

ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้พลังงานของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลัก
ต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวาง

นายเอกณัฐ พฤกษ์วัฒนา

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 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of the leeward-vertical control jet to main jet mass flowrate ratio
on entrainment of a jet in crossflow

Mr. Aekanut Pruekwatana



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 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้พลังงานของเชื้อเพลิงตาม
ตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลักต่อการเหนี่ยวนำการ
ผสมของเจ็ดในกระแสลมขวาง

โดย

นายเอกณัฐ พุกษ์วัฒนา

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.อศิ บุญจิตราดุลย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สร้อย ศาลากิจ)

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

เอกณัฐ พุกขวิวัฒน์ : ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ตหลักต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Effects of the leeward-vertical control jet to main jet mass flowrate ratio on entrainment of a jet in crossflow) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อติ บุญจิตราดุลย์, 273 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ตหลักต่อการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) และคุณลักษณะของเจ็ตอีก 2 ปริมาณ ได้แก่ เส้นทางการเดิน และค่า circulation ของเจ็ตในกระแสลมขวาง ในการนี้เพื่อให้สามารถประเมินวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Volumetric Entrainment Ratio, E), คุณลักษณะ, และโครงสร้างของเจ็ตที่เกิดจากส่วนผสมของเจ็ตหลักเท่านั้นไม่รวมส่วนของกระแสลมขวางบริสุทธิ์ได้โดยตรง งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่ไปกับการไล่อินทิเกรตตามการไหลเฉพาะเจ็ตหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในการไหลอื่น งานวิจัยนี้ทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลของเจ็ตหลัก (r) เท่ากับ 4 ตัวเลข เรย์โนลด์สของกระแสลมขวาง (Re_{cp}) เท่ากับ 3,100 การเก็บข้อมูลจะกระทำที่ระยะขนาดตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, และ 1.5 สำหรับกรณีที่ทำการศึกษาเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (Leeward-Vertical Control Jet, LVJ) นั้น จะทำการฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) เท่ากับ 3.8%, 6%, 8%, 10%, และ 13% ที่ตำแหน่งตามระยะการไหล x/rd เท่ากับ 0.25 ผลการศึกษาพบว่ากรณีฉีดเจ็ตควบคุมจะส่งเสริมให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร เส้นทางการเดิน และค่า circulation ของเจ็ตเพิ่มสูงขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของ r_m จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร เส้นทางการเดิน และค่า circulation ของเจ็ตเพิ่มสูงขึ้นด้วย สำหรับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 13% จะส่งผลให้ค่า E เพิ่มขึ้นได้สูงสุดถึง 1.86 เท่าของกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมที่ระยะขนาดตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 1.5 นอกเหนือจากนั้นเพื่อที่จะศึกษาหาขนาดตัวใหม่ทีนอกเหนือจากจะสามารถ collapse ผลของ r ของเจ็ตในกระแสลมขวางกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมได้แล้วยังสามารถ collapse ผลของ r_m ในกรณีฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมได้อีกด้วย งานวิจัยนี้จึงปรับปรุงและพัฒนา scaling-power law ที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) ซึ่งเขียน scaling law ของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติในรูป $\Pi_q = q/S_q(r)$ เมื่อ q คือปริมาณทางฟิสิกส์มีมิติ และ $S_q(r)$ คือมาตรวัดที่สามารถ collapse ผลของ r ที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมได้ และพบความสัมพันธ์ของการพัฒนาตัวของ Π_q ตามระยะการไหล x/rd ในรูป power law กล่าวคือ $\Pi_q = A_q(x/rd)^{B_q}$ โดยที่ A_q และ B_q เป็นสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ (ไม่ขึ้นกับพารามิเตอร์ r แต่ยังคงขึ้นกับพารามิเตอร์ r_m) ผลการศึกษาพบ scaling law ใหม่ที่นอกเหนือจากสามารถ collapse ผลของ r ได้แล้วยังสามารถ collapse ผลของ r_m ได้ด้วย โดยจะอยู่ในรูป $\Pi_q'' = \Pi_q / S''(r_m x/rd)$ เมื่อ $S''(r_m x/rd) = s_A(r_m) s_B(r_m x/rd)$ เป็นมาตรวัดใหม่ของ Π_q ที่สามารถ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางในกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมได้ โดยที่พจน์ $s_A(r_m)$ และ $s_B(r_m x/rd)$ คือผลของ r_m ที่มีต่อสัมประสิทธิ์ A_q และ B_q ตามลำดับ การประยุกต์ใช้ scaling law ใหม่ ($\Pi_q'' = \Pi_q / S''(r_m x/rd)$) จะสามารถลด scatter (นิยามจากอัตราส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูล) ของ Π_q จาก 16.6%-42.2% (แสดงเฉพาะค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุด) เป็น scatter ของ Π_q'' ซึ่งจะอยู่ในช่วง 1.84%-4.90% นอกจากนี้ยังพบว่า power-law model fit ซึ่งอยู่ในพอร์ม $\Pi_q'' = A_q''(x/rd)^{B_q''}$ โดยที่ A_q'' และ B_q'' เป็นสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ (ไม่ขึ้นกับพารามิเตอร์ r และ r_m) สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ Π_q'' ตามระยะการไหล x/rd ได้เป็นอย่างดี

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970416121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: JET IN CROSSFLOW / LVCJ / ENTRAINMENT / SCALING LAWS

AEKANUT PRUEKWATANA: Effects of the leeward-vertical control jet to main jet mass flowrate ratio on entrainment of a jet in crossflow. ADVISOR: ASSOC. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA, Ph.D., 273 pp.

Effects of the leeward-vertical control jet to main jet mass flowrate ratio (r_m) on jet volumetric entrainment ratio (E), jet streamwise vorticity trajectory, and jet circulation of a jet in crossflow are investigated. In order to experimentally and directly determine jet volumetric entrainment ratio and other jet-fluid mixture properties, the stereoscopic particle image velocimetry (SPIV) together with main-jet-fluid only seeding scheme is employed. As a result, jet properties in this work refer to jet-fluid mixture properties without contribution from pure crossflow property. The experiment is conducted with the effective velocity ratio (r) of 4 and the crossflow Reynolds number (Re_{cf}) of 3,100. For cases of controlled jets in crossflow (cJICFs), a leeward-vertical control jet (LVCJ) is steadily activated at the downstream position $x/rd = 0.25$ with the leeward-vertical control jet to main jet mass flowrate ratios (r_m) of 3.8%, 6%, 8%, 10%, and 13%. The results show that the leeward-vertical control jet can be used to promote jet volumetric entrainment ratio (E), and increase jet penetration and jet circulation. In addition, it is found that as r_m increases, jet volumetric entrainment ratio (E), jet streamwise vorticity trajectory and jet circulation also increase. In order to unify the results at various r_m , we investigate new scaling laws, which can not only collapse the effects of r (for JICFs) but can also collapse the effects of the leeward-vertical control jet to main jet mass flowrate ratio (r_m) (for JICFs and cJICFs), by modifying the original scaling-power laws for JICFs proposed by Pruekwatana *et al.* (2016). These original scaling laws are in the form of $\pi_q = q/S_q(r)$, where q is a dimensional quantity of interest and $S_q(r)$ is the appropriate scale for q that can collapse the effects of r for JICFs, but not yet r_m for cJICFs. In Pruekwatana *et al.* (2016)'s original scaling laws, it was found that the power-law model fit of the form $\pi_q = A_q(x/rd)^{B_q}$, where A_q and B_q are constants (with respect to r , but not yet r_m), can describe the development of π_q along the downstream distance x/rd of JICFs well. When the LVCJ is applied, however, the original scaling laws can not collapse the effects of r_m and the new scaling laws are required. In this work, it is found that the appropriate scaling laws for all three jet-fluid mixture properties, which can not only collapse the effects of r (for JICFs) but also the effects of r_m (for JICFs and cJICFs), are in the form of $\pi_q'' = \pi_q / S''(r_m, x/rd)$ where $S''(r_m, x/rd) = s_A(r_m)s_B(r_m, x/rd)$ is the new scale for π_q , $s_A(r_m)$ is the effect of r_m on A_q , and $s_B(r_m, x/rd)$ is the effect of r_m on B_q . In these new scaling laws, it is found that the effects of r_m on all three jet-fluid mixture properties can be reasonably well collapsed with the overall scatters (measured with the mean-normalized standard deviation) with respect to the original π_q reduced from 16.6%-42.2% (overall from minimum to maximum) to the overall scatters with respect to the new π_q'' of 1.84%-4.90%. In addition, it is found that the power-law model fit of the form $\pi_q'' = A_q''(x/rd)^{B_q''}$, where A_q'' and B_q'' are now constants (with respect to both r and r_m), can describe the development of π_q'' along the normalized downstream streamwise distance x/rd well.

Department: Mechanical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ตลอดจนคณาจารย์ที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อศิ บุญจิตราดุลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ท่านยังคอยให้ความรู้ผู้จัดทำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องกระบวนการคิดวิเคราะห์อย่างเป็นระบบเพื่อให้สามารถเขียนและสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งทักษะเหล่านี้เองจะเป็นส่วนสำคัญที่จะหล่อหลอมให้บัณฑิตที่สำเร็จออกไปนั้นมีความรู้และความรอบคอบคิดเป็นระบบและคิดอย่างชัดเจนเพื่อเป็นวิศวกรที่ดีและมีคุณภาพที่ดีต่อไป

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย รศ.ดร.บุญชัย เลิศนุวัฒน์, รศ.ดร.เวชพงศ์ ชูติชูเดช, อาจารย์ ดร.สร้อย ศาลากิจ ที่ได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ นายอินทกานต์ ณ ตะกั่วทุ่ง ที่มีส่วนช่วยเหลือและให้คำปรึกษาต่าง ๆ ซึ่งทำให้ในทุกขั้นตอนของการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ราบรื่นและสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่สาว ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนผู้จัดทำในด้านต่าง ๆ ด้วยดีอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผู้จัดทำมีกำลังใจและไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้นตลอดมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทฉบับนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฑ
สารบัญรูปภาพ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 แรงจูงใจ	4
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	7
1.6 แผนการดำเนินงานของโครงการ.....	8
บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	9
2.1 ปริมาณที่สำคัญของเจ็ตในกระแสมขวาง	9
2.1.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล	9
2.1.2 ตัวเลขเรย์โนลด์ของเจ็ตและกระแสมขวาง.....	10
2.2 การศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวาง.....	11
2.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของเจ็ตในกระแสมขวาง	11
2.2.2 กระบวนการเกิดและพัฒนาตัวของ Counter-rotating vortex pair (CVP).....	11
2.2.3 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง (Entrainment mechanism)	12
2.2.4 เส้นทางเดินของเจ็ต.....	14

2.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสม.....	16
2.3 การปรับแต่งและควบคุมคุณลักษณะของเจ็ต	17
2.3.1 การกระตุ้นโดยไม่ใช้พลังงานกระตุ้น (Passive control).....	17
2.3.2 การกระตุ้นโดยการใช้พลังงานกระตุ้น (Active control).....	18
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎี	21
3.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Volumetric Entrainment Ratio, E)	22
3.2 ปัญหาของการศึกษาประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ตใน กระแสมวลในออดีตและการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้.....	30
3.2.1 การแก้ปัญหาในการวัดองค์ประกอบของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตหลักด้วย เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) หลายจุดในระนาบ ตัดขวางพร้อมกัน	30
3.2.2 การแก้ปัญหาในการระบุขอบเขตของส่วนผสมของเจ็ตหลักออกจากกระแสมวล บริสุทธิ์รอบข้าง	31
3.3 การประเมินวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตที่ผ่านระนาบตัดขวางเฉลี่ยเทียบกับ เวลา	32
3.4 ค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสม	35
3.5 การศึกษาโครงสร้างของการไหล	37
บทที่ 4 ชุดการทดลองและการทดลอง	41
4.1 พิกัดของการทดลอง	41
4.2 ชุดทดลอง.....	41
4.2.1 อุโมงค์ลม (wind tunnel).....	41
4.2.2 ชุดหัวเจ็ตหลัก	43
4.2.3 ชุดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (leeward-vertical control jet, LVCJ).....	43
4.3 ชุดเครื่องมือวัดความเร็ว Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV)	44

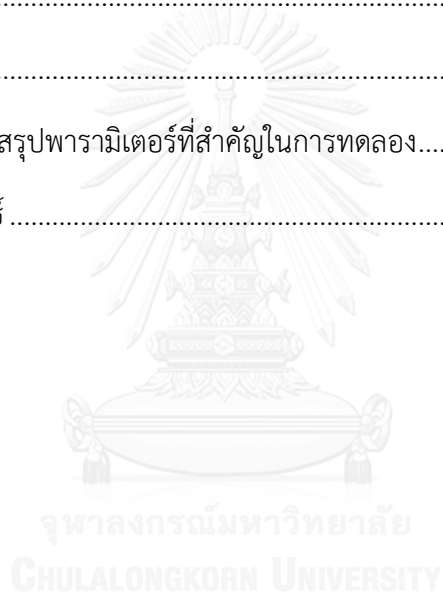
4.3.1 ชุดอุปกรณ์ในการบันทึกข้อมูล.....	44
4.3.2 การประมวลผลหาค่าสนามความเร็วโดยโปรแกรม TSI™ Insight 4G	45
4.4 การวัดและเครื่องมือวัด.....	46
4.4.1 การวัดความเร็วกระแสลมขวางและความเร็วของเจ็ตหลัก	46
4.3.2 การวัดอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม.....	46
4.4.3 จำนวนการเก็บข้อมูลในการทดลอง	47
4.4.4 การสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง SPIV กับ Pitot tube.....	47
4.5 สรุปพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการทดลอง	48
บทที่ 5 โครงสร้างของเจ็ต.....	49
5.1 ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ.....	50
5.2 ผลของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCJ) ต่อโครงสร้างของเจ็ต	50
5.2.1 ผลของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCJ) ต่อความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่จุดใดๆ (ϕ_j)	51
5.2.2 เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$) หรือ In-plane vector	54
5.2.3 ผลของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCJ) ต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$)	56
5.2.4 ผลของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCJ) ต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน transverse ไร้มิติ ($V_{j,y} / u_{cf}$)	58
5.2.5 ผลของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCJ) ต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน spanwise ไร้มิติ ($V_{j,z} / u_{cf}$)	60
5.2.6 ผลของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCJ) ต่อการกระจายตัวของ vorticity ในแกน streamwise ไร้มิติ ($\omega_{j,x} d / u_{cf}$)	62

บทที่ 6 ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้เงินของเงินลงทุนตามแนวคิดด้านท้ายลมต่อเงิน หลักต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ประสิทธิภาพของการใช้เงินลงทุน เส้นทาง เดิน และค่า Circulation ของเงิน.....	65
6.1 การสอบทวนค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกับงานวิจัยก่อนหน้า	69
6.2 ผลของการกำหนดชนิดของของไหลที่นำมาฉีดเป็นเงินลงทุนต่อค่าอัตราส่วนการ เหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร	70
6.3 ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้เงินของเงินลงทุนต่อเงินหลักต่ออัตราส่วนการ เหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร	72
6.4 การเปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรระหว่างการประยุกต์ใช้เงิน ลงทุนตามแนวคิดด้านท้ายลม (LVCJ) กับการประยุกต์ใช้เงินลงทุนตามแนวเส้นรอบวง (ACJ)	74
6.5 ผลของการกำหนดชนิดของของไหลที่นำมาฉีดเป็นเงินลงทุนต่อค่าประสิทธิภาพของการ ใช้เงินลงทุนตามแนวคิดด้านท้ายลม	78
6.6 ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้เงินของเงินลงทุนต่อเงินหลักต่อประสิทธิภาพของการ ใช้เงินลงทุนตามแนวคิดด้านท้ายลม	80
6.7 ผลของเงินลงทุนต่อเส้นทางเดินของเงิน.....	82
6.8 ผลของเงินลงทุนต่อค่า circulation	83
บทที่ 7 มาตรฐานสมบัติของเงินและการพัฒนาตัวของคุณสมบัติร่วมของเงิน.....	86
7.1 ผลการศึกษาของ Pruekwatana <i>et al.</i> (2016)	87
7.2 สัญลักษณ์และคำนิยาม.....	89
7.2.1 การพิจารณาชุดข้อมูล.....	89
7.2.2 การกำหนดสัญลักษณ์.....	90
7.3 พารามิเตอร์ชี้วัด collapsibility (ε) และ goodness of fit (R^2)	91
7.3.1 พารามิเตอร์ชี้วัด collapsibility (ε)	91
7.3.2 พารามิเตอร์ชี้วัด goodness of fit (R^2)	92

7.4 การสเกลคุณลักษณะต่างๆ ของเจ็ตในกระแสมวลขวางด้วยมาตรวัดเดียวกับ Pruekwatana <i>et al.</i> (2016)	92
7.5 วิธีการและขั้นตอนในการหาตัวแปรไร้มิติ	97
7.6 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_q และ B_q และการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์	103
7.7 ผลการศึกษาการ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (r_m) ต่อคุณลักษณะต่างๆ ของเจ็ตในกระแสมวลขวาง	105
7.7.1 การประยุกต์ใช้มาตรวัด s_A เพื่อนำไปสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q หรือปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi'_q = \pi_q/s_A$	106
7.7.2 การประยุกต์ใช้มาตรวัด s_B เพื่อนำไปสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π'_q หรือปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi''_q = \pi'_q/s_B = \pi_q/s_A s_B$	111
7.8 สรุป scaling law และ power-law model fit ที่เหมาะสมที่สามารถ collapse ผลของ r_m ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกรณีเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมได้ในงานวิจัยนี้	118
7.8.1 เมื่อประยุกต์ใช้มาตรวัด s_A กับ π_q หรือปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi'_q = \pi_q/s_A$	118
7.8.2 เมื่อประยุกต์ใช้มาตรวัด s_B กับ π'_q หรือปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi''_q = \pi'_q/s_B = \pi_q/s_A s_B$	121
7.8.3 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ A_q และ B_q จาก power-law model fit	124
7.9 บทสรุปการ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ที่มีต่อคุณลักษณะต่างๆ ของเจ็ตในกระแสมวลขวาง	126
บทที่ 8 อภิปรายผลการทดลอง	128
8.1 ข้อสมมติฐานในการประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร	128
8.1.1 การวิเคราะห์เส้นทางเดินของเจ็ตเพื่อประเมินความถูกต้องของข้อสมมติฐาน	129
8.1.2 การวิเคราะห์หลักฐานเชิงโครงสร้างของเจ็ตเพื่อประเมินความถูกต้องของข้อสมมติฐาน	134

บทที่ 9 สรุปผลการทดลอง.....	136
9.1 โครงสร้างของส่วนผสมของเจ็ดและผลของเจ็ดควบคุมต่อโครงสร้างของส่วนผสมของเจ็ด.	137
9.1.1 ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด (ϕ_j)	137
9.1.2 เวกเตอร์ในระนาบตัดขวางการไหลเฉลี่ยไร้มิติ ($\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$) หรือ In-plane vector	138
9.1.3 ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$) .	138
9.1.4 ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน transverse ไร้มิติ ($V_{j,y} / u_{cf}$) ...	139
9.1.5 ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise ไร้มิติ ($V_{j,z} / u_{cf}$)	140
9.1.6 Vorticity ของส่วนผสมของเจ็ดในแกน streamwise ไร้มิติ ($\omega_{j,x} d / u_{cf}$)	140
9.2 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลักต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ประสิทธิภาพของการใช้เจ็ดควบคุมเส้นทางเดิน และค่า circulation ของเจ็ด	141
9.2.1 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลักต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร	141
9.2.2 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลักต่อค่าประสิทธิภาพของการใช้เจ็ดควบคุม	142
9.2.3 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลักต่อเส้นทางเดินของเจ็ด	142
9.2.4 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลักต่อค่า circulation ของเจ็ด.....	143
9.3 การกำหนดมาตรวัดต่อคุณสมบัติของเจ็ด.....	143
ประมวลตาราง	148
ประมวลรูปภาพ	163
บทที่ 1.....	163
บทที่ 2.....	164

บทที่ 3.....	179
บทที่ 4.....	187
บทที่ 5.....	195
บทที่ 6.....	229
บทที่ 7.....	241
บทที่ 8.....	263
รายการอ้างอิง	264
รายการอ้างอิง	265
ภาคผนวก ก : ตารางสรุปพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทดลอง.....	268
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	273



สารบัญตาราง

ตารางที่ 6.1	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกับผลการทดลองจากงานวิจัยภายใน FMRL และ Yuan and Street (1998)	148
ตารางที่ 6.2	ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมและกรณีฉีดเจ็ดควบคุม เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) และสัมพันธ์จาก power-law model fit.....	149
ตารางที่ 6.3	ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมและกรณีฉีดเจ็ดควบคุม เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) และสัมพันธ์จาก power-law model fit...	149
ตารางที่ 6.4	ค่าประสิทธิผลของการฉีดเจ็ดควบคุม เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (η_1)	150
ตารางที่ 6.5	ค่าประสิทธิผลของการฉีดเจ็ดควบคุม เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) เมื่อใช้ค่า E_{JICF} ที่ค่า r เท่ากับ 4 ในการเปรียบเทียบ ($\eta_{2,1}$)	150
ตารางที่ 6.6	ค่าประสิทธิผลของการฉีดเจ็ดควบคุม เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) เมื่อใช้ค่า $E_{JICF, mod r}$ ในการเปรียบเทียบ ($\eta_{2,2}$)	151
ตารางที่ 6.7	เส้นทางเดินไร้มติของเจ็ดซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาด vorticity ของส่วนผสมของเจ็ดหลักในแนวแกน streamwise ในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม และกรณีฉีดเจ็ดควบคุม และสัมพันธ์จาก power-law model fit	151
ตารางที่ 6.8	ค่า circulation ไร้มติของเจ็ดในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมและกรณีฉีดเจ็ดควบคุม และสัมพันธ์จาก power-law model fit	152

ตารางที่ 7.1 ค่าปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_{E_1} และสัมประสิทธิ์จาก power-law model fit .. 153

ตารางที่ 7.2 ค่าปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_{E_2} และสัมประสิทธิ์จาก power-law model fit .. 154

ตารางที่ 7.3 ค่าปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_y และสัมประสิทธิ์จาก power-law model fit ... 155

ตารางที่ 7.4 ค่าปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_T และสัมประสิทธิ์จาก power-law model fit ... 156

ตารางที่ 7.5 สรุปสัมประสิทธิ์ของ model fit เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ A_q .157

ตารางที่ 7.6 สรุปสัมประสิทธิ์ของ model fit เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ B_q .158

ตารางที่ 7.7 ค่า scatter ของชุดข้อมูลจากการประยุกต์ใช้มาตรวัด s_A กับปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q โดยที่ $s_A = A_q(r_m)/A_q(0)$ 159

ตารางที่ 7.8 ค่า scatter ของชุดข้อมูลจากการประยุกต์ใช้มาตรวัด $s_A s_B$ กับปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q โดยที่ $s_A = A_q(r_m)/A_q(0)$ และ $s_B = (x/rd)^{B_q(r_m)-B_q(0)}$ 160

ตารางที่ 7.9 สรุป scaling law และสัมประสิทธิ์จาก power-law model fit ของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ $\pi'_q = \pi_q/s_A$ โดยที่ $s_A = A_q(r_m)/A_q(0)$ 161

ตารางที่ 7.10 สรุป scaling law และสัมประสิทธิ์จาก power-law model fit ของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ $\pi''_q = \pi'_q/s_B = \pi_q/s_A s_B$ โดยที่ $s_A = A_q(r_m)/A_q(0)$ และ $s_B = (x/rd)^{B_q(r_m)-B_q(0)}$ 162

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1	การเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้ามาผสมกับตัวเจ็ต.....	163
รูปที่ 2.1	โครงสร้างของ vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Fric and Roshko, 1994).....	164
รูปที่ 2.2	Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวขึ้นระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางที่บริเวณ ด้านข้างปากทางออกของเจ็ต (Yuan <i>et al.</i> , 1999).....	164
รูปที่ 2.3	การพับตัวของ vortex ring ทำให้เกิดโครงสร้าง CVP (ก) มุมมอง isometric ของ jet shear layer vortex ring (ข) Schematic diagram ของการเปลี่ยนตำแหน่ง ของ shear layer vorticity (Cortelezzi and Karagozian, 2001).....	165
รูปที่ 2.4	การเกิดโครงสร้าง CVP จากการพัฒนาตัวของ vortex loop (Lim <i>et al.</i> , 2001).....	166
รูปที่ 2.5	วิวัฒนาการของ streamlines ในการก่อตัวของ Kelvin-Helmholtz roller (Sau <i>et al.</i> , 2004).....	166
รูปที่ 2.6	Average magnitude of vorticity field (Cortelezzi and Karagozian, 2001)	167
รูปที่ 2.7	Instantaneous of streamline ซึ่งแสดงถึงการที่โครงสร้าง horseshoe vortex ถูกเหนี่ยวนำให้ไปผสมกับเจ็ตผ่านช่องระหว่างคู่ CVP (Sau <i>et al.</i> , 2004).....	168
รูปที่ 2.8	ภาพวาดซึ่งแสดงถึงกลไกการเหนี่ยวนำการผสมโดยโครงสร้าง CVP ใน ระบาย ตัดขวางของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Sornphrom and Bunyajitradulya, 2016)..	169
รูปที่ 2.9	บริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมสูง (ก) กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (ข) กรณีฉีดเจ็ต ควบคุมที่ตำแหน่งมุม ± 165 องศา (Na Takuathung and Bunyajitradulya, 2016).....	169
รูปที่ 2.10	การสเกลเส้นทางเดินของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วย rd , d , และ r^2d (Smith and Mungal, 1998).....	170
รูปที่ 2.11	เส้นทางเดินของเจ็ตบนสเกล rd อยู่ในรูปแบบของ power law (Yuan and Street, 1998).....	171

รูปที่ 2.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\dot{V}_{jet}}{\dot{V}_0} - 1$ และ x / rd บน log-log scale (Yuan and Street, 1998).....	171
รูปที่ 2.13	ผลของการติด delta tab ที่มีต่อเส้นทางเดินของเจ็ต (Zaman and Fross, 1997).....	172
รูปที่ 2.14	ชุดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jet) (Kornsri <i>et al.</i> , 2009).....	173
รูปที่ 2.15	ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อเส้นทางเดินของเจ็ต (Kornsri <i>et al.</i> , 2009).....	174
รูปที่ 2.16	ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม เชิงปริมาตร (Witayaprapakorn, 2013).....	174
รูปที่ 2.17	ผลของอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อค่า อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Chaikasetzin <i>et al.</i> , 2014).....	175
รูปที่ 2.18	(ก) ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรตามแนวการไหล (ข) ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อค่าประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำ การผสม (Wangkiat <i>et al.</i> , 2015).....	176
รูปที่ 2.19	ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม เชิงปริมาตร (E) (Tekhuad, 2015).....	177
รูปที่ 2.20	ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อค่าประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการ ผสม (η) (Tekhuad, 2015).....	178

รูปที่ 3.1 ปริมาตรควบคุมแสดงการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวางกรณีไม่มีการฉีดเจ็ดควบคุม 179

รูปที่ 3.2 ปริมาตรควบคุมแสดงการเหนี่ยวนำการผสมกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในกระแสมขวาง (F_2) และไม่ใช้ของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (F_1) 180

รูปที่ 3.3(ก) ปริมาตรควบคุมแสดงการเหนี่ยวนำการผสมกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) ในกรณีที่มีการไหลของเจ็ดหลักและการไหลของเจ็ดควบคุมยังคงแยกกันอย่างอิสระที่ระนาบตัดขวางการไหลที่ทำการประเมินวัด E 181

รูปที่ 3.3(ข) ปริมาตรควบคุมแสดงการเหนี่ยวนำการผสมกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) ในกรณีที่เจ็ดควบคุมถูกเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมกับเจ็ดหลักเฉพาะบางส่วน ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งยังไม่ถูกเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมกับเจ็ดหลักที่ระนาบตัดขวางการไหลที่ทำการประเมินวัด E 182

รูปที่ 3.3(ค) ปริมาตรควบคุมแสดงการเหนี่ยวนำการผสมกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) ในกรณีที่เจ็ดควบคุมถูกเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมกับเจ็ดหลักหมดแล้วที่ระนาบตัดขวางการไหลที่ทำการประเมินวัด E 183

รูปที่ 3.3(ง) ปริมาตรควบคุมของเจ็ดควบคุมก่อนที่จะถูกเหนี่ยวนำเข้าไปผสมกับเจ็ดหลักซึ่งเป็นปริมาตรควบคุมย่อยของรูปที่ 3.3(ค) 184

รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบระหว่างภาพอนุภาคติดตามการไหล ณ ขณะใดๆ (ซ้าย) และภาพเวกเตอร์ความเร็ว ณ ขณะใดๆ (ขวา) (ก) การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ดหลักและกระแสมขวาง (ข) การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดหลักเท่านั้น (Sornphrom and Bunyajitradulya, 2016)..... 185

รูปที่ 3.5 แผนภูมิแสดงชนิดของของไหลที่เป็นไปได้ที่จะปรากฏ ณ ตำแหน่ง \bar{x} และเวลา t (ก) กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) (ข) กรณีฉีดเจ็ดควบคุม (CJICF)..... 186

รูปที่ 4.1 แผนภาพจำลองภาพรวมของการทดลองในงานวิจัยนี้ 187

รูปที่ 4.2 พิกัดอ้างอิงในงานวิจัยนี้ 187

รูปที่ 4.3	อุโมงค์ลมภายในห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Soupramongkol, 2015).....	188
รูปที่ 4.4	พัดลมหอยโข่งแบบ backward curve airfoil blades (Soupramongkol, 2015)	188
รูปที่ 4.5	เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (ABB™ model ACS401002032, ขนาด 50 Hz, ค่า ความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz) (Soupramongkol, 2015).....	189
รูปที่ 4.6	Schematic diagram ของอุโมงค์ลม (Soupramongkol, 2015).....	189
รูปที่ 4.7	ส่วนประกอบของชุดเจ็ตหลัก	190
รูปที่ 4.8	ส่วนประกอบของชุดเจ็ตควบคุม.....	190
รูปที่ 4.9	ภาพจำลองเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านซ้าย.....	191
รูปที่ 4.10	เครื่องกำเนิดเลเซอร์ชนิด ND:YAG ยี่ห้อ New Wave Research™ (model Solo 200XT ซึ่งมีกำลังสูงสุด 200 mJ/pulse ที่ความยาวคลื่น 532 nm).....	192
รูปที่ 4.11	ชุดกระจกสะท้อนแสงที่ผูกติดตั้งไว้ในแขนส่งเลเซอร์ (laser light arm, model 610015).....	192
รูปที่ 4.12	เครื่องปล่อยอนุภาคติดตามการไหล TSI™ six-jet atomizer (TSI™ model 9306A).....	193
รูปที่ 4.13	กล้อง CCD.....	193
รูปที่ 4.14	Synchronizer model 610035.....	194
รูปที่ 4.15	ผลการสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง SPIV กับ pitot tube และ Curve fitting ช่วงสีฟ้าคือความเร็วต่ำ และช่วงสีส้มคือความเร็วสูง (Wongthongsiri, 2014)	194
รูปที่ 5.1(ก)	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต (ϕ_j) ที่ระนาบตัดขวาง $x/rd = 0.25$	195
รูปที่ 5.1(ข)	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต (ϕ_j) ที่ระนาบตัดขวาง $x/rd = 0.50$	196

รูปที่ 5.1(ค) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด (ϕ_j) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 0.75$	197
รูปที่ 5.1(ง) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด (ϕ_j) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 1.0$	198
รูปที่ 5.1(จ) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด (ϕ_j) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 1.5$	199
รูปที่ 5.2(ก) การพัฒนาตัวของเจ็ดกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม โดยที่เป็นการพล็อตซ้อนทับกันระหว่าง	200
รูปที่ 5.2(ข) การพัฒนาตัวของเจ็ดกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ $r_m = 3.8\%$ โดยที่เป็นการพล็อตซ้อนทับกันระหว่าง	201
รูปที่ 5.2(ค) การพัฒนาตัวของเจ็ดกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ $r_m = 6\%$ โดยที่เป็นการพล็อตซ้อนทับกันระหว่าง.....	202
รูปที่ 5.2(ง) การพัฒนาตัวของเจ็ดกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ $r_m = 8\%$ โดยที่เป็นการพล็อตซ้อนทับกันระหว่าง.....	203
รูปที่ 5.2(จ) การพัฒนาตัวของเจ็ดกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ $r_m = 10\%$ โดยที่เป็นการพล็อตซ้อนทับกันระหว่าง	204
รูปที่ 5.2(ฉ) การพัฒนาตัวของเจ็ดกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ $r_m = 13\%$ โดยที่เป็นการพล็อตซ้อนทับกันระหว่าง	205
รูปที่ 5.2(ช) เปรียบเทียบเวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล ($\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$) หรือ In-plane vector กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ r_m เท่ากับ 13% ที่ระนาบตัดขวางการไหล $x / rd = 0.25$	206
รูปที่ 5.3(ก) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 0.25$	207
รูปที่ 5.3(ข) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 0.50$	208
รูปที่ 5.3(ค) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 0.75$	209

รูปที่ 5.3(ง) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 1.0$	210
รูปที่ 5.3(จ) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 1.5$	211
รูปที่ 5.3(ฉ) เจ็ดควบคุมประพืดตัวเหมือนทรงกระบอกที่วางขวางแนวทางการไหลของเจ็ด	212
รูปที่ 5.3(ช) การเปลี่ยนแปลงทิศทางของเวกเตอร์ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเมื่อทำการ ฉีดเจ็ดควบคุม.....	212
รูปที่ 5.4(ก) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน transverse ไร้มิติ ($V_{j,y} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 0.25$	213
รูปที่ 5.4(ข) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน transverse ไร้มิติ ($V_{j,y} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 0.50$	214
รูปที่ 5.4(ค) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน transverse ไร้มิติ ($V_{j,y} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 0.75$	215
รูปที่ 5.4(ง) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน transverse ไร้มิติ ($V_{j,y} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 1.0$	216
รูปที่ 5.4(จ) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน transverse ไร้มิติ ($V_{j,y} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 1.5$	217
รูปที่ 5.4(ฉ) Surface contour แสดงการกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ย ตามแนวแกน transverse ไร้มิติ ($V_{j,y} / u_{cf}$) ในระนาบ $x/rd = 0.25$ กรณีไม่ ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ที่พล็อตซ้อนทับกับ.....	218
รูปที่ 5.5(ก) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยของส่วนผสมของเจ็ดตามแนวแกน spanwise ไร้ มิติ ($V_{j,z} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 0.25$	219
รูปที่ 5.5(ข) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise ไร้ มิติ ($V_{j,z} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 0.50$	220
รูปที่ 5.5(ค) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise ไร้ มิติ ($V_{j,z} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 0.75$	221

รูปที่ 5.5(ง)	การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise ไร้ มิติ ($V_{j,z} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 1.0$	222
รูปที่ 5.5(จ)	การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise ไร้ มิติ ($V_{j,z} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 1.5$	223
รูปที่ 5.6(ก)	การกระจายตัวของ vorticity ของส่วนผสมของเจ็ดไร้มิติในแกน streamwise ($\omega_{j,x} d / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 0.25$	224
รูปที่ 5.6(ข)	การกระจายตัวของ vorticity ของส่วนผสมของเจ็ดไร้มิติในแกน streamwise ($\omega_{j,x} d / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 0.50$	225
รูปที่ 5.6(ค)	การกระจายตัวของ vorticity ของส่วนผสมของเจ็ดไร้มิติในแกน streamwise ($\omega_{j,x} d / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 0.75$	226
รูปที่ 5.6(ง)	การกระจายตัวของ vorticity ของส่วนผสมของเจ็ดไร้มิติในแกน streamwise ($\omega_{j,x} d / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 1.0$	227
รูปที่ 5.6(จ)	การกระจายตัวของ vorticity ของส่วนผสมของเจ็ดไร้มิติในแกน streamwise ($\omega_{j,x} d / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 1.5$	228
รูปที่ 6.1	การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีไม่ฉีดเจ็ด ควบคุม (JICF) ที่ประกอบไปด้วย.....	229
รูปที่ 6.2	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณี.....	230
รูปที่ 6.3(ก)	ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อค่า อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็น เจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) และไม่เกี่ยวข้องกับของ ไหลในเจ็ดหลัก (F_1)	231
รูปที่ 6.3(ข)	ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อค่า อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็น เจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1)	232
รูปที่ 6.4(ก)	การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในกรณีไม่ฉีดเจ็ด ควบคุมในงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Tekhuad (2015) และสมการการประมาณ	

การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของ Pruekwatana *et al.* (2016) ที่ r เท่ากับ 4 233

รูปที่ 6.4(ข) การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรด้วยการประยุกต์ใช้
 เจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมและการประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้น
 รอบวงโดย Tekhuad (2015) 234

รูปที่ 6.5 ประสิทธิภาพของการใช้เจ็ดควบคุมที่ค่า $r_m = 13\%$ กรณี 235

รูปที่ 6.6(ก) ประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสมเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุม
 คือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (η_1) 236

รูปที่ 6.6(ข) ประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสมเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุม
 คือของไหลชนิดของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) เมื่อใช้ค่า E_{JCF} ที่ค่า r เท่ากับ 4 ใน
 การเปรียบเทียบ ($\eta_{2,1}$) 237

รูปที่ 6.6(ค) ประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสมเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุม
 คือของไหลชนิดของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) เมื่อใช้ค่า $E_{JCF, mod r}$ ในการเปรียบเทียบ
 ($\eta_{2,2}$) โดยในแต่ละ r_m จะมีค่า r_{mod} ดังนี้ 238

รูปที่ 6.7 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อเส้นทาง
 เดินไร้มิติของเจ็ด ซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาด vorticity ในแนวแกน
 streamwise 239

รูปที่ 6.8 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อ
 circulation ไร้มิติของเจ็ด 240

รูปที่ 7.1 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อ
 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็น
 เจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) และไม่เกี่ยวข้องกับของ
 ไหลในเจ็ดหลัก (F_1) 241

รูปที่ 7.2 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อ
 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็น
 เจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) 242

รูปที่ 7.3	ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อเส้นทางเดินของเจ็ตซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาด vorticity ของเจ็ตในแนวแกน streamwise	243
รูปที่ 7.4	ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อค่า circulation ของเจ็ต.....	244
รูปที่ 7.5	ผลของ r_m ที่มีต่อ A_{E_1} และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ A_{E_1}	245
รูปที่ 7.6	ผลของ r_m ที่มีต่อ A_{E_2} และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ A_{E_2}	246
รูปที่ 7.7	ผลของ r_m ที่มีต่อ A_y และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ A_y	247
รูปที่ 7.8	ผลของ r_m ที่มีต่อ A_r และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ A_r	248
รูปที่ 7.9	ผลของ r_m ที่มีต่อ B_{E_1} และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ B_{E_1}	249
รูปที่ 7.10	ผลของ r_m ที่มีต่อ B_{E_2} และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ B_{E_2}	250
รูปที่ 7.11	ผลของ r_m ที่มีต่อ B_y และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ B_y	251

- รูปที่ 7.12 ผลของ r_m ที่มีต่อ B_Γ และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ B_Γ 252
- รูปที่ 7.13 การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) และไม่เกี่ยวข้อง กับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi'_q = \pi_q/s_A$ 253
- รูปที่ 7.14 การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi'_q = \pi_q/s_A$ 254
- รูปที่ 7.15(ก) การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อเส้นทางเดินของเจ็ดซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาด vorticity ของเจ็ดในแนวแกน streamwise โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะ อยู่ในรูป $\pi'_q = \pi_q/s_A$ 255
- รูปที่ 7.15(ข) การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อเส้นทางเดินของเจ็ดซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาด vorticity ของเจ็ดในแนวแกน streamwise โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi'_q = \pi_q/s_A$ 256
- รูปที่ 7.16 การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อค่า circulation ของเจ็ด โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi'_q = \pi_q/s_A$ 257
- รูปที่ 7.17 การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) และไม่เกี่ยวข้อง กับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi''_q = \pi'_q/s_B = \pi_q/s_A s_B$ 258

- รูปที่ 7.18 การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ทควบคุมต่อเจ็ทหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ทควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ทหลัก (F_1) โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi_q'' = \pi_q' / s_B = \pi_q / s_A s_B$ 259
- รูปที่ 7.19(ก) การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ทควบคุมต่อเจ็ทหลัก (r_m) ต่อเส้นทางเดินของเจ็ทซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาด vorticity ของเจ็ทในแนวแกน streamwise โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi_q'' = \pi_q' / s_B = \pi_q / s_A s_B$ 260
- รูปที่ 7.19(ข) การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ทควบคุมต่อเจ็ทหลัก (r_m) ต่อเส้นทางเดินของเจ็ทซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาด vorticity ของเจ็ทในแนวแกน streamwise โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi_q'' = \pi_q' / s_B = \pi_q / s_A s_B$ 261
- รูปที่ 7.20 การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ทควบคุมต่อเจ็ทหลัก (r_m) ต่อค่า circulation ของเจ็ท โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi_q'' = \pi_q' / s_B = \pi_q / s_A s_B$ 262
- รูปที่ 8.1 การประมาณการพัฒนาตัวของเส้นทางเดินของเจ็ทหลักและเส้นทางเดินของเจ็ทควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 3.8%, 6%, 8%, 10%, และ 13% เพื่อประเมินความถูกต้องของข้อสมมติฐานในการประเมินวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ทควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ทหลัก 263

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เจ็ตในกระแสมวล (JICF) คือ กระแสการไหลของเจ็ตที่ถูกฉีดเข้าไปตั้งฉากกับกระแสมวล ขวาง เมื่อเจ็ตปะทะกับกระแสมวล ขวาง เจ็ตและกระแสมวล ขวาง จะเกิดปฏิสัมพันธ์กัน เป็นผลทำให้เจ็ต เกิดการเลี้ยวเข้าสู่แนวการไหลของกระแสมวล ขวาง และเกิดโครงสร้าง (Jet structure) และ คุณสมบัติต่างๆ เช่น การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) การผสม (Mixing) และเส้นทางเดิน ของเจ็ต (Jet trajectory) ซึ่งคุณลักษณะดังกล่าวมีผลต่อประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการ ประยุกต์ใช้เจ็ตในกระแสมวล ขวาง

เจ็ตในกระแสมวล ขวาง เป็นการไหลพื้นฐานที่พบได้ทั่วไปในงานทางวิศวกรรม อาทิ การฉีด เชื้อเพลิงเข้าผสมกับอากาศในห้องเผาไหม้ (ซึ่งคุณลักษณะที่สำคัญที่มีผลคือ Entrainment และ Mixing) การระบายความร้อนบริเวณผิวของใบพัดของ Gas turbine ด้วยเทคนิค Film cooling (Jet trajectory) และการกระจายของมลพิษจากปล่องควันตามโรงงานอุตสาหกรรม (Dispersion และ Jet trajectory) เป็นต้น ดังนั้นความรู้และความเข้าใจจากการศึกษาเจ็ตในกระแสมวล ขวางจึงเป็น ประโยชน์อย่างยิ่งแก่การปรับปรุงและพัฒนาสมรรถนะของอุปกรณ์ทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับเจ็ต ในกระแสมวล ขวาง

งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเจ็ตในกระแสมวล ขวางสามารถแบ่งออกได้เป็นสอง แนวทางหลัก แนวทางแรกคือ การศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมวล ขวาง และ แนวทางที่สองคือ การศึกษาการปรับแต่งและควบคุมคุณลักษณะ เช่น เส้นทางเดินและการเหนี่ยวนำ การผสมและการผสมของเจ็ตในกระแสมวล ขวาง เป็นต้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมวล ขวางเป็น ส่วนที่สำคัญที่ทำให้เข้าใจโครงสร้างและพฤติกรรมทางกายภาพของเจ็ตในกระแสมวล ขวางได้ดียิ่งขึ้น และยังเป็นแนวทางในการคิดค้นเทคนิคการปรับแต่งและควบคุมเจ็ตในกระแสมวล ขวางอีกด้วย ตัวอย่างของงานวิจัยที่จัดอยู่ในประเภทนี้ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมวล ขวางโดย Fric and Roshko (1994) ซึ่งพบว่า โครงสร้างหลักของเจ็ตในกระแสมวล ขวางมี 4 โครงสร้างหลัก ได้แก่ Jet shear layer, Horseshoe vortices, Wake structures และ Counter-rotating vortex pair (CVP) การศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ตและการผสมโดย Yuan and Street (1998) ด้วยวิธี Large-Eddy Simulation (LES) พบว่าเส้นทางเดินของเจ็ตและอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิง

ปริมาตรมีความสัมพันธ์กัน และยังพบว่าระยะ penetration ของเจ็ตตามแนว transverse มีความสัมพันธ์กับระยะตามแนว downstream ในช่วง $x > 0.8rd$ ในรูปแบบของ power law

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการปรับแต่งและควบคุมคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางในอดีตโดยส่วนมากจะเน้นไปที่การปรับแต่งและควบคุมคุณลักษณะของเจ็ตโดยการกระตุ้นการก่อตัวและการพัฒนาตัวของ flow shear layer ที่บริเวณรอบปากทางออกของเจ็ต ซึ่งหลักการดังกล่าวมีการประยุกต์ใช้หลายเทคนิคด้วยกัน เช่น การติด delta tab ที่บริเวณปากทางออกเจ็ต (Zaman and Foss (1997) และ Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005)) การควบคุมโดย swirling jet (Niederhaus *et al.* (1997), Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001), และ Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005)) และการใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง หรือ Azimuthal control jet (ACJ) (Kornsri *et al.* (2009), Witayaprapakorn (2013), และ Tekhuad (2015))

การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความพยายามที่จะปรับแต่งและควบคุมเส้นทางเดินและการผสมของเจ็ตในอดีตโดยใช้เทคนิคการใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jet, ACJ) ซึ่งริเริ่มโดย Kornsri *et al.* (2009) พบว่า การใช้เจ็ตควบคุมฉีดยทางด้าน leeward มีผลทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตสูงขึ้น ในทางกลับกันเมื่อใช้เจ็ตควบคุมฉีดยทางด้าน windward มีผลทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตต่ำลง โดยงานวิจัยดังกล่าวยังไม่สามารถวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Volumetric entrainment ratio) ได้เนื่องจากใช้ single hot wire anemometer ในการศึกษา เพื่อให้สามารถวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้โดยตรงและสามารถประเมินประสิทธิภาพของการใช้เจ็ตควบคุมต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร Witayaprapakorn (2013) จึงใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่ไปกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้น งานวิจัยนี้พบว่า การใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงฉีดยที่มุม ± 135 องศา (ด้าน leeward) มีผลทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรมีค่าสูงกว่าการใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงฉีดยที่มุม ± 15 องศา (ด้าน windward) และกรณีที่ไม่ฉีดยเจ็ตควบคุม การศึกษาวิจัยเพื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร โดยใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงถูกศึกษาเรื่อยมาอย่างต่อเนื่อง Tekhuad and Bunyajitradulya (2016) และ Soupramongkol (2015) พบว่าการใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงโดยการฉีดยที่มุม ± 165 องศา สามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้มากที่สุด (เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีไม่ฉีดยเจ็ตควบคุมเป็นจุดอ้างอิง) โดยที่สามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้มากกว่ากรณีไม่ฉีดยเจ็ตควบคุมประมาณ 40%

การศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมเป็นอีกหนึ่งประเด็นที่สำคัญของการศึกษาเจ็ตใน กระแสลมขวาง โดยที่ Cortelezzi and Karagozian (2001) ได้ศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสม ด้วยเทคนิค 3D vortex element simulation พบว่าโครงสร้าง counter rotating vortex pair (CVP) เกิดขึ้นจากการปรับตัวของ vortex ring ซึ่งอยู่บริเวณปากทางออกของเจ็ตและยังพบอีกว่า กระแสลมขวางบริสุทธิ์ถูกเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมกับเจ็ตผ่านช่องระหว่างคู่ CVP ทางด้านหลังเจ็ต ต่อมา Sau *et al.* (2004) ใช้วิธี Direct Numerical Method (DNS) ในการศึกษาการเหนี่ยวนำ การผสม พบว่าโครงสร้าง horseshoe vortices ซึ่งเกิดบริเวณด้านหลังปากทางออกของเจ็ตจะยกตัว ขึ้นเหนือพื้นด้านหลังเจ็ตและถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP เข้าไปผสมกับเจ็ต ซึ่งผลการศึกษา มี ความสอดคล้องกับ Cortelezzi and Karagozian (2001) อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ล้วนแต่เป็นการศึกษาโดยใช้การจำลองการไหล (simulation) การอธิบายกลไกการเหนี่ยวนำการผสม ของเจ็ตในกระแสลมขวางโดยใช้หลักฐานจากการทดลองนั้นมีอยู่น้อยมาก ดังนั้นจึงเป็นแรงจูงใจให้ Sornphrom and Bunyajitradulya (2016), Soupramongkol (2015), และ Na Takuathung and Bunyajitradulya (2016) พยายามที่จะอธิบายกลไกการเหนี่ยวนำการผสมโดยใช้หลักฐานจาก การทดลองมาประกอบการอธิบายเชิงกายภาพขึ้น โดยที่ทั้งสามงานวิจัยสามารถสรุปกลไกการ เหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางโดย CVP ออกมาได้สอดคล้องกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกมาได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ 1) โครงสร้าง CVP เหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริเวณด้านข้างเจ็ตมีการเคลื่อนที่ ลักษณะหมุนวนในลักษณะ พุ่งลง-พุ่งเข้า-พุ่งขึ้น (downward-inward-and-upturn) ลงมาที่บริเวณ ขอบเจ็ตด้านล่างและบริเวณปากทางเข้าของช่องทางการไหลคู่เข้า-ออกในแนวตั้ง (converging-diverging vertical channel of high upward flow, VC) ซึ่งวางตัวอยู่กึ่งกลางของโครงสร้าง CVP 2) กระแสลมขวางไหลเข้าสู่ช่องทางการไหลคู่เข้า-ออก ในแนวตั้งซึ่งขับเคลื่อนโดยโครงสร้าง CVP โดย พบว่าบริเวณที่มีอัตราการเหนี่ยวนำการผสมสูงจะอยู่ในช่วงคู่เข้า และยังพบอีกว่าเมื่อของไหลไหลเข้า สู่ช่วงคอคอด (throat) ของไหลจะกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตจนเกือบหมดแล้ว หลังจากนั้นของไหล ซึ่งเป็นส่วนผสมของเจ็ตจะไหลออกจากบริเวณคอคอดช่วงคู่ออกและเข้าสู่บริเวณกลางเจ็ตซึ่งเป็น โครงสร้างรูปอ่าว ซึ่งเป็นบริเวณที่เจ็ตมีความเร็วในแกน streamwise ต่ำ 3) โครงสร้างรูปไต (kidney-shaped structure) ซึ่งเป็นบริเวณที่เจ็ตมีความเร็วเฉลี่ยไร้มิตติตามแนวแกน streamwise สูงจะ เหนี่ยวนำของไหลที่เป็นส่วนผสมของเจ็ตที่อยู่บริเวณอ่าวที่อยู่ด้านใต้ให้วิ่งเข้าไปผสมเข้ากับโครงสร้าง รูปไตด้านบนคล้ายกับการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (free jet)

1.2 แรงจูงใจ

จากผลการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางโดย CVP โดยอาศัยหลักฐานจากการทดลองของ Sornphrom and Bunyajitradulya (2016), Soupramongkol (2015), และ Na Takuathung and Bunyajitradulya (2016) ซึ่งพบว่าโครงสร้าง CVP จะเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์ให้เข้าไปผสมกับเจ็ตผ่านช่องทางการไหลลู่เข้า-ออกในแนวตั้ง (VC) และยังพบอีกว่าบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมสูงสุดคือช่วงลู่เข้า ซึ่งอยู่บริเวณด้านล่างของเจ็ต จึงทำให้เกิดเป็นแนวคิดใหม่และแรงจูงใจของงานวิจัยนี้ที่จะปรับแต่ง ควบคุม และส่งเสริมการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางผ่านกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางในช่องทางการไหลลู่เข้า-ออกตามแนวตั้ง (VC) โดย CVP ที่มีอยู่แล้วแทนที่จะไปปรับแต่งและควบคุมการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางผ่านการกระตุ้นการก่อตัวและการพัฒนาตัวของ flow shear layer ที่บริเวณรอบปากทางออกของเจ็ตอย่างงานวิจัยในอดีต

ด้วยหลักการและแนวคิดใหม่ที่จะปรับแต่งเพิ่มอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรด้วยการส่งเสริมกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในระนาบตัดขวางโดย CVP ซึ่งเป็นกลไกที่มีอยู่แล้วนั้น งานวิจัยนี้จึงจะประยุกต์ใช้หลักการดังกล่าวโดยใช้เจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (Leeward-Vertical Control Jet, LVCJ) ฉีดพุ่งเข้าสู่ช่องทางการไหลลู่เข้า-ออกตามแนวตั้งระหว่าง CVP ที่บริเวณด้านหลังปากทางออกของเจ็ตเพื่อเหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริสุทธิ์ด้านล่างของเจ็ตถูกเหนี่ยวนำโดย LVCJ ให้เคลื่อนที่เข้าสู่ VC ระหว่าง CVP เพื่อส่งเสริมให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสมที่มากยิ่งขึ้น โดยที่รูปที่ 1.1(ก) และ และ รูปที่ 1.1(ข) แสดงภาพจำลองการเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์รอบข้างเจ็ตเข้ามาผสมกับตัวเจ็ตเมื่อเปรียบเทียบกรณีที่ไม่ฉีด LVCJ และ กรณีฉีด LVCJ

อนึ่งโดยสรุปหลักการใหม่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีความแตกต่างจากหลักการที่ใช้ในงานวิจัยในอดีตซึ่งใช้หลักการการปรับแต่งและควบคุมการเหนี่ยวนำการผสมผ่านการกระตุ้นการก่อตัวและการพัฒนาตัวของ flow shear layer รอบปากทางออกของเจ็ต ซึ่งต้องการอาศัยเทคนิคการติดอุปกรณ์ควบคุมที่บริเวณรอบปากทางออกของเจ็ต (Zaman and Foss (1997), Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005), Niederhaus *et al.* (1997), Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001), Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005), Korn Sri *et al.* (2009), Witayaprapakorn (2013), และ Tekhuad (2015)) ในขณะที่หลักการใหม่ที่นำมาเสนอในงานวิจัยนี้

คือ การปรับแต่ง ควบคุม และส่งเสริมเพิ่มการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวางผ่านกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางใน VC โดย CVP ที่มีอยู่แล้วโดยการใช้เจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCJ) ซึ่งจากผลการทดลองเบื้องต้น (preliminary result) พบว่าการปรับแต่งและควบคุมการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวางโดยการใช้เจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCJ) สามารถเพิ่มค่าอัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้มากที่สุดถึง 60 % ที่อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลักเท่ากับ 13% เมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมและมากกว่าการใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jet) ที่อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ดหลักเท่ากับ 4% อยู่ 20% อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อมูลในปัจจุบันยังมีข้อจำกัดในการเปรียบเทียบ กล่าวคือจะพิจารณาค่าอัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่สูงสุดที่ทำได้เป็นหลัก ยังไม่ได้เปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขที่อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลักเท่ากัน

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ที่มีต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรและปริมาณทางฟิสิกส์อื่นๆ เช่น เส้นทางเดิน และ ค่า circulation ของเจ็ด โดยเทคนิคการใช้เจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCJ) ซึ่งถูกติดตั้งอยู่บริเวณด้านหลังปากทางออกของเจ็ดในกระแสลมขวาง โดยที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4 โดยการวัดสนามความเร็วที่ระนาบตัดขวางการไหลใดๆ ของเจ็ดในกระแสลมขวางนั้น งานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดหลักเท่านั้นและไม่ใส่ในการไหลอื่น ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้สามารถเขียนสรุปในรูปแบบ functional form ได้ดังนี้

$$E = f\left(\frac{x}{rd}; r_m(r_{cj}); r, \frac{x_{cj}}{rd}, \frac{\rho_{mj}}{\rho_{cf}}, \frac{\rho_{cj}}{\rho_{cf}}, \frac{d_{cj}}{d}, Re_{mj}, Re_{cf}, Re_{cj}, \psi_{bl}, \psi_{jp}, \frac{\delta}{d}\right)$$

$$\Gamma_j, y_{CM,|\omega_{j,x}|} = f\left(\frac{x}{rd}; r_m(r_{cj}); r, \frac{x_{cj}}{rd}, \frac{\rho_{mj}}{\rho_{cf}}, \frac{\rho_{cj}}{\rho_{cf}}, \frac{d_{cj}}{d}, Re_{mj}, Re_{cf}, Re_{cj}, \psi_{bl}, \psi_{jp}, \frac{\delta}{d}\right)$$

โดยที่

E คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

Γ_j คือ ค่า Circulation ของส่วนผสมของเจ็ดหลัก

$y_{CM, \omega_{j,x} }$	คือ ระยะ penetration ของเจ็ตซึ่งนิยามจากจุด center of mass ของขนาดของ streamwise jet vorticity ของส่วนผสมของเจ็ตหลัก ($ \omega_{j,x} $) เฉลี่ยเทียบกับเวลา
$\frac{x}{rd}$	คือ ระยะทางไร้มิติตามแนวการไหลของกระแสลมขวาง
r_m	คือ อัตราส่วนการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก
r_{cj}	คือ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลของเจ็ตควบคุม
r	คือ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลของเจ็ตหลัก
$\frac{x_{cj}}{rd}$	คือ ตำแหน่งไร้มิติของเจ็ตควบคุมตามแนวการไหลของกระแสลมขวาง
$\frac{\rho_{mj}}{\rho_{cf}}$	คือ อัตราส่วนความหนาแน่นของเจ็ตหลักต่อกระแสลมขวาง
$\frac{\rho_{cj}}{\rho_{cf}}$	คือ อัตราส่วนความหนาแน่นของเจ็ตควบคุมต่อกระแสลมขวาง
$\frac{d_{cj}}{d}$	คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ตควบคุมและเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ตหลัก
Re_{mj}	คือ เลขเรย์โนลด์ของเจ็ตหลัก
Re_{cf}	คือ เลขเรย์โนลด์ของกระแสลมขวาง
Re_{cj}	คือ เลขเรย์โนลด์ของเจ็ตควบคุม
ψ_{bl}	คือ สภาวะเริ่มต้นของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางไร้มิติ
ψ_{jp}	คือ สภาวะเริ่มต้นของเจ็ตไร้มิติ
$\frac{\delta}{d}$	คือ ความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางไร้มิติ

อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ r_m , r_{cj} และ Re_{cj} เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่อิสระต่อกัน

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4
2. การฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม และกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม
3. อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) เท่ากับ 3.8% 6% 8% 10% และ 13%

4. ตำแหน่งไร้มิติของเจ็ดควบคุมตามแนวการไหลของกระแสลมขวาง (x_{cj} / rd) เท่ากับ 0.25
5. อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ดควบคุมและเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ดหลัก $\left(\frac{d_{cj}}{d}\right)$ เท่ากับ 0.10
6. เรย์โนลส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง (Re_{cf}) มีค่าประมาณ 3,100
7. เรย์โนลส์นัมเบอร์ของเจ็ดหลัก (Re_{mj}) มีค่าประมาณ 12,400
8. เรย์โนลส์นัมเบอร์ของเจ็ดควบคุม (Re_{cj}) มีค่าประมาณ 4,900 7,700 10,300 12,800 และ 16,700
9. สภาพการไหลของกระแสลมขวาง คือ การไหลแบบคงตัว
10. สภาพการไหลของเจ็ดหลัก คือ การไหลผ่านท่อแบบปั่นป่วนที่พัฒนาตัวเต็มที่
11. ระยะทางไร้มิติตามแนวการไหลของกระแสลมขวาง (x / rd) เท่ากับ 0.25, 0.50, 0.75, 1.0 และ 1.50
12. อัตราส่วนความหนาแน่นของเจ็ดหลักต่อกระแสลมขวาง (ρ_{mj} / ρ_{cf}) เท่ากับ 1
13. อัตราส่วนความหนาแน่นของเจ็ดควบคุมต่อกระแสลมขวาง (ρ_{cj} / ρ_{cf}) เท่ากับ 1
14. ความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางไร้มิติ (δ / d) เท่ากับ 0.6
15. เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลนั้นจะใช้วิธีใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ดหลักเท่านั้น

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

ผลที่คาดว่าจะได้รับแบ่งเป็นสองส่วนหลักคือ ความรู้และความเข้าใจในด้านวิชาการ และการประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรม

ผลที่คาดว่าจะได้รับในด้านวิชาการนั้นคือ ผลของอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลักเมื่อใช้เจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมที่ตำแหน่ง x_{cj} / rd เท่ากับ 0.25 และข้อมูลความสัมพันธ์เชิงปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องต่อเจ็ดในกระแสลมขวาง

ผลที่คาดว่าจะได้รับในด้านการประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรมคือ การนำเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมไปใช้ในการปรับแต่งและควบคุมการเหนี่ยวนำการผสมและคุณลักษณะต่างๆ ของเจ็ดในกระแสลมขวาง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบ ปรับปรุง หรือพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ ในงานวิศวกรรมเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

1.6 แผนการดำเนินงานของโครงการ

กิจกรรม	ต.ค. 59	พ.ศ. 59	ธ.ค. 59	ม.ค. 60	ก.พ. 60	มี.ค. 60	ม.ย. 60	พ.ค. 60	มิ.ย. 60	ก.ค. 60
1. ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา	X	X	X							
2. ออกแบบการทดลอง		X	X							
3. ปรับปรุงชุดทดลอง		X	X	X						
4. เตรียมชุดทดลอง และ สอบเทียบเครื่องมือวัด		X	X	X	X					
5. ทดสอบการทดลอง (Preliminary Experiment)			X	X	X					
6. วางแผนการทดลอง					X					
7. เสนอโครงร่าง						X				
8. การทดลองอย่างละเอียด						X	X	X		
9. วิเคราะห์ข้อมูลและ สรุปผลการทดลอง							X	X		
10. ทำรายงานและนำเสนอ ผลงาน							X	X	X	X

บทที่ 2

งานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัยที่ศึกษาเจ็ดในกระแสมขวางมีขอบเขตการศึกษาอย่างกว้างขวาง ซึ่งการจัดแบ่งประเภทสามารถแบ่งออกมาได้ทั้งหมด 2 ประเภทหลัก ได้แก่ 1) การศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ดในกระแสมขวาง และ 2) การศึกษาการปรับแต่งและควบคุมคุณลักษณะของเจ็ด เช่น การปรับแต่งเส้นทางเดินและการเหนี่ยวนำการผสมและการผสมของเจ็ดในกระแสมขวางให้เป็นไปตามต้องการ เป็นต้น การจัดแบ่งขอบเขตของการศึกษาวิจัยให้ชัดเจนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ เนื้อหาในบทนี้จะเริ่มด้วยการกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญในการศึกษาเจ็ดในกระแสมขวางก่อนเพื่อปูพื้นฐานให้ผู้อ่านเข้าใจบทนิยามของปริมาณทางฟิสิกส์ที่ใช้ในการศึกษาเจ็ดในกระแสมขวาง จากนั้นเนื้อหาของบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยในอดีตที่น่าสนใจ เพื่อให้ผู้อ่านเห็นภาพรวมและสามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์และความสำคัญของการศึกษาเจ็ดในกระแสมขวางตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้

2.1 ปริมาณที่สำคัญของเจ็ดในกระแสมขวาง

2.1.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล

อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity ratio, r) เป็นปริมาณทางฟิสิกส์หลักที่มีผลต่อคุณลักษณะทางกายภาพของเจ็ดในกระแสมขวาง โดยที่ปริมาณดังกล่าวถูกนิยามโดย รากที่สองของอัตราส่วนระหว่างโมเมนตัมฟลักซ์ของเจ็ดและโมเมนตัมฟลักซ์ของกระแสมขวาง ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบของสมการได้ดังนี้

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

โดยที่ ρ_j และ ρ_{cf} คือ ความหนาแน่นของเจ็ดและกระแสมขวางตามลำดับ

u_j และ u_{cf} คือ ความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ดและกระแสมขวางตามลำดับ

อย่างไรก็ตามเมื่อความหนาแน่นของเจ็ดและกระแสมขวางมีค่าเท่ากัน ($\rho_j = \rho_{cf}$) สมการที่ 2.1 จะสามารถลดรูปได้เป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ดและความเร็วของกระแสมขวางดังนี้

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

2.1.2 ตัวเลขเรย์โนลด์ของเจ็ตและกระแสลมขวาง

ตัวเลขเรย์โนลด์เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง ซึ่งตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางมีอยู่ 2 ค่า คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ของเจ็ต และตัวเลขเรย์โนลด์ของกระแสลมขวาง

ตัวเลขเรย์โนลด์ของเจ็ต

ตัวเลขเรย์โนลด์ของเจ็ตเป็นตัวเลขที่บอกสถานะของของไหลว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ(laminar flow) หรือ เป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) และพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความสำคัญอย่างมากในการบ่งบอกถึงสถานะเริ่มต้นที่ปากทางออกของเจ็ต โดยที่ตัวเลขเรย์โนลด์ของเจ็ต (Jet Reynolds number, Re_j) สามารถนิยามได้จาก

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

โดยที่ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากทางออกของเจ็ต
 ν_j คือ ความหนืดคิเนเมติกส์ของเจ็ต (Jet kinematic viscosity)

ตัวเลขเรย์โนลด์ของกระแสลมขวาง

ตัวเลขเรย์โนลด์ของกระแสลมขวาง (Crossflow Reynolds number, Re_{cf}) เป็นตัวเลขที่มีความเกี่ยวข้องกับ wake ที่เกิดขึ้นในการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวาง ซึ่งสามารถนิยามได้จาก

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

โดยที่ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากทางออกของเจ็ต
 ν_{cf} คือ ความหนืดคิเนเมติกส์ของกระแสลมขวาง (Crossflow kinematic viscosity)

2.2 การศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง

2.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของเจ็ตในกระแสลมขวาง

Fric and Roshko (1994) ศึกษาโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวางโดยใช้เทคนิค smoke-wire flow visualization และวัดความเร็วด้วย hot-wire anemometry ในช่วงค่า r ระหว่าง 2 ถึง 10 พบว่า vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวางประกอบด้วย 4 โครงสร้างหลัก ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนี้

- 1) Jet shear layer vortices ซึ่งเกิดจากการแยกตัวของ shear layer บริเวณปากทางออกของเจ็ต และมีลักษณะคล้ายกับ vortex ring ของ free jet
- 2) Horseshoes vortices ซึ่งเกิดจากการม้วนตัวของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง (crossflow boundary layer) ณ บริเวณรอบปากทางออกของเจ็ต โดยที่เป็นเหตุมาจากการที่กระแสลมขวางได้รับผลจาก adverse pressure gradient ที่เกิดจากการที่เจ็ตพุ่งออกมาเกิดขวางการไหลของกระแสลมขวาง
- 3) Wake vortices มีลักษณะคล้ายกับ wake ที่เกิดจากการไหลผ่านวัตถุทรงกระบอก โดย wake vortices มีแหล่งกำเนิดจากชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง (crossflow boundary layer) ที่ผนังพื้น
- 4) Counter-rotating vortex pair (CVP) มีลักษณะเป็นโครงสร้างคู่หมุนซึ่งมีการหมุนเข้าหากัน โดย CVP เป็นโครงสร้างที่สำคัญต่อกลไกการเหนี่ยวนำการผสมที่บริเวณ far field

2.2.2 กระบวนการเกิดและพัฒนาตัวของ Counter-rotating vortex pair (CVP)

Yuan *et al.* (1999) ศึกษาโครงสร้างและก่อตัวของโครงสร้าง CVP ของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วยเทคนิค large-eddy simulation (LES) พบว่า โครงสร้าง CVP เกิดจาก hanging vortices ซึ่งเกิดขึ้นใน skewed mixing layer ที่พัฒนาขึ้นและอยู่ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางที่บริเวณด้านข้างปากทางออกของเจ็ตตามแสดงในรูปที่ 2.2

Cortelezzi and Karagozian (2001) ศึกษาการก่อตัวและการพัฒนาตัวตามแนว downstream ของโครงสร้าง CVP ในสนามการไหล โดยการจำลอง (simulation) สนามการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางด้วย three-dimensional vortex element พบว่าโครงสร้าง CVP เกิดจากการพับตัวของ vortex ring ที่เกิดขึ้นใกล้ปากทางออกของเจ็ต โดยที่เมื่อ vortex ring ปะทะกับกระแสลมขวาง vortex ring จะโค้งตัวตามแนวกระแสลมขวางและเกิดการห่อตัวขึ้น โดยขอบ

ด้านหลังของ vortex ring จะยกตัวสูงขึ้น และเชื่อมต่อกับขอบด้านหลังของ vortex ring อีกตัวที่เกิดขึ้นก่อนและพัฒนาตัวกลายเป็น CVP ที่สมบูรณ์ที่บริเวณ far field ดังแสดงในรูปที่ 2.3

Lim *et al.* (2001) ศึกษา large scale structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง ด้วยเทคนิคการฉีดสี พบว่าการ vortex loop ก่อตัวขึ้นจากการเสีรूपของ cylindrical vortex sheet โดยผลการศึกษาชี้แนะว่าโครงสร้าง CVP เกิดจากการพัฒนาตัวของ vortex loop ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แทนที่จะเป็น vortex ring ซึ่งถูกเสนอโดย Cortelezzi and Karagozian (2001)

Sau *et al.* (2004) ศึกษาโครงสร้าง vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยที่ปากทางออกของเจ็ตเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยวิธี direct numerical simulation (DNS) พบว่าโครงสร้าง CVP ก่อตัวจาก skewed mixing layer ที่บริเวณด้านข้างของปากทางออกเจ็ต และยังพบว่าโครงสร้าง Kelvin-Helmholtz roller ไม่ได้ก่อตัวเป็น closed vortex ring ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงวิวัฒนาการของ streamline ในการก่อตัวของ Kelvin-Helmholtz roller

2.2.3 กลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Entrainment mechanism)

Cortelezzi and Karagozian (2001) ศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมด้วยเทคนิค three-dimensional vortex element พบว่ากระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่อยู่บริเวณ boundary layer จะถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ให้ยกตัวขึ้นแล้วเคลื่อนที่เข้าไปผสมกับเจ็ตผ่านช่องระหว่างคู่ CVP ทางด้านหลังเจ็ตดังแสดงในรูปที่ 2.6

Sau *et al.* (2004) ใช้วิธี direct numerical method (DNS) ในการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง พบว่าโครงสร้าง horseshoe vortices ซึ่งเกิดที่บริเวณด้านหลังปากทางออกของเจ็ตจะยกตัวสูงขึ้นเหนือพื้นด้านหลังเจ็ตและถูกเหนี่ยวนำโดยโครงสร้าง CVP ให้เคลื่อนที่เข้าไปผสมกับเจ็ตผ่านบริเวณช่องระหว่างคู่ CVP ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งผลการศึกษา มีความสอดคล้องกับ Cortelezzi and Karagozian (2001)

กลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสลมขวางจากหลักฐานจากการทดลอง

งานวิจัยที่ศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางส่วนใหญ่จะใช้เทคนิคการศึกษาจากการจำลองการไหล (simulation) อย่างไรก็ตามการศึกษาและอธิบายกลไกการเหนี่ยวนำการผสมโดยหลักฐานจากการทดลองเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากหลักฐานที่เก็บได้จากการทดลองเป็นหลักฐานจริงที่เกิดขึ้นจริงในการไหลของของไหล

Sornphrom and Bunyajitradulya (2016) ศึกษาโครงสร้าง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง และกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสลมขวางที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4 ด้วย SPIV ประกอบกับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหล 2 วิธี วิธีแรกคือการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตเท่านั้นและไม่ใส่ในกระแสลมขวาง และวิธีที่สองคือการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งเจ็ตและกระแสลมขวาง สำหรับที่มาและความสำคัญของการประยุกต์ใช้เทคนิคสามารถอ่านเพิ่มเติมได้จาก Sornphrom and Bunyajitradulya (2016) ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้าง CVP เป็นโครงสร้างที่ทำให้เกิดกลไกการผสมหลักในระนาบตัดขวาง โดยที่ผลการศึกษาสามารถอธิบายกลไกการเหนี่ยวนำการผสมโดยโครงสร้าง CVP ได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) โครงสร้าง CVP เหนี่ยวนำให้กระแสลมขวางบริเวณด้านข้างของเจ็ตมีการเคลื่อนที่ลักษณะหมุนวนในลักษณะ พุ่งลง-พุ่งเข้า-พุ่งขึ้น (downward-inward-and-upturn) ลงมาที่บริเวณขอบเจ็ตด้านล่างและเข้าสู่ปากทางของช่องทางการไหลลู่เข้า-ออกในแนวตั้ง (converging-diverging vertical channel of high upward flow, VC) ซึ่งวางตัวอยู่กึ่งกลางของโครงสร้าง CVP
- 2) กระแสลมขวางไหลเข้าสู่ช่องทางการไหลลู่เข้า-ออก ในแนวตั้งซึ่งขับเคลื่อนโดยโครงสร้าง CVP โดยพบว่าบริเวณที่มีอัตราการเหนี่ยวนำการผสมสูงอยู่จะในช่วงลู่เข้า และยังพบอีกว่าเมื่อของไหลไหลเข้าสู่ช่วงคอคอด (throat) ของไหลจะกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ตจนเกือบหมดแล้ว หลังจากนั้นของไหลซึ่งเป็นส่วนผสมของเจ็ตจะไหลออกจากบริเวณคอคอดช่วงลู่ออกและเข้าสู่บริเวณกลางเจ็ตซึ่งเป็นโครงสร้างรูปอ่าว และเป็นบริเวณที่มีความเร็วในแกน streamwise ต่ำ
- 3) โครงสร้างรูปไต (Kidney-shaped structure) ซึ่งเป็นบริเวณที่เจ็ตมีความเร็วเฉลี่ยรัศมีตามแนวแกน streamwise สูงจะเหนี่ยวนำของไหลที่เป็นส่วนผสมของเจ็ตที่อยู่บริเวณอ่าวที่อยู่ด้านใต้ให้วิ่งเข้าไปผสมเข้ากับโครงสร้างรูปไตคล้ายกับการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตอิสระ (free jet)

โดยที่รูปที่ 2.8 เป็นภาพวาดที่แสดงถึงกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางโดย CVP

Soupramongkol (2015) ศึกษาผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมและกลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางของการไหลของเจ็ตในกระแสลมขวางที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r เท่ากับ 4 โดยที่กรณีใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงจะฉีดที่

ตำแหน่ง ± 165 องศา (I165) ที่อัตราส่วนอัตราการใช้พลังงานของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) เท่ากับ 4% โดยที่เทคนิคที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นเทคนิคเดียวกับ Sornphrom and Bunyajitradulya (2016) การศึกษาพบว่าการใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่ง ± 165 องศา (I165) จะช่วยส่งเสริม (promote) ให้การเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มสูงขึ้นทุกระนาบตัดขวางตามการไหล นอกจากนี้ยังพบว่ากรณีเจ็ดควบคุมจะก่อให้เกิดโครงสร้าง wake อย่างชัดเจนที่บริเวณด้านล่างของเจ็ด ในส่วนของผลการศึกษากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางในกรณีที่ไม่ฉีดเจ็ดควบคุมจะสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับ Sornphrom and Bunyajitradulya (2016) แต่เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่ง I165 พบว่ากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางยังคงคล้ายคลึงกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม อย่างไรก็ตาม Soupramongkol (2015) ได้เสนอว่าการมีอยู่ของโครงสร้าง wake ทำให้พื้นที่การเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ดและกระแสลมขวางมีมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อทำการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวง

Na Takuathung and Bunyajitradulya (2016) ศึกษาโครงสร้างและกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดและเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงในกระแสลมขวางที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 12 โดยที่กรณีใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงจะฉีดที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ ± 165 องศา (I165) โดยมีอัตราส่วนอัตราการใช้พลังงานของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) เท่ากับ 4% ผลการศึกษาพบว่ากลไกการเหนี่ยวนำการผสมในระนาบตัดขวางโดย CVP ของเจ็ดในกระแสลมขวางนั้นสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sornphrom and Bunyajitradulya (2016) และ Soupramongkol (2015) นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังพบว่าบริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมสูงของเจ็ดและเจ็ดควบคุมตามแนวที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 12 เกิดที่บริเวณด้านข้าง-ล่างของบริเวณส่วนผสมของเจ็ดดังรูปที่ 2.9

2.2.4 เส้นทางเดินของเจ็ด

Pratte and Baines (1967) ศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ดในกระแสลมขวางในช่วงอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) อยู่ในช่วง 5 ถึง 25 ด้วยเทคนิค flow visualization พบว่าเส้นทางเดินของเจ็ดบน rd สกอลอยู่ในรูปแบบของ power law ตามสมการ

$$\frac{y}{rd} = A_r \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_r} \quad (2.5)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ A_r มีค่าอยู่ในช่วง 1.35 ถึง 2.63 ตามแต่กรณีดังนี้

$$A_T = \begin{cases} 1.35 & ; \text{ for the bottom-edge trajectory of the jet} \\ 2.05 & ; \text{ for the center trajectory of the jet} \\ 2.63 & ; \text{ for the top-edge trajectory of the jet} \end{cases}$$

และสัมประสิทธิ์ B_T มีค่าเท่ากับ 0.28 สำหรับทุกกรณี

Smith and Mungal (1998) ศึกษาเส้นทางเดินและการสเกลเส้นทางเดินของเจ็ตในกระแสมขวางด้วยเทคนิค planar laser-induced fluorescence (PLIF) ของ acetone vapor โดยนิยามเส้นทางเดินของเจ็ตคือจุดที่มีความเข้มข้นสูงที่สุด โดยค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลของการทดลองอยู่ในช่วง 5 ถึง 25 โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการสเกลเส้นทางเดินของเจ็ตด้วย d , rd , และ r^2d พบว่า การสเกลเส้นทางเดินของเจ็ตด้วยทั้ง 3 สเกลไม่สามารถ collapse ให้เส้นทางเดินของเจ็ตที่ต่าง r ให้รวมมาเป็นกราฟเส้นเดียวได้ อย่างไรก็ตาม Smith and Mungal (1998) เสนอว่า rd เป็นสเกลที่ทำให้การนำเสนอเส้นทางเดินของเจ็ตออกมาดีที่สุดตามแสดงในรูปที่ 2.10 นอกจากนั้นยังพบว่าสัมประสิทธิ์ A_T และ B_T จากสมการที่ 2.5 มีค่าประมาณ 1.5 และ 0.27 ตามลำดับ

Yuan and Street (1998) ศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 2 และ 3.3 ด้วยเทคนิค large-eddy simulation (LES) โดยนิยามเส้นทางเดินของเจ็ตเป็น streamline เฉลี่ยที่เกิดขึ้น ณ จุดกึ่งกลางของปากทางออกเจ็ต พบว่าระยะ penetration ของเจ็ตและระยะตามแนว downstream บนสเกล rd ในช่วง $x/rd > 0.8$ มีความสัมพันธ์กันในรูปของ power law ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยที่สัมประสิทธิ์ A_T อยู่ในช่วง 1.2 ถึง 1.4 ตามแต่กรณีของเจ็ต ในส่วนค่าสัมประสิทธิ์ B_T จะอยู่ในช่วง 0.27 – 0.29 ตามแต่กรณีของเจ็ตเช่นกัน ซึ่งสัมประสิทธิ์ B_T มีความสอดคล้องกับ Pratte and Baines (1967) ซึ่งเสนอว่า B_T เท่ากับ 0.28

Pruekwatana *et al.* (2016) ศึกษาการสเกลระยะ penetration ของส่วนผสมของเจ็ต ($y_{CM,|\omega_{j,x}|}$) ตามแนวการไหลของกระแสมขวางเพื่อที่จะ collapse ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่มีต่อระยะ penetration ของส่วนผสมของเจ็ตด้วยเทคนิคเดียวกับ Witayaprapakorn (2013) โดยงานวิจัยนี้จะนิยามระยะ penetration ของส่วนผสมของเจ็ตคือ จุด center of mass ของขนาดของ streamwise jet vorticity ($|\omega_{j,x}|$) เฉลี่ยเทียบกับเวลาและทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4 8 และ 12 งานวิจัยนี้พบว่า scaling law ที่เหมาะสมสำหรับระยะ penetration ของส่วนผสมของเจ็ตอยู่ในรูปแบบดังแสดงในสมการที่ 2.6A และความสัมพัทธ์ระหว่างระยะ penetration ของส่วนผสมของเจ็ตกับระยะตามแนวการไหลของกระแสมขวางสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของ power law ได้ตามสมการที่ 2.6B

$$\text{Scaling law : } y_{CM,|\omega_j,x|} / r^{C_y} d = f(x / rd) \quad (2.6A)$$

$$\text{Correlation : } y_{CM,|\omega_j,x|} / r^{C_y} d = A_y (x / rd)^{B_y} \quad (2.6B)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ A_y, B_y และ C_y เป็นค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.63, 0.3257 และ 1.36 ตามลำดับ

2.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสม

Hasselbrink and Mungal (1996) เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรและระยะตามแนว downstream โดยใช้การกำหนดปริมาตรควบคุมภายใต้ข้อสมมติฐานว่า ที่บริเวณ far field เส้นทางเดินของเจ็ตจะได้รับอิทธิพลมาจากการเหนี่ยวนำการผสมเท่านั้น โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนได้ในรูปแบบสมการดังนี้

$$\frac{\dot{V}_{jet}}{\dot{V}_0} = E = 1 + A_E \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_E} \quad (2.7)$$

โดยที่ $A_E = r / A_T B_T$ และ $B_E = 1 - B_T$ เมื่อ A_T และ B_T คือสัมประสิทธิ์ที่ได้มาจากสมการที่ 2.5

Yuan and Street (1998) นำสมการที่ 2.7 มาใช้กับผลการทดลองของตัวเอง โดยที่พล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\dot{V}_{jet}}{\dot{V}_0} - 1$ กับ x / rd บนสเกล log-log เพื่อที่จะหาสัมประสิทธิ์ B_E เพื่อที่จะนำไปสู่การหาค่า B_T จากความชันของกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งผลการศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์ B_T ที่สามารถหาได้จากความชันของกราฟมีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์ B_T ที่หาจากสมการที่ 2.5 โดยมีค่าต่างกันเพียง 7% ดังนั้น Yuan and Street (1998) จึงได้สรุปว่าเส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสมมีความสัมพันธ์กันและสมมติฐานของ Hasselbrink and Mungal (1996) ที่ว่า ณ บริเวณ far field เส้นทางเดินของเจ็ตจะได้รับอิทธิพลมาจากการเหนี่ยวนำการผสมเท่านั้นเพื่อที่จะได้มาซึ่งสมการที่ 2.7 มีความแม่นยำพอสมควร

Pruekwatana *et al.* (2016) ศึกษาการสเกลค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ตามแนวการไหลของกระแสมขวางเพื่อที่จะ collapse ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ที่มีต่อค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรด้วยเทคนิคเดียวกับ Witayaprapakorn (2013) งานวิจัยนี้ทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4 8 และ 12 ผลการศึกษาพบว่า scaling law ที่เหมาะสมสำหรับค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) อยู่ในรูปแบบดังแสดงในสมการที่ 2.8A และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการ

ผสมเชิงปริมาตร (E) กับระยะตามแนวการไหลของกระแสลมขวางสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของ power law ได้ดังสมการที่ 2.8B

$$\text{Scaling law : } (E-1) / a_E(r) = f(x / rd) \quad (2.8A)$$

$$\text{Correlation : } (E-1) / a_E(r) = (x / rd)^{B_E} \quad (2.8B)$$

โดยที่ $a_E(r) = 0.9r + 1.4$ และสัมประสิทธิ์ B_E เป็นค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.5573

2.3 การปรับแต่งและควบคุมคุณลักษณะของเจ็ต

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับแต่งและควบคุมคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ผ่านมาในอดีตนิยมอาศัยหลักการปรับแต่งและควบคุมคุณลักษณะของเจ็ตโดยการกระตุ้นการก่อตัวและการพัฒนาตัวของ flow shear layer ที่บริเวณรอบปากทางออกของเจ็ต

การปรับแต่งและควบคุมคุณลักษณะของเจ็ตโดยการกระตุ้นการก่อตัวและพัฒนาตัวของ flow shear layer ที่บริเวณใกล้ปากทางออกของเจ็ตสามารถแบ่งออกได้อีก 2 ประเภท คือ 1) การกระตุ้นโดยการไม่ใช้พลังงานกระตุ้น (Passive control) และ 2) การกระตุ้นโดยใช้พลังงานกระตุ้น (Active control) ซึ่งรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะกล่าวถึงต่อไป

2.3.1 การกระตุ้นโดยการไม่ใช้พลังงานกระตุ้น (Passive control)

การกระตุ้นด้วยการติด tab ที่บริเวณปากทางออกของเจ็ต

Zaman and Fross (1997) ได้ศึกษาผลของ vortex generator แบบ delta tap ซึ่งมี รูปทรงสามเหลี่ยมที่มีต่อการ penetration และ การ spreading ของเจ็ตในกระแสลมขวางที่อัตราส่วนโมเมนตัมฟลักซ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง ($J = \rho_j u_j^2 / \rho_{cf} u_{cf}^2$) เท่ากับ 21.1 และ 54.4 โดยผลการศึกษาพบว่า การติด delta tap ที่ตำแหน่ง windward นั้นมีผลให้ตำแหน่ง contour ของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบตั้งฉากของเจ็ตอยู่ต่ำกว่ากรณีที่ไม่ติด delta tap ดังแสดงในรูปที่ 2.13

2.3.2 การกระตุ้นโดยใช้พลังงานกระตุ้น (Active control)

การกระตุ้นโดยใช้เจ็ตหมุนควง (swirling jet)

Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) ศึกษาผลของการใช้เจ็ตหมุนควง (swirling jet) ต่อ maximum center-plane trajectory และ decay ซึ่งเป็นส่วนที่บอกลถึงการเปรียบเทียบระหว่างผลของการใช้เจ็ตหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะและโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางในระนาบตัดขวางและผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่มีต่อคุณลักษณะและโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางในระนาบตัดขวาง โดยที่ค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ของการทดลองเท่ากับ 4.1 และค่า swirl ratio (Sr) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 0.82 ผลการศึกษาพบว่า การปรับแต่งและควบคุมคุณลักษณะของเจ็ตโดยใช้เจ็ตหมุนควงมีอิทธิพลต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของเจ็ตในกระแสมขวางน้อยเมื่อเทียบกับผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่มีต่อเจ็ตในกระแสมขวาง และยังพบว่าการใช้เจ็ตหมุนควงมีผลทำให้เจ็ตเกิดความไม่สมมาตรในโครงสร้างของเจ็ตและการกระจายตัวของอุณหภูมิ

การกระตุ้นโดยใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jet)

Kornsri *et al.* (2009) เป็นผู้ริเริ่มการปรับแต่งและควบคุมคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวางด้วยเทคนิคการใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jet) ซึ่งลักษณะของเจ็ตควบคุมแสดงไว้ในรูปที่ 2.14 โดยวิธีการนี้มีข้อดีคือใช้พลังงานในการควบคุมน้อยเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่มีต่อคุณลักษณะและโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวางที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 3.9 โดยใช้ single sensor hot film anemometer เป็นเครื่องมือวัดความเร็ว สำหรับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมงานวิจัยนี้ใช้ค่า r_m อยู่ระหว่าง 1.8% ถึง 2.3% ผลการศึกษาพบว่าเมื่อทำการฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน leeward จะส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ตสูงขึ้น ในทางกลับกันเมื่อทำการฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน windward จะส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ตต่ำลงตามแสดงในรูปที่ 2.15

Witayaprapakorn (2013) ศึกษาผลของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร โดยใช้เทคนิค SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาค

ติดตามการไหลเฉพาะ جهتเท่านั้นเพื่อให้สามารถแบ่งแยกขอบเขตของส่วนผสมของเจ็ดออกจากกระแสลมขวางบริสุทธิ์ได้ชัดเจน ซึ่งส่งผลให้ Witayaprapakorn (2013) สามารถประเมินค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมได้โดยตรง ซึ่งค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ของงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 3.9 ในกรณีฉีดเจ็ดควบคุมมีพารามิเตอร์ r_m เท่ากับ 2% และทำการฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุม 2 กรณีด้วยกัน คือ ± 15 องศา (I15) และตำแหน่ง ± 135 องศา (I135) ผลการศึกษาพบว่า ในการใช้เจ็ดควบคุมกรณี I15 ส่งผลทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรใกล้เคียงกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม ในขณะที่การใช้เจ็ดควบคุมกรณี I135 ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกรณี I15 และไม่ฉีดเจ็ดควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2.16

Chaikasetzin *et al.* (2014) ศึกษาผลของอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรด้วยเทคนิคเดียวกับ Witayaprapakorn (2013) โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4.1 ในกรณีที่ฉีดเจ็ดควบคุมและกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่มุม ± 135 องศา (I135) ค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) เท่ากับ 2% และ 4% ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) มีผลทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในกรณี I135 เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 2.17

Wangkiat *et al.* (2015) ศึกษาผลของตำแหน่งการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้างและค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ดในกระแสลมขวางด้วยเทคนิคเดียวกับ Witayaprapakorn (2013) ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 12 โดยทำการทดลองในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ I15, I45, I75, I105, I135 และ I165 โดยที่อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) มีค่าคงที่เท่ากับ 4 % ผลการศึกษาพบว่า กรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมทางด้าน windward (I15–I75) มีผลทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรต่ำกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม ในขณะที่กรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งเชิงมุมทางด้าน leeward (I105–I165) มีผลทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการ

ผสมเชิงปริมาตรสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม และยังพบว่าแนวโน้มของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อทำการเพิ่มค่าตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ดควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2.18

Tekhuad (2015) ศึกษาผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) ของเจ็ดในกระแสมวลขวางด้วยเทคนิคเดียวกับ Witayaprapakorn (2013) โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4, 8, และ 12 ในกรณีฉีดเจ็ดควบคุมงานวิจัยนี้ทำการทดลองที่กรณี I15, I30, I45, I60, I75, I90, I105, I120, I135, I150, และ I165 โดยที่ตรงค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ดหลัก (r_m) ไว้ที่ 4 % ผลการศึกษาพบว่าการฉีดเจ็ดควบคุมทางด้าน windward (ตำแหน่งเชิงมุมน้อยกว่า 90 องศา) จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรลดลงในทุกๆ ค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) หรือสามารถกล่าวได้ว่าการฉีดเจ็ดควบคุมจะไปยับยั้ง (suppress) การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมวลขวาง ในขณะที่การฉีดเจ็ดควบคุมทางด้าน leeward (ตำแหน่งเชิงมุมมากกว่า 90 องศา) จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นในทุกๆ ค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) หรือสามารถกล่าวได้ว่าการฉีดเจ็ดควบคุมจะไปส่งเสริม (promote) การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมวลขวาง ผลการทดลองได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.19 และรูปที่ 2.20 ซึ่งผลการศึกษาที่มีความสอดคล้องกับ Wangkiat *et al.* (2015) นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุมกับเจ็ดในกระแสมวลขวางที่มีค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ำจะมากกว่าเจ็ดในกระแสมวลขวางที่มีค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลสูง

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎี

การทดลองเจ็ตในกระแสมวลว่างในงานวิจัยนี้มีลักษณะการไหลที่เกี่ยวข้อง 3 ลักษณะด้วยกันคือ 1) การไหลของเจ็ตหลัก (mj) หรือย่อว่า “เจ็ตหลัก” 2) การไหลของกระแสมวลว่าง (cf) หรือย่อว่า “กระแสมวลว่าง” และ 3) การไหลของเจ็ตควบคุม (cj) หรือย่อว่า “เจ็ตควบคุม” โดยที่การไหลทั้ง 3 ลักษณะสามารถมีชนิดของไหลที่แตกต่างกันได้ทั้งหมด 3 ชนิดด้วยกัน คือ ของไหลชนิดที่หนึ่ง (F_1) ของไหลชนิดที่สอง (F_2) และของไหลชนิดที่สาม (F_3) ดังนั้นการประยุกต์ใช้ทั่วไปอาจมีกรณีเฉพาะได้ทั้งหมด $3 \times 3 = 9$ กรณี อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะกรณีการประยุกต์ใช้ในลักษณะดังนี้

- กำหนดให้ของไหลที่เป็นเจ็ตหลัก (main jet) เป็น ของไหลชนิดที่หนึ่ง (F_1)
- กำหนดให้ของไหลที่เป็นกระแสมวลว่าง (crossflow) เป็น ของไหลชนิดที่สอง (F_2) ซึ่งต่างชนิดกับของไหลชนิดที่หนึ่ง (F_1)
- กำหนดให้ของไหลที่เป็นเจ็ตควบคุม (control jet) เป็น ของไหลชนิดที่หนึ่ง (F_1) หรือ ของไหลชนิดที่สอง (F_2) เท่านั้น

การเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ต คือ ความสามารถในการเหนี่ยวนำของไหลรอบข้างเจ็ตเข้ามาผสมกับตัวเจ็ตเอง เช่น การเหนี่ยวนำเอาอากาศรอบข้างเข้ามาผสมกับเจ็ตหลักซึ่งเป็นเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ การเหนี่ยวนำการผสมเป็นคุณสมบัติที่ถูกประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น การผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ การแพร่กระจายตัวของควันจากปล่องควันโรงงาน และการผสมของสารเคมี เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรม

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงคำนิยามของปริมาณที่ใช้วัดความสามารถในการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลว่างซึ่งคืออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Volumetric Entrainment Ratio, E) จากนั้นจะกล่าวถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการประเมินวัดการเหนี่ยวนำการผสม รวมไปถึงเทคนิคต่างๆที่ใช้ในการแก้ปัญหาในการประเมินวัดการเหนี่ยวนำการผสม และลงท้ายด้วยตัวแปรที่บ่งบอกถึงประสิทธิผลของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมในงานวิจัยนี้

3.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Volumetric Entrainment Ratio, E)

การเหนี่ยวนำการผสมเป็นความสามารถที่เจ็ตสามารถเหนี่ยวนำให้ของไหลรอบข้างเข้ามาผสมกับตัวเจ็ตเอง ซึ่งส่งผลให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางใดๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเจ็ตไหลไปตามแนวทางการไหล โดยที่รูปที่ 3.1 แสดงการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางในกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม เนื่องจากการประยุกต์ใช้อาจมีการไหลได้ 3 ลักษณะ (m_j, c_f, c_j) และอาจมีของไหลที่แตกต่างกันได้ถึง 3 ชนิด (F_1, F_2, F_3) ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น โดยที่งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการเหนี่ยวนำการผสม ซึ่งนำไปสู่การผสมของของไหลอย่างน้อย 2 ชนิดคือของไหลของเจ็ตหลัก (F_1) และของไหลของกระแสลมขวาง (F_2) ในขณะที่ของไหลของเจ็ตควบคุมอาจเป็น F_1 หรือ F_2 ดังนั้นเพื่อความชัดเจนและเพื่อให้สามารถประเมินการเหนี่ยวนำการผสมของไหล 2 ชนิด (F_1, F_2) ได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมทั้งในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (รูปที่ 3.1) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุม (รูปที่ 3.2 และ รูปที่ 3.3(ก)-(ค)) ดังจะอธิบายในรายละเอียดต่อไป งานวิจัยนี้จะนิยาม ‘เจ็ต’ ในบริบทของการเหนี่ยวนำการผสมเป็น

“การไหลของส่วนผสมของของไหลที่เป็นชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลัก”

ซึ่งจะครอบคลุมทั้งในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ตควบคุม (CJICF) ไม่ว่าของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมนั้นจะเป็นของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) หรือของไหลชนิดเดียวกับเจ็ตหลัก (F_1) ก็ตาม

อนึ่ง รูปที่ 3.2 แสดงปริมาตรควบคุม (CV) ในกรณีที่ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในกระแสลมขวาง (F_2) ในขณะที่รูปที่ 3.3(ก)-(ค) แสดงปริมาตรควบคุม (CV) ในกรณีที่ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลัก (F_1) ใน 3 สถานการณ์ที่เป็นไปได้ต่างๆ กัน กล่าวคือ ในระนาบตัดขวางการไหลที่ตำแหน่ง x ที่ทำการประเมินวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

- รูปที่ 3.3(ก) การไหลของเจ็ตหลักและการไหลของเจ็ตควบคุมยังคงแยกกันอย่างอิสระ และไม่มีการผสมกันเลย
- รูปที่ 3.3(ค) เจ็ตควบคุมถูกเหนี่ยวนำเข้าไปผสมกับเจ็ตหลักหมดแล้ว
- รูปที่ 3.3(ข) กรณีระหว่างกลางซึ่งส่วนหนึ่งของเจ็ตควบคุมถูกเหนี่ยวนำให้ไปผสมกับเจ็ตหลัก ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งยังไม่ถูกเหนี่ยวนำให้ไปผสมกับเจ็ตหลักที่ระนาบตัดขวาง x ที่ทำการประเมินวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

ปริมาณที่ใช้วัดความสามารถในการเหนี่ยวนำการผสมคืออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Volumetric Entrainment Ratio, E) ซึ่งนิยามเป็น

$$E = \frac{Q_{F_1}(x)}{Q_{F_1,o}} \quad (3.1)$$

โดย E คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเฉลี่ยเทียบกับเวลา

$Q_{F_1}(x)$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลักที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x เฉลี่ยเทียบกับเวลา โดยในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมและกรณีฉีดเจ็ตควบคุม โดยที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในกระแสลมขวาง (F_2) จะหมายถึงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของของไหลที่มาจากเจ็ตหลัก หรือสามารถเรียกอย่างย่อเป็น “อัตราการไหลของส่วนผสมของเจ็ตหลัก” และในกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลัก (F_1) จะหมายถึง อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของของไหลที่มาจากทั้งเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุม หรือสามารถเรียกอย่างย่อว่า “อัตราการไหลของส่วนผสมของเจ็ตหลักและส่วนผสมของเจ็ตควบคุม”

$Q_{F_1,o}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมของของไหลที่เป็นชนิดเดียวกับเจ็ตหลักที่ปากทางออก โดยจะรวมถึงอัตราการไหลของเจ็ตควบคุมในกรณีที่ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลัก (F_1)

เมื่อประยุกต์ใช้สมการที่ 3.1 กับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) จึงได้เป็น

$$E = \frac{Q_{F_1}(x)}{Q_{F_1,o}} = \frac{(Q_{mj,o} + Q_{cf/mj})}{Q_{mj,o}} \quad (3.2)$$

เมื่อ $Q_{F_1}(x)$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลักที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x เฉลี่ยเทียบกับเวลา ซึ่งในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) จะหมายถึงอัตราการไหล

เชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดหลัก โดยที่ตามกฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) จะสามารถเขียนได้เป็น

$$Q_{F_1}(x) = Q_{mj,o} + Q_{cf/mj}$$

$Q_{mj,o}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ดหลัก
 $Q_{cf/mj}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวางทั้งหมด (F_2) ที่ถูกเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมกับเจ็ดหลักผ่าน control surface ของปริมาตรควบคุม (CV) ดังแสดงในรูปที่ 3.1

อนึ่ง $Q_{F_1}(x) [= Q_{mj,o} + Q_{cf/mj}]$ ในกรณีนี้จะมีค่าเท่ากับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดหลัก ซึ่งสามารถประเมินวัดได้โดยตรงด้วยเทคนิคการวัดด้วย SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดหลักเท่านั้น โดยที่ค่าที่ประเมินวัดได้นั้นจะมีความถูกต้องและสอดคล้องกับกายภาพการไหลจริงในงานวิจัยนี้อยู่แล้ว

สำหรับกรณีเจ็ดควบคุมนั้น งานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะ 2 กรณีของของไหลที่เป็นเจ็ดควบคุม คือ กรณีที่ของไหลที่เป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) โดยที่จะเรียกกรณีนี้ว่า 'case I' และกรณีที่ของไหลที่เป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (F_1) โดยที่จะเรียกกรณีนี้ว่า 'case II' เพื่อให้สมการที่ 3.1 มีความสอดคล้องกับการใช้งานและชนิดของของไหลที่นำมาคิดเป็นเจ็ดควบคุม ดังนั้นสมการที่ 3.1 จึงสามารถประยุกต์ใช้ได้ 2 กรณี ดังนี้

1) การประเมินอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาคิดเป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในกระแสลมขวาง (F_2) และไม่ใช้ของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (F_1) หรือ case I

เมื่อของไหลที่นำมาคิดเป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในกระแสลมขวาง (F_2) และไม่ใช้ของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (F_1) ปริมาตรควบคุมที่ใช้ในการประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ที่มีความสอดคล้องกับกายภาพจริงในกรณีนี้จะแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ดังนั้นอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E_1 ตามนิยามสมการ 3.1 สามารถประยุกต์ใช้ในกรณีนี้ได้เป็น

$$E_1 = \frac{Q_{F_1}(x)}{Q_{F_1,o}} = \frac{(Q_{mj,o} + Q_{cf/mj})}{Q_{mj,o}} \quad (3.3)$$

เมื่อ $Q_{F_1}(x)$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลักที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x เฉลี่ยเทียบกับเวลา ซึ่งในกรณีนี้จะหมายถึงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ตหลัก โดยที่ตามกฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) จะสามารถเขียนได้เป็น $Q_{F_1}(x) = Q_{mj,o} + Q_{cf/mj}$

$Q_{mj,o}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ตหลัก

$Q_{cf/mj}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวางทั้งหมด (F_2) ที่ถูกเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมกับเจ็ตหลักผ่าน control surface ของปริมาตรควบคุม (CV) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ไม่ว่าของไหลนั้นจะมาจากกระแสลมขวางหรือเจ็ตควบคุมก็ตาม

อนึ่ง $Q_{F_1}(x) [= Q_{mj,o} + Q_{cf/mj}]$ ในกรณีนี้จะมีค่าเท่ากับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ตหลัก ซึ่งสามารถประเมินวัดได้โดยตรงด้วยเทคนิคการวัดด้วย SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตหลักเท่านั้น โดยที่ค่าที่ประเมินวัดได้นั้นจะมีความถูกต้องและสอดคล้องกับกายภาพการไหลจริงในงานวิจัยนี้แล้ว

2) การประเมินอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลัก (F_1) หรือ case II

เมื่อของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลัก (F_1) โดยลักษณะการไหลที่ปรากฏในระนาบตัดขวาง x ที่ทำการประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่เป็นไปได้จะมี 3 กรณี ซึ่งจะแสดงพร้อมปริมาตรควบคุมที่สอดคล้องกับกายภาพจริงของการไหลและเหมาะสมในการวิเคราะห์ในรูปที่ 3.3(ก)-(ค) โดยที่อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร E_2 ตามสมการ 3.1 สามารถประยุกต์ใช้ในกรณีนี้ได้เป็น

$$E_2 = \frac{Q_{F_1}(x)}{Q_{F_1,o}} = \frac{(Q_{mj,o} + Q'_{cf/mj}) + Q_{cj,o} + Q'_{cf/cj}}{Q_{mj,o} + Q_{cj,o}} \quad (3.4)$$

เมื่อ $Q_{F_1}(x)$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลักที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x เฉลี่ยเทียบกับเวลา ซึ่งในกรณีนี้จะหมายถึงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ตหลักและส่วนผสมของเจ็ตควบคุม โดยที่ตามกฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) จะสามารถเขียนได้เป็น

$$Q_{F_1}(x) = (Q_{mj,o} + Q'_{cf/mj}) + Q_{cj,o} + Q'_{cf/cj}$$

$(Q_{mj,o} + Q'_{cf/mj})$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ตหลัก
$Q_{mj,o}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ตหลัก
$Q'_{cf/mj}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของกระแสลมขวางที่ถูกเจ็ตหลักเหนี่ยวนำเข้ามาผสมผ่าน control surface ที่เป็นผิวสัมผัสระหว่างส่วนผสมของเจ็ตหลักกับกระแสลมขวางบริสุทธิ์เท่านั้น ไม่รวมส่วนของเจ็ตควบคุม
$Q_{cj,o}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ตควบคุม
$Q'_{cf/cj}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของกระแสลมขวางที่ถูกเจ็ตควบคุมเหนี่ยวนำเข้ามาผสมผ่าน control surface ที่เป็นผิวสัมผัสระหว่างส่วนผสมของเจ็ตควบคุมและกระแสลมขวางเท่านั้น ไม่รวมส่วนของเจ็ตหลัก ก่อนที่เจ็ตหลักจะเหนี่ยวนำให้เจ็ตควบคุมเข้ามาผสม

อนึ่งการประยุกต์ใช้สมการที่ 3.4 นี้ เพื่อให้มีความสอดคล้องกับกายภาพจริง จึงสามารถคิดเปรียบเทียบว่าในการทดลองมีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุม

อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์การทดลอง จึงส่งผลให้ไม่สามารถใส่อนุภาคติดตามการไหลในของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมได้ ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาความถูกต้องทางกายภาพในการประยุกต์ใช้สมการ 3.4 ดังนี้

เมื่อพิจารณาผลการทดลองทางด้านโครงสร้างของเจ็ตในบทที่ 5 ประกอบกับการอธิบายผลการทดลองที่จะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 8 พบว่า ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd ที่ทำการประเมินวัดจะสอดคล้องกับสถานการณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.3(ค) เป็นหลัก ซึ่งคือกรณีที่เจ็ตควบคุมถูกเจ็ตหลักเหนี่ยวนำเข้าไปผสมหมดแล้ว ดังนั้นการพิจารณาความถูกต้องในการประเมิน

วัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจะพิจารณาบนสมมติฐาน คือ การไหลที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับสถานการณ์ที่เกิดขึ้นในรูปที่ 3.3(ค) เท่านั้น ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาพจน์ $Q_{F_1}(x)$ ที่เศษในสมการที่ 3.4 หรือ อัตราการไหลของส่วนผสมของเจ็ดหลักและส่วนผสมของเจ็ดควบคุมของปริมาตรควบคุมในรูปที่ 3.3(ค) จะสามารถเขียนได้เป็น

$$Q_{F_1,true} = (Q_{mj,o} + Q'_{cf/mj}) + Q_{cj,o} + Q'_{cf/cj} \quad (3.5)$$

โดยที่	$Q_{F_1,true}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดหลักและส่วนผสมของเจ็ดควบคุมจริงตามกายภาพของการไหลที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x
	$Q_{mj,o}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ดหลัก
	$Q'_{cf/mj}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของกระแสลมขวางที่ถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำเข้ามาผสมผ่าน control surface ที่เป็นผิวสัมผัสระหว่างส่วนผสมของเจ็ดหลักกับกระแสลมขวางบริสุทธิ์เท่านั้น ไม่รวมส่วนของเจ็ดควบคุม
	$Q_{cj,o}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ดควบคุม
	$Q'_{cf/cj}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของกระแสลมขวางที่ถูกเจ็ดควบคุมเหนี่ยวนำเข้ามาผสมผ่าน control surface ที่เป็นผิวสัมผัสระหว่างส่วนผสมของเจ็ดควบคุมและกระแสลมขวางเท่านั้น ไม่รวมส่วนของเจ็ดหลัก ก่อนที่เจ็ดหลักจะเหนี่ยวนำให้เจ็ดควบคุมเข้ามาผสม

เพื่อให้สามารถได้มาซึ่งอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดควบคุมก่อนที่จะไหลเข้าไปผสมกับเจ็ดหลักจึงต้องพิจารณาปริมาตรควบคุม (CV) ในรูปที่ 3.3(ง) ประกอบ โดยที่รูปที่ 3.3(ง) แสดงปริมาตรควบคุม (CV) ของเจ็ดควบคุมก่อนที่จะถูกเหนี่ยวนำเข้าไปผสมกับเจ็ดหลัก ซึ่งเป็นปริมาตรควบคุมย่อยของรูปที่ 3.3(ค)

เมื่อประยุกต์กฎอนุรักษ์มวล (conservation of mass) กับปริมาตรควบคุมของเจ็ดควบคุมในรูปที่ 3.3 (ง) ทำให้สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q_{cj} = Q_{cj,o} + Q'_{cf/cj} \quad (3.6)$$

โดยที่ Q_{cj} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดควบคุมก่อนที่จะไหลเข้าไปผสมกับเจ็ดหลัก

เมื่อแทน Q_{cj} ในสมการที่ 3.6 ลงในสมการที่ 3.5 จะได้

$$Q_{F_1,true} = (Q_{mj,o} + Q'_{cf/mj}) + Q_{cj} \quad (3.7)$$

อย่างไรก็ตามในการทดลองจริงจะทำการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมวลและเจ็ดควบคุม ดังนั้นจึงส่งผลให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลักที่ประเมินวัดได้โดย SPIV จะสอดคล้องกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดหลักในปริมาตรควบคุม (CV) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 กล่าวคือ

$$Q_{F_1,meas} = Q_{mj,o} + Q_{cf/mj} \quad (3.8)$$

โดยที่ $Q_{F_1,meas}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดหลักที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x ที่สามารถประเมินวัดได้จริงจากการใช้เทคนิค SPIV ควบคุมไปกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมวลและเจ็ดควบคุม

$Q_{cf/mj}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกับกระแสมวลทั้งหมด (F_2) ที่ถูกเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมกับเจ็ดหลักผ่าน control surface ของปริมาตรควบคุม (CV) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ไม่ว่าของไหลจะมาจากกระแสมวลหรือเจ็ดควบคุมก็ตาม

เมื่อพิจารณาพจน์ $Q_{cf/mj}$ ในสมการที่ 3.8 ซึ่งสามารถแยกเทอมออกมาได้เป็น 2 เทอม ดังนี้

$$Q_{cf/mj} = Q'_{cf/mj} + Q_{cj} \quad (3.9)$$

โดยที่ $Q'_{cf/mj}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของกระแสมวลทั้งหมดที่ถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำเข้ามาผสมผ่าน control surface ที่เป็นผิวสัมผัส

ระหว่างส่วนผสมของเจ็ดหลักกับกระแสลมขวางบริสุทธิ์เท่านั้น ไม่รวม
รวมส่วนของเจ็ดควบคุม
 Q_{cj} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดควบคุมก่อนที่จะ
ไหลเข้าไปผสมกับเจ็ดหลัก

เมื่อแทน $Q_{cf/mj}$ ในสมการที่ 3.9 ลงในสมการที่ 3.8 จะได้

$$Q_{F_1, meas} = Q_{mj,o} + Q'_{cf/mj} + Q_{cj} \quad (3.10)$$

เพื่อประเมินวัดค่าความคลาดเคลื่อนของค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ด
หลักและส่วนผสมของเจ็ดควบคุม จึงนำค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดหลักที่ไหล
ผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x ที่สามารถประเมินวัดได้จริง ($Q_{F_1, meas}$) ในสมการที่ 3.10 หักออก
จากค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดหลักและส่วนผสม
ของเจ็ดควบคุม ($Q_{F_1, true}$) ในสมการที่ 3.7 ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} error &= Q_{F_1, true} - Q_{F_1, meas} \\ &= [(Q_{mj,o} + Q'_{cf/mj}) + Q_{cj}] - [Q_{mj,o} + Q'_{cf/mj} + Q_{cj}] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ 3.11 จะพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อน (*error*) ในการประเมินวัดอัตราการไหลเชิง
ปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดหลักและส่วนผสมของเจ็ดควบคุมใน case II บนสมมติฐานว่า “เจ็ด
ควบคุมถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำเข้าไปผสมหมดแล้วที่ระนาบตัดขวางการไหล x ที่ทำการประเมินวัด
อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร” จะเท่ากับ 0 ซึ่งแสดงว่าถ้าสมมติฐานดังกล่าวเป็นจริง
ตามกายภาพจริงของการไหลแล้ว การประเมินวัด $Q_{F_1}(x)$ และ E_2 ในการทดลองนี้จะมีความถูก
ต้อง

3.2 ปัญหาของการศึกษาประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ดในกระแสมขวางในอดีตและการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้

การศึกษาประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ดในกระแสมขวางโดยตรงจากการทดลองในงานวิจัยในอดีตแทบจะไม่มีเลย ทั้งนี้เป็นเหตุมาจากข้อจำกัดต่างๆของอุปกรณ์และเทคนิคการวัด โดยปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเด็นหลักคือ

- 1) ปัญหาในการวัดองค์ประกอบของความเร็วของส่วนผสมของของไหลตามแนวแกน 3 แกนหลัก (x, y, z) ที่เป็นส่วนผสมของเจ็ดหลักบนระนาบตัดขวางใดๆ หลายจุดพร้อมกัน
- 2) ปัญหาในการระบุแยกแยะขอบเขตของส่วนผสมของเจ็ดหลักบนระนาบตัดขวางใดๆ ออกจากกระแสมขวางบริสุทธิ์รอบข้าง

จากปัญหาดังกล่าว จึงทำให้งานวิจัยในอดีตแก้ปัญหาโดยใช้วิธีวัดปริมาณอื่นที่มีคุณลักษณะเชื่อมโยงกับการเหนี่ยวนำการผสมโดยทางอ้อมแทนซึ่งไม่ใช่เป็นการวัดค่าการเหนี่ยวนำการผสมโดยตรง ตัวอย่างเช่น การวัด spread rate และ decay rate ของความเร็วเฉลี่ยและปริมาณความเข้มข้น (scalar concentration) เช่น งานวิจัยของ Karmotoni and Greber (1972) ซึ่งศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมโดยใช้วิธีวัดอัตราการลดลงของอุณหภูมิ (temperature decay rate) แทนการวัดค่าการเหนี่ยวนำการผสมโดยตรง หรืองานวิจัยของ Smith and Mungal (1998) ซึ่งศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมโดยใช้การลดลงของ passive scalar (passive scalar concentration decay) เป็นตัวบ่งชี้ เป็นต้น

เพื่อให้สามารถแก้ปัญหาทั้งสองประเด็นนี้ได้และให้สามารถประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้โดยตรงจากการทดลอง จึงเป็นแรงจูงใจให้ Witayaprapakorn (2013) และ Sornphrom and Bunyajitradulya (2016) ใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดหลักเท่านั้น (main-jet-fluid only seeding scheme) ไม่ใส่ในกระแสมขวาง ในการแก้ปัญหา โดยรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3.2.1 การแก้ปัญหาในการวัดองค์ประกอบของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดหลักด้วยเทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) หลายจุดในระนาบตัดขวางพร้อมกัน

ปัจจุบันมีอุปกรณ์การวัดความเร็วสนามของของไหลซึ่งเรียกว่า Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ซึ่งสามารถวัดองค์ประกอบของความเร็วของเจ็ดในกระแสมขวางทั้ง

สามองค์ประกอบตาม 3 แนวแกน (x, y, z) พร้อมกันหลายๆ จุดบนระนาบหน้าตัดขวางใดๆ ณ ขณะเดียวกันได้ ดังนั้นปัญหาในประเด็นที่ 1 จึงสามารถแก้ไขได้โดยใช้เครื่องมือ SPIV

3.2.2 การแก้ปัญหาในการระบุขอบเขตของส่วนผสมของเจ็ดหลักออกจากกระแสลมขวางปริสสุทธ์รอบข้าง

เพื่อให้สามารถวัดความเร็วสนามของของไหลหลายๆ จุดบนระนาบตัดขวางใดๆ ที่เวลาเดียวกันโดยเทคนิค SPIV ได้ การใส่อนุภาคติดตามการไหลในของไหลเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจาก SPIV ใช้หลักการวัดความเร็วของอนุภาคที่อยู่ในของไหลซึ่งถูกแรงต้านจากของไหลกระทำให้เคลื่อนที่ไปกับของไหลแทนที่จะวัดความเร็วของของไหลโดยตรง อย่างไรก็ตามงานวิจัยในอดีตมักใช้เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ดหลักและในกระแสลมขวางเพื่อศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ดในกระแสลมขวาง ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคนิคดังกล่าวจะทำให้ไม่สามารถระบุและแยกแยะขอบเขตของส่วนผสมของเจ็ดหลักออกจากกระแสลมขวางปริสสุทธ์ได้อย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 3.4(ก) นอกจากนี้โครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ดในกระแสลมขวางต่างๆ ที่สามารถประเมินวัดได้สำหรับเทคนิคนี้จะได้มาซึ่งโครงสร้างและคุณลักษณะที่เป็นผลรวมของทั้งส่วนของส่วนผสมของเจ็ดหลักและส่วนของกระแสลมขวางปริสสุทธ์ที่ไม่แยกแยะออกจากกัน ดังนั้นเพื่อให้สามารถแก้ปัญหาในประเด็นที่ไม่สามารถระบุแยกแยะขอบเขตของส่วนผสมของเจ็ดหลักออกจากกระแสลมขวางปริสสุทธ์ได้อย่างชัดเจน จึงนำมาสู่การใช้เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะของไหลที่เป็นชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลักเท่านั้นและไม่ใส่ในกระแสลมขวางในการวัดความเร็วด้วย SPIV

อนึ่งด้วยการใช้เทคนิค SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดหลักเท่านั้นและไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ทำให้สามารถระบุแยกแยะบริเวณที่เป็นส่วนผสมของเจ็ดหลักออกจากกระแสลมขวางปริสสุทธ์รอบข้างได้ และทำให้สามารถประเมินหาค่าความเร็วเฉพาะส่วนที่มาจากส่วนผสมของเจ็ดหลักเท่านั้นและไม่รวมส่วนของกระแสลมขวางปริสสุทธ์ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.4(ข) อีกทั้งยังสามารถแสดงโครงสร้างของส่วนผสมของเจ็ดหลักและปริมาณทางฟิสิกส์อื่นๆ ของเจ็ดในกระแสลมขวางโดยไม่รวมส่วนของกระแสลมขวางปริสสุทธ์ได้

สำหรับการใส่อนุภาคติดตามการไหลในกรณีเจ็ดควบคุมโดยที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) ที่ถูกต้องคือ ต้องมีการใส่อนุภาคติดตามไหลในเจ็ดควบคุมด้วย อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์การทดลอง จึงส่งผลให้ไม่มีการใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ดควบคุมในงานวิจัยนี้และนำมาสู่สมมติฐานในการคำนวณค่า E_2 ในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้กล่าวไปโดยละเอียดแล้วในหัวข้อที่ 3.1

3.3 การประเมินวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตที่ผ่านระนาบตัดขวางเฉลี่ยเทียบกับเวลา

การทดลองโดยใช้ SPIV ควบคู่ไปกับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตหลักเท่านั้นและไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ทำให้ความเร็วของการไหลที่วัดได้โดย SPIV เป็นส่วนที่มาจากส่วนผสมของเจ็ตหลักเท่านั้นและไม่รวมส่วนของกระแสลมขวางบริสุทธิ์มาเจือปน เนื่องจากบริเวณที่พบอนุภาคติดตามการไหลคือบริเวณที่เป็นส่วนผสมของเจ็ตหลักเท่านั้น ในทางกลับกันบริเวณที่ไม่พบอนุภาคติดตามการไหลคือบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ดังนั้นความเร็วที่ SPIV สามารถวัดได้จะสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\vec{V}_{\text{SPIV}}(\vec{x}, t) = \vec{V}_{F_1}(\vec{x}, t) = \begin{cases} \vec{V}(\vec{x}, t) & ; \vec{x} \text{ is in the main jet-fluid mixture region.} \\ \vec{0} & ; \vec{x} \text{ is in the pure surrounding crossflow region.} \end{cases} \quad (3.12)$$

โดยที่ $\vec{V}_{\text{SPIV}}(\vec{x}, t)$ คือ ความเร็วที่ SPIV ประเมินวัดได้ ที่ตำแหน่ง \vec{x} ณ เวลา t ใดๆ

$\vec{V}_{F_1}(\vec{x}, t)$ คือ ความเร็วของส่วนผสมของของไหลที่เป็นชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลัก ที่ตำแหน่ง \vec{x} ณ เวลา t ใดๆ โดยที่ในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม และกรณีฉีดเจ็ตควบคุม case I จะ หมายถึงความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตหลัก ในขณะที่กรณีฉีดเจ็ตควบคุม case II จะ หมายถึง ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตหลักและส่วนผสมของเจ็ตควบคุม

$\vec{V}(\vec{x}, t)$ คือ ความเร็วสนามซึ่งเป็นความเร็วที่ไม่แยกแยะส่วนที่เป็นของส่วนผสมของเจ็ตหลักและส่วนที่เป็นของกระแสลมขวางบริสุทธิ์

อนึ่ง เนื้อหาที่จะกล่าวถึงต่อไป จะกล่าวถึงเฉพาะในกรณีที่ไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) เท่านั้น โดยสำหรับกรณีฉีดเจ็ตควบคุม (CJICF) สามารถที่จะประยุกต์เนื้อหาของกรณีไม่ได้ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ในมุมมองของการประเมินวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ถูกต้องตามกายภาพจริงของไหลตามแต่กรณีของการฉีดเจ็ตควบคุมดังจะกล่าวถึงต่อไป

เพื่อที่จะประเมินวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ตหลักที่ระนาบตัดขวางใด ๆ งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้สมการที่ 3.12 ควบคู่กับสมการอัตราการไหลเชิงปริมาตรดังนี้

$$Q_{F_1}(x,t) = \int_{A_{F_1}(x,t)} V_x(\bar{x},t)dA = \int_{A(x)} V_{F_1,x}(\bar{x},t)dA \quad (3.13)$$

$Q_{F_1}(x,t)$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดหลักที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x ณ เวลา t ใดๆ
$V_x(\bar{x},t)$	คือ	ความเร็วสนามในแกน x ที่ตำแหน่ง \bar{x} ณ เวลา t ใดๆ
$A_{F_1}(x,t)$	คือ	ขอบเขตของส่วนผสมของเจ็ดหลักบนระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x ณ เวลา t ใดๆ
$V_{F_1,x}(\bar{x},t)$	คือ	ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดหลัก ที่ตำแหน่ง \bar{x} ณ เวลา t ใดๆ ตามสมการที่ 3.12
$A(x)$	คือ	ขอบเขตทั้งหมดบนระนาบตัดขวางที่ครอบคลุม $A_{F_1}(x,t)$ ทั้งหมดตลอดช่วงเวลาการเก็บข้อมูล

เมื่อนำอัตราการไหลของส่วนผสมของเจ็ดหลักมาเฉลี่ยเทียบกับเวลาโดยอ้างอิงสมการที่ 3.13 จะได้

$$\begin{aligned} Q_{F_1}(x) &= \frac{1}{T} \int_0^T Q_{F_1}(x,t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \left(\int_{A_{F_1}(x,t)} V_x(\bar{x},t) dA \right) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \left(\int_{A(x)} V_{F_1,x}(\bar{x},t) dA \right) dt \\ &= \int_{A(x)} \left(\frac{1}{T} \int_0^T V_{F_1,x}(\bar{x},t) dt \right) dA \\ &= \int_{A(x)} V_{F_1,x}(\bar{x}) dA \end{aligned} \quad (3.14)$$

เมื่อ	$Q_{F_1}(x)$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดหลักที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x เฉลี่ยเทียบกับเวลา
	$V_{F_1,x}(\bar{x})$	คือ	ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดหลักตามแนวแกน x ที่ตำแหน่ง \bar{x} เฉลี่ยเทียบกับเวลา ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$V_{F_1,x}(\bar{x}) = \frac{1}{T} \int_0^T V_{F_1,x}(\bar{x},t) dt$$

เมื่อนามความเร็วเป็นเมตริกซ์ขนาดจำกัด (finite matrix) ดังนั้นจะสามารถประมาณ $Q_{F_1}(x)$ จากสมการที่ 3.14 ได้เป็น

$$Q_{F_1}(x) = \int_{A(x)} V_{F_1,x}(\bar{x})dA = \sum_{mm} (V_{F_1,x,mm}\Delta A) \quad (3.15)$$

โดยที่ $V_{F_1,x,mm}$ คือ ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดหลักเฉลี่ยเทียบกับเวลาในแนวแกน x ที่แต่ละเอลิเมนต์ที่ตำแหน่ง (m,n) บนเมตริกซ์นามความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดหลัก

ΔA คือ พื้นที่ของแต่ละเอลิเมนต์ที่ตำแหน่ง (m,n) ซึ่งมีค่าเท่ากันหมดทุกเอลิเมนต์

สำหรับการประยุกต์ใช้กับกรณีเจ็ดจุดควม (CJICF) นั้นความเร็วและขอบเขตของส่วนผสมของของไหลที่เป็นชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลักนั้นจะแบ่งตามแต่กรณีดังนี้

case I : ความเร็วของส่วนผสมของของไหลที่เป็นชนิดเดียวกับเจ็ดหลักและขอบเขตของส่วนผสมของของไหลที่เป็นชนิดเดียวกับของไหลเจ็ดหลักคือ ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดหลักและขอบเขตของส่วนผสมของเจ็ดหลักตามลำดับ ดังนั้นการวิเคราะห์การประเมินวัฏจักรการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดที่ผ่านระนาบตัดขวางเฉลี่ยเทียบกับเวลาจึงมีความสอดคล้องกับกับสมการที่ 3.12-3.15 เช่นเดียวกับกรณีไม่เจ็ดจุดควมอยู่แล้ว

case II : ความเร็วของส่วนผสมของของไหลที่เป็นชนิดเดียวกับเจ็ดหลักและขอบเขตของส่วนผสมของของไหลที่เป็นชนิดเดียวกับของไหลเจ็ดหลักคือ ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดหลักและส่วนผสมของเจ็ดจุดควมและขอบเขตของส่วนผสมของเจ็ดหลักและส่วนผสมของเจ็ดจุดควมตามลำดับ ดังนั้นความหมายของพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไปจากกรณีไม่เจ็ดจุดควมจะมีดังนี้

$\vec{V}_{F_1}(\bar{x}, t)$ คือ ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดหลักและส่วนผสมของเจ็ดจุดควม

$\vec{V}(\bar{x}, t)$ คือ ความเร็วสนามซึ่งเป็นความเร็วที่ไม่แยกแยะส่วนผสมของเจ็ดหลัก, ส่วนผสมของเจ็ดจุดควม, และส่วนที่เป็นกระแสลมขวางบริสุทธิ์

$A_F(x, t)$ คือ ขอบเขตของส่วนผสมของเจ็ดหลักและส่วนผสมของเจ็ดควบคุมบนระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x ณ เวลา t ใดๆ

3.4 ค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสม

เมื่อใช้เจ็ดควบคุมชนิดเพื่อปรับแต่งและควบคุมคุณลักษณะของเจ็ดในกระแสมขวาง การนิยามค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมจึงเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากเป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุมต่อค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ฉีดเจ็ดควบคุม ดังนั้นค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมจึงถูกนิยามเป็น อัตราส่วนระหว่างอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของกรณีฉีดเจ็ดควบคุม (E_{JICF}) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของกรณีที่ไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (E_{JICF}) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\eta = \frac{E_{JICF}}{E_{JICF}} \quad (3.16)$$

เมื่อ E_{JICF} คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีฉีดเจ็ดควบคุม
 E_{JICF} คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม

เพื่อให้การประยุกต์ใช้ประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสม (η) มีความสอดคล้องกับ 2 กรณีของการกำหนดชนิดของของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุม ดังนั้นการนิยามค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมสามารถแบ่งได้ 2 กรณีดังนี้

- 1) เมื่อของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในกระแสมขวาง (F_2) ดังนั้นค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมจะสามารถนิยามได้เป็น

$$\eta_1 = \frac{E_1}{E_{JICF}} \quad (3.17)$$

- 2) เมื่อของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) ดังนั้นค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมจะสามารถนิยามได้เป็น

$$\eta_{2,1} = \frac{E_2}{E_{JICF}} \quad (3.18)$$

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาพจน์ E_{JICF} ในสมการที่ 3.18 พบว่าหากของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมคือของไหลที่เป็นชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลัก เราสามารถมีทางเลือกประยุกต์ใช้คือ ไม่ใช่เจ็ตควบคุมแต่ใช้เจ็ตหลักที่มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรเริ่มต้นเท่ากับผลรวมของอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุมของกรณีฉีดเจ็ตควบคุม ดังนั้นจึงเป็นการเหมาะสมกว่าที่จะเปรียบเทียบเปรียบเสมือนว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตหลักที่ปากทางออกมีค่าเท่ากับ ผลรวมของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตหลักกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตควบคุมที่ปากทางออก จึงทำให้ในกรณีที่ฉีดเจ็ตควบคุมค่าอ้างอิงของ E_{JICF} ควรจะเป็น E_{JICF} ที่จะเสมือนว่ามีค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ที่มากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม ดังนั้นเพื่อให้การเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมมีความเหมาะสมยิ่งขึ้นจึงนิยามประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมตัวที่ 2 ขึ้น โดยคิดเปรียบเสมือนว่าค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมที่นำมาเปรียบเทียบกับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมนั้น มีการรวมผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ซึ่งการปรับแก้อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลจะทำได้ดังนี้

$$r_{mod} = \sqrt{\frac{\rho_{mj} u_{mj, mod}^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2}} \quad (3.19)$$

เมื่อ r_{mod} คือ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลของเจ็ตหลักที่ถูกปรับแก้
 $u_{mj, mod}$ คือ ความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตหลักที่ถูกปรับแก้ซึ่งสามารถคิดได้จาก

$$u_{mj, mod} = \frac{Q_{mj,o} + Q_{cj,o}}{A_{mj,o}} \quad (3.20)$$

โดยที่ $A_{mj,o}$ คือ พื้นที่หน้าตัดที่บริเวณปากทางออกของเจ็ตหลัก

ρ_{mj} คือ ความหนาแน่นของของไหลที่เป็นเจ็ตหลัก

ρ_{cf} คือ ความหนาแน่นของของไหลที่เป็นกระแสลมขวาง

ดังนั้นประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสมตัวที่ 2 ตามนิยามในสมการที่ 3.16 จะเขียนได้เป็น

$$\eta_{2,2} = \frac{E_2}{E_{\text{JICF, mod } r}} \quad (3.21)$$

เมื่อ $E_{\text{JICF, mod } r}$ คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมที่รวมผลของอัตราส่วนอัตราการใช้ของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก โดยที่ $E_{\text{JICF, mod } r}$ จะสามารถประมาณได้จากสมการของ Pruekwatana *et al.*(2016) ดังนี้

$$\frac{E_{\text{JICF, mod } r} - 1}{0.9r_{\text{mod}} + 1.4} = \left(\frac{x}{r_{\text{mod}}d} \right)^{0.5573} \quad (3.22)$$

3.5 การศึกษาโครงสร้างของการไหล

การประยุกต์ใช้เทคนิค SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลในการไหลนั้นๆ ส่งผลให้พบอนุภาคติดตามการไหล และทำให้ SPIV สามารถประเมินวัดความเร็วที่ไม่เป็นศูนย์สัมบูรณ์ได้ ($\vec{V} \neq 0$) ซึ่งนำมาสู่การได้มาซึ่งคุณลักษณะและโครงสร้างของเจ็ดในกระแสมขวง

โครงสร้างของเจ็ดในงานวิจัยนี้จะนิยามจาก “โครงสร้างของส่วนผสมของเจ็ดหลัก” โดยที่งานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะกรณีของการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดหลักเท่านั้นและไม่ใส่ในการไหลอื่น ดังนั้นเพื่อเกิดความชัดเจนในการพิจารณาโครงสร้างของเจ็ดในกระแสมขวงทั้งในกรณีที่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีที่ฉีดเจ็ดควบคุม (CJICF) ที่ประเมินวัดได้จากเทคนิค SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดหลักเท่านั้นและไม่ใส่ในการไหลอื่น จึงสามารถอธิบายได้ดังนี้

➤ เมื่อพิจารณากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF)

รูปที่ 3.5(ก) แสดงแผนภูมิชนิดของของไหลที่เป็นไปได้ที่จะปรากฏ ณ ตำแหน่ง \bar{x} และเวลา t ในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) โดย

บริเวณที่ 1	หมายถึง	ของไหลเจ็ดหลักบริสุทธิ์ (F_1)
บริเวณที่ 2	หมายถึง	ของไหลกระแสมขวงบริสุทธิ์ (F_2)
บริเวณที่ 12	หมายถึง	ส่วนผสมของของไหลเจ็ดหลัก (F_1) กับของไหลกระแสมขวง (F_2) หรือเรียกอย่างย่อว่า “ F_{12} ”

โดยที่บริเวณที่ถูกแรงแสดงบริเวณที่สามารถพบอนุภาคติดตามการไหลได้ (จากการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง) ซึ่งทำให้บริเวณนี้สามารถประเมินวัดความเร็วที่ไม่เป็นศูนย์สมบูรณ์ ($\vec{V} \neq 0$) ได้ด้วย SPIV ในขณะที่บริเวณที่ 2 SPIV จะประเมินวัดความเร็วเป็นศูนย์สมบูรณ์ ($\vec{V} = 0$)

อนึ่ง เมื่อพิจารณาที่จุด \vec{x} และ เวลา t ชนิดของของไหลที่จะปรากฏจุด \vec{x} และ เวลา t ที่เป็นไปได้จะมี 2 ชนิดคือ ส่วนผสมของเจ็ตหลัก หรือกระแสลมขวางบริสุทธิ์ โดยที่การปรากฏของของไหลจะปรากฏเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้น (ไม่สามารถปรากฏพร้อมกันได้) ดังนั้นเพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างของส่วนผสมของเจ็ตหลัก จึงต้องได้มาซึ่งความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตหลักซึ่งสามารถนิยามได้ดังนี้

$$\vec{V}_{mj}(\vec{x}, t) = \begin{cases} \vec{V}(\vec{x}, t) & ; \vec{x} \text{ is in the main jet-fluid mixture region.} \\ \vec{0} & ; \vec{x} \text{ is not in the main jet-fluid mixture region.} \end{cases} \quad (3.23)$$

เมื่อ $\vec{V}_{mj}(\vec{x}, t)$ คือ ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตหลักที่ตำแหน่ง \vec{x} ณ เวลา t

$\vec{V}(\vec{x}, t)$ คือ ความเร็วสนามซึ่งเป็นความเร็วที่ไม่แยกแยะระหว่างส่วนผสมของเจ็ตหลักกับกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ที่ตำแหน่ง \vec{x} ณ เวลา t

หมายเหตุ : สำหรับกรณีฉีดเจ็ตควบคุม $\vec{V}(\vec{x}, t)$ จะหมายถึงความเร็วสนามซึ่งเป็นความเร็วที่ไม่แยกแยะระหว่างส่วนผสมของเจ็ตหลักกับกระแสลมขวางบริสุทธิ์ (ไม่ว่าของไหลนั้นจะมาจากระแสลมขวางหรือเจ็ตควบคุมก็ตาม)

สมการที่ 3.23 สามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อพิจารณาที่จุด \vec{x} ณ เวลา t ถ้าของไหลที่จุดนั้นเป็นเจ็ตหลักหรือส่วนผสมของเจ็ตหลัก จะนิยามให้ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตหลักมีค่าเท่ากับความเร็วสนามซึ่งไม่เป็นศูนย์สมบูรณ์ ($\vec{V} \neq 0$) ในทางกลับกันถ้าจุด \vec{x} ณ เวลา t ของไหลที่จุดนั้นเป็นของไหลชนิดอื่นที่ไม่ใช่เจ็ตหลักหรือส่วนผสมของเจ็ตหลักจะกำหนดให้ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตหลักที่จุด \vec{x} ณ เวลา t นั้นมีค่าเป็นศูนย์สมบูรณ์ ($\vec{V} = 0$)

ดังนั้นเมื่อพิจารณาคุณสมบัติและโครงสร้างที่สามารถประเมินวัดได้ในกรณีนี้จะเป็น โครงสร้างที่มีส่วนประกอบจากทั้ง F_1 หรือ F_{12} โดยโครงสร้างที่มาจากทั้งสอง ส่วนประกอบนี้จะเป็น “โครงสร้างของเจ็ดหลัก (บริสุทธิ) หรือส่วนผสมของเจ็ดหลัก”

➤ เมื่อพิจารณากรณีเจ็ดเจ็ดควบคุม (CJICF)

รูปที่ 3.5(ข) แสดงแผนภูมิชนิดของของไหลที่เป็นไปได้ที่ปรากฏ ณ ตำแหน่ง x และ เวลา t ในกรณีเจ็ดเจ็ดควบคุม (CJICF) โดย

บริเวณที่ 1	หมายถึง	ของไหลเจ็ดหลักบริสุทธิ (F_1)
บริเวณที่ 2	หมายถึง	ของไหลที่กระแสมขวางบริสุทธิ (F_2)
บริเวณที่ 3	หมายถึง	ของไหลเจ็ดควบคุมบริสุทธิ (F_3)
บริเวณที่ 12	หมายถึง	ส่วนผสมของของไหลเจ็ดหลัก (F_1) กับของไหล กระแสมขวาง (F_2) เท่านั้น (ไม่มีส่วนผสม ของของไหลเจ็ดควบคุม) หรือเรียกอย่างย่อว่า “ F_{12} ”
บริเวณที่ 13	หมายถึง	ส่วนผสมของของไหลเจ็ดหลัก (F_1) กับของไหล เจ็ดควบคุม (F_3) เท่านั้น (ไม่มีส่วนผสมของ ของไหลกระแสมขวาง) หรือสามารถเรียกอย่าง ย่อว่า “ F_{13} ”
บริเวณที่ 23	หมายถึง	ส่วนผสมของของไหลกระแสมขวาง (F_2) กับ ของไหลเจ็ดควบคุม (F_3) เท่านั้น (ไม่มีส่วนผสม ของของไหลเจ็ดหลัก) หรือเรียกอย่างย่อว่า “ F_{23} ”
บริเวณที่ 123	หมายถึง	ส่วนผสมของของไหลเจ็ดหลัก (F_1), ของไหล กระแสมขวาง (F_2), และของไหลเจ็ดควบคุม (F_3) หรือเรียกอย่างย่อว่า “ F_{123} ”

โดยที่บริเวณที่ถูกแรงแสดงบริเวณที่สามารถพบอนุภาคติดตามการไหลได้ (จากการใส่ อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมขวางและเจ็ดควบคุม) ซึ่ง ทำให้บริเวณนี้สามารถประเมินวัดความเร็วที่ไม่เป็นศูนย์สัมบูรณ์ ($\vec{V} \neq 0$) ได้ด้วย SPIV ในขณะที่บริเวณที่ไม่ถูกแรง SPIV จะประเมินวัดความเร็วเป็นศูนย์สัมบูรณ์ ($\vec{V} = 0$)

ดังนั้นเมื่อพิจารณาประกอบกับสมการที่ 3.23 จะได้ว่าคุณสมบัติและโครงสร้างที่สามารถประเมินวัดได้ในกรณีนี้คือโครงสร้างที่มีส่วนประกอบจากทั้ง F_1 , F_{12} , F_{13} , หรือ F_{123} โดยโครงสร้างที่ประกอบไปด้วย 4 ส่วนดังกล่าวนี้ก็คือ “โครงสร้างของเจ็ดหลัก (บริสุทธิ) หรือ ส่วนผสมของเจ็ดหลัก” เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดยุติควบคุม

ดังนั้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะมีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในการไหลอื่น ไม่ว่าจะเป็กรณีไม่ฉีดยุติควบคุม (JICF) หรือ กรณีฉีดยุติควบคุม (CJICF) ก็ตาม ดังนั้นคุณสมบัติและโครงสร้างของเจ็ดในกระแสมวลที่ประเมินวัดได้ในงานวิจัยนี้จะเป็น “โครงสร้างของเจ็ดหลัก (บริสุทธิ) หรือส่วนผสมของเจ็ดหลัก” ไม่ว่าจะมีการฉีดยุติควบคุมหรือไม่ก็ตาม

อนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างของเจ็ดหลัก (บริสุทธิ) หรือส่วนผสมของเจ็ดหลักในกรณีไม่ฉีดยุติควบคุม (JICF) และกรณีฉีดยุติควบคุม (CJICF) โดยทั่วไปพบว่าโครงสร้างของเจ็ดหลัก (บริสุทธิ) หรือส่วนผสมของเจ็ดหลักในกรณีฉีดยุติควบคุมจะแตกต่างจากกรณีไม่ฉีดยุติควบคุม (JICF) ตรงที่โครงสร้างของเจ็ดหลัก (บริสุทธิ) หรือส่วนผสมของเจ็ดหลักจะมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ดหลักกับเจ็ดควบคุมด้วย

บทที่ 4

ชุดการทดลองและการทดลอง

เนื้อหาได้บันทึกจะกล่าวถึงชุดการทดลองและอุปกรณ์การทดลองในงานวิจัยนี้ และรวมไปถึงวิธีในการวัดและการสอบเทียบเครื่องมือวัดต่างๆ ในส่วนของชุดการทดลองนั้นจะสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) อุโมงค์ลมซึ่งมีพัดลมหอยโข่งทำหน้าที่สร้างกระแสลมขวาง 2) ชุดเจ็ทหลักซึ่งมีพัดลมหอยโข่งทำหน้าที่สร้างเจ็ทหลัก และ 3) ชุดเจ็ทควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCJ) ซึ่งมีคอมเพรสเซอร์ทำหน้าที่สร้างเจ็ทควบคุม สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเร็วของของไหลคือ Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) โดยที่ภาพรวมของการทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้ กระแสลมขวางที่ถูกสร้างมาจากพัดลมหอยโข่งจะไหลมาตามอุโมงค์ลม ในขณะที่เจ็ทหลักซึ่งถูกสร้างมาจากพัดลมหอยโข่งก็จะไหลมาตามท่อเจ็ทหลัก โดยที่เจ็ทหลักจะไหลพุ่งขึ้นปะทะกับกระแสลมขวางในแนวตั้งฉากที่บริเวณที่ทำการทดลอง (test section) เมื่อเจ็ทปะทะกับกระแสลมขวางแล้วเจ็ทจะเลี้ยวเบนและเคลื่อนที่ไปตามแนวทางการไหลของกระแสลมขวาง โดยที่การประเมินวัดความเร็วของส่วนผสมของเจ็ทหลัก ณ ระนาบตัดขวาง x งานวิจัยนี้จะใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) และนำภาพที่ได้ไปประมวลผลเพื่อหาสนามความเร็วของส่วนผสมของเจ็ทหลัก ณ เวลา t ใดๆ ผ่านโปรแกรม Insight 4G โดยที่รูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพจำลองภาพรวมของการทดลองในงานวิจัยนี้

4.1 พิกัดของการทดลอง

พิกัดในการทดลองนี้คือพิกัด xyz โดยที่กำหนดจุดกำเนิด (origin point) ไว้ที่กึ่งกลางปากทางออกเจ็ทหลัก การกำหนดแกนสามารถอธิบายได้ดังนี้ 1) แกน x (แกน streamwise) จะอยู่ในทิศทางเดียวกับแนวการไหลของกระแสลมขวาง 2) แกน y (แกน transverse) จะอยู่ในทิศทางเดียวกับความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ทหลักซึ่งตั้งฉากกับทิศแนวการไหลของกระแสลมขวาง และ 3) แกน z (แกน spanwise) เป็นแกนที่ตั้งฉากกับแกน x และ y ตามกฎมือขวา ดังแสดงในรูปที่ 4.2

4.2 ชุดทดลอง

4.2.1 อุโมงค์ลม (wind tunnel)

รูปที่ 4.3 แสดงอุโมงค์ลมภายในห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หน้า

ของอุโมงค์ลมคือสร้างกระแสลมขวางอย่างสม่ำเสมอบนหน้าตัดการไหลของกระแสลมขวาง โดยที่อุโมงค์ลมมี 6 ส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ พัดลมหยอโข่ง (centrifugal blower), ท่ออ่อน (flexible duct), ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (diffuser), ห้องจัดปรับการไหล (setting chamber), ส่วนลดพื้นที่หน้าตัด (contraction) และ บริเวณที่ทำการทดลอง (test section)

การทำงานของอุโมงค์ลมจะเริ่มจากการดูดอากาศในห้องผ่านพัดลมหยอโข่งแบบ backward curve airfoil blades (รูปที่ 4.4) ซึ่งมีขนาด 15 kW และทางออกขนาด $76 \times 76 \text{ cm}^2$ การควบคุมอัตราการไหลของกระแสลมขวางสามารถทำได้ด้วยการควบคุมความเร็วรอบด้วยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (ABBTM model ACS401002032, ขนาด 50 Hz, ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz) ดังรูปที่ 4.5 หลังจากนั้นกระแสลมขวางจะไหลผ่านท่ออ่อน (flexible duct) เพื่อลดแรงสั่นสะเทือน จากนั้นกระแสลมขวางจะไหลผ่านส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (diffuser) ซึ่งมีขนาดทางเข้าเท่ากับ $78 \times 78 \text{ cm}^2$ และมีขนาดทางออกเท่ากับ $100 \times 100 \text{ cm}^2$ ซึ่งมีความยาว 74 cm ภายในส่วนขยายพื้นที่หน้าตัดนั้นจะประกอบไปด้วยแผ่นเหล็กเจาะรู (perforated plate) จำนวน 4 แผ่น โดยที่แต่ละแผ่นมีระยะห่างจากด้านทางเข้าเท่ากับ 15, 30, 45, และ 60 cm ตามลำดับ โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดความความเร็วของกระแสลมขวางก่อนที่จะไหลผ่านห้องจัดปรับการไหล (setting chamber) ที่มี screen ติดตั้งอยู่ภายใน เนื่องจากถ้ากระแสลมขวางไหลเข้ามาด้วยอัตราการไหลที่สูงจะก่อให้เกิดความสูญเสียมาก และหลังจากนั้นกระแสลมขวางผ่านเข้าห้องจัดปรับการไหลที่มีขนาด $100 \times 100 \text{ cm}^2$ และยาว 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 ในส่วนถัดจาก honeycomb จะมีตาข่ายอลูมิเนียม (มุ้งลวด) ขนาด (Mesh) x SWG เท่ากับ $(16 \times 18) \times 31$ จำนวน 7 แผ่น โดยแต่ละแผ่นวางห่างกัน 12.6 cm ซึ่งทำหน้าที่ปรับให้กระแสลมขวางมีการไหลอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัด หลังจากนั้นกระแสลมขวางจะไหลผ่านส่วนลดพื้นที่หน้าตัด (contraction) ซึ่งมีอัตราส่วนเท่ากับ 4:1 ซึ่งรูปร่างเส้นโค้งของส่วนลดพื้นที่หน้าตัดได้ออกแบบตามสมการ polynomial ดีกรี 4 มีจุดเปลี่ยนความโค้งที่ระยะ $2/3$ เท่าวัดจากปากทางออกของความยาว 170 cm เพื่อให้กระแสลมขวางมีความเร็วเพิ่มขึ้นจนมีความเร็วที่ต้องการในการทดสอบ และกระแสลมขวางจะผ่านไปที่ย่านที่ทำการทดลอง (test section) ซึ่งมีหน้าตัดขนาด $50 \times 50 \text{ cm}^2$ ยาว 240 cm และทำจากแผ่นอะคริลิกที่มีความหนา 15 mm โดยบริเวณผนังด้านข้างของส่วนทดลองสามารถเปิดปิดได้แบบหน้าต่างบานพับ และสำหรับชุดเจ็ทจะต่อเข้าทางผนังด้านล่างของ

ส่วนทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลาง โดยจุดศูนย์กลางของเจ็ตห่างจากปลาย contraction เท่ากับ 50 cm ขอบด้านท้ายของบริเวณทดสอบเท่ากับ 190 cm โดยรูปที่ 4.6 แสดง schematic diagram ของอุโมงค์ลม

4.2.2 ชุดหัวเจ็ตหลัก

รูปที่ 4.7 แสดงส่วนประกอบของชุดเจ็ตหลักซึ่งมีหน้าที่สร้างเจ็ตเพื่อพุ่งออกมาตั้งฉากกับกระแสลมขวาง เส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากทางออกของเจ็ตหลักมีขนาดเท่ากับ 12.75 mm โดยที่การทำงานของชุดหัวเจ็ตหลักสามารถอธิบายได้ดังนี้ อากาศจะถูกดูดเข้าสู่พัดลมหอยโข่งขนาด 10 แรงม้า (Elprom™) และถูกเป่าออกมาสู่ท่อ PVC ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และมีความยาว 367 เซนติเมตร การควบคุมรอบของพัดลมหอยโข่งสามารถทำได้โดยใช้เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า หรือ inverter (ABB™ model ACS401002032, ขนาด 50 Hz, ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz) ในระหว่างที่อากาศไหลอยู่ในส่วนท่อ PVC อากาศจะถูกใส่อนุภาคติดตามการไหล (glycerin ความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร) โดย six-jet atomizer (TSI™ model 9306A) จากนั้นท่อ PVC จะถูกลดขนาดลงเพื่อที่จะต่อตั้งฉากกับท่อ stainless steel ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8 นิ้ว ซึ่งมีความยาว 95 เซนติเมตร เพื่อเชื่อมต่อกับหัวเจ็ตหลัก โดยท่อ stainless steel นี้มีความยาวประมาณ 75 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากทางออกของเจ็ตหลัก ดังนั้นรูปร่างความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตจึงเป็นการไหลแบบพัฒนาเต็มที่ (fully-developed turbulent pipe flow)

4.2.3 ชุดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (leeward-vertical control jet, LVCJ)

รูปที่ 4.8 แสดงส่วนประกอบของชุดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมซึ่งคือเจ็ตที่ถูกฉีดขึ้นไปตามแนวตั้งที่บริเวณด้านหลังปากทางออกของเจ็ต (ดูรูปที่ 4.9 ประกอบ) การทำงานของชุดเจ็ตควบคุมจะเริ่มจากอากาศซึ่งถูกอัดอยู่ในเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ (reciprocating air compressor, ยี่ห้อ Ingersoll Rand, Model SS10, Serial NO. 3084931) จะไหลผ่านบอลลวาล์ว และจะไหลต่อเนื่องไปผ่านอุปกรณ์การวัดและควบคุมอัตราการไหลชนิดโรตารีมิเตอร์ จากนั้นอากาศจะไหลผ่านเก้จวัดความดัน (ASAHI™, มีช่วงวัด 0-100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, มีความละเอียด 2 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และจะไหลต่อไปยังสายยางและไหลเข้าไปในรูฉีดเจ็ตควบคุมซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน เท่ากับ 1.3 มิลลิเมตร

4.3 ชุดเครื่องมือวัดความเร็ว Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV)

เพื่อที่จะสามารถประเมินวัดสนามความเร็วของของไหลในระนาบตัดขวางใดๆ ได้ งานวิจัยนี้จึงใช้เทคนิค Stereoscopic Image Velocimetry (SPIV) อย่างไรก็ตามการใช้เทคนิค SPIV ไม่ได้เป็นการวัดสนามความเร็วของของไหลโดยตรง แต่จะเป็นการวัดสนามความเร็วของอนุภาคติดตามการไหลที่ใส่ไปในของไหลนั้นๆ แทนด้วยวิธีการถ่ายภาพ และนำภาพไปประเมินวัดระยะทางที่อนุภาคติดตามการไหลเคลื่อนที่ไปต่อความห่างของช่วงเวลาที่ทำการบินถ่ายภาพ ซึ่งผลที่ได้คือความเร็วของอนุภาคติดตามการไหล ณ ตำแหน่งนั้นๆ โดยการทำงานของ SPIV จะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักที่ทำงานร่วมกันคือ 1) ส่วนของชุดอุปกรณ์บันทึกข้อมูล และ 2) ส่วนของโปรแกรมการคำนวณเวกเตอร์ความเร็วสนาม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม TSI™ Insight 4G Global Imaging Application

4.3.1 ชุดอุปกรณ์ในการบันทึกข้อมูล

รูปที่ 4.10-4.14 แสดงส่วนประกอบของ SPIV ต่างๆ ซึ่งเป็นของบริษัทผู้ผลิต TSI™ ดังนี้

➤ ชุดแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

เครื่องกำเนิดเลเซอร์ มีหน้าที่ในการส่งแสงเลเซอร์ให้ไปกระทบกับอนุภาคติดตามการไหลที่อยู่ในของไหลเพื่อก่อให้เกิดการสะท้อนและไปปรากฏในภาพที่ถูกบันทึกโดยชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพ สำหรับเครื่องกำเนิดเลเซอร์ชนิด ND:YAG ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ New Wave Research™ (model Solo 200XT ซึ่งมีกำลังสูงสุด 200 mJ/pulse ที่ความยาวคลื่น 532 nm) ซึ่งถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 โดยที่แสงจะถูกส่งผ่านชุดของกระจกสะท้อนแสงที่ถูกติดตั้งไว้ในแขนส่งเลเซอร์ (laser light arm, model 610015) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.11 โดยที่ปลายทางออกของแขนส่งเลเซอร์จะต่ออยู่กับ light sheet optics (model 610021-SIL) ซึ่งมีหน้าที่ในการสร้างระนาบเลเซอร์ (laser sheet) โดยส่วนประกอบของ light sheet optics จะประกอบด้วยเลนส์ cylindrical -25mm และ เลนส์ spherical +500mm

➤ ชุดอุปกรณ์ใส่อนุภาคติดตามการไหล

เครื่องมือที่ใช้ในการใส่อนุภาคติดตามการไหลในของไหลในงานวิจัยนี้คือ TSI™ six-jet atomizer (TSI™ model 9306A) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.12 โดยที่อนุภาคติดตามการไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือสารละลายยกลีเซอร์รินที่มีความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร

➤ ชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพ

อุปกรณ์ถ่ายภาพในงานวิจัยนี้คือกล้อง CCD จำนวน 2 ตัว (PowerView Plus11MP, model 630062 ความละเอียด 4008 พิกเซล x 2672 พิกเซล, ขนาดพิกเซล 9x9 ตารางไมโครเมตร, ขนาด CCD 36.07 x 24.05 ตารางมิลลิเมตร, และไดนามิกเรนจ์ 12 บิต ดังแสดงในรูปที่ 4.13 สำหรับเลนส์ที่ใช้กับกล้อง CCD ทั้งสองตัวคือเลนส์ยี่ห้อ Tokina TM (model 100mm f2.8D Macro)

เพื่อให้ทุกอุปกรณ์ทุกตัวสามารถเชื่อมต่อกันและสามารถทำงานกันอย่างเป็นระบบ ชุดกำเนิดแสงเลเซอร์ ชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพ และคอมพิวเตอร์จะถูกเชื่อมต่อกันด้วยเครื่องควบคุมส่วนกลาง (Synchronizer model 610035) ดังแสดงในรูปที่ 4.14

4.3.2 การประมวลผลหาค่าสนามความเร็วโดยโปรแกรม TSI™ Insight 4G

เพื่อที่จะประมวลผลหาเวกเตอร์สนามความเร็วจากภาพที่ถูกบันทึกมา งานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม TSI™ Insight 4G Global Imaging Application โดยที่ขั้นตอนในการประมวลผลประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1) Calibration (Perspective Calibration Process) : เป็นขั้นตอนในการปรับเทียบพิกัดระยะจริงที่เกิดขึ้นในระนาบวัตถุกับพิกัดที่เกิดขึ้นในภาพถ่าย โดยจะกระทำโดยใช้แผ่น target เป็นตัวอ้างอิง กล่าวคือ โปรแกรมจะคำนวณและปรับเทียบขนาดของภาพถ่ายจากหน่วย pixel เป็นหน่วยมิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะจริงบนระนาบของวัตถุ

2) Pre-processing : ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนของการปรับอัตราส่วนของรูปให้มีระยะจริงต่อ 1 พิกเซลเท่ากัน ด้วยวิธีการใช้คำสั่ง Image dewarping เพราะว่าการถ่ายภาพ SPIV นั้นกล้องจะต้องทำมุมกับแนวการถ่ายตั้งฉากกับภาพ ซึ่งภาพถ่ายที่ได้จะเป็นภาพ perspective นั่นคือภาพของวัตถุที่มีระยะจากกล้องไกลกว่าจะมีขนาดระยะจริงต่อ 1 พิกเซล มากกว่าฝั่งของภาพที่ใกล้กล้องมากกว่า เมื่อผ่านกระบวนการนี้แล้วโปรแกรมจะบันทึกผลของภาพทั้ง frame A และ frame B ในรูปของไฟล์ .tiff

3) Processing : ขั้นตอนนี้เป็นการคำนวณหาเวกเตอร์จากภาพในแต่ละ frame ทั้งด้านซ้ายและด้านขวา จะได้เป็นภาพเวกเตอร์ความเร็วทางด้านซ้ายและด้านขวา ในรูปแบบไฟล์ .VEC

4) Post-processing : ขั้นตอนนี้เป็นการเทียบภาพเวกเตอร์ความเร็วของภาพทางด้านซ้ายและขวาที่ตำแหน่งเดียวกันของเจ็ทในกระแสลมขวางจะได้สนามความเร็วในรูปแบบไฟล์ .V3D

4.4 การวัดและเครื่องมือวัด

4.4.1 การวัดความเร็วกระแสลมขวางและความเร็วของเจ็ทหลัก

เครื่องมือที่ใช้วัดความเร็วของกระแสลมขวางและความเร็วของเจ็ทหลักในงานวิจัยนี้คือ pitot static tube โดยความเร็วของกระแสลมขวางในการทดลองเป็นแบบสม่ำเสมอ (uniform flow) ซึ่งมีค่าประมาณ 4.03 เมตรต่อวินาที และความเร็วของเจ็ทหลักมีค่าประมาณ 16 เมตรต่อวินาที

4.3.2 การวัดอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ทควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม

อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ทควบคุมต่อเจ็ทหลักในงานวิจัยนี้สามารถนิยามได้เป็น

$$r_m = \left(\frac{\dot{m}_{cj}}{\dot{m}_{mj}} \right) = \left(\frac{\rho_{cj} Q_{cj,o}}{\rho_{mj} Q_{mj,o}} \right) \quad (4.1)$$

โดยที่	r_m	คือ	อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ทควบคุมต่อเจ็ทหลัก
	\dot{m}_{cj}	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ทควบคุมที่ปากทางออก
	\dot{m}_{mj}	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ทหลักที่ปากทางออก
	$Q_{cj,o}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ทควบคุมที่ปากทางออก
	$Q_{mj,o}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ทหลักที่ปากทางออก
	ρ_{cj}	คือ	ความหนาแน่นของของไหลที่เป็นเจ็ทควบคุม
	ρ_{mj}	คือ	ความหนาแน่นของของไหลที่เป็นเจ็ทหลัก

เมื่อความหนาแน่นของเจ็ดควบคุมมีค่าเท่ากับเจ็ดหลัก ($\rho_{cj} = \rho_{mj}$) สมการที่ 4.1 สามารถเขียนได้เป็น

$$r_m = \left(\frac{Q_{cj,o}}{Q_{mj,o}} \right) \quad (4.2)$$

โดยที่ $Q_{cj,o}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดควบคุมที่ปากทางออก
 $Q_{mj,o}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดหลักที่ปากทางออก

4.4.3 จำนวนการเก็บข้อมูลในการทดลอง

งานวิจัยนี้จะทำการเก็บข้อมูลภาพของเจ็ดในกระแสมขวาง ณ ขณะใดๆ โดย SPIV เพื่อนำไปประมวลผลหาเวกเตอร์สนามความเร็วผ่านโปรแกรม Insight 4G Global Imaging Application โดยที่แต่ละกรณีการทดลองจะทำการเก็บข้อมูลภาพทั้งหมด 1000 ภาพ

4.4.4 การสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง SPIV กับ Pitot tube

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าการประยุกต์ใช้ SPIV นั้นไม่ได้เป็นการวัดสนามความเร็วของของไหลโดยตรง แต่จะเป็นการวัดสนามความเร็วของอนุภาคติดตามการไหลที่ใส่ไปในของไหลแทน ดังนั้นเพื่อความแม่นยำและความถูกต้องในการประเมินวัดความเร็วของของไหลโดยใช้ SPIV จึงมีความจำเป็นต้องสอบเทียบความเร็วที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดความเร็ว SPIV ด้วย pitot tube โดยงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงผลการสอบเทียบและสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่วัดได้จาก pitot static tube (V_{pitot}) กับความเร็วที่วัดได้จาก SPIV (V_{SPIV}) มาจากงานวิจัยของ Wongthongsiri (2014) โดยรูปที่ 4.15 แสดงผลของการสอบเทียบ SPIV กับ pitot static tube พบว่า สามารถแบ่งช่วงความเร็วออกได้เป็น 3 ช่วง ดังสมการ

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

4.5 สรุปพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการทดลอง

- 1) อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4
- 2) อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) เท่ากับ 0% (JICF), 3.8%, 6%, 8%, 10%, และ 13%
- 3) ตำแหน่งไร้มิติของเจ็ดควบคุมตามแนวการไหลของกระแสมขวาง (x_{cj} / rd) เท่ากับ 0.25
- 4) อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ดควบคุมและเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ดหลัก เท่ากับ 0.10
- 5) เรย์โนลส์นัมเบอร์ของกระแสมขวาง (Re_{cf}) มีค่าประมาณ 3,100
- 6) เรย์โนลส์นัมเบอร์ของเจ็ดหลัก (Re_{mj}) มีค่าประมาณ 12,400
- 7) เรย์โนลส์นัมเบอร์ของเจ็ดควบคุม (Re_{cj}) มีค่าประมาณ 4,873 7,694 10,259 12,824 และ 16,671
- 8) สภาพการไหลของกระแสมขวาง คือ การไหลแบบคงตัว
- 9) สภาพการไหลของเจ็ด คือ การไหลผ่านท่อแบบปั่นป่วนที่พัฒนาตัวเต็มที่
- 10) ระยะทางไร้มิติตามแนวการไหลของกระแสมขวาง (x / rd) ที่ทำการเก็บข้อมูล คือ 0.25, 0.50, 0.75, 1.0 และ 1.50
- 11) อัตราส่วนความหนาแน่นของเจ็ดหลักต่อกระแสมขวาง (ρ_{mj} / ρ_{cf}) เท่ากับ 1
- 12) อัตราส่วนความหนาแน่นของเจ็ดควบคุมต่อกระแสมขวาง (ρ_{cj} / ρ_{cf}) เท่ากับ 1
- 13) ความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสมขวางไร้มิติ (δ / d) เท่ากับ 0.6
- 14) เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลจะใช้วิธีใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ดหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมขวางและเจ็ดควบคุม

อนึ่ง ตารางสรุปพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทดลองจะถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ก ตารางที่ 1-5 และสำหรับพารามิเตอร์ที่สำคัญของเจ็ดควบคุมจะถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ก ตารางที่ 6

บทที่ 5

โครงสร้างของเจ็ด

เพื่อเป็นการทบทวนเนื้อหาและรายละเอียดในบทที่ 3 ที่อธิบายเกี่ยวกับการศึกษาโครงสร้างของเจ็ด งานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้เทคนิค SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ดหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวางและเจ็ดควบคุม ซึ่งนำไปสู่การได้มาซึ่งความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดหลัก (\bar{V}_{mj}), คุณสมบัติ, และโครงสร้างของเจ็ดในกระแสลมขวาง โดยที่โครงสร้างของเจ็ดในกระแสลมขวางที่สามารถประเมินวัดได้ในงานวิจัยนี้คือ “โครงสร้างของเจ็ดหลัก (บริสุทธิ์) หรือส่วนผสมของเจ็ดหลัก” ไม่ว่าจะมีการฉีดเจ็ดควบคุมหรือไม่ก็ตาม อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างของเจ็ดหลัก (บริสุทธิ์) หรือส่วนผสมของเจ็ดหลักในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุม (CJICF) โดยทั่วไปพบว่าโครงสร้างของเจ็ดหลัก (บริสุทธิ์) หรือส่วนผสมของเจ็ดหลักในกรณีฉีดเจ็ดควบคุมจะแตกต่างจากกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ตรงที่โครงสร้างของเจ็ดหลัก (บริสุทธิ์) หรือส่วนผสมของเจ็ดหลักนั้นจะมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างเจ็ดหลักกับเจ็ดควบคุมด้วย

อนึ่ง เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางการไหลใกล้ปากทางออกของเจ็ดหลักแล้ว โครงสร้างที่สามารถประเมินวัดได้ในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของเจ็ดหลัก (บริสุทธิ์) หรือส่วนผสมของเจ็ดหลัก อย่างไรก็ตามเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามแนวการไหลและเมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางการไหลไกลจากปากทางออกของเจ็ดหลักออกไป ซึ่งสำหรับในงานวิจัยนี้จะเป็นระนาบตัดขวางการไหล $x/rd \geq 0.5$ unmixed core ของเจ็ดหลักจะหายไปหมดแล้ว จึงทำให้โครงสร้างที่สามารถประเมินวัดได้ที่ระนาบตัดขวางการไหลที่ไกลออกไปนั้นจะเป็นโครงสร้างของส่วนผสมของเจ็ดหลักเท่านั้น ดังนั้นเพื่อความกระชับงานวิจัยนี้จะเรียกโครงสร้างโดยรวมทั้งหมดที่จะกล่าวต่อไปว่า “โครงสร้างของส่วนผสมของเจ็ด” เท่านั้น

หมายเหตุสัญลักษณ์ : เพื่อให้เกิดความกระชับในการเขียนสัญลักษณ์ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดหลักซึ่งคือ “ \bar{V}_{mj} ” ที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 3.5 งานวิจัยนี้จะเขียนแทนด้วย “ \bar{V}_j ” (เขียน subscript “ j ” แทน “ mj ”)

5.1 ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ

การใช้เทคนิค SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดหลักเท่านั้นและไม่ใส่ในกระแสลมขวางและเจ็ดควบคุม ทำให้งานวิจัยนี้สามารถประเมินวัดความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่จุดใดๆ ได้ โดยความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่จุดใดๆ (ϕ_j) จะเขียนเป็น

$$\phi_j = \frac{N_j}{N} \quad (5.1)$$

เมื่อ N_j คือ ระยะเวลา (จำนวน snapshot) ที่พบส่วนผสมของเจ็ดจากจำนวน snapshot ที่ทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด N
 N คือ ระยะเวลา (จำนวน snapshot) ทั้งหมดที่ทำการเก็บข้อมูลซึ่ง N ในงานวิจัยนี้จะเท่ากับ 1,000

อนึ่ง เนื่องจากที่จุด \bar{x} ณ เวลา t ใดๆ ตลอดช่วงการเก็บข้อมูล N snapshot ชนิดของของไหลที่เป็นไปได้ที่จะมาปรากฏที่จุด \bar{x} ณ เวลา t จะเป็นส่วนผสมของเจ็ดหรือของไหลกระแสลมขวางบริสุทธิ์เท่านั้น (ไม่ว่าของไหลนั้นจะมาจากกระแสลมขวางหรือเจ็ดควบคุมก็ตามซึ่งในการทดลองนี้จะเป็นอากาศที่ไม่มีการใส่อนุภาคติดตามการไหลเหมือนกัน) ดังนั้น

$$N = N_j + N_{pcf}$$

เมื่อ N_{pcf} คือ ระยะเวลา (จำนวน snapshot) ที่พบของไหลกระแสลมขวางบริสุทธิ์ (ไม่ว่าของไหลนั้นจะมาจากกระแสลมขวางหรือเจ็ดควบคุมก็ตาม) จากจำนวน snapshot ที่เก็บข้อมูลทั้งหมด N ดังนั้นจึงทำให้ $0 \leq \phi_j \leq 1$

และ $\phi_j + \phi_{pcf} = 1$ โดยที่ $\phi_{pcf} = N_{pcf} / N$

5.2 ผลของการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCI) ต่อโครงสร้างของเจ็ด

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่บ่งบอกถึงผลของการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCI) ต่อโครงสร้างต่างๆ ของเจ็ด อนึ่งเพื่อความชัดเจน โครงสร้างของเจ็ดทั้งหมดที่กล่าวถึงในงานวิจัยนี้ทั้งหมดจะเป็นโครงสร้างที่เป็นของส่วนผสมของเจ็ดเท่านั้นเนื่องจากการใส่อนุภาค

ติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดหลักเท่านั้น และเพื่อความสะดวกในการใช้คำ งานวิจัยนี้จะใช้คำว่า ‘เจ็ด’ เพื่อหมายถึงการไหลของส่วนผสมของเจ็ด

อนึ่งในการแสดงผลการทดลองของโครงสร้างของเจ็ด งานวิจัยนี้จะแสดงเป็นการพล็อตแบบ contour line โดยในแต่ละโครงสร้างจะมีการใช้สเกลสีในการบ่งบอกค่าปริมาณต่างๆ เดียวกันในทุก ระบายตัดขวางการไหลที่ทำการประเมินวัด

5.2.1 ผลของการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCI) ต่อความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่จุดใดๆ (ϕ_j)

รูปที่ 5.1(ก)-(จ) แสดงผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลักต่อการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่ระบายตัดขวาง $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0,$ และ 1.5 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า

กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF)

- 1) เมื่อพิจารณาความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดในทุกๆ ระบายตัดขวางการไหลพบว่า ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดจะมีค่าสูงที่บริเวณกลางเจ็ด และจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนวรัศมีจากบริเวณกลางเจ็ดจนเป็นศูนย์ที่บริเวณกระแสมวงบริสุทธิ์ที่ด้านนอกของเจ็ด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ณ จุดบริเวณกลางเจ็ดจะพบส่วนผสมของเจ็ดเป็นส่วนใหญ่ของเวลาทั้งหมดและจะพบกระแสมวงบริสุทธิ์เป็นส่วนน้อยของช่วงเวลาทั้งหมด ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาที่บริเวณขอบเจ็ด จะพบกระแสมวงบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ของเวลาทั้งหมด และพบส่วนผสมของเจ็ดเป็นส่วนน้อยของเวลาทั้งหมด
- 2) บริเวณ local peak ของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดในทุกๆ ระบายตัดขวางการไหลจะวางตัวอยู่ที่กึ่งกลางเจ็ดและปรากฏเพียงแค่ peak เดียว
- 3) เมื่อพิจารณาความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่มีค่าสูงสุดในทุกๆ ระบายตัดขวางการไหลจาก upstream ไป downstream พบว่า ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่สูงที่สุดในระบายตัดขวาง x/rd เท่ากับ 0.25 มีค่าประมาณ 0.97 ($\phi_{j,max} \approx 0.97$) แต่เมื่อพิจารณาความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่มีค่าสูงสุดในระบายตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.5, 0.75, 1.0, และ 1.5 พบว่ามีค่าประมาณ 1 ($\phi_{j,max} \approx 1$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่บริเวณ upstream ใกล้ปากทางออกของเจ็ดหลัก เจ็ดจะมีการสะสมตัวและไม่

คงตัวมากกว่าในระนาบตัดขวางการไหลใน downstream โดยการสับตัดตัวของเจ็ตจะทำให้มีกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้ามาแทนที่ จึงทำให้ $\phi_{j,\max}$ น้อยกว่าระนาบตัดขวางที่ไกลออกไป

- 4) รูปร่างการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตในขอบบริเวณ upstream จะมีลักษณะค่อนข้างกลม โดยที่บริเวณกึ่งกลางด้านล่างของเจ็ตจะมีส่วนที่เว้าเข้าเล็กน้อย เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจาก upstream ไปตาม downstream พบว่าลักษณะโดยรวมของเจ็ตมีรูปร่างกลมขึ้นและเจ็ตจะกินบริเวณที่กว้างขึ้นโดยที่ส่วนเว้าด้านล่างยังคงอยู่
- 5) ผลการทดลองในส่วนของการสร้างของการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตโดยภาพรวมแล้วมีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Soupramongkol (2015), Sornphrom (2015), และ Tekhuad (2015)

กรณีฉีดเจ็ตควบคุม (cJICF)

- 1) เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.25 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำการฉีดเจ็ตควบคุม พบว่า
 - 1.1) เมื่อทำการฉีดเจ็ตควบคุมจะส่งผลให้เกิดร่องของบริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตต่ำ ซึ่งวางตัวในแนวตั้งตามแนวการไหลของเจ็ตควบคุมที่บริเวณกึ่งกลางด้านล่างของเจ็ต ในขณะที่เมื่อพิจารณากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมจะไม่พบบริเวณดังกล่าว ซึ่งร่องนี้จะทำให้บริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตสูงเกิดการแยกออกจากกันและทำให้รูปร่างโครงสร้างโดยรวมของการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตมีลักษณะคล้ายพื่นที่มีรากฟัน 2 ข้าง โดยที่เมื่อ r_m เพิ่มขึ้นจาก 3.8% เป็น 13% จะส่งผลให้ร่องดังกล่าวมีขนาดยาวขึ้นในแนวตั้งและเห็นรูปร่างพื่นที่มีรากฟัน 2 ข้างได้อย่างชัดเจน

ผลการทดลองที่พบว่าเมื่อทำการฉีดเจ็ตควบคุมจะส่งผลให้เกิดร่องของบริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตต่ำสามารถอธิบายได้ว่า ร่องดังกล่าวเกิดจากผลของการฉีดเจ็ตควบคุม (ซึ่งไม่มีการใส่อนุภาคติดตามการไหล) ที่มารบกวนและกระตุ้นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเจ็ต โดยที่การฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m สูงขึ้นจะส่งผลให้ร่องดังกล่าวมีขนาดที่สูงขึ้นในแนวตั้ง ซึ่งแสดงถึงการที่เจ็ต

ควบคุมมิโมเมนต์ที่มากขึ้นและสามารถที่จะ penetrate เข้าไปในเจ็ตหลักได้มากขึ้น

- 1.2) นอกจากนั้นพบว่าจากเดิมในกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุมพบ local peak ของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต peak เดียวซึ่งวางตัวอยู่ที่กึ่งกลางเจ็ต แต่เมื่อทำการฉีดเจ็ตควบคุมค่า r_m ตั้งแต่ 10% ขึ้นไป จะพบ local peak ของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต 3 peaks ด้วยกัน ซึ่ง peak หนึ่งจะวางตัวอยู่บริเวณกึ่งกลางเจ็ต ในขณะที่อีก 2 peaks วางตัวอยู่ที่บริเวณรากฟันทั้งสองข้าง โดยที่ peaks ที่อยู่ตรงบริเวณรากฟันจะประมาณได้ว่าตรงกับบริเวณที่ความเร็วในแกน streamwise สูง (ดูรูปที่ 5.3(ก) ประกอบ) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไปในหัวข้อ 5.2.3
- 1.3) เมื่อเพิ่ม r_m จะส่งผลให้ความน่าจะเป็นสูงสุดที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่บริเวณกลางเจ็ตลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 13% โดยที่ค่า $\phi_{j,max}$ จะลดลงจาก 0.97 ในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม เป็น 0.92 ในกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 13%
- 2) เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.25 ไปสู่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.5 พบว่าร่องของบริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตต่ำได้หายไปแล้ว ซึ่งแสดงว่าบริเวณดังกล่าวจากเดิม (พิจารณาที่ x/rd เท่ากับ 0.25) ที่พบส่วนผสมของเจ็ตเป็นส่วนน้อยของเวลา กลายเป็นพบส่วนผสมของเจ็ตเป็นส่วนมากของเวลา (พิจารณาที่ x/rd เท่ากับ 0.5) จึงเป็นข้อชี้แนะว่าที่ระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 0.5 เจ็ตควบคุมได้ถูกเจ็ตหลักเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมจนหมดแล้วซึ่งมีความสอดคล้องกับหลักฐานทางเส้นทางการเดินของเจ็ต (jet trajectory) ที่จะอภิปรายในบทที่ 8 ดังนั้นด้วยหลักฐานนี้เองจึงเป็นหลักฐานประกอบข้อสมมติฐานของงานวิจัยนี้ในการประเมินค่า E_2 ที่ได้กล่าวหัวข้อที่ 3.1
- 3) เมื่อพิจารณากรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m ตั้งแต่ 10% ขึ้นไป พบว่าเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.25 ไปสู่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.5 จะพบว่า local peak ของความน่าจะเป็นสูงสุดที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตจะเปลี่ยนจากมี 3 local peaks เป็น 1 local peak เท่านั้น และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวต่อไปจากระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.5 ไปสู่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.75 จะพบ local peak ของ

ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดแยกออกจาก 1 peak กลายเป็น 2 peaks ซึ่งวางตัวซ้อนกันในแนวตั้งตรงกลางเจ็ดเป็น peak บน กับ peak ล่าง โดยที่ peak ล่างจะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้าง CVP (ดูรูปที่ 5.6(ค) ประกอบ) ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.2.6 ภายหลัง

ผลการทดลองนี้ชี้แนะว่า นอกเหนือจากจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวจากระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 0.25 ไปยังระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 0.5 โดยที่เจ็ดควบคุมได้ถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมจนหมดแล้ว (ร่องของบริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดต่ำได้หายไป) ยังมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวจากระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 0.5 ไปยังระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 0.75 โดยจะมีการฟอร์มตัวของโครงสร้าง CVP ของเจ็ดควบคุม ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 5.2.6

5.2.2 เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$) หรือ In-plane vector

รูปที่ 5.2(ก)-(จ) แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ดในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม และกรณีฉีดเจ็ดควบคุม ที่ค่า r_m เท่ากับ 3.8%, 6%, 8%, 10%, และ 13% ตามลำดับ โดยการแสดงผลการทดลองจะอยู่ในรูปกราฟที่เป็นการพล็อตซ้อนทับของ

- 1) Surface contour ของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยในแกน streamwise ไร้มิติ ($\vec{V}_{j,x} / u_{cf}$)
- 2) Contour line ของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด (ϕ_j) ที่ค่าเท่ากับ 0.01, 0.25, 0.75, 0.95, และ 0.99
- 3) เวกเตอร์ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยในระนาบตัดขวางการไหล ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$) หรือ In-plane vector

ผลการทดลองพบว่า

กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF)

- 1) เมื่อพิจารณาในทุกุระนาบตัดขวางการไหล พบว่าเวกเตอร์ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยในระนาบตัดขวางการไหล ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$) มีการเคลื่อนที่

หมุนวนในลักษณะครึ่งหนึ่งของเวกเตอร์ความเร็วที่เกิดจากโครงสร้าง CVP ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 5.2.6

- 2) เมื่อพิจารณาที่กึ่งกลางเจ็ตในทุกขนาดตัดขวางการไหล พบว่าองค์ประกอบของความเร็วยังของ In-plane vector ส่วนมากจะอยู่ในแกน transverse
- 3) พบช่องการไหลลู่เข้า-ออกในแนวตั้ง (converging-diverging vertical channel of high upward flow, VC) ซึ่งวางตัวอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของโครงสร้าง CVP
- 4) เมื่อพิจารณาที่บริเวณขอบเจ็ตที่ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตต่ำ พบว่า In-plane vector จะเข้าสู่ศูนย์ ($\vec{0}$)
- 5) เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจาก upstream ไปยัง downstream พบการเคลื่อนที่ในลักษณะหมุนวนของ In-plane vector ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

กรณีฉีดเจ็ตควบคุม (cJICF)

- 1) เมื่อพิจารณาที่ขนาดตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.25 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำการฉีดเจ็ตควบคุม จากเดิมในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมพบ In-plane vector มีการเคลื่อนที่หมุนวนในลักษณะครึ่งหนึ่งของเวกเตอร์ความเร็วที่เกิดจากโครงสร้าง CVP แต่เมื่อทำการฉีดเจ็ตควบคุมแล้วส่งผลให้ In-plane vector มีการเคลื่อนที่ในแนว transverse มากขึ้นและเห็นการเคลื่อนที่ในลักษณะหมุนวนน้อยลงเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม โดยจะเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่ม r_m เป็น 13% ดังแสดงในรูปที่ 5.2(ซ)
- 2) เมื่อพิจารณาที่บริเวณขอบเจ็ตที่ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตต่ำ พบว่า In-plane vector จะเข้าสู่ศูนย์ ($\vec{0}$) คล้ายกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม
- 3) เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจาก upstream ไปยัง downstream พบการเคลื่อนที่ในลักษณะหมุนวนของ In-plane vector ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

5.2.3 ผลของการฉีดยึดเจ็ทควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCJ) ต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ทตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$)

รูปที่ 5.3(ก)-(จ) แสดงผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ทควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ทหลักต่อการกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ทเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x / rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0,$ และ 1.5 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า

กรณีไม่ฉีดยึดเจ็ทควบคุม (JICF)

- 1) ในทุกระนาบตัดขวางตามระยะทางการไหลพบบริเวณที่มีค่า $V_{j,x} / u_{cf}$ สูง มีลักษณะคล้ายรูปไตซึ่งวางตัวอยู่บริเวณกึ่งกลางเจ็ท อนึ่งเพื่อความชัดเจนในการนิยามโครงสร้างรูปไต งานวิจัยนี้จะนิยามบริเวณที่มีค่า $V_{j,x} / u_{cf}$ สูงกว่าบริเวณรอบข้างที่มีรูปร่างคล้ายไตว่าเป็นโครงสร้างรูปไต (Kidney Shaped structure, K-S) นอกจากนี้ยังพบว่าที่บริเวณใต้ K-S จะเป็นบริเวณที่มีค่า $V_{j,x} / u_{cf}$ ต่ำโดยที่มีลักษณะคล้ายรูปตัวอักษร U กลับหัว ซึ่งจะเรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณอ่าว (Gulf Region, G-R)
- 2) เมื่อเจ็ทพัฒนาตัวจาก upstream ไปตาม downstream พบว่าลักษณะโครงสร้างโดยรวมของเจ็ทยังคงมีลักษณะคล้ายกับบริเวณ upstream อยู่ กล่าวคือยังพบทั้ง K-S และ G-R อยู่ เพียงแต่ว่ารูปร่างโดยภาพรวมของเจ็ทจะใหญ่ขึ้น และค่า local peak ของ $V_{j,x} / u_{cf}$ ใน K-S จะลดลงหรือสลายลงนั่นเอง
- 3) ผลการทดลองในส่วนของโครงสร้างและลักษณะโดยภาพรวมแล้วมีความสอดคล้องกับ Soupramongkol (2015), Sornphrom (2015), และ Tekhuad (2015)

กรณีฉีดยึดเจ็ทควบคุม (cJICF)

- 1) เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางการไหล $x / rd = 0.25$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำการฉีดยึดเจ็ทควบคุม พบว่า การฉีดยึดเจ็ทควบคุมจะส่งผลให้ภาพรวมของการกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ทเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ มีลักษณะคล้ายการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ท

กล่าวคือจะมีลักษณะคล้ายพินที่มีรากพิน 2 ข้าง และเกิดคู่ peak ของค่า $V_{j,x}/u_{cf}$ ขึ้นที่บริเวณรากพินทั้ง 2 ข้าง โดยที่

1.1) การฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่า r_m สูงขึ้น จะส่งผลให้

1.1.1) ค่า $V_{j,x}/u_{cf}$ ของคู่ peak ที่บริเวณรากพินทั้งสองข้างสูงขึ้น และส่งผลให้ K-S มีการยกตัวขึ้นตามแนวดิ่ง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่ม r_m เป็น 13% จะพบ peak ของ $V_{j,x}/u_{cf}$ ปรากฏ 3 peaks ด้วยกัน โดย peak หนึ่งอยู่ตรงกึ่งกลางด้านบนของ K-S ซึ่งมีรูปร่างคล้ายไตที่มีการยกตัวขึ้นตามแนวดิ่ง และอีก 2 peaks จะปรากฏที่บริเวณรากพินทั้ง 2 ข้าง เช่นเดียวกับกรณีฉีดเจ็ดควบคุมกรณีอื่น

จากผลการทดลองที่พบว่าเมื่อเริ่มฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่า r_m สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า $V_{j,x}/u_{cf}$ ของคู่ peak ที่บริเวณรากพินทั้งสองข้างสูงขึ้น ซึ่งชี้แนะว่าเกิดจากการที่เจ็ดควบคุมประพุดิตัวคล้ายทรงกระบอกที่วางตัวขวางแนวการไหล (cylinder in a stream) จึงทำให้ส่วนผสมของเจ็ดที่อยู่บริเวณใกล้เจ็ดควบคุมบางส่วนต้องเคลื่อนที่อ้อมเจ็ดควบคุมซึ่งประพุดิตัวคล้ายทรงกระบอก ดังนั้นจึงส่งผลให้ความเร็วในแกน streamwise ของส่วนผสมของเจ็ดบริเวณใกล้กับแนวทางการไหลของเจ็ดควบคุมถูกเร่งและความเร็วในแกน streamwise สูงขึ้น (ดูรูปที่ 5.3(ฉ) ประกอบ)

1.1.2) ค่าของ $V_{j,x}/u_{cf}$ ที่บริเวณกึ่งกลางด้านบนของ K-S ลดลง

จากผลการทดลองที่พบว่าเมื่อเริ่มฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่า r_m สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า $V_{j,x}/u_{cf}$ ที่บริเวณกึ่งกลางด้านบนของ K-S ลดลงสามารถอธิบายได้ด้วย 2 คำอธิบาย ดังนี้

1. การฉีดเจ็ดควบคุมซึ่งมีเวกเตอร์ความเร็วในแกน transverse สูงจะไปผลักให้เวกเตอร์ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเบนขึ้น (ดูรูปที่ 5.3(ช) ประกอบ) ทำให้เวกเตอร์ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดมีองค์ประกอบในแกน transverse สูงขึ้น ($V_{j,y}$ สูงขึ้น) ในขณะที่องค์ประกอบในแกน streamwise ต่ำลง ($V_{j,x}$ ต่ำลง) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของความเร็วในแกน transverse ของส่วนผสมของเจ็ดดังแสดงในรูปที่ 5.4(ก) ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อ 5.2.4

2. เนื่องจากเจ็ดควบคุม (ซึ่งไม่มีการใส่อนุภาคติดตามการไหล) ที่ถูกฉีดขึ้นมาในแนวตั้งและมีความเร็วในแกน transverse สูง ได้ถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำเข้าไปผสมกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ด จึงส่งผลให้ส่วนผสมของเจ็ดที่เหนี่ยวนำเอาเจ็ดควบคุมเข้าไปผสมนั้น มีความเร็วในแกน transverse สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของความเร็วในแกน transverse ของส่วนผสมของเจ็ดดังแสดงในรูปที่ 5.4(ก) ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อ 5.2.4

- 2) เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวจาก upstream ไปตาม downstream ในทุกกรณีของการฉีดเจ็ดควบคุม พบว่าค่าของ $V_{j,x}/u_{cf}$ ใน K-S และคู่ peak ของ $V_{j,x}/u_{cf}$ ที่บริเวณรากฟันทั้งสองข้าง จะสลายตัวลงอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงระนาบตัดขวางการไหลที่ทำการประเมินวัด อย่างไรก็ตามลักษณะโครงสร้างโดยรวมของเจ็ดยังคงมีลักษณะคล้ายกับบริเวณ upstream อยู่ กล่าวคือยังพบทั้ง K-S และ G-R อยู่ แต่รูปร่างโดยภาพรวมของเจ็ดจะใหญ่ขึ้น

5.2.4 ผลของการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCI) ต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ดตามแนวแกน transverse ไร้มิติ ($V_{j,y}/u_{cf}$)

รูปที่ 5.4(ก)-(จ) แสดงผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลักต่อการกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน transverse ไร้มิติ ($V_{j,y}/u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$, และ 1.5 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า

กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF)

- 1) โครงสร้างของเจ็ดในทุกระนาบตัดขวางการไหลจะประกอบไปด้วย 2 บริเวณหลัก ได้แก่ บริเวณที่ $V_{j,y}/u_{cf}$ มีค่าเป็นบวกซึ่งวางตัวในแนวตั้งบริเวณกลางเจ็ด และ บริเวณที่ $V_{j,y}/u_{cf}$ มีค่าเป็นลบ 2 บริเวณ ซึ่งมีลักษณะเป็น lobe และวางตัวประกอบอยู่ด้านข้างของบริเวณที่ $V_{j,y}/u_{cf}$ มีค่าเป็นบวกทั้งสองข้าง
- 2) เมื่อพิจารณาที่บริเวณ upstream พบว่าบริเวณที่ $V_{j,y}/u_{cf}$ มีค่าเป็นบวกจะวางตัวเป็นแนวยาวในแนวตั้งโดยที่มี local peak ค่าบวกอยู่ 2 บริเวณ ได้แก่ local peak ด้านบนซึ่งจะวางตัวอยู่ตำแหน่งเดียวกับ K-S (ซึ่งสามารถดู

ประกอบได้ในรูปที่ 5.3(ก)) และ local peak ด้านล่างซึ่งจะวางตัวประมาณตรงบริเวณช่องการไหลคู่เข้า-ออก ในแนวตั้ง (VC) ซึ่งสามารถดูประกอบได้ในรูปที่ 5.4(ฉ)

- 3) เมื่อเจ็ทพัฒนาตัวจาก upstream ไปตาม downstream พบว่า local peak ค่าบวกด้านบนได้สลายไปเหลือเพียงแต่ local peak ค่าบวกด้านล่างเท่านั้น ในขณะที่ local peak ค่าลบทั้ง 2 บริเวณยังคงปรากฏในทุกระนาบตัดขวางการไหลและขยายตัวเป็นบริเวณที่กว้างขึ้น
- 4) ผลการทดลองโดยรวมมีความสอดคล้องกับ Witayaprapakorn (2013), Soupramongkol (2015), และ Sornphrom (2015)

กรณีฉีดเจ็ทควบคุม (CJICF)

- 1) โครงสร้างของเจ็ทในทุกกรณีของการฉีดเจ็ทควบคุมในทุกระนาบตัดขวางการไหลจะประกอบไปด้วย 2 บริเวณหลัก ได้แก่ บริเวณที่ $V_{j,y}/u_{cf}$ มีค่าเป็นบวกซึ่งวางตัวในแนวตั้งบริเวณกลางเจ็ท และ บริเวณที่ $V_{j,y}/u_{cf}$ มีค่าเป็นลบซึ่งวางตัวประกบอยู่ด้านข้างของบริเวณที่ $V_{j,y}/u_{cf}$ มีค่าเป็นบวกทั้งสองข้างคล้ายกรณีไม่ฉีดเจ็ทควบคุม
- 2) เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางการไหล $x/rd = 0.25$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำการฉีดเจ็ทควบคุม พบว่า
 - 2.1) เมื่อทำการฉีดเจ็ทควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 3.8% จะส่งผลให้ local peak ค่าบวกบริเวณด้านล่างมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ทควบคุม (จากขนาด $V_{j,y}/u_{cf}$ ประมาณเท่ากับ 1.50 กลายเป็น 1.85) ในขณะที่ยังพบบริเวณที่ $V_{j,y}/u_{cf}$ มีค่าเป็นลบทั้งสองบริเวณอยู่เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ทควบคุม
 - 2.2) การฉีดเจ็ทควบคุมที่ค่า r_m สูงขึ้น จะส่งผลให้เกิด local peak ค่าบวกเพียง peak เดียว ซึ่งจากเดิมในกรณีไม่ฉีดเจ็ทควบคุมพบว่ามี local peak ค่าบวก 2 peaks โดยที่ค่าของ local peak ของกรณีฉีดเจ็ทควบคุม จะมีค่าสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ทควบคุมอย่างชัดเจน และการเพิ่มขึ้นของค่า r_m จะส่งผลให้ local peak ค่าบวกของ $V_{j,y}/u_{cf}$ สูงขึ้น
 - 2.3) บริเวณ local peak ค่าบวกของ $V_{j,y}/u_{cf}$ วางตัวอยู่ประมาณบริเวณเดียวกับ K-S ที่มีการยกตัวขึ้นตามแนวตั้ง (ดูรูปที่ 5.3(ก) ประกอบ)

อนึ่งจากหลักฐานที่พบว่ากรณีการฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m สูงขึ้นจะส่งผลให้ local peak ค่าบวกของ $V_{j,y}/u_{cf}$ สูงขึ้น และบริเวณ local peak ค่าบวกของ $V_{j,y}/u_{cf}$ ซึ่งวางตัวอยู่ประมาณบริเวณเดียวกับ K-S ที่มีการยกตัวขึ้นตามแนวตั้ง จะมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในส่วนของ $V_{j,x}/u_{cf}$ ในหัวข้อที่ 5.2.3 ที่พบว่าเมื่อเริ่มฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า $V_{j,x}/u_{cf}$ ที่บริเวณกึ่งกลางด้านบนของ K-S ที่มีลักษณะคล้ายรูปไตที่มีการยกตัวขึ้นตามแนวตั้ง ซึ่งคำอธิบายได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 5.2.3

- 3) เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจาก upstream ไปตาม downstream
 - 3.1) กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 3.8% พบว่า local peak ค่าบวกด้านบนได้สลายตัวไป เหลือเพียง local peak ค่าบวกด้านล่างเท่านั้น ในขณะที่ local peak ค่าลบทั้ง 2 บริเวณยังคงปรากฏในทุกระนาบตัดขวางการไหลคล้ายกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม
 - 3.2) กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m สูงกว่า 3.8% พบว่า local peak ค่าบวก (ซึ่งปรากฏเพียง peak เดียว) มีการสลายตัวอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงที่ทำการเก็บข้อมูล ในขณะที่โดยภาพรวมแล้ว local peak ค่าลบทั้ง 2 บริเวณยังคงปรากฏในทุกระนาบตัดขวางการไหลและมีขนาดบริเวณที่ใหญ่ขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.2.5 ผลของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCJ) ต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน spanwise ไร้มิติ ($V_{j,z}/u_{cf}$)

รูปที่ 5.5(ก)-(จ) แสดงผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวตั้ง ด้านท้ายลมต่อเจ็ตหลักต่อการกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise ไร้มิติ ($V_{j,z}/u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x/rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0,$ และ 1.5 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า

กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF)

- 1) โครงสร้างการกระจายตัวของความเร็วของเจ็ดตามแนวแกน spanwise ไร้มิติ ในทุกระนาบตัดขวางการไหลพบว่า $V_{j,z} / u_{cf}$ จะมีลักษณะคล้ายปีกผีเสื้อ โดยที่จะมี positive local peak และ negative local peak วางตัวเป็นคู่ๆ และมีทั้งหมด 2 คู่ด้วยกัน โดยคู่บนจะมีขนาดใหญ่กว่าคู่ล่าง
- 2) ทิศทางของความเร็วตามแนวแกน spanwise จะมีความสอดคล้องกับทิศทางการหมุนวนของโครงสร้าง CVP คู่หลัก (ดูรูปที่ 5.6(ก)-(จ) ประกอบ) กล่าวคือ เจ็ดจะมีความเร็วในทิศที่พุ่งออกจากระนาบสมมาตรที่บริเวณด้านบน (lobe บน) และจะพุ่งเข้าสู่ระนาบสมมาตรที่บริเวณด้านล่าง (lobe ล่าง) โดยที่การตัดกันของ lobe ที่มีเครื่องหมายเหมือนกันซึ่งวางตัวแยงมุมกันจะทำให้เกิดโครงสร้างอานม้า (saddle point) ที่บริเวณกึ่งกลางเจ็ดขึ้น
- 3) เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวจาก upstream ไปตาม downstream พบว่า ค่าของคู่ local peak ทั้งสองคู่จะค่อยๆ สลายไปอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงระนาบตัดขวางการไหลที่ทำการประเมินวัด
- 4) ผลการทดลองในประเด็นที่ 1-3 มีความสอดคล้องกับ Soupramongkol (2015), Sornphrom (2015), และ Tekhuad (2015)

กรณีฉีดเจ็ดควบคุม (cJICF)

- 1) โครงสร้างการกระจายตัวของความเร็วของเจ็ดตามแนวแกน spanwise ไร้มิติ ในทุกกรณีของการฉีดเจ็ดควบคุมจะมีส่วนประกอบหลักของโครงสร้าง เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม กล่าวคือ จะมี positive local peak และ negative local peak จำนวน 2 คู่ด้วยกัน โดยคู่บนจะมีขนาดใหญ่กว่าคู่ล่าง ซึ่งทิศทางของความเร็วตามแนวแกน spanwise จะมีความสอดคล้องกับทิศทางการหมุนวนของโครงสร้าง CVP โดยที่การตัดกันของ lobe ที่มีเครื่องหมายเหมือนกันซึ่งวางตัวแยงมุมกันจะทำให้เกิดโครงสร้างอานม้า (saddle point) ที่บริเวณกึ่งกลางเจ็ดขึ้น คล้ายกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม
- 2) เมื่อพิจารณาในที่ระนาบตัดขวางการไหล x / rd เท่ากับ 0.25 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำการฉีดเจ็ดควบคุม พบว่า
 - 2.1) เมื่อทำการฉีดเจ็ดควบคุมในทุกกรณีจะส่งผลให้ค่า $V_{j,z} / u_{cf}$ ของคู่ peak ทั้งสองคู่สูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (จากค่าสูงสุดประมาณ 0.6 ในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมกลายเป็นค่าสูงสุด

ประมาณ 0.9 ในกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 13%) นอกจากนี้ยังพบว่าคู่ของ local peak ด้านบนจะถูกยึดออกในแนวตั้งเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม

2.2) การเพิ่มขึ้นของค่า r_m จะส่งผลให้คู่ของ local peak ด้านบนยึดตัวในแนวตั้งมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 13%

3) เมื่อฉีดพัฒนาตัวจาก upstream ไปตาม downstream พบว่าค่าของคู่ peak ทั้ง 2 คู่จะค่อยๆ สลายไปอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงระนาบตัดขวางการไหลที่ทำให้การประเมินวัดเช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม

5.2.6 ผลของการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCJ) ต่อการกระจายตัวของ vorticity ในแกน streamwise ไร้มิติ ($\omega_{j,x}d / u_{cf}$)

งานวิจัยนี้นิยาม vorticity จาก $\vec{\omega}_j = \vec{\nabla} \times \vec{V}_j$ เมื่อ \vec{V}_j คือเวกเตอร์สนามความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดหลัก ดังนั้นองค์ประกอบของ vorticity ในแนวแกน streamwise สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\omega_{j,x} = \frac{\partial V_{j,z}}{\partial y} - \frac{\partial V_{j,y}}{\partial z} \quad (5.2)$$

เมื่อ	$\omega_{j,x}$	คือ	vorticity ในแนวแกน streamwise ของส่วนผสมของเจ็ดหลัก เฉลี่ยเทียบกับเวลา
	$V_{j,z}$	คือ	องค์ประกอบของความเร็วในแนวแกน spanwise ของส่วนผสมของเจ็ดหลักเฉลี่ยเทียบกับเวลา
	$V_{j,y}$	คือ	องค์ประกอบของความเร็วในแนวแกน transverse ของส่วนผสมของเจ็ดหลักเฉลี่ยเทียบกับเวลา

รูปที่ 5.6(ก)-(จ) แสดงผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลักต่อการกระจายตัวของ vorticity ของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยไร้มิติในแกน streamwise ($\omega_{j,x}d / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x / rd = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0,$ และ 1.5 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า

กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)

- 1) ที่บริเวณ upstream พบว่ามีคู่ vortex ที่มีเครื่องหมายตรงข้ามและมีการหมุนสวนทางกัน (Counter-rotating vortex pair, CVP) อยู่ทั้งหมด 3 คู่ด้วยกัน ได้แก่ 1 คู่หลัก ซึ่งมีรูปร่างคล้ายกับจุลภาคกลับหัว (inverse comma) และมีขนาดใหญ่ที่สุด นอกจากนั้นยังพบคู่ vortex อีก 2 คู่ย่อยซึ่งมีทิศทางการหมุนที่สวนทางกับคู่หลัก โดยคู่หนึ่งจะวางตัวอยู่บริเวณกลางเจ็ตระหว่าง vortex คู่หลัก และอีกคู่หนึ่งจะวางตัวอยู่บริเวณด้านล่างเจ็ตใต้คู่หลัก อนึ่งทิศทางการหมุนของ vortex ที่วางตัวอยู่บริเวณด้านล่างเจ็ตใต้ vortex คู่หลักนี้จะมีความสอดคล้องกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง houseshoe vortex
- 2) เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจาก upstream ไปตาม downstream พบว่ากำลังของคู่ vortex ทั้ง 3 คู่จะสลายตัวไปอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงระยะนาบตัดขวางที่ทำการประเมินวัด โดยที่เมื่อพิจารณาที่ระยะนาบตัดขวางการไหล x/rd ตั้งแต่ 0.75 ขึ้นไป จะพบว่า vortex คู่ย่อยที่วางตัวอยู่บริเวณกลางเจ็ตระหว่าง vortex คู่หลัก ได้สลายตัวไปเกือบหมดแล้ว เหลือแต่ vortex คู่หลักที่เป็นโครงสร้าง CVP ของเจ็ตในกระแสลมขวาง และ vortex คู่ย่อยที่วางตัวอยู่บริเวณด้านล่างเจ็ตใต้คู่หลัก โดยที่ vortex คู่หลักจะมีความเด่นชัด ในขณะที่ vortex คู่ย่อยที่วางตัวอยู่บริเวณด้านล่างเจ็ตใต้ vortex คู่หลักจะไม่เด่นชัด

กรณีฉีดเจ็ตควบคุม (cJICF) กรณีมหาวิทยาลัย

- 1) เมื่อพิจารณาที่ระยะนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.25 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำการฉีดเจ็ตควบคุม พบว่า
 - 1.1) โดยภาพรวมแล้ว การฉีดเจ็ตควบคุมจะส่งผลให้ peak ของ vorticity สูงขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม
 - 1.2) เมื่อทำการฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 3.8% พบว่าโครงสร้างโดยภาพรวมของการกระจายตัวของ vorticity ในแกน streamwise ยังมีความคล้ายคลึงกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมอยู่ กล่าวคือ ยังคงพบคู่ vortex ที่มีการหมุนสวนทางกันอยู่ทั้งหมด 3 คู่ เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม
 - 1.3) เมื่อทำการฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m สูงขึ้น พบว่าจะส่งผลให้โครงสร้างของการกระจายตัวของ vorticity ในแกน streamwise จะเริ่มมีความแตกต่างกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมอย่างชัดเจน กล่าวคือจะพบคู่ vortex

ที่มีการหมุนสวนทางกันเพียง 2 คู่เท่านั้น ได้แก่ vortex คู่หลักที่เป็นโครงสร้าง CVP ของเจ็ตและอีกหนึ่งคู่ย่อยที่วางตัวอยู่ด้านล่างใต้ vortex คู่หลัก โดยรูปร่างของคู่ vortex ที่เหลืออยู่มีลักษณะที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม ดังนี้

1.3.1) รูปร่างโดยภาพรวมของ vortex คู่หลักที่เป็นโครงสร้าง CVP ของเจ็ต จะมีลักษณะตรงและสูงขึ้นในแนวตั้งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมซึ่งมีลักษณะคล้ายจุลภาคกลับหัว (inverse comma)

1.3.2) คู่ vortex ย่อยอีกคู่หนึ่งที่เคยวางตัวอยู่บริเวณด้านล่างเจ็ตใต้ vortex คู่หลักและมีเครื่องหมายสอดคล้องกับทิศทางการหมุนของโครงสร้าง houseshoe vortex จะยึดตัวขึ้นตามแนวตั้งและย้ายตำแหน่งจากบริเวณใต้ vortex คู่หลักมาอยู่บริเวณระหว่าง vortex คู่หลัก ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 13%

1.4) การเพิ่มขึ้นของค่า r_m จะส่งผลให้ peak ของ vorticity สูงขึ้น และส่งผลให้ vortex คู่หลักและคู่ย่อยก็จะมีการยึดขึ้นในแนวตั้งมากขึ้น

2) เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจาก upstream ไปตาม downstream จะพบว่า peak ของ vorticity ในทุกกรณีของการฉีดเจ็ตควบคุมจะมีการสลายตัวอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงที่ทำการประเมินวัดเช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

3) ในกรณีของการฉีดเจ็ตควบคุมที่มีค่า r_m สูงกว่า 8% เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจาก upstream ไปยังระนาบตัดขวาง x/rd ตั้งแต่ 0.75 เป็นต้นไป พบว่าเกิดการฟอร์มตัวของ vortex คู่หลักของเจ็ตควบคุมขึ้น (โครงสร้าง CVP ของเจ็ตควบคุม) โดยที่จะเห็นได้ชัดในกรณีที่ฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 13% ซึ่งชี้แนะถึงเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream เจ็ตควบคุมจะประพฤติตัวเปรียบเสมือนเป็นเจ็ตในกระแสมวลขวางอีกตัวหนึ่งซึ่งอยู่ใต้เจ็ตหลัก โดย CVP คู่บนมาจากเจ็ตหลัก และ CVP จะคู่ล่างมาจากเจ็ตควบคุม

บทที่ 6

ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้าย ลมต่อเจ็ดหลักต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ประสิทธิภาพ ของการใช้เจ็ดควบคุม เส้นทางการเดิน และค่า Circulation ของเจ็ด

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยผลการทดลองที่บ่งบอกถึงผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) รวมไปถึงประสิทธิภาพของการใช้เจ็ดควบคุม (η) ทั้งในกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในกระแสมวล (F_2) และไม่ใช่ของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) และกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) นอกจากนี้เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อคุณลักษณะและปริมาณทางฟิสิกส์ของเจ็ดในกระแสมวลที่สำคัญอีก 2 ปริมาณ ได้แก่ เส้นทางการเดิน และค่า circulation ไร้มิติของเจ็ด บน rd scale

เพื่อทบทวนการคำนวณค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรดังที่ได้กล่าวโดยละเอียดในบทที่ 3 แล้วนั้น อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรสามารถนิยามเป็น

$$E = \frac{Q_{F_1}(x)}{Q_{F_1,0}} \quad (3.1)$$

โดย E คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเฉลี่ยเทียบกับเวลา
 $Q_{F_1}(x)$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลักที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x เฉลี่ยเทียบกับเวลา โดยในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมและกรณีฉีดเจ็ดควบคุม โดยที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในกระแสมวล (F_2) จะหมายถึงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของของไหลที่มาจากเจ็ดหลัก หรือสามารถเรียกอย่างย่อเป็น “อัตราการไหลของส่วนผสมของเจ็ดหลัก” และในกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) จะหมายถึง อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของของไหล

ที่มาจากทั้งเจ็ดหลักและเจ็ดควบคุม หรือสามารถเรียกอย่างย่อว่า “อัตราการไหลของส่วนผสมของเจ็ดหลักและส่วนผสมของเจ็ดควบคุม”

$Q_{F_1,o}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมของของไหลที่เป็นชนิดเดียวกับเจ็ดหลักที่ปากทางออก โดยจะรวมถึงอัตราการไหลของเจ็ดควบคุมในกรณีที่มีของไหลที่นำมาคิดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1)

เมื่อประยุกต์ใช้สมการที่ 3.1 กับกรณีไม่คิดเจ็ดควบคุม (JICF) จึงได้เป็น

$$E = \frac{Q_{F_1}(x)}{Q_{F_1,o}} = \frac{(Q_{mj,o} + Q_{cf/mj})}{Q_{mj,o}} \quad (3.2)$$

เมื่อ $Q_{F_1}(x)$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลักที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x เฉลี่ยเทียบกับเวลา ซึ่งในกรณีไม่คิดเจ็ดควบคุม (JICF) จะหมายถึงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดหลัก โดยที่ตามกฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) จะสามารถเขียนได้เป็น

$$Q_{F_1}(x) = Q_{mj,o} + Q_{cf/mj}$$

$Q_{mj,o}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ดหลัก

$Q_{cf/mj}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวางทั้งหมด (F_2) ที่ถูกเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมกับเจ็ดหลักผ่าน control surface ของปริมาตรควบคุม (CV) ดังแสดงในรูปที่ 3.1

อนึ่ง $Q_{F_1}(x) [= Q_{mj,o} + Q_{cf/mj}]$ ในกรณีนี้จะมีค่าเท่ากับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดหลัก ซึ่งสามารถประเมินวัดได้โดยตรงด้วยเทคนิคการวัดด้วย SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดหลักเท่านั้น โดยที่ค่าที่ประเมินวัดได้นั้นจะมีความถูกต้องและสอดคล้องกับกายภาพการไหลจริงในงานวิจัยนี้แล้ว

สำหรับกรณีที่มีการฉีดเจ็ทควบคุมนั้น งานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะ 2 กรณีของของไหลที่เป็นเจ็ทควบคุม ดังนั้นสมการที่ 3.1 สามารถประยุกต์ใช้ได้ 2 กรณี ได้แก่

- 1) กรณีที่ของไหลที่เป็นเจ็ทควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) และไม่ใช่ของไหลชนิดเดียวกับเจ็ทหลัก (F_1) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$E_1 = \frac{Q_{F_1}(x)}{Q_{F_1,o}} = \frac{(Q_{mj,o} + Q_{cf/mj})}{Q_{mj,o}} \quad (3.3)$$

เมื่อ $Q_{F_1}(x)$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ทหลักที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x เฉลี่ยเทียบกับเวลา ซึ่งในกรณีนี้จะหมายถึงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ทหลัก โดยที่ตามกฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) จะสามารถเขียนได้เป็น $Q_{F_1}(x) = Q_{mj,o} + Q_{cf/mj}$

$Q_{mj,o}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ทหลัก

$Q_{cf/mj}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวางทั้งหมด (F_2) ที่ถูกเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมกับเจ็ทหลักผ่าน control surface ของปริมาตรควบคุม (CV) ดังแสดงในรูปที่ 3.2
ไม่ว่าของไหลนั้นจะมาจากกระแสลมขวางหรือเจ็ทควบคุมก็ตาม

อนึ่ง $Q_{F_1}(x) [= Q_{mj,o} + Q_{cf/mj}]$ ในกรณีนี้จะมีค่าเท่ากับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ทหลัก ซึ่งสามารถประเมินวัดได้โดยตรงด้วยเทคนิคการวัดด้วย SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ทหลักเท่านั้น โดยที่ค่าที่ประเมินวัดได้นั้นจะมีความถูกต้องและสอดคล้องกับกายภาพการไหลจริงในงานวิจัยนี้อยู่แล้ว

- 2) กรณีที่ของไหลที่เป็นเจ็ทควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับเจ็ทหลัก (F_1) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$E_2 = \frac{Q_{F_1}(x)}{Q_{F_1,o}} = \frac{(Q_{mj,o} + Q'_{cf/mj}) + Q_{cj,o} + Q'_{cf/cj}}{Q_{mj,o} + Q_{cj,o}} \quad (3.4)$$

เมื่อ $Q_{F_1}(x)$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลักที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x เฉลี่ยเทียบกับเวลา ซึ่งในกรณีนี้จะหมายถึงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ตหลักและส่วนผสมของเจ็ตควบคุม โดยที่ตามกฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) จะสามารถเขียนได้เป็น

$$Q_{F_1}(x) = (Q_{mj,o} + Q'_{cf/mj}) + Q_{cj,o} + Q'_{cf/cj}$$

$(Q_{mj,o} + Q'_{cf/mj})$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ตหลัก
$Q_{mj,o}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ตหลัก
$Q'_{cf/mj}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของกระแสลมขวางที่ถูกเจ็ตหลักเหนี่ยวนำเข้ามาผสมผ่าน control surface ที่เป็นผิวสัมผัสระหว่างส่วนผสมของเจ็ตหลักกับกระแสลมขวางบริสุทธิ์เท่านั้น ไม่รวมส่วนของเจ็ตควบคุม
$Q_{cj,o}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ตควบคุม
$Q'_{cf/cj}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของกระแสลมขวางที่ถูกเจ็ตควบคุมเหนี่ยวนำเข้ามาผสมผ่าน control surface ที่เป็นผิวสัมผัสระหว่างส่วนผสมของเจ็ตควบคุมและกระแสลมขวางเท่านั้น ไม่รวมส่วนของเจ็ตหลัก ก่อนที่เจ็ตหลักจะเหนี่ยวนำให้เจ็ตควบคุมเข้ามาผสม

อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์การทดลอง จึงส่งผลให้งานวิจัยนี้ไม่สามารถใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ตควบคุมได้ ดังนั้นอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่สามารถประเมินวัดได้จริงด้วย SPIV นั้นคืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ตหลักเท่านั้น จึงทำให้ไม่ครอบคลุมในทุกกรณีของการประยุกต์ใช้สมการที่ 3.4 อย่างไรก็ตามด้วยข้อสมมติฐานที่ว่า “ที่ระนาบตัดขวางการไหล x ที่ทำการประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร เจ็ตควบคุมถูกเจ็ตหลักเหนี่ยวนำเข้าไปผสมหมดแล้ว” จึงส่งผลให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่สามารถประเมินวัดได้จริงด้วย SPIV มีความสอดคล้องกับการประยุกต์ใช้ในสมการที่ 3.4 และทำให้การประยุกต์ใช้ค่า E_2 มีความถูกต้อง โดยที่การพิสูจน์ได้ถูกกล่าวไปโดยละเอียดแล้วในหัวข้อที่ 3.1

อนึ่งเนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวางและเจ็ตควบคุม ดังนั้น เส้นทางการเดินและค่า circulation ไร้มิติของเจ็ต ที่จะกล่าวถึงในงานวิจัยนี้จะหมายถึงปริมาณของของไหลที่เป็นส่วนผสมของเจ็ตหลักเท่านั้น

หมายเหตุสัญลักษณ์ : เพื่อให้เกิดความกระชับในการเขียนสัญลักษณ์ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตหลักซึ่งคือ “ \vec{V}_{mj} ” ที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 3.5 งานวิจัยนี้จะเขียนแทนด้วย “ \vec{V}_j ” (เขียน subscript “ j ” แทน “ mj ”)

6.1 การสอบทวนค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกับงานวิจัยก่อนหน้า

รูปที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรสำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ระหว่างงานวิจัยนี้กับงานวิจัยภายใน Fluid Mechanics Research Laboratory (FMRL) ซึ่งประกอบไปด้วยทั้งหมด 8 งานวิจัยด้วยกันคือ งานวิจัยปัจจุบัน, Witthayaprapakorn (2013), Srimekharat (2013), Dawyok (2014), Wongthongsiri (2014), Soupramongkol (2015), Sornphom (2015), และ Tekhuad (2015) ในกรณีที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4 รวมไปถึงยังเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในงานวิจัยนี้กับสมการของ Pruekwatana *at al.* (2016) และงานวิจัยของ Yuan and Street ซึ่งศึกษาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 3.3 ผลการศึกษาพบว่า

- 1) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองในงานวิจัยปัจจุบันกับงานวิจัยในอดีตได้ งานวิจัยนี้จึงนิยามค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นดังนี้

$$e = \left| \frac{E_{\text{present work}} - E_{\text{ref}}}{E_{\text{ref}}} \right| \times (100\%)$$

โดยที่	e	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อน
	$E_{\text{present work}}$	คือ	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่ประเมินวัดได้ในงานวิจัยนี้ที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd ใดๆ
	E_{ref}	คือ	จุดอ้างอิงของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd ใดๆ ในกรณีที่ไม่มีฉีดเจ็ตควบคุม

สำหรับการเปรียบเทียบโดยที่กำหนดให้ E_{ref} เท่ากับ \bar{E} ของทั้ง 8 งานวิจัยภายใน FMRL ผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมจะมีความสอดคล้องกันและมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด (e_{max}) ไม่เกิน 11%

- 2) เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมโดยการกำหนดให้ E_{ref} คือค่า E จากสมการการประมาณการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) โดยการแทนค่า r เท่ากับ 4 ผลการเปรียบเทียบพบว่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Pruekwatana *et al.* (2016) มีความสอดคล้องกันโดยที่มีความคลาดเคลื่อนสูงสุด (e_{max}) ไม่เกิน 4.8%
- 3) การประยุกต์ใช้สมการการประมาณการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) ที่ค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 3.3 ซึ่งเท่ากับงานวิจัยของ Yuan and Street (1998) พบว่า สมการที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) มีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Yuan and Street (1998)
- 4) เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่ประเมินวัดได้จากงานวิจัยนี้ซึ่งทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4 กับงานวิจัยของ Yuan and Street (1998) โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 3.3 พบว่าค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในงานวิจัยนี้มากกว่าสมการจากงานวิจัยของ Yuan and Street (1998) ในทุกๆขนาดตัดขวาง x/rd ซึ่งเป็นผลจากการที่ค่า r ของงานวิจัยนี้สูงกว่างานวิจัยของ Yuan and Street (1998) เล็กน้อย

โดยที่ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์จากสมการยกกำลังของงานวิจัยทั้งหมดจะถูกสรุปไว้ในตารางที่ 6.1

6.2 ผลของการกำหนดชนิดของของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมต่อค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

ก่อนที่จะกล่าวถึงผลของ r_m ที่มีต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร เส้นทางเดินและค่า circulation ของเจ็ดโดยละเอียด เพื่อให้เห็นถึงภาพรวมถึงผลของการกำหนดชนิดของของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมต่อค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจึงนำมาสู่เนื้อหาใน

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรระหว่างกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม, ฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่า r_m เดียวกันในกรณีที่มีการเลือกใช้ชนิดของของไหลที่แตกต่างกัน 2 ชนิด (E_1, E_2), และกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมโดยคิดเปรียบเสมือนว่าเจ็ดหลักมีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ซึ่งรวมผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ไปแล้ว ($E_{JICF, mod r}$)

อนึ่งจากผลการทดลองที่จะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 6.3 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรใน case I (E_1) และ case II (E_2) ในแต่ละ r_m จะมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเลือกแสดงเฉพาะกรณี r_m เท่ากับ 13% เท่านั้น

รูปที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณี

- 1) ไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF)
- 2) ฉีดเจ็ดควบคุมโดยมีค่า r_m เท่ากับ 13% เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (E_1)
- 3) ฉีดเจ็ดควบคุมโดยมีค่า r_m เท่ากับ 13% เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (E_2)
- 4) ไม่ฉีดเจ็ดควบคุมโดยคิดเปรียบเสมือนว่าเจ็ดหลักมีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ซึ่งรวมผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ซึ่งเท่ากับ 13% ไปแล้ว ดังนั้นค่า r_{mod} จะเท่ากับ 4.52 (ที่ $r_m = 13\%$)

ผลการเปรียบเทียบโดยภาพรวมสามารถอธิบายได้ดังนี้

- ในทุกระนาบตัดขวางการไหล การฉีดเจ็ดควบคุมทั้ง 2 กรณี (E_1 หรือ E_2) จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมและกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมโดยคิดเปรียบเสมือนว่าเจ็ดหลักมีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ซึ่งรวมผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ไปแล้ว ($E_{JICF, mod r}$)
- เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 กรณีของการกำหนดชนิดของของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เดียวกัน พบว่า ในทุกระนาบตัดขวาง x/rd อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (E_1) จะมีค่าสูงกว่ากรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (E_2)

- สำหรับทั้ง 3 กรณีของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจะพบว่า

$$E_1 > E_2 > E_{\text{JICF, mod } r} \text{ ในทุกระนาบตัดขวางการไหล } x / rd$$

อนึ่ง จากผลการทดลองที่พบว่า E_1 มากกว่า E_2 เสมอในทุกระนาบตัดขวางการไหลสามารถอธิบายได้ดังนี้ การฉีดเจ็ดควบคุมโดยกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมนั้นเป็นของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) จะสามารถมองเปรียบเทียบเสมือนการผลักกระแสลมขวางให้เข้าไปผสมกับเจ็ดหลักโดยตรง ในขณะที่การฉีดเจ็ดควบคุมโดยกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมนั้นเป็นของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (F_1) จะสามารถมองเปรียบเทียบเสมือนได้ว่าเจ็ดควบคุมซึ่งเป็นของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลักจะทำหน้าที่ช่วยเหนี่ยวนำกระแสลมขวางเข้ามาผสมกับเจ็ดหลักในลักษณะคล้ายเจ็ดอิสระเท่านั้น

เมื่อมองในมุมการเปรียบเทียบเชิงตัวเลข การนิยามอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในสมการที่ 3.1 พบว่า พจน์ $Q_{F_1,0}$ ที่ส่วนซึ่งคือ ผลรวมของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลที่เป็นชนิดเดียวกับเจ็ดหลักที่ปากทางออก (โดยจะรวมถึงอัตราการไหลของเจ็ดควบคุมในกรณีที่ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก) ดังนั้นการฉีดเจ็ดควบคุมโดยการกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลักจึงส่งผลให้พจน์ $Q_{F_1,0}$ ที่ส่วนสูงขึ้น ในขณะที่พจน์ $Q_{F_1}(x)$ ที่เศษ ซึ่งคืออัตราการไหลเชิงปริมาตรอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของของไหลที่เป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลักที่ไหลผ่านระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x เฉลี่ยเทียบกับเวลา ที่สามารถประเมินวัดได้ด้วย SPIV มีค่าเท่าเดิมไม่ว่าจะกำหนดชนิดของของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมเป็นชนิดใดก็ตาม ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ค่า E_1 มากกว่า ค่า E_2 ในทุกระนาบตัดขวางที่ทำการประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

6.3 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลักต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

รูปที่ 6.3(ก)-(ข) แสดงผลของอัตราส่วนอัตราไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลักต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร โดยกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลที่เป็นชนิดเดียวกับของไหลในกระแสลมขวาง (E_1) จะแสดงในรูปที่ 6.3(ก) และกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (E_2) จะแสดงในรูปที่ 6.3(ข)

กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF)

ผลการทดลองในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) พบว่า

- 1) เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream แล้ว อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ด (E) จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกๆ ระยะเวลาตัดขวางการไหลที่ทำการประเมินวัด
- 2) การเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) จะอยู่ในรูปของ power law และสามารถประมาณด้วยสมการ

$$E = 1 + A_E \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_E} \quad (6.1)$$

โดยที่ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ในระยะเวลาตัดขวางการไหลที่ทำการประเมินวัดและสัมประสิทธิ์ A_E และ B_E จากสมการที่ 6.1 ได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 6.2

กรณีฉีดเจ็ดควบคุม (cJICF)

ผลการทดลองในกรณีฉีดเจ็ดควบคุม (cJICF) พบว่า

- 1) เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ด (E_1 และ E_2) จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกๆ ระยะเวลาตัดขวางการไหลที่ทำการประเมินวัดเช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF)
- 2) การเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ในกรณีของการฉีดเจ็ดควบคุม (cJICF) จะอยู่ในรูปของ power law ดังนั้นค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) จะสามารถประมาณด้วยสมการเลขยกกำลังตามสมการที่ 6.1 โดยที่ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรและสัมประสิทธิ์ A_E และ B_E จากสมการที่ 6.1 จะถูกสรุปไว้ใน
 - ตารางที่ 6.2 กรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (E_1)
 - ตารางที่ 6.3 กรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (E_2)
- 3) เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาตัดขวางของการไหล x/rd เดียวกัน การฉีดเจ็ดควบคุมจะส่งผลให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E_1 และ E_2) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และเมื่อทำการเพิ่มค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุม

ต่อเจ็ดหลัก (r_m) จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (E_1) และกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (E_2)

- 4) เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางของการไหล x/rd เดียวกัน ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (E_1) จะมีค่ามากกว่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (E_2) เสมอ ซึ่งเหตุผลได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 6.2

6.4 การเปรียบเทียบอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรระหว่างการประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCJ) กับการประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (ACJ)

เนื้อหาในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงแนวคิดใหม่และแรงจูงใจของงานวิจัยนี้ที่จะปรับแต่งเพิ่มอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวางด้วยการส่งเสริมกลไกการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวางในระนาบตัดขวางโดย CVP ซึ่งเป็นกลไกที่มีอยู่แล้วด้วยการประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม ซึ่งหลักการดังกล่าวเป็นหลักการใหม่ที่มีความแตกต่างจากหลักการที่ใช้ในงานวิจัยในอดีตที่ส่วนใหญ่มักประยุกต์ใช้หลักการการปรับแต่งและควบคุมการเหนี่ยวนำการผสมผ่านการกระตุ้นการก่อตัวและการพัฒนาตัวของ flow shear layer รอบปากทางออกของเจ็ด เช่น การประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (ACJ) เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพและเปรียบเทียบความสามารถในการส่งเสริมการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวางของเทคนิคที่ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ จึงนำมาสู่เนื้อหาในหัวข้อนี้ซึ่งจะเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรระหว่างการประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (LVCJ) กับการประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (ACJ)

อนึ่ง การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจะทำการพิจารณาเปรียบเทียบเฉพาะในกรณีของการประยุกต์ใช้ ACJ (ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4) ที่ส่งผลให้เกิดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่สูงสุด ซึ่งคือกรณีที่ทำการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ 165 องศา (I165) ที่ค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ดหลัก (r_m) เท่ากับ 4% โดยการเปรียบเทียบจะกระทำโดยการอ้างอิงผลการทดลองของ Tekhuad (2015)

เพื่อเป็นการสอบทวนกรณีพื้นฐานหรือกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ซึ่งเป็นกรณีอ้างอิงก่อนการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของการประยุกต์ใช้ LVCJ และ ACJ ซึ่งจะทำให้ผลการเปรียบเทียบผลของการประยุกต์ใช้เทคนิคการฉีดเจ็ดควบคุมต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรระหว่างทั้งสองงานวิจัยมีความน่าเชื่อถือจึงทำได้ดังแสดงในรูปที่ 6.4(ก)

รูปที่ 6.4(ก) แสดงการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมในงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Tekhuad (2015) และสมการการประมาณการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของ Pruekwatana *et al.* (2016) พบว่า ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในแต่ละระนาบตัดขวางการไหลงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tekhuad (2015) โดยที่มีความคลาดเคลื่อน (ซึ่งคิดจาก

$$\left| \frac{E_{\text{Present work}} - E_{\text{Tekhuad (2015)}}}{E_{\text{Present work}}} \times (100\%) \right| \text{ ในแต่ละระนาบตัดขวางการไหล } x/rd \text{ สูงสุดไม่เกิน } 13\%$$

นอกจากนี้ยังพบว่าผลการการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับทั้งงานวิจัยของ Tekhuad (2015) และ สมการการประมาณการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจากงานวิจัยของ Pruekwatana *et al.* (2016) ที่ r เท่ากับ 4

รูปที่ 6.4(ข) แสดงการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรด้วยการประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมในงานวิจัยนี้และการประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงโดย Tekhuad (2015) โดยกรณีทั้งหมดที่ทำการแสดงในรูปที่ 6.4(ข) มีดังนี้

- 1) กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมของงานวิจัยนี้
- 2) กรณีฉีด LVCJ ที่ค่า $r_m = 3.8\%$ เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในกระแสลมขวาง (F_2) หรือ E_1
- 3) กรณีฉีด LVCJ ที่ค่า $r_m = 3.8\%$ เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) หรือ E_2
- 4) กรณีฉีด LVCJ ที่ค่า $r_m = 13\%$ เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในกระแสลมขวาง (F_2) หรือ E_1
- 5) กรณีฉีด LVCJ ที่ค่า $r_m = 13\%$ เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) หรือ E_2

- 6) กรณีฉีด ACJ ที่ค่า $r_m = 4\%$ ที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ ± 165 องศา (I165) เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในกระแสมวง (F_2) หรือ E_1
- 7) กรณีฉีด ACJ ที่ค่า $r_m = 4\%$ ที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ ± 165 องศา (I165) เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) หรือ E_2
- 8) สมการการประมาณการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมโดย Preukwatana *et al.* (2016) ที่ r เท่ากับ 4

จากรูปที่ 6.4(ข) พบว่า

- ทุกกรณีของการฉีดเจ็ดควบคุม (ไม่ว่าจะประยุกต์ใช้เทคนิค LVCJ หรือ ACJ ก็ตาม) ค่า E_1 จะมากกว่า ค่า E_2 เสมอ โดยการอธิบายเหตุผลได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 6.2
- ทุกกรณีการตัดขวางการไหล x/rd การฉีด LVCJ ในกรณี r_m เท่ากับ 13% และการฉีด ACJ ในกรณี r_m เท่ากับ 4% จะส่งผลให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมเสมอ ในขณะที่การฉีด LVCJ ในกรณี r_m เท่ากับ 3.8% จะส่งผลให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรมีค่าประมาณใกล้เคียงหรือสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมเล็กน้อย
- เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางการไหลเดียวกัน ในกรณีฉีดเจ็ดควบคุมที่ r_m ประมาณ 4% พบว่าการประยุกต์ใช้ ACJ จะส่งผลให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรมีค่าสูงกว่าการประยุกต์ใช้ LVCJ
- เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางการไหลเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีฉีดเจ็ดควบคุม จะพบว่า

$$E(\text{LVCJ}; r_m = 13\%) > E(\text{ACJ}; r_m = 4\%; \text{I165}) > E(\text{LVCJ}; r_m = 3.8\%) > E_{\text{JCF}}$$

เมื่อ $E(\text{LVCJ}; r_m = 13\%)$ คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจากการประยุกต์ใช้ LVCJ ที่ค่า r_m เท่ากับ 13% ที่ประเมินวัดได้ที่ระนาบตัดขวาง x/rd ใดๆ

$E(ACJ ; r_m = 4\% ; I165)$	คือ	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจากการประยุกต์ใช้ ACJ ที่ค่า r_m เท่ากับ 4% ที่ตำแหน่งเชิงมุมเท่ากับ ± 165 องศา (I165) ที่ประเมินวัดได้ที่ระนาบตัดขวาง x/rd ใดๆ
$E(LVCJ ; r_m = 3.8\%)$	คือ	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจากการประยุกต์ใช้ LVCJ ที่ค่า r_m เท่ากับ 3.8% ที่ประเมินวัดได้ที่ระนาบตัดขวาง x/rd ใดๆ
E_{JICF}	คือ	อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมที่ประเมินวัดได้ที่ระนาบตัดขวาง x/rd ใดๆ

จากผลการเปรียบเทียบสามารถสรุปได้ว่าในช่วงที่ทำการฉีดเจ็ดควบคุมที่มีค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลักใกล้เคียงกัน (ประมาณ 4%) การประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ตำแหน่งเชิงมุม ± 165 องศา (I165) จะส่งผลให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรมีค่าสูงกว่าการประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม อย่างไรก็ตามเมื่อทำการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมที่ค่า r_m เท่ากับ 13 % จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรสูงกว่าการประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ r_m เท่ากับ 4 %

อนึ่งจากงานวิจัยของ Korsuwan *et al.* (2016) (unpublished) ซึ่งเป็นหนึ่งในงานวิจัยภายใน FMRL ชี้แนะว่าการประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงสามารถส่งผลให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นได้เพียงแค่ช่วงค่า r_m หนึ่งเท่านั้น การฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ค่า r_m สูงเกินไป เช่น 13% จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรลดลง จึงเป็นข้อสันนิษฐานว่าการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ค่า r_m สูงเกินไปจะทำให้การไหลของเจ็ดควบคุมไปขวางการไหลของเจ็ดหลัก ซึ่งส่งผลให้แทนที่เจ็ดควบคุมจะไปส่งเสริมการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวางกลับไปยับยั้งการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวาง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง ACJ และ LVCJ ในเชิงการประยุกต์ใช้งานจริงในงานทางวิศวกรรมนั้นจะพบว่าการประยุกต์ใช้ LVCJ นั้นจะมีความสะดวกกว่าในแง่ของการขึ้นรูปชิ้นงานและการติดตั้งเพื่อใช้งานจริง

6.5 ผลของการกำหนดชนิดของของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ทควบคุมต่อค่าประสิทธิผลของการใช้เจ็ทควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม

เนื้อหาในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลของการใช้เจ็ทควบคุมในกรณีที่ฉีดเจ็ทควบคุมที่ค่า r_m เดียวกันระหว่างค่า η_1 , $\eta_{2,1}$, และ $\eta_{2,2}$ การเปรียบเทียบพบว่าแนวโน้มในแต่ละกรณีฉีดเจ็ทควบคุมที่ค่า r_m เดียวกันจะให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะเลือกแสดงเฉพาะกรณีที่ฉีดเจ็ทควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 13 % เท่านั้น

เพื่อเป็นการทบทวนการนิยามค่าประสิทธิผลการใช้เจ็ทควบคุมซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.4 ประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสมสามารถนิยามตามสมการที่ 3.16 ได้ดังนี้

$$\eta = \frac{E_{\text{cJICF}}}{E_{\text{JICF}}} \quad (3.16)$$

เมื่อ E_{cJICF} คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีฉีดเจ็ทควบคุม
 E_{JICF} คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีไม่ฉีดเจ็ทควบคุม

เพื่อให้การประยุกต์ใช้ประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสม (η) มีความสอดคล้องกับ 2 กรณีของการกำหนดชนิดของของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ทควบคุม ดังนั้นการนิยามค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมสามารถแบ่งได้ 2 กรณีดังนี้

- 1) เมื่อของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ทควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในกระแสลมขวาง (F_2) ดังนั้นค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมจะสามารถนิยามได้เป็น

$$\eta_1 = \frac{E_1}{E_{\text{JICF}}} \quad (3.17)$$

- 2) เมื่อของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ทควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ทหลัก (F_1) ดังนั้นค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมจะสามารถนิยามได้เป็น

$$\eta_{2,1} = \frac{E_2}{E_{\text{JICF}}} \quad (3.18)$$

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาพจน์ E_{JICF} ในสมการที่ 3.18 พบว่าหากของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมคือของไหลที่เป็นชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลัก เราสามารถมีทางเลือกประยุกต์ใช้คือ ไม่ใช่เจ็ตควบคุมแต่ใช้เจ็ตหลักที่มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรเริ่มต้นเท่ากับผลรวมของอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุมของกรณีฉีดเจ็ตควบคุม ดังนั้นจึงเป็นการเหมาะสมกว่าที่จะเปรียบเทียบเปรียบเสมือนว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตหลักที่ปากทางออกมีค่าเท่ากับ ผลรวมของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตหลักกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตควบคุมที่ปากทางออก จึงทำให้ในกรณีนี้ฉีดเจ็ตควบคุมค่าอ้างอิงของ E_{JICF} ควรจะเป็น E_{JICF} ที่จะเสมือนว่ามีค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ที่มากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม ดังนั้นเพื่อให้การเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมมีความเหมาะสมยิ่งขึ้นจึงนิยามประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมตัวที่ 2 ขึ้น โดยคิดเปรียบเสมือนว่าค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมที่นำมาเปรียบเทียบกับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมนั้น มีการรวมผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ซึ่งการปรับแก้อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลจะทำได้ดังนี้

$$r_{mod} = \sqrt{\frac{\rho_{mj} u_{mj, mod}^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2}} \quad (3.19)$$

เมื่อ r_{mod} คือ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลของเจ็ตหลักที่ถูกปรับแก้
 $u_{mj, mod}$ คือ ความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตหลักที่ถูกปรับแก้ซึ่งสามารถคิดได้จาก

$$u_{mj, mod} = \frac{Q_{mj,o} + Q_{cj,o}}{A_{mj,o}} \quad (3.20)$$

โดยที่ $A_{mj,o}$ คือ พื้นที่หน้าตัดที่บริเวณปากทางออกของเจ็ตหลัก

ρ_{mj} คือ ความหนาแน่นของของไหลที่เป็นเจ็ตหลัก

ρ_{cf} คือ ความหนาแน่นของของไหลที่เป็นกระแสลมขวาง

ดังนั้นประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมตัวที่ 2 ตามนิยามในสมการที่ 3.16 จะเขียนได้เป็น

$$\eta_{2,2} = \frac{E_2}{E_{\text{JICF, mod } r}} \quad (3.21)$$

เมื่อ $E_{\text{JICF, mod } r}$ คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมที่รวมผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก โดยที่ $E_{\text{JICF, mod } r}$ จะสามารถประมาณได้จากสมการของ Pruekwatana *et al.*(2016) ดังนี้

$$\frac{E_{\text{JICF, mod } r} - 1}{0.9r_{\text{mod}} + 1.4} = \left(\frac{x}{r_{\text{mod}}d} \right)^{0.5573} \quad (3.22)$$

รูปที่ 6.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 13% กรณี η_1 , $\eta_{2,1}$, และ $\eta_{2,2}$ ผลการเปรียบเทียบพบว่า

- โดยภาพรวมแล้วเมื่อเจ็ดไหลไปตาม downstream จะส่งผลให้ค่าประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุมทั้ง 3 กรณีเพิ่มขึ้น
- เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เดียวกัน พบว่า $\eta_1 > \eta_{2,1} > \eta_{2,2}$ ในทุกๆ ระนาบตัดขวางการไหล

6.6 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลักต่อประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม

รูปที่ 6.6(ก)-(ค) ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลักต่อค่าประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม โดยที่กรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลที่เป็นชนิดเดียวกับของไหลในกระแสลมขวาง (F_2) จะแสดงในรูปที่ 6.6(ก), กรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) จะแสดงในรูปที่ 6.6(ข) สำหรับการให้ค่า E_{JICF} ที่ค่า r เท่ากับ 4 ในการเปรียบเทียบ และรูปที่ 6.6(ค) สำหรับการให้ค่า $E_{\text{JICF, mod } r}$ ที่ค่า r_{mod} ในการเปรียบเทียบ ผลการทดลองพบว่า

- 1) สำหรับกรณี η_1 และ $\eta_{2,1}$ จะพบว่าค่าประสิทธิผลสูงสุดจะเกิดที่ตำแหน่งระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 1.5 ซึ่งเป็นระนาบตัดขวางที่ไกลที่สุดที่งานวิจัยนี้ทำการประเมินวัด ยกเว้นกรณี

- ทำการฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) เท่ากับ 3.8 % ซึ่งพบว่าค่าประสิทธิผลสูงสุดจะเกิดที่ตำแหน่งระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 0.5
- 2) สำหรับกรณี $\eta_{2,2}$ พบว่าในกรณีที่ค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) เท่ากับ 3.8%, 6%, และ 8% ค่าประสิทธิผลสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 1.0 แต่เมื่ออัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) มีค่าเป็น 10% และ 13% ค่าประสิทธิผลสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 1.5
- 3) เมื่อเปรียบที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เดียวกัน พบว่าการฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) เท่ากับ 13 % จะส่งผลให้เกิดค่าประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุมสูงสุด โดยที่
- η_1 จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.86
 - $\eta_{2,1}$ จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.64
 - $\eta_{2,2}$ จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.45
- ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 1.5 ทั้งสามกรณี

โดยที่ค่าประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุมในทุกๆระนาบตัดขวางการไหลจะถูกแสดงไว้ใน

- ตารางที่ 6.4 เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับ กระแสลมขวาง (η_1)
- ตารางที่ 6.5 เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับ เจ็ดหลัก (F_1) โดยที่ใช้ค่า E_{JICF} ที่ค่า r เท่ากับ 4 ในการเปรียบเทียบ ($\eta_{2,1}$)
- ตารางที่ 6.6 เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับ เจ็ดหลัก (F_1) โดยที่ใช้ค่า $E_{JICF, mod r}$ ในการเปรียบเทียบ ($\eta_{2,2}$)

6.7 ผลของเจ็ตควบคุมต่อเส้นทางเดินของเจ็ต

เส้นทางเดินของเจ็ตเป็นอีกหนึ่งปริมาณทางฟิสิกส์ที่บ่งบอกถึงคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมวลว่าง เนื่องจากเส้นทางเดินของเจ็ตในกระแสมวลว่างสามารถนิยามจากปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับเจ็ตได้ในหลายรูปแบบ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้จะนิยามเส้นทางเดินของเจ็ตเป็น center of mass ของขนาดของ vorticity ในแนวแกน streamwise หรือ แกน x นั้นเอง ดังนั้นเส้นทางเดินของเจ็ตในงานวิจัยนี้จะสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$y_{CM,|\omega_{j,x}|} = \frac{\int y |\omega_{j,x}| dA}{\int_A |\omega_{j,x}| dA} \quad (6.2)$$

เมื่อ $y_{CM,|\omega_{j,x}|}$ คือ เส้นทางเดินของเจ็ตซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาดของ vorticity ในแนวแกน streamwise ของส่วนผสมของเจ็ตหลัก

$\omega_{j,x}$ คือ streamwise vorticity ของส่วนผสมของเจ็ตหลัก

อนึ่งเพื่อความชัดเจนและความกระชับ คำว่า ‘เจ็ต’ ในงานวิจัยนี้จะหมายถึงส่วนผสมของเจ็ตหลักเท่านั้น (jet-fluid mixture)

รูปที่ 6.7 แสดงผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลักต่อเส้นทางเดินไร้มิติของเจ็ต ($y_{CM,|\omega_{j,x}|} / rd$) ซึ่งนิยามจากขนาดของ vorticity ของเจ็ตในแนวแกน streamwise

กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF)

ผลการทดลองพบว่า

- 1) เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream เจ็ตจะมีเส้นทางเดินที่สูงขึ้นหรือเจ็ตจะยกตัวสูงขึ้น
- 2) การพัฒนาตัวของเส้นทางเดินของเจ็ตตามระยะทางการไหลจะอยู่ในรูปของ power law ซึ่งสามารถประมาณได้ด้วยสมการ

$$\frac{y_{CM,|\omega_{j,x}|}}{rd} = A_T \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_T} \quad (6.3)$$

โดยที่ค่าเส้นทางเดินไร้มิติของเจ็ด ($y_{CM,|\omega_j,x|}/rd$) ที่ระนาบตัดขวางการไหลใดๆ และสัมประสิทธิ์ A_y และ B_y ที่ได้จากสมการที่ 6.3 ของกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมจะถูกสรุปไว้ในตารางที่ 6.7

- 3) ผลการทดลองในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pruekwatana *et al.* (2016) โดยที่ค่า เส้นทางเดินไร้มิติของเจ็ด มีความใกล้เคียงกันตลอดช่วงการเก็บข้อมูล

กรณีฉีดเจ็ดควบคุม (cJICF)

ผลการทดลองพบว่า

- 1) เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream เส้นทางเดินของเจ็ดจะสูงขึ้น หรือเจ็ดจะยกตัวสูงขึ้น เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม
- 2) การพัฒนาตัวของเส้นทางเดินของเจ็ดตามระยะทางการไหลสามารถประมาณได้ด้วยสมการ power law ดังแสดงในสมการที่ 6.3 เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม โดยที่ค่าเส้นทางเดินไร้มิติ ($y_{CM,|\omega_j,x|}/rd$) ของเจ็ดที่ระนาบตัดขวางการไหลใดๆ และสัมประสิทธิ์ A_y และ B_y กรณีฉีดเจ็ดควบคุมจะถูกสรุปไว้ในตารางที่ 6.7
- 3) เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางการไหลเดียวกันพบว่า เมื่อทำการฉีดเจ็ดควบคุมในทุกกรณีจะส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม และการฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) สูงขึ้นจะส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ดสูงขึ้นเช่นกัน

6.8 ผลของเจ็ดควบคุมต่อค่า circulation

เนื่องจากโครงสร้าง CVP เป็นโครงสร้างหลักที่ก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมวลขวางขึ้น ดังนั้นการประเมินกำลังของโครงสร้าง CVP ซึ่งมีการเคลื่อนที่ในลักษณะหมุนวนจึงเป็นสิ่งสำคัญ สำหรับการประเมินกำลังของโครงสร้าง CVP ของส่วนผสมของเจ็ดหลักจะสามารถประเมินได้จากค่า circulation ของส่วนผสมของเจ็ดหลัก งานวิจัยนี้จึงคำนวณค่า Γ_j จากสมการ

$$\Gamma_j = \oint_C \vec{V}_j \cdot d\vec{r} \quad (6.4)$$

รอบเส้นโค้งปิด C บนระนาบตัดขวางที่ทำการประเมินวัดที่ครอบคลุมบริเวณของส่วนผสมของเจ็ดหลักทุกเวลา

เมื่อ Γ_j	คือ	ค่า circulation ของส่วนผสมของเจ็ตหลัก (ซึ่งได้มาจากการประยุกต์ใช้เทคนิค SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในการไหลอื่น)
\vec{V}_j	คือ	เวกเตอร์สนามความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตหลักเฉลี่ยเทียบกับเวลา

เมื่อประยุกต์ใช้ทฤษฎีของสโตกส์กับสมการที่ 6.4 ในระนาบ yz ส่งผลให้การอินทิเกรตบนโดเมนที่เป็นเส้นโค้งปิด C สามารถเขียนได้อยู่ในรูปของการอินทิเกรตบนโดเมนพื้นผิวในระนาบ yz ดังสมการ

$$\Gamma_j = \oint_C \vec{V}_j \cdot d\vec{r} = \int_{A(x)} \vec{\omega}_j \cdot d\vec{A} \quad (6.5)$$

ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะประเมินค่า circulation ของเจ็ตเฉลี่ยเทียบกับเวลาในระนาบตัดขวางของการไหลดังนั้นสมการที่ 6.5 สามารถเขียนได้เป็น

$$\Gamma_j = \int_{A(x)} \omega_{j,x} dA \quad (6.6)$$

เมื่อ Γ_j	คือ	ค่า circulation ของส่วนผสมของเจ็ตหลัก (ซึ่งได้มาจากการประยุกต์ใช้เทคนิค SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ตหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในการไหลอื่น)
$\omega_{j,x}$	คือ	vorticity ตามแนวแกน streamwise ของส่วนผสมของเจ็ตหลักเฉลี่ยเทียบกับเวลา
$A(x)$	คือ	พื้นที่หน้าตัดที่ครอบคลุมบริเวณของส่วนผสมของเจ็ตหลักตลอดเวลา

จากผลการทดลองพบว่าขนาดของ circulation ค่าบวกซึ่งประเมินได้จาก vorticity ค่าบวกของเจ็ตมีค่าประมาณเท่ากับขนาดของ circulation ค่าลบซึ่งประเมินได้จาก vorticity ค่าลบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่แสดง circulation ของเจ็ตที่เป็นเฉพาะค่าบวกเท่านั้น นอกเหนือจากนั้นงานวิจัยนี้จะแสดง circulation ของเจ็ตในรูปของปริมาณไร้มิติ $(+\Gamma_j / u_{cf} d)$ เมื่อ u_{cf} คือความเร็วของกระแสลมขวาง และ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากทางออกของเจ็ตหลัก

รูปที่ 6.8 แสดงผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลักต่อ circulation ไร้มิติของเจ็ต $(\Gamma_j / u_{cf} d)$

กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF)

ผลการทดลองพบว่า

- 1) เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream ขนาดของ circulation จะมีค่าลดลงหรือสามารถกล่าวในอีกนัยหนึ่งว่า circulation ของเจ็ดจะสลายตัวอย่างต่อเนื่องเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream
- 2) การสลายตัวของ circulation ของเจ็ดอยู่ในรูปของ power law ซึ่งสามารถประมาณได้ด้วยสมการ

$$\frac{\Gamma_j}{u_{cf}d} = A_\Gamma \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_\Gamma} \quad (6.7)$$

โดยที่ค่า circulation ไร้มิติของเจ็ด ($\Gamma_j / u_{cf}d$) ในระนาบตัดขวางการไหลใดๆ และสัมประสิทธิ์ A_Γ และ B_Γ จากสมการที่ 6.7 กรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมจะถูกสรุปไว้ในตารางที่ 6.8

- 3) ผลการทดลองในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pruekwatana *et al.* (2016) โดยที่ค่า circulation ไร้มิติของเจ็ด มีความใกล้เคียงกันตลอดช่วงการเก็บข้อมูล

กรณีฉีดเจ็ดควบคุม (cJICF)

ผลการทดลองพบว่า

- 1) โดยภาพรวมแล้วเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream ขนาดของ circulation จะมีค่าลดลงซึ่งแสดงถึงการสลายตัวของ circulation ของเจ็ดเมื่อพัฒนาตัวไปตาม downstream เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม
- 2) การสลายตัวของ circulation ของเจ็ดเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream กรณีฉีดเจ็ดควบคุมอยู่ในรูปของ power law และสามารถประมาณได้ด้วยสมการ power law เช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมดังสมการที่ 6.7 โดยที่ค่า circulation ไร้มิติของเจ็ดที่ระนาบตัดขวางการไหลใดๆ และสัมประสิทธิ์ A_Γ และ B_Γ กรณีฉีดเจ็ดควบคุมจะถูกสรุปไว้ในตารางที่ 6.8
- 3) เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เดียวกันพบว่าการฉีดเจ็ดควบคุมจะส่งผลให้ค่า circulation ของเจ็ดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม และเมื่อทำการเพิ่มค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) จะส่งผลให้ค่า circulation ของเจ็ดสูงขึ้น

บทที่ 7

มาตรวัดคุณสมบัติของเจ็ตและการพัฒนาตัวของคุณสมบัติไร้มิติของเจ็ต

การค้นหามาตรวัด (scale) ของปริมาณทางฟิสิกส์ที่เหมาะสมเป็นหนึ่งในประเด็นที่สำคัญที่จะนำไปสู่แนวทางในการอธิบายและเข้าใจปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์นั้นๆ ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น นอกเหนือจากนั้นมาตรวัดของปริมาณทางฟิสิกส์ที่เหมาะสมยังทำให้ความสัมพันธ์แบบไร้มิติ (dimensionless physical relation) ทางฟิสิกส์อยู่ในรูปที่กระชับขึ้น กล่าวคือมีตัวแปรไร้มิติที่ใช้ อธิบายน้อยลงตามกฎของ Buckingham pi theorem สำหรับการศึกษาระเบิดในกระแสลมขวางนั้น พบว่ามีหลายงานวิจัยที่พยายามจะศึกษามาตรวัดที่เหมาะสมเพื่อที่จะอธิบายคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง เช่น งานวิจัยของ Smith and Mungal (1998) ที่ศึกษามาตรวัดที่เหมาะสมเพื่อที่จะ collapse เส้นทางการเดินทางของเจ็ตซึ่งนิยามจากปริมาณ mean passive scalar ผลการศึกษาพบว่ามาตรวัด rd สามารถ collapse เส้นทางการเดินทางของเจ็ตได้ดีในระดับหนึ่ง หรืองานวิจัยของ Wongthongsiri (2014) และ Pruekwatana *et al.* (2016) ที่ศึกษามาตรวัดและ model fit ที่เหมาะสมในการ collapse ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง ได้แก่ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร เส้นทางการเดินทาง และค่า circulation ของเจ็ตที่นิยามจากบริเวณที่เป็นส่วนผสมของเจ็ตเท่านั้น ไม่รวมส่วนที่เป็นกระแสลมขวางบริสุทธิ์

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงมาตรวัดและ model fit ที่เหมาะสมที่นอกเหนือจากจะสามารถ collapse ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ไม่มีการควบคุม ตามที่ Pruekwatana *et al.* (2016) ได้เสนอไว้แล้ว ยังสามารถ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อคุณลักษณะต่างๆ ของเจ็ตในกรณีที่ถูกควบคุมด้วยเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมได้ด้วย อันได้แก่ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร, เส้นทางการเดินทางของเจ็ต (ซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาดของ vorticity ในแนวแกน streamwise), และ ค่า circulation ของเจ็ต โดยเนื้อหาจะเริ่มจากการกล่าวถึงผลการศึกษาของ Pruekwatana *et al.* (2016) ในการ collapse ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ไม่มีการควบคุม ต่อจากนั้นจะกล่าวถึงสัญลักษณ์และคำนิยาม เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจถึงตัวแปรต่างๆ ที่จะใช้ต่อไปในการ collapse ต่อมาจะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้มาตรวัดเดิมที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) กับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ซึ่งจะพบว่า มาตรวัดเดิมที่สามารถ collapse ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ในเจ็ตในกระแสลมขวางที่ไม่มีการควบคุมได้นั้นจะไม่สามารถ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ในกรณีที่ฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมได้ จากนั้นจึงกล่าวถึงวิธีการ

และขั้นตอนที่ใช้หามาตรวัดและ model fit ใหม่ที่เหมาะสมที่นอกจากจะสามารถ collapse ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ของเจ็ตในกระแสลมขวางในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมได้แล้ว ยังสามารถ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ได้อีกด้วย โดยที่งานวิจัยนี้จะใช้ผลการศึกษาของ Pruekwatana *et al.* (2016) เป็นหลัก และพัฒนาปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถ collapse ผลของ r_m ดังกล่าวได้ และในส่วนท้ายบทจะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้มาตรวัดและ model fit ที่ได้จากงานวิจัยนี้

7.1 ผลการศึกษาของ Pruekwatana *et al.* (2016)

Pruekwatana *et al.* (2016) ศึกษามาตรวัดและ model fit ที่เหมาะสมในการ collapse ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ที่มีต่อคุณลักษณะต่างๆ ของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม ได้แก่ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร, เส้นทางเดินของเจ็ต (ซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาดของ vorticity ในแนวแกน streamwise), และ ค่า circulation ของเจ็ต งานวิจัยนี้ทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4, 8, และ 12 โดยที่ปริมาณคุณลักษณะเหล่านี้นิยามจากบริเวณที่เป็นส่วนผสมของเจ็ตเท่านั้น ไม่รวมส่วนของกระแสลมขวางบริสุทธิ์

ผลการศึกษาของงานวิจัยของ Pruekwatana *et al.* (2016) จะอยู่ภายใต้ข้อสมมติฐานคือ 1) งานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะผลของพารามิเตอร์ r ที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางที่ไม่มีการควบคุมเป็นหลัก โดยจะถือว่าผลของพารามิเตอร์อื่นที่อาจมีผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางจะเป็นรอง 2) มาตรวัดที่เหมาะสมของระยะทางตามแนวการไหล x คือ rd 3) การพัฒนาตัวของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q ตามระยะทางการไหล x/rd อยู่ในรูปฟอร์มของ power law : $\pi_q = A_q(x/rd)^{B_q}$

อนึ่ง จากผลการศึกษาที่จะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 7.4 พบว่า การใช้ power-law model fit ซึ่งอยู่ในรูปของ $\pi_q = A_q(x/rd)^{B_q}$ สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของ π_q ในแต่ละ r_m ได้ดี อย่างไรก็ตามจะพบว่าสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_q และ B_q จาก power-law model fit ในแต่ละ r_m จะมีค่าแตกต่างกัน กล่าวคือ A_q และ B_q เป็นฟังก์ชันของ r_m , $A_q(r_m)$ และ $B_q(r_m)$, โดยที่ในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) จะสอดคล้องกับกรณี r_m เท่ากับ 0 หรือสามารถเขียนได้เป็น $A_q(0)$ และ $B_q(0)$ นั่นเอง

ผลการศึกษาของ Pruekwatana *et al.* (2016) พบว่า

- 1) มาตรการวัดและ model fit ที่เหมาะสมในการ collapse ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ที่มีต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{Scaling law :} \quad [\pi_q = (E-1)/a_E(r)] = f(x/rd) \quad (7.1A)$$

$$\text{Power-law correlation :} \quad (E-1)/a_E(r) = A_E(0)(x/rd)^{B_E(0)} \quad (7.1B)$$

$$\text{โดยที่} \quad a_E(r) = 0.9r + 1.4 \quad (7.1C)$$

$$A_E(0) = 1, \quad B_E(0) = 0.5573 \quad (7.1D)$$

และ r คือ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากทางออกของเจ็ตหลัก

- 2) มาตรการวัดและ model fit ที่เหมาะสมในการ collapse ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ที่มีต่อเส้นทางเดินของเจ็ต ($y_{CM,|\omega_{j,x}|}$) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{Scaling law :} \quad [\pi_q = y_{CM,|\omega_{j,x}|} / r^{C_y} d] = f(x/rd) \quad (7.2A)$$

$$\text{Power-law correlation :} \quad y_{CM,|\omega_{j,x}|} / r^{C_y} d = A_y(0)(x/rd)^{B_y(0)} \quad (7.2B)$$

$$\text{โดยที่} \quad C_y = 1.36 \quad (7.2C)$$

$$A_y(0) = 0.63, \quad B_y(0) = 0.3257 \quad (7.2D)$$

และ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากทางออกของเจ็ตหลัก

- 3) มาตรการวัดและ model fit ที่เหมาะสมในการ collapse ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ที่มีต่อค่า circulation ของเจ็ต (Γ_j) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{Scaling law :} \quad [\pi_q = \Gamma_j / u_{cf} r^{C_r} d] = f(x/rd) \quad (7.3A)$$

$$\text{Power-law correlation :} \quad \Gamma_j / u_{cf} r^{C_r} d = A_r(0)(x/rd)^{B_r(0)} \quad (7.3B)$$

$$\text{โดยที่} \quad C_r = 0.94 \quad (7.3C)$$

$$A_r(0) = 1.037, \quad B_r(0) = -0.4879 \quad (7.3D)$$

และ u_{cf} คือ ความเร็วของกระแสลมขวาง

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากทางออกของเจ็ตหลัก

อนึ่ง **scaling law** ในงานวิจัยนี้ หมายถึง ตัวแปรไร้มิติ π_q ซึ่งเกิดจากการสเกลปริมาณทางฟิสิกส์แบบมีมิติ q ด้วยมาตราวัด(สเกล) ของ q (s_q) ที่เหมาะสมที่ทำให้เดิมค่าของตัวแปรมีมิติ q ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กัน ที่ยังไม่ collapse ลงเป็นจุดเดียวกัน (เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่างกันจะทำให้ค่าของตัวแปรมีมิติ q ไม่เท่ากัน) จะ collapse ลงเป็นจุดเดียวกันเมื่อใช้ตัวแปรไร้มิติ π_q แทน (ถึงแม้ว่าค่าพารามิเตอร์จะต่างกันแต่ค่า π_q จะเท่ากัน)

ในขณะที่ **model fit** ในที่นี้จะหมายถึง สมการ correlation ที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามได้ดี

7.2 สัญลักษณ์และคำนิยาม

7.2.1 การพิจารณาชุดข้อมูล

งานวิจัยนี้มีการทดลองและเก็บข้อมูลภายใต้เงื่อนไขที่เจ็ดหลักมีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4 และที่ค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก 6 ค่าด้วยกัน ได้แก่ $r_m = 0\%$ (JICF), 3.8%, 6%, 8%, และ 13% สำหรับการเก็บข้อมูลในแต่ละ r_m งานวิจัยนี้จะทำการเก็บข้อมูลที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd 5 ระนาบด้วยกันคือ 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, และ 1.5 ดังนั้นจำนวนจุดข้อมูลของผลการทดลองทั้งหมดจะมีอยู่ $(6 r_m \times 5 x/rd) = 30$ จุดข้อมูล เพื่อให้เกิดความชัดเจนในการพิจารณาชุดข้อมูล (Sample) ที่นำมาพิจารณาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จึงมีการนิยามชุดข้อมูลดังนี้

Sample = $(r_m \times x/rd)$:	ชุดข้อมูลที่พิจารณาคือจุดข้อมูลทั้งหมดที่ทำการเก็บข้อมูล (ทุก r_m และ ทุก x/rd) เท่ากับ 30 จุด
Sample = (r_m)	:	ชุดข้อมูลที่พิจารณาประกอบไปด้วย 6 ค่าของ r_m ที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เดียวกัน
Sample = (x/rd)	:	ชุดข้อมูลที่พิจารณาประกอบไปด้วย 5 ค่าของ x/rd ที่ค่า r_m เดียวกัน

ดังนั้นในการหาปริมาณทางสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย หรือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน งานวิจัยนี้จะหา “บนชุดข้อมูล” ที่ระบุ

7.2.2 การกำหนดสัญลักษณ์

เพื่อให้เกิดความสะดวกในการกล่าวถึงปริมาณทางฟิสิกส์ใดๆ จึงมีการกำหนดสัญลักษณ์ในงานวิจัยนี้ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

กำหนดให้ q คือ ปริมาณทางฟิสิกส์มีมิติที่สนใจ

q คือ ปริมาณทางฟิสิกส์มีมิติ

$q_{r_m, x/rd}$ คือ ปริมาณทางฟิสิกส์มีมิติ q ที่ทำการประเมินค่าที่ r_m และ ตำแหน่ง x/rd

s_q คือ มาตรฐานวัดที่นำไปสเกลปริมาณทางฟิสิกส์มีมิติ q

$\pi_q = q / s_q$ คือ ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติของ q ที่ถูกสเกลด้วยมาตรฐาน s_q ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นฟังก์ชันของ 2 ตัวแปร ได้แก่ r_m และ x/rd โดยมี r_m เป็นพารามิเตอร์, $\pi_q(x/rd; r_m)$

$\pi_{q|r_m, x/rd}$ คือ ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติของ q (π_q) ที่ประเมินค่าที่ r_m และที่ตำแหน่ง x/rd

$\pi_{q|x/rd}$ คือ ค่าเฉลี่ยของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ประเมินวัดที่ตำแหน่ง x/rd

$S_{X(n)|x/rd}$ คือ Unbiased standard deviation (SD) ของ ปริมาณ X บนชุดข้อมูล Sample = (n) ที่ประเมินวัดที่ตำแหน่ง x/rd

$\mathcal{E}_{X(n)|x/rd} = S_{X(n)|x/rd} / \bar{X}$ คือ scatter ของปริมาณ X บนชุดข้อมูล Sample = (n) ที่ตำแหน่ง x/rd โดยที่ $S_{X(n)|x/rd}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ X และ \bar{X} คือค่าเฉลี่ยของ X บนชุดข้อมูล Sample = (n) ตัวอย่างเช่น $\mathcal{E}_{\pi_q(r_m)|x/rd}$ หมายถึง scatter ของ π_q บนชุดข้อมูลที่มี Sample =

(r_m) ที่ตำแหน่ง x/rd ดังนั้น
 $\mathcal{E}_{\pi_q(r_m)|x/rd} = S_{\pi_q(r_m)|x/rd} / \pi_{q|x/rd}$
 $\pi_q = \Pi_q(x/rd; r_m)$ คือ การพัฒนาตัวของตัวแปรไร้มิติ π_q ตามระยะทางการไหล x/rd ที่แต่ละ r_m
 $\pi_{q,fit} = \Pi_{q,fit}(x/rd; r_m)$ คือ model fit ที่ใช้ในการประมาณ $\pi_q = \Pi_q(x/rd; r_m)$

7.3 พารามิเตอร์ชี้วัด collapsibility (\mathcal{E}) และ goodness of fit (R^2)

7.3.1 พารามิเตอร์ชี้วัด collapsibility (\mathcal{E})

ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 7.1 ว่า “scaling law จะหมายถึงตัวแปรไร้มิติ π_q ซึ่งเกิดจากการสเกลปริมาณทางฟิสิกส์แบบมีมิติ q ด้วยสเกลของ q (s_q) ที่เหมาะสมที่ทำให้เดิมค่าของตัวแปรมีมิติ q ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กัน ที่ยังไม่ collapse ลงเป็นจุดเดียวกัน (เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่างกันจะทำให้ค่าของตัวแปรมีมิติ q ไม่เท่ากัน) จะ collapse ลงเป็นจุดเดียวกันเมื่อใช้ตัวแปรไร้มิติ π_q แทน (ถึงแม้ว่าค่าพารามิเตอร์จะต่างกัน แต่ค่า π_q จะเท่ากัน)” ดังนั้นเพื่อที่จะประเมินวัด collapsibility ของ ผลของ r_m ที่มีต่อ π_q ที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เดียวกัน ซึ่งชุดข้อมูลจะประกอบด้วย 6 ค่าของ π_q ซึ่งโดยทั่วไปจะแปรตาม 6 ค่าของ r_m หรือ Sample = (r_m) จึงนิยาม scatter ซึ่งเป็นตัวชี้วัด collapsibility นี้เป็น

$$\mathcal{E}_{\pi_q(r_m)|x/rd} = \frac{S_{\pi_q(r_m)|x/rd}}{\pi_{q|x/rd}} \quad ; \quad \text{Sample} = (r_m) \quad (7.4)$$

เมื่อ $\mathcal{E}_{\pi_q(r_m)|x/rd}$ คือ scatter ของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ตำแหน่ง x/rd
 $S_{\pi_q(r_m)|x/rd}$ คือ Unbiased standard deviation ของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ตำแหน่ง x/rd
 $\pi_{q|x/rd}$ คือ ค่าเฉลี่ยของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ประเมินวัดที่ตำแหน่ง x/rd

อนึ่ง การแสดงค่า scatter จะแสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ หรือ $\varepsilon_{\pi_q(r_m)|x/rd} = S_{\pi_q(r_m)|x/rd} / \pi_{q|x/rd} (\times 100\%)$ และเนื่องจาก scatter ของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ 5 ระบายตัดขวาง x/rd ที่ต่างกันอาจมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อที่จะบอกค่า scatter โดยภาพรวม งานวิจัยนี้จึงจะแสดง scatter เป็นช่วงจากค่าเฉลี่ยของ 5 ระบายตัดขวาง x/rd ถึง ค่าสูงสุดของ 5 ระบายตัดขวาง x/rd ดังนี้

$$\varepsilon_{\pi_q(r_m)} = (\text{Mean of } \varepsilon_{\pi_q(r_m)|x/rd} \text{ over } 5 \text{ } x/rd) - (\text{Max of } \varepsilon_{\pi_q(r_m)|x/rd} \text{ over } 5 \text{ } x/rd) \quad (7.5)$$

7.3.2 พารามิเตอร์ชี้วัด goodness of fit (R^2)

ในขณะเดียวกันเพื่อที่จะประเมินความสามารถของ model fit ในการอธิบายและประมาณการพัฒนาตัวของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใดๆ ของเจ็ดในกระแสลมขวางตามระยะทางการไหล x/rd งานวิจัยนี้จะใช้พารามิเตอร์ $R^2_{\pi_q}$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความแม่นยำของ model fit ในการอธิบายการพัฒนาตัวของ π_q ตามระยะการไหล x/rd

7.4 การสังเกตคุณลักษณะต่างๆ ของเจ็ดในกระแสลมขวางด้วยมาตรวัดเดียวกับ Pruekwatana et al. (2016)

เมื่อประยุกต์ใช้ scaling law และ power-law model fit ที่เสนอโดย Pruekwatana et al. (2016) ซึ่งสามารถ collapse ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมได้ กับผลการทดลองของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร, เส้นทางเดิน, และค่า circulation ของเจ็ดในกระแสลมขวางในงานวิจัยนี้ซึ่งมีกรณีที่ฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมด้วย โดยให้ $\pi_q = q/S_q(r)$ ในที่นี้จะหมายถึง scaling law ตามสมการที่ 7.1A-7.3A และ $S_q(r)$ คือมาตรวัดที่เสนอโดย Pruekwatana et al. (2016) ที่สามารถ collapse ผลของ r ที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ดในกระแสลมขวางในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมได้ ผลการศึกษาพบว่า

1) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E_1 และ E_2)

รูปที่ 7.1 และ รูปที่ 7.2 แสดงการประยุกต์ใช้ scaling law และ power-law model fit ที่เสนอโดย Pruekwatana et al. (2016) ตามสมการที่ 7.1A-7.1C กับอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในกรณี E_1 และ E_2 ตามลำดับ

ผลการศึกษาทั้งสองกรณีของการกำหนดชนิดของของไหลที่ใช้ฉีดเป็นเจ็ดควบคุม (E_1 และ E_2) มีแนวโน้มไปทางเดียวกันโดยพบว่า

1.1) การใช้ power-law model fit ตามสมการที่ 7.1B สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของ π_{E_1} (รูปที่ 7.1) และ π_{E_2} (รูปที่ 7.2) ในแต่ละ r_m ได้ดี โดยที่ค่า π_{E_1} และ π_{E_2} รวมไปถึงสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_q (A_{E_1} หรือ A_{E_2}) และ B_q (B_{E_1} หรือ B_{E_2}) จาก power-law model fit ในแต่ละ r_m จะถูกแสดงไว้ใน

- ตารางที่ 7.1 เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุม คือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (E_1)
- ตารางที่ 7.2 เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุม คือของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (E_2)

1.2) เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางไหล x/rd เดียวกัน พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า r_m จะส่งผลให้ทั้ง π_{E_1} (รูปที่ 7.1) และ π_{E_2} (รูปที่ 7.2) เพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่ง การใช้ scaling law ที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) ยังไม่สามารถ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้ โดยที่การใช้สเกลนี้ส่งผลให้ scatter ของ π_E บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) มีค่าสูงดังนี้

- $\left[\pi_{E_1} = \frac{E_1 - 1}{a_E(r)} \right]$; $\varepsilon_{\pi_q(r_m)} = 21.4\% - 27.0\%$
- $\left[\pi_{E_2} = \frac{E_2 - 1}{a_E(r)} \right]$; $\varepsilon_{\pi_q(r_m)} = 16.6\% - 22.5\%$

โดยที่ $a_E(r) = 0.9r + 1.4$ (ตามสมการที่ 7.1C)

1.3) อย่างไรก็ตามเมื่อพยายามบังคับ collapse ผลของ r_m ต่อ π_E โดยถือว่าข้อมูลในแต่ละค่า r_m เป็นข้อมูลชุดเดียวกันและทำการประยุกต์ใช้ power-law model fit (เรียกว่า ‘Forced collapsing model fit’) เพื่อ fit π_E (π_{E_1} และ π_{E_2}) กับ x/rd ผ่านชุดข้อมูล Sample = ($r_m \times x/rd$) ซึ่งประกอบไปด้วย 30 จุดข้อมูล ผลการศึกษาในรูปที่ 7.1 (สำหรับกรณี E_1) และ รูปที่ 7.2 (สำหรับกรณี E_2) พบว่า

$$\left[\pi_{E_1} = \frac{E_1 - 1}{a_E(r)} \right] = 1.332 \left(\frac{x}{rd} \right)^{0.6067} ; R_{\pi_q}^2 = 0.6974 \quad (7.6)$$

$$\left[\pi_{E_2} = \frac{E_2 - 1}{a_E(r)} \right] = 1.226 \left(\frac{x}{rd} \right)^{0.6122} ; R_{\pi_q}^2 = 0.7826 \quad (7.7)$$

โดยที่ $a_E(r) = 0.9r + 1.4$ (ตามสมการที่ 7.1C)

กล่าวคือพารามิเตอร์ $R_{\pi_q}^2$ จาก Forced collapsing model fit มีค่าต่ำ ($E_1 ; R_{\pi_q}^2 = 0.6974$ และ $E_2 ; R_{\pi_q}^2 = 0.7826$) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ Forced collapsing model fit ยังไม่สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของชุดข้อมูลตามระยะทางการไหลได้ดี (สาเหตุมาจาก π_E ยังไม่สามารถ collapse ผลของ r_m ได้ดังที่กล่าวใน 1.2)

2) เส้นทางเดินของเจ็ต ($y_{CM,|\omega_{j,x}|}$)

รูปที่ 7.3 แสดงการประยุกต์ใช้ scaling law และ power-law model fit ที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) ตามสมการที่ 7.2A-7.2C กับเส้นทางเดินของเจ็ต ผลการศึกษาพบว่า

- 2.1) การใช้ power-law model fit ตามสมการที่ 7.2B สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของ π_y ในแต่ละ r_m ได้ดี โดยที่ค่า π_y และสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_y และ B_y จาก power-law model fit ในแต่ละ r_m จะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 7.3
- 2.2) เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางไหล x/rd เดียวกัน พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า r_m ส่งผลให้ π_y สูงขึ้น หรืออีกนัยหนึ่ง การใช้ scaling law ที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) ยังไม่สามารถ collapse ผลของอัตราส่วนอัตรา การไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อเส้นทางเดินของเจ็ตได้ โดยที่ scatter ของ π_y บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) จะมีค่าสูงดังนี้

$$\left[\pi_y = \frac{y_{CM,|\omega_{j,x}|}}{r^{C_y} d} \right], C_y = 1.36 ; \varepsilon_{\pi_q(r_m)} = 20.4\% - 23.2\%$$

- 2.3) อย่างไรก็ตามเมื่อพยายามบังคับ collapse ผลของ r_m ต่อ π_y โดยถือว่าข้อมูลในแต่ละค่า r_m เป็นข้อมูลชุดเดียวกันและทำการประยุกต์ใช้ power-law model fit (เรียกว่า 'Forced collapsing model fit') เพื่อ fit π_y กับ

x/rd ผ่านชุดข้อมูล Sample = $(r_m \times x/rd)$ ซึ่งประกอบไปด้วย 30 จุดข้อมูล พบว่า

$$\left[\pi_y = \frac{y_{CM,|\omega_{j,x}|}}{r^{C_y} d} \right] = 0.8576 \left(\frac{x}{rd} \right)^{0.381}, C_y = 1.36 ; R_{\pi_q}^2 = 0.5564 \quad (7.8)$$

กล่าวคือพารามิเตอร์ $R_{\pi_q}^2$ จาก Forced collapsing model fit มีค่าต่ำ ($R_{\pi_q}^2 = 0.5564$) หรือสามารถกล่าวได้ว่า Forced collapsing model fit ยังไม่สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของชุดข้อมูลตามระยะทางการไหลได้ดี (สาเหตุมาจาก π_y ยังไม่สามารถ collapse ผลของ r_m ได้ดังที่กล่าวใน 2.2)

3) ค่า circulation ของเจ็ต (Γ_j)

รูปที่ 7.4 แสดงการประยุกต์ใช้ scaling law และ power-law model fit ที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) สมการที่ 7.3A-7.3C กับค่า circulation ของเจ็ต ผลการศึกษาพบว่า

- 3.1) การใช้ power-law model ตามสมการที่ 7.3B สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของ π_Γ ในแต่ละ r_m ได้ดี โดยที่ค่า π_Γ และสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_Γ และ B_Γ จาก power-law model fit ในแต่ละ r_m จะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 7.4
- 3.2) เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางไหล x/rd เดียวกัน พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า r_m ส่งผลให้ π_Γ สูงขึ้น หรืออีกนัยหนึ่ง การใช้ scaling law ที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) ยังไม่สามารถ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อค่า circulation ของเจ็ตได้ โดยที่ scatter ของ π_Γ บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) จะมีค่าสูงดังนี้

$$\left[\pi_\Gamma = \frac{\Gamma_j}{u_{cf} r^{C_\Gamma} d} \right], C_\Gamma = 0.94 ; \varepsilon_{\pi_q(r_m)} = 32.2\% - 42.2\%$$

- 3.3) อย่างไรก็ตามเมื่อพยายามบังคับ collapse ผลของ r_m ต่อ π_Γ โดยถือว่าข้อมูลในแต่ละค่า r_m เป็นข้อมูลชุดเดียวกันและทำการประยุกต์ใช้ power-law model fit (เรียกว่า ‘Forced collapsing model fit’) เพื่อ fit π_Γ กับ x/rd ผ่านชุดข้อมูล Sample = $(r_m \times x/rd)$ ซึ่งประกอบไปด้วย 30 จุดข้อมูล ซึ่งผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 7.4 พบว่า

$$\left[\pi_{\Gamma} = \frac{\Gamma_j}{u_{cf} r^{C_{\Gamma}} d} \right] = 1.581 \left(\frac{x}{rd} \right)^{-0.6101}, C_{\Gamma} = 0.94 \quad ; \quad R_{\pi_q}^2 = 0.5271 \quad (7.9)$$

กล่าวคือพารามิเตอร์ $R_{\pi_q}^2$ จาก Forced collapsing model fit มีค่าต่ำ ซึ่งแสดงว่า Forced collapsing model fit ยังไม่สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของชุดข้อมูลตามระยะทางการไหลได้ดี (สาเหตุมาจาก π_{Γ} ยังไม่สามารถ collapse ผลของ r_m ได้ ดังที่กล่าวใน 3.2)

ผลการศึกษาในหัวข้อนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การใช้ power-law model fit ซึ่งอยู่ในรูป $\pi_q = A_q (x/rd)^{B_q}$ สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของ π_q ในแต่ละ r_m ได้ดี
- 2) เมื่อพิจารณาดารางที่ 7.1-7.4 ซึ่งแสดงค่าตัวแปรไร้มิติของคุณลักษณะเจ็ด ได้แก่ อัตราการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (ดารางที่ 7.1 แสดง E_1 , ดารางที่ 7.2 แสดง E_2), เส้นทางเดินของเจ็ด (ดารางที่ 7.3), และค่า circulation ของเจ็ด (ดารางที่ 7.4) และสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_q และ B_q ในแต่ละ r_m ที่ได้จาก power-law model fit พบว่าสัมประสิทธิ์ A_q และ B_q ที่ได้จาก power-law model fit ในแต่ละ r_m จะมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งแสดงถึงผลของ r_m ที่มีต่อสัมประสิทธิ์ A_q และ B_q หรืออีกนัยหนึ่ง $A_q(r_m)$ และ $B_q(r_m)$
- 3) การใช้ scaling law ที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) ยังไม่สามารถ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร, เส้นทางเดิน, และค่า circulation ของเจ็ดได้ โดยค่า scatter ของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) จะยังค่อนข้างสูง ($\varepsilon_{\pi_q(r_m)} = 16.6\% - 42.2\%$)
- 4) การประยุกต์ใช้ power-law model fit (เรียกว่า ‘Forced collapsing model fit’) เพื่อ fit π_q กับ x/rd ผ่านชุดข้อมูล Sample = ($r_m \times x/rd$) ซึ่งประกอบไปด้วย 30 จุดข้อมูลจะก่อให้เกิดค่า $R_{\pi_q}^2$ ที่ต่ำ ($R_{\pi_q}^2 = 0.5271 - 0.7826$)

7.5 วิธีการและขั้นตอนในการหาตัวแปรไร้มิติ

ข้อสรุปในหัวข้อที่ 7.4 ที่พบว่า

“การใช้ power-law model fit ซึ่งอยู่ในรูปของ $\pi_q = A_q(x/rd)^{B_q}$ สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของ π_q ในแต่ละ r_m ได้ดี โดยที่สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_q และ B_q จาก power-law model fit ในแต่ละ r_m จะมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งแสดงถึงผลของ r_m ที่มีต่อสัมประสิทธิ์ A_q และ B_q ; $A_q(r_m), B_q(r_m)$ ”

ดังนั้นจึงนำมาสู่แนวคิดในงานวิจัยนี้ที่จะพัฒนาและปรับปรุงมาตรวัดใหม่ขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อให้นอกเหนือจากจะสามารถ collapse ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ได้ ยังสามารถ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร, เส้นทางการเดิน, และค่า circulation ของเจ็ดได้ โดยแนวคิดในงานวิจัยนี้จะเสนอให้

➤ สัมประสิทธิ์ A_q เป็นฟังก์ชันของ r_m หรือสามารถเขียนได้เป็น $A_q = A_q(r_m)$

➤ สัมประสิทธิ์ B_q เป็นฟังก์ชันของ r_m หรือสามารถเขียนได้เป็น $B_q = B_q(r_m)$

อนึ่ง ในการใช้ r_m ในความสัมพันธ์ต่างๆ เช่น $A_q(r_m)$ และ $B_q(r_m)$ และการคำนวณจะใช้ค่า r_m ที่อยู่ในรูปเศษส่วน ไม่ใช่ r_m ที่อยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ เช่น $r_m = 13\%$ จะเป็น $r_m = 0.13$

ดังนั้นปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q ที่ประเมินวัดที่ r_m และที่ตำแหน่ง x/rd หรือ $\pi_{q|r_m, x/rd}$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\pi_{q|r_m, x/rd} = [A_q(r_m)](x/rd)^{[B_q(r_m)]} \quad (7.10)$$

สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF, $r_m = 0$) สมการที่ 7.10 สามารถเขียนได้เป็น

$$\pi_{q|0, x/rd} = [A_q(0)](x/rd)^{[B_q(0)]} \quad (7.11)$$

เมื่อนำสมการที่ 7.10 ทหารด้วยสมการที่ 7.11 จะได้

$$\frac{\pi_{q|r_m, x/rd}}{\pi_{q|0, x/rd}} = \frac{[A_q(r_m)]}{[A_q(0)]} (x/rd)^{[B_q(r_m)] - [B_q(0)]} \quad (7.12)$$

เพื่อที่จะ collapse ผลของ r_m ได้ ค่าของตัวแปรไร้มิติใหม่ที่ประเมินที่ค่า r_m ที่ต่างกันจะต้องมีค่าที่เท่ากัน (ตัวแปรไร้มิติใหม่จะไม่ขึ้นกับ r_m) ที่ตำแหน่ง x/rd เดียวกัน ดังนั้นจึงชี้แนะว่าควรที่จะจัดรูปตัวแปรและสมการที่ 7.12 ใหม่ให้อยู่ในรูป

$$\frac{\pi_{q|r_m, x/rd}}{\underbrace{\frac{[A_q(r_m)]}{[A_q(0)]}}_{s_A} \underbrace{(x/rd)^{[B_q(r_m)]-[B_q(0)]}}_{s_B}} = \pi_{q|0, x/rd} = \text{ค่าคงที่เมื่อเทียบกับ } r_m \quad (7.13A)$$

โดยที่ $\pi_{q|r_m, x/rd}$ คือ ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติของ q เดิม (Pruekwatana *et al.* (2016))
ที่ประเมินวัดที่ r_m ที่ตำแหน่ง x/rd
 $\pi_{q|0, x/rd}$ คือ ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติของ q เดิม (Pruekwatana *et al.* (2016))
ที่ประเมินวัดที่ $r_m=0$ หรือ π_q ของกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF)
ที่ตำแหน่ง x/rd

จากการวิเคราะห์ดังแสดงในสมการที่ 7.13A จึงชี้แนะว่าตัวแปรไร้มิติใหม่ที่จะสามารถ collapse ผลของ r_m ได้ควรอยู่ในรูป

$$\left[\pi_q'' = \frac{\pi_q}{(s_A s_B)} \right] = \pi_{q|0, x/rd} \quad (7.13B)$$

$$\text{เมื่อ} \quad s_A = \frac{A_q(r_m)}{A_q(0)} \quad , \quad s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_q(r_m) - B_q(0)} \quad (7.14)$$

จากสมการที่ 7.13B สามารถอธิบายได้ว่าพจน์ s_A และ s_B คือ ผลของ r_m ที่มีต่อปริมาณทางฟิสิกส์ของ q ในกรณีที่มีการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม โดยที่

- พจน์ s_A คือ ผลของ r_m ต่อ A_q
- พจน์ s_B คือ ผลของ r_m ต่อ B_q

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในสมการที่ 7.13B จะสามารถอธิบายได้ดังนี้ ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q เดิม (Pruekwatana *et al.* (2016)) เมื่อถูกสเกลด้วยพจน์ $(s_A s_B)$ จะส่งผลให้ปริมาณฟิสิกส์ไร้มิติใหม่ π_q'' นั้นจะมีค่าเท่ากับค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับ r_m และมีค่าเท่ากับ π_q ที่ประเมินวัดในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (r_m เท่ากับ 0) ที่ตำแหน่ง x/rd หรือ $\pi_{q|0, x/rd}$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า

การสเกล π_q ด้วย $s_A s_B$ ($\pi_q'' = \pi_q / (s_A s_B)$) จะทำให้ค่าของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่ (π_q'') collapse ลงเป็นจุดเดียวกันไม่ขึ้นกับ r_m และมีค่าเท่ากับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควมคุม ($\pi_{q|0,x/rd}$)

ดังนั้นในความพยายามที่จะ collapse ผลของ r_m ในงานวิจัยนี้จะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

- 1) ทำการ collapse ผลของ r_m โดยใช้เฉพาะมาตรวัด s_A เพื่อไปสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q โดยจะได้ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่ซึ่งอยู่ในรูป

$$\pi_q' = \frac{\pi_q}{s_A} \quad (7.15A)$$

โดยที่
$$s_A = \frac{A_q(r_m)}{A_q(0)} \quad (7.15B)$$

- 2) ทำการ collapse ผลของ r_m โดยใช้มาตรวัด s_B เพื่อไปสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q' โดยจะได้ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่ซึ่งอยู่ในรูป

$$\pi_q'' = \frac{\pi_q'}{s_B} = \frac{\pi_q}{s_A s_B} \quad (7.16A)$$

โดยที่
$$s_A = \frac{A_q(r_m)}{A_q(0)}, \quad s_B = \left(\frac{x}{rd}\right)^{B_q(r_m) - B_q(0)} \quad (7.16B)$$

ดังนั้นสมการที่ 7.13B สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\left[\pi_q'' = \frac{\pi_q'}{s_B} = \frac{\pi_q}{s_A s_B} \right] = \pi_{q|0,x/rd} \quad (7.17)$$

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะแสดงผลการทดลองในรูปตัวแปรไร้มิติซึ่งประยุกต์ใช้มาตรวัดที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ดังนี้

- 1) ประยุกต์ใช้มาตรวัดเดียวกับ Pruekwatana *et al.* (2016) หรือปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติจะอยู่ในรูป π_q (ซึ่งได้แสดงแล้วในหัวข้อที่ 7.4)
- 2) ประยุกต์ใช้มาตรวัดเดียวกับ Pruekwatana *et al.* (2016) ซึ่งถูกสเกลด้วย s_A หรือปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติจะอยู่ในรูป π_q'

หมายเหตุ : การประยุกต์ใช้แบบนี้ในทางทฤษฎีแล้วจะสามารถ collapse ผลของ r_m ได้ดีก็

ต่อเมื่อเมื่อ $B_q(r_m)$ มีค่าประมาณเท่ากับ $B_q(0)$ หรือ $B_q(r_m) \approx B_q(0)$ ตามสมการที่ 7.13A

- 3) ประยุกต์ใช้มาตรวัดเดียวกับ Pruekwatana *et al.* (2016) ซึ่งถูกสเกลอีกด้วย $s_A s_B$ หรือ ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติจะอยู่ในรูป π_q'' ซึ่งการแสดงผลในรูปแบบนี้จะเป็นการประยุกต์ใช้สมการที่ 7.13B อย่างเต็มรูปแบบ

อนึ่ง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Pruekwatana *et al.* (2016) การ collapse ผลของ อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ในงานวิจัยนี้จะอยู่ภายใต้ข้อสมมติฐานคือ 1) งานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะผลของพารามิเตอร์ r และ r_m ที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ดในกระแสมวลว่างเป็นหลัก โดยจะถือว่าผลของพารามิเตอร์อื่นที่อาจมีต่อคุณลักษณะของเจ็ดในกระแสมวลว่างจะเป็นรอง 2) มาตรวัดที่เหมาะสมของระยะทางตามแนวการไหล x คือ rd 3) การพัฒนาตัวของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใดๆ ตามระยะทางการไหล x/rd อยู่ในรูปฟอร์มของ power law : $\pi_q' = A_q'(x/rd)^{B_q'}$ หรือ $\pi_q'' = A_q''(x/rd)^{B_q''}$

ขั้นตอนในการหาสเกลและตัวแปรไร้มิติ

- ขั้นตอนที่ 1 ประเมินวัด $q_{r_m, x/rd}$ ทั้ง 30 ค่า ($6 r_m \times 5 x/rd$) ด้วย SPIV ซึ่ง $q_{r_m, x/rd}$ ในที่นี้จะหมายถึงปริมาณ E , $y_{CM, |\omega_j, x|}$, และ Γ_j
- ขั้นตอนที่ 2 $\pi_q = q / S_q(r)$; ทำให้ $q_{r_m, x/rd}$ เป็นปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติด้วยการสเกลด้วย $S_q(r)$ ที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) ตามสมการที่ 7.1A-7.3A [ดังนั้น $\pi_q|_{r_m, x/rd}$ คือค่าของ π_q ที่จุด r_m และตำแหน่ง x/rd]
- ขั้นตอนที่ 3 $\pi_{q, fit} = \Pi_{q, fit}(x/rd; r_m)$ ตามสมการที่ 7.1B-7.3B ; ประยุกต์ใช้ model fit (power-law model fit) ในแต่ละ r_m ดังนั้นในแต่ละ r_m จะได้สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_q และ B_q และ $R_{\pi_q}^2$
หมายเหตุ : $R_{\pi_q}^2$ ในขั้นตอนนี้จะหมายถึงค่า R^2 ที่ได้มาจากการประยุกต์ใช้ power-law model fit เพื่อ fit ชุดข้อมูลเฉพาะในแต่ละ r_m
- ขั้นตอนที่ 4 ประเมินหาค่า scatter ของชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ตำแหน่ง x/rd ดังนี้

$$\mathcal{E}_{\pi_q(r_m)|x/rd} = \frac{S_{\pi_q(r_m)|x/rd}}{\pi_q|x/rd}, \text{ [Sample = } (r_m)\text{]}$$

- **ขั้นตอนที่ 5** ประยุกต์ใช้ model fit (power-law model fit) หรือเรียกว่า “Forced collapsing model fit” โดย fit ปริมาณฟิสิกส์ไร้มิติ π_q ผ่านชุดข้อมูล Sample = $(r_m \times x / rd)$ ซึ่งประกอบไปด้วย 30 จุดข้อมูลของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใดๆ โดยจะได้สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_q , B_q และ $R_{\pi_q}^2$ มา
- หมายเหตุ** : $R_{\pi_q}^2$ ในขั้นตอนนี้จะหมายถึงค่า R^2 ที่ได้มาจากการประยุกต์ใช้ power-law model fit ที่ fit ผ่านชุดข้อมูล Sample = $(r_m \times x / rd)$

อนึ่ง ขั้นตอนที่ 1 ถึง ขั้นตอนที่ 5 คือผลการศึกษาที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 7.4

- **ขั้นตอนที่ 6** $A_q = A_q(r_m)$, $B_q = B_q(r_m)$; ทำการหา model fit เพื่อที่จะประมาณหาความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ A_q หรือ B_q
- หมายเหตุ** : สัมประสิทธิ์ $A_q(r_m = 0)$ และ $B_q(r_m = 0)$ คือสัมประสิทธิ์ A_q และ B_q ในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) โดยที่งานวิจัยนี้จะใช้ค่าเดียวกับงานวิจัยของของ Pruekwatana *et al.* (2016) เพราะเป็นค่าที่ได้มาจากจำนวนชุดข้อมูลที่มีการทดลองที่มากกว่างานวิจัยนี้ (4 จุดการทดลองซ้ำ) ดังนั้นจึงถือได้ว่ามีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า โดยที่ $A_q(r_m = 0)$ และ $B_q(r_m = 0)$ ในงานวิจัยดังกล่าวซึ่งแสดงในสมการที่ 7.1D-7.3D เป็นดังนี้

$$\left. \begin{aligned} A_E(0) &= 1, & B_E(0) &= 0.5573 & (7.1D) \\ A_y(0) &= 0.63, & B_y(0) &= 0.3257 & (7.2D) \\ A_T(0) &= 1.037, & B_T(0) &= -0.4879 & (7.3D) \end{aligned} \right\} (7.18)$$

- **ขั้นตอนที่ 7** $\pi'_q = \pi_q / s_A$, $\pi''_q = \pi'_q / s_B$; ทำการสเกล π_q ด้วยมาตราวัด s_A (π'_q) หรือ $s_A s_B$ (π''_q) ตามแต่กรณีย่อยที่ทำการแสดงผลการศึกษาเพื่อหาปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่
- **ขั้นตอนที่ 8** ประเมินหาค่า scatter ของ π'_q หรือ π''_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ตำแหน่ง x / rd

$$\mathcal{E}_{\pi'_q(r_m)|x/rd} = \frac{S_{\pi'_q(r_m)|x/rd}}{\pi'_{q|x/rd}}, [\text{Sample} = (r_m)]$$

$$\varepsilon_{\pi_q''(r_m)|x/rd} = \frac{S_{\pi_q''(r_m)|x/rd}}{\pi_q''|x/rd}, [\text{Sample} = (r_m)]$$

- ขั้นตอนที่ 9 ประยุกต์ใช้ model fit (power-law model fit) โดย fit ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π'_q หรือ π''_q ผ่านชุดข้อมูล Sample = $(r_m \times x / rd)$ ซึ่งประกอบไปด้วย 30 จุดข้อมูลของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใดๆ โดยจะได้ $(A'_q, B'_q, R_{\pi_q'}^2)$ หรือ $(A''_q, B''_q, R_{\pi_q''}^2)$ มา

หมายเหตุ :

- 1) เพื่อให้เกิดความชัดเจนในการกล่าวถึงค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ จากการประยุกต์ใช้ power-law model fit กับปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติในแต่ละรูปแบบ (π'_q หรือ π''_q) งานวิจัยนี้จึงกำหนดสัญลักษณ์ดังนี้

$$\bullet \left[\pi'_q = \frac{\pi_q}{S_A} \right] = A'_q (x / rd)^{B'_q} \quad (7.19)$$

$$\bullet \left[\pi''_q = \frac{\pi'_q}{S_B} = \frac{\pi_q}{S_A S_B} \right] = A''_q (x / rd)^{B''_q} \quad (7.20)$$

กล่าวคือจะกำหนดให้ (A'_q, B'_q) และ (A''_q, B''_q) คือ สัมประสิทธิ์จากการประยุกต์ใช้ power-law model fit กับปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π'_q และ π''_q บนชุดข้อมูล Sample = $(r_m \times x / rd)$ ซึ่งประกอบไปด้วย 30 จุดข้อมูล ตามลำดับ

- 2) $R_{\pi_q}^2$ ในขั้นตอนนี้จะหมายถึงค่า R^2 ที่ได้มาจากการประยุกต์ใช้ power-law model fit ที่ fit ผ่านชุดข้อมูล Sample = $(r_m \times x / rd)$

7.6 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_q และ B_q และการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในสมการที่ 7.13A พบว่า $A_q(r_m)$ และ $B_q(r_m)$ มีบทบาทสำคัญในการ collapse ผลของ r_m ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร, เส้นทางการเดิน, และค่า circulation ของเจ็ด ดังนั้นเพื่อจะได้มาซึ่ง $A_q(r_m)$ และ $B_q(r_m)$ และนำไปสู่การได้มาซึ่งปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่ที่สามารถ collapse ผลของ r_m ได้ จึงนำมาสู่เนื้อหาในหัวข้อนี้ที่จะกล่าวถึงการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) กับสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_q และ B_q ของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร, เส้นทางการเดิน, และค่า circulation ของเจ็ด [ขั้นตอนที่ 6 ; $A_q = A_q(r_m)$, $B_q = B_q(r_m)$]

ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ที่มีต่อสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_q และการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์

เพื่อที่จะได้มาซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) และสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_q ของปริมาณทางฟิสิกส์ใดๆ หรือ $A_q(r_m)$ งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้โมเดลพหุนามกำลัง 1 (linear), พหุนามกำลัง 2 (parabolic), และพหุนามกำลัง 3 (cubic) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ A_q โดยรูปที่ 7.5-7.8 แสดงผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อ A_{E_1} , A_{E_2} , A_y , และ A_T ตามลำดับ และสัมประสิทธิ์ค่าคงที่จากการประยุกต์ใช้แต่ละ model fit จะแสดงในตารางที่ 7.5

เพื่อให้ $A_q(r_m)$ มีความถูกต้องเชิงฟิสิกส์ งานวิจัยนี้จะบังคับให้ค่าของเส้น model fit ที่ค่า $r_m = 0$ เท่ากับ $A_q(0)$ ซึ่งเป็นค่าของกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) จึงเป็นผลให้ในการทำ model fit นี้ ค่า C_0 ของแต่ละ model fit จะถูกบังคับให้มีค่าเท่ากับ $A_q(0)$ ดังแสดงในสมการที่ 7.18 และปรากฏในตารางที่ 7.5

จากรูปที่ 7.5-7.8 พบว่าแนวโน้มของผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ที่มีต่อสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_{E_1} , A_{E_2} , A_y , และ A_T จะมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน กล่าวคือ

- 1) การเพิ่มขึ้นของ r_m จะส่งผลให้จะส่งผลให้ A_{E_1} , A_{E_2} , A_y , และ A_T เพิ่มขึ้น
- 2) เมื่อพิจารณารูปที่ 7.5-7.8 ประกอบกับตารางที่ 7.5 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง r_m กับ A_{E_1} , A_{E_2} , A_y , และ A_T สามารถอธิบายได้ดีด้วยโมเดลพหุนามกำลัง 2 (parabolic model fit) โดยที่ค่า R^2 จะอยู่ในช่วง 0.9800 ถึง 0.9997

- 3) เมื่อเพิ่มดีกรีของ polynomial จากพหุนามกำลัง 2 ไปเป็นพหุนามกำลัง 3 เพื่อนำไปอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m กับ A_{E_1} , A_{E_2} , A_y , และ A_Γ จะส่งผลให้ R^2 โดยภาพรวมสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ parabolic model fit ซึ่งอยู่ในช่วง 0.9990 ถึง 0.9996 (ดูตารางที่ 7.5 ประกอบ)

ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ที่มีต่อสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ B_q และการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์

ในทำนองเดียวกับการหา $A_q(r_m)$ งานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้โมเดลพหุนามกำลัง 1 (linear), พหุนามกำลัง 2 (parabolic), และพหุนามกำลัง 3 (cubic) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ B_q โดยรูปที่ 7.9-7.12 แสดงผลของอัตราส่วนอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ที่มีต่อ B_{E_1} , B_{E_2} , B_y , และ B_Γ ตามลำดับ และสัมประสิทธิ์ค่าคงที่จากการประยุกต์ใช้แต่ละ model fit จะแสดงในตารางที่ 7.6

ในทำนองเดียวกับ $A_q(r_m)$ เพื่อให้ $B_q(r_m)$ มีความถูกต้องเชิงฟิสิกส์ งานวิจัยนี้จะบังคับให้ค่าของเส้น model fit ที่ค่า $r_m = 0$ เท่ากับ $B_q(0)$ ซึ่งเป็นค่าของกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) จึงเป็นผลให้ในการทำ model fit นี้ ค่า D_0 ของแต่ละ model fit จะถูกบังคับให้มีค่าเท่ากับ $B_q(0)$ ดังแสดงในสมการที่ 7.18 และปรากฏในตารางที่ 7.6

จากรูปที่ 7.9-7.12 พบว่าแนวโน้มของผลของอัตราส่วนอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ที่มีต่อสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ B_{E_1} , B_{E_2} , และ B_y จะมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของ r_m จะส่งผลให้ค่า B_{E_1} , B_{E_2} , และ B_y โดยภาพรวมเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันกับผลของอัตราส่วนอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ที่มีต่อสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ B_Γ ซึ่งพบว่าการเพิ่มขึ้นของ r_m จะส่งผลให้ค่า B_Γ โดยภาพรวมต่ำลง และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ค่าคงที่จากการประยุกต์ใช้แต่ละ model fit ในตารางที่ 7.6 ประกอบ พบว่า

- 1) เมื่อทำการประยุกต์ใช้ linear model fit ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m กับ B_{E_1} , B_{E_2} , B_y , และ B_Γ จะส่งผลให้ R^2 โดยภาพรวมต่ำ ซึ่งอยู่ในช่วง 0.6127 ถึง 0.8832
- 2) เมื่อประยุกต์ใช้ parabolic model fit จะส่งผลให้ R^2 สูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ linear model fit ซึ่งอยู่ในช่วง 0.7232 ถึง 0.9402
- 3) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มดีกรีของ model fit ไปเป็น cubic จะส่งผลให้ R^2 สูงขึ้นอีกเมื่อเทียบกับ parabolic model fit ซึ่งอยู่ในช่วง 0.9014 ถึง 0.9901

7.7 ผลการศึกษาการ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม (r_m) ต่อคุณลักษณะต่างๆ ของเจ็ดในกระแสลมขวาง

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 7.4 พบว่าการประยุกต์ใช้ scaling law ที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) ยังไม่สามารถ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร, เส้นทางการเดิน, และ ค่า circulation ของเจ็ดได้ โดยในภาพรวมการใช้ scaling law ดังกล่าวจะก่อให้เกิด scatter ของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่สูง : $\varepsilon_{\pi_q(r_m)} = 17.0\% - 42.2\%$ [ขั้นตอนที่ 1 ถึง ขั้นตอนที่ 4] ในขณะที่เมื่อพยายามบังคับ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) โดยการประยุกต์ใช้ power-law model fit (เรียกว่า 'Forced collapsing model fit') เพื่อ fit π_q กับ x/rd บนชุดข้อมูล Sample = ($r_m \times x/rd$) ซึ่งประกอบไปด้วย 30 จุดข้อมูล จะก่อให้เกิดค่า $R_{\pi_q}^2$ ที่ต่ำ : $R_{\pi_q}^2 = 0.5271 - 0.7826$ [ขั้นตอนที่ 5] ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้สามารถ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อคุณลักษณะต่างๆ ของเจ็ดตามการวิเคราะห์ในสมการที่ 7.13A จึงนำมาสู่เนื้อหาในหัวข้อที่ 7.6 ที่ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) กับสัมประสิทธิ์ A_q และ B_q [ขั้นตอนที่ 6 ; $A_q = A_q(r_m)$, $B_q = B_q(r_m)$] เมื่อทราบถึง $A_q(r_m)$ และ $B_q(r_m)$ จึงนำมาสู่เนื้อหาในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้สมการที่ 7.17 เพื่อที่จะศึกษาหามาตรวัดที่เหมาะสมในการ collapse ผลของ r_m โดยที่จะแบ่งการแสดงผลการทดลองในรูปแบบแปรไร้มิติเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกัน ได้แก่

- ขั้นตอนที่ 1 การประยุกต์ใช้มาตรวัด s_A เพื่อนำไปสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติไร้มิติ π_q หรือ ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi'_q = \pi_q / s_A$
- ขั้นตอนที่ 2 การประยุกต์ใช้มาตรวัด s_B เพื่อนำไปสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π'_q หรือ ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi''_q = \pi'_q / s_B$ (กล่าวอีกนัยหนึ่งคือนำ π_q ไปสเกลด้วยมาตรวัด $s_A s_B$)

7.7.1 การประยุกต์ใช้มาตรวัด s_A เพื่อนำไปสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q หรือปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi'_q = \pi_q / s_A$

- 1) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาจัดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสมขวาง (F_2) หรือ E_1

ตารางที่ 7.7 แสดงผลของการสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_{E_1} ด้วยมาตรวัด s_A ตามสมการ 7.15A และ 7.15B ดังนี้

$$\left[\pi'_{E_1} = \frac{\pi_{E_1}}{s_A} \right] ; \quad s_A = A_{E_1}(r_m) / A_{E_1}(0)$$

และค่า scatter ของ π'_{E_1} บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) จากการประยุกต์ใช้ $A_{E_1}(r_m)$ ที่อยู่ใน 3 รูปฟอร์มที่แตกต่างกัน ได้แก่ เส้นตรง (linear), พหุนามกำลัง 2 (parabolic), และพหุนามกำลัง 3 (cubic) ซึ่งพบว่า scatter ของชุดข้อมูลเป็นดังนี้

$A_{E_1}(r_m)$:	Linear	$\mathcal{E}_{\pi'_q(r_m)} = 6.59\% - 7.32\%$
$A_{E_1}(r_m)$:	Parabolic	$\mathcal{E}_{\pi'_q(r_m)} = 3.76\% - 6.27\%$
$A_{E_1}(r_m)$:	Cubic	$\mathcal{E}_{\pi'_q(r_m)} = 3.92\% - 6.69\%$

กล่าวคือเมื่อ $A_{E_1}(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 2 จะส่งผลให้ค่า scatter ของ π'_{E_1} บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) มีค่าต่ำกว่าพหุนามกำลัง 1 (สามารถ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อ E_1 ได้ดีกว่า) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มดีกรีของ $A_{E_1}(r_m)$ เป็นพหุนามกำลัง 3 แล้วพบว่า scatter ของ π'_{E_1} บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) มีค่าใกล้เคียงกับพหุนามกำลัง 2 ดังนั้นเพื่อความสะดวกต่อการใช้งาน งานวิจัยนี้จึงเสนอว่าการใช้ $A_{E_1}(r_m)$ ในรูปพหุนามกำลังสองในมาตรวัด s_A มีความเหมาะสมที่จะ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อ E_1

นอกจากนั้นยังพบว่า การประยุกต์ใช้ power-law model fit ระหว่าง π'_{E_1} กับ x/rd บนชุดข้อมูล Sample = ($r_m \times x/rd$) สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของชุดข้อมูลได้ดีดังแสดงในรูปที่ 7.13 โดยพบความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left[\pi'_{E_1} = \frac{\pi_{E_1}}{s_A} = \frac{(E_1 - 1)/a_E(r)}{s_A} \right] = A'_{E_1} \left(\frac{x}{rd} \right)^{B'_{E_1}} \quad (7.21)$$

$$\text{Coefficient of scaling law} : a_E(r) = 0.9r + 1.4, \quad s_A = \frac{A_{E_1}(r_m)}{A_{E_1}(0)},$$

$$A_{E_1}(r_m) = 39.16r_m^2 + 1.269r_m + 1, \quad A_{E_1}(0) = 1$$

$$\text{Coefficient of model fit} : A'_{E_1} = 0.995, \quad B'_{E_1} = 0.5959, \quad R_{\pi'_q}^2 = 0.9796$$

- 2) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (F_1) หรือ E_2

ตารางที่ 7.7 แสดงผลของการสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_{E_2} ด้วยมาตรวัด s_A ตามสมการ 7.15A และ 7.15B ดังนี้

$$\left[\pi'_{E_2} = \frac{\pi_{E_2}}{s_A} \right] ; \quad s_A = A_{E_2}(r_m)/A_{E_2}(0)$$

และค่า scatter ของ π'_{E_2} บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) จากการประยุกต์ใช้ $A_{E_2}(r_m)$ ที่อยู่ใน 3 รูปฟอร์มที่แตกต่างกัน ได้แก่ เส้นตรง (linear), พหุนามกำลัง 2 (parabolic), และพหุนามกำลัง 3 (cubic) ซึ่งพบว่า scatter ของชุดข้อมูลเป็นดังนี้

$$A_{E_2}(r_m) : \text{Linear} \quad \mathcal{E}_{\pi'_q(r_m)} = 6.59\% - 10.1\%$$

$$A_{E_2}(r_m) : \text{Parabolic} \quad \mathcal{E}_{\pi'_q(r_m)} = 4.04\% - 6.92\%$$

$$A_{E_2}(r_m) : \text{Cubic} \quad \mathcal{E}_{\pi'_q(r_m)} = 4.16\% - 7.37\%$$

กล่าวคือเมื่อ $A_{E_2}(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 2 จะส่งผลให้ค่า scatter ของ π'_{E_2} บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) มีค่าต่ำกว่าพหุนามกำลัง 1 (สามารถ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อ E_2 ได้ดีกว่า) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มดีกรีของ $A_{E_2}(r_m)$ เป็นพหุนามกำลัง 3 แล้วพบว่า scatter ของ π'_{E_2} บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) มีค่าใกล้เคียงกับพหุนามกำลัง 2 ดังนั้นเพื่อความสะดวกต่อการใช้งาน งานวิจัยนี้จึงเสนอว่าการใช้ $A_{E_1}(r_m)$ ในรูปพหุนามกำลังสองในมาตรวัด s_A มีความเหมาะสมที่จะ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อ E_2

นอกจากนี้ยังพบว่า การประยุกต์ใช้ power-law model fit ระหว่าง π'_{E_2} กับ x/rd บนชุดข้อมูล Sample = $(r_m \times x/rd)$ สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของชุดข้อมูล ได้ดีดังแสดงในรูปที่ 7.14 โดยพบความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left[\pi'_{E_2} = \frac{\pi_{E_2}}{s_A} = \frac{(E_2 - 1)/a_E(r)}{s_A} \right] = A'_{E_2} \left(\frac{x}{rd} \right)^{B'_{E_2}} \quad (7.22)$$

$$\text{Coefficient of scaling law} : a_E(r) = 0.9r + 1.4, \quad s_A = \frac{A_{E_2}(r_m)}{A_{E_2}(0)},$$

$$A_{E_2}(r_m) = 32.97r_m^2 + 0.2905r_m + 1, \quad A_{E_2}(0) = 1$$

$$\text{Coefficient of model fit} : A'_{E_2} = 0.9952, \quad B'_{E_2} = 0.6032, \quad R_{\pi'_q}^2 = 0.9785$$

3) เส้นทางเดินของเจ็ต [$y_{CM,|\omega_{j,x}|}$]

ตารางที่ 7.7 แสดงผลของการสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_y ด้วยมาตรวัด s_A ตามสมการ 7.15A และ 7.15B ดังนี้

$$\left[\pi'_y = \frac{\pi_y}{s_A} \right] ; \quad s_A = A_y(r_m)/A_y(0)$$

และค่า scatter ของ π'_y บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) จากการประยุกต์ใช้ $A_y(r_m)$ ที่อยู่ใน 3 รูปฟอร์มที่แตกต่างกัน ได้แก่ เส้นตรง (linear), พหุนามกำลัง 2 (parabolic), และ พหุนามกำลัง 3 (cubic) ซึ่งพบว่า scatter ของชุดข้อมูลเป็นดังนี้

$$A_y(r_m) : \text{Linear} \quad \mathcal{E}_{\pi'_q(r_m)} = 6.39\% - 7.81\%$$

$$A_y(r_m) : \text{Parabolic} \quad \mathcal{E}_{\pi'_q(r_m)} = 4.55\% - 6.75\%$$

$$A_y(r_m) : \text{Cubic} \quad \mathcal{E}_{\pi'_q(r_m)} = 3.23\% - 6.62\%$$

กล่าวคือเมื่อ $A_y(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 2 จะส่งผลให้ค่า scatter ของ π'_y บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) มีค่าต่ำกว่าพหุนามกำลัง 1 (สามารถ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อเส้นทาง

เดินของเจ็ดได้ดีกว่า) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มดีกรีของ $A_y(r_m)$ เป็นพหุนามกำลัง 3 แล้วพบว่า scatter ของ π'_y บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) มีค่าต่ำกว่าพหุนามกำลัง 2 เล็กน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอว่าการประยุกต์ใช้มาตรวัด s_A โดยที่ $A_y(r_m)$ อยู่ในรูปของพหุนามกำลัง 2 และพหุนามกำลัง 3 มีความเหมาะสมและสามารถ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อเส้นทางเดินของเจ็ดได้ทั้งสอง อย่างไรก็ตามในแง่ของการประยุกต์ใช้งานจริงจะขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้ใช้งานซึ่งต้องถ่วงดุลความเหมาะสมระหว่างความสะดวกกับความแม่นยำ

นอกจากนั้นยังพบว่าการใช้ power-law model fit ระหว่าง π'_y กับ x/rd บนชุดข้อมูล Sample = $(r_m \times x/rd)$ สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของชุดข้อมูลได้ดีดังนี้

➤ รูปที่ 7.15(ก) แสดงการประยุกต์ใช้ power-law model fit ระหว่าง π'_y กับ x/rd บนชุดข้อมูล Sample = $(r_m \times x/rd)$ เมื่อ $A_y(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 2 โดยพบความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left[\pi'_y = \frac{\pi_y}{s_A} = \left(\frac{y_{CM,|\omega_j,x|}}{s_A} / r^{C_y} d \right) \right] = A'_y \left(\frac{x}{rd} \right)^{B'_y} \quad (7.23)$$

$$\text{Coefficient of scaling law} : C_y = 1.36, \quad s_A = \frac{A_y(r_m)}{A_y(0)},$$

$$A_y(r_m) = 16.2r_m^2 + 1.83r_m + 0.63, \quad A_y(0) = 0.63$$

$$\text{Coefficient of model fit} : A'_y = 0.6296, \quad B'_y = 0.3744, \quad R_{\pi'_y}^2 = 0.9656$$

- รูปที่ 7.15(ข) แสดงการประยุกต์ใช้ power-law model fit ระหว่าง π'_y กับ x/rd บนชุดข้อมูล Sample = $(r_m \times x/rd)$ เมื่อ $A_y(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 3 โดยพบความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left[\pi'_y = \frac{\pi_y}{s_A} = \left(\frac{y_{CM,|\omega_{j,x}|}/r^{C_y}d}{s_A} \right) \right] = A'_y \left(\frac{x}{rd} \right)^{B'_y} \quad (7.24)$$

$$\text{Coefficient of scaling law} : C_y = 1.36, \quad s_A = \frac{A_y(r_m)}{A_y(0)},$$

$$A_y(r_m) = -414.8r_m^3 + 95.08r_m^2 - 1.581r_m + 0.63,$$

$$A_y(0) = 0.63$$

$$\text{Coefficient of model fit} : A'_y = 0.6326, \quad B'_y = 0.374, \quad R_{\pi'_q}^2 = 0.9823$$

4) ค่า circulation ของเจ็ต $[\Gamma_j]$

ตารางที่ 7.7 แสดงผลของการสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_Γ ด้วยมาตรวัด s_A ตามสมการ 7.15A และ 7.15B ดังนี้

$$\left[\pi'_\Gamma = \frac{\pi_\Gamma}{s_A} \right] ; \quad s_A = A_\Gamma(r_m)/A_\Gamma(0)$$

และค่า scatter ของ π'_Γ บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) จากการประยุกต์ใช้ $A_\Gamma(r_m)$ ที่อยู่ใน 3 รูปฟอร์มที่แตกต่างกัน ได้แก่ เส้นตรง (linear), พหุนามกำลัง 2 (parabolic), และพหุนามกำลัง 3 (cubic) ซึ่งพบว่า scatter ของชุดข้อมูลเป็นดังนี้

$$A_\Gamma(r_m) : \text{Linear} \quad \mathcal{E}_{\pi'_q(r_m)} = 9.37\% - 20.2\%$$

$$A_\Gamma(r_m) : \text{Parabolic} \quad \mathcal{E}_{\pi'_q(r_m)} = 8.21\% - 18.0\%$$

$$A_\Gamma(r_m) : \text{Cubic} \quad \mathcal{E}_{\pi'_q(r_m)} = 8.25\% - 18.1\%$$

กล่าวคือเมื่อ $A_{\Gamma}(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 2 จะส่งผลให้ค่า scatter ของ π'_{Γ} บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) มีค่าต่ำกว่าพหุนามกำลัง 1 (สามารถ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อค่า circulation ของเจ็ด ได้ดีกว่า) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มดีกรีของ $A_{\Gamma}(r_m)$ เป็นพหุนามกำลัง 3 แล้วพบว่า scatter ของ π'_{Γ} บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) มีค่าใกล้เคียงกับพหุนามกำลัง 2 ดังนั้นเพื่อความสะดวกต่อการใช้งาน งานวิจัยนี้จึงเสนอว่า การใช้ $A_{\Gamma}(r_m)$ ในรูปพหุนามกำลังสองในมาตรวัด s_A มีความเหมาะสมที่จะ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อค่า circulation ของเจ็ด

นอกจากนั้นยังพบว่า การประยุกต์ใช้ power-law model fit ระหว่าง π'_{Γ} กับ x/rd บนชุดข้อมูล Sample = $(r_m \times x/rd)$ สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของชุดข้อมูลได้ดีดังแสดงในรูปที่ 7.16 และความสัมพันธ์จะเป็นดังนี้

$$\left[\pi'_{\Gamma} = \frac{\pi_{\Gamma}}{s_A} = \left(\frac{\Gamma_j / u_{cf} r^{C_{\Gamma}} d}{s_A} \right) \right] = A'_{\Gamma} \left(\frac{x}{rd} \right)^{B'_{\Gamma}} \quad (7.25)$$

$$\text{Coefficient of scaling law} : C_{\Gamma} = 0.94, \quad s_A = \frac{A_{\Gamma}(r_m)}{A_{\Gamma}(0)},$$

$$A_{\Gamma}(r_m) = 24.87r_m^2 + 5.835r_m + 1.037, \quad A_{\Gamma}(0) = 1.037$$

$$\text{Coefficient of model fit} : A'_{\Gamma} = 1.025, \quad B'_{\Gamma} = -0.587, \quad R_{\pi'_q}^2 = 0.8745$$

7.7.2 การประยุกต์ใช้มาตรวัด s_B เพื่อนำไปสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π'_q หรือปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi''_q = \pi'_q / s_B = \pi_q / s_A s_B$

ผลการศึกษาในหัวข้อที่ 7.7.1 พบว่า การประยุกต์ใช้มาตรวัด s_A เพื่อนำไปสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q จะส่งผลให้ scatter ของ π'_q ชุดข้อมูล Sample = (r_m) มีค่าต่ำในระดับหนึ่ง หรือสามารถกล่าวได้ว่าสามารถ collapse ผลของ r_m ได้ดีในระดับหนึ่ง ($\varepsilon_{\pi_q(r_m)} = 3.23\% - 18.0\%$) อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะได้มาซึ่งปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่ที่สามารถ collapse ผลของ r_m ได้ดียิ่งขึ้น จึงนำมาสู่การประยุกต์ใช้มาตรวัด s_B เพื่อนำไปสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π'_q (หรืออีกนัยหนึ่งคือนำมาตรวัด $s_A s_B$ ไปสเกล π_q) สำหรับการประยุกต์ใช้มาตรวัด $s_A s_B$ นั้น งานวิจัยนี้จะถือว่า s_A ที่ได้เสนอไปในหัวข้อที่ 7.7.1 เป็นมาตรวัด s_A ที่อยู่ในฟอร์มที่เหมาะสมที่สุดในการ collapse ผลของ r_m และจะใช้มาตรวัด s_A นี้ในการศึกษาต่อในหัวข้อนี้ ดังนี้

$$E_1 : s_A = \frac{A_{E_1}(r_m)}{A_{E_1}(0)} = \frac{39.16r_m^2 + 1.269r_m + 1}{1}$$

$$E_2 : s_A = \frac{A_{E_2}(r_m)}{A_{E_2}(0)} = \frac{32.97r_m^2 + 0.2905r_m + 1}{1}$$

$$y_{|CM,\omega_j,x|} : s_A = \begin{cases} \frac{A_y(r_m)}{A_y(0)} = \frac{16.2r_m^2 + 1.83r_m + 0.63}{0.63} \\ \frac{A_y(r_m)}{A_y(0)} = \frac{-414.8r_m^3 + 95.08r_m^2 - 1.581r_m + 0.63}{0.63} \end{cases}$$

$$\Gamma_j : s_A = \frac{A_\Gamma(r_m)}{A_\Gamma(0)} = \frac{24.87r_m^2 + 5.835r_m + 1.037}{1.037}$$

อย่างไรก็ตามสำหรับมาตรวัด s_B งานวิจัยนี้จะทดลองเปลี่ยนรูปฟอร์มของ $B_q(r_m)$ ในมาตรวัด s_B ทั้งหมด 3 รูปฟอร์มด้วยกันได้แก่ เส้นตรง (linear), พหุนามกำลังสอง (parabolic), และพหุนามกำลังสาม (cubic) โดยมีจุดประสงค์เพื่อหามาตรวัด s_B ที่เหมาะสมที่สุดสามารถ collapse ผลของ r_m ที่มีต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร, เส้นทางเดิน, และค่า circulation ของเจ็ตได้

- 1) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) หรือ E_1

ตารางที่ 7.8 แสดงผลของการสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π'_{E_1} ด้วยมาตรวัด s_B ตามสมการ 7.16A และ 7.16B ดังนี้

$$\left[\pi''_{E_1} = \frac{\pi'_{E_1}}{s_B} = \frac{\pi_{E_1}}{s_A s_B} \right] ; \quad s_A = A_{E_1}(r_m)/A_{E_1}(0) \quad , \quad s_B = (x/rd)^{B_{E_1}(r_m)-B_{E_1}(0)}$$

และค่า scatter ของ π''_{E_1} บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) จากการประยุกต์ใช้ $A_{E_1}(r_m)$ ที่อยู่ในรูปพหุนามกำลังสอง (parabolic) และ $B_{E_1}(r_m)$ ที่อยู่ใน 3 รูปฟอร์มที่แตกต่างกันได้แก่ เส้นตรง (linear), พหุนามกำลัง 2 (parabolic), และ พหุนามกำลัง 3 (cubic) ซึ่งพบว่า scatter ของชุดข้อมูลเป็นดังนี้

$$B_{E_1}(r_m) : \text{Linear} \quad \mathcal{E}_{\pi''_{E_1}(r_m)} = 2.89\% - 4.79\%$$

$$B_{E_1}(r_m) : \text{Parabolic} \quad \mathcal{E}_{\pi''_{E_1}(r_m)} = 2.99\% - 4.81\%$$

$$B_{E_1}(r_m) : \text{Cubic} \quad \varepsilon_{\pi_q(r_m)} = 3.40\% - 6.40\%$$

กล่าวคือเมื่อ $B_{E_1}(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 1 (linear) จะส่งผลให้ค่า scatter ของ π''_{E_1} บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) มีค่าต่ำสุด (สามารถ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อ E_1 ได้ดีที่สุด) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มดีกรีของ $B_{E_1}(r_m)$ เป็นพหุนามกำลัง 2 (parabolic) และพหุนามกำลัง 3 (cubic) แล้วพบว่า scatter ของ π''_{E_1} บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) จะมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอว่าการใช้ $B_{E_1}(r_m)$ ในรูปพหุนามกำลัง 1 (linear) ในมาตรวัด s_B มีความเหมาะสมที่จะ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อ E_1

นอกจากนั้นยังพบว่าการใช้ power-law model fit ระหว่าง π''_{E_1} กับ x/rd บนชุดข้อมูล Sample = $(r_m \times x/rd)$ สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของชุดข้อมูลได้ดีดังแสดงในรูปที่ 7.17 โดยพบความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left[\pi''_{E_1} = \frac{\pi'_{E_1}}{s_B} = \frac{\pi_{E_1}}{s_A s_B} = \frac{(E_1 - 1)/a_E(r)}{s_A s_B} \right] = A''_{E_1} \left(\frac{x}{rd} \right)^{B'_{E_1}} \quad (7.26)$$

$$\text{Coefficient of scaling law} : a_E(r) = 0.9r + 1.4,$$

$$s_A = \frac{A_{E_1}(r_m)}{A_{E_1}(0)}, \quad s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_{E_1}(r_m) - B_{E_1}(0)},$$

$$A_{E_1}(r_m) = 39.16r_m^2 + 1.269r_m + 1, \quad A_{E_1}(0) = 1,$$

$$B_{E_1}(r_m) = 0.7772r_m + 0.5573, \quad B_{E_1}(0) = 0.5573$$

$$\text{Coefficient of model fit} : A''_{E_1} = 0.9948, \quad B''_{E_1} = 0.5437, \quad R^2_{\pi_q} = 0.9823$$

- 2) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (F_1) หรือ E_2

ตารางที่ 7.8 แสดงผลของการสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π'_{E_2} ด้วยมาตรวัด s_B ตามสมการ 7.16A และ 7.16B ดังนี้

$$\left[\pi''_{E_2} = \frac{\pi'_{E_2}}{s_B} = \frac{\pi_{E_2}}{s_A s_B} \right] ; \quad s_A = A_{E_2}(r_m)/A_{E_2}(0) \quad , \quad s_B = (x/rd)^{B_{E_2}(r_m) - B_{E_2}(0)}$$

และค่า scatter ของ π''_{E_2} บนชุดข้อมูล r_m จากการประยุกต์ใช้ $A_{E_2}(r_m)$ ที่อยู่ในรูปพหุนามกำลังสอง (parabolic) และ $B_{E_2}(r_m)$ ที่อยู่ใน 3 รูปฟอร์มที่แตกต่างกัน ได้แก่ เส้นตรง (linear), พหุนามกำลัง 2 (parabolic), และ พหุนามกำลัง 3 (cubic) ซึ่งพบว่า scatter ของชุดข้อมูลเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} B_{E_2}(r_m) : \text{Linear} & \quad \mathcal{E}_{\pi''_{E_2}(r_m)} = 2.99\% - 4.90\% \\ B_{E_2}(r_m) : \text{Parabolic} & \quad \mathcal{E}_{\pi''_{E_2}(r_m)} = 3.09\% - 4.92\% \\ B_{E_2}(r_m) : \text{Cubic} & \quad \mathcal{E}_{\pi''_{E_2}(r_m)} = 3.53\% - 6.59\% \end{aligned}$$

กล่าวคือเมื่อ $B_{E_2}(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 1 (linear) จะส่งผลให้ค่า scatter ของ π''_{E_2} บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) มีค่าต่ำสุด (สามารถ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อ E_2 ได้ดีที่สุด) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มดีกรีของ $B_{E_2}(r_m)$ เป็นพหุนามกำลัง 2 (parabolic) และพหุนามกำลัง 3 (cubic) แล้วพบว่า scatter ของ π''_{E_2} บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) จะมีความสูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอว่าการใช้ $B_{E_2}(r_m)$ ในรูปพหุนามกำลัง 1 (linear) ในมาตรวัด s_B มีความเหมาะสมที่จะ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อ E_2

นอกจากนั้นยังพบว่า การประยุกต์ใช้ power-law model fit ระหว่าง π''_{E_2} กับ x/rd บนชุดข้อมูล Sample = $(r_m \times x/rd)$ สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของชุดข้อมูลได้ดีดังแสดงในรูปที่ 7.18 และความสัมพันธ์จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\left[\pi''_{E_2} = \frac{\pi'_{E_2}}{s_B} = \frac{\pi_{E_2}}{s_A s_B} = \frac{(E_2 - 1)/a_E(r)}{s_A s_B} \right] = A''_{E_2} \left(\frac{x}{rd} \right)^{B''_{E_2}} \quad (7.27)$$

Coefficient of scaling law : $a_E(r) = 0.9r + 1.4$,

$$s_A = \frac{A_{E_2}(r_m)}{A_{E_2}(0)}, \quad s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_{E_2}(r_m) - B_{E_2}(0)},$$

$$A_{E_2}(r_m) = 32.97r_m^2 + 0.2905r_m + 1, \quad A_{E_2}(0) = 1,$$

$$B_{E_2}(r_m) = 0.8835r_m + 0.5573, \quad B_{E_2}(0) = 0.5573$$

Coefficient of model fit : $A''_{E_2} = 0.9949$, $B''_{E_2} = 0.544$, $R^2_{\pi''_{E_2}} = 0.9815$

3) เส้นทางเดินของเจ็ต [$y_{CM,|\omega_j,x|}$]

ตารางที่ 7.8 แสดงผลของการสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π'_y ด้วยมาตราวัด s_B ตามสมการ 7.16A และ 7.16B ดังนี้

$$\left[\pi''_y = \frac{\pi'_y}{s_B} = \frac{\pi_y}{s_A s_B} \right] ; \quad s_A = A_y(r_m)/A_y(0) \quad , \quad s_B = (x/rd)^{B_y(r_m)-B_y(0)}$$

และค่า scatter ของ π''_y บนชุดข้อมูล r_m จากการประยุกต์ใช้ $B_y(r_m)$ ที่อยู่ใน 3 รูปฟอร์มที่แตกต่างกัน ได้แก่ เส้นตรง (linear), พหุนามกำลัง 2 (parabolic), และ พหุนามกำลัง 3 (cubic) โดยจะแยกพิจารณาใน 2 รูปฟอร์มของ $A_y(r_m)$ ดังนี้

➤ เมื่อ $A_y(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 2 (parabolic) พบว่า

$$B_y(r_m) : \text{Linear} \quad \mathcal{E}_{\pi''_y(r_m)} = 3.70\% - 4.15\%$$

$$B_y(r_m) : \text{Parabolic} \quad \mathcal{E}_{\pi''_y(r_m)} = 3.61\% - 3.83\%$$

$$B_y(r_m) : \text{Cubic} \quad \mathcal{E}_{\pi''_y(r_m)} = 3.73\% - 4.27\%$$

➤ เมื่อ $A_y(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 3 (cubic) พบว่า

$$B_y(r_m) : \text{Linear} \quad \mathcal{E}_{\pi''_y(r_m)} = 1.84\% - 2.87\%$$

$$B_y(r_m) : \text{Parabolic} \quad \mathcal{E}_{\pi''_y(r_m)} = 1.73\% - 2.46\%$$

$$B_y(r_m) : \text{Cubic} \quad \mathcal{E}_{\pi''_y(r_m)} = 1.72\% - 2.48\%$$

กล่าวคือเมื่อพิจารณาเฉพาะกรณีที $A_y(r_m)$ อยู่ในฟอร์มเดียวกัน พบว่าการประยุกต์ใช้มาตราวัด s_B ในทั้งสามรูปฟอร์มของ $B_y(r_m)$ จะส่งผลให้ค่า scatter ของ π''_y บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) มีค่าใกล้เคียงกัน (สามารถ collapse ผลของ r_m ที่มีเส้นทางเดินของเจ็ตได้ดีใกล้เคียงกัน) ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการประยุกต์ใช้งานวิจัยนี้จึงเสนอว่าการใช้ $B_y(r_m)$ ในรูปพหุนามกำลัง 1 (linear) ในมาตราวัด s_B มีความเหมาะสมที่จะ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อเส้นทางเดินของเจ็ต

นอกจากนั้นยังพบว่า การประยุกต์ใช้ power-law model fit ระหว่าง π''_y กับ x/rd บนชุดข้อมูล Sample = ($r_m \times x/rd$) สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของชุดข้อมูลได้ดีโดยที่

- รูปที่ 7.19(ก) แสดงการ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการผลิตเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อเส้นทางเดินของเจ็ดเมื่อ $A_y(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 2 (parabolic) และ $B_y(r_m)$ ในรูปพหุนามกำลัง 1 (linear) โดยที่ความสัมพันธ์สามารถเขียนได้เป็น

$$\left[\pi_y'' = \frac{\pi_y'}{s_B} = \frac{\pi_y}{s_A s_B} = \left(\frac{y_{CM,|\omega_j,x|}/r^{C_y} d}{s_A s_B} \right) \right] = A_y'' \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_y''} \quad (7.28)$$

Coefficient of scaling law : $C_y = 1.36$, $s_A = \frac{A_y(r_m)}{A_y(0)}$, $s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_y(r_m) - B_y(0)}$

$$A_y(r_m) = 16.2r_m^2 + 1.83r_m + 0.63, \quad A_y(0) = 0.63$$

$$B_y(r_m) = 0.7616r_m + 0.3257, \quad B_y(0) = 0.3257$$

Coefficient of model fit : $A_y'' = 0.6295$, $B_y'' = 0.3237$, $R_{\pi_q}^2 = 0.9665$

- รูปที่ 7.19(ข) แสดงการ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการผลิตเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อเส้นทางเดินของเจ็ดเมื่อ $A_y(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 3 (cubic) และ $B_y(r_m)$ ในรูปพหุนามกำลัง 1 (linear) โดยความสัมพันธ์สามารถเขียนได้เป็น

$$\left[\pi_y'' = \frac{\pi_y'}{s_B} = \frac{\pi_y}{s_A s_B} = \left(\frac{y_{CM,|\omega_j,x|}/r^{C_y} d}{s_A s_B} \right) \right] = A_y'' \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_y''} \quad (7.29)$$

Coefficient of scaling law : $C_y = 1.36$, $s_A = \frac{A_y(r_m)}{A_y(0)}$, $s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_y(r_m) - B_y(0)}$

$$A_y(r_m) = -414.8r_m^3 + 95.08r_m^2 - 1.581r_m + 0.63,$$

$$A_y(0) = 0.63,$$

$$B_y(r_m) = 0.7616r_m + 0.3257, \quad B_y(0) = 0.3257$$

Coefficient of model fit : $A_y'' = 0.6326$, $B_y'' = 0.3236$, $R_{\pi_q}^2 = 0.99$

4) ค่า circulation ของเจ็ต [Γ_j]

ตารางที่ 7.8 แสดงผลของการสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π'_Γ ด้วยมาตรวัด s_B ตามสมการ 7.16A และ 7.16B ดังนี้

$$\left[\pi''_\Gamma = \frac{\pi'_\Gamma}{s_B} = \frac{\pi_\Gamma}{s_A s_B} \right] ; \quad s_A = A_\Gamma(r_m)/A_\Gamma(0) \quad , \quad s_B = (x/rd)^{B_\Gamma(r_m)-B_\Gamma(0)}$$

และค่า scatter ของ π''_Γ บนชุดข้อมูล r_m จากการประยุกต์ใช้ $A_\Gamma(r_m)$ ที่อยู่ในรูปพหุนามกำลังสอง (parabolic) และ $B_\Gamma(r_m)$ ที่อยู่ใน 3 รูปฟอร์มที่แตกต่างกัน ได้แก่ เส้นตรง (linear), พหุนามกำลัง 2 (parabolic), และ พหุนามกำลัง 3 (cubic) ซึ่งพบว่า scatter ของชุดข้อมูลเป็นดังนี้

$B_\Gamma(r_m)$:	Linear	$\mathcal{E}_{\pi''_\Gamma(r_m)} = 5.34\% - 10.1\%$
$B_\Gamma(r_m)$:	Parabolic	$\mathcal{E}_{\pi''_\Gamma(r_m)} = 4.91\% - 9.39\%$
$B_\Gamma(r_m)$:	Cubic	$\mathcal{E}_{\pi''_\Gamma(r_m)} = 3.24\% - 4.46\%$

กล่าวคือเมื่อ $B_\Gamma(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 3 (cubic) จะส่งผลให้ค่า scatter ของ π''_Γ บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) มีค่าต่ำสุดอย่างเด่นชัด (สามารถ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อค่า circulation ของเจ็ตได้ดีที่สุด) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอว่า การใช้ $B_\Gamma(r_m)$ ในรูปพหุนามกำลัง 3 (cubic) ในมาตรวัด s_B มีความเหมาะสมที่จะ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อค่า circulation ของเจ็ต

นอกจากนั้นยังพบว่า การประยุกต์ใช้ power-law model fit ระหว่าง π''_Γ กับ x/rd บนชุดข้อมูล Sample = ($r_m \times x/rd$) สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของชุดข้อมูลได้ดีดังแสดงในรูปที่ 7.20 โดยความสัมพันธ์จะได้เป็นดังนี้

$$\left[\pi_{\Gamma}'' = \frac{\pi_{\Gamma}'}{s_B} = \frac{\pi_{\Gamma}}{s_A s_B} = \left(\frac{\Gamma_j / u_{cf} r^{C_{\Gamma}} d}{s_A s_B} \right) \right] = A_{\Gamma}'' \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_{\Gamma}''} \quad (7.30)$$

$$\text{Coefficient of scaling law} : C_{\Gamma} = 0.94, \quad s_A = \frac{A_{\Gamma}(r_m)}{A_{\Gamma}(0)}, \quad s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_{\Gamma}(r_m) - B_{\Gamma}(0)}$$

$$A_{\Gamma}(r_m) = 24.87r_m^2 + 5.835r_m + 1.037, \quad A_{\Gamma}(0) = 1.037,$$

$$B_{\Gamma}(r_m) = 993.8r_m^3 - 206.7r_m^2 + 8.422r_m - 0.4879,$$

$$B_{\Gamma}(0) = -0.4879$$

$$\text{Coefficient of model fit} : A_{\Gamma}'' = 1.03, \quad B_{\Gamma}'' = -0.4837, \quad R_{\pi_q}^2 = 0.9683$$

7.8 สรุป scaling law และ power-law model fit ที่เหมาะสมที่สามารถ collapse ผลของ r_m ต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกรณีเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมได้ในงานวิจัยนี้

7.8.1 เมื่อประยุกต์ใช้มาตรวัด s_A กับ π_q หรือปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi_q' = \pi_q / s_A$

ภาพรวมของการประยุกต์ใช้มาตรวัด s_A กับ π_q หรือปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi_q' = \pi_q / s_A$ (ที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 7.7.1) พบว่าจะสามารถ collapse ผลของ r_m ได้ดีในระดับหนึ่ง ($\varepsilon_{\pi_q(r_m)} = 3.23\% - 18.0\%$) โดยที่มาตรวัด s_A ของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q และ power-law model fit ที่งานวิจัยนี้เสนอว่าสามารถ collapse ผลของ r_m ได้ดีและมีความเหมาะสมในเชิงการประยุกต์ใช้งานดังแสดงในสมการที่ 7.21-7.25 จะสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุม คือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) หรือ E_1

$$\left[\pi'_{E_1} = \frac{\pi_{E_1}}{s_A} = \frac{(E_1 - 1)/a_E(r)}{s_A} \right] = A'_{E_1} \left(\frac{x}{rd} \right)^{B'_{E_1}} \quad (7.21)$$

Coefficient of scaling law : $a_E(r) = 0.9r + 1.4$, $s_A = \frac{A_{E_1}(r_m)}{A_{E_1}(0)}$,

$$A_{E_1}(r_m) = 39.16r_m^2 + 1.269r_m + 1, \quad A_{E_1}(0) = 1$$

Scatter : $\varepsilon_{\pi'_q} = 3.76\% - 6.27\%$

Coefficient of model fit : $A'_{E_1} = 0.995$, $B'_{E_1} = 0.5959$, $R_{\pi'_q}^2 = 0.9796$

- 2) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุม คือของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (F_1) หรือ E_2

$$\left[\pi'_{E_2} = \frac{\pi_{E_2}}{s_A} = \frac{(E_2 - 1)/a_E(r)}{s_A} \right] = A'_{E_2} \left(\frac{x}{rd} \right)^{B'_{E_2}} \quad (7.22)$$

Coefficient of scaling law : $a_E(r) = 0.9r + 1.4$, $s_A = \frac{A_{E_2}(r_m)}{A_{E_2}(0)}$,

$$A_{E_2}(r_m) = 32.97r_m^2 + 0.2905r_m + 1, \quad A_{E_2}(0) = 1$$

Scatter : $\varepsilon_{\pi'_q} = 4.04\% - 6.92\%$

Coefficient of model fit : $A'_{E_2} = 0.9952$, $B'_{E_2} = 0.6032$, $R_{\pi'_q}^2 = 0.9785$

3) เส้นทางเดินของเจ็ต [$y_{CM,|\omega_{j,x}|}$]

3.1) เมื่อกำหนดให้ $A_y(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 2

$$\left[\pi'_y = \frac{\pi_y}{s_A} = \left(\frac{y_{CM,|\omega_{j,x}|} / r^{C_y} d}{s_A} \right) \right] = A'_y \left(\frac{x}{rd} \right)^{B'_y} \quad (7.23)$$

Coefficient of scaling law : $C_y = 1.36$, $s_A = \frac{A_y(r_m)}{A_y(0)}$,

$$A_y(r_m) = 16.2r_m^2 + 1.83r_m + 0.63, \quad A_y(0) = 0.63$$

Scatter : $\varepsilon_{\pi'_q} = 4.55\% - 6.75\%$

Coefficient of model fit : $A'_y = 0.6296$, $B'_y = 0.3744$, $R_{\pi'_q}^2 = 0.9656$

3.2) เมื่อกำหนดให้ $A_y(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 3

$$\left[\pi'_y = \frac{\pi_y}{s_A} = \left(\frac{y_{CM,|\omega_{j,x}|} / r^{C_y} d}{s_A} \right) \right] = A'_y \left(\frac{x}{rd} \right)^{B'_y} \quad (7.24)$$

Coefficient of scaling law : $C_y = 1.36$, $s_A = \frac{A_y(r_m)}{A_y(0)}$,

$$A_y(r_m) = -414.8r_m^3 + 95.08r_m^2 - 1.581r_m + 0.63, \\ A_y(0) = 0.63$$

Scatter : $\varepsilon_{\pi'_q} = 3.23\% - 6.62\%$

Coefficient of model fit : $A'_y = 0.6326$, $B'_y = 0.374$, $R_{\pi'_q}^2 = 0.9823$

4) ค่า circulation ของเจ็ต $[\Gamma_j]$

$$\left[\pi'_\Gamma = \frac{\pi_\Gamma}{s_A} = \left(\frac{\Gamma_j / u_{cf} r^{C_\Gamma} d}{s_A} \right) \right] = A'_\Gamma \left(\frac{x}{rd} \right)^{B'_\Gamma} \quad (7.25)$$

$$\text{Coefficient of scaling law} : C_\Gamma = 0.94, \quad s_A = \frac{A_\Gamma(r_m)}{A_\Gamma(0)},$$

$$A_\Gamma(r_m) = 24.87r_m^2 + 5.835r_m + 1.037, \quad A_\Gamma(0) = 1.037$$

$$\text{Scatter} : \varepsilon_{\pi'_q} = 8.21\% - 18.0\%$$

$$\text{Coefficient of model fit} : A'_\Gamma = 1.025, \quad B'_\Gamma = -0.587, \quad R_{\pi'_q}^2 = 0.8745$$

อนึ่ง พารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ จากการประยุกต์ใช้มาตรวัด s_A และ power-law model fit ที่เสนอโดยงานวิจัยนี้ดังแสดงในสมการที่ 7.21-7.25 ได้ถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 7.9

7.8.2 เมื่อประยุกต์ใช้มาตรวัด s_B กับ π'_q หรือปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป

$$\pi''_q = \pi'_q / s_B = \pi_q / s_A s_B$$

ภาพรวมของการประยุกต์ใช้มาตรวัด s_B กับ π'_q หรือปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi''_q = \pi'_q / s_B = \pi_q / s_A s_B$ (ที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 7.7.2) ซึ่งพบว่าสามารถ collapse ผลของ r_m ได้ดีกว่าการประยุกต์ใช้เพียงมาตรวัด s_A เพียงพจน์เดียวสเกลบน π_q โดยมาตรวัด $s_A s_B$ ของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q และ power-law model fit ที่งานวิจัยนี้เสนอว่าสามารถ collapse ผลของ r_m ได้ดีและมีความเหมาะสมในเชิงการประยุกต์ใช้งานตามสมการที่ 7.26-7.30 จะสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุม คือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) หรือ E_1

$$\left[\pi''_{E_1} = \frac{\pi'_{E_1}}{s_B} = \frac{\pi_{E_1}}{s_A s_B} = \frac{(E_1 - 1)/a_E(r)}{s_A s_B} \right] = A''_{E_1} \left(\frac{x}{rd} \right)^{B'_{E_1}} \quad (7.26)$$

Coefficient of scaling law : $a_E(r) = 0.9r + 1.4$,

$$s_A = \frac{A_{E_1}(r_m)}{A_{E_1}(0)}, \quad s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_{E_1}(r_m) - B_{E_1}(0)},$$

$$A_{E_1}(r_m) = 39.16r_m^2 + 1.269r_m + 1, \quad A_{E_1}(0) = 1,$$

$$B_{E_1}(r_m) = 0.7772r_m + 0.5573, \quad B_{E_1}(0) = 0.5573$$

Scatter : $\varepsilon_{\pi_q} = 2.89\% - 4.79\%$

Coefficient of model fit : $A''_{E_1} = 0.9948$, $B''_{E_1} = 0.5437$, $R^2_{\pi_q} = 0.9823$

- 2) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุม คือของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (F_1) หรือ E_2

$$\left[\pi''_{E_2} = \frac{\pi'_{E_2}}{s_B} = \frac{\pi_{E_2}}{s_A s_B} = \frac{(E_2 - 1)/a_E(r)}{s_A s_B} \right] = A''_{E_2} \left(\frac{x}{rd} \right)^{B'_{E_2}} \quad (7.27)$$

Coefficient of scaling law : $a_E(r) = 0.9r + 1.4$,

$$s_A = \frac{A_{E_2}(r_m)}{A_{E_2}(0)}, \quad s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_{E_2}(r_m) - B_{E_2}(0)},$$

$$A_{E_2}(r_m) = 32.97r_m^2 + 0.2905r_m + 1, \quad A_{E_2}(0) = 1,$$

$$B_{E_2}(r_m) = 0.8835r_m + 0.5573, \quad B_{E_2}(0) = 0.5573$$

Scatter : $\varepsilon_{\pi_q} = 2.99\% - 4.90\%$

Coefficient of model fit : $A''_{E_2} = 0.9949$, $B''_{E_2} = 0.544$, $R^2_{\pi_q} = 0.9815$

3) เส้นทางเดินของเจ็ต $[y_{CM,|\omega_{j,x}|}]$ 3.1) เมื่อกำหนดให้ $A_y(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 2

$$\left[\pi_y'' = \frac{\pi_y'}{s_B} = \frac{\pi_y}{s_A s_B} = \left(\frac{y_{CM,|\omega_{j,x}|} / r^{C_y} d}{s_A s_B} \right) \right] = A_y'' \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_y''} \quad (7.28)$$

Coefficient of scaling law : $C_y = 1.36$, $s_A = \frac{A_y(r_m)}{A_y(0)}$, $s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_y(r_m) - B_y(0)}$

$$A_y(r_m) = 16.2r_m^2 + 1.83r_m + 0.63, \quad A_y(0) = 0.63$$

$$B_y(r_m) = 0.7616r_m + 0.3257, \quad B_y(0) = 0.3257$$

Scatter : $\varepsilon_{\pi_q''} = 3.70\% - 4.15\%$

Coefficient of model fit : $A_y'' = 0.6295$, $B_y'' = 0.3237$, $R_{\pi_q''}^2 = 0.9665$

3.2) เมื่อกำหนดให้ $A_y(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 3

$$\left[\pi_y'' = \frac{\pi_y'}{s_B} = \frac{\pi_y}{s_A s_B} = \left(\frac{y_{CM,|\omega_{j,x}|} / r^{C_y} d}{s_A s_B} \right) \right] = A_y'' \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_y''} \quad (7.29)$$

Coefficient of scaling law : $C_y = 1.36$, $s_A = \frac{A_y(r_m)}{A_y(0)}$, $s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_y(r_m) - B_y(0)}$

$$A_y(r_m) = -414.8r_m^3 + 95.08r_m^2 - 1.581r_m + 0.63,$$

$$A_y(0) = 0.63,$$

$$B_y(r_m) = 0.7616r_m + 0.3257, \quad B_y(0) = 0.3257$$

Scatter : $\varepsilon_{\pi_q''} = 1.84\% - 2.87\%$

Coefficient of model fit : $A_y'' = 0.6326$, $B_y'' = 0.3236$, $R_{\pi_q''}^2 = 0.99$

4) ค่า circulation ของเจ็ต $[\Gamma_j]$

$$\left[\pi_\Gamma'' = \frac{\pi_\Gamma'}{s_B} = \frac{\pi_\Gamma}{s_A s_B} = \left(\frac{\Gamma_j / u_{cf} r^{C_\Gamma} d}{s_A s_B} \right) \right] = A_\Gamma'' \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_\Gamma''} \quad (7.30)$$

$$\text{Coefficient of scaling law} : C_\Gamma = 0.94, \quad s_A = \frac{A_\Gamma(r_m)}{A_\Gamma(0)}, \quad s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_\Gamma(r_m) - B_\Gamma(0)}$$

$$A_\Gamma(r_m) = 24.87r_m^2 + 5.835r_m + 1.037, \quad A_\Gamma(0) = 1.037,$$

$$B_\Gamma(r_m) = 993.8r_m^3 - 206.7r_m^2 + 8.422r_m - 0.4879,$$

$$B_\Gamma(0) = -0.4879$$

$$\text{Scatter} : \varepsilon_{\pi_q''} = 3.24\% - 4.46\%$$

$$\text{Coefficient of model fit} : A_\Gamma'' = 1.03, \quad B_\Gamma'' = -0.4837, \quad R_{\pi_q''}^2 = 0.9683$$

อนึ่ง พารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ จากการประยุกต์ใช้มาตรวัด $s_A s_B$ และ power-law model fit ที่เสนอโดยงานวิจัยนี้ตามสมการที่ 7.26-7.30 ได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 7.10

7.8.3 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ A_q และ B_q จาก power-law model fit

เมื่อพิจารณาสมการที่ 7.13B ดังแสดง

$$\left[\pi_q'' = \frac{\pi_q}{s_A s_B} \right] = \pi_{q|0,x/rd} \quad (7.13B)$$

พบว่าตามทฤษฎีแล้ว เมื่อปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q ถูกสเกลด้วยมาตรวัด $s_A s_B$ จะส่งผลให้ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q'' นั้นมีค่าเท่ากับค่าคงที่ซึ่งไม่ขึ้นกับ r_m และมีค่าเท่ากับ π_q ที่ประเมินวัดในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (r_m เท่ากับ 0) ที่ตำแหน่ง x/rd หรือ $\pi_{q|0,x/rd}$ อย่างไรก็ตาม $\pi_{q|r_m,x/rd}$ นั้นจะสามารถประมาณด้วยสมการความสัมพันธ์ตามสมการที่ 7.11 ดังนี้

$$\pi_{q|0,x/rd} = A_q(0) \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_q(0)} \quad (7.11)$$

ดังนั้นเมื่อแทน $\pi_{q|0,x/rd}$ ในสมการที่ 7.11 ลงในสมการที่ 7.13B สามารถเขียนได้เป็น

$$\left[\pi_q'' = \frac{\pi_q}{s_A s_B} \right] = A_q(0) \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_q(0)} \quad (7.31)$$

นอกจากนั้นจากหัวข้อ 7.7.2 พบว่า power-law model fit สามารถอธิบายการพัฒนาตัวของ ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q'' ตามระยะการไหล x/rd ซึ่งอยู่ในรูป

$$\left[\pi_q'' = \frac{\pi_q'}{s_B} = \frac{\pi_q}{s_A s_B} \right] = A_q'' \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_q''} \quad (7.20)$$

ดังนั้นสมการที่ 7.20 จะเท่ากับ 7.31 ซึ่งเขียนได้เป็น

$$A_q'' \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_q''} = A_q(0) \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_q(0)} \quad (7.32)$$

กล่าวคือจากสมการที่ 7.32 พบว่า A_q'' และ B_q'' ในทางทฤษฎีแล้วต้องมีค่าเท่ากับ $A_q(0)$ และ $B_q(0)$ (ซึ่งงานวิจัยนี้จะอ้างอิงมาจาก Pruekwatana *et al.* (2016))

ดังนั้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ A_q'' และ B_q'' จาก power-law model fit ของ ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q'' ตามสมการที่ 7.26-7.30 กับ $A_q(0)$ และ $B_q(0)$ ดังแสดงในสมการที่ 7.18 ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} A_E(0) &= 1, & B_E(0) &= 0.5573 & (7.1D) \\ A_y(0) &= 0.63, & B_y(0) &= 0.3257 & (7.2D) \\ A_T(0) &= 1.037, & B_T(0) &= -0.4879 & (7.3D) \end{aligned} \right\} \quad (7.18)$$

$$\begin{array}{l}
 \text{Entrainment : } A_{E_1}'' = 0.9948, \quad B_{E_1}'' = 0.5437 \quad (7.26) \\
 \qquad \qquad \qquad A_{E_2}'' = 0.9949, \quad B_{E_2}'' = 0.544 \quad (7.27) \\
 \text{Trajectory : } A_y(r_m) \text{ is in parabolic form. ; } A_y'' = 0.6295, \quad B_y'' = 0.3237 \quad (7.28) \\
 \qquad \qquad \qquad A_y(r_m) \text{ is in cubic form. ; } A_y'' = 0.6326, \quad B_y'' = 0.3236 \quad (7.29) \\
 \text{Circulation : } A_r'' = 1.03, \quad B_r'' = -0.4837 \quad (7.30)
 \end{array} \quad (7.33)$$

ผลการเปรียบเทียบจากสมการที่ 7.18 และสมการที่ 7.33 พบว่าสัมประสิทธิ์ A_q'' และ B_q'' มีความใกล้เคียง $A_q(0)$ และ $B_q(0)$ อย่างมาก โดยที่มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 2.4% (คิดจาก

$$\frac{A_q'' - A_q(0)}{A_q(0)} \times 100 \quad \text{และ} \quad \frac{B_q'' - B_q(0)}{B_q(0)} \times 100$$

นั้นมีความสอดคล้องตามการวิเคราะห์ดังแสดงในสมการที่ 7.32

7.9 บทสรุปการ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ที่มีต่อคุณลักษณะต่างๆ ของเจ็ตในกระแสลมขวาง

ผลการศึกษาในบทนี้พบมาตรวัดใหม่ที่นอกเหนือจากสามารถ collapse ผลของ r ได้แล้วยังสามารถ collapse ผลของ r_m ที่มีต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร, เส้นทางการเดิน, และค่า circulation ของเจ็ตในกระแสลมขวางในกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมได้ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 7.7 โดยเมื่อทำการสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q ด้วยมาตรวัด $s_A = A_q(r_m)/A_q(0)$ หรือปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi_q' = \pi_q/s_A$ จะส่งผลให้ scatter ของ π_q' บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) มีค่าต่ำในระดับหนึ่งหรือสามารถกล่าวได้ว่าสามารถ collapse ผลของ r_m ได้ดีในระดับหนึ่ง ($\varepsilon_{\pi_q'(r_m)} = 3.23\% - 18.0\%$) อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้มาซึ่งปริมาณฟิสิกส์ไร้มิติใหม่ที่สามารถ collapse ผลของ r_m ได้ดียิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงทำการประยุกต์ใช้มาตรวัด $s_B = (x/rd)^{B_q(r_m) - B_q(0)}$ เพื่อนำไปสเกลปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q' หรือปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi_q'' = \pi_q'/s_B = \pi_q/s_A s_B$ ผลการศึกษาพบว่าโดยภาพรวม scatter ของ π_q'' บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) จะต่ำ ($\varepsilon_{\pi_q''(r_m)} = 1.84\% - 4.90\%$) หรือกล่าวได้ว่าสามารถ collapse ผลของ r_m ได้ดีขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่า การประยุกต์ใช้ power-law model fit ยังสามารถอธิบายการพัฒนาตัวของ π_q'' ตามระยะทาง x/rd ได้ดี โดยที่พารามิเตอร์ $R_{\pi_q}^2$ จะอยู่ในช่วง 0.9665 ถึง 0.9900 และเมื่อพิจารณาการพัฒนาตัวของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q'' ตามระยะ x/rd พบว่า

- 1) เมื่อ x/rd เพิ่มขึ้น จะพบว่า π''_{E_1} , π''_{E_2} , π''_y จะเพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 7.17-7.19 ประกอบ)
- 2) เมื่อ x/rd เพิ่มขึ้น จะพบว่า π''_r จะลดลง (ดูรูปที่ 7.20 ประกอบ)

อนึ่ง scaling law และ power-law model fit ที่สามารถ collapse ผลของ r_m ที่มีต่อ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร, เส้นทางเดิน , และค่า circulation ของเจ็ตในกระแส ลมขวางในกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมที่งานวิจัยนี้เสนอจะถูกสรุปไว้ในตารางที่ 7.10



บทที่ 8

อภิปรายผลการทดลอง

8.1 ข้อสมมติฐานในการประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

เพื่อให้การนำอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสม งานวิจัยนี้จึงนิยามอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Volumetric Entrainment Ratio, E) สำหรับทุกกรณีการทดลองตามสมการที่ 3.1 ดังนี้

$$E = \frac{Q_{F_1}(x)}{Q_{F_1,o}} \quad (3.1)$$

โดยที่คำอธิบายความหมายของพารามิเตอร์ต่างๆ นั้น สามารถดูประกอบได้ในหัวข้อที่ 3.1

เมื่อพิจารณาการประยุกต์ใช้ในกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุม โดยกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในกระแสมวลขวาง นั้นจะได้ว่าผลการทดลองโดยใช้เทคนิค SPIV ควบคู่ไปกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดหลัก ไม่ใส่ในกระแสมวลขวางและเจ็ดควบคุมจะทำให้สามารถประเมินวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้อย่างถูกต้องและสามารถนำค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่ประเมินวัดได้นั้นไปประยุกต์ใช้ได้โดยตรง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการประยุกต์ใช้ในกรณีฉีดเจ็ดควบคุมโดยที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก จะได้ว่า การประเมินวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่ถูกต้องในการทดลองนั้น จะต้องมีการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ดหลักและในเจ็ดควบคุมเพื่อให้ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่สามารถประเมินวัดได้ด้วย SPIV มีความสอดคล้องกับ $Q_{F_1}(x)$ ตามนิยามในสมการที่ 3.1 อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์การทดลองในงานวิจัยนี้ จึงส่งผลให้ไม่สามารถใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ดควบคุมได้ และทำให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่สามารถประเมินวัดได้ด้วย SPIV (จากการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดหลักเท่านั้น) นั้นจะเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตรของส่วนผสมของเจ็ดหลักเท่านั้น ซึ่งจะไม่สอดคล้องกับ $Q_{F_1}(x)$ ตามนิยามในสมการที่ 3.1 ด้วยเหตุผลนี้จึงนำมาสู่ข้อสมมติฐานของงานวิจัยนี้กล่าวคือ “ที่ระนาบตัดขวางการไหล x ที่ทำการ

ประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร เจ็ดควบคุมได้ถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำเข้าไปผสมหมดแล้ว” ซึ่งจะสอดคล้องกับปริมาตรควบคุมดังแสดงในรูปที่ 3.3(ค) ด้วยข้อสมมติฐานดังกล่าวนี้เองจะส่งผลให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่สามารถประเมินวัดได้ด้วย SPIV มีความสอดคล้องกับ $Q_F(x)$ ตามนิยามในสมการที่ 3.1 (เนื้อหาการพิสูจน์โดยละเอียดได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 3.1)

อย่างไรก็ตามเพื่ออภิปรายความเป็นไปได้และประเมินความถูกต้องของข้อสมมติฐานดังกล่าว จึงนำมาสู่เนื้อหาในหัวข้อนี้จะอภิปรายหลักฐานต่างๆ ที่เป็นข้อสนับสนุนข้อสมมติฐานในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์เส้นทางเดินของเจ็ด และหลักฐานทางด้านโครงสร้างของเจ็ด

8.1.1 การวิเคราะห์เส้นทางเดินของเจ็ดเพื่อประเมินความถูกต้องของข้อสมมติฐาน

การเปรียบว่าเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมประพืดตัวเป็นเจ็ดในกระแสลมขวางอีกตัวหนึ่งที่ถูกฉีดขึ้นมาที่หลังปากทางออกของเจ็ดหลักและมีเส้นทางเดินแตกต่างกับเส้นทางเดินของเจ็ดหลัก ทำให้เกิดแนวคิดที่จะอภิปรายความเป็นไปได้และประเมินความถูกต้องของข้อสมมติฐานด้วยการวิเคราะห์เส้นทางเดินของเจ็ด โดยที่การประมาณการ penetrate ของเจ็ดควบคุมเข้าไปในเจ็ดหลักในงานวิจัยนี้นั้นจะใช้วิธีพล็อตกราฟการพัฒนาตัวของเส้นทางเดินเจ็ด (ซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาดของ vorticity ในแนวแกน streamwise) ของทั้งเจ็ดหลักและเจ็ดควบคุมตามระยะการไหล โดยที่จุดตัดระหว่างเส้นทางเดินของเจ็ดหลักและเส้นทางเดินของเจ็ดควบคุมเป็นจุดชี้แนะว่าเจ็ดควบคุมได้ penetrate เข้าไปในเจ็ดหลักและถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ดหลักจนหมดแล้ว ดังนั้นเพื่อที่จะประมาณการพัฒนาตัวของเส้นทางเดินของทั้งเจ็ดหลักและเจ็ดควบคุมตามระยะการไหล งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีดังนี้

- 1) เพื่อที่จะประมาณเส้นทางเดินของเจ็ดหลัก งานวิจัยนี้จะใช้ power-law model fit จากการ fit ชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ดังแสดงในตาราง 6.7 ดังนี้

$$\frac{y_{CM, |w_{j,x}|}}{rd} = 1.065(x/rd)^{0.3013} \quad (8.1A)$$

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เส้นทางเดินของเจ็ตในบทนี้นั้นจะทำการวิเคราะห์บนตัวแปรที่มีมิติตั้งนั้นสมการที่ 8.1A สามารถเขียนได้เป็น

$$y_{CM,|\omega_{j,x}|} = 1.065r^{0.6987}d^{0.6987}(x)^{0.3013} \quad (8.1B)$$

- 2) เพื่อที่จะประมาณเส้นทางเดินของเจ็ตควบคุม งานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้สมการการประมาณการพัฒนาตัวของเส้นทางเดินของเจ็ตในกรณีไม่มีการควบคุมที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) ตามสมการที่ 7.2B-7.2D ดังนี้

$$\frac{y_{CM,|\omega_{j,x}|}}{r^C d} = A_y(0) \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_y(0)} \quad (7.2B)$$

$$C_y = 1.36 \quad (7.2C)$$

$$A_y(0) = 0.63, \quad B_y(0) = 0.3257 \quad (7.2D)$$

เมื่อ $y_{CM,|\omega_{j,x}|}$ คือ เส้นทางเดินของเจ็ตซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาดของ vorticity ของส่วนผสมของเจ็ตหลักในแนวแกน streamwise

r คือ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากทางออกของเจ็ต

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เส้นทางเดินของเจ็ตในบทนี้นั้นจะทำการวิเคราะห์บนตัวแปรที่มีมิติตั้งนั้นสมการที่ 7.2B-7.2D สามารถเขียนได้เป็น

$$y_{CM,|\omega_{j,x}|} = 0.63r^{1.0343}d^{0.6743}(x)^{0.3257} \quad (8.2)$$

การคำนวณค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลของเจ็ตควบคุม

จากสมการที่ 2.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลของเจ็ตหลักสามารถเขียนได้เป็น

$$r = \sqrt{\frac{\rho_{mj} u_{mj}^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2}} \quad (8.3)$$

เมื่อ	u_{mj}	คือ	ความเร็วที่ปากทางออกเจ็ตหลัก
	u_{cf}	คือ	ความเร็วของกระแสลมขวาง
	ρ_{mj}	คือ	ความหนาแน่นของของไหลที่เป็นเจ็ตหลัก
	ρ_{cf}	คือ	ความหนาแน่นของของไหลที่เป็นกระแสลมขวาง

หากเปรียบเสมือนว่าเจ็ตควบคุมเป็นเจ็ตในกระแสลมขวางอีกตัวหนึ่ง จากสมการที่ 2.1 จึงทำให้อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลของเจ็ตควบคุมสามารถเขียนได้เป็น

$$r_{cj} = \sqrt{\frac{\rho_{cj} u_{cj}^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2}} \quad (8.4)$$

เมื่อ	r_{cj}	คือ	อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลของเจ็ตควบคุม
	u_{cj}	คือ	ความเร็วที่ปากทางออกเจ็ตควบคุม
เมื่อ	$\rho_{cj} = \rho_{cf}$		สมการที่ 8.4 สามารถเขียนได้เป็น

$$r_{cj} = \frac{u_{cj}}{u_{cf}} \quad (8.5)$$

อย่างไรก็ตามความเร็วที่ปากทางออกของเจ็ตควบคุมจะสามารถคำนวณได้จาก

$$u_{cj} = \frac{Q_{cj,o}}{A_{cj,o}} \quad (8.6)$$

เมื่อ	$Q_{cj,o}$	คือ	อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกเจ็ตควบคุม
	$A_{cj,o}$	คือ	พื้นที่หน้าตัดที่ปากทางออกเจ็ตควบคุม

จากการประยุกต์ใช้สมการที่ 8.5 และ 8.6 จะสามารถประมาณอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลของเจ็ตควบคุม (r_{cj}) ตามแต่กรณีของการฉีดเจ็ตควบคุมได้ดังนี้

- 1) $r_m = 3.8\%$; $r_{cj} = 15$
- 2) $r_m = 6\%$; $r_{cj} = 23$
- 3) $r_m = 8\%$; $r_{cj} = 31$
- 4) $r_m = 10\%$; $r_{cj} = 38$
- 5) $r_m = 13\%$; $r_{cj} = 50$

อนึ่ง เนื่องจากการฉีดเจ็ดควบคุมจะกระทำที่ตำแหน่ง x/rd เท่ากับ 0.25 (x เท่ากับ 12.75 mm) จึงส่งผลให้การประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่ระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 0.25 ไม่สอดคล้องกับข้อสมมติฐานอยู่แล้ว และทำให้การอธิบายความเป็นไปได้และประเมินความถูกต้องของข้อสมมติฐานจะครอบคลุมเฉพาะระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 0.50, 0.75, 1.0, และ 1.5 เท่านั้น

รูปที่ 8.1 แสดงการพัฒนาตัวของเส้นทางเดินของเจ็ดหลักและเส้นทางเดินของเจ็ดควบคุมในกรณี r_m เท่ากับ 3.8%, 6%, 8%, 10%, และ 13% ตามระยะการไหล x ซึ่งพบว่าเส้นทางเดินของเจ็ดควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 3.8% จะไม่พุ่งขึ้นไปตัดกับเส้นทางเดินของเจ็ดหลักตลอดช่วงระนาบตัดขวางที่ทำการทดลอง (x เท่ากับ 12.75 mm ถึง 76.5 mm) อย่างไรก็ตามเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่า r_m ตั้งแต่ 6% ขึ้นไปแล้วจะพบว่าเส้นทางเดินของเจ็ดควบคุมจะพุ่งขึ้นไปตัดกับเส้นทางเดินของเจ็ดหลักก่อนที่เจ็ดหลักจะพัฒนาตัวไปยังระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 0.50 (หรือตำแหน่ง $x = 25.5$ mm) จึงชี้แนะว่าสำหรับการฉีดเจ็ดควบคุมที่มีค่า r_m เท่ากับ 6%, 8%, 10%, และ 13% นั้น เจ็ดควบคุมได้ penetrate เข้าไปในเจ็ดหลักและถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำเข้าไปผสมจนหมดแล้ว ก่อนระนาบตัดขวางที่ทำการประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (x/rd เท่ากับ 0.50 เป็นต้นไป)

สำหรับการฉีดเจ็ดควบคุมกรณี r_m เท่ากับ 3.8% ที่พบว่าเส้นทางเดินของเจ็ดหลักและเส้นทางเดินของเจ็ดควบคุมจะไม่ตัดกันตลอดช่วงระนาบตัดขวางที่ทำการประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ดังนั้นการพิจารณาเฉพาะการตัดกันของเส้นทางเดินของเจ็ดจึงยังไม่เพียงพอที่จะใช้เป็นข้อชี้แนะว่าเจ็ดควบคุมทั้งหมดได้ penetrate เข้าไปในเจ็ดหลักและถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำเข้าไปผสม จึงนำมาสู่การพิจารณาในส่วนของขนาดของเจ็ด กล่าวคือการประมาณส่วน

(ขอบเขต) ของเจ็ตควบคุมที่สามารถ penetrate เข้าไปในเจ็ตหลัก ที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.50 (หรือระยะ x เท่ากับ 25.5 mm) เป็นการเพิ่มเติม

เพื่อที่จะสามารถประมาณขอบเขตของเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุม งานวิจัยจะใช้วิธีดังนี้

1) การประมาณขอบเขตของเจ็ตหลัก (main jet)

งานวิจัยนี้จะประมาณขอบเขตของเจ็ตหลัก โดยการอ้างอิงจากบริเวณขอบของโครงสร้างการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต (เส้น contour line ที่ ϕ_j เท่ากับ 0.01) ในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม ที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.50 ($x = 25.5$ mm) ดังแสดงในรูปที่ 5.1(ข) ซึ่งผลการประมาณพบว่าจุด $y_{CM,|\omega_{j,x}|} \approx 45$ mm โดยที่ขอบบนของเจ็ตหลักจะอยู่สูงกว่าจุด $y_{CM,|\omega_{j,x}|}$ อยู่ประมาณ 47 mm ในขณะที่ขอบล่างของเจ็ตหลักจะอยู่ต่ำกว่าจุด $y_{CM,|\omega_{j,x}|}$ อยู่ประมาณ 30 mm

2) การประมาณขอบเขตของเจ็ตควบคุม (control jet)

เช่นเดียวกับเจ็ตหลัก งานวิจัยนี้จะประมาณขอบเขตของเจ็ตควบคุม โดยการอ้างอิงจากบริเวณขอบของโครงสร้างการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตหลักในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r_{cj} เท่ากับ 15

อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยข้อมูลอันจำกัด งานวิจัยนี้จึงทำการประมาณขอบเขตของเจ็ตควบคุมจากโครงสร้างการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตหลักในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล r เท่ากับ 12 ที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.5 โดยการอ้างอิงผลการทดลองจากงานวิจัยของ Wongthongsiri (2014) แทน ซึ่งผลการประมาณพบว่าจุด $y_{CM,|\omega_{j,x}|} \approx 27$ mm โดยที่ขอบบนของเจ็ตควบคุมจะอยู่สูงกว่าจุด $y_{CM,|\omega_{j,x}|}$ อยู่ประมาณ 13 mm ในขณะที่ขอบล่างของเจ็ตควบคุมจะอยู่ต่ำกว่าจุด $y_{CM,|\omega_{j,x}|}$ อยู่ประมาณ 17 mm

ผลการประมาณขอบเขตของเจ็ดหลักและเจ็ดควบคุมที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.50 (หรือระยะ x เท่ากับ 25.5 mm) จะแสดงเป็น error bar ในรูปที่ 8.1 ซึ่งพบว่าที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.50 (หรือระยะ x เท่ากับ 25.5 mm) เจ็ดควบคุมเกือบทั้งหมดได้ penetrate เข้าไปในเจ็ดหลักแล้วและอาจถูกเหนี่ยวนำเข้าไปผสมกับเจ็ดหลักเกือบหมดแล้วเช่นเดียวกับกรณี r_m เท่ากับ 6%, 8%, 10%, และ 13%

อนึ่ง การประมาณในที่นี้ยังไม่รวมถึงผลของการที่เจ็ดควบคุมถูกเจ็ดหลักบัง (shielding effect) ซึ่งจะส่งผลให้อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลของเจ็ดควบคุมสูงกว่าค่าที่ประมาณได้จริงและจะส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ดควบคุมสูงขึ้น และทำให้เจ็ดควบคุมสามารถ penetrate เข้าไปในเจ็ดหลักได้มากขึ้น

ดังนั้นโดยภาพรวมของการประมาณการตัดกันระหว่างเส้นทางเดินของเจ็ดหลักและเส้นทางเดินของเจ็ดควบคุมรวมไปถึงการพิจารณาขอบเขตของเจ็ดควบคุมที่ penetrate เข้าไปในเจ็ดหลักเฉพาะในกรณี r_m เท่ากับ 3.8% ดังแสดงในรูปที่ 8.1 จึงชี้แนะว่าสำหรับทุกกรณีของการฉีดเจ็ดควบคุม ที่ระนาบตัดขวางที่ทำการประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (ตำแหน่ง x/rd ตั้งแต่ 0.5 หรือ ระยะ x ตั้งแต่ 25.5 mm เป็นต้นไป) เจ็ดควบคุมน่าจะถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำเข้าไปผสมจนหมดแล้วหรือเกือบหมดแล้วซึ่งจะสอดคล้องกับการพิจารณาในปริมาตรควบคุมที่ 3.3(ค) นอกเหนือจากนั้นงานวิจัยนี้ยังมีหลักฐานเชิงโครงสร้างของเจ็ดที่จะสนับสนุนข้อสมมติฐานดังกล่าว ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อ 8.1.2

8.1.2 การวิเคราะห์หลักฐานเชิงโครงสร้างของเจ็ดเพื่อประเมินความถูกต้องของข้อสมมติฐาน

จากหลักฐานในรูปที่ 5.1(ก) ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด (ϕ_j) ที่ระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 0.25 พบว่าการฉีดเจ็ดควบคุมจะส่งผลให้เกิดร่องของบริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดต่ำ ซึ่งวางตัวในแนวตั้งตามแนวการไหลของเจ็ดควบคุมที่บริเวณกึ่งกลางด้านล่างของเจ็ด ในขณะที่เมื่อพิจารณากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมจะไม่พบบริเวณดังกล่าว ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าร่องดังกล่าวเกิดจากผลของการฉีดเจ็ดควบคุม (ซึ่งไม่มีการใส่อนุภาคติดตามการไหล) ที่มารบกวนและกระตุ้นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเจ็ด โดยเมื่อ r_m สูงขึ้นจะส่งผลให้ร่องดังกล่าวมีขนาดที่สูงขึ้นในแนวตั้ง ซึ่งแสดงถึงการที่เจ็ดควบคุมมีโมเมนตัมที่มากขึ้นและสามารถที่จะ penetrate เข้าไปในเจ็ดหลักได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวจากระนาบ

ตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.25 มายังระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 5.1(ข) จะพบว่าร่องของบริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดตัวได้หายไปแล้ว จากหลักฐานดังกล่าวจึงชี้แนะว่าเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวมายังระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.5 เจ็ดควบคุมได้ถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมจนหมดแล้วหรือเกือบหมดแล้ว และเป็นอีกหนึ่งข้อสนับสนุนข้อสมมติฐานในงานวิจัยนี้ซึ่งกล่าวว่า “ที่ระนาบตัดขวาง x ที่ทำการประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร เจ็ดควบคุมได้ถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมจนหมดแล้วหรือเกือบหมดแล้ว” ซึ่งจะสอดคล้องกับการพิจารณาในปริมาตรควบคุมที่ 3.3(ค)

ด้วยการวิเคราะห์เส้นทางเดินของเจ็ดที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 8.1.1 ประกอบกับการวิเคราะห์หลักฐานเชิงโครงสร้างของเจ็ดในหัวข้อที่ 8.1.2 จะชี้แนะไปในเชิงสนับสนุนข้อสมมติฐานในงานวิจัยนี้กล่าวคือ “ที่ระนาบตัดขวางที่ทำการประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเจ็ดควบคุมได้ถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมจนหมดแล้วหรือเกือบหมดแล้ว ซึ่งจะสอดคล้องกับการพิจารณาในปริมาตรควบคุมที่ 3.3(ค) เป็นหลัก” และหากว่าข้อสมมติฐานในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องตามกายภาพของการไหลจริง ก็จะส่งผลให้ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ SPIV สามารถประเมินวัดได้นั้นจะสอดคล้องกับ $Q_{F_1}(x)$ ตามนิยามในหลักสมการที่ 3.1 และทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในกรณี E_2 จะมีความถูกต้องในเชิงการประยุกต์ใช้งานจริง

บทที่ 9

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรและปริมาณทางฟิสิกส์อีก 2 ปริมาณ ได้แก่ เส้นทางการเดิน และ ค่า circulation ของเจ็ดในกระแสมวลขวาง โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ของเจ็ดหลักเท่ากับ 4 การวัดสนามความเร็วที่ระนาบตัดขวางการไหลใดๆ ของเจ็ดในกระแสมวลขวางจะประยุกต์ใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV)

เพื่อที่จะศึกษาโครงสร้างของส่วนผสมของเจ็ดและเพื่อที่จะประเมินวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร รวมไปถึงปริมาณทางฟิสิกส์ 2 ปริมาณ ได้แก่ เส้นทางการเดิน และค่า circulation ของเจ็ด งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้เทคนิค SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะเจ็ดหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในการไหลอื่น ทำให้คุณลักษณะและโครงสร้างของเจ็ดในกระแสมวลขวางที่ประเมินวัดได้ในงานวิจัยนี้นั้นเป็นคุณลักษณะและโครงสร้างของส่วนผสมของเจ็ดหลักเท่านั้น ไม่รวมส่วนของกระแสมวลขวางบริสุทธิ์

สำหรับการประยุกต์ใช้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุมโดยกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในกระแสมวลขวาง (E_1) ที่ประเมินวัดได้ด้วยเทคนิค SPIV ประกอบกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ดหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสมวลขวางและเจ็ดควบคุม จะทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่ประเมินวัดได้ในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องตามกายภาพจริงของการไหลและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้โดยตรง อย่างไรก็ตามสำหรับการประยุกต์ใช้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในกรณีฉีดเจ็ดควบคุมโดยกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (E_2) นั้น เทคนิคที่ถูกต้องที่ทำให้สามารถประเมินวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้ตรงตามนิยามในสมการที่ 3.1 คือ การประยุกต์ใช้ SPIV ควบคู่ไปกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ดหลักและเจ็ดควบคุม ไม่ใส่ในกระแสมวลขวาง อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์การทดลองจึงทำให้งานวิจัยนี้ไม่สามารถใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ดควบคุมได้ จึงทำให้ค่า E_2 ที่ประเมินวัดได้ด้วย SPIV ยังไม่สอดคล้องตามนิยามในสมการที่ 3.1 ดังนั้นเพื่อให้ค่า E_2 ที่ประเมินวัดได้ด้วย SPIV มีความสอดคล้องตามนิยามในสมการที่ 3.1 จึงนำมาสู่ข้อสมมติฐานในงานวิจัยนี้คือ “ที่ระนาบตัดขวางการไหล

x ที่ทำการประเมินวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร เจ็ดควบคุมได้ถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมจนหมดแล้ว ดังแสดงในปริมาตรควบคุมในรูปที่ 3.3(ค)”

9.1 โครงสร้างของส่วนผสมของเจ็ดและผลของเจ็ดควบคุมต่อโครงสร้างของส่วนผสมของเจ็ด

9.1.1 ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด (ϕ_j)

เมื่อพิจารณากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (รูปที่ 5.1(ก)-(จ) กรณี JICF) สำหรับในทุกกระบวนการตัดขวางการไหลจะพบบริเวณความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดสูงซึ่งวางตัวบริเวณกลางเจ็ด โดยที่ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนวรัศมีจากบริเวณกลางเจ็ดจนเป็นศูนย์ที่บริเวณกระแสลมขวางบริสุทธิ์ที่ด้านนอกของเจ็ด

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการฉีดเจ็ดควบคุม (ซึ่งไม่มีการใส่อนุภาคติดตามการไหล) จะทำให้พบร่องของบริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดต่ำที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.25 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำการฉีดเจ็ดควบคุม (รูปที่ 5.1(ก)) ซึ่งร่องดังกล่าวจะวางตัวในแนวตั้งตามแนวการไหลของเจ็ดควบคุมที่บริเวณกึ่งกลางด้านล่างของเจ็ด โดยร่องนี้จะทำให้บริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดสูงเกิดการแยกออกจากกันและทำให้รูปร่างโครงสร้างโดยภาพรวมของการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดมีลักษณะคล้ายฟันที่มีรากฟัน 2 ซี่ง อย่างไรก็ตามเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวจากระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.25 ไปยังระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.5 (รูปที่ 5.1(ข)) พบว่าร่องของบริเวณที่ความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดต่ำได้หายไปแล้ว ซึ่งเป็นข้อชี้แนะว่าเจ็ดควบคุมได้ถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมจนหมดแล้วซึ่งเป็นหลักฐานสนับสนุนข้อสมมติฐานในการประเมินวัดค่า E_2

เมื่อพิจารณากรณีที่ฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่า r_m ตั้งแต่ 10% ขึ้นไป พบว่าเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวจากระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.5 ไปยังระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.75 เป็นต้นไป (รูปที่ 5.1(ค)-(จ)) จะพบ peak ของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดแยกออกเป็น 2 peaks ซึ่งวางตัวอยู่ด้านบนและด้านล่างตามแนวกึ่งกลางของเจ็ด โดยการปรากฏของ peak ของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดด้านล่างนั้นชี้แนะว่ามีความเกี่ยวข้องกับการฟอร์มตัวของโครงสร้าง CVP ของเจ็ดควบคุม

9.1.2 เวกเตอร์ในระนาบตัดขวางการไหลเฉลี่ยไร้มิติ ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$) หรือ In-plane vector

สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (รูปที่ 5.2(ก)) พบเวกเตอร์ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเฉลี่ยในระนาบตัดขวางการไหล (In-plane vector) มีการเคลื่อนที่หมุนวนในลักษณะครึ่งหนึ่งของเวกเตอร์ความเร็วที่เกิดจากโครงสร้าง CVP โดยที่บริเวณกึ่งกลางเจ็ตจะพบว่าองค์ประกอบของความเร็วของ In-plane vector ส่วนมากจะอยู่ในแกน transverse นอกจากนี้ยังพบช่องการไหลลู่เข้า-ออก (VC) ที่ถูกขับเคลื่อนโดยโครงสร้าง CVP วางตัวอยู่บริเวณกึ่งกลางเจ็ต เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจาก upstream ไปยัง downstream พบการเคลื่อนที่ในลักษณะหมุนวนของ In-plane vector ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับ Soupramongkol (2015) และ Sornphrom (2015)

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการฉีดเจ็ตควบคุมพบว่าที่บริเวณกลางเจ็ต In-plane vector จะมีองค์ประกอบของความเร็วส่วนมากจะอยู่ในแกน transverse และมีขนาดสูงกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 13% (ดูรูปที่ 5.2(ข) ประกอบ) ซึ่งชี้แนะว่าการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบของความเร็วในแกน transverse นั้นเป็นผลจากเจ็ตควบคุม

9.1.3 ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$)

สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (รูปที่ 5.3(ก)-(จ) กรณี JICF) พบโครงสร้างรูปไต (K-S) ซึ่งจะนิยามเป็นบริเวณที่มีความเร็วในแกน streamwise สูงที่มีลักษณะคล้ายรูปไตและวางตัวอยู่บริเวณกลางเจ็ต และบริเวณอ่าว (G-R) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วในแกน streamwise ต่ำ วางตัวอยู่ใต้ K-S และมีลักษณะคล้ายรูปร่าง U กลับหัว เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม downstream พบว่าลักษณะโครงสร้างโดยรวมของเจ็ตยังคงมีลักษณะคล้ายกับบริเวณ upstream อยู่ กล่าวคือยังพบทั้ง K-S และ G-R อยู่ เพียงแต่ว่ารูปร่างโดยภาพรวมของเจ็ตจะใหญ่ขึ้น และค่า $V_{j,x} / u_{cf}$ ใน K-S จะลดลงหรือสลายลง ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับ Soupramongkol (2015), Sornphrom (2015), และ Tekhuad (2015)

สำหรับกรณีฉีดเจ็ตควบคุม พบว่าที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.25 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำการฉีดเจ็ตควบคุม (รูปที่ 5.3(ก)) การฉีดเจ็ตควบคุมจะส่งผลให้ภาพรวมของการกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ มีลักษณะคล้ายการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต กล่าวคือมีลักษณะเหมือนพื่นที่มีรากฟัน 2 ข้าง และเกิดคู่ peak ของค่า $V_{j,x} / u_{cf}$ ขึ้นที่บริเวณรากฟันทั้ง 2 ข้าง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 13% โดยการปรากฏของคู่ peak สามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากการที่เจ็ตควบคุมประพุดิตัวคล้ายทรงกระบอกที่ขวางการไหลของเจ็ต จึงทำให้ส่วนผสมของเจ็ตที่อยู่บริเวณใกล้เจ็ตควบคุมบางส่วนต้องเคลื่อนที่อ้อมเจ็ตควบคุม และทำให้ความเร็วในแกน streamwise ของ

ส่วนผสมของเจ็ดถูกเร่งขึ้นและมีความเร็วสูงขึ้น (ดูรูปที่ 5.3(ฉ) ประกอบ) นอกจากนั้นยังพบว่าการฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่า r_m สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า peak ของค่า $V_{j,x}/u_{cf}$ สูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็จะส่งผลให้ K-S ยกตัวสูงขึ้นในแนวตั้ง นอกจากนั้นยังพบว่าค่าของ $V_{j,x}/u_{cf}$ ที่บริเวณกึ่งกลางด้านบนของ K-S ลดต่ำลง (รูปที่ 5.3(ก))

อนึ่ง จากผลการทดลองที่พบว่าเมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่า r_m สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า $V_{j,x}/u_{cf}$ ที่บริเวณกึ่งกลางด้านบนของ K-S ลดลงสามารถอธิบายได้ด้วย 2 คำอธิบาย ดังนี้

- 1) เจ็ดควบคุมซึ่งมีเวกเตอร์ความเร็วในแกน transverse สูงจะไปผลักให้เวกเตอร์ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเบนขึ้น (ดูรูปที่ 5.3(ข) ประกอบ) ทำให้เวกเตอร์ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดมีองค์ประกอบในแกน transverse สูงขึ้น ($V_{j,y}$ สูงขึ้น) ในขณะที่องค์ประกอบในแกน streamwise ต่ำลง ($V_{j,x}$ ต่ำลง)
- 2) เนื่องจากเจ็ดควบคุม (ซึ่งไม่มีการใส่อนุภาคติดตามการไหล) ที่ถูกฉีดขึ้นมาในแนวตั้งและมีความเร็วในแกน transverse สูง ได้ถูกเจ็ดหลักเหนี่ยวนำเข้าไปผสมกลายเป็นส่วนผสมของเจ็ด จึงส่งผลให้ส่วนผสมของเจ็ดที่เหนี่ยวนำเอาเจ็ดควบคุมเข้าไปผสมนั้น มีความเร็วในแกน transverse สูงขึ้นตามไปด้วย

เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวจาก upstream ไปยัง downstream แล้วยังพบ K-S และ G-R อยู่ เพียงแต่ค่า $V_{j,x}/u_{cf}$ มีการสลายตัวลงอย่างต่อเนื่องคล้ายกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (รูปที่ 5.3(ข)-(จ))

9.1.4 ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน transverse ไร้มิติ ($V_{j,y}/u_{cf}$)

สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (รูปที่ 5.4(ก) กรณี JICF) พบว่าที่บริเวณ upstream ประกอบไปด้วย 2 บริเวณหลัก ได้แก่บริเวณที่ความเร็วในแกน transverse เป็นบวกซึ่งวางตัวในแนวตั้งบริเวณกลางเจ็ด และบริเวณที่ความเร็วในแกน transverse เป็นลบ ซึ่งมีลักษณะเป็น lobe และวางตัวประกบด้านข้างของบริเวณที่ความเร็วในแกน transverse เป็นบวก โดยที่บริเวณที่ความเร็วในแกน transverse เป็นบวกจะมี local peak อยู่ 2 บริเวณ ได้แก่ peak ด้านบนซึ่งวางตัวอยู่ตำแหน่งเดียวกับ K-S ในขณะที่ peak ด้านล่างวางตัวอยู่ประมาณตรงบริเวณช่องการไหลคู่เข้า-ออก ในแนวตั้ง (VC) (ดูรูปที่ 5.4(ฉ) ประกอบ) โดยเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวจาก upstream ไปยัง downstream พบว่า peak บวกด้านบนได้สลายไป เหลือเพียงแต่ peak บวกด้านล่างเท่านั้น (รูปที่ 5.4(ข)-(จ)) โดยที่ผลการทดลองโดยภาพรวมจะมีความสอดคล้องกับ Witayaprapakorn (2013), Soupramongkol (2015), และ Sornphrom (2015)

สำหรับกรณีฉีดเจ็ตควบคุมพบว่า ที่ตำแหน่ง x/rd เท่ากับ 0.25 (รูปที่ 5.4(ก)) การฉีดเจ็ตควบคุมจะส่งผลให้ peak บวกที่วางตัวในแนวตั้งที่บริเวณกลางเจ็ตมีค่าสูงขึ้น โดยเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m สูงกว่า 3.8% จะส่งผลให้ peak บวกปรากฏเพียง peak เดียวเท่านั้น และการเพิ่มขึ้นของ r_m จะส่งผลให้ peak บวกมีค่าสูงขึ้น เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปยัง downstream (รูปที่ 5.4(ข)-(จ)) พบว่า peak บวกได้ค่อยๆ สลายตัวไปเช่นเดียวกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

9.1.5 ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise ไร้มิติ ($V_{j,z} / u_{cf}$)

สำหรับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม และกรณีฉีดเจ็ตควบคุม (cJICF) ที่ค่า r_m เท่ากับ 3.8%, 6%, 8%, 10%, และ 13% (รูปที่ 5.5(ก)-(จ)) พบ positive local peak และ negative local peak วางตัวเป็นคู่ๆ และมีทั้งหมด 2 คู่ด้วยกัน โดยทิศทางความเร็วในแกน spanwise มีทิศทางที่สอดคล้องกับทิศทางการหมุนวนของโครงสร้าง CVP นอกจากนั้นยังพบว่า การตัดกันของ lobe ที่มีเครื่องหมายเหมือนกันซึ่งวางตัวแยงมุมกันจะทำให้เกิดโครงสร้าง鞍鞍 (saddle point) ที่บริเวณกึ่งกลางเจ็ตขึ้น เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจาก upstream ไปตาม downstream พบว่าค่าของคู่ local peak ทั้งสองคู่จะค่อยๆ สลายไปอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงระยะนาบตัดขวางการไหลที่ทำการประเมินวัด ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับ Soupramongkol (2015), Sornphrom (2015), และ Tekhuad (2015)

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการฉีดเจ็ตควบคุม พบว่า ที่ระยะนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.25 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำการฉีดเจ็ตควบคุม การฉีดเจ็ตควบคุมจะส่งผลให้ peak ของความเร็วมีค่าสูงขึ้น (รูปที่ 5.5(ก)) โดยการฉีดเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m สูงขึ้นจะส่งผลให้คู่ของ local peak ด้านบนยึดตัวในแนวตั้งมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจาก upstream ไปยัง downstream (รูปที่ 5.5(ข)-(จ)) พบว่าคู่ของ local peak ทั้งสองจะค่อยๆ สลายไปคล้ายกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

9.1.6 Vorticity ของส่วนผสมของเจ็ตในแกน streamwise ไร้มิติ ($\omega_{j,x} d / u_{cf}$)

เมื่อพิจารณาที่บริเวณ upstream ในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) (รูปที่ 5.6(ก)) กรณี JICF พบว่ามีคู่ vortex ที่มีเครื่องหมายตรงข้ามและมีการหมุนสวนทางกัน (Counter-rotating vortex pair, CVP) อยู่ทั้งหมด 3 คู่ด้วยกัน ได้แก่ 1 คู่หลัก ซึ่งมีรูปร่างคล้ายกับจุลภาคกลับหัว (inverse comma) และมีขนาดใหญ่ที่สุด ซึ่งเป็น CVP ของเจ็ตในกระแสลมขวาง นอกจากนั้นยังพบคู่ vortex อีก 2 คู่ย่อยซึ่งมีทิศทางการหมุนที่สวนทางกับคู่หลัก โดยคู่หนึ่งจะวางตัวอยู่บริเวณกลางเจ็ตระหว่าง vortex คู่หลัก และอีกคู่หนึ่งจะวางตัวอยู่บริเวณด้านล่างเจ็ตใต้คู่หลัก เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตาม

downstream (รูปที่ 5.6(ข)-(จ) JICF) พบว่า peak ของ vorticity ค่อยๆ สลายตัวไปอย่างต่อเนื่อง และรูปร่างโดยรวมจะขยายใหญ่ขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการฉีดเจ็ดควบคุม พบว่า ที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เท่ากับ 0.25 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำการฉีดเจ็ดควบคุม (รูปที่ 5.6(ก)) การฉีดเจ็ดควบคุมจะส่งผลให้ peak ของ vorticity สูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม โดยที่การฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่า r_m สูงขึ้นจะส่งผลให้ peak ของ vorticity สูงขึ้นและส่งผลให้โครงสร้างของการกระจายตัวของ vorticity ในแกน streamwise จะเริ่มมีความแตกต่างกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม กล่าวคือจะพบคู่ vortex ที่มีการหมุนสวนทางกันเพียง 2 คู่เท่านั้น ได้แก่ vortex คู่หลักที่เป็นโครงสร้าง CVP ของเจ็ดที่มีลักษณะตรงและสูงขึ้นในแนวตั้ง และอีกหนึ่งคู่ย่อยที่วางตัวอยู่ด้านล่างได้ vortex คู่หลักจะยึดตัวขึ้นตามแนวตั้งและย้ายตำแหน่งจากบริเวณใต้ vortex คู่หลักมาอยู่บริเวณระหว่าง vortex คู่หลัก เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตาม downstream (รูปที่ 5.6(ข)-(จ)) พบว่า peak ของ vorticity จะค่อยๆ สลายตัวไปอย่างต่อเนื่อง และรูปร่างการกระจายตัวของ vorticity ขยายใหญ่ขึ้นคล้ายกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม

อนึ่ง เมื่อพิจารณากรณีทำการฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่า r_m สูงกว่า 8% พบว่าเมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปยังระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 0.75 เป็นต้นไป (รูปที่ 5.6(ค)-(จ)) พบการฟอร์มตัวของโครงสร้าง CVP อีกคู่ขึ้น ซึ่งชี้แนะว่าเกิดจากการที่เจ็ดควบคุมประพุดตัวเปรียบเสมือนเป็นเจ็ดในกระแสลมขวางอีกตัวหนึ่งซึ่งอยู่ใต้เจ็ดหลัก โดย CVP คู่บนมาจากเจ็ดหลัก และ CVP จะคู่ล่างมาจากเจ็ดควบคุม

9.2 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลักต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ประสิทธิภาพของการใช้เจ็ดควบคุม เส้นทางการเดิน และค่า circulation ของเจ็ด

9.2.1 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลักต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

ทั้งกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุม (cJICF) ที่ค่า r_m เท่ากับ 3.8%, 6%, 8%, 10%, และ 13% (รูปที่ 6.3(ก) สำหรับ E_1 , รูปที่ 6.3(ข) สำหรับ E_2) พบว่า เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามแนวทางการไหล ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (ทั้ง E_1 และ E_2) จะเพิ่มขึ้น โดยการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรตามระยะการไหล x/rd ที่ r_m ใดๆ สามารถอธิบายได้ดีด้วย one-plus-power-law model fit เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เดียวกัน พบว่า การฉีดเจ็ดควบคุมจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (ทั้ง E_1 และ E_2) เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF)

และการเพิ่มขึ้นของ r_m จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (ทั้ง E_1 และ E_2) เพิ่มขึ้นเช่นกัน

9.2.2 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลักต่อค่าประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุม

สำหรับทุกกรณีของการฉีดเจ็ดควบคุมพบว่า เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามแนวทางการไหล ค่าประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุมจะเพิ่มขึ้น (ทั้ง η_1 (รูปที่ 6.6(ก)) , $\eta_{2,1}$ (รูปที่ 6.6(ข)) , และ $\eta_{2,2}$ (รูปที่ 6.6(ค))) โดยเมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เดียวกัน พบว่า การเพิ่มขึ้นของ r_m จะส่งผลให้ค่าประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุม (ทั้ง η_1 , $\eta_{2,1}$, และ $\eta_{2,2}$) เพิ่มขึ้นเช่นกัน และโดยทั่วไปจะพบว่า $\eta_1 > \eta_{2,1} > \eta_{2,2}$

9.2.3 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลักต่อเส้นทางเดินของเจ็ด

ทั้งกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุม (CJICF) ที่ค่า r_m เท่ากับ 3.8%, 6%, 8%, 10%, และ 13% (รูปที่ 6.7) พบว่า เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามแนวทางการไหล เส้นทางเดินไร้มิติของเจ็ด ($y_{CM}|_{\omega_j, x} / rd$) จะสูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงการที่เจ็ดสามารถ penetrate เข้าไปในกระแสลมขวางได้มากขึ้น โดยการพัฒนาตัวของเส้นทางเดินไร้มิติของเจ็ดตามระยะการไหล x/rd ที่ r_m ใดๆ สามารถอธิบายได้ดีด้วย power-law model fit เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางการไหล x/rd เดียวกัน พบว่า การฉีดเจ็ดควบคุมจะส่งผลให้เส้นทางเดินไร้มิติของเจ็ดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และการเพิ่มขึ้นของ r_m จะส่งผลให้เส้นทางเดินของเจ็ดสูงขึ้นเช่นกัน

อนึ่ง การที่เจ็ดมีเส้นทางเดินที่สูงขึ้นซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่เพิ่มสูงขึ้น สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง wall blocking effect ที่เสนอโดย Kornrsri *et al.* (2009) ซึ่งชี้แนะว่า ถ้าเจ็ดมีเส้นทางเดินที่ต่ำและอยู่ใกล้ผนังด้านล่าง ผนังจะขัดขวางและลดความสามารถการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ด ซึ่งจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรต่ำ อย่างไรก็ตามหากเจ็ดมีเส้นทางเดินที่สูงขึ้น ผลของผนังจะลดลงซึ่งจะทำให้เจ็ดสามารถเหนี่ยวนำเอากระแสลมขวางบริสุทธิ์รอบข้างเข้ามาผสมได้มากขึ้น

9.2.4 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลักต่อค่า circulation ของเจ็ด

ทั้งกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) และกรณีฉีดเจ็ดควบคุม (cJICF) ที่ค่า r_m เท่ากับ 3.8%, 6%, 8%, 10%, และ 13% (รูปที่ 6.8) พบว่า เมื่อเจ็ดพัฒนาตัวไปตามแนวทางการไหล ค่า circulation ไร้มิติของเจ็ด ($\Gamma_j / u_{cf} d$) จะสลายตัวลง โดยการสลายตัวของค่า circulation ไร้มิติของเจ็ดตามระยะการไหล x / rd ที่ r_m ใดๆ สามารถอธิบายได้ดีด้วย power-law model fit เมื่อพิจารณาที่ระนาบตัดขวางการไหล x / rd เดียวกัน พบว่าการฉีดเจ็ดควบคุมจะส่งผลให้ค่า circulation ไร้มิติของเจ็ด ($\Gamma_j / u_{cf} d$) เพิ่มสูงขึ้น โดยที่เมื่อทำการฉีดเจ็ดควบคุมที่ค่า r_m สูงขึ้นจะส่งผลให้ ค่า circulation ไร้มิติของเจ็ด ($\Gamma_j / u_{cf} d$) เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน

อนึ่ง การเพิ่มขึ้นของค่า circulation นั้นมีความสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของการเหนี่ยวนำการผสม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การที่โครงสร้าง CVP เจ็ดมี circulation ที่สูงขึ้น จะแสดงถึงว่าเจ็ดมีศักยภาพในการเหนี่ยวนำการผสมสูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น

9.3 การกำหนดมาตรวัดต่อคุณสมบัติของเจ็ด

ผลการทดลองในบทที่ 6 พบว่า การฉีดเจ็ดควบคุมจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร, เส้นทางการเดิน, และค่า circulation ของเจ็ดบน scaling law : $E, y_{CM,|\omega_{j,x}|} / rd$, และ $\Gamma_j / u_{cf} d$ มีการเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีที่ไม่มีการฉีดเจ็ดควบคุม ซึ่งแสดงถึงว่า scaling law เดิมนั้นยังไม่สามารถ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อปริมาณทางฟิสิกส์เหล่านั้นได้ ดังนั้นเพื่อที่จะศึกษาหามาตรวัดใหม่ที่สามารถ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร, เส้นทางการเดิน, และค่า circulation ของเจ็ดได้ งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีปรับปรุงและพัฒนา scaling law ที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) เพื่อให้นอกจากสามารถ collapse ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมได้แล้ว ยังสามารถ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ได้อีกด้วย

การศึกษาหามาตรวัดและ model fit ในงานวิจัยนี้จะอยู่ภายใต้ข้อสมมติฐานคือ 1) งานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะผลของพารามิเตอร์ r และ r_m ที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ดในกระแสมวลขวางเป็นหลัก โดยจะถือว่าผลของพารามิเตอร์อื่นที่อาจมีต่อคุณลักษณะของเจ็ดจะเป็นรอง 2) มาตรวัดที่เหมาะสมของระยะทางตามแนวการไหล x คือ rd 3) การพัฒนาตัวของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใดๆ

ตามระยะทางการไหล x/rd อยู่ในรูปพหุคูณของ power law : $\pi'_q = A'_q(x/rd)^{B'_q}$ หรือ $\pi''_q = A''_q(x/rd)^{B''_q}$

ผลการศึกษาพบ scaling law ใหม่ที่สามารถ collapse ผลของ r_m ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร, เส้นทางการเดิน , และค่า circulation ของเจ็ตในกระแสลมขวางได้ดี โดยที่ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่นั้นจะอยู่ในรูป

$$\left[\pi''_q = \frac{\pi_q}{S_A S_B} \right] = \pi_{q|0,x/rd} \quad (7.13B)$$

โดยที่ π''_q	คือ	ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่ที่สามารถ collapse ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) และอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ได้
$\pi_q = q/S_q(r)$	คือ	ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติของ q ที่ถูกสเกลด้วยมาตรวัด $S_q(r)$ ซึ่งเป็นมาตรวัดที่สามารถ collapse ผลของ r ที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมที่เสนอโดย Pruekwatana <i>et al.</i> (2016)
$\pi_{q 0,x/rd}$	คือ	ปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติของ q ที่ประเมินวัดที่ $r_m = 0\%$ หรือ π_q ของกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) ที่ตำแหน่ง x/rd
S_A	คือ	มาตรวัด ซึ่งเท่ากับ $A_q(r_m)/A_q(0)$
S_B	คือ	มาตรวัด ซึ่งเท่ากับ $(x/rd)^{B_q(r_m)-B_q(0)}$

หมายเหตุ : $A_q(r_m)$ และ $B_q(r_m)$ คือ ความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ A_q และ B_q โดยที่ A_q และ B_q จะมาจากการประยุกต์ใช้ power-law model fit (ซึ่งอยู่ในรูป $\pi_q = A_q(x/rd)^{B_q}$) กับปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q ตามระยะการไหล x/rd ในแต่ละ r_m ดังแสดงในตารางที่ 7.1-7.4

ผลการศึกษาโดยภาพรวมพบว่า scatter ของ π''_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) จะมีค่าต่ำ (สามารถ collapse ผลของ r_m ได้ดี) เมื่อเปรียบเทียบกับ การประยุกต์ใช้มาตรวัดเดิมที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) ดังนี้

มาตรการใหม่ Vs. มาตรการเดิมที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016)
 $\varepsilon_{\pi_q(r_m)}$: ต่ำ $\approx 1.84\% - 4.90\%$ Vs. สูง $\approx 16.6\% - 42.2\%$

นอกจากนี้ยังพบว่า power-law model fit สามารถอธิบายการพัฒนาดัชนีของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่ π_q'' ที่สามารถ collapse ผลของ r_m ได้ ตามระยะทาง x/rd ได้ดี โดยที่พารามิเตอร์ $R_{\pi_q''}^2$ จะอยู่ในช่วง 0.9665 ถึง 0.99

ผลการศึกษามาตรการใหม่ที่สามารถ collapse ผลของ r_m และความสัมพันธ์ระหว่าง π_q'' และระยะการไหล x/rd โดยละเอียดมีดังนี้

- 1) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) หรือ E_1 (รูปที่ 7.17)

$$\left[\pi_{E_1}'' = \frac{\pi_{E_1}'}{s_B} = \frac{\pi_{E_1}}{s_A s_B} = \frac{(E_1 - 1)/a_E(r)}{s_A s_B} \right] = A_{E_1}'' \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_{E_1}''} \quad (7.26)$$

Coefficient of scaling law : $a_E(r) = 0.9r + 1.4$,

$$s_A = \frac{A_{E_1}(r_m)}{A_{E_1}(0)}, \quad s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_{E_1}(r_m) - B_{E_1}(0)},$$

$$A_{E_1}(r_m) = 39.16r_m^2 + 1.269r_m + 1, \quad A_{E_1}(0) = 1,$$

$$B_{E_1}(r_m) = 0.7772r_m + 0.5573, \quad B_{E_1}(0) = 0.5573$$

Scatter : $\varepsilon_{\pi_q''} = 2.89\% - 4.79\%$

Coefficient of model fit : $A_{E_1}'' = 0.9948$, $B_{E_1}'' = 0.5437$, $R_{\pi_q''}^2 = 0.9823$

- 2) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาจัดเป็นเจ็ด
ควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (F_1) หรือ E_2 (รูปที่ 7.18)

$$\left[\pi''_{E_2} = \frac{\pi'_{E_2}}{s_B} = \frac{\pi_{E_2}}{s_A s_B} = \frac{(E_2 - 1)/a_E(r)}{s_A s_B} \right] = A''_{E_2} \left(\frac{x}{rd} \right)^{B''_{E_2}} \quad (7.27)$$

Coefficient of scaling law : $a_E(r) = 0.9r + 1.4$,

$$s_A = \frac{A_{E_2}(r_m)}{A_{E_2}(0)}, \quad s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_{E_2}(r_m) - B_{E_2}(0)},$$

$$A_{E_2}(r_m) = 32.97r_m^2 + 0.2905r_m + 1, \quad A_{E_2}(0) = 1,$$

$$B_{E_2}(r_m) = 0.8835r_m + 0.5573, \quad B_{E_2}(0) = 0.5573$$

Scatter : $\varepsilon_{\pi_q} = 2.99\% - 4.90\%$

Coefficient of model fit : $A''_{E_2} = 0.9949$, $B''_{E_2} = 0.544$, $R^2_{\pi_q} = 0.9815$

- 3) เส้นทางเดินของเจ็ด ($y_{CM,|\omega_{j,x}|}$) (รูปที่ 7.19(ก)-(ข))

สำหรับมาตรวัดใหม่ของเส้นทางเดินของเจ็ดใหม่นั้น งานวิจัยนี้จะเสนอใน 2 รูปแบบ ดังนี้

3.1) เมื่อ $A_y(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 2 (รูปที่ 7.19(ก))

$$\left[\pi''_y = \frac{\pi'_y}{s_B} = \frac{\pi_y}{s_A s_B} = \left(\frac{y_{CM,|\omega_{j,x}|} / r^{C_y} d}{s_A s_B} \right) \right] = A''_y \left(\frac{x}{rd} \right)^{B''_y} \quad (7.28)$$

Coefficient of scaling law : $C_y = 1.36$, $s_A = \frac{A_y(r_m)}{A_y(0)}$, $s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_y(r_m) - B_y(0)}$

$$A_y(r_m) = 16.2r_m^2 + 1.83r_m + 0.63, \quad A_y(0) = 0.63$$

$$B_y(r_m) = 0.7616r_m + 0.3257, \quad B_y(0) = 0.3257$$

Scatter : $\varepsilon_{\pi_q} = 3.70\% - 4.15\%$

Coefficient of model fit : $A''_y = 0.6295$, $B''_y = 0.3237$, $R^2_{\pi_q} = 0.9665$

3.2) เมื่อ $A_y(r_m)$ อยู่ในรูปพหุนามกำลัง 3 (รูปที่ 7.19(ข))

$$\left[\pi_y'' = \frac{\pi_y'}{s_B} = \frac{\pi_y}{s_A s_B} = \left(\frac{y_{CM} |\omega_{j,x}| / r^{C_y} d}{s_A s_B} \right) \right] = A_y'' \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_y''} \quad (7.29)$$

Coefficient of scaling law : $C_y = 1.36$, $s_A = \frac{A_y(r_m)}{A_y(0)}$, $s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_y(r_m) - B_y(0)}$

$$A_y(r_m) = -414.8r_m^3 + 95.08r_m^2 - 1.581r_m + 0.63,$$

$$A_y(0) = 0.63,$$

$$B_y(r_m) = 0.7616r_m + 0.3257, \quad B_y(0) = 0.3257$$

Scatter : $\varepsilon_{\pi_q''} = 1.84\% - 2.87\%$

Coefficient of model fit : $A_y'' = 0.6326$, $B_y'' = 0.3236$, $R_{\pi_q''}^2 = 0.99$

4) ค่า circulation ของเจ็ต (รูปที่ 7.20)

$$\left[\pi_\Gamma'' = \frac{\pi_\Gamma'}{s_B} = \frac{\pi_\Gamma}{s_A s_B} = \left(\frac{\Gamma_j / u_{cf} r^{C_\Gamma} d}{s_A s_B} \right) \right] = A_\Gamma'' \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_\Gamma''} \quad (7.30)$$

Coefficient of scaling law : $C_\Gamma = 0.94$, $s_A = \frac{A_\Gamma(r_m)}{A_\Gamma(0)}$, $s_B = \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_\Gamma(r_m) - B_\Gamma(0)}$

$$A_\Gamma(r_m) = 24.87r_m^2 + 5.835r_m + 1.037, \quad A_\Gamma(0) = 1.037,$$

$$B_\Gamma(r_m) = 993.8r_m^3 - 206.7r_m^2 + 8.422r_m - 0.4879,$$

$$B_\Gamma(0) = -0.4879$$

Scatter : $\varepsilon_{\pi_q''} = 3.24\% - 4.46\%$

Coefficient of model fit : $A_\Gamma'' = 1.03$, $B_\Gamma'' = -0.4837$, $R_{\pi_q''}^2 = 0.9683$

อนึ่ง พารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ จากการประยุกต์ใช้มาตรวัด $s_A s_B$ และ power-law model fit ที่เสนอโดยงานวิจัยนี้ตามสมการที่ 7.26-7.30 ได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 7.10

ประมวลตาราง

ตารางที่ 6.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกับผลการทดลองจากงานวิจัยภายใน FMRL และ Yuan and Street (1998)

		Jet volumetric entrainment ratio (E)					Empirical Curve Fit $E = 1 + A_E(x/rd)^{B_E}$		
Work		Experimental Data							
		$x/rd =$					A_E	B_E	R^2
		0.25	0.50	0.75	1	1.5			
$r = 4$	Present Work	3.36	4.29	5.24	6.29	6.95	4.95	0.53	0.98
	Witayaprapakom (2013)	-	2.88	4.00	4.80	5.39	3.48	0.67	0.93
	Srimekharat (2013)	-	2.91	3.91	4.89	5.36	3.48	0.67	0.92
	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	0.50	0.89
	Soupramongkol (2015)	-	4.18	5.53	6.38	7.25	5.12	0.56	0.96
	Sornphrom (2015)	-	4.51	5.36	6.31	7.24	4.98	0.64	0.95
	Tekhuad (2015)	-	4.44	5.51	5.88	7.86	5.22	0.63	0.97
$r = 3.3$	Pruekwatana <i>et al.</i> (2016)	-	-	-	-	-	5.00	0.56	-
	Yuan and Street (1998)	-	-	-	-	-	4.38	0.7	-
	N	2	8	8	8	8	-	-	-
	\bar{E}	3.16	3.86	4.97	5.79	6.71	4.60	0.57	0.99
	S_E	0.283	0.723	0.713	0.669	0.906			
	S_E / \bar{E}	0.090	0.187	0.143	0.115	0.135			
	Precision uncertainty of \bar{E} $P_{\bar{E}} = tS_E / \sqrt{N} @ 95\%$	2.54 ^a	0.604	0.596	0.559	0.757			
	Fraction of precision uncertainty of $\bar{E}, P_{\bar{E}} / \bar{E}$	0.804	0.157	0.120	0.0965	0.113			

CHULALONGKORN UNIVERSITY

หมายเหตุ : N คือ จำนวนข้อมูลในชุดข้อมูลที่ทำการพิจารณา

\bar{E} คือ ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร
ของชุดข้อมูลที่พิจารณา

S_E คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (unbiased standard deviation) ของ
ชุดข้อมูลที่พิจารณา

^a precision uncertainty มีค่าสูงเนื่องจากจำนวนข้อมูลในชุดข้อมูลที่พิจารณาที่
น้อย ($N = 2$)

ตารางที่ 6.2 ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมและกรณีฉีดเจ็ดควบคุม เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) และสัมพันธ์จาก power-law model fit

	$E_1\left(\frac{x}{rd}\right)$					curve fit : $E_1 = 1 + A_{E_1}\left(\frac{x}{rd}\right)^{B_{E_1}}$		
$\frac{x}{rd}$	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	A_{E_1}	B_{E_1}	R^2
JICF	3.363	4.294	5.243	6.289	6.946	4.948	0.5255	0.9799
$r_m = 3.8\%$	3.458	4.665	5.505	6.657	7.279	5.273	0.5146	0.9772
$r_m = 6\%$	3.722	4.971	6.009	7.334	8.747	6.121	0.5999	0.995
$r_m = 8\%$	3.737	5.494	6.529	8.092	9.729	6.833	0.6342	0.9942
$r_m = 10\%$	4.409	5.844	7.189	8.893	11.05	7.733	0.6391	0.9944
$r_m = 13\%$	4.684	6.785	8.090	10.18	12.89	9.035	0.6692	0.9956

ตารางที่ 6.3 ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมและกรณีฉีดเจ็ดควบคุม เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) และสัมพันธ์จาก power-law model fit

	$E_2\left(\frac{x}{rd}\right)$					curve fit : $E_2 = 1 + A_{E_2}\left(\frac{x}{rd}\right)^{B_{E_2}}$		
$\frac{x}{rd}$	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	A_{E_2}	B_{E_2}	R^2
JICF	3.363	4.294	5.243	6.289	6.946	4.948	0.5255	0.9799
$r_m = 3.8\%$	3.331	4.494	5.303	6.414	7.012	5.042	0.519	0.977
$r_m = 6\%$	3.512	4.689	5.669	6.919	8.252	5.715	0.6073	0.995
$r_m = 8\%$	3.460	5.087	6.045	7.493	9.009	6.249	0.6435	0.994
$r_m = 10\%$	4.008	5.313	6.535	8.085	10.04	6.935	0.6498	0.9947
$r_m = 13\%$	4.145	6.004	7.159	9.006	11.41	7.874	0.6818	0.9958

ตารางที่ 6.4 ค่าประสิทธิผลของการฉีดเจ็ดควบคุม เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุม คือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (η_1)

	$\eta_1\left(\frac{x}{rd}\right)$				
$\frac{x}{rd}$	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5
JICF	1	1	1	1	1
$r_m = 3.8\%$	1.0283	1.0865	1.0499	1.0586	1.0479
$r_m = 6\%$	1.1070	1.1577	1.1460	1.1663	1.2594
$r_m = 8\%$	1.1112	1.2795	1.2452	1.2868	1.4008
$r_m = 10\%$	1.3112	1.3611	1.3711	1.4141	1.5902
$r_m = 13\%$	1.3929	1.5801	1.5429	1.6183	1.8556

ตารางที่ 6.5 ค่าประสิทธิผลของการฉีดเจ็ดควบคุม เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุม คือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) เมื่อใช้ค่า E_{JICF} ที่ค่า r เท่ากับ 4 ในการเปรียบเทียบ ($\eta_{2,1}$)

	$\eta_{2,1}\left(\frac{x}{rd}\right)$				
$\frac{x}{rd}$	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5
JICF	1	1	1	1	1
$r_m = 3.8\%$	0.99069	1.0467	1.0115	1.0199	1.0096
$r_m = 6\%$	1.0443	1.0921	1.0812	1.1003	1.1881
$r_m = 8\%$	1.0289	1.1848	1.1530	1.1914	1.2970
$r_m = 10\%$	1.1920	1.2373	1.2464	1.2856	1.4457
$r_m = 13\%$	1.2326	1.3984	1.3654	1.4322	1.6421

ตารางที่ 6.6 ค่าประสิทธิผลของการฉีดเจ็ตควบคุม เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุม คือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลัก (F_1) เมื่อใช้ค่า $E_{\text{JICF, mod } r}$ ในการเปรียบเทียบ ($\eta_{2,2}$)

	$\eta_{2,2} \left(\frac{x}{rd} \right)$				
$\frac{x}{rd}$	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5
JICF	1	1	1	1	1
$r_m = 3.8\%$	0.98782	1.0007	0.98650	1.0451	0.94258
$r_m = 6\%$	1.0301	1.0318	1.0414	1.1131	1.0946
$r_m = 8\%$	1.0051	1.1074	1.0982	1.1916	1.1809
$r_m = 10\%$	1.1533	1.1444	1.1741	1.2711	1.3008
$r_m = 13\%$	1.1757	1.2732	1.2653	1.3925	1.4521

ตารางที่ 6.7 เส้นทางเดินไร้มติของเจ็ตซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาด vorticity ของส่วนผสมของเจ็ตหลักในแนวแกน streamwise ในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมและกรณีฉีดเจ็ตควบคุม และสัมพันธ์จาก power-law model fit

	$\frac{y_{CM, \omega_{j,x} }}{rd} \left(\frac{x}{rd} \right)$					curve fit : $\frac{y_{CM, \omega_{j,x} }}{rd} = A_y \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_y}$		
$\frac{x}{rd}$	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	A_y	B_y	R^2
JICF	0.684	0.883	0.986	1.059	1.20	1.065	0.3013	0.9945
$r_m = 3.8\%$	0.673	0.888	1.03	1.12	1.28	1.119	0.3495	0.9967
$r_m = 6\%$	0.760	1.02	1.18	1.29	1.54	1.31	0.3848	0.9976
$r_m = 8\%$	0.825	1.14	1.34	1.46	1.74	1.481	0.404	0.9964
$r_m = 10\%$	0.943	1.26	1.50	1.63	1.95	1.655	0.3984	0.9981
$r_m = 13\%$	1.03	1.40	1.66	1.83	2.18	1.846	0.412	0.9987

ตารางที่ 6.8 ค่า circulation ไร้มิติของเจ็ตในกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมและกรณีฉีดเจ็ตควบคุมและสัมพันธ์จาก power-law model fit

$\frac{x}{rd}$	$\frac{\Gamma_j}{u_{cf}d} \left(\frac{x}{rd} \right)$					curve fit : $\frac{\Gamma_j}{u_{cf}d} = A_\Gamma \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_\Gamma}$		
	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	A_Γ	B_Γ	R^2
JICF	7.183	4.720	3.942	3.935	2.894	3.56	-0.4941	0.9743
$r_m = 3.8\%$	8.357	6.096	4.968	5.152	4.096	4.761	-0.3955	0.9688
$r_m = 6\%$	11.64	7.397	6.016	5.893	4.602	5.449	-0.5333	0.9781
$r_m = 8\%$	14.69	8.977	7.017	6.633	4.944	6.142	-0.619	0.9891
$r_m = 10\%$	18.85	10.39	8.204	7.543	5.321	6.836	-0.7202	0.987
$r_m = 13\%$	21.81	12.96	9.402	8.897	6.284	8.172	-0.7024	0.9928



ตารางที่ 7.1 ค่าปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_{E_1} และสัมประสิทธิ์จาก power-law model fit

	$\left[\pi_q = \frac{E_1 - 1}{a_E(r)} \right], a_E(r) = 0.9r + 1.4$					$\left[\frac{E_1 - 1}{a_E(r)} \right] = A_{E_1} \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_{E_1}}$		
$\frac{x}{rd}$	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	A_{E_1}	B_{E_1}	R^2
JICF	0.473	0.659	0.849	1.06	1.19	0.9896	0.5255	0.9799
$r_m = 3.8\%$	0.491	0.7330	0.901	1.13	1.26	1.055	0.5146	0.9772
$r_m = 6\%$	0.545	0.794	1.00	1.27	1.55	1.224	0.5999	0.995
$r_m = 8\%$	0.547	0.899	1.11	1.42	1.75	1.367	0.6342	0.9942
$r_m = 10\%$	0.682	0.969	1.24	1.58	2.00	1.547	0.6390	0.9944
$r_m = 13\%$	0.737	1.157	1.42	1.84	2.38	1.807	0.6692	0.9956
Forced collapsing model fit						1.332	0.6067	0.6974
$\pi_{q x/rd}$	0.579	0.868	1.09	1.38	1.69			
$S_{\pi_{q(r_m) x/rd}}$	0.11	0.18	0.22	0.29	0.46			
$\mathcal{E}_{\pi_{q(r_m) x/rd}}$ (%)	18.4	20.7	19.8	21.1	27.0			

หมายเหตุ	q	คือ	E_1
	$\pi_{q x/rd}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ประเมินวัดที่ตำแหน่ง x/rd
	$S_{\pi_{q(r_m) x/rd}}$	คือ	Unbiased standard deviation ของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ตำแหน่ง x/rd
	$\mathcal{E}_{\pi_{q(r_m) x/rd}}$	คือ	scatter ของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ตำแหน่ง x/rd

ตารางที่ 7.2 ค่าปริมาณทางฟิสิกส์ไรมิตี π_{E_2} และสัมประสิทธิ์จาก power-law model fit

	$\left[\pi_q = \frac{E_2 - 1}{a_E(r)} \right], a_E(r) = 0.9r + 1.4$					$\left[\frac{E_2 - 1}{a_E(r)} \right] = A_{E_2} \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_{E_2}}$		
$\frac{x}{rd}$	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	A_{E_2}	B_{E_2}	R^2
JICF	0.473	0.659	0.849	1.06	1.19	0.9896	0.5255	0.9799
$r_m = 3.8\%$	0.466	0.699	0.861	1.08	1.20	1.008	0.519	0.977
$r_m = 6\%$	0.502	0.738	0.934	1.18	1.45	1.143	0.6073	0.995
$r_m = 8\%$	0.492	0.817	1.01	1.20	1.60	1.25	0.6435	0.994
$r_m = 10\%$	0.602	0.863	1.11	1.42	1.81	1.387	0.6498	0.9947
$r_m = 13\%$	0.629	1.00	1.23	1.60	2.08	1.575	0.6818	0.9958
Forced collapsing model fit						1.226	0.6122	0.7826
$\pi_{q x/rd}$	0.527	0.796	0.998	1.27	1.56			
$S_{\pi_{q(r_m) x/rd}}$	0.070	0.13	0.15	0.21	0.35			
$\mathcal{E}_{\pi_{q(r_m) x/rd}}$ (%)	13.3	15.7	15.0	16.5	22.5			

หมายเหตุ	q	คือ	E_2
	$\pi_{q x/rd}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ประเมินวัดที่ตำแหน่ง x/rd
	$S_{\pi_{q(r_m) x/rd}}$	คือ	Unbiased standard deviation ของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ตำแหน่ง x/rd
	$\mathcal{E}_{\pi_{q(r_m) x/rd}}$	คือ	scatter ของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ตำแหน่ง x/rd

ตารางที่ 7.3 ค่าปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_y และสัมประสิทธิ์จาก power-law model fit

	$\left[\pi_q = \frac{y_{CM, \omega_{j,x} }}{r^{C_y} d} \right], C_y = 1.36$					$\left[\frac{y_{CM, \omega_{j,x} }}{r^{C_y} d} \right] = A_y \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_y}$		
$\frac{x}{rd}$	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	A_y	B_y	R^2
JICF	0.415	0.536	0.599	0.643	0.727	0.6466	0.3013	0.9945
$r_m = 3.8\%$	0.408	0.539	0.624	0.679	0.777	0.6791	0.3495	0.9967
$r_m = 6\%$	0.462	0.619	0.714	0.783	0.934	0.7951	0.3848	0.9976
$r_m = 8\%$	0.501	0.693	0.812	0.886	1.06	0.8989	0.404	0.9964
$r_m = 10\%$	0.572	0.766	0.909	0.991	1.18	1.005	0.3984	0.9981
$r_m = 13\%$	0.623	0.852	1.01	1.11	1.32	1.121	0.412	0.9987
Forced collapsing model fit						0.8576	0.381	0.5564
$\pi_{q x/rd}$	0.497	0.667	0.777	0.849	1.00			
$S_{\pi_{q(r_m) x/rd}}$	0.086	0.13	0.16	0.18	0.23			
$\mathcal{E}_{\pi_{q(r_m) x/rd}}$ (%)	17.4	19.0	20.8	21.5	23.2			

หมายเหตุ	q	คือ	$y_{CM, \omega_{j,x} }$
	$\pi_{q x/rd}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ประเมินวัดที่ตำแหน่ง x/rd
	$S_{\pi_{q(r_m) x/rd}}$	คือ	Unbiased standard deviation ของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ตำแหน่ง x/rd
	$\mathcal{E}_{\pi_{q(r_m) x/rd}}$	คือ	scatter ของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ตำแหน่ง x/rd

ตารางที่ 7.4 ค่าปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q และสัมประสิทธิ์จาก power-law model fit

	$\left[\pi_q = \frac{\Gamma_j}{u_{cf} r^{C_\Gamma} d} \right], C_\Gamma = 0.94$					$\left[\frac{\Gamma_j}{u_{cf} r^{C_\Gamma} d} \right] = A_\Gamma \left(\frac{x}{rd} \right)^{B_\Gamma}$		
$\frac{x}{rd}$	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	A_Γ	B_Γ	R^2
JICF	1.952	1.282	1.071	1.069	0.7862	0.9671	-0.4941	0.9743
$r_m = 3.8\%$	2.270	1.656	1.350	1.400	1.113	1.293	-0.3956	0.9688
$r_m = 6\%$	3.164	2.010	1.635	1.601	1.250	1.481	-0.5333	0.9781
$r_m = 8\%$	3.990	2.439	1.906	1.802	1.343	1.669	-0.619	0.9891
$r_m = 10\%$	5.122	2.824	2.229	2.049	1.446	1.857	-0.7202	0.987
$r_m = 13\%$	5.926	3.520	2.555	2.417	1.707	2.22	-0.7024	0.9928
Forced collapsing model fit						1.581	-0.6101	0.5271
$\pi_{q x/rd}$	3.74	2.29	1.79	1.72	1.27			
$S_{\pi_q(r_m) x/rd}$	1.6	0.81	0.55	0.48	0.31			
$\mathcal{E}_{\pi_q(r_m) x/rd}$ (%)	42.2	35.6	30.8	27.7	14.5			

หมายเหตุ	q	คือ	Γ_j
	$\pi_{q x/rd}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ประเมินวัดที่ตำแหน่ง x/rd
	$S_{\pi_q(r_m) x/rd}$	คือ	Unbiased standard deviation ของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ตำแหน่ง x/rd
	$\mathcal{E}_{\pi_q(r_m) x/rd}$	คือ	scatter ของ π_q บนชุดข้อมูล Sample = (r_m) ที่ตำแหน่ง x/rd

ตารางที่ 7.5 สรุปสัมประสิทธิ์ของ model fit เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ A_q

	$A_q(r_m) = C_3 r_m^3 + C_2 r_m^2 + C_1 r_m + C_0$				R^2
	C_3	C_2	C_1	$C_0 = A_q(0)$	
Entrainment ($q = E_1$)	-	-	5.333	1	0.8989
	-	39.16	1.269		0.9916
	-412.4	117.6	-2.122		0.9990
Entrainment ($q = E_2$)	-	-	3.712		0.8619
	-	32.97	0.2905		0.9840
	-417.9	112.5	-3.147		0.9981
Trajectory ($q = y_{CM, \omega_{j,x} }$)	-	-	3.511	0.63	0.9385
	-	16.2	1.83		0.9800
	-414.8	95.08	-1.581		0.9995
Circulation ($q = \Gamma_j$)	-	-	8.416	1.037	0.9797
	-	24.87	5.835		0.9997
	41.81	16.91	6.179		0.9996

ตารางที่ 7.6 สรุปสัมประสิทธิ์ของ model fit เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ B_q

	$B_q(r_m) = D_3 r_m^3 + D_2 r_m^2 + D_1 r_m + D_0$				R^2
	D_3	D_2	D_1	$D_0 = B_q(0)$	
Entrainment ($q = E_1$)	-	-	0.7772	0.5573	0.6628
	-	6.964	0.05445		0.7463
	-354.2	74.33	-2.858		0.9014
Entrainment ($q = E_2$)	-	-	0.8835	0.5573	0.708
	-	6.637	0.1946		0.7744
	-356.9	74.52	-2.74		0.9122
Trajectory ($q = y_{CM, \omega_{j,x} }$)	-	-	0.7616	0.3257	0.8832
	-	-3.415	1.116		0.9402
	-66	9.139	0.5733		0.9555
Circulation ($q = \Gamma_j$)	-	-	-1.586	-0.4879	0.6127
	-	-17.69	0.2495		0.7232
	993.8	-206.7	8.422		0.9901

ตารางที่ 7.7 ค่า scatter ของชุดข้อมูลจากการประยุกต์ใช้มาตรวัด s_A กับปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ

$$\pi_q \text{ โดยที่ } s_A = A_q(r_m)/A_q(0)$$

$\left[\pi_q = \frac{\pi_q}{s_A} \right]$	$A_q(r_m) = C_3 r_m^3 + C_2 r_m^2 + C_1 r_m + C_0$				$\varepsilon_{\pi_q(r_m)}(\%)$
	C_3	C_2	C_1	$C_0 = A_q(0)$	
$\frac{(E_1 - 1)/a_E(r)}{s_A}$	-	-	5.333	1	6.59 - 7.32
	-	39.16	1.269		3.76 - 6.27
	-412.4	117.6	-2.122		3.92 - 6.69
$\frac{(E_2 - 1)/a_E(r)}{s_A}$	-	-	3.712		6.59 - 10.1
	-	32.97	0.2905		4.04 - 6.92
	-417.9	112.5	-3.147		4.16 - 7.37
$\frac{y_{CM} _{\omega_{mj,x}}/r^{C_y}d}{s_A}$	-	-	3.511	0.63	6.39 - 7.81
	-	16.2	1.83		4.55 - 6.75
	-414.8	95.08	-1.581		3.23 - 6.62
$\frac{\Gamma_j/u_{cf}r^{C_\Gamma}d}{s_A}$	-	-	8.416	1.037	9.37 - 20.2
	-	24.87	5.835		8.21 - 18.0
	41.81	16.91	6.179		8.25 - 18.1
Coefficient of scaling law					
Entrainment : $a_E(r) = 0.9r + 1.4$					
Trajectory : $C_y = 1.36$					
Circulation : $C_\Gamma = 0.94$					

$\left[\frac{\pi_q^r}{s_A s_B} \right]$	$A_q(r_m) = C_3 r_m^3 + C_2 r_m^2 + C_1 r_m + C_0$				$B_q(r_m) = D_3 r_m^3 + D_2 r_m^2 + D_1 r_m + D_0$				$\varepsilon_{\pi_q(r_m)} (\%)$	
	C_3	C_2	C_1	$C_0 = A_q(0)$	D_3	D_2	D_1	$D_0 = B_q(0)$		
$\frac{(E_1 - 1)/a_E(r)}{s_A s_B},$ $a_E(r) = 0.9r + 1.4$	-	39.16	1.269	1	-	-	0.7772	0.5573	2.89 - 4.79	
	-	-	-		-	-	6.964		0.05445	2.99 - 4.81
	-	-	-		-	-354.2	74.33		-2.858	3.40 - 6.40
	-	-	-		-	-	-		0.8835	2.99 - 4.90
$\frac{(E_2 - 1)/a_E(r)}{s_A s_B},$ $a_E(r) = 0.9r + 1.4$	-	32.97	0.2905	0.63	-	6.637	0.1946	0.3257	3.09 - 4.92	
	-	-	-		-	-356.9	74.52		-2.74	3.53 - 6.59
	-	-	-		-	-	-		0.7616	3.70 - 4.15
	-	-	-		-	-	-3.415		1.116	3.61 - 3.83
$\frac{y_{CM _{\theta_{px}}} / r^{c_y} d}{s_A s_B},$ $C_y = 1.36$	-	16.2	1.83	0.63	-66	9.139	0.5733	0.3257	3.73 - 4.27	
	-	-	-		-	-	-		0.7616	1.84 - 2.87
	-414.8	95.08	-1.581		-	-	-3.415		1.116	1.73 - 2.46
	-	-	-		-	-66	9.139		0.5733	1.72 - 2.48
$\frac{\Gamma_j / u_q r^{c_T} d}{s_A s_B},$ $C_T = 0.94$	-	24.87	5.835	1.037	-	-	-1.586	-0.4879	5.34 - 10.1	
	-	-	-		-	-	-17.69		0.2495	4.91 - 9.39
	-	-	-		-	993.8	-206.7		8.422	3.24 - 4.46
	-	-	-		-	-	-		-	-

ตารางที่ 7.8 ค่า scatter ของชุดข้อมูลจากการประยุกต์ใช้มาตรวัด $s_A s_B$ กับปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ π_q โดยที่ $s_A = A_q(r_m)/A_q(0)$

และ $s_B = (x/rd)^{B_q(r_m) - B_q(0)}$

$\left[\pi'_q = \frac{\pi_q}{s_A} \right]$	$A_q(r_m) = C_3 r_m^3 + C_2 r_m^2 + C_1 r_m + C_0$				$\varepsilon_{\pi'_q(r_m)} (\%)$	$\pi'_q = A'_q(x/rd)^{B'_q}$		
	C_3	C_2	C_1	$C_0 = A_q(0)$		A'_q	B'_q	$R_{\pi'_q}^2$
$\frac{(E_1 - 1)/a_E(r)}{s_A}$	-	39.16	1.269	1	3.76 - 6.27	0.995	0.5959	0.9796
$\frac{(E_2 - 1)/a_E(r)}{s_A}$	-	32.97	0.2905	0.63	4.04 - 6.92	0.9952	0.6032	0.9785
$\frac{y_{CM_j(\phi_j, x)} / r^{C_y} d}{s_A}$	-	16.2	1.83		4.55 - 6.75	0.6296	0.3744	0.9656
$\frac{\Gamma_j / u_{cf} r^{C_T} d}{s_A}$	-414.8	95.08	-1.581		3.23 - 6.62	0.6326	0.374	0.9823
$\frac{\Gamma_j / u_{cf} r^{C_T} d}{s_A}$	-	24.87	5.835	1.037	8.21 - 18.0	1.025	-0.587	0.8745
Coefficient of scaling law								
Entrainment : $a_E(r) = 0.9r + 1.4$								
Trajectory : $C_y = 1.36$								
Circulation : $C_T = 0.94$								

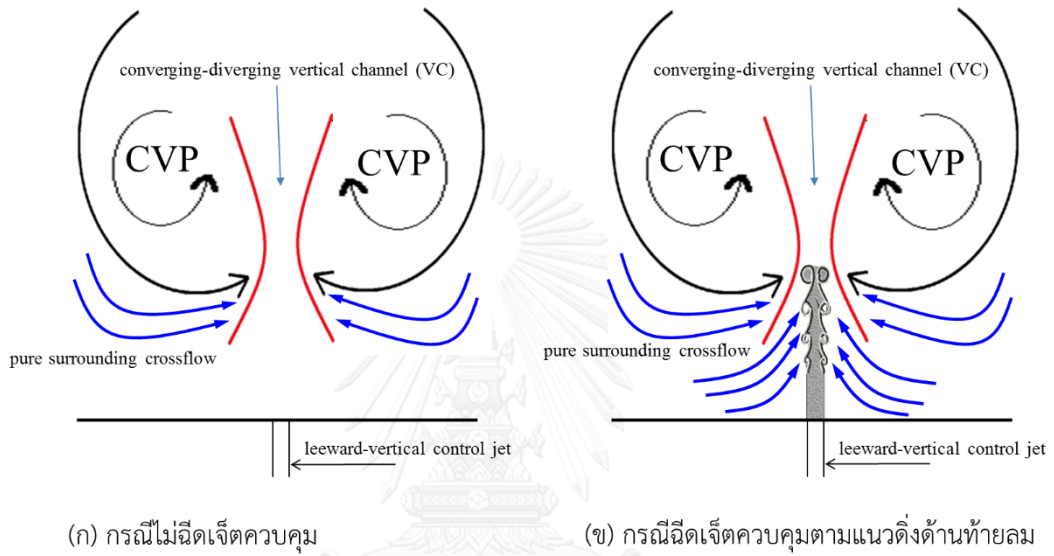
ตารางที่ 7.9 สรุป scaling law และสัมประสิทธิ์จาก power-law model fit ของปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติ $\pi'_q = \pi_q / s_A$ โดยที่ $s_A = A_q(r_m) / A_q(0)$

$\left[\frac{\pi_q''}{S_A S_B} \right]$	$A_q(r_m) = C_3 r_m^3 + C_2 r_m^2 + C_1 r_m + C_0$			$B_q(r_m) = D_3 r_m^3 + D_2 r_m^2 + D_1 r_m + D_0$			$\varepsilon_{\pi_q''(r_m)} (\%)$		
	C_3	C_2	C_1	$C_0 = A_q(0)$	D_3	D_2		D_1	$D_0 = B_q(0)$
$\frac{(E_1 - 1)/a_E(r)}{S_A S_B}$	-	39.16	1.269	1	-	-	0.7772	0.5573	2.89 - 4.79
	$\pi_{E_1}'' = A_{E_1}''(x/rd)^{B_{E_1}}; A_{E_1}'' = 0.9948, B_{E_1}'' = 0.5437, R_{\pi_q''}^2 = 0.9823$								
$\frac{(E_2 - 1)/a_E(r)}{S_A S_B}$	-	32.97	0.2905	1	-	-	0.8835	0.5573	2.99 - 4.90
	$\pi_{E_2}'' = A_{E_2}''(x/rd)^{B_{E_2}}; A_{E_2}'' = 0.9949, B_{E_2}'' = 0.544, R_{\pi_q''}^2 = 0.9815$								
$\frac{y_{\text{car} (0,x)} / r^{C_y} d}{S_A S_B}$		16.2	1.83	0.63	-	-	0.7616	0.3257	3.70 - 4.15
	$\pi_y'' = A_y''(x/rd)^{B_y}; A_y'' = 0.6295, B_y'' = 0.3237, R_{\pi_q''}^2 = 0.9665$								
	-414.8	95.08	-1.581	0.63	-	-	-	0.7616	0.3257
$\frac{\Gamma_j / u_q r^{C_\Gamma} d}{S_A S_B}$	$\pi_y'' = A_y''(x/rd)^{B_y}; A_y'' = 0.6326, B_y'' = 0.3236, R_{\pi_q''}^2 = 0.99$								
	-	24.87	5.835	1.037	993.8	-206.7	8.422	-0.4879	3.24 - 4.46
$\pi_{\Gamma}'' = A_{\Gamma}''(x/rd)^{B_{\Gamma}}; A_{\Gamma}'' = 1.03, B_{\Gamma}'' = -0.4837, R_{\pi_q''}^2 = 0.9683$									
Coefficient of scaling law									
Entrainment : $a_E(r) = 0.9r + 1.4$									
Trajectory : $C_y = 1.36$									
Circulation : $C_{\Gamma} = 0.94$									

ตารางที่ 7.10 สรุป scaling law และสัมประสิทธิ์จาก power-law model fit ของปริมาณทางฟิสิกส์ไว้มีที่ $\pi_q'' = \pi_q' / S_B = \pi_q' / S_A S_B$ โดยที่ $s_A = A_q(r_m) / A_q(0)$ และ $s_B = (x/rd)^{B_q(r_m) - B_q(0)}$

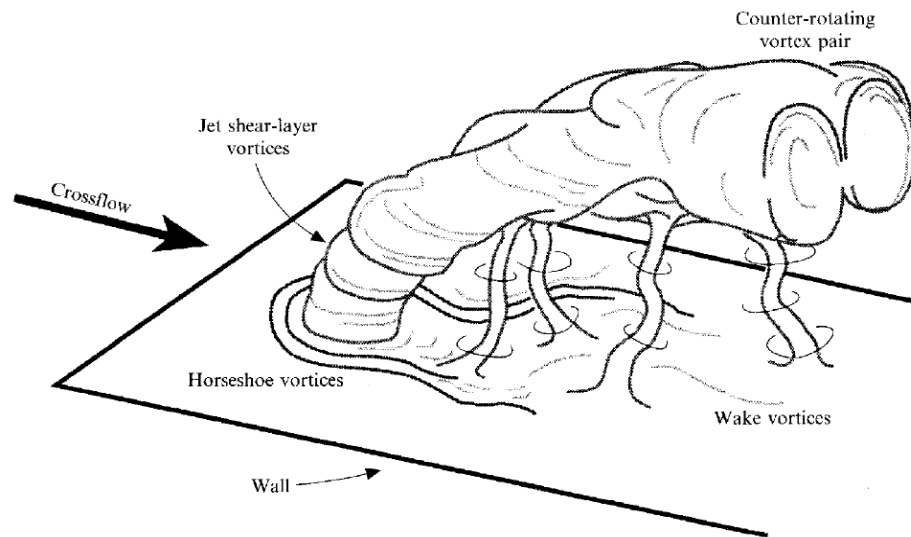
ประมวลรูปภาพ

บทที่ 1

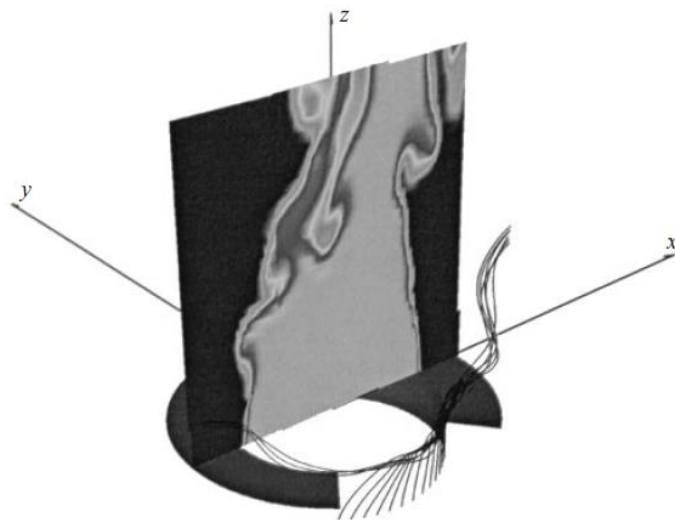


รูปที่ 1.1 การเหนี่ยวนำกระแสลมขวางบริสุทธิ์เข้ามาผสมกับตัวเจ็ต

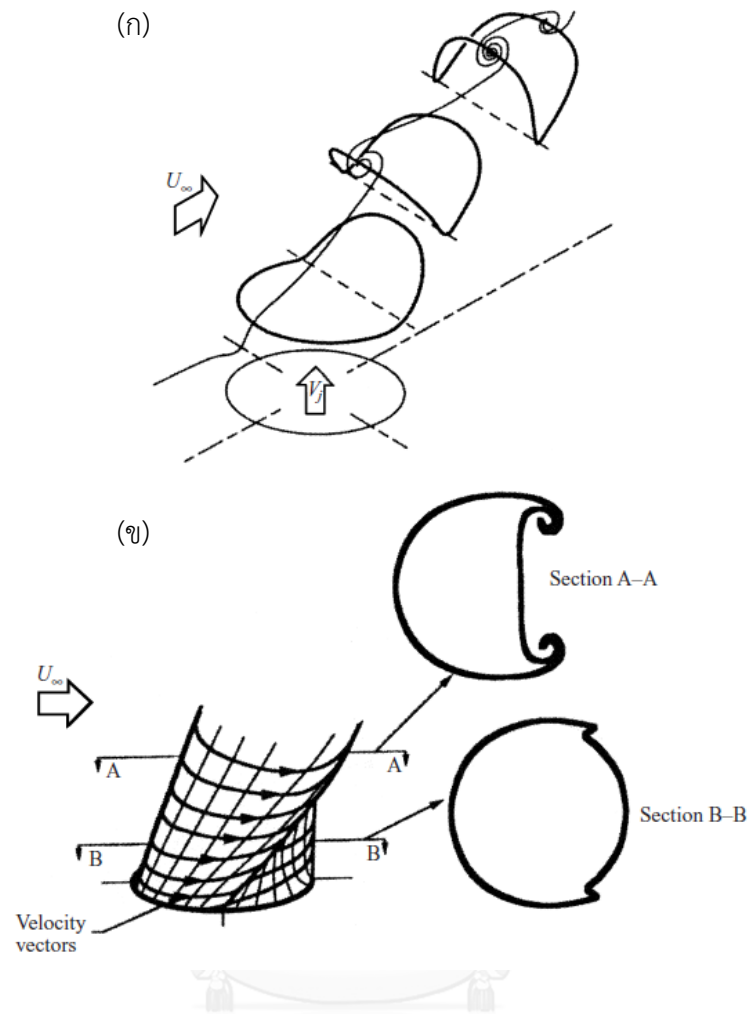
บทที่ 2



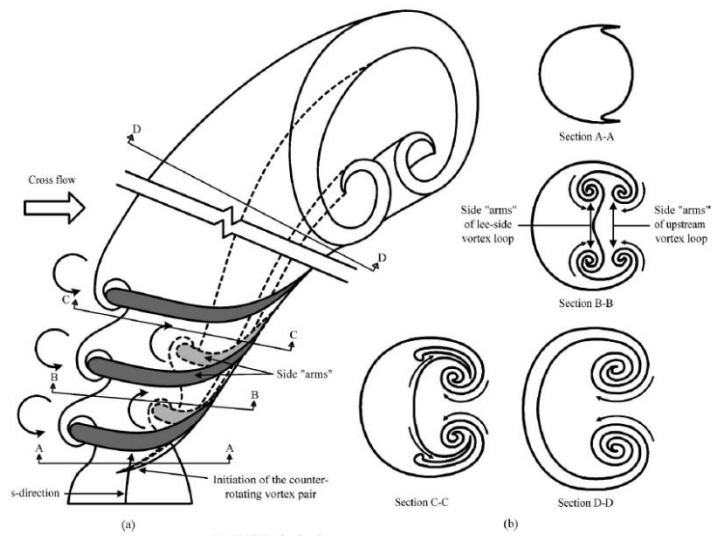
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Fric and Roshko, 1994)



รูปที่ 2.2 Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวขึ้นระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางที่บริเวณด้านข้างปากทางออกของเจ็ต (Yuan *et al.*, 1999)



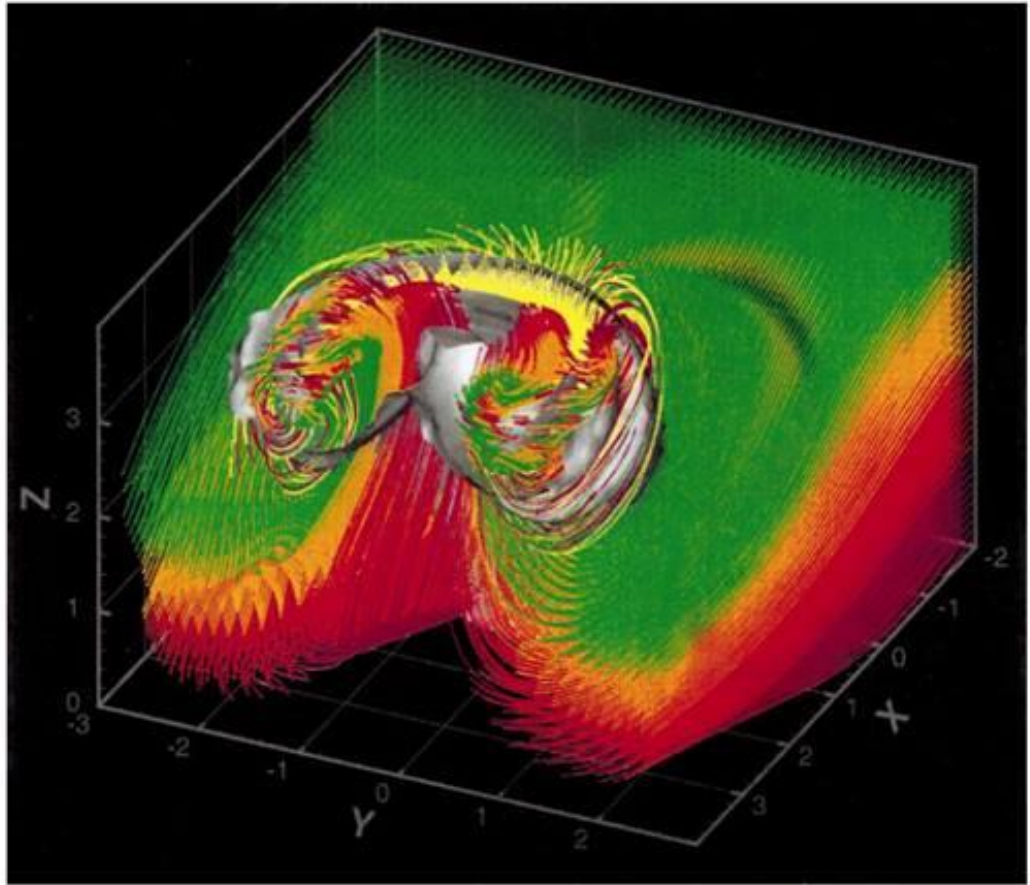
รูปที่ 2.3 การพับตัวของ vortex ring ทำให้เกิดโครงสร้าง CVP
 (ก) มุมมอง isometric ของ jet shear layer vortex ring
 (ข) Schematic diagram ของการเปลี่ยนตำแหน่งของ shear layer vorticity (Cortelezzi and Karagozian, 2001)



รูปที่ 2.4 การเกิดโครงสร้าง CVP จากการพัฒนาตัวของ vortex loop (Lim *et al.*, 2001)



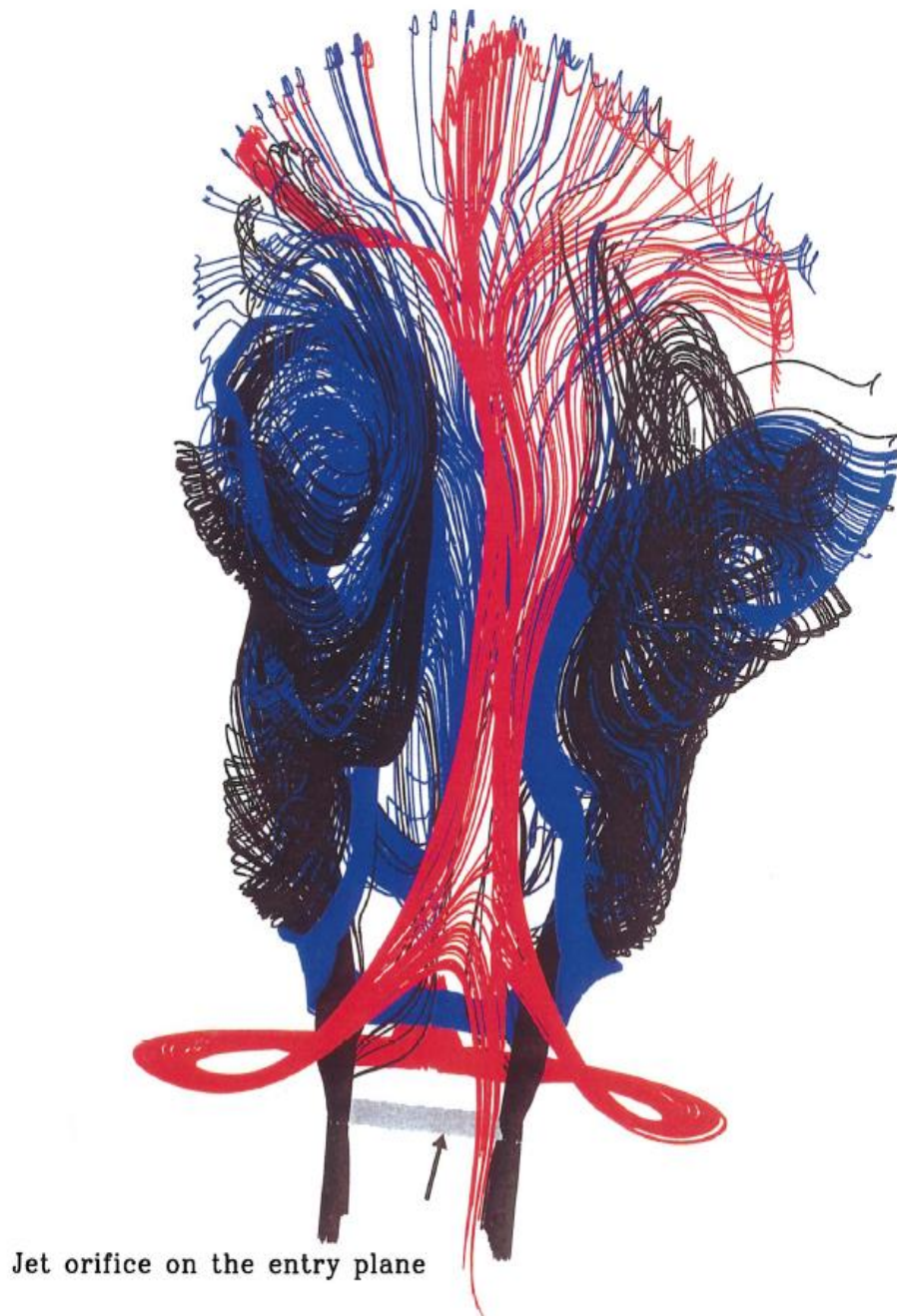
รูปที่ 2.5 วิวัฒนาการของ streamlines ในการก่อตัวของ Kelvin-Helmholtz roller (Sau *et al.*, 2004)



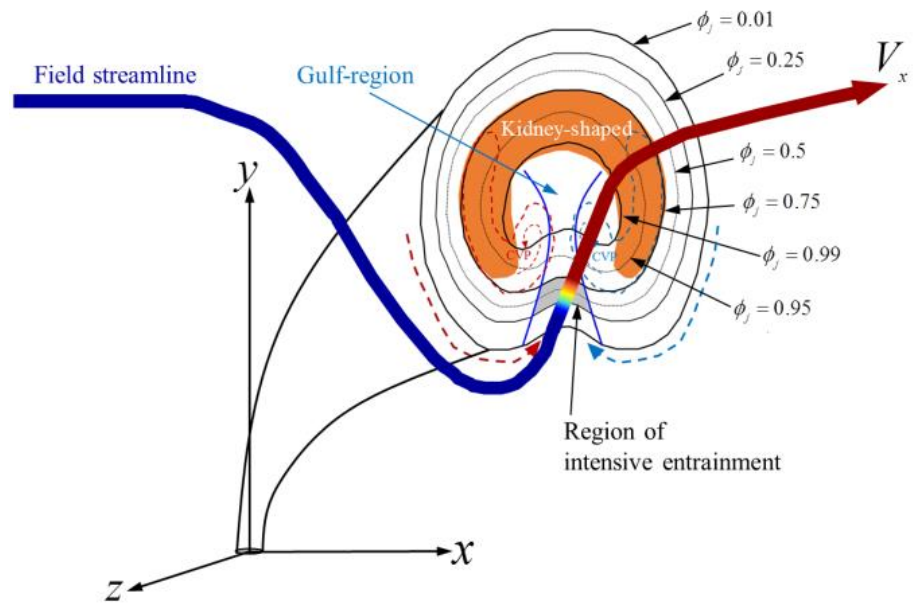
รูปที่ 2.6

Average magnitude of vorticity field
(Cortelezzi and Karagozian, 2001)

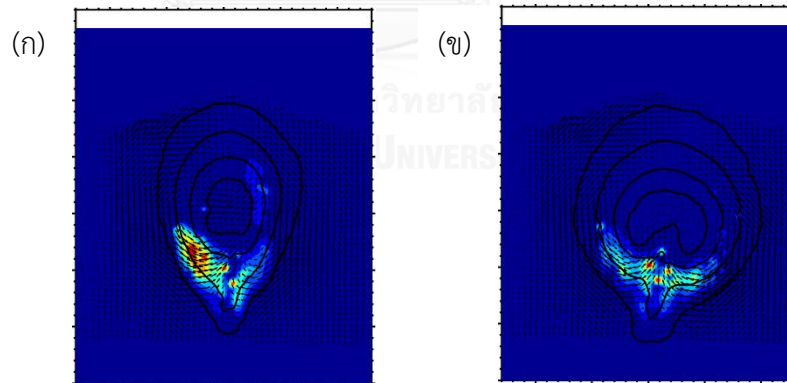
CHULALONGKORN UNIVERSITY



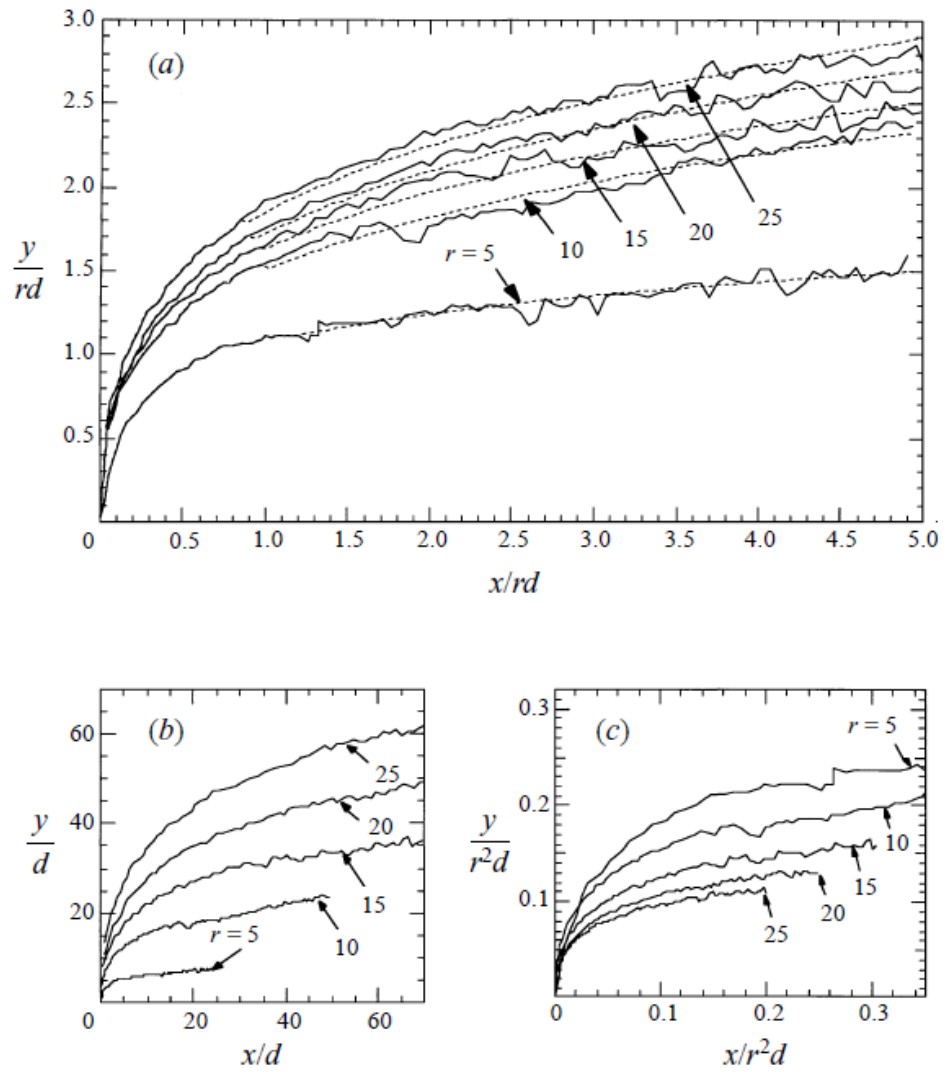
รูปที่ 2.7 Instantaneous of streamline ซึ่งแสดงถึงการที่โครงสร้าง horseshoe vortex ถูกเหนี่ยวนำให้ไปผสมกับเจ็ตผ่านช่องระหว่างคู่ CVP (Sau *et al.*, 2004)



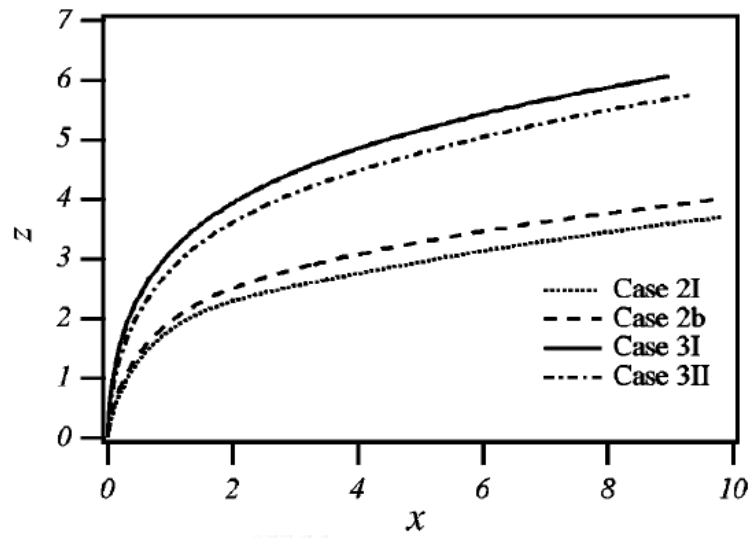
รูปที่ 2.8 ภาพวาดซึ่งแสดงถึงกลไกการเหนี่ยวนำการผสมโดยโครงสร้าง CVP ในระนาบตัดขวางของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Sornphrom and Bunyajitradulya, 2016)



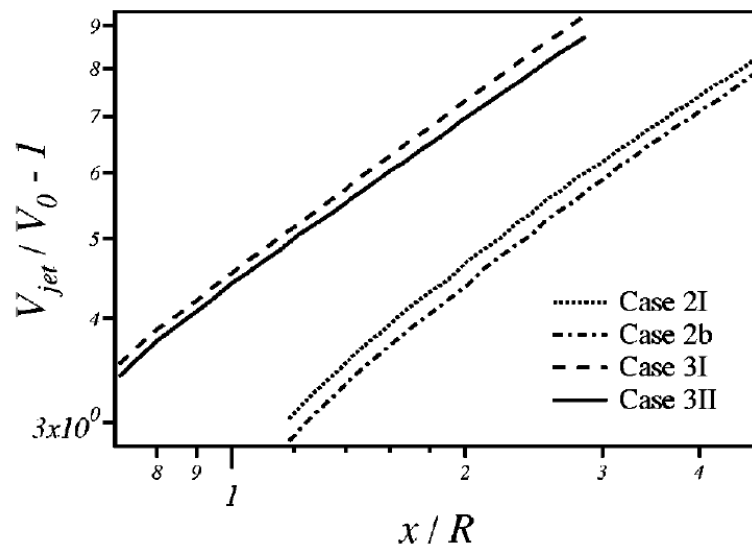
รูปที่ 2.9 บริเวณที่มีการเหนี่ยวนำการผสมสูง
 (ก) กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม
 (ข) กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งมุม ± 165 องศา
 (Na Takuathung and Bunyajitradulya, 2016)



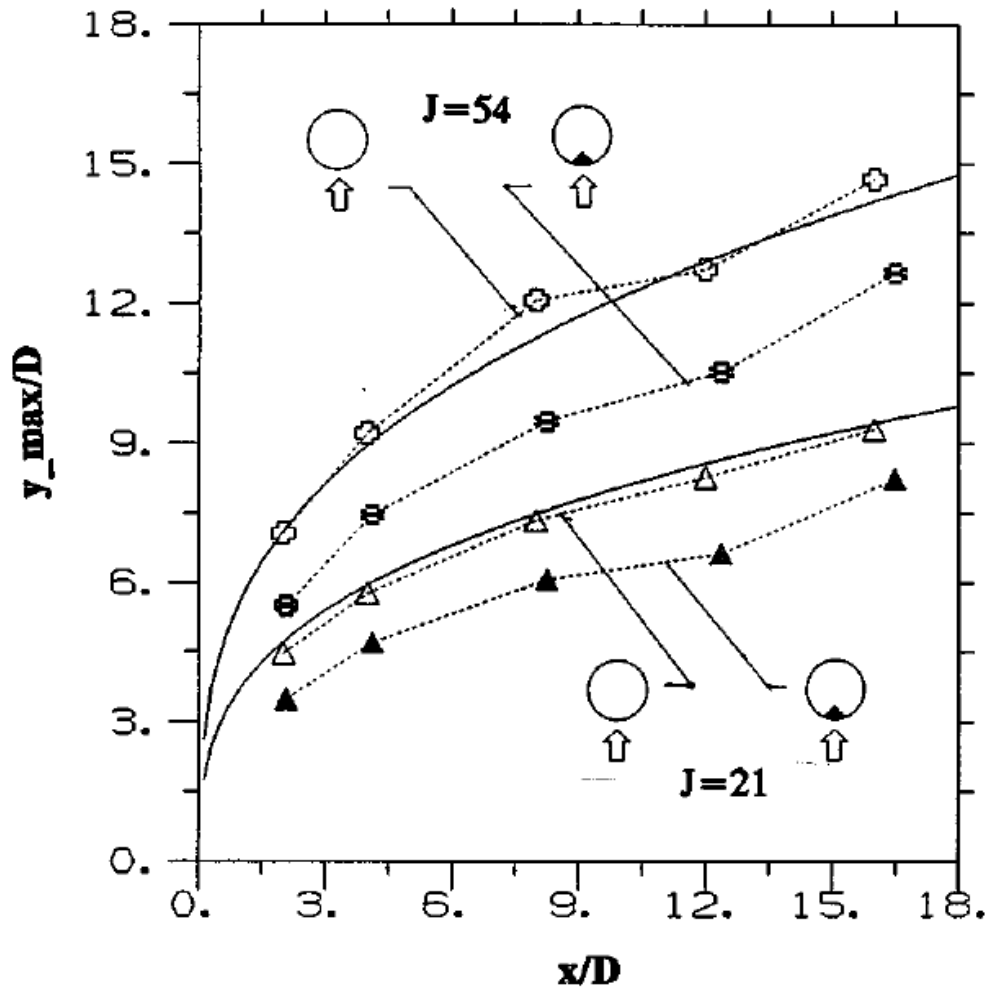
รูปที่ 2.10 การสเกลเส้นทางเดินของเจ็ตในกระแสมวงด้วย rd , d , และ r^2d
(Smith and Mungal, 1998)



รูปที่ 2.11 เส้นทางเดินของเจ็ตบนสเกล rd อยู่ในรูปแบบของ power law (Yuan and Street, 1998)

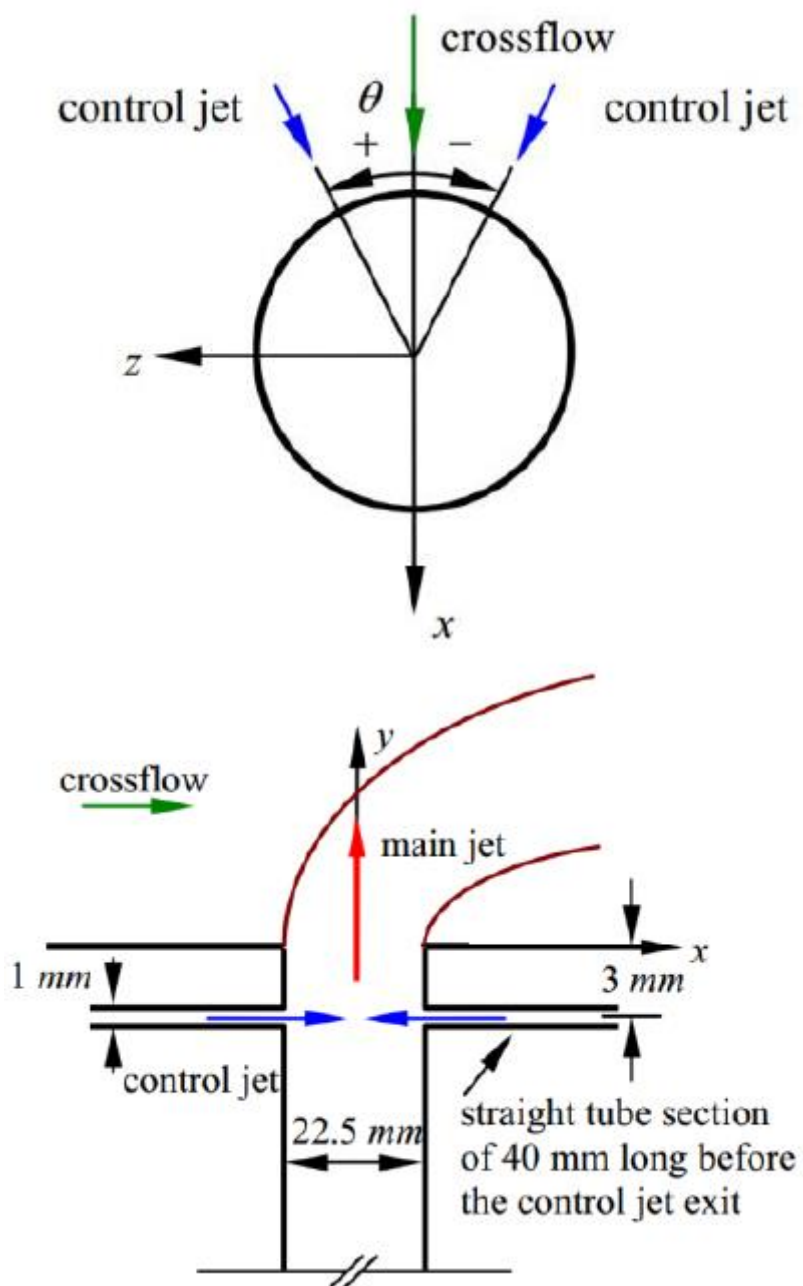


รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\dot{V}_{jet}}{\dot{V}_0} - 1$ และ x/rd บน log-log scale (Yuan and Street, 1998)

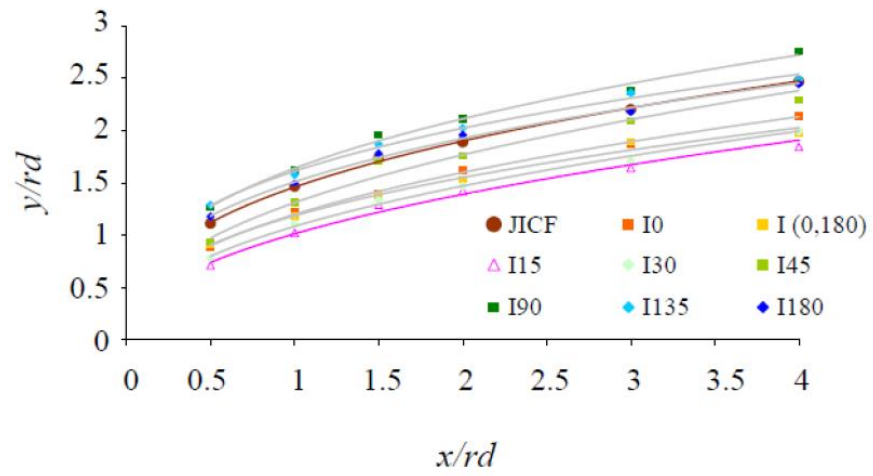


รูปที่ 2.13

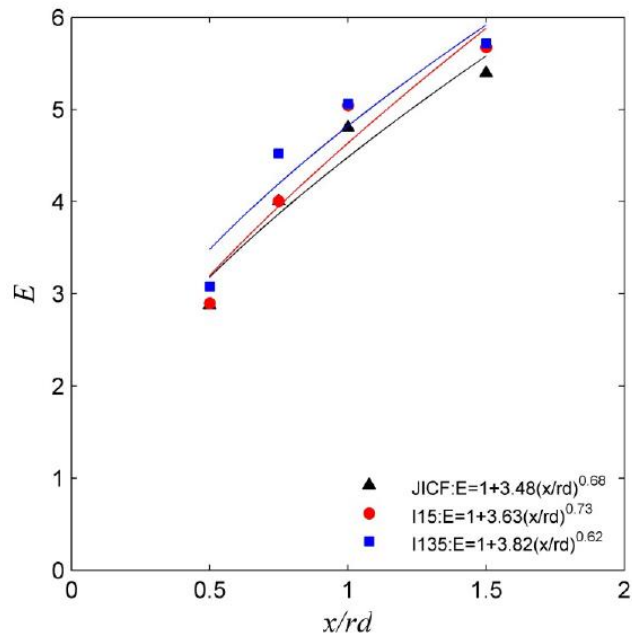
ผลของการติด delta tab ที่มีต่อเส้นทางเดินของเจ็ต
(Zaman and Fross, 1997)



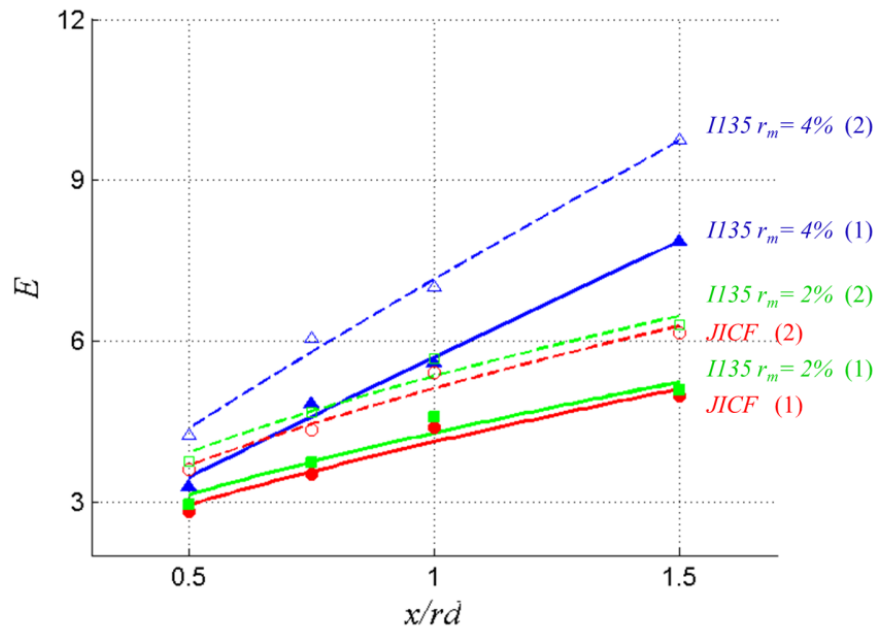
รูปที่ 2.14 ชุดเจ็ทควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (Azimuthal control jet)
(Kornsri *et al.*, 2009)



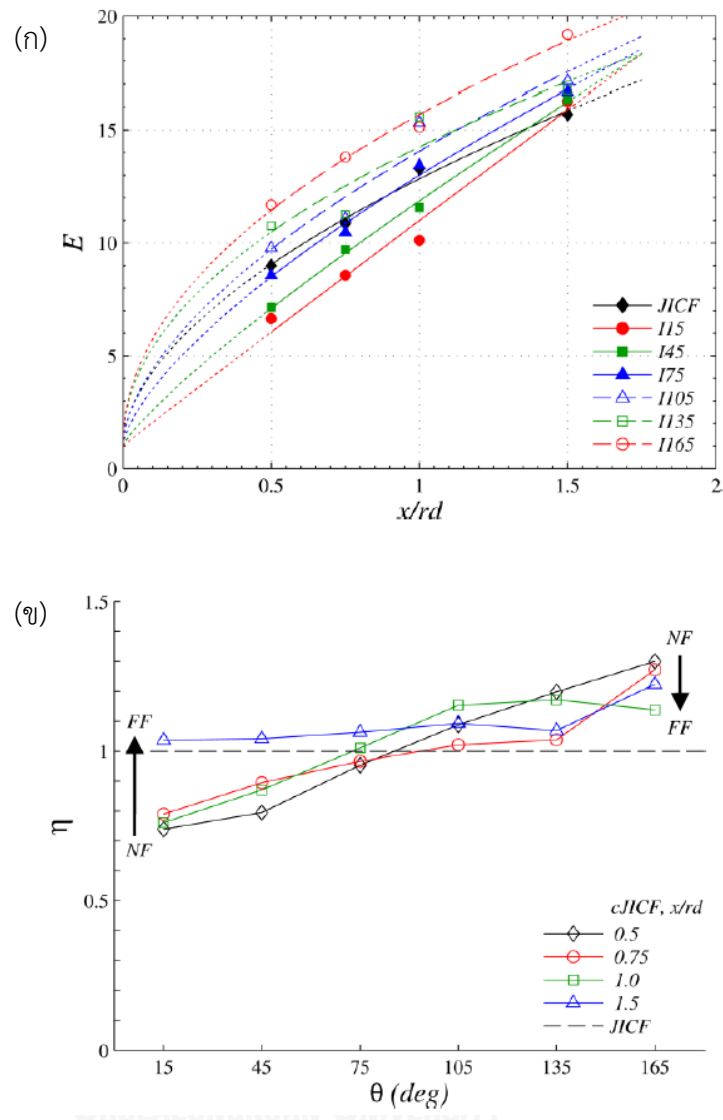
รูปที่ 2.15 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อเส้นทางเดินของเจ็ต (Kornsri *et al.*, 2009)



รูปที่ 2.16 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Witayaprapakorn, 2013)

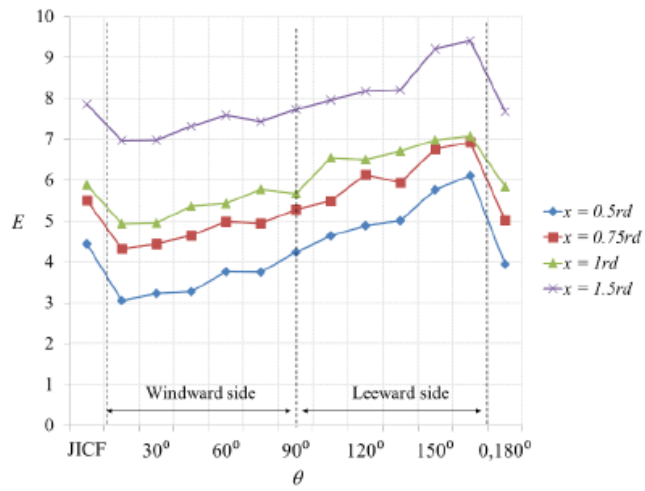


รูปที่ 2.17 ผลของอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (Chaikasetsin *et al.*, 2014)

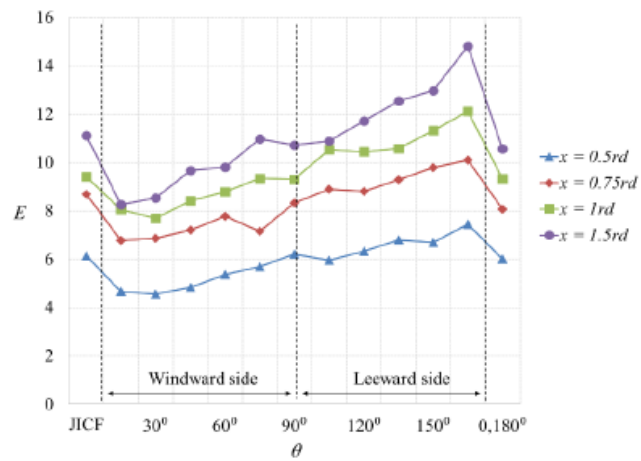


รูปที่ 2.18 (ก) ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรตามแนวการไหล
 (ข) ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ดควบคุมต่อค่าประสิทธิภาพการ
 เหนี่ยวนำการผสม
 (Wangkiat *et al.*, 2015)

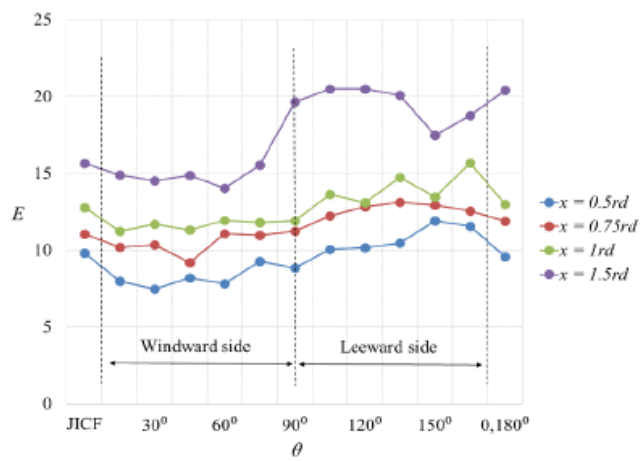
$r = 4$



$r = 8$

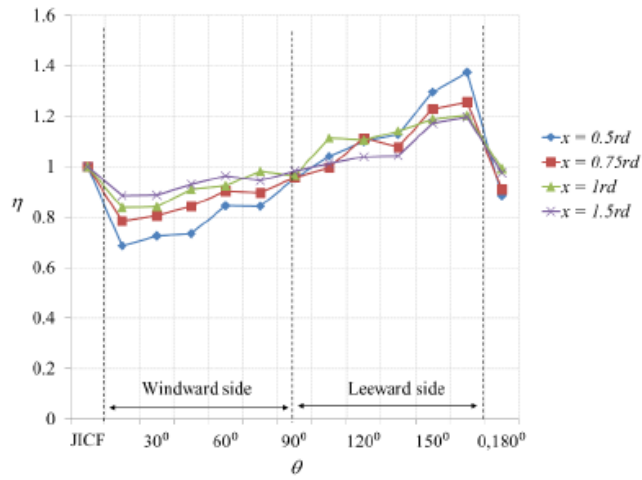


$r = 12$

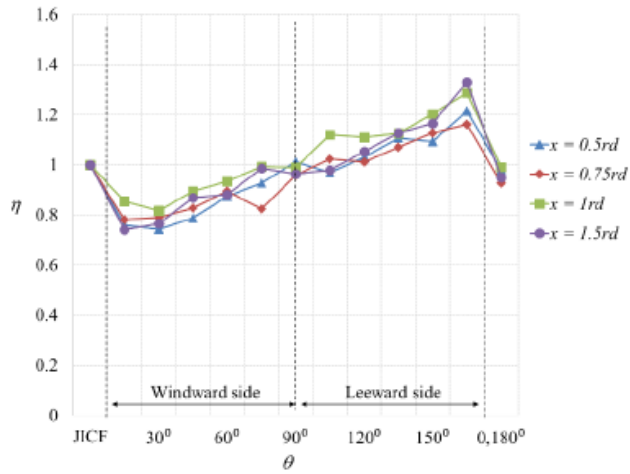


รูปที่ 2.19 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) (Tekhuad, 2015)

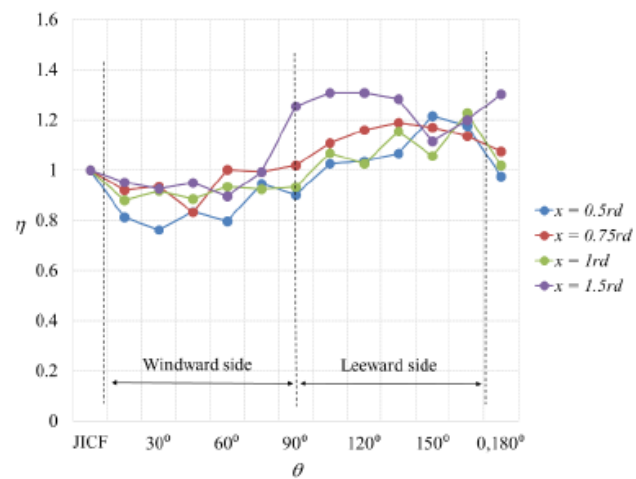
$r = 4$



$r = 8$

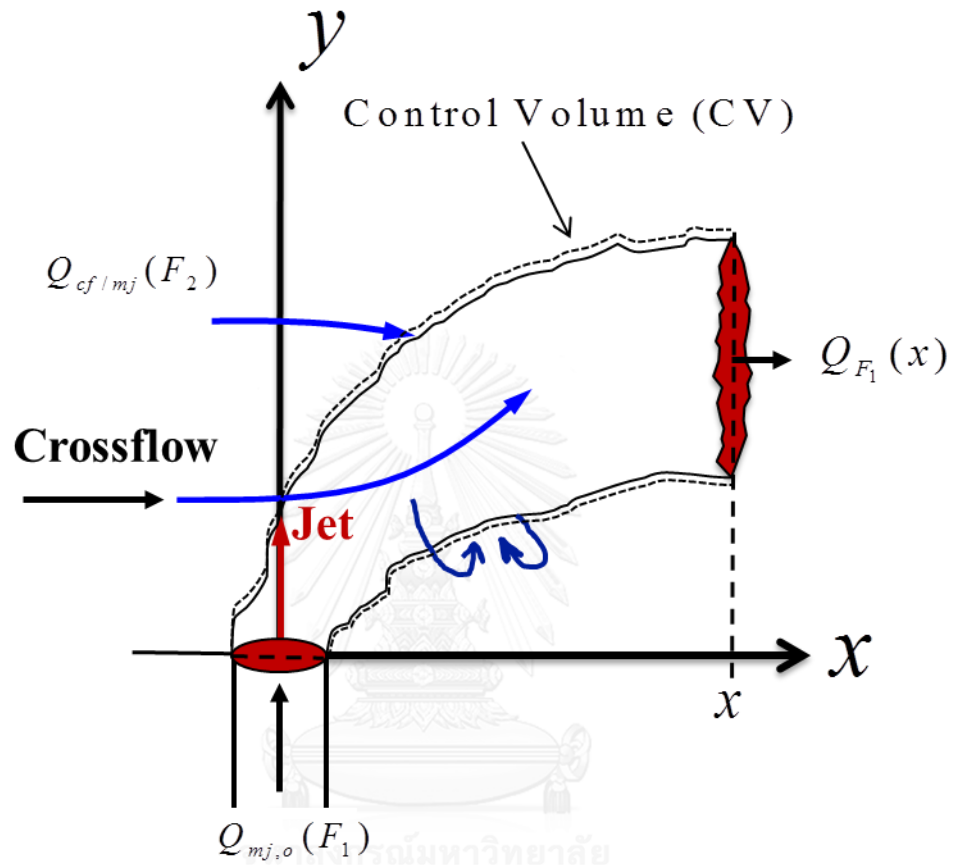


$r = 12$

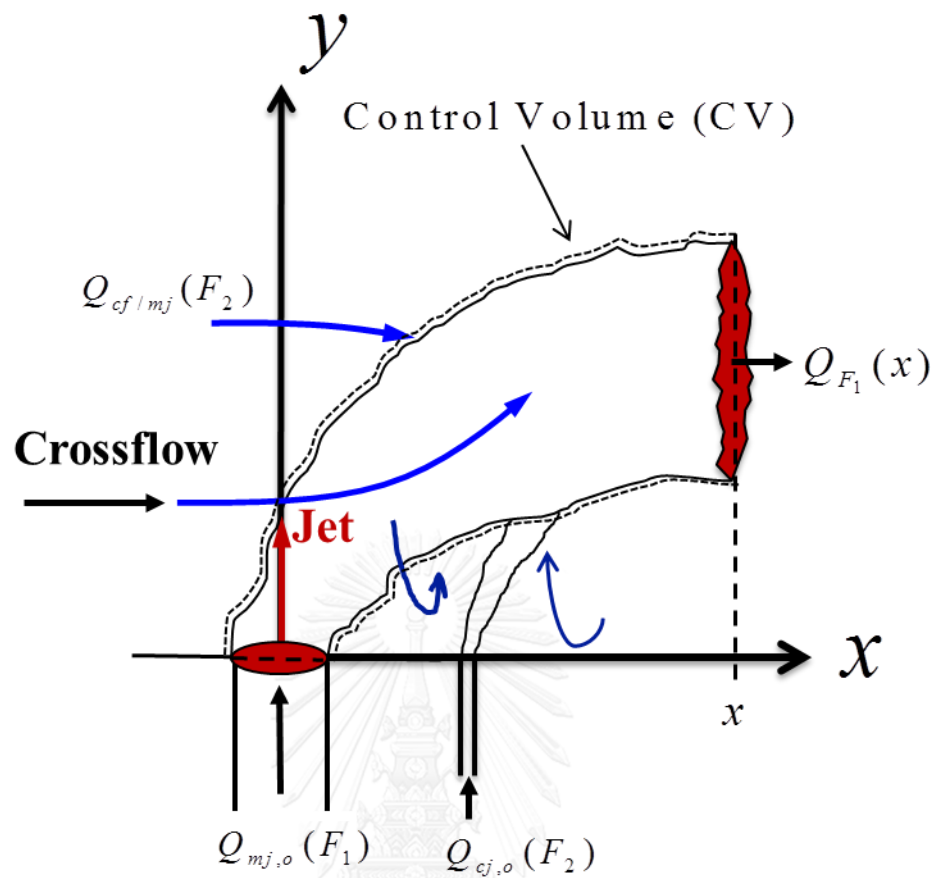


รูปที่ 2.20 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อค่าประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสม (η) (Tekhuad, 2015)

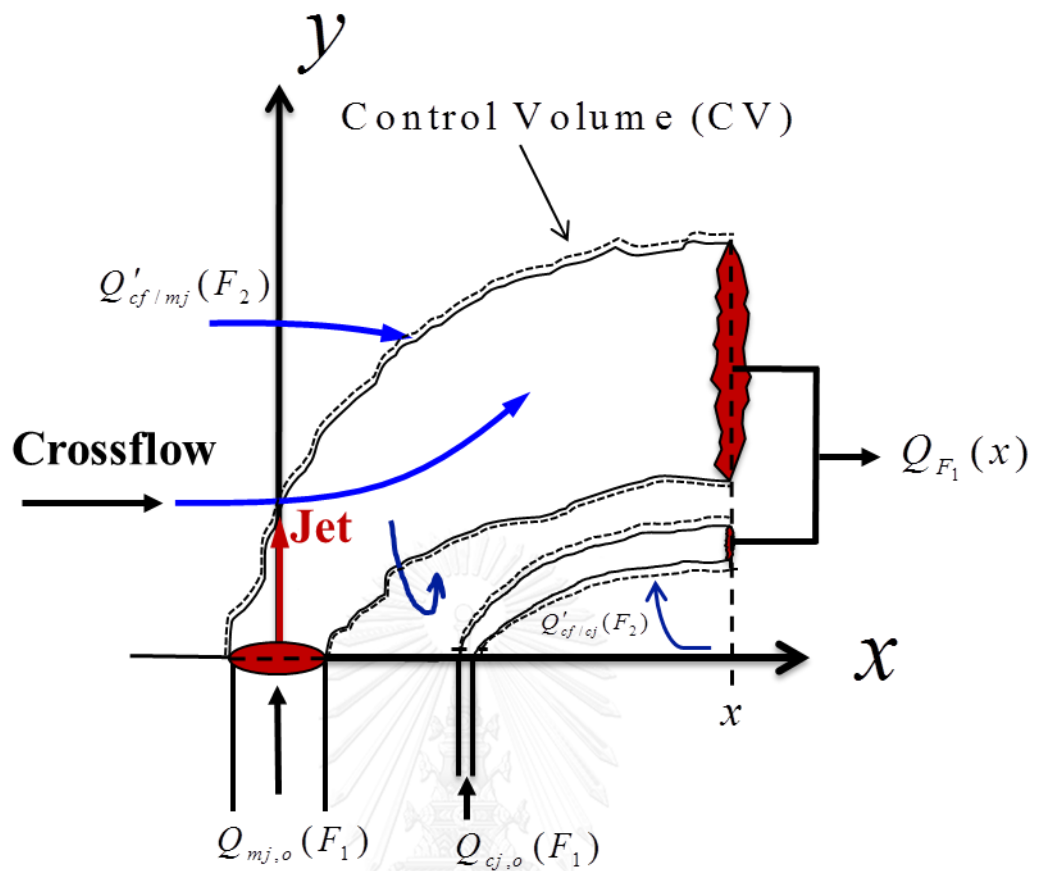
บทที่ 3



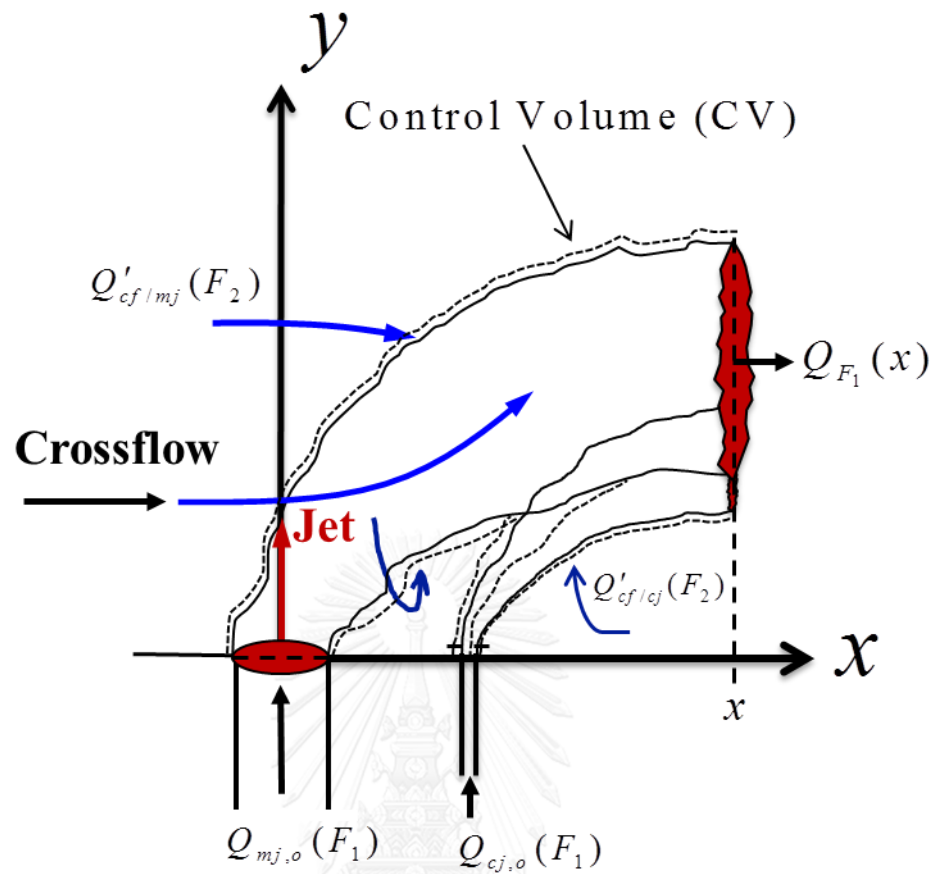
รูปที่ 3.1 ปริมาตรควบคุมแสดงการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางกรณี
ไม่มีการฉีดเจ็ตควบคุม



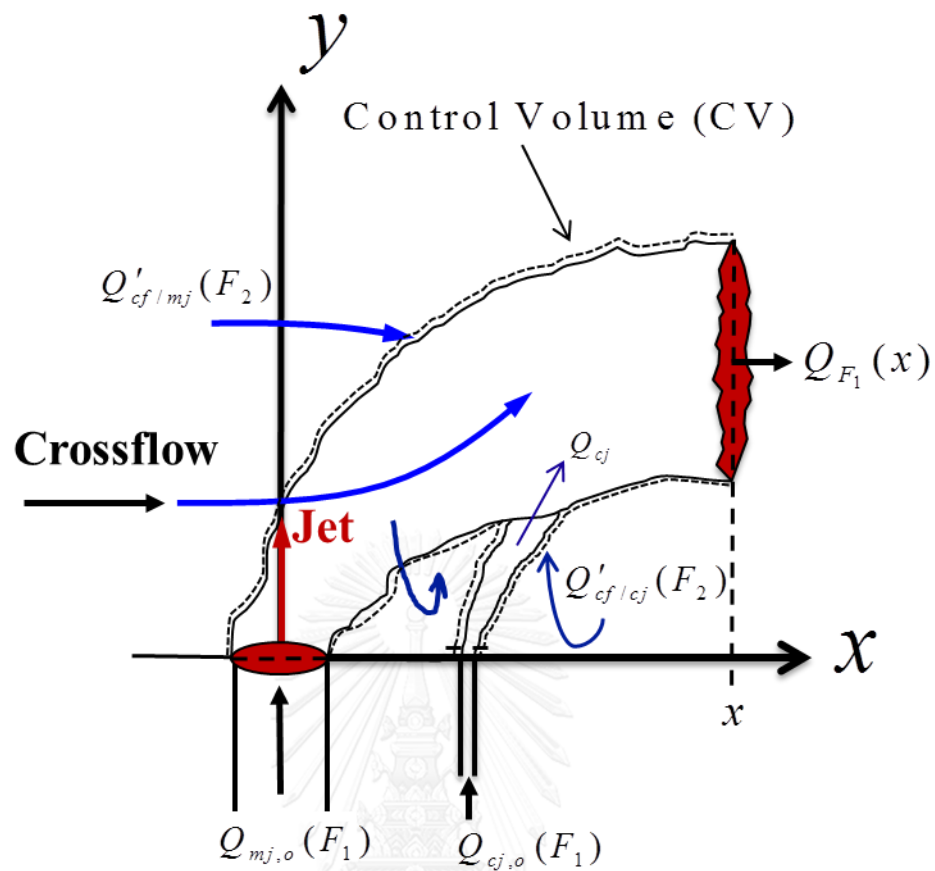
รูปที่ 3.2 ปริมาตรควบคุมแสดงการเหนี่ยวนำการผสมกันที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในกระแสลมขวาง (F_2) และไม่ใช่ของไหลชนิดเดียวกับเจ็ตหลัก (F_1)



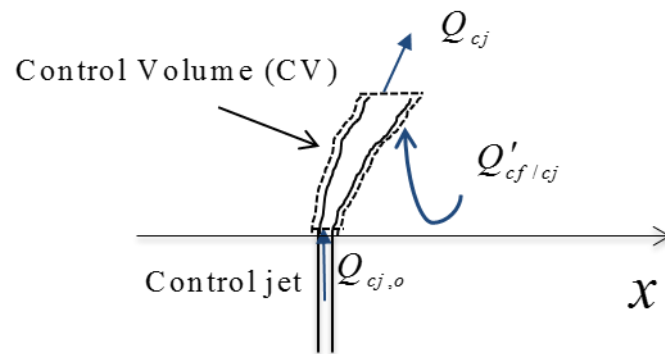
รูปที่ 3.3(ก) ปริมาตรควบคุมแสดงการเหนี่ยวนำการผสมกันที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลัก (F_1) ในกรณีที่มีการไหลของเจ็ตหลักและการไหลของเจ็ตควบคุมยังคงแยกกันอย่างอิสระที่ระนาบตัดขวาง การไหลที่ทำการประเมินวัด E



รูปที่ 3.3(ข) ปริมาตรควบคุมแสดงการเหนี่ยวนำการผสมกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ทควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ทหลัก (F_1) ในกรณีที่เจ็ทควบคุมถูกเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมกับเจ็ทหลักเฉพาะบางส่วน ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งยังไม่ถูกเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมกับเจ็ทหลักที่ระนาบตัดขวางการไหลที่ทำการประเมินวัด E

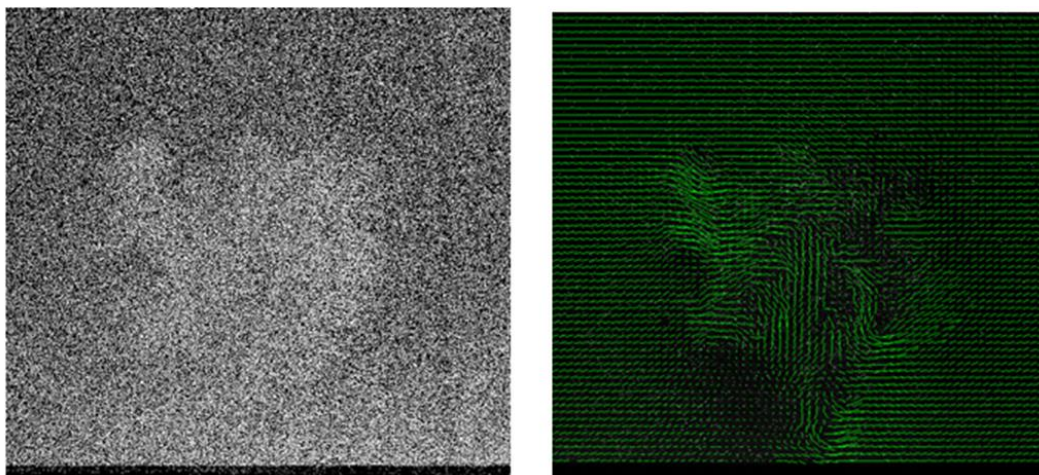


รูปที่ 3.3(ค) ปริมาตรควบคุมแสดงการเหนี่ยวนำการผสมกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมเป็นของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลัก (F_1) ในกรณีที่เจ็ตควบคุมถูกเหนี่ยวนำให้เข้าไปผสมกับเจ็ตหลักหมดแล้วที่ระนาบตัดขวางการไหลที่ทำการประเมินวัด E

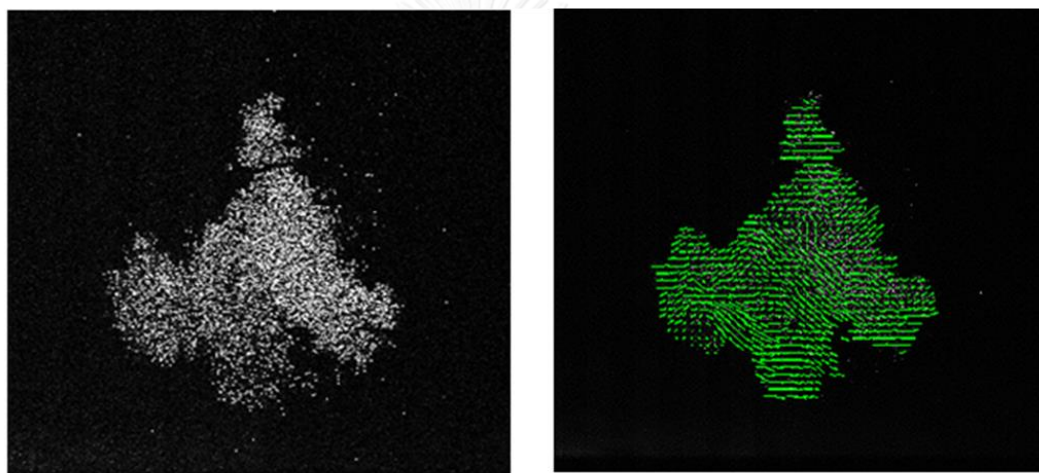


รูปที่ 3.3(ง) ปริมาตรควบคุมของเจ็ตควบคุมก่อนที่จะถูกเหนี่ยวนำเข้าไปผสมกับเจ็ตหลักซึ่งเป็น ปริมาตรควบคุมย่อยของรูปที่ 3.3(ค)





(ก) การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ทหลักและกระแสมขวาง



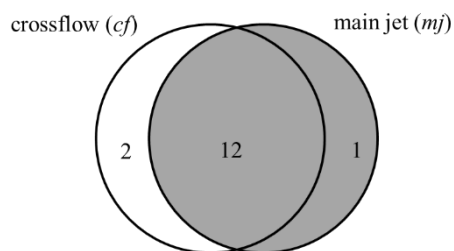
(ข) การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ทหลักเท่านั้น

รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบระหว่างภาพอนุภาคติดตามการไหล ณ ขณะใดๆ (ซ้าย) และภาพเวกเตอร์ความเร็ว ณ ขณะใดๆ (ขวา)

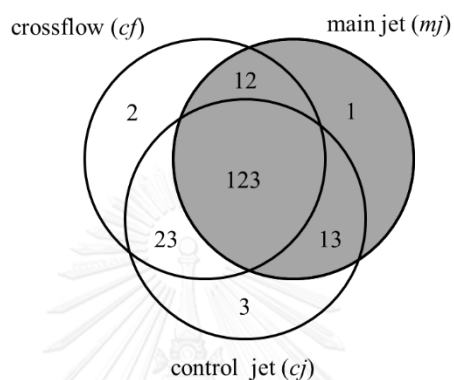
(ก) การใส่อนุภาคติดตามการไหลทั้งในเจ็ทหลักและกระแสมขวาง

(ข) การใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ทหลักเท่านั้น

(Sornphrom and Bunyajitradulya, 2016)



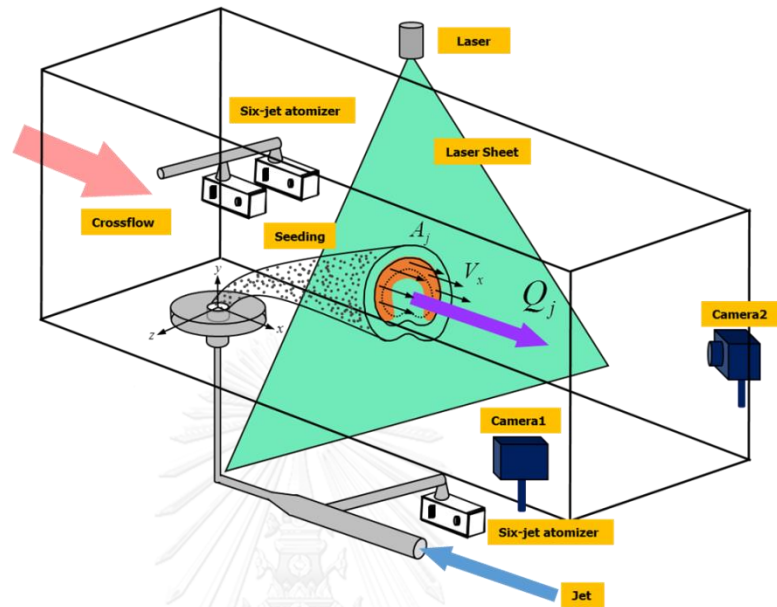
(ก)



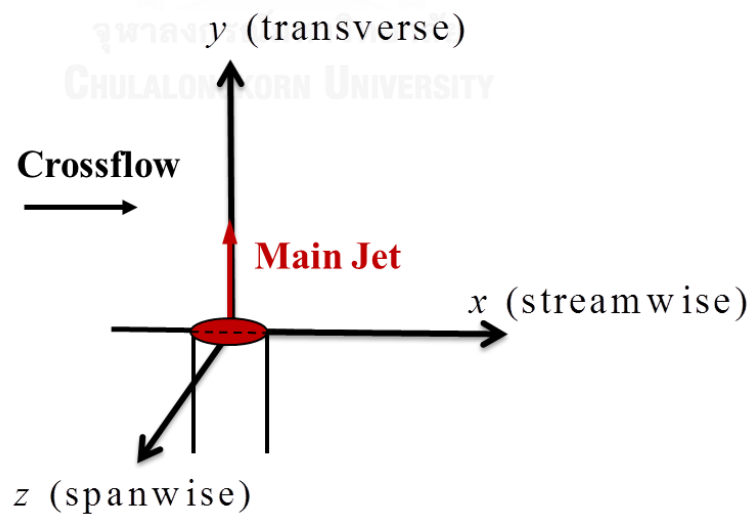
(ข)

- รูปที่ 3.5 แผนภูมิแสดงชนิดของของไหลที่เป็นไปได้ที่จะปรากฏ ณ ตำแหน่ง \vec{x} และเวลา t
 (ก) กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม (JICF) (ข) กรณีฉีดเจ็ตควบคุม (cJICF)
 โดยที่บริเวณที่ถูกแรงแสดงบริเวณที่สามารถพบอนุภาคติดตามการไหลได้จากการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ตหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในการไหลอื่น (กระแสลมขวางและเจ็ตควบคุม) ซึ่งทำให้บริเวณนี้สามารถประเมินวัดความเร็วที่ไม่เป็นศูนย์สมบูรณ์ ($\vec{V} \neq 0$) ได้ด้วย SPIV

บทที่ 4



รูปที่ 4.1 แผนภาพจำลองภาพรวมของการทดลองในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.2

พิกัดอ้างอิงในงานวิจัยนี้



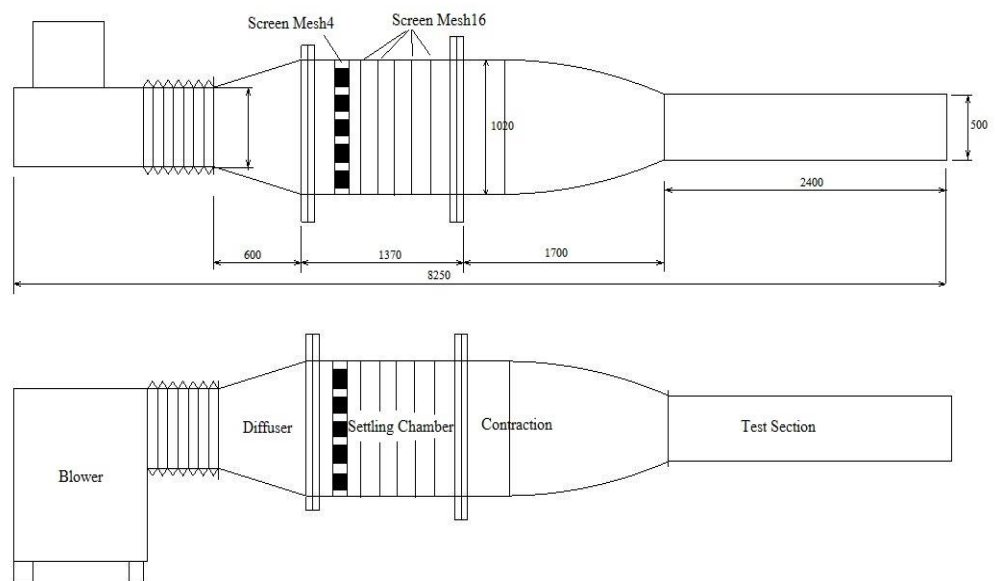
รูปที่ 4.3 อุโมงค์ลมภายในห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล
ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
(Soupramongkol, 2015)



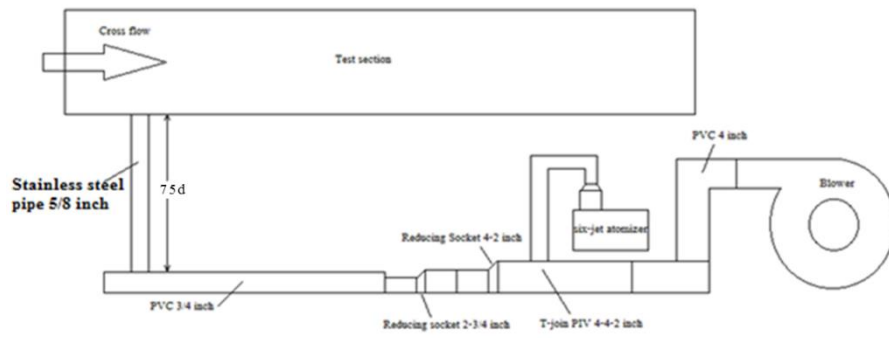
รูปที่ 4.4 พัดลมหอยโข่งแบบ backward curve airfoil blades
(Soupramongkol, 2015)



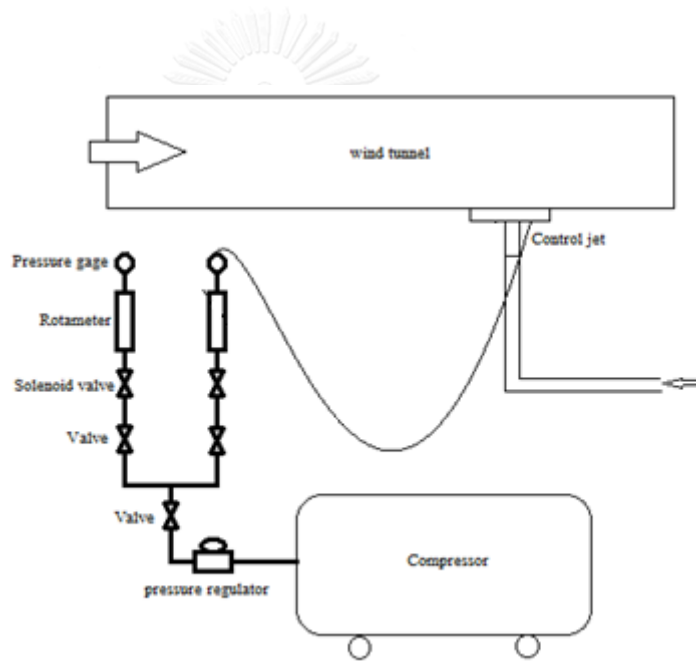
รูปที่ 4.5 เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (ABB™ model ACS401002032, ขนาด 50 Hz, ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz) (Soupramongkol, 2015)



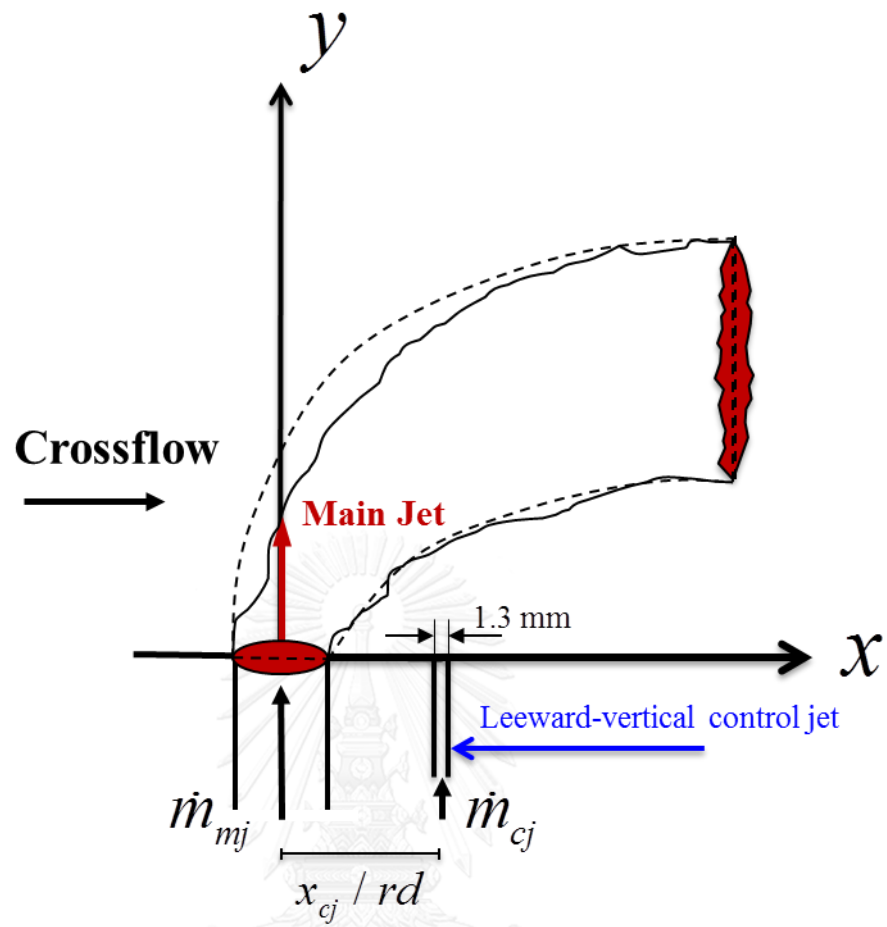
รูปที่ 4.6 Schematic diagram ของอุโมงค์ลม (Soupramongkol, 2015)



รูปที่ 4.7 ส่วนประกอบของชุดเจ็ตหลัก



รูปที่ 4.8 ส่วนประกอบของชุดเจ็ตควบคุม



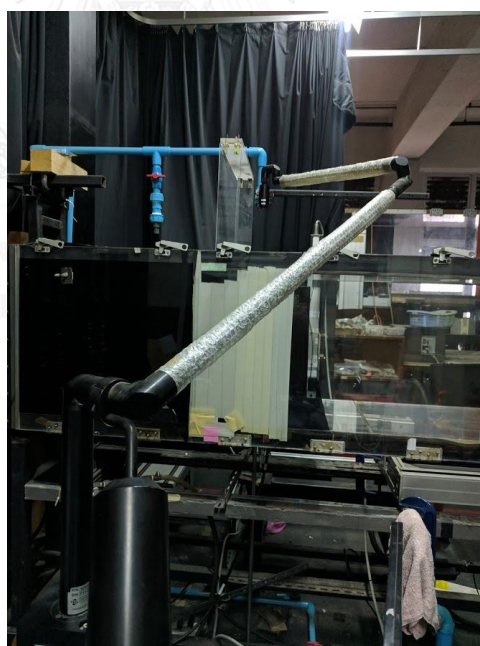
รูปที่ 4.9

ภาพจำลองเจ็ตควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.10 เครื่องกำเนิดเลเซอร์ชนิด ND:YAG ยี่ห้อ New Wave Research™
(model Solo 200XT ซึ่งมีกำลังสูงสุด 200 mJ/pulse ที่ความยาวคลื่น 532 nm)



รูปที่ 4.11 ชุดกระจกสะท้อนแสงที่ถูกติดตั้งไว้ในแขนส่งเลเซอร์
(laser light arm, model 610015)



รูปที่ 4.12 เครื่องปล่อยอนุภาคติดตามการไหล TSI™ six-jet atomizer (TSI™ model 9306A)



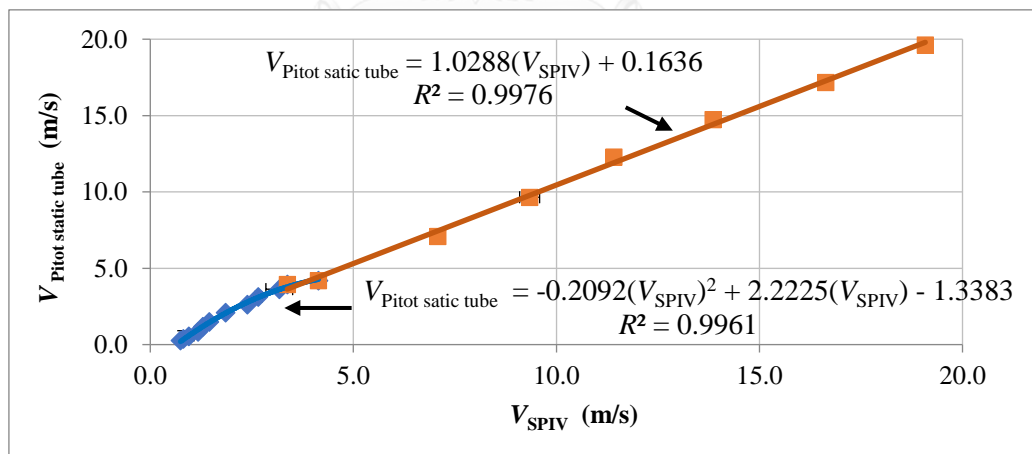
รูปที่ 4.13

กล้อง CCD



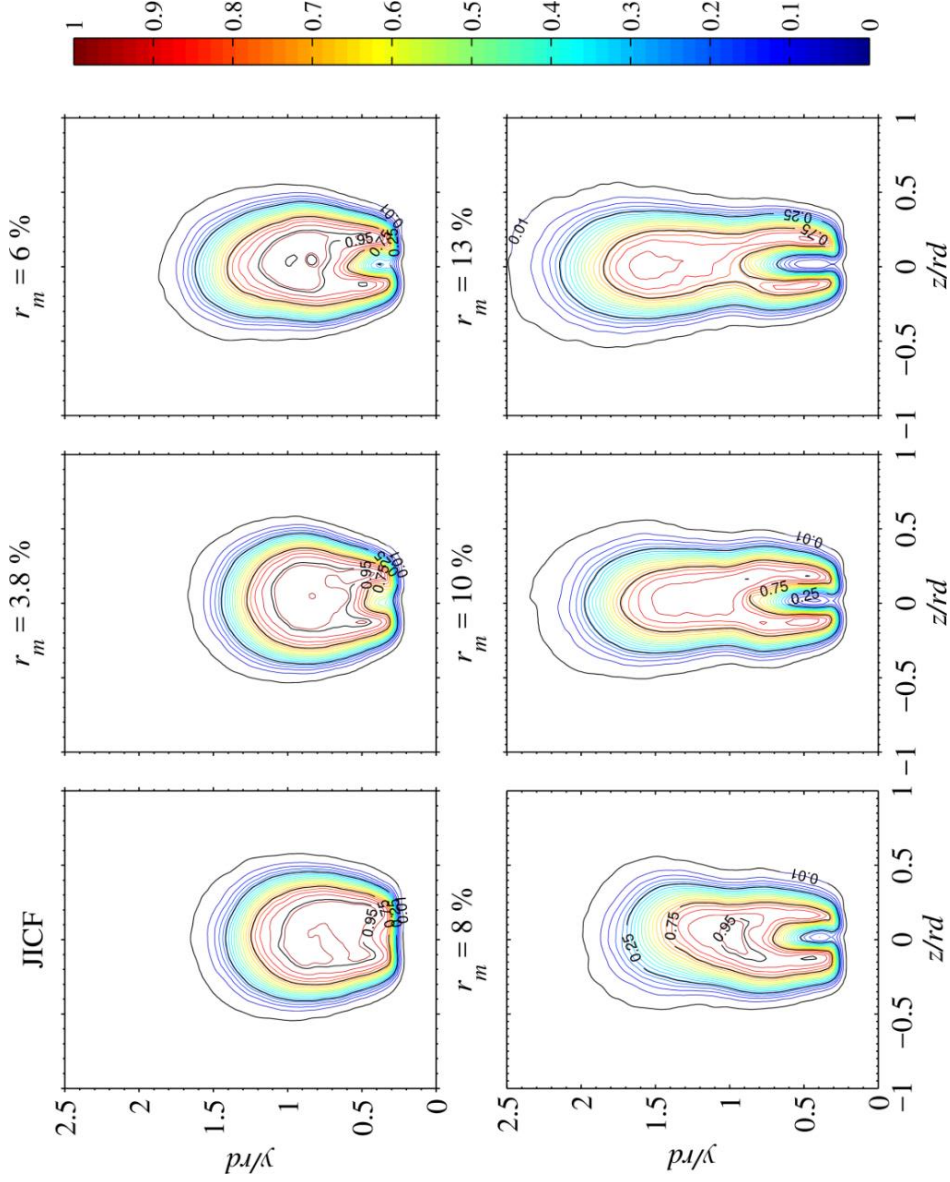
รูปที่ 4.14

Synchronizer model 610035

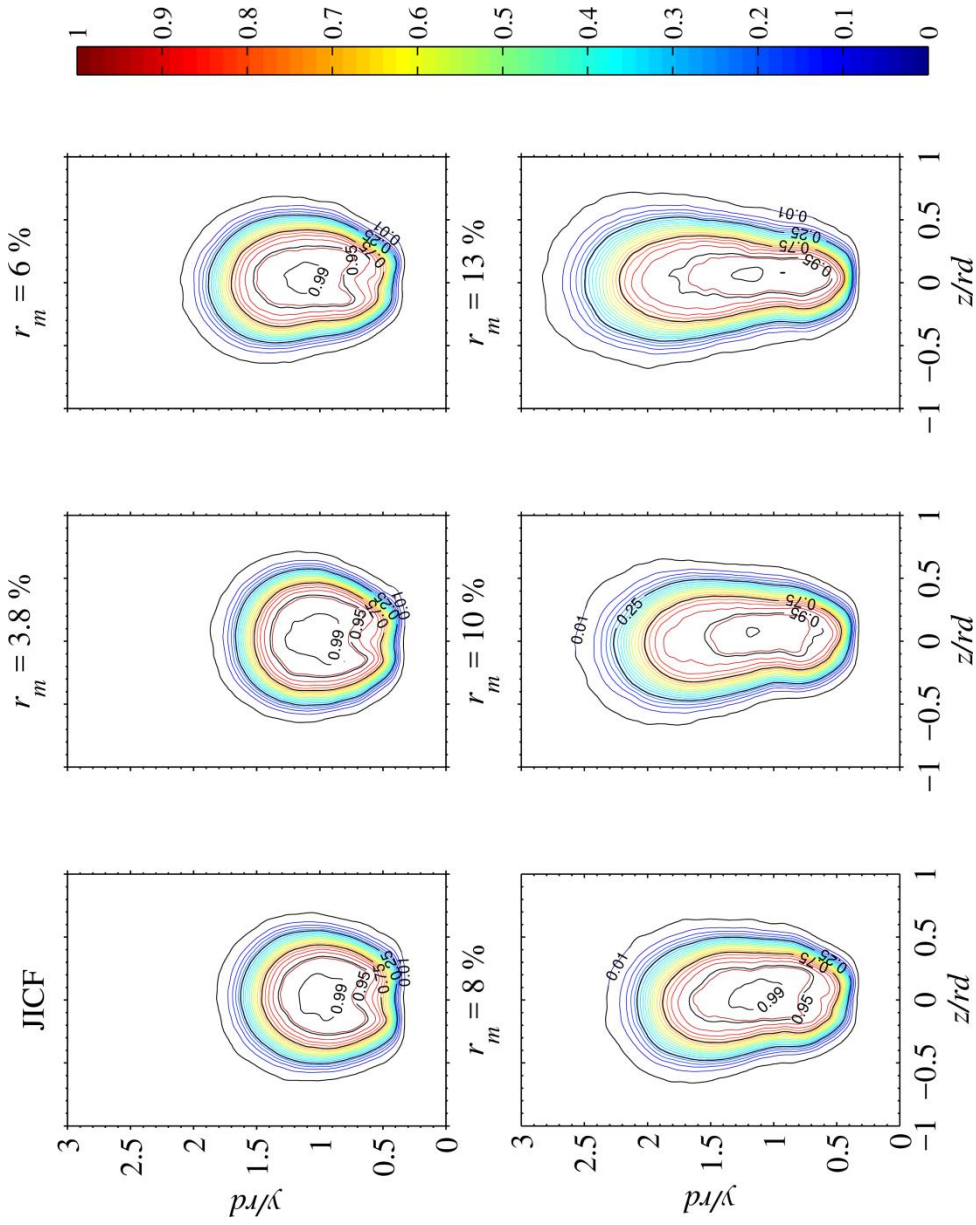


รูปที่ 4.15 ผลการสอบเทียบการวัดความเร็วระหว่าง SPIV กับ pitot tube และ Curve fitting ช่วงสีฟ้าคือความเร็วต่ำ และช่วงสีส้มคือความเร็วสูง (Wongthongsiri, 2014)

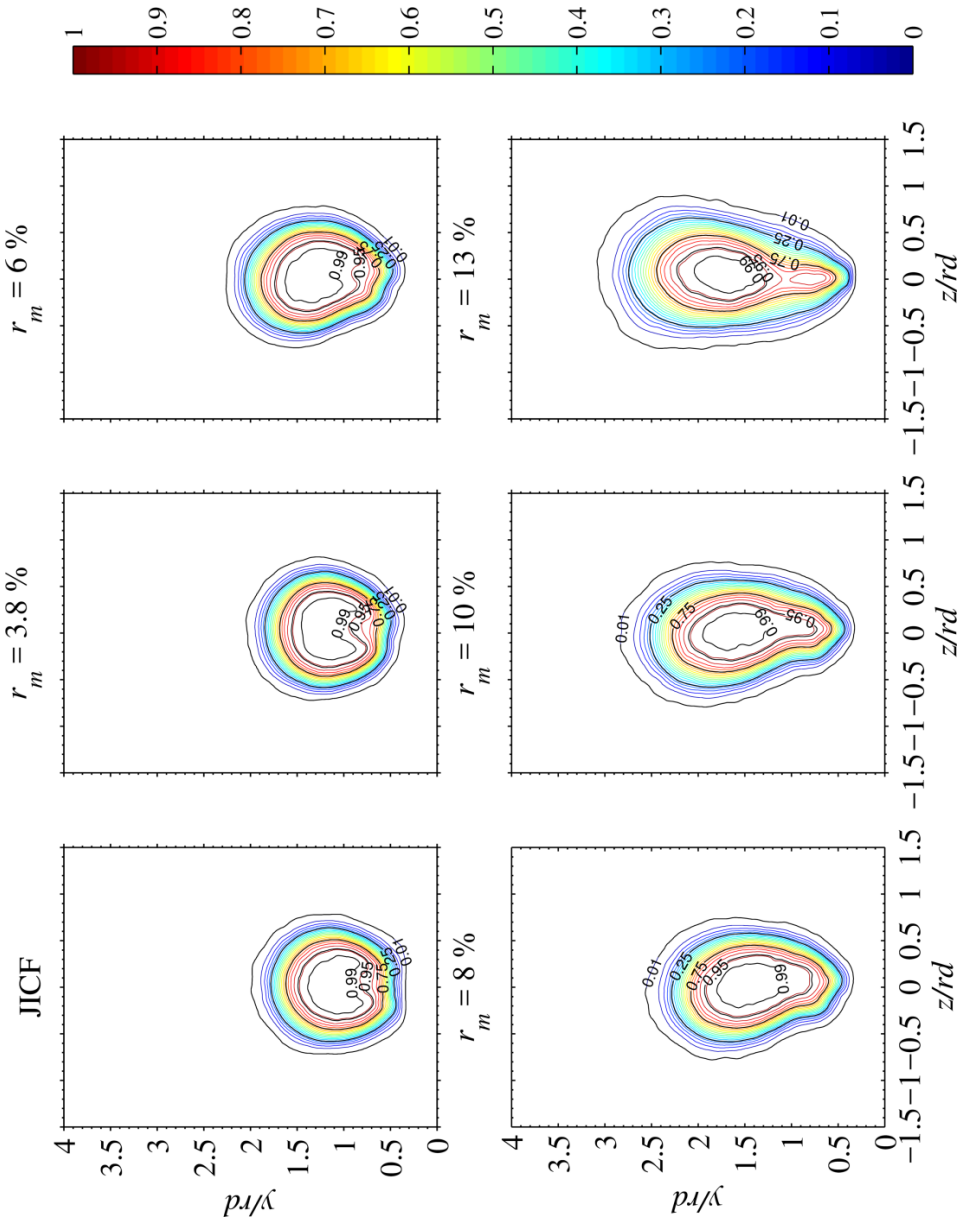
บทที่ 5



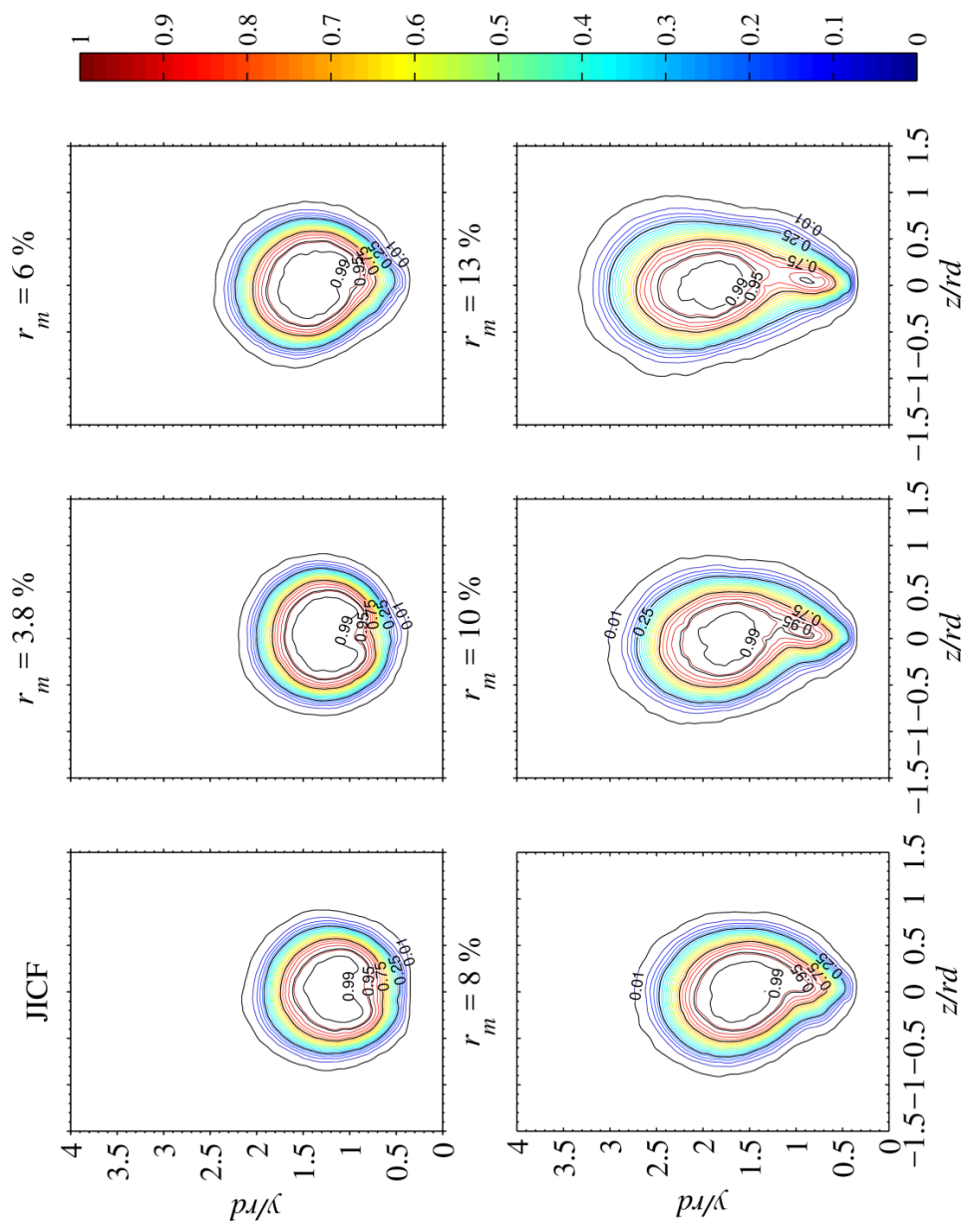
รูปที่ 5.1(ก) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด (ϕ_j) ที่ระนาบตัดขวาง $x/rd = 0.25$, โดย contour line จะแสดงค่า ϕ_j ที่ 0.01, $0.05 \leq \phi_j \leq 0.95$ [Resolution : 0.05], 0.99



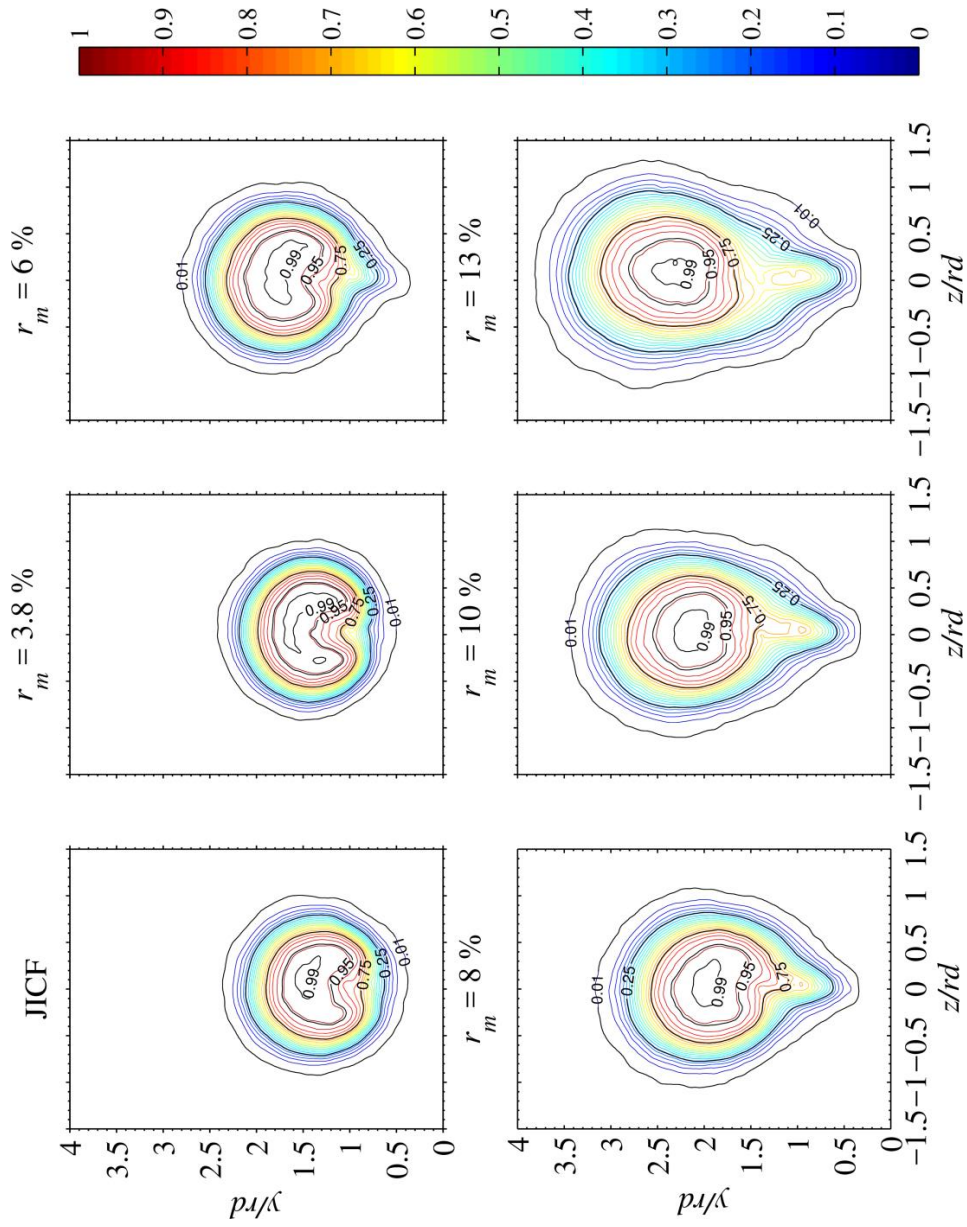
รูปที่ 5.1(ข) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด (ϕ_j) ที่ขนาดตัดขวาง $xrd = 0.50$, โดย contour line จะแสดงค่า ϕ_j ที่ 0.01, $0.05 \leq \phi_j \leq 0.95$ [Resolution : 0.05], 0.99



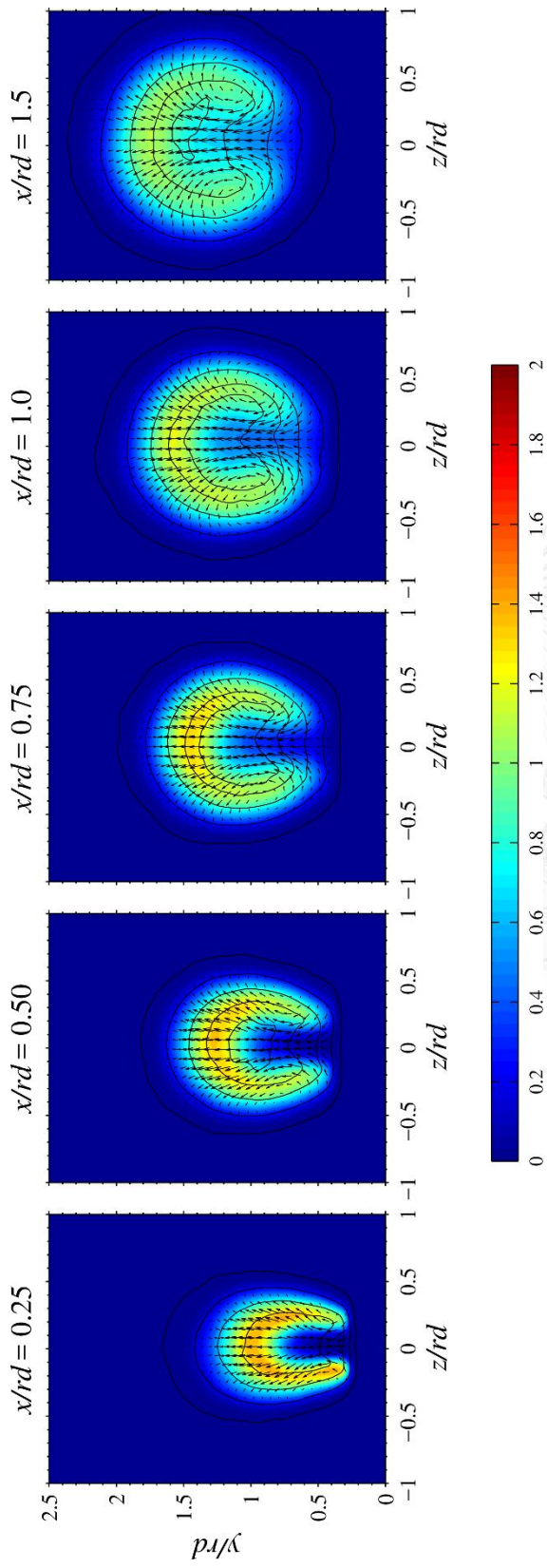
รูปที่ 5.1(ค) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด (ϕ_j) ที่ระยะนำตัดขวาง $x/rd = 0.75$, โดย contour line จะแสดงค่า ϕ_j ที่ 0.01, 0.05 $\leq \phi_j \leq 0.95$ [Resolution : 0.05], 0.99



รูปที่ 5.1(ง) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ด (ϕ_j) ที่ระยะขนาดตัดขวาง $x/rd = 1.0$, โดย contour line จะแสดงค่า ϕ_j ที่ 0.01, 0.05 $\leq \phi_j \leq 0.95$ [Resolution : 0.05], 0.99

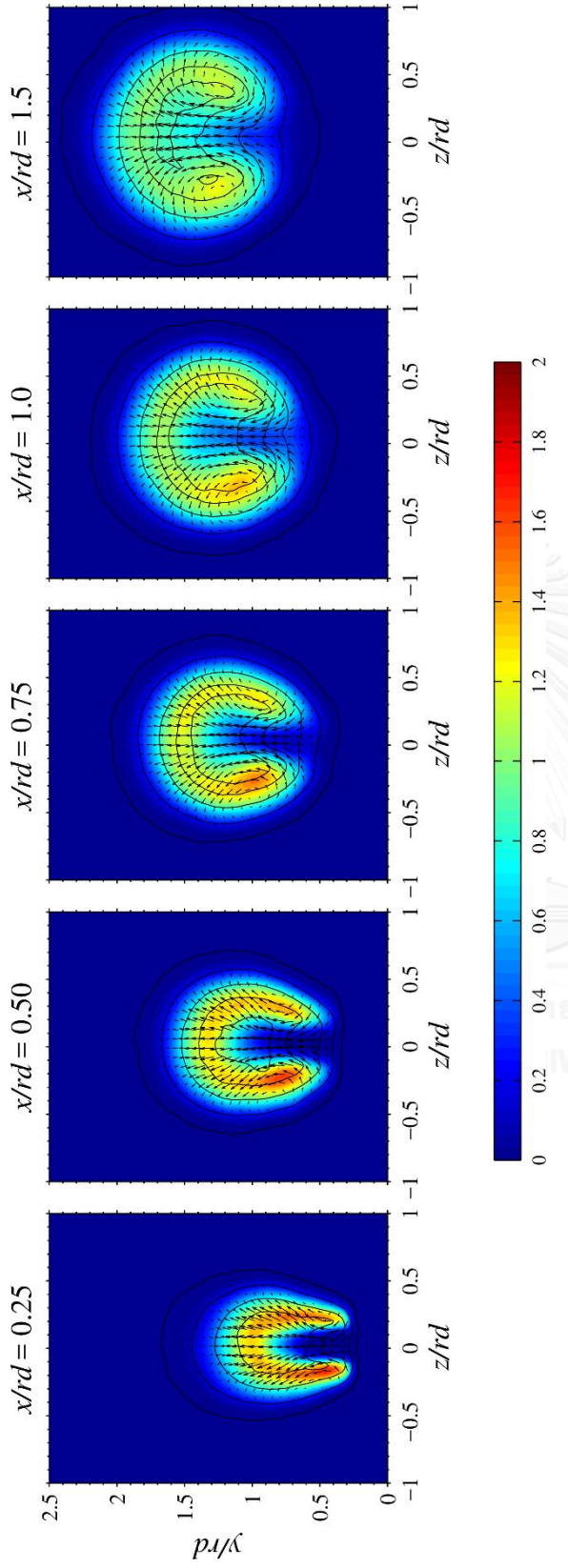


รูปที่ 5.1(จ) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ต (ϕ_j) ที่ระนาบตัดขวาง $x/r_d = 1.5$, โดย contour line จะแสดงค่า ϕ_j ที่ 0.01, 0.05 $\leq \phi_j \leq 0.95$ [Resolution : 0.05], 0.99



รูปที่ 5.2(ก) การพัฒนาตัวของเจ็ตกรณีไม่เกิดเจ็ตควบคุม โดยที่เป็นการพล็อตซ้อนทับกันระหว่าง

1. Surface contour แสดงการกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$)
2. Contour line แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่ค่า $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75, 0.95, 0.99$
3. In-plane vector ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$)



รูปที่ 5.2(ข) การพัฒนาตัวของเจ็ตกรณิดิเจ็ตควบคุมที่ $r_m = 3.8\%$ โดยที่เป็นการพล็อตซ้อนทับกันระหว่าง

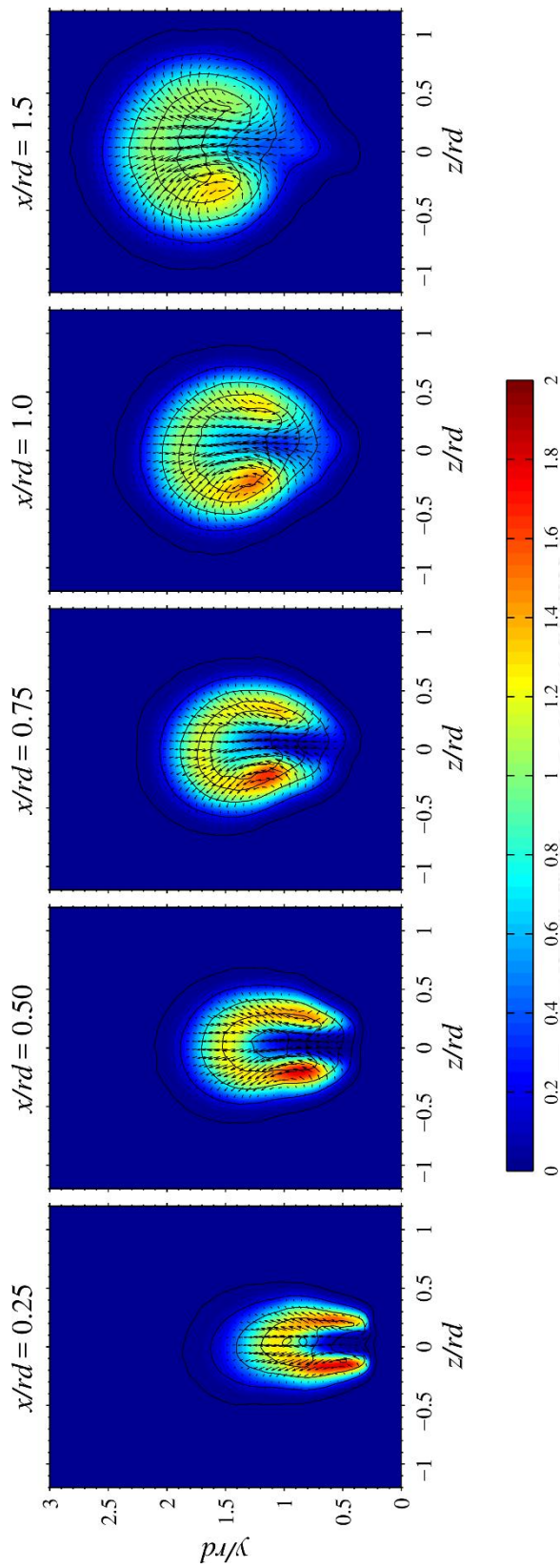
1. Surface contour แสดงการกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเฉลี่ยตาม

แนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$)

2. Contour line แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่ค่า

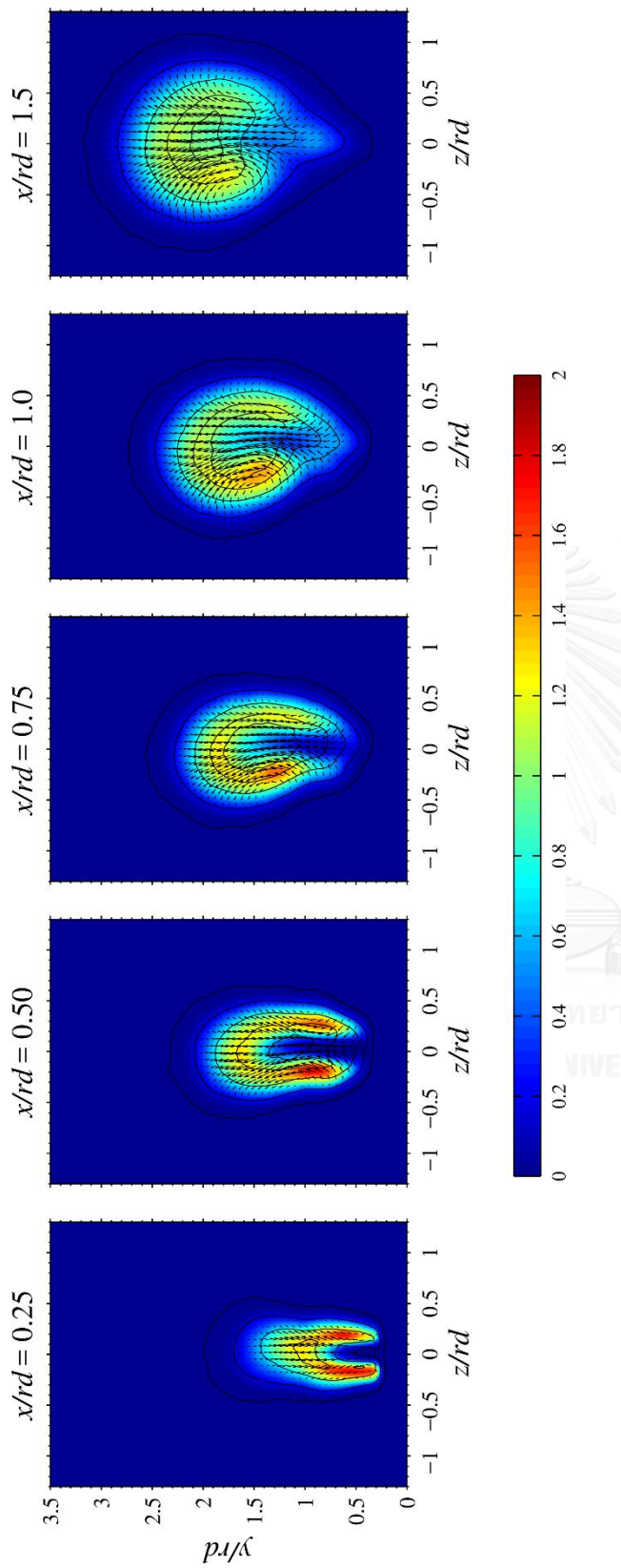
$\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75, 0.95, 0.99$

3. In-plane vector ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$)



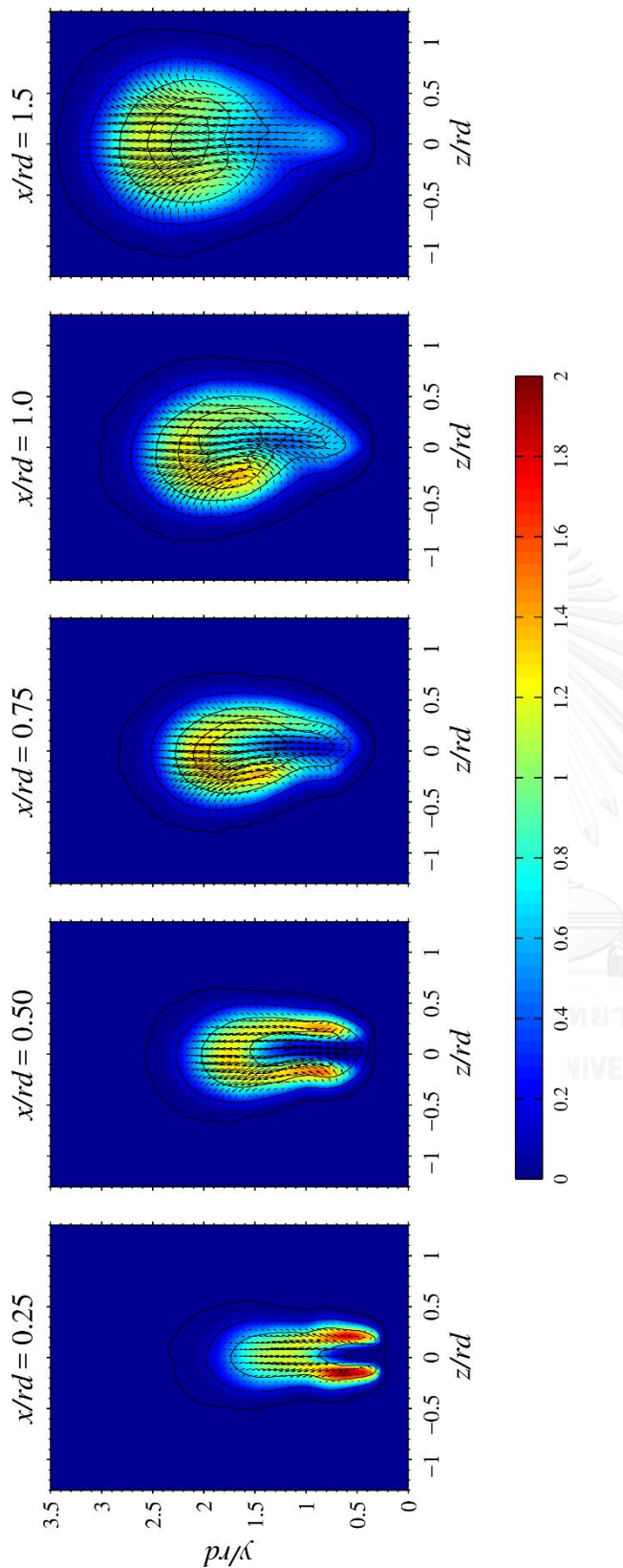
รูปที่ 5.2(ค) การพัฒนาตัวของเจ็ตกรณิดเจ็ตควบคุมที่ $r_m = 6\%$ โดยที่เป็นการพล็อตซ้อนทับกันระหว่าง

1. Surface contour แสดงการกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$)
2. Contour line แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่ค่า $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75, 0.95, 0.99$
3. In-plane vector ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$)



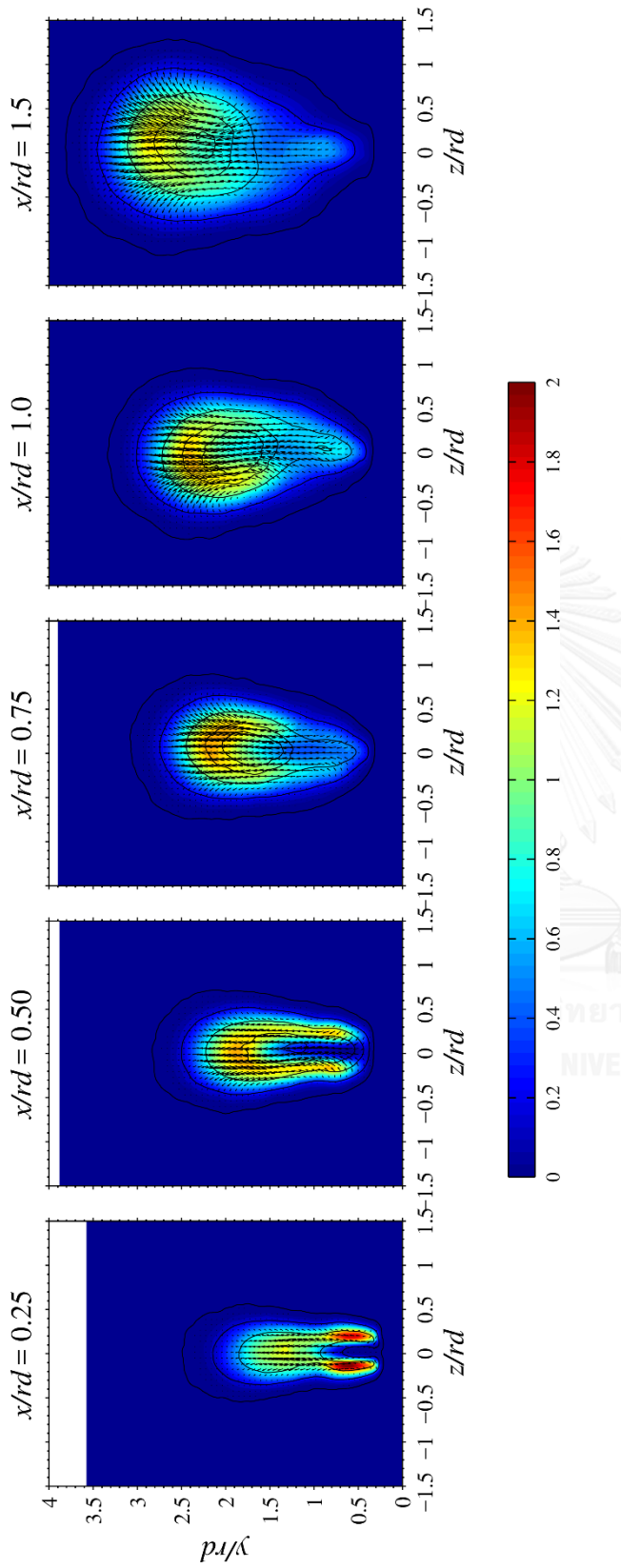
รูปที่ 5.2(ง) การพัฒนาตัวของเจ็ตกรณินิตเจ็ตความดันที่ $r_m = 8\%$ โดยที่เป็นการพล็อตซ้อนทับกันระหว่าง

1. Surface contour แสดงการกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$)
2. Contour line แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่ค่า $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75, 0.95, 0.99$
3. In-plane vector ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$)



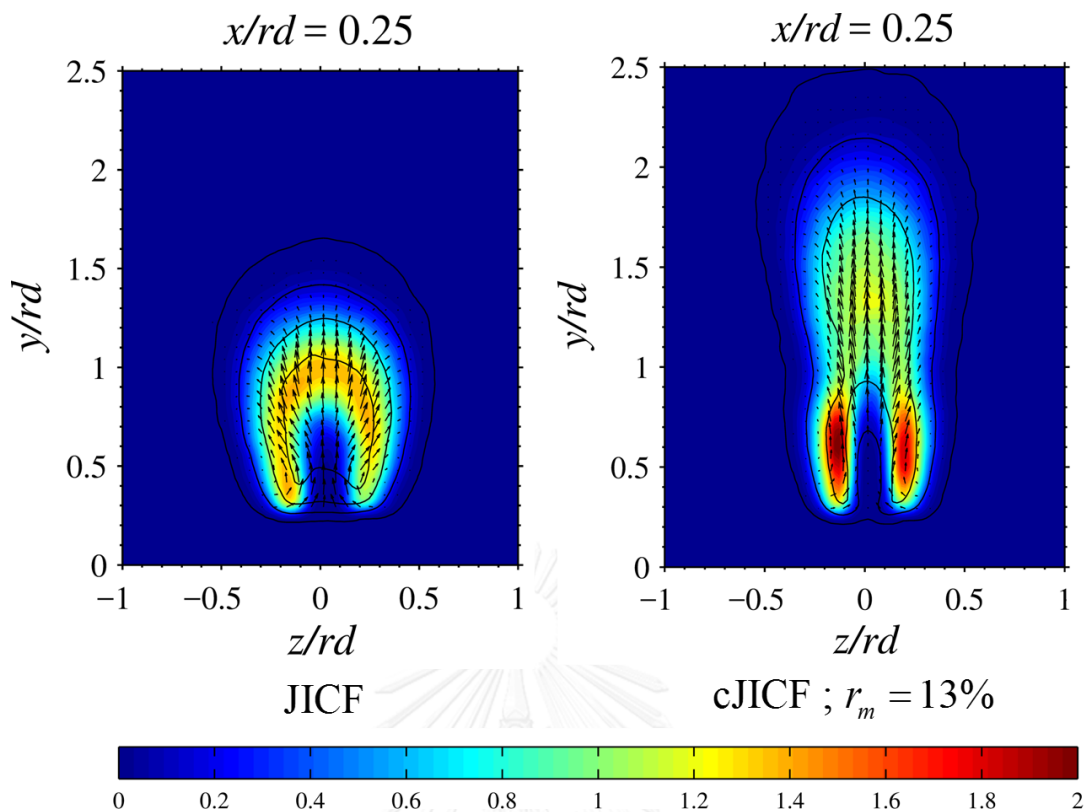
รูปที่ 5.2(จ) การพัฒนาตัวของเจ็ตกรณีเจ็ตความดันที่ $r_m = 10\%$ โดยที่เป็นการพล็อตซ้อนทับกันระหว่าง

1. Surface contour แสดงการกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise เวกเตอร์ ($\vec{V}_{j,x} / u_{cf}$)
2. Contour line แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่ค่า $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75, 0.95, 0.99$
3. In-plane vector ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$)

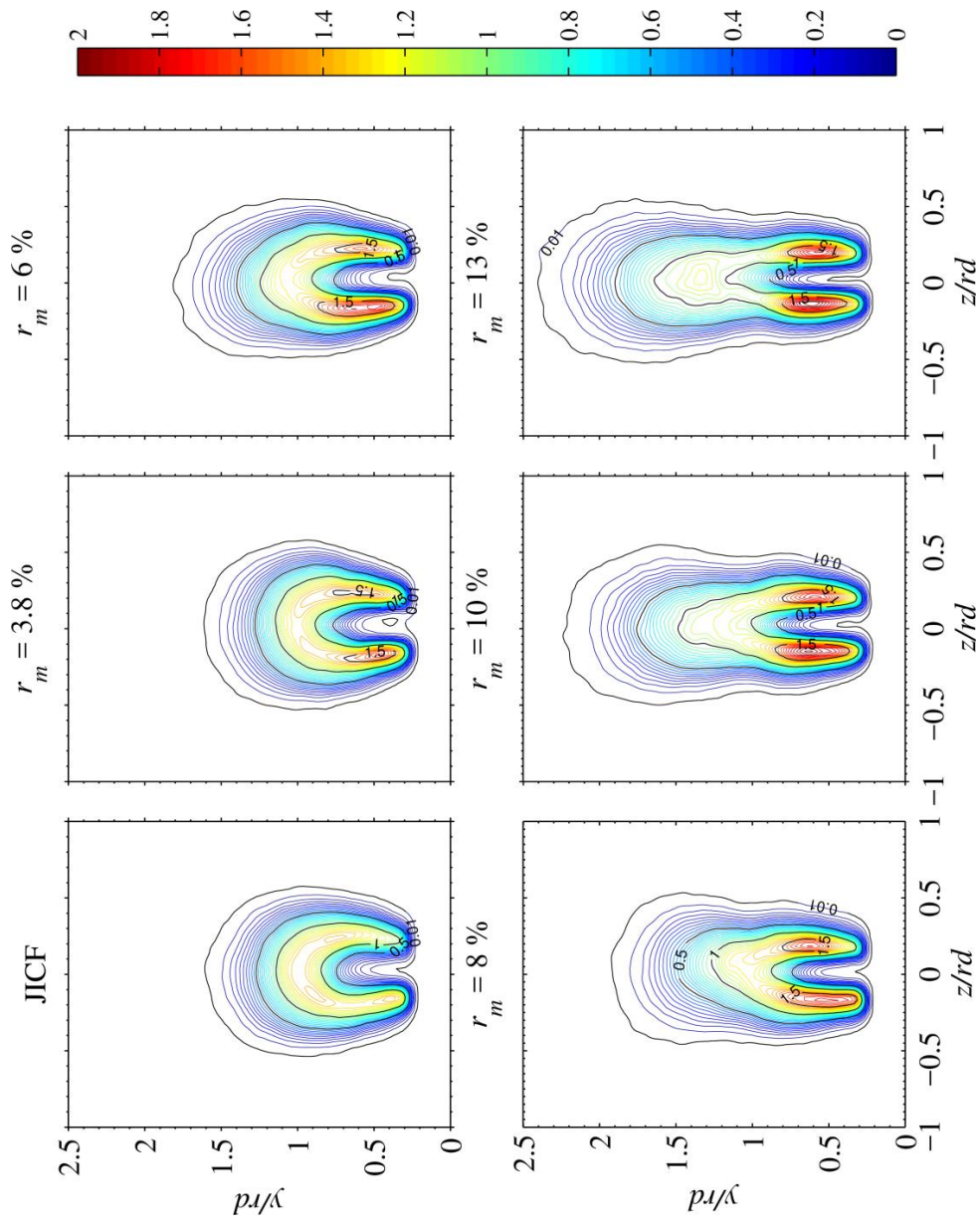


รูปที่ 5.2(ด) การพัฒนาตัวของเจ็ตกรณีเจ็ตความดันที่ $r_m = 13\%$ โดยที่เป็นการพล็อตซ้อนทับกันระหว่าง

1. Surface contour แสดงการกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร่มีติ ($V_{j,x} / u_{cf}$)
2. Contour line แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ตที่ค่า $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75, 0.95, 0.99$
3. In-plane vector ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$)

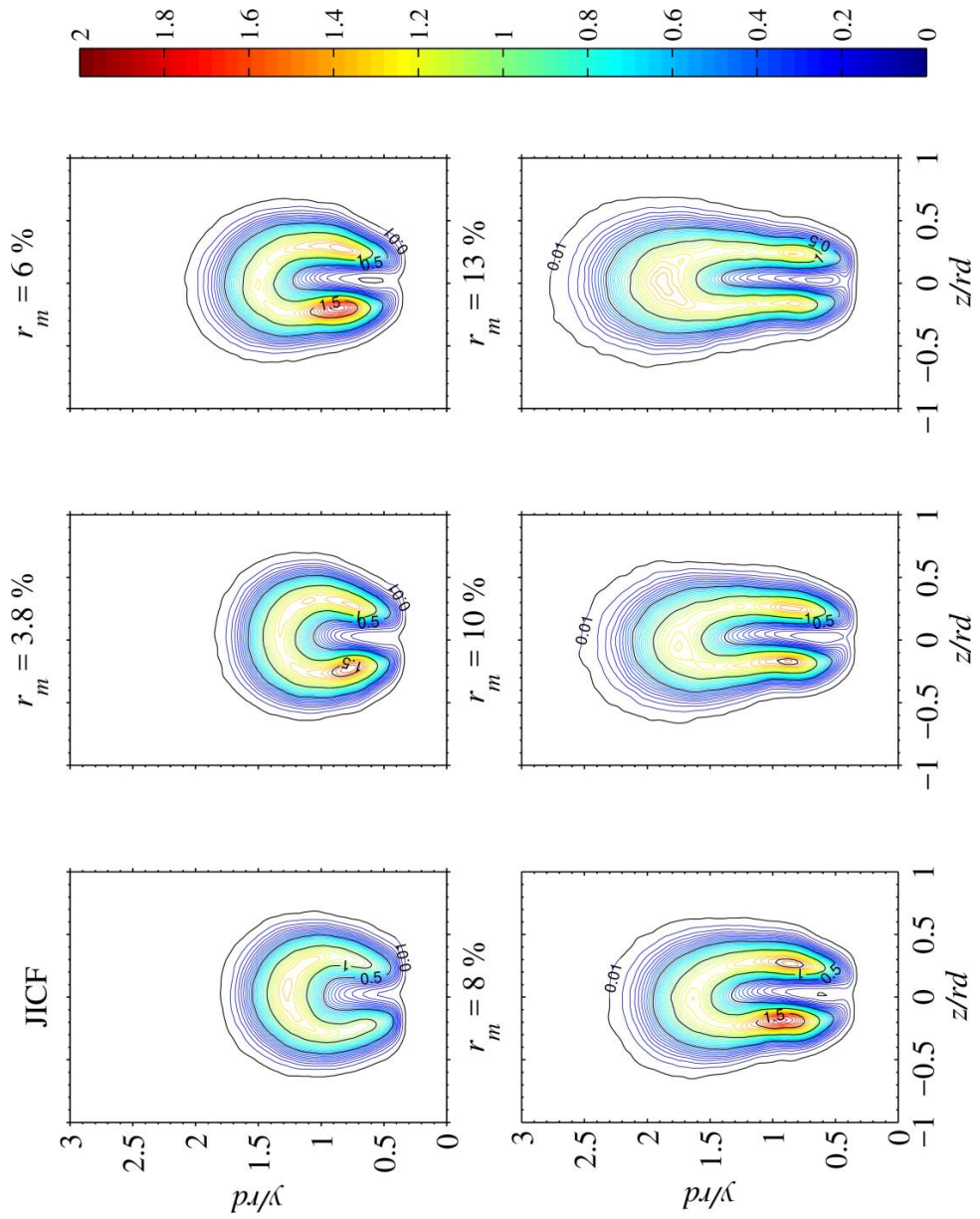


รูปที่ 5.2(ข) เปรียบเทียบเวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยไร้มิติในระนาบตัดขวางการไหล ($\bar{V}_{j,yz} / u_{cf}$) หรือ In-plane vector กรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม และ กรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ r_m เท่ากับ 13% ที่ระนาบตัดขวางการไหล $x/rd = 0.25$

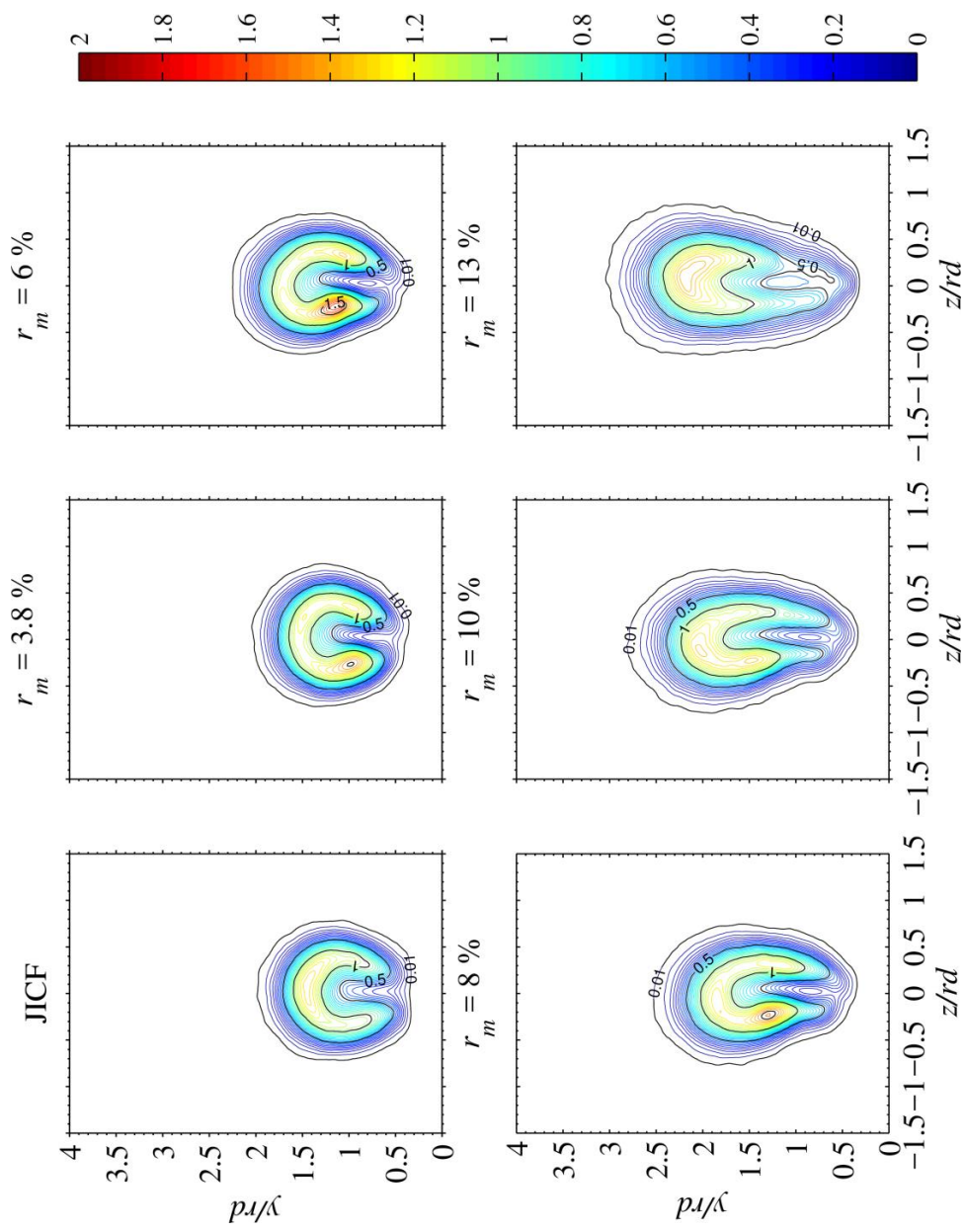


รูปที่ 5.3(ก) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$) ที่ระนาบ

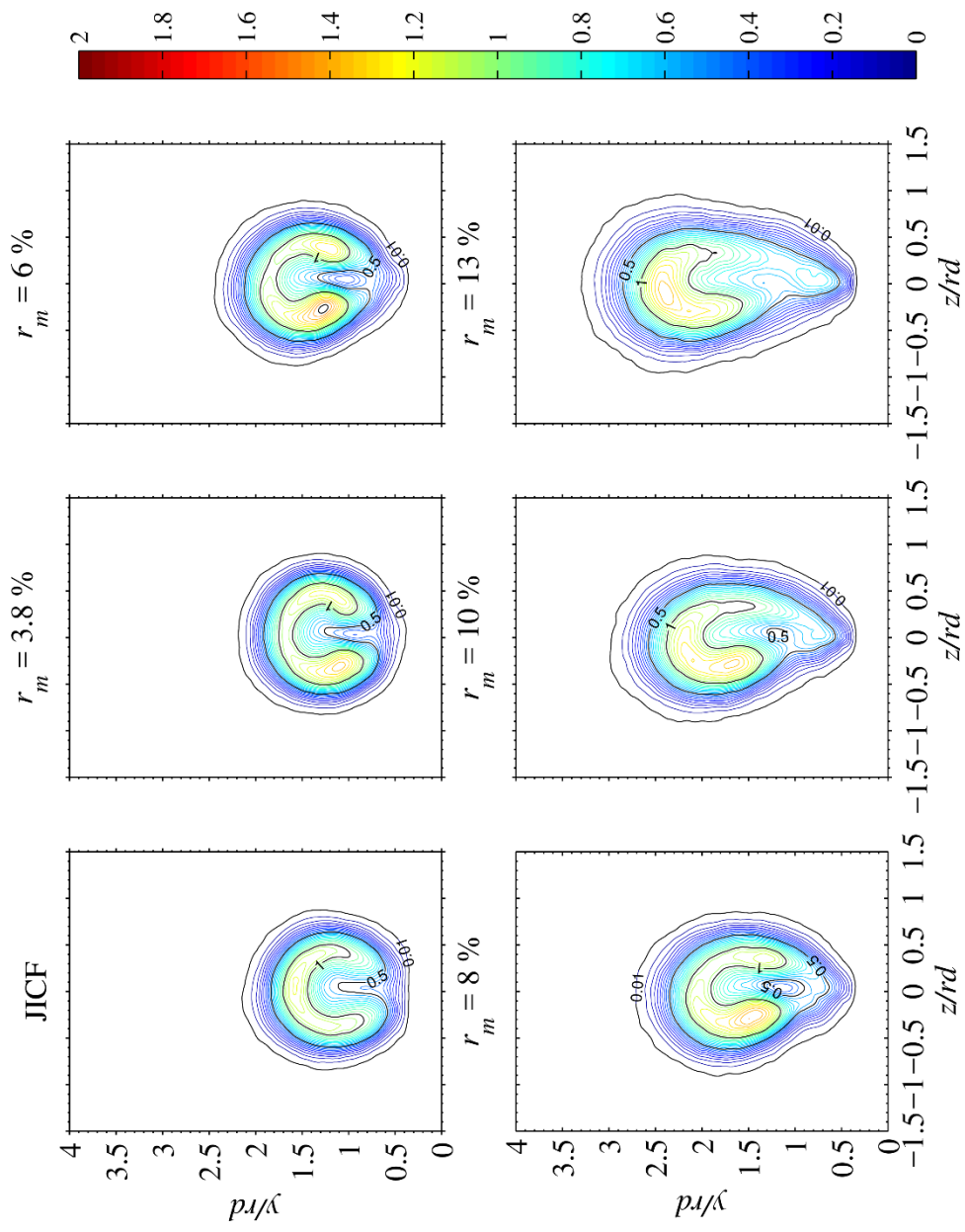
ตัดขวาง $x/r_d = 0.25$, โดย contour line จะแสดงค่า $V_{j,x} / u_{cf}$ ที่ 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 [Resolution : 0.05]



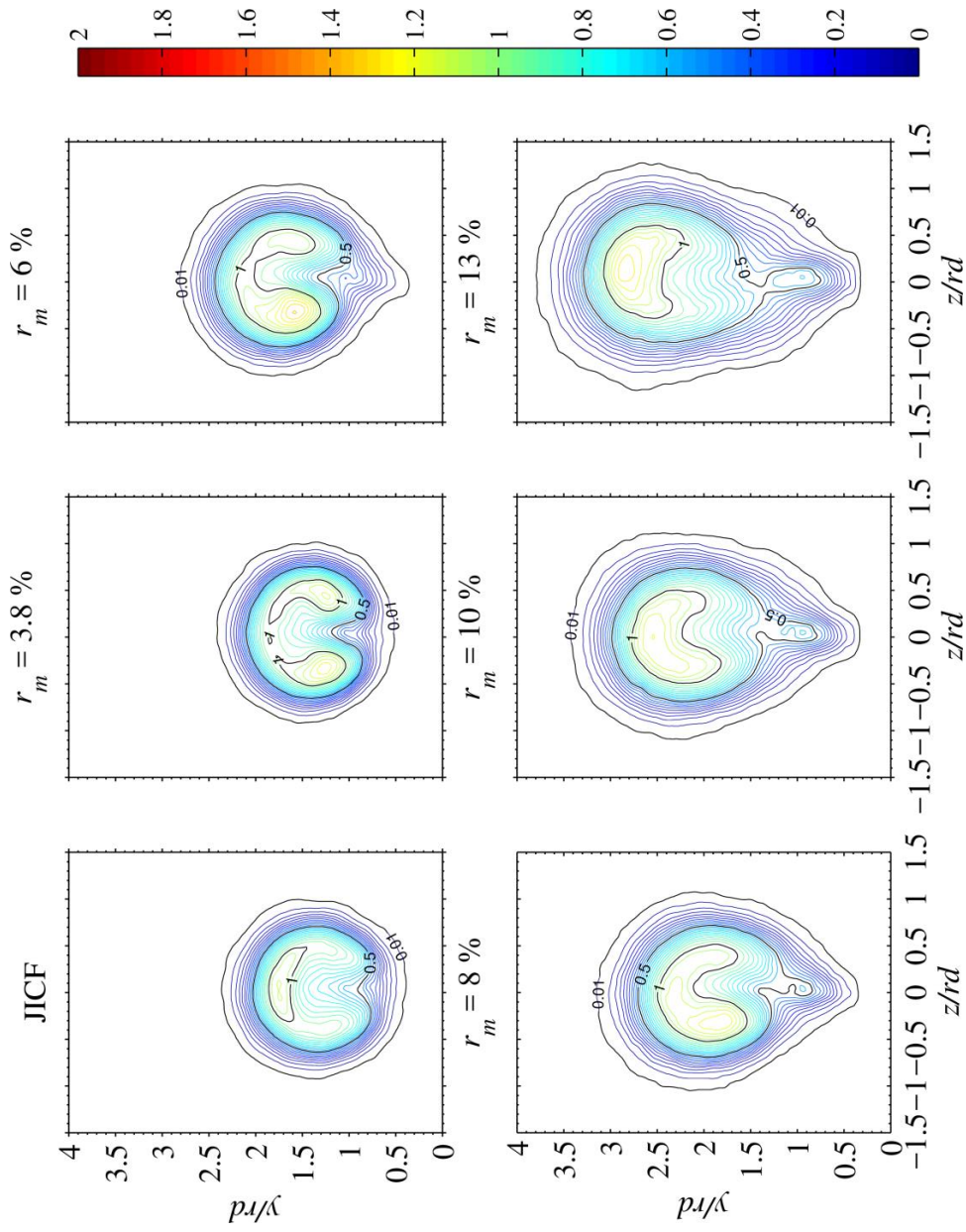
รูปที่ 5.3(๗) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 0.50$, โดย contour line จะแสดงค่า $V_{j,x} / u_{cf}$ ที่ 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 2 [Resolution : 0.05]



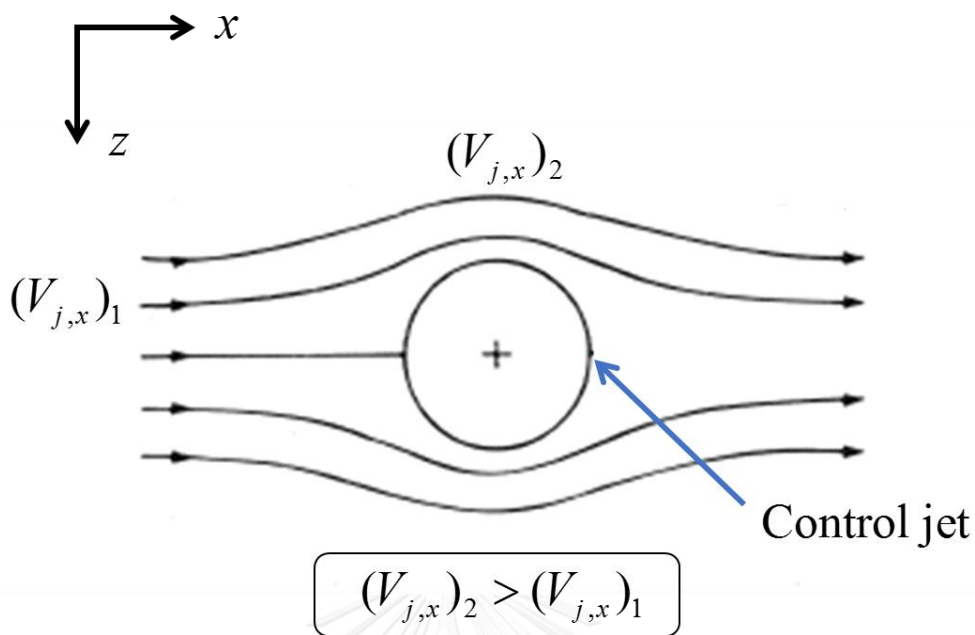
รูปที่ 5.3(ค) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise เริ่มต้น ($V_{j,x} / u_{cf}$) ที่ระยะนาบตัดขวาง $x/r/d = 0.75$, โดย contour line จะแสดงค่า $V_{j,x} / u_{cf}$ ที่ 0.01, 0.05, $0.05 \leq V_{j,x} / u_{cf} \leq 2$ [Resolution : 0.05]



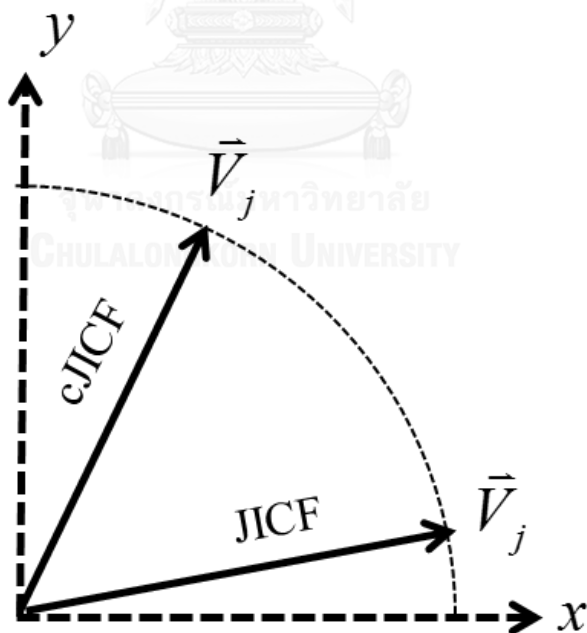
รูปที่ 5.3(จ) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x/r_d = 1.0$, โดย contour line จะแสดงค่า $V_{j,x} / u_{cf}$ ที่ 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2 [Resolution : 0.05]



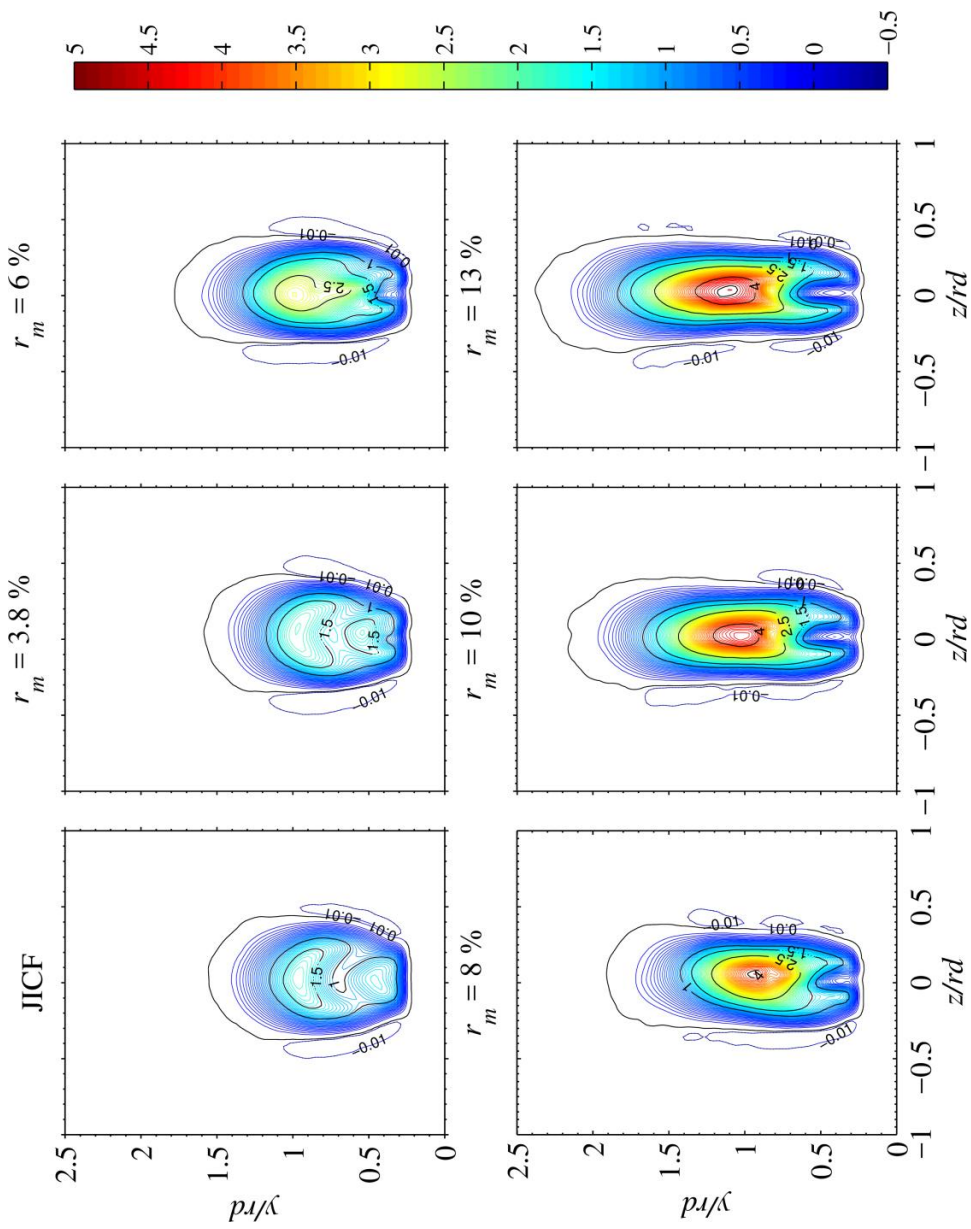
รูปที่ 5.3(จ) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเฉลี่ยตามแนวแกน streamwise ไร้มิติ ($V_{j,x} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x/r_d = 1.5$, โดย contour line จะแสดงค่า $V_{j,x} / u_{cf}$ ที่ 0.01, $0.05 \leq V_{j,x} / u_{cf} \leq 2$ [Resolution : 0.05]



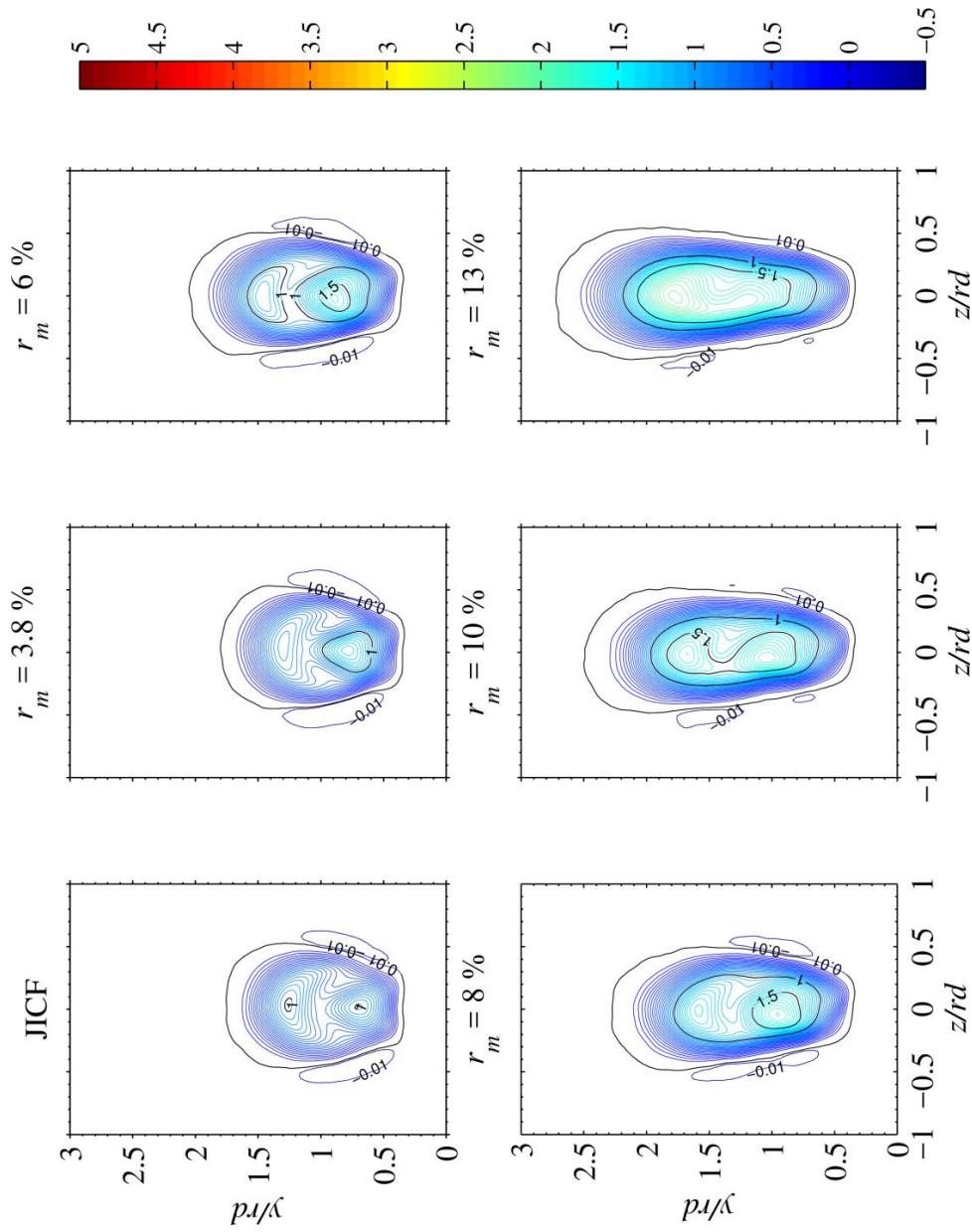
รูปที่ 5.3(ฉ) เจ็ตควบคุมประพุดิตัวเหมือนทรงกระบอกที่วางขวางแนวทางการไหลของเจ็ต



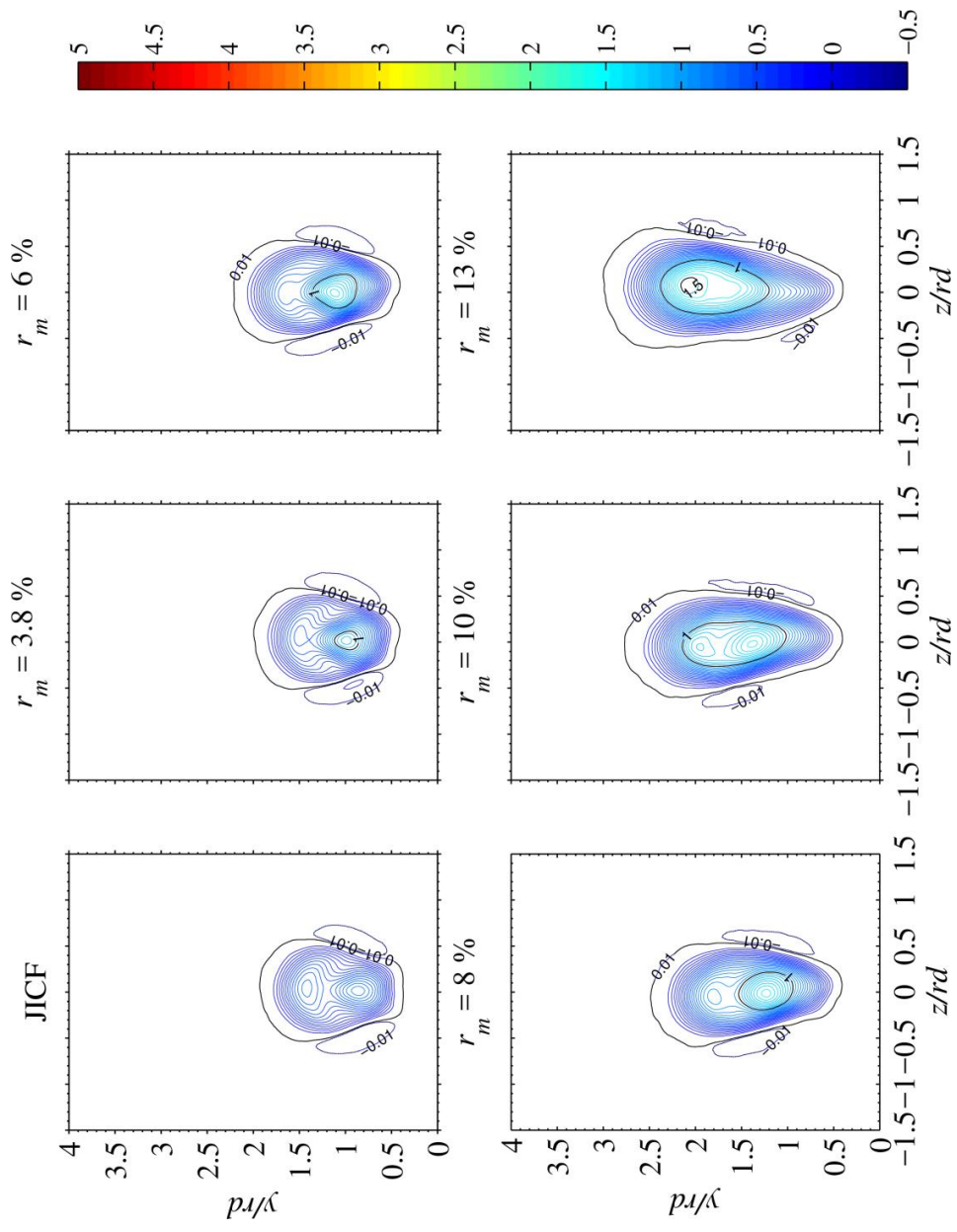
รูปที่ 5.3(ข) การเปลี่ยนแปลงทิศทางของเวกเตอร์ความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเมื่อทำการฉีดเจ็ตควบคุม



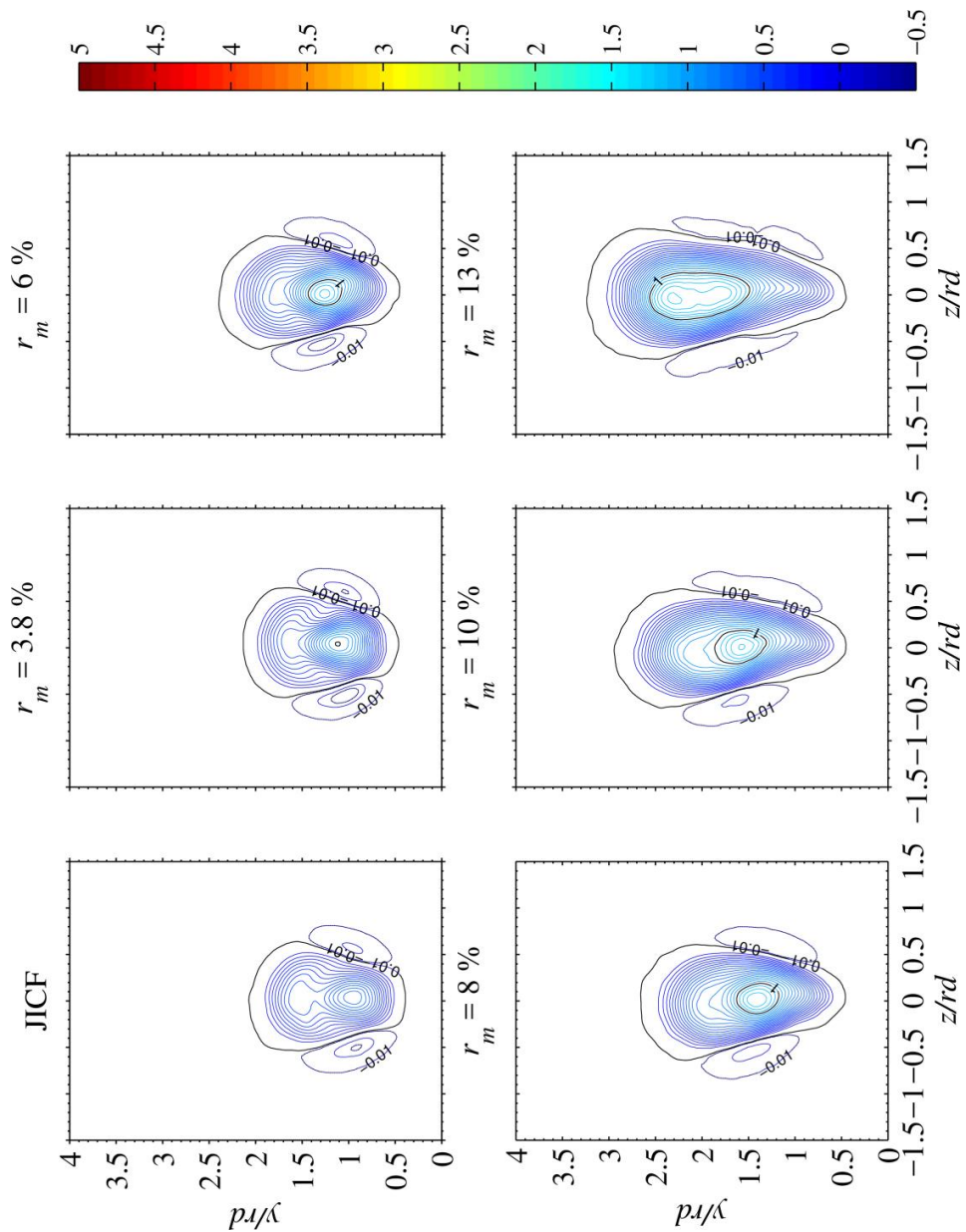
รูปที่ 5.4(ก) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน transverse ไร้มิติ ($V_{j,y} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x/rd = 0.25$, โดย contour line จะแสดงค่า $V_{j,y} / u_{cf}$ ที่ $-0.5 \leq V_{j,y} / u_{cf} \leq 5$ [Resolution : 0.05] และ -0.01, 0.01



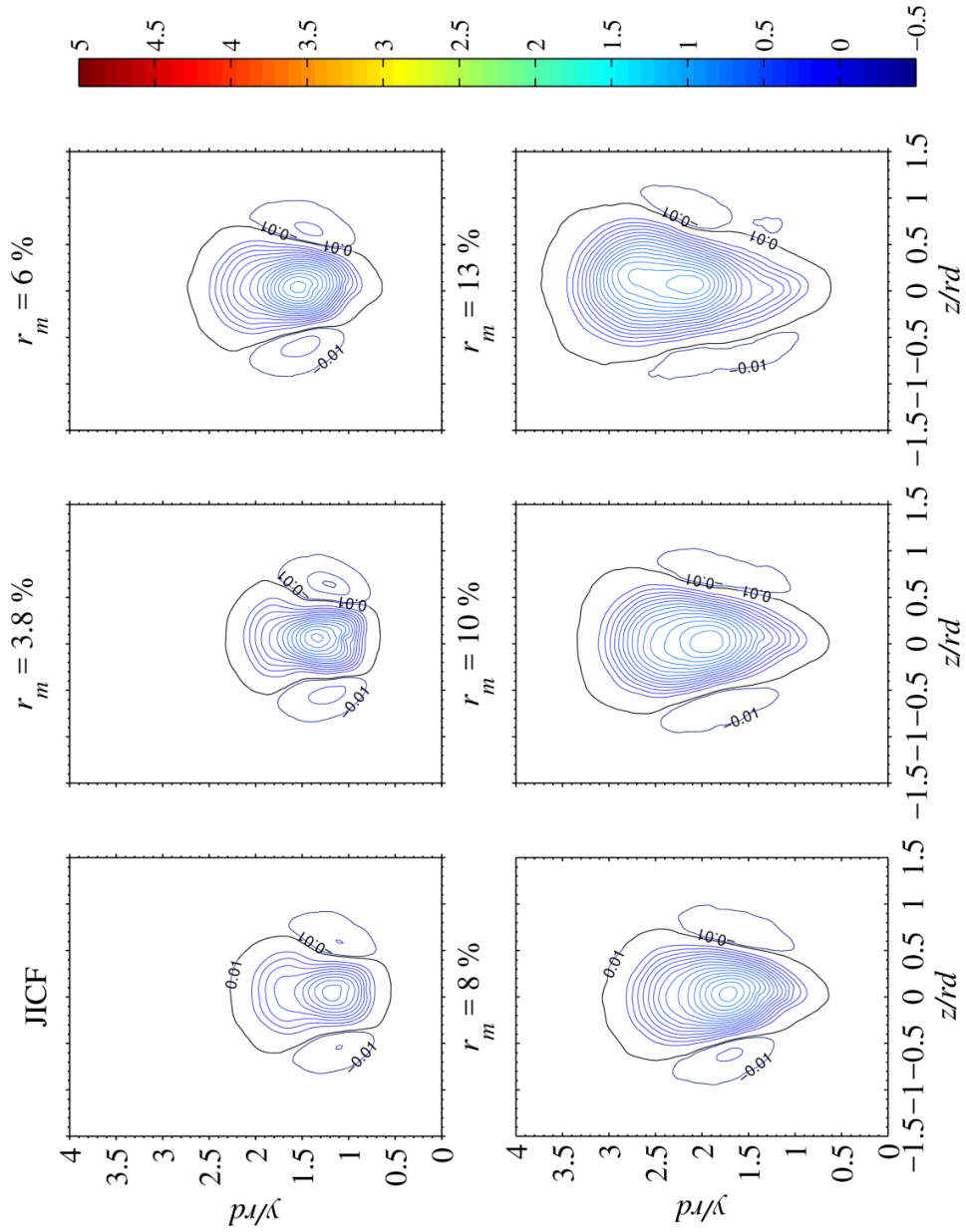
รูปที่ 5.4(ข) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน transverse ไร้มิติ ($V_{j,y} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x/rd = 0.50$, โดย contour line จะแสดงค่า $V_{j,y} / u_{cf}$ ที่ $-0.5 \leq V_{j,y} / u_{cf} \leq 5$ [Resolution : 0.05] และ $-0.01, 0.01$



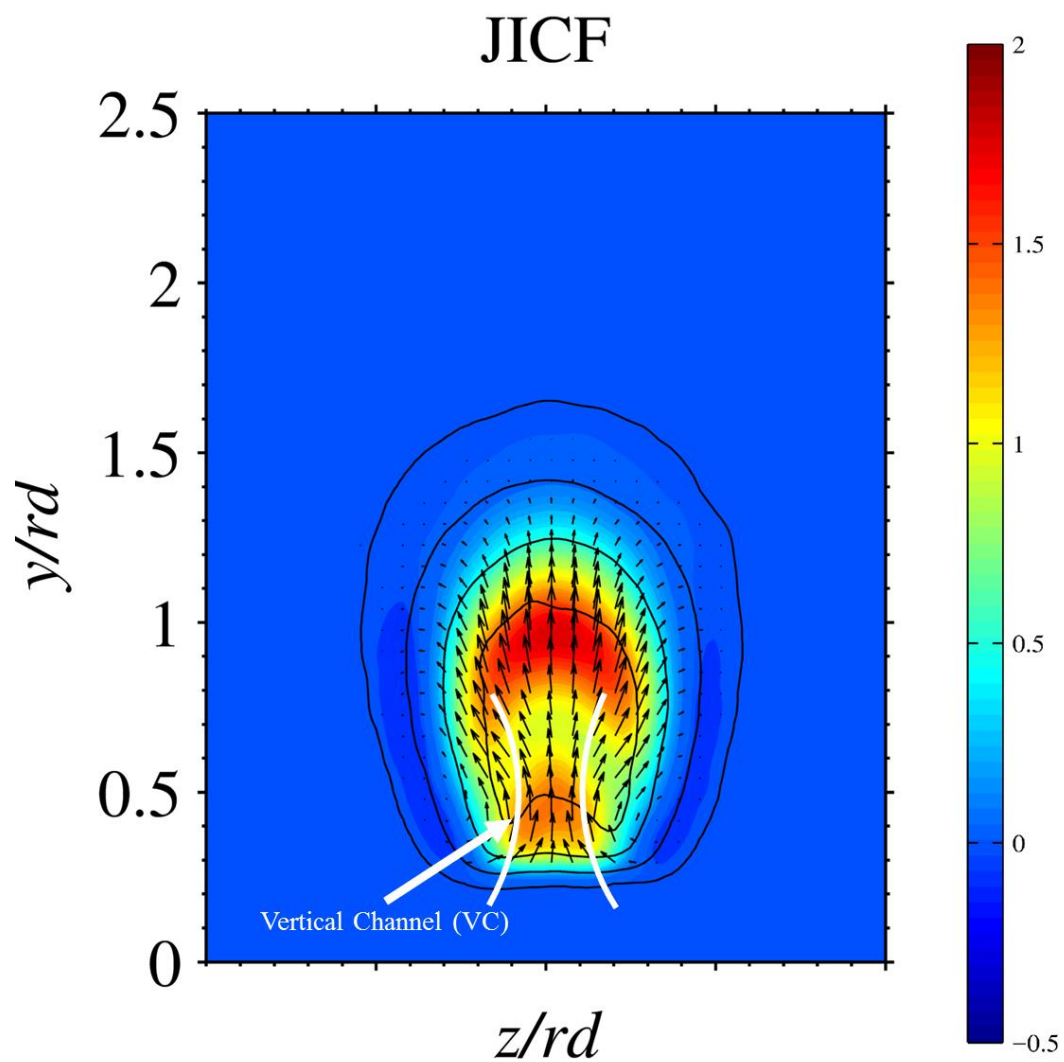
รูปที่ 5.4(ค) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ตเฉลี่ยตามแนวแกน transverse ไร้มิติ ($V_{j,y} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x/rd = 0.75$, โดย contour line จะแสดงค่า $V_{j,y} / u_{cf}$ ที่ $-0.5 \leq V_{j,y} / u_{cf} \leq 5$ [Resolution : 0.05] และ $-0.01, 0.01$



รูปที่ 5.4(ง) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน transverse รัศมี ($V_{j,y} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x/rd = 1.0$, โดย contour line จะแสดงค่า $V_{j,y} / u_{cf}$ ที่ $-0.5 \leq V_{j,y} / u_{cf} \leq 5$ [Resolution : 0.05] และ $-0.01, 0.01$

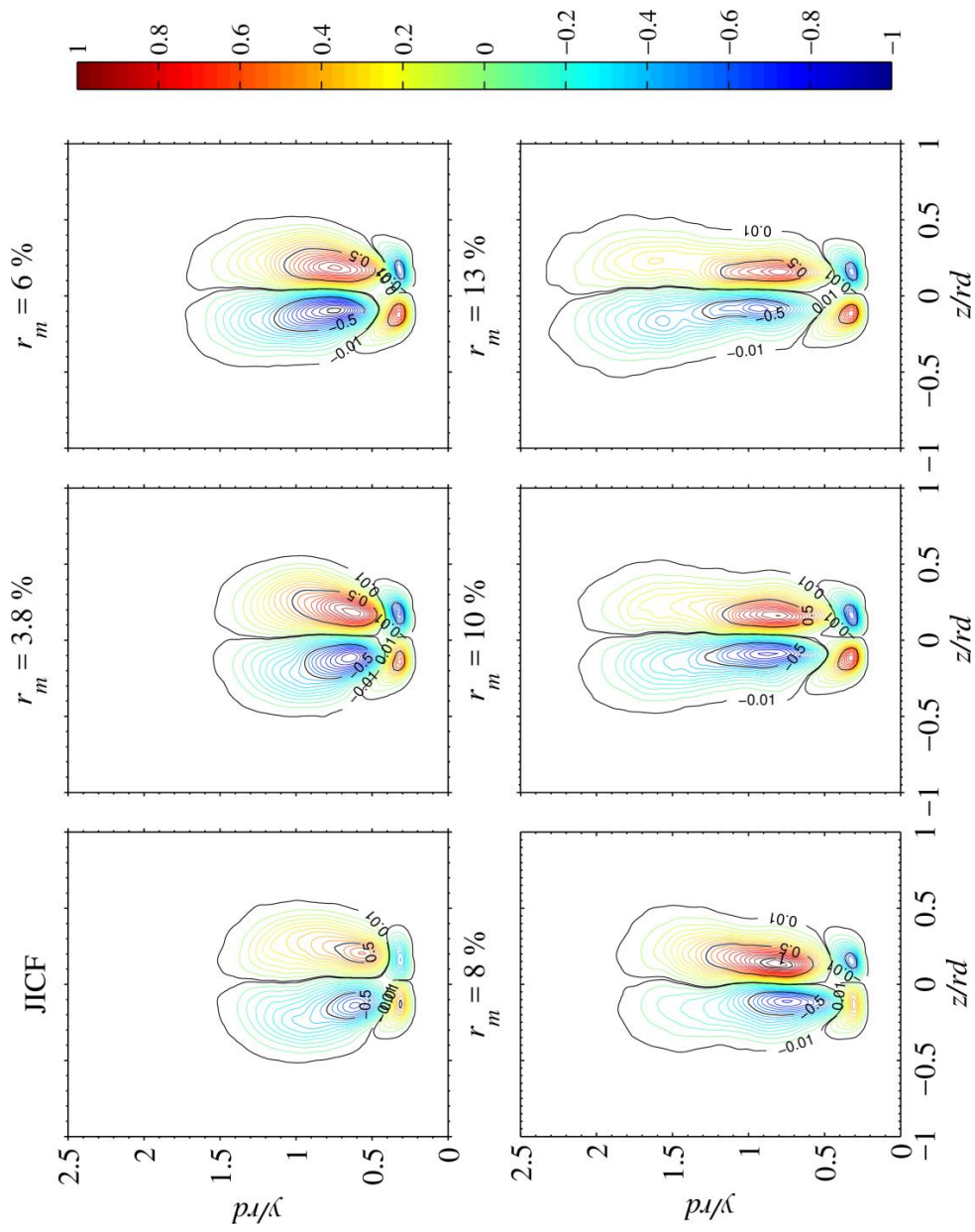


รูปที่ 5.4(จ) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน transverse รัศมี ($V_{j,y} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 1.5$, โดย contour line จะแสดงค่า $V_{j,y} / u_{cf}$ ที่ $-0.5 \leq V_{j,y} / u_{cf} \leq 5$ [Resolution : 0.05] และ $-0.01, 0.01$

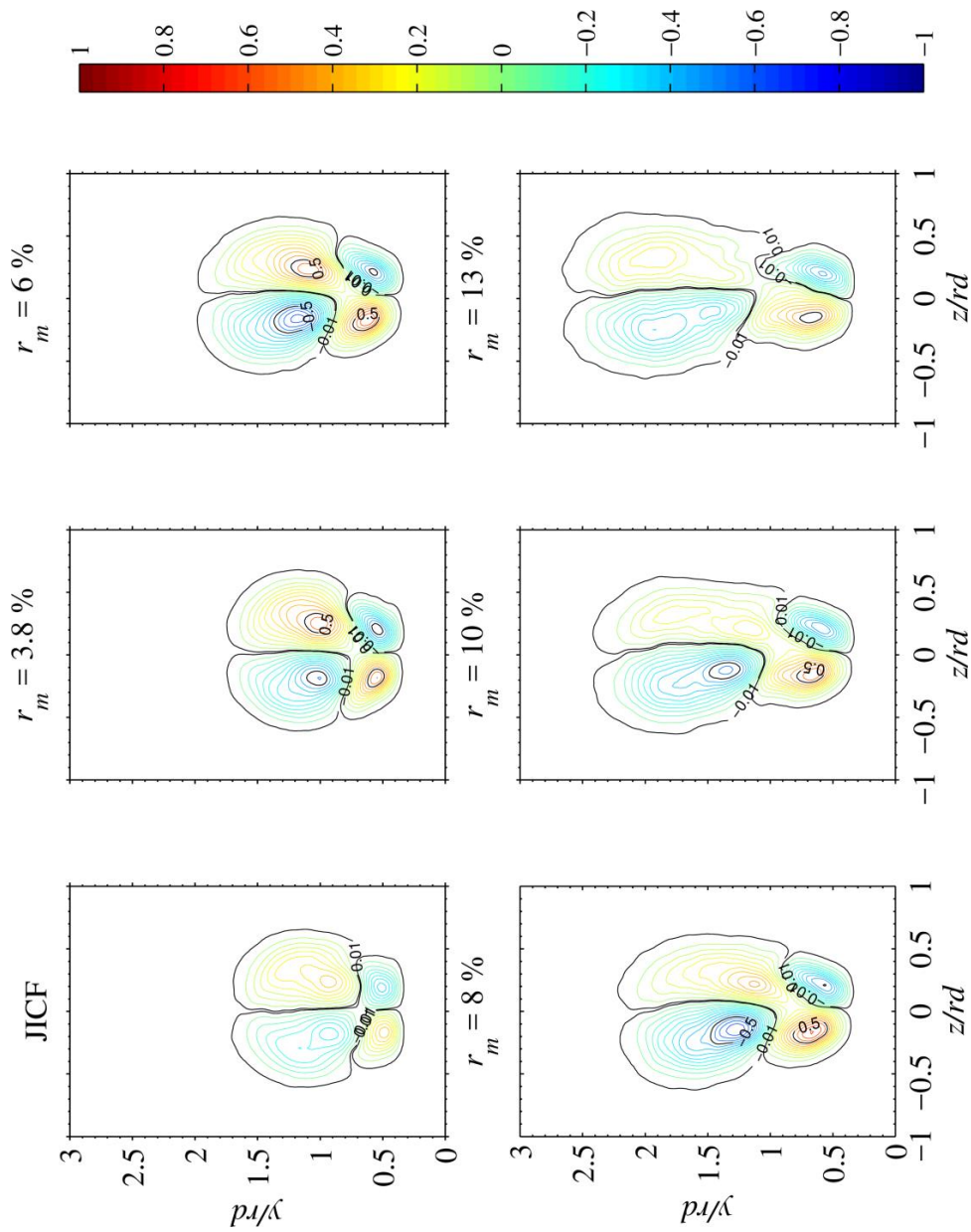


รูปที่ 5.4(ฉ) Surface contour แสดงการกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน transverse ไร้มิติ ($V_{j,y} / u_{cf}$) ในระนาบ $x/rd = 0.25$ กรณีไม่ฉีดเจ็ดควมคุม (JICF) ที่พล็อตซ้อนทับกับ

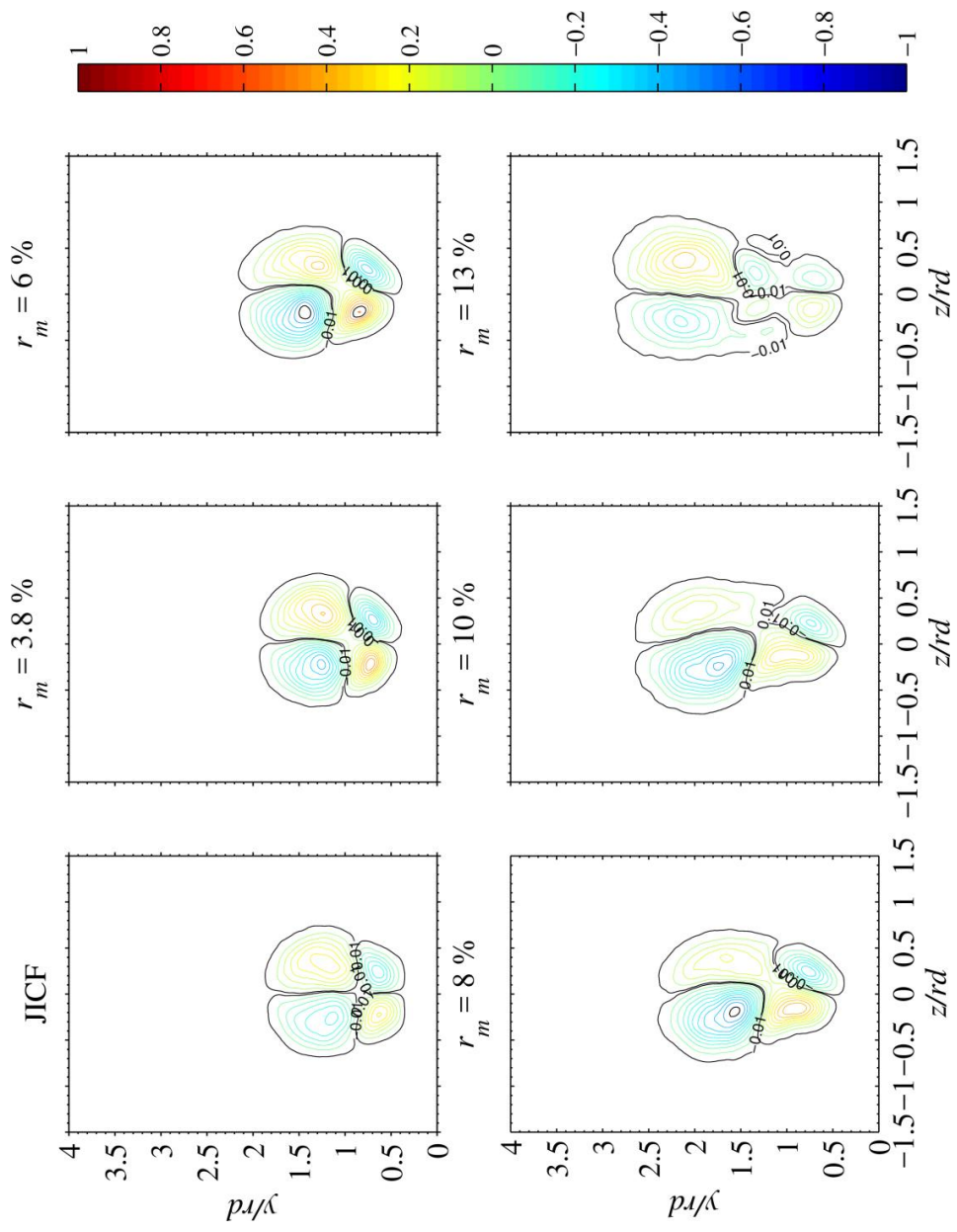
1. Contour line แสดงความน่าจะเป็นที่จะพบส่วนผสมของเจ็ดที่ค่า $\phi_j = 0.01, 0.25, 0.75, 0.95$
2. In-plane vector ($\vec{V}_{j,yz} / u_{cf}$)



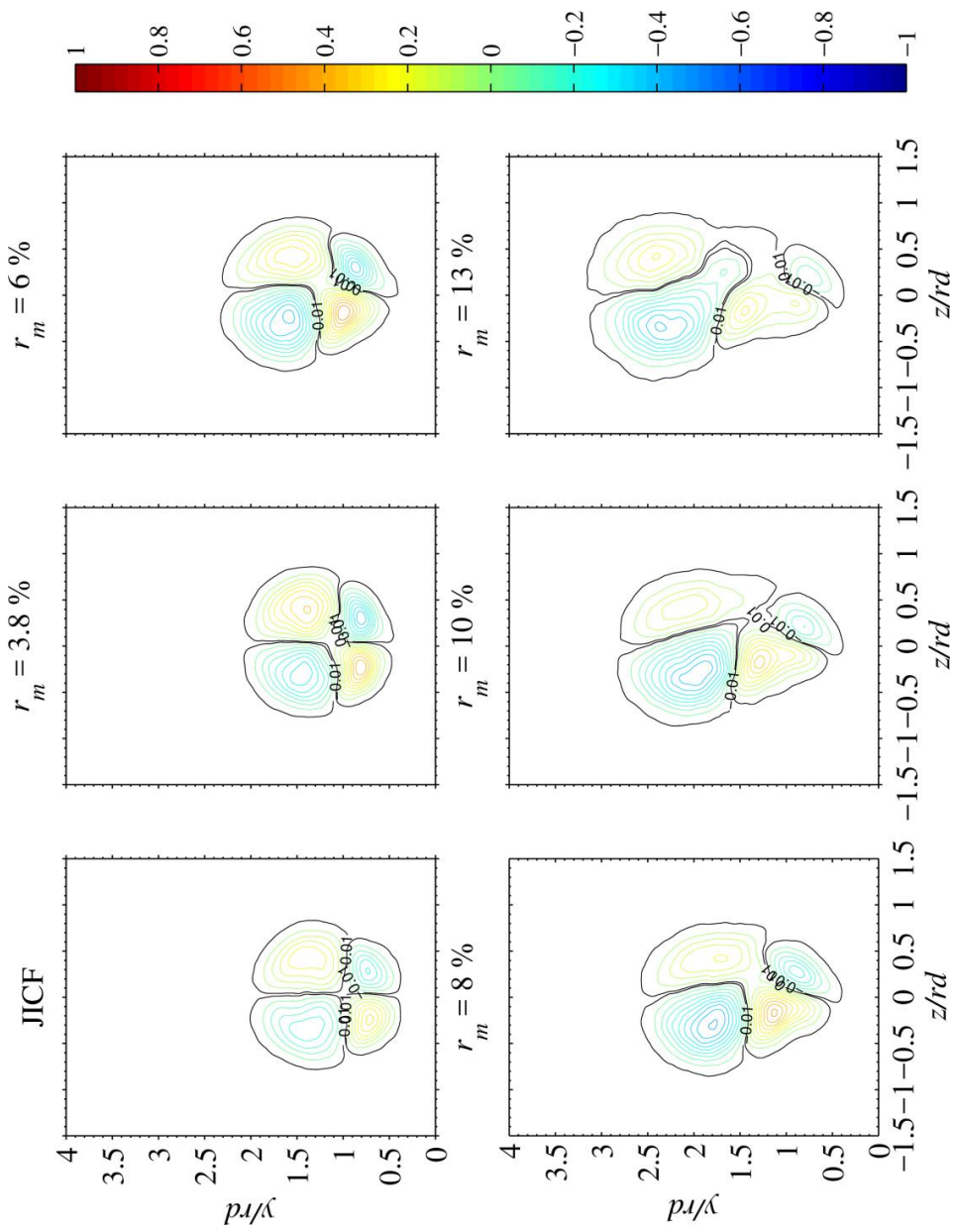
รูปที่ 5.5(ก) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยของส่วนผสมของเจ็ดตามแนวแกน spanwise ไร้มิติ ($V_{j,z}/u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x/rd = 0.25$, โดย contour line จะแสดงค่า $V_{j,z}/u_{cf}$ ที่ $-1 \leq V_{j,z}/u_{cf} \leq 1$ [step by 0.05] และ $-0.01, 0.01$



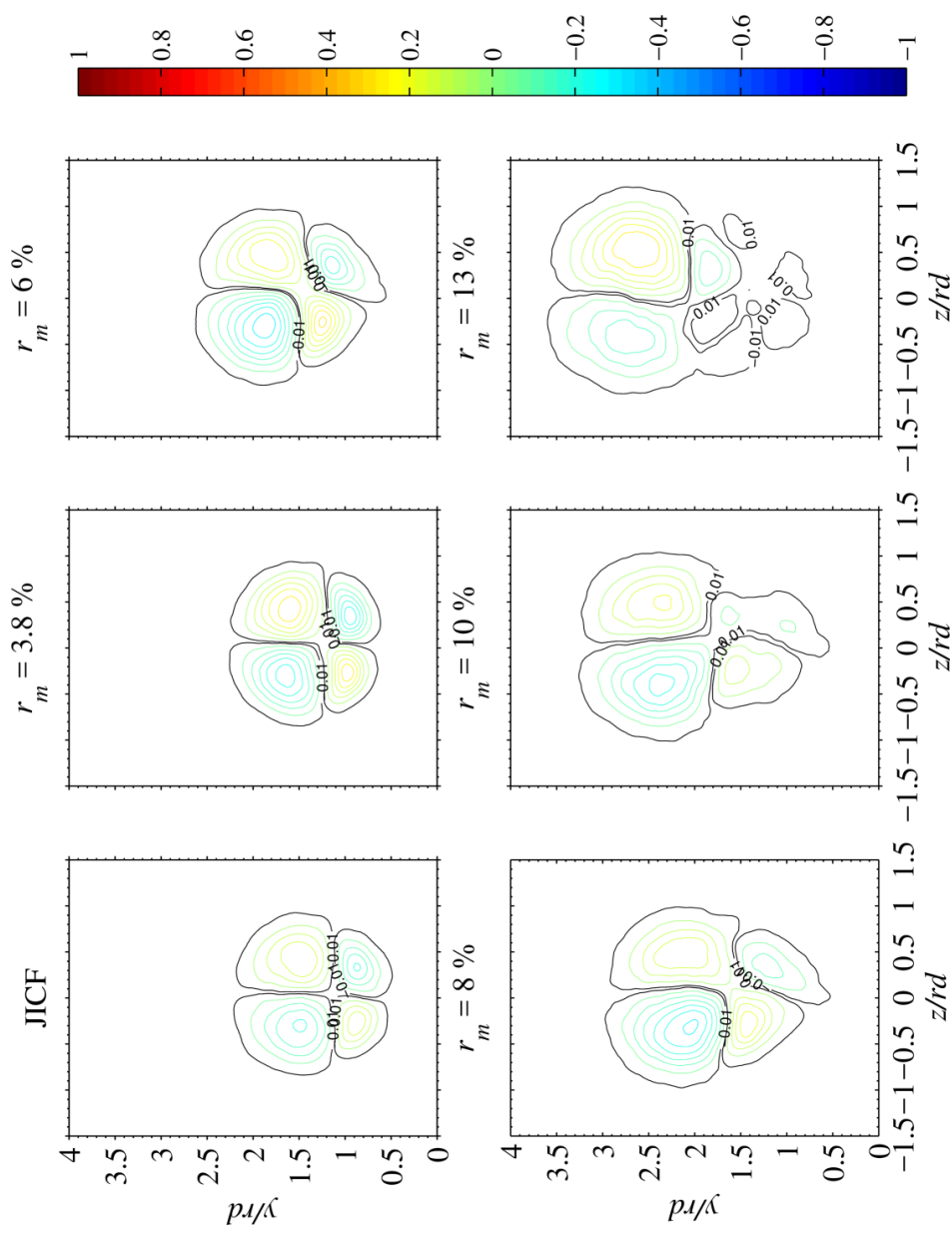
รูปที่ 5.5(๗) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise ไร้มิติ ($V_{j,z} / u_{cf}$) ที่ระยะนับตัดขวาง $x/rd = 0.50$, โดย contour line จะแสดงค่า $V_{j,z} / u_{cf}$ ที่ $-1 \leq V_{j,z} / u_{cf} \leq 1$ [step by 0.05] และ $-0.01, 0.01$



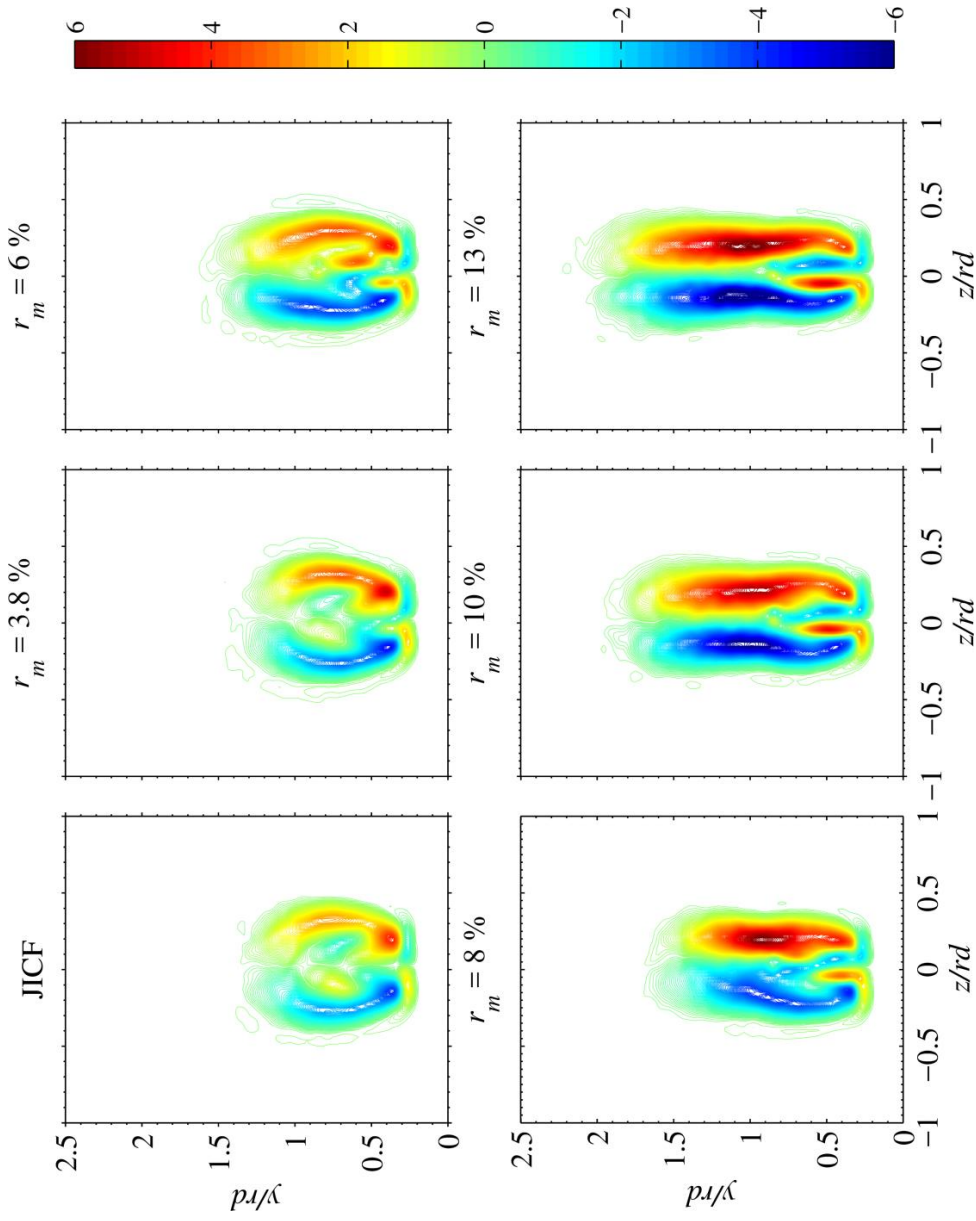
รูปที่ 5.5(ค) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise เริ่มต้น ($V_{j,z} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x_{rd} = 0.75$, โดย contour line จะแสดงค่า $V_{j,z} / u_{cf}$ ที่ $-1 \leq V_{j,z} / u_{cf} \leq 1$ [step by 0.05] และ $-0.01, 0.01$



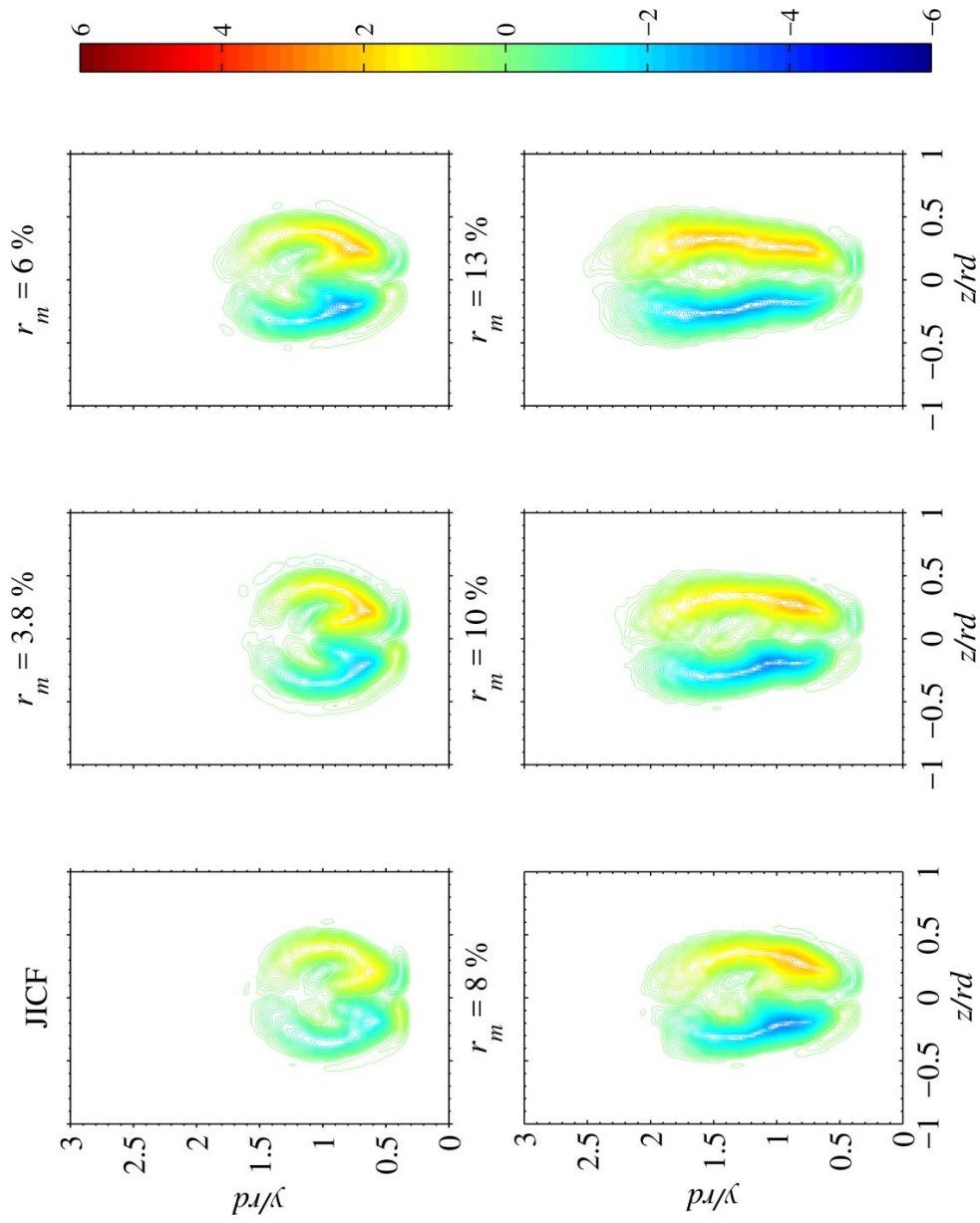
รูปที่ 5.5(ง) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเฉลี่ยตามแนวแกน spanwise เริ่มต้นที่ $(V_{j,z}/u_{cf})$ ที่ระนาบตัดขวาง $x/rd = 1.0$, โดย contour line จะแสดงค่า $V_{j,z}/u_{cf}$ ที่ $-1 \leq V_{j,z}/u_{cf} \leq 1$ [step by 0.05] และ $-0.01, 0.01$



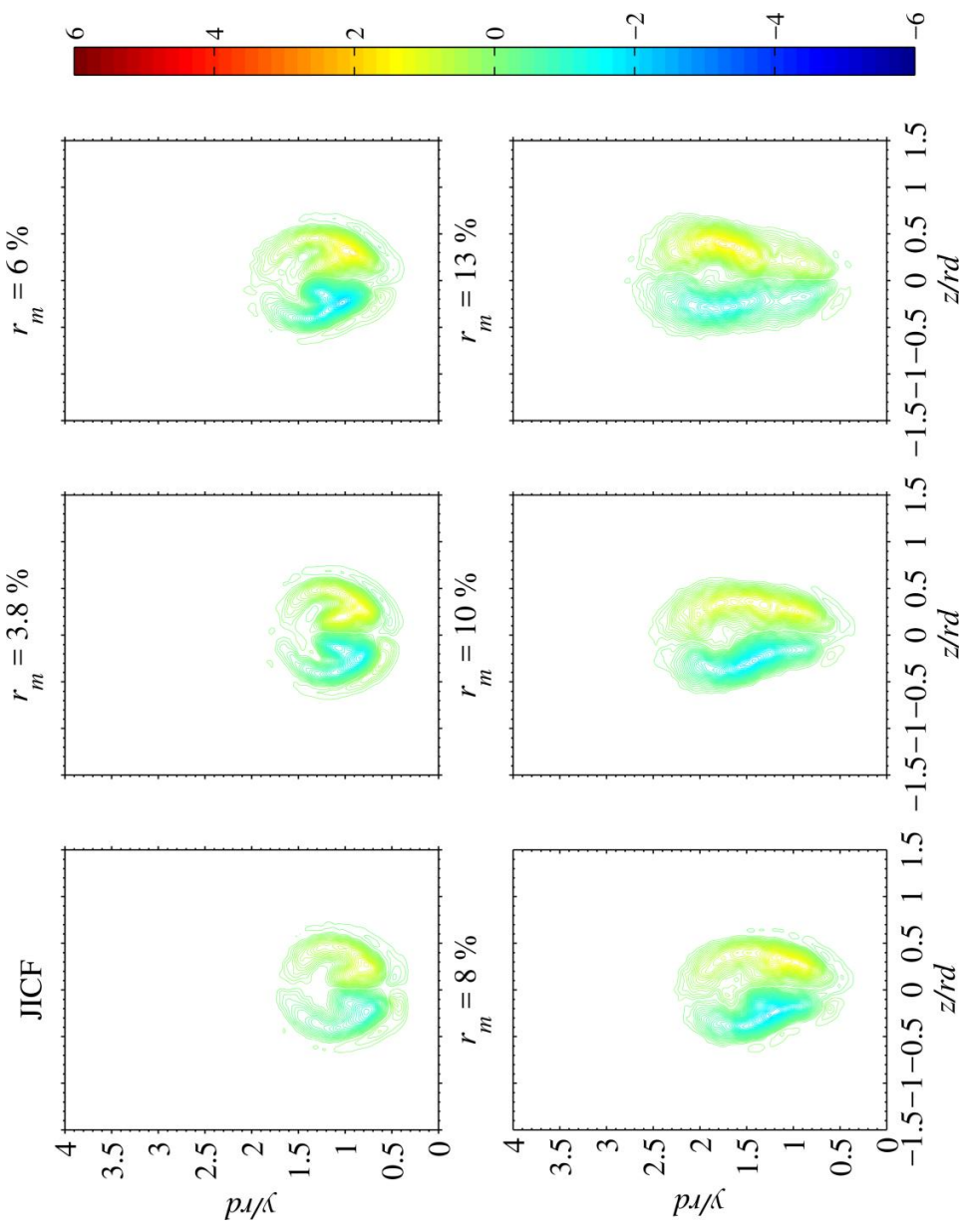
รูปที่ 5.5(จ) การกระจายตัวของความเร็วของส่วนผสมของเจ็ดเหลี่ยมตามแนวแกน spanwise ไร้มิติ ($V_{j,z} / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x/rd = 1.5$, โดย contour line จะแสดงค่า $V_{j,z} / u_{cf}$ ที่ $-1 \leq V_{j,z} / u_{cf} \leq 1$ [step by 0.05] และ -0.01, 0.01



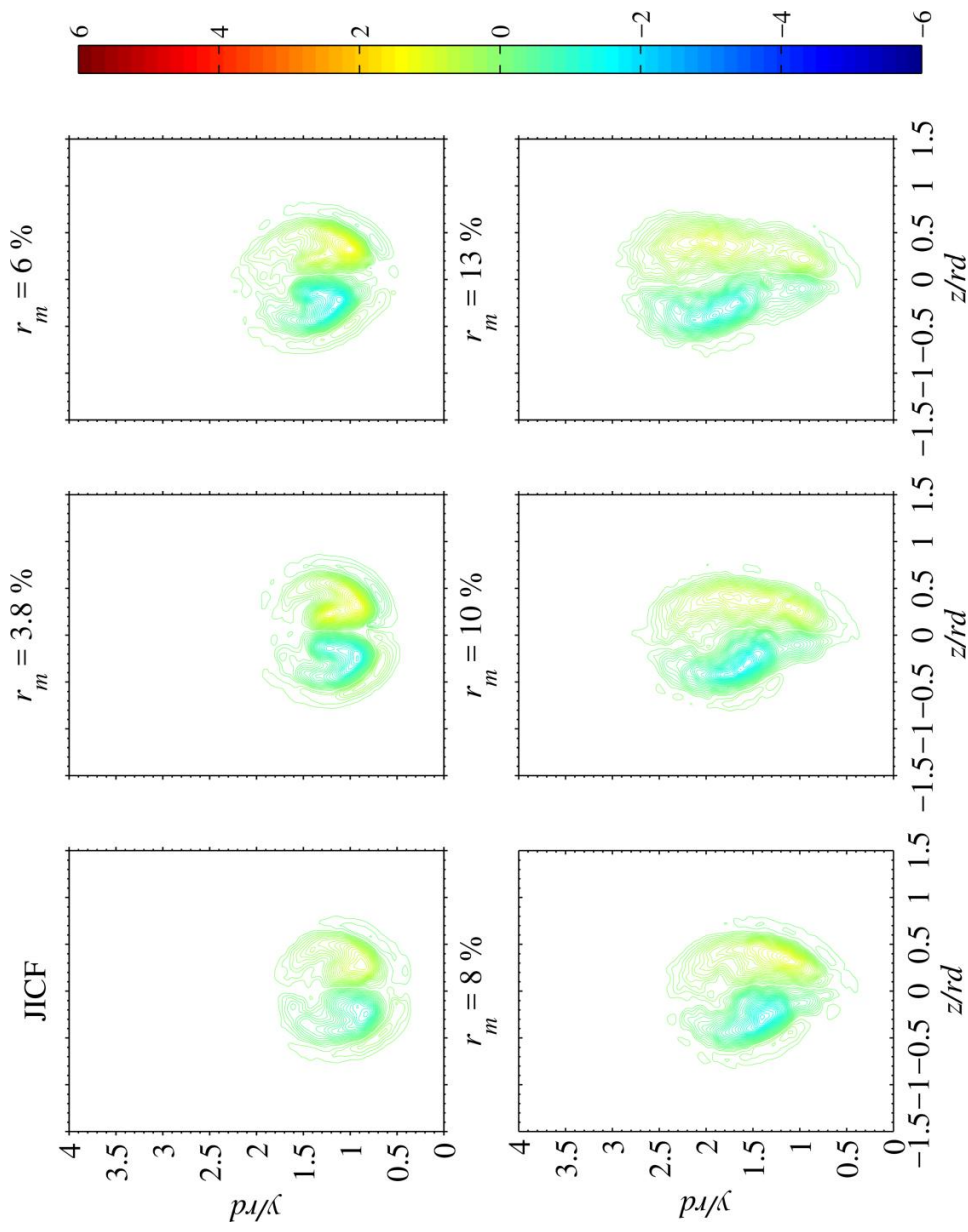
รูปที่ 5.6(ก) การกระจายตัวของ vorticity ของส่วนผสมของเจ็ตโรตีในแกน streamwise ($\omega_{j,x}d/u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $xrd = 0.25$, โดย contour line จะแสดงค่า $\omega_{j,x}d/u_{cf}$ ที่ $-6 \leq \omega_{j,x}d/u_{cf} \leq 6$ [step by 0.05]



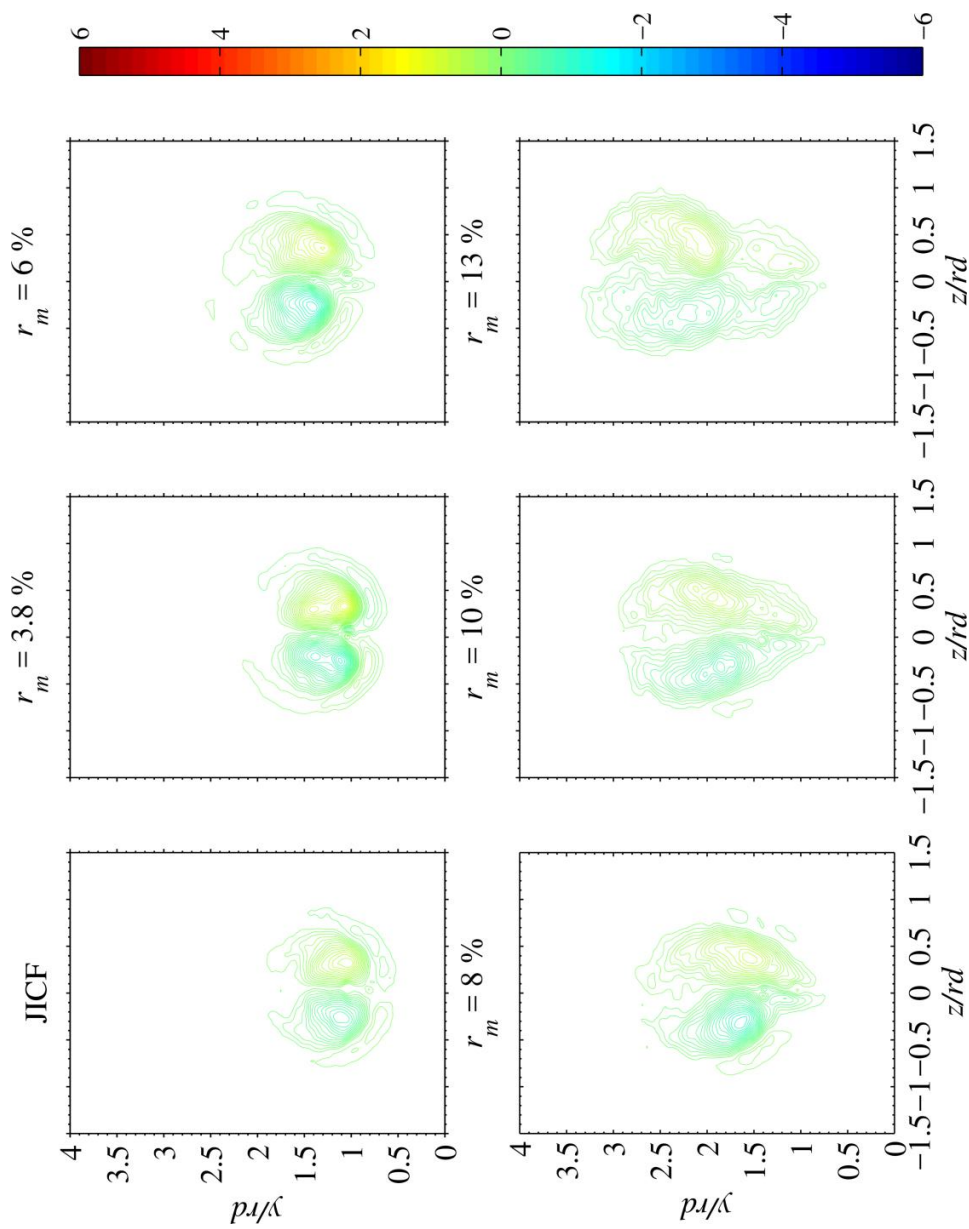
รูปที่ 5.6(ข) การกระจายตัวของ vorticity ของส่วนผสมของเจ็ตโรตีในแกน streamwise ($\omega_{j,x} d / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x/r_d = 0.50$, โดย contour line จะแสดงค่า $\omega_{j,x} d / u_{cf}$ ที่ $-6 \leq \omega_{j,x} d / u_{cf} \leq 6$ [step by 0.05]



รูปที่ 5.6(ค) การกระจายตัวของ vorticity ของส่วนผสมของเจ็ทเริ่มตีในแกน streamwise ($\omega_{j,x} d / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x/r_d = 0.75$, โดย contour line จะแสดงค่า $\omega_{j,x} d / u_{cf}$ ที่ $-6 \leq \omega_{j,x} d / u_{cf} \leq 6$ [step by 0.05]

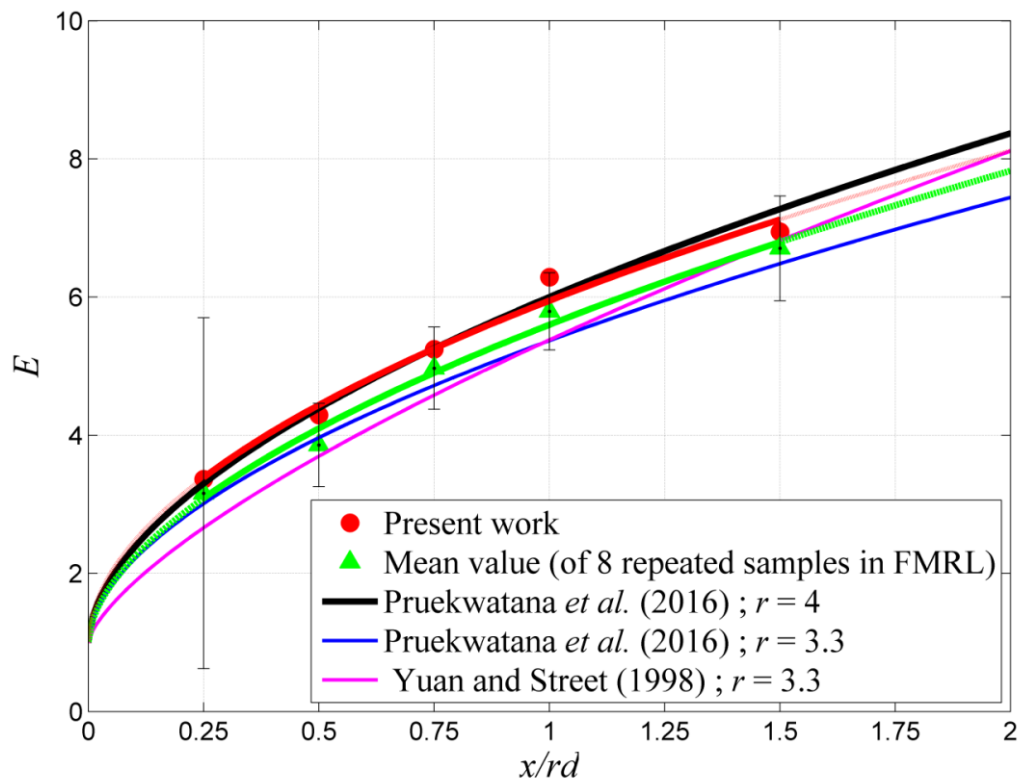


รูปที่ 5.6(ง) การกระจายตัวของ vorticity ของส่วนผสมของเจ็ทโรตีในแกน streamwise ($\omega_{j,x} d / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x/r_d = 1.0$, โดย contour line จะแสดงค่า $\omega_{j,x} d / u_{cf}$ ที่ $-6 \leq \omega_{j,x} d / u_{cf} \leq 6$ [step by 0.05]



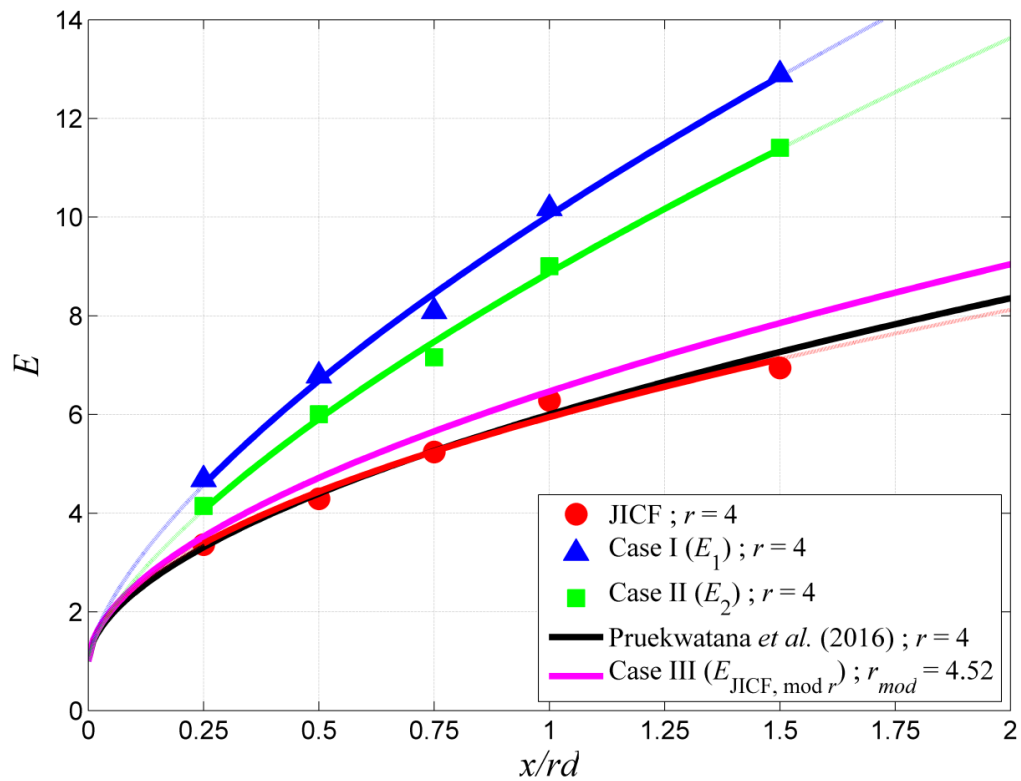
รูปที่ 5.6(จ) การกระจายตัวของ vorticity ของส่วนผสมของเจ็ตโรตีในแกน streamwise ($\omega_{j,x} d / u_{cf}$) ที่ระนาบตัดขวาง $x/r_d = 1.5$, โดย contour line จะแสดงค่า $\omega_{j,x} d / u_{cf}$ ที่ $-6 \leq \omega_{j,x} d / u_{cf} \leq 6$ [step by 0.05]

บทที่ 6



รูปที่ 6.1 การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม (JICF) ที่ประกอบไปด้วย

- 1) งานวิจัยปัจจุบัน
- 2) ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยภายใน Fluid Mechanics Research Laboratory (FMRL) โดยที่ error bar แสดง precision uncertainty ($P_E = tS_E/\sqrt{N}$) ของชุดข้อมูลที่ความเชื่อมั่น 95% โดยที่ระนาบตัดขวาง x/rd เท่ากับ 0.25 จะมีจำนวน sample N เท่ากับ 2 ในขณะที่ระนาบตัดขวาง x/rd อื่นๆจะมีจำนวน sample N เท่ากับ 8
- 3) สมการการประมาณการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรที่เสนอโดย Pruekwatana *et al.* (2016) ที่ค่า $r = 3.3$ และ $r = 4$
- 4) Yuan and Street (1998) ; $r = 3.3$



รูปที่ 6.2

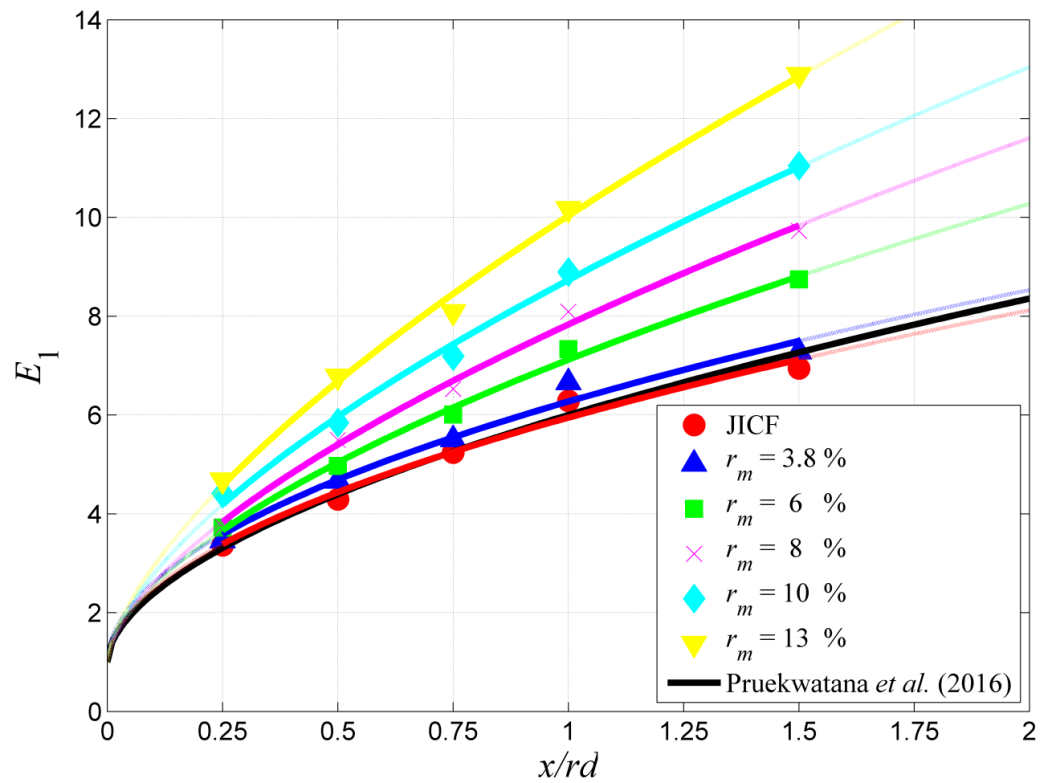
อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกรณี

JICF : ไม่ฉีดเจ็ดควบคุม

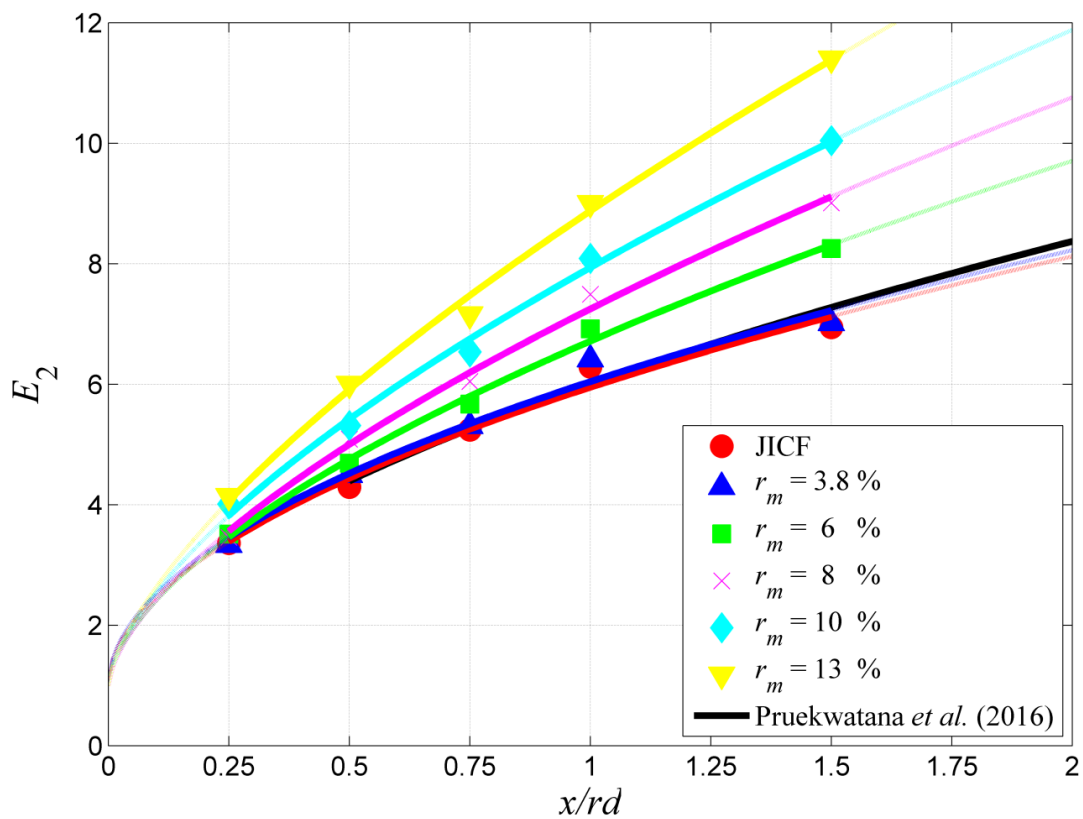
Case I : ฉีดเจ็ดควบคุมโดยมีค่า r_m เท่ากับ 13% เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (E_1)

Case II : ฉีดเจ็ดควบคุมโดยมีค่า r_m เท่ากับ 13% เมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับเจ็ดหลัก (E_2)

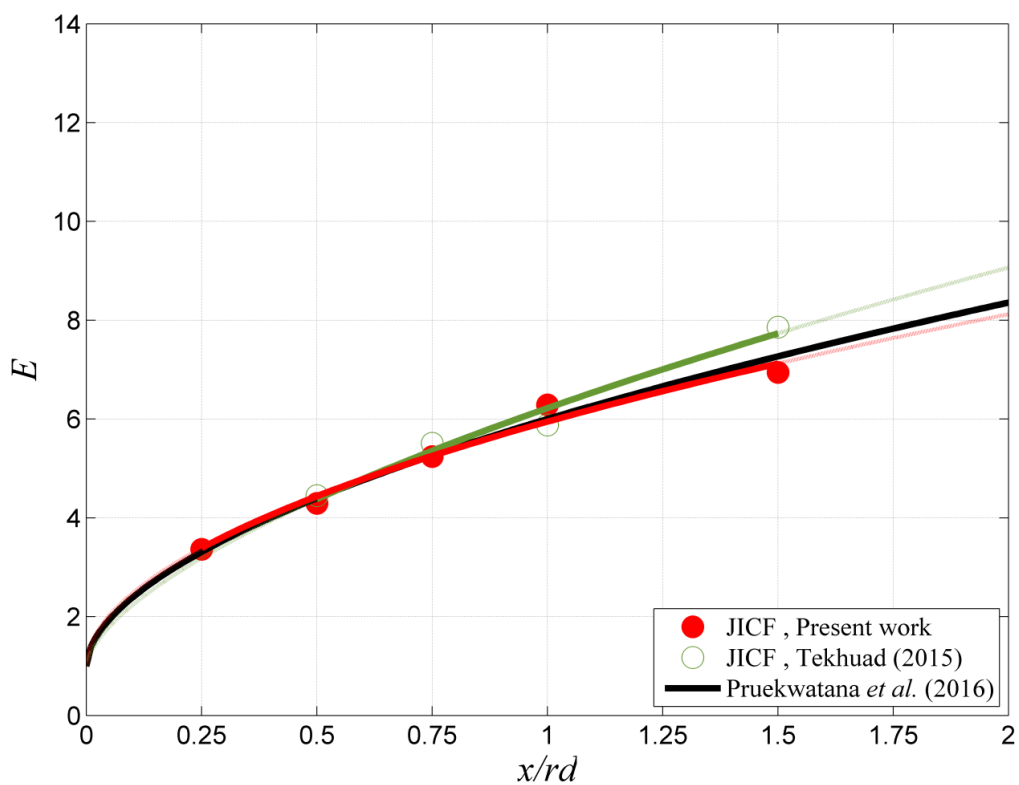
Case III : ไม่ฉีดเจ็ดควบคุมโดยคิดเปรียบเสมือนว่าเจ็ดหลักมีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ซึ่งรวมผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ซึ่งเท่ากับ 13% ไปแล้ว ($E_{JICF, mod r}$) โดยที่ $r_{mod} = 4.52$



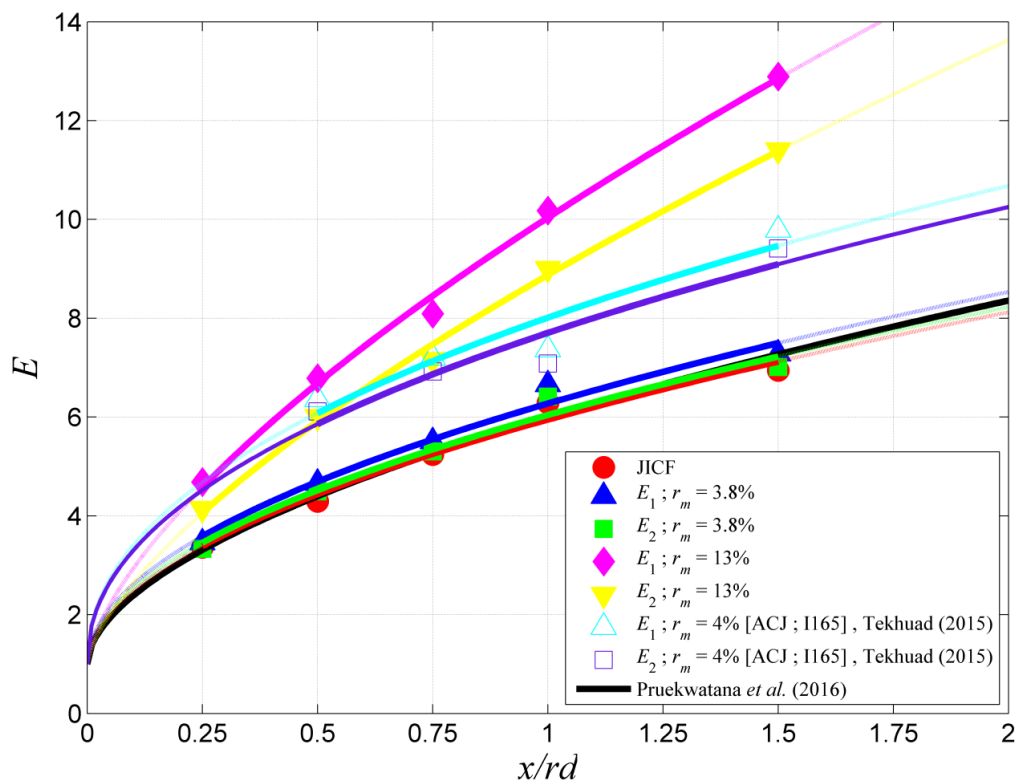
รูปที่ 6.3(ก) ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้ของไหลเชิงมวลของเจ็ทควบคุมต่อเจ็ทหลัก (r_m) ต่อค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ทควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) และไม่เกี่ยวข้องกับของไหลในเจ็ทหลัก (F_1)



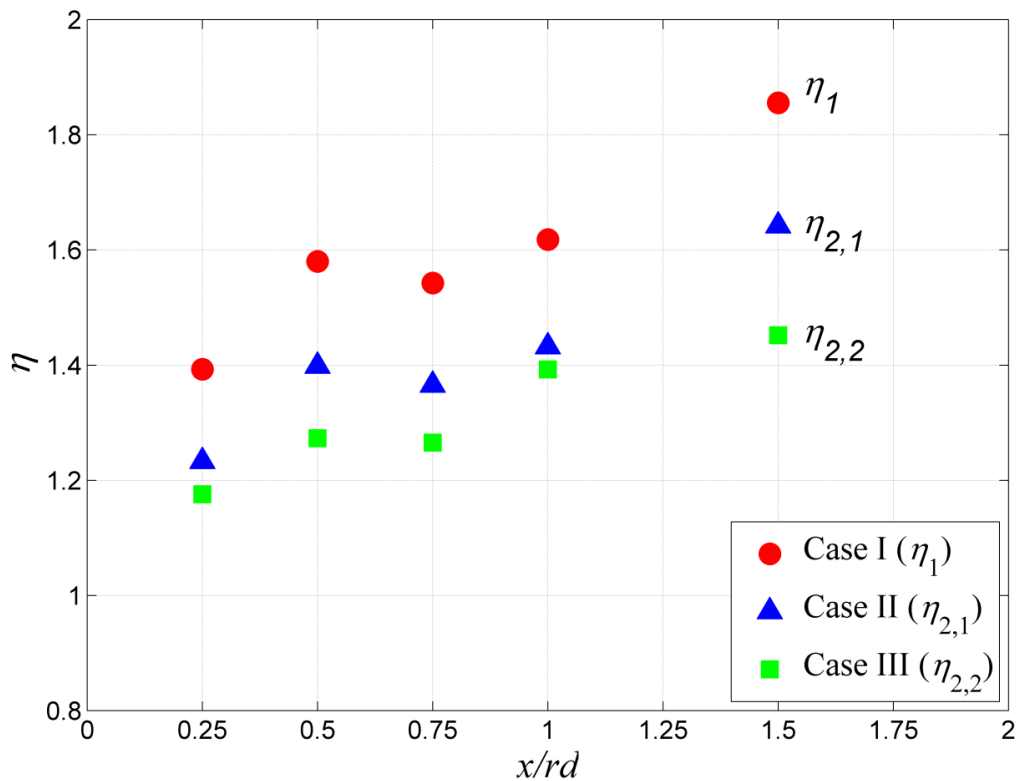
รูปที่ 6.3(ข) ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลัก (F_1)



รูปที่ 6.4(ก) การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในกรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุมในงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Tekhuad (2015) และสมการการประมาณการพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของ Pruekwatana *et al.* (2016) ที่ r เท่ากับ 4



รูปที่ 6.4(ข) การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนียวนำการผสมเชิงปริมาตรด้วยการประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมตามแนวตั้งด้านท้ายลมและการประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงโดย Tekhuad (2015)



รูปที่ 6.5

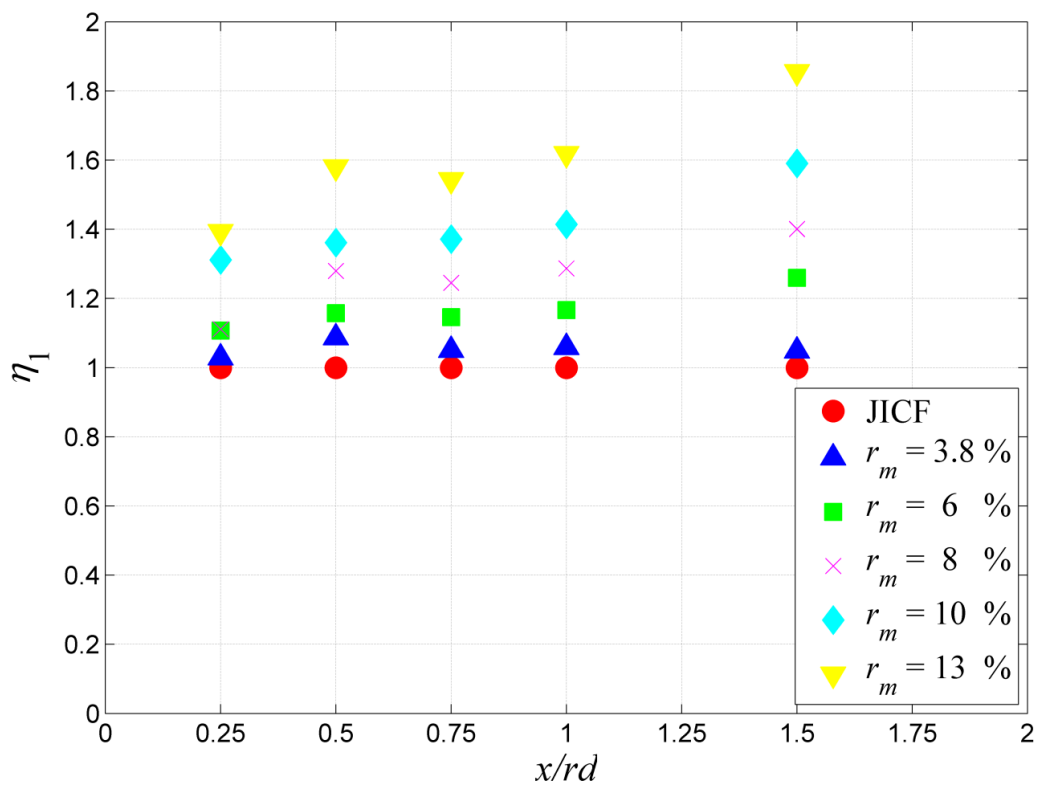
ประสิทธิภาพของการใช้เจ็ดควบคุมที่ค่า $r_m = 13\%$ กรณี

Case I : ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแส
ลมขวาง (F_2) และไม่เกี่ยวข้องกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1)

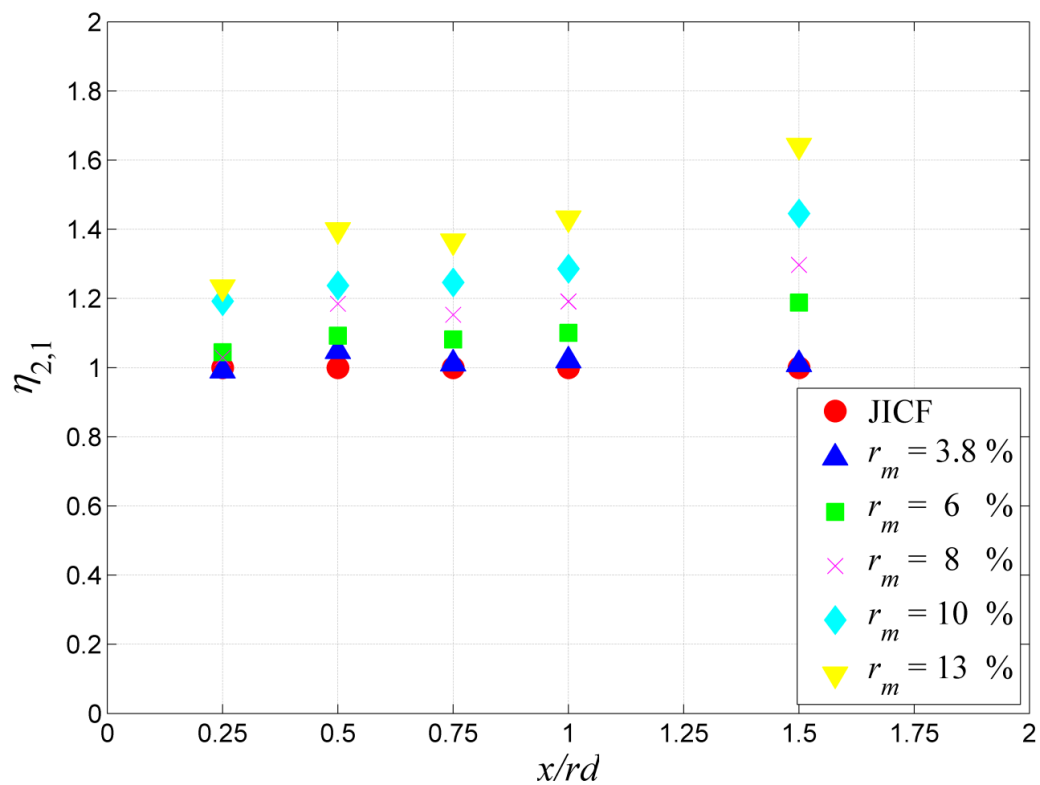
หรือ η_1

Case II : ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของ
ไหลในเจ็ดหลัก (F_1) เมื่อใช้ค่า E_{JICF} ที่ค่า r เท่ากับ 4 ในการ
เปรียบเทียบ หรือ $\eta_{2,1}$

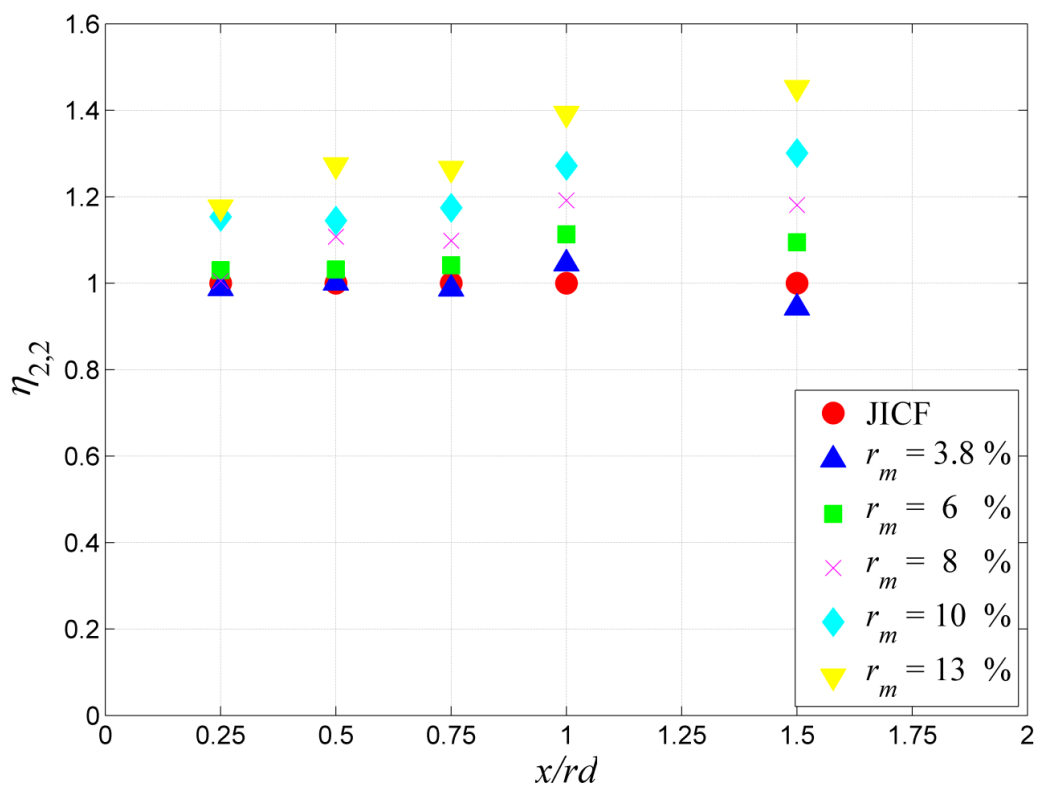
Case III : ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของ
ไหลในเจ็ดหลัก (F_1) เมื่อใช้ค่า $E_{JICF, mod r}$ ที่ค่า r_{mod} เท่ากับ
4.52 ในการเปรียบเทียบ หรือ $\eta_{2,2}$



รูปที่ 6.6(ก) ประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสมเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุม คือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (η_1)

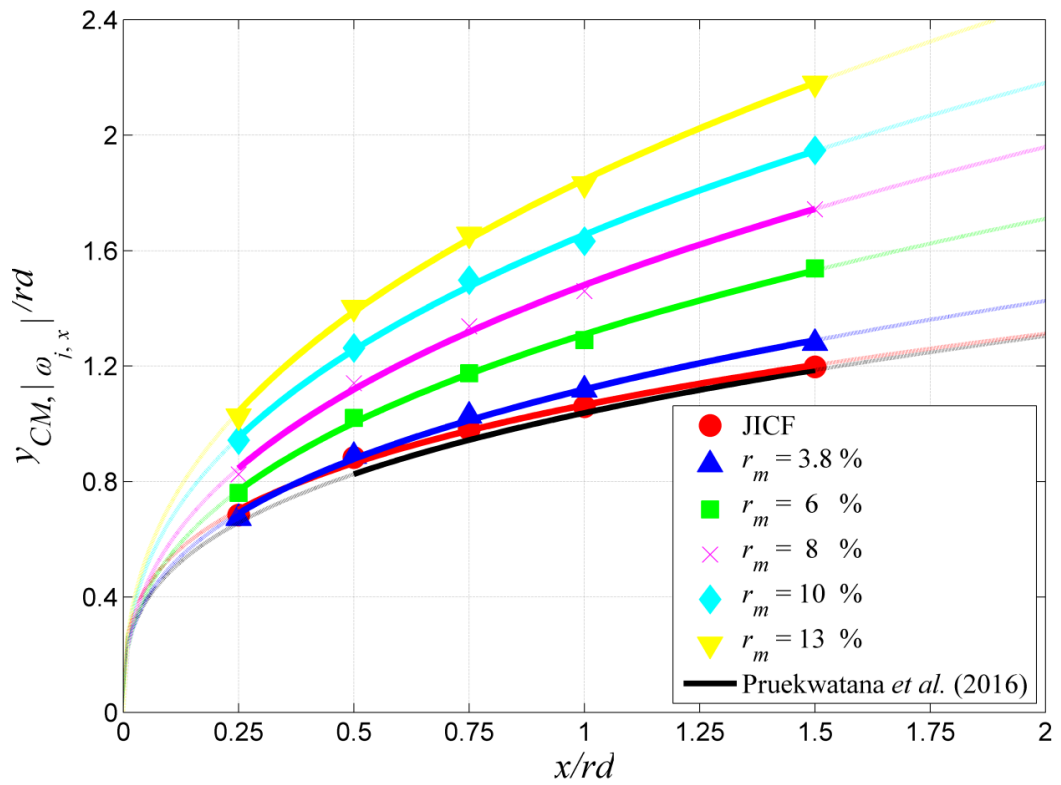


รูปที่ 6.6(ข) ประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสมเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุม คือของไหลชนิดของไหลในเจ็ตหลัก (F_1) เมื่อใช้ค่า E_{JICF} ที่ค่า r เท่ากับ 4 ในการเปรียบเทียบ ($\eta_{2,1}$)

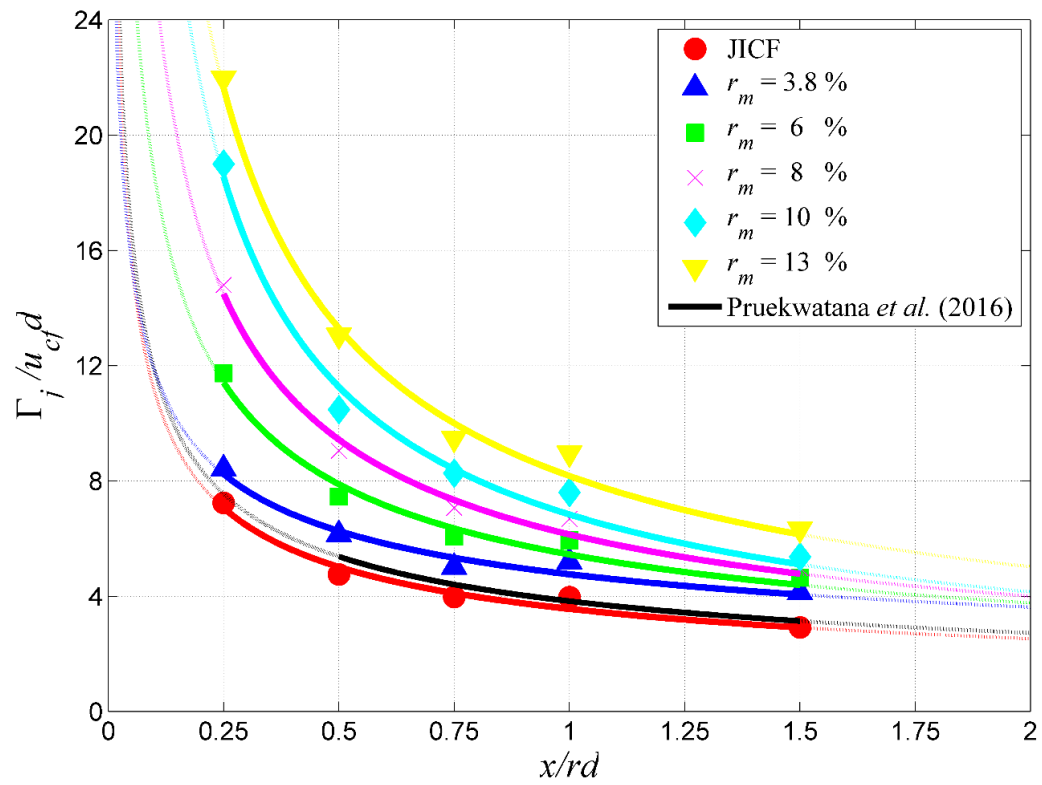


รูปที่ 6.6(ค) ประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสมเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุม คือของไหลชนิดของไหลในเจ็ตหลัก (F_1) เมื่อใช้ค่า $E_{JICF, mod r}$ ในการเปรียบเทียบ ($\eta_{2,2}$) โดยในแต่ละ r_m จะมีค่า r_{mod} ดังนี้

- 1) $r_m = 3.8\%$; $r_{mod} = 4.15$
- 2) $r_m = 6\%$; $r_{mod} = 4.24$
- 3) $r_m = 8\%$; $r_{mod} = 4.32$
- 4) $r_m = 10\%$; $r_{mod} = 4.40$
- 5) $r_m = 13\%$; $r_{mod} = 4.52$

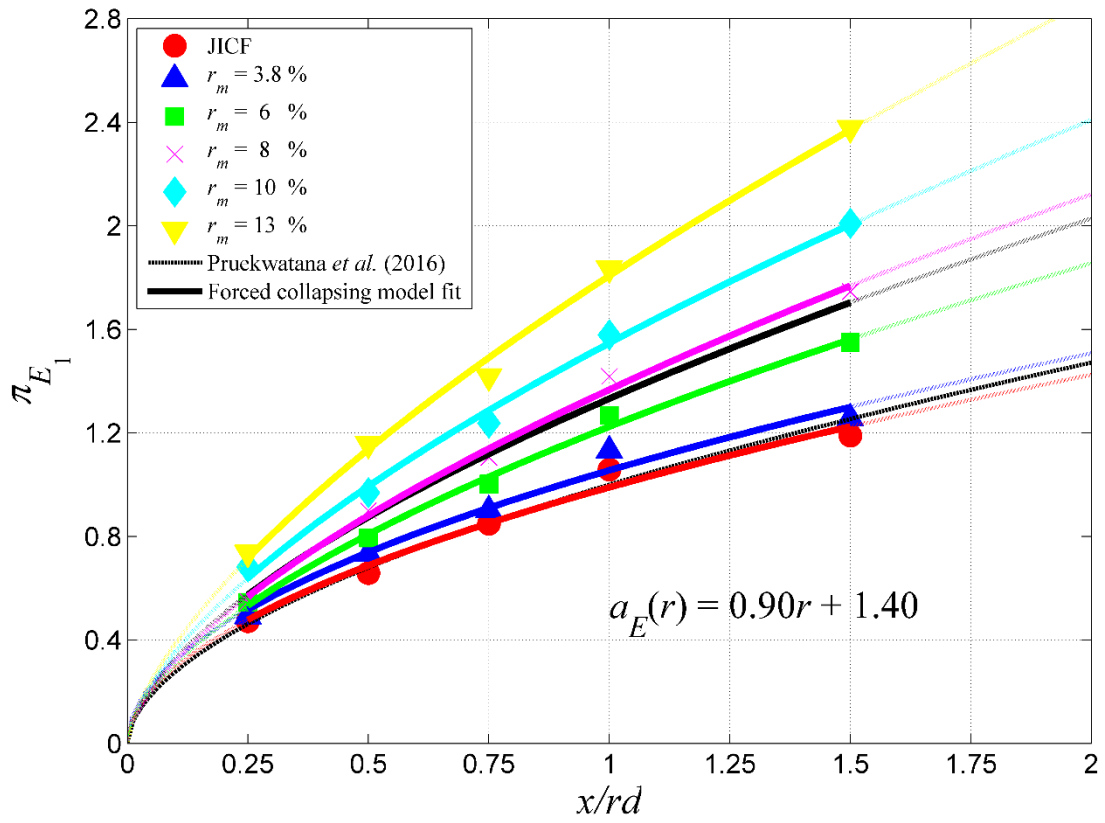


รูปที่ 6.7 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อเส้นทางเดินไร้มิติของเจ็ต ซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาด vorticity ในแนวแกน streamwise



รูปที่ 6.8 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อ circulation ไร้มิติของเจ็ต

บทที่ 7

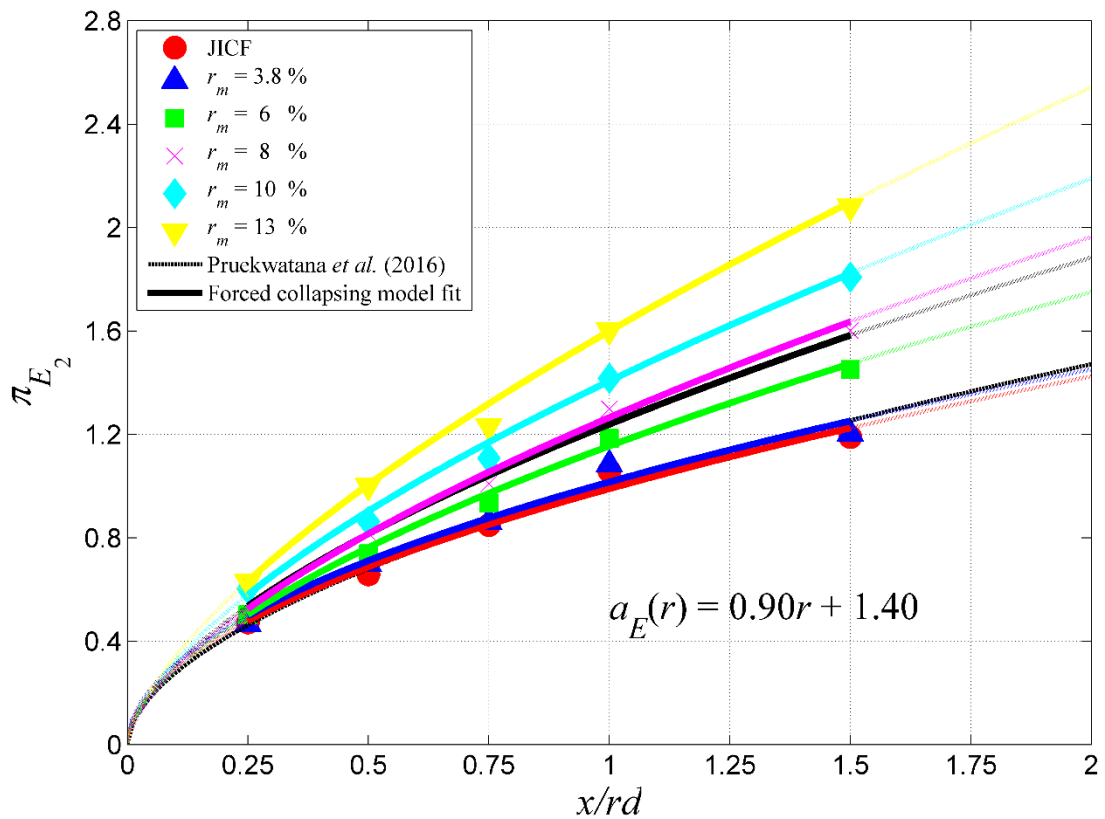


รูปที่ 7.1 ผลของอัตราส่วนอัตราการผลิตเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนียวต่อการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) และไม่เกี่ยวข้องกันของไหลในเจ็ดหลัก (F_1)

Scaling law :
$$\left[\pi_{E_1} = \frac{E_1 - 1}{a_E(r)} \right] = f(x/rd)$$

Scaling law coefficient : $a_E(r) = 0.9r + 1.4$

Collapsibility : $\varepsilon_{\pi_q(r_m)} = 21.4\% - 27.0\%, R_{\pi_q}^2 = 0.6974$

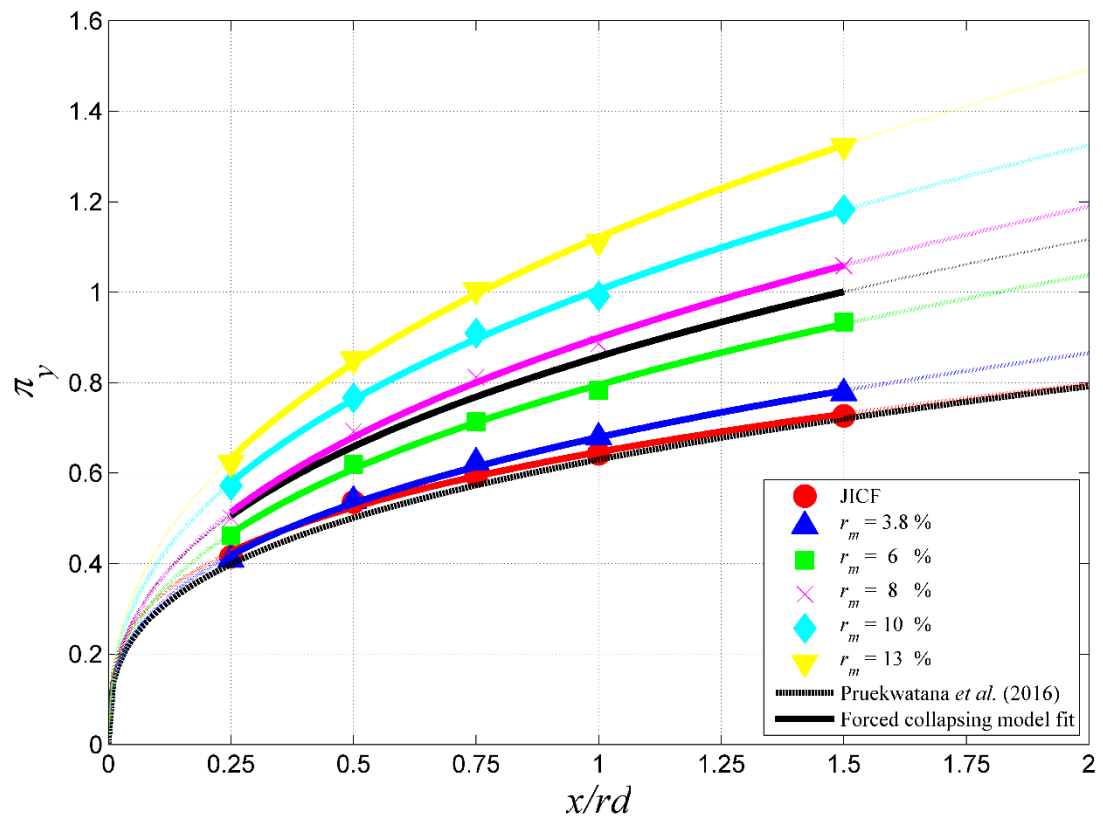


รูปที่ 7.2 ผลของอัตราส่วนอัตราการผลิตเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผลิตเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1)

$$\text{Scaling law : } \left[\pi_{E_2} = \frac{E_2 - 1}{a_E(r)} \right] = f(x / rd)$$

$$\text{Scaling law coefficient : } a_E(r) = 0.9r + 1.4$$

$$\text{Collapsibility: } \varepsilon_{\pi_q(r_m)} = 16.6\% - 22.5\%, \quad R_{\pi_q}^2 = 0.7826$$

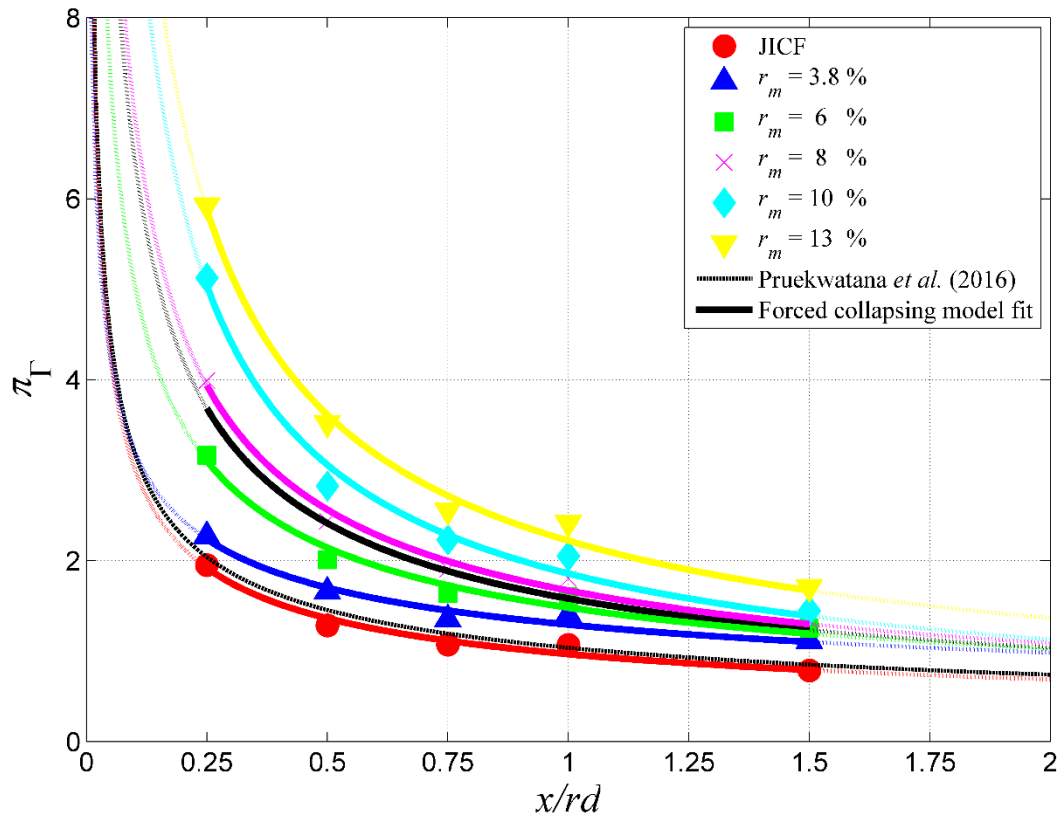


รูปที่ 7.3 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อเส้นทางเดินของเจ็ตซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาด vorticity ของเจ็ตในแนวแกน streamwise

$$\text{Scaling law: } \left[\pi_y = \frac{y_{CM} |\omega_{j,x}|}{r^{C_y} d} \right] = f(x/rd)$$

$$\text{Scaling law coefficient: } C_y = 1.36$$

$$\text{Collapsibility: } \varepsilon_{\pi_q(r_m)} = 20.4\% - 23.2\%, \quad R_{\pi_q}^2 = 0.5564$$

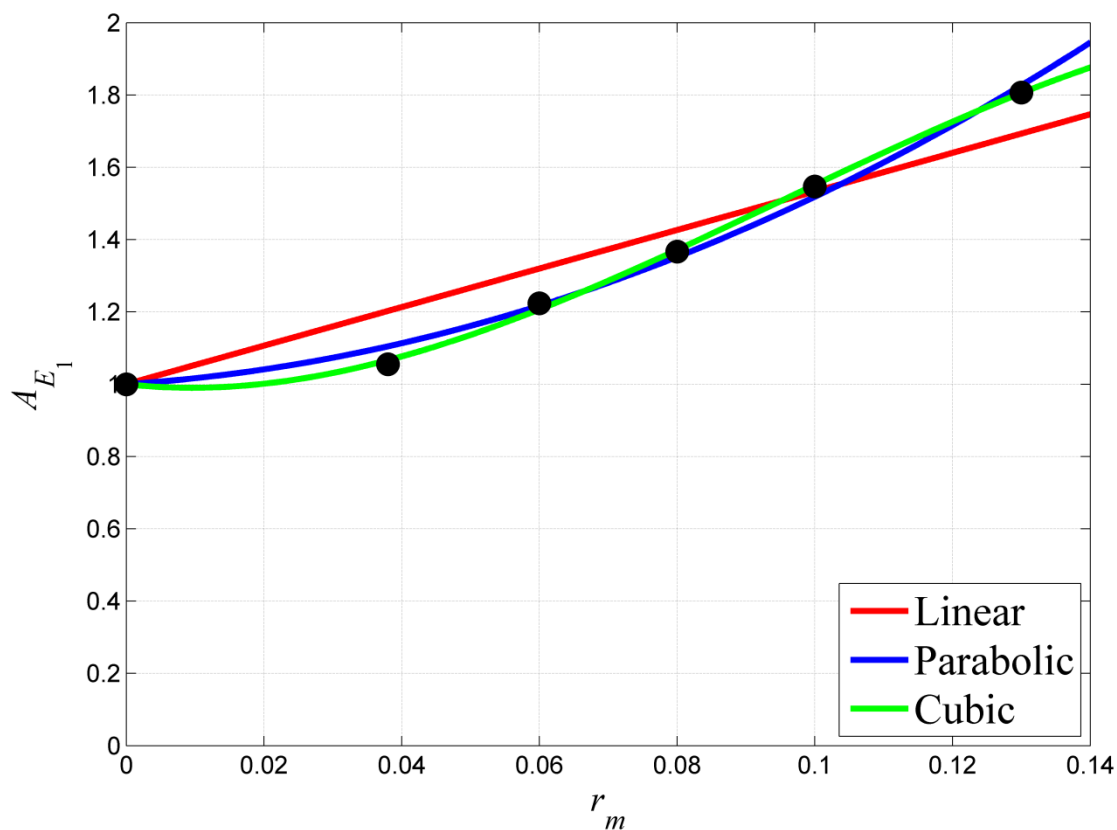


รูปที่ 7.4 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อค่า circulation ของเจ็ต

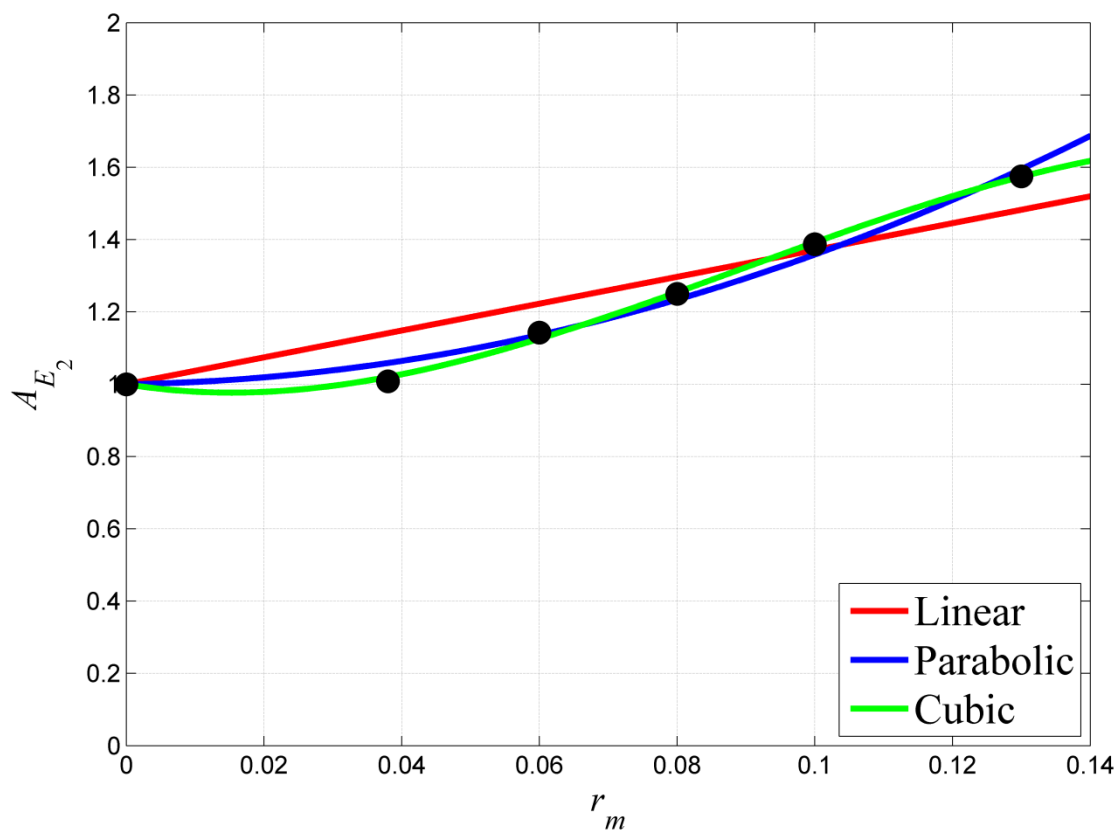
$$\text{Scaling law: } \left[\pi_\Gamma = \frac{\Gamma_j}{u_{cf} r^{C_\Gamma} d} \right] = f(x/rd)$$

$$\text{Scaling law coefficient : } C_\Gamma = 0.94$$

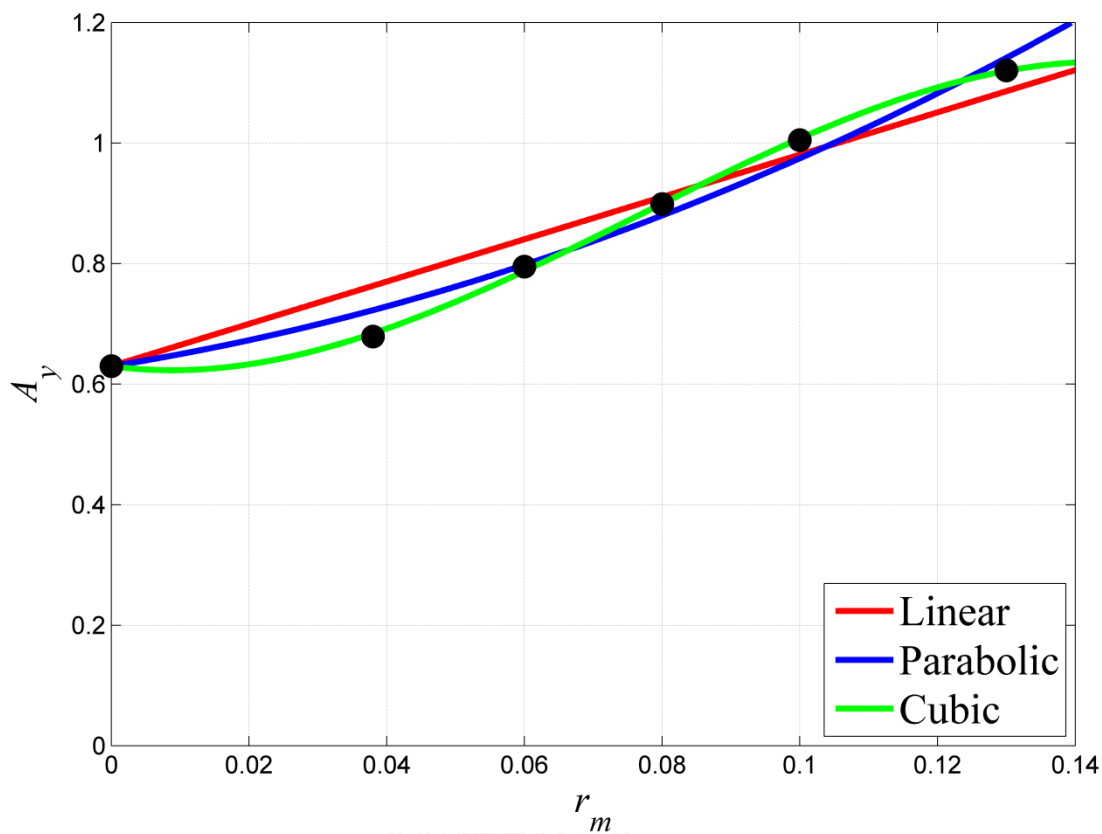
$$\text{Collapsibility: } \varepsilon_{\pi_q(r_m)} = 32.2\% - 42.2\%, \quad R_{\pi_q}^2 = 0.5271$$



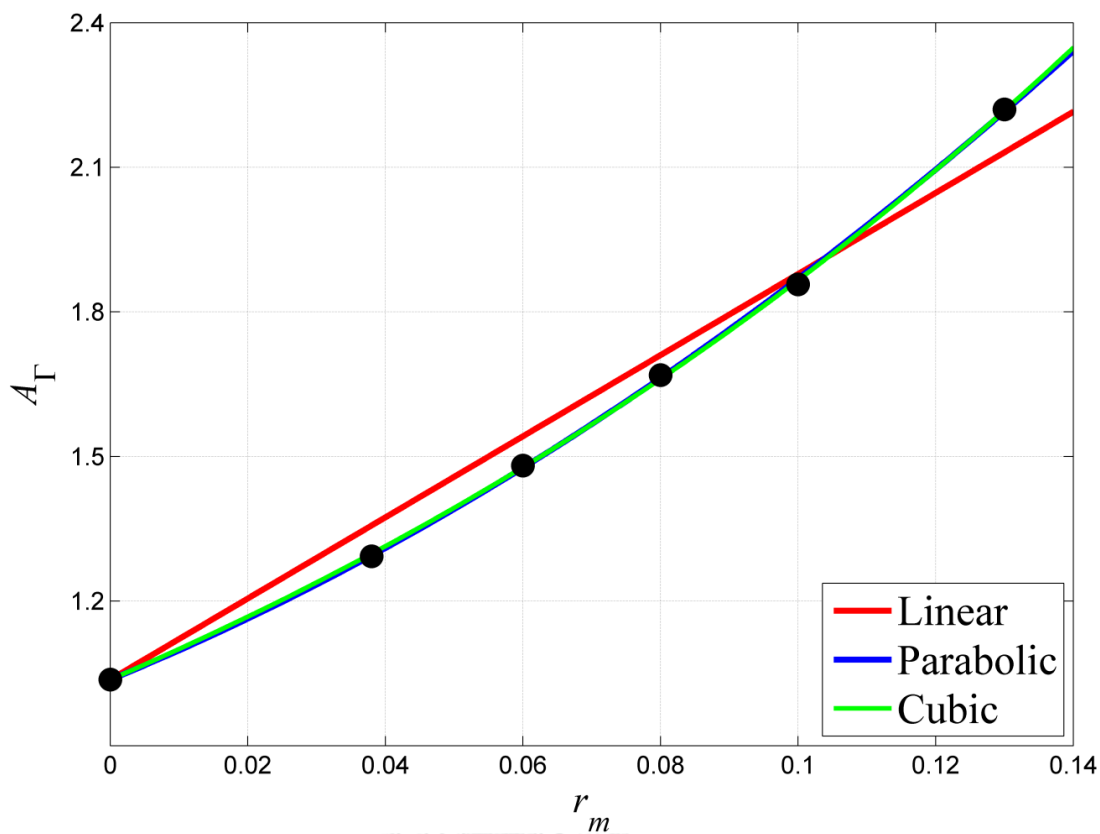
รูปที่ 7.5 ผลของ r_m ที่มีต่อ A_{E_1} และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ A_{E_1}



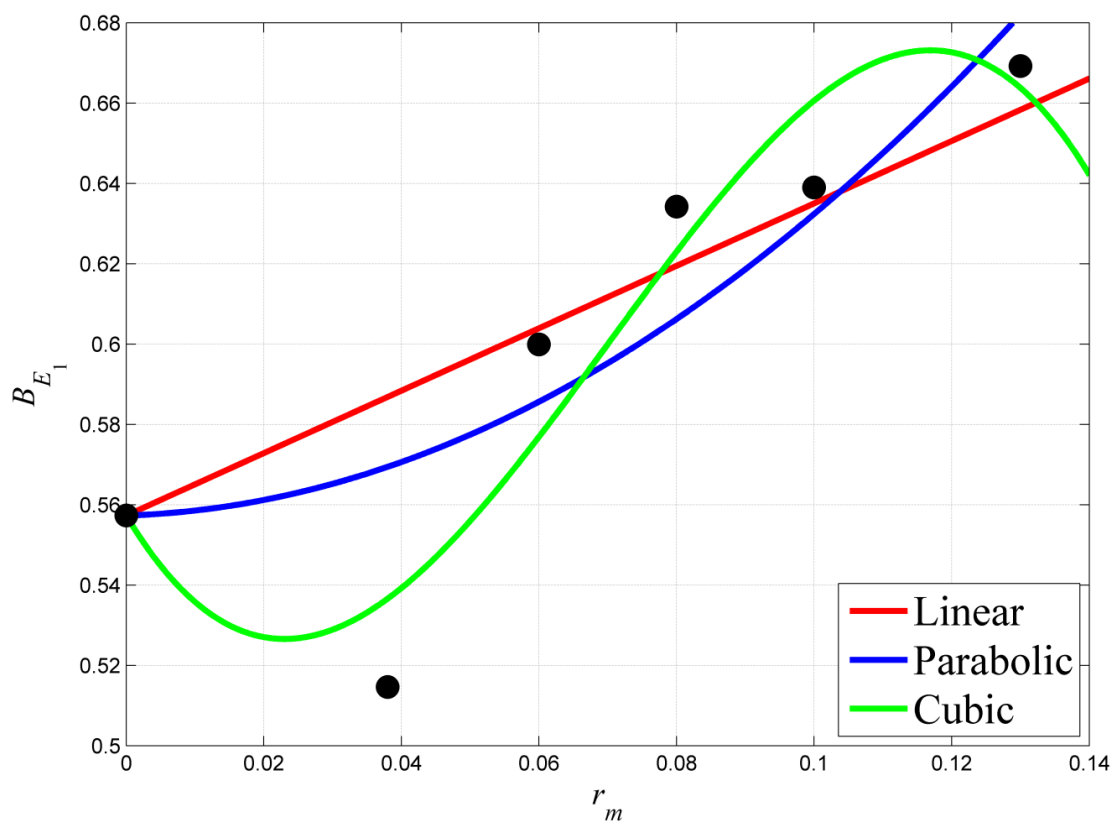
รูปที่ 7.6 ผลของ r_m ที่มีต่อ A_{E_2} และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ A_{E_2}



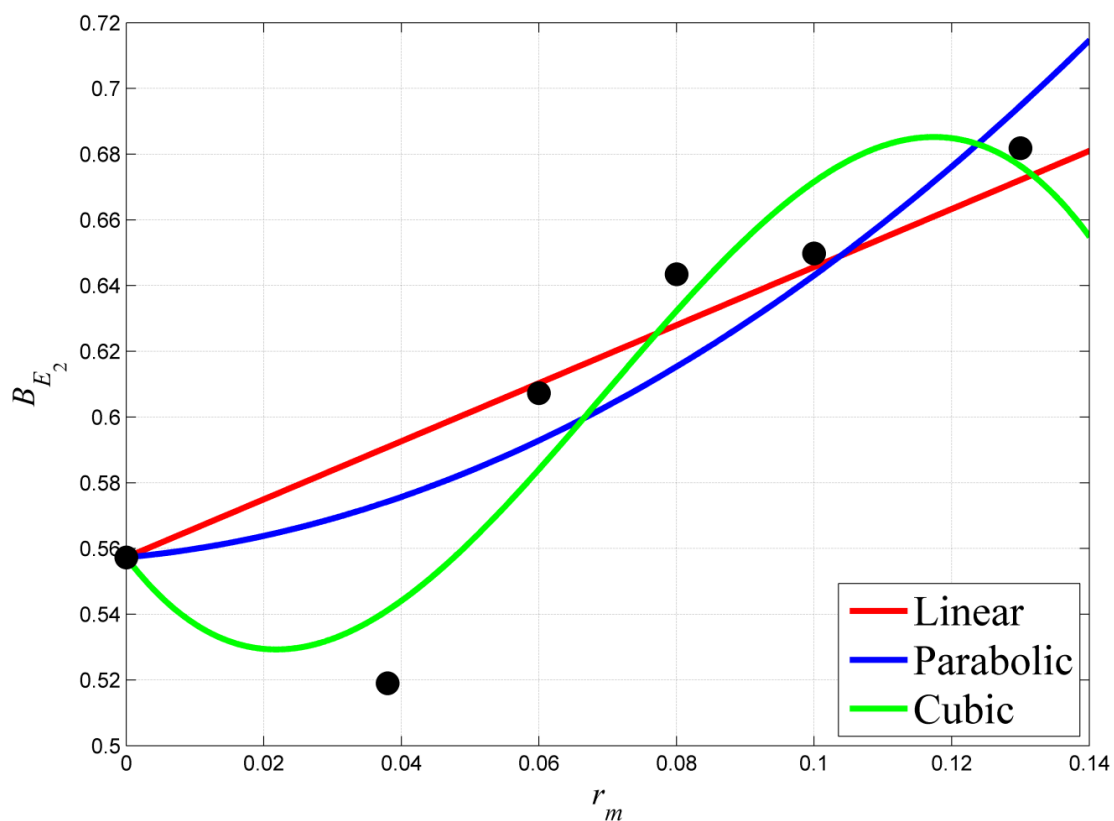
รูปที่ 7.7 ผลของ r_m ที่มีต่อ A_y และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ A_y



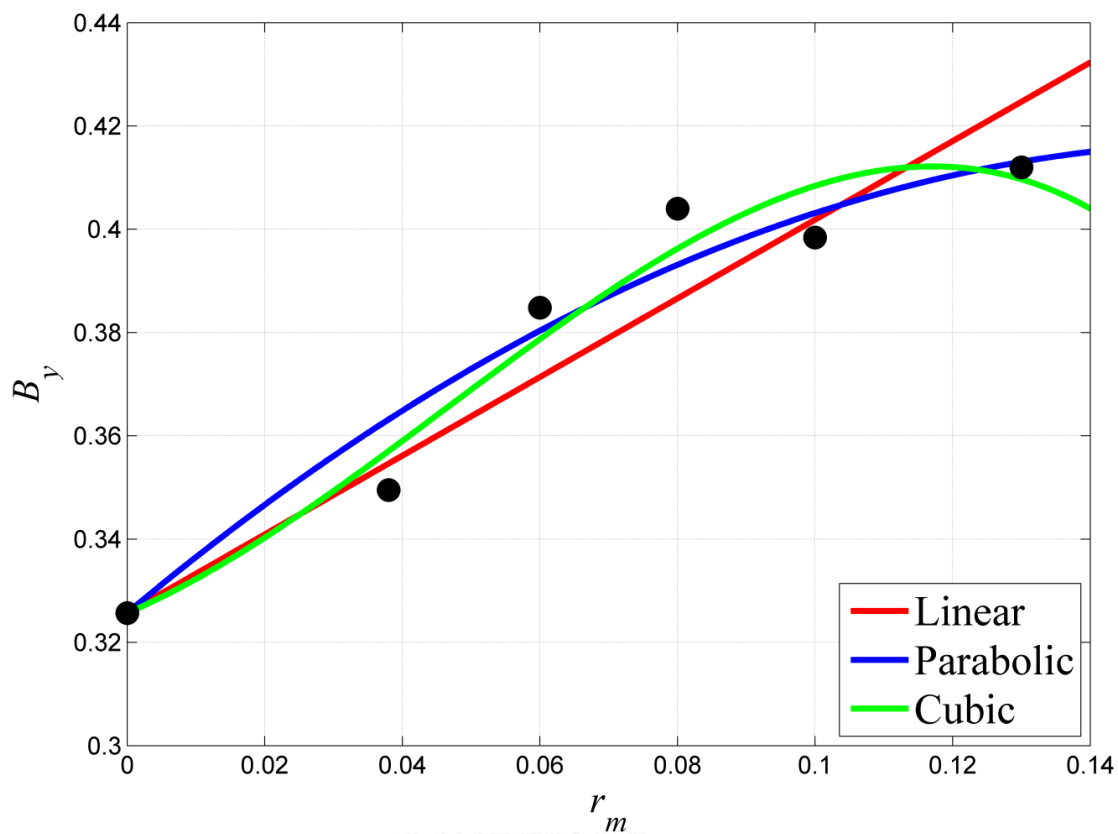
รูปที่ 7.8 ผลของ r_m ที่มีต่อ A_T และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ A_T



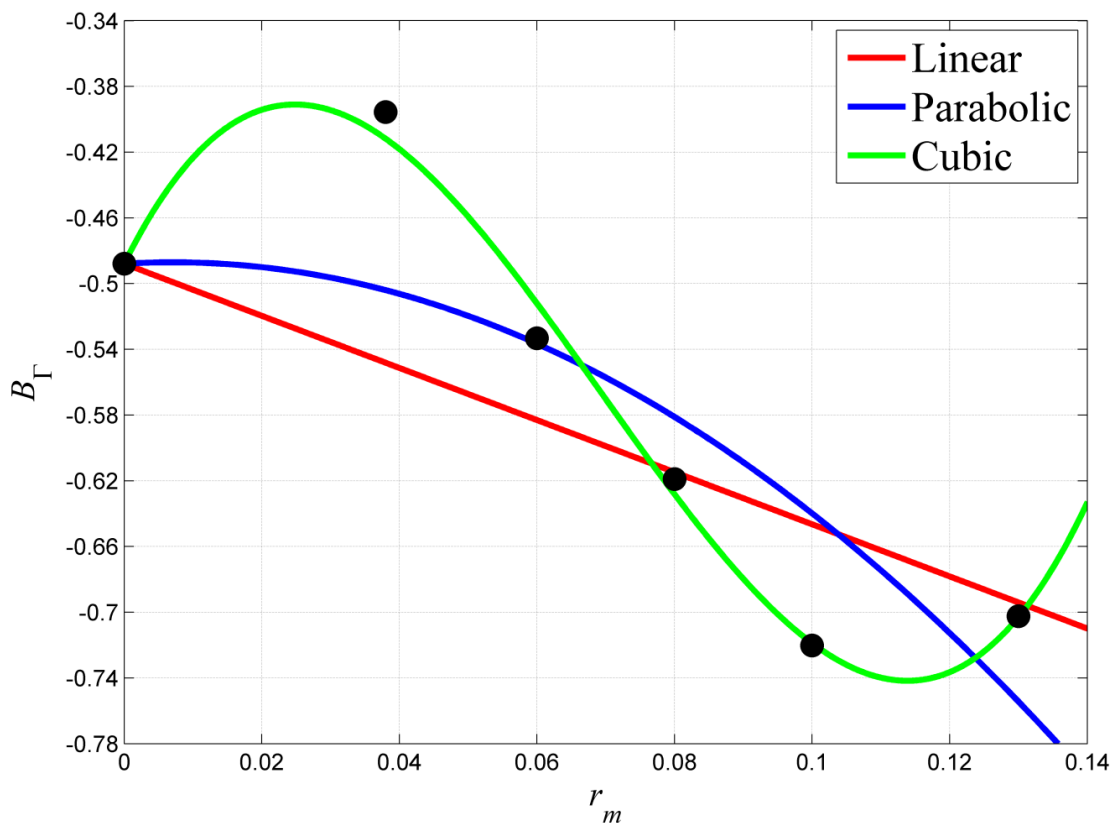
รูปที่ 7.9 ผลของ r_m ที่มีต่อ B_{E_1} และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ B_{E_1}



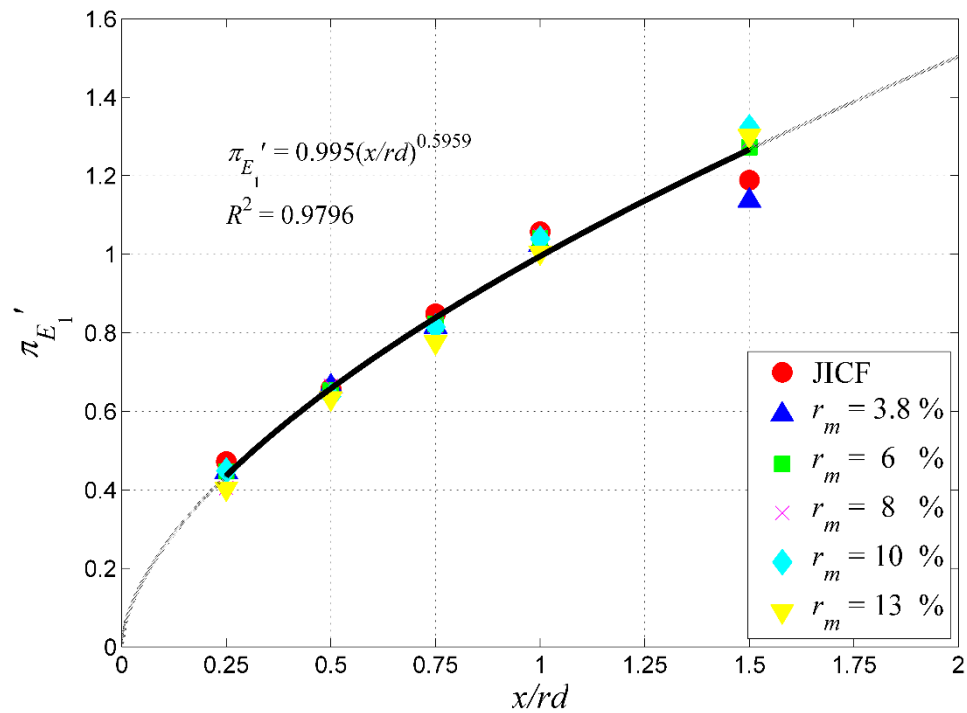
รูปที่ 7.10 ผลของ r_m ที่มีต่อ B_{E_2} และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ B_{E_2}



รูปที่ 7.11 ผลของ r_m ที่มีต่อ B_y และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ B_y



รูปที่ 7.12 ผลของ r_m ที่มีต่อ B_T และการประยุกต์ใช้โมเดลเส้นตรง (linear model fit), พหุนามกำลังสอง (parabolic model fit), และพหุนามกำลังสาม (cubic model fit) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง r_m และ B_T



รูปที่ 7.13 การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้ของไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) และไม่เกี่ยวข้องกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi'_q = \pi_q/s_A$

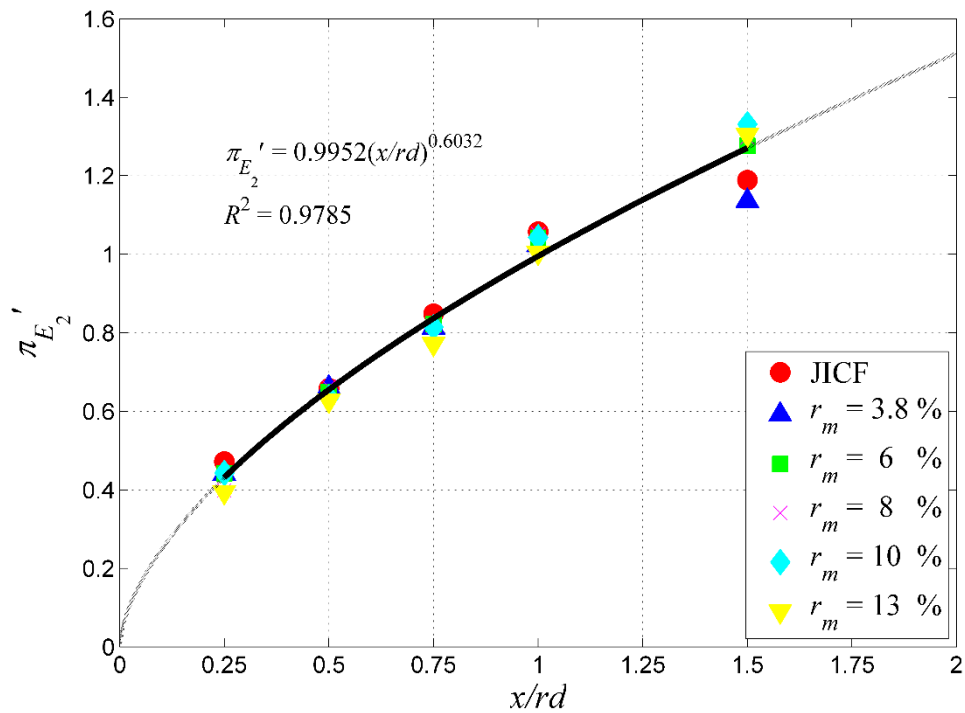
$$\text{Scaling law: } \left[\pi'_{E_1} = \frac{\pi_{E_1}}{s_A} = \left(\frac{(E_1 - 1)/a_E(r)}{s_A} \right) \right] = \pi_{E_1|0,x/rd}$$

$$a_E(r) = 0.9r + 1.4, \quad s_A = A_{E_1}(r_m)/A_{E_1}(0)$$

$$A_{E_1}(r_m) = 39.16r_m^2 + 1.269r_m + 1, \quad A_{E_1}(0) = 1$$

$$\text{Correlation: } \pi'_{E_1} = A'_{E_1}(x/rd)^{B'_{E_1}}; \quad A'_{E_1} = 0.995, \quad B'_{E_1} = 0.5959$$

$$\text{Collapsibility: } \varepsilon_{\pi'_q(r_m)} = 3.76\% - 6.27\%, \quad R_{\pi'_q}^2 = 0.9796$$



รูปที่ 7.14 การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้เหล็กมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi'_q = \pi_q/s_A$

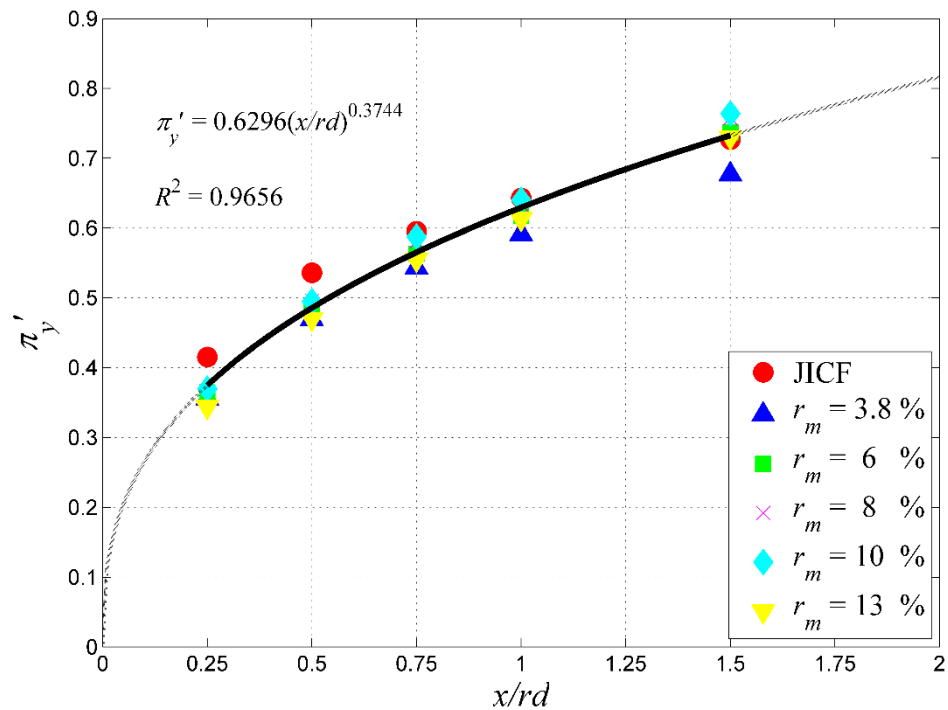
$$\text{Scaling law: } \left[\pi'_{E_2} = \frac{\pi_{E_2}}{s_A} = \left(\frac{(E_2 - 1)/a_E(r)}{s_A} \right) \right] = \pi_{E_2|0, x/rd}$$

$$a_E(r) = 0.9r + 1.4, \quad s_A = A_{E_2}(r_m)/A_{E_2}(0)$$

$$A_{E_2}(r_m) = 32.97r_m^2 + 0.2905r_m + 1, \quad A_{E_2}(0) = 1$$

$$\text{Correlation: } \pi'_{E_2} = A'_{E_2}(x/rd)^{B'_{E_2}}; \quad A'_{E_2} = 0.9952, \quad B'_{E_2} = 0.6032$$

$$\text{Collapsibility: } \varepsilon_{\pi'_q(r_m)} = 4.04\% - 6.92\%, \quad R^2_{\pi'_q} = 0.9785$$



รูปที่ 7.15(ก) การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อเส้นทางเดินของเจ็ตซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาด vorticity ของเจ็ตในแนวแกน streamwise โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi'_q = \pi_q / s_A$

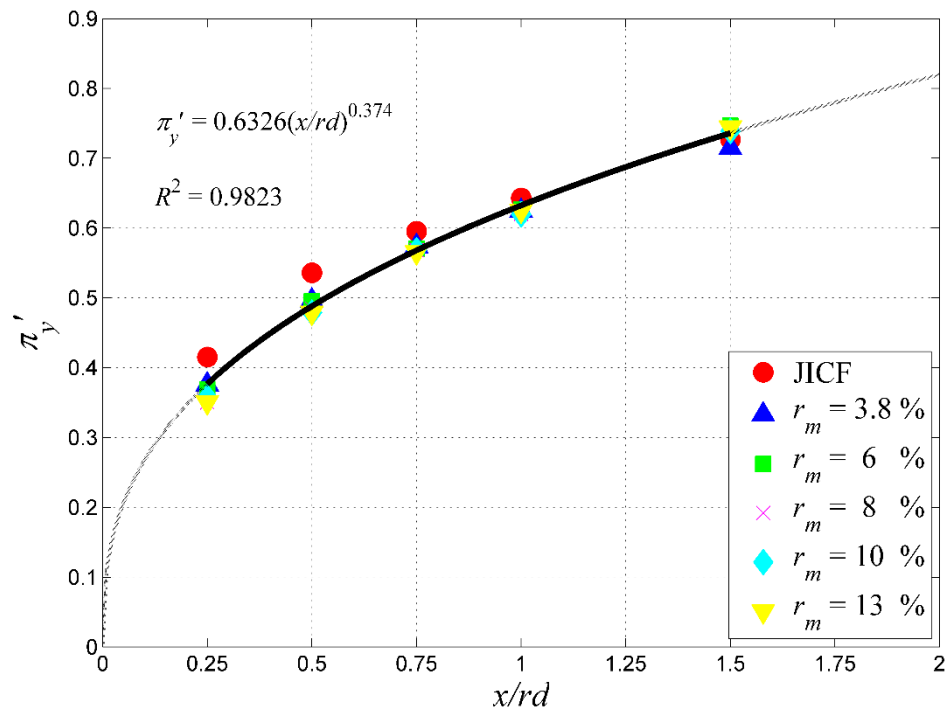
$$\text{Scaling law: } \left[\pi'_y = \frac{\pi_y}{s_A} = \left(\frac{y_{CM,|\omega_j,x|} / r^{C_y} d}{s_A} \right) \right] = \pi_{y|0,x/d}$$

$$C_y = 1.36, \quad s_A = A_y(r_m) / A_y(0)$$

$$A_y(r_m) = 16.2r_m^2 + 1.83r_m + 0.63, \quad A_y(0) = 0.63$$

$$\text{Correlation: } \pi'_y = A'_y(x/d)^{B'_y}; \quad A'_y = 0.6296, \quad B'_y = 0.3744$$

$$\text{Colapsibility: } \varepsilon_{\pi'_q(r_m)} = 4.55\% - 6.75\%, \quad R_{\pi'_q}^2 = 0.9656$$



รูปที่ 7.15(ข) การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อเส้นทางเดินของเจ็ตซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาด vorticity ของเจ็ตในแนวแกน streamwise โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไว้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi'_q = \pi_q / s_A$

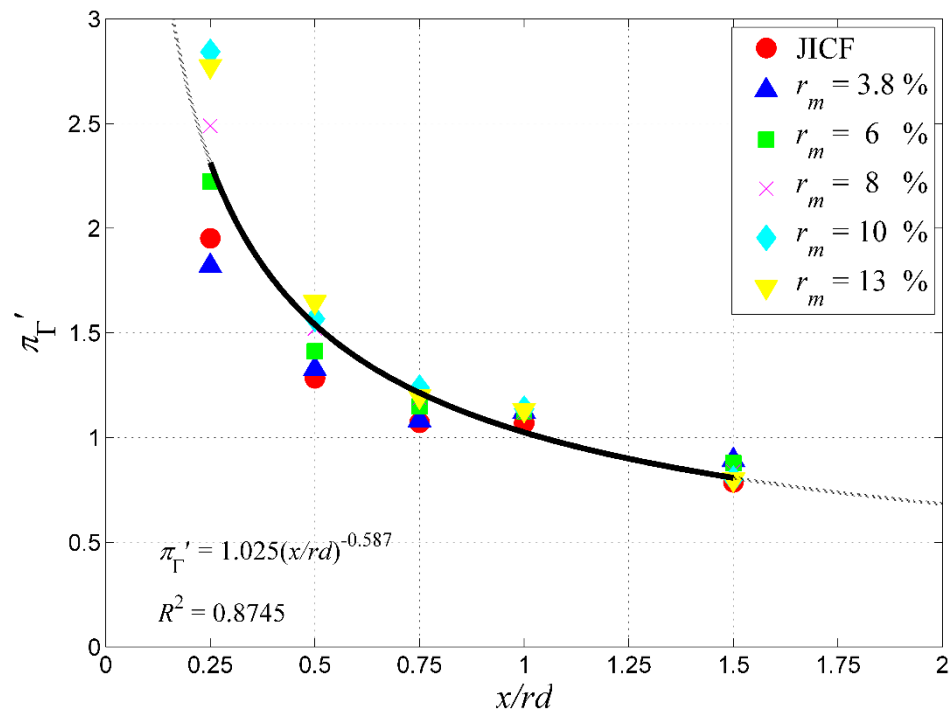
$$\text{Scaling law: } \left[\pi'_y = \frac{\pi_y}{s_A} = \left(\frac{y_{CM,|\omega_j,x|} / r^{C_y} d}{s_A} \right) \right] = \pi_{y|0,x/rd}$$

$$C_y = 1.36, \quad s_A = A_y(r_m) / A_y(0)$$

$$A_y(r_m) = -414.8r_m^3 + 95.08r_m^2 - 1.581r_m + 0.63, \quad A_y(0) = 0.63$$

$$\text{Correlation: } \pi'_y = A'_y(x/rd)^{B'_y}; \quad A'_y = 0.6326, \quad B'_y = 0.374$$

$$\text{Collapsibility: } \varepsilon_{\pi'_q(r_m)} = 3.23\% - 6.62\%, \quad R_{\pi'_q}^2 = 0.9823$$



รูปที่ 7.16 การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อค่า circulation ของเจ็ต โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi'_q = \pi_q / s_A$

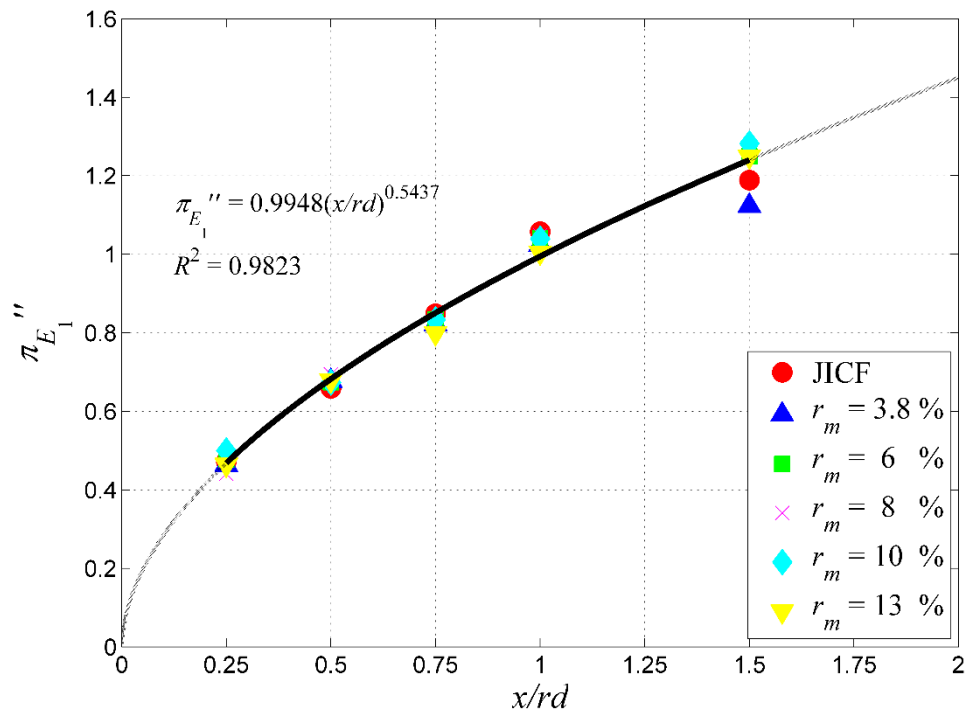
$$\text{Scaling law: } \left[\pi'_\Gamma = \frac{\pi_\Gamma}{s_A} = \left(\frac{\Gamma_j / u_{cf} r^{0.94} d}{s_A} \right) \right] = \pi_{\Gamma 0, x/rd}$$

$$C_\Gamma = 0.94, \quad s_A = A_\Gamma(r_m) / A_\Gamma(0)$$

$$A_\Gamma(r_m) = 24.87r_m^2 + 5.835r_m + 1.037, \quad A_\Gamma(0) = 1.037$$

$$\text{Correlation: } \pi'_\Gamma = A'_\Gamma(x/rd)^{B'_\Gamma}; \quad A'_\Gamma = 1.025, \quad B'_\Gamma = -0.587$$

$$\text{Collapsibility: } \varepsilon_{\pi'_q(r_m)} = 8.21\% - 18.0\%, \quad R_{\pi'_q}^2 = 0.8745$$



รูปที่ 7.17 การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้เหล็กเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับกระแสลมขวาง (F_2) และไม่เกี่ยวข้องกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป

$$\pi''_q = \pi'_q / s_B = \pi_q / s_A s_B$$

$$\text{Scaling law: } \left[\pi''_{E_1} = \frac{\pi'_{E_1}}{s_B} = \frac{\pi_{E_1}}{s_A s_B} = \left(\frac{(E_1 - 1)/a_E(r)}{s_A s_B} \right) \right] = \pi_{E_1|0, x/rd}$$

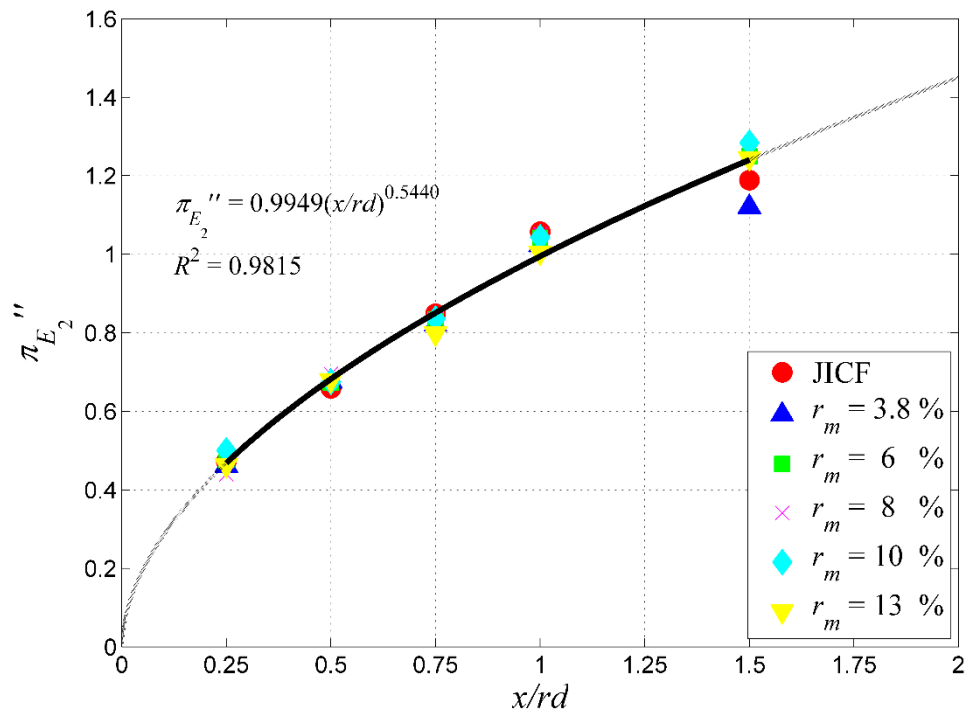
$$a_E(r) = 0.9r + 1.4, \quad s_A = A_{E_1}(r_m)/A_{E_1}(0), \quad s_B = (x/rd)^{B_{E_1}(r_m) - B_{E_1}(0)}$$

$$A_{E_1}(r_m) = 39.16r_m^2 + 1.269r_m + 1, \quad A_{E_1}(0) = 1.$$

$$B_{E_1}(r_m) = 0.7772r_m + 0.5573, \quad B_{E_1}(0) = 0.5573$$

$$\text{Correlation: } \pi''_{E_1} = A''_{E_1}(x/rd)^{B''_{E_1}}; \quad A''_{E_1} = 0.9948, \quad B''_{E_1} = 0.5437$$

$$\text{Collasibility: } \varepsilon_{\pi''_{E_1}(r_m)} = 2.89\% - 4.79\%, \quad R^2_{\pi''_{E_1}} = 0.9823$$



รูปที่ 7.18 การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้เหล็กมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเมื่อกำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ดควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ดหลัก (F_1) โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi''_q = \pi'_q/s_B = \pi_q/s_A s_B$

$$\text{Scaling law: } \left[\pi''_{E_2} = \frac{\pi'_{E_2}}{s_B} = \frac{\pi_{E_2}}{s_A s_B} = \left(\frac{(E_2 - 1)/a_E(r)}{s_A s_B} \right) \right] = \pi_{E_2|0, x/rd}$$

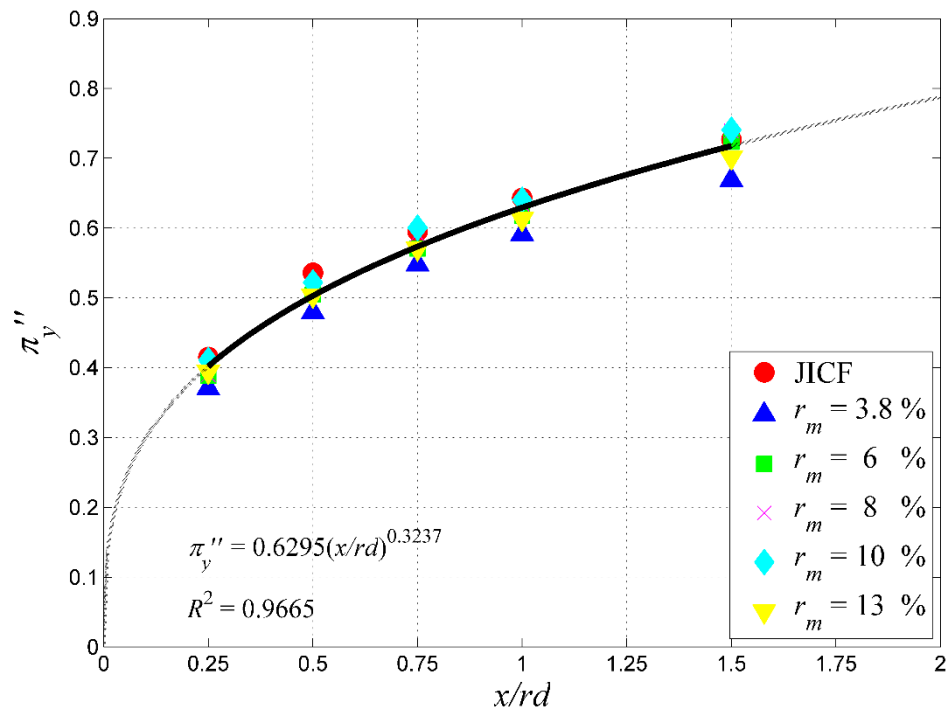
$$a_E(r) = 0.9r + 1.4, \quad s_A = A_{E_2}(r_m)/A_{E_2}(0), \quad s_B = (x/rd)^{B_{E_2}(r_m) - B_{E_2}(0)}$$

$$A_{E_2}(r_m) = 32.97r_m^2 + 0.2905r_m + 1, \quad A_{E_2}(0) = 1.$$

$$B_{E_2}(r_m) = 0.8835r_m + 0.5573, \quad B_{E_2}(0) = 0.5573$$

$$\text{Correlation: } \pi''_{E_2} = A''_{E_2}(x/rd)^{B''_{E_2}}; \quad A''_{E_2} = 0.9949, \quad B''_{E_2} = 0.544$$

$$\text{Collapsibility: } \varepsilon_{\pi''_{E_2}(r_m)} = 2.99\% - 4.90\%, \quad R^2_{\pi''_{E_2}} = 0.9815$$



รูปที่ 7.19(ก) การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อเส้นทางเดินของเจ็ตซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาด vorticity ของเจ็ตในแนวแกน streamwise โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป

$$\pi_q'' = \pi_q' / s_B = \pi_q / s_A s_B$$

$$\text{Scaling law: } \left[\pi_y'' = \frac{\pi_y'}{s_B} = \frac{\pi_y}{s_A s_B} = \left(\frac{y_{CM,|\omega_{j,x}|} / r^{C_y} d}{s_A s_B} \right) \right] = \pi_{y|0,x/rd}$$

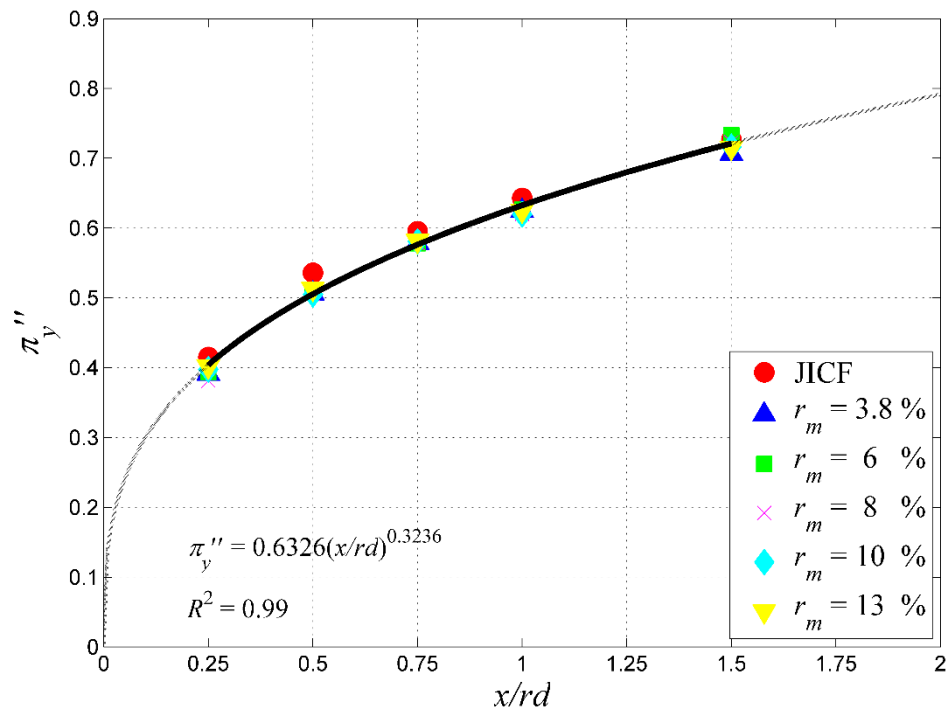
$$C_y = 1.36, \quad s_A = A_y(r_m) / A_y(0), \quad s_B = (x / rd)^{B_y(r_m) - B_y(0)}$$

$$A_y(r_m) = 16.2r_m^2 + 1.83r_m + 0.63, \quad A_y(0) = 0.63$$

$$B_y(r_m) = 0.7616r_m + 0.3257, \quad B_y(0) = 0.3257$$

$$\text{Correlation: } \pi_y'' = A_y''(x / rd)^{B_y''}; \quad A_y'' = 0.6295, \quad B_y'' = 0.3237$$

$$\text{Collapsibility: } \varepsilon_{\pi_q''(r_m)} = 3.70\% - 4.15\%, \quad R_{\pi_q''}^2 = 0.9665$$



รูปที่ 7.19(ข) การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อเส้นทางเดินของเจ็ตซึ่งนิยามจาก center of mass ของขนาด vorticity ของเจ็ตในแนวแกน streamwise โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป

$$\pi_q'' = \pi_q' / s_B = \pi_q / s_A s_B$$

$$\text{Scaling law: } \left[\pi_y'' = \frac{\pi_y'}{s_B} = \frac{\pi_y}{s_A s_B} = \left(\frac{y_{CM,|\omega_j,x|} / r^{C_y} d}{s_A s_B} \right) \right] = \pi_{y|0,x/rd}$$

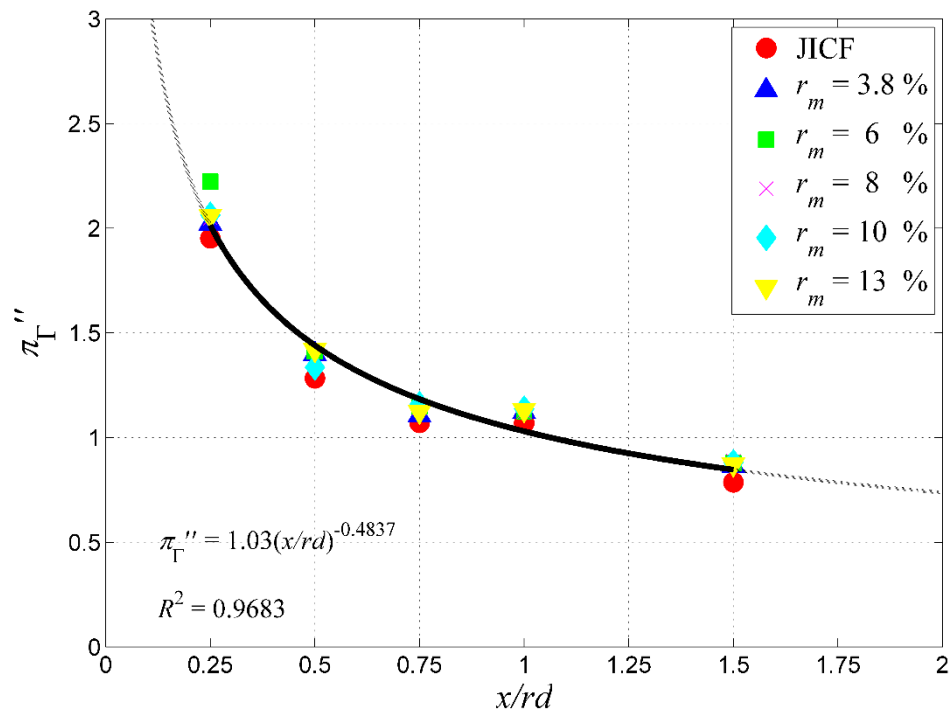
$$C_y = 1.36, \quad s_A = A_y(r_m) / A_y(0), \quad s_B = (x / rd)^{B_y(r_m) - B_y(0)}$$

$$A_y(r_m) = -414.8r_m^3 + 95.08r_m^2 - 1.581r_m + 0.63, \quad A_y(0) = 0.63$$

$$B_y(r_m) = 0.7616r_m + 0.3257, \quad B_y(0) = 0.3257$$

$$\text{Correlation: } \pi_y'' = A_y''(x/rd)^{B_y''}; \quad A_y'' = 0.6326, \quad B_y'' = 0.3236$$

$$\text{Collapsibility: } \varepsilon_{\pi_q''(r_m)} = 1.84\% - 2.87\%, \quad R_{\pi_q''}^2 = 0.99$$



รูปที่ 7.20 การ collapse ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อค่า circulation ของเจ็ต โดยปริมาณทางฟิสิกส์ไร้มิติใหม่จะอยู่ในรูป $\pi_G'' = \pi_q' / s_B = \pi_q / s_A s_B$

$$\text{Scaling law: } \left[\frac{\pi_G''}{s_B} = \frac{\pi_G'}{s_A s_B} = \left(\frac{\Gamma_j / u_{cf} r^{C_\Gamma} d}{s_A s_B} \right) \right] = \pi_{\Gamma|0, x/rd}$$

$$C_\Gamma = 0.94, \quad s_A = A_\Gamma(r_m) / A_\Gamma(0), \quad s_B = (x / rd)^{B_\Gamma(r_m) - B_\Gamma(0)}$$

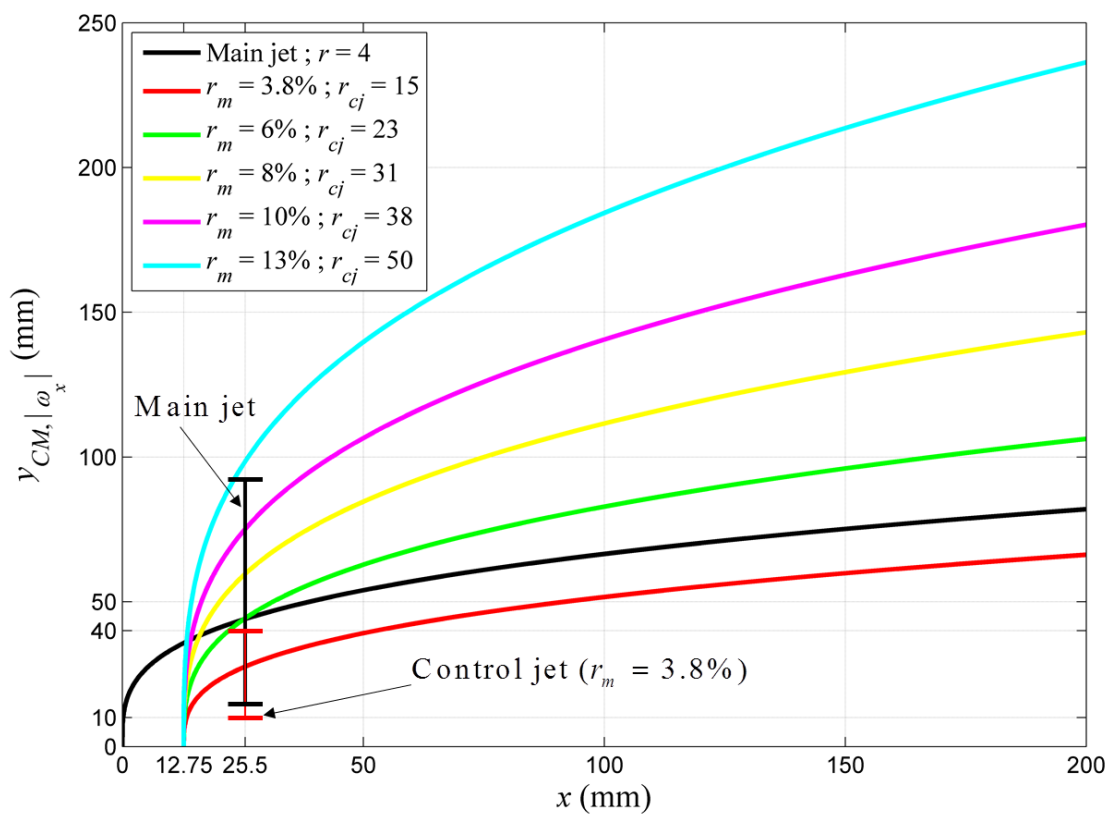
$$A_\Gamma(r_m) = 24.87r_m^2 + 5.835r_m + 1.037, \quad A_\Gamma(0) = 1.037$$

$$B_\Gamma(r_m) = 993.8r_m^3 - 206.7r_m^2 + 8.422r_m - 0.4879, \quad B_\Gamma(0) = -0.4879$$

$$\text{Correlation: } \pi_G'' = A_\Gamma''(x / rd)^{B_\Gamma''}; \quad A_\Gamma'' = 1.03, \quad B_\Gamma'' = -0.4837$$

$$\text{Collapsibility: } \varepsilon_{\pi_q''(r_m)} = 3.24\% - 4.46\%, \quad R_{\pi_q''}^2 = 0.9683$$

บทที่ 8



รูปที่ 8.1 การประมาณการพัฒนาตัวของเส้นทางเดินของเจ็ตหลักและเส้นทางเดินของเจ็ตควบคุมที่ค่า r_m เท่ากับ 3.8%, 6%, 8%, 10%, และ 13% เพื่อประเมินความถูกต้องของข้อสมมติฐานในการประเมินวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรในกรณีที่กำหนดให้ของไหลที่นำมาฉีดเป็นเจ็ตควบคุมคือของไหลชนิดเดียวกับของไหลในเจ็ตหลัก

รายการอ้างอิง



รายการอ้างอิง

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 5th 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.

Dawyok, S. (2014). Effects of the azimuthal control jets to main jet mass flowrate ratio on the flow structures of a jet in crossflow via POD, Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

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.

Hasselbrink, E. F. and Mungal, M. G. (1996). An analysis of the time-averaged properties of the far field of the transverse jet, presented in *The Thirty-fourth Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA Paper No. 96-0201, Reno, Nevada, U.S.A.

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.

Na Takuathung, I., and Bunyajitradulya, A. (2016). Structures, jet-and-crossflow interactions, and cross-plane entrainment mechanisms of jet and controlled jet in crossflow, paper presented in *The Seventh Thai Society of Mechanical Engineers International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 7)*, December 13-16, 2016, Duangtawan Hotel, Chiang Mai, Thailand. Paper No TSF016.

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.

Pratte, B. D. and Baines, W. D. (1967). Profiles of the round turbulent jet in a cross flow. *J. Hydraul. Div. ASCE*, Vol. 92, pp. 53-64.

Preukwatana, A., Sornphrom, K., Tekhuad, C., Wongthongsiri, K., Soupramongkol, P., Wangkiat, S., and Bunyajitradulya, A. (2016). Scaling-Power law correlations for collapsing the effects of the effective velocity ratio on jet-fluid mixture trajectory, circulation, and entrainment of jets in crossflow, paper presented in *The Seventh Thai Society of Mechanical Engineers International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 7)*, December 13-16, 2016, Duangtawan Hotel, Chiang Mai, Thailand. Paper No TSF017.

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.

Sornphrom, K. and Bunyajitradulya, A. (2016). Structures, jet-and-crossflow interactions, and cross-plane entrainment mechanism of a jet in crossflow, paper presented in *The Thirtieth Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 30)*, July 5-8, 2016, Songkhla, Thailand. Paper No. TSF 0015.

Soupramongkol, P. (2015). Effects of azimuthal control jets on entrainment and cross-plane entrainment mechanism of a jet in crossflow, Master thesis. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.

Srimekharat, A. (2014). Analysis of structures of a controlled jet in crossflow with POD, Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

Tekhuad, C. and Bunyajitradulya, A. (2016). Effects of azimuthal position of azimuthal control jets on manipulation and control of entrainment of jets in crossflow, paper presented in *The Thirtieth Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 30)*, July 5-8, 2016, Songkhla, Thailand. Paper No. TSF 0004.

Tekhuad, C. (2015). Optimal injection angles of the azimuthal control jets for entrainment of jets 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.

Wangkiat, S., Khemakanon, S., Kengkarnpanich, A., and Bunyajitradulya, A. (2015). Effects of the azimuthal positions of the azimuthal control jets on structures and entrainment of a jet in crossflow at high effective velocity ratio 12, paper presented in *The Sixth Thai Society of Mechanical Engineers International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 6)*, December 16-18, 2015, The Regent Cha-am beach Resort, Hua-Hin, Thailand. Paper No TSF006.

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

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

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

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก : ตารางสรุปพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทดลอง

ตารางที่ 1

$$x / rd = 0.25 \quad ; \quad \text{JICF}, r_m = 3.8\%, r_m = 6\%, r_m = 8\%, r_m = 10\%, r_m = 13\%$$

General	x / rd	0.25
	$T_{\text{atm}} [^{\circ}\text{C}]$	31.5
	$P_{\text{atm}} [\text{kPa}]$	101.4
Laser	Thickness [mm]	3
Seeding (six jet atomizer)	$P [\text{psig}]$	26
	No. of nozzle	3
Jet & Crossflow	$u_{mj} [\text{m/s}]$	15.95
	$u_{cf} [\text{m/s}]$	4.030
	r	3.96
Camera (L/R)	Camera position [cm]	5
	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	5.6/8
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 2 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	1.059x1.059 (66.183 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 10 \mu\text{s}$

ตารางที่ 2

$x / rd = 0.50$; JICF, $r_m = 3.8\%$, $r_m = 6\%$, $r_m = 8\%$, $r_m = 10\%$, $r_m = 13\%$

General	x / rd	0.50
	$T_{\text{atm}} [^{\circ}\text{C}]$	31.5
	$P_{\text{atm}} [\text{kPa}]$	101.4
Laser	Thickness [mm]	3
Seeding (six jet atomizer)	$P [\text{psig}]$	26
	No. of nozzle	3
Jet & Crossflow	$u_{mj} [\text{m/s}]$	15.95
	$u_{cf} [\text{m/s}]$	4.030
	r	3.96
Camera (L/R)	Camera position [cm]	11
	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/5.6
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 1 ช่อง
	Spatial resolution [mm^2]	1.113x1.113 (69.538 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 20 \mu\text{s}$ $\Delta t = 18 \mu\text{s}$ (for $r_m = 8\%, 10\%$) $\Delta t = 15 \mu\text{s}$ (for $r_m = 13\%$)

ตารางที่ 3

$x / rd = 0.75$; JICF, $r_m = 3.8\%$, $r_m = 6\%$, $r_m = 8\%$, $r_m = 10\%$, $r_m = 13\%$

General	x / rd	0.75
	$T_{\text{atm}} [^{\circ}\text{C}]$	31.5
	$P_{\text{atm}} [\text{kPa}]$	101.4
Laser	Thickness [mm]	3
Seeding (six jet atomizer)	$P [\text{psig}]$	26
	No. of nozzle	3
Jet & Crossflow	$u_{mj} [\text{m/s}]$	15.95
	$u_{cf} [\text{m/s}]$	4.030
	r	3.96
Camera (L/R)	Camera position [cm]	5
	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/5.6
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 1 ช่อง
	Spatial resolution [mm^2]	1.124x 1.124 (70.220 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 20 \mu\text{s}$ $\Delta t = 15 \mu\text{s}$ (for $r_m = 13\%$)

ตารางที่ 4

$x/rd = 1.0$; JICF, $r_m = 3.8\%$, $r_m = 6\%$, $r_m = 8\%$, $r_m = 10\%$, $r_m = 13\%$

General	x/rd	1.0
	$T_{\text{atm}} [^{\circ}\text{C}]$	31.5
	$P_{\text{atm}} [\text{kPa}]$	101.4
Laser	Thickness [mm]	3
Seeding (six jet atomizer)	$P [\text{psig}]$	26
	No. of nozzle	3
Jet & Crossflow	$u_{mj} [\text{m/s}]$	15.95
	$u_{cf} [\text{m/s}]$	4.030
	r	3.96
Camera (L/R)	Camera position [cm]	18
	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/5.6
	Crosshair location	อยู่ต่ำกว่าจุดศก. Target 0.5 ช่อง
	Spatial resolution [mm ²]	1.177x1.177 (73.552 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 25 \mu\text{s}$ $\Delta t = 20 \mu\text{s}$ (for $r_m = 13\%$)

ตารางที่ 5

 $x/rd = 1.5$; JICF, $r_m = 3.8\%$, $r_m = 6\%$, $r_m = 8\%$, $r_m = 10\%$, $r_m = 13\%$

General	x/rd	1.5
	$T_{\text{atm}} [^{\circ}\text{C}]$	31.5
	$P_{\text{atm}} [\text{kPa}]$	101.4
Laser	Thickness [mm]	3
Seeding (six jet atomizer)	$P [\text{psig}]$	26
	No. of nozzle	3
Jet & Crossflow	$u_{mj} [\text{m/s}]$	15.95
	$u_{cf} [\text{m/s}]$	4.030
	r	3.96
Camera (L/R)	Camera position [cm]	27
	Lens [mm]	100
	F no. (L/R)	4/5.6
	Crosshair location	จุดศูนย์กลาง
	Spatial resolution [mm^2]	1.260x1.260 (78.769 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)
Note	SNR = 1.5	$\Delta t = 25 \mu\text{s}$

ตารางที่ 6 สรุปรพารามิเตอร์ที่สำคัญของเจ็ตควบคุม

	r_m				
	3.8%	6%	8%	10%	13%
u_{cj}	60 m/s	93 m/s	125 m/s	153 m/s	202 m/s
r_{cj}	15	23	31	38	50
Re_{cj}	4,873	7,694	10,259	12,824	16,671

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

เกิดเมื่อวันที่ 3 ตุลาคม 2536 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนโยธินบูรณะ ปี พ.ศ. 2554 สำเร็จการศึกษาชั้นอุดมศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2558 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



