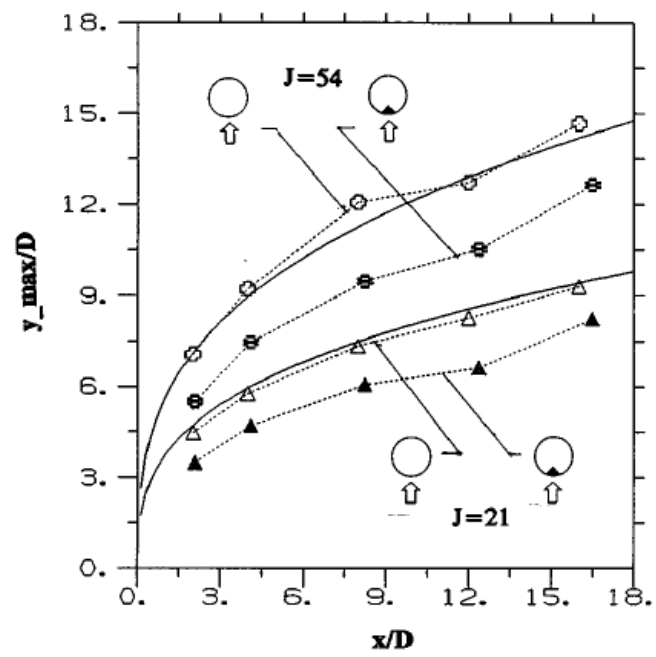


รูปที่ 2.37

ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดที่จุดใด ๆ ต่อพื้นที่ และอัตราส่วนการเหนียวนำการผสม

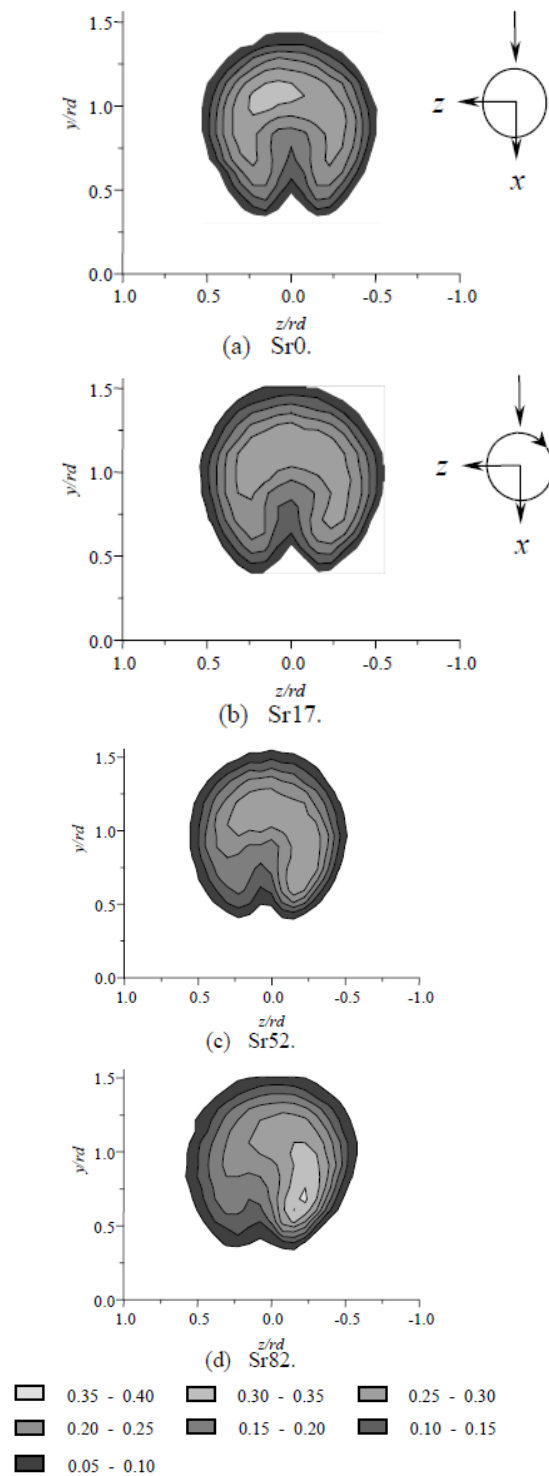
(Wongthongsiri and Bunyajitradulya, 2014)

a.)  $x/rd = 0.25$       b.)  $x/rd = 0.5$       c.)  $x/rd = 1.5$

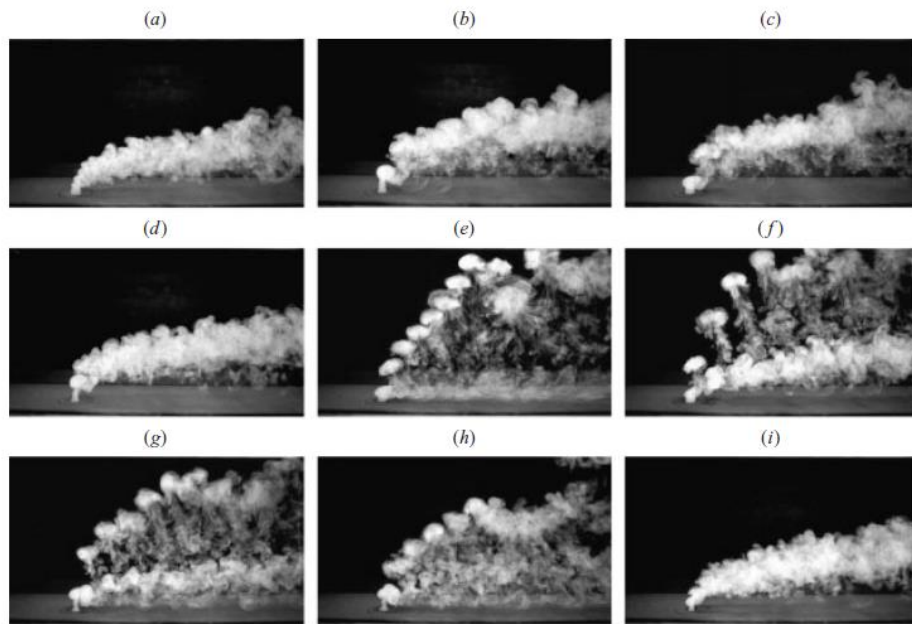


รูปที่ 2.38

เส้นทางการไหลของเจ็ตของเจ็ตที่มีวาล์วตัด tab (Zaman and Foss, 1997)



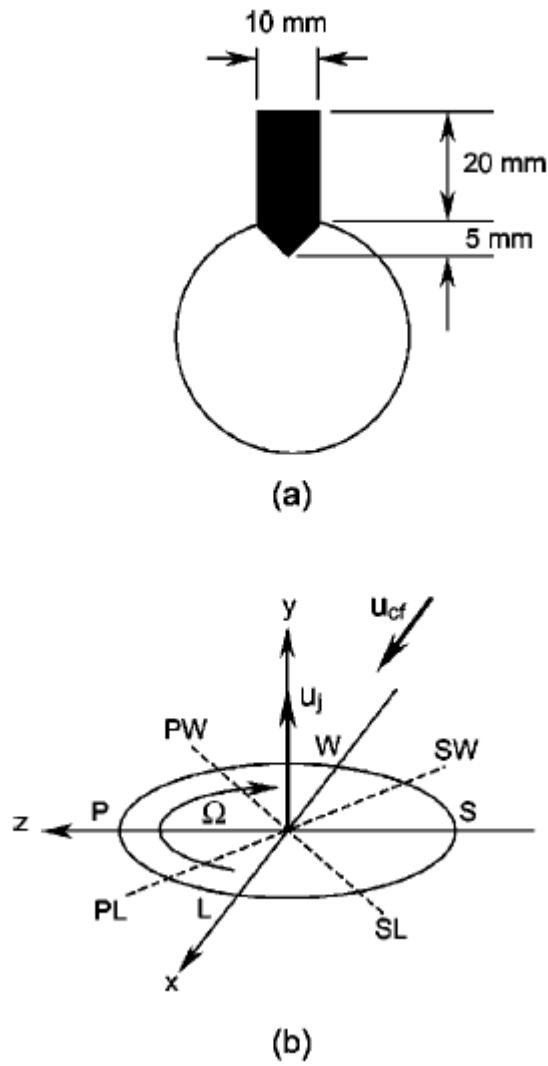
รูปที่ 2.39 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิตั้งฉาก (Wangjiraniran and Bunyajitradulya, 2001)



รูปที่ 2.40

ผลของการกระตุ้นด้วย Pulse (M'Closkey et. al., 2002)

- a.) JICF
- b.) Uncompensate เจ็ต ที่กระตุ้นด้วย sine wave ความถี่ 73.5 Hz
- c.) Compensate เจ็ต ที่กระตุ้นด้วย sine wave ความถี่ 73.5 Hz
- d.) Uncompensate เจ็ต ที่กระตุ้นด้วย square wave ความถี่ 110 Hz duty cycle 31%
- e.) Compensate เจ็ต ที่กระตุ้นด้วย square wave ความถี่ 110 Hz duty cycle 31%
- f.) Compensate เจ็ต ที่กระตุ้นด้วย square wave ความถี่ 55 Hz duty cycle 15%
- g.) Compensate เจ็ต ที่กระตุ้นด้วย square wave ความถี่ 73.5 Hz duty cycle 22%
- h.) Compensate เจ็ต ที่กระตุ้นด้วย square wave ความถี่ 85 Hz duty cycle 24%
- i.) Compensate เจ็ต ที่กระตุ้นด้วย square wave ความถี่ 220 Hz duty cycle 62%



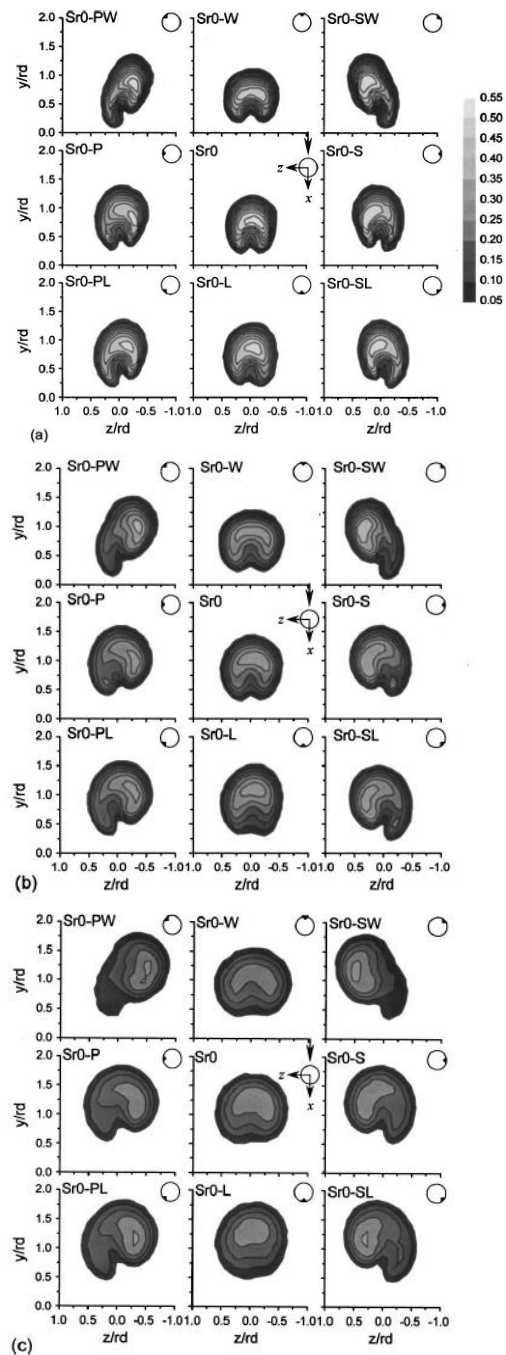
รูปที่ 2.41

ตำแหน่ง tab และระบบแกน

(Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)

a.) Tab และการติดตั้ง

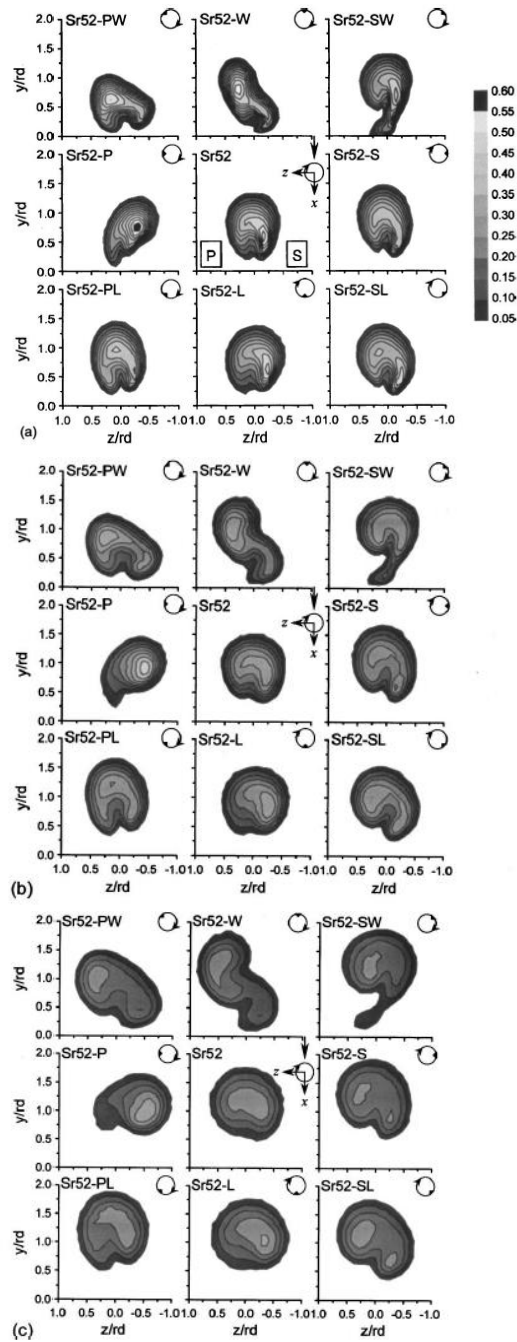
b.) ระบบแกน และทิศทางการหมุน



รูปที่ 2.42

การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการติด tab กรณีเจ็ตไม่หมุนควง  
(Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)

- a.)  $x / rd = 0.25$
- b.)  $x / rd = 0.5$
- c.)  $x / rd = 1.0$

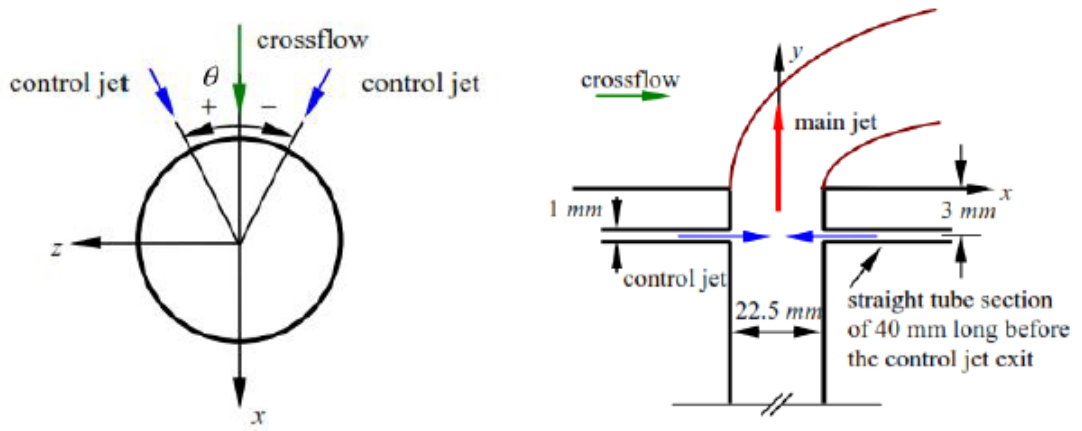


รูปที่ 2.43

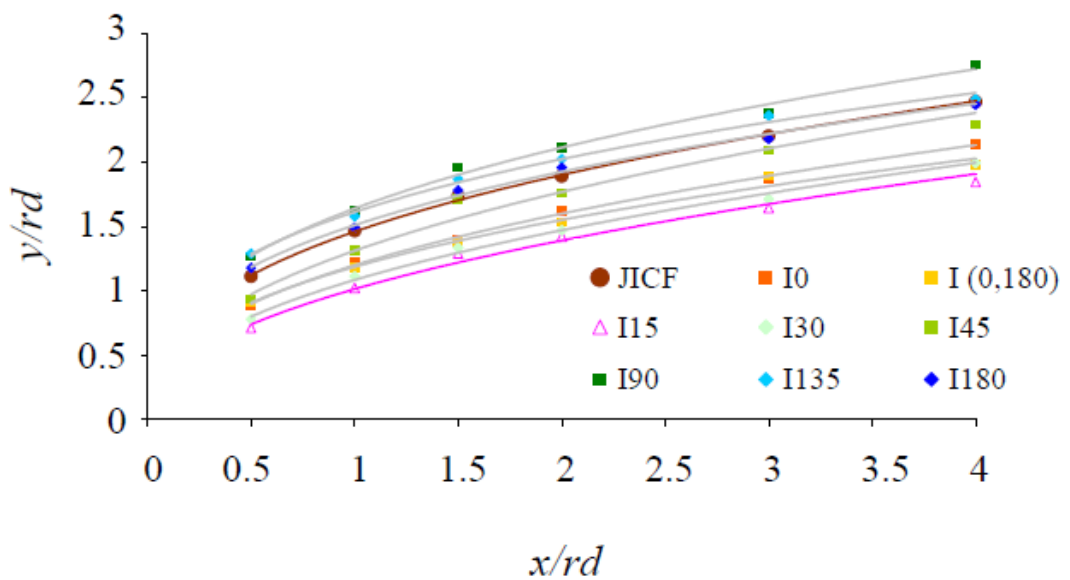
การกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสจากการติด tab กรณีเจ็ตหมุนควง  
(Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)

- a)  $x / rd = 0.25$
- b)  $x / rd = 0.5$
- c)  $x / rd = 1.0$

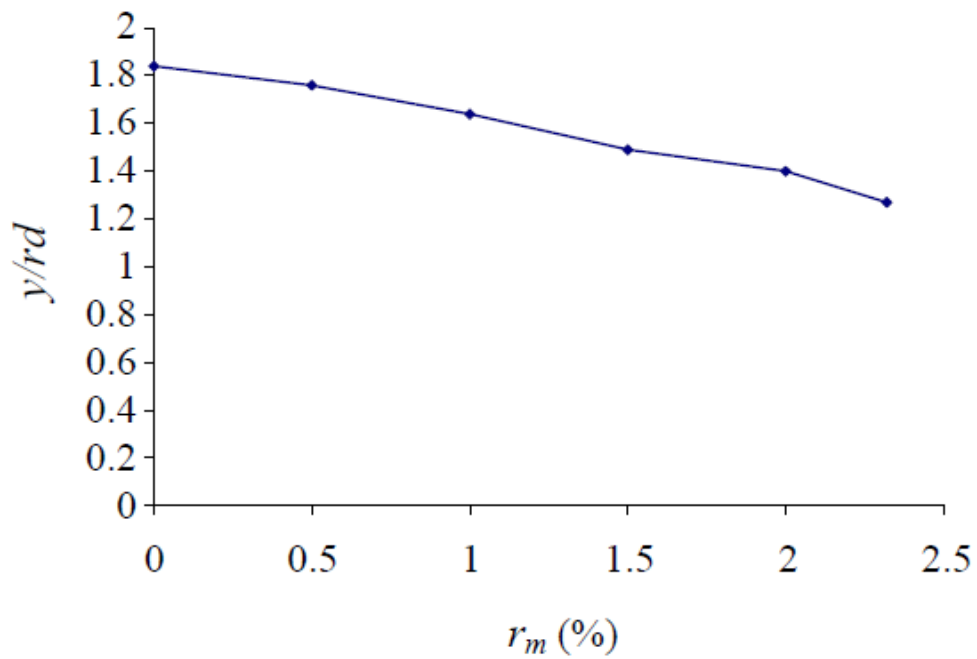




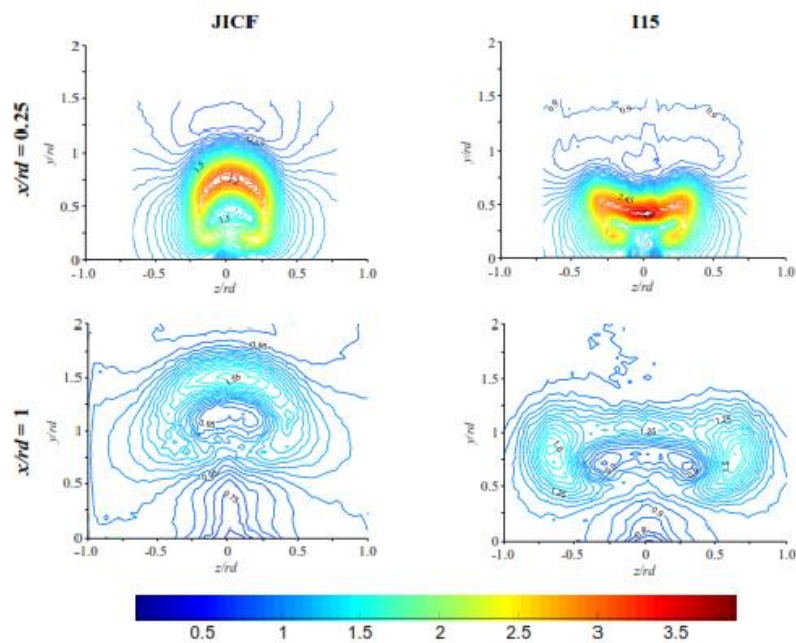
รูปที่ 2.44 ลักษณะของเจ็ตควบคุม (Azimuthal control jets) (Kornsri et al., 2009)



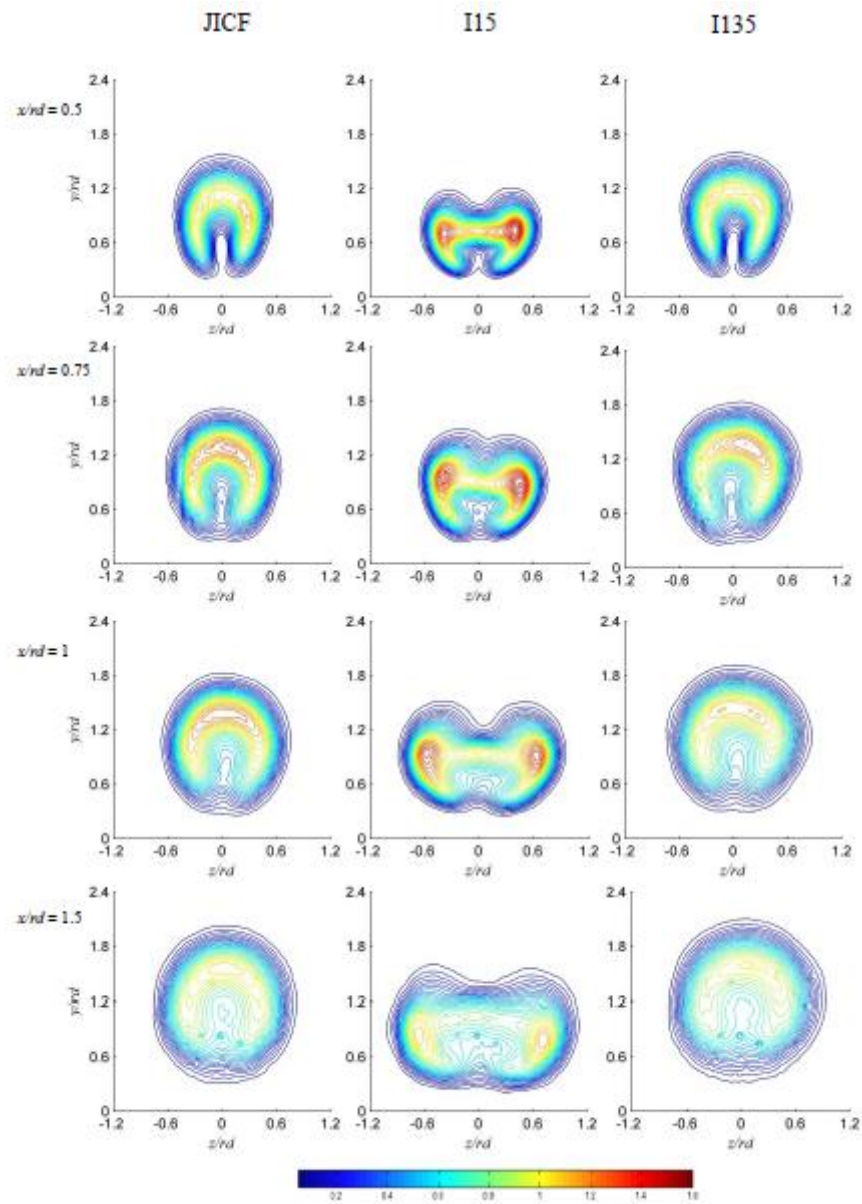
รูปที่ 2.45 ผลของมุมที่ฉีดเจ็ตควบคุม (Azimuthal control jets) ต่อเส้นทางการเดินของเจ็ต โดยที่ I0 = ฉีดที่มุม  $\pm 0$  จาก windward side, I15 = ฉีดที่มุม  $\pm 15$ , .... (Kornsri et al., 2009)



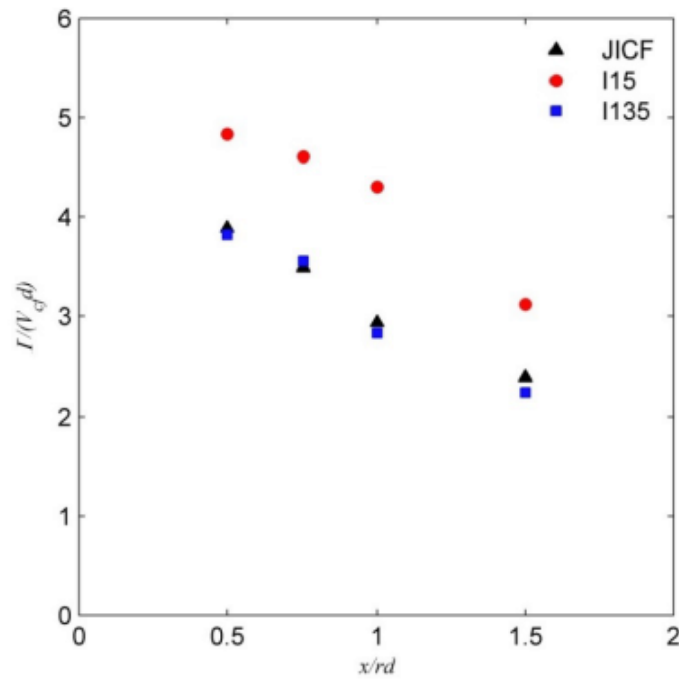
รูปที่ 2.46 ผล  $r_m$  ต่อเส้นทางการเดินของเจ็ตที่ตำแหน่ง  $x = 1.5 rd$  ของกรณี I15 (Kornsri et al., 2009)



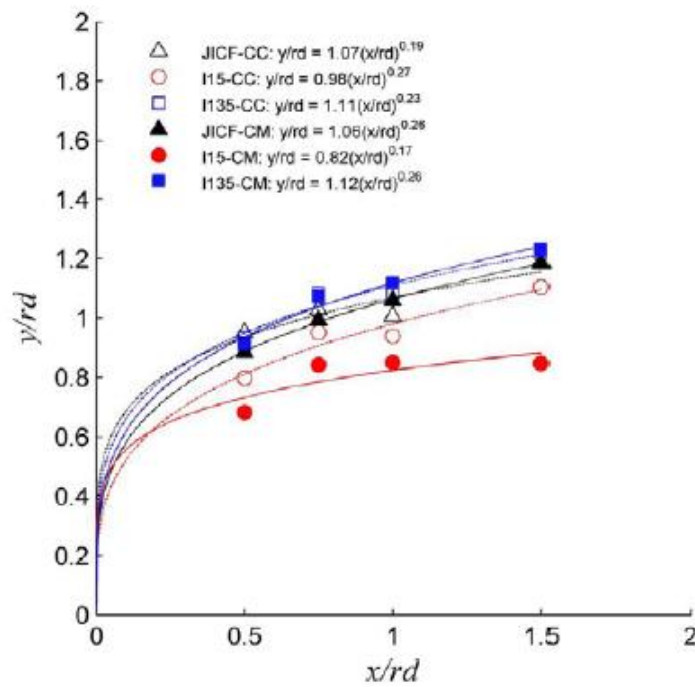
รูปที่ 2.47 โครงสร้างของ JICF และ I15 ด้วย contour plot ของ  $V_j / u_{cf}$  ที่ตำแหน่ง  $x = 0.5, 1.5 rd$  (Kornsri et al., 2009)



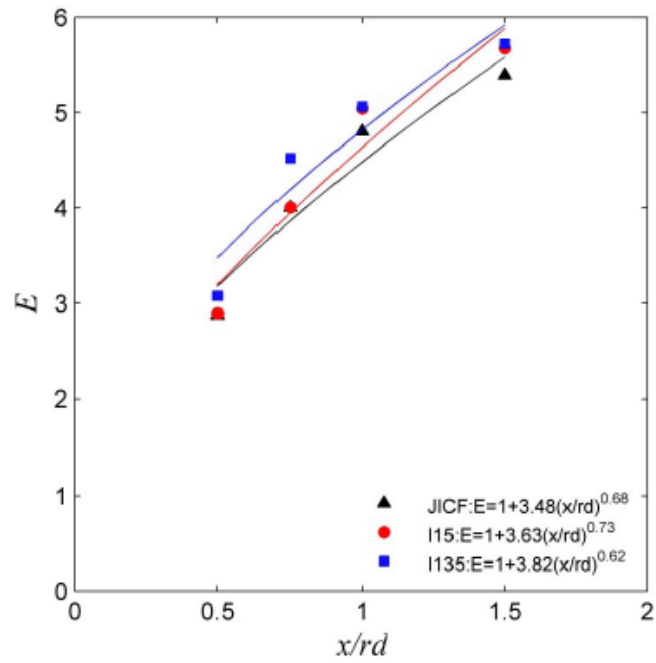
รูปที่ 2.48 โครงสร้างของเจ็ตที่พิจารณาจากการกระจายตัวความเร็วตามแนวแกน x (streamwise) ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x / u_{cf}$ ) (Witayaprapakorn, 2013)



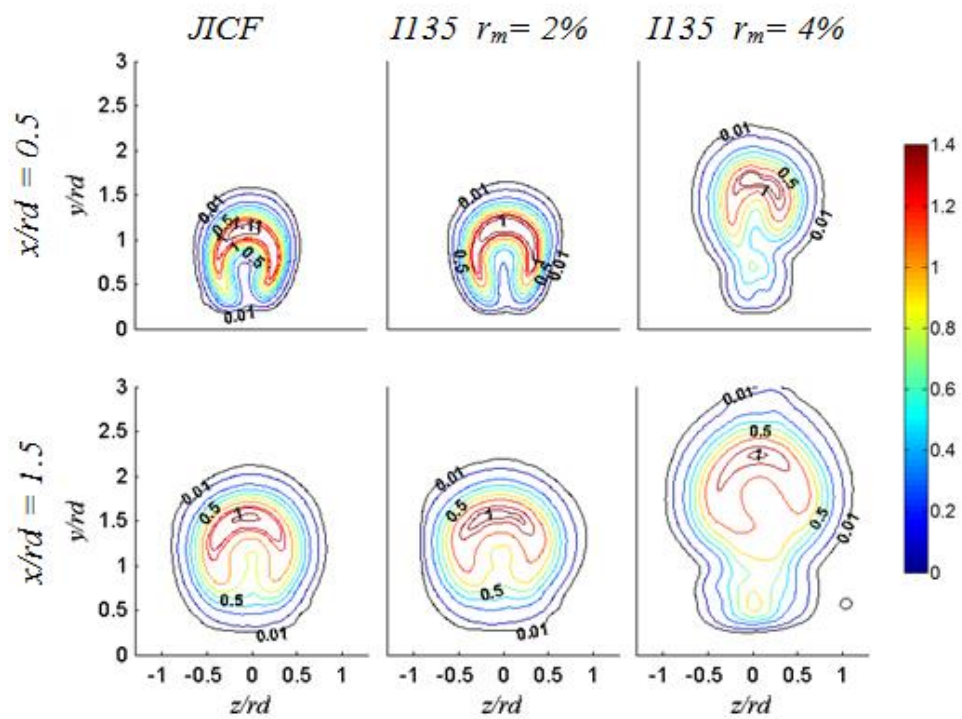
รูปที่ 2.49 ผลของเซเจตควบคุมต่อ circulation เรมตตามแนว downstream (Witayaprapakorn, 2013)



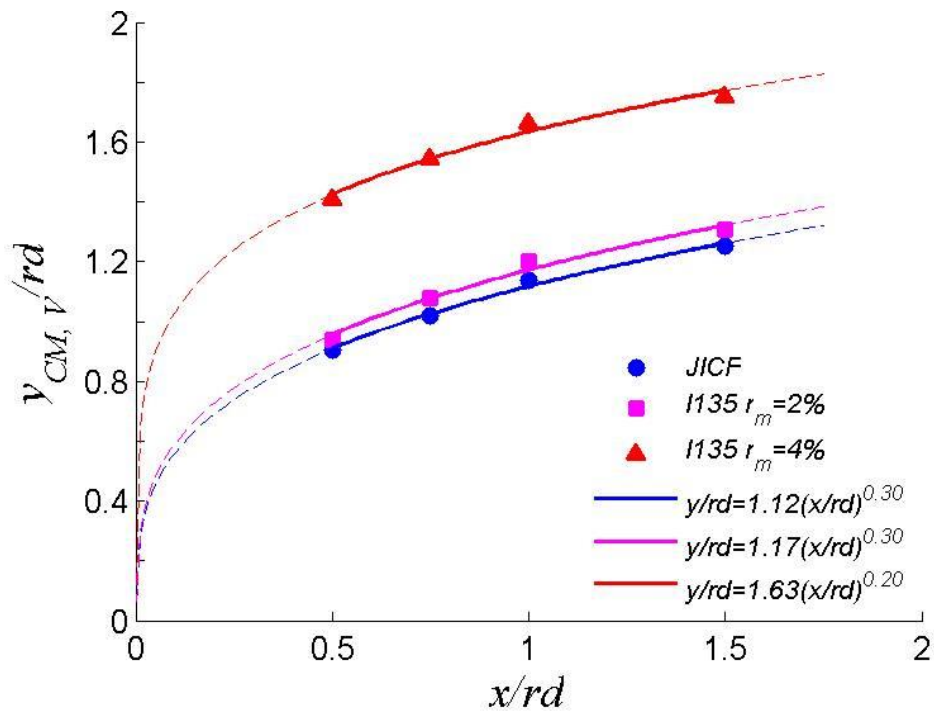
รูปที่ 2.50 ผลของใช้เจ็ตควบคุมต่อ CC และ CM ของผลรวมความเร็ว (V) (Witayaprapakorn, 2013)



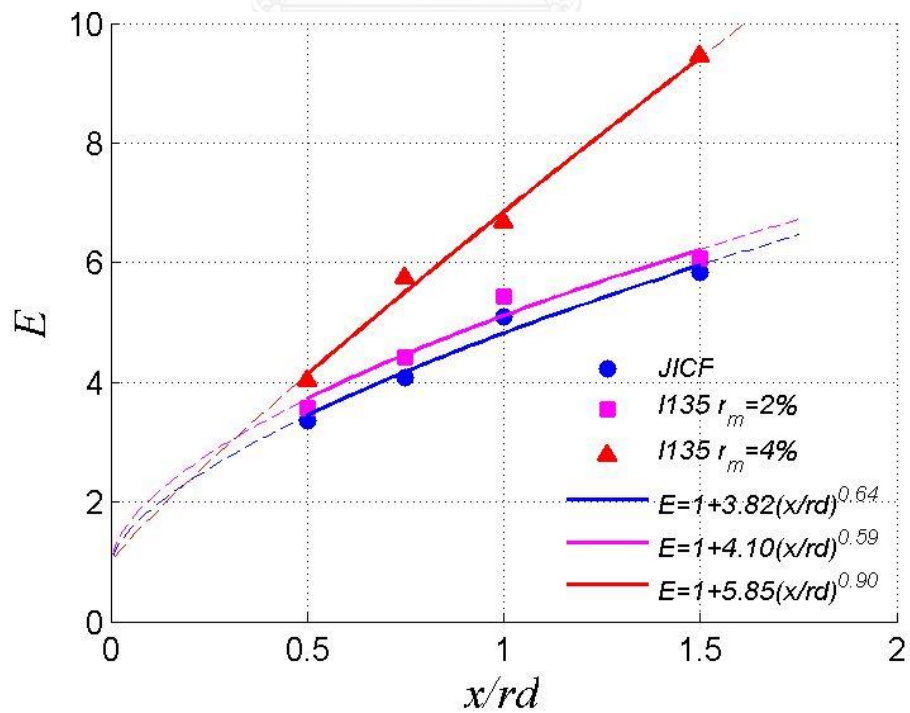
รูปที่ 2.51 ผลของใช้เจ็ตควบคุมต่อ entrainment ที่ระนาบและกรณีต่างๆ (Witayaparakorn, 2013)



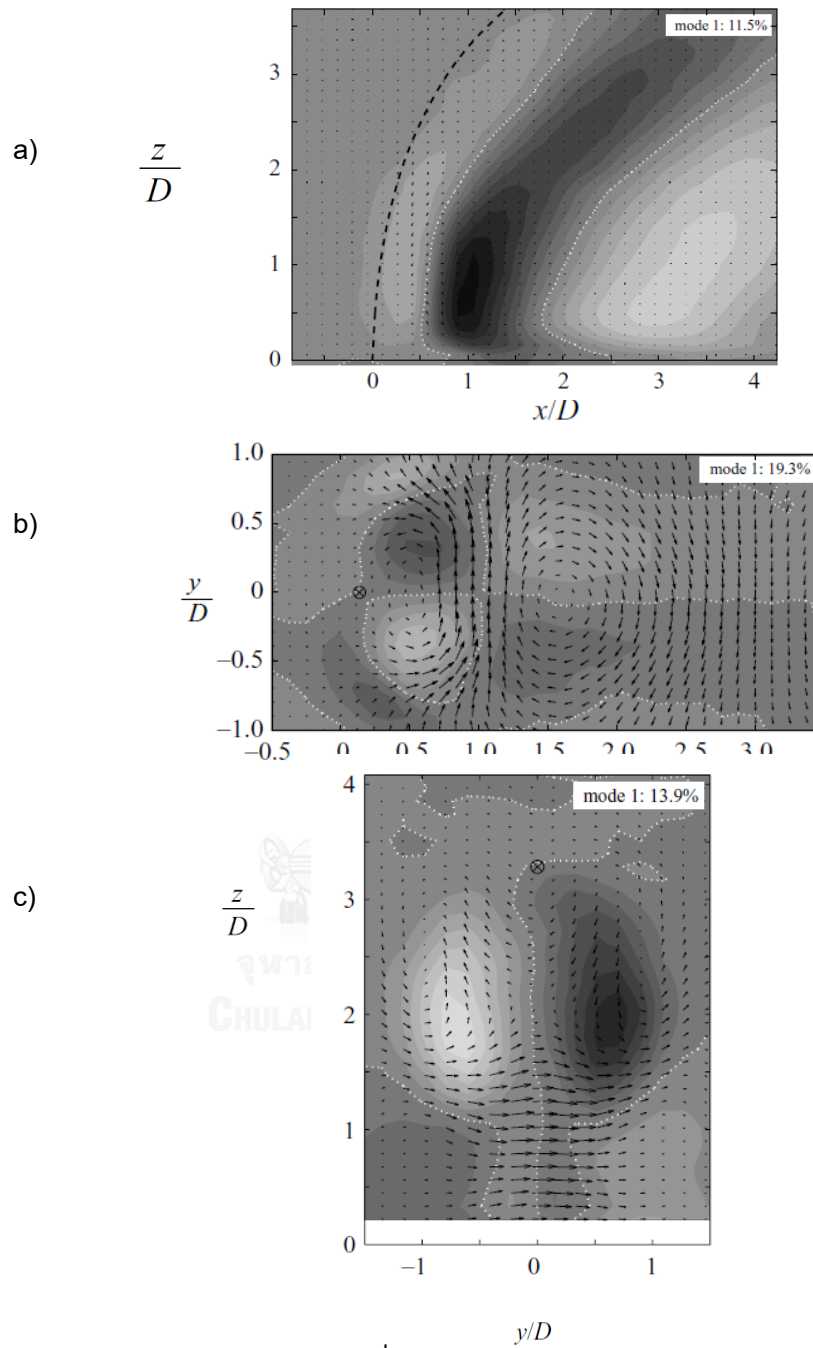
รูปที่ 2.52 โครงสร้างของเจ็ตที่พิจารณาจากการกระจายตัวความเร็วตามแนวแกน x (streamwise) ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x / u_{cf}$ ) (Chaikasetin et al., 2014)



รูปที่ 2.53 ผลของ  $r_m$  ต่อเส้นทางการไหลของเจ็ต (Chaikasetsin et al., 2014)

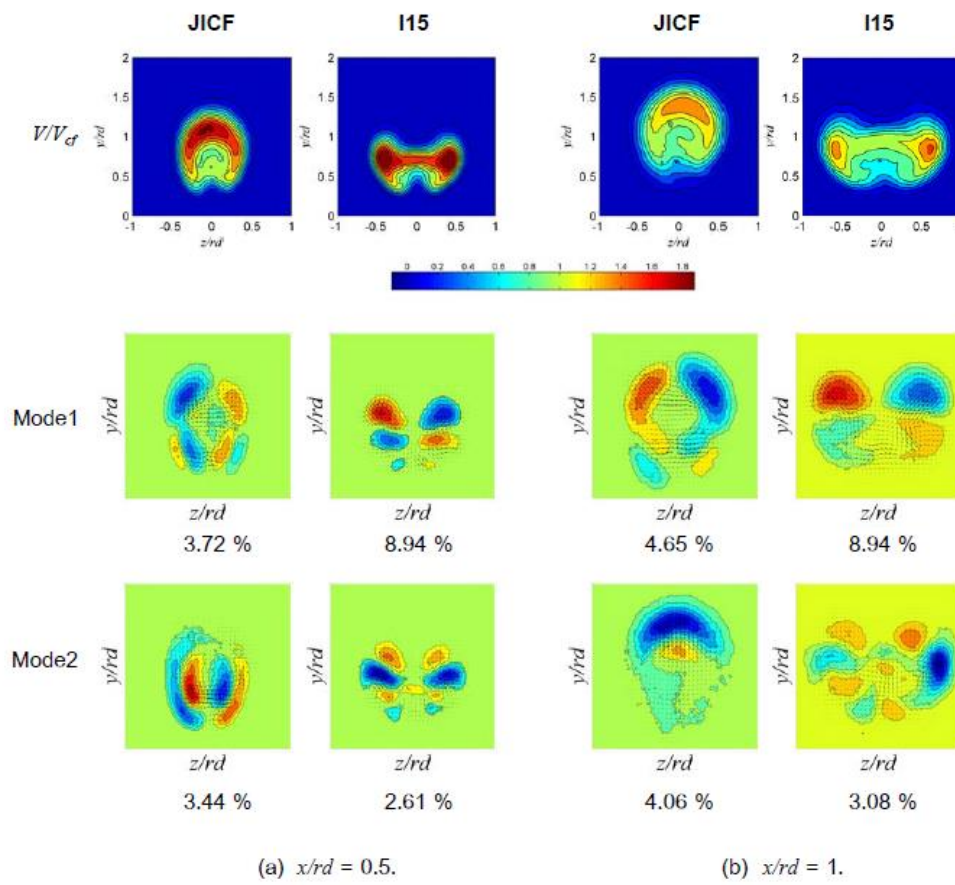


รูปที่ 2.54 ผลของ  $r_m$  ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (Chaikasetsin et al., 2014)



รูปที่ 2.55 โครงสร้างที่มีพลังงานปั่นป่วนสูงสุด (POD mode 1) และระดับพลังงานของเจ็ตในกระแสมขวาง (Meyer et al. 2007)

- a) Side view
- b) Top view
- c) End view

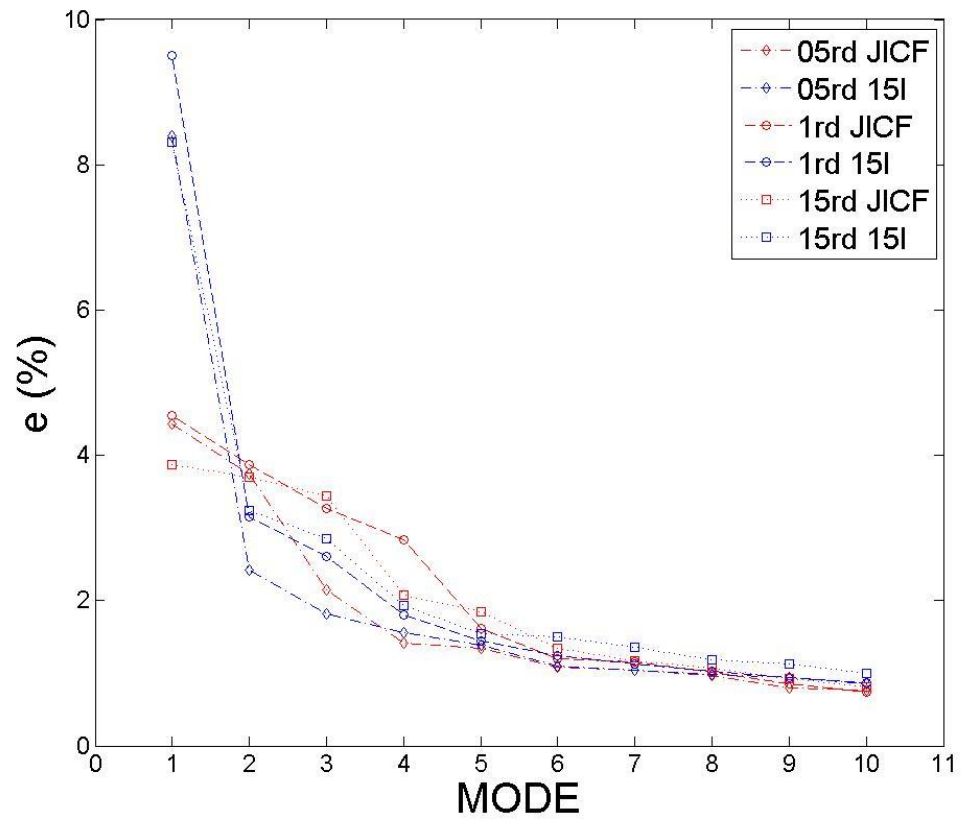
(a)  $x/rd = 0.5$ .(b)  $x/rd = 1$ .

รูปที่ 2.56 โครงสร้างที่มีพลังงานปั่นป่วนสูงสุด 2 โหมดแรก (POD mode 1 and 2) ของกรณี JICF และ I15 (Srimekharat and Bunyajitradulya, 2013)

a)  $x/rd = 0.5$

b)  $x/rd = 1.0$

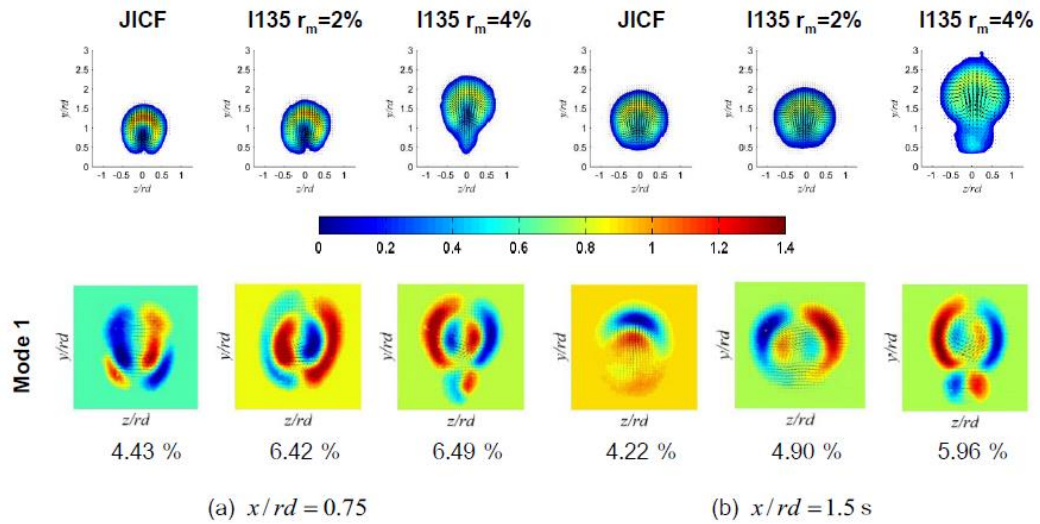




รูปที่ 2.57

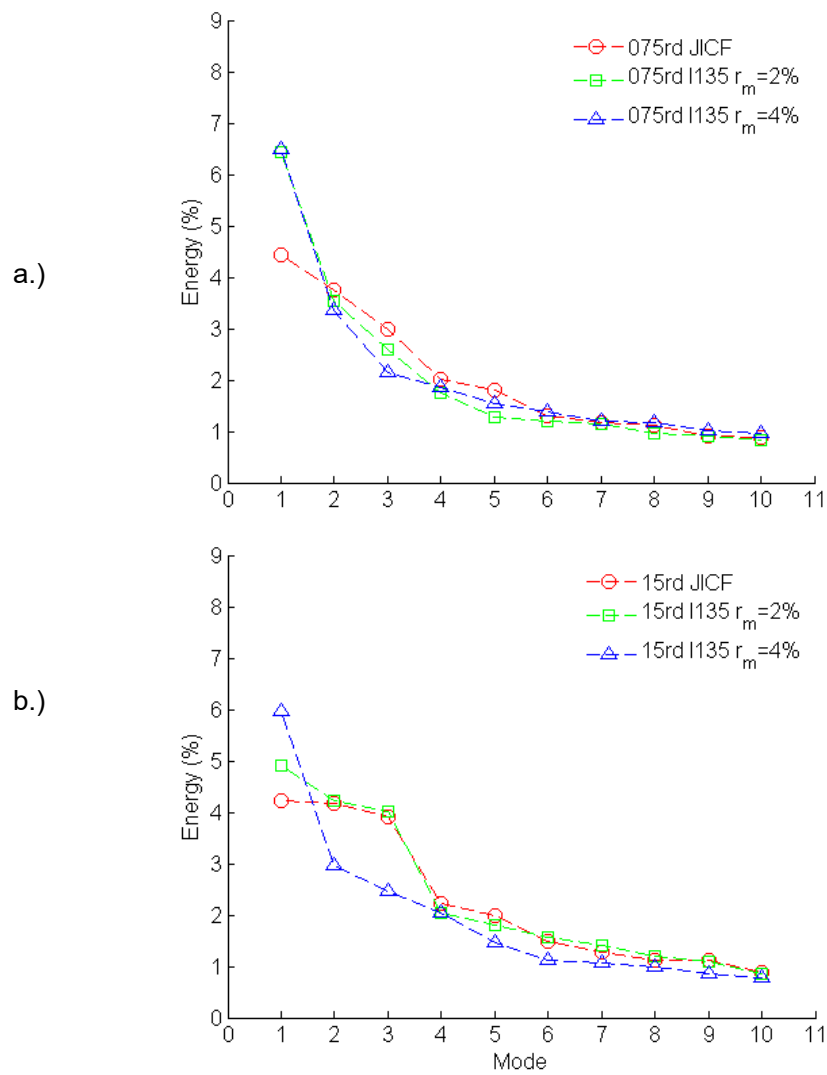
การกระจายตัวของระดับพลังงานในแต่ละโหมดที่ระนาบ

$x/rd = 0.5, 1.0, 1.5$  (Srimekharat and Bunyajitradulya, 2013)



รูปที่ 2.58 โครงสร้างที่มีพลังงานปั่นป่วนสูงสุด (POD mode 1) ของกรณี JICF และ I135 ที่  $r_m = 2 - 4\%$  (Dawyok and Bunyajitradulya, 2013)

- a)  $x/rd = 0.75$   
 b)  $x/rd = 1.5$



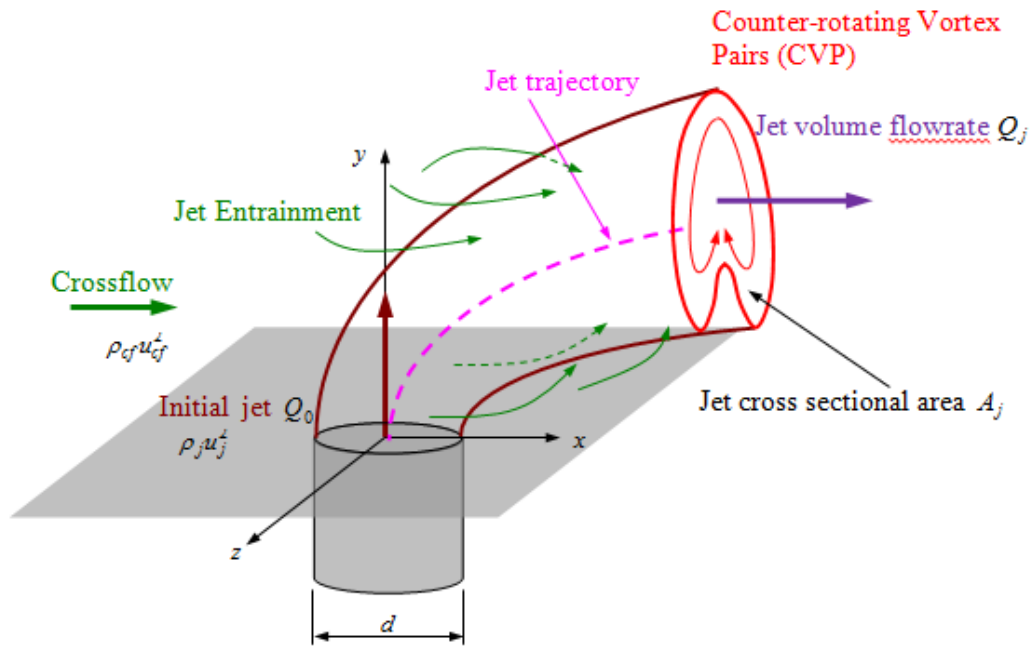
รูปที่ 2.59

การกระจายตัวของระดับพลังงานในแต่ละโหมด 10 โหมดแรก ของกรณี JICF และ I15 ที่  $r_m = 2-4\%$  (Dawyok and Bunyajitradulya, 2013)

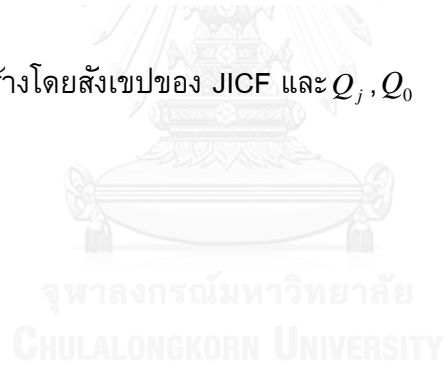
a)  $x/rd = 0.75$

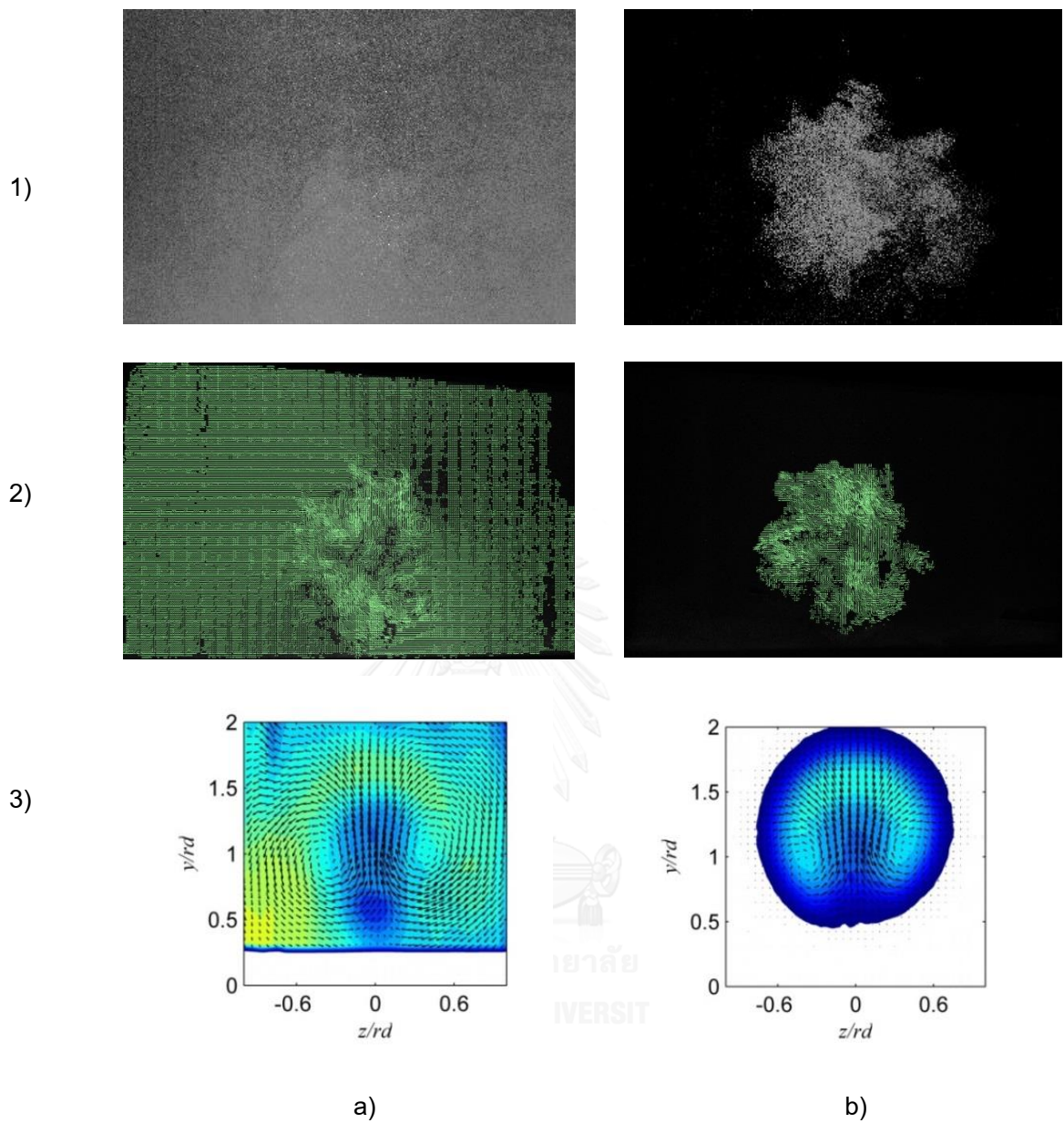
b)  $x/rd = 1.5$

### บทที่ 3



รูปที่ 3.1 โครงสร้างโดยสังเขปของ JICF และ  $Q_j, Q_0$





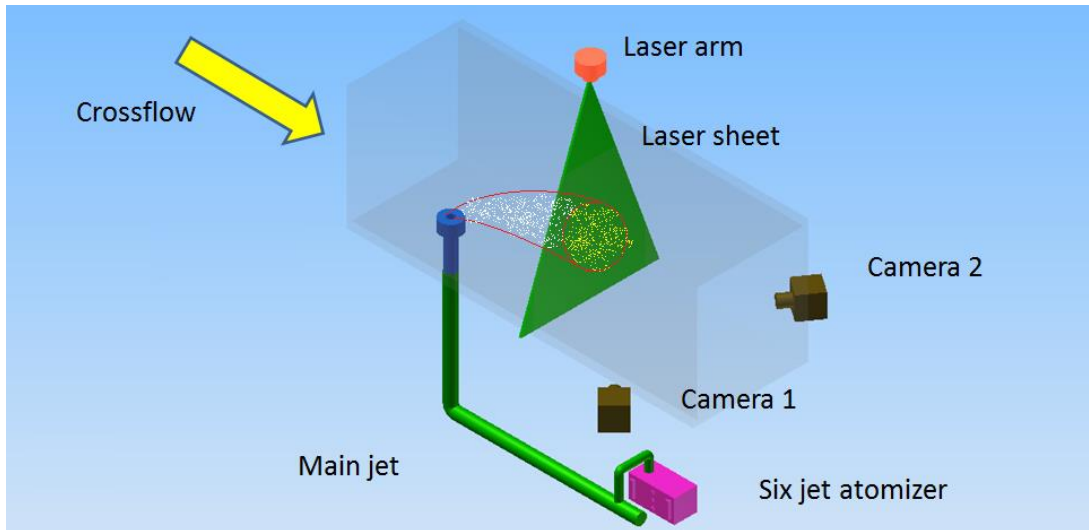
รูปที่ 3.2

รูปที่ SPIV ถ่ายได้ และเมื่อผ่านการประมวลผลหาเวกเตอร์เมื่อใส่อนุภาคติดตามการไหล

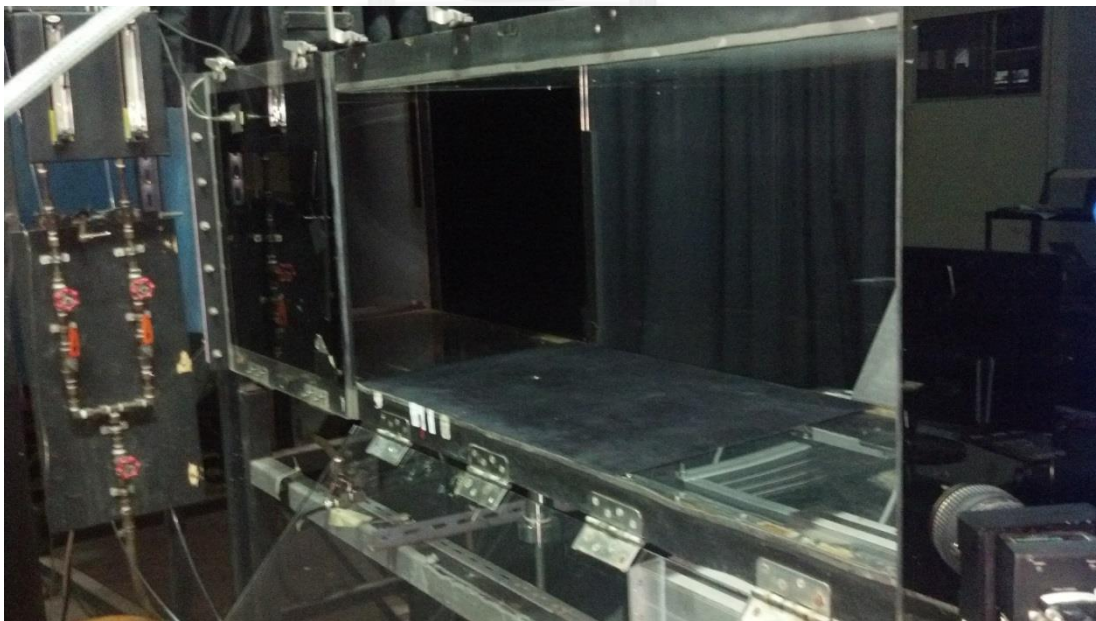
- a) ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ต และกระแสมขวาง
- b) ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น

- 1.) ภาพ ณ ขณะใดๆของ JICF
- 2.) ภาพ ณ ขณะใดๆของ JICF เมื่อผ่านการประมวลผลหาเวกเตอร์แล้ว
- 3.) ภาพเฉลี่ยของ JICF และเวกเตอร์

## บทที่ 4



รูปที่ 4.1 โครงสร้างโดยสังเขปของชุดการทดลอง



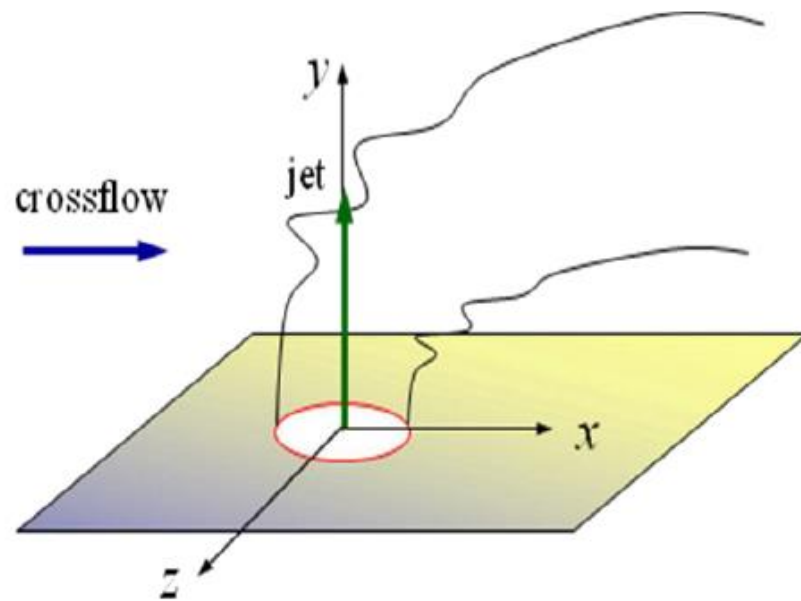
รูปที่ 4.2 อุโมงค์ลม



รูปที่ 4.3 พัดลมหอยโขงแบบ backward curve airfoil blades

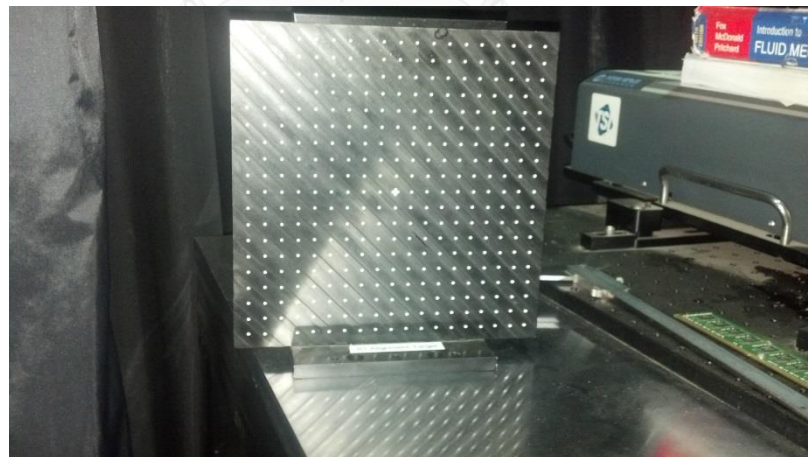


รูปที่ 4.4 พัดลม Elprom™



รูปที่ 4.5

พิกัดการทดลอง



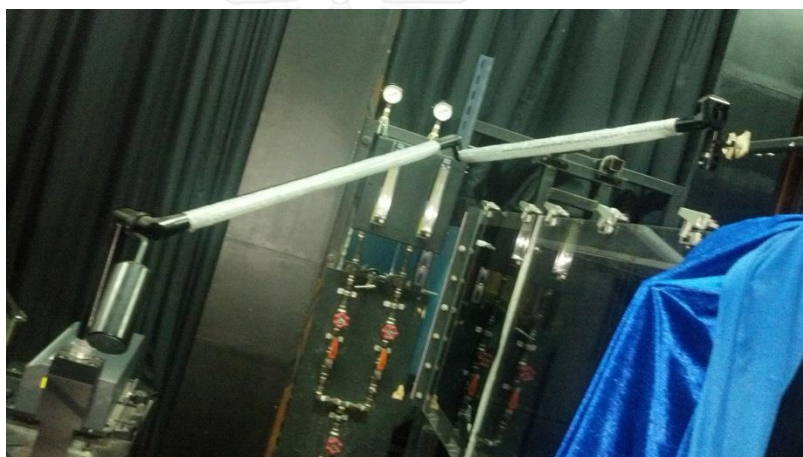
รูปที่ 4.6

แผ่น calibration





รูปที่ 4.7 เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์



รูปที่ 4.8 light Arm



รูปที่ 4.9 light sheet optics



รูปที่ 4.10 six-jet atomizer



รูปที่ 4.11 กล้อง powerview plus11MP 630062



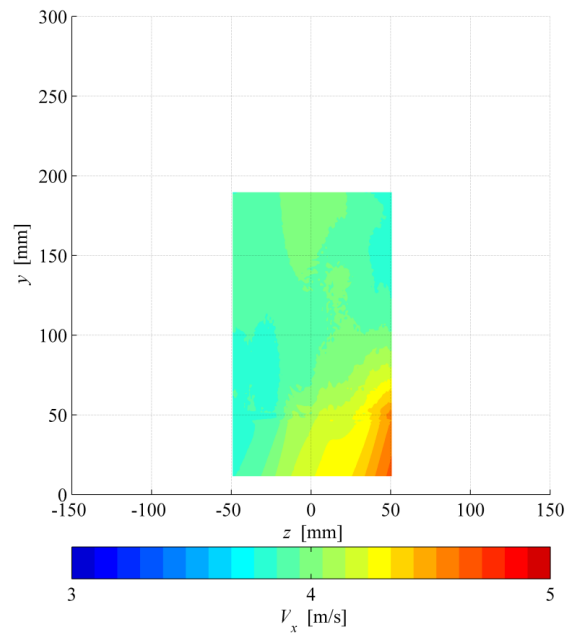
รูปที่ 4.12 เลนส์ Tokina 100 mm. Micro f/2.8 mounting



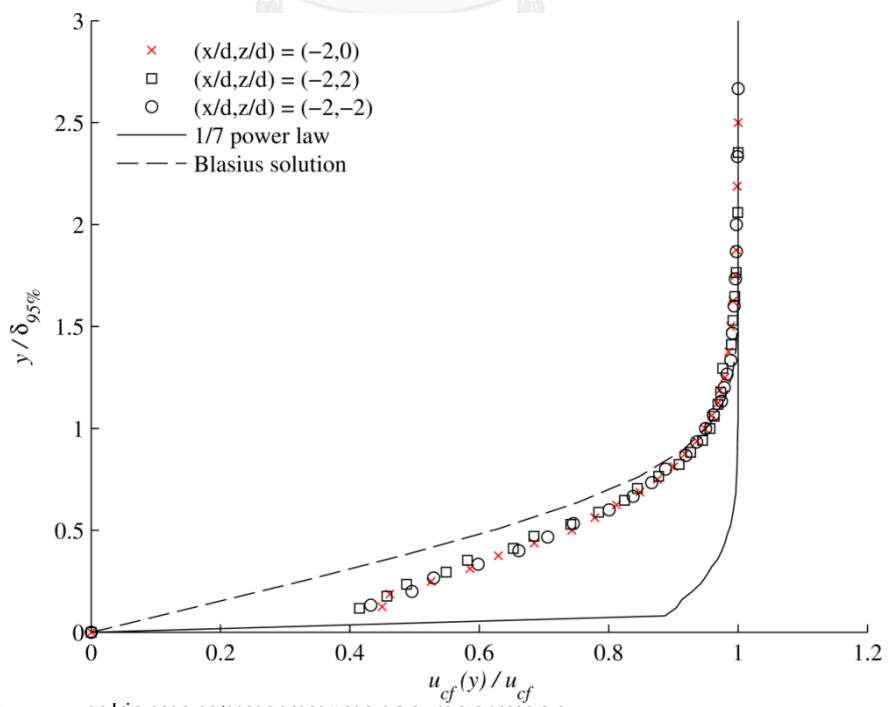
รูปที่ 4.13 เลนส์ Nikon<sup>TM</sup> (model AF 50 mm f1.8D)



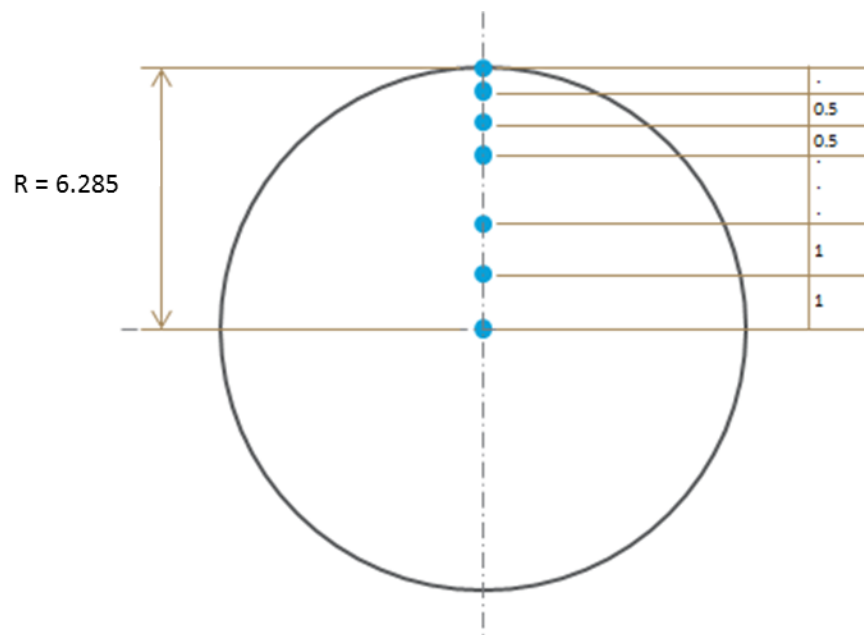
รูปที่ 4.14 Traverse



รูปที่ 4.15 ความสม่ำเสมอของความเร็วจนลึยของกระแสลมขวาง

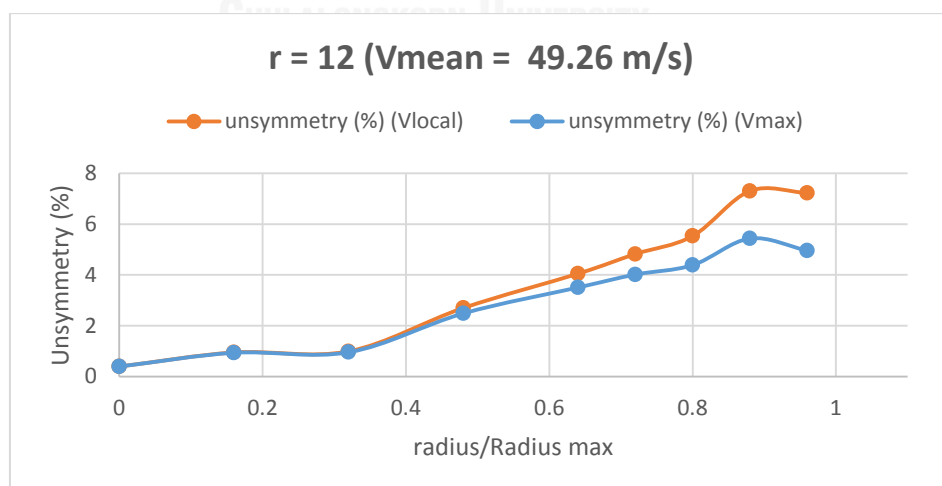
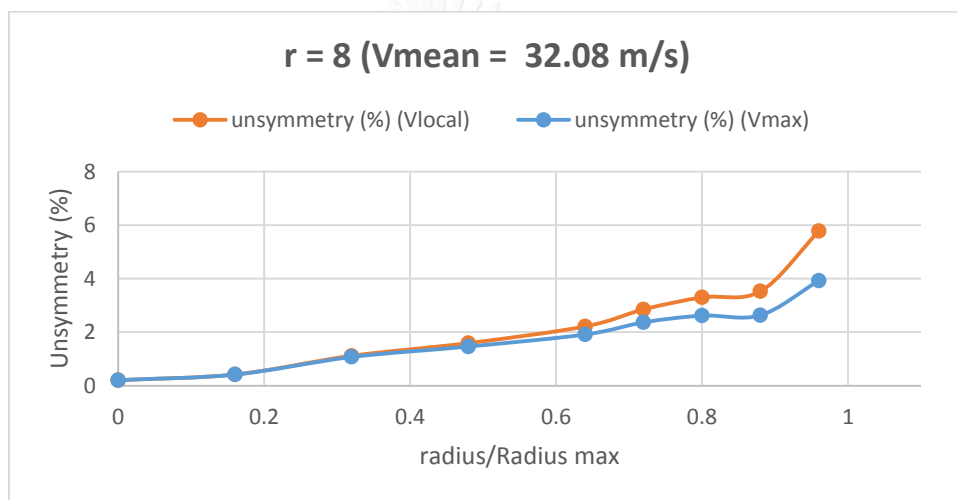
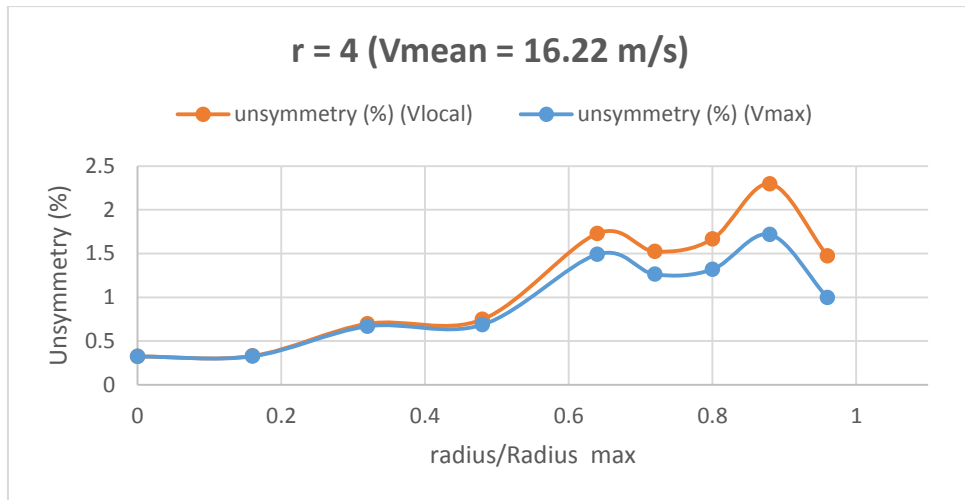


รูปที่ 4.16 รูปร่างของชนขอบเขตของกระแสลมขวาง

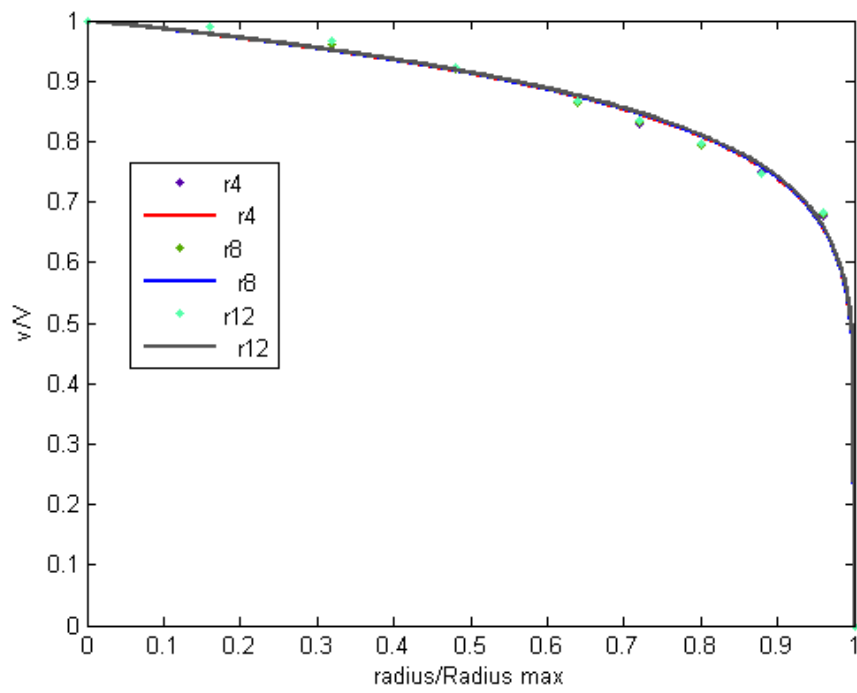


รูปที่ 4.17 ตำแหน่งในการวัดความเร็วที่สภาวะเริ่มต้นของเจ็ต

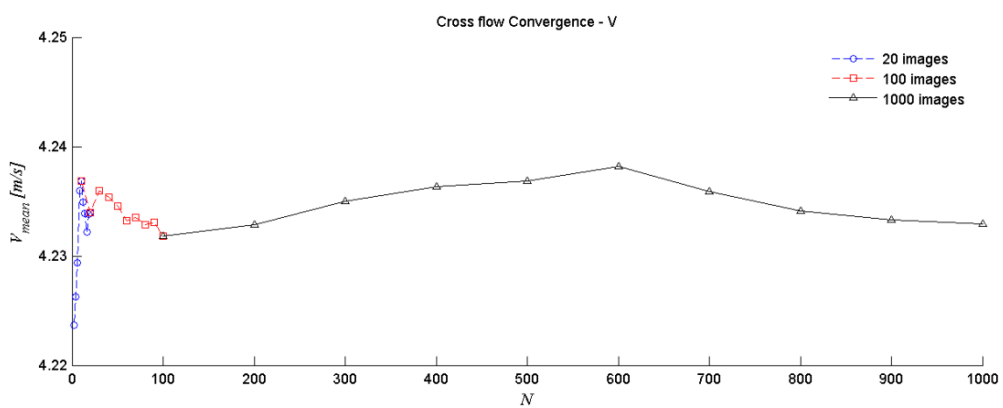




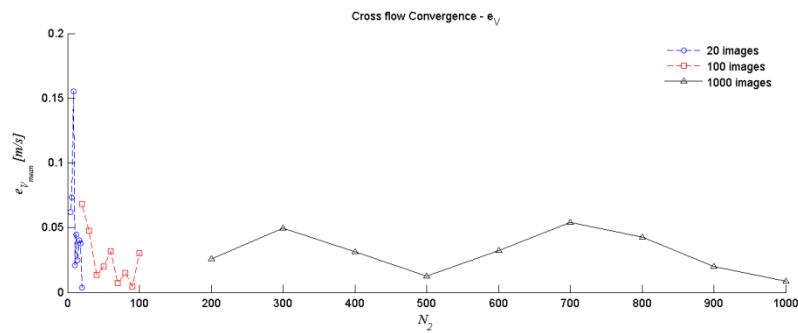
รูปที่ 4.18 เปรอเซ็นต์ความไม่สมมาตรของเจ็ตเมื่อเทียบกับความเร็วเฉลี่ยที่แต่ละรัศมีกรณี  $r = 4, 8, 12$



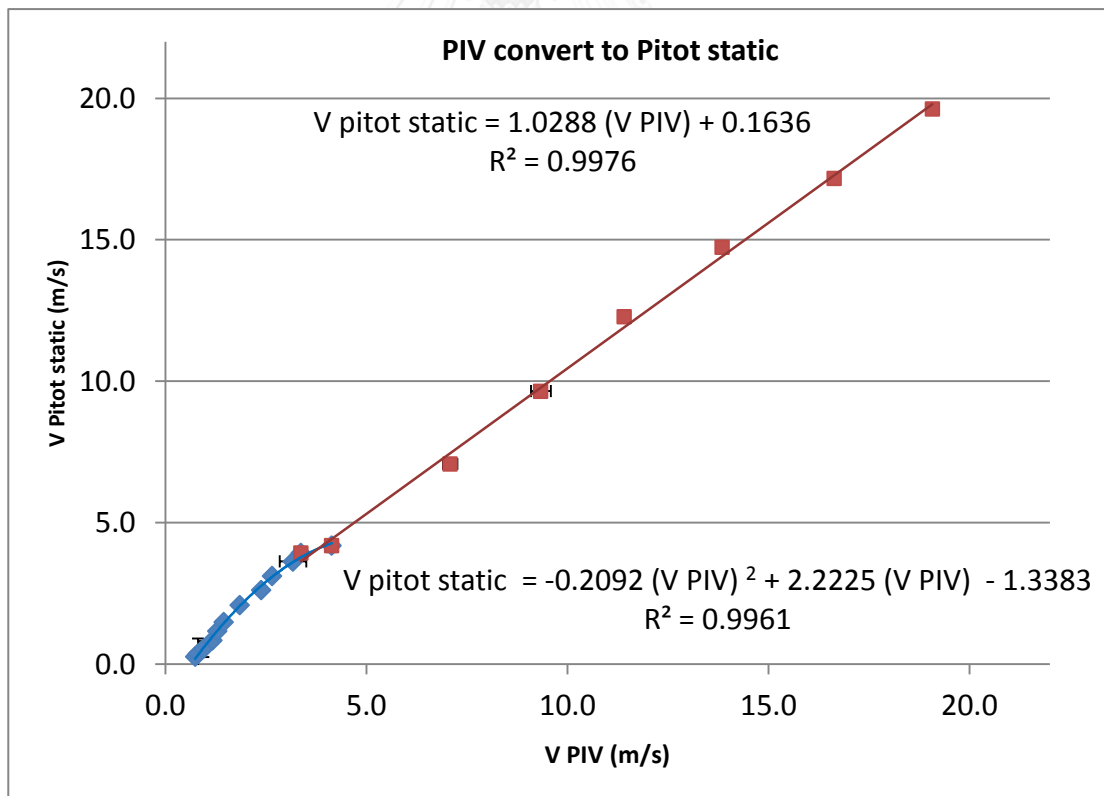
รูปที่ 4.19 ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตตามแนวแกน  $y$  ที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีต่างๆ



รูปที่ 4.20 แสดงผลความเร็วเฉลี่ยที่จำนวนภาพแตกต่างกัน



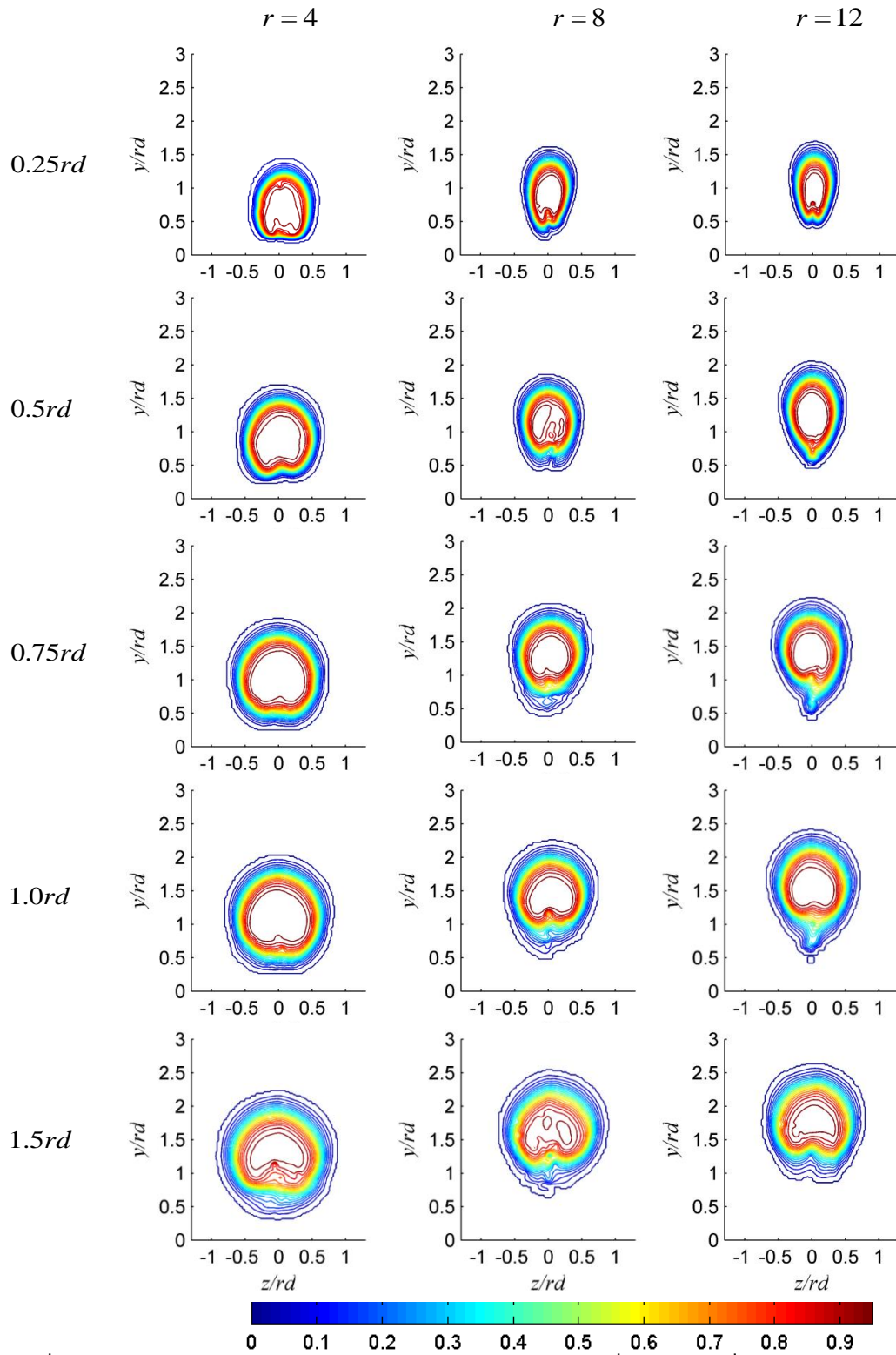
รูปที่ 4.21 แสดงผลความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยที่จำนวนภาพแตกต่างกัน



รูปที่ 4.22 แสดงผลการสอบเทียบที่ความเร็วต่างๆ และ Curve fitting โดยที่แบ่งเป็น 2 ช่วง คือสีฟ้าที่เป็นช่วงความเร็วต่ำ และสีแดงที่เป็นช่วงความเร็วสูง

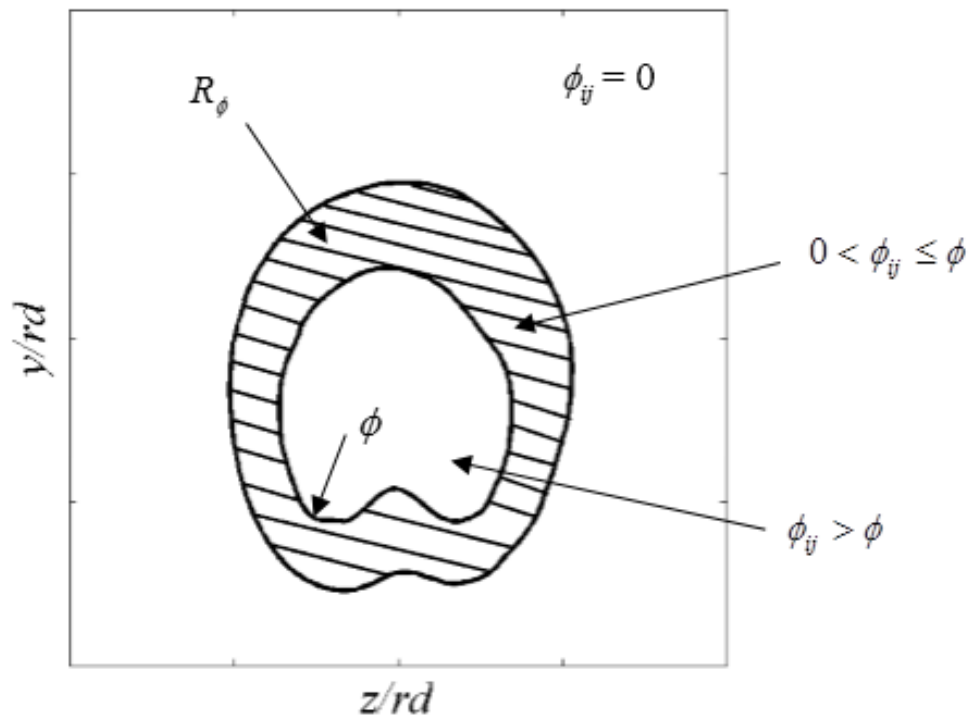


บทที่ 5



รูปที่ 5.1

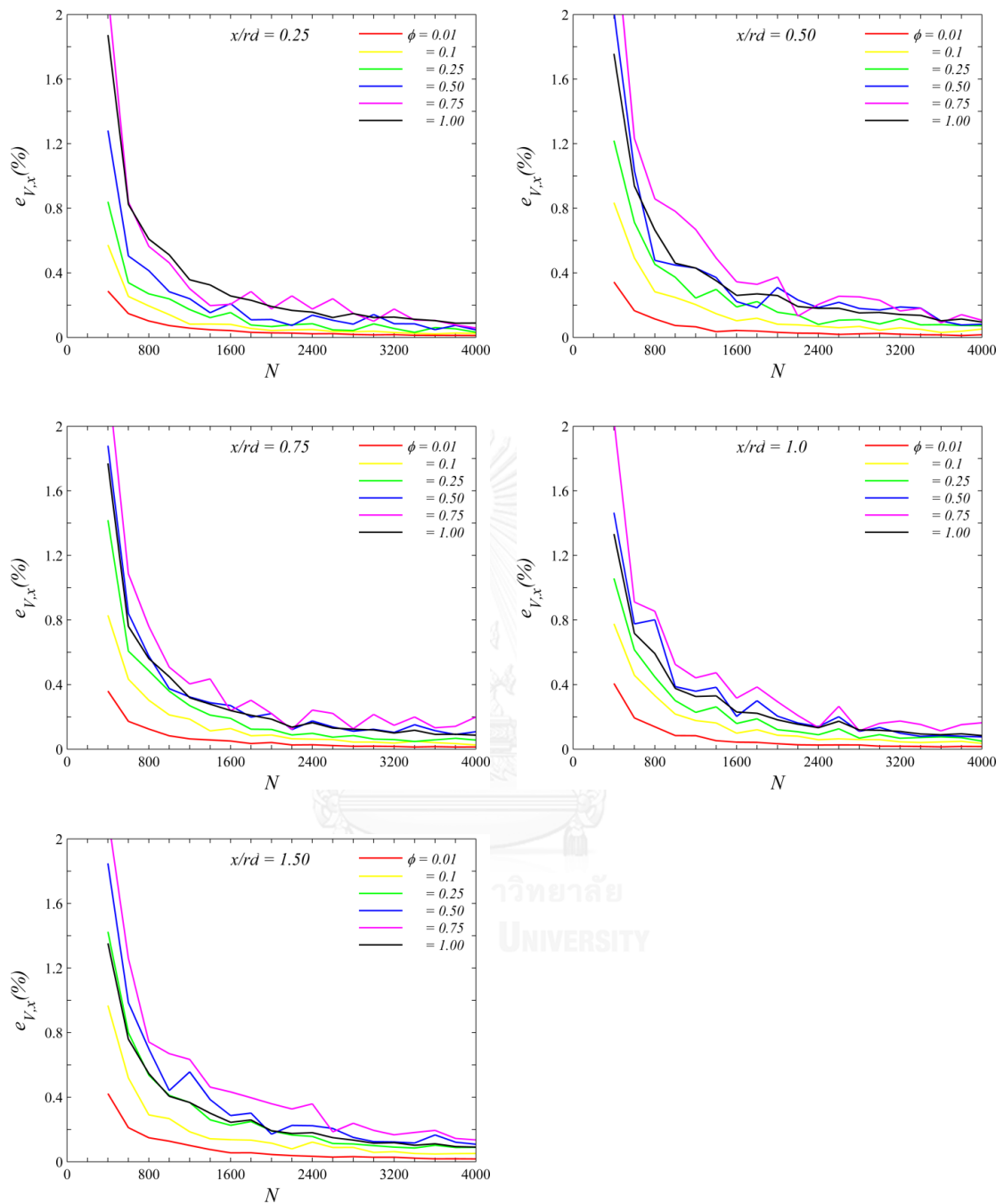
การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ



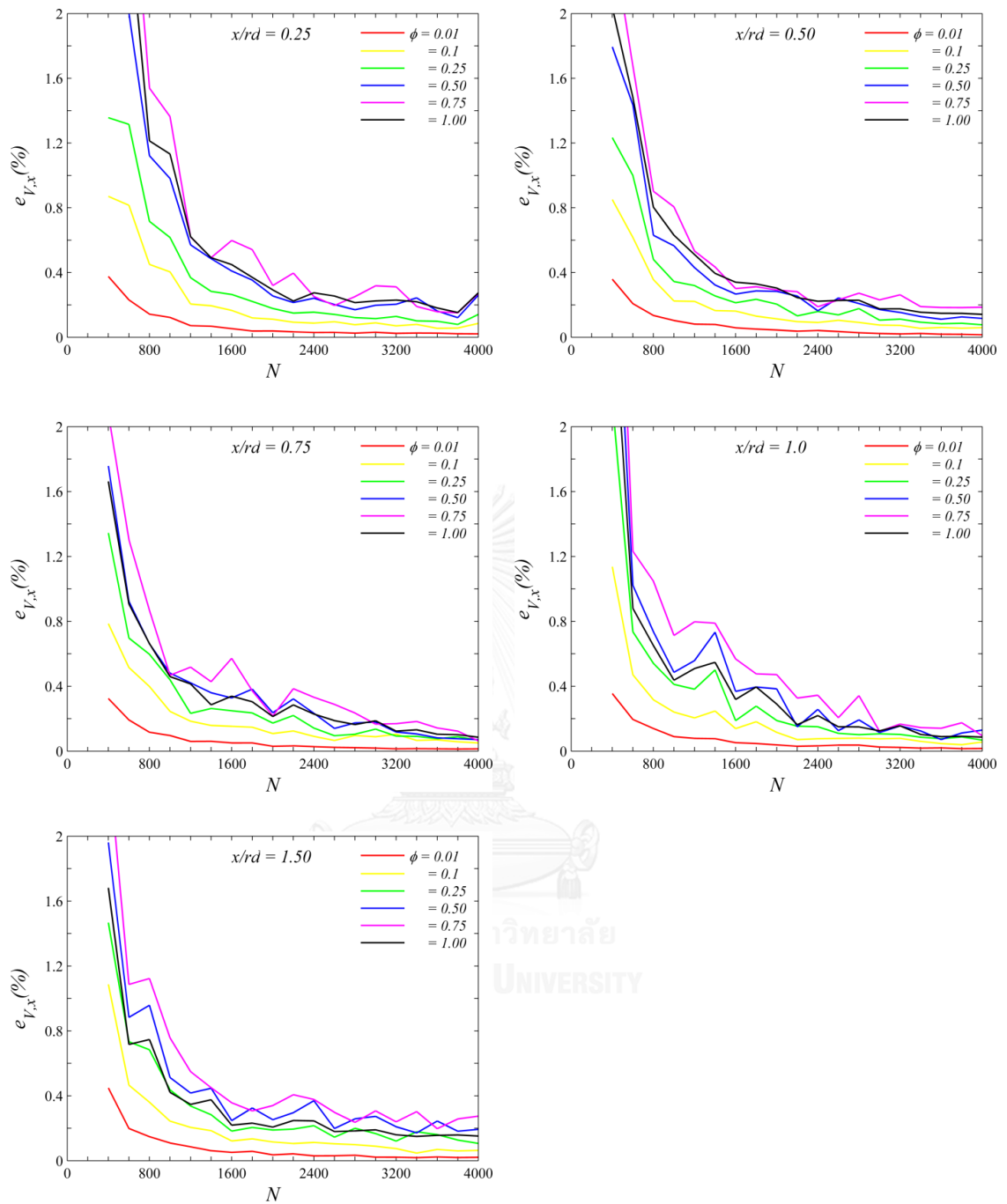
รูปที่ 5.2

บริเวณของเจ็ตที่นิยามด้วย  $R_\phi$  ซึ่งเท่ากับ บริเวณของเจ็ตที่  $0 < \phi_{ij} \leq \phi$

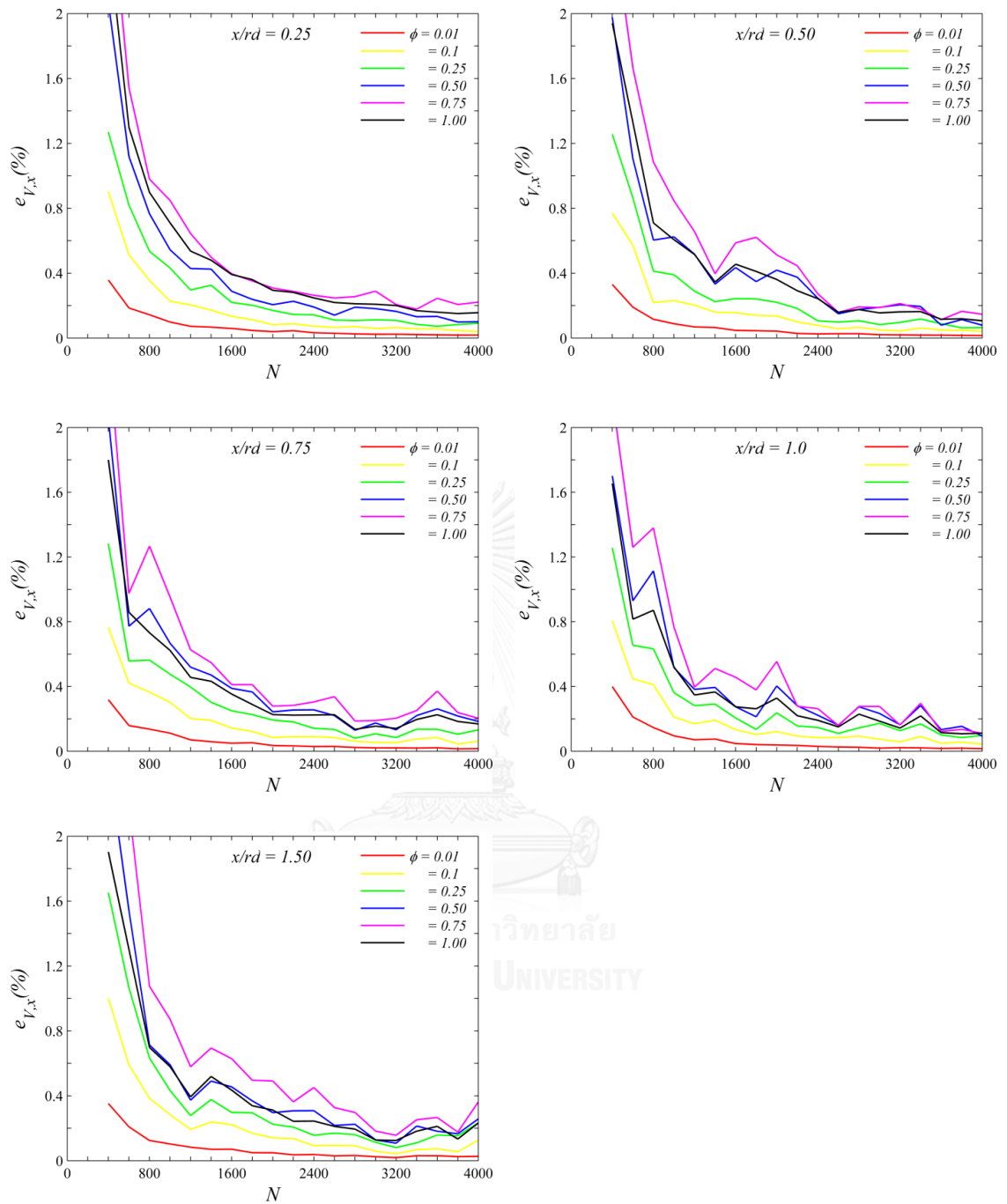
## บทที่ 6



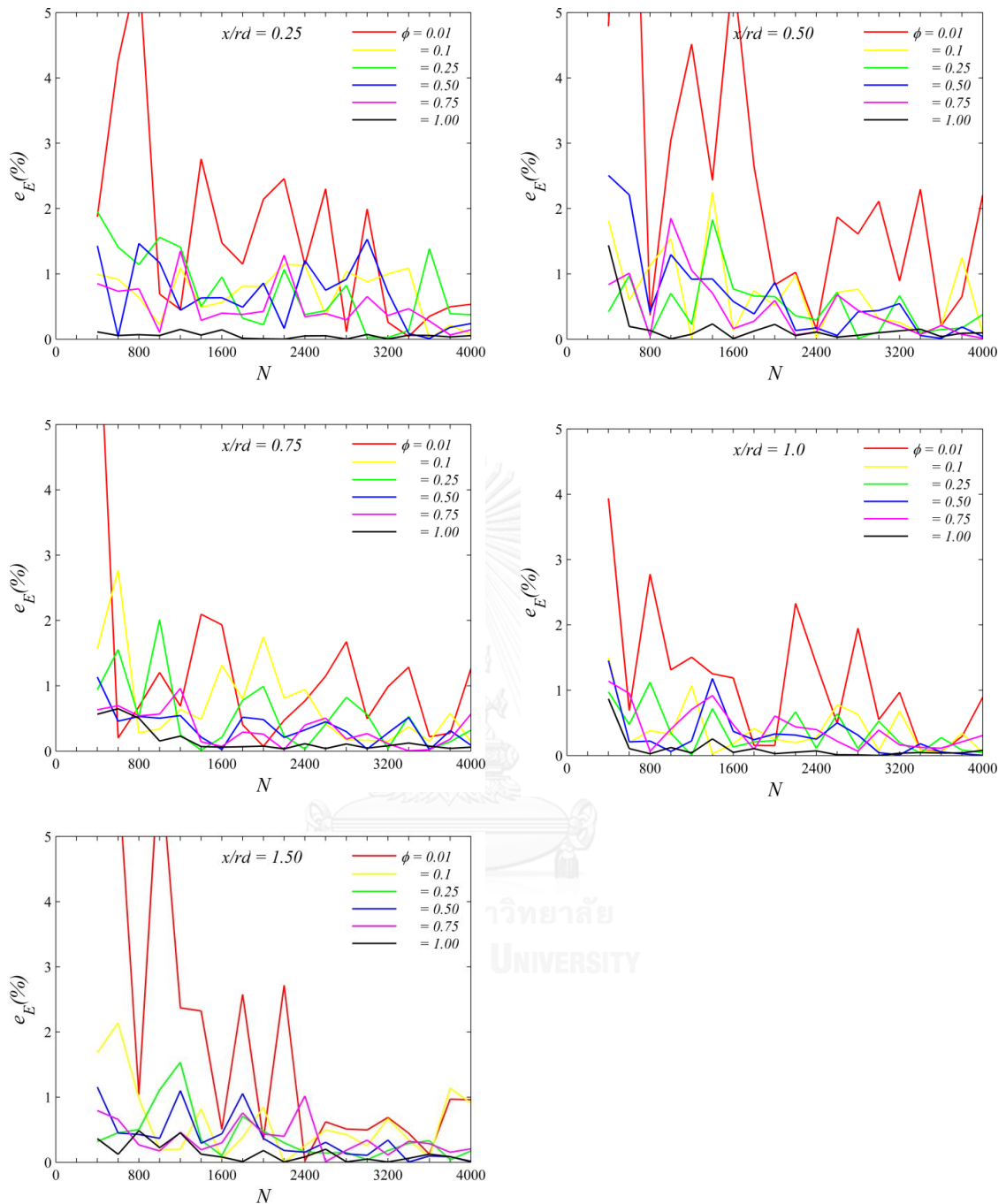
รูปที่ 6.1 ความคลาดเคลื่อนของการลู่อเข้าของความเร็วตามแนวแกน streamwise ต่อจุด ( $e_{v,x}$ ) ที่แต่ละจำนวนรูป กรณีนี  $r = 4$  ที่ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ ( $\phi$ ) ที่แต่ละตำแหน่ง  $x/rd$



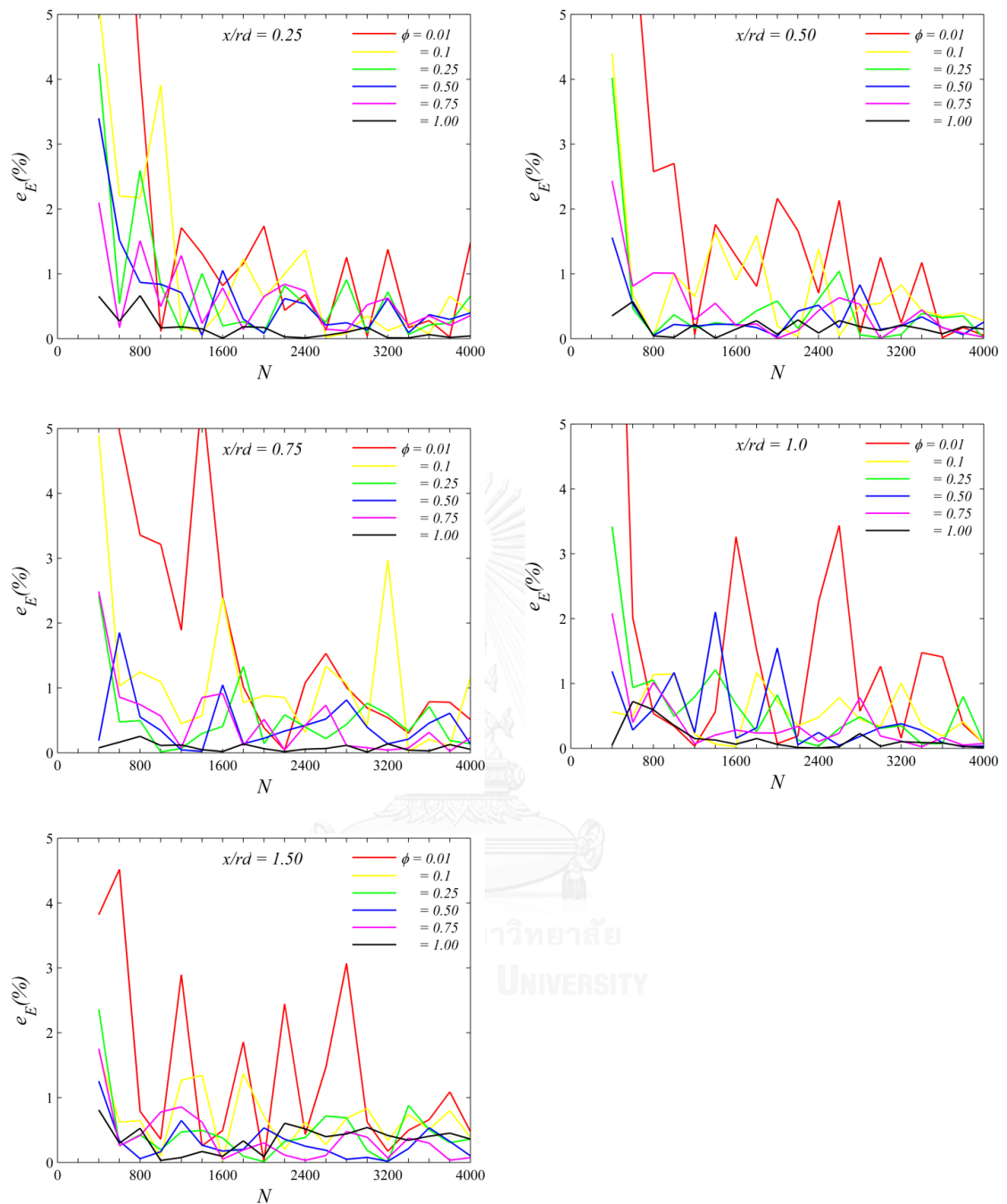
รูปที่ 6.2 ความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วตามแนวแกน streamwise ต่อจุด ( $e_{v,x}$ ) ที่แต่ละจำนวนรูป กรณีส  $r = 8$  ที่ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ ( $\phi$ ) ที่แต่ละตำแหน่ง  $x/rd$



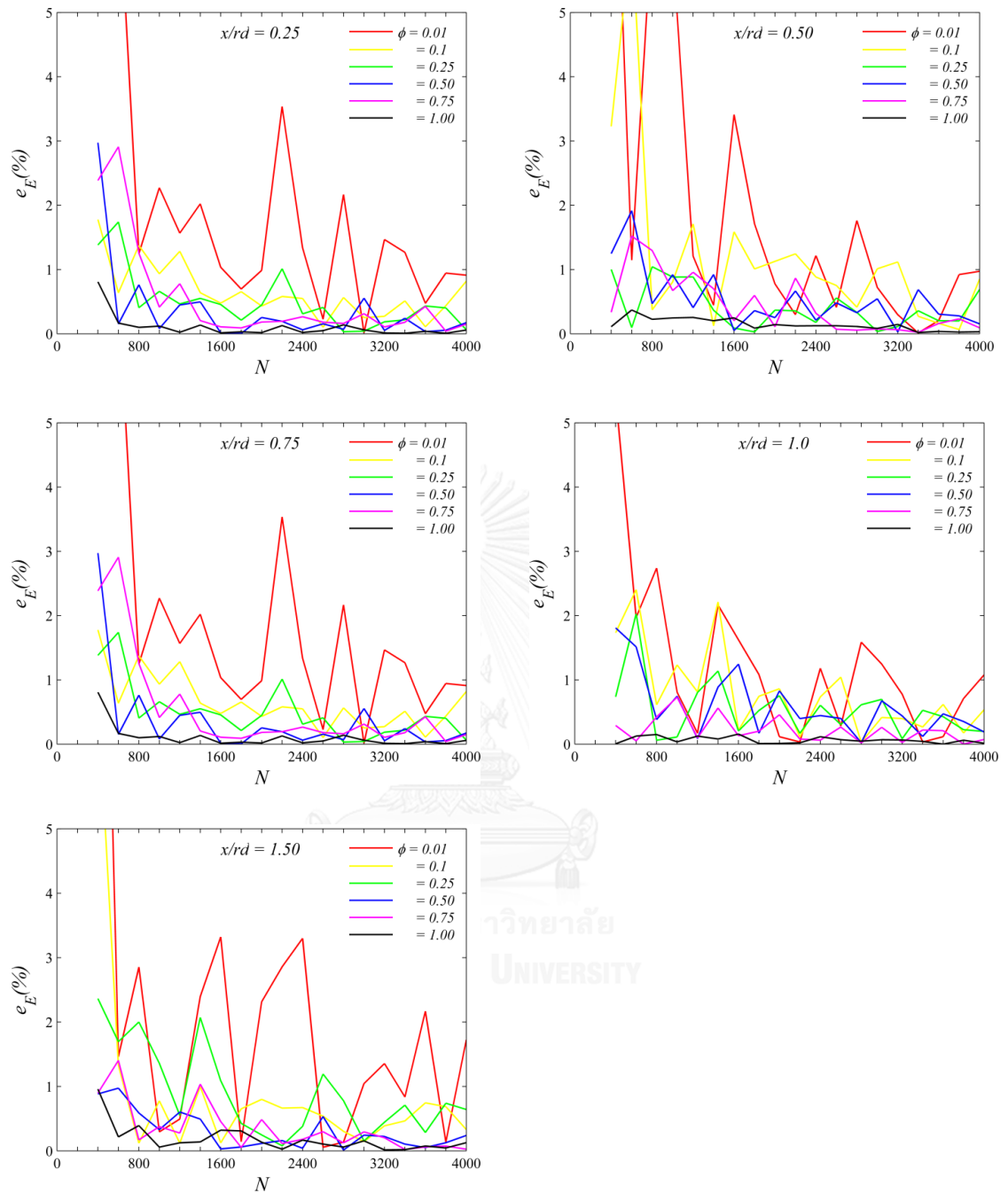
รูปที่ 6.3 ความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วตามแนวแกน streamwise ต่อจุด ( $e_{v,x}$ ) ที่แต่ละจำนวนรูป กรณีส  $r = 12$  ที่ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ ( $\phi$ ) ที่แต่ละตำแหน่ง  $x/rd$



รูปที่ 6.4 ความคลาดเคลื่อนของการลู่อเข้าของค่าเหนี่ยวนำการผสม ( $e_E$ ) ที่แต่ละจำนวนรูป กรณีนี  $r = 4$  ที่ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ ( $\phi$ ) ที่แต่ละตำแหน่ง  $x/rd$

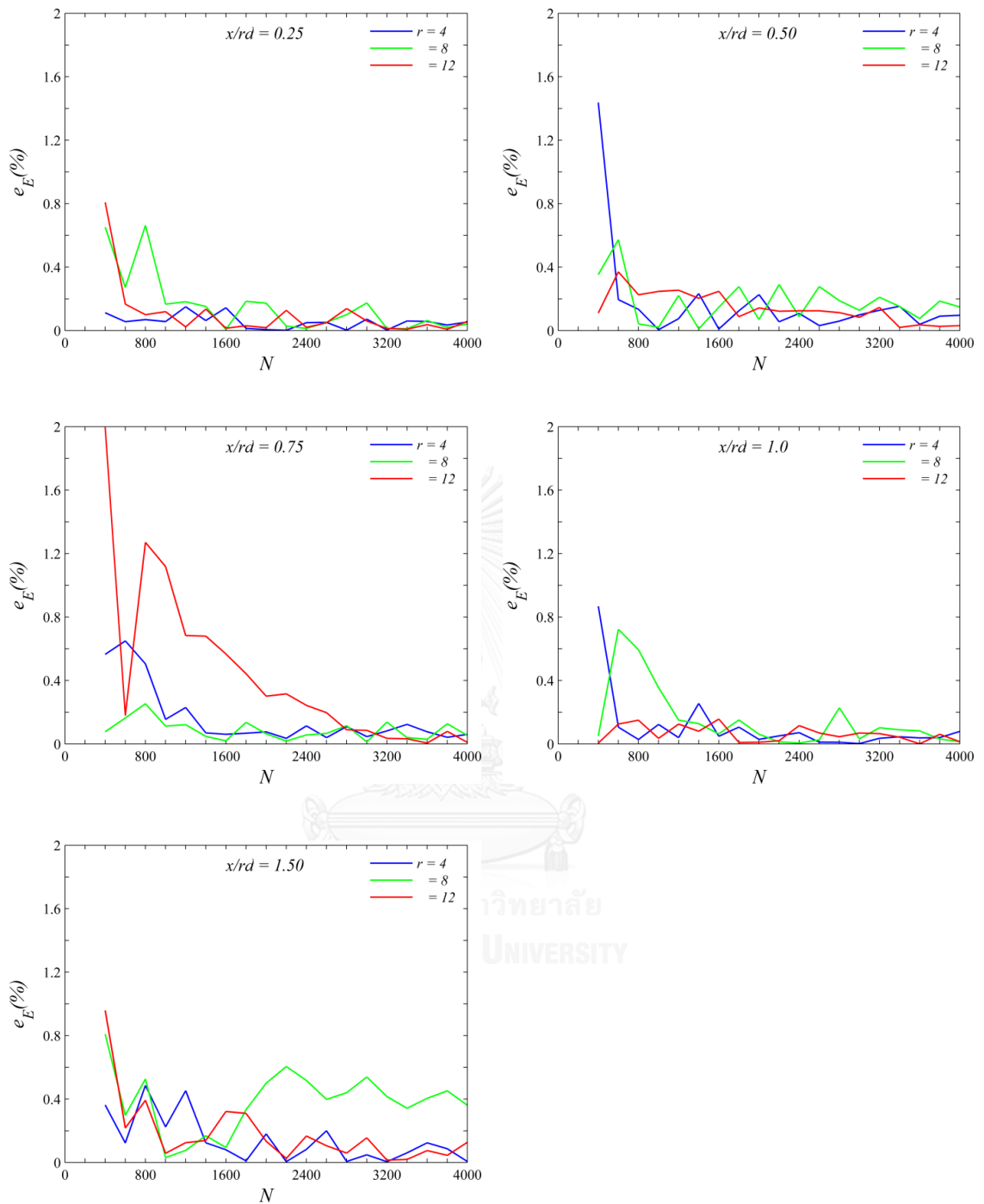


รูปที่ 6.5 ความคลาดเคลื่อนของการสุ่มเข้าของค่าเหนี่ยวนำการผสม ( $e_E$ ) ที่แต่ละจำนวนรูป กรณีส  $r = 8$  ที่ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ ( $\phi$ ) ที่แต่ละตำแหน่ง  $x/rd$



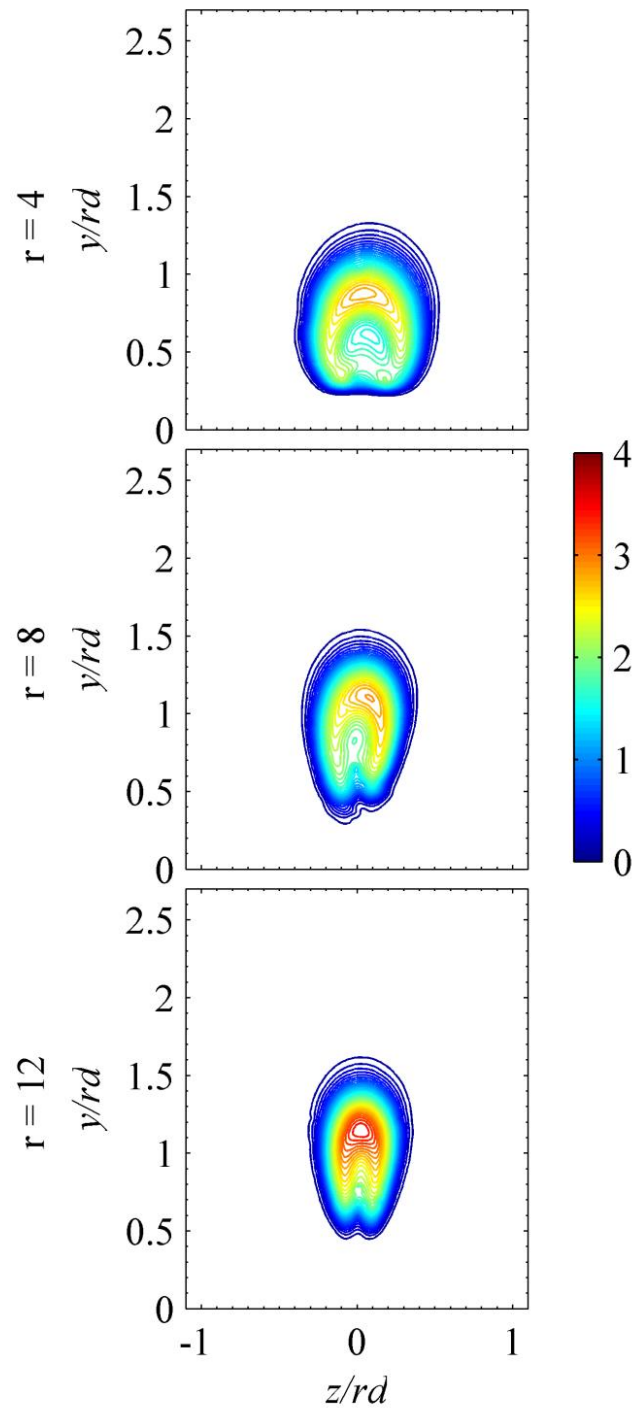
รูปที่ 6.6 ความคลาดเคลื่อนของการสุ่มซ้ำของค่าเหนี่ยวนำการผสม ( $e_E$ ) ที่แต่ละจำนวนรูป กรณีส  $r = 12$  ที่ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ ( $\phi$ ) ที่แต่ละตำแหน่ง  $x/rd$





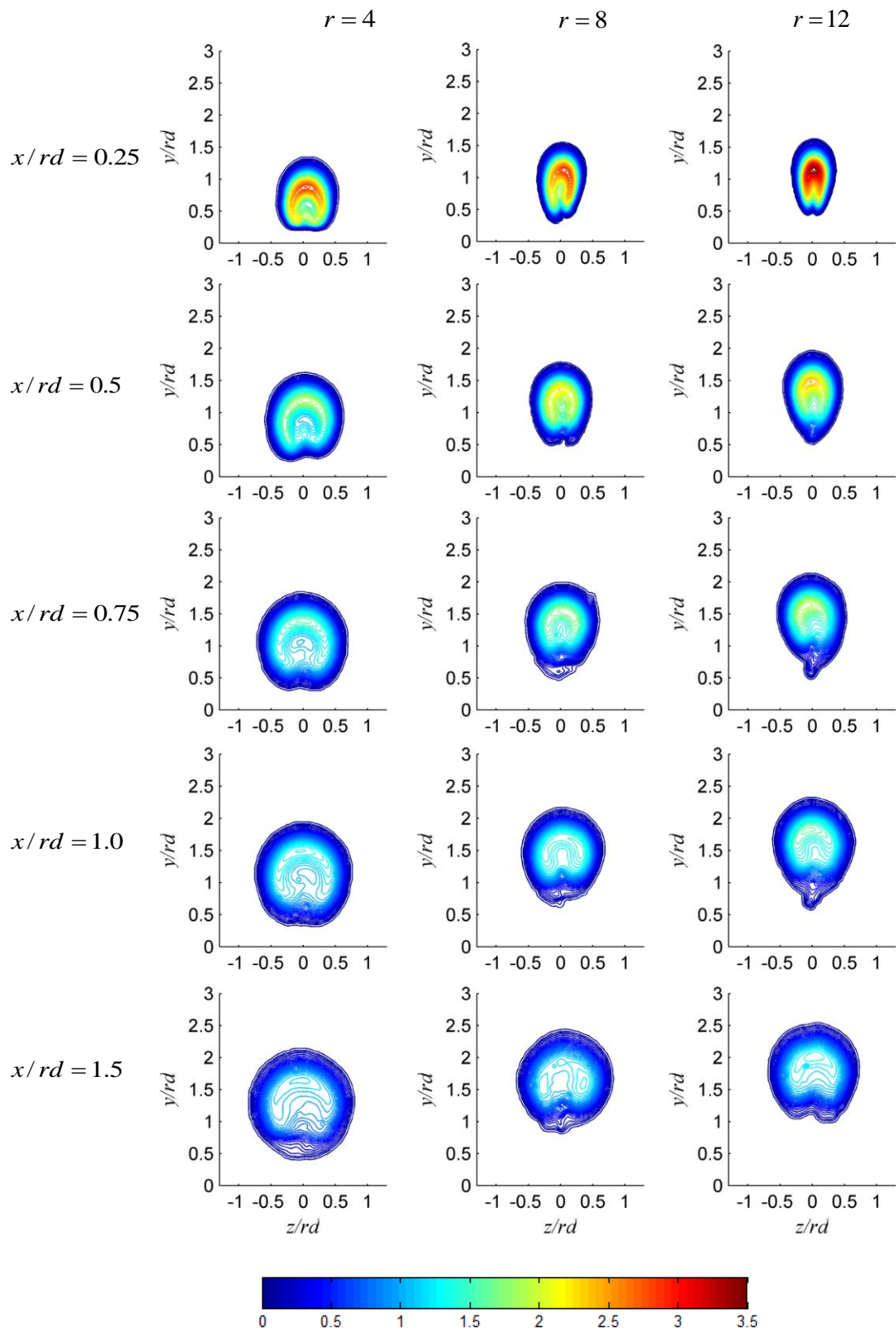
รูปที่ 6.7 ความคลาดเคลื่อนของการสุ่มซ้ำของค่าเหนี่ยวนำการผสม ( $e_E$ ) ที่แต่ละจำนวนรูป กรณีนี  $r = 4, 8, 12$  และ  $\phi = 1$  ที่แต่ละตำแหน่ง  $x/rd$

## บทที่ 7

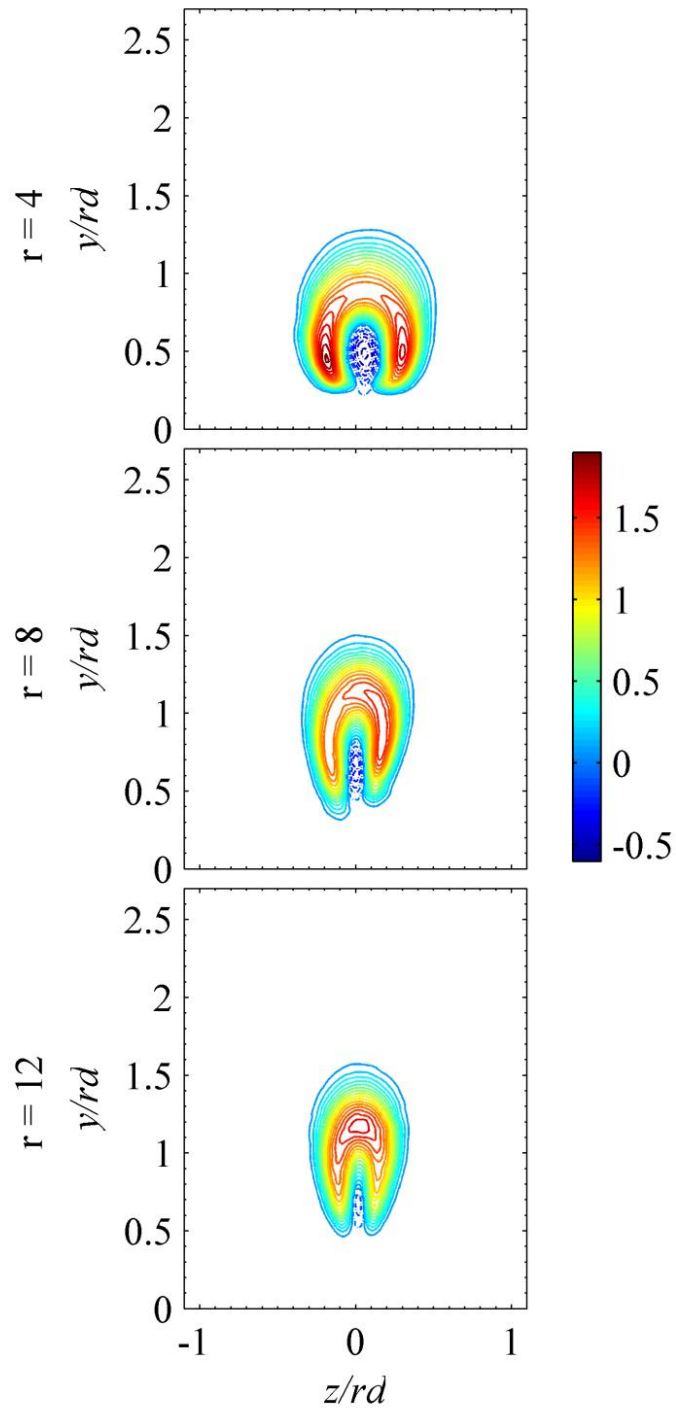


รูปที่ 7.1

การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ย ( $V/u_{cf}$ ) ต่อกระแสลมขวางที่ระนาบ  $x/r_d = 0.25$

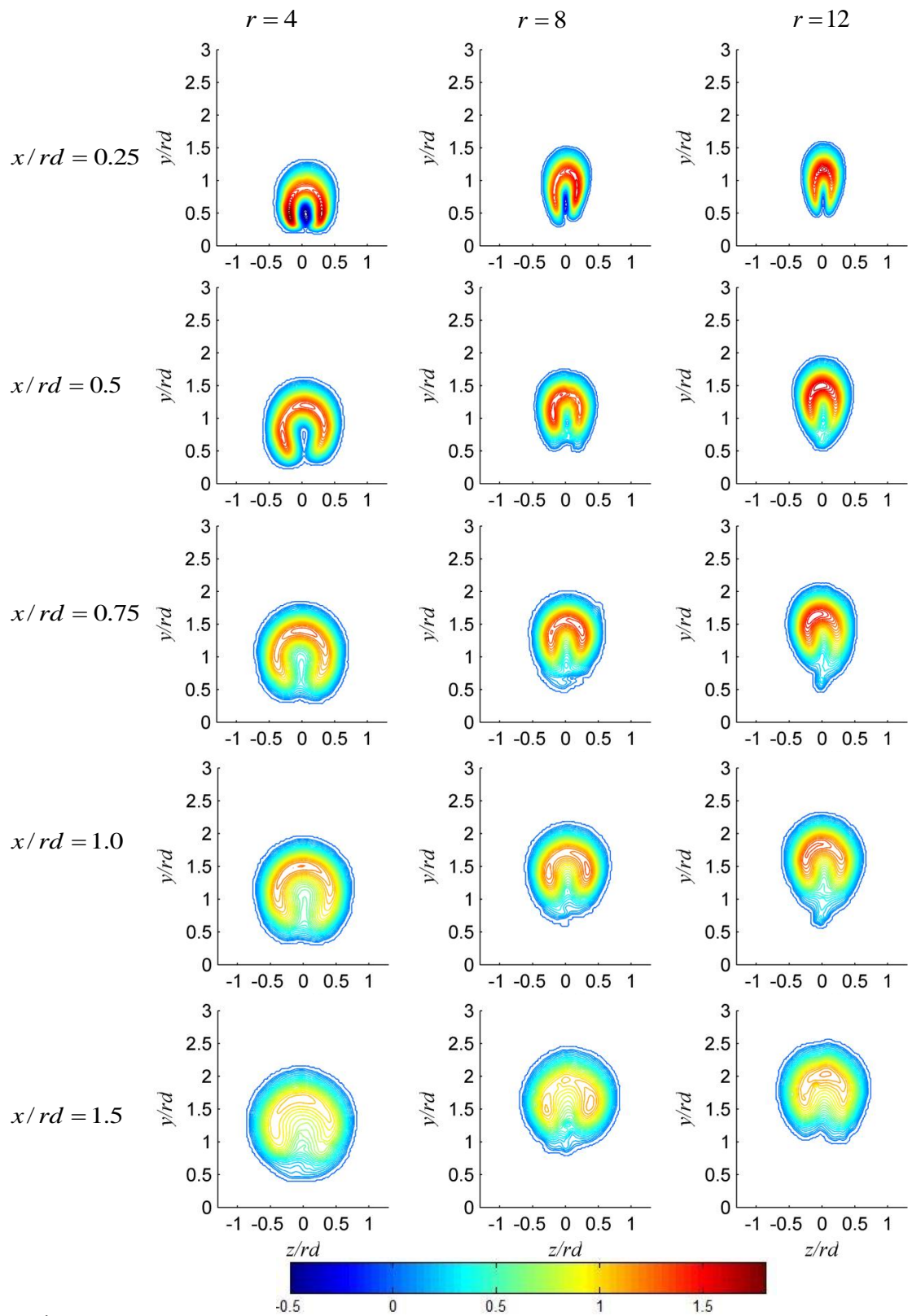


รูปที่ 7.2 การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของอัตราเร็วเฉื่อยต่อกระแสลมขวาง ( $V/u_{cf}$ )



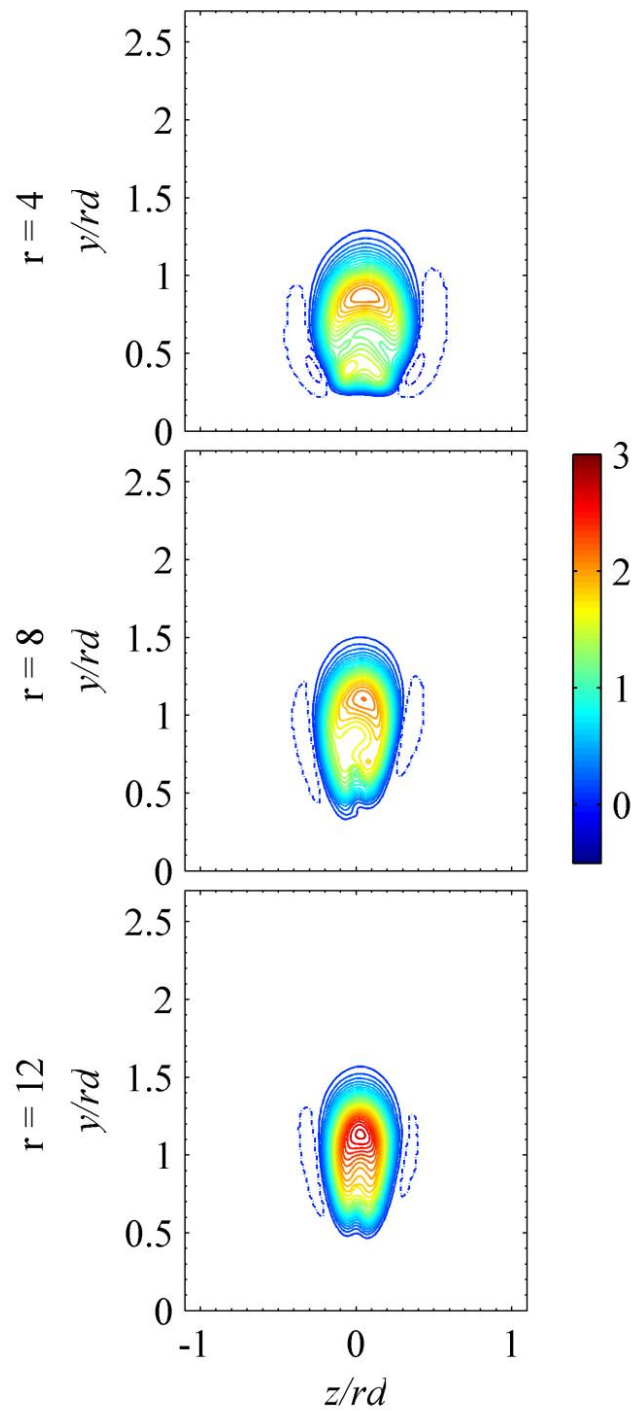
รูปที่ 7.3

การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสมขวาง  $(v_x/u_{cf})$  ที่ระนาบ  $x/rd = 0.25$

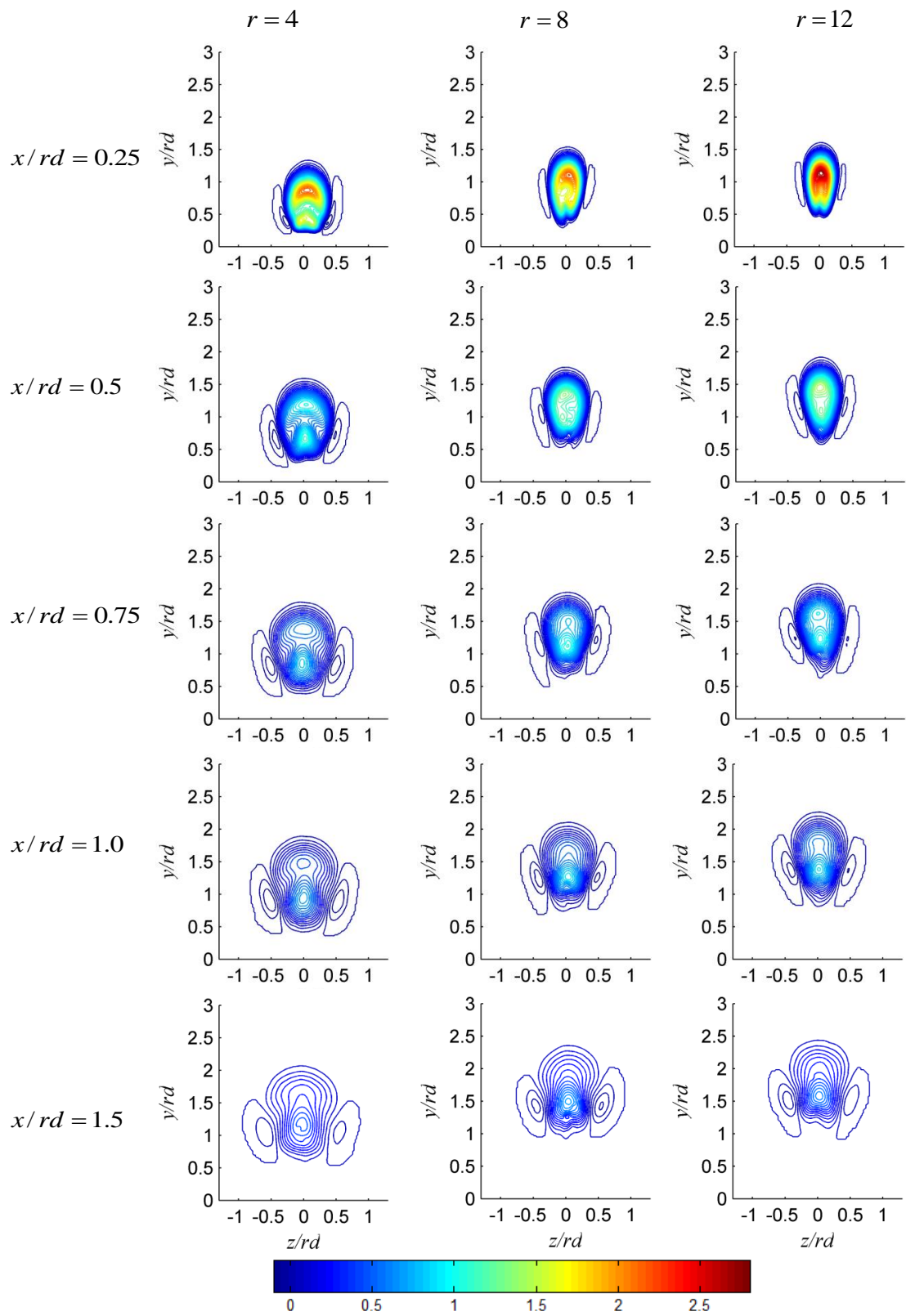


รูปที่ 7.4

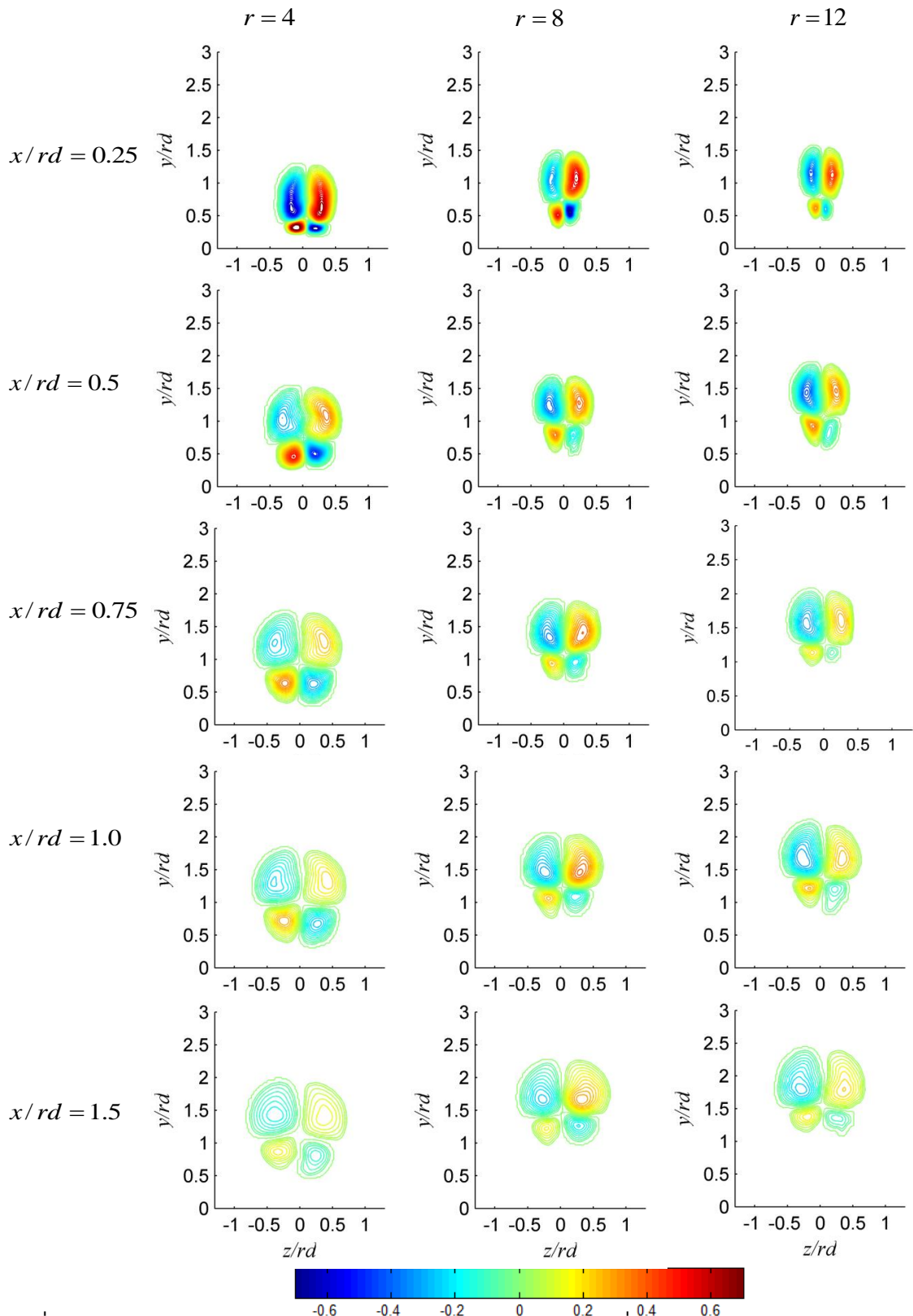
การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x / u_{cf}$ )



รูปที่ 7.5 การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อ กระแสลมขวาง ( $v_y / u_{cf}$ ) ที่ระนาบ  $x/rd = 0.25$



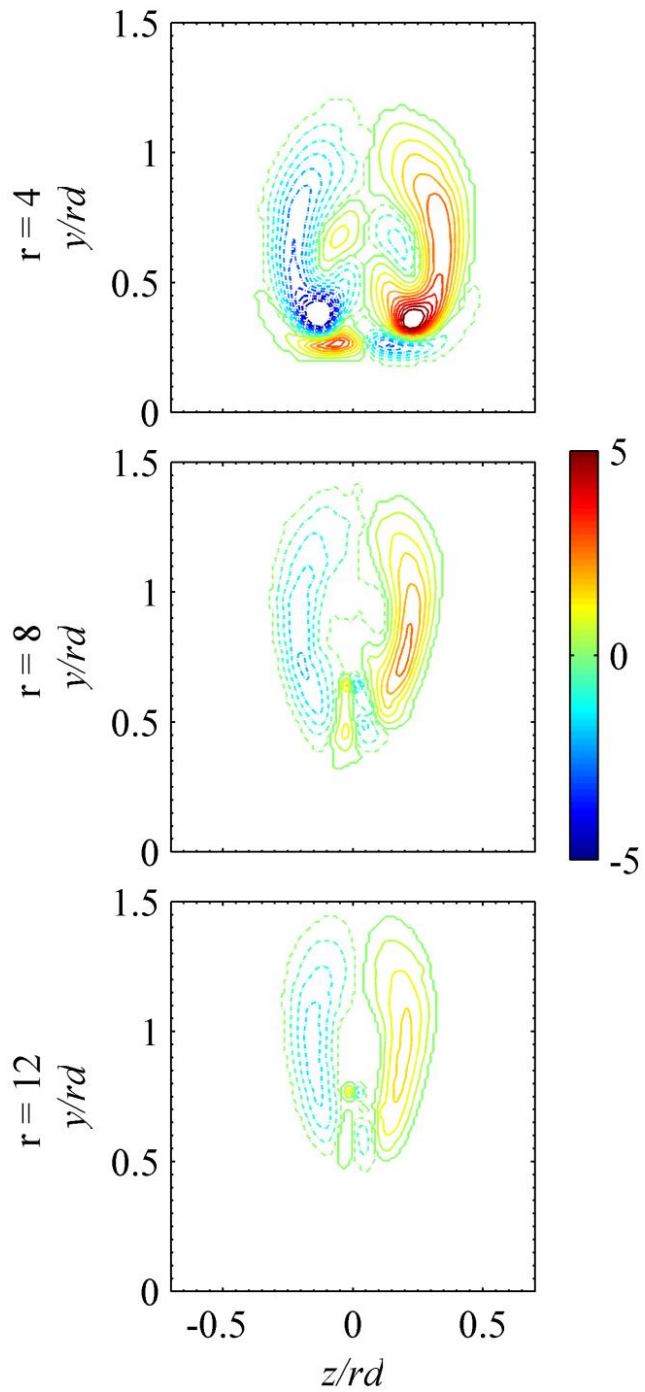
รูปที่ 7.6 การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสมขวาง ( $V_y / u_{cf}$ )



รูปที่ 7.7

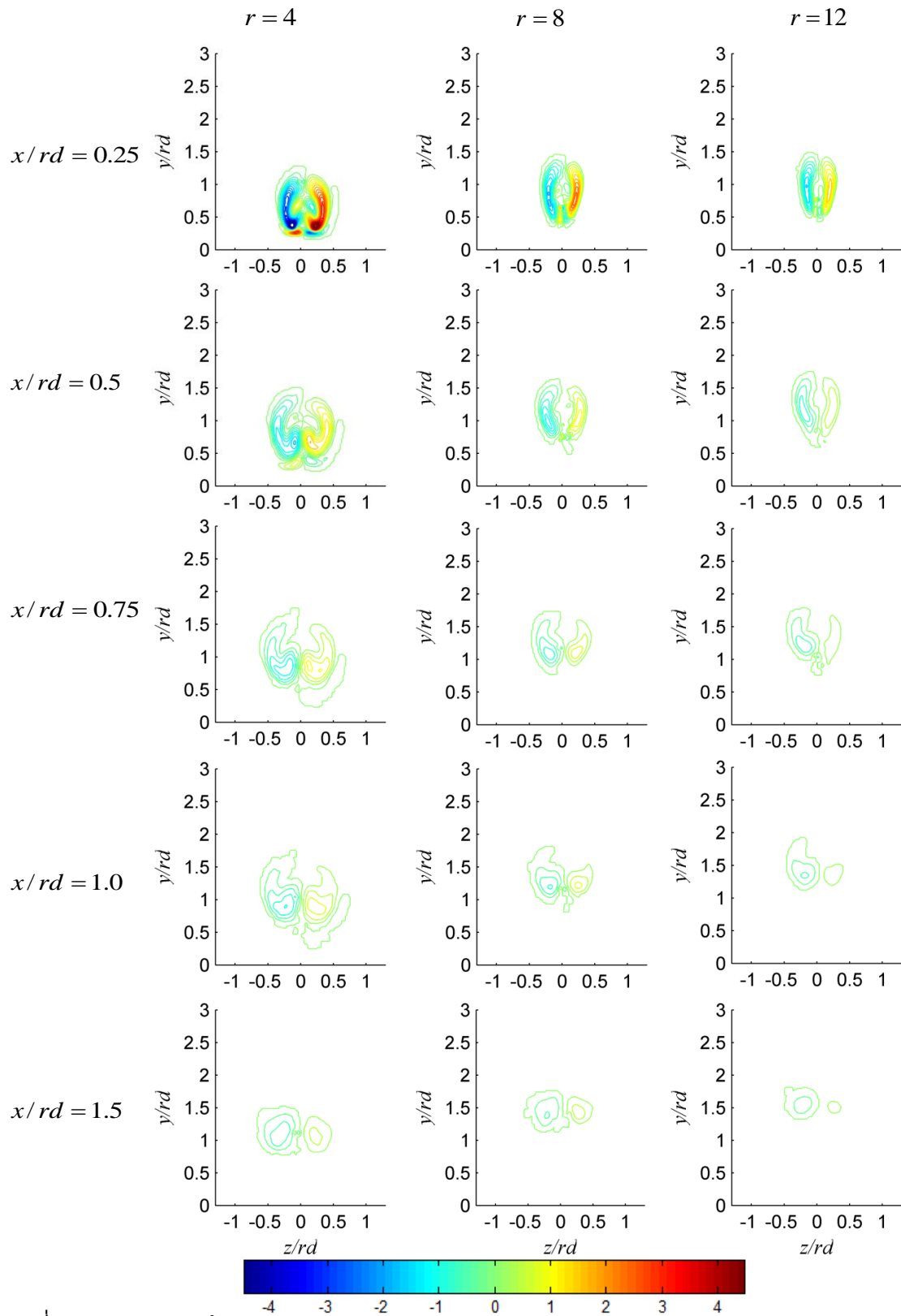
การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise ต่อกระแสลมขวาง ( $v_z / u_{cf}$ )





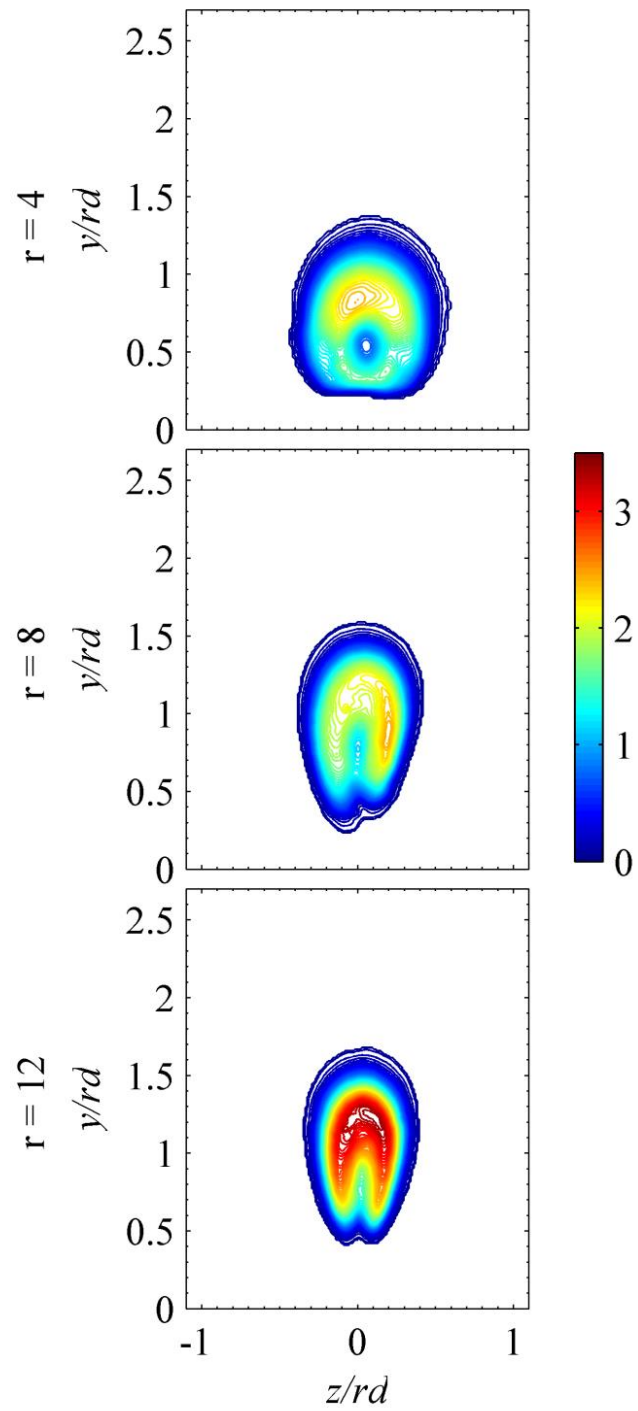
รูปที่ 7.8

การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของ normalized vorticity ตามแนวแกน streamwise ( $\omega_x d / u_{cf}$ ) ที่ระนาบ  $x/r_d = 0.25$

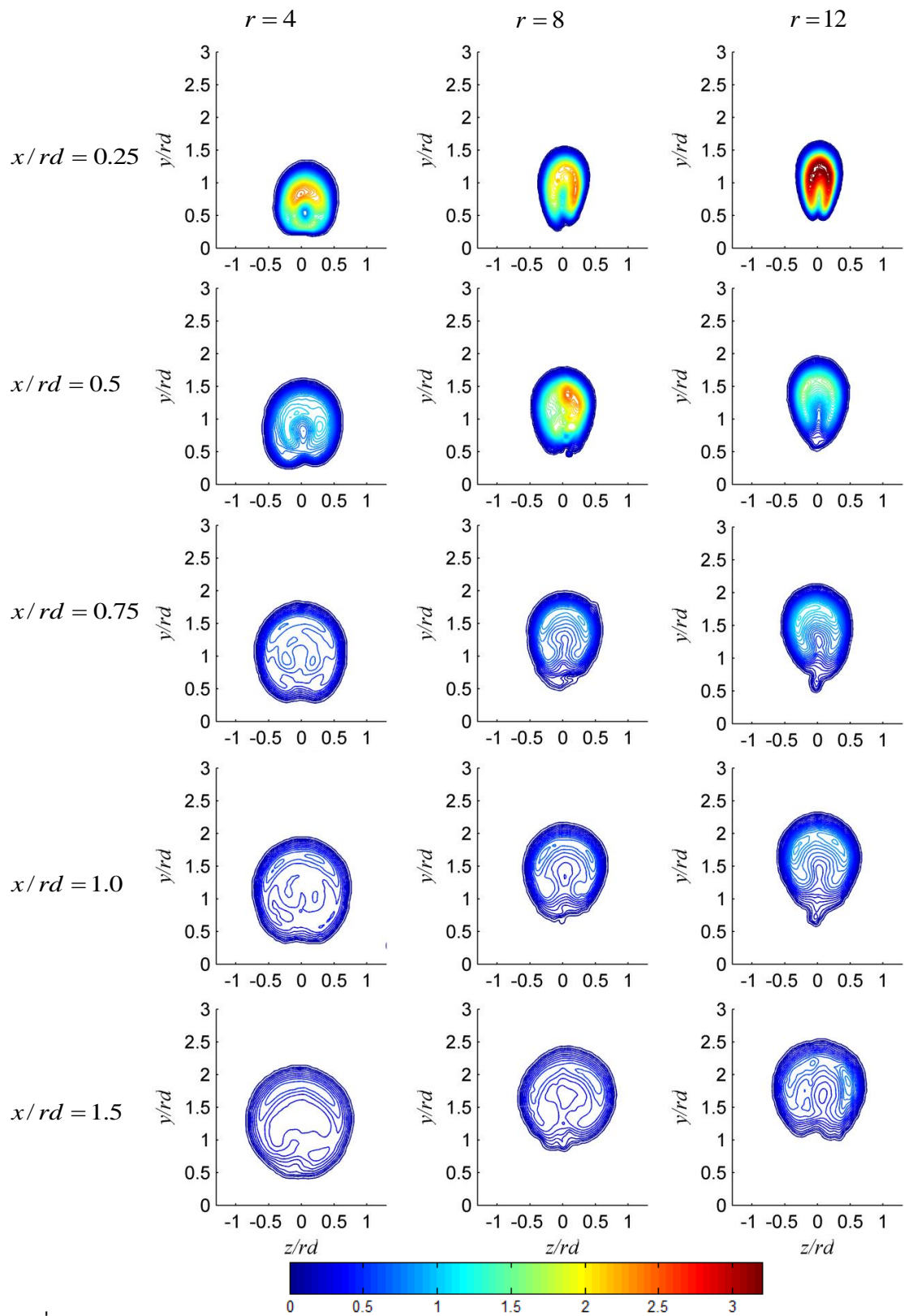


รูปที่ 7.9

การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของ normalized vorticity ตามแนวแกน streamwise ( $\omega_x d / u_{cf}$ )

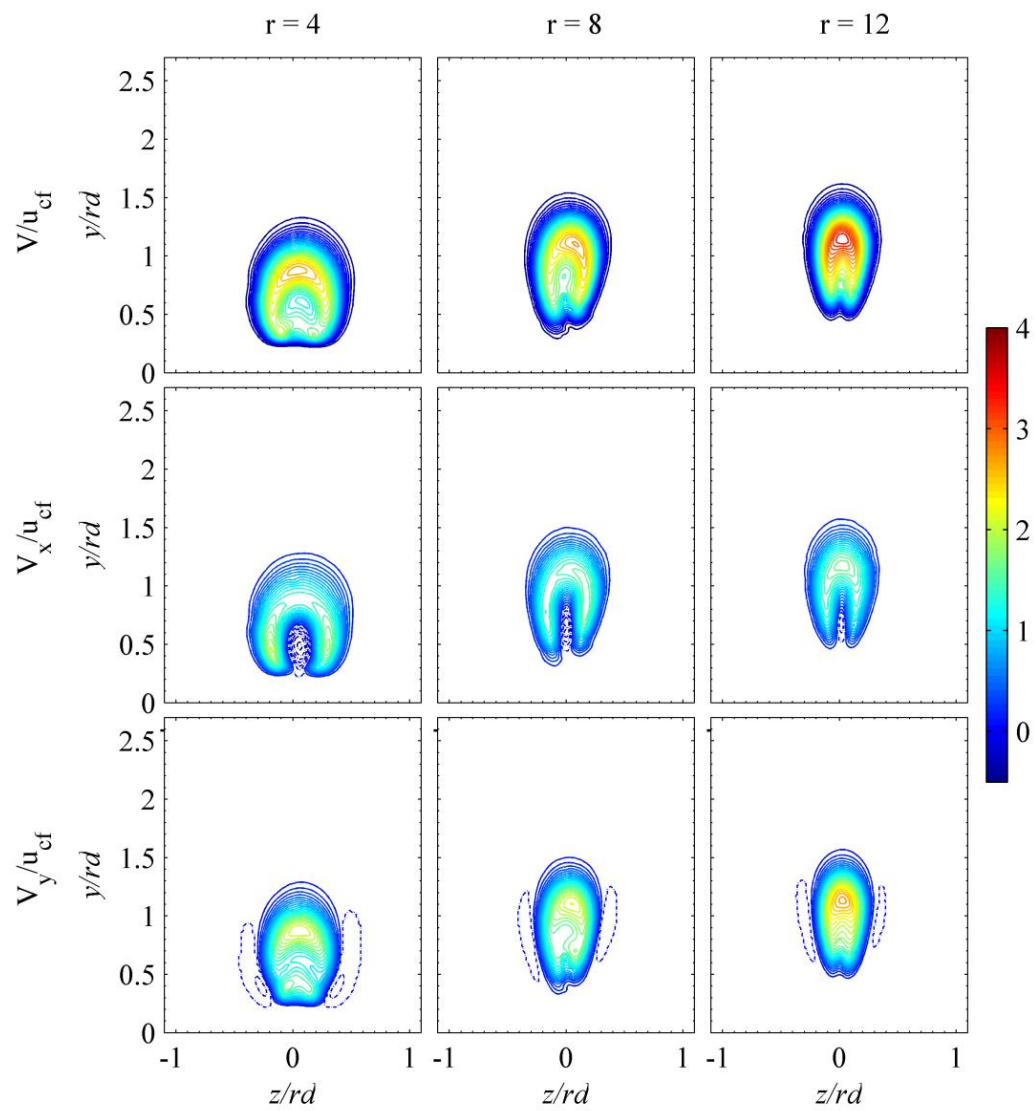


รูปที่ 7.10 การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของ Turbulent kinetic energy (TKE) ต่อ Crossflow kinetic energy (CKE) ที่ระนาบ  $x/rd = 0.25$

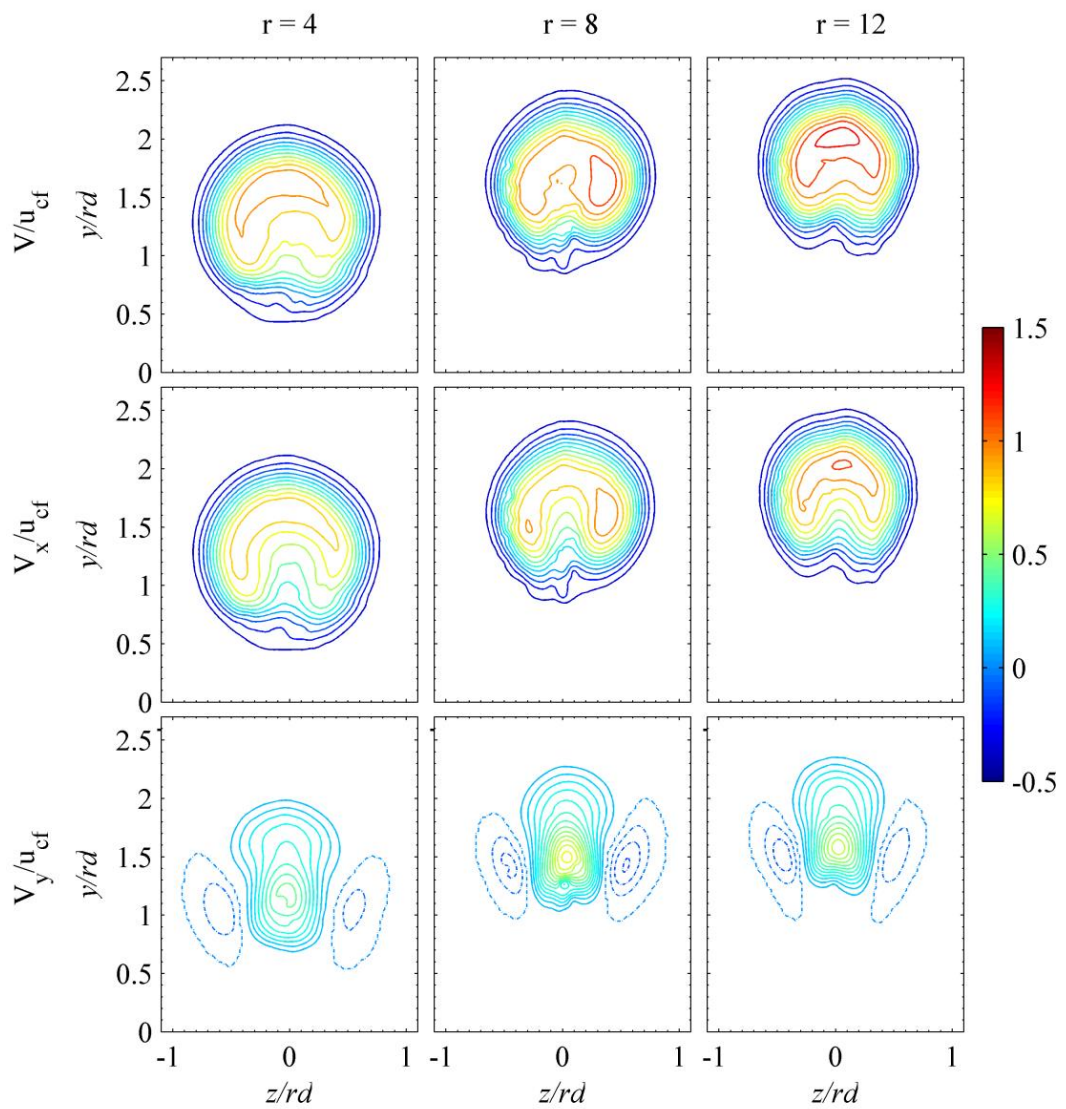


รูปที่ 7.11

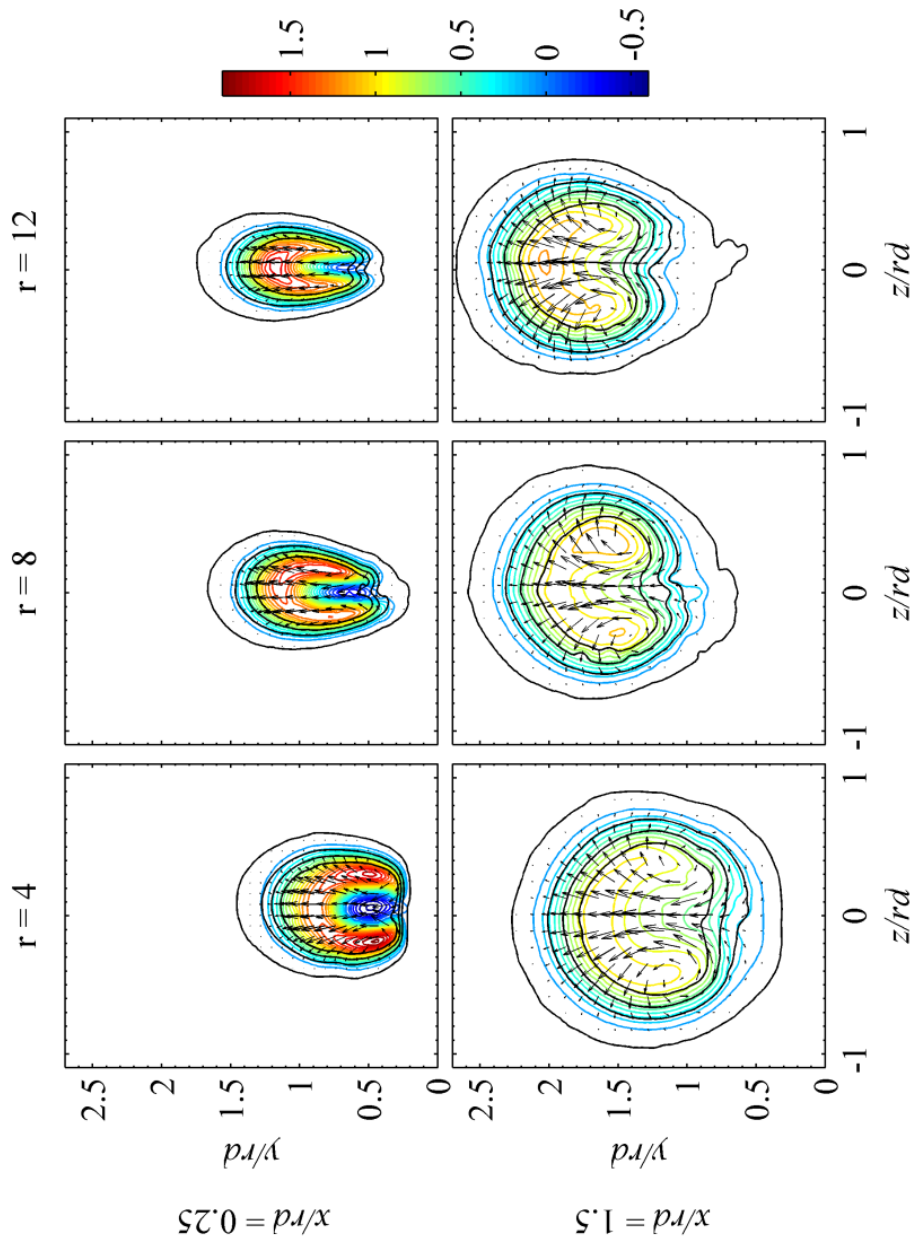
การพัฒนาตัวของการกระจายตัวของ Turbulent kinetic energy (TKE) ต่อ Crossflow kinetic energy (CKE)



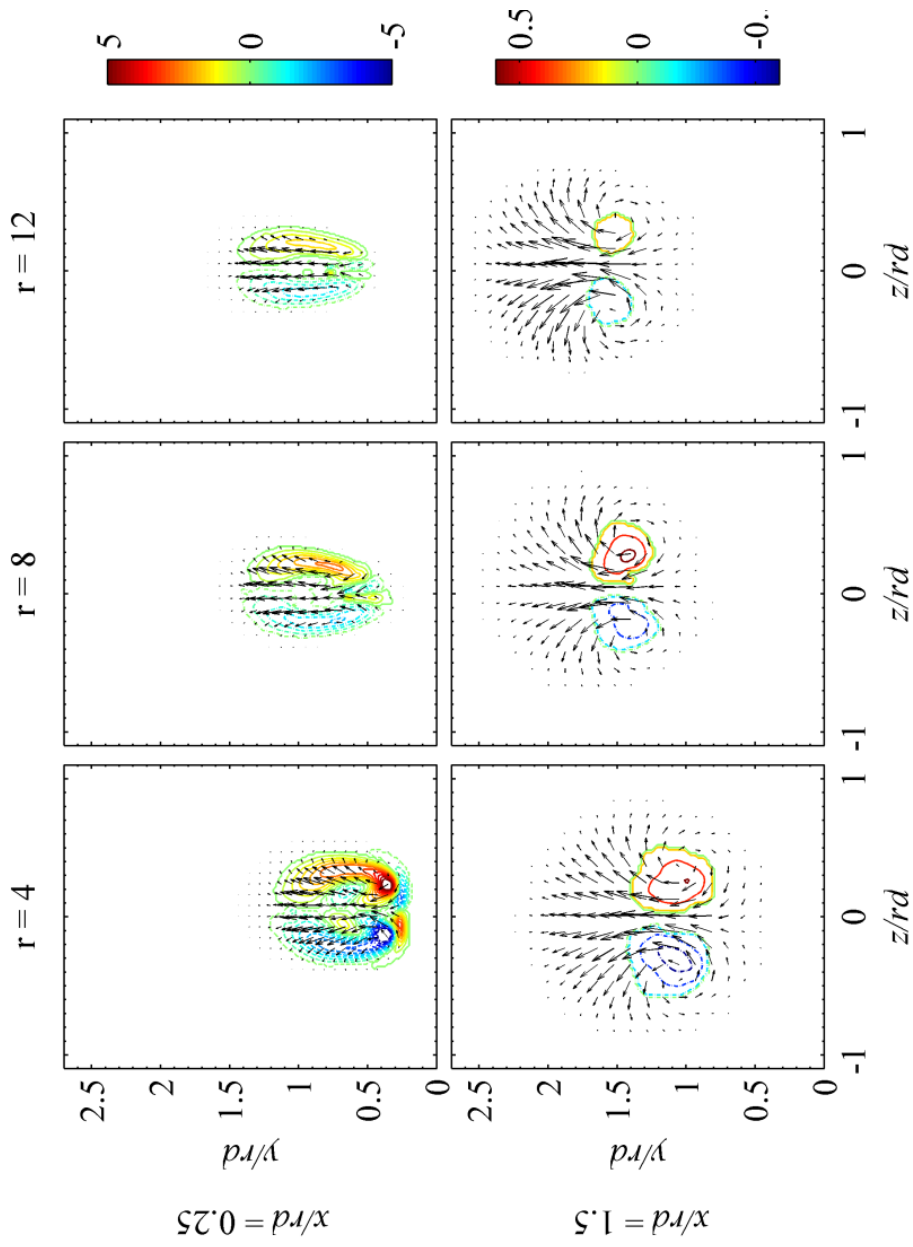
รูปที่ 7.12 การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง ( $V/u_{cf}$ ) ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x/u_{cf}$ ) และความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสลมขวาง ( $V_y/u_{cf}$ ) ที่ระนาบ  $x/rd = 0.25$



รูปที่ 7.13 การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อกระแสลมขวาง ( $V/u_{cf}$ ) ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x/u_{cf}$ ) และความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสลมขวาง ( $V_y/u_{cf}$ ) ที่ระนาบ  $x/rd=1.5$

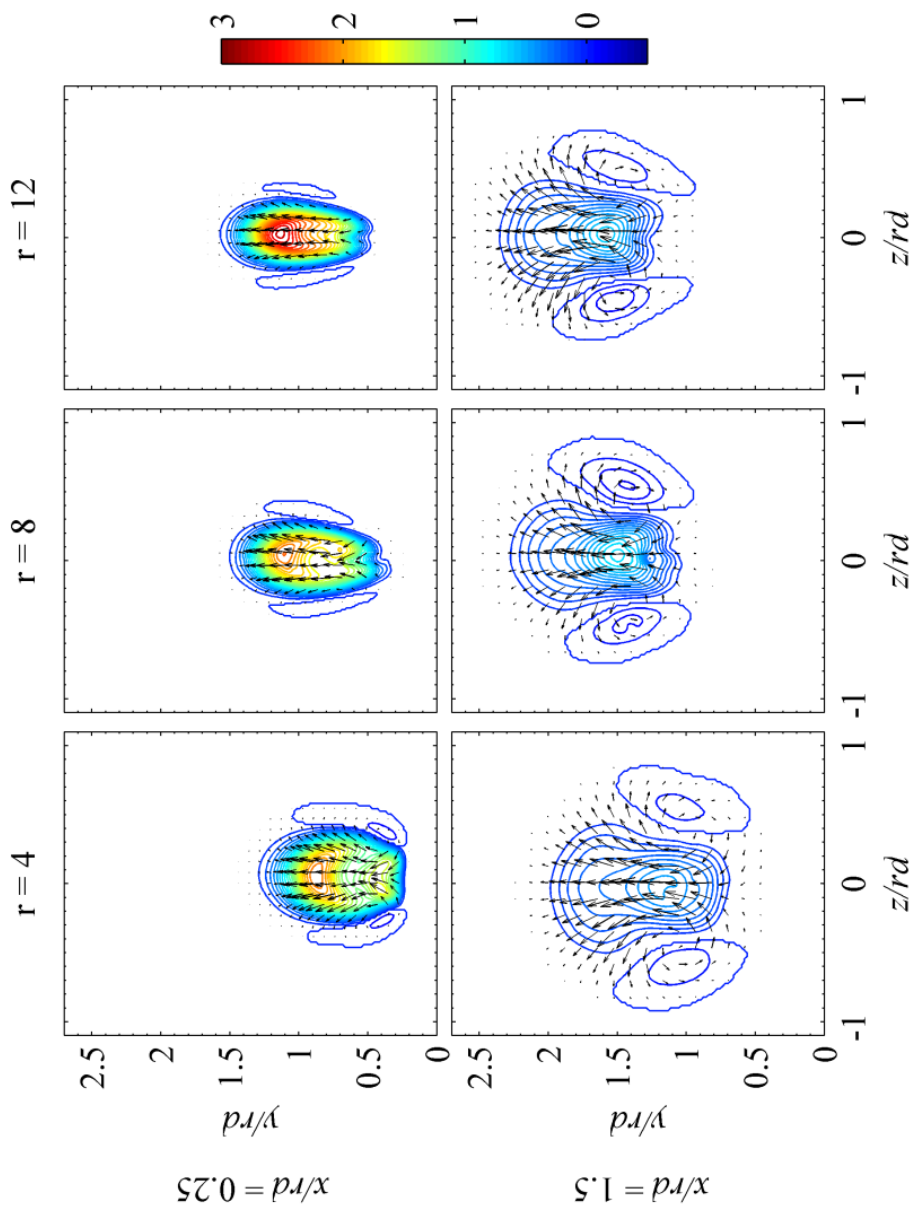


รูปที่ 7.14 การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ต่อกระแสลมขวาง ( $V_x / u_{cf}$ ) ที่พล็อตซ้อนทับกับความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเบร็ชต์ที่จุดใดๆ และของความเร็วมตามแนวแกน traverse และ spanwise (เวกเตอร์บนระนาบ) ที่ระนาบ  $x / rd = 0.25$  และ  $1.5$

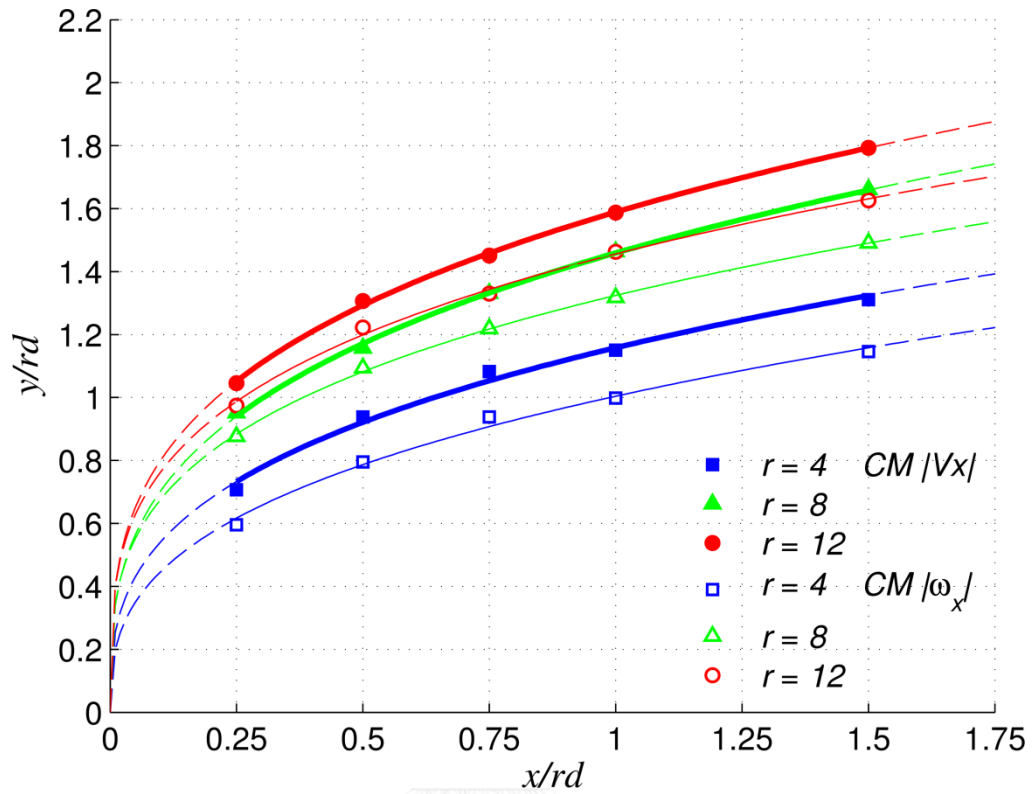


รูปที่ 7.15 การกระจายตัวของ normalized vorticity ตามแนวแกน streamwise ( $\omega_x d / u_{cf}$ ) ที่พล็อตซ้อนทับกับเวกเตอร์ของความเร็วมตามแนวแกน traverse และ spanwise (เวกเตอร์บนระนาบ) ที่ระนาบ  $x / rd = 0.25$  และ  $1.5$





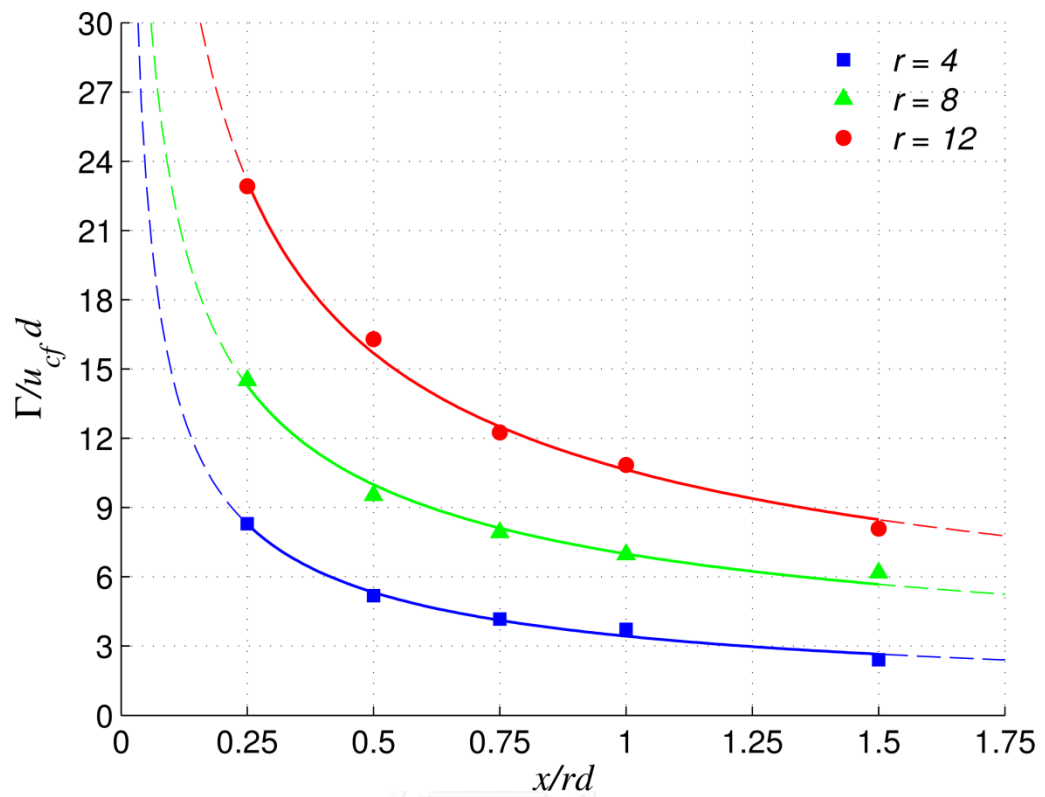
รูปที่ 7.16 การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน traverse ต่อกระแสลมขวาง ( $V_y / u_{cf}$ ) ที่พล็อตซ้อนทับกับเวกเตอร์ของความเร็วตามแนวแกน traverse และ spanwise (เวกเตอร์บนระนาบ) ที่ระนาบ  $x / rd = 0.25$  และ  $1.5$



รูปที่ 7.17

Center of mass trajectory ของปริมาณความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise และ vorticity ตามแนวแกน streamwise

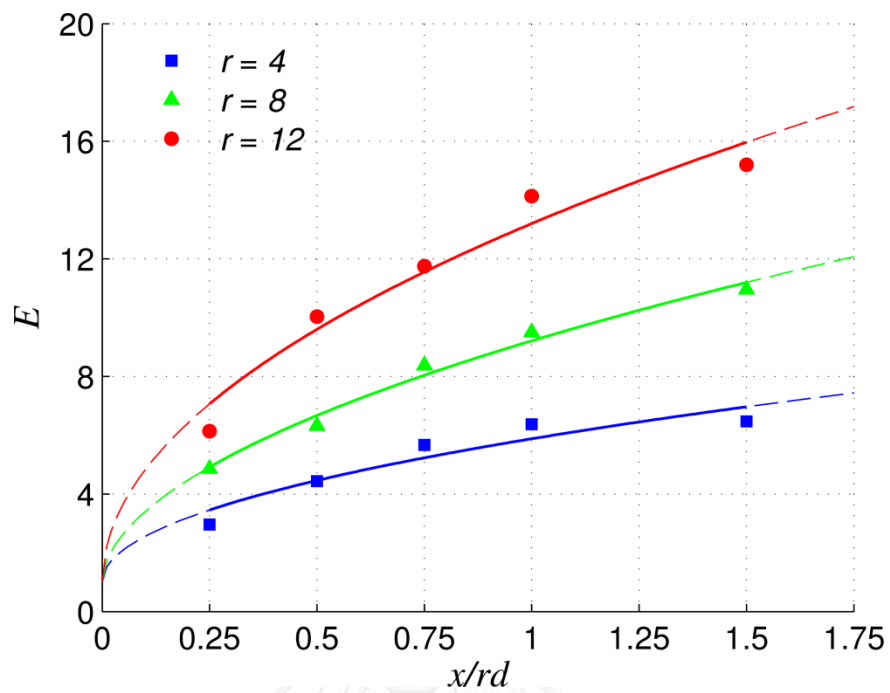
สมการกำลังของ trajectory : 
$$\frac{y}{rd} = a_T \left( \frac{x}{rd} \right)^{b_T}$$



รูปที่ 7.18

ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อ circulation ไร้มิติ ( $\Gamma/u_{cf}d$ )

สมการกำลังของ circulation :  $\frac{\Gamma}{u_{cf}d} = a_c \left( \frac{x}{rd} \right)^{b_c}$

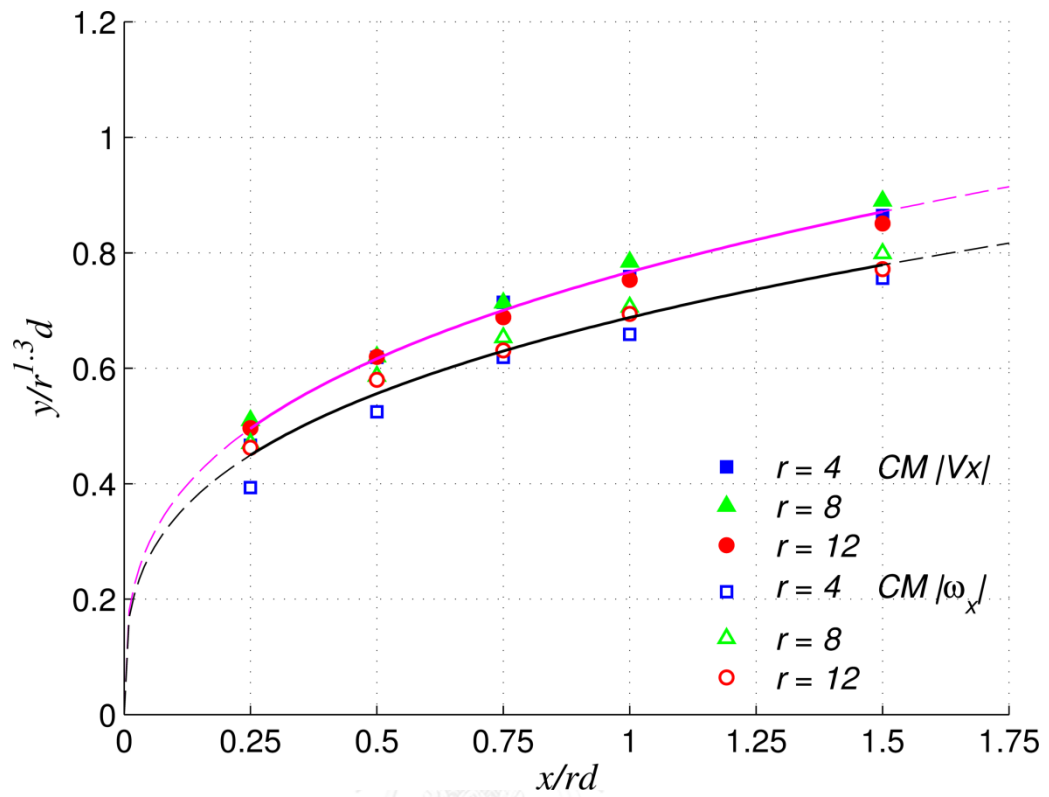


รูปที่ 7.19

ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

สมการกำลังของ entrainment :  $E = 1 + a_E \left( \frac{x}{rd} \right)^{b_E}$

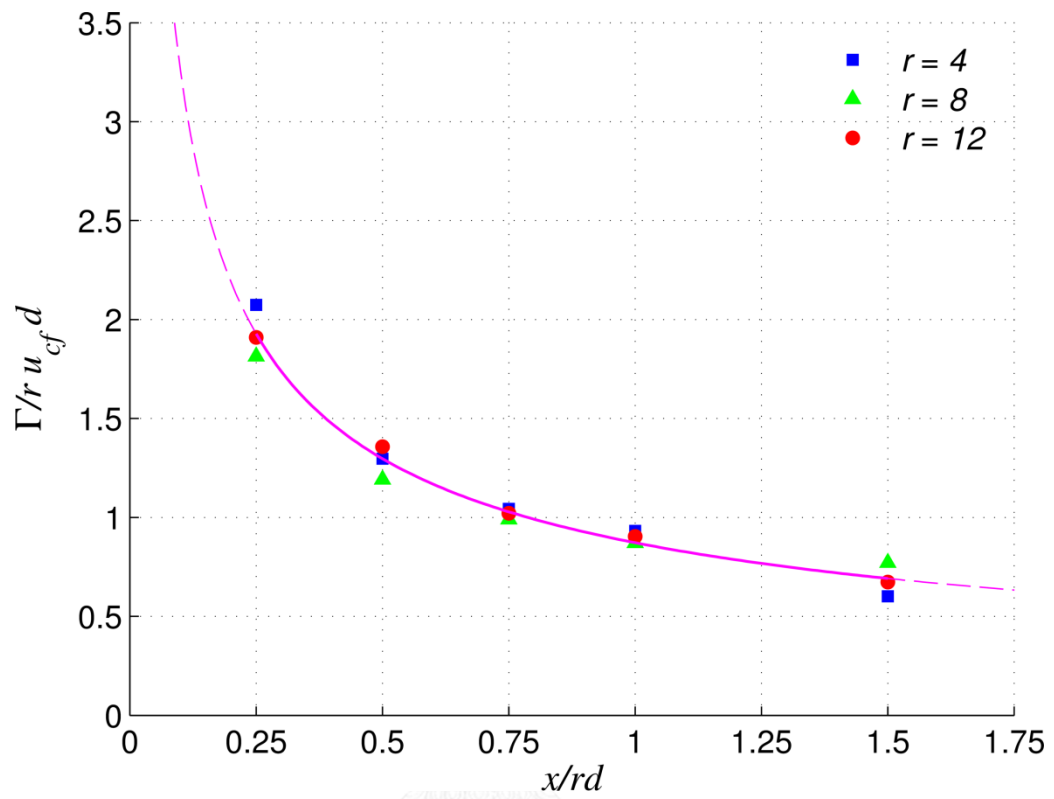
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 7.20 Center of mass trajectory ของปริมาณความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise และ vorticity ตามแนวแกน streamwise เมื่อ scaling ด้วย  $r^{1.3}d$

$$\text{CM of streamwise velocity } (y_{CM, V_x}) \quad \frac{y}{r^{1.3}d} = 0.767 \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.315}$$

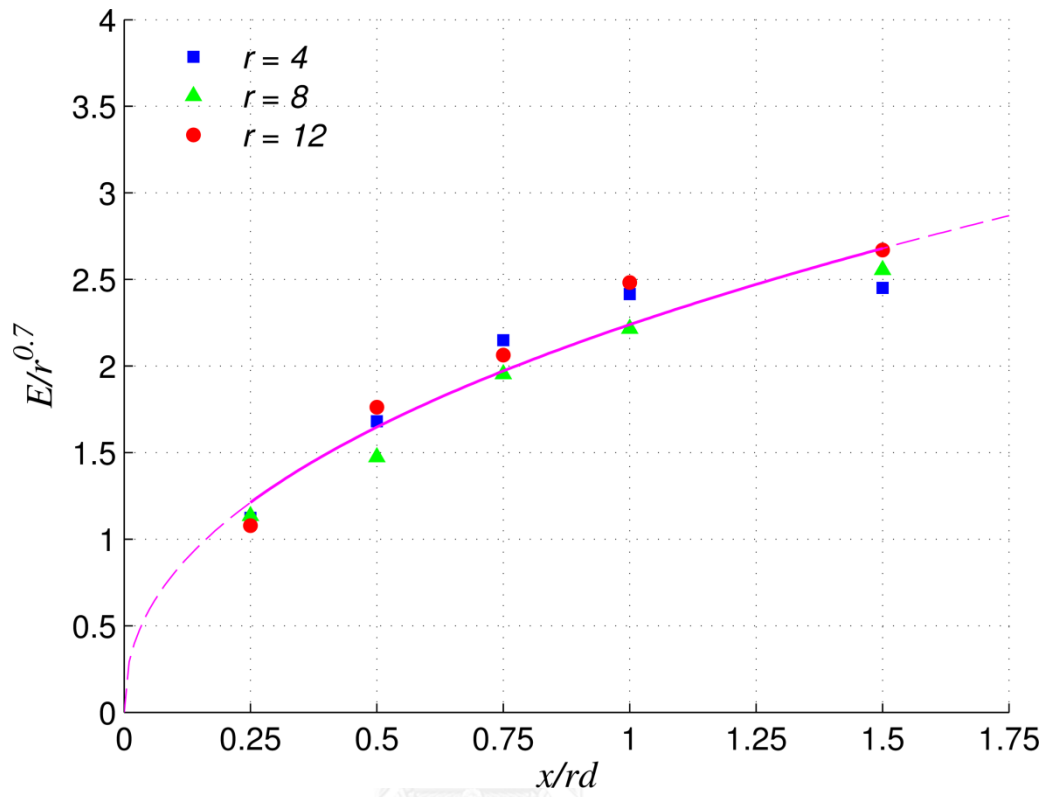
$$\text{CM of streamwise vorticity } (y_{CM, \omega_x}) \quad \frac{y}{r^{1.3}d} = 0.689 \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.284}$$



รูปที่ 7.21

Circulation เมื่อ scaling ด้วย  $r u_{cf} d$ 

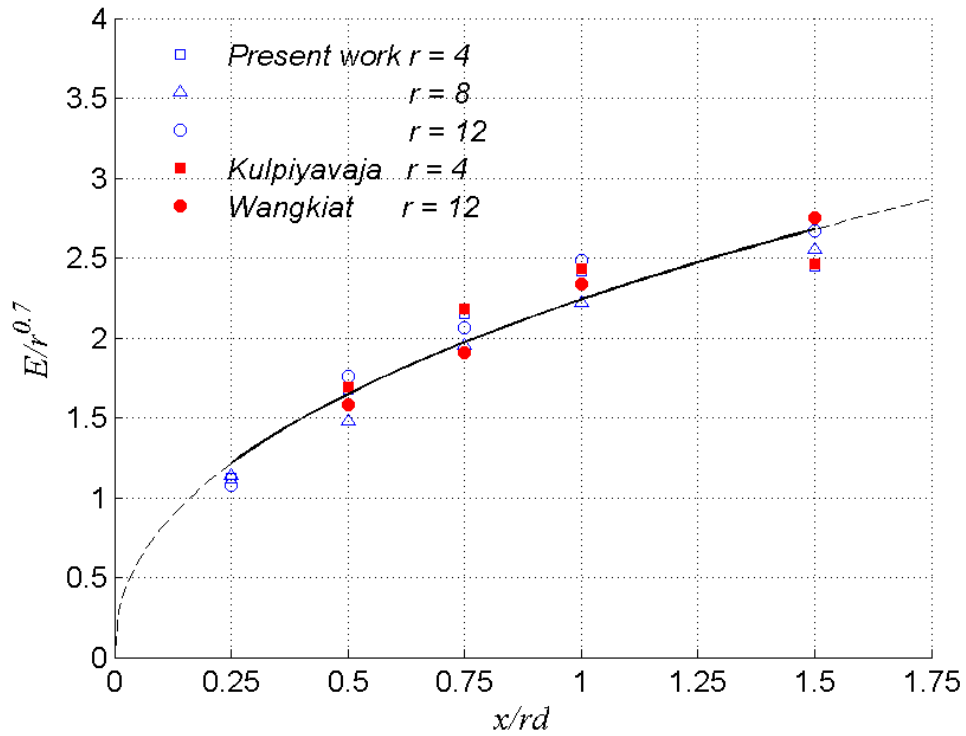
$$\frac{\Gamma}{r V_{cf} d} = 0.8722 \left( \frac{x}{rd} \right)^{-0.572}$$



รูปที่ 7.22

อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อ scaling ด้วย  $r^{0.7}$ 

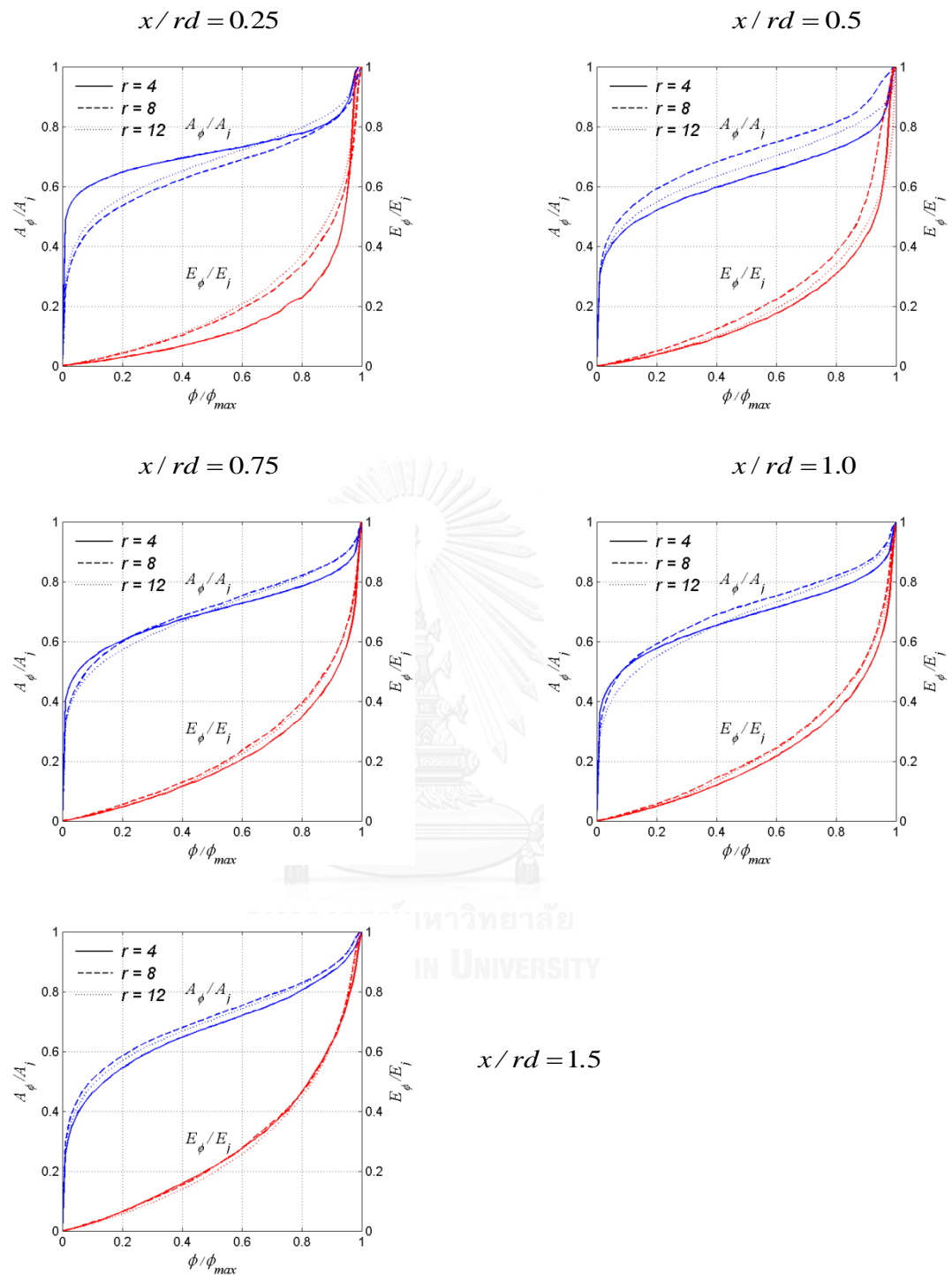
$$\frac{E}{r^{0.7}} = 2.251 \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.4119}$$



รูปที่ 7.23

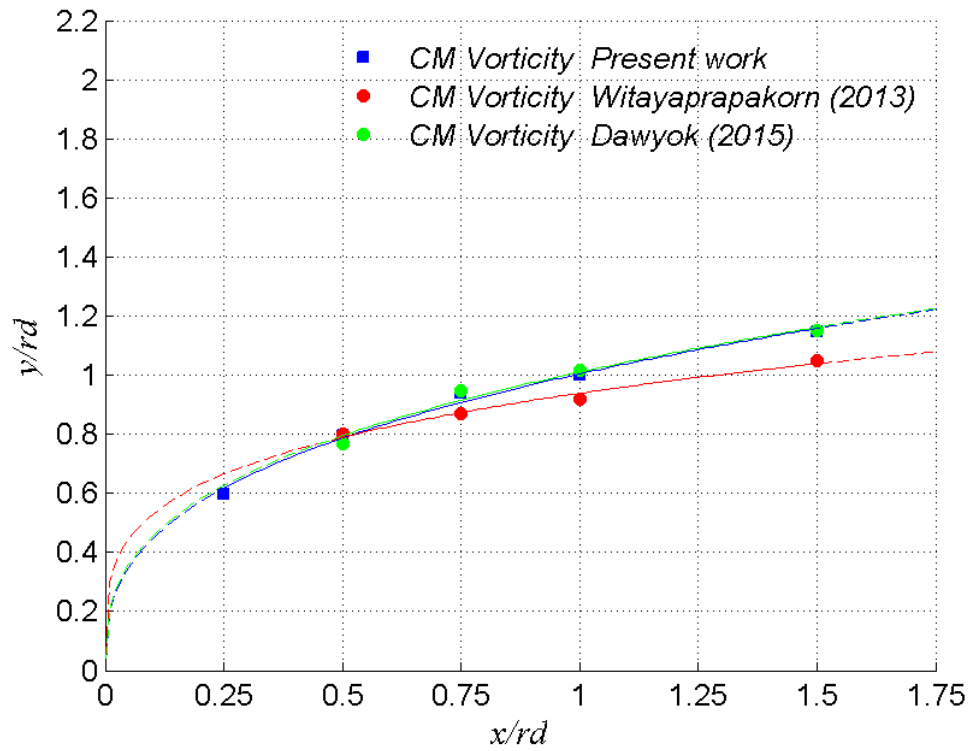
เปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อ scaling ด้วย  $r^{0.7}$  ของการทดลองนี้กับการทดลองของ Kulpiyavaja (2015) และ Wangkiat (2015)



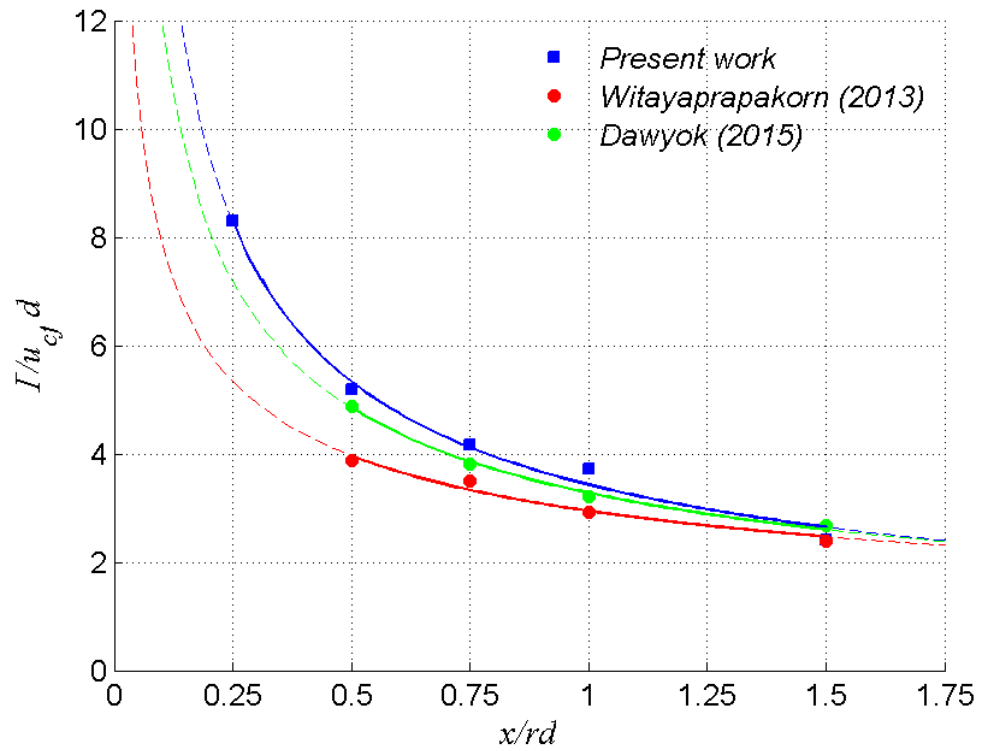


รูปที่ 7.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง area ratio–probability,  $A_\phi / A_j(\phi)$  และ entrainment ratio–probability relation,  $E_\phi / E_j(\phi)$  ที่ระนาบต่างๆ

## บทที่ 8

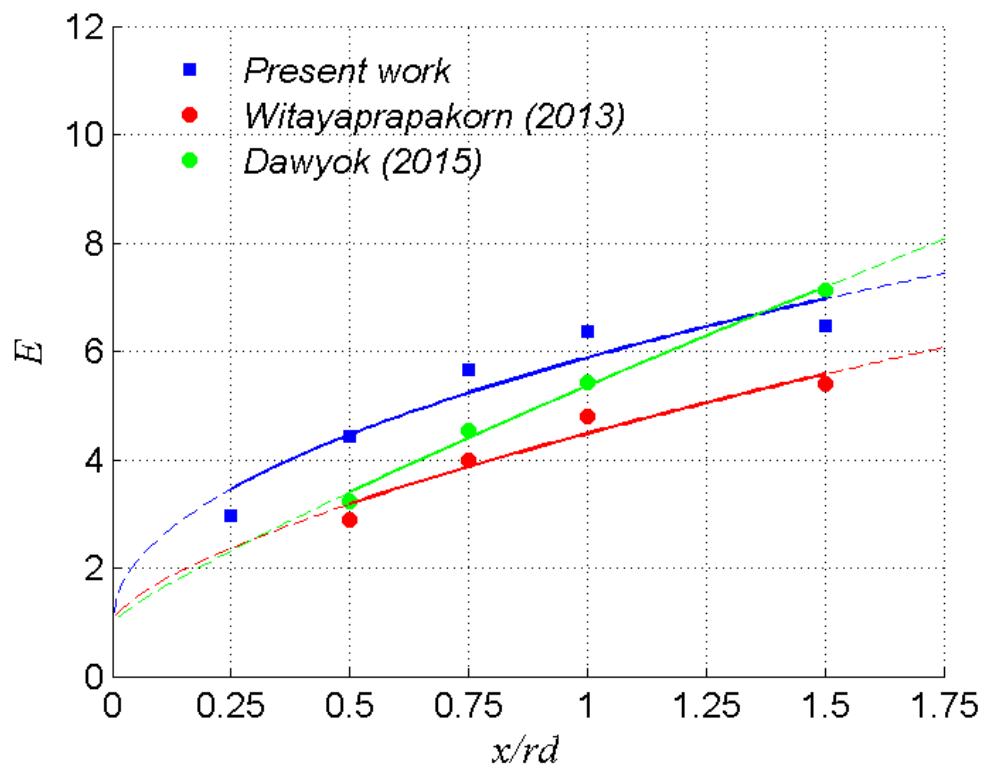


รูปที่ 8.1 เปรียบเทียบ center of mass trajectory ของปริมาณ vorticity ตามแนวแกน streamwise ของการทดลองนี้กับการทดลองของ Witayaprapakorn (2013) และ Dawyok (2015)



รูปที่ 8.2

เปรียบเทียบ circulation ของการทดลองนี้กับการทดลองของ Witayaprapakorn (2013) และ Dawyok (2015)



รูปที่ 8.3

เปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของการทดลองนี้กับการทดลองของ Witayaprapakorn (2013) และ Dawyok (2015)

## รายการอ้างอิง

- Berchet, A., Thomas, L., Braud, P. and David, L. (2013). *Instantaneous volumic concentration and velocity measurements of a jet in crossflow for the evaluation of the entrainment. Experiments in Fluids*, 54(12).
- Broadwell, J. E. and Breidenthal, R. E. (1984). *Structure and mixing of a transverse jet in incompressible flow. Journal of Fluid Mechanics*, 148, 405-412.
- 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*, 17(4), 045102.
- Chaikasetsin, S., Teerapat, S., Piyapon, P. and Bunyajitradulya, A. (2014). *Effects of Azimuthal Control Jets to Main Jet Mass Flowrate Ratio on the Entrainment of a Jet in Crossflow*. Paper presented at the The Fifth TSME International Conference on Mechanical Engineering, Chiang Mai, Thailand.
- Cortelezzi, L. and Karagozian, A. R. (2001). *On the Formation of the Counter-Rotating Vortex Pair in Transverse Jets. Journal of Fluid Mechanics*, 446, 347-373.
- Dawyok, S. and Bunyajitradulya, A. (2014). *Effects of the azimuthal control jets to main jet mass flowrate ratio on the flow structures of a jet in crossflow via POD*. Paper presented at the The Fifth TSME International Conference on Mechanical Engineering, Chiang Mai, Thailand.
- Fric, T. F. and Roshko, A. (1994). *Vortical structure in the wake of a transverse jet. Journal of Fluid Mechanics*, 279, 1-47.
- Kamotani, Y. and Greber, I. (1972). *Experiments on a Turbulent Jet in a Cross Flow. AIAA Journal*, 11, 1425-1429.
- Kornsri, 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*. Paper presented at the The Twenty-Third Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, Chiang Mai, Thailand.
- 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*, 13(3), 770.
- Limdumrongtum, P. (2007). *Swirling Jet in crossflow : A flow visualization study*. (Master), Chulalongkorn University, Thailand.
- Limdumrongtum, P., Chongsiripinyo, K., Nontiwatwanich, P., A., P. and A., B. (2009, November 4-7). *Investigation of mixing structure in the near field of swirling jets in crossflow*. Paper presented at the Proceedings of the Twenty-Third Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, Chiang Mai, Thailand.
- M'Closkey, R. T., King, J. M., Cortelezzi, L. and Karagozian, A. R. (2002). *The actively controlled jet in crossflow. Journal of Fluid Mechanics*, 452.
- Margason, R. J. (1968) *The path of a jet directed at large angles to a subsonic freestream*: Technical Report TN D-4919, NASA.

- Meyer, K. E., Pedersen, J. M. and Özcan, O. (2007). *A turbulent jet in crossflow analysed with proper orthogonal decomposition*. *Journal of Fluid Mechanics*, 583, 199.
- Muppidi, S. and Mahesh, K. (2005a). *Study of trajectories of jets in crossflow using direct numerical simulations*. *Journal of Fluid Mechanics*, 530, 81-100.
- Muppidi, S. and Mahesh, K. (2005b). *Velocity field of around turbulent transverse jet*. Paper presented at the Proceedings fourth international symposium on turbulent and shear flow phenomena, Williamsburg Virginia.
- Muppidi, S. and Mahesh, K. (2006). *Two-dimensional model problem to explain counter-rotating vortex pair formation in a transverse jet*. *Physics of Fluids*, 18(8), 085103.
- Smith, S. H. and Mungal, M. G. (1998). *Mixing, structure and scaling of the jet in crossflow*. *Journal of Fluid Mechanics*, 357, 83-122.
- 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*. Paper presented at the The Fourth TSME International Conference on Mechanical Engineering, Chonburi, Thailand.
- Wangjiraniran, W. and Bunyajitradulya, A. (2001). *Temperature distribution in non-zero circulation swirling jet in crossflow*. Paper presented at the Proceedings of The Fifteenth Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand, Bangkok, Thailand.
- Watakulsin, P., Gimjaiyen, W., Saengnumpong, W., Sangnimnuan, A., Pimpin, A. and Bunyajitradulya, A. (2010). *Effect of effective velocity ratio on the near-field mixing structures of a jet in crossflow*. Paper presented at the The First TSME International Conference on Mechanical Engineering, Ubon Ratchathani, Thailand.
- Witayaprapakorn, T. and Bunyajitradulya, A. (2013). *Effects of azimuthal control jets on the entrainment of a jet in crossflow*. (Master), Chulalongkorn University, Thailand.
- Wongthongsiri, K. and Bunyajitradulya, A. (2014). *Effects of crossflow reynolds number on structures and entrainment of a jet in crossflow*. Paper presented at the The Fifth TSME International Conference on Mechanical Engineering, Chiang Mai, Thailand.
- Yuan, L. L. and Street, R. L. (1998). *Trajectory and entrainment of a round jet in crossflow*. *Physics of Fluids*, 10(9), 2323-2335.
- Yuan, L. L., Street, R. L. and Ferziger, J. H. (1999). *Large-eddy simulation of a round jet in crossflow*. *Journal of Fluid Mechanics*, 379, 71 - 104.
- Zaman, K. B. M. Q. and Foss, J. K. (1997). *The effect of vortex generators on a jet in a crossflow*. *Physics of Fluids*, 9, 106-114.



ภาคผนวก

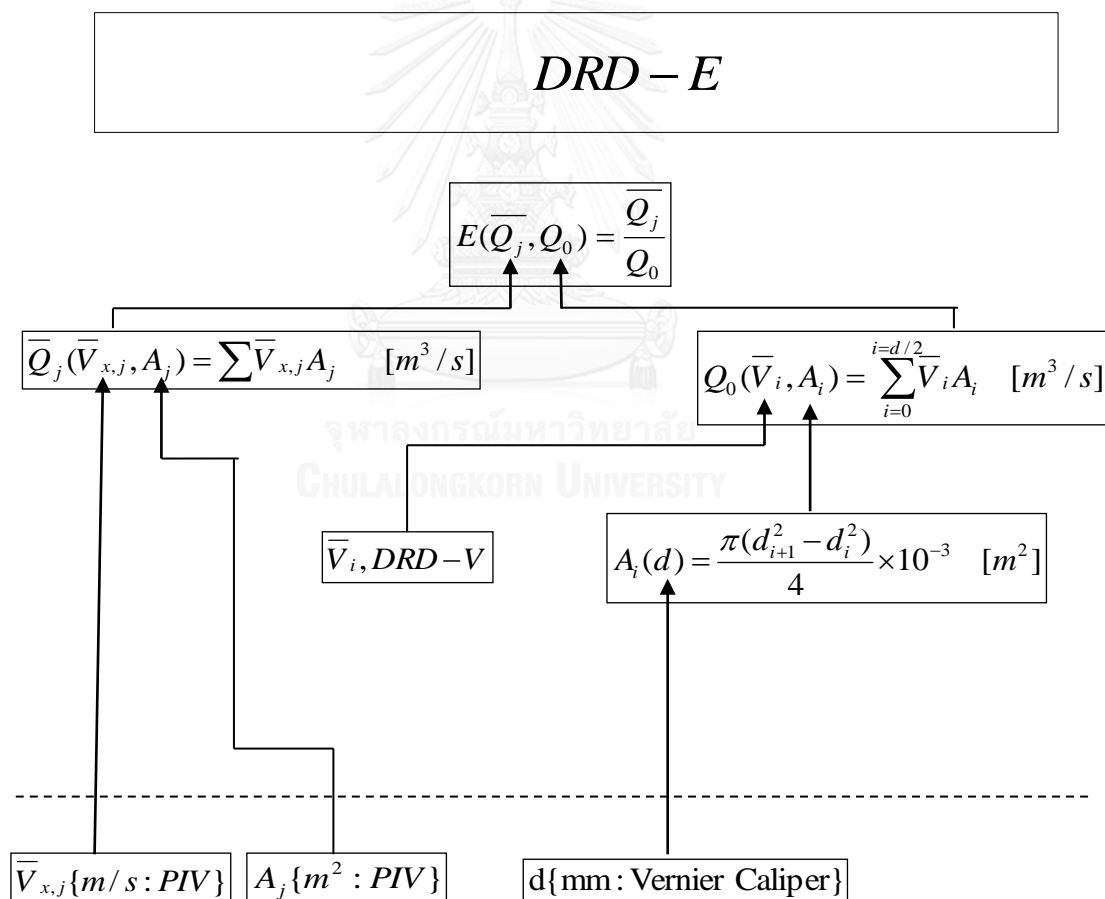
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก

### Data Reduction Diagram

#### ก.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

ในแผนภาพที่ ก.1 จะแสดงค่าเหนี่ยวนำการผสมนิยามจากอัตราการไหลของเจ็ตในกระแสมขวางที่หน้าตัดใดๆ ต่ออัตราการไหลที่ปากเจ็ต ซึ่งปริมาณที่ต้องวัดได้แก่ ความเร็วเฉลี่ยในแกน streamwise ของเจ็ตที่หน้าตัดใดๆ ( $\bar{V}_{x,j}$ ) พื้นที่ของเจ็ตที่หน้าตัดใดๆ ( $A_j$ ) และระยะเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต ( $d$ ) ส่วน DRD ของความเร็วที่บริเวณปากเจ็ตที่บริเวณปากเจ็ตจะแสดงในแผนภาพที่ ก.2

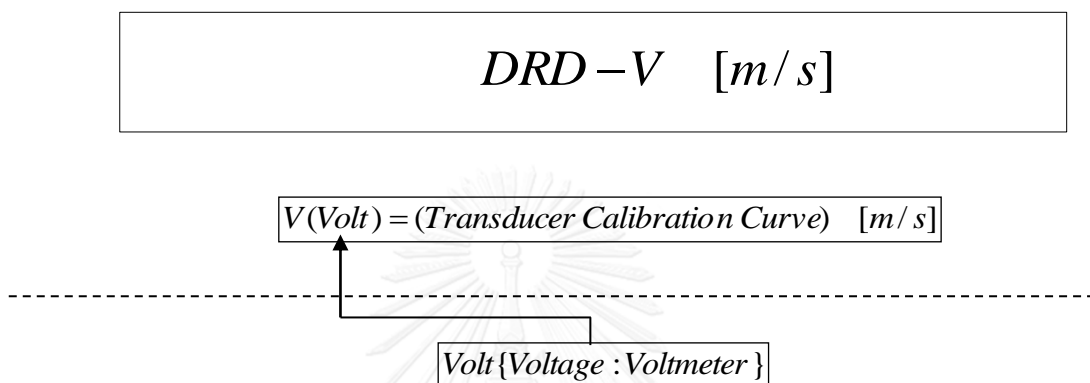


แผนภาพที่ ก.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม



## ก.2 ความเร็วที่วัดได้จาก pitot static tube

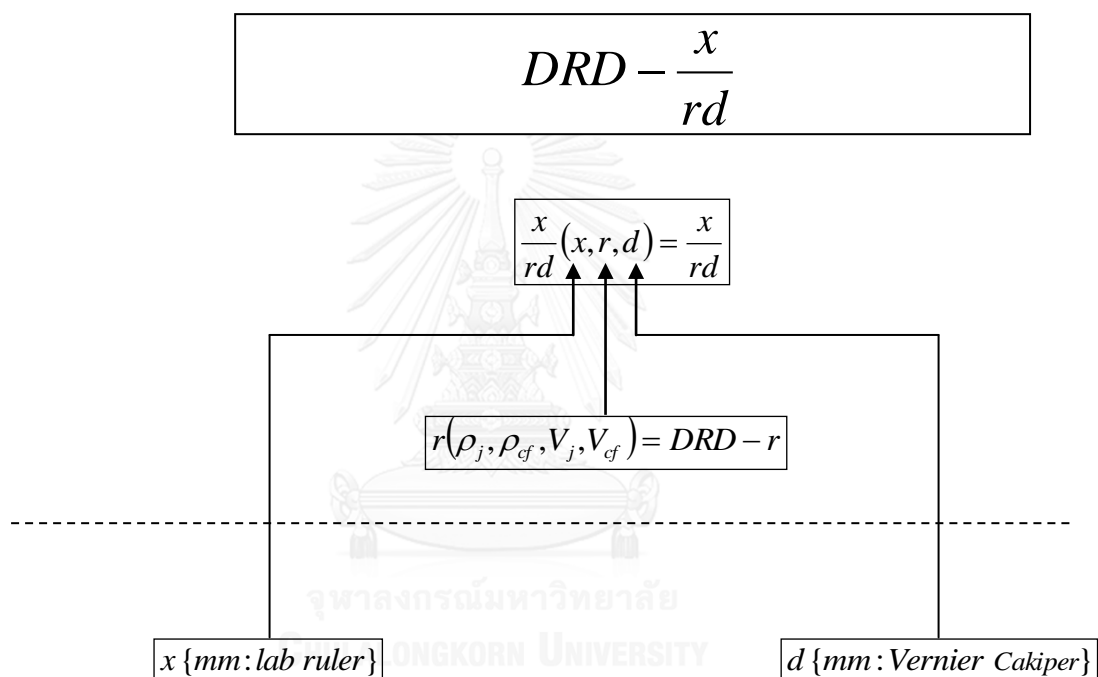
ความเร็วที่วัดได้จาก pitot static tube เป็นปริมาณที่มีความสำคัญเนื่องจากเป็นปริมาณที่นำไปใช้คำนวณต่อในอีกหลายปริมาณ เช่น ค่าเหนี่ยวนำการผสม ( $E$ ) อัตราส่วนความเป็นประสิทธิผล ( $r$ ) และเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง ( $Re_{cf}$ )



แผนภาพที่ ก.2 ความเร็วที่วัดได้จาก pitot static tube

### ก.3 ระยะตามแนว downstream

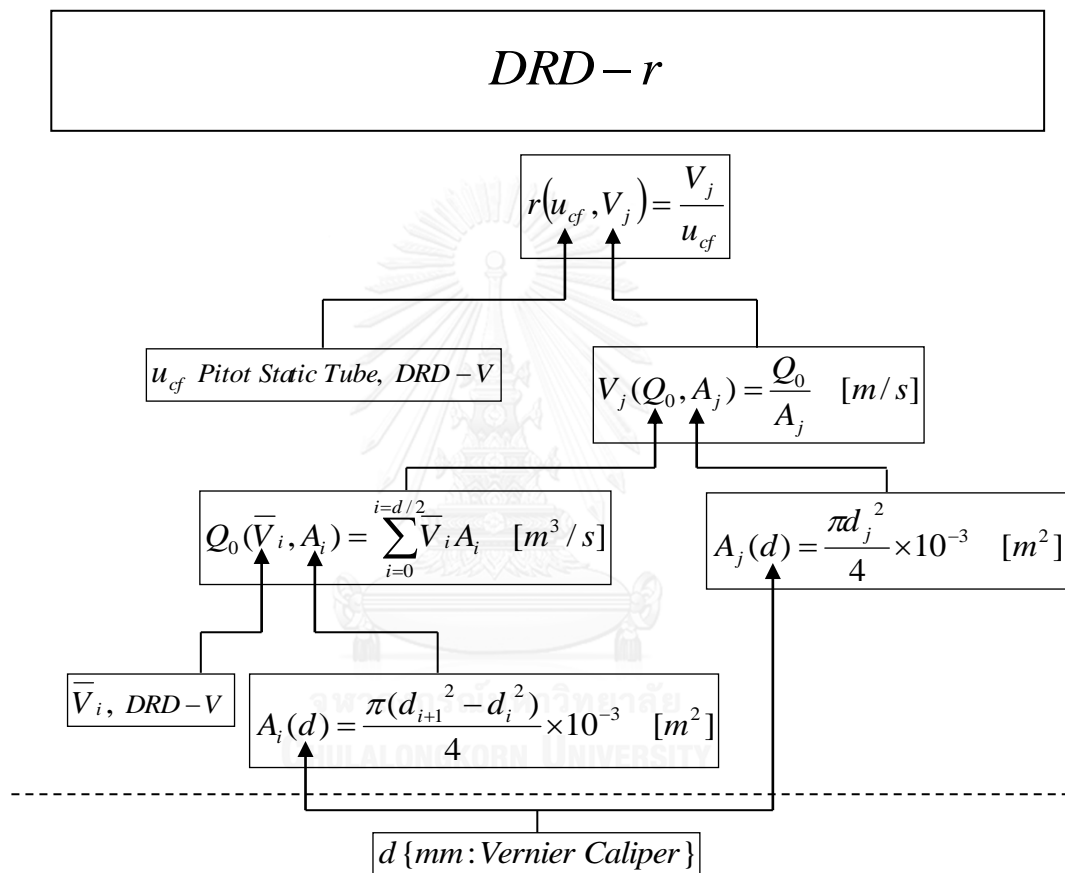
ระยะตามแนว downstream เป็นปริมาณที่ต้องการศึกษาว่าเมื่อเปลี่ยนระยะตามแนว downstream จะมีผลอย่างไรต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ซึ่งเบื้องต้นมีปริมาณที่วัดได้แก่ ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ด ( $d$ ) และระยะตามแนว downstream ( $x$ ) โดยวัดได้จากไม้บรรทัด นอกจากนี้ระยะตามแนว downstream ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) ดังแสดงในแผนภาพที่ ก.5



แผนภาพที่ ก.3 ระยะตามแนว downstream ( $x/rd$ )

#### ก.4 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล

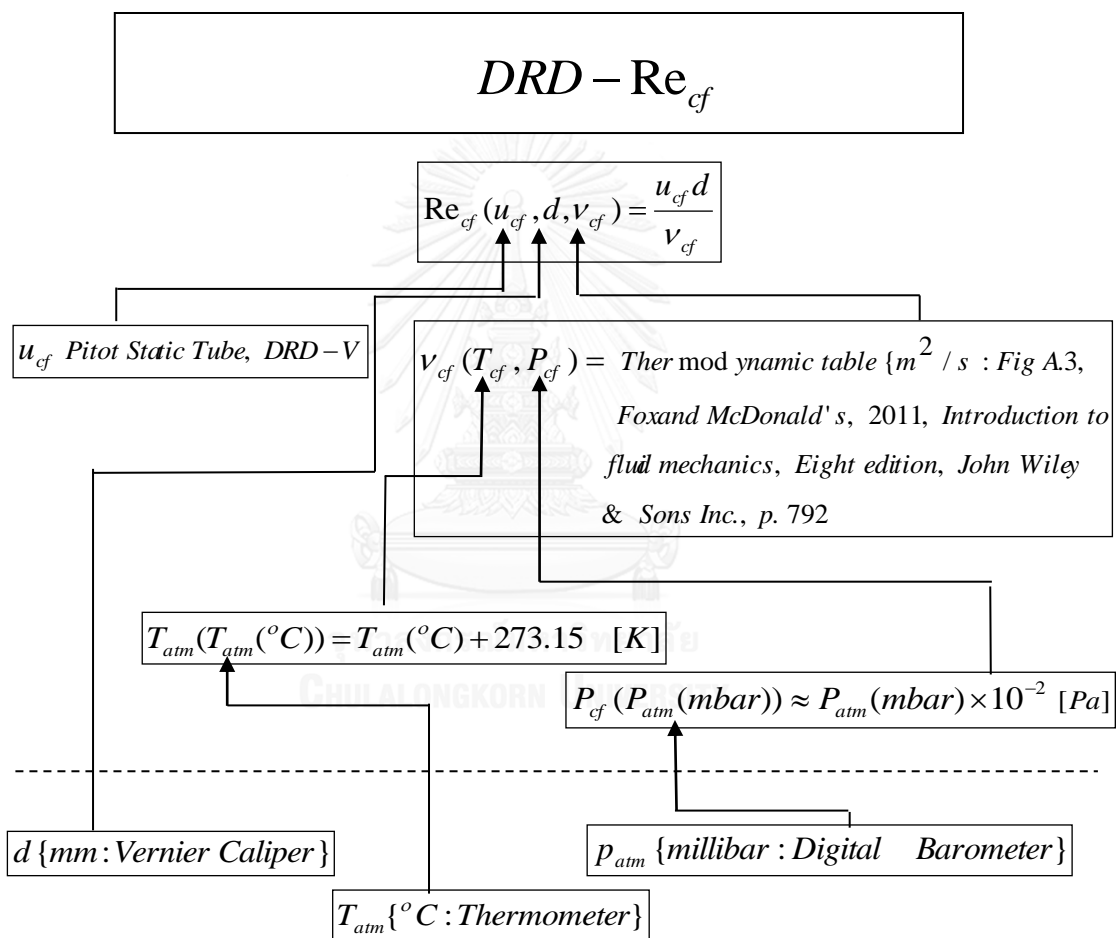
อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเป็นปริมาณที่สำคัญที่ต้องวัดในการทดลองนี้ ซึ่งปริมาณที่ต้องวัดได้แก่ ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต ( $d$ ) ส่วน DRD ของความเร็วที่บริเวณปากเจ็ตและความเร็วของกระแสลมขวางซึ่งเป็นความเร็วที่วัดได้จาก pitot tube จะแสดงในแผนภาพที่ ก.2



แผนภาพที่ ก.4 อัตราส่วนความเป็นประสิทธิผล ( $r$ )

### ก.5 เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวาง

เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวางเป็นปริมาณที่ต้องควบคุมสำหรับการทดลองนี้ ซึ่งปริมาณที่ต้องวัดได้แก่ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต ( $d$ ) ความดัน ( $P_{atm}$ ) และอุณหภูมิ ( $T_{atm}$ ) บรรยากาศ ส่วน DRD ของความเร็วของกระแสมขวางซึ่งวัดได้จาก pitot tube จะแสดงในแผนภาพที่ ก.



แผนภาพที่ ก.5 เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวาง ( $Re_{cf}$ )

## ภาคผนวก ข

### ความไม่แน่นอน

#### ข.1 ค่าความไม่แน่นอนของค่าความเร็ว

การวิเคราะห์หาค่าความไม่แน่นอนของค่าความเร็ว ( $U_V$ )

$$V = \sqrt{\frac{2\rho_w g \Delta h}{\rho_a}} \quad (\text{ข.1.1})$$

เมื่อ	$\rho_w$	คือ ความหนาแน่นของของน้ำ ที่อุณหภูมิ T และความดัน P	$[kg/m^3]$
	$g$	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก	$[m/s^2]$
	$\Delta h$	คือ ผลต่างระดับความสูงของน้ำที่อ่านได้จากเครื่องวัด (ทั้งความสูงระดับน้ำจริงจากமானอมิเตอร์ หรือความสูงน้ำเสมือน เมื่อวัดจาก Pressure transducer )	$[m(\text{water})]$
	$\rho_a$	คือ ความหนาแน่นของของอากาศ ที่อุณหภูมิ T และความดัน P	$[kg/m^3]$

สมมติฐาน

พิจารณาให้ค่า  $\rho_w$  และ  $g$  เป็นค่าคงที่จากตารางทางเทอร์โมไดนามิก จึงไม่มีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของ  $V$

ความคลาดเคลื่อนของค่าความเร็ว  $U_V$  จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด Bias ( $B_V$ ) และความคลาดเคลื่อนจากการวัด Precision ( $P_V$ )

$$U_V = \sqrt{B_V^2 + P_V^2} \quad (\text{ข.1.2})$$

พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัด Precision ( $P_V$ ) สามารถหาได้จาก

$$P_V = \sqrt{t_{\frac{\alpha}{2}, v=n-1}^2 S_V^2} = \sqrt{t_{\frac{\alpha}{2}, v=n-1}^2 \frac{S_V}{\sqrt{n}}} \quad (\text{ข.1.3})$$

เมื่อ	$S_V$	คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็ว $V$
	$n$	คือ จำนวนครั้งของการทดลอง

พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด Bias ( $B_V$ ) สามารถหาได้จากการกระจายพจน์ความไม่แน่นอนโดย Uncertainty Propagation Equation (UPE)

$$B_V^2 = \left( \frac{\partial V}{\partial (\Delta h)} \right)^2 B_{\Delta h}^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial \rho_a} \right)^2 B_{\rho_a}^2 \quad (\text{ข.1.4})$$

เมื่อ

$$\frac{\partial V}{\partial(\Delta h)} = \frac{V}{2(\Delta h)}$$

$$\frac{\partial V}{\partial \rho_a} = -\frac{V}{2\rho_a}$$

$$B_V^2 = \left(\frac{V}{2(\Delta h)}\right)^2 B_{\Delta h}^2 + \left(-\frac{V}{2\rho_a}\right)^2 B_{\rho_a}^2 \quad (\text{ข.1.5})$$

เปลี่ยนให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ โดยนำ  $V^2$  หารตลอดสมการ

$$\left(\frac{B_V}{V}\right)^2 = \frac{1}{4}\left(\frac{B_{\Delta h}}{\Delta h}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{B_{\rho_a}}{\rho_a}\right)^2 \quad (\text{ข.1.6})$$

พิจารณาพจน์  $\left(\frac{B_{\Delta h}}{\Delta h}\right)^2$

$$(B_{\Delta h})^2 = e_0^2 + e_{acc}^2 \quad (\text{ข.1.7})$$

เมื่อ  $e_0$  คือ  $\frac{1}{2}$  resolution ของเครื่องมือวัด

$e_{acc}$  คือ ค่า accuracy ของเครื่องมือวัด

กรณีที่เป็นมานอมิเตอร์ (วัดช่วงความเร็วสูง) เนื่องจากไม่ทราบค่า accuracy ของบารอมิเตอร์ที่ใช้วัด จึงเหลือเพียง  $e_0$  เท่านั้น

กรณีที่เป็น Pressure transducer (วัดช่วงความเร็วต่ำ) เนื่องจากค่า resolution ของ Pressure transducer มีค่าน้อยมาก จึงเหลือเพียง  $e_{acc}$  เท่านั้น

ดังนั้นสมการ (ข.1.7) จึงสามารถลดรูปได้เหลือ

$$B_{\Delta h} = e \quad (\text{ข.1.7})$$

เมื่อ  $e$  หมายถึง  $e_0$  หรือ  $e_{acc}$  ตามแต่ช่วงความเร็วที่ใช้เครื่องมือวัดต่างกัน

พิจารณาพจน์  $\left(\frac{B_{\rho_a}}{\rho_a}\right)^2$

สมมติฐาน

ให้อากาศประพฤติตัวเป็นแก๊สในอุดมคติ จะได้ความสัมพันธ์จากกฎของแก๊สว่า

$$\rho_a = \frac{P}{RT} \quad (\text{ข.1.8})$$

เมื่อ  $P$  คือ ความดันอากาศ ในกรณีนี้เทียบเท่ากับความดันบรรยากาศ  $[kPa]$

$R$  คือ ค่าคงตัวของแก๊ส ในกรณีนี้คืออากาศ  $[kJ/kg-K]$

$T$  คือ อุณหภูมิอากาศ  $[K]$

ใช้ Uncertainty Propagation Equation (UPE) ในการกระจายพจน์ความไม่แน่นอนในรูปไร้มิติ

$$B_{\rho_a}^2 = \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial P}\right)^2 B_P^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial T}\right)^2 B_T^2 \quad (\text{ข.1.9})$$

เมื่อ

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial P} = \frac{1}{RT}$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial T} = -\frac{P}{RT^2}$$

$$B_{\rho_a}^2 = \left(\frac{1}{RT}\right)^2 B_P^2 + \left(\frac{P}{RT^2}\right)^2 B_T^2 \quad (\text{ข.1.10})$$

เปลี่ยนให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ โดยนำ  $\rho_a^2$  หารตลอดสมการ

$$\left(\frac{B_{\rho_a}}{\rho_a}\right)^2 = \left(\frac{B_P}{P}\right)^2 + \left(\frac{B_T}{T}\right)^2 \quad (\text{ข.1.11})$$

พิจารณาพจน์  $B_P$

$$e_o = \frac{1}{2}(\text{resolution of Barometer}) = 0.5 \text{ mbar} = 0.05 \text{ kPa}$$

$$e_I = \text{Accuracy of Barometer} = 10.6 \text{ mbar} = 1.06 \text{ kPa}$$

เพราะฉะนั้น

$$B_P = \sqrt{e_o^2 + e_I^2} = 1.061 \text{ kPa}$$

พิจารณาพจน์  $B_T$

$$e_o = \frac{1}{2}(\text{resolution of Thermometer}) = 0.5 \text{ }^\circ\text{C (or K)}$$

สมมติให้  $e_I \approx 0$  เนื่องจากไม่ทราบค่า Accuracy ของเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้วัด

เพราะฉะนั้น

$$B_T = \sqrt{e_o^2 + e_I^2} \approx \sqrt{e_o^2} = 0.5 \text{ Ka}$$

แทนลงในสมการ (ข.1.11) จะได้ว่า

$$\left(\frac{B_{\rho_a}}{\rho_a}\right)^2 = \left(\frac{1.061}{P}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{T}\right)^2 \quad (\text{ข.1.12})$$

ดังนั้น Bias ของค่าความเร็ว ( $B_V$ ) จึงสามารถหาได้จาก

$$\left(\frac{B_V}{V}\right)^2 = \frac{1}{4}\left(\frac{e}{\Delta h}\right)^2 + \frac{1}{4}\left[\left(\frac{1.061}{P}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{T}\right)^2\right] \quad (\text{ข.1.13})$$

ค่าความไม่แน่นอนของค่าความเร็ว ( $U_V$ ) จึงสามารถหาได้จาก

เมื่อ

$$U_V = \sqrt{B_V^2 + P_V^2} \quad (\text{ข.1.2})$$

$$\left(\frac{B_V}{V}\right)^2 = \frac{1}{4}\left(\frac{e}{\Delta h}\right)^2 + \frac{1}{4}\left[\left(\frac{1.061}{P}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{T}\right)^2\right] \quad (\text{ข.1.13})$$

$$P_V = \sqrt{t_{\frac{\alpha}{2}, \nu=n-1} S_V} = \sqrt{t_{\frac{\alpha}{2}, \nu=n-1} \frac{S_V}{\sqrt{n}}} \quad (\text{ข.1.3})$$





## ข.2 ค่าความไม่แน่นอนของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

การวิเคราะห์หาค่าความไม่แน่นอนของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

$(U_E)$

$$E = \frac{\bar{Q}_j}{Q_0} \quad (\text{ข.2.1})$$

เมื่อ  $\bar{Q}_j$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรเฉลี่ยของเจ็ดที่หน้าตัดใดๆ

$Q_0$  คือ อัตราการไหลเริ่มต้น ที่ปากทางออกเจ็ด

ความคลาดเคลื่อนของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร  $(U_E)$  จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด Bias  $(B_E)$  และความคลาดเคลื่อนจากการวัด Precision  $(P_E)$

$$U_E = \sqrt{B_E^2 + P_E^2} \quad (\text{ข.2.2})$$

พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัด Precision  $(P_E)$  สามารถหาได้จาก

$$P_E = \sqrt{t_{\frac{\alpha}{2}, v=n-1} S_E} = \sqrt{t_{\frac{\alpha}{2}, v=n-1} \frac{S_E}{\sqrt{n}}} \quad (\text{ข.2.3})$$

เมื่อ  $S_E$  คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

$E$

$n$  คือ จำนวนครั้งของการทดลอง

พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด Bias  $(B_E)$  สามารถหาได้จากการกระจายพจน์ความไม่แน่นอนโดย Uncertainty Propagation Equation (UPE)

$$B_E^2 = \left( \frac{\partial E}{\partial \bar{Q}_j} \right)^2 B_{\bar{Q}_j}^2 + \left( \frac{\partial E}{\partial Q_0} \right)^2 B_{Q_0}^2 \quad (\text{ข.2.4})$$

เมื่อ

$$\frac{\partial E}{\partial \bar{Q}_j} = \frac{1}{Q_0}$$

$$\frac{\partial E}{\partial Q_0} = -\frac{\bar{Q}_j}{Q_0^2}$$

$$B_E^2 = \left( \frac{1}{Q_0} \right)^2 B_{\bar{Q}_j}^2 + \left( -\frac{\bar{Q}_j}{Q_0^2} \right)^2 B_{Q_0}^2 \quad (\text{ข.2.5})$$

เปลี่ยนให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ โดยนำ  $E^2$  หารตลอดสมการ

$$\left(\frac{B_E}{E}\right)^2 = \left(\frac{B_{\bar{Q}_j}}{\bar{Q}_j}\right)^2 + \left(\frac{B_{Q_0}}{Q_0}\right)^2 \quad (\text{ข.2.6})$$

พิจารณาพจน์  $\left(\frac{B_{\bar{Q}_j}}{\bar{Q}_j}\right)^2$

เนื่องจาก  $\bar{Q}_j$  ในการทดลองนี้นิยามด้วยสมการ 2.7  $\bar{Q}_j = \sum \bar{V}_{ij} \Delta A$

และ  $\Delta A$  มีค่าคงที่ในแต่ละกรณี จึงสามารถเขียนสมการ 2.7 ได้ในรูป

$$\bar{Q}_j = \Delta A \sum \bar{V}_{ij} \quad (\text{ข.2.7})$$

ใช้ Uncertainty Propagation Equation (UPE) ในการกระจายพจน์ความไม่แน่นอนของ  $B_{\bar{Q}_j}$

จะได้ว่า

$$B_{\bar{Q}_j}^2 = \left(\frac{\partial \bar{Q}_j}{\partial (\Delta A)}\right)^2 B_{\Delta A}^2 + \left(\frac{\partial \bar{Q}_j}{\partial (\sum \bar{V}_{ij})}\right)^2 B_{\sum \bar{V}_{ij}}^2 \quad (\text{ข.2.8})$$

สมมติฐาน

ละทิ้ง  $B_{A_{ij}}$  เนื่องจาก  $A_{ij}$  ถูกคำนวณจากโปรแกรม Insight 4G ซึ่งไม่สามารถหาสูตรการคำนวณเพื่อหา  $B_{A_{ij}}$  อย่างถูกต้องได้

$$B_{\bar{Q}_j}^2 = (\Delta A)^2 B_{\sum \bar{V}_{ij}}^2 \quad (\text{ข.2.9})$$

เนื่องจาก

$$\sum \bar{V}_{ij} = \bar{V}_{11} + \bar{V}_{12} + \bar{V}_{13} + \dots + \bar{V}_{21} + \bar{V}_{22} + \dots \quad (\text{ข.2.10})$$

ใช้ Uncertainty Propagation Equation (UPE) ในการกระจายพจน์ความไม่แน่นอนของ  $B_{\sum \bar{V}_{ij}}$

ซึ่งเป็นความเร็วแต่ละจุดของเจ็ตบนระนาบ จะได้ systematic uncertainties ว่า

$$B_{\sum \bar{V}_{ij}}^2 = \sum_{ij} B_{\bar{V}_{ij}}^2 + 2 \sum_{ij} \left[ B_{\bar{V}_{ij}} \left( \sum_{mn} B_{\bar{V}_{mn}} \right) \right] \quad (\text{ข.2.11})$$

อย่างไรก็ตามพจน์  $2 \sum_{ij} \left[ B_{\bar{V}_{ij}} \left( \sum_{mn} B_{\bar{V}_{mn}} \right) \right]$  ซึ่งเป็นพจน์ correlation ในการทดลองนี้จะมีค่า

เป็น 0 เพราะการทดลองนี้ uncorrelated เนื่องด้วยเหตุผล 2 ข้อ

1. การทดลองนี้เก็บค่าความเร็วในขั้นตอนการสอบเทียบด้วย pitot static tube ควบคุมกับเครื่องมือแปรค่าความเร็ว 3 เครื่องตั้งที่กล่าวไว้แล้ว (transducer 2 เครื่อง และ manometer) ดังนั้นความเร็วที่แตกต่างกัน 3 ช่วงจะ uncorrelated กัน

2. การสอบเทียบความเร็ว ค่าความเร็วที่วัดจาก SPIV ที่จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดจาก pitot static tube เป็นค่าความเร็วเฉลี่ยจากพื้นที่บางส่วนของระนาบที่วัดมา ดังนั้นความเร็วที่แต่ละจุดจะ uncorrelated กัน เนื่องด้วย non-uniformity ของกระแสลมขวาง

สมการ (ข.2.11) จึงลดรูปเป็น

$$B_{\Sigma \bar{V}_{ij}}^2 = \sum_{ij} B_{\bar{V}_{ij}}^2 \quad (\text{ข.2.12})$$

แทนสมการที่ (ข.2.12) ลงในสมการที่ (ข.2.9) จะได้ว่า

$$B_{\bar{Q}_0}^2 = (\Delta A)^2 \sum_{ij} B_{\bar{V}_{ij}}^2 \quad (\text{ข.2.13})$$

พิจารณาพจน์  $\left(\frac{B_{Q_0}}{Q_0}\right)^2$

เนื่องจาก  $Q_0$  นิยามโดย  $Q_0 = \sum_{r=0}^{r=d/2} \bar{V}_r A_r$

เมื่อ  $\bar{V}_r$  คือ ความเร็วในแนวแกน  $x$  ที่ตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางของเจ็ตรัสมี  $r$

$A_r$  คือ พื้นที่วงแหวนที่เจ็ตรัสมีความเร็วเท่ากับ  $\bar{V}_r$

ใช้ Uncertainty Propagation Equation (UPE) ในการกระจายพจน์ความไม่แน่นอนของ  $B_{Q_0}$  จะได้ว่า

$$B_{Q_0}^2 = \sum_{r=0}^{r=d/2} \left[ \left( \frac{\partial Q_0}{\partial \bar{V}_r} \right)^2 B_{\bar{V}_r}^2 \right] + \sum_{r=0}^{r=d/2} \left[ \left( \frac{\partial Q_0}{\partial A_r} \right)^2 B_{A_r}^2 \right] \quad (\text{ข.2.14})$$

เมื่อ  $\frac{\partial Q_0}{\partial \bar{V}_r} = A_r = \pi(r_o^2 - r_i^2)$

$$\frac{\partial Q_0}{\partial A_r} = \bar{V}_r$$

$$B_{Q_0}^2 = \sum_{r=0}^{r=d/2} (A_r^2 B_{\bar{V}_r}^2) + \sum_{r=0}^{r=d/2} (\bar{V}_r^2 B_{A_r}^2) \quad (\text{ข.2.15})$$

พิจารณาพจน์  $B_{A_r}$

เนื่องจาก  $A_r$  นิยามโดย  $A_r = \pi(r_o^2 - r_i^2)$

ใช้ Uncertainty Propagation Equation (UPE) ในการกระจายพจน์ความไม่แน่นอนของ  $B_{A_r}$

จะได้ว่า

$$B_{A_r}^2 = \left( \frac{\partial A_r}{\partial r_o} \right)^2 B_{r_o}^2 + \left( \frac{\partial A_r}{\partial r_i} \right)^2 B_{r_i}^2 \quad (\text{ข.2.16})$$

เมื่อ

$$\frac{\partial A_r}{\partial r_o} = 2\pi r_o$$

$$\frac{\partial A_r}{\partial r_i} = 2\pi r_i$$

$$B_{A_r}^2 = (2\pi r_o)^2 B_{r_o}^2 + (2\pi r_i)^2 B_{r_i}^2 \quad (\text{ข.2.17})$$

เนื่องจาก  $B_{r_o}^2 = B_{r_i}^2 = B_r^2$  ดังนั้น

$$B_{A_r}^2 = (2\pi B_r)^2 (r_o^2 + r_i^2) \quad (\text{ข.2.18})$$

แทนสมการที่ (ข.2.18) ลงในสมการที่ (ข.2.15)

$$B_{Q_0}^2 = \sum_{r=0}^{r=d/2} (A_r B_{V_r})^2 + (2\pi B_r)^2 \sum_{r=0}^{r=d/2} [\bar{V}_r^2 (r_o^2 + r_i^2)] \quad (\text{ข.2.19})$$

เพราะฉะนั้นจะจัดรูปได้

$$\left( \frac{B_{Q_0}}{Q_0} \right)^2 = \left( \frac{1}{Q_0^2} \right) \left[ \sum_{r=0}^{r=d/2} (A_r B_{V_r})^2 + (2\pi B_r)^2 \sum_{r=0}^{r=d/2} [\bar{V}_r^2 (r_o^2 + r_i^2)] \right] \quad (\text{ข.2.20})$$

แทน (ข.2.13) และ (ข.2.20) ลงในสมการ (ข.2.6) จะได้ว่า

$$\left( \frac{B_E}{E} \right)^2 = \frac{(\Delta A)^2 \Sigma B_{ij}^2}{Q_j^2} + \left( \frac{1}{Q_0^2} \right) \left[ \sum_{r=0}^{r=d/2} (A_r B_{V_r})^2 + (2\pi B_r)^2 \sum_{r=0}^{r=d/2} [\bar{V}_r^2 (r_o^2 + r_i^2)] \right] \quad (\text{ข.2.21})$$

ค่าความไม่แน่นอนของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ( $U_E$ ) จึงสามารถหาได้

จาก

$$U_V = \sqrt{B_V^2 + P_V^2} \quad (\text{ข.2.2})$$

เมื่อ

$$\left( \frac{B_E}{E} \right)^2 = \frac{(\Delta A)^2 \Sigma B_{ij}^2}{Q_j^2} + \left( \frac{1}{Q_0^2} \right) \left[ \sum_{r=0}^{r=d/2} (A_r B_{V_r})^2 + (2\pi B_r)^2 \sum_{r=0}^{r=d/2} [\bar{V}_r^2 (r_o^2 + r_i^2)] \right] \quad (\text{ข.2.21})$$

$$P_V = \sqrt{t_{\alpha, v=n-1}^2 S_V} = \sqrt{t_{\alpha, v=n-1}^2 \frac{S_V}{\sqrt{n}}} \quad (\text{ข.2.3})$$

ผลการคำนวณพบว่าทุกกรณีมี  $U_E$  ไม่เกิน 3%

**ภาคผนวก ค**  
**พารามิเตอร์ในการทดลอง**

$$r = 4$$

**ค.1.1**

General	x/rd	0.25
	T <sub>atm</sub> [°C]	31
	P <sub>atm</sub> [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	10
	No. of nozzle	1
Jet & Crossflow	V <sub>j</sub> [m/s]	16.22
	u <sub>cf</sub> [m/s]	4.030
	r	4.024
Camera (L/R)	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 3 ช่อง
	Spatial resolution [mm <sup>2</sup> ]	0.971x0.971 (60.714 μm/pixel )
Note	SNR = 1.5	Δt = 15 μs

**ค.1.2**

General	x/rd	0.50
	T <sub>atm</sub> [°C]	30.2
	P <sub>atm</sub> [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	10
	No. of nozzle	1
Jet & Crossflow	V <sub>j</sub> [m/s]	16.22
	u <sub>cf</sub> [m/s]	4.030
	r	4.024
Camera (L/R)	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	2.8/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 3 ช่อง
	Spatial resolution [mm <sup>2</sup> ]	0.962x0.962 (60.164 μm/pixel )
Note	SNR = 1.5	Δt = 20 μs

## ค.1.3

General	x/rd	0.75
	T <sub>atm</sub> [°C]	30.2
	P <sub>atm</sub> [mbar]	101.6
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	10
	No. of nozzle	1
Jet & Crossflow	V <sub>j</sub> [m/s]	16.22
	u <sub>cf</sub> [m/s]	4.030
	r	4.024
Camera (L/R)	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 3 ช่อง
	Spatial resolution [mm <sup>2</sup> ]	0.942x0.942 (58.94 μm/pixel )
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 20 \mu s$

## ค.1.4

General	x/rd	1.0
	T <sub>atm</sub> [°C]	30.2
	P <sub>atm</sub> [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	14
	No. of nozzle	1
Jet & Crossflow	V <sub>j</sub> [m/s]	16.22
	u <sub>cf</sub> [m/s]	4.030
	r	4.024
Camera (L/R)	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 3 ช่อง
	Spatial resolution [mm <sup>2</sup> ]	0.936x0.936 (58.52 μm/pixel )
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 25 \mu s$

## ค.1.5

General	x/rd	1.5
	T <sub>atm</sub> [°C]	30.4
	P <sub>atm</sub> [mbar]	101.0
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	18
	No. of nozzle	1
Jet & Crossflow	V <sub>j</sub> [m/s]	16.22
	u <sub>cf</sub> [m/s]	4.030
	r	4.024
Camera (L/R)	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดตก. Target 2.5 ช่อง
	Spatial resolution [mm <sup>2</sup> ]	0.992x0.992 (62.0 μm/pixel )
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 25 \mu s$

$$r = 8$$

## ค.2.1

General	x/rd	0.25
	T <sub>atm</sub> [°C]	30.9
	P <sub>atm</sub> [mbar]	101.3
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	16
	No. of nozzle	2
Jet & Crossflow	V <sub>j</sub> [m/s]	32.08
	u <sub>cf</sub> [m/s]	4.030
	r	7.961
Camera (L/R)	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	2.8/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดตก. Target 1 ช่อง
	Spatial resolution [mm <sup>2</sup> ]	1.112x1.112 (69.52 μm/pixel )
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 15 \mu s$

## ค.2.2

General	x/rd	0.50
	T <sub>atm</sub> [°C]	30.2
	P <sub>atm</sub> [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	20
	No. of nozzle	2
Jet & Crossflow	V <sub>j</sub> [m/s]	32.08
	u <sub>cf</sub> [m/s]	4.030
	r	7.961
Camera (L/R)	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	2.8/2.8
	Crosshair location	อยู่ตรงจุดตก. Target
	Spatial resolution [mm <sup>2</sup> ]	1.291x1.291 (80.69 μm/pixel )
Note	SNR = 1.3	Δt = 15 μs

## ค.2.3

General	x/rd	0.75
	T <sub>atm</sub> [°C]	30.0
	P <sub>atm</sub> [mbar]	101.6
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	20
	No. of nozzle	2
Jet & Crossflow	V <sub>j</sub> [m/s]	32.08
	u <sub>cf</sub> [m/s]	4.030
	r	7.961
Camera (L/R)	Lens [mm]	50
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่สูงกว่าจุดตก. Target 6 ช่อง
	Spatial resolution [mm <sup>2</sup> ]	2.115x2.115 (132.2 μm/pixel )
Note	SNR = 1.5	Δt = 30 μs



## ค.2.4

General	x/rd	1.00
	T <sub>atm</sub> [°C]	30.3
	P <sub>atm</sub> [mbar]	101.3
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	20
	No. of nozzle	2
Jet & Crossflow	V <sub>j</sub> [m/s]	32.08
	u <sub>cf</sub> [m/s]	4.030
	r	7.961
Camera (L/R)	Lens [mm]	50
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่สูงกว่าจุดศก. Target 6 ช่อง
	Spatial resolution [mm <sup>2</sup> ]	2.063x2.063 (128.9 μm/pixel )
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 40 \mu s$

## ค.2.5

General	x/rd	1.50
	T <sub>atm</sub> [°C]	30.7
	P <sub>atm</sub> [mbar]	101.6
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	20
	No. of nozzle	2
Jet & Crossflow	V <sub>j</sub> [m/s]	32.08
	u <sub>cf</sub> [m/s]	4.030
	r	7.961
Camera (L/R)	Lens [mm]	50
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่สูงกว่าจุดศก. Target 7 ช่อง
	Spatial resolution [mm <sup>2</sup> ]	1.991x1.991 (124.5 μm/pixel )
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 50 \mu s$

$$r = 12$$

### ค.3.1

General	x/rd	0.25
	T <sub>atm</sub> [°C]	30.1
	P <sub>atm</sub> [mbar]	101.3
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	20
	No. of nozzle	4
Jet & Crossflow	V <sub>j</sub> [m/s]	49.26
	u <sub>cf</sub> [m/s]	4.030
	r	12.22
Camera (L/R)	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	2.8/2.8
	Crosshair location	อยู่สูงกว่าจุดตก. Target 5.5 ช่อง
	Spatial resolution [mm <sup>2</sup> ]	1.629x1.629 (101.8 μm/pixel )
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 25 \mu s$

### ค.3.2

General	x/rd	0.50
	T <sub>atm</sub> [°C]	30.2
	P <sub>atm</sub> [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	24
	No. of nozzle	5
Jet & Crossflow	V <sub>j</sub> [m/s]	49.26
	u <sub>cf</sub> [m/s]	4.030
	r	12.22
Camera (L/R)	Lens [mm]	50
	F no. (L/R)	2.8/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดตก. Target 2.5 ช่อง + 101 mm
	Spatial resolution [mm <sup>2</sup> ]	2.283x2.283 (142.7 μm/pixel )
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 30 \mu s$

## ค.3.3

General	x/rd	0.75
	T <sub>atm</sub> [°C]	30.2
	P <sub>atm</sub> [mbar]	101.6
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	24
	No. of nozzle	5
Jet & Crossflow	V <sub>j</sub> [m/s]	49.26
	u <sub>cf</sub> [m/s]	4.030
	r	12.22
Camera (L/R)	Lens [mm]	50
	F no. (L/R)	1.8/1.8
	Crosshair location	อยู่สูงกว่าจุดศก. Target 1 ช่อง + 101 mm
	Spatial resolution [mm <sup>2</sup> ]	2.425x2.425 (151.8 μm/pixel )
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 30 \mu s$

## ค.3.4

General	x/rd	1.00
	T <sub>atm</sub> [°C]	30.2
	P <sub>atm</sub> [mbar]	101.6
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	24
	No. of nozzle	5
Jet & Crossflow	V <sub>j</sub> [m/s]	49.26
	u <sub>cf</sub> [m/s]	4.030
	r	12.22
Camera (L/R)	Lens [mm]	50
	F no. (L/R)	4/1.8
	Crosshair location	อยู่สูงกว่าจุดศก. Target 1 ช่อง + 101 mm
	Spatial resolution [mm <sup>2</sup> ]	2.586x2.586 (161.6 μm/pixel )
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 40 \mu s$

## ค.3.5

General	x/rd	1.50
	T <sub>atm</sub> [°C]	29.9
	P <sub>atm</sub> [mbar]	101.1
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	24
	No. of nozzle	5
Jet & Crossflow	V <sub>j</sub> [m/s]	49.26
	u <sub>cf</sub> [m/s]	4.030
	r	12.22
Camera (L/R)	Lens [mm]	50
	F no. (L/R)	2.8/1.8
	Crosshair location	อยู่สูงกว่าจุดตก. Target 5.5 ช่อง + 101 mm
	Spatial resolution [mm <sup>2</sup> ]	2.823x2.823 (176.4 μm/pixel )
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 50 \mu s$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

เกิดเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนโยธินบูรณะ ปี พ.ศ. 2553 สำเร็จการศึกษาชั้นอุดมศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2557 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

