

ผลของเจตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสม
และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ดในกระแสลมขวาง



นายภัทรพล ศุภมงคล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of Azimuthal Control Jets on Entrainment and
Cross-Plane Entrainment Mechanism of a Jet in Crossflow

Mr. Pattarapol Soupramongkol



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

ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำ
การผสม และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบ
ตัดขวางการไหลของเจ็ดในกระแสลมขวาง

โดย

นายภัทรพล ศุภมงคล

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.อศิ บุญจิตราดุลย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

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

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

ภัทรพล ศุภมงคล : ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสม และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Effects of Azimuthal Control Jets on Entrainment and Cross-Plane Entrainment Mechanism of a Jet in Crossflow) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์
หลัก: รศ. ดร.อศิ บุญจิตราคุลย์, 196 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสม และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ไม่มีการควบคุม (JICF) และมีการควบคุม (CJICF) โดยใช้ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหล 2 ลักษณะคือ (A) การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง และ (B) การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสลมขวาง การทดลองในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4 ตัวเลขเรย์โนลด์ของกระแสลมขวางเท่ากับ 3,100 และกรณีควบคุมด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง ± 165 องศา ($I165$) ที่อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) เท่ากับ 4% จากผลการศึกษาพบว่า การประยุกต์ใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง ± 165 องศา ($I165$) จะช่วยส่งเสริม (promote) ให้การเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มสูงขึ้นทุกตำแหน่งตามการไหลที่ทำการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมจะก่อให้เกิดโครงสร้าง Wake อย่างชัดเจนที่บริเวณด้านล่างของเจ็ต สำหรับการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ไม่มีการควบคุม พบว่าสามารถแบ่งแยกออกเป็น 3 ชั้นดังนี้ 1) โครงสร้าง Counter-rotating vortex pair (CVP) ของเจ็ตเป็นโครงสร้างหลักของกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตจะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์บริเวณด้านข้างของเจ็ตให้มีการเคลื่อนที่หมุนวนลงมาที่ขอบเจ็ตด้านล่าง 2) โครงสร้าง CVP ของเจ็ตจะเหนี่ยวนำให้เกิดช่องการไหลลู่เข้า-ออกขึ้นในแนวตั้ง (converging-diverging vertical channel of high upward flow) ซึ่งจะมีอัตราการเหนี่ยวนำการผสมสูงที่บริเวณที่มีการไหลลู่เข้า 3) โครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure) จะเหนี่ยวนำส่วนผสมของเจ็ตที่ผสมแล้วจากบริเวณช่องการไหลลู่ออกเข้าไปผสมกับตัวเจ็ตเอง คล้ายกับการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (Free jets) เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $I165$ พบว่า กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางยังคงคล้ายกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม อย่างไรก็ตามเนื่องจากการมีอยู่ของโครงสร้าง Wake ทำให้พื้นที่การเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางมีมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม นอกจากนี้ยังทำการทดลองในระนาบสมมาตรการไหลเพื่อศึกษาหา กลไกการเหนี่ยวนำการผสมอื่นในเบื้องต้น พบว่า บริเวณขอบเจ็ตด้านหน้า (Windward) โครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ตจะเป็นอีกกลไกการเหนี่ยวนำการผสมหนึ่งซึ่งพบได้ในระนาบสมมาตร นอกจากนั้นยังพบว่ามีความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนวแกน Streamwise เท่านั้นที่ก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $I165$ พบว่า บริเวณขอบเจ็ตด้านหน้า (Windward) กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรยังคงคล้ายกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมจะส่งผลให้พื้นที่การเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางที่บริเวณใกล้ปากทางออกของเจ็ตเพิ่มมากขึ้น และมีการหมุนออก ทำให้หลังจากการเข้าปะทะกับเจ็ตที่บริเวณด้านหน้า (Windward) กระแสลมขวางบริสุทธิ์จะเกิดการเลี้ยวเบนลงในแนวตั้ง ดังนั้นนอกจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนวแกน Streamwise แล้ว ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนวแกน Transverse จะก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสมด้วย ด้วยปัจจัยเหล่านี้ สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $I165$ เมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5870216921 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: JET IN CROSSFLOW / ENTRAINMENT / ENTRAINMENT MECHANISM / CONTROL JETS

PATTARAPOL SOUPRAMONGKOL: Effects of Azimuthal Control Jets on Entrainment and Cross-Plane Entrainment Mechanism of a Jet in Crossflow. ADVISOR: ASSOC. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA, Ph.D., 196 pp.

The effects of azimuthal control jets on entrainment and cross-plane entrainment mechanism of a jet and a controlled jet in crossflow (JICF and cJICF) are investigated. Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) with two seeding schemes: (A) the jet-fluid only and (B) the jet-and-crossflow fluid seeding schemes are used. The experiment is conducted for the baseline jet in crossflow (JICF) with the effective velocity ratio (r) of 4 and the crossflow Reynolds number (Re_{cf}) of 3,100. For the case of cJICF, a pair of azimuthal control jets are deployed steadily at the azimuthal position of ± 165 degree with the control jets to main jet mass flowrate ratio (r_m) of 4%. The results show that the application of the pair of control jets helps promoting entrainment throughout all cross planes measured, making the jet volumetric entrainment ratio (E) of cJICF more than JICF. In addition, as a result of the application of the control jets, the wake structure is observed and prominent at bottom of the jet. For entrainment mechanism of JICF, it is found that the counter-rotating vortex pair (CVP) is the main cross-plane entrainment mechanism and that the mechanism can be divided into three subsequent stages: 1) Jet-CVP-induced pure crossflow vortical motion, in which the pure crossflow fluid from each lateral side of the jet is induced towards the bottom of the jet, 2) Jet-CVP-induced converging-diverging vertical channel of high upward flow, in which the region of high rate of entrainment is in the converging section of the channel, and 3) Free-jet like entrainment of the jet kidney-shaped structure, in which the already jet-fluid mixture in the diverging section of the channel is further induced by the jet kidney-shaped structure into itself like a free-jet entrainment. When the pair of control jets is applied, cross-plane entrainment mechanism is still similar to JICF. However, due to the existence of the additional wake structure, the surface of the jet-and-crossflow interaction increases. This is consistent with the increase in entrainment of cJICF over JICF. Furthermore, the experiment is also conducted in the center plane in order to preliminarily investigate other entrainment mechanisms. For JICF, another entrainment mechanism by the jet spanwise roller on the jet windward edge is revealed in this center plane. On this edge, as far as the time-mean velocity is concerned, it is also found that the crossflow streamwise velocity – and not the transverse velocity – contributes to entrainment. When the pair of control jets is applied, the center-plane entrainment mechanism is still similar to JICF. However the windward surface of interaction between the jet and the crossflow near the jet exit is increased and convexed windward. As a result, the incoming pure crossflow in front of the jet near the jet exit is deflected downward such that its transverse velocity component now contributes to entrainment. These are also consistent with the increase in entrainment of cJICF over JICF. Finally, the effects of the azimuthal control jets on jet trajectory and circulation are also investigated.

Department: Mechanical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ตลอดจนคณาจารย์ที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ทั้งหลาย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน ทั้งการให้คำแนะนำในการทำวิจัย การสอนวิชาความรู้ต่างๆ การฝึกกระบวนการคิดอย่างเป็นระบบ การให้คำแนะนำประสบการณ์ในการดำเนินชีวิตและข้อคิดต่างๆ นอกจากนี้ยังได้ถ่ายทอดประสบการณ์การทำงาน กฎเกณฑ์ต่างๆ ตลอดจนกระบวนการที่สำคัญและจำเป็นในวิชาชีพวิศวกร เพื่อให้หนังสือได้สำเร็จออกไปเป็นวิศวกรที่คิดเป็น รู้รอบและรอบคอบ และได้ตระหนักถึงแนวทางในการทำงาน

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. บุญชัย เลิศนุวัฒน์ ผศ.ดร. นิพนธ์ วรรณโสภากย์ และ รศ.ดร. เวชพงศ์ ชุตติชูเดช ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการการตรี-โท 5 ปี และเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาลประจำปีงบประมาณ 2557 ตามสัญญาเลขที่ GRB_APS_๒๓_๕๗_๒๑_๐๑ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ พี่อภิเชษฐ์ ศรีเมฆขจรรัตน์ พี่เศรษฐสิทธิ์ ชัยเกษตรสิน พี่สุภัก ดาวยก และพี่กิตติคุณ วงศ์ทองศิริ ที่ช่วยถ่ายทอดวิชาความรู้ทั้งที่จำเป็นต่อการทำวิจัยและที่มีประโยชน์ในการดำเนินชีวิต ทั้งยังถ่ายทอดแนวคิดและข้อคิดต่างๆที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณ สมาชิกในปฏิบัติการและวิจัยกลศาสตร์ของไหล นางสาวขวัญมณต์ ศรพรหม นายศรัณย์ หวังเกียรติ นายสุเมธ เขมกานนท์ นายอภิโชติ เก่งการพานิช นายอนันต์ คุณปิยะวาจา นายอภิวัฒน์ ชนินทร์วงศ์ศิริ และนางสาวมินธานนท์ ชัยรัตน์ และนายเชาว์วัฒน์ เต็กฮวด ที่ช่วยเหลือในทุกๆด้าน ทั้งในการวางแผนการวิจัย การทดลอง การแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ตลอดจนความเป็นเพื่อนที่ดีเสมอมา

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้การเลี้ยงดู อบรม สนับสนุนในทุกๆด้าน อีกทั้งยังคอยส่งกำลังใจมาโดยตลอด ทำให้มีกำลังใจในการทำงานและไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคต่างๆ ที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยขออุทิศคุณความดีอันก่อให้เกิดประโยชน์ พร้อมทั้งความสำเร็จทั้งหมดแต่บิดา มารดา และอาจารย์ที่ปรึกษาผู้ซึ่งเสียสละความสุขและความสบายในชีวิต ส่งเสริมให้เข้าเฝ้าการศึกษา จนยืนหยัดในสังคมได้อย่างยั่งยืนด้วยตัวเอง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฑ
สารบัญรูป.....	ฒ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ป
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 แรงจูงใจ.....	4
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.4 ขอบเขตโครงการ.....	6
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	7
1.6 แผนการดำเนินงานและงบประมาณของโครงการ.....	7
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 การศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....	8
2.1.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล.....	8
2.1.2 เรย์โนลด์์นัมเบอร์ของเจ็ตและกระแสลมขวาง.....	8
2.2 การศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....	9
2.2.1 โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง.....	9
2.2.2 กระบวนการเกิดและพัฒนาตัวของ Counter-rotating vortex pair.....	10
2.2.3 การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ต และความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ต.....	11

2.2.4	กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวาง.....	12
2.2.5	เส้นทางเดินของเจ็ด.....	13
2.2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางเดินของเจ็ดและการเหนี่ยวนำการผสม.....	15
2.3	การปรับแต่งและควบคุมเจ็ด.....	15
2.3.1	การกระตุ้นโดยไม่ใช้พลังงาน.....	16
2.3.2	กระตุ้นโดยใช้พลังงาน.....	17
<p>บทที่ 3 หลักการและเทคนิคในการประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม และการศึกษา กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหล.....</p>		
3.1	ปัญหาการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวาง.....	22
3.2	การประเมินอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร และประสิทธิผลการเหนี่ยวนำ การผสม.....	24
3.2.1	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E).....	24
3.2.2	ค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสม (η).....	25
3.3	กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ดในกระแสลมขวาง.....	26
3.3.1	ปัญหาของการศึกษาการกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ด ในกระแสลมขวาง.....	26
3.3.2	การวัดความเร็วของสนามการไหลโดยใช้ SPIV และเทคนิคการใส่อนุภาคติดตาม การไหลทั้งในเจ็ดและในกระแสลมขวาง.....	27
3.3.3	การนิยามกระแสลมขวางบริสุทธิ์ เพื่อศึกษาการกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดใน กระแสลมขวาง.....	28
<p>บทที่ 4 ชุดการทดลองและการทดลอง.....</p>		
4.1	ชุดการทดลอง.....	30
4.1.1	อุโมงค์ลม.....	30
4.1.2	ชุดหัวเจ็ดหลัก (Main jet).....	31

4.1.3 ชุดหัวเจ็ตควบคุม (Azimuthal control jet)	32
4.2 พิกัดอ้างอิงในการทดลอง	32
4.3 ชุดเครื่องมือวัดความเร็ว Stereoscopic Particle Image Velocimetry	33
4.3.1 ส่วนประกอบและการทำงานของ Stereoscopic Particle Image Velocimetry	33
4.3.2 การหาค่าสนามเวกเตอร์ความเร็วโดยโปรแกรม Insight 4G	33
4.4 การวัดและเครื่องมือวัด	34
4.4.1 การวัดความสม่ำเสมอของความเร็วกระแสลมขวาง	34
4.4.2 การวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ต	35
4.4.3 การวัดอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก	36
4.4.4 การสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง SPIV กับ Pitot tube	37
4.5 สรุปพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการทดลอง	40
บทที่ 5 ผลของเจ็ตควบคุมต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ประสิทธิภาพการใช้	
เจ็ตควบคุม เส้นทางการเดินของเจ็ต และ Circulation	41
5.1 ผลของเจ็ตควบคุมต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร	41
5.2 การสอบทวนค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร	42
5.3 ประสิทธิภาพของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง	42
5.4 ผลของเจ็ตควบคุมต่อเส้นทางการเดินของเจ็ต	43
5.4.1 เส้นทางการเดินของเจ็ตจากปริมาณความเร็วเจ็ตในแนวแกน Streamwise	44
5.4.2 เส้นทางการเดินของเจ็ตจากปริมาณ Vorticity ของเจ็ตในแนวแกน Streamwise	45
5.4.3 เปรียบเทียบเส้นทางการเดินของเจ็ตจากปริมาณความเร็วของเจ็ต และ Vorticity ของ	
เจ็ตในแนวแกน Streamwise	45
5.4.4 ผลของเส้นทางการเดินของเจ็ตต่อการเหนี่ยวนำการผสม	46
5.5 Circulation ของเจ็ต	46
5.5.1 ผลของเจ็ตควบคุมต่อ Circulation ของเจ็ต	47

บทที่ 6 โครงสร้าง และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหล กรณีไม่ฉีดเจ็ต	
ควบคุม (JICF)	49
6.0 การแสดงผลการทดลอง และความหมาย	49
6.0.1 Contour surfaces (CS).....	50
6.0.1 In-plane vector	50
6.0.3 Contour lines (CL).....	50
6.1 ความน่าจะเป็น	51
6.2 เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล	53
6.2.1 โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางปริส্তুที่เคลื่อนที่หมุนวน	54
6.2.2 ช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Converging – diverging vertical channel).....	54
6.2.3 บริเวณที่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมสูง	55
6.3 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise.....	56
6.4 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Transverse	57
6.5 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise.....	59
6.6 Vorticity เฉลี่ยต่อเวลาไร้มิติในแนวแกน Streamwise	60
6.7 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบตัดขวางการไหลสำหรับ	
กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม	61
บทที่ 7 โครงสร้าง และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหล กรณีฉีดเจ็ต	
ควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง I165.....	64
7.1 ความน่าจะเป็น	64
7.2 เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล	65
7.2.1 โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางปริส্তুที่เคลื่อนที่หมุนวน	67
7.2.2 ช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Converging – diverging vertical channel).....	67
7.2.3 บริเวณที่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมสูง	68

7.3 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise.....	68
7.4 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Transverse.....	70
7.5 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise.....	71
7.6 Vorticity เฉลี่ยต่อเวลาไร้มิติในแนวแกน Streamwise	71
7.7 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมวงสำหรับ กรณีฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง I165.....	73
บทที่ 8 โครงสร้าง และการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรการไหล.....	75
8.1 ความน่าจะเป็น	75
8.2 เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตรการไหล	76
8.2.1 บริเวณที่เกิดการเหนี่ยวนำการผสม.....	78
8.3 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise.....	79
8.4 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Transverse	80
8.5 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise.....	82
8.6 Vorticity เฉลี่ยต่อเวลาไร้มิติในแนวแกน Spanwise	83
8.7 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวงในระนาบสมมาตรการไหลสำหรับ กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)	84
8.8 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวงในระนาบสมมาตรการไหลสำหรับ กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165	85
บทที่ 9 อภิปรายผลการทดลอง	87
9.0 พื้นฐานการในการวิเคราะห์.....	87
9.0.1 อัตราการไหลของกระแสมวงบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ตผ่านพื้นผิวความน่าจะเป็นที่จะ พบเจ็ตมีค่าคงที่.....	87
9.1 การตีความผลการทดลอง.....	88
9.2 ผลการทดลอง.....	90

9.2.1 อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF).....	90
9.2.2 อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165...	91
9.2.3 การเปรียบเทียบอัตราการไหลกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165.....	92
9.3 การนำกลไกการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาณเพื่ออธิบายเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165.....	93
บทที่ 10 สรุปผลการทดลอง.....	94
10.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร และประสิทธิภาพการใช้เจ็ตควบคุม	94
10.2 เส้นทางการเดินของเจ็ต	95
10.3 Circulation ของเจ็ต.....	95
10.4 โครงสร้าง และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมขวางกรณีไม่ฉีดเจ็ต (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165.....	96
10.4.1 ความน่าจะเป็น.....	96
10.4.2 เวกเตอร์ในระนาบตัดขวางการไหลเฉลี่ยไร้มิติ	96
10.4.3 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise	98
10.4.4 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Transverse.....	98
10.4.5 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise	99
10.4.6 Vorticity เฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise	99
10.4.7 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมขวาง ..	100
10.5 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ตในกระแสมขวาง.....	101
10.6 การอธิบายการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม เมื่อฉีดเจ็ตควบคุม(I165) โดยกลไกการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาณ	102
10.7 ปัจจัยที่มีผลช่วยส่งเสริมการเหนี่ยวนำการผสมกรณีฉีดเจ็ตควบคุม (I165) เมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)	102

ประมวลตาราง	104
ประมวลรูปภาพ	108
รายการอ้างอิง	184
ภาคผนวก.....	187
ภาคผนวก ก: ตารางสรุปพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทดลอง	188
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	196



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 5.1 สรุปค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรและค่าประสิทธิผลการใช้เจ็ด ควมคุมที่ตำแหน่ง I165.....	105
ตารางที่ 5.2 สรุปค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมในงานวิจัยปัจจุบัน และงานวิจัยในอดีต.....	106
ตารางที่ 5.3 สรุปค่าเส้นทางเดินของเจ็ดโดยคำนวณมาจาก V_x	107
ตารางที่ 5.4 สรุปค่าเส้นทางเดินของเจ็ดโดยคำนวณมาจาก ω_x	107
ตารางที่ 5.5 สรุปค่า Circulation.....	107



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Fric and Roshko,1994).....	109
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของการเกิด CVP (Cortelezzi and Karagozian,2001) Isometric ของเจ็ต Shear layer vortex ring	109
รูปที่ 2.3 การพัฒนาตัวของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Cortelezzi and Karagozian,2001)	110
รูปที่ 2.4 Vortices structure ของเจ็ตในกระแสลมขวางบนระนาบสมมาตร (Lim et al., 2001).....	111
รูปที่ 2.5 การพับตัวของ cylindrical shear layer (Lim et al., 2001).....	111
รูปที่ 2.6 โครงสร้างบริเวณ Near field ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Yuan et al., 1999)	112
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ Hanging vortices (Yuan et al., 1999).....	112
รูปที่ 2.8 Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวขึ้นระหว่างเจ็ต และกระแสลมขวางที่บริเวณขอบด้านข้างของเจ็ต (Yuan et al., 1999).....	113
รูปที่ 2.9 วิวัฒนาการของ Streamlines ในการก่อตัวของ Kelvin-Helmholtz roller (Sau et al., 2004)	113
รูปที่ 2.10 จุดแบ่งระหว่าง Near Field และ Far Field บน r^2d (เครื่องหมาย X) (Smith and Mungal, 1998).....	114
รูปที่ 2.11 การลดลงของ C % ของ JICF และ Free jet บน Near Field และ Far Field บน rd เปรียบเทียบกับ free jet (Smith and Mungal, 1998).....	114
รูปที่ 2.12 Instantaneous contour ของ Spanwise vorticity (Yuan et al., 1999).....	115
รูปที่ 2.13 Average magnitude ของ Streamwise vorticity Cortelezzi and Karagozian (2001)	115
รูปที่ 2.14 Instantaneous of streamline (Sau et al., 2004).....	116

รูปที่ 2.15	แนวคิดกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Kornsri et al., 2009).....	116
รูปที่ 2.16	เส้นทางเดินความเร็วและอุณหภูมิของเจ็ต (Kamotani and Graeber ,1972)	117
รูปที่ 2.17	โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Fric and Roshko,1994).....	117
รูปที่ 2.18	เส้นทางเดินของ streamline (Yuan and Street, 1998).....	118
รูปที่ 2.19	Center-plane trajectory อุณหภูมิ และ Centroid trajectory อุณหภูมิ (Wangjiraniran, 2001)	118
รูปที่ 2.20	Contour ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบตั้งฉากสำหรับ J=21 (Zaman and Fross, 1997).....	119
รูปที่ 2.21	Contour ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบตั้งฉากสำหรับ J=54 (Zaman and Fross, 1997).....	119
รูปที่ 2.22	ความเร็วเฉลี่ยบนหน้าตัดตั้งฉากและ Streamwise vorticity isosurface J=21 (Zaman and Fross, 1997).....	120
รูปที่ 2.23	ความเร็วเฉลี่ยบนหน้าตัดตั้งฉากและ Streamwise vorticity isosurface J=54 (Zaman and Fross, 1997).....	120
รูปที่ 2.24	ผลของการติด Tab ต่อเส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตบนระนาบสมมาตร (Zaman and Fross, 1997).....	121
รูปที่ 2.25	ผลของการติด Tab ต่อ Circulation distribution ไปตามแนว Downstream (Zaman and Fross, 1997).....	121
รูปที่ 2.26	a) Tab และการติดตั้ง b) ระบบแกนตั้งฉากกับทิศทางการหมุน (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005).....	122
รูปที่ 2.27	การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการติด Tab กรณีปากทางออกเจ็ตไม่หมุนควง (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005).....	123
รูปที่ 2.28	การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการติด Tab กรณีปากทางออกเจ็ตหมุนควง (ก) (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005).....	124

รูปที่ 2.29	ผลการกระตุ้นเจ็ตด้วยลำโพง (M'Closkey et al., 2002) ยังไม่กระตุ้นเจ็ต	125
รูปที่ 2.30	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวมบนระนาบตั้งฉาก (Wangjiraniran and Bunyajitradulya,2001)	126
รูปที่ 2.31	ภาพแสดง Contours of line-of-sight integrated mean images ของ Traverses profile ไปตามแนว downstream (Yingjaroen et al., 2006).....	127
รูปที่ 2.32	Instantaneous image ของ mixing structure บนด้าน Top view (Limdumrongtum et al., 2009)	127
รูปที่ 2.33	Instantaneous isoconcentration surface ด้าน Top view (Denev et. al., 2005)	128
รูปที่ 2.34	Instantaneous isoconcentration surface ด้าน Top view (Denev et. al., 2005)	129
รูปที่ 2.35	ชุดเจ็ตควบคุม (Kornsri et al., 2009).....	130
รูปที่ 2.36	เส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตสำหรับควบคุมและไม่ควบคุม (Kornsri et al., 2009).....	131
รูปที่ 2.37	เส้นทางเดินของความเร็วเจ็ต (Kornsri et al., 2009)	131
รูปที่ 2.38	Contour ของความเร็วเฉลี่ย (Normalize ด้วย ความเร็วกระแสลมขวาง) เปรียบเทียบระหว่างไม่ควบคุมกับควบคุมที่สภาวะเหมาะสม (Kornsri et al., 2009).....	132
รูปที่ 2.39	ตัวอย่างสนามความเร็วบนระนาบที่วัดได้จาก SPIV ก) กรณีใส่อนุภาคติดตามการ ไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสลมขวาง ข) กรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหล เฉพาะในเจ็ตหลักเท่านั้น (Witayaprapakorn, 2013)	132
รูปที่ 2.40	ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อประสิทธิภาพใช้เจ็ตควบคุมเจ็ตใน กระแสลมขวางกรณี JICF, I15 และ I135 (Witayaprapakorn, 2013)	133

รูปที่ 2.41	ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อประสิทธิภาพการใช้เจ็ดควบคุมของเจ็ดใน กระแสมขวางกรณี JICF, I135 ที่ $r_m = 2\%$ และ 4% (Chaikasetsin et al., 2015).....	133
รูปที่ 2.42	ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสม และ ประสิทธิภาพของการใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงของเจ็ดในกระแสมขวาง กรณี JICF, I15 และ I135 (Soupramongkol, 2015).....	134
รูปที่ 2.43	ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสม ขวางกรณี JICF, I15, I45, I75, I105, I135 และ I165 (Wangkiat, Khemakanon and Kengkarnpanich, 2015).....	135
รูปที่ 3.1	ภาพ Cross-plane ของเจ็ดในกระแสมขวางที่หน้าตัดใดๆ โดยใช้ SPIV ควบคุม กับ (B) การใส่อนุภาคติดตามในทั้งเจ็ดและกระแสมขวาง.....	136
รูปที่ 3.2	ภาพ Cross-plane ของเจ็ดในกระแสมขวางที่หน้าตัดใดๆ โดยใช้ SPIV ควบคุม กับ (A)การใส่อนุภาคติดตามเฉพาะในส่วนของเจ็ดเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมขวาง	136
รูปที่ 4.1	ชุดทดลองภายในห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	137
รูปที่ 4.2	ภาพ Schematic diagram ของชุดทดลอง.....	137
รูปที่ 4.3	ภาพถ่ายของชุดทดลอง.....	138
รูปที่ 4.4	Centrifugal blower สำหรับอุโมงค์ลมเพื่อสร้างกระแสมขวาง.....	138
รูปที่ 4.5	เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า.....	139
รูปที่ 4.6	รูป Schematic diagram ของอุโมงค์ลม.....	139
รูปที่ 4.7	ส่วนประกอบของชุดเจ็ดหลัก.....	140
รูปที่ 4.8	ชุดเจ็ดหลักและเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวง.....	140
รูปที่ 4.9	ส่วนประกอบของชุดเจ็ดควบคุม.....	140
รูปที่ 4.10	พิกัดอ้างอิงในการทดลอง.....	141
รูปที่ 4.11	เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ ND:YAG ยี่ห้อ New Wave™ model Solo 200XT.....	141

รูปที่ 4.12	Laser light arm.....	142
รูปที่ 4.13	กล้อง CCD PowerView Plus 11 MP	142
รูปที่ 4.14	Synchronizer	143
รูปที่ 4.15	ขอบเขตและความละเอียดในการวัดความเป็นระเบียบของกระแสลมขวาง.....	143
รูปที่ 4.16	การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ของกระแสลมขวาง	144
รูปที่ 4.17	ตำแหน่งในการวัดความเร็วที่สภาวะเริ่มต้นของเจ็ต	144
รูปที่ 4.18	เปอร์เซ็นต์ความไม่สมมาตรของเจ็ตเมื่อเทียบกับความเร็วเฉลี่ยที่แต่ละรัศมี.....	145
รูปที่ 4.19	ความเร็วเจ็ตในแนวแกน y ตามแนวรัศมีที่ปากทางออก.....	145
รูปที่ 4.20	Rotameter flow meter สำหรับเจ็ตควบคุม.....	146
รูปที่ 4.21	ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ที่จำนวนภาพต่าง ๆ.....	146
รูปที่ 4.22	ความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x เมื่อใช้จำนวนภาพที่มากขึ้น	147
รูปที่ 4.23	ผลการสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง SPIV กับ pitot tube	147
รูปที่ 5.1	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่ $r = 4$ ของกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165	148
รูปที่ 5.2	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมในงานวิจัยปัจจุบัน และงานวิจัยในอดีต.....	148
รูปที่ 5.3	ประสิทธิภาพของการใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง กรณีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165	149
รูปที่ 5.4	เส้นทางเดินของเจ็ตจากปริมาณความเร็วเจ็ต และ Vorticity ของเจ็ตในแนวแกน Streamwise ระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165	149
รูปที่ 5.5	Circulation ของเจ็ต ระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165	150
รูปที่ 6.1 ก	JICF: Contour surfaces แสดงความน่าจะเป็น: (A) ϕ_j , (B) ϕ และ (C) ϕ_{cf} Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz} / u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$	151

รูปที่ 6.1 ข	JICF: Contour surfaces: (A) $V_{j,x}/u_{cf}$, (B) V_x/u_{cf} และ (C) $V_{cf,x}/u_{cf}$ Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$ 152
รูปที่ 6.1 ค	JICF: Contour surfaces: (A) $V_{j,y}/u_{cf}$, (B) V_y/u_{cf} และ (C) $V_{cf,y}/u_{cf}$ Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$ 153
รูปที่ 6.1 ง	JICF: Contour surfaces: (A) $V_{j,z}/u_{cf}$, (B) V_z/u_{cf} และ (C) $V_{cf,z}/u_{cf}$ Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$ 154
รูปที่ 6.1 จ	JICF: Contour surfaces: (A) $\omega_{j,x}d/u_{cf}$, (B) $\omega_x d/u_{cf}$ และ (C) $\omega_{cf,x}d/u_{cf}$ Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$ 155
รูปที่ 6.2	ความสัมพันธ์และความเกี่ยวเนื่องกันของปริมาณเฉลี่ยไรมิติต่างๆ กรณีไม่ฉีดเจ็ด ควบคุม (JICF) ที่ $x/rd = 0.75$ 156
รูปที่ 6.3	ภาพเหมือนแสดงกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวง กรณีไม่ ฉีดเจ็ดควบคุมโดยเส้นสีของ Streamline แสดงค่าความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ด $\phi_j = 0$ สีน้ำเงิน และเพิ่มมากขึ้นสู่ $\phi_j = 1$ สีแดง Sornphorm and Bunyajitradulya (2016) 157
รูปที่ 6.4	การเลี้ยวเบนของชั้นในแนวตั้งของกระแสมขวงบริสุทธิ์หลังจากการเข้าปะทะ กับเจ็ดที่ด้านหน้า (Windward)..... 157
รูปที่ 6.5	บริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสม $\left[(\vec{V}_{cf}/u_{cf}) \cdot d\nabla\phi_j \right]$ ของกรณีไม่ฉีดเจ็ด ควบคุม (JICF) 158
รูปที่ 7.1 ก	I165: Contour surfaces แสดงความน่าจะเป็น: (A) ϕ_j , (B) ϕ และ (C) ϕ_{cf} Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$ 159

- รูปที่ 7.1 ข I165: Contour surfaces: (A) $V_{j,x}/u_{cf}$, (B) V_x/u_{cf} และ (C) $V_{cf,x}/u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95
 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$ 160
- รูปที่ 7.1 ค I165: Contour surfaces: (A) $V_{j,y}/u_{cf}$, (B) V_y/u_{cf} และ (C) $V_{cf,y}/u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95
 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$ 161
- รูปที่ 7.1 ง I165: Contour surfaces: (A) $V_{j,z}/u_{cf}$, (B) V_z/u_{cf} และ (C) $V_{cf,z}/u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95
 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$ 162
- รูปที่ 7.1 จ JICF: Contour surfaces : (A) $\omega_{j,x}d/u_{cf}$, (B) $\omega_x d/u_{cf}$ และ (C) $\omega_{cf,x}d/u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95
 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$ 163
- รูปที่ 7.2 ก กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม และกรณีฉีดเจ็ดควบคุม (I165) ที่ $x/rd = 0.75$
 Contour surface: (A) ϕ_j , (B) ϕ และ (C) ϕ_{cf}
 Contour lines: $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95
 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$ 164
- รูปที่ 7.2 ข กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม และกรณีฉีดเจ็ดควบคุม (I165) ที่ $x/rd = 0.75$
 Contour surface: (A) $V_{j,x}/u_{cf}$, (B) V_x/u_{cf} และ (C) $V_{cf,x}/u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95
 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$ 165
- รูปที่ 7.2 ค กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม และกรณีฉีดเจ็ดควบคุม (I165) ที่ $x/rd = 0.75$
 Contour surface: (A) $V_{j,y}/u_{cf}$, (B) V_y/u_{cf} และ (C) $V_{cf,y}/u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95
 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$ 166

รูปที่ 7.2 ง	<p>กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม และกรณีฉีดเจ็ตควบคุม (I165) ที่ $x / rd = 0.75$ Contour surface: (A) $V_{j,z} / u_{cf}$, (B) V_z / u_{cf} และ (C) $V_{cf,z} / u_{cf}$ Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz} / u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$ 167</p>
รูปที่ 7.2 จ	<p>กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม และกรณีฉีดเจ็ตควบคุม (I165) ที่ $x / rd = 0.75$ Contour surface: (A) $\omega_{j,x} d / u_{cf}$, (B) $\omega_x d / u_{cf}$ และ (C) $\omega_{cf,x} d / u_{cf}$ Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz} / u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$ 168</p>
รูปที่ 7.3	<p>ความสัมพันธ์และความเกี่ยวเนื่องกันของปริมาณเฉลี่ยโรมิติต่างๆ กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 $x / rd = 0.75$ 169</p>
รูปที่ 7.4	<p>บริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสม $\left[(\vec{V}_{cf} / u_{cf}) \cdot d\nabla\phi_j \right]$ ระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม และกรณีฉีดเจ็ตควบคุม (I165)..... 170</p>
รูปที่ 8.1 ก	<p>JICF: CS แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบ (A) เจ็ต (ϕ_j) (B) ของไหลใดๆ (ϕ) (C) กระแสลมขวางปริสุทธิ์ (ϕ_{cf}) 171</p>
รูปที่ 8.1 ข	<p>JICF: CS แสดง Streamwise velocity ของ (A) เจ็ต ($V_{j,x} / u_{cf}$) (B) ของไหลใดๆ (V_x / u_{cf}) (C) กระแสลมขวางปริสุทธิ์ ($V_{cf,x} / u_{cf}$) 172</p>
รูปที่ 8.1 ค	<p>JICF: CS แสดง Transverse velocity ของ (A) เจ็ต ($V_{j,y} / u_{cf}$) (B) ของไหลใดๆ (V_y / u_{cf}) (C) กระแสลมขวางปริสุทธิ์ ($V_{cf,y} / u_{cf}$) 173</p>
รูปที่ 8.1 ง	<p>JICF: CS แสดง Spanwise velocity ของ (A) เจ็ต ($V_{j,z} / u_{cf}$) (B) ของไหลใดๆ (V_z / u_{cf}) (C) กระแสลมขวางปริสุทธิ์ ($V_{cf,z} / u_{cf}$) 174</p>
รูปที่ 8.1 จ	<p>JICF: CS แสดง Spanwise vorticity ของ (A) เจ็ต ($\omega_{j,z} d / u_{cf}$) (B) ของไหลใดๆ ($\omega_z d / u_{cf}$) (C) กระแสลมขวางปริสุทธิ์ ($\omega_{cf,z} d / u_{cf}$) 175</p>
รูปที่ 8.2	<p>JICF: ความสัมพันธ์ของปริมาณต่างๆในระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง 176</p>
รูปที่ 8.3	<p>I165: ความสัมพันธ์ของปริมาณต่างๆในระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางกรณีมีการควบคุม 177</p>

รูปที่ 8.4	ความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ (ϕ_{cf}) ระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีการฉีดเจ็ตควบคุม (I165).....	178
รูปที่ 9.1	Control volume (CV) พื้นผิวทรงกระบอก แสดงการไหลผ่านหน้าตัดการไหลเข้า A_1 หน้าตัดการไหลออก A_2 ที่มีขนาดเท่ากัน $A_1 = A_2$ และหน้าตัดการไหลด้านข้าง A_{wall} โดยมีระยะทางการไหลของ CV เท่ากับ Δx ในทิศทางตามแนวการไหล.....	179
รูปที่ 9.2	การพัฒนาตัวของอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติต่อระยะความลึก $\Delta x = 1rd$ ($Q_{cf, \Delta x=1rd} / Q_o$) สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม(JICF).....	180
รูปที่ 9.3	การพัฒนาตัวของอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติต่อระยะความลึก $\Delta x = 1rd$ ($Q_{cf, \Delta x=1rd} / Q_o$) สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม(JICF).....	180
รูปที่ 9.4	การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่เข้าสู่ตัวเจ็ต โดยมีการไหลเข้ามาจากระนาบอื่น	181
รูปที่ 9.5	การลดลงของอัตราการไหลกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่เข้าสู่ตัวเจ็ต ในกรณีที่มีการไหลออกจากระนาบที่สนใจ	181
รูปที่ 9.6	การเปรียบเทียบการพัฒนาตัวของอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติต่อระยะความลึก $\Delta x = 1rd$ ($Q_{cf, \Delta x=1rd} / Q_o$) ระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 (ก) ที่ระยะการไหล $x / rd = 0.5$ (ข) ที่ระยะการไหล $x / rd = 0.75$ (ค) ที่ระยะการไหล $x / rd = 1.0$ (ง) ที่ระยะการไหล $x / rd = 1.5$	182
รูปที่ 9.7	การเปรียบเทียบอัตราการไหลสูงสุดไร้มิติของกระแสลมขวางต่อระยะความลึก $\Delta x = 1rd$ ($Q_{cf, \Delta x=1rd} / Q_o$) ระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165.....	183

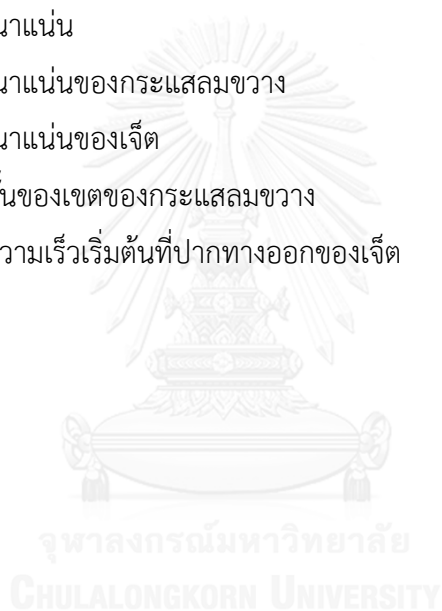
คำอธิบายสัญลักษณ์

อักษรโรมัน

A	พื้นที่
A_j	พื้นที่หน้าตัดของเจ็ต
d	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ปากทางออกของเจ็ต
E	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการการผสมเชิงปริมาตรขณะใด ๆ หรือ เฉลี่ยตามเวลา
\dot{m}_j	อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตหลัก
\dot{m}_{cj}	อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (รวมทุกรู)
n	ดัชนีเวลาของสนามความเร็ว ลำดับภาพสนามความเร็ว
N	จำนวนสนามความเร็ว หรือ จำนวนภาพ (snapshots) ทั้งหมด
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตร
Q_j	อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ไหลผ่านหน้าตัดที่มีส่วนผสมของเจ็ต
Q_o	อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ต
Q_{cj}	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (รวมทุกรู)
r	อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล
r_m	อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก
Re_{cf}	ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของกระแสลมขวาง, $Re_{cf} = u_{cf} d / \nu_{cf}$
Re_j	ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ต, $Re_j = u_j d / \nu_j$
u_{cf}	ความเร็วของกระแสลมขวาง
u_j	ความเร็วของเจ็ต
\vec{V}_{yz}	เวกเตอร์ความเร็วในระนาบตัดขวางของของไหลใดๆ (เจ็ตหรือกระแสลมขวาง)
$\vec{V}_{j,yz}$	เวกเตอร์ความเร็วในระนาบตัดขวางของส่วนผสมของเจ็ต
$\vec{V}_{cf,yz}$	เวกเตอร์ความเร็วในระนาบตัดขวางของกระแสลมขวางบริสุทธิ์
x, y, z	พิกัดอ้างอิง
x / rd	พิกัดตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ
y / rd	พิกัดตามแนวแกน transverse ไร้มิติ
z / rd	พิกัดตามแนวแกน spanwise ไร้มิติ

อักษรกรีก

ϕ	ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลใดๆ (เจ็ดหรือกระแสลมขวาง)
ϕ_j	ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด
ϕ_{cf}	ความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์
θ	ตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวง
v	ความหนืดคิเนเมติก
v_{cf}	ความหนืดคิเนเมติกของกระแสลมขวาง
v_j	ความหนืดคิเนเมติกของเจ็ด
ρ	ความหนาแน่น
ρ_{cf}	ความหนาแน่นของกระแสลมขวาง
ρ_j	ความหนาแน่นของเจ็ด
ψ_{bl}	รูปร่างชั้นของเขตของกระแสลมขวาง
ψ_{jp}	รูปร่างความเร็วเริ่มต้นที่ปากทางออกของเจ็ด



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เจ็ตในกระแสลมขวาง (Jet in Crossflow, JICF) คือเจ็ตที่ถูกฉีดเข้าไปในแนวตั้งฉากสู่กระแสลมขวาง เมื่อเจ็ตปะทะกับกระแสลมขวางจะทำให้เจ็ตเลี้ยวเข้าสู่แนวการไหลของกระแสลมขวาง และเกิดปฏิสัมพันธ์กันระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง ส่งผลให้เกิดคุณลักษณะสำคัญ เช่น โครงสร้างของเจ็ต (Jet Structure) เส้นทางการเดินของเจ็ต (Jet Trajectory) การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) และการผสม (Mixing) ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้มีผลต่อประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการประยุกต์ใช้เจ็ตในกระแสลมขวางในงานทางวิศวกรรมและอุตสาหกรรม เช่น การฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (การเหนี่ยวนำการผสมและการผสม) การใช้ Film Cooling ระบายความร้อนของใบพัดเครื่องยนต์กังหันแก๊ส (เส้นทางการเดิน) การออกแบบระบบขึ้นลงแนวดิ่งของเครื่องบินประเภท V/STOL (Vertical and/or Short Take-Off and Landing) (เส้นทางการเดิน) การกระจายตัวของมลภาวะจากปล่องควันในโรงงานอุตสาหกรรม (เส้นทางการเดิน การเหนี่ยวนำการผสม และการกระจายตัว) เป็นต้น ผลประโยชน์จากการประยุกต์เหล่านี้ทำให้การศึกษาวิธีการควบคุมคุณลักษณะสำคัญให้เป็นไปตามความต้องการ เช่น การควบคุมการเหนี่ยวนำการผสมและการผสมของอากาศและเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่เหมาะสมและมีสมรรถนะที่สูงที่สุด นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง จึงทำให้มีความพยายามในการศึกษาเจ็ตในกระแสลมขวาง ซึ่งสามารถแบ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเจ็ตในกระแสลมขวางได้เป็นสองกลุ่มหลัก ได้แก่ งานวิจัยที่ศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง และงานวิจัยที่ศึกษาเทคนิคการปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวางให้มีคุณลักษณะดังต้องการ

ในอดีตได้มีการศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง Fric and Roshko (1994) พบโครงสร้างหลักๆ ทั้งหมด 4 ส่วนได้แก่ Jet shear layer, Horseshoe vortices, Wake structures และ Counter-rotating vortex pair หลังจากนั้นก็ได้มีการศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ตมากมายเช่น Smith and Mungal (1998) พบว่าการก่อตัวของโครงสร้าง CVP (Counter-rotating vortex pair) บริเวณ Near Field ของเจ็ตในกระแสลมขวางทำให้การเหนี่ยวนำการผสมดีกว่ากรณีของเจ็ตอิสระ (Free jet) แต่การเหนี่ยวนำการผสมในบริเวณ Far Field นั้นไม่แตกต่างกันมากนัก Yuan and Street (1998) พบว่าเส้นทางการเดินของ JICF ก็กับการเหนี่ยวนำการผสมมีความสัมพันธ์กัน

ในส่วนของการศึกษาเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง Yuan et al. (1999) ได้จำลองเจ็ตในกระแสลมขวางโดย Large-eddy simulation (LES) เสนอโครงสร้างที่มีบทบาท โครงสร้างหนึ่งคือ Spanwise roller โดยการเหนี่ยวนำการผสมเกิดจากปฏิสัมพันธ์ของเจ็ตและกระแสลมขวาง ทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่บริเวณทางด้านหน้าของขอบเจ็ต โดยกระแสลมขวางจะดูดกลืนผ่านเข้าไปผสมกับเจ็ตผ่านทางช่องว่างดังกล่าว ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง Spanwise rollers ที่ upstream และที่ downstream ในฐานะบทบาทของ CVP Yuan et al. (1999) พบว่า แม้ว่าค่า Circulation เฉลี่ยของ CVP จะค่อนข้างอ่อนแรงลงในบริเวณ Far field แต่ CVP จะช่วยเพิ่มการเหนี่ยวนำการผสมโดยการเพิ่มพื้นที่การปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง ต่อมา Cortelezzi and Karagozian (2001) ใช้เทคนิค 3D vortex element simulation ศึกษาการเหนี่ยวนำการเหนี่ยวนำผสม พบว่า CVP พัฒนาตัวมาจาก Vortex ring รอบปากทางออกของเจ็ต และพบว่ากระแสลมขวางจะถูกเหนี่ยวนำและยกตัวลอยขึ้นเข้าไปผสมที่บริเวณด้านหลังของเจ็ตระหว่างคู่ CVP นอกจากนี้ Sau et al. (2004) ใช้เทคนิค Direct numerical method (DNS) พบว่าทางทั้งสองข้างของโครงสร้าง Horseshoe vortex ซึ่งเกิดจาก flow shear layer ของ crossflow จะถูกยกขึ้นจากพื้นที่ด้านหลังของเจ็ต และต่อมาจะถูกเหนี่ยวนำโดย CVP เข้าไปผสมกับเจ็ตคล้ายคลึงกับผลการทดลองของ Cortelezzi and Karagozian (2001) อย่างไรก็ตาม การศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมที่ผ่านมามีส่วนมากศึกษาผ่านการจำลอง simulation ทั้งหมด ซึ่ง การศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมจากการทดลองและหลักฐานจากการทดลองนั้นยังมีอยู่น้อยมาก

วัตถุประสงค์ที่สำคัญส่วนหนึ่งของการศึกษาเจ็ตในกระแสลมขวางนั้น มีความต้องการที่จะเพิ่มการเหนี่ยวนำการผสม และประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยที่ผ่านมามีความพยายามที่จะควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวางด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การติด Delta Tab เพื่อทำให้เกิด Vortex (Liscinsky et al., 1995; Zaman and Foss, 1997; และ Bunyajitradulya และ Sathapornnanon 2005), การใช้ pulsing (Hermanson et al., 1998; Eroglu and Breidenthal, 2001; และ M'Closkey et al., 2002) การใช้ Swirling jet (Kavasaoglu and Schetz, 1989; Yoshizako et al., 1991; Liscinsky et al., 1995; -Niederhaus et al., 1997; และ Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005) สำหรับการติด Delta Tab ถึงแม้ว่าจะติดตั้งได้ง่ายแต่จะปรับเปลี่ยนการควบคุมได้ยาก ส่วนวิธีการควบคุมโดยใช้ Swirling jet หรือ Pulsing นั้น ต้องใช้พลังงานในการควบคุมมาก ต่อมา Kornsri et al. (2007) จึงใช้การควบคุมเจ็ตตามเส้นรอบวง (Azimuthal Control Jets) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานในการควบคุมมากและสามารถควบคุมได้ง่ายจากผลการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางเดินของเจ็ตและอัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของ Yuan and Street ซึ่งระบุว่าเมื่อเส้นทางเดินของเจ็ตต่ำลง จะทำให้อัตราการเหนี่ยวนำ

การผสมเพิ่มขึ้น ด้วยแนวคิดนี้ Kornsri et al.(2009) ได้พัฒนาเทคนิคการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง พบว่าตำแหน่งของมุมฉีดเจ็ตควบคุมมีผลต่อทางเดินของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมด้าน Windward จะทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตต่ำลง ในขณะที่ถ้าฉีดเจ็ตควบคุมด้าน Leeward จะทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม มากไปกว่านั้นยังพบว่าเส้นทางเดินของเจ็ตต่ำที่สุดเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ $\theta = \pm 15^\circ$ แต่ยังไม่สามารถหา Volumetric Entrainment ได้โดยตรง เนื่องจากใช้ Single hot wire anemometer ในการศึกษา ต่อมา Witayaprapakorn (2013) ได้นำแนวคิดของ Kornsri et al. (2009) มาพัฒนาและสามารถหาอัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้ โดยใช้ Stereo Particle Image Velocimetry (SPIV) ประกอบกับเทคนิคปล่อยอนุภาคติดตามการไหลในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง โดยทำการทดลองที่ $r = 4$ พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\theta = \pm 15^\circ$ ทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตต่ำลง แต่กลับไม่ทำให้อัตราการเหนี่ยวนำการผสมดีขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ในทางตรงกันข้ามการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\theta = \pm 135^\circ$ นั้นทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตสูงขึ้น รวมทั้งยังทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมนั้นเพิ่มด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม โดยสาเหตุที่ทำให้อัตราการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นนั้น อาจเกิดจากผลของผนัง (Wall blocking) อนึ่งเมื่อเส้นทางเดินของเจ็ตต่ำลงจะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมต่ำลงด้วย ในทางตรงกันข้ามเมื่อเส้นทางเดินของเจ็ตสูงขึ้น จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งขัดแย้งกับผลการวิเคราะห์สมการของ Yuan and street (1998) ซึ่งสันนิษฐานว่าอาจเกิดจากผลของผนัง (Wall blocking) ตามที่ Kornsri et al (2009) ได้เสนอแนะไว้ หลังจากนั้น Chaikasetsin et al.(2014) ศึกษาผลของอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ที่ 2% และ 4% ที่มีต่อการเหนี่ยวนำการผสมที่ $r = 4$ พบว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\theta = \pm 135^\circ$ ที่ $r_m = 4\%$ มีเส้นทางเดินของเจ็ตสูงกว่าที่ $r_m = 2\%$ และ JICF แต่กลับทำให้อัตราการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นมากที่สุดถึง 57% ที่ $x/rd = 1.5$ ซึ่งผลการทดลองทั้งสองก็ให้ผลที่ขัดแย้งจากผลวิเคราะห์สมการ Yuan and Street (1998)

1.2 แรงจูงใจ

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสมที่ผ่านมานั้นตามที่ได้กล่าวไปด้านต้น พบว่าเป็นการศึกษาจาก Simulation เกือบทั้งหมด จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่งเกี่ยวกับ การศึกษา การเหนี่ยวนำการผสมจากการทดลอง ประกอบกับผลจากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลกับอัตราการเหนี่ยวนำการผสมของ Chaikasetsin et al.(2014), Soupramongkol and Bunyajitradulya(2015) และ Wangkiat and Bunyajitradulya (2015) ซึ่ง ทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4, 8 และ 12 ตามลำดับ พบว่า เมื่อ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลสูงขึ้น ก็จะทำให้อัตราการเหนี่ยวนำการผสมก็เพิ่มมากขึ้นด้วย ตามลำดับ ในทางกลับกันจะทำให้ประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุมในการเหนี่ยวนำการผสมลดต่ำลง ประกอบกับผลของตำแหน่งมุมฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่ออัตราการเหนี่ยวนำการผสมของ Tekhuad (2016) พบว่าการฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง 165° จะทำให้อัตราการเหนี่ยวนำการผสม ที่มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งมุมฉีดเจ็ดควบคุมอื่นๆ และมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม

ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ดและกระแสมวลรวมถึงกลไก การผสมของเจ็ดในกระแสมวลเป็นอย่างไร มากไปกว่านั้นการใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ ชั้นการไหล $r < 5$ ($r = 4$) ซึ่งเป็นช่วงการไหลที่มีค่าประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุมมากที่สุด โดย ฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งที่มุมฉีด $\theta = \pm 165^\circ$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ให้อัตราการเหนี่ยวนำการผสมและ ประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสมมากที่สุดนั้น มีกลไกการเหนี่ยวนำการผสมที่แตกต่างกับกรณีไม่ฉีด เจ็ดควบคุมอย่างไร

ดังนั้นนำเข้าสู่เป้าหมายของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการ เหนี่ยวนำการผสมและกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมวล โดยใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ในการวัดสนามความเร็วของเจ็ดที่ระนาบใดๆ ประกอบกับการใช้เทคนิคการปล่อยอนุภาคติดตามการไหล 2 ลักษณะ คือ 1) การปล่อยอนุภาค ติดตามการไหลในส่วนของเจ็ดเท่านั้น และ 2) การปล่อยอนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ด และกระแสมวล เพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ดและกระแสมวล และกลไกการเหนี่ยวนำ การผสมของเจ็ดในกระแสมวล ผลลัพธ์ที่ได้ของงานวิจัยนี้จะช่วยให้มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับ พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเจ็ดควบคุมในแนวเส้นรอบวงมากขึ้น และนำไปสู่การพัฒนาทางวิศวกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับเจ็ดในกระแสมวลไม่ว่าจะเป็น การเพิ่มประสิทธิภาพของการผสมในท้องเผาไหม้ที่ได้ กล่าวมา หรือการปรับปรุงให้ควันทิ้งจากปล่องควันทิ้งของโรงงานสามารถดึงเอาอากาศรอบข้างเข้ามาผสม ได้อย่างรวดเร็วส่งผลให้มลภาวะลดลง

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jets) ต่อการเหนี่ยวนำการผสม(Entrainment) และกลไกการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment mechanism) ในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Jet in crossflow) ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4 โดยการวัดสนามความเร็วที่ระนาบใดๆของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วยเทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ประกอบกับการปล่อยอนุภาคติดตามการไหล 2 ลักษณะ คือ (A) การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะส่วนของเจ็ต ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง และ (B) การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสลมขวาง

$$E = f\left(\frac{x}{rd}; \theta; r, r_m, \frac{\rho_j}{\rho_{cf}}, \frac{\rho_{cj}}{\rho_{cf}}, \frac{d_{cj}}{d}, Re_j, Re_{cf}, Re_{cj}, \psi_{bl}, \psi_{jp}, \frac{\delta}{d}\right) \quad (1.1)$$

$$EM = f\left(\frac{x}{rd}; \theta; \frac{z}{rd}, r, r_m, \frac{\rho_j}{\rho_{cf}}, \frac{\rho_{cj}}{\rho_{cf}}, \frac{d_{cj}}{d}, Re_j, Re_{cf}, Re_{cj}, \psi_{bl}, \psi_{jp}, \frac{\delta}{d}\right) \quad (1.2)$$

$$\Gamma, \frac{y}{rd}, Structure = f\left(\frac{x}{rd}; \theta; \frac{z}{rd}, r, r_m, \frac{\rho_j}{\rho_{cf}}, \frac{\rho_{cj}}{\rho_{cf}}, \frac{d_{cj}}{d}, Re_j, Re_{cf}, Re_{cj}, \psi_{bl}, \psi_{jp}, \frac{\delta}{d}\right) \quad (1.3)$$

โดยที่	E	คือ การเหนี่ยวนำการผสม
	EM	คือ กลไกการเหนี่ยวนำการผสม
	Γ	คือ ค่า Circulation ไร้มิติ
	$\frac{y}{rd}$	คือ เส้นทางการเดินของเจ็ต
	$Structure$	คือ โครงสร้างของเจ็ต ได้แก่ Probability, V , V_x , V_y , V_z และ Vorticity
	$\frac{x}{rd}$	คือ ระยะทางไร้มิติตามแนวขวางการไหลของเจ็ต
	θ	คือ ตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงเทียบกับกระแสลมขวาง
	r	คือ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล
	r_m	คือ อัตราส่วนการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก
	$\frac{z}{rd}$	คือ ระยะทางไร้มิติตามแนวแกนสมมาตรของเจ็ต
	$\frac{\rho_j}{\rho_{cf}}$	คือ อัตราส่วนความหนาแน่นของเจ็ตหลักต่อกระแสลมขวาง
	$\frac{\rho_{cj}}{\rho_{cf}}$	

$\frac{\rho_{cj}}{\rho_j}$	คือ อัตราส่วนความหนาแน่นของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก
$\frac{d_{cj}}{d}$	คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดต่อเจ็ดหลัก
Re_j	คือ เลขเรย์โนลด์ของเจ็ดหลัก
Re_{cf}	คือ เลขเรย์โนลด์ของกระแสลมขวาง
Re_{cj}	คือ เลขเรย์โนลด์ของเจ็ดควบคุม
Ψ_{bl}	คือ สภาวะเริ่มต้นของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางไร้มิติ
Ψ_{jp}	คือ สภาวะเริ่มต้นของเจ็ดไร้มิติ
$\frac{\delta}{d}$	คือ ความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางไร้มิติ

1.4 ขอบเขตโครงการ

1. อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4
2. เรย์โนลด์สสัมเบอร์ของกระแสลมขวาง (Re_{cf}) มีค่าประมาณ 3,100
3. เรย์โนลด์สสัมเบอร์ของเจ็ดขวาง (Re_j) มีค่าประมาณ 12,400
4. และกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (θ) ที่ตำแหน่ง ± 165 องศา (I165)
5. อัตราการไหลเชิงมวล (r_m) เท่ากับ 4% ของอัตราการไหลเจ็ด
6. สภาพการไหลของกระแสลมขวาง คือ การไหลแบบสม่ำเสมอและคงตัว
7. สภาพการไหลของเจ็ด คือ การไหลในท่อแบบปั่นป่วนที่พัฒนาตัวเต็มที่
8. Cross-plane: ระยะทางไร้มิติตามแนวขวางกับการไหลของเจ็ด (x/rd) เท่ากับ 0.5, 0.75, 1.0 และ 1.5
9. Center-plane: ระยะทางไร้มิติตามแนวแกนสมมาตรกับการไหลของเจ็ด (z/rd) เท่ากับ 0 (ระนาบกึ่งกลางของเจ็ด)
10. เทคนิคการปล่อยอนุภาคติดตามการไหล 2 แบบ คือ 1).การปล่อยอนุภาคติดตามการไหลในส่วนเฉพาะที่เป็นเจ็ดเท่านั้นและ2).ทั้งในส่วนของเจ็ดและส่วนของกระแสลมขวาง
11. เส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ดหลัก เท่ากับ 12.57 mm.
12. เส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ดควบคุม เท่ากับ 0.5 mm.

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ประโยชน์ในเชิงวิชาการ และประโยชน์ในเชิงประยุกต์

ประโยชน์ในเชิงวิชาการด้านข้อมูล ความรู้ และความเข้าใจที่เกี่ยวกับ 1) การพัฒนาตัวของอัตราการเหนี่ยวนำการผสม และประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมตามระยะทางการไหล และ 2) โครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ดและกระแสนวมขวาง และกลไกการผสมของเจ็ดในกระแสนวมขวางมากขึ้น ทั้งในกรณีที่ไม่ฉีดเจ็ดควบคุม และกรณีที่ฉีดเจ็ดควบคุม

ประโยชน์ในประยุกต์ในงานทางด้านวิศวกรรม คือ 1) สามารถนำข้อมูล ความรู้ และความเข้าใจมาใช้ในการออกแบบพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านวิศวกรรม เช่น การออกแบบห้องเผาไหม้ การออกแบบปล่องควันของโรงงาน และการออกแบบอุปกรณ์ในอุตสาหกรรมการผสมสารเคมีหรือสีให้มีประสิทธิภาพ และประสิทธิผลเพิ่มสูงขึ้น 2) ได้แนวทางในการคิด วิเคราะห์ และพัฒนาอุปกรณ์ในการปรับแต่ง และควบคุมเจ็ดในกระแสนวมขวางให้มีประสิทธิผลที่สูงขึ้น

1.6 แผนการดำเนินงานและงบประมาณของโครงการ

กิจกรรม	ต.ค.	พ.ศ.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
	58	58	58	59	59	59	59	59	59	59
1. ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา	X	X	X							
2. ศึกษาอุปกรณ์ในการทดลอง		X	X							
3. ออกแบบการทดลอง		X	X							
4. สอบเทียบเครื่องมือวัด		X	X	X						
5. ทดสอบการทดลอง			X	X						
6. ทำการเก็บข้อมูลอย่างหยาบ			X	X						
7. วางแผนการทดลอง				X	X					
8. ทำการเก็บข้อมูลอย่างละเอียด				X	X	X	X			
9. เสนอโครงร่าง							X			
10. วิเคราะห์ข้อมูล							X	X	X	
11. ทำวิทยานิพนธ์ และสอบ								X	X	X

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเจ็ตในกระแสมขวาง โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ 1) การศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญของเจ็ตในกระแสมขวาง เช่น อัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพ เรย์โนลด์นัมเบอร์เจ็ตและกระแสมขวาง เป็นต้น 2) การศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวาง เช่น เส้นทางเดินของเจ็ต การเหนี่ยวนำการผสม และกลไกการเหนี่ยวนำการผสม เป็นต้น 3) การปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสมขวาง เช่น การควบคุมโดยไม่ใช่พลังงาน และการควบคุมโดยใช้พลังงาน เป็นต้น รายละเอียดของงานวิจัยต่างๆเป็นดังนี้

2.1 การศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญของเจ็ตในกระแสมขวาง

2.1.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพ

การศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวาง คือ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพ (r) ซึ่งนิยามนิยามเป็น

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

โดยที่ ρ_j, ρ_{cf} คือ ความหนาแน่นของเจ็ต และกระแสมขวางตามลำดับ

u_j, u_{cf} คือ ความเร็วของเจ็ต และกระแสมขวางตามลำดับ

ในกรณี ρ_j และ ρ_{cf} เท่ากัน อัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพจะลดรูปเป็น ความเร็วเจ็ตต่อกระแสมขวาง (u_j / u_{cf}) ซึ่งเป็นอัตราส่วนความเร็วของเจ็ตต่อกระแสมขวางได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอัตราส่วนความเร็วดังกล่าวเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณลักษณะเฉพาะของเจ็ต

2.1.2 เรย์โนลด์นัมเบอร์ของเจ็ตและกระแสมขวาง

ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ต (Re_j) ซึ่งแสดงถึงสภาวะของการไหลของเจ็ตก่อนที่จะออกจากปากเจ็ต ว่าเป็นแบบราบเรียบ (laminar) หรือปั่นป่วน (turbulent) และมีผลต่อสภาวะของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ต โดยนิยามเป็น

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

โดยที่ u_j คือ ความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ต
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออกของเจ็ต
 ν_j คือ ความหนืดคินแมติกส์ของเจ็ต และ

ตัวเลขเรย์โนลด์ส์กระแสลมขวาง (Re_{cf}) ซึ่งมีผลต่อ wake ของเจ็ตในกระแสลมขวาง คล้ายคลึงกับ wake ของทรงกระบอก โดยนิยามเป็น

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

โดยที่ u_{cf} คือ ความเร็วของกระแสลมขวาง
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออกของเจ็ต
 ν_{cf} คือ ความหนืดคินแมติกส์ของกระแสลมขวาง

2.2 การศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง

2.2.1 โครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง

Fric and Roshko (1994) ศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง ผ่าน Flow visualization โดยใช้เทคนิค smoke-wire พบ โครงสร้าง vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวางที่สำคัญ 4 โครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.1

- 1) Jet shear layer vortices มีลักษณะคล้ายกับ Vortex ring ของ Free jet โดยเกิดจากการแยกตัวของ shear layer บริเวณปากทางออกของเจ็ต
- 2) Horseshoes vortices เกิดจากม้วนตัวของกระแสลมขวางในบริเวณชั้นขอบเขต ณ รอบปากเจ็ต ซึ่งกระแสลมขวางได้รับผลจาก Adverse pressure gradient ที่เกิดจากการกีดขวางการไหลของเจ็ตที่พุ่งออกมา
- 3) Wake vortices มีลักษณะคล้ายกับ Wake ของการไหลผ่านวัตถุทรงกระบอก แต่มีแหล่งกำเนิดจาก Boundary layer ของกระแสลมขวางที่พื้นของผนัง
- 4) Counter-rotating vortex pair (CVP) มีลักษณะเป็น Vortex 2 ลูกซึ่งมีทิศทางการหมุนตรงข้ามกัน

2.2.2 กระบวนการเกิดและพัฒนาตัวของ Counter-rotating vortex pair

โครงสร้าง Counter-rotating vortex pair (CVP) เป็น Vortical structure ที่สำคัญต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางอย่างยิ่ง การเข้าใจถึงกลไกและกระบวนการเกิดของ CVP จึงจำเป็นต่อความรู้พื้นฐานสำหรับการปรับปรุงและพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านวิศวกรรม การศึกษากลไกและกระบวนการเกิดของ CVP มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

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

Cortelezzi and Karagozian (2001) ศึกษาการก่อตัวและพัฒนาตัวของ CVP ในสนามการไหล โดยจำลองเจ็ตในกระแสลมขวางด้วย 3D vortex element แสดงในรูปที่ 2.2 แสดงถึงโมเดลของกลไกของการเกิด CVP ที่นำเสนอโดยเริ่มจากการที่ Vortices ที่เกิดขึ้นจากผนังท่อของเจ็ต และก่อตัวเป็นวงแหวนใกล้ปากทางออกของเจ็ตและโค้งตัวตามกระแสลมขวาง ทำให้ Vortex ring เกิดการห่อตัวโดยขอบด้านหลังของ Vortex ring จะยกตัวสูงขึ้นและเชื่อมต่อกับขอบด้านหลังของ Vortex ring อีกตัวที่เกิดขึ้นก่อน และพัฒนาตัวกลายเป็น CVP ที่สมบูรณ์ที่บริเวณ Far field จากรูปที่ 2.3 แสดงถึงกระบวนการเกิดของ Vortical structure เกิดจากการม้วนตัวของเจ็ต Shear layer โดยการพับของขอบ Vortex ring และขอบที่พับตัวจะกระตุ้นทำให้เกิด Vortex ring ตัวใหม่เกิดขึ้น

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

Lim et al. (2001) ทำการศึกษา Large scale structure ในเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยใช้เทคนิคฉีดสี และ PLIF ในการศึกษา จากรูปที่ 2.4 จะพบ Upstream vortex (A) และ Lee side vortex (B) ซึ่งมีลักษณะเป็น Vortex loop ซึ่งเกิดจากการพัฒนาตัวของ Cylindrical vortex sheet ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงการพัฒนาตัว CVP ซึ่ง Lim et al.(2001) เชื่อว่า CVP นั้นเกิดจากการพัฒนาตัวของ Vortex loop แทนที่จะเป็น Vortex ring เหมือนเจ็ตอิสระ (Free jet) ตามที่เสนอโดย Cortelezzi and Karagozian (2001)

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

Yuan et al. (1999) ได้เสนอแนะการเกิดของ CVP ว่ามีจุดกำเนิดจาก Hanging vortices (รูปที่ 2.6) ซึ่งเป็นการม้วนตัวของกระแสลมขวางทางเข้ามาในตัวเจ็ต โดยที่แกนการม้วนตามทิศทางผลรวมระหว่างเวกเตอร์ความเร็วเจ็ตและกระแสลมขวาง (\bar{u}_{mean}) ดังรูปที่ 2.7 (ก) ซึ่งโครงสร้างเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วระหว่างเจ็ตกับกระแสลมขวางในทิศตั้งฉากกับ \bar{u}_{mean} หรือที่เรียกว่า Skewed mixing layer ดังรูปที่ 2.7 (ข)

รูปที่ 2.8 แสดงการพัฒนาตัวของ Skewed mixing layer ระหว่างเจ็ตและกระแสมขวางที่ขอบด้านข้างของเจ็ต โดยการไหลไปตามแนวแกนผ่าน Hanging vortices จะเป็นตัวนำ Vortical fluid จาก Boundary layer ที่ติดกับผนังเข้ามาทางด้านหลังของลำเจ็ตทำให้ Hanging vortices เกิดการปะทะกับ Adverse pressure gradient เป็นผลให้เกิด Breakdown ขณะเดียวกัน Vortex จะขยายขนาดและก่อตัวเป็น CVP ที่มีกำลังไม่มากและเอียงตัวตามแนวเส้นทางเคลื่อนที่ของเจ็ต

Sau et al. (2004) ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field ของเจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยม จากผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.9 พบว่ากลไกของการเกิด CVP เริ่มจาก Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวจากทางผนังด้านข้างของเจ็ต และพบว่า Kelvin-Helmholtz roller นั้นไม่ได้ก่อตัวเป็น Closed vortex ring นอกจากนี้แล้วยังพบว่า Wake vortical structure ที่ก่อตัวขึ้นทางด้าน Downstream และ Horseshoe ซึ่งก่อตัวขึ้นทางด้าน Upstream เป็นปฏิสัมพันธ์ของ Shear layer ที่พื่นกับตัวเจ็ต

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

2.2.3 การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ต และความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ต

Smith and Mungal (1998) ศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมจากการลดลงของความเข้มข้น (Scalar concentration) ตามแนวแกนเจ็ต จากผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงถึงอัตราการลดลงของความเข้มข้นไปตามเส้นทางเดินของเจ็ตเสกด้วย r^2d พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราการลดลงของความเข้มข้นที่ตำแหน่ง $s/r^2d = 0.3$ จึงเป็นนิยามเป็นจุดแบ่งเขตระหว่าง Near field และ Far field โดยกำหนดให้ $s/r^2d < 0.3$ เป็นตำแหน่ง Near Field และที่ $s/r^2d > 0.3$ เป็น Far field รูปที่ 2.11 แสดงถึงอัตราการลดลงของความเข้มข้นไปตามเส้นทางเดินของเจ็ตเสกด้วย rd พบว่าบริเวณ Near field ความเข้มข้นมีอัตราการลดลงแปรตาม $(s/rd)^{-1.3}$ ซึ่งสูงกว่ากรณีของเจ็ตอิสระที่มีการลดลงแปรตาม $(s/rd)^{-1}$ ในขณะที่บริเวณ Far field มีการลดลงแปรตาม $(s/rd)^{-2/3}$ ซึ่งบ่งชี้ว่า CVP ใน Far field นั้นไม่ทำให้การผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง (JICF) นั้นดีกว่า Free jet แต่การ Form ตัวของ CVP ที่ Near field ต่างหากที่เป็นกลไกที่สำคัญของ JICF ที่ทำให้การผสมนั้นดีกว่า Free jet

2.2.4 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง

Yuan et al. (1999) พบว่ากลไกการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางนั้นได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงของ Large coherent structure ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการเกิด Turbulent mixing ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.12 พบว่าในช่วงต้นของการผสม ($z/d < 3$) โครงสร้างของของ Spanwise roller ที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผิวสัมผัสระหว่างเจ็ตและกระแสมขวาง ทำให้เกิดการผสมในระดับ Large scale ต่อมาในบริเวณที่เจ็ตเริ่มมีการโค้งตัว และ กระแสมขวางจะดึงเข้าไปในเจ็ตอากาศ ทำให้เกิดช่องภายในเจ็ตอากาศ (Gap) ซึ่งจะทำให้เกิดการผสมในระดับ Large scale และเมื่อเจ็ตอากาศพัฒนาตัวไปจนถึงบริเวณ Vortex zone โครงสร้างของ CVP จะเป็นกลไกสำคัญของการผสม โดยกระแสมขวางจะถูกดึงเข้าไปในเจ็ตตามทิศทางการหมุนวนของ CVP

Cortelezzi and Karagozian (2001) ศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง โดยใช้เทคนิค 3D vortex element พบว่า กระแสมขวางบริสุทธิ์จาก boundary layer จะถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ต และยกตัวสูงขึ้นเข้าสู่ตัวเจ็ตทางด้านหลังผ่านคู่ CVP ดังแสดงในรูปที่ 2.13

Sau et al. (2004) ศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง พบว่า โครงสร้าง CVP จะเหนี่ยวนำให้หางของโครงสร้าง Horse-shoe vortex ที่อยู่ใน boundary layer ของกระแสมขวางยกตัวสูงขึ้นเข้าสู่ตัวเจ็ตผ่านระหว่างทางคู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 คล้ายคลึงกับกลไกการเหนี่ยวนำการผสมที่ได้จากการศึกษาของ Cortelezzi and Karagozian (2001) อนึ่งจากการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมของ Sau et al. (2004) และ Cortelezzi and Karagozian (2001) นั้นยังไม่สามารถระบุบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสม และบริเวณที่มีการผสมมากได้

อย่างไรก็ตามการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมนั้นยังไม่มีข้อสรุปที่แน่ชัดว่า กลไกการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางนั้นเป็นอย่างไร ประกอบกับการศึกษาที่ผ่านมาเป็นการศึกษาผ่านการจำลองเท่านั้น และยังขาดหลักฐานทางการทดลอง

Kornsri et al. (2009) เสนอแนวคิดเรื่อง spanwise separation-mutual blocking และ wall-separation blocking ต่อการเหนี่ยวนำการผสมดังนี้ พบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างโครงสร้าง Streamwise vertical structure (CVP) แยกออกจากกันมากในแนว spanwise (spanwise separation) จะลดการเหนี่ยวนำการผสมโดย CVP (mutual blocking) เอง ดังแสดงในรูปที่ 2.14 อย่างไรก็ตามหากเส้นทางเดินของเจ็ตที่ต่ำลง

จนใกล้พื้นเกินไป จะทำให้ระยะ wall separation ต่ำลง ส่งผลให้เกิดการขัดขวางการเหนี่ยวนำการผสมโดย wall (wall blocking effect)

2.2.5 เส้นทางเดินของเจ็ต

Margason (1968) ศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ตในกระแสมวลขวางพบว่า เส้นทางเดินของเจ็ตมีความสัมพันธ์กับระยะทางตามแนวการไหลบนบน rd สเกล ตามสมการเลขยกกำลัง

$$\frac{y}{rd} = a_T \left(\frac{x}{rd} \right)^{b_T} \quad (2.4)$$

โดยที่ a_T, b_T คือ ค่าสัมประสิทธิ์ โดยมีค่าประมาณ 1.6 และ 1/3 ตามลำดับ

Kamotani and Greber (1972) ศึกษาเส้นทางเดินของความเร็วของเจ็ต และเส้นทางเดินอุณหภูมิของเจ็ต โดยให้ความร้อนแก่เจ็ตจนมีอุณหภูมิสูงกว่ากระแสมวลขวางประมาณ 75°F และ 320°F ที่อัตราส่วนโมเมนต์ เท่ากับ 15.3 และ 59.3 ดังรูปที่ 2.16 พบว่า ที่อัตราส่วนโมเมนต์เดียวกัน เส้นทางเดินของอุณหภูมิจะมีค่าต่ำกว่าเส้นทางเดินของความเร็ว และอัตราส่วนโมเมนต์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและส่งผลต่อเส้นทางเดินของความเร็วและอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามในขณะที่อัตราส่วนความหนาแน่น จะไม่ส่งผลต่อเส้นทางเดินของความเร็วของเจ็ต แต่จะส่งผลต่อเส้นทางเดินของอุณหภูมิล็กน้อย โดยเส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตนิยามเป็นเส้นทางเดินของจุดที่มีความเร็วสูงที่สุดบนระนาบสมมาตร (Center plan) ซึ่งเขียนอยู่ในรูป rd สเกลเป็น

$$\frac{y_u}{rd} = 0.89 r^{0.3} \left(\frac{x}{rd} \right)^{0.36} \quad (2.5)$$

ในขณะที่เส้นทางเดินอุณหภูมิของเจ็ตนิยามเป็นเส้นทางเดินของจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดบนระนาบสมมาตร ซึ่งเขียนอยู่ในรูป rd สเกลเป็น

$$\frac{y_T}{rd} = 0.73 r^{0.33} \left(\frac{\rho_j}{\rho_{cf}} \right)^{0.11} \left(\frac{x}{rd} \right)^{0.29} \quad (2.6)$$

Smith and Mungal (1998) ศึกษาเส้นทางการเดินของการลดลงของ Mean passive scalar concentration โดยใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) ร่วมกับการฉีด acetone Vapor โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ตั้งแต่ 5 ถึง 25 และทำการสเกลผลของการกระจายตัวของ concentration บนระนาบด้วย d , rd และ r^2d ดังแสดงในรูปที่ 2.17 พบว่า เมื่อสเกลด้วย rd เส้นทางการเดินของ Passive scalar concentration จะ collapsed เข้าหากันมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสเกลด้วย r^2d หรือ d

Yuan and Street (1998) ศึกษาเส้นทางการเดินของเจ็ดในกระแสลมขวาง โดยใช้เทคนิคการจำลองแบบ Large-eddy Simulation (LES) ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 2 และ 3.3 โดยรูปที่ 2.18 แสดงเส้นทางการเดินของเจ็ดบนสเกล rd ด้วยกราฟ log-log พบว่า บริเวณ downstream ($x/rd > 0.8$) เส้นทางการเดินของเจ็ดจะมีแนวโน้มลู่เข้าสู่เส้นทางการเดินเดียวและเป็นเส้นตรง บ่งชี้ว่าเส้นทางการเดินของเจ็ดนี้สามารถนิยามได้เป็นสมการรูปแบบ power โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ $A = 1.2 - 1.4$, $b = 0.27 - 0.28$ ตามแต่กรณี ซึ่ง Yuan and Street (1998) เรียกบริเวณนี้ว่า power law region

Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) ศึกษาเส้นทางการเดินของจากเจ็ดจากอุณหภูมิของเจ็ด และการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบสามมาตรฐานตามการไหล (Cross plane) ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4.1 โดยศึกษาเส้นทางการเดินอุณหภูมิของเจ็ดซึ่งนิยามเหมือนกับ Kamotani and Greber (1972) และศึกษาเส้นทางการเดินของเจ็ดที่นิยามจาก Center of mass temperature พบว่า Center of mass temperature trajectory จะอยู่ต่ำกว่า Maximum center plane temperature trajectory เสมอ บ่งชี้ว่าบริเวณอุณหภูมิสูงส่วนใหญ่ของเจ็ดจะอยู่ด้านข้างของด้านล่างซึ่งต่ำกว่าบริเวณอุณหภูมิสูงบนระนาบสามมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 2.19

Limdumrongtum et al. (2007) และ Limdumrongtum et al. (2009) ศึกษาโครงสร้างการผสมและเส้นทางการเดินของเจ็ดในกระแสลมขวาง โดยใช้เทคนิค smoke fluid condensation, Mie scattering และ Laser-sheet visualization techniques โดยมีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4.1 โดยงานวิจัยนี้จะแตกต่างจากการศึกษาของ Smith and Mungal (1998) ที่ใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) โดย Passive concentration field ที่ได้จะแสดงถึงทั้งส่วนผสมและที่ไม่ผสมที่มีต่อ Stoichiometric ratio แต่งานวิจัยนี้ concentration field ที่ได้จากเทคนิคนี้จะแสดงถึงส่วนของเจ็ดที่ผสมเสร็จแล้วเท่านั้น พบว่า Center of mass reactive scalar trajectory

และ Center of mass scalar trajectory จะต่างกันเพียงเล็กน้อยที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากัน บ่งชี้ว่าการกระจายตัวของการผสมค่อนข้างจะสม่ำเสมอบนหน้าตัดของการผสมของเจ็ต

2.2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสม

Yuan et al. (1999) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางเดินของเจ็ตและการผสมด้วยการใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบ Large-eddy Simulation (LES) พบว่าบริเวณ Far field การผสมของเจ็ตจะมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับเส้นทางเดินของเจ็ต ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตกับเส้นทางเดินของเจ็ตได้ในรูปสมการ

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

โดยที่ a_E, b_E คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของสมการ

r คือ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล

นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ $a_E \approx a_T$ และ $b_E \approx b_T$ ในสมการที่ 2.4

2.3 การปรับแต่งและควบคุมเจ็ต

งานวิจัยที่ผ่านมามีความพยายามที่จะปรับแต่ง ควบคุมคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง เช่น เส้นทางเดินของเจ็ต การเหนี่ยวนำการผสม โดยจากการศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง พบว่า CVP เป็นโครงสร้างหนึ่งที่สำคัญต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยการก่อตัวของ CVP ที่บริเวณ Near field มีผลทำให้การผสมนั้นดีกว่าเจ็ตอิสระ และการก่อตัวของ CVP นั้นเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสลมขวางบริเวณรอบปากทางออกของเจ็ต ทำให้งานวิจัยต่างๆมีแนวคิดในการปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวางที่บริเวณปากทางออกเจ็ต โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ 1) การควบคุมโดยไม่ใช้พลังงานกระตุ้น (Passive control) เช่นการใช้ Vortex generator tab และ 2) การควบคุมด้วยการโดยใช้พลังงานกระตุ้น (Active Control) เช่น การกระตุ้นด้วยลำโพง (Pulse control) การกระตุ้นด้วยการหมุนควง (Swirling control) และ การกระตุ้นด้วยเจ็ตควบคุม (Jet control) เป็นต้น

2.3.1 การกระตุ้นโดยไม่ใช้พลังงาน

- การกระตุ้นด้วยการติด Tab ที่ปากทางออกของเจ็ต

Zaman and Fross (1997) ได้ศึกษาผลของ Vortex generator แบบ Tap ชนิดรูปทรงสามเหลี่ยมที่มีผลต่อ Penetration และ spreading ของเจ็ตในกระแสลมขวาง สำหรับ Momentum flux ratio ($\rho_j u_j^2 / \rho_{cf} u_{cf}^2$) เท่ากับ 21.1 และ 54.4 โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2.20 และรูปที่ 2.21 พบว่า การติด Tap ที่ตำแหน่ง Windward นั้นมีผลให้ตำแหน่ง Contour ของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบตั้งฉากของเจ็ตอยู่ต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีการติด Tap และถึงการติด Tap ที่ตำแหน่งอื่นๆ

รูปที่ 2.22 และรูปที่ 2.23 แสดง Contour ของความเร็วเฉลี่ยและ Streamwise vorticity isosurface โดยที่ Streamwise vorticity isosurface จะบอกถึงกำลัง (Strength) ของ CVP จากขนาด พบว่ากรณีการติด Tap ที่ตำแหน่ง Windward นั้นมีผลทำให้ Penetration และ Spreading น้อยลงและขนาด Streamwise vorticity isosurface จะมีขนาดเล็กลง เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ติด Tap

รูปที่ 2.24 แสดงเส้นทางการเดินของความเร็ว พบว่าการติด Tap ที่ตำแหน่ง Windward มีผลทำให้เส้นทางการเดินของความเร็วของเจ็ตบนระนาบสมมาตรต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ติด Tap

รูปที่ 2.25 แสดงการกระจายตัวของ Circulation พบว่าการติด Tap เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง Windward นั้นมีผลทำให้ Circulation น้อยลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ติด Tap

Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ได้ศึกษาผลของการติด Tab ต่อการกระจายตัวของเจ็ตร้อนสำหรับเจ็ตไม่หมุนควง (JICF) และเจ็ตหมุนควง (SJICF) ที่ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์ โดยทำการทดลองที่ Swirl ratio (Sr) เท่ากับ 0 สำหรับเจ็ตไม่หมุนควง และ 0.52 สำหรับเจ็ตหมุนควง ที่อัตราส่วนของความเร็วประสิทธิภาพคงที่เท่ากับ 4 โดยใช้ Tab รูปสามเหลี่ยมซึ่งมีขนาดพื้นที่ประมาณ 3% ของพื้นที่ปากเจ็ตโดยติดตั้งที่ขอบปากเจ็ตและเลื่อนไปโดยรอบ 8 ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 2.26

รูปที่ 2.27 แสดงผลการทดลองในกรณีเจ็ตไม่หมุนควง พบว่าโครงสร้างการไหลจะมีความไวมากที่สุดเมื่อติด Tab บริเวณตำแหน่ง Lateral จนถึง Windward โดยที่เจ็ตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างรูปไต ซึ่งมีลักษณะคล้าย CVP ไปเป็นโครงสร้างรูปจุลภาคโดย

ที่มีแกนกลางซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าและลอยอยู่บนตำแหน่งที่สูงกว่ากรณีไม่ติด Tab และยังคงรูปร่างแบบจุลภาคจนไปถึงหน้าตัดสุดท้ายของการวัด

รูปที่ 2.28 แสดงผลการทดลองในกรณีที่เจ็ทหมุนควง พบว่ามีผลคล้ายคลึงกับกรณีเจ็ทไม่หมุนควง แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อแตกต่างกัน กล่าวคือโครงสร้างการไหลของกรณีเจ็ทหมุนควงจะมีความไวที่ตำแหน่งในบริเวณที่กว้างกว่าเจ็ทไม่หมุนควง โดยบริเวณนี้คือจากตำแหน่ง Pressure leeward ไปถึงตำแหน่ง Suction เมื่อเลื่อนตำแหน่งของ Tab ไปตามทิศทางของการหมุน

ผลการศึกษาสรุปได้ว่าบริเวณที่มีความไวต่อการกระตุ้นด้วย Tab ซึ่งทำให้โครงสร้างการไหลของเจ็ทเปลี่ยนรูปร่างมากที่สุด คือตำแหน่ง Pressure windward (PW) จนไปถึง Windward (W) ทั้งเจ็ทไม่หมุนควงและเจ็ทหมุนควง ผลการศึกษาชี้แนะว่าการเกิดโครงสร้างการไหลมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับ Skewed Shear Layer ตามทิศทางการไหลของกระแสลมขวางรอบลำเจ็ทใกล้กับลำของเจ็ทที่ปากทางออก

2.3.2 กระตุ้นโดยใช้พลังงาน

- การกระตุ้นเจ็ทเป็นจังหวะ (Pulsing)

M'Closkey et al., (2002) มีความพยายามที่จะปรับเปลี่ยนรูปแบบการไหลของเจ็ท ณ ปากทางออกของเจ็ท โดยใช้ลำโพงกระตุ้นทำให้ความเร็วที่ปากทางของเจ็ทให้เปลี่ยนไปตามเวลาด้วยการกระตุ้นเจ็ทเป็นจังหวะ (Temporal pulse) ซึ่งได้มีการปรับเปลี่ยนแบบสัญญาณ ความถี่ และอุปกรณ์การควบคุม (filter) แบบที่มี Compensator และ ไม่มี Compensator พบว่าชุดควบคุมที่ประกอบด้วย Compensator มีการตอบสนองที่เที่ยงตรงมากกว่าในกรณีที่ไม่มี Compensator เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดความเร็วที่ปากทางออกด้วย Hot wire anemometer จากรูปที่ 2.29 พบว่ากรณีที่กระตุ้นด้วยสัญญาณรูปร่างสี่เหลี่ยม และมี Compensator ที่สัดส่วนการเกิด Vortex shedding ($1/5$, $1/4$, $1/3$ และ $1/2$) นั้นจะสามารถพุ่งทะลุ (Penetration) เข้าไปในกระแสลมขวางได้เหมาะสมที่สุด ซึ่งตรงกับค่าของสัญญาณอยู่ในช่วงระหว่าง 2.7-3.0 มิลลิวินาที

- การกระตุ้นด้วยเจ็ตหมุนควง (Swirling)

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

Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) ศึกษาผลกระทบของความเร็วในการหมุนควงซึ่งแสดงโดยค่า Swirl ratio (Sr) ที่มีต่อคุณลักษณะของอุณหภูมิจากการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสน้ำขวาง โดยทำการทดลองที่ค่า Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 จนถึง 0.82 ที่อัตราส่วนของความเร็วประสิทธิผลคงที่ 4.1 ในช่วง $x/rd = 0.25 - 2$ ซึ่งอยู่ระหว่าง Near field กับ Far field โดยใช้ท่อหมุนในการทำให้เกิดการหมุนควงเป็นผลให้ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์ ยิ่งไปกว่านั้น รูปที่ 2.30 แสดงถึงการกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวมบนระนาบตั้งฉาก พบว่าการหมุนควงของเจ็ตจะส่งผลทำให้อุณหภูมิและเกรเดียนต์ของอุณหภูมิต่ำบริเวณด้าน Suction ในขณะที่จะส่งผลทำให้มีอุณหภูมิและเกรเดียนต์ของอุณหภูมิต่ำบริเวณด้าน Pressure เมื่อเปรียบเทียบกับไม่มีการหมุนควง รวมถึงการหมุนควงยังทำให้โครงสร้างการไหลมีความไม่สมมาตรอีกด้วย อย่างไรก็ตามจากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการหมุนควงนั้นมีอิทธิพลต่อพารามิเตอร์เช่น เส้นทางการเดินและ decay ของเจ็ตในกระแสน้ำขวางน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนของความเร็วประสิทธิผล

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

Yingjaroen et al. (2006) ศึกษาการวิวัฒนาการของเจ็ตในกระแสน้ำขวางกรณีเจ็ตหมุนควงที่ความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสรอบปากเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์และกรณีเจ็ตไม่หมุนควง โดยใช้ปฏิกิริยา กรด-เบส แสดงถึง Reactive mixing และฉีดสีแสดงถึง Passive mixing

โดยจะทดลองที่ค่า Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.8 ที่อัตราส่วนของความเร็วประสิทธิผลคงที่ 4 ซึ่งในการศึกษาจะใช้ Contours of line-of-sight integrated mean images แทนปริมาณเชิงคุณภาพของการผสม โดยรูปที่ 2.31 แสดงถึง Contours of line-of-sight integrated mean images พบว่ากรณีเจ็ดไม่หมุนควงบริเวณตำแหน่ง $x/rd < 0.5$ Passive outer region mixing จะมีการผสมบริเวณนี้มาก และเมื่อตำแหน่งระยะการไหลมากขึ้น พบว่าการผสมบริเวณ Passive outer region mixing จะมีการผสมน้อยลง ในขณะที่ Central-region mixing จะมีอิทธิพลต่อการผสมมากขึ้น และ Reactive inner region mixing จะมีการผสมเพียงเล็กน้อยในบริเวณนี้ กรณีเจ็ดหมุนควงพบว่าบริเวณ Outer และ Inner regions จะมีการผสมบริเวณนี้มาก ในขณะที่ Central-region mixing ไม่มีนัยสำคัญต่อการผสม

Limdumrongtum et al. (2009) ศึกษาโครงสร้างการเหนี่ยวนำการผสม Mixing Structure ในบริเวณ Near field โดยศึกษาโครงสร้างของ Instantaneous และ Mean flow ของเจ็ดในกระแสลมขวาง โดยใช้เทคนิคผลรวมของ Smoke fluid condensation, Mie scattering และ Laser-sheet visualization techniques ในการศึกษา โดยทำการทดลองที่ค่า Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.8 ที่อัตราส่วนของความเร็วประสิทธิผลคงที่ 4 จากรูปที่ 2.32 แสดงถึง Instantaneous image ของ mixing structure บนด้าน Top view ที่บริเวณ $y/rd < 0.2$ พบว่า Swirl จะไปพัฒนาและส่งเสริมการเกิด Cascading azimuthal K-H mixing structures บนด้าน Pressures ขณะที่จะไปยับยั้งบนด้าน Suction และที่บริเวณ $y/rd > 0.2$ จะไปพัฒนาและส่งเสริมการเกิด Vortical roll-ups บนด้าน Pressures ขณะที่จะไปยับยั้งบนด้าน Suction สำหรับการพัฒนาตัวของ Vortical roll-ups บนด้าน Pressures เกิดจากพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่องจาก Cascading azimuthal K-H mixing structures จาก Upstream ในขณะที่ Vortical roll-ups บนด้าน Suction จะเกิดจากพัฒนาและขยายตัวอย่างต่อเนื่องจาก Lee side cusp

Denev et al. (2005) ศึกษาโครงสร้างและการผสมของเจ็ดหมุนควงในกระแสลมขวาง โดยศึกษาที่ Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.6 แลใช้วิธี LES ศึกษาสนามการไหล พบว่า การไหลและสนามความเข้มข้นของเจ็ดจะบิดเบี้ยวไป และพบ High concentration ทางด้าน Suction เมื่อมีการหมุนควง ดังในรูปที่ 2.33 และรูปที่ 2.34 จากการศึกษาชี้แนะว่าการหมุนควงนั้นไม่ได้ช่วยให้การผสมดีขึ้นหรือมีผลน้อยมากต่อการผสม

- การกระตุ้นด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jets)

Kornsri et al. (2009) ศึกษาการผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมวลขวางโดยศึกษาผลของพารามิเตอร์ของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง ดังแสดงในรูปที่ 2.35 คือ 1) ตำแหน่งเชิงมุมตามแนวรัศมี (θ) 2) อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) โดยใช้ Single sensor hot film anemometer เป็นเครื่องมือวัดความเร็ว โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 3.9 และ r_m อยู่ระหว่าง 1.8% ถึง 2.3% พบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม $\theta = \pm 15^\circ$ (กรณี I15) นั้นจะให้เส้นทางเดินต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมหรือฉีดเจ็ตควบคุมกรณีอื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.36

รูปที่ 2.37 แสดง Penetration ของเส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ สำหรับการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\theta = \pm 15^\circ$ พบว่าการ Penetration ของเส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตจะแปรผกผันกับอัตราส่วนเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก Kornsri et al.(2009) เลือกสภาวะที่เหมาะสมต่อการควบคุมคือ $\theta = \pm 15^\circ$ และ $r_m = 2\%$

รูปที่ 2.38 แสดงการกระจายของความเร็วเฉลี่ยไร้มิติ พบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\theta = \pm 15^\circ$ ที่ $r_m = 2\%$ จะทำให้เจ็ตมี Streamwise vortical pair ห่างจากกันตามแนว Spanwise มากขึ้น และจะยับยั้งการเกิด Windward jet shear layer ในขณะที่ระยะพุ่งทะลุของเจ็ตเทียบกับพื้นด้านล่าง (Wall separation) จะน้อยลง (เจ็ตต่ำลง)

Witayaprapakorn (2013) ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างและการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลขวาง และสามารถประเมินอัตราการเหนี่ยวนำการผสมได้โดยตรงโดยใช้ SPIV ในการวัดสนามความประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้นไม่ใส่ในกระแสมวลขวาง ดังแสดงในรูปที่ 2.39 โดยทำการทดลองทำที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 3.9 สำหรับการทดลองสองกรณีคือ กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\theta = \pm 15^\circ$ (I15) และ $\pm 135^\circ$ (I135) ที่อัตราส่วนเชิงมวลเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก (r_m) เท่ากับ 2% ผลของเจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสม กรณี I15 พบว่าส่งผลให้เจ็ตมีการเหนี่ยวนำการผสมใกล้เคียงกับกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ และ 0.75 แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปที่ตำแหน่ง $x/rd = 1$ และ 1.5 พบว่าจะมีการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นจากกรณี JICF ประมาณ 5% ในขณะที่กรณี I135 จะทำให้เจ็ตมีการเหนี่ยวนำการเพิ่มขึ้นตลอด

ช่วงตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ ถึง 1.5 และมีการเหนี่ยวนำการผสมมากที่สุดที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.75$ ดังแสดงในรูปที่ 2.40

Chaikasetsin et al. (2015) ศึกษาผลของอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อโครงสร้างและอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ดในกระแสมวล โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4.1 ในกรณีที่ไม่มีการควบคุม (JICF) และกรณีที่มีการควบคุมด้วยการฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง $\theta = \pm 135^\circ$ ที่ r_m เท่ากับ 2% และ 4% ตามลำดับ โดยใช้ SPIV และการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ดเท่านั้นเหมือนกับในงานวิจัยของ Witayaprapakorn (2013) พบว่า เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่มุม $\theta = \pm 135^\circ$, $r_m = 2\%$ นั้นจะทำให้การเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่กรณี $r_m = 4\%$ จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และสามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมได้มากที่สุดถึง 61% ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ฉีดเจ็ดควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2.41

Soupramongkol (2015) ศึกษาผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างและอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมวล โดยทำการทดลองที่ r เท่ากับ 8 ในกรณีที่ไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง $\theta = \pm 15^\circ$ (I15) และ $\pm 135^\circ$ (I135) ที่ $r_m = 4\%$ พบว่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมสำหรับกรณี I15 จะมีค่าลดต่ำกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมด้วย และค่าประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุมจะมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ในขณะที่เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I135 จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มสูงขึ้นกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม และมีค่าประสิทธิผลการใช้เจ็ดควบคุมมากที่สุดเท่ากับ 1.16 ที่ $x/rd = 1.5$ อีกในความหมายคือสามารถเพิ่มอัตราการเหนี่ยวนำการผสมมากขึ้นกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม 16% ดังแสดงในรูปที่ 2.42

Wangkiat et al. (2015) ศึกษาผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างและการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมวล โดยทำการทดลองที่ r เท่ากับ 12 โดยทำการทดลอง สองกรณีคือ กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ I15, I45, I75, I105, I135 และ I165 ที่อัตราส่วนเชิงมวลเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ดหลักคงที่เท่ากับ 4 % พบว่ากรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่มุม windward side (I15–I75) ทำให้ค่าการเหนี่ยวนำการผสมต่ำกว่า กรณี JICF แต่กรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่มุม leeward side (I105–I165) ทำให้ค่าการเหนี่ยวนำการผสมสูงกว่า กรณี JICF และค่าการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นตลอดช่วงตำแหน่งมุมฉีด I15 ถึง I165 ดังที่แสดงในรูปที่ 2.43

บทที่ 3

หลักการและเทคนิคในการประเมินวัตต์อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม และการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหล

การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ต คือ ความสามารถของเจ็ตในการดึงของไหลรอบข้างเข้ามาผสมในตัวเจ็ตเอง โดยการเหนี่ยวนำการผสมนั้นเป็นหลักการของอุปกรณ์ต่างๆมากมาย เช่น การผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศในห้องเผาไหม้ และการกระจายตัวของควันทิ้งออกจากปล่องควันทิ้ง ทำให้การเหนี่ยวนำการผสมจึงเป็นปริมาณที่มีความสำคัญในงานประยุกต์เหล่านี้

3.1 ปัญหาการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง

การประเมินวัดการเหนี่ยวนำการผสม จะประเมินวัดจากค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ซึ่งนิยามเป็น

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

โดย E คือ ค่าเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อเฉลี่ยเทียบกับเวลา

$Q_j(x)$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตที่ผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x เฉลี่ยเทียบกับเวลา โดย $Q_j(x)$ สามารถหาได้จาก

$$Q_j(x) = \frac{1}{T} \int_0^T Q_j(x, t) dt \quad (3.2)$$

เมื่อ

$$Q_j(x, t) = \int_{A_j(x, t)} V_x(\bar{x}, t) dA \quad (3.3)$$

โดย $Q_j(x, t)$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x ณ เวลา t ใดๆ

$V_x(\bar{x}, t)$ คือ ความเร็วของของไหลใดๆตามแนวแกน x ที่จุด \bar{x} ณ เวลา t ใดๆ

$A_j(x, t)$ คือ ขอบเขตของเจ็ตบนระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x ณ เวลา t ใดๆ

อย่างไรก็ตามการศึกษ้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตในกระแสลมขวางนั้นมีความลำบากในการระบุค่าการเหนี่ยวนำการผสม เนื่องจากปัญหาซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเด็นหลัก คือ

- 1) ปัญหาในการวัดความเร็วของเจ็ตในกระแสลมขวางซึ่งความเร็วเจ็ตมีหลายแกน (มิติ) บนระนาบตัดขวางการไหลหลายๆ จุดพร้อมกัน และ
- 2) ปัญหาในการระบุพื้นที่หน้าตัดของเจ็ตออกจากกระแสลมขวางให้ชัดเจน

จากปัญหาดังกล่าวทำให้งานวิจัยอดีตเลือกที่จะศึกษาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (E) โดยอ้อมผ่านทางปริมาณต่างๆ ที่มีคุณลักษณะเชื่อมโยงกับการเหนี่ยวนำการผสม เช่น Spread rate และ Decay rate ของความเร็วเฉลี่ยและปริมาณความเข้มข้น (Scalar concentration) ซึ่งศึกษาได้โดยสะดวกกว่าการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตโดยตรง อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวไม่สามารถประเมินวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมได้โดยตรง

จนกระทั่งมีการพัฒนาเครื่องมือที่สามารถแก้ปัญหามาในประเด็นที่หนึ่ง คือ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ซึ่งสามารถวัดความเร็วสนามการไหลได้ทั้ง 3 แกน ทั้ง V_x , V_y และ V_z ณ ใดๆ พร้อมกันหลายจุดบนระนาบ ส่วนประเด็นที่สองนั้นยังคงเป็นปัญหาอยู่เนื่องจากการใช้ SPIV ในงานวิจัยทั่วไปนั้นจะมีการใส่อนุภาคติดตามการไหลในทั้งของไหลส่วนที่เป็นเจ็ตและกระแสลมขวาง ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือ สามารถแสดงสนามความเร็วได้อย่างต่อเนื่องจากบริเวณเจ็ตสู่บริเวณที่เป็นกระแสลมขวางดังแสดงในรูปที่ 3.1 แต่ข้อเสียคือ ไม่สามารถแยกแยะบริเวณที่เป็นส่วนผสมของเจ็ตออกจากกระแสลมขวางได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ในงานวิจัยในอดีตยังใช้ข้อมูลเริ่มต้นในการวิเคราะห์เป็นปริมาณเฉลี่ย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดขอบเขตของเจ็ตจากปริมาณอื่นขึ้นมาอย่างไม่มีการหลักเกณฑ์ที่ชัดเจน (Arbitrariness) จึงนำมาสู่เทคนิคในงานวิจัยนี้ คือ การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง

ด้วยเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวางนี้ ประกอบกับการใช้ SPIV ถ่ายภาพและประมวลผลจะได้ว่าบริเวณที่พบอนุภาคติดตามการไหลความเร็วจะไม่เท่ากับศูนย์ ($\vec{V} \neq \vec{0}$) ซึ่งแสดงถึงบริเวณที่เป็นส่วนผสมของเจ็ต ขณะที่บริเวณที่ไม่พบอนุภาคติดตามการไหล ความเร็วจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\vec{V} = \vec{0}$) ซึ่งแสดงถึงบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ทำให้สามารถระบุบริเวณที่เป็นเจ็ตและขอบเขตของเจ็ต ณ เวลาใดๆ ได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงทำให้สามารถวัดสนามความเร็วบริเวณที่มีเจ็ตเป็นส่วนผสมได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยในการทดลองนี้จะใส่อนุภาคติดตาม เป็นสารละลายกริเซอร์ลินที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

3.2 การประเมินอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร และประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสม

3.2.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E)

การเหนี่ยวนำผสมของเจ็ตในกระแสมวลขวาง คือ การที่เจ็ตเหนี่ยวนำกระแสมวลขวางบริสุทธิ์เข้ามาผสม โดยประเมินวัดจากค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรซึ่งนิยามเป็น

$$E = \frac{Q_j(x)}{Q_o + Q_{cj}} \quad (3.4)$$

โดย E คือ ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเฉลี่ยเทียบกับเวลา
 $Q_j(x)$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x เฉลี่ยเทียบกับเวลานิยามโดยสมการที่ 3.2
 Q_o คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตหลัก
 Q_{cj} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตควบคุม

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตบนระนาบต่างๆ เฉลี่ยเทียบกับเวลา

ในการวัดค่าสนามความเร็ว ณ ใดๆ โดยเครื่อง SPIV ประกอบกับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลในส่วนของเจ็ตเท่านั้น แต่จะไม่ใส่ในกระแสมวลขวาง ทำให้สนามความเร็วที่วัดได้จะเป็นบริเวณที่เป็นเจ็ต ซึ่งก็คือบริเวณที่พบอนุภาคติดตามอยู่นั่นเอง ส่วนบริเวณที่ไม่พบอนุภาคติดตามการไหล คือ ส่วนของกระแสมวลขวาง สนามความเร็วก็จะมีค่าเป็นศูนย์ดังแสดงได้จากสมการ

$$V_j(\bar{x}, t) = V_{SPIV}(\bar{x}, t) = \begin{cases} V(\bar{x}, t) ; \bar{x} \text{ is in the jet region} \\ 0 ; \bar{x} \text{ is in the crossflow region} \end{cases} \quad (3.5)$$

เมื่ออินทิเกรตความเร็วในแนวแกน x ของของไหลทั้งหมดบนเฉพาะพื้นที่หน้าตัดของเจ็ตดังแสดงในสมการ 3.3 จะได้อัตราการไหล ณ ใดๆ ซึ่งมีค่าเท่ากับการอินทิเกรตความเร็วเฉพาะของไหลส่วนที่เป็นเจ็ตบนพื้นที่หน้าตัดของทั้งหมด ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการ

$$Q_j(x,t) = \int_{A_j(x,t)} V_x(\vec{x},t)dA = \int_{A(x)} V_{j,x}(\vec{x},t)dA \quad (3.6)$$

โดย	$A_j(x,t)$	คือ ขอบเขตของเจ็ตบนระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x ณ เวลา t
	A	คือ บริเวณทั้งหมดของภาพที่ครอบคลุมเจ็ตที่ทุกเวลา
	$V_{j,x}(\vec{x},t)$	คือ สนามความเร็วตามแนวแกน x ของส่วนผสมของเจ็ต
	$V_x(\vec{x},t)$	คือ สนามความเร็วตามแนวแกน x ทั้งหมดไม่แยกแยะว่าเป็นส่วนผสมของเจ็ตหรือกระแสลมขวาง

เมื่อนำอัตราการไหลมาเฉลี่ยเทียบกับเวลาจะได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned} Q_j(x) &= \frac{1}{T} \int_0^T Q_j(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \left(\int_A V_{j,x}(\vec{x},t) dA \right) dt \\ &= \int_A \left(\frac{1}{T} \int_0^T V_{j,x}(\vec{x},t) dt \right) dA \\ &= \int_{A(x)} V_{j,x}(\vec{x}) dA \end{aligned} \quad (3.7)$$

เมื่อได้สนามความเร็ว จะพบว่าได้สนามความเร็วเป็นเมตริกขนาดจำกัด (finite) ทำให้สามารถแปลงสมการที่ 3.5 ให้อยู่ในรูปของผลรวมได้ดังนี้

$$Q_j(x) = \int_A V_{j,x}(\vec{x}) dA = \sum_{mm} (\bar{V}_{j,x,mm} \Delta A) \quad (3.8)$$

โดย	$\bar{V}_{j,x,mm}$	คือ ความเร็วเจ็ตเฉลี่ยเทียบเวลาในแนวแกน x ที่แต่ละอิลิเมนต์ที่ตำแหน่ง (m,k) บนเมตริกของสนามความเร็วของเจ็ต
	ΔA	คือ พื้นที่ของแต่ละอิลิเมนต์ที่ตำแหน่ง (i,j) ซึ่งมีค่าเท่ากันหมดทุกอิลิเมนต์เนื่องจากทั้งภาพมี spatial resolution ที่เท่ากัน

3.2.2 ค่าประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสม (η)

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ต ค่าประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสมจึงถูกนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางกรณีเจ็ตมีการ

ควบคุม (cJICF) และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวางกรณีเจ็ดไม่มีการควบคุม(JICF)

$$\eta = \frac{E_{cJICF}}{E_{JICF}} \quad (3.9)$$

เมื่อ E_{cJICF} คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมกรณีมีการฉีดเจ็ดควบคุม
 E_{JICF} คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมกรณีไม่มีการฉีดเจ็ดควบคุม.

3.3 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ดในกระแสมขวาง

3.3.1 ปัญหาของการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ดในกระแสมขวาง

การศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวางที่ผ่านมาส่วนใหญ่ศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมจากแบบจำลอง (simulation) Yuan and Street (1998) และ Yuan et al. (1999) ศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมโดยใช้การ simulation พบว่าเจ็ดในกระแสมขวางมีกลไกการเหนี่ยวนำการผสมเกิดขึ้นที่ด้านหน้าของเจ็ดที่เจ็ดเลี้ยวเบนเข้าสู่กระแสมขวางโดยโครงสร้าง spanwise rollers Cortelezzi and Karagozian (2001) และ Sau et al. (2004) ศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมโดยใช้การ simulation และความเห็นสอดคล้องกันว่ามีกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวางเกิดขึ้นที่ด้านหลังของเจ็ดระหว่างคู่ของโครงสร้าง CVP

อย่างไรก็ตามยังไม่มีข้อสรุปที่แน่ชัดว่ากลไกการเหนี่ยวนำการผสมเป็นอย่างไร และกลไกใดเป็นกลไกการเหนี่ยวนำการผสมหลักของเจ็ดในกระแสมขวาง ยิ่งไปกว่านั้นผลการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมส่วนมากจะศึกษาจากแบบจำลองเท่านั้น หลักฐานทางการทดลองยังมีอยู่น้อยมาก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวางโดยตรงจากผลการทดลองโดยมีหลักการและทฤษฎีในการศึกษาดังต่อไปนี้

3.3.2 การวัดความเร็วของสนามการไหลโดยใช้ SPIV และเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสลมขวาง

เพื่อที่จะศึกษาโครงสร้างของเจ็ตและกระแสลมขวาง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสลมขวาง ซึ่งจะนำไปสู่ผลการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบตัดขวางการไหล ในงานวิจัยนี้ใช้ SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหล 2 ลักษณะ คือ

- 1) การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้นซึ่งทำให้สามารถระบุตำแหน่ง ขอบเขต ความเร็ว และโครงสร้างของเจ็ต (Jet-fluid mixture) ณ เวลาใดๆได้ซึ่งกล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.2 และ
- 2) การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสลมขวางซึ่งทำให้สามารถระบุความเร็วสนามได้ และจากการวิเคราะห์ข้อมูลจากทั้งสองเทคนิค จะทำให้สามารถประมาณหาความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ได้ จึงสามารถศึกษาโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง และการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์โดยเจ็ต นำไปสู่การศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางได้

อนึ่งเพื่อให้สามารถศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของกระแสลมขวางบริสุทธิ์นั้น ซึ่งจะนำไปสู่การศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง การเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์โดยเจ็ต และกลไกการเหนี่ยวนำการผสม จะไม่สามารถหาได้จากการใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนกระแสลมขวางเท่านั้น เนื่องจากเมื่อกระแสลมขวางบริสุทธิ์ถูกเจ็ตเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมจนกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตแล้ว จะทำให้ไม่สามารถแยกแยะบริเวณ และสนามความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ออกจากส่วนผสมของเจ็ตได้ (แต่จะได้สนามความเร็วของเจ็ตบริสุทธิ์) ทำให้เทคนิคดังกล่าวไม่สามารถได้ข้อมูลทั้งในส่วนโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ต ของส่วนผสมของเจ็ต และของกระแสลมขวางบริสุทธิ์

ในทางตรงกันข้ามถ้าต้องการศึกษาโครงสร้างของเจ็ตเจ็ตที่ยังไม่มีการผสมกับกระแสลมขวางบริสุทธิ์เลย (เจ็ตบริสุทธิ์) จะต้องใช้เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนกระแสลมขวาง ไม่ใส่ในเจ็ต โดยเทคนิคต่างๆดังต่อไปนี้

- (A) เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง จะได้โครงสร้างและความเร็วของเจ็ต

- (B) เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสลมขวาง จะได้
สนามความเร็วของของไหลใดๆ (เจ็ตหรือกระแสลมขวาง)
- (C) = (B) – (A) จะได้สนามความเร็ว และโครงสร้างของกระแสลมขวางบริสุทธิ์
- (D) เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของกระแสลมขวาง ไม่
ใส่ในเจ็ต จะได้โครงสร้างและความเร็วของส่วนผสมของกระแสลมขวาง
- (E) = (B) – (D) จะได้โครงสร้างและความเร็วของเจ็ตบริสุทธิ์

อนึ่งเนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะศึกษาหาสนามความเร็วของกระแสลมขวาง
บริสุทธิ์ที่ถูกเหนี่ยวนำโดยเจ็ตจึงเลือกใช้วิธี (C) = (B) – (A) แทนที่จะเลือกใช้ (E) = (B) – (D)

3.3.3 การนิยามกระแสลมขวางบริสุทธิ์ เพื่อศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตใน กระแสลมขวาง

เพื่อที่จะศึกษาโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและกระแสลมขวาง
โดยแสดงถึงการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์โดยเจ็ต ซึ่งจะนำไปสู่ผลการศึกษากลไกการ
เหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบตัดขวางการไหล จำเป็นจะวิเคราะห์
ข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้ง 2 แบบประกอบกันดังกล่าวไปใน
3.3.2 คือเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น(1) ร่วมกับ
เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสลมขวาง(2) แต่เนื่องจาก
ข้อจำกัดในการทดลองของงานวิจัยนี้ ทำให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลการปล่อยอนุภาคติดตาม
การไหลทั้ง 2 เทคนิคได้ในเวลาเดียวกัน จึงจำเป็นต้องเก็บข้อมูลในเวลาที่แตกต่างกัน หรือ
คนละ *realizations* ดังนั้นในงานวิจัยนี้ประเมินวัดผลการทดลองของเทคนิคการใส่อนุภาค
แต่ละแบบ หรือ แต่ละ *realization* ดังนี้

- (A) เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลม
ขวาง นิยามด้วย realization ω : จะได้ความเร็วของเจ็ต $V_{j,\omega}$
- (B) เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตและในกระแสลมขวาง นิยาม
ด้วย realization ω' : จะได้ความเร็วของของไหลใดๆ $V_{\omega'}$

โดยสำหรับทุกๆ realization $V_{\omega'}$ จะประกอบด้วยความเร็วของเจ็ต $V_{j,\omega'}$ และ
ความเร็วของกระแสลมขวาง $V_{cf,\omega'}$ ดังนี้

$$V_{\omega'} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_{n,\omega'} = \frac{1}{N} \left[\sum_{n_j=1}^{N_j} V_{j,n_j,\omega'} + \sum_{n_{cf}=1}^{N_{cf}} V_{cf,n_{cf},\omega'} \right] \quad (3.10)$$

$$= V_{j,\omega'} + V_{cf,\omega'}$$

$$N = N_j + N_{cf} \quad (3.11)$$

โดย n_j และ N_j คือ ดัชนีและระยะเวลาหรือจำนวน Snapshots ที่พบเจ็ตทั้งหมด
 n_{cf} และ N_{cf} คือ ดัชนีและระยะเวลาหรือจำนวนครั้งที่พบกระแสลมขวางทั้งหมด
 เมื่อลบความเร็วของเจ็ตที่ realization ω ออกจากความเร็วของของไหลใดๆที่ realization ω' จะได้

$$V_{\omega'} - V_{j,\omega} = V_{cf,\omega'} + (V_{j,\omega'} - V_{j,\omega}) \quad (3.12)$$

โดยถ้าเจ็ตในกระแสลมขวางมีการไหลโดยเฉลี่ยคงตัว (Steady-in-mean) ประกอบกับ
 ช่วงเวลาในการทดลองที่นานพอเพียง จะประมาณได้ว่า $V_{j,\omega'} \approx V_{j,\omega}$ จึงทำให้สามารถ
 ประมาณความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ได้จากสมการ

$$V_{cf,\omega'} \approx V_{\omega'} - V_{j,\omega} \quad (3.13)$$

เมื่อเราสามารถประเมินหาสนามความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ได้แล้ว จึงจะ
 สามารถการศึกษาโครงสร้าง และปฏิสัมพันธ์ของเจ็ตและกระแสลมขวาง การเหนี่ยวนำ
 กระแสลมขวางบริสุทธิ์โดยเจ็ต ซึ่งนำไปสู่การศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตใน
 กระแสลมขวางได้

บทที่ 4

ชุดการทดลองและการทดลอง

4.1 ชุดการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1 ภาพรวมของชุดทดลองในรูปแบบแผนภาพ schematic แสดงในรูปที่ 4.2 และในรูปแบบภาพถ่ายแสดงในรูปที่ 4.3 โดยชุดทดลองนั้นประกอบไปด้วย อุโมงค์ลมซึ่งมีพัดลมหอยโข่งที่ทำหน้าที่สร้างกระแสลมขวาง ชุดเจ็ทหลักซึ่งมีพัดลมหอยโข่งที่ทำหน้าที่สร้างเจ็ท ชุดเจ็ทควบคุมที่มีหัวของเจ็ทควบคุมตามแนวเส้นรอบวงและมีคอมเพรสเซอร์ที่ทำหน้าที่สร้างเจ็ทควบคุม และอุปกรณ์วัดความเร็ว SPIV โดยภาพรวมของการทดลองจะเป็นดังนี้ กระแสลมขวางจะถูกสร้างขึ้นจากพัดลมหอยโข่งของอุโมงค์ลม และจะไหลผ่านอุโมงค์ลมไปเจอกับเจ็ทซึ่งถูกสร้างขึ้นจากพัดลมหอยโข่งของเจ็ท ที่บริเวณส่วนทดลอง (test section) ในกรณีที่มีการฉีดเจ็ทควบคุม เจ็ทควบคุมจะถูกยิงออกมาในลำกระแสของเจ็ทก่อนที่เจ็ทจะออกมาปะทะกับกระแสลมขวาง เมื่อเจ็ทเจอกับกระแสลมขวางแล้วจะใช้อุปกรณ์ SPIV ในการถ่ายภาพเจ็ทที่หน้าตัดใดๆ แล้วนำไปผ่านการคำนวณในโปรแกรมต่างๆ ต่อไปเพื่อหาสนามความเร็ว ณ ระนาบตัดขวางใดๆ ในบทนี้จะอธิบายถึง พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง ส่วนประกอบหลักของชุดทดลอง การวัดและเครื่องมือวัดต่างๆ ในการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จริง เช่น การวัดสถานะเริ่มต้นของเจ็ทที่ปากทางออกของเจ็ท

4.1.1 อุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมมีหน้าที่สร้างกระแสลมขวางในหน้าตัดของการทดลอง ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ 6 ส่วน คือ พัดลมแบบหอยโข่ง (centrifugal blower), ท่ออ่อน (flexible duct), ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (diffuser), ห้องจัดปรับการไหล (setting chamber), ส่วนลดพื้นที่หน้าตัด (contraction) และบริเวณทดสอบ (test section)

การทำงานของอุโมงค์ลมจะเริ่มจากการดูดอากาศในห้องผ่านพัดลมหอยโข่งแบบ backward curve airfoil blades ขนาด 15 kW ซึ่งมีขนาดทางออก $76 \times 76 \text{ cm}^2$ ดังรูปที่ 4.5 สามารถควบคุมอัตราการไหลของกระแสลมขวางได้โดยการควบคุมความเร็วรอบด้วยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (ABBTM model ACS401002032, ขนาด 50 Hz, ค่าความ

ละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz) ดังรูปที่ 4.5 ต่อมากระแสลมขวางที่ควบคุมอัตราการไหลแล้วจะไหลผ่านท่ออ่อนเพื่อลดแรงสั่นสะเทือน (flexible duct) และผ่านไปที่ย่านขยายพื้นที่หน้าตัด (diffuser) ซึ่งมีขนาดทางเข้าเท่ากับ $78 \times 78 \text{ cm}^2$ ขนาดทางออก $100 \times 100 \text{ cm}^2$ ยาว 74 cm โดยที่ภายในส่วนขยายพื้นที่หน้าตัดประกอบไปด้วยแผ่นเหล็กเจาะรู (perforated plate) จำนวน 4 แผ่น โดยแต่ละแผ่นมีระยะห่างจากด้านเข้าเท่ากับ 15, 30, 45 และ 60 cm ตามลำดับ เพื่อลดความรวดเร็ว เนื่องจากถ้ากระแสลมขวางผ่านห้องจัดปรับการไหล (setting chamber) ที่มี screen ติดตั้งอยู่ภายในด้วยอัตราการไหลสูงจะเกิดความสูญเสียมาก และเมื่อกระแสลมขวางผ่านเข้าห้องจัดปรับการไหล ขนาด $100 \times 100 \text{ cm}^2$ ยาว 125 cm ภายในประกอบด้วยตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh x SWG เท่ากับ $4 \times 24 \text{ cm}^2$ ที่ทางเข้าจนถึงชุดปรับทิศทางการไหล (honeycomb) ที่ทำจากท่อ PVC ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 15 mm หนา 1 mm ยาว 120 mm วางเรียงอยู่เต็มหน้าตัดการไหล ถัดจาก honeycomb จะมีตาข่ายอลูมิเนียม (มุ้งลวด) ขนาด (Mesh) x SWG เท่ากับ $(16 \times 18) \times 31$ จำนวน 7 แผ่น โดยแต่ละแผ่นวางห่างกัน 12.6 cm เพื่อปรับทิศทางการไหลให้มีความสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด ต่อจากนั้นกระแสลมขวางจะไหลผ่านส่วนลดพื้นที่หน้าตัด (Contraction) ซึ่งมีอัตราส่วน 4:1 โดยมีรูปร่างเส้นโค้งของส่วนลดพื้นที่หน้าตัดได้ออกแบบตามสมการ polynomial ดีกรี 4 มีจุดเปลี่ยนความโค้งที่ระยะ $2/3$ เท่าวัดจากปากทางออกของความยาว 170 cm เพื่อให้กระแสลมขวางมีความเร็วเพิ่มขึ้นจนมีความเร็วที่ต้องการในการทดสอบ และกระแสลมขวางจะผ่านไปที่ย่านทดลอง (test section) ซึ่งมีหน้าตัดขนาด $50 \times 50 \text{ cm}^2$ ยาว 240 cm ทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 15 mm โดยบริเวณผนังด้านข้างของส่วนทดลองสามารถเปิดปิดได้แบบหน้าต่างบานพับ และสำหรับชุดเจ็ตจะต่อเข้าทางผนังด้านล่างของส่วนทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลาง โดยจุดศูนย์กลางของเจ็ตห่างจากปลาย Contraction เท่ากับ 50 cm ขอบด้านท้ายของบริเวณทดสอบเท่ากับ 190 cm ดังรูปที่ 4.6

4.1.2 ชุดหัวเจ็ตหลัก (Main jet)

รูปที่ 4.7 แสดงส่วนประกอบชุดเจ็ตหลักซึ่งทำหน้าที่เจ็ตออกมาตั้งฉากกับกระแสลมขวางมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12.57 mm ซึ่งทำงานโดยใช้พัดลมความดันขนาด 10 แรงม้า (ElpromTM) จะดูดอากาศภายในห้อง สามารถควบคุมอัตราการไหลของเจ็ตหลักโดยการควบคุมความเร็วรอบด้วยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (ABBTM model ACS401002032, ขนาด 50 Hz, ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz) จากนั้นอากาศจะถูกส่งผ่านระบบท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 inch ยาว 367 cm โดยมี Six-Jet

Atomizer (TSITM model 9306A) จำนวน 1 ตัว เพื่อฉีดอนุภาค Glycerol solution ความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร จากนั้นท่อจะลดขนาดเป็น 2 inch และ 1 inch ตามลำดับ ซึ่งท่อขนาด 2 inch ยาว 15 cm และ 1 inch ยาว 42 cm จากนั้นจะผ่านท่อ stainless steel ขนาด 5/8 inch ยาว 97 cm ที่ต่อตั้งฉากกันแล้วไหลไปที่หัวเจ็ต โดยก่อนปากทางออกของเจ็ตจะมีความยาวเท่ากับ 77d เพื่อให้การไหลของเจ็ตเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในท่อที่พัฒนาตัวเต็มที่ (Fully-developed turbulent pipe flow) ก่อนที่จะไหลไปถึงปากทางออก

4.1.3 ชุดหัวเจ็ตควบคุม (Azimuthal control jet)

เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (azimuthal control jet) คือการฉีดอากาศผ่านรูเล็ก ๆ ตามแนวรัศมีในทิศทางตั้งฉากกับเจ็ตหลัก อ้างอิงตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมโดยกำหนดให้การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง 0 องศา อยู่ที่ด้าน upstream ของปากทางออกของเจ็ตและตำแหน่งมุมตามเข็มและทวนเข็มให้เป็นบวกและลบตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8 สำหรับการทำงานของเจ็ตควบคุม เริ่มต้นจากอากาศจะถูกส่งจากเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ (reciprocating air compressor, ยี่ห้อ PUMA ขนาด 0.75 กิโลวัตต์) ผ่านชุดควบคุมแรงดัน (pressure regulator) จากนั้นจะแยกออกเป็นสองชุด โดยแต่ละชุดจะผ่านวาล์วเข็มแบบโซลินอยด์ (solenoid needle valve) ขนาด 1/2 นิ้ว จากนั้นจะผ่านไปที่อุปกรณ์การวัดและควบคุมอัตราการไหลชนิดโรตารี (Dwyer™, model VA20434, มีช่วงการวัด 0 - 4,562 มิลลิลิตร/นาที, ความแม่นยำ (accuracy) $\pm 2\%$ Full scale output) จากนั้นอากาศจะไหลผ่านเกจวัดความดัน (ASAHIT™, มีช่วงวัด 0-100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, มีความละเอียด 2 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และต่อผ่านสายยางไปที่รูฉีดเจ็ตควบคุมซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.9

4.2 พิกัดอ้างอิงในการทดลอง

พิกัดที่ใช้ในการทดลองนี้คือพิกัด x, y, z โดยได้กำหนดจุดเริ่มต้นอยู่ที่ปากทางออกของเจ็ตบนระนาบปากทางออก และได้กำหนดแกน x ให้มีทิศทางเดียวกับความเร็วของกระแสลมขวาง (Streamwise) ส่วนแกน y จะมีทิศตั้งฉากกับกระแสลมขวาง หรือทิศเดียวกับความเร็วที่ออกจากปากเจ็ต (Traverses) และแกน z จะตั้งฉากกับแกน x และ y ตามกฎมือขวา (Spanwise) สำหรับตำแหน่งมุมในการฉีดเจ็ตควบคุมจะกำหนดให้มุม 0 องศา มีทิศทางเดียวกับกระแสลมขวาง มุมบวกมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาและมุมลบมีทิศทวนเข็ม ดังรูปที่ 4.10

4.3 ชุดเครื่องมือวัดความเร็ว Stereoscopic Particle Image Velocimetry

4.3.1 ส่วนประกอบและการทำงานของ Stereoscopic Particle Image Velocimetry

Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดความเร็วของของไหลได้ทั้ง 3 แกนพิกัด (x, y, z) ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ หลักการวัดความเร็วของ SPIV นั้นจะไม่ได้วัดความเร็วของของไหลโดยตรง แต่วัดความเร็วของไหลจากการตรวจจับความเร็วจากอนุภาคติดตามการไหลที่พบในของไหลนั้น รายละเอียดของการทำงานของชุด SPIV มีดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.2 แสดงถึงอุปกรณ์ต่างๆของ SPIV ซึ่งผลิตโดยบริษัท TSI โดยการทำงานเริ่มจากเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ ND:YAG ยี่ห้อ New WaveTM (model Solo 200XT กำลังสูงสุด 200 mJ/pulse ที่ความยาวคลื่น 532nm, รูปที่ 4.11) ส่งเลเซอร์ผ่านทางแขนส่งต่อเลเซอร์ (Laser light arm, Model 610015, รูปที่ 4.12) ที่ปลายทางออกของแขนส่งต่อเลเซอร์จะต่ออยู่กับเลนส์เพื่อสร้างเลเซอร์เป็นแผ่นยิงไปบนระนาบต่างๆ อนุภาคของกลีเซอรินที่อยู่ในเจ็ตเมื่อถูกแสงเลเซอร์ก็จะกระเจิงแสงสว่างขึ้น จากนั้นภาพของอนุภาคที่เกิดขึ้นก็จะถูกบันทึกด้วยกล้อง CCD จำนวนสองตัว (PowerView Plus11MP, model 630062 ความละเอียด 4008 พิกเซล \times 2672 พิกเซล, ขนาดพิกเซล 9×9 ตารางไมโครเมตร, ขนาด CCD 36.07×24.05 ตารางมิลลิเมตร, และไดนามิกเรนจ์ 12 บิต, รูปที่ 4.13) ซึ่งกล้องทั้งสองนี้จะถูกติดตั้งเลนส์ ยี่ห้อ TokinaTM (model 100 mm f2.8D Macro) สำหรับการถ่ายภาพทุกกรณีในการทดลอง ทั้งนี้เพื่อให้การถ่ายภาพและการยิงเลเซอร์ทำงานประสานกัน กล้อง เลเซอร์และคอมพิวเตอร์จะถูกเชื่อมต่อกันด้วยเครื่องควบคุมส่วนกลาง (Synchronizer model 610035, รูปที่ 4.14 ภาพที่บันทึกได้ด้วยกล้อง 2 ตัวจะถูกนำมาประมวลผลเพื่อหาเป็นเวกเตอร์ความเร็วด้วยโปรแกรม TSITM Insight 4G

4.3.2 การหาค่าสนามเวกเตอร์ความเร็วโดยโปรแกรม Insight 4G

โปรแกรม Insight 4G ถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณหาเวกเตอร์ของความเร็ว โดยประมวลผลจากภาพถ่ายอนุภาคติดตามการไหลประกอบด้วยทั้งหมด 4 ขั้นตอนดังนี้

- Calibration (Perspective calibration process)

โปรแกรมจะทำการปรับเทียบระยะจริงที่ระนาบของวัตถุกับระยะที่เห็นในระนาบของภาพถ่าย โดยการถ่ายภาพแผ่นปรับเทียบ (แผ่น Target) จากนั้นโปรแกรมจะตรวจสอบ

หาจุดสี่ขาบนแผ่นปรับเทียบ เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนระยะทางจริงในระนาบตัดขวางใดๆ ต่อ 1 พิกเซล ซึ่งมีหน่วยเป็นไมโครเมตรในระนาบของวัตถุของทั้งในแนวแกน x , y และ z ต่อ 1 พิกเซล

- Pre-processing

ขั้นตอนการปรับอัตราส่วนของรูปให้มีระยะจริงต่อ 1 พิกเซลเท่ากันก่อน โดยใช้คำสั่ง Image dewarping เพราะว่าการถ่ายภาพ SPIV นั้นกล้องจะทำมุมเอียงระนาบที่ต้องการ โดยภาพของวัตถุที่อยู่ไกลจะมีขนาดเล็ก ขณะที่ภาพของวัตถุที่อยู่ใกล้จะมีขนาดใหญ่ ดังนั้นขั้นตอนนี้จะทำการปรับระยะทางจริงจาก Perspective ของภาพนั้น เพื่อนำไปคำนวณหาความเร็วต่อไป เมื่อผ่านกระบวนการนี้แล้วโปรแกรมจะบันทึกผลลัพธ์เป็นภาพจากทั้งกล้องซ้าย และขวา และ Frame A และ Frame B ในรูปของไฟล์ .tiff

- Processing

ขั้นตอนการประมวลผลหาระยะทางที่เคลื่อนไปของกลุ่มอนุภาคต่อเวลา เพื่อที่จะคำนวณสนามความเร็ว ผลที่ได้จะเป็นภาพเวกเตอร์ความเร็วจากกล้องด้านซ้ายและด้านขวา ในรูปแบบไฟล์ .VEC ซึ่งจะทำหลังจากการปรับอัตราส่วนของภาพเรียบร้อยแล้ว

- Post-processing

ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะนำภาพเวกเตอร์ความเร็วของภาพจากกล้องด้านซ้ายและขวา ที่ตำแหน่งเดียวกันของเจ็ตในกระแสลมขวางมาเทียบกันว่า ถ้ามีเวกเตอร์ความเร็วปรากฏทั้งด้านซ้ายและด้านขวา โปรแกรมจะบันทึกค่าความเร็ว ได้สนามความเร็วในรูปแบบไฟล์ .V3D

4.4 การวัดและเครื่องมือวัด

4.4.1 การวัดความสม่ำเสมอของความเร็วกระแสลมขวาง

เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของกระแสลมขวางในอุโมงค์ลม จะวัดความเร็วของกระแสลมขวางที่ใช้ในการทดลอง $Re_{cf} = 3100$ (ความถี่ไฟฟ้า 8.6 Hz) ด้วย Pitot tube ที่ตำแหน่ง $x/rd = -0.5$ และเพื่อให้ครอบคลุมบริเวณเจ็ตทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองนี้จึงกำหนดขอบเขตในการวัดคือ $30 \times 30 \text{ cm}^2$ โดยแต่ละตำแหน่งจะห่างกัน 3 cm และฐานสูงจากพื้น 1 cm ดังรูปที่ 4.15 และจะวัดความเร็วบนระนาบซ้ำทั้งหมด 3 ครั้งรูปที่ 4.16 แสดง

การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ของกระแสลมขวาง ซึ่งมีความเร็วเฉลี่ยทั้งหมดของพื้นที่เป็น 4.19 m/s ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.025 m/s แต่จุดมีความเร็วต่างจากความเร็วเฉลี่ยไม่เกิน ± 0.04 m/s คิดเป็น 0.95 % ยกเว้นที่ขอบล่างที่มีความเร็วที่น้อยกว่าเนื่องจากผลของ boundary layer ซึ่งสามารถยอมรับได้ว่ามีความสม่ำเสมอสำหรับการทดลอง

4.4.2 การวัดสถานะเริ่มต้นของเจ็ต

เพื่อหาความเร็วเฉลี่ยของเจ็ต รูปร่างของความเร็ว (Velocity profile) และความสมมาตร ซึ่งการวัดสถานะเริ่มต้นของเจ็ตทดลองนี้ได้มีการวัดความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตหลักโดยใช้ pitot tube โดยตำแหน่งในการวัดจะวัดเป็นรูปกากบาทตามแนวแกน x และแกน z โดยตำแหน่งใกล้ขอบเจ็ตจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่มากจึงต้องมีการวัดอย่างละเอียด โดยในรูปที่ 4.17 ได้แสดงตำแหน่งการวัดซึ่งกำหนดว่าระยะจากจุดศูนย์กลางเจ็ตเท่ากับ 0 ถึง 4 mm จะวัดแต่ละจุดห่างกัน 1 mm และ ตำแหน่ง 4 ถึง 6 จะวัดห่างกัน 0.5 mm และทำการวัดความเร็วในแต่ละจุดจะวัดซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง การคำนวณความเร็วเฉลี่ยจะทำโดยการคูณความเร็วของแต่ละจุดกับเศษหนึ่งส่วนสี่ของพื้นที่วงแหวนแล้วนำมารวมกันหารด้วยพื้นที่เจ็ตทั้งหมด เพื่อหาความเร็วเฉลี่ยจาก $\bar{V} = Q/A$

เปอร์เซ็นต์ความไม่สมมาตรของเจ็ตเมื่อเทียบกับความเร็วเฉลี่ยแต่ละรัศมี และเปอร์เซ็นต์ความไม่สมมาตรของเจ็ตเทียบกับความเร็วที่จุดศูนย์กลางของเจ็ต ดังที่แสดงในรูปที่ 4.18 โดยนิยามจากสมการ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

$$\text{Unsymmetry} = \frac{V_{\max}(r) - V_{\min}(r)}{\bar{V}(r)} \times 100\% \quad (4.1)$$

$$\text{Unsymmetry} = \frac{V_{\max}(r) - V_{\min}(r)}{V_{\text{center}}} \times 100\% \quad (4.2)$$

พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของทุกกรณีที่ระยะจากจุดศูนย์กลางเจ็ตโดย $\frac{r}{R}$ มีค่าน้อยกว่า 3% และช่วง $0 \leq \frac{r}{R} \leq 0.5$ และมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 8% และความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตตามแนวแกน y ที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีต่างๆดังที่แสดงในรูปที่ 4.19 กรณี $r = 4$ ความเร็ว

เฉลี่ยบนพื้นที่หน้าตัดปากเจ็ตมีค่าเท่ากับ 16.2 m/s และเมื่อนำความเร็วในแต่ละรัศมีมาสร้างกราฟตามสมการ

$$\frac{\bar{V}}{V} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} \quad (4.3)$$

จะได้กราฟที่บ่งบอกลักษณะของ Jet velocity profile นอกจากนี้ยังมีการนิยามพารามิเตอร์ γ ซึ่งนิยามโดย

$$\gamma = \frac{\bar{V}}{V_{center}} \quad (4.4)$$

โดยค่านี้จะใช้เป็นค่าในการคำนวณความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตเบื้องต้นในการวัดความเร็วเจ็ตครั้งต่อไป โดยสำหรับกรณี $r = 4$ ค่า $\gamma = 0.795$

4.4.3 การวัดอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก

ในการทดลองนี้มีการปรับและควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) โดยได้เมื่อความหนาแน่นของอากาศของเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุมมีค่าเท่ากันแล้ว อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลักจึงนิยามได้ดังนี้

$$r_m = \frac{\dot{m}_{cj}}{\dot{m}_j} = \frac{Q_{cj}}{Q_j} \quad (4.5)$$

โดย \dot{m}_{cj} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมที่ถูกฉีดทั้งหมด
 \dot{m}_j คือ อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตหลัก
 Q_{cj} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตควบคุมที่ถูกฉีดทั้งหมด
 Q_j คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตหลัก

การปรับอัตราการไหลของเจ็ตควบคุมจะทำได้โดยการปรับวาล์วของ Flow meter ชนิด Rotameter (Dwyer™, model VA20434, มีช่วงการวัด 0 - 4,562 มิลลิลิตรต่อนาที, ความแม่นยำ (accuracy) $\pm 2\%$ Full scale output) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 เพื่อให้ได้อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลักตามที่ต้องการ โดยในการทดลองนี้วัดอัตราการไหลของเจ็ตหลักได้เท่ากับ 1.241×10^{-4} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ดังนั้นอัตราการไหลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) เป็น 4 % มีค่าเท่ากับ 8.051×10^{-5} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

โดยรวมทั้งสองข้างของการฉีดเจ็ตควบคุม ประกอบกับการคำนวณหาอัตราการไหลของเจ็ตควบคุมนั้นจะต้องดูระดับความสูงของลูกลอยที่อ่านได้จาก Rotameter เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับตารางอัตราการไหลที่ผู้ผลิตให้ไว้ และอ่านค่าความดันจาก Pressure gauge เพื่อหา Working pressure สำหรับคำนวณ Correction factor เพื่อนำไปปรับแก้หาอัตราการไหลที่แท้จริง

4.4.4 การสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง SPIV กับ Pitot tube

เพื่อความแม่นยำและความถูกต้องในการวัดค่าความเร็วโดยใช้ SPIV เนื่องจากความเร็วที่วัดได้เป็นความเร็วของอนุภาคติดตามการไหลที่ใส่ลงในส่วนของเจ็ต จึงต้องสอบเทียบความเร็วที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดความเร็ว SPIV ด้วย pitot tube ในส่วนของกระบวนการสอบเทียบ จะต้องปิดเจ็ตหลักและเปิดเฉพาะกระแสลมขวางเท่านั้น ในลำดับต่อมาใส่อนุภาคติดตามการไหลในกระแสลมขวาง โดยใช้สารละลายกลีเซอรินความเข้มข้น 50% โดยปริมาตร เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของการไหลของกระแสลมขวางนั้นมากกว่าเจ็ต และการสอบเทียบนั้นทำให้ความเร็วต่ำกว่าความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตเป็นส่วนมาก โดยพารามิเตอร์ของ SPIV เป็นดังนี้

1. ใช้เลนส์ Nikon (model AF 50mm, f/1.8D) เพื่อ field of view ขนาดใหญ่
2. ถ่ายภาพที่ตำแหน่ง $x / rd = -1.0$
3. จะนำเฉพาะบริเวณของแผ่น calibrate มาพิจารณาเท่านั้น ซึ่งมีขนาดประมาณ $20 \times 20 \text{ cm}^2$ ตั้งอยู่ สูงจากพื้น 5 ซม. และอยู่กึ่งกลางของ test section
4. ใช้ interrogation area เริ่มต้นจาก 64×64 พิกเซล เป็น 32×32 พิกเซล และสุดท้ายจาก 32×32 เป็น 16×16 พิกเซล โดยมีการ overlap = 50%
5. สอบเทียบที่ความเร็วอ้างอิง 5 ค่า ได้แก่ 2.5, 5, 10, 15 และ 20 เมตรต่อวินาที
6. ทำการสอบเทียบซ้ำจำนวน 6 ครั้ง

- การลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยที่ใช้ในการสอบเทียบ

เนื่องจากการประมวลผลของสนามความเร็วของเจ็ตในกระแสลมขวางจากโปรแกรม Insight 4G ใช้เวลาการคำนวณอย่างมาก ดังนั้นจึงจะคำนวณหาจำนวนภาพที่เหมาะสม โดยที่ให้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำในเกณฑ์รับได้ ดังนั้นการทดลองนี้ทำการประเมินการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยที่ใช้ในการสอบเทียบ โดยพิจารณาจากค่าการความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ย ($e_{v,mean}$) บนระนาบ x y z ใดๆ ซึ่งนิยามเป็น

$$V_{mean} = \frac{1}{i \times j} \sum_{ij} \bar{V}_{ij} \quad (4.6)$$

เมื่อ V_{mean} คือ ความเร็วเฉลี่ยต่อพื้นที่ของความเร็วเฉลี่ยต่อเวลา
 \bar{V}_{ij} คือ ความเร็วที่เฉลี่ยต่อเวลาที่ตำแหน่ง (i,j) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\bar{V}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_{ij,n} \quad (4.7)$$

เมื่อ $V_{ij,n}$ คือ ความเร็วที่ตำแหน่ง (i,j) ที่จำนวนรูปที่ n (เวลาที่ n) และ
 N คือ สนามความเร็วทั้งหมดภายในเวลาที่เก็บภาพ

การพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ย ($e_{v,mean}$)
 ซึ่งนิยามเป็น

$$e_v = \frac{|V_{mean}(N_2) - V_{mean}(N_1)|}{V_{mean}(N_1)} \times 100\% \quad (4.8)$$

เมื่อ $V_{mean}(N)$ คือ ความเร็วเฉลี่ย จากรูปจำนวน N รูป
 N_1 คือ จำนวนสนามความเร็วเริ่มต้นที่ใช้ในการประเมินการลู่เข้า
 N_2 คือ จำนวนสนามความเร็วถัดไปที่ใช้ในการประเมินการลู่เข้า

ทดสอบการลู่เข้าโดยทดลองวัดความเร็วที่ 5 เมตรต่อวินาที แล้วเก็บภาพจำนวน
 1,000 ภาพ แล้วนำมาคำนวณหา ความเร็วเฉลี่ย และ ค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้า
 ของความเร็วเฉลี่ย โดยแบ่งเป็นสามกรณี ดังนี้

1. รูปในการคำนวณคือ 20 รูป โดยเพิ่มจำนวนรูปที่ใช้คำนวณทีละ 2 รูป
2. รูปในการคำนวณคือ 100 รูป โดยเพิ่มจำนวนรูปที่ใช้คำนวณทีละ 10 รูป
3. รูปในการคำนวณคือ 1000 รูป โดยเพิ่มจำนวนรูปที่ใช้คำนวณทีละ 100 รูป

รูปที่ 4.21 และ 4.22 แสดงความเร็วเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้า
 ของความเร็วเฉลี่ย ตามลำดับ พบว่าที่จำนวนภาพน้อยกว่า 100 ภาพ ความเร็วเฉลี่ยมีความ
 ผันผวนในระดับหนึ่ง และค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยก็มีค่าแกว่ง
 ขึ้นลงมาก ในขณะที่ตั้งแต่ 100 ภาพขึ้นไปความเร็วเฉลี่ยค่อนข้างคงที่ที่ ความเร็วเฉลี่ยมี
 ความผันผวนในระดับหนึ่ง และค่าความคลาดเคลื่อนของการลู่เข้าของความเร็วเฉลี่ยก็มีค่า
 แกว่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ ไม่เกิน 0.05% ดังนั้นการสอบเทียบจึงจะใช้จำนวนภาพที่
 100 ภาพ ในการคำนวณหาความเร็วเฉลี่ยตามเวลาที่เฉลี่ยบนระนาบ yz ใดๆ

- การสอบเทียบ (Calibration)

การสอบเทียบอ้างอิงจากความถี่ที่ปรับได้ของ blower ของกระแสลมขวางทั้งหมด 16 ความถี่ คือ 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 6, 7, 8, 8.6, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 Hz ซึ่งครอบคลุมความเร็วตั้งแต่ 0.537 ถึง 19.624 เมตร/วินาที วัดจาก pitot static tube โดยแต่ละความถี่จะเก็บภาพ 100 ภาพ จำนวน 5 ครั้ง

รูปที่ 4.23 แสดงผลของการสอบเทียบ SPIV กับ pitot static tube พบว่า สามารถแบ่งช่วงความเร็วออกได้เป็น 3 ช่วง ดังสมการ

$$V_{pitot} = \begin{cases} V_{PIV} & ; V_{PIV} < 0.6408 \text{ m/s} \\ -0.2092(V_{PIV})^2 + 2.2225(V_{PIV}) - 1.3383 & ; 0.6408 \leq V_{PIV} < 3.833 \text{ m/s} \\ 1.0288(V_{PIV}) + 0.1636 & ; V_{PIV} \geq 3.833 \text{ m/s} \end{cases} \quad (4.9)$$

โดยช่วงที่มีความเร็วต่ำกว่า 0.6408 เมตร/วินาที จะให้ $V_{pitot} = V_{PIV}$ เนื่องจากความเร็วในช่วงนี้ ค่าแรงดันที่อ่านได้จาก Digital multimeter (Fluke™, model 19) ค่อนข้างกว้างหรือไม่สามารถวัดความเร็วได้อย่างถูกต้องแม่นยำ สันนิษฐานว่าน่าจะเป็นเพราะสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (noise) ที่เกิดขึ้นในระบบการวัดในช่วงความเร็วนี้ ดังนั้นความเร็วที่วัดได้ในช่วงความเร็วที่ต่ำกว่า 0.6408 เมตรต่อวินาที (รวมถึงช่วงความเร็วที่น้อยกว่าศูนย์หรือไหลย้อนกลับ) จะให้มีความเร็วเท่ากับความเร็วที่วัดได้จาก SPIV เลย

4.5 สรุปพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการทดลอง

1. อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4
2. เรย์โนลส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง (Re_{cf}) มีค่าประมาณ 3,100
3. เรย์โนลส์นัมเบอร์ของเจ็ตขวาง (Re_j) มีค่าประมาณ 12,400
4. กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (θ) ที่ตำแหน่ง ± 165 องศา (I165)
5. อัตราการไหลเชิงมวล (r_m) เท่ากับ 4% ของอัตราการไหลเจ็ต
6. สภาพการไหลของกระแสลมขวาง คือ การไหลแบบสม่ำเสมอและคงตัว
7. สภาพการไหลของเจ็ตกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม คือ การไหลในท่อแบบปั่นป่วนที่พัฒนาตัวเต็มที่
8. Cross-plane: ระยะทางไร้มิติตามแนวขวางกับการไหลของเจ็ต (x/rd) เท่ากับ 0.5, 0.75, 1.0 และ 1.5
9. Center-plane: ระยะทางไร้มิติตามแนวแกนสมมาตรกับการไหลของเจ็ต (z/rd) เท่ากับ 0 (ระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ต)
10. เทคนิคการปล่อยอนุภาคติดตามการไหล 2 แบบ คือ 1).การปล่อยอนุภาคติดตามการไหลในส่วนเฉพาะที่เป็นเจ็ตเท่านั้นและ 2).ทั้งในส่วนของเจ็ตและส่วนของกระแสลมขวาง
11. ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตหลัก ($V_{j,0}$) มีค่าเท่ากับ 16.1 ± 0.2 เมตรต่อวินาที
12. ความเร็วกระแสลมขวาง (V_{cf}) มีค่าเท่ากับ 4.03 ± 0.2 เมตรต่อวินาที
13. เมื่อความหนาแน่นของเจ็ตหลัก (ρ_j) และกระแสลมขวาง (ρ_{cf}) มีค่าเท่ากัน
14. เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของเจ็ตหลัก เท่ากับ 12.57 mm.
15. เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของเจ็ตควบคุม เท่ากับ 0.5 mm.

โดยจะสรุปพารามิเตอร์อื่นๆที่สำคัญในการทดลอง SPIV ไว้ใน ภาคผนวก ก

บทที่ 5

ผลของเจ็ดควบคุมต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ประสิทธิผลการใช้เจ็ดควบคุม เส้นทางเดินของเจ็ด และ Circulation

การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดคือการที่เจ็ดเหนี่ยวนำของไหลโดยรอบเข้ามาผสม โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาและประเมินวัดการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมวลจากค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) บน rd Scale โดยใช้SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ดเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมวล ผลการศึกษาจะกล่าวโดยละเอียดในบทนี้

5.1 ผลของเจ็ดควบคุมต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

รูปที่ 5.1 แสดงการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ดในกระแสมวล สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง I165

กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) พบว่า

1. เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (E) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยสรุปค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ไว้ในตารางที่ 5.1
2. การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) นี้สามารถประมาณด้วยสมการเลขยกกำลังดังนี้

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

โดยสรุปค่าสัมประสิทธิ์ไว้ในตารางที่ 5.1

เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง I165

1. เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) กล่าวคือ เมื่อฉีดพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล อัตราการส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (E) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย โดยสรุปค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมไว้ในตารางที่ 5.1
2. ในทุกระยะทางตามแนวการไหล อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (E) ของกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะมีค่ามากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม(JICF)
3. การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (E) เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 สามารถประมาณด้วยสมการเลขยกกำลังที่ 5.1 โดยสรุปค่าสัมประสิทธิ์ไว้ในตารางที่ 5.1

5.2 การสอบทวนค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

รูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรสำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยภายในแลปทั้งหมด 6 งานวิจัย ได้แก่ Witthayaprapakorn (2013) Srimekharat (2013) Dawyok (2014) Wongthongsiri (2014) Sornphom (2015) Tekhuad (2015) ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4 และงานวิจัยของ Yuan et al (1998) ที่ r เท่ากับ 3.3 พบว่า ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในงานวิจัยนี้มีค่าคาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 11% จากค่าเฉลี่ย และสำหรับกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Tekhuad (2016) พบว่างานวิจัยนี้มีค่าความคาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 9% จากค่าเฉลี่ย โดยสรุปค่าทั้งหมดไว้ในตารางที่ 5.2

5.3 ประสิทธิภาพของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวง

เพื่อประเมินหาประสิทธิภาพของการใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่มีต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ได้อย่างชัดเจนมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงนิยามค่าประสิทธิภาพของการใช้เจ็ดควบคุม (η) ตามสมการที่ 3.7 โดยรูปที่ 5.3 แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างค่าประสิทธิภาพของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (η) พบว่า

1. เมื่อฉีดพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล ค่าประสิทธิภาพ (η) ของเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะลดลงตามไปด้วย แสดงถึง ผลของเจ็ดควบคุมจะลดลงเมื่อฉีดพัฒนาไปตามระยะการไหล

2. ในทุกระยะทางตามแนวการไหล ค่าประสิทธิผล (η) ของเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง 1165 จะมีค่ามากกว่า 1 โดยมากที่สุดที่ระยะ $x/rd = 0.5$ มีค่าเท่ากับ 1.49 แสดงว่าการฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง 1165 ทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ถึง 49% โดยสรุปค่าประสิทธิผลที่ทุกระยะการไหลไว้ในตารางที่ 5.1
3. การพัฒนาตัวของค่าประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุม (η) ตามระยะการไหลสามารถประมาณด้วยสมการเลขยกกำลัง

$$\eta = a_\eta (x/rd)^{b_\eta} \quad (5.2)$$

โดยสรุปค่าสัมประสิทธิ์ไว้ในตารางที่ 5.1

5.4 ผลของเจ็ดควบคุมต่อเส้นทางเดินของเจ็ด

เส้นทางเดินของเจ็ดเป็นอีกหนึ่งคุณลักษณะที่สำคัญของเจ็ดในกระแสลมขวาง โดยเส้นทางเดินของเจ็ดจะนิยามจาก center of mass ของปริมาณ X ใดๆ ตามสมการ

$$y_{\text{cm},x} = \frac{\int_{A_j} y|X|dA}{\int_{A_j} |X|dA} \quad (5.3)$$

โดย $|X|$ คือ ขนาดของปริมาณ X ใดๆ

ในงานนี้จะคำนวณหาเส้นทางเดินของเจ็ดจากปริมาณ 2 ปริมาณที่มีความสำคัญต่อการเหนี่ยวนำการผสม คือ ความเร็วเจ็ดในแนวแกน Streamwise ($V_{j,x}$) และ Vorticity ตามแนวแกน streamwise ($\omega_{j,x}$) เนื่องจากความเร็วในแนวแกน Streamwise ($V_{j,x}$) ใช้ในการคำนวณอัตราไหลของเจ็ดที่ผ่านระนาบตัดขวางใดๆ จึงสามารถหาค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร นำไปสู่การประเมินวัดการเหนี่ยวนำการผสมได้โดยตรง และ Vorticity ของเจ็ดในแนวแกน Streamwise ($\omega_{j,x}$) เป็นปริมาณที่แสดงถึงโครงสร้าง CVP ของเจ็ด โดยจะมีบทบาทหลักในการเหนี่ยวนำการผสมซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 6

5.4.1 เส้นทางเดินของเจ็ตจากปริมาณความเร็วเจ็ตในแนวแกน Streamwise

รูปที่ 5.4 แสดงเส้นทางเดินของเจ็ตจากปริมาณความเร็วเจ็ตในแนวแกน Streamwise $(y_{CM,|V_{j,x}}/rd)$ ของกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165

กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) พบว่า

1. เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล เส้นทางเดินของเจ็ต $(y_{CM,|V_{j,x}}/rd)$ มีค่าสูงขึ้น แสดงถึงเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล เส้นทางเดินของเจ็ตจะลอยตัวสูงขึ้น โดยจะสรุปค่าเส้นทางเดินของเจ็ตจากปริมาณความเร็วเจ็ตในแนวแกน Streamwise ไว้ในตารางที่ 5.3
2. การเพิ่มสูงขึ้นของเส้นทางเดินของเจ็ต $(y_{CM,|V_{j,x}}/rd)$ สามารถประมาณได้ด้วยสมการเลขยกกำลัง

$$\frac{y}{rd} = a_T \left(\frac{x}{rd} \right)^{b_T} \quad (5.4)$$

โดยสรุปค่าสัมประสิทธิ์ไว้ในตารางที่ 5.3

เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบว่า

1. เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) กล่าวคือ เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล เส้นทางเดินของเจ็ต $(y_{CM,|V_{j,x}}/rd)$ มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยจะสรุปค่าเส้นทางเดินของเจ็ตจากปริมาณความเร็วเจ็ตในแนวแกน Streamwise ไว้ในตารางที่ 5.3
2. ในทุกระยะตามแนวการไหล เส้นทางเดินของเจ็ต $(y_{CM,|V_{j,x}}/rd)$ กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะมีค่าสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) แสดงถึงการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะไปส่งเสริมทำให้เจ็ตมีเส้นทางเดินที่ลอยตัวสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

3. การเพิ่มสูงขึ้นของเส้นทางเดินของเจ็ต ($y_{CM,|V_{j,x}|} / rd$) สามารถประมาณได้ด้วยสมการเลขยกกำลังสมการเลขยกกำลังที่ 5.4 โดยสรุปค่าสัมประสิทธิ์ไว้ในตารางที่ 5.3

5.4.2 เส้นทางเดินของเจ็ตจากปริมาณ Vorticity ของเจ็ตในแนวแกน Streamwise

รูปที่ 5.4 แสดงเส้นทางเดินของเจ็ตจากปริมาณ Vorticity ของเจ็ตในแนวแกน Streamwise ($y_{CM,|\omega_{j,x}|} / rd$) ของกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบว่า เช่นเดียวกับผลการทดลองของเส้นทางเดินของเจ็ตจากปริมาณความเร็วของเจ็ตในแนว Streamwise ($y_{CM,|V_{j,x}|} / rd$) กล่าวคือ เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล เส้นทางเดินของเจ็ต ($y_{CM,|\omega_{j,x}|} / rd$) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทั้งกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 โดยกรณีฉีดเจ็ตควบคุมจะมีเส้นทางเดินของเจ็ตสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมตลอดระยะการไหล และสามารถประมาณเส้นทางเดินของเจ็ตได้โดยสมการที่ 5.4 โดยสรุปค่าสัมประสิทธิ์ไว้ในตารางที่ 5.4

5.4.3 เปรียบเทียบเส้นทางเดินของเจ็ตจากปริมาณความเร็วของเจ็ต และ Vorticity ของเจ็ตในแนวแกน Streamwise

รูปที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบเส้นทางเดินของเจ็ตจากปริมาณความเร็วเจ็ตในแนวแกน Streamwise ($V_{j,x}$) และ Vorticity ของเจ็ตในแนวแกน Streamwise ($\omega_{j,x}$) พบว่า ในกรณีใดๆ ทั้งกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และ กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 เส้นทางเดินของเจ็ตจากปริมาณความเร็วเจ็ต ($V_{j,x}$) จะมีเส้นทางเดินของเจ็ตที่สูงกว่าเส้นทางเดินของเจ็ตจากปริมาณ Vorticity ในแนวแกน Streamwise ($\omega_{j,x}$) โดยผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการวางตัวของโครงสร้างรูปไต (Kidney shape) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วในแนวการไหลสูง โดยวางตัวอยู่ด้านบนเมื่อเทียบกับโครงสร้าง CVP ซึ่งเป็นบริเวณที่มีขนาดของ Vorticity ในแนวการไหลสูง โดยจะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 6

5.4.4 ผลของเส้นทางเดินของเจ็ตต่อการเหนี่ยวนำการผสม

ผลการทดลองของเส้นทางเดินของเจ็ตทั้งจากปริมาณความเร็วเจ็ต และ Vorticity ในแนวแกน Streamwise แสดงให้เห็นว่า เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตมีค่าสูงมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมตลอดทุกระยะการไหล โดยการเพิ่มสูงขึ้นดังกล่าวสอดคล้องกับการเพิ่มสูงขึ้นของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเมื่อมีการฉีดเจ็ตที่ตำแหน่ง I165 ตลอดทุกระยะการไหล

เมื่อนำแบบจำลอง Wall blocking effect ของ Kornsi et al (2009) ที่ได้เสนอแนะว่า ถ้าเส้นทางเดินของเจ็ตอยู่ต่ำใกล้ผนัง ผนังจะมีผลไปกีดกันการเหนี่ยวนำการผสม ทำให้การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตลดต่ำลง (Wall blocking) แต่เมื่อเส้นทางเดินของเจ็ตสูงขึ้น ผลของการกีดกันการเหนี่ยวนำการผสมจากผนังจะลดลง ทำให้เจ็ตสามารถเหนี่ยวนำการผสมได้มากขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลอง เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตยกตัวสูงขึ้นและมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

5.5 Circulation ของเจ็ต

เพื่อที่จะประเมินกำลังของโครงสร้าง CVP ของเจ็ตที่มีการหมุนวน จึงประเมินจากค่า Circulation ของเจ็ต (ส่วนผสมของเจ็ต) ขณะใดๆ โดยคำนวณหาจากสมการ

$$\Gamma = \oint_{c_j} \vec{V} \cdot d\vec{r} \quad (5.5)$$

โดย c_j คือ เส้นโค้งปิดบนระนาบตัดขวาง x ณ เวลา t ใดๆ

เมื่อประยุกต์ใช้ทฤษฎีของสต็อกส์ลงบนระนาบ yz ของหน้าตัดเจ็ตที่ระยะ x จะสามารถเปลี่ยนจากอินทิเกรตบนเส้นโค้งปิด เป็นอินทิเกรตบนพื้นผิวปิด ได้ดังสมการ

$$\Gamma = \oint_{c_j} \vec{V} \cdot d\vec{r} = \int_{A_j} \vec{\omega} \cdot d\vec{A} = \int_{A_j} \omega_x dA \quad (5.6)$$

โดย A_j คือ พื้นผิวของเจ็ตบนระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x ณ เวลา t ใดๆ

เนื่องจาก (A) กรณีการใช้ SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง จึงทำให้สามารถคำนวณหา Circulation เฉลี่ยต่อเวลาได้ตามสมการ

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

โดย $\omega_{j,x}$ คือ Vorticity ของเจ็ตในแนวแกน Streamwise เฉลี่ยต่อเวลา

$A(x)$ คือ พื้นที่ในระนาบตัดขวางที่ระยะ x โดยมีขนาดครอบคลุมเจ็ตที่ทุกเวลา

เนื่องจากโครงสร้างของ CVP ของเจ็ตเป็นโครงสร้างที่มีการหมุนสวนทางกันของคู่ Vortex ซึ่งมีเครื่องหมายของ ω_x ตรงข้ามกัน และจากการทดลอง พบว่าขนาดของ Circulation ที่คำนวณจาก ω_x ที่เป็นบวกและเป็นลบมีค่าประมาณเท่ากัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกแสดง Circulation ของเจ็ตเฉพาะค่าที่เป็นค่าบวก และจะทำให้เป็นปริมาณไร้มิติ $(+\Gamma / u_{cf} d)$

5.5.1 ผลของเจ็ตควบคุมต่อ Circulation ของเจ็ต

รูปที่ 5.5 แสดง Circulation ของเจ็ตระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165

กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) พบว่า

1. เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล Circulation ของเจ็ต $(+\Gamma / u_{cf} d)$ จะมีค่าลดต่ำลง แสดงถึง เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหลกำลังของโครงสร้าง CVP จะมีค่าต่ำลง โดยจะสรุปค่า Circulation ของเจ็ตไว้ในตารางที่ 5.5
2. การลดต่ำลงของ Circulation ของเจ็ตสามารถประมาณได้ด้วยสมการเลขยกกำลัง

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

โดยสรุปค่าสัมประสิทธิ์ไว้ในตารางที่ 5.5

เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบว่า

1. เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) กล่าวคือ เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล Circulation ของเจ็ด ($+\Gamma / u_{cf} d$) จะมีค่าลดต่ำลงตามไปด้วย โดยจะสรุปค่า Circulation ของเจ็ดไว้ในตารางที่ 5.5
2. ในทุกระยะตามแนวการไหล Circulation ของเจ็ด ($+\Gamma / u_{cf} d$) เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะมีค่าสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) แสดงถึงการฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะไปส่งเสริมให้ CVP มีกำลังมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF)
3. การลดลงของ Circulation ของเจ็ด ($+\Gamma / u_{cf} d$) สามารถประมาณได้ด้วยสมการเลขยกกำลังสมการเลขยกกำลังที่ 5.8 โดยสรุปค่าสัมประสิทธิ์ไว้ในตารางที่ 5.5

ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลของ Circulation ของเจ็ดต่อการเพิ่มสูงขึ้นของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเมื่อมีการฉีดเจ็ดที่ตำแหน่ง I165 จะพบว่า การที่โครงสร้าง CVP เจ็ดมี Circulation สูงขึ้น แสดงถึง เจ็ดมีศักยภาพในการเหนี่ยวนำการผสมสูงขึ้น ทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมสูงขึ้น โดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ดดังกล่าวจะมีบทบาทที่สำคัญต่อกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 6

บทที่ 6

โครงสร้าง และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหล กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)

การศึกษาโครงสร้างของเจ็ต และปฏิสัมพันธ์ของโครงสร้างของเจ็ตและกระแสลมขวาง และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางเกิดจากการวิเคราะห์ผลการทดลองจากหลายปริมาณประกอบกัน ได้แก่ ความน่าจะเป็น เวกเตอร์ความเร็วในระนาบตัดขวางการไหลเฉลี่ยไร้มิติ และการกระจายตัวของปริมาณเฉลี่ยไร้มิติต่างๆในแนวแกน Streamwise Transverse และ Spanwise สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ให้ผลการทดลองดังนี้

6.0 การแสดงผลการทดลอง และความหมาย

การทดลองจากการใช้วิธี SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง และเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสลมขวางดังที่กล่าวในบทที่ 3 สามารถแสดงผลได้ใน 3 ส่วนดังนี้

- (A) ผลการทดลองของกรณีการใช้ SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง จะให้คุณสมบัติของเจ็ต (ส่วนผสมของเจ็ต) เท่านั้น ไม่รวมคุณสมบัติของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ (q_j)
- (B) ผลการทดลองของกรณีการใช้ SPIV ควบคู่กับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสลมขวาง จะให้คุณสมบัติของสนามการไหลซึ่งรวมคุณสมบัติของเจ็ตและกระแสลมขวางบริสุทธิ์ทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน (q)
- (C) = (B) – (A) จะแสดงถึงคุณสมบัติของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ (q_{cf}) โดยประมาณตามสมการที่ 3.11

การแสดงผลการทดลองต่างๆ จะแสดงผลการทดลองด้วยข้อมูล 3 ส่วนแสดงผ่านการพล็อตกราฟ 3 ลักษณะซ้อนทับกันคือ Contour surface, In-plane vector และ Contour line

6.0.1 Contour surfaces (CS)

- (A) แสดงปริมาณเฉลี่ยไร้มิติต่างๆของเจ็ต (q_j)
- (B) แสดงปริมาณเฉลี่ยไร้มิติต่างๆของสนาม (q)
- (C) แสดงปริมาณเฉลี่ยไร้มิติต่างๆของกระแสลมขวางบริสุทธ์ (q_{cf})

6.0.1 In-plane vector

เพื่อให้แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณต่างๆกับสนามความเร็วในระนาบตัดขวางการไหล ดังนั้นแสดง Contour surface ซ้อนทับด้วยเวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล โดยคำนวณมากจากความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Transverse และ Spanwise โดย

- (A) แสดงเวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหลส่วนผสมเจ็ต ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$)
- (B) แสดงเวกเตอร์ความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิตินระนาบตัดขวางการไหล (\vec{V}_{yz} / u_{cf})
- (C) แสดงเวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธ์เฉลี่ยไร้มิตินระนาบตัดขวางการไหล ($\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$)

6.0.3 Contour lines (CL)

เพื่อให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ของสนามความเร็วในระนาบ(In-plane vector) และปริมาณต่างๆ (CS) กับความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลต่างๆ CS จะซ้อนทับด้วย Contour line ของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตซึ่งแสดงผ่านเส้นค่าคงที่ของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต(CL) โดยแสดงความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่ $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 โดยเรียงตัวจากบริเวณภายนอกเจ็ตมุ่งเข้าสู่ภายในตัวเจ็ตตามลำดับ

6.1 ความน่าจะเป็น

เนื่องจากกรณีการใช้ SPIV ควบคุมกับการปล่อยอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนองเจ็ดเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวางทำให้สามารถหาความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ด ณ ตำแหน่งใดๆได้ซึ่งนิยามจาก

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

โดย ϕ_j คือ ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ด (ส่วนผสมของเจ็ด) ที่ตำแหน่งใดๆ

N_j คือ ระยะเวลา (จำนวน Snapshot) ที่ SPIV สามารถวัดความเร็ว $\neq 0$ หรืออีกนัยหนึ่งหมายถึง SPIV พบอนุภาคติดตามการไหล หรืออีกนัยหนึ่งพบส่วนผสมของเจ็ด

N คือ ระยะเวลาที่เก็บข้อมูลทั้งหมดซึ่งในงานวิจัยนี้ $N = 2000$

นอกเหนือจากนี้ความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์เป็นส่วนเติมเต็มของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดแสดงดังสมการ

$$\phi_j + \phi_{cf} = 1 \quad (6.2)$$

ดังนั้นจึงสามารถหาความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ได้จาก

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

โดย ϕ_{cf} คือ ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ตำแหน่งใดๆ

(A) ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ด (ϕ_j)

รูปที่ 6.1ก(A) CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดพบว่าความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดจะมีค่าสูงเข้าสู่หนึ่งที่บริเวณใจกลางเจ็ด และมีค่าลดต่ำลงตามแนวรัศมีที่มุ่งออกไปยังขอบเจ็ดจนมีค่าต่ำเข้าสู่ศูนย์ที่บริเวณขอบเจ็ด และมีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ด้านนอก ผลการทดลองนี้แสดงว่า ณ จุดบริเวณกลางเจ็ด จุดนั้นๆ จะมีส่วนผสมของเจ็ดอยู่เป็นส่วนใหญ่ของเวลาทั้งหมด และจะมีกระแสลมขวางบริสุทธิ์มาที่จุดนั้นเป็นช่วงเวลาน้อยของเวลาทั้งหมด ในทางกลับกัน ณ จุดบริเวณขอบเจ็ด จุดนั้นๆ จะมีกระแสลมขวางบริสุทธิ์อยู่เป็นส่วนใหญ่ของเวลาทั้งหมด และจะมีส่วนผสมของเจ็ดมาที่จุดนั้นเป็นช่วงเวลาน้อยของเวลาทั้งหมด

(B) ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลใดๆ(เจ็ดหรือกระแสมขวาง) (ϕ)

รูปที่ 6.1ก(B) CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลใดๆ โดยทางทฤษฎีความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลใดๆจะมีค่าเป็นหนึ่งเสมอทุกจุดทั่วทั้งระนาบตัดขวาง เนื่องจากจะต้องพบของไหลอย่างใดอย่างหนึ่งเสมอไม่ว่าจะเป็นเจ็ดหรือกระแสมขวาง จากการทดลองพบว่าความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลใดๆนั้นมีค่าเฉลี่ยมากกว่า 0.99 ในทุกระยะทางตามแนวการไหล โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ดและกระแสมขวางในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ในการทดลองมีความสม่ำเสมอ และคงตัวทั่วทั้งระนาบตัดขวางการไหล

อนึ่งยกเว้นบริเวณด้านล่างใกล้กับพื้นของอุโมงค์ลมการทดลองในทุกกรณีซึ่งความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลใดๆนั้นมีลดลงค่าไม่เข้าสู่หนึ่ง โดยเป็นผลมาจากการสะท้อนกลับของเลเซอร์ทำให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลในบริเวณดังกล่าวได้ นอกจากนี้บริเวณขอบซ้ายบนที่ระยะ $x/rd = 0.75$ พบว่าความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลใดๆมีค่าลดลงไม่เข้าใกล้หนึ่งนั้น เป็นผลมาจากความกว้างของแผ่นเลเซอร์น้อยเกินไปทำให้ไม่สามารถเก็บค่าความเร็วได้ แต่อย่างไรก็ตามบริเวณดังกล่าวอยู่ห่างไกลออกไปจากตัวเจ็ดซึ่งเป็นบริเวณที่สนใจจึงไม่ส่งผลต่อการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

(C) ความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสมขวางบริสุทธิ์ (ϕ_{cf})

รูปที่ 6.1ก(C) CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสมขวางบริสุทธิ์ซึ่งได้มาจากผลต่างระหว่างความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลใดๆ (เจ็ดหรือกระแสมขวาง, B) กับความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ด (A) ได้ตามสมการ

$$\phi_C = \phi_B - \phi_A \quad (6.4)$$

จากกราฟพบว่าความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสมขวางบริสุทธิ์มีค่าต่ำเข้าสู่ศูนย์ที่บริเวณใจกลางเจ็ด และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามแนวรัศมีที่มุ่งออกไปยังขอบเจ็ดจนมีค่าสูงที่บริเวณขอบเจ็ด และมีค่าเข้าสู่หนึ่งที่บริเวณกระแสมขวางบริสุทธิ์ด้านนอก เนื่องจากความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสมขวางบริสุทธิ์นั้นเป็นส่วนเติมเต็มของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ด อีกนัยหนึ่งหมายความว่าความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดมีค่าสูงเข้าสู่หนึ่งที่บริเวณใจกลางเจ็ด และมีค่าลดต่ำลงตามแนวรัศมีที่มุ่งออกไปยังขอบเจ็ดจนมีค่าต่ำเข้าสู่ศูนย์ที่บริเวณขอบเจ็ด และมีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณด้านนอกขอบเจ็ดหรือที่บริเวณกระแสมขวางบริสุทธิ์

6.2 เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล

รูปที่ 6.1ก In-plane vector แสดงการพัฒนาตัวของเวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) โดย (A) เวกเตอร์ความเร็วเจ็ต ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$), (B) เวกเตอร์ความเร็วสนาม (\vec{V}_{yz} / u_{cf}) และ (C) เวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ($\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$)

(A) เวกเตอร์ความเร็วเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$)

รูปที่ 6.1ก(A) In-plane vector แสดงการพัฒนาตัวของเวกเตอร์ความเร็วเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$) พบว่าเวกเตอร์ความเร็วเจ็ตมีการเคลื่อนที่หมุนวนลักษณะคล้ายกับครึ่งหนึ่งของเวกเตอร์ความเร็วที่เกิดจากโครงสร้าง CVP (ซึ่งจะกล่าวถึงและนิยามอย่างชัดเจนจาก $\omega_{j,x} d / u_{cf}$ ในหัวข้อที่ 6.6) และจะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ ($\vec{0}$) ที่บริเวณขอบเจ็ต เนื่องจากความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่ขอบเจ็ตมีค่าต่ำเข้าสู่ศูนย์

(B) เวกเตอร์ความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล (\vec{V}_{yz} / u_{cf})

รูปที่ 6.1ก(B) In-plane vector แสดงการพัฒนาตัวของเวกเตอร์ความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล (\vec{V}_{yz} / u_{cf}) พบว่าเวกเตอร์ความเร็วสนามมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวนเต็มรูปแบบชัดเจนโดยมีลักษณะเหมือนกับเวกเตอร์ความเร็วที่เกิดจาก CVP ที่พบทั่วไปในงานวิจัยในอดีตโดยพบสนามความเร็วอีกหนึ่งส่วนที่ไม่สามารถพบได้จาก (A)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์ความเร็วเจ็ต ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$) ในรูป 6.1ก(B) พบว่าเวกเตอร์ความเร็วสนาม (\vec{V}_{yz} / u_{cf}) ที่บริเวณขอบเจ็ตสามารถเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นและมีค่ามากกว่าเวกเตอร์ความเร็วเจ็ต (โดย $\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$ มีค่าเป็นศูนย์ที่ขอบเจ็ต) เนื่องจากเวกเตอร์ความเร็วนี้เกิดจากการคำนวณค่าเฉลี่ยของเวกเตอร์ความเร็วทั้งหมดต่อเวลา ดังนั้นการที่เวกเตอร์ความเร็วมีความเร็วมากกว่า เกิดจากการคำนวณเวกเตอร์ความเร็วของไหลใดๆทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นเจ็ตหรือกระแสลมขวางก็ตาม ส่วนเวกเตอร์ความเร็วเจ็ตจะคำนวณเฉพาะเวกเตอร์ความเร็วเจ็ตเท่านั้น

(C) เวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล ($\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$)

รูปที่ 6.1ก(C) In-plane vector แสดงการพัฒนาตัวของเวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล ($\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$) พบว่าเวกเตอร์ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์มีการเคลื่อนที่หมุนวนเป็นอีกครั้งที่เหลือของเวกเตอร์ความเร็วที่เกิดจากโครงสร้าง CVP ที่ไม่สามารถพบได้จาก รูป 6.1ก(A) โดยสิ่งนี้เป็นหลักฐานสนับสนุนว่ากระแสลมขวางบริสุทธิ์ถูกโครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนวนขึ้น โดยการเคลื่อนที่แบบหมุนวนของกระแสลมขวางบริสุทธิ์นี้จะเกิดที่บริเวณด้านล่างมากกว่าด้านบน

6.2.1 โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์เคลื่อนที่หมุนวน

รูปที่ 6.1ก(C) พบว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ต (ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไปในหัวข้อที่ 6.6) จะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์ให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนวนขึ้นซึ่งเกิดที่บริเวณด้านล่างมากกว่าด้านบน โดยสามารถอธิบายการเกิดขึ้นตามลำดับดังนี้

- โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ขอบเจ็ตด้านข้างทั้งสองข้างมีการเคลื่อนที่พุ่งลงในแนวตั้งไปยังบริเวณขอบเจ็ตด้านล่าง
- หลังจากนั้นโครงสร้าง CVP ของเจ็ตจะเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์เกิดการกลับตัวและพุ่งเข้าสู่เจ็ตผ่านมาที่บริเวณปากอ่าว (Bell-shaped inlet) ของช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Vertical channel)

6.2.2 ช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Converging – diverging vertical channel)

รูปที่ 6.1ก(B) ยังพบการไหลของของไหลผ่าน “ช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Converging – diverging vertical channel of high upward flow)” ซึ่งวางตัวอยู่บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้าง CVP โดยแบ่งแยกเป็น 3 บริเวณ คือ 1) บริเวณที่มีการไหลลู่เข้า (Converging section) ซึ่งรวมถึงบริเวณปากอ่าว (Bell-shaped inlet) ด้านล่าง 2) บริเวณคอคอด(Throat) และ 3) บริเวณที่มีการไหลลู่ออกด้านบน(Diverging section)

รูปที่ 6.1ก(C) พบว่าสามารถอธิบายการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ตผ่านช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Vertical channel) ได้ดังนี้ การไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เริ่มจาก 6.2.1 มาที่ปากอ่าว (bell-shaped inlet) โดยมีรูปทรงคล้ายระฆังคว่ำที่บริเวณขอบเจ็ตด้านล่างซึ่งความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตต่ำ และความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวาง

บริสุทธิ์สูงผ่านช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง โดยพบว่าเวกเตอร์ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์มีทิศทางตั้งฉากกับเส้นค่าคงที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดอย่างมาก $\left[(\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}) \perp \phi_{j,const} \right]$ ต่อมาของไหลจะมุ่งเข้าสู่ใจกลางเจ็ดจนถึงบริเวณคอคอด (Throat) ที่บริเวณคอคอดนี้พบว่าความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดมีค่าสูง ในขณะที่ความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์มีค่าต่ำ แสดงว่ากระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่บริเวณปากอ่าวด้านล่างของเจ็ดไหลผ่านบริเวณที่มีการไหลลู่เข้า (Converging section) จะถูกเหนี่ยวนำให้ผสมกับเจ็ดกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ดจนเกือบหมดแล้ว เมื่อของไหลมาถึงบริเวณคอคอด (Throat) จะกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ดเกือบหมด

6.2.3 บริเวณที่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมสูง

รูปที่ 6.5 แสดงบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสม $\left[(\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}) \cdot (d\nabla\phi_j) \right]$ พบว่าหลังจากกระแสลมขวางไหลเข้าสู่ตัวเจ็ดที่บริเวณปากอ่าว (Bell-shaped inlet) ก็จะถูกโครงสร้าง CVP เหนี่ยวนำเขาไปผสมกับเจ็ด ตั้งแต่บริเวณขอบเจ็ดด้านล่างผ่านช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Vertical channel) ในช่วงความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ด $0.01 < \phi_j < 0.75$ ยิ่งไปกว่านั้นยังพบบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมสูงในช่วงความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดประมาณในช่วง $0.25 < \phi_j < 0.75$ และพบบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมสูงสุด (Maximum local peak) แบ่งแยกออกเป็น 3 บริเวณ คือ ขอบเจ็ดตรงกลางด้านล่าง และขอบเจ็ดซ้าย-ขวาด้านล่าง เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามระยะการไหลก็ยังสามารถพบบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมสูงทั้ง 3 บริเวณได้อยู่ตลอดทุกระยะการไหล

อนึ่งพบว่า โครงสร้าง CVP ของเจ็ดจะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์จากทางด้านล่างเข้ามาผสมจนเกือบหมดสมบูรณ์ตั้งแต่ภายในบริเวณที่มีการไหลลู่เข้า (Converging section) ของช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Converging – diverging vertical channel) แล้วเมื่อการไหลมาถึงบริเวณคอคอด (Throat) จะกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ดเกือบหมด (รูปที่ 6.1ก (B) และ (C))

นอกจากนี้ยังพบว่าที่บริเวณขอบด้านล่างของเจ็ดจะมีทิศทางของเวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ จะประมาณตั้งฉากกับเส้นค่าคงที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ด $\left[(\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}) \perp \phi_{j,const} \right]$ แสดงถึง กระแสลมขวางบริสุทธิ์มีการไหลเข้าสู่เจ็ด

6.3 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise

รูปที่ 6.1 ข CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) (A) ความเร็วเจ็ต ($V_{j,x} / u_{cf}$), (B) ความเร็วสนาม (V_x / u_{cf}) และ (C) ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ($V_{cf,x} / u_{cf}$)

(A) ความเร็วเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise ($V_{j,x} / u_{cf}$)

รูปที่ 6.1 ข(A) CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความเร็วเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise ($V_{j,x} / u_{cf}$)

โครงสร้างรูปไต(Kidney shape): ผลการทดลองพบบริเวณที่มีความเร็วเจ็ต ($V_{j,x} / u_{cf}$) สูง โดยมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างรูปทรงไต (Kidney shape) หรือตัวอักษร U กลับหัว (Inverse U) โดยวางตัวอยู่ภายในเส้นค่าคงที่ของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตประมาณ $\phi_j > 0.75$ เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหลก็ยังสามารถพบโครงสร้างรูปทรงไตได้อยู่ แต่ความเร็วเจ็ตในแนวแกน Streamwise ที่บริเวณดังกล่าวจะมีค่าลดต่ำลง

บริเวณอ่าว(Gulf region): บริเวณที่มีความเร็วเจ็ต ($V_{j,x} / u_{cf}$) ต่ำ โดยมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับอ่าว โดยวางตัวอยู่ด้านล่างของโครงสร้างรูปไตหรือด้านในของโครงสร้างตัวอักษร U กลับหัวนั่นเอง เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหลก็ยังสามารถพบบริเวณอ่าวได้อยู่ และมีการขยายตัวของรูปร่าง นอกเหนือจากนี้ยังพบความสอดคล้องกันระหว่างบริเวณคอคอด (Throat) ของช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Vertical channel) ซึ่งมีความเร็วในแนวแกน Transverse ($V_{j,y} / u_{cf}$) สูง โดยวางตัวอยู่ที่บริเวณเดียวกันกับบริเวณอ่าวซึ่งมีความเร็วในแนว Stream wise ($V_{j,x} / u_{cf}$) ต่ำ

อนึ่งเนื่องจากงานวิจัยในอดีตมักนิยาม โครงสร้างรูปไต (Kidney shaped) หมายถึงบริเวณที่มีรูปร่างคล้ายไตจากปริมาณต่างๆกัน (Velocity, Passive scalar ฯลฯ) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะนิยามโครงสร้างรูปไต (Kidney shaped) และบริเวณอ่าว (Gulf region) นั้นจะหมายถึงโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise เท่านั้น

(B) ความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise (V_x / u_{cf})

รูปที่ 6.1 ข(B) CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise (V_x / u_{cf}) พบว่า โครงสร้างรูปไตและบริเวณอ่าวมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย

เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีค่าความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตสูงอยู่แล้ว ทำให้ผลกระทบจาก “ส่วนเติมเต็ม” จากกระแสลมขวางบรีสุทธีนั้นน้อย นอกจากนี้ยังพบโครงสร้างรูปไตที่มีความเร็วในแนวแกน Streamwise สูง และบริเวณอ่าวที่มีความเร็วในแนวแกน Streamwise ต่ำ ตลอดระยะการไหลที่ทำทดลอง

(C) ความเร็วกระแสลมขวางบรีสุทธีเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise ($V_{cf,x} / u_{cf}$)

รูปที่ 6.1ข(C) CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความเร็วกระแสลมขวางบรีสุทธีเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise ($V_{cf,x} / u_{cf}$) พบว่าบริเวณใจกลางเจ็ตซึ่งความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมีค่าสูง และความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบรีสุทธีมีค่าต่ำนั้นกระแสลมขวางบรีสุทธีมีความเร็วเฉลี่ยตามเวลาเข้าสู่ศูนย์อย่างที่ได้คาดการณ์ไว้ (ในบทที่ 3.3) นอกจากนี้ยังพบบริเวณที่กระแสลมขวางบรีสุทธีมีความเร็วลดลงต่ำกว่าหนึ่ง ($V_{cf,x} / u_{cf} < 1$) ที่ด้านบนของโครงสร้างรูปไตซึ่งความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมีค่าต่ำ ($\phi_j < 0.25$) และความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบรีสุทธีมีค่าสูง ($\phi_j > 0.75$) ผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่ากระแสลมขวางบรีสุทธีด้านบนของเจ็ตจะถูกลดความเร็วลงหลังจากการไหลเข้าปะทะกับเจ็ตที่ด้านหน้า และเกิดการเลี้ยวเบนขึ้น ออกจากแนวแกน Streamwise ดังแสดงในรูปที่ 6.4

อีกหนึ่งหลักฐานนี้จะใช้เป็นส่วนหนึ่งของเหตุผลที่ไม่รวมการไหลออกของกระแสลมขวางที่ด้านบนในการคำนวณหาอัตราการไหลของกระแสลมขวางบรีสุทธีเข้าสู่เจ็ต [$Q_{cf,\Delta x}(\phi_j)$] ในบทที่ 9

6.4 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Transverse

รูปที่ 6.1ค CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Transverse สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) (A) ความเร็วเจ็ต ($V_{j,y} / u_{cf}$), (B) ความเร็วสนาม (V_y / u_{cf}) และ (C) ความเร็วกระแสลมขวางบรีสุทธี ($V_{cf,y} / u_{cf}$)

(A) ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติของเจ็ตในแนวแกน Transverse ($V_{j,y} / u_{cf}$)

รูปที่ 6.1ค(A) CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Transverse ($V_{j,y} / u_{cf}$) พบบริเวณ 2 บริเวณที่โดดเด่นคือ 1) บริเวณที่เจ็ตมีความเร็วเป็นบวก

และมีค่าสูงสุด 2 บริเวณ วางตัวอยู่กึ่งกลางด้านบนและด้านล่างของเจ็ต และ 2) บริเวณที่เจ็ตมีความเร็วเป็นลบและมีค่าต่ำสุดซึ่งวางตัวอยู่ด้านข้างทั้งสองข้างของเจ็ต

บริเวณที่มีค่าความเร็วเจ็ตในแนวแกน Transverse สูงสุดเป็นบวก และการสลายตัว:

ผลการทดลองพบว่า ที่ $x/rd = 0.5$ พบบริเวณที่มีเจ็ตมีความเร็วสูงสุดในแนวตั้งเป็นบวก 2 บริเวณ คือ ที่ด้านบนซึ่งวางตัวอยู่บริเวณเดียวกับโครงสร้างรูปไต และด้านล่างซึ่งวางตัวอยู่ในช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Vertical channel) เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหลพบว่าบริเวณที่ความเร็วเจ็ตสูงสุดเป็นบวกที่ด้านบนจะสลายตัวไปอย่างรวดเร็ว หลักฐานนี้ชี้แนะว่าบริเวณนี้ไม่มีกลไกช่วยในการขับเคลื่อนให้สามารถคงอยู่ตลอดตามแนวการไหลได้ ดังนั้นหลักฐานชี้แนะว่าบริเวณนี้น่าจะเกิดจากโมเมนตัมที่หลงเหลืออยู่จากปากทางออกของเจ็ต

ในทางกลับกันขณะที่บริเวณที่ความเร็วเจ็ตสูงสุดเป็นบวกที่กึ่งกลางด้านล่างยังสามารถพบได้ อยู่แม้ว่าเจ็ตจะพัฒนาตัวไปตามระยะการไหลแล้วก็ตาม แต่จะมีความเร็วลดลง ซึ่งวางตัวอยู่ในช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Vertical channel) และตรงกับตำแหน่งของโครงสร้าง CVP ในแนวตั้งตลอดแนวการไหล ซึ่งสอดคล้องกับทั้งการมีอยู่และขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปของโครงสร้าง CVP หลักฐานนี้บ่งชี้ว่าโครงสร้าง CVP เป็นกลไกที่เหนี่ยวนำให้เกิดบริเวณที่มีค่าความเร็วสูงสุดเป็นบวกในแนวแกน Transverse ในทุกระยะการไหล

บริเวณที่มีค่าความเร็วเจ็ตในแนวแกน Transverse ต่ำสุดเป็นลบ และการพัฒนาตัว:

ผลการทดลองพบบริเวณที่เจ็ตมีความเร็วต่ำสุดเป็นลบวางตัวอยู่ที่ด้านข้างทั้งสองข้างของเจ็ต โดยมีตำแหน่งในแนวตั้งตรงกับบริเวณที่เจ็ตมีความเร็วสูงสุดเป็นบวกที่กึ่งกลางด้านล่าง และตรงกับตำแหน่งในแนวของโครงสร้าง CVP ประกอบกับมีทิศความเร็วสอดคล้องกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง CVP เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหลพบว่าบริเวณที่ค่าความเร็วสูงสุดเป็นลบนั้นมีการพัฒนาตัวทั้งในด้านขนาดที่กว้างขึ้นและค่าความเร็วต่ำสุดที่เป็นลบที่มากขึ้นคล้อยกับการขยายตัวของโครงสร้าง CVP หลักฐานบ่งชี้ว่า บริเวณที่เกิดจากสนามความเร็วของโครงสร้าง CVP

(B) และ (C) ความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติ (V_y/u_{cf}) และความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติ ($V_{cf,y}/u_{cf}$) ในแนวแกน Transverse

จากรูปที่ 6.1ค(B)และ(C) CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติ (V_y/u_{cf}) และความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติ ($V_{cf,y}/u_{cf}$) ในแนวแกน Transverse ผลการทดลองชี้แนะว่ากระแสลมขวางบริสุทธิ์ถูก CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำให้มีความเร็วในแนวตั้งมีค่าเป็นลบที่ด้านข้างขอบเจ็ต และเป็นบวกที่ด้านในกลางเจ็ต

นอกจากนี้ที่บริเวณขอบเขตด้านบนที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตต่ำ ($\phi_j < 0.25$) พบว่า กระแสลมขวางบริสุทธ์มีความเร็วในแนวแกน Transverse มากกว่าศูนย์ ซึ่งบริเวณดังกล่าวสอดคล้องกับบริเวณที่กระแสลมขวางบริสุทธ์มีความเร็วในแนวแกน Streamwise ต่ำกว่าหนึ่ง ($V_{cf,x}/u_{cf} < 1$) ดังกล่าวในหัวข้อ 6.3(C) หลักฐานนี้สนับสนุนการเข้าปะทะกันระหว่างกระแสลมขวางบริสุทธ์กับเจ็ตที่ด้านหน้าทำให้กระแสลมขวางเลี้ยวเบนขึ้นในแนวตั้ง

6.5 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise

รูปที่ 6.1ง CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) (A) ความเร็วเจ็ต ($V_{j,z}/u_{cf}$), (B) ความเร็วสนาม (V_z/u_{cf}) และ (C) ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธ์ ($V_{cf,z}/u_{cf}$)

(A) ความเร็วเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise ($V_{j,z}/u_{cf}$)

รูปที่ 6.1ง(A) CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความเร็วเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise ($V_{j,z}/u_{cf}$) พบว่ามีคูโลบ 2 คู่ วางตัวอยู่ในแนว ซ้าย-ขวา ของเจ็ต แต่ละคู่ประกอบด้วย คูโลบล่างและโลบบน โดยโลบที่ใหญ่กว่าจะอยู่ด้านบน และมีทิศทางตรงความข้ามกัน เมื่อพิจารณาทิศทางของความเร็ว พบว่า ที่คูโลบบนจะมีทิศทางความเร็วพุ่งออกจากใจกลางเจ็ต ส่วนที่คูโลบล่างจะมีทิศทางความเร็วพุ่งเข้าสู่ใจกลางเจ็ต ซึ่งทิศทางความเร็วดังกล่าวสอดคล้องกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง CVP ของเจ็ต นอกจากนี้ความสมมาตรของโครงสร้างดังกล่าวจึงทำให้เกิดจุดอานม้า (Saddle point) ที่บริเวณบรรจบกึ่งกลางของทั้ง 4 โลบ ซึ่งตรงกับตำแหน่งกึ่งกลางของเจ็ตที่บริเวณความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตสูง ($\phi_j > 0.95$) โดยวางตัวประมาณตำแหน่งเดียวกับบริเวณคอคอด (Throat) ของช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง

(B) และ (C) ความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติ (V_z/u_{cf}) และความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธ์เฉลี่ยไร้มิติ ($V_{cf,z}/u_{cf}$) ในแนวแกน Spanwise

รูปที่ 6.1ง(B)และ(C) CS แสดงความเร็วเฉลี่ยไร้มิติของสนาม (V_z/u_{cf}) และกระแสลมขวางบริสุทธ์ ($V_{cf,z}/u_{cf}$) ในแนวแกน Spanwise พบบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธ์มีความเร็วสอดคล้องกับสนามการหมุนวนของโครงสร้าง CVP จากผลการทดลองชี้แนะว่าการหมุนวนของเวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธ์เกิดจากการเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ต

6.6 Vorticity เกลี่ยต่อเวลาไร้มิติในแนวแกน Streamwise

รูปที่ 6.1จ CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้าง Vorticity เกลี่ยต่อเวลาไร้มิติในแนวแกน Streamwise สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) (A) Vorticity เจ็ต ($\omega_{j,x}d/u_{cf}$), (B) Vorticity สนาม ($\omega_x d/u_{cf}$), (C) Vorticity ของกระแสลมขวางบริสุทธ์ ($\omega_{cf,x}d/u_{cf}$)

(A) Vorticity เจ็ตเกลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise ($\omega_{j,x}d/u_{cf}$)

รูปที่ 6.1จ(A) CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้าง Vorticity เจ็ตเกลี่ยไร้มิติในแนวแกน streamwise ($\omega_{j,x}d/u_{cf}$) โดยค่าที่เป็นบวก (+) หมายถึงการหมุนตามเข็มนาฬิกา (CW) และค่าที่เป็นลบ (-) หมายถึงมีการหมุนทวนเข็มนาฬิกา (CCW) ที่ระยะ $x/rd = 0.5$ พบโครงสร้าง Counter – rotating vortex pair (CVP) 3 คู่ โดยมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน

โครงสร้าง CVP หลักของเจ็ต: โครงสร้าง CVP หลักของเจ็ต คือคู่ CVP ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดซึ่งอยู่บริเวณกลางเจ็ตมีรูปร่างคล้ายกับเครื่องหมายจุลภาคกลับหัว (Inverse comma) 2 ลูกที่หันเข้าหากัน โดยมีค่า Vorticity สูงที่สุดอยู่ที่บริเวณหัวของจุลภาค และมีหางโค้งไปตามเส้นค่าคงที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต $\phi_j = 0.75$ ขึ้นไปในแนวตั้ง อนึ่งในงานวิจัยนี้จะนิยาม “โครงสร้าง CVP ของเจ็ต” โดยหมายถึง CVP คู่แรกนี้

สองคู่ Vortex ที่เหลือ: คู่ Vortex ที่สองมีขนาดและรูปร่างเล็กกว่าโดยวางตัวอยู่ด้านล่างของโครงสร้าง CVP ของเจ็ตซึ่งมีทิศทางการหมุนตรงข้าม ส่วนคู่ Vortex ที่สามมีขนาดและรูปร่างเล็กที่สุดโดยวางตัวอยู่ระหว่างช่องกึ่งกลางของคู่ CVP หลักของเจ็ต และมีทิศทางการหมุนตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง CVP เช่นกัน

เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล ในทุกกรณีขนาดของ Vorticity จะสลายตัวลดลง ขณะที่รูปร่างจะมีการพัฒนาตัวขยายใหญ่ขึ้นโดยทางโครงสร้าง CVP ของเจ็ตจะเริ่มสั้นลง นอกจากนี้ คู่ Vortex ที่สามนั้นจะสลายตัวหายไป ส่วนโครงสร้าง CVP ของเจ็ตและคู่ Vortex ที่สองนั้นยังคงอยู่

(B) และ (C) Vorticity สนามเกลี่ยไร้มิติ ($\omega_x d/u_{cf}$) และ Vorticity กระแสลมขวางบริสุทธ์ ($\omega_{cf,x}d/u_{cf}$) ในแนวแกน Streamwise

รูปที่ 6.1จ(B)และ(C) CS แสดง Vorticity เกลี่ยไร้มิติของสนาม ($\omega_x d/u_{cf}$) และ Vorticity ของกระแสลมขวางบริสุทธ์ ($\omega_{cf,x}d/u_{cf}$) ในแนวแกน Streamwise พบ Vortex 2 คู่ ที่มีทิศทางการหมุนสวนทางกัน โดยคู่ที่มีขนาดใหญ่กว่ามีทิศทางการหมุนเดียวโครงสร้าง CVP ของเจ็ตซึ่งวางตัวอยู่

เหนือคู่ Vortex อีกคู่หนึ่งซึ่งมีขนาดเล็กกว่าและทิศทางการหมุนตรงข้ามกับโครงสร้าง CVP ของเจ็ต โดยทฤษฎีแล้วในกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่มีความเร็วสม่ำเสมอและคงตัวนั้นจะไม่มี Vorticity

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาตลอดทุกระยะการไหลพบว่า ยังสามารถพบ Vortex ทั้งสองคู่ได้อยู่ ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าคู่ Vortex ด้านบนมีการยกตัวสูงขึ้น ประกอบกับเมื่อพิจารณาทิศทางการหมุนพบว่าทิศทางการหมุนของ Vortex คู่บนสอดคล้องกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง Wake ขณะที่ทิศทางการหมุนของ Vortex คู่ล่างสอดคล้องกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง Horseshoe vortex ดังนั้นแล้วหลักฐานชี้แนะว่า การที่กระแสลมขวางบริสุทธิ์พบ Vorticity อาจเกิดขึ้นจากโครงสร้างดังกล่าว

อนึ่ง แม้ว่าทิศทางการหมุนของ Vortex คู่ล่างนั้นจะสอดคล้องกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง Horseshoe vortex ก็ตาม แต่ที่บริเวณ Vortex คู่ล่างนั้นใกล้กับขอบภาพ ดังนั้นบริเวณดังกล่าวอาจเกิดจากความคาดเคลื่อนในการวัดความเร็ว

6.7 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบตัดขวางการไหล สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

จากหลักฐานของการทดลองในการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้ง 2 ลักษณะคือ (A) การใส่อนุภาคติดตามการไหลในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง และ (B) การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสลม จึงสามารถคำนวณหาปริมาณต่างๆของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ (C) เพื่ออธิบายกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหล จึงนำข้อมูลของปริมาณต่างๆที่ $x/rd = 0.5$ มาพล็อตดังรูปที่ 6.2 ซึ่งแสดงผลการทดลองของความน่าจะเป็น, เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล และความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise, Transverse และ Spanwise ประกอบกันทำให้สามารถอธิบายกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยจากหลักฐานต่างๆบ่งชี้ว่า โครงสร้าง CVP คู่หลักของเจ็ตเป็นกลไกการเหนี่ยวนำการผสมหลักในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง

อนึ่งเจ็ตในกระแสลมขวางอาจมีกลไกการเหนี่ยวนำการผสมอื่นที่ไม่สามารถตรวจหาได้ด้วยข้อมูลในระนาบตัดขวางการไหล (yz) อย่างไรก็ตามในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง กลไกการเหนี่ยวนำการผสมเป็นดังนี้

โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำและขับเคลื่อนให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์เกิดการเคลื่อนที่หมุนวน

จากรูปที่ 6.2 จากความสัมพันธ์ระหว่าง Vorticity เฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise ($\omega_x d / u_{cf}$) และ เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล (\vec{V}_{yz} / u_{cf}) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำและขับเคลื่อนให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่อยู่โดยรอบเกิดการเคลื่อนที่หมุนวน โดยเริ่มจากกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ขอบเจ็ตทั้งสองข้างถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่พุ่งลงในแนวตั้งไปยังขอบเจ็ตด้านล่าง หลังจากนั้นกระแสลมขวางบริสุทธิ์จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการกลับตัวพุ่งเข้าสู่เจ็ตที่ขอบเจ็ตด้านล่างผ่านเข้าสู่บริเวณปากอ่าว (Bell-shaped inlet) ของช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Vertical channel)

โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำและขับเคลื่อนการไหลขึ้นผ่านช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Vertical channel) และบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมสูง

จากรูปที่ 6.2 จากความสัมพันธ์ระหว่าง Vorticity เฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise ($\omega_x d / u_{cf}$) เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล (\vec{V}_{yz} / u_{cf}) และความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Transverse (V_y / u_{cf}) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำและขับเคลื่อนให้เกิดช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Converging – diverging vertical channel of high upward flow) ซึ่งอยู่ตรงกับกึ่งกลางโครงสร้าง CVP ของเจ็ต โดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตจะเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์เกิดการไหลผ่านผ่านบริเวณปากอ่าว (Bell-shaped inlet) ที่ขอบเจ็ตด้านล่างแล้วซึ่งค่าความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตต่ำ และความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์สูง จะเริ่มเกิดการเหนี่ยวนำการผสมจนกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตเกือบหมดแล้วที่บริเวณที่มีการไหลลู่เข้า (Converging section) และไหลต่อไปมุ่งเข้าสู่ใจกลางเจ็ตผ่านบริเวณคอคอด (Throat) ของช่องการไหลขึ้นในแนวตั้งซึ่งบริเวณดังกล่าวมีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตสูงแล้ว (ความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ต่ำ) ยิ่งไปกว่านั้นพบบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมอย่างมากเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ในช่วงความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต $0.25 < \phi_j < 0.75$ หลังจากของไหลที่ผสมกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตแล้วจะผ่านต่อไปยังบริเวณที่มีการไหลลู่ออก (Diverging section) สู่บริเวณอ่าว (Gulf region)

การเหนี่ยวนำการผสมโดยโครงสร้างรูปไต (Kidney shape) คล้ายเจ็ตอิสระ

จากรูปที่ 6.2 เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล (\vec{V}_{yz} / u_{cf}) และความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise (V_x / u_{cf}) แสดงให้เห็นว่าเมื่อของไหลที่ผสมจนกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตเข้าสู่บริเวณอ่าว (Gulf region) ซึ่งมีความเร็วในแนวแกน Streamwise ต่ำ และ ความเร็วในแนว Transverse สูง จะถูกเหนี่ยวนำให้ไหลกระจายตัวลู่ออกไปปะทะกับแนวขอบของโครงสร้างรูปไต (Kidney shaped) ที่มีความเร็วในแนวแกน Streamwise สูง และเกิดการเหนี่ยวนำการผสมโดยโครงสร้างรูปไตคล้ายกับการเหนี่ยวนำการผสมในเจ็ตอิสระ (Free jet)

อย่างไรก็ตามให้ตระหนักว่าการเหนี่ยวนำการผสมโดยโครงสร้างรูปไต (Kidney shaped) ไม่ช่วยให้เจ็ตเหนี่ยวนำการผสมขวางบริสุทธิ์เข้ามาผสมโดยตรง แต่เป็นการเหนี่ยวนำส่วนผสมของเจ็ตเข้าไปผสมกับตัวเจ็ตเอง

กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสลมขวาง

จากความสัมพันธ์ของโครงสร้างปริมาณต่างๆ สามารถสรุปได้ว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ตเป็นกลไกหลักสำคัญที่เหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าไปผสมกับเจ็ตผ่านช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง จนกระทั่งกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต และจะถูกเหนี่ยวนำต่อโดยโครงสร้างรูปไต (Kidney shaped) ให้มีความเร็วตามแนวการไหลเพิ่มมากขึ้นคล้ายเจ็ตอิสระ เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนจึงแสดงภาพจำลองกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสลมขวางในรูปที่ 6.3

บทที่ 7

โครงสร้าง และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหล กรณีฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง I165

ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาผลกระทบของการควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวางด้วยการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง I165 ที่มีต่อโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ของโครงสร้างเจ็ตและกระแสลมขวาง และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยผลการทดลองสำหรับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 เป็นดังต่อไปนี้

7.1 ความน่าจะเป็น

เนื่องจากกรณีการใช้ SPIV ควบคู่กับการปล่อยอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้นทำให้สามารถหาความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ณ ตำแหน่งใดๆได้ตามหัวข้อ 6.1

(A) ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต (ϕ_j)

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) กล่าวคือ รูปที่ 7.1ก(A) ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมีค่าสูงเข้าสู่หนึ่งที่บริเวณใจกลางเจ็ต และมีค่าลดต่ำลงตามแนวรัศมีจนมีค่าต่ำเข้าสู่ศูนย์ที่บริเวณขอบเจ็ต และมีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ด้านนอก ดังแสดงในรูปที่ 7.1ก(A)

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ดังแสดงในรูปที่ 7.2ก(A) พบว่าโครงสร้างความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมีการขยายตัวออกทางด้านข้าง และทางด้านบนซึ่งแสดงว่าเจ็ตสามารถพุ่งทะลุเข้าไปสู่กระแสลมขวางในแนวตั้งได้มากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม(JICF)

นอกจากนี้เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ยังพบโครงสร้าง Wake ที่ด้านล่างของเจ็ตโดยมีลักษณะเหมือนขาต่อจากบริเวณตัวเจ็ตยาวลงไปแนวตั้งจนถึงพื้น เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหลก็ยังคงพบโครงสร้าง Wake ได้อยู่ แต่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตในโครงสร้าง Wake จะลดลง หรือความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในโครงสร้าง Wake เพิ่มสูงขึ้นตามระยะการไหล

(B) ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลใดๆ(เจ็ดหรือกระแสมขวาง) (ϕ)

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) กล่าวคือ ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลใดๆ นั้นมีค่าเฉลี่ยมากกว่า 0.99 ในทุกระยะทางตามแนวการไหล โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ดและกระแสมขวางเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 นั้นก็ ยังมีความสม่ำเสมอ และคงตัวทั่วทั้งระนาบตัดขวางการไหลคล้ายคลึงกับผลการทดลองของกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม(JICF) ดังแสดงในรูปที่ 7.1ก(B)

อนึ่งยกเว้นบริเวณด้านล่างใกล้กับพื้นของการทดลองในทุกกรณีซึ่งความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลใดๆมีลดลงค่าไม่เข้าสู่หนึ่ง โดยเป็นผลมาจากการสะท้อนกลับของเลเซอร์ทำให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลในบริเวณดังกล่าวได้ นอกจากนี้ที่ระยะ $x/rd = 0.5$ พบบริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลใดๆมีค่าลดลงไม่เข้าสู่หนึ่งที่บริเวณขอบซ้ายบน เป็นผลมาจากความกว้างของแผ่นเลเซอร์น้อยเกินไปทำให้ไม่สามารถเก็บค่าความเร็วได้ แต่อย่างไรก็ตามบริเวณดังกล่าวอยู่ไกลออกไปจากตัวเจ็ดจึงไม่ส่งผลต่อการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

(C) ความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสมขวางบริสุทธิ์ (ϕ_{cf})

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) กล่าวคือ ความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสมขวางบริสุทธิ์มีค่าต่ำเข้าสู่ศูนย์ที่บริเวณใจกลางเจ็ด และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามแนวรัศมีมุ่งออกไปยังขอบเจ็ดจนมีค่าสูงที่บริเวณขอบเจ็ด และมีค่าเข้าสู่หนึ่งที่บริเวณกระแสมขวางบริสุทธิ์ด้านนอก ดังแสดงในรูปที่ 7.1ก(C) อีกนัยหนึ่งหมายถึงความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดมีค่าเข้าสู่หนึ่งที่บริเวณใจกลางเจ็ด และมีค่าลดลงตามแนวรัศมีมุ่งออกไปยังขอบเจ็ดจนมีค่าต่ำเข้าสู่ศูนย์ที่บริเวณขอบเจ็ด และมีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณกระแสมขวางบริสุทธิ์ เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล พบว่าบริเวณโครงสร้าง Wake มีความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสมขวางเพิ่มสูงขึ้น หรือความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดลดต่ำลง

7.2 เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล

รูปที่ 7.1ก CS แสดงการพัฒนาตัวของเวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล สำหรับกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 (A) เวกเตอร์ความเร็วเจ็ด ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$), (B) เวกเตอร์ความเร็วสนาม (\vec{V}_{yz} / u_{cf}) และ (C) เวกเตอร์ความเร็วกระแสมขวางบริสุทธิ์ ($\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$)

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

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) กล่าวคือ พบว่าเวกเตอร์ความเร็วของเจ็ต ($\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$) มีการเคลื่อนที่ของสนามความเร็วที่เกิดจากโครงสร้าง CVP (ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดอย่างชัดเจนในหัวข้อที่ 7.6) ลักษณะครึ่งการหมุนวน นอกจากนี้บริเวณขอบเจ็ตมีค่าเวกเตอร์ความเร็วเข้าสู่ศูนย์ ($\vec{0}$) เนื่องจากความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมีค่าต่ำเข้าสู่ศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 7.1ก(A)

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ดังแสดงในรูปที่ 7.2ก(A) พบเวกเตอร์ความเร็วเจ็ตที่โครงสร้าง Wake มีเคลื่อนที่การเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้ง

(B) เวกเตอร์ความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล (\bar{V}_{yz} / u_{cf})

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) กล่าวคือ เวกเตอร์ความเร็วสนาม (\bar{V}_{yz} / u_{cf}) มีลักษณะการเคลื่อนที่หมุนวนเต็มรูปเหมือนกับเวกเตอร์ความเร็วที่เกิดจาก CVP ทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 7.1ก (B)

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ดังแสดงในรูปที่ 7.2ก(B) พบว่าเวกเตอร์ความเร็วสนามมีตำแหน่งการหมุนวนยกตัวสูงขึ้นในแนวตั้งมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)

(C) เวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล ($\bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}$)

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) กล่าวคือ เวกเตอร์ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ($\bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}$) มีการเคลื่อนที่หมุนวนเป็นอีกครั้งที่เหลือจาก (A) ซึ่งผลการทดลองบ่งชี้ว่ากระแสลมขวางบริสุทธิ์ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนที่ดังกล่าวจากโครงสร้าง CVP ของเจ็ต โดยเกิดที่บริเวณด้านล่างมากกว่าด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 7.1ก(C)

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ดังแสดงในรูปที่ 7.2ก(C) พบว่าเวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์มีการเคลื่อนที่ตัวจากทั้งสองข้างของขอบเจ็ต พุ่งเข้าสู่ตัวเจ็ตที่บริเวณโครงสร้าง Wake ด้านข้างตัวเจ็ต ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่าขนาดของเวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์นั้นมียาวกว่า ขณะที่กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม(JICF) มีทิศทางเวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์พุ่งเข้าสู่เจ็ตที่ทางด้านล่างของขอบเจ็ต พร้อมทั้งมีขนาดที่สั้นกว่า

7.2.1 โครงสร้าง CVP ของเจ็ดเหนี่ยวนำให้กระแสมขวางบริสุทธิ์เคลื่อนที่หมุนวน

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) กล่าวคือ เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ดังแสดงในรูปที่ 7.1ก(C) พบว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ดจะเหนี่ยวนำกระแสมขวางบริสุทธิ์ให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนวนขึ้น โดยเริ่มจากโครงสร้าง CVP ของเจ็ดเหนี่ยวนำให้กระแสมขวางบริสุทธิ์ที่ขอบเจ็ดทั้งสองข้างมีการเคลื่อนที่พุ่งลงในแนวตั้ง

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ดังแสดงในรูป 7.2ก(C) พบว่าหลังจากที่กระแสมขวางบริสุทธิ์ที่ขอบเจ็ดทั้งสองข้างเคลื่อนที่พุ่งลงในแนวตั้งแล้ว จะถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ดให้มีการเคลื่อนที่เลี้ยวเข้าสู่เจ็ดที่บริเวณข้างโครงสร้าง Wake เป็นหลัก แตกต่างกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ที่กระแสมขวางบริสุทธิ์จะเข้าสู่เจ็ดที่ขอบเจ็ดด้านล่างเป็นหลัก ส่วนหลังจากกระแสมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่ตัวเจ็ดแล้ว จะผ่านบริเวณปากอ่าวของช่องการไหลขึ้นในแนวตั้งซึ่งคล้ายคลึงกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม

7.2.2 ช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Converging – diverging vertical channel)

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) กล่าวคือ เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ดังแสดงในรูปที่ 7.1ก พบการไหลขึ้นของของไหลใดๆผ่าน “ช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Vertical channel)” (B) ซึ่งวางตัวอยู่บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้าง CVP โดยแบ่งแยกเป็น 3 บริเวณ คือ 1) บริเวณที่มีการไหลลู่เข้า (Converging section) ซึ่งรวมถึงบริเวณปากอ่าว (Bell-shaped inlet) 2) บริเวณคอคอด (Throat) และ 3) บริเวณที่การไหลลู่ออก (Diverging section)

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ดังแสดงในรูป 7.2ก(B) พบว่าบริเวณปากอ่าว (Bell-shape inlet) นั้นยกตัวสูงขึ้นจากพื้นมากกว่าทำให้ฐานของอ่าวนั้นมีขนาดที่กว้างกว่าตามไปด้วย ผลการทดลองชี้แนะว่าการยกตัวสูงขึ้นจากพื้นนั้นจะช่วยไปลดผลของ Wall blocking (Kornsri (2009), Witthayapaprakorn(2013)) นอกเหนือจากนี้ยังพบว่าบริเวณคอคอดนั้นมีการวางตัวที่สูงขึ้นกว่า และมีขนาดยาวกว่าในแนวตั้งเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ส่วนการไหลเริ่มต้นจาก 7.2.1 และผ่านต่อไปยังบริเวณคอคอดของช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง จนกระทั่งไหลไปสู่บริเวณที่มีการไหลลู่ออกซึ่งมีความคล้ายคลึงกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF)

7.2.3 บริเวณที่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมสูง

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) กล่าวคือ เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบว่า บริเวณที่เกิดการผสมเกิดในช่วงความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต $0.01 < \phi_j < 0.75$ และบริเวณที่มีการผสมอย่างสูงในช่วงความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตประมาณในช่วง $0.25 < \phi_j < 0.75$ ที่ด้านล่างของขอบเจ็ตโดยวางตัวอยู่ที่โครงสร้าง Wake ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 7.4 นอกจากนี้การเหนี่ยวนำการผสมจะเกือบหมดสมบูรณ์ตั้งแต่ภายในบริเวณที่มีการไหลลู่เข้า (Converging section) ของช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Converging – diverging vertical channel) แล้ว เมื่อการไหลมาถึงบริเวณคอคอด (Throat) จะกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตเกือบหมด

อย่างไรก็ตามการมีอยู่ของโครงสร้าง Wake เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ดังแสดงในรูป 7.2(C) จะช่วยเพิ่มพื้นที่การไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ต และจะช่วยเพิ่มพื้นที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางในกรณีฉีดเจ็ตควบคุม (I165) มากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)

ดังนั้นจากการผลการทดลองทำให้สามารถประมาณได้ว่าอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ตเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 นั้นมีอัตราการไหลที่มากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม $\left[\left(Q_{cf, \Delta x}(\phi_j) \right)_{I165} > \left(Q_{cf, \Delta x}(\phi_j) \right)_{JICF} > 0 \right]$ โดยจะมีการอภิปรายอย่างละเอียดในบทที่ 8

7.3 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise

รูปที่ 7.1 ข CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise สำหรับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 (A) ความเร็วเจ็ต ($V_{j,x} / u_{cf}$), (B) ความเร็วสนาม (V_x / u_{cf}) และ (C) ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ($V_{cf,x} / u_{cf}$)

(A) ความเร็วเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise ($V_{j,x} / u_{cf}$)

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) กล่าวคือ พบโครงสร้างรูปไต (Kidney shape) ที่มีความเร็วในแนวแกน Streamwise สูง ($V_{j,x} / u_{cf}$) และบริเวณปากอ่าว (Gulf region) ที่มีความเร็วในแนวแกน Streamwise ต่ำกว่าบริเวณอื่น ดังแสดงในรูปที่ 7.1ข(A) เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหลก็ยังสามารถพบโครงสร้างรูปทรงไตและบริเวณอ่าวได้อยู่ ขณะที่ค่าความเร็วสูงสุดนั้นจะมีค่าลดต่ำลง

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ดังแสดงในรูปที่ 7.2ข(A) พบว่าโครงสร้างรูปไตไม่โดดเด่นเท่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) โดยความเร็วสูงสุดในแนวแกน Streamwise ที่ด้านบนของโครงสร้างรูปไตถูกหน่วงให้มีค่าลดลง แสดงถึง ที่บริเวณดังกล่าวมี Decay rate ที่สูง ยิ่งไปกว่านั้นยังพบบริเวณที่มีความเร็วสูงอีกบริเวณภายในโครงสร้าง Wake วางตัวต่อจากปลายของโครงสร้างรูปไต มีลักษณะเหมือนเกาะซึ่งในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมจะไม่พบบริเวณนี้ นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณอ่าวที่มีความเร็วต่ำนั้นยกตัวสูงขึ้นในแนวตั้งมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม ผลการทดลองชี้แนะว่าการฉีดเจ็ตควบคุมทำให้ Wall blocking ลดลง

อนึ่งเนื่องจากงานวิจัยในอดีตมักนิยาม โครงสร้างรูปไต (Kidney shaped) หมายถึงบริเวณที่มีรูปร่างคล้ายไตจากปริมาณต่างๆกัน (Velocity, Passive scalar ฯลฯ) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะนิยามโครงสร้างรูปไต (Kidney shaped) และบริเวณอ่าว (Gulf region) นั้นจะหมายถึงโครงสร้างความเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise เท่านั้น

(B) ความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise (V_x / u_{cf})

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) กล่าวคือ พบว่า โครงสร้างรูปไตและบริเวณอ่าวมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีค่าความน่าจะเป็นที่พบเจ็ตสูงแล้ว จึงมีผลกระทบจากส่วนเดิมของกระแสลมขวางบริสุทธิ์น้อย พร้อมทั้งยังคงเห็นโครงสร้างรูปเกาะอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 7.1ข(B)

(C) ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise ($V_{cf,x} / u_{cf}$)

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) กล่าวคือ บริเวณใจกลางเจ็ตมีความเร็วต่ำเข้าสู่ศูนย์เนื่องจากความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมีค่าสูง และความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์มีค่าต่ำ นอกจากนี้ยังพบบริเวณที่ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์มีค่าลดลงต่ำกว่าหนึ่ง ($V_{cf,x} / u_{cf} < 1$) ที่ด้านบนของโครงสร้างรูปไตซึ่งบ่งชี้ว่ากระแสลมขวางบริสุทธิ์เกิดความหน่วงขึ้นหลังจากการเข้าปะทะกับเจ็ตที่ด้านหน้า และเกิดการเลี้ยวเบนออกจากแนวแกน Streamwise ดังแสดงในรูปที่ 6.4

อนึ่งหลักฐานนี้จะใช้เป็นส่วนหนึ่งของเหตุผลที่ไม่รวมการไหลออกของกระแสลมขวางที่ด้านบนในการคำนวณหาอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ต $[Q_{cf,\Delta x}(\phi_j)]$ ในบทที่ 9

7.4 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Transverse

รูปที่ 7.1ค CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Transverse สำหรับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 (A) ความเร็วเจ็ต ($V_{j,y}/u_{cf}$), (B) ความเร็วสนาม (V_y/u_{cf}) และ (C) ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ($V_{cf,y}/u_{cf}$)

(A) ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติของเจ็ตในแนวแกน Transverse ($V_{j,y}/u_{cf}$)

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม(JICF) กล่าวคือ พบบริเวณที่มีค่าความเร็วสูงสุดในแนวแกน Transverse เป็นบวกรบริเวณกึ่งกลางเจ็ต และบริเวณที่มีค่าความเร็วต่ำสุดเป็นลบบริเวณทั้งสองข้างของขอบเจ็ต ดังแสดงในรูปที่ 7.1ค(A)

เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหลพบว่าบริเวณที่มีค่าความเร็วสูงสุดเป็นบวกรนั้นยังสามารถพบได้อยู่ซึ่งสอดคล้องกับบริเวณที่มีอยู่ของบริเวณที่มีค่าความเร็วสูงสุดเป็นบวกรที่ด้านล่างของกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) โดยเป็นบริเวณเดียวกับบริเวณคอคออด(Throat) ของช่องในแนวตั้งซึ่งถูกเหนี่ยวนำให้เกิดโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ต

อย่างไรก็ตาม เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ดังแสดงในรูปที่ 7.2ค(A) พบบริเวณที่มีค่าความเร็วสูงสุดในแนวแกน Transverse เป็นบวกรแค่เพียงบริเวณเดียวที่กึ่งกลางของเจ็ต ซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ซึ่งพบบริเวณที่มีค่าความเร็วสูงสุดเป็นบวกร 2 บริเวณที่กึ่งกลางด้านบนและด้านล่างของตัวเจ็ต นอกเหนือจากนี้ยังพบว่าบริเวณที่เป็นบวกรเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมนั้นวางตัวสูงขึ้นกว่า และมีขนาดความเร็วในแนวตั้งที่มากกว่าด้วย

(B) และ (C) ความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติ (V_y/u_{cf}) และความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติ ($V_{cf,y}/u_{cf}$) ในแนวแกน Transverse

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม(JICF) กล่าวคือ บริเวณทั้งสองข้างของขอบเจ็ตนั้นมีความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ซึ่งผลการทดลองชี้แนะว่าเกิดจากการเหนี่ยวนำของโครงสร้าง CVP ของเจ็ตให้มีความเร็วในแนวตั้งมีค่าเป็นลบที่ด้านบน และเป็นบวกรที่ด้านในกลางเจ็ต ดังแสดงในรูปที่ 7.1ค(B) และ(C)

นอกจากนี้ที่ด้านบนขอบเจ็ต พบว่ากระแสลมขวางบริสุทธิ์มีความเร็วในแนวแกน Transverse มากกว่าศูนย์ซึ่งสอดคล้องกับบริเวณที่กระแสลมขวางบริสุทธิ์มีความเร็วในแนวแกน

Streamwise ต่ำกว่าหนึ่ง ($V_{cf,x} / u_{cf} < 1$) ซึ่งสนับสนุนการถึงเข้าประทะกันระหว่างกระแสลมขวาง บริสุทธิ์กับเจ็ตที่ด้านหน้า และทำให้กระแสลมขวางเลี้ยวเบนขึ้นในแนวตั้ง

7.5 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise

รูปที่ 7.1ง CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise สำหรับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 โดยในรูป (A) ความเร็วเจ็ต ($V_{j,z} / u_{cf}$), (B) ความเร็วสนาม (V_z / u_{cf}) และ (C) ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ($V_{cf,z} / u_{cf}$)

(A) ความเร็วเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise ($V_{j,z} / u_{cf}$)

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) กล่าวคือ พบบริเวณที่มีความเร็วเจ็ตสูงสุด 2 คู่ โดยทิศทางความเร็วของแต่ละคู่สอดคล้องกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง CVP ดังแสดงในรูปที่ 7.1ง(A)

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ดังแสดงในรูปที่ 7.2ง(A) ก็ยังสามารถพบจุดอานม้า (Saddle point) บริเวณความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตสูง $\phi_j > 0.95$ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางเจ็ต โดยจุดอานม้าวางตัวสูงขึ้นกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมอย่างชัดเจน

(B) และ (C) ความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติ (V_z / u_{cf}) และความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติ ($V_{cf,z} / u_{cf}$) ในแนวแกน Spanwise

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) กล่าวคือ พบบริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์มีความเร็วสอดคล้องกับสนามการหมุนวนของโครงสร้าง CVP จากผลการทดลองชี้แนะว่าการหมุนวนของเวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์เกิดจากการเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ต ดังแสดงในรูปที่ 7.1ง(B)และ(C)

7.6 Vorticity เฉลี่ยต่อเวลาไร้มิติในแนวแกน Streamwise

รูปที่ 7.1จ CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้าง Vorticity เฉลี่ยต่อเวลาไร้มิติในแนวแกน Streamwise สำหรับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 โดยในรูป (A) Vorticity เจ็ต ($\omega_{j,x} d / u_{cf}$), (B) Vorticity สนาม ($\omega_x d / u_{cf}$), (C) Vorticity กระแสลมขวางบริสุทธิ์ ($\omega_{cf,x} d / u_{cf}$)

(A) Vorticity เจ็ดเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise ($\omega_{j,x}d/u_{cf}$)

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) กล่าวคือ ที่ระยะ $x/rd = 0.5$ พบโครงสร้าง Counter rotating vortex pair(CVP) หลักของเจ็ดเพียง 1 คู่ และมีทิศทางการหมุนสอดคล้องกับโครงสร้าง CVP ในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) โดยบริเวณที่มีค่า Vorticity สูงนั้นอยู่ตรงกลางของโครงสร้าง CVP พร้อมทั้งมีขาแยกออกไปในแนวตั้ง และอีกขาแยกมาทางด้านล่างโดยวางตัวอยู่ภายในโครงสร้าง Wake เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามระยะการไหลก็ยังสามารถพบโครงสร้าง CVP ได้อยู่เหมือนกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 7.1จ(A)

อย่างไรก็ตามกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) พบคู่ CVP ถึง 3 คู่ เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง 1165 พบเพียงแค่ 1 คู่ ดังแสดงในรูปที่ 7.2จ(A) นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ดในกรณีฉีดเจ็ดควบคุมนั้นลอยตัวสูงขึ้นกว่าในแนวตั้งอย่างเห็นได้ชัด

(B) และ (C) Vorticity สนามเฉลี่ยไร้มิติ ($\omega_x d/u_{cf}$) และ Vorticity กระแสลมขวางบริสุทธ์ ($\omega_{cf,x}d/u_{cf}$) ในแนวแกน Streamwise

โดยรูปที่ 7.1จ(B)และ(C) แสดง Vorticity เจ็ดเฉลี่ยไร้มิติของสนาม ($\omega_x d/u_{cf}$) และ Vorticity กระแสลมขวางบริสุทธ์ ($\omega_{cf,x}d/u_{cf}$) ในแนวแกน Streamwise พบว่ามี Vortex 2 คู่ โดยทิศทางการหมุนซึ่งทิศทางของทั้ง 2 คู่ นั้นเหมือนกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม ซึ่งในกระแสลมขวางบริสุทธ์นั้นจะไม่มี Vorticity

เช่นเดียวกับกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) กล่าวคือ เมื่อพิจารณาตลอดทุกระยะการไหลพบว่า ยังสามารถพบ Vortex ทั้งสองคู่ได้อยู่ ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าคู่ Vortex ด้านบนมีการยกตัวสูงขึ้น ประกอบกับเมื่อพิจารณาทิศทางการหมุน พบว่าทิศทางการหมุนของ Vortex คู่บนสอดคล้องกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง Wake ขณะที่ทิศทางการหมุนของ Vortex คู่ล่างสอดคล้องกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง Horseshoe vortex ดังนั้นแล้วหลักฐานชี้แนะว่า การที่กระแสลมขวางบริสุทธ์พบ Vorticity อาจเกิดขึ้นจากโครงสร้างดังกล่าว

อนึ่ง แม้ว่าทิศทางการหมุนของ Vortex คู่ล่างนั้นจะสอดคล้องกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง Horseshoe vortex ก็ตาม แต่ที่บริเวณ Vortex คู่ล่างนั้นใกล้กับขอบภาพ ดังนั้นบริเวณดังกล่าวอาจเกิดจากความคาดเคลื่อนในการวัดความเร็ว

7.7 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง สำหรับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง I165

กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 นั้นมีกลไกการผสมคล้ายคลึงกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม โดยพบว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ตเป็นโครงสร้างหลักที่ทำให้เกิดกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยสามารถอธิบายกลไกการผสมในระนาบตัดขวางได้ตามความสัมพันธ์ของปริมาณเฉลี่ยไว้มิติต่างๆดังแสดงในรูป 7.3

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบว่ากระแสลมขวางบริสุทธิ์ซึ่งถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตจะไปเข้าสู่ตัวเจ็ตตลอดบริเวณโครงสร้าง Wake ทำให้พื้นที่บริเวณที่กระแสลมขวางบริสุทธิ์ไหลเข้าสู่เจ็ตนั้นมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมซึ่งกระแสลมขวางไหลเข้าสู่ตัวเจ็ตเฉพาะที่บริเวณด้านล่างเท่านั้น

โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำและขับเคลื่อนให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์เกิดการเคลื่อนที่หมุนวน

เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) กล่าวคือ ว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำและขับเคลื่อนให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่อยู่โดยรอบเกิดการเคลื่อนที่หมุนวน โดยเริ่มจากกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ขอบเจ็ตทั้งสองข้างถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่พุ่งลงในแนวตั้งเหมือนกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 หลังจากที่กระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ขอบเจ็ตทั้งสองข้างพุ่งลงในแนวตั้งแล้ว จะถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตให้มีการเคลื่อนที่เลี้ยวเข้าสู่เจ็ตที่บริเวณข้างโครงสร้าง Wake เป็นหลัก แตกต่างกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ที่กระแสลมขวางบริสุทธิ์จะเข้าสู่เจ็ตที่ขอบเจ็ตด้านล่างเป็นหลัก หลังจากเข้าสู่ตัวเจ็ตแล้ว จะไหลไปยังบริเวณปากอ่าวซึ่งวางตัวสูงชันกว่า (ชี้แนะว่าผลของ Wall blocking) ทำให้บริเวณฐานนั้นมีขนาดกว้างกว่าตามไปด้วย จากนั้นจะไหลผ่านช่องการไหลขึ้นในแนวตั้งเข้าใจกลางเจ็ต

โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำและขับเคลื่อนการไหลขึ้นผ่านช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Vertical channel) และบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมสูง

เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม กล่าวคือ โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำและขับเคลื่อนทำให้เกิดช่องการไหลขึ้นผ่านช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Converging – diverging vertical channel) ซึ่งอยู่ตรงกับกึ่งกลางโครงสร้าง CVP ของเจ็ต โดยหลังจากการไหลผ่านผ่านเข้าสู่เจ็ตที่บริเวณโครงสร้าง Wake ซึ่งค่าความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตต่ำ และความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์สูง จะเริ่มเกิดการเหนี่ยวนำการผสมจนกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตจนเกือบหมดแล้วบริเวณที่บริเวณที่มีการไหลลู่เข้า (Converging section) และไหลต่อไปมุ่งเข้าสู่ใจกลางเจ็ตผ่านบริเวณคอคอด (Throat) ของช่องการไหลขึ้นในแนวตั้งซึ่งบริเวณดังกล่าวมีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตสูงแล้ว และความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นพบบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมสูงเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ในช่วงความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต $0.25 < \phi_j < 0.75$

การเหนี่ยวนำการผสมโดยโครงสร้างรูปไต (Kidney shape) คล้ายเจ็ตอิสระ

เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) กล่าวคือ เมื่อของไหลที่ผสมจนกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตเข้าสู่บริเวณอ่าว (Gulf region) ซึ่งมีความเร็วในแนวแกน Streamwise ต่ำ และ ความเร็วในแนว Transverse สูง จะถูกเหนี่ยวนำให้ไหลกระจายตัวลู่ออกไปปะทะกับแนวขอบของโครงสร้างรูปไต (Kidney shaped) ที่มีความเร็วในแนวแกน Streamwise สูง และเกิดการเหนี่ยวนำการผสมโดยโครงสร้างรูปไตคล้ายกับการเหนี่ยวนำการผสมในเจ็ตอิสระ(Free jet)

กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง

เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) กล่าวคือ โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเป็นกลไกหลักสำคัญที่เหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตามแต่เมื่อฉีดเจ็ตควบคุม กระแสลมขวางจะเข้าไปผสมกับเจ็ตผ่านด้านข้างของโครงสร้าง Wake เป็นหลัก และไหลผ่านช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง เกิดการเหนี่ยวนำการผสมจนกระทั่งกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต และจะถูกเหนี่ยวนำต่อโดยโครงสร้างรูปไตให้มีความเร็วตามแนวการไหลเพิ่มมากขึ้น คล้ายเจ็ตอิสระ เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนขึ้นจะแสดงภาพจำลองกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสลมขวางในรูปที่ 6.3

บทที่ 8

โครงสร้าง และการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรการไหล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาโครงสร้าง และการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรการไหล (Center-plane, $z / rd = 0$) ของเจ็ตในกระแสมวลว่าง ทั้งในการกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จากการวิเคราะห์ปริมาณต่างๆ ได้แก่ ความน่าจะเป็นเวกเตอร์ความเร็วในระนาบสมมาตรการไหล ความเร็วในแนวแกน Streamwise Transverse และ Spanwise และ Vorticity ในแนวแกน Spanwise ประกอบกันทำให้สามารถวิเคราะห์กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรการไหลได้ โดยหลักการในการวิเคราะห์และการแสดงผลจะคล้ายคลึงกับการศึกษาในระนาบตัดขวางการไหล

8.1 ความน่าจะเป็น

(A) ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต (ϕ_j)

รูปที่ 8.1ก(A) CS แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต พบว่าความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตจะมีค่าสูงเข้าสู่หนึ่งที่บริเวณใจกลางเจ็ต และมีค่าลดต่ำลงมุ่งออกไปยังขอบเจ็ตจนมีค่าต่ำเข้าสู่ศูนย์ที่บริเวณขอบเจ็ต และมีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณกระแสมวลว่างบริสุทธิ์ด้านนอก สอดคล้องกับผลการทดลองในระนาบตัดขวาง

ข้อสังเกตหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตในงานวิจัยนี้กับกรณีการทดลองที่ศึกษา Passive scale concentration โดย Smith and mungal (1998) (รูปที่ 2.10) พบว่า ในงานวิจัยนี้เส้นค่าคงที่ของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต (Contour line) จะไม่เป็นเส้นปิด โดยความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตจะไม่ลดลงตามระยะการไหล แตกต่างกับกรณีเส้นค่าคงที่ของการลดลงของความเข้มข้น (Scalar concentration) ที่จะเส้นปิด เนื่องจากความเข้มข้นจะมีค่าลดลงตามระยะการไหล

(B) ความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลใดๆ(เจ็ตหรือกระแสมวลว่าง) (ϕ)

รูปที่ 8.1ก(B) CS แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลใดๆ โดยทางทฤษฎีความน่าจะเป็นที่จะพบของไหลใดๆจะมีค่าเป็นหนึ่งสม่ำเสมอทุกจุดทั่วทั้งระนาบตัดขวาง เนื่องจากจะต้องพบของไหลอย่างใดอย่างหนึ่งเสมอไม่ว่าจะเป็นเจ็ตหรือกระแสมวลว่าง จากการทดลองพบว่าความน่าจะเป็นที่จะ

พบของไหลใดๆนั้นมีความเฉื่อยมากกว่า 0.99 ในทุกระยะทางตามแนวการไหล โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการสื่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสลมขวางในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ในการทดลองนี้มีความสม่ำเสมอ และคงตัวทั่วทั้งระนาบสมมาตรการไหล

(C) ความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ (ϕ_{cf})

รูปที่ 8.1ก(C) CS แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ พบว่า ความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์เป็นส่วนเติมเต็มของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต โดยความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์มีค่าต่ำเข้าสู่ศูนย์ที่บริเวณใจกลางเจ็ต และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมุ่งออกไปยังขอบเจ็ตจนมีค่าสูงที่บริเวณขอบเจ็ต และมีค่าเข้าสู่หนึ่งที่บริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ด้านนอก

8.2 เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตรการไหล

รูปที่ 8.1ก In-plane vector แสดงเวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตรการไหล สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) โดย (A) เวกเตอร์ความเร็วเจ็ต ($\vec{V}_{j,xy} / u_{cf}$), (B) เวกเตอร์ความเร็วสนาม (\vec{V}_{xy} / u_{cf}) และ (C) เวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ($\vec{V}_{cf,xy} / u_{cf}$)

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

รูปที่ 8.1ก(A) In-plane vector แสดงเวกเตอร์ความเร็วเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตรการไหล ($\vec{V}_{j,xy} / u_{cf}$) พบว่าเวกเตอร์ความเร็วเจ็ตมีการเคลื่อนที่คล้ายกับเวกเตอร์ความเร็วที่เกิดจากโครงสร้าง Spanwise roller เพียงครั้งหนึ่งที่ขอบเจ็ตด้านหน้า (ซึ่งจะกล่าวถึงและนิยามอย่างชัดเจนจาก $\omega_{j,z} d / u_{cf}$ ในหัวข้อที่ 8.6) และเวกเตอร์ความเร็วเจ็ต ($\vec{V}_{j,xy} / u_{cf}$) จะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ (0) ที่บริเวณขอบเจ็ต เนื่องจากความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่ขอบเจ็ตมีค่าต่ำเข้าสู่ศูนย์

ข้อสังเกตเมื่อพิจารณาที่บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (Windward) พบว่า เส้นค่าคงที่ของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตจะโค้งอย่างต่อเนื่องไปตามระยะการไหล ในขณะที่บริเวณด้านหลังของเจ็ต (Leeward) พบว่า เส้นค่าคงที่ของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตจะมีลักษณะหักมุม (Kink) ที่ตำแหน่ง $x / rd = 0.3 - 0.5$ ยิ่งไปกว่านั้นยังที่บริเวณด้านหลังของเจ็ต (Leeward) จะเริ่มเห็นส่วนผสมของเจ็ตมีความเร็วไหลขึ้นในแนวตั้ง ($\vec{V}_{j,y} / u_{cf}$)

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่เวกเตอร์ความเร็วของเจ็ตในระนาบสมมาตร ($\vec{V}_{j,xy} / u_{cf}$) โดยพิจารณาจากรูปที่ 8.1ข(A) จะสามารถแบ่งบริเวณการไหลโดยประมาณได้เป็น 2 บริเวณ คือ

1. บริเวณตั้งแต่ใจกลางเจ็ตขึ้นไปทางด้านบนวางตัวตรงกับโครงสร้างรูปไต (Kidney-shape) โดยมีลักษณะการไหลคล้ายกับเจ็ตอิสระที่พุ่งขึ้นในแนวตั้งแล้วถูกเบนโค้งไปตามระยะการไหล แสดงถึง บริเวณนี้โครงสร้างรูปไตมีความโดดเด่นในการขับเคลื่อน
2. บริเวณส่วนด้านล่างที่เหลือ จะพบเวกเตอร์ความเร็วของเจ็ตมีการไหลขึ้นในแนวตั้งเข้าสู่บริเวณโครงสร้างรูปไตด้านบน ซึ่งการไหลดังกล่าวถูกเหนี่ยวนำให้เกิดโดยโครงสร้าง CVP และ โครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ต กล่าวคือ ส่วนผสมของเจ็ตที่ด้านล่างจะถูกโครงสร้าง CVP ผลักดัน และโครงสร้าง Spanwise roller เหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมกับโครงสร้างรูปไต (Kidney shape) คล้ายการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ แสดงถึง ที่บริเวณดังกล่าว โครงสร้างรูปไตและโครงสร้าง CVP ของเจ็ตมีความโดดเด่นในการขับเคลื่อน

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

รูปที่ 8.1ก(B) In-plane vector แสดงเวกเตอร์ความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตร การไหล (\vec{V}_{xy} / u_{cf}) พบว่าเวกเตอร์ความเร็วสนามมีการเคลื่อนที่คล้ายกับเวกเตอร์ความเร็วที่เกิดจากโครงสร้าง Spanwise roller เต็มรูปที่ขอบเจ็ตด้านหน้า โดยสามารถเห็นสนามความเร็วอีกครั้งหนึ่ง นอกจากนี้ยังพบสนามความเร็วสนามด้านนอกขอบเจ็ตที่บริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่อยู่ด้านนอกเจ็ตไปไกล มีการเคลื่อนที่ตรงไปในแนวการไหล ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่จะมีความเร็วเฉพาะในแนวการไหลเท่านั้น

(C) เวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล ($\vec{V}_{cf,xy} / u_{cf}$)

รูปที่ 8.1ก(C) In-plane vector แสดงเวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติในระนาบสมมาตรการไหล ($\vec{V}_{cf,xy} / u_{cf}$) เมื่อพิจารณาที่บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (Windward) พบว่าเวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์มีการเคลื่อนที่คล้ายกับเวกเตอร์ความเร็วอีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากโครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ต ที่ไม่สามารถพบได้จาก รูป8.1ก(A) โดยสิ่งนี้เป็นหลักฐานสนับสนุนว่ากระแสลมขวางบริสุทธิ์ถูกโครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ตเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนที่

8.2.1 บริเวณที่เกิดการเหนี่ยวนำการผสม

รูปที่ 8.1ก(C) การวิเคราะห์การเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรจะแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (Windward) และบริเวณด้านหลังของเจ็ต (Leeward)

บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (Windward) พบว่า มีการเหนี่ยวนำการผสมเกิดขึ้นในระนาบสมมาตรการไหลโดยความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนว Streamwise ($\vec{V}_{cf,x}$) เท่านั้น ในขณะที่ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนว Transverse ($\vec{V}_{cf,y}$) ไม่ก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม โดยพิจารณาจากเวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนว Streamwise เท่านั้นที่มีการไหลไปในทิศทางเดียวกับการเพิ่มขึ้นของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ($\vec{V}_{cf,x} \cdot \nabla \phi_j > 0$) (หรือทิศทางเดียวกับการลดลงของความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์) ซึ่งแสดงถึงการเหนี่ยวนำการผสมเกิดขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Yuan et al (1998) ซึ่งพบว่า มีการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรการไหลที่ด้านหน้าของเจ็ต (Windward) โดยกระแสลมขวางบริสุทธิ์จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการผสมโดยโครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ต ในขณะที่ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนวแกน Transverse จะมีทิศทางการไหลไปในทิศทางเดียวกับการเพิ่มขึ้นของความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ($\vec{V}_{cf,y} \cdot \nabla \phi_j < 0$) (หรือทิศทางเดียวกับการลดลงของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต) ซึ่งไม่ก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม

บริเวณด้านหลังของเจ็ต (Leeward) พบว่า มีการเหนี่ยวนำการผสมเกิดขึ้นโดยความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนว Transverse เท่านั้น ในขณะที่ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนว Streamwise ไม่ก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม พิจารณาการมีเวกเตอร์ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนว Transverse เท่านั้นที่มีการไหลไปในทิศทางเดียวกับการเพิ่มขึ้นของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ($\vec{V}_{cf,y} \cdot \nabla \phi_j > 0$) ซึ่งสอดคล้องกับการเหนี่ยวนำการผสมโดยของสร้าง CVP ในระนาบตัดขวางการไหล (ดังเสนอแนะในบทที่ 6) ในขณะที่ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนว Streamwise จะมีการไหลประมาณขนานกับเส้นค่าคงที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมีค่าคงที่ ($\vec{V}_{cf,x} \cdot \nabla \phi_j \approx 0$) ซึ่งการไหลดังกล่าวจะไม่ก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม

ดังนั้น การเหนี่ยวนำการผสมที่พบในระนาบสมมาตรการไหลซึ่งเกิดจากความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนว Streamwise ($\vec{V}_{cf,x} \cdot \nabla \phi_j > 0$) โดยเกิดที่ด้านหน้าของเจ็ต

(Windward) แสดงให้เห็นว่า การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวางไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะในระนาบตัดขวางการไหลเท่านั้น แต่จะมีการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรการไหลด้วย ดังนั้นกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวางจะประกอบด้วย 2 กลไกเป็นอย่างน้อย คือ โครงสร้าง CVP ของเจ็ด และโครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ด

8.3 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise

รูปที่ 8.1ข CS แสดงโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) (A) ความเร็วเจ็ด ($V_{j,x} / u_{cf}$), (B) ความเร็วสนาม (V_x / u_{cf}) และ (C) ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ($V_{cf,x} / u_{cf}$)

(A) ความเร็วเจ็ดเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise ($V_{j,x} / u_{cf}$)

รูปที่ 8.1ข(A) CS แสดงการพัฒนาตัวของโครงสร้างความเร็วเจ็ดเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise ($V_{j,x} / u_{cf}$) พบ บริเวณที่มีความเร็วเจ็ดในแนวการไหลสูงวางตัวค่อนข้างขนานของตัวเจ็ด และยังคงอยู่เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล ซึ่งบริเวณที่มีความเร็วสูงดังกล่าวสอดคล้องกับโครงสร้างรูปไต (Kidney shape) ที่พบในการศึกษาในระนาบตัดขวางการไหล

นอกจากนี้ยังพบบริเวณที่มีความเร็วเจ็ดในแนวตามการไหลต่ำ วางตัวอยู่บริเวณด้านล่างบริเวณที่มีความเร็วเจ็ดในแนวการไหลสูง ซึ่งสอดคล้องกับบริเวณอ่าว (Gulf region) ที่พบในการศึกษาในระนาบตัดขวางการไหล ยิ่งไปกว่านั้นพบบริเวณที่มีความเร็วเจ็ดในแนวการไหลมีค่าเป็นลบที่ $x / rd = 0.25$ ซึ่งสอดคล้องกับบริเวณอ่าวของงานวิจัยของ Wongthongsiri (2015) และ Dowyok (2015)

(B) ความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise (V_x / u_{cf})

รูปที่ 8.1ข(B) CS แสดงโครงสร้างความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise (V_x / u_{cf}) พบว่า บริเวณที่มีความเร็วในแนวการไหลสูง (Kidney shape) และที่มีความเร็วในแนวการไหลต่ำ (Gulf region) มีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีค่าความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดสูงอยู่แล้ว ทำให้ผลกระทบจาก “ส่วนเติมเต็ม” จากกระแสลมขวางบริสุทธิ์นั้นมีน้อยสอดคล้องกับผลการทดลองในระนาบตัดขวางการไหล

(C) ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธ์เฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise ($V_{cf,x} / u_{cf}$)

รูปที่ 8.1ข(C) CS แสดงโครงสร้างความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธ์เฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise ($V_{cf,x} / u_{cf}$) พบว่า ที่บริเวณใจกลางเจ็ต ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธ์มีค่าต่ำเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งสอดคล้องกับความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธ์มีค่าต่ำ หรือความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมีค่าสูง

นอกจากนี้ยังพบว่า ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่บริเวณขอบเจ็ตด้านหน้ามีความเร็วลดลงต่ำกว่าหนึ่ง ($V_{cf,x} / u_{cf} < 1$) แสดงถึง กระแสลมขวางบริสุทธ์จะถูกลดความเร็วลงหลังจากการไหลเข้าปะทะกับเจ็ตที่ด้านหน้า และเกิดการเลี้ยวเบนขึ้น ออกจากแนวแกน Streamwise ดังแสดงในรูปที่ 6.4

อนึ่งหลักฐานนี้จะใช้เป็นส่วนหนึ่งของเหตุผลที่ไม่รวมการไหลออกของกระแสลมขวางที่ด้านบนในการคำนวณหาอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธ์เข้าสู่เจ็ต $[Q_{cf,\Delta t}(\phi_j)]$

8.4 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Transverse

รูปที่ 8.1ค CS แสดงโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Transverse สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) (A) ความเร็วเจ็ต ($V_{j,y} / u_{cf}$), (B) ความเร็วสนาม (V_y / u_{cf}) และ (C) ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธ์ ($V_{cf,y} / u_{cf}$)

(A) ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติของเจ็ตในแนวแกน Transverse ($V_{j,y} / u_{cf}$)

รูปที่ 8.1ค(A) CS แสดงโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Transverse ($V_{j,y} / u_{cf}$) พบบริเวณที่มีความเร็วเจ็ตในแนว Transverse มีค่าสูงสุดที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของเจ็ต และแยกตัวออกเป็นบริเวณที่มีความเร็วในแนว Transverse สูงสุด 2 บริเวณไปทางด้านล่าง และด้านบน

บริเวณที่มีค่าความเร็วเจ็ตในแนวแกน Transverse สูงสุด (Maximum local peak) ที่ด้านบน พบว่า เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหลจะมีการสลายตัวไป แสดงถึง บริเวณนี้ไม่มีกลไกช่วยในการขับเคลื่อนให้สามารถคงอยู่ตลอดตามแนวการไหลได้ ซึ่งบริเวณนี้น่าจะเกิดจากโมเมนตัมที่หลงเหลืออยู่จากปากทางออกของเจ็ต โดยสอดคล้องกับบริเวณที่มีค่าความเร็วสูงสุดเป็นบวกที่ด้านบนในระนาบตัดขวางการไหล

ในทางกลับกันขณะที่บริเวณที่มีค่าความเร็วเจ็ตในแนวแกน Transverse สูงสุด (Maximum local peak) ที่ด้านล่าง ยังสามารถพบได้อยู่แม้ว่าเจ็ตจะพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล แต่จะมีความเร็วลดลง แสดงถึง มีกลไกมาขับเคลื่อนให้คงอยู่ได้ตลอดระยะการไหล ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในระนาบตัดขวางการไหล โดยบริเวณดังกล่าววางตัวตรงกับตำแหน่งและขนาดของโครงสร้าง CVP ดังนั้นหลักฐานนี้บ่งชี้ว่าโครงสร้าง CVP เป็นกลไกที่เหนี่ยวนำและขับเคลื่อนบริเวณที่มีค่าความเร็วสูงสุดในแนวแกน Transverse ที่ด้านล่าง

(B) และ (C) ความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติ (V_y / u_{cf}) และความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติ ($V_{cf,y} / u_{cf}$) ในแนวแกน Transverse

จากรูปที่ 8.1ค(B)และ(C) CS แสดงโครงสร้างความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติ (V_y / u_{cf}) และความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์เฉลี่ยไร้มิติ ($V_{cf,y} / u_{cf}$) ในแนวแกน Transverse ผลการทดลองจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (Windward) และบริเวณด้านหลังของเจ็ต (Leeward)

บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (Windward) พบ บริเวณที่มีความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์มีค่ามากกว่าศูนย์ ($V_{cf,y} / u_{cf} > 0$) ที่ขอบเจ็ตไปตามระยะการไหล โดยผลการทดลองสนับสนุนการเข้าปะทะกันระหว่างกระแสลมขวางบริสุทธิ์กับเจ็ตที่ด้านหน้า (Windward) ทำให้กระแสลมขวางเฉลี่ยเบนขึ้นในแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 6.4

บริเวณด้านหลังของเจ็ต (Leeward) พบ บริเวณที่มีความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์มีค่ามากกว่าศูนย์ ($V_{cf,y} / u_{cf} > 0$) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในระนาบตัดขวางการไหล โดยจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ต ยิ่งไปกว่านั้นที่ตำแหน่ง $x / rd < 0.5$ (ใกล้ปากทางออกของเจ็ตซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่มีข้อมูลในระนาบตัดขวางการไหลของตำแหน่งดังกล่าว) พบว่า ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนวตั้งมีค่าสูงกว่าบริเวณโดยรอบอย่างชัดเจน ประกอบกับการตั้งฉากกันระหว่างเวกเตอร์ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนว Transverse กับเส้นค่าคงที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต $\left[(\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}) \perp \phi_{j,const} \right]$ อย่างมาก แสดงถึง บริเวณดังกล่าวจะมีการเหนี่ยวนำการผสมสูง ($\vec{V}_{cf,y} \cdot \nabla \phi_j > 0$ มีค่าสูง) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Smith and mungal (1998) พบว่า ที่บริเวณ Near field เจ็ตในกระแสลมขวาง (JICF) จะมีการเหนี่ยวนำการผสมสูงกว่าเจ็ตอิสระ (Free jet) โดย Smith and mungal อธิบายว่า การเพิ่มสูงขึ้นของการเหนี่ยวนำการผสมดังกล่าวเกิดจากการก่อดำของโครงสร้าง CVP

8.5 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise

รูปที่ 8.1ง CS แสดงโครงสร้างความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise สำหรับกรณีไม่ฉีด เจ็ตควบคุม (JICF) (A) ความเร็วเจ็ต ($V_{j,z} / u_{cf}$), (B) ความเร็วสนาม (V_z / u_{cf}) และ (C) ความเร็ว กระแสลมขวางบริสุทธ์ ($V_{cf,z} / u_{cf}$)

(A) ความเร็วเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise ($V_{j,z} / u_{cf}$)

รูปที่ 8.1ง(A) CS แสดงโครงสร้างความเร็วเจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise ($V_{j,z} / u_{cf}$) พบบริเวณที่มีความเร็วเจ็ตในแนว Spanwise มีค่าสูงสุดแยกตัวออกเป็น 2 บริเวณที่ด้านล่าง และ ด้านบน

บริเวณที่มีค่าความเร็วเจ็ตในแนวแกน Spanwise สูงสุด (Maximum local peak) ที่ด้านบน โดยวางตัวอยู่ตำแหน่งเดียวกับกับบริเวณที่มีความเร็วในแนวแกน Transverse สูงที่ด้านบน ซึ่งบริเวณดังกล่าวน่าจะเกิดจากโมเมนตัมที่หลงเหลืออยู่จากปากทางออกของเจ็ต

ในทางกลับกันขณะที่บริเวณที่มีค่าความเร็วเจ็ตในแนวแกน Spanwise สูงสุด (Maximum local peak) ที่ด้านล่าง โดยวางตัวอยู่ตำแหน่งเดียวกับกับบริเวณที่มีความเร็วในแนวแกน Transverse สูงที่ด้านล่าง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในระนาบตัดขวางการไหล โดยบริเวณดังกล่าววางตัวตรงกับตำแหน่งของโครงสร้าง CVP ดังนั้นหลักฐานนี้บ่งชี้ว่าโครงสร้าง CVP เป็นกลไกที่เหนี่ยวนำให้เกิดบริเวณที่มีค่าความเร็วสูงในแนวแกน Spanwise ที่ด้านล่าง

(B) และ (C) ความเร็วสนามเฉลี่ยไร้มิติ (V_z / u_{cf}) และความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธ์เฉลี่ยไร้มิติ ($V_{cf,z} / u_{cf}$) ในแนวแกน Spanwise

รูปที่ 8.1ง(B) และ(C) CS แสดงความเร็วเฉลี่ยไร้มิติของสนาม (V_z / u_{cf}) และกระแสลมขวางบริสุทธ์ ($V_{cf,z} / u_{cf}$) ในแนวแกน Spanwise พบ บริเวณกระแสลมขวางบริสุทธ์มีความเร็ว เพราะในความเป็นจริง เจ็ตจะไม่สมมาตรอุดมคติ โดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตอาจเอียงไปทางด้านใดด้านหนึ่ง ไม่อยู่ตรงกลางในระนาบสมมาตร ดังนั้นความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธ์ที่พบก็เกิดจากการเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ตตามรูป 8.1ง(A)

8.6 Vorticity เฉลี่ยต่อเวลาไร้มิติในแนวแกน Spanwise

รูปที่ 8.1จ CS แสดงโครงสร้าง Vorticity เฉลี่ยต่อเวลาไร้มิติในแนวแกน Streamwise สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) (A) Vorticity เจ็ต ($\omega_{j,z}d/u_{cf}$), (B) Vorticity สนาม ($\omega_z d/u_{cf}$), (C) Vorticity ของกระแสลมขวางบริสุทธ์ ($\omega_{cf,z}d/u_{cf}$)

(A) Vorticity เจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise ($\omega_{j,z}d/u_{cf}$)

รูปที่ 8.1จ(A) CS แสดงโครงสร้าง Vorticity เจ็ตเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise ($\omega_{j,z}d/u_{cf}$) โดยค่าที่เป็นบวก (+) หมายถึงการหมุนทวนเข็มนาฬิกา (CCW) และค่าที่เป็นลบ (-) หมายถึงมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา (CW) พบ Vorticity ของเจ็ตในแนวแกน Spanwise ที่มีทิศทางการหมุนตรงข้ามกัน ซึ่งแสดงถึง โครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ตที่ด้านหน้า (Windward) และที่ด้านหลัง (Leeward) โดยวางตัวอยู่บริเวณเดียวกับบริเวณที่มีความเร็วเจ็ตในแนวแกน Streamwise สูง (Kidney shape)

บริเวณด้านหลัง (Leeward) เมื่อพิจารณา Vorticity ของเจ็ตที่มีค่าเป็นลบในแนว Spanwise (CW) ซึ่งวางตัวอยู่ตำแหน่งเดียวกับโครงสร้างรูปไต (Kidney shape) พบว่า นอกจากโครงสร้าง CVP ของเจ็ตแล้ว Vorticity ของเจ็ตที่เป็นลบดังกล่าว จะช่วยเหนี่ยวนำส่วนผสมของเจ็ตด้านล่าง (Gulf region) ให้มีการเคลื่อนที่ และเข้าไปผสมกับโครงสร้างรูปไต (kidney shape) เกิดการเหนี่ยวนำการผสมคล้ายเจ็ตอิสระ ซึ่งการเหนี่ยวนำการผสมดังกล่าวสอดคล้องกับการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวาง

(B) Vorticity สนามเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise ($\omega_z d/u_{cf}$)

รูปที่ 8.1จ(B) CS แสดง Vorticity เฉลี่ยไร้มิติของสนาม ($\omega_z d/u_{cf}$) และ Vorticity ของกระแสลมขวางบริสุทธ์ ($\omega_{cf,z}d/u_{cf}$) ในแนวแกน Streamwise พบ Vorticity ของของไหลใดๆ (เจ็ตหรือกระแสลมขวาง) ซึ่งจะเห็น Vorticity ของของไหลใดๆจะมีการกระจายตัวคล้ายกับการกระจายตัวของ Vorticity ของเจ็ต (รูป (A)) แสดงว่า Vorticity ของของไหลใดๆเกิดมาจากส่วนผสมของเจ็ต

บริเวณด้านหน้า (Windward) เมื่อพิจารณา Vorticity ของเจ็ตที่มีค่าเป็นบวกในแนว Spanwise (CCW) (ซึ่งจะสามารถเห็นได้ชัดเจนในรูป (B)) โดยวางตัวอยู่บริเวณเดียวกับโครงสร้างรูปไต (Kidney shape) พบว่า Vorticity ของเจ็ตที่เป็นบวกดังกล่าว จะเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธ์ที่ด้านนอกขอบเจ็ตเข้ามาผสมกับเจ็ต โดยโครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ต

(Instantaneous structure) ซึ่งการเหนี่ยวนำการผสมนี้เป็นการเหนี่ยวนำการผสมอีกส่วนหนึ่งซึ่งไม่สามารถพบได้ในการศึกษาในระนาบตัดขวาง โดยสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Yuan et al (1998) พบว่า ในระนาบสมมาตรการไหล กระแสลมขวางบริสุทธิ์จะถูกเหนี่ยวนำเข้าไปผสมกับเจ็ตที่ขอบเจ็ตด้านหน้า โดยโครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ต

(C) Vorticity กระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนวแกน Spanwise ($\omega_{cf,z} d / u_{cf}$)

รูปที่ 8.1จ(C) CS แสดง Vorticity ของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ($\omega_{cf,z} d / u_{cf}$) ในแนวแกน Spanwise พิจารณาบริเวณใกล้ปากทางออกของเจ็ต พบ บริเวณที่มีค่า Vorticity กระแสลมขวาง โดยน่าจะเกิดจากของโครงสร้าง Wake และ Horse-shoe vortex ซึ่งมีแกนการหมุนใน 3 มิติ ไม่ได้มีการหมุนเฉพาะแกนบนระนาบเท่านั้น

8.7 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบสมมาตรการไหล สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)

จากหลักฐานในการทดลอง จึงนำข้อมูลของปริมาณต่างๆ มาพล็อตดังรูปที่ 8.2 ซึ่งแสดงผลการทดลองของความน่าจะเป็น เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไว้มิติในระนาบตัดขวางการไหล และความเร็วเฉลี่ยไว้มิติในแนวแกน Streamwise โดยจากการวิเคราะห์หลักฐานประกอบกัน ชี้แนะว่ากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางได้ โดยโครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ตเป็นกลไกการเหนี่ยวนำการผสมหนึ่งในระนาบสมมาตรการไหล ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (Windward) และบริเวณด้านหลังของเจ็ต (Leeward)

บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (Windward): โครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ตซึ่งเป็นโครงสร้างขณะใดๆ (Instantaneous structure) เป็นกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตร โดยจะเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่บริเวณด้านหน้าของขอบเจ็ตเข้ามาผสมกับตัวเจ็ต (พิจารณา $\omega_z d / u_{cf}$ ในรูปที่ 8.2) พบว่า ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนวแกน Streamwise จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม ($\vec{V}_{cf,x} \cdot \nabla \phi_j > 0$) ในขณะที่ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนวแกน Transverse จะไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม ($\vec{V}_{cf,y} \cdot \nabla \phi_j < 0$) (พิจารณา ϕ_{cf} ในรูปที่ 8.2) เมื่อพิจารณาในแง่มุมของค่าเฉลี่ยโครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ต ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างรูปไต (Kidney shape) ที่มีความเร็วในแนวการไหลสูง โครงสร้างรูปไตที่เป็นเป็นส่วนของเจ็ตจะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์ด้านนอกขอบเจ็ตเข้าไปผสมคล้ายการเหนี่ยวนำการ

ผสมเจ็ตอิสระ (พิจารณา V_x / u_{cf} ในรูปที่ 8.2) โดยกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตของ Yuan et al (1998) พบว่า โครงสร้าง Spanwise roller เป็นกลไกในการเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าไปผสมที่บริเวณขอบเจ็ตด้านหน้า (Windward)

บริเวณด้านหลังของเจ็ต (Leeward): นอกเหนือจากโครงสร้าง CVP ของเจ็ตจะเหนี่ยวนำทำให้ความเร็วสูงขึ้นในแนวตั้งแล้ว โครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ตจะเป็นอีกกลไกหนึ่งที่จะเหนี่ยวนำให้ส่วนผสมของเจ็ตเองที่บริเวณอ่าว (Gulf region) ด้านล่างให้เข้าไปผสมกับโครงสร้างรูปไต (Kidney shape) ด้านบนคล้ายกับเจ็ต (พิจารณา V_x / u_{cf} ในรูปที่ 8.2) โดยกลไกการเหนี่ยวนำการผสมนี้สอดคล้องกลไกการเหนี่ยวนำส่วนผสมของเจ็ตเข้าไปผสมในระนาบตัดขวางการไหล โดยความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนวแกน Streamwise จะไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม ($\vec{V}_{cf,x} \cdot \nabla \phi_j < 0$) ในขณะที่ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนวแกน Transverse จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม ($\vec{V}_{cf,y} \cdot \nabla \phi_j > 0$) (พิจารณา ϕ_{cf} ในรูปที่ 8.2)

อนึ่งกลไกการเหนี่ยวนำการผสมนี้เป็นเพียงข้อชี้แนะจากผลการทดลองที่มีเท่านั้น

8.8 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบสมมาตรการไหล สำหรับกรณีเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165

เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) จากรูปที่ 8.3 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณต่างๆ ชี้แนะว่ากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบว่า โครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ตเป็นกลไกการเหนี่ยวนำการผสมหนึ่งในระนาบสมมาตรการไหล ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (Windward) และบริเวณด้านหลังของเจ็ต (Leeward)

บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (Windward): โครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ตจะเป็นกลไกการเหนี่ยวนำการผสม โดยจะเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่บริเวณด้านหน้าของขอบเจ็ตเข้ามาผสมกับตัวเจ็ตที่โครงสร้างรูปไต (Kidney shape) คล้ายกับการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (พิจารณา $\omega_z d / u_{cf}$ รูปที่ 8.3)

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะพบว่า พื้นที่การเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางเพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 8.4) และพบการเหนี่ยวนำการผสมที่เกิดจากความเร็วกกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนว Transverse ($\vec{V}_{cf,y} \cdot \nabla \phi_j > 0$) ด้วย ในช่วง $-0.5 < x / rd < 0.25$

(พิจารณา ϕ_{cf} รูปที่ 8.3) ในขณะที่กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) การเหนี่ยวนำการผสมจะเกิดจากความเร็วของกระแสลมขวางปริส্তুธิ์ในแนว Streamwise ($\vec{V}_{cf,x} \cdot \nabla \phi_j > 0$) เท่านั้น

บริเวณด้านหลังของเจ็ต (Leeward): โครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ตจะเป็นกลไกเหนี่ยวนำให้ส่วนผสมของเจ็ตเองที่บริเวณอ่าว (Gulf region) ด้านล่างให้เข้าไปผสมกับโครงสร้างรูปไต (Kidney shape) ด้านบนคล้ายกับเจ็ต (พิจารณา V_x / u_{cf} ในรูปที่ 8.3) โดยกลไกการเหนี่ยวนำการผสมนี้สอดคล้องกลไกการเหนี่ยวนำส่วนผสมของเจ็ตเข้าไปผสมในระนาบตัดขวางการไหล



บทที่ 9

อภิปรายผลการทดลอง

เพื่อประเมินวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (E) งานวิจัยจึงใช้ SPIV ควบคู่กับ (A) การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวางพบว่า เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง I165 ทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (E) เพิ่มสูงขึ้นมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ดังแสดงในบทที่ 5

เพื่อศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสลมขวาง งานวิจัยจึงใช้ SPIV ควบคู่กับการใส่อนุภาคติดตามการไหล 2 ลักษณะ คือ (A) การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้นไม่ใส่ในกระแสลมขวาง และ (B) การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสลมขวาง พบว่า โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเป็นกลไกการเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์จากทางด้านล่างขึ้นมาผสมกับเจ็ตผ่านช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Vertical channel) ดังแสดงในบทที่ 6 และ 7

ดังนั้นเพื่ออธิบายและสนับสนุน ข้อเสนอสรุปกลไกการเหนี่ยวนำการผสมดังกล่าว เป็นกลไกหลัก (อย่างน้อยในระนาบตัดขวาง) ในการเหนี่ยวนำการผสม ประเด็นอภิปรายในหัวข้อนี้จะนำกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางมาอธิบายเชิงปริมาณว่า ทำไมเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ถึงทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (E) เพิ่มสูงขึ้นมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)

9.0 พื้นฐานการในการวิเคราะห์

9.0.1 อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ตผ่านพื้นผิวความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมีค่าคงที่

การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตคือการที่เจ็ตเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์โดยรอบเข้ามาผสมกับเจ็ต ดังนั้นการคำนวณหาอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ผ่านเข้าสู่ตัวเจ็ตนั้นจะเป็นหลักฐานที่บ่งชี้ถึงปริมาณการเหนี่ยวนำการผสม และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม

ดังนั้นเมื่อพิจารณากลไกการเหนี่ยวนำการผสม ดังที่กล่าวไปในบทที่ 6 และ 7 จึงสามารถเขียน Control volume (CV) เพื่อหาอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ผ่าน Control Surface (CS) เข้าสู่เจ็ตได้ดังแสดงในรูปที่ 9.1

รูปที่ 9.1 แสดง Control volume (CV) พื้นผิวทรงกระบอก แสดงการไหลผ่านหน้าตัดการไหลเข้า A_1 หน้าตัดการไหลออก A_2 ที่มีขนาดเท่ากัน $A_1 = A_2$ และหน้าตัดพื้นผิวการไหลด้านข้าง A_{wall} ที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมีค่าคงที่โดยมีความยาวของ CV เท่ากับ Δx ในทิศทางตามแนวการไหล และมีหน้าตัดของทรงกระบอก CV เป็นพื้นที่ล้อมรอบด้วยเส้นค่าคงที่ที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต ($\phi_j = \text{constant}$) ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลผ่านพื้นผิว A_{wall} ที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมีค่าคงที่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 Q_{cf,\Delta x}(\phi_j) &= \int_{A_{\phi_j}} \bar{V}_{cf,yz} \cdot d\bar{A}_{\phi_j} \\
 &: d\bar{A}_{\phi_j} = \|d\bar{A}_{\phi_j}\| \hat{e}_{\phi_j} \\
 &: \hat{e}_{\phi_j} = \frac{\nabla\phi_j}{\|\nabla\phi_j\|} \\
 &: \|d\bar{A}_{\phi_j}\| = w dl = (\Delta x) dl \\
 &= \Delta x \left[\int_{A_{\phi_j}} (\bar{V}_{cf,yz} \cdot \hat{e}_{\phi_j}) dl \right] \tag{8.1}
 \end{aligned}$$

$$\frac{Q_{cf,\Delta x}(\phi_j)}{Q_0} = \frac{\Delta x}{Q_0} \left[\int_{A_{\phi_j}} (\bar{V}_{cf,yz} \cdot \hat{e}_{\phi_j}) dl \right] \tag{8.2}$$

- โดย $\bar{V}_{cf,yz}$ คือ เวกเตอร์ความเร็วของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในระนาบตัดขวางการไหล
 $d\bar{A}_{\phi_j}$ คือ เวกเตอร์ของพื้นที่หน้าตัดที่ตำแหน่งความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต
 \hat{e}_{ϕ_j} คือ เวกเตอร์แสดงทิศทางตั้งฉากกับเส้นค่าคงที่ที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต
 $\nabla\phi_j$ คือ เกรเดียนท์ของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต
 w คือ ระยะทางตามแนวการไหล
 dl คือ ความยาวของเส้นค่าคงที่ที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตใดๆ
 Q_0 คือ อัตราการไหลที่ปากทางออกของเจ็ต

9.1 การตีความผลการทดลอง

การตีความผลการทดลองเพื่อแสดงถึงอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ซึ่งเหนี่ยวนำเข้าไปผสมกับเจ็ตผ่านเส้นค่าคงที่ของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่ระยะทางตามแนวการไหลใดๆ จะ

แสดงในรูปอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่ใจเจ็ดต่ออัตราการไหลที่ปากทางออกเจ็ดที่ CV มีความยาวเท่ากับ Δx ใดๆ โดยในผลการทดลองจะใช้ระยะความลึก $\Delta x = 1rd$ ($Q_{cf, \Delta x=1rd} / Q_o$) เป็นค่าอ้างอิง ผลการทดลองจะแบ่งการไหลไร้มิติของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ผ่านเส้นค่าคงที่ความน่าจะเป็นใดๆ ได้เป็นสองส่วนคือ อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติที่เป็นบวกซึ่งแสดงถึงการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่ใจกลางเจ็ด และอัตราการไหลไร้มิติของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่เป็นลบซึ่งแสดงถึงการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ออกจากใจกลางเจ็ด

อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติที่เป็นบวก การตีความ และเงื่อนไข

อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติที่เป็นบวก คือ อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลจาก บริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ด้านนอกเข้าสู่ใจกลางเจ็ดในทิศทางของ $\nabla\phi_j$ หรืออัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ผ่านจากบริเวณความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์สูง เข้าสู่ใจกลางเจ็ดที่ความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางต่ำ แสดงถึงอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ภายนอกที่ถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ด ให้เข้าไปผสมกับเจ็ดที่ด้านใน

ตัวอย่างการตีความ และเงื่อนไขในการตีความ โดยรูปที่ 9.2 แสดงการพัฒนาตัวของอัตราการไหลของกระแสลมขวางไร้มิติ ($Q_{cf, \Delta x=1rd} / Q_o$) กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) พิจารณาที่ $x / rd = 0.5$ พบว่าอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์นั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความน่าจะเป็นที่พบเจ็ดสูงขึ้น แสดงถึง มีการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้ามาจากระนาบการไหลก่อนหน้าทำให้มีการไหลเข้าสู่เจ็ดมากเพิ่มมากขึ้นตามความน่าจะเป็นที่พบเจ็ดมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9.3 จนกระทั่งมีอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติสูงสุด แสดงถึงบริเวณที่กระแสลมขวางบริสุทธิ์มีการไหลเข้าสู่เจ็ดมากที่สุด หลังจากนั้นอัตราการไหลจะลดลง โดยจะเกิดได้จาก 2 สาเหตุ คือ 1) มีการไหลออกของกระแสลมขวางบริสุทธิ์จากระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 9.4 และ 2) เกิดการเหนี่ยวนำการผสมจนทำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์ไปกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ดซึ่งสอดคล้องกับความน่าจะเป็นที่พบกระแสลมขวางมีค่าต่ำลงหรือความน่าจะเป็นที่พบเจ็ดเพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์จะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ เมื่อความน่าจะเป็นที่พบเจ็ดมีค่าเข้าสู่หนึ่ง

เมื่อพิจารณาจุดวิกฤตของกราฟจะพบว่ามีเพียงจุดเดียว คือ จุดที่มีอัตราการไหลของกระแสลมขวางเข้าสู่เจ็ดสูงสุด ($Q_{cf, \Delta x, \max} / Q_o$) ดังนั้นจึงใช้จุดดังกล่าวนี้เพื่อแสดงถึงปริมาณการไหลเข้าของกระแสลมขวางทั้งหมดที่ถูกเหนี่ยวนำโดยเจ็ด

อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติที่เป็นลบ

อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติที่เป็นลบ คือ อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลออกจากใจกลางเจ็ตกลับสู่บริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ด้านนอก หรืออัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลออกจากบริเวณความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตเพิ่มสูง ไปสู่บริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตต่ำตามทิศทางของ $\nabla\phi_j$ โดยทางทฤษฎีเมื่อกระแสลมขวางบริสุทธิ์ถูกเหนี่ยวนำให้ผสมกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตแล้ว กระแสลมขวางบริสุทธิ์จะไม่สามารถแยกตัวออกจากเจ็ต กลับมาเป็นกระแสลมขวางบริสุทธิ์ได้อีก ดังนั้นอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่เป็นลบ น่าจะมีความหมายในแง่มุมมองอื่น ไม่ใช่การไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ออกจากเจ็ต

อย่างไรก็ตามบริเวณที่มีอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่เป็นลบ (ไหลออกจากเจ็ต) เกิดขึ้นอย่างมากที่บริเวณด้านบนของตัวเจ็ต ซึ่งชี้แนะว่าบริเวณการไหลดังกล่าวเกิดจากการเข้าปะทะกันระหว่างกระแสลมขวางบริสุทธิ์กับเจ็ต ทำให้ความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในแนว Streamwise มีค่าลดลง และเลี้ยวเบนออกขึ้นไปในแนว Transverse ด้วยเหตุนี้แล้ว จะพิจารณาอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ถูกเหนี่ยวนำไปผสมกับเจ็ตกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตจากอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่เป็นบวกเท่านั้น

อนึ่งการตีความนี้เป็นการตีความในเชิงเฉลี่ยเท่านั้น

9.2 ผลการทดลอง

9.2.1 อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)

รูปที่ 9.2 แสดงการพัฒนาตัวของอัตราการไหลของกระแสลมขวางไร้มิติ ($Q_{cf, \Delta x=1rd}/Q_o$) กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) พิจารณาที่ $x/rd = 0.5$ พบว่าอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์นั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตสูงขึ้น แสดงถึงกระแสลมขวางบริสุทธิ์เริ่มมีการไหลเข้าสู่เจ็ตมากเพิ่มมากขึ้นตามความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตมากขึ้น และจะมีอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ สูงสุดเท่ากับ $Q_{cf, \Delta x=1rd, \max}/Q_o = 1.52$ ที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต $\phi_j = 0.2$ แสดงถึงบริเวณที่กระแสลมขวางบริสุทธิ์มีการไหลเข้าสู่เจ็ตมากที่สุด หลังจากนั้นอัตราการไหลจะลดลงเมื่อความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตเพิ่มสูงขึ้น แสดงถึง การที่กระแสลมขวางนั้นเกิดการเหนี่ยวนำการผสมจนกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ต ซึ่งสอดคล้องกับความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางมีค่าต่ำลง

หรือความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดเพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ จะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ เมื่อความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดมีค่าเข้าสู่หนึ่ง

เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล ผลการทดลองคล้ายคลึงกับที่ $x / rd = 0.5$ กล่าวคือ อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดมีค่าสูงขึ้นในช่วงแรกจนมีค่าอัตราการไหลมากที่สุด หลังจากนั้นอัตราการไหลจะลดลง และเข้าสู่ศูนย์ เมื่อความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดสูงขึ้นจนเข้าสู่หนึ่ง

อย่างไรก็ตามอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์สูงสุด ($Q_{cf, \Delta x=1rd, max} / Q_o$) จะมีค่ามากที่สุดที่ระยะการไหลใกล้กับปากเจ็ด และจะลดลงเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล

9.2.2 อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติ กรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165

เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) กล่าวคือ พิจารณาที่ $x / rd = 0.5$ พบว่า อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์นั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความน่าจะเป็นที่พบเจ็ดสูงขึ้น แสดงถึงกระแสลมขวางบริสุทธิ์เริ่มมีการไหลเข้าสู่เจ็ดมากเพิ่มมากขึ้นตามความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดมากขึ้น และจะมีอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติสูงสุดเท่ากับ $Q_{cf, \Delta x=1rd, max} / Q_o = 2.03$ ที่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ด $\phi_j = 0.23$ แสดงถึงบริเวณที่กระแสลมขวางบริสุทธิ์มีการไหลเข้าสู่เจ็ดมากที่สุด หลังจากนั้นอัตราการไหลจะลดลงเมื่อความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดเพิ่มสูงขึ้นหรือความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางลดต่ำลง แสดงถึง การที่กระแสลมขวางนั้นเกิดการเหนี่ยวนำการผสมจนกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ด ซึ่งสอดคล้องกับความน่าจะเป็นที่พบกระแสลมขวางมีค่าต่ำลงหรือความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่ใจกลางเจ็ด จนกระทั่งอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์จะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ เมื่อความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดมีค่าเข้าสู่หนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 9.3

เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล ผลการทดลองคล้ายคลึงกับที่ $x / rd = 0.5$ กล่าวคือ อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดมีค่าสูงขึ้นในช่วงแรกจนมีค่าอัตราการไหลมากที่สุด หลังจากนั้นอัตราการไหลจะลดลง และเข้าสู่ศูนย์ เมื่อความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดสูงขึ้นจนเข้าสู่หนึ่ง

อย่างไรก็ตามอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์สูงสุด ($Q_{cf, \Delta x=1rd, max} / Q_o$) จะมีค่ามากที่สุดที่ระยะการไหลใกล้กับปากเจ็ด และจะลดลงเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล

9.2.3 การเปรียบเทียบอัตราการไหลกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165

รูปที่ 9.6 แสดงการเปรียบเทียบการพัฒนาตัวของอัตราการไหลของกระแสลมขวางไร้มิติ ($Q_{cf, \Delta x=1rd} / Q_o$) กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165

ที่ระยะ $x / rd = 0.5$ เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติจะมีค่ามากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ในทุกความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ด แสดงถึง เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 กระแสลมขวางบริสุทธิ์จะถูกเหนี่ยวนำให้ไหลเข้าสู่ตัวเจ็ดมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 9.6 (ก)

เช่นเดียวกับผลการทดลองที่ระยะ $x / rd = 0.5$ กล่าวคือ พิจารณาที่ระยะการไหล $x / rd = 0.75$ และ 1.0 กล่าวคือ เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติจะมีค่ามากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) อย่างไรก็ตามพบบริเวณอัตราการไหลของกระแสลมขวางไร้มิติมีค่าลดจนกระทั่งเท่ากับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมที่ $\phi_j = 0.75$ และ 0.82 ที่ระยะการไหล $x / rd = 0.75$ และ 1.0 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงว่าเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์จะมีการลดลงเร็วกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม กล่าวคือ เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะมีการหายไปของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เร็วกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม ซึ่งบ่งชี้ว่าเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 การเหนี่ยวนำการผสมจะเกิดขึ้นเร็วกว่าเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 9.6 (ข) และ (ค)

เช่นเดียวกับผลการทดลองที่ระยะ $x / rd = 0.75$ และ 1.0 พิจารณาที่ระยะการไหล $x / rd = 1.5$ กล่าวคือ เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบบริเวณที่อัตราการไหลกระแสลมขวางบริสุทธิ์มีค่าลดจนกระทั่งเท่ากับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมที่ $\phi_j = 0.53$ แสดงถึง เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมทำให้การเหนี่ยวนำการผสมจะเกิดขึ้นเร็วกว่าเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม ยิ่งไปกว่านั้นยังพบจุดตัดอีกจุดหนึ่งในช่วงที่อัตราการไหลกระแสลมขวางบริสุทธิ์มีค่าเพิ่มขึ้นที่ $\phi_j = 0.11$ ซึ่งแสดงถึง เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะทำให้ การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลเข้าสู่เจ็ดเพิ่มขึ้นเร็วกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JIC) ดังแสดงในรูปที่ 9.6 (ง)

9.3 การนำกลไกการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาณเพื่ออธิบายเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165

เพื่อที่จะอธิบายการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ถึงมีค่ามากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ดังกล่าวไปในบทที่ 5 ดังนั้นจะนำกลไกการเหนี่ยวนำการผสมมาอธิบายเชิงปริมาณอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ด โดยอัตราการไหลของกระแสลมขวางที่เข้าสู่เจ็ดทั้งหมดและเกิดการเหนี่ยวนำการผสมกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ดทั้งหมด จะคิดจากอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ดที่มีค่าสูงที่สุด

รูปที่ 9.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่มีค่าสูงสุด ($Q_{cf, \Delta x=1rd, \max} / Q_o$) ที่ระยะการไหลใดๆ ระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และการฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ที่ระยะการไหลเริ่มต้นที่ $x / rd = 0.5$ พบว่า ค่าอัตราการไหลสูงสุดของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ถูกโครงสร้าง CVP ของเจ็ดเหนี่ยวนำเข้ามาผสม เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 มีค่ามากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) แสดงถึง เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะทำให้อัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ดนั้นมีค่ามากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม ประกอบกับที่ระยะการไหลเริ่มต้นนี้ ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ก็มีค่ามากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมด้วย เพราะฉะนั้นที่ระยะการไหลต่อไป ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมก็ควรจะมีค่ามากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม ซึ่งสอดคล้องค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมมากกว่าไม่ฉีดเจ็ดควบคุมที่ระยะตามการไหล $x / rd = 0.75$

ยิ่งไปกว่านั้นพบว่า ค่าอัตราการไหลสูงสุดของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 มีค่ามากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ในทุกระยะการไหล ประกอบกับที่ทุกระยะการไหล ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ก็มีค่ามากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมด้วย ดังนั้นจึงทำให้ เมื่อฉีดเจ็ดควบคุม (I165) มีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (E) มากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF)

บทที่ 10

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jets) ต่อการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) และกลไกการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment mechanism) ในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมวลที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4 โดยการวัดสนามความเร็วที่ระนาบใดๆ ของเจ็ตในกระแสมวลด้วยเทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ประกอบกับการปล่อยอนุภาคติดตามการไหล 2 ลักษณะ คือ (A) การปล่อยอนุภาคติดตามการไหลเฉพาะส่วนของเจ็ต ไม่ใส่ในกระแสมวล และ (B) การปล่อยอนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสมวล

เพื่อประเมินวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) งานวิจัยจึงใช้ SPIV ควบคู่กับ (A) การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมวล ทำให้สามารถระบุบริเวณที่เป็นเจ็ตออกจากกระแสมวลได้อย่างชัดเจน นำไปสู่การหาอัตราการไหลของเจ็ต ณ ระนาบตัดขวางการไหลใดๆ และสามารถประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้โดยตรง

เพื่อศึกษาโครงสร้างเจ็ต ปฏิสัมพันธ์ของโครงสร้างเจ็ตและกระแสมวล การเหนี่ยวนำกระแสมวลโดยเจ็ต และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสมวล งานวิจัยจึงใช้ SPIV ควบคู่กับการใส่อนุภาคติดตามการไหล 2 ลักษณะ คือ (A) การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้นไม่ใส่ในกระแสมวล ทำให้ได้ความเร็วและโครงสร้างของเจ็ต และ (B) การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสมวล ทำให้สามารถได้ความเร็วสนามของของไหลใดๆ (เจ็ตหรือกระแสมวล) เมื่อนำความเร็วของเทคนิคที่ (B) – (A) จะทำให้สามารถประมาณหาความเร็วของกระแสมวลบริสุทธิ์ (C) และการเหนี่ยวนำกระแสมวลบริสุทธิ์โดยเจ็ต นำไปสู่การศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสมวลได้

10.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร และประสิทธิผลการใช้เจ็ตควบคุม

ทั้งกรณีไม่มีเจ็ตควบคุม (JICF) และเมื่อมีเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบว่า เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) จะมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไร

ก็ตาม เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง I165 ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร จะมีค่ามากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมที่ทุกระยะทางตามแนวการไหล (รูปที่ 5.1)

เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบว่า เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล ค่าประสิทธิภาพการใช้เจ็ตควบคุม (η) จะมีค่าลดลง แสดงว่า เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล ผลของการฉีดเจ็ตควบคุม (165) ที่ปากทางออกของเจ็ตจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ยิ่งไปกว่านั้นที่ทุกระยะการไหล ค่าประสิทธิภาพการใช้เจ็ตควบคุม จะมีค่ามากกว่า 1 โดยมีค่ามากที่สุดที่ระยะ $x/rd = 0.5$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.49 แสดงถึง การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม ถึง 49% (รูปที่ 5.2)

10.2 เส้นทางการเดินของเจ็ต

ทั้งกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบว่า เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล เส้นทางการเดินของเจ็ตทั้งจากปริมาณความเร็วเจ็ต และ Vorticity ในแนวแกน Streamwise จะยกตัวสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะทำให้เส้นทางการเดินของเจ็ตสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม ตลอดทุกระยะการไหล (รูปที่ 5.4) โดยการเพิ่มสูงขึ้นดังกล่าวสอดคล้องกับการเพิ่มสูงขึ้นของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเมื่อฉีดเจ็ตที่ตำแหน่ง I165 ตลอดทุกระยะการไหล (รูปที่ 5.1) สอดคล้องกับแบบจำลอง Wall blocking effect ของ Korn Sri et al (2009) ซึ่งชี้แนะว่า ถ้าเส้นทางการเดินของเจ็ตอยู่ต่ำใกล้ผนัง ผนังจะมีผลไปขัดขวางและจะลดการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ต (Wall blocking) ทำให้เจ็ตเหนี่ยวนำการผสมได้น้อย แต่เมื่อเส้นทางการเดินของเจ็ตสูงขึ้น ผลของผนังจะลดลงทำให้เจ็ตสามารถเหนี่ยวนำการผสมได้มากขึ้น

10.3 Circulation ของเจ็ต

ทั้งกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบว่า เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล Circulation ของเจ็ต ($+\Gamma/u_{cf}d$) จะมีค่าลดต่ำลง อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะทำให้ Circulation ของเจ็ต ($+\Gamma/u_{cf}d$) มีค่าสูงมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม ตลอดทุกระยะการไหล (รูปที่ 5.5) โดยการเพิ่มสูงขึ้นดังกล่าวสอดคล้องกับการเพิ่มสูงขึ้นของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเมื่อฉีดเจ็ตที่ตำแหน่ง I165 ตลอดทุกระยะการไหล (รูปที่ 5.1) โดยความสอดคล้องระหว่าง Circulation กับการเหนี่ยวนำการผสมสามารถอธิบายได้ว่า การที่โครงสร้าง

CVP เจ็ดมี Circulation สูงขึ้น แสดงถึง เจ็ดมีศักยภาพในการเหนี่ยวนำการผสมสูงขึ้น จึงทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมสูงขึ้น

10.4 โครงสร้าง และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ดในกระแสลมขวางกรณีไม่ฉีดเจ็ด (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165

10.4.1 ความน่าจะเป็น

ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดมีค่าสูงเข้าสู่หนึ่งที่บริเวณใจกลางเจ็ด และมีค่าลดต่ำลงตามแนวรัศมีจนมีค่าต่ำเข้าสู่ศูนย์ที่บริเวณขอบเจ็ด และมีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ด้านนอก (รูปที่ 6.1ก)

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 เจ็ดสามารถพุ่งทะลุเข้าไปสู่กระแสลมขวางในแนวตั้งได้มากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) นอกจากนี้เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ยังพบโครงสร้าง Wake ที่ด้านล่างของเจ็ด เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามระยะการไหลก็ยังคงพบโครงสร้าง Wake ได้อยู่ แต่ความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ดในโครงสร้าง Wake จะลดลง หรือความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ในโครงสร้าง Wake จะเพิ่มสูงขึ้นตามระยะการไหล (รูปที่ 7.1ก)

10.4.2 เวกเตอร์ในระนาบตัดขวางการไหลเฉลี่ยไร้มิติ

- (A) สามารถเห็นโครงสร้าง CVP ของเจ็ดครึ่งหนึ่ง
- (B) สามารถเห็นโครงสร้าง CVP ของเจ็ดแบบเต็มรูป
- (C) สามารถเห็นกระแสลมขวางบริสุทธิ์ถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ดให้เกิดการเคลื่อนที่หมุนวน

จากการพิจารณาเวกเตอร์ความเร็วในระนาบตัดขวางเฉลี่ยไร้มิติ (A) – (C) ทำให้สามารถวิเคราะห์ 1) โครงสร้างของเจ็ด 2) ปฏิสัมพันธ์ของโครงสร้างเจ็ดและกระแสลมขวาง 3) กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ดในกระแสลมขวาง

- **โครงสร้าง CVP ของเจ็ดเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์เคลื่อนที่หมุนวน**

กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) พบว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ดเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ขอบเจ็ดทั้งสองข้างให้มีการเคลื่อนที่หมุนวนพุ่งลงในแนวตั้งมาที่ขอบเจ็ด

ด้านล่าง และจะถูกเหนี่ยวนำให้กลับตัวขึ้นเข้าสู่เจ็ตที่ขอบเจ็ตด้านล่างเป็นหลักผ่านช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Converging –diverging vertical channel of high upward flow) อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบว่าหลังจากที่กระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ขอบเจ็ตทั้งสองข้างจะถูกโครงสร้าง CVP ของเจ็ตสามารถเหนี่ยวนำให้มีการเคลื่อนที่หมุนวนพุ่งลงในแนวตั้งแล้ว และจะถูกเหนี่ยวนำต่อให้มีการเคลื่อนที่เลี้ยวเข้าสู่เจ็ตที่บริเวณข้างโครงสร้าง Wake เป็นหลัก

- **ช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Converging – diverging vertical channel)**

พบการไหลขึ้นผ่าน “ช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Vertical channel)” กล่าวคือ กระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่บริเวณปากอ่าว (Bell – shape inlet) ด้านล่างของเจ็ตจะไหลผ่านบริเวณที่มีการไหลลู่เข้า (Converging section) และไหลไปที่บริเวณคอคอด (Throat) :ซึ่งที่บริเวณนี้กระแสลมขวางบริสุทธิ์จะถูกเหนี่ยวนำให้ผสมกับเจ็ตกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตจนเกือบหมดแล้ว

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบว่า บริเวณปากอ่าว (Bell-shape inlet) นั้นยกตัวสูงขึ้นจากพื้นมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ซึ่งแนะนำการยกตัวสูงขึ้นจากพื้นนั้นจะช่วยไปลดผลของ Wall blocking และอาจเป็นสาเหตุให้โครงสร้าง CVP ของเจ็ตสามารถเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์ให้มีการเคลื่อนที่หมุนวนและไหลเข้าสู่เจ็ตได้มากกว่า

- **บริเวณที่เกิดการเหนี่ยวนำการผสมสูง**

ทั้งกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมในช่วงความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต $0.01 < \phi_j < 0.75$ และบริเวณที่มีการผสมอย่างมากในช่วงความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตประมาณในช่วง $0.25 < \phi_j < 0.75$ (รูปที่ 7.4) นอกจากนี้ พบว่า การเหนี่ยวนำการผสมจะเกือบหมดสมบูรณ์ตั้งแต่ภายในบริเวณที่มีการไหลลู่เข้า (Converging section) ของช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Converging – diverging vertical channel) แล้ว เมื่อการไหลมาถึงบริเวณคอคอด (Throat) จะกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตเกือบหมด

อย่างไรก็ตาม เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะทำให้เกิดโครงสร้าง Wake ที่ด้านล่าง โดยการมีอยู่ของโครงสร้าง Wake ดังกล่าว จะช่วยเพิ่มพื้นที่การไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ต และจะช่วยเพิ่มพื้นที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางในกรณีฉีดเจ็ตควบคุม (I165) มากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

10.4.3 ความเร็วเฉลี่ยใรมิติในแนวแกน Streamwise

พบโครงสร้างรูปไต (Kidney shape) ซึ่งเป็นบริเวณที่เป็นส่วนผสมของเจ็ตเป็นส่วนใหญ่พร้อมทั้งมีความเร็วในแนวแกน Streamwise สูง ($V_{j,x}/u_{cf}$) และบริเวณปากอ่าว (Gulf region) ที่มีความเร็วในแนวแกน Streamwise ต่ำกว่าบริเวณอื่น เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหลก็ยังสามารถพบโครงสร้างรูปทรงไตและบริเวณอ่าวได้อยู่ ขณะที่ค่าความเร็วสูงสุดนั้นจะมีค่าลดต่ำลง (รูปที่ 6.1 ข และ 7.1ข)

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 โครงสร้างรูปไตไม่โดดเด่นเท่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) โดยความเร็วสูงสุดในแนวแกน Streamwise ที่ด้านบนของโครงสร้างรูปไตถูกหน่วงให้มีค่าลดลง และพบการยกตัวสูงขึ้นของบริเวณอ่าวเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม โดยผลการทดลองชี้แนะว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ทำให้ Wall blocking ลดลง และส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 นั้นมีค่ามากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) (รูปที่ 7.2ข)

นอกจากนี้พบบริเวณที่กระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าปะทะกับเจ็ตที่ด้านหน้า และเกิดการเลี้ยวเบนออกขึ้นจากแนวแกน Streamwise ที่ด้านบนของขอบเจ็ต

10.4.4 ความเร็วเฉลี่ยใรมิติในแนวแกน Transverse

กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) พบ บริเวณที่มีค่าความเร็วสูงสุดในแนวแกน Transverse ที่เป็นบวก 2 บริเวณ คือ ที่ด้านบนซึ่งเกิดจากโมเมนตัมที่หลงเหลืออยู่จากปากทางออกของเจ็ต โดยวางตัวอยู่บริเวณเดียวกับโครงสร้างรูปไต ขณะที่ด้านล่างเกิดจากการเหนี่ยวนำจากโครงสร้าง CVP ของเจ็ต โดยวางตัวอยู่ในช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Vertical channel) อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบบริเวณที่ความเร็วสูงสุดในแนว Transverse มีขนาดใหญ่กว่าและมีค่าความเร็วสูงสุดมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และพบเพียงแค่วัดบริเวณเดียวที่กึ่งกลางของเจ็ตซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำของโครงสร้าง CVP ของเจ็ต โดยวางตัวอยู่ในช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Vertical channel) (รูปที่ 7.2ค)

นอกจากนี้ยังพบบริเวณที่มีค่าความเร็วต่ำสุดเป็นลบที่ขอบเจ็ตทั้งสองข้างโดยเกิดจากการเหนี่ยวนำของโครงสร้าง CVP ของเจ็ต ทั้งกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JIC) และเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ยิ่งไปกว่านั้นที่บริเวณด้านบนของเจ็ตพบว่ามีความเร็วกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไหลขึ้นซึ่งสนับสนุนการเลี้ยวเบนขึ้นในแนวตั้งออกจากแนว Streamwise หลังจากการปะทะกันระหว่างกระแสลมขวางบริสุทธิ์กับเจ็ตที่ด้านหน้า (7.2ค (B) และ (C))

10.4.5 ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Spanwise

สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบบริเวณที่มีความเร็วเจ็ตสูงสุด 2 คู่ โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่ของแต่ละคู่สอดคล้องกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง CVP และพบจุดอานม้า (Saddle point) ที่บริเวณความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตสูง ($\phi_j > 0.95$) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางเจ็ต (รูปที่ 7.2ง)

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบว่าจุดอานม้าวางตัวสูงขึ้นกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมอย่างชัดเจน (รูปที่ 7.2ง)

10.4.6 Vorticity เฉลี่ยไร้มิติในแนวแกน Streamwise

กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) พบโครงสร้าง Counter – rotating vortex pair (CVP) 3 คู่ โดยมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้าง CVP หลักของเจ็ต คือคู่ CVP ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะการไหล ยังสามารถพบโครงสร้าง CVP ของเจ็ต โดยขนาดของ Vorticity จะสลายตัวลดลง ขณะที่รูปร่างจะมีการพัฒนาตัวขยายใหญ่ (รูปที่ 6.1จ)

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบคู่ CVP ที่ชัดเจนเพียง 1 คู่ โดยเป็นโครงสร้าง CVP หลักของเจ็ต และมีทิศทางการหมุนไปในทางเดียวกันกับโครงสร้าง CVP ของเจ็ตกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้าง CVP ของเจ็ตเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 ยกตัวสูงขึ้นมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (รูปที่ 7.2จ)

การพบ Vorticity ในกระแสลมขวางบริสุทธิ์ทั้งในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 โดยพบ Vortex สองคู่ทุกระยะการไหล โดยทิศทางการหมุนของ Vortex คู่บนสอดคล้องกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง Wake ขณะที่ทิศทางการหมุนของ Vortex คู่ล่างสอดคล้องกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง Horseshoe vortex ดังนั้นแล้วหลักฐานชี้แนะว่า การพบ Vorticity ในกระแสลมขวางบริสุทธิ์อาจเกิดขึ้นจากโครงสร้างดังกล่าว (รูปที่ 7.2จ (C))

อนึ่ง แม้ว่าทิศทางการหมุนของ Vortex คู่ล่างนั้นจะสอดคล้องกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง Horseshoe vortex ก็ตาม แต่ที่บริเวณ Vortex คู่ล่างนั้นใกล้เคียงกับขอบภาพ ดังนั้นบริเวณดังกล่าวอาจเกิดจากความคาดเคลื่อนในการวัดความเร็ว

10.4.7 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง

โครงสร้าง CVP หลักของเจ็ตเป็นโครงสร้างหลักที่ทำให้เกิดกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสลม (รูปที่ 6.2)

โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่บริเวณด้านข้างขอบเจ็ตโดยรอบให้มีการเคลื่อนที่พุ่งลงในแนวตั้งมาที่ขอบเจ็ตด้านล่าง และถูกเหนี่ยวนำให้กลับตัวขึ้นเข้าสู่เจ็ตที่ขอบเจ็ตด้านล่างเป็นหลักผ่านบริเวณที่อ่าว (bell shaped inlet) ของช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Converging – diverging vertical channel of high upward flow)

โครงสร้าง CVP ของเจ็ตเป็นกลไกในการเหนี่ยวนำและขับเคลื่อนให้เกิดช่องการไหลขึ้นผ่านช่องการไหลขึ้นในแนวตั้ง (Converging – diverging vertical channel) ซึ่งวางตัวตรงกับกึ่งกลางโครงสร้าง CVP เมื่อกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไหลผ่านบริเวณที่มีการไหลลู่เข้า (Converging section) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมสูงในช่วงความนำจะเป็นที่ $0.25 < \phi_j < 0.75$ และไหลต่อไปถึงบริเวณคอคอด (Throat) กระแสลมขวางบริสุทธิ์จะถูกเจ็ตเหนี่ยวนำให้กลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตจนเกือบหมดแล้ว หลังจากของไหลที่ผสมกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตแล้วจะผ่านต่อไปยังบริเวณที่มีการไหลลู่ออก (Diverging section) สู่บริเวณอ่าว (Gulf region) ซึ่งมีความเร็วในแนวแกน Streamwise ต่ำ และความเร็วในแนวแกน Transverse สูง

ของไหลที่ผสมจนกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตจะไหลกระจายตัวลู่ออกไปปะทะกับแนวขอบของโครงสร้างรูปไต (Kidney shape) ด้านบนซึ่งเป็นบริเวณที่พบส่วนผสมของเจ็ตเป็นส่วนใหญ่ และมีความเร็วในแนวแกน Streamwise สูง และโครงสร้างรูปไตนี้จะเหนี่ยวนำส่วนผสมของเจ็ตที่ด้านล่างที่บริเวณอ่าว (Gulf region) ให้เข้าไปผสม คล้ายการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (Free jet)

อย่างไรก็ตามกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 โดยรวมมีลักษณะกลไกการเหนี่ยวนำการผสมคล้ายคลึงกัน แต่จะแตกต่างกันที่เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 โครงสร้าง CVP จะเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ขอบเจ็ตด้านข้างโดยรอบเกิดการเคลื่อนที่หมุนวนลงด้านล่าง และไหลเข้าสู่เจ็ตที่บริเวณด้านข้างโครงสร้าง Wake เป็นหลัก ขณะที่กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมกระแสลมขวางบริสุทธิ์จะไหลเข้าสู่เจ็ตที่บริเวณขอบเจ็ตด้านล่างเป็นหลัก

10.5 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง

โครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ตเป็นกลไกการเหนี่ยวนำการผสมหนึ่งในระนาบสมมาตรการไหล ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (Windward) และบริเวณด้านหลังของเจ็ต (Leeward)

บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (Windward): โครงสร้าง Spanwise roller ของโครงสร้างรูปไต (Kidney shape) เป็นกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตร โดยจะเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริเวณที่บริเวณด้านหน้าของขอบเจ็ตเข้ามาผสมกับตัวเจ็ต (พิจารณา $\omega_x d / u_{cf}$ ในรูปที่ 8.2) พบว่าความเร็วของกระแสลมขวางบริเวณในแนวแกน Streamwise จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม ($\vec{V}_{cf,x} \cdot \nabla \phi_j > 0$) ซึ่งคล้ายการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (พิจารณา V_x / u_{cf} ในรูปที่ 8.2) ในขณะที่ความเร็วของกระแสลมขวางบริเวณในแนวแกน Transverse จะไม่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม ($\vec{V}_{cf,y} \cdot \nabla \phi_j < 0$) (พิจารณา ϕ_{cf} ในรูปที่ 8.2) โดยกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบสมมาตรนี้สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตของ Yuan et al (1998) พบว่า โครงสร้าง Spanwise roller เป็นกลไกในการเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริเวณที่ขอบเจ็ตด้านหน้า (Windward)

อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I65 พบว่า พื้นที่การเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางเพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 8.4) และพบการเหนี่ยวนำการผสมที่เกิดจากความเร็วกว้างขวางบริเวณในแนว Transverse ($\vec{V}_{cf,y} \cdot \nabla \phi_j > 0$) ด้วย ในช่วง $-0.5 < x / rd < 0.25$ (พิจารณา ϕ_{cf} รูปที่ 8.3) ในขณะที่กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) การเหนี่ยวนำการผสมจะเกิดจากความเร็วกว้างขวางบริเวณในแนว Streamwise ($\vec{V}_{cf,x} \cdot \nabla \phi_j > 0$) เท่านั้น

บริเวณด้านหลังของเจ็ต (Leeward): ทั้งกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I65 พบว่า นอกเหนือจากโครงสร้าง CVP ของเจ็ตจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดความเร็วเจ็ตสูงขึ้นไปแล้ว โครงสร้าง Spanwise roller ของเจ็ตจะเป็นอีกกลไกหนึ่งที่จะช่วยเหนี่ยวนำให้ส่วนผสมของเจ็ตเอง (ไม่ใช่กระแสลมขวางบริเวณ) จากบริเวณอ่าว (Gulf region) ด้านล่างให้เข้าไปผสมกับโครงสร้างรูปไต (Kidney shape) ด้านบนคล้ายการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (พิจารณา V_x / u_{cf} ในรูปที่ 8.2) สอดคล้องกับกลไกการเหนี่ยวนำส่วนผสมของเจ็ตเข้าไปผสมเจ็ตเองที่พบในระนาบตัดขวาง

อย่างไรก็ตามความเร็วกว้างขวางบริเวณในแนวแกน Streamwise จะไม่ก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม ($\vec{V}_{cf,x} \cdot \nabla \phi_j < 0$) ในขณะที่ความเร็วกว้างขวางบริเวณในแนวแกน

Transverse จะก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสม ($\vec{V}_{cf,y} \cdot \nabla \phi_j > 0$) ซึ่งถูกเหนี่ยวนำให้เกิดโดยโครงสร้าง CVP ของเจ็ต (พิจารณา ϕ_{cf} รูปที่ 8.2)

อนึ่ง กลไกการเหนี่ยวนำการผสมนี้เป็นเพียงข้อชี้แนะจากผลการทดลองที่มีเท่านั้น โดยการพิจารณากลไกการเหนี่ยวนำการผสมซึ่งนำไปสู่ข้อสรุปของการเหนี่ยวนำการผสมโดยความเร็วตามแนวแกนใดๆ พึงตระหนักกว่าเป็นการพิจารณาจากความเร็วเฉลี่ยเท่านั้น

10.6 การอธิบายการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม เมื่อฉีดเจ็ตควบคุม (I165) โดยกลไกการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาณ

เพื่อสอบทวน อธิบาย และสนับสนุนกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง งานวิจัยจึงนำกลไกการเหนี่ยวนำการผสมมาคำนวณเชิงปริมาณซึ่งแสดงเป็นอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลเข้าสู่เจ็ต พบว่า เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะทำให้อัตราการของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ไหลเข้าสู่เจ็ตนั้นมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ระยะการไหล (รูปที่ 9.5) ที่ทุกระยะการไหล สอดคล้องกับเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 จะทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (E) เพิ่มสูงขึ้นมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมที่ทุกระยะการไหล (รูปที่ 5.1)

10.7 ปัจจัยที่มีผลช่วยส่งเสริมการเหนี่ยวนำการผสมกรณีฉีดเจ็ตควบคุม (I165) เมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)

จากการศึกษาเจ็ตในกระแสลมขวางทั้งในระนาบตัดขวางการไหล และระนาบสมมาตรการไหล สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบว่า มีปัจจัยต่างๆที่ช่วยส่งเสริมให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมกรณีฉีดเจ็ตควบคุม (I165) มากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม ได้แก่

- **เส้นทางเดินของเจ็ต:** เมื่อฉีดเจ็ตควบคุม (I165) จะทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตลอยตัวสูงขึ้น ส่งผลให้ลดผลของการกีดกันการเหนี่ยวนำการผสมจากผนัง (Wall blocking)
- **Circulation ของเจ็ต:** เมื่อฉีดเจ็ตควบคุม (I165) จะทำให้ Circulation ของเจ็ตมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้โครงสร้าง CVP ของเจ็ตมีศักยภาพในการเหนี่ยวนำการผสมมากขึ้น

- **พื้นที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง:**
 - **ระนาบตัดขวางการไหล:** เมื่อฉีดเจ็ตควบคุม (I165) จะก่อให้เกิดโครงสร้าง Wake ที่บริเวณด้านล่างของเจ็ตซึ่งจะช่วยเพิ่มพื้นที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง และจะช่วยเพิ่มพื้นที่การไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้าสู่เจ็ต
 - **ระนาบสมมาตรการไหล:** เมื่อฉีดเจ็ตควบคุม (I165) จะทำให้ขอบเจ็ตที่บริเวณด้านหน้าของเจ็ต (Windward) มีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง

ปัจจัยต่างๆเหล่านี้ล้วนช่วยส่งเสริมให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุม (I165) มากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)





ตารางที่ 5.1 สรุปค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรและค่าประสิทธิภาพ
ใช้เจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165

	$E\left(\frac{x}{rd}\right)$				Curve fit: $E = 1 + a_E \left(\frac{x}{rd}\right)^{b_E}$		
$\frac{x}{rd}$	0.5	0.75	1.0	1.5	a_E	b_E	R^2
JICF	4.183	5.531	6.381	7.255	5.119	0.5627	0.9589
I165	6.252	7.142	8.159	8.825	6.875	0.3627	0.9709
	$\eta\left(\frac{x}{rd}\right)$				Curve fit: $\eta = a_\eta \left(\frac{x}{rd}\right)^{b_\eta}$		
					a_η	b_η	R^2
I165	1.495	1.291	1.278	1.216	1.280	-0.1889	0.862

ตารางที่ 5.2 สรุปค่าอัตราส่วนการเที่ยงนุกการผสมในงานวิจัยปัจจุบัน และงานวิจัยในอดีต

		E									
Work	Actual r	Experimental Data						Empirical Curve Fit			
		$x/trd = 0.25$	0.5	0.75	1	1.5	a_E	b_E	R^2		
$r = 4$	Present work	-	4.18	5.53	6.38	7.25	5.12	0.56	0.96		
	Witayaparakorn (2013)	-	2.88	4.23	4.82	5.39	3.48	0.68	0.93		
	Srimekharat (2013)	-	2.91	3.91	4.89	5.36	3.33	0.683	0.94		
	Dawyok (2014)	-	3.22	4.55	5.43	7.12	4.36	0.86	0.99		
	Wongthongsiri (2014)	2.96	4.44	5.67	6.37	6.47	4.88	0.496	0.92		
	Somphrom (2016)	-	4.51	5.36	6.31	7.24	4.98	0.639	0.95		
	Tekhuad(2016)	-	4.44	5.51	5.88	7.86	5.22	0.628	0.97		
	\bar{E}	2.96	3.80	4.97	5.73	6.70	4.43	0.626	0.98		
Curve fit parameter to E of all works as one sample											
	S_E	-	0.760	0.720	0.688	1.00					
	S_E / \bar{E}	-	0.2	0.145	0.120	0.149					
	Precision uncertainty of \bar{E} $P_E = tS_E / \sqrt{N}$	-	0.703	0.666	0.636	0.925					
	Fraction of precision uncertainty of \bar{E} , P_E / \bar{E}	-	0.185	0.134	0.111	0.138					

ตารางที่ 5.3 สรุปค่าเส้นทางเดินของเจ็ตโดยคำนวณมาจาก V_x

	$\frac{y_{CM, V_x }}{rd} \left(\frac{x}{rd} \right)$				Curve fit: $\frac{y_{CM, V_x }}{rd} = a_T \left(\frac{x}{rd} \right)^{b_T}$		
$\frac{x}{rd}$	0.5	0.75	1.0	1.5	a_T	b_T	R^2
JICF	0.9061	1.083	1.168	1.417	1.194	0.3912	0.9987
I165	1.331	1.513	1.563	1.749	1.586	0.2413	0.9844

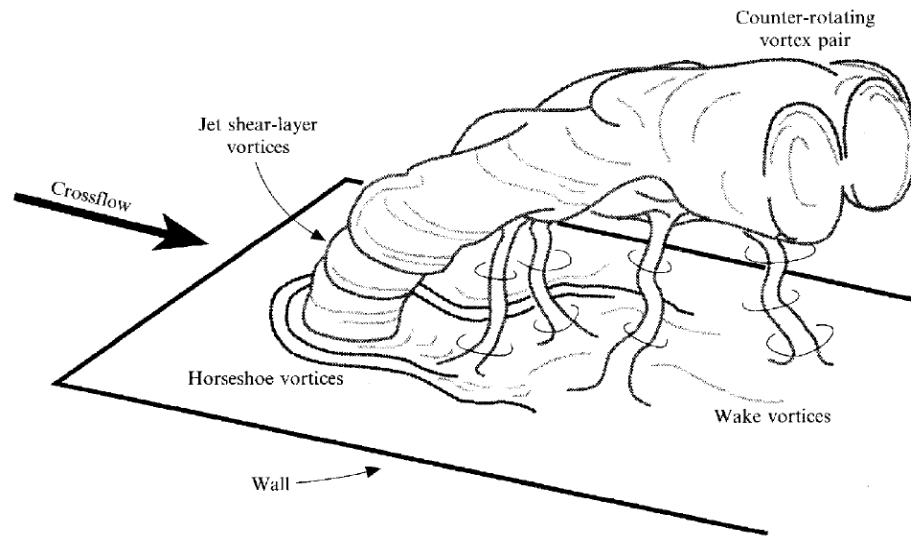
ตารางที่ 5.4 สรุปค่าเส้นทางเดินของเจ็ตโดยคำนวณมาจาก ω_x

	$\frac{y_{CM, \omega_x }}{rd} \left(\frac{x}{rd} \right)$				Curve fit: $\frac{y_{CM, \omega_x }}{rd} = a_T \left(\frac{x}{rd} \right)^{b_T}$		
$\frac{x}{rd}$	0.5	0.75	1.0	1.5	a_T	b_T	R^2
JICF	0.7658	0.9288	1.027	1.232	1.036	0.4274	0.9975
I165	1.200	1.319	1.453	1.551	1.423	0.2394	0.98

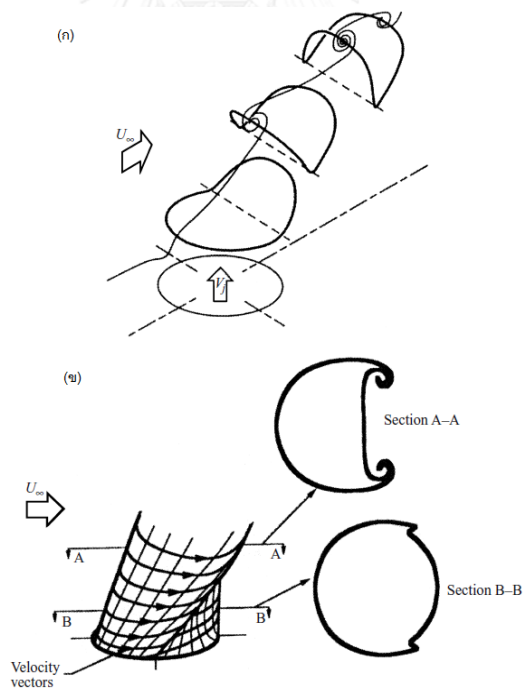
ตารางที่ 5.5 สรุปค่า Circulation

	$\frac{\Gamma}{u_{cf}d} \left(\frac{x}{rd} \right)$				Curve fit: $\frac{\Gamma}{u_{cf}d} = a_C \left(\frac{x}{rd} \right)^{b_C}$		
$\frac{x}{rd}$	0.5	0.75	1.0	1.5	a_C	b_C	R^2
JICF	5.438	4.449	3.750	3.441	3.953	-0.532	0.9634
I165	7.213	6.168	5.493	3.979	5.173	-0.428	0.9599

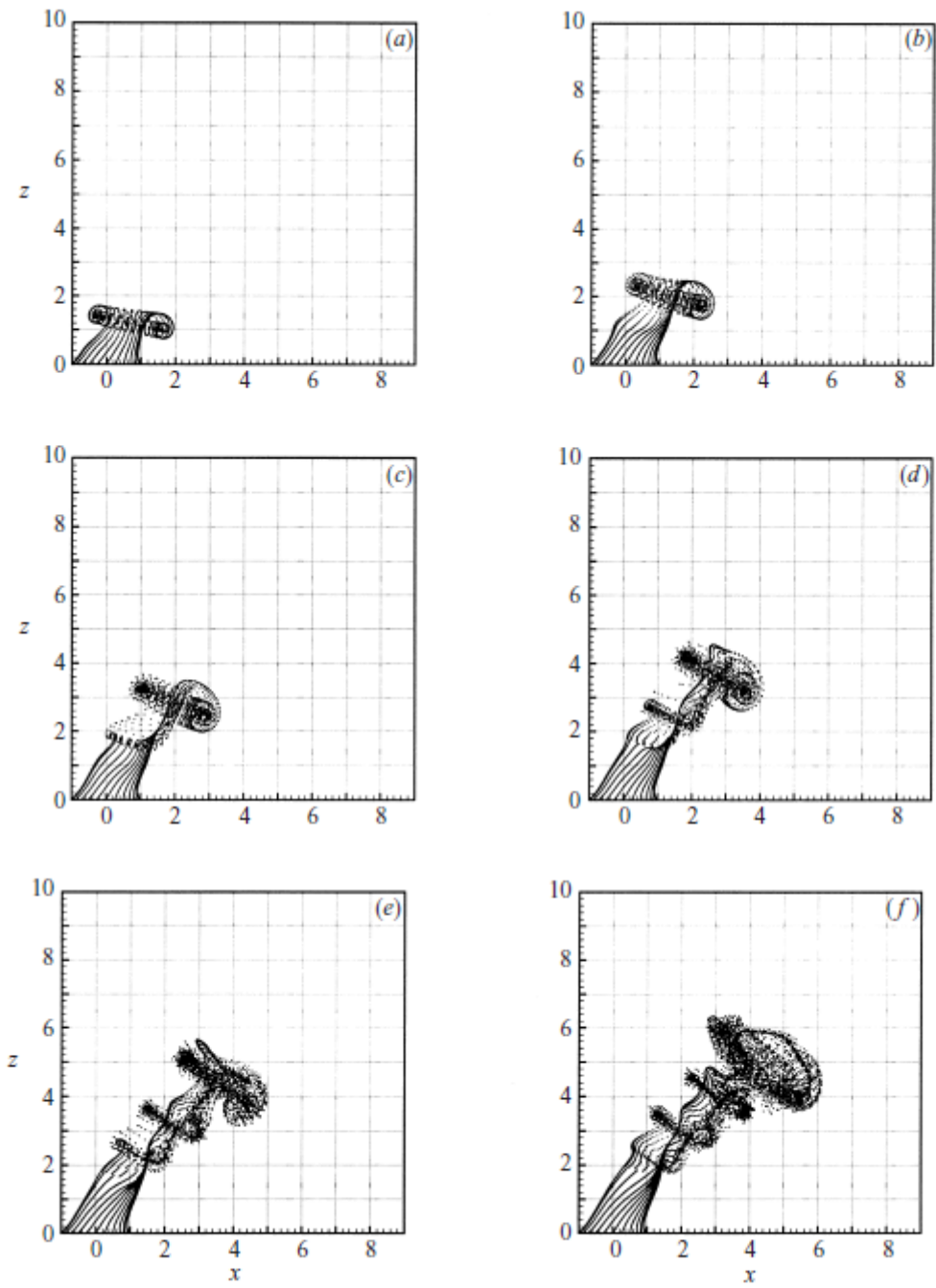




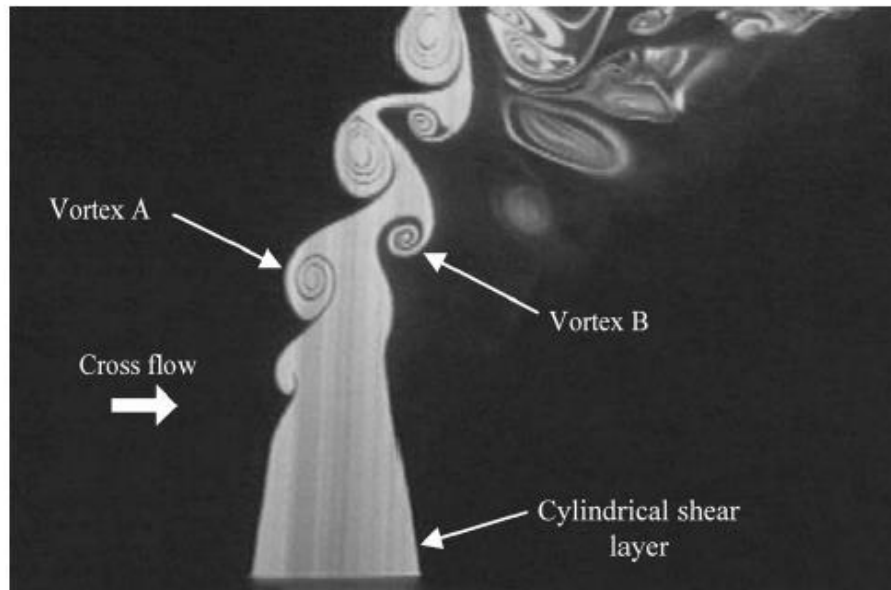
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Fric and Roshko,1994)



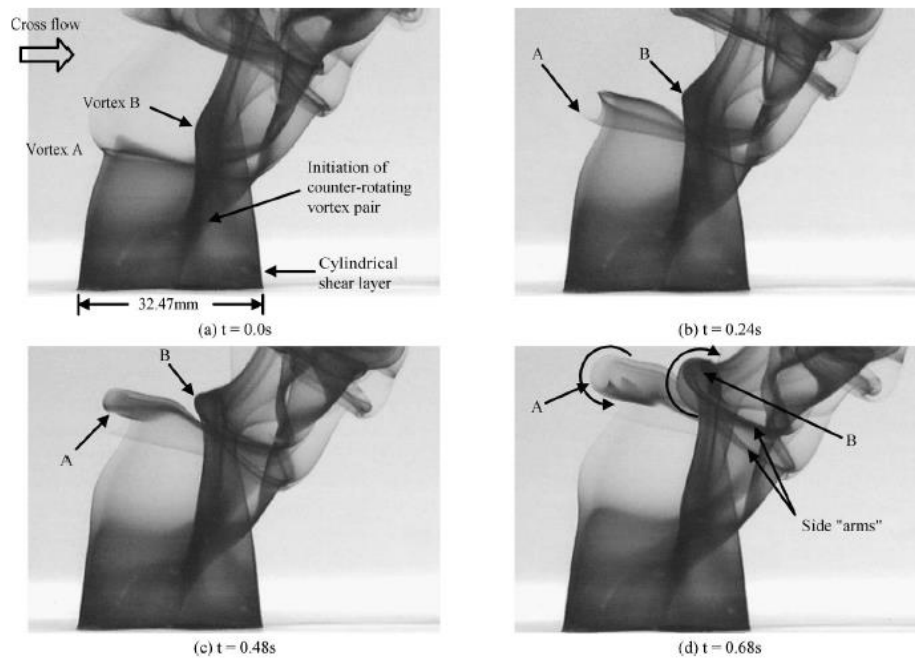
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของการเกิด CVP (Cortelezzi and Karagozian,2001) Isometric ของเจ็ต Shear layer vortex ring Schematic diagram ของ การเปลี่ยนตำแหน่งของ Shear layer vorticity



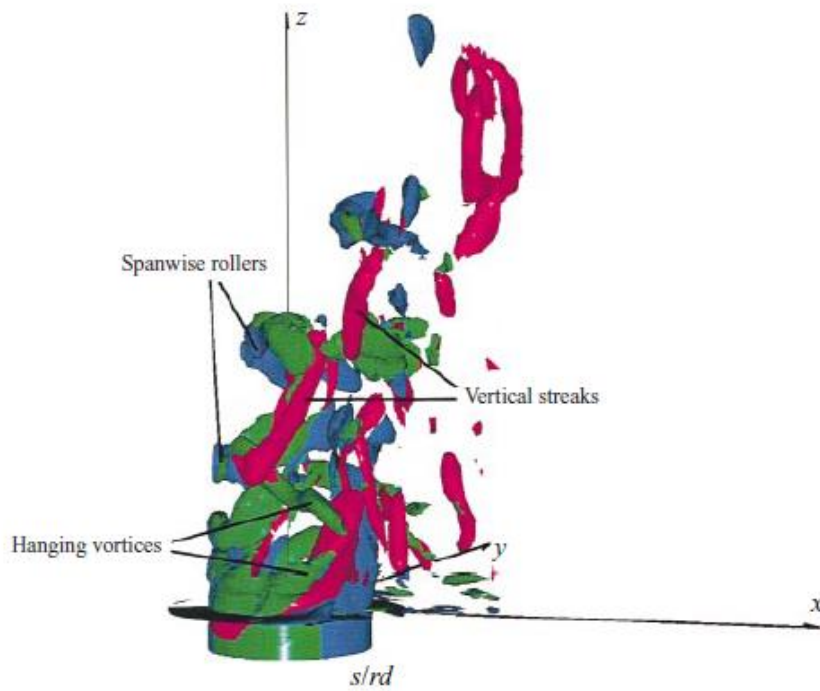
รูปที่ 2.3 การพัฒนาตัวของเจ็ตในกระแสมขวาง
(Cortelezzi and Karagozian,2001)



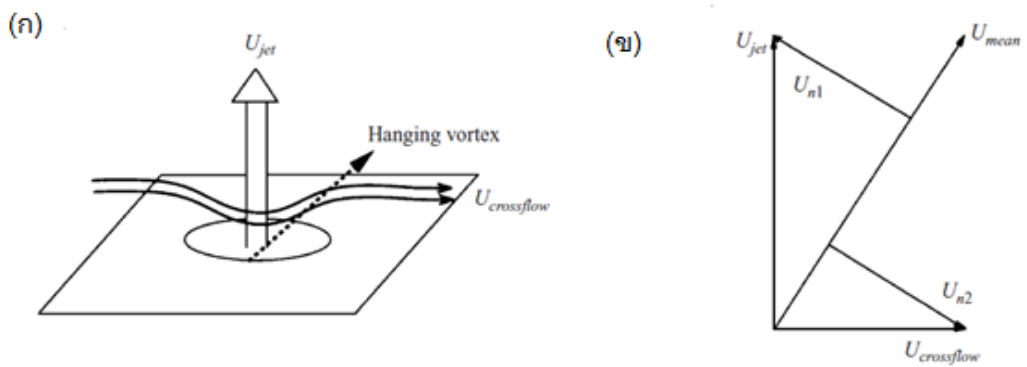
รูปที่ 2.4 Vortices structure ของเจ็ตในกระแสลมขวางบนระนาบสมมาตร (Lim et al., 2001)



รูปที่ 2.5 การพับตัวของ cylindrical shear layer (Lim et al., 2001)



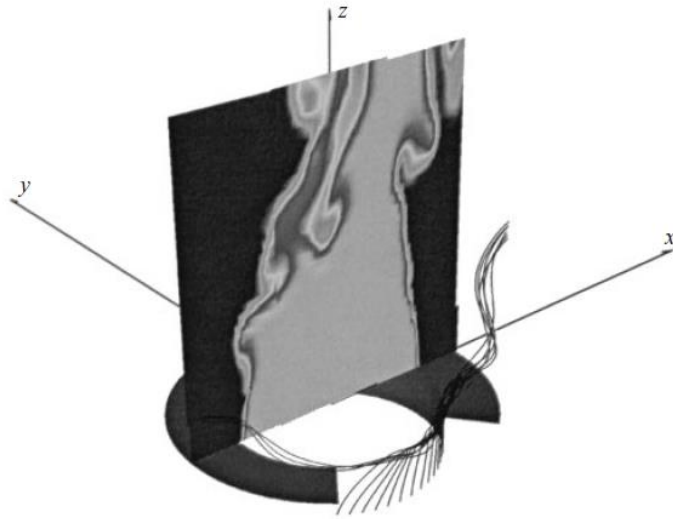
รูปที่ 2.6 โครงสร้างบริเวณ Near field ของเจ็ตในกระแสมุมขวาง ซึ่งแสดงเป็น Isosurface ของ Vorticity (Yuan et al., 1999)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ Hanging vortices (Yuan et al., 1999)

ก) รูป Schematic ของ Hanging vortices

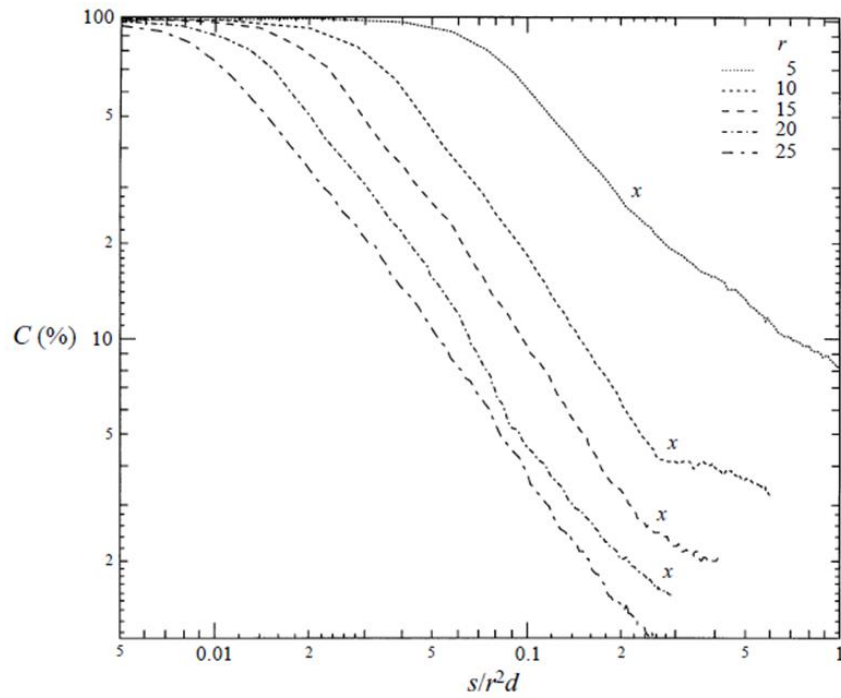
ข) Vector ความเร็วซึ่งแสดงกลไกของการเกิด Hanging vortices



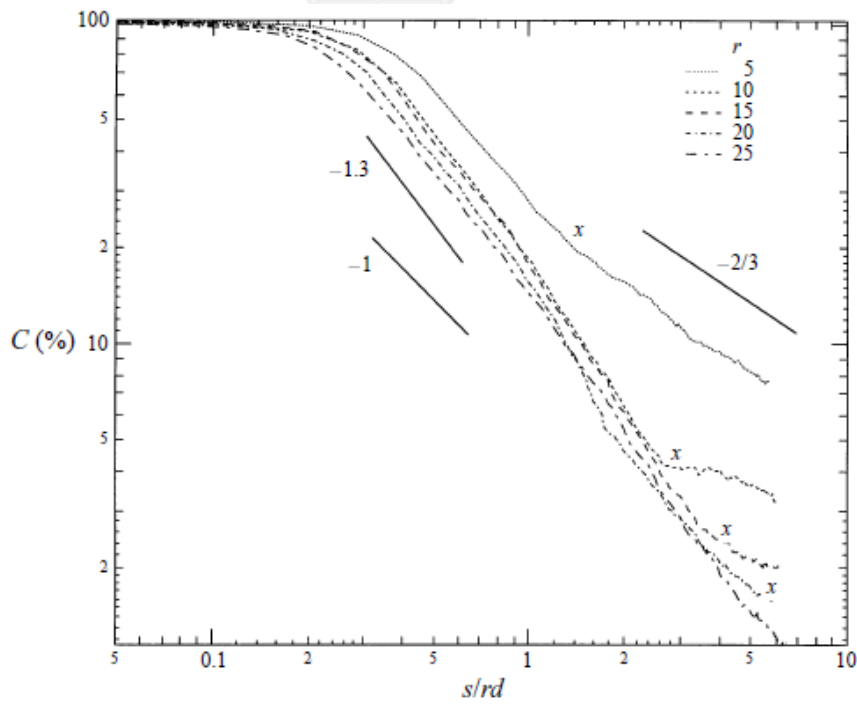
รูปที่ 2.8 Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวขึ้นระหว่างเจ็ต และกระแสลมขวางที่บริเวณขอบด้านข้างของเจ็ต (Yuan et al., 1999)



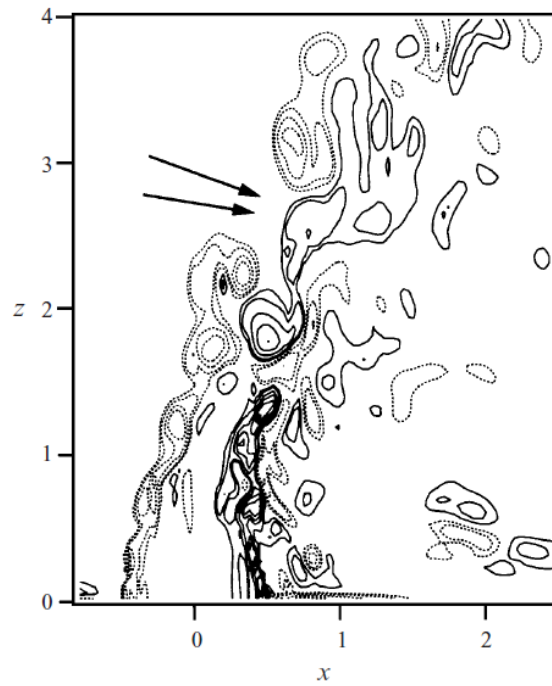
รูปที่ 2.9 วิวัฒนาการของ Streamlines ในการก่อตัวของ Kelvin-Helmholtz roller (Sau et al., 2004)



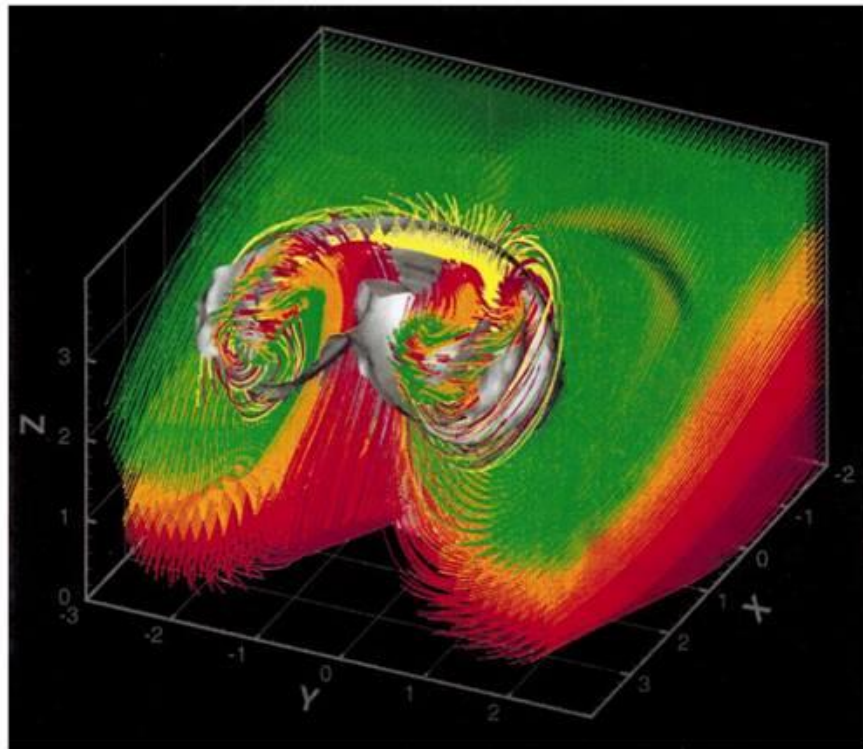
รูปที่ 2.10 จุดแบ่งระหว่าง Near Field และ Far Field บน r^2d (เครื่องหมาย X) (Smith and Mungal, 1998)



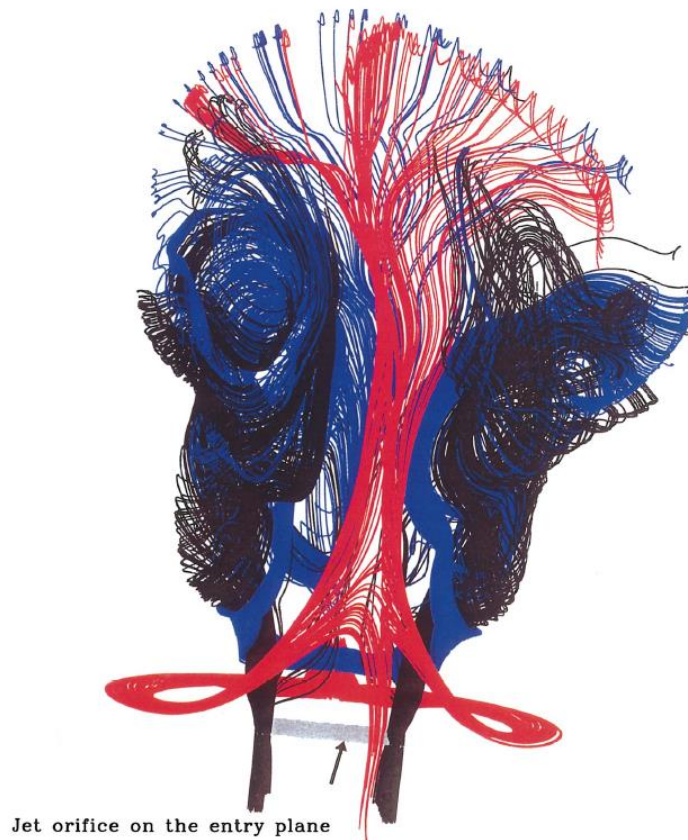
รูปที่ 2.11 การลดลงของ C % ของ JICF และ Free jet บน Near Field และ Far Field บน rd เปรียบเทียบกับ free jet (Smith and Mungal, 1998)



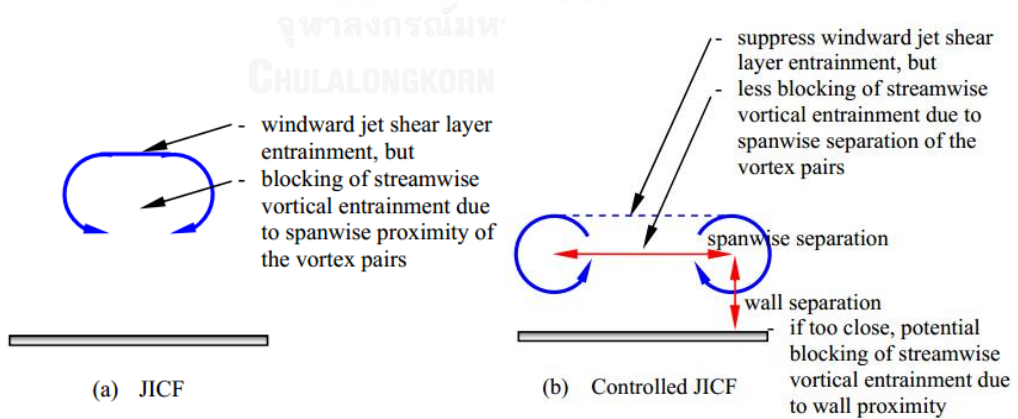
รูปที่ 2.12 Instantaneous contour ของ Spanwise vorticity
(Yuan et al., 1999)



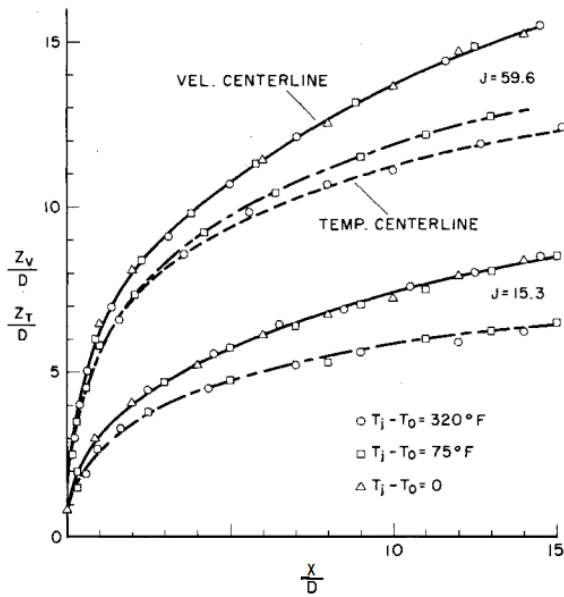
รูปที่ 2.13 Average magnitude ของ Streamwise vorticity
Cortelezzi and Karagozian (2001)



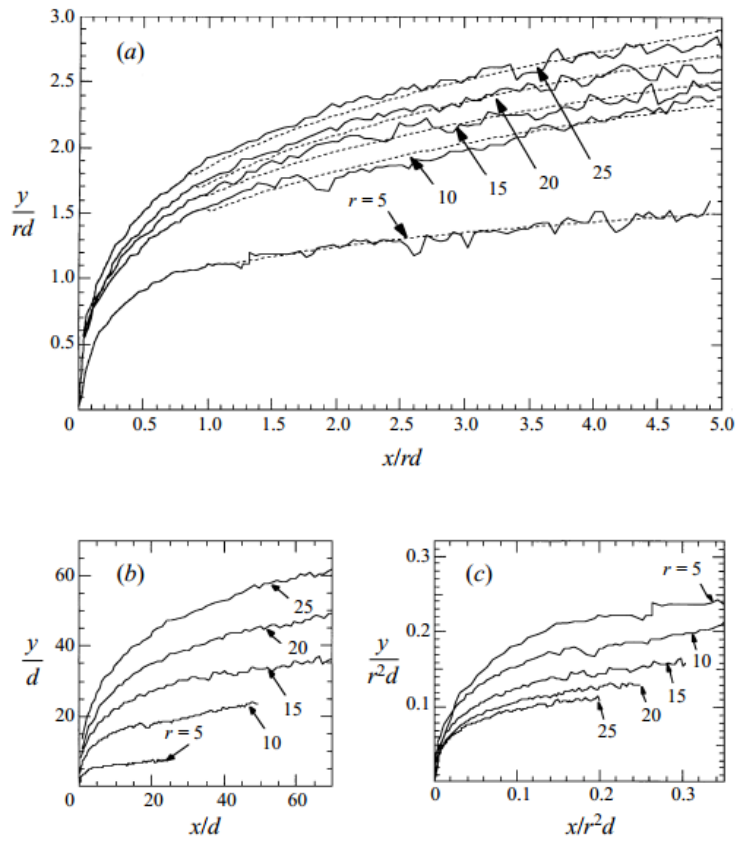
รูปที่ 2.14 Instantaneous of streamline (Sau et al., 2004)



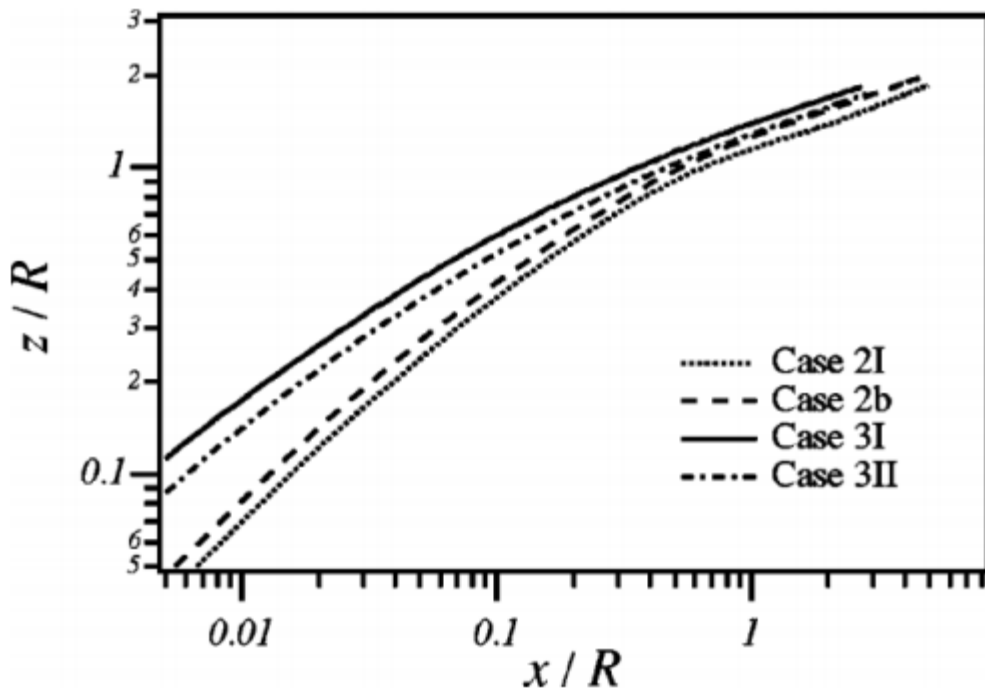
รูปที่ 2.15 แนวคิดกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Kornsri et al., 2009)



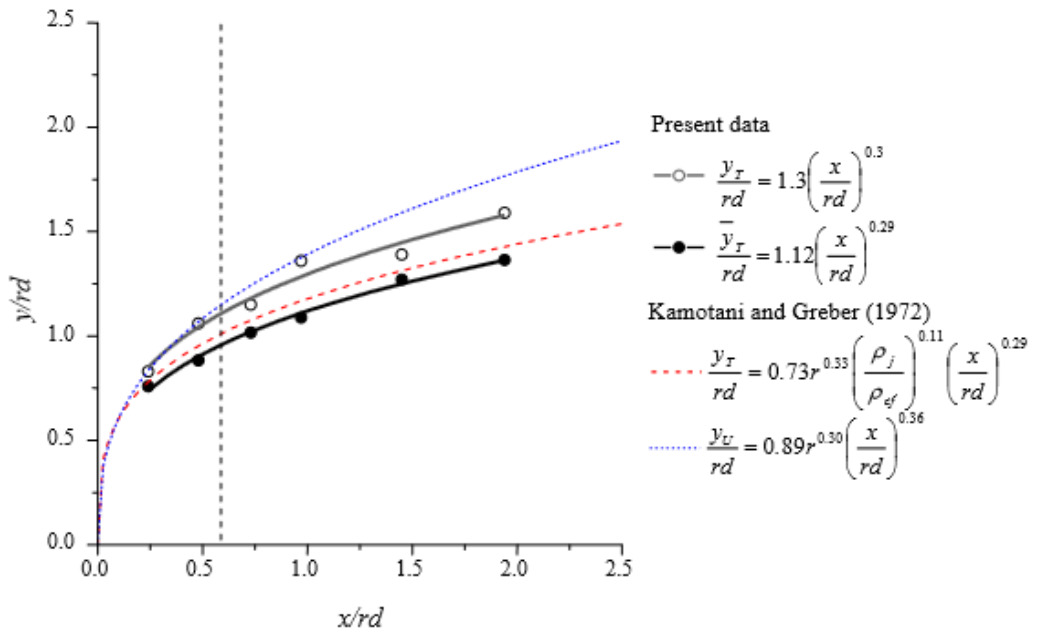
รูปที่ 2.16 เส้นทางเดินความเร็วและอุณหภูมิของเจ็ต (Kamotani and Graeber, 1972)



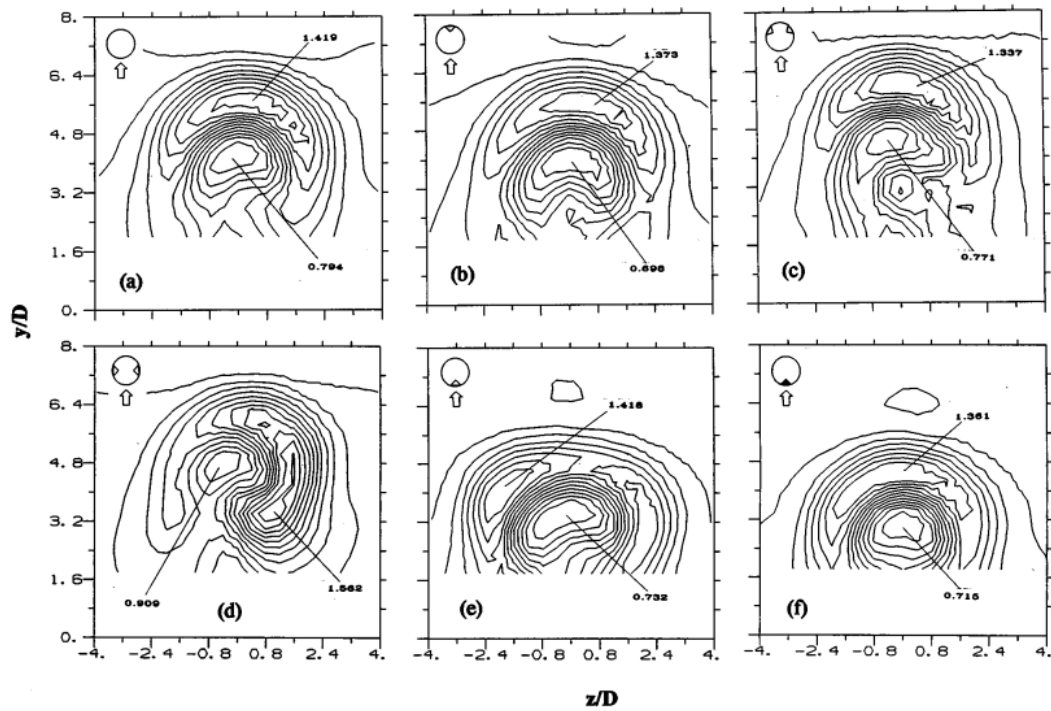
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Fric and Roshko, 1994)



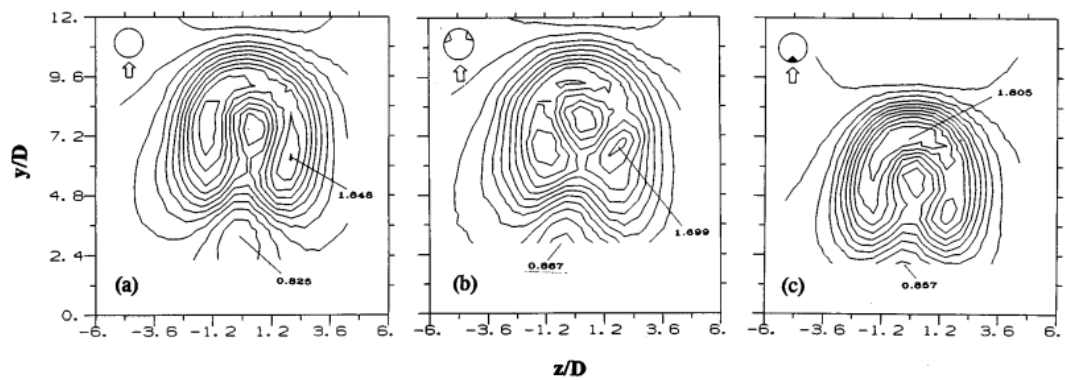
รูปที่ 2.18 เส้นทางเดินของ streamline (Yuan and Street, 1998)



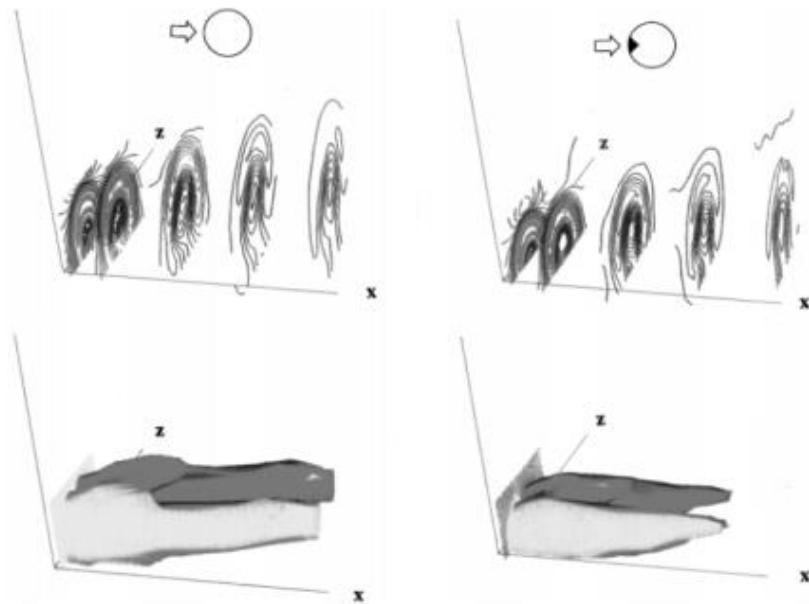
รูปที่ 2.19 Center-plane trajectory อุนทงูมิ และ Centroid trajectory อุนทงูมิ (Wangjiraniran, 2001)



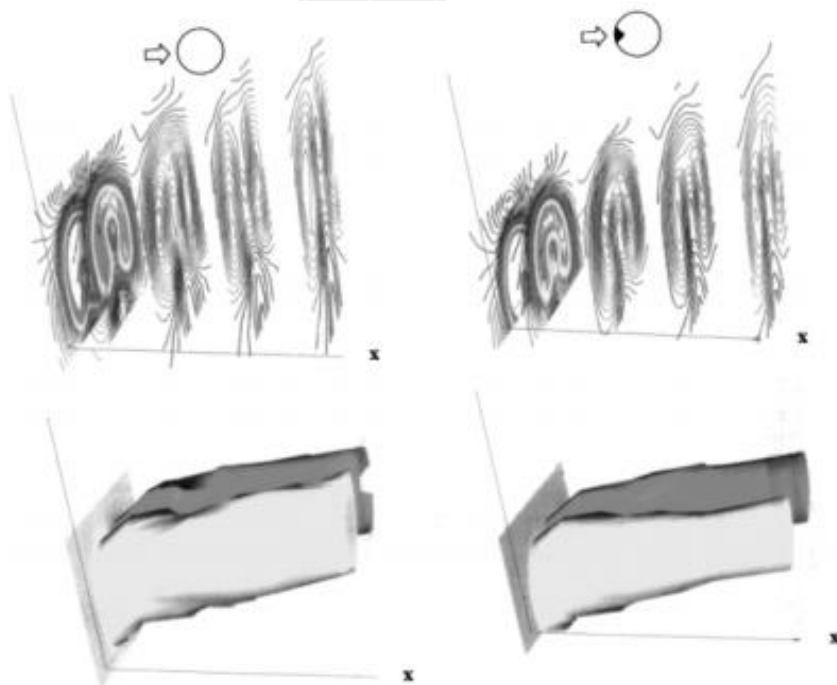
รูปที่ 2.20 Contour ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบตั้งฉากสำหรับ $J=21$
(Zaman and Fross, 1997)



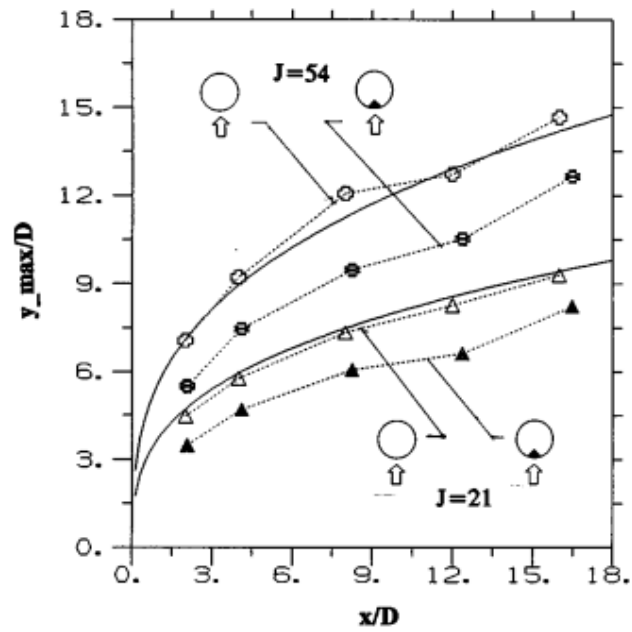
รูปที่ 2.21 Contour ความเร็วเฉลี่ยบนระนาบตั้งฉากสำหรับ $J=54$
(Zaman and Fross, 1997)



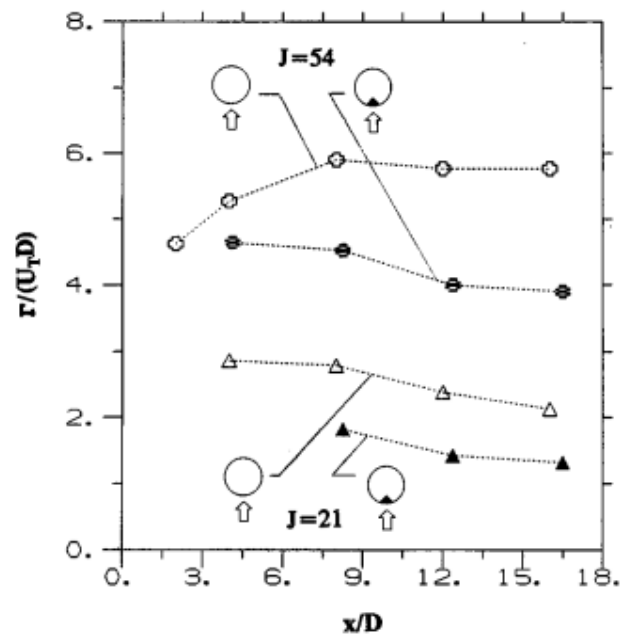
รูปที่ 2.22 ความเร็วเฉลี่ยบนหน้าตัดตั้งฉากและ Streamwise vorticity isosurface สำหรับ $J=21$ (Zaman and Fross, 1997)



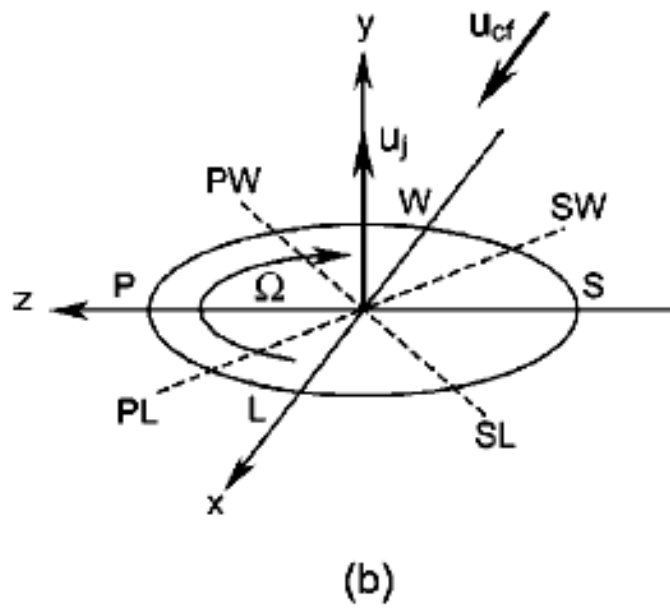
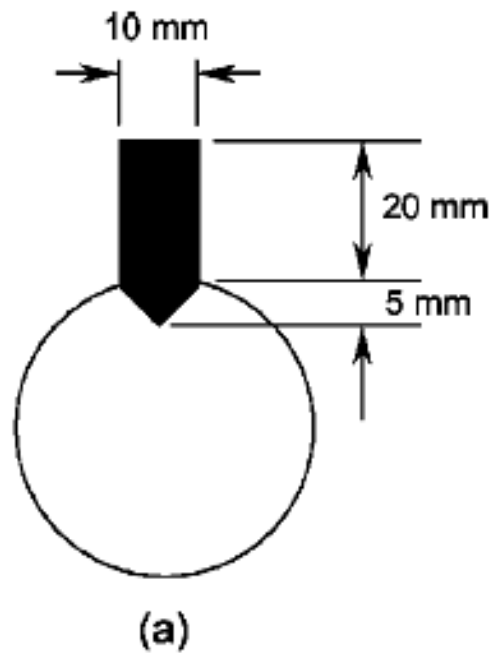
รูปที่ 2.23 ความเร็วเฉลี่ยบนหน้าตัดตั้งฉากและ Streamwise vorticity isosurface สำหรับ $J=54$ (Zaman and Fross, 1997)



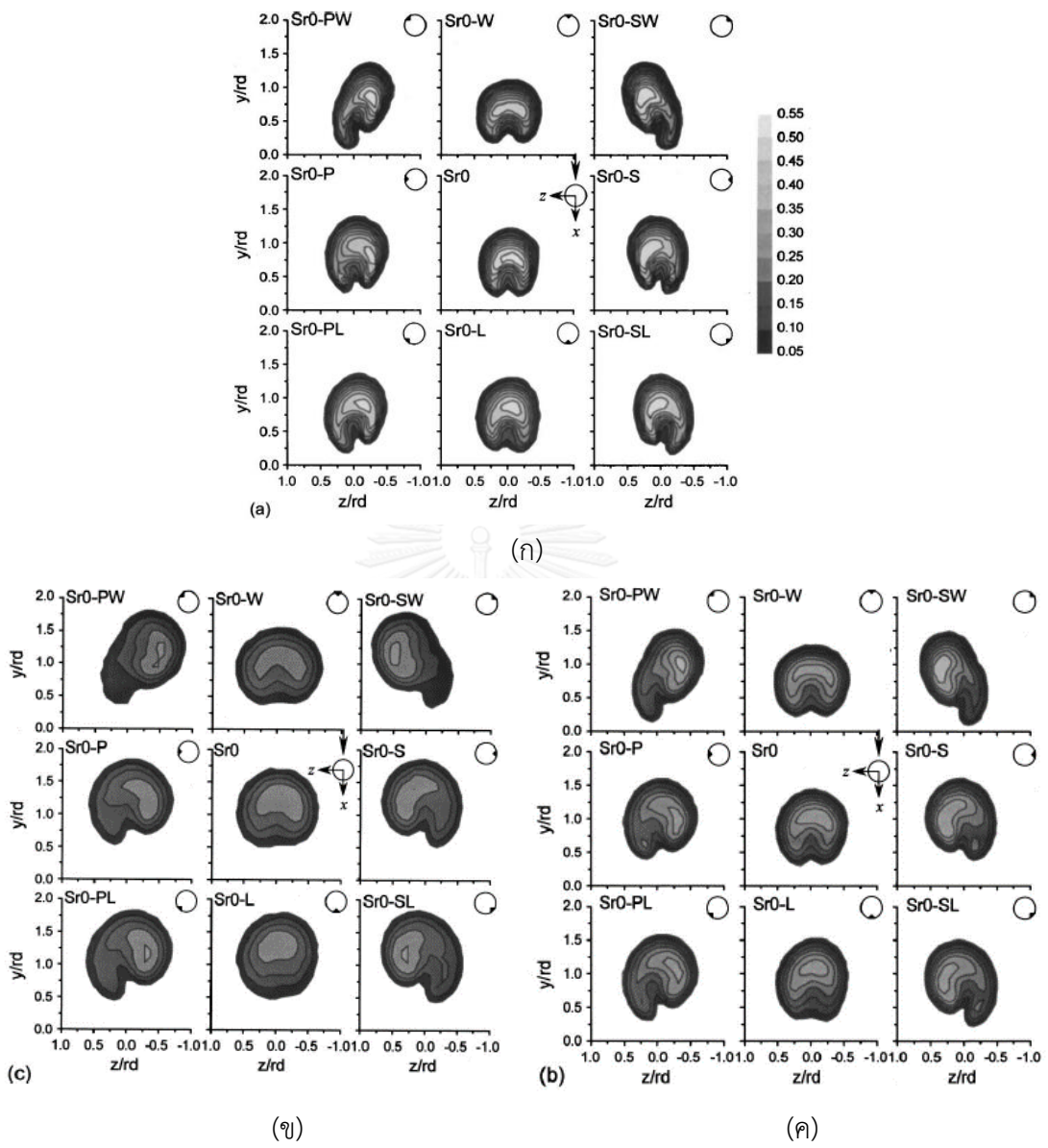
รูปที่ 2.24 ผลของการติด Tab ต่อเส้นทางเดินความเร็วของเจ็ทบนระนาบสมมาตร (Zaman and Fross, 1997)



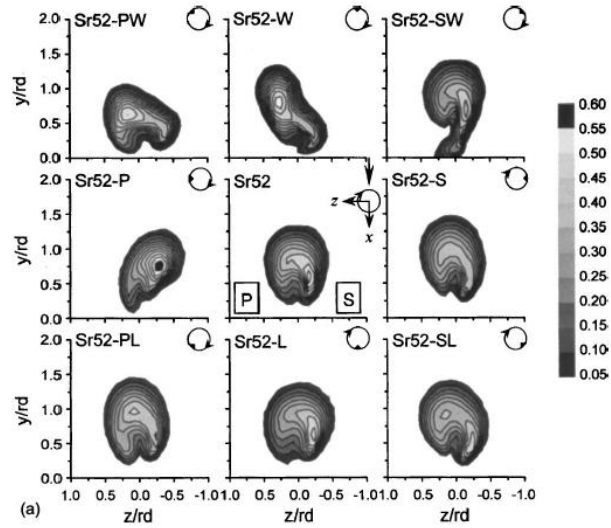
รูปที่ 2.25 ผลของการติด Tab ต่อ Circulation distribution ไปตามแนว Downstream (Zaman and Fross, 1997)



รูปที่ 2.26 a) Tab และการติดตั้ง b) ระบบแกนตั้งฉากกับทิศทางการหมุน
(Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)



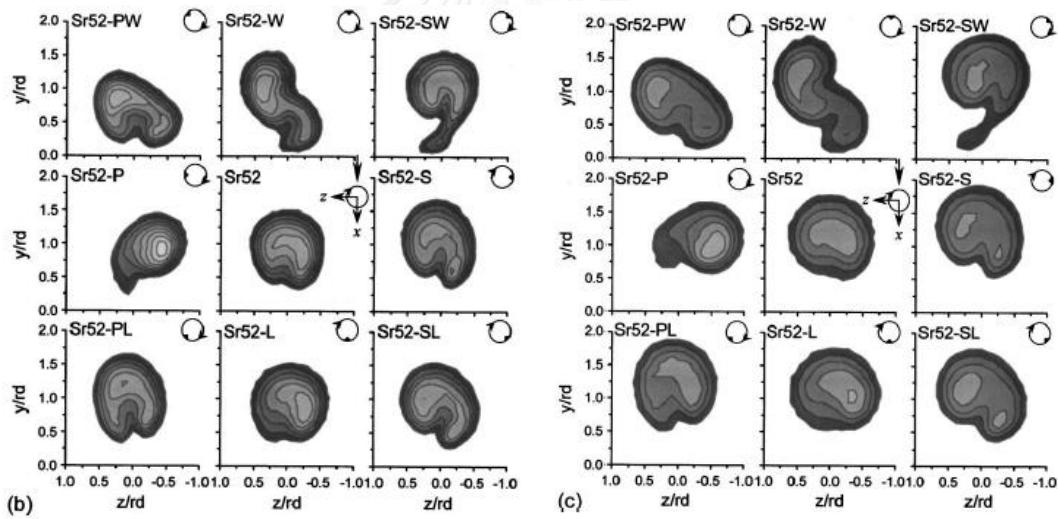
รูปที่ 2.27 การกระจายตัวของอุณหภูมิจากการติด Tab
 กรณีปากทางออกเจ็ตไม่หมุนควง
 (ก) $x / rd = 0.25$ (ข) $x / rd = 0.5$ (ค) $x / rd = 1.0$
 (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)



(a)



(ก)



(b)

(c)

(ข)

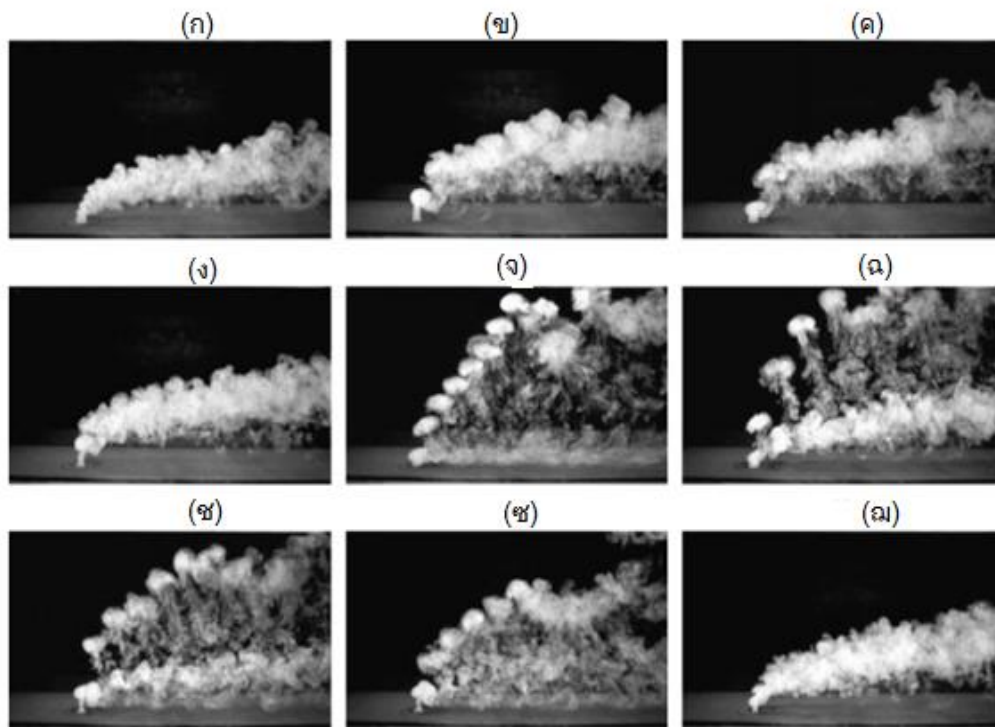
(ค)

รูปที่ 2.28 การกระจายตัวของอนุหภูมิจากการติด Tab

กรณีปากทางออกเจ็ตหมุนควง

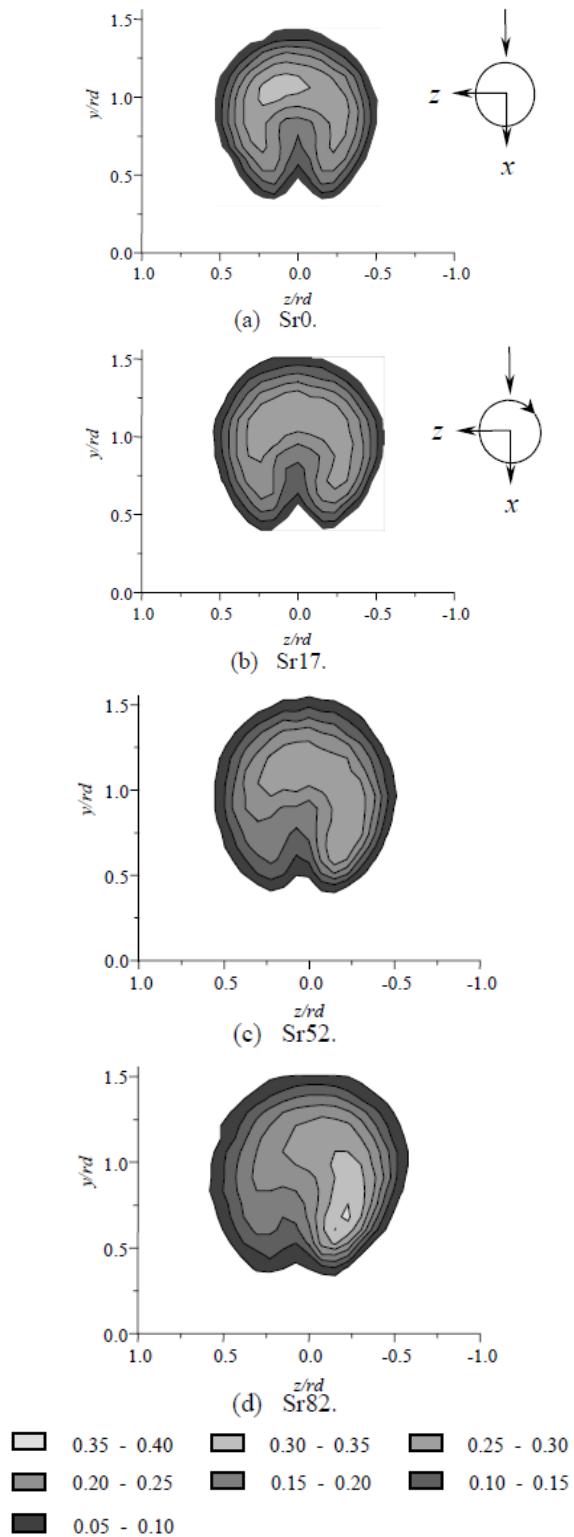
(ก) $x / rd = 0.25$ (ข) $x / rd = 0.5$ (ค) $x / rd = 1.0$

(Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)

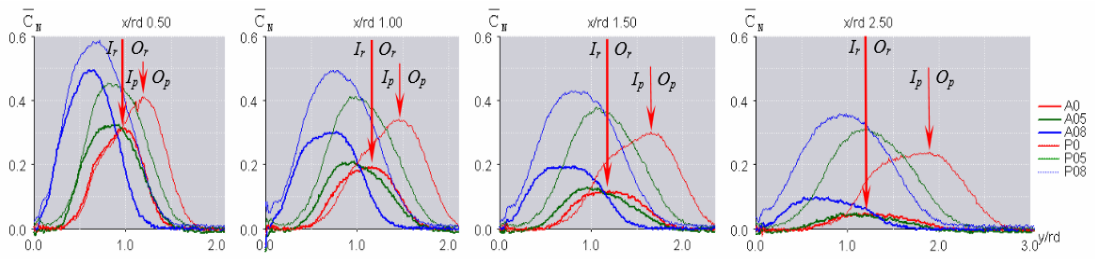


รูปที่ 2.29 ผลการกระตุ้นเจ็ตด้วยลำโพง (M'Closkey et al., 2002)
 ยังไม่กระตุ้นเจ็ต

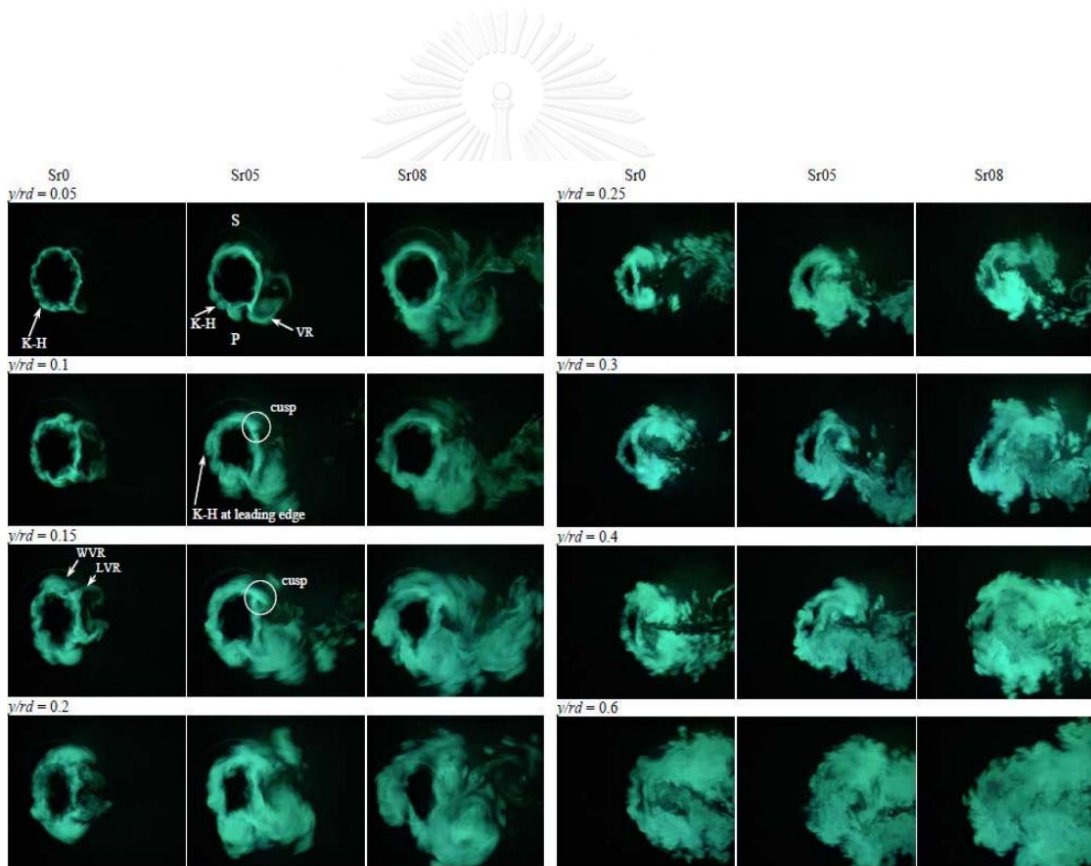
(ก) Uncompensated กระตุ้นด้วย Sine wave ที่ความถี่ 73.5 Hz
 (ข) Compensated กระตุ้นด้วย Sine wave ที่ความถี่ 73.5
 (ค) Uncompensated กระตุ้นด้วย Square wave ที่ความถี่ 110 Hz duty cycle 31%
 (ง) Compensated กระตุ้นด้วย Square wave ที่ความถี่ 110 Hz duty cycle 31%
 (จ) Compensated กระตุ้นด้วย Square wave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



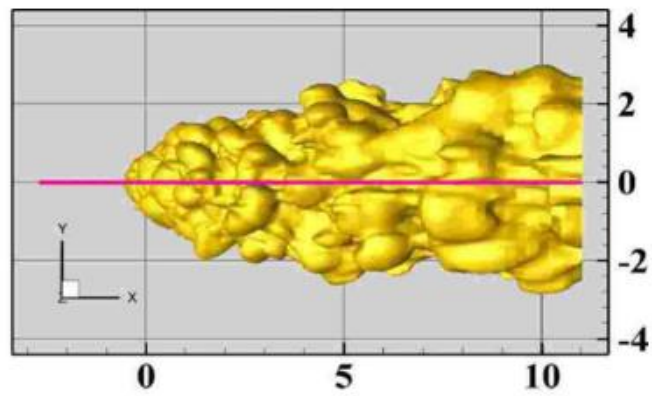
รูปที่ 2.30 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวมบนระนาบตั้งฉาก (Wangjiraniran and Bunyajitradulya,2001)



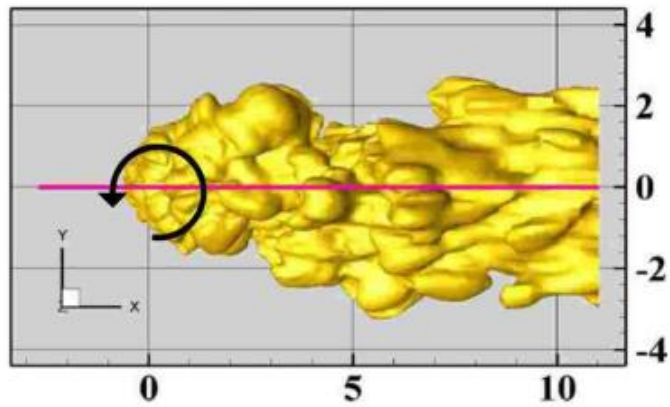
รูปที่ 2.31 ภาพแสดง Contours of line-of-sight integrated mean images ของ Traverses profile ไปตามแนว downstream โดยที่ P แทน Passive และ A แทน Reactive (Yingjaroen et al., 2006)



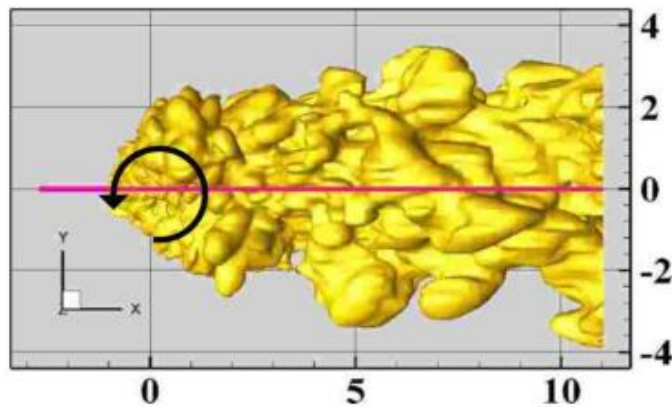
รูปที่ 2.32 Instantaneous image ของ mixing structure บนด้าน Top view (Limdumrongtum et al., 2009)



(ก)



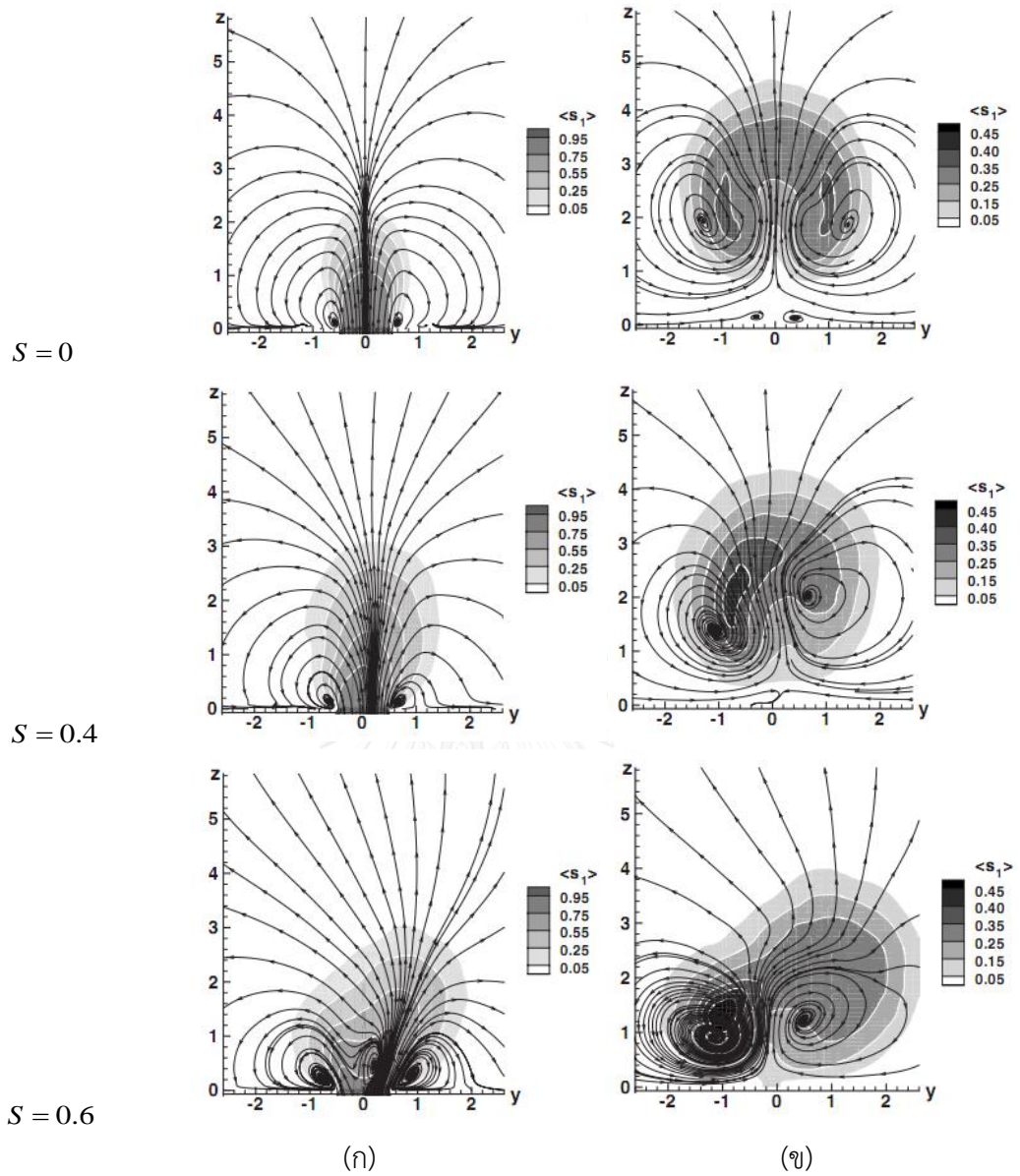
(ข)



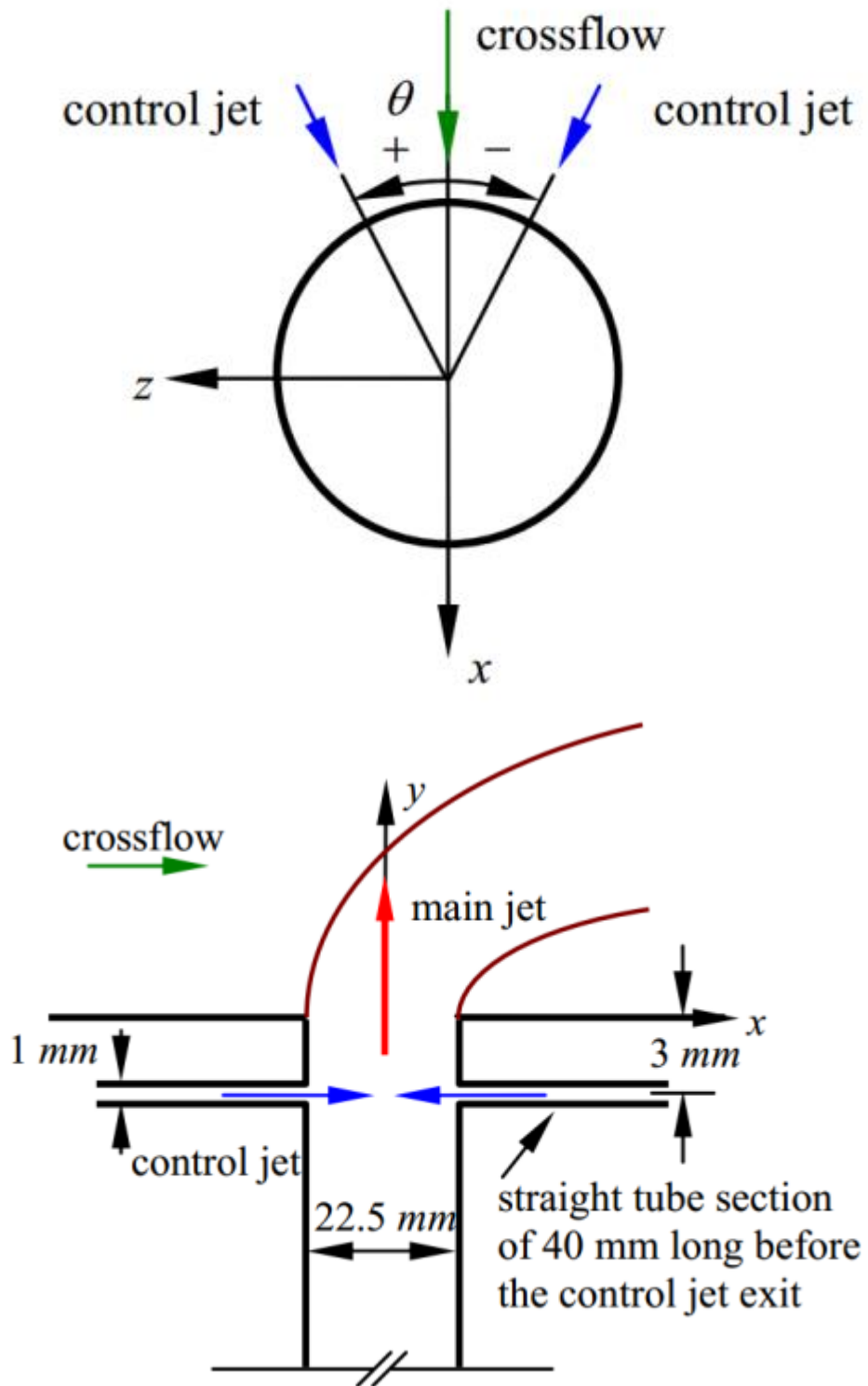
(ค)

รูปที่ 2.33 Instantaneous isoconcentration surface ด้าน Top view
(Denev et. al., 2005)

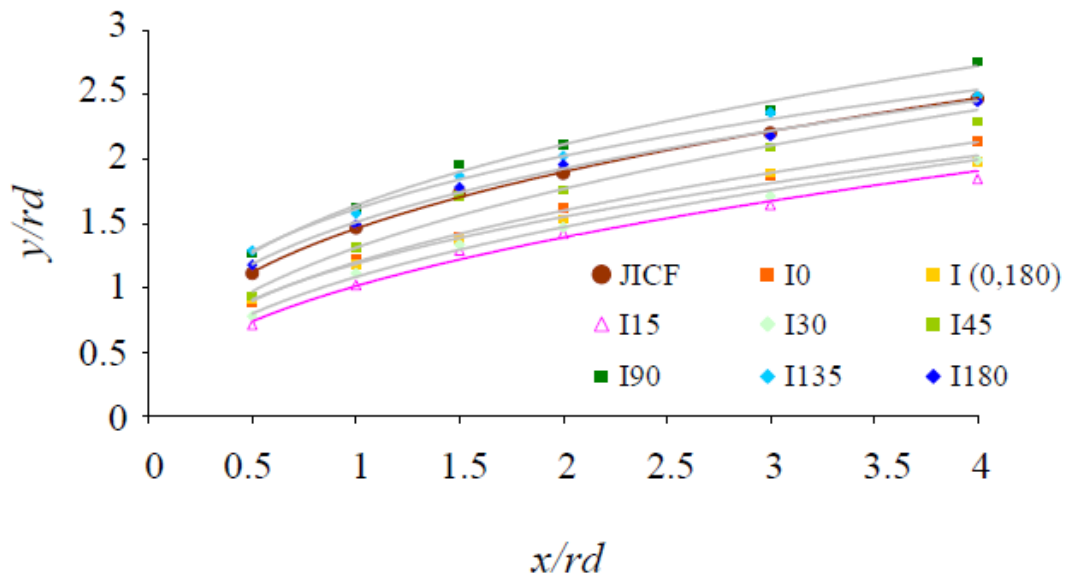
(ก) $S = 0$ (ข) $S = 0.4$ (ค) $S = 0.6$



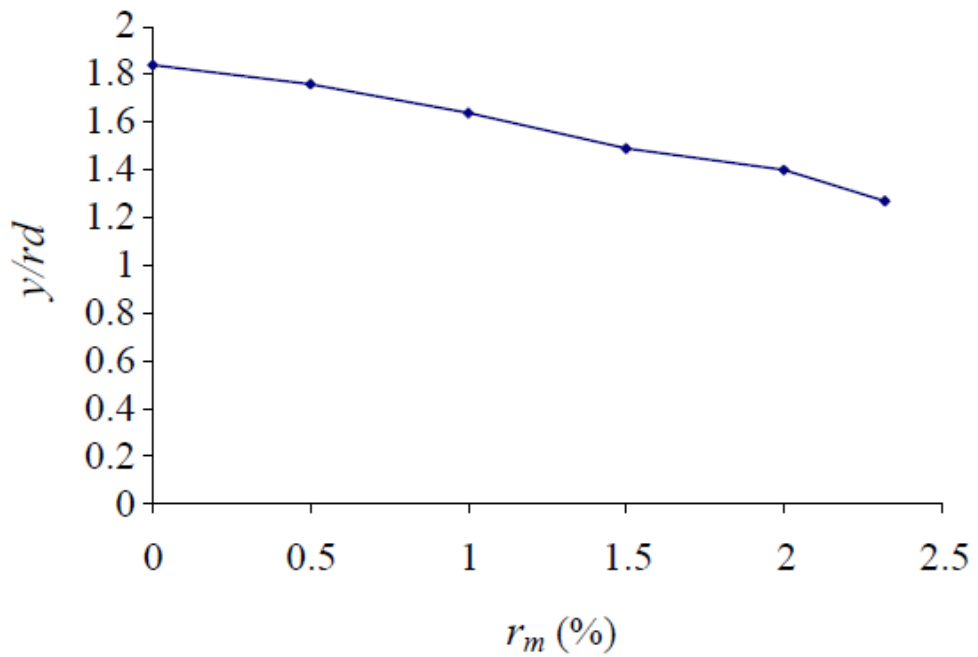
รูปที่ 2.34 Instantaneous isoconcentration surface ด้าน Top view (Denev et. al., 2005) (ก) $x/D = 0$ (ข) $x/D = 1.83$



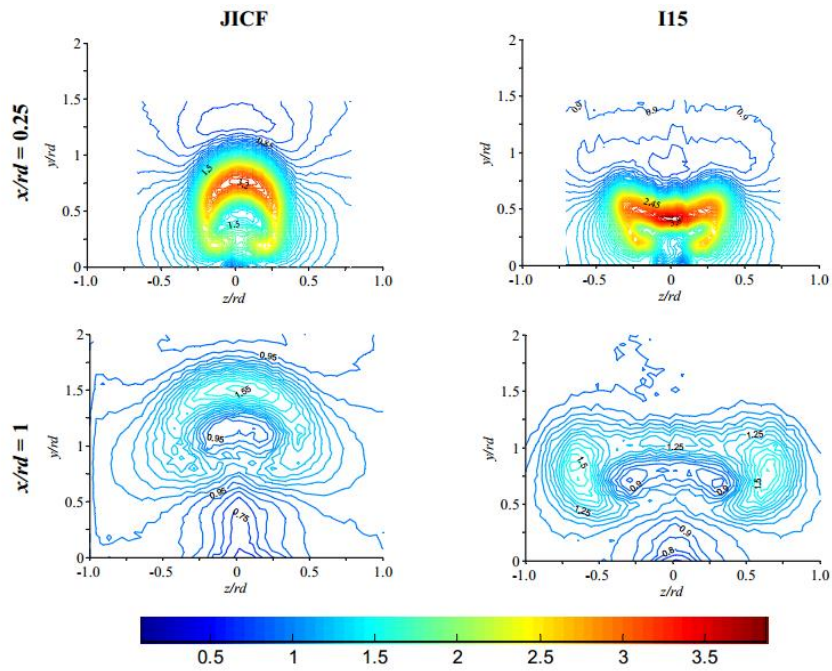
รูปที่ 2.35 ชุดเจ็ทควบคุม (Kornsri et al., 2009)



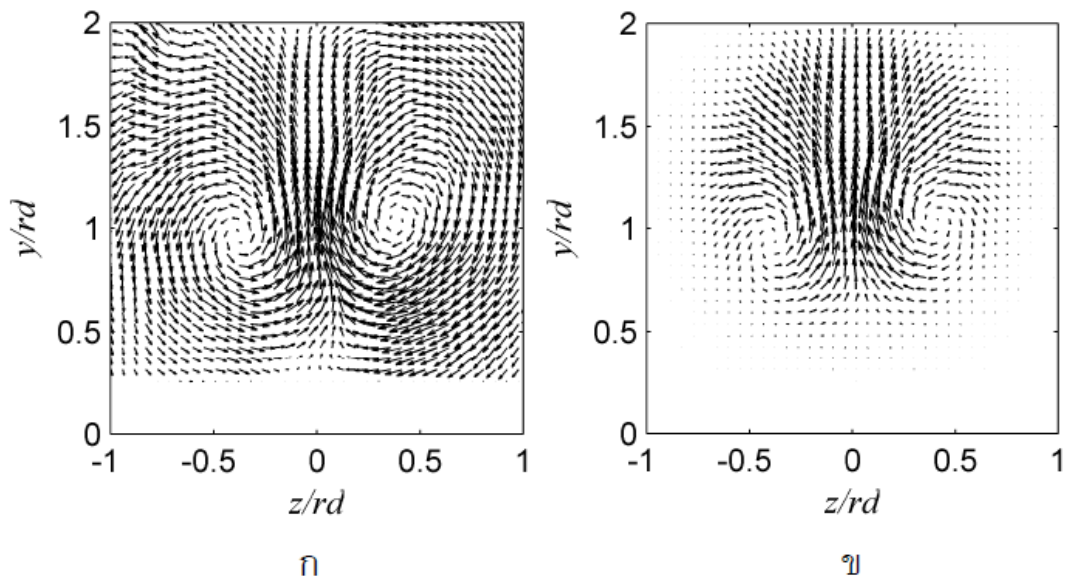
รูปที่ 2.36 เส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตสำหรับควบคุมและไม่ควบคุม (Kornsri et al., 2009)



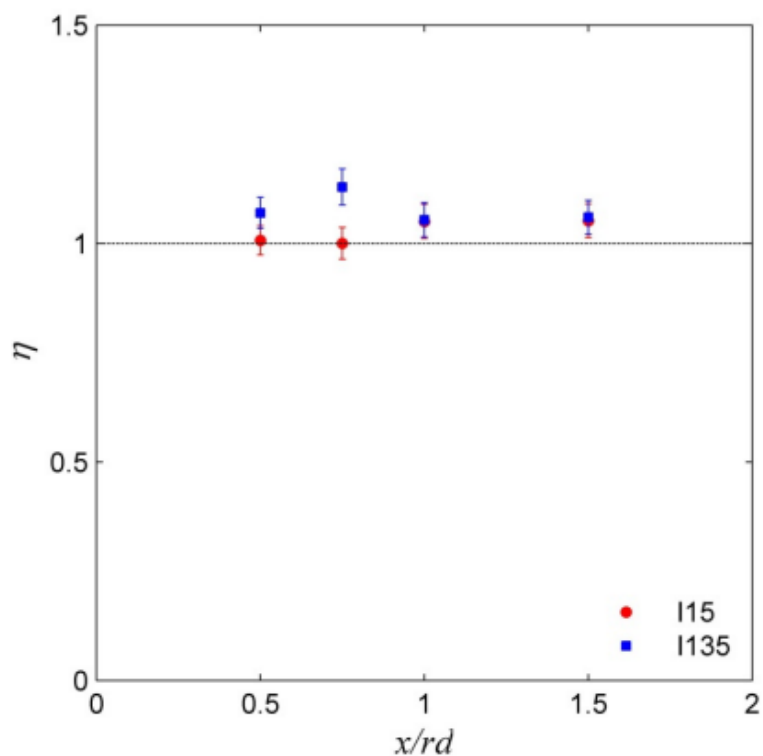
รูปที่ 2.37 เส้นทางเดินของความเร็วเจ็ตที่ตำแหน่ง $x / rd = 1.5$ สำหรับมุมที่ $\theta = \pm 15$ ที่ r_m ต่างๆ (Kornsri et al., 2009)



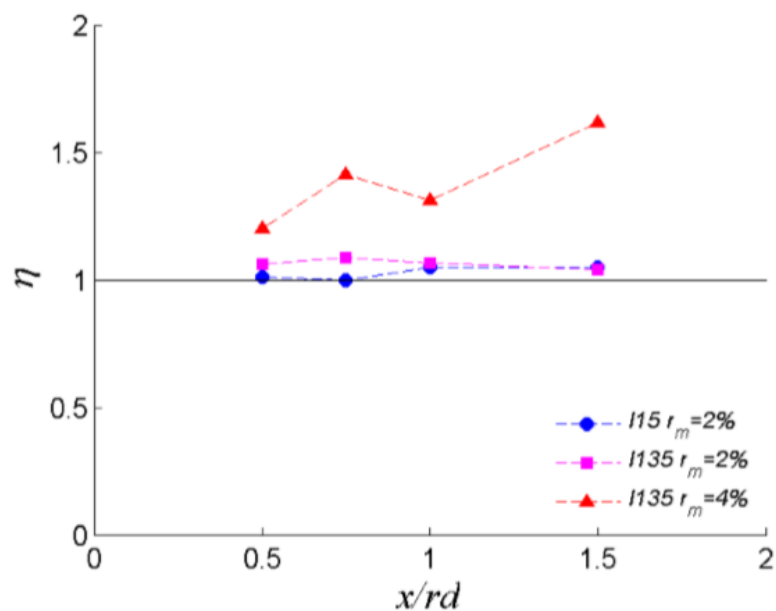
รูปที่ 2.38 Contour ของความเร็วเฉลี่ย (Normalize ด้วย ความเร็วกระแสลมขวาง) เปรียบเทียบระหว่างไม่ควบคุมกับควบคุมที่สภาวะเหมาะสม ($\theta = \pm 15$ ที่ $r_m = 2\%$) (Kornsri et al., 2009)



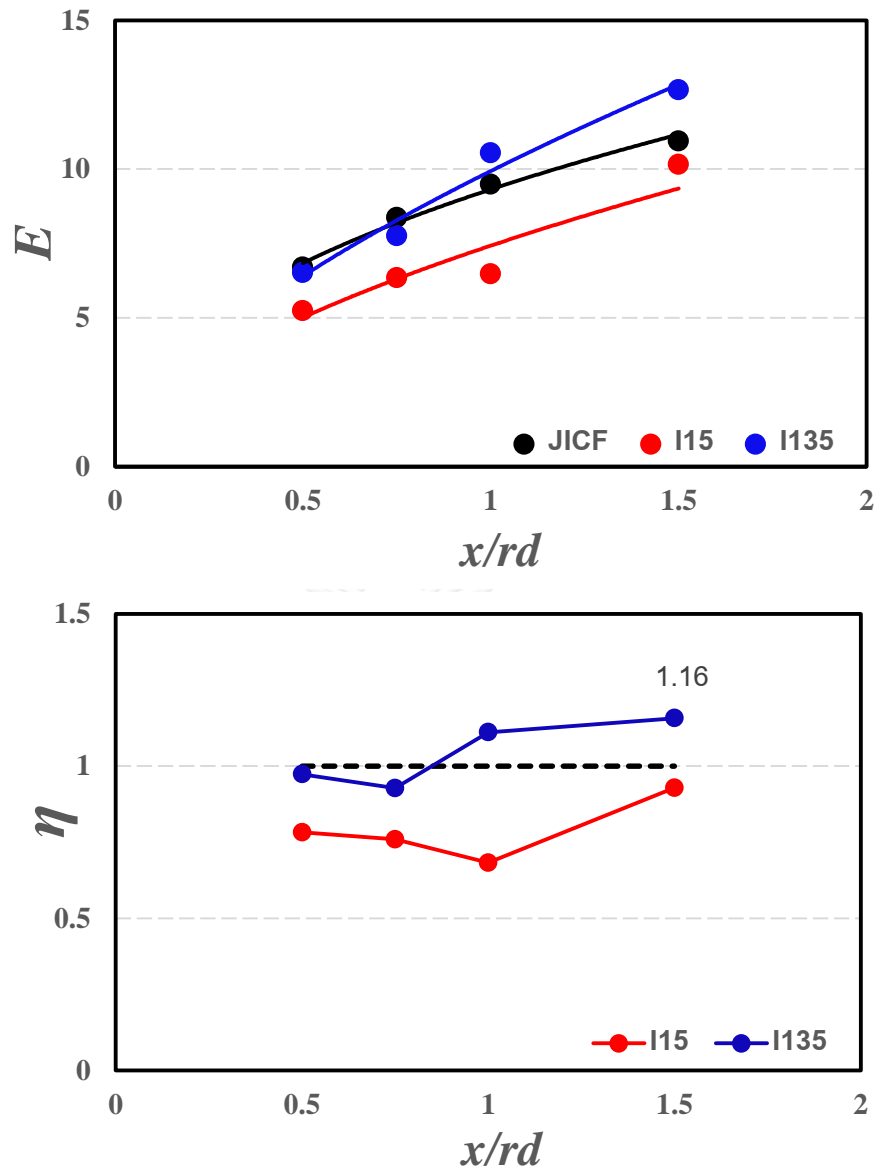
รูปที่ 2.39 ตัวอย่างสนามความเร็วบนระนาบ yz ที่วัดได้จาก SPIV
 ก) กรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสลมขวาง
 ข) กรณีที่ใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตหลักเท่านั้น
 (Witayaprapakorn, 2013)



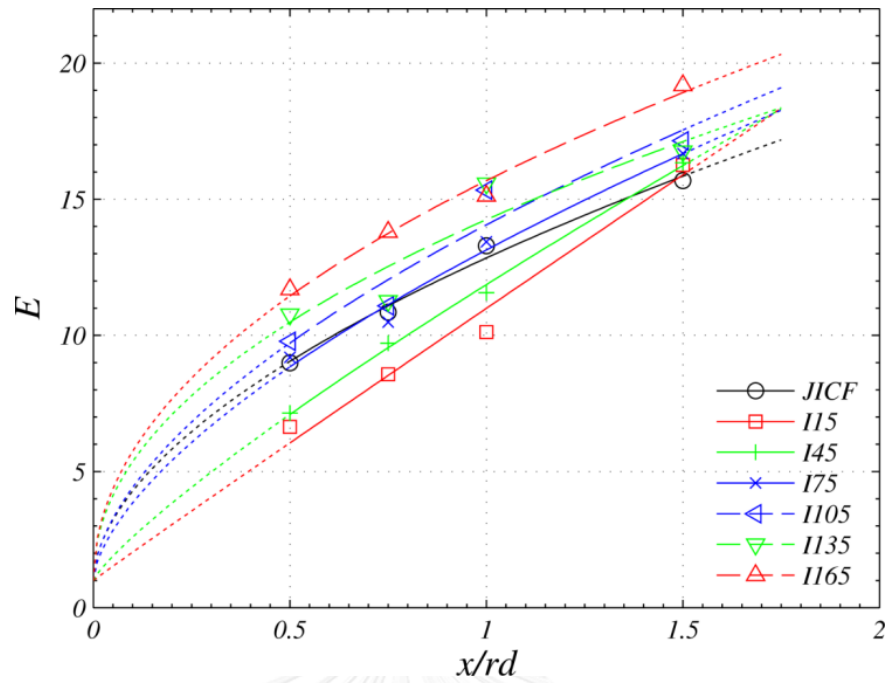
รูปที่ 2.40 ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อประสิทธิภาพการใช้เจ็ดควบคุมเจ็ดในกระแสมขวางกรณี JICF, I15 และ I135 (Witayaprapakorn, 2013)



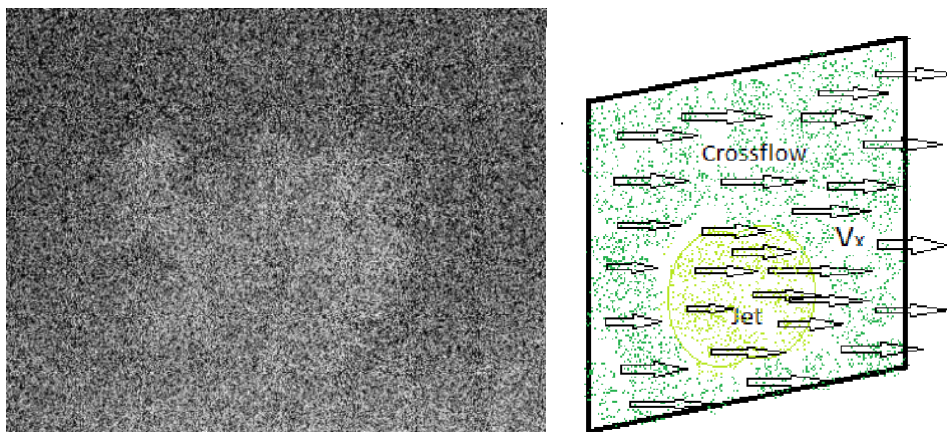
รูปที่ 2.41 ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อประสิทธิภาพการใช้เจ็ดควบคุมของเจ็ดในกระแสมขวางกรณี JICF, I135 ที่ $r_m = 2\%$ และ 4% (Chaikasetzin et al., 2015)



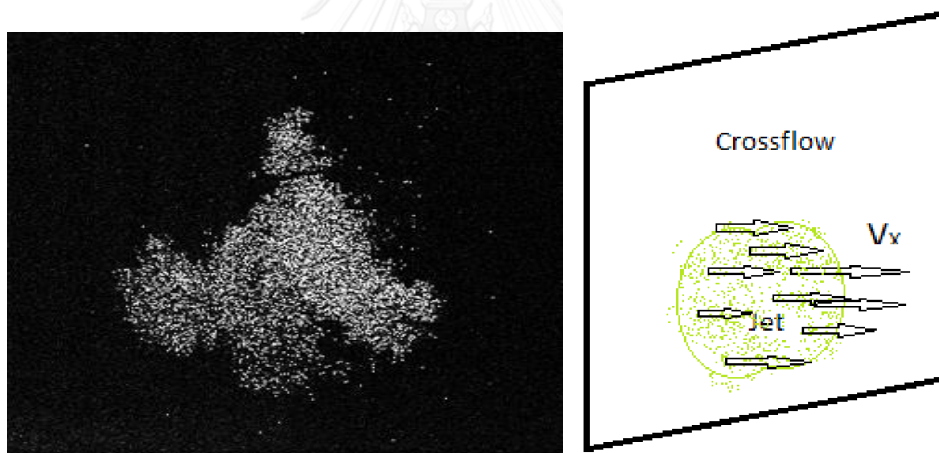
รูปที่ 2.42 ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสม และ ประสิทธิภาพของการใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงของเจ็ดในกระแสมขวางกรณี JICF, I15 และ I135 (Soupramongkol, 2015)



รูปที่ 2.43 ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ทในกระแสมวลวงกรณี JICF, I15, I45, I75, I105, I135 และ I165 (Wangkiat, Khemakanon and Kengkarnpanich, 2015)



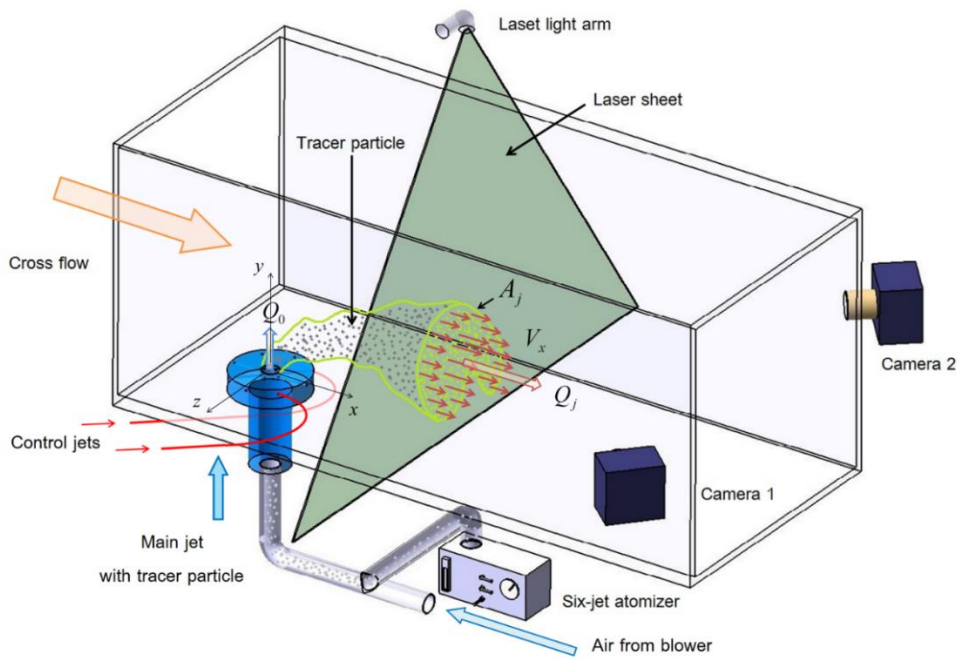
รูปที่ 3.1 ภาพ Cross-plane ของเจ็ตในกระแสลมขวางที่หน้าตัดใดๆ โดยใช้ SPIV ควบคู่กับ (B) การใส่อนุภาคติดตามในทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง ทำให้ไม่สามารถระบุ แยกแยะบริเวณที่เป็นเจ็ตออกจากกระแสลมขวางได้



รูปที่ 3.2 ภาพ Cross-plane ของเจ็ตในกระแสลมขวางที่หน้าตัดใดๆ โดยใช้ SPIV ควบคู่กับ (A)การใส่อนุภาคติดตามเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ทำให้การระบุขอบเขตเจ็ตทำได้ชัดเจน



รูปที่ 4.1 ชุดทดลองภายในห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 ภาพ Schematic diagram ของชุดทดลอง



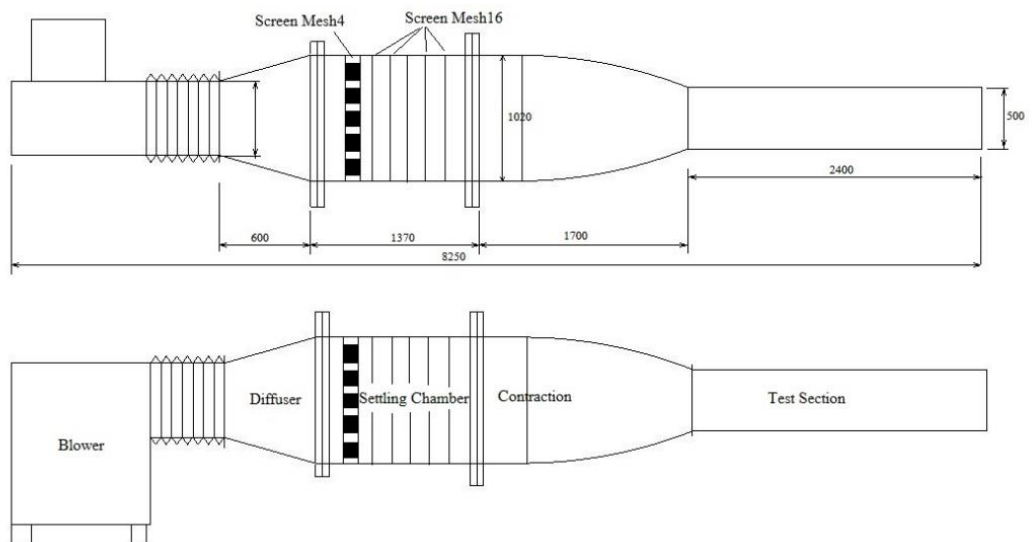
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายของชุดทดลอง



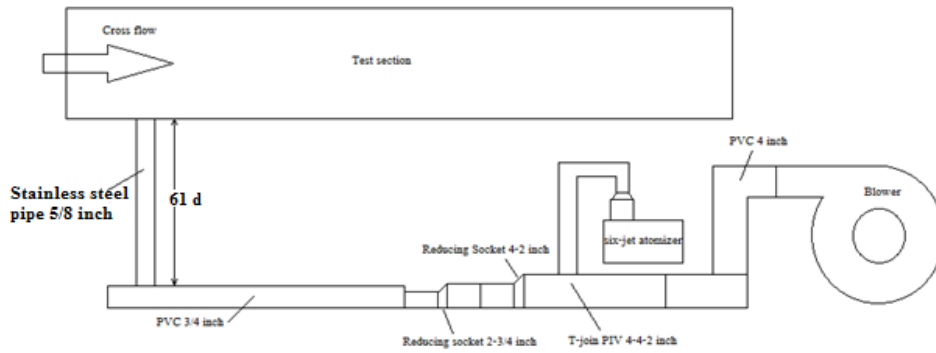
รูปที่ 4.4 Centrifugal blower สำหรับอุโมงค์ลมเพื่อสร้างกระแสลมขวาง



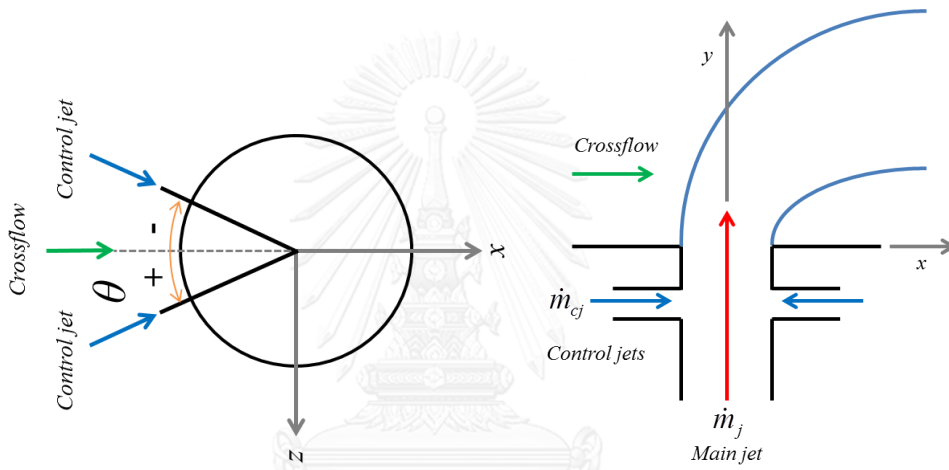
รูปที่ 4.5 เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า



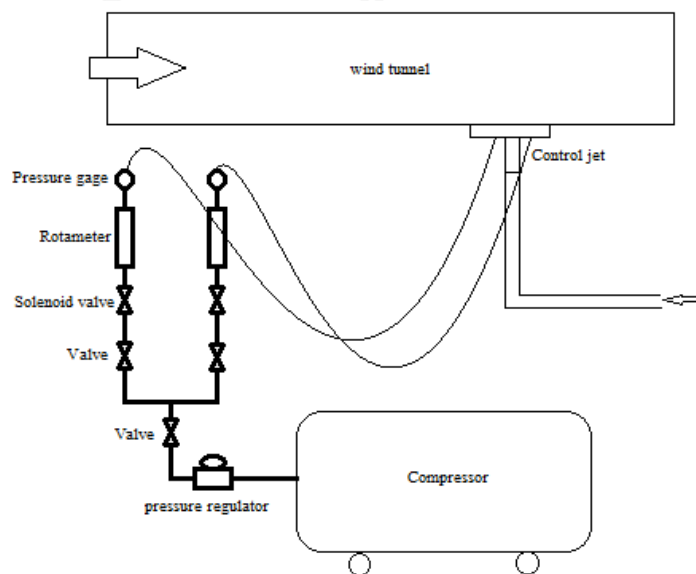
รูปที่ 4.6 รูป Schematic diagram ของอุโมงค์ลม



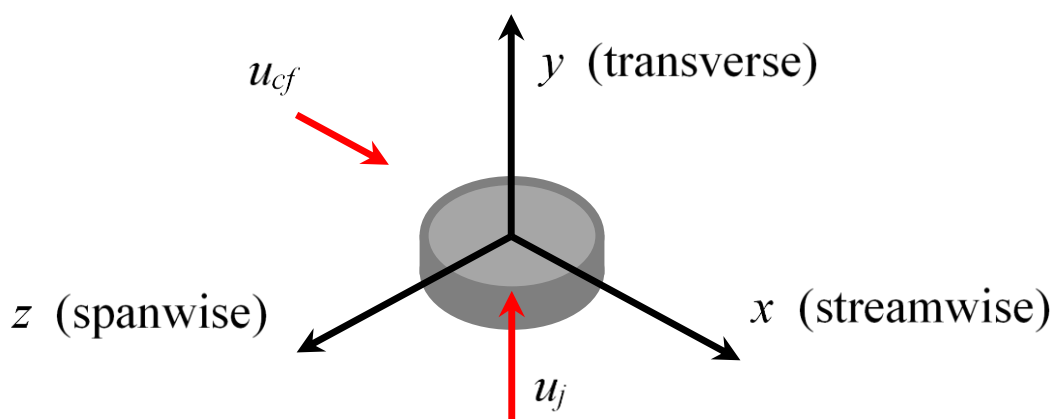
รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบของชุดเจ็ทหลัก



รูปที่ 4.8 ชุดเจ็ทหลักและเจ็ทควบคุมตามแนวเส้นรอบวง



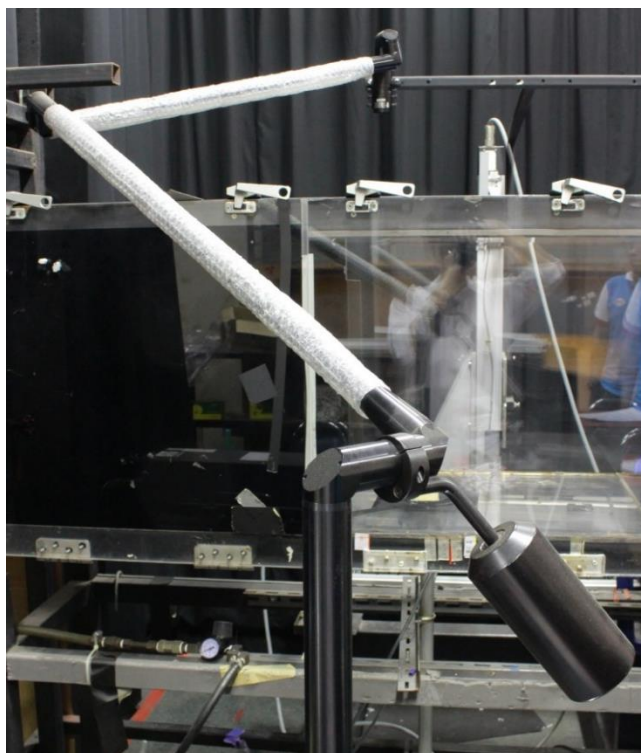
รูปที่ 4.9 ส่วนประกอบของชุดเจ็ทควบคุม



รูปที่ 4.10 พิกัดอ้างอิงในการทดลอง



รูปที่ 4.11 เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ ND:YAG ยี่ห้อ New Wave™ model Solo 200XT



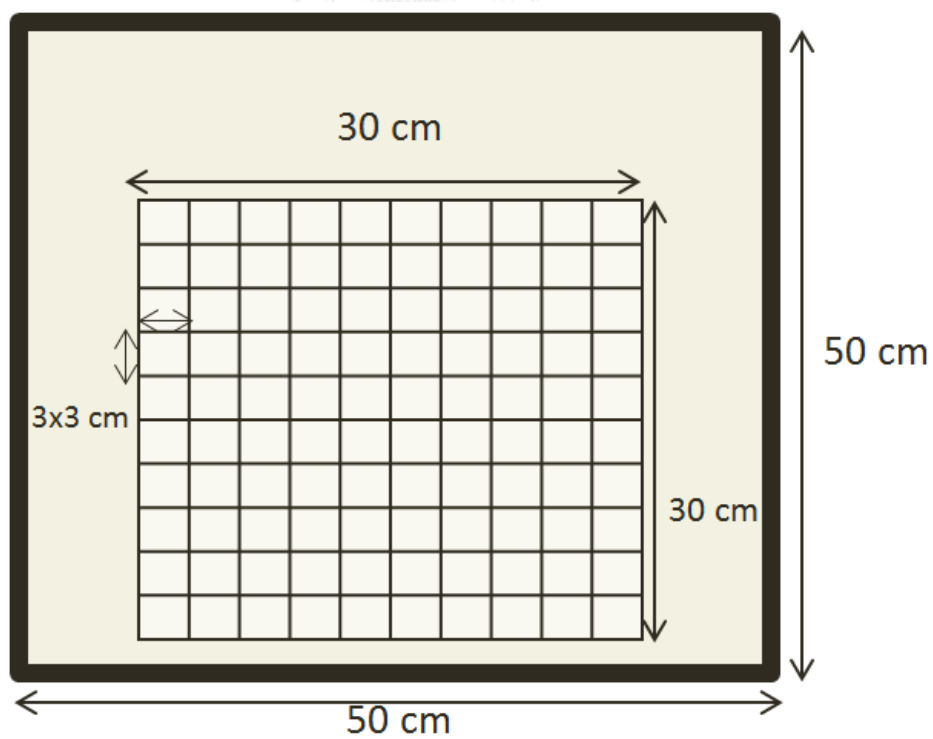
รูปที่ 4.12 Laser light arm



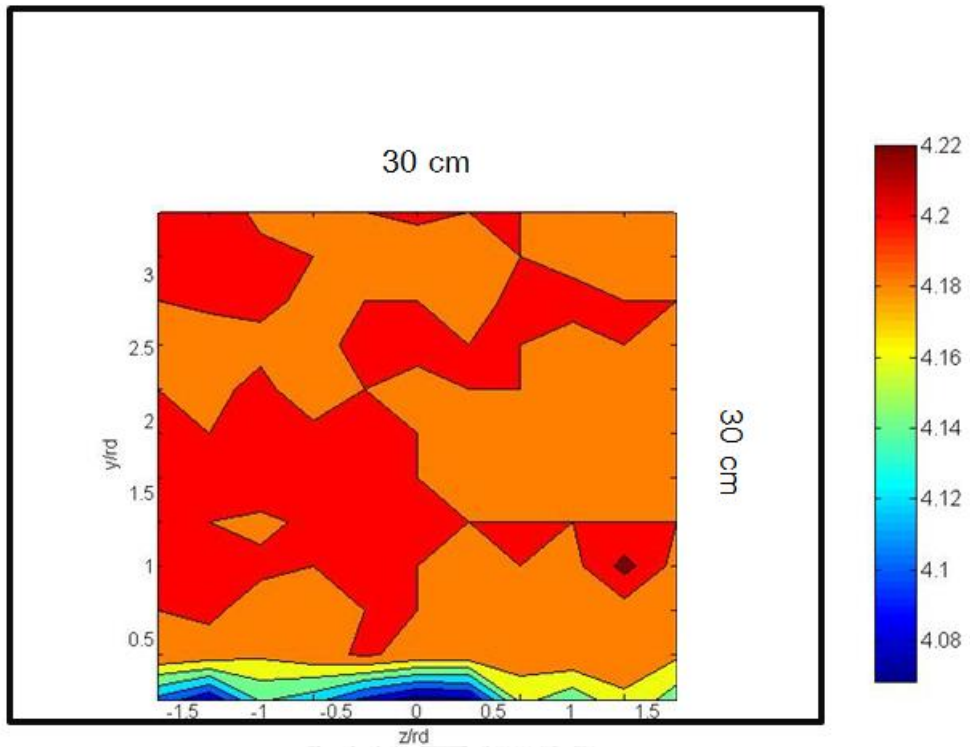
รูปที่ 4.13 กล้อง CCD PowerView Plus11MP



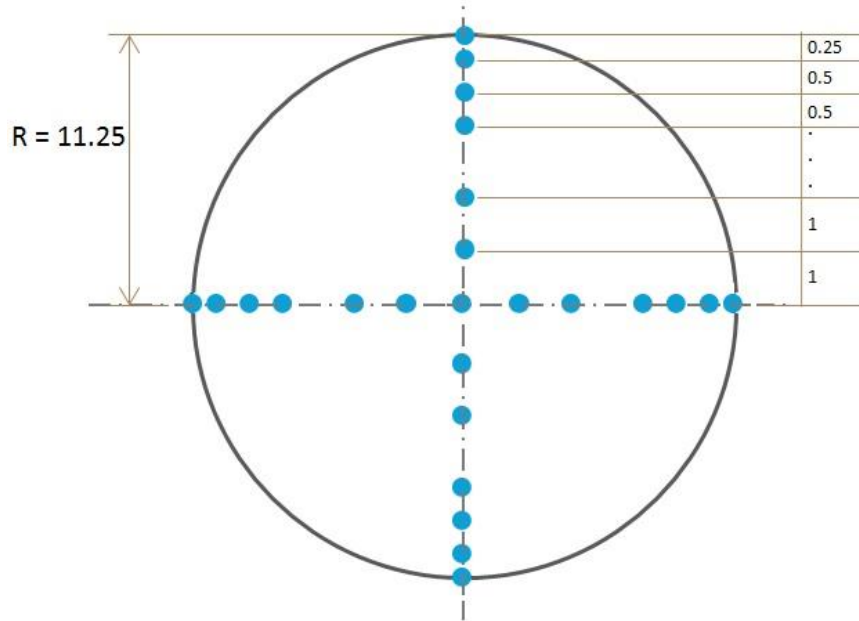
รูปที่ 4.14 Synchronizer



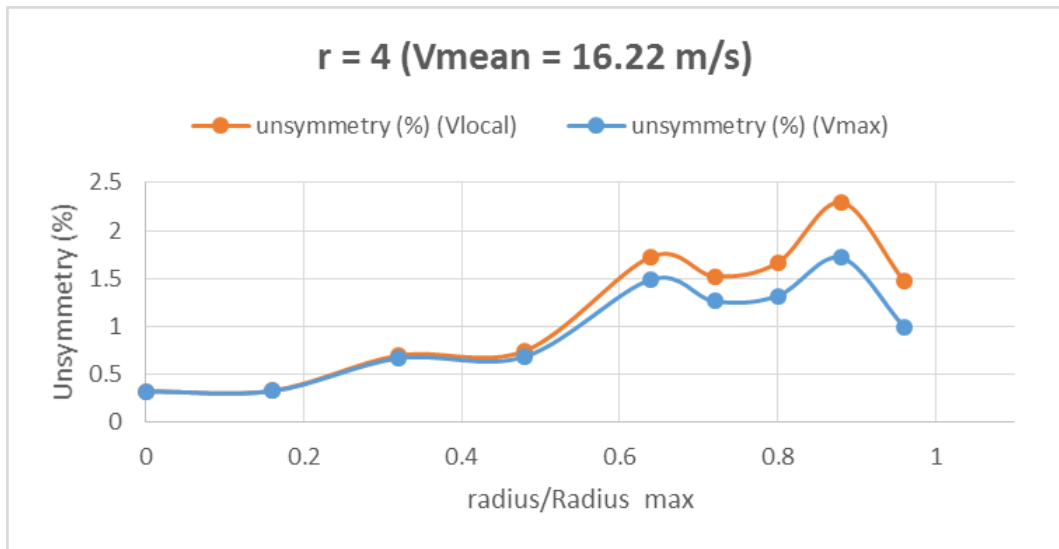
รูปที่ 4.15 ขอบเขตและความละเอียดในการวัดความเป็นระเบียบของกระแสมขวาง



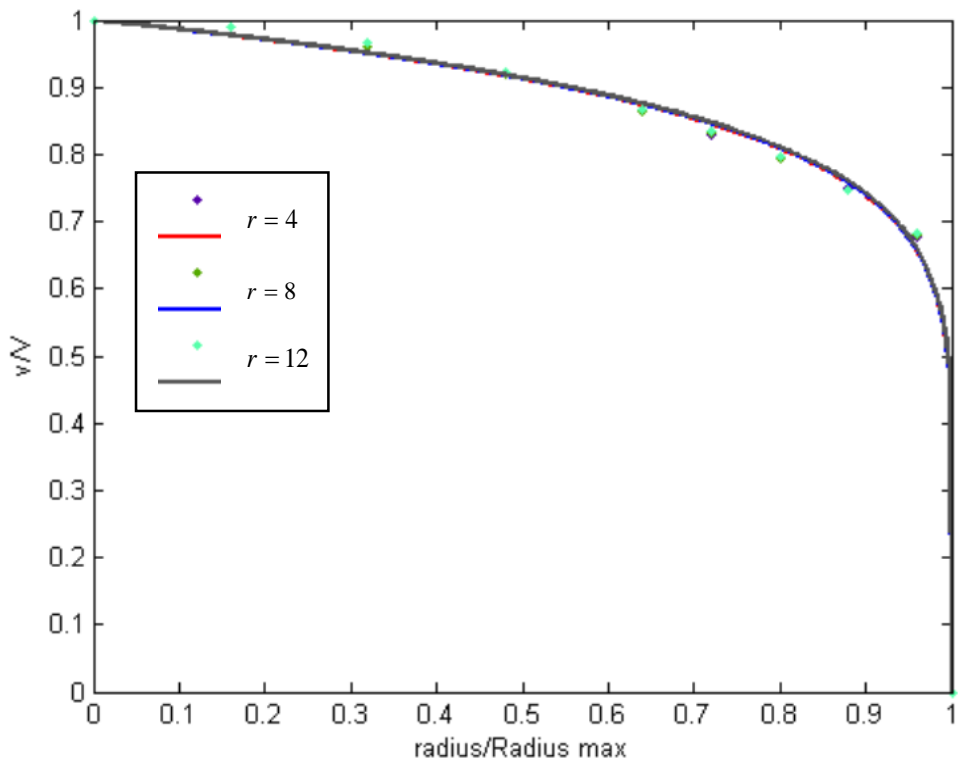
รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ของกระแสน้ำขวาง



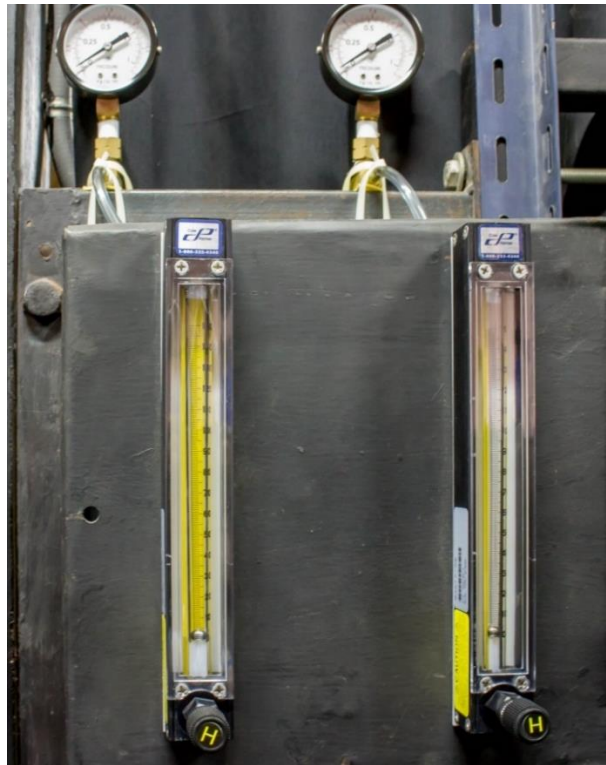
รูปที่ 4.17 ตำแหน่งในการวัดความเร็วที่สภาวะเริ่มต้นของเจ็ต



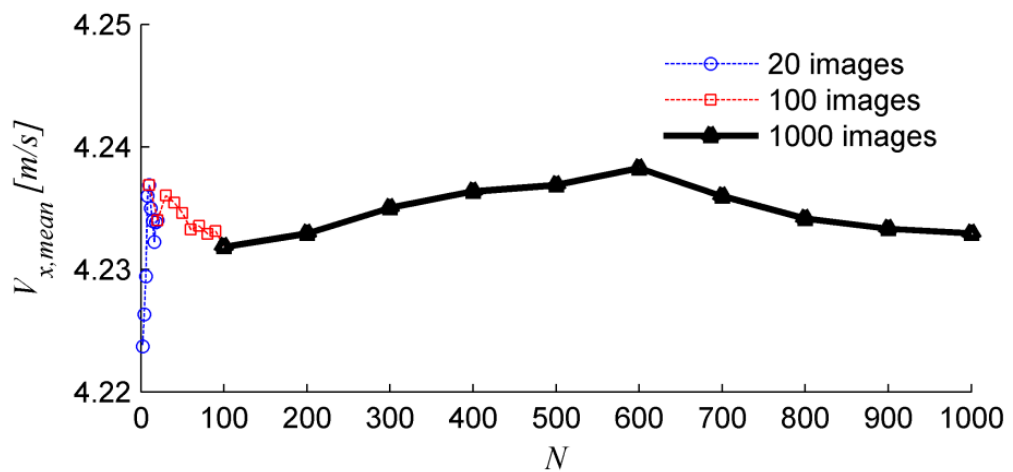
รูปที่ 4.18 เปอร์เซ็นต์ความไม่สมมาตรของเจ็ตเมื่อเทียบกับความเร็วเฉลี่ยที่แต่ละรัศมี



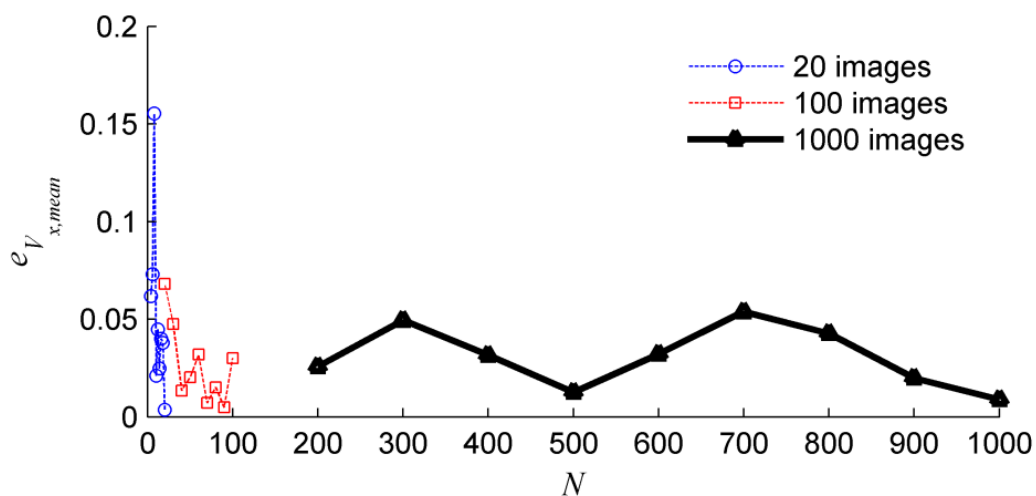
รูปที่ 4.19 ความเร็วเจ็ตในแนวแกน y ตามแนวรัศมีที่ปากทางออก



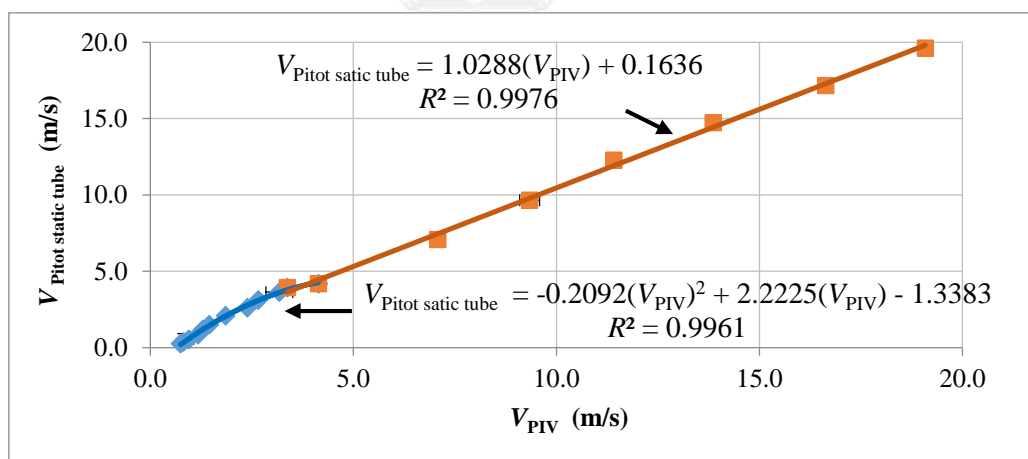
รูปที่ 4.20 Rotameter flow meter สำหรับเจ็ดควบคุม



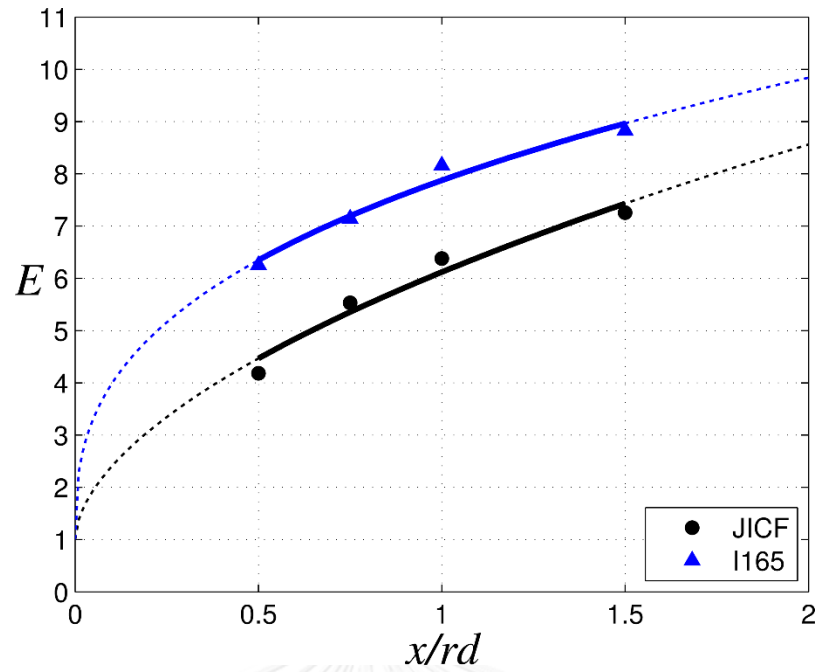
รูปที่ 4.21 ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x ที่จำนวนภาพต่าง ๆ โดยการคำนวณจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ 1) ช่วงสีฟ้า 2 - 20 ภาพ โดยเพิ่มทีละ 2 ภาพ 2) ช่วงสีแดง 20 - 100 ภาพ โดยเพิ่มทีละ 10 ภาพ 3) ช่วงสีดำ 100 - 1,000 ภาพ โดยเพิ่มทีละ 100 ภาพ



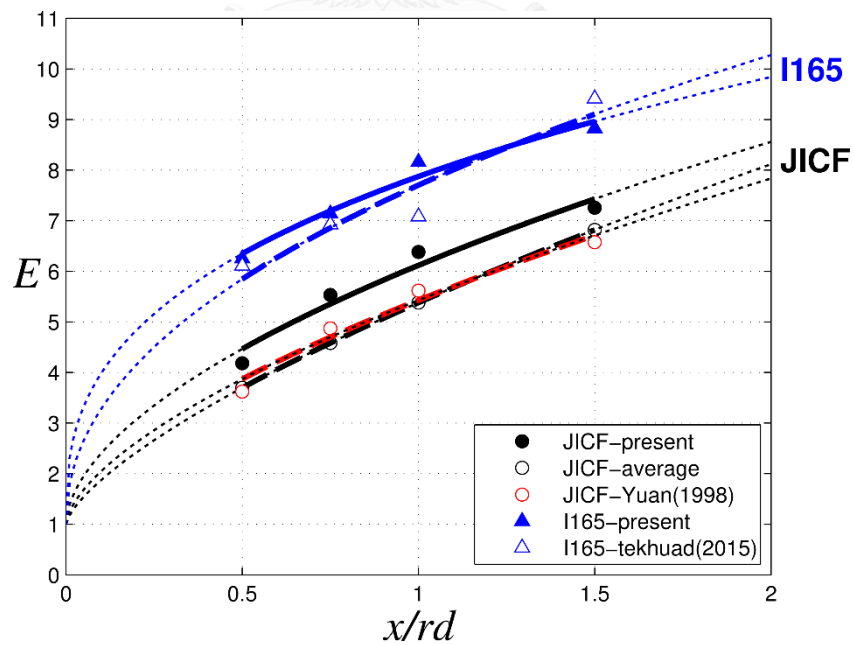
รูปที่ 4.22 ความคลาดเคลื่อนของความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน x เมื่อใช้จำนวนภาพที่มากขึ้น โดยการคำนวณจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ 1) ช่วงสีฟ้า 2 - 20 ภาพ โดยเพิ่มทีละ 2 ภาพ 2) ช่วงสีแดง 20 - 100 ภาพ โดยเพิ่มทีละ 10 ภาพ 3) ช่วงสีดำ 100 - 1,000 ภาพ โดยเพิ่มทีละ 100 ภาพ



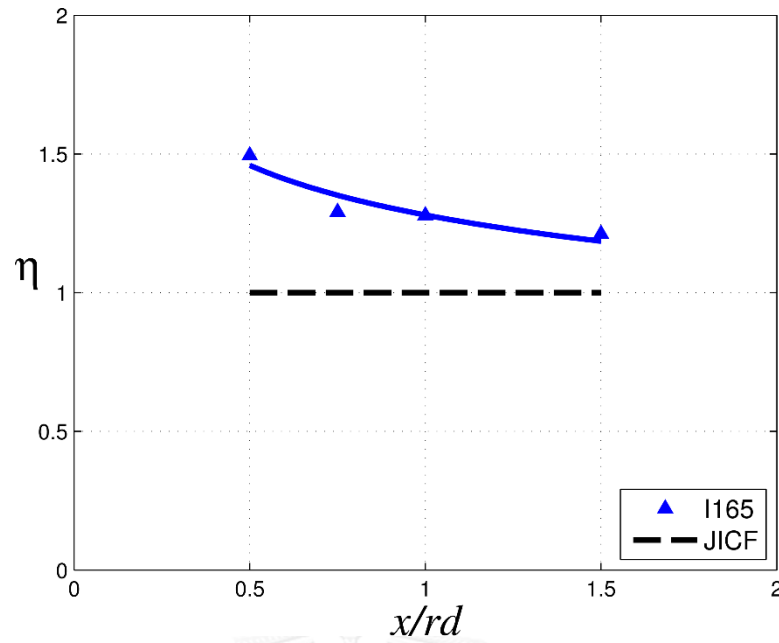
รูปที่ 4.23 ผลการสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง SPIV กับ pitot tube และ Curve fitting ช่วงสีฟ้าคือความเร็วต่ำ และช่วงสีแดงคือความเร็วสูง



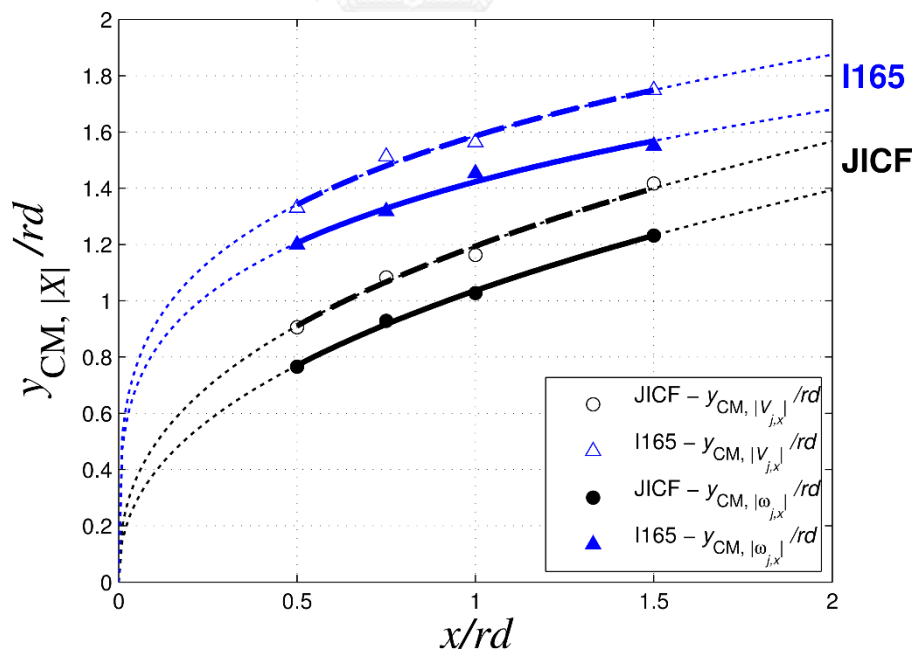
รูปที่ 5.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่ $r = 4$ ของกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165



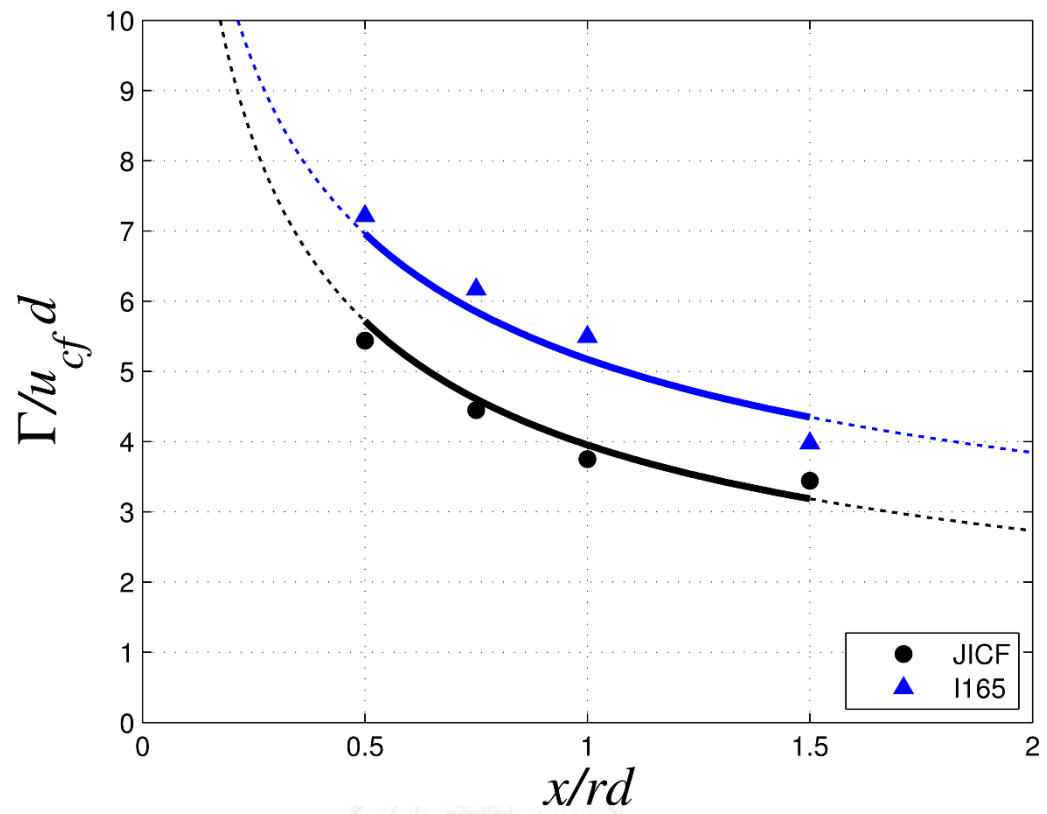
รูปที่ 5.2 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในงานวิจัยปัจจุบัน และงานวิจัยในอดีต



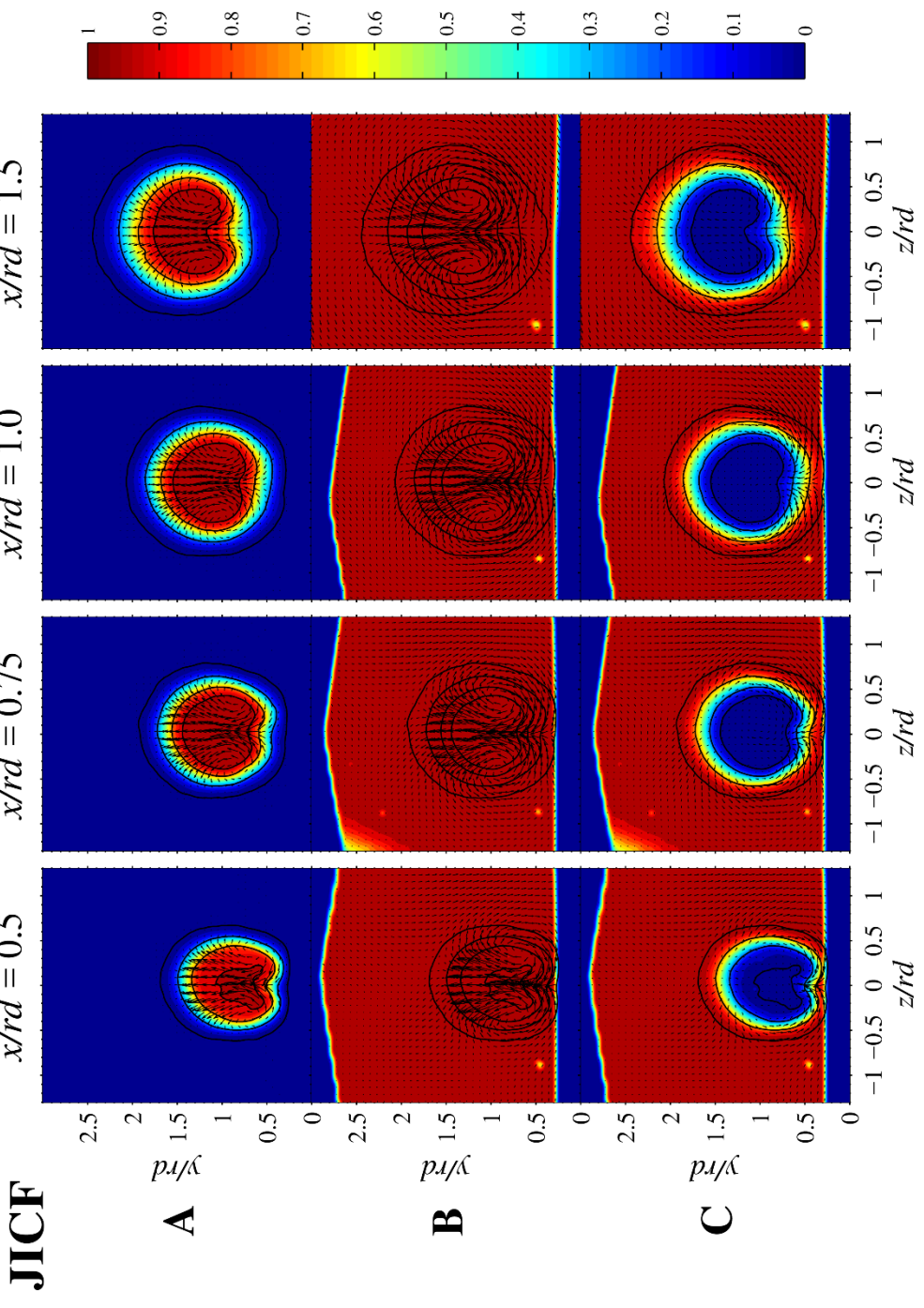
รูปที่ 5.3 ประสิทธิภาพของการใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง
กรณีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165



รูปที่ 5.4 เส้นทางเดินของเจ็ตจากปริมาณความเร็วเจ็ต และ Vorticity ของเจ็ตใน
แนวแกน Streamwise ระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีด
เจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165

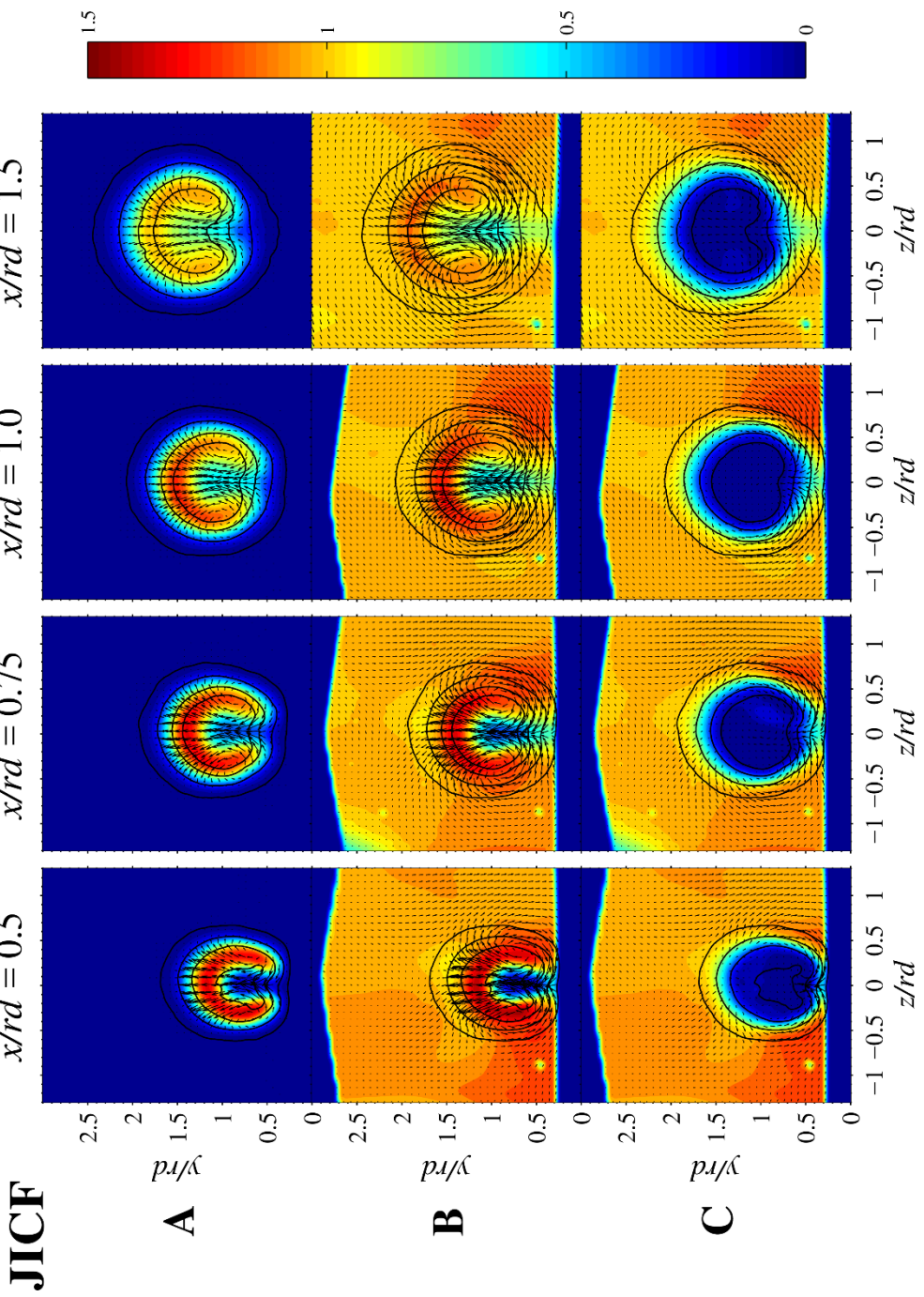


รูปที่ 5.5 Circulation ของเจ็ต ระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165



JICF

รูปที่ 6.1 ก JICF: Contour surfaces แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบ: (A) ϕ_j , (B) ϕ และ (C) ϕ_{cf}
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$ และ (C) $\bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}$



JICF

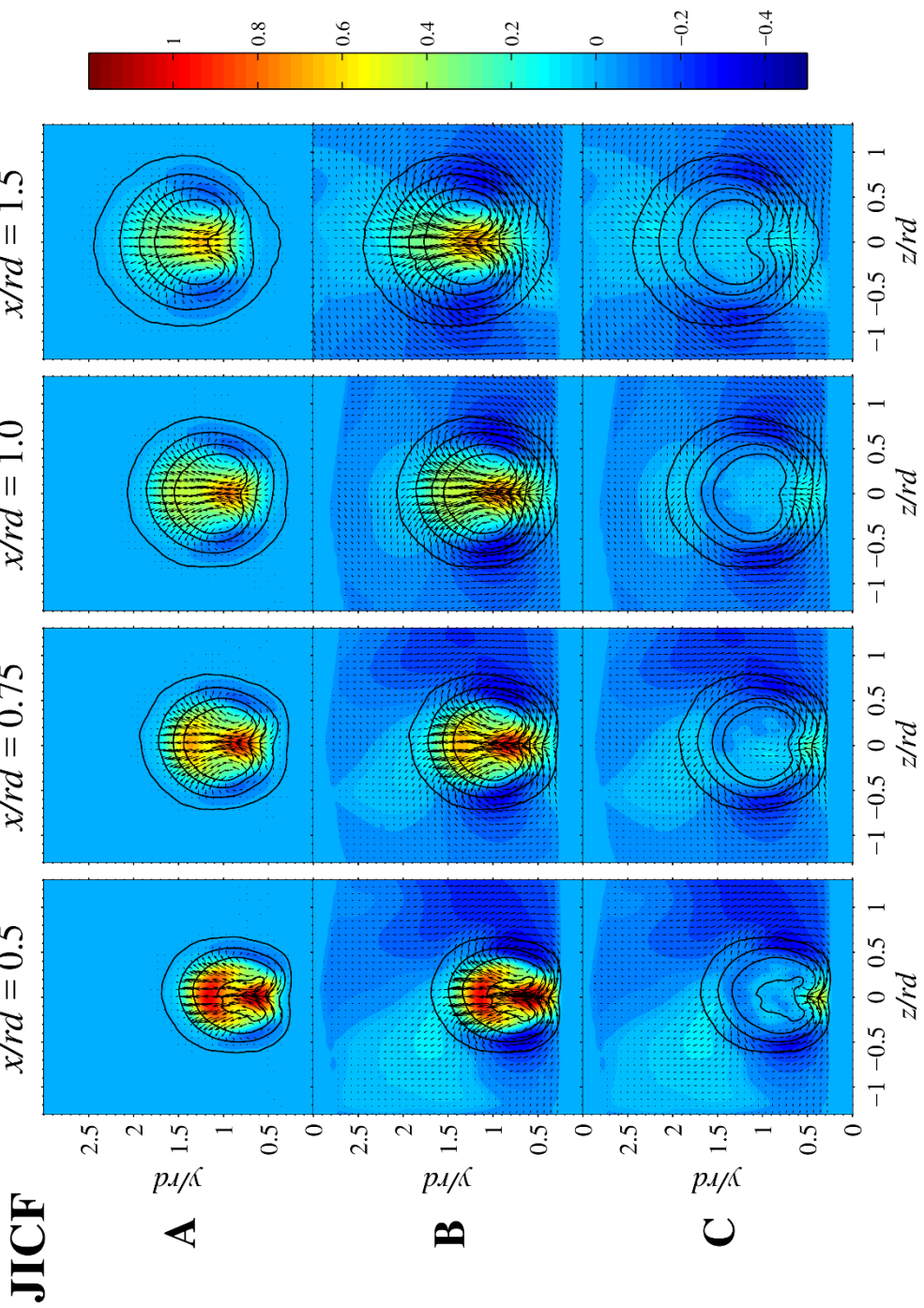
$x/rd = 0.5$ $x/rd = 0.75$ $x/rd = 1.0$ $x/rd = 1.5$

A

B

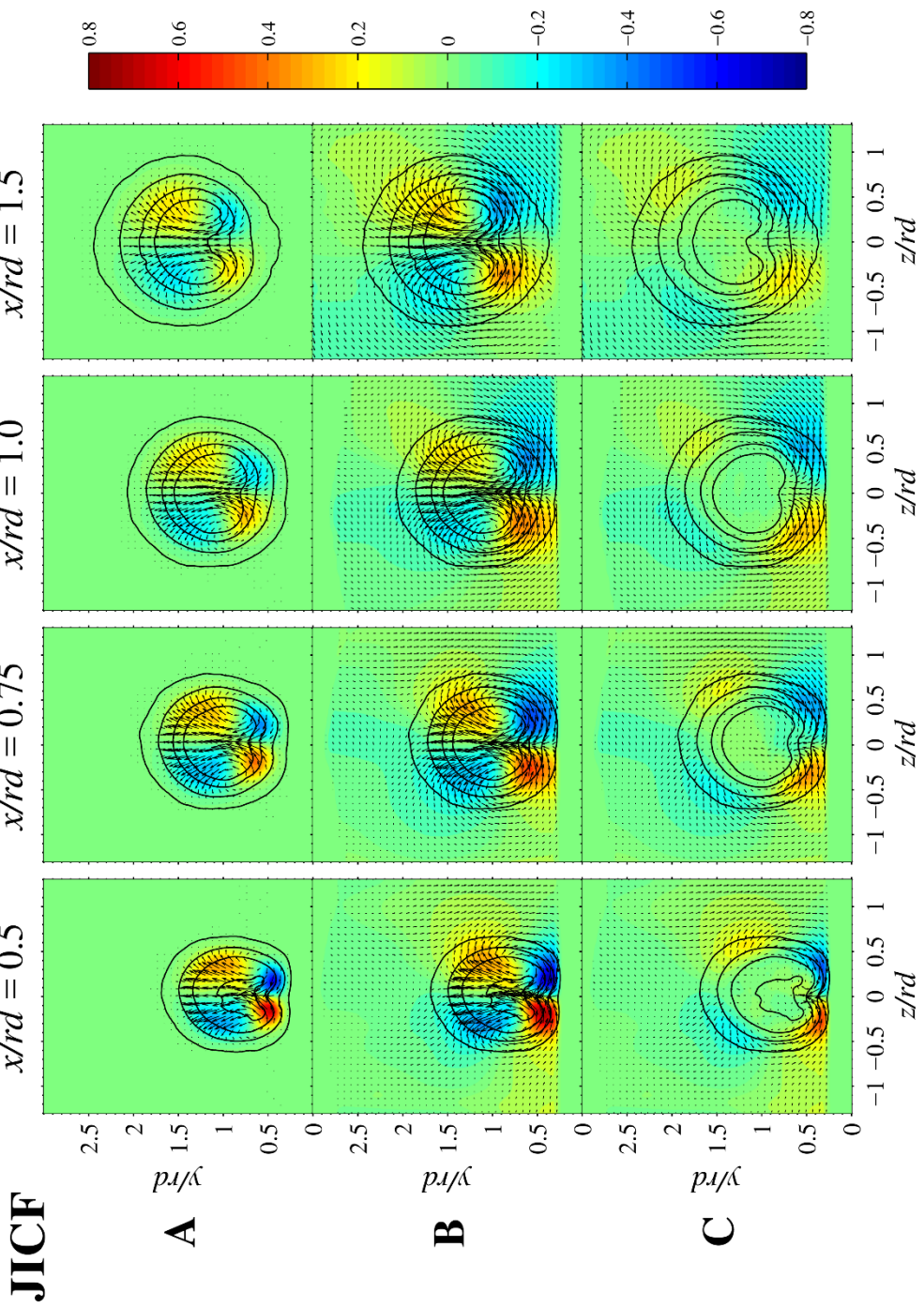
C

รูปที่ 6.1 ข JICF: Contour surfaces แสดงความเร็วในแนวแกน Streamwise ของ: (A) $V_{j,x} / u_{cf}$, (B) V_x / u_{cf} และ (C) $V_{cf,x} / u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$, (B) \bar{V}_{yz} / u_{cf} และ (C) $\bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}$



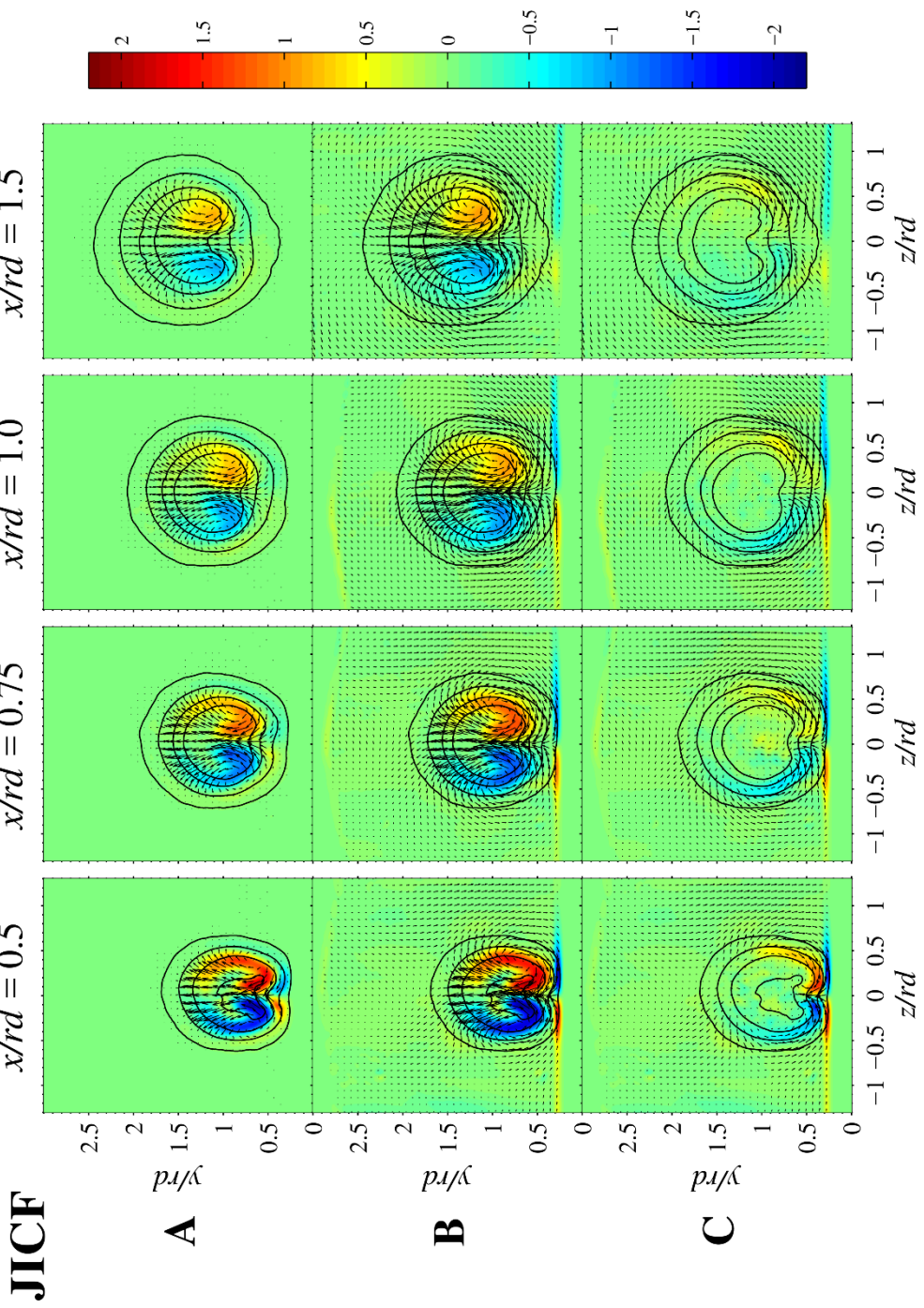
JICF

รูปที่ 6.1 ค JICF: Contour surfaces แสดงความเร็วในแนวแกน Transverse ของ: (A) $V_{j,y} / u_{cf}$, (B) V_y / u_{cf} และ (C) $V_{cf,y} / u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz} / u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$

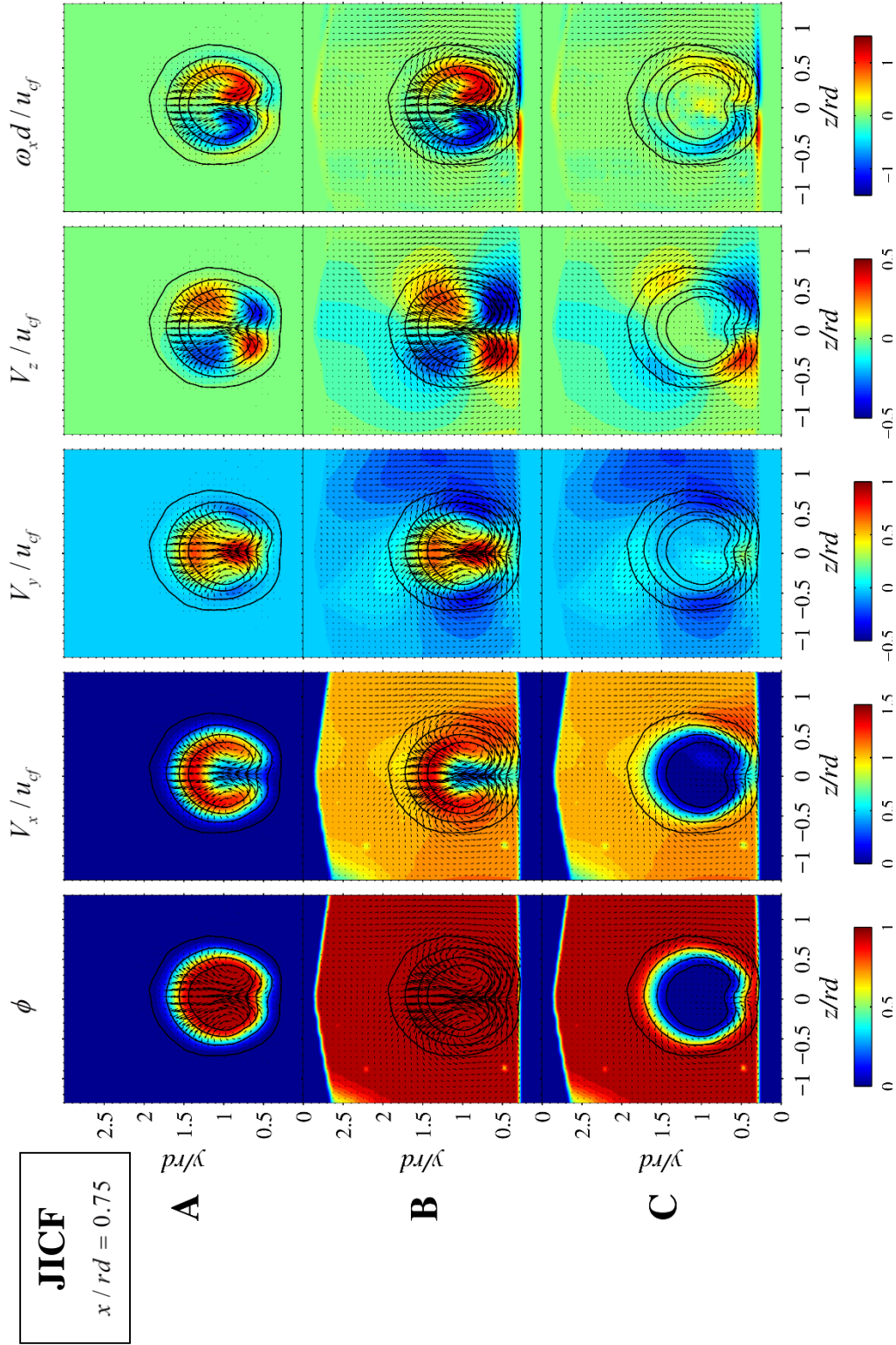


JICF

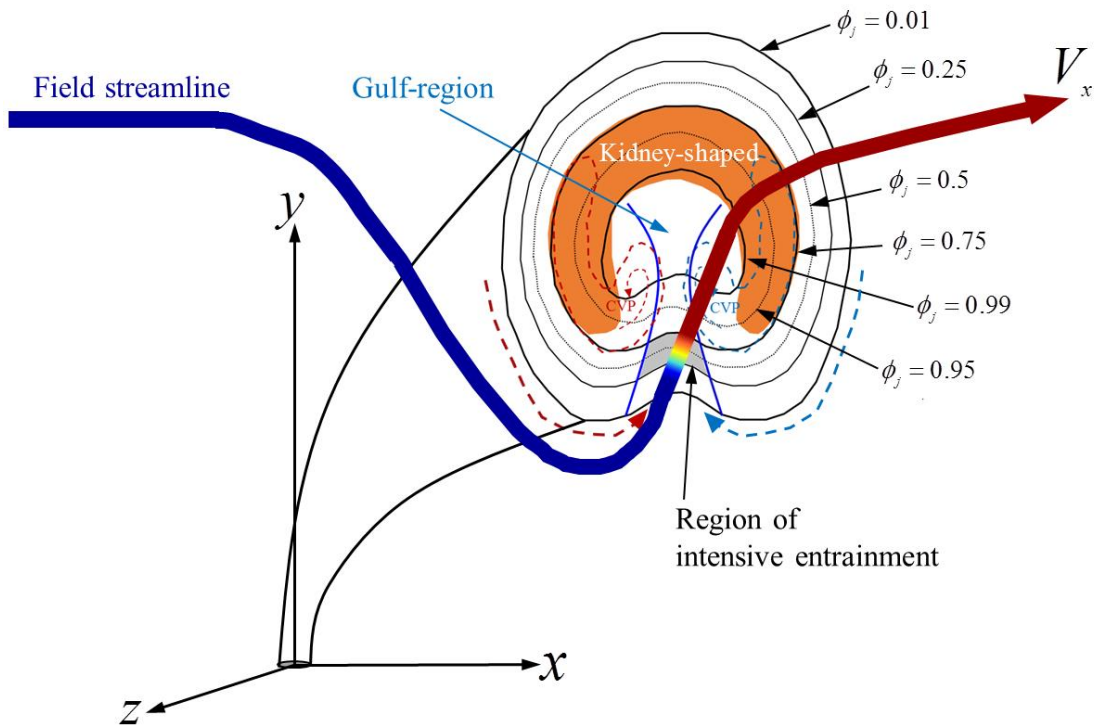
รูปที่ 6.1 จ JICF: Contour surfaces แสดงความเร็วในแนวแกน Spanwise ของ: (A) $V_{j,z}/u_{cf}$, (B) V_z/u_{cf} และ (C) $V_{cf,z}/u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$



รูปที่ 6.1 จ JICF: Contour surfaces แสดง Vorticity แนวแกน Streamwise ของ: (A) $\omega_{j,x} d / u_{cf}$, (B) $\omega_x d / u_{cf}$ และ (C) $\omega_{cf,x} d / u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz} / u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$

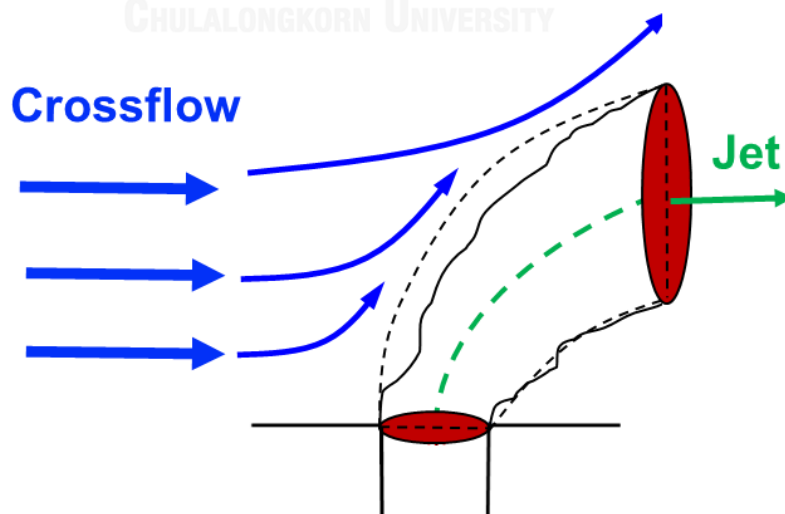


รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์และความเกี่ยวเนื่องกันของปริมาณเฉลี่ยโรติต่างๆ กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ที่ $x / rd = 0.75$

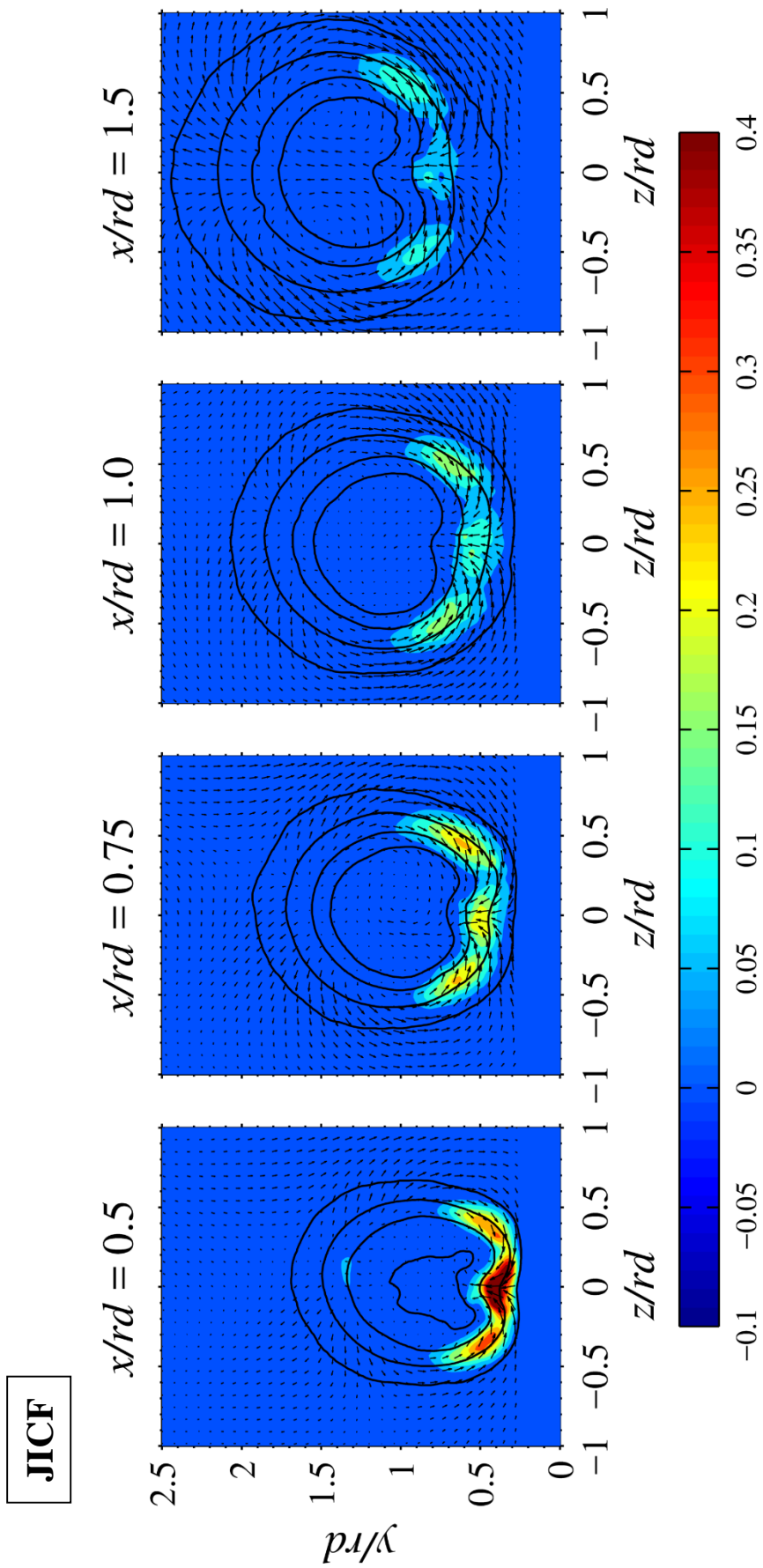


รูปที่ 6.3 ภาพเสมือนแสดงกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมโดยเส้นสีของ Streamline แสดงค่าความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต $\phi_j = 0$ สีน้ำเงิน และเพิ่มมากขึ้นสู่ $\phi_j = 1$ สีแดง Sornphorm and Bunyajitradulya (2016)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

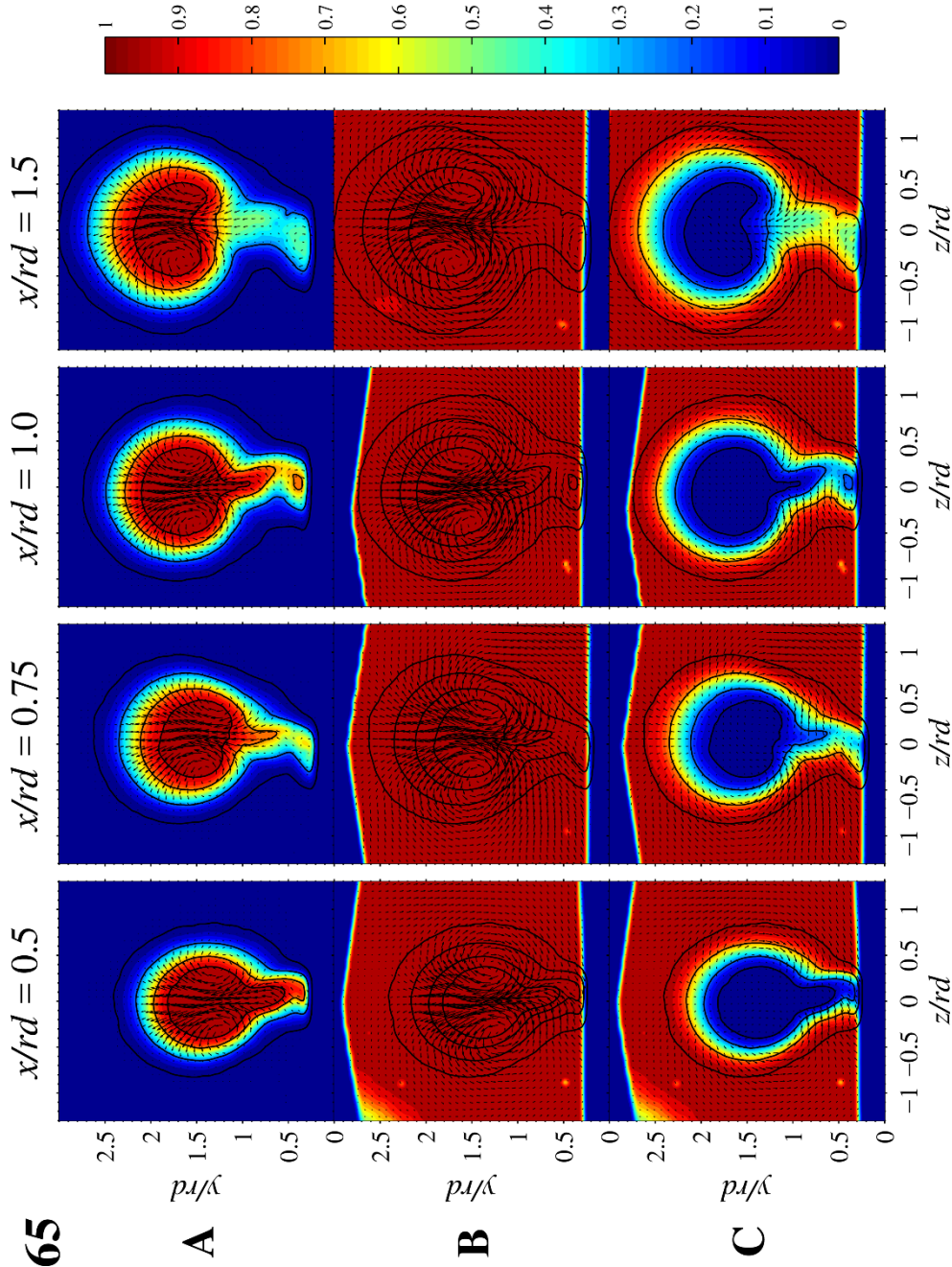


รูปที่ 6.4 การเลี้ยวเบนของชั้นในแนวตั้งของกระแสลมขวางบริสุทธิ์หลังจากการเข้าปะทะกับเจ็ตที่ด้านหน้า (Windward)



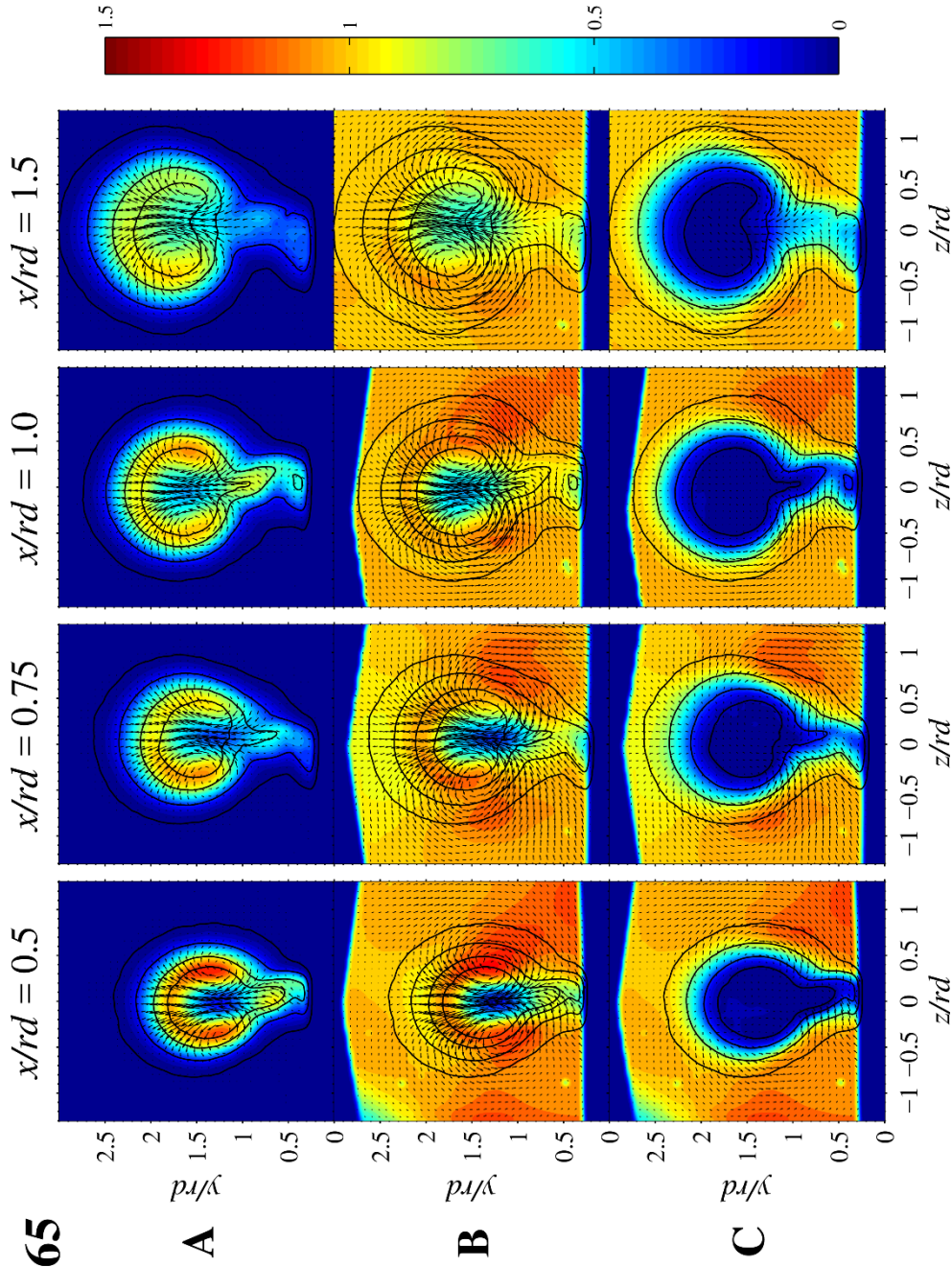
รูปที่ 6.5 บริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสม $\left[(\vec{V}_{cf} / u_{cf}) \cdot d\nabla\phi_j \right]$ ของกรณีไม่เจ็ดเจ็ดความคุม (JICF)

I165



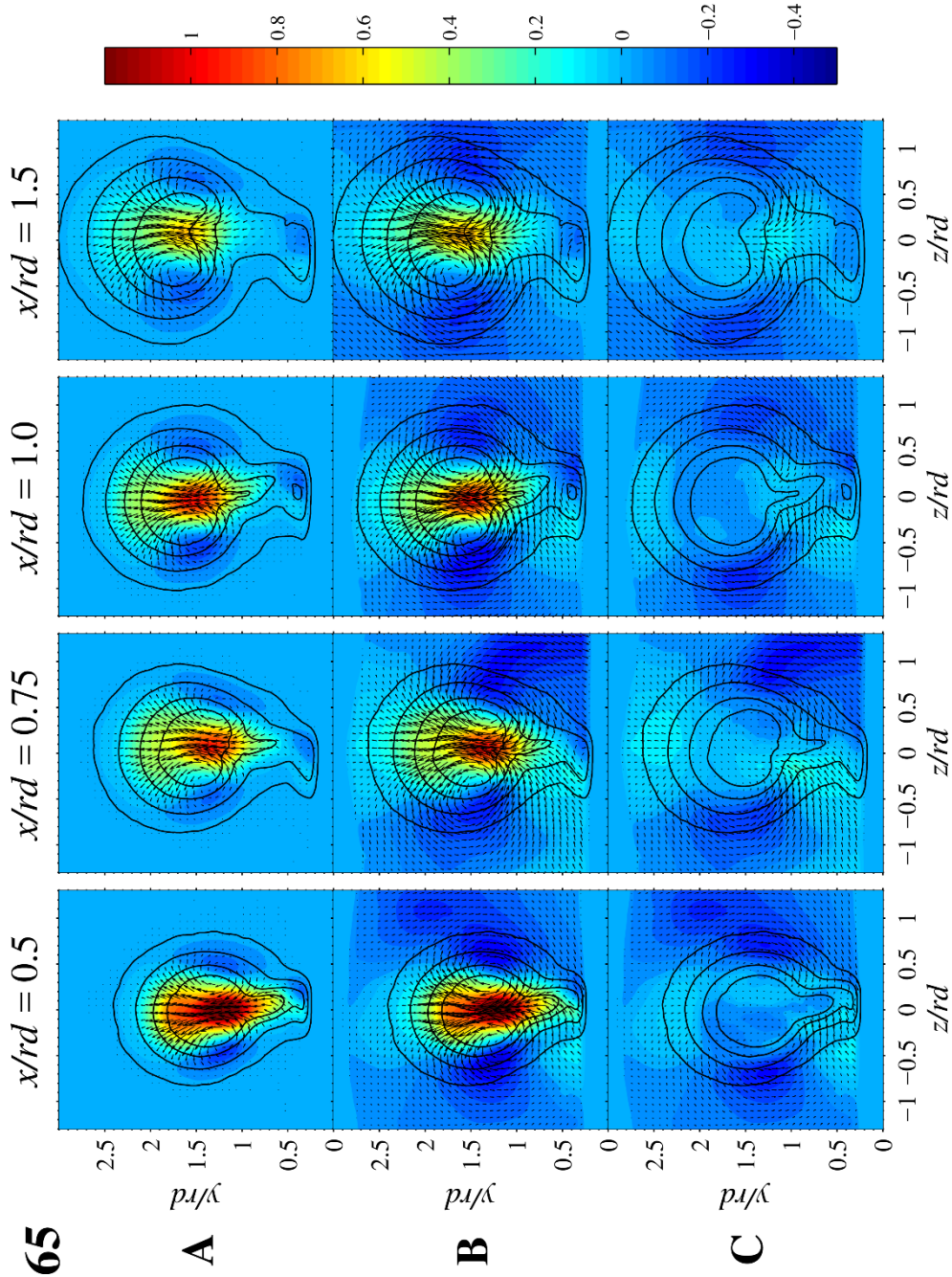
รูปที่ 7.1 ก I165: Contour surfaces แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบ: (A) ϕ_j , (B) ϕ และ (C) ϕ_{cf}
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$ และ (C) $\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$

I165



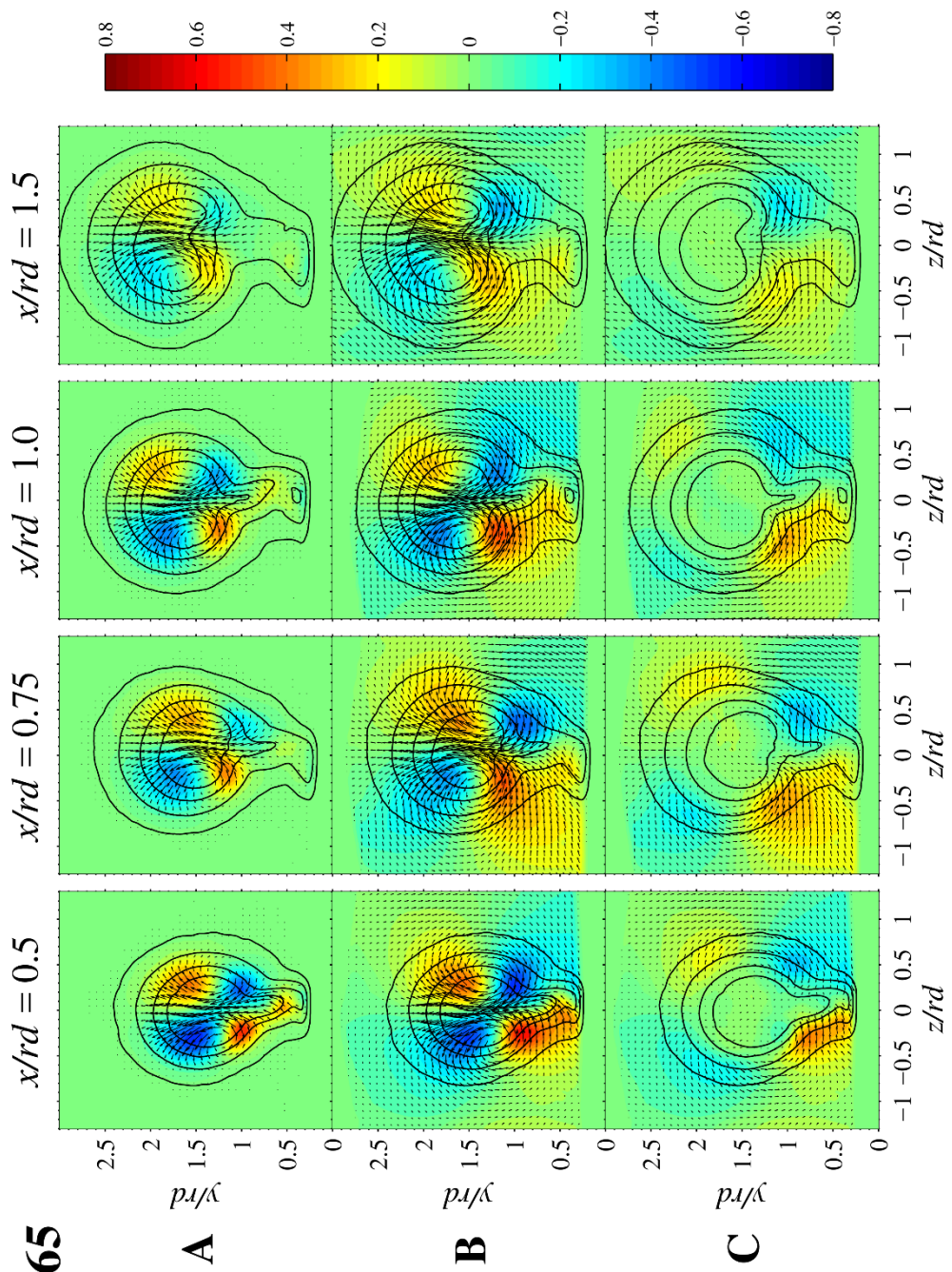
รูปที่ 7.1 ข I165: Contour surfaces แสดงความเร็วในแนวแกน Streamwise ของ: (A) $V_{j,x} / u_{cf}$, (B) V_x / u_{cf} และ (C) $V_{j,y} / u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$ และ (C) $\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$

I165



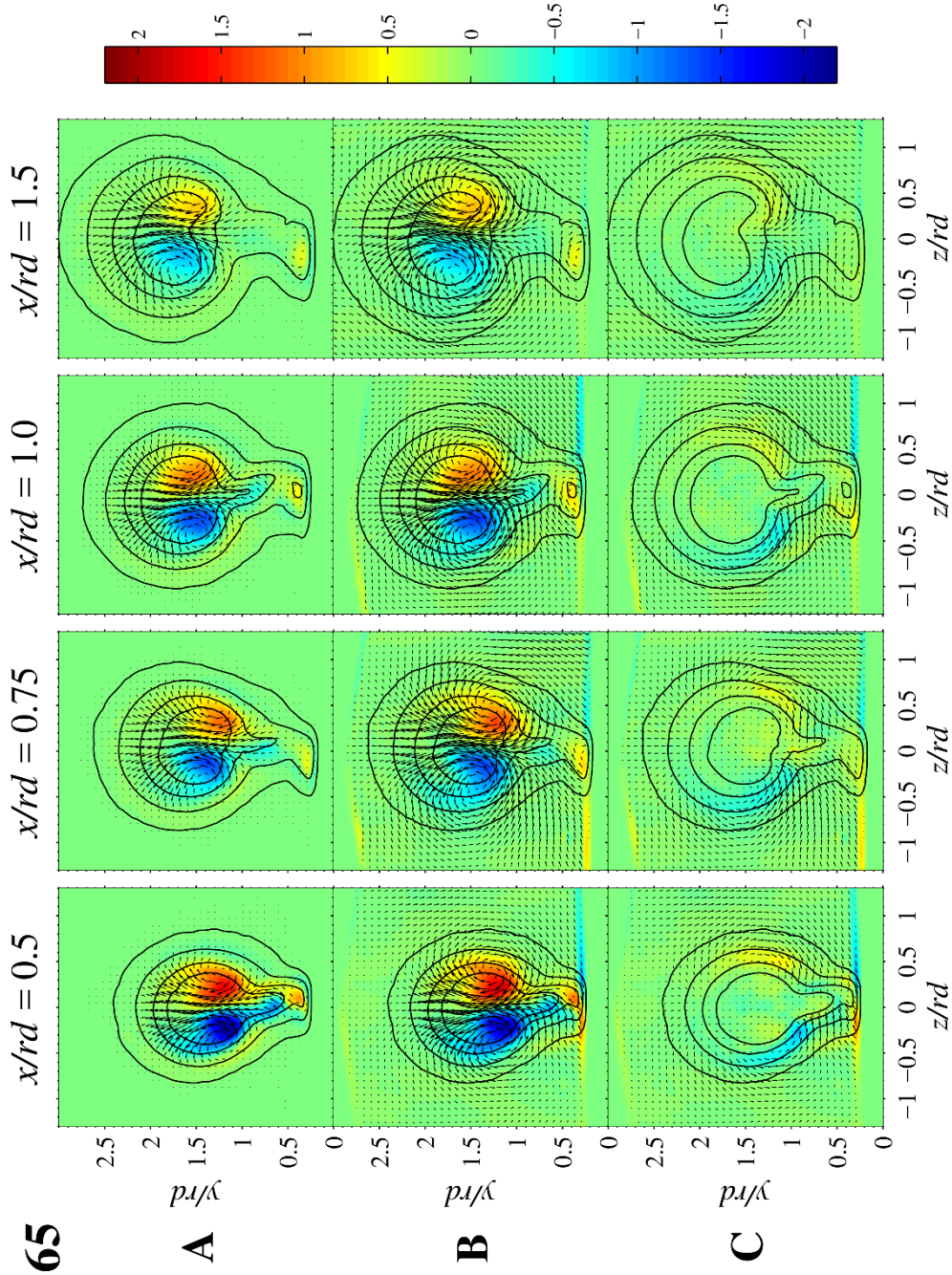
รูปที่ 7.1 ค I165: Contour surfaces แสดงความเร็วในแนวแกน Transverse ของ: (A) $V_{j,y} / u_{cf}$, (B) V_y / u_{cf} และ (C) $V_{cf,y} / u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$, (B) \bar{V}_{yz} / u_{cf} และ (C) $\bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}$

I165

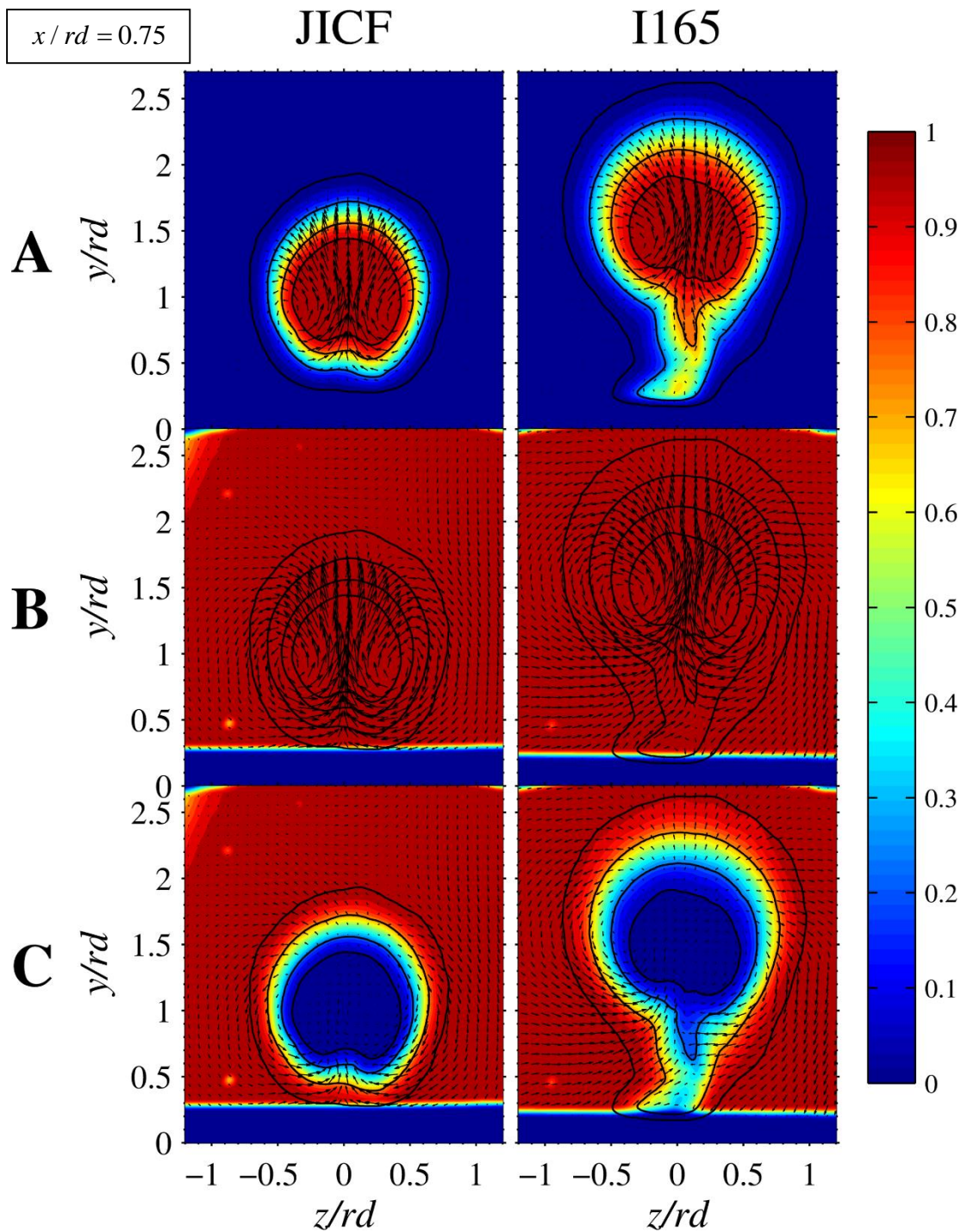


รูปที่ 7.1 § I165: Contour surfaces แสดงความเร็วในแนวนอน Spanwise ของ: (A) $V_{j,z}/u_{cf}$, (B) V_z/u_{cf} และ (C) $V_{cf,z}/u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$

I165



รูปที่ 7.1 จ JICF: Contour surfaces แสดง Vorticity แนวแกน Streamwise ของ: (A) $\omega_{j,x} d/u_{cf}$, (B) $\omega_x d/u_{cf}$ และ (C) $\omega_{cf,x} d/u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$ และ (B) \vec{V}_{yz} / u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz} / u_{cf}$

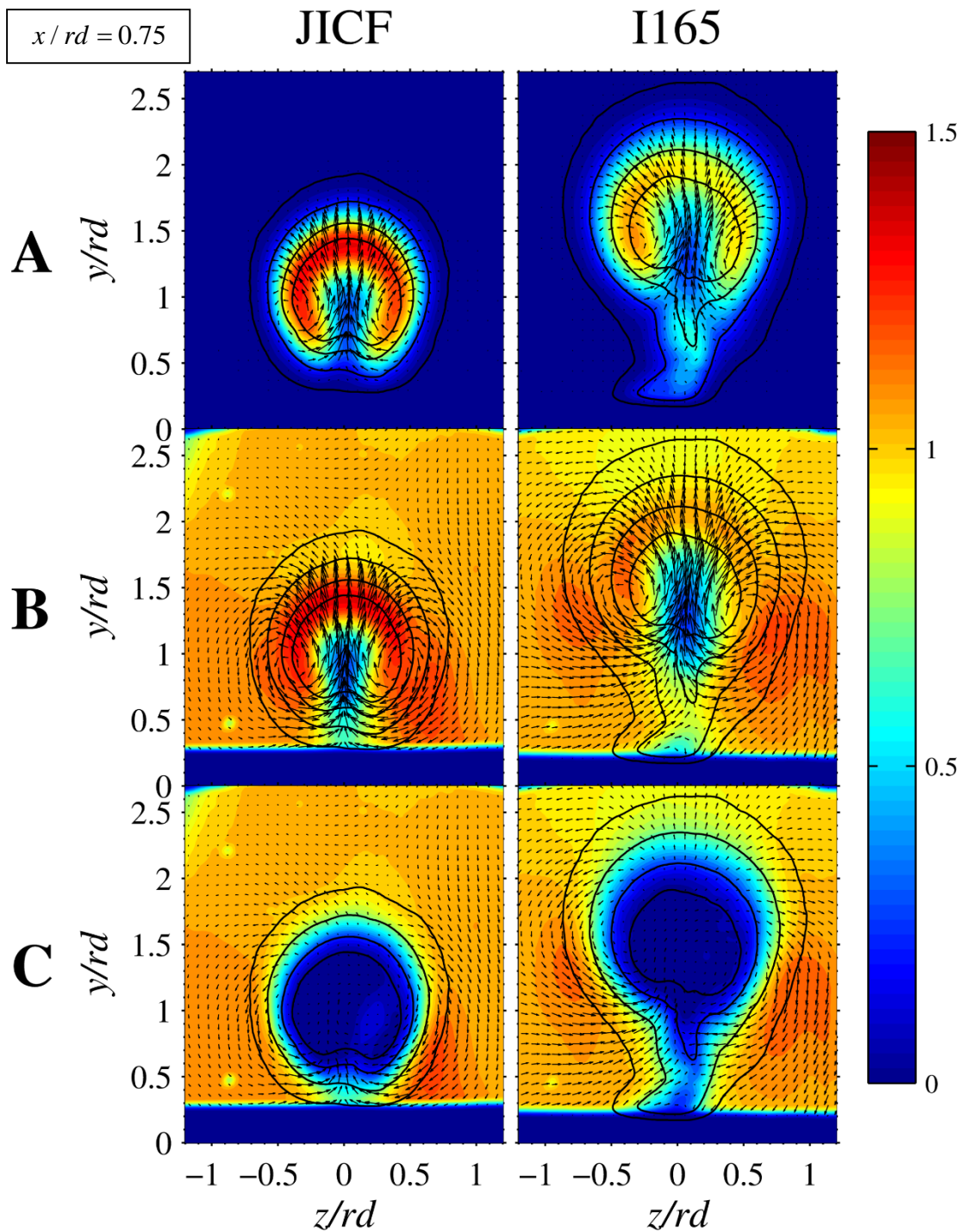


รูปที่ 7.2 ก กรณีนี้อาจจะเกิดจากความคลุมเครือ และกรณีนี้คือกรณีของความคลุมเครือ (I165) ที่ $x/rd = 0.75$

Contour surface: (A) ϕ_j , (B) ϕ และ (C) ϕ_{cf}

Contour lines: $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95

In-plane vector: (A) $\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$, (B) \bar{V}_{yz} / u_{cf} และ (C) $\bar{V}_{cf,yz} / u_{cf}$

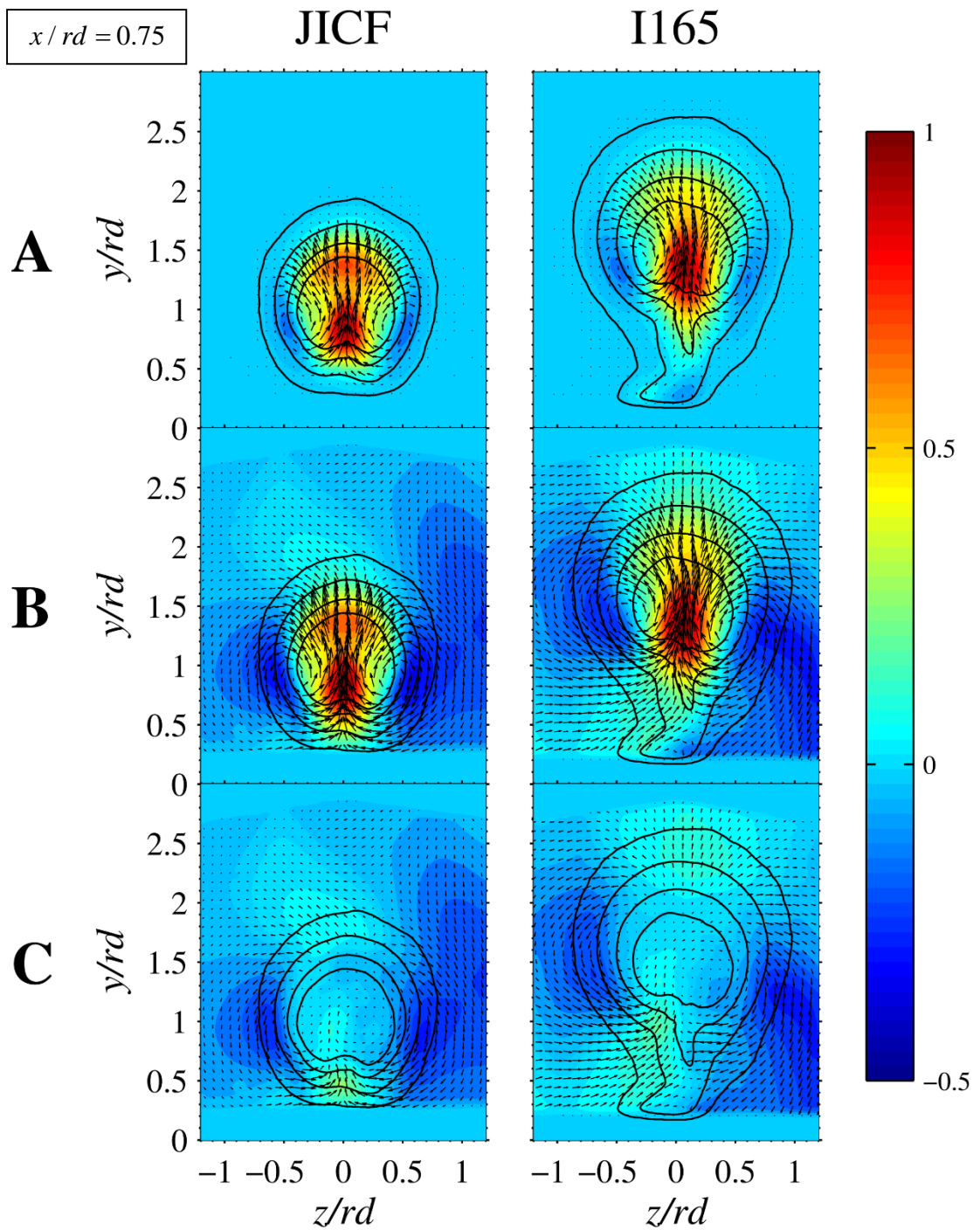


รูปที่ 7.2 ข กรณีนี้อินทิเกรตความดัน และกรณีนี้อินทิเกรตความดัน (I165) ที่ $x/rd = 0.75$

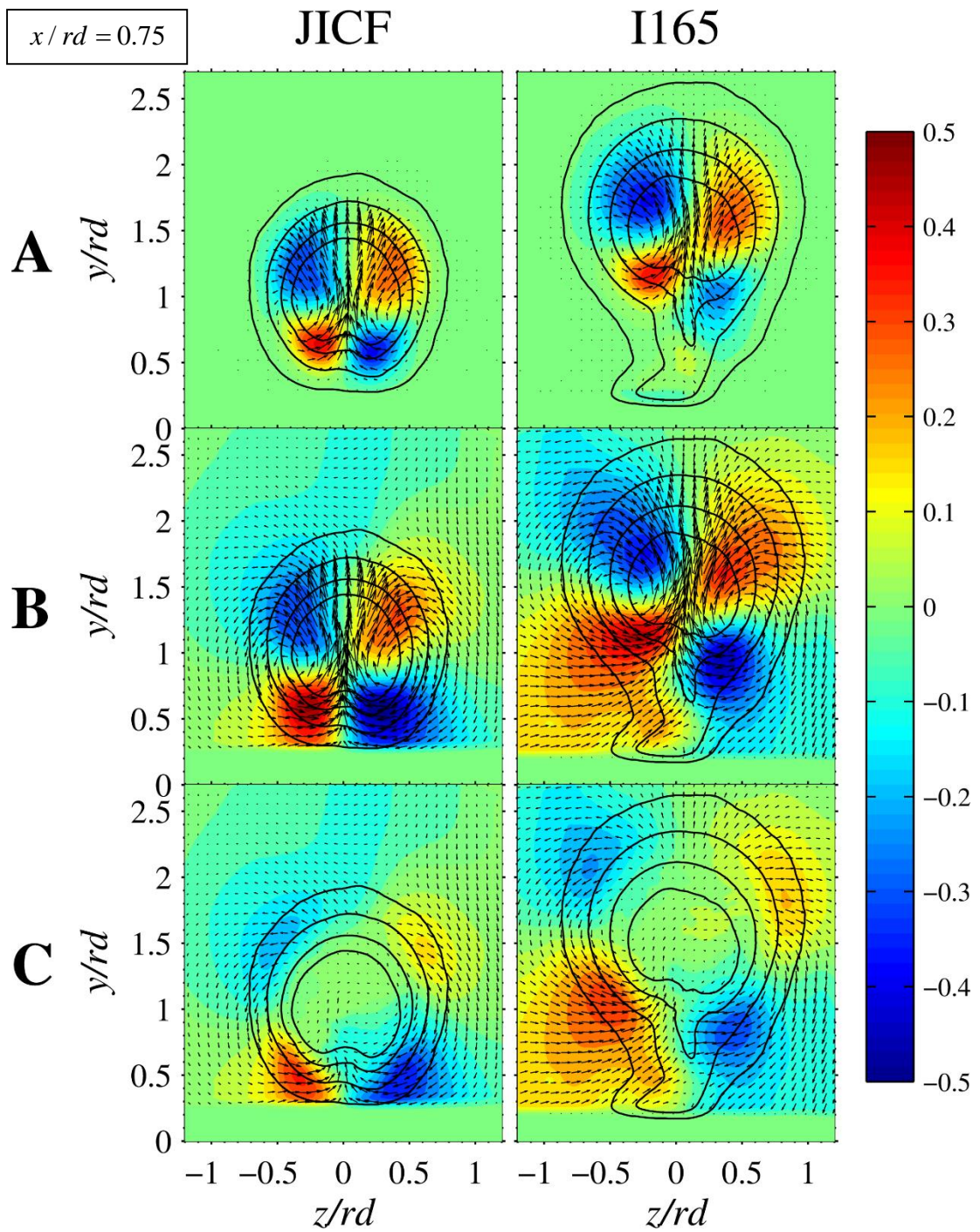
Contour surface: (A) $V_{j,x}/u_{cf}$, (B) V_x/u_{cf} และ (C) $V_{cf,x}/u_{cf}$

Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95

In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$



รูปที่ 7.2 ค กรณีน้ไม่ฉีดเจ็ตคววมคุม และกรณีน้ฉีดเจ็ตคววมคุม (I165) ที่ $x/rd = 0.75$
 Contour surface: (A) $V_{j,y}/u_{cf}$, (B) V_y/u_{cf} และ (C) $V_{cf,y}/u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95
 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$

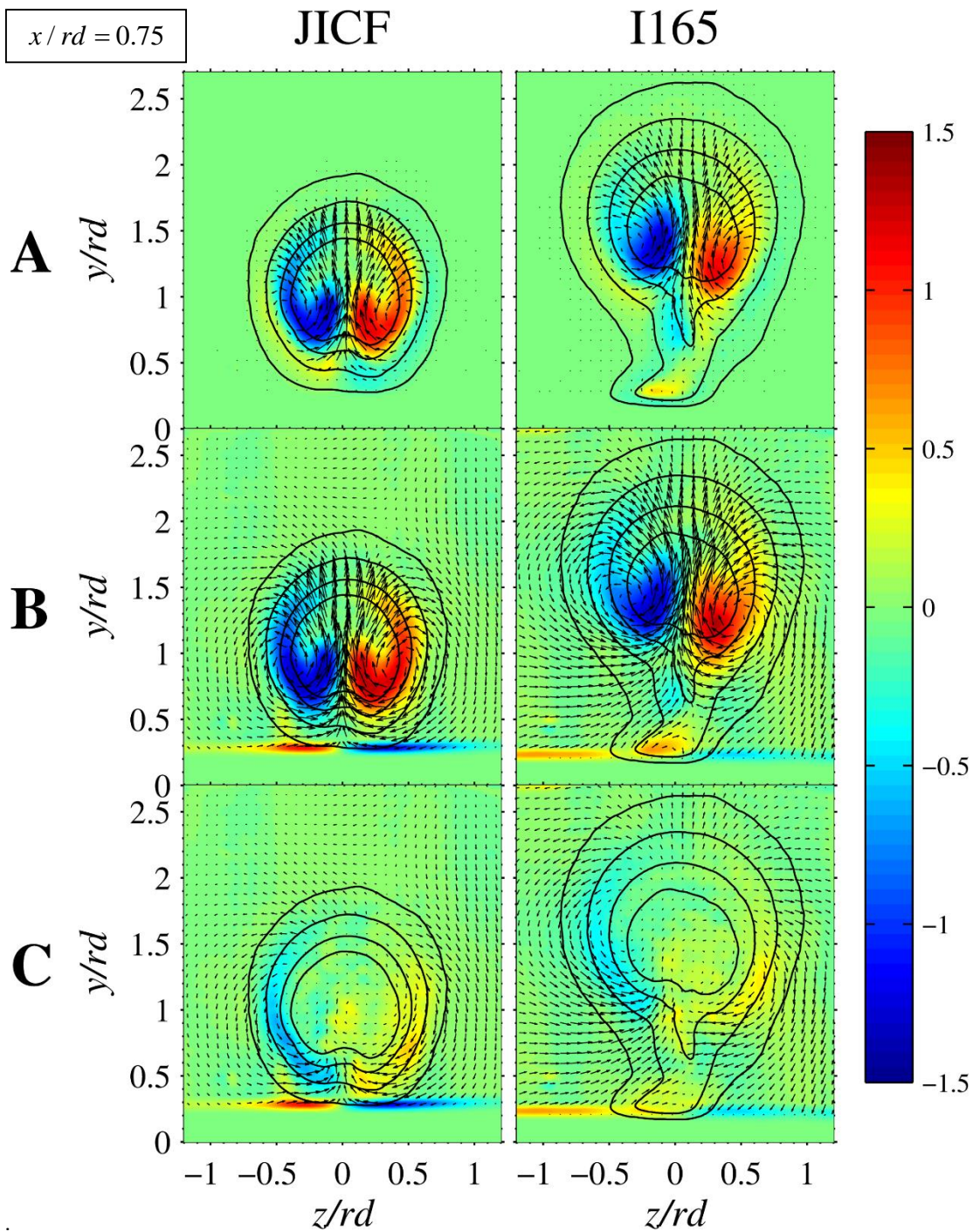


รูปที่ 7.2 ง กรณีน้ไม่ฉีดเจ็ตควบคุม และกรณีน้ฉีดเจ็ตควบคุม (I165) ที่ $x/rd = 0.75$

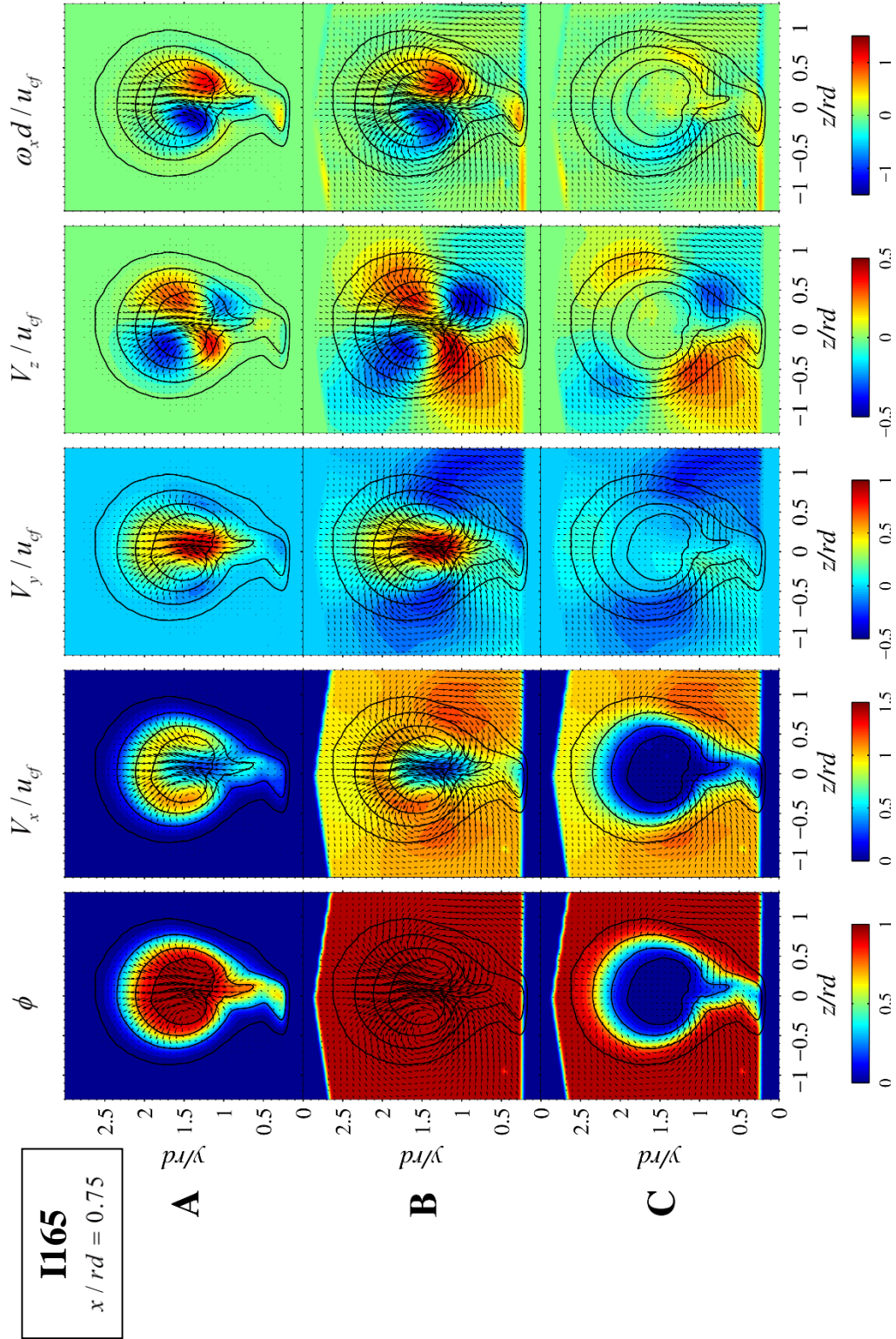
Contour surface: (A) $V_{j,z}/u_{cf}$, (B) V_z/u_{cf} และ (C) $V_{cf,z}/u_{cf}$

Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95

In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$

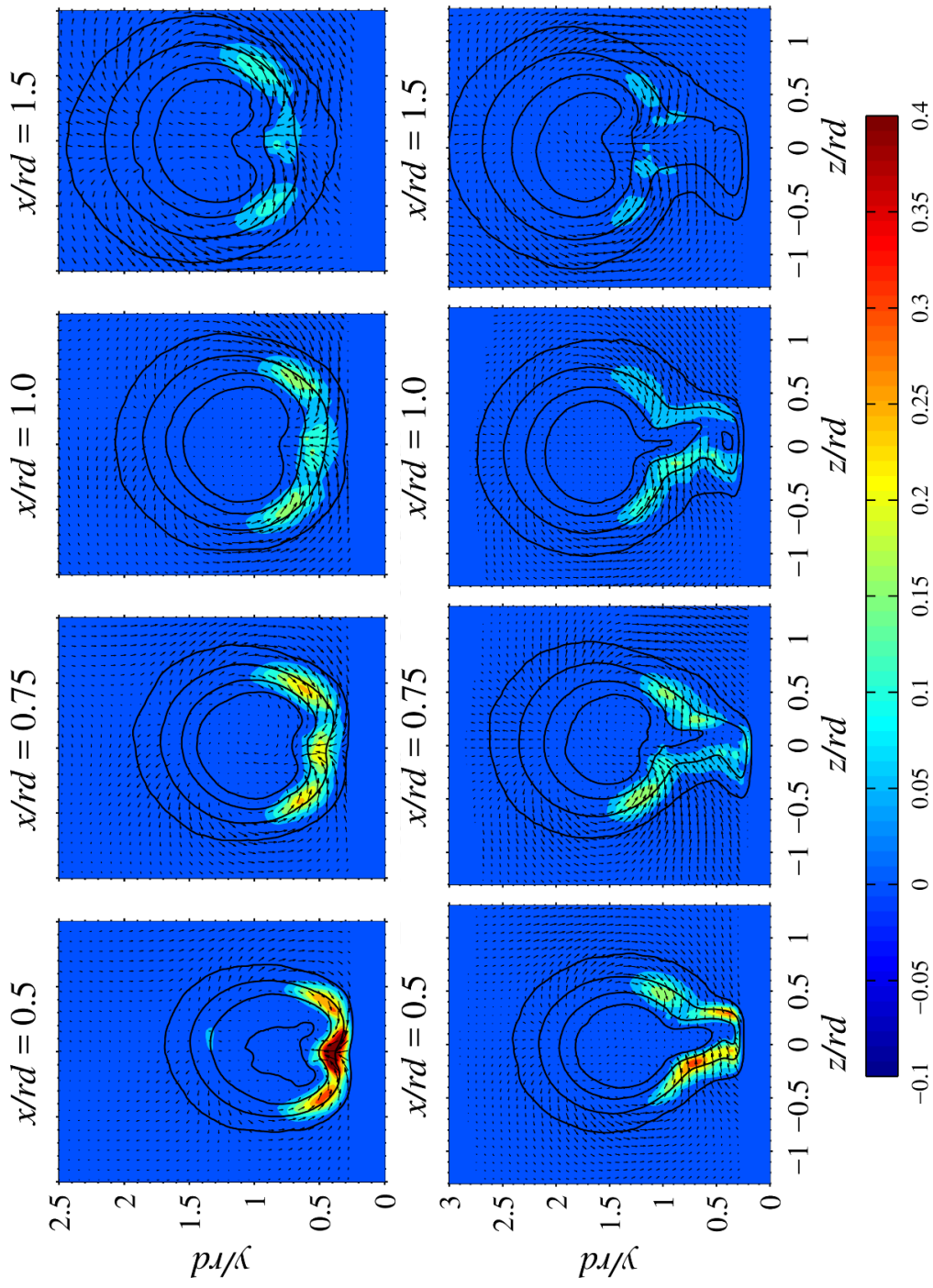


รูปที่ 7.2 จ กรณีน้ไม่ฉีดเจ็ตควบคุม และกรณีน้ฉีดเจ็ตควบคุม (I165) ที่ $x/rd = 0.75$
 Contour surface: (A) $\omega_{j,x}d/u_{cf}$, (B) $\omega_x d/u_{cf}$ และ (C) $\omega_{cf,x}d/u_{cf}$
 Contour lines : $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75$ และ 0.95
 In-plane vector: (A) $\vec{V}_{j,yz}/u_{cf}$, (B) \vec{V}_{yz}/u_{cf} และ (C) $\vec{V}_{cf,yz}/u_{cf}$

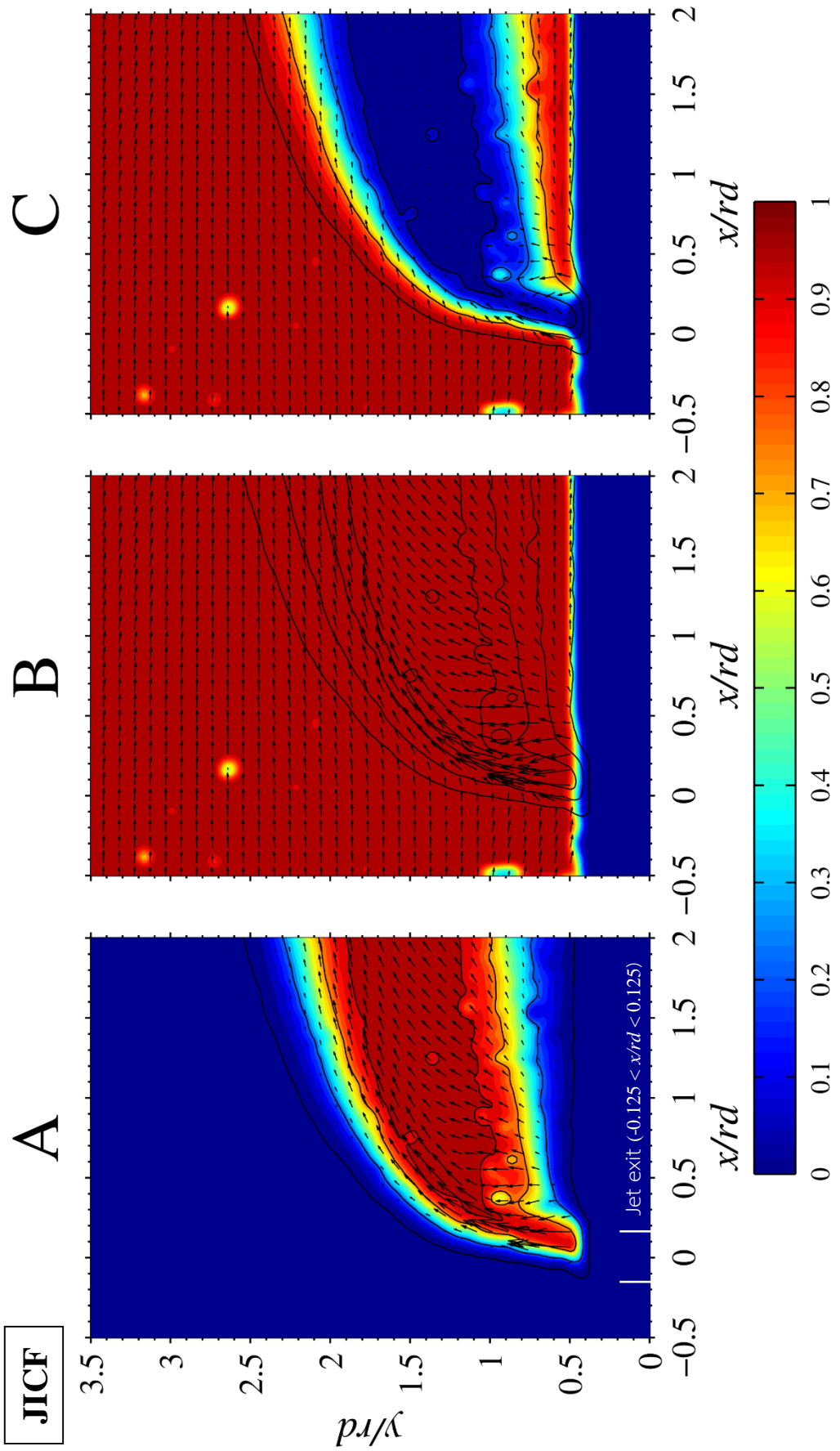


รูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์และความเกี่ยวเนื่องกันของปริมาณเฉลี่ยโรมิติต่างๆ กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165

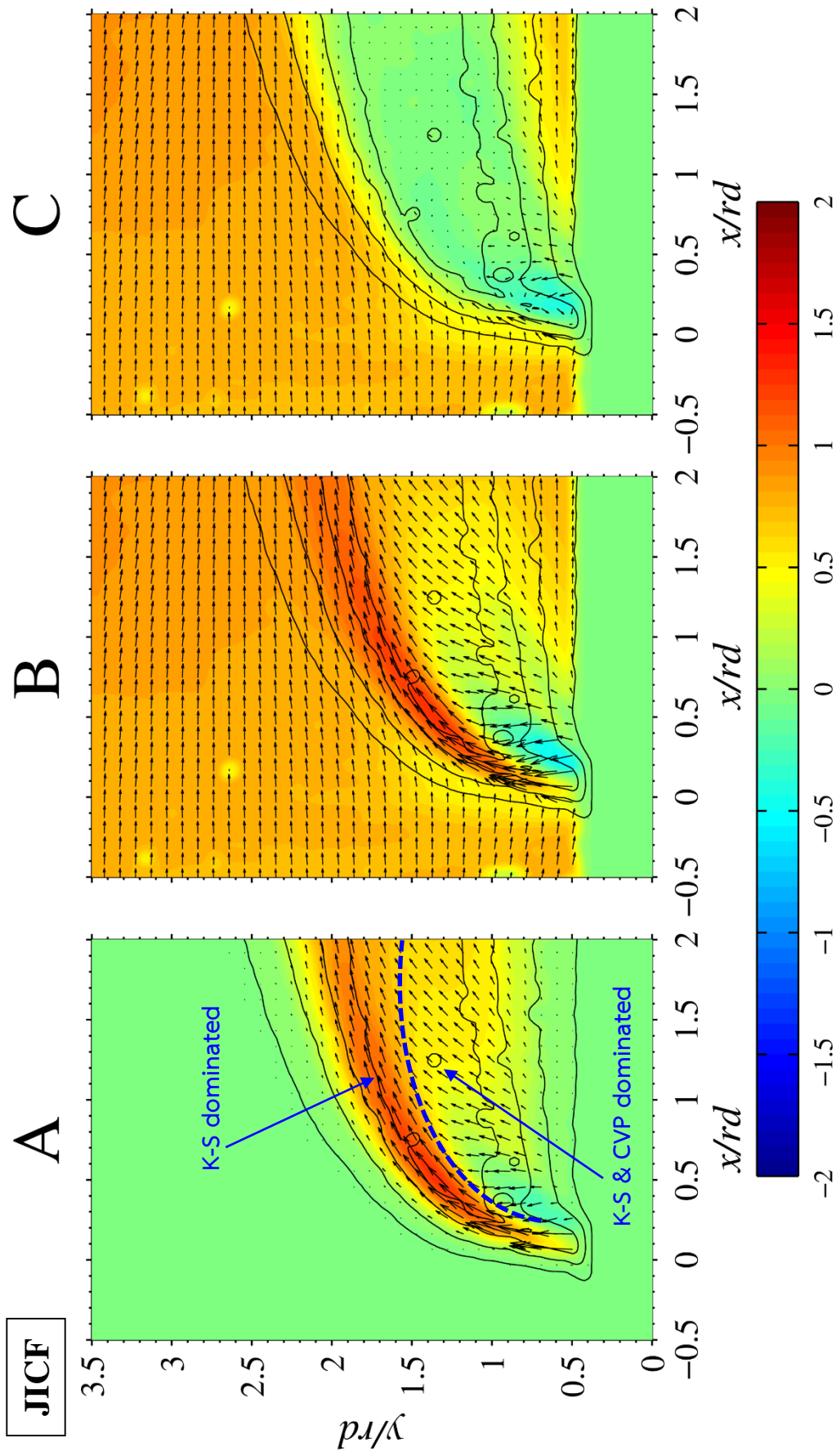
**JICF
v.s.
I165**



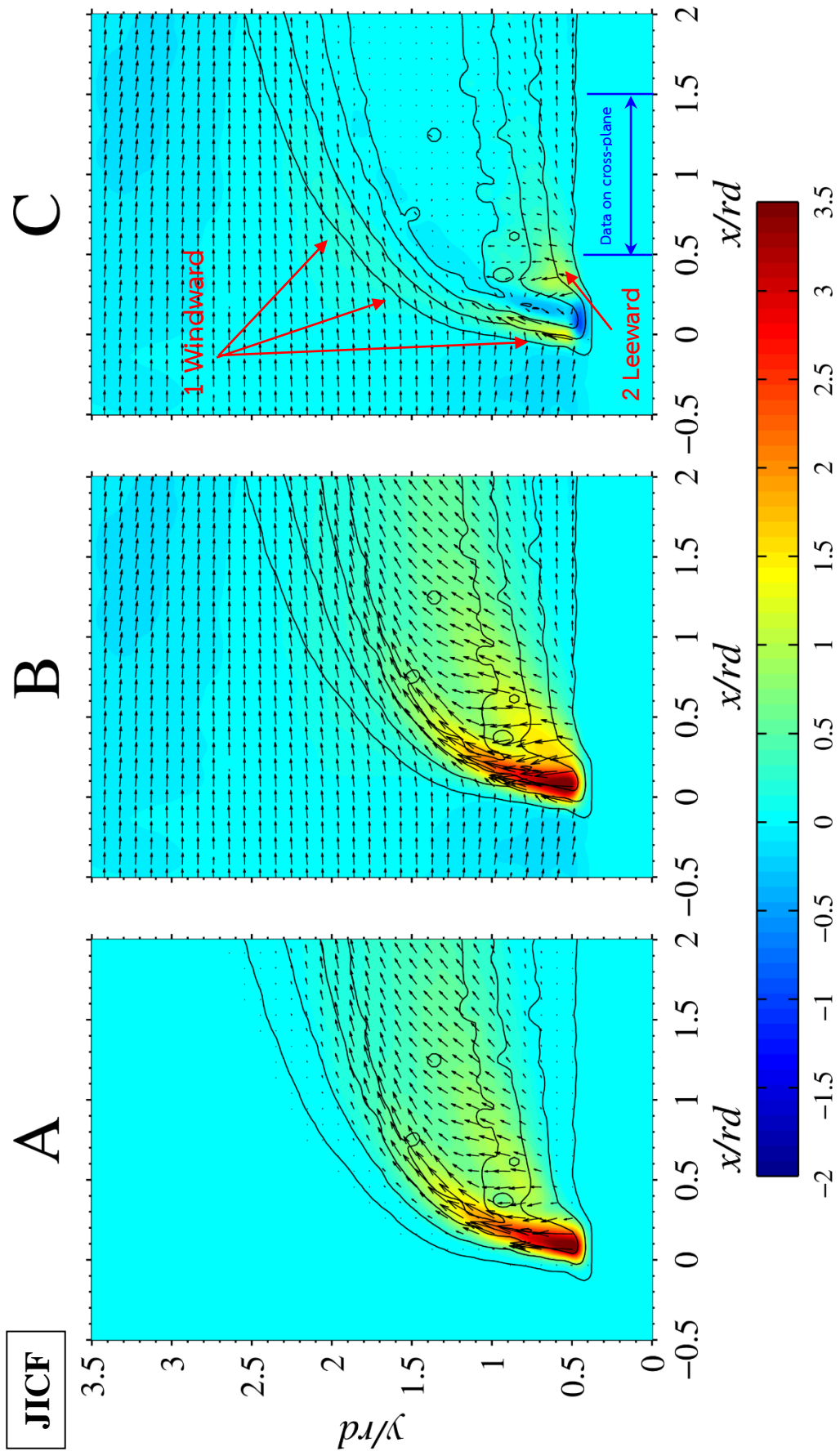
รูปที่ 7.4 บริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสม $[(\bar{V}_{cf} / u_{cf}) \cdot d\nabla\phi_j]$ ระหว่างการถล่มไม่เสถียรเจ็ตความดัน และการถล่มเจ็ตความดัน (I165)



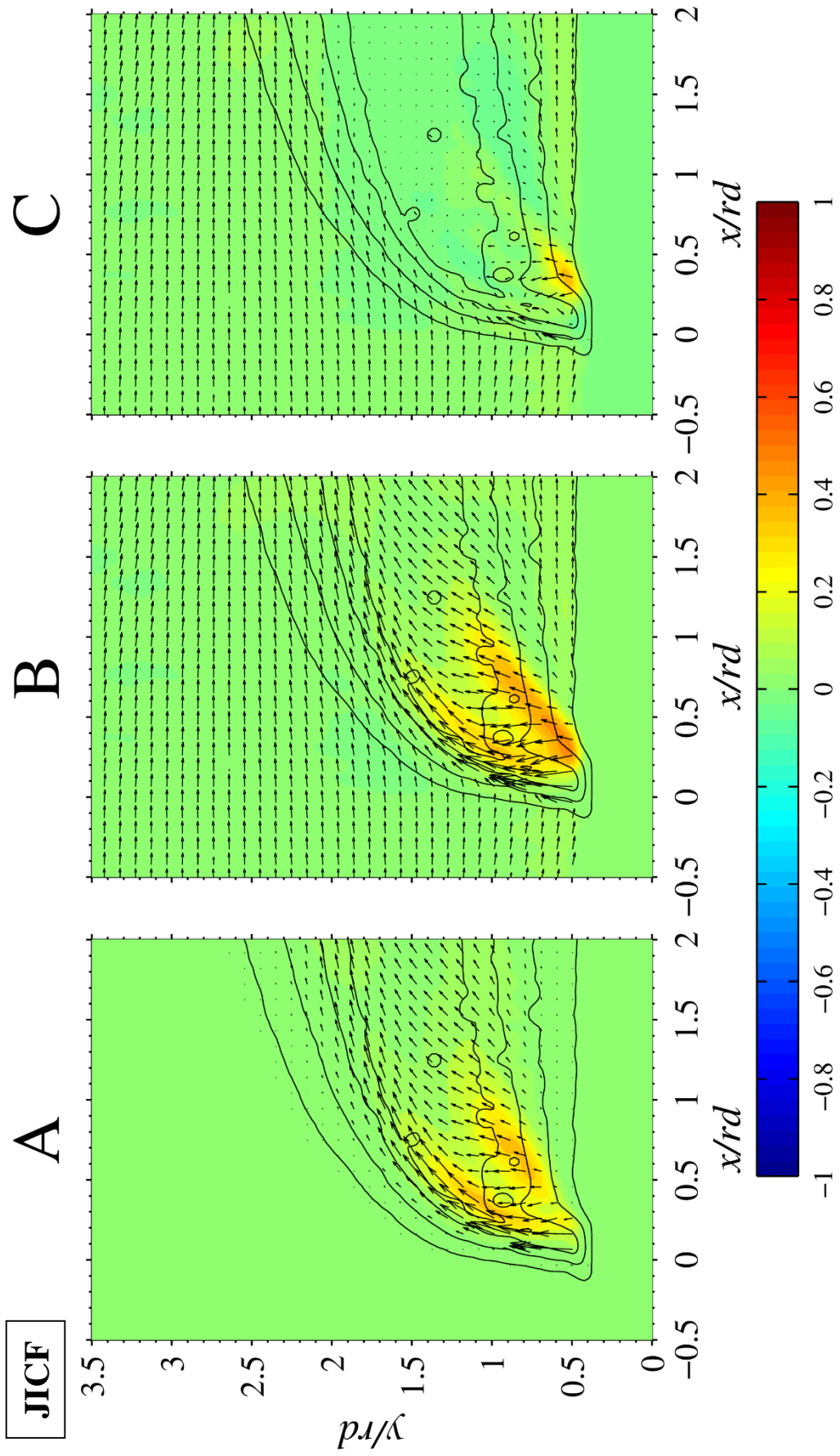
รูปที่ 8.1 ก JICF: CS แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบ (A) เจ็ต (ϕ_i) (B) ของไหลใดๆ (ϕ) (C) กระแสผสมทางบริสุทธิ์ (ϕ_{cf})



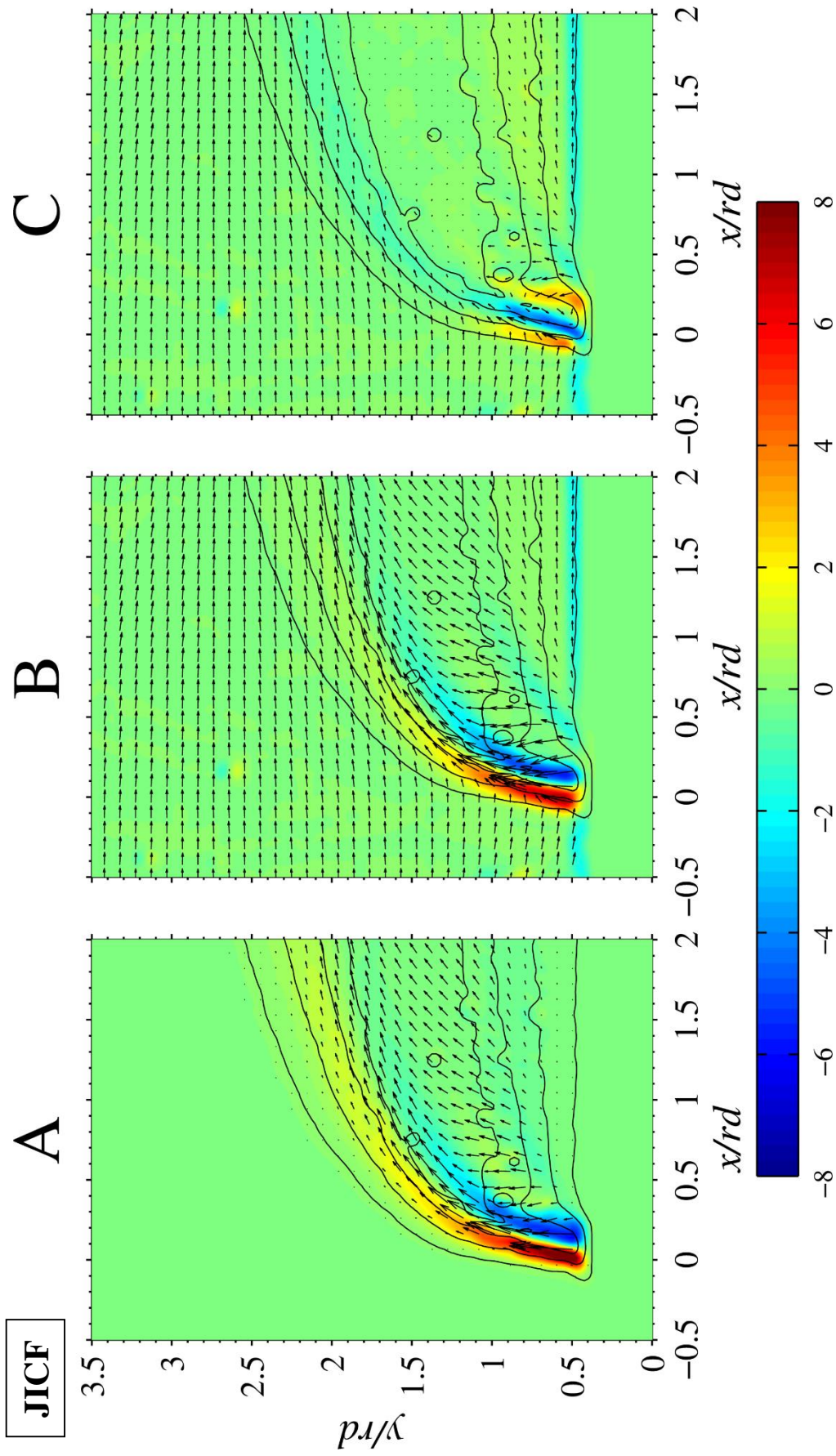
รูปที่ 8.1 ข JICF: CS แสดง Streamwise velocity ของ (A) เจ็ด ($V_{j,x} / u_{cf}$) (B) ของไหลใดๆ (V_x / u_{cf}) (C) กระแสผสมขวางบริสุทธิ์ ($V_{cf,x} / u_{cf}$)



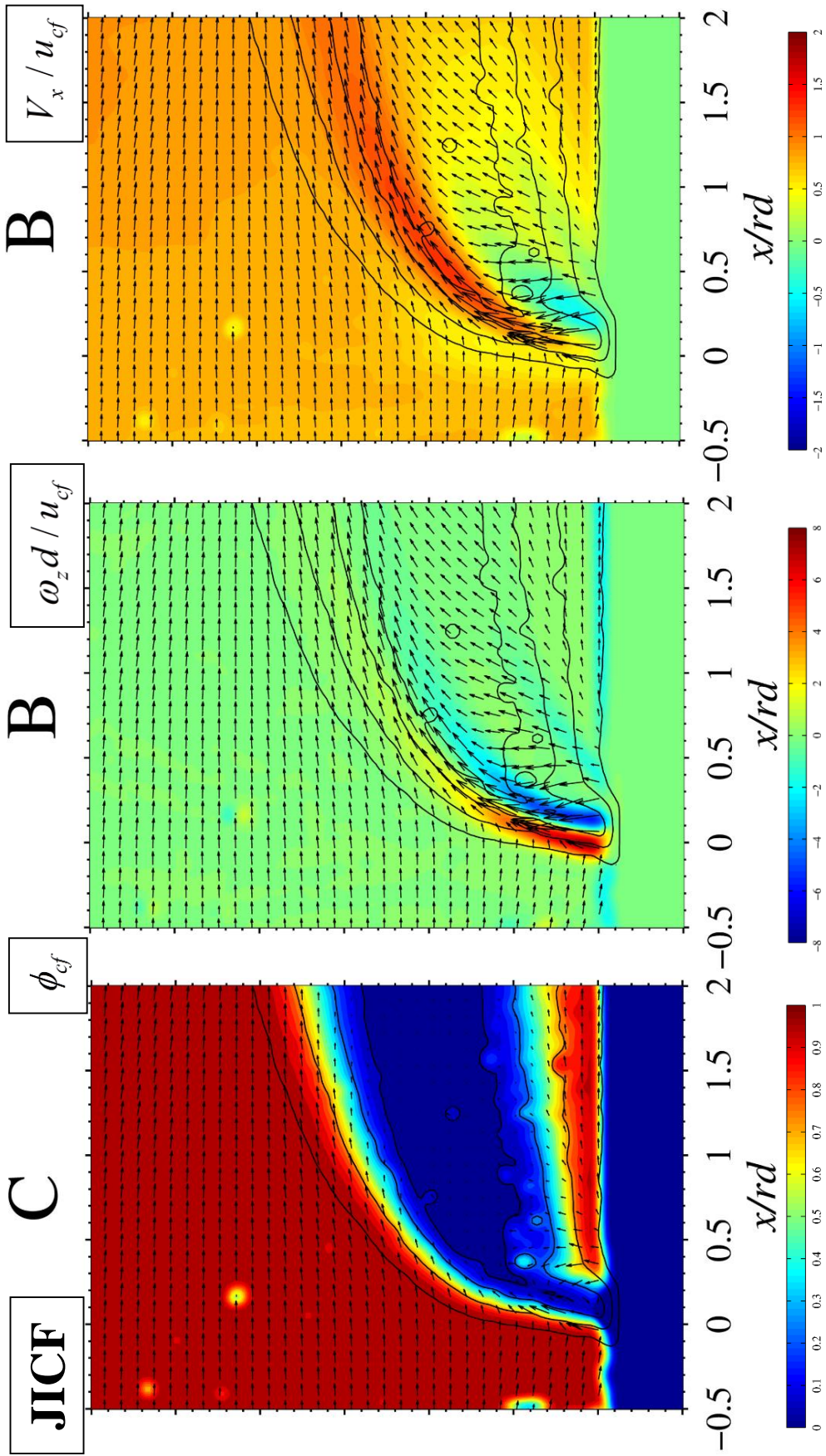
รูปที่ 8.1 ค JICF: CS แสดง Transverse velocity ของ (A) เจ็ต $(V_{i,y} / u_{cf})$ (B) ของไหลใดๆ (V_y / u_{cf}) (C) กระแสลมขวางบริสุทธิ์ $(V_{cf,y} / u_{cf})$



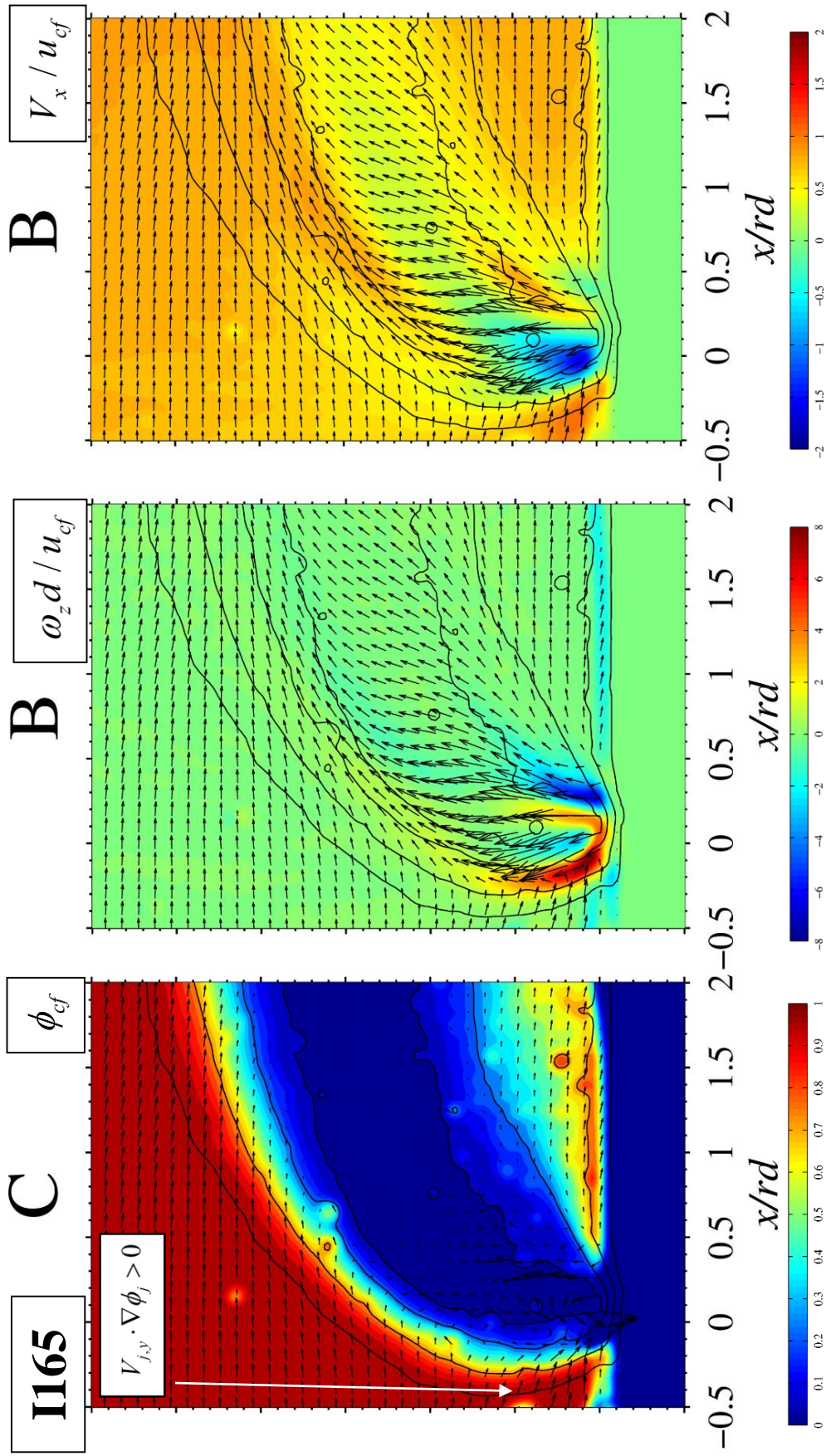
รูปที่ 8.1 ง JICF: CS แสดง Spanwise velocity ของ (A) เจ็ต ($V_{j,z}/u_{cf}$) (B) ของไหลใดๆ (V_z/u_{cf}) (C) กระแสผสมขวางปริศูทธิ์ ($V_{cf,z}/u_{cf}$)



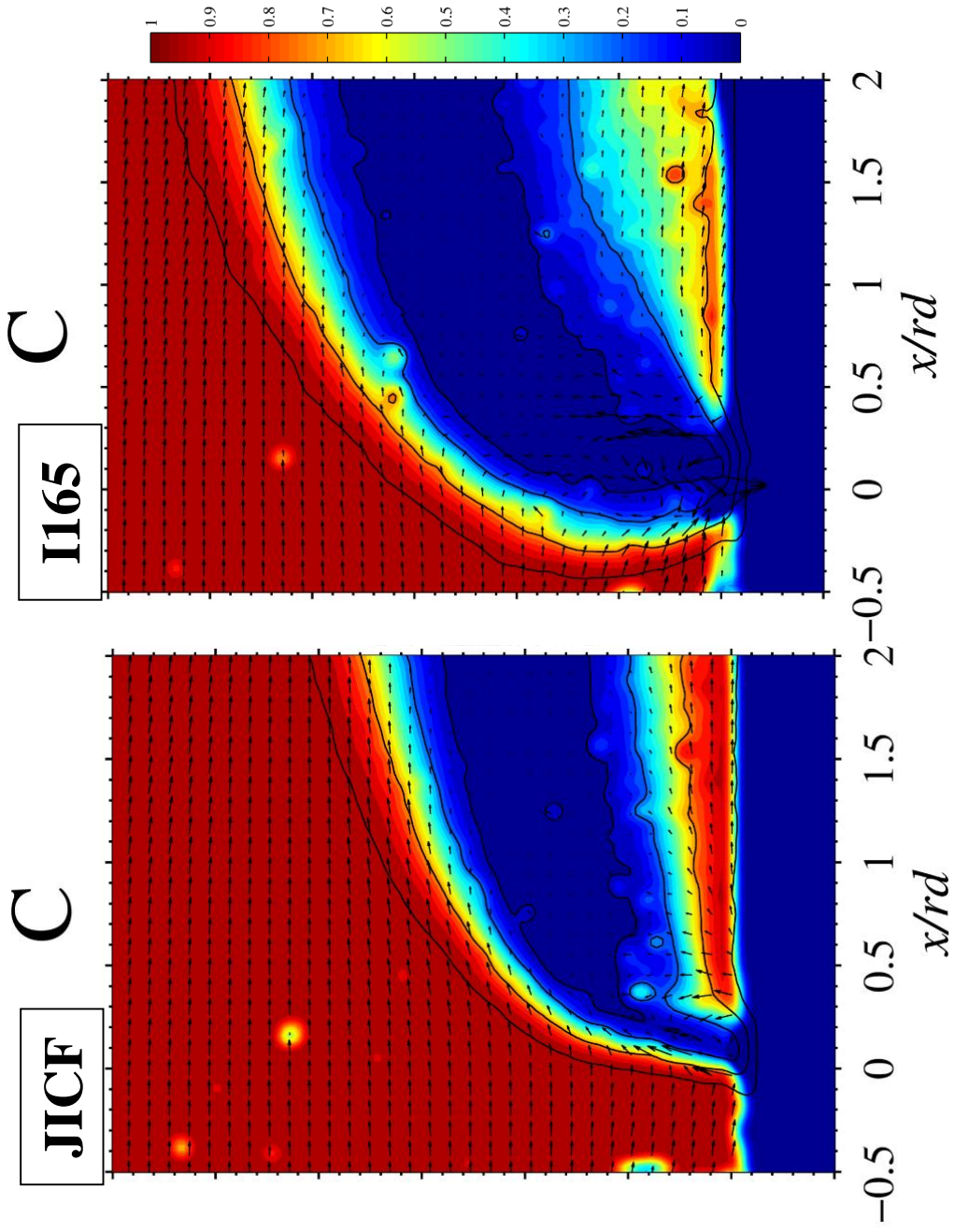
รูปที่ 8.1 จ JICF: CS แสดง Spanwise vorticity ของ (A) เจ็ต ($\omega_{j,z} d/u_{cf}$) (B) ของไหลโดย ($\omega_z d/u_{cf}$) (C) กระแสลมขวางบริสุทธิ์ ($\omega_{cf,z} d/u_{cf}$)



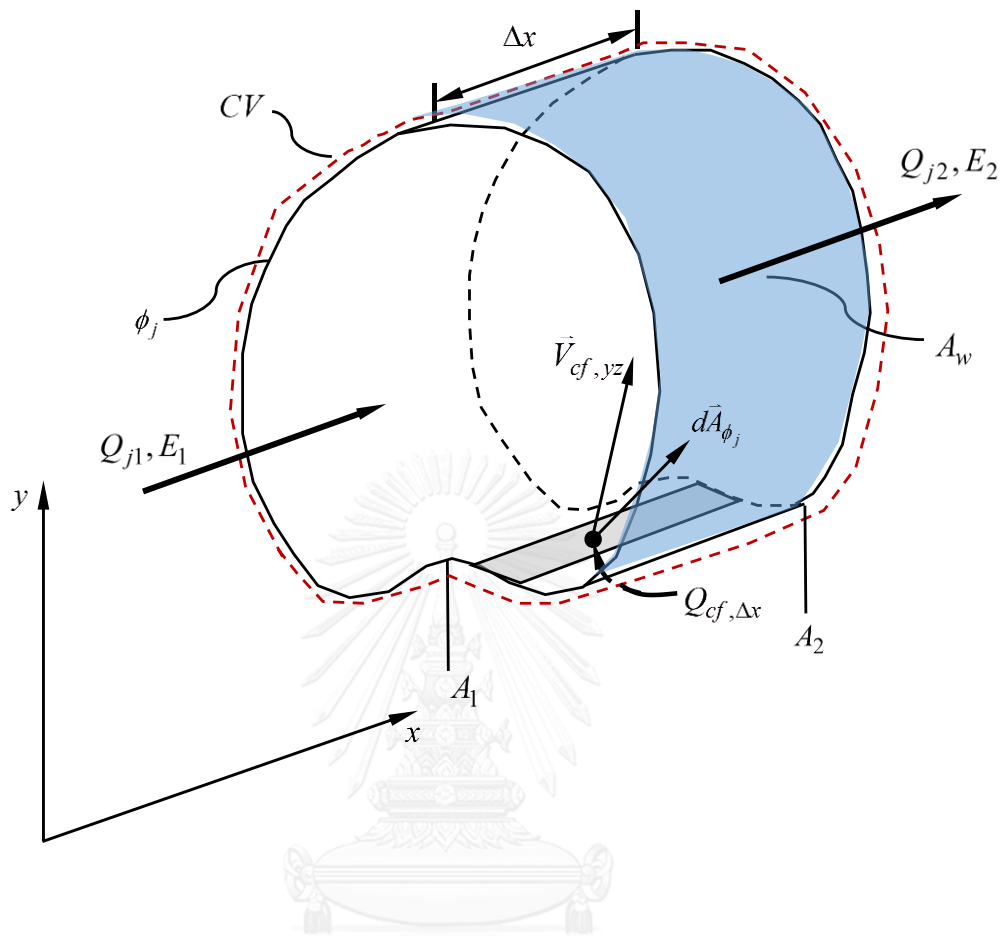
รูปที่ 8.2 JICF: ความสัมพันธ์ของปริมาณต่างๆในระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ทในกระแสลมขวาง



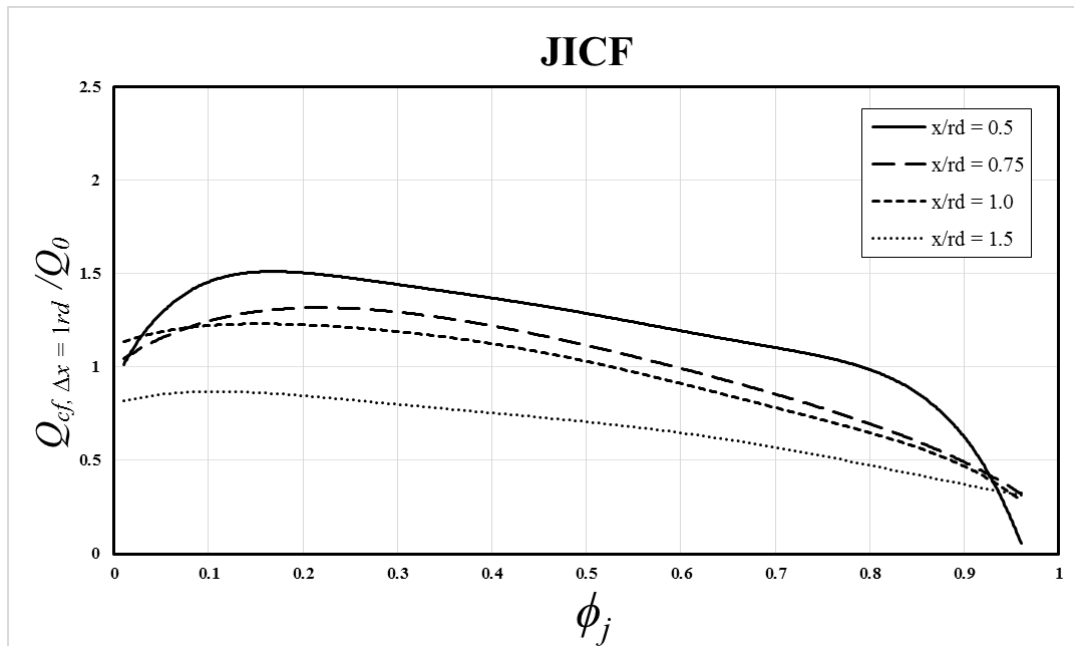
รูปที่ 8.3 I165: ความสัมพันธ์ของปริมาณต่างๆในระนาบสมมาตรการไหลของเจ็ตในกระแสไหลขวางกรณีการควบคุม



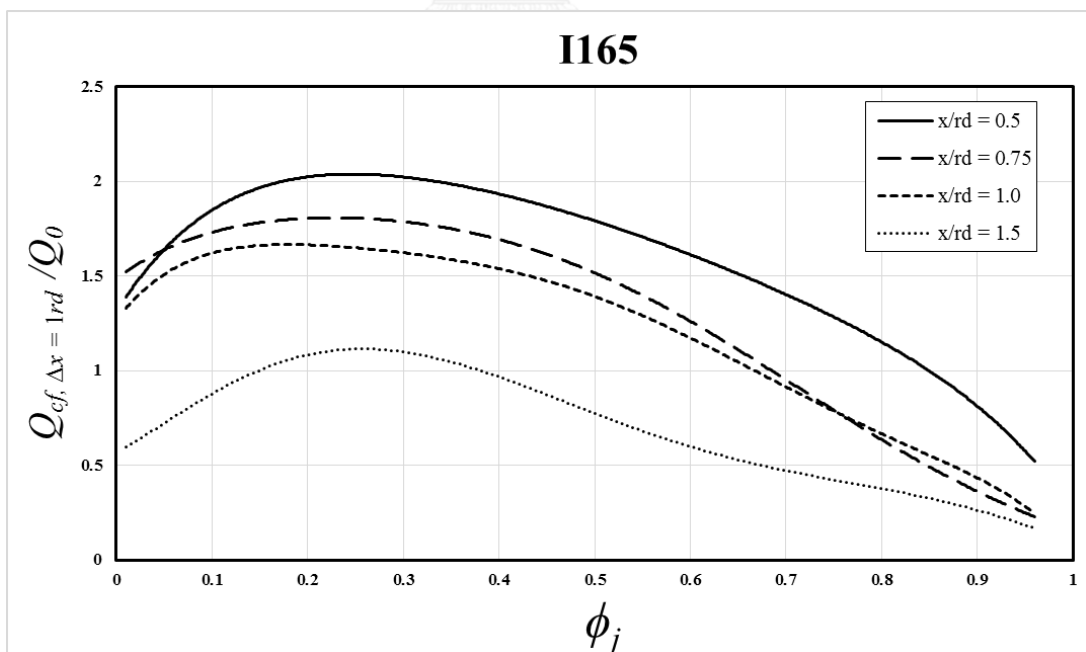
รูปที่ 8.4 ความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสลมขวางบริสุทธิ์ (ϕ_{ct}) ระหว่างกรณีไม่เกิดเจ็ตความคุม (JICF) และการเกิดการเจ็ตความคุม (I165)



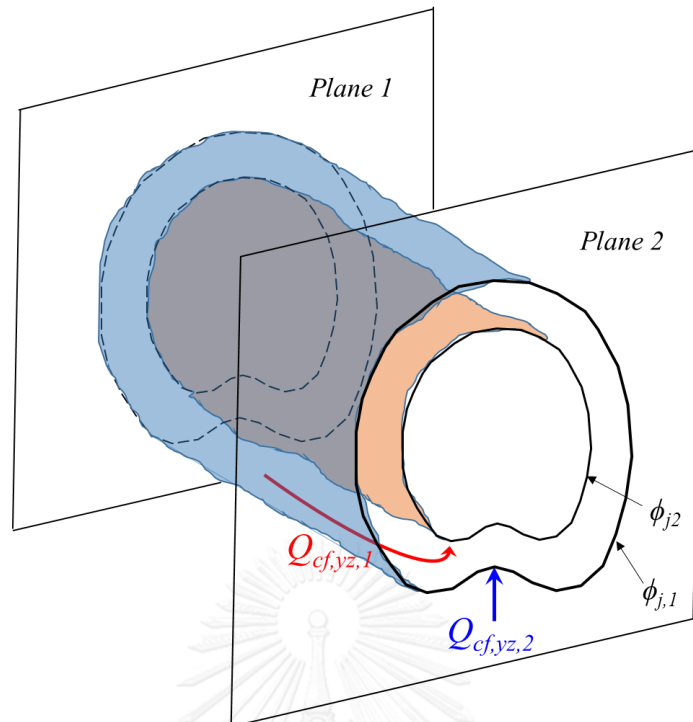
รูปที่ 9.1 Control volume (CV) พื้นผิวทรงกระบอก แสดงการไหลผ่านหน้าตัดการไหลเข้า A_1 หน้าตัดการไหลออก A_2 ที่มีขนาดเท่ากัน $A_1 = A_2$ และหน้าตัดการไหลด้านข้าง A_{wall} โดยมีระยะทางการไหลของ CV เท่ากับ Δx ในทิศทางตามแนวการไหล



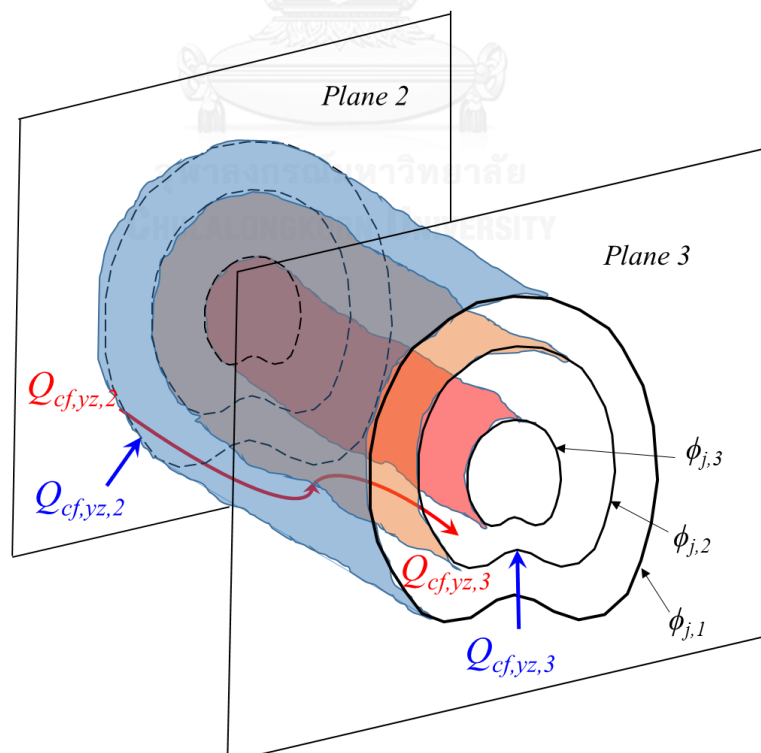
รูปที่ 9.2 การพัฒนาตัวของอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติต่อระยะความลึก $\Delta x = 1rd$ ($Q_{cf, \Delta x = 1rd} / Q_0$) สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)



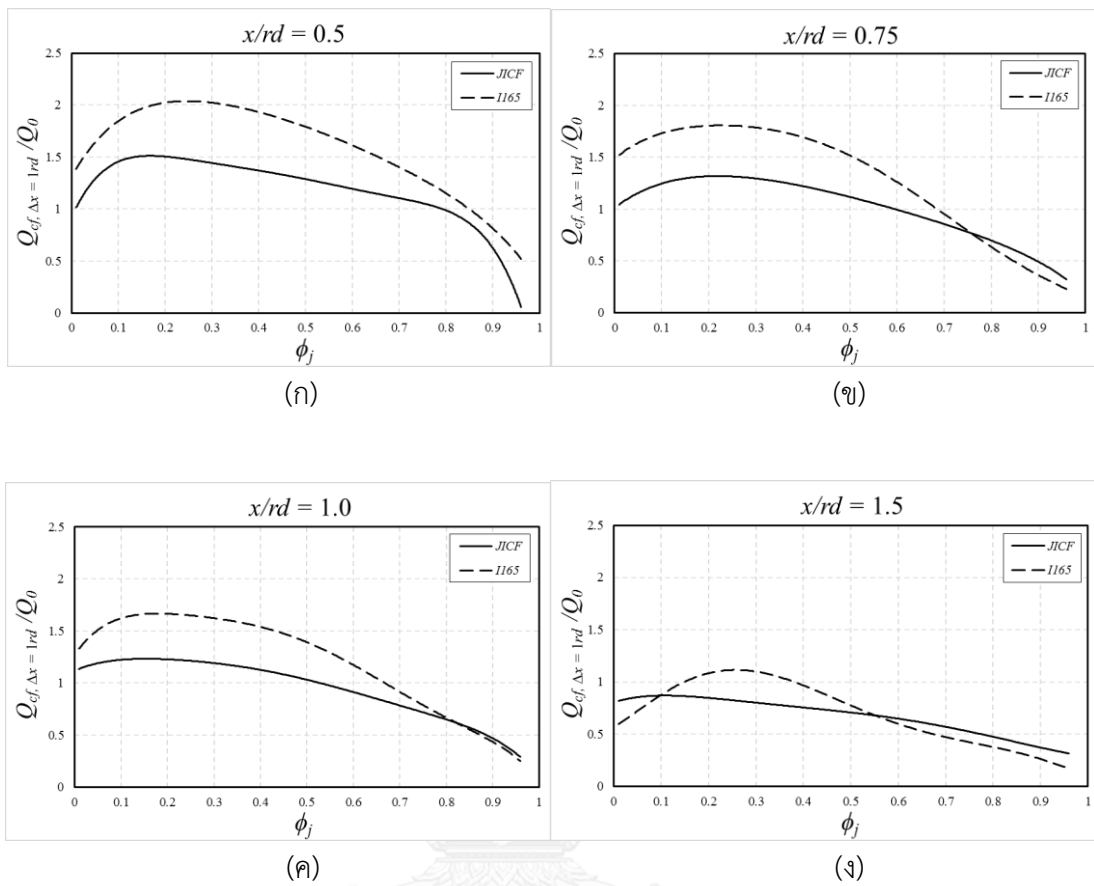
รูปที่ 9.3 การพัฒนาตัวของอัตราการไหลของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ไร้มิติต่อระยะความลึก $\Delta x = 1rd$ ($Q_{cf, \Delta x = 1rd} / Q_0$) สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)



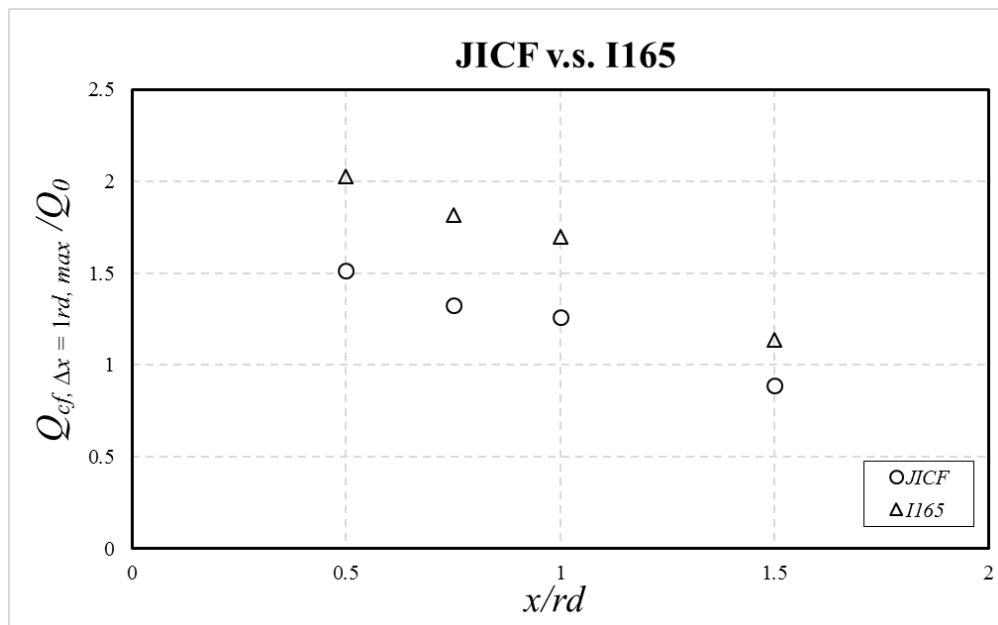
รูปที่ 9.4 การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลกระแสมวงขวางบริสุทธิ์ที่เข้าสู่ตัวเจ็ด โดยมี การไหลเข้ามาจากระนาบอื่น



รูปที่ 9.5 การลดลงของอัตราการไหลกระแสมวงขวางบริสุทธิ์ที่เข้าสู่ตัวเจ็ด ในกรณีที่มี การไหลออกจากกระนาบที่สนใจ



รูปที่ 9.6 การเปรียบเทียบการพัฒนาตัวของอัตราการผลิตของกระแสมขวางบริสุทธิ์
 ไร้มิติต่อระยะความลึก $\Delta x = 1rd$ ($Q_{cf, \Delta x = 1rd} / Q_0$)
 ระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165
 (ก) ที่ระยะการไหล $x / rd = 0.5$
 (ข) ที่ระยะการไหล $x / rd = 0.75$
 (ค) ที่ระยะการไหล $x / rd = 1.0$
 (ง) ที่ระยะการไหล $x / rd = 1.5$



รูปที่ 9.7 การเปรียบเทียบอัตราการไหลสูงสุดไร้มิติของกระแสมวงต่อระยะความลึก $\Delta x = 1rd$ ($Q_{cf, \Delta x=1rd} / Q_0$) ระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง I165

รายการอ้างอิง

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

swirling jets in crossflow, The Twenty-Third Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 23), 4-7 November 2009, Chiang Mai.

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.

Muppidi, S. and Mahesh, K. (2005a). Velocity field of a round turbulent transverse jet, *Proceedings of, Williamsburg, Virginia*, pp. 829-834

Muppidi, S. and Mahesh, K. (2005b). Study of trajectories of jets in crossflow using direct numerical simulations, *J. Fluid Mech.*, Vol. 530, pp. 81-100.

Niederhaus, C. E., Champagne, F. H. and Jacobs, J. W. (1997). Scalar transport in a swirling transverse jet, *AIAA J.*, Vol. 35, No. 11, pp. 1697-1704.

Sau, A., Sheu, T., Hwang, R. and Yang, W. (2004). Three-dimensional simulation of square jets in cross-flow, *Phys. Rev. E*, Vol. 69, CID 066302.

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. (2001). Effects of the swirl number on mixing characteristics of a heated swirling jet in crossflow, Master thesis. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

Wangjiraniran, W. and Bunyajitradulya, A. (2001). Temperature distribution in Non-zero circulation swirling jet in crossflow, *Proceedings of The Fifteenth Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand, Bangkok, Thailand, 28-30 November 2001*, Vol. 1, pp. TF104-TF116

Witayaprapakorn, T. (2013). Effects of azimuthal control jets on the entrainment of a jet in crossflow, Master thesis. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.

Witayaprapakorn, T. and Bunyajitradulya, A. (2013). Effects of azimuthal control jets on structure and entrainment of a jet in crossflow, *The Twenty-Seventh Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 27)*, 16-18 October 2013, Pattaya, Chonburi, Thailand.

Yingjaroen, T., Pimpin, A. and Bunyajitradulya, A. (2006). Evolution of mixing regions in jet and swirling jet in crossflow: An experimental study, *Proceedings of The Twentieth Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand, Nakhon Ratchasima, Thailand, 18-20 October 2006*, pp. TSF032

Soupramongkol, P. and Bunyajitradulya, A. (2015). Effects of Azimuthal Control Jets on the Entrainment of Jet in Crossflow at Intermediate Effective Velocity Ratio 8, the 6th TSME - IcoME International Conference on Mechanical Engineering, 16-18 December 2015, Phethchaburi, Thailand

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, the 6th TSME - IcoME International Conference on Mechanical Engineering, 16-18 December 2015, Phethchaburi, Thailand

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

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

Zaman, K. B. M. Q. and Foss, J. K. (1997). The effect of vortex generators on a jet in a crossflow, *Physics of Fluids*, Vol. 9, pp. 106-114.

Bunyajitra ulya, 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.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก: ตารางสรุปพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทดลอง

กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ที่ $r = 4$ สำหรับ (A) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะใน ส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง และ (B) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ต และกระแสลมขวาง

ตารางที่ 1 JICF: $x/rd = 0.5$

General	x/rd	0.5
	Tatm [oC]	31.5
	Patm [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer) (A) and (B)	P [psig]	15
	No. of nozzle	3
Seeding (six jet atomizer) Only (B)	P [psig]	60
	No. of nozzle	6
Jet & Crossflow	V_j [m/s]	16.22
	ucf [m/s]	4.030
	r	4.024
Camera (L/R)	Camera position [cm]	0 (minimum)
	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 2.75 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	0.944x0.944 (59.997 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 15 \mu\text{s}$
	Jet point ($\phi_j \geq 0.01$)	4111

ตารางที่ 2 JICF: $x/rd = 0.75$

General	x/rd	0.75
	Tatm [oC]	31.7
	Patm [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer) (A) and (B)	P [psig]	15
	No. of nozzle	3
Seeding (six jet atomizer) Only (B)	P [psig]	60
	No. of nozzle	6
Jet & Crossflow	V_j [m/s]	16.22
	u_{cf} [m/s]	4.030
	r	4.024
Camera (L/R)	Camera position [cm]	0 (minimum)
	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 3 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	0.947x0.947 (59.221 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 15 \mu\text{s}$
	Jet point ($\phi_j \geq 0.01$)	5567

ตารางที่ 3 JICF: $x/rd = 1.0$

General	x/rd	1.0
	Tatm [oC]	30.8
	Patm [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer) (A) and (B)	P [psig]	18
	No. of nozzle	3
Seeding (six jet atomizer) Only (B)	P [psig]	60
	No. of nozzle	6
Jet & Crossflow	V_j [m/s]	16.22
	u_{cf} [m/s]	4.030
	r	4.024
Camera (L/R)	Camera position [cm]	0 (minimum)
	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 3 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	0.930x0.930 (58.131 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 20 \mu\text{s}$
	Jet point ($\phi_j \geq 0.01$)	6926

ตารางที่ 4 JICF: $x/rd = 1.5$

General	x/rd	1.5
	Tatm [oC]	30.6
	Patm [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer) (A) and (B)	P [psig]	20
	No. of nozzle	3
Seeding (six jet atomizer) Only (B)	P [psig]	60
	No. of nozzle	6
Jet & Crossflow	V_j [m/s]	16.22
	u_{cf} [m/s]	4.030
	r	4.024
Camera (L/R)	Camera position [cm]	12
	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 2 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	1.075x1.075 (67.237 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 25 \mu\text{s}$
	Jet point ($\phi_j \geq 0.01$)	6523

กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\theta = \pm 165^\circ$ (I165) ที่ $r = 4$ สำหรับ (A) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง และ (B) กรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในส่วนของเจ็ตและกระแสลมขวาง

ตารางที่ 5 I165: $x/rd = 0.5$

General	x/rd	0.5
	Tatm [oC]	31.3
	Patm [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer) (A) and (B)	P [psig]	15
	No. of nozzle	3
Seeding (six jet atomizer) Only (B)	P [psig]	60
	No. of nozzle	6
Jet & Crossflow	V_j [m/s]	16.22
	ucf [m/s]	4.030
	r	4.024
Camera (L/R)	Camera position [cm]	0 (minimum)
	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 2.75 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	0.961x0.961 (60.116 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 15 \mu\text{s}$
	Jet point ($\phi_j \geq 0.01$)	7308

ตารางที่ 6 I165: $x/rd = 0.75$

General	x/rd	0.75
	Tatm [oC]	31.4
	Patm [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer) (A) and (B)	P [psig]	15
	No. of nozzle	3
Seeding (six jet atomizer) Only (B)	P [psig]	60
	No. of nozzle	6
Jet & Crossflow	V_j [m/s]	16.22
	u_{cf} [m/s]	4.030
	r	4.024
Camera (L/R)	Camera position [cm]	0 (minimum)
	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 3 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	0.972x0.972 (60.773 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 15 \mu\text{s}$
	Jet point ($\phi_j \geq 0.01$)	8766

ตารางที่ 7 I165: $x/rd = 1.0$

General	x/rd	1.0
	Tatm [oC]	32.1
	Patm [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer) (A) and (B)	P [psig]	18
	No. of nozzle	3
Seeding (six jet atomizer) Only (B)	P [psig]	60
	No. of nozzle	6
Jet & Crossflow	V_j [m/s]	16.22
	u_{cf} [m/s]	4.030
	r	4.024
Camera (L/R)	Camera position [cm]	0 (minimum)
	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 3 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	0.933x0.933 (58.338 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 20 \mu\text{s}$
	Jet point ($\phi_j \geq 0.01$)	10785

ตารางที่ 8 I165: $x/rd = 1.5$

General	x/rd	1.5
	Tatm [°C]	31.6
	Patm [mbar]	101.4
Laser	Thickness [mm]	2
Seeding (six jet atomizer) (A) and (B)	P [psig]	20
	No. of nozzle	3
Seeding (six jet atomizer) Only (B)	P [psig]	60
	No. of nozzle	6
Jet & Crossflow	V_j [m/s]	16.22
	u_{cf} [m/s]	4.030
	r	4.024
Camera (L/R)	Camera position [cm]	12
	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/2.8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 2 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	1.075x1.075 (67.237 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 25 \mu\text{s}$
	Jet point ($\phi_j \geq 0.01$)	9873

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ภัทรพล ศุภมงคล เกิดวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2536 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2553 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2557 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2558

