

การเหนียนำการผสมและกลไกการเหนียนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหล
ของเจ็ดในกระแสมขวาง



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 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Entrainment and Cross-Plane Entrainment Mechanism of Jets in Crossflow

Miss Kwanmon Sornphrom



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเหนี่ยวนำการผสมและกลไกการเหนี่ยวนำการผสมใน
ระบบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง

โดย

นางสาวขวัญมณต์ ศรีพรหม

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เลิศนุกวัญ)

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

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ เวชพงศ์ ชูติชูเดช)

ขั้วฉนวนที่ ครรพรม : การเหนี่ยวนำการผสมและกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Entrainment and Cross-Plane Entrainment Mechanism of Jets in Crossflow) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. อติ บุญจิตราดุลย์, 228 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาโครงสร้างของเจ็ต ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสลมขวาง การเหนี่ยวนำกระแสลมขวางโดยเจ็ต และโดยเฉพาะกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง (JICF) โดยเพื่อที่จะประเมินขีดความสามารถเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) โดยตรง จึงใช้วิธี Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับ (A) เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง และเพื่อที่จะศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสม จึงใช้วิธี SPIV ควบคู่กับ (A) เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง และ (B) เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางตั้งนี้ งานวิจัยนี้จึงสามารถหาความเร็วของกระแสลมขวางปริมาตรได้จาก $C = (B)-(A)$ การทดลองทำที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4, 8, และ 12 ค่าเรย์โนลด์สแบบเบอร์ของกระแสลมขวางคงที่เท่ากับ 3,100 ผลการศึกษาพบว่า เมื่อพิจารณาบน rd scale ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r เดียวกัน เมื่อเจ็ตพัฒนาไปตามแนว downstream อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) จะเพิ่มขึ้น และจะสามารถประมาณได้ด้วยสมการเลขยกกำลัง และเมื่อพิจารณาที่ x/rd เดียวกัน เมื่อ r เพิ่มขึ้น E จะเพิ่มขึ้น แสดงว่า JICF ที่มีค่า r สูงจะมีค่า E สูงกว่า JICF ที่มีค่า r ต่ำ อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษานบน d scale พบว่าที่ x/d เดียวกัน ในขณะที่บริเวณ farfield เมื่อ r เพิ่มขึ้น E จะเพิ่มขึ้น แต่ที่บริเวณ near field แม้ว่าค่า r จะสูงขึ้น แต่ค่า E จะประมาณคงที่ ซึ่งระบุว่า d scale จะสามารถ collapse E ของ JICF ได้ดีกว่า rd scale ที่บริเวณ near field สำหรับการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางพบว่า โครงสร้าง CVP ของเจ็ต (Jet-CVP) จะเป็นโครงสร้างสำคัญในการเหนี่ยวนำการผสมอย่างน้อยในระนาบตัดขวางการไหลและในช่วงที่ทำการศึกษากล่าวคือ 1) Jet-CVP จะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางปริมาตรที่อยู่บริเวณด้านข้างทั้งสองข้างของเจ็ตให้มีการเคลื่อนที่แบบหมุนวนในทิศทางพุ่งลง-พุ่งเข้า-พุ่งขึ้น (downward-inward-and-upturn) เข้าสู่ทางเข้าของช่องการไหลคู่เข้า-ออกในแนวตั้ง (converging-diverging vertical channel of high upward flow, VC) ที่ขอบด้านใต้ของเจ็ต จากนั้น 2) กระแสลมขวางดังกล่าวจะไหลผ่านช่องการไหลในแนวตั้งที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นและขับเคลื่อนให้คงอยู่ได้ด้วย CVP ของเจ็ต นอกจากนั้นยังพบว่า บริเวณที่มีการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางปริมาตรเข้ามาผสมสูง คือบริเวณส่วนล่างของช่องการไหลในแนวตั้งนี้ โดยการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางปริมาตรเข้ามาผสมจะประมาณได้ว่าเสร็จสิ้นแล้วหรือเกือบเสร็จสิ้นแล้วในส่วนนี้ ทำให้เมื่อของไหลไหลถึงตำแหน่งคอคอด (throat) ของช่องการไหลคู่เข้า-ออกในแนวตั้งนี้ ของไหลจะกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) เกือบหมด จากนั้นส่วนผสมของเจ็ตจะไหลขึ้นผ่านส่วนล่างออก เข้าสู่บริเวณกลางเจ็ตที่เป็นโครงสร้างรูปอ่าวที่มีความเร็วเจ็ตเฉลี่ยไร้มิตตามแนวแกน streamwise ต่ำ จากนั้น 3) โครงสร้างรูปไตของเจ็ตที่มีความเร็วเจ็ตเฉลี่ยไร้มิตตามแนวแกน streamwise สูง จะเหนี่ยวนำส่วนผสมของเจ็ตในบริเวณอ่าวที่อยู่ด้านใต้ ให้เข้ามาผสมกับโครงสร้างรูปไตของตัวเอง คล้ายการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (Free jet) นอกจากนี้ ผลการศึกษายังพบว่า ถึงแม้ว่าเจ็ตในกระแสลมขวางจะมี r เท่ากัน แต่จะมีกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลคล้ายคลึงกัน อย่างน้อยในช่วงพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา เพื่อที่จะสอบทวนกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางที่พบ งานวิจัยนี้จึงคำนวณอัตราการไหลของกระแสลมขวางปริมาตรที่ไหลเข้าสู่เจ็ตผ่านพื้นผิวความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตคั้งที่ซึ่งอัตราการไหลของกระแสลมขวางปริมาตรนี้จะเป็ปริมาณที่แสดงถึงการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางปริมาตรเข้าสู่เจ็ต พบว่า ผลการคำนวณสอดคล้องในเชิงคุณลักษณะกับการลดลงของการเพิ่มขึ้นของ E ที่ได้จากการวัดโดยตรง และกับผลของ r ต่อ E ที่ย่าสุด เพื่อที่จะค้นหากลไกการเหนี่ยวนำการผสมอื่น งานวิจัยนี้จึงศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรด้วย ผลการศึกษพบว่า ในมุมมองจากระนาบสมมาตรและของารไหลเฉลี่ย การเหนี่ยวนำการผสมสามารถอธิบายได้ดังนี้ 1) ทางด้านหน้าที่ปะทะลม (กระแสลมขวาง) ของเจ็ต (windward) การเหนี่ยวนำเอากระแสลมขวางปริมาตรเข้ามาผสมเกิดจากโครงสร้าง spanwise rollers ด้านปะทะลมของเจ็ต ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างรูปไตเมื่อมองจากระนาบตัดขวาง นอกจากนั้น ในมุมมองของการไหลเฉลี่ย ยังพบว่า ความเร็วของกระแสลมขวางตามแกน streamwise เท่านั้น ไม่ใช่ตามแนว Transverse ที่ก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสมในบริเวณนี้ 2) ทางด้านหลังลมของเจ็ต (leeward) พบการเหนี่ยวนำเอากระแสลมขวางปริมาตรเข้ามาผสมโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ต ตามด้วย การเหนี่ยวนำเอาส่วนผสมของเจ็ตเข้ามาผสมโดยโครงสร้างรูปไต (โดยเฉพาะเจาะจงคือ ส่วนของโครงสร้างรูปไตที่เป็นโครงสร้าง spanwise rollers ด้านหลังลมของเจ็ต) สอดคล้องกับผลการศึกษาในระนาบตัดขวางการไหล นอกจากนั้น ในมุมมองของการไหลเฉลี่ย ยังพบว่า ความเร็วของกระแสลมขวางตามแกน transverse เท่านั้น ไม่ใช่ตามแนว streamwise ที่ก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสมโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ต

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5870325621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: JET IN CROSSFLOW, ENTRAINMENT, ENTRAINMENT MECHANISM, COUNTER-ROTATING VORTEX PAIR (CVP)

KWANMON SORNPHROM: Entrainment and Cross-Plane Entrainment Mechanism of Jets in Crossflow. ADVISOR: ASSOC. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA, Ph.D., 228 pp.

Structures, jet-and-crossflow interactions, entrainment, and cross-plane entrainment mechanism of jets in crossflow (JICF) are investigated. On the one hand, in order to determine the volumetric entrainment ratio (E) more directly, Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) together with (A) the jet fluid only – and not the crossflow fluid - seeding scheme is used. On the other hand, in order to investigate the structures, jet-and-crossflow interactions, and cross-plane entrainment mechanism of jets in crossflow more clearly, both (A) the jet-fluid only seeding scheme and (B) the jet-and-crossflow fluid seeding scheme need to be employed. The pure crossflow velocity induced by the jet can then be determined from (C) = (B)-(A). The experiment is conducted at the jet-to-crossflow effective velocity ratios (r) of 4, 8, and 12 and a fixed crossflow Reynolds number (Re_{cf}) of 3,100. For entrainment E , the results show that on rd -scale the relation between E and x/rd can be represented by one-plus-power law. As for the effect of r at the same x/rd , when r increases, E also increases. In other words, on rd -scale, JICF with higher r entrains more than JICF with lower r . However, on d -scale the results show that, at the same x/d , while in the far field E increases significantly with r , in the near field it varies less with r . These suggest that d -scale can better collapse E of JICF than rd -scale in the near field. For the structures, jet-and-crossflow interactions, and cross-plane entrainment mechanism, the results show that the jet-CVP is the main mechanism for JICF entrainment, at least in the cross planes and in the range of parameters investigated. Furthermore, JICF entrainment in the cross-plane and in the mean flow perspective can be summarized in three stages as follows. 1) *Jet-CVP-induced pure crossflow vortical motion*: The jet-CVP induces the pure crossflow fluid from each lateral side of the jet to have *downward-inward-and-upturn motion* towards the inlet of the ‘converging-diverging vertical channel of high upward flow (VC)’ at the bottom edge of the jet. 2) *Jet-CVP-induced converging-diverging vertical channel of high upward flow*: The pure crossflow at the bottom edge of the jet is then further induced by the jet-CVP to flow almost vertically upward through the VC, whose existence and persistence in the downstream direction is induced and fueled by the jet-CVP. More importantly, it is found that the region of high rate of entrainment is in the converging section of the channel. This is such that at the end of the converging section and towards the throat of the channel, the entrainment of pure crossflow fluid by the jet is virtually complete, and the fluid at the throat of the channel becomes mainly jet-fluid mixture. Subsequently, the jet-fluid mixture further flows upward along the diverging section of the channel, which leads towards the *gulf region* of low streamwise jet velocity. 3) *Free-jet like entrainment of jet kidney-shaped structure*: *Jet kidney-shaped* structure of high streamwise jet velocity subsequently entrains the jet-fluid mixture in the gulf region below it into jet itself, similar to entrainment of a free jet. Furthermore, the results show that JICFs with different r have similar jet-CVP dominated cross-plane entrainment mechanism, at least in the ranges of parameters investigated. In order to qualitatively evaluate the entrainment mechanism found, the normalized pure crossflow volume flowrates through surfaces of constant probability of finding the jet fluid in the cross planes – which are indicative of the pure crossflow volume flowrates being entrained - are evaluated. The results are qualitatively in agreement with the increase in E in the downstream direction as well as the effect of r on E . Finally, the center-plane entrainment is also investigated in order to search for other entrainment mechanism. From the center-plane and mean-flow perspective, the results show the followings. 1) On the windward side of the jet facing the incoming crossflow, entrainment of pure crossflow fluid by the jet (windward) spanwise rollers, which are manifested as (part of) the jet kidney-shaped structure in the cross-plane, are observed. In addition, from the mean flow perspective, it is observed that only the streamwise – and not the transverse – velocity component of pure crossflow fluid contributes to this entrainment. 2) On the leeward side of the jet, the ‘jet-CVP entrainment of pure crossflow’ followed by the ‘jet kidney-shaped structure (specifically, jet leeward spanwise rollers) entrainment of jet-fluid mixture’ are observed, in consistent with what observed in the cross-planes. Furthermore, from the mean flow perspective, it is observed that only the transverse – and not the streamwise – velocity component of the pure crossflow fluid contributes to entrainment by the jet CVP.

Department: Mechanical Engineering
 Field of Study: Mechanical Engineering
 Academic Year: 2015

Student's Signature
 Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลือและคำแนะนำของรองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราคุลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ความรู้ คำปรึกษา ให้ข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์และยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัยอีกด้วย รวมถึงท่านยังเป็นแบบอย่างในการทำงาน การคิดวิเคราะห์ การเขียน การสื่อสารอย่างเป็นระบบและมีเหตุผล ไปจนกระทั่งการเรียงลำดับความสำคัญซึ่งทักษะเหล่านี้จะช่วยหล่อหลอมข้าพเจ้าให้เป็นผู้ที่ประสบความสำเร็จและเป็นวิศวกรที่มีคุณภาพต่อไปในอนาคต

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เลิศนุวัฒน์ รองศาสตราจารย์ เวชพงศ์ ชูติชูเดช และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ วรรณโสภากย์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อชี้แนะอันเป็นประโยชน์ในระหว่างการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ นายภัทรพล ศุภมมงคล นายเชาวน์วัฒน์ เต็กฮวด และเพื่อน ๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการพลศาสตร์ของไหลและการควบคุมการไหลทุกคนที่เป็นกำลังใจ สร้างเสียงหัวเราะ ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้อย่างเต็มใจมาโดยตลอด

นอกจากนี้ขอขอบคุณ เพื่อนค่ายอาสา VESC43 เพื่อนภาคเครื่องกล และเพื่อนศิษย์เก่า SKN ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ช่วยสนับสนุน และแวะเวียนมาหาขณะดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	13
สารบัญรูปภาพ.....	14
บทที่ 1 บทนำ.....	25
1.1 บทนำ.....	25
1.2 แรงจูงใจ.....	26
1.3 วัตถุประสงค์.....	29
1.4 ขอบเขตของโครงการ	30
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	31
บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	32
2.1 ปริมาณที่สำคัญของเจ็ตในกระแสมขวาง	32
2.2 การศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวาง	33
PART I โครงสร้างพื้นฐานของเจ็ตในกระแสมขวาง.....	33
PART II คุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวาง	35
1) กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง (Entrainment mechanism)...	35
2) การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment).....	36
3) งานวิจัยที่เกี่ยวกับเจ็ตในกระแสมขวาง	41
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎี.....	45
3.1 การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง	45

3.1.1 การนิยามการเหนี่ยวนำการผสม.....	45
3.1.2 ปัญหาของการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง	46
3.1.3 การวัดความเร็วของสนามการไหลโดยใช้ SPIV และเทคนิคการใส่อนุภาคติดตาม การไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง	46
3.2 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง	47
3.2.1 ปัญหาของการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ต ในกระแสลมขวาง	47
3.2.2 การวัดความเร็วของสนามการไหลโดยใช้ SPIV และเทคนิคการใส่อนุภาคติดตาม การไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสลมขวาง	48
3.2.3 การประเมินหาความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ เพื่อศึกษากลไกการเหนี่ยวนำ การผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง	49
บทที่ 4 ชุดการทดลอง และอุปกรณ์การทดลอง	51
4.0 พิกัดของการทดลอง.....	51
4.1 ชุดทดลอง (rig).....	51
4.1.1 ชุดอุโมงค์ (Tunnel).....	51
4.1.2 ชุดหัวเจ็ต (Jet).....	52
4.2 ชุดเครื่องมือวัดความเร็ว Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV).....	53
4.2.1 ส่วนประกอบและการทำงานของ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV)	53
4.2.2 การหาค่าสนามเวกเตอร์ความเร็วโดยโปรแกรม Insight 4G.....	54
4.3 สรุปรามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการทดลอง	55
บทที่ 5 อัตราการส่วเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร	56
5.1 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรใน ระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางบน <i>rd</i> scale.....	56

5.2 การเปรียบเทียบผลการศึกษาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกับงานวิจัยที่ ผ่านมา.....	56
5.3 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราการส่วนเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรใน ระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางบน d scale	58
5.4 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตบน rd scale.....	59
5.4.1 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อเส้นทางการเดินของเจ็ต	59
5.4.2 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อ Circulation	61
บทที่ 6 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง กรณี $r = 4$	63
6.0 วิธีการแสดงผลการทดลอง.....	63
6.1 ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลที่จุดใดๆ.....	64
6.2 สนามความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง	66
6.2.1 Converging-Diverging vertical channel	68
6.2.2 เจ็ตเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน	69
6.2.3 บริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมสูง.....	69
6.3 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise.....	71
โครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure) ของบริเวณที่ $V_{j,x} / u_{cf}$ สูงและบริเวณ อ่าว (Gulf region) ที่มี $V_{j,x} / u_{cf}$ ต่ำ.....	72
6.4 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse.....	73
6.5 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise	74
6.6 vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise	74
6.7 ความสัมพันธ์ของโครงสร้างของปริมาณต่างๆของเจ็ตในกระแสลมขวาง	76
6.8 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....	77
บทที่ 7 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง กรณี $r = 8$ และ 12.....	79
7.1 ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลที่จุดใดๆ.....	79

7.2	สนามความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมขวาง	80
7.3	ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise	80
7.4	ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse	81
7.5	ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise	81
7.6	vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise	82
7.7	ความสัมพันธ์ของโครงสร้างของปริมาณต่างๆของเจ็ตในกระแสมขวาง	83
7.8	กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง	84
บทที่ 8	กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางในระนาบสมมาตรการไหล	86
8.1	ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลที่จุดใดๆ กรณี $r = 4$	86
8.2	สนามความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ตในกระแสมขวางกรณี $r = 4$	87
8.2.1	การเหนี่ยวนำกระแสมขวางบริสุทธิ์ของเจ็ต	89
8.3	ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise กรณี $r = 4$	90
8.4	ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse กรณี $r = 4$	91
8.5	ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise กรณี $r = 4$	93
8.6	vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนว spanwise กรณี $r = 4$	94
8.7	กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางในระนาบสมมาตรกรณี $r = 4$	95
8.8	กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางในระนาบสมมาตรกรณี $r = 8$ และ 12	96
8.8.1	ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลที่จุดใดๆ	96
8.8.2	สนามความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ตในกระแสมขวาง	97
	การเหนี่ยวนำกระแสมขวางบริสุทธิ์ของเจ็ต พบว่าเช่นเดียวกับกรณี $r = 4$	98
8.8.3	ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise	98
8.8.4	ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse	99

8.8.5 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise	100
8.8.6 vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนว spanwise.....	101
8.8.7 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบสมมาตร	102
บทที่ 9 อภิปรายผลการทดลอง	104
9.0 พื้นฐานการวิเคราะห์	104
อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ผ่าน control surface ที่ ϕ_j ใดๆ.....	104
9.1 การอภิปรายความสัมพันธ์ของ r กับ E ในเชิงปริมาณจากกลไกการเหนี่ยวนำการผสม	106
9.1.1 เส้นแสดงอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf,\Delta x}/Q_o$ ที่ไหลผ่านพื้นผิววงที่ ϕ_j ใดๆ.....	106
9.1.2 การอธิบายผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E ด้วยกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวาง บน rd scale	107
9.1.3 การอธิบายผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E ด้วยกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวาง บน d scale.....	108
9.2 การอภิปรายเปรียบเทียบการ scale อัตราการเหนี่ยวนำการผสม $(\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j$ ด้วย d , rd และ r^2d	110
บทที่ 10 สรุปผลการทดลอง.....	111
10.1 อัตราการส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E).....	111
10.2 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบตัดขวางการไหล กรณี $r = 4, 8$ และ 12	112
10.3 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบสมมาตรไหล กรณี $r = 4, 8$ และ 12	117
ประมวลตาราง.....	121

ประมวลรูปภาพ	127
บทที่ 2.....	128
บทที่ 3.....	150
บทที่ 4.....	151
บทที่ 5.....	155
บทที่ 6.....	158
บทที่ 7.....	166
บทที่ 8.....	186
บทที่ 9.....	209
รายการอ้างอิง.....	218
ภาคผนวก ก พารามิเตอร์ในการทดลอง	220
1. พารามิเตอร์ของการทดลองในระนาบตัดขวางที่ $r = 4$	220
2. พารามิเตอร์ของการทดลองในระนาบตัดขวางที่ $r = 8$	222
3. พารามิเตอร์ของการทดลองในระนาบตัดขวางที่ $r = 12$	224
4.พารามิเตอร์ของการทดลองในระนาบสมมาตร	226
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	228

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1ก ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล $r = 4$ และค่าสัมประสิทธิ์ a_E, b_E	122
5.1ข ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล $r = 8$ และค่าสัมประสิทธิ์ a_E, b_E	123
5.1ค ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล $r = 12$ และค่าสัมประสิทธิ์ a_E, b_E	124
5.2 ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของแต่ละอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลบน d scale และค่าสัมประสิทธิ์ a_E, b_E	125
5.3 เส้นทางการเดินของเจ็ตที่นิยามจากความเร็วเฉลี่ยและ vorticity ตามแนวแกน streamwise และค่าสัมประสิทธิ์ a_T, b_T	126
5.4 Circulation และค่าสัมประสิทธิ์ a_C, b_C	126

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
บทที่ 2	
2.1	ลักษณะของ Coherent vortical structures ของ JICF (Fric and Roshko, 1994).....128
2.2	ลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ $r = 10$ ถึง $r = 25$ (Smith and Mungal, 1998).128
2.3	แบบจำลองของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยพล็อต Isosurface ของ Vorticity (Yuan <i>et al.</i> , 1999)..... 129
2.4	(a) Hanging vortex and orientations of JICF U_{Jet} = bulk velocity and $U_{Crossflow}$ is crossflow velocity (b) Vector sum of relevant velocities (Yuan <i>et al.</i> , 1999) 129
2.5	โครงสร้าง Spanwise roller (Yuan <i>et al.</i> , 1999)..... 130
2.6	โครงสร้างของการเกิดเป็น CVP (Cortelezzi and Karagozian, 2001)..... 130
2.7	แบบจำลองการพับตัวของ Cylindrical shear layer (Lim <i>et. al.</i> , 2001)..... 131
2.8	วิวัฒนาการของ streamlines ในการก่อตัวโครงสร้าง CVP (ซ้าย) และ Kelvin-Helmholtz roller (ขวา) (Sau <i>et. al.</i> , 2004)..... 131
2.9	Vorticity field และ streaklines ของกระแสลมขวาง 132
2.10	โครงสร้าง horseshoe vortex ถูกดึงดูดเข้าผสมกับเจ็ตหลักผ่านกึ่งกลาง CVP ((Sau <i>et. al.</i> , 2004)..... 132
2.11	การลดลงของ % Passive scalar concentration ของ JICF และ Free jet ที่ Near field เมื่อสเกลด้วย rd (Smith and Mungal, 1998)..... 133
2.12	ชุดเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Kornsri <i>et. al.</i> , 2009)..... 133
2.13	ผลของเจ็ตควบคุมต่อเส้นทางเดินของความเร็วเจ็ต (Kornsri <i>et. al.</i> , 2009)..... 133
2.14	ผลของปริมาณ r_m ต่อการ Penetration ของเส้นทางเดินของความเร็วเจ็ตที่ตำแหน่ง $x / rd = 1.5$ ที่ตำแหน่งมุม $\theta = \pm 15^\circ$ (Kornsri <i>et. al.</i> , 2009)..... 134

รูปที่	หน้า	
2.15	Contour ของความเร็วเฉลี่ย (V/u_{cf}) เปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม กับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่มุม $\theta = \pm 15^\circ$, $r_m = 2\%$ (Kornsri et. al., 2009).....	134
2.16	แนวคิดกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลขวาง (Kornsri et. al., 2009).....	135
2.17	CC และ CM ของผลรวมความเร็ว (V) กรณี JICF, I15 และ I135.....	135
2.18	CC และ CM ของ vorticity (ω_x) กรณี JICF, I15 และ I135 (Witayaprapakorn, 2013)	136
2.19	การกระจายตัวผลรวมความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ต่อกระแสมวลขวาง (V_x/u_{cf}) กรณี JICF, I15 และ I135 (Witayaprapakorn, 2013).....	137
2.20	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Witayaprapakorn, 2013).....	138
2.21	ประสิทธิผลของเจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร	138
2.22	ผลอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อเส้นทางการเดินในกรณี JICF, I135 $r_m = 2\%$ และ I135 $r_m = 4\%$ (Chaikasetzin et al., 2014).....	139
2.23	ผลอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมในกรณี JICF, I135 $r_m = 2\%$ และ I135 $r_m = 4\%$ (Chaikasetzin et al., 2014).....	139
2.24	การพัฒนาตัวของเจ็ตที่มุมมอง top view (Watakulsin et al., 2010).....	140
2.25	ความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง $\dot{V}_{jet}/\dot{V}_0 - 1$ และ x/rd บน Log-Log Scale (Yuan and Street, 1998).....	140
2.26	การลดลงของอุณหภูมิต่อระยะทาง Temperature decay	141
2.27	การกระจายตัวของฟลักซ์ของมวลเจ็ตตามการไหล mass flux.....	141
2.28	การลดลงของ % Passive scalar concentration ของ JICF และ Free jet ที่ Near field เมื่อสเกลด้วย r^2d ที่ $r = 5-25$ (Smith and Mungal, 1998).....	142
2.29	การกระจายตัวของอุณหภูมิ Temperature distribution (Karmatoni and Greber, 1972) โดย $r_M = 15.3$ (บน) และ $r_M = 59.6$ (ล่าง).....	142
2.30	Circulation ของเจ็ตที่ด้านหนึ่งของแกนสมมาตร (Zaman and Foss, 1997).....	143

รูปที่	หน้า
2.31 เส้นทางเดินของ Passive scalar concentration โดย scale ด้วย (a) rd (b) d และ (c) r^2d (Smith and Mungal, 1998).....	143
2.32 การคงอยู่ของเจ็ตที่ผนัง ที่ $r = 5$ โดย ภาพเฉลี่ย (ซ้าย) และภาพ ณ ขณะใดๆ (ขวา) (Smith and Mungal, 1998).....	144
2.33 มุมมองด้านข้างของเจ็ตที่ r ต่างๆกัน (Smith and Mungal, 1998).....	144
2.34 Streamline jet trajectories. (Yuan and Street, 1998) โดย.....	145
2.35 Streamline jet trajectories ที่สเกลด้วย rd (Yuan and Street, 1998).....	145
2.36 ผลของ Re_{cf} ต่อการผสม (Yuan and Street, 1998) โดย.....	146
2.37 เจ็ตที่ระนาบตัวขวางการไหล (Muppidi and Mahesh, 2006) โดย $Re_{cf} = 1,000$ (บน) และ $Re_{cf} = 10,000$ (ล่าง).....	146
2.38 โครงสร้าง CVP ของเจ็ตที่ระนาบตัวขวางการไหลที่มีความเสถียรแล้ว	147
2.39 ผลของ r และ Re_{cf} ต่อเส้นทางการเดินของเจ็ต (Muppidi and Mahesh, 2006).....	147
2.40 ผล Re_{cf} ต่อ u_{final} และ $u_{induced}$ (Muppidi and Mahesh, 2006).....	148
2.41 ผลของ Re_{cf} ต่อความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ	148
2.42 ผลของ Re_{cf} ต่อความเร็วตามแนวการไหล (Streamwise velocity).....	149
2.43 ผลของ Re_{cf} ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม	149

บทที่ 3

3.1 แสดงการเปรียบเทียบความเร็ว ณ ขณะใดๆ (ซ้าย) และสนามของเวกเตอร์ความเร็ว ณ ขณะใดๆ (ขวา) ด้วยวิธี SPIV	150
--	-----

รูปที่

หน้า

บทที่ 4

4.1	Schematic ของ test section และ พิกัด xyz ของการทดลอง	151
4.2	Schematic diagram ของอุโมงค์ลม	151
4.3	พัดลมหอยโข่งขนาด 15 กิโลวัตต์ (centrifugal blower ประเภท backward curve airfoil blades).....	152
4.4	เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้าหรือ inverter (ABB™ model ACS401002032 ขนาด 50 Hz ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz).....	152
4.5	เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ ND:YAG ยี่ห้อ New Wave Research™ model Solo 200XT กำลังสูงสุด 200 mJ/pulse ที่ความยาวคลื่น 532 nm	153
4.6	แขนส่งเลเซอร์ Laser Light Arm, model 610015.....	153
4.7	กล้อง CCD ยี่ห้อ PowerView Plus11MP model 630062 ความละเอียด 4008 × 2672 pixel ² ขนาดpixel 9 × 9 μm^2 , ขนาด CCD 36.07 × 24.05 mm ² , และไดนามิกเรนจ์ 12 bit	154

บทที่ 5

5.1	ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมวงบน rd scale	155
5.2	ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) บน rd scale จะประกอบด้วยผลการทดลองของงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Wongthongsiri (2015) และค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ตในกระแสมวงจากผลการทดลองที่ผ่านมา	155
5.3	การพัฒนาตัวของ E ตามทิศทางกรไหลบน rd scale และผลของ r ต่อ E บน rd scale ของเจ็ตในกระแสมวงที่ $r = 4, 8$ และ 12 ของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของทุกงานวิจัยที่ผ่านมา	156

รูปที่	หน้า
5.4 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางบน d scale.	156
5.5 เส้นทางการเดินของเจ็ตจาก center of mass ของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตตามแนวแกน streamwise V_x และ vorticity เฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ω_x บน rd scale และผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่อการพัฒนาตัวของเส้นทางการเดินของเจ็ตบน rd scale.....	157
5.6 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อ circulation ไร้มิตินบน rd scale.....	157

บทที่ 6

6.1ก การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดใดๆ กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต ϕ_j (B) ของของไหลใดๆ ϕ และ (C) ของกระแสลมขวาง ϕ_{cf} โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0.....	158
6.1ข การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต $V_{j,x}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_x/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,x}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0.....	159
6.1ค การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว transverse กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต $V_{j,y}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_y/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,y}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0.....	160
6.1ง การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว spanwise กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต $V_{j,z}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_z/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,z}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0.....	161
6.1จ การกระจายตัวของ vorticity ไร้มิติตามแนว streamwise กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต $\omega_{j,x}d/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ $\omega_x d/u_{cf}$ และ (C) ของกระแสลมขวาง $\omega_{cf,x}d/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0.....	162
6.2 การกระจายตัวของปริมาณไร้มิติต่างๆ กรณี $r = 4$ ที่ $x/rd = 0.75$ (a) Probability, (b) Streamwise velocity, (c) Transverse velocity, (d) Spanwise velocity และ (e) Streamwise vorticity.....	163

รูปที่	หน้า
6.3	กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง กรณี $r = 4$ 164
6.4	บริเวณที่มีการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ตผ่านเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่ ของ $r = 4$ 165
บทที่ 7	
7.1ก	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดใดๆ กรณี $r = 8$ (A) ของเจ็ต ϕ_j (B) ของ ของไหลใดๆ ϕ และ (C) ของกระแสลมขวาง ϕ_{cf} โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0..... 166
7.1ข	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise กรณี $r = 8$ (A) ของเจ็ต $V_{j,x}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_x/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,x}/u_{cf}$ โดยดู คำอธิบายที่หัวข้อ 6.0..... 167
7.1ค	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว transverse กรณี $r = 8$ (A) ของเจ็ต $V_{j,y}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_y/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,y}/u_{cf}$ โดยดู คำอธิบายที่หัวข้อ 6.0..... 168
7.1ง	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว spanwise กรณี $r = 8$ (A) ของเจ็ต $V_{j,z}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_z/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,z}/u_{cf}$ โดยดู คำอธิบายที่หัวข้อ 6.0..... 169
7.1จ	การกระจายตัวของ vorticity ไร้มิติตามแนว streamwise กรณี $r = 8$ (A) ของเจ็ต $\omega_{j,x}d/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ $\omega_x d/u_{cf}$ และ (C) ของกระแสลมขวาง $\omega_{cf,x}d/u_{cf}$ โดย ดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0..... 170
7.2	การกระจายตัวของปริมาณไร้มิติต่างๆ กรณี $r = 8$ ที่ $x/rd = 0.75$ (a) Probability, (b) Streamwisw velocity, (c) Transverse velocity, (d) Spanwise velocity และ (e) Streamwise vorticity..... 171
7.3	บริเวณที่มีการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ตผ่านเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่ ของ $r = 8$ 172

รูปที่	หน้า
7.4ก การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดใดๆ กรณี $r=12$ (A) ของเจ็ต ϕ_j (B) ของของไหลใดๆ ϕ และ (C) ของกระแสลมขวาง ϕ_{cf} โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	173
7.4ข การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise กรณี $r=12$ (A) ของเจ็ต $V_{j,x}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_x/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,x}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	174
7.4ค การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว transverse กรณี $r=12$ (A) ของเจ็ต $V_{j,y}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_y/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,y}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	175
7.4ง การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว spanwise กรณี $r=12$ (A) ของเจ็ต $V_{j,z}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_z/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,z}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	176
7.4จ การกระจายตัวของ vorticity ไร้มิติตามแนว streamwise กรณี $r=12$ (A) ของเจ็ต $\omega_{j,x}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ ω_x/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $\omega_{cf,x}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	177
7.5 การกระจายตัวของปริมาณไร้มิติต่างๆ กรณี $r=12$ ที่ $x/rd=0.75$ (a) Probability, (b) Streamwisw velocity, (c) Transverse velocity, (d) Spanwise velocity และ (e) Streamwise vorticity	178
7.6 บริเวณที่มีการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ตผ่านเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่ ของ $r=12$	179
7.7ก การเปรียบเทียบความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดใดๆ กรณี $r=4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/rd=0.75$	180
7.7ข การเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise กรณี $r=4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/rd=0.75$	181
7.7ค การเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว transverse กรณี $r=4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/rd=0.75$	182

รูปที่

หน้า

7.7ง	การเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว spanwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/rd = 0.75$	183
7.7จ	การเปรียบเทียบ vorticity ไร้มิติตามแนว streamwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/rd = 0.5$ ด้วยแถบสี (color bar) ที่แตกต่างกัน (color bar) ที่แตกต่างกันไปในแต่ละ ค่า r	184
7.7ฉ	การเปรียบเทียบ vorticity ไร้มิติตามแนว streamwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/rd = 0.75$	185

บทที่ 8

8.1ก	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดใดๆ กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต ϕ_j (B) ของ ของไหลใดๆ ϕ และ (C) ของกระแสลมขวาง ϕ_{cf} โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	186
8.1ข	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต $V_{j,x}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_x/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,x}/u_{cf}$ โดยดู คำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	187
8.1ค	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว transverse กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต $V_{j,y}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_y/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,y}/u_{cf}$ โดยดู คำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	188
8.1ง	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว spanwise กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต $V_{j,z}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_z/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,z}/u_{cf}$ โดยดู คำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	189
8.1จ	การกระจายตัวของ vorticity ไร้มิติตามแนว spanwise กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต $\omega_{j,z}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ ω_z/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $\omega_{cf,z}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่ หัวข้อ 6.0	190
8.2	การกระจายตัวของปริมาณไร้มิติต่างๆ กรณี $r = 4$ (ซ้าย) Probability ϕ_{cf} , (กลาง) Spanwise vorticity ω_z/u_{cf}	191

รูปที่	หน้า
8.3ก การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดใดๆ กรณี $r=8$ (A) ของเจ็ต ϕ_j (B) ของของไหลใดๆ ϕ และ (C) ของกระแสลมขวาง ϕ_{cf} โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	192
8.3ข การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise กรณี $r=8$ (A) ของเจ็ต $V_{j,x}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_x/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,x}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	193
8.3ค การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว transverse กรณี $r=8$ (A) ของเจ็ต $V_{j,y}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_y/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,y}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	194
8.3ง การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว spanwise กรณี $r=8$ (A) ของเจ็ต $V_{j,z}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_z/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,z}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	195
8.3จ การกระจายตัวของ vorticity ไร้มิติตามแนว spanwise กรณี $r=8$ (A) ของเจ็ต $\omega_{j,z}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ ω_z/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $\omega_{cf,z}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	196
8.4 การกระจายตัวของปริมาณไร้มิติต่างๆ กรณี $r=8$ (ซ้าย) Probability ϕ_{cf} , (กลาง) Spanwise vorticity ω_z/u_{cf}	197
8.5ก การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดใดๆ กรณี $r=12$ (A) ของเจ็ต ϕ_j (B) ของของไหลใดๆ ϕ และ (C) ของกระแสลมขวาง ϕ_{cf} โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	198
8.5ข การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise กรณี $r=12$ (A) ของเจ็ต $V_{j,x}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_x/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,x}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	199
8.5ค การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว transverse กรณี $r=12$ (A) ของเจ็ต $V_{j,y}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_y/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,y}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0	200

รูปที่	หน้า
8.5ง การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว spanwise กรณี $r=12$ (A) ของเจ็ต $V_{j,z}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_z/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,z}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0.....	201
8.5จ การกระจายตัวของ vorticity ไร้มิติตามแนว spanwise กรณี $r=12$ (A) ของเจ็ต $\omega_{j,z}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ ω_z/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $\omega_{cf,z}/u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0.....	202
8.6 การกระจายตัวของปริมาณไร้มิติต่างๆ กรณี $r=12$ (ซ้าย) Probability ϕ_{cf} , (กลาง) Spanwise vorticity ω_z/u_{cf}	203
8.7ก การเปรียบเทียบความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดใดๆ กรณี $r=4, 8$ และ 12 ตามลำดับ.....	204
8.7ข การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise กรณี $r=4, 8$ และ 12	205
8.7ค การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse กรณี $r=4, 8$ และ 12	206
8.7ง การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise กรณี $r=4, 8$ และ 12	207
8.7จ การเปรียบเทียบการกระจายตัวของ vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise กรณี $r=4, 8$ และ 12	208
 บทที่ 9	
9.1 อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลผ่าน control surface เข้าสู่ตัวเจ็ต.....	209
9.2ก อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf,\Delta x}/Q_o$ กรณี $r=4$	209
9.2ข อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf,\Delta x}/Q_o$ กรณี $r=8$	210
9.2ค อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf,\Delta x}/Q_o$ กรณี $r=12$	210

รูปที่

หน้า

- 9.3 การพัฒนาตัวหาค่าสูงสุดของอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ไร้มิติ
 $Q_{cf, \Delta x=1rd, \max} / Q_0$ บน rd scale และผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$
 และ 12 ต่ออัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ $Q_{cf, \Delta x=1rd, \max} / Q_0$ ที่ไหลผ่านความยาว
 $\Delta x = 1rd$ บน rd scale211
- 9.4 การพัฒนาตัวหาค่าสูงสุดของอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ไร้มิติ
 $Q_{cf, \Delta x=d, \max} / Q_0$ บน d scale และผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ
 12 ต่ออัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ $Q_{cf, \Delta x=d, \max} / Q_0$ ที่ไหลผ่านความยาว
 $\Delta x = 1d$ บน d scale211
- 9.5ก บริเวณที่มีการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์เข้าสู่เจ็ตผ่านเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j
 คงที่ บน d scale212
- 9.5ข บริเวณที่มีการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์เข้าสู่เจ็ตผ่านเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j
 คงที่ บน rd scale213
- 9.5ค บริเวณที่มีการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์เข้าสู่เจ็ตผ่านเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j
 คงที่ บน r^2d scale214

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

เจ็ตในกระแสลมขวาง (Jet in cross flow, JICF) คือ เจ็ตที่พุ่งขึ้นในแนวตั้งฉากกับกระแสลมขวาง จากนั้นเจ็ตจะเกิดปฏิสัมพันธ์กับกระแสลมขวางทำให้เกิดโครงสร้างหมุนวนที่สำคัญหลายชนิด โดยปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางประกอบกับโครงสร้างหมุนวนนี้จะทำให้เกิดคุณลักษณะที่สำคัญของเจ็ตในกระแสลมขวาง คือ การเหนี่ยวนำการผสม (Jet entrainment) และเส้นทางเดินของเจ็ต (Jet trajectory) เจ็ตในกระแสลมขวางสามารถพบเห็นได้อย่างแพร่หลายในงานทางวิศวกรรม เช่น การฉีดเชื้อเพลิงเข้าผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้ของ Gas turbine การปล่อยควันออกจากปล่องควันของโรงงานอุตสาหกรรมแล้วพุ่งขึ้นเจอกับกระแสลมภายนอก การขึ้นลงในแนวตั้งของเครื่องบิน (Vertical Short Take Off and Landing, V/STOL) และการระบายความร้อนของใบพัดเครื่องยนต์กังหันแก๊สด้วยเทคนิค Cooling film

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเจ็ตในกระแสลมขวางนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทหลัก ประเภทแรกคือการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง และประเภทที่สองคือการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคการควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวางให้มีพฤติกรรมเป็นไปตามต้องการ ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ผ่านมา ได้แก่ Fric and Roshko (1994) พบว่าโครงสร้างหมุนวนที่เกิดขึ้นของเจ็ตในกระแสลมขวางประกอบด้วย 4 โครงสร้างหลัก ได้แก่ 1) Jet shear layer vortices เป็นโครงสร้างของเจ็ตที่เกิดขึ้นที่ด้านหน้าบริเวณที่เจ็ตปะทะเข้ากับกระแสลมขวาง 2) Horseshoe vortices เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการม้วนตัวของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางที่พื้นรอบปากทางออกของเจ็ต 3) Wake vortices เป็นโครงสร้างคล้ายการไหลของของไหลผ่านวัตถุทรงกระบอกที่ด้านหลังของเจ็ต และ 4) Counter rotating vortex pairs (CVP) เป็นโครงสร้างคู่หมุนที่มีทิศทางหมุนตรงข้ามกัน Smith and Mungal (1998) พบว่าถึงแม้ว่า CVP ที่พัฒนาตัวเต็มที่และเป็นกลไกหลักในการเหนี่ยวนำการผสมใน Far Field แต่ไม่ได้ทำให้เจ็ตในกระแสลมขวางเกิดการผสมได้ดีกว่าในเจ็ตอิสระ (Free Jet) ในขณะที่การก่อตัวของ CVP ของเจ็ตในกระแสลมขวางใน Near Field จะทำให้เจ็ตในกระแสลมขวางผสมดีกว่าเจ็ตอิสระ Yuan et al. (1999) พบว่า CVP ก่อตัวมาจากโครงสร้าง Hanging vortices ที่พัฒนาจาก skewed mixing layer ในบริเวณรอบปากเจ็ต และ Yuan and Street (1998) พบว่าการเหนี่ยวนำการผสมนั้นมีความสัมพันธ์กับเส้นทางเดินของเจ็ตในกระแสลมขวาง ในช่วง $x > 0.8rd$ ตาม สมการ Power law

ส่วนการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคการควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวาง มีตัวอย่างเช่น การควบคุมโดยวิธีติด *delta tab* (Zaman and Foss, 1997; Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005) การควบคุมโดยวิธี *pulsing* (M'Closkey et al., 2002 และ Narayanan et al., 2003) การควบคุมโดยวิธีหมุนควง *swirling jet* (Niederhuas et al., 1997; Wangjiraniran and Bunyajitradulya, 2001; Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005; Denev et al., 2009); จนมาถึงการควบคุมโดยใช้เทคนิคเจ็ตควบคุมในแนวเส้นรอบวง (Kornsri et al., 2009, Witayaprapakorn and Bunyajitradulya., 2013, Chaikasetsin et al., 2014 and Wangkiat et al., 2015)

1.2 แรงจูงใจ

เจ็ตในกระแสลมขวางมีโครงสร้างหลัก 4 โครงสร้างตาม Fric and Roshko (1994) อย่างไรก็ตาม โครงสร้างหลักที่โดดเด่นและมีบทบาทสำคัญ โครงสร้างหนึ่งต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางคือ Counter rotating vortex pairs (CVP) ดังนั้นจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับการก่อตัวและการพัฒนาตัวของโครงสร้าง CVP นี้อย่างกว้างขวาง ในกรณีการก่อตัวของโครงสร้าง CVP Cortelezzi and Karagozian (2001) ซึ่งสอดคล้องกับ Kelso et al. (1996) พบว่า CVP เกิดจากการพับของ Vortex ring Yuan et al. (1999) ศึกษาโดยใช้วิธี Large-Eddy simulation (LES) ซึ่งแนะนำ CVP ก่อตัวมาจากโครงสร้าง Hanging vortices ซึ่งก่อตัวจาก skewed mixing layer ที่พัฒนามาจากเจ็ต และกระแสลมขวางบริเวณด้านข้างของปากทางออกของเจ็ต Lim et al. (2001) พบว่า CVP เกิดจากการพับตัวของ Vortex sheet ที่ด้านในเกิดเป็น Vortex loops ที่มีส่วนเชื่อมกันที่ด้านหลัง ไม่ใช่ Vortex ring Sau et al. (2004) ศึกษาเจ็ตในกระแสลมขวางที่ปากทางออกเจ็ตเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยใช้วิธี Direct Numerical Simulation (DES) พบว่า CVP เกิดจาก skewed shear layer ที่พัฒนาขึ้นบริเวณด้านข้างทั้งสองของปากทางออกของเจ็ต ซึ่งสอดคล้องกับข้อชี้แนะการก่อตัวของ CVP ของ Yuan et al. (1999)

สำหรับคุณลักษณะหนึ่งที่สำคัญที่เกิดจากโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง คือ การเหนี่ยวนำการผสม Smith and Mungal (1998) พบว่าแม้ว่าโครงสร้าง CVP จะเป็นกลไกหลักในการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางที่บริเวณ Far field แต่กลับไม่ทำให้เกิดการผสมที่ดีกว่าเจ็ตอิสระ ในขณะที่การก่อตัวของ CVP ที่บริเวณ Near field ต่างหากที่ทำให้เจ็ตในกระแสลมขวางผสมได้ดีกว่า Free jet Yuan and Street (1998) และ Yuan et al. (1999) ซึ่งแนะนำถึงการเหนี่ยวนำการผสมที่ด้านหน้าของเจ็ตโดยโครงสร้าง Spanwise rollers เมื่อ Spanwise rollers ที่ upstream และที่ downstream เกิดปฏิสัมพันธ์กัน จะเหนี่ยวนำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ที่ขอบด้านหน้าของเจ็ต

(engulf) ดึงดูดให้กระแสลมขวางเข้าผสมกับเจ็ตผ่านช่องว่างนี้ โดยกลไกนี้ต้องการมุมปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางสูงสุด จึงมักเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณส่วนที่โค้งที่สุดของเส้นทางเดินของเจ็ต Cortezzi and Karagozian (2001) ใช้วิธี Three-dimensional vortex element ศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสม พบว่ากระแสลมขวางบริเวณ upstream ที่ถูกรบกวนจากเจ็ตที่พุ่งขึ้นตั้งฉากจะเบนอ้อมและยกตัวขึ้นที่ด้านหลังของเจ็ตแล้วพุ่งเข้าสู่เจ็ตที่บริเวณกึ่งกลางของ CVP จากนั้นจะรวมตัวเข้ากับ CVP ในที่สุด Sau et al. (2004) พบว่าทางทั้งสองของโครงสร้าง Horseshoe vortex ซึ่งเกิดจาก Boundary layer ของกระแสลมขวาง จะถูกยกขึ้นจากพื้นที่ด้านหลังของเจ็ตและต่อมาจะถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่ CVP อย่างไรก็ตามการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางส่วนใหญ่ใช้วิธีแบบจำลอง (Simulation) จึงขาดหลักฐานจริงที่ได้จากการทดลอง (empirical evidence) นอกจากนี้การศึกษาที่ผ่านมาไม่สามารถระบุบริเวณที่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมว่าสูงหรือต่ำอย่างไรที่บริเวณใดได้

อนึ่ง ในการประเมินวัดการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง จะใช้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E นิยามเป็นอัตราการไหลของเจ็ต ณ หน้าตัดใดๆ Q_j ส่วนด้วยอัตราการไหลที่ปากทางออกของเจ็ต Q_o เนื่องจากรัด Q_j และในที่สุด E มีความยากลำบาก ทำให้งานวิจัยในอดีตหา E ด้วยวิธีทางอ้อม โดยอ้างอิงจากปริมาณอื่นที่เกี่ยวข้องกับการเหนี่ยวนำการผสม เช่น Karmotoni and Greber(1972) ใช้อัตราการลดลงของอุณหภูมิ (Temperature decay rate) และฟลักซ์ของมวลเจ็ตตามการไหล (Mass flux) หรือ Smith and Mungal(1998) ที่ใช้การลดลงของ passive scalar (passive scalar concentration decay) ต่อมาของ Yuan and Street(1998) ได้หา E โดยตรง โดยใช้วิธี Large-Eddy Simulation(LES) แต่เนื่องจากปริมาณที่คำนวณได้เริ่มต้นเป็นค่าเฉลี่ย (time-mean) ไม่ใช่ค่า ณ ขณะใดๆ (instantaneous) จึงจำเป็นต้องกำหนดค่าเกณฑ์ที่แสดงขอบเขตของเจ็ตจากค่าเฉลี่ยนั้นๆอย่างไม่มีหลักเกณฑ์แน่ชัด (arbitrary) เพื่อให้สามารถระบุและแบ่งแยกขอบเขตของเจ็ตจากกระแสลมขวางได้ ต่อมา Wittayaprapakorn (2013) ใช้วิธี Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหล (tracer particle) เฉพาะในเจ็ตเท่านั้น และไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ทำให้สามารถระบุและแบ่งแยกส่วนของเจ็ตออกจากส่วนของกระแสลมขวางภายนอกได้ จึงสามารถหาอัตราการไหล (volume flowrate) และหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้โดยตรงและแม่นยำ

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักคือเพื่อศึกษาโครงสร้างและปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสลมขวาง และการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางของเจ็ต โดยเฉพาะกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง จึงจำเป็นต้องมีคุณสมบัติของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ แต่เนื่องจากการศึกษาในอดีตไม่สามารถหาคุณสมบัติของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ได้ ในงานวิจัยนี้จึงใช้

SPIV รวมกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางด้วย เพื่อให้สามารถหาคุณสมบัติของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ถูกเหนี่ยวนำโดยเจ็ตได้

นอกจากนี้ในอดีตมีการศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (effective velocity ratio) ต่อเจ็ตในกระแสลมขวางและการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง Smith and Mungal (1972) ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลตั้งแต่ 5 ถึง 25 ผลการทดลองชี้แนะว่าเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับหรือต่ำกว่า 5 จะอยู่คนละ flow regime และจะมีคุณลักษณะที่แตกต่างจากเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับหรือสูงกว่า 10 โดยเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับหรือต่ำกว่า 5 จะมีเส้นทางการเดินของเจ็ตต่ำกว่าและอยู่เลยไปไกลกับพื้นมากกว่าเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลสูง และยังมีการเหนี่ยวนำการผสมต่ำกว่า (ใช้ concentration decay เป็นปริมาณอ้างอิง) โดยการที่เจ็ตในกระแสลมขวางมีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับหรือต่ำกว่า 5 มีคุณลักษณะที่แตกต่างดังกล่าวเชื่อว่าเป็นผลจาก Wall effect ซึ่งจะไม่พบในเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลสูง ต่อมา Wongthongsiri (2015) ศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อเจ็ตในกระแสลมขวางและการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4, 8, และ 12 โดยใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น และไม่ใส่ในกระแสลมขวาง เพื่อให้สามารถระบุและแบ่งแยกส่วนของเจ็ตออกจากส่วนของกระแสลมขวางภายนอกได้อย่างแม่นยำ จึงทำให้สามารถหาอัตราการไหลและอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้โดยตรง พบว่าโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4 จะค่อนข้างแตกต่างจากโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 8 และ 12 ที่มีโครงสร้างคล้ายกัน จากผลการทดลองชี้แนะว่าเจ็ตในกระแสลมขวางที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4 จะอยู่คนละ flow regime กับที่ 8 และ 12 ใน near field แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยัง far field ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางจะลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตโดยเฉพาะการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางบน rd -scale พบว่าเมื่ออัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเพิ่มขึ้น การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตาม Wongthongsiri(2015) ไม่ได้ศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสลมขวางที่นำไปสู่การศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางว่ามีลักษณะอย่างไรในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง

จากเหตุผลทั้งหมดข้างต้นจึงเป็นที่มาของแรงจูงใจในงานวิจัยนี้ โดยมุ่งเน้นเพื่อศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมและกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลม

ขวาง จากโครงสร้างและปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสลมขวาง และการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางของเจ็ต เพื่อที่จะประเมินอัตราการส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร จึงใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใช่ในกระแสลมขวาง เพื่อให้สามารถระบุและแบ่งแยกส่วนของเจ็ตออกจากส่วนของกระแสลมขวางภายนอกได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้เพื่อที่จะศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสม จึงใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวางด้วยเพื่อให้สามารถหาคุณสมบัติของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ถูกเหนี่ยวนำโดยเจ็ตได้ โดยจะทำการศึกษาที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r เท่ากับ 4, 8 และ 12 เป็นตัวแทนของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่น้อยกว่า 5, ระหว่าง 5-10 และสูงกว่า 10 ตามลำดับ

นอกจากนี้เพื่อที่จะศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมอื่น ซึ่งเป็นจุดประสงค์รองของงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาทั้งในระนาบตัดขวางการไหล (Cross-plane หรือ End-view) และในระนาบสมมาตรการไหลด้านข้าง (Symmetric-plane หรือ Side-view) ร่วมกับวิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งสองแบบเช่นเดียวกัน

1.3 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสลมขวาง การเหนี่ยวนำกระแสลมขวางโดยเจ็ต การเหนี่ยวนำการผสม และโดยเฉพาะกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปของ functional form ได้เป็น

$$E = f\left(\frac{x}{rd}; r; \text{Re}_{cf}, \text{Re}_j = \text{Re}_{cf} \times r, \frac{\rho_i}{\rho_{cf}} = 1, \psi_{bl}, \psi_{jp}, \frac{\delta}{d}\right)$$

$$EM = f\left(\frac{x}{rd}; r, TS; \frac{z}{rd}, \text{Re}_{cf}, \text{Re}_j = \text{Re}_{cf} \times r, \frac{\rho_i}{\rho_{cf}} = 1, \psi_{bl}, \psi_{jp}, \frac{\delta}{d}\right)$$

$$\Gamma, \text{Trajectory}, \text{Structure} = f\left(\frac{x}{rd}; r; \frac{z}{rd}, \text{Re}_{cf}, \text{Re}_j = \text{Re}_{cf} \times r, \frac{\rho_i}{\rho_{cf}} = 1, \psi_{bl}, \psi_{jp}, \frac{\delta}{d}\right)$$

โดยที่	E	คือ	การเหนี่ยวนำการผสม
	EM	คือ	กลไกการเหนี่ยวนำการผสม
	Γ	คือ	ค่า Circulation ไร้มิติ
	$Trajectory$	คือ	เส้นทางการเดินของเจ็ต
	$Structure$	คือ	โครงสร้างของเจ็ต ได้แก่ $V, V_x, V_y, V_z, Vorticity,$ Probability

$\frac{x}{rd}$	คือ	ระยะทางของระนาบตามแนว Streamwise ไร้มิติ
r	คือ	อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล
TS	คือ	ชนิดของการใส่อนุภาคติดตามกลางไหล
$\frac{z}{rd}$	คือ	ระนาบ Centerplane ในแนว Spanwise ไร้มิติ
Re_{cf}	คือ	ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง
Re_j	คือ	ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ของเจ็ต
$\frac{\rho_j}{\rho_{cf}}$	คือ	อัตราส่วนความหนาแน่นระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง
Ψ_{bl}	คือ	สภาวะเริ่มต้นของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางไร้มิติ
Ψ_{jp}	คือ	สภาวะเริ่มต้นของเจ็ตไร้มิติ
$\frac{\delta}{d}$	คือ	ความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางไร้มิติ

โดยที่ให้ Re_{cf} คงที่ แล้วจะปรับค่า Re_j ตามค่า r ที่เปลี่ยนไป

1.4 ขอบเขตของโครงการ

1. อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity ratio, r) เท่ากับ 4, 8 และ 12
2. ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ของเจ็ต Re_j เท่ากับ 12,400, 24,800 และ 37,200 ตามลำดับ
3. ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง Re_{cf} คงที่เท่ากับ 3,100 มีการไหลของชั้นขอบเขต (Boundary layer) แบบราบเรียบ (laminar) โดยมีความหนาของชั้นขอบเขต (Boundary layer thickness, $\delta_{95\%} / d$) เท่ากับ 0.64 ที่ $x/d = -2$
4. วัดสนามความเร็วของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบตัดขวางการไหลที่ $x/rd = 0.5, 0.75, 1.0$ และ 1.5
5. วัดสนามความเร็วของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบสมมาตรการไหลที่ $z/rd = 0$ (Center-plane)
6. เจ็ตหลักมี Initial velocity profile เป็นแบบ Fully-developed turbulent pipe flow
7. ใช้วิธี SPIV ควบคู่ไปกับการใส่อนุภาคติดตามการไหล 2 แบบ คือ การใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง และการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการศึกษาเชิงวิชาการจะทำให้ได้ข้อมูล ความรู้ ความเข้าใจ และสามารถทบทวนการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางและสามารถหาการเหนี่ยวนำการผสมได้โดยตรงอย่างแม่นยำเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในอนาคต รวมถึงยังทราบโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสลมขวาง และข้อมูลความสัมพันธ์เชิงปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับเจ็ตในการผสมขวาง นอกจากนี้ยังสามารถนำผลการศึกษาไปเป็นแนวทางเพื่อค้นคว้าเพิ่มเติมต่อไป

ผลการศึกษาเชิงประยุกต์คือการนำมาซึ่งข้อมูล ความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสมและการเหนี่ยวนำการผสม รวมถึงโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสลมขวาง และปริมาณอื่นๆเพื่อให้สามารถนำความรู้ ความเข้าใจดังกล่าวไปเป็นแนวทางในการออกแบบ ปรับปรุง หรือพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆที่มีการนำเจ็ตในกระแสลมขวางมาประยุกต์ใช้ให้มีสมรรถนะและประสิทธิภาพสูงขึ้น

บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา

การศึกษาเจ็ตในกระแสมวลมีการศึกษาอย่างกว้างขวางในหลายคุณลักษณะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมและกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลซึ่งสามารถนำมาเป็นแนวทางการศึกษาของงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ยังรวมถึงการศึกษาคุณลักษณะอื่นๆ ของเจ็ตในกระแสมวลอีกด้วย

2.1 ปริมาณที่สำคัญของเจ็ตในกระแสมวล

▪ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล

อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity ratio, r) เป็นปริมาณหลักที่ใช้กำหนดคุณลักษณะทางกายภาพของเจ็ตในกระแสมวล โดยนิยามจากอัตราส่วนโมเมนตัมฟลักซ์ของเจ็ตต่ออัตราส่วนโมเมนตัมฟลักซ์ของกระแสมวล

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

เมื่อ ρ_j และ ρ_{cf} คือ ความหนาแน่นของเจ็ตและของกระแสมวลตามลำดับ u_j และ u_{cf} คือ ความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตและความเร็วของกระแสมวลตามลำดับ อย่างไรก็ตามถ้าความหนาแน่นของเจ็ตสามารถประมาณว่ามีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของกระแสมวล ($\rho_j \approx \rho_{cf}$) สมการที่ 2.1 จะสามารถลดรูปได้ดังนี้

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

▪ เรย์โนลด์ส้นัมเบอร์ของเจ็ตและเรย์โนลด์ส้นัมเบอร์ของกระแสมวล

เรย์โนลด์ส้นัมเบอร์ของเจ็ต (Jet Reynolds number, Re_j) นิยามได้จาก

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

เมื่อ u_j คือ ความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ต d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ต และ ν_j คือ ความหนืดคินเนติกของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ต (Kinematic viscosity) ซึ่งเรย์โนลด์ส้นัมเบอร์ของเจ็ตจะแสดงถึงสภาวะการไหลของเจ็ตก่อนออกจากปากเจ็ตว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar) หรือการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent)

เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง (Crossflow Reynolds number) นิยามได้จาก

$$\text{Re}_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu_{cf}} \quad (2.4)$$

เมื่อ u_{cf} คือ ความเร็วของกระแสลมขวาง d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ต และ ν_{cf} คือ ความหนืดคิเนมาติกของกระแสลมขวาง (Kinematic viscosity) เนื่องจากเจ็ตในกระแสลมขวางมีลักษณะ การไหลของกระแสลมขวางผ่านตัวเจ็ตคล้ายคลึงกับการไหลของของไหลผ่านแท่งทรงกระบอก คือมีโครงสร้าง Wake ที่ด้านหลังของเจ็ตและแท่งทรงกระบอกคล้ายคลึงกัน ทำให้เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวางจะนิยามจากเส้นผ่านศูนย์กลางของปากทางออกเจ็ตเช่นเดียวกับที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของของไหลนิยามจากแท่งทรงกระบอก

โดยถ้าความหนาแน่นและความหนืดคิเนมาติกของเจ็ตสามารถประมาณว่ามีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นและความหนืดคิเนมาติกของกระแสลมขวาง ($\rho_j \approx \rho_{cf}, \nu_j \approx \nu_{cf}$) สมการที่ 2.4 จะสามารถลดรูปได้ดังนี้

$$r = \frac{\text{Re}_j}{\text{Re}_{cf}} \quad (2.5)$$

2.2 การศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง

PART I โครงสร้างพื้นฐานของเจ็ตในกระแสลมขวาง

Fric and Roshko (1994) ศึกษาโครงสร้างหมุนวน (Vortical structures) ต่างๆของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยใช้เทคนิค smoke-wire เพื่อแสดง flow visualize ประกอบกับการวัดความเร็วโดยใช้เทคนิค Hot-wire พบว่า vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวางประกอบด้วย 4 โครงสร้างดังรูปที่ 2.1 ได้แก่ 1) Jet shear layer vortices เกิดจาก shear layer ของเจ็ตที่บริเวณด้านหน้าเมื่อเจ็ตปะทะกับกระแสลมขวางแล้ว เจ็ตจะพับตัวมีลักษณะคล้ายกับ Vortex ring ของ Free jet 2) Horseshoe vortices เกิดจากการที่กระแสลมขวางบริเวณชั้นขอบเขตที่พื้นบริเวณด้านหน้าใกล้ปากเจ็ตไหลมาปะทะกับเจ็ตที่พุ่งขึ้นทำให้ได้รับผลจาก Adverse pressure gradient จะแยกตัวออกเป็น 2 หางคล้ายรูปเกือกม้า 3) Wake vortices เกิดจาก crossflow boundary layer ที่มีลักษณะคล้ายกับ wake ของการไหลผ่านวัตถุทรงกระบอก และ 4) Counter – rotating vortex pair (CVP) เป็นโครงสร้างหมุนวนที่เป็นกลไกการผสมสำคัญในบริเวณ far field

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาการผสม (Mixing) จากการลดลงของความเข้มข้น (passive scalar concentration) โดยใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) ที่

อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r ระหว่าง 5 ถึง 25 โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาการเหนี่ยวนำการผสม โดยอ้างอิงจาก Centerline concentration decay โดยเมื่อ scale ด้วย r^2d พบว่ามีจุดแบ่ง (Branch point) ที่นำมาเป็นเกณฑ์ในการแบ่งแยกบริเวณการลดลงตามแนวแกนเจ็ตเป็น 2 ช่วงที่ ตำแหน่ง $s/r^2d = 0.3$ คือช่วง Near field ที่ $s/r^2d < 0.3$ และช่วง Far field ที่ $s/r^2d > 0.3$ ของเจ็ตในกระแสลมขวางในรูปที่ 2.2

Yuan *et al.* (1999) ศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางและศึกษาการก่อตัวของ โครงสร้าง CVP โดยใช้วิธี Large-eddy simulation พบว่าที่บริเวณ Near field เจ็ตในกระแสลม ขวางมีโครงสร้างหลัก 3 โครงสร้างในรูปที่ 2.3 1) Hanging Vortices เกิดจากความไม่ต่อเนื่องของ ความเร็วเจ็ตและ กระแสลมขวางบริเวณปากเจ็ตที่เรียกว่า Skewed mixing layer รูปที่ 2.4 2) Spanwise rollers มีลักษณะเดียวกับการม้วนตัวของ Vortex ring ของเจ็ตอิสระ พบโครงสร้าง Spanwise rollers ที่เฉพาะด้านหน้าและด้านหลังของเจ็ตเท่านั้น รูปที่ 2.5 และ 3) Vertical streaks เป็นโครงสร้างที่มีแกนตามแนวตั้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของโครงสร้าง Spanwise rollers ด้านหน้าเนื่องจากผลของ Perturbation และ Gradient ของความเร็วในแนวตั้งตามแนว Downstream

นอกจากนี้ยังพบว่าการก่อตัวของโครงสร้าง CVP มีเกิดจาก Hanging vortices ที่บริเวณ Near field ซึ่งเกิดจาก Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวขึ้น ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางที่ขอบ ด้านข้างของเจ็ต

Cortelezzi and Karagozian (2001) ศึกษาการก่อตัวและพัฒนาตัวของ CVP โดยใช้วิธี 3D vortex element simulation รูปที่ 2.6 พบว่าโครงสร้าง CVP เกิดจากการพับของ Vortex ring โดย ขอบด้านหลังของ Vortex ring โดยจะเชื่อมต่อกับ Vortex ring อีกตัว ที่ขอบด้านหลังแล้วพัฒนา กลายเป็น CVP ที่สมบูรณ์ที่ downstream

Lim *et al.* (2001) ศึกษาด้วย Large scale structure โดยใช้เทคนิคคิติดิสและ พบลักษณะ Vortex loop ซึ่งเกิดจากการพัฒนาตัวของ Cylindrical vortex sheet รูปที่ 2.7 จึงชี้แนะว่า โครงสร้าง CVP นั้นเกิดจากการพัฒนาตัวของ Vortex loop แทนที่จะเป็น Vortex ring

Sau *et al.* (2004) ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ด้วยวิธี Direct numerical simulation (DNS) พบว่าโครงสร้าง CVP ก่อตัวจาก Skewed shear layer ที่บริเวณด้านข้างของ

ปากทางออกเจ็ต นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้าง Kelvin–Helmholtz roller ไม่ได้มีลักษณะเป็น Closed vortex ring รูปที่ 2.8

PART II คุณสมบัติของเจ็ตในกระแสลมขวาง

1) กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Entrainment mechanism)

Yuan and Street (1998) และ Yuan *et al.* (1999) ศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางและศึกษาการก่อตัวของโครงสร้าง CVP โดยใช้วิธี Large-eddy simulation สำหรับกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง จะพบกลไกการเหนี่ยวนำการผสมบริเวณ upstream ที่เจ็ตเลี้ยวเบนเข้าสู่แนวการไหลของกระแสลมขวางโดยโครงสร้าง Spanwise rollers เมื่อเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง Spanwise rollers ที่ upstream และที่ downstream รูปที่ 2.5 จะทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ที่ก่อตัวขึ้นที่ขอบของเจ็ตบริเวณ upstream (Engulf) จากนั้นกระแสลมขวางจะถูกดึงดูดเข้ามาผสมกับเจ็ตหลักในช่องว่างนี้

Cortelezzi and Karagozian (2001) ศึกษาการก่อตัวและพัฒนาตัวของ CVP โดยใช้วิธี 3D vortex element simulation พบว่ากระแสลมขวางจะถูกเหนี่ยวนำให้ยกตัวขึ้นที่ด้านหลังของเจ็ตหลัก จากแบบจำลอง streaklines ของกระแสลมขวางที่ระยะความสูงจากพื้นต่างๆในรูปที่ 2.9 จากนั้นกระแสลมขวางจะถูกดึงดูดเข้ามาผสมกับเจ็ตที่บริเวณกึ่งกลาง CVP ซึ่งแสดงด้วย Vorticity field surface ของเจ็ต

Sau *et al.* (2004) ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ด้วยวิธี Direct numerical simulation (DNS) พบว่าโครงสร้าง Horseshoe vortex ที่เกิดจากกระแสลมขวาง (เส้น Streamlines สีแดง) จะถูกเหนี่ยวนำเข้ามาผสมกับเจ็ตหลักผ่านกึ่งกลางโครงสร้าง CVP ของเจ็ตที่ก่อตัวจาก Skewed shear layer ที่บริเวณด้านข้างของปากทางออกเจ็ต (เส้น Streamlines สีดำ) และ CVP นี้จะถูกสนับสนุนโดยโครงสร้าง Kelvin–Helmholtz roller ของเจ็ต (เส้น Streamlines สีน้ำเงิน) ในรูปที่ 2.10

2) การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment)

2.1) การหาการเหนี่ยวนำการผสม

การหาการเหนี่ยวนำการผสมทางอ้อม

Karmotani and Greber (1972) ศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมโดยอ้างอิงจากอัตราการลดลงของอุณหภูมิ (Temperature decay rate) และฟลักซ์ของมวลเจ็ตตามการไหล (Mass flux) ที่เพิ่มขึ้น พบว่าจะชี้แนะถึงการเพิ่มขึ้นของการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลว่าง

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาการผสม (Mixing) จากการลดลงของความเข้มข้น (passive scalar concentration) โดยใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r ระหว่าง 5 ถึง 25 โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมโดยอ้างอิงจาก Centerline concentration decay เมื่อ scale ด้วย rd พบว่าที่ Near field ซึ่งเป็นบริเวณที่พบการก่อตัวของโครงสร้าง Counter Rotating Vortex Pair (CVP) ความเข้มข้นสูงสุดจะลดลงด้วยอัตรา $(s/rd)^{-1.3}$ ซึ่งมากกว่าในกรณีของเจ็ตอิสระ (Free-jet) ที่ลดลงด้วยอัตรา $(s/rd)^{-1}$ ในขณะที่ Far field ซึ่งเป็นบริเวณที่โครงสร้าง CVP พัฒนาตัวอย่างสมบูรณ์แล้ว ความเข้มข้นสูงสุดจะลดลงด้วยอัตรา $(s/rd)^{-2/3}$ ซึ่งน้อยกว่าในกรณีของเจ็ตอิสระในรูปที่ 2.11

จากการศึกษาชี้แนะว่าแม้ว่าโครงสร้าง CVP จะเป็นกลไกหลักที่ทำให้เกิดการผสมในบริเวณ Far Field แต่ก็ไม่ทำให้การผสมดีไปกว่าเจ็ตอิสระ แต่การก่อตัวของโครงสร้าง CVP ในบริเวณ Near field ต่างหากที่ทำให้เจ็ตในกระแสมวลว่างการผสมดีกว่าเจ็ตอิสระ

การหาการเหนี่ยวนำการผสมทางตรง

Yuan and Street (1998) ศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมนิยามจาก volume flux ของเจ็ตต่อ volume flux เริ่มต้นของเจ็ต โดยใช้วิธี Large-eddy simulation (LES) อย่างไรก็ตามค่าความเร็วเริ่มต้นที่ใช้ในการหา volume flux ของเจ็ตเป็นค่าเฉลี่ย จึงไม่สามารถแยกแยะเจ็ตออกจากกระแสมวลว่างได้อย่างชัดเจน งานทดลองนี้จึงเลือกระบุค่า Mean scalar concentration เป็นเกณฑ์ในการระบุขอบเขตเจ็ตเพื่อใช้แยกแยะพื้นที่ของเจ็ตออกจากกระแสมวลว่าง

Kornsiri *et al.* (2009) ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามเส้นรอบวง (Azimuthal control jet) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมวลว่าง ที่ r เท่ากับ 3.9 และมีค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก r_m ระหว่าง 1.8% ถึง 2.3% นิยามด้วย

$$r_m = \frac{\dot{m}_{cj}}{\dot{m}_j} \quad (2.6)$$

เมื่อ \dot{m}_{cj} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุม และ \dot{m}_j คือ อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตหลัก โดยใช้วิธี single sensor hot film anemometer ทำให้ค่าความเร็วที่ใช้ในการหาอัตราการไหลของเจ็ตเป็นค่าเฉลี่ย จึงเลือกระบุค่า 12% ของ maximum turbulent intensity เป็นเกณฑ์ในการระบุขอบเขตของเจ็ตเพื่อให้สามารถแยกแยะพื้นที่ของเจ็ตออกจากกระแสลมขวาง

พบว่าเมื่อฉีดเจ็ตควบคุม (cJICF) ในรูปที่ 2.12 ที่ด้าน Windward ให้เส้นทางเดินของเจ็ตที่ต่ำกว่าในกรณีเจ็ตในกระแสลมขวางที่ไม่มีเจ็ตควบคุม (JICF) โดยที่ฉีด cJICF ที่มุม $\pm 15^\circ$ (I15) จะได้เส้นทางเดินที่ต่ำที่สุด และเมื่อฉีด cJICF ด้าน Leeward ให้เส้นทางเดินที่สูงกว่าในกรณี JICF ในรูปที่ 2.13 เมื่อพิจารณาที่กรณีฉีด cJICF ที่มุม $\pm 15^\circ$ (I15) การ Penetration ของเจ็ตจะลดลง เมื่อ r_m เพิ่มขึ้น ในรูปที่ 2.14 นอกจากนี้จะทำให้เจ็ตกระจายตัวออกทางด้านข้าง (Spanwise) มากขึ้น ในรูปที่ 2.15 และมี Spanwise separation ระหว่างโครงสร้าง CVP มากขึ้น ในรูปที่ 2.16(b)

Berchet *et al.* (2013) ศึกษาการเหนี่ยวนำการผสม ซึ่งการเหนี่ยวนำการผสมจะนิยามจาก volume flux ที่ไหลผ่าน envelope หรือ control volume ของเจ็ต โดยใช้วิธี Planar laser-induced fluorescence (PLIF) และ Particle image velocimetry (PIV) ร่วมกับ laser scanning และใช้ควบคู่กับเทคนิคการใส่สีและอนุภาคไปที่กระแสลมขวาง (น้ำ) เท่านั้น ไม่ใส่ในเจ็ต แม้ว่าค่าความเร็วที่วัดได้จะเป็นค่า instantaneous แต่ envelope ของการทดลองนี้จะนิยามจากบริเวณที่มี concentration ของสีน้อยกว่า 0.7 แบบ arbitrary เป็นเกณฑ์ในการระบุขอบเขตของเจ็ตเพื่อให้สามารถแยกแยะพื้นที่ของเจ็ตออกจากกระแสลมขวาง

การหาการเหนี่ยวนำการผสมโดยวิธี Stereo particle image velocimetry (SPIV)

Witayaprapakorn and Bunyajitradulya (2013) และ Witayaprapakorn (2013) ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jet) ต่อโครงสร้างและการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r เท่ากับ 3.9 และมีค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก r_m ระหว่าง 2% ที่เจ็ตควบคุมมุม $\pm 15^\circ$ (I15) และ $\pm 135^\circ$ (I135) โดยใช้วิธี Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะที่เจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ทำให้สามารถวัดความเร็วเป็นแบบ instantaneous ได้และยังสามารถแยกแยะบริเวณของเจ็ตและส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) ออกจากกระแสลมขวางได้โดยตรงอย่างชัดเจน ไม่จำเป็นต้องระบุค่าเกณฑ์ของปริมาณ

เฉลี่ยอื่น ดังนั้นวิธีนี้จึงสามารถแก้ไขปัญหาในการหาการเหนี่ยวนำการผสมที่ผ่านมาได้ โดยจะนิยามอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจากอัตราการไหลของเจ็ตที่หน้าตัดขวางการไหล ณ ขณะใดๆ Q_j ต่ออัตราการไหลที่ปากทางออกของเจ็ต Q_o ดังสมการ

$$E = \frac{Q_j}{Q_o} \quad (2.7)$$

และเมื่อใช้เจ็ตควบคุมตัวส่วนจะรวมอัตราการไหลของเจ็ตควบคุม Q_{cj} ด้วยเป็น

$$E = \frac{Q_j}{Q_o + Q_{cj}} \quad (2.8)$$

การศึกษาผลต่อเส้นทางการเดินของเจ็ต พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเจ็ตในกระแสลมขวางที่ไม่ได้ฉีดเจ็ตควบคุม JICF แล้วเมื่อฉีด cJICF ที่มุม $\pm 15^\circ$ (I15) เส้นทางการเดินของเจ็ตจะต่ำลง ในขณะที่เมื่อฉีด cJICF ที่มุม $\pm 135^\circ$ (I135) เส้นทางการเดินของเจ็ตจะสูงขึ้น ทั้งรูปที่ 2.17 และ 2.18

การศึกษาผลต่อโครงสร้าง พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF แล้วเมื่อฉีด cJICF ที่มุม $\pm 15^\circ$ (I15) ทำให้โครงสร้างของเจ็ตขยายตัวออกด้านข้าง (Spanwise) มากขึ้น แต่ระยะห่างระหว่างเจ็ตกับผนัง (Wall separation) ลดลง ในขณะที่เมื่อฉีด cJICF ที่มุม $\pm 135^\circ$ (I135) ไม่ทำให้โครงสร้างของเจ็ตเปลี่ยนไปมากนัก ในรูปที่ 2.19

การศึกษาผลต่อการเหนี่ยวนำการผสม พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี JICF แล้วเมื่อฉีด cJICF ที่มุม $\pm 15^\circ$ (I15) ที่ระนาบ $x/rd = 0.5$ และ 0.75 จะมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E ใกล้เคียงกับกรณี JICF อย่างไรก็ตามเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปถึงระนาบ $x/rd = 1.0$ และ 1.5 พบว่าจะจะมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E เพิ่มขึ้นจากกรณี JICF ประมาณ 5 % ขณะที่การฉีด cJICF ที่มุม $\pm 135^\circ$ (I135) ทำให้เจ็ตจะมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E เพิ่มขึ้น ตลอดช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 และมีการเหนี่ยวนำการผสมมากที่สุดที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ โดยเพิ่มขึ้นจากกรณี JICF ประมาณ 13 % ในรูปที่ 2.20 และ 2.21

Chaikasetsin *et al.* (2014) ศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก r_m ต่อโครงสร้างการผสมและการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร โดยใช้วิธี Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะที่เจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพ r เท่ากับ 4.1 และฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง $\pm 135^\circ$ ที่ $r_m = 2\%$ และ 4% พบว่าเมื่อฉีด cJICF ที่มุม $\pm 135^\circ$ (I135) $r_m = 4\%$ มีเส้นทางการเดินของเจ็ตสูงขึ้น ในรูปที่ 2.22 และมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี $r_m = 2\%$ และกรณีเจ็ตใน

กระแสลมขวางที่ไม่ได้ฉีดเจ็ตควบคุม JICF ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมี E สูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม ถึง 61% ในตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ ในรูปที่ 2.23

2.2) ผลของพารามิเตอร์ต่างๆต่อการเหนี่ยวนำการผสม

2.2.1) โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางต่อการเหนี่ยวนำการผสม

Yuan and Street (1998) ศึกษาโครงสร้างที่มีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง พบว่าแม้ว่า circulation ของโครงสร้าง CVP จะน้อยที่ Far field อย่างไรก็ตาม CVP ยังคงช่วยเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของเจ็ตและนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการเหนี่ยวนำการผสม จึงชี้แนะได้ว่าโครงสร้าง CVP เป็นกลไกหลักในการผสมที่ Far field โดยจะม้วนกระแสลมขวางเข้ามาผสมที่ด้านล่างของเจ็ต

Watakulsin *et al.* (2010) ศึกษาโครงสร้างการผสมในบริเวณ near field ที่ $r = 2, 4, 7$ โดยใช้วิธี smoke fluid condensation, mie scattering และ laser-sheet visualization techniques โดยจะพิจารณาการพัฒนาตัวของเจ็ตที่มุมมอง top view พบว่าที่ $r = 2$ เกิดการผสมขึ้นที่ด้านหลังของ unmixed core และเกิด Leewardly-connected ของ Lateral vortical roll up แต่ $r = 7$ กลับเกิดการผสมขึ้นที่ด้านหน้าของ unmixed core และเกิด Windwardly-connected ของ Lateral vortical roll up ในขณะที่ $r = 4$ จะเริ่มเกิดการผสมขึ้นที่ด้านหน้าของ unmixed core คล้ายที่ $r = 7$ ก่อนแล้วจึงเกิดการผสมขึ้นที่ด้านหลังของ unmixed core คล้ายที่ $r = 2$ ในรูปที่ 2.24 จึงชี้แนะว่าโครงสร้างการผสมของเจ็ตจะขึ้นอยู่กับการพัฒนาตัวของ Lateral skewed mixing layers และ Windward jet shear layer

Kornsiri *et al.* (2009) ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามเส้นรอบวง (Azimuthal control jet) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง ที่ r เท่ากับ 3.9 และมีค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก r_m ระหว่าง 1.8% ถึง 2.3% ได้เสนอแนวคิด Spanwise separation – Mutual blocking และ Wall separation – Wall blocking ต่อกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง เมื่อฉีด CJICF ที่มุม $\pm 15^\circ$ (I15) ในรูปที่ 2.16 ได้ว่าสำหรับแนวคิด Spanwise separation – Mutual blocking การฉีดเจ็ตควบคุมที่มุม $\pm 15^\circ$ (I15) จะมีผลในการลดการพัฒนาตัวของ Windward Jet Shear Layer ที่ด้านหน้าของเจ็ตและสนับสนุนการพัฒนาตัวของ Lateral skewed mixing Layer ซึ่งจะพัฒนาต่อเป็น Streamwise vortical structure จะแยกออกเป็นสองลูกซ่าย-ขวาส่งผลให้มีระยะห่างตามแนว Spanwise (Spanwise separation) มากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดการขัดขวางการเหนี่ยวนำการผสมกันเองของโครงสร้าง CVP (Mutual Blocking) สำหรับแนวคิด

Wall separation – Wall blocking การฉีดเจ็ตควบคุมที่มุม $\pm 15^\circ$ (I15) เจ็ตจะมีระยะห่างจากพื้นด้านล่าง (Wall separation) ลดลงซึ่งอาจขัดขวางการเหนี่ยวนำการผสมจากบริเวณด้านล่างของเจ็ต (Wall blocking)

2.2.2) เส้นทางเดินของเจ็ตต่อการเหนี่ยวนำการผสม

Yuan and Street (1998) ศึกษาการหาเส้นทางเดินของเจ็ต (Trajectory) และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) โดยวิธี Large Eddy Simulation โดยทำการทดลองที่ r เท่ากับ 2 และ 3.3 พบว่าการเหนี่ยวนำการผสมสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง Volume flux ของเจ็ตและเส้นทางเดินเฉลี่ยของเจ็ต ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการรูป Power law ตามสมการ

$$\frac{Q_j}{Q_o} = \frac{\dot{V}_{jet}}{\dot{V}_o} = 1 + \frac{rd}{Ab} \left(\frac{x}{rd}\right)^{1-b} \quad (2.9)$$

เมื่อ A และ b เป็นค่าคงที่ และ x คือระยะตามแนว Streamwise โดยที่ค่า b สามารถหาได้จากความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง $\dot{V}_{jet}/\dot{V}_o - 1$ และ x/rd บน Log-Log Scale ในรูปที่ 2.25 ซึ่งในทุกกรณีจะมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 0.3

จากงานวิจัยนี้จึงสามารถนำสมการที่ 2.9 มาหาความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสมได้ตามสมการ

$$\frac{Q_j}{Q_o} = \frac{\dot{V}_{jet}}{\dot{V}_o} = 1 + \frac{rd}{b} \left(\frac{x}{rd} / \frac{y}{rd}\right) \quad (2.10)$$

จะชี้แนะว่าเมื่อเส้นทางเดินของเจ็ตต่ำลงจะส่งผลให้การเหนี่ยวนำการผสมดีขึ้นและในทางกลับกันหากเส้นทางเดินของเจ็ตสูงขึ้นจะส่งผลให้การเหนี่ยวนำการผสมแย่ลง

2.2.3) อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อการเหนี่ยวนำการผสม

Karmotani and Greber (1972) ศึกษาผลของอัตราส่วนโมเมนตัมต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวง โดยอัตราส่วนโมเมนตัม r_M นิยามด้วย

$$r_M = \frac{\rho_j u_j^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2} \quad (2.11)$$

โดยค่าการเหนี่ยวนำการผสมจะอ้างอิงจากปริมาณอื่น คือ อัตราการลดลงของอุณหภูมิ (Temperature decay rate) และ ฟลักซ์ของมวลเจ็ตตามการไหล (Mass flux) ศึกษาที่ $r_M = 15.3$ และ 59.3 พบว่าที่อัตราส่วนโมเมนตัมสูงจะมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิช้า แสดงว่ามี การเหนี่ยวนำ

การผสมน้อยในรูปที่ 2.26 ในขณะที่อัตราส่วนโมเมนตัมสูงจะมีฟลักซ์ของมวลเจ็ตตามการไหลเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีการเหนี่ยวนำการผสมสูงในรูปที่ 2.27 ซึ่งให้ผลตรงกันข้าม

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาการผสม (Mixing) จากการลดลงของความเข้มข้น (passive scalar concentration) โดยใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r ระหว่าง 5 ถึง 25 โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาการเหนี่ยวนำการผสม โดยอ้างอิงจากการลดลงของปริมาณ passive scalar (scalar concentration decay) โดยที่รูปแบบการไหลที่มีอัตราการลดลงของความเข้มข้นที่สูงขึ้น หมายถึงมีการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นเมื่อเจ็ตไหลไปตามแนว downstream พบว่าที่ $r = 10-25$ มีอัตราการลดลงของความเข้มข้นที่ใกล้เคียงกัน และลดลงมากกว่าที่ $r = 5$ จึงบ่งชี้ว่าที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลสูงมีการเหนี่ยวนำการผสมสูงกว่าในรูปที่ 2.28

Yuan and Street (1998) ศึกษาการหาเส้นทางเดินของเจ็ต (Trajectory) และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) โดยวิธี Large Eddy Simulation โดยทำการทดลองที่ r เท่ากับ 2 และ 3.3 และที่เจ็ตที่มี Reynolds Number เท่ากับ 1,050 - 2,100 พบว่าเมื่ออัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลสูงขึ้น การเหนี่ยวนำการผสมจะสูงขึ้นด้วยในรูปที่ 2.25

3) งานวิจัยที่เกี่ยวกับเจ็ตในกระแสมขวาง

3.1) ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล

Karmotani and Greber (1972) ศึกษาผลของอัตราส่วนโมเมนตัมต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางที่ $r_M = 15.3$ และ 59.3 พบว่าทั้งอัตราส่วนโมเมนตัมต่ำและสูง มีการกระจายตัวของอนุภาคที่มีความสมมาตรรอบแกนกลาง แต่ที่อัตราส่วนโมเมนตัมสูง vortical structure มีกำลังมากกว่าจึงเกิด local peak 2 ลูกในรูปที่ 2.29

Zaman and Foss (1997) ศึกษาเจ็ตในกระแสมขวางที่อัตราส่วนโมเมนตัมเท่ากับ 21 และ 54 พบว่าที่อัตราส่วนโมเมนตัมสูง จะมี circulation สูงกว่ากรณีอัตราส่วนโมเมนตัมต่ำกว่าเสมอ และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวพบว่า circulation จะลดลง ซึ่งชี้แนะว่าเป็นผลมาจาก turbulent diffusion ในรูปที่ 2.30

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาการผสม (Mixing) จากการลดลงของความเข้มข้น (passive scalar concentration) โดยใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r ระหว่าง 5 ถึง 25 เมื่อ scale ด้วย rd พบว่าลักษณะการไหล (Flow regime) ของเจ็ตในกระแสมขวางแบ่งออกเป็น 2 ช่วง 1) อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ำ $r = 5$ ที่มีเส้นทางเดินของเจ็ตติดผนัง ซึ่งเชื่อว่าอาจมีผลของ Wall effect และ 2) อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลสูง $r = 10-25$ ในรูปที่ 2.31(a)

นอกจากนี้ยังพบว่าช่วง $r = 10-15$ เป็นช่วง transition ของการเกิดโครงสร้าง Wake vortices โดยเจ็ตในกระแสมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลน้อยกว่านี้จะไม่ Wake ในขณะที่เจ็ตในกระแสมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลมากกว่านี้จะมี Wake เสมอในรูปที่ 2.32 และ 2.33

Watakulsin *et al.* (2010) ศึกษาโครงสร้างการผสมในบริเวณ near field ที่ $r = 2, 4, 7$ โดยใช้วิธี smoke fluid condensation, mie scattering และ laser-sheet visualization techniques โดยจะพิจารณาการพัฒนาตัวของเจ็ตที่มุมมอง top view พบว่าที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.15$ เจ็ตในกระแสมขวางที่ $r = 2$ จะมีการพัฒนาโครงสร้าง vortical roll up เร็วและมีการผสมสูงที่ lateral vortical roll up 2 บริเวณที่ด้าน Leeward ในขณะที่ $r = 7$ จะมีการผสมสูงบริเวณเดียวที่ด้าน Windward นอกจากนี้กรณี $r = 4$ จะมีคุณลักษณะเหมือนกับ $r = 7$ ที่บริเวณ near field แต่จะจะมีคุณลักษณะที่เหมือนกับ $r = 2$ เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่บริเวณ far field แล้วในรูปที่ 2.24

3.2) ผลของเส้นทางการเดินของเจ็ต

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาการผสม (Mixing) จากการลดลงของความเข้มข้น (passive scalar concentration) โดยใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r ระหว่าง 5 ถึง 25 เมื่อ scale เส้นทางเดินของเจ็ตด้วย rd พบว่าเส้นทางการเดินของเจ็ตที่มีค่า r ต่างกัน จะมีแนวโน้มเข้าใกล้กัน (collapse) มากกว่าเมื่อ scale ด้วย d หรือ r^2d ยกเว้นที่ค่า r เท่ากับ 5 ที่เกิด Self-similarity ดังนั้นการ scale ด้วย rd จึงเป็น scale ที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษาเส้นทางการเดินของเจ็ต ในรูปที่ 2.31

Yuan and Street (1998) ศึกษาการหาเส้นทางการเดินของเจ็ต (Trajectory) และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) โดยวิธี Large Eddy Simulation โดยทำการทดลองที่ r

เท่ากับ 2 และ 3.3 จากการศึกษา Streamline jet trajectories หรือ เส้นทางการเดินของเจ็ต พบว่า อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r , เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของ crossflow Re_{cf} และแรงลอยตัวของเจ็ต Fr มีผลต่อเส้นทางการเดินของเจ็ต ในรูปที่ 2.34 โดยที่ค่า r มีผลมากกว่าค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น จากรูปที่ 2.35 เมื่อ scale เส้นทางการเดินของเจ็ตด้วย rd พบว่าที่บริเวณ $x > 0.8rd$ เส้นทางการเดินของเจ็ตที่ค่า rd ต่างๆ จะมีแนวโน้มลู่เข้าใกล้กัน (collapse) จนเกือบจะทับเป็นเส้นเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถนิยามเส้นทางการเดินของเจ็ตได้ด้วยสมการรูป Power-law ดังสมการ

$$\frac{y_c}{rd} = A \left(\frac{x}{rd} \right)^b \quad (2.12)$$

เมื่อ A และ b เป็นสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ซึ่งมีค่าประมาณ 1.2-1.4 และ 0.27-0.28 ตามลำดับ

3.3) ผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

Yuan and Street (1998) ศึกษาการหาเส้นทางการเดินของเจ็ต (Trajectory) และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) โดยวิธี Large Eddy Simulation โดยทำการทดลองที่ r เท่ากับ 2 และ 3.3 จากการศึกษาผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง Re_{cf} ต่อเส้นทางการเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสม ชี้แนะว่าในกรณีเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวางสูง ค่า turbulent intensity จะส่งผลให้เส้นทางการเดินของเจ็ตต่ำลงในบริเวณ near field เนื่องจากจะขัดขวางการก่อตัวของ coherent vortical structure ของ jet shear layer ทำให้เจ็ตทะลุเข้าสู่กระแสลมขวางได้น้อยลง ในรูปที่ 2.34 และ 2.36

Muppidi and Mahesh (2006) ศึกษาเจ็ตในกระแสลมขวางโดยใช้วิธี Direct numerical simulation (DNS) แบบ 2 มิติ ทำการศึกษาที่ $r = 1$ และ $Re_{cf} = 1,000-10,000$ พบว่าเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวางสูง เจ็ตจะเสีयरูปซ้ำในรูปที่ 2.37 แต่จะมีความเสถียร (stability) ต่ำโดยจะพบ roller ที่รอบเจ็ตในรูปที่ 2.38 และมีเส้นทางการเดินของเจ็ตต่ำลงในรูปที่ 2.39 เมื่อเปรียบเทียบกับเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวางต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจะพบว่าเจ็ตจะมีความเสถียรในที่สุด ต่อมาเมื่อศึกษาโครงสร้าง CVP ที่พัฒนาตัวสมบูรณ์แล้วที่ Far field พบว่า vortex แต่ละตัวของ CVP จะเหนี่ยวนำให้เกิดความเร็วตามสมการ

$$u_{induced} = \frac{\Gamma}{2\pi h} \quad (2.13)$$

เมื่อ Γ คือ circulation ของแต่ละ vortex และ h คือ ระยะระหว่างคู่ vortices โดยเสนอว่าหากไม่มีผลของ CVP มาเกี่ยวข้องกับความเร็วของเจ็ตจะถูกเร่งเข้าสู่ความเร็วของกระแสลมขวางที่ Far field แต่ในการไหลจริงความเร็วของเจ็ตบางส่วนจะถูกโครงสร้าง CVP เหนี่ยวนำไปทำให้ความเร็วปลาย u_{final} ของเจ็ตมีค่าต่ำกว่าความเร็วของกระแสลมขวางเสมอที่ Far field ตามสมการ

$$u_{\infty} - u_{induced} = u_{final} \quad (2.14)$$

เมื่อ u_{∞} คือ ความเร็วของกระแสลมขวาง ดังนั้นเมื่อเจ็ตถูกเร่งด้วยกระแสลมขวางจนกระทั่งมีความเร็วเท่ากับ u_{final} แล้ว เจ็ตจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวางสูงขึ้น $u_{induced}$ จะเพิ่มขึ้นทำให้ u_{final} ลดลง เนื่องจากเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวางสูง จะมีอัตรา circulation decay ต่ำลง หรือมีค่า circulation สูงขึ้น ส่งผลให้ $u_{induced}$ เพิ่มขึ้นและ u_{final} ลดลงในรูปที่ 2.40

Wongthongsiri and Bunyajitradulya (2014) ศึกษาผลของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวางต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วยวิธี Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะที่เจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง โดยทดลองที่ $r = 4.1$ และ Re_{cf} เท่ากับ 5,600 และ 12,000 พบว่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวางจะมีผลต่อโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางเฉพาะที่ Near field เท่านั้น โดยเมื่อเพิ่มเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง ค่าความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ ในรูปที่ 2.41 และความเร็วตามแนวการไหล (streamwise velocity) ในรูปที่ 2.42 อีกทั้งอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจะเพิ่มขึ้นในรูปที่ 2.43 แต่จะให้ผลตรงกันข้ามที่ Far field

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎี

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีความพยายามในการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางหลากหลายวิธี โดยอาศัยหลักการ ทฤษฎี และเทคนิคที่มีในช่วงเวลานั้นทั้งทางตรงและทางอ้อม ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางโดยใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมขวาง โดยหลักการและทฤษฎีจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.1 นอกจากนี้เพื่อศึกษาโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ของโครงสร้างของเจ็ตและกระแสมขวาง การเหนี่ยวนำกระแสมขวางโดยเจ็ต และกลไกการเหนี่ยวนำการผสม ในงานวิจัยนี้จึงใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสมขวาง โดยหลักการและทฤษฎีจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.2

3.1 การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง

3.1.1 การนิยามการเหนี่ยวนำการผสม

การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) เป็นการนิยามลักษณะทางกายภาพที่กระแสมขวางถูกดึงดูด หรือถูกเหนี่ยวนำเข้ามาผสม (Mixing) กับเจ็ตหลัก โดยในงานวิจัยนี้ประเมินวัดการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง ด้วยอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E นิยามเป็น

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

โดย Q_j คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตหรือส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) เฉลี่ยเทียบกับเวลาที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางใด ๆ และ Q_o คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ต โดย $Q_j(x)$ ที่เฉลี่ยเทียบกับเวลาแล้วจะสามารถนิยามได้จาก

$$Q_j(x) = \int_{A(x)} V_{j,x}(\vec{x}) dA \quad (3.2)$$

โดย $V_{j,x}(\vec{x})$ คือ ความเร็วของเจ็ต หรือ ส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) เฉลี่ยเทียบกับเวลาในแนวแกน streamwise และ $A(x)$ คือพื้นที่บนระนาบตัดขวางการไหล (Cross-plane) ที่ครอบคลุมพื้นที่หน้าตัดของส่วนผสมของเจ็ตตลอดเวลาเก็บข้อมูล

อนึ่ง รายละเอียดของที่มาของสมการที่ 3.2 สามารถอ่านเพิ่มเติมได้ใน Chaikasetzin *et al.* (2014) และ Wangkiat *et al.* (2015)

3.1.2 ปัญหาของการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลขวาง

เนื่องจากข้อจำกัดทางหลักการและทฤษฎีทำให้การหาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลขวางในอดีตนั้น ต้องอาศัยวิธีทางอ้อมโดยอ้างอิงจากปริมาณบ่งชี้อื่นที่มีคุณลักษณะเชื่อมโยงกับการเหนี่ยวนำการผสม เช่น การลดลงของปริมาณต่างๆ (Decay rate) และการขยายตัวของเจ็ต (Spread rate) ตัวอย่างเช่น Karmotoni and Greber (1972) ศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมโดยใช้อัตราการลดลงของอุณหภูมิ (Temperature decay rate) และฟลักซ์ของมวลเจ็ตตามการไหล (Mass flux) หรือ Smith and Mungal (1998) ที่ศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมโดยใช้การลดลงของ passive scalar (passive scalar concentration decay) เป็นต้น ต่อมามีการพัฒนาการหาการเหนี่ยวนำการผสมโดยตรง แต่เนื่องจากปริมาณเริ่มต้นที่ใช้ในการวัดการเหนี่ยวนำการผสมเป็นการประเมินค่าเฉลี่ย (time-mean) ไม่ใช่ค่า ณ ขณะใดๆ (instantaneous) จึงจำเป็นต้องกำหนดค่าเกณฑ์ที่แสดงขอบเขตของเจ็ต เช่นค่า threshold หรือใช้ปริมาณอื่นๆอย่างไม่มีหลักเกณฑ์ที่แน่ชัด (arbitrary) เพื่อให้สามารถระบุและแบ่งแยกขอบเขตของเจ็ตจากกระแสมวลขวางบริสุทธิ์ได้ จึงทำให้เกิดปัญหา arbitrariness และปัญหาความแม่นยำในการหาการเหนี่ยวนำการผสมขึ้น

3.1.3 การวัดความเร็วของสนามการไหลโดยใช้ SPIV และเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมวลขวาง

เนื่องจากประเด็นปัญหาในการหาการเหนี่ยวนำการผสมดังกล่าว Wittayaprapakorn (2013) จึงเลือกใช้วิธี Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ที่สามารถวัดความเร็ว ณ ขณะใดๆ (instantaneous) บนระนาบได้ ในทั้ง 3 แกน คือ streamwise V_x , transverse V_y และ spanwise V_z ควบคู่ไปกับการใช้เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมวลขวาง เพื่อให้สามารถนิยามขอบเขตเฉพาะส่วนที่เป็นเจ็ตและส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) แบ่งแยกออกจากกระแสมวลขวางบริสุทธิ์ได้ชัดเจน

รูปที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบรูปภาพถ่ายของ PIV tracer particle ณ ขณะใดๆ (ซ้าย) และสนามของเวกเตอร์ความเร็ว ณ ขณะใดๆ (ขวา) ด้วยวิธี SPIV โดยรูปที่ 3.1a แสดงการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสมวลขวาง จะเห็นว่า ไม่สามารถระบุและแบ่งแยกขอบเขตของเจ็ตออกจากกระแสมวลขวางบริสุทธิ์ได้ ในขณะที่รูปที่ 3.1b แสดงการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมวลขวาง จะเห็นว่าสามารถระบุและแบ่งแยกขอบเขตของเจ็ต

ออกจากกระแสลมขวางบริสุทธิ์ได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ บริเวณที่พบเจ็ต หรือ ส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) นั้นจะมีค่าความเร็ว ($V_{j,x}(\vec{x}, t) \neq 0$) ในขณะที่บริเวณที่พบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ (pure crossflow) จะพบว่าไม่มีค่าความเร็ว ($V_{j,x}(\vec{x}, t) = 0$) ดังนั้นจะสามารถประเมินหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ต หรือ ส่วนผสมของเจ็ต ณ ขณะใด ๆ (instantaneous) ที่ไหลผ่านระนาบตัดขวาง $Q_j(x, t)$ ได้จาก

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

โดย $V_x(\vec{x}, t)$ คือ สนามความเร็วตามแนวแกน streamwise ของของไหลใดๆไม่แยกแยะว่าเป็นของเจ็ตหรือของกระแสลมขวางบริสุทธิ์

$A_j(x, t)$ คือ พื้นที่ของเจ็ต ณ ตำแหน่งระนาบตัดขวาง x และเวลา t ใดๆ

$V_{j,x}(\vec{x}, t)$ คือ ความเร็วของเจ็ตหรือส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) ตามแนวแกน streamwise ที่จุด \vec{x} และเวลา t ใดๆ

และเมื่อนำมาเฉลี่ยเทียบกับเวลาจะได้ดังสมการที่ 3.2 นำไปสู่สูตรส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในที่สุด

3.2 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง

3.2.1 ปัญหาของการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง

กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางมีการศึกษามาบ้างแล้วในอดีต โดยจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ 1) การศึกษาด้วยการทดลอง (experiment) และ 2) การศึกษาด้วยแบบจำลอง (simulation) เช่น Smith and Mungal (1998) ศึกษาเจ็ตในกระแสลมขวางโดยใช้การทดลอง จะชี้แนะจากหลักฐานโดยอ้อมว่าแม้ว่าโครงสร้าง CVP จะเป็นกลไกหลักในการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางที่บริเวณ Far field แต่กลับไม่ทำให้เกิดการผสมที่ดีกว่าเจ็ตอิสระ (Free jet) ในขณะที่การก่อตัวของ CVP ที่บริเวณ Near field ต่างหากที่ทำให้เจ็ตในกระแสลมขวางผสมได้ดีกว่าเจ็ตอิสระ นอกจากนี้ Yuan and Street (1998) และ Yuan et al. (1999) ศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมโดยใช้วิธี Large-eddy simulation (LES) พบว่าเจ็ตในกระแสลมขวางมีกลไกการเหนี่ยวนำการผสมเกิดขึ้นที่ด้านหน้าของเจ็ตบริเวณเดียวกับที่เจ็ตเลี้ยวเบนเข้าสู่กระแสลมขวางโดยโครงสร้าง spanwise rollers หรือ Cortezzi and Karagozian (2001) และ Sau et al. (2004) ศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมโดยใช้วิธี 3-D vortex element simulation และวิธี Direct numerical

simulation ตามลำดับมีความเห็นสอดคล้องกันว่ามีการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมวลของเหลวที่เกิดขึ้นที่ด้านหลังของเจ็ดระหว่างคู่ของโครงสร้าง CVP

อย่างไรก็ตาม การศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมวลของเหลวส่วนใหญ่เป็นการใช้วิธีแบบจำลอง (simulation) จึงขาดหลักฐานจริงที่ได้จากการทดลอง (empirical evidence) และยังไม่สามารถระบุบริเวณที่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมได้ ยิ่งไปกว่านั้นการศึกษาก่อนหน้านี้ของการผสมของเจ็ดในกระแสมวลโดยตรงจากการทดลองในอดีตยังยากอยู่ เนื่องจากไม่สามารถแบ่งแยกขอบเขตของเจ็ดออกจากกระแสมวลของบริสุทธิ์ได้อย่างชัดเจน ทำให้ไม่สามารถหาคุณสมบัติของกระแสมวลของบริสุทธิ์

3.2.2 การวัดความเร็วของสนามการไหลโดยใช้ SPIV และเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ดและในกระแสมวล

เพื่อที่จะศึกษาโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ดและกระแสมวล การเหนี่ยวนำกระแสมวลของบริสุทธิ์โดยเจ็ด ซึ่งจะนำไปสู่ผลการศึกษาก่อนหน้านี้ของการผสมของเจ็ดในกระแสมวลในระนาบตัดขวางการไหล จึงจำเป็นต้องประเมินหาความเร็วของกระแสมวลของบริสุทธิ์ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมวลที่สามารถหาความเร็วของเจ็ด หรือ ส่วนผสมของเจ็ด (jet-fluid mixture) ได้ทั้ง 3 แกน ซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ดได้ ร่วมกับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ดและในกระแสมวล โดยเมื่อพิจารณาทั้ง 2 เทคนิคประกอบกันจะทำให้สามารถแบ่งแยกและประเมินหาความเร็วของทั้งเจ็ดและกระแสมวลของบริสุทธิ์ที่ถูกเหนี่ยวนำโดยเจ็ดซึ่งจะสามารถแสดงโครงสร้าง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ดและกระแสมวล และการเหนี่ยวนำกระแสมวลของบริสุทธิ์โดยเจ็ดได้ โดยงานวิจัยนี้จะแสดงการประเมินหาความเร็วของกระแสมวลของบริสุทธิ์เพื่อให้สามารถศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของกระแสมวลของบริสุทธิ์ได้ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

อย่างไรก็ตามในการประเมินหาความเร็วของกระแสมวลของบริสุทธิ์ จะไม่สามารถหาได้จากการใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในกระแสมวลเท่านั้น ไม่ใส่ในเจ็ด เนื่องจากเมื่อกระแสมวลถูกเหนี่ยวนำเข้ามาผสมกับเจ็ดแล้ว จะผสมจนกระทั่งกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ดไปจนหมด ทำให้ไม่สามารถประเมินหาความเร็วของกระแสมวลของบริสุทธิ์ แต่จะสามารถประเมินหาคุณสมบัติของเจ็ดบริสุทธิ์กับส่วนผสมของกระแสมวลแทน ซึ่งไม่สามารถนำมาช่วยในการศึกษาก่อนหน้านี้ของการผสมในงานวิจัยนี้ ในงานวิจัยนี้จึงนิยามความเร็วของกระแสมวล

ลมขวางบริสุทธิ์เพื่อให้สามารถศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ได้ในหัวข้อถัดไป

3.2.3 การประเมินหาความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ เพื่อศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง

เพื่อที่จะศึกษาโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสลมขวาง การเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์โดยเจ็ต ซึ่งจะนำไปสู่ผลการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบตัดขวางการไหล จำเป็นต้องใช้และต้องจะวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้ง 2 แบบประกอบกัน คือเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ร่วมกับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสลมขวาง แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการทดลองของงานวิจัยนี้ ทำให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลโดยใช้วิธีการใส่อนุภาคทั้ง 2 แบบได้ในเวลาเดียวกัน จึงจำเป็นต้องเก็บข้อมูลในเวลาที่แตกต่างกันหรือคนละ *realizations* ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนิยามผลการทดลองของเทคนิคการใส่อนุภาคแต่ละแบบ หรือ แต่ละ *realization* ดังนี้

- เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ที่ realization ω จะได้ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ต $V_{j,\omega}$
- เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสลมขวาง ที่ realization ω' จะได้ความเร็วเฉลี่ยของของไหลใดๆ $V_{\omega'}$

โดย $V_{\omega'}$ จะสามารถเขียนได้ในรูปของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ต $V_{j,\omega'}$ และความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวาง $V_{cf,\omega'}$ ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{\omega'} &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_{n,\omega'} = \frac{1}{N} \left[\sum_{n_j=1}^{N_j} V_{j,n_j,\omega'} + \sum_{n_{cf}=1}^{N_{cf}} V_{cf,n_{cf},\omega'} \right] \\ &= V_{j,\omega'} + V_{cf,\omega'} \end{aligned} \quad (3.4)$$

โดย $N = N_j + N_{cf}$ ซึ่ง n_j และ N_j คือ ดัชนีและระยะเวลาหรือจำนวนครั้ง (snapshots) ที่พบเจ็ตทั้งหมด และ n_{cf} และ N_{cf} คือ ดัชนีและระยะเวลาหรือจำนวนครั้งที่พบกระแสลมขวางทั้งหมด

เมื่อลบความเร็วของเจ็ตที่ realization ω ออกจากความเร็วของของไหลใดๆที่ realization ω' จะได้

$$V_{\omega'} - V_{j,\omega} = V_{cf,\omega'} + (V_{j,\omega'} - V_{j,\omega}) \quad (3.5)$$

โดยถ้าเจ็ตในกระแสลมขวางมีการไหลคงที่แบบ steady-in-mean และช่วงเวลาที่เก็บข้อมูล นานพอเพียง จะประมาณได้ว่า $V_{j,\omega'} \approx V_{j,\omega}$ จึงทำให้สามารถประมาณหาความเร็วของกระแสลม ขวางบริสุทธิ์ได้จากสมการ

$$V_{cf,\omega'} \approx V_{\omega'} - V_{j,\omega} \quad (3.6)$$

เพื่อให้สะดวกในการกล่าวถึงภายหลังจึงจะเรียกความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ ประมาณจากสมการที่ 3.4 ว่าความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมขวางบริสุทธิ์



บทที่ 4

ชุดการทดลอง และอุปกรณ์การทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงชุดการทดลอง และอุปกรณ์การทดลอง ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) ชุดทดลอง (rig) ประกอบไปด้วย อุโมงค์ลมซึ่งมีพัดลมหอยโข่งที่ทำหน้าที่สร้างกระแสลมขวาง ชุดเจ็ทหลักซึ่งมีพัดลมหอยโข่งของเจ็ทที่ทำหน้าที่สร้างเจ็ท และ 2) เครื่องมือวัด (instrument) ได้แก่ เครื่องมือวัดความเร็ว SPIV

ภาพรวมของการทดลองจะเริ่มต้นโดย กระแสลมขวางจะถูกสร้างขึ้นจากพัดลมหอยโข่งของอุโมงค์ลม และจะไหลผ่านอุโมงค์ลมไปเจอกับเจ็ทหลักซึ่งถูกสร้างขึ้นจากพัดลมหอยโข่งของเจ็ท ที่บริเวณที่ทำการทดลอง (test section) โดยเมื่อเจ็ทพุ่งขึ้นตั้งฉากกับกระแสลมขวาง เจ็ทจะปะทะกับกระแสลมขวางแล้วจะถูกถ่ายภาพที่หน้าตัดใดๆโดยใช้เครื่องมือวัดความเร็ว Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) จากนั้นภาพที่ได้จะนำไปผ่านการคำนวณในโปรแกรมต่างๆ เพื่อหาสนามความเร็ว ณ ขณะเวลาใดๆต่อไป

4.0 พิกัดของการทดลอง

พิกัดที่ใช้ในการทดลองนี้คือพิกัด xyz โดยได้กำหนดจุดเริ่มต้นอยู่ที่ปากทางออกของเจ็ท โดยกำหนดให้แกน x หรือ streamwise เป็นทิศทางเดียวกับความเร็วของกระแสลมขวาง แกน y หรือ transverse เป็นทิศตั้งฉากกับกระแสลมขวางหรือทิศเดียวกับความเร็วที่ออกจากปากเจ็ท และแกน z หรือ spanwise เป็นแกนที่ตั้งฉากกับแกน x และ y ตามกฎมือขวาดังรูปที่ 4.1

4.1 ชุดทดลอง (rig)

4.1.1 ชุดอุโมงค์ (Tunnel)

รูปที่ 4.2 แสดงภาพ Schematic ของอุโมงค์ลมและซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ พัดลมหอยโข่ง (centrifugal blower, รูปที่ 4.3) ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (diffuser) ห้องจัดปรับการไหล (settling chamber) ส่วนลดพื้นที่หน้าตัด (contraction) และหน้าตัดทดสอบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (test section)

การทำงานของอุโมงค์ลมจะเริ่มจากอากาศจะถูกดูดเข้าโดยพัดลมหอยโข่งขนาด 15 กิโลวัตต์ (centrifugal blower ประเภท backward curve airfoil blades) เพื่อสร้างกระแสลมขวางโดยจะควบคุมความเร็วรอบเพื่อปรับความเร็วลมด้วยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้าหรือ inverter (ABBTM

model ACS401002032 ขนาด 50 Hz ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz ในรูปที่ 4.4) จากนั้นอากาศจะไหลผ่านท่อลดแรงสั่นสะเทือน (flexible duct) ไปสู่ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (diffuser) เพื่อลดความเร็วของอากาศ โดยภายในส่วนขยายพื้นที่หน้าตัดจะประกอบด้วยแผ่นเหล็กเจาะรู (perforated plate) 4 แผ่นแต่ละแผ่นห่างกัน 15 เซนติเมตร เพื่อป้องกันการเกิด separation และเพื่อให้อากาศกระจายตัวเต็มที่ในส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด จากนั้นอากาศจะไหลผ่านเข้าสู่ห้องจัดปรับการไหล (settling chamber) ขนาด 100 x 100 ตารางเซนติเมตร ยาว 125 เซนติเมตร ภายในประกอบด้วยตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh x SWG เท่ากับ 4 x 24 และชุดปรับทิศทางการไหล (honeycomb) ที่ทำจากท่อ PVC ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 15 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตรวางตัวเรียงอยู่เต็มหน้าตัดการไหล ถัดจาก honey comb จะมีตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh x SWG เท่ากับ 16 x 18 x 31 7 แผ่น วางห่างกัน 12.6 เซนติเมตร เพื่อปรับทิศทางการไหลและให้อากาศมีความเร็วสม่ำเสมอ จากนั้นอากาศจะไหลไปในส่วนลดพื้นที่หน้าตัด (contraction) มีรูปร่างเส้นโค้งเพื่อเร่งความเร็วของอากาศ เพิ่มความสม่ำเสมอและลดความปั่นป่วนของอากาศก่อนเข้าสู่หน้าตัดทดสอบ (test section) รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 50 x 50 ตารางเซนติเมตร ยาว 240 เซนติเมตร

4.1.2 ชุดหัวเจ็ต (Jet)

ส่วนประกอบของหัวเจ็ตหลัก โดยเจ็ตหลักจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d) เท่ากับ 12.57 มิลลิเมตร โดยการทำงานของเจ็ตหลักจะเริ่มจากอากาศจะถูกดูดเข้าโดยพัดลมความดันสูง 10 แรงม้า (Elprom™) เพื่อที่จะสร้างเจ็ตโดยจะควบคุมความเร็วรอบเพื่อปรับความเร็วลมด้วยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า หรือ inverter (ABB™ model ACS401002032 ขนาด 50 Hz ค่าความละเอียด 0.1 Hz) แล้วส่งผ่านท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ความยาว 367 เซนติเมตร ผ่าน six-jet atomizer (TSI™ model 9306A) สำหรับใส่อนุภาคติดตามการไหล จากนั้นท่อจะถูกลดขนาดลงและต่อตั้งฉากกับท่อ stainless steel ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8 นิ้ว ความยาว 97 เซนติเมตร สู่ปากทางออกเจ็ต โดยท่อ stainless steel นี้มีความยาวเป็น 45 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ตเพื่อให้ได้รูปร่างความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตเป็นการไหลแบบพัฒนาเต็มที่ (fully-developed turbulent pipe flow)

4.2 ชุดเครื่องมือวัดความเร็ว Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV)

ในการทดลองนี้ได้ใช้เครื่องมือวัดความเร็วชนิด Stereo Particle Image Velocimetry (SPIV) ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดความเร็วของของไหลได้ทั้ง 3 แกน คือ streamwise V_x , transverse V_y และ spanwise V_z แต่อย่างไรก็ตาม SPIV จะไม่ได้วัดความเร็วของของไหลได้โดยตรง แต่จะตรวจจับความเร็วของอนุภาคติดตามการไหล (tracer particles) ที่ใส่ไปในของไหลใดๆ จากถ่ายภาพของอนุภาคติดตามการไหลจะสามารถหาระยะทางการเคลื่อนที่ที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลาหนึ่งของอนุภาคติดตามการไหล ทำให้สามารถวัดความเร็วของอนุภาคซึ่งเป็นตัวแทนของความเร็วของของไหลใดๆ ณ ตำแหน่งนั้นได้ โดยรายละเอียดของส่วนประกอบการทำงานของชุด SPIV และการหาค่าความเร็วด้วยโปรแกรม Insight 4G มีดังนี้

4.2.1 ส่วนประกอบและการทำงานของ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV)

รูปที่ 4.5-4.7 แสดงอุปกรณ์ต่างๆของ SPIV ซึ่งมีผู้ผลิตคือบริษัท TSI™ โดยเริ่มจาก

■ ชุดแหล่งกำเนิด

เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ ND:YAG ยี่ห้อ New Wave Research™ (model Solo 200XT กำลังสูงสุด 200 mJ/pulse ที่ความยาวคลื่น 532 nm, รูปที่ 4.5) จะส่งเลเซอร์ผ่านทางแขนส่งเลเซอร์ (Laser Light Arm, model 610015, รูปที่ 4.6) ที่ปลายทางออกของแขนส่งเลเซอร์จะต่ออยู่กับ

Light Sheet Optics (model 610021-SIL ประกอบด้วย เลนส์ cylindrical -25 mm และ เลนส์ spherical +500 mm) เพื่อสร้างระนาบเลเซอร์ (laser sheet) บนระนาบต่างๆ

■ ชุดอุปกรณ์การใส่อนุภาคติดตามการไหล

TSI™ six-jet atomizer (TSI™ model 9306A) จะใส่อนุภาคติดตามการไหล สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้สารละลายกลีเซอรินเป็นอนุภาคติดตามการไหลโดย

- กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมุมขวาง จะใช้ TSI™ six-jet atomizer 1 เครื่อง และสารละลายกลีเซอรินที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 5% โดยปริมาตร
- กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสมุมขวาง ในส่วนของเจ็ตจะใช้ TSI™ six-jet atomizer 1 เครื่อง และสารละลายกลีเซอรินที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 5% โดยปริมาตร และในส่วนของกระแสมุมขวางจะใช้ TSI™ six-jet atomizer 2 เครื่อง และสารละลายกลีเซอรินที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50% โดยปริมาตร

เมื่อละอองของกลีเซอรินที่ถูกฉีดเข้าไปในเจ็ตหรือทั้งในเจ็ตและในกระแสลมขวาง จะไหลผ่าน Laser sheet และกระเจิงแสงสว่างขึ้น แล้วจะถูกถ่ายภาพโดย

▪ ชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพ

กล้อง CCD จำนวนสองตัว (PowerView Plus11MP model 630062 ความละเอียด $4008 \times 2672 \text{ pixel}^2$ ขนาด pixel $9 \times 9 \mu\text{m}^2$, ขนาด CCD $36.07 \times 24.05 \text{ mm}^2$, และไดนามิกเรนจ์ 12 bit, รูปที่ 4.7) โดยในแต่ละระนาบตัดขวาง อาจมีความต้องการ field of view ของการถ่ายภาพต่างกัน ดังนั้นถ้าต้องการ field of view ที่เล็ก ในกรณี $r = 4$ และ $r = 8$ ที่ $x/rd = 0.5$ จะเลือกใช้เลนส์ Tokina™, model 100 mm f2.8D Macro macro ที่มีความยาวโฟกัส 100 mm หรือถ้าต้องการ field of view ที่ใหญ่ขึ้น ในกรณี $r = 12$ และ $r = 8$ ที่ $x/rd = 0.75-1.5$ จะเลือกใช้เลนส์ Nikorn™ 50 mm f1.8D

ทั้งนี้เพื่อให้การถ่ายภาพและการยิงเลเซอร์ทำงานประสานกัน กล้อง เลเซอร์และคอมพิวเตอร์จะถูกเชื่อมต่อกันด้วย อุปกรณ์เชื่อมระบบการทำงาน หรือ synchronizer (model 610035) โดยภาพที่บันทึกได้ด้วยกล้อง 2 ตัวจะถูกนำมาประมวลผลเพื่อหาเป็นเวกเตอร์ความเร็วด้วยโปรแกรม TSI™ Insight 4G

4.2.2 การหาค่าสนามเวกเตอร์ความเร็วโดยโปรแกรม Insight 4G

การทำงานของโปรแกรมเพื่อประมวลผลภาพถ่ายเป็นเวกเตอร์ความเร็วประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ จำนวน 4 ขั้นตอนดังนี้

1. Spatial calibration (Perspective Calibration Process) : การปรับเทียบระยะ ระยะจริงที่ระนาบของวัตถุกับระยะที่เห็นในระนาบของภาพถ่าย โดยจะเทียบกับแผ่นปรับเทียบ (แผ่น Target) กล่าวคือระยะที่เห็นในระนาบของภาพถ่ายขนาด 1 pixel นั้นจะมีขนาดเป็นกี่ mm เมื่อเทียบกับระยะจริงที่ระนาบของวัตถุ
2. Pre-processing : การปรับอัตราส่วนของรูปให้มีระยะจริงต่อ 1 pixel เท่ากันก่อน โดยใช้คำสั่ง Image dewarping เมื่อผ่านกระบวนการนี้แล้วโปรแกรมจะบันทึกผลของภาพทั้ง Frame A และ Frame B ในรูปของไฟล์ .tiff
3. Processing : การคำนวณหาเวกเตอร์จากภาพในแต่ละ frame ทั้งด้านซ้ายและด้านขวา จะได้เป็นภาพเวกเตอร์ความเร็วทางด้านซ้ายและด้านขวา ในรูปแบบไฟล์ .VEC
4. Post-processing : dkigxiup[เทียบภาพเวกเตอร์ความเร็วของภาพทางด้านซ้ายและขวาที่ตำแหน่งเดียวกันของเจ็ตในกระแสลมขวางจะได้สนามความเร็วในรูปแบบไฟล์ .V3D

4.3 สรุปพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองเจ็ตในกระแสมวลในงานวิจัยนี้ทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4, 8 และ 12 ตามลำดับ ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของกระแสมวล (Re_{cf}) เท่ากับ 3,100 และ ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ต (Re_j) เท่ากับ 12,400, 24,800 และ 37,200 ตามลำดับ ที่ระนาบ $x/rd = 0.5, 0.75, 1.0$ และ 1.5 อัตราส่วนความหนาแน่นของเจ็ตต่อกระแสมวล (ρ_j / ρ_{cf}) เท่ากับ 1 มีรูปแบบความเร็วเริ่มต้นที่ปากทางออกของเจ็ตเป็นแบบ Fully-developed turbulent pipe flow ในงานวิจัยนี้ใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ที่ใส่อนุภาคติดตามการไหล 2 เทคนิค คือ 1) การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมวล เพื่อสามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่มาจากเจ็ตเท่านั้น นอกจากนี้เพื่อศึกษาอัตราการเหนี่ยวนำการผสม เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถระบุและแบ่งแยกขอบเขตของเจ็ตจากกระแสมวลบริสุทธิ์ได้อย่างชัดเจน และ 2) การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสมวล เพื่อศึกษาโครงสร้างและปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตกับกระแสมวล โดยเฉพาะอย่างยิ่งนำไปสู่การศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสมวล

นอกจากนี้ยังศึกษาโครงสร้าง และ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตกับกระแสมวล ที่ด้านข้างของเจ็ตในกระแสมวลที่ระนาบ $z/rd = 0$ (centerplane) ซึ่งเป็นจุดประสงค์รองอีกด้วย

ตารางสรุปพารามิเตอร์จะแสดงในภาคผนวก ก

บทที่ 5

อัตราการส่วนเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r ต่ออัตราการส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E ในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมวลขวางที่ $r=4, 8$ และ 12 โดยใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมวลขวาง

5.1 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราการส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมวลขวางบน rd scale

รูปที่ 5.1 แสดงการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E ตามทิศทางการไหลบน rd scale และผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่อการพัฒนาตัวของอัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E ของเจ็ตในกระแสมวลขวางบน rd scale พบว่าที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลแต่ละค่า เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream จะมีค่า E เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ x/rd เดียวกัน เมื่อค่า r เพิ่มขึ้น จะมีค่า E เพิ่มขึ้น แสดงว่าเมื่อพิจารณาบน rd scale เจ็ตในกระแสมวลขวางที่มีค่า r สูง จะมีค่า E สูงกว่าเจ็ตในกระแสมวลขวางที่มีค่า r ต่ำ โดยความสัมพันธ์ระหว่าง E กับ x/rd สามารถ fit ได้ด้วย power law

$$E = 1 + a_E \left(\frac{x}{rd} \right)^{b_E} \quad (5.1)$$

ค่าอัตราการส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของแต่ละอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลบน rd scale และค่าสัมประสิทธิ์ a_E, b_E ของงานวิจัยนี้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1ก-ค

5.2 การเปรียบเทียบผลการศึกษาอัตราการส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกับงานวิจัยที่ผ่านมา

เนื่องจากในอดีตมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาอัตราการส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E ของเจ็ตในกระแสมวลขวางบน rd scale โดยในงานวิจัยนี้ได้รวบรวมผลการศึกษาในอดีตเพื่อเปรียบเทียบและทำให้สามารถแสดงถึงความแม่นยำของการทดลองได้

รูปที่ 5.2 แสดงการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E ตามทิศทางการไหลบน rd scale และผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่อ

อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E บน rd scale จะประกอบด้วยผลการทดลองของงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Wongthongsiri (2015) ซึ่งศึกษาผลของ r ต่อ E ที่ $r = 4, 8$ และ 12 เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ โดยในกรณีของ Wongthongsiri(2015) จะ scaling ด้วย $r^{0.7}$ ตามสมการ

$$\frac{E}{r^{0.7}} = 2.25 \left(\frac{x}{rd} \right)^{0.412} \quad (5.2)$$

และค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ดในกระแสมวลขวางจากผลการทดลองที่ผ่านมา ได้แก่ Witayaprapakorn(2013), Srimekharat (2015), Dawyok(2015), Wongthongsiri(2015), Soupramongkol and Bunyajitradulya (2015), Wangkiat *et al.*(2015), Soupramongkol(2016) และ Tekhuad(2016) พบว่าเมื่อพิจารณาที่ r แต่ละค่า เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream จะมีค่า E เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ x/rd เดียวกัน เมื่อค่า r เพิ่มขึ้น จะมีค่า E เพิ่มขึ้น แสดงว่าเมื่อพิจารณาบน rd scale เจ็ดในกระแสมวลขวางที่มีค่า r สูง จะมีค่า E สูงกว่าเจ็ดในกระแสมวลขวางที่มีค่า r ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี โดยกรณี $r = 4$ พบว่าผลการทดลองของงานวิจัยนี้จะสอดคล้องกับ Wongthongsiri (2015) มากกว่าค่าเฉลี่ยของทุกงานวิจัย โดยมีค่าความแตกต่างสูงสุด (maximum deviation) ประมาณ 12% ของค่าเฉลี่ยของค่า E ที่แต่ละ x/rd จากทั้งสองงานวิจัย ในขณะที่กรณี $r = 8$ และ 12 พบว่าผลการทดลองของงานวิจัยนี้จะสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยของทุกงานวิจัยมากกว่า Wongthongsiri (2015) โดยมีค่าความแตกต่างสูงสุด (maximum deviation) ประมาณ 8% ของค่าเฉลี่ยของค่า E ที่แต่ละ x/rd ของทั้งกรณี $r = 8$ และ 12 ระหว่างผลของการทดลองนี้และค่าเฉลี่ยของทุกงานวิจัย

รูปที่ 5.3 แสดงการพัฒนาตัวของ E ตามทิศทางการไหลบน rd scale และผลของ r ต่อ E บน rd scale ของเจ็ดในกระแสมวลขวางที่ $r = 4, 8$ และ 12 ของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของทุกงานวิจัยที่ผ่านมา โดยจะแสดงทุกจุดข้อมูลของผลการทดลองเพื่อแสดงการกระจายตัวของข้อมูล แสดงว่าเมื่อพิจารณาบน rd scale เจ็ดในกระแสมวลขวางที่มีค่า r สูง จะมีค่า E สูงกว่าเจ็ดในกระแสมวลขวางที่มีค่า r ต่ำ เช่นเดียวกับผลการศึกษาที่ได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ยังพบว่าผลการศึกษาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E บน rd scale ในงานวิจัยนี้และในงานวิจัยที่ผ่านมา มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ที่แสดงถึงการกระจายตัวของข้อมูล และค่าความไม่แน่นอน (Precision uncertainty) ประมาณ 15% อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมดมีความสอดคล้องกันและยังแสดงถึงความแม่นยำ

และความน่าเชื่อถือของผลการทดลองอีกด้วย โดยจะแสดงรายละเอียดในแต่ละกรณีของแต่ละงานวิจัยไว้ที่ตาราง 5.1ก-ค

อย่างไรก็ตามแม้ว่าในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Wongthongsiri (2015) ที่ศึกษาผลของ r ต่อ E ที่ $r = 4, 8$ และ 12 เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ แต่ไม่ได้ศึกษาโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสมขวาง การเหนี่ยวนำกระแสมขวางของเจ็ต และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางในระนาบตัดขวางการไหลดังเช่นงานวิจัยนี้ ซึ่งจะแสดงในบทที่ 6-7

5.3 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมขวางบน d scale

รูปที่ 5.4 แสดงการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E ตามทิศทางการไหลบน d scale และผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่อ E ในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมขวางบน d scale พบว่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลแต่ละค่า เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream จะมีค่า E เพิ่มขึ้น ต่อมาเมื่อพิจารณาที่ x/d เดียวกัน จะสามารถเปรียบเทียบได้ที่ 3 ตำแหน่งคือ

1. ที่ $x/d = 4$ จะตรงกับกรณี $r = 4$ ที่ $x/rd = 1.0$ และ กรณี $r = 8$ ที่ $x/rd = 0.5$
2. พบว่าเมื่อค่า r เพิ่มขึ้น จะมีค่า E ประมาณเท่าเดิม
3. ที่ $x/d = 6$ จะตรงกับกรณี $r = 4$ ที่ $x/rd = 1.5$, กรณี $r = 8$ ที่ $x/rd = 0.75$ และ กรณี $r = 12$ ที่ $x/rd = 0.5$ พบว่าเมื่อค่า r เพิ่มขึ้น จะมีค่า E เพิ่มขึ้น
4. ที่ $x/d = 12$ จะตรงกับกรณี $r = 8$ ที่ $x/rd = 1.5$ และ กรณี $r = 12$ ที่ $x/rd = 1.0$ พบว่าเมื่อค่า r เพิ่มขึ้น จะมีค่า E เพิ่มขึ้น

แสดงว่าเมื่อพิจารณาบน d scale ที่ระยะใกล้ปากทางออกเจ็ต near field แม้ว่าเจ็ตในกระแสมขวางจะมี r สูงขึ้น แต่ค่า E ของเจ็ตในกระแสมขวางจะมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาไปตามแนว downstream ที่ระยะไกลจากปากทางออกเจ็ต far field เจ็ตในกระแสมขวางที่มีค่า r สูง จะมีค่า E สูงกว่าเจ็ตในกระแสมขวางที่มีค่า r ต่ำ แสดงให้เห็นว่าบน d scale ที่บริเวณ near field สามารถ collapse ผลของ r ต่อ E ได้ดีกว่าบน rd scale ซึ่งจะบอกได้ด้วยค่า root sum square (RSS) ต่อค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร \bar{E} ตามสมการ

$$\frac{RSS}{\bar{E}} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left(\frac{E_{i,j} - \bar{E}}{\bar{E}} \right)^2} \quad (5.3)$$

โดย	$E_{i,j}$	คือ	ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรแต่ละกรณี i ที่แต่ละ Cross-plane j
	\bar{E}	คือ	ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรแต่ละ Cross-plane j
	m	คือ	จำนวนจุดข้อมูลในแต่ละ Cross-plane j
	n	คือ	จำนวน Cross-plane

ในกรณีบน rd scale พบว่าค่า RSS ต่อ \bar{E} ของมีค่าประมาณ 1.10 ในขณะที่บน d scale มีค่า RSS ต่อ \bar{E} ประมาณ 0.17 ซึ่งจะชี้แนะว่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E ของเจ็ตในกระแสลมขวางสามารถ collapse ได้ที่บน d scale โดยเฉพาะที่บริเวณ near field โดยความสัมพันธ์ระหว่าง E กับ x/d สามารถ fit ได้ด้วย power law ตามสมการ

$$E = 1 + a_E \left(\frac{x}{d} \right)^{b_E} \quad (5.4)$$

ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของแต่ละอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลบน d scale และค่าสัมประสิทธิ์ a_E, b_E ของงานวิจัยนี้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2

5.4 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตบน rd scale

5.4.1 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อเส้นทางการเดินของเจ็ต

เส้นทางการเดินของเจ็ตจะนิยามจาก center of mass trajectory ของปริมาณ q ใดๆ ตามสมการ

$$y_{cm,q} = \frac{\int_{A_j} y|q|dA}{\int_{A_j} |q|dA} \quad (5.5)$$

เมื่อ $|q|$ แทนขนาดของปริมาณ q

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเส้นทางการเดินของเจ็ตจากปริมาณของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตตามแนวแกน streamwise V_x เนื่องจาก V_x มีความสัมพันธ์ต่อการหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรโดยตรง นอกจากนี้ยังศึกษาเส้นทางการเดินของเจ็ตจากปริมาณของ vorticity เฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ω_x ด้วย เนื่องจากการศึกษาของ Wittayaprapakorn (2013) ชี้แนะว่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรมีความสัมพันธ์กับ circulation ของโครงสร้าง CVP ของเจ็ต ซึ่งสามารถหาได้จาก vorticity ตามแนวแกน streamwise

รูปที่ 5.5 แสดงเส้นทางการเดินของเจ็ตจาก center of mass ของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตตามแนวแกน streamwise V_x และ vorticity เฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ω_x บน rd scale และผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่อการพัฒนาตัวของเส้นทางการเดินของเจ็ตบน rd scale พบว่าที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลแต่ละค่า เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream เส้นทางการเดินของเจ็ต จะสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ x/rd เดียวกัน เมื่อค่า r เพิ่มขึ้น เส้นทางการเดินของเจ็ตจะสูงขึ้นด้วย

จากการศึกษาของ Yuan and Street (1998) เสนอว่าเส้นทางการเดินของเจ็ตจะนิยามได้ด้วยสมการ power law ดังนี้

$$\frac{y_c}{rd} = a_T \left(\frac{x}{rd} \right)^{b_T} \quad (5.6)$$

โดยผลการศึกษาในงานวิจัยนี้จะสามารถ fit curve ได้ด้วยสมการ 5.5 เช่นกัน

แสดงว่าเมื่อพิจารณาบน rd scale เจ็ตในกระแสมวลขวางที่มีค่า r สูง จะมีเส้นทางการเดินของเจ็ตสูงกว่าและมี jet penetration สูงกว่าเจ็ตในกระแสมวลขวางที่มีค่า r ต่ำ ทั้งเส้นทางการเดินเจ็ตของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตตามแนวแกน streamwise V_x และ vorticity เฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ω_x โดยเส้นทางการเดินเจ็ตของ V_x นี้จะแสดง center of mass ของบริเวณมีความเร็วตามแนวแกน streamwise สูง จะสอดคล้องกับบริเวณโครงสร้างรูปไตที่มีของเจ็ต V_x สูงที่จะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 6.3, 7.3 และ 8.3 และเส้นทางการเดินเจ็ตของ ω_x นี้จะแสดง center of mass ของบริเวณมี vorticity เฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ω_x สูง จะสอดคล้องกับบริเวณโครงสร้าง CVP ของเจ็ตที่จะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 6.5, 7.5 และ 8.5

ค่าความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตตามแนวแกน streamwise V_x ของแต่ละอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลบน rd scale และค่าสัมประสิทธิ์ a_T, b_T ของงานวิจัยนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3

จากผลการศึกษาเส้นทางการเดินของเจ็ตจาก 2 ปริมาณในงานวิจัยนี้ พบว่าเส้นทางการเดินเจ็ตของ V_x ที่แสดงบริเวณของโครงสร้างรูปไตที่มีของเจ็ต จะสูงกว่าเส้นทางการเดินเจ็ตของ ω_x ที่แสดงบริเวณของโครงสร้าง CVP ของเจ็ตเสมอ ตลอดแนวการไหลของเจ็ตในกระแสมวลขวาง ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการศึกษาโครงสร้างของเจ็ตทั้งในระนาบตัดขวางการไหลและในระนาบสมมาตรการไหล

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในรูปที่ 5.1 บน rd scale พบว่าที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลแต่ละค่า เมื่อเส้นทางการเดินของเจ็ตสูงขึ้น ค่า E จะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ x/rd เดียวกัน เมื่อเส้นทางการเดินของเจ็ตสูงขึ้น ค่า E จะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด Wall blocking ของ Korn Sri et al. (2009) คือเมื่อค่า r

เพิ่มขึ้น เจ็ตจะมีตำแหน่งสูงขึ้นพิจารณาจากเส้นทางการเดินของเจ็ต ผลจาก Wall blocking จะลดลง ส่งผลให้มีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมมากขึ้น

5.4.2 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อ Circulation

Circulation (Γ) ซึ่งแสดงกำลังของโครงสร้างหมุน Vortex จะนิยามค่าเฉลี่ยต่อเวลาของ circulation ด้วย

$$\Gamma = \int_{A(x)} \omega_{j,x} dA \quad (5.7)$$

โดยที่ $\omega_{j,x}$ คือ vorticity ของเจ็ตเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise เฉลี่ยเทียบกับเวลา และ $A(x)$ พื้นที่บนระนาบตัดขวางการไหล (Cross-plane) ที่ครอบคลุมพื้นที่หน้าตัดของส่วนผสมของเจ็ตตลอดเวลาเก็บข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ศึกษา circulation ของโครงสร้าง CVP ของเจ็ต ที่มีลักษณะเป็นคู่ vortex ที่มีขนาดใกล้เคียงกันและหมุนสวนทางกัน ทำให้ได้ circulation ทั้งที่มีค่าเป็นบวกและลบ อย่างไรก็ตาม การศึกษาค่าสุทธิ circulation ที่มีค่าเข้าใกล้ 0 ไม่สามารถแสดงถึงกำลังของโครงสร้าง CVP ได้ ดังนั้นในวิจัยนี้จะนำผลการศึกษา circulation ไร้มิติที่มีค่าเป็นบวก ($+\Gamma/u_{cf}d$) มาวิเคราะห์เท่านั้น

รูปที่ 5.6 แสดงผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อ circulation ไร้มิติบน rd scale พบว่าที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลแต่ละค่า เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream ค่า circulation จะลดลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ x/rd เดียวกัน เมื่อค่า r เพิ่มขึ้น circulation จะมีค่ามากขึ้น แสดงว่าเมื่อพิจารณาบน rd scale เจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่า r สูง จะมีค่า circulation สูงกว่าเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่า r ต่ำ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในรูปที่ 5.1 บน rd scale พบว่าที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลแต่ละค่า เมื่อค่า r เพิ่มขึ้น ค่า E และ circulation จะเพิ่มขึ้น E แสดงว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น จะมีกำลังของโครงสร้าง CVP ของเจ็ตมากกว่าผลส่งผลให้เจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่า r สูง มี E มากกว่าเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่า r ต่ำ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Wongthongsiri (2014) ที่ได้เสนอว่า circulation สามารถแสดงได้ด้วยสมการ power law ดังนี้

$$\frac{\Gamma}{u_{cf}d} = a_c \left(\frac{x}{rd} \right)^{b_c} \quad (5.8)$$

พบว่าสมการนี้สามารถแสดง circulation ของงานวิจัยนี้ได้ดีและสอดคล้องกับ Wongthongsiri (2014) และค่า circulation และค่าสัมประสิทธิ์ a_c, b_c ของแต่ละกรณีได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.4



บทที่ 6

กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง กรณี $r = 4$

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสมขวาง การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตและกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมขวางกรณี $r = 4$ ที่ $x/rd = 0.5, 0.75, 1.0$ และ 1.5 โดยใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมขวาง ร่วมกับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสมขวาง

6.0 วิธีการแสดงผลการทดลอง

เพื่อศึกษาโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสมขวาง การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ต จนกระทั่งนำไปสู่กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง ในงานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมขวาง ร่วมกับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสมขวาง โดยการแสดงผลการทดลองจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ดังนี้

- (A) ผลการทดลองในกรณีใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมขวาง ซึ่งจะแสดงถึงคุณสมบัติของเจ็ต หรือ ส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) เท่านั้น ไม่รวมคุณสมบัติของกระแสมขวางบริสุทธ์
- (B) ผลการทดลองในกรณีใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสมขวาง ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติของสนามการไหลโดยรวม ไม่มีการแยกแยะว่าคุณสมบัติเป็นของเจ็ตหรือของกระแสมขวาง
- (C) ผลการทดลองในกรณี $C=B-A$ โดยใช้หลักการในบทที่ 3 ตามสมการที่ 3.6 ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติของกระแสมขวางบริสุทธ์ที่ถูกเหนี่ยวนำโดยเจ็ต

ในแต่ละรูปแสดงผลการทดลองจะมีข้อมูลแสดงด้วยกราฟ 3 ลักษณะ คือ

1. Contour surfaces :

- (A) การกระจายตัวของปริมาณเฉลี่ยไร้มิติต่างๆของเจ็ตเท่านั้น ที่ได้จากใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมขวาง
(q_j)

- (B) การกระจายตัวของปริมาณเฉลี่ยไร้มิติต่างๆของของไหลใดๆในระนาบตัดขวางการไหล ไม่แยกแยะว่าเป็นของเจ็ทหรือของกระแสลมขวาง ที่ได้จากใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิค การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ทและในกระแสลมขวาง (q)
- (C) การกระจายตัวของปริมาณเฉลี่ยไร้มิติต่างๆของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เท่านั้น ที่ได้จาก $C=B-A$ ตามสมการที่ 3.6 (q_{cf})

2. **Contour lines** : แสดง Contour lines ของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ท ϕ_j ซึ่งจะซ้อนทับบน contour surfaces โดยจะแสดงค่าความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ทที่ $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75, 0.95$ และ 0.99 จากภายนอกจนถึงภายในตัวเจ็ทตามลำดับ ซึ่งค่าความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ทเหล่านี้มาจากความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของพื้นที่ของเจ็ทและความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ทโดย Bunyajitradulya (2015) พบว่าสามารถแบ่งแยกความแตกต่างของบริเวณที่จะพบเจ็ทในระนาบตัดขวางการไหลจากความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของพื้นที่ของเจ็ทและความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ทออกเป็นช่วงๆ โดยช่วงที่มีความสัมพันธ์ดังกล่าวประมาณเป็นเส้นตรงมี 2 ช่วง คือ ช่วงประมาณ $0 < \phi_j / \phi_{j,max} < 0.01$ และ ช่วงประมาณ $0.25 < \phi_j / \phi_{j,max} < 0.75$ ในกรณี contour line นี้ ทุกรูป (A), (B), (C) และทุกระนาบจะเหมือนกันหมด

3. **In-plane vector plot** : แสดงเวกเตอร์ความเร็วตามแนวแกน transverse และแกน spanwise ในระนาบตัดขวางการไหล ซึ่งจะซ้อนทับบน contour surfaces เพื่อแสดงสนามความเร็วของเจ็ทและของกระแสลมขวางโดยจะแสดงดังนี้

- (A) เวกเตอร์ความเร็วของเจ็ทเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล $\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$
- (B) เวกเตอร์ความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล \vec{V}_{yz} / u_{cf}
- (C) เวกเตอร์ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล ที่ได้จาก $C=B-A$ ตามสมการที่ 3.6 $\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$

6.1 ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลที่จุดใดๆ

ผลการทดลองในกรณีใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ทเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ทำให้สามารถระบุความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ทที่จุดใดๆได้ โดยนิยามตามสมการ

$$\phi_j = \frac{N_j}{N} \quad (6.1)$$

โดยที่ ϕ_j คือ ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ท หรือ ส่วนผสมของเจ็ทที่จุดใดๆ
 N_j คือ ระยะเวลาหรือจำนวนครั้ง (snapshots) ที่พบเจ็ทที่ SPIV สามารถระบุ
 ความเร็วได้
 N คือ ระยะเวลาหรือจำนวนครั้งที่เก็บข้อมูลทั้งหมด

จาก $N = N_j + N_{cf}$ แสดงว่าระยะเวลาหรือจำนวนครั้งทั้งหมด N จะประกอบด้วย
 ระยะเวลาหรือจำนวนครั้งในการพบเจ็ท N_j และระยะเวลาหรือจำนวนครั้งในการพบ
 กระแสลมขวางบริสุทธ์ N_{cf} ทำให้สามารถหาค่าความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ϕ_{cf}
 ซึ่งนิยามด้วย

$$\phi_{cf} = \frac{N_{cf}}{N} \quad (6.2)$$

จากความสัมพันธ์

$$\phi_j + \phi_{cf} = 1 \quad (6.3)$$

(A) ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ทที่จุดใดๆ ϕ_j

รูปที่ 6.1ก (A) contour surface แสดงความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ท ϕ_j พบว่า
 ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ท ϕ_j มีค่าสูง ($\phi_j \approx 1$) ที่บริเวณกลางเจ็ทซึ่งแสดงด้วย contour
 surface สีเหลืองเข้ม เมื่อเริ่มเคลื่อนที่ออกจากกลางเจ็ทไปยังขอบเจ็ท พบว่าความน่าจะเป็นที่จะ
 พบเจ็ทจะลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องเข้าใกล้ 0 ($\phi_j \approx 0$) จนมีค่าเป็น 0 ($\phi_j = 0$) ที่บริเวณกระแสลม
 ขวางบริสุทธ์ด้านนอก แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณกลางเจ็ทเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ท
 สูง ในขณะที่เดียวกันเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางต่ำตามสมการที่ 6.3
 เมื่อเริ่มเคลื่อนที่ออกจากกลางเจ็ทความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ทจะลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องเข้าใกล้ 0
 ($\phi_j \approx 0$) จนมีค่าเป็น 0 ที่บริเวณกระแสลมขวางบริสุทธ์ด้านนอก แสดงว่าเมื่อเริ่มเคลื่อนที่ออก
 จากกลางเจ็ทความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ϕ_{cf} จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเข้า
 ใกล้ 1 จนมีค่าสูงใกล้เคียง 1 ($\phi_{cf} \approx 1$) ที่ขอบเจ็ท

(B) ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบของไหลใดๆ ϕ

รูปที่ 6.1ก (B) contour surface แสดงความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบของไหลใดๆ ϕ
 โดยความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบของไหลใดๆ ϕ คือความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ท ϕ_j หรือพบ

กระแสลมขวางบริสุทธ์ ϕ_{cf} ที่จุดใดๆ ดังนั้นความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบของไหลใดๆ ϕ ควร มีค่าเท่ากับ 1 ($\phi = 1$) ซึ่งแสดงถึงความแน่นอนในการพบของไหลใดๆไม่ว่าจะเป็นเจ็ตหรือกระแส ลมขวาง โดยผลการทดลองรูปที่ 6.1ก (B) พบว่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบของไหลใดๆ ϕ มีค่าใกล้เคียง 1 ($\phi \approx 1$) อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะนาบตัดขวางการไหล ยกเว้นบริเวณด้านล่างใกล้ กับผนังอุโมงค์ลมในทุกกรณีตั้งแต่ upstream จนถึง downstream แสดงให้เห็นว่าการใส่ อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสลมขวางในงานวิจัยนี้นั้นมีความคงตัว (steady) และสม่ำเสมอ (uniform) แต่เนื่องจากการสะท้อนของเลเซอร์บริเวณด้านล่างใกล้กับผนังอุโมงค์ ลมส่งผลให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบของไหลที่จุดใดๆ ϕ บริเวณ ด้านล่างใกล้กับผนังอุโมงค์ลมได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

(C) ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่จุดใดๆ ϕ_{cf}

รูปที่ 6.1ก (C) contour surface แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ที่จุดใดๆ ϕ_{cf} ได้ตามหลักการคล้ายคลึงกับสมการที่ 3.6 ($C=B-A$) พบว่าที่บริเวณกลางเจ็ตความ น่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์มีค่าต่ำ ($\phi_{cf} \approx 0$) ซึ่งแสดงด้วย contour surface สีน้ำ เงิน เมื่อเริ่มเคลื่อนที่ออกจากกลางเจ็ตไปยังขอบเจ็ต พบว่าความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขว างบริสุทธ์จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนมีค่าสูงใกล้เคียง 1 ($\phi_{cf} \approx 1$) ที่บริเวณกระแสลมขวาง บริสุทธ์ด้านนอก แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณกลางเจ็ตเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแส ลมขวางบริสุทธ์ต่ำ ในขณะที่เดียวกันเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตสูงเมื่อเริ่มเคลื่อนที่ ออกจากกลางเจ็ตความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนมีค่าสูง ใกล้เคียง 1 ($\phi_{cf} \approx 1$) ที่กระแสลมขวางใดๆ แสดงว่าเมื่อเริ่มเคลื่อนที่ออกจากกลางเจ็ตความ น่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตจะลดต่ำลง จนมีค่าเป็น 0 ที่ขอบเจ็ต

6.2 สนามความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง

รูปที่ 6.1ก. contour surface แสดงสนามของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวระนาบตัดขวาง ของเจ็ตในกระแสลมขวางประกอบด้วย (A) ของเจ็ต $\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$ (B) ของสนามการไหลในแนวระนาบ ตัดขวาง \bar{V}_{yz} / u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวางบริสุทธ์ $\bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}$

(A) สนามของเวกเตอร์ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในแนวระนาบตัดขวาง $\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$

รูป (A) แสดงสนามของเวกเตอร์ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในแนวระนาบตัดขวาง $\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$ พบว่าความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติ $\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$ แสดงให้เห็นโครงสร้าง counter rotating vortex pair (CVP) เพียงครั้งเดียว ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาจากบริเวณกลางเจ็ตออกไปยังบริเวณขอบเจ็ต พบว่า $\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$ จะลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องเข้าใกล้ 0 จนมีค่าต่ำประมาณ 0 ($\bar{V}_{j,yz} / u_{cf} \approx 0$) ที่ขอบเจ็ตและเป็น 0 ที่กระแสลมขวางใดๆ ซึ่งบริเวณใกล้ขอบของเจ็ตนี้เป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตต่ำ ($\phi_j \approx 0$) ดังนั้นแม้ว่าที่บริเวณขอบเจ็ต ค่าเวกเตอร์ความเร็วของเจ็ตแบบขณะใดๆ ที่เก็บได้อาจมีค่าสูงหรืออาจมีค่าสูงกว่ากระแสลมขวาง แต่เวกเตอร์ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยตามเวลาไร้มิติ $\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$ ที่บริเวณนี้มีค่าต่ำประมาณ 0 เนื่องจากที่บริเวณนี้มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตต่ำ ($\phi_j \approx 0$)

อย่างไรก็ตามเราจะกล่าวถึงโครงสร้าง CVP อย่างชัดเจนอีกครั้งในหัวข้อที่ 6.5 vorticity ของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise $\omega_{j,x} d / u_{cf}$

(B) สนามของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติในแนวระนาบตัดขวาง

$$\bar{V}_{yz} / u_{cf}$$

รูป (B) แสดงสนามของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติในแนวระนาบตัดขวาง \bar{V}_{yz} / u_{cf} พบว่าสามารถเห็นสนามความเร็วที่แสดงถึงโครงสร้าง CVP ที่สามารถพบเห็นได้ในหลายงานวิจัยที่ผ่านมา ในขณะที่ รูป (A) ที่แสดงความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติ $\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$ จะเห็นสนามความเร็วของ CVP ดังกล่าวเพียงครั้งเดียว แสดงว่าสนามความเร็วอีกครั้งหนึ่งของ CVP นั้นเกิดจากส่วนของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ซึ่งจะเห็นส่วนนี้ได้ชัดเจนในรูป (C)

(C) สนามของเวกเตอร์ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติในแนวระนาบ

$$\text{ตัดขวาง } \bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}$$

รูป (C) แสดงสนามของเวกเตอร์ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติในแนวระนาบตัดขวาง $\bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}$ พบว่าสนามความเร็วนี้แสดงถึงโครงสร้างอีกครั้งหนึ่งของ CVP ที่เกิดจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เท่านั้น นอกจากนี้ รูป (C) ยังแสดงถึงการเคลื่อนที่แบบหมุนของกระแสลมขวางที่เกิดจากการเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ต ดังต่อไปนี้

- กระแสลมขวางมีการเคลื่อนที่พุ่งลง (downward motion) จากด้านข้างทั้งสองฝั่งของเจ็ตลงสู่ขอบด้านใต้ของเจ็ตโดยการเหนี่ยวนำของโครงสร้าง CVP ของเจ็ต
- ต่อมากระแสลมขวางจะเคลื่อนที่พุ่งเข้าและพุ่งขึ้น (inward-and-upturn motion) เข้าสู่ทางเข้ารูประฆังคว่ำ (bell-shaped inlet) ของช่องการไหลในแนวตั้ง (ซึ่งจะกล่าวต่อไป)

เมื่อกระแสลมขวางถูกเหนี่ยวนำให้พุ่งขึ้นเข้าสู่ช่องการไหลในแนวตั้งแล้วจะถูกเหนี่ยวนำเข้าผสมกับเจ็ตที่บริเวณระหว่างเส้น contour lines ของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตระหว่าง $\phi_j = 0.01 - 0.75$ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณช่องการไหลในแนวตั้งที่ระหว่างเส้น contour lines $0.25 < \phi_j < 0.75$ จะมีการเหนี่ยวนำการผสมสูงกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของ ϕ_j ต่อระยะทาง ($\nabla \phi_j$) มาก

6.2.1 Converging-Diverging vertical channel

รูป (A) (ดูรูป (B) ประกอบ) แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณกลางเจ็ต ระหว่างคู่ของโครงสร้าง CVP มีการไหลของเจ็ตในทิศพุ่งขึ้นแนวตั้งด้วยความเร็วสูง มีลักษณะเป็นช่อง คอดเข้าแล้วบานออก วางตัวในแนวตั้ง เราจะเรียกบริเวณนี้ว่าช่องการไหลในแนวตั้ง Converging-Diverging (C-D) vertical channel of high upward flow หรือ Vertical channel โดยความเร็วของเจ็ต $\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$ จะไหลเข้า Vertical channel ผ่านทางเข้ารูประฆังคว่ำ หรือ Bell-shaped inlet จากด้านใต้ของเจ็ตซึ่งเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j ต่ำหรือมีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวาง ϕ_{cf} สูง เข้าสู่บริเวณคอดคอด หรือ throat ของ C-D vertical channel ที่กลางเจ็ตซึ่งเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูงใกล้เคียง 1 หรือมีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวาง ϕ_{cf} ต่ำประมาณ 0 นอกจากนี้ยังพบว่า แม้ว่าที่บริเวณทางเข้าของ bell-shaped inlet ซึ่งอยู่บริเวณด้านใต้ของเจ็ตระหว่างเส้น contour lines ของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตระหว่าง $\phi_j = 0.01$ ถึง $\phi_j \approx 0.5$ (ซึ่งเป็นเส้นที่ไม่ได้แสดงไว้) จะมีค่า $\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$ ต่ำ แต่เมื่อพิจารณาขึ้นไปตามแนวของ vertical channel แล้วจะพบว่า $\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$ มีค่าสูงขึ้นและพุ่งขึ้นตั้งฉากกับเส้น contour lines ของ ϕ_j ซึ่งมีค่า ϕ_j คงที่ นอกจากนี้ รูป (C) ยังพบว่าบริเวณทางเข้าของ bell-shaped inlet ที่ส่วน converging ของ vertical channel ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ $\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$ มีลักษณะพุ่งขึ้นตั้งฉากกับเส้น contour lines ของ ϕ_j ซึ่งมีค่า ϕ_j คงที่ เข้าสู่บริเวณที่ ϕ_j สูงตามแนวของ vertical channel เช่นเดียวกับ $\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$

บริเวณช่องการไหลในแนวตั้ง vertical channel ที่มีการไหลของเจ็ตในทิศพุ่งขึ้นแนวตั้ง ด้วยความเร็วสูงนี้ จะมีบทบาทสำคัญต่อกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไปในหัวข้อที่ 6.8

6.2.2 เจ็ตเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน

เมื่อพิจารณารูป (A) ที่แสดงความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติ $\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$ เปรียบเทียบกับรูป (B) ที่แสดงความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติ \bar{V}_{yz} / u_{cf} พบว่าเนื่องจากค่าความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติ \bar{V}_{yz} / u_{cf} เป็นความเร็วของของไหลทั้งหมดคือทั้งของส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) และของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในระนาบตัดขวาง ดังนั้นค่าความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางที่บริเวณขอบโดยรอบของเจ็ตและบริเวณใกล้เคียงในรูป (B) จะสูงกว่า รูป (A)

นอกจากนี้ในรูป (B) สามารถพบเห็นลักษณะการเคลื่อนที่แบบหมุนวน (circular and vortical motion) ที่เกิดขึ้นบริเวณรอบข้างของโครงสร้างคู่หมุนของ CVP ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j ต่ำหรือมีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวาง ϕ_{cf} สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณารูป (C) ซึ่งแสดงความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ $\bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}$ จะเห็นว่าที่บริเวณนี้จะมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวนของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เกิดขึ้นที่ขอบด้านข้างทั้งสองฝั่งและด้านใต้ของเจ็ตอย่างชัดเจนโดย $\bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}$ จะมีทิศพุ่งลง (downward) ในปริมาณที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรูป (A) ต่อมาเมื่อ $\bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}$ พุ่งลงจากด้านข้างทั้งสองฝั่งของเจ็ต (downward) สู่ขอบด้านใต้ของเจ็ตแล้วจะพุ่งเข้า (inward) และพุ่งขึ้น (upturn) เข้าสู่ทางเข้ารูประฆังคว่ำ (bell-shaped inlet) ของช่องการไหลในแนวตั้ง (vertical channel) ระหว่างเส้น contour lines ของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตระหว่าง $\phi_j = 0.01$ ถึง $\phi_j \approx 0.5$ ด้วยความเร็วสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรูป (A)

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากระแสลมขวางที่อยู่บริเวณรอบข้างของเจ็ตถูกเหนี่ยวนำให้มีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน คือ downward- inward-and-upturn โดยเจ็ต ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ตจะเหนี่ยวนำการเคลื่อนที่แบบหมุนวนของกระแสลมขวางบริเวณครึ่งล่างของเจ็ตได้ดีกว่าบริเวณครึ่งบนของเจ็ตโดยพิจารณาจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ $\bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}$ ที่มีค่าสูงกว่าที่บริเวณครึ่งล่างของเจ็ตในรูป (C)

6.2.3 บริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมสูง

รูป (C) ประกอบกับรูป (A) แสดงให้เห็นว่าเมื่อกระแสลมขวางบริสุทธิ์ถูกเหนี่ยวนำให้มีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน พุ่งลง-พุ่งเข้า-และ-พุ่งขึ้น ปริมาณตั้งฉากกับเส้นความน่าจะเป็นที่จะ

พบเจ็ต ϕ_j คงที่ เข้าสู่ตัวเจ็ตผ่านช่องการไหลในแนวตั้ง Converging-Diverging (C-D) vertical channel ที่ด้านล่าง จากบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ϕ_{cf} สูงแล้ว จะเริ่มไหลจากส่วน Converging ของช่องการไหลในแนวตั้งเข้าไปถึงส่วน Diverging ของช่องการไหลในแนวตั้งที่กลางเจ็ต โดยจะพบว่าในส่วน converging นี้ ความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ϕ_{cf} จะลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อพิจารณาที่ระหว่างเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่ ประมาณ $0.25 < \phi_j < 0.75$ ของส่วน Converging นี้ จะพบว่า เป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของ ϕ_j ต่อระยะทาง $(\nabla \phi_j)$ สูง แสดงว่าเกิดการเหนี่ยวนำการผสมสูงที่บริเวณนี้ ตั้งแต่ในส่วน Converging ของช่องการไหลในแนวตั้งแล้ว และจะผสมเกือบเสร็จสิ้นแล้วที่บริเวณนี้ ทำให้เมื่อของไหลไหลไปถึงบริเวณ throat ของช่องการไหลในแนวตั้งที่กลางเจ็ตตรงกับบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูง ($\phi_j \approx 0.95 - 0.99$) ของไหลจะกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) จนเกือบหมดแล้ว

เพื่อที่จะระบุบริเวณที่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมสูงในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสลมขวาง ในงานวิจัยนี้จึงคำนวณปริมาณ $(\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}) \cdot (d\nabla \phi_j)$ ซึ่งแสดงถึงความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลไปในทิศทางเดียวกับทิศทางการลดลงของความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ $((\vec{V}_{cf} / u_{cf}) \cdot (d\nabla \phi_{cf}) < 0)$ หรือทิศทางการเพิ่มขึ้นของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต $((\vec{V}_{cf} / u_{cf}) \cdot (d\nabla \phi_j) > 0)$ ผ่านเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่ จะแสดงในรูปที่ 6.4 พบว่ามี $(\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}) \cdot (d\nabla \phi_j)$ สูงที่ด้านล่างระหว่างเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่ ประมาณ $0.25 < \phi_j < 0.75$ โดยจะมี local peaks 3 บริเวณเรียงกันที่ด้านล่างของเจ็ต โดย local peak ที่อยู่ตรงกลางจะมีค่าสูงสุด แสดงว่าเป็นบริเวณที่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมสูงสุด สอดคล้องกับบริเวณที่มี $\nabla \phi_j$ สูง ในส่วน Converging ของช่องการไหลในแนวตั้ง

เนื่องจากการใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหล 2 แบบ คือ 1) เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ร่วมกับ 2) เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสลมขวาง ซึ่งได้กล่าวถึงไปแล้วในแสดงผลการทดลองรูป (A)-(C) ทำให้สามารถสรุปผลการทดลองที่สำคัญได้ดังต่อไปนี้

1. **Contributions:** สนามความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในแนวระนาบตัดขวาง $\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$ และสนามความเร็วเฉลี่ยไร้มิติของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนวระนาบตัดขวาง $\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$ ประกอบกันเป็นสนามความเร็วที่แสดงถึงโครงสร้าง CVP ในสนามความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติในแนวระนาบตัดขวาง \vec{V}_{yz} / u_{cf} ($B=A+C$)

2. ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสลมขวาง (Jet-and-Crossflow interactions): โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน พุ่งลง-พุ่งเข้า-และ-พุ่งขึ้น (downward- inward-and-upturn) จากขอบเจ็ตเข้าสู่ตัวเจ็ตที่ด้านใต้ (รูป (C))
3. การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment): กระแสลมขวางบริสุทธิ์ถูกเหนี่ยวนำโดยเจ็ตเข้าไปในส่วนคอขวด converging ของช่องการไหลในแนวตั้ง (vertical channel) ที่อยู่ระหว่างเส้น contour lines ตั้งแต่ ϕ_j ต่ำถึง $\phi_j < 0.75-0.95$ จนกระทั่งเข้าไปถึงบริเวณ throat ของ vertical channel ที่อยู่ระหว่างเส้น contour lines ของ $\phi_j \approx 0.95-0.99$ แสดงว่าที่บริเวณ throat ของ vertical channel กระแสลมขวางจะถูกเหนี่ยวนำและผสมเข้ากับเจ็ตจนกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) จนเกือบหมดแล้ว สรุปได้ว่าส่วน converging ของ vertical channel มีการเหนี่ยวนำการผสมสูงและจะผสมเกือบเสร็จสิ้นแล้วที่บริเวณนี้ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของ ϕ_j ต่อระยะทาง ($\nabla\phi_j$) ที่ระหว่างเส้น contour lines $0.25 < \phi_j < 0.75$ สูง และสอดคล้องกับบริเวณที่มี $(\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}) \cdot \nabla\phi_j$ สูง แสดงว่ามีอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่ตัวเจ็ตผ่านเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่สูงที่บริเวณนี้อีกด้วย

6.3 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise

รูปที่ 6.1x contour surface แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise ประกอบไปด้วย (A) ของเจ็ต $V_{j,x} / u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_x / u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,x} / u_{cf}$

(A) ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x} / u_{cf}$

รูป (A) แสดงความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x} / u_{cf}$ จะพบโครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure) ที่ $V_{j,x} / u_{cf}$ มีค่าสูงและบริเวณอ่าว (Gulf region) ที่ $V_{j,x} / u_{cf}$ มีค่าต่ำ

**โครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure) ของบริเวณที่ $V_{j,x}/u_{cf}$ สูงและบริเวณ
อ่าว (Gulf region) ที่มี $V_{j,x}/u_{cf}$ ต่ำ**

รูป (A) แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x}/u_{cf}$ มีค่าสูงนั้นมีรูปร่างคล้ายกับรูปไต (Kidney-shaped structure) หรือรูปตัวอักษร U กลับหัว (Inverse U shaped) ในขณะที่บริเวณที่ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x}/u_{cf}$ มีค่าต่ำอยู่ด้านใต้ของโครงสร้างรูปไตมีลักษณะเป็นเหมือนอ่าว (Gulf region) ปากอ่าวเปิดสู่ด้านใต้ของเจ็ตและพื้น วางตัวในแนวตั้ง transverse และถูกโอบล้อมทั้งด้านบนและด้านข้างด้วยแขนทั้งสองข้างของโครงสร้างรูปไต โดยโครงสร้างรูปไตและบริเวณอ่าวจะเชื่อมต่อกันด้วยขอบชายฝั่งของอ่าวที่อยู่ใต้โครงสร้างรูปไต เนื่องจากทั้งสองโครงสร้างนี้มีบทบาทสำคัญต่อกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง เราจึงจะนิยามโครงสร้างอย่างชัดเจนในหัวข้อนี้เพื่อให้สามารถอ้างอิงถึงได้ในภายหลัง

- บริเวณที่ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x}/u_{cf}$ มีค่าสูงนั้นมีรูปร่างคล้ายกับรูปไต (Kidney-shaped structure) หรือรูปตัวอักษร U กลับหัว (Inverse U shaped) แม้ว่าในหลายงานวิจัยที่ผ่านมา “โครงสร้างรูปไต” หรือ “Kidney-shaped structure” เคยถูกใช้ในการอธิบายรูปร่างของปริมาณต่างๆที่มีลักษณะคล้ายรูปไต ตัวอย่างเช่น passive scalar concentration หรือ รูปร่างของความเร็วอื่นๆ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะนิยาม “โครงสร้างรูปไต” หรือ “Kidney-shaped structure” ตัวย่อ K-S อย่างชัดเจนว่าเป็นบริเวณที่ $V_{j,x}/u_{cf}$ มีค่าสูง นอกจากนี้พบว่าโครงสร้างรูปไต จะวางตัวอยู่ในแนวเส้น contour lines ระหว่าง $0.75 < \phi_j < 0.99$
- บริเวณที่ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x}/u_{cf}$ มีค่าต่ำนั้นมีลักษณะเป็นเหมือนอ่าว (Gulf region) โดยในงานวิจัยนี้จะนิยาม “โครงสร้างรูปอ่าว” หรือ “Gulf region” ตัวย่อ G-R อย่างชัดเจนว่าเป็นบริเวณที่ $V_{j,x}/u_{cf}$ มีค่าต่ำ

(B) ความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise V_x/u_{cf}

รูป (B) แสดงความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise V_x/u_{cf} พบว่าที่บริเวณโครงสร้างรูปอ่าว G-R ยังคงมีความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise V_x/u_{cf} ต่ำอยู่ จึงสรุปได้ว่าที่บริเวณอ่าวเป็นบริเวณที่มีค่าความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise ต่ำโดยรวม

(C) ความเร็วของกระแสลมขวางเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{cf,x} / u_{cf}$

รูป (C) (ดูรูป (B) ประกอบ) แสดงความเร็วของกระแสลมขวางเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{cf,x} / u_{cf}$ พบว่าที่บริเวณเหนือโครงสร้างรูปไต ที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j ต่ำ ($\phi_j < 0.25$) หรือมีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวาง ϕ_{cf} สูงจะมีค่าความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยตามแนว streamwise ต่ำกว่าความเร็วของกระแสลมขวาง u_{cf} ($V_{cf,x} / u_{cf} < 1$) ซึ่งชี้แนะได้ว่ากระแสลมขวางจะถูกลดความเร็วลงเมื่อปะทะกับเจ็ตที่บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (windward region)

6.4 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse

รูปที่ 6.1c contour surface แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse ประกอบไปด้วย (A) ของเจ็ต $V_{j,y} / u_{cf}$ (B) ของช่องไหลใดๆ V_y / u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,y} / u_{cf}$

(A) ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y} / u_{cf}$

รูป (A) แสดงความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y} / u_{cf}$ พบว่ามีโครงสร้างของความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y} / u_{cf}$ 2 บริเวณ คือ 1) บริเวณที่มีค่า $V_{j,y} / u_{cf}$ เป็นบวกที่กลางเจ็ต มี local peak ของค่าบวก 2 peaks วางตัวเรียงกันในแนวตั้ง (transverse) โดย positive local peak บริเวณบนจะตรงกับโครงสร้างรูปไต ในรูปที่ 6.1x (A) ในขณะที่ positive local peak บริเวณล่างจะประมาณได้ว่าตรงกับส่วนคอตัดเข้า converging ของช่องการไหลในแนวตั้ง (vertical channel) และตรงกับกึ่งกลางของสนามความเร็วของโครงสร้าง CVP จะเห็นได้ชัดเจนในรูป (B) และ 2) บริเวณที่ $V_{j,y} / u_{cf}$ มีค่าเป็นลบขนาดเล็ก 2 บริเวณ วางตัวอยู่ที่ทั้งสองข้างของบริเวณที่ $V_{j,y} / u_{cf}$ มีค่าเป็นบวกและมี local peak ของค่าลบ 2 peaks อยู่ในตำแหน่งระดับเดียวกับกับ positive local peak บริเวณล่าง

(B) ความเร็วของช่องไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse V_y / u_{cf} และ

(C) ความเร็วของกระแสลมขวางเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{cf,y} / u_{cf}$

รูป (B) และ (C) แสดงความเร็วของช่องไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse V_y / u_{cf} และความเร็วของกระแสลมขวางเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{cf,y} / u_{cf}$ ผล

การทดลองแสดงถึงกระแสลมขวางถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตให้มีความเร็วในแนว transverse พุ่งลง (ติดลบ) ที่บริเวณด้านข้างของเจ็ต โดยจะเห็นได้ชัดเจนในรูป (C)

6.5 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise

รูปที่ 6.1ง. contour surface แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise ประกอบไปด้วย (A) ของเจ็ต $V_{j,z}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_z/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,z}/u_{cf}$

(A) ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise $V_{j,z}/u_{cf}$

รูป (A) แสดงความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise $V_{j,z}/u_{cf}$ พบโครงสร้างความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise $V_{j,z}/u_{cf}$ 2 คู่ คู่ซ้ายและคู่ขวา แต่ละคู่จะประกอบไปด้วย lobe 2 lobes ที่มีเครื่องหมายและขนาดที่ต่างกัน โดยที่ lobe บนจะมีขนาดใหญ่กว่า lobe ล่าง สำหรับเครื่องหมายของแต่ละ lobe จะสอดคล้องกับทิศทางการหมุนวนของโครงสร้าง CVP ของเจ็ต คือจะมีทิศทางพุ่งออกจากเจ็ต (ระนาบสมมาตร) ด้านบนแล้วพุ่งเข้าเจ็ตที่ด้านล่าง โดยจากเครื่องหมายที่แตกต่างกันนี้ทำให้เกิดโครงสร้างอานม้า (Saddle point) ที่กลางเจ็ต หรือ จุดที่ lobe ทั้ง 4 บรรจบกัน

(B) ความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise V_z/u_{cf} และ

(C) ความเร็วของกระแสลมขวางเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise $V_{cf,z}/u_{cf}$

รูป (B) และ (C) แสดงความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise V_z/u_{cf} และความเร็วของกระแสลมขวางเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{cf,z}/u_{cf}$ ผลการทดลองแสดงถึงการที่กระแสลมขวางถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตให้มีความเร็วในแนว spanwise ตามทิศทางการหมุนวนของ CVP โดยจะเห็นได้ชัดเจนในรูป (C)

6.6 vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise

รูปที่ 6.1จ. contour surface แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของ vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise ประกอบไปด้วย (A) ของเจ็ต $\omega_{j,x}d/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆในแนวระนาบตัดขวาง $\omega_x d/u_{cf}$ และ (C) ของกระแสลมขวาง $\omega_{cf,x}d/u_{cf}$

(A) vorticity ของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $\omega_{j,x}d/u_{cf}$

รูป (A) แสดง vorticity ของเจ็ตเฉลิยไรมิติตตามแนวแกน streamwise $\omega_{j,x}d/u_{cf}$ พบ โครงสร้าง counter rotating vortex pairs 3 คู่ ที่แตกต่างกันทั้งขนาด รูปร่างและเครื่องหมาย ดังนี้ 1) โครงสร้างคู่หลักหรือคู่ที่ 1 ที่เป็นโครงสร้างที่เห็นเป็นหลักของ vorticity ของเจ็ตเฉลิยไรมิติตตามแนวแกน streamwise $\omega_{j,x}d/u_{cf}$ จะเรียกว่าเป็นโครงสร้าง CVP ของเจ็ต (Jet-CVP) ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกำลังที่สุด รูปร่างคล้ายจุลภาคกลับหัว (inverse comma) วางตัวในแนวตั้ง transverse บริเวณกลางเจ็ต และมีค่าสูงสุดของ $\omega_{j,x}d/u_{cf}$ (magnitude of normalized streamwise vorticity) อยู่ที่บริเวณหัวของ commas ทั้งสอง ต่อมาเมื่อพิจารณาโครงสร้าง vortex คู่ที่ 2) และคู่ที่ 3) พบว่ามีขนาดและรูปร่างเล็กกว่า CVP ของเจ็ต โดยคู่ที่สองจะมีขนาดใหญ่กว่าคู่ที่สาม วางตัวอยู่ด้านใต้และมีเครื่องหมายตรงข้ามกับเครื่องหมายของ CVP ของเจ็ต ในขณะที่ vortex คู่ที่สาม ที่มีขนาดเล็กที่สุดนั้น วางตัวอยู่ในช่องบริเวณเหนือหัวของรูปร่าง commas ของ CVP ของเจ็ต โดยสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากงานของ Bunyajitradulya (2015) อย่างไรก็ตามเราจะพบโครงสร้าง vortex คู่ที่สามเฉพาะที่บริเวณใกล้ปากทางออกของเจ็ตมาก หรือ $x/rd = 0.5$ ของกรณี $r = 4$ เท่านั้น เช่นเดียวกันกับงานของ Wongthongsiri (2015) ต่อมาเมื่อเจ็ตพัฒนาไปตาม downstream พบว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ตยังคงอยู่ในขณะที่โครงสร้าง vortex คู่อื่น ๆ นั้น ค่อยๆลดค่าลงและสลายไป

(B) vorticity ของของไหลใดๆเฉลิยไรมิติตตามแนวแกน streamwise $\omega_x d/u_{cf}$ และ

(C) vorticity ของกระแสมขวางเฉลิยไรมิติตตามแนวแกน streamwise $\omega_{cf,x}d/u_{cf}$

รูป (B) และ (C) แสดง vorticity ของของไหลใดๆเฉลิยไรมิติตตามแนวแกน streamwise $\omega_x d/u_{cf}$ และ vorticity ของกระแสมขวางเฉลิยไรมิติตตามแนวแกน streamwise $\omega_{cf,x}d/u_{cf}$ พบโครงสร้าง vortex ของกระแสมขวาง 2 คู่ ที่บริเวณใต้โครงสร้าง CVP ของเจ็ต ดังนี้ 1) โครงสร้าง vortex ของกระแสมขวางคู่แรกจะมีเครื่องหมายเหมือนกันกับ CVP ของเจ็ตอยู่ที่บริเวณเส้น contour lines $0.25 < \phi < 0.75$ ซึ่งชี้แนะได้ว่ามาจากโครงสร้าง Wake vortices ของกระแสมขวาง เนื่องจากมีเครื่องหมายสอดคล้องกัน และจะวางตัวอยู่บน 2) โครงสร้าง vortex ของกระแสมขวางคู่ที่สอง ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าและมีเครื่องหมายตรงข้ามอยู่ที่บริเวณเส้น contour lines $0.01 < \phi < 0.25$ ซึ่งชี้แนะได้ว่ามาจากโครงสร้าง Horseshoe vortices ของกระแสมขวาง เนื่องจากมีเครื่องหมายสอดคล้องกัน

6.7 ความสัมพันธ์ของโครงสร้างของปริมาณต่างๆของเจ็ตในกระแสมขวาง

รูปที่ 6.2 แสดงการกระจายตัวของปริมาณไร้มิติต่างๆ กรณี $r = 4$ ที่ $x/rd = 0.75$ เพื่อให้สามารถเห็นความสัมพันธ์ของโครงสร้างของปริมาณต่างๆของเจ็ตในกระแสมขวางได้งายขึ้น โดยความสัมพันธ์ของโครงสร้าง CVP ของเจ็ต กับความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลและความเร็วของเจ็ตในกระแสมขวาง มีดังนี้

1. พบว่าบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูงในรูป a จะอยู่ตรงกับบริเวณกึ่งกลางโครงสร้างของคู่ CVP ของเจ็ต (Jet-CVP) ในรูป e เหนือบริเวณหัวของรูปจุลภาคเล็กน้อย
2. พบว่าโครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure) ในรูป b จะวางตัวอยู่บริเวณส่วนหางรูปร่างจุลภาคของโครงสร้าง CVP ของเจ็ตในรูป e ระหว่างเส้น contour lines $0.75 < \phi_j < 0.95 - 0.99$ เป็นเหมือนส่วนต่อเชื่อมทางของรูปร่างจุลภาคของ CVP เข้าด้วยกัน
3. พบว่าโครงสร้างอานม้า (Saddle point) ของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise V_z / u_{cf} ในรูป d อยู่บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้าง CVP ของเจ็ตในรูป e ที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูงในรูป a (ตามข้อ 1)

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของโครงสร้าง CVP ของเจ็ต กับสนามความเร็วเฉลี่ยไร้มิติและความเร็วของเจ็ตในกระแสมขวาง ยังแสดงว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ตเป็นตัวเหนี่ยวนำและส่งเสริมช่องการไหลในแนวตั้ง (vertical channel) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีของไหลพุ่งขึ้นเข้าสู่ใจกลางเจ็ตปริมาณมาก ดังนี้

4. พบว่า positive local peak บริเวณล่างของความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y} / u_{cf}$ ในรูป c อยู่ตรงกับช่องการไหลในแนวตั้ง ซึ่งช่องการไหลในแนวตั้งนี้วางตัวอยู่ที่กึ่งกลางของโครงสร้างของคู่ CVP ของเจ็ตในรูป e นอกจากนี้ยังพบว่า negative local peaks ทั้งสองของ $V_{j,y} / u_{cf}$ วางตัวอยู่ที่ด้านข้างทั้งสองของ CVP โดยจะเห็นว่า positive local peak บริเวณล่าง, vertical channel และ negative local peaks ทั้งสองวางตัวเรียงกันตามแนว spanwise และที่สำคัญคือมีทิศทางสอดคล้องกับการหมุนของ CVP อีกด้วย
5. ต่อมาพิจารณารูปที่ 6.1ค (A) และ 6.1จ (A) เมื่อเจ็ตพัฒนาจาก upstream ไป downstream พบว่า CVP ของเจ็ต, positive local peak บริเวณล่างของ $V_{j,y} / u_{cf}$ และช่องการไหลในแนวตั้งยังคงอยู่ ในขณะที่ positive local peak บริเวณบนของ $V_{j,y} / u_{cf}$ ที่อยู่ตรงกับโครงสร้างรูปไตจะค่อยๆสลายตัวไป

จากหลักฐานทั้งหมดนี้ชี้แนะว่าช่องการไหลในแนวตั้ง (vertical channel) และ positive local peak บริเวณล่างของความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y} / u_{cf}$ ที่มีทิศพุ่งขึ้นแนวตั้งด้วยความเร็วสูงถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นและขับเคลื่อนให้คงอยู่ไปได้ตลอดตามทิศทางการไหลด้วยโครงสร้าง CVP ของเจ็ต ในทางตรงกันข้าม positive local peak บริเวณบนที่อยู่ตรงกับโครงสร้างรูปไตของความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise สูงที่ไม่มีกลไกในการเหนี่ยวนำให้คงอยู่ได้ตลอดจะค่อยๆสลายไปเมื่อเจ็ตพัฒนาไปตามแนว downstream ชี้แนะว่าเกิดจาก momentum เริ่มต้นในแนว transverse ของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ตที่คงเหลืออยู่

6.8 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง

เนื่องด้วยผลการทดลองที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 6.1-6.7 โดยรวบรวมไว้ในรูปที่ 6.2 จึงนำมาสู่การสร้างโมเดลของกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมขวาง โดยมีโครงสร้าง CVP ของเจ็ตเป็นโครงสร้างสำคัญในกลไกการเหนี่ยวนำการผสม ดังนี้

1. โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำให้กระแสมขวางมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน

ในรูปที่ 6.2 เมื่อพิจารณาสนามความเร็วของกระแสมขวางเฉลี่ยไร้มิติ $V_{cf,yz} / u_{cf}$ ในรูป (C) (ดูรูป (B) ประกอบ) พบว่ากระแสมขวางบริสุทธิ์ที่ด้านข้างทั้งสองของเจ็ตถูกโครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำให้กระแสมขวางมีการเคลื่อนที่พุ่งลง-พุ่งเข้าและ-พุ่งขึ้น (downward-inward-and-upturn) เข้าสู่ทางเข้ารูประฆังคว่ำ (bell-shaped inlet) ของช่องการไหลในแนวตั้ง (Converging-Diverging vertical channel) ที่ขอบด้านใต้ของเจ็ต

นอกจากนี้จากรูป e สามารถสรุปได้ว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ตเป็นโครงสร้างหลักของกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมขวางที่เหนี่ยวนำการเคลื่อนที่แบบหมุนวนของกระแสมขวางเข้าสู่ช่องการไหลในแนวตั้ง

2. โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำการไหลพุ่งขึ้นผ่านช่องการไหลในแนวตั้ง และบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมเข้มข้น

ต่อมากระแสมขวางบริสุทธิ์ที่บริเวณขอบด้านใต้ของเจ็ตและบริเวณรอบทางเข้ารูประฆังคว่ำจะถูกเหนี่ยวนำเข้าผสมอย่างต่อเนื่องเข้าสู่เจ็ตในรูป (C) จากบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j ต่ำผ่านส่วนคอคอดเข้า converging ของช่องการไหลในแนวตั้ง โดยเมื่อพิจารณา

ช่วง $0.25 < \phi_j < 0.75$ ที่ตรงกับส่วน converging นี้ จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของ ϕ_j ต่อระยะทาง ($\nabla\phi_j$) สูงในรูป (A) และยังมี $(\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}) \cdot (d\nabla\phi_j)$ สูงในรูปที่ 6.4 แสดงว่าการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าผสมกับตัวเจ็ตนั้น จะเกิดและเสร็จสิ้นเกือบสมบูรณ์แล้วตั้งแต่ในบริเวณนี้ ทำให้เมื่อของไหลไหลถึงส่วน throat ของช่องการไหลในแนวตั้งที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูง หรือ $\phi_j > 0.95$ ของไหลจะกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) เกือบหมดแล้วในรูป a

3. การเหนี่ยวนำการผสมที่คล้ายเจ็ตอิสระ (Free-jet) โดยโครงสร้างรูปไต

หลังจากที่กระแสลมขวางบริสุทธิ์บริเวณขอบด้านใต้ของเจ็ตและบริเวณทางเข้ารูปประฆังคว่ำถูกเหนี่ยวนำเข้าผสมในรูป (C) จนกระทั่งกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) เกือบหมดแล้วที่บริเวณ throat ของช่องการไหลในแนวตั้งที่ตรงกับบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูงในรูป (A) ของ a ซึ่งตรงกับบริเวณอ่าว (gulf region) ของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x} / u_{cf}$ ต่ำในรูป b ส่วนผสมของเจ็ตที่มี $V_{j,x} / u_{cf}$ ต่ำบริเวณอ่าวนี้ จะถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่โครงสร้างรูปไตของเจ็ตเองซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x} / u_{cf}$ สูง ที่โอบล้อมอยู่เหนือบริเวณอ่าวในรูป (A) ของ b โดยการเหนี่ยวนำการผสมในลักษณะนี้จะคล้ายคลึงกับการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (Free-jet)

ดังนั้น จึงสามารถสรุปเป็นกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางได้ดังรูปที่ 6.3

บทที่ 7

กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวาง กรณี $r = 8$ และ 12

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ดและกระแสมขวาง และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ดในกระแสมขวางกรณี $r = 8$ และ 12 ที่ $x/rd = 0.5, 0.75, 1.0$ และ 1.5 โดยใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมขวาง ร่วมกับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ดและในกระแสมขวาง นอกจากนี้ยังกล่าวถึงส่วนที่เหมือนและแตกต่างกับกรณี $r = 4$ ที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 6 อีกด้วย

7.1 ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลที่จุดใดๆ

รูปที่ 7.1ก และ รูปที่ 7.4ก แสดงความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ กรณี $r = 8$ และ 12 ตามลำดับ พบว่าเช่นเดียวกับกรณี $r = 4$ กล่าวคือที่บริเวณกลางเจ็ดเป็นบริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ด ϕ_j สูง ($\phi_j \approx 1$) และเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสมขวางบริสุทธิ์ ϕ_{cf} ต่ำ ($\phi_{cf} \approx 0$) โดยเมื่อเริ่มเคลื่อนที่ออกจากกลางเจ็ด ϕ_j จะลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง จนมีค่าเป็น 0 ที่ขอบเจ็ดและเมื่อเริ่มเคลื่อนที่ออกจากกลางเจ็ดความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสมขวางบริสุทธิ์ ϕ_{cf} จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนมีค่าสูงใกล้เคียง 1 ($\phi_{cf} \approx 1$) ที่ขอบเจ็ด (รูป (A) และ (C)) นอกจากนี้พบว่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบของไหลใดๆ ϕ มีค่าใกล้เคียง 1 ($\phi \approx 1$) อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะนาบตัดขวางการไหล แสดงว่าการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ดและในกระแสมขวางในการทดลองนี้นั้นมีความคงตัว (steady) และสม่ำเสมอ (uniform) อย่างไรก็ตามเช่นเดียวกับกรณี $r = 4$ จะไม่สามารถเก็บข้อมูลบริเวณด้านล่างใกล้กับผนังอุโมงค์ลมได้เนื่องจากการสะท้อนของเลเซอร์บริเวณนั้น (รูป B)

รูปที่ 7.7ก แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/rd = 0.75$ พบว่าค่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดสูงสุด $\phi_{j,max}$ ของกรณี $r = 8$ และ 12 (รูป (A)) มีค่าน้อยกว่า $\phi_{j,max}$ ของกรณี $r = 4$ แสดงว่าเจ็ดในกระแสมขวางกรณี $r = 8$ และ 12 มีความปั่นป่วนและไม่คงตัว (unsteady) สูงกว่าในกรณี $r = 4$

7.2 สนามความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมขวาง

รูปที่ 7.1ก และ รูปที่ 7.4ก แสดงสนามของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสมขวาง กรณี $r = 8$ และ 12 ตามลำดับ พบว่าเช่นเดียวกับกรณี $r = 4$ กล่าวคือสนามความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติ $\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$ และสนามความเร็วเฉลี่ยไร้มิติของกระแสมขวางบริสุทธิ์ $\bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}$ จะประกอบกันเป็นสนามความเร็วที่แสดงถึงโครงสร้าง CVP ในสนามความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติ \bar{V}_{yz} / u_{cf} ($B=A+C$)

นอกจากนี้โครงสร้าง CVP ของเจ็ตจะเหนี่ยวนำให้กระแสมขวางมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวนในรูป (C) เข้าไปในช่องการไหลในแนวตั้ง (vertical channel) แล้วจะผสมเข้ากับเจ็ตจนกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) จนเกือบหมดที่บริเวณ throat ของช่องการไหลในแนวตั้ง โดยที่ระหว่างเส้น contour lines $0.25 < \phi_j < 0.75$ ที่อยู่ตรงกับส่วนคอตัดเข้า converging ของช่องการไหลในแนวตั้งจะมีการเปลี่ยนแปลงของ ϕ_j ต่อระยะทาง $(\nabla \phi_j)$ สูง (รูป A) และสอดคล้องกับบริเวณที่มี $(\bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}) \cdot (d\nabla \phi_j)$ สูงที่แสดงว่ามีอัตราการไหลของกระแสมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่ตัวเจ็ตผ่านเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่สูง แสดงว่ามีการเหนี่ยวนำการผสมสูงและจะผสมเกือบเสร็จสิ้นแล้วที่ส่วน converging นี้ในรูปที่ 7.3 และ 7.6 เช่นเดียวกับกรณี $r = 4$

รูปที่ 6.4, 7.3 และ 7.6 แสดงบริเวณที่มีการไหลของกระแสมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ตผ่านเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่บน d scale กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาประกอบกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E เมื่อ r เพิ่มขึ้นในบทที่ 5 เราจึงสามารถอภิปรายความสัมพันธ์ของ r กับ E จาก $(\bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}) \cdot (d\nabla \phi_j)$ ได้ในบทที่ 9

7.3 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise

รูปที่ 7.1ข และ 7.4ข แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise กรณี $r = 8$ และ 12 ตามลำดับ พบว่าเช่นเดียวกับกรณี $r = 4$ กล่าวคือจะพบ “โครงสร้างรูปไต” หรือ “Kidney-shaped structure” ที่เป็นบริเวณที่ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x} / u_{cf}$ มีค่าสูง และจะพบ “โครงสร้างรูปอ่าว” หรือ “Gulf region” ที่เป็นบริเวณที่ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x} / u_{cf}$ มีค่าต่ำ (รูป (A)) โดยพบว่าที่บริเวณอ่าวจะมีค่าความเร็วตามแนวการไหลต่ำทั้งในเจ็ตและในกระแสมขวาง ((A) - (C)) นอกจากนี้พบว่าที่บริเวณเหนือโครงสร้างรูปไตจะมีค่าความเร็วของกระแสมขวางเฉลี่ยไร้มิติน้อยกว่า 1 ($V_{cf,x} / u_{cf} < 1$) (รูป (C)) ซึ่งชี้แนะได้ว่ากระแสมขวางจะถูกลดความเร็วลงเมื่อปะทะเข้ากับเจ็ตที่บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (windward region)

รูปที่ 7.7 ข แสดงการเปรียบเทียบกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/rd = 0.75$ พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x}/u_{cf}$ ของโครงสร้างรูปไตจะวางตัวที่ตำแหน่งสูงขึ้น และแขนของโครงสร้างรูปไตจะหดสั้นลง

7.4 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse

รูปที่ 7.1 ค และ 7.3 ค แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse กรณี $r = 8$ และ 12 ตามลำดับ พบว่าเช่นเดียวกับกรณี $r = 4$ กล่าวคือจะมีโครงสร้างของความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y}/u_{cf}$ 2 บริเวณ คือ 1) บริเวณที่มีค่า $V_{j,y}/u_{cf}$ เป็นบวกที่กลางเจ็ต มี local peak ของค่าบวก 2 peak วางตัวเรียงกันในแนวตั้ง transverse โดย positive local peak บริเวณบนจะตรงกับโครงสร้างรูปไตในรูปที่ 7.1 ข และ 7.4 ข ในขณะที่ positive local peak บริเวณล่างจะประมาณได้ว่าตรงกับส่วนคอตเข้า converging ของช่องการไหลในแนวตั้ง (vertical channel) และตรงกับกึ่งกลางของสนามความเร็วของโครงสร้าง CVP (รูป (A) และจะเห็นอย่างชัดเจนในรูป (B)) และ 2) บริเวณที่ $V_{j,y}/u_{cf}$ มีค่าเป็นลบขนาดเล็กที่ทั้งสองข้างของบริเวณที่ $V_{j,y}/u_{cf}$ มีค่าเป็นบวก มี local peak ของค่าลบ 2 peaks อยู่ที่แต่ละข้างของบริเวณที่ $V_{j,y}/u_{cf}$ มีค่าลบ วางตัวตามแนว spanwise อยู่ในตำแหน่งระดับเดียวกันกับ positive local peak บริเวณล่าง นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงถึงการที่กระแสลมขวางถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตให้มีความเร็วในแนว transverse พุ่งลง (ติดลบ) ที่บริเวณด้านข้างของเจ็ต (รูป (B) และ (C))

รูปที่ 7.7 ค แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/rd = 0.75$ พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น ค่าความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y}/u_{cf}$ สูงสุดที่บริเวณกลางเจ็ตจะวางตัวที่ตำแหน่งสูงขึ้น

7.5 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise

รูปที่ 7.1 ง. และ 7.4 ง. แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise กรณี $r = 8$ และ 12 ตามลำดับ พบว่าเช่นเดียวกับกรณี $r = 4$ กล่าวคือจะมีโครงสร้างหลักของ $V_{j,z}/u_{cf}$ สามารถแบ่งได้เป็น 2 คู่ คู่ซ้ายและคู่ขวา แต่ละคู่จะประกอบไปด้วย lobe 2 lobes ที่มีเครื่องหมายและขนาดที่ต่างกัน โดยที่ lobe บนจะมีขนาดใหญ่กว่า lobe ล่าง โดย

แต่ละ lobe จะมีเครื่องหมายสอดคล้องกับทิศทางการหมุนวนของโครงสร้าง CVP ของเจ็ต คือจะมีทิศทางพุ่งออกจากเจ็ต (ระนาบสมมาตร) ด้านบนแล้วพุ่งเข้าเจ็ตที่ด้านล่าง โดยจากเครื่องหมายที่แตกต่างกันนี้ทำให้เกิดโครงสร้าง鞍鞍 (Saddle point) ที่กลางเจ็ต หรือ จุดที่ lobe ทั้ง 4 บรรจบกัน (รูป (A) และ (B)) นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงถึงการที่กระแสลมลมขวางถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตให้มีความเร็วในแนว spanwise ตามทิศทางการหมุนของ CVP (รูป (C))

รูปที่ 7.7 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/rd = 0.75$ พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น ค่าสูงสุดของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise แต่ละ r มีขนาดใกล้เคียงกัน

7.6 vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise

รูปที่ 7.1จ. และ 7.4จ. แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของ vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise กรณี $r = 8$ และ 12 ตามลำดับ

รูปที่ 7.7จ แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของ vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/rd = 0.5$ ด้วยแถบสี (color bar) ที่แตกต่างกันไปในแต่ละค่า r โดยในกรณี $r = 4$ แถบสีจะอยู่ในช่วง $[-2, 2]$ และในกรณี $r = 8$ และ 12 แถบสีจะอยู่ในช่วง $[-1, 1]$ เพื่อให้สามารถเห็นโครงสร้างของ vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise ในแต่ละ r ได้ยังอย่างชัดเจน พบว่าแตกต่างจากกรณี $r = 4$ คือจะพบโครงสร้าง counter rotating vortex pairs 2 คู่ แตกต่างกันทั้งขนาด รูปร่างและเครื่องหมายดังนี้ 1) โครงสร้างคู่หลักหรือคู่ที่ 1 ที่เป็นโครงสร้างที่เห็นเป็นหลักของ vorticity ของเจ็ตไร้มิติตามแนวแกน streamwise $\omega_{j,x}d/u_{cf}$ จะเรียกว่าเป็นโครงสร้าง CVP ของเจ็ต (Jet-CVP) ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกำลังสูงที่สุด รูปร่างคล้ายจุลภาคกลับหัว (inverse comma) วางตัวในแนวตั้ง transverse บริเวณกลางเจ็ต และมีค่าสูงสุดของขนาดของ $\omega_{j,x}d/u_{cf}$ (magnitude of normalized streamwise vorticity) อยู่ที่บริเวณหัวของจุลภาคทั้งสอง ต่อมาเมื่อพิจารณาโครงสร้าง vortex คู่ที่ 2) มีขนาดและรูปร่างเล็กกว่า CVP ของเจ็ต วางตัวอยู่ด้านใต้และมีเครื่องหมายตรงข้ามกับเครื่องหมายของ CVP ของเจ็ต ในขณะที่ กรณี $r = 4$ พบโครงสร้าง counter rotating vortex pairs 3 คู่ ต่อมาเมื่อเจ็ตพัฒนาไปตาม downstream พบว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ตยังคงอยู่ในกรณี $r = 8$ และ 12 ในขณะที่โครงสร้าง vortex คู่ที่ 2 นั้น ค่อยๆลดค่าลงและสลายไปเช่นเดียวกับการสลายตัวของโครงสร้าง vortex คู่อื่นๆในกรณี $r = 4$ ในรูปที่ 6.1ง (A), 7.1จ (A) และ 7.4จ (A)

นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปที่ 7.7จ (C) จะพบโครงสร้าง vortex ของกระแสลมขวางเพียง 1 คู่ที่มีเครื่องหมายของทิศทางการหมุนเดียวกับโครงสร้าง CVP ของเจ็ต อยู่บริเวณใต้ของโครงสร้าง

CVP ของเจ็ตระหว่างเส้น contour lines $0.25 < \phi_j < 0.75$ ซึ่งชี้แนะว่ามาจากโครงสร้าง Wake vortices ของกระแสลมขวาง เนื่องจากมีเครื่องหมายของทิศทางการหมุนสอดคล้องกัน ในขณะที่กรณี $r = 4$ พบโครงสร้าง vortex ของกระแสลมขวาง 2 คู่ โดยจะกล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 6.6

นอกจากนี้ รูปที่ 7.5ฉ แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของ vorticity ของเจ็ตเฉลี่ย ไร้มิติตามแนวแกน streamwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/rd = 0.75$ ด้วยแถบสี (color bar) เดียวกัน พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น ค่าสูงสุดของ vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise จะลดลง แสดงว่าบน rd scale เจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่า r สูง vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise จะลดลงเร็วกว่าเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่า r ต่ำ

7.7 ความสัมพันธ์ของโครงสร้างของปริมาณต่างๆของเจ็ตในกระแสลมขวาง

รูปที่ 7.2 และ 7.5 แสดงการกระจายตัวของปริมาณไร้มิติต่างๆ กรณี $r = 8$ และ 12 ที่ $x/rd = 0.5$ เพื่อให้สามารถเห็นความสัมพันธ์ของโครงสร้างของปริมาณต่างๆของเจ็ตในกระแสลมขวางได้ง่ายขึ้น พบว่าความสัมพันธ์ของโครงสร้าง CVP ของเจ็ต กับความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลที่จุดใดๆ, สนามความเร็วเฉลี่ยไร้มิติและความเร็วของเจ็ตในกระแสลมขวาง สอดคล้องกับกรณี $r = 4$ กล่าวคือบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูงและโครงสร้างอานม้า (Saddle point) ของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise V_z/u_{cf} จะอยู่ตรงกับบริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างของคู่ CVP ของเจ็ต (Jet-CVP) (รูป a, d และ e) ในขณะที่โครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure) จะอยู่ตรงกับบริเวณส่วนหางของโครงสร้าง CVP ของเจ็ต (รูป d และ e)

นอกจากนี้ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y}/u_{cf}$ มีบริเวณที่มีค่าบวกและค่าลบที่สอดคล้องกับทิศทางการหมุนของ CVP (รูป c และ e) ต่อมาเมื่อเจ็ตพัฒนาจาก upstream ไป downstream ช่องการไหลในแนวตั้ง (vertical channel) และ positive local peak บริเวณล่างของ $V_{j,y}/u_{cf}$ ที่อยู่ตรงกับกึ่งกลางของโครงสร้างคู่ CVP ของเจ็ตยังคงอยู่ แสดงว่า vertical channel และ positive local peak บริเวณล่างของ $V_{j,y}/u_{cf}$ ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นและขับเคลื่อนให้คงอยู่ไปได้ตลอดตามทิศทางการไหลด้วยโครงสร้าง CVP ของเจ็ต ในขณะที่ positive local peak บริเวณบนที่อยู่ตรงกับโครงสร้างรูปไตที่ไม่มีกลไกในการเหนี่ยวนำให้คงอยู่ได้ตลอดจะค่อยๆสลายไปเมื่อเจ็ตพัฒนาไปตามแนว downstream ชี้แนะว่าเกิดจาก momentum เริ่มต้นในแนว transverse ของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ตที่คงเหลืออยู่ในรูปที่ 7.1ค (A), 7.1จ (A) และ 7.4ค (A), 7.4 (A)

7.8 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง

เนื่องด้วยผลการทดลองที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 7.1-7.7 โดยรวบรวมไว้ในรูปที่ 7.2 และ 7.5 จึงนำมาสู่การสร้างโมเดลของกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยมีโครงสร้าง CVP ของเจ็ตเป็นโครงสร้างสำคัญในกลไกการเหนี่ยวนำการผสม ดังนี้

1. โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางมีการเคลื่อนที่แบบหมุน

พบว่าเช่นเดียวกับกรณี $r = 4$ กล่าวคือเมื่อพิจารณาในรูปที่ 7.2 และ 7.5 สนามความเร็วของกระแสลมขวางเฉลี่ยไร้มิติ $V_{cf,yz} / u_{cf}$ (รูป (C) และ ดูรูป (B) ประกอบ) พบว่ากระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ด้านข้างทั้งสองของเจ็ตถูกโครงสร้าง CVP ของเจ็ตที่เป็นโครงสร้างหลักของกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง (รูป e) เหนี่ยวนำทำให้กระแสลมขวางมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวนในทิศพุ่งลง-พุ่งเข้าและ-พุ่งขึ้น (downward-inward-and-upturn) เข้าสู่ทางเข้ารูประฆังคว่ำ (bell-shaped inlet) ของช่องการไหลในแนวตั้ง (Converging-Diverging vertical channel) ที่ขอบด้านใต้ของเจ็ต

2. โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำการไหลพุ่งขึ้นผ่าน vertical channel และบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมเข้มข้น

พบว่าเช่นเดียวกับ กรณี $r = 4$ กระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่บริเวณขอบด้านใต้ของเจ็ตและบริเวณรอบทางเข้ารูประฆังคว่ำจะถูกเหนี่ยวนำเข้าผสมอย่างต่อเนื่องเข้าสู่เจ็ต (รูป (C)) จากบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j ต่ำผ่านส่วนคอตัดเข้า converging ของช่องการไหลในแนวตั้ง โดยเมื่อพิจารณาช่วง $0.25 < \phi_j < 0.75$ ที่ตรงกับส่วน converging นี้ จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของ ϕ_j ต่อระยะทาง $(\nabla \phi_j)$ สูง (รูป (A)) และยังมี $(\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}) \cdot (d\nabla \phi_j)$ สูง (รูปที่ 7.3 และ 7.6) แสดงว่าการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าผสมกับตัวเจ็ตนั้น จะเกิดและเสร็จสิ้นเกือบสมบูรณ์แล้วตั้งแต่ในบริเวณนี้ ทำให้เมื่อของไหลไหลถึงส่วน throat ของช่องการไหลในแนวตั้งที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูง หรือ $\phi_j > 0.95$ ของไหลจะกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) เกือบหมดแล้ว (รูป a)

3. การเหนี่ยวนำการผสมที่คล้ายเจ็ตอิสระ (Free-jet) โดยโครงสร้างรูปไต

หลังจากที่กระแสลมขวางบริสุทธิ์ถูกเหนี่ยวนำจนกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) เกือบหมดแล้วที่บริเวณ throat ของช่องการไหลในแนวตั้งซึ่งตรงกับบริเวณอ่าว (gulf region) ของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x} / u_{cf}$ ต่ำ (รูป b) ส่วนผสมของ

เจ็ตที่มี $V_{j,x}/u_{cf}$ ต่ำบริเวณอ่าวนี้ จะถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่โครงสร้างรูปไตของเจ็ตเองซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x}/u_{cf}$ สูง ที่โอบล้อมอยู่เหนือบริเวณอ่าว (รูป (A) ของ b) โดยจะคล้ายคลึงกับการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (Free-jet) เช่นเดียวกับ กรณี $r = 4$

ดังนั้น จึงสามารถสรุปเป็นกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมขวางของทั้งกรณี $r = 8$ และ 12 ที่สอดคล้องกับกรณี $r = 4$ ได้ว่าเจ็ตในกระแสมขวางที่มีค่า $r = 4, 8$ และ 12 มีกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลในลักษณะเดียวกัน ดังรูปที่ 6.3



บทที่ 8

กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางในระนาบสมมาตรการไหล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลศึกษาโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสมขวาง การเหนี่ยวนำการผสมขวางโดยเจ็ต และโดยเฉพาะกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางในระนาบสมมาตรการไหลที่กรณี $r = 4, 8,$ และ 12 ซึ่งเป็นจุดประสงค์รองในงานวิจัยนี้ โดยใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิค (A) การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมขวางซึ่งจะได้คุณสมบัติของเจ็ต และส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) เท่านั้น ไม่รวมรวมกระแสมขวาง ร่วมกับเทคนิค (B) การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสมขวางซึ่งจะได้คุณสมบัติของของไหลใดๆในระนาบสมมาตรการไหล ไม่แบ่งแยกระหว่างเจ็ตและกระแสมขวาง และจะใช้หลักการ $(C)=(B)-(A)$ ในการประมาณหาคุณสมบัติของกระแสมขวางบริสุทธิ์ที่ถูกเหนี่ยวนำโดยเจ็ตในระนาบสมมาตรการไหล โดยจะมีวิธีการแสดงผลการทดลองตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.0 โดยจะเริ่มพิจารณากรณี $r = 4$ ในหัวข้อที่ 8.1-8.7 และกรณี $r = 8, 12$ ในหัวข้อที่ 8.8

8.1 ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลที่จุดใดๆ กรณี $r = 4$

(A) ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ ϕ_j

รูปที่ 8.1ก (A) contour surface แสดงความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ต ϕ_j พบว่าความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j มีค่าสูง ที่บริเวณกลางเจ็ตซึ่งแสดงด้วย contour surface สีเหลือง เมื่อเริ่มเคลื่อนที่ออกจากกลางเจ็ตไปยังขอบเจ็ต พบว่าความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตจะลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง จนมีค่าเป็น 0 ($\phi_j = 0$) ที่บริเวณกระแสมขวางบริสุทธิ์ด้านนอก สอดคล้องกับผลการทดลองในระนาบตัดขวางในหัวข้อที่ 6.1 และ 7.1

นอกจากนี้ยังพบข้อสังเกตหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j ในระนาบสมมาตรของงานวิจัยนี้ กับผลการศึกษา Passive scalar concentration ของ Smith and Mungal (1998) (รูปที่ 6) พบว่าเส้น contour ของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j ที่ ϕ_j คงที่ไม่เป็นเส้นปิด ในขณะที่เส้น contour ของ Passive scalar concentration นั้นจะเป็นเส้นปิด เนื่องจากเมื่อเจ็ตพัฒนาไปตามแนว downstream แล้ว concentration จะลดลงแตกต่างกับความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ต ϕ_j ที่จะไม่ลดลงตามแนว streamwise

(B) ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบของไหลใดๆ ϕ

รูปที่ 8.1ก (B) contour surface แสดงความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบของไหลใดๆ ϕ ในทางทฤษฎีความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบของไหลใดๆ ϕ ควรค่าเท่ากับ 1 ($\phi=1$) ซึ่งแสดงถึงความแน่นอนในการพบของไหลใดๆไม่ว่าจะเป็นเจ็ตหรือกระแสลมขวาง โดยผลการทดลองรูปที่ 8.1ก (B) พบว่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบของไหลใดๆ ϕ มีค่าใกล้เคียง 1 ($\phi \approx 1$) อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะนาบตัดขวางการไหล แสดงให้เห็นว่าการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสลมขวางในงานวิจัยนี้นั้นมีความคงตัว (steady) และสม่ำเสมอ (uniform)

(C) ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่จุดใดๆ ϕ_{cf}

รูปที่ 8.1ก (C) contour surface แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่จุดใดๆ ϕ_{cf} พบว่าที่บริเวณกลางเจ็ตความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์มีค่าต่ำ ($\phi_{cf} \approx 0$) ซึ่งแสดงด้วย contour surface สีน้ำเงิน เมื่อเริ่มเคลื่อนที่ออกจากกลางเจ็ตไปยังขอบเจ็ต พบว่าความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเข้าใกล้ 1 จนมีค่าสูงใกล้เคียง 1 ($\phi_{cf} \approx 1$) ที่บริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ด้านนอกซึ่งจะเป็นส่วนเติมเต็มของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ต ϕ_j

8.2 สนามความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางกรณี $r = 4$

รูปที่ 8.1ก. แสดงสนามของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางประกอบด้วย (A) ของเจ็ต $\vec{V}_{j,xy} / u_{cf}$ (B) ของสนามการไหลในระนาบสมมาตร \vec{V}_{xy} / u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ $\vec{V}_{cf,xy} / u_{cf}$

(A) สนามของเวกเตอร์ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตร $\vec{V}_{j,xy} / u_{cf}$

รูป (A) แสดงสนามของเวกเตอร์ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตร $\vec{V}_{j,xy} / u_{cf}$ จะพบสนามความเร็วของเจ็ตและส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) ใน 2 ลักษณะ ได้แก่ 1) ที่บริเวณด้านหน้า (Windward) จะพบสนามความเร็วที่แสดงถึงโครงสร้าง Spanwise rollers ที่มาจากเจ็ตและส่วนผสมของเจ็ตเพียงครึ่งหนึ่ง หรือ ครึ่งล่าง ไม่รวมส่วนที่เกิดจากกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่เป็นครึ่งบน (จะเห็นได้ชัดเจนในรูป (C)) (อย่างไรก็ตามเราจะกล่าวถึงโครงสร้าง Spanwise rollers อย่างชัดเจนอีกครั้งในหัวข้อที่ 8.5 vorticity ของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise $\omega_{j,z} d / u_{cf}$) และ 2) ที่บริเวณด้านหลัง (Leeward) จะพบสนาม

ความเร็วของเจ็ตที่ถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตให้มีทิศทางพุ่งจากด้านล่างเข้าสู่กลางเจ็ตในแนวตั้ง โดยยังพบว่า $\vec{V}_{j,xy} / u_{cf}$ จะลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องเข้าใกล้ 0 จนเป็น 0 ที่กระแสลมขวางบริสุทธ์ใดๆ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตต่ำ ($\phi_j \approx 0$)

จากผลการศึกษาทำให้สามารถแบ่งบริเวณของเจ็ตโดยสังเขปได้ 2 บริเวณ คือ

- 1) **Kidney-shaped region** : จะอยู่ที่ด้านหน้า Windward ของเจ็ต ตรงกับบริเวณที่พบสนามความเร็วที่แสดงถึงโครงสร้าง Spanwise rollers เป็นโครงสร้าง ณ ขณะใดๆ (instantaneous structure) โดยเมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยจะปรากฏเป็นโครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure) ซึ่งจะมีลักษณะ คล้ายเจ็ตอิสระที่ถูกเบนให้โค้งไปตามแนวการไหล (จะเห็นอย่างชัดเจนจากสนามความเร็วในรูป 8.1ข(A))
- 2) **Counter rotating vortex pair (CVP) region** : จะอยู่ที่ด้านหลัง Leeward และล่างของเจ็ต ตรงกับบริเวณที่พบสนามความเร็วของเจ็ตที่มีทิศทางพุ่งจากด้านล่างเข้าสู่กลางเจ็ตในแนวตั้ง ที่ถูกเหนี่ยวนำโดย CVP (จะเห็นอย่างชัดเจนจากสนามความเร็วในรูป 8.1ข(A))

(B) สนามของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตร \vec{V}_{xy} / u_{cf}

รูป (B) แสดงสนามของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตร \vec{V}_{xy} / u_{cf} จะพบสนามความเร็วที่แสดงถึงโครงสร้าง Spanwise rollers ที่สมบูรณ์ (เต็มเต็มจากรูป (A)) และยังพบว่าสนามความเร็วของของไหลใดๆที่อยู่ไกลจากเจ็ตในบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ϕ_{cf} สูง จะมีความเร็วในแนวแกน streamwise เท่านั้นซึ่งจะสอดคล้องกับความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่จะมีสนามความเร็วในแนว streamwise เท่านั้น จะเห็นได้ชัดเจนในรูป (C)

(C) สนามของเวกเตอร์ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์เฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตร

$$\vec{V}_{cf,xy} / u_{cf}$$

รูป (C) แสดงสนามของเวกเตอร์ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์เฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตร $\vec{V}_{cf,xy} / u_{cf}$ จะพบสนามความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ด้าน Windward ที่แสดงถึงสนามความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง Spanwise rollers อีกครั้งหนึ่ง หรือ ครึ่งบน ที่เป็นส่วนเติมเต็มจากรูป (A) แสดงให้เห็นว่ากระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ด้าน Windward จะถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่โดยโครงสร้าง Spanwise rollers

นอกจากนี้ยังพบสนามความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ด้าน Leeward และด้านล่างที่ถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตให้มีทิศทางพุ่งจากบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ϕ_{cf} สูงเข้าสู่ตัวเจ็ตในแนวตั้ง

8.2.1 การเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธ์ของเจ็ต

จากผลการศึกษาจะพบการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธ์โดยเจ็ต 2 บริเวณซึ่งสอดคล้องกับการแบ่งบริเวณของเจ็ตอย่างหยาบที่กล่าวมาแล้ว โดยจะพิจารณาการเกิดการเหนี่ยวนำการผสมกระแสลมขวางบริสุทธ์ของเจ็ตจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ไหลไปในทิศทางเดียวกับทิศทางการเพิ่มขึ้นของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ($(\vec{V}_{cf} / u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$) หรือทิศทางการลดลงของความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ($(\vec{V}_{cf} / u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j < 0$) โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาจากความเร็วเฉลี่ย

1. การเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธ์ของเจ็ตที่ด้าน Windward

รูป (C) พบว่าเมื่อพิจารณา $(\vec{V}_{cf,x} / u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ แสดงว่ามีการเหนี่ยวนำการผสมกระแสลมขวางบริสุทธ์เกิดขึ้นจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว streamwise แต่เมื่อพิจารณา $(\vec{V}_{cf,y} / u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j < 0$ หรือ $(\vec{V}_{cf,y} / u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ แสดงว่าจะไม่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมขึ้นจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว tranverse ที่ด้าน Windward และเมื่อพิจารณาร่วมกับสนามความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยโครงสร้าง Spanwise rollers จะสรุปได้ว่าที่ด้าน Windward มีการเหนี่ยวนำการผสมเกิดขึ้นในระนาบสมมาตรจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว streamwise $\vec{V}_{cf,x} / u_{cf}$ เท่านั้น โดยโครงสร้าง Spanwise rollers ซึ่งจะสอดคล้องกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ด้าน Windward โดย Spanwise rollers ของ Yuan and Street (1998) และ Yuan *et al.* (1999)

2. การเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธ์ของเจ็ตที่ด้าน Leeward

เช่นเดียวกันกับการพิจารณาที่ด้าน Windward ในรูป (C) พบว่าเมื่อพิจารณา $(\vec{V}_{cf,y} / u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ แสดงว่ามีการเหนี่ยวนำการผสมกระแสลมขวางบริสุทธ์เกิดขึ้นจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว transverse แต่ในขณะที่เมื่อพิจารณา $(\vec{V}_{cf,x} / u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j \approx 0$ แสดงว่าจะไม่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมขึ้นจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว streamwise ที่ด้าน Leeward และเมื่อพิจารณาร่วมกับ

สนามความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP จะสรุปได้ว่าที่ด้าน Leeward มีการเหนี่ยวนำการผสมเกิดขึ้นในระนาบสมมาตรจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ตามแนว transverse $\bar{V}_{cf,y} / u_{cf}$ เท่านั้น โดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ต ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสลมขวางโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตที่พบในงานวิจัยนี้ซึ่งนำเสนอในบทที่ 6-7

8.3 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise กรณี $r = 4$

รูปที่ 8.1x contour surface แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise ประกอบไปด้วย (A) ของเจ็ต $V_{j,x} / u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_x / u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ $V_{cf,x} / u_{cf}$

(A) ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x} / u_{cf}$

รูป (A) แสดงความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x} / u_{cf}$ จะพบความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน streamwise $V_{j,x} / u_{cf}$ ที่มีค่าสูงที่ด้าน Windward ของเจ็ตในระนาบสมมาตร ซึ่งจะสอดคล้องกับโครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure) ของเจ็ตที่มี $V_{j,x} / u_{cf}$ สูงที่พบในระนาบตัดขวางการไหล (หัวข้อที่ 6.3 และ 7.3) เมื่อเจ็ตพัฒนาไปตามแนว downstream แล้ว ยังคงพบความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน streamwise อยู่ แต่ค่า magnitude จะลดลงซึ่งสอดคล้องกับการสลายตัวของโครงสร้างรูปไตที่พบในระนาบตัดขวาง

นอกจากนี้ยังพบบริเวณที่มีความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน streamwise ต่ำวางตัวอยู่ด้านใต้โครงสร้างรูปไตที่มีความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน streamwise สูง ซึ่งบริเวณที่มีความเร็วตามแนวแกน streamwise ต่ำในระนาบสมมาตรนี้จะสอดคล้องกับโครงสร้างรูปอ่าว (Gulf region) ของเจ็ตที่มี $V_{j,x} / u_{cf}$ ต่ำที่พบในระนาบตัดขวางการไหล นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง $x / rd = 0.25$ พบความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน streamwise ที่มีค่าเป็นลบที่อ่าวซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wongthongsiri (2015) และ Dowyok (2015)

(B) ความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise V_x / u_{cf}

รูป (B) แสดงความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise V_x / u_{cf} พบว่าบริเวณโครงสร้างรูปไตที่มี $V_{j,x} / u_{cf}$ สูง และบริเวณอ่าวที่มี $V_{j,x} / u_{cf}$ ต่ำในรูป (A) ยังคงปรากฏอยู่และมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากวางตัวอยู่ในบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูง แสดงว่าที่บริเวณดังกล่าวจะได้รับผลกระทบจากส่วนเติมเต็มของกระแสลม

ขวางเพียงเล็กน้อย จึงสรุปได้ว่าโครงสร้างรูปไตและบริเวณอ่าวมาจากเจ็ตและส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) เป็นหลัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในระนาบตัดขวางในหัวข้อที่ 6.3 และ 7.3

นอกจากนี้ยังพบความเร็วตามแนวแกน streamwise ของของไหลใดๆที่อยู่ไกลจากเจ็ต ในบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ϕ_{cf} สูง ซึ่งจะสอดคล้องกับความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่จะมีความเร็วในแนวแกน streamwise เท่านั้น จะเห็นได้ชัดเจนในรูป (C)

(C) ความเร็วของกระแสลมขวางเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{cf,x} / u_{cf}$

รูป (C) (ดูรูป (B) ประกอบ) แสดงความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์เฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{cf,x} / u_{cf}$ พบว่าที่บริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ϕ_{cf} สูงด้านนอกเจ็ต กระแสลมขวางบริสุทธ์จะมีความเร็วตามแนวแกน streamwise เท่านั้น เมื่อพิจารณาจากบริเวณด้านนอกเข้าสู่กลางเจ็ตความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนวแกน streamwise จะลดลงเข้าใกล้ 0 ซึ่งสอดคล้องกับความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ϕ_{cf} ต่ำและความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูง ที่กลางเจ็ต

นอกจากนี้ยังพบว่าที่บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (windward region) จะมีค่าความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์เฉลี่ยตามแนว streamwise ต่ำกว่าความเร็วของกระแสลมขวาง u_{cf} ($V_{cf,x} / u_{cf} < 1$) ซึ่งแสดงว่ากระแสลมขวางจะถูกลดความเร็วลงเมื่อปะทะกับเจ็ตที่บริเวณด้านหน้าและเกิดการเลี้ยวเบนจากแนวแกน streamwise ซึ่งจะเป็นหลักฐานหนึ่งที่จะไม่รวมการไหลออกของกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ด้าน Windward ในการประมาณอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ไหลเข้าสู่เจ็ต $Q_{cf,\Delta x} / Q_o$ ในบทที่ 9

8.4 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse กรณี $r = 4$

รูปที่ 8.1ค contour surface แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse ประกอบไปด้วย (A) ของเจ็ต $V_{j,y} / u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_y / u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวางบริสุทธ์ $V_{cf,y} / u_{cf}$

(A) ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y} / u_{cf}$

รูป (A) แสดงความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y} / u_{cf}$ พบว่ามีโครงสร้างของความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y} / u_{cf}$ สูงสุด (Local

maximum peaks) ที่เป็นบวกในระนาบสมมาตร 2 บริเวณซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในระนาบตัดขวาง คือ 1) ที่บริเวณด้านหน้า (Windward) ของเจ็ต เมื่อเจ็ตพัฒนาไปตามแนว downstream แล้ว จะพบว่าค่า $V_{j,y}/u_{cf}$ สูงสุดที่บริเวณนี้จะมีการสลายตัวไป เนื่องจากไม่มีกลไกช่วยในการขับเคลื่อนให้คงอยู่ตามแนวแกน transverse Local peak ส่วนนี้จะเกิดจากโมเมนตัมที่ปากทางออกของเจ็ตที่คงเหลืออยู่ ซึ่งจะสอดคล้องกับการสลายตัวของ positive local peak บริเวณบนของเจ็ตในระนาบตัดขวางการไหล และ 2) ที่บริเวณด้านหลัง (Leeward) ของเจ็ตที่เป็นบริเวณที่โครงสร้าง CVP มีความโดดเด่น (CVP region) เมื่อเจ็ตพัฒนาไปตามแนว downstream แล้ว จะพบว่าค่า $V_{j,y}/u_{cf}$ สูงสุดที่บริเวณนี้ยังคงอยู่ แต่ค่า magnitude จะลดลง แสดงให้เห็นว่าค่า $V_{j,y}/u_{cf}$ สูงสุดที่บริเวณนี้จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นและขับเคลื่อนให้คงอยู่ไปได้ตลอดตามแนวการไหลโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในระนาบตัดขวางการไหลหัวข้อที่ 6.4 และ 7.4

(B) ความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไว้มิติตามแนวแกน transverse V_y/u_{cf} และ

(C) ความเร็วของกระแสลมขวางเฉลี่ยไว้มิติตามแนวแกน transverse $V_{cf,y}/u_{cf}$

รูป (B) และ (C) แสดงความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไว้มิติตามแนวแกน transverse V_y/u_{cf} และ ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไว้มิติตามแนวแกน transverse $V_{cf,y}/u_{cf}$ พบว่าที่บริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ϕ_{cf} สูง กระแสลมขวางบริสุทธิ์จะไม่มีความเร็วตามแนวแกน transverse จะเห็นได้ชัดเจนในรูป (C)

ในขณะที่เมื่อพิจารณารูป (C) ที่บริเวณด้านหน้าของเจ็ต Windward จะพบว่ากระแสลมขวางบริสุทธิ์จะถูกเหนี่ยวนำให้มีความเร็วพุ่งขึ้นในแนวตั้ง $V_{cf,y}/u_{cf} > 0$ 2 บริเวณ ได้แก่ 1) ที่บริเวณด้านหน้าใกล้ปากทางออกของเจ็ต ซึ่งน่าจะอาจเกิดจากโครงสร้าง Jet shear layer จะเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่บริเวณใกล้ปากทางออกของเจ็ตนี้มีความเร็วพุ่งขึ้นในแนวตั้ง และ 2) ที่บริเวณด้านหน้าก่อนไปด้านบนของเจ็ต แสดงได้ว่าเมื่อกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่บริเวณนี้ปะทะกับเจ็ตที่บริเวณด้านหน้าแล้วกระแสลมขวางจะเกิดการเลี้ยวเบนขึ้นพุ่งออกจากเจ็ต (deflect) ซึ่งสอดคล้องกับการเลี้ยวเบนออกจากแนว streamwise ของกระแสลมขวางและเป็นหลักฐานหนึ่งที่จะไม่รวมการไหลออกของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ด้าน Windward ในการประมาณอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลเข้าสู่เจ็ต $Q_{cf,\Delta x}/Q_o$ ในบทที่ 9

นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูป (C) ที่ด้านหลังของเจ็ต Leeward บริเวณ near field จะพบว่ากระแสลมขวางบริสุทธิ์จะถูกเหนี่ยวนำให้มีความเร็วพุ่งขึ้นในแนวตั้งมีค่า $V_{cf,y}/u_{cf}$ สูงจากบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ϕ_{cf} สูงที่ได้เจ็ตเข้าสู่ตัวเจ็ตที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูงที่บริเวณด้านหลังของเจ็ต Leeward และมีค่าอ้างอิง

$(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j$ สูง (เนื่องจากไม่มีข้อมูลของบริเวณนี้ในระนาบตัดขวาง ($x/rd < 0.5$)) แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณ near field จะเกิดการเหนี่ยวนำการผสมสูง ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Smith and Mungal (1998) ที่พบว่าอัตราการลดลงของ Passive scalar concentration เกิดขึ้นเร็วที่บริเวณ near field ซึ่งหมายถึงจะเกิดการเหนี่ยวนำการผสมสูงที่บริเวณนี้

8.5 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise กรณี $r = 4$

รูปที่ 8.1ง. contour surface แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise ประกอบไปด้วย (A) ของเจ็ต $V_{j,z}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_z/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ $V_{cf,z}/u_{cf}$

(A) ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise $V_{j,z}/u_{cf}$

รูป (A) แสดงความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise $V_{j,z}/u_{cf}$ แม้ว่าในทางทฤษฎี ถ้าการไหล steady-in-mean แล้วความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน spanwise $V_{j,z}/u_{cf}$ ในระนาบสมมาตรจะเท่ากับ 0 แต่ในความเป็นจริง การไหลจะไม่สมมาตรโดยสมบูรณ์ ดังนั้นจากผลการศึกษาจึงพบความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน spanwise $V_{j,z}/u_{cf}$ 2 บริเวณ 1) ที่ด้าน Windward ใกล้ปากทางออกเจ็ต น่าจะเกิดจากโมเมนตัมที่ปากทางออกของเจ็ตที่คงเหลืออยู่ และ 2) ที่ด้าน Leeward ที่เป็นบริเวณที่โครงสร้าง CVP มีความโดดเด่น (CVP region) เมื่อเจ็ตพัฒนาไปตามแนว downstream แล้ว พบว่าค่า $V_{j,z}/u_{cf}$ ยังคงอยู่ โดยจะวางตัวตรงกับบริเวณที่พบค่า $V_{j,y}/u_{cf}$ สูงสุดในระนาบสมมาตรที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นและขับเคลื่อนให้คงอยู่ด้วยโครงสร้าง CVP แสดงให้เห็นว่าโครงสร้าง CVP จะเหนี่ยวนำให้เกิด $V_{j,z}/u_{cf}$ ที่ด้าน Leeward ในระนาบสมมาตรด้วย

(B) ความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise V_z/u_{cf} และ

(C) ความเร็วของกระแสลมขวางเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise $V_{cf,z}/u_{cf}$

รูป (B) และ (C) แสดงความเร็วของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise V_z/u_{cf} และความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise $V_{cf,z}/u_{cf}$ เช่นเดียวกับในรูป (A) เนื่องจากในความเป็นจริง การไหลจะไม่สมมาตรโดยสมบูรณ์ จึงอาจพบความเร็วของของไหลใดๆตามแนวแกน spanwise V_z/u_{cf}

8.6 vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนว spanwise กรณี $r = 4$

รูปที่ 8.1จ. contour surface แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของ vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise ประกอบไปด้วย (A) ของเจ็ต $\omega_{j,z}d/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆในระนาบสมมาตร $\omega_z d/u_{cf}$ และ (C) ของกระแสลมขวางบริสุทธ์ $\omega_{cf,z}d/u_{cf}$

(A) vorticity ของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $\omega_{j,z}d/u_{cf}$

รูป (A) แสดง vorticity ของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $\omega_{j,z}d/u_{cf}$ จะพบ $\omega_{j,z}d/u_{cf}$ ที่มีค่าบวก หมายถึงการหมุนทวนเข็มนาฬิกา (CCW) ที่ด้าน Windward และ $\omega_{j,z}d/u_{cf}$ มีค่าลบ หมายถึงการหมุนตามเข็มนาฬิกา (CW) ที่ด้าน Leeward ซึ่งจะแสดงถึงโครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ต ที่พบในผลการศึกษาของ Yuan and Street (1998) และ Yuan *et al.* (1999) โดยโครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ตนี้จะวางตัวอยู่ตรงกับบริเวณโครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure) ที่มีความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน streamwise $V_{j,x}/u_{cf}$ สูง เนื่องจากโครงสร้าง Spanwise rollers เป็นโครงสร้าง ณ ขณะใดๆ (instantaneous structure) เมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยแล้วจะปรากฏเป็นโครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure)

นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้าง Spanwise rollers ที่มีค่า $\omega_{j,z}d/u_{cf}$ เป็นลบวางตัวอยู่ตรงกับโครงสร้างรูปไตที่มี $V_{j,x}/u_{cf}$ สูง จะเหนี่ยวนำให้เจ็ตและส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) ที่ด้านใต้ในโครงสร้างอ่าว (Gulf region) ที่มี $V_{j,x}/u_{cf}$ ต่ำ และอยู่ในบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูง เข้าผสมกับโครงสร้างรูปไตของเจ็ต คล้ายการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (Free-jet) ซึ่งจะสอดคล้องกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางที่พบในงานวิจัยนี้ซึ่งนำเสนอในบทที่ 6-7

(B) vorticity ของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $\omega_z d/u_{cf}$

รูป (B) (ดูรูป (A) ประกอบ) แสดง vorticity ของของไหลใดๆเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $\omega_z d/u_{cf}$ พบว่าโครงสร้าง Spanwise rollers ที่มีค่า $\omega_{j,z}d/u_{cf}$ เป็นบวกวางตัวอยู่ตรงกับโครงสร้างรูปไตที่มี $V_{j,x}/u_{cf}$ สูง จะเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธ์ที่บริเวณด้าน Windward มีการเคลื่อนที่และเข้าผสมกับเจ็ตตามแนวแกน streamwise โดยพิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ ซึ่งจะสอดคล้องกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางโดย Spanwise rollers ของเจ็ตที่ด้าน Windward โดย Yuan and Street (1998) และ Yuan

et al. (1999) ซึ่งกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางนี้จะไม่สามารถพบได้ในระนาบตัดขวางการไหล

ในขณะที่ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ตามแนว transverse จะไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม พิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j < 0$ หรือ $(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_{cf} > 0$

(C) vorticity ของกระแสลมขวางเฉลี่ยไร้มิตตามแนวแกน streamwise $\omega_{cf,z} d/u_{cf}$

รูป (C) แสดง vorticity ของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิตตามแนวแกน streamwise $\omega_{cf,z} d/u_{cf}$ ในทางทฤษฎีแล้วจะไม่พบ $\omega_{cf,z} d/u_{cf}$ ในกระแสลมขวางบริสุทธิ์ แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติ การไหลจะไม่คงที่ ดังนั้น $\omega_{cf,z} d/u_{cf}$ ที่พบอาจเกิดจากการเอียงของแกนของ Vorticity ของโครงสร้างของกระแสลมขวางในแนวแกนอื่น เช่น โครงสร้าง Horseshoe vortex หรือ โครงสร้าง Wake vortex

8.7 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบสมมาตรกรณี $r = 4$

จากผลการศึกษาที่แสดงในหัวข้อ 8.1-8.3 และ 8.6 จะนำหลักฐาณดังกล่าวมาวิเคราะห์ประกอบกันในรูปแบบที่ 8.2 นำไปสู่การชี้แนะถึงกลไกการเหนี่ยวนำการผสมหนึ่งของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบสมมาตรการไหล

กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบสมมาตรจะเกิดขึ้น 2 ส่วน ดังนี้

1. กลไกการเหนี่ยวนำการผสมที่ด้าน Windward โดยโครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ต

พบว่าการเหนี่ยวนำการผสมกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในระนาบสมมาตรที่ด้าน Windward โดยจะเกิดจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ตามแนว streamwise เท่านั้น พิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ ในขณะที่ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ตามแนว transverse จะไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม พิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j < 0$ หรือ $(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_{cf} > 0$

เนื่องจากที่ด้าน Windward เป็นบริเวณที่โครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ตโดดเด่น จะสรุปได้ว่าโครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ตที่วางตัวอยู่ตรงกับโครงสร้างรูปไตที่มี $V_{j,x}/u_{cf}$ สูง จะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ด้าน Windward ให้เข้าผสมกับเจ็ตตามแนวแกน Streamwise เท่านั้น

2. กลไกการเหนี่ยวนำการผสมที่ด้าน Leeward

พบว่ามีการเหนี่ยวนำการผสมกระแสลมขวางบริสุทธ์ในระนาบสมมาตรที่ด้าน Windward โดยจะเกิดจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว transverse เท่านั้น พิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,y} / u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ ในขณะที่ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว streamwise จะไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม พิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,x} / u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j \approx 0$

เนื่องจากที่ด้าน Leeward เป็นบริเวณที่โครงสร้าง CVP ของเจ็ตโดดเด่น จะสรุปได้ว่า โครงสร้าง CVP ของเจ็ต จะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ด้านหลัง Leeward และด้านล่าง จากบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ϕ_{cf} สูงที่ได้เจ็ตให้เข้าผสมกับเจ็ตตามแนวแกน transverse เท่านั้น เข้าสู่บริเวณกลางเจ็ตตรงกับโครงสร้างอ่าว (Gulf region) ที่มี $V_{j,x} / u_{cf}$ ต่ำที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูง ทำให้ของไหลจะกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) เกือบหมดแล้วที่บริเวณนี้

จากนั้นโครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ตที่วางตัวอยู่ตรงกับโครงสร้างรูปไตที่มี $V_{j,x} / u_{cf}$ สูงที่เป็นบริเวณที่โครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ตโดดเด่น จะเหนี่ยวนำเจ็ตและส่วนผสมของเจ็ตในโครงสร้างอ่าวที่อยู่ด้านใต้เข้าผสมกับโครงสร้างรูปไตของเจ็ตเอง คล้ายการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (Free-jet)

8.8 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบสมมาตรกรณี $r = 8$ และ 12

8.8.1 ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลที่จุดใดๆ

รูปที่ 8.3ก และ 8.5ก contour surface แสดงความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ต ϕ_j กรณี $r = 8$ และ 12 ตามลำดับ พบว่าเช่นเดียวกับกรณี $r = 4$ กล่าวคือที่บริเวณกลางเจ็ตจะมีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูง ($\phi_j \approx 1$) และเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ϕ_{cf} ต่ำ ($\phi_{cf} \approx 0$) โดยเมื่อเริ่มเคลื่อนที่ออกจากกลางเจ็ต ϕ_j จะลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง จนมีค่าเป็น 0 ที่ขอบเจ็ตและเมื่อเริ่มเคลื่อนที่ออกจากกลางเจ็ตความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ϕ_{cf} จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนมีค่าสูงใกล้เคียง 1 ($\phi_{cf} \approx 1$) ที่ขอบเจ็ต (รูป (A) และ (C)) นอกจากนี้พบว่าความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบของไหลใดๆ ϕ มีค่าใกล้เคียง 1 ($\phi \approx 1$) อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาตัดขวางการไหล แสดงว่าการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสลมขวางในการทดลองนี้นั้นมีความคงตัว (steady) และสม่ำเสมอ (uniform) (รูป B) เช่นเดียวกับกรณี $r = 4$

รูปที่ 8.7ก แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดใดๆ กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับในระนาบสมมาตร พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น เจ็ตจะพุ่งทะลุ (penetrate) เข้าไปในกระแสลมขวางตามแนว transverse มากขึ้น นอกจากนี้เมื่อ r เพิ่มขึ้น จะพบว่าเส้น contour ของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j ที่ ϕ_j คงที่จะเป็นเส้นปิด ซึ่งในกรณีนี้น่าจะเกิดจากเมื่อ r เพิ่มขึ้น เจ็ตในกระแสลมขวางจะพุ่งสูงมากขึ้นและมีขนาดขยายใหญ่ขึ้น ทำให้มีความยากในการเก็บข้อมูลของการทดลอง ซึ่งจะไม่ได้หมายถึงการลดลงของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j ตามแนว streamwise

8.8.2 สนามความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง

รูปที่ 8.3ก และ 8.5ก แสดงสนามของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางกรณี $r = 8$ และ 12 ตามลำดับ พบว่าเช่นเดียวกับกรณี $r = 4$ กล่าวคือ สามารถแบ่งบริเวณของเจ็ตโดยสังเขปได้ 2 บริเวณ บริเวณ คือ

- 1) **Kidney-shaped region** : เป็นบริเวณที่โครงสร้าง Spanwise rollers มีความโดดเด่นจะอยู่ที่ด้านหน้า Windward ของเจ็ต โดยสนามความเร็วที่แสดงถึงโครงสร้าง Spanwise rollers ซึ่งเป็นโครงสร้าง ณ ขณะใดๆ (instantaneous structure) จะมาจากสนามความเร็วของเจ็ตและส่วนผสมของเจ็ตเพียงครั้งหนึ่ง (ครึ่งล่าง) และอีกครึ่งหนึ่ง (ครึ่งบน) จะมาจากสนามความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง Spanwise rollers โดยเมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยจะปรากฏเป็นโครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure) (รูป (A) และ (C) จะเห็นอย่างชัดเจนจากสนามความเร็วในรูป 8.3ข (A) และ 8.5ข(A))
- 2) **Counter rotating vortex pair (CVP) region** : เป็นบริเวณที่โครงสร้าง CVP มีความโดดเด่นจะอยู่ที่ด้านหลัง Leeward และล่างของเจ็ต ตรงกับบริเวณที่พบสนามความเร็วของเจ็ตและสนามความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่มีทิศทางพุ่งจากด้านล่างเข้าสู่กลางเจ็ตในแนวตั้ง ที่ถูกเหนี่ยวนำโดย CVP (รูป (A) และ (C) จะเห็นอย่างชัดเจนจากสนามความเร็วในรูป 8.3ข(A) และ 8.5ข(A))

รูปที่ 8.7ก พบว่าเจ็ตในกระแสลมขวางกรณี $r = 4$ จะสามารถแบ่งแยกบริเวณของเจ็ตได้ชัดเจนมากกว่ากรณี $r = 8$ และ 12

การเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์ของเจ็ต พบว่าเช่นเดียวกับกรณี $r = 4$

1) การเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์ของเจ็ตที่ด้าน Windward

พบว่าที่ด้าน Windward มีการเหนี่ยวนำการผสมเกิดขึ้นในระนาบสมมาตรจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ตามแนว streamwise $\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}$ เท่านั้น โดยโครงสร้าง Spanwise rollers พิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ (รูป (C)) ซึ่งจะสอดคล้องกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ด้าน Windward โดย Spanwise rollers ของ Yuan and Street (1998) และ Yuan *et al.* (1999)

ในขณะที่เมื่อพิจารณา $(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j < 0$ หรือ $(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_{cf} > 0$ แสดงว่าจะไม่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมขึ้นจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ตามแนว transverse

นอกจากนี้รูปที่ 8.7ก ยังพบว่าเจ็ตในกระแสลมขวางกรณี $r = 8$ และ 12 จะมี $(\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ สูงกว่ากรณี $r = 4$ แสดงว่าเจ็ตในกระแสลมขวางกรณี $r = 8$ และ 12 มีการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ตามแนว streamwise $\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}$ สูงกว่ากรณี $r = 4$

2) การเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์ของเจ็ตที่ด้าน Leeward

เช่นเดียวกันกับการพิจารณาที่ด้าน Windward พบว่าที่ด้าน Leeward มีการเหนี่ยวนำการผสมเกิดขึ้นในระนาบสมมาตรจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ตามแนว transverse $\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}$ เท่านั้น โดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ต พิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ (รูป (C)) ซึ่งจะสอดคล้องกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสลมขวางโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตที่พบในงานวิจัยนี้ซึ่งนำเสนอในบทที่ 6-7

ในขณะที่เมื่อพิจารณา $(\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j \approx 0$ แสดงว่าจะไม่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมขึ้นจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ตามแนว streamwise เช่นเดียวกับกรณี $r = 4$

8.8.3 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise

รูปที่ 8.3ข และ 8.5ข contour surface แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise กรณี $r = 8$ และ 12 ตามลำดับ พบว่าเช่นเดียวกับกรณี $r = 4$ กล่าวคือพบโครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure) ของเจ็ตที่มีความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน streamwise $V_{j,x}/u_{cf}$ ที่มีค่าสูงที่ด้าน Windward ของเจ็ตในระนาบสมมาตร เมื่อเจ็ตพัฒนาไปตามแนว downstream แล้ว ยังคงพบความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน streamwise อยู่แต่ค่า magnitude จะลดลงซึ่งสอดคล้องกับการสลายตัวของโครงสร้างรูปไตที่พบในระนาบตัดขวางและยังพบโครงสร้างรูปอ่าว (Gulf region) ของเจ็ตที่มีความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน streamwise

ตำวางตัวอยู่ด้านใต้โครงสร้างรูปไต (รูป (A)) เนื่องจากโครงสร้างรูปไตและโครงสร้างรูปอ่าววางตัวอยู่ในบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ด ϕ_j สูง จึงสรุปได้ว่าโครงสร้างเหล่านี้มาจากเจ็ดและส่วนผสมของเจ็ด (jet-fluid mixture) เป็นหลัก (รูป (B) ดู (A) ประกอบ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในระนาบตัดขวางในหัวข้อที่ 6.3 และ 7.3

นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่อยู่ไกลจากเจ็ดในบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ϕ_{cf} สูง จะมีความเร็วในแนวแกน streamwise เท่านั้น (รูป (C)) และที่บริเวณด้านหน้าของเจ็ด (windward region) ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยตามแนว streamwise จะถูกหน่วงให้มีค่าลดลงต่ำกว่าความเร็วของกระแสลมขวาง u_{cf} ($V_{cf,x} / u_{cf} < 1$) เมื่อปะทะกับเจ็ดที่บริเวณด้านหน้าและเกิดการเลี้ยวเบนจากแนวแกน streamwise ซึ่งจะเป็นหลักฐานหนึ่งที่จะไม่รวมการไหลออกของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ด้าน Windward ในการประมาณอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลเข้าสู่เจ็ด $Q_{cf,\Delta x} / Q_o$ ในบทที่ 9 เช่นเดียวกับกรณี $r = 4$

รูปที่ 8.7 พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น ตำแหน่งของโครงสร้างรูปไตของเจ็ดจะสูงขึ้นสอดคล้องกับผลการศึกษาในระนาบตัดขวาง (รูปที่ 7.5) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่บริเวณ near field ตำแหน่ง $x / rd < 0.5$ พบเจ็ดในกระแสลมขวางกรณี $r = 8$ และ 12 ความเร็วของเจ็ดตามแนวแกน streamwise ที่มีค่าเป็นลบมากกว่าเจ็ดในกระแสลมขวางกรณี $r = 4$

8.8.4 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse

รูปที่ 8.3ค และ 8.5ค contour surface แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse กรณี $r = 8$ และ 12 ตามลำดับ พบว่าเช่นเดียวกับกรณี $r = 4$ กล่าวคือพบว่ามีโครงสร้างของความเร็วของเจ็ดเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y} / u_{cf}$ สูงสุด (Local maximum peaks) ที่เป็นบวมในระนาบสมมาตร 2 บริเวณซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในระนาบตัดขวาง คือ 1) ที่บริเวณด้านหน้า (Windward) ของเจ็ด เมื่อเจ็ดพัฒนาไปตามแนว downstream แล้ว Local peak ส่วนนี้จะสลายตัวไป เนื่องจากไม่มีกลไกช่วยในการขับเคลื่อนให้คงอยู่ตามแนวแกน transverse จะเกิดจากโมเมนตัมที่ปากทางออกของเจ็ดที่คงเหลืออยู่ ซึ่งจะสอดคล้องกับการสลายตัวของ positive local peak บริเวณบนของเจ็ดในระนาบตัดขวางการไหล และ 2) ที่บริเวณด้านหลัง (Leeward) ของเจ็ด เมื่อเจ็ดพัฒนาไปตามแนว downstream แล้ว Local peak ส่วนนี้ยังคงอยู่ แต่ค่า magnitude จะลดลง แสดงให้เห็นว่าบริเวณนี้จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นและขับเคลื่อนให้คงอยู่ไปได้ตลอดตามแนวการไหลโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ดซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในระนาบตัดขวางการไหลหัวข้อที่ 6.4 และ 7.4 (รูป (A)) เช่นเดียวกับกรณี $r = 4$

นอกจากนี้พบว่ากระแสลมขวางบริสุทธ์ที่บริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ϕ_{cf} สูง จะไม่มีความเร็วตามแนวแกน transverse (รูป (C)) แต่ที่บริเวณใกล้กับตัวเจ็ตกระแสลมขวางบริสุทธ์จะถูกเหนี่ยวนำให้มีความเร็วตามแนวแกน transverse ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 บริเวณ คือ

- 1) **ที่ด้านหน้าของเจ็ต Windward** พบว่ากระแสลมขวางบริสุทธ์จะถูกเหนี่ยวนำให้มีความเร็วพุ่งขึ้นในแนวตั้ง $V_{cf,y} / u_{cf} > 0$ 2 ส่วน ได้แก่ 1) ที่บริเวณด้านหน้าใกล้ปากทางออกของเจ็ต ซึ่งน่าจะอาจเกิดจากโครงสร้าง Jet shear layer และ 2) ที่บริเวณด้านหน้าก่อนไปด้านบนของเจ็ต พบว่ากระแสลมขวางบริสุทธ์เมื่อปะทะกับเจ็ตที่บริเวณด้านหน้าแล้วจะเกิดการเลี้ยวเบนขึ้นพุ่งออกจากเจ็ต (deflect) ซึ่งสอดคล้องกับการเลี้ยวเบนออกจากแนว streamwise ของกระแสลมขวางและเป็นหลักฐานหนึ่งที่จะไม่รวมการไหลออกของกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ด้าน Windward ในการประมาณอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ไหลเข้าสู่เจ็ต $Q_{cf,\Delta x} / Q_o$ ในบทที่ 9 เช่นเดียวกับกรณี $r = 4$
- 2) **ที่ด้านหลังของเจ็ต Leeward** บริเวณ near field จะพบว่ากระแสลมขวางบริสุทธ์จะถูกเหนี่ยวนำให้มีความเร็วพุ่งขึ้นในแนวตั้งมีค่า $V_{cf,y} / u_{cf}$ สูง จากบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ϕ_{cf} สูงที่ได้เจ็ตเข้าสู่ตัวเจ็ตที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูงที่บริเวณด้านหลังของเจ็ต Leeward และมีค่าอ้างอิง $(\vec{V}_{cf,y} / u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j$ สูง (เนื่องจากไม่มีข้อมูลของบริเวณนี้ในระนาบตัดขวาง ($x / rd < 0.5$)) แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณ near field จะเกิดการเหนี่ยวนำการผสมสูง ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Smith and Mungal (1998) ที่พบว่าอัตราการลดลงของ Passive scalar concentration เกิดขึ้นเร็วที่บริเวณ near field ซึ่งหมายถึงจะเกิดการเหนี่ยวนำการผสมสูงที่บริเวณนี้ เช่นเดียวกับกรณี $r = 4$

รูปที่ 8.7ค แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น ค่าความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y} / u_{cf}$ ที่ปากทางออกของเจ็ตตรงกับ Local peak ที่ด้าน Windward จะสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในระนาบตัดขวางการไหล (รูปที่ 7.5ค)

8.8.5 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise

รูปที่ 8.3ง และ 8.5ง contour surface แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise กรณี $r = 8$ และ 12 ตามลำดับ กล่าวคือพบความเร็ว

ตามแนวแกน spanwise 2 บริเวณ 1) ที่ด้าน Leeward ที่เป็นบริเวณที่โครงสร้าง CVP มีความโดดเด่น (CVP region) เมื่อเจ็ตพัฒนาไปตามแนว downstream แล้ว พบว่าค่าความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน spanwise $V_{j,z}/u_{cf}$ ยังคงอยู่ โดยจะวางตัวตรงกับบริเวณที่พบค่า $V_{j,y}/u_{cf}$ สูงสุดในระนาบสมมาตรที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นและขับเคลื่อนให้คงอยู่ด้วยโครงสร้าง CVP แสดงให้เห็นว่าโครงสร้าง CVP จะเหนี่ยวนำให้เกิด $V_{j,z}/u_{cf}$ ที่ด้าน Leeward ในระนาบสมมาตร (รูป (A)) เช่นเดียวกับกรณี $r = 4$ และ 2) ที่บริเวณกระแสลมขวางบริสุทธ์ภายนอก (รูป (C))

รูปที่ 8.7ง แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น บริเวณที่พบความเร็วตามแนวแกน spanwise จะแตกต่างกันไป ยกเว้นความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y}/u_{cf}$ ที่พบที่ด้าน Leeward ของเจ็ต เนื่องจากในทางทฤษฎี ถ้าการไหล steady-in-mean แล้วความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน spanwise $V_{j,z}/u_{cf}$ ในระนาบสมมาตรจะเท่ากับ 0 แต่ในความเป็นจริง การไหลจะไม่สมมาตรโดยสมบูรณ์

8.8.6 vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนว spanwise

รูปที่ 8.3จ และ 8.5จ contour surface แสดงการพัฒนาตัวของการกระจายตัวของ vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise กรณี $r = 8$ และ 12 ตามลำดับ กล่าวคือเช่นเดียวกับกรณี $r = 4$ จะพบ $\omega_{j,z}d/u_{cf}$ ที่มีค่าบวก (CCW) ที่ด้าน Windward และ $\omega_{j,z}d/u_{cf}$ มีค่าลบ (CW) ที่ด้าน Leeward ซึ่งจะแสดงถึงโครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ตพบในผลการศึกษาของ Yuan and Street (1998) และ Yuan *et al.* (1999) โดยจะวางตัวอยู่ตรงกับบริเวณโครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure)

นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้าง Spanwise rollers จะเหนี่ยวนำให้เกิดการผสมขึ้น 2 ส่วน คือ 1) โครงสร้าง Spanwise rollers ที่มีค่า $\omega_{j,z}d/u_{cf}$ เป็นลบ จะเหนี่ยวนำให้เจ็ตและส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) ที่ด้านใต้ในโครงสร้างอ่าว (Gulf region) เข้าผสมกับโครงสร้างรูปไตของเจ็ต คล้ายการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (Free-jet) (รูป (A)) ซึ่งจะสอดคล้องกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางที่พบในงานวิจัยนี้ซึ่งนำเสนอในบทที่ 6-7 และ 2) โครงสร้าง Spanwise rollers ที่มีค่า $\omega_{j,z}d/u_{cf}$ เป็นบวก จะเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ด้าน Windward มีการเคลื่อนที่และเข้าผสมกับเจ็ตตามแนวแกน streamwise โดยพิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ ซึ่งจะสอดคล้องกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางโดย Spanwise rollers ของเจ็ตที่ด้าน Windward โดย Yuan and Street (1998) และ Yuan *et al.* (1999) ซึ่งกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางนี้จะไม่สามารถพบได้ในระนาบตัดขวางการไหล

ในขณะที่ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว transverse จะไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม พิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j < 0$ หรือ $(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ เช่นเดียวกับกรณี $r = 4$

รูปที่ 8.7จ แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของ vorticity เฉลี่ยไว้มิติตามแนวแกน spanwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ แม้ว่าในทางทฤษฎีแล้วจะไม่พบ $\omega_{cf,z}d/u_{cf}$ ในกระแสลมขวางบริสุทธ์ แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติ การไหลจะไม่คงที่ ดังนั้น $\omega_{cf,z}d/u_{cf}$ ที่พบอาจเกิดจากการเอียงของแกนของ Vorticity ของโครงสร้างของกระแสลมขวางในแนวแกนอื่น เช่น โครงสร้าง Horseshoe vortex หรือ โครงสร้าง Wake vortex

8.8.7 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบสมมาตร

จากผลการศึกษาที่แสดงในหัวข้อ 8.8.1-8.8.3 และ 8.8.6 จะนำหลักฐานดังกล่าวมาวิเคราะห์ประกอบกันในรูปแบบที่ 8.4 และ 8.6 นำไปสู่การชี้แนะถึงกลไกการเหนี่ยวนำการผสมหนึ่งของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบสมมาตรการไหลกรณี $r = 8$ และ 12

กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบสมมาตรจะเกิดขึ้น 2 ส่วน เช่นเดียวกับกรณี $r = 4$ ดังนี้

1. กลไกการเหนี่ยวนำการผสมที่ด้าน Windward

พบว่าที่ด้าน Windward เป็นบริเวณที่โครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ตโดดเด่น จะสรุปได้ว่าโครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ตที่วางตัวอยู่ตรงกับโครงสร้างรูปไตที่มี $V_{j,x}/u_{cf}$ สูง จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเหนี่ยวนำผสมจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว streamwise $\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}$ เท่านั้น ในขณะที่ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว transverse จะไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม พิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ ในขณะที่ $(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j < 0$ หรือ $(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$

2. กลไกการเหนี่ยวนำการผสมที่ด้าน Leeward

พบว่าที่ด้าน Leeward เป็นบริเวณที่โครงสร้าง CVP ของเจ็ตโดดเด่น จึงสรุปได้ว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ต จะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ด้าน Leeward และด้านล่างจากบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ϕ_{cf} สูงที่ได้เจ็ตให้เข้าสู่เจ็ตและเกิดการเหนี่ยวนำการผสมจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว transverse เท่านั้น แต่จะไม่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว streamwise พิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ ในขณะที่ $(\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j \approx 0$

ต่อมากระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ถูกเหนี่ยวนำการผสมจนเกือบจะกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) หมดแล้ว จะไหลเข้าสู่บริเวณกลางเจ็ตที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูงตรงกับโครงสร้างอ่าว (Gulf region) ที่มี $V_{j,x} / u_{cf}$ ต่ำได้โครงสร้างรูปไตที่มี $V_{j,x} / u_{cf}$ สูง จากนั้นโครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ตที่วางตัวอยู่ตรงกับโครงสร้างรูปไตที่เป็นบริเวณที่โครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ตโดดเด่น จะเหนี่ยวนำส่วนผสมของเจ็ตที่บริเวณนี้ให้เข้าผสมกับโครงสร้างรูปไตของเจ็ตเอง คล้ายการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (Free-jet)



บทที่ 9

อภิปรายผลการทดลอง

เพื่อการประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม E ของงานวิจัยนี้ จึงใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง พบว่าบน rd scale เมื่อค่า r เพิ่มขึ้น จะมีค่า E เพิ่มขึ้น ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 5 และเพื่อการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง งานวิจัยนี้จึงใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ร่วมกับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสลมขวาง พบว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ต (Jet-CVP) ที่เป็นกลไกการเหนี่ยวนำการผสมหลัก (อย่างน้อยในระนาบตัดขวางการไหล) เหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์จากภายนอกเจ็ตเข้ามาผสมกับเจ็ตผ่านช่องการไหลในแนวตั้ง (vertical channel) ดังที่เสนอในบทที่ 6-7 ดังนั้นเพื่อที่จะสอบทวน ผลการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมที่พบ ในหัวข้อนี้ จึงนำกลไกการเหนี่ยวนำการผสมนี้มาอธิบายการเพิ่มขึ้นของ E เมื่อ r เพิ่มขึ้นในเชิงปริมาณ

9.0 พื้นฐานการวิเคราะห์

อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ผ่าน control surface ที่ ϕ_j ใดๆ

การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตคือการที่เจ็ตเหนี่ยวนำเอากระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้ามาผสมกับเจ็ต ดังนั้นถ้าสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ถูกเหนี่ยวนำให้เข้ามาผสมกับเจ็ตได้ก็จะสามารถบ่งชี้ถึงปริมาณการเหนี่ยวนำการผสม และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางได้ โดยจากผลการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมที่เสนอในบทที่ 6-7 ทำให้สามารถเขียน control volume เพื่อหาอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลเข้าสู่ตัวเจ็ตผ่าน control surface ที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตใดๆ ϕ_j ได้ ดังรูปที่ 9.1 โดยจะสามารถหาอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลผ่านเข้าพื้นผิวนี้มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่ใดๆ $Q_{cf,\Delta x}$ ได้จาก

$$Q_{cf,\Delta x}(\phi_j) = \int_{A_{\phi_j}} \bar{V}_{cf,yz}(\bar{x}) \cdot d\bar{A}_{\phi_j} \quad (9.1)$$

$$: \quad d\bar{A}_{\phi_j} = \|d\bar{A}_{\phi_j}\| \hat{e}_{\phi_j}$$

$$: \quad \hat{e}_{\phi_j} = \frac{\nabla \phi_j}{\|\nabla \phi_j\|}$$

$$: \quad \left\| d\vec{A}_{\phi_j} \right\| = w dL = (\Delta x) dl$$

โดย $\vec{V}_{cf,yz}$ คือ เวกเตอร์ความเร็วของกระแสลมขวางปริสสุทธ์ในระนาบตัดขวางการไหลเฉลี่ยต่อเวลา

$d\vec{A}_{\phi_j}$ คือ เวกเตอร์ของพื้นผิวที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่

\hat{e}_{ϕ_j} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยแสดงทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่ โดยมีทิศทางเดียวกับ $\nabla \phi_j$

$\nabla \phi_j$ คือ การเปลี่ยนแปลงของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j ต่อระยะทาง

Δx คือ ความยาวของ Control volume ตามแนวการไหล

dl คือ ความยาวที่วัดตามแนวความเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่

เนื่องจากอัตราการไหลของกระแสลมขวางปริสสุทธ์ที่ผ่านพื้นผิวที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต

ใดๆ $Q_{cf,\Delta x}$ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย

1. ส่วนที่อัตราการไหลของกระแสลมขวาง $Q_{cf,\Delta x}$ มีค่าบวก คืออัตราการไหลของกระแสลมขวางปริสสุทธ์ที่ไหลจากบริเวณของกระแสลมขวางปริสสุทธ์ภายนอก ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวาง ϕ_{cf} สูง เข้าสู่กลางเจ็ต ซึ่งเป็นบริเวณที่มี ϕ_{cf} ต่ำและ ϕ_j สูง แสดงถึงอัตราการไหลของกระแสลมขวางปริสสุทธ์ที่ถูกเหนี่ยวนำเข้าไปผสมจนกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต
2. ส่วนที่อัตราการไหลของกระแสลมขวาง $Q_{cf,\Delta x}$ มีค่าลบ คืออัตราการไหลของกระแสลมขวางปริสสุทธ์ที่ไหลออกจากบริเวณกลางเจ็ตที่มี ϕ_j สูง กลับเข้าสู่บริเวณของกระแสลมขวางปริสสุทธ์ภายนอกที่มี ϕ_{cf} สูง โดยในทางทฤษฎีนั้นเมื่อกระแสลมขวางเข้าผสมจนกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตแล้วจะไม่สามารถแยกกลับไปเป็น กระแสลมขวางปริสสุทธ์ได้อีก ซึ่งอัตราการไหลของกระแสลมขวาง $Q_{cf,\Delta x}$ ที่มีค่าลบ น่าจะมีความหมายในแง่มุมมองอื่นมากกว่าการแสดงถึงการไหลออกจากเจ็ตของกระแสลมขวางปริสสุทธ์ โดยจากผลการทดลองบทที่ 6, 7 และ 8 ในหัวข้อที่ 3 และ 4 ประเมินได้ว่าอัตราการไหลของกระแสลมขวาง $Q_{cf,\Delta x}$ ที่มีค่าลบ แสดงถึงการเลี้ยวเบนจากแนวแกน streamwise ของกระแสลมขวางเมื่อปะทะกับเจ็ตที่บริเวณด้านหน้า Windward

ดังนั้น จึงจะพิจารณาเฉพาะส่วนที่อัตราการไหลของกระแสลมขวาง $Q_{cf,\Delta x}$ มีค่าบวกเท่านั้น ซึ่งแสดงถึงอัตราการไหลของกระแสลมขวางปริสสุทธ์ที่ถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่เจ็ต

9.1 การอภิปรายความสัมพันธ์ของ r กับ E ในเชิงปริมาณจากกลไกการเหนี่ยวนำการผสม

เพื่อที่จะสอบสวน ผลการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมที่พบในงานวิจัยนี้ จึงนำกลไกการเหนี่ยวนำการผสมนี้มาอธิบายการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E เมื่ออัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r เพิ่มขึ้นในเชิงปริมาณ ด้วยการคำนวณอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ ϕ_j ใดๆต่ออัตราการไหลที่ปากทางออกของเจ็ต หรือ อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf,\Delta x}/Q_o$ ที่แสดงถึงอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่เจ็ตในระนาบตัดขวางผ่านเข้าพื้นผิวที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่

9.1.1 เส้นแสดงอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf,\Delta x}/Q_o$ ที่ไหลผ่านพื้นผิวคงที่ ϕ_j ใดๆ

รูปที่ 9.2ก แสดงอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf,\Delta x}/Q_o$ กรณี $r = 4$ ที่ $x/rd = 0.5, 0.75, 1.0$ และ 1.5 ตามลำดับ โดยในกรณีนี้จะใช้ $\Delta x = 1m$ หมายถึง $Q_{cf,\Delta x}/Q_o$ ที่ไหลผ่าน Control volume ที่มีความยาวตามแนว streamwise $1 m$ พบว่าที่แต่ละ x/rd เมื่อเริ่มพิจารณาจากบริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j ต่ำ และมีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ϕ_{cf} สูง อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf,\Delta x}/Q_o$ จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าอัตราการไหลของกระแสลมขวางสูงสุด แสดงถึงการที่มีกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไหลเข้าสู่ตัวเจ็ตเพิ่มขึ้นเมื่อ ϕ_j สูงขึ้น จนถึงจุดที่กระแสลมขวางบริสุทธิ์จะไหลเข้าสู่สูงสุด $Q_{cf,\Delta x=1m,max}/Q_o$ จากนั้นเมื่อเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่มี ϕ_j สูงและ ϕ_{cf} ต่ำ อัตราการไหลของกระแสลมขวางเข้าสู่เจ็ตจะลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง จนมีค่าประมาณ 0 ที่บริเวณกลางเจ็ต

รูปที่ 9.2ข และ 9.2ค แสดงอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf,\Delta x}/Q_o$ กรณี $r = 8$ และ 12 ตามลำดับ พบว่าที่แต่ละ x/rd เมื่อ ϕ_j เพิ่มขึ้น จะมีอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf,\Delta x}/Q_o$ เพิ่มขึ้นจนสูงสุด จากนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จนมีค่าประมาณ 0 ที่บริเวณกลางเจ็ตเช่นเดียวกับกรณี $r = 4$

แสดงว่ากระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลเข้าสู่เจ็ตผ่านเข้าพื้นผิวที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่จะถูกเหนี่ยวนำให้เป็นส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) จนหมดที่บริเวณกลางเจ็ต โดยจะสอดคล้องกันในทุกกรณีของ r

9.1.2 การอธิบายผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E ด้วยกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวาง บน rd scale

รูปที่ 9.3 แสดงการพัฒนาตัวของค่าสูงสุดของอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf, \Delta x=1rd, \max} / Q_o$ บน rd scale และผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่ออัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ $Q_{cf, \Delta x=1rd, \max} / Q_o$ ที่ไหลผ่าน Control volume ที่มีความยาวตามแนว streamwise $1rd$ ($\Delta x = 1rd$) บน rd scale พบว่าเมื่อพิจารณาที่ x/rd เดียวกัน เมื่อค่า r เพิ่มขึ้น จะมีค่า $Q_{cf, \Delta x=1rd, \max} / Q_o$ เพิ่มขึ้นตลอดทุกระยะการไหล แสดงว่าเมื่อพิจารณาบน rd scale เจ็ดในกระแสลมขวางที่มีค่า r สูง จะมีอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่พุ่งเข้าสู่เจ็ดในระนาบตัดขวางผ่านพื้นผิวที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ด ϕ_j คงที่สูงกว่าเจ็ดในกระแสลมขวางที่มีค่า r ต่ำ

เมื่อพิจารณาประกอบกับผลการศึกษาคำนวณความสัมพันธ์ของ E ที่หาได้โดยตรงจากวิธี SPIV กับอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลบน rd scale ในรูปที่ 5.1 โดยจะแสดงการอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่พุ่งเข้าสู่เจ็ดในระนาบตัดขวางในแต่ละ x/rd ที่สอดคล้องกับ E ดังนี้

■ อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติที่ระยะการไหล $x/rd = 0.5$

รูปที่ 9.3 พบว่าเมื่อค่า r สูงขึ้น มีค่าสูงสุดของอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf, \Delta x=1rd, \max} / Q_o$ สูงขึ้น แสดงว่าเมื่อ r สูงขึ้น จะมีอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไหลเข้าสู่เจ็ดมากขึ้น ซึ่งแนะว่าเมื่อเจ็ดพัฒนาไปที่ระยะการไหลถัดไป ค่า E ของกรณี r สูงจะสูงกว่ากรณี r ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับที่ระยะการไหลถัดไปที่ $x/rd = 0.75$ กล่าวคือที่กรณี $r = 12$ จะมี E สูงกว่า $r = 8$ และ 4 ตามลำดับ เนื่องจากอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลเข้าสู่เจ็ดนั้นจะแสดงผลที่ระยะการไหลถัดไป

■ อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติที่ระยะการไหล $x/rd = 0.75$ และ 1.0

เช่นเดียวกับที่ $x/rd = 0.5$ กล่าวคือ พบว่า เมื่อค่า r สูงขึ้น จะมีค่า $Q_{cf, \Delta x=1rd, \max} / Q_o$ สูงขึ้น ซึ่งแนะได้ว่าในระยะการไหลถัดไปค่า E ของกรณี r สูงจะสูงกว่ากรณี r ต่ำ (รูปที่ 9.3)

- อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ไร้มิติที่ระยะการไหล $x/rd = 1.5$
เช่นเดียวกับที่ $x/rd = 0.5, 0.75$ และ 1.0 กล่าวคือพบว่าเมื่อค่า r สูงขึ้น จะมี $Q_{cf, \Delta x=1rd, \max}/Q_o$ สูงขึ้น โดยอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ไหลเข้าสู่เจ็ตนี้ จะแสดงผลในระยะการไหลถัดไป (รูปที่ 9.3)

สรุปได้ว่าจะสามารถอธิบายผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรโดยใช้ SPIV E ได้ด้วยอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ไร้มิติ $Q_{cf, \Delta x=1rd, \max}/Q_o$ ว่าเมื่ออัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r สูงขึ้น แล้วอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรโดยใช้ SPIV E สูงขึ้น เนื่องจากเจ็ตในกระแสลมขวางที่มี r สูง จะมีอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์จากภายนอกที่ถูกเหนี่ยวนำให้เข้าผสมกับเจ็ตผ่านพื้นผิวที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่สูงกว่าเจ็ตในกระแสลมขวางที่มี r ต่ำบน rd scale

9.1.3 การอธิบายผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E ด้วยกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวาง บน d scale

รูปที่ 9.4 แสดงการพัฒนาตัวของค่าสูงสุดของอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ไร้มิติ $Q_{cf, \Delta x=1rd, \max}/Q_o$ บน d scale และผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่ออัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ $Q_{cf, \Delta x=1rd, \max}/Q_o$ ที่ไหลผ่าน Control volume ที่มีความยาวตามแนว streamwise $1d$ ($\Delta x=1d$) บน d scale พบว่าเมื่อพิจารณาที่ x/d เดียวกัน เมื่อค่า r เพิ่มขึ้น จะมีค่า $Q_{cf, \Delta x=1rd, \max}/Q_o$ เพิ่มขึ้นตลอดทุกระยะการไหล แสดงว่าเมื่อพิจารณาบน d scale เจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่า r สูง จะมีอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่พุ่งเข้าสู่เจ็ตในระนาบตัดขวางผ่านพื้นผิวที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่สูงกว่าเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่า r ต่ำ เช่นเดียวกับบน rd scale

เมื่อพิจารณาประกอบกับผลการศึกษาความสัมพันธ์ของ E ที่หาได้โดยตรงจากวิธี SPIV กับอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลบน d scale ในรูปที่ 5.4 พบว่ามีอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่พุ่งเข้าสู่เจ็ตในระนาบตัดขวางในแต่ละ x/d ที่สอดคล้องกับ E ในลักษณะเดียวกับบน rd scale ดังนี้

- อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ไร้มิติที่ระยะการไหล $x/d = 4$
ที่ระยะการไหล $x/d = 4$ ตรงกับกรณี $r = 4$ ที่ $x/rd = 1.0$ และกรณี $r = 8$ ที่ $x/rd = 0.5$ จากในรูปที่ 5.4 พบว่าเมื่อค่า r สูงขึ้น ค่า E จะประมาณเท่าเดิม ในขณะที่รูปที่ 9.4 พบว่าเมื่อค่า r สูงขึ้น จะมีค่าสูงสุดของอัตราการไหลของกระแสลม

ขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf,\Delta x=d,\max}/Q_o$ สูงขึ้น แสดงว่าแม้ว่าที่ระยะการไหลแรกค่า E ยังมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เจ็ดในกระแสมวลขวางที่มี r สูงจะมีอัตราการไหลของกระแสมวลขวางบริสุทธิ์พุ่งเข้าเจ็ดมากกว่าเจ็ดในกระแสมวลขวางที่มี r ต่ำ ซึ่งน่าจะเมื่อเจ็ดพัฒนาไปที่ระยะการไหลถัดไปที่ $x/d=6$ กล่าวคือค่า E ของกรณี r สูงจะมากกว่าที่ r ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับที่ระยะการไหลถัดไปคือที่กรณี $r=8$ จะมี E สูงกว่า $r=4$ เนื่องจากอัตราการไหลของกระแสมวลขวางบริสุทธิ์ที่ไหลเข้าสู่เจ็ดนั้นจะแสดงผลที่ระยะการไหลถัดไป

■ อัตราการไหลของกระแสมวลขวางบริสุทธิ์ไร้มิติที่ระยะการไหล $x/d=6$

เช่นเดียวกับที่ $x/d=4$ กล่าวคือที่ $x/d=6$ จะตรงกับกรณี $r=4$ ที่ $x/rd=1.5$, กรณี $r=8$ ที่ $x/rd=0.75$ และกรณี $r=12$ ที่ $x/rd=0.5$ จะพบว่าเมื่อค่า r เพิ่มขึ้น จะมีค่า E สูงขึ้นจะสอดคล้องกับข้อชี้แนะจากระยะการไหลก่อนหน้า และพบว่าเมื่อค่า r สูงขึ้น จะมีค่า $Q_{cf,\Delta x=d,\max}/Q_o$ สูงขึ้น คือที่กรณี $r=12$ จะมากกว่าที่ $r=8$ และ 4 ตามลำดับ จึงชี้แนะได้ว่าในระยะการไหลถัดไปค่า E ของกรณี r สูงจะมากกว่ากรณี r ต่ำ (รูปที่ 9.4)

■ อัตราการไหลของกระแสมวลขวางบริสุทธิ์ไร้มิติที่ระยะการไหล $x/d=12$

เช่นเดียวกับที่ $x/d=4$ และ 6 กล่าวคือที่ $x/d=12$ จะตรงกับกรณี $r=8$ ที่ $x/rd=1.5$ และกรณี $r=12$ ที่ $x/rd=1.0$ พบว่าเมื่อค่า r เพิ่มขึ้น จะมีค่า E สูงขึ้นสอดคล้องกับข้อชี้แนะจากระยะการไหลก่อนหน้า และพบว่าเมื่อค่า r สูงขึ้น จะมีค่า $Q_{cf,\Delta x=d,\max}/Q_o$ สูงขึ้น โดยอัตราการไหลของกระแสมวลขวางบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ดจะแสดงผลในระยะการไหลถัดไป (รูปที่ 9.4)

ดังนั้น จะสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับบน rd scale ว่าเจ็ดในกระแสมวลขวางที่มี r สูงจะมีอัตราการไหลของกระแสมวลขวางบริสุทธิ์จากภายนอกที่ถูกเหนี่ยวนำให้พุ่งเข้าผสมกับเจ็ดผ่านพื้นผิวที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ด ϕ_j คงที่ สูงกว่าเจ็ดในกระแสมวลขวางที่มี r ต่ำบน d scale ส่งผลให้เมื่อ r สูงขึ้น แล้ว E จะสูงขึ้นด้วย

จากหลักฐานเหล่านี้จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลง $Q_{cf,\Delta x,\max}/Q_o$ เทียบกับ r จะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของ E เทียบกับ r ทั้งบน rd scale และบน d scale

9.2 การอภิปรายเปรียบเทียบการ scale อัตราการเหนี่ยวนำการผสม $(\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j$ ด้วย d , rd และ r^2d

เพื่ออภิปรายถึงการสเกลที่เหมาะสมในการสเกลปริมาณที่แสดงถึงอัตราการเหนี่ยวนำการผสม $(\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j$ จึงได้ทดลองสเกลปริมาณนี้ ด้วย d , rd และ r^2d จะแสดงในรูป 9.5ก, 9.5ข และ 9.5ค จากรูปพบว่าค่า $(\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}) \cdot (r^2d \nabla \phi_j)$ บน r^2d scale สามารถแสดงความสัมพันธ์ของ r กับ E ที่เมื่อ r เพิ่มขึ้น แล้ว E เพิ่มขึ้น ได้สอดคล้องมากกว่าบน d และ rd scale ชี้แนะว่าการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวงจะแสดงด้วย r^2d scale ได้เหมาะสมกว่าบน d และ rd scale เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเฉพาะใน 3 scale นี้

อย่างไรก็ตามเนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่มีหลักฐานเพียงพอ จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวงควรแสดงบน scale ไต จึงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป



บทที่ 10

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสมขวาง การเหนี่ยวนำการผสม และโดยเฉพาะกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสมขวาง และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E โดยใช้วิธี Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหล 2 แบบ คือ การใส่อนุภาคเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมขวาง และการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสมขวาง โดยทำการศึกษาที่ค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r เท่ากับ 4, 8, และ 12 ที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวาง Re_{cf} เท่ากับ 3,100 ที่ระนาบ $x/rd = 0.5, 0.75, 1.0$ และ 1.5 และมีรูปร่างความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตหลัก (Initial velocity profile) เป็นแบบ Fully-developed turbulent pipe flow

10.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E)

จากการศึกษาโดยใช้วิธี Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมขวาง เพื่อให้สามารถระบุและแบ่งแยกส่วนของเจ็ตออกจากส่วนของกระแสมขวางบริสุทธิ์รอบข้างได้ ทำให้สามารถหาอัตราการไหลของเจ็ต ณ หน้าตัดใดๆ (volume flowrate) และหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ตในกระแสมขวางได้โดยตรงและแม่นยำ เมื่อพิจารณาบน rd scale พบว่าที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลแต่ละค่า เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream จะมีค่า E เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ x/rd เดียวกัน เมื่อค่า r เพิ่มขึ้น E จะมีค่า เพิ่มขึ้น แสดงว่าเมื่อพิจารณาบน rd scale เจ็ตในกระแสมขวางที่มีค่า r สูง จะมีค่า E สูงกว่าเจ็ตในกระแสมขวางที่มีค่า r ต่ำ (รูปที่ 5.1) โดยความสัมพันธ์ระหว่าง E กับ x/rd สามารถ fit ได้ด้วยสมการ power law (สมการที่ 5.1)

ในขณะที่บน d scale เมื่อพิจารณาที่ระยะใกล้ปากทางออกเจ็ต (near field) เจ็ตในกระแสมขวางที่มีค่า r ต่างกันจะให้ ค่า E ที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาไปตามแนว downstream (far field) แล้ว ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E กับระยะการไหลที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r ต่างกัน จะเริ่มแยกออกจากกัน โดยที่เจ็ตในกระแสมขวางที่มีค่า r สูง จะมีค่า E สูงกว่าเจ็ตในกระแสมขวางที่มีค่า r ต่ำ (รูปที่ 5.4)

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าบน d scale สามารถ collapse อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ตในกระแสมขวาง ได้ดีกว่าบน rd scale ที่บริเวณ near field

10.2 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางในระนาบตัดขวางการไหล กรณี

$r = 4, 8$ และ 12

- โครงสร้าง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสมขวางในระนาบตัดขวางการไหล กรณี $r = 4, 8$ และ 12

จากการศึกษาโดยใช้วิธี Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมขวาง ร่วมกับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสมขวาง จะมีการตีความการทดลองดังนี้

- (A) ผลการทดลองในกรณีใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมขวาง ซึ่งจะแสดงถึงคุณสมบัติของเจ็ต หรือ ส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) และโครงสร้างของส่วนผสมของเจ็ตเท่านั้น ไม่รวมคุณสมบัติของกระแสมขวางบริสุทธิ์
- (B) ผลการทดลองในกรณี ใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและกระแสมขวาง จะแสดงคุณสมบัติของสนามการไหลโดยรวม ไม่มีการแยกแยะว่าคุณสมบัตินั้นเป็นของเจ็ตหรือของกระแสมขวางบริสุทธิ์
- (C) ผลการทดลองในกรณี $C=B-A$ โดยใช้หลักการในบทที่ 3 ตามสมการที่ 3.6 ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติของกระแสมขวางบริสุทธิ์

จึงทำให้สามารถศึกษาโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสมขวาง การเหนี่ยวนำการผสม และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสมขวาง ได้

ก. ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลที่จุดใดๆ

จากการศึกษาพบว่าที่บริเวณกลางเจ็ตจะเป็นบริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูง ($\phi_j \approx 1$) และเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสมขวางบริสุทธิ์ ϕ_{cf} ต่ำ ($\phi_{cf} \approx 0$) โดยเมื่อเริ่มเคลื่อนที่ออกจากกลางเจ็ตไปยังขอบเจ็ต ϕ_j จะลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง จนมีค่าเป็น 0 ที่กระแสมขวางบริสุทธิ์ภายนอกและในขณะที่ ϕ_{cf} จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนมีค่าสูงใกล้เคียง 1 ($\phi_{cf} \approx 1$) ที่ขอบเจ็ต (A, C ของรูปที่ 6.1ก, 7.1ก และ 7.4ก)

นอกจากนี้พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น เจ็ตในกระแสลมขวางกรณี $r = 8$ และ 12 ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตสูงสุด $\phi_{j,\max}$ มีค่าน้อยกว่า $\phi_{j,\max}$ ของเจ็ตในกระแสลมขวางกรณี $r = 4$ แสดงว่าเจ็ตในกระแสลมขวางกรณี $r = 8$ และ 12 มีความปั่นป่วนและไม่คงตัว (unsteady) สูงกว่า (รูปที่ 7.7ก)

ข. ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง

Converging-Diverging vertical channel of high upward flow

จากการศึกษาพบว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ต (Jet-CVP) เหนี่ยวนำให้เกิดช่องการไหลในแนวตั้ง (Converging-Diverging (C-D) vertical channel of high upward flow) ที่บริเวณกลางเจ็ตระหว่างคู่ CVP โดยที่ส่วน converging ของ vertical channel ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ $\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$ จะมีลักษณะพุ่งขึ้นประมาณตั้งฉากกับเส้น contour lines ของ ϕ_j คงที่ เข้าสู่เจ็ตตามแนวของ vertical channel

เจ็ตเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน

โครงสร้าง CVP ของเจ็ตจะเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริเวณด้านข้างของเจ็ตทั้งสองข้างให้มีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน downward- inward-and-upturn (C ของรูปที่ 6.1ก, 7.1ก และ 7.4ก) ลงมาที่ด้านใต้ของเจ็ตที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j ต่ำและไหลขึ้นต่อเข้าไปในส่วนคอดเข้า converging ของช่องการไหลในแนวตั้ง (vertical channel) ที่อยู่ประมาณเส้น contour lines ตั้งแต่ ϕ_j ต่ำถึง $\phi_j < 0.75 - 0.95$ จนกระทั่งเข้าไปถึงบริเวณคอดคอด (throat) ของ vertical channel ที่อยู่ระหว่างเส้น contour lines ของ $\phi_j \approx 0.95 - 0.99$ แสดงว่าที่บริเวณ throat ของ vertical channel กระแสลมขวางจะถูกเหนี่ยวนำและผสมเข้ากับเจ็ตจนกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) จนเกือบหมดแล้ว (A ของรูปที่ 6.1ก, 7.1ก และ 7.4ก) ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าส่วน converging ของ vertical channel มีการเหนี่ยวนำการผสมสูงและจะผสมเกือบเสร็จสิ้นแล้วที่บริเวณนี้ นอกจากนี้จะพบว่าบริเวณที่มีอัตราการเหนี่ยวนำสูงจะอยู่ที่บริเวณ $0.25 < \phi_j < 0.75$ เนื่องจากในบริเวณนี้มีการเปลี่ยนแปลงของ ϕ_j ต่อระยะทาง $(\nabla \phi_j)$ สูง และสอดคล้องกับบริเวณที่มี $(\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}) \cdot (d\nabla \phi_j)$ สูง (รูปที่ 6.4, 7.3 และ 7.6)

ค. ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise

จากการศึกษาพบ “โครงสร้างรูปไต” หรือ “Kidney-shaped structure” เป็นบริเวณที่ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $(V_{j,x} / u_{cf})$ มีค่าสูง และ “โครงสร้างรูป

อ่าว” หรือ “Gulf region” เป็นบริเวณที่ $V_{j,x}/u_{cf}$ มีค่าต่ำทั้งในเจ็ตและในกระแสลมขวาง (A-C ของรูปที่ 6.1ข, 7.1ข และ 7.4ข)

นอกจากนี้พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น โครงสร้างรูปไตจะวางตัวที่ตำแหน่งสูงขึ้น และแกนของโครงสร้างรูปไตจะหดสั้นลง (รูปที่ 7.7ข)

ง. ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse

จากการศึกษาพบโครงสร้างของความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y}/u_{cf}$ 2 บริเวณ คือ 1) บริเวณที่มีค่า $V_{j,y}/u_{cf}$ เป็นบวกที่กลางเจ็ต มี local peak ของค่าบวก 2 peaks วางตัวเรียงกันในแนวตั้ง (transverse) โดย positive local peak บริเวณบนจะตรงกับโครงสร้างรูปไต ((A) ของรูปที่ 6.1ค, 7.1ค และ 7.4ค) ในขณะที่ positive local peak บริเวณล่างจะประมาณได้ว่าตรงกับส่วนคอตเข้า converging ของช่องการไหลในแนวตั้ง (vertical channel) และตรงกับกึ่งกลางของสนามความเร็วของโครงสร้าง CVP และ 2) บริเวณที่ $V_{j,y}/u_{cf}$ มีค่าเป็นลบขนาดเล็ก 2 บริเวณ วางตัวอยู่ที่ทั้งสองข้างของบริเวณที่ $V_{j,y}/u_{cf}$ มีค่าเป็นบวกและมี local peak ของค่าลบ 2 peaks อยู่ในตำแหน่งระดับเดียวกันกับ positive local peak บริเวณล่าง โดยกระแสลมขวางจะถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตให้มีความเร็วในแนว transverse พุ่งลง (ติดลบ) ที่บริเวณด้านข้างของเจ็ตในและมีทิศทางสอดคล้องกับการหมุนของ CVP (B, C ของรูปที่ 6.1ค, 7.1ค และ 7.4ค)

นอกจากนี้พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น ค่าความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y}/u_{cf}$ สูงสุดที่บริเวณกลางเจ็ตจะวางตัวที่ตำแหน่งสูงขึ้น (รูปที่ 7.7ค)

จ. ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise

จากการศึกษาพบโครงสร้างหลักของ $V_{j,z}/u_{cf}$ 2 คู่ คู่ซ้ายและคู่ขวา แต่ละคู่จะประกอบไปด้วย lobe 2 lobes ที่มีเครื่องหมายและขนาดที่ต่างกัน lobe บนจะมีขนาดใหญ่กว่า lobe ล่าง และแต่ละ lobe จะมีเครื่องหมายสอดคล้องกับทิศทางการหมุนวนของโครงสร้าง CVP ของเจ็ต คือจะมีทิศทางพุ่งออกจากเจ็ต (ระนาบสมมาตร) ด้านบน (lobe บน) แล้วพุ่งเข้าเจ็ตที่ด้านล่าง (lobe ล่าง) โดยจากเครื่องหมายที่แตกต่างกันนี้ทำให้เกิดจุดอานม้า (Saddle point) ที่กลางเจ็ต หรือ จุดที่ lobe ทั้ง 4 บรรจบกัน (A, B ของรูปที่ 6.1ง, 7.1ง และ 7.4ง) โดยกระแสลมขวางจะถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตให้มีความเร็วในแนว spanwise ตามทิศทางการหมุนของ CVP (C ของรูปที่ 6.1ค, 7.1ค และ 7.4ค)

นอกจากนี้พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น ค่าสูงสุดของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise แต่ละ r มีขนาดใกล้เคียงกัน (รูปที่ 7.5ง)

ฉ. vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise

จากการศึกษาในกรณี $r=4$ จะพบโครงสร้าง counter rotating vortex pairs 3 คู่ ในขณะที่กรณี $r=8$ และ 12 จะพบเพียง 2 คู่เท่านั้น โดย vortex ที่พบจะแตกต่างกันทั้งขนาดรูปร่างและเครื่องหมาย โดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ต (Jet-CVP) จะมีขนาดใหญ่และมีกำลังมากที่สุดอยู่ที่บริเวณกลางเจ็ต และจะมีค่าสูงสุดของขนาดของ $\omega_{j,x} d / u_{cf}$ อยู่ที่บริเวณหัวของรูปร่างจุลภาคทั้งสอง อนึ่ง โครงสร้าง CVP ของเจ็ต จะพบในทุกกรณีของ r

นอกจากนี้พบว่าบน rd scale เจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่า r สูง vorticity เฉลี่ยไร้มิติตามแนว streamwise จะลดลงเร็วกว่าเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่า r ต่ำ (รูปที่ 7.5ฉ)

ช. ความสัมพันธ์ของโครงสร้างของปริมาณต่างๆของเจ็ตในกระแสลมขวาง

จากการศึกษาพบว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ต มีความสัมพันธ์กับความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลที่จุดใดๆ, สนามความเร็วเฉลี่ยไร้มิติและความเร็วของเจ็ตในกระแสลมขวาง สอดคล้องกันในทุกกรณีของ r กล่าวคือบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูง จุดอานม้า (Saddle point) และบริเวณ throat ของช่องการไหลในแนวตั้งจะอยู่ตรงกับบริเวณกึ่งกลางของโครงสร้างของคู่ CVP ของเจ็ต (Jet-CVP) (a, d และ e ของรูปที่ 6.2, 7.2 และ 7.5)

โครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure) จะอยู่ตรงกับบริเวณส่วนหางของโครงสร้าง CVP ของเจ็ตคล้ายเป็นส่วนต่อเชื่อมหางของรูปร่างจุลภาคของ CVP เข้าด้วยกัน (d, e ของรูปที่ 6.2, 7.2 และ 7.5))

นอกจากนี้เมื่อเจ็ตพัฒนาจาก upstream ไป downstream โครงสร้าง CVP ของเจ็ตจะเหนี่ยวนำช่องการไหลในแนวตั้ง (vertical channel) และ positive local peak บริเวณกลางของ $V_{j,y} / u_{cf}$ ให้เกิดขึ้นและขับเคลื่อนให้คงอยู่ไปตลอดแนวการไหล ในขณะที่ positive local peak บริเวณบนซึ่งไม่มีกลไกในการเหนี่ยวนำและขับเคลื่อนให้คงอยู่ไปตลอดตามแนวการไหลจะค่อยๆ สลายไป ซึ่งชี้แนะว่า Positive local peak บริเวณบนนี้ เกิดจาก momentum เริ่มต้นตามแนว transverse ที่ปากทางออกของเจ็ตที่คงเหลืออยู่ (รูปที่ 7.1ค (A), 7.1จ (A) และ 7.4ค (A), 7.4จ (A))

▪ กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบตัดขวางการไหล

โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเป็นโครงสร้างสำคัญในกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางนี้ กล่าวคือ โครงสร้าง CVP ของเจ็ตจะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่อยู่บริเวณด้านข้างทั้งสองของเจ็ต ให้มีการเคลื่อนแบบหมุนวนในทิศพุ่งลง-พุ่งเข้าและ-พุ่งขึ้น (downward-inward-and-upturn) เข้าสู่ทางเข้ารูประฆังคว่ำ (bell-shaped inlet) ของช่องการไหลในแนวตั้ง (Converging-Diverging vertical channel) ที่ขอบด้านใต้ของเจ็ต โดยมีความเร็ว $\vec{V}_{cf,yz}$ ประมาณตั้งฉากกับ contour line ที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตคงที่ (รูป (C) ของ 6.2, 7.2 และ 7.5)

กระแสลมขวางบริสุทธิ์ดังกล่าวจะถูกเหนี่ยวนำให้ไหลขึ้นตามแนวตั้ง เข้าไปผสมอย่างต่อเนื่องในส่วนคอตัดเข้า converging ของช่องการไหลในแนวตั้ง โดยที่บริเวณ $0.25 < \phi_j < 0.75$ ที่อยู่ตรงกับส่วนคอตัดเข้า converging ของช่องการไหลในแนวตั้งนี้เป็นบริเวณที่มี $\nabla\phi_j$ สูงและมี $(\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}) \cdot \nabla\phi_j$ สูง แสดงว่าที่บริเวณนี้มีการเหนี่ยวนำการผสมสูงและการเหนี่ยวนำการผสมจะเกือบเสร็จสิ้นแล้วที่บริเวณส่วนนี้ ทำให้เมื่อของไหลไหลเข้าไปถึงส่วน throat ของช่องการไหลในแนวตั้ง (ที่ตรงกับบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูง หรือ $\phi_j > 0.95$) จะกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) เกือบหมดแล้ว (รูป a ของ 6.2, 7.2 และ 7.5 และ รูปที่ 6.4, 7.3 และ 7.6)

หลังจากที่กระแสลมขวางบริสุทธิ์ถูกเหนี่ยวนำจนกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) เกือบหมดแล้วที่บริเวณ throat ของช่องการไหลในแนวตั้งซึ่งตรงกับบริเวณอ่าว (gulf region) ที่มีความเร็วเฉลี่ยรัศมีตามแนวแกน streamwise $V_{j,x} / u_{cf}$ ต่ำ (รูป b ของ 6.2, 7.2 และ 7.5) ส่วนผสมของเจ็ตที่มี $V_{j,x} / u_{cf}$ ต่ำในบริเวณอ่าวนี้อาจจะถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่โครงสร้างรูปไตของเจ็ตเอง ที่เป็นบริเวณที่มีความเร็วเฉลี่ยรัศมีตามแนวแกน streamwise $V_{j,x} / u_{cf}$ สูง ที่โอบล้อมอยู่เหนือบริเวณอ่าว (รูป A ของ 6.2b, 7.2b และ 7.5b) ซึ่งจะคล้ายคลึงกับการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (Free-jet) โดยจะสามารถสรุปเป็นโมเดลของกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลได้ในรูปที่ 6.3

▪ การอธิบายการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร เมื่อค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเพิ่มขึ้น ด้วยกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหล

เพื่อที่จะสอบสวน กลไกการเหนี่ยวนำการผสมที่พบในงานวิจัยนี้ จึงนำกลไกการเหนี่ยวนำการผสมที่พบมาอธิบายในเชิงปริมาณ โดยพิจารณาคำนวนอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลเข้าสู่เจ็ตผ่านพื้นผิวเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตคงที่และค่าสูงสุดของอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์รัศมี $Q_{cf,\Delta x,max} / Q_0$ ซึ่งใช้ประมาณเป็นอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่

ถูกเหนี่ยวนำเข้าผสมกับเจ็ต พบว่าเมื่อค่า r สูงขึ้น ค่าสูงสุดของอัตราการผลิตของกระแสลมขวาง บริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf,\Delta x,\max}/Q_o$ จะสูงขึ้น สอดคล้องกับค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E ที่ได้จากการวัดโดยตรงด้วยวิธี SPIV ที่มีค่าสูงขึ้นตาม r โดยจะสอดคล้องทั้งบน d scale และ บน rd scale

10.3 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบสมมาตรไหล กรณี $r = 4, 8$ และ 12

- โครงสร้าง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสลมขวางในระนาบสมมาตรการไหล กรณี $r = 4, 8$ และ 12

ก. ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลที่จุดใดๆ

จากการศึกษาพบว่าที่บริเวณกลางเจ็ตจะเป็นบริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูง ($\phi_j \approx 1$) และเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ϕ_{cf} ต่ำ ($\phi_{cf} \approx 0$) โดยเมื่อเริ่มเคลื่อนที่ออกจากกลางเจ็ตไปยังขอบเจ็ต ϕ_j จะลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง จนมีค่าเป็น 0 ที่กระแสลมขวางบริสุทธิ์ภายนอก ในขณะที่ ϕ_{cf} จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนมีค่าสูงใกล้เคียง 1 ($\phi_{cf} \approx 1$) ที่ขอบเจ็ต (A, C ของรูปที่ 8.1ก, 8.3ก และ 8.5ก)

นอกจากนี้พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น เจ็ตสามารถพุ่งทะลุ (penetrate) เข้าไปในกระแสลมขวางตามแนว transverse มากขึ้น (รูปที่ 8.7ก)

ข. ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง

จากการศึกษาพบว่าสามารถแบ่งบริเวณของเจ็ตโดยสังเขปได้ 2 บริเวณสอดคล้องกับบริเวณที่เกิดการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์ของเจ็ต โดยเจ็ตในกระแสลมขวางกรณี $r = 4$ จะสามารถแบ่งแยกบริเวณของเจ็ตได้ชัดเจนมากกว่ากรณี $r = 8$ และ 12 ดังนี้

- 1) **Kidney-shaped region อยู่ที่ด้าน Windward ของเจ็ต** : พบว่ามีการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้ามาผสมโดยเกิดขึ้นจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ตามแนว streamwise $\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}$ เท่านั้น แต่จะไม่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ตามแนว tranverse พิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ ในขณะที่ $(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j < 0$ (C ของรูปที่ 8.1ก, 8.3ก และ 8.5ก) โดยการเหนี่ยวนำจะเกิดจากโครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ต

- 2) Counter rotating vortex pair (CVP) region ที่ด้าน Leeward และด้านล่างของเจ็ต : พบว่ามีการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้ามาผสมโดยเกิดขึ้นจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ตามแนว transverse $\vec{V}_{cf,y} / u_{cf}$ เท่านั้น แต่จะไม่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ตามแนว streamwise พิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,y} / u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ ในขณะที่ $(\vec{V}_{cf,x} / u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j \approx 0$ (C ของรูปที่ 8.1ก, 8.3ก และ 8.5ก) โดยการเหนี่ยวนำจะเกิดจากโครงสร้าง CVP ของเจ็ต

ค. ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise

จากการศึกษาพบ “โครงสร้างรูปไต” หรือ “Kidney-shaped structure” เป็นบริเวณที่ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน streamwise $V_{j,x} / u_{cf}$ มีค่าสูง และ “โครงสร้างรูปอ่าว” หรือ “Gulf region” เป็นบริเวณที่ $V_{j,x} / u_{cf}$ มีค่าต่ำทั้งในเจ็ตและในกระแสลมขวาง (A-C ของรูปที่ 8.1ข, 8.3ข และ 8.5ข) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในระนาบตัดขวาง (รูปที่ 7.5)

นอกจากนี้พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น โครงสร้างรูปไตจะวางตัวที่ตำแหน่งสูงขึ้น และแขนของโครงสร้างรูปไตจะหดสั้นลง (รูปที่ 8.7ข)

ง. ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse

จากการศึกษาพบโครงสร้างของความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y} / u_{cf}$ 2 บริเวณ คือ 1) ที่บริเวณด้านหน้า (Windward) ของเจ็ต เมื่อเจ็ตพัฒนาไปตามแนว downstream แล้ว Local peak ส่วนนี้จะสลายตัวไป เนื่องจากไม่มีกลไกช่วยในการขับเคลื่อนให้คงอยู่ตามแนวการไหล ซึ่งจะเกิดจากโมเมนตัมที่ปากทางออกของเจ็ตที่คงเหลืออยู่ และ 2) ที่บริเวณด้านหลัง (Leeward) หรือด้านล่างของเจ็ต เมื่อเจ็ตพัฒนาไปตามแนว downstream แล้ว Local peak ส่วนนี้ยังคงอยู่ เนื่องจากถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นและขับเคลื่อนให้คงอยู่ไปได้ตลอดตามแนวการไหลโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในระนาบตัดขวางการไหลหัวข้อที่ 6.4 และ 7.4 (A ของรูปที่ 8.1ค, 8.3ค และ 8.5ค)

นอกจากนี้พบว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น ค่าความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน transverse $V_{j,y} / u_{cf}$ สูงสุดที่บริเวณกลางเจ็ตจะวางตัวที่ตำแหน่งสูงขึ้น (รูปที่ 8.7ค)

จ. ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise

จากการศึกษาพบโครงสร้างหลักของความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติตามแนวแกน spanwise $V_{j,z} / u_{cf}$ ที่ด้าน Leeward ของเจ็ต เมื่อเจ็ตพัฒนาไปตามแนว downstream แล้ว พบว่า $V_{j,z} / u_{cf}$

ยังคงอยู่ โดยจะวางตัวตรงกับบริเวณที่พบค่า $V_{j,y}/u_{cf}$ สูงสุดในระนาบสมมาตร เนื่องจากถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นและขับเคลื่อนให้คงอยู่ด้วยโครงสร้าง CVP (A ของรูปที่ 8.1ง, 8.3ง และ 8.5ง)

ฉ. vorticity เฉลี่ยไว้มิติตามแนว spanwise

จากการศึกษาพบโครงสร้าง vorticity ของเจ็ตเฉลี่ยไว้มิติตามแนวแกน spanwise $\omega_{j,z}d/u_{cf}$ ที่แสดงถึงโครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ต ซึ่งเป็นโครงสร้าง ณ ขณะใดๆ (instantaneous structure) ที่เมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยจะปรากฏเป็นโครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure) จะเหนี่ยวนำให้เกิดการผสมขึ้น 2 ส่วน คือ 1) โครงสร้าง Spanwise rollers ที่มีค่า $\omega_{j,z}d/u_{cf}$ เป็นบวก จะเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ด้าน Windward มีการเคลื่อนที่เข้าสู่เจ็ตและจะเกิดการเหนี่ยวนำการผสมจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนวแกน streamwise เท่านั้น ไม่เกิดจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว tranverse โดยพิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}) \cdot \nabla\phi_j > 0$ ในขณะที่ $(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla\phi_j < 0$ และ 2) โครงสร้าง Spanwise rollers ที่มีค่า $\omega_{j,z}d/u_{cf}$ เป็นลบ จะเหนี่ยวนำให้เจ็ตและส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) ที่ด้านใต้ในโครงสร้างอ่าว (Gulf region) เข้าผสมกับโครงสร้างรูปไตของเจ็ต คล้ายการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (Free-jet) (A ของรูปที่ 8.1จ, 8.3จ และ 8.5จ) ซึ่งจะสอดคล้องกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางที่พบในงานวิจัยนี้

- กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบสมมาตรการไหล
- กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบสมมาตรจะเกิดขึ้น 2 ส่วน ดังนี้

1) กลไกการเหนี่ยวนำการผสมที่ด้าน Windward

พบว่าที่ด้าน Windward เป็นบริเวณที่โครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ตโดดเด่น และสรุปได้ว่าโครงสร้าง Spanwise rollers ของเจ็ตที่วางตัวอยู่ตรงกับโครงสร้างรูปไตที่มี $V_{j,x}/u_{cf}$ สูง จะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่เข้ามาปะทะเจ็ตที่ด้านหน้าให้เข้ามาผสมโดยความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว streamwise $\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}$ เท่านั้น ในขณะที่ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว tranverse จะไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม พิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,x}/u_{cf}) \cdot \nabla\phi_j > 0$ ในขณะที่ $(\vec{V}_{cf,y}/u_{cf}) \cdot \nabla\phi_j < 0$

2) กลไกการเหนี่ยวนำการผสมที่ด้าน Leeward

พบว่าที่ด้าน Leeward หรือด้านใต้ของเจ็ตเป็นบริเวณที่โครงสร้าง CVP ของเจ็ตโดดเด่น จึงสรุปได้ว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ต จะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ด้านใต้ของเจ็ตซึ่งเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์ ϕ_{cf} สูงให้เข้าสู่เจ็ตและเกิดการเหนี่ยวนำการผสมจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว transverse เท่านั้น แต่จะไม่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ตามแนว streamwise พิจารณาจาก $(\vec{V}_{cf,y} / u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j > 0$ ในขณะที่ $(\vec{V}_{cf,x} / u_{cf}) \cdot \nabla \phi_j \approx 0$ สอดคล้องกับผลการศึกษาในระนาบตัดขวาง

ต่อมากระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ถูกเหนี่ยวนำการผสมจนเกือบจะกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต (jet-fluid mixture) หมดแล้ว จะไหลเข้าสู่บริเวณโครงสร้างอ่าว (Gulf region) ที่มี $V_{j,x} / u_{cf}$ ต่ำ ตรงกับบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j สูง ได้โครงสร้างรูปไตที่มี $V_{j,x} / u_{cf}$ สูง จากนั้นโครงสร้าง Spanwise rollers ที่มีเครื่องหมายลบของเจ็ต จะเหนี่ยวนำส่วนผสมของเจ็ตที่บริเวณนี้ให้เข้าผสมกับโครงสร้างรูปไตของเจ็ตเอง คล้ายการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (Free-jet)



ประมวลดาราง

จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Work	Actual r	\bar{E}							Empirical Curve Fit		
		$x/r/d$ = 0.25	Experimental Data						a_E	b_E	R^2
			0.5	0.75	1	1.5	2.0	3.0			
Present work	4.01		4.51	5.36	6.31	7.24		4.98	0.639	0.95	
Witayaparakom (2013)	3.9±0.3		2.88	4.23	4.82	5.39		3.48	0.68	0.93	
Srimekharat (2013)	3.9±0.3		2.91	3.91	4.89	5.36		3.33	0.683	0.94	
Dawyok (2014)	4.2		3.22	4.55	5.43	7.12		4.36	0.86	0.99	
Wongthongsiri (2014)	4.02		4.44	5.67	6.37	6.47		4.88	0.496	0.92	
Tekhuad (2016)	4.02		4.44	5.51	5.88	7.86		5.22	0.628	0.97	
Soupramongkol (2016)	4.02		4.21	5.54	6.40	7.48		5.12	0.520	0.97	
\bar{E}	$\bar{r} = 4.05$	2.96	3.80	4.97	5.73	6.70		4.43	0.626	0.98	
S_E	$S_r = 0.082$	0.760	0.720	0.688	1.00						
S_E / \bar{E}	$S_r / r = 0.02$	0.2	0.145	0.120	0.149						
Precision uncertainty of \bar{E} $P_E = tS_E / \sqrt{N}$	$P_r = 0.076$	0.703	0.666	0.636	0.925						
Fraction of precision uncertainty of \bar{E} , P_E / \bar{E}	$P_r / r = 0.019$	0.185	0.134	0.111	0.138						

$r = 4$

ตารางที่ 5.1 ก ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล $r = 4$ และค่าสัมประสิทธิ์ a_E , b_E

Work	Actual r	\bar{E}						Empirical Curve Fit		
		Experimental Data						a_E	b_E	R^2
		$x/rd = 0.25$	0.5	0.75	1	1.5				
Present work	8.02		6.14	8.11	9.27	11.77	8.31	0.648	0.99	
Wongthongiri (2014)	7.96	4.86	6.32	8.36	9.50	10.95	8.21	0.534	0.97	
Soupramongkol (2015)	7.96	6.70	8.37	9.41	10.95		8.29	0.545	0.94	
Tekhuad (2016)	7.93	6.16	8.69	9.41	11.13		8.29	0.485	0.98	
\bar{E}	$\bar{r} = 7.97$	4.68	6.332	8.382	9.417	11.2	8.28	0.55	0.98	
S_E	$S_r = 0.035$		0.260	0.240	0.107	0.389				
S_E / \bar{E}	$S_r / r = 0.004$		0.041	0.029	0.001	0.089				
Precision uncertainty of \bar{E} $P_E = tS_E / \sqrt{N}$	$P_r = 0.056$		0.414	0.382	0.170	0.619				
Fraction of precision uncertainty of \bar{E} , P_E / \bar{E}	$P_r / r = 0.007$		0.065	0.046	0.018	0.055				

ตารางที่ 5.1๗ ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล $r = 8$ และค่าสัมประสิทธิ์ a_E , b_E

Work	\bar{E}									
	Actual r	Experimental Data					Empirical Curve Fit			
		$x/rd = 0.25$	0.5	0.75	1	1.5	a_E	b_E	R^2	
Present work	12.11	8.5	12.27	14.06	16.25	12.57	0.556	0.92		
Wongthongsiri (2014)	12.22	10.03	11.75	14.13	15.2	12.2	0.504	0.95		
Wangkiat et. al (2015)	12.21	8.99	10.85	13.29	15.68	11.84	0.558	0.99		
Tekhuad (2016)	12.21	9.81	11.05	12.77	15.66	11.91	0.487	0.99		
\bar{E}	$\bar{r} = 12.19$	9.33	11.48	13.56	15.7	12.14	0.51	0.97		
S_E	$S_r = 0.052$	0.713	0.654	0.651	0.428					
S_E / \bar{E}	$S_r / \bar{r} = 0.004$	0.1113	0.078	0.069	0.038					
Precision uncertainty of \bar{E} $P_E = tS_E / \sqrt{N}$	$P_r = 0.083$	1.135	1.041	1.036	0.681					
Fraction of precision uncertainty of \bar{E} , P_E / \bar{E}	$P_r / \bar{r} = 0.007$	0.122	0.091	0.076	0.043					

$r = 12$

ตารางที่ 5.1ค ค่าอัตราส่วนการเห็นว่นำการผสมเชิงปริมาตรของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล $r = 12$ และค่าสัมประสิทธิ์ a_E , b_E

r		$E = 1 + a_E \left(\frac{x}{d} \right)^{b_E}$		
		a_E	b_E	R^2
$r = 4$	E	2.49	0.520	0.983
$r = 8$	E	2.16	0.648	0.993
$r = 12$	E	2.57	0.646	0.963

ตารางที่ 5.2 ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของแต่ละอัตราส่วนความเร็ว
ประสิทธิผลบน d scale และค่าสัมประสิทธิ์ a_E , b_E



r	y/rd	ตำแหน่ง x/rd			$\frac{y}{rd} = a_T \left(\frac{x}{rd} \right)^{b_T}$		
		0.5	0.75	1.0	a_T	b_T	R^2
$r = 4$	$y_{curf,1}/rd$	0.924	1.10	1.22	1.21	0.361	0.993
	$y_{curw,1}/rd$	0.791	0.954	1.07	1.06	0.389	0.993
$r = 8$	$y_{curf,1}/rd$	1.22	1.42	1.53	1.53	0.306	0.994
	$y_{curw,1}/rd$	1.13	1.29	1.39	1.38	0.275	0.998
$r = 12$	$y_{curf,1}/rd$	1.36	1.52	1.63	1.66	0.306	0.990
	$y_{curw,1}/rd$	1.26	1.41	1.51	1.53	0.290	0.994

ตารางที่ 5.3 เส้นทาง การเติบโตของเจ็ตที่นิยามจากความเร็วเฉลี่ยและ vorticity ตามแนวแกน streamwise และค่าสัมประสิทธิ์ a_T , b_T

r	ตำแหน่ง x/rd			$\frac{\Gamma}{u_{cd}} = a_C \left(\frac{x}{rd} \right)^{b_C}$		
	0.5	0.75	1.0	a_C	b_C	R^2
$r = 4$	5.24	4.25	4.06	3.96	-0.386	0.973
$r = 8$	9.53	7.59	6.94	6.98	-0.425	0.978
$r = 12$	14.6	13.0	10.4	10.8	-0.458	0.965

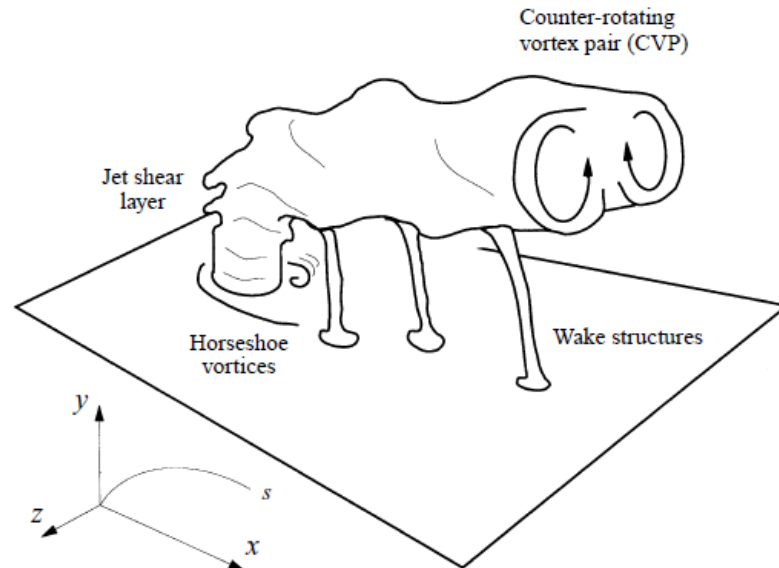
ตารางที่ 5.4 Circulation และค่าสัมประสิทธิ์ a_C , b_C



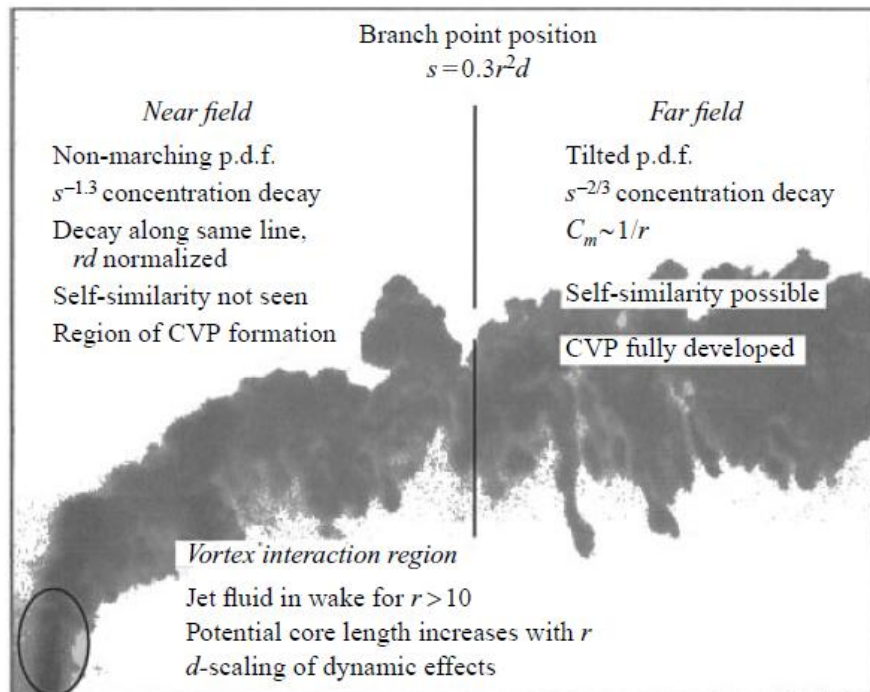
ประมวลรูปภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

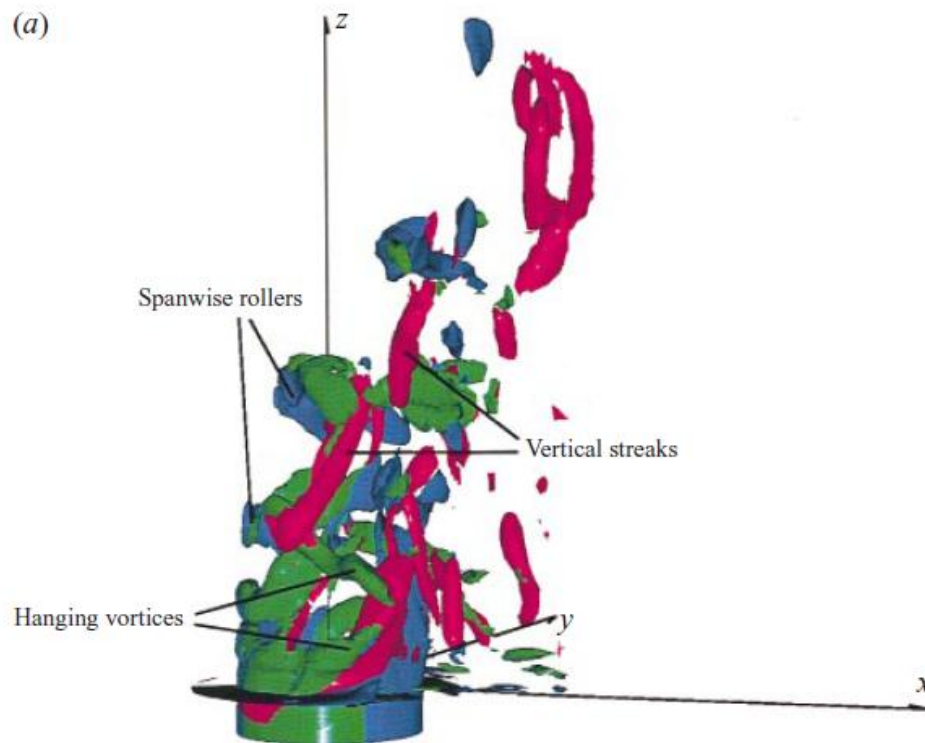
บทที่ 2



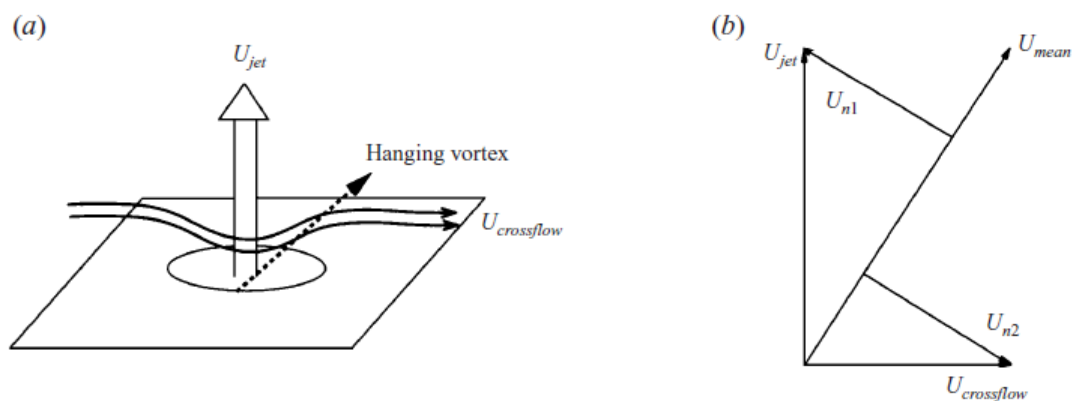
รูปที่ 2.1 ลักษณะของ Coherent vortical structures ของ JICF (Fric and Roshko, 1994)



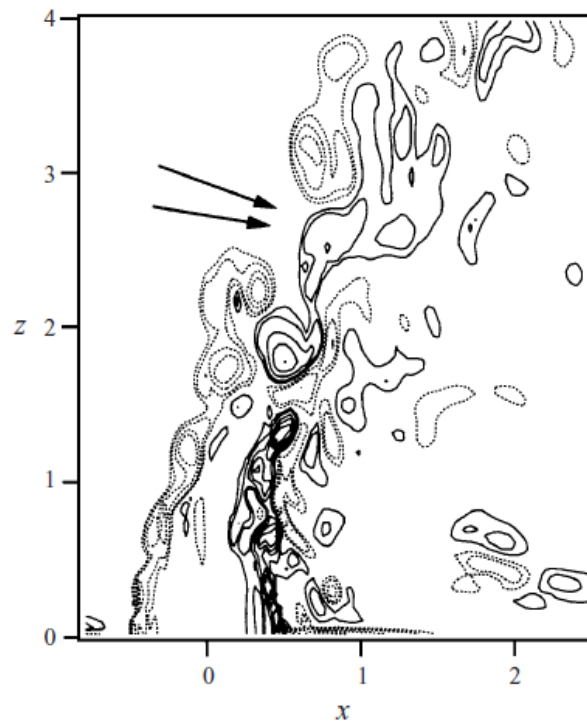
รูปที่ 2.2 ลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ $b_c = 10$ ถึง $b_c = 25$ (Smith and Mungal, 1998)



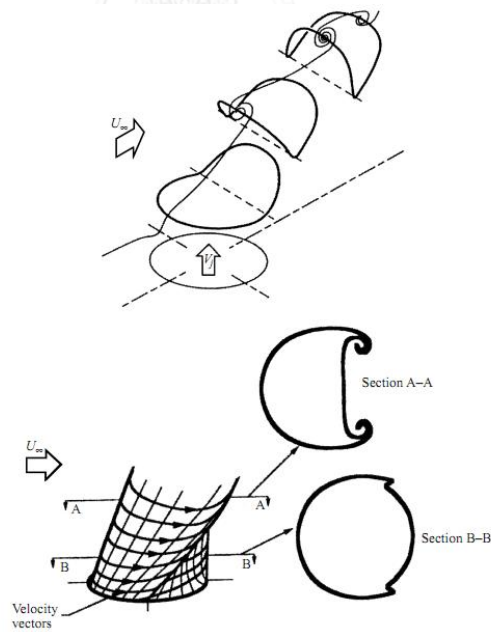
รูปที่ 2.3 แบบจำลองของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยพล็อต Isosurface ของ Vorticity (Yuan *et al.*, 1999)



รูปที่ 2.4 (a) Hanging vortex and orientations of JICF U_{jet} = bulk velocity and $U_{Crossflow}$ is crossflow velocity (b) Vector sum of relevant velocities (Yuan *et al.*, 1999)



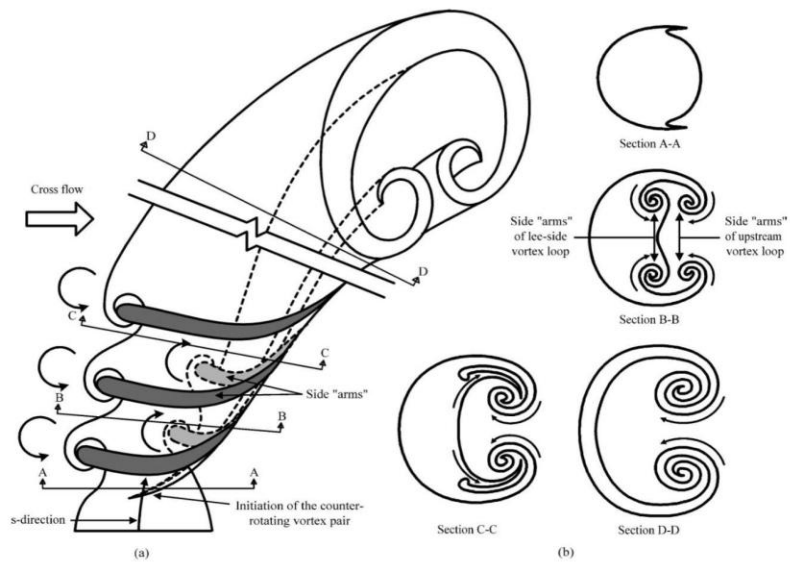
รูปที่ 2.5 โครงสร้าง Spanwise roller (Yuan *et al.*, 1999)



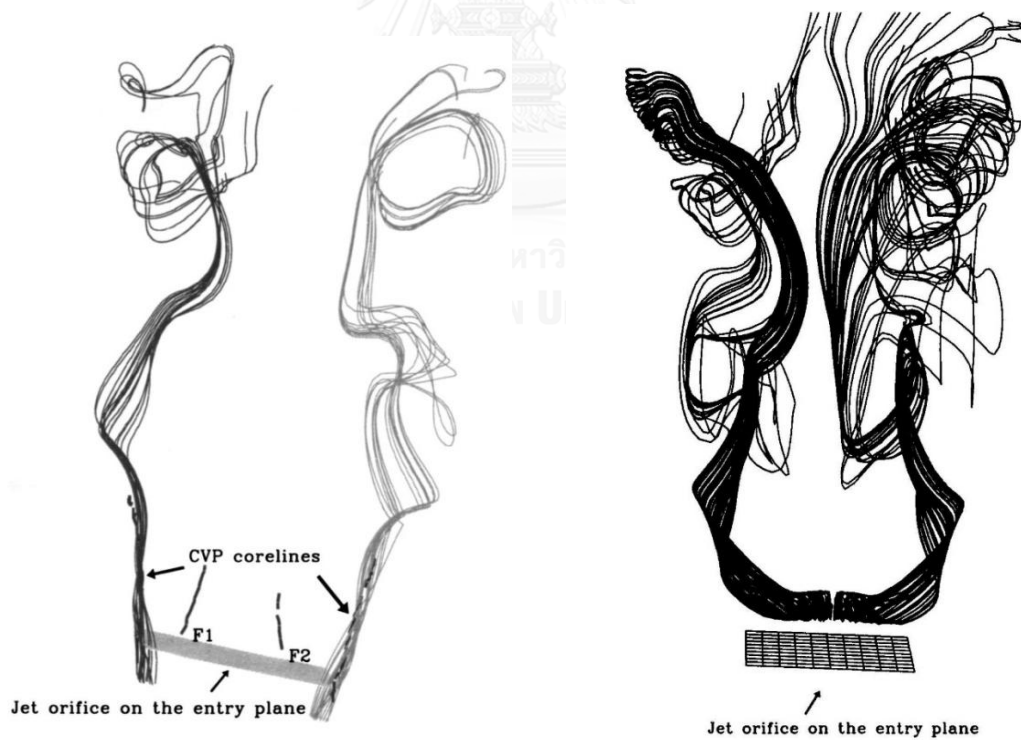
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของการเกิดเป็น CVP (Cortelezzi and Karagozian, 2001)

(ก) มุมมอง Isometric ของ Jet shear layer vortex ring

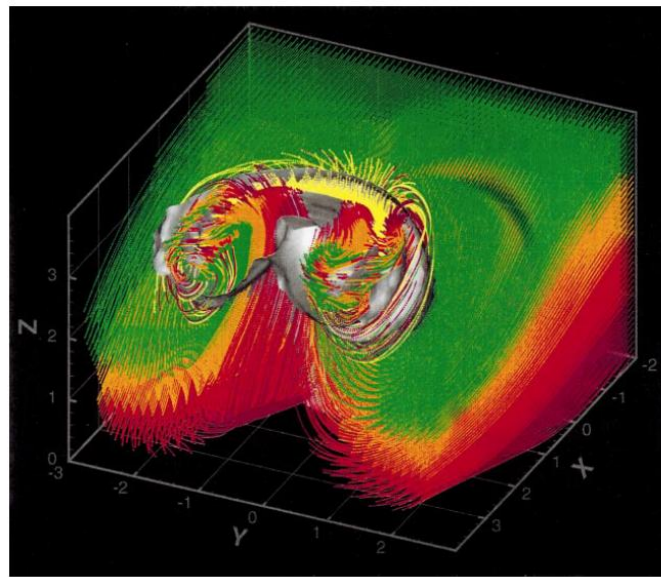
(ข) Schematic diagram ของการเปลี่ยนตำแหน่งของ shear layer vorticity



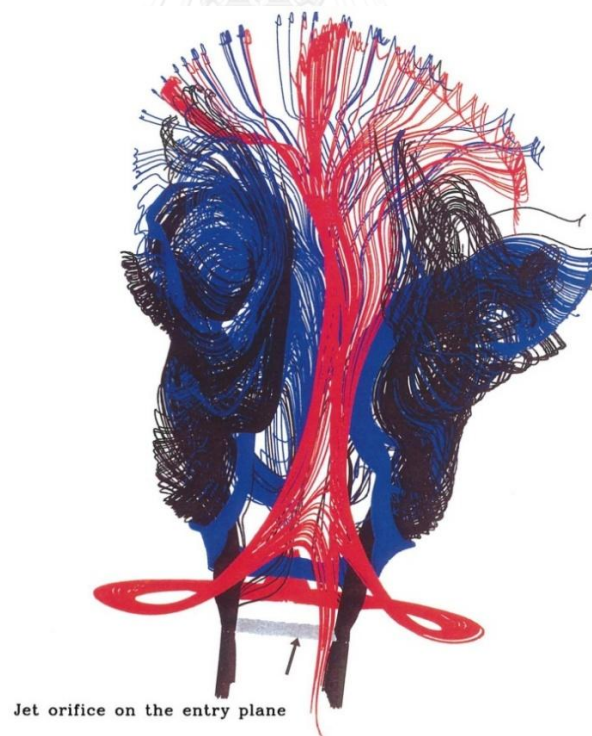
รูปที่ 2.7 แบบจำลองการพับตัวของ Cylindrical shear layer (Lim *et. al.*, 2001)



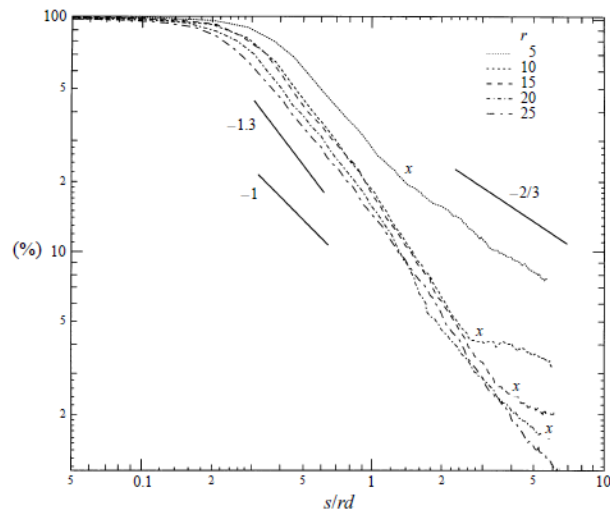
รูปที่ 2.8 วิวัฒนาการของ streamlines ในการก่อตัวโครงสร้าง CVP (ซ้าย) และ Kelvin-Helmholtz roller (ขวา) (Sau *et. al.*, 2004)



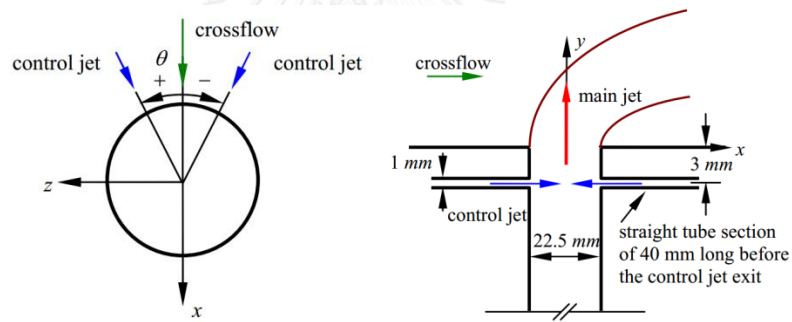
รูปที่ 2.9 Vorticity field และ streaklines ของกระแสลมขวาง
(Cortelezzi and Karagozian, 2001)



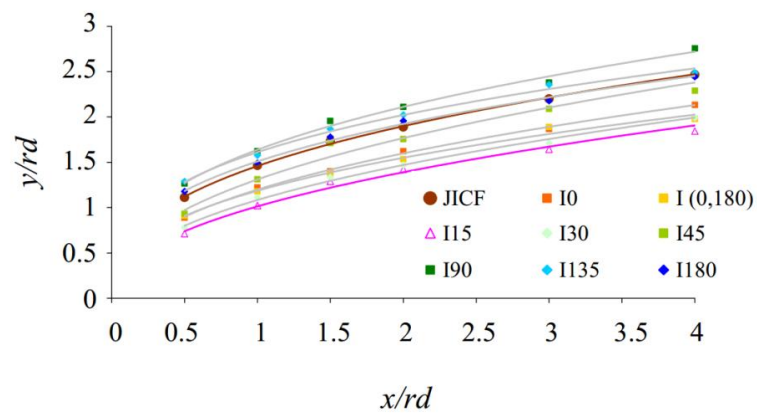
รูปที่ 2.10 โครงสร้าง horseshoe vortex ถูกดึงดูดเข้าผสมกับเจ็ตหลักผ่านกึ่งกลาง CVP
((Sau et. al., 2004)



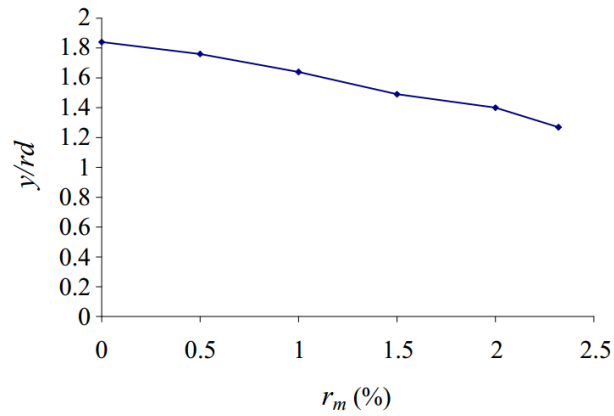
รูปที่ 2.11 การลดลงของ % Passive scalar concentration ของ JICF และ Free jet ที่ Near field เมื่อสเกลด้วย rd (Smith and Mungal, 1998)



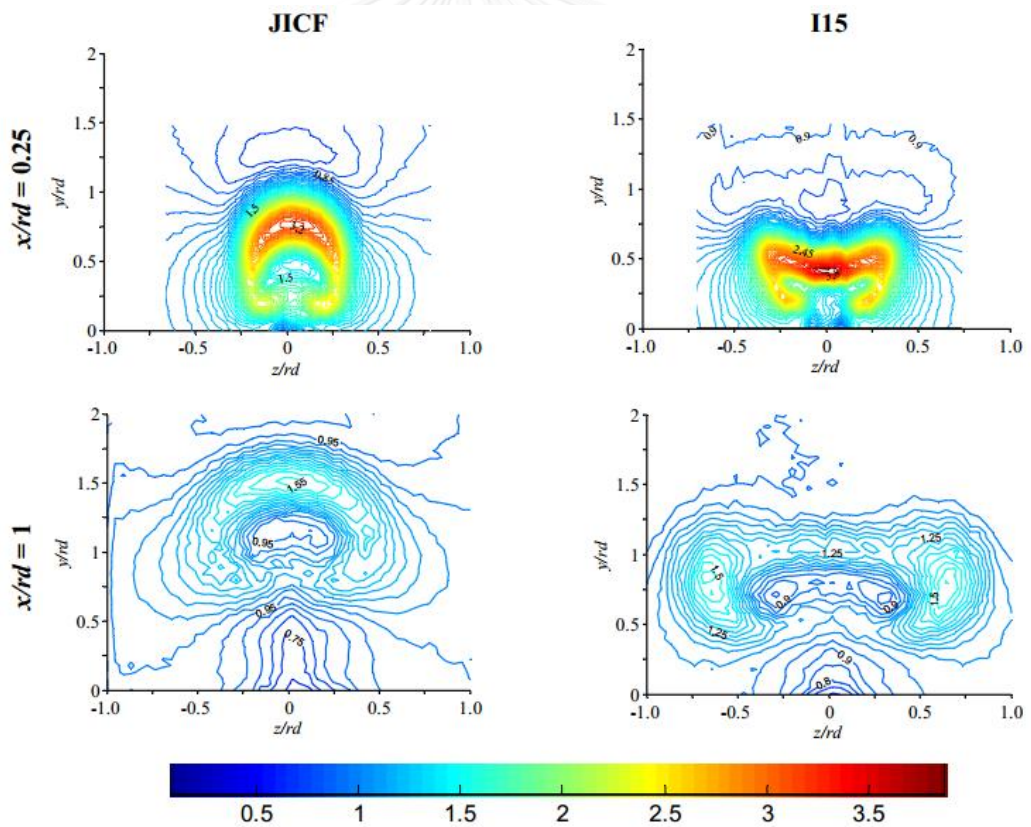
รูปที่ 2.12 ชุดเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Kornsri et. al., 2009)



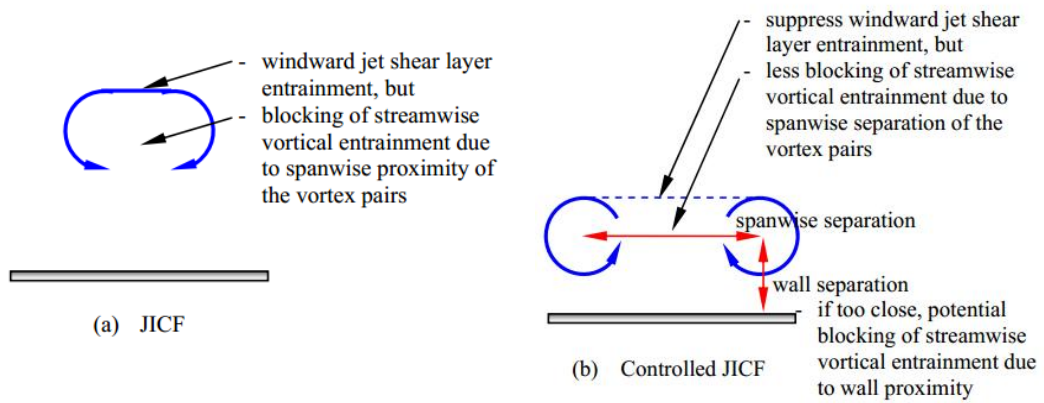
รูปที่ 2.13 ผลของเจ็ตควบคุมต่อเส้นทางเดินของความเร็วเจ็ต (Kornsri et. al., 2009)



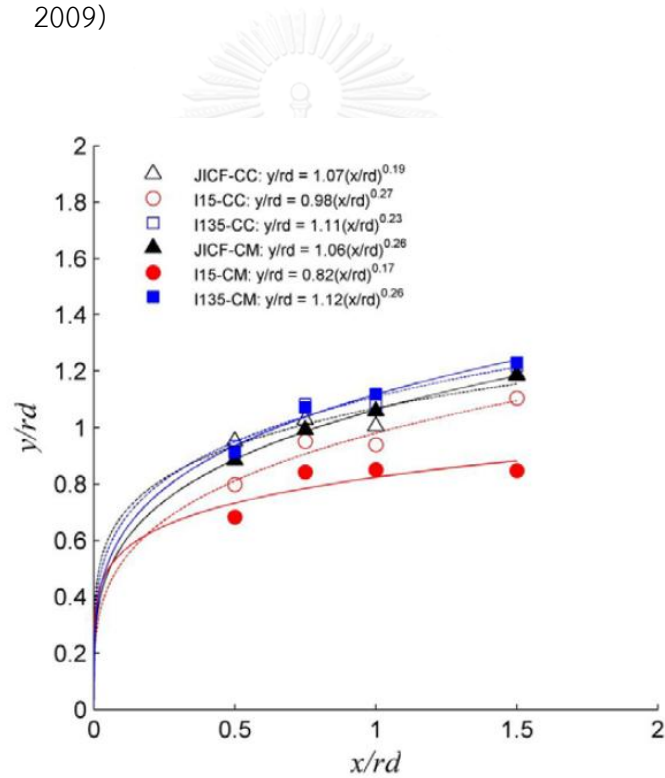
รูปที่ 2.14 ผลของปริมาณ r_m ต่อการ Penetration ของเส้นทางเดินของความเร็วเจ็ตที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ ที่ตำแหน่งมุม $\theta = \pm 15^\circ$ (Kornsri et. al., 2009)



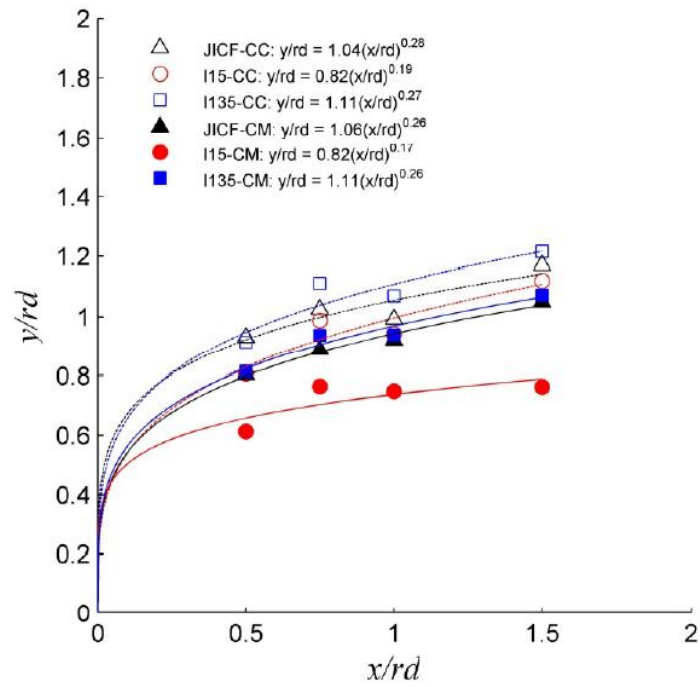
รูปที่ 2.15 Contour ของความเร็วเฉลี่ย (V/u_{cf}) เปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม กับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่มุม $\theta = \pm 15^\circ$, $r_m = 2\%$ (Kornsri et. al., 2009)



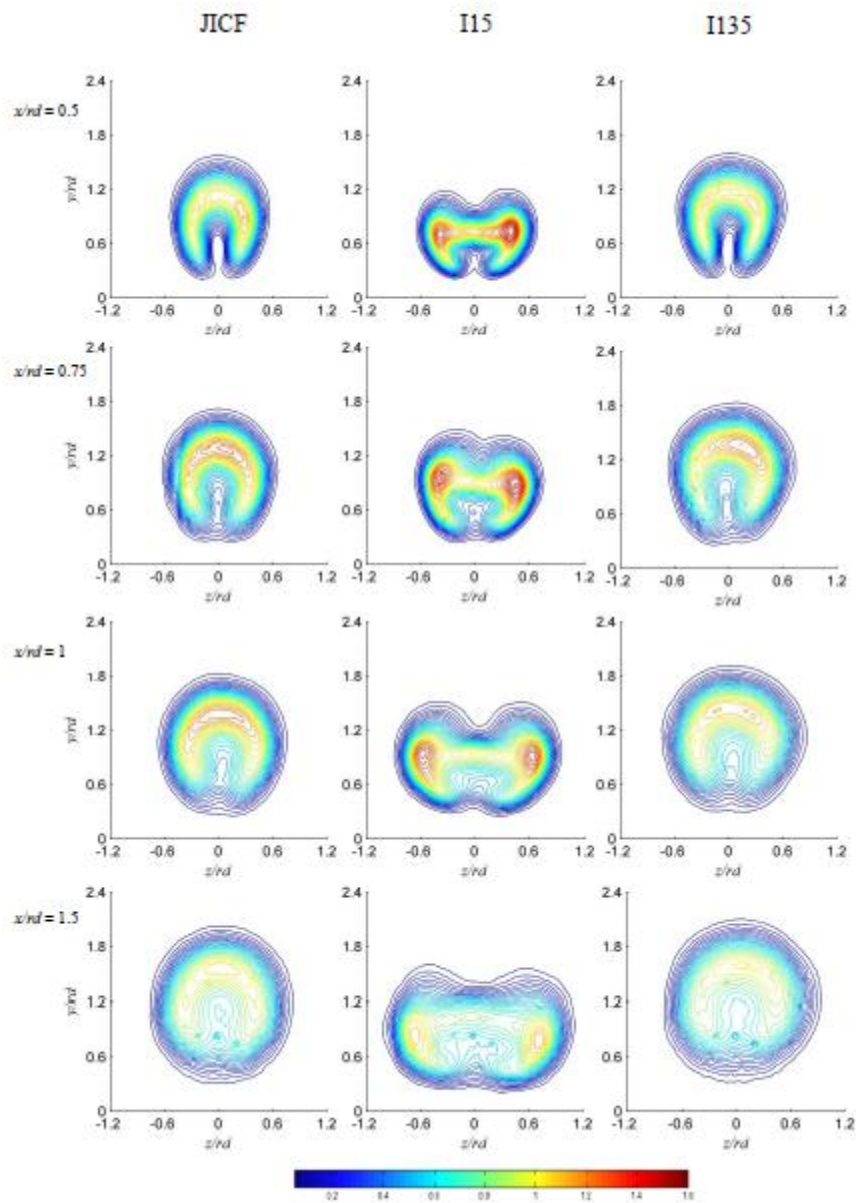
รูปที่ 2.16 แนวคิดกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง (Kornsri et. al., 2009)



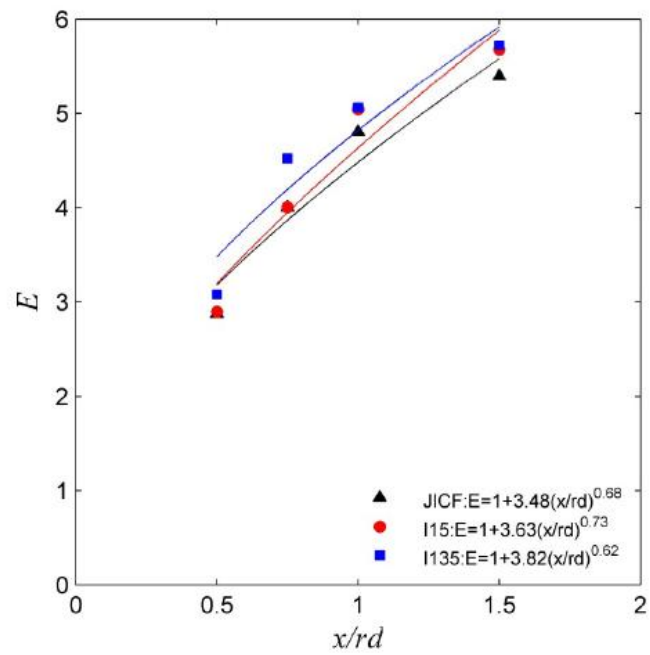
รูปที่ 2.17 CC และ CM ของผลรวมความเร็ว (V) กรณี JICF, I15 และ I135 (Witayaprapakorn, 2013)



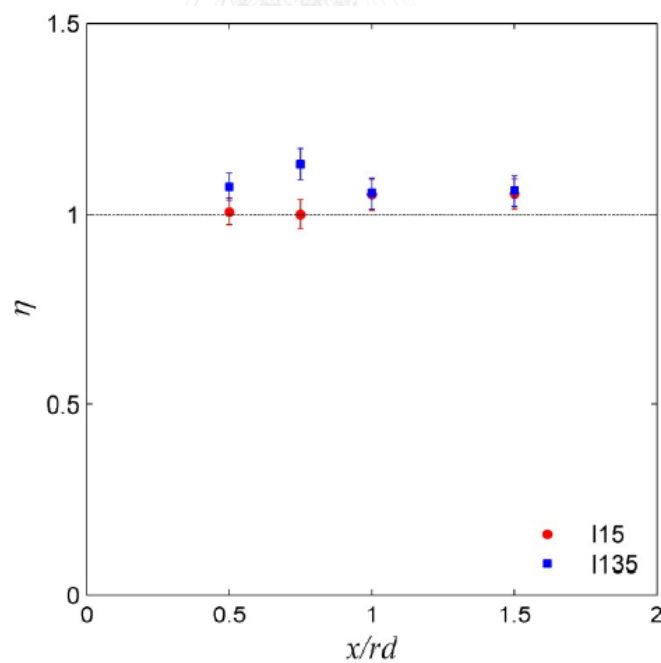
รูปที่ 2.18 CC และ CM ของ vorticity (ω_x) กรณี JICF, I15 และ I135 (Witayaprapakorn, 2013)



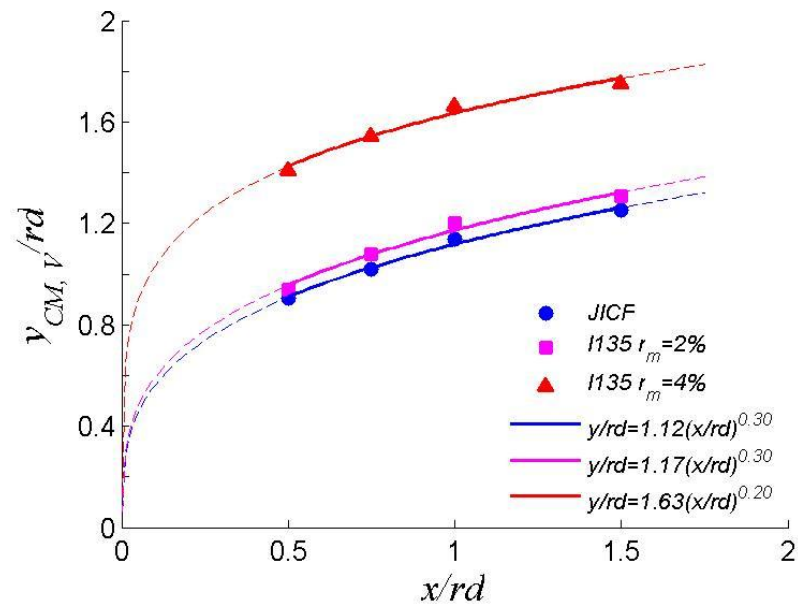
รูปที่ 2.19 การกระจายตัวผลรวมความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ต่อกระแสมขวาง (V_x / u_c) กรณี JICF, I15 และ I135 (Witayaprapakorn, 2013)



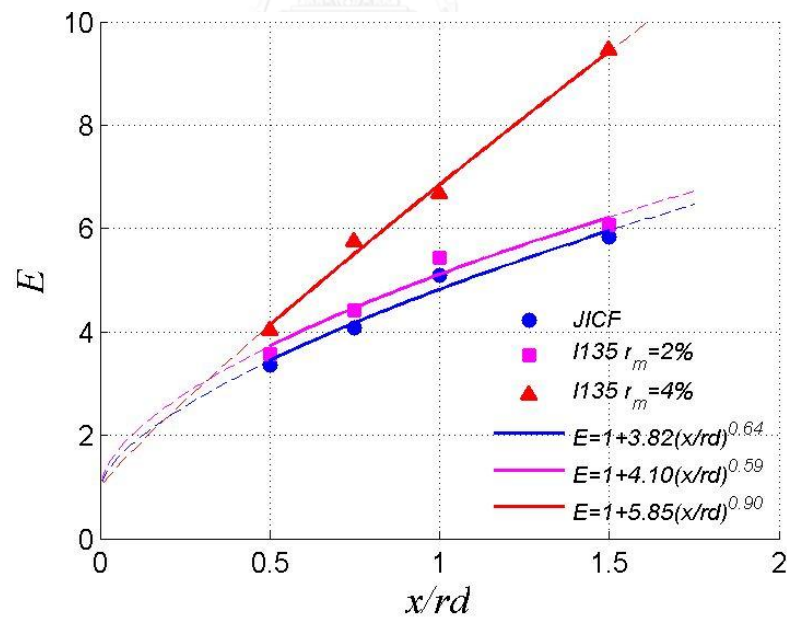
รูปที่ 2.20 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Witayaprapakorn, 2013)



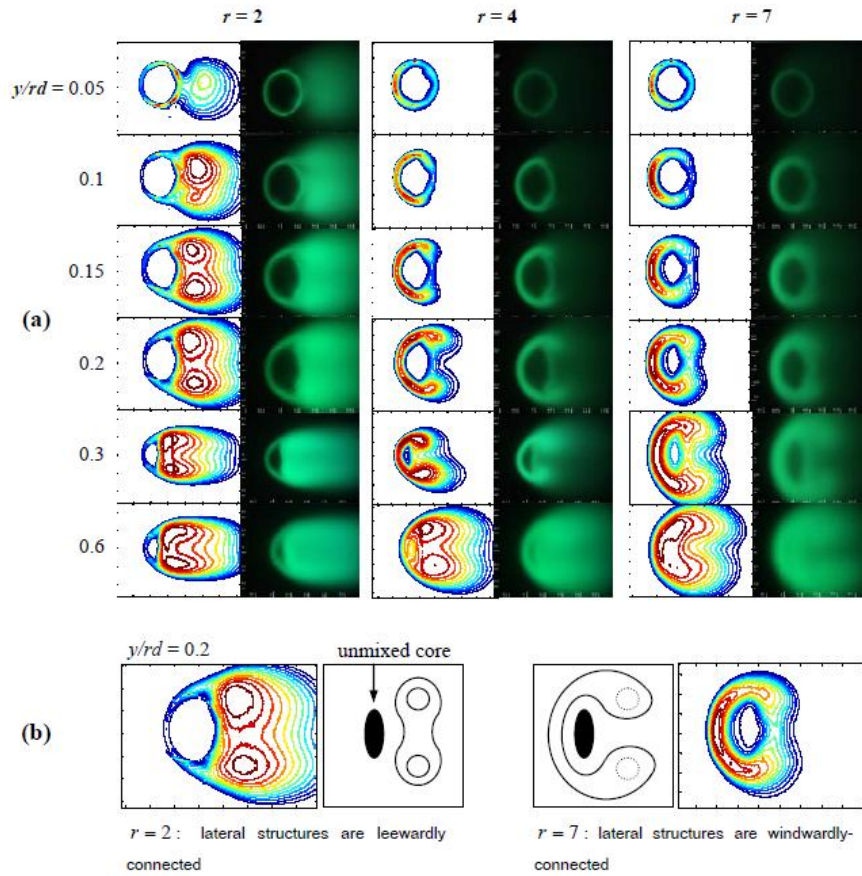
รูปที่ 2.21 ประสิทธิภาพของเจ็ดควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Witayaprapakorn, 2013)



รูปที่ 2.22 ผลอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อเส้นทางการเดินในกรณี JICF, I135 $r_m = 2\%$ และ I135 $r_m = 4\%$ (Chaikasetsin *et al.*, 2014)

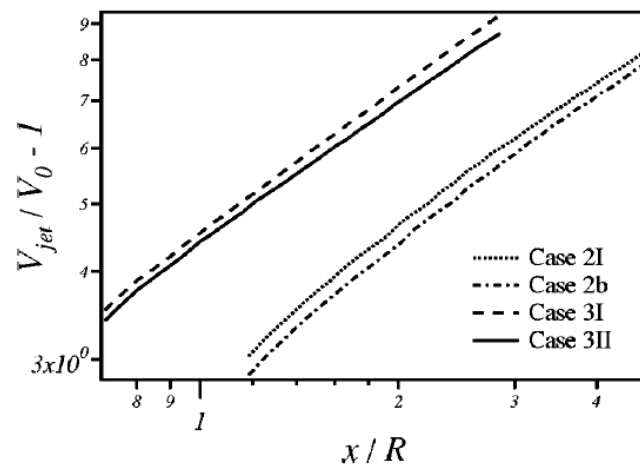


รูปที่ 2.23 ผลอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำอาหารผสมในกรณี JICF, I135 $r_m = 2\%$ และ I135 $r_m = 4\%$ (Chaikasetsin *et al.*, 2014)

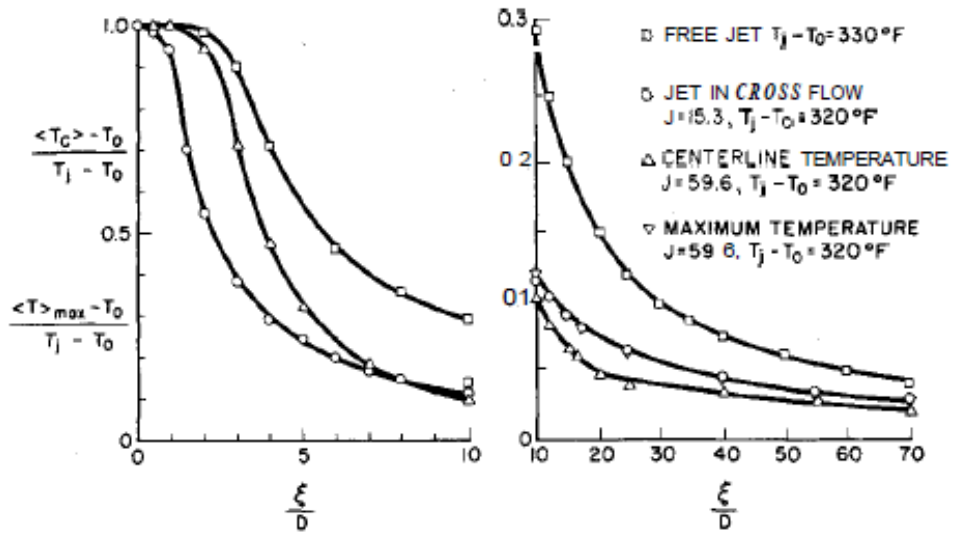


รูปที่ 2.24 การพัฒนาตัวของเจ็ตที่มีมุมมอง top view (Watakulsin et al., 2010)

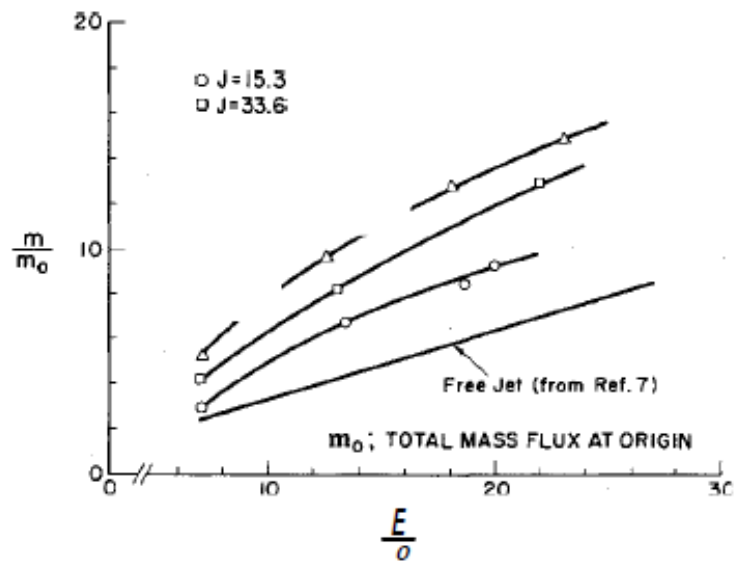
- a.) ภาพเฉลี่ยวแบบ contour และ ภาพจริง
- b.) การเชื่อมกันของ lateral vortical roll up



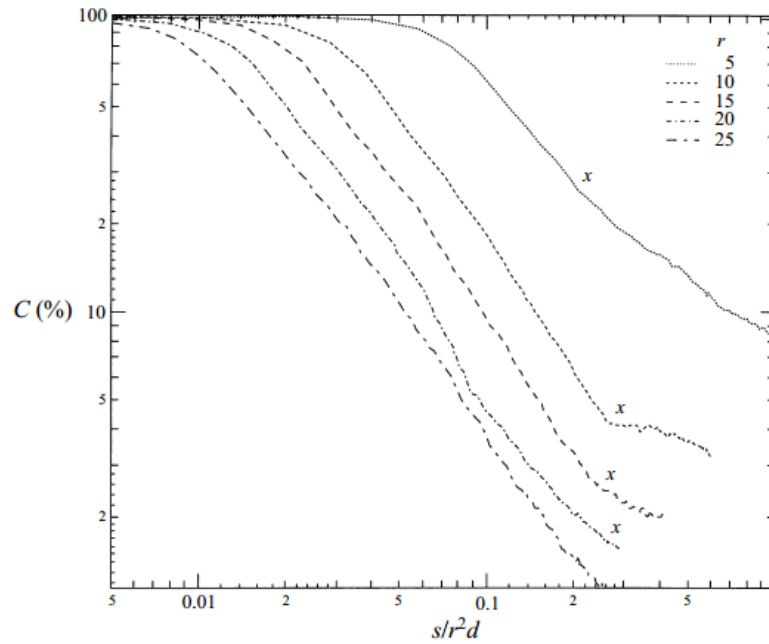
รูปที่ 2.25 ความชันของความสัมพันธ์ระหว่าง $\dot{V}_{jet} / \dot{V}_0 - 1$ และ x/rd บน Log-Log Scale (Yuan and Street, 1998)



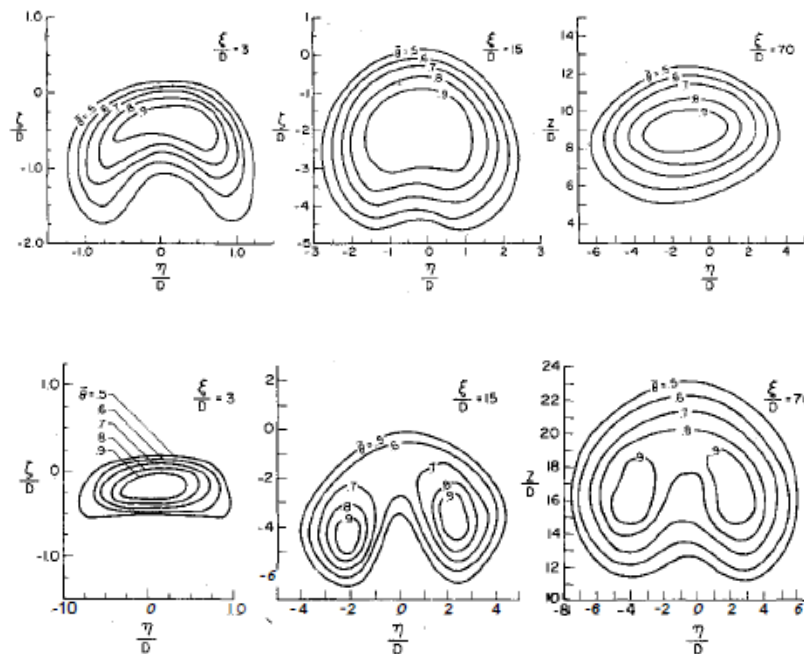
รูปที่ 2.26 การลดลงของอุณหภูมิต่อระยะทาง Temperature decay (Karmatoni and Greber, 1972)



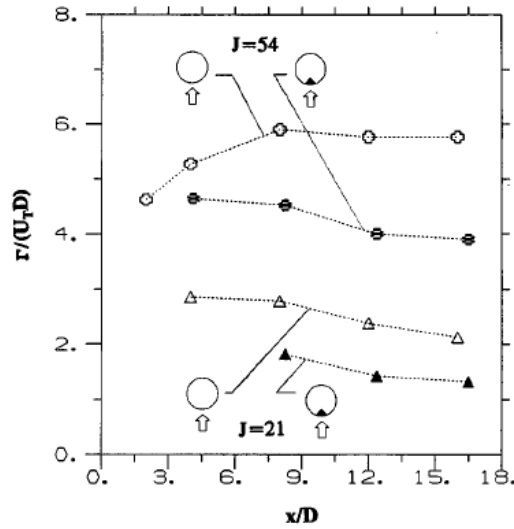
รูปที่ 2.27 การกระจายตัวของฟลักซ์ของมวลเจ็ตตามการไหล mass flux (Karmatoni and Greber, 1972)



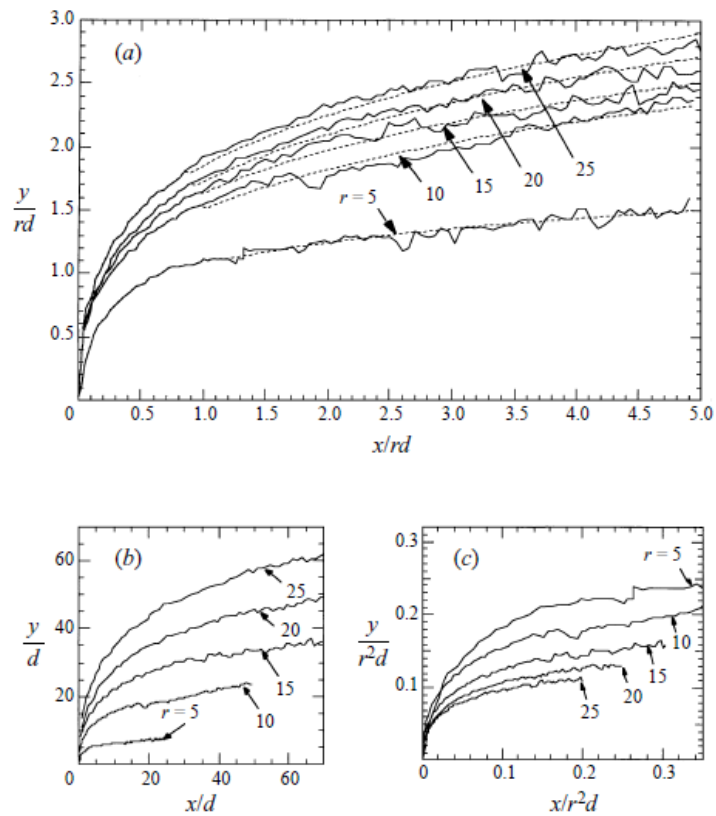
รูปที่ 2.28 การลดลงของ % Passive scalar concentration ของ JICF และ Free jet ที่ Near field เมื่อสเกลด้วย r^2d ที่ $r = 5-25$ (Smith and Mungal, 1998)



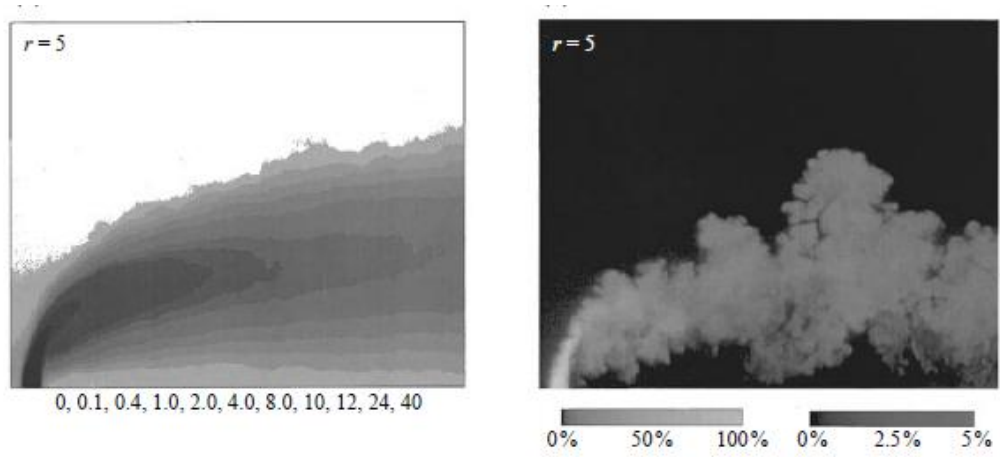
รูปที่ 2.29 การกระจายตัวของอุณหภูมิ Temperature distribution (Karmatoni and Greber, 1972) โดย $r_M = 15.3$ (บน) และ $r_M = 59.6$ (ล่าง)



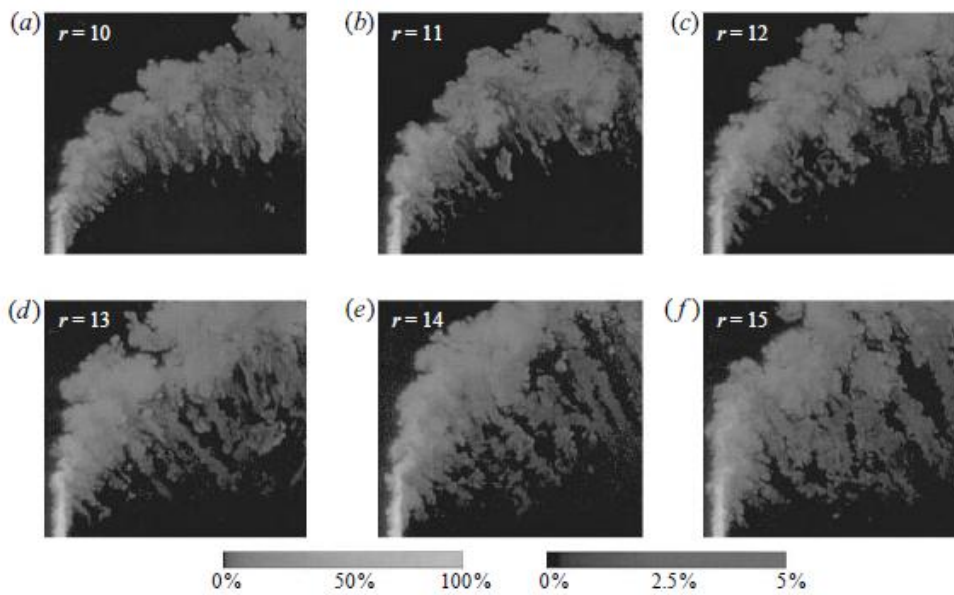
รูปที่ 2.30 Circulation ของเจ็ตที่ด้านหนึ่งของแกนสมมาตร (Zaman and Foss, 1997)



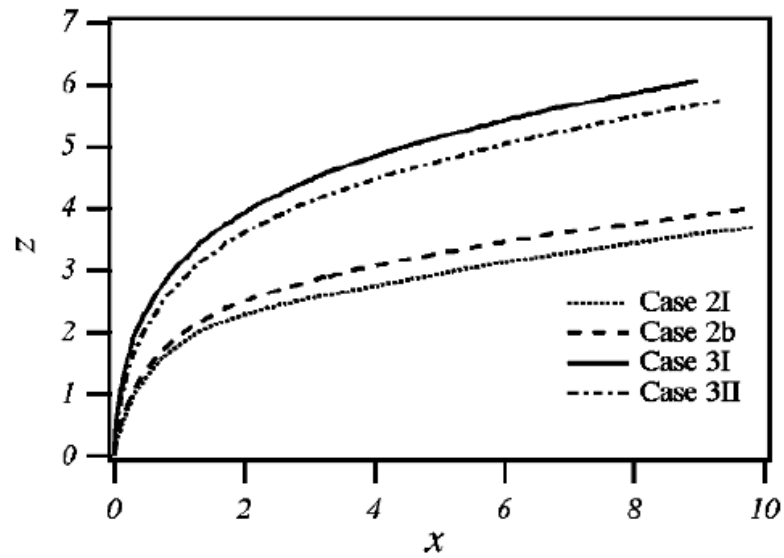
รูปที่ 2.31 เส้นทางเดินของ Passive scalar concentration โดย scale ด้วย (a) rd (b) d และ (c) $r^2 d$ (Smith and Mungal, 1998)



รูปที่ 2.32 การคงอยู่ของเงืงที่ผนัง ที่ $r=5$ โดย ภาพเฉลี่ย (ซ้าย) และภาพ ณ ขณะใดๆ (ขวา) (Smith and Mungal, 1998)



รูปที่ 2.33 มุมมองด้านข้างของเงืงที่ r ต่างๆกัน (Smith and Mungal, 1998)



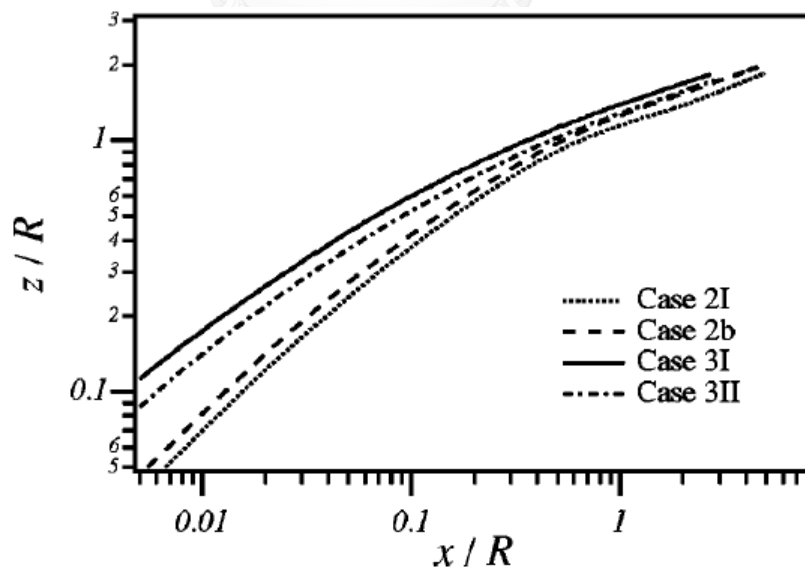
รูปที่ 2.34 Streamline jet trajectories. (Yuan and Street, 1998) โดย

Case 2I ($Re_D = 2,100$, $r = 2.0$, $Fr = \infty$)

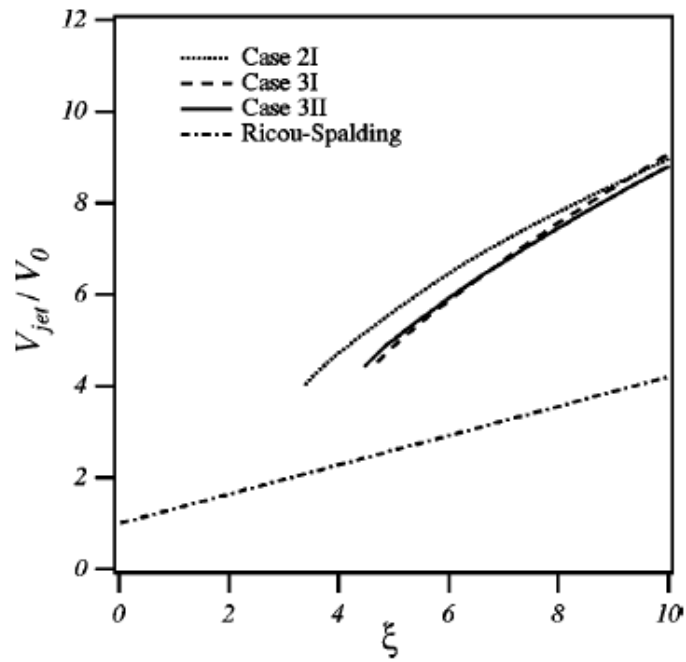
Case 2b ($Re_D = 2,100$, $r = 2.0$, $Fr = 10.0$)

Case 3I ($Re_D = 1,050$, $r = 3.3$, $Fr = \infty$)

Case 3II ($Re_D = 1,050$, $r = 3.3$, $Fr = \infty$)



รูปที่ 2.35 Streamline jet trajectories ที่สเกลด้วย rd (Yuan and Street, 1998)

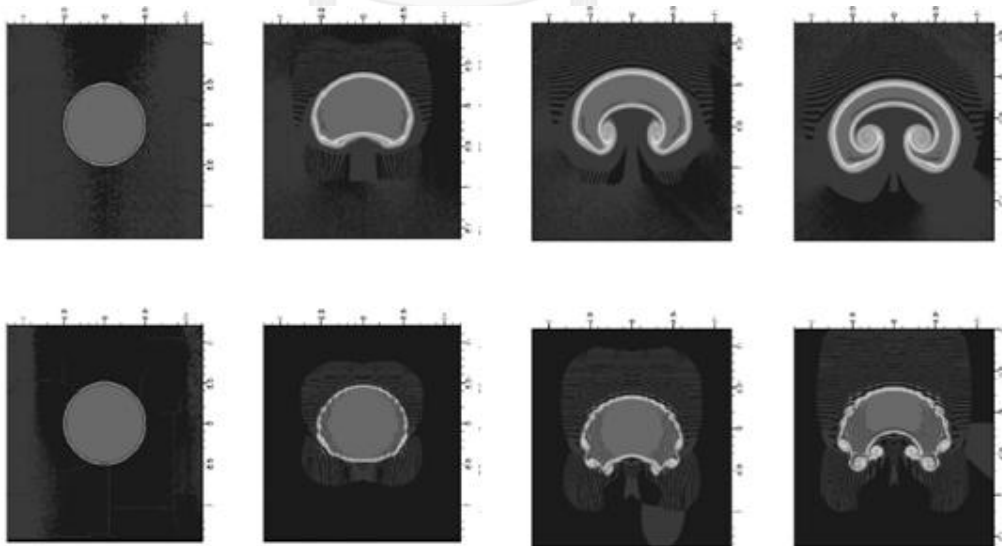


รูปที่ 2.36 ผลของ Re_{cf} ต่อการผสม (Yuan and Street, 1998) โดย

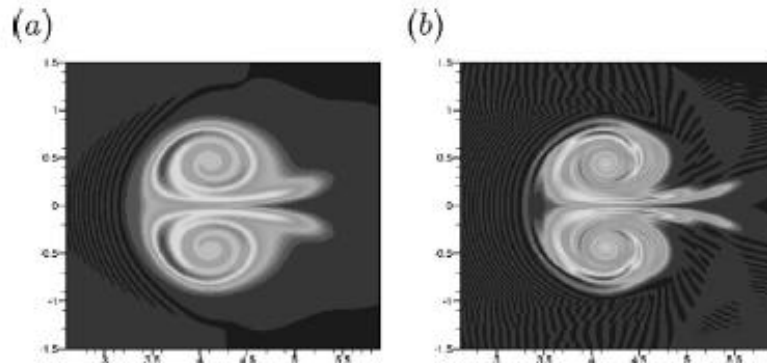
Case 2I ($Re_D = 2,100$, $r = 2.0$, $Fr = \infty$)

Case 3I ($Re_D = 1,050$, $r = 3.3$, $Fr = \infty$)

Case 3II ($Re_D = 2,100$, $r = 3.3$, $Fr = \infty$)

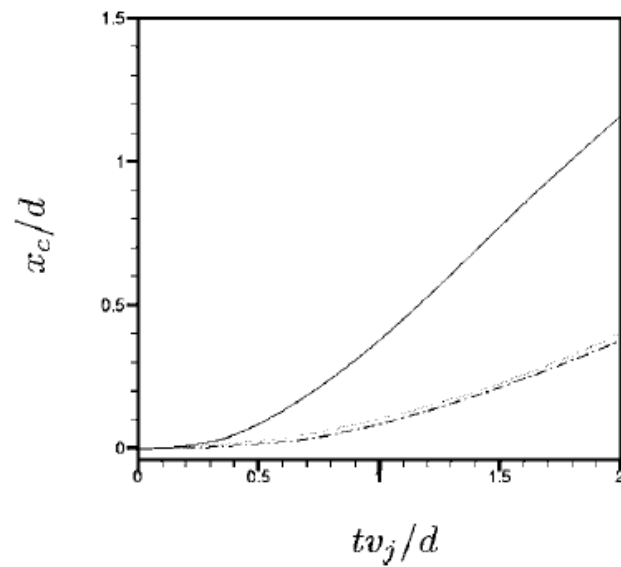


รูปที่ 2.37 เจ็ตที่ระนาบตัวขวางการไหล (Muppidi and Mahesh, 2006) โดย $Re_{cf} = 1,000$ (บน) และ $Re_{cf} = 10,000$ (ล่าง)



รูปที่ 2.38 โครงสร้าง CVP ของเจ็ตที่ระนาบตัวขวางการไหลที่มีความเสถียรแล้ว
โดย a) $Re_{cf} = 1,000$ และ b) $Re_{cf} = 10,000$

(Muppidi and Mahesh, 2006)



รูปที่ 2.39 ผลของ r และ Re_{cf} ต่อเส้นทางการเดินของเจ็ต (Muppidi and Mahesh, 2006)

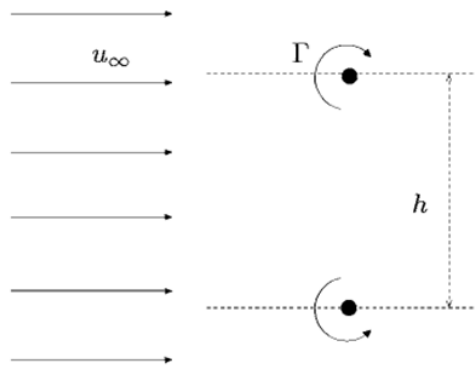
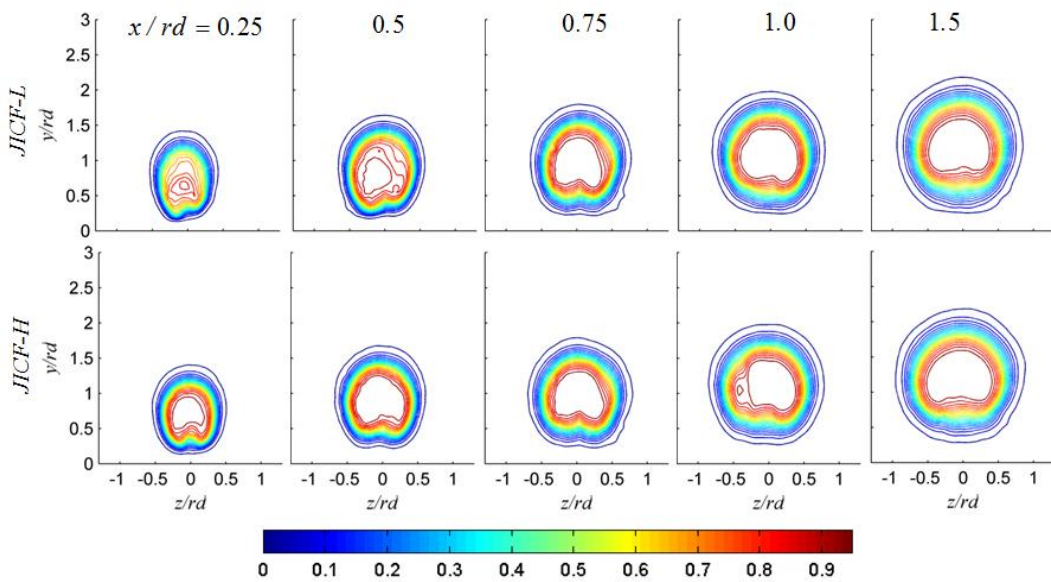


FIG. 16. Schematic of the flow in the far field, dominated by the counter-rotating vortex pair.

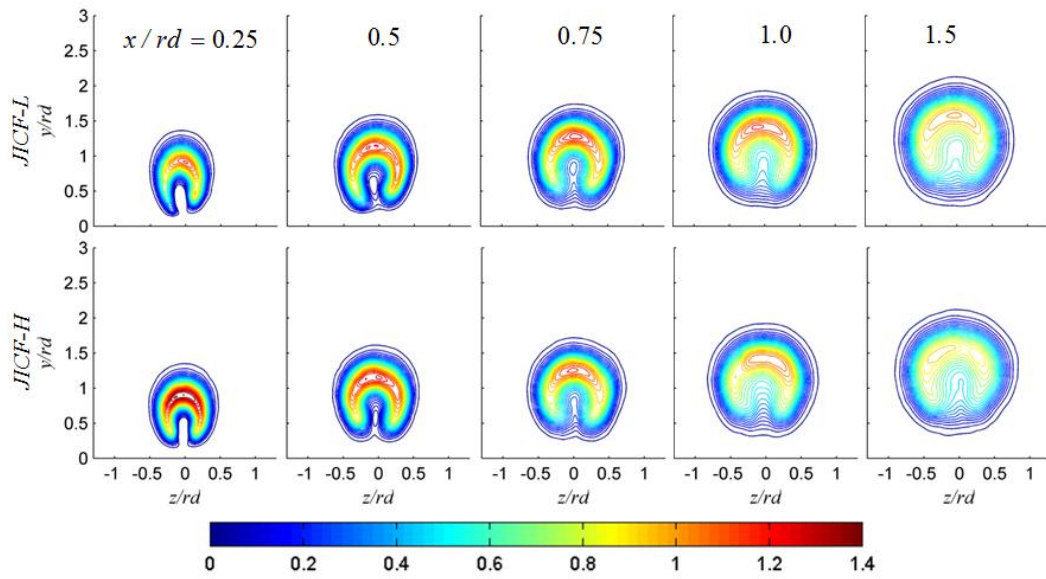
TABLE I. Variation of translation velocity (u_{final}) in the constant-velocity regime with Reynolds number.

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

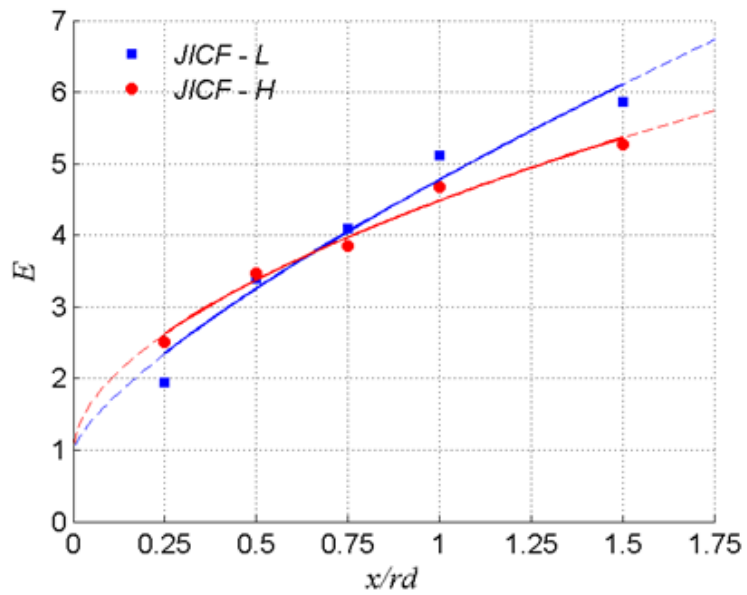
รูปที่ 2.40 ผล Re_{cf} ต่อ u_{final} และ $u_{induced}$ (Muppidi and Mahesh, 2006)



รูปที่ 2.41 ผลของ Re_{cf} ต่อความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ (Wongthongsiri and Bunyajitradulya, 2014)

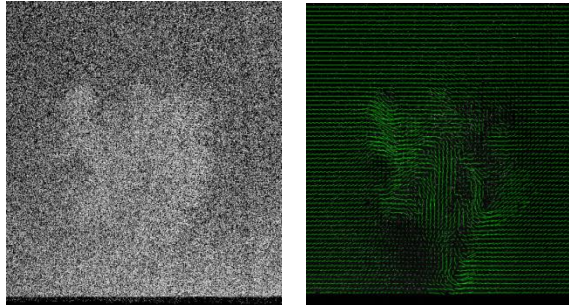


รูปที่ 2.42 ผลของ Re_{cf} ต่อความเร็วตามแนวการไหล (Streamwise velocity)
(Wongthongsiri and Bunyajitradulya, 2014)

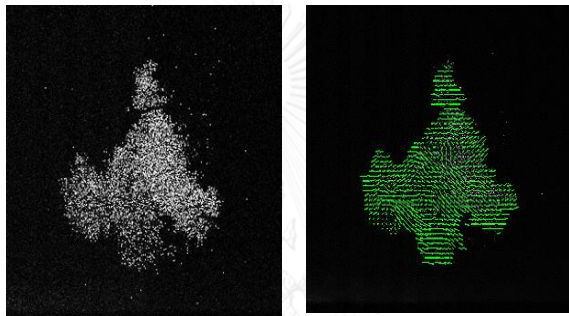


รูปที่ 2.43 ผลของ Re_{cf} ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม
(Wongthongsiri and Bunyajitradulya, 2014)

บทที่ 3



(a) Jet-and-crossflow fluid seeding.



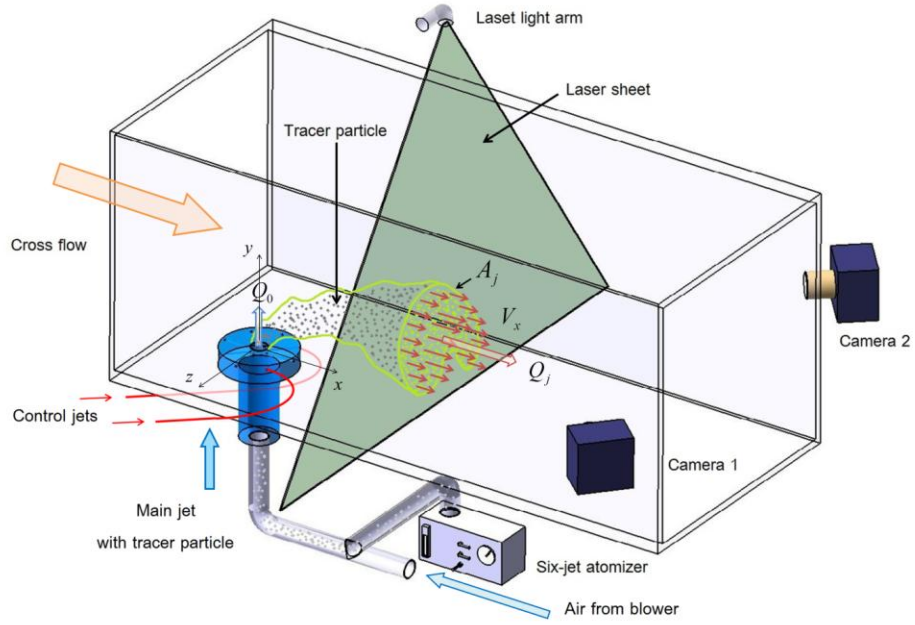
(b) Jet-fluid only seeding.

รูปที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบความเร็ว ณ ขณะใดๆ (ซ้าย) และสนามของเวกเตอร์
ความเร็ว ณ ขณะใดๆ (ขวา) ด้วยวิธี SPIV

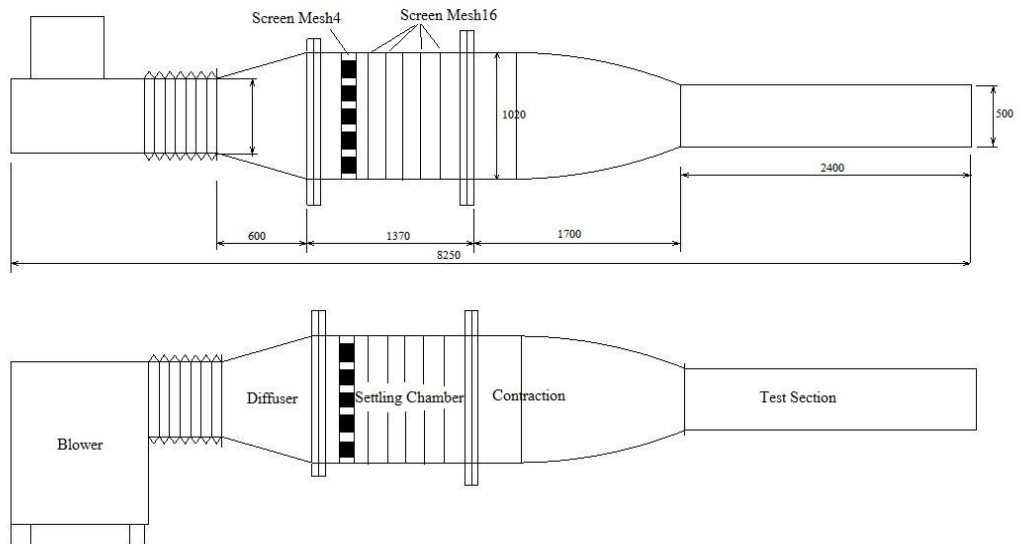
(a) แสดงการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสลมขวาง

(b) แสดงการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลม
ขวาง

บทที่ 4



รูปที่ 4.1 Schematic ของ test section และ พิกัด xyz ของการทดลอง



รูปที่ 4.2 Schematic diagram ของอุโมงค์ลม



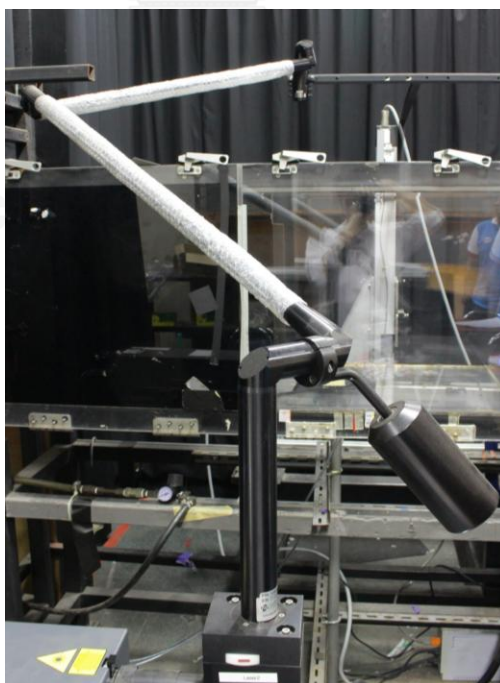
รูปที่ 4.3 พัดลมหอยโขงขนาด 15 กิโลวัตต์ (centrifugal blower ประเภท backward curve airfoil blades)



รูปที่ 4.4 เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้าหรือ inverter (ABB™ model ACS401002032 ขนาด 50 Hz ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz)



รูปที่ 4.5 เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ ND:YAG ยี่ห้อ New Wave Research™ model Solo 200XT กำลังสูงสุด 200 mJ/pulse ที่ความยาวคลื่น 532 nm

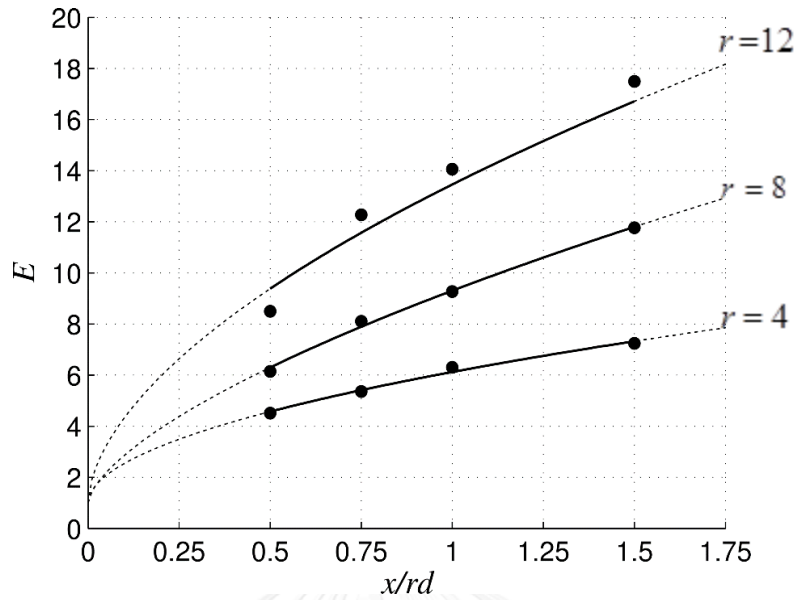


รูปที่ 4.6 แขนส่งเลเซอร์ Laser Light Arm, model 610015

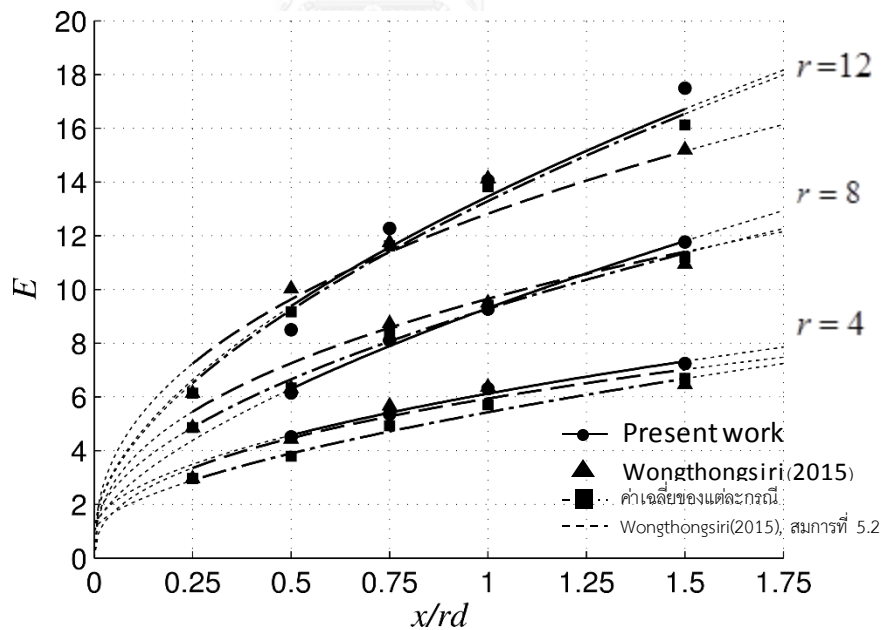


รูปที่ 4.7 กล้อง CCD ยี่ห้อ PowerView Plus11MP model 630062 ความละเอียด
4008 × 2672 pixel² ขนาดpixel 9 × 9 μm^2 , ขนาด CCD 36.07 × 24.05
mm², และไดนามิกเรนจ์ 12 bit

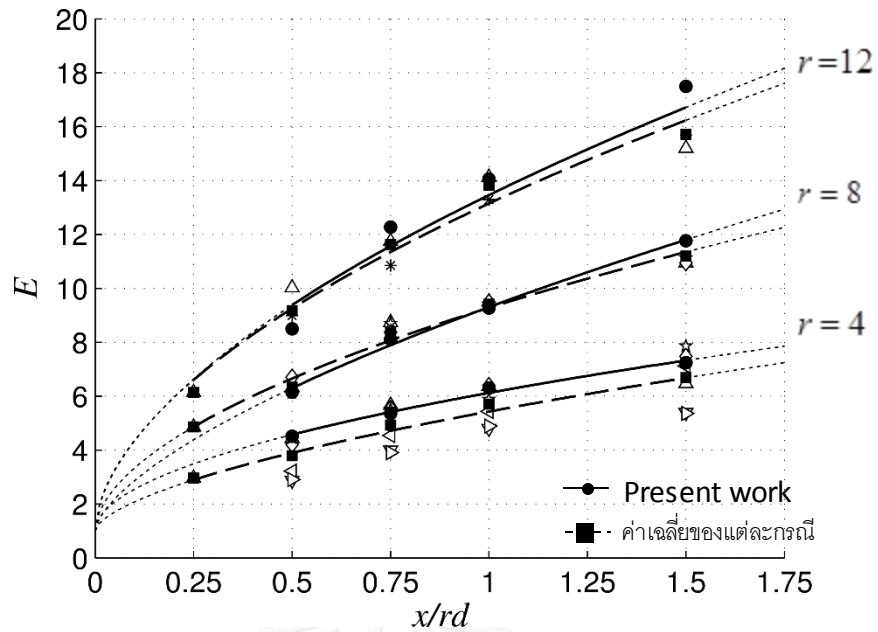
บทที่ 5



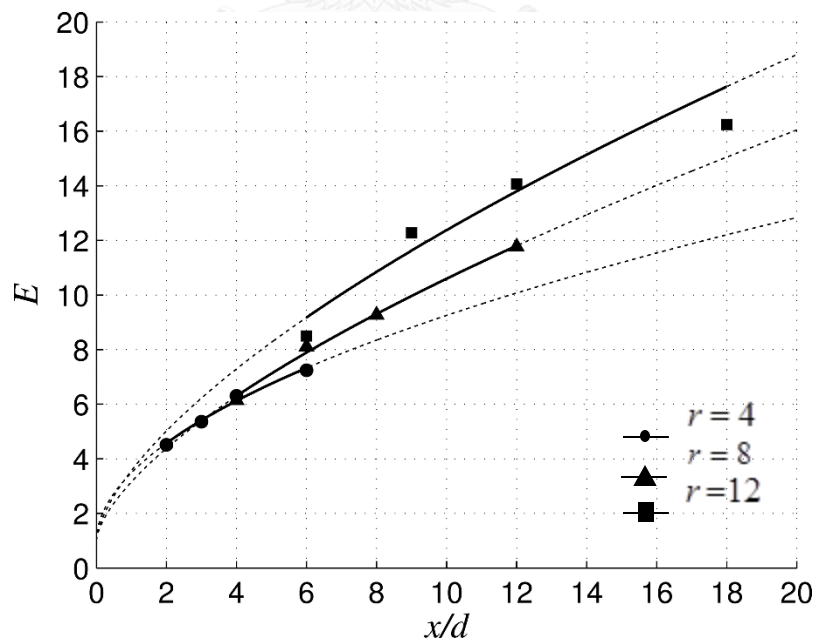
รูปที่ 5.1 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมวงบน rd scale



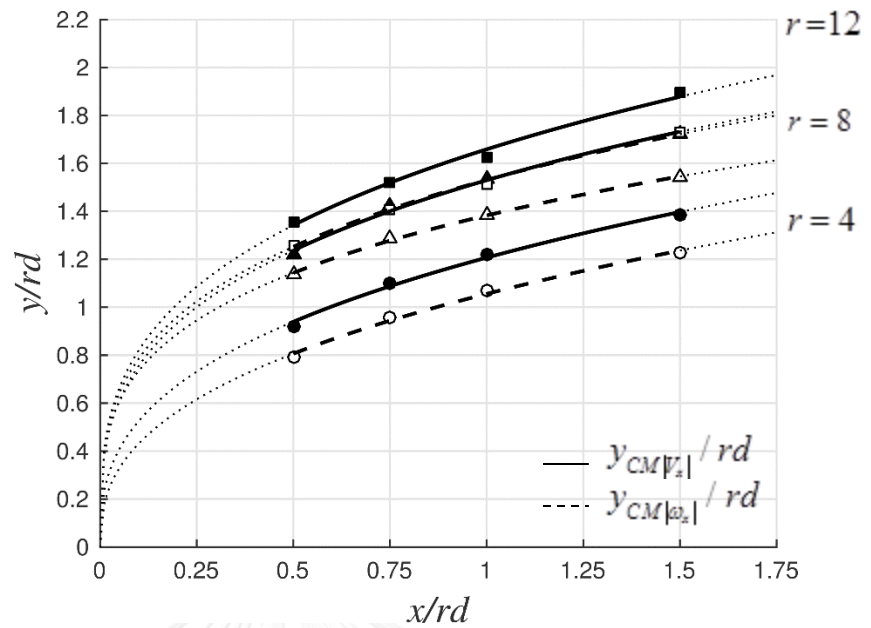
รูปที่ 5.2 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) บน rd scale จะประกอบด้วยผลการทดลองของงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Wongthongsiri (2015) และค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ตในกระแสมวงจากผลการทดลองที่ผ่านมา



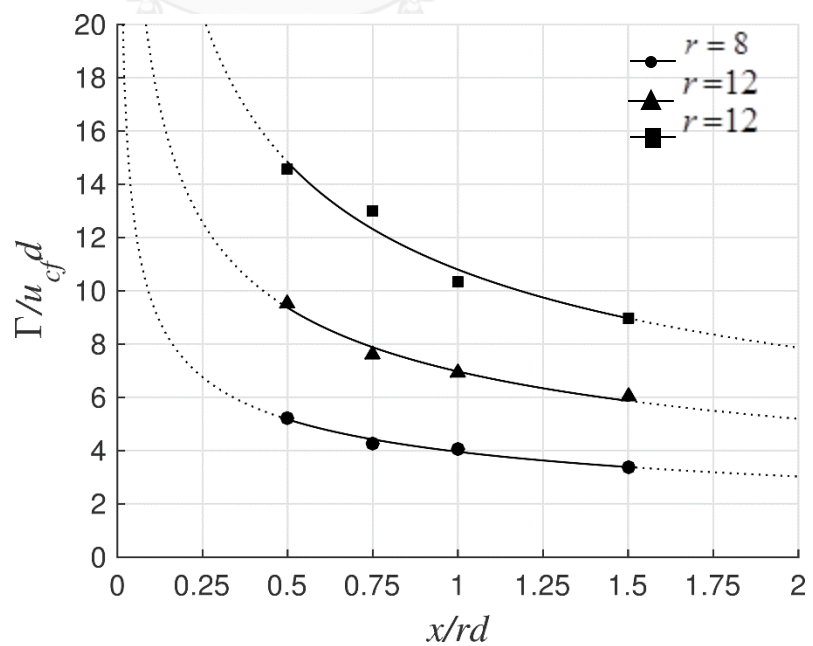
รูปที่ 5.3 การพัฒนาตัวของ E ตามทิศทางกรไหลบน rd scale และผลของ r ต่อ E บน rd scale ของเจ็ตในกระแสมขวางที่ $r = 4, 8$ และ 12 ของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของทุกงานวิจัยที่ผ่านมา



รูปที่ 5.4 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมขวางบน d scale

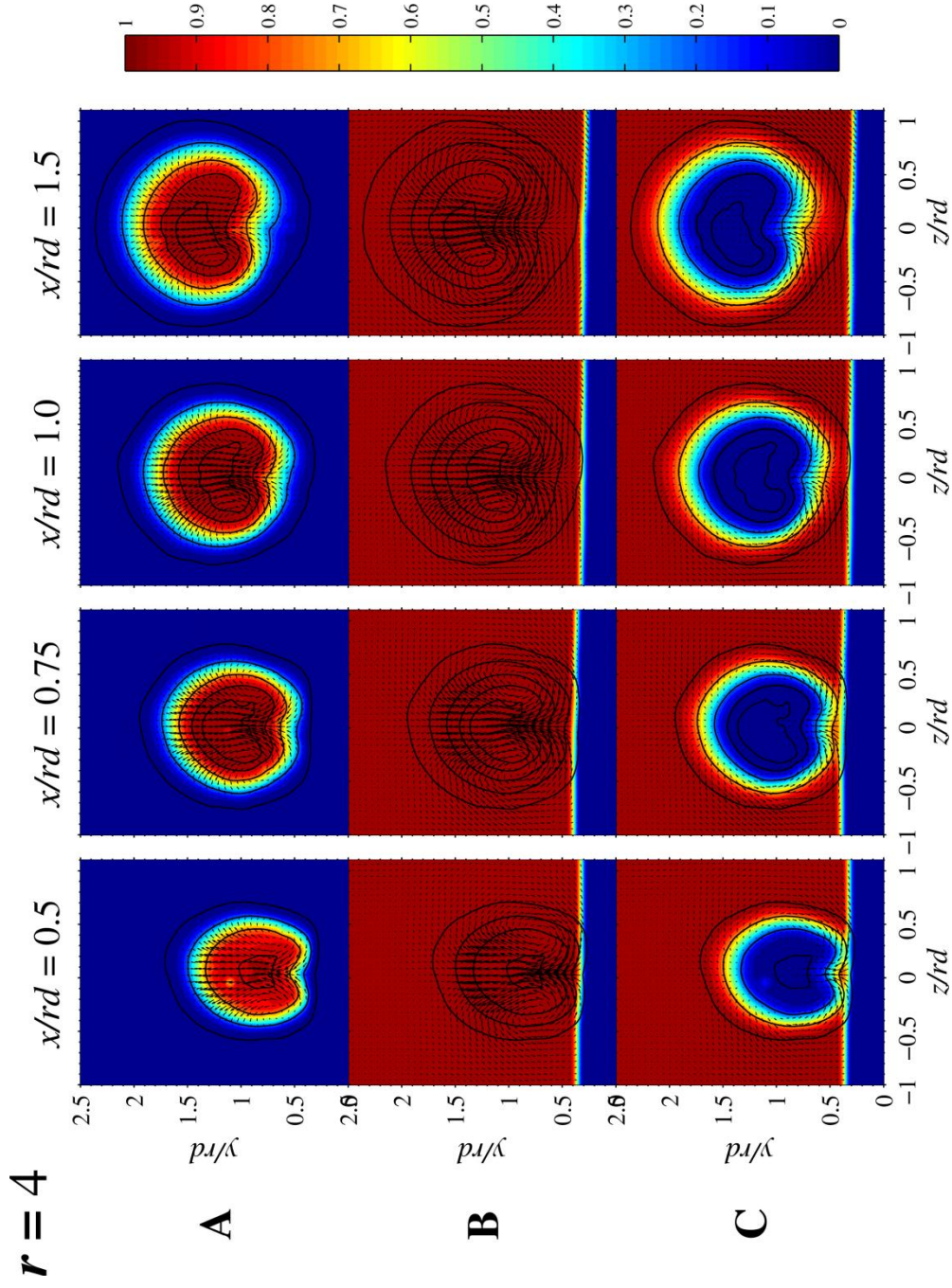


รูปที่ 5.5 เส้นทางการเดินของเจ็ตจาก center of mass ของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตตามแนวแกน streamwise V_x และ vorticity เฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ω_x บน rd scale และผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่อการพัฒนาตัวของเส้นทางการเดินของเจ็ตบน rd scale

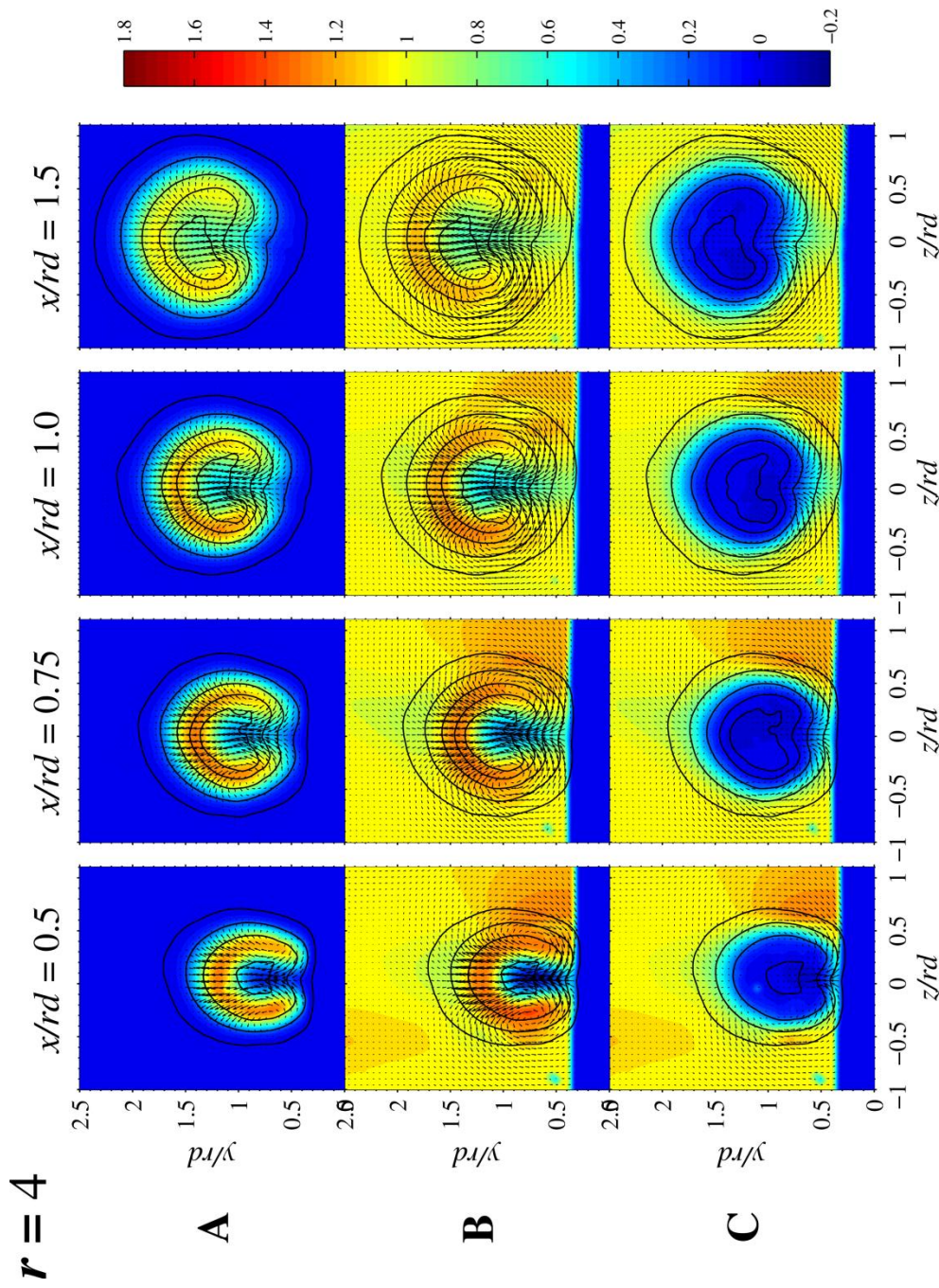


รูปที่ 5.6 ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อ circulation ไร้มิติบน rd scale

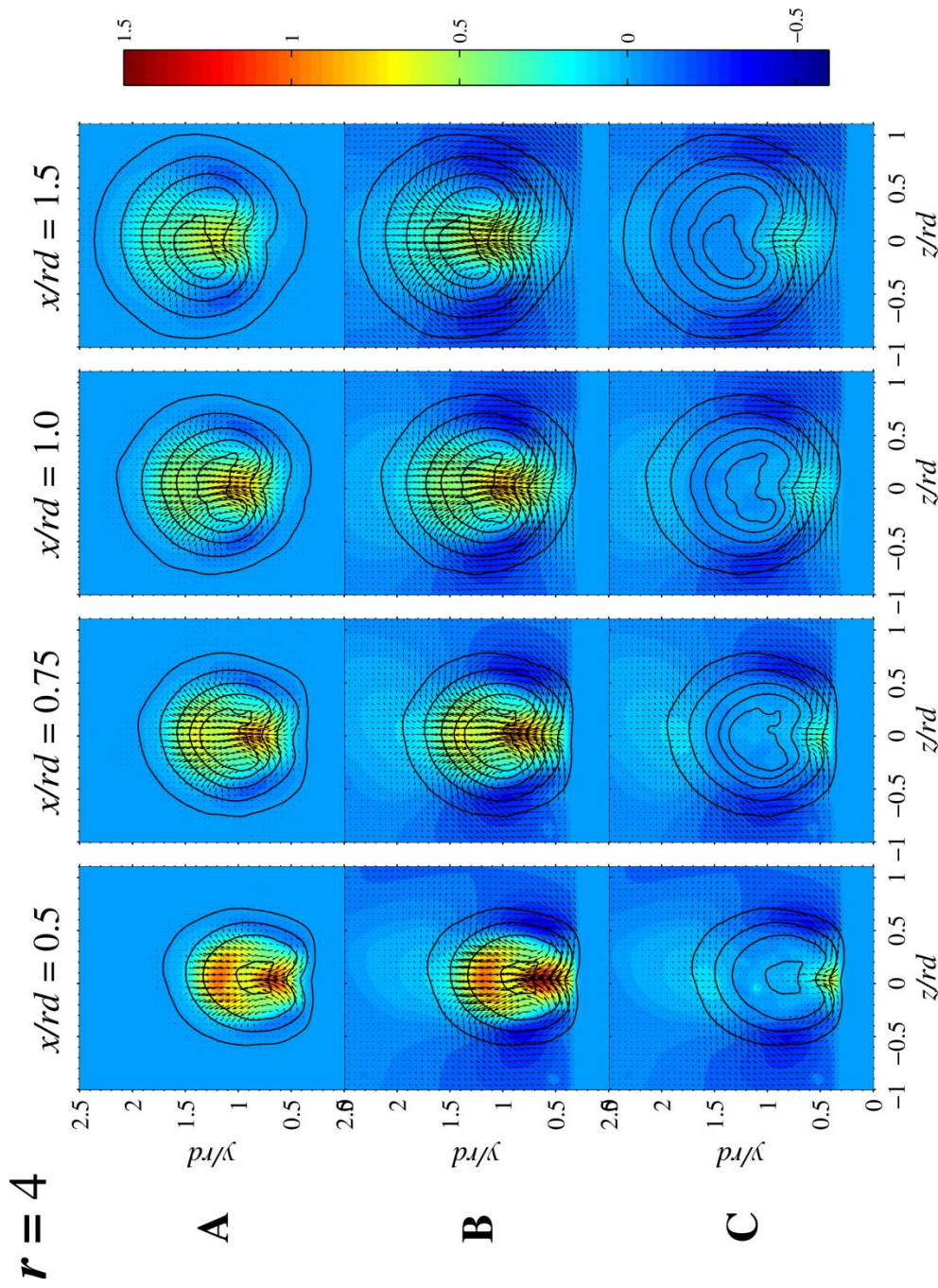
บทที่ 6



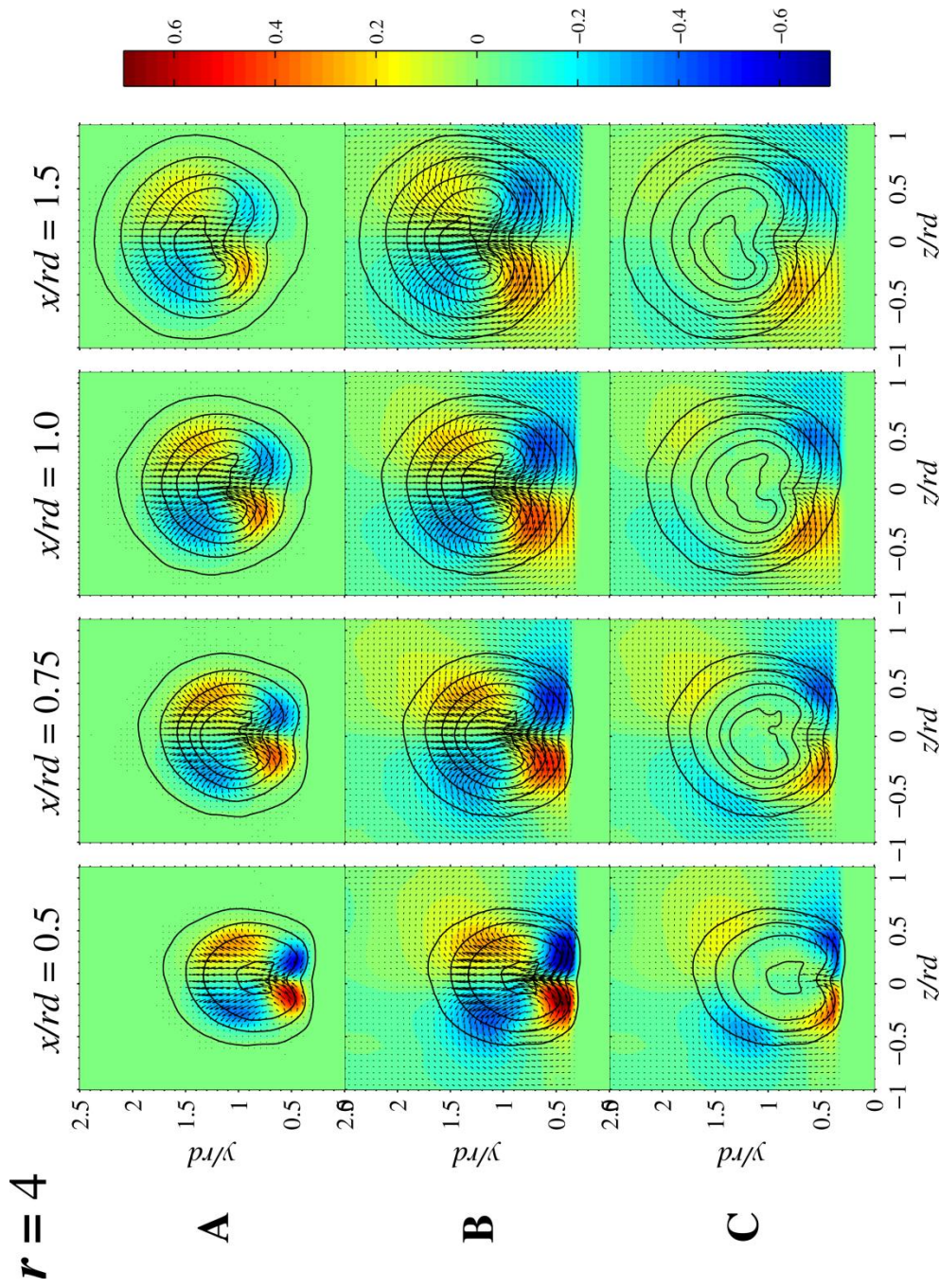
รูปที่ 6.1ก การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาทีจุดใดๆ กรณี $r = 4$ (A) ของเงืต ϕ_j (B) ของเงืต ϕ_j และ (C) ของกระแสดมขวาง ϕ_j โดยดาคออิบายที่หัวข้อ 6.0



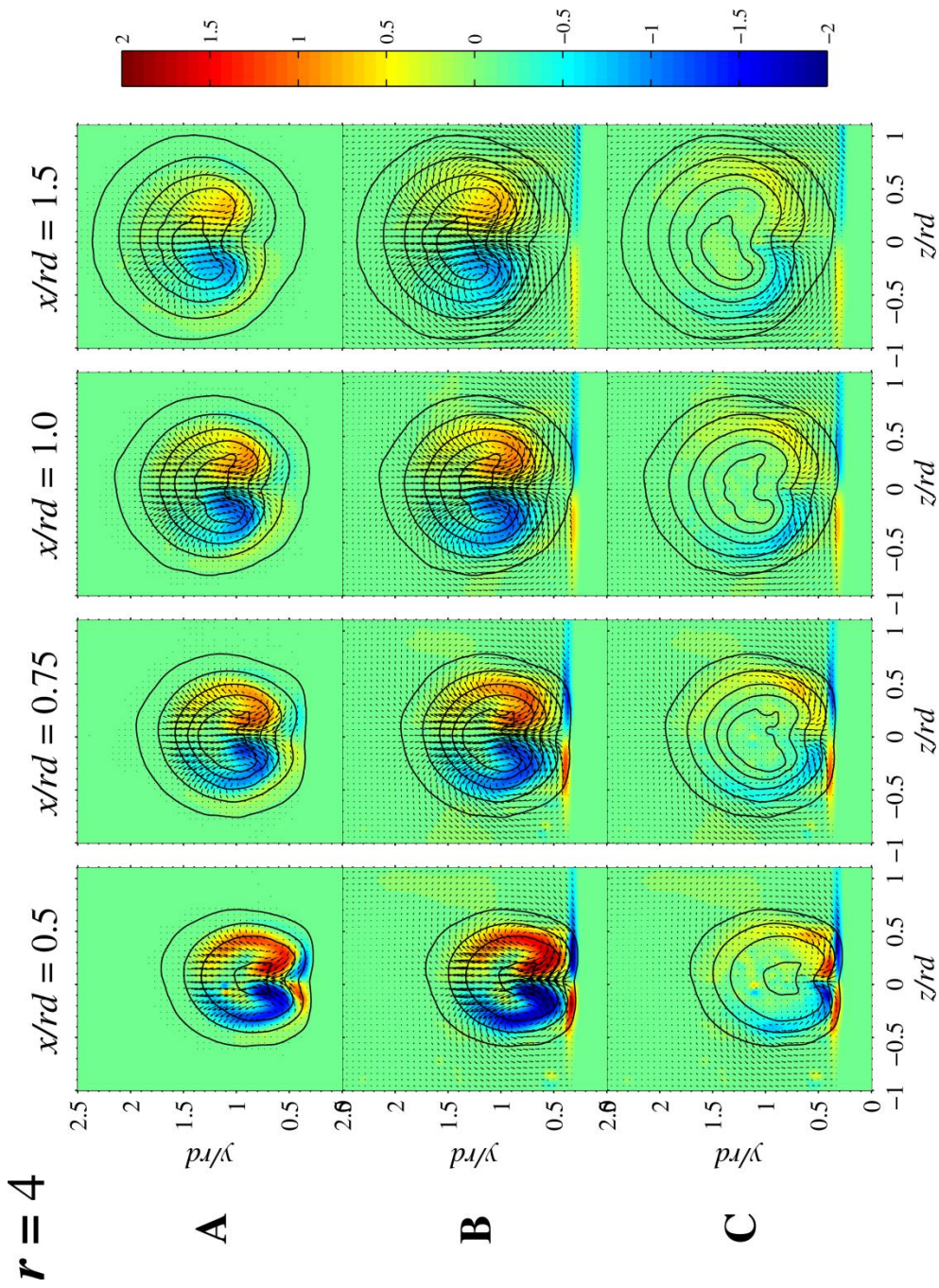
รูปที่ 6.1x การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไม่มีทิศทางแนว streamwise กรณี $r = 4$ ของเจ็ต $V_{j,x}/u_d$ (A) ขององุ่นไหลใต้ V_x/u_d และ (C) ของกระแสสมขวาง $V_{j,z}/u_d$ โดยคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0



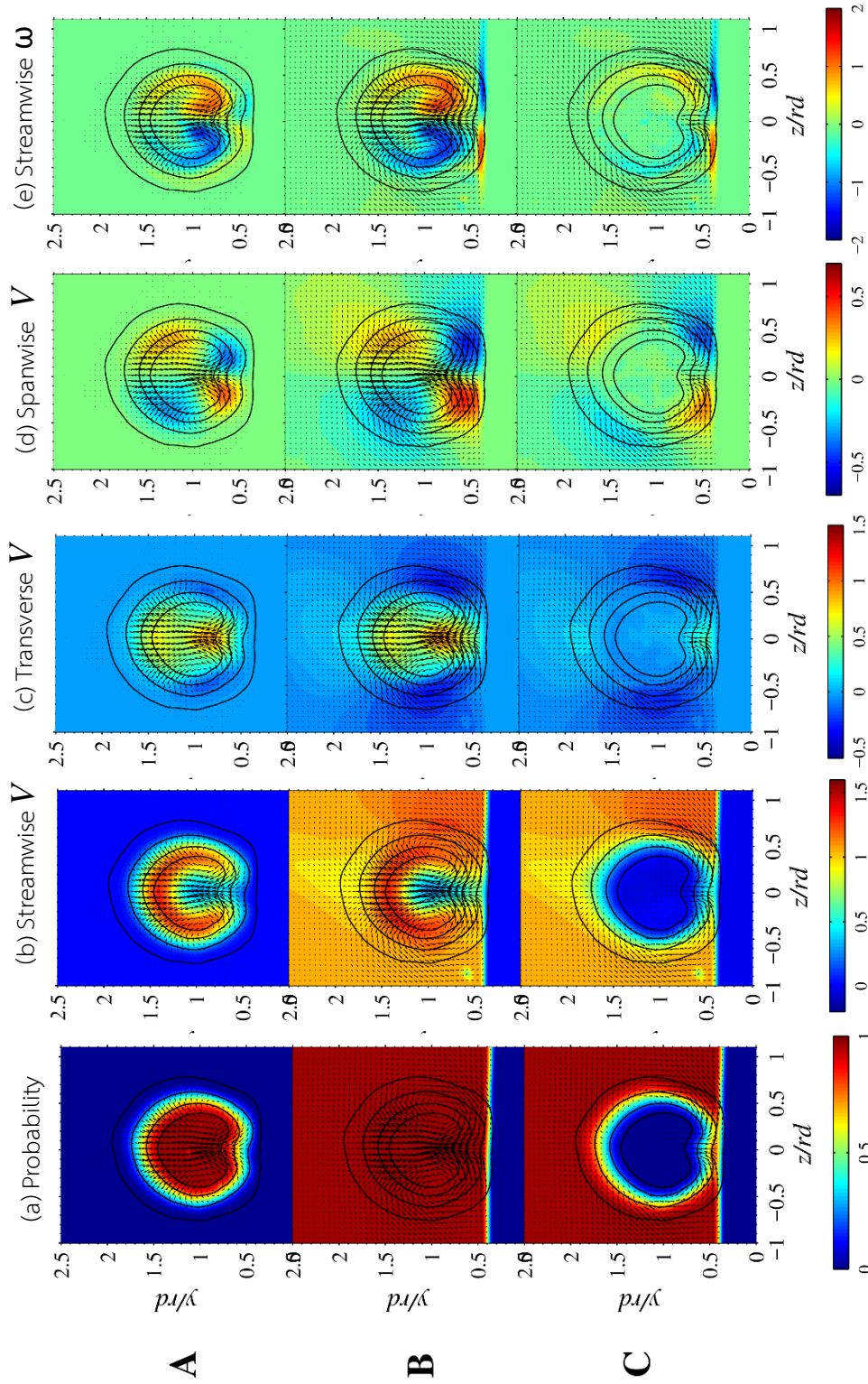
รูปที่ 6.1ค การกระจายตัวของความเร็วเริ่มติดตามแนว transverse กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต $V_{x,y} / u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ $V_{y,z} / u_{cf}$ และ (C) ของกระแสสมขวาง $V_{z,x} / u_{cf}$ โดยคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0



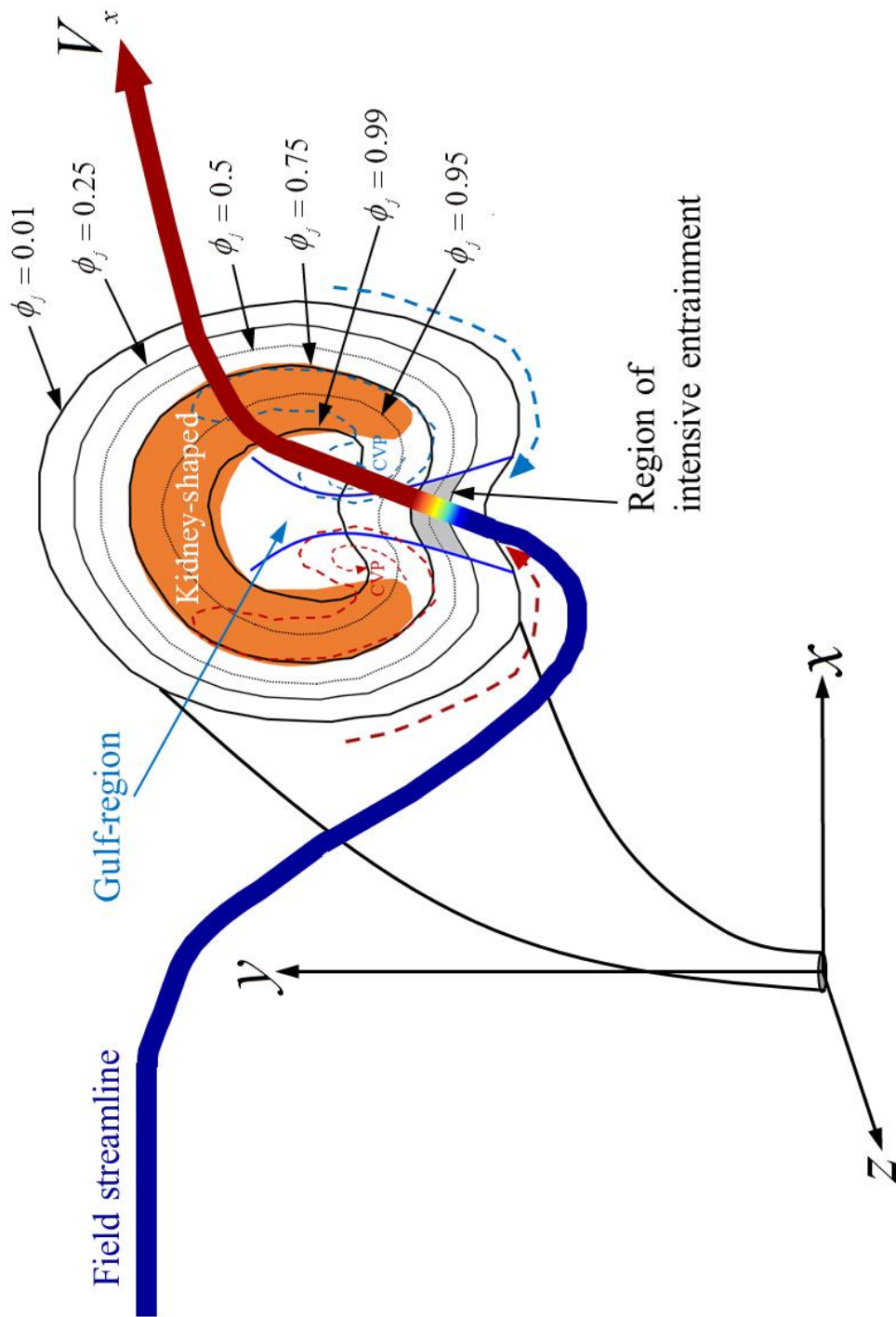
รูปที่ 6.14 การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไปรัศมีตามแนว spanwise กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต $V_{j,z}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_z/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง V_{xz}/u_{cf} โดยดูค่าอธิบายที่หัวข้อ 6.0



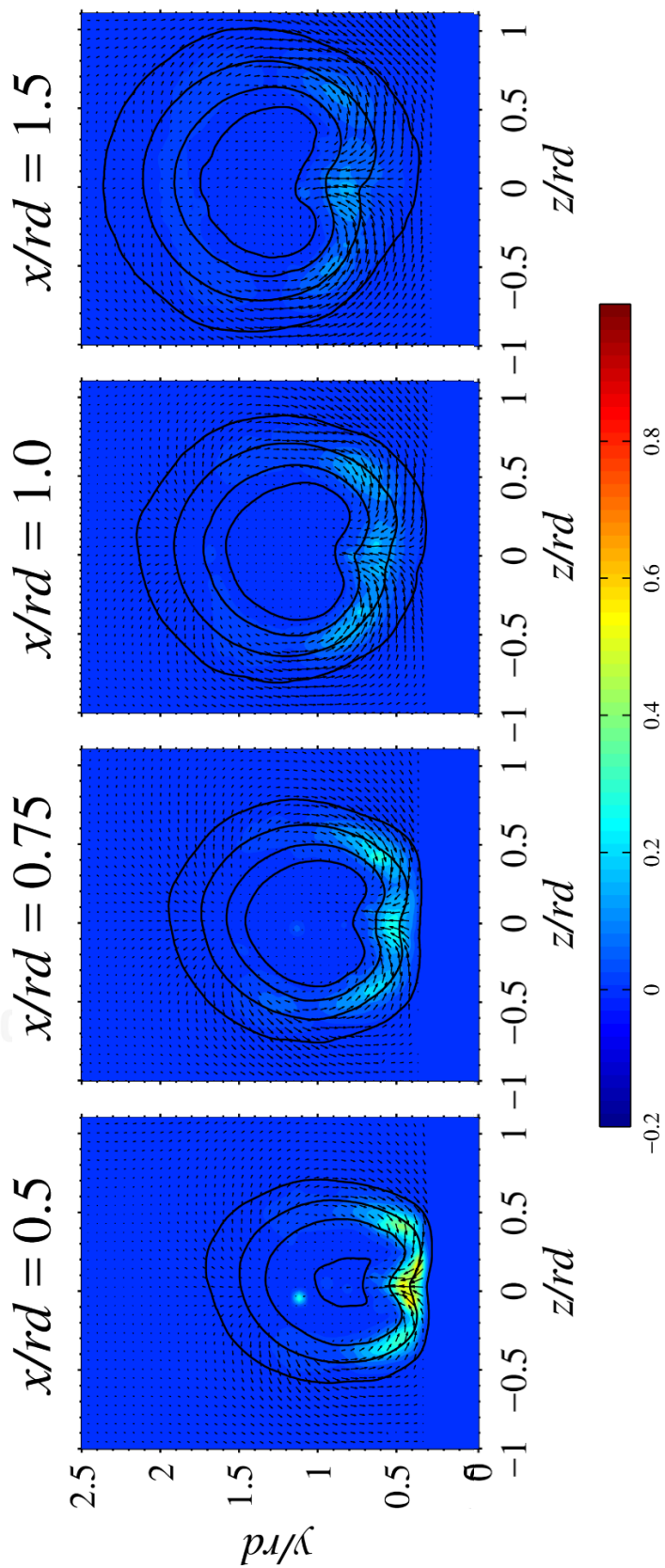
รูปที่ 6.1จ การกระจายตัวของ vorticity ไล่ติดตามแนว streamline กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต $\omega_{j,x}d / u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ $\omega_{x,d} / u_{cf}$ และ (C) ของกระแสสมขวาง $\omega_{cf,x}d / u_{cf}$ โดยคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0



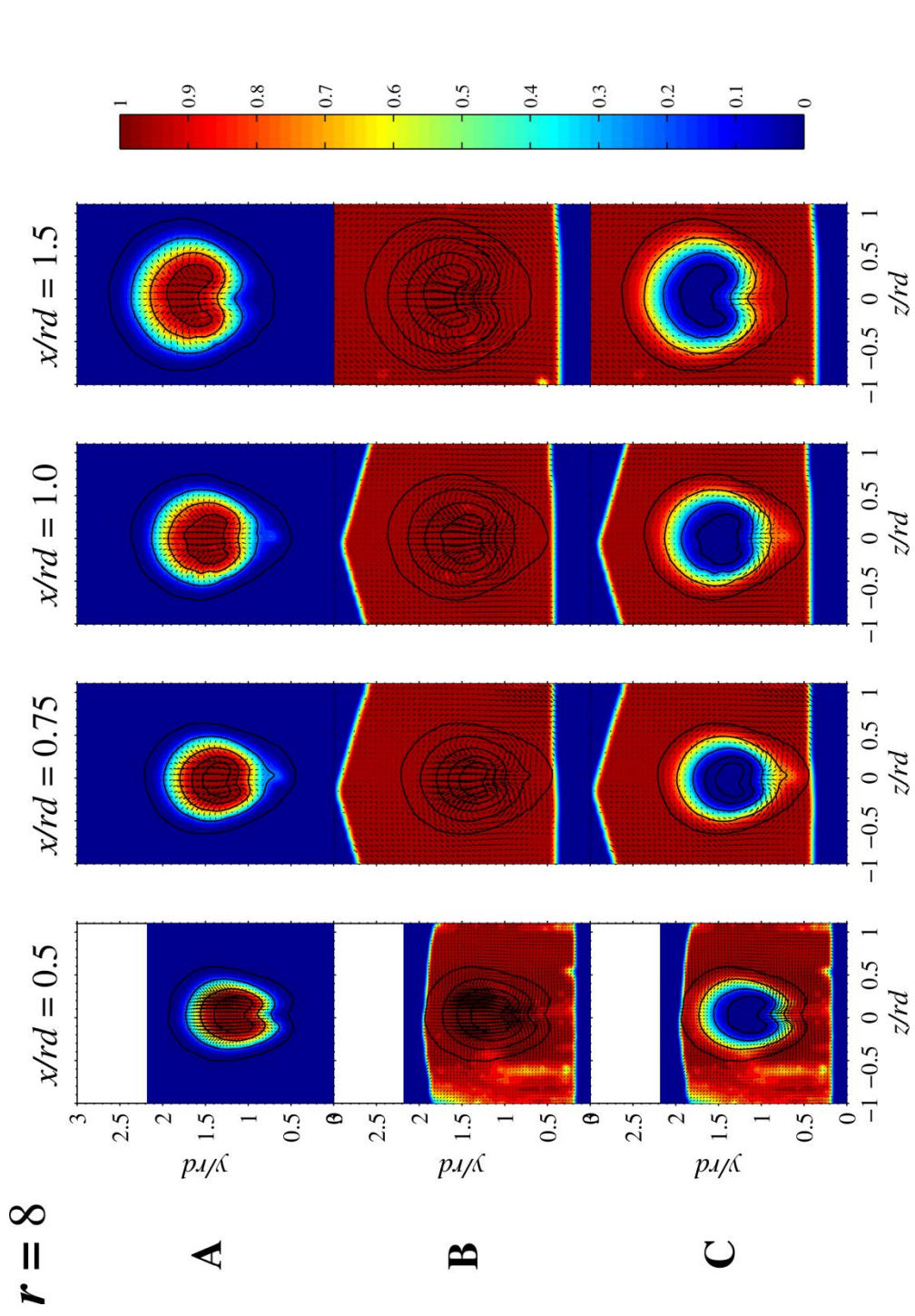
รูปที่ 6.2 การกระจายตัวของปริมาณโมเมนตัมต่าง ๆ กรณี $r = 4$ ที่ $x/rd = 0.75$ (a) Probability, (b) Streamwise velocity, (c) Transverse velocity, (d) Spanwise velocity และ (e) Streamwise vorticity



รูปที่ 6.3 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางไหลของเจ็ตในกระแสผสมขวาง กรณี $r = 4$

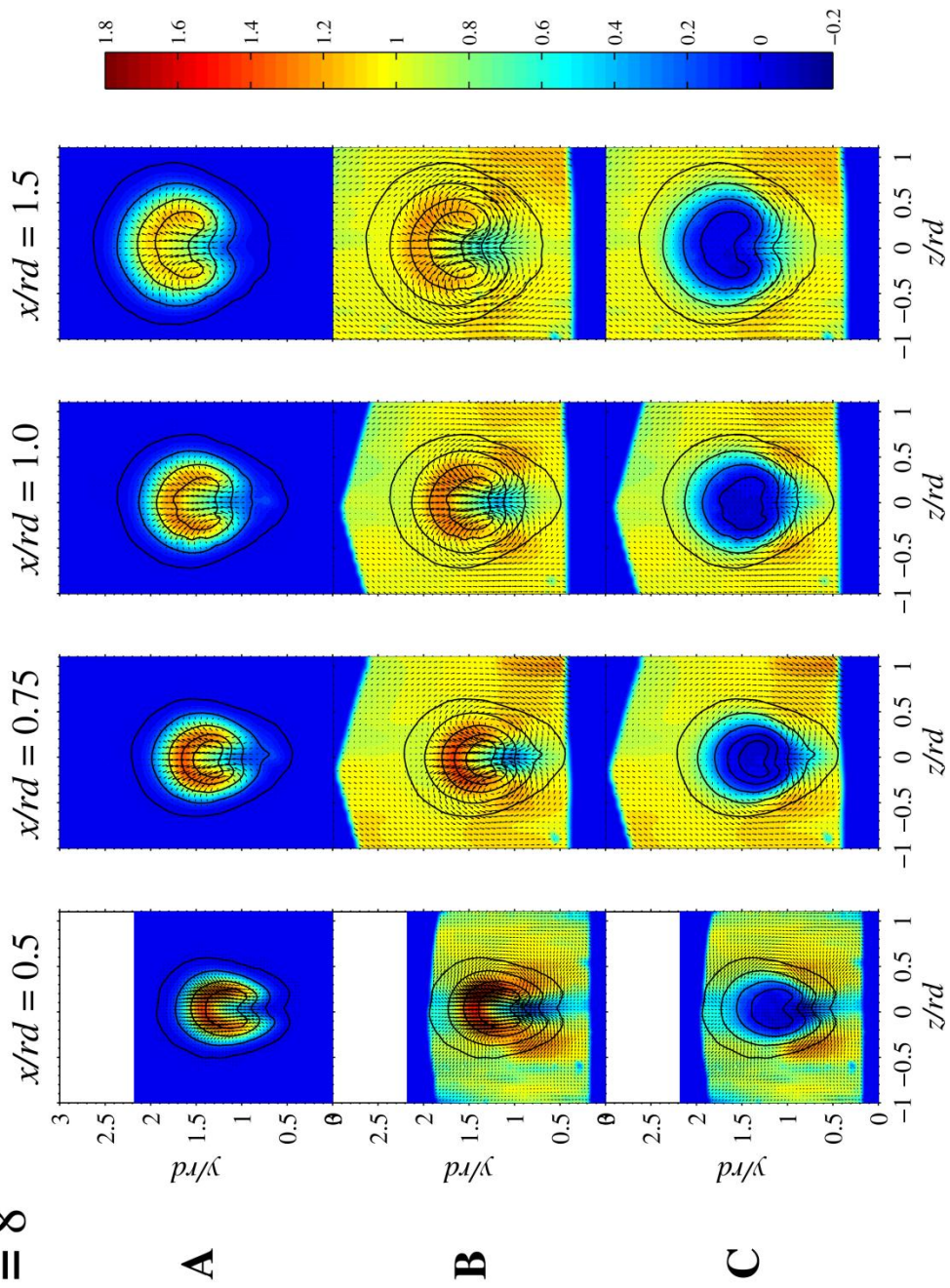


รูปที่ 6.4 บริเวณที่มีการไหลของกระแสสมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่จุดไหลผ่านเส้นความนำจะเป็นที่ละเอียด ϕ_j คงที่ ของ $r = 4$



รูปที่ 7.1ก การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดใดๆ กรณี $r = 8$ (A) ของเวกเตอร์ ϕ_j และ (C) ของกระแสผสมขวาง ϕ_d โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0

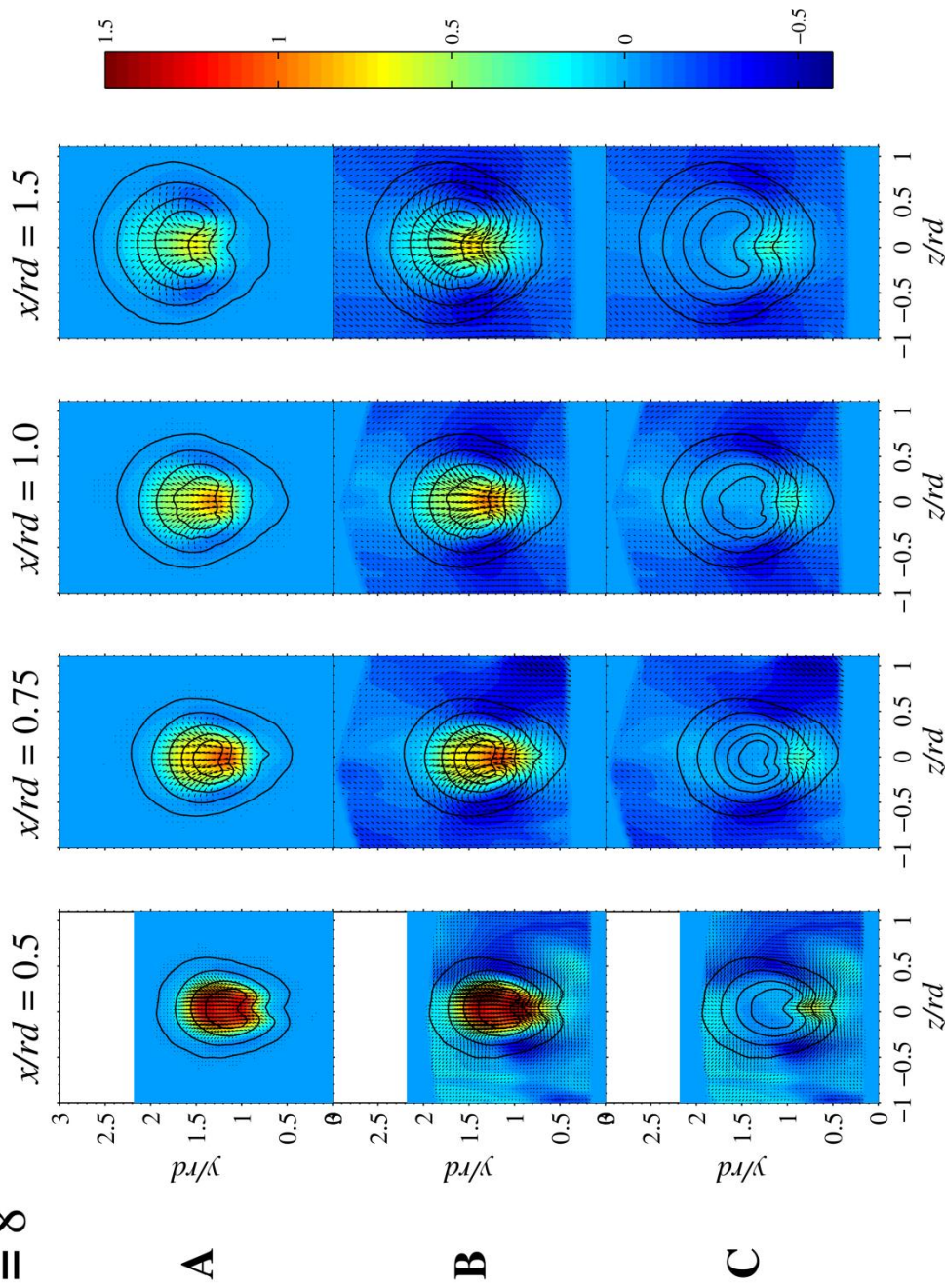
$r = 8$



รูปที่ 7.1ข การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเริ่มติดตามแนว streamwise กรณี $r = 8$ (A) ของเจ็ต $V_{j,x} / u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_x / u_{cf} และ

(C) ของกระแสผสมขวาง $V_{cf,x} / u_{cf}$ โดยตัดค่าอธิบายที่หัวข้อ 6.0

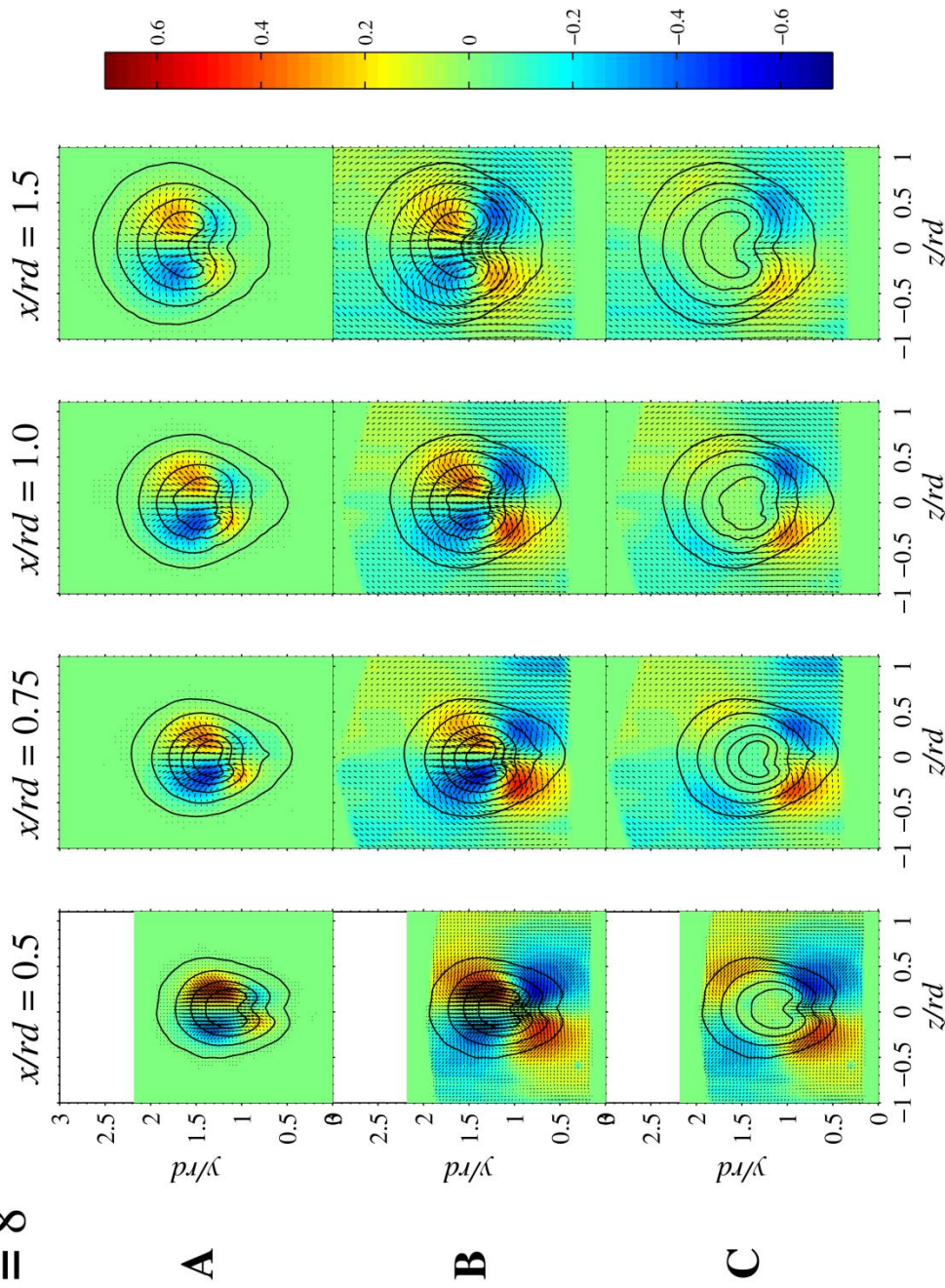
$r = 8$



รูปที่ 7.1ค การกระจายตัวของความเร็วตามรัศมีตามแนว transverse กรณี $r = 8$ (A) ของเจ็ต $V_{j,y}/u_d$ (B) ของของไหลใดๆ $V_{x,y}/u_d$ และ

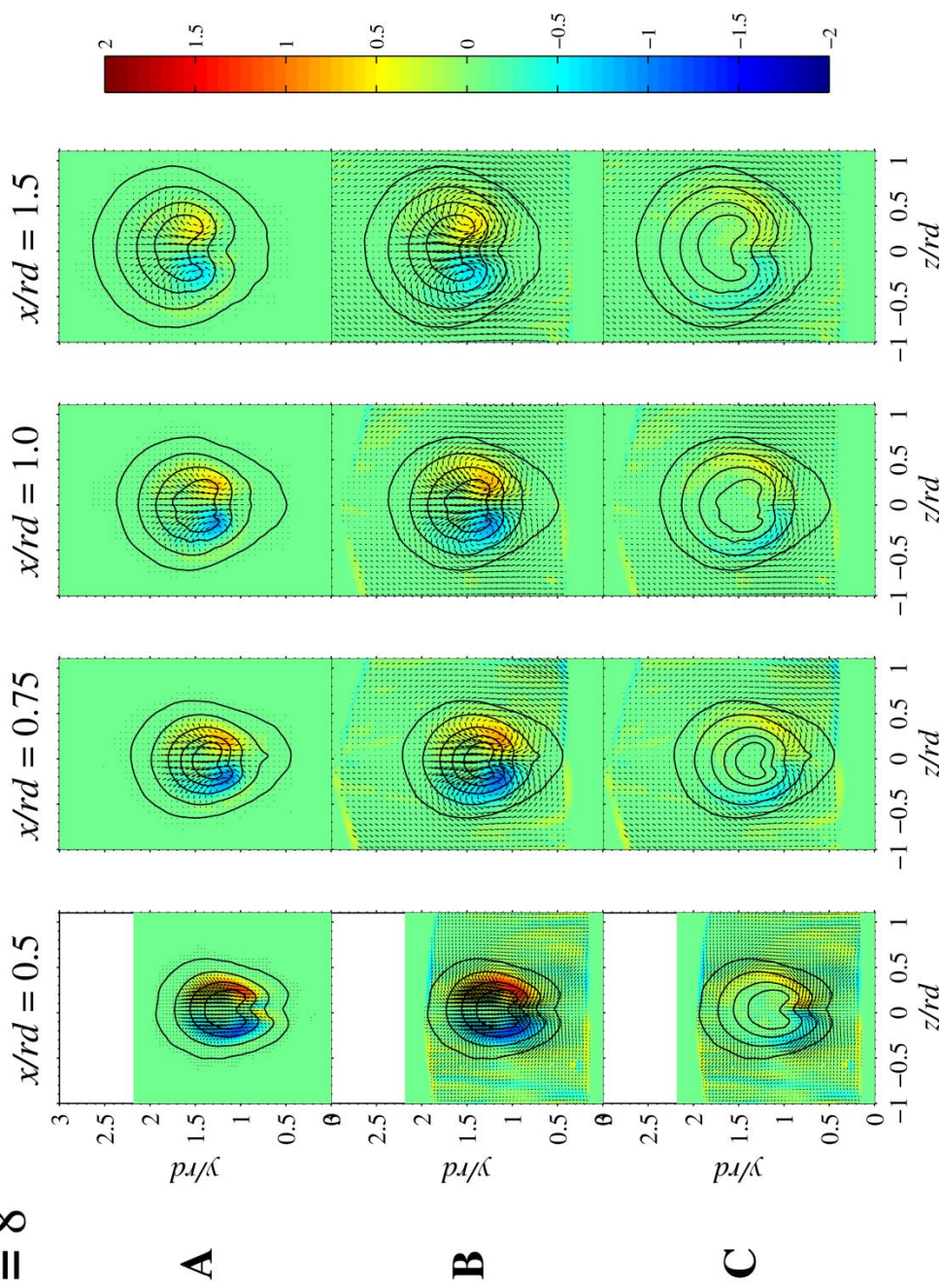
(C) ของกระแสสมขวาง $V_{z,y}/u_d$ โดยคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0

$r = 8$

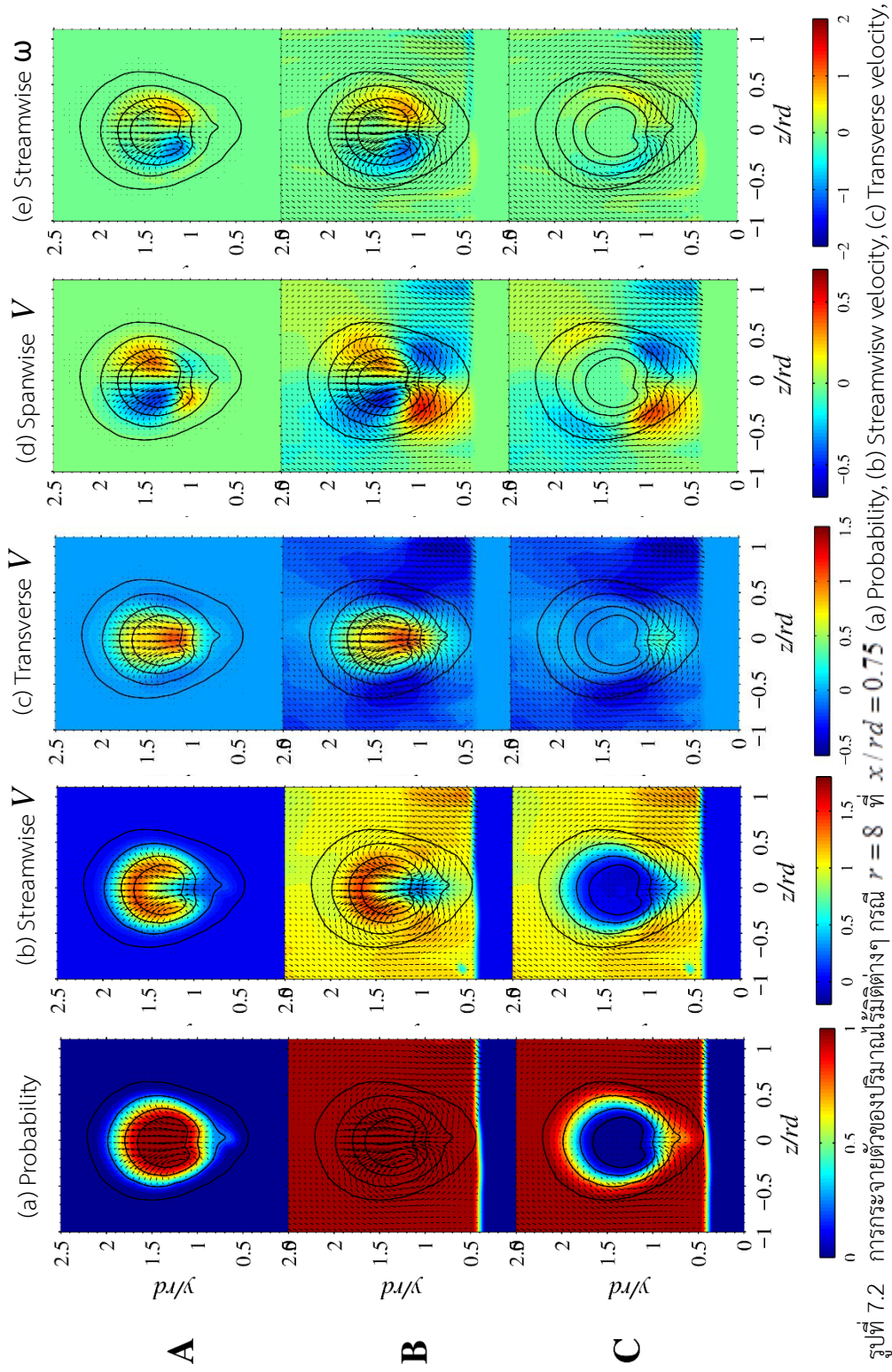


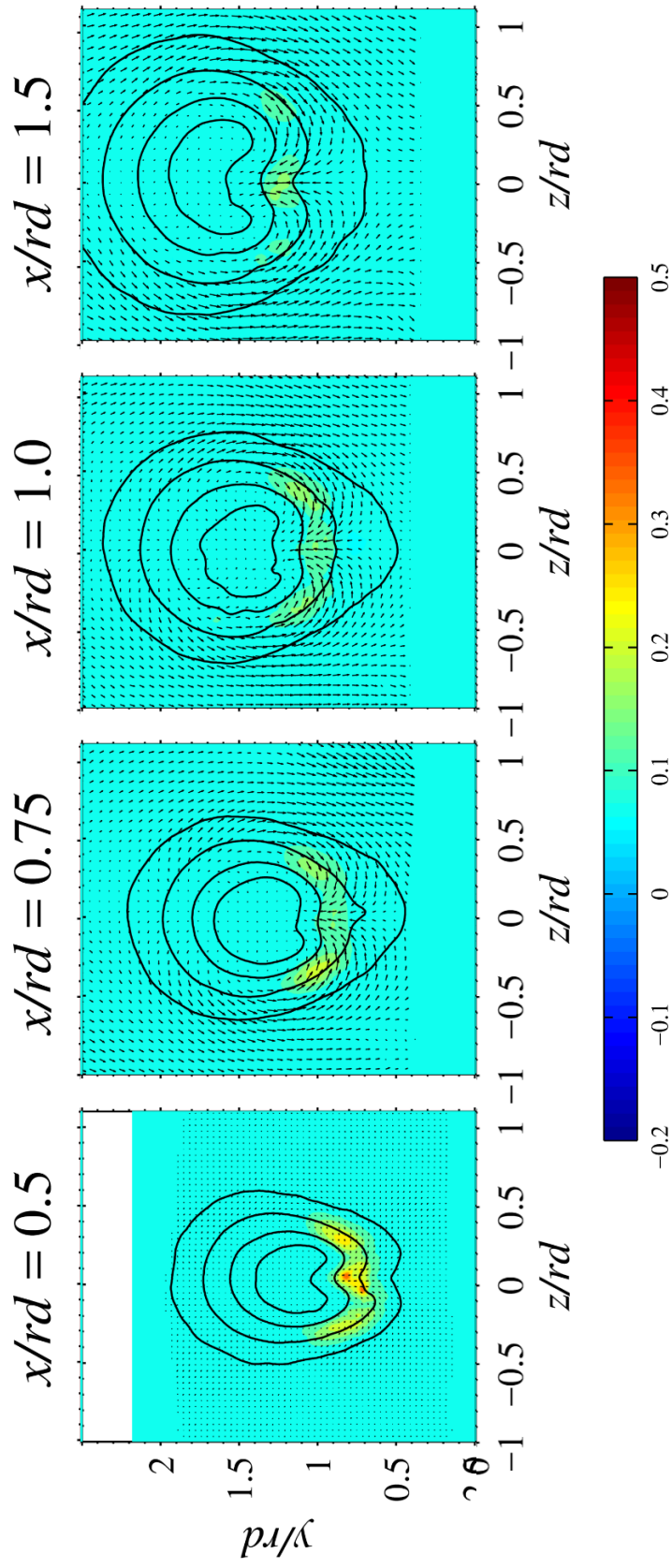
รูปที่ 7.14 การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยในมิติตามแนว spanwise กรณี $r = 8$ (A) ของเจ็ต $V_{j,z}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ $V_{z,z}/u_{cf}$ และ (C) ของกระแสสมขวาง $V_{z,z}/u_{cf}$ โดยคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0

$r = 8$

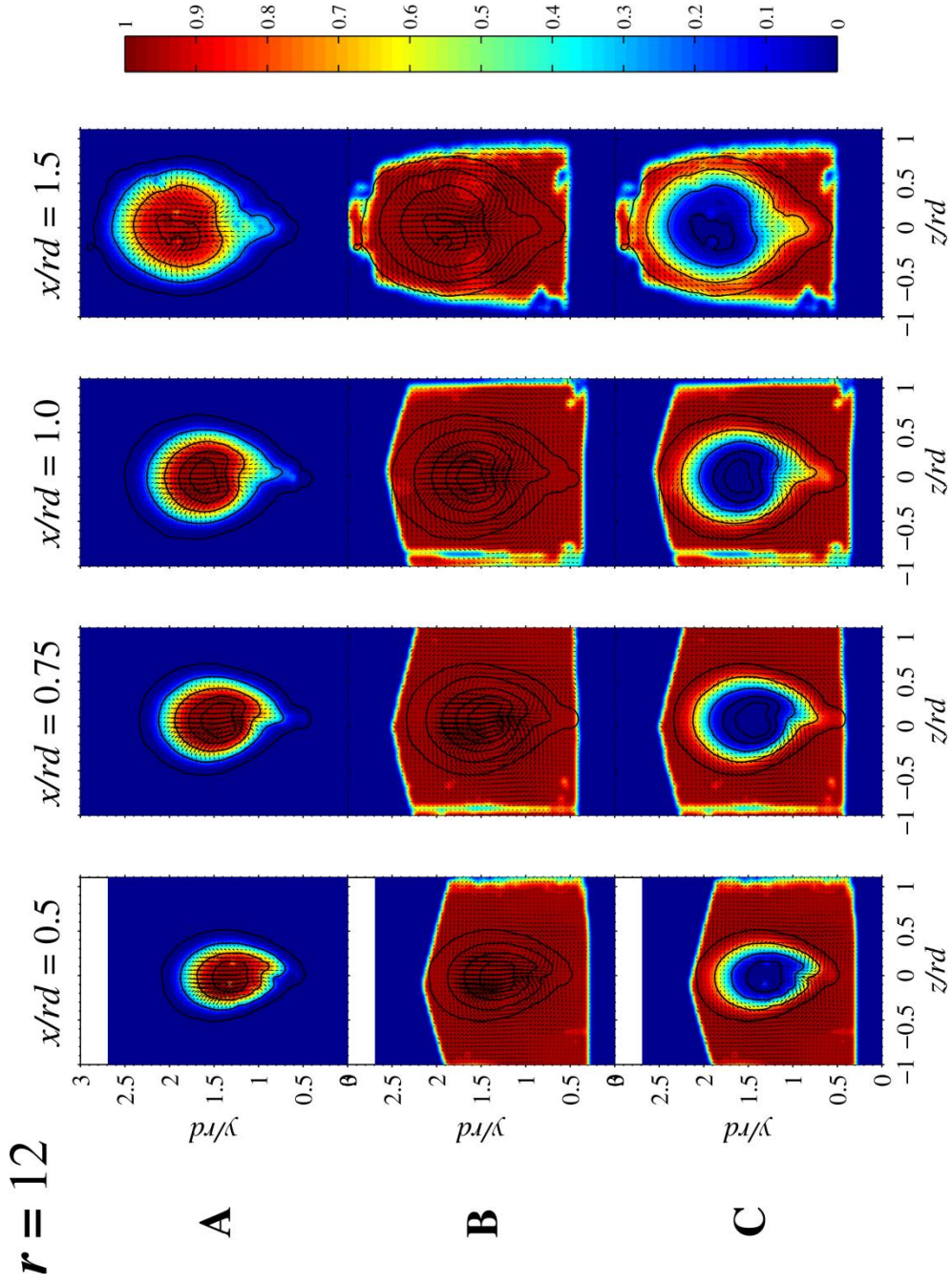


รูปที่ 7.1จ การกระจายตัวของ vorticity ไร้มิตตามแนว streamwise กรณี $r = 8$ (A) ของเจ็ต $\omega_{j,x}d/u_{j,r}$ (B) ของของไหลใดๆ $\omega_{x,d}/u_{j,r}$ และ (C) ของกระแสลมขวาง $\omega_{j,r}d/u_{j,r}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0

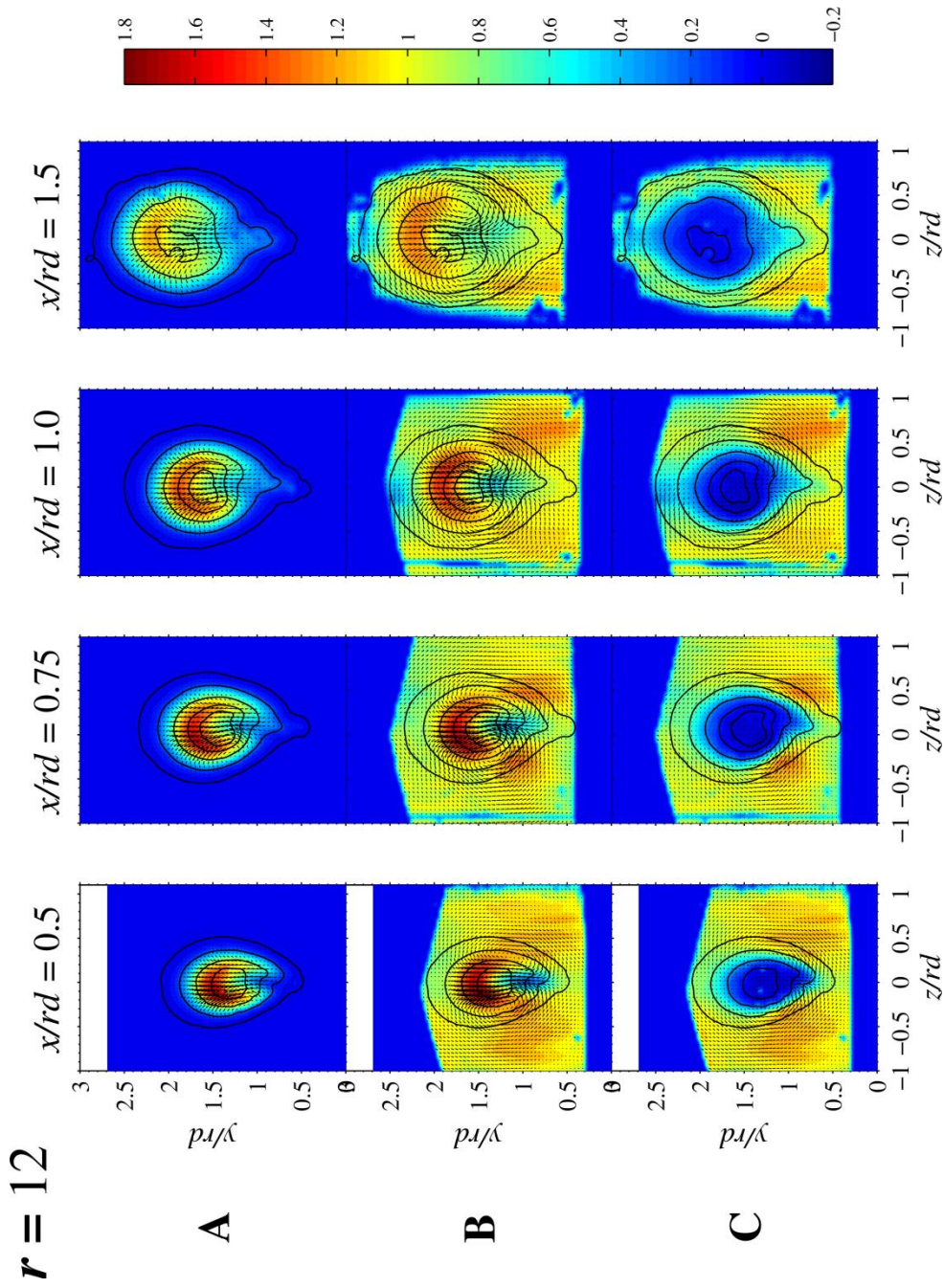




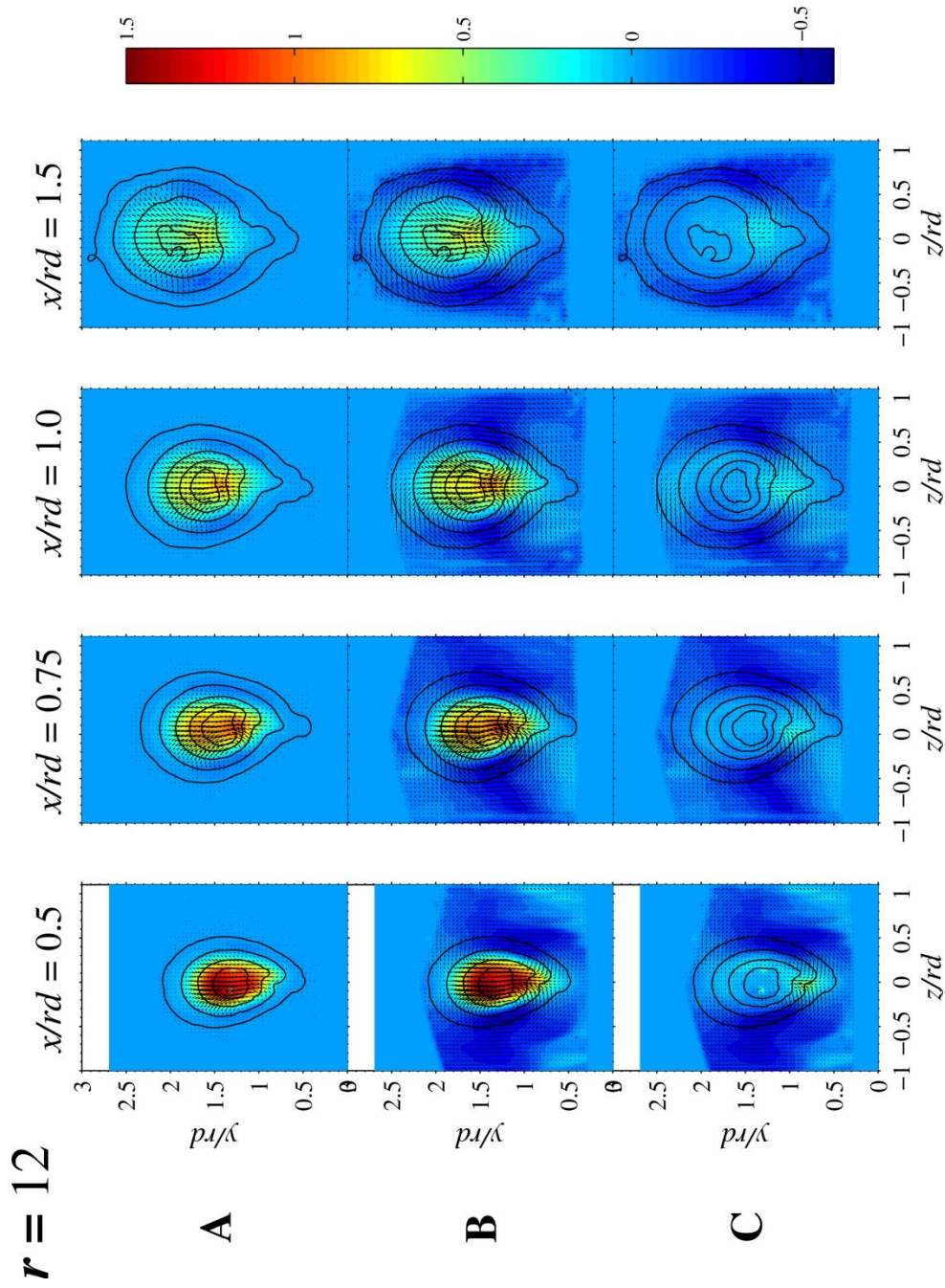
รูปที่ 7.3 บริเวณที่มีการไหลของกระแสตรงบริเวณที่เข้าสู่ใต้ผ่านเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่ ของ $r = 8$



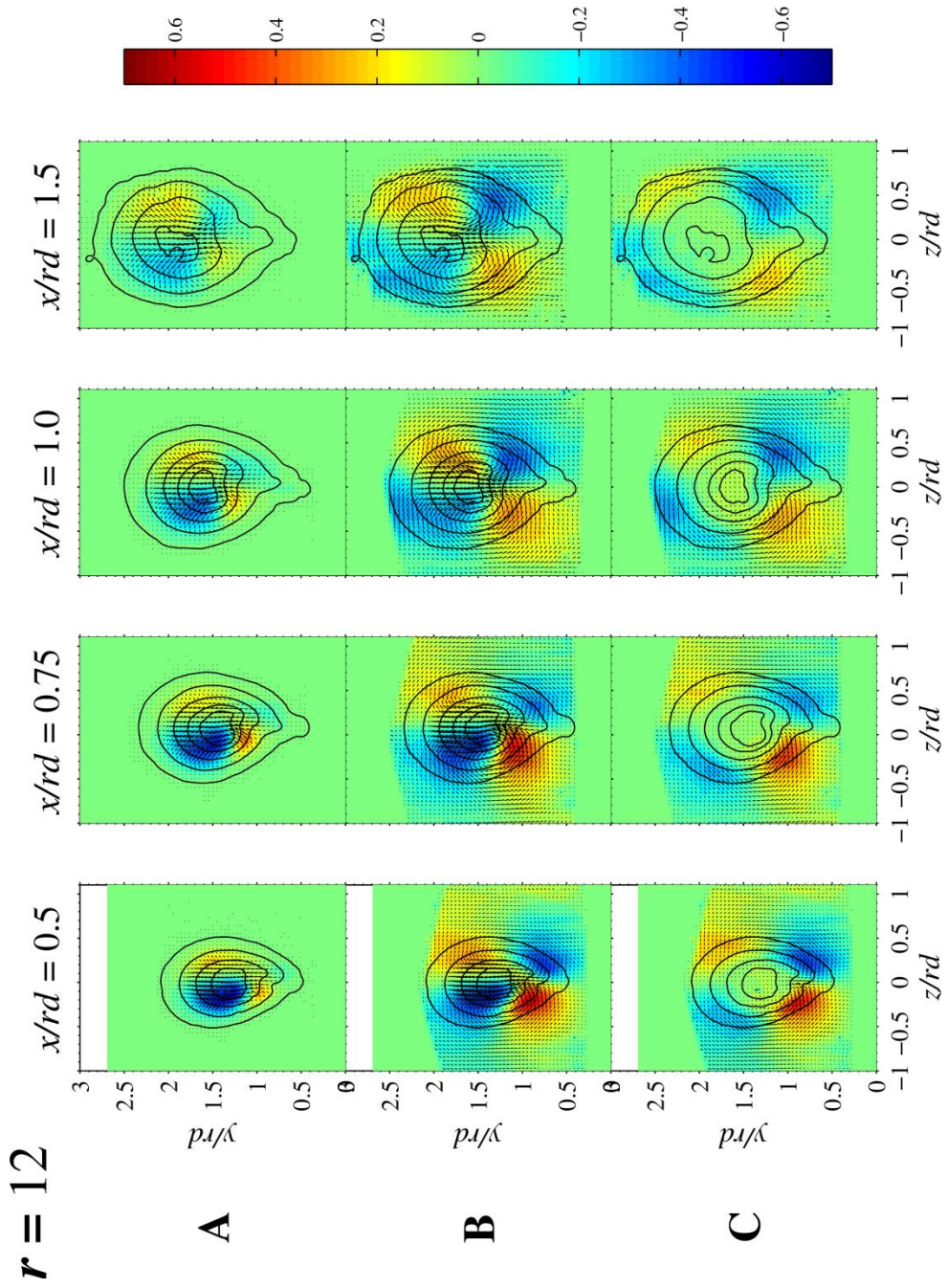
รูปที่ 7.4ก การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดใดๆ กรณี $r = 12$ (A) ของเจ็ต ϕ_j (B) ของของไหลใดๆ ϕ และ (C) ของกระแสผสมขวาง ϕ_{cr} โดยดูค่าอธิบายที่หัวข้อ 6.0



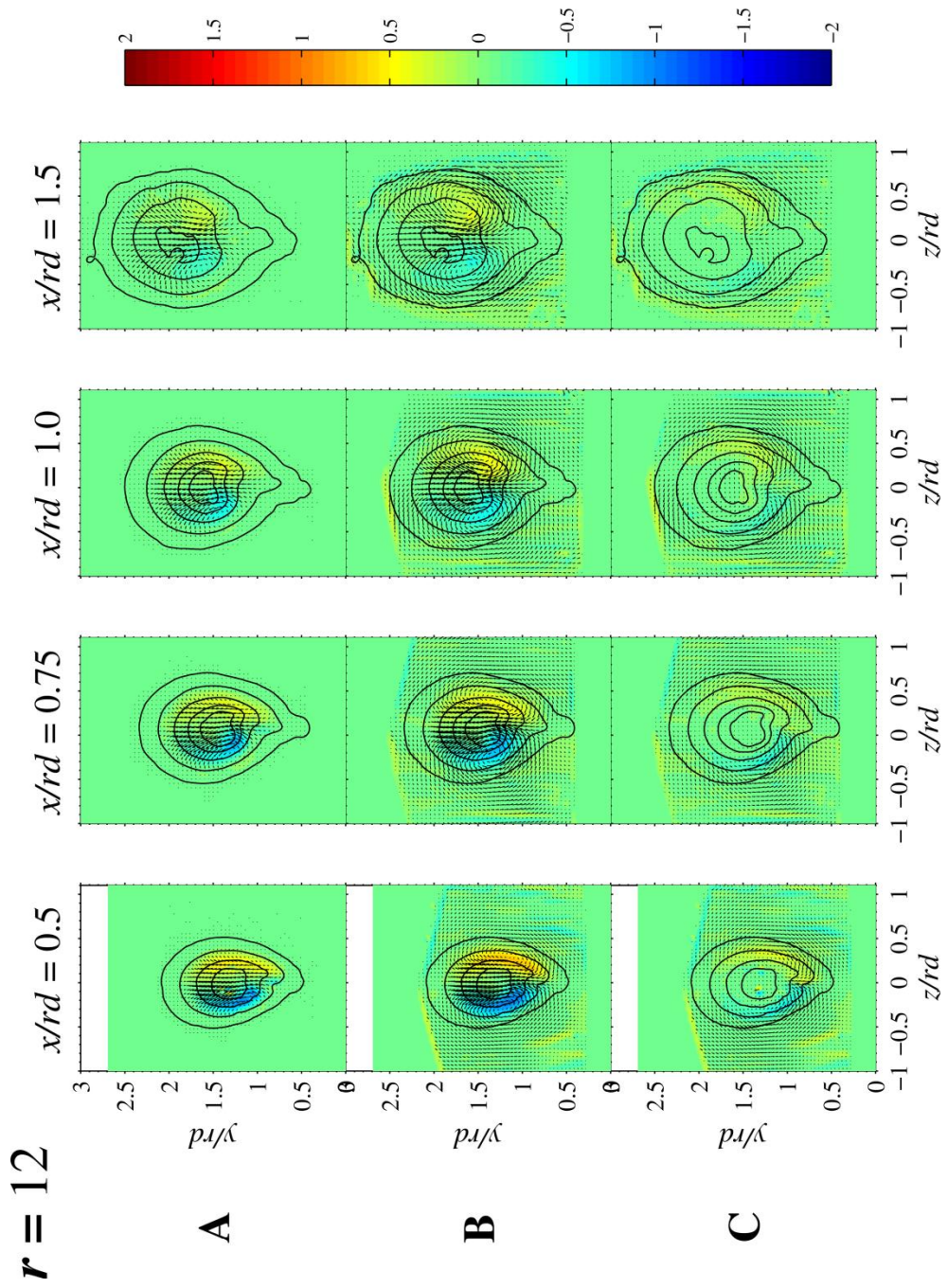
รูปที่ 7.4ข การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไว้มีติดตามแนว streamwise กรณี $r = 12$ (A) ของเจ็ต $V_{j,x} / u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_x / u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,x} / u_{cf}$ โดยคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0



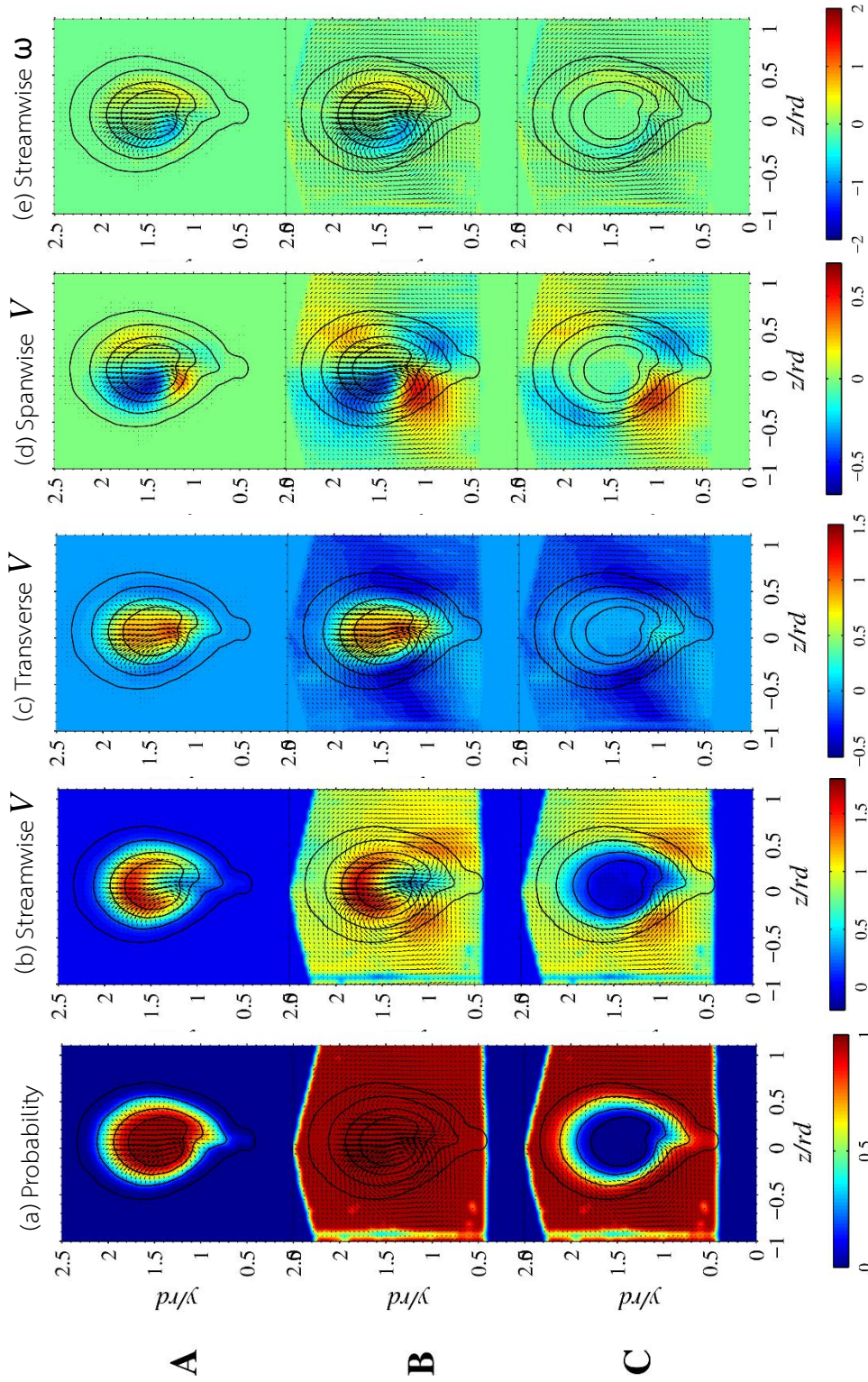
รูปที่ 7.4ค การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไว้มีทิศทางแนว transverse กรณี $r = 12$ (A) ของเจ็ต $V_{x,y} / u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ $V_{y,z} / u_{cf}$ และ (C) ของกระแสตามขวาง $V_{z,x} / u_{cf}$ โดยคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0



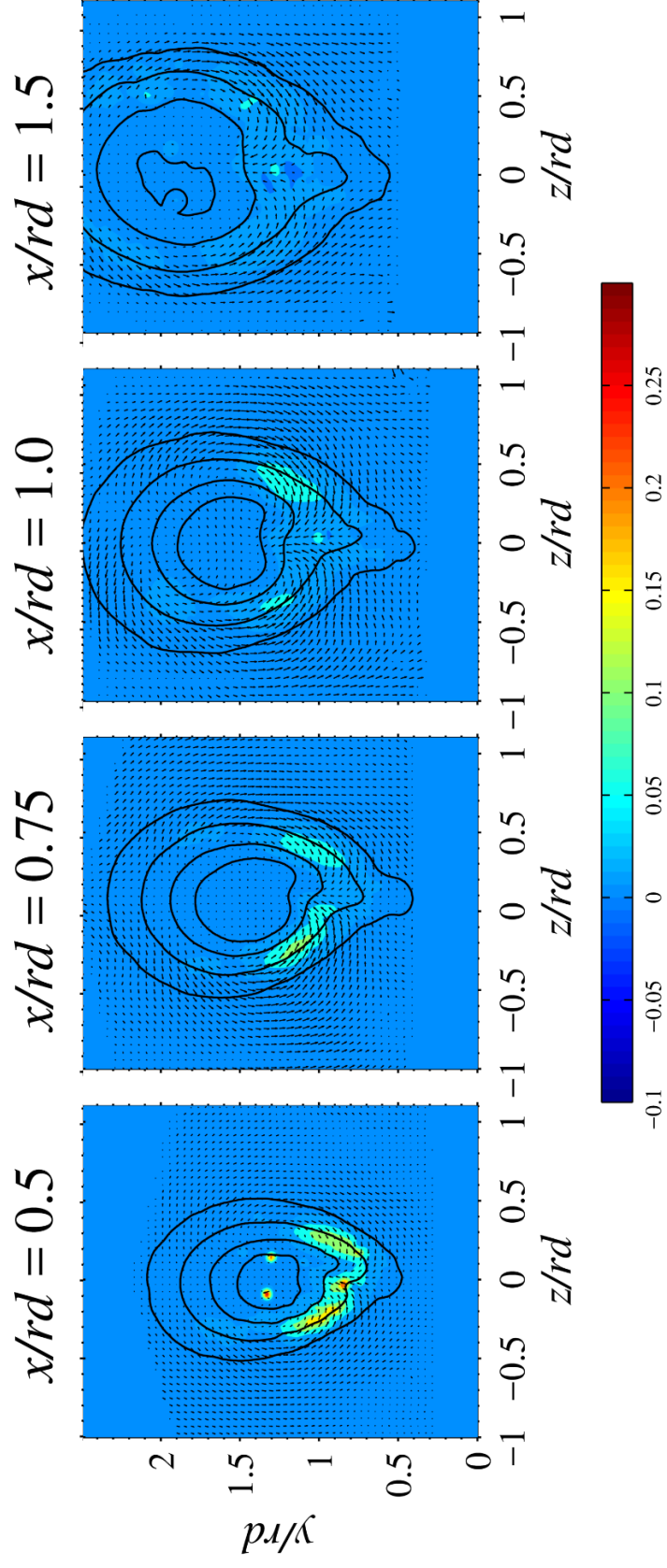
รูปที่ 7.4 การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยในมิติตามแนว spanwise กรณี $r = 12$ (A) ของเจ็ต $V_{j,z} / u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_z / u_{cf} และ (C) ของกระแสสมขวาง $V_{cf,z} / u_{cf}$ โดยคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0



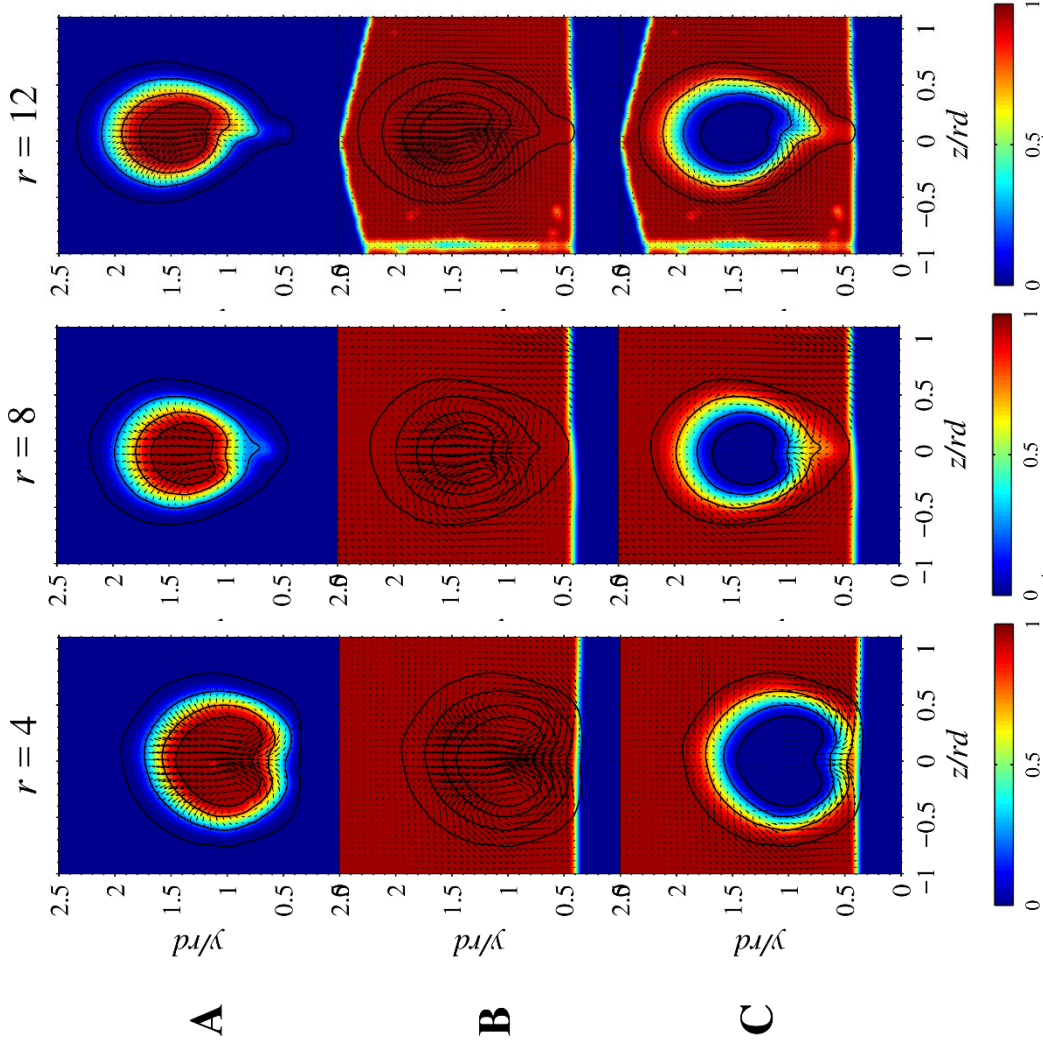
รูปที่ 7.4จ การกระจายตัวของ vorticity ไร้มิตตามแนว streamwise การณ์ $r = 12$ (A) ของเจ็ต $\omega_{j,x} / u_{cf}$ (B) ของของไหลเดี่ยว ω_x / u_{cf} และ (C) ของกระแสสมขวาง $\omega_{cf,x} / u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0



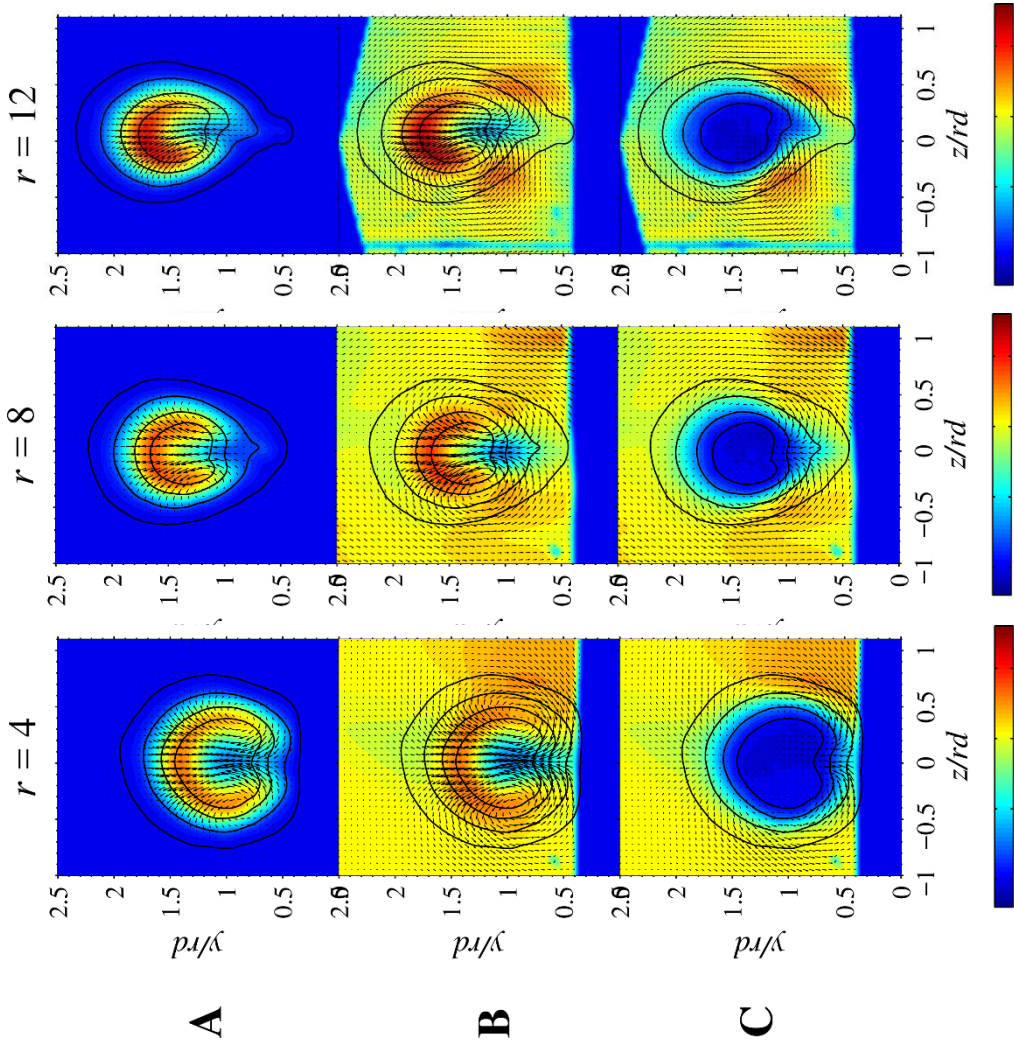
รูปที่ 7.5 การกระจายตัวของปริมาณไร้มิติต่างๆ กรณี $r = 12$ ที่ $x/rd = 0.75$ (a) Probability, (b) Streamwise velocity, (c) Transverse velocity, (d) Spanwise velocity และ (e) Streamwise vorticity



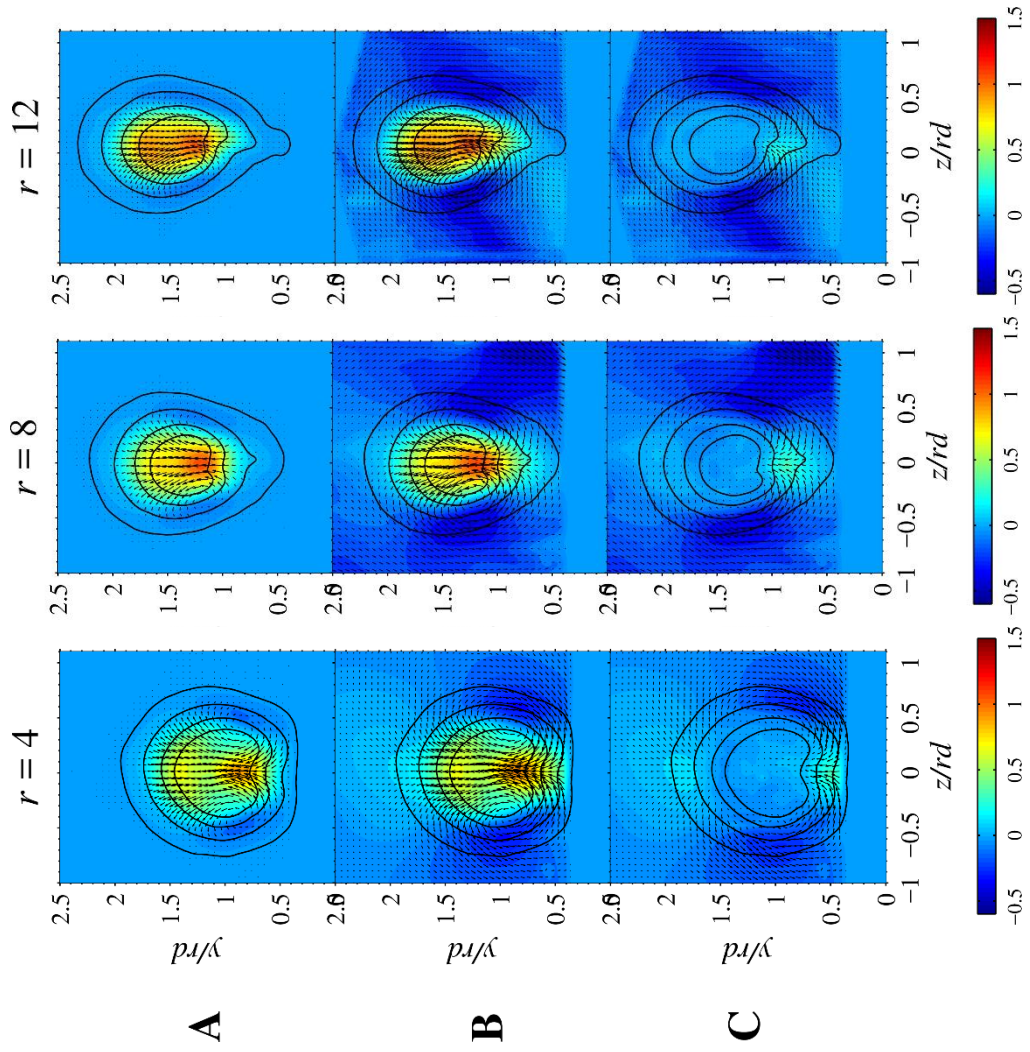
รูปที่ 7.6 บริเวณที่มีการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่ได้พัฒนาความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่ ของ $r=12$



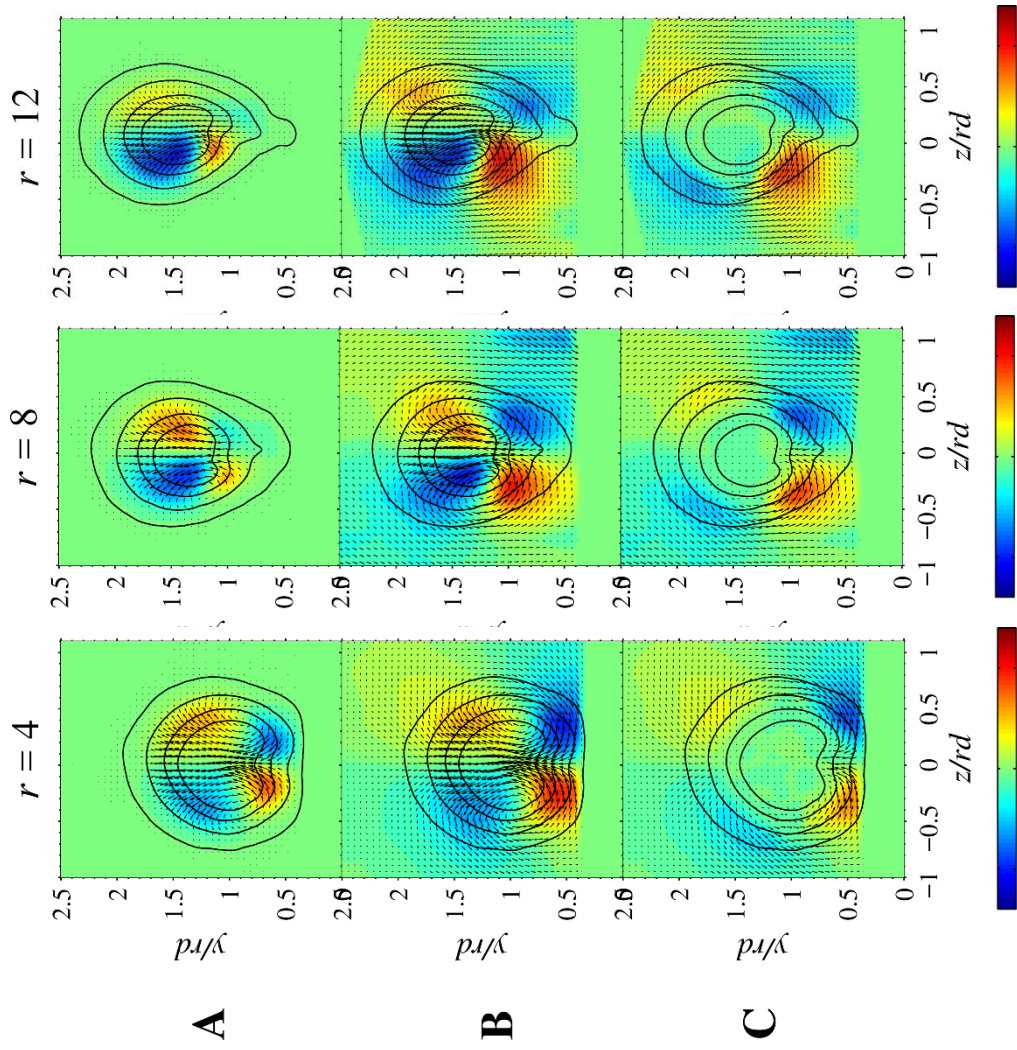
รูปที่ 7.7n การเปรียบเทียบความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดใดๆ กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/r_d = 0.75$



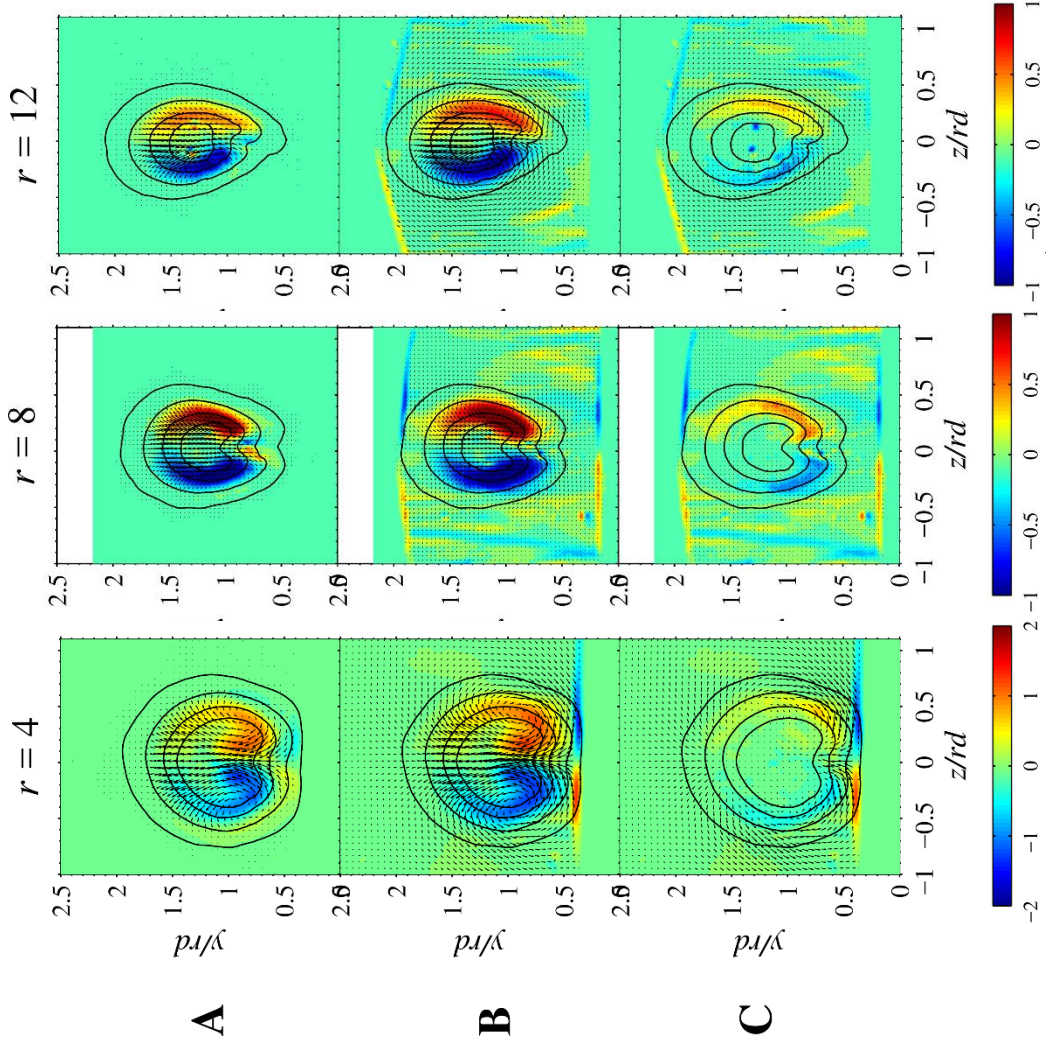
รูปที่ 7.7 การเปรียบเทียบความเร็วตามรัศมีเฉลี่ยไว้ริมิตตามแนว streamwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/rd = 0.75$



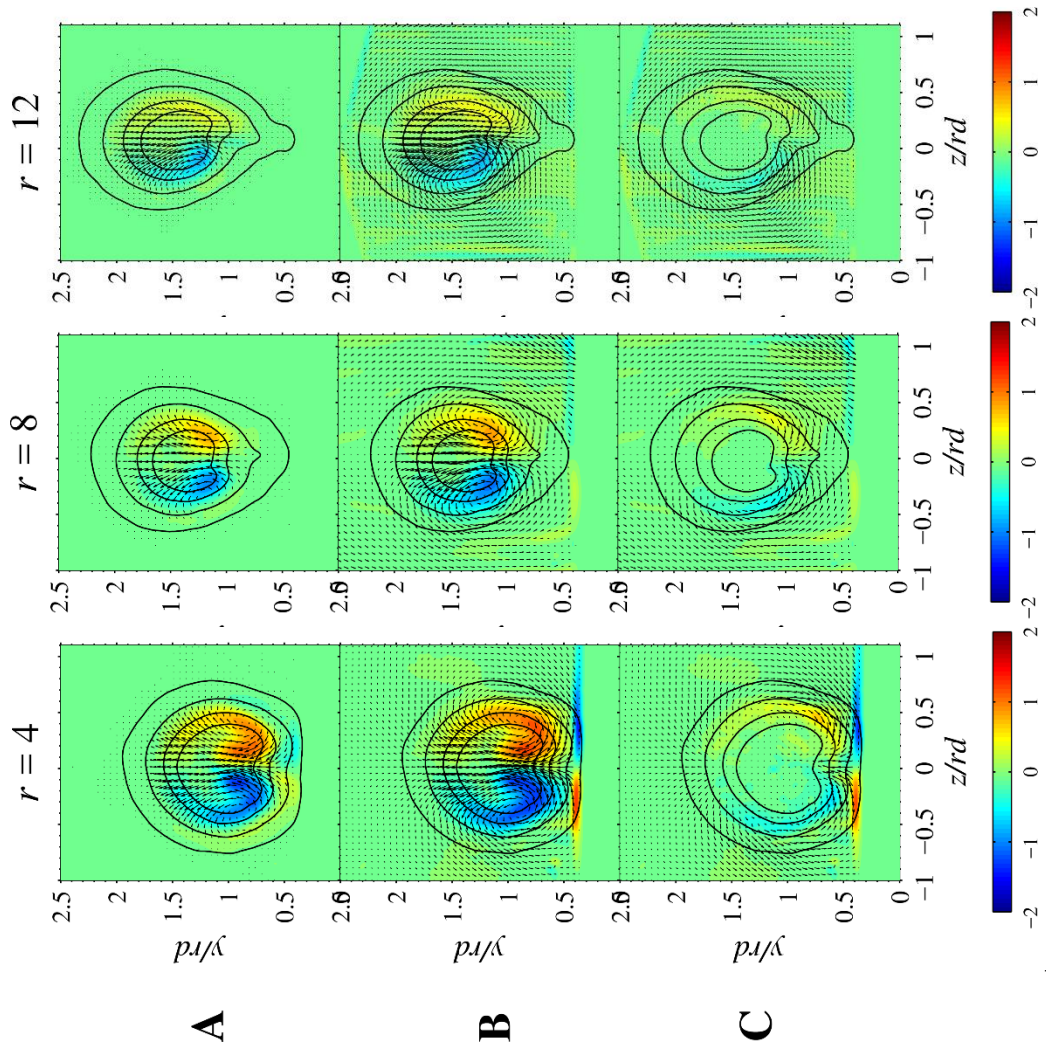
รูปที่ 7.7C การเปรียบเทียบความเร็วตามแนว transverse กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/r_d = 0.75$



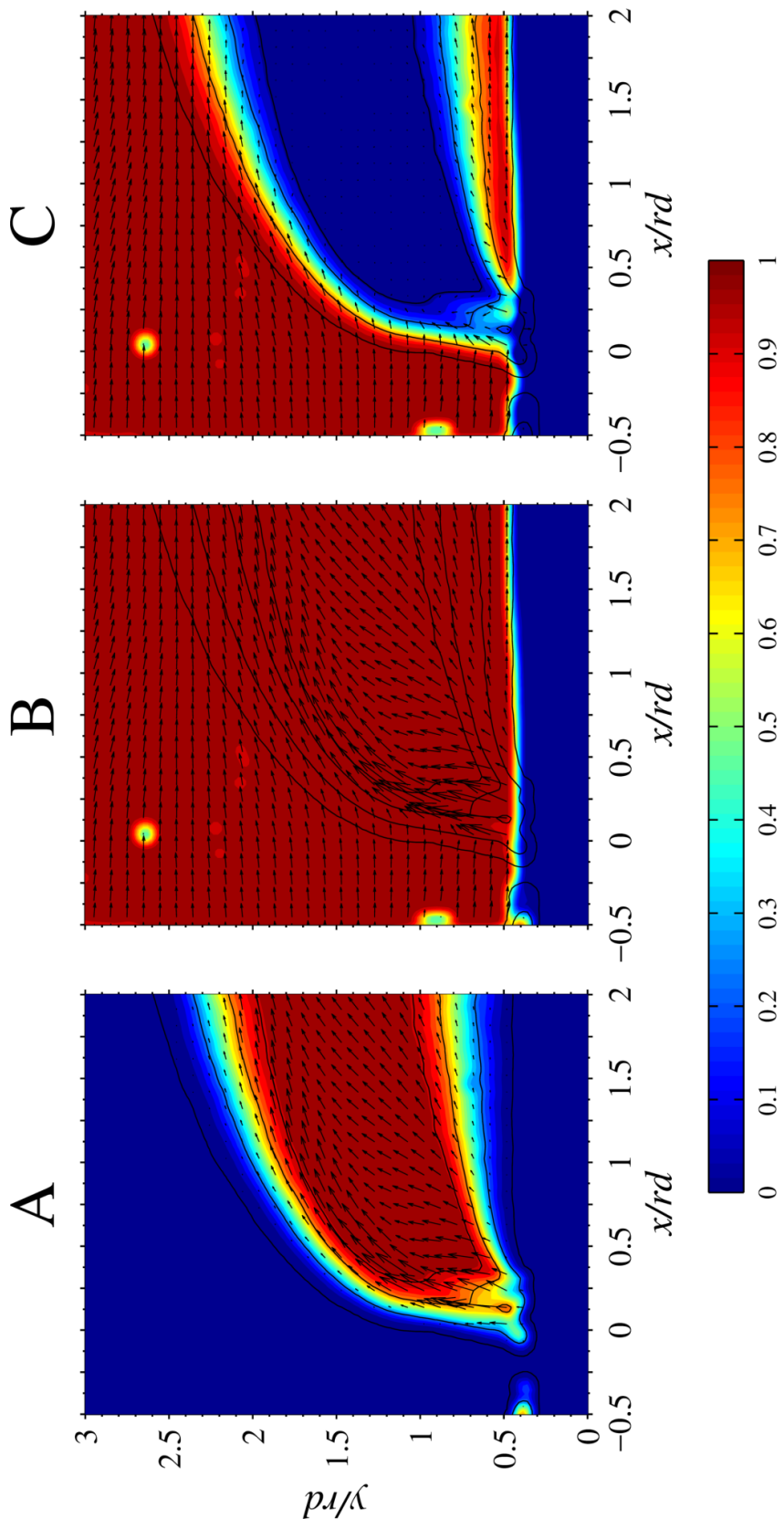
รูปที่ 7.74 การเปรียบเทียบความเร็วตามแนวเส้นตัดตามแนว spanwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/rd = 0.75$



รูปที่ 7.7จ การเปรียบเทียบ vorticity รัศมีตามแนว streamwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/rd = 0.5$ ด้วยแถบสี (color bar) ที่แตกต่างกัน

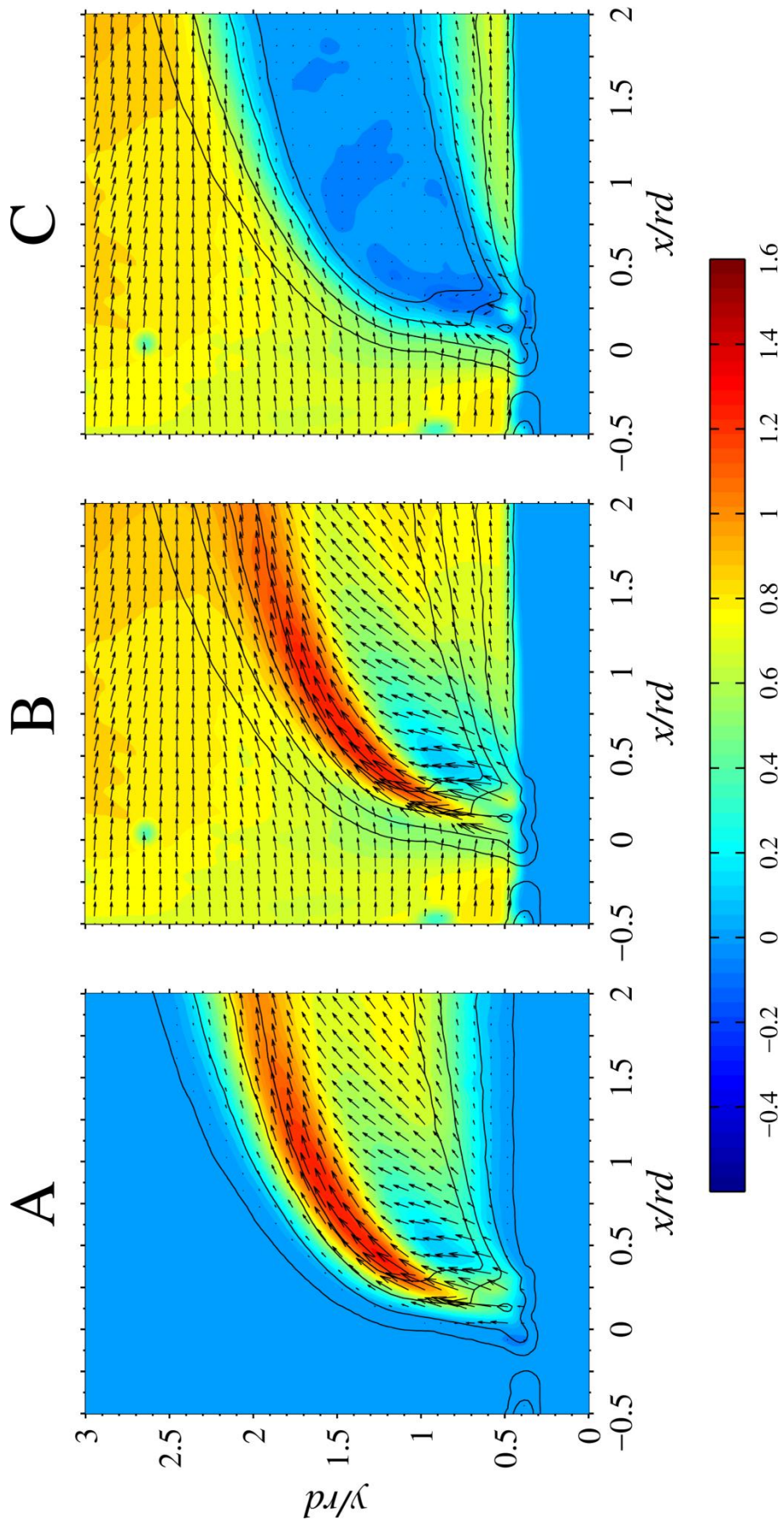


รูปที่ 7.7ด การเปรียบเทียบ vorticity ไร้มิติตามแนว streamwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ที่ $x/r_d = 0.75$

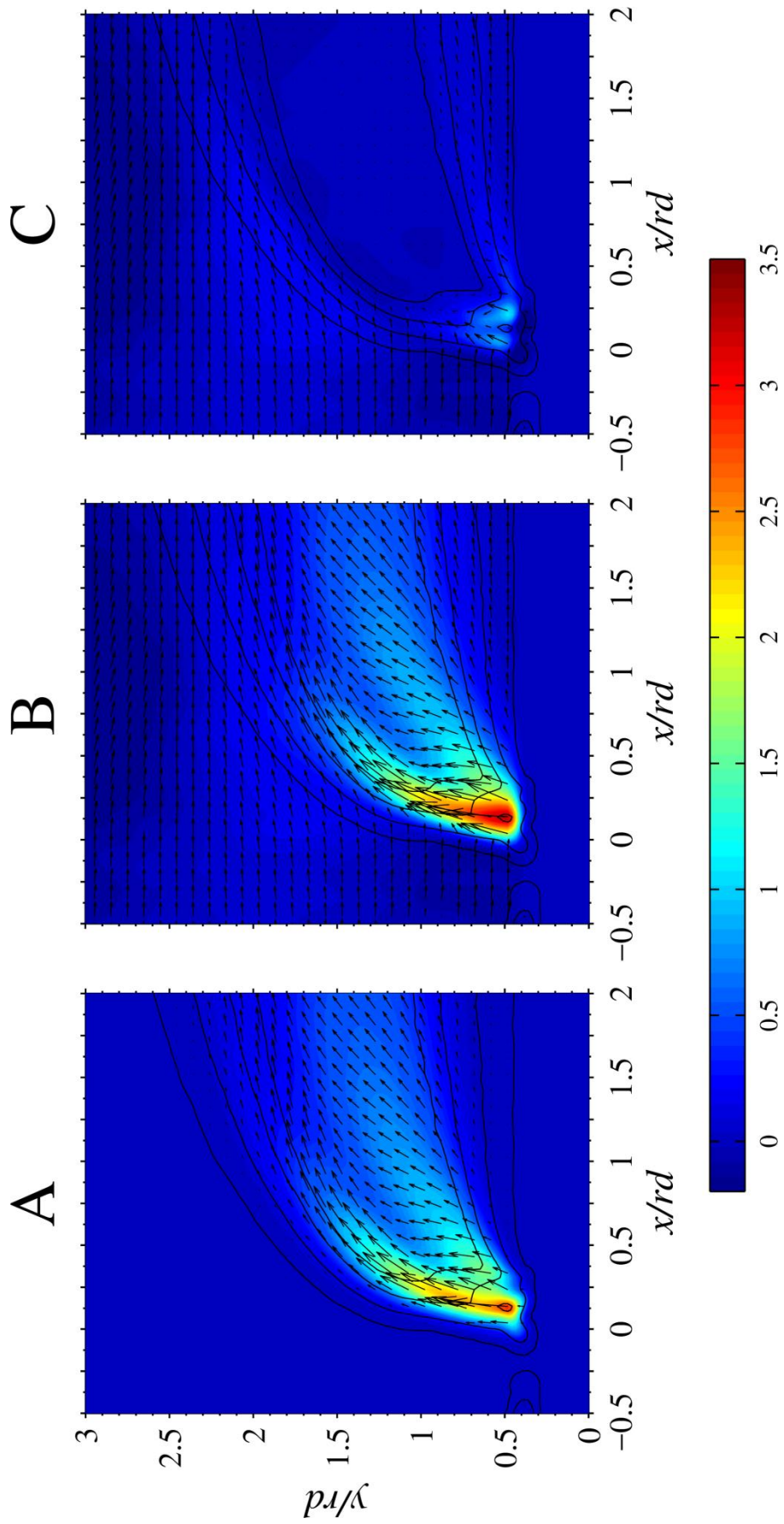


บทที่ 8

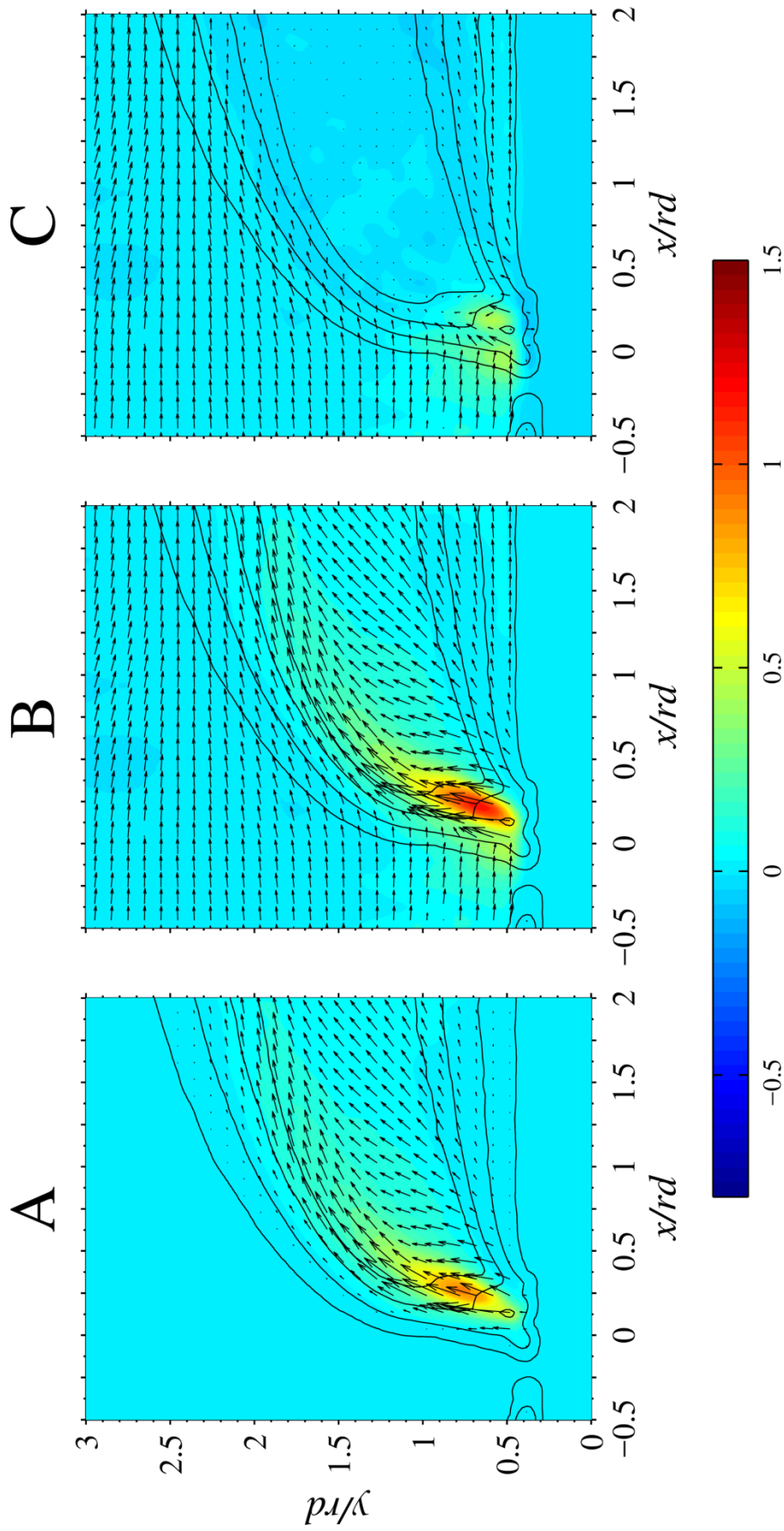
รูปที่ 8.1ก การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดใด ๆ กรณิ $r = 4$ (A) ของเจ็ต ϕ_j (B) ของของไหลเดี่ยว ϕ และ (C) ของกระแสผสมขวาง ϕ_{σ} โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0



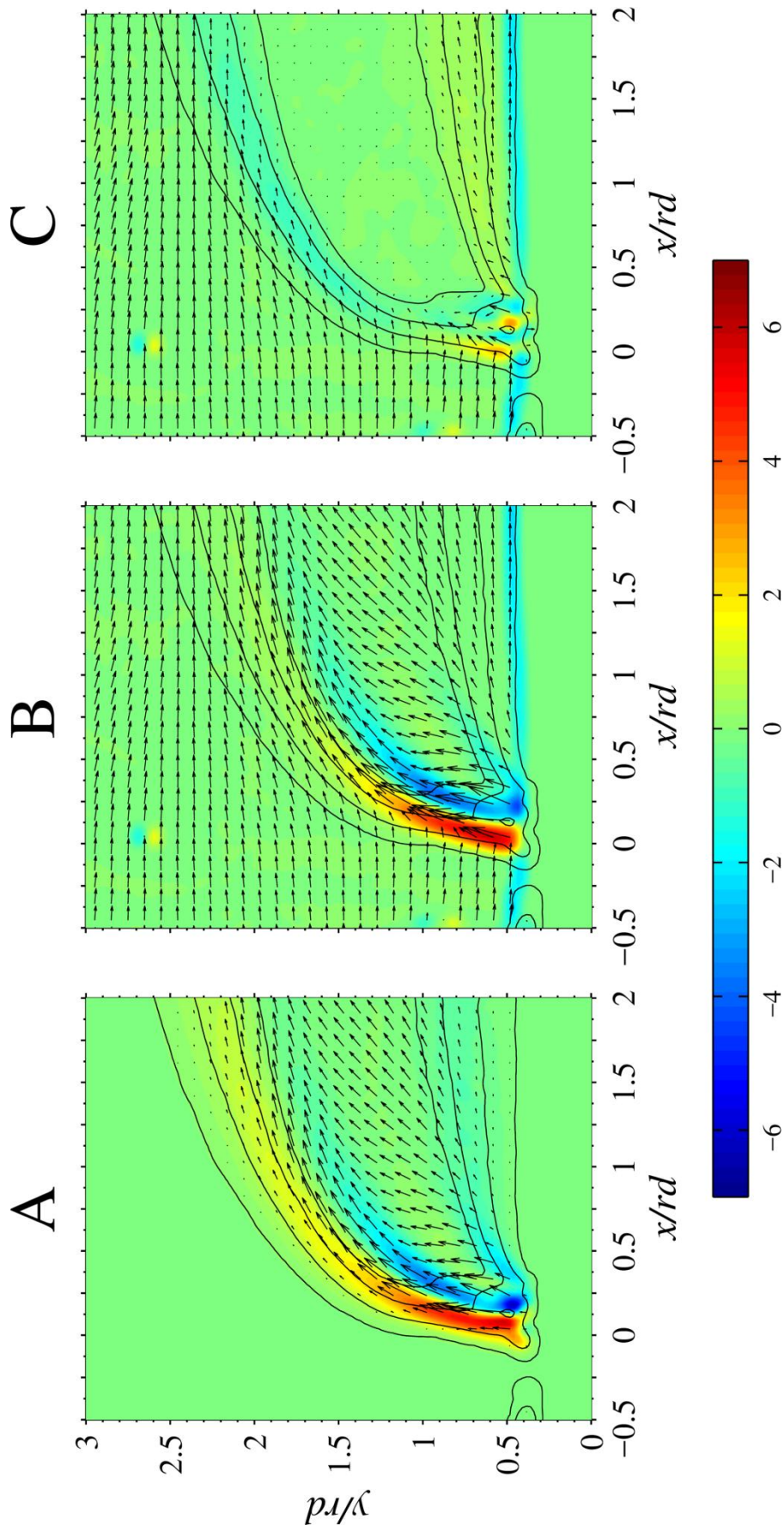
รูปที่ 8.1ข การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเริ่มติดตามแนว streamwise กรณี $r = 4$ (A) ของเงืต $V_{j,x}/u_c$ (B) ของของไหลใตใต V_x/u_c และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{c,x}/u_c$ โดยดุดำอธิบายที่หัวข้อ 6.0



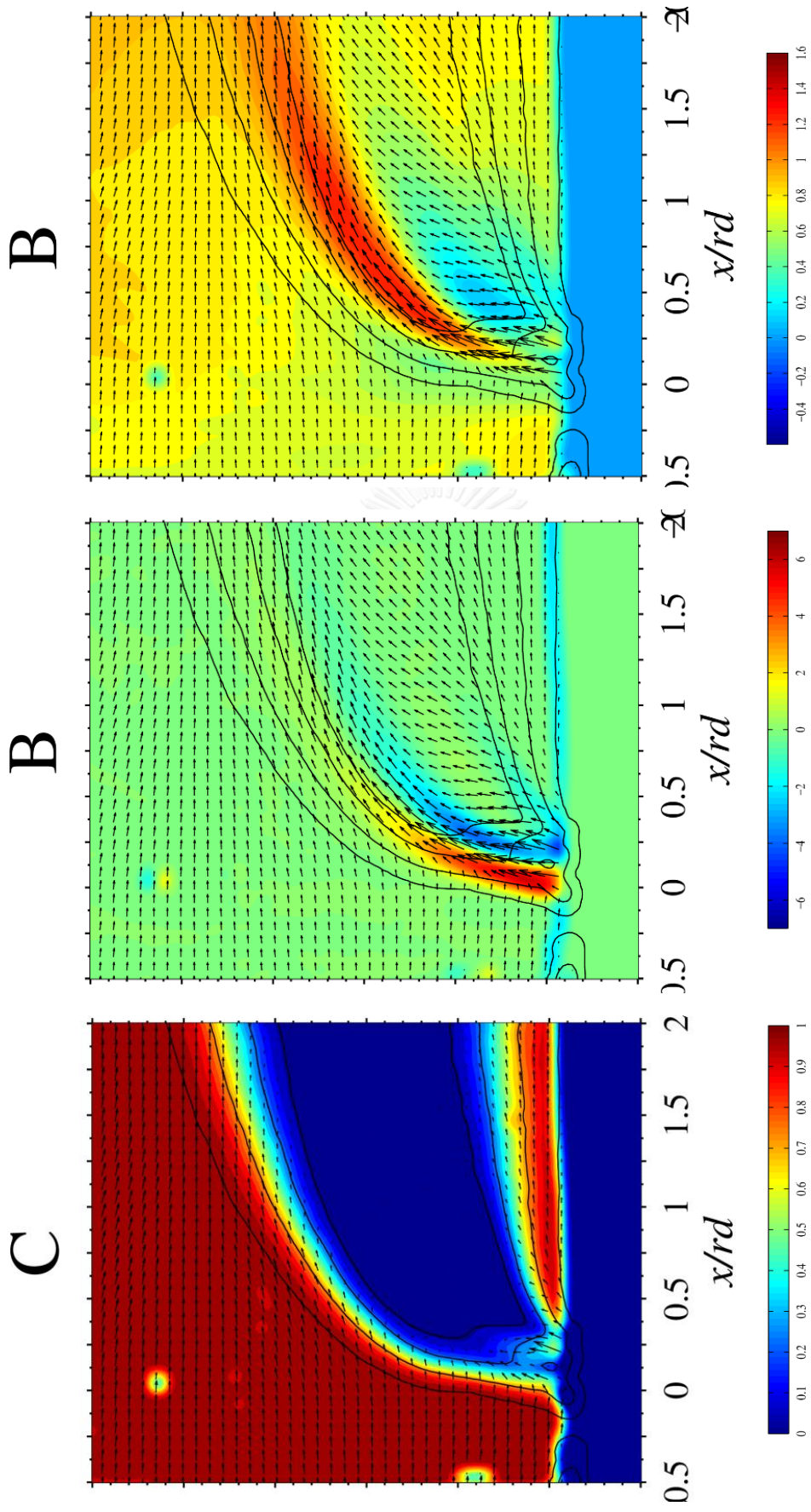
รูปที่ 8.1ค การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเริ่มติดตามแนว transverse กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต $V_{i,y} / u_{cf}$ (B) ของของไหลเดี่ยว V_y / u_{cf} และ (C) ของกระแสผสมขวาง $V_{cf,y} / u_{cf}$ โดยดัดคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0



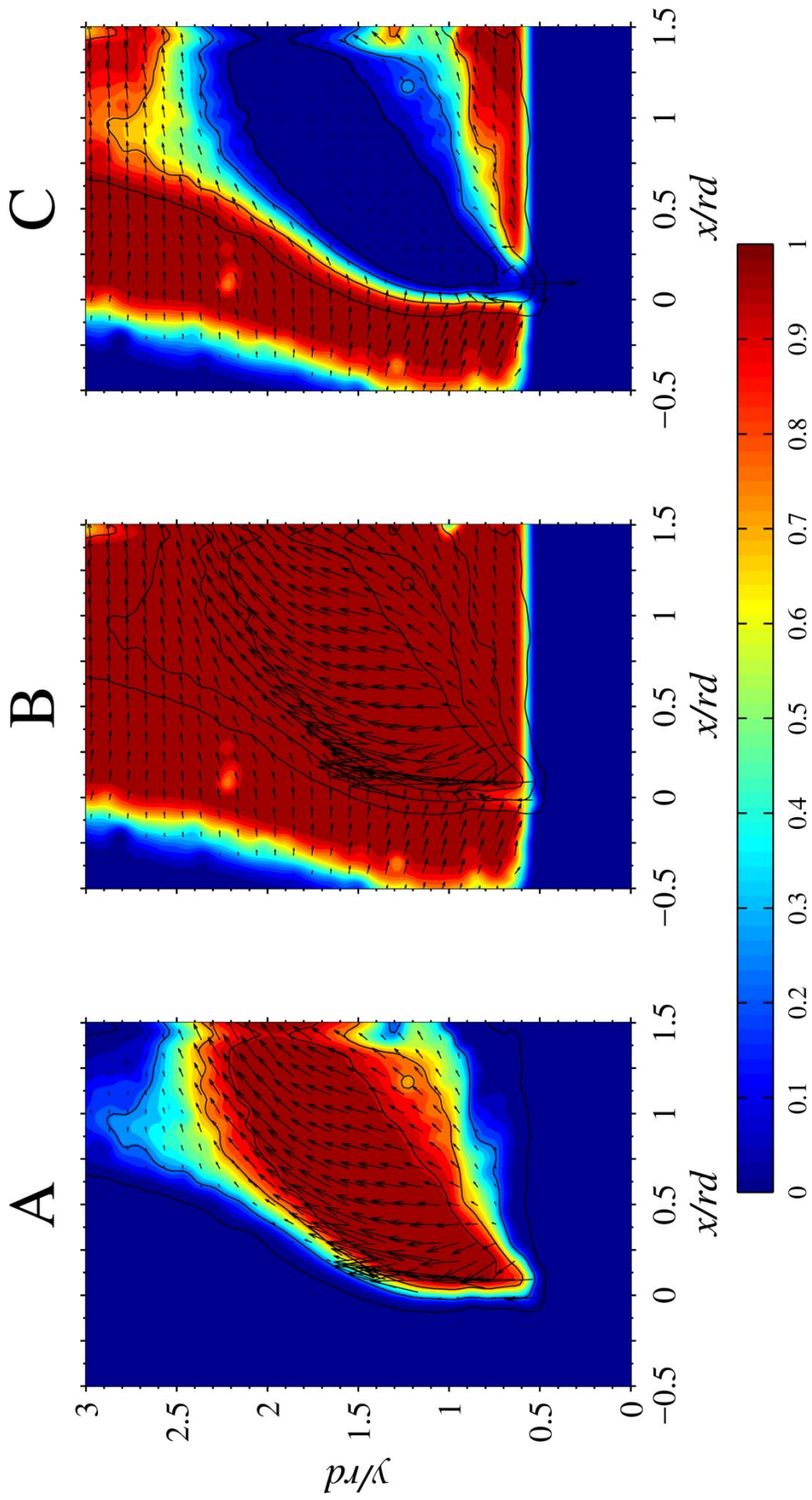
รูปที่ 8.1ง การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยได้เริ่มต้นตามแนว spanwise กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต V_{jz} / u_f (B) ของของไหลใดๆ V_z / u_f และ (C) ของกระแสผสมขวาง V_{cz} / u_f โดยดัดคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0



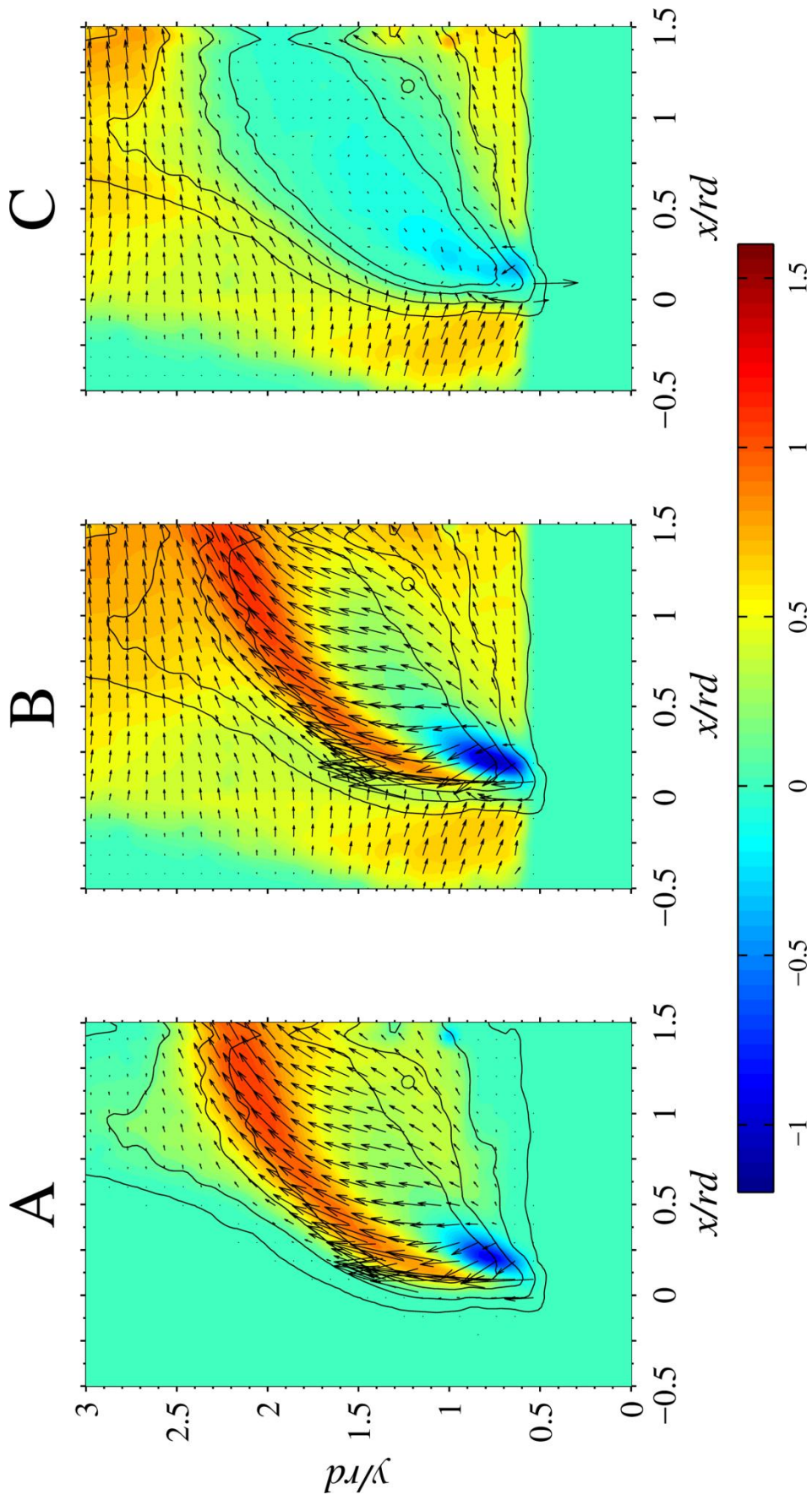
รูปที่ 8.1จ การกระจายตัวของ vorticity เริ่มต้นตามแนว spanwise กรณี $r = 4$ (A) ของเจ็ต $\omega_{j,z} / u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ ω_z / u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $\omega_{cf,z} / u_{cf}$ โดยดูคำอธิบายที่หัวข้อ 6.0



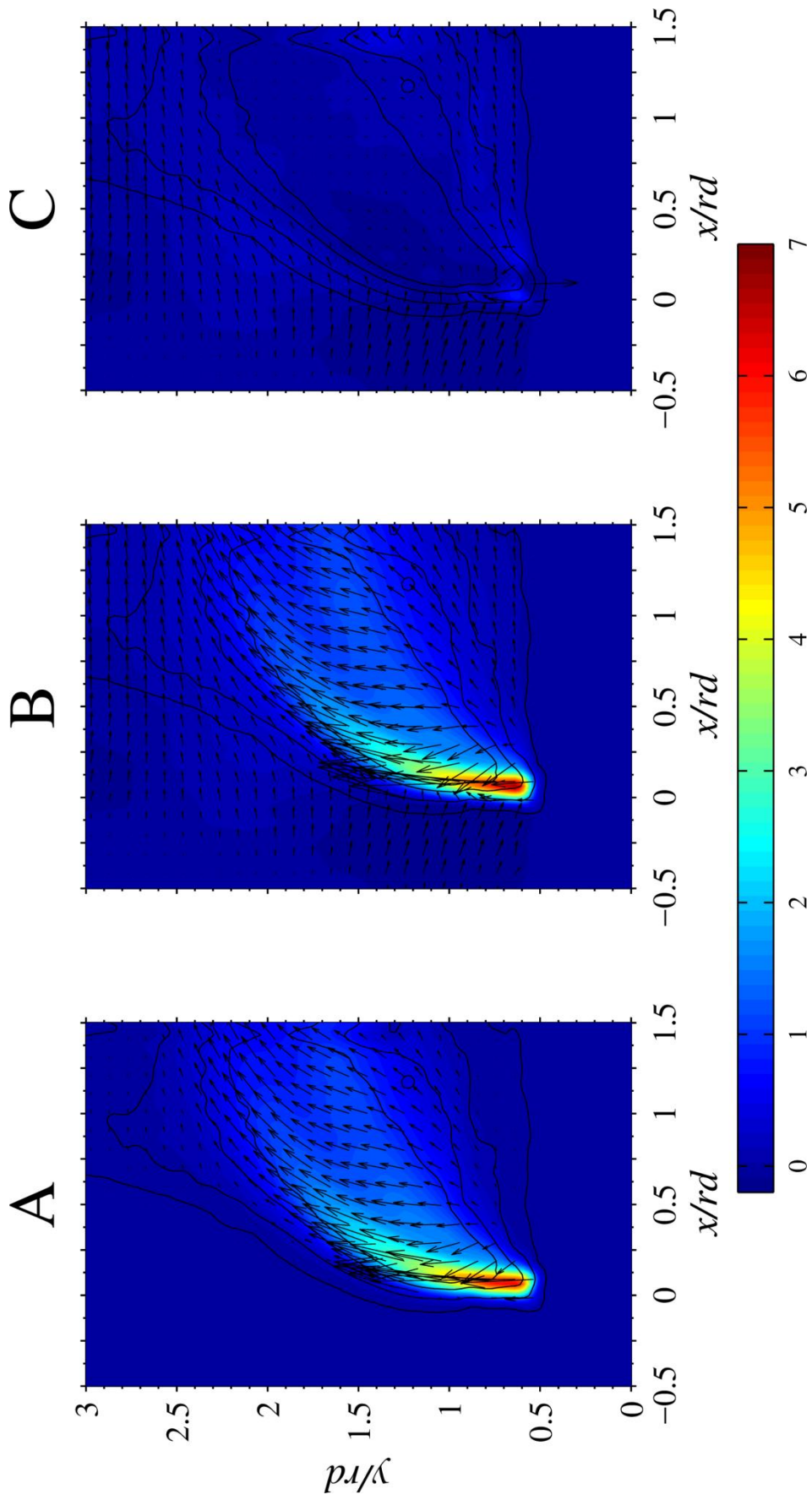
รูปที่ 8.2 การกระจายตัวของปริมาณไร้มิติต่างๆ กรณี $r = 4$ (ซ้าย) Probability ϕ_G , (กลาง) Spanwise vorticity ω_z / u_∞ และ (ขวา) Streamwise velocity V_x / u_∞



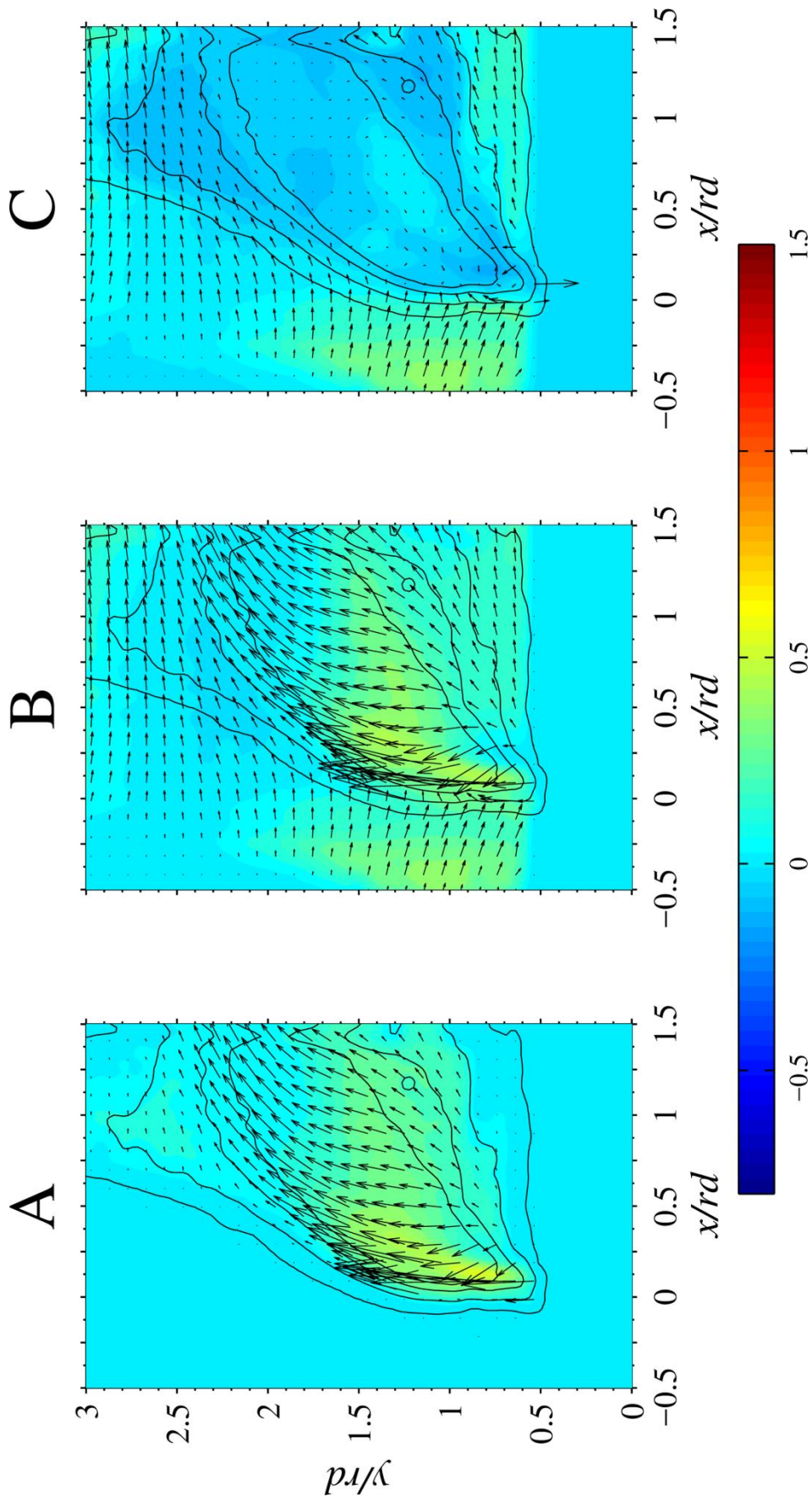
รูปที่ 8.3ก การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาทีจุดใดๆ กรณี $r = 8$ (A) ของเงืต ϕ_j (B) ของเงืต ϕ และ (C) ของกระแสดมขวาง ϕ_{σ} โดยตุค้ออบยที่หัวขอ 6.0



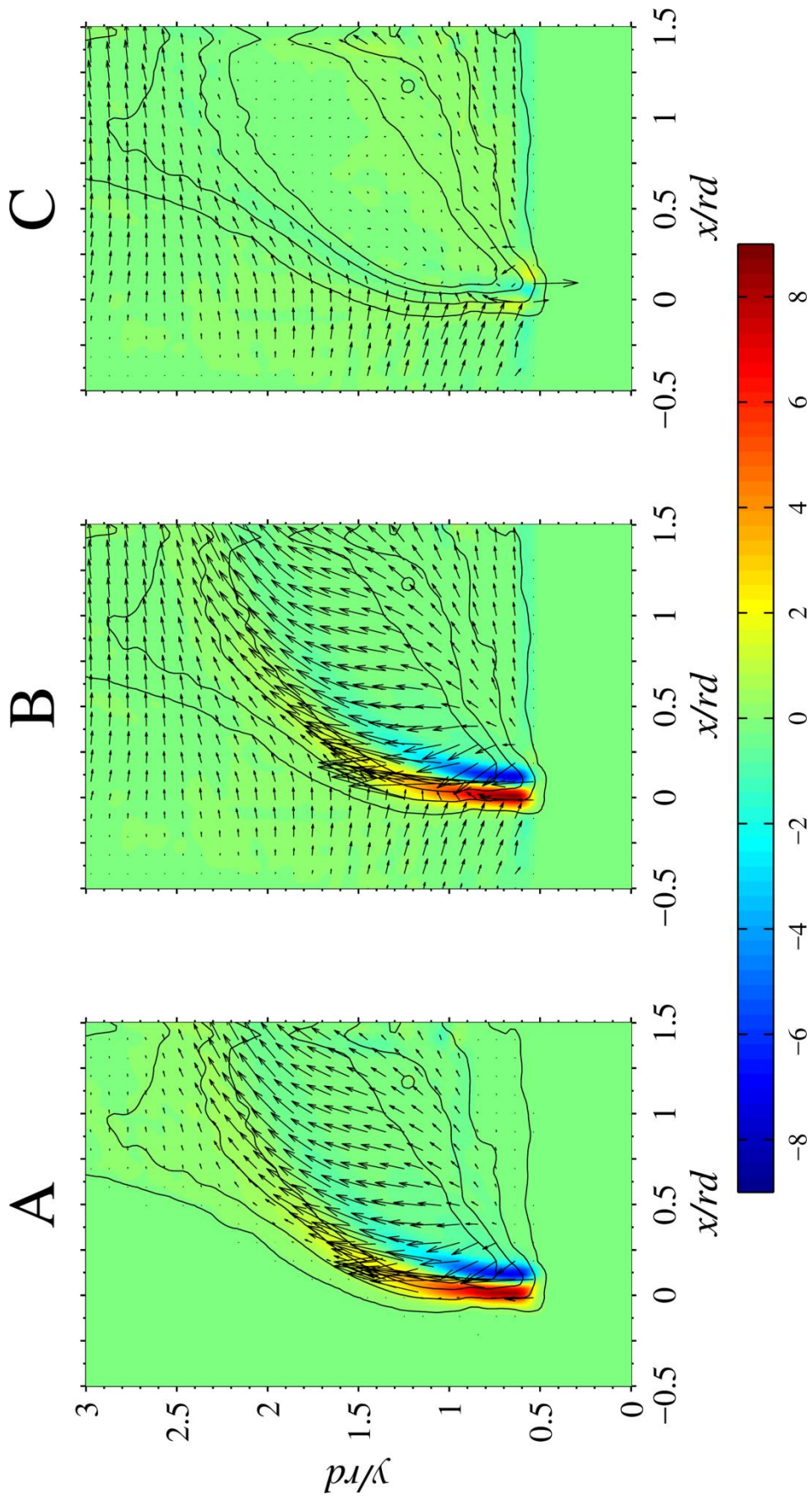
รูปที่ 8.3ข การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเริ่มมีทิศทางแนว streamwise กรณี $r = 8$ (A) ของเจ็ต $V_{j,x}/u_{cf}$ (B) ของของไหลใดๆ V_x/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,x}/u_{cf}$ โดยดูค่าอธิบายที่หัวข้อ 6.0



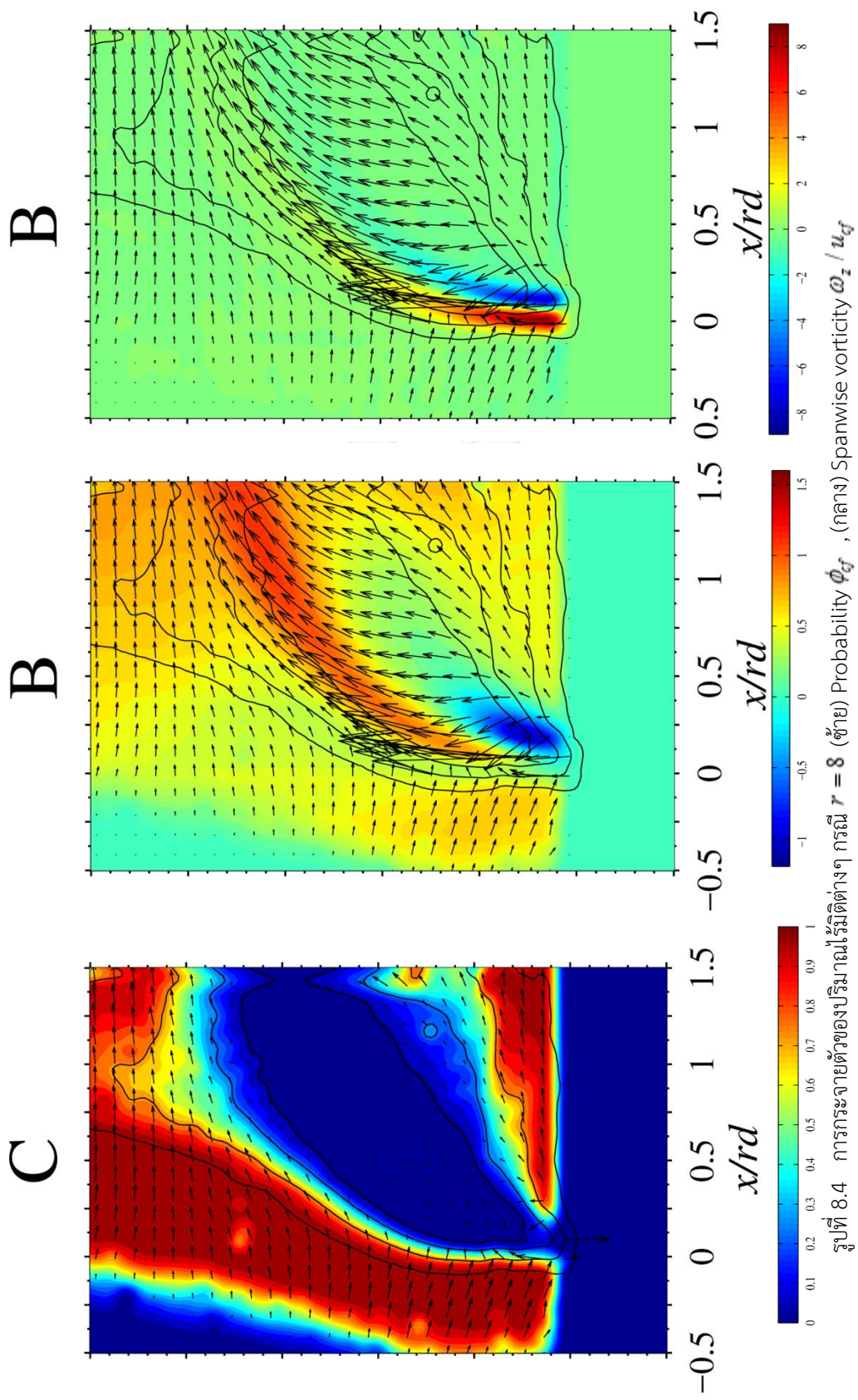
รูปที่ 8.3ค การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเริ่มมีทิศทางแนว transverse กรณี $r = 8$ (A) ของเจ็ต $V_{j,y}/u_{cf}$ (B) ของของไหลเฉื่อย V_y/u_{cf} และ (C) ของกระแสสมขวาง $V_{cf,y}/u_{cf}$ โดยตัดออร์บิทัลที่หัวข้อ 6.0



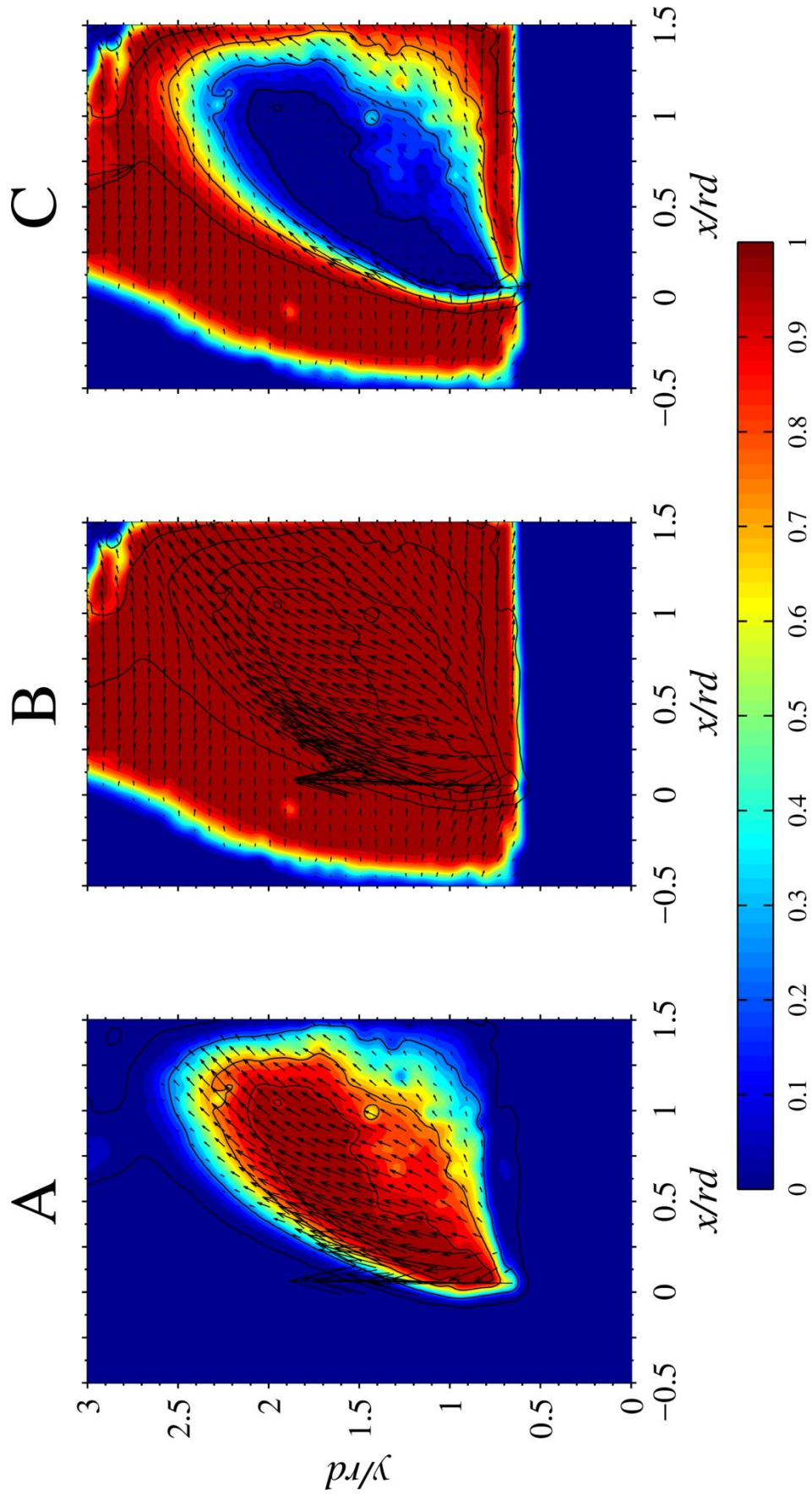
รูปที่ 8.3ง การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเริ่มติดตามแนว spanwise กรณี $r = 8$ (A) ของเจ็ต $V_{j,z}/u_{cf}$ (B) ของของไหลเดี่ยว V_z/u_{cf} และ (C) ของกระแสผสมขวาง $V_{cf,z}/u_{cf}$ โดยตัดค่าอธิบายที่หัวข้อ 6.0



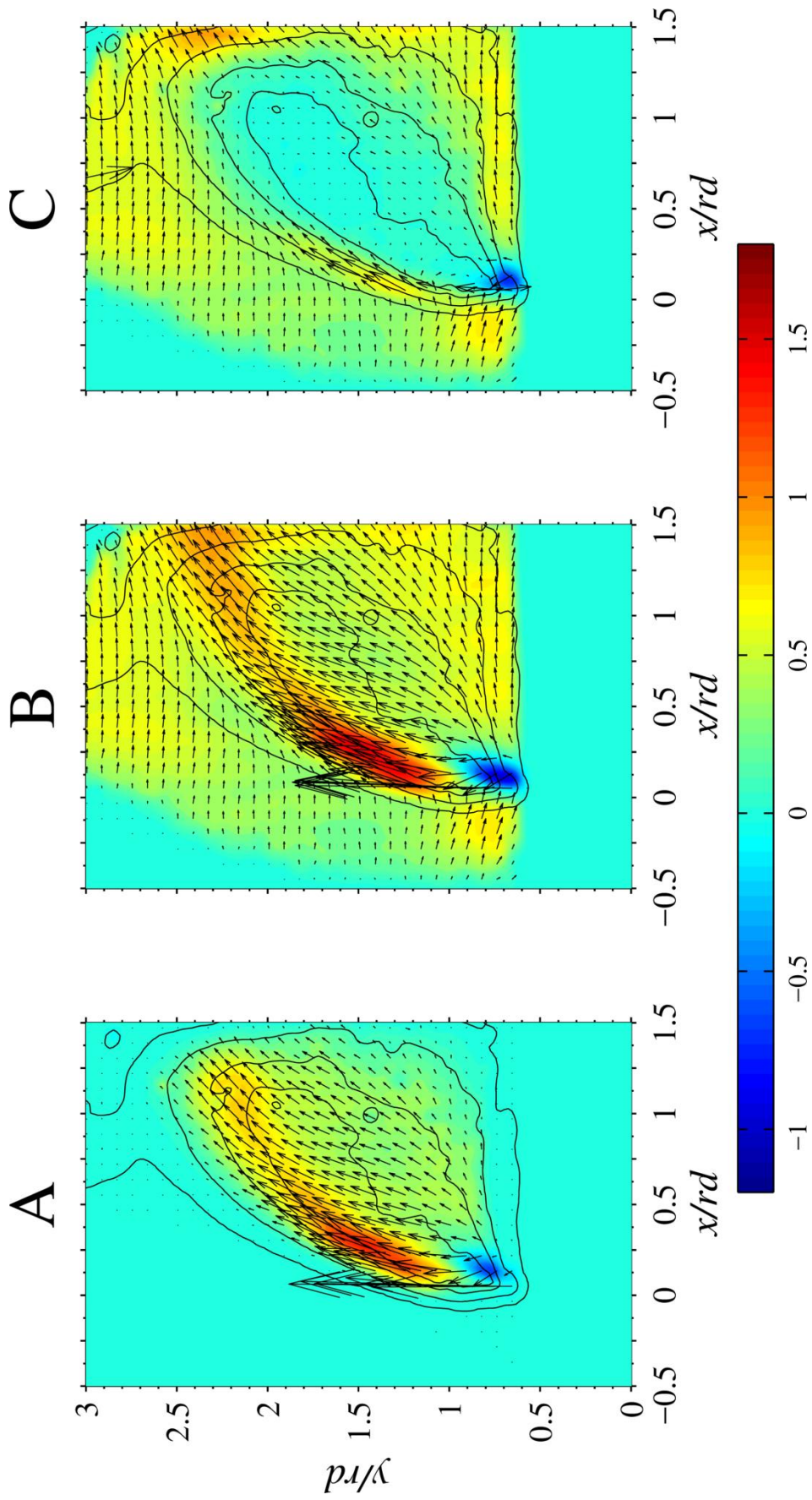
รูปที่ 8.3จ การกระจายตัวของ vorticity เริ่มติดตามแนว spanwise กรณี $r = 8$ (A) ของเจ็ต ω_{jz} / u_{cf} (B) ของของไหลเดี่ยว ω_z / u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $\omega_{cf,z} / u_{cf}$ โดยจุดคืออิมบายที่หัวข้อ 6.0



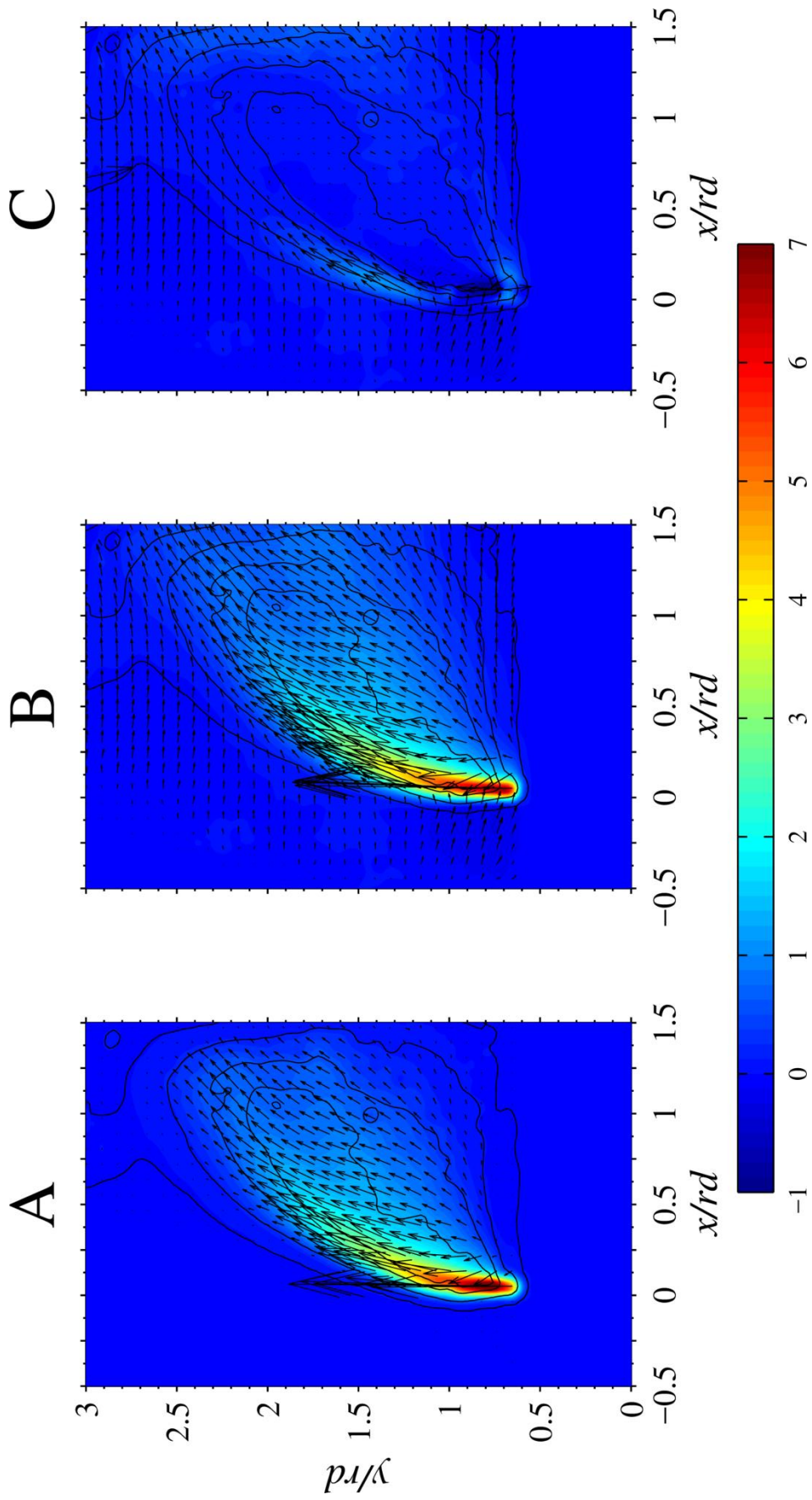
รูปที่ 8.4 การกระจายตัวของปริมาณเริ่มต้นต่างๆ กรณี $r = 8$ (ซ้าย) Probability ϕ_ϕ , (กลาง) Spanwise vorticity ω_z / u_f และ (ขวา) Streamwise velocity V_x / u_f



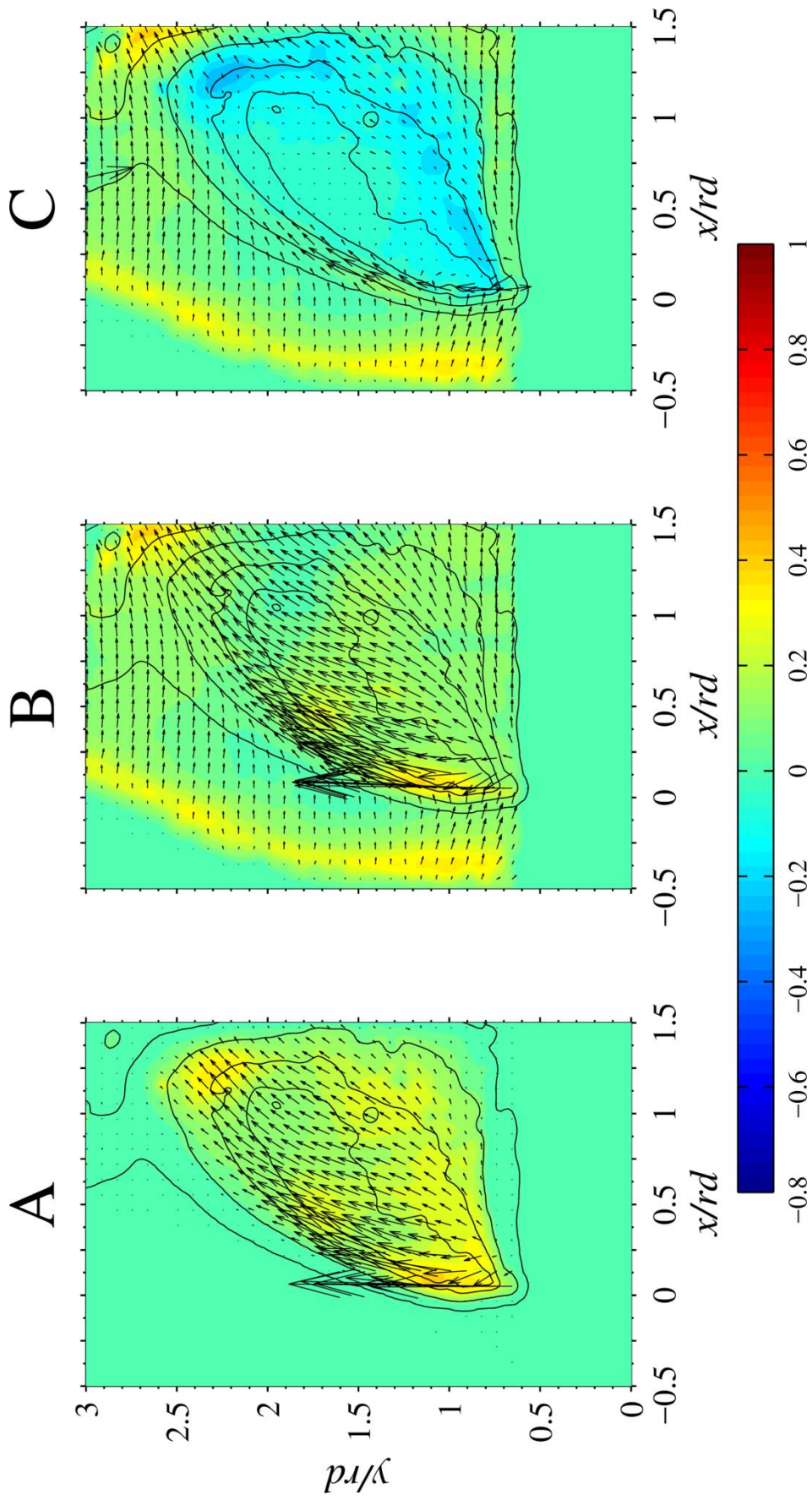
รูปที่ 8.5ก การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดใดๆ กรณี $r = 12$ (A) ของเจ็ต ϕ_j (B) ของของไหลใดๆ ϕ และ (C) ของกระแสผสมขวาง $\phi_{\text{ม}}$ โดยตุ้ค่าอธิบายที่หัวข้อ 6.0



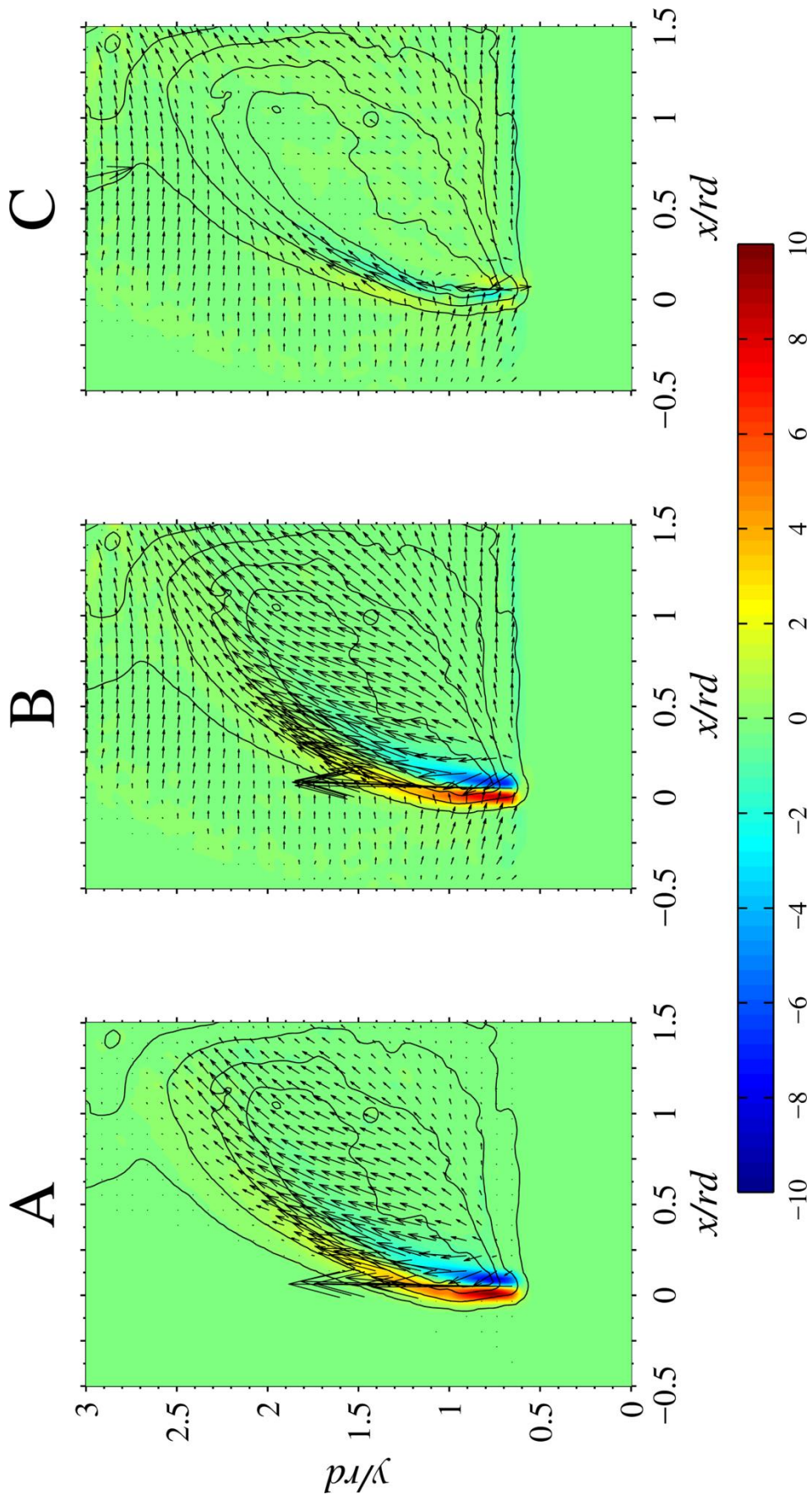
รูปที่ 8.5ข การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเริ่มติดตามแนว streamwise กรณี $r = 12$ (A) ของเจ็ต $V_{j,x}/u_{cf}$ (B) ของของไหลเดี่ยว V_x/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $V_{cf,x}/u_{cf}$ โดยดูค่าอธิบายที่หัวข้อ 6.0



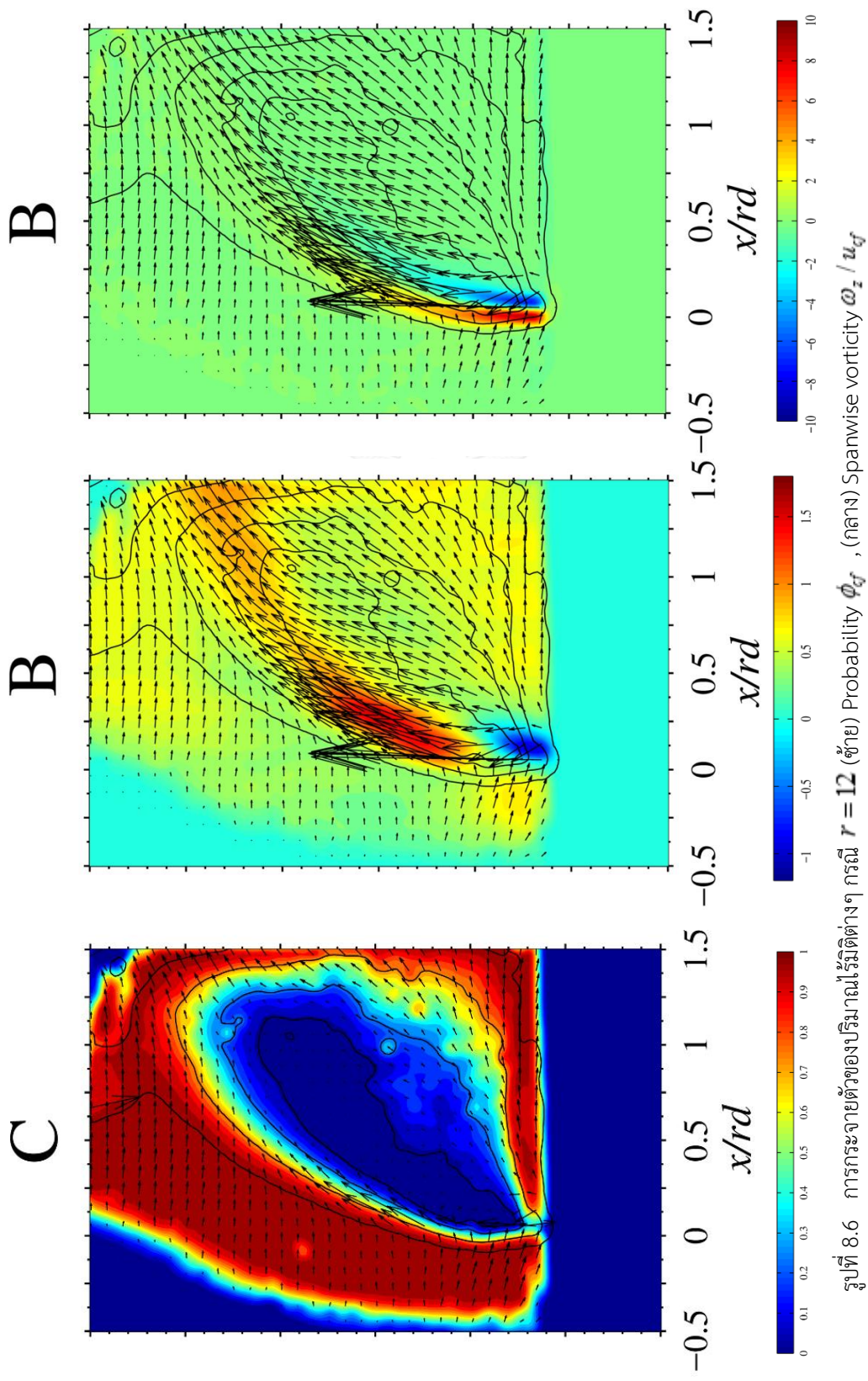
รูปที่ 8.5ค การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเริ่มติดตามแนว transverse กรณี $r = 12$ (A) ของเจ็ต $V_{x,y} / u_{cf}$ (B) ของช่องไหลใดก็ตาม V_y / u_{cf} และ (C) ของกระแสสมขวาง $V_{x,y} / u_{cf}$ โดยตัดอธิบายที่หัวข้อ 6.0



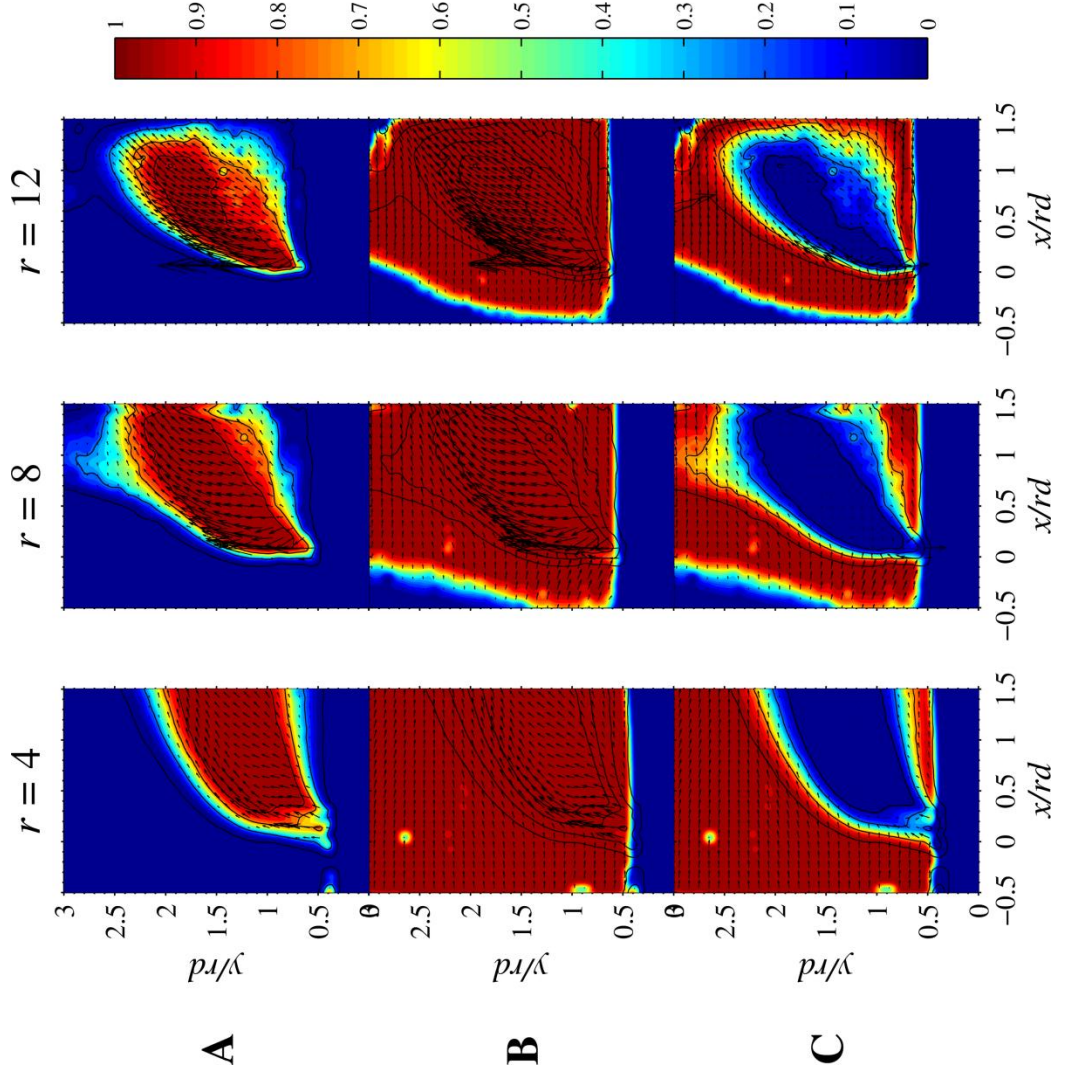
รูปที่ 8.5ง การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเริ่มติดตามแนว spanwise กรณี $r = 12$ (A) ของเจ็ต $V_{j,z}/u_{cf}$ (B) ของของไหลโตๆ V_z/u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง V_z/u_{cf} โดยตัดอธิบายที่หัวข้อ 6.0



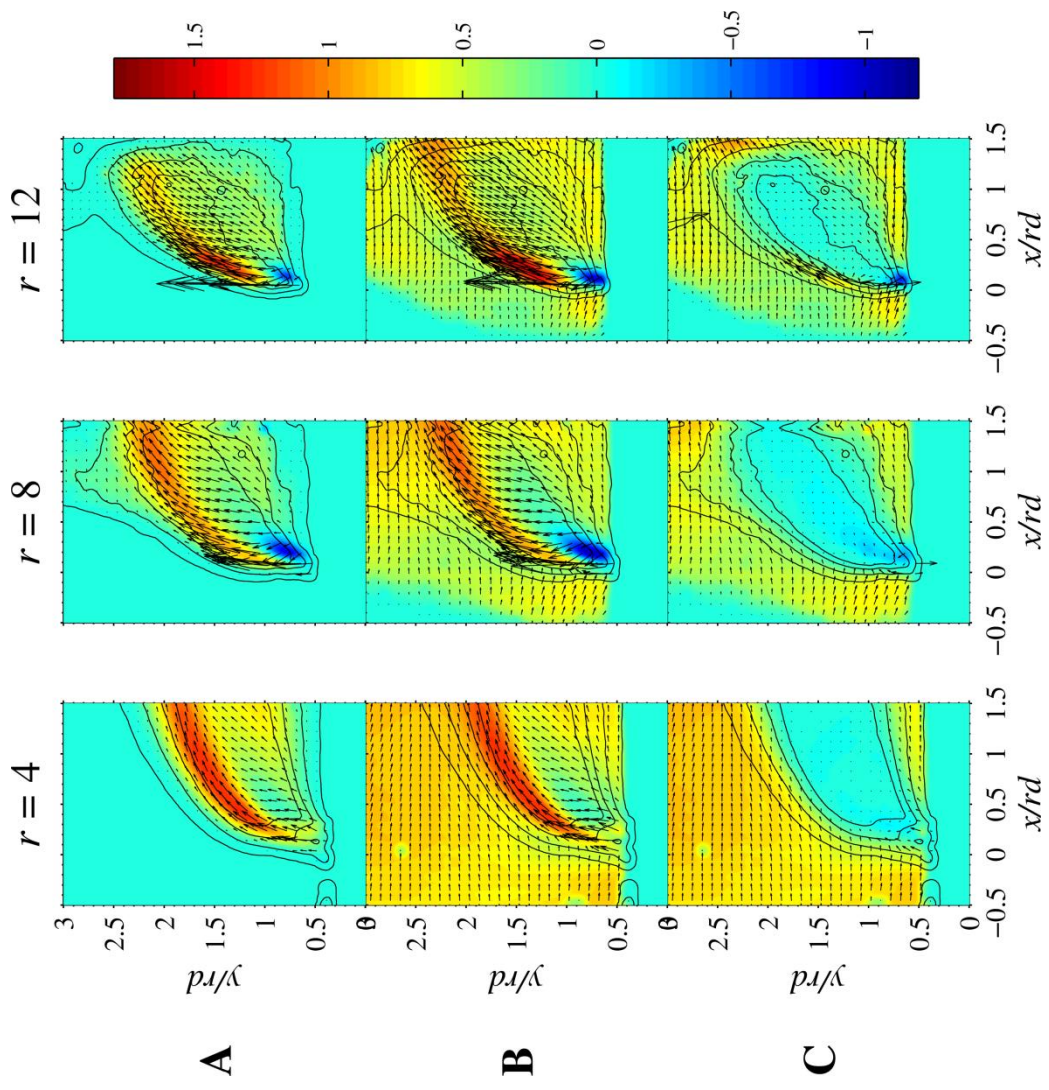
รูปที่ 8.5จ การกระจายตัวของ vorticity ไร้มิติตามแนว spanwise กรณี $r = 12$ (A) ของเจ็ตแต่ละเจ็ต ω_z / u_{cf} (B) ของของไหลเดี่ยว ω_z / u_{cf} และ (C) ของกระแสลมขวาง $\omega_{cf,z} / u_{cf}$ โดยดูค่าอธิบายที่หัวข้อ 6.0



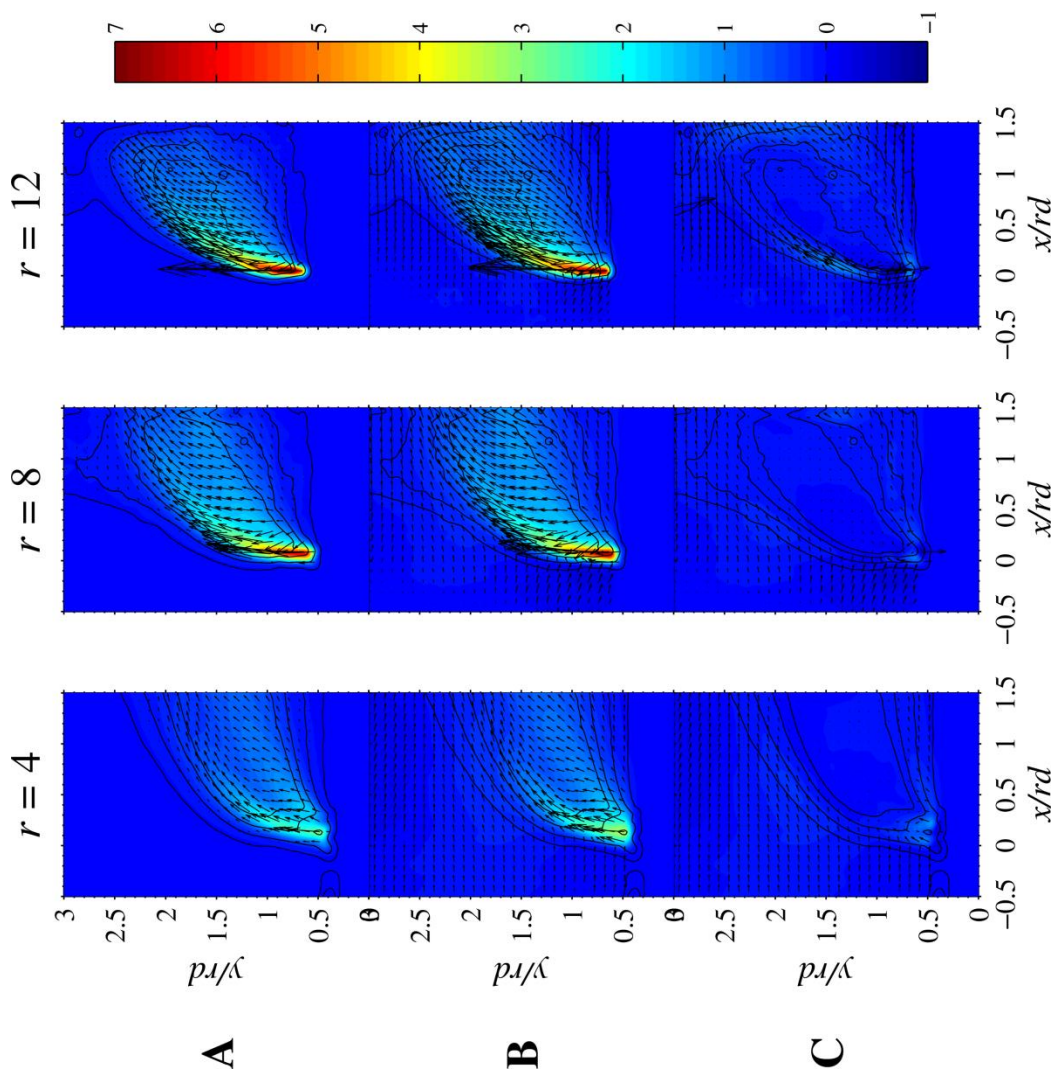
รูปที่ 8.6 การกระจายตัวของปริมาณที่มีมิติต่างๆ กรณี $r = 12$ (ซ้าย) Probability ϕ_c , (กลาง) Spanwise vorticity ω_z / u_{∞} และ (ขวา) Streamwise velocity V_x / u_{∞}



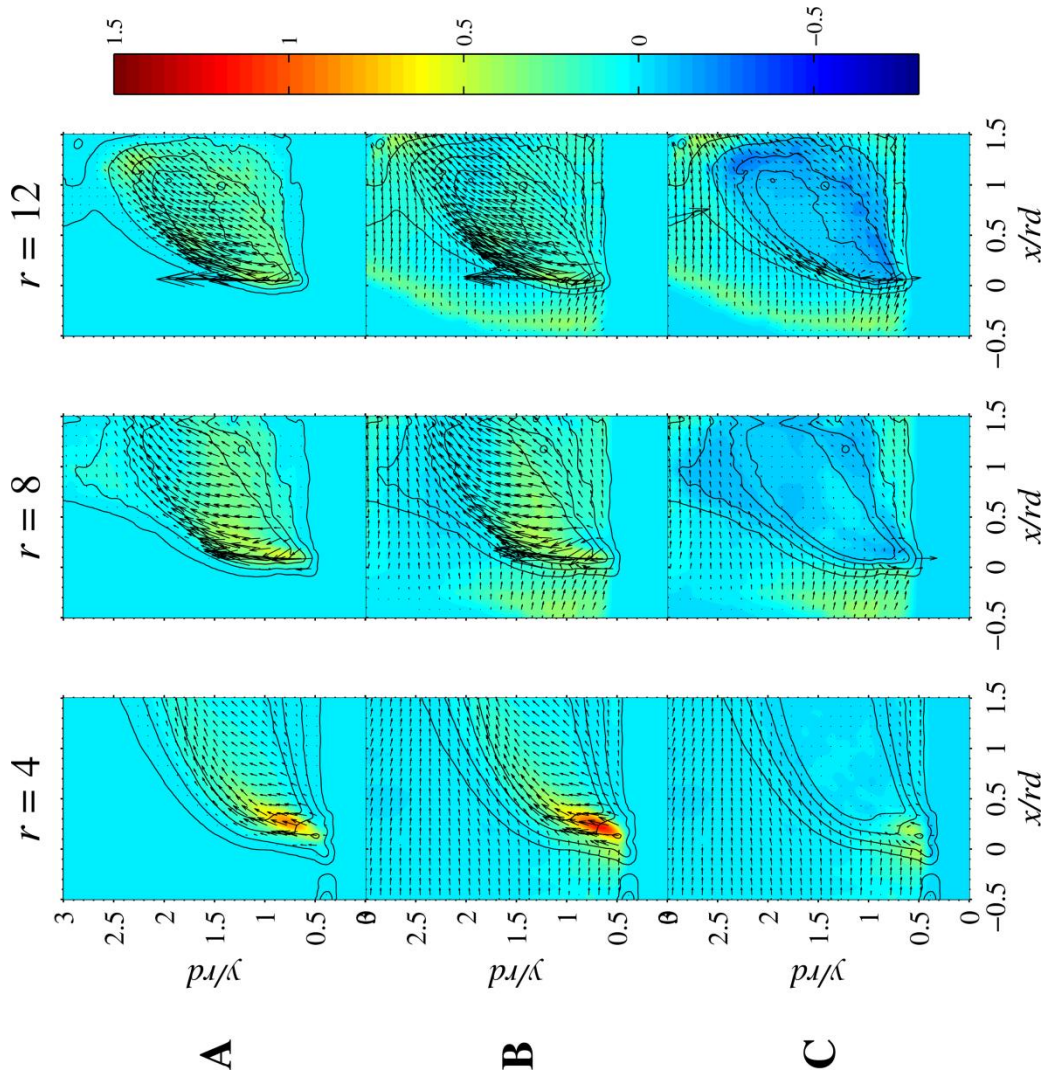
รูปที่ 8.7ก การเปรียบเทียบความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดใดๆ กรณี $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ



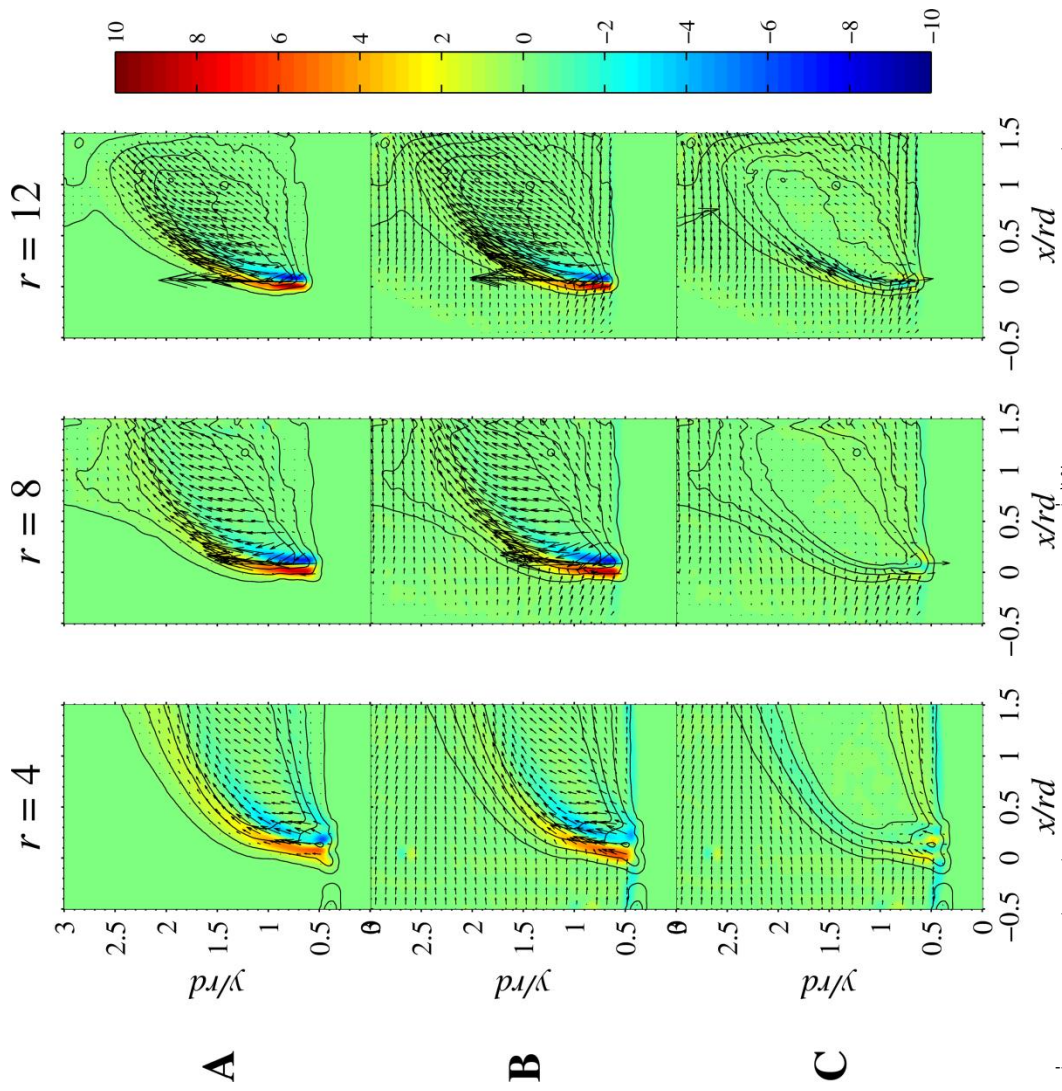
รูปที่ 8.7ข การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไว้ริมิตตามแนวแกน streamwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12



รูปที่ 8.7ค การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไว้มิติตามแนวแกน transverse กรณี $r = 4, 8$ และ 12

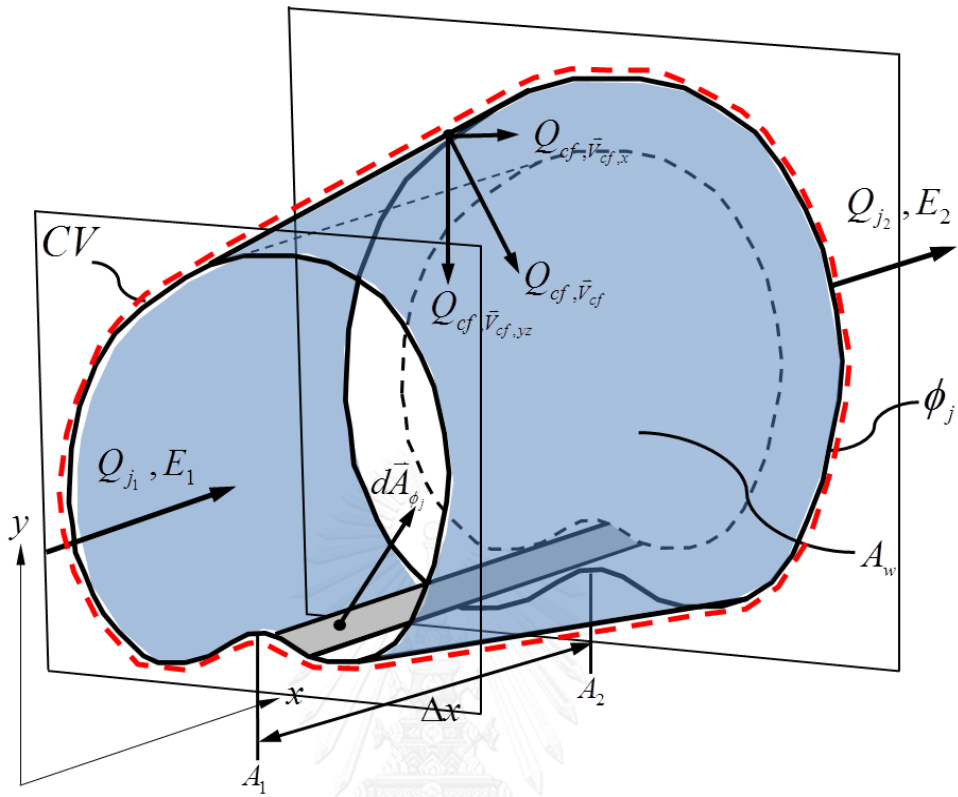


รูปที่ 8.7ง การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยไว้ริมตีตามแนวแกน spanwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12



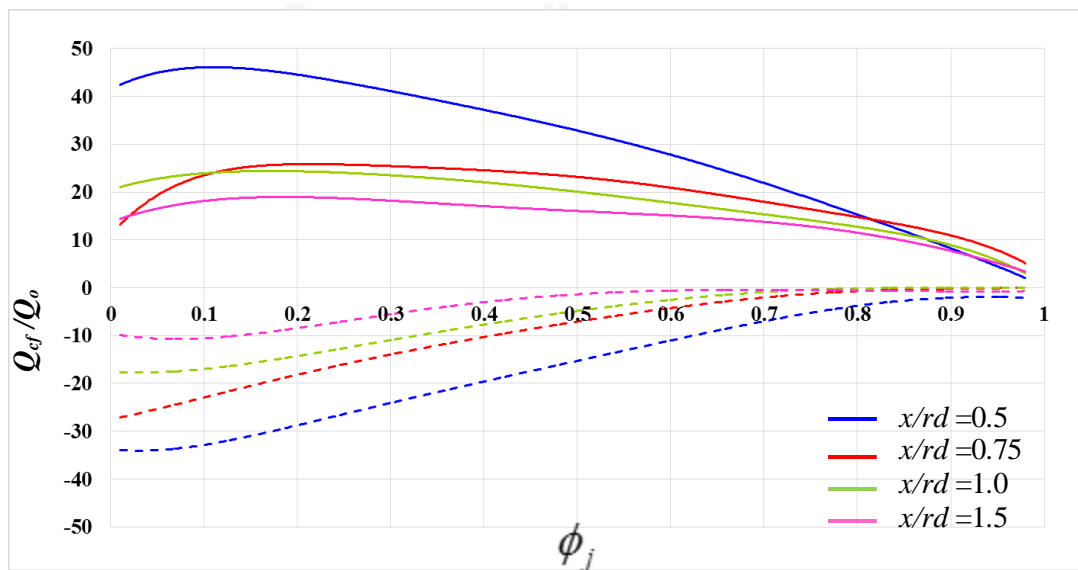
รูปที่ 8.7จ การเปรียบเทียบการกระจายตัวของ vorticity เติบโตขึ้นตามแนวแกน spanwise กรณี $r = 4, 8$ และ 12

บทที่ 9

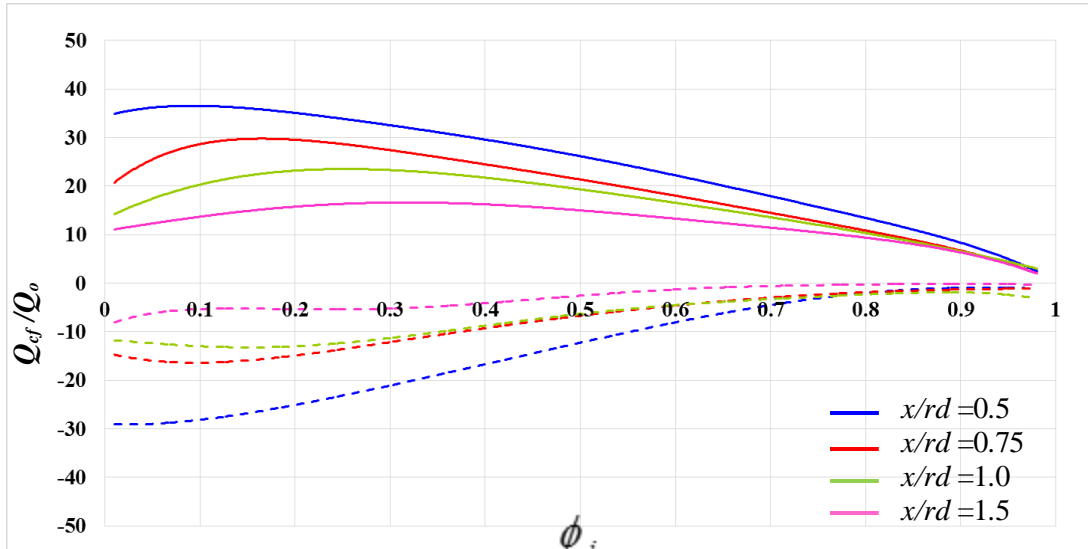


รูปที่ 9.1 อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิที่ไหลผ่าน control surface เข้าสู่ตัวเจ็ต

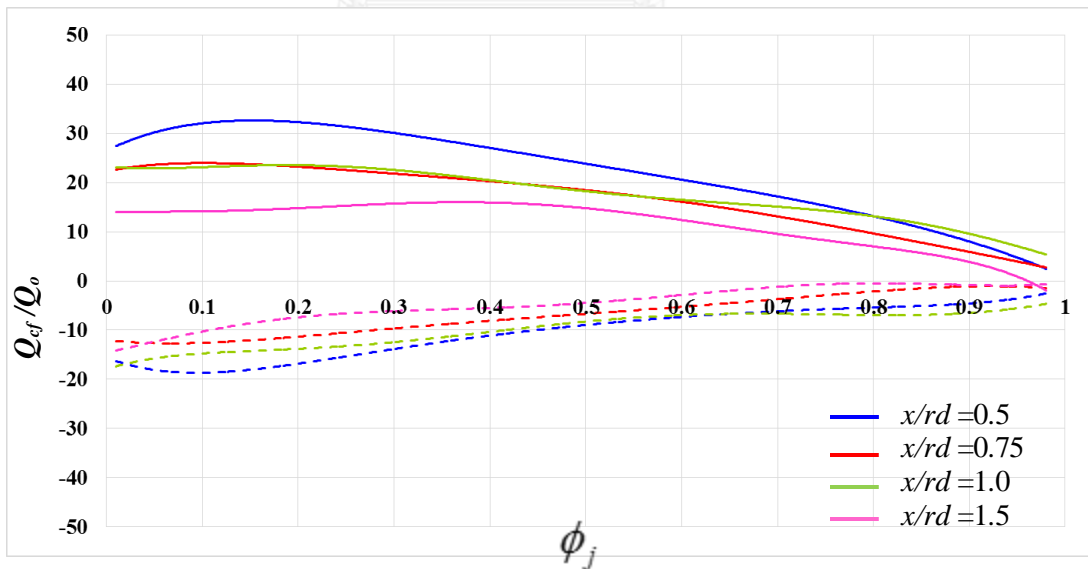
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



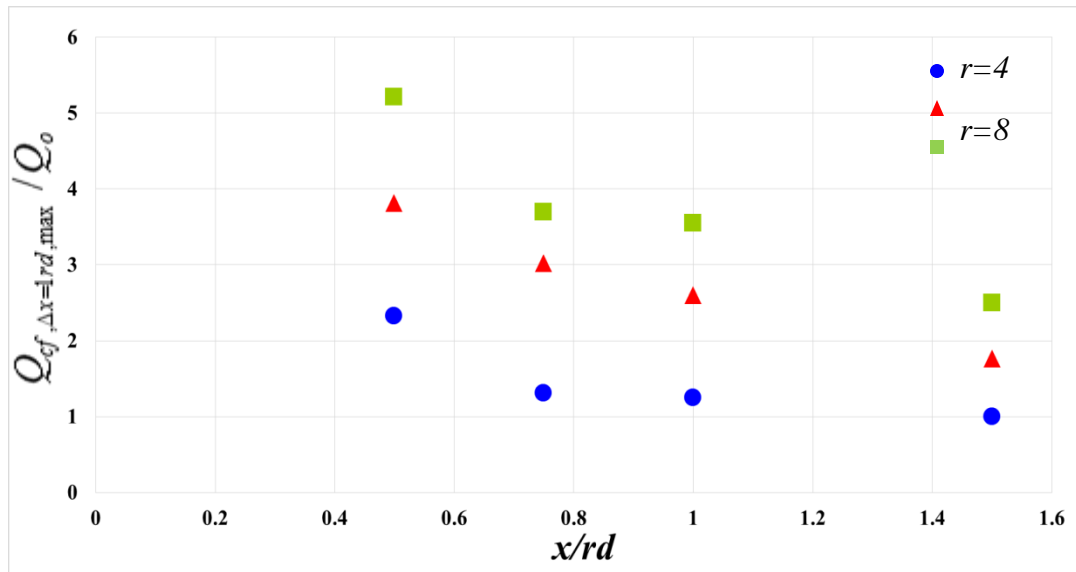
รูปที่ 9.2ก อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิที่เริ่มมีติ $Q_{cf,\Delta x}/Q_o$ กรณี $r = 4$



รูปที่ 9.2ข อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf,\Delta x}/Q_o$ กรณี $r = 8$

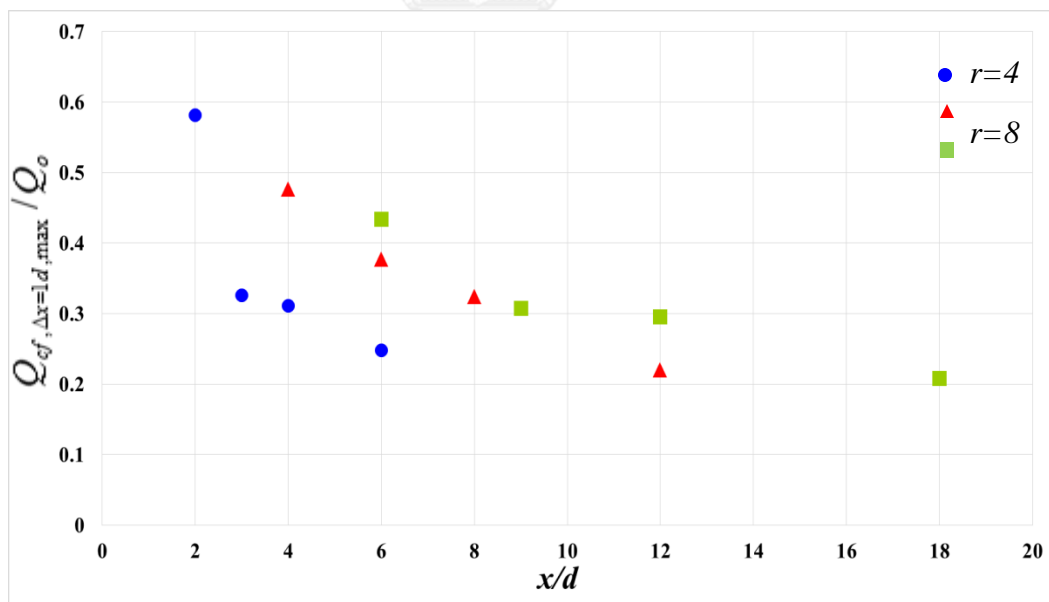


รูปที่ 9.2ค อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ $Q_{cf,\Delta x}/Q_o$ กรณี $r = 12$



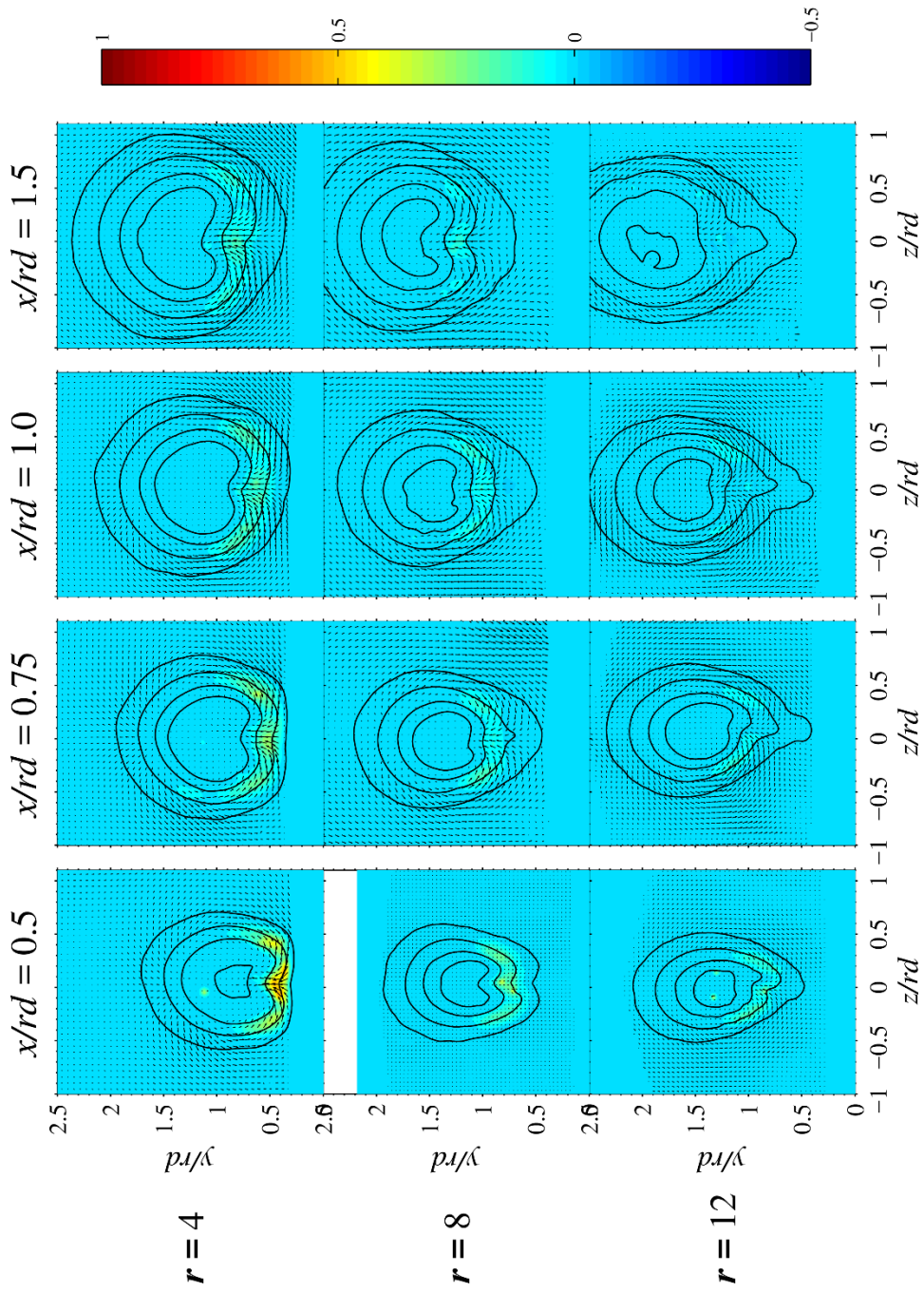
รูปที่ 9.3 การพัฒนาตัวหาค่าสูงสุดของอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ไร้มิติ

$Q_{cf, \Delta x=1rd, max} / Q_0$ บน rd scale และผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่ออัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ $Q_{cf, \Delta x=1rd, max} / Q_0$ ที่ไหลผ่านความยาว $\Delta x = 1rd$ บน rd scale

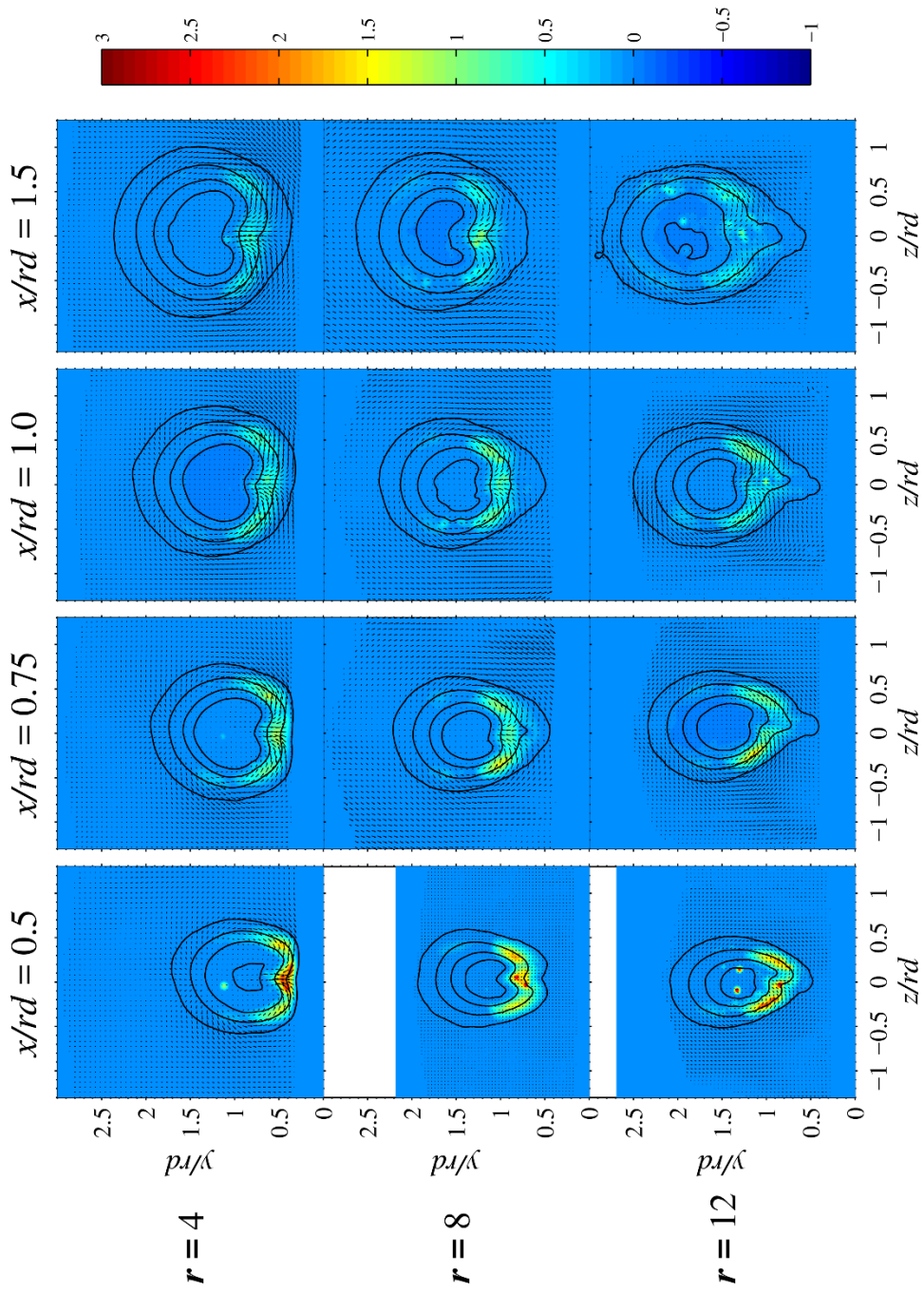


รูปที่ 9.4 การพัฒนาตัวหาค่าสูงสุดของอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ไร้มิติ

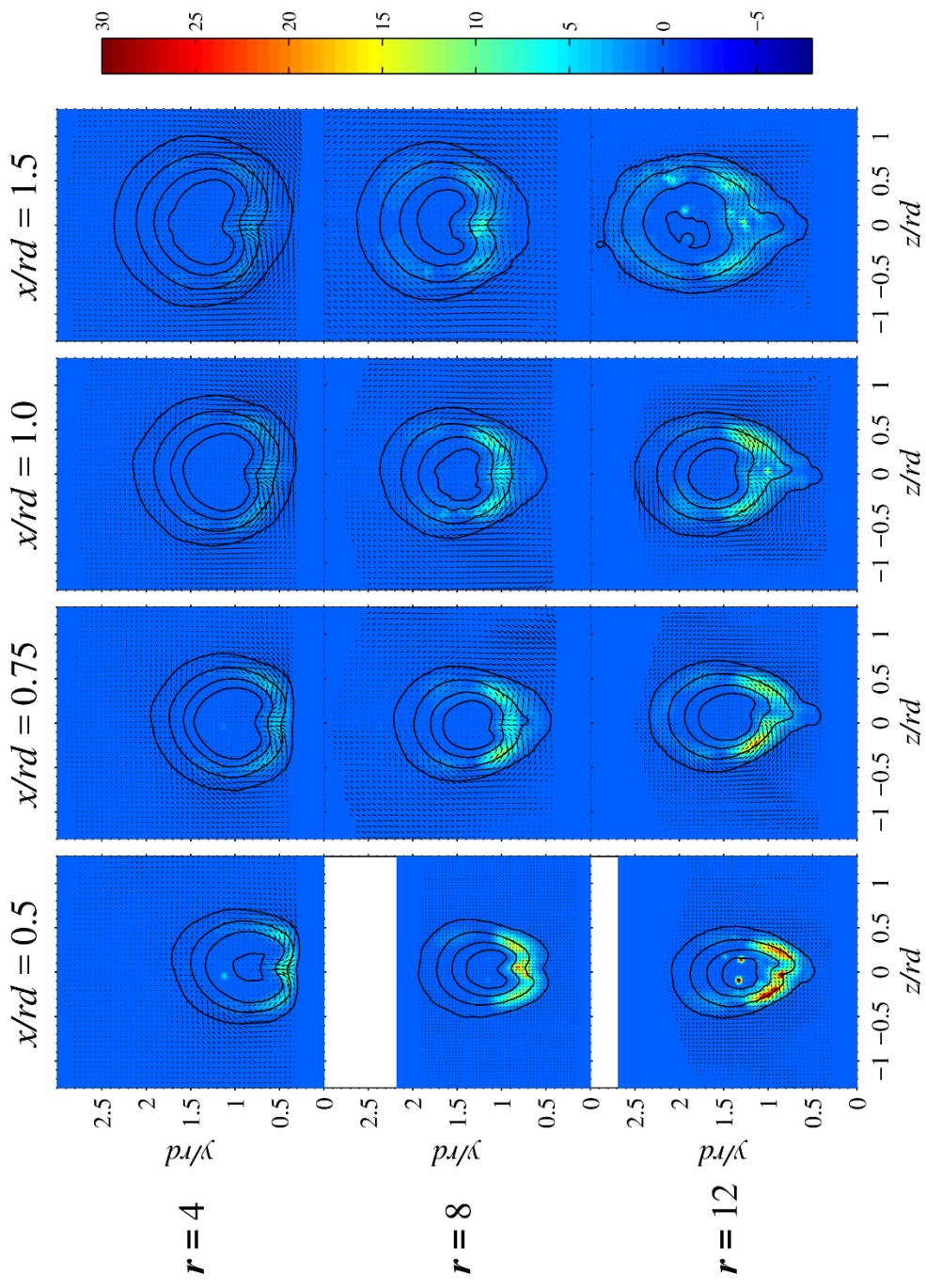
$Q_{cf, \Delta x=d, max} / Q_0$ บน d scale และผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ $r = 4, 8$ และ 12 ต่ออัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์ $Q_{cf, \Delta x=d, max} / Q_0$ ที่ไหลผ่านความยาว $\Delta x = 1d$ บน d scale



รูปที่ 9.5ก บริเวณที่มีการไหลของกระแสของวงบริสุทธ์เข้าสู่จุดผ่านเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่ บน d scale



รูปที่ 9.5ข บริเวณที่มีการไหลของกระแสของวงปริศน์ที่เข้าสู่จุดผ่านเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่ บน rd scale



รูปที่ 9.5ค บริเวณที่มีการไหลของกระแสของวงปริศน์ที่เข้าสู่จุดผ่านเส้นความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ϕ_j คงที่ บน r^2d scale

รายการอ้างอิง

Bunyajitradulya, A. (2015). Evaluation of the volumetric entrainment ratio of a jet in crossflow and its evolution, Thai Government GRB_APS_23_57_21_01 Research Project Report, Thai Government Research Fund FY 2557.

Bunyajitradulya, A., and Sathapornnanon, S., 2005, "Sensitivity to tab disturbance of the mean flow structure of nonswirling jet and swirling jet in crossflow", Phys. Fluids 17, 045102.

Chaikasetsin et al. (2014). Effects of azimuthal control jets to main jet mass flowrate ratio on the entrainment of a jet in crossflow, paper presented in the 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering, December 17-19, 2014, Chiang Mai, Thailand.

Cortelezzi, L. and Karagozian, A.R. (2001). On the formation of the counter-rotating vortex pair in traverse jets, J.Fluid Mech., vol.446, pp. 347-373.

Fric, T. F., and Roshko, A., 1994, "Vortical structure in the wake of a transverse jet," J. Fluid Mech., Vol. 279, pp. 1-47.

Kamotani, Y., and Greber, I., 1972, "Experiments on a turbulent jet in a cross flow," AIAA J., Vol. 10, No. 11, pp. 1425- 1429.

Kelso, R.M., Lim, T.T. and Perry, A.E. (1996). An experimental study of round jets in cross-flow, J.Fluid Mech., vol.306, pp. 111-144.

Kornsri,P., Pimpin,A., and Bunyajitradulya,A., "A Scheme for The Manipulation and Control of A Jet in Crossflow: The Use of Azimuthal Control Jets", The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand November 4 – 7, 2009, Chiang Mai

Lim, T. T., New, T. H., and Lou, S. C., 2001, "On the development of large-scale structures of a jet normal to a crossflow," Phys. Fluids, Vol. 13, No. 3, pp. 770-775.

M'Closkey, R. T., King, J. M., Cortelezzi, L., and Karagozian, A. R., 2002, "The actively controlled jet in crossflow", *J. Fluid Mech.*, Vol. 452, pp. 325-335.

Sathapornnanon, S and Bunyajitradulya, A, 2002, "Effects of Delta Tab on Temperature Distribution in Non-Zero Circulation Swirling Jet in Crossflow", The Sixteenth National Mechanical Engineering Network Conference October 14 -16, 2002; Phuket

Sau, A., Sheu, T.W.H., Hwang, R.R., and Yang, W.C. (2004). Three-dimensional simulation of square jets in cross-flow, *Phys Rev*, vol.69.

Smith, S. H., and Mungal, M. G., 1998, "Mixing, structure and scaling of the jet in crossflow", *J. Fluid Mech.*, Vol. 357, pp. 83-122.

Wangjiraniran,W. and Bunyajitradulya,A. ,2001, "Temperature Distribution in Non-Zero Circulation Swirling Jet in Crossflow", The Fifteenth National Mechanical Engineering Network Conference.

Wangkiat, S., Khemakanon, S., and Kengkarnpanich, A. (2015), "Effects of Azimuthal Positions of the Azimuthal Control Jets on the Entrainment of Jet in Crossflow at Effective Velocity Ratio 12," Senior Project. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

Witayapapakorn, T. (2013), "Effects of azimuthal control jets on the entrainment of a jet in crossflow," Masterthesis. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

Witayapapakorn, T. and Bunyajitradulya, A. (2013). Effects of azimuthal control jets on structure and entrainment of a jet in crossflow, paper presented in The Twenty-Seventh Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand, October 16 – 18, 2013, Chonburi, Thailand.

Wongthongsiri, K, (2015). Effects of effective velocity ratio on entrainment and structure of a jet in crossflow, Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

Yuan, L. L. and Street, R. L., 1998, "Trajectory and entrainment of a round jet incrossflow", *Physics of Fluids*, Vol. 10, No. 9, pp. 2323-2335.

Yuan, L. L., Street, R. L., and Ferziger, J. H., 1999, "Large-eddy simulations of a round jet in crossflow" *J. Fluid Mech.*, Vol. 379, pp. 71- 104.

Zaman, K. B. M. Q., and Foss, J. K., 1997, "The effect of vortex generators on a jet in a cross-flow," *Phys. Fluids*, Vol. 9, No. 1, pp. 106-114.



รายการอ้างอิง





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
พารามิเตอร์ในการทดลอง

1. พารามิเตอร์ของการทดลองในระนาบตัดขวางที่ $r = 4$

ค.1.1

General	x/rd	0.50
	T _{atm} [°C]	29
	P _{atm} [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	15
	No. of nozzle	4
Jet & Crossflow	V _j [m/s]	16.16
	u _{cf} [m/s]	4.030
	r	4.01
Camera (L/R)	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location จาก จุดศก. Target	3 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	0.962x0.962 (60.3 μm/pixel)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 15 \mu s$

ค.1.2

General	x/rd	0.75
	T _{atm} [°C]	29
	P _{atm} [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	18
	No. of nozzle	4
Jet & Crossflow	V _j [m/s]	16.16
	u _{cf} [m/s]	4.030
	r	4.01
Camera (L/R)	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location จาก จุดศก. Target	3 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	0.944x0.944 (58.97 μm/pixel)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 20 \mu s$

ค.1.3

General	x/rd	0.750
	T _{atm} [°C]	29
	P _{atm} [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	18
	No. of nozzle	4
Jet & Crossflow	V _j [m/s]	16.16
	u _{cf} [m/s]	4.030
	r	4.01
Camera (L/R)	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	5.6/2.8
	Crosshair location จาก จุดศก. Target	3 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	0.946x0.946 (58.46 μm/pixel)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 20 \mu s$

ค.1.4

General	x/rd	1.0
	T _{atm} [°C]	29
	P _{atm} [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	18
	No. of nozzle	4
Jet & Crossflow	V _j [m/s]	16.16
	u _{cf} [m/s]	4.030
	r	4.01
Camera (L/R)	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	5.6/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 3 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	0.988x0.988 (61.75 μm/pixel)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 25 \mu s$

2. พารามิเตอร์ของการทดลองในระนาบตัดขวางที่ $r = 8$

ค.2.1

General	x/rd	0.50
	T _{atm} [°C]	29
	P _{atm} [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	25
	No. of nozzle	6
Jet & Crossflow	V _j [m/s]	32.30
	u _{cf} [m/s]	4.030
	r	8.015
Camera (L/R)	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/5.6
	Crosshair location	อยู่ตรงจุดตก. Target
	Spatial resolution [mm ²]	1.272x1.272 (79.52 μm/pixel)
Note	SNR = 1.3	$\Delta t = 15 \mu s$

ค.2.2

General	x/rd	0.75
	T _{atm} [°C]	29
	P _{atm} [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	20
	No. of nozzle	6
Jet & Crossflow	V _j [m/s]	32.30
	u _{cf} [m/s]	4.030
	r	8.015
Camera (L/R)	Lens [mm]	50
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่สูงกว่าจุดตก. Target 6.5 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	2.104x2.104 (131.5 μm/pixel)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 30 \mu s$

ค.2.3

General	x/rd	1.00
	T _{atm} [°C]	29
	P _{atm} [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	25
	No. of nozzle	6
Jet & Crossflow	V _j [m/s]	32.30
	u _{cf} [m/s]	4.030
	r	8.015
Camera (L/R)	Lens [mm]	50
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่สูงกว่าจุดศก. Target 6 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	2.059x2.059 (128.72 μm/pixel)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 40 \mu s$

ค.2.4

General	x/rd	1.50
	T _{atm} [°C]	29
	P _{atm} [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	20
	No. of nozzle	6
Jet & Crossflow	V _j [m/s]	32.30
	u _{cf} [m/s]	4.030
	r	8.015
Camera (L/R)	Lens [mm]	50
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่สูงกว่าจุดศก. Target 7 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	2.371x2.371 (148.2 μm/pixel)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 50 \mu s$

3. พารามิเตอร์ของการทดลองในระนาบตัดขวางที่ $r = 12$

ค.3.1

General	x/rd	0.50
	T _{atm} [°C]	29
	P _{atm} [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	25
	No. of nozzle	5
Jet & Crossflow	V _j [m/s]	48.81
	u _{cf} [m/s]	4.030
	r	12.11
Camera (L/R)	Lens [mm]	50
	F no. (L/R)	2.8/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 2.5 ช่อง + 101 mm
	Spatial resolution [mm ²]	2.254x2.254 (140.89 μm/pixel)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 30 \mu s$

ค.3.2

General	x/rd	0.75
	T _{atm} [°C]	29
	P _{atm} [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	25
	No. of nozzle	5
Jet & Crossflow	V _j [m/s]	48.81
	u _{cf} [m/s]	4.030
	r	12.11
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 ²]	2.484x2.484 (155.3 μm/pixel)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 30 \mu s$

ค.3.3

General	x/rd	1.00
	T _{atm} [°C]	29
	P _{atm} [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	25
	No. of nozzle	6
Jet & Crossflow	V _j [m/s]	48.81
	u _{cf} [m/s]	4.030
	r	12.11
Camera (L/R)	Lens [mm]	50
	F no. (L/R)	2.8/1.8
	Crosshair location	อยู่สูงกว่าจุดตก. Target 1 ช่อง + 101 mm
	Spatial resolution [mm ²]	2.664x2.664 (166.5 μm/pixel)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 40 \mu s$

ค.3.4

General	x/rd	1.50
	T _{atm} [°C]	29
	P _{atm} [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P [psig]	25
	No. of nozzle	6
Jet & Crossflow	V _j [m/s]	48.81
	u _{cf} [m/s]	4.030
	r	12.11
Camera (L/R)	Lens [mm]	50
	F no. (L/R)	1.8/1.8
	Crosshair location	อยู่สูงกว่าจุดตก. Target 5.5 ช่อง + 101 mm
	Spatial resolution [mm ²]	2.956x2.956 (184.8 μm/pixel)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 50 \mu s$

4. พารามิเตอร์ของการทดลองในระนาบสมมาตร

ค.4.1 ที่ $r = 4$

General	T_{atm}	[°C]	29
	P_{atm}	[mbar]	101.4
Laser	Thickness	[mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P	[psig]	15
	No. of nozzle		4
Jet & Crossflow	V_j	[m/s]	16.16
	u_{cf}	[m/s]	4.030
	r		4.01
Camera (L/R)	Lens	[mm]	100
	F no. (L/R)		4/2.8
	Camera position		$x = \text{minimum}$ $z = 31.5\text{cm}$
	Target position จากปากเจ็ตถึงฐาน Target		7cm
	Crosshair location จาก จุดศก. Target		0 (ที่ Crosshair)
Note	SNR = 1.5		$\Delta t = 10\mu s$

ค.4.2 ที่ $r = 8$

General	T_{atm}	[°C]	29
	P_{atm}	[mbar]	101.4
Laser	Thickness	[mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P	[psig]	20
	No. of nozzle		4
Jet & Crossflow	V_j	[m/s]	32.30
	u_{cf}	[m/s]	4.030
	r		8.015
Camera (L/R)	Lens	[mm]	50
	F no. (L/R)		5.6/2.8
	Camera position		$x = \text{minimum}$ $z = 31.5\text{cm}$
	Target position จากปากเจ็ตถึงฐาน Target		17cm
	Crosshair location จาก จุดศก. Target		Over Crosshair
Note	SNR = 1.5		$\Delta t = 4\mu s$

ค.4.3 ที่ $r = 12$

General	T_{atm}	[°C]	29
	P_{atm}	[mbar]	101.4
Laser	Thickness	[mm]	2
Seeding (six jet atomizer)	P	[psig]	18
	No. of nozzle		5
Jet & Crossflow	V_j	[m/s]	48.81
	u_{cf}	[m/s]	4.030
	r		12.11
Camera (L/R)	Lens	[mm]	50
	F no. (L/R)		2.8/1.8
	Camera position		$x = 26.5\text{cm}$
			$z = 31.5\text{cm}$
	Target position จากปากเจ็ตถึงฐาน Target		24cm
Crosshair location จาก จุดศก. Target		6 ช่อง	
Note	SNR = 1.5		$\Delta t = 2\mu\text{s}$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวขวัญมณธ์ ศรพรหม เกิดวันที่ 11 มกราคม พ.ศ. 2536 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2557 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์ ปีการศึกษา 2558



