

ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่เหมาะสมต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดใน
กระแสมขวาง



นายเชาวน์วัฒน์ เต็กฮวด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

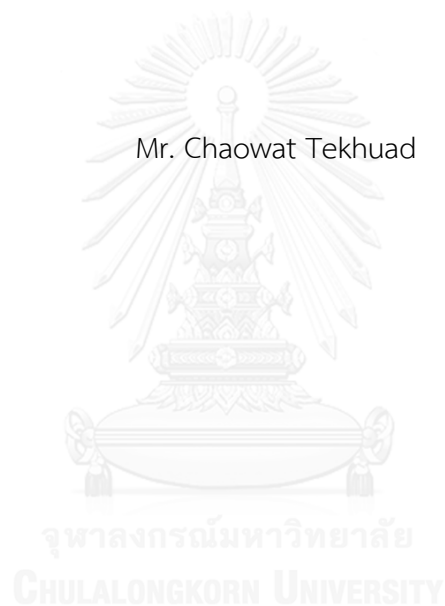
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMAL INJECTION ANGLES OF THE AZIMUTHAL CONTROL JETS FOR ENTRAINMENT
OF JETS IN CROSSFLOW

Mr. Chaowat Tekhuad



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่
เหมาะสมต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสม
ขวาง

โดย

นายเชาวน์วัฒน์ เต็กฮวด

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.อศิ บุญจิตราดุลย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

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

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

เชาวน์วัฒน์ เต็กฮวด : ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่เหมาะสมต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง (OPTIMAL INJECTION ANGLES OF THE AZIMUTHAL CONTROL JETS FOR ENTRAINMENT OF JETS IN CROSSFLOW) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อศิ บุญจิตราดุลย์, 172 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) ของเจ็ตในกระแสลมขวาง ในการนี้ เพื่อให้สามารถวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้โดยตรง จึงใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับการใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ตหลักเท่านั้นแต่ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง การทดลองทำที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลของเจ็ตต่อกระแสลมขวาง (r) ที่ 4, 8 และ 12 โดยมีเลขเรย์โนลด์ของเจ็ต (Re_j) เท่ากับ 12,400, 24,800 และ 37,200 ตามลำดับ ส่วนเลขเรย์โนลด์ของกระแสลมขวาง (Re_{cf}) ให้มีค่าคงที่ที่ 3,100 ความเร็วเริ่มต้นของเจ็ตหลักเป็นแบบการไหลในท่อแบบปั่นป่วนที่พัฒนาตัวเต็มที่ ในการฉีดเจ็ตควบคุมจะทำการฉีดเจ็ตควบคุมแบบคงตัวพุ่งเข้าหาเจ็ตหลักตามแนวรัศมี ที่ก่อนปากทางออกของเจ็ต โดยจะฉีดเป็นคู่ที่ตำแหน่งเชิงมุม ($\pm\theta$) ต่างๆตามแนวเส้นรอบวง เพื่อปรับเปลี่ยนการควบคุมการพัฒนาโครงสร้างการไหลของเจ็ตหลัก ณ บริเวณปากทางออกของเจ็ต ในการศึกษานี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมจากมุม $\pm 15^\circ$ ถึง $\pm 165^\circ$ โดยเพิ่มมุมขึ้นทีละ 15° และ กรณีคู่สมมาตรอีก 1 คู่ คือที่ตำแหน่ง 0° และ 180° โดยคงค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ที่ 4% จากผลการทดลองพบว่า ที่ทั้งสามอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลของเจ็ตในกระแสลมขวาง (r) คือ 4, 8 และ 12 การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน windward ($\theta < 90^\circ$) จะส่งผลให้ E และ η ของ cJICF ลดลงจากกรณี JICF หรืออีกนัยหนึ่ง การฉีดเจ็ตควบคุมจะไปยับยั้ง (suppress) การเหนี่ยวนำการผสมของ cJICF เมื่อเทียบกับ JICF ในทางตรงกันข้าม การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน leeward ($\theta > 90^\circ$) จะส่งผลให้ E และ η ของ cJICF เพิ่มขึ้นจากกรณี JICF หรืออีกนัยหนึ่ง การฉีดเจ็ตควบคุมจะไปส่งเสริม (promote) การเหนี่ยวนำการผสมของ cJICF เมื่อเทียบกับ JICF เมื่อเพิ่มตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมจากทางด้าน windward $\pm 15^\circ$ ไปทางด้าน leeward $\pm 165^\circ$ อย่างต่อเนื่อง จะส่งผลให้ E และ η มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ต นอกเหนือจากนั้นยังพบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมจะมีประสิทธิผลที่ r ต่ำมากกว่าที่ r สูง

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5670498321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: JET IN CROSSFLOW, CONTROL JETS, ENTRAINMENT, EFFECTIVENESS

CHAOWAT TEKHUAD: OPTIMAL INJECTION ANGLES OF THE AZIMUTHAL CONTROL JETS FOR ENTRAINMENT OF JETS IN CROSSFLOW. ADVISOR: ASSOC. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA, Ph.D., 172 pp.

Effects of the azimuthal positions (θ) of the azimuthal control jets on the volumetric entrainment ratio (E) of jets in crossflow (JICF) and the effectiveness of the use of the azimuthal control jets (η) are investigated. In order to determine the volumetric entrainment ratio, the stereoscopic particle image velocimetry (SPIV) with the jet-fluid only seeding scheme is employed. The baseline JICFs investigated have the effective velocity ratios (r) of 4, 8, and 12; the jet Reynolds number (Re_j) of 12,400, 24,800, and 37,200, respectively; a fixed crossflow Reynolds number (Re_{cf}) of 3,100; and the jet initial velocity profile at the jet exit of a fully-developed turbulent pipe flow. For the cases of controlled jets in crossflow (cJICFs), in order to manipulate the development of the flow structure, a pair of azimuthal control jets are activated radially and steadily at the azimuthal positions varied from $\theta = \pm 15^\circ$ to $\pm 165^\circ$, with a step increase of 15° , and another case with a pair at $\theta = 0^\circ$ and 180° . The control jets to main jet mass flowrate ratio (r_m) is fixed at 4%. The results show that, for all r , the azimuthal position of the control jets affects entrainment. Specifically, windward injection ($\theta < 90^\circ$) suppresses entrainment, causing E and η of cJICF to be lower than JICF. On the other hand, leeward injection ($\theta > 90^\circ$) promotes entrainment, causing E and η of cJICF to be higher than JICF. In addition, as the azimuthal position of the control jets increases from windward to leeward, E and η increase accordingly. Furthermore, overall it is found that the use of the azimuthal control jets with JICF at lower r is more effective than with JICF at higher r .

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้มอบโอกาสความรู้ และสถานที่สำหรับงานการศึกษางานวิจัยเรื่องนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่มอบคำแนะนำโอกาส แนวทางของงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วง ตลอดจนความรู้ วิธีคิด กระบวนการวิเคราะห์ การแก้ไขปัญหาต่างๆ ทั้งในแง่วิชาการและการทำงาน เพื่อให้มีความรู้ ความสามารถ และประสบการณ์ที่จะเป็นพื้นฐานเวลาทำงานในฐานะวิศวกรที่ดีต่อไป

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล สถานที่ปฏิบัติงานวิจัยนี้ (Fluid Mechanics Research Laboratory : FMRL) ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ และอุปกรณ์ต่างๆที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณกลุ่มบุคคลที่มีส่วนช่วยในโครงการนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นาย ภัทรพล ศุภมงคล นางสาว ขวัญมณฑิ์ ศรพรหม นิสิตปริญญาโทที่คอยให้คำแนะนำ และช่วยเหลือในงานวิจัยนี้, นาย อินทกานต์ ณ ตะกั่วทุ่ง นาย เอกณัฐ พงศ์วัฒนา นาย ศิริวิทย์ คุวพัฒนานนท์ และนิสิตปริญญาตรีทุกกลุ่มที่คอยให้กำลังใจ และแก้ปัญหาต่างๆในการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยส่วนหนึ่งจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ 2557 ตามสัญญาเลขที่ GRB_APS_๒๓_๕๗_๒๑_๐๑ และทุนสนับสนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

สุดท้ายขอกราบขอบคุณ บิดา มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจ ชี้นำ และให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ โดยเฉพาะด้านการศึกษาที่เห็นความสำคัญ และให้การสนับสนุนมาโดยตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 เจ็ตในกระแสลมขวาง.....	1
1.2 แรงจูงใจ	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	5
1.5 แนวทางการวิจัย	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	7
2.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล	7
2.2 เส้นทางเดินของเจ็ต	7
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสม.....	8
2.4, ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ต.....	9
2.5 กระบวนการเกิดและพัฒนาตัวของ Counter – rotating vortex pair	10
2.6 การปรับแต่งและควบคุมเจ็ต.....	11
2.6.1 การกระตุ้นโดยไม่ใช้พลังงาน	11
2.6.2 กระตุ้นโดยใช้พลังงาน.....	11

บทที่ 3 เทคนิคและหลักการในการประเมินหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร	15
3.1 ปัญหาการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวาง	15
3.2 เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามในการวัดสนามการไหล	16
3.3 การประเมินหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรและค่าประสิทธิผลการ เหนี่ยวนำการผสม	16
3.3.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร	16
3.3.2 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดบนระนาบต่างๆ เกลี่ยเทียบกับเวลา	17
3.3.3 ค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสม	18
บทที่ 4 รายละเอียดและอุปกรณ์การทดลอง	19
4.1 อุโมงค์ลม	19
4.2 ชุดเจ็ดหลักและเจ็ดควบคุม	20
4.2.1 เจ็ดหลัก (Main jet)	21
4.2.2 เจ็ดควบคุม (Control jets)	21
4.3 ชุดเครื่องมือวัดความเร็ว Stereoscopic Particle Image Velocimetry	21
4.3.1 ส่วนประกอบและการทำงานของ Stereoscopic Particle Image Velocimetry	21
4.3.2 การหาค่าสนามเวกเตอร์ความเร็วโดยโปรแกรม Insight 4G	22
4.4 การวัดและเครื่องมือวัด	24
4.4.1 การวัดความสม่ำเสมอของกระแสลมขวาง	24
4.4.2 การวัดสถานะเริ่มต้นของเจ็ด	24
4.4.3 การวัดอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก	25
บทที่ 5	27
โครงสร้างของเจ็ด	27
5.1 ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ	27

5.2 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้าง	29
5.2.1 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ตตาม แนวแกน x ไร้มิติ, V_x / u_{cf}	29
5.2.2 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ตตาม แนวแกน y ไร้มิติ, V_y / u_{cf}	31
5.2.3 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ตตาม แนวแกน z ไร้มิติ, V_z / u_{cf}	31
5.2.5 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อการกระจายตัวของ Vorticity ตาม แนวแกน x ไร้มิติ ($\omega_x d / u_{cf}$)	33
บทที่ 6	35
อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรและค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสม	35
6.1 การพัฒนาตัวของการเหนี่ยวนำการผสมตามระยะทางการไหล	35
6.2 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการ ผสมของเจ็ตในกระแสมวลว่าง	35
6.3 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อค่าประสิทธิผลการ เหนี่ยวนำการผสม	36
6.4 การพัฒนาตัวของค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมตามระยะทางการไหล	38
บทที่ 7	39
อภิปรายผลการทดลอง	39
7.1 เปรียบเทียบค่า E ระหว่างงานปัจจุบันกับงานทั้งหมดของ FMRL	40
7.2 เปรียบเทียบค่า E ระหว่างงานปัจจุบันกับ Wongthongsiri, K. (2014)	40
บทที่ 8	43
สรุปผลการทดลอง	43
8.1 การเหนี่ยวนำการผสมและประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสม กรณี $r = 4, 8$ และ 12 พบว่า แนวโน้มโดยรวมเป็นดังนี้	43

8.2 โครงสร้างของเจ็ต ผลการศึกษาสำหรับทั้งสามกรณีของ r (4, 8 และ 12) พบว่า แนวโน้มโดยรวมเป็นดังนี้.....	44
8.2.1 ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ	44
8.2.2 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน x ไร้มิติ, V_x / u_{cf}	45
8.2.3 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน y ไร้มิติ, V_y / u_{cf}	45
8.2.4 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน z ไร้มิติ, V_z / u_{cf}	46
8.2.5 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างอัตราเร็วเฉลี่ยไร้มิติ, V / u_{cf}	46
8.2.6 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อการกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ไร้มิติ ($\omega_x d / u_{cf}$)	46
รายการอ้างอิง	162
ภาคผนวก ก Data Reduction Diagram.....	164
ก.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร	164
ก.2 ความเร็วที่วัดได้จาก pitot static tube.....	165
ก.3 ระยะตามแนว downstream.....	166
ก.4 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล	167
ก.5 เรย์โนลด์สสัมเบอร์ของกระแสลมขวาง	168
ภาคผนวก ข พารามิเตอร์ในการทดลอง	169
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	172

สารบัญตาราง

บทที่ 6

- ตารางที่ 6.1(ก) ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ของกรณีการทดลองทั้งหมด.....48
- ตารางที่ 6.1(ข) ค่า Coefficient a และ b พร้อมค่า R^2 ของการ fit curve ด้วยสมการ power law $E = 1 + a(x/rd)^b$ 49
- ตารางที่ 6.2 ค่าประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสม (η) ของกรณีการทดลองทั้งหมด 50

บทที่ 7

- ตารางที่ 7.1(ก) ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ในกรณี JICF ของงานวิจัยที่ผ่านมาที่ $r=4$ 51
- ตารางที่ 7.1(ข) ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ในกรณี JICF ของงานวิจัยที่ผ่านมาที่ $r=8$52
- ตารางที่ 7.1(ค) ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ในกรณี JICF ของงานวิจัยที่ผ่านมาที่ $r=12$ 53

สารบัญรูปภาพ

บทที่ 1	
รูปที่ 1.1	เจ็ตในกระแสมวลว่าง (ภาพจากห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)54
บทที่ 2	
รูปที่ 2.1	เส้นทางเดินความเร็วและอุณหภูมิของเจ็ต Kamotani and Graeber (1972)....54
รูปที่ 2.2	เส้นทางเดินของ Passive Scalar concentration เมื่อเสกกลด้วย d, rd, r^2d Smith and Mungal, (1998).....55
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสมวลว่าง Fric and Roshko (1994)56
รูปที่ 2.4	จุดแบ่งระหว่าง Near Field และ Far Field บน r^2d (เครื่องหมาย X) Smith and Mungal (1998).....56
รูปที่ 2.5	การลดลงของ C % ของ JICF และ Free jet บน Near Field และ Far Field บน rd เปรียบเทียบกับ free jet (Smith and Mungal, 1998).....57
รูปที่ 2.6	Instantaneous contour ของ Spanwise vorticity Yuan et al., (1999).....58
รูปที่ 2.7	โครงสร้างของ Hanging vortices Yuan et al., (1999)59
รูปที่ 2.8	Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวขึ้นระหว่างเจ็ต และกระแสมวลว่างที่บริเวณขอบด้านข้างของเจ็ต Yuan et al., (1999)59
รูปที่ 2.9	วิวัฒนาการของ Streamlines ในการก่อตัวของ Kelvin-Helmholtz roller Sau et al., (2004).....60
รูปที่ 2.10	วิวัฒนาการของ Wake vortices structure Sau et al., (2004).....61
รูปที่ 2.11	ระบบแกนตั้งฉากกับทิศทางการหมุน Bunyajitradulya and Sathapornnanon, (2005)62
รูปที่ 2.12	ชุดเจ็ตควบคุม Kornsri et al., (2009).....63

รูปที่ 2.13	เส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตสำหรับควบคุมและไม่ควบคุม Kornsri <i>et al.</i> , (2009).....	64
รูปที่ 2.14	ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางกรณี JICF, I15 และ I135 Witayaprapakorn, (2013).....	64
รูปที่ 2.15	ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้เพลิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อการเหนี่ยวนำการผสม ที่ $r=4$ Chaikasetzin <i>et al.</i> 2013.....	65
รูปที่ 2.16	ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางกรณี JICF, I15, I45, I75, I105, I135 และ I165 Wangkiat <i>et al.</i> , (2005).....	65
รูปที่ 2.17	ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร Wongthongsiri (2014).....	66
บทที่3		
รูปที่ 3.1	ภาพ End view ของเจ็ตในกระแสมขวางที่หน้าตัดใดๆ ในกรณีที่มีการปล่อยอนุภาคติดตามเฉพาะในทั้งเจ็ตเท่านั้น ทำให้การระบุขอบเขตเจ็ตทำได้ง่ายขึ้น.....	67
บทที่4		
รูปที่ 4.1	ชุดทดลองภายในห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	68
รูปที่ 4.2	ภาพ Schematic diagram ของชุดทดลอง.....	69
รูปที่ 4.3	ภาพถ่ายของชุดทดลอง.....	69
รูปที่ 4.4	พิกัดอ้างอิงในการทดลอง.....	70
รูปที่ 4.5	รูป Schematic diagram ของอุโมงค์ลม.....	70
รูปที่ 4.6	Blower สำหรับอุโมงค์ลมเพื่อสร้างกระแสมขวาง.....	71
รูปที่ 4.7	เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า.....	71
รูปที่ 4.8	ชุดเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง.....	72
รูปที่ 4.9	ส่วนประกอบของชุดเจ็ตหลัก.....	72

รูปที่ 4.10	ส่วนประกอบของชุดเจ็ทควบคุม.....	73
รูปที่ 4.11	เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ ND:YAG ยี่ห้อ New Wave™ model Solo 200XT ..	74
รูปที่ 4.12	Laser light arm	75
รูปที่ 4.13	กล้อง CCD PowerView Plus11MP.....	76
รูปที่ 4.14	Synchronizer	76
รูปที่ 4.15	ขอบเขตและความละเอียดในการวัดความเป็นระเบียบของกระแสลมขวาง	77
รูปที่ 4.16	การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ของกระแสลมขวาง	77
รูปที่ 4.17	ตำแหน่งในการวัดความเร็วที่สถานะเริ่มต้นของเจ็ท	78
รูปที่ 4.18	ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทตามแนวแกน y ที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีต่างๆ	78
รูปที่ 4.19	Rotameter flow meter สำหรับเจ็ทควบคุม	79
บทที่ 5		
รูปที่ 5.1(ก)	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ทที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$	80
รูปที่ 5.1(ข)	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ทที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$	81
รูปที่ 5.1(ค)	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ทที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$	82
รูปที่ 5.1(ง)	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ทที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$	83
รูปที่ 5.1(จ)	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ทที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$	84
รูปที่ 5.1(ฉ)	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ทที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$	85
รูปที่ 5.1(ช)	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ทที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$	86

รูปที่ 5.1(ซ)	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$	87
รูปที่ 5.1(ฌ)	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$	88
รูปที่ 5.1(ญ)	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$	89
รูปที่ 5.1(ฎ)	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$	90
รูปที่ 5.1(ฏ)	การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$	91
รูปที่ 5.2(ก)	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลม ขวาง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$	92
รูปที่ 5.2(ข)	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลม ขวาง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$	93
รูปที่ 5.2(ค)	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลม ขวาง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$	94
รูปที่ 5.2(ง)	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$	95
รูปที่ 5.2(จ)	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$	96
รูปที่ 5.2(ฉ)	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$	97
รูปที่ 5.2(ช)	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$	98
รูปที่ 5.2(ซ)	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$	99

รูปที่ 5.4(ฎ)	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน Z ต่อความเร็วกระแสมขวาง (V_z / u_{cf}) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$	126
รูปที่ 5.4(ฏ)	การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน Z ต่อความเร็วกระแสมขวาง (V_z / u_{cf}) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$	127
รูปที่ 5.5(ก)	การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสมขวาง (V / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$	128
รูปที่ 5.5(ข)	การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสมขวาง (V / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$	129
รูปที่ 5.5(ค)	การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสมขวาง (V / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$	130
รูปที่ 5.5(ง)	การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสมขวาง (V / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$	131
รูปที่ 5.5(จ)	การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสมขวาง (V / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$	132
รูปที่ 5.5(ฉ)	การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสมขวาง (V / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$	133
รูปที่ 5.5(ช)	การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสมขวาง (V / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$	134
รูปที่ 5.5(ซ)	การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสมขวาง (V / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$	135
รูปที่ 5.5(ฅ)	การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสมขวาง (V / u_{cf}) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$	136
รูปที่ 5.5(ณ)	การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสมขวาง (V / u_{cf}) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$	137
รูปที่ 5.5(ด)	การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสมขวาง (V / u_{cf}) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$	138

รูปที่ 5.5(ง)	การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V/u_{cf}) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$	139
รูปที่ 5.6(ก)	การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง ($\omega_x d/u_{cf}$) ที่ $r= 4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$	140
รูปที่ 5.6(ข)	การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง ($\omega_x d/u_{cf}$) ที่ $r= 4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$	141
รูปที่ 5.6(ค)	การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง ($\omega_x d/u_{cf}$) ที่ $r= 4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$	142
รูปที่ 5.6(ง)	การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง ($\omega_x d/u_{cf}$) ที่ $r= 4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$	143
รูปที่ 5.6(จ)	การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง ($\omega_x d/u_{cf}$) ที่ $r= 8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$	144
รูปที่ 5.6(ฉ)	การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง ($\omega_x d/u_{cf}$) ที่ $r= 8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$	145
รูปที่ 5.6(ช)	การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง ($\omega_x d/u_{cf}$) ที่ $r= 8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$	146
รูปที่ 5.6(ซ)	การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง ($\omega_x d/u_{cf}$) ที่ $r= 8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$	147
รูปที่ 5.6(ฌ)	การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง ($\omega_x d/u_{cf}$) ที่ $r= 12$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$	148
รูปที่ 5.6(ฎ)	การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง ($\omega_x d/u_{cf}$) ที่ $r= 12$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$	149
รูปที่ 5.6(ฏ)	การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง ($\omega_x d/u_{cf}$) ที่ $r= 12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$	150
รูปที่ 5.6(ฐ)	การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง ($\omega_x d/u_{cf}$) ที่ $r= 12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$	151

บทที่ 6

รูปที่ 6.1	การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรตามระยะทางการไหล	152
รูปที่ 6.2	ผลของตำแหน่งเชิงมุมฉีดเจ็ทควบคุมต่อค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E)	153
รูปที่ 6.3	ผลของตำแหน่งเชิงมุมฉีดเจ็ทควบคุมต่อค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสม (η)	154
รูปที่ 6.4	การพัฒนาตัวของค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสม (η) ตามระยะทางการไหล	155

บทที่ 7

รูปที่ 7.1(ก)	การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรตาม ระยะทางการไหลกรณี JICF บน $-rd$ สเกล จากงานวิจัยปัจจุบันและ อดีต.....	156
รูปที่ 7.1(ข)	การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ตามระยะทางการไหลกรณี JICF บน $-d$ สเกล จากงานวิจัย ปัจจุบันและอดีต.....	157
รูปที่ 7.2	การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรตาม ระยะทางการไหลกรณี JICF สเกลด้วย $-rd$	158

บทที่ 1

บทนำ

1.1 เจ็ตในกระแสมขวาง

เจ็ตในกระแสมขวาง คือ เจ็ตที่พุ่งเข้าสู่กระแสมขวางในแนวตั้งฉาก โดยเมื่อเจ็ตวิ่งมาเจอกับกระแสมขวางจะเกิดปฏิสัมพันธ์จึงเกิดเป็นโครงสร้างการไหล และในขณะเดียวกันก็จะเกิดการเหนี่ยวนำการผสมระหว่างเจ็ตและกระแสมขวางขึ้นดังรูปที่ 1.1 เจ็ตในกระแสมขวางนั้นมีการประยุกต์ใช้ในวงกว้าง ตัวอย่างเช่น

- การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ตัวอย่างเช่น การผสมของเชื้อเพลิงและอากาศในห้องเผาไหม้
- Gas turbine เช่น การระบายในความร้อนบริเวณผิวของใบพัดของ Gas turbine ด้วยเทคนิค (Film cooling)
- สิ่งแวดล้อมและมลภาวะ เช่นกระจายของมลภาวะของปล่องควันตามโรงงานอุตสาหกรรม

คุณลักษณะที่สำคัญของเจ็ตในกระแสมขวางที่มีต่อประสิทธิภาพหรือประสิทธิผลของอุปกรณ์ คือ การเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) และเส้นทางเดินของเจ็ต (Trajectory) ดังนั้นแล้วหากสามารถหาเทคนิคในการควบคุมการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมขวางได้อย่างเหมาะสมในสภาวะของภาระต่างๆ กันได้ ก็จะทำให้มีศักยภาพในการออกแบบห้องเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้มากขึ้น ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงภาระที่กว้างขึ้น และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง ดังนั้นจึงมีความพยายามศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเจ็ตในกระแสมขวาง โดยงานวิจัยนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มหลักดังนี้ กลุ่มแรกคือ งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างและคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวางและกลุ่มที่สองคือ งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคการควบคุมเจ็ตในกระแสมขวางให้มีพฤติกรรมเป็นไปตามต้องการและศึกษาถึงผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการพัฒนาตัวของเจ็ต

ในแง่โครงสร้างและคุณลักษณะ Smith and Mungal (1998) พบว่า การก่อตัวของ CVP ที่บริเวณ Near field มีผลทำให้การผสมของ JICF นั้นดีกว่า Free jet แต่โครงสร้าง CVP ที่บริเวณ Far field ไม่ทำให้การผสมของ JICF นั้นดีไปกว่า Free jet และสำหรับการศึกษาเส้นทางเดินของเจ็ตนั้นควรจะสเกลด้วย rd ต่อมา Yuan, Street et al. (1999) ได้จำลองการไหลด้วย Large-Eddy Simulation (LES) พบว่า CVP เกิดจาก Hanging vortices ที่พัฒนาตัวมาจาก Skewed mixing layer ระหว่างเจ็ตและกระแสมขวางบริเวณรอบปากเจ็ต นอกจากนี้ Yuan and Street (1998)

อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเหนี่ยวนำการผสมและเส้นทางเดินของเจ็ตว่าการเหนี่ยวนำการผสมนั้นมีผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ตโดยเฉพาะในบริเวณ Far field

ในแง่การควบคุมทางเดินและการผสมของเจ็ต ได้มีการศึกษาถึงเทคนิคต่าง ๆ เช่น การติด delta tab Liscinsky, True et al. (1995), Zaman and Foss (1997) และ Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ซึ่งเป็นการควบคุมลักษณะ passive ที่ใช้พลังงานน้อย แต่ไม่สะดวกในการปรับเปลี่ยนการควบคุม การใช้วิธี pulsing Hermanson *et al.*, (1998), Eroglu and Breidenthal (2001) และ M'Closkey, King *et al.* (2002) พบว่าสามารถทำให้เจ็ตทะลุเข้าไปในกระแสมวลว่างได้ดีขึ้น และการใช้ swirling jet Kavsaoğlu and Schetz (1989), Liscinsky et al., (1995), Niederhaus, Champagne et al. (1997), Bunyajitradulya and Sathapornnanon, (2005), Yingjaroen, Pimpin *et al.* (2006), Denev, Fröhlich *et al.* (2009) และ Limdumrongtum, Chongsiripinyo *et al.* (2009) พบว่ามีผลต่อโครงสร้างของเจ็ตแต่ส่งผลน้อยต่อการเหนี่ยวนำการผสม อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีนี้เป็นวิธีการควบคุมที่ใช้พลังงานมาก ในปัจจุบันทางห้องวิจัยกลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanic Research Lab, FMRL) ได้พัฒนามาเป็นวิธีการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง Korn Sri *et al.*, (2009), Bunyajitradulya (2011), Witayaprapakorn and Bunyajitradulya (2013), Witayaprapakorn (2013), Chaikasetsin *et al.* (2013) และ Wangkiat *et al.* (2015) ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมที่มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานขึ้น

1.2 แรงจูงใจ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับเจ็ตควบคุมในแนวเส้นรอบวง Witayaprapakorn และ Bunyajitradulya (2013) พบว่าการเหนี่ยวนำการผสมที่มุม $\pm 135^\circ$ สูงกว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่มุม $\pm 15^\circ$ และกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม แต่ผลการศึกษานี้ทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4 เพียงค่าเดียวและฉีดเจ็ตควบคุมเพียง 2 มุมเท่านั้น โดยที่ $r_m = 2\%$ ต่อมา Chaikasetsin *et al.* (2013) จึงได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ของเจ็ตในกระแสมวลว่างที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4 โดยทำการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 135^\circ$ เพียงตำแหน่งเดียวเนื่องจากเป็นตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมที่งานก่อนหน้าพบว่าทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) มีค่าสูงกว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 15^\circ$ และกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุมพบว่า เมื่อเพิ่มการฉีดเจ็ตควบคุมจาก $r_m = 2\%$ เป็น 4% จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลว่างมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม Chaikasetsin *et al.* (2013) ยังคงศึกษาผลของ

ตำแหน่งของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงเพียงตำแหน่งเดียว และที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ค่อนข้างต่ำค่าเดียวคือเท่ากับ 4 เท่านั้น ซึ่งต่อมา Wangkiat *et al.* (2015) จึงได้ทำการศึกษาผลของการประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมกับเจ็ดในกระแสมขวงที่มีค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) สูงขึ้น โดยทำการทดลองฉีดเจ็ดควบคุมกับเจ็ดในกระแสมขวงที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 12 และในขณะเดียวกันเพื่อให้สามารถประเมินผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ดควบคุมได้ละเอียดและชัดเจนยิ่งขึ้นกว่างานก่อนหน้า จึงทำการฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งที่ละเอียดขึ้น ได้แก่ $\pm 15^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 75^\circ$, $\pm 105^\circ$, $\pm 135^\circ$ และ $\pm 165^\circ$ ผลการศึกษาพบว่าโดยทั่วไปแล้ว กรณีการฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งด้านหน้าลม (windward) คือที่มุม $\pm 15^\circ$, $\pm 45^\circ$ และ $\pm 75^\circ$ จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวงน้อยกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม แต่การฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งด้านหลังลม (leeward) คือที่มุม $\pm 105^\circ$, $\pm 135^\circ$ และ $\pm 165^\circ$ จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวงมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ดควบคุม นอกเหนือจากนั้นยังพบว่า เมื่อเพิ่มตำแหน่งมุมฉีดจากด้านหน้าลมไปด้านหลังลม คือจาก $\pm 15^\circ$ ไป $\pm 165^\circ$ จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ดควบคุมที่ทำให้เจ็ดในกระแสมขวงมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมมากที่สุดคือ $\pm 165^\circ$ นอกจากนี้ ผลการศึกษายังพบว่า เมื่อเปรียบเทียบเจ็ดในกระแสมขวงที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4 และ 12 ใน rd สเกลแล้ว ถึงแม้ว่าเจ็ดในกระแสมขวงที่มี r สูงกว่าคือที่ 12 จะมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมที่มากกว่าเจ็ดในกระแสมขวงที่มี r ต่ำกว่าคือที่ 4 แต่การประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมกับเจ็ดในกระแสมขวงที่มี r สูงกว่า จะมีประสิทธิผลซึ่งวัดด้วยค่าประสิทธิผลของการฉีดเจ็ดควบคุม (η) ที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการประยุกต์ใช้เจ็ดควบคุมกับเจ็ดในกระแสมขวงที่มี r ต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม Wangkiat *et al.* (2015) ศึกษาผลของตำแหน่งของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงเพียง 6 ตำแหน่ง และที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 12 เท่านั้น

แต่จากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ยังไม่มีการศึกษาผลของตำแหน่งของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวงที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่างๆ อย่างละเอียด จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยมีเป้าหมายที่จะศึกษาผลของเจ็ดควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมในตำแหน่งมุมฉีดที่ละเอียดกว่างานวิจัยที่ผ่านมาที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่างๆกัน

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาผลของตำแหน่งของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ด
ในกระแสลมขวาง ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่างๆ

สามารถนำมาเขียนสรุปเป็น Functional form ดังสมการ(1.1)

$$E = f\left(\frac{x}{rd}; r, \theta; r_m, Re_{cf}, Re_j = Re_{cf} \times r, \frac{\rho_j}{\rho_{cf}} = 1, \psi_{bl}, \psi_{jp}, \frac{\delta}{d}\right) \quad (1.1)$$

ซึ่งใช้เครื่องหมายอัฒภาค “ ; ” ใน functional form เพื่อที่จะแยกบทบาทของตัวแปรต่างๆในการ
ทดลอง ดังสมการที่ (1.2)

$$y = f(x ; p ; c) \quad (1.2)$$

Functional form ในสมการที่ (1.2) นี้มีความหมายว่า “ผลของ x ต่อ y ภายใต้เงื่อนไขของ p
และค่าคงที่ c ” โดยที่

- y คือ ตัวแปรตาม (dependent variable)
- x คือ ตัวแปรอิสระ (independent variables)
- p คือ ตัวแปรที่ผันแปรได้ (variable parameters) ซึ่งสอดคล้องกับการทำการทดลอง
ในกรณีต่างๆ
- c คือ ตัวแปรคงที่ (constant parameters) หรือเป็นตัวแปรที่มีค่าคงที่ตลอดการทำการ
ทดลอง

โดยในสมการ (1.1) ตัวแปรต่าง ๆ คือ

- y คือ Entrainment (E) หมายถึง ค่าการเหนี่ยวนำการผสมโดยคำนวณจาก
อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดในกระแสลมขวางบนระนาบตั้ง
ฉากต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดที่ปากทางออกซึ่งจะกล่าวในรายละเอียด
ต่อไปในบทที่ 3
- x คือ x/rd หมายถึง ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางปากทางออกของเจ็ดตามแนว
กระแสลมขวางแบบไร้มิติ
- p คือ r หมายถึง อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล และ θ หมายถึง ตำแหน่งเชิงมุม
ของการฉีดเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวง

C คือ r_m หมายถึง อัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก

Re_{cf} คือ ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง

Re_j คือ ค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ของเจ็ต

$\frac{\rho_j}{\rho_{cf}}$ คือ อัตราส่วนความหนาแน่นระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง

Ψ_{bl} คือ สภาวะเริ่มต้นของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางไร้มิติ

Ψ_{jp} คือ สภาวะเริ่มต้นของเจ็ตไร้มิติ

$\frac{\delta}{d}$ คือ ความหนาของชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางไร้มิติ

โดยที่ให้ Re_{cf} คงที่ แล้วจะปรับค่า Re_j ตามค่า r ที่เปลี่ยนไป

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

พารามิเตอร์ของการทดลอง สำหรับขอบเขตของงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

- 1.4.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4, 8 และ 12 โดยมีค่าเรย์โนลส์นัมเบอร์ของเจ็ต Re_j เท่ากับ 12,400, 24,800 และ 37,200 ตามลำดับ
- 1.4.2 เรย์โนลส์นัมเบอร์ของกระแสลมขวาง (Re_{cf}) มีค่าประมาณ 3,100
- 1.4.3 รูปแบบของความเร็วของเจ็ตที่ออกจากปากเจ็ตที่ออกจากปากเจ็ตเป็นแบบพัฒนาตัวเต็มที่
- 1.4.4 ในกรณีฉีดเจ็ตควบคุม จะฉีดที่มุม $\theta = \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 60^\circ, \pm 75^\circ, \pm 90^\circ, \pm 105^\circ, \pm 120^\circ, \pm 135^\circ, \pm 150^\circ, \pm 165^\circ, 0, 180^\circ$ และฉีดที่อัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมในแนวเส้นรอบวงต่อเจ็ตหลัก (r_m) เป็น 4%
- 1.4.5 ทำการทดลองโดยใช้เทคนิค Particle Image Velocimetry (PIV) ร่วมกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ตเท่านั้น วัดสนามความเร็วบนระนาบสองมิติ (yz plane) ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5, 0.75, 1$ และ 1.5

1.5 แนวทางการวิจัย

เพื่อประเมินประสิทธิผลของการใช้เจ็ดควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมสำหรับเจ็ดในกระแสลมขวาง ด้วยการใช้เทคนิค Stereo Particle Image Velocimetry (SPIV) โดยการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในส่วนของเจ็ดเท่านั้น วัดสนามความเร็วบนระนาบในการไหลขณะใดขณะหนึ่งของเจ็ด แล้วจึงนำไปสู่การหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดซึ่งนิยามจากอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดในกระแสลมขวางบนระนาบตั้งฉากต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ดที่ปากทางออกซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดการคำนวณต่อไปในบทที่ 3

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ในเชิงวิชาการที่จะทำให้มีความรู้ความเข้าใจและข้อมูลเชิงปริมาณเกี่ยวกับผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวางมากขึ้น และสามารถนำผลนี้ ไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ในแง่พลังงาน ได้แก่ การพัฒนาห้องเผาไหม้ให้เกิดการผสมกันได้ดีและส่งผลให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นภายใต้ภาระการทำงานที่กว้างขึ้น ในแง่ของสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การพัฒนาการปล่อยควันออกจากปล่องควันของโรงงานอุตสาหกรรมให้มีมลภาวะต่อบริเวณข้างเคียงน้อยลง เป็นต้น

บทที่ 2

งานวิจัยที่ผ่านมา

สำหรับบทนี้จะกล่าวในส่วนความรู้เบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมถึงงานวิจัยที่ผ่านมาของการศึกษาคุณลักษณะและการศึกษาในส่วนของการปรับแต่งและควบคุมเส้นทางเดินและการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสลมขวางซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของเจ็ดในกระแสลมขวางเช่น เส้นทางเดินของเจ็ดและการเหนี่ยวนำการผสม รวมถึง Vortical structure เป็นต้น อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลนิยามเป็น

$$r = \left(\frac{\rho_j V_j^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

โดยที่ ρ_j , ρ_{cf} คือ ความหนาแน่นของเจ็ด และกระแสลมขวางตามลำดับ V_j , u_{cf} คือความเร็วของเจ็ด และกระแสลมขวางตามลำดับ สำหรับในกรณีที่ ρ_j และ ρ_{cf} เท่ากัน อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลจะลดรูปเป็น ความเร็วเจ็ดต่อกระแสลมขวาง (V_j / u_{cf})

2.2 เส้นทางเดินของเจ็ด

Margason (1968) ได้แสดงความสัมพันธ์ของเส้นทางเดินของเจ็ดในกระแสลมขวางซึ่งเขียนอยู่ในรูป rd สเกลเป็น

$$\frac{y}{rd} = A \left(\frac{x}{rd} \right)^m \quad (2.2)$$

โดยที่ A , m เป็นค่าคงที่ของสมการมีค่าประมาณ 1.6 และ 1/3 ตามลำดับ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ด

Kamotani and Greber (1972) ได้ศึกษาเส้นทางเดินความเร็วของเจ็ด (Center plan maximal velocity trajectory) และเส้นทางเดินอุณหภูมิจึงเจ็ด (Center plan maximal

temperature trajectory) โดยให้ความร้อนแก่เจ็ตจนมีอุณหภูมิสูงกว่ากระแสลมขวางประมาณ $75 F^\circ$ และ $320 F^\circ$ ที่อัตราส่วนโมเมนตัม $(\rho_j V_j^2 / \rho_{cf} u_{cf}^2)$ เท่ากับ 15.3 และ 59.3 โดยเส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตนิยามเป็นเส้นทางเดินของจุดที่มีความเร็วสูงที่สุดบนระนาบสมมาตร (Center plan) ซึ่งเขียนอยู่ในรูป rd สเกลเป็น

$$\frac{y}{rd} = Ar^b \left(\frac{x}{rd} \right)^a \quad (2.3)$$

ในขณะที่เส้นทางเดินอุณหภูมิของเจ็ตนิยามเป็นเส้นทางเดินของจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดบนระนาบสมมาตร ซึ่งเขียนอยู่ในรูป rd สเกลเป็น

$$\frac{y}{rd} = Ar^b \left(\frac{\rho_j}{\rho_{cf}} \right)^c \left(\frac{x}{rd} \right)^a \quad (2.4)$$

โดยที่ A , a , b และ c เป็นค่าคงที่ของสมการ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ต

ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.1 พบว่าที่อัตราส่วนโมเมนตัมเดียวกันเส้นทางเดินอุณหภูมิของเจ็ตจะอยู่ต่ำกว่าเส้นทางเดินความเร็วของเจ็ตเสมอ อัตราส่วนโมเมนตัมเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลต่อเส้นทางเดินความเร็วและอุณหภูมิของเจ็ต ในขณะที่อัตราส่วนความหนาแน่นไม่ส่งผลต่อเส้นทางเดินความเร็วของเจ็ต แต่จะส่งผลต่อเส้นทางเดินอุณหภูมิของเจ็ตเพียงเล็กน้อย

Smith and Mungal (1998) ใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF) ร่วมกับ Acetone Vapour ฉีดเข้าไปในเจ็ต เพื่อศึกษาการลดลงของ Passive scalar concentration ตามแนวแกนเจ็ต โดยทดลองที่อัตราส่วนความเร็ว ประสิทธิภาพ (r) ตั้งแต่ 5 ถึง 25 และทำการสเกลผลของการกระจายตัวของ concentration บนระนาบด้วย d, rd, r^2d จากผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.2 พบว่าเมื่อสเกลเส้นทางเดินของ Passive scalar concentration ด้วย rd จะได้ลักษณะเส้นทางเดินที่มีแนวโน้มเป็นเส้นเดียวกันที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสเกลด้วย r^2d หรือ d

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางเดินของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสม

Yuan and Street (1998) ได้คำนวณหาเส้นทางเดินของเจ็ต (Trajectory) และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) โดยวิธี Large Eddy Simulation โดยคำนวณที่ r เท่ากับ 2 และ 3.3 และที่เรโนลด์นัมเบอร์ของเจ็ตที่อ้างอิงจากความเร็วที่กระแสลมขวางและเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ตเท่ากับ 1,050 ถึง 2,100 พบว่าบริเวณ Far field การผสมของเจ็ตจะมีความสัมพันธ์อย่าง

ใกล้เคียงกับเส้นทางเดินของเจ็ต ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการผสมของเจ็ตกับเส้นทางเดินของเจ็ตในรูปสมการได้เป็น

$$\frac{Q_j}{Q_0} = \frac{\dot{V}_{jet}}{\dot{V}_0} = 1 + \frac{rd}{ab} \left(\frac{x}{rd}\right)^{1-b} \quad (2.5)$$

โดยที่ a และ b เป็นค่าคงที่ของสมการ r คืออัตราส่วนความเร็วเจ็ตต่อกระแสลมขวาง \dot{V}_{jet} , \dot{V}_0 คือ Volume flux ของเจ็ตในกระแสลมขวาง และ เจ็ตที่ปากทางออกตามลำดับ

2.4, ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของเจ็ตและการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ต

Eric and Roshko (1994) ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ที่เกิดขึ้นในเจ็ตในกระแสลมขวาง ด้วย Flow visualize โดยเทคนิค Smoke-wire และวัดความเร็วด้วย Hot-wire พบว่าโครงสร้างของ Vortical structure แบ่งออกเป็น 4 ลักษณะดังรูปที่ 2.3 ได้แก่ 1) Jet shear layer vortices ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ Vortex ring ของ Free jet โดยเกิดจากการแยกตัวของ shear layer บริเวณปากเจ็ต 2) Horseshoes vortices โดยเกิดจากม้วนตัวของกระแสลมขวางในบริเวณชั้นขอบเขตที่พื้นที่รอบปากเจ็ต ซึ่งเกิดจากการที่กระแสลมขวางได้รับผลจาก Adverse pressure gradient ที่เกิดจากการกีดขวางการไหลของเจ็ตที่พุ่งออกมา ประกอบกับผลของความหนาของชั้นขอบเขตของพื้นที่บริเวณปากเจ็ต 3) Wake vortices ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ Wake ของการไหลผ่านวัตถุทรงกระบอก โดยมีแหล่งกำเนิดจาก Boundary layer ของกระแสลมขวางที่ผนังพื้นและ 4) Counter – rotating vortex pair (CVP) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เป็นกลไกสำคัญในการผสมโดยเฉพาะในบริเวณ Far field

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาการลดลงของความเข้มข้น (Scalar concentration) ตามแนวแกนเจ็ต จากผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงถึงอัตราการลดลงของความเข้มข้นไปตามเส้นทางเดินของเจ็ตสากลด้วย $r^2 d$ พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราการลดลงของความเข้มข้นที่ตำแหน่ง $s / r^2 d = 0.3$ จึงเป็นนิยามเป็นจุดแบ่งเขตระหว่าง Near field และ Far field โดยกำหนดให้ $s / r^2 d < 0.3$ เป็นตำแหน่ง Near Field และที่ $s / r^2 d > 0.3$ เป็น Far field รูปที่ 2.5 แสดงถึงอัตราการลดลงของความเข้มข้นไปตามเส้นทางเดินของเจ็ตสากลด้วย rd พบว่าบริเวณ Near field ความเข้มข้นมีอัตราการลดลงแปรตาม $(s / rd)^{-1.3}$ ซึ่งสูงกว่ากรณีของเจ็ตอิสระที่มีการลดลงแปรตาม $(s / rd)^{-1}$ ในขณะที่บริเวณ Far field มีการลดลงแปรตาม $(s / rd)^{-2/3}$ ซึ่งบ่งชี้ว่าการ Form ตัวของ CVP ที่ Far field นั้นไม่ทำให้การผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง (JICF) นั้นดีกว่า Free jet แต่

การ Form ตัวของ CVP ที่ Near field ต่างหากที่เป็นกลไกที่สำคัญของ JICF ที่ทำให้การผสมนั้น ดีกว่า Free jet

Yuan *et al.* (1999) พบว่ากลไกของการผสมสำหรับเจ็ตในกระแสมวลขวางนั้นได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงของ Large coherent structure ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการเกิด Turbulent mixing ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.6 พบว่าในช่วงต้นของการผสม ($z/rd < 3$) โครงสร้างของ Spanwise roller ที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผิวสัมผัสระหว่างเจ็ตและกระแสมวลขวาง ทำให้เกิดการผสมในระดับ Large scale ต่อมาในบริเวณที่เจ็ตเริ่มมีการโค้งตัว และ กระแสมวลขวางจะดึงเข้าไปในเจ็ตอากาศ ทำให้เกิดช่องภายในเจ็ตอากาศ (Gape) ซึ่งจะทำให้เกิดการผสมในระดับ Large scale และเมื่อเจ็ตอากาศพัฒนาตัวไปจนถึงบริเวณ Vortex zone โครงสร้างของ CVP จะเป็นกลไกสำคัญของการผสม โดยกระแสมวลขวางจะถูกดึงเข้าไปในเจ็ตตามทิศทางการหมุนวนของ CVP

2.5 กระบวนการเกิดและพัฒนาตัวของ Counter – rotating vortex pair

Counter – rotating vortex pair (CVP) เป็น Vortical structure ที่สำคัญต่อการเหนี่ยวนำการผสมในแง่คุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมวลขวาง

Yuan *et al.* (1999) ได้เสนอแนะการเกิดของ CVP ว่ามีจุดกำเนิดจาก Hanging vortices (รูปที่ 2.11) ซึ่งเป็นการม้วนตัวของกระแสมวลขวางทางเข้ามาในตัวเจ็ต โดยที่แกนการม้วนตามทิศทางผลรวมระหว่างเวกเตอร์ความเร็วเจ็ตและกระแสมวลขวาง (\bar{u}_{mean}) ดังรูปที่ 2.7(ก) ซึ่งโครงสร้างเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วระหว่างเจ็ตกับกระแสมวลขวางในทิศตั้งฉากกับ \bar{u}_{mean} , \bar{u}_{nj} และ \bar{u}_{ncf} หรือที่เรียกว่า Skewed mixing layer ดังรูป 2.7(ข)

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

Sue *et al.* (2004) ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field ของเจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยม จากผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.9 พบว่ากลไกของการเกิด CVP เริ่มจาก Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวจากทางผนังด้านข้างของเจ็ต และพบว่า Kelvin-Helmholtz roller นั้นไม่ได้ก่อตัวเป็น Closed vortex ring นอกจากนี้แล้ว รูปที่ 2.10 พบ Wake vortical

structure ที่ก่อดำขึ้นทางด้าน Downstream และ Horseshoe ซึ่งก่อดำขึ้นทางด้าน Upstream เป็นปฏิสัมพันธ์ของ Shear layer ที่พัวพันกับตัวเจ็ต

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

2.6 การปรับแต่งและควบคุมเจ็ต

งานวิจัยที่ผ่านมาได้นำเทคนิคต่างๆมาปรับเปลี่ยนรูปแบบการไหลโดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทแรกการควบคุมโดยไม่ใช้พลังงานกระตุ้น (Passive control) เช่นการใช้ Vortex generator tab ประเภทที่สองควบคุมด้วยการโดยใช้พลังงานกระตุ้น (Active Control) เช่น การกระตุ้นด้วยลำโพง (Pulse control) การกระตุ้นด้วยการหมุนควง (Swirling control) และ การกระตุ้นด้วยเจ็ตควบคุม (Jet control) เป็นต้น

2.6.1 การกระตุ้นโดยไม่ใช้พลังงาน

การติด (passive) tab (Liscinsky ; Zaman and Foss และ Bunyajitradulya and Sathapornnanon) ซึ่งเป็นการควบคุมแบบ passive ไม่สามารถปรับเปลี่ยนการควบคุมได้ รูปที่ 2.11

2.6.2 กระตุ้นโดยใช้พลังงาน

การใช้ pulsing (Eroglu and Breidenthal และ M'Closkey *et al.*) ซึ่งเป็นการควบคุมแบบ active สามารถปรับเปลี่ยนการควบคุมได้ พบว่าสามารถทำให้เจ็ตพุ่งทะลุเข้าไปในกระแสลมขวางได้ดีขึ้น และ การใช้ swirling jet (Liscinsky; Niederhaus *et al.*; Bunyajitradulya Sathapornnanon; Yingjaroen *et al.*; Denev *et al.* และ Limdumrongtum *et al.*) พบว่าการหมุนควงมีผลต่อโครงสร้างของเจ็ตแต่ส่งผลน้อยต่อการเหนี่ยวนำการผสม อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีหลังนี้เป็นวิธีการควบคุมที่ต้องใช้พลังงานมาก

ต่อมา Kornsri, Pimpin *et al.* (2009) ได้ศึกษาพัฒนาการใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงในการควบคุมเจ็ตในกระแสลมขวางรูปที่ 2.12 ซึ่งวิธีนี้สามารถปรับเปลี่ยนการควบคุมได้ง่ายและใช้พลังงานในการควบคุมน้อย พบว่าเจ็ตควบคุมสามารถควบคุมเส้นทางเดินของเจ็ตได้ โดยเมื่อฉีดคู้เจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งด้านหน้าลม (windward) จะทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตต่ำลง แต่เมื่อฉีดคู้เจ็ต

ควบคุมที่ตำแหน่งด้านท้ายลม (leeward) จะทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตสูงขึ้น รูปที่ 2.13 อย่างไรก็ตาม Kornsri *et al.* และ Bunyajitradulya (2011) ยังไม่สามารถวัดการเหนี่ยวนำการผสมได้โดยตรง จึงยังไม่สามารถประเมินหาผลของการใช้เจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมได้โดยตรง

เพื่อให้สามารถวัดการเหนี่ยวนำการผสมและประเมินผลของการใช้เจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมได้โดยตรง Witayaprapakorn and Bunyajitradulya และ Witayaprapakorn (ดูประกอบ Bunyajitradulya) จึงได้ใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่ไปกับเทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลในส่วนของเจ็ตหลักเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง โดยศึกษากับเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4 และทำการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 15^\circ$ และตำแหน่ง $\pm 135^\circ$ โดยคงค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ที่ 2% พบว่าเมื่อทำการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 135^\circ$ ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) มีค่าสูงกว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 15^\circ$ และกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม รูปที่ 2.14 งานวิจัยนี้ได้ให้คำชี้แนะว่าหากเพิ่มค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) น่าจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) เพิ่มขึ้นตาม อย่างไรก็ตามงานวิจัยทั้งสองศึกษาผลของตำแหน่งของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงเพียงสองตำแหน่งเท่านั้น

ต่อมา Chaikasetzin *et al.* (2013) จึงได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ของเจ็ตในกระแสลมขวางที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4 โดยทำการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 135^\circ$ เพียงตำแหน่งเดียว เนื่องจากเป็นตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมที่งานก่อนหน้าพบว่าทำให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) มีค่าสูงกว่าการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 15^\circ$ และกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม พบว่า เมื่อเพิ่มการฉีดเจ็ตควบคุมจาก $r_m = 2\%$ เป็น 4% จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางมีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.15 อย่างไรก็ตาม Chaikasetzin *et al.* (2013) ยังคงศึกษาผลของตำแหน่งของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงเพียงตำแหน่งเดียว และที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลที่ค่อนข้างต่ำค่าเดียวคือเท่ากับ 4 เท่านั้น

Wangkiat *et al.* (2015) จึงได้ทำการศึกษาผลของการประยุกต์ใช้เจ็ตควบคุมต่อการเหนี่ยวนำการผสมกับเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) สูงขึ้น โดยทำการทดลองฉีดเจ็ตควบคุมกับเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 12 และในขณะเดียวกันเพื่อให้สามารถประเมินผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมได้ละเอียดและ

ชัดเจนยิ่งขึ้นกว่างานก่อนหน้า จึงทำการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งที่ละเอียดขึ้น ได้แก่ $\pm 15^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 75^\circ$, $\pm 105^\circ$, $\pm 135^\circ$ และ $\pm 165^\circ$ ผลการศึกษาพบว่า โดยทั่วไปแล้ว การกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งด้านหน้าลม (windward) คือที่มุม $\pm 15^\circ$, $\pm 45^\circ$ และ $\pm 75^\circ$ จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลน้อยกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม แต่การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งด้านท้ายลม (leeward) คือที่มุม $\pm 105^\circ$, $\pm 135^\circ$ และ $\pm 165^\circ$ จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลมากกว่ากรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม นอกเหนือจากนั้นยังพบว่า เมื่อเพิ่มตำแหน่งมุมฉีดจากด้านหน้าลมไปด้านท้ายลม คือจาก $\pm 15^\circ$ ไป $\pm 165^\circ$ จะทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสมวลมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมมากที่สุดคือ $\pm 165^\circ$ รูปที่ 2.16 นอกจากนี้ ผลการศึกษายังพบว่า เมื่อเปรียบเทียบเจ็ตในกระแสมวลที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4 และ 12 ใน rd สเกลแล้ว ถึงแม้ว่าเจ็ตในกระแสมวลที่มี r สูงกว่าคือที่ 12 จะมีอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมที่มากกว่าเจ็ตในกระแสมวลที่มี r ต่ำกว่าคือที่ 4 แต่การประยุกต์ใช้เจ็ตควบคุมกับเจ็ตในกระแสมวลที่มี r สูงกว่า จะมีประสิทธิผลซึ่งวัดด้วยค่าประสิทธิผลของการฉีดเจ็ตควบคุม (η) ที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการประยุกต์ใช้เจ็ตควบคุมกับเจ็ตในกระแสมวลที่มี r ต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม Wangkiat *et al.* (2015) ศึกษาผลของตำแหน่งของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงเพียง 6 ตำแหน่ง และที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 12 เท่านั้น

ในอีกด้านหนึ่ง ที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลที่ยังไม่มีการควบคุมโดยใช้การวัดอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรโดยตรง Wongthongsiri (2014) จึงได้ศึกษาในประเด็นนี้ โดยทำการทดลองกับเจ็ตในกระแสมวลที่ไม่มีการควบคุมที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4, 8 และ 12 พบว่า ที่ตำแหน่ง x/rd เดียวกัน เมื่อค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) เพิ่มขึ้นตาม รูปที่ 2.17 และที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ใดๆ ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากบริเวณใกล้ปากทางออกของเจ็ต (near field, $x/rd = 0.5$) ไปยังบริเวณไกลปากทางออกของเจ็ต (far field, $x/rd = 1.5$) โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรกับระยะทางตามแนว downstream ที่สเกลด้วย rd สเกลจะสามารถเขียนได้ในรูป power law ตามสมการ

$$E = 1 + a(x/rd)^b \quad (2.6)$$

Wongthongsiri พบว่าสำหรับเจ็ดในกระแสมขวางที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4, 8 และ 12 จะมีค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ดังนี้

$$r = 4: \quad a = 4.88, \quad b = 0.50$$

$$r = 8: \quad a = 8.21, \quad b = 0.53$$

$$r = 12: \quad a = 12.20, \quad b = 0.50$$

นอกเหนือจากนี้ Wongthongsiri ยังพบสมการ power law ที่สามารถ collapse การพัฒนาตัวของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ดในกระแสมขวางตามระยะทางการไหลที่ r ต่างๆกันข้างต้นเป็นสมการเดียวคือ

$$\frac{E}{r^{0.7}} = 2.251 \left(\frac{x}{rd} \right)^{0.412} \quad (2.7)$$

ซึ่งนับว่าเป็นสมการที่สะดวกต่อการนำไปใช้งานมาก อย่างไรก็ตาม สมการนี้เป็นสมการที่ได้จากการประเมินผลการทดลองในช่วงระยะทางตามแนวการไหลที่จำกัดเท่านั้น ($0.25 \leq x/rd \leq 1.5$) และสมการนี้จะไม่ถูกต้องสำหรับตำแหน่งที่ปากทางออกของเจ็ดและบริเวณใกล้ปากเจ็ดมากๆ

บทที่ 3

เทคนิคและหลักการในการประเมินหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

3.1 ปัญหาการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมวลขวาง

ในอดีตที่ผ่านมา การศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมวลขวาง และโดยเฉพาะ การประเมินหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรจากการทดลองโดยตรงนั้นยังพบไม่มากนัก เนื่องจากเหตุผลทางด้านการวัด ซึ่งมีความยุ่งยาก ซับซ้อน เนื่องจากประเด็นปัญหาหลัก 2 ประเด็นคือ (1) ความยากลำบากในการวัดองค์ประกอบความเร็วที่มีทิศทางตั้งฉากกับระนาบของพื้นที่หน้าตัดของเจ็ด $V_x(\bar{x}, t)$ พร้อมกันทั่วทุกจุดบนระนาบ ณ เวลาใดๆ ได้ตลอดเวลา โดยความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มเทียบกับเวลา (2) ความลำบากในการระบุพื้นที่หน้าตัดของเจ็ดออกจากกระแสมวลขวางได้อย่างชัดเจน งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จึงได้ศึกษาปริมาณที่มีคุณลักษณะเชื่อมโยงกับการเหนี่ยวนำการผสมแทน เช่น Spread rate และ Decay rate ของความเร็วเฉลี่ยและปริมาณความเข้มข้นสเกลาร์ (Scalar concentration) ซึ่งศึกษาได้โดยสะดวกกว่าการศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดโดยตรง

เพื่อที่จะสามารถศึกษาการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดโดยตรง ในการที่จะตอบประเด็นปัญหาที่หนึ่งได้ คือ การทดลองนี้ต้องสามารถวัดความเร็วสนามการไหลของเจ็ดในแนวแกน x (V_x) ได้ ซึ่งเครื่อง Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) นั้นถูกนำมาพิจารณาเป็นเครื่องมือที่จะในการวัดความเร็ว เพราะเครื่อง SPIV สามารถวัดความเร็วสนามการไหลของเจ็ดได้ 3 แกน ทั้ง V_x , V_y และ V_z พร้อมกันทั่วทุกจุดบนระนาบใดๆได้ในขณะที่ในส่วนของคำตอบประเด็นปัญหาที่สองนั้น ในปัจจุบันยังคงเป็นปัญหาอยู่ เนื่องจากเครื่อง SPIV ในงานวิจัยทั่วไปนั้นจะมีการใส่อนุภาคติดตามการไหลในทั้งของไหลส่วนที่เป็นเจ็ดและกระแสมวลขวาง ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือ สามารถแสดงสนามความเร็วได้อย่างต่อเนื่องจากบริเวณเจ็ดสู่บริเวณที่เป็นกระแสมวลขวางดังแสดงในรูปที่ 3.1 แต่ก็มีข้อเสียคือ ไม่สามารถแยกแยะส่วนที่เป็นส่วนผสมของเจ็ดออกจากกระแสมวลขวางบริสุทธิ์ได้นอกจากนั้นปริมาณที่วัดได้เป็นปริมาณเฉลี่ยจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนในการนิยามบริเวณที่เป็นเจ็ดในกระแสมวลขวางจึงทำให้การกำหนดขอบเขตที่เป็นส่วนผสมของเจ็ดนั้นเป็นแบบไม่มีหลักเกณฑ์ที่ชัดเจน (Arbitrariness) เพราะฉะนั้นการใส่อนุภาคติดตามการไหลในทั้งของไหลส่วนที่เป็นเจ็ดและกระแสมวลขวางจึงไม่เหมาะสม เนื่องจากจะทำให้ไม่สามารถแยกแยะบริเวณที่เป็นเจ็ดและบริเวณที่เป็นกระแสมวลขวางออกจากกันได้อย่างชัดเจน จึงนำมาสู่เทคนิคในงานวิจัยนี้ คือ การใส่

อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะของไหลส่วนที่เป็นเจ็ตเท่านั้น แต่จะไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.2 เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามในการวัดสนามการไหล

ในการตอบประเด็นปัญหาที่สอง ซึ่งคือ ความลำบากในการระบุพื้นที่หน้าตัดของเจ็ตออกจากกระแสลมขวางได้อย่างชัดเจน ณ เวลาใดๆ ทุกเวลา ทำให้การทดลองนี้ใช้เทคนิคการใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะของไหลส่วนที่เป็นเจ็ตเท่านั้น แต่จะไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ทำให้การนิยามบริเวณที่เป็นเจ็ตในกระแสลมขวางทำได้อย่างชัดเจนเพราะอย่างน้อยบริเวณที่มีอนุภาคติดตามการไหล บริเวณนั้นต้องมีของไหลส่วนที่เป็นเจ็ตผสมอยู่ จึงทำให้ความเร็วที่วัดได้จากเครื่อง SPIV เป็นความเร็วเฉพาะบริเวณที่เป็นเจ็ตหรือส่วนผสมของเจ็ตเท่านั้น เนื่องจากเครื่อง SPIV ในทางปฏิบัตินั้นจะวัดความเร็วของอนุภาคติดตามที่วิ่งอยู่ในของไหล ส่วนบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางความเร็วที่วัดได้มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่มีอนุภาคติดตามการไหลอยู่ดังแสดงในรูปที่ 3.2

การวัดสนามการไหลของความเร็วในแนวแกน x ณ เวลาใดๆบนระนาบตัดขวาง โดยใช้ SPIV ร่วมกับการระบุบริเวณ ส่วนที่เป็นเจ็ตในกระแสลมขวางได้ ทำให้สามารถหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมได้อย่างชัดเจน โดย ในการทดลองนี้จะใส่อนุภาคติดตาม เป็นสารละลายกรีนเซอร์ินที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยจะใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะส่วนที่เป็นเจ็ต แต่จะไม่ใส่ในกระแสลมขวาง

3.3 การประเมินหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรและค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสม

3.3.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

การหาอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมซึ่งเป็นจุดประสงค์ของการทดลองนี้ นิยามคือ

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

โดย E คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรเฉลี่ยเทียบกับเวลา

Q_j คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตเฉลี่ยเทียบกับเวลาผ่านระนาบตัดขวางใดๆ ซึ่งวิธีการหา Q_j จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

Q_0 คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปากทางออกของเจ็ต ในกรณีควบคุม

$$Q_0 = Q_{mj} + Q_{cj}$$

3.3.2 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ตบนระนาบต่างๆ เกลี่ยเทียบกับเวลา

ในการทดลองนี้จะใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะส่วนที่เป็นเจ็ตเท่านั้น แต่จะไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ดังนั้นสนามความเร็วที่วัดได้จากเครื่อง SPIV จะเป็นบริเวณที่พบอนุภาคติดตามก็คือ บริเวณที่มีของไหลส่วนที่เป็นส่วนผสมของเจ็ตอยู่นั่นเอง ส่วนบริเวณที่ไม่พบอนุภาคติดตามการไหล ความเร็วจะมีค่าเป็นศูนย์ดังแสดงได้จากสมการ (3.2)

$$\vec{V}_{PIV}(\vec{x}, t) = \begin{cases} \vec{V}_j(\vec{x}, t) & \vec{x} \text{ อยู่ในบริเวณที่เป็นส่วนผสมของเจ็ต} \\ \vec{0} & \vec{x} \text{ อยู่ในบริเวณที่เป็นกระแสลมขวางบริสุทธิ์} \end{cases} \quad (3.2)$$

ดังนั้น อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเจ็ต ณ จะหาได้จากสมการ

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

เมื่อ $A_j(x, t)$ คือ บริเวณที่อยู่ในขอบเขตเจ็ต ณ เวลาใดๆ

$V_{j,x}(\vec{x}, t)$ คือ สนามความเร็วตามแนวแกน x ของเจ็ต ณ เวลาใดๆ

$V_x(\vec{x}, t)$ คือ สนามความเร็วรวมไม่แยกแยะความเร็วของเจ็ตหรือความเร็วกระแสลมขวางตามแนวแกน x ณ เวลาใดๆ

A คือ บริเวณทั้งหมดของภาพที่ครอบคลุม $A_j(x, t)$ ที่ทุกเวลาที่เก็บข้อมูล

เมื่อนำอัตราการไหล มาเฉลี่ยเทียบกับเวลาจะได้

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

$$\begin{aligned}
 &= \int_A \left(\frac{1}{T} \int_0^T V_{j,x}(\bar{x}, t) dt \right) dA \\
 &= \int_A V_{j,x}(\bar{x}) dA
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

เมื่อ $V_{j,x}(\bar{x})$ คือ ความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน x เฉลี่ยเทียบกับเวลา

เมื่อใช้ SPIV วัดจะได้สนามความเร็วเป็นเมตริกขนาดจำกัดและ Discrete ทำให้สามารถแปลง สมการที่ (3.4) ให้อยู่ในรูปของผลรวมได้ดังนี้

$$Q_j(x) = \int_A V_{j,x}(\bar{x}) dA = \sum_{mm} (V_{j,x,mm} \Delta A) \tag{3.5}$$

โดย $V_{j,x,mm}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยเมื่อเทียบเวลาในแนวแกน x ของเจ็ตของแต่ละอิเลิเมนต์ที่ตำแหน่ง (m,n) บนเมตริกของสนามความเร็วของเจ็ต

ΔA คือ พื้นที่ของแต่ละอิเลิเมนต์ที่ตำแหน่ง (m,n) ซึ่งมีค่าเท่ากันหมดทุกอิเลิเมนต์เนื่องจากทั้งภาพมี spatial resolution ที่เท่ากัน

3.3.3 ค่าประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสม

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการใช้เจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมเชิง ปริมาตรของเจ็ต จึงนิยามประสิทธิภาพ จากอัตราส่วนระหว่างอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลขวางกรณีเจ็ตมีการควบคุม (controlled JICF, cJICF) และอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลขวางกรณีเจ็ตไม่มีการควบคุม (JICF) ตามสมการที่ (3.6)

$$\eta = \frac{E_{cJICF}}{E_{JICF}} \tag{3.6}$$

เมื่อ E_{cJICF} คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลขวางกรณีเจ็ตมีการควบคุม

E_{JICF} คือ อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวลขวางกรณีเจ็ตไม่มีการควบคุม

บทที่ 4

รายละเอียดและอุปกรณ์การทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้มีชุดทดลองอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ภาพรวมของชุดทดลองในรูปแบบแผนภาพ schematic แสดงในรูปที่ 4.2 และในรูปแบบภาพถ่ายแสดงในรูปที่ 4.3 โดยชุดทดลองนั้นประกอบไปด้วย อุโมงค์ลมซึ่งมีพัดลมหอยโข่งที่ทำหน้าที่สร้างกระแสลมขวาง ชุดเจ็ตหลักซึ่งมีพัดลมหอยโข่งที่ทำหน้าที่สร้างเจ็ต ชุดเจ็ตควบคุมที่มีหัวของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงและมีคอมเพรสเซอร์ที่ทำหน้าที่สร้างเจ็ตควบคุม และอุปกรณ์วัดความเร็ว SPIV โดยภาพรวมของการทดลองจะเป็นดังนี้ กระแสลมขวางจะถูกสร้างขึ้นจากพัดลมหอยโข่งของอุโมงค์ลม และจะไหลผ่านอุโมงค์ลมไปเจอกับเจ็ตซึ่งถูกสร้างขึ้นจากพัดลมหอยโข่งของเจ็ต ที่บริเวณที่ทำการทดลอง (test section) ในกรณีที่มีการฉีดเจ็ตควบคุม เจ็ตควบคุมจะถูกยิงออกมาในลำกระแสของเจ็ตก่อนที่เจ็ตจะออกมาเจอกับกระแสลมขวาง เมื่อเจ็ตเจอกับกระแสลมขวางแล้วจะใช้อุปกรณ์ SPIV ในการถ่ายภาพเจ็ตที่หน้าตัดใดๆ แล้วนำไปผ่านการคำนวณในโปรแกรมต่างๆ ต่อไปเพื่อหาสนามความเร็ว ณ ขณะเวลาใดๆ ในบทนี้จะอธิบายถึง พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง ส่วนประกอบหลักของชุดทดลอง การวัดและเครื่องมือวัดต่างๆ ในการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จริง เช่น การวัดสถานะเริ่มต้นของเจ็ตที่ปากทางออกของเจ็ต เป็นต้น

พิกัดที่ใช้ในการทดลองนี้คือพิกัด xyz โดยได้กำหนดจุดเริ่มต้นอยู่ที่ปากทางออกของเจ็ตและได้กำหนดแกน x ให้มีทิศทางเดียวกับความเร็วของกระแสลมขวาง (Streamwise) ส่วนแกน y จะมีทิศตั้งฉากกับกระแสลมขวางหรือทิศเดียวกับความเร็วที่ออกจากปากเจ็ต (Traverses) และแกน z จะตั้งฉากกับแกน x และ y ตามกฎมือขวา สำหรับมุมในการฉีดเจ็ตควบคุมนั้นจะกำหนดให้มุม 0 องศา มีทิศทางเดียวกับกระแสลมขวาง มุมบวกมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาและมุมลบมีทิศทวนเข็มนาฬิกา ดังรูปที่ 4.4

4.1 อุโมงค์ลม

รูปที่ 4.5 แสดงภาพ Schematic ของอุโมงค์ลมซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ พัดลมหอยโข่ง (Centrifugal blower) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (Diffuser) ห้องจัดปรับการไหล (settling chamber) ส่วนลดพื้นที่หน้าตัด (Contraction) และหน้าตัดทดสอบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Test section)

การทำงานของอุโมงค์ลมจะเริ่มจากการดูดอากาศเข้าทางด้านของพัดลมหอยโข่งชนิด Backward curve airfoil blades ขนาด 15 กิโลวัตต์ ซึ่งมีขนาดทางออก 76 x 76 ตารางเซนติเมตร ควบคุมความเร็วรอบด้วยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (ABBTM model ACS401002032, ขนาด 50 Hz, ค่าความละเอียดเท่ากับ 0.1 Hz) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จากนั้นอากาศจะผ่านช่องลดแรงสั่นสะเทือน (Flexible duct) ไปสู่ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัดเพื่อลดความเร็วของอากาศโดยมีความยาว 74 เซนติเมตร และมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 78 x 78 ตารางเซนติเมตรที่ทางเข้าและ 100 x 100 ตารางเซนติเมตร ที่ทางออก โดยภายในส่วนขยายพื้นที่หน้าตัดจะประกอบด้วยแผ่นเหล็กเจาะรู (Perforated plate) จำนวน 4 แผ่นโดยแต่ละแผ่นห่างกัน 15 เซนติเมตร เพื่อป้องกันการเกิด Separation และเพื่อให้อากาศกระจายตัวเต็มที่ในส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด จากนั้นอากาศจะผ่านไปสู่อ่างจัดปรับการไหลซึ่งมีขนาด 100 x 100 ตารางเซนติเมตร ยาว 125 เซนติเมตร ภายในประกอบด้วยตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh x SWG เท่ากับ 4 x 24 และชุดปรับทิศทางการไหล (Honeycomb) ที่ทำจากท่อ PVC ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 15 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตรวางตัวเรียงอยู่เต็มหน้าตัดการไหล ถัดจาก Honey comb จะมีตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh x SWG เท่ากับ 16 x 18 x 31 จำนวน 7 แผ่น วางห่างกัน 12.6 เซนติเมตร เพื่อปรับทิศทางการไหลและให้อากาศมีความเร็วสม่ำเสมอ จากนั้นอากาศจะไหลไปในส่วนลดพื้นที่หน้าตัดซึ่งมีรูปร่างเส้นโค้งเป็นสมการ Polynomial ดีกรี 4 มีจุดเปลี่ยนความโค้งที่ระยะ 2/3 ของความยาว 170 เซนติเมตร เพื่อเร่งความเร็วของอากาศ เพิ่มความสม่ำเสมอและลดความปั่นป่วนของอากาศก่อนเข้าสู่หน้าตัดทดสอบ โดยที่ด้านล่างของหน้าตัดทดสอบจะต่ออยู่กับเจ็ตหลักซึ่งมีระยะห่างจากขอบด้านหน้าของหน้าตัดทดสอบอยู่ 85 เซนติเมตร

4.2 ชุดเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุม

รูปที่ 4.8 แสดงส่วนประกอบของหัวเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุม โดยเจ็ตหลักมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 12.57 มิลลิเมตร ภายในเจาะรูโดยรอบเป็นเจ็ตควบคุมซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 มิลลิเมตรและยาว 40 มิลลิเมตร โดยเจ็ตควบคุมแต่ละตัวมีระยะห่างเชิงมุมเท่ากับ 15 องศา รวมทั้งหมด 24 ตัว และจุดศูนย์กลางของเจ็ตควบคุมอยู่ต่ำกว่าระดับทางออกของเจ็ตหลักเท่ากับ 3 มิลลิเมตร

4.2.1 เจ็ตหลัก (Main jet)

รูปที่ 4.9 แสดงส่วนประกอบต่างๆของส่วนเจ็ตหลัก โดยการทำงานของเจ็ตหลักจะเริ่มจากพัดลมความดันสูง 10 แรงม้า (Elprom™) ควบคุมความเร็วรอบด้วยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (ABB™ model ACS401002032 ,ขนาด 50 Hz, ค่าความละเอียด 0.1 Hz) ดูดอากาศจากภายนอกแล้วส่งผ่านท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และมีการติดตั้ง Six-jet atomizer (TSITM model9306A) สำหรับฉีดละอองของสารละลาย Glycerol ที่ความเข้มข้น 5% เพื่อใช้เป็นอนุภาคติดตามการไหล จากนั้นท่อจะถูกลดขนาดเป็น 2.5 นิ้ว และ 3/4 นิ้วอีกครั้ง และต่อกับท่ออลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8 นิ้ว ซึ่งมีความยาวถึง 44 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเพื่อให้รูปร่างของเจ็ตที่ปากทางออกเป็นแบบพัฒนาเต็มที่ (Fully developed pipe flow)

4.2.2 เจ็ตควบคุม (Control jets)

รูปที่ 4.10 แสดงส่วนประกอบของชุดเจ็ตควบคุม โดยการทำงานจะเริ่มจากการอัดอากาศผ่านเครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ (Reciprocating air compressor) จากนั้นจะผ่านตัวควบคุมแรงดัน (Pressure regulator) , Ball valve และวาล์วทองเหลืองแบบเข็ม (Needle valve) ขนาด 1/2 นิ้วแบบ Solenoid จากนั้นจะผ่าน Rotameter แบบมีวาล์วในตัว (Cole –Parmer 03217-30 ชนิด 150 มิลลิเมตร) เพื่อใช้ควบคุมและวัดอัตราการไหล ถัดจาก Rotameter จะต่ออยู่กับ Pressure gage (TK รุ่น 15 lb/in² full scale) เพื่อใช้วัดความดันในระบบเพื่อนำไปหาค่าตัวแปรแก้ไข (Correction factor) สำหรับอัตราการไหล จากนั้นอากาศจะผ่านสายยางขนาด 3/16 นิ้วและไปต่อกับรูของเจ็ตควบคุมที่ต้องการ

4.3 ชุดเครื่องมือวัดความเร็ว Stereoscopic Particle Image Velocimetry

4.3.1 ส่วนประกอบและการทำงานของ Stereoscopic Particle Image Velocimetry

ในการทดลองนี้ได้ใช้อุปกรณ์วัดความเร็วชนิด Stereo Particle Image Velocimetry (SPIV) ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดความเร็วของของไหลได้ทั้ง 3 แกนพิกัด (x, y, z) แต่ SPIV จะไม่ได้วัดความเร็วของของไหลโดยตรงแต่ SPIV จะตรวจจับความเร็วจากอนุภาคติดตามที่ได้ปล่อยไปในของไหล โดยรายละเอียดของการทำงานของชุด SPIV มีดังนี้

รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ต่างๆของ SPIV ซึ่งมีผู้ผลิตคือบริษัท TSI โดยการทำงานเริ่มจากเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ ND:YAG ยี่ห้อ New Wave™ (model Solo 200XT กำลังสูงสุด 200 mJ/pulse ที่

ความยาวคลื่น 532 nm, รูปที่ 4.11) ส่งเลเซอร์ผ่านทางแขนส่งต่อเลเซอร์ (Laser light arm, Model 610015, รูปที่ 4.12) ที่ปลายทางออกของแขนส่งต่อเลเซอร์จะต่ออยู่กับเลนส์เพื่อสร้างเลเซอร์เป็นแผ่นยิงไปบนระนาบต่างๆ ละอองของกลีเซอรินที่อยู่ในเจ็ตเมื่อถูกแสงเลเซอร์ก็จะสว่างขึ้น จากนั้นภาพที่เกิดขึ้นก็จะถูกบันทึกด้วยกล้อง CCD จำนวนสองตัว (PowerView Plus11MP, model 630062 ความละเอียด 4008 พิกเซล \times 2672 พิกเซล, ขนาดพิกเซล 9×9 ตารางไมโครเมตร, ขนาด CCD 36.07×24.05 ตารางมิลลิเมตร, และไดนามิกเรนจ์ 12 บิต, รูปที่ 4.13) ซึ่งกล้องทั้งสองนี้จะถูกติดตั้งเลนส์ ยี่ห้อ Tokina™ (model 100 mm f2.8D Macro) สำหรับการถ่ายภาพทุกกรณี ที่ x/rd เท่ากับ 1.5 ซึ่งหน้าตัดเจ็ตมีขนาดใหญ่จึงจำเป็นต้องใช้เลนส์ยี่ห้อ Nikkor (model 50 mm f1.8D Macro) แทน ทั้งนี้เพื่อให้การถ่ายภาพและการยิงเลเซอร์ทำงานประสานกัน กล้อง เลเซอร์และคอมพิวเตอร์จะถูกเชื่อมต่อกันด้วยเครื่องควบคุมส่วนกลาง (Synchronizer model 610035) รูปที่ 4.14 ทำหน้าที่ประสานการทำงานของเลเซอร์, กล้อง และคอมพิวเตอร์ให้ทำงานสัมพันธ์กัน สำหรับการบันทึกภาพ จะบันทึกภาพด้วยความถี่ 1.04 Hz เพื่อให้ได้สนามความเร็วจำนวน 1,000 สนาม (1,000 คู่ภาพ) ภาพที่บันทึกได้ด้วยกล้อง 2 ตัวจะถูกนำมาประมวลผลเพื่อหาเป็นเวกเตอร์ความเร็วด้วยโปรแกรม TSI™ Insight 4G ทำการประมวลผลเพื่อหาเวกเตอร์ความเร็วจากคู่ภาพ ในการประมวลผลจะใช้ Interrogation area เริ่มต้นเท่ากับ 64×64 พิกเซล² และสุดท้ายเท่ากับ 32×32 พิกเซล² ซึ่ง Interrogation area จะ Overlap กันที่ 50% ทำให้ท้ายสุดจะได้ Spatial resolution ของสนามความเร็วเป็น 16×16 พิกเซล² เทียบเป็น Spatial resolution ของสนามความเร็วที่มีขนาดตั้งแต่ 0.97×0.97 มม² ที่ $x/rd = 0.5$ จนถึง 1.04×1.04 มม² ที่ $x/rd = 1.5$ ที่กรณี $r = 4$ (ภาคผนวก ข.1) ส่วนกรณี $r = 8$ Spatial resolution ของสนามความเร็วที่ได้จะมีขนาดตั้งแต่ 1.28×1.28 มม² ที่ $x/rd = 0.5$ จนถึง 2.18×2.18 มม² ที่ $x/rd = 1.5$ (ภาคผนวก ข.2) และกรณี $r = 12$ Spatial resolution ของสนามความเร็วที่ได้จะมีขนาดตั้งแต่ 2.31×2.31 มม² ที่ $x/rd = 0.5$ จนถึง 2.76×2.76 มม² ที่ $x/rd = 1.5$ (ภาคผนวก ข.3) และทุกกรณีจะมีสนามเวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตที่วัดได้ไม่ต่ำกว่า 10,000 เวกเตอร์

4.3.2 การหาค่าสนามเวกเตอร์ความเร็วโดยโปรแกรม Insight 4G

การทำงานของโปรแกรมเพื่อประมวลผลภาพถ่ายเป็นเวกเตอร์ความเร็วประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ จำนวน 4 ขั้นตอนดังนี้

A. Calibration (Perspective Calibration Process)

เป็นขั้นตอนที่โปรแกรมจะเปรียบเทียบระยะจริงที่ระนาบของวัตถุกับระยะที่เห็นในระนาบของภาพถ่าย โดยการถ่ายภาพแผ่นเปรียบเทียบ (แผ่น Target) จากนั้นโปรแกรมจะตรวจสอบหาจุดสี่ขาคบนแผ่นเปรียบเทียบ เพื่อคำนวณหาขนาดของ 1 พิกเซล มีหน่วยเป็นไมโครเมตร กล่าวคือระยะที่เห็นในระนาบของภาพถ่ายนั้นขนาด 1 พิกเซล มีขนาดเป็นกิมิลลิเมตรในระนาบของวัตถุของทั้งในแนวแกน x , y และ z

B. Pre-processing

เป็นขั้นตอนของการปรับอัตราส่วนของรูปให้มีระยะจริงต่อ 1 พิกเซลเท่ากันก่อน โดยใช้คำสั่ง Image dewarping เพราะว่าการถ่ายภาพ SPIV นั้นกล้องจะต้องทำมุมกับแนวการถ่ายตั้งฉากกับภาพ ซึ่งภาพถ่ายที่ได้จะเป็นภาพ Perspective นั่นคือภาพของวัตถุที่มีระยะจากกล้องไกลกว่าจะมีขนาดระยะจริงต่อ 1 พิกเซล มากกว่าฝั่งของภาพที่ใกล้กล้องมากกว่า เมื่อผ่านกระบวนการนี้แล้ว โปรแกรมจะบันทึกผลของภาพทั้ง Frame A และ Frame B ในรูปของไฟล์ .tiff

C. Processing

เป็นขั้นตอนที่คำนวณหาเวกเตอร์จากภาพในแต่ละ frame ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาโดยใช้กฎและหลักการดังนี้

C.1 ขนาดกลุ่มของจุด (Interrogation spot) ในภาพที่ถ่ายได้ควรมีขนาดเล็กเพียงพอตั้งนั้นเวกเตอร์หนึ่งเวกเตอร์อธิบายการไหลภายในกลุ่มของจุดได้

C.2 ในหนึ่งกลุ่มของจุดควรมีอนุภาคในภาพถ่ายมากกว่า 10 อนุภาค

C.3 ระยะภาพมากที่สุดในระนาบควรมีค่าน้อยกว่าหนึ่งในสี่ของกลุ่มของจุด

C.4 ระยะภาพมากที่สุดนอกระนาบควรมีค่าน้อยกว่าหนึ่งในสี่ของความหนาของเลเซอร์ (ความหนาของเลเซอร์ในการทดลองนี้ประมาณ 5 มิลลิเมตร)

C.5 ระยะภาพต่ำสุดในระนาบควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่แตกต่างกันอย่างน้อย 2 ขนาด

C.6 รูรับแสงต้องกว้างเพียงพอสำหรับการแสดงอนุภาค

ผลที่ได้จะเป็นภาพเวกเตอร์ความเร็วทางด้านซ้ายและด้านขวา ในรูปแบบไฟล์ .VEC ซึ่งจะทำหลังจากการปรับอัตราส่วนของภาพเรียบร้อยแล้ว

D. Post-processing

ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะนำภาพเวกเตอร์ความเร็วของภาพทางด้านซ้ายและขวาที่ตำแหน่งเดียวกันของเจ็ตในกระแสลมขวางมาเทียบกันว่า ถ้ามีเวกเตอร์ความเร็วปรากฏทั้งด้านซ้ายและด้านขวา โปรแกรมจะบันทึกค่าความเร็ว ได้สนามความเร็วในรูปแบบไฟล์ .V3D

4.4 การวัดและเครื่องมือวัด

4.4.1 การวัดความสม่ำเสมอของกระแสลมขวาง

จุดประสงค์ของการทำการทดลองนี้คือเพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของกระแสลมขวางในอุโมงค์ลม โดยจะวัดความเร็วของกระแสลมขวางที่ $Re_{cf} = 3100$ (ความถี่ไฟฟ้า 8.6 Hz) ด้วย Pitot tube ที่ตำแหน่ง $x/rd = -0.5$ และเพื่อให้ครอบคลุมบริเวณเจ็ตทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองนี้จึงกำหนดขอบเขตในการวัดคือ 30×30 เซนติเมตรโดยแต่ละตำแหน่งจะห่างกัน 3 เซนติเมตรและฐานสูงจากพื้น 1 เซนติเมตรดังรูปที่ 4.15 และจะวัดความเร็วบนระนาบซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

รูปที่ 4.16 แสดงการกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ของกระแสลมขวาง ซึ่งมีความเร็วเฉลี่ยทั้งหมดของพื้นที่เป็น 4.19 เมตรต่อวินาที ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.025 เมตรต่อวินาที แต่ละจุดมีความเร็วต่างจากความเร็วเฉลี่ยไม่เกิน ± 0.04 เมตรต่อวินาที คิดเป็น 0.95 % ยกเว้นที่ขอบล่างที่มีความเร็วที่น้อยกว่าเนื่องจากผลของ boundary layer ซึ่งสามารถยอมรับได้ว่ามีความเป็นระเบียบสำหรับนำไปใช้เป็นกระแสลมขวางสำหรับเจ็ตในทดลองนี้

4.4.2 การวัดสถานะเริ่มต้นของเจ็ต

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

น้ำ การวัดความเร็วในแต่ละจุดจะวัดทั้งหมด 5 ครั้ง การคำนวณความเร็วเฉลี่ยจะทำได้โดยการคูณความเร็วของแต่ละจุดกับเศษหนึ่งส่วนสี่ของพื้นที่วงแหวนแล้วนำมารวมกัน หาค่าด้วยพื้นที่เฉลี่ยทั้งหมด

รูปที่ 4.18 แสดงความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตตามแนวแกน y ที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีต่างๆ ซึ่งความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตบนพื้นที่หน้าตัดปากเจ็ต กรณี $r = 4$ มีค่าเท่ากับ 16.2 m/s, $r = 8$ มีค่าเท่ากับ 32.1 m/s และ $r = 12$ มีค่าเท่ากับ 49.3 m/s ซึ่งเมื่อนำความเร็วในแต่ละรัศมีมา fit curve ตามสมการ

$$\frac{\bar{v}}{V} = \left(1 - \frac{\text{radius}}{\text{radius max}}\right)^{1/n} \quad (4.1)$$

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

นอกจากนี้ยังมีการนิยามพารามิเตอร์ γ ซึ่งนิยามโดยความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตหารด้วยความเร็วที่จุดศูนย์กลางเจ็ตดังสมการ

$$\gamma = \frac{\bar{V}}{V_{\text{Center}}} \quad (4.2)$$

เพื่อให้การทดลองครั้งต่อไปมีความสะดวกในการหาความเร็วเฉลี่ยเริ่มต้นของเจ็ตได้สะดวกขึ้น ซึ่งกรณี $r = 4$ ค่า γ จะมีค่าเท่ากับ 0.795, $r = 8$ ค่า γ จะมีค่าเท่ากับ 0.796 และ $r = 12$ ค่า γ จะมีค่าเท่ากับ 0.798

4.4.3 การวัดอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก

ในการทดลองนี้มีการปรับและควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) โดยได้ สมมติว่าความหนาแน่นของอากาศของเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุมเท่ากัน อัตราการไหลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลักจึงนิยามได้ดังนี้

$$r_m = \frac{\dot{m}_{\text{controlJet}}}{\dot{m}_{\text{mainjet}}} \quad (4.3)$$

โดย

$\dot{m}_{controlJet}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุม

$\dot{m}_{mainjet}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตหลัก

การปรับอัตราการไหลของเจ็ตควบคุมจะทำโดยการปรับวาล์วของ Flow meter ชนิด Rotameter (Cole-Parmer รุ่น 03217-30 (150 mm) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 เพื่อให้ได้อัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลักตามที่ต้องการ ทั้งนี้ได้วัดอัตราการไหลของเจ็ตควบคุมได้เท่ากับ 0.00693 ลูกบาศก์เมตร/วินาที คิดเป็น 416 ลิตร/นาที่ โดยในกรณีใช้อัตราการไหลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) เป็น 4% อัตราการไหลของเจ็ตควบคุมแต่ละกรณีจะเป็น 8.32 ลิตร/นาที่ ทั้งนี้การคำนวณหาอัตราการไหลของเจ็ตควบคุมนั้นจะต้องดูระดับความสูงของลูกลอยที่อ่านได้จาก Rotameter เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับอัตราการไหลจากตารางที่ผู้ผลิตให้ไว้และอ่านค่าความดันจาก Pressure gauge เพื่อหา Working pressure สำหรับคำนวณ Correction factor เพื่อนำไปปรับแก้หาอัตราการไหลที่แท้จริง สำหรับกรณี $r_m = 4\%$ Working pressure

บทที่ 5

โครงสร้างของเจ็ต

5.1 ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ

เมื่อใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ตเท่านั้น แต่ไม่ใส่ลงในกระแสมขวาง ทำให้ SPIV สามารถวัดความเร็วที่จุดใดๆได้ ก็ต่อเมื่อมีอนุภาคติดตามการไหลจากเจ็ตมาปรากฏที่จุดนั้นเท่านั้น หรืออีกนัยหนึ่ง ก็ต่อเมื่อมีส่วนผสมของของไหลที่มาจากเจ็ตอยู่ที่จุดนั้น เท่านั้น ในทางตรงกันข้าม ณ เวลาใดๆ ถ้าที่จุดนั้นมีแต่ของไหลจากกระแสมขวางบริสุทธิ์มาปรากฏ กล่าวคือ ไม่มีอนุภาคติดตามการไหลจากเจ็ตที่จุดนั้น SPIV ก็ไม่สามารถถ่ายภาพอนุภาคติดตามการไหลได้ จึงจะไม่สามารถวัดความเร็วได้ และ SPIV จะให้ความเร็วที่จุดนั้นเป็นศูนย์สมบูรณ์ ดังนี้ นอกเหนือจากผลการทดลองอื่นๆที่จะกล่าวถึงต่อไป เทคนิคการใช้ SPIV ควบคู่กับการฉีดอนุภาคติดตามการไหลในเจ็ตเท่านั้น ไม่ฉีดในกระแสมขวางยังทำให้งานวิจัยนี้สามารถหาความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆได้ โดยความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ (ϕ_j) นิยามเป็น

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

เมื่อ N_j คือระยะเวลา (จำนวน snapshot) ที่พบเวกเตอร์ความเร็วที่ไม่เป็นศูนย์สมบูรณ์ หรืออีกนัยหนึ่ง พบอนุภาคติดตามการไหล หรือ ส่วนผสมของเจ็ตที่จุดนั้น และ N คือระยะเวลาที่เฉลี่ยทั้งหมด (จำนวน snapshot ทั้งหมดตลอดช่วงเวลาที่เก็บข้อมูล)

นอกเหนือจากนั้น เนื่องจาก $N = N_j + N_{cf}$ เมื่อ N_{cf} คือระยะเวลา (จำนวน snapshot) ที่พบเวกเตอร์ความเร็วที่เป็นศูนย์สมบูรณ์ หรืออีกนัยหนึ่ง ไม่พบอนุภาคติดตามการไหล หรืออีกนัยหนึ่ง พบแต่กระแสมขวางบริสุทธิ์ ดังนี้จึงยังสามารถหาความน่าจะเป็นที่จะพบกระแสมขวางบริสุทธิ์ (ϕ_{cf}) ซึ่งนิยามเป็น $\phi_{cf} = N_{cf} / N$ ได้จาก

$$\phi_j + \phi_{cf} = 1 \quad (5.2)$$

อนึ่ง ในงานวิจัยนี้ ในทุกกรณี ใช้ข้อมูลของความเร็วขณะใดๆทั้งหมด $N = 1,000$ snapshots

รูปที่ 5.1(ก)-(ง) แสดงผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ ในกรณี JICF และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งต่างๆ (cJICF) ที่ $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ ผลการทดลอง พบว่า บริเวณกลางเจ็ตมีการกระจายตัวของ ϕ_j และค่า ϕ_j มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง แสดงว่าบริเวณตรงกลางของเจ็ตเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต (ส่วนผสมของเจ็ต) มาก แต่พบกระแสลมขวางบริสุทธิ์น้อย ในทางตรงกันข้าม เมื่อเข้าใกล้บริเวณขอบเจ็ตค่า ϕ_j มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ นั่นหมายความว่าบริเวณตรงของเจ็ตเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตน้อย แต่พบกระแสลมขวางบริสุทธิ์มาก ซึ่งสอดคล้องกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ตเท่านั้น

ในกรณี JICF ที่ $r = 4$ (รูปที่ 5.1(ก)) พิจารณาที่บริเวณกลางเจ็ต รูปร่างการกระจายตัวของ ϕ_j นั้นมีลักษณะค่อนข้างกลม และเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง Upstream ไปยังตำแหน่ง Downstream (รูปที่ 5.1(ง)) รูปร่างการกระจายตัวของ ϕ_j ยังคงมีลักษณะค่อนข้างกลมเช่นเดียวกัน แต่เจ็ตมีการพัฒนาตัวสูงขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเดิม

ในกรณี JICF ที่ $r = 8$ และ 12 (รูปที่ 5.1(จ) และ รูปที่ 5.1(ฉ)) ตามลำดับ พิจารณาที่บริเวณกลางเจ็ต รูปร่างการกระจายตัวของ ϕ_j นั้นมีลักษณะค่อนข้างพอม เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวจากตำแหน่ง Upstream ไปยังตำแหน่ง Downstream (รูปที่ 5.1(ซ) และ รูปที่ 5.1(ญ)) รูปร่างการกระจายตัวของ ϕ_j นั้นมีลักษณะกลมขึ้น และเจ็ตมีการพัฒนาตัวสูงขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเดิม

ในกรณี cJICF ทั้ง 3 r โดยรวม เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมบริเวณ windward ($\theta < 90^\circ$) เจ็ตจะมีการพุ่งทะลุ (penetrate) เข้าไปในกระแสลมขวางน้อยลงและเจ็ตมีขนาดเล็กลง เมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม แต่ กรณีเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมบริเวณ leeward ($\theta > 90^\circ$) เจ็ตจะมีการพุ่งทะลุ (penetrate) เข้าไปในกระแสลมขวางมากขึ้นและเจ็ตมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

ในขณะเดียวกัน การฉีดเจ็ตควบคุมบริเวณ leeward จะทำให้เกิด wake ตรงบริเวณขอบล่างของเจ็ตอย่างชัดเจนโดยเฉพาะในกรณี r ต่ำ ($r = 4$) โดยที่ $r = 4$ จะเกิด wake ที่ตำแหน่งมุมฉีด leeward ทุกมุมที่ฉีด ยกเว้นมุม $\pm 135^\circ$ และโครงสร้าง Wake นี้จะเห็นได้ชัดตลอดระยะตามแนว Downstream ที่ทำการทดลอง (ถึง $x/rd = 1.5$) ที่ $r = 8$ จะเกิด wake ที่มีขนาดเล็กกว่าและสั้นกว่าเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปในแนว Downstream ส่วนที่ $r = 12$ จะเกิด wake ที่ตำแหน่งมุมฉีด

ทางด้าน leeward ทุกมุมที่ฉีดและโครงสร้าง Wake นี้จะเห็นได้ชัดตลอดระยะตามแนว Downstream ที่ทำการทดลอง (ถึง $x/rd = 1.5$).

5.2 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อโครงสร้าง

5.2.1 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน x ไร้มิติ, V_x/u_{cf}

รูปที่ 5.2 (ก)-(ฎ) แสดงผลของตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมต่อการกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ของเจ็ตเฉลี่ยตามเวลา ต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_x/u_{cf}) ในกรณี JICF และ cJICF ที่ $r=4, 8$ และ 12

อนึ่ง ในงานนี้ เนื่องจากการใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ตเท่านั้น ไม่ใส่ในกระแสลมขวาง ค่าความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยตามเวลา ตามแนวแกนใดๆ ณ จุดใดๆ ได้หาจาก

$$V_j = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_{j,n} \quad (5.3)$$

แต่เนื่องจากบางขณะเวลาที่จุดนั้นอาจจะไม่มีส่วนผสมของเจ็ตอยู่ เป็นกระแสลมขวางบริสุทธิ์ ดังนี้ ถ้าให้ n_j คือจำนวน snapshot ที่ความเร็ว $V_{j,n} \neq 0$ และ n_{cf} คือจำนวน snapshot ที่ความเร็ว $V_{j,n} = 0$ หรือมีแต่กระแสลมขวางบริสุทธิ์อยู่ที่จุดนั้น สมการ (5.3) อาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} V_j &= \frac{1}{N} \left[\sum_{n_j=1}^{N_j} V_{j,n_j} + \sum_{n_{cf}=1}^{N_{cf}} (V_{j,n_{cf}} = 0) \right] \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n_j=1}^{N_j} V_{j,n_j} \end{aligned} \quad (5.4)$$

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการหาค่าเฉลี่ยตามเวลา ดังนี้ ตัวหารด้านหน้าของการคำนวณค่าเฉลี่ยจะยังคงเป็นจำนวน snapshot ทั้งหมด N อนึ่ง เพื่อให้ความหมายทางกายภาพของค่าเฉลี่ยตามเวลาของกรณีใส่อนุภาคติดตามการไหลเฉพาะในเจ็ต ไม่ใส่ในกระแสลมขวางชัดเจนขึ้น จึงจะยกตัวอย่างอธิบายดังนี้ สมมติว่าความเร็วของเจ็ตขณะใดๆ ที่จุดนี้มีค่าเท่ากันหมดที่ทุกเวลา $V_{j,n_j} = V_j$ จึงได้ว่า $V_j = (N_j/N)V_j = \phi_j V_j$ กล่าวคือ ความเร็วเฉลี่ยตามเวลานี้จะเป็นความเร็วขณะใดๆ ที่ถูกถ่วงน้ำหนัก (weight) ด้วยความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตที่จุดนั้น ถึงแม้ความเร็วขณะใดๆ ของเจ็ตอาจจะมีค่าสูงมาก และสูงกว่าความเร็วของกระแสลมขวาง แต่ถ้าจุดนั้นอยู่บริเวณขอบเจ็ต ซึ่ง

มีความน่าจะเป็นในการพบเจ็ตต่ำ ความเร็วของเจ็ตเฉลี่ยตามเวลา V_j ก็จะมีค่าต่ำ และ ที่ไกลออกไปที่พบแต่กระแสนลมขวางที่ทุกเวลา $V_j=0$

ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5.2(ก)-(ง) พบว่า ในกรณี JICF ทั้งในกรณี $r=4, 8$ และ 12 ที่บริเวณ near field ($x/rd=0.5$) บริเวณที่มีขนาด V_x/u_{cf} สูงจะมีรูปร่างคล้ายรูปไต โครงสร้างการกระจายตัวของ V_x/u_{cf} นี้จึงเรียกว่า ‘โครงสร้างรูปไต’ (Kidney-Shaped structure, ย่อ K-S) แต่เพื่อความชัดเจน เนื่องจากคำว่า ‘โครงสร้างรูปไต’ นี้มีการใช้ในงานวิจัยต่าง ๆ กัน ซึ่งแต่ละงานวิจัยก็อาจอ้างอิงจากปริมาณต่าง ๆ กัน อย่างไรก็ตาม ในงานนี้ จะนิยามคำว่า ‘โครงสร้างรูปไต’ อ้างอิงจากการกระจายตัวของ V_x/u_{cf} เท่านั้น (ไม่ใช่อ้างอิงจากปริมาณอื่นๆ) และหมายถึงบริเวณที่มีรูปร่างคล้ายรูปไตที่มี V_x/u_{cf} สูง ส่วนบริเวณที่มีรูปร่างเป็นอ่าวรูปตัว ก หรือ U กลับหัว ที่มี V_x/u_{cf} ต่ำ จะเรียกว่าบริเวณ ‘อ่าว’ (Gulf Region, ย่อ G-R)

ดังนั้น เมื่อ JICF พัฒนาตัวจาก near field ($x/rd=0.5$) ไป far field ($x/rd=1.5$) โครงสร้าง K-S นี้จะยังคงอยู่ ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปบ้าง โดย K-S จะมีความเร็ว V_x ที่ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะทางการไหล

สำหรับทั้งสามกรณีของ r (4, 8 และ 12) ทั้งบริเวณ near field ($x/rd=0.5$) และบริเวณ far field ($x/rd=1.5$) เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ด้าน windward แล้ว จะส่งผลให้ขนาดของปริมาณไร้มิติ V_x/u_{cf} สูงกว่ากรณี JICF แต่จะส่งผลให้ขนาดของเจ็ตนั้นเล็กกว่ากรณี JICF ส่วนกรณีฉีดเจ็ตควบคุมบริเวณ leeward จะส่งผลให้ขนาดของปริมาณไร้มิติ V_x/u_{cf} ต่ำกว่ากรณี JICF แต่จะส่งผลให้ขนาดของเจ็ตนั้นใหญ่กว่ากรณี JICF

นอกเหนือจากนั้นยังพบว่า สำหรับทั้งสามกรณีของ r (4, 8 และ 12) เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ด้าน leeward แล้ว โครงสร้าง Wake ที่สังเกตเห็นในกรณีความน่าจะเป็นในการพบเจ็ตจะยังคงอยู่ (สำหรับกรณีที่มี Wake ปรากฏใน ϕ_j) ประเด็นนี้ บ่งบอกได้ว่า บริเวณ wake นี้ เจ็ตจะมีความเร็วตามแนวแกน x เป็นองค์ประกอบสำคัญขององค์ประกอบหนึ่ง (ถ้า Wake ปรากฏใน ϕ_j แต่ไม่ปรากฏใน V_x/u_{cf} แสดงว่า ความเร็วของเจ็ตในโครงสร้าง Wake จะมาจากองค์ประกอบตามแนวแกน y หรือ z เป็นหลัก)

5.2.2 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน y ไร้มิติ, V_y / u_{cf}

รูปที่ 5.3(ก)-(ง) แสดงผลของตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมต่อการกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน y ของเจ็ตเฉลี่ยตามเวลา ต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_y / u_{cf}) ในกรณี JICF และ CJICF ที่ $r = 4, 8$ และ 12

ผลการทดลองสำหรับทั้งสามกรณีของ r (4, 8 และ 12) พบว่า กรณี JICF เจ็ตประกอบด้วย peak ของความเร็ว 2 บริเวณ อันได้แก่ 1) บริเวณที่ peak ของความเร็วเป็นบวก (positive local peak) 2) บริเวณที่ peak ของความเร็วเป็นลบ (negative local peak) โดยที่ positive local peak จะอยู่บริเวณตรงกลางของเจ็ต ส่วน negative local peak ซึ่งมีรูปร่างลักษณะคล้ายเมล็ดถั่วจะประกบด้านข้างของ positive local peak ทั้งสองฝั่ง ภายในของ positive local peak จะสังเกตเห็น peak 2 peak ย่อย นั่นคือ top positive local peak ซึ่งอยู่ตรงบริเวณด้านบนของเจ็ต และ bottom positive local peak ซึ่งอยู่ตรงบริเวณด้านล่างของเจ็ต

สำหรับทั้งสามกรณีของ r (4, 8 และ 12) ที่บริเวณ near field ($x / rd = 0.5$) พิจารณาที่ positive local peak (บริเวณกลางเจ็ต) พบว่า เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ด้าน windward ไปยังด้าน leeward จะส่งผลให้ top positive local peak ซึ่งอยู่ตรงบริเวณด้านบนของเจ็ตมีขนาดลดลงเรื่อยๆ ตามตำแหน่งมุมฉีด และยังพบว่าทั้งบริเวณ near field ($x / rd = 0.5$) และบริเวณ far field ($x / rd = 1.5$) เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ด้าน windward แล้ว จะส่งผลให้ขนาดของปริมาณไร้มิติ V_y / u_{cf} สูงกว่ากรณี JICF แต่จะส่งผลให้ขนาดของเจ็ตนั้นเล็กกว่ากรณี JICF ส่วนกรณีฉีดเจ็ตควบคุมบริเวณ leeward จะส่งผลให้ขนาดของปริมาณไร้มิติ V_y / u_{cf} ต่ำกว่ากรณี JICF แต่จะส่งผลให้ขนาดของเจ็ตนั้นใหญ่กว่ากรณี JICF

5.2.3 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน z ไร้มิติ, V_z / u_{cf}

รูปที่ 5.4(ก)-(ง) แสดงผลของตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมต่อการกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน z ของเจ็ตเฉลี่ยตามเวลาต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_z / u_{cf}) ในกรณี JICF และ CJICF ที่ $r = 4, 8$ และ 12

ผลการทดลองสำหรับทั้งสามกรณีของ r (4, 8 และ 12) พบว่า กรณี JICF รูปร่างเจ็ทมีลักษณะคล้ายผีเสื้อ โดยมี positive local peak และ negative local peak อยู่กันเป็นคู่ๆ โดยคู่หนึ่งจะอยู่ข้างซ้ายและอีกคู่หนึ่งจะอยู่ด้านขวา

สำหรับทั้งสามกรณีของ r (4, 8 และ 12) ทั้งบริเวณ near field ($x/rd=0.5$) และบริเวณ far field ($x/rd=1.5$) เมื่อฉีดเจ็ทควบคุมที่ด้าน windward แล้ว จะส่งผลให้ขนาดของปริมาณไร้มิติ V_z/u_{cf} สูงกว่ากรณี JICF แต่จะส่งผลให้ขนาดของเจ็ทนั้นเล็กกว่ากรณี JICF ส่วนกรณีฉีดเจ็ทควบคุมบริเวณ leeward จะส่งผลให้ขนาดของปริมาณไร้มิติ V_z/u_{cf} ต่ำกว่ากรณี JICF แต่จะส่งผลให้ขนาดของเจ็ทนั้นใหญ่กว่ากรณี JICF

5.2.4 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ทควบคุมต่อโครงสร้างอัตราเร็วเฉลี่ยไร้มิติ, V/u_{cf}

รูปที่ 5.5(ก)-(ง) แสดงผลของตำแหน่งการฉีดเจ็ทควบคุมต่อการกระจายตัวของโครงสร้างอัตราเร็วเฉลี่ยไร้มิติ, V/u_{cf} ในกรณี JICF และ cJICF ที่ $r=4, 8$ และ 12

ผลการทดลองสำหรับทั้งสามกรณีของ r (4, 8 และ 12) โดยรวมพบว่า กรณี JICF เมื่อพิจารณาบริเวณขอบนอกสุดของเจ็ท รูปร่างเจ็ทมีลักษณะคล้ายกับรูปร่างโครงสร้างความเร็วของเจ็ทตามแนวแกน x ไร้มิติ, (V_x/u_{cf}) แต่เมื่อพิจารณาบริเวณตรงกลางของเจ็ท รูปร่างการกระจายตัวของ V/u_{cf} จะเป็นรูปร่างที่ไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับรูปร่างการกระจายตัวของ V_x/u_{cf} ซึ่งจะเป็นรูปไต (kidney-shaped structure) ค่อนข้างชัดเจน

สำหรับทั้งสามกรณีของ r (4, 8 และ 12) ทั้งบริเวณ near field ($x/rd=0.5$) และบริเวณ far field ($x/rd=1.5$) เมื่อฉีดเจ็ทควบคุมที่ด้าน windward แล้ว จะส่งผลให้ขนาดของปริมาณไร้มิติ V/u_{cf} สูงกว่ากรณี JICF แต่จะส่งผลให้ขนาดของเจ็ทนั้นเล็กกว่ากรณี JICF ส่วนกรณีฉีดเจ็ทควบคุมบริเวณ leeward จะส่งผลให้ขนาดของปริมาณไร้มิติ V/u_{cf} ต่ำกว่ากรณี JICF แต่จะส่งผลให้ขนาดของเจ็ทนั้นใหญ่กว่ากรณี JICF

5.2.5 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อการกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ไร้มิติ ($\omega_x d / u_{cf}$)

รูปที่ 5.6(ก)-(ง) ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อการกระจายตัวของ Vorticity ($\omega_x d / u_{cf}$) ในกรณี JICF และ CJICF ที่ $r = 4, 8$ และ 12

เนื่องจาก Vorticity นิยามจาก

$$\vec{\omega}_x = \nabla \times \vec{V} \quad (5.5)$$

สำหรับการหมุนรอบแกน x สมการที่ (5.5) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\omega_x = \frac{\partial V_z}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial z} \quad (5.6)$$

โดยที่ ω_x จะคำนวณจาก V_x และ V_y ที่เฉลี่ยไปตามเวลา

ผลการทดลองสำหรับกรณี $r = 4$ พบว่า ในกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่า มีโครงสร้างการหมุนควงอยู่ 3 คู่ อันได้แก่ คู่บน, คู่กลางและคู่ล่าง โดยคู่กลางซึ่งเป็นคู่หลักมีขนาดและรูปร่างค่อนข้างสมมาตรคล้ายจุลภาคกลับหัว .ทิศทางการหมุนควงของแต่ละคู่จะมีทิศทางสลับกัน ส่วนกรณี $r = 8$ และ 12 นั้น จะมีคู่กลางซึ่งเป็นโครงสร้างหลักอยู่ 1 คู่ ส่วนคู่ย่อยจะมีอยู่หรือไม่ ยังไม่ชัดเจน

สำหรับทั้งสามกรณีของ r (4, 8 และ 12) ทั้งบริเวณ near field ($x/rd = 0.5$) และบริเวณ far field ($x/rd = 1.5$) เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ด้าน windward แล้ว จะส่งผลให้ขนาดของปริมาณไร้มิติ ($\omega_x d / u_{cf}$) สูงกว่ากรณี JICF แต่จะส่งผลให้ขนาดของเจ็ตนั้นเล็กกว่ากรณี JICF ส่วนกรณีฉีดเจ็ตควบคุมบริเวณ leeward จะส่งผลให้ขนาดของปริมาณไร้มิติ ($\omega_x d / u_{cf}$) ต่ำกว่ากรณี JICF แต่จะส่งผลให้ขนาดของเจ็ตนั้นใหญ่กว่ากรณี JICF

โดยรวมในเรื่องของโครงสร้างของเจ็ตที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ สำหรับทั้งสามกรณีของ r (4, 8 และ 12) เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ด้าน windward จะส่งผลให้ขนาดของปริมาณไร้มิติ V_x / u_{cf} , V_y / u_{cf} ,

V_z/u_{cf} , V/u_{cf} และ $\omega_x d/u_{cf}$ สูงกว่ากรณี JICF แต่จะส่งผลให้รูปร่างขนาดเจ็ทมีขนาดเล็กกว่ากรณี JICF ในทางกลับกันเมื่อฉีดเจ็ทควบคุมที่ด้าน leeward จะส่งผลให้ขนาดของปริมาณไรมิตี V_x/u_{cf} , V_y/u_{cf} , V_z/u_{cf} , V/u_{cf} และ $\omega_x d/u_{cf}$ ต่ำกว่ากรณี JICF แต่จะส่งผลให้เจ็ทมีขนาดใหญ่กว่ากรณี JICF



บทที่ 6

อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรและค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสม

6.1 การพัฒนาตัวของการเหนี่ยวนำการผสมตามระยะทางการไหล

รูปที่ 6.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ตามระยะทางการไหลจากบริเวณ near field ไปยังบริเวณ far field

พบว่าที่ทั้งสาม r (4, 8 และ 12) และทุกกรณี (JICF และ CJICF) อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของเจ็ตในกระแสลมขวางจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องกับระยะทางการไหล

นอกเหนือจากนั้น พบว่า การฉีดเจ็ตควบคุมด้าน windward ($\theta < 90^\circ$) จะมีผลทำให้ E ลดลงเมื่อเทียบกับ JICF หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง การฉีดเจ็ตควบคุมด้าน windward จะมีผลไปยับยั้ง (suppress) การเหนี่ยวนำการผสมเมื่อเทียบกับกรณี JICF ในทางตรงกันข้าม การฉีดเจ็ตควบคุมด้าน leeward ($\theta > 90^\circ$) จะมีผลทำให้ E เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ JICF หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง การฉีดเจ็ตควบคุมด้าน leeward จะมีผลไปส่งเสริม (promote) การเหนี่ยวนำการผสมเมื่อเทียบกับกรณี JICF อนึ่ง ข้อมูลค่า E ที่ x/rd ต่างๆ ของทุกกรณีดูได้จากตารางที่ 6.1(ก)

งานวิจัยนี้สามารถประมาณแนวโน้มการพัฒนาตัวของการเหนี่ยวนำการผสมตามระยะทางการไหลอย่างหยابได้ด้วย power law ตามสมการ (6.1)

$$E = 1 + a(x/rd)^b \quad (2.6)$$

รูปที่ 6.1 จากการประมาณแนวโน้มด้วย power law จะสังเกตได้ว่า ในบางกรณีและบางระนาบจะมีการเบี่ยงเบนปรากฏอยู่บ้าง การประมาณนี้จึงเป็นการประมาณอย่างหยابเท่านั้น ค่า coefficient a และ b ดูได้จากตารางที่ 6.1(ข).

6.2 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวาง

ผลของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมด้าน windward/leeward ต่อการ suppress/promote การเหนี่ยวนำการผสมนี้จะสามารถสังเกตได้ชัดเจนขึ้นเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง E และมุมฉีด θ ในรูปที่ 6.2

รูปที่ 6.2 แสดงผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของทั้งสองกรณีของ r (4, 8 และ 12) และทุกระนาบการไหล แนวโน้มโดยรวม (มีการเบี่ยงเบนบ้างในบางกรณี หรือ บางระนาบ) พบว่า

- การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน windward ($\theta < 90^\circ$) จะส่งผลให้ E ของ cJICF ลดลงจากกรณี JICF หรืออีกนัยหนึ่ง การฉีดเจ็ตควบคุมจะไปยับยั้ง (suppress) การเหนี่ยวนำการผสมของ cJICF เมื่อเทียบกับ JICF
- ในทางตรงกันข้าม การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน leeward ($\theta > 90^\circ$) จะส่งผลให้ E ของ cJICF เพิ่มขึ้นจากกรณี JICF หรืออีกนัยหนึ่ง การฉีดเจ็ตควบคุมจะไปส่งเสริม (promote) การเหนี่ยวนำการผสมของ cJICF เมื่อเทียบกับ JICF
- เมื่อเพิ่มตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมจากทางด้าน windward $\pm 15^\circ$ ไปทางด้าน leeward $\pm 165^\circ$ อย่างต่อเนื่อง จะส่งผลให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสขวางมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุม
- ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสขวางมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมลดลงจนมีค่าต่ำสุดคือ $\pm 15^\circ$ และ $\pm 30^\circ$ ในขณะที่ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสขวางมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดคือ $\pm 165^\circ$ แต่สำหรับกรณี $r = 12$ นั้นตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ส่งผลให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรสูงสุด จะเป็นตำแหน่งฉีดเจ็ตควบคุมที่บริเวณ leeward ($\pm 105^\circ - \pm 165^\circ$) อนึ่ง ข้อมูลค่า E ที่ x/rd ต่างๆ ของทุกกรณีดูได้จากตาราง 6.1(ก).

ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ส่งผลให้ค่า E มีค่าสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละ r มีดังต่อไปนี้

$$\text{กรณี } r = 4 : E_{\min} = 3.05 \text{ ที่ตำแหน่งมุมฉีด } \pm 15^\circ, E_{\max} = 9.41 \text{ ที่ตำแหน่งมุมฉีด } \pm 165^\circ$$

$$\text{กรณี } r = 8 : E_{\min} = 4.56 \text{ ที่ตำแหน่งมุมฉีด } \pm 30^\circ, E_{\max} = 14.81 \text{ ที่ตำแหน่งมุมฉีด } \pm 165^\circ$$

$$\text{กรณี } r = 12 : E_{\min} = 7.48 \text{ ที่ตำแหน่งมุมฉีด } \pm 30^\circ, E_{\max} = 20.53 \text{ ที่ตำแหน่งมุมฉีด } \pm 120^\circ$$

6.3 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อค่าประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสม

รูปที่ 6.3 แสดงผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อค่าประสิทธิภาพของการฉีดเจ็ตควบคุมในการเหนี่ยวนำการผสม (η) พบว่า แนวโน้มโดยรวม ที่ทุกกรณีของ r (4, 8 และ 12) ผล

ของตำแหน่งเชิงมุม ($\pm \theta$) ต่อค่าประสิทธิผลของการฉีดเจ็ตควบคุมในการเหนี่ยวนำการผสม (η) จะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับผลต่อค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม (E) กล่าวคือ

- การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน windward จะมีผลไปยับยั้ง (suppress) การเหนี่ยวนำการผสมของ cJICF เมื่อเทียบกับ JICF ทำให้ $\eta < 1$
- การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน leeward จะมีผลไปส่งเสริม (promote) การเหนี่ยวนำการผสมของ cJICF เมื่อเทียบกับ JICF ทำให้ $\eta > 1$
- เมื่อเพิ่มตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมจากทางด้าน windward $\pm 15^\circ$ ไปทางด้าน leeward $\pm 165^\circ$ อย่างต่อเนื่อง จะส่งผลให้ η มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุม
- นอกเหนือจากนั้นยังพบว่า η จะมีค่าเบี่ยงเบนจาก 1 (ค่าของกรณี Baseline JICF) มากในกรณีที่ตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมค่อนข้างไปทางปลายสุดของทั้งสองฝั่ง คือ windward ($\pm 15^\circ$) หรือ leeward ($\pm 165^\circ$) ในขณะที่ เมื่อตำแหน่งการฉีดเลื่อนเข้าสู่ $\pm 90^\circ$ ค่า η จะเข้าใกล้ 1 กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งเข้าใกล้ $\pm 90^\circ$ จะไม่ส่งผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมมากนัก ยกเว้น ที่ $r = 12$ ในบริเวณ far field ($x/rd = 1.5$) ตำแหน่งการฉีด $\pm 90^\circ$ ส่งผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมไปค่อนข้างมาก
- ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสลมขวางมีค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมต่ำสุดคือ $\pm 15^\circ$ และ $\pm 30^\circ$ ในขณะที่ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสลมขวางมีค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมสูงสุดคือ $\pm 165^\circ$ แต่สำหรับกรณี $r = 12$ นั้นตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ส่งผลค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมสูงสุดจะอยู่ในบริเวณ leeward ($\pm 105^\circ - \pm 165^\circ$) อนึ่ง ข้อมูลค่า η ที่ x/rd ต่างๆ ของทุกกรณีดูได้จากตาราง 6.2.

โดยรวมสำหรับทุกกรณีของ r (4, 8 และ 12) เมื่อเพิ่มตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมจากทางด้าน windward $\pm 15^\circ$ ไปทางด้าน leeward $\pm 165^\circ$ อย่างต่อเนื่อง จะส่งผลให้ η มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุม

ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ส่งผลให้ค่า η มีค่าสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละ r มีดังต่อไปนี้

กรณี $r = 4$: $\eta_{\min} = 0.69$ ที่ตำแหน่งมุมฉีด $\pm 15^\circ$, $\eta_{\max} = 1.37$ ที่ตำแหน่งมุมฉีด $\pm 165^\circ$

กรณี $r = 8$: $\eta_{\min} = 0.74$ ที่ตำแหน่งมุมฉีด $\pm 30^\circ$, $\eta_{\max} = 1.33$ ที่ตำแหน่งมุมฉีด $\pm 165^\circ$

กรณี $r = 12$: $\eta_{\min} = 0.76$ ที่ตำแหน่งมุมฉีด $\pm 30^\circ$, $\eta_{\max} = 1.31$ ที่ตำแหน่งมุมฉีด $\pm 120^\circ$

6.4 การพัฒนาตัวของค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมตามระยะทางการไหล

รูปที่ 6.4 แสดงการพัฒนาตัวของค่าประสิทธิผลของการฉีดเจ็ตควบคุมในการเหนี่ยวนำการผสม (η) ตามระยะทางการไหล พบว่า สำหรับ cJICF ที่ $r = 4$ และที่ตำแหน่งมุมฉีดใดๆ เจ็ตควบคุมจะมีผลมากในบริเวณ near field ($x/rd = 0.5$) (η เบี่ยงเบนไปจาก 1 มาก) แต่เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะทางการไหล ผลของเจ็ตควบคุมจะลดลงตามระยะทางการไหล (η ลู่เข้าสู่ค่า 1) ในขณะที่ผลลักษณะเดียวกันจะยังไม่ชัดเจนนักสำหรับ cJICF ที่ $r = 8$ และ 12

โดยรวมผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวล และต่อค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสม ที่ทุกกรณีของ r (4, 8 และ 12) มีดังนี้

- เมื่อเพิ่มตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมจากทางด้าน windward $\pm 15^\circ$ ไปทางด้าน leeward $\pm 165^\circ$ อย่างต่อเนื่อง จะส่งผลให้ E และ η มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุม
- การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน windward ($\theta < 90^\circ$) จะส่งผลให้ E และ η ของ cJICF ลดลงจากกรณี JICF หรืออีกนัยหนึ่ง การฉีดเจ็ตควบคุมจะไปยับยั้ง (suppress) การเหนี่ยวนำการผสมของ cJICF เมื่อเทียบกับ JICF ในทางตรงกันข้าม การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน leeward ($\theta > 90^\circ$) จะส่งผลให้ E และ η ของ cJICF เพิ่มขึ้นจากกรณี JICF หรืออีกนัยหนึ่ง การฉีดเจ็ตควบคุมจะไปส่งเสริม (promote) การเหนี่ยวนำการผสมของ cJICF เมื่อเทียบกับ JICF
- ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสมวลมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมลดลงจนมีค่าต่ำสุดคือ $\pm 15^\circ$ และ $\pm 30^\circ$ ในขณะที่ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสมวลมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดของ $r = 4$ และ 8 คือ $\pm 165^\circ$ แต่สำหรับกรณี $r = 12$ นั้นตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ส่งผลค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรสูงสุด จะเป็นตำแหน่งฉีดเจ็ตควบคุมที่บริเวณ leeward ($\pm 105^\circ - \pm 165^\circ$) ตารางที่ 6.1(ก)
- ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสมวลมีค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมต่ำสุดคือ $\pm 15^\circ$ และ $\pm 30^\circ$ ในขณะที่ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสมวลมีค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมสูงสุดของ $r = 4$ และ 8 คือ $\pm 165^\circ$ แต่สำหรับกรณี $r = 12$ นั้นตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ส่งผลค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมสูงสุดจะอยู่ในบริเวณ leeward ($\pm 105^\circ - \pm 165^\circ$) ตามตารางที่ 6.2

บทที่ 7

อภิปรายผลการทดลอง

ในอดีตนั้นได้มีการศึกษาค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ในกรณีต่างๆ ในบทนี้จะอภิปรายเปรียบเทียบผลการศึกษา E ของงานวิจัยต่างๆ โดยงานวิจัยที่ผ่านมา มีดังนี้

กรณีในการเปรียบเทียบจึงมีดังต่อไปนี้ (ตารางที่ 7.1(ก)-(ค))

- 1) งานปัจจุบัน (Present work) ทำการทดลองที่ $r = 4, 8$ และ 12
- 2) Witayaprapakorn, T. (2013) ทำการทดลองที่ $r = 4$
- 3) Srimekharat, A. (2013) ทำการทดลองที่ $r = 4$
- 4) Dawyok, S. (2014) ทำการทดลองที่ $r = 4$
- 5) Wongthongsiri, K. (2014) ทำการทดลองที่ $r = 4, 8$ และ 12
- 6) Soupramongkol, P. (2015) ทำการทดลองที่ $r = 8$
- 7) Wangkiat *et. al.* (2015) ทำการทดลองที่ $r = 12$
- 8) Sornphrom, K. (2016) ทำการทดลองที่ $r = 4, 8$ และ 12

ทั้ง 8 กรณี ข้างต้นที่กล่าวมาทั้งหมด fit curve ด้วยสมการ power law ส่วนค่า a และ b สามารถดูได้ในตารางที่ 7.1(ก)-(ค)

$$E = 1 + a(x/rd)^b \quad (2.6)$$

- 9) Yuan, L. L. and Street, R. L. (1998) ทำการทดลองที่ $r = 3.3$

$$\frac{Q_j}{Q_0} = \frac{V_{jet}}{V_0} = 1 + \frac{rd}{ab} \left(\frac{x}{rd}\right)^{1-b} \quad (2.5)$$

เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ได้ระบุค่า coefficient a ไว้อย่างชัดเจน แต่ระบุค่า coefficient $b = 0.3$ ซึ่งค่านี้ได้จากการประมาณจากการ fit curve ด้วย power law เพื่อประมาณหาสมการเส้นทางเดินของเจ็ต (สมการ 7.1) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 7%

$$\frac{Z_C}{R} = a \left(\frac{x}{rd} \right)^{1-b} \quad (7.1)$$

ดังนั้น เมื่อทราบค่า b แล้ว แต่การที่ทราบค่า a นั้นจำเป็นต้องรู้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ก่อน ซึ่งเราประมาณค่า E โดยประมาณค่าจากกราฟในรูปที่ 7.2 พบว่า ค่า coefficient $a = 4.42$

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด ค่า r เป็นค่าประมาณว่าใกล้เคียงกับ 4, 8 และ 12 ตามลำดับ ค่า r ที่ได้จากการวัดจริง สามารถดูได้ในตารางที่ 7.1(ก)-(ค)

7.1 เปรียบเทียบค่า E ระหว่างงานปัจจุบันกับงานทั้งหมดของ FMRL

คิดจาก

$$e(\text{error}) = \frac{\bar{E}_{FMRL} - E_{\text{present}}}{\bar{E}_{FMRL}} \times 100\% \quad (7.2)$$

โดยที่ E_{present} คือ ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานปัจจุบัน
 \bar{E}_{FMRL} คือ ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดใน Fluids Mechanics Research Laboratory (FMRL)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.2 เปรียบเทียบค่า E ระหว่างงานปัจจุบันกับ Wongthongsiri, K. (2014)

คิดจาก

$$\bar{E} = \frac{E_{Wongthongsiri} + E_{\text{present}}}{2} \quad (7.3)$$

โดยที่ E_{present} คือ ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานปัจจุบัน
 $E_{Wongthongsiri}$ คือ ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของ Wongthongsiri, K. (2014)
 \bar{E} คือ ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยทั้ง 2 งาน

นำสมการ (7.3) ไปแทนในสมการ (7.4) จะได้

$$e(\text{error}) = \frac{E_{\text{Wongthongsiri}} - E_{\text{present}}}{\bar{E}} \times 100\% \quad (7.4)$$

ผลการเปรียบเทียบงานวิจัยที่ผ่านมานี้เปรียบเทียบกับบน *rd*-สเกล (รูปที่ 7.1(ก)) พบว่า

- เมื่อ r เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) เพิ่มขึ้นตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Wongthongsiri, K. (2014)
- พิจารณาที่ $r = 4$ งานปัจจุบัน (Present work) ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E_{present}) เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดใน FMRL (\bar{E}_{FMRL}) มีค่าต่างกันไม่เกิน 23% ของค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดใน FMRL นอกเหนือจากนั้นยังพบว่า เมื่อนำงานปัจจุบัน (E_{present}) เปรียบเทียบกับงานของ Wongthongsiri, K. (2014) ($E_{\text{Wongthongsiri}}$) ค่า E มีค่าต่างกันไม่เกิน 8% ของค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยทั้ง 2 งาน
- พิจารณาที่ $r = 8$ งานปัจจุบัน (Present work) ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E_{present}) เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดใน FMRL (E_{FMRL}) มีค่าต่างกันไม่เกิน 8% ของค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดใน FMRL นอกเหนือจากนั้นยังพบว่า เมื่อนำงานปัจจุบัน (E_{present}) เปรียบเทียบกับงานของ Wongthongsiri, K. (2014) ($E_{\text{Wongthongsiri}}$) ค่า E มีค่าต่างกันไม่เกิน 4% ของค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยทั้ง 2 งาน
- พิจารณาที่ $r = 12$ งานปัจจุบัน (Present work) ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E_{present}) เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดใน FMRL (E_{FMRL}) มีค่าต่างกันไม่เกิน 6% ของค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดใน FMRL นอกเหนือจากนั้นยังพบว่า เมื่อนำงานปัจจุบัน (E_{present}) เปรียบเทียบกับงานของ Wongthongsiri, K. (2014) ($E_{\text{Wongthongsiri}}$) ค่า E มีค่าต่างกันไม่เกิน 10% ของค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยทั้ง 2 งาน
- พิจารณาที่ $r = 3.3$ งานของ Yuan, L. L. and Street, R. L. (1998) ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E_{Yuan}) เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดใน FMRL (\bar{E}_{FMRL}) ที่ $r = 4$ พบว่า ค่า E

มีค่าต่างกันไม่เกิน 6% ของค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดใน FMRL

ผลการเปรียบเทียบงานวิจัยที่ผ่านมาเปรียบเทียบกับบน d -สเกล (รูปที่ 7.1(ข)) พบว่า

โดยรวมกรณีของงานปัจจุบัน (Present work) ทำการทดลองที่ $r = 4, 8$ และ 12 เมื่อ r เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) เพิ่มขึ้นตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Wongthongsiri (2014) ที่ $r = 4, 8$ และ 12 ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ($E_{present}$) เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดใน FMRL (\bar{E}_{FMRL}) มีค่าต่างกันไม่เกิน 23%, 8% และ 6% ตามลำดับ ของค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดใน FMRL

โดยรวมผลการเปรียบเทียบงานวิจัยที่ผ่านมาเปรียบเทียบกับบน rd -สเกล และ d -สเกล กรณีของงานปัจจุบัน (Present work) ทำการทดลองที่ $r = 4, 8$ และ 12 เมื่อ r เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) เพิ่มขึ้นตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Wongthongsiri (2014) ที่ $r = 4, 8$ และ 12 ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานปัจจุบัน ($E_{present}$) เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดใน FMRL (\bar{E}_{FMRL}) มีค่าต่างกันไม่เกิน 23%, 8% และ 6% ตามลำดับ ของค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรของงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดใน FMRL

บทที่ 8

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสม (Entrainment) ของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยมีเป้าหมายรองเพื่อหาตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมที่ทำให้อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ของเจ็ตในกระแสลมขวาง และค่าประสิทธิภาพของการฉีดเจ็ตควบคุมในการเหนี่ยวนำการผสม (η) สูงที่สุด (หรือต่ำที่สุด) เพื่อให้สามารถวัดค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรได้โดยตรงการทดลองนี้จึงใช้เทคนิค Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) ควบคู่กับการใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ตหลักเท่านั้นไม่ใส่ในกระแสลมขวาง การทดลองทำที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพของเจ็ตต่อกระแสลมขวาง (r) ที่ 4, 8 และ 12 ทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมจากมุม $\pm 15^\circ$ ถึง $\pm 165^\circ$ โดยเพิ่มมุมขึ้นทีละ 15° และ กรณีคู่สมมาตรอีก 1 คู่ คือที่ตำแหน่ง 0° และ 180° โดยคงค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ที่ 4%

8.1 การเหนี่ยวนำการผสมและประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสม กรณี $r = 4, 8$ และ 12 พบว่าแนวโน้มโดยรวมเป็นดังนี้

- การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน windward ($\theta < 90^\circ$) จะส่งผลให้ E และ η ของ cJICF ลดลงจากกรณี JICF หรืออีกนัยหนึ่ง การฉีดเจ็ตควบคุมจะไปยับยั้ง (suppress) การเหนี่ยวนำการผสมของ cJICF เมื่อเทียบกับ JICF ในทางตรงกันข้าม การฉีดเจ็ตควบคุมทางด้าน leeward ($\theta > 90^\circ$) จะส่งผลให้ E และ η ของ cJICF เพิ่มขึ้นจากกรณี JICF หรืออีกนัยหนึ่ง การฉีดเจ็ตควบคุมจะไปส่งเสริม (promote) การเหนี่ยวนำการผสมของ cJICF เมื่อเทียบกับ JICF
- เมื่อเพิ่มตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมจากทางด้าน windward $\pm 15^\circ$ ไปทางด้าน leeward $\pm 165^\circ$ อย่างต่อเนื่อง จะส่งผลให้ E และ η มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุม
- ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสลมขวางมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมลดลงจนมีค่าต่ำสุดอยู่ในช่วง $\pm 15^\circ - \pm 30^\circ$ ในขณะที่ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสลมขวางมีค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดของ $r = 4$ และ 8 คือ $\pm 165^\circ$ แต่สำหรับกรณี $r = 12$ นั้นตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ส่งผลค่า

อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรสูงสุด จะเป็นตำแหน่งฉีดเจ็ตควบคุมที่บริเวณ leeward ($\pm 105^\circ - \pm 165^\circ$) ตารางที่ 6.2(ก)

- ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสลมขวางมีค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมต่ำสุดอยู่ในช่วง $\pm 15^\circ - \pm 30^\circ$ ในขณะที่ตำแหน่งเชิงมุมของเจ็ตควบคุมที่ทำให้เจ็ตในกระแสลมขวางมีค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมสูงสุดของ $r = 4$ และ 8 คือ $\pm 165^\circ$ แต่สำหรับกรณี $r = 12$ นั้นตำแหน่งการฉีดเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงที่ส่งผลค่าประสิทธิผลการเหนี่ยวนำการผสมสูงสุดจะอยู่ในช่วง leeward ($\pm 105^\circ - \pm 165^\circ$) ตารางที่ 6.2(ข)
- ค่าประสิทธิผลของการฉีดเจ็ตควบคุม (η) สูงที่สุดสำหรับทุกกรณีและทุกระนาบที่ทำการทดลอง คือ 1.37 ซึ่งเกิดในกรณีเจ็ตในกระแสลมขวางที่มี r เท่ากับ 4 โดยการฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่ง $\pm 165^\circ$ และวัดที่ตำแหน่งใกล้ปากทางออกของเจ็ตที่สุดที่ทำการทดลอง คือ $x/rd = 0.5$ รูปที่ 6.4
- ที่ $r = 4$ ที่ทุกตำแหน่งมุมการฉีด เจ็ตควบคุมจะมีผลมากในบริเวณใกล้ปากทางออกของเจ็ต (η เบี่ยงเบนไปจาก 1 มาก) แต่จะมีผลน้อยลง (η ลู่เข้าสู่ค่า 1) เมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปตามระยะทางการไหล ในขณะที่แนวโน้มนี้จะไม่ชัดเจนนักสำหรับ cJICF ที่ $r = 8$ และ 12

8.2 โครงสร้างของเจ็ต ผลการศึกษาสำหรับทั้งสามกรณีของ r (4, 8 และ 12) พบว่า แนวโน้มโดยรวมเป็นดังนี้

โดยรวมในเรื่องของโครงสร้างของเจ็ตที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ สำหรับทั้งสามกรณีของ r (4, 8 และ 12) เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ด้าน windward จะส่งผลให้ขนาดของปริมาณไร้มิติ V_x/u_{cf} , V_y/u_{cf} , V_z/u_{cf} , V/u_{cf} และ $\omega_x d/u_{cf}$ สูงกว่ากรณี JICF แต่จะส่งผลให้รูปร่างขนาดเจ็ตมีขนาดเล็กกว่ากรณี JICF ในทางกลับกันเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมที่ด้าน leeward จะส่งผลให้ขนาดของปริมาณไร้มิติ V_x/u_{cf} , V_y/u_{cf} , V_z/u_{cf} , V/u_{cf} และ $\omega_x d/u_{cf}$ ต่ำกว่ากรณี JICF แต่จะส่งผลให้เจ็ตมีขนาดใหญ่กว่ากรณี JICF

8.2.1 ความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ

กรณี JICF และกรณีฉีดเจ็ตควบคุมที่ตำแหน่งต่างๆ (cJICF) ที่ $r = 4, 8$ และ 12 ตามลำดับ บริเวณกลางเจ็ตมีการกระจายตัวของ ϕ_j และค่า ϕ_j มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง แสดงว่าบริเวณตรงกลางของเจ็ตเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ต (ส่วนผสมของเจ็ต) มาก แต่พบกระแสลมขวางบริสุทธิ์น้อย ในทางตรงกันข้าม เมื่อเข้าใกล้บริเวณขอบเจ็ตค่า ϕ_j มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่าบริเวณตรงของ

ของเจ็ตเป็นบริเวณที่มีความน่าจะเป็นที่จะพบเจ็ตน้อย แต่พบกระแสลมขวางบริสุทธิ์มาก ซึ่งสอดคล้องกับการใส่อนุภาคติดตามการไหลในเจ็ตเท่านั้น

ในกรณี CJCF ทั้ง 3 r โดยรวม เมื่อฉีดเจ็ตควบคุมบริเวณ windward ($\theta < 90^\circ$) เจ็ตจะมีการพุ่งทะลุ (penetrate) เข้าไปในกระแสลมขวางน้อยลงและเจ็ตมีขนาดเล็กลง เมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม แต่ กรณีเมื่อฉีดเจ็ตควบคุมบริเวณ leeward ($\theta > 90^\circ$) เจ็ตจะมีการพุ่งทะลุ (penetrate) เข้าไปในกระแสลมขวางมากขึ้นและเจ็ตมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับกรณีไม่ฉีดเจ็ตควบคุม

ในขณะเดียวกัน การฉีดเจ็ตควบคุมบริเวณ leeward จะทำให้เกิด wake ตรงบริเวณขอบล่างของเจ็ตอย่างชัดเจนโดยเฉพาะในกรณี r ต่ำ ($r = 4$) โดยที่ $r = 4$ จะเกิด wake ที่ตำแหน่งมุมฉีด leeward ทุกมุมที่ฉีด ยกเว้นมุม $\pm 135^\circ$ และโครงสร้าง Wake นี้จะเห็นได้ชัดตลอดระยะตามแนว Downstream ที่ทำการทดลอง (ถึง $x/rd = 1.5$) ที่ $r = 8$ จะเกิด wake ที่มีขนาดเล็กกว่าและสั้นกว่าเมื่อเจ็ตพัฒนาตัวไปในแนว Downstream ส่วนที่ $r = 12$ จะเกิด wake ที่ตำแหน่งมุมฉีดทางด้าน leeward ทุกมุมที่ฉีดและโครงสร้าง Wake นี้จะเห็นได้ชัดตลอดระยะตามแนว Downstream ที่ทำการทดลอง (ถึง $x/rd = 1.5$).

8.2.2 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน x ไร้มิติ, V_x/u_{cf}

กรณี JICF ทั้งในกรณี $r = 4, 8$ และ 12 ที่บริเวณ near field ($x/rd = 0.5$) บริเวณที่มีขนาด V_x/u_{cf} สูงจะมีรูปร่างคล้ายรูปไต โครงสร้างการกระจายตัวของ V_x/u_{cf} นี้เรียกว่า 'โครงสร้างรูปไต' (Kidney-Shaped structure, ย่อ K-S) ส่วนบริเวณที่มีรูปร่างเป็นอ่าวรูปตัว ก หรือ U กลับหัว ที่มี V_x/u_{cf} ต่ำ จะเรียกว่าบริเวณ 'อ่าว' (Gulf Region, ย่อ G-R)

8.2.3 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ตควบคุมต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ตตามแนวแกน y ไร้มิติ, V_y/u_{cf}

กรณี JICF เจ็ตประกอบด้วย peak ของความเร็ว 2 บริเวณ อันได้แก่ 1) บริเวณที่ peak ของความเร็วเป็นบวก (positive local peak) 2) บริเวณที่ peak ของความเร็วเป็นลบ (negative local

peak) positive local peak จะประกอบด้วย peak ย่อย 2 peak นั่นคือ top positive local peak และ bottom positive local peak

ทั้งสามกรณีของ r (4, 8 และ 12) ที่บริเวณ near field ($x/rd=0.5$) พิจารณาที่ positive local peak(บริเวณกลางเจ็ด) พบว่า เมื่อฉีดเจ็ดควบคุมที่ด้าน windward ไปยังด้าน leeward จะส่งผลให้ top positive local peak ซึ่งอยู่ตรงบริเวณด้านบนของเจ็ดมีขนาดลดลงอย่างต่อเนื่อง ตามตำแหน่งมุมฉีด

8.2.4 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ดควบคุมต่อโครงสร้างความเร็วของเจ็ดตามแนวแกน z ไร้มิติ, V_z/u_{cf}

กรณี JICF รูปร่างเจ็ดมีลักษณะคล้ายผีเสื้อ โดยมี positive local peak และ negative local peak อยู่กันเป็นคู่ๆ โดยคู่หนึ่งจะอยู่ข้างซ้ายและอีกคู่หนึ่งจะอยู่ด้านขวาโดยมีทิศทางสอดคล้องกับทิศทางการหมุนของ CVP

8.2.5 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ดควบคุมต่อโครงสร้างอัตราเร็วเฉลี่ยไร้มิติ, V/u_{cf}

กรณี JICF เมื่อพิจารณาบริเวณขอบนอกสุดของเจ็ด รูปร่างเจ็ดมีลักษณะคล้ายกับรูปร่างโครงสร้างความเร็วของเจ็ดตามแนวแกน x ไร้มิติ, (V_x/u_{cf}) แต่เมื่อพิจารณาบริเวณตรงกลางของเจ็ด รูปร่างการกระจายตัวของ V/u_{cf} จะเป็นรูปร่างที่ไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับรูปร่างการกระจายตัวของ V_x/u_{cf} ซึ่งจะเป็นรูปไต (kidney-shaped structure) ค่อนข้างชัดเจน

8.2.6 ผลของตำแหน่งเชิงมุมของการฉีดเจ็ดควบคุมต่อการกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ไร้มิติ ($\omega_x d/u_{cf}$)

ผลการทดลองสำหรับกรณี $r = 4$ พบว่า ในกรณี JICF ที่ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$ พบว่า มีโครงสร้างการหมุนควงอยู่ 3 คู่ อันได้แก่ คู่บน, คู่กลางและคู่ล่าง โดยคู่กลางซึ่งเป็นคู่หลักมีขนาดและรูปร่างค่อนข้างสมมาตรคล้ายจุลภาคกลับหัว .ทิศทางหมุนควงของแต่ละคู่จะมีทิศทางสลับกัน ส่วนกรณี $r = 8$ และ 12 นั้น จะมีคู่กลางซึ่งเป็นโครงสร้างหลักอยู่ 1 คู่ ส่วนคู่ย่อยจะมีอยู่หรือไม่ ยังไม่ชัดเจน



<i>E</i>												
Case	<i>r</i> =4			<i>r</i> =8			<i>r</i> =12					
	0.5	0.75	1	1.5	0.5	0.75	1	1.5	0.5	0.75	1	1.5
<i>x/rd</i>	0.5	0.75	1	1.5	0.5	0.75	1	1.5	0.5	0.75	1	1.5
JICF	4.45	5.51	5.88	7.86	6.14	8.69	9.41	11.13	9.81	11.05	12.77	15.66
l15	3.05	4.32	4.93	6.97	4.67	6.79	8.06	8.26	7.98	10.18	11.24	14.90
l30	3.23	4.45	4.95	6.98	4.56	6.88	7.69	8.53	7.48	10.35	11.71	14.51
l45	3.27	4.65	5.39	7.31	4.84	7.20	8.42	9.67	8.19	9.20	11.31	14.87
l60	3.76	4.98	5.44	7.58	5.36	7.78	8.80	9.81	7.83	11.08	11.93	14.04
l75	3.75	4.94	5.76	7.43	5.70	7.16	9.34	10.98	9.29	10.97	11.80	15.55
l90	4.24	5.27	5.67	7.73	6.21	8.34	9.31	10.73	8.84	11.25	11.92	19.65
l105	4.64	5.49	6.55	7.96	5.95	8.90	10.54	10.90	10.06	12.25	13.64	20.50
l120	4.89	6.13	6.50	8.17	6.33	8.81	10.45	11.72	10.17	12.82	13.11	20.53
l135	5.01	5.94	6.71	8.20	6.79	9.30	10.59	12.55	10.47	13.14	14.74	20.10
l150	5.77	6.77	6.99	9.21	6.70	9.80	11.32	12.97	11.92	12.94	13.49	17.47
l165	6.11	6.92	7.08	9.41	7.46	10.1	12.11	14.81	11.56	12.55	15.68	18.78
l0,180	3.95	5.02	5.84	7.67	6.01	8.07	9.32	10.57	9.57	11.89	13.01	20.42

ตารางที่ 6.1(ก) ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (*E*) ของกรณีการทดลองทั้งหมด

$E=1+a(x/rd)^b$												
$r = 4$				$r = 8$				$r = 12$				
case	a	b	R ²	case	a	b	R ²	case	a	b	R ²	
JICF	5.22	0.628	0.97	JICF	8.29	0.545	0.94	JICF	11.91	0.487	0.99	
I15	4.08	0.931	0.99	I15	6.28	0.521	0.82	I15	10.68	0.623	0.99	
I30	4.16	0.872	0.99	I30	6.27	0.566	0.88	I30	10.62	0.621	0.98	
I45	4.43	0.879	0.99	I45	6.95	0.640	0.93	I45	10.49	0.652	0.98	
I60	4.73	0.782	0.98	I60	7.19	0.590	0.94	I60	10.79	0.521	0.94	
I75	4.77	0.749	0.99	I75	7.76	0.676	0.97	I75	11.49	0.525	0.97	
I90	5.02	0.673	0.97	I90	8.07	0.518	0.96	I90	12.67	0.859	0.93	
I105	5.46	0.603	0.99	I105	8.53	0.526	0.82	I105	13.93	0.752	0.96	
I120	5.73	0.536	0.98	I120	8.82	0.572	0.94	I120	13.96	0.725	0.92	
I135	5.77	0.537	0.99	I135	9.33	0.576	0.97	I135	14.44	0.651	0.98	
I150	6.51	0.502	0.94	I150	9.75	0.591	0.93	I150	13.53	0.393	0.90	
I165	6.70	0.468	0.91	I165	10.75	0.656	0.99	I165	14.38	0.515	0.97	
I0,180	4.92	0.744	0.99	I0,180	7.92	0.538	0.95	I0,180	13.53	0.807	0.95	

ตารางที่ 6.1(ข) ค่า Coefficient a และ b พร้อมค่า R^2 ของการ fit curve ด้วยสมการ power law $E = 1 + a(x/rd)^b$

η												
Case	r=4				r=8				r=12			
	0.5	0.75	1	1.5	0.5	0.75	1	1.5	0.5	0.75	1	1.5
x/rd	0.5	0.75	1	1.5	0.5	0.75	1	1.5	0.5	0.75	1	1.5
JICF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
I15	0.69	0.79	0.84	0.89	0.76	0.78	0.86	0.74	0.81	0.92	0.88	0.95
I30	0.73	0.81	0.84	0.89	0.74	0.79	0.82	0.77	0.76	0.94	0.92	0.93
I45	0.74	0.84	0.91	0.93	0.79	0.83	0.90	0.87	0.84	0.83	0.89	0.95
I60	0.85	0.90	0.92	0.97	0.87	0.89	0.94	0.88	0.80	1.01	0.94	0.90
I75	0.84	0.90	0.98	0.95	0.93	0.82	0.99	0.99	0.95	0.99	0.93	0.99
I90	0.95	0.96	0.96	0.98	1.01	0.96	0.99	0.97	0.90	1.02	0.93	1.25
I105	1.04	0.99	1.11	1.01	0.97	1.02	1.12	0.98	1.03	1.11	1.07	1.30
I120	1.10	1.11	1.11	1.04	1.03	1.01	1.11	1.05	1.04	1.16	1.03	1.31
I135	1.13	1.08	1.14	1.04	1.11	1.07	1.13	1.13	1.07	1.19	1.16	1.28
I150	1.30	1.23	1.19	1.17	1.09	1.13	1.20	1.17	1.22	1.17	1.06	1.12
I165	1.37	1.26	1.2	1.20	1.22	1.16	1.29	1.33	1.18	1.14	1.23	1.20
I0,180	0.89	0.91	0.99	0.98	0.98	0.93	0.99	0.95	0.98	1.08	1.02	1.30

ตารางที่ 6.2 ค่าประสิทธิภาพการเขียนโปรแกรม (η) ของกรณีการทดลองทั้งหมด

		E									
Work	Actual r	Experimental Data					Empirical Curve Fit				
		$x/rd=0.25$	0.5	0.75	1	1.5	a_E	b_E	R^2		
$r = 4$	4.02		4.44	5.51	5.88	7.86	5.22	0.628	0.97		
Witayaprapakorn (2013)	3.9±0.3		2.88	4.23	4.82	5.39	3.48	0.68	0.93		
Srimekharat (2013)	3.9±0.3		2.91	3.91	4.89	5.36	3.33	0.683	0.94		
Dawvok (2014)	4.2		3.22	4.55	5.43	7.12	4.36	0.86	0.99		
Wongthongsiri (2014)	4.02	2.96	4.44	5.67	6.37	6.47	4.88	0.496	0.92		
Sornphrom (2016)	4.0		4.51	5.36	6.31	7.24	4.98	0.639	0.95		
Soupramongkol (2016)	4.02		4.21	5.54	6.40	7.48	5.12	0.520	0.98		
\bar{E}	$\bar{r} = 4.052$	2.96	3.80	4.97	5.73	6.70	4.43	0.626	0.98		
Curve fit parameter to E of all works's FMRL											
S_E	$S_r = 0.083$		0.760	0.720	0.688	1.00					
S_E / \bar{E}	$S_r / \bar{r} = 0.021$		0.2	0.145	0.120	0.149					
Precision uncertainty of \bar{E} $P_{\bar{E}} = tS_E / \sqrt{N}$	Precision uncertainty of \bar{r} $P_{\bar{r}} = tS_r / \sqrt{N}$		0.703	0.666	0.636	0.925					
Fraction of precision uncertainty of \bar{E} , $P_{\bar{E}} / \bar{E}$	Fraction of precision uncertainty of \bar{r} , $P_{\bar{r}} / \bar{r}$		0.185	0.134	0.111	0.138					

ตารางที่ 7.1(ก) ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ในกรณี JICF ของงานวิจัยที่ผ่านมาที่ $r=4$

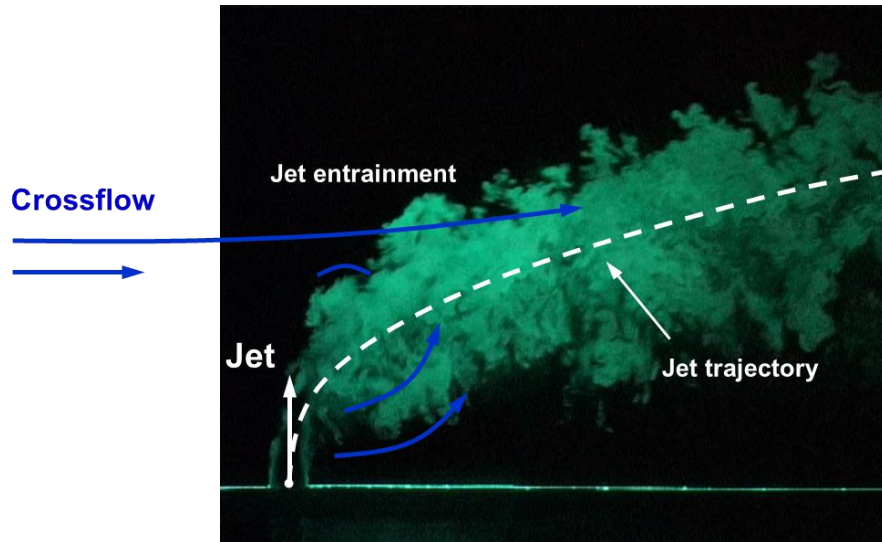
	Work	E									
		Actual r	Experimental Data					Empirical Curve Fit			
		$x/rd = 0.25$	0.5	0.75	1	1.5	a_E	b_E	R^2		
$r = 8$	Present work		6.16	8.69	9.41	11.13	8.29	0.485	0.98		
	Wongthongsiri (2014)	4.86	6.32	8.36	9.50	10.95	8.21	0.534	0.97		
	Soupramongkol (2015)		6.70	8.37	9.41	10.95	8.29	0.545	0.94		
	Sornphrom (2016)		6.14	8.11	9.27	11.77	8.31	0.648	0.99		
	\bar{E}	$\bar{r} = 7.945$	6.33	8.38	9.42	11.20	8.28	0.55	0.98		
	Curve fit parameter to E of all works's FMRL										
	S_E	$S_r = 0.017$	0.260	0.240	0.107	0.389					
	S_E / \bar{E}	$S_r / \bar{r} = 0.002$	0.041	0.029	0.001	0.089					
	Precision uncertainty of \bar{E} $P_{\bar{E}} = tS_E / \sqrt{N}$	Precision uncertainty of \bar{r} $P_{\bar{r}} = tS_r / \sqrt{N}$	0.414	0.382	0.170	0.619					
	Fraction of precision uncertainty of \bar{E} , $P_{\bar{E}} / \bar{E}$	Fraction of precision uncertainty of \bar{r} , $P_{\bar{r}} / \bar{r}$	0.065	0.046	0.018	0.055					

ตารางที่ 7.1(๗) ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ในกรณี JICF ของงานวิจัยที่ผ่านมากที่ $r=8$

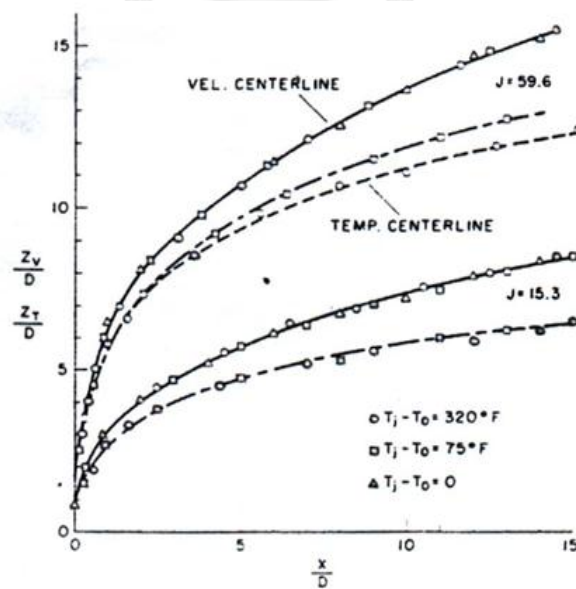
	Work	\bar{E}										Empirical Curve Fit		
		Actual r	Experimental Data					a_E	b_E	R^2				
			$x/rd = 0.25$	0.5	0.75	1	1.5							
$r=12$	Present work	12.21	9.81	11.05	12.77	15.66	11.91	0.487	0.99					
	Wongthongsiri (2014)	12.22	10.03	11.75	14.13	15.2	12.2	0.504	0.95					
	Wangkiat et. al (2015)	12.21	8.99	10.85	13.29	15.68	11.84	0.558	0.99					
	Sornphrom (2016)	12.22	8.5	12.27	14.06	16.25	12.57	0.556	0.92					
	\bar{E}	$\bar{r} = 12.22$	6.136	9.33	11.48	13.56	15.7	12.14	0.51	0.97				
	Curve fit parameter to \bar{E} of all works's FMRL													
	S_E	$S_r = 0.006$	0.713	0.654	0.651	0.428								
	S_E / \bar{E}	$S_r / \bar{r} = 0.001$	0.113	0.078	0.069	0.038								
	Precision uncertainty of \bar{E} $P_E = tS_E / \sqrt{N}$	Precision uncertainty of \bar{r} $P_r = tS_r / \sqrt{N}$	1.135	1.041	1.036	0.681								
	Fraction of precision uncertainty of \bar{E} , P_E / \bar{E}	Fraction of precision uncertainty of \bar{r} , P_r / \bar{r}	0.122	0.091	0.076	0.043								

ตารางที่ 7.1(ค) ค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E) ในกรณี JICF ของงานวิจัยที่ผ่านมาที่ $r=12$

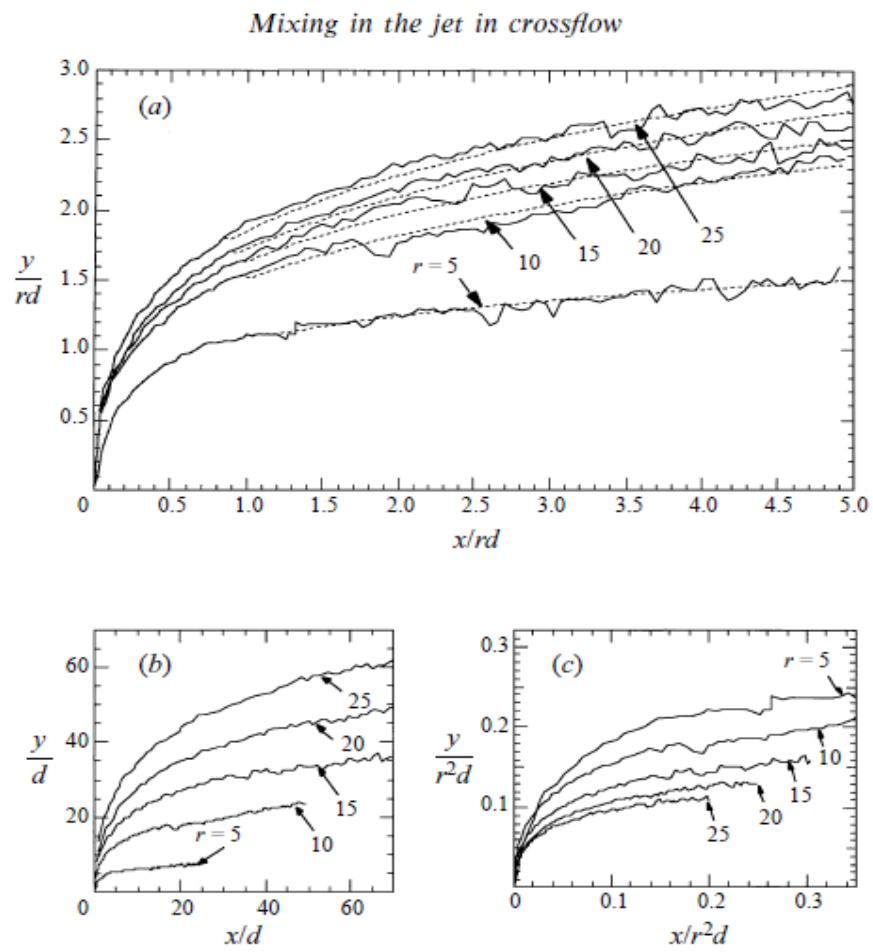
ประ มวลรูปภาพ



รูปที่ 1.1 เจ็ตในกระแสลมขวาง (ภาพจากห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

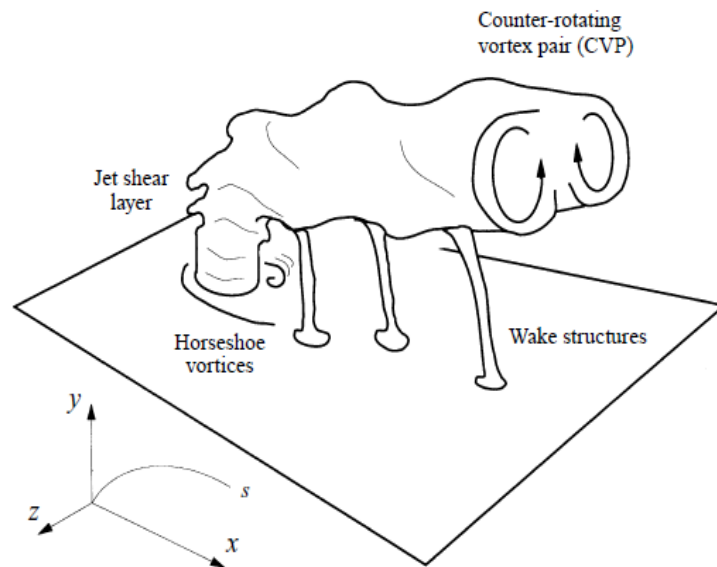


รูปที่ 2.1 เส้นทางเดินความเร็วและอุณหภูมิของเจ็ต Kamotani and Graeber (1972)

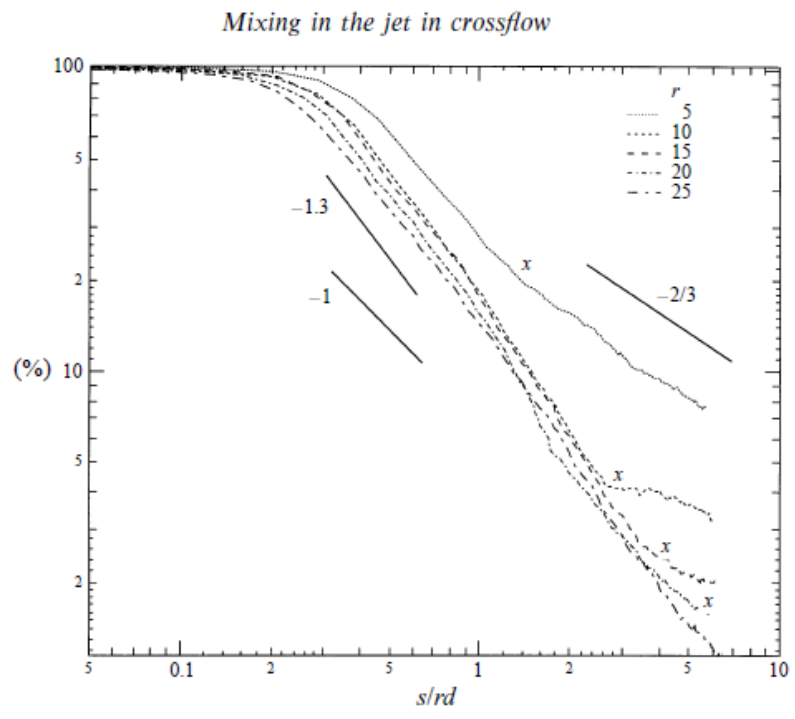


รูปที่ 2.2

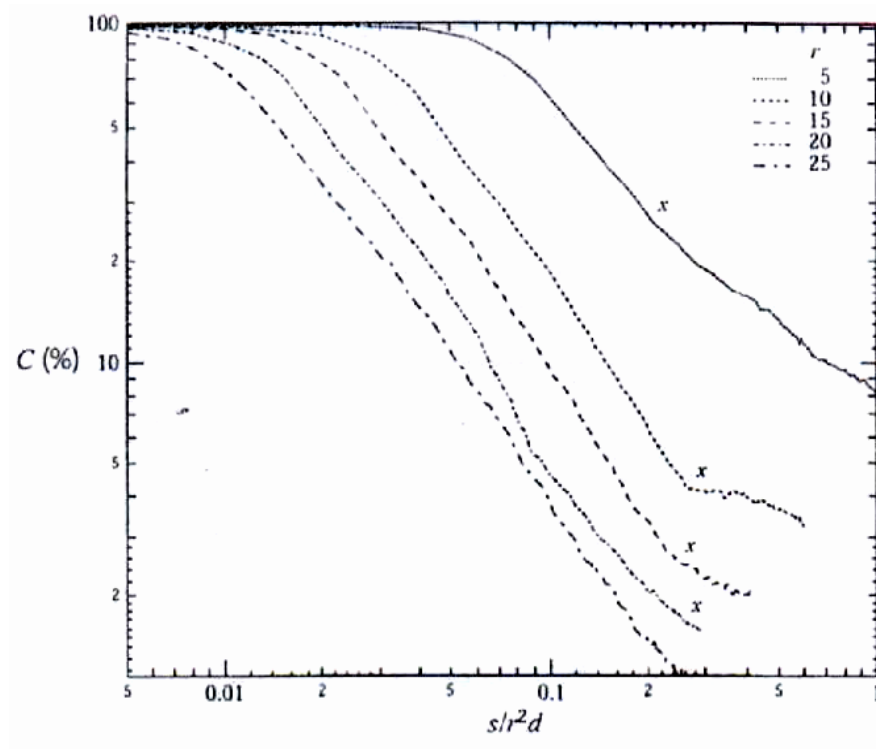
เส้นทางเดินของ Passive Scalar concentration เมื่อเสกด้วย d, rd, r^2d
Smith and Mungal, (1998)



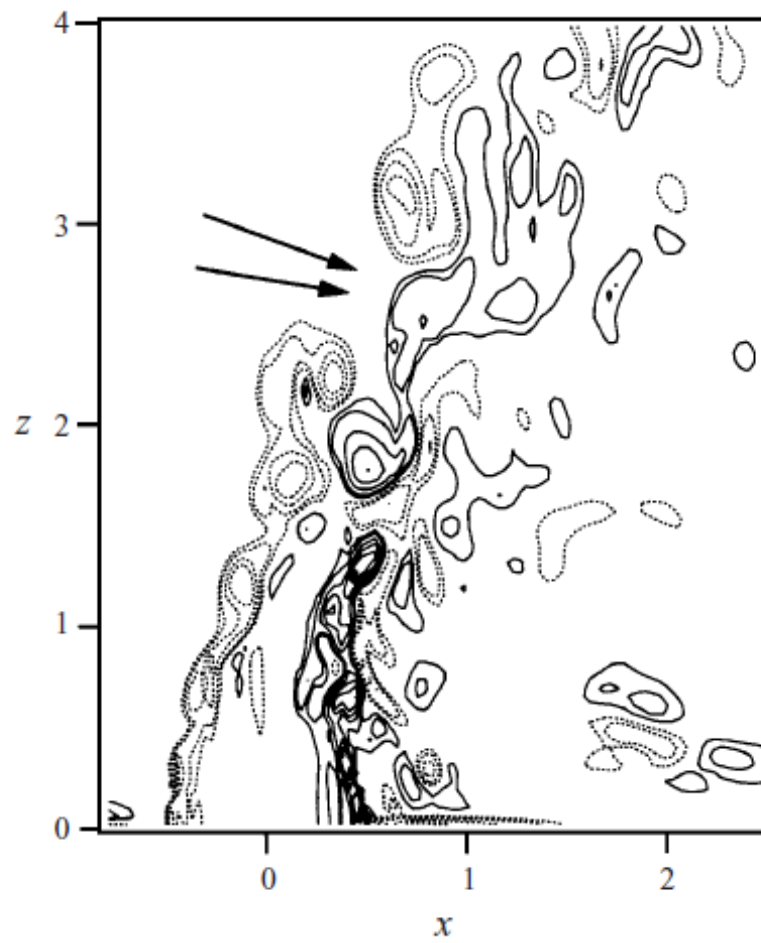
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง Fric and Roshko (1994)



รูปที่ 2.4 จุดแบ่งระหว่าง Near Field และ Far Field บน r^2d (เครื่องหมาย X) Smith and Mungal (1998)

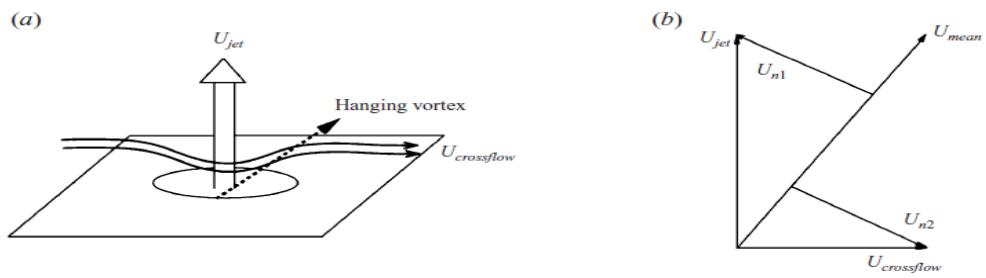


รูปที่ 2.5 การลดลงของ C % ของ JICF และ Free jet บน Near Field และ Far Field บน rd เปรียบเทียบกับ free jet (Smith and Mungal, 1998)



รูปที่ 2.6

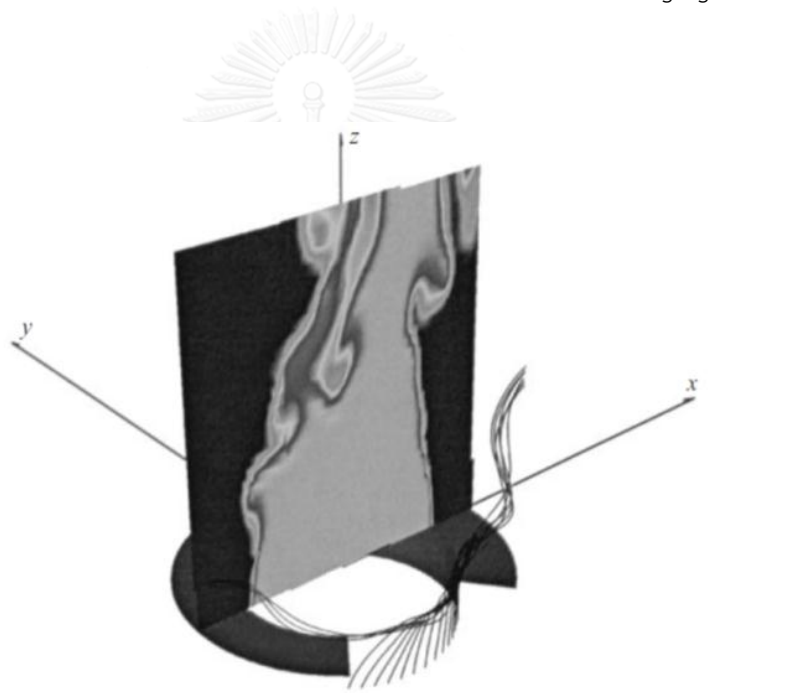
Instantaneous contour ของ Spanwise vorticity Yuan et al., (1999)



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

ก) รูป Schematic ของ Hanging vortices

ข) Vector ความเร็วซึ่งแสดงกลไกของการเกิด Hanging vortices

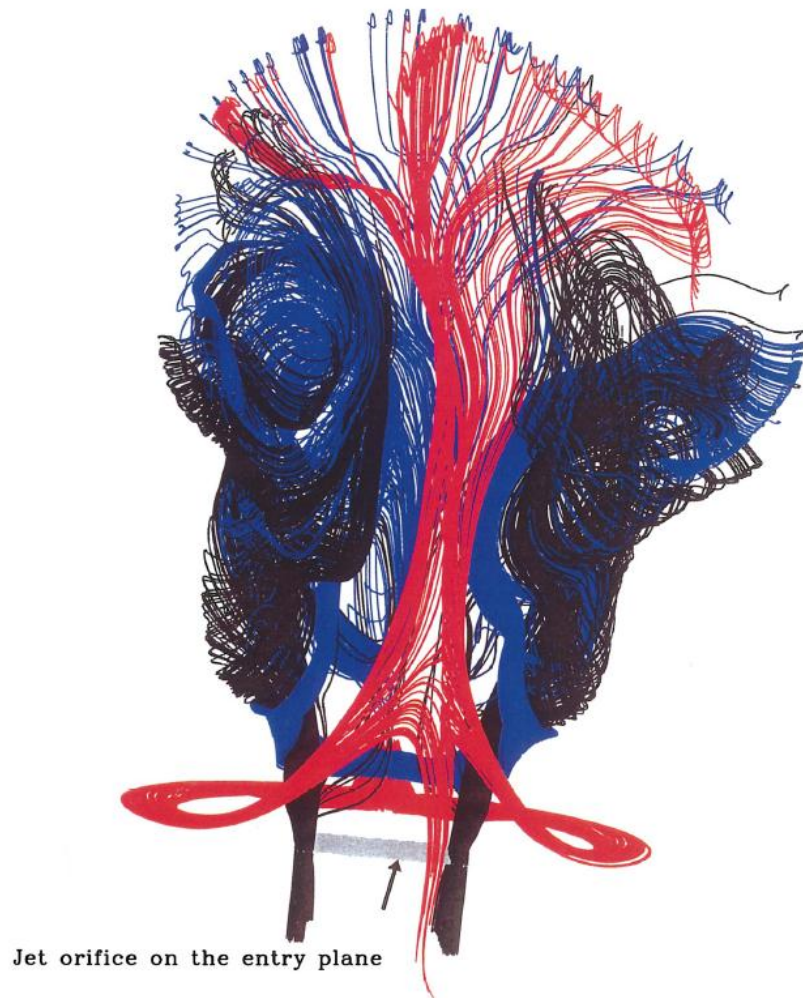


รูปที่ 2.8 Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวขึ้นระหว่างเจ็ต และกระแสลมขวางที่บริเวณขอบด้านข้างของเจ็ต Yuan et al., (1999)

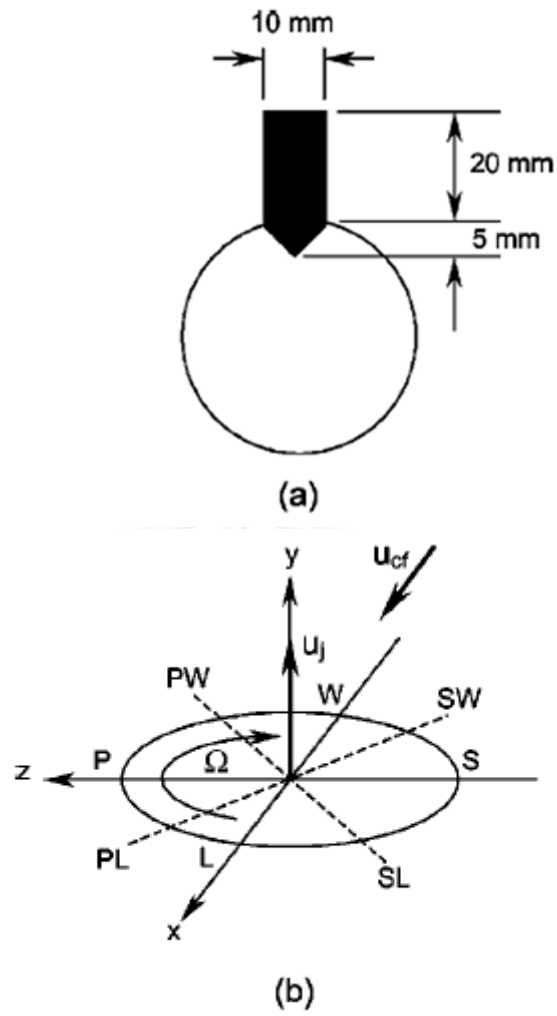


รูปที่ 2.9

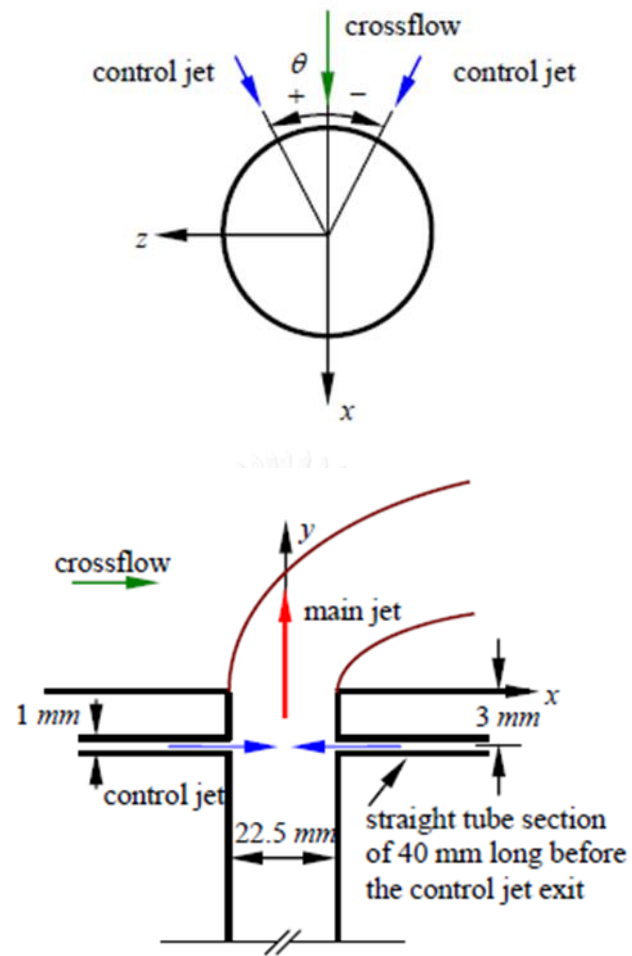
วิวัฒนาการของ Streamlines ในการก่อตัวของ Kelvin-Helmholtz roller Sau et al., (2004)



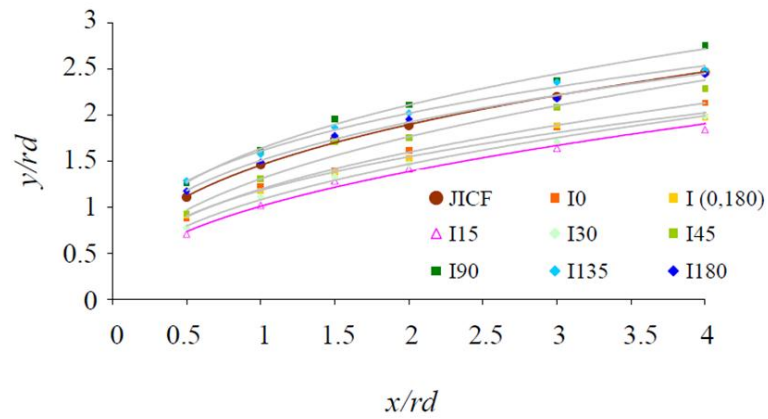
รูปที่ 2.10 วิวัฒนาการของ Wake vortices structure Sau et al., (2004)



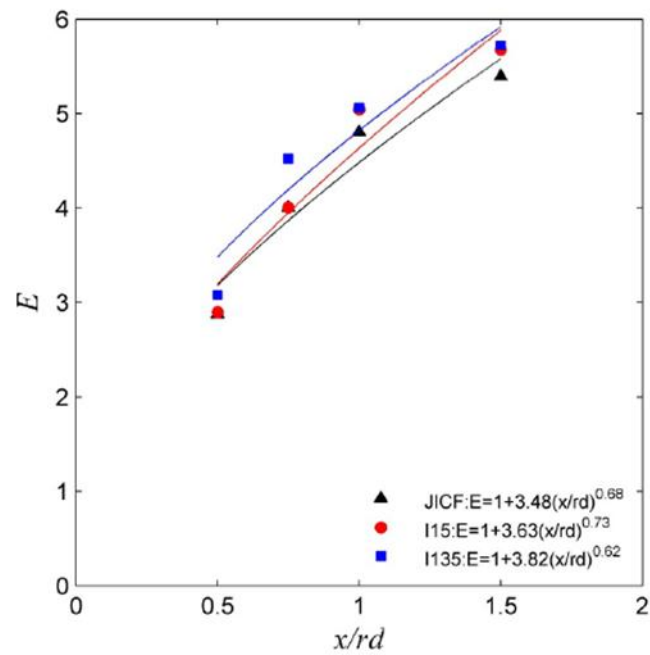
รูปที่ 2.11 ระบบแกนตั้งฉากกับทิศทางการหมุน Bunyajitradulya and Sathapornnanon, (2005)



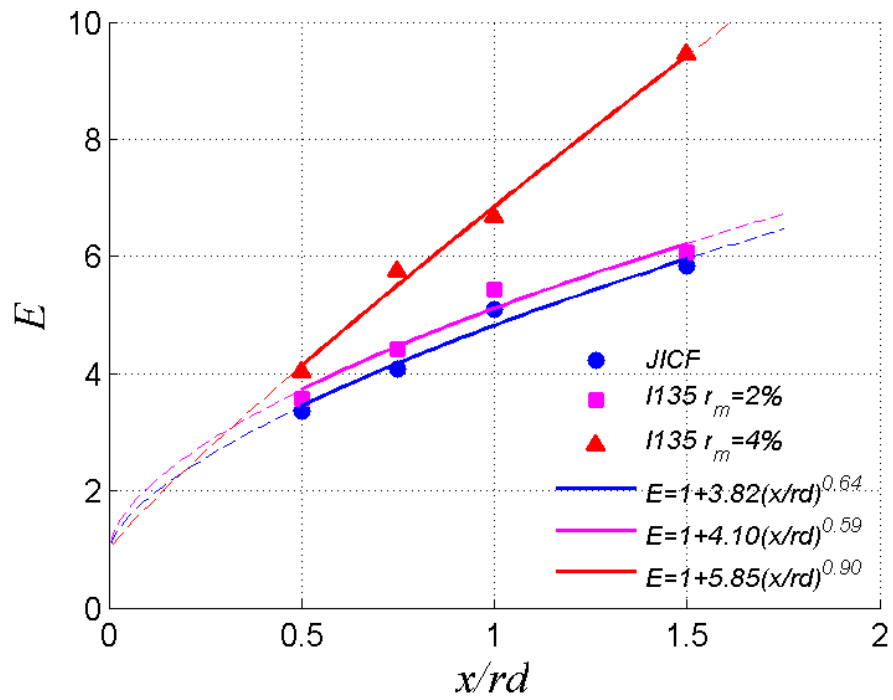
รูปที่ 2.12 ชุดเจ็ตควบคุม Komsri et al., (2009)



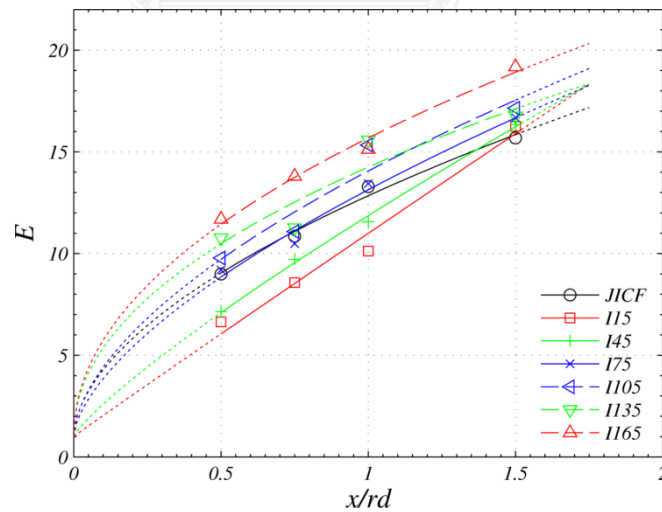
รูปที่ 2.13 เส้นทางเดินความเร็วของเจ็ดสำหรับควบคุมและไม่ควบคุม Kornsri *et al.*, (2009)



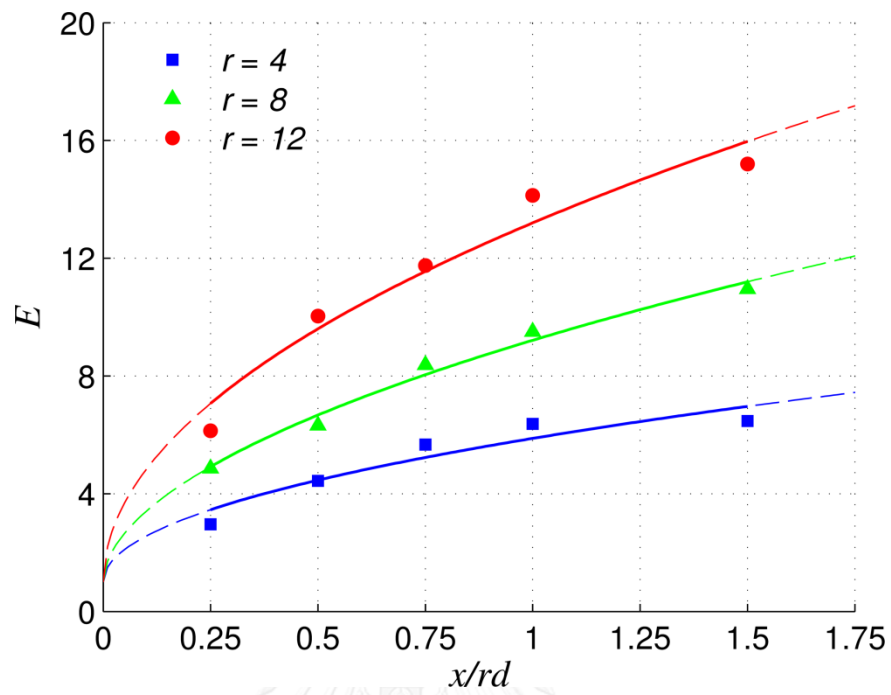
รูปที่ 2.14 ผลของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ดในกระแสมหาวงกรณี JICF, I15 และ I135 Witayaprapakorn, (2013)



รูปที่ 2.15 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเจ็ตควบคุมต่อเจ็ตหลัก (r_m) ต่อการเหนี่ยวนำการผสม ที่ $r=4$ Chaikasetsin *et al.* 2013

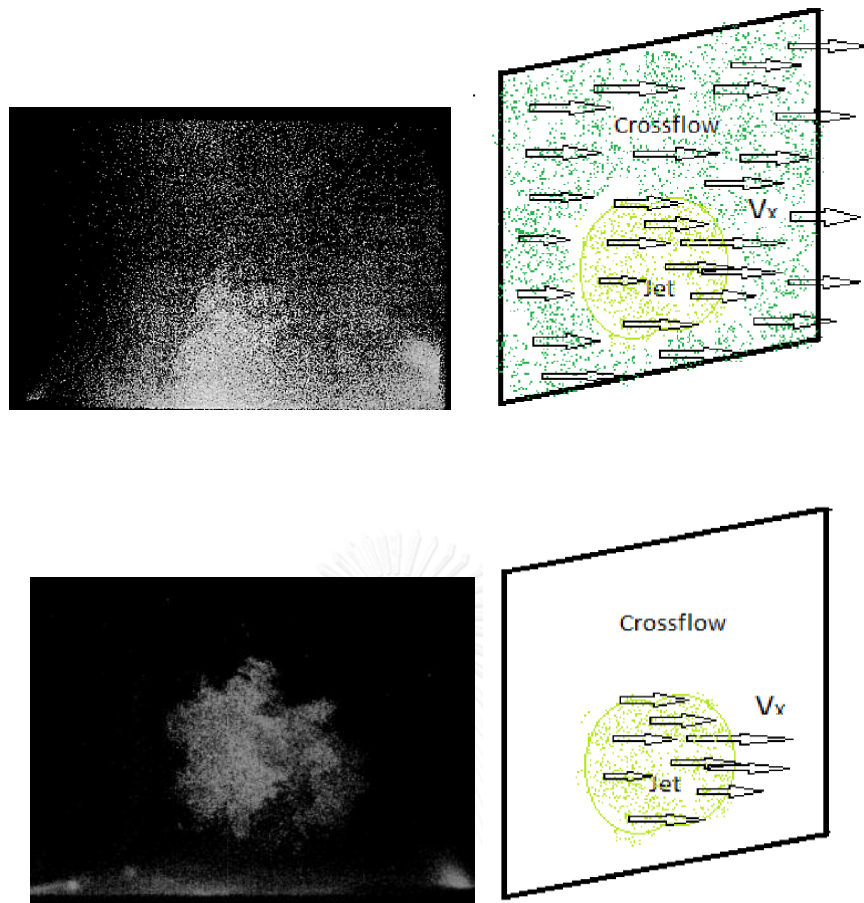


รูปที่ 2.16 ผลของเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวงต่อการเหนี่ยวนำการผสมของเจ็ตในกระแสมวงกรณีย์ JICF, I15, I45, I75, I105, I135 และ I165 Wangkiat *et al.*, (2005)



รูปที่ 2.17

ผลของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิง
ปริมาตร Wongthongsiri (2014)

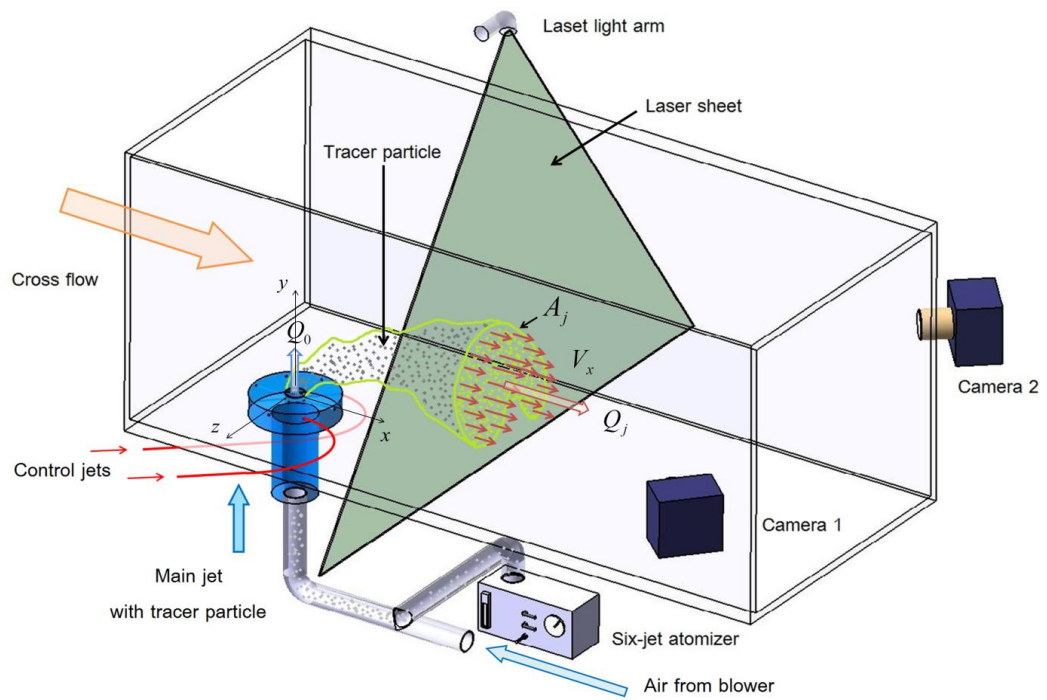


รูปที่ 3.1

ภาพ End view ของเจ็ตในกระแสขวางที่หน้าตัดใดๆ ในกรณีที่มีการปล่อยอนุภาคติดตามเฉพาะในทั้งเจ็ตเท่านั้น ทำให้การระบุขอบเขตเจ็ตทำได้อย่างชัดเจน



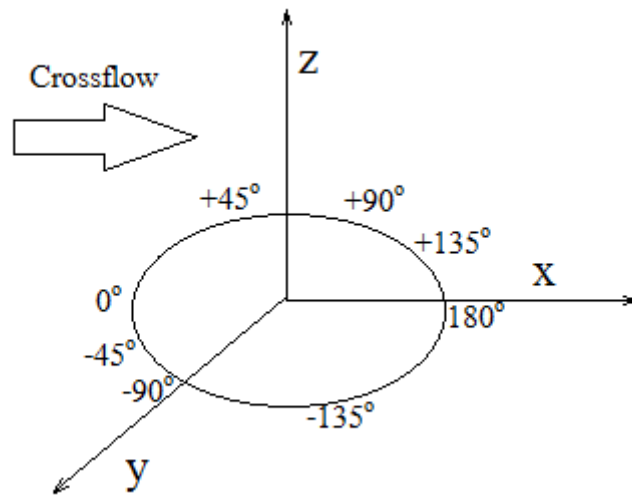
รูปที่ 4.1 ชุดทดลองภายในห้องปฏิบัติการวิจัยพลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล
ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



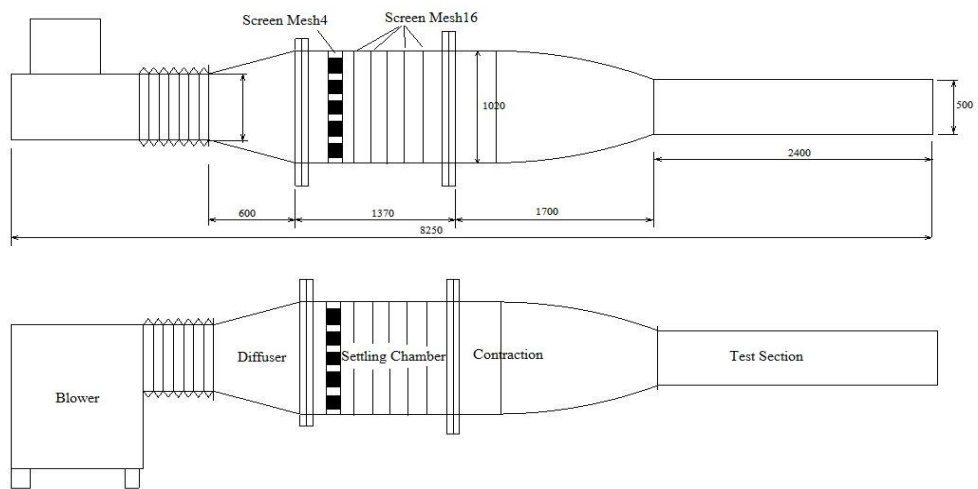
รูปที่ 4.2 ภาพ Schematic diagram ของชุดทดลอง



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายของชุดทดลอง



รูปที่ 4.4 พิกัดอ้างอิงในการทดลอง



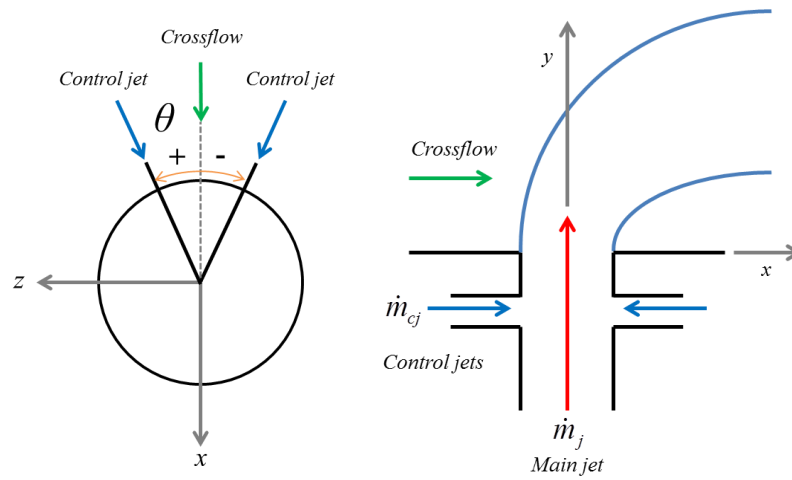
รูปที่ 4.5 รูป Schematic diagram ของอุโมงค์ลม



รูปที่ 4.6 Blower สำหรับอุโมงค์ลมเพื่อสร้างกระแสลมขวาง

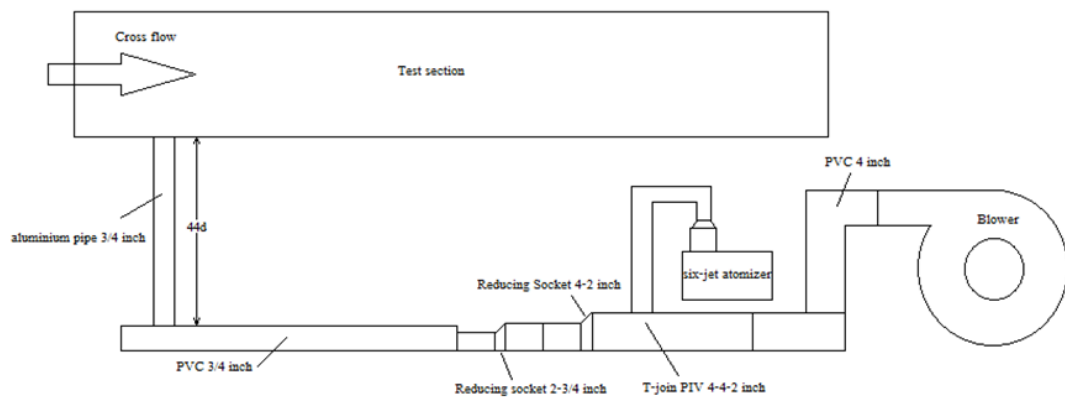


รูปที่ 4.7 เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า



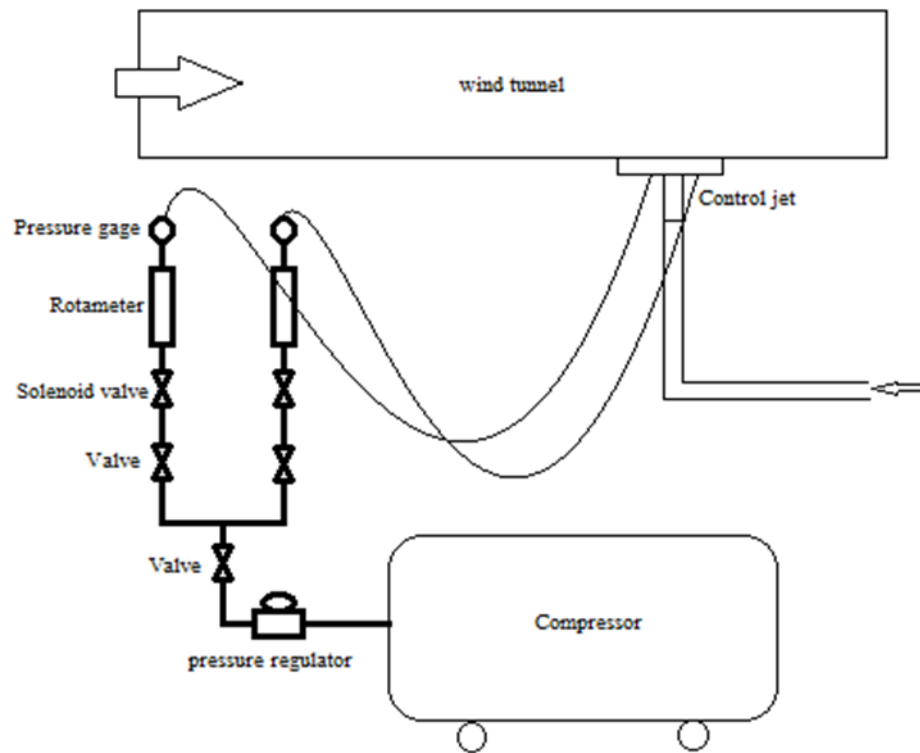
รูปที่ 4.8

จุดเจ็ตหลักและเจ็ตควบคุมตามแนวเส้นรอบวง



รูปที่ 4.9

ส่วนประกอบของจุดเจ็ตหลัก



รูปที่ 4.10 ส่วนประกอบของชุดเจ็ตควบคุม

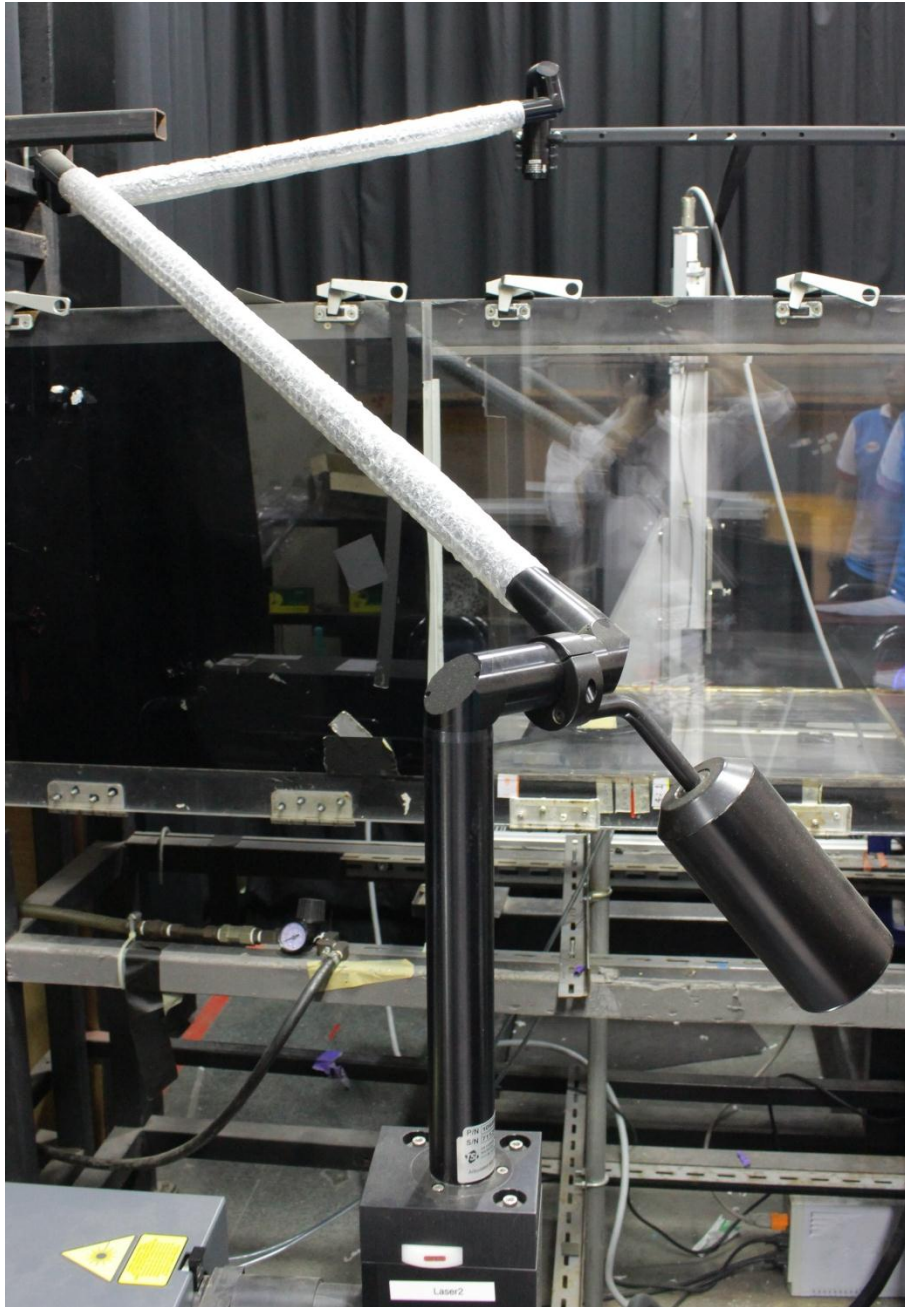


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.11

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



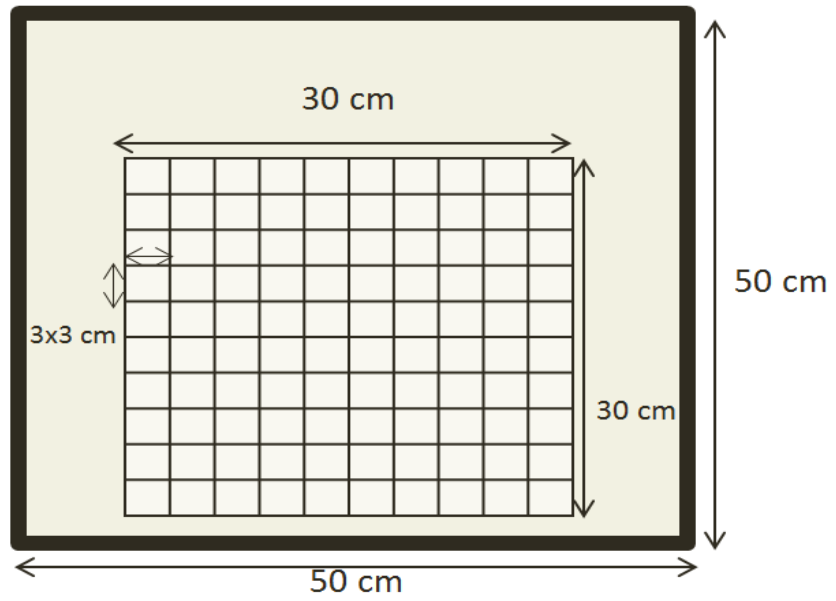
รูปที่ 4.12 Laser light arm



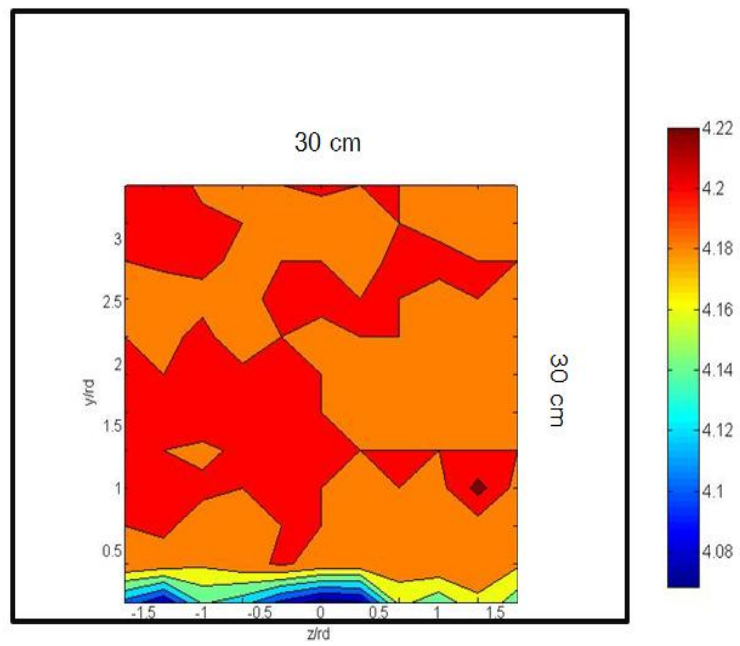
รูปที่ 4.13 กล้อง CCD PowerView Plus11MP



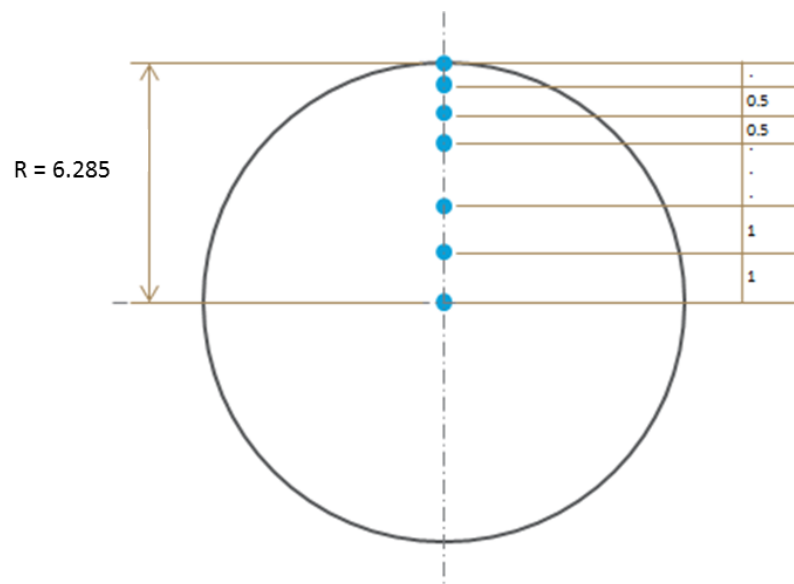
รูปที่ 4.14 Synchronizer



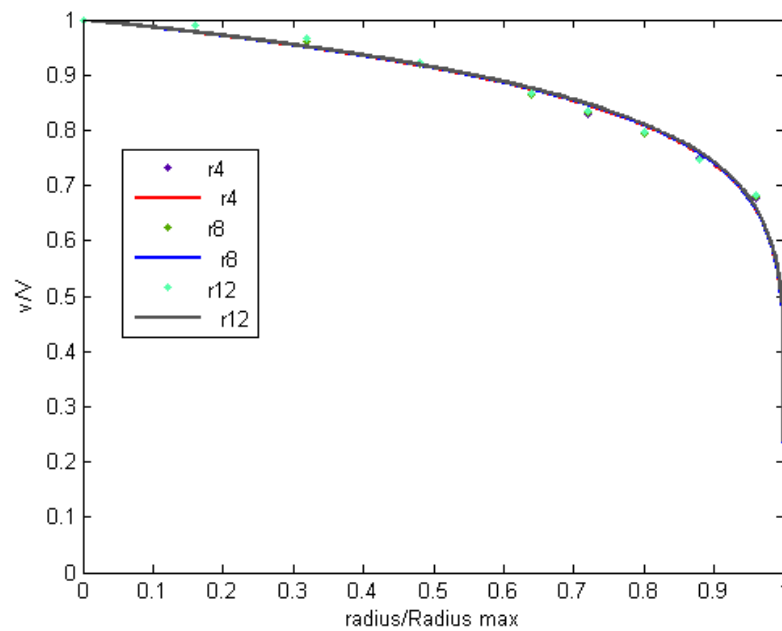
รูปที่ 4.15 ขอบเขตและความละเอียดในการวัดความเป็นระเบียบของกระแสลมขวาง



รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของความเร็วตามแนวแกน x ของกระแสลมขวาง



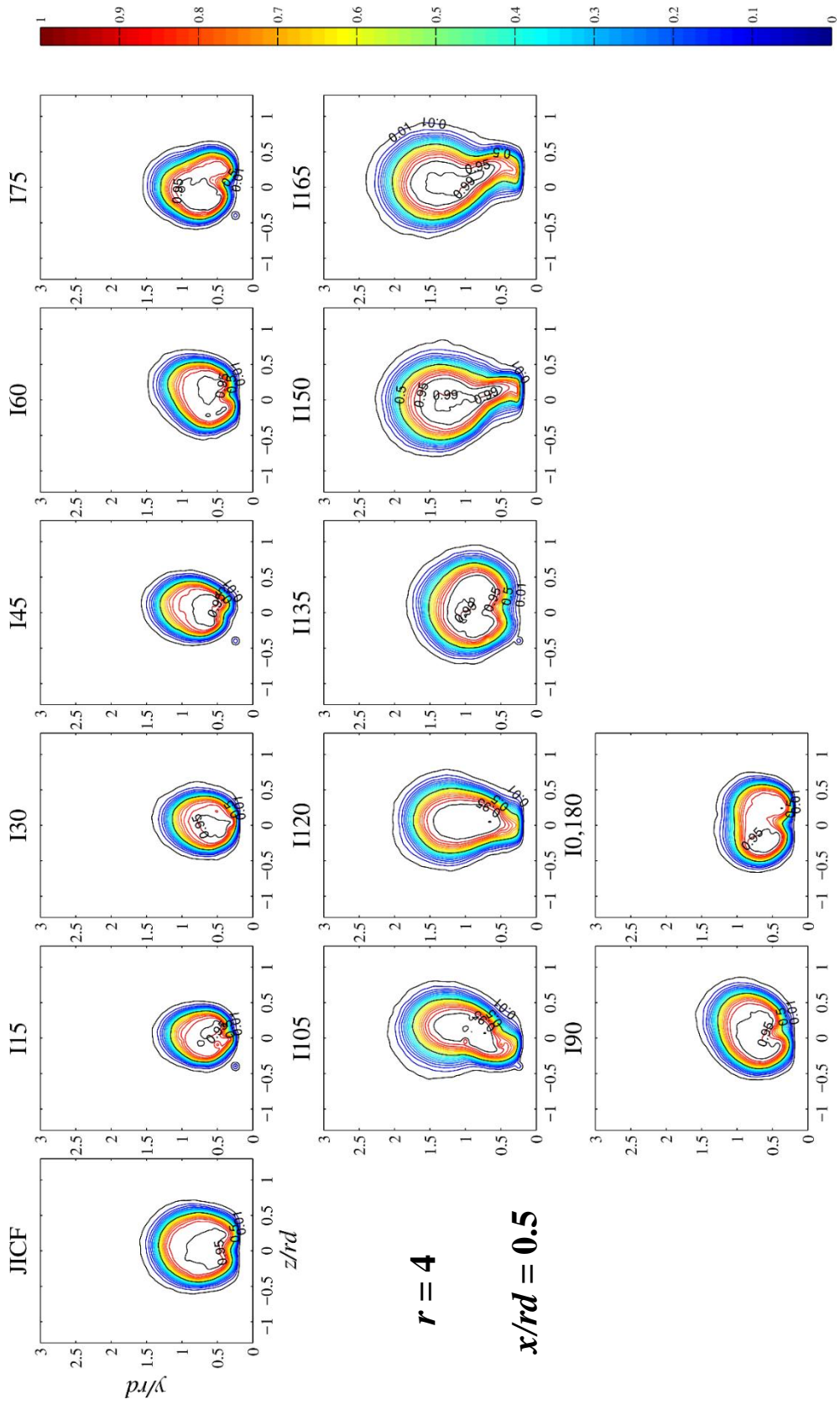
รูปที่ 4.17 ตำแหน่งในการวัดความเร็วที่สภาวะเริ่มต้นของเจ็ต



รูปที่ 4.18 ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ตตามแนวแกน y ที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีต่างๆ

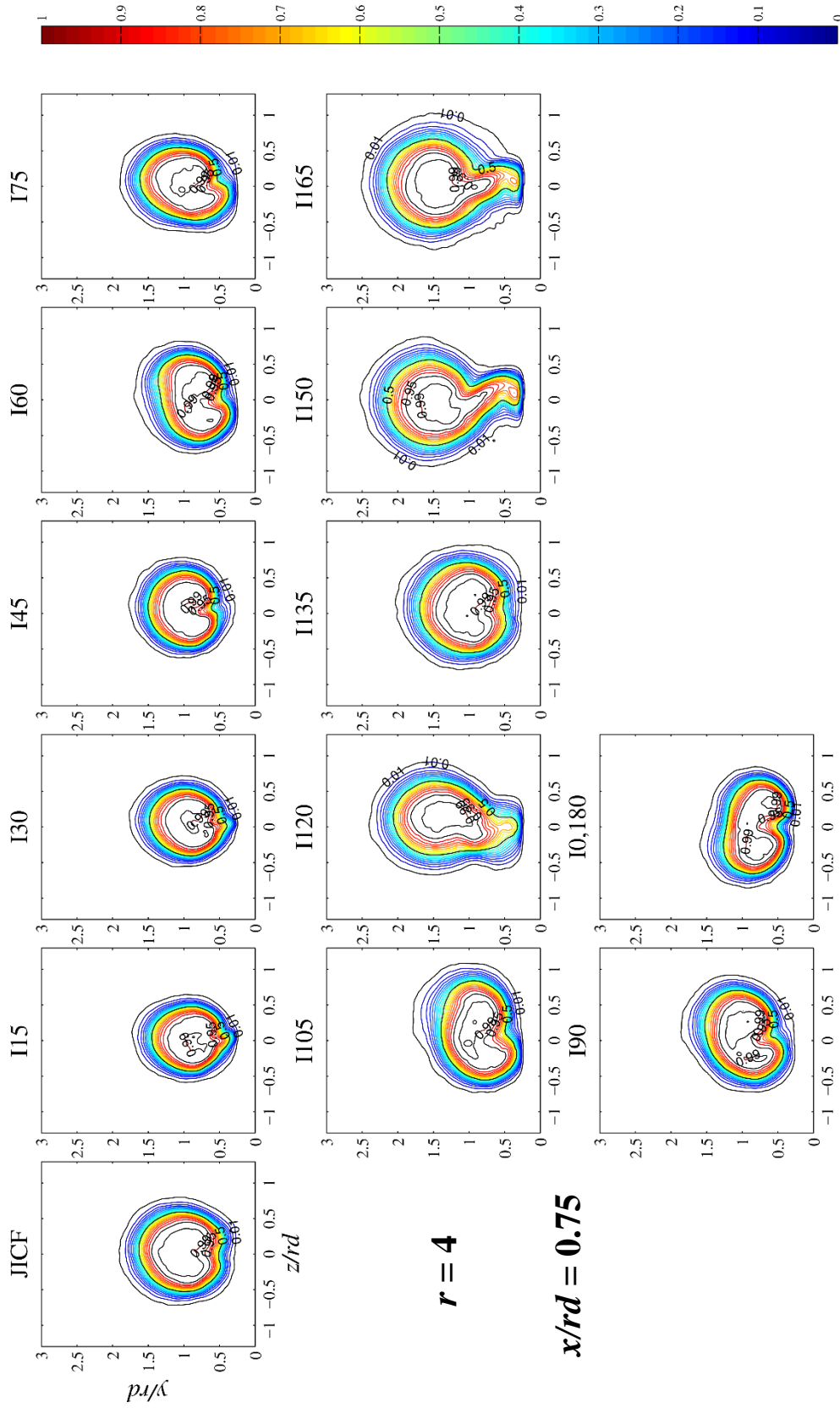


รูปที่ 4.19 Rotameter flow meter สำหรับเจ็ดควบคุม



$r = 4$
 $x/rd = 0.5$

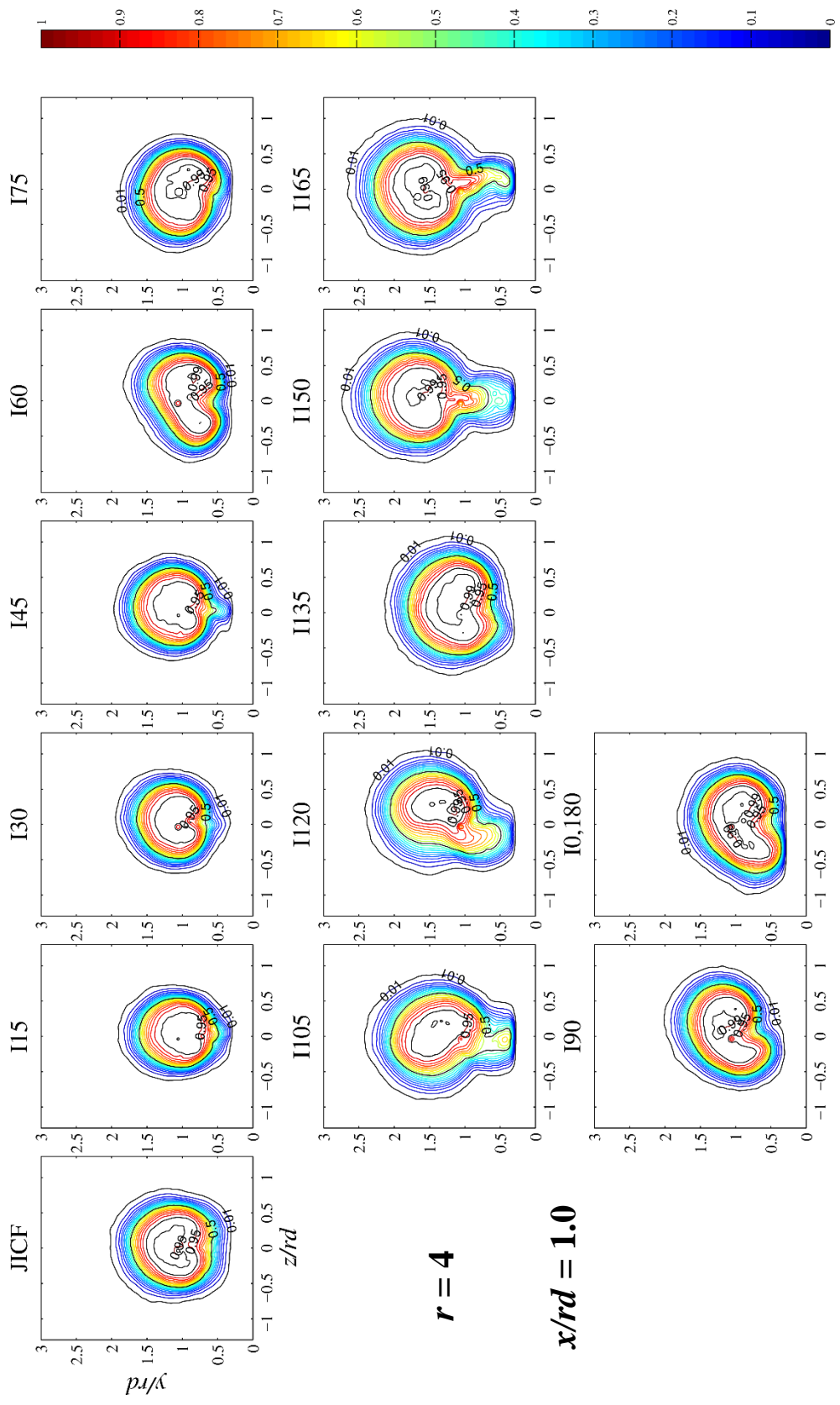
รูปที่ 5.1(ก) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ (ϕ_j) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง



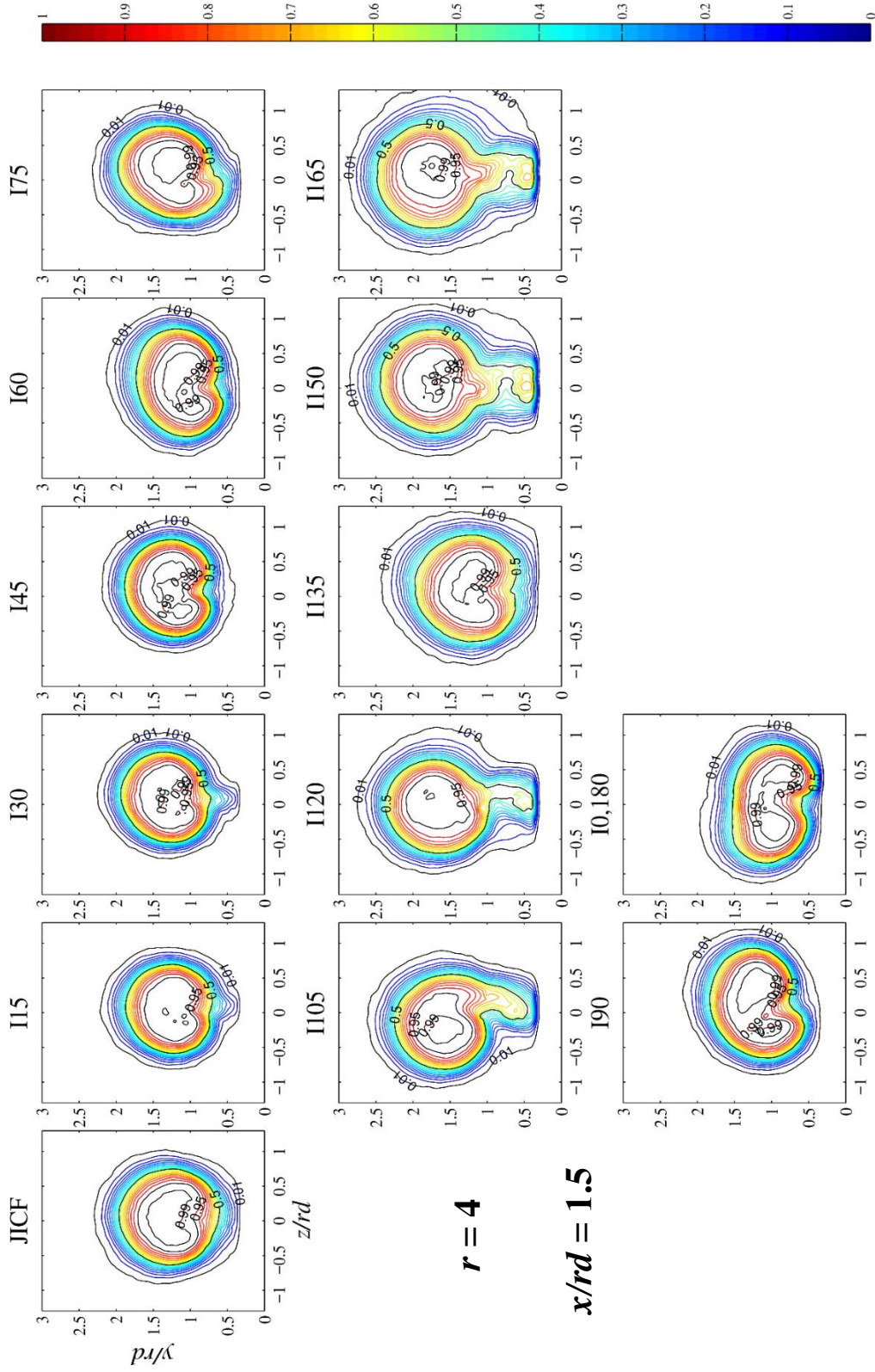
$r = 4$

$x/rd = 0.75$

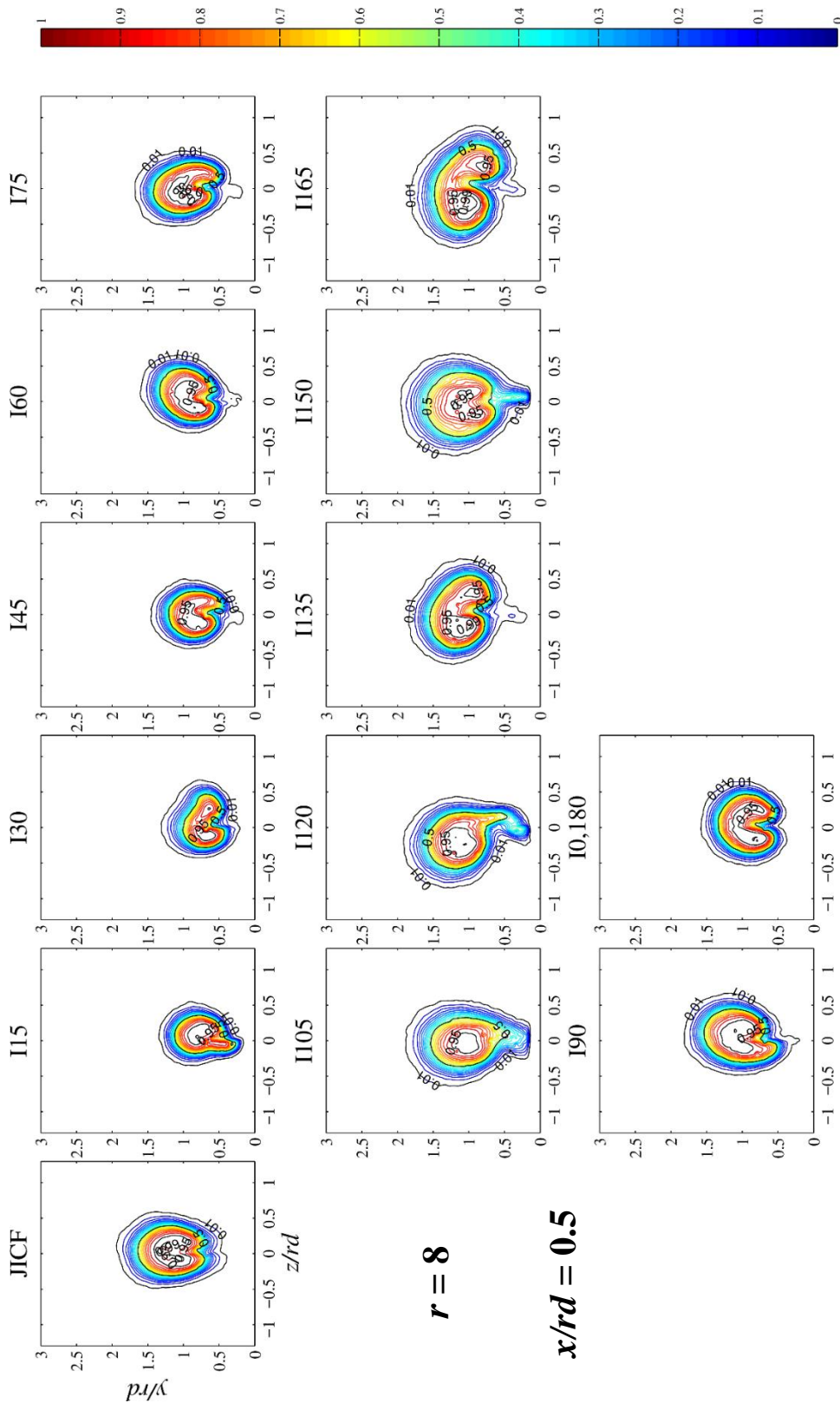
รูปที่ 5.1(๑) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จุดตัด (ϕ) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$



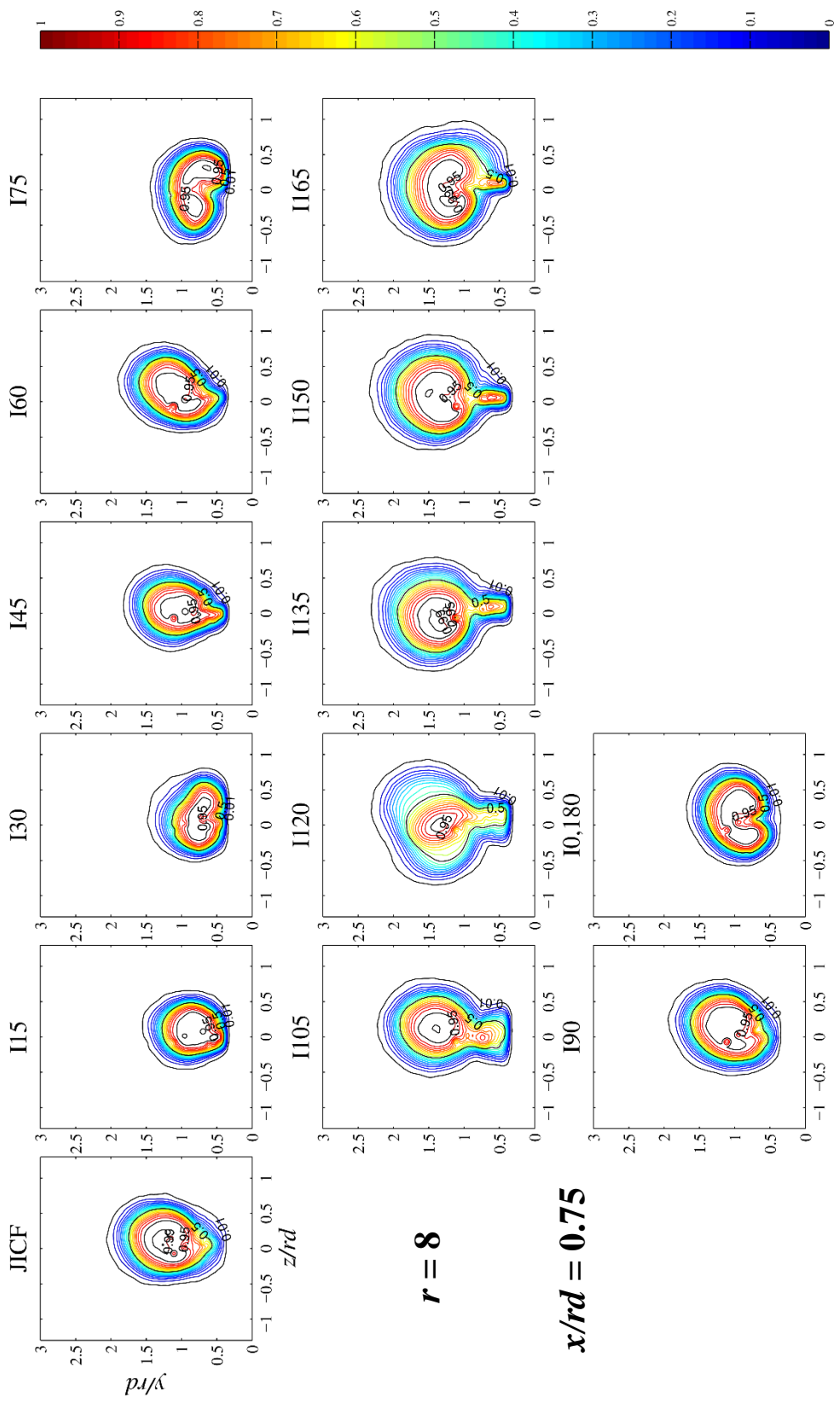
รูปที่ 5.1(ค) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$



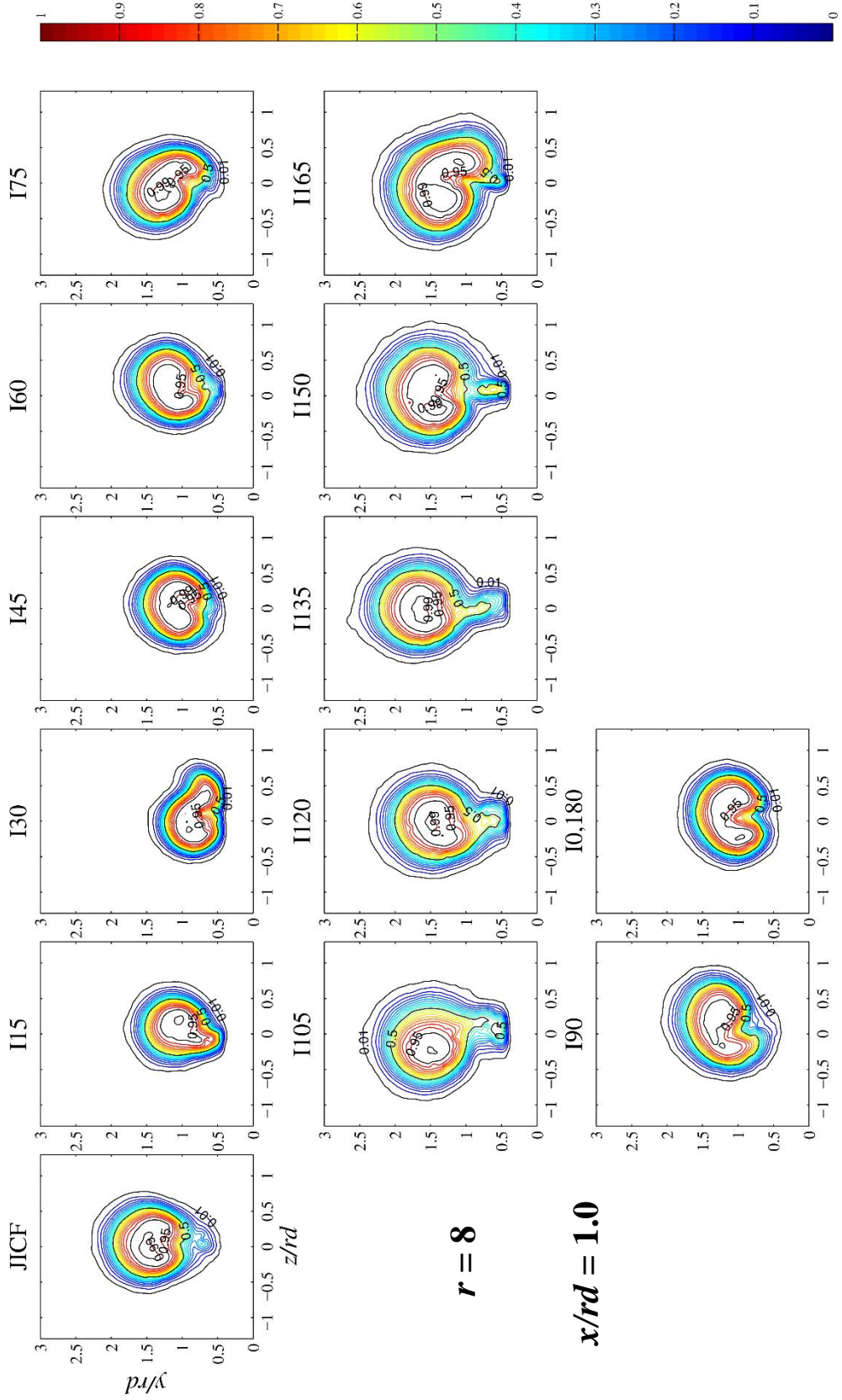
รูปที่ 5.1(ง) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ดที่จุดใดๆ (ϕ) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$



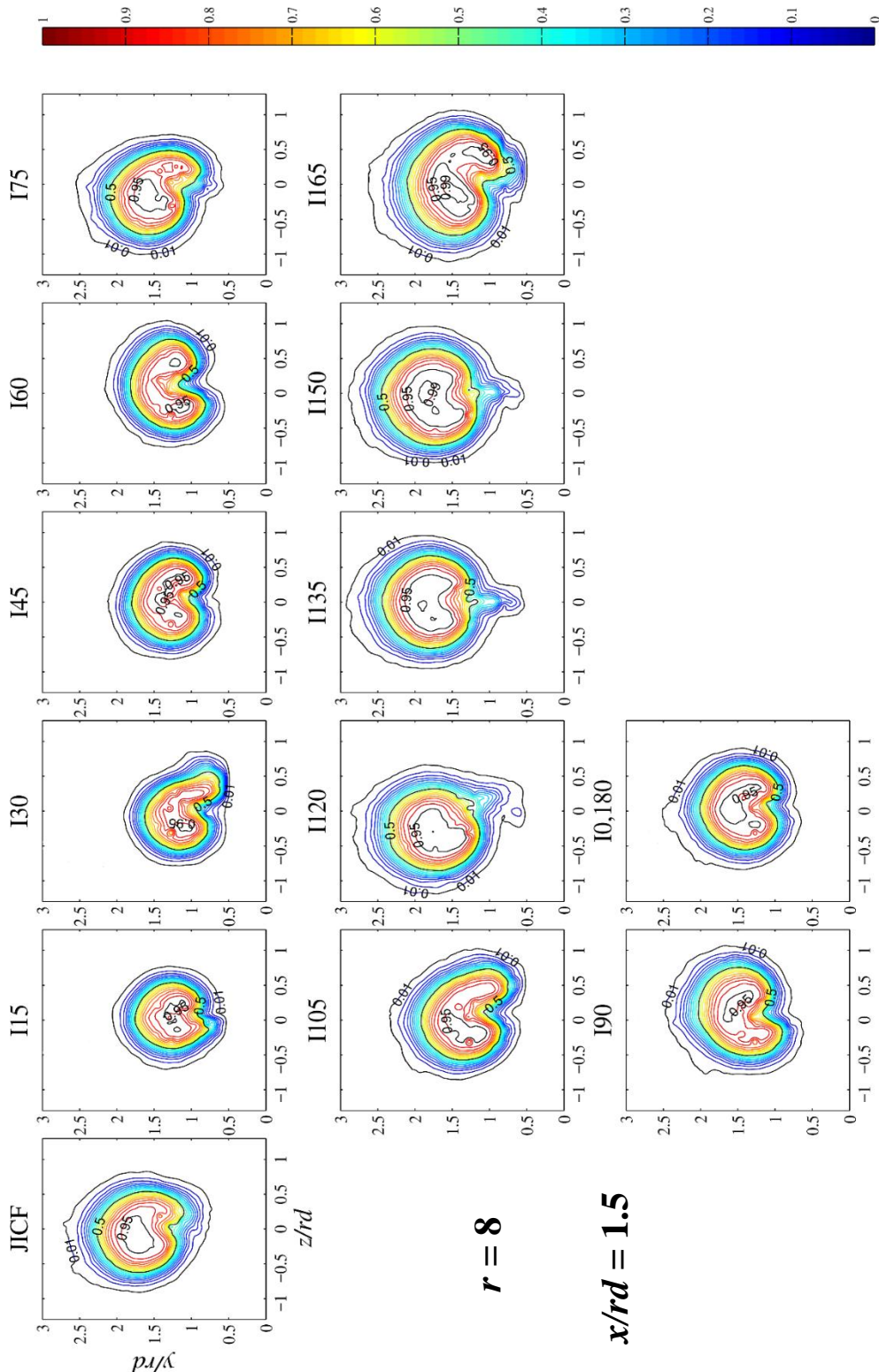
รูปที่ 5.1(๓) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$



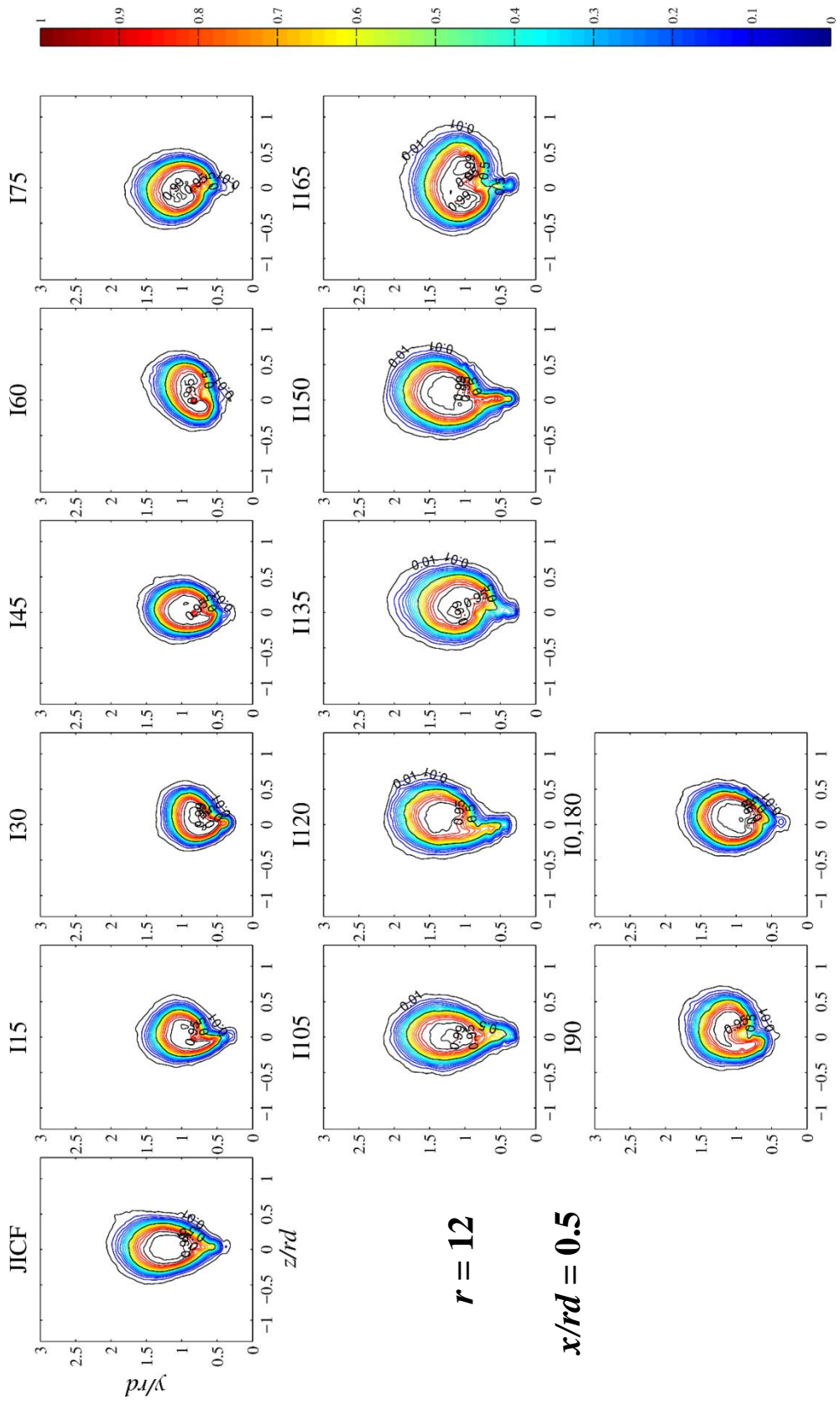
รูปที่ 5.1(ค) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$



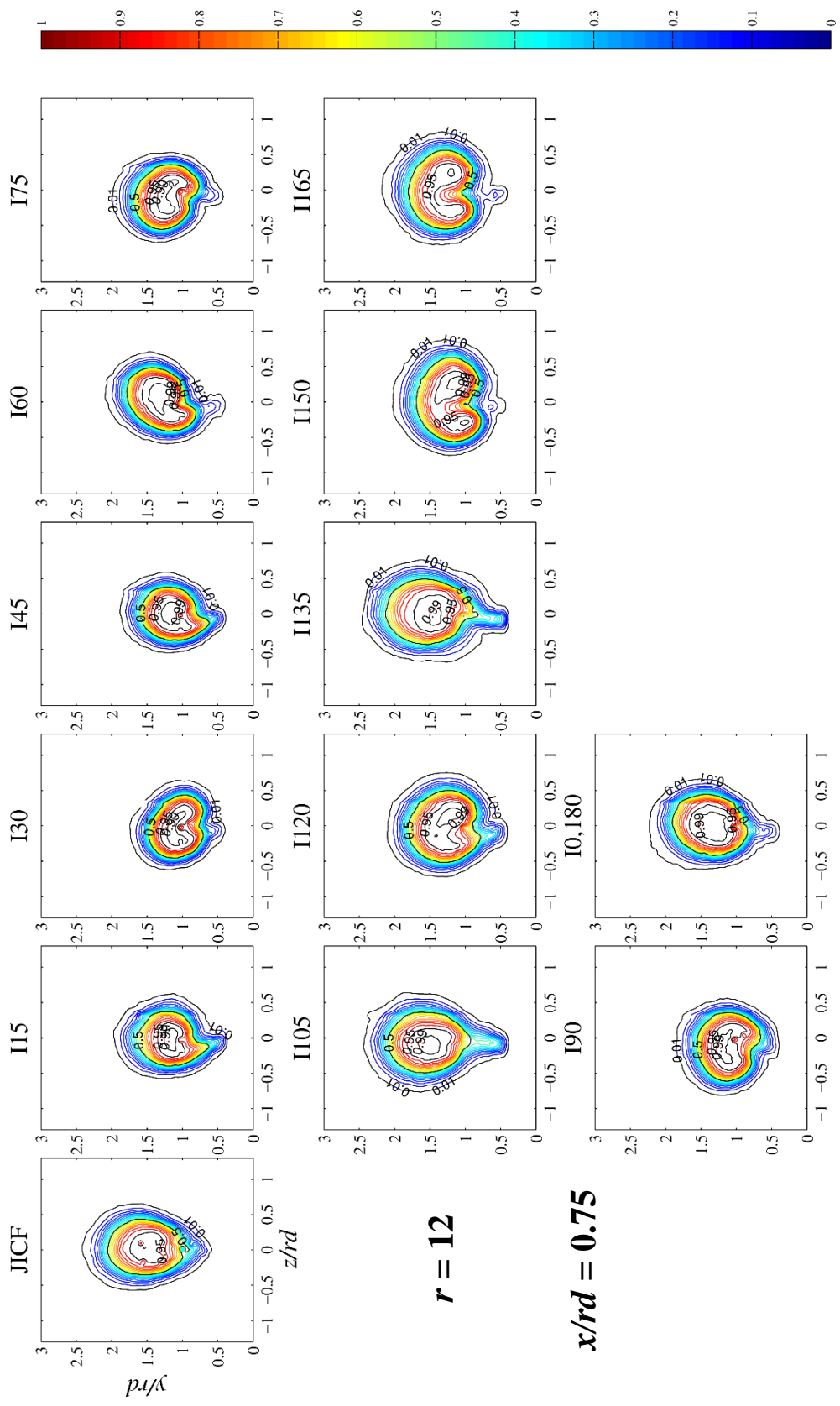
รูปที่ 5.1(ข) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่พบเจ็ตที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/r_d=1.0$



รูปที่ 5.1(ซ) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใด ๆ (ϕ_j) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$



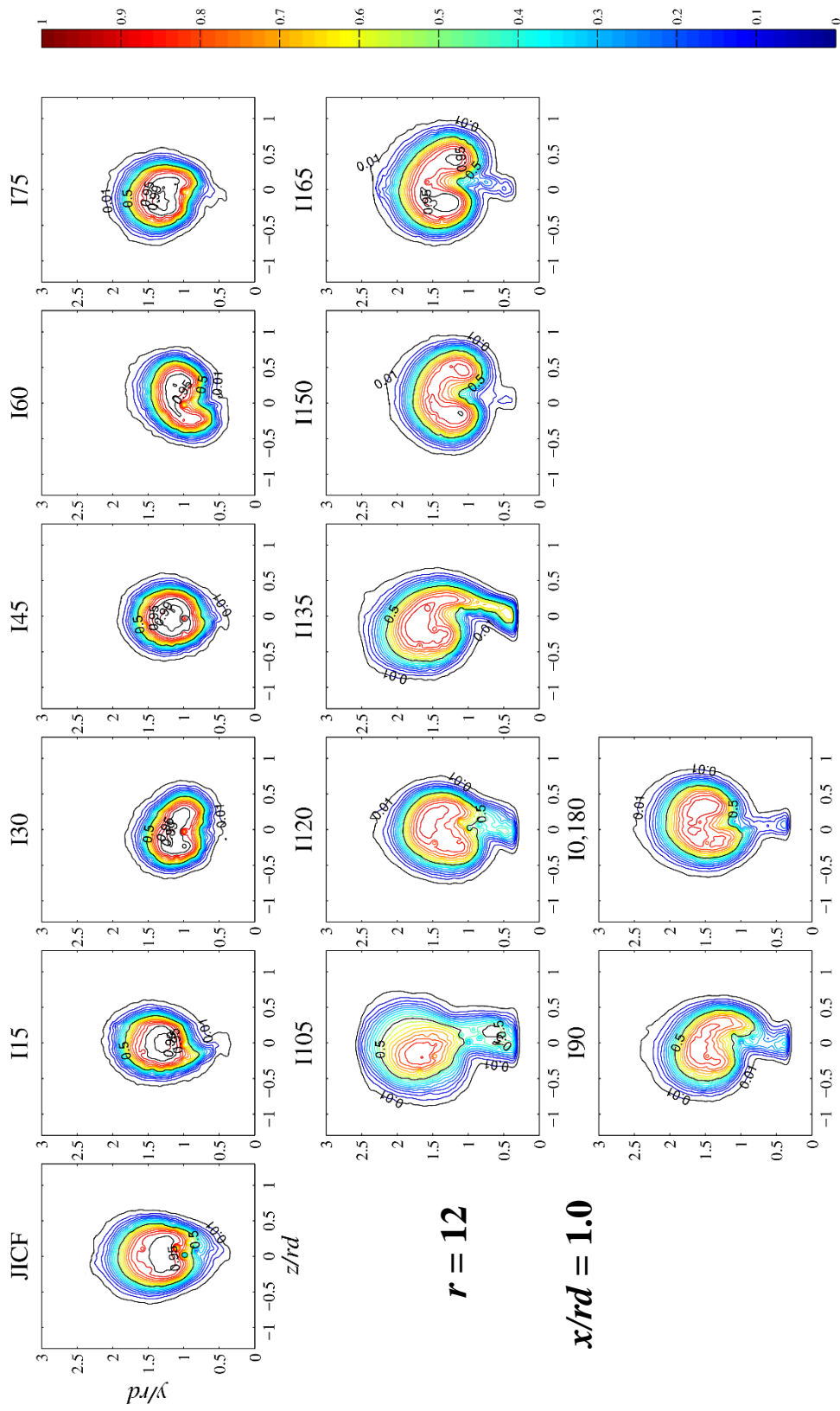
รูปที่ 5.1(ฉ) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$



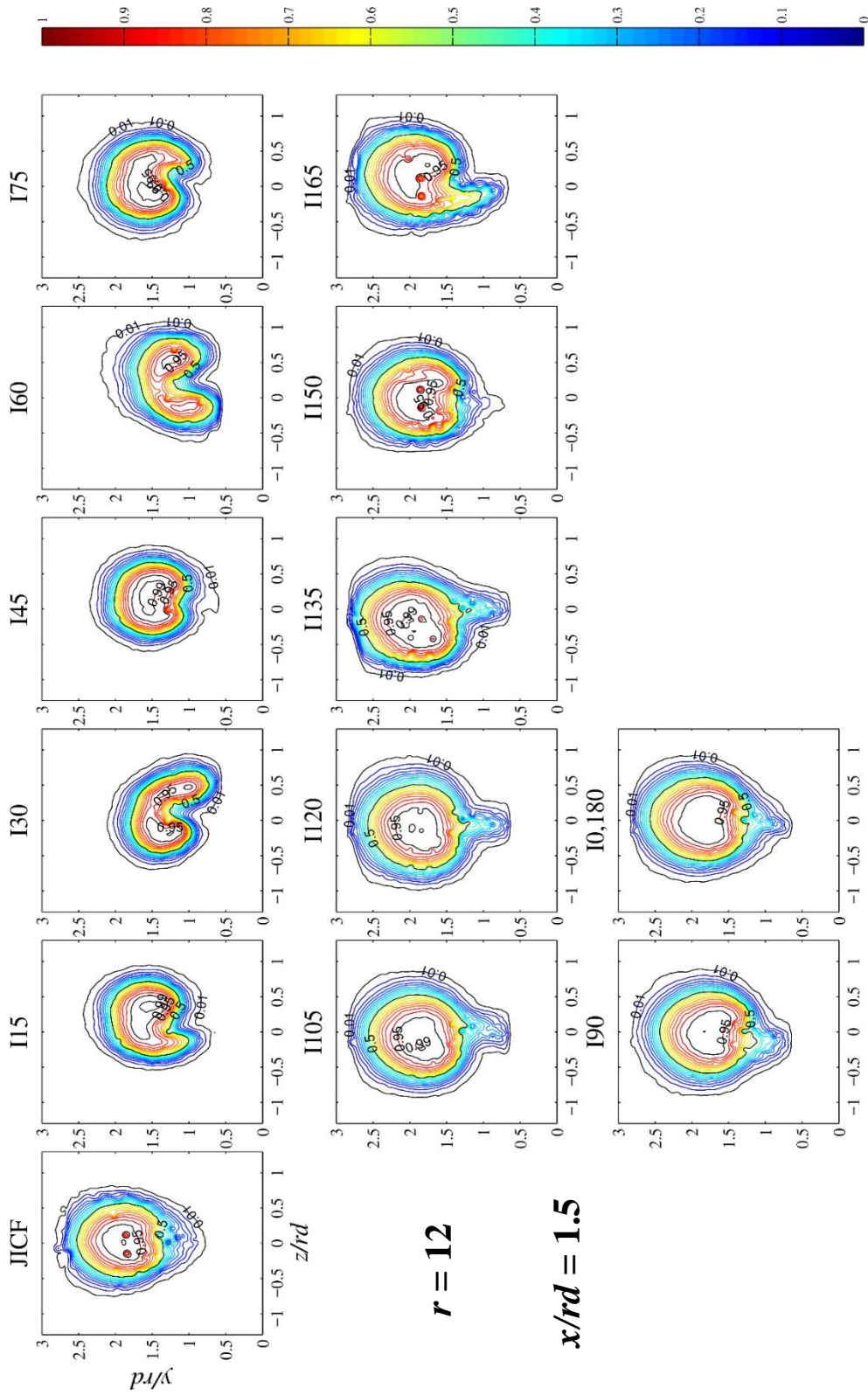
$r = 12$

$x/rd = 0.75$

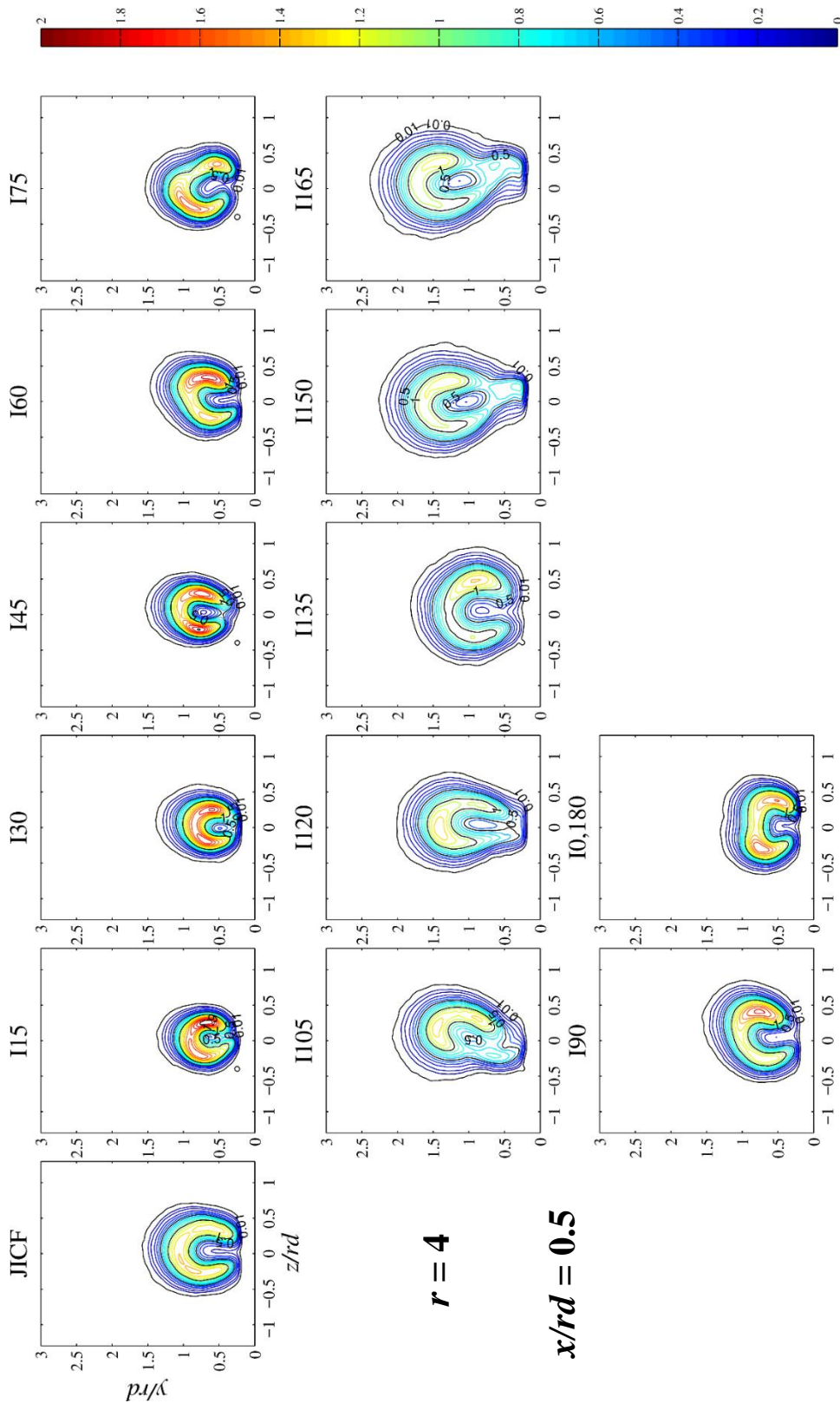
รูปที่ 5.1(ญ) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงเวลาที่จะพบเจ็ตที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง



รูปที่ 5.1(ก) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงพื้นที่จุดใดๆ (ϕ_i) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$



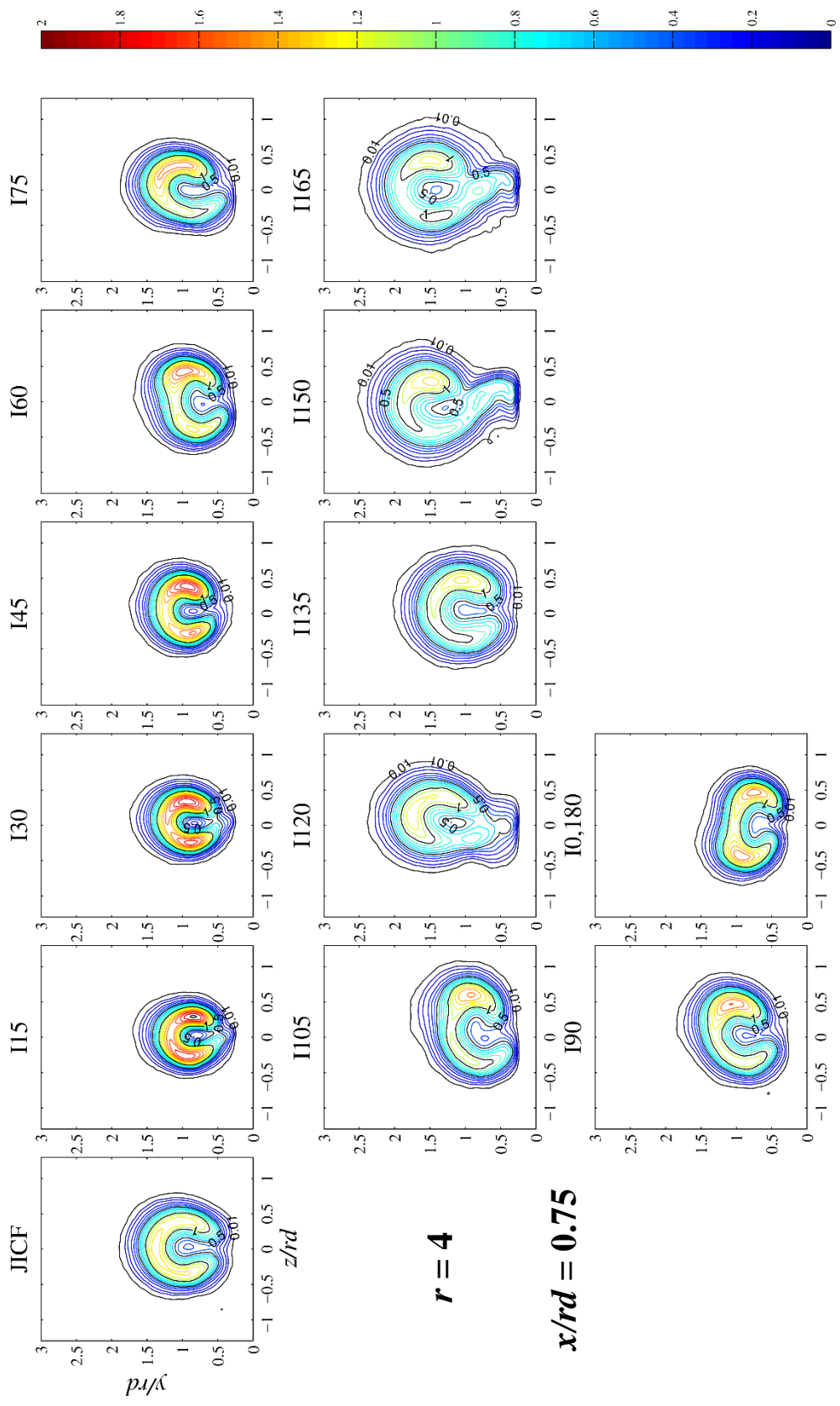
รูปที่ 5.1(ก) การกระจายตัวของความน่าจะเป็นเชิงวงกลมที่จุดใดๆ (ϕ_j) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$



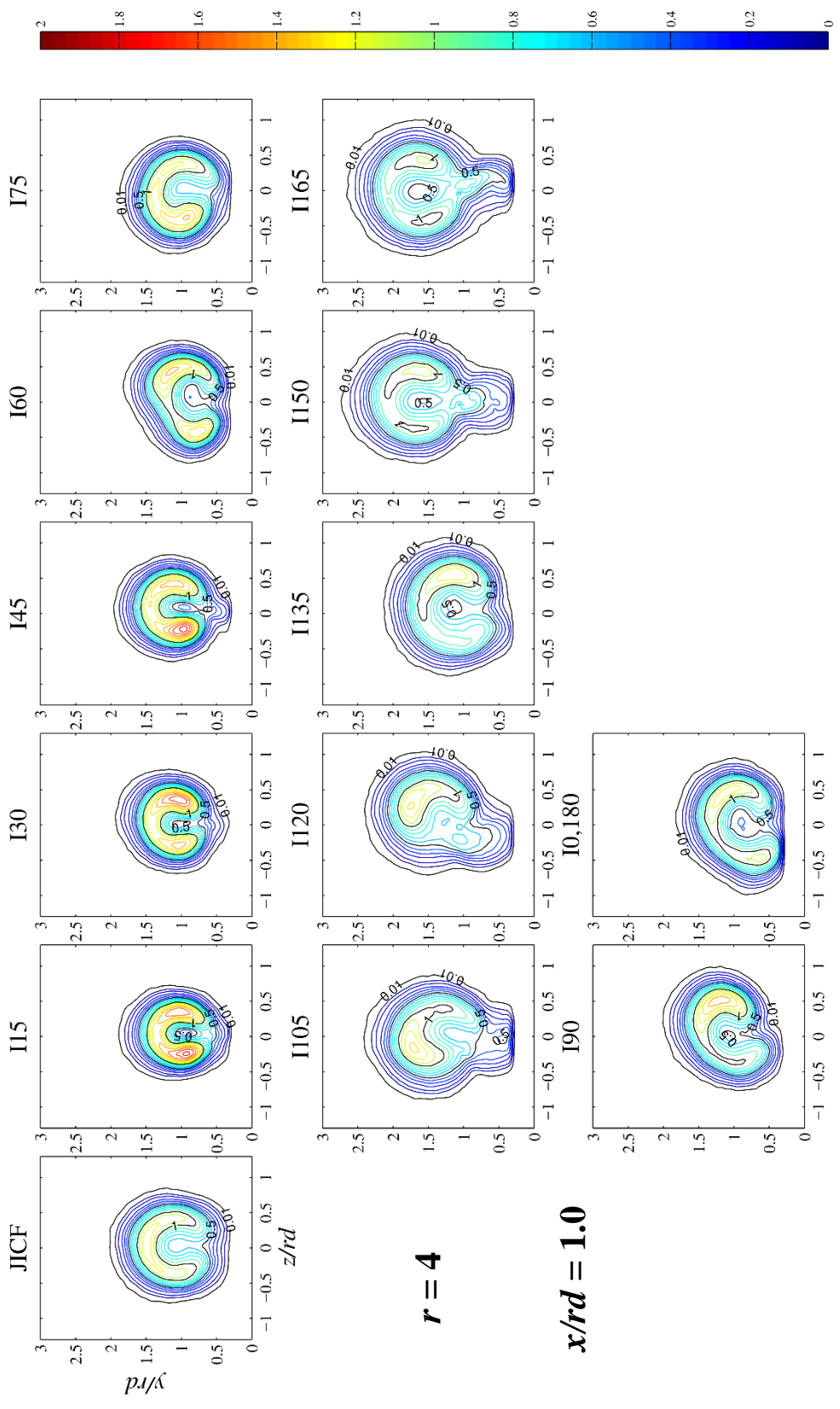
$r = 4$

$x/rd = 0.5$

รูปที่ 5.2(ก) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสมุมขวาง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$



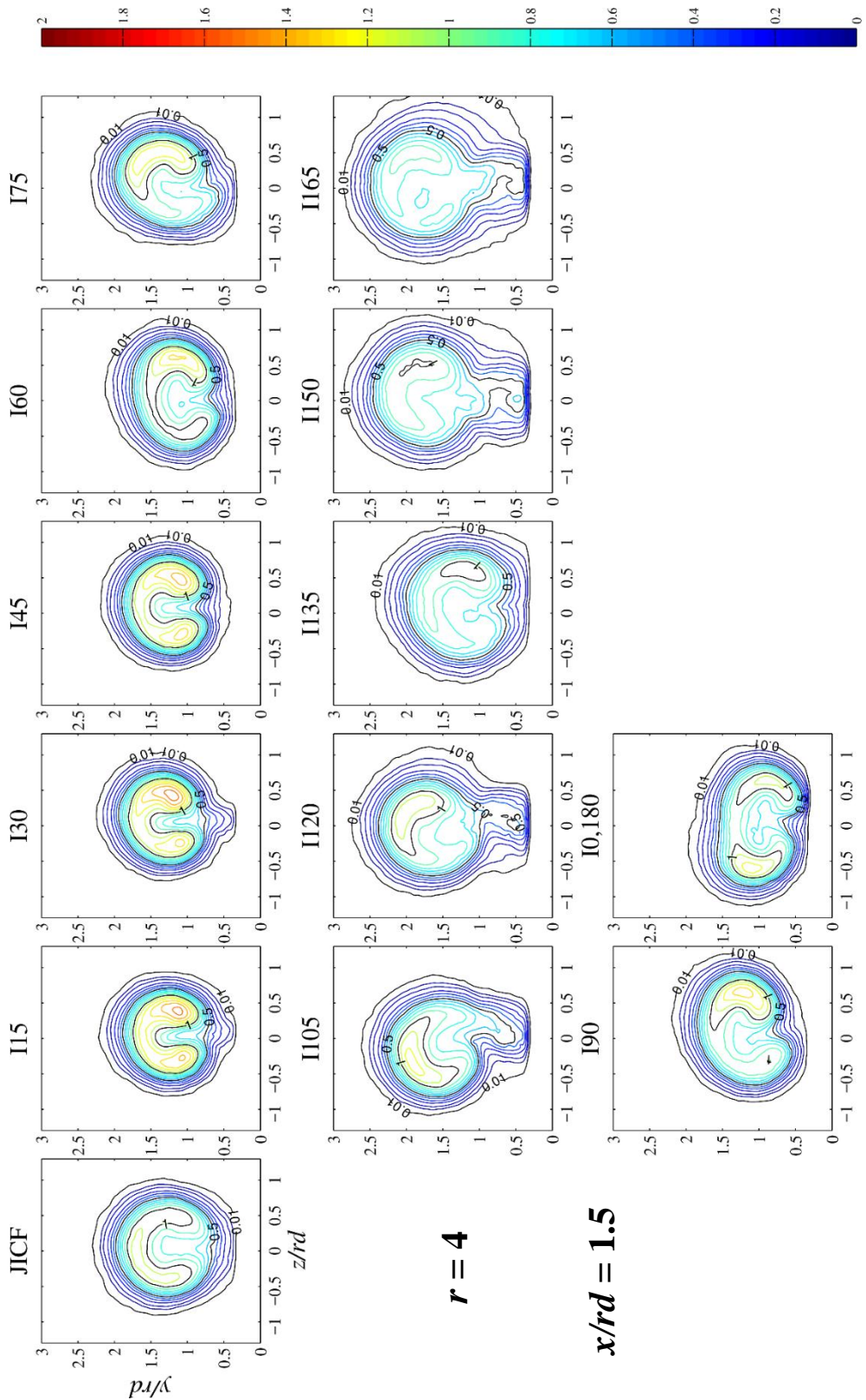
รูปที่ 5.2(๑) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสสมทวง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$



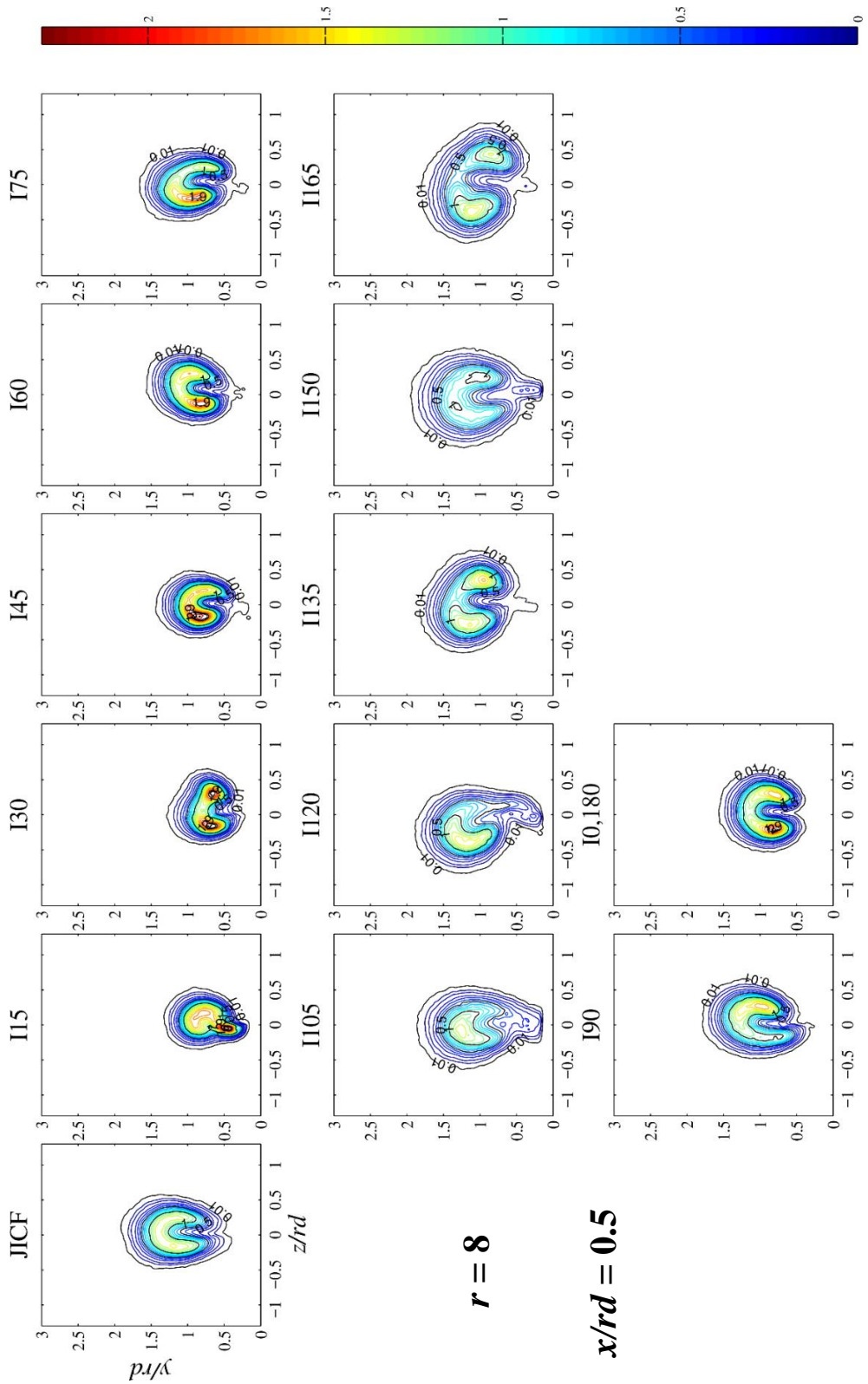
$r = 4$

$x/rd = 1.0$

รูปที่ 5.2(ค) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสมวง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$



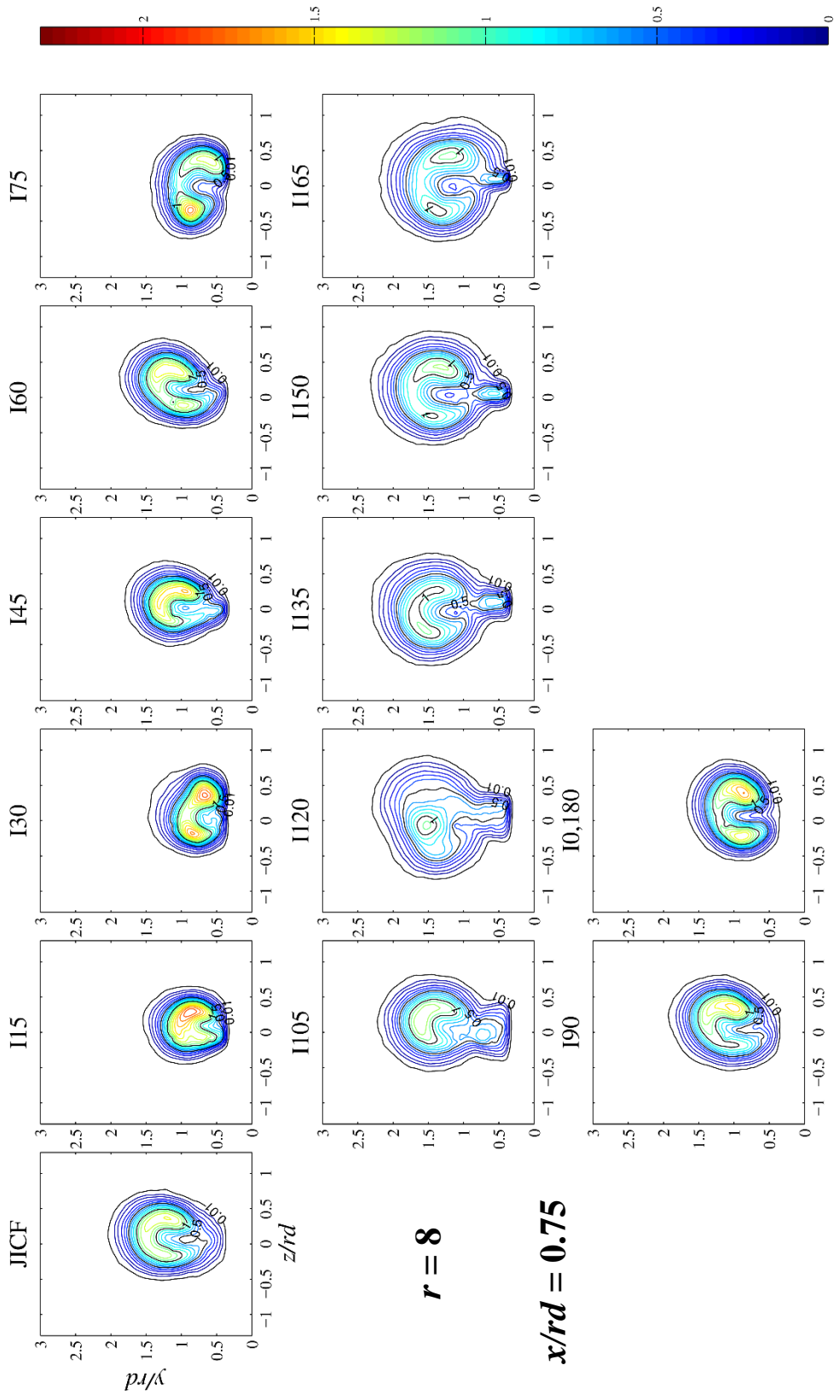
รูปที่ 5.2(จ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$



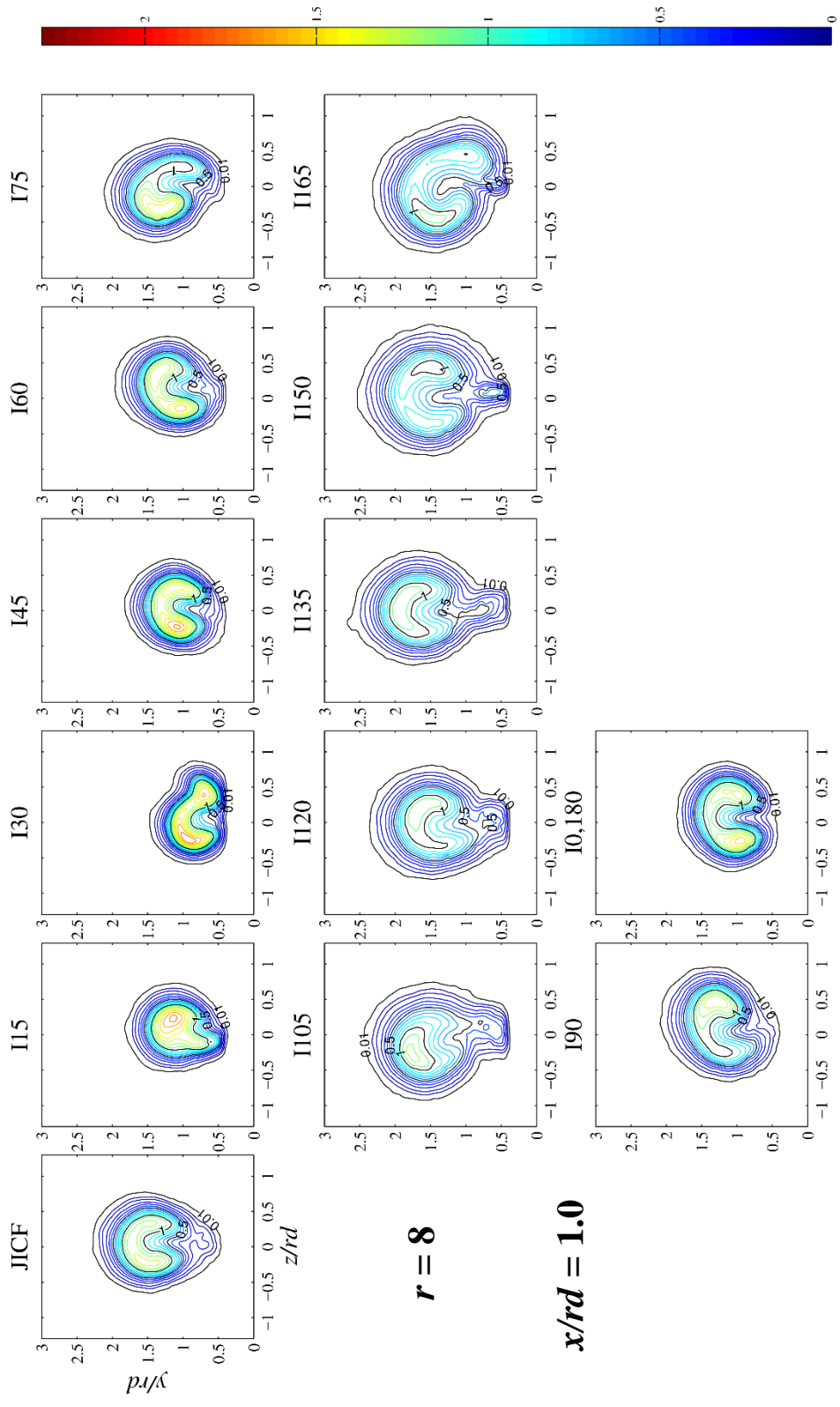
$r = 8$

$x/rd = 0.5$

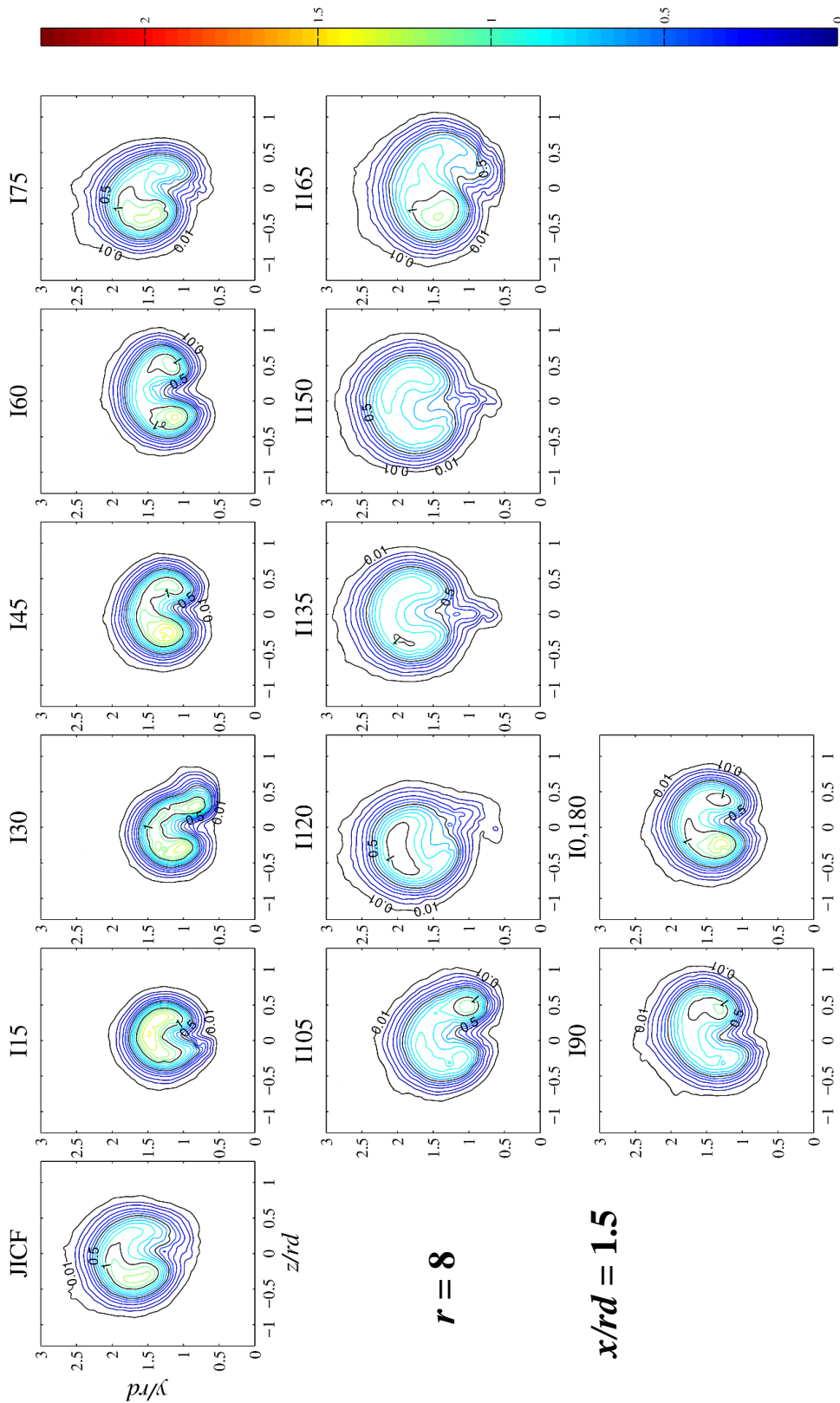
รูปที่ 5.2(จ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$



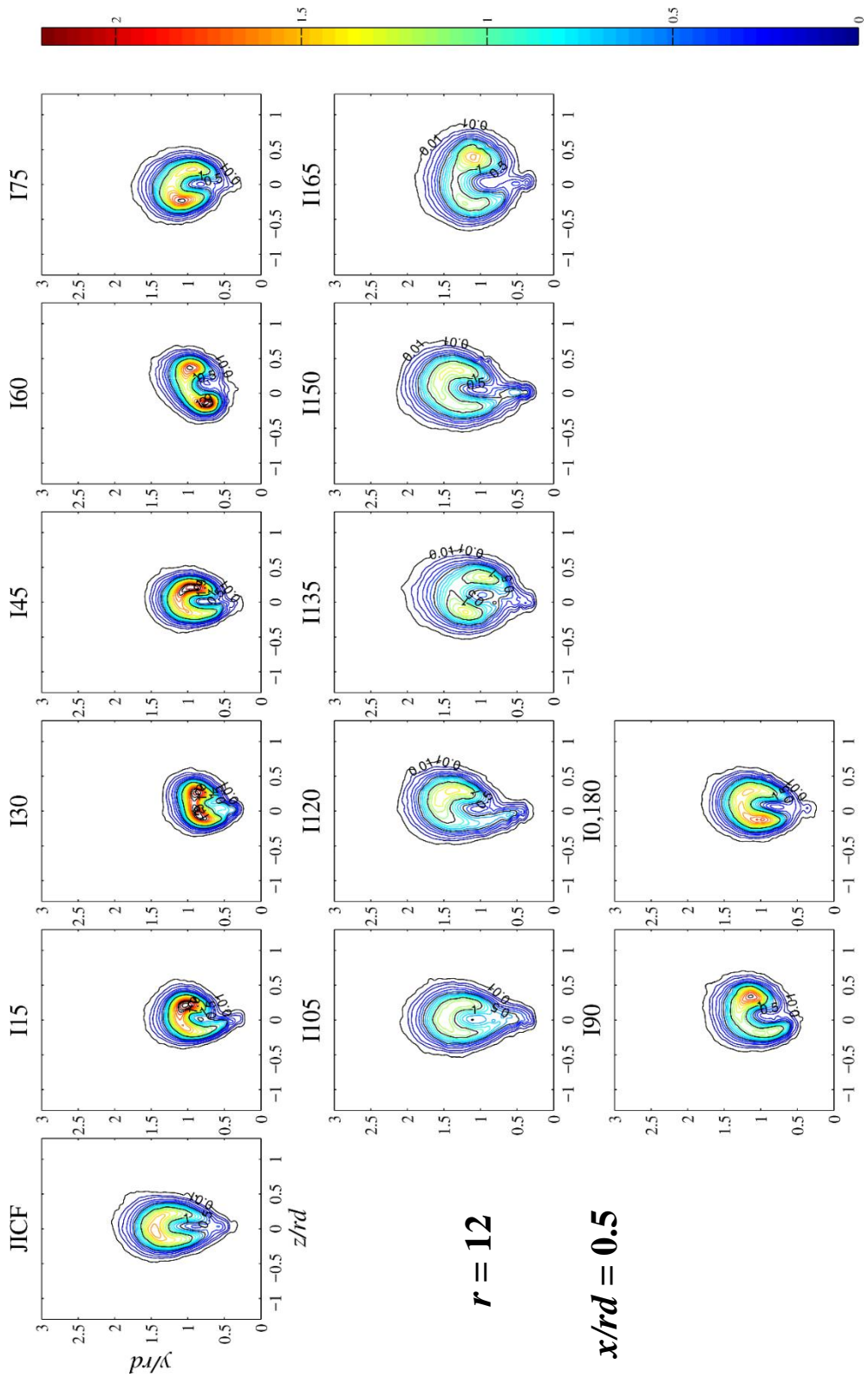
รูปที่ 5.2(ฉ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยที่ตัดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสสมมาตรวง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$



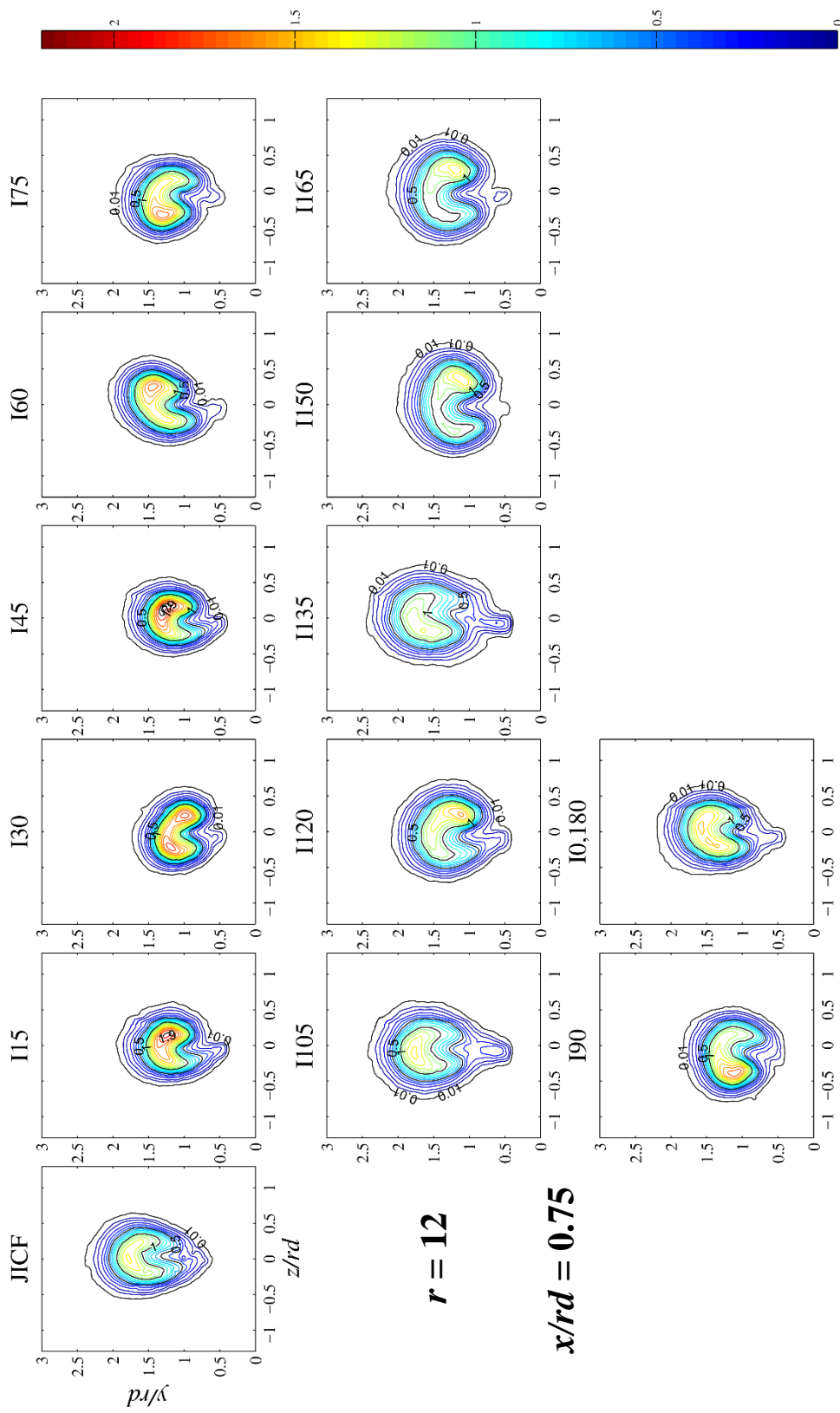
รูปที่ 5.2(๗) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสตรงของ (V_x / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$



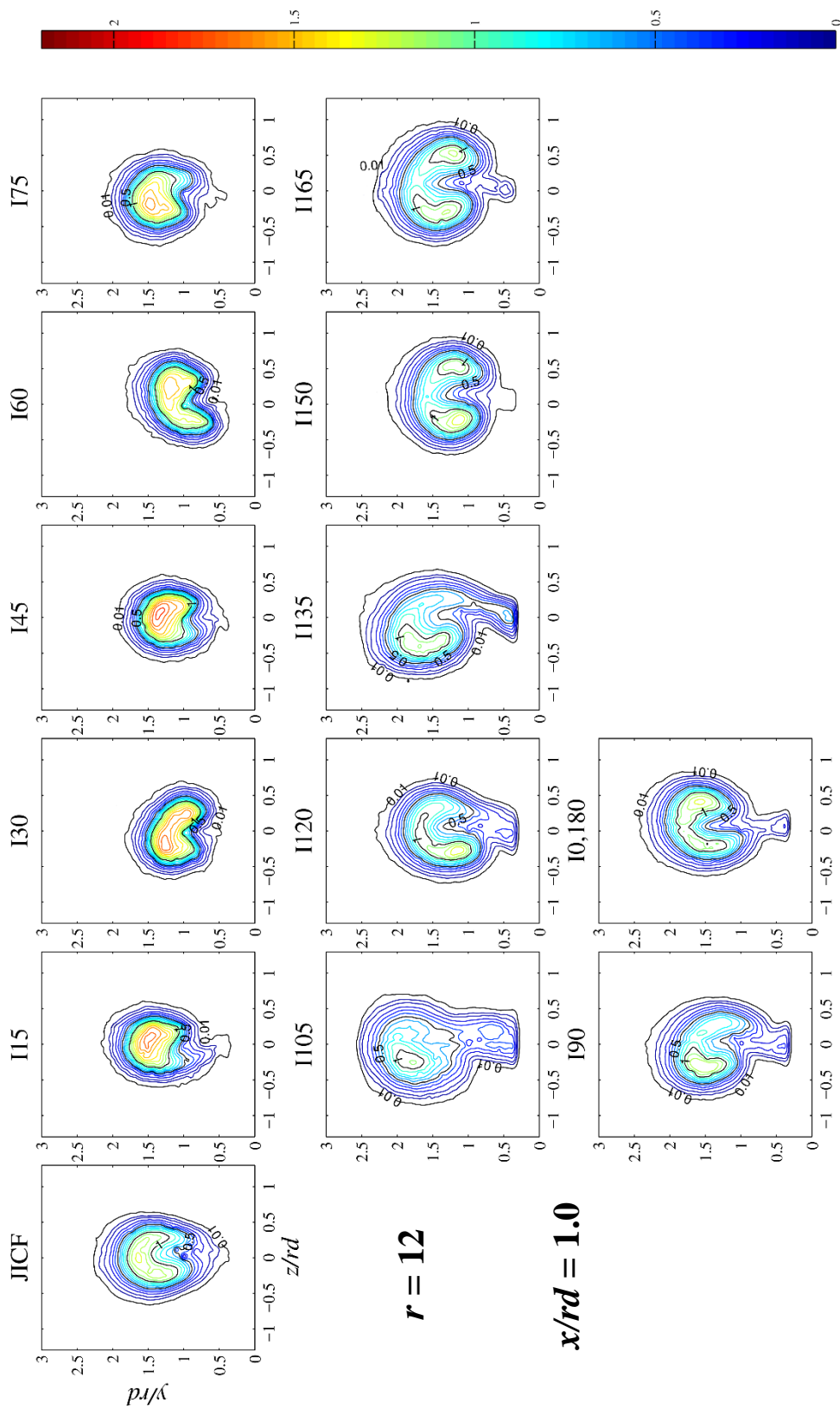
รูปที่ 5.2(ข) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยที่จุดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสสมขวาง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$



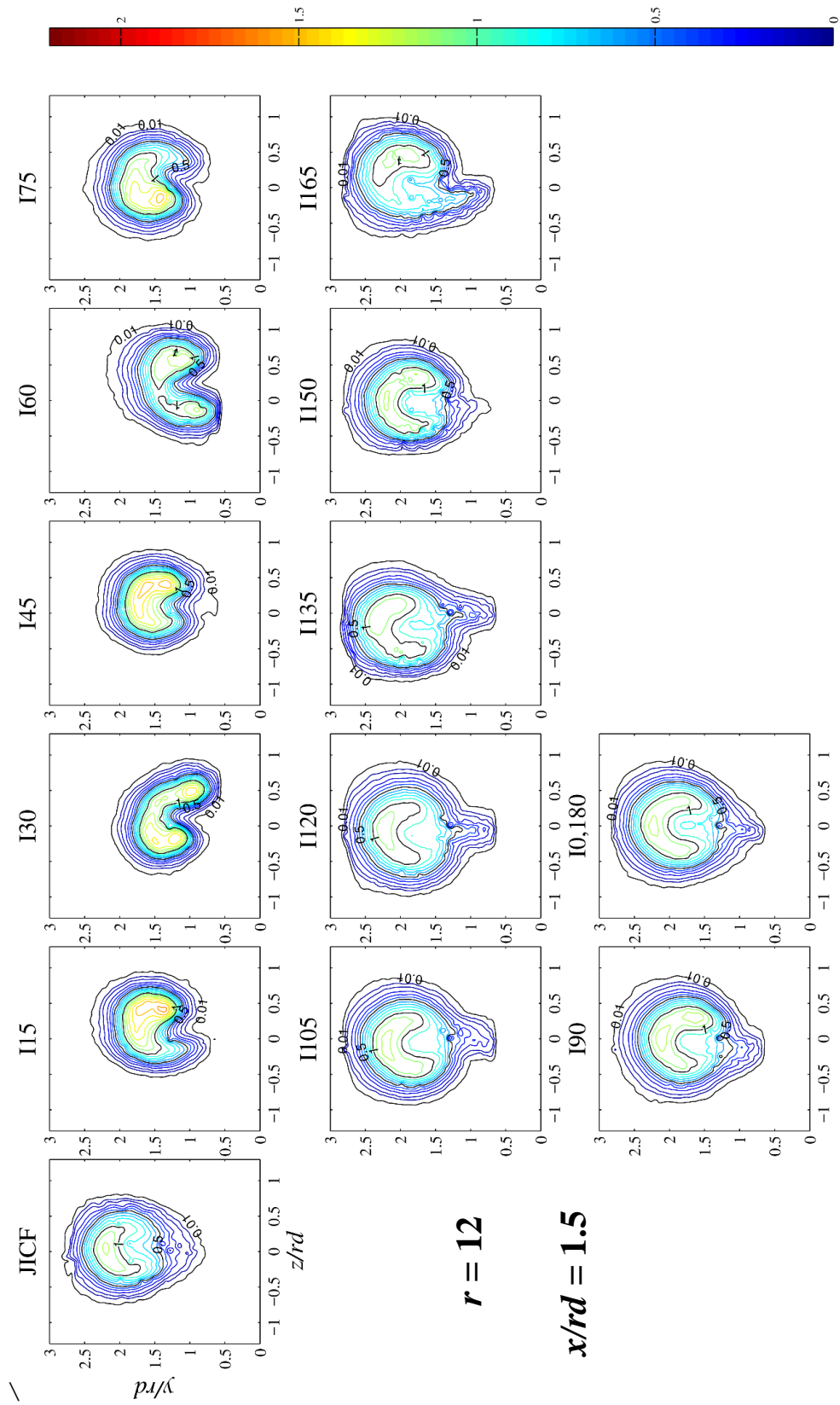
รูปที่ 5.2(ฉ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยที่ตัดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสกลาง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$



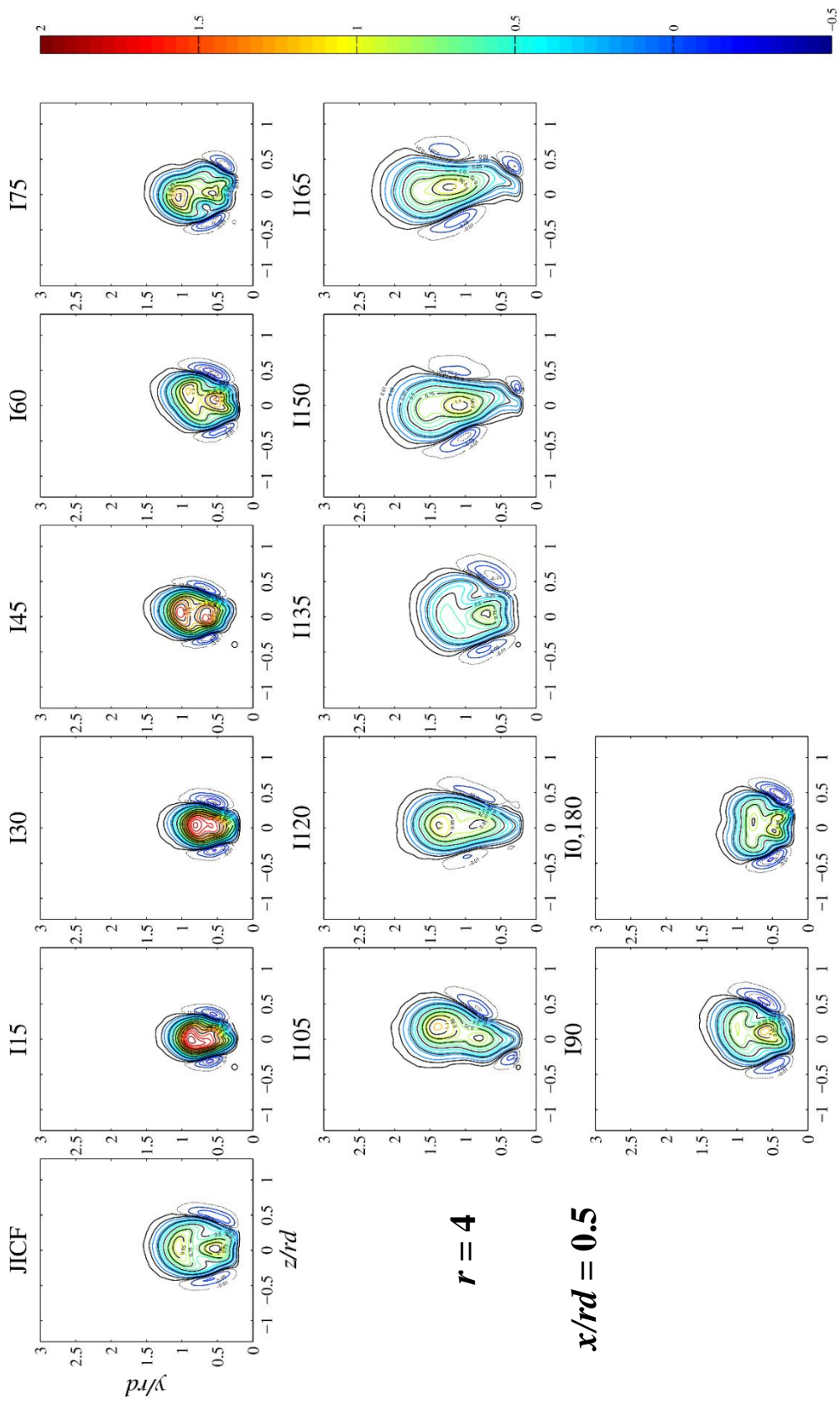
รูปที่ 5.2(ญ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยที่ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสสมขวาง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$



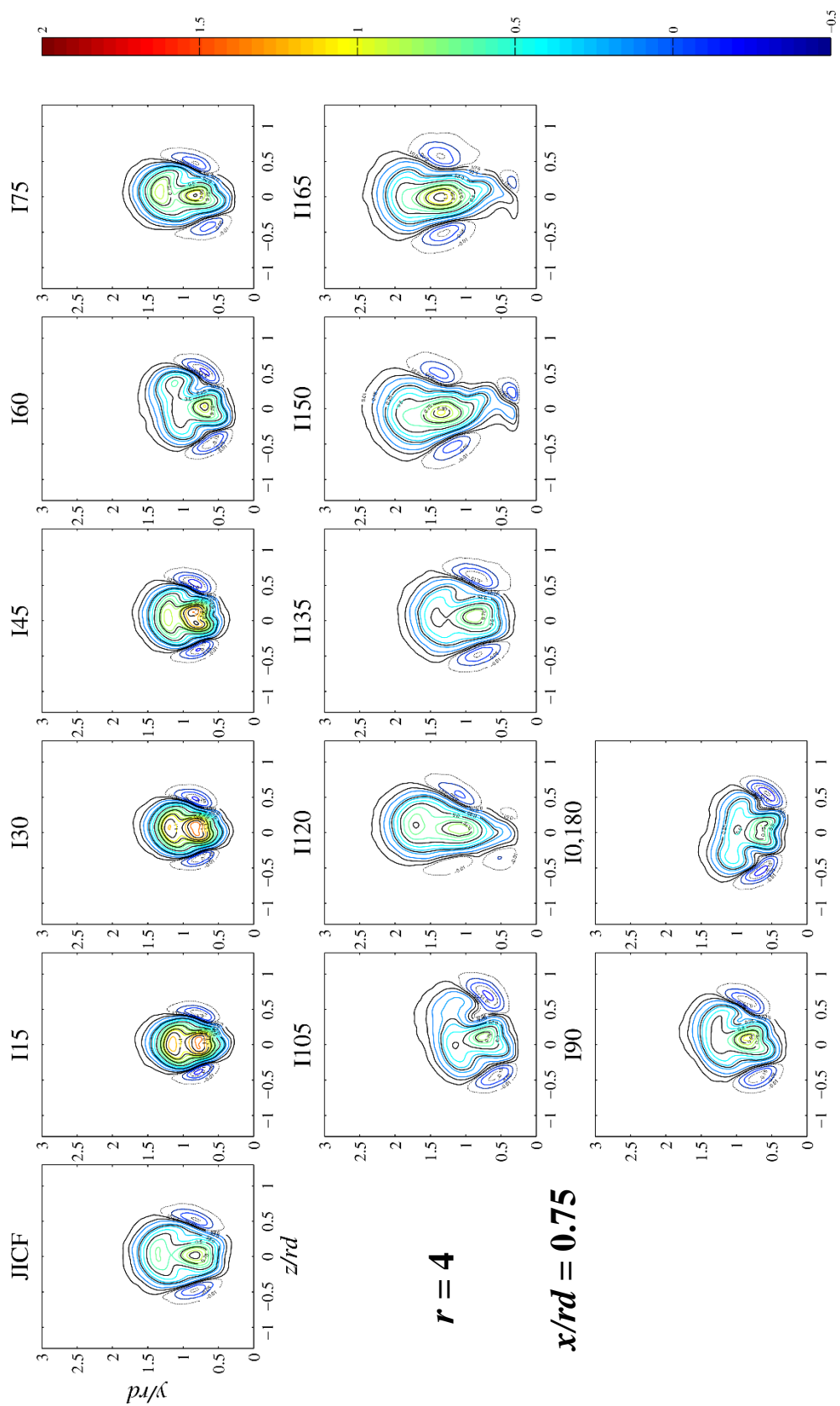
รูปที่ 5.2(ก) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยที่ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสวนของ (V_x / u_{cf}) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$



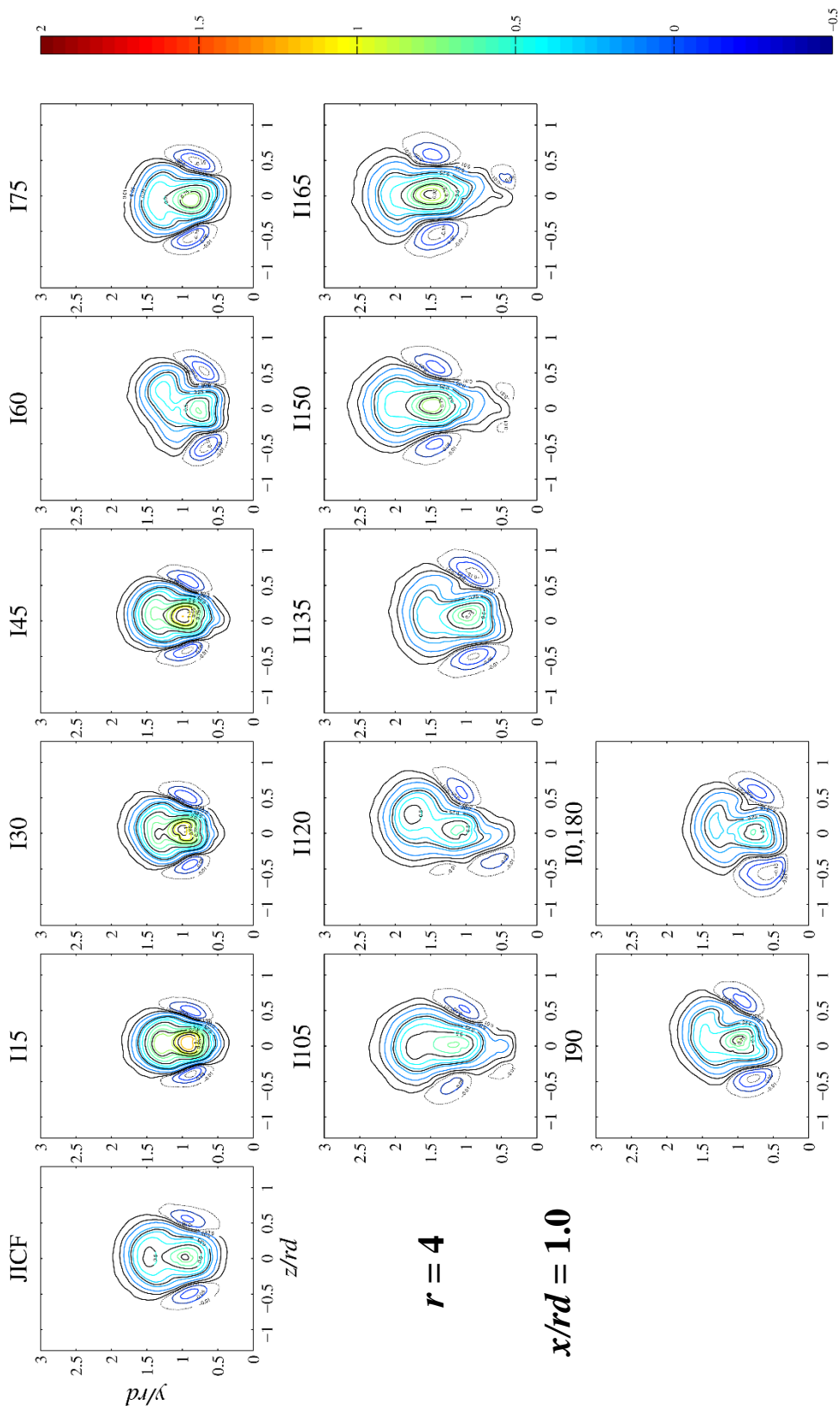
รูปที่ 5.2(ก) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสสมของวง (V_x / u_{cf}) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$



รูปที่ 5.3(ก) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน y ต่อความเร็วกระแสผสมขวาง (V_y / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$



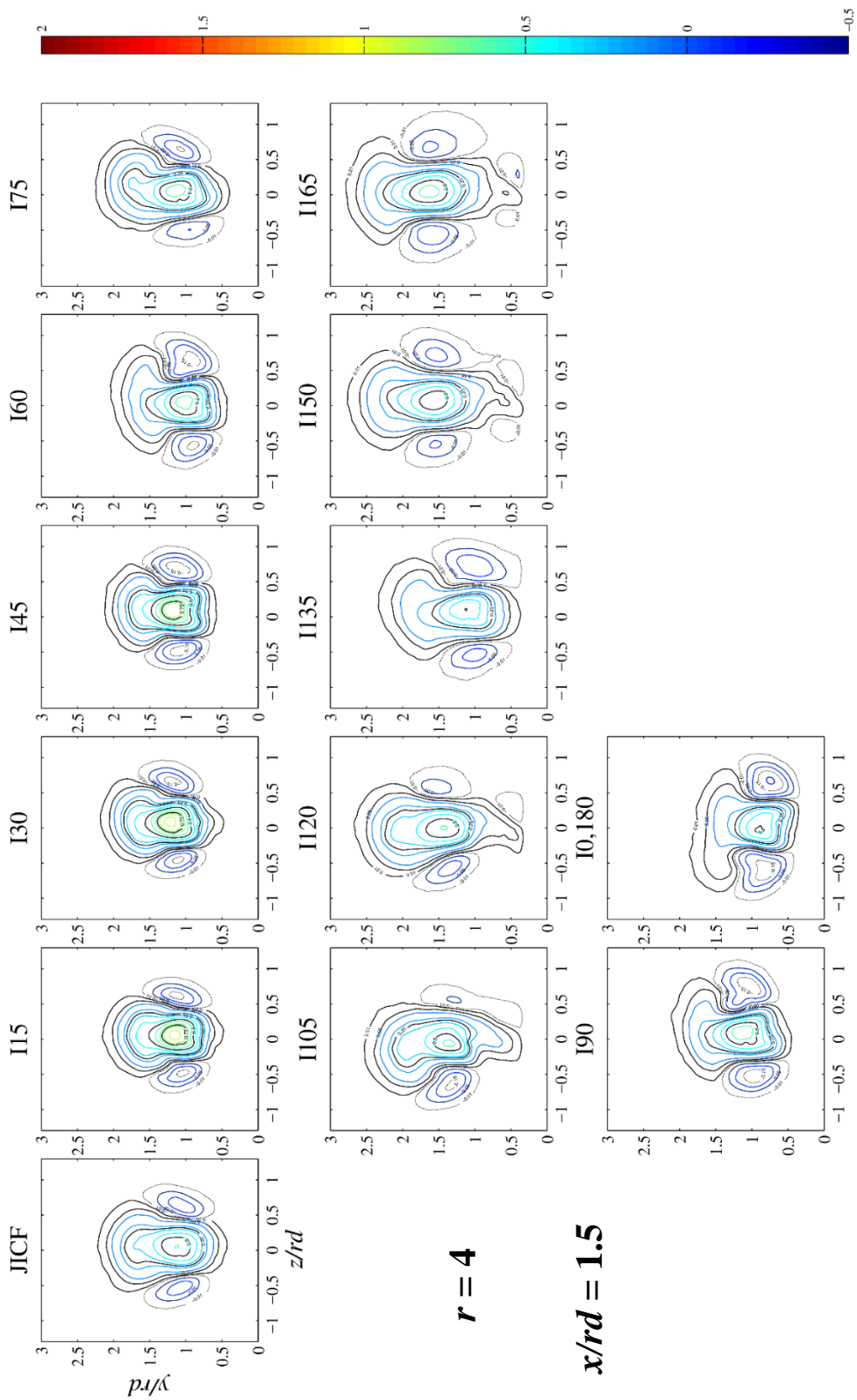
รูปที่ 5.3(๓) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยที่ตัดตามแนวแกน y ต่อความเร็วกระแสสมขวาง (V_y / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$



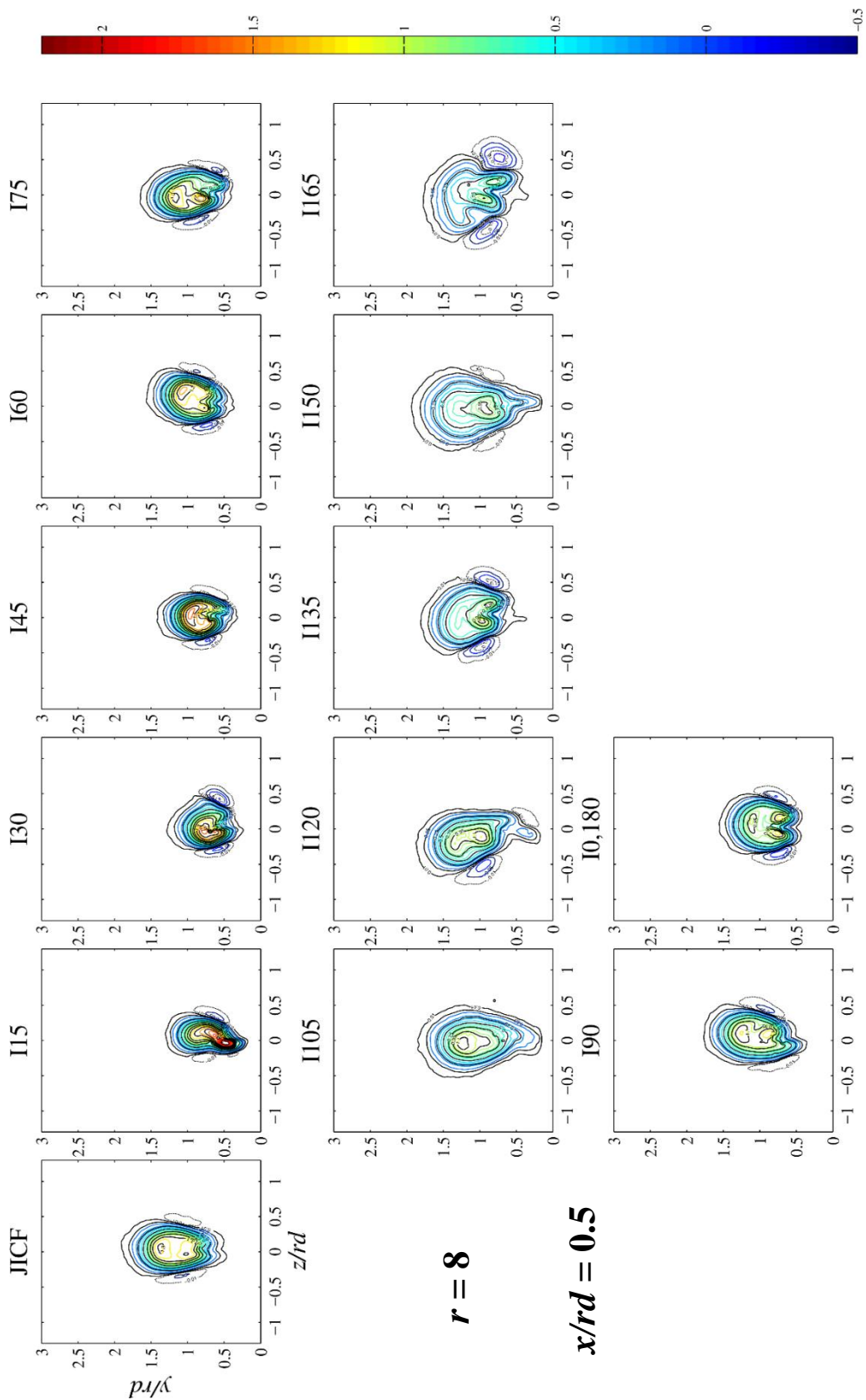
$r = 4$

$x/rd = 1.0$

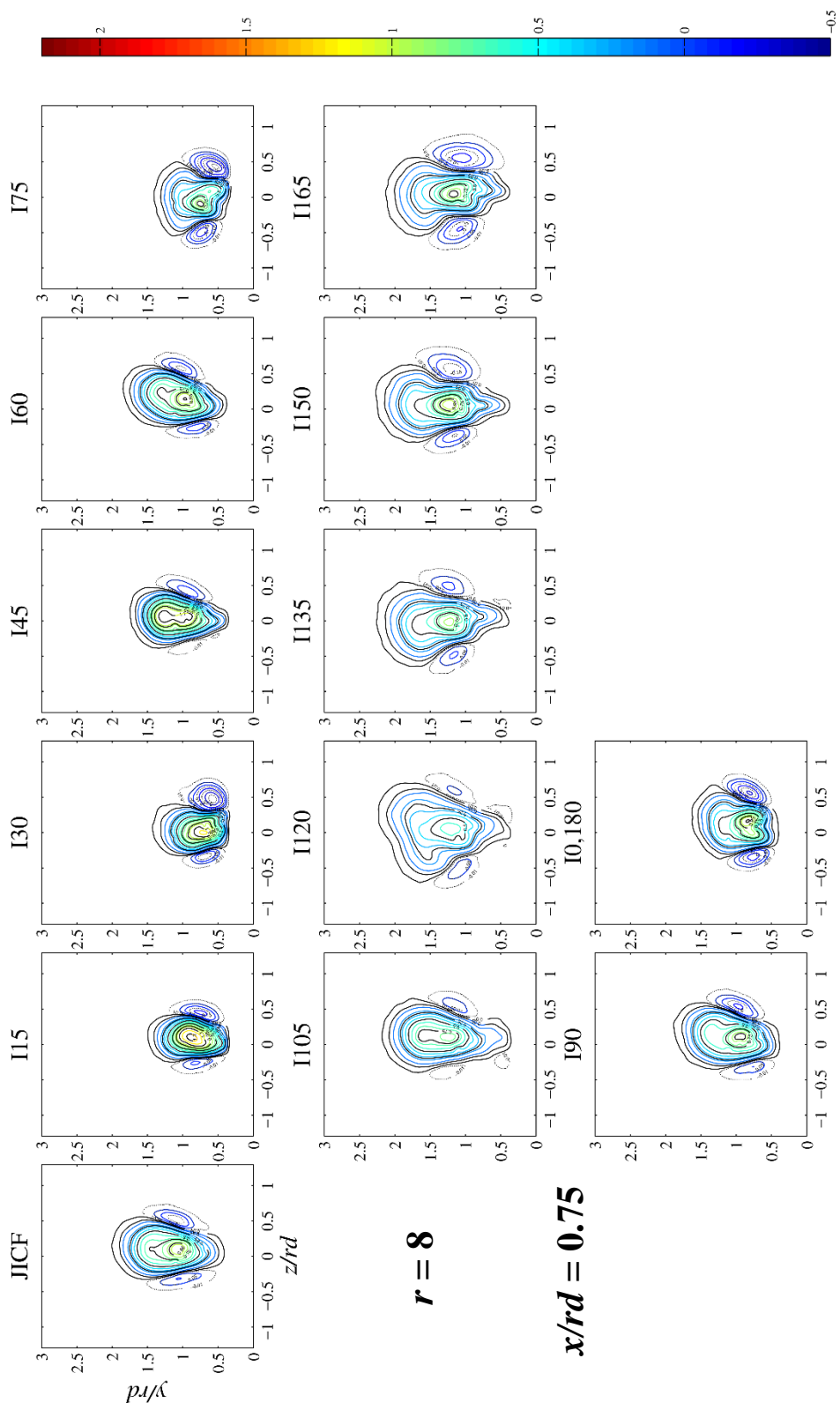
รูปที่ 5.3(ค) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยได้ตามแนวแกน y ต่อความเร็วกระแสสมขวาง (V_y / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$



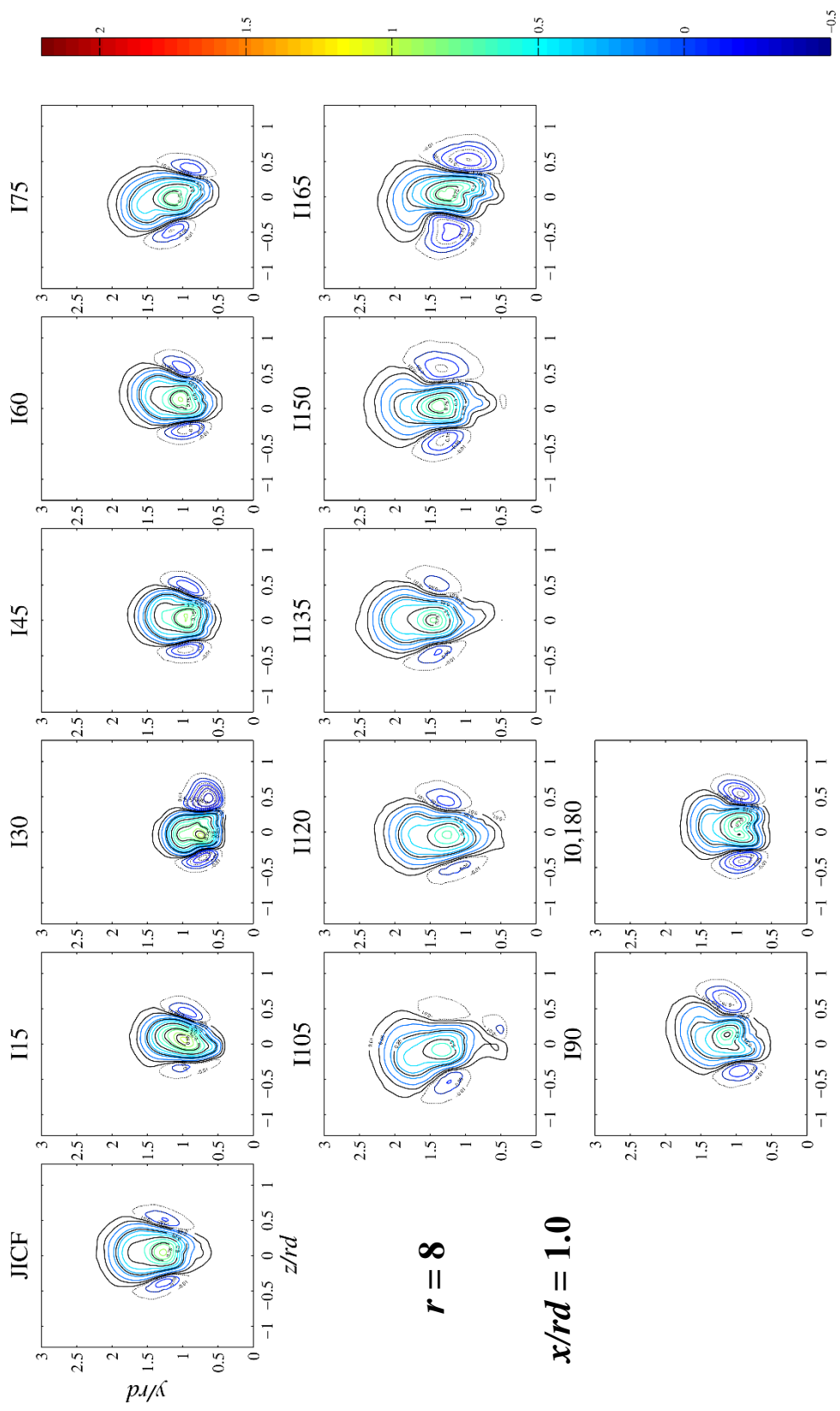
รูปที่ 5.3(ง) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน y ต่อความเร็วการระลอกขวาง (V_y / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$



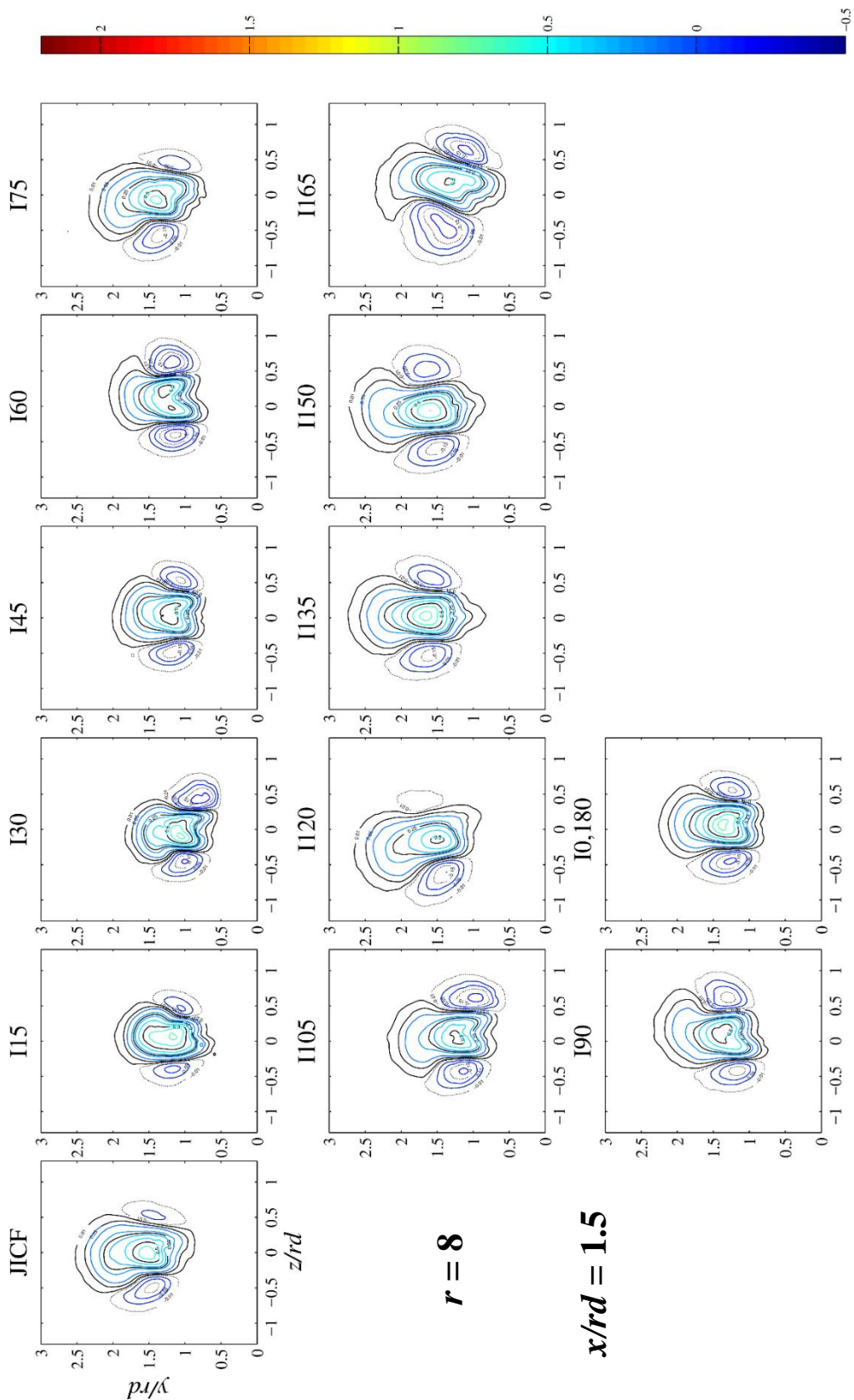
รูปที่ 5.3(จ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยที่ตัดตามแนวแกน y ต่อความเร็วกระแสมุมขวาง (V_y / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$



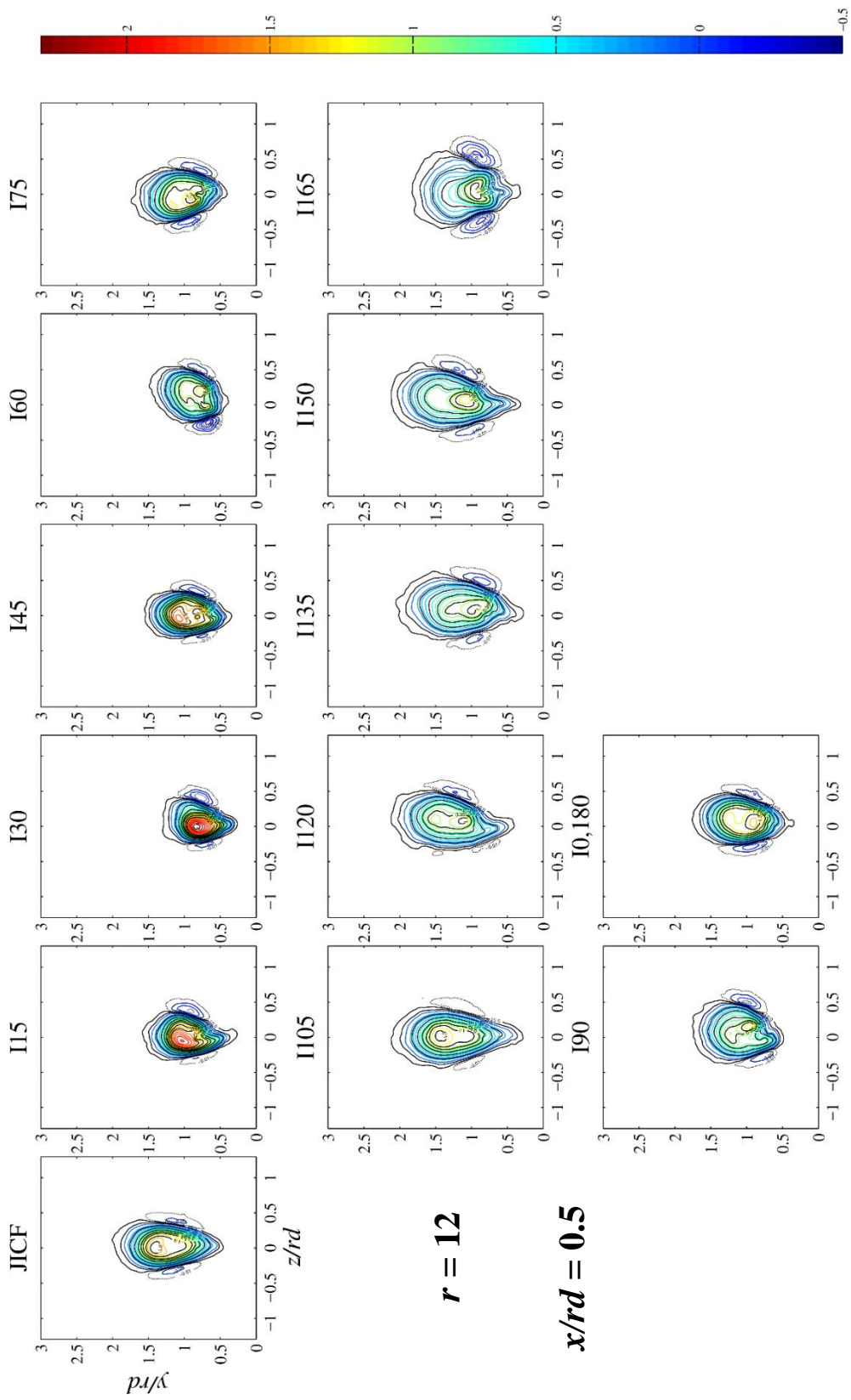
รูปที่ 5.3(ด) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยได้ตามแนวแกน y ต่อความเร็วกระแสสมขวาง (V_y / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$



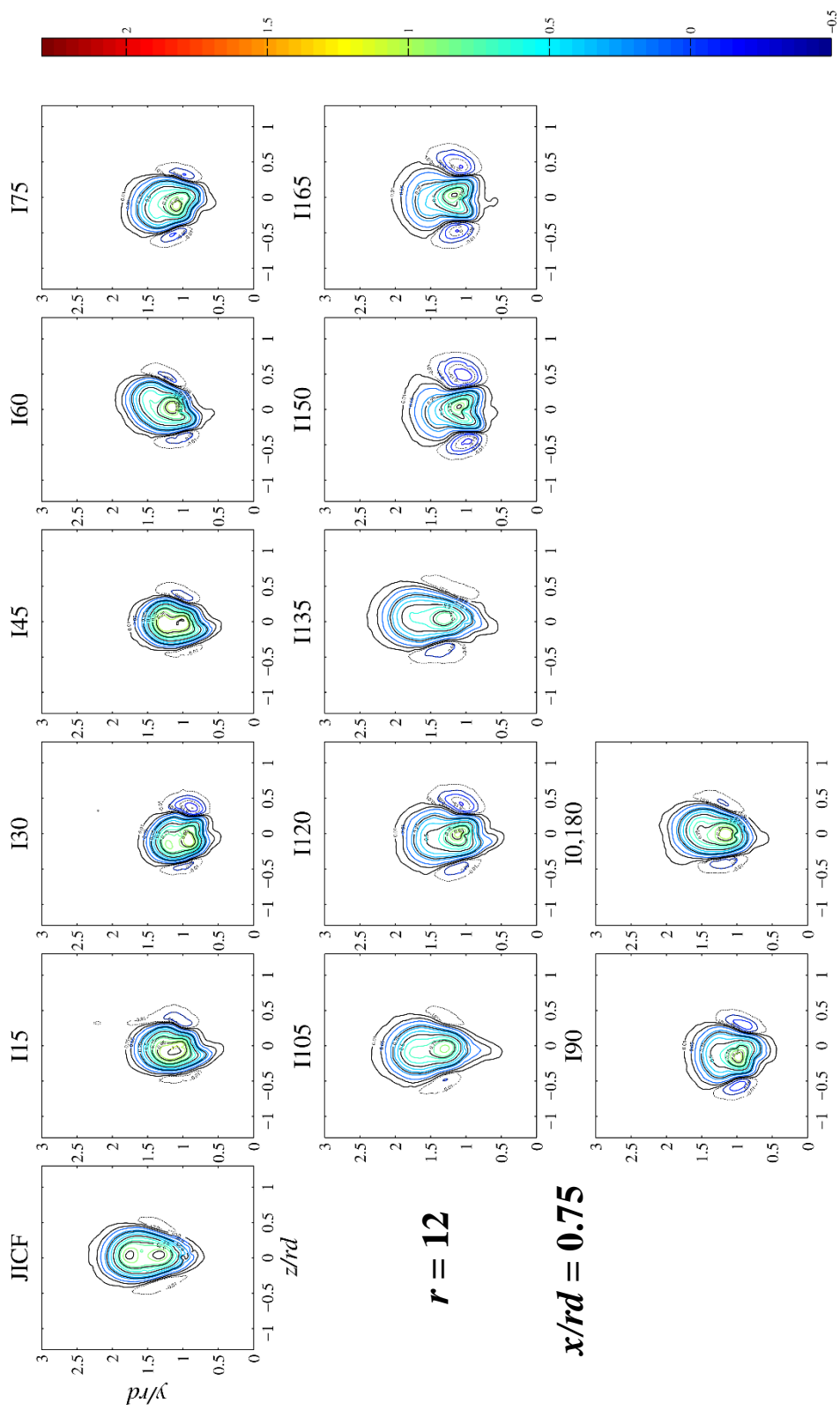
รูปที่ 5.3(ข) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน y ต่อความเร็วกระแสสมขวาง (V_y / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$



รูปที่ 5.3(ซ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน y ต่อความเร็วกระแสของ (V_y / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$



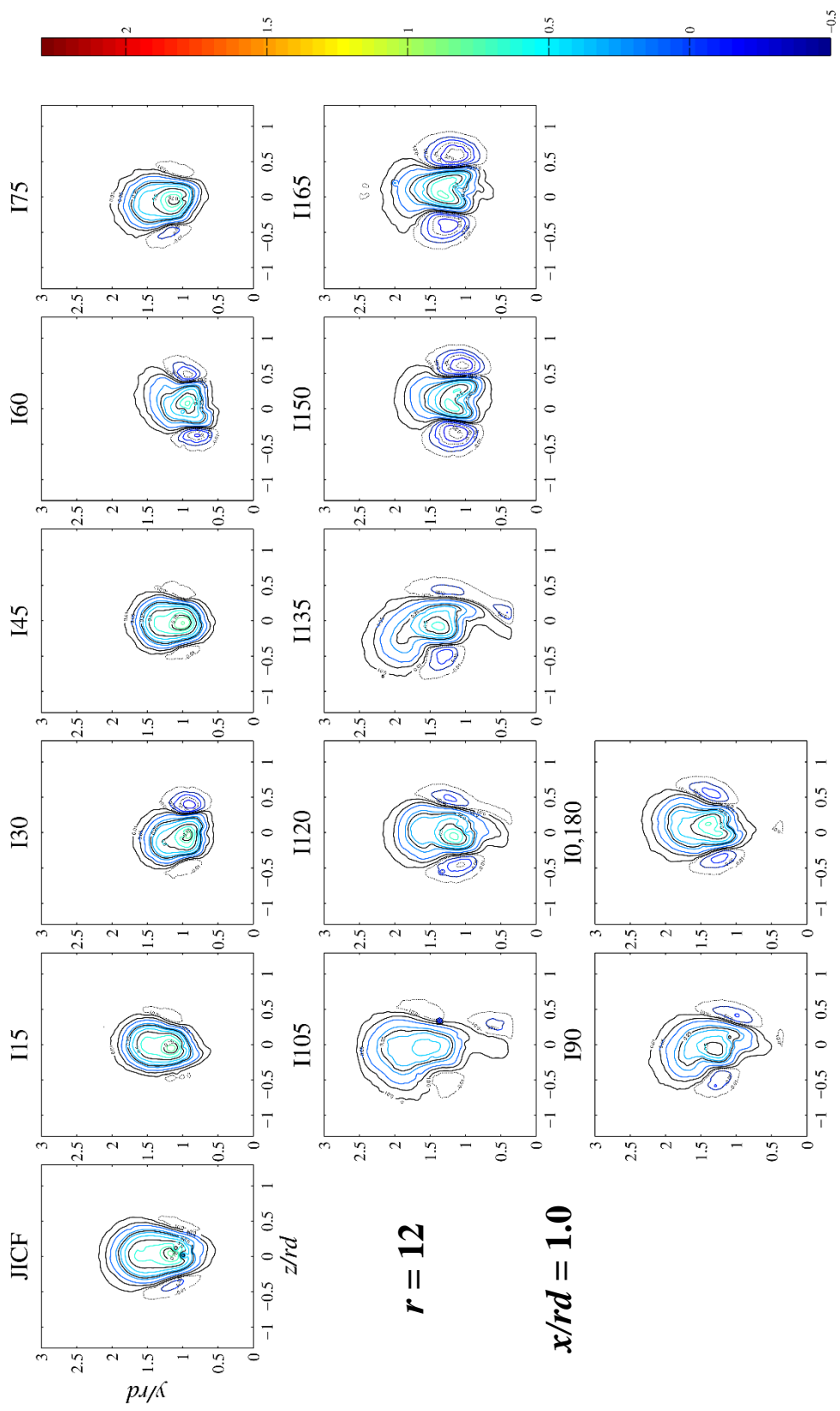
รูปที่ 5.3(ฅ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน y ต่อความเร็วกระแสมุมขวาง (V_y / u_{cf}) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$



$r = 12$

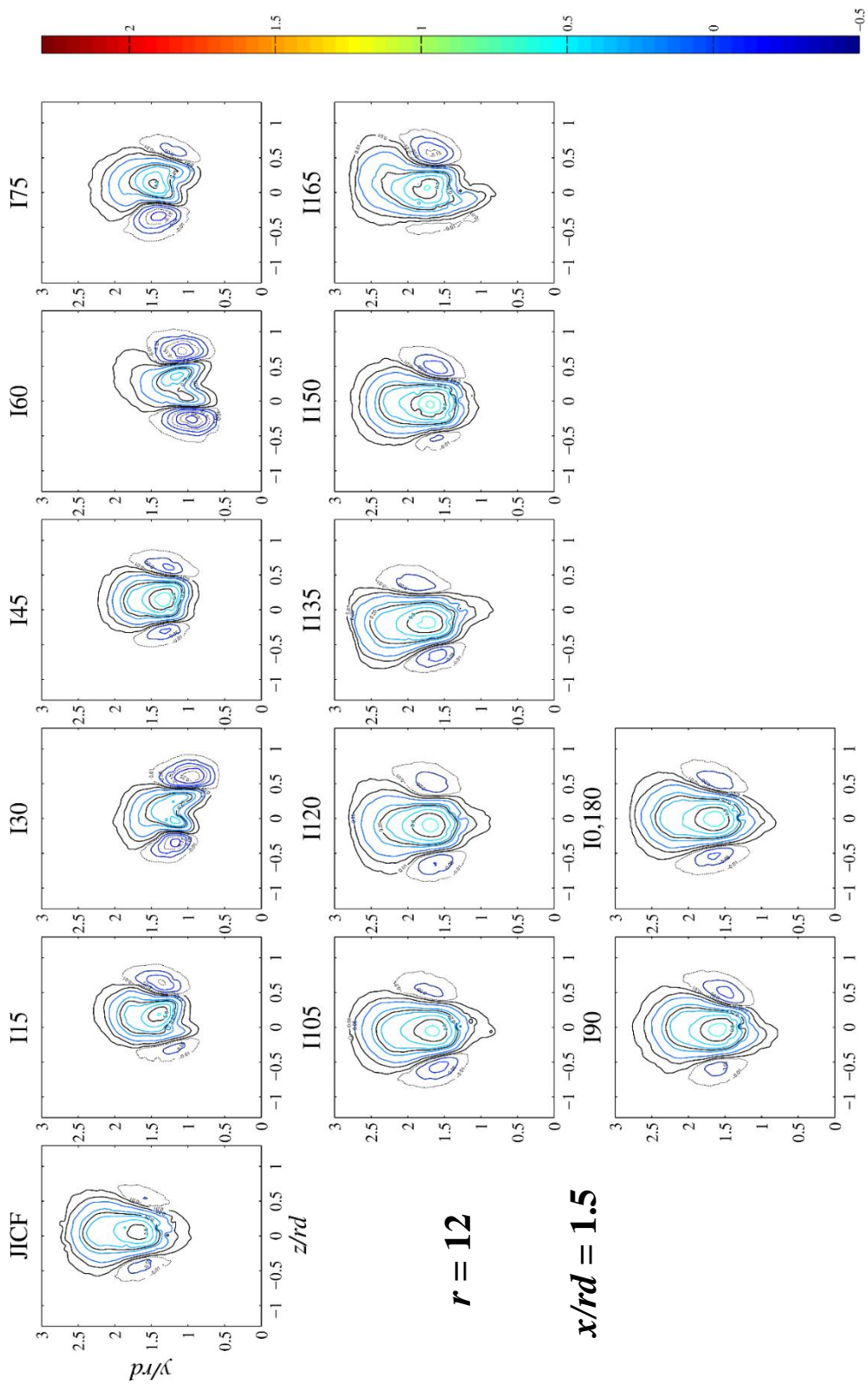
$x/rd = 0.75$

รูปที่ 5.3(ญ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน y ต่อความเร็วการเคลื่อนที่ของวง (V_y / u_{df}) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$



$r = 12$
 $x/rd = 1.0$

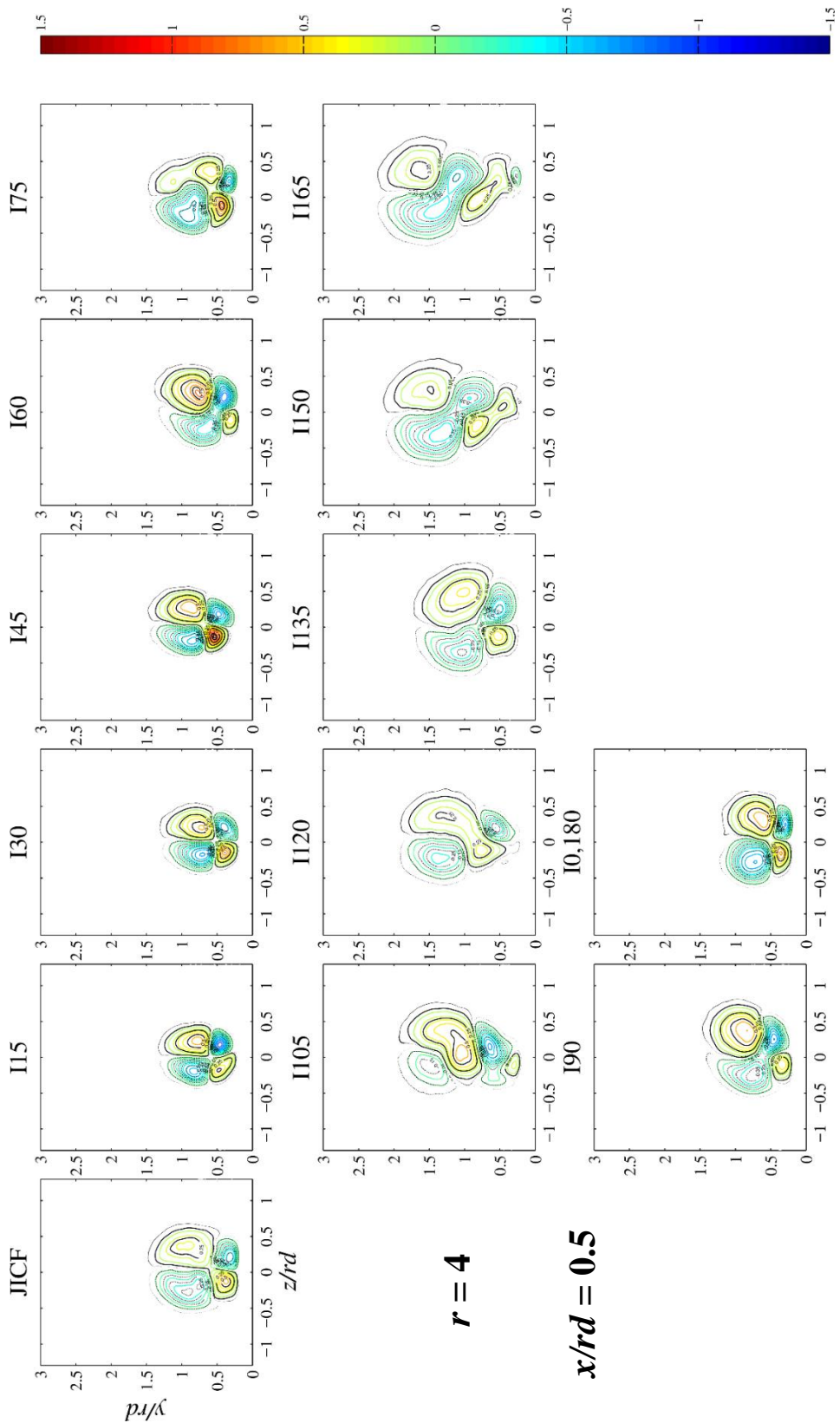
รูปที่ 5.3(ญ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน y ต่อความเร็วกระแสสมขวาง (V_y / u_c) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$



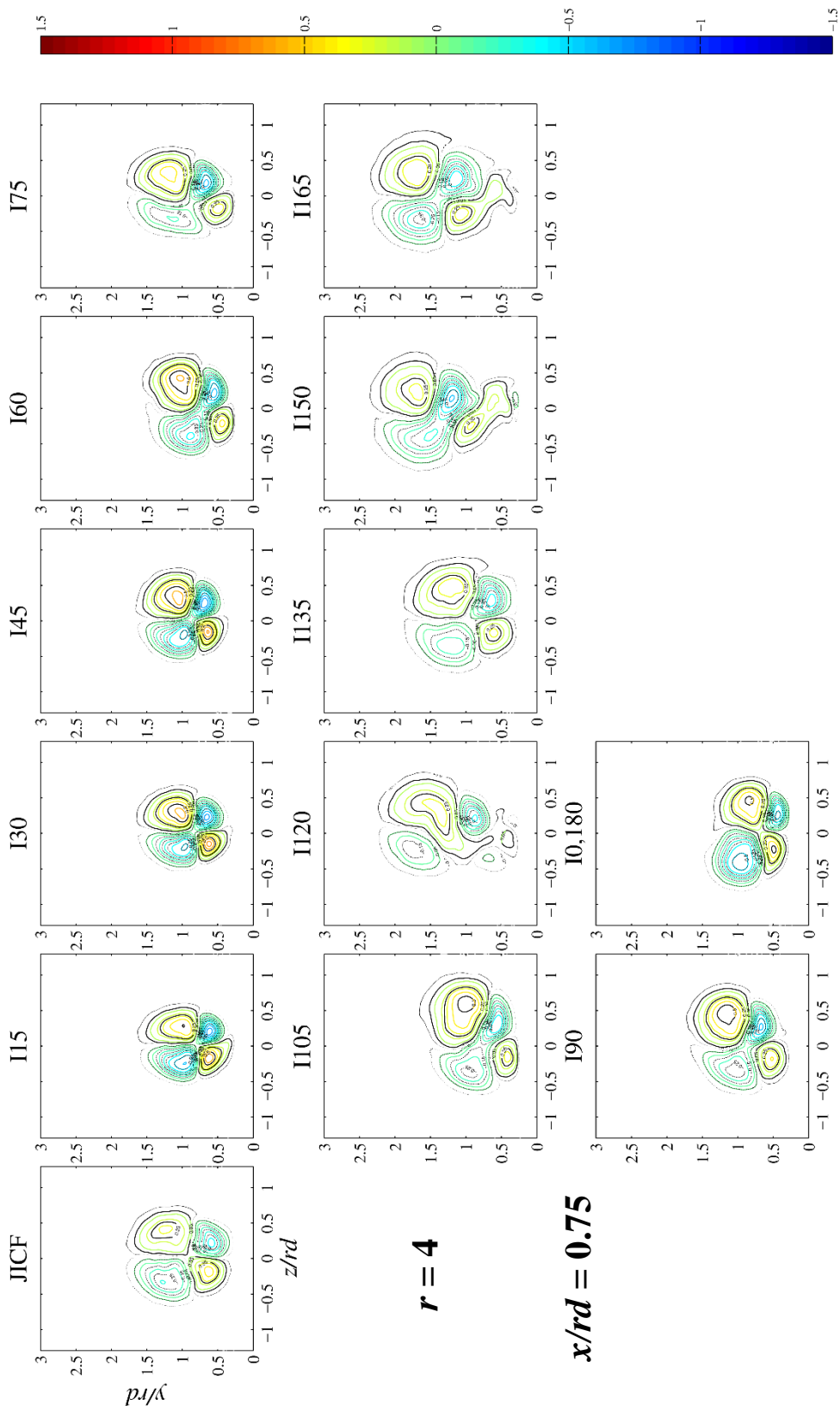
$r = 12$

$x/rd = 1.5$

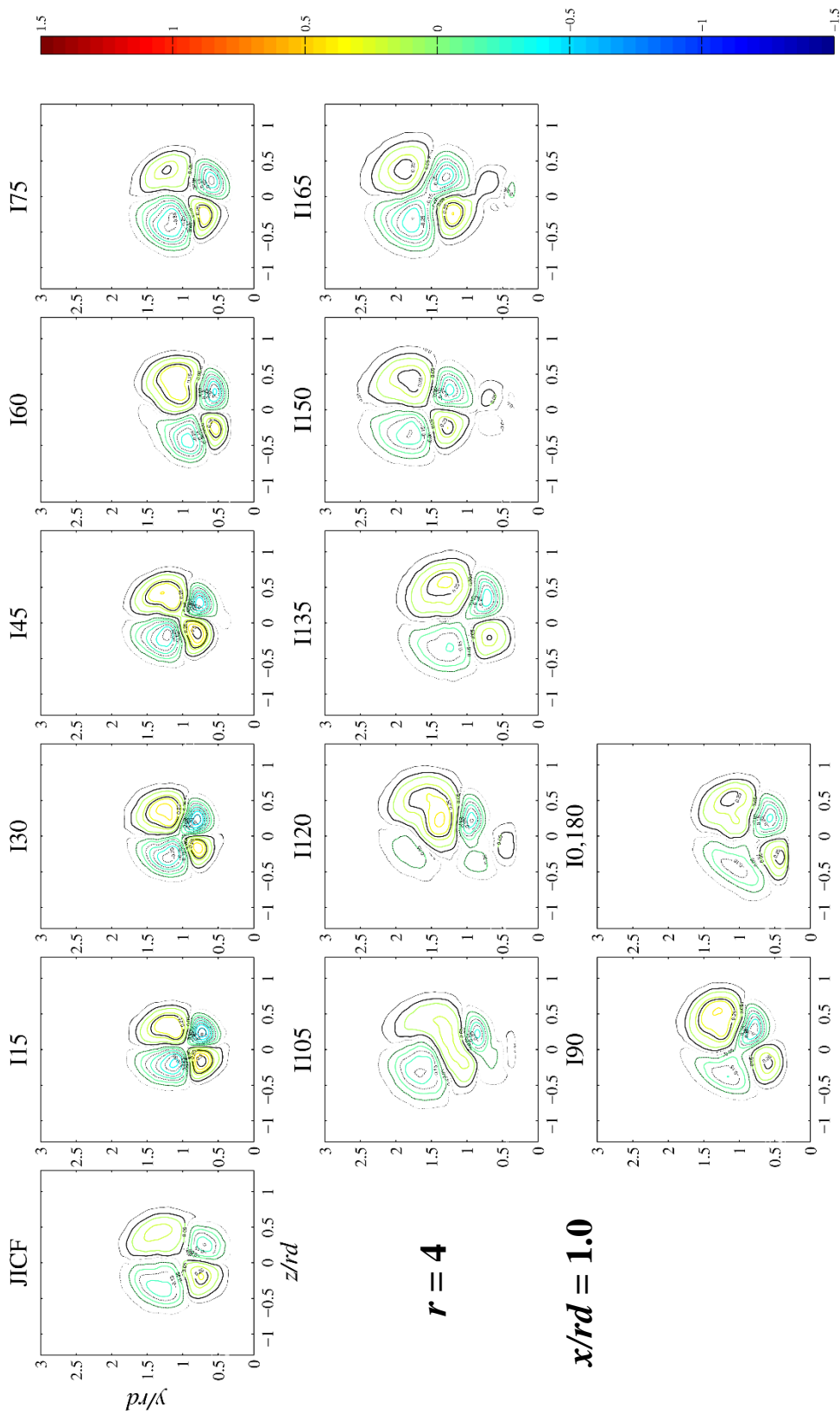
รูปที่ 5.3(ก) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน y ต่อความเร็วกระแสตรงของ (V_y / u_{cf}) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$



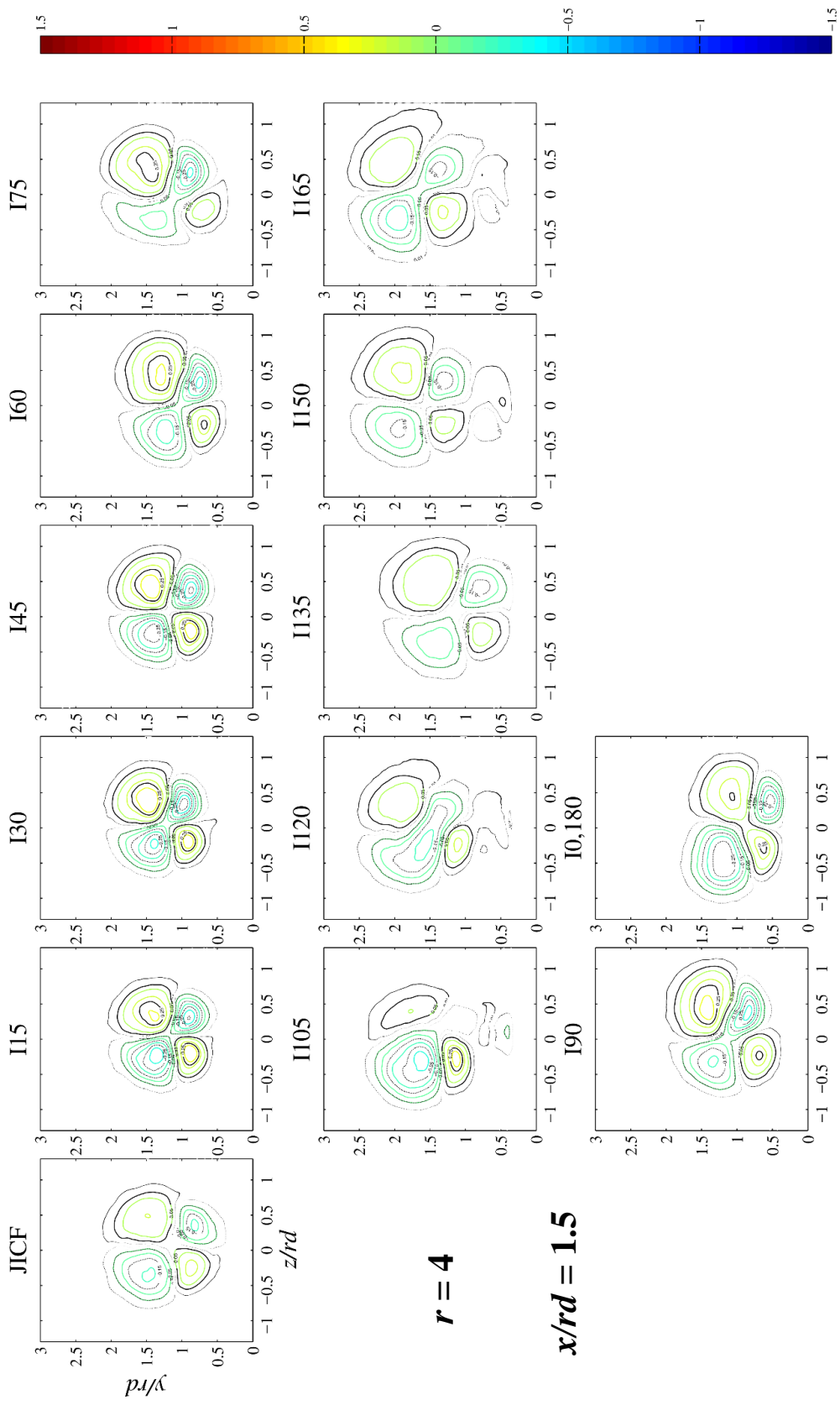
รูปที่ 5.4(ก) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยที่ตัดตามแนวแกน z ต่อความเร็วการเคลื่อนที่ของ (V_z / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$



รูปที่ 5.4(ข) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยที่ตัดตามแนวแกน z ต่อความเร็วกระแสลมขวาง (V_z / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$



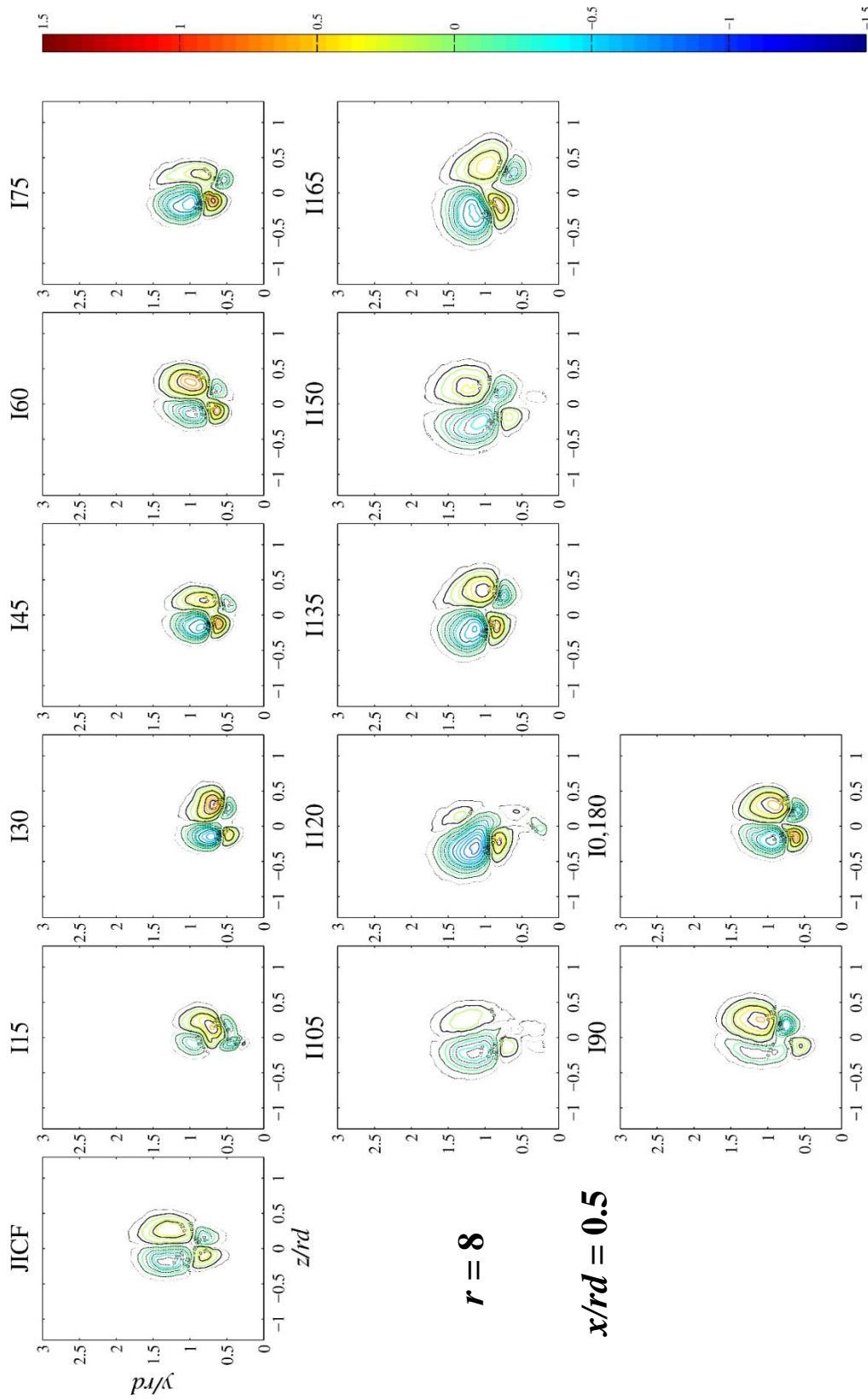
รูปที่ 5.4(ค) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยที่ตัดตามแนวแกน z ต่อความเร็วกระแสแตรมของ (V_z / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$



$r = 4$

$x/rd = 1.5$

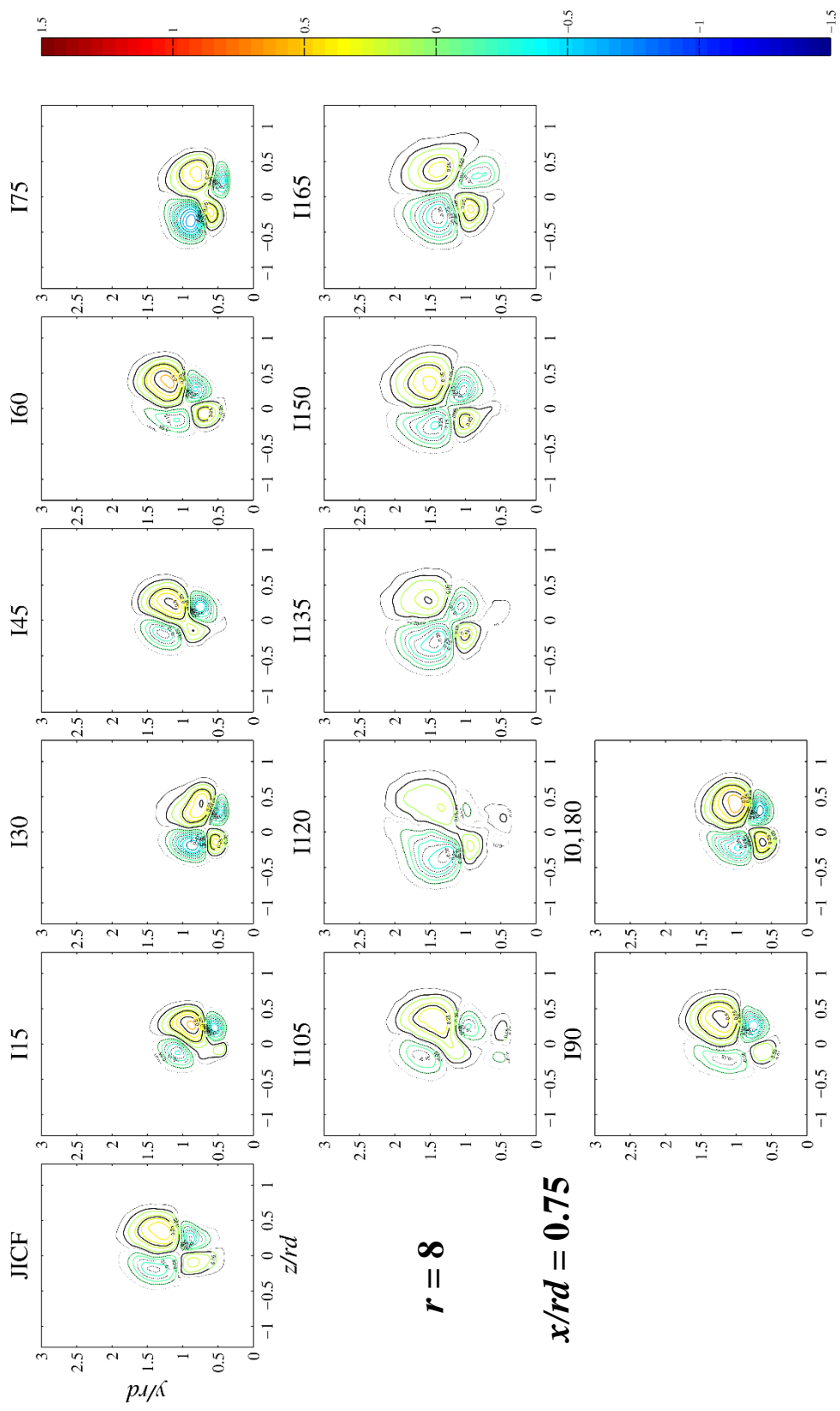
รูปที่ 5.4(จ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน z ต่อความเร็วกระแสสมขวาง (V_z / u_{cf}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$



$r = 8$

$x/rd = 0.5$

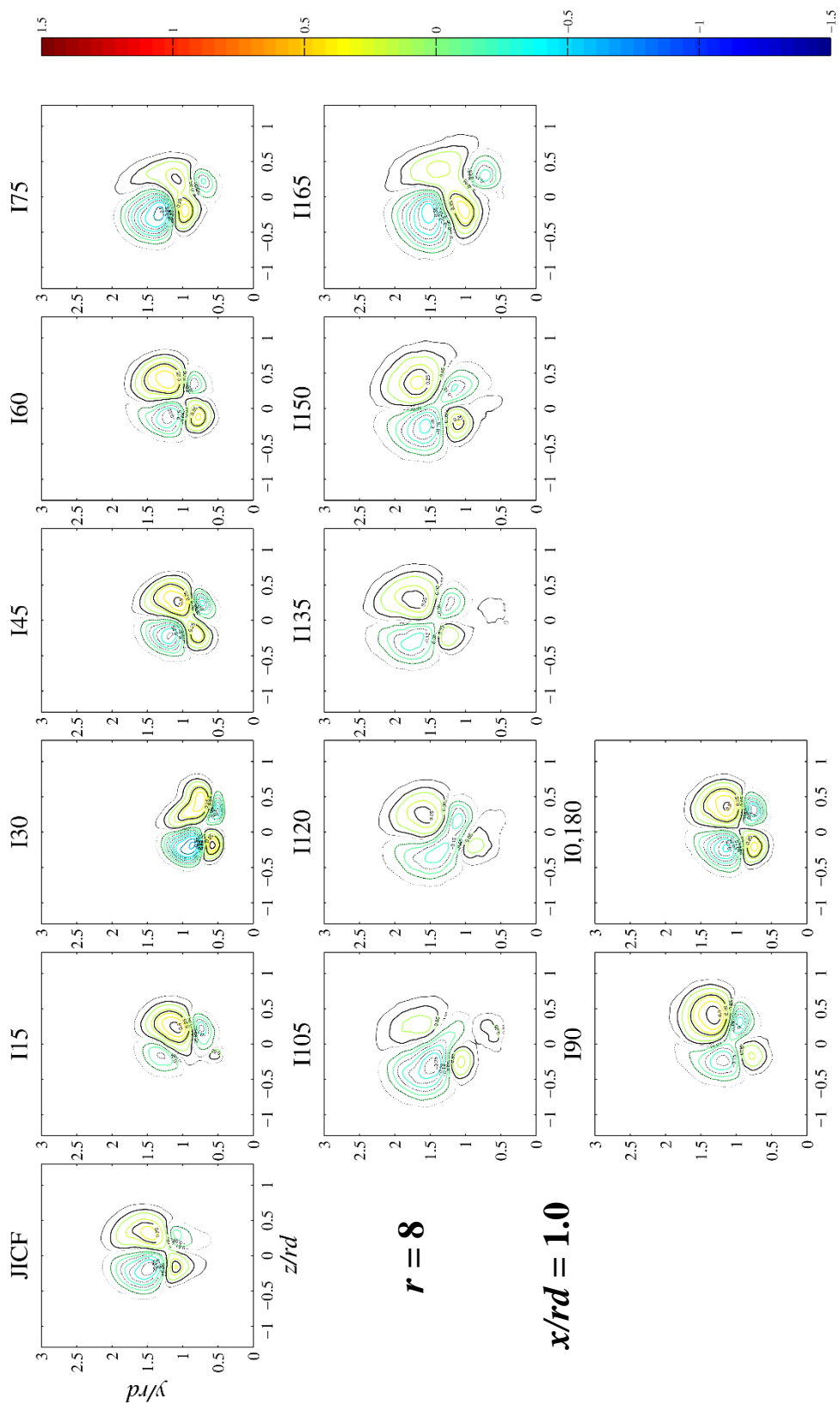
รูปที่ 5.4(จ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน z ต่อความเร็วกรรสมขวาง (V_z / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$



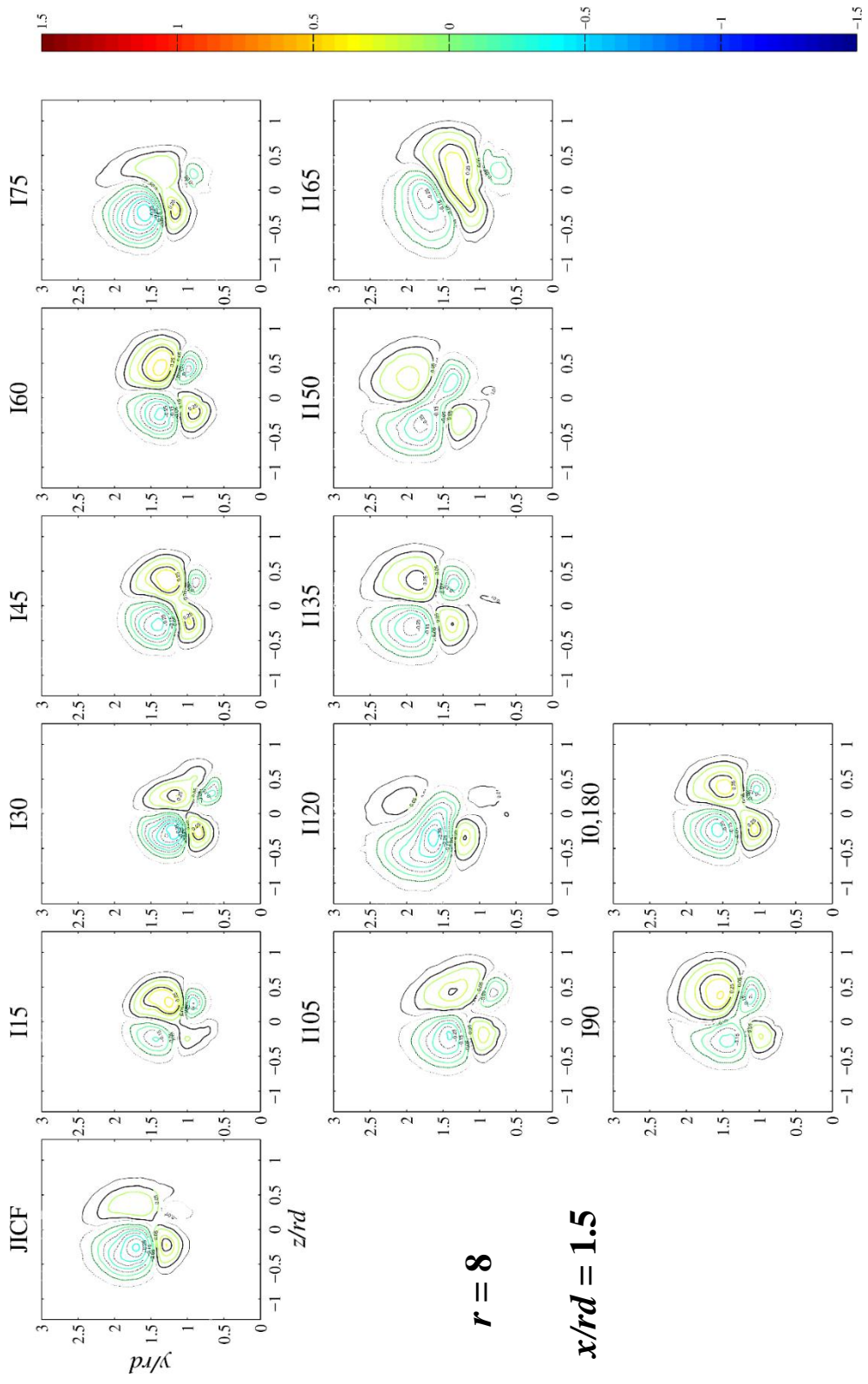
$r = 8$

$x/rd = 0.75$

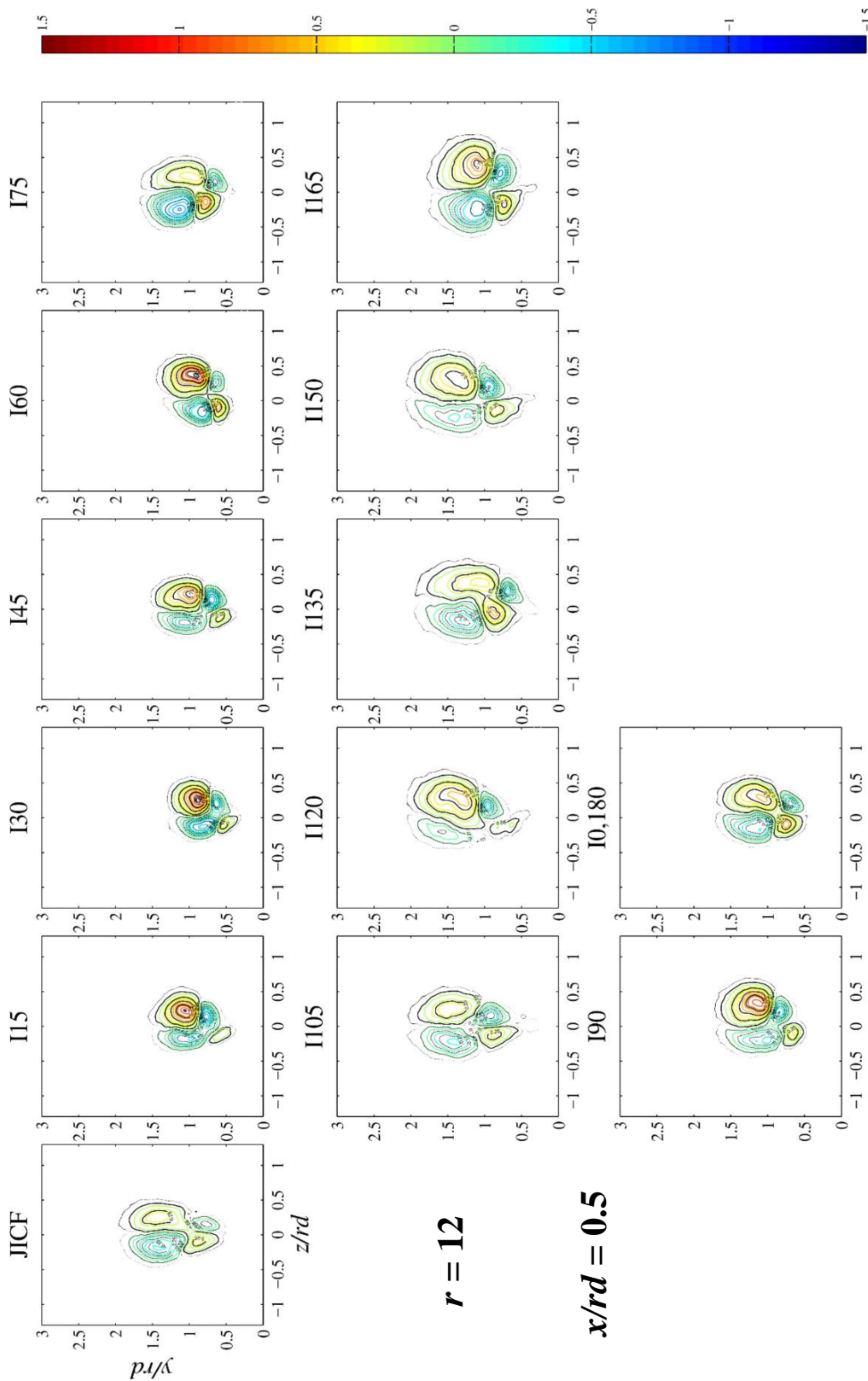
รูปที่ 5.4(จ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยที่ตัดตามแนวแกน z ต่อความเร็วการไหลของของไหล (V_z / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$



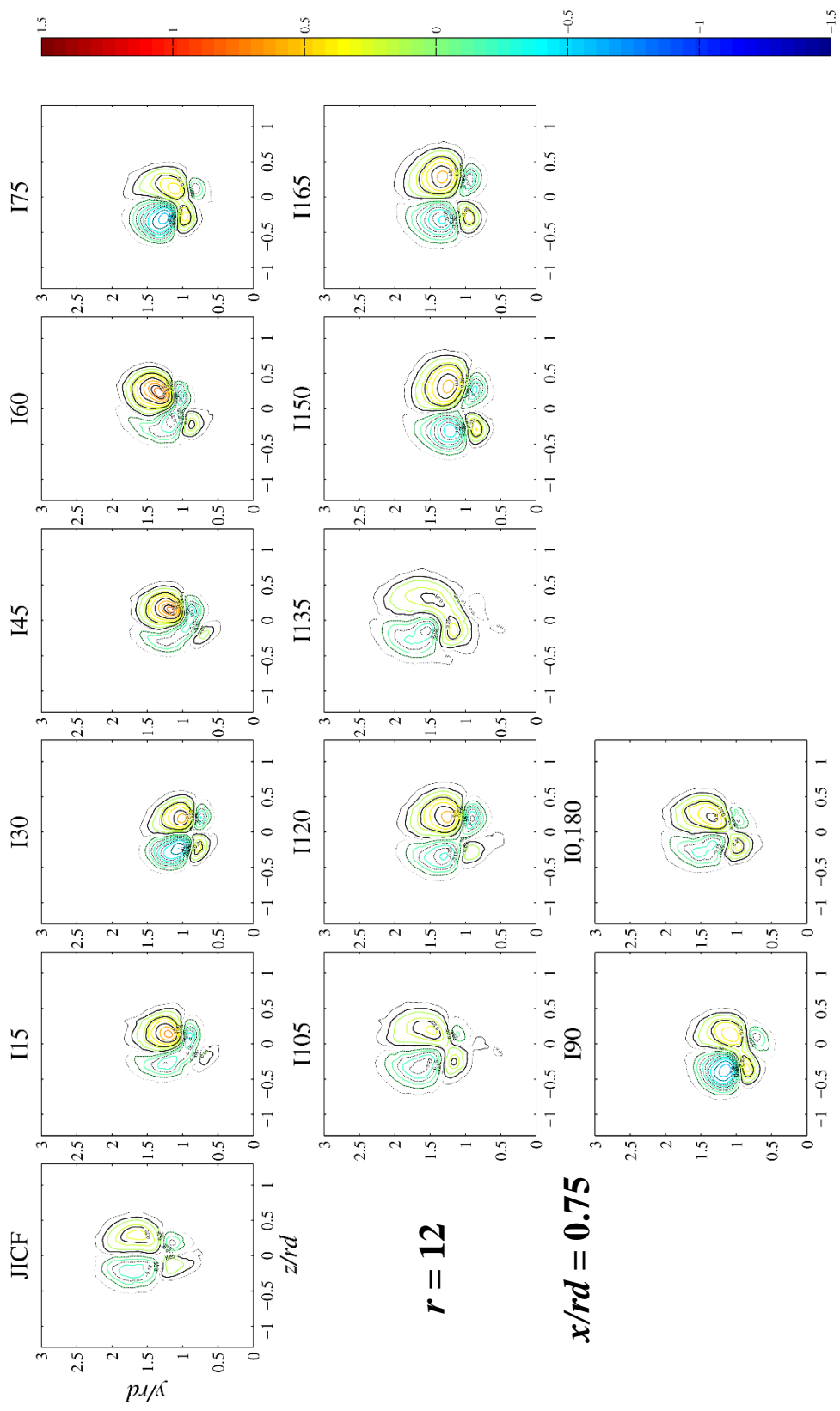
รูปที่ 5.4(ซ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเห็นตามแนวแกน z ต่อความเร็วกระแสนวนของ (V_z / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$



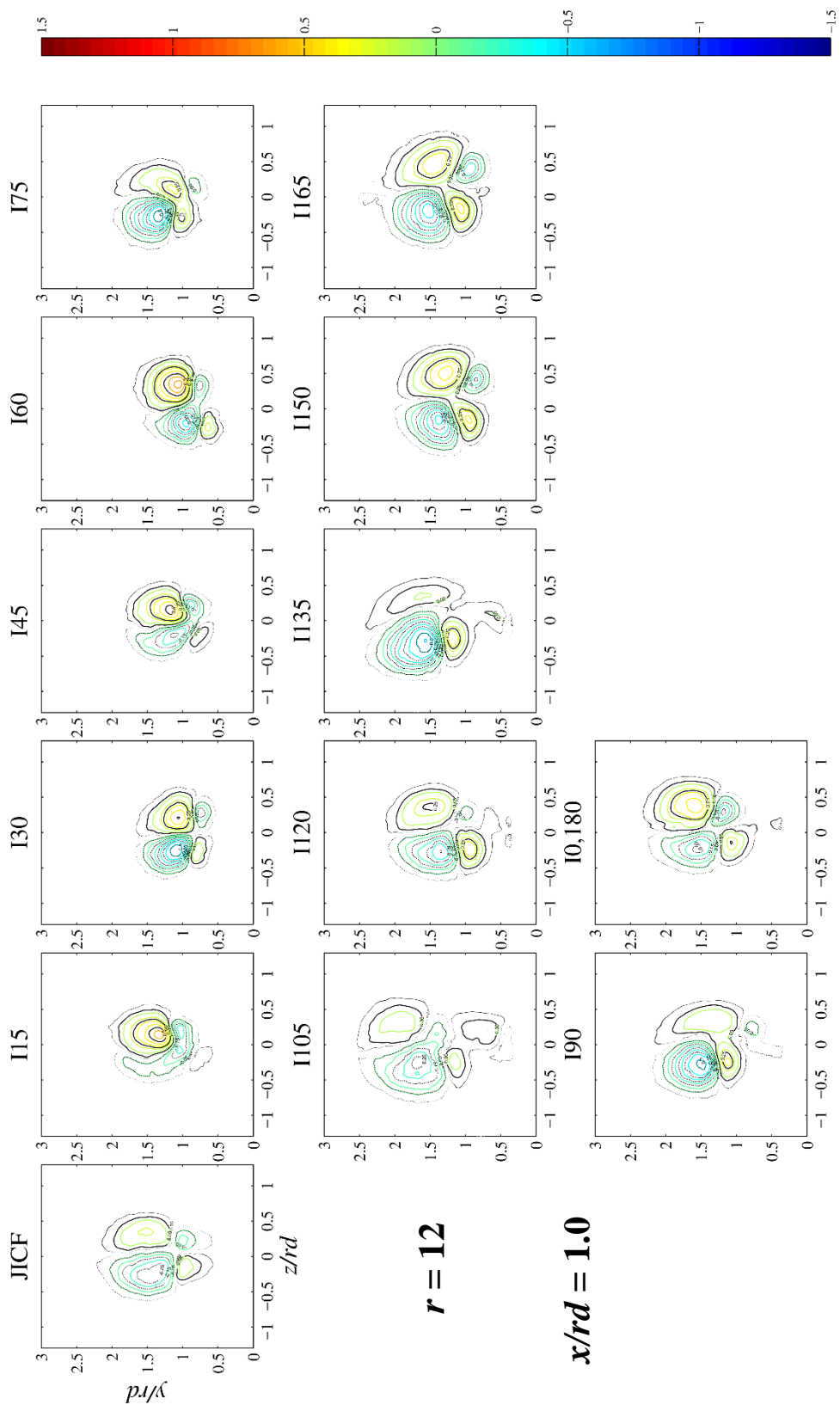
รูปที่ 5.4(ช) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยที่ตัดตามแนวแกน z ต่อความเร็วกระแสผสมขวาง (V_z / u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$



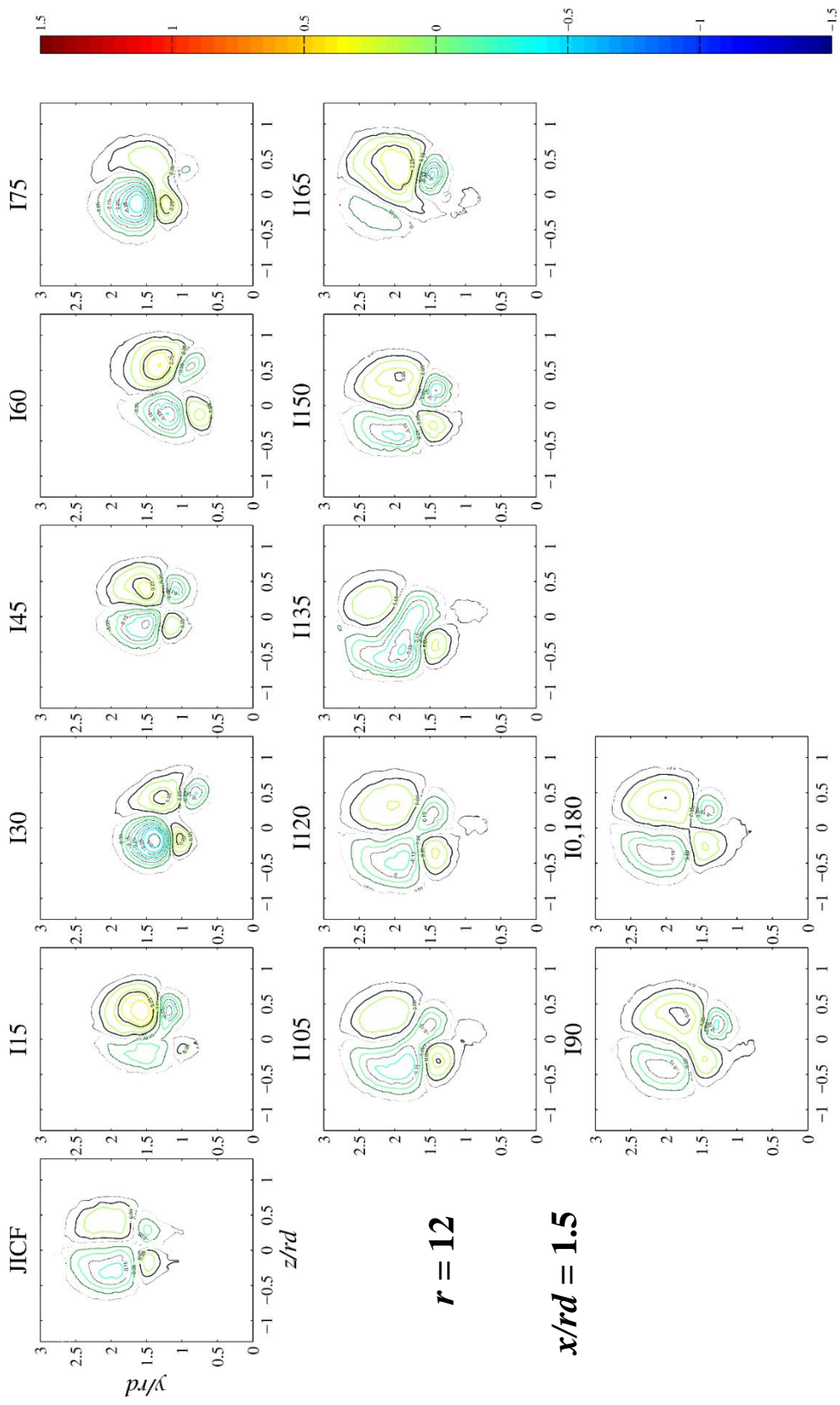
รูปที่ 5.4(ฅ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน z ต่อความเร็วการเคลื่อนที่ของ (V_z / u_{cf}) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$



รูปที่ 5.4(ญ) การกระจายตัวของความเร็วเฉลี่ยเจ็ดตามแนวแกน z ต่อความเร็วกระแสมุมขวาง (V_z / u_{cf}) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$



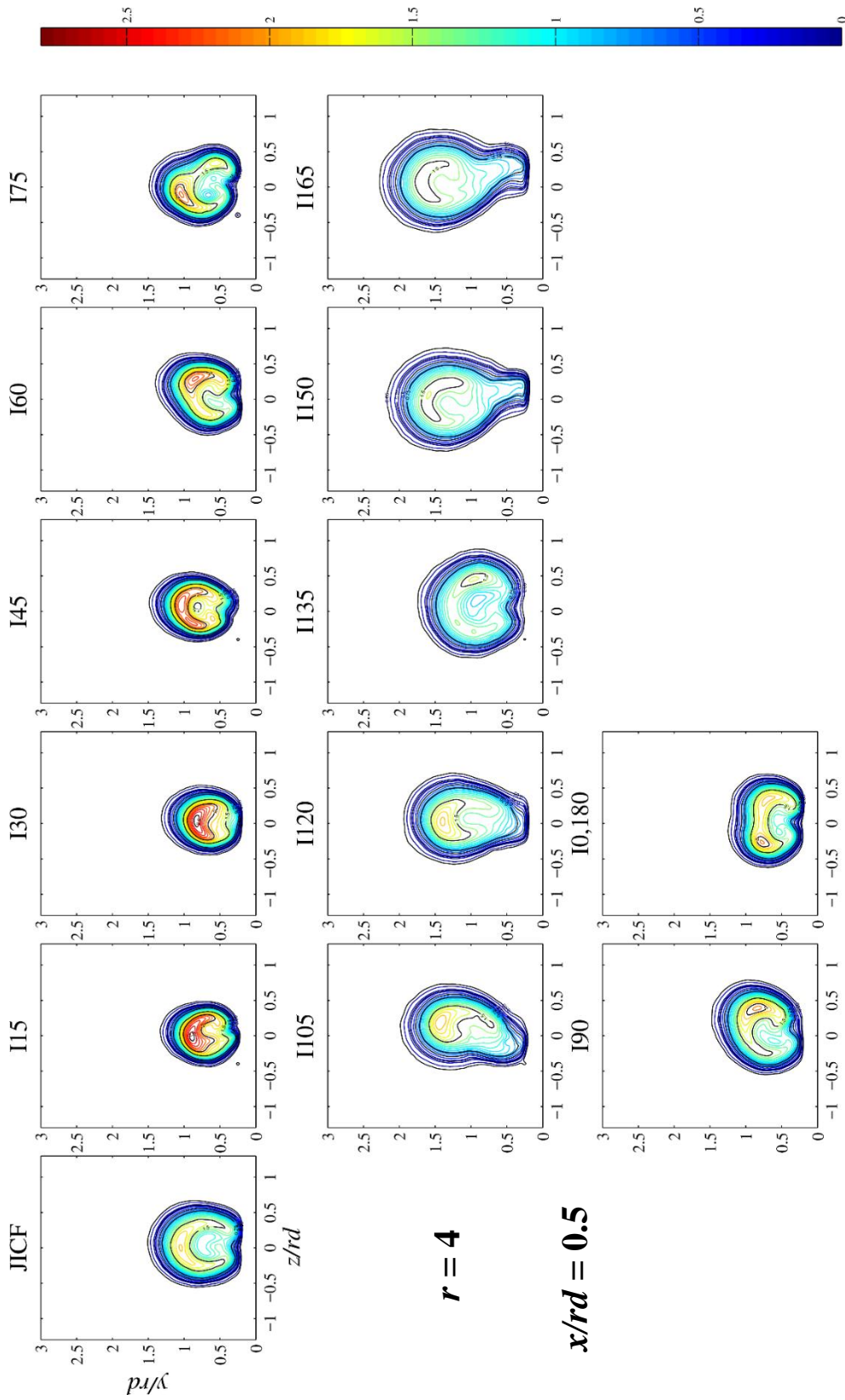
รูปที่ 5.4(ก) การกระจายตัวของความเร็วเฉื่อยเจ็ดตามแนวแกน z ต่อความเร็วกระแสสมขวาง (V_z / u_d) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$



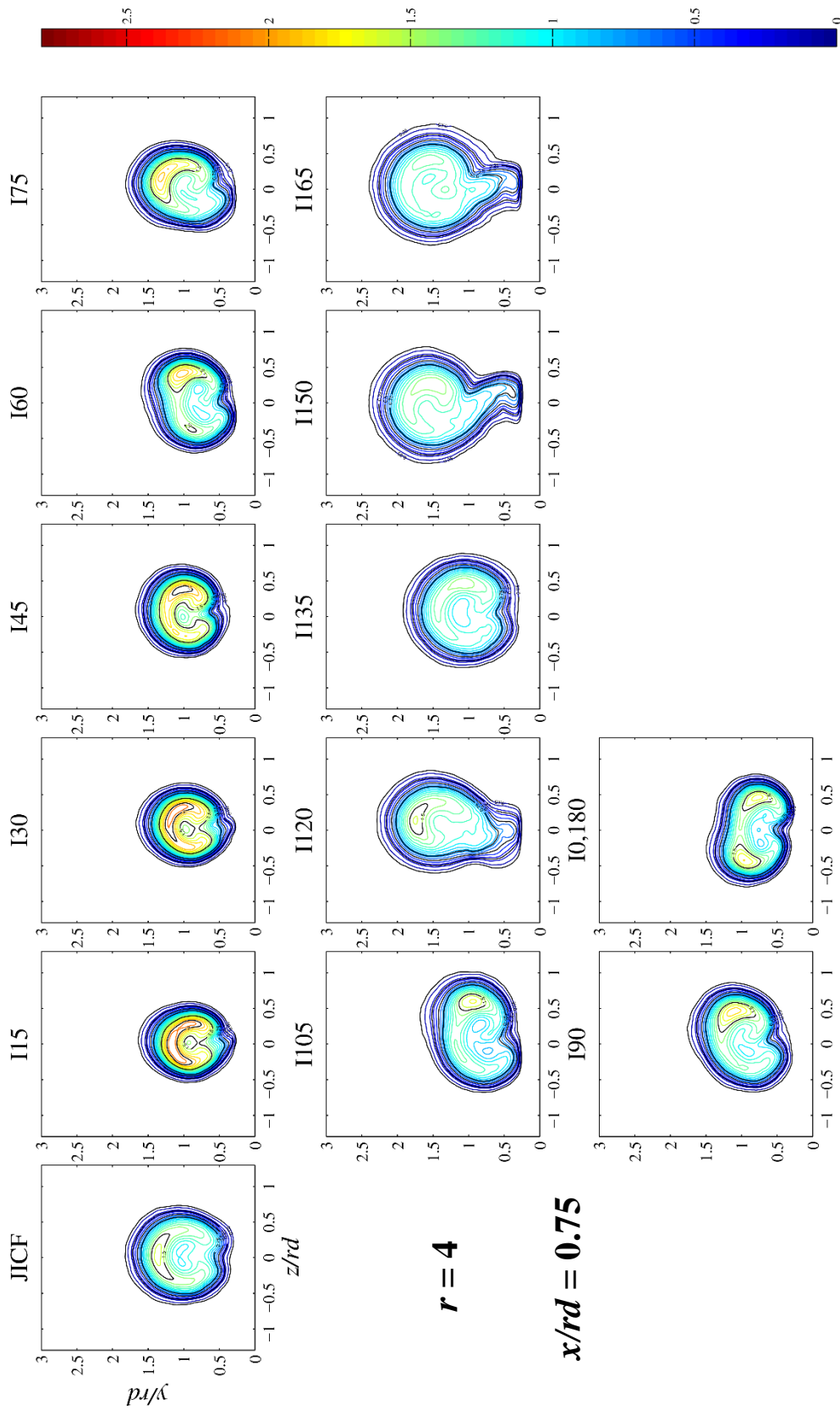
$r = 12$

$x/rd = 1.5$

รูปที่ 5.4(ก) การกระจายตัวของความเร็วเฉื่อยเฉื่อยตามแนวแกน z ต่อความเร็วการเคลื่อนที่ของ V_z / u_{cr} ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$



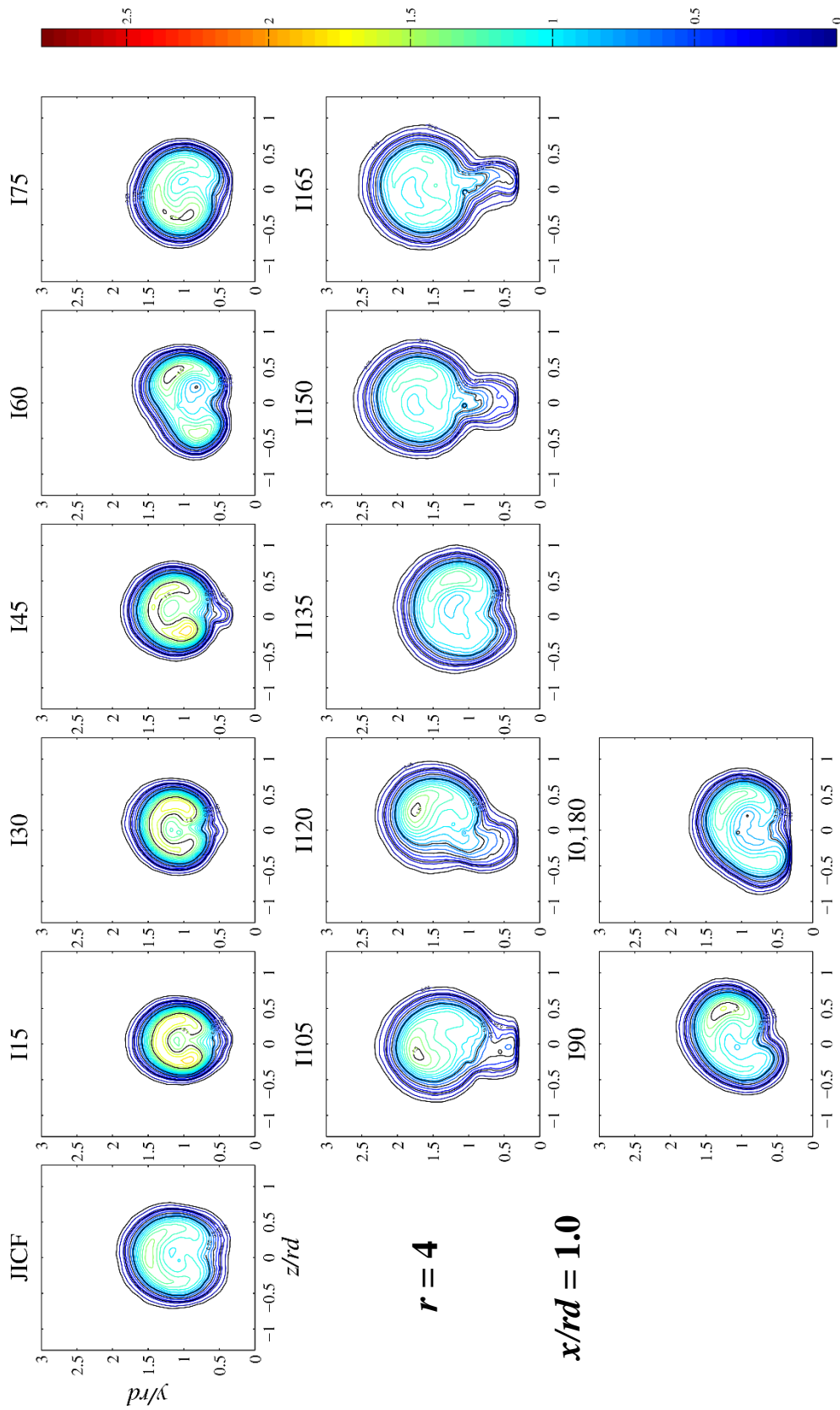
รูปที่ 5.5(ก) การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกวาระแอสมของ (V/u_c) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/r_d=0.5$



$r = 4$

$x/rd = 0.75$

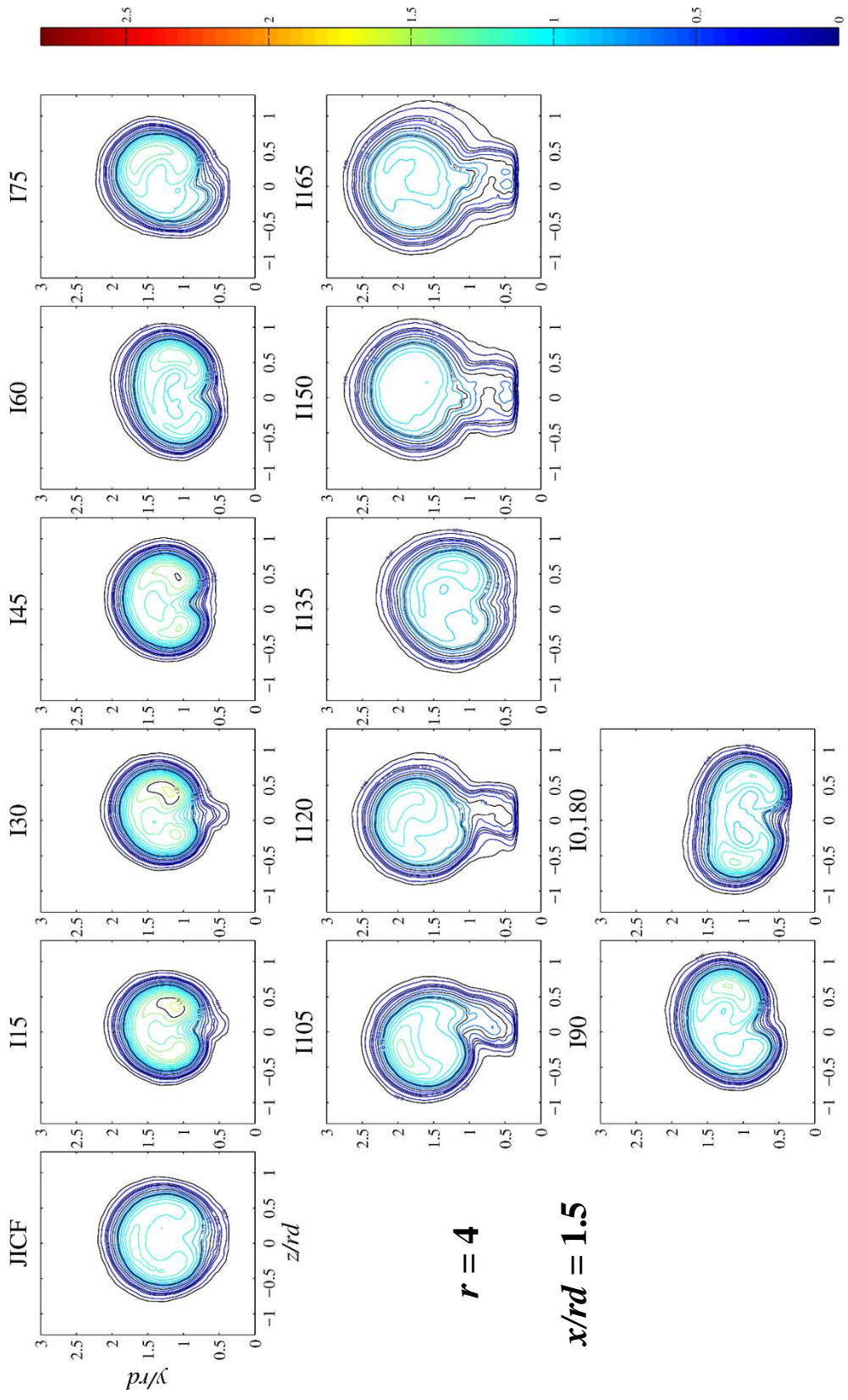
รูปที่ 5.5(ข) การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกวาระแสมขวาง (V/u_c) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$



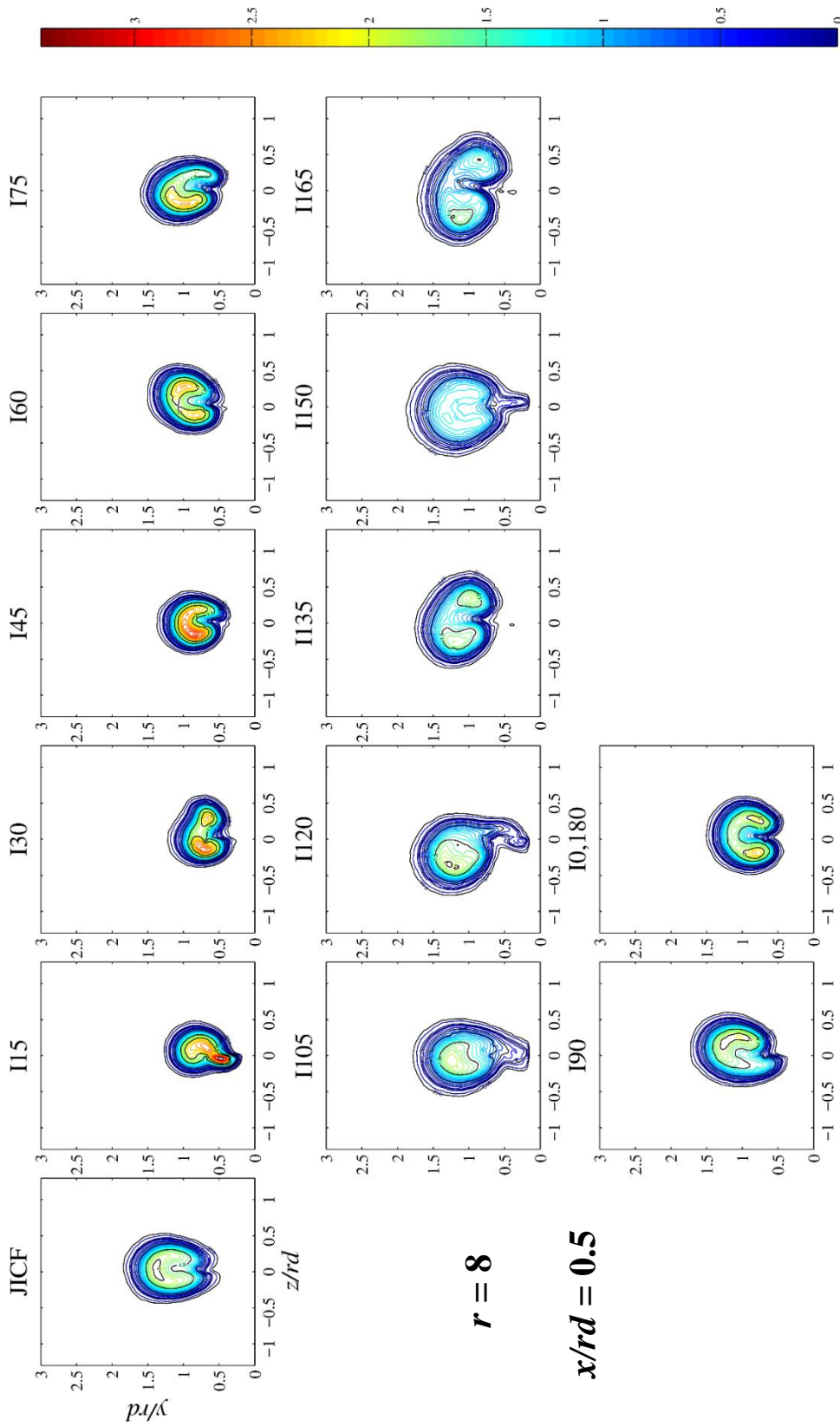
$r = 4$

$x/rd = 1.0$

รูปที่ 5.5(ค) การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกว้างขวาง (V/u_c) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$



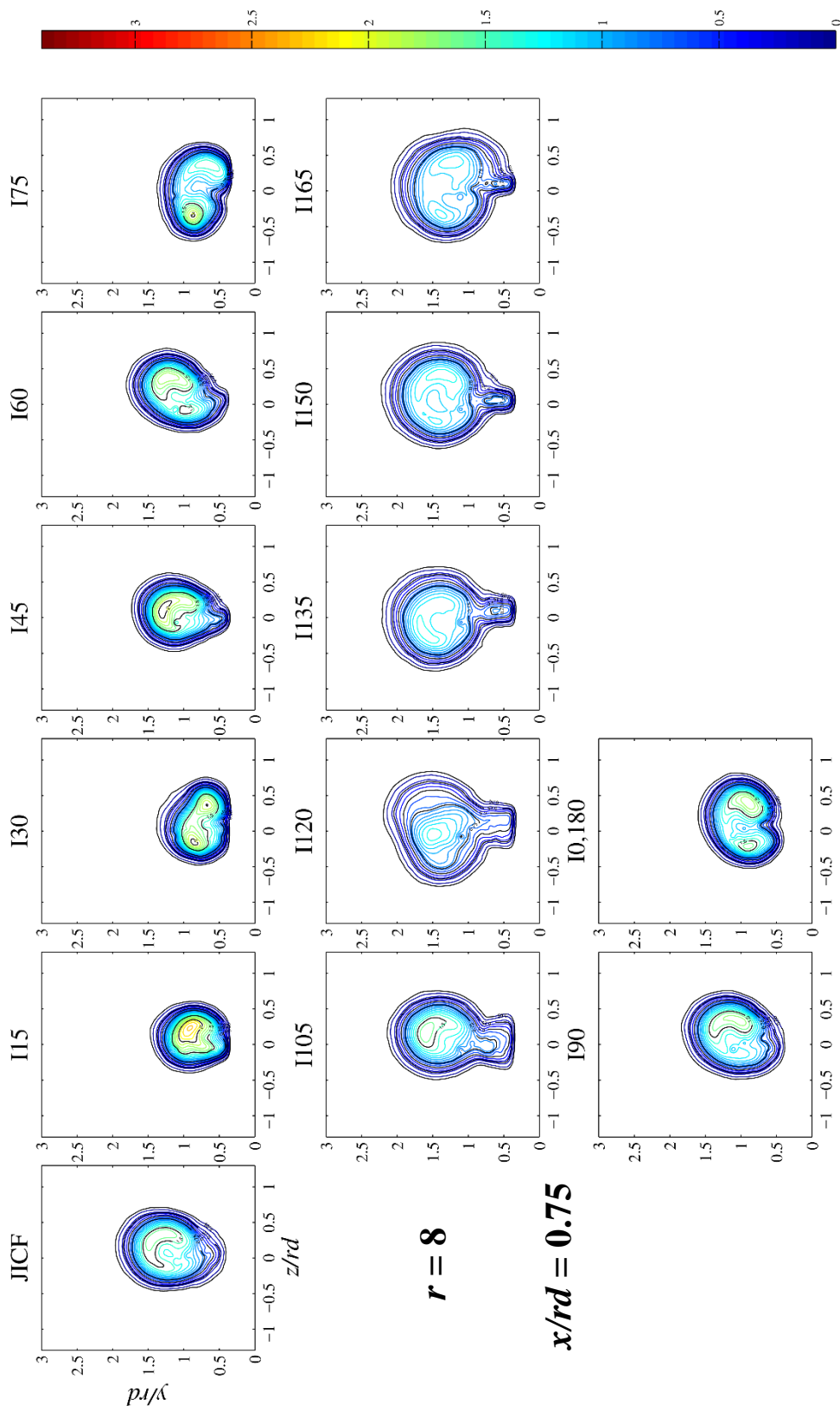
รูปที่ 5.5(ง) การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสสมขวาง (V/u_{cr}) ที่ $r=4$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$



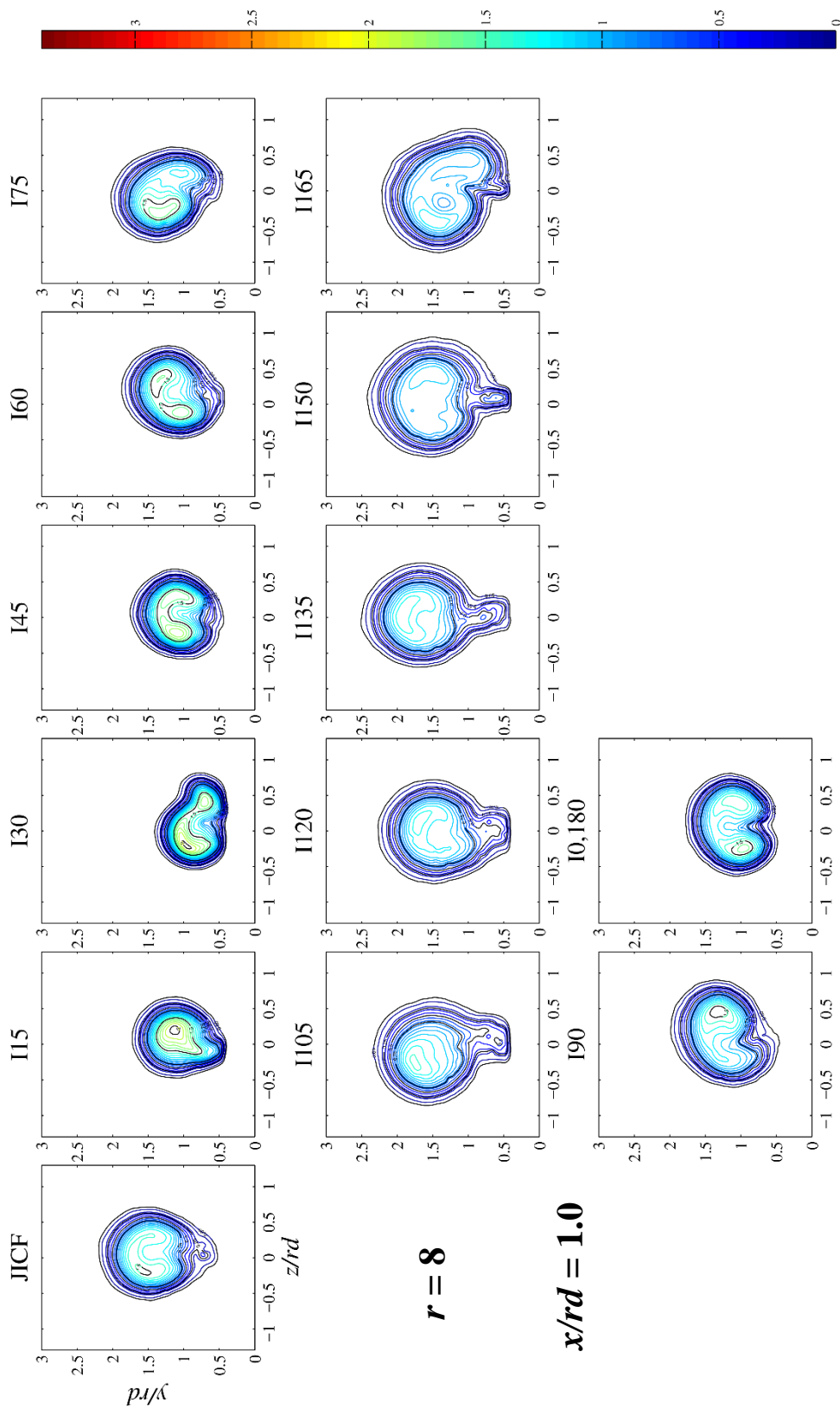
$r = 8$

$x/rd = 0.5$

รูปที่ 5.5(จ) การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกวาระผสมขวาง (V/u_c) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$



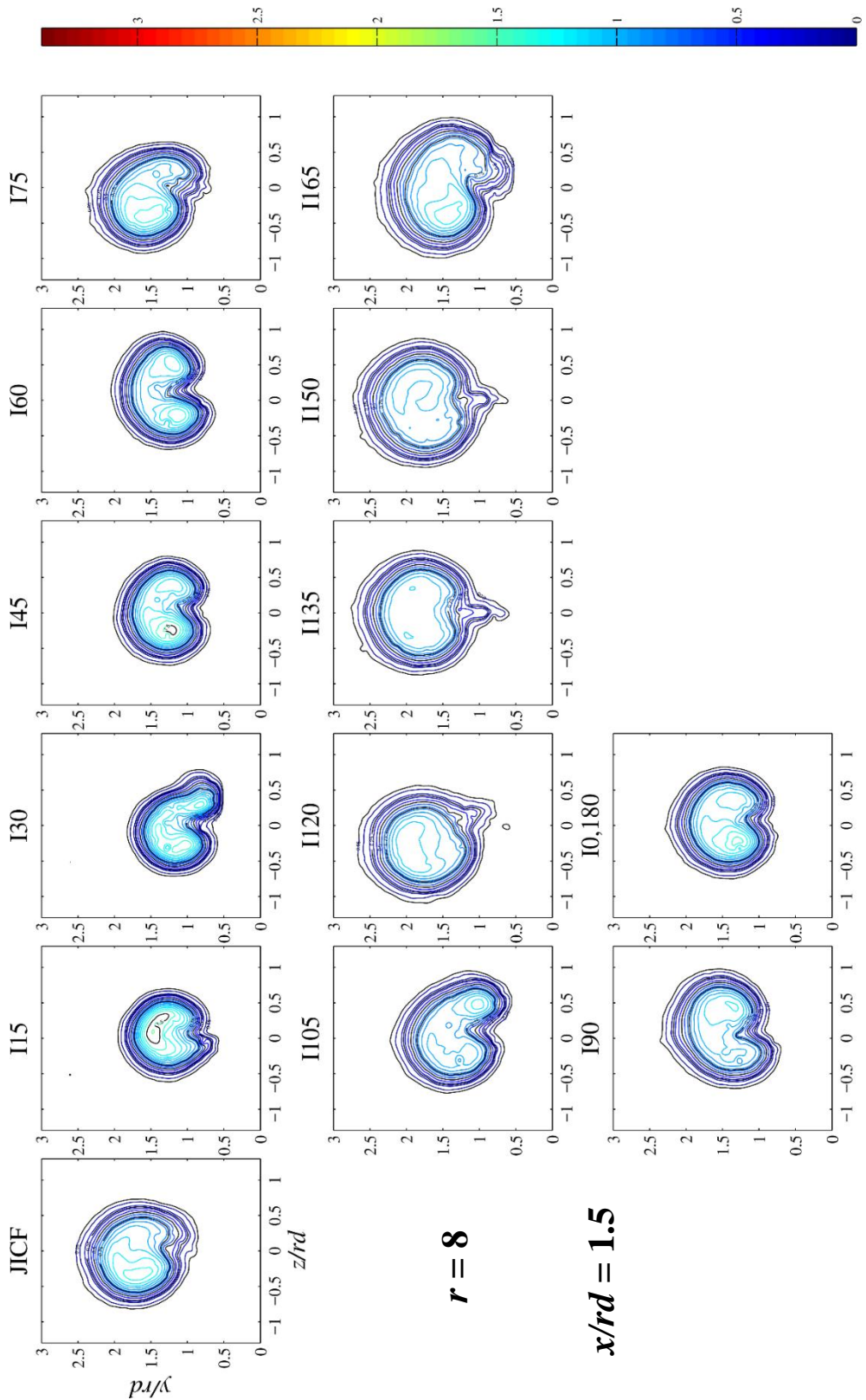
รูปที่ 5.5(ฉ) การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกว้างขวาง (V/u_c) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$



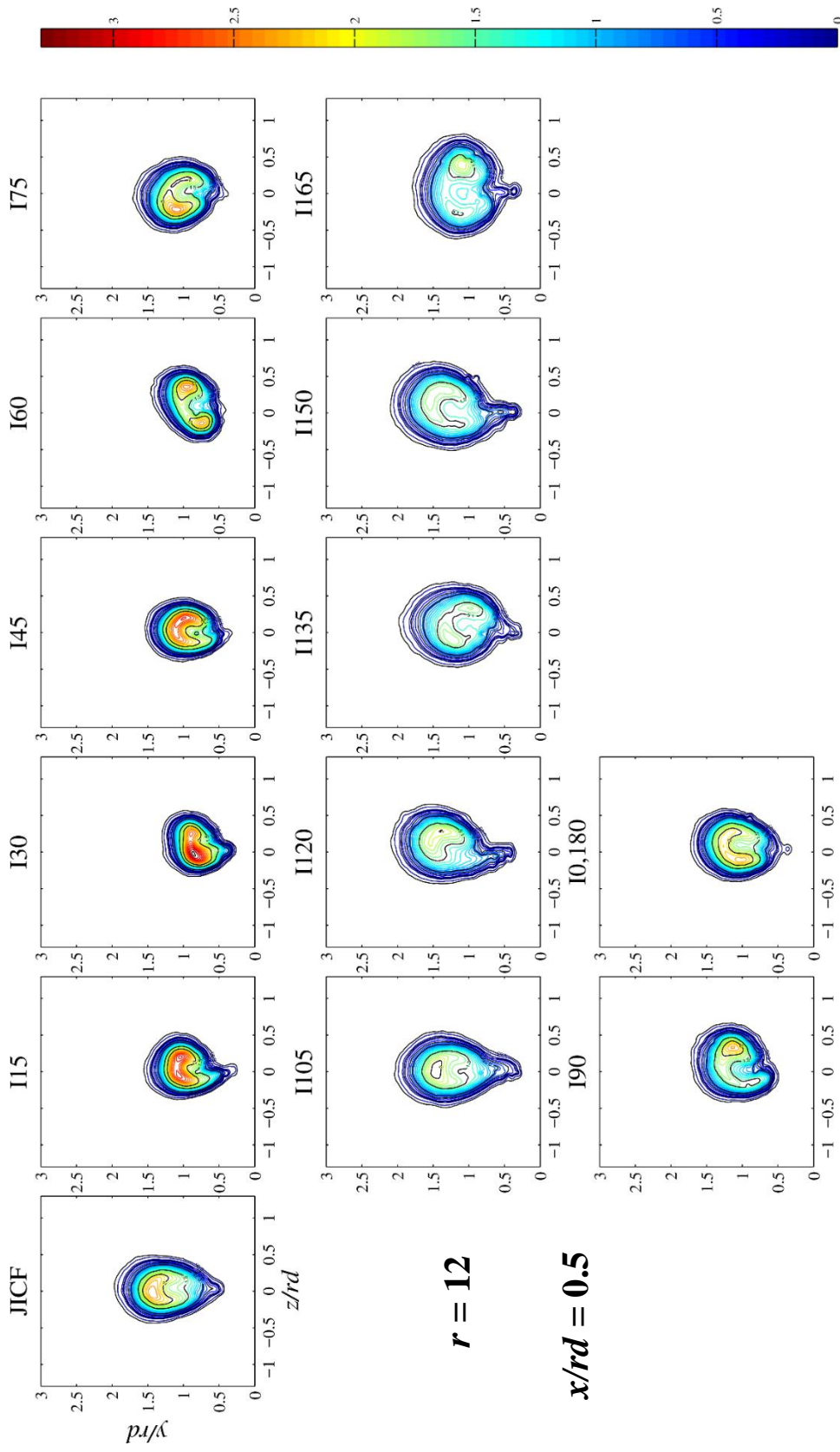
$r = 8$

$x/rd = 1.0$

รูปที่ 5.5(ข) การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสสมขวาง (V/u_{cf}) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$



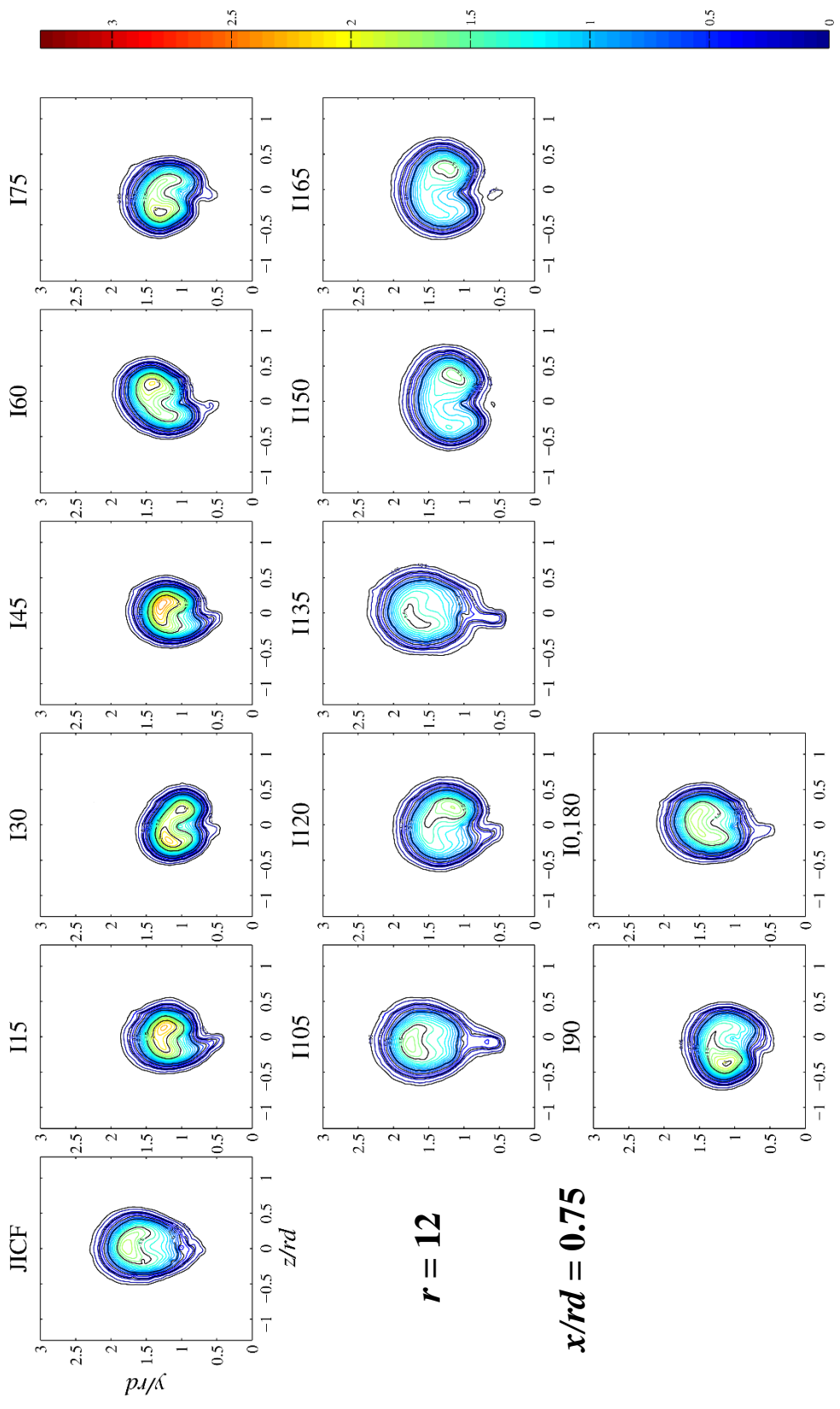
รูปที่ 5.5(ข) การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสสมทรงวง (V/u_c) ที่ $r=8$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$



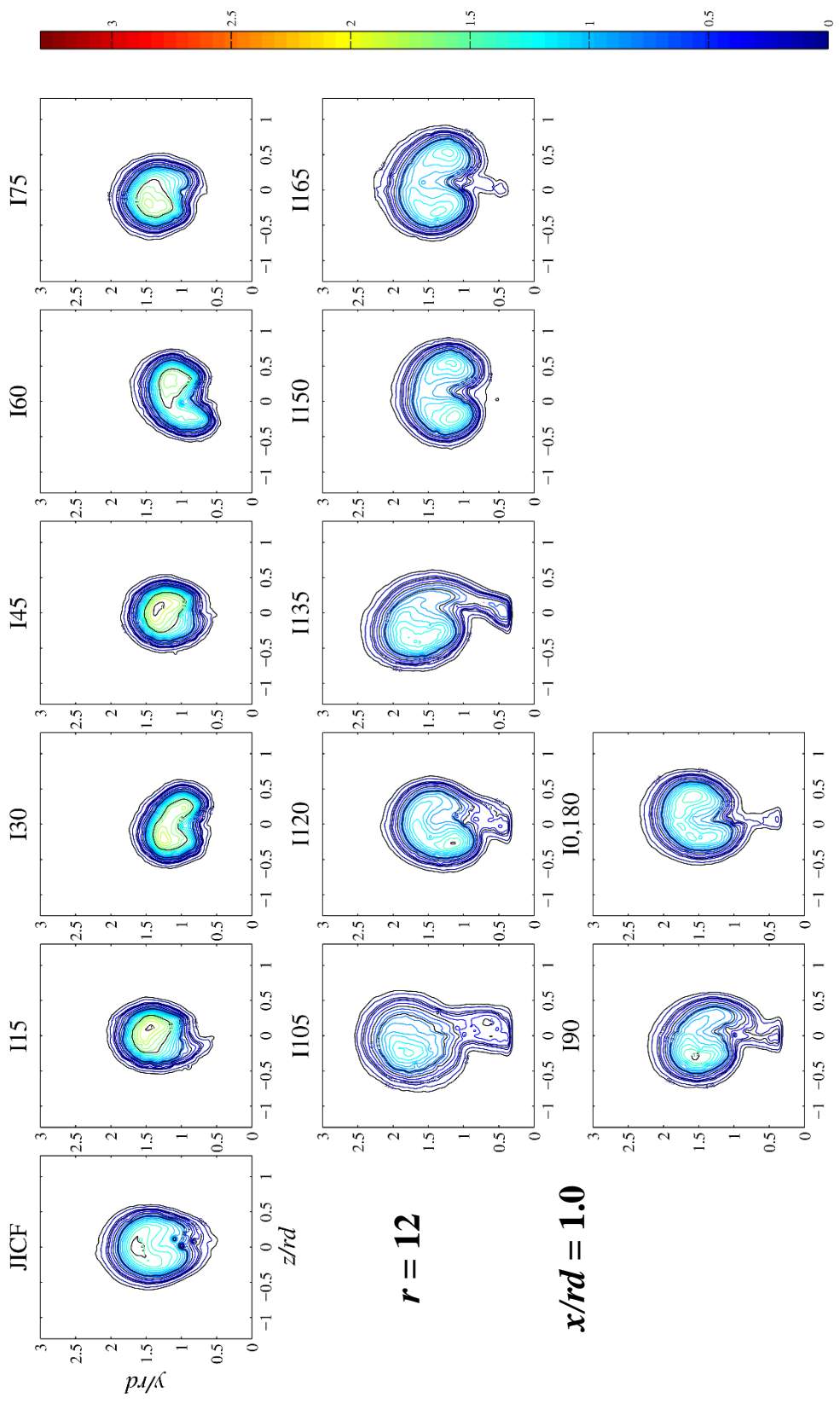
$r = 12$

$x/rd = 0.5$

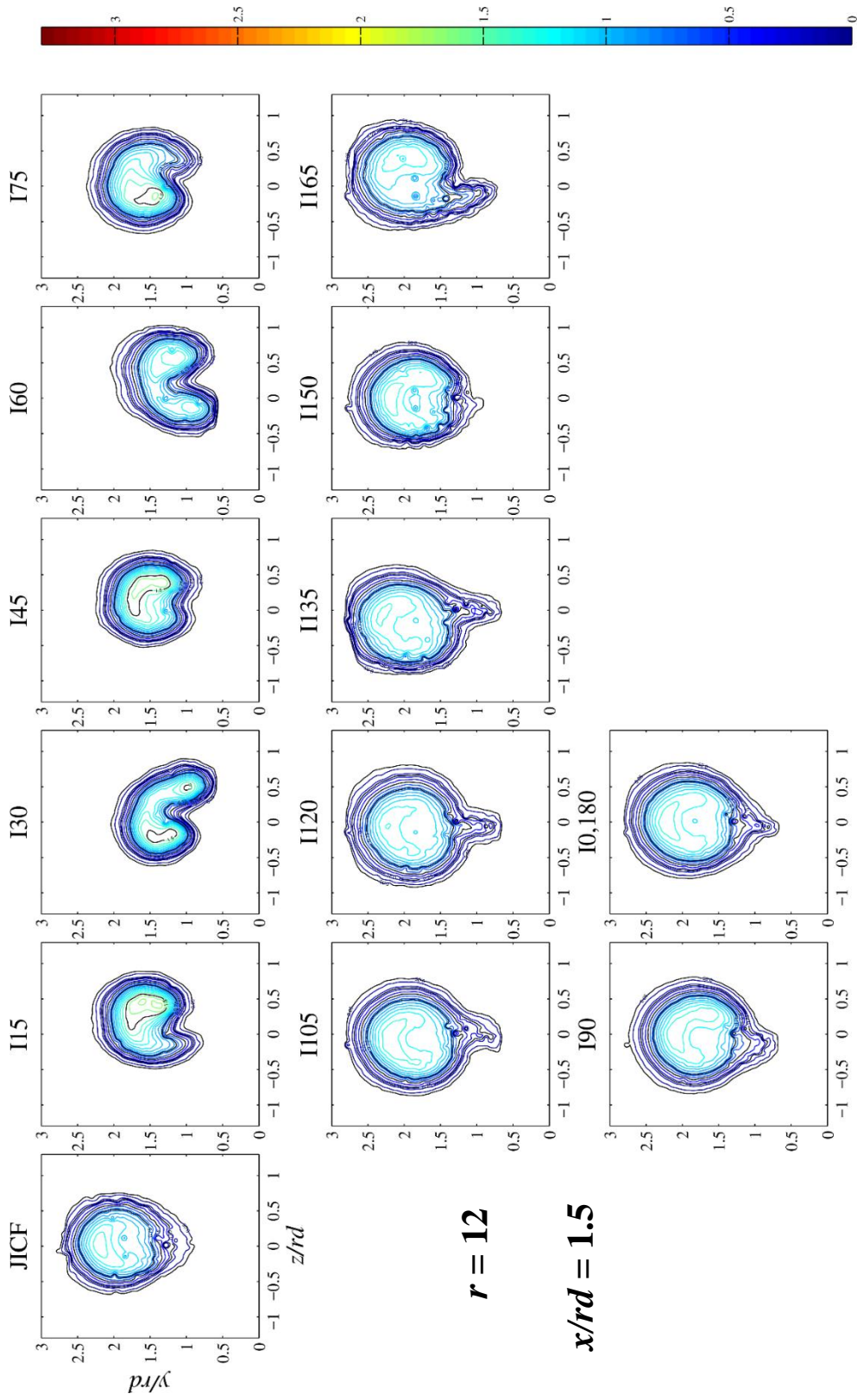
รูปที่ 5.5(ฉ) การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกระแสสมขวาง (V/u_c) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=0.5$



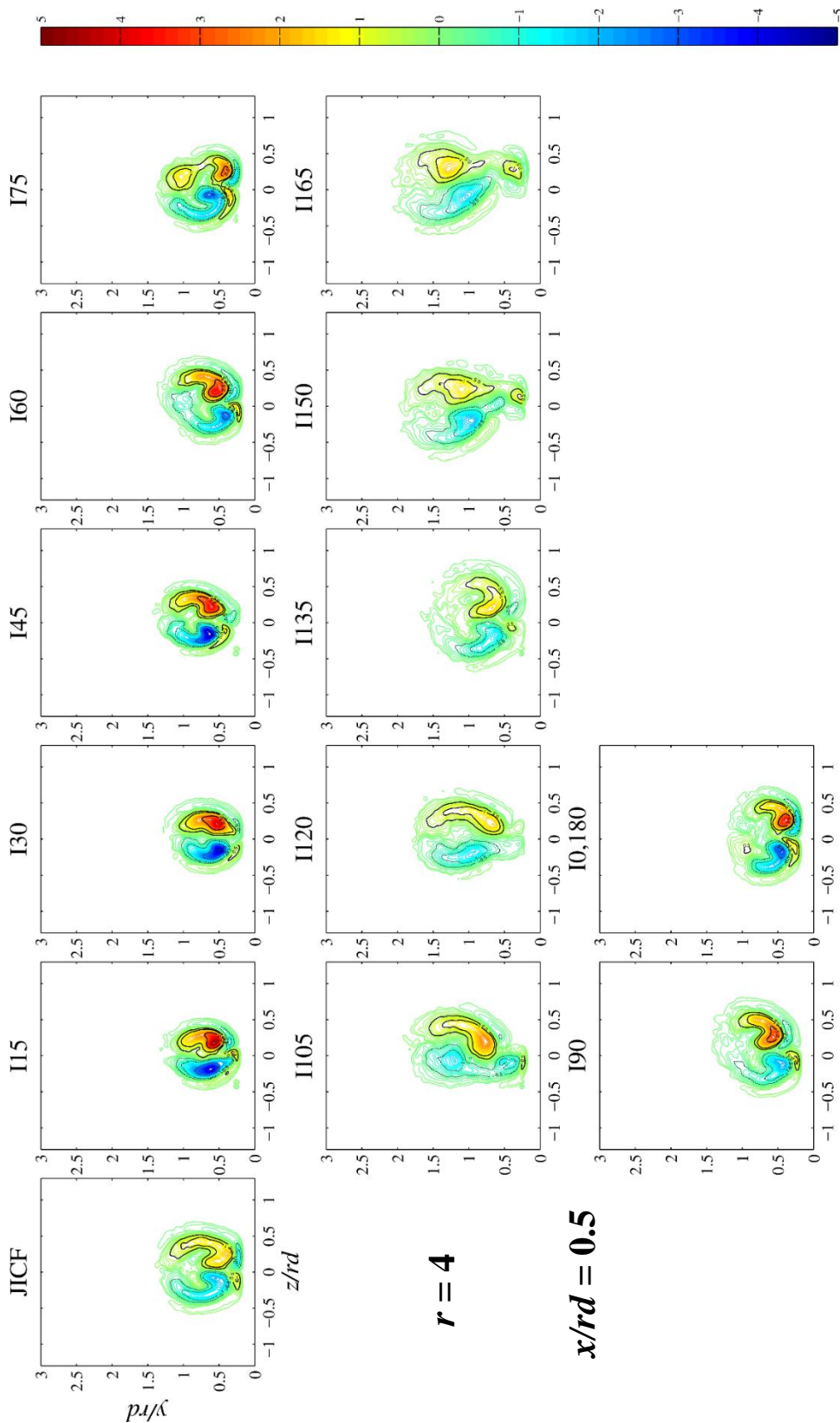
รูปที่ 5.5(ญ) การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกะแสสมขวาง (V/u_c) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=0.75$



รูปที่ 5.5(ง) การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกว้างขวาง (V/u_c) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.0$



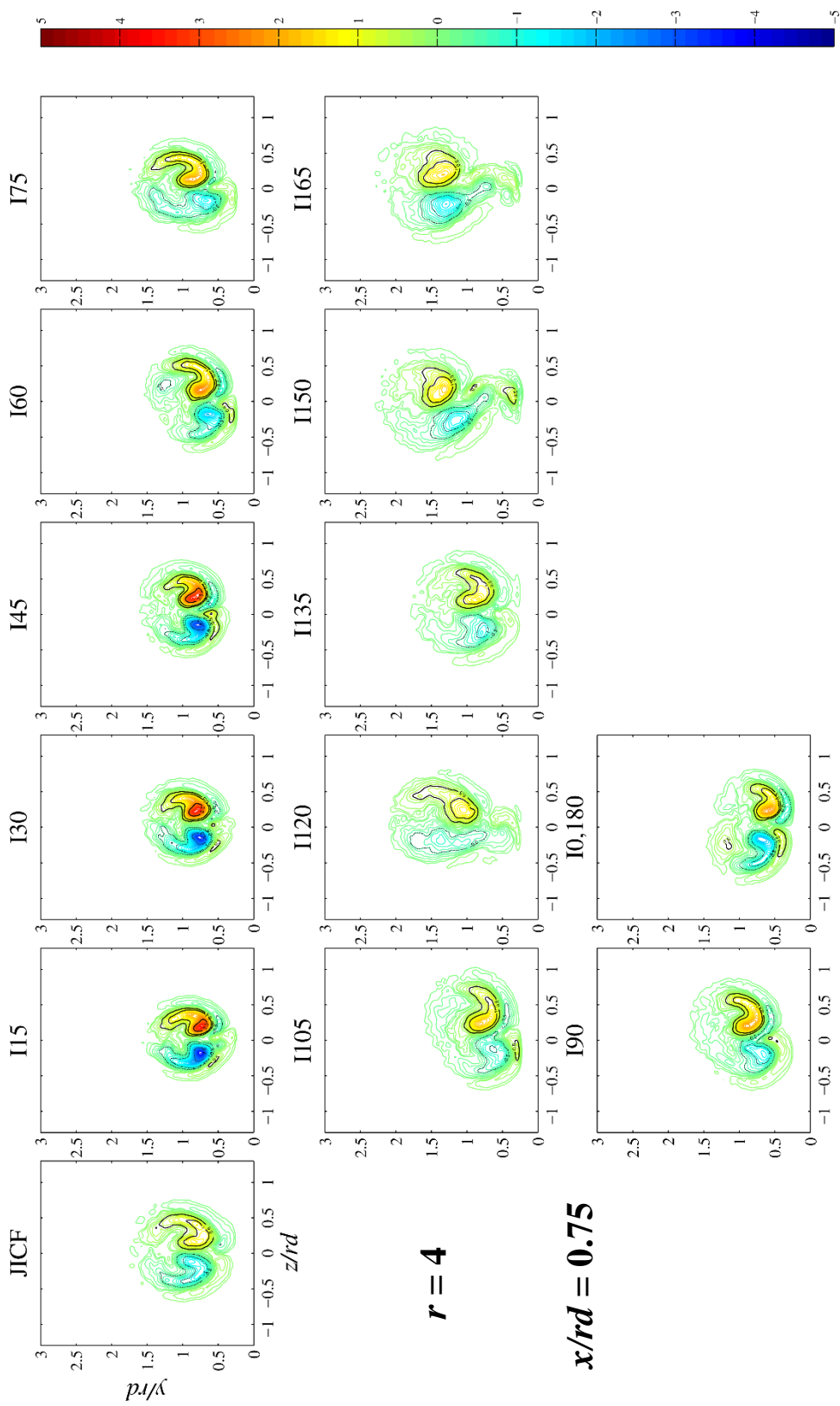
รูปที่ 5.5(ง) การกระจายตัวของอัตราเร็วเฉลี่ยต่อความเร็วกวาระผสมขวาง (V/u_c) ที่ $r=12$ ตำแหน่ง $x/rd=1.5$



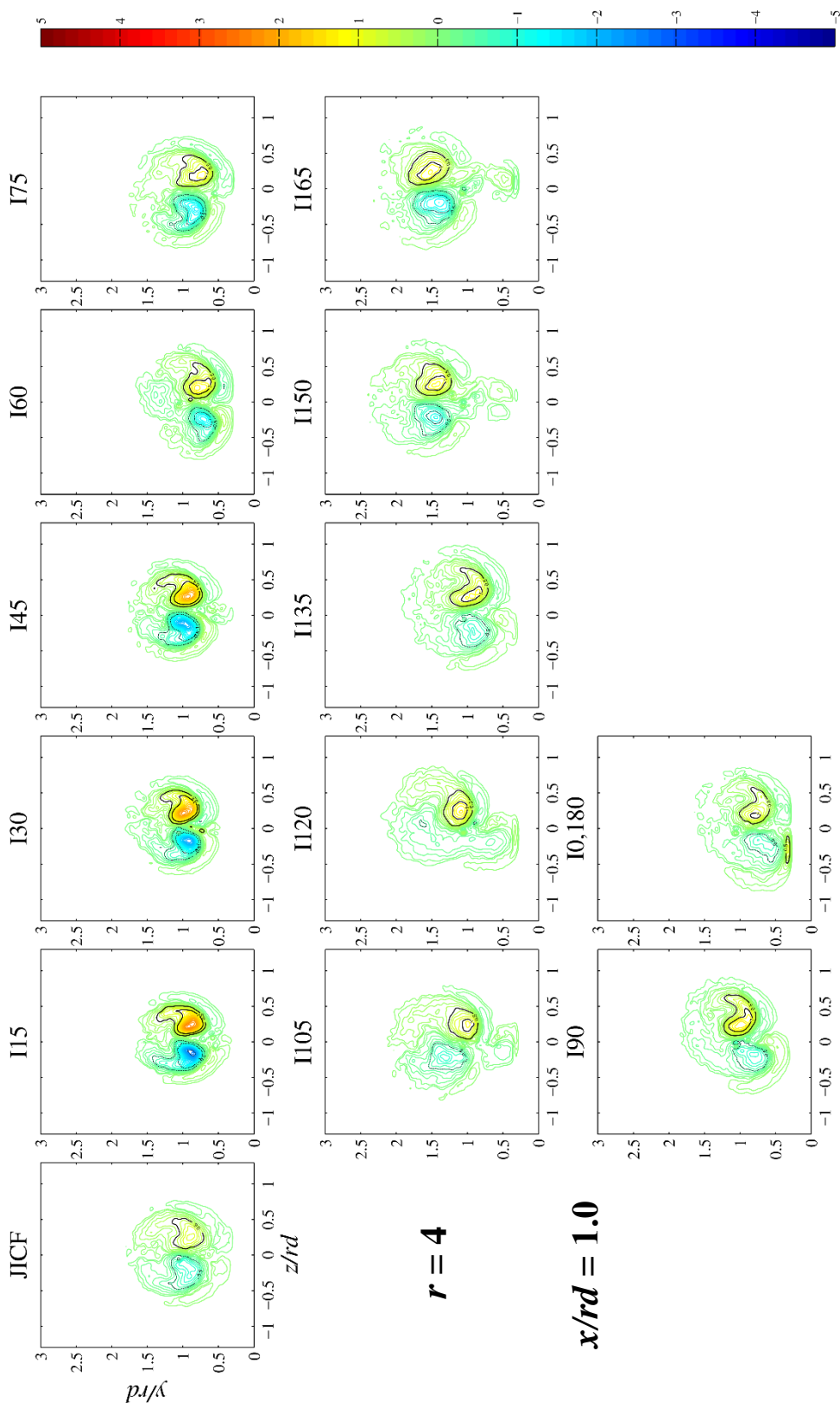
$r = 4$

$x/rd = 0.5$

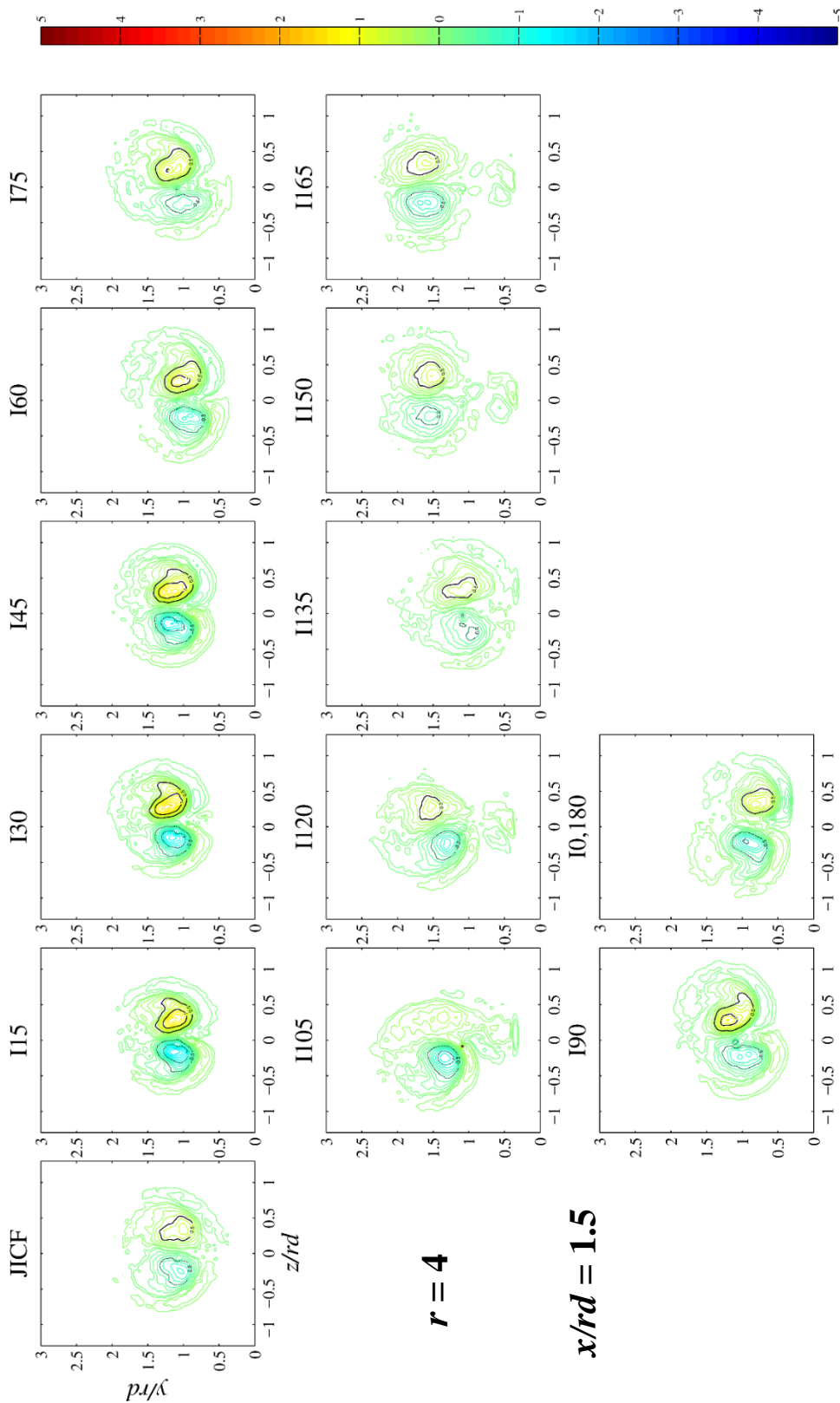
รูปที่ 5.6(ก) การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสมวง ($\omega_x d / u_{cf}$) ที่ $r = 4$ ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$



รูปที่ 5.6(ข) การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสสมขวาง ($\omega_x d / u_{cr}$) ที่ $r = 4$ ตำแหน่ง $x/rd = 0.75$



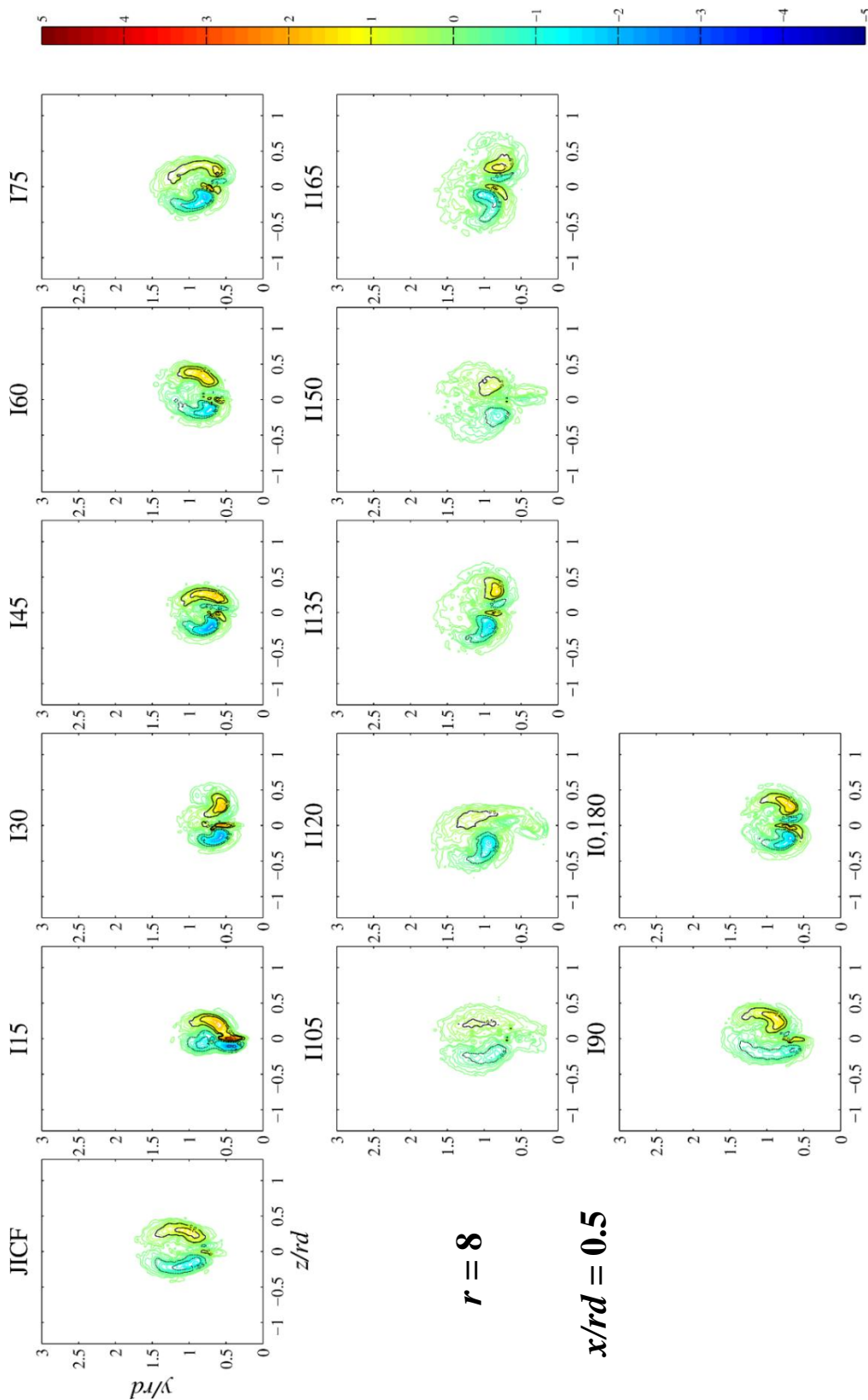
รูปที่ 5.6(ค) การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสสมทรงวง ($\omega_x d / u_{cf}$) ที่ $r = 4$ ตำแหน่ง $x/rd = 1.0$



$r = 4$

$x/rd = 1.5$

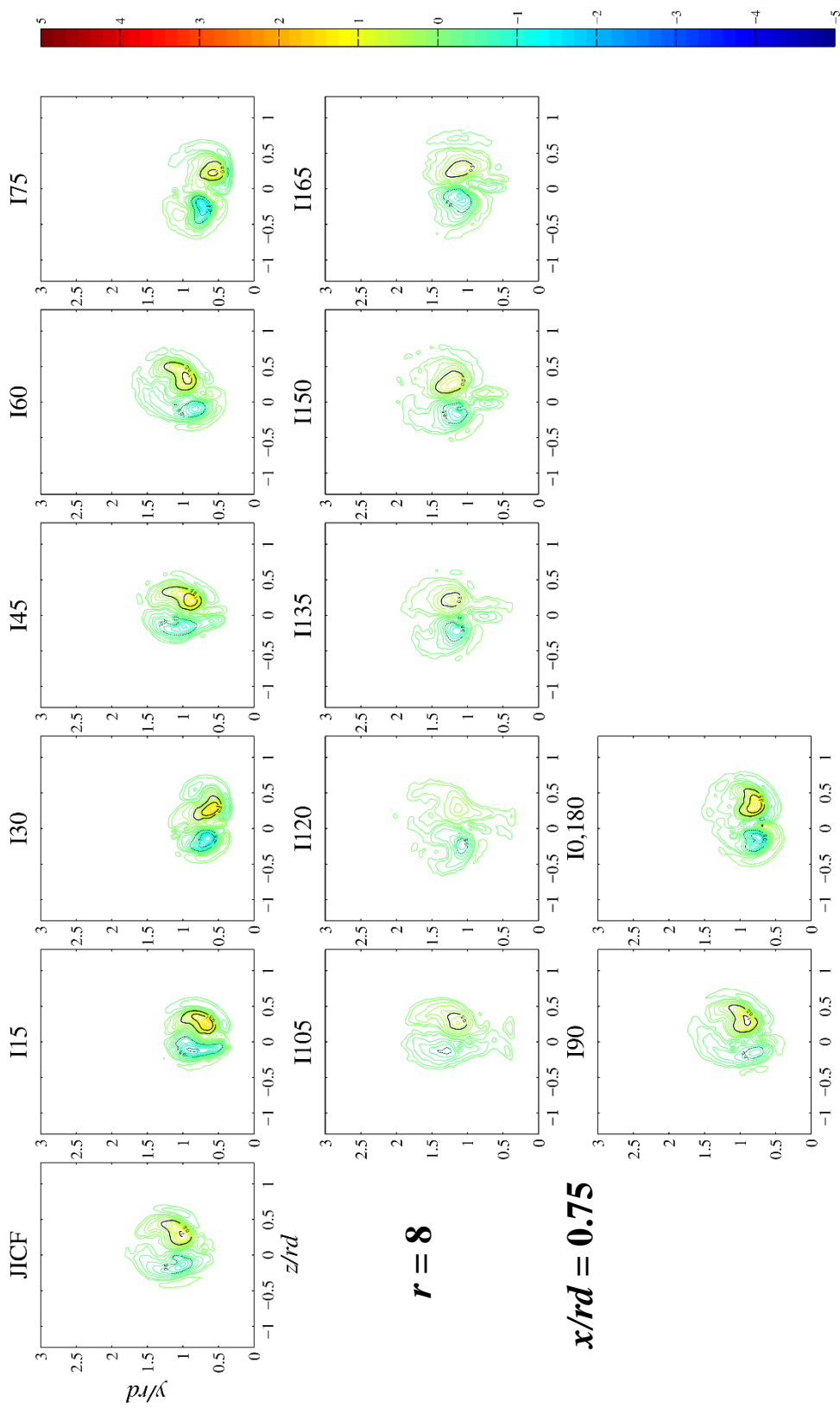
รูปที่ 5.6(ง) การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสสมขวาง ($\omega_x d / u_c$) ที่ $r = 4$ ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$



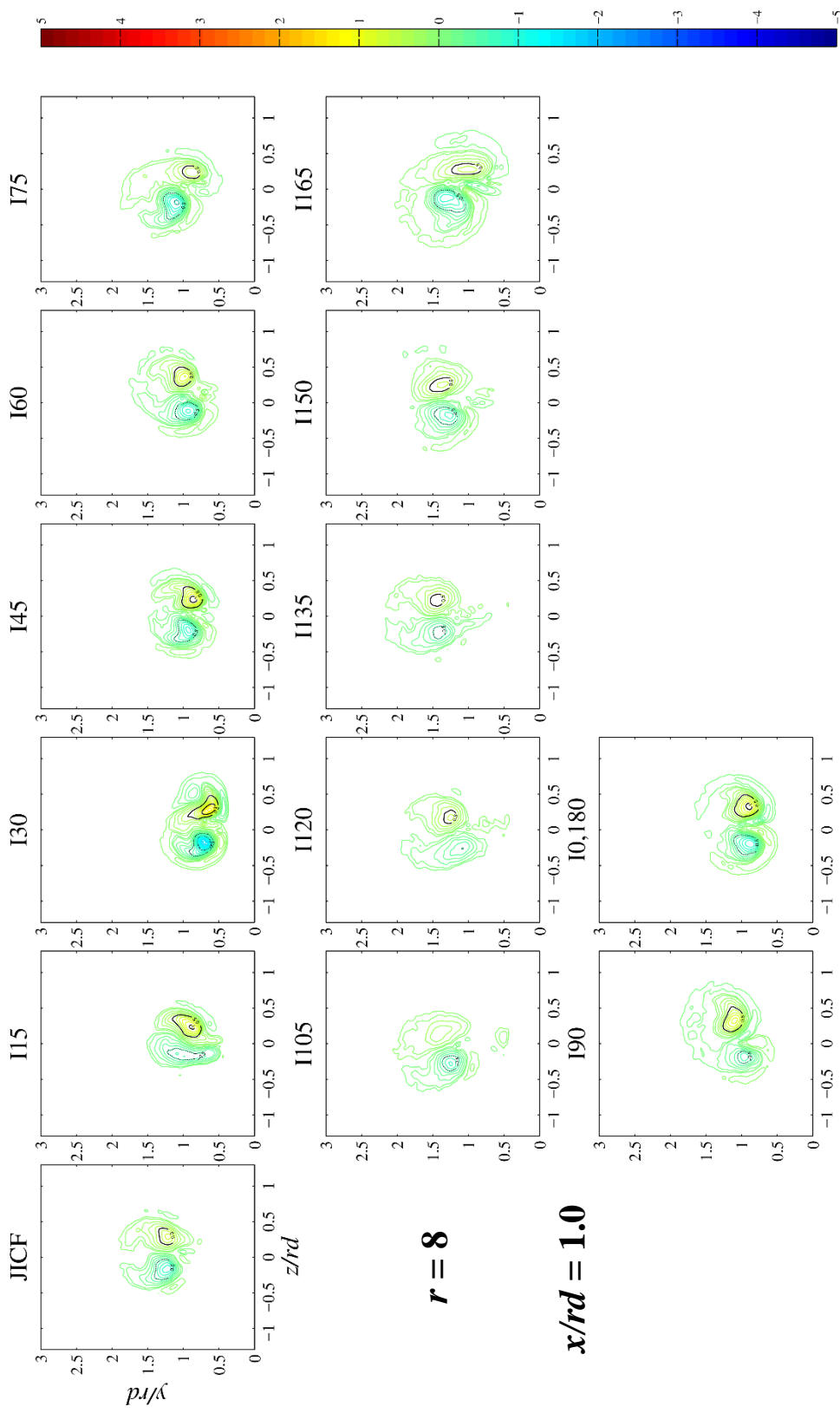
$r = 8$

$x/rd = 0.5$

รูปที่ 5.6(จ) การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสลมขวาง ($\omega_x d / u_{cf}$) ที่ $r = 8$ ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$



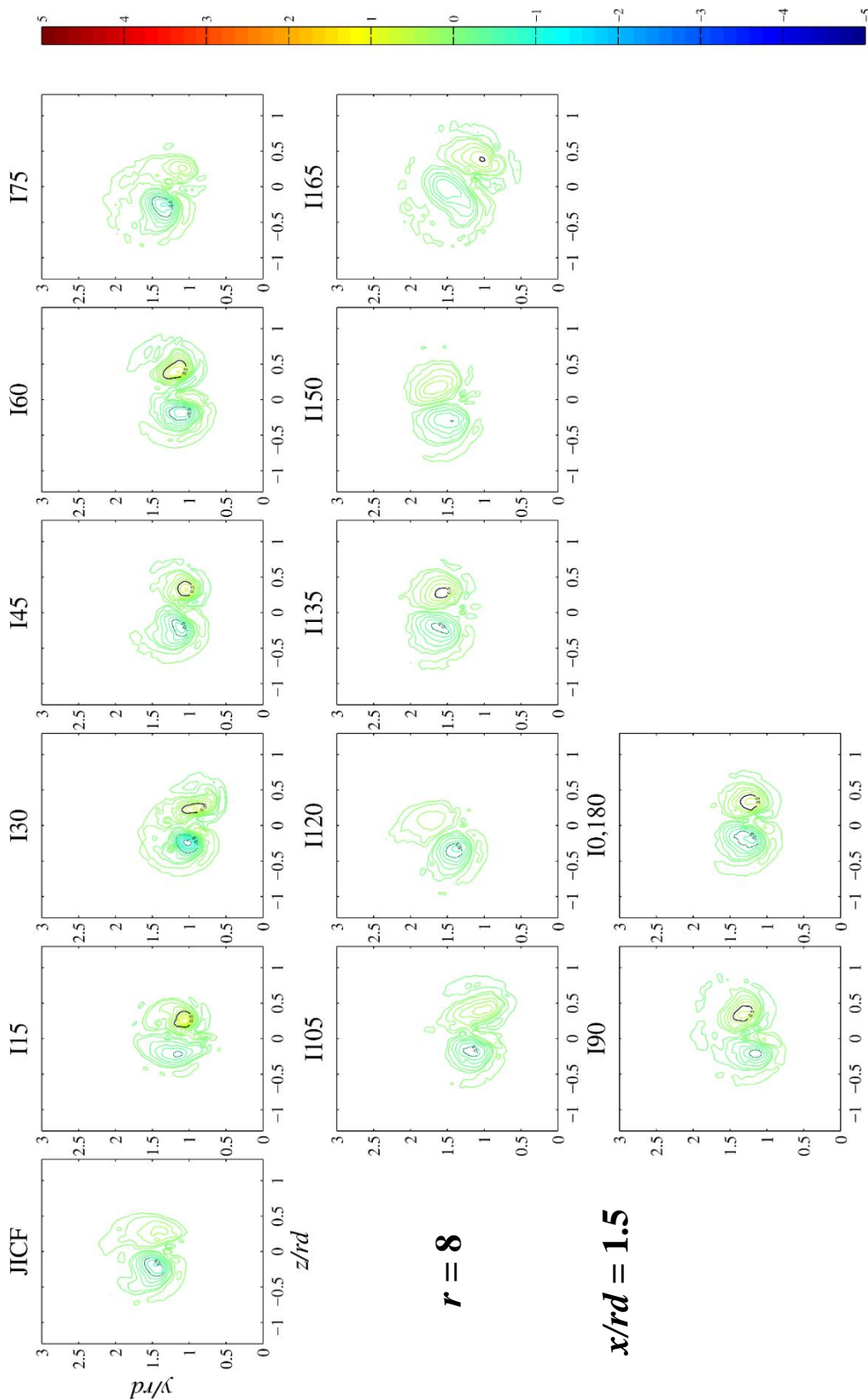
รูปที่ 5.6(ด) การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสมุมฉาก ($\omega_x d / u_{cf}$) ที่ $r = 8$ ตำแหน่ง $x/rd = 0.75$



$r = 8$

$x/rd = 1.0$

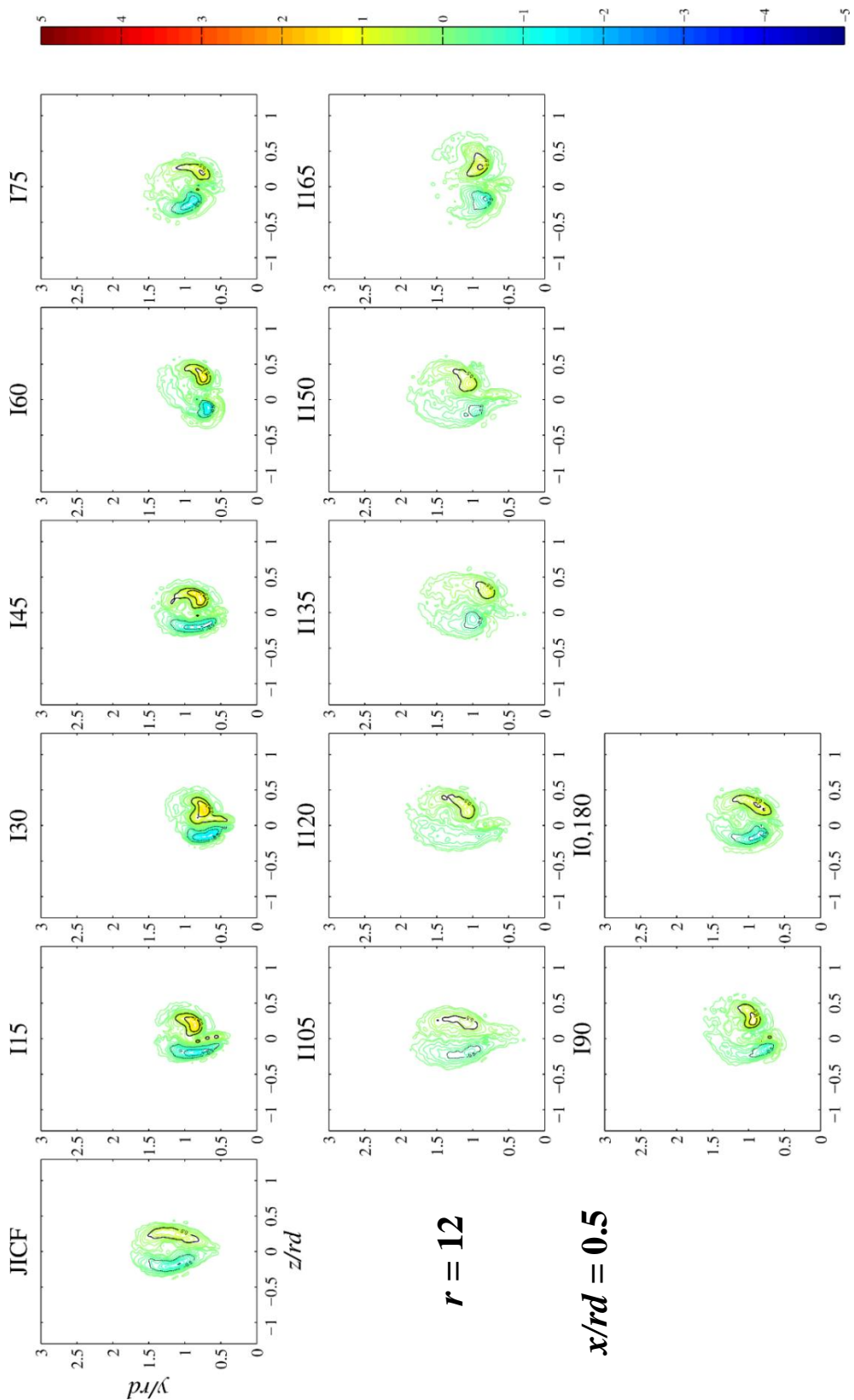
รูปที่ 5.6(ข) การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสมุมฉาก ($\omega_x d / u_{cf}$) ที่ $r = 8$ ตำแหน่ง $x/rd = 1.0$



$r = 8$

$x/rd = 1.5$

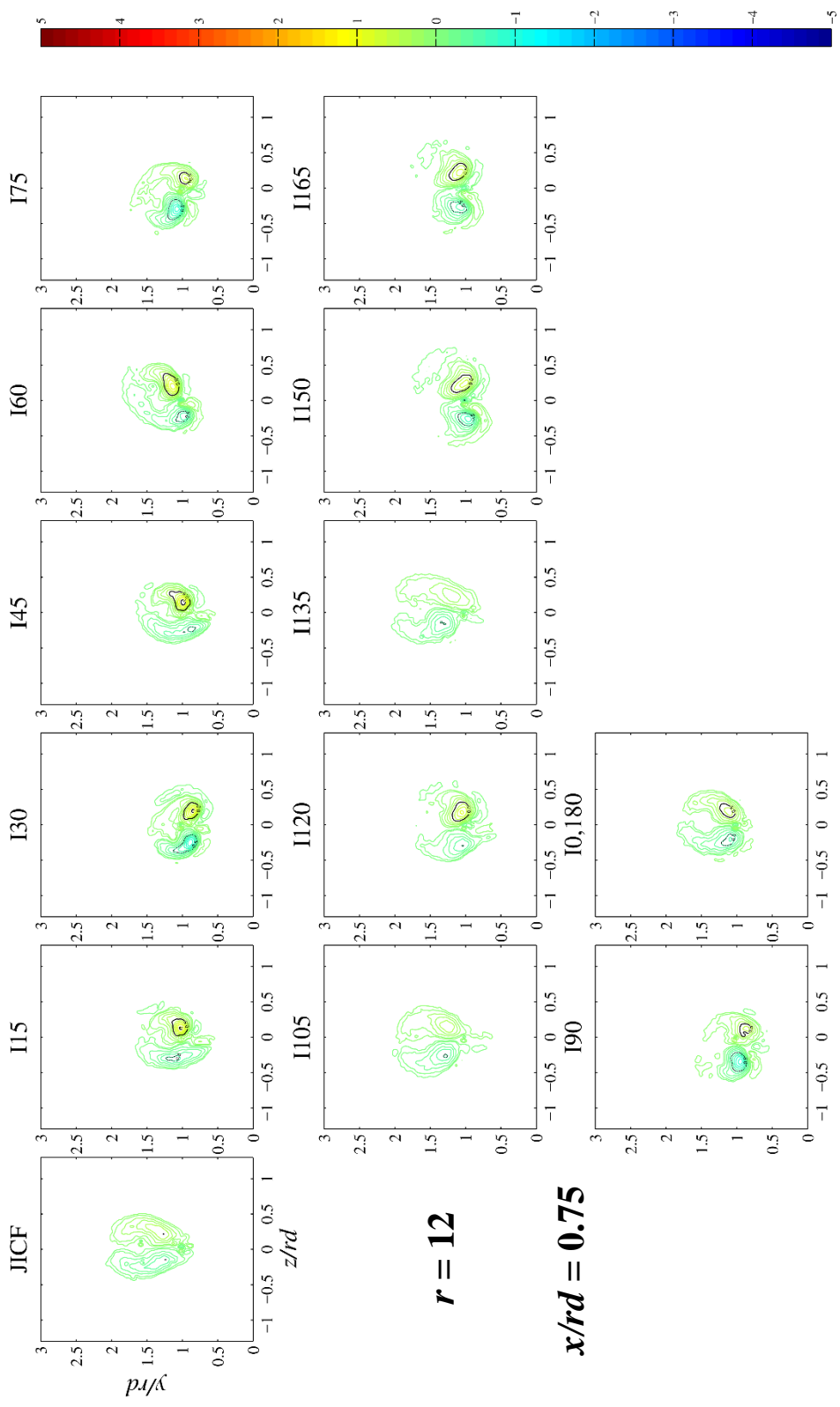
รูปที่ 5.6(ซ) การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสสมมาตร ($\omega_x d / u_{cf}$) ที่ $r = 8$ ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$



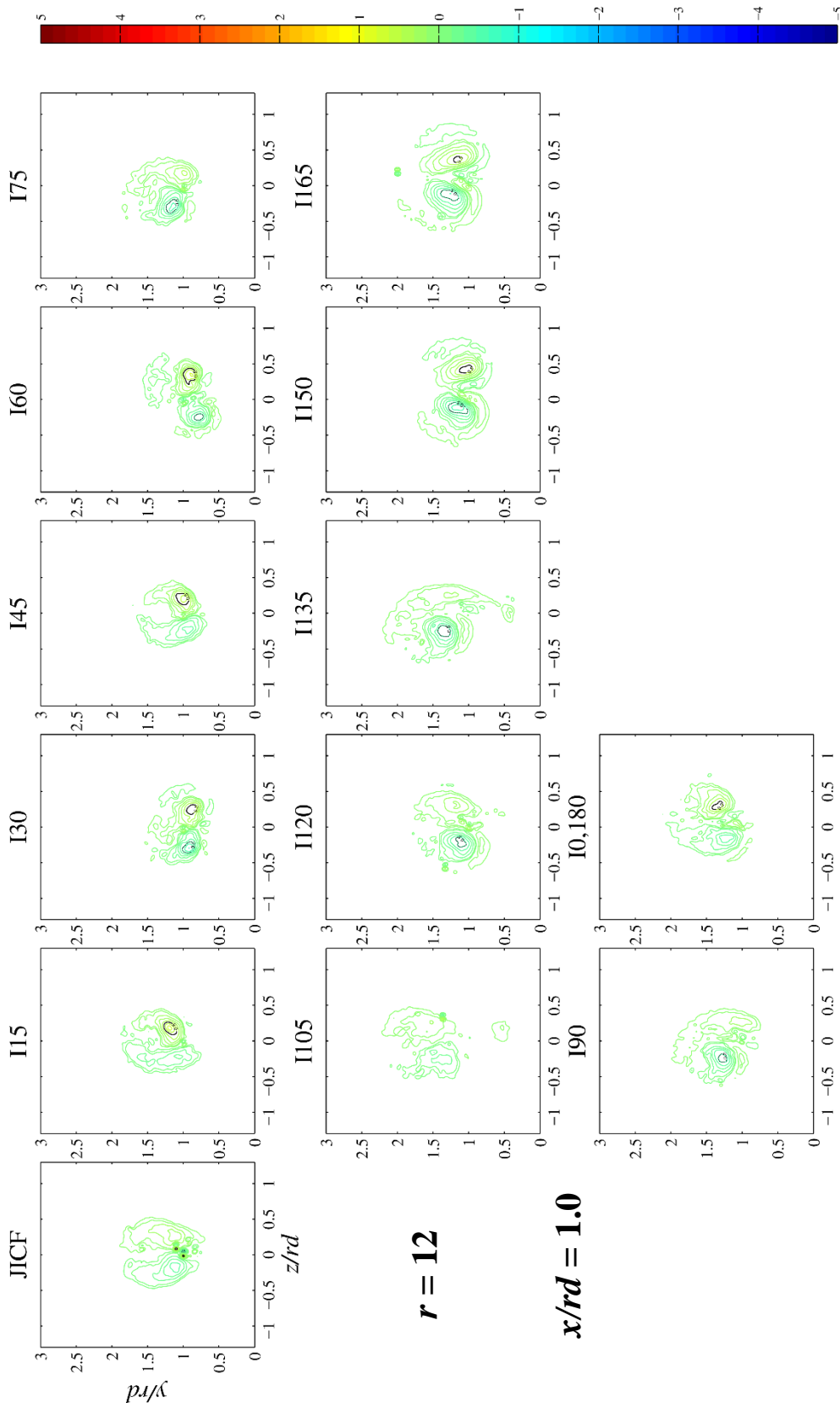
$r = 12$

$x/rd = 0.5$

รูปที่ 5.6(ฅ) การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสมุมฉาก ($\omega_x d / u_{cf}$) ที่ $r = 12$ ตำแหน่ง $x/rd = 0.5$



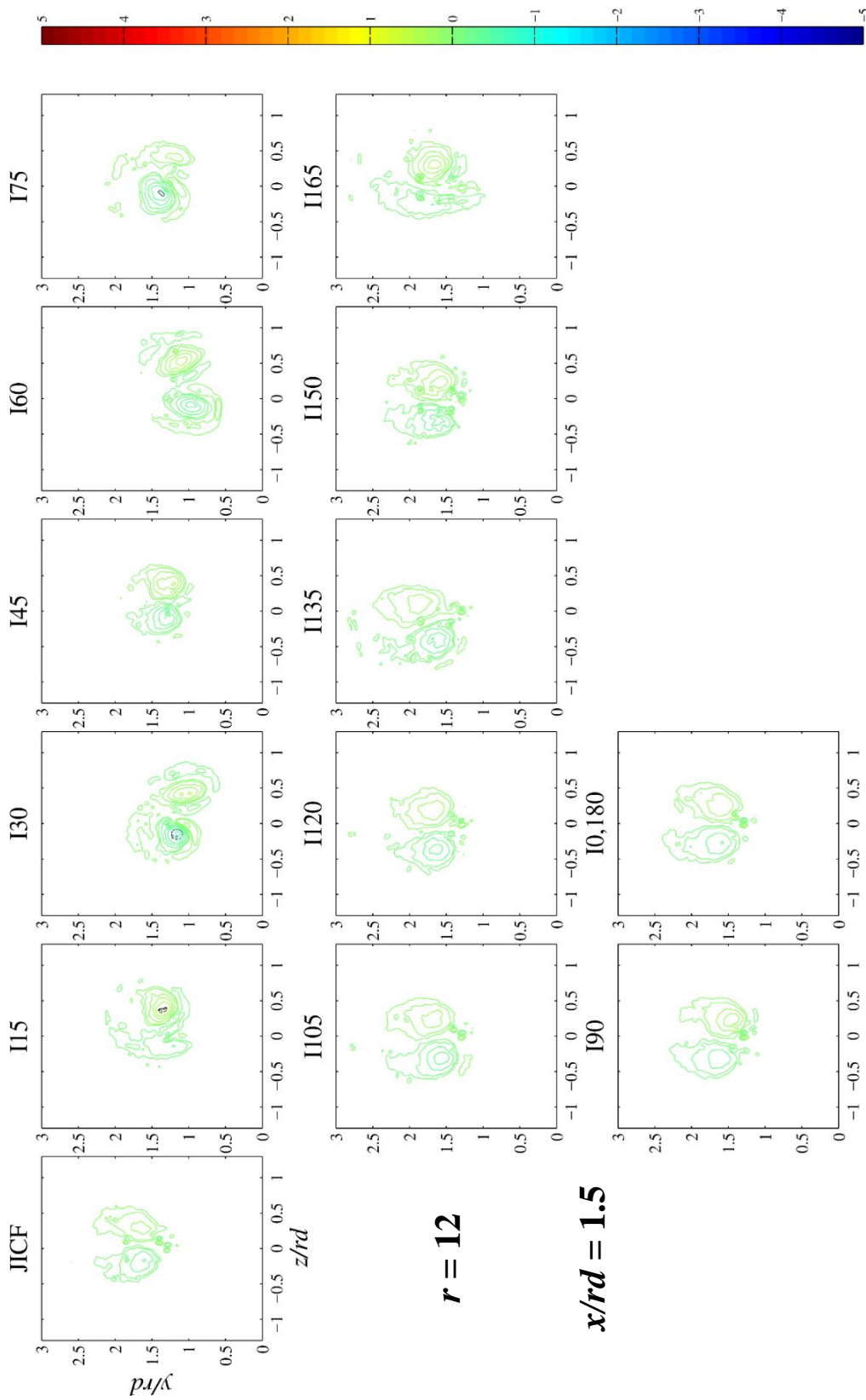
รูปที่ 5.6(ญ) การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสสมขวาง ($\omega_x d / u_{cf}$) ที่ $r = 12$ ตำแหน่ง $x/rd = 0.75$



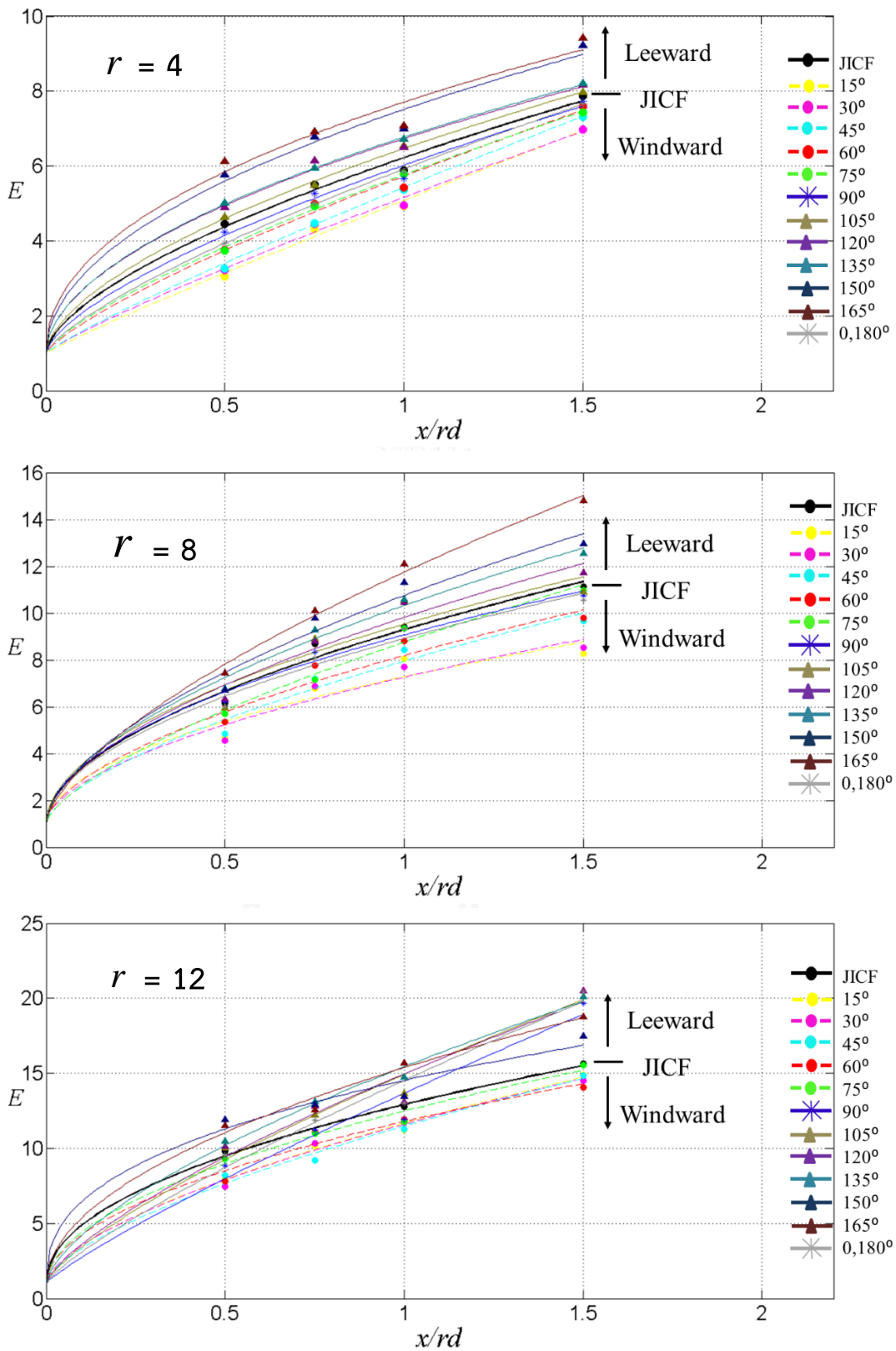
$r = 12$

$x/rd = 1.0$

รูปที่ 5.6(ก) การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วการกระแสมุมขวาง ($\omega_x d / u_{cf}$) ที่ $r = 12$ ตำแหน่ง $x/rd = 1.0$

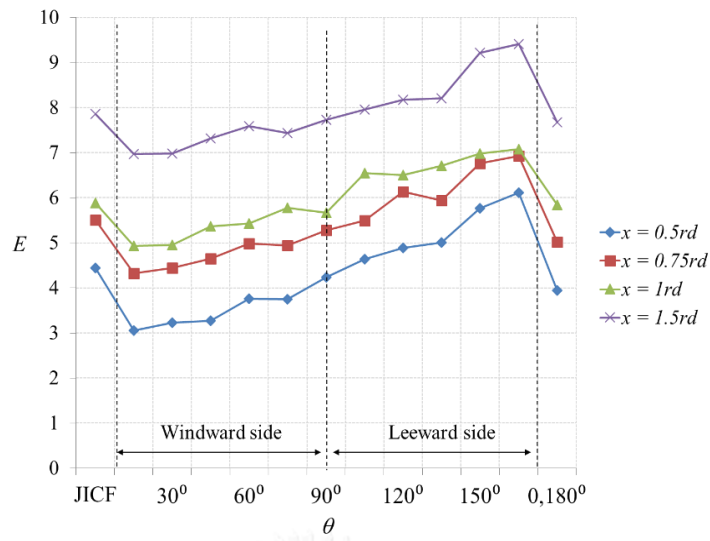


รูปที่ 5.6(ญ) การกระจายตัวของ Vorticity ตามแนวแกน x ต่อความเร็วกระแสสมขวาง ($\omega_x d / u_{cf}$) ที่ $r = 12$ ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$

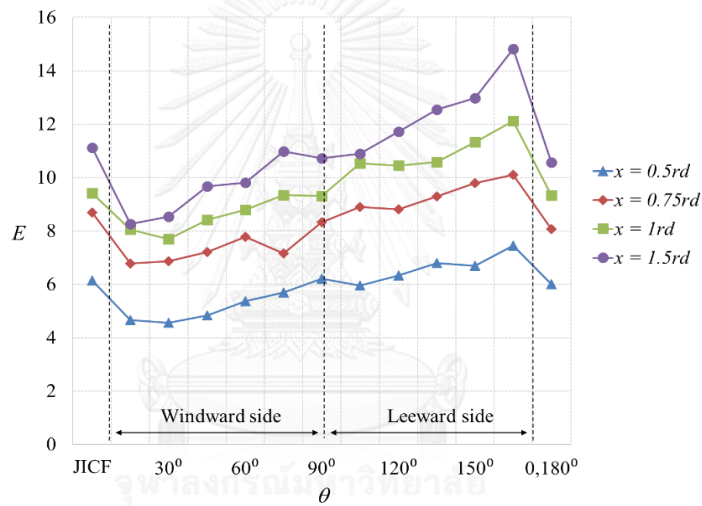


รูปที่ 6.1 การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรตามระยะทางการไหล

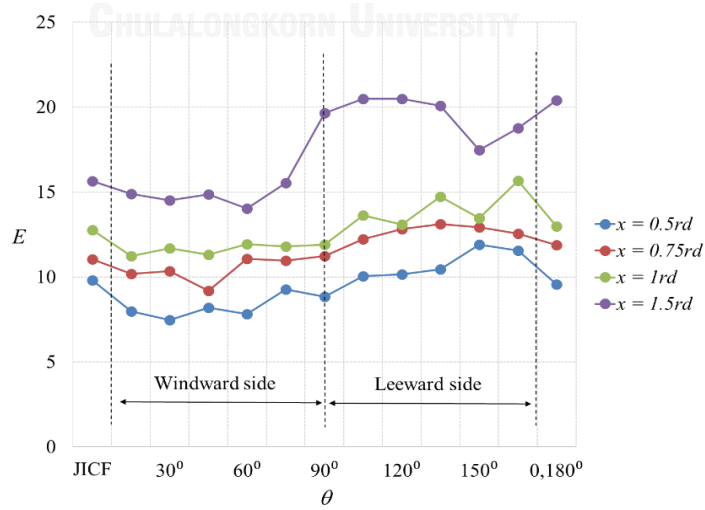
$r = 4$



$r = 8$

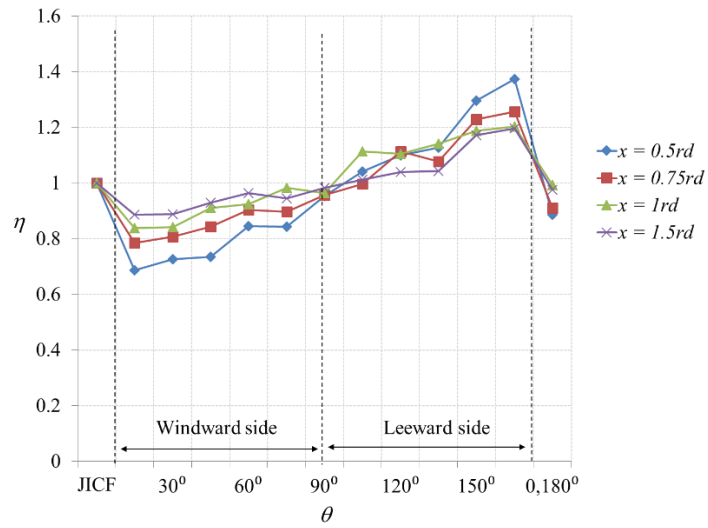


$r = 12$

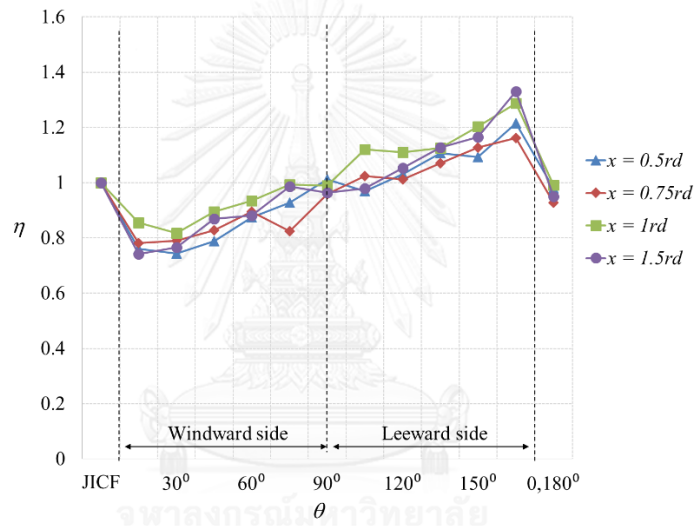


รูปที่ 6.2 ผลของตำแหน่งเชิงมุมชนิดเจ็ตควบคุมต่อค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร (E)

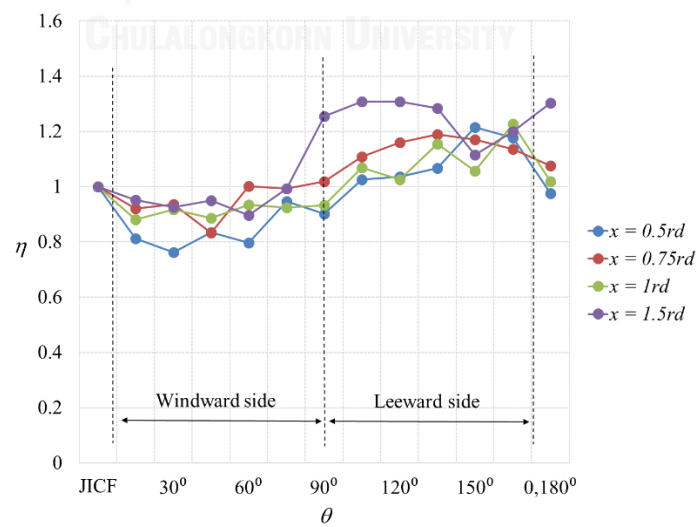
$r = 4$



$r = 8$



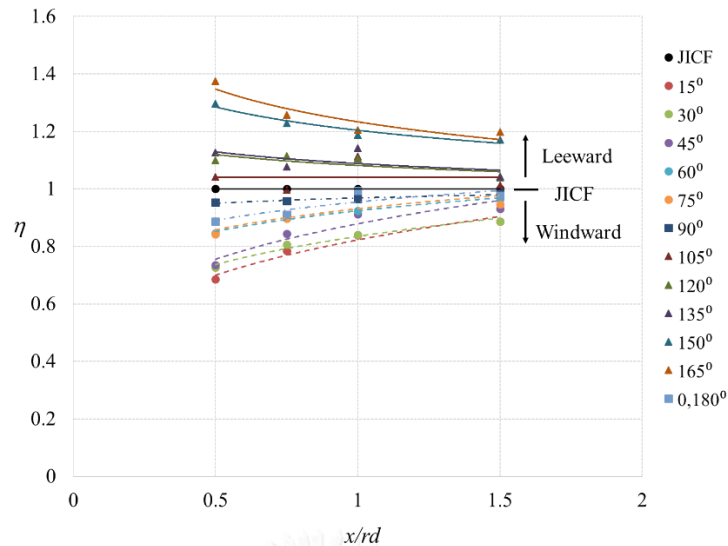
$r = 12$



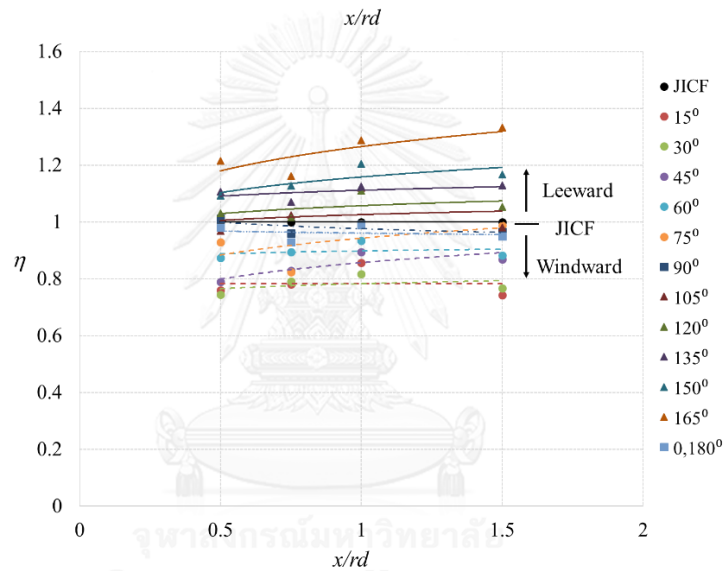
รูปที่ 6.3

ผลของตำแหน่งเชิงมุมฉีดเจ็ตควบคุมต่อค่าประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสม (η)

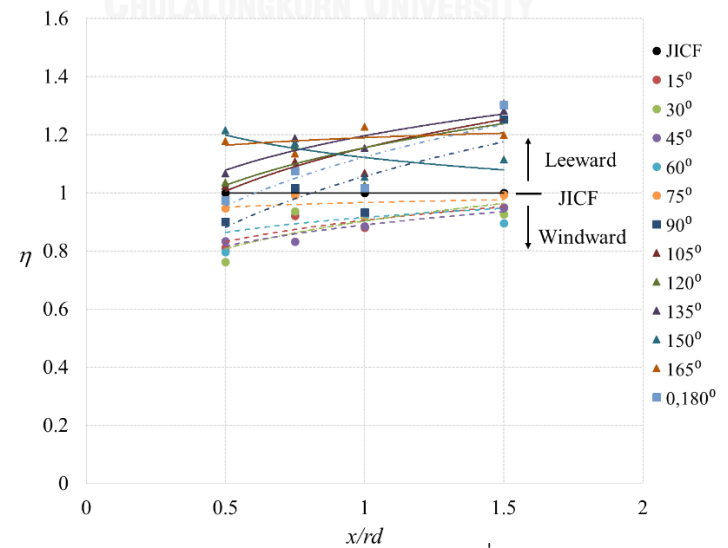
$r = 4$



$r = 8$

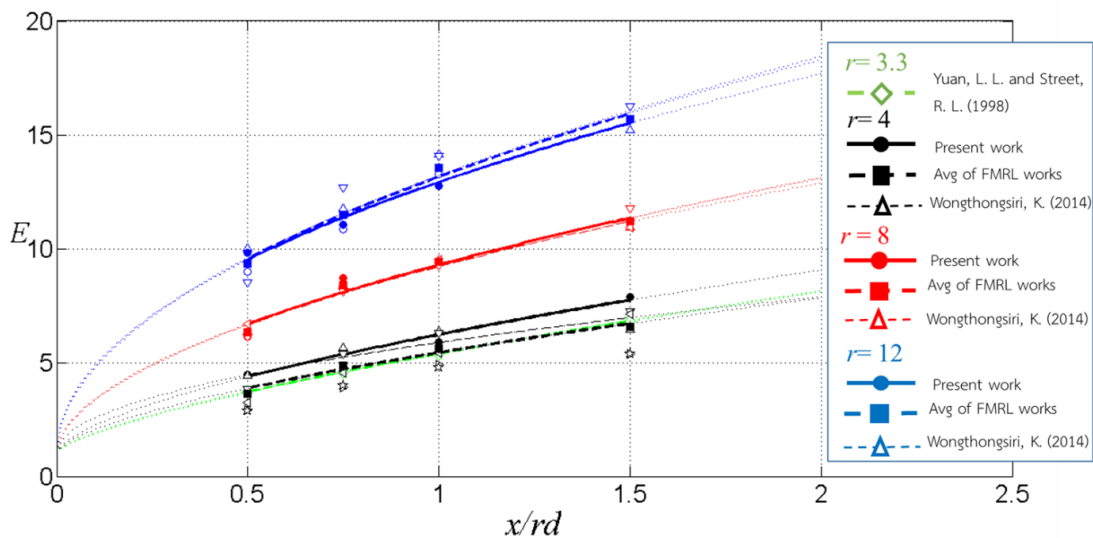


$r = 12$



รูปที่ 6.4

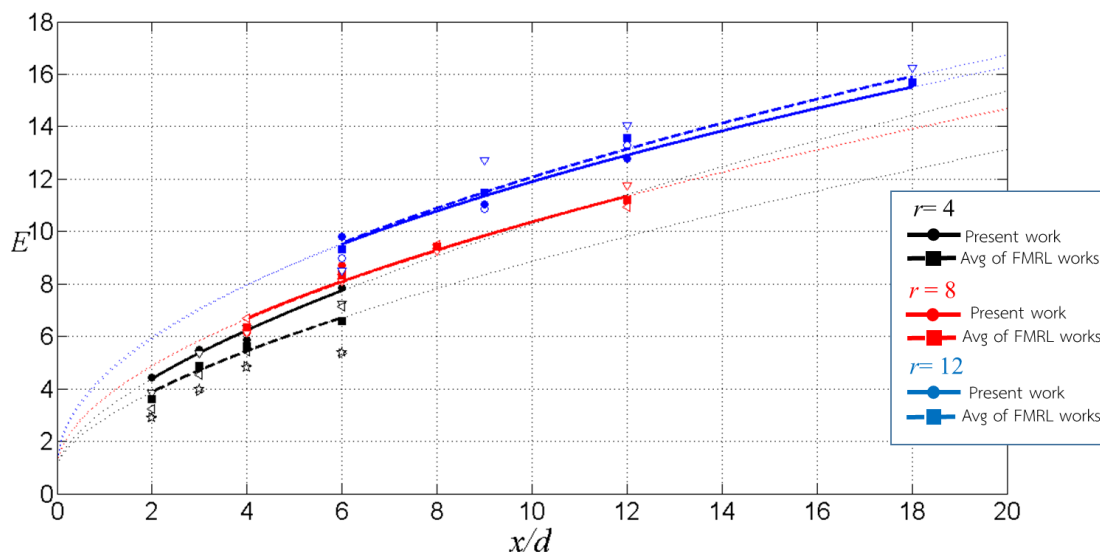
การพัฒนาตัวของค่าประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำการผสม (η) ตามระยะทางการไหล



โดยที่ Avg of FMRL works คือ ค่าเฉลี่ยของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ของงานดังต่อไปนี้

- 1) กรณีของงานปัจจุบัน (Present work) ทำการทดลองที่ = 4,8 และ 12
- 2) กรณีของ Witayaparakorn, T. (2013) ทำการทดลองที่ = 4
- 3) กรณีของ Srimekharat, A. (2013) ทำการทดลองที่ = 4
- 4) กรณีของ Dawyok, S. (2014) ทำการทดลองที่ = 4
- 5) กรณีของ Wongthongsiri, K. (2014) ทำการทดลองที่ = 4,8 และ 12
- 6) กรณีของ Soupramongkol, P. (2015) ทำการทดลองที่ = 8
- 7) กรณีของ Wangkiat *et. al.* (2015) ทำการทดลองที่ = 12
- 8) กรณีของ Somphrom, K.(2016) ทำการทดลองที่ = 4,8 และ 12

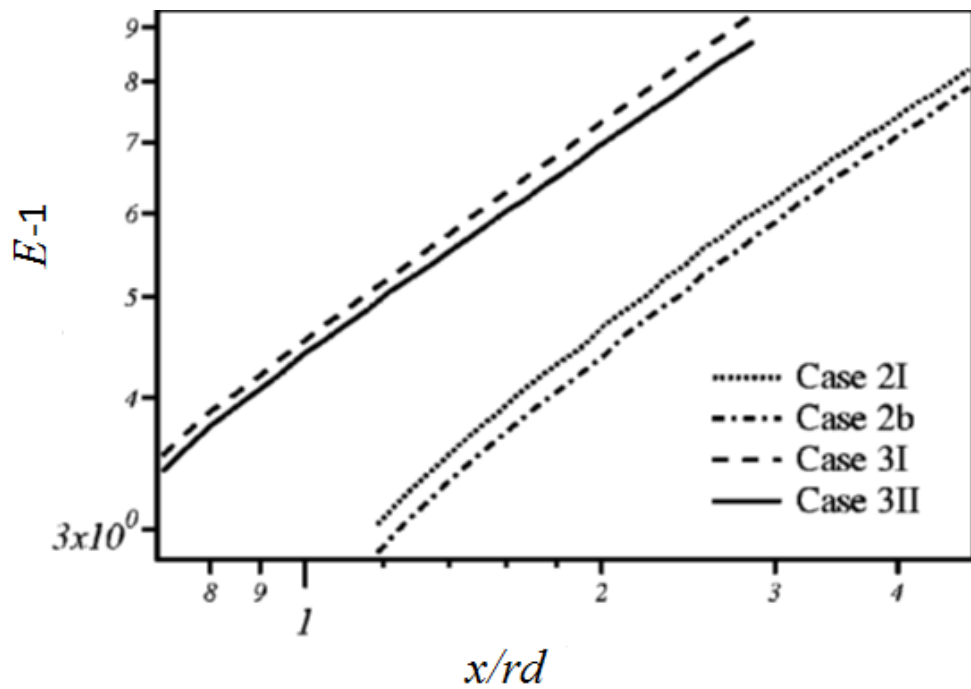
รูปที่ 7.1(ก) การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรตามระยะทางการไหลกรณี JICF บน $-rd$ สเกล จากงานวิจัยปัจจุบันและอดีต



โดยที่ Avg of FMRL works คือ ค่าเฉลี่ยของค่าอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ของงานดังต่อไปนี้

- 9) กรณีของงานปัจจุบัน (Present work) ทำการทดลองที่ = 4,8 และ 12
- 10) กรณีของ Witayaparakorn, T. (2013) ทำการทดลองที่ = 4
- 11) กรณีของ Srimekharat, A. (2013) ทำการทดลองที่ = 4
- 12) กรณีของ Dawyok, S. (2014) ทำการทดลองที่ = 4
- 13) กรณีของ Wongthongsiri, K. (2014) ทำการทดลองที่ = 4,8 และ 12
- 14) กรณีของ Soupramongkol, P. (2015) ทำการทดลองที่ = 8
- 15) กรณีของ Wangkiat *et. al.* (2015) ทำการทดลองที่ = 12
- 16) กรณีของ Sornphrom, K.(2016) ทำการทดลองที่ = 4,8 และ 12

รูปที่ 7.1(ข) การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ตามระยะทางการไหลกรณี JICF บน- d สเกล จากงานวิจัย ปัจจุบันและอดีต



รูปที่ 7.2

การพัฒนาตัวของอัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตรตาม
ระยะทางการไหลกรณี JICF สเกลด้วย rd

Yuan, L. L. and Street, R. L. (1998)

รายการอ้างอิง

- 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.
- 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.
- Yuan, L. L. and Street, R. L. (1998). Trajectory and entrainment of a round jet in crossflow, *Physics of Fluids*, Vol. 10, No. 9, pp. 2323-2335.
- Liscinsky, D. S., True, B. and Holdeman, J. D. (1995). Effects of initial conditions on a single jet in crossflow, Proceedings of the 31st Joint Propulsion Conference, San Diego, 10–12 July 1995, AIAA Paper No. 95-2998,
- 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.
- Bunyajitradulya, A. and Sathapornnanon, S. (2005). Sensitivity to tab disturbance of the mean flow structure of nonswirling jet and swirling jet in crossflow, *Phys. Fluids* 17, 045102.
- Eroglu, A. and Breidenthal, R.E. (2001). Structure, penetration and mixing of pulsed jets in crossflow, *AIAA J.*, vol. 39, no. 3, pp. 417-423.
- M'Closkey, R. T., King, J. M., Cortelezzi, L. and Karagozian, A. R. (2002). The actively controlled jet in crossflow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 452, pp. 325-335.
- 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.
- Yingjaroen, T., Pimpin, A. and Bunyajitradulya, A. (2006). Evolution of Mixing Regions in Jet and Swirling Jet in Crossflow: An Experimental Study, The 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand 18-20 October 2006, Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Denev, J. A., Fröhlich, J. and Bockhorn, H. (2009). Large eddy simulation of a swirling transverse jet into a crossflow with investigation of scalar transport, *Phys. Fluids* 21, 015101.

Limdumrongtum, P., Chongsiripinyo, K., Non-tiwatwanich, P., Pimpin, A. and Bunyajitradulya, A. (2009). Investigation of Mixing Structure in The Near Field of Swirling Jets in Crossflow, The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand November 4 – 7, 2009, Chiang Mai.

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 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand November 4 – 7, 2009, Chiang Mai.

Bunyajitradulya, A. (2011). Manipulation and control of the entrainment of a jet in crossflow, TRF RMU5080047 Research Project Report, Thailand Research Fund (TRF).

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

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.

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

Chaikasetsin, S., Sushewakhul, T. and Panusittikorn, P. (2014). Effects of azimuthal control jets to main jet mass flowrate ratio on the entrainment of a jet in crossflow, paper presented in *the 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering*, Chiang Mai, Thailand.

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

Wongthongsiri, K. (2014). Effects of effective velocity ratio on entrainment and structure of jet in crossflow, Master thesis. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

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



รายการอ้างอิง

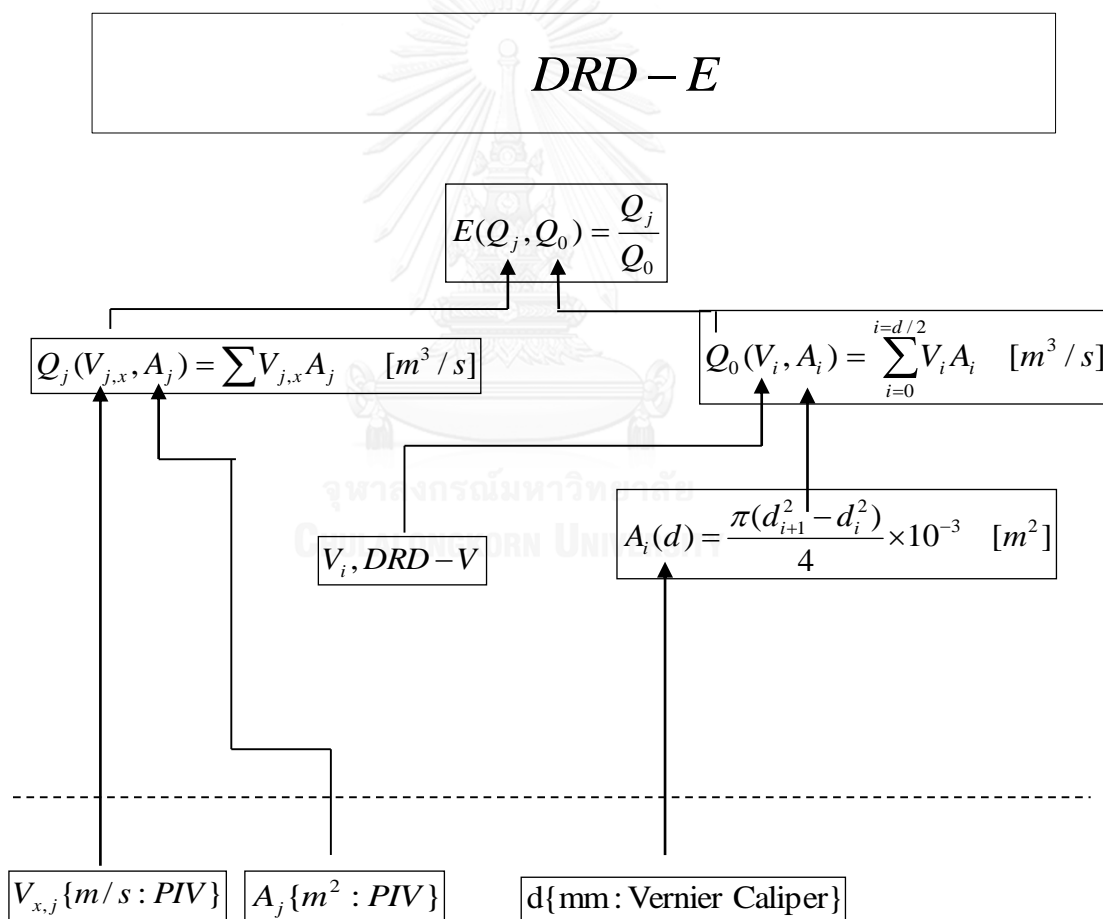




ภาคผนวก ก
Data Reduction Diagram

ก.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร

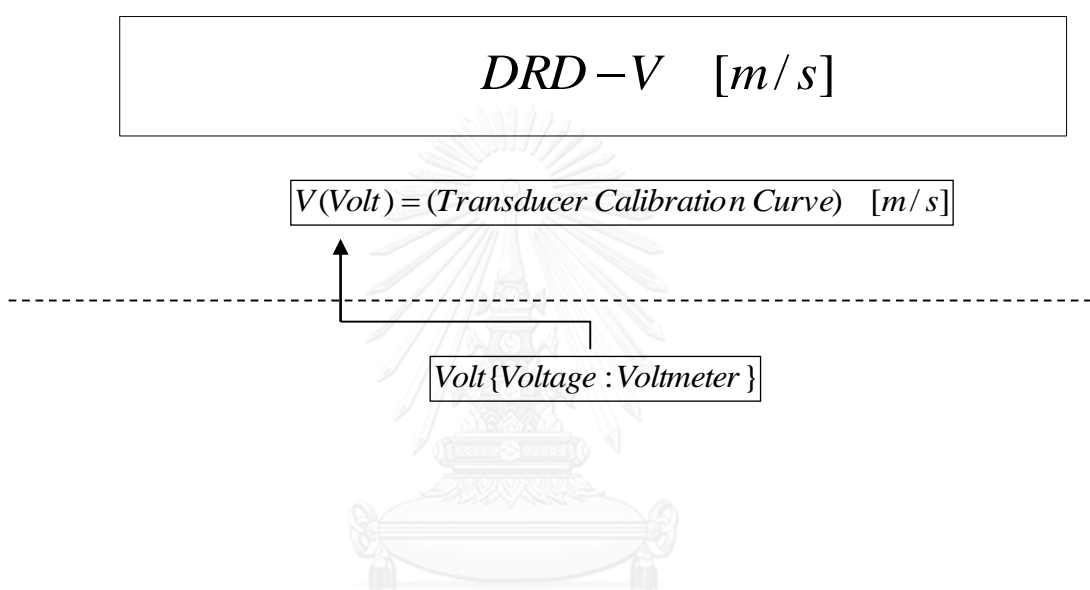
ในแผนภาพที่ ก.1 จะแสดงค่าเหนี่ยวนำการผสมนิยามจากอัตราการไหลของเจ็ตในกระแสมขวงที่หน้าตัดใดๆ ต่ออัตราการไหลที่ปากเจ็ต ซึ่งปริมาณที่ต้องวัดได้แก่ ความเร็วเฉลี่ยในแกน streamwise ของเจ็ตที่หน้าตัดใดๆ ($V_{x,j}$) พื้นที่ของเจ็ตที่หน้าตัดใดๆ (A_j) และระยะเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต (d) ส่วน DRD ของความเร็วที่บริเวณปากเจ็ตที่บริเวณปากเจ็ตจะแสดงในแผนภาพที่ ก.2



แผนภาพที่ ก.1 อัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสม

ก.2 ความเร็วที่วัดได้จาก pitot static tube

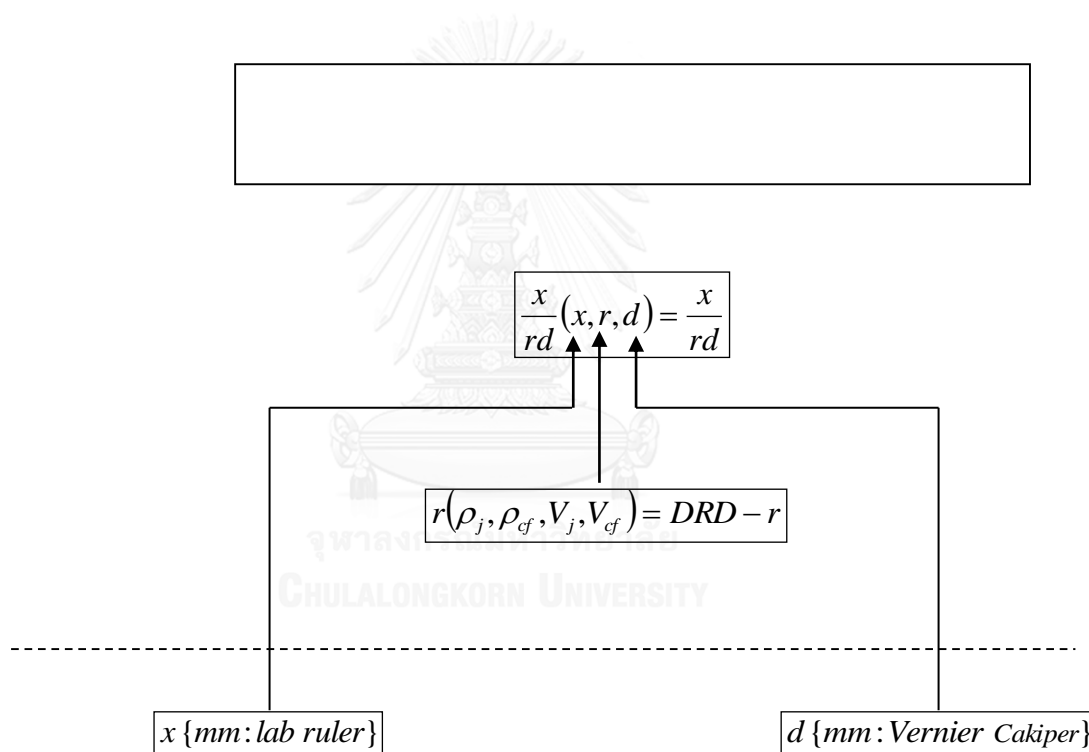
ความเร็วที่วัดได้จาก pitot static tube เป็นปริมาณที่มีความสำคัญเนื่องจากเป็นปริมาณที่นำไปใช้คำนวณต่อในอีกหลายปริมาณ เช่น ค่าเหนี่ยวนำการผสม (E) อัตราส่วนความเป็นประสิทธิผล (r) และเรย์โนลด์สสัมเบอร์ของกระแสลมขวาง (Re_{cf})



แผนภาพที่ ก.2 ความเร็วที่วัดได้จาก pitot static tube

ก.3 ระยะตามแนว downstream

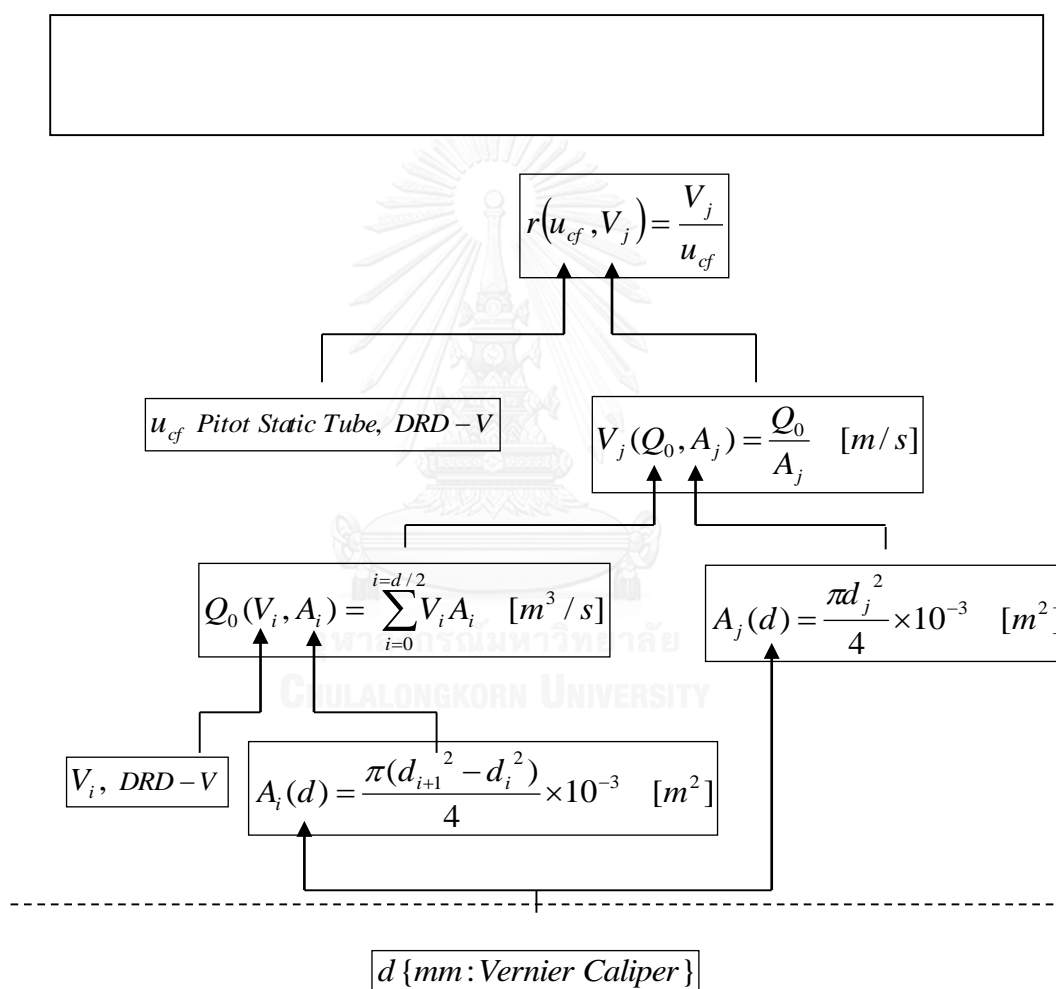
ระยะตามแนว downstream เป็นปริมาณที่ต้องการศึกษาว่าเมื่อเปลี่ยนระยะตามแนว downstream จะมีผลอย่างไรต่ออัตราส่วนการเหนี่ยวนำการผสมเชิงปริมาตร ซึ่งเบื้องต้นมีปริมาณที่วัดได้แก่ ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต (d) และระยะตามแนว downstream (x) โดยวัดได้จากไม้บรรทัด นอกจากนี้ระยะตามแนว downstream ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพ (r) ดังแสดงในแผนภาพที่ ก.5



แผนภาพที่ ก.3 ระยะตามแนว downstream (x/rd)

ก.4 อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล

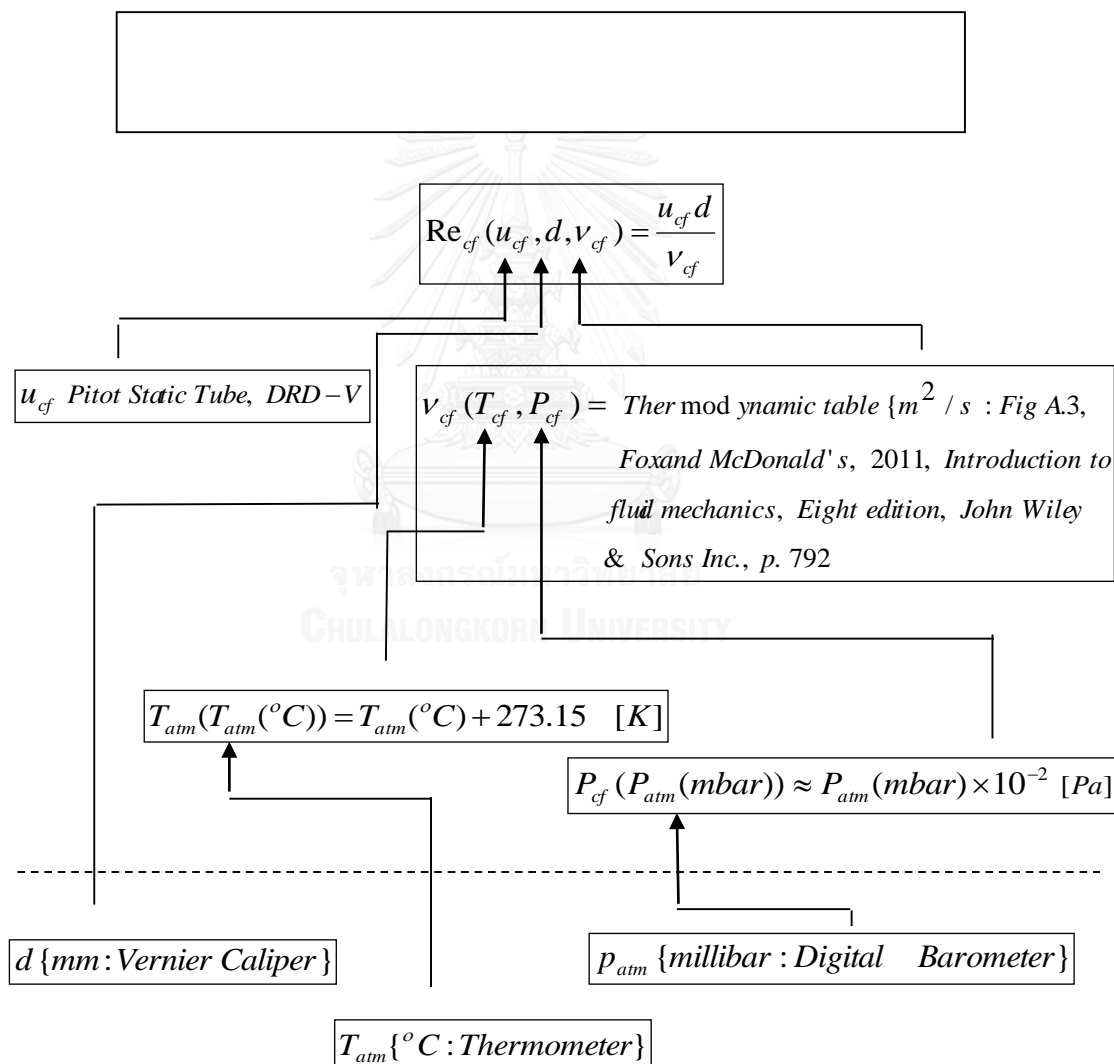
อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเป็นปริมาณที่สำคัญที่ต้องวัดในการทดลองนี้ ซึ่งปริมาณที่ต้องวัดได้แก่ ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต (d) ส่วน DRD ของความเร็วที่บริเวณปากเจ็ตและความเร็วของกระแสลมขวางซึ่งเป็นความเร็วที่วัดได้จาก pitot tube จะแสดงในแผนภาพที่ ก.2



แผนภาพที่ ก.4 อัตราส่วนความเป็นประสิทธิผล (r)

ก.5 เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวาง

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



แผนภาพที่ ก.5 เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสมขวาง (Re_{cf})

ภาคผนวก ข
พารามิเตอร์ในการทดลอง

ข.1 $r = 4$

General	x/id	หน่วย	0.50	0.75	1.0	1.5
	T_{Laser}	[°C]	30.2	30.2	30.2	30.4
	P_{Laser}	[mbar]	101.4	101.6	101.4	101.0
Laser	Thickness	[mm]	2	2	2	2
Seeding (six jet atomizer)	P	[psig]	10	10	10	10
	No. of nozzle		5	5	5	5
Jet & Crossflow	V_j	[m/s]	16.22	16.22	16.22	16.22
	V_{cf}	[m/s]	4.030	4.030	4.030	4.030
Camera (L/R)	r		4.024	4.024	4.024	4.024
	Lens	[mm]	100	100	100	100
	F no. (L/R)		4/2.8	4/2.8	4/2.8	4/2.8
Crosshair location		อยู่ที่ท้าวจุดศก. Target 3 ของ	อยู่ที่ท้าวจุดศก. Target 3 ของ	อยู่ที่ท้าวจุดศก. Target 3 ของ	อยู่ที่ท้าวจุดศก. Target 3 ของ	อยู่ที่ท้าวจุดศก. Target 2.5 ของ
	Spatial resolution	[mm ²]	0.969x0.969 (60.568 $\mu\text{m/pixel}$)	0.939x0.939 (58.72 $\mu\text{m/pixel}$)	0.923x0.923 (57.708 $\mu\text{m/pixel}$)	1.04x1.04 (65.11 $\mu\text{m/pixel}$)
Note			$\Delta t = 20 \mu\text{s}$	$\Delta t = 20 \mu\text{s}$	$\Delta t = 25 \mu\text{s}$	$\Delta t = 25 \mu\text{s}$

พ.2 r = 8

General	x/rd	หน่วย	0.50	0.75	1.00	1.50
	T _{atmo}	[°C]	30.2	30.0	30.3	30.7
	P _{atmo}	[mbar]	101.4	101.6	101.3	101.6
Laser	Thickness	[mm]	2	2	2	2
Seeding (six jet atomizer)	P	[psig]	20	20	20	20
	No. of nozzle		3	3	3	3
Jet & Crossflow	V _j	[m/s]	32.08	32.08	32.08	32.08
	U _{cf}	[m/s]	4.030	4.030	4.030	4.030
	r		7.961	7.961	7.961	7.961
Camera (L/R)	Lens	[mm]	100	50	50	50
	F no. (L/R)		2.8/2.8	2.8/2.8	4/2.8	4/2.8
	Crosshair location		อยู่ตรงจุดศก. Target	อยู่สูงกว่าจุดศก. Target 6 ช่อง	อยู่สูงกว่าจุดศก. Target 6 ช่อง	อยู่สูงกว่าจุดศก. Target 3 ช่อง
	Spatial resolution	[mm ²]	1.299x1.299 (81.229 μm/pixel)	2.153x2.153 (134.581 μm/pixel)	2.068x2.068 (129.239 μm/pixel)	2.477x2.477 (154.793 μm/pixel)
Note			Δt = 15 μs	Δt = 40 μs	Δt = 40 μs	Δt = 50 μs

ท.3 $r = 12$

General	x/rd	หน่วย	0.50	0.75	1.00	1.50
	T_{atmo}	[°C]	30.2	30.2	30.2	29.9
	P_{atmo}	[mbar]	101.4	101.6	101.6	101.1
Laser	Thickness	[mm]	2	2	2	2
Seeding (six jet atomizer)	P	[psig]	30	30	30	30
	No. of nozzle		3	3	3	3
Jet & Crossflow	V_j	[m/s]	49.26	49.26	49.26	49.26
	U_{cf}	[m/s]	4.030	4.030	4.030	4.030
	r		12.22	12.22	12.22	12.22
Camera (L/R)	Lens	[mm]	50	50	50	50
	F no. (L/R)		2.8/2.8	1.8/1.8	4/1.8	2.8/1.8
	Crosshair location		อยู่ต่ำกว่าจุดตก. Target 2.5 ช่อง + 101 mm	อยู่สูงกว่าจุดตก. Target 1 ช่อง + 101 mm	อยู่สูงกว่าจุดตก. Target 1 ช่อง + 101 mm	อยู่สูงกว่าจุดตก. Target 5.5 ช่อง + 101 mm
	Spatial resolution	[mm ²]	2.312x2.312 (144.47 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)	2.441x2.441 (152.548 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)	2.580x2.580 (161.263 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)	2.760x2.760 (172.499 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)
Note			$\Delta t = 30 \mu\text{s}$	$\Delta t = 40 \mu\text{s}$	$\Delta t = 40 \mu\text{s}$	$\Delta t = 50 \mu\text{s}$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

เกิดเมื่อวันที่ 10 ธันวาคม 2532 ที่จังหวัดอุดรดิตถ์ สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนกัลยาณีศรธรรมราช ปี พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาชั้นอุดมศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปี พ.ศ. 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



