

เจ็ดที่หมื่นดวงในกระแสดมขวาง: การศึกษาด้วยไฟลวิซชวลไลเซชัน



นาย ปราโมทย์ ลี้มดำรงธรรม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SWIRLING JET IN CROSSFLOW: A FLOW VISUALIZATION STUDY

Mr. Pramot Limdumrongtum

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2007  
Copyright of Chulalongkorn University

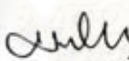
หัวข้อวิทยานิพนธ์      เจ็ดที่หมูนควงในกระแสลมขวาง: การศึกษาด้วยโฟลววิชวลไลเซชัน  
โดย                              นาย ปราโมทย์ ลิ่มดำรงธรรม  
สาขาวิชา                      วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์

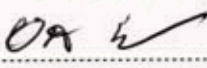
---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

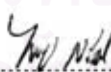
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนริญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(อาจารย์ ดร. อลงกรณ์ พิมพ์พิณ)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพบูลย์ ศรีรักษา)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เลิศนวัฒน์)

ปราโมทย์ ลิมดำรงธรรม : เจ็ตที่หมุนควงในกระแสลมขวาง: การศึกษาด้วยฟลูอิดซาวลไลเซชัน  
(SWIRLING JET IN CROSSFLOW : A FLOW VISUALIZATION STUDY)

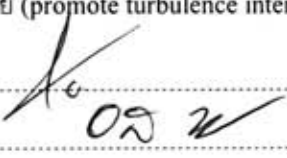
อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.อศิ บุญจิตราดุลย์ อ.ที่ปรึกษาร่วม: อ.ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิน; 233หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณลักษณะและโครงสร้างการผสม (mixed fluid) ของเจ็ตในกระแสลมขวางและเจ็ตหมุนควงในกระแสลมขวางแบบความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส และ Circulation ไม่เป็นศูนย์โดยการวิเคราะห์ทางภาพถ่ายที่ได้จากแสงที่กระเจิงมาจากอนุภาค (mie scattering) ในการทดลองจะให้ความร้อนกับเจ็ตอากาศ แล้วทำการฉีดน้ำยาสร้างควันเข้าไปผสมกับอากาศร้อนจนน้ำยากลายเป็นไอและฉีดลำเจ็ตอากาศผสมน้ำยานั้นไหลขึ้นมาตั้งฉากกับกระแสลมขวางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เจ็ตอากาศผสมน้ำยาตั้งฉากกระแสลมขวางและเย็นตัวลง จึงส่งผลให้น้ำยาสร้างควันเกิดการกลั่นตัวกลับกลายเป็นอนุภาคเล็กๆ (product formation) เมื่อใช้ laser sheet ฉายไปบริเวณลำเจ็ตที่กำลังพัฒนาตัวนั้น แสงเลเซอร์จะกระเจิงจากอนุภาคควันทำให้สามารถถ่ายภาพโครงสร้างของอนุภาคเล็กๆ (mixed fluid) ได้ การทดลองนี้ทำที่ค่า Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.80 และ ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลคงที่ที่ 4.13 โดยมีค่า Reynolds number ของเจ็ต  $Re_j$  ประมาณ 14,000 และ Reynolds number ของกระแสลมขวาง  $Re_{cf}$  ประมาณ 4,600 โดยถ่ายภาพทั้ง 3 view คือ end view, top view และ side view ซึ่งครอบคลุมบริเวณใกล้ปากเจ็ต และ ไกลปากเจ็ต

สำหรับกรณีเจ็ตในกระแสลมขวาง เมื่อพิจารณาหน้าตัด top view ของภาพขณะใดๆ จะพบ Azimuthal structure ของ mixed fluid ที่เรียงตัวกันเป็นวงแหวนรอบๆปากเจ็ต โดยพบ Kelvin-Helmholtz (K-H) vortical roll-up อย่างชัดเจนทางด้านข้างของเจ็ต ในภาพขณะใดๆ ตั้งแต่หน้าตัด  $y/rd = 0.05$  ในขณะที่จะยังไม่พบเห็น structure ดังกล่าว ในภาพเฉลี่ยจนกว่าจะถึงหน้าตัด  $y/rd = 0.15$  และพบบริเวณ unmixed core ที่ทุกหน้าตัด สำหรับหน้าตัด end view เมื่อพิจารณาภาพขณะใดๆ พบ vortical roll-up ทางด้านข้างบริเวณใกล้ปากเจ็ต และเมื่อพิจารณาภาพเฉลี่ยพบ mixed fluid มากทางด้านข้างและด้านล่าง เมื่อเปรียบเทียบกับด้านบน ในขณะที่เดียวกันจะมีบริเวณ unmixed core ทำให้โครงสร้าง mixed fluid มีรูปร่างคล้ายเกือกม้า โดยพัฒนาใหญ่ขึ้นจนเห็นเป็น CVP ที่หน้าตัดไกลออกไป

สำหรับกรณีเจ็ตหมุนควงในกระแสลมขวาง ที่หน้าตัด top view เมื่อพิจารณาภาพขณะใดๆ พบ Azimuthal structure ซึ่งมีลักษณะเป็น Kelvin-Helmholtz (K-H) vortical roll-up ของ mixed fluid และปริมาณ mixed fluid ที่ไม่สมมาตรโดยปรากฏทางด้าน pressure มากกว่าด้าน suction นอกเหนือจากนั้น ยังพบ local peak ของ mixed fluid และ turbulent intensity ที่มีค่าสูงทางด้าน pressure ด้วย เมื่อพิจารณาภาพขณะใดๆ ที่หน้าตัด end view พบการ roll-up ของ vortical structure ทางด้านข้าง สำหรับภาพเฉลี่ยนั้น พบ local peak ของ mixed fluid ทั้งสองฝั่ง ในขณะที่ค่าสูงที่สุดนั้นจะอยู่ฝั่ง pressure และตำแหน่งของค่าสูงที่สุดยังตรงกับบริเวณที่เกิดการ roll-up ของ vortical structure นอกจากนี้ ยังพบว่า ผลของการหมุนควงทำให้เส้นทางการเดินของเจ็ตจะต่ำลง และบริเวณ unmixed core สั้นลง

เมื่อพิจารณาผลการทดลองสำหรับเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีการหมุนควงแบบ NZT/NZC พบว่า การผสมทางด้าน pressure จะดีกว่าทางด้าน suction ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลของ Initial tangential velocity profile ที่ก่อให้เกิด shear layer ที่มี strength สูงทางด้าน pressure มากกว่าด้าน suction จึงสามารถดึง (Entrain) เอา crossflow fluid เข้ามาผสมทางด้าน pressure ได้ดีกว่าและยังก่อให้เกิดความปั่นป่วนที่สูงกว่าด้วย (promote turbulence intensity)

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล ..... ลายมือชื่อนิสิต .....  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา   
ปีการศึกษา ..... 2550 ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 0.อลงกรณ์ พิมพ์พิน



## 4770587321: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD : SWIRLING JET/ JET IN CROSSFLOW/ FLOW VISUALIZATION  
/ ROTATING PIPE/MIXING STRUCTURE



PROMOT LIMDUMRONGTUM: SWIRLING JET IN CROSSFLOW : A FLOW  
VISUALIZATION STUDY THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. ASI  
BUNYAJITRADULYA, Ph.D., THESIS COADVISOR: ALONGKORN PIMPIN,  
Ph.D 233pp.

Characteristics and mixed fluid structures of a jet in crossflow (JICF) and swirling jets in crossflow (SJICF) with non-zero tangential velocity and non-zero circulation (NZT/NZC) are experimentally investigated by means of Product formation/Mie scattering/Laser-sheet imaging technique. In the experiment, smoke fluid is introduced into the hot air jet, and evaporated, upstream of the jet exit. When the mixture jet is issued at the jet exit, it entrains and mixes with cold crossflow air, resulting in the smoke fluid vapor condensing to small aerosol particles that mark the regions of mixed fluid. The mixed fluid structures are then imaged with a laser sheet and a CCD camera. The experiment is conducted at the jet in crossflow effective velocity ratio of 4.13, the jet Reynolds number of 14,000, the crossflow Reynolds number of 4,600. Three swirl ratios ( $S_r$ ) are investigated, namely 0 (JICF), 0.5, and 0.8. The mixed fluid structures are imaged in three sets of perpendicular cross sectional planes, namely the cross sectional planes in the top, end, and side views.

In the case of JICF, instantaneous image in the top view reveals a series of small Kelvin-Helmholtz (K-H) azimuthal structures of mixed fluid (which appear as bright structures) cascading azimuthally around the unmixed core of the jet (which appears as a dark region) very near the jet exit (e.g., at  $y/rd = 0.05$ ). In addition, it also reveals a more developed and larger K-H vortical roll-up structure that periodically shedding from each lateral side of the jet. While these structures can be observed in instantaneous image early on near the jet exit, the series of small K-H azimuthal structures cannot be observed in the mean image due to the averaging and the more developed K-H structure at each lateral side will not be observed in the mean image until some further distance downstream (e.g., at  $y/rd = 0.15$ ). From the end view, instantaneous image reveals vortical roll-ups at each lateral side near the jet exit. Furthermore, the mean image shows mixed fluid to be concentrated more on each lateral and lower part of the jet. With the unmixed core at the center, the cross section of the mean mixed fluid structure in the near field from this end view appears to be horseshoe in shape. As the jet develops further downstream, the mean mixed fluid structure evolves into the counter-rotating vortex pairs (CVP).

In the case of SJICF, instantaneous image in the top view reveals similar series of small K-H azimuthal structures of mixed fluid around the unmixed core and the more developed K-H vortical roll-up as before, but this time the amount of mixed fluid and the structures are obviously biased towards the pressure side in comparison to the suction side. Of particular note is the much larger K-H roll-up and shedding on the pressure side in the near field. In addition, when the mean and standard deviation images are considered, more mixed fluid and local peak, and high turbulent intensity are found on the pressure side. From the end view, similar vortical roll-ups as in JICF are observed in instantaneous image, but again the bias is towards the pressure side; more mixed fluid and larger vortical structures are found on this side. The mean and standard deviation images also show similar trend. Furthermore, it is found that swirl causes lower jet trajectory and shorter unmixed core.

Finally, better mixing on the pressure side in comparison to the suction side in the case of NZT/NZC SJICF is attributed to the initial tangential velocity profile. Specifically, this type of initial tangential velocity profile results in shear layer with larger strength along the pressure side, making the vortical structures on this side being more effective in entraining crossflow fluid as well as promoting turbulence for mixing along this side.

Department	Mechanical Engineering	Student's signature	
Field of study	Mechanical Engineering	Advisor's signature	
Academic year	2007	Co-advisor's signature	Alongkorn Pimpin

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน จากท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย “รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์” ซึ่งได้ให้โอกาสและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างสูงทั้งในการศึกษาและการดำเนินชีวิตของผู้วิจัย เหนือสิ่งอื่นใดคือท่านอาจารย์ยังได้ให้วิธีการคิดแบบวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์ ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญต่อทัศนคติเกี่ยวกับโลกและชีวิตของผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง

และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย อ.ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พินธ ซึ่งได้ให้คำปรึกษาปัญหา และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างสูงในทางการศึกษา และการทำวิจัย

ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล แห่งนี้ผู้วิจัยได้รับกำลังใจ และความเอื้ออาทรจาก พี่ เพื่อน และน้อง ในห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งแด่ นายพรชัย กกรศรี ที่ให้กำลังใจเสมอมา น้องศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น และโดยเฉพาะน้องการุ จงศิริภิญโญ ที่ได้ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือพี่ในทุกด้าน และฝ่าฟันอุปสรรคตลอดการทำงานมาด้วยกัน อีกทั้งขอขอบพระคุณ พี่โกวิท โกพล และพี่สุบิน ชันติบุคลากรทุกคนของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้ช่วยเหลืองานในด้านต่างๆ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

และสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจและต่อสู้กับอุปสรรคตลอดมาคือครอบครัวซึ่งประกอบไปด้วย นางวรรณกร เรืองเดช ภรรยาของผู้วิจัย และ ด.ญ. อรุโพลิน ลี้มดำรงธรรม บุตรสาวของผู้วิจัย และ นายฉาย หมิ่นวล คุณตาวัย 95 ปีของผู้วิจัย

และในท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ของผู้วิจัยที่ได้ให้การเลี้ยงดูทั้งกายและใจ ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ มาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีแรงใจในการทำงานและไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ณ
สารบัญรูปภาพ .....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ด
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา .....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	9
1.4 แนวทางการทำวิจัย .....	10
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ .....	11
บทที่ 2 ชุดทดลองและการทดลอง .....	12
2.1 ชุดทดลอง .....	12
2.2 พิกัดอ้างอิงที่ใช้การทดลอง .....	15
2.3 สภาวะของการทดลอง .....	16
2.4 วิธีการทดลองและอุปกรณ์การวัด .....	18
2.4.1 การวัดสภาวะเริ่มต้น .....	18
2.4.2 การบันทึกภาพ และ กระบวนการทางภาพถ่าย .....	21
บทที่ 3 ผลการทดลอง .....	25
3.1 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้น .....	27
3.1.1 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสมขวาง .....	27
3.1.2 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ต .....	28
3.2 ผลการถ่ายภาพทางด้านบน (Top View) .....	29



3.3 ผลการถ่ายภาพทางด้านท้าย (End View).....	32
3.3.1 การพัฒนาตัวของเจ็ดตามแนวDownstream ในกรณีเจ็ดไม่หมุนควง Sr0 .....	32
3.3.2 การพัฒนาตัวของเจ็ดตามแนวDownstream ในกรณีเจ็ดไม่หมุนควง Sr05 .....	35
3.3.3 การพัฒนาตัวของเจ็ดตามแนวDownstream ในกรณีเจ็ดไม่หมุนควง Sr08 .....	38
3.3.4 เปรียบเทียบผลกรณีเจ็ดที่ไม่หมุนควงกับเจ็ดที่หมุนควง กับ Sr05 และ Sr08 ที่ หน้าตัดต่างๆ .....	39
3.3.5 ผลของทิศทางการหมุนควง .....	41
3.3.6 เส้นทางการเดินของเจ็ด .....	41
3.4 ผลการถ่ายภาพทางด้านข้าง (Side View).....	43
บทที่ 4 อภิปรายผลการทดลอง .....	48
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	49
ประมวลตาราง.....	52
ประมวลรูปภาพ .....	73
รายการอ้างอิง.....	220
ภาคผนวก.....	222
ภาคผนวก ก.....	223
ภาคผนวก ข.....	227
ภาคผนวก ค.....	231
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	233



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวาง.....	53
ตารางที่ 1.2	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวางกรณีติด Tap.....	62
ตารางที่ 1.3	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตที่หมุนควง ในกระแสมขวาง.....	67
ตารางที่ 2.1	รายละเอียดพารามิเตอร์ในการทดลองและความคลาดเคลื่อนในแต่ละกรณี.....	71
ตารางที่ 3.1	แสดงค่า $A$ และ $m$ ผลการทดลองกรณี Swirl ต่างๆ ที่ $r_{eff}$ เท่ากับ 4.....	72

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	การไหลแบบเจ็ตในกระแสมวลที่ เกิดจากการระบายอากาศเสีย จากปล่องควัน และการระบายความร้อนที่ผิวของ Turbine blade.....	74
รูปที่ 1.2	ลักษณะของเจ็ตในกระแสมวล (Rajaratnam, 1976).....	74
รูปที่ 1.3	โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสมวล (Fric and Roshko, 1994).....	75
รูปที่ 1.4	ลักษณะของ Wake vortices (Kelso <i>et al.</i> , 1996).....	75
รูปที่ 1.5	ลักษณะโครงสร้างของ Jet ใน Cross flow ที่สภาวะต่างๆ (Kelso <i>et al.</i> , 1996).....	76
รูปที่ 1.6	โครงสร้างบริเวณ Near field ของเจ็ตในกระแสมวล ซึ่งแสดงเป็น Isosurface ของ Vorticity (Yuan <i>et al.</i> , 1999).....	76
รูปที่ 1.7	โครงสร้างของ Hanging vortices (Yuan <i>et al.</i> , 1999)	77
รูปที่ 1.8	โครงสร้างของ Spanwise rollers ซึ่งแสดงเป็น Instantaneous contour ของ Spanwise vorticity ( $\omega_z$ ) โดยเส้นประแสดงค่าลบ (Yuan <i>et al.</i> , 1999).....	77
รูปที่ 1.9	Trajectory ของ Jet ใน Cross Flow (Pratte and Baines, 1967).....	78
รูปที่ 1.10	Centerline Trajectory ตามแนวแกน Jet ของ Jet ใน Cross Flow.....	78
รูปที่ 1.11	Trajectory ของความเร็วและอุณหภูมิในกรณี $T_j - T_0 = 0$ , $T_j - T_0 = 75 F$ และ $T_j - T_0 = 320 F$ (Kamotani and Greber, 1972).....	79
รูปที่ 1.12	Centerline trajectory (Smith and Mungal, 1998).....	80
รูปที่ 1.13	Centerline concentration decay ตามแนว $S$ (Smith and Mungal, 1998).....	80
รูปที่ 1.14	แสดง Contour ของ Instantaneous spanwise vorticity และ Contour ของ Scalar concentration Centerplane (Yuan and Street, 1998).....	80
รูปที่ 1.15	โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตที่มีปากทางออก เป็นรูปสี่เหลี่ยม Sau <i>et al.</i> (2004).....	81
รูปที่ 1.16	Trajectory ของ Maximum mean velocity บน Centerplane และ Circulation ( $\Gamma = \iint \omega_x dydz$ ) ที่ด้านหนึ่งของแกนสมมาตร (Zaman and Foss, 1997).....	81

รูปที่ 1.17	การกระจายของ Static pressure ในทิศทางต่างๆ (Zaman and Foss, 1997).....	82
รูปที่ 1.18ก-ข	ลักษณะและการติดตั้ง Tab สามเหลี่ยม (Bunyajitradulya and Sathapornnanon ,2005).....	82
รูปที่ 1.19	การกระจายตัวของอุณหมิ $C_{TG}$ ใน Cross planeตามทิศทางกรณีไม่หมุนควง Downstream( Bunyajitradulya and Sathapornnanon ,2005).....	83
รูปที่ 1.20	การกระจายตัวของอุณหมิ $C_{TG}$ ใน Cross plane ตามทิศทางกรณีหมุนควง Downstream ( Bunyajitradulya and Sathapornnanon ,2005).....	84
รูปที่ 1.21ก-ค	การกระจายตัวของความดันสถิตยที่พื้นผิว Test section บริเวณรอบขอบปากเจ็ตกรณีที่เจ็ตไม่มีการหมุนควงและกรณีที่เจ็ตมีการหมุนควง (Kavsaoglu and Schetz ,1989).....	85
รูปที่ 1.22ก-ง	รูปร่างการกระจายของความเร็วเริ่มต้นที่ปากเจ็ตของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดย (Wangjiraniran and Bunyajitradulya ,2001).....	86
รูปที่ 1.23-1.24	Instantaneous iso-concentrationและภาพเฉลี่ยของ Streamline ค่าความเข้มข้น ที่ $x=0$ และ $x=1.83D$ Top view (Denev <i>et al.</i> 2004)...	87
รูปที่ 1.25	Contour และ Traverse profile ของสัญญาณสี่เหลี่ยม Yingjaroen (2006)...	88
รูปที่ 1.26	รูปร่าง Contour ของอุณหภูมิจนในงานวิจัย Bunyajitradulya and Wangjiraniran เปรียบเทียบกับ Contour ของปริมาณ Scalar concentration จาก Niederhaus <i>et al.</i> (1997).....	89
รูปที่ 2.1	รูป Schematic ของอุโมงค์ลม (หน่วยเซนติเมตร).....	90
รูปที่ 2.2	พัดลมหอยโข่ง (Centrifugal Blower) ชนิดใบพัดแบบ Backward-curved airfoil ขนาด 30 กิโลวัตต์ที่ใช้สำหรับ อุโมงค์ลม .....	90
รูปที่ 2.3	ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัดซึ่งประกอบด้วย Main diffuser และ Adapter diffuser.....	91
รูปที่ 2.4	ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) และ Contraction ของอุโมงค์ลม	91
รูปที่ 2.5	หน้าตัดทดสอบ (Test section) ทั้ง 2 ส่วนของอุโมงค์ลม .....	92
รูปที่ 2.6	ภายในหน้าตัดทดสอบ (Test section) ส่วนแรก .....	92
รูปที่ 2.7	รูป Schematic ของชุดเจ็ตแบบท่อหมุนและชุดฉีดน้ำยา .....	93

รูปที่ 2.8	ชุดเจ็ดเฉพาะส่วนท่อหมุน.....	94
รูปที่ 2.9	Schematic Laser Visualization System .....	95
รูปที่ 2.10	รูปถ่ายชุด Laser Beam (Model Stabilite 2017).....	95
รูปที่ 2.11	ชุดถ่ายส่งลำแสงแบบ Prisms .....	96
รูปที่ 2.12	ชุดถ่ายส่งลำแสงแบบ Cylindrical lenses มุมบานที่ 50 องศา.....	96
รูปที่ 2.13(ก-ค)	พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง การนิยามด้าน Pressure และ Suction นิยามอัตราส่วน $w_p / \bar{u}_j$ .....	97
รูปที่ 2.14	รูป Schematic ของ Probe ที่ใช้วัด.....	98
รูปที่ 2.15	รูปถ่ายของ Probe ที่ใช้วัด.....	99
รูปที่ 2.16	อุปกรณ์การวัดอื่นๆ.....	100
รูปที่ 2.17	แสดงอุณหภูมิของเจ็ตขณะทำการฉีด Smoke fluid.....	101
รูปที่ 2.18	ลักษณะการวัดสภาวะเริ่มต้นที่ปากเจ็ต.....	102
รูปที่ 2.19	ผลการสอบเทียบ Thermocouple เทียบกับอุปกรณ์มาตรฐานคือ Drywell Calibrator.....	102
รูปที่ 2.20	ลักษณะการวางชุดปริซึม เลนส์ทรงกระบอกและกล้องบันทึกภาพ สำหรับการทดลอง End view, Top view และ Side view.....	103
รูปที่ 3.1	ความสม่ำเสมอของความเร็วในแนวแกนเฉลี่ย $x (u)$ ของกระแสลมขวาง ที่หน้าตัด $x = -15 \text{ cm}$ .....	104
รูปที่ 3.2	รูปร่างของ Boundary layer บนผนังทั้ง 4 ด้านในหน้าตัดทดสอบ.....	105
รูปที่ 3.3	รูปร่างอุณหภูมิของเจ็ตอากาศที่ทางออกเจ็ต.....	105
รูปที่ 3.4	รูปร่างความเร็วในแนวแกนของเจ็ตอากาศที่ทางออกเจ็ต.....	106
รูปที่ 3.5	รูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ตอากาศที่ทางออกเจ็ต.....	107
รูปที่ 3.6(ก-ค)	ภาพขณะใดๆทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับ กรณี Sr0, Sr05 และ Sr08.....	108
รูปที่ 3.7(ก-ค)	ภาพเฉลี่ยทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับ กรณี Sr0, Sr05 และ Sr08.....	111
รูปที่ 3.8(ก-ค)	Contour ภาพเฉลี่ยทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับ กรณี Sr0, Sr05 และ Sr08.....	114



รูปที่ 3.9(ก-ค)	ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆ สำหรับ กรณี Sr0, Sr05 และ Sr08.....	117
รูปที่ 3.10(ก-ค)	Contour ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆ สำหรับกรณี JICF Sr05 และ Sr08.....	120
รูปที่ 3.11(ก-ค)	Turbulent intensity ทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆ สำหรับกรณี JICF Sr05 และ Sr08.....	123
รูปที่		
3.12.1-3.12.3	ภาพขณะใดๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี เจ็ตไม่มีการหมุนควง Sr0.....	126
รูปที่		
3.13.1-3.13.3	ภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณีเจ็ตไม่มีการหมุนควง Sr0.....	129
รูปที่		
3.14.1-3.14.3	Contour ภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณีเจ็ตไม่มีการหมุนควง Sr0.....	132
รูปที่		
3.15.1-3.15.3	ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณีเจ็ตไม่มีการหมุนควง Sr0.....	135
รูปที่		
3.16.1-3.16.3	Contour ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณีเจ็ตไม่มีการหมุนควง Sr0.....	138
รูปที่		
3.17.1-3.17.3	ภาพขณะใดๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี เจ็ตไม่มีการหมุนควง Sr05.....	141
รูปที่		
3.18.1-3.18.3	ภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณีเจ็ตไม่มีการหมุนควง Sr05.....	144

รูปที่		
3.19.1-3.19.3	Contour ภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณีเจ็ตไม่มีการหมุนควง Sr05.....	147
รูปที่		
3.20.1-3.20.3	ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณีเจ็ตไม่มีการหมุนควง Sr05.....	150
รูปที่		
3.21.1-3.21.3	Contour ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณีเจ็ตไม่มีการหมุนควง Sr05.....	153
รูปที่		
3.22.1-3.22.3	ภาพขณะใดๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณีเจ็ตไม่มีการหมุนควง Sr08.....	156
รูปที่		
3.23.1-3.23.3	ภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณีเจ็ตไม่มีการหมุนควง Sr08.....	159
รูปที่		
3.24.1-3.24.3	Contour ภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณีเจ็ตไม่มีการหมุนควง Sr08.....	162
รูปที่		
3.25.1-3.25.3	ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณีเจ็ตไม่มีการหมุนควง Sr08.....	165
รูปที่		
3.26.1-3.26.3	Contour ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณีเจ็ตไม่มีการหมุนควง Sr08.....	168
รูปที่ 3.27(ก-ฉ)	Contour ภาพเฉลี่ยสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆ.....	171
รูปที่ 3.28(ก-ฉ)	Contour ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x).....	180

รูปที่ 3.29(ก-ฉ)	Contour ภาพ Turbulent intensity สำหรับเปรียบเทียบผล ของ Swirl ต่างๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x).....	189
รูปที่ 3.30	การเปรียบเทียบผลของทิศการหมุนควง.....	198
รูปที่ 3.31(ก-ข)	Center of Mass Trajectory ของภาพเฉลี่ยทางด้าน End view x-y view บนสเกลเชิงเส้นและสเกล log-log .....	199
รูปที่ 3.32(ก-ข)	Centroid Trajectory ของภาพเฉลี่ยทางด้าน End view x-y view บนสเกลเชิงเส้นและสเกล log-log.....	200
รูปที่ 3.33(ก-ข)	Trajectory ของภาพเฉลี่ยทางด้าน End view x-z view Center of Mass และ Centroid Trajectory.....	201
รูปที่ 3.34(ก-ข)	CM และ CC เปรียบเทียบกับผลของ Passive scalar ของ Smith and Mungal (1998) บนสเกลเชิงเส้น และ สเกล log-log.....	202
รูปที่ 3.35	Maximum decay ตามแนว Downstream (x) ในแต่ละกรณีต่างๆ.....	203
รูปที่ 3.36	ภาพขณะใดๆทางด้านข้างของแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับกรณี JICF Sr05 และ Sr08 .....	204
รูปที่ 3.37	ภาพเฉลี่ยทางด้านข้างของแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับกรณี JICF Sr05 และ Sr08 .....	205
รูปที่ 3.38	Contour ภาพเฉลี่ยทางด้านข้างของแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับกรณี JICF Sr05 และ Sr08 .....	206
รูปที่ 3.39	ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้านข้างของแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับ กรณี JICF Sr05 และ Sr08 .....	207
รูปที่ 3.40	Contour ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้านข้างของแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับ กรณี JICF Sr05 และ Sr08 .....	208
รูปที่ 3.41	Turbulent intensity ทางด้าน Side view ในแต่ละหน้าตัดใดๆ สำหรับกรณี JICF Sr05 และ Sr08.....	209
รูปที่ 3.42	ค่าความเข้มข้นของแสงที่ตำแหน่ง Traverse ใดๆของ เจ็ตในกระแสมขวาง กรณี Sr05 และ Sr08.....	210
รูปที่ 3.43(ก-ข)	เปรียบเทียบผล Swirl ratio ต่างๆตามตำแหน่ง Downstream (x) Traverse ใดๆ.....	211

รูปที่ 3.44	ผลของ Swirl ที่หน้าตัดตามแนว Spanwise(z) สำหรับตำแหน่ง ที่ Center plane.....	213
รูปที่ 3.45	ผลของ Swirl ที่หน้าตัดตามแนว Spanwise(z) สำหรับตำแหน่ง ที่ Pressure Side.....	213
รูปที่ 3.46	ผลของ Swirl ที่หน้าตัดตามแนว Spanwise(z) สำหรับตำแหน่ง ที่ Suction Side.....	214
รูปที่ 3.47	Centerplane trajectory ทางด้าน Sideview และCentiod trajectory x-y view ทางด้าน Endview เปรียบเทียบกับ Wangiraniran(2001) และ Kamotani and Greber (1972).....	214
รูปที่ 3.48	เปรียบเทียบ CM กับ CC ของงานวิจัยนี้กับ Passive Scalar ของ Smith and Mungal (1998).....	215
รูปที่ 3.49	เปรียบเทียบผลของ Swirl ระหว่าง CM กับ CC.....	215
รูปที่ 3.50	Maximun decay ของสัญญาณทางด้าน Sideview ที่ Center plane.....	216
รูปที่ 3.51	Maximun decay ของสัญญาณทางด้าน Sideview ที่ Pressure Side.....	216
รูปที่ 3.52	Maximun decay ของสัญญาณทางด้าน Sideview ที่ Suction Side.....	217
รูปที่ 3.53	ผลรวมของสัญญาณแสงในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x).....	217
รูปที่ 3.54	diagram แสดงการผสมจากด้าน leeward ไปสู่ด้าน windward.....	218
รูปที่ 3.55	diagram แสดงการกระจายตัวของ mixed fluid.....	218
รูปที่ 3.56	diagram แสดงการผสมจากด้าน leeward ไปสู่ด้าน windward ในลักษณะ traverse profile.....	219



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A$	พื้นที่หน้าตัดรวมของเจ็ต
$A_{jet}$	พื้นที่หน้าตัดของเจ็ต (โดยมีขอบเป็น 10 % ของความเข้มสูงสุด)
$C$	ค่าความเข้มแสง
$\overline{Se_{ij}}$	ภาพเฉลี่ยที่ทำการลบฉากปรับแสง
$\overline{X}_{ij}$	ภาพเฉลี่ย (Mean Image)
$\overline{B}_{ij}$	ภาพฉากปรับแสง
$\sigma_{Se_{ij}}$	ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ทำการลบฉากปรับแสง Standard deviation
$d$	ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต
$Fr$	Densimetric Froude number
$h, h_j, h_{cf}$	เอนทาลปีของเจ็ตอากาศหลังการผสม, เอนทาลปีเริ่มต้นของเจ็ต และ เอนทาลปีเริ่มต้นของกระแสลมขวาง
$Nu$	ค่า Nusselt number
$P$	ตำแหน่ง Pressure
$PL$	ตำแหน่ง Pressure-Leeward
$PW$	ตำแหน่ง Pressure-Windward
$r_{eff}$	อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity Ratio)
$r$	ระยะตามแนวรัศมีของเจ็ต
$r_d$	อัตราส่วนความหนาแน่นระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง (Density ratio)
$r_m$	อัตราส่วนโมเมนตัมระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง (Momentum ratio)
$r_v$	อัตราส่วนความเร็วระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง (Velocity ratio)
$R$	รัศมีของท่อเจ็ต
$Re_{cf}$	เรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ (Reynolds Number) เทียบกับความเร็วในแนวแกนของกระแสลมขวาง
$Re_j$	เรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ (Reynolds Number) เทียบกับความเร็วในแนวแกนของเจ็ต
$S$	ตำแหน่ง Suction
$Sr$	อัตราส่วนสเวิร์ด (Swirl ratio)
$T_j$	อุณหภูมิของเจ็ตอากาศที่ปากเจ็ต
$\overline{T}_j$	อุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged temperature) ที่ปากเจ็ต
$T_{cf}$	อุณหภูมิของกระแสลมขวาง
$T_r$	อุณหภูมิบรรยากาศ (Room temperature)

$u$	ความเร็วในแนวแกนที่ตำแหน่งใดๆ
$u_{cf}$	ขนาดความเร็วของกระแสลมขวาง
$\overline{u_{cf}}$	ความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง
$\overline{u_j}$	ความเร็วตามแนวแกนเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged axial velocity) ที่ปากเจ็ต
$u_{max}$	ความเร็วตามแนวแกนสูงสุดตามแนวที่ทำกรวัด
$w$	ความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ตที่ตำแหน่งใดๆ
$w_p$	ความเร็วตามแนวสัมผัสของท่อเจ็ต
$w_R$	ความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ตที่ขอบท่อเจ็ต
$x, y, z$	ระยะตามแนว Downstream, Transverse และ Spanwise ตามพิกัดอ้างอิงหลัก
$\overline{y_T}$	Centroid trajectory ของรูปร่างความเข้มแสงบนระนาบสมมาตร (ระนาบ $x-y$ )
$\overline{z_T}$	Centroid trajectory ของรูปร่างความเข้มแสงบนระนาบแนวนอน (ระนาบ $x-z$ )
$\overline{y_m}$	Center of mass trajectory ของความเข้มแสงบนระนาบสมมาตร (ระนาบ $x-y$ )
$\overline{z_m}$	Center of mass trajectory ของความเข้มแสงบนระนาบแนวนอน (ระนาบ $x-z$ )

**อักษรกรีก**

$\Omega$	ความเร็วเชิงมุมของท่อเจ็ต
$\delta$	ค่าความไม่แน่นอนในการทดลอง (Uncertainty)
$\delta_{0.95}$	ความหนาของชั้นขอบเขตที่ตำแหน่งซึ่งมีความเร็วเป็น 95% ของความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง
$\rho_j$	ค่าความหนาแน่นของเจ็ตอากาศ
$\rho_{cf}$	ค่าความหนาแน่นของกระแสลมขวาง

**อักษรย่อ**

CCD	Charge Coupled Devices
CVP	Counter Rotating Vortex Pair
JICF	Jet In Crossflow
NZT/NZC	Non zero tangential and Non zero circuration
ZT/ZC	Zero tangential and Zero circuration
SJICF	Swirling Jet In Crossflow
Sr0	swirl ratio 0 or Jet In Crossflow
Sr05	swirl ratio 0.5
Sr08	swirl ratio 0.8

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำและความเป็นมา

การไหลแบบเจ็ตในกระแสมขวางเป็นการไหลพื้นฐานที่พบอย่างกว้างขวางในอุปกรณ์ต่างๆทางวิศวกรรม เช่น ใน Combustor (ใช้ในการฉีดเชื้อเพลิงเข้าผสมกับอากาศในกระบวนการเผาไหม้), ใน Gas turbine (ใช้ในการระบายความร้อนจากใบพัด) และในเครื่องบินแบบ V/STOL (Vertical Short Take Off and Landing, V/STOL) ที่ใช้ในช่วงที่มีการขึ้น-ลงในแนวดิ่ง นอกจากนี้ยังพบในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมและมลภาวะ เช่น การระบายความร้อนจากท่อน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมสู่แหล่งน้ำ และการระบายอากาศเสียจากปล่องควันดัง

#### รูปที่ 1.1

การไหลแบบเจ็ตในกระแสมขวางนี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของการไหล (Fric and Roshko, 1994) เพื่อให้เกิดความเข้าใจในลักษณะและที่มาของรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น อันจะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมการไหลและการปรับปรุงประสิทธิภาพการผสมให้ดียิ่งขึ้นโดยในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษา เจ็ตในกระแสมขวางเกี่ยวกับโครงสร้างของเจ็ตในกระแสมขวาง เช่น การศึกษาโครงสร้างและเส้นทางเดินของเจ็ต (Kamotani and Greber, 1972), การศึกษาโครงสร้างที่มีผลต่อการผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง (Smith and Mungal, 1998), การศึกษาเส้นทางเดิน และการผสม (Yuan and Street, 1998), การศึกษา ลักษณะโครงสร้างที่มีการปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างเจ็ต และกระแสมขวาง (Kelso *et al.*, 1996; Yuan *et al.*, 1999; Lim *et al.*, 2001; Sau *et al.*, 2004; Muppidi and Mahesh, 2005; Denev *et al.* 2005)

นอกจากนี้ ในงานวิจัยที่ผ่านมา Yuan *et al.* (1999) พบว่าการเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหลเริ่มต้นที่ปากเจ็ตมีผลต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในกระแสมขวางเป็นอย่างมาก จึงได้มีการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงสภาวะเริ่มต้นดังกล่าวในรูปแบบต่างๆอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะการไหลแบบหมุนควง (Swirling flow) อันเป็นที่ทราบดีว่า มีส่วนอย่างมากในการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของเจ็ตอิสระ (Free jet) เช่น จากงานวิจัยของ (เพิ่ม) Feyedelem and Sarpkaya (1997) และ Wangjiraniran *et al.* (1999) และต่อมาได้มีงานวิจัยของ Niederhaus *et al.* (1997) ได้ศึกษาผลของการหมุนที่มีต่อคุณลักษณะของ เจ็ตในกระแสมขวางโดยการสร้าง swirl ด้วยใบพัด เป็นผลทำให้ความเร็วในแนวสัมผัสและ Circulation ที่ปากเจ็ตเป็นศูนย์ พบว่าลักษณะของ CVP เปลี่ยนไปจากลักษณะที่ค่อนข้างสมมาตรในกรณีที่ไม่มี Swirl เป็น

ลักษณะที่ Vortex ด้านหนึ่งมีขนาดโตขึ้นและอีกด้านหนึ่งมีขนาดลดลงรวมถึงรูปร่างที่เปลี่ยนไปเป็น Comma shape ในกรณีที่มีผลของการหมุนควบนอกจากนี้ยังพบ high concentration ทางด้าน Pressure side ในทางตรงกันข้าม Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) ได้ศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตร้อนที่หมุนควงในกระแสมวลว่างโดยใช้ rotating pipe เป็นตัวสร้างความเร็วในการหมุนควง Swirl ซึ่งในกรณีนี้ทำให้ Tangential velocity และ Circulation ที่ปากเจ็ทไม่เป็นศูนย์ พบว่าบริเวณที่มีอุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงจะอยู่ทางด้าน Suction ผลการศึกษาที่ดูเหมือนว่าจะได้ผลตรงกันข้าม(ภายใต้เงื่อนไขที่ต่างกัน)จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจและชี้แนะถึงผลของ Tangential Velocity Profile ซึ่งอาจจะเป็นผลทำให้มีความแตกต่างอย่างมากต่อการพัฒนาตัวของเจ็ทต่อไป

## 1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

### เจ็ทในกระแสมวลว่าง

Rajaratnam (1976) ได้แบ่งลักษณะของ เจ็ทในกระแสมวลว่างออกเป็น 3 บริเวณตามรูปที่ 1.2 ได้แก่ Potential core region ซึ่งเป็นบริเวณกึ่งกลางของ Shear layer ของ Jet ในช่วงต้นซึ่ง Total pressure มีค่าสม่ำเสมอโดย Keffer and Baines (1963) พบว่าที่ Velocity ratio มากกว่า 4 แกนของ Potential core จะยังคงอยู่ในแนวแกนของ Jet ในขณะที่เมื่อ Velocity ratio น้อยกว่า 4 แกนของ Potential core จะเริ่มเลื่อนไปในทิศทางของ Cross flow นอกจากนี้ Pratte and Baines (1967) ยังพบว่าที่ Velocity ratio สูงๆ ความยาวของ Potential core ของเจ็ทในกระแสมวลว่างจะมีขนาดเข้าใกล้ลักษณะของ Free jet ต่อจาก Potential core region จะเข้าสู่ Zone of maximum deflection ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนทิศทางของ Jet มากที่สุดและยังเป็นบริเวณที่มี Pressure gradient และ Entrainment rate มากที่สุดทำให้เป็นบริเวณที่ยากที่จะวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง ต่อจากนั้นจะเป็นบริเวณ Far field ซึ่งมีลักษณะเข้าใกล้ Self-similar และเป็นบริเวณที่การวิเคราะห์ทำได้ง่าย

Fric and Roshko (1994) ได้ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ของ เจ็ทในกระแสมวลว่างพบว่า เจ็ทในกระแสมวลว่างมี Vortical structure 4 ลักษณะได้แก่ Jet shear layer vortices ซึ่งเป็นผลของ Kelvin-Helmholtz instability จากการแยกตัว (Separation) ของ Shear layer บริเวณปาก Jet, Horseshoe vortices ซึ่งเกิดจาก Boundary layer ของผนังได้รับผลของ Adverse pressure gradient เนื่องจาก Jet ที่พุ่งออกมาใน Free stream ซึ่งมีลักษณะคล้ายสิ่งกีดขวางการไหล (Obstacle), Counter-rotating vortex pair (CVP) ซึ่งเป็นกลไกที่สำคัญในการผสมบริเวณ Far field และ Wake vortices บริเวณด้านหลัง Jet ดังรูป 1.3



สำหรับกลไกในการเกิด Counter-rotating vortex pairs (CVP) ยังไม่เป็นที่เข้าใจกันมากนัก แต่ลักษณะหนึ่งซึ่งนักวิจัยส่วนใหญ่ให้ความเห็นตรงกันคือการเกิด Separation ของ Boundary layer ภายในท่อที่ปาก Jet ทำให้เกิดการม้วนตัวของ CVP (Moussa *et al.* (1977), Andreopoulos (1984,1985), Andreopoulos and Rodi (1984), Sykes *et al.* (1986), Coelho and Hunt (1989) และ Kelso *et al.* (1996)) นอกจากนี้ Kelso *et al.* (1996) เสนอว่า Vortex ring ที่มีการเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจาก Cross flow fluid และ Vorticity ที่เกิดจากผนังของพื้นต่างเป็นองค์ประกอบและมีผลในการเกิด CVP เช่นเดียวกัน

Kelso *et al.* (1996) อธิบายว่า CVP และ Wall vortices ยังมีความเชื่อมโยงกับ Wake vortices และที่ Reynolds number สูงๆลักษณะของ Wake จะเปลี่ยนไปใน 3 ลักษณะคือ von Karman vortex street, Mushroom-like upright vortex และ Alternative mushroom-like upright vortex ดังรูปที่ 1.4 และได้สรุปลักษณะโครงสร้างของ เจ็ตในกระแสมวลที่เก็ตรขึ้นในสภาวะต่างๆดังรูปที่ 1.5

นอกจากนี้ Yuan *et al.* (1999) ได้พบโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field 3 ลักษณะดังรูปที่ 1.6 ได้แก่ 1) Hanging vortices ซึ่งเป็นการม้วนตัวของกระแสมวลทางด้านข้างเข้ามาในตัวเจ็ตโดยมีแกนการม้วนตัวตามทิศทางของผลรวมระหว่างความเร็วเจ็ตและกระแสมวล ( $\bar{u}_{mean}$ ) ดังรูปที่ 1.7 (ก) ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วระหว่างเจ็ตกับกระแสมวลในทิศทางตั้งฉากกับ  $\bar{u}_{mean}$  ( $\bar{u}_{nj}$  และ  $\bar{u}_{ncf}$ ) หรือที่เรียกว่า Skewed mixing layer ดังรูปที่ 1.7 (ข) ประกอบกับการได้รับผลของการพา (Convection) จาก  $\bar{u}_{mean}$  2) Spanwise rollers ซึ่งมีลักษณะเดียวกับการม้วนตัวของ Vortex ring ของเจ็ตอิสระ แต่เนื่องจากผลของกระแสมวลทำให้คุณสมบัติตามเส้นรอบวงที่ขอบเจ็ตไม่สม่ำเสมอโดยเฉพาะด้านข้างเจ็ตซึ่งความเร็วของกระแสมวลจะถูกเร่งและหน่วงเมื่อผ่านตัวเจ็ตทำให้พบลักษณะของ Spanwise rollers เฉพาะด้านหน้าและด้านหลังเจ็ตดังรูปที่ 1.8 และ 3) Vertical streaks ซึ่งมีแกนการม้วนตัวในแนวตั้ง โดยเกิดจากการเปลี่ยนทิศทางของ Spanwise rollers ด้านหน้า เนื่องจาก ผลของ Perturbation และ Gradient ของความเร็วในแนวตั้งตามแนว Downstream ( $\partial v/\partial x$ )

### เส้นทาง (Trajectory) ของเจ็ตในการแผลมมวล

Pratte และ Baines (1967) ได้ศึกษา Trajectory ของความเร็วโดยปากเจ็ตติดอยู่บริเวณศูนย์กลางของแผ่นราบกลมรัศมี 6 นิ้วซึ่งสูงจากระดับพื้น 8 นิ้วทำให้ไม่มีผลของ Boundary layer ของผนังที่พื้น และพบความสัมพันธ์ของ Trajectory ในรูปของ Empirical equation ใน rd – scale ตามความสัมพันธ์  $y/rd = A(x/rd)^m$  (ในช่วง  $r = 5$  ถึง  $r = 35$ ) โดยค่าคงที่ A และ m สำหรับ Trajectory ของ Outer boundary, Centerline และ Inner boundary

เท่ากับ 2.63, 2.05, 1.35 และ 0.28, 0.28, 0.28 ตามลำดับ (Centerline trajectory ได้จากระยะกึ่งกลางระหว่าง Outer และ Inner boundary) รวมทั้งลักษณะข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังรูปที่ 1.9 (จากรูป  $\alpha = r = \text{Velocity ratio}$ ) นอกจากนี้ยังมีการพิจารณา Trajectory ตามแนวแกนของ Jet ( $\xi$ ) ดังรูป 1.10

Kamotani and Greber (1972) ได้ศึกษา Trajectory ของความเร็วและอุณหภูมิโดยปาก Jet ติดอยู่กับแผ่นราบซึ่งสูงจากระดับพื้น 2.5 นิ้วและห่างจากขอบด้านหน้าของแผ่นราบ 2 นิ้วทำให้ไม่มีผลของ Boundary layer ของผนังที่พื้น และทำการทดลองในกรณีที่

- 1) อุณหภูมิของ Jet เท่ากับอุณหภูมิของ Cross flow และ
- 2) อุณหภูมิของ Jet สูงกว่าอุณหภูมิของ Cross flow ประมาณ  $75^{\circ}\text{F}$  และ  $320^{\circ}\text{F}$

จากผลการทดลองดังรูปที่ 1.11 พบว่า Trajectory ของความเร็ว (นิยามจากแนวของจุดที่มีความเร็วมากที่สุดบนระนาบสมมาตร) ขึ้นกับอัตราส่วนโมเมนต์โดยไม่ขึ้นกับอัตราส่วนความหนาแน่น และยังพบว่า Trajectory ของอุณหภูมิ (นิยามจากแนวของจุดที่มีอุณหภูมิมากที่สุดบนระนาบสมมาตร) นอกจากจะขึ้นกับอัตราส่วนโมเมนต์แล้วยังขึ้นกับอัตราส่วนความหนาแน่นเล็กน้อยด้วย

นอกจากนี้ยังพบว่า Trajectory ของอุณหภูมิมิ Penetration น้อยกว่า Trajectory ของความเร็วที่อัตราส่วนโมเมนต์เดียวกันโดยแสดงความสัมพันธ์ของเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิดังสมการ

$$\frac{y_U}{d} = 0.89r_m^{0.47} \left( \frac{x}{d} \right)^{0.36} \quad (2.1)$$

$$\frac{y_T}{d} = 0.73r_m^{0.52} \left( \frac{\rho_j}{\rho_{cf}} \right)^{0.11} \left( \frac{x}{d} \right)^{0.29} \quad (2.2)$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปของผลคูณระหว่างความเร็วประสิทธิผลและเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต ( $rd$ -scale) ได้เป็น

$$\frac{y_U}{rd} = 0.89r^{0.3} \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.36} \quad (2.3)$$

$$\frac{y_T}{rd} = 0.73r^{0.33} \left( \frac{\rho_j}{\rho_{cf}} \right)^{0.11} \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.29} \quad (2.4)$$

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษา Trajectory ของ Scalar concentration (นิยามจากแนวของจุดที่มีค่า Concentration มากที่สุดบนระนาบ  $Z = 0$ ) โดย Trajectory นั้นจะแปรตาม rd-scale Vorticalformation นั้นจะแปรตาม d-scale ดังรูปที่ 1.12 โดยปาก Jet อยู่ที่ระดับพื้น พบว่า Trajectory ใน rd scale ไม่ Collapse ที่  $r$  ต่างๆกัน (ในช่วง  $r = 10$  ถึง  $r = 25$ ) ซึ่งต่างจากผลการทดลองของ Pratte and Baines (1967) ทั้งนี้อาจจะเป็นเนื่องจากการที่ปาก Jet อยู่ที่ระดับพื้นทำให้มีผลของ Boundary layer ของผนังที่พื้นรวมทั้งการเกิดบริเวณที่มีความดันต่ำด้านหลังปาก Jet ซึ่งมีค่าขึ้นกับ Velocity ratio และที่  $r=5$  นั้นจะมีคุณลักษณะที่แตกต่างจาก  $r=10$  ถึง 25 มากเพราะมีผลเนื่องจากผนัง (Fric and Roshko (1994) พบบริเวณที่มีความดันต่ำดังกล่าวที่  $r < 8$ )

### Entrainment ของเจ็ตในกระแสลมขวาง

การศึกษา Entrainment สำหรับ เจ็ตในกระแสลมขวางนั้นมีความซับซ้อนค่อนข้างมาก เนื่องจากการไหลมีลักษณะเป็น 3 มิติ อย่างไรก็ตามการศึกษา Entrainment ที่ผ่านมาจะพิจารณาจาก Spread rate และ Decay rate ทั้งในแง่ของความเร็วเฉลี่ยและ Mean scalar ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่มีความเชื่อมโยงกับ Entrainment และสามารถศึกษาได้ง่าย โดยการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า Entrainment และการผสมสำหรับ เจ็ตในกระแสลมขวางมีมากกว่ากรณีของ Free jet (Keffer and Baines (1963), Pratte and Baines (1967), Rajaratnam and Gangadhariah (1980) และ Andreopoulos and Rodi (1984))

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษา Scalar concentration decay ดังรูปที่ 1.13 พบว่า Centerline concentration decay ในบริเวณ Near field แปรตาม  $(S/rd)^{-1.3}$  (เมื่อ  $S$  คือ ระยะทางในแนว Centerline ซึ่งนิยามจากค่า Maximum concentration ในแต่ละหน้าตัด) และในบริเวณ Far field แปรตาม  $(S/rd)^{-2/3}$  โดยมี Branch point ที่ประมาณ  $S/r^2d = 0.3$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงจากบริเวณที่มีการผสมค่อนข้างมาก (Enhanced mixing) ไปสู่บริเวณที่มีการผสมลดลง (Reduced mixing) นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบกับกรณีของ Free jet ซึ่ง Decay rate แปรตาม  $S^{-1}$

Yuan and Street (1998) พบว่ากลไกของ Entrainment สำหรับเจ็ตในกระแสลมขวางนั้นได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงของ Large coherent structure เช่นเดียวกับ Turbulent shear flow โดยจากรูปที่ 1.14 ในช่วงต้นของการผสม ( $Z < 3$ ) Spanwise roller ที่เกิดจาก Shear layer ของ Jet จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงผิวสัมผัสระหว่าง Jet และ Cross flow ทำให้เกิดการผสมในระดับ Large scale ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการผสมของ Free jet

ต่อมาในบริเวณ Bending region การผสมจะเกิดจากอิทธิพลของ Cross flow fluid โดย Cross flow fluid จะถูกดึงเข้าไปใน Jet fluid ทำให้เกิดช่องว่างระหว่าง Jet fluid ขนาดใหญ่เนื่องจากมุมปะทะที่ค่อนข้างมากระหว่าง Jet fluid และ Cross flow fluid ซึ่งทำให้เกิดการผสมในระดับ Large scale และสำหรับการผสมในบริเวณ Far field จะมีกลไกที่สำคัญคือการเกิด CVP โดย Cross flow fluid จะถูกดึงลงมาทางด้านล่างของ Jet เนื่องจาก Circulation ของ CVP นอกจากนี้ Trajectory และ Entrainment ยังมีความสัมพันธ์กัน โดยผลของ Yuan and Street (1998) ชี้แนะว่าการที่ Trajectory ต่ำลงนั้นแสดงว่ามี Entrainment เพิ่มขึ้น

### การศึกษาผลของ Inlet condition ที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง

Sau *et al.* (2004) ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field ของเจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมเสนอแนะว่า CVP เกิดจาก Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวจากทางผนังด้านข้างของเจ็ต และพบว่า Wake vortice structure จะปรากฏขึ้นที่บริเวณ Downstream Horse shoe มีการก่อตัวขึ้นทางด้าน Upstream ซึ่งเป็นผลของการปฏิสัมพันธ์ของ Shear layer ที่พื่นกับเจ็ตดังรูปที่ 1.15

Zaman and Foss (1997) ได้ศึกษาผลของ Vortex generators โดยติด Delta taps บริเวณปาก Jet พบว่าการติด Delta taps ด้านหน้า (Windward side) ทำให้ Jet penetration ลดลงรวมทั้งลด Strength ของ CVP เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ติด Tap ดังรูปที่ 1.16

นอกจากนี้ยังพบว่าการติด Delta taps ด้านหลัง (Leeward side) ไม่ส่งผลต่อ Jet penetration และ Strength ของ CVP ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Lincinsky (1995) เนื่องจากด้านหลัง (Leeward side) เป็นบริเวณที่มี Static pressure ต่ำ ในขณะที่ด้านหน้า (Windward side) เป็นบริเวณที่มี Static pressure สูงที่เรียกว่า “Pressure hill” ซึ่งเป็น Primary source ของ Streamwise vorticity ดังรูปที่ 1.17

Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ได้ทำการศึกษามลกระทบของ Tab ต่อการกระจายตัวของเจ็ตร้อนที่หมุนควงในกระแสลมขวางรูปที่ 1.18 ในการทดลองได้ทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยเฉลี่ยบนระนาบหน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสลมขวางทั้งนี้ได้ทำการทดลองที่ค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล( $r$ )คงที่ประมาณ 4.0 โดยมีค่าเสวิร์ล ( $Sr$ ) เท่ากับ 0 ในกรณีเจ็ตไม่หมุนควงและเท่ากับ 0.52 กรณีที่เจ็ตหมุนควง ที่ค่า Reynolds number ของเจ็ตประมาณ 15,000 และกระแสลมขวางประมาณ 4,400 โดยใช้ Tab รูป



สามเหลี่ยมซึ่งมีขนาดพื้นที่ประมาณ 3.0 % ของพื้นที่ปากเจ็ตวางอยู่กับที่บนขอบปากเจ็ตและเลื่อนไปโดยรอบ 8 ตำแหน่ง

สำหรับผลการทดลองในกรณีเจ็ตไม่หมุนควงในกระแสลมขวางดังแสดงในรูปที่ 1.19 พบว่าโครงสร้างการไหลจะมีความไวมากที่สุดเมื่อติด Tab บริเวณตำแหน่ง Lateral ไปจนถึง Windward โดยเจ็ตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างรูปไตซึ่งมีลักษณะโครงสร้างการไหลแบบ Counter Rotating Vortex Pair (CVP) ในกรณีไม่ติด Tab ไปเป็นโครงสร้างรูปจุลภาคและยังคงรูปร่างเช่นนี้อยู่จนถึงหน้าตัดสุดท้ายที่ทำการวัด

สำหรับผลการทดลองในกรณีที่เจ็ตมีการหมุนควงในกระแสลมขวางดังแสดงในรูปที่ 1.20 พบว่ามีผลคล้ายกับกรณีเจ็ตไม่หมุนควงแต่อย่างไรก็ตามยังคงมีความแตกต่างกันอยู่บ้างกล่าวคือโครงสร้างการไหลของกรณีเจ็ตหมุนควงจะมีความไวต่อตำแหน่งของ Tab ในบริเวณที่กว้างกว่ากรณีที่เจ็ตไม่หมุนควง โดยบริเวณนี้คือจากตำแหน่ง Pressure leeward ไปจนถึงตำแหน่ง Suction เมื่อเลื่อนตำแหน่งของ Tab ไปตามทิศทางการหมุนของเสวิร์ล อย่างไรก็ตามบริเวณที่มีความไวต่อโครงสร้างการไหลมากที่สุด ก็คือตรงกลางระหว่างตำแหน่ง Pressure windward (PW) ไปจนถึง Windward (W) โดยโครงสร้างการไหลจะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งที่ติด Tab ในบริเวณนี้ อีกทั้งโครงสร้างการไหลดังกล่าวยังมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีที่ติด Tab เป็นอย่างมากและยังคงอยู่ที่ตำแหน่งหน้าตัดสุดท้าย ที่ทำการวัดอีกเช่นเดียวกัน

จากผลการทดลองบ่งชี้ว่ากลไกซึ่งเกี่ยวข้องเนื่องกับการเกิดโครงสร้างการไหลทั้งในกรณีเจ็ตไม่หมุนควงและกรณีที่เจ็ตหมุนควงในกระแสลมขวางนั้นน่าจะเกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับบริเวณดังกล่าวข้างต้น อีกทั้งยังได้ชี้แนะว่ากลไกการเกิดโครงสร้างการไหลน่าจะเกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับการพัฒนา Skewed Shear Layer รอบเจ็ตตามทิศทางการไหลของกระแสลมขวางรอบเจ็ตใกล้กับลำของเจ็ตที่ปากทางออก

### การศึกษาคุณลักษณะของ Swirling Jet in Cross flow

Kavsoglu and Schetz (1989) ได้ศึกษาผลของการหมุนควงและปริมาณความปั่นป่วนที่มีต่อความดันสถิตยบนพื้นผิวรอบปากเจ็ตและความเร็วของเจ็ตในกระแสลมขวาง ที่อัตราส่วนความเร็ว ( $r_v$ ) เท่ากับ 2.2, 4 และ 8 โดยมีปริมาณความปั่นป่วน 3% สำหรับกรณีความปั่นป่วนต่ำและ 10-16% สำหรับกรณีความปั่นป่วนสูง ในการทดลองใช้ Screen เป็นตัวควบคุมปริมาณความปั่นป่วน และทำการเปลี่ยนค่า Swirl ratio (Sr) ไป 2 ค่าคือเท่ากับ 0.4 และ 0.58 โดยใช้การฉีดอากาศทางด้านข้างในการทำให้เกิดการหมุนควง จากผลการทดลองพบว่าเจ็ตที่มีความ



ปั่นป่วนสูงนั้น ทำให้พื้นที่ผิวซึ่งครอบคลุมบริเวณที่มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (Negative pressure) ลดลง ดังผลการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 1.21 (ก) และ (ข) และยังทำให้เจ็ทมี Penetration ลดลงด้วย และเมื่อพิจารณาผลของการหมุนควงพบว่า ผลของการหมุนควงดังกล่าว จะมีมากในสภาวะที่มีอัตราส่วนความเร็ว ( $r_v$ ) ต่ำ และปริมาณความปั่นป่วนสูง โดยเฉพาะที่ บริเวณใกล้ปากเจ็ท และยังพบอีกด้วยว่าเจ็ทที่มีการหมุนควงทำให้ความดันสถิตยที่พื้นผิวมีความ ไม่สมมาตรมากขึ้น ดังผลการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 1.21 (ก) และ (ค) และยังทำให้เจ็ทมี Penetration ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการหมุนควงอีกด้วย แต่ถึงกระนั้นก็ตามก็ยังคง มีลักษณะที่สำคัญอยู่ประการหนึ่งที่เกิดร่วมกันทั้งในกรณีไม่มีการหมุนควง และมีการหมุนควงคือ ความดันสถิตยบริเวณพื้นด้านหน้าเจ็ทที่กระแสมขวางมาปะทะกับเจ็ทจะมีความดันสถิตยสูงกว่า บริเวณพื้นด้านหลังของเจ็ท

Niederhaus *et al.* (1997) ได้ศึกษาผลของการหมุนที่มีต่อคุณลักษณะของ เจ็ทใน กระแสน้ำขวางโดยศึกษา Scalar concentration ใน Water channel โดยใช้ Planar laser-induced fluorescence (PLIF) และให้กำเนิด swirl โดยใช้ใบพัด เป็นผลทำให้ความเร็วในแนว สัมผัสที่ปากเจ็ทเป็นศูนย์ดังในรูปที่ 1.22 (ข) พบว่าลักษณะของ CVP เปลี่ยนไปจากลักษณะที่ ค่อนข้างสมมาตรในกรณีที่ไม่มี Swirl เป็นลักษณะที่ Vortex ด้านหนึ่งมีขนาดโตขึ้นและอีกด้าน หนึ่งมีขนาดลดลงรวมถึงรูปร่างที่เปลี่ยนไปเป็น Comma shape ในกรณีที่มี Swirl นอกจากนี้ยัง พบการลดลงของ Jet penetration อย่างไรก็ตามในช่วง Swirl number ที่ทดลอง ( $N_s=0$  ถึง 0.17) ไม่พบความแตกต่างของการลดลงของ Maximum mean concentration

Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) ได้ศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตร้อนที่หมุน ควงในกระแสมขวางโดยที่ rotating pipe เป็นตัวสร้าง swirl ซึ่งในกรณีนี้ทำให้ Tangential velocity รอบปากเจ็ทไม่เป็นศูนย์ดังในรูปที่ 1.22 (ก) จากการศึกษาคุณลักษณะการผสมของเจ็ท โดยใช้เทอร์โมคัพเปิ้ลเป็นเครื่องมือในการวัดอุณหภูมิ พบว่าบริเวณที่มีอุณหภูมิและอัตราการ เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงจะอยู่ทางด้าน Suction ขณะที่บริเวณที่มีอุณหภูมิและอัตราการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำจะอยู่ทางด้าน Pressure

Denev *et al.* (2005) ศึกษาโครงสร้างและการผสมของเจ็ทหมุนควงในกระแสมขวาง และศึกษาที่  $r = 3.3$  และ Swirl number ( $S$ ) = 0-0.6 โดยใช้วิธี LES ศึกษาสนามการไหลพบว่าการไหลและสนามความเข้มของเจ็ทจะบิดเบี้ยวไปเมื่อมี Swirling ดังรูปที่ 1.23 และที่  $S=0.4$  พบว่า Maximum Concentration ที่ทางด้าน Suction ดังรูปที่ 1.24 และมีผลต่อการผสมแต่ละ หน้าตัดเพียงเล็กน้อย สรุปได้ว่า Swirl ไม่ได้ช่วยในการผสมให้ดีขึ้นหรือมีผลน้อยมากต่อการผสม

Yingjaroen *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาคูณลักษณะของเจ็ทที่หมุนควงในกระแสน้ำ ขวางโดยใช้การ rotating pipe เป็นตัวสร้าง swirl ซึ่งในกรณีนี้ทำให้ Tangential velocity รอบ

ปากเจ็ตไม่เป็นศูนย์ Reynolds number jet เท่ากับ 1300 ด้วยวิธี Active และ Passive พบว่าปริมาณการรวมของแสงตามแนวแกน  $y$  นั้นจะพบทางด้าน Suction ดังรูปที่ 1.25(ก) และจากรูป 1.25(ข)แสดงถึงบริเวณของการผสมที่เกิดจากขอบทางด้านหน้า (windward) ไปสู่ขอบทางด้านหลังเจ็ต (leeward)

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคูณลักษณะเช่นเดียวกันกับ Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) โดยมี initial tangential velocity profile เป็นแบบ NZT/NZC ดังรูปที่ 1.22(ก)ซึ่งต่างจาก Niederhaus *et al.* (1997) เป็นแบบ ZT/ZC ดังรูปที่ 1.22(ข)

เมื่อพิจารณาผลการทดลองของ Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) ( $r=4$ ,  $Sr=0.52$ ), Yingjaroen (2006) และ Denev *et al.* (2005) ( $r=3.3$ ,  $S=0.4$ ) กับ Niederhaus *et al.* (1997) ( $r=4$ ,  $Sr=0.17$ ) พบว่า Niederhaus *et al.* (1997) พบ high concentration ทางด้าน pressure side ในทางตรงกันข้าม Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) พบ high temperature ทางด้าน Suction side ดังแสดงในรูปที่ 1.26 เช่นเดียวกันกับ Denev *et al.* (2005) พบ high concentration ทางด้าน Suction

จะเห็นได้ว่าจากงานวิจัยที่ผ่านมาประเด็นดังกล่าวจึงชี้แนะได้ว่าอาจจะเป็นผลมาจากความแตกต่างของ Tangential Velocity Profile ซึ่งทำให้มีผลอย่างมากต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการศึกษาโครงสร้างและการพัฒนาตัวของเจ็ตที่หมุนควงในกระแสลมขวางแบบความเร็วในแนวเส้นสัมผัสไม่เป็นศูนย์ให้ลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาวิวัฒนาการและโครงสร้างของการผสมโดยพิจารณาจากการกลั่นตัวของ Smoke Fluid (Condensation) ที่หน้าตัดในระนาบต่างๆของเจ็ตในกระแสลมขวางและเจ็ตที่หมุนควงในการผสมขวางแบบความเร็วในแนวเส้นสัมผัสและ Circulation ไม่เป็นศูนย์ (Non-Zero tangential velocity and Non-Zero Circulation) โดยการวิเคราะห์ด้วยฟลูอิซซอลไลเซชัน

### 1.4 แนวทางวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาวิวัฒนาการ และ โครงสร้างของเจ็ตที่หมุนควงในกระแสลมขวาง SJICF แบบความเร็วในแนวสัมผัสไม่เป็นศูนย์ (non-zero tangential velocity) ในบริเวณ Near field ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการ Interaction ระหว่าง Jet fluid กับ Cross flow fluid และการผสม นอกจากนี้ยังเป็นบริเวณที่มีการพัฒนาของ Vortical structure ต่างๆ

ในการทดลองจะทำการทดลองเพื่อดูผลของค่า Swirl ratio (Sr) โดยนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ตที่ขอบเจ็ตกับความเร็วเฉลี่ยในแนวแกนเจ็ต โดยสำหรับกรณีของท่อหมุนในงานวิจัยนี้ ความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ตที่ขอบเจ็ตนั้นมีค่าเท่ากับความเร็วในแนวสัมผัสของท่อหมุน ดังนั้นค่า Swirl ratio (Sr) จึงแสดงดังสมการ

$$Sr = \frac{w_R}{u_j} = \frac{w_P}{u_j} \quad (1.1)$$

เมื่อ	$w_R$	คือความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ตที่ขอบเจ็ต
	$w_P$	คือความหนาในแนวสัมผัสของท่อหมุน
	$\bar{u}_j$	คือความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ในแนวแกนเจ็ต

และเมื่อพิจารณากรณีที่การกระจายของความเร็วในแนวแกน ( $u$ ) สม่่าเสมอตามแนวรัศมีของเจ็ต (Uniform flow condition) และให้ความเร็วในแนวสัมผัส ( $w$ ) มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับระยะทางตามแนวรัศมี (Solid body rotation) นั่นคือ  $w = \Omega r$  โดยที่  $\Omega$  คือความเร็วเชิงมุมของท่อเจ็ต จะได้ว่ากรณีนี้ Sn กับ Sr จะมีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$Sn = \frac{\Omega R}{2u_j} = \frac{w_P}{u_j} = \frac{Sr}{2} \quad (1.2)$$

สำหรับวิธีการในการทำให้เกิดการหมุนควงนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการหมุนท่อเจ็ต (Rotating pipe) ซึ่งมีความแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการใช้การติดใบพัดในการหมุนกวนของไหลและการฉีดของไหลตามแนวสัมผัสที่ทำให้ Tangential Velocity = 0 และ Circulation = 0

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการถ่ายภาพ โดยภาพที่ได้นั้นจะได้ออกจากการ Scatter แสงออกมาของอนุภาค Smoke fluid (Mie Scatter) โดย smoke fluid ที่มีอนุภาคน้ำสูงและถูกฉีดออกมาจากเจ็ตนั้นเมื่อสัมผัสกับของไหล รอบข้างซึ่งมีระดับพลังงานความร้อนหรืออนุภาคน้ำต่ำกว่า จะเกิดการผสมทำให้ส่วนผสมเย็นตัวลง ส่งผลให้ smoke fluid เกิดการกลั่นตัวกลายเป็นอนุภาคเล็กๆแล้วทำการบันทึกภาพโดยภาพถ่ายที่ได้เป็นความเข้มแสงที่ Scatter ออกมาจากอนุภาคของ Smoke fluid ที่เกิดจากการกลั่นตัว โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาผลของการหมุนโดยการเปลี่ยนค่า Swirl number ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลคงที่

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

ผลในเชิงวิชาการที่ได้จากการศึกษาจะขยายความรู้ความเข้าใจและข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับผลของการหมุนควงแบบความเร็วในแนวเส้นสัมผัสเท่ากับศูนย์ที่มีต่อโครงสร้างและวิวัฒนาการของเจ็ตที่หมุนควงในกระแสลมขวาง

ผลในเชิงประยุกต์ที่ได้จากการศึกษา จะเป็นแนวทางในการควบคุมการไหล (Flow Control) และการพัฒนาประสิทธิภาพของการผสม, การเผาไหม้ใน Combustor และ การพัฒนาประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ชุดทดลองและการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของความเร็วในการหมุนของเจ็ตร้อนในกระแสลมขวาง ซึ่งมีพารามิเตอร์หลักคือค่า Swirl ratio (Sr) ที่นิยามโดยอัตราส่วนของความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสต่อความเร็วในแนวแกนเจ็ต  $Sr = w_p / \bar{u}_j$  ที่ค่าเท่ากับ 0, 0.51, และ 0.80 ตามลำดับ โดยทุกการทดลองมีค่าอัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพ ( $r_{eff}$ ) ซึ่งนิยามโดยอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยของเจ็ตอากาศต่อแรงเฉื่อยของกระแสลมขวางคงที่โดยมีค่าเท่ากับ 4.13 ซึ่งการทดลองจะอุ่นเจ็ตอากาศจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของกระแสลมขวางประมาณ 100 องศาเซลเซียส และฉีด smoke fluid ไปผสมกับอากาศร้อนนั้น เมื่อเจ็ตร้อนที่มีไอของ Smoke fluid ผสมอยู่ไหลมาสัมผัสกับกระแสลมขวางซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า จะเกิดการผสมกันระหว่างอากาศร้อนและเย็นส่งผลให้ smoke fluid เกิดการกลั่นตัวกลายเป็นอนุภาคเล็ก ๆ และเมื่อใช้ Laser sheet ฉายไปบริเวณลำเจ็ตที่กำลังพัฒนาตัวนั้น แสงเลเซอร์จะสะท้อนบนผิวของอนุภาคควันและมาตกกระทบบนเซนเซอร์ของกล้อง สำหรับรายละเอียดของชุดทดลองและการทดลอง มีดังต่อไปนี้

#### 2.1 ชุดทดลอง

ชุดทดลองในงานวิจัยนี้ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยชุดทดลองประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ อุโมงค์ลมที่มีขนาดหน้าตัดทดสอบ  $98.5 \times 98.5$  ตารางเซนติเมตร ชุดเจ็ตแบบท่อหมุนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร และ ชุด Laser Visualization System

##### 2.1.1 อุโมงค์ลม (Wind tunnel)

อุโมงค์ลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีหน้าที่สร้างกระแสลมขวาง โดยแสดงเป็นลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ พัดลมแบบหอยโข่ง (Centrifugal Blower) ขนาด 30 กิโลวัตต์แสดงดังรูปที่ 2.2 ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (Diffuser) แสดงดังรูปที่ 2.3 ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) ขนาด  $300 \times 300$  ตารางเซนติเมตรดังรูปที่ 2.4 Contraction ที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดด้านทางเข้าต่อด้านทางออกเท่ากับ 9 และหน้าตัดทดสอบ (Test section) ขนาด  $98.5 \times 98.5$  ตารางเซนติเมตรดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ (หลักการดำเนินงานของอุโมงค์ลมได้จากวิทยานิพนธ์ของนาย สิทธิพงศ์ สถาพรนานนท์ ปีการศึกษา 2546)



### 2.1.2 ชุดเจ็ดแบบท่อหมุน

ชุดเจ็ดแบบท่อหมุนแสดงเป็นลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.7ก ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนพัดลมและ Flow meter ส่วน Heating chamber ส่วนของชุดฉีดน้ำยาทำควัน และ ส่วนท่อหมุน (Rotating pipe)

ในส่วนพัดลมและ Flow meter นี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมและตรวจสอบอัตราการไหลของเจ็ดโดยอากาศจะถูกเป่าจากพัดลมแบบความดันสูง (High pressure blower) ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ผ่านท่ออ่อน (Flexible duct) เพื่อลดการสั่นสะเทือนจากพัดลมไปยังส่วนอื่น ๆ ของชุดทดลอง ผ่านระบบท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1, 2, 3, 4 และ 5 นิ้ว (Nominal size) โดยมีวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly valve) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของเจ็ดอากาศ ต่อจากนั้นอากาศจะผ่าน Honeycomb ซึ่งทำจากหลอดพลาสติกเรียงเต็มหน้าตัดของท่อ และประกบปลายทั้งสองด้วยตาข่ายอลูมิเนียม (Household screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ (16×18)×31 เพื่อปรับทิศทางการไหล

ในส่วน Heating chamber นั้นเป็นส่วนที่ให้ความร้อนกับอากาศ โดยมีลักษณะเป็นห้องขนาดหน้าตัด 30×30 ตารางเซนติเมตรและยาว 120 เซนติเมตร โดยทางเข้ามีลักษณะเป็นหน้าแปลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว (Nominal size) ซึ่งต่อกับท่อพลาสติกของส่วนพัดลมและ Flow meter โดยติดตั้งตาข่ายสแตนเลส (Screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ 50×36 เพื่อเป็น Filter สำหรับกรองฝุ่น สำหรับทางออกได้ติดตั้ง Bush ครอบกันความร้อนซึ่งทำจากวัสดุผสมของคาร์บอนและกราไฟท์เกรด JP1300 เพื่อต่อรองรับท่อหมุน ด้านในของ Heating chamber ได้ทำการติดตั้ง Heater ไฟฟ้าขนาด 2 กิโลวัตต์ จำนวน 3 ตัว ซึ่งจะควบคุมกำลังได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Variac แบบ 3 เฟส ขนาด 27 kVA (0-480 V/ 30A) และระหว่าง Heater แต่ละตัวจะมีแผ่นเหล็กเจาะรูที่มีขนาดรู (มิลลิเมตร)×ระยะระหว่างรู (มิลลิเมตร) เท่ากับ 10×15 และมีอัตราส่วนช่องเปิด 50% เพื่อให้อุณหภูมิของอากาศมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดก่อนผ่าน Heater แต่ละตัว และหลังจาก Heater ตัวสุดท้าย จะมีแผ่นเหล็กเจาะรูดังกล่าวอีก 4 แผ่น เพื่อให้อากาศมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอก่อนเข้าไปในส่วนของท่อหมุน (Rotating pipe) นอกจากนี้ที่ผนังด้านนอกทุกด้านของห้องจะติดฉนวนชนิดแผ่นใยหินเพื่อลดการสูญเสียพลังงานความร้อนออกสู่ภายนอก

สำหรับส่วนของชุดฉีดน้ำยาทำควันนั้นเป็นส่วนที่ฉีด Smoke fluid เข้าไปผสมกับอากาศภายใน Heating chamber ผ่านหัวฉีด (Atomizer) ด้วยอัตราการไหล 0.1 cc/s โดย smoke fluid จะกลายเป็นไอที่อุณหภูมิของอากาศอย่างน้อย 130 องศาเซลเซียส (ซึ่งได้จากการทำการทดลองวัดอุณหภูมิที่ปากเจ็ดขณะฉีดน้ำยา smoke fluid และพบว่ายังไม่กลั่นตัวเป็นควัน) สำหรับ Atomizer มีลักษณะไดอะแกรมตามรูปที่ 2.7ข

สำหรับถังใส่น้ำยาที่มีความจุ 200 cc ซึ่งต่อเข้ากับวาล์วเพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำยาที่ไหลลงสู่หลอดทดลองที่มีขนาด 10 cc (โดยการฉีดน้ำยาสำหรับงานวิจัยนี้เราจะใช้หลักการรักษาระดับความสูงของน้ำยาให้คงที่ (Overflow)) และไหลผ่านท่อยางแล้วจึงเข้าสู่วาล์ว (Needle valve) ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำยาก่อนเข้าสู่ชุดหัวฉีด สำหรับฉีดน้ำยาเข้าสู่ Heating chamber ต่อไป โดยรูปที่ 2.7ค แสดงไดอะแกรมของส่วนควบคุมชุดฉีดน้ำยา

เมื่ออากาศไหลผ่านชุดควบคุมส่วนอื่น ๆ มาแล้ว ในส่วนสุดท้ายอากาศร้อนจะไหลผ่านส่วนท่อหมุน (Rotating pipe) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เจ็ทอากาศมีความเร็วในแนวสัมผัสและทำให้เกิดการหมุนควง สำหรับท่อที่ใช้เป็นท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน ( $d$ ) เท่ากับ 32 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร โดยแบ่งเป็น 3 ท่อนดังรูปที่ 2.8ก และรูปที่ 2.8ข ซึ่งท่อแต่ละท่อนสวมอยู่กับตลับลูกปืนชนิดปรับแนวได้เอง (Self-aligning ball bearings) แบบมีปลอกสวม (Adapter sleeve) ยี่ห้อ SKF รุ่น 1209EK ท่อนละ 2 ชุดและท่อแต่ละท่อนถูกยึดติดกันด้วย Coupling ซึ่งทำจากท่อเหล็กและใช้ Set screw ในการยึด

สำหรับท่อท่อนแรกมีความยาว 30 เซนติเมตร (คิดเป็น  $9.4d$ ) ปลายด้านล่างสวมด้วย Bush ซึ่งติดตั้งที่ทางออกของ Heating chamber ท่อท่อนที่สองมีความยาว 51 เซนติเมตร (คิดเป็น  $15.9d$ ) ซึ่งภายในบรรจุ Honeycomb โดยทำจากท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 4.5 มิลลิเมตร บรรจุเต็มหน้าตัดท่อและยาวตลอดความยาวของท่อที่สอง โดยมีตาข่ายสแตนเลส (Screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ 30×35 ปะกบ สำหรับท่อท่อนที่สามมีความยาว 45 เซนติเมตร (คิดเป็น  $14d$ ) ภายในบรรจุตาข่ายสแตนเลส (Screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ 30×35 จำนวน 3 อัน โดยอันแรกติดตั้งที่ระยะห่างจากปลาย Honeycomb 6 เซนติเมตร (คิดเป็น  $1.9d$ ) แต่ละอันห่างกัน 6 เซนติเมตร (คิดเป็น  $1.9d$ ) ทำให้อันสุดท้ายอยู่ห่างจากปากเจ็ท 27 เซนติเมตร (คิดเป็น  $8.4d$ ) ตาข่ายดังกล่าวมีหน้าที่ลดความปั่นป่วนของอากาศหลังจากผ่าน Honeycomb นอกจากนี้ที่ปลายด้านบนของท่อท่อนที่สามได้ต่อเข้ากับพื้นด้านล่างของ Test section ของอุโมงค์ลมด้วย Bush ซึ่งทำจากวัสดุผสมของคาร์บอนและกราไฟท์เกรด JP1300 และใช้ Mechanical seal ยี่ห้อ Zero-leak แบบ Double cartridge seal ขนาด 40 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันอากาศรั่วระหว่างท่อหมุนกับพื้นด้านล่างของหน้าตัด โดยใช้น้ำในการหล่อเย็นหน้าสัมผัสของ Mechanical seal ซึ่งทำจาก Silicon carbide และในการหมุนขับท่อได้ใช้สายพานชนิดร่องวีต่อเข้ากับ Pulley แบบ Taper lock ขับจากเพลลาของมอเตอร์ ยี่ห้อ Crompton Greaves แบบ 3-phase induction motor ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ 2830 รอบต่อนาที โดยส่งกำลังไปยังท่อท่อนที่สอง ซึ่งมีอัตราทดความเร็วรอบของมอเตอร์ต่อความเร็วรอบของท่อหมุนเท่ากับ 1 ต่อ 2.2 และควบคุมความเร็วรอบของท่อหมุนโดยใช้เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (Inverter) ยี่ห้อ ABB รุ่น ACS401-006-3 ขนาด 5.5 กิโลวัตต์

หลังจากอากาศไหลออกจากท่อเจ็ตขึ้นมากกระทบกับกระแสลมขวางที่มีความเร็วและอุณหภูมิต่ำกว่าจะเกิดการผสมทำให้ส่วนผสมเย็นตัวลง และส่งผลให้ Smoke fluid เกิดการกลั่นตัวกลับกลายเป็นอนุภาคควันเล็ก ๆ ลอยไปกับกระแสของเจ็ต

ในส่วนท่อหมุนนั้น ในตอนแรกใช้น้ำมันจารบีแบบทนความร้อนที่อุณหภูมิสูงสุด 120 องศาเซลเซียสซึ่งพบว่ามีเสียงดังในขณะที่หมุนท่อด้วยความเร็ว แต่เมื่อทำการเปลี่ยนน้ำมันจารบีเป็นแบบทนความร้อนที่อุณหภูมิสูงสุด 270 องศาเซลเซียสก็สามารถแก้ปัญหาที่นั่นได้

### 2.1.3 ชุด Laser Visualization System

ชุด Laser Visualization System นั้น เป็นชุดที่ใช้ในการฉายและถ่ายส่งลำแสงเลเซอร์จากเครื่องกำเนิดเข้าสู่บริเวณที่ทำการทดลอง โดยแสดงเป็นลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนได้แก่ ส่วนเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์และชุดถ่ายส่งลำแสง

ในส่วนของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์นั้นเป็นชนิด Argon ion laser (Spectra-physics) โดยมี Power output สูงสุดที่ 6 Watt มีความยาวคลื่นในช่วง 457.9–514.5 nm (Vis) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำเลเซอร์ที่บริเวณ  $1/e^2$  เท่ากับ 1.4 mm และ Beam divergence เท่ากับ 0.5 mrad สำหรับงานวิจัยนี้การฉายเลเซอร์จะใช้ Power output ที่ 3 Watt และความยาวคลื่นที่ 488 nm โดยรูปถ่ายของเครื่องกำเนิดเลเซอร์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10

สำหรับชุดถ่ายส่งลำแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ปริซึม (Right-angle prisms) และเลนส์ทรงกระบอก (Cylindrical lenses) โดยการส่งถ่ายลำแสงเลเซอร์นั้นจะใช้ปริซึมที่มีมุม 90 องศาสำหรับการหักลำแสงเลเซอร์โดยปริซึมมีขนาดเท่ากับ  $32.5 \times 32.5 \times 22.5 \text{ mm}^3$  และมีลักษณะแสดงไว้ในรูปที่ 2.11 โดยสำหรับการทดลองที่หน้าตัดทางด้าน Side view จะใช้ปริซึมทั้งหมด 4 ชิ้นและการทดลองที่หน้าตัดทางด้าน Top view และ End view จะใช้ปริซึมทั้งหมด 5 ชิ้น ในส่วนสุดท้ายของชุดส่งถ่ายลำแสงเลเซอร์ก่อนที่จะฉายเข้าสู่ส่วนทดลอง ลำแสงจะผ่านเลนส์ทรงกระบอก โดยที่เลนส์ทรงกระบอกนั้นจะทำหน้าที่สร้างมุมบานให้กับตัวลำแสงเลเซอร์ โดยในงานวิจัยที่ใช้มุมบานที่ 50 องศา โดยเลนส์ทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 4.5 mm ยาวเท่ากับ 6 mm และมีลักษณะพร้อมทั้งลักษณะการประกอบกับชุดเลนส์ทรงกระบอกเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งการฉายเลเซอร์ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.12 และความหนาของเลเซอร์ซีทที่ได้จากชุด Laser Visualization System มีขนาดประมาณ 1 mm

## 2.2 พิกัดอ้างอิงการทดลองและคำศัพท์ที่ใช้

พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 2.13ก คือพิกัด  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ซึ่งเป็นพิกัดอ้างอิงเทียบกับหน้าตัดทดสอบ โดยมีตำแหน่งกึ่งกลางเจ็ตเป็นจุดเริ่มต้น

สำหรับการทำให้เจ็ตอากาศเกิดการหมุนควงโดยใช้ท่อหมุน จะทำให้ลักษณะการไหลของเจ็ตคล้ายกับการหมุนควงของทรงกระบอกในกระแสลมขวาง ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Magnus effect” โดยด้านที่ทิศทางของความเร็วในแนวสัมผัสของการหมุนมีทิศทางเดียวกับทิศทางของกระแสลมขวาง จะทำให้กระแสลมขวางมีความเร็วมากขึ้นส่งผลให้มีความดันลดลงจนเกิดความดันต่ำซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า ด้าน “Suction” ในขณะที่ด้านที่ทิศทางของความเร็วสัมผัสของการหมุนหักล้างกับความเร็วของกระแสลมขวาง จะทำให้กระแสลมขวางมีความเร็วลดลง ส่งผลให้มีความดันเพิ่มขึ้นจนเกิดความดันสูงซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า ด้าน “Pressure” ดังแสดงด้าน Suction และ Pressure ในรูปที่ 2.13ข

## 2.3 สภาวะการทดลอง

### 2.3.1 ความเร็วและอุณหภูมิที่ปากทางออกเจ็ต

การทดลองได้ทำที่ความเร็วของกระแสลมขวางประมาณ  $2.16 \pm 0.1$  เมตรต่อวินาทีและความเร็วของเจ็ตซึ่งพิจารณาจากค่าเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area average) ซึ่งนิยามจาก

$$\overline{u}_j = \frac{1}{A} \int_A u dA \quad (2.1)$$

$\overline{u}_j$	คือ	ความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ในแนวแกนเจ็ต
$A$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเจ็ต
$u$	คือ	ความเร็วที่ทำการวัดตามแนวรัศมี

โดย  $\overline{u}_j$  ในการทดลองมีค่าประมาณ  $10.2 \pm 0.17$  เมตรต่อวินาทีและทำการวัดความเร็วโดยการสอด Probe ทางด้านข้างของส่วนทดลองและคงตำแหน่งไว้ ในการวัดนี้จะวัดบนแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต 2 แนว โดยแนวแรกคือแกน  $z$  และแนวที่สองคือแนวแกน  $x$  (เพื่อความสะดวกในการวัดจะทำการหมุนท่อ 90 องศาไปยังตำแหน่ง probe แทน) โดยระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการวัดเท่ากับ 1 mm และมีความเร็วที่จุดกึ่งกลางประมาณ  $9.5 \pm 1.0$  เมตรต่อวินาที

สำหรับอุณหภูมิของกระแสลมขวางมีค่าประมาณ  $30.6 \pm 0.31$  °C และอุณหภูมิของเจ็ตซึ่งพิจารณาจากค่าเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area average) ซึ่งนิยามจาก

$$\overline{T}_j = \frac{1}{A} \int_A T dA \quad (2.2)$$

$\overline{T}_j$	คือ	อุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ในแนวแกนเจ็ต
------------------	-----	--------------------------------------



$A$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเจ็ต
$T$	คือ	อุณหภูมิที่ทำการวัดตามแนวรัศมี

โดย  $\bar{T}_j$  ในการทดลองมีค่าประมาณ  $131.73 \pm 0.31$  °C และทำการวัดโดยทำการใส่ Probe ทางด้านข้างของส่วนทดลองและคงตำแหน่งไว้ ในการวัดนี้จะวัดบนแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต 2 แนว โดยแนวแรกคือแกน  $z$  และแนวที่สองคือแนวแกน  $x$  (เพื่อความสะดวกในการวัดจะทำการหมุนท่อ 90 องศาไปยังตำแหน่ง probe แทน) โดยระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการวัดเท่ากับ 1 mm โดยมีอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางประมาณ  $149.23 \pm 0.31$  °C ทำให้ได้อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล  $r_{eff} = (\rho_j \bar{u}_j^2 / \rho_{cf} \bar{u}_{cf}^2)^{1/2}$  คงที่ที่ประมาณ 4.13 โดยมีค่า Reynolds number ของเจ็ต  $Re_j = \bar{u}_j d / \nu$  ประมาณ  $14,000 \pm 200$  และ Reynolds number ของกระแสลมขวาง  $Re_{cf} = \bar{u}_{cf} d / \nu$  ประมาณ 4,600 โดยรายละเอียดของสภาวะการทดลองและความคลาดเคลื่อนในทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

เนื่องจากการให้ความร้อนกับเจ็ตอากาศทำให้มีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของเจ็ตและกระแสลมขวาง ดังนั้นผลของแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นจึงนำมาพิจารณาด้วยค่า Densimetric Froude number ( $Fr$ ) ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวของเจ็ตอากาศกับแรงเฉื่อยของกระแสลมขวางโดย

$$Fr = \left[ \frac{(\rho_{cf} - \rho_j)gd}{\rho_{cf} u_{cf}^2} \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

ซึ่งในการทดลองมีค่า  $Fr$  เท่ากับ 0.16 และค่า  $Fr/r$  ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวของเจ็ตอากาศกับแรงเฉื่อยของเจ็ตอากาศโดย

$$Fr/r = \left[ \frac{(\rho_{cf} - \rho_j)gd}{\rho_j u_j^2} \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

ซึ่งในการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.031 นั่นคือผลของแรงลอยตัวเนื่องจากเจ็ตร้อนนั้นมีค่าประมาณ 16% ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของกระแสลมขวางและมีค่าประมาณ 3.1% ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของเจ็ต

### 2.3.2 ค่า Swirl ratio

ในการศึกษาผลของการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางนั้น จะพิจารณาจากระดับของการหมุนควงซึ่งแสดงด้วยค่า Swirl ratio ( $Sr$ ) นิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วในแนวสัมผัสของท่อเจ็ตกับความเร็วเฉลี่ยในแนวแกนของเจ็ต ( $Sr = w_p / \bar{u}_j$ )



ดังแสดงไดอะแกรมในรูปที่ 2.13ค ซึ่งในการทดลองนี้ได้พิจารณาค่า Swirl ratio ทั้งหมด 3 กรณี คือ Sr0, Sr05 และ Sr08 โดยมีค่า Sr เท่ากับ 0, 0.5 และ 0.8 ตามลำดับ

## 2.4 วิธีการทดลองและอุปกรณ์การวัด

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การวัดสภาวะเริ่มต้น การบันทึกภาพ และวิธีการวิเคราะห์ภาพถ่าย สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการทำทดลองและอุปกรณ์วัดเท่านั้น สำหรับผลการวัดจะแสดงในบทที่ 3 ต่อไป

### 2.4.1 การวัดสภาวะเริ่มต้น

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงพารามิเตอร์ความเร็วและอุณหภูมิสำหรับสภาวะเริ่มต้นของทั้ง กระแสลมขวางและของเจ็ต ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.4.1.1 การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวาง

การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวาง เราได้ทำการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วภายในหน้าตัดทดสอบ และการวัดความหนาของชั้นขอบเขตที่ผนังพื้นของหน้าตัดทดสอบ ซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

สำหรับการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วภายใน Test section นั้น จะทำการวัดที่ระยะ  $x = -15$  เซนติเมตร และที่ความเร็วเฉลี่ยภายในหน้าตัดทดสอบประมาณ 2.16 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วที่ใช้ในการทดลองและทำการวัดอย่างละเอียดเฉพาะบริเวณที่คาดว่ากระแสลมขวางจะปะทะกับเจ็ต ซึ่งมีขนาดหน้าตัดประมาณ  $3rd \times 3rd$  หรือ  $40 \times 40$  ตารางเซนติเมตร โดยทำการวัดเป็นเมตริกซ์ขนาด  $9 \text{ จุด} \times 9 \text{ จุด}$  ห่างกัน 5 เซนติเมตร ทั้งนี้การวัดความเร็วจะใช้ Pitot probe (แบบ A) ดัง Schematic ในรูปที่ 2.14ก และภาพถ่ายในรูปที่ 2.15ก เป็นเครื่องมือวัด โดย Probe ดังกล่าวทำขึ้นจากท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 3 มิลลิเมตร ตัดให้โค้งเป็นมุมฉาก มีระยะจากปลาย Probe ถึงแนวก้าน 90 มิลลิเมตร (19 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของปลาย Probe) และก้าน Probe ยาว 140 เซนติเมตร ความดันที่วัดได้จาก Pitot probe จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer ชนิด Differential ยี่ห้อ SETRA รุ่น 264 ที่มีช่วงการวัดความดันเข้า  $\pm 0.05$  นิ้วน้ำ ช่วงแรงดันไฟฟ้าด้านทางออก 0-5 Volts และความถูกต้องเท่ากับ  $\pm 0.25\%$  Full scale ดังรูปที่ 2.16(ก) จากนั้นค่าแรงดันไฟฟ้างกล่าวจะถูกอ่านค่าโดยใช้ Digital multimeter ยี่ห้อ KYORITSU รุ่น 1008 ดังรูปที่ 2.16(ข)

สำหรับการวัดความหนาของชั้นขอบเขตที่ผนังพื้นของหน้าตัดทดสอบนั้น จะทำการวัด 3 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งแรกก่อนถึงขอบปากเจ็ตด้าน Windward  $(x, z) = (-0.5rd, 0)$  ส่วนอีกสอง

ตำแหน่งนั้นจะวัดที่ด้านข้างทั้งสองก่อนถึงปากเจ็ต ( $x, z$ ) =  $(-0.5rd, -1.5rd)$ , และ  $(-0.5rd, 1.5rd)$  ที่ความเร็วเฉลี่ยภายในหน้าตัดทดสอบประมาณ 2.16 เมตรต่อวินาที โดยใช้ความละเอียดในการวัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร สำหรับเครื่องมือวัดนั้นใช้ Pitot probe (แบบ B) ดัง Schematic ในรูปที่ 2.14x และภาพถ่ายในรูปที่ 2.15x เป็นเครื่องมือวัด โดย Probe ดังกล่าวทำขึ้นจากเข็มสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 1.2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.8 มิลลิเมตร โดยเข็มถูกตัดให้โค้งเป็นมุมฉาก และมีระยะจากปลายเข็มถึงแนวก้าน 32 มิลลิเมตร (53 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของเข็ม) โดยเข็มสแตนเลสถูกต่อเข้ากับท่อทองเหลืองเพื่อใช้เป็นก้าน Probe มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3.2 มิลลิเมตร ทำให้มีความยาวรวมของก้าน Probe ประมาณ 33 เซนติเมตร ความดันที่วัดได้จาก Pitot probe จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer และถูกอ่านค่าโดยใช้ Digital multimeter ชัดเดียวกันกับที่ใช้ในการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วของกระแสลมขวาง

#### 2.4.1.2 การวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ต

การวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตโดยก่อนการวัดสภาวะเริ่มต้นได้ทำการวัดอุณหภูมิของเจ็ตจนกว่าจะคงที่โดยใช้เวลาในการวัดประมาณ 5 ชั่วโมงและทำการบันทึกทุกๆ 5 นาทีโดยได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.16 โดยช่วงแรกนั้นจะเป็นช่วงที่ทำการวัดเฉพาะ Free jet ต่อมาช่วงที่สองจะเป็นช่วงที่เริ่มทำการฉีดน้ำยาสร้างควันด้วยอัตราการไหล 0.1 cc/s และความดันของคอมเพรสเซอร์ที่ 2 bar และช่วงที่สามนั้นจะทำการวัดโดยการฉีดน้ำยาและเปิด Crossflow ไปพร้อมกัน และจึงทำการทดลองในแต่ละกรณี สำหรับกรณีที่เจ็ตไม่มีการหมุนควงได้ทำการวัดในกรณีที่ไม่มีกระแสลมขวางที่ขอบปากเจ็ตและให้ความร้อนกับเจ็ตจน “จุดศูนย์กลางเจ็ต” มีอุณหภูมิและความเร็วคงที่เท่ากับ  $149.50 \pm 0.31$  °C และ  $10.01 \pm 0.1$  เมตรต่อวินาทีตามลำดับ ส่วนกรณี  $Sr05$  มีค่าเท่ากับ  $149.20 \pm 0.31$  °C และ  $9.30 \pm 0.1$  เมตรต่อวินาที และสำหรับกรณีที่เจ็ตมีการหมุนควงที่  $Sr08$  นั้นมีค่าเท่ากับ  $149.00 \pm 0.31$  °C และ  $9.30 \pm 0.1$  เมตรต่อวินาที ทั้งนี้สภาวะเริ่มต้นของทั้งกรณีเจ็ตไม่หมุนควงและเจ็ตหมุนควงจะมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ  $10.27 \pm 0.17$  เมตรต่อวินาที ดังนั้นทั้งสามกรณีจะมีอัตราการไหลโดยปริมาตรเกือบเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามในขณะที่ทำการฉีดน้ำยาทำควันแล้ว ไม่ได้ทำการวัดความเร็วหรืออัตราการไหลโดยปริมาตรอีกครั้ง ดังนั้นอัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศที่ออกมาจากปากเจ็ตอาจไม่เท่ากัน ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล  $r_{eff} = (\rho_j \bar{u}_j^2 / \rho_{cf} \bar{u}_{cf}^2)^{1/2}$  คงที่ประมาณ 4.13 นั้นเป็นเพียงค่าโดยประมาณเท่านั้น

สำหรับผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างการหยุดฉีดน้ำยาเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งวัดเป็นดังนี้ เนื่องจากระหว่างเปลี่ยนตำแหน่งการวัดมีการหยุดฉีดน้ำยาเป็นเวลานานกว่า 2 นาที และ

ได้ลองวัดขณะทำการหยุดฉีดแล้วพบว่าอุณหภูมินั้นมีการเปลี่ยนแปลงประมาณ  $\pm 3$  องศาเซลเซียส และนอกจากนั้นยังได้ทำการวัดและถ่ายรูปไปพร้อมกันพบว่าขนาดอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงถึง  $\pm 10$  องศาเซลเซียส ผลจากการบันทึกภาพยังไม่เห็นความแตกต่างกัน ดังนั้นเราจึงไม่ได้สนใจการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตั้งแต่ระหว่างการหยุดฉีดน้ำยาเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งวัด

ทั้งนี้ในการทดลองนี้ จะใช้ Pitot probe และ Yaw probe สำหรับวัดการกระจายของความเร็วและใช้ Thermocouple ในการวัดการกระจายของอุณหภูมิ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับการวัดความเร็วในกรณีเจ็ตที่ไม่หมุนควง (Sr0) นั้นได้วัดการกระจายของความเร็วเริ่มต้นที่ปากเจ็ต 2 แนวโดยทำการหมุนท่อที่ละ 90 องศา ทั้งหมด 2 ครั้ง และใช้ Pitot probe ในการวัดความเร็วในแนวแกน ( $u$ ) ซึ่งในการวัดนั้นได้ใส่ Probe เข้าทางด้านข้างของหน้าตัดทดสอบและเลื่อน Probe ตามแนว  $z$  ดังตำแหน่งในรูปที่ 2.18 ทั้งนี้ใช้ความละเอียดในการวัด (Spatial resolution) เท่ากับ 1 มิลลิเมตร โดยใช้ Pitot Probe (แบบ C) ดังไดอะแกรมในรูปที่ 2.14ค และภาพถ่ายในรูปที่ 2.15ค เป็นเครื่องมือวัด โดย Probe ทำขึ้นจากเข็มสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 1.2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.8 มิลลิเมตร ถูกตัดให้โค้งเป็นมุมฉาก และมีระยะจากปลายเข็มถึงแนวก้าน 35 มิลลิเมตร (28 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของเข็ม) โดยเข็มสแตนเลสถูกต่อเข้ากับท่อทองเหลืองเพื่อใช้เป็นก้าน Probe มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3.2 มิลลิเมตร ทำให้มีความยาวรวมของก้าน Probe 87 เซนติเมตร ซึ่งความดันที่วัดได้จาก Pitot probe จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer (ยี่ห้อ SETRA รุ่น 264) ที่มีช่วงการวัดความดันเข้า  $\pm 0.5$  นิ้วน้ำและถูกอ่านค่าโดยใช้ Digital multimeter ชุดเดียวกับที่ใช้ในการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วของกระแสลมขวาง

สำหรับการวัดความเร็วในกรณีเจ็ตที่มีการหมุนควงที่ (Sr05 และ Sr08) นั้นได้ใช้ Yaw probe แบบ Three-tube cobra probe ลักษณะเดียวกับของ Chue (1975) ในการวัดความเร็วแนวแกน ( $u$ ) และความเร็วแนวสัมผัส ( $w$ ) โดยวัดตามแนว  $z$  ดังตำแหน่งในรูปที่ 2.18 ทั้งนี้ใช้ความละเอียด (Resolution) ในการวัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร สำหรับ Yaw probe ที่ใช้นั้นแสดงดังรูป Schematic ในรูปที่ 2.14ง และภาพถ่ายในรูปที่ 2.15ง ทำขึ้นจากเข็มสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 0.5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.32 มิลลิเมตร จำนวน 3 อันยึดติดกัน โดยเข็มด้านข้างทั้ง 2 ด้านถูกฝนให้มีมุมเอียง ( $\alpha$ ) เท่ากับ 30 องศา และถูกตัดโค้งเป็นมุมฉาก โดยมีระยะจากปลายเข็มถึงแนวก้าน 35 มิลลิเมตร ซึ่งก้านเข็มสแตนเลสแต่ละก้านถูกต่อเข้ากับท่อทองเหลืองเพื่อใช้เป็นก้าน Probe มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3 มิลลิเมตร หนา 0.5 มิลลิเมตร ทำให้ก้าน Probe มีความยาวรวม 60 เซนติเมตร ซึ่งความดันแตกต่างที่วัดได้จาก Yaw probe แต่ละด้านจะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure (ยี่ห้อ SETRA รุ่น 264) ที่มีช่วงการวัดความ

ดัชนีเข้า  $\pm 0.5$  นิ้วน้ำและถูกอ่านค่าโดยใช้ Digital multimeter ชุดเดียวกับที่ใช้ในการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วของกระแสลมขวาง

โดย Yaw probe ที่ทำขึ้นนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับ Pitot-Static Probe แบบมาตรฐานที่ความเร็ว 8, 10 และ 12 เมตรต่อวินาทีที่อุณหภูมิจึงแล้ว และเนื่องจากเป็นการวัดเจ็ตอากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจึง ดังนั้นในการคำนวณความเร็วจึงได้พิจารณาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเนื่องจากอุณหภูมิของเจ็ตอากาศดังกล่าวด้วย โดยแสดงรายละเอียดของการเปรียบเทียบและการคำนวณความเร็วในภาคผนวก ก และในการวัดความเร็วรอบของท่อหมุนได้ใช้ Optical tachometer ยี่ห้อ SKF รุ่น TMOT6 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.16ค

สำหรับการวัดอุณหภูมิในทุกกรณีนั้นได้ใช้ Thermocouple เป็นอุปกรณ์การวัด สำหรับกรณี Sr0 ได้ทำการวัด 2 แนวเช่นเดียวกับการวัดความเร็ว และสำหรับกรณี Sr05 และ Sr08 จะทำการวัดเฉพาะตามแนว z ดังแสดงไว้ดังรูปที่ 2.18 โดย Thermocouple ที่ใช้นั้นมี Sensor เป็นลวด Thermocouple ชนิด Type T (Copper-Constantan) ยี่ห้อ OMEGA รุ่น TT-T-30 ที่มีช่วงของการวัดอุณหภูมิอยู่ระหว่าง  $-270$  ถึง  $400$  องศาเซลเซียส โดยลวด Thermocouple ดังกล่าว จะถูกสอดเข้าไปใน Probe ดัง Schematic ในรูปที่ 2.14จ และภาพถ่ายในรูปที่ 2.15จ ซึ่งก้าน Probe ทำจากท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $6.5$  มิลลิเมตร และมีความยาวรวม  $113$  เซนติเมตร เพื่อให้มีการโค้งงอที่น้อยที่สุด และส่วนปลาย Probe ทำจากท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก  $3.5$  มิลลิเมตรและเข็มฉีดยาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก  $1.5$  มิลลิเมตร โดยตัดให้ส่วนปลายงอเป็นรูปตัวแอลยื่นออกจากแนวแกน  $225$  มิลลิเมตร และให้ปลายของ Thermocouple อยู่เลยจากปลาย Probe ประมาณ  $5$  มิลลิเมตร เพื่อให้ Probe มีผลต่อการไหลน้อยที่สุด โดยสัญญาณที่ได้จากลวด Thermocouple จะถูกส่งเข้าไปในตัวอ่านค่าอุณหภูมิ (Thermocouple thermometer) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 54-2 ดังรูปที่ 2.16ง ซึ่งมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ  $0.1$  องศาเซลเซียส โดยค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบเครื่องมือวัดนี้ถูกจำกัดโดยลวด Thermocouple ซึ่งมีค่าประมาณ  $\pm 0.31$  °C ที่อุณหภูมิสูงสุดที่ทำการทดลองคือประมาณ  $149.23 \pm 0.31$  °C โดย Thermocouple ดังกล่าวได้ทำการสอบเทียบ (Calibrate) กับอุปกรณ์มาตรฐานคือ Drywell Calibrator โดยทำการสอบเทียบทุก  $2$  องศาเซลเซียส ดังแสดงผลการสอบเทียบดังรูปที่ 2.19 พบว่าอุณหภูมิที่อ่านได้จาก Thermocouple มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิที่อ่านได้จากอุปกรณ์มาตรฐาน โดยมีความชันของกราฟเท่ากับ  $0.9934$

#### 2.4.2 การบันทึกภาพ

การทดลองนี้จะทำการบันทึกภาพทั้งหมด 3 ด้านด้วยกันคือ End view, Top view และ



Side view โดยด้าน End view ประกอบด้วยหน้าตัด  $x/rd=0, 0.06, 0.12, 0.19, 0.25, 0.38, 0.5, 0.62, 0.75, 0.88, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5$  และ 4

สำหรับ Top view จะประกอบด้วยหน้าตัด  $y/rd = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55$  และ 0.6 และสำหรับ Side view จะประกอบได้ด้วยหน้าตัด  $z/rd = 0.12, 0, -0.12$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ด้าน Pressure, Center และ Suction side ตามลำดับ ซึ่งรูปที่ 2.20(ก-ค) แสดงลักษณะการวางชุดปริซึม เลนส์ทรงกระบอกและกล้องบันทึกภาพ สำหรับการทดลอง End view. Top view และ Side view ตามลำดับ

หลักการของการทดลองนี้คือ เมื่ออากาศซึ่งถูกผสมกับ Smoke fluid อุณหภูมิสูงและไหลออกมาสัมผัสกับกับกระแสมวลของวาล์วซึ่งมีระดับพลังงานความร้อนหรืออุณหภูมิต่ำกว่า จะเกิดการผสมทำให้ส่วนผสมเย็นตัวลง ส่งผลให้ Smoke fluid เกิดการกลั่นตัวกลายเป็นอนุภาคเล็กๆ ซึ่งเรียกว่ากระบวนการ “Product formation”

อนุภาคควันเหล่านี้เองที่จะ Scatter แสงเลเซอร์ซึ่งช่วยปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Mie scattering” ให้มาตกกระทบบนเซนเซอร์ของกล้อง ซึ่งจำนวนของอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรนั้นจะสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มข้นของแสงที่มาตกกระทบบน Pixel ทำให้เกิดความแตกต่างของสัญญาณทางไฟฟ้าในแต่ละ Pixel ของ CCDs หลังจากนั้นสัญญาณไฟฟ้างกล่าวจะถูกแปลงเป็นสัญญาณแม่เหล็กและบันทึกลงบนเทปวีดีโอของกล้อง Digital video camera recorder ยี่ห้อ Sony รุ่น DCR-VX2000E ซึ่งมี Charge couple pickup devices (3CCDs) ขนาด 2/3.8” โดยมีค่าความละเอียดของภาพขนาด 720 x 576 pixel หลังจากนั้นจึงนำสัญญาณจากกล้องวีดีโอเข้ามายังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการแยกสัญญาณวีดีโอออกมาเป็นภาพในแต่ละเฟรมซึ่งภาพควันจะถูกบันทึกเทปวีดีโอเป็นระยะเวลา 2 นาที ด้วยความเร็ว 25 ภาพต่อวินาที โดยข้อมูลที่บันทึกจะสามารถแยกเป็นสัญญาณภาพ 3,000 ภาพแล้วจึงนำภาพที่ได้มาทำกระบวนการทางภาพถ่าย

ในการศึกษาครั้งนี้ ภาพจำนวน 3,000 ภาพได้ถูกเลือกใช้ จากการคำนวณเปรียบเทียบกันระหว่าง 4,000 3,500 3,000 1,500 และ 750 ภาพโดยนำมาทำการเฉลี่ยแล้วนำแต่ละกรณีมาทำการเปรียบเทียบกับกรณี 750 ภาพซึ่งพบว่ากรณี 4,000 กรณี 3,500 และกรณี 3,000 ภาพนั้นเมื่อนำมาลบบกับกรณี 750 จะมีค่าเท่ากับทั้งสามกรณี ซึ่งต่างจากกรณี 1,500 ภาพดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกกรณี 3,000 ภาพที่จะนำมาวิเคราะห์ในทางสถิติต่อไป

กล้องวีดีโอที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นกล้อง Digital video camera recorder ยี่ห้อ Sony รุ่น DCR-VX2000E ซึ่งมี Charge couple pickup devices (3CCDs) ขนาด 2/3.8” โดยมีค่าความละเอียดของภาพขนาด 720 x 576 pixel



โดยสัญญาณที่ได้มาจากการ Scatter ของแสงจากอนุภาคควันจะมีสัญญาณอื่น ๆ รวมมาด้วยซึ่งเรียกว่าเป็นสัญญาณ  $X_{ij}$  ดังนั้นจากการสมมติว่าสัญญาณที่เราไม่ต้องการเป็นสัญญาณจากฉากหลัง  $B_{ij}$  ดังนั้นเราจะได้สัญญาณที่สะท้อนมาจากควันจริงๆเท่ากับ  $Se_{ij} \approx X_{ij} - B_{ij}$  ดังนั้นเราจึงประมาณได้ว่า ภาพเฉลี่ยในแต่ละการทดลองที่ทำการลบภาพฉากกับแสง  $\overline{Se_{ij}}$  ซึ่งแสดงถึงค่าเฉลี่ยของสัญญาณ  $Se_{ij}$  จะมีค่าเท่ากับ  $\overline{X_{ij} - B_{ij}}$  และ ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละการทดลองที่ทำการลบภาพฉากกับแสง  $\sigma_{Se_{ij}}$  ซึ่งแสดงถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณ  $Se_{ij}$  จะมีค่าเท่ากับ  $\sigma_{X_{ij}-B_{ij}}$

ดังนั้น ขั้นตอนการบันทึกภาพในการทดลองจึงเป็นดังนี้ ในตอนแรกจะบันทึกภาพฉากหลังเป็นเวลา 2 นาที แล้วจึงทำการบันทึกภาพเจ็ทอีกเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นจะทำการบันทึกภาพฉากหลังอีกครั้งเป็นเวลา 2 นาที โดยสำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพถ่ายจะอธิบายอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป

### 2.4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ภาพถ่าย

ขั้นตอนการวิเคราะห์ทางภาพถ่ายสำหรับในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

#### 2.4.3.1 การหาภาพสัญญาณที่นำมาทำกระบวนการทางภาพถ่าย

ไฟล์วิดีโอที่ได้จากการถ่ายภาพการทดลองเมื่อแยกเป็นเฟรมออกมาแล้วจะมีขนาดเฟรมเท่ากับ 720 x 576 Pixel ในเฟรมของภาพจะประกอบด้วยสามสีได้แก่ R G และ B แต่ในการคำนวณจะนำเฉพาะค่าสี G เท่านั้นมาทำการคำนวณ เนื่องจากแสงที่มาจาก Laser source นั้นจะมีแสงสีเขียวเป็นส่วนใหญ่จึงมีการเปลี่ยนแปลงของแสงสีเขียวที่มากกว่าสีอื่น

#### 2.4.3.2 การหาภาพเฉลี่ยในแต่ละการทดลองที่ทำการลบภาพฉากกับแสง ( $\overline{Se_{ij}}$ )

เนื่องจากในสภาวะการทดลองไม่สามารถทำการหาค่า  $X_{ij}$  และค่า  $B_{ij}$  ที่เวลาเดียวกันได้ ดังนั้นการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณ  $\overline{Se_{ij}}$  จึงทำโดยการนำภาพเฉลี่ยที่ได้ในแต่ละการทดลอง ( $\overline{X_{ij}}$ ) ลบออกด้วยภาพเฉลี่ยของภาพฉากกับแสง ( $\overline{B_{ij}}$ ) ตามสมการ

$$\overline{Se_{ij}} = \overline{X_{ij} - B_{ij}} = \overline{X_{ij}} - \overline{B_{ij}} \quad (2.5)$$

การหาภาพเฉลี่ยในแต่ละการทดลอง ( $\overline{X_{ij}}$ ) จะนำภาพในแต่ละเฟรมที่ได้จากในแต่ละการทดลองมาคำนวณหาภาพเฉลี่ยด้วยโปรแกรม MATLAB ตาม Matrix และสมการดังต่อไปนี้

$$(\overline{X_{ij}}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [(X_{ij})_k] \quad (2.6)$$

โดยที่  $X_{ij}$  ภาพในแต่ละเฟรม และ  $N$  จำนวนภาพที่นำมาเฉลี่ย

การหาภาพเฉลี่ยของภาพจากฉากรับแสง ( $\bar{B}_{ij}$ ) จะนำภาพเฉลี่ยของฉากรับแสงก่อนทำการถ่ายภาพเจ็ดและหลังจากทำการถ่ายภาพเจ็ดมาเฉลี่ยกัน การหาภาพเฉลี่ยของภาพฉากรับแสงมีสมการคือ

$$\bar{B}_{ij} = \frac{(\bar{B}_{ij})_1 + (\bar{B}_{ij})_2}{2} \quad (2.7)$$

โดยที่  $(\bar{B}_{ij})_1$  คือภาพเฉลี่ยของฉากรับแสงก่อนทำการถ่ายภาพเจ็ด และ  $(\bar{B}_{ij})_2$  คือภาพเฉลี่ยของฉากรับแสงหลังจากทำการถ่ายภาพเจ็ด การหาภาพเฉลี่ยของฉากรับแสงก่อนถ่ายและหลังถ่ายภาพเจ็ดมีสมการคือ

$$(\bar{B}_{ij})_1 = \sum_{k=1}^{N/2} \left( \frac{(B_{ij})_{1k}}{(N/2)} \right) \text{ และ } (\bar{B}_{ij})_2 = \sum_{k=1}^{N/2} \left( \frac{(B_{ij})_{2k}}{(N/2)} \right)$$

โดยที่  $(B_{ij})_1$  และ  $(B_{ij})_2$  เป็นภาพฉากรับแสงก่อนถ่ายและหลังถ่าย และ  $N$  เป็นจำนวนของภาพฉากรับแสงที่นำมาหาภาพเฉลี่ย ซึ่งผลรวมของภาพฉากรับแสงก่อนถ่าย และหลังถ่ายภาพเจ็ดเท่ากับจำนวนของภาพเจ็ดที่นำมาหาภาพเฉลี่ย

#### 2.4.3.3 การหาภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละการทดลองที่ทำการลบภาพฉากรับแสง ( $\sigma_{Se_{ij}}$ )

การหาภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละการทดลองที่ทำการลบภาพฉากรับแสง ( $\sigma_{Se_{ij}}$ ) ทำโดยใช้ความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\begin{aligned} \sigma_{Se_{ij}} &= \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{k=1}^N [((Se_{ij}) - (\overline{Se_{ij}}))_k]^2} \\ &= \sigma_{X_{ij}-B_{ij}} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{k=1}^N [(X_{ij} - B_{ij}) - (\overline{X_{ij} - B_{ij}})]_k]^2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

#### 2.4.3.4 การหาภาพ Turbulent intensity ( $T_{Se_{ij}}$ )

Turbulent intensity นิยามโดยอัตราส่วนระหว่างภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานต่อภาพเฉลี่ยในแต่ละการทดลองดังนี้

$$T_{Se_{ij}} = \frac{\sigma_{se_{ij}}}{Se_{ij}} \quad (2.9)$$

## บทที่ 3

### ผลการทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงคุณลักษณะของผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาวะเริ่มต้นที่มีต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ตร้อนที่หมุนควงในกระแสมขวง โดยการเปลี่ยนความเร็วในการหมุนควงซึ่งแสดงพารามิเตอร์หลักคือค่า Swirl ratio (Sr) ที่ค่าประมาณเท่ากับ 0.50 โดยในงานวิจัยนี้จะแทนด้วย Sr05 และ Swirl ratio เท่ากับ 0.80 แทนด้วย Sr08 โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

ผลการทดลองประกอบไปด้วย 4 ส่วน ดังนี้

#### 3.1 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้น

- ผลการวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสมขวง (รูปที่ 3.1-3.2)
- ผลการวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตร (รูปที่ 3.3-3.5)

#### 3.2 ผลการถ่ายภาพทางด้านบน (Top View)

3.2.1 การพัฒนาตัวและการเปรียบเทียบของเจ็ตรตามแนว Traverse ( $y/rd=0.05, 0.10, 0.15, 0.2, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55$  และ  $0.6$ ) ในกรณีเจ็ตรไม่หมุนควง Sr0 กรณีหมุนควงที่ Sr05 และ Sr08

- ภาพถ่ายขณะใดๆ Instantaneous (รูปที่ 3.6 ก - ค)
- ภาพเฉลี่ย Mean (รูปที่ 3.7 ก - ค)
- Contour ของภาพ เฉลี่ย (รูปที่ 3.8 ก - ค)
- ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐาน (รูปที่ 3.9 ก - ค)
- Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐาน (รูปที่ 3.10 ก - ค)
- Contour Turbulent intensity (รูปที่ 3.11 ก - ค)

#### 3.3 ผลการถ่ายภาพทางด้านท้าย (End View)

3.3.1 การพัฒนาตัวของเจ็ตรตามแนว Downstream ( $x/rd=0, 0.06, 0.12, 0.19, 0.25, 0.38, 0.5, 0.62, 0.75, 0.88, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5$  และ  $4$ ) สำหรับกรณี Sr0

- ภาพถ่ายขณะใดๆ Instantaneous (รูปที่ 3.12.1-3.12.3)
- ภาพเฉลี่ย Mean (รูปที่ 3.13.1-3.13.3)
- Contour ของภาพ เฉลี่ย (รูปที่ 3.14.1-3.14.3)
- ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐาน Standard deviation (Std) (รูปที่ 3.15.1-3.15.3)
- Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐาน (รูปที่ 3.16.1-3.16.3)

3.3.2 การพัฒนาตัวของเจ็ตตามแนว Downstream ( $x/rd=0, 0.06, 0.12, 0.19, 0.25, 0.38, 0.5, 0.62, 0.75, 0.88, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5$  และ 4) สำหรับกรณี Sr05

- ภาพถ่ายขณะใดๆ Instantaneous (รูปที่ 3.17.1-3.17.3)
- ภาพเฉลี่ย Mean (รูปที่ 3.18.1-3.18.3)
- Contour ของภาพ เฉลี่ย (รูปที่ 3.19.1-3.19.3)
- ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐาน Standard deviation (Std) (รูปที่ 3.20.1-3.20.3)
- Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐาน(รูปที่ 3.21.1-3.21.3)

3.3.3 การพัฒนาตัวของเจ็ตตามแนว Downstream ( $x/rd=0, 0.06, 0.12, 0.19, 0.25, 0.38, 0.5, 0.62, 0.75, 0.88, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5$  และ 4) สำหรับกรณี Sr08

- ภาพถ่ายขณะใดๆ Instantaneous (รูปที่ 3.22.1 – 3.22.3)
- ภาพเฉลี่ย Mean (รูปที่ 3.23.1 – 3.23.3)
- Contour ของภาพ เฉลี่ย (รูปที่ 3.24.1 – 3.24.3)
- ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐาน (รูปที่ 3.25.1 – 3.25.3)
- Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐาน (รูปที่ 3.26.1 – 3.26.3)

3.3.4 การเปรียบเทียบผลในกรณีเจ็ตไม่หมุนควงกับเจ็ตที่หมุนควง Sr05 และ Sr08

- Contour ของภาพ เฉลี่ย (รูปที่ 3.27 ก - ฉ)
- Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐาน (รูปที่ 3.28 ก - ฉ)
- Contour Turbulent intensity (รูปที่ 3.29 ก - ฉ)

3.3.5 ผลของทิศทางการหมุนควง (รูปที่ 3.30)

3.3.6 เส้นทางการเดินของเจ็ต

- Center of mass Trajectory x-y view (CM) (รูปที่ 3.31)
- Centroid Trajectory x-y view (CC) (รูปที่ 3.32)
- Center of mass และ Centroid Trajectory x-z view (รูปที่ 3.33 ก-ข)
- เปรียบเทียบ CM และ CC กับ Passive Scalar ของ Smith and Mungal (1998) บนสเกลเชิงเส้น และสเกล log-log(รูปที่ 3.34 ก-ข)
- Maximum decay ตามแนว Downstream (x) (รูปที่ 3.35)

3.4 ผลการถ่ายภาพทางด้านข้าง (Side View)

3.4.1 การพัฒนาตัวและการเปรียบเทียบผลในกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08

- ภาพถ่ายขณะใดๆ Instantaneous (รูปที่ 3.36)
- ภาพเฉลี่ย Mean (รูปที่ 3.37)
- Contour ของภาพ เฉลี่ย (รูปที่ 3.38)

- ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐาน STD (รูปที่ 3.39)
- Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐาน (รูปที่ 3.40)
- Contour Turbulent intensity (รูปที่ 3.41)
- Traverse Profile (รูปที่ 3.42 – 3.43)
- Side view Trajectory (รูปที่ 3.44 – 3.46)
- เปรียบเทียบเส้นทางการเดินทางงานวิจัยนี้กับ Wangiraniran (2001) และ Kamotani and Greber (1972) (รูปที่ 3.47)
- เปรียบเทียบ CM กับ CC ของงานวิจัยนี้กับ Passive Scalar ของ Smith and Mungal (1998) (รูปที่ 3.48)
- เปรียบเทียบผลของ Swirl ระหว่าง CM กับ CC (รูปที่ 3.49)
- Maximum decay (รูปที่ 3.50 – 3.52)
- ผลรวมของสัญญาณแสงในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) (รูปที่ 3.53)

### 3.1 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้น

#### 3.1.1 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวาง

รูปที่ 3.1 แสดงผลการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วเฉลี่ย ( $u_{cf}$ ) ใน Test section ของอุโมงค์ลม ที่ตำแหน่งหน้าปากเจ็ต 15 เซนติเมตร ( $x/d = -4.7$  หรือ  $x/rd \approx -1$ ) ที่ความเร็วประมาณ 2.16 เมตรต่อวินาที โดยได้ทำการวัดเป็นเมตริกซ์ขนาด 9 จุด  $\times$  9 จุด และมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 5 เซนติเมตร  $\times$  5 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดประมาณ  $3rd \times 3rd$  นอกชั้นขอบเขตของผนัง จากการวัดพบว่ามีความเร็วเฉลี่ย ( $\bar{u}_{cf}$ ) ประมาณ 2.16 เมตรต่อวินาทีโดยมีความไม่สม่ำเสมอ (Non-uniformity) อยู่ในช่วง  $\pm 0.5\%$  ของความเร็วเฉลี่ย

รูปที่ 3.2 แสดงรูปร่างของชั้นขอบเขต (Boundary layer,  $u_{cf}/\bar{u}_{cf}$ ) ตามแนว Transverse ซึ่งแสดงโดยค่า  $y/\delta_{0.95}$  โดยที่  $\delta_{0.95}$  เป็นความหนาของชั้นขอบเขตซึ่งนิยามจากระยะ  $y$  ที่มีความเร็วเป็น 95% ของความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขต ทั้งนี้ความเร็วเฉลี่ยมีค่าประมาณ 2.16 เมตรต่อวินาที โดยวัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางบนพื้นหน้าตัดทดสอบ ก่อนถึงปากเจ็ต 7 เซนติเมตร  $(x, z) = (-0.5rd, 0)$  และที่ตำแหน่งด้านข้างอีกสองตำแหน่ง ห่างจากกึ่งกลางออกไปด้านละ 20 เซนติเมตร  $(x, z) = (-0.5rd, -1.5rd), (-0.5rd, 1.5rd)$  โดยผลการวัดดังกล่าวได้เปรียบเทียบกับผลเฉลยของ Blasius สำหรับชั้นขอบเขตแบบ Laminar และผลเฉลยในรูปแบบ 1/7 power law สำหรับชั้นขอบเขตแบบ Turbulent



จากผลการวัดพบว่าชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง สอดคล้องกับผลเฉลยของ Blasius โดยตรงแนวกลางก่อนถึงปากเจ็ตประมาณ  $0.5rd$  หรือ  $1.0d$  มีความหนาของชั้นขอบเขต ( $\delta_{0.95}$ ) ประมาณ 7.0 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งด้านข้าง  $(x, z) = (-0.5rd, -1.5rd), (-0.5rd, 1.5rd)$  มีความหนาของชั้นขอบเขต ( $\delta_{0.95}$ ) ประมาณ 7.0 และ 8.0 มิลลิเมตรตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าชั้นขอบเขตของกระแสลมขวางนั้นเป็นแบบ Laminar

### 3.1.2 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้นของเจ็ต

สำหรับสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตได้ทำการวัดการกระจายของอุณหภูมิตามแนวรัศมีของเจ็ต และการกระจายของความเร็วในแนวแกน ( $u$ ), ความเร็ว ในแนวสัมผัส ( $w$ ) (ในกรณีที่มีการหมุนควง) โดยมีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 3.3 แสดงผลการวัดการกระจายของอุณหภูมิตามแนวรัศมีเปรียบเทียบทั้งนี้ จะพิจารณาการกระจายของอุณหภูมิจากค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ ( $C_T$ ) ซึ่งนิยามเป็น

$$C_T = \frac{T - T_a}{T_m - T_a} \quad (3.1)$$

โดยที่  $T$  คืออุณหภูมิที่ทำการวัดตามแนวรัศมีของเจ็ต  
 $T_m$  คืออุณหภูมิสูงสุดตามแนวรัศมีของเจ็ต  
 $T_a$  คืออุณหภูมিবรรยากาศขณะที่ทำการวัด

พบว่าทั้งในกรณีเจ็ตไม่หมุนควงและกรณีเจ็ตหมุนควงมีค่า  $C_T$  ที่ตำแหน่งเดียวกันแตกต่างกันเล็กน้อยโดยมีความแตกต่างกันที่ตำแหน่งขอบทางด้านข้างไม่เกิน  $\pm 0.31$  ที่ตำแหน่งครึ่งรัศมีจะมีค่าไม่เกิน  $\pm 0.1$  และที่ตำแหน่งกลางเจ็ตพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันสำหรับค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของ  $C_T$  ข้างต้นมีค่าประมาณ  $\pm 0.31$  สังเกตจากรูปร่างของอุณหภูมิแล้วพบว่า มีลักษณะการพัฒนาดำเนินไปแบบ fully develop

รูปที่ 3.4 ก แสดงผลการวัดการกระจายของความเร็วในแนวแกน ( $u$ ) ตามแนวรัศมี พบว่าในแต่ละกรณีมีขนาดของความเร็วแตกต่างกันเล็กน้อย โดยมีความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged) ประมาณ  $10.27 \pm 0.17$  เมตรต่อวินาที โดยค่าของความเร็วที่วัดที่จุดใดๆ มีค่าความไม่แน่นอนของ Pitot probe ประมาณ  $\pm 0.1$  เมตรต่อวินาที (แสดงในภาคผนวก ข.) นอกจากนี้ยังได้แสดงเป็นค่าที่สเกลด้วยค่าสูงสุดในการวัดแต่ละแนว ( $u/u_{max}$ ) ดังรูปที่ 3.4 ข พบว่าในทุกกรณี รูปร่างของการกระจายตัวมีลักษณะเดียวกันและค่อนข้างสมมาตร และยังพบอีกว่ามีความแตกต่างกันระหว่างกรณี Sr0 กับ Sr05 และ Sr08 ประมาณที่ตำแหน่ง Center ไปจนถึง  $r/R = -0.25$

รูปที่ 3.5ก แสดงผลการวัดการกระจายของความเร็วในแนวสัมผัส ( $w$ ) ตามแนวรัศมีในกรณี Sr52 เปรียบเทียบกับการกระจายแบบเชิงเส้นที่มีความเร็วที่ขอบเขตเท่ากับความเร็วตามแนวสัมผัสของท่อ และยังแสดงเป็นค่าที่สเกลด้วยความเร็วในแนวสัมผัสของท่อ ( $w/w_p$ ) ดังรูปที่ 3.5ข พบว่ารูปร่างของการกระจายตัวในทุกกรณีมีลักษณะใกล้เคียงกับการกระจายแบบเชิงเส้น

เมื่อสังเกตระหว่าง Temperature Profile กับ Velocity profile แล้วพบว่ารูปร่างของอุณหภูมิแล้วพบว่ามีความคล้ายคลึงที่เข้าสู่ Fullydevelop ซึ่งมีการพัฒนาตัวมากกว่า Velocity profile ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากหลอดตาข่าย (Screen) ที่ใช้ในการปรับการไหลแต่ไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิ

### 3.2 ผลการถ่ายภาพทางด้านบน (Top View)

โดยสำหรับในการทดลองนี้สัญญาณที่พบเห็นนั้นเป็นสัญญาณมาจากการที่แสง Scatter ออกมาจากอนุภาคของ Smoke fluid หมายความว่าบริเวณที่พบเห็นแสงคือบริเวณที่มีการผสมกันระหว่าง Smoke fluid กับ Crossflow แล้วจน Smoke fluid กลั่นตัวเป็นละออง (mixed fluid) ซึ่งอาจจะประมาณเป็น Stoichiometric ratio อย่างหยาบได้เป็น 4.6 โดยรายละเอียดได้แสดงในภาคผนวก ค โดยที่บริเวณภายในเจ็ตที่ไม่พบสัญญาณแสงนั้นคือบริเวณที่ไม่มีการผสม (unmixed core)

รูปที่ 3.6(ก-ค) แสดงภาพขณะใดๆทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Traverse ( $y$ ) ( $y/rd=0.05-0.6$ ) สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08 โดยสำหรับกรณี Sr0 พบบริเวณที่มีความเข้มแสงสูงเป็นวงแหวนรอบปากเจ็ต (Azimuthal Structure) โดยวงแหวนนั้นมีลักษณะเป็นวงรีโดยจะยืดออกทางด้าน lateral โดยมีค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (Aspect ratio) ประมาณ 1.2 ซึ่งแสดงถึงบริเวณที่มีการผสมและเกิดเป็น Mixed Fluid ว่ามีโดยรอบปากเจ็ตทั้งด้านหน้าและหลังในขณะเดียวกันจะพบว่ามี Vortex roll-up ที่ทางด้าน leeward ทั้งสองข้างโดยบริเวณดังกล่าวจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อ  $y/rd$  มีค่ามากขึ้นและดูเหมือนสมมาตรรอบแกน streamwise ขณะที่บริเวณรอบข้างมีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นบริเวณที่มีความเข้มแสงต่ำ unmixed core มีขนาดเล็กลงเมื่อ  $y/rd$  มีค่ามากขึ้น โครงสร้างการผสมเริ่มแยกตัวเป็นสองบริเวณที่ด้านข้างอย่างชัดเจนที่ตำแหน่ง  $y/rd = 0.25$  เหมือนเป็นขาทั้งสองข้าง ซึ่งอาจจะเป็น CVP และในขณะเดียวกันที่บริเวณความเข้มแสงต่ำตรงกลางนั้นเริ่มมีลักษณะโค้งงอเหมือนเป็นเสี้ยวดวงจันทร์

สำหรับกรณีที่เพิ่มความเร็วของการหมุนเป็นกรณี Sr05 และกรณี Sr08 นั้นจะพบบริเวณที่มี Instability ทางด้าน Pressure มากกว่า Suction อย่างชัดเจนโดยจะพบเห็นเป็น Vortex roll-up ลักษณะเป็น Kelvin-Helmholtz (K-H) Instability ซึ่งแสดงว่าเจ็ตทางด้าน Pressure มีการ Mixed Fluid มากกว่าด้าน Suction และเริ่มแบ่งตัวออกเป็นสองฝั่งเมื่อ  $y/rd$  มีค่ามากขึ้น

โดยจะพบบริเวณ Mixed Fluid เป็นบริเวณกว้างที่ทางด้าน Pressure มากกว่าทางด้าน Suction ซึ่งผลจะเห็นเด่นชัดมากขึ้นเมื่อเพิ่มระดับของการหมุนควงเป็นกรณี Sr08 และยังพบว่า บริเวณ unmixed core นั้นจะเล็กลงเมื่อเทียบกับกรณี Sr0 และเมื่อพิจารณาผลของการหมุน Sr05 และ Sr08 ที่หน้าตัด  $y/rd = 0.25-0.6$  พบว่าบริเวณ unmixed core จะมีขนาดเล็กลงและมีลักษณะที่เป็นรูปรีโดยจะเอียงไปทางด้าน Suction side เมื่อค่า  $y/rd$  มีค่ามากขึ้น

รูปที่ 3.7(ก-ค) แสดงภาพเฉลี่ยทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Traverse (y) ( $y/rd=0.05-0.6$ ) สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08 โดยเมื่อพิจารณากรณี Sr0 พบความสมมาตรในตัวเจ็ต โดยพบความเข้มแสงสูงโดยเฉลี่ยเป็นวงแหวนกระจายตัวอยู่บริเวณรอบปากเจ็ตและสังเกตที่  $y/rd=0.15$  พบเห็นเป็น Vortical roll-up ของ Mean อย่างชัดเจนซึ่งต่างจากภาพ Instantaneous ซึ่งจะพบ Vortical roll-up ตั้งแต่  $y/rd=0.05$  และยังพบว่าบริเวณ Mixed Fluid นั้นเป็นบริเวณเดียวกันกับ Vortical roll-up ของ Mean โดยบริเวณ Mixed Fluid จะใหญ่ขึ้นตาม  $y/rd$  ที่เพิ่มมากขึ้นจนพัฒนาตัวกลายเป็นรูปไตหรือ CVP โดยจะสังเกตได้ชัดเจนที่หน้าตัด  $y/rd=0.25$  พบว่าเจ็ตจะมีลักษณะเป็นรูปไต CVP อย่างเต็มรูปแบบซึ่งในขณะเดียวกันจะเกิดบริเวณ unmixed core ที่หน้าตัดนี้โดยจะมีขนาดเล็กลงเมื่อ  $y/rd$  ที่เพิ่มมากขึ้น

สำหรับผลของการเพิ่มระดับของการหมุนควงเป็นกรณี Sr05 นั้นจะพบความไม่สมมาตรของเจ็ตสำหรับกรณี Sr05 ที่  $y/rd=0.1$  จะสังเกตเห็น Vortical roll-up ของ Mean อย่างชัดเจนซึ่งต่างจากภาพ Instantaneous ซึ่งจะพบ Vortical roll-up ตั้งแต่  $y/rd=0.05$  โดยจะพบว่า Mixed Fluid นั้นจะกระจายตัวมากพบทางด้าน Pressure และในขณะเดียวกันบริเวณ unmixed core นั้นจะเล็กลงเมื่อ  $y/rd$  ที่เพิ่มมากขึ้นและสังเกตได้ว่าเมื่อ  $y/rd = 0.60$  จะไม่พบบริเวณ unmixed core

สำหรับกรณี Sr08 พบว่ามีความแตกต่างกับกรณี Sr05 เล็กน้อยที่ Vortical roll-up ของ Mean นั้นจะพบเห็นที่หน้าตัดเดียวกับภาพ Instantaneous ซึ่งอาจจะหมายความว่ากรณี Sr08 นั้นมี Strength สูงทางด้าน Pressure จึงทำให้พบเห็นได้ที่บริเวณใกล้ปากเจ็ตในขณะเดียวกันบริเวณ unmixed core นั้นจะเล็กลงเมื่อ  $y/rd$  ที่เพิ่มมากขึ้นและสังเกตได้ว่าเมื่อ  $y/rd = 0.45$  จะไม่พบบริเวณ unmixed core

รูปที่ 3.8(ก-ค) แสดง Contour ของภาพเฉลี่ยทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Traverse (y) ( $y/rd=0.05-0.6$ ) สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08 เมื่อพิจารณากรณี Sr0 พบว่าบริเวณความเข้มแสงสูงซึ่งแสดงถึงบริเวณที่มีการผสมและเกิดเป็น Mixed Fluid เป็นวงแหวนเรียงตัวอยู่รอบปากเจ็ต โดยมี Local Peak อยู่ที่บริเวณด้านข้างเอียงไปด้าน leeward เล็กน้อยอย่างไรก็ตามเมื่อ  $y/rd$  มีค่ามากขึ้นค่า Local Peak นั้นจะพบเห็นที่ทางด้าน Pressure

สำหรับผลของการเพิ่มระดับของการหมุนควงเป็นกรณี Sr05 และกรณี Sr08 นั้นพบว่า บริเวณความเข้มแสงสูงนั้นกลับไม่สมมาตรรอบแกน streamwise แต่หนักไปในบริเวณ Pressure มากกว่าด้าน Suction ซึ่งแสดงว่าทางด้าน Pressure มีการผสมและเกิดเป็น Mixed Fluid มากกว่าด้าน Suction โดยในขณะที่เดียวกันบริเวณที่ยังไม่เกิดการผสม unmixed core จะเล็กกว่ากรณี Sr0 เมื่อเปรียบเทียบที่หน้าตัดเดียวกันและเมื่อสังเกตต่อไปที่กรณี Sr08 ที่หน้าตัด  $y/rd = 0.4$  พบว่าเส้น Contour ของภาพเฉลี่ยบริเวณ unmixed core นั้นจะหายไปโดยในขณะที่เดียวกัน ค่า local peak นั้นจะกระจายตัวอยู่ที่ทางด้าน Pressure มากกว่าด้าน Suction อย่างชัดเจน

รูปที่ 3.9(ก-ค) แสดงภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Traverse (y) ( $y/rd=0.05-0.6$ ) สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08 เมื่อพิจารณากรณี Sr0 ที่หน้าตัด  $y/rd = 0.05$  จะพบบริเวณที่มี Activity สูงรอบๆปากเจ็ตโดยมีลักษณะเป็นวงแหวน และเมื่อสังเกตที่หน้าตัด  $y/rd = 0.15-0.4$  พบว่าบริเวณ Activity สูงนั้นจะพบเห็นลักษณะเป็น 2 ชั้นซ้อนกันที่ทางด้านขอบในและขอบด้านนอกโดยจะสังเกตได้ว่าขอบด้านในนั้นจะค่อยๆเล็กลงจนหายไปที่หน้าตัด  $y/rd = 0.5$  ซึ่งต่างจากกรณีที่มีผลของ Swirl นั้นจะพบเห็นบริเวณ Activity สูงที่มีลักษณะ 2 ชั้นได้เร็วกว่าโดยจะพบตั้งแต่ที่หน้าตัด  $y/rd = 0.05$  และเมื่อสังเกตต่อไปพบว่าที่กรณี Sr05 นั้นบริเวณขอบด้านในจะเล็กลงเมื่อ  $y/rd$  เพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งหายไปที่หน้าตัด  $y/rd = 0.45$  และสำหรับกรณี Sr08 นั้นขอบด้านในจะจางหายไปที่หน้าตัด  $y/rd = 0.35$  และในขณะที่เดียวกันที่บริเวณขอบด้านนอกนั้นก็ขยายตัวใหญ่ขึ้นเมื่อ  $y/rd$  เพิ่มมากขึ้นโดยมีลักษณะเอียงไปทางด้าน Pressure

รูปที่ 3.10(ก-ค) แสดง Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Traverse (y) ( $y/rd=0.05-0.6$ ) สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08 เมื่อพิจารณากรณี Sr0 พบความสมมาตรในตัวเจ็ตโดยที่หน้าตัด  $y/rd = 0.05$  พบว่า Local peak ของค่า Standard deviation (STD) ซึ่งประมาณว่าเป็นบริเวณที่มี Activity สูงมีการกระจายตัวที่บริเวณขอบทางด้าน Leeward และยังพบการแผ่ขยายของค่า STD ออกไปทางด้านหลังเจ็ตโดยจะขยายตัวใหญ่ขึ้นเมื่อ  $y/rd$  เพิ่มมากขึ้นและยังพบอีกว่าที่  $y/rd = 0.15-0.6$  นั้นมีการกระจายตัวของ Local peak มาทางด้าน windward โดยจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนที่หน้าตัด  $y/rd=0.2-0.55$

เมื่อมีผลของ Swirl จะพบความไม่สมมาตรของ Contour ได้อย่างชัดเจนโดยเมื่อพิจารณากรณี Sr05 ที่หน้าตัด  $y/rd = 0.05$  พบว่า Local peak หรือบริเวณที่มี Activity สูงจะกระจายตัวทางด้าน Pressure มากกว่าทาง Suction เมื่อสังเกตหน้าตัดที่ไกลออกไปก็ยังคงพบบริเวณ Activity สูงมากทางด้าน Pressure ซึ่งอาจจะสรุปได้ว่า Swirl มีผลทำให้ขอบเจ็ตทางด้าน Pressure มี Activity ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับด้าน Suction โดยผลจะเด่นชัดมากเมื่อมีการเพิ่มระดับของการหมุนควงเป็น Sr08



รูปที่ 3.11(ก-ค) แสดง Contour ของ Turbulent intensity ทางด้าน Top view ซึ่งนิยามจากอัตราส่วนระหว่างค่า Standard deviation กับค่า Mean โดยสังเกตได้ว่าบริเวณ Near field ที่หน้าตัด  $y/rd = 0.05-0.2$  นั้นบริเวณที่มีความเป็น Turbulent สูงจะอยู่บริเวณด้านหน้าปากเจ็ตและที่หน้าตัด  $y/rd = 0.25-0.6$  พบว่าบริเวณที่มีค่า Turbulent สูงจะกระจายตัวอยู่ที่บริเวณด้านข้างเจ็ต โดยเมื่อมีผลของ Swirl เป็นกรณี Sr05 แล้วพบว่าบริเวณที่มีค่า Turbulent intensity สูงนั้นจะกระจายตัวอยู่ที่บริเวณด้าน windward ไปจนถึงด้าน Pressure และผลจะเด่นชัดขึ้นเมื่อเพิ่มระดับการหมุนคงเป็น Sr08

โดยการพัฒนาตัวที่บริเวณใกล้ปากเจ็ตสำหรับกรณี Sr0 นั้นจะพบโครงสร้าง Azimuthal Structure ที่รอบๆปากเจ็ตและทางด้าน leeward จะพบลักษณะ Vortex roll-up ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการ Mixed Fluid โดยโครงสร้างลักษณะดังกล่าวจะใหญ่ขึ้นและปรากฏเป็น CVP ในหน้าตัดถัดไป โดยโครงสร้างของการผสมจะสังเกตได้อย่างชัดเจนเมื่อมีผลของ Swirl สังเกตได้จากบริเวณที่มี Instability มากจะอยู่ทาง Pressure มากกว่า Suction โดยพบ Vortex roll-up ลักษณะเป็น Kelvin-Helmholtz (K-H) Instability แสดงว่าทางด้าน Pressure นั้นมีการ Mixed Fluid มากกว่า Suction และบริเวณดังกล่าวยังพบว่ามีค่า Local Peak และ Activity สูงจึงทำให้มี Turbulent ที่สูงมากทางด้าน Pressure และในขณะเดียวกันบริเวณ unmixed core ก็จะมีค่าต่ำลงด้วย โดยจะเห็นผลอย่างชัดเจนขึ้นเมื่อเพิ่มระดับการหมุนคงเป็นกรณี Sr08 ซึ่งผลในลักษณะดังกล่าวอาจจะสรุปได้ว่า การเพิ่มระดับของการหมุนคงแบบความเร็วในแนวเส้นสัมผัสไม่เป็นศูนย์และ Circulation ไม่เป็นศูนย์ ทำให้มีการ Promote Turbulent ทางด้าน Pressure ให้เพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เกิดการผสมที่เพิ่มมากขึ้นทางด้าน Pressure และในขณะเดียวกัน Swirl นั้นยังส่งผลถึงบริเวณ unmixed core เล็กน้อยซึ่งเกิดจากการดึงเอา Crossflow fluid เข้าสู่บริเวณดังกล่าวมากขึ้นจึงทำให้เกิดการผสมมากที่บริเวณดังกล่าว

### 3.3 ผลการถ่ายภาพทางด้านท้าย (End View)

#### 3.3.1 การพัฒนาตัวของเจ็ตตามแนว Downstream ( $x/rd=0-4$ ) ในกรณีเจ็ตไม่หมุนคง Sr0

รูปที่ 3.12.1-3.12.3 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตด้วย ภาพถ่ายขณะใดๆทางด้านท้าย End view ในกรณีเจ็ตที่ไม่หมุนคง Sr0 ของการทดลองนี้ที่หน้าตัด  $x/rd = 0-4$  เมื่อสังเกตแล้วพบว่าเจ็ตจะโตขึ้นตาม Downstream ( $x$ ) ในขณะที่เจ็ตนั้นก็เลยตัวสูงขึ้นโดยพบว่าที่บริเวณ Near Field จะพบ Large scale structure ซึ่งต่างจากบริเวณ Far Field ที่พบทั้ง Large scale และ Small scale structure



เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0$  พบว่าที่บริเวณขอบทางด้านข้างทั้งสองข้างของเจ็ทมี Lateral Shear Layer (LSL) ซึ่งแสดงถึงบริเวณที่มี Mixed Fluid จะสมมาตรในขณะที่ยังตรงกลางนั้นพบบริเวณที่ยังไม่มีการผสมของเจ็ท (unmixed core) และยังคงพบลักษณะเป็นเจ็ทซ้อนกันอยู่สองตัว (double deck) โดยที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.06$  ที่ตำแหน่งครึ่งของครึ่งปากเจ็ททางด้าน Leeward นั้นจะพบลักษณะเป็น shear layer สองตัวซ้อนกันทั้งสองข้างอย่างชัดเจนในขณะที่ยังตรงกลางนั้นพบบริเวณ unmixed core ที่มีลักษณะผอมสูงชันและยังคงพบลักษณะเป็นเจ็ทซ้อนกันอยู่สองตัว (double deck) โดยที่  $x/rd = 0.12$  เป็นตำแหน่งที่ขอบปากเจ็ททางด้าน Leeward นั้นไม่พบบริเวณ unmixed core และยังคงได้ถึงเจ็ท shear layer ที่บริเวณด้านข้างที่มีลักษณะที่ใหญ่ขึ้นที่  $x/rd = 0.25$  พบว่าเจ็ทนั้นมีลักษณะเริ่มคล้ายกับ CVP (Counter rotating vortex pair) ที่  $x/rd = 1.5-4$  นั้นจะพบเห็นโครงสร้างของ wake structure ของ Mixed Fluid ทอดตัวยาวและเชื่อมต่อกับตัวเจ็ทลงมาที่พื้นซึ่งบ่งบอกถึง wake structure ว่าเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของการผสม (Mixing Structure) และมี Jet Fluid สอดคล้องกับ Smith and Mungal (1998) ซึ่งพบว่า wake structure นั้นมีบริเวณที่เป็นส่วนของเจ็ท และ crossflow fluid

รูปที่ 3.13.1-3.13.3 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ทด้วย ภาพถ่ายเฉียงทางด้านท้าย End view ในกรณีเจ็ทที่ไม่หมุนควง  $Sr_0$  ของการทดลองนี้ที่หน้าตัด  $x/rd = 0 - 4$  พบว่าในทุกหน้าตัดของเจ็ทมีลักษณะที่ค่อนข้างสมมาตร และมีลักษณะเป็นรูปไตและเจ็ทนั้นจะสูงขึ้นตาม Downstream(x) โดยที่หน้าตัด  $x/rd = 0$  บริเวณ Near Field นั้นพบว่าค่าความเข้มของแสงที่มากนั้นจะอยู่บริเวณที่มีการผสมตรงขอบด้านข้างในขณะเดียวกันยังคงพบบริเวณ unmixed core ที่บริเวณแกนกลางของเจ็ท และที่หน้าตัด  $x/rd = 0.06$  จะสังเกตเห็นการม้วนตัว (Roll-up) ของ Lateral Vortical Structure โดยเห็นอย่างชัดเจนว่า Concentration ของ Mixed fluid ทางด้านข้างสูงกว่าทางด้านบนของเจ็ทในขณะเดียวกันพบบริเวณ unmixed core ที่มีลักษณะผอมและสูงชัน และที่  $x/rd = 0.12$  พบค่าความเข้มแสงมากที่บริเวณขอบด้านข้างในส่วนล่างของเจ็ท ซึ่งที่หน้าตัดนี้จะพบบริเวณ unmixed fluid ลอยตัวอยู่ที่ด้านบนของเจ็ท และที่  $x/rd = 0.19$  จะสังเกตเห็นได้ถึงเจ็ทจะมีลักษณะที่เป็น CVP อย่างชัดเจนโดยที่ ค่าความเข้มแสงนั้นจะอยู่ที่บริเวณด้านล่างทั้งสองข้างของเจ็ทบริเวณที่มีความเข้มแสงสูงนั้นจะขยายตัวใหญ่ขึ้นโดยจะสังเกตเห็นที่  $x/rd = 0.25 - 4$

รูปที่ 3.14.1-3.14.3 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ทด้วย Contour ของภาพถ่ายเฉียงทางด้านท้าย End view ในกรณีเจ็ทที่ไม่หมุนควง  $Sr_0$  ของการทดลองนี้ที่หน้าตัด  $x/rd = 0 - 4$  โดยค่าความเข้มแสงที่แสดงนั้นได้ทำการ Normalize ด้วยค่าความเข้มแสงสูงสุดที่หน้าตัดนั้นๆ พบอีกว่า Contour ของภาพถ่ายเฉียง มีรูปร่างค่อนข้างสมมาตร ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0$  พบว่าค่า Local Peak นั้นจะอยู่ทางด้านข้างของเจ็ท (Lateral) ในขณะเดียวกันจะพบบริเวณ unmixed

core ที่แกนกลางของเจ็ต และที่หน้าตัด  $x/rd = 0.06$  นั้นพบว่าค่า Local Peak นั้นจะอยู่ทางด้านข้างของเจ็ต (Lateral) โดยที่หน้าตัดนี้ยังคงพบบริเวณ unmixed core ที่แกนกลางของเจ็ตแต่มีลักษณะเปลี่ยนไปจากหน้าตัดก่อนหน้าเล็กน้อยคือมีลักษณะที่ผอมและสูงขึ้น ที่หน้าตัด  $x/rd = 0.12$  ยังคงพบค่า Local Peak นั้นจะอยู่ทางด้านข้างของเจ็ตแต่ที่หน้าตัดนี้พบบริเวณ unmixed fluid จะลอยตัวอยู่ด้านบนของเจ็ตในตำแหน่งถัดมาที่  $x/rd = 0.19$  นั้นพบว่าเจ็ตมีลักษณะเป็นรูปไต (Kidney-shape) โดยในหน้าตัดนี้ไม่พบบริเวณ unmixed fluid ทั้งตัวเจ็ตและเมื่อสังเกตเจ็ตตั้งแต่  $x/rd = 0-0.38$  พบว่ามี 2 Local Peak โดยจะสังเกตเห็นการ Merge กันระหว่าง Peak และเมื่อสังเกตที่หน้าตัด  $x/rd > 0.5$  ไปจะพบว่าเหลือเพียง Local Peak โดยตำแหน่งของ Local Peak นั้นจะยกตัวสูงขึ้นและเจ็ตนั้นจะกระจายตัวตามแนว traverse (y) มากกว่า spanwise (z) ที่ Near Field ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการโค้งตัวของเจ็ตในช่วงแรกในทางตรงกันข้ามจะกระจายตัวตามแนว spanwise (z) มากกว่า traverse (y) ที่ Far Field ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Pratte and Baines (1967)

เมื่อพิจารณาตามแนว downstream (x) พบการปฏิสัมพันธ์ (interaction) กันของ Local peak สังเกตที่  $x/rd = 0.19 - 0.38$  และยังพบการขยายตัวของเจ็ตและยกตัวสูงขึ้นจากพื้นมากขึ้น โดยพบว่าที่บริเวณ Near Field นั้นจะมี Gradient มีค่าเป็นลบมากที่สุดทิศทางซึ่งลงโดยพุ่งออกจาก Quadrant ที่ 3 และ 4 ดังรูป 3.14.1 โดย Gradient นั้นจะมีค่าเป็นลบน้อยลงตามแนว downstream (x)

รูปที่ 3.15.1-3.15.3 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตด้วย ภาพถ่ายเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้านท้าย End view ในกรณีเจ็ตที่ไม่หมุนควง  $Sr0$  ของการทดลองนี้ที่หน้าตัด  $x/rd = 0-4$  จะสังเกตได้ถึงความค่อนข้างสมมาตรของเจ็ตโดยที่  $x/rd = 0$  พบว่าบริเวณที่มี Activity สูงนั้นจะกระจายตัวอยู่ที่บริเวณขอบด้านข้างของเจ็ตทั้งสองข้างและที่  $x/rd = 0.06$  พบบริเวณที่มี Activity สูงสองบริเวณโดยบริเวณแรกนั้นจะพบที่ด้านขอบทางด้านข้างทั้งสองข้างซึ่งจะมีลักษณะโค้งตามขอบเจ็ตและอีกบริเวณคือที่บริเวณ core ของเจ็ตโดยมีลักษณะที่โค้งออกทางด้านตรงข้ามกันกับบริเวณแรกโดยเมื่อสังเกตในทุกๆ หน้าตัดแล้วพบบริเวณที่มี Activity สูงที่ขอบด้านข้างของเจ็ตที่ Near Field และบริเวณที่มี Activity สูงล้อมรอบเจ็ตที่บริเวณ Far Field

รูปที่ 3.16.1-3.16.3 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตด้วย Contour ของภาพถ่ายเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้านท้าย End view ในกรณีเจ็ตที่ไม่หมุนควง  $Sr0$  ของการทดลองนี้ที่หน้าตัด  $x/rd = 0-4$  พบว่า Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานมีรูปร่างค่อนข้างสมมาตรที่  $x/rd = 0$  ค่า Local Peak ของ Standard deviation (STD) จะกระจายอยู่ที่บริเวณขอบด้านข้างของเจ็ต

นอกจากนี้ที่หน้าตัด  $x/rd = 0.06$  พบบริเวณที่มี activity สูงกระจายอยู่ที่บริเวณขอบทางด้านข้างของเจ็ตและบริเวณที่มี activity ต่ำจะอยู่ที่บริเวณแกนเจ็ตโดยทั้งสองบริเวณนี้มีทิศ

ของการกระจายตัวที่โค้งเข้าหากัน และเมื่อสังเกตที่หน้าตัด  $x/rd = 0.12$  พบบริเวณที่มี activity สูงนั้นที่บริเวณขอบด้านข้างโดยมีการกระจายตัวขึ้นตามแนว Traverse(y) และเมื่อสังเกตที่หน้าตัด  $x/rd = 0.19$  พบค่า activity ต่ำที่บริเวณใจกลางของเจ็ตพบว่าเจ็ตนั้นจะยกตัวสูงขึ้นเมื่อเทียบกับหน้าตัดก่อนหน้าโดยพบว่าค่าของ Local Peak นั้นจะอยู่ที่ขอบด้านข้างก่อนไปทางด้านล่างของเจ็ตและสังเกตได้ถึงบริเวณที่มี activity ต่ำที่บริเวณใจกลางก่อนไปทางด้านบนของเจ็ตและสังเกตได้ถึงความเป็น CVP ของเจ็ตในหน้าตัดนี้ และเมื่อสังเกตในหน้าตัดที่ไกลออกไปนั้น ตำแหน่งของ Local Peak นั้นจะยกตัวสูงขึ้นและจะมีการกระจายตามแนว traverse (y) และเมื่อพิจารณาตามแนว downstream (x) แล้วพบว่าบริเวณที่มี activity สูงนั้นเริ่มไม่สมมาตรโดยจะเอียงไปทางด้านซ้ายโดยเมื่อสังเกตในทุกหน้าตัดแล้วพบว่าค่าของ Local Peak ของ Std สูงสุดนั้นประมาณว่าเป็นบริเวณเดียวกันกับบริเวณที่มีค่า Local Peak ของ Mean อย่างไรก็ตามรูปร่าง Contour ของ STD ดูเหมือนจะสะท้อนถึง Strain Field มากกว่าเมื่อเทียบกับ Contour ของ Mean โดยจะยืดออกตามแนวเส้นรอบวงด้านข้าง

โดยการพัฒนาตัวของกรณี Sr0 จะสังเกตโครงสร้างการผสมหรือโครงสร้างของ Mixed fluid ที่บริเวณใกล้ปากเจ็ตโครงสร้างจะมีความสม่ำเสมอน้อยกว่าบริเวณไกลปากเจ็ตโดยในบริเวณใกล้ปากเจ็ตนั้นจะพบ Mixed fluid มากทางด้านข้างและด้านล่างโดยจะสังเกตว่า Concentration ของ Mixed fluid สูงสุดที่บริเวณเกิดการม้วนตัว (Roll-up) ของ Lateral Vortical Structure ในขณะที่เดียวกันจะปรากฏบริเวณ unmixed core ทำให้โครงสร้างมีรูปร่างคล้ายเกือกม้า โดยที่หน้าตัด  $x/rd = 0-0.38$  พบว่ามี 2 Local Peak โดยจะสังเกตเห็นการ Merge กันระหว่าง Peak โดยที่หน้าตัด  $x/rd > 0.5$  ไปจะพบว่าเหลือเพียง Local Peak เดียวซึ่งเมื่อเจ็ตนั้นพัฒนาตัวไปตาม downstream (x) บริเวณ unmixed core จะหายไปและโครงสร้างของ Mixed fluid พัฒนาตัวไปเป็นรูปไต CVP

### 3.3.2 การพัฒนาตัวของเจ็ตตามแนว Downstream( $x/rd=0-4$ )ในกรณีเจ็ตหมุนควง Sr05

รูปที่ 3.17.1-3.17.3 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตด้วย ภาพถ่ายขณะใดๆทางด้านท้าย End view ในกรณีเจ็ตที่หมุนควง Sr05 ของการทดลองนี้ที่หน้าตัด  $x/rd = 0-4$  เมื่อสังเกตแล้วพบว่าเจ็ตจะโตขึ้นตาม Downstream(x) ในขณะที่เจ็ตนั้นก็เลยตัวสูงขึ้นด้วยโดยที่บริเวณ Near Field จะพบ Large scale structure ซึ่งต่างจากบริเวณ Far Field ที่พบทั้ง Large scale และ Small scale structure และพบโครงสร้างโดยรวมของเจ็ตมีความแตกต่างกับกรณีเจ็ตไม่หมุนควง Sr0 อย่างชัดเจนโดยจะมีความต่างกันที่บริเวณ Near Field ที่  $x/rd = 0$  จะสังเกตเห็น Lateral Shear Layer (LSL) ที่ขอบทั้งสองข้างของเจ็ตมีความไม่สมมาตรโดยมี LSL ที่ขอบ

ทางด้าน Pressure จะใหญ่กว่าที่ขอบทางด้าน Suction อย่างชัดเจนแสดงถึงการผสมที่ทางด้าน Pressure มากกว่าทาง Suction และยังคงพบ Vortical Roll-up ที่ขอบทั้งสองข้างโดยในขณะเดียวกันยังพบบริเวณ unmixed core ที่บริเวณแกนกลางของเจ็ต

เมื่อสังเกตที่หน้าตัด  $x/r_d = 0.06$  ที่ตำแหน่งครึ่งของรัศมีปากเจ็ตทางด้านหลังยังคงพบ LSL ที่ขอบด้าน Pressure ใหญ่กว่าด้าน Suction อย่างชัดเจนและบริเวณ unmixed core นั้นจะผอมและสูงโดยจะเอียงไปทางด้าน Suction เมื่อสังเกตที่หน้าตัด  $x/r_d = 0.12$  นั้นจะสังเกตเห็นว่าบริเวณ unmixed core นั้นจะหายไปแต่จะพบบริเวณ unmixed fluid core ที่ลอยตัวอยู่ทางด้าน Suction แทนและที่หน้าตัด  $x/r_d = 0.19$  ยังสังเกตได้ถึงลักษณะ CVP ที่เกิดขึ้นในตัวเจ็ตแต่จะค่อนข้างเอียงไปทางด้าน Pressure และที่หน้าตัดที่ไกลออกไปที่ตำแหน่ง  $x/r_d = 2 - 4$  สังเกตได้ถึง CVP แต่จะมีรูปร่างที่ไม่สมมาตรและยังคงพบโครงสร้างของ wake structure ของ Mixed Fluid ทอดตัวยาวและเชื่อมต่อกับตัวเจ็ตลงมาจากพื้นซึ่งบ่งบอกถึง wake structure ว่าเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของการผสม(Mixing Structure)และมี Jet Fluid

รูปที่ 3.18.1-3.18.3 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตด้วยภาพถ่ายเฉื่อยทางด้านท้าย End view ในกรณีเจ็ตที่หมุนควง  $Sr_{05}$  ของการทดลองนี้ที่หน้าตัด  $x/r_d=0-4$  พบว่าที่หน้าตัดบริเวณ Near Field ของเจ็ตนั้นมีลักษณะที่ไม่สมมาตรอย่างชัดเจนโดยเจ็ตจะมีลักษณะเอียงไปทางด้าน Pressure และ ที่บริเวณ Far Field นั้นลักษณะของเจ็ตนั้นค่อนข้างคล้ายกับเจ็ตกรณีที่ไม่มีการหมุนควง  $Sr_0$  ที่หน้าตัด  $x/r_d=0$  พบว่า LSL ที่แสดงถึงบริเวณ Mixed Fluid จะไม่สมมาตรโดยด้าน Pressure จะมีขนาดใหญ่กว่าด้าน Suction อย่างชัดเจน ซึ่งยังคงพบบริเวณ unmixed core ที่บริเวณแกนเจ็ตและที่หน้าตัด  $x/r_d = 0.06$  พบว่า LSL ที่แสดงถึงบริเวณ Mixed Fluid จะไม่สมมาตรโดยด้าน Pressure จะมีขนาดใหญ่กว่าด้าน Suction อย่างชัดเจนและพบอีกว่าบริเวณ unmixed core นั้นจะยืดตัวสูงและผอมลงโดยจะเอียงไปทางด้าน Suction และเมื่อสังเกตที่หน้าตัดถัดไปที่  $x/r_d = 0.12$  ซึ่งเป็นหน้าตัดที่อยู่ตำแหน่งที่ขอบปากเจ็ตทางด้านหลังนั้นจะพบบริเวณ unmixed fluid core ทางด้าน Suction และบริเวณที่มีความเข้มแสงสูงก็จะอยู่ทาง Suction เช่นกัน และที่หน้าตัดถัดไปที่  $x/r_d = 0.19$  จะสังเกตเห็นเจ็ตมีลักษณะเป็นรูปไตโดยจะมีการเอียงของบริเวณ Mixed Fluid ไปทางด้าน Pressure เล็กน้อยและยังสังเกตได้อีกว่าที่บริเวณขอบเจ็ตด้านล่างทางฝั่ง Pressure นั้นจะต่ำกว่าขอบเจ็ตทางด้านล่างฝั่ง Suction

รูปที่ 3.19.1-3.19.3 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตด้วย Contour ของภาพถ่ายเฉื่อยทางด้านท้าย End view ในกรณีเจ็ตที่หมุนควง  $Sr_{05}$  ของการทดลองนี้ที่หน้าตัด  $x/r_d=0-4$  พบว่า Contour ของภาพถ่ายเฉื่อยนั้นจะมีความไม่สมมาตรของเจ็ตอย่างชัดเจน สังเกตที่หน้าตัด  $x/r_d = 0-0.25$  นั้นพบว่าเจ็ตนั้นมี 2 Local Peak ที่อยู่ทาง Lateral โดยจะกระจายตัวมากที่ทางด้าน pressure และยังคงสังเกตเห็นการเอียงตัวของ Contour ไปทางด้าน pressure อย่างชัดเจนและใน



ขณะเดียวกันยังคงพบบริเวณ unmixed core ที่แกนกลางเจ็ตและเมื่อสังเกตที่หน้าตัด  $x/rd = 0.06$  พบว่า Local Peak นั้นจะอยู่ทาง Lateral และยังคงพบบริเวณ unmixed core ที่แกนกลางของเจ็ตแต่มีลักษณะที่ผอมและสูงขึ้นและจะบิดเบี้ยวไปทางด้าน Suction และที่หน้าตัด  $x/rd = 0.12-0.25$  ยังคงพบบริเวณ unmixed fluid core ที่ลอยตัวอยู่ทางด้าน Suction และยังคงสังเกตได้ถึงบริเวณ Mixed Fluid และ Local Peak มากทางด้าน Pressure และที่หน้าตัด  $x/rd > 0.38$  พบว่าเจ็ตนั้นมีเพียง Local Peak เดียวและอยู่ทางด้าน Pressure

เมื่อสังเกตที่หน้าตัด  $x/rd = 0.25- 0.88$  ค่า ของ Local Peak นั้นจะสังเกตเห็นทางด้าน Pressure และสำหรับที่ Far Field ที่หน้าตัด  $x/rd = 1-2$  นั้น ค่าของ Local Peak นั้นจะสังเกตเห็นทางด้าน Suction side ส่วนที่  $x/rd = 2.5 - 4$  นั้นค่าความเข้มแสงนั้นจะกระจายตัวไปทั่วตัวเจ็ต

รูปที่ 3.20.1-3.20.3 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตด้วยภาพถ่ายเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้านท้าย End view ในกรณีเจ็ตที่หมุนควง Sr05 ของการทดลองนี้ที่หน้าตัด  $x/rd = 0-4$  โดยจะพบความไม่สมมาตรของตัวเจ็ตและพบว่าค่า STD จะมีมากที่บริเวณขอบด้านข้างของเจ็ตโดยสังเกตที่หน้าตัด  $x/rd = 0$  พบว่าบริเวณที่มี Activity สูงจะกระจายอยู่ที่ทางด้าน Lateral โดยจะมีลักษณะเอียงไปทางด้าน Pressure และที่หน้าตัด  $x/rd = 0.06$  ยังคงพบบริเวณที่มี Activity สูงอยู่ที่ทางด้านข้างเจ็ตและยังสังเกตเห็นบริเวณแกนกลางของเจ็ตนั้นเป็นบริเวณที่มี Activity ต่ำโดยเอียงไปทางด้าน Suction และเมื่อสังเกตหน้าตัดที่ไกลออกไปตั้งแต่  $x/rd = 0.19 - 4$  พบว่าบริเวณที่มี Activity สูงนั้นจะล้อมลอบเต็มตัวเจ็ต

รูปที่ 3.21.1-3.21.3 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตด้วย Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้านท้าย End view ในกรณีเจ็ตที่ไม่หมุนควง Sr05 ของการทดลองนี้ที่หน้าตัด  $x/rd = 0-4$  พบความไม่สมมาตรของรูปร่าง Contour ของ Standard deviation (STD) และที่หน้าตัด  $x/rd = 0-0.06$  พบ Local Peak ที่ขอบล่างทางด้าน Pressure มากกว่าด้าน Suction และเมื่อสังเกตที่หน้าตัด  $x/rd = 0.12$  พบว่าบริเวณที่มีค่า STD ต่ำกระจายตัวอยู่ที่บริเวณใจกลางของเจ็ตและเมื่อสังเกตที่หน้าตัดที่ไกลออกไปแล้วพบว่าบริเวณดังกล่าวจะมีลักษณะคล้ายรูปไตและจะเอียงไปทางด้าน Suction อีกด้วย

นอกจากนี้ยังพบว่าที่หน้าตัด  $x/rd = 0.19 - 4$  พบว่าค่า Local Peak ของ STD นั้นจะกระจายตัวอยู่ทางด้าน Pressure อย่างไรก็ตามยังคงพบ local peak ที่ทางด้าน Suction ด้วยและเมื่อเปรียบเทียบกับค่า Mean แล้วพบว่าค่าของ Contour STD นั้นจะพบ 2 Local Peak ซึ่ง Contour Mean นั้นจะพบเพียง Local Peak เดียวที่ทุกๆหน้าตัดใน Far Field

โดยการพัฒนาตัวของกรณี Sr05 จะสังเกตโครงสร้างการผสมหรือโครงสร้างของ Mixed fluid ที่บริเวณใกล้ปากเจ็ตโครงสร้างจะมีความสม่ำเสมอน้อยกว่าบริเวณไกลปากเจ็ตโดยใน



บริเวณใกล้ปากเจ็ตนั้นจะพบ Mixed fluid มากทางด้าน Pressure โดยจะสังเกตว่า Concentration ของ Mixed fluid สูงสุดตรงบริเวณที่เกิดการม้วนตัว (Roll-up) ของ Lateral Vortical Structure รวมถึงบริเวณที่มี Activity สูงในทุกหน้าตัดนั้นจะอยู่ทางด้าน Pressure มากกว่าทางด้าน Suction อย่างไรก็ตามยังคงพบความแตกต่างระหว่างค่า Mean กับค่า STD อยู่บ้างโดยพบว่า Contour STD นั้นจะพบ 2 Local Peak แต่ Contour Mean นั้นจะพบเพียง 1 Local Peak เดียวที่ทุกหน้าตัดใน Far Field โดยจะพบการพัฒนาตัวของ Mixed fluid เป็นรูปไต CVP ซึ่งในขณะเดียวกันพบว่าบริเวณ unmixed core จะเปลี่ยนเป็นบริเวณ Mixed fluid

### 3.3.3 การพัฒนาตัวของเจ็ตตามแนว Downstream ( $x/r_d=0-4$ ) ในกรณีเจ็ตหมุนควง $Sr08$

รูปที่ 3.22.1-3.22.3 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตด้วย ภาพถ่ายขณะใดๆทางด้านท้าย End view ในกรณีเจ็ตที่ไม่หมุนควง  $Sr08$  ของการทดลองนี้ที่หน้าตัด  $x/r_d = 0-4$  พบว่าลักษณะโครงสร้างของเจ็ตจะคล้ายกับกรณี  $Sr05$  ดังนี้ 1) เจ็ตจะโตขึ้นตาม Downstream ( $x$ ) 2) สังเกตได้ถึง small scale และ Large scale structure ที่ชัดเจน 3) สังเกตเห็น Lateral Shear Layer (LSL) ที่ขอบทั้งสองข้างโดยที่ขอบทางด้าน Pressure จะใหญ่กว่าที่ขอบทางด้าน Suction 4) พบบริเวณ unmixed core ที่บริเวณแกนกลางของเจ็ต นอกจากนี้ ที่บริเวณ Far Field ที่หน้าตัด  $x/r_d = 1 - 4$  นั้นยังคงพบโครงสร้างของ wake structure ของ Mixed Fluid ทอดตัวยาวและเชื่อมต่อกับตัวเจ็ตลงมาจากที่พื้น

รูปที่ 3.23.1-3.23.3 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตด้วยภาพถ่ายเฉียงทางด้านท้าย End view ในกรณีเจ็ตที่ไม่หมุนควง  $Sr08$  ของการทดลองนี้ที่หน้าตัด  $x/r_d = 0-4$  พบว่าลักษณะโครงสร้างของเจ็ตจะคล้ายกับกรณี  $Sr05$  ดังนี้ 1) บริเวณ Mixed Fluid จะไม่สมมาตรโดยด้าน Pressure จะมีขนาดใหญ่กว่าด้าน Suction 2) ที่หน้าตัด  $x/r_d = 0.06$  บริเวณ unmixed core นั้นจะยืดตัวสูงและผอมลงโดยจะเอียงไปทางด้าน Suction 3) ที่หน้าตัด  $x/r_d = 0.12$  พบบริเวณ unmixed fluid core ทางด้าน Suction และบริเวณที่มีความเข้มแสงสูงก็จะอยู่ทาง Suction อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตความเข้มแสงด้วยตาพบว่ากรณี  $Sr08$  จะต่ำกว่ากรณี  $Sr05$  เล็กน้อย

รูปที่ 3.24.1-3.24.3 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตด้วย Contour ของภาพถ่ายเฉียงทางด้านท้าย End view ในกรณีเจ็ตที่ไม่หมุนควง  $Sr08$  ของการทดลองนี้ที่หน้าตัด  $x/r_d = 0-4$  พบลักษณะของ Contour ของภาพเฉี่ยวนั้นจะมีความคล้ายกับกรณี  $Sr05$  ดังนี้ 1) ที่หน้าตัด  $x/r_d = 0-0.25$  นั้นพบ 2 Local Peak ที่อยู่ทาง Lateral โดยจะกระจายตัวมากด้าน pressure 2) ยังคงพบบริเวณ unmixed core ที่แกนกลางของเจ็ต 3) ที่หน้าตัด  $x/r_d = 0.12$  ยังคงพบบริเวณ unmixed fluid core ที่ลอยตัวอยู่ทางด้าน Suction 4) ที่หน้าตัด  $x/r_d = 0.25-0.88$  พบค่าของ Local Peak ทางด้าน Pressure และหน้าตัด  $x/r_d = 1-2$  ค่าของ Local Peak นั้นจะอยู่ทางด้าน

Suction side อย่างไรก็ตามที่หน้าตัด  $x/rd = 0.88 - 1.5$  จะมีการเปลี่ยนของค่า Local Peak จากด้าน Pressure Side ไปเป็นด้าน Suction side

รูปที่ 3.25.1-3.25.3 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตด้วยภาพถ่ายเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้านท้าย End view ในกรณีเจ็ตที่ไม่หมุนควง Sr08 โดยจะพบลักษณะของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานมีความคล้ายกับกรณี Sr05 ดังนี้ 1) พบว่าบริเวณที่มี Activity สูงจะกระจายอยู่ที่ทางด้าน Lateral โดยจะมีลักษณะเอียงไปทางด้าน Pressure 2) ที่หน้าตัด  $x/rd = 0.06$  ยังคงพบบริเวณที่มี Activity ต่ำที่บริเวณแกนกลางของเจ็ตโดยจะเอียงไปทางด้าน Suction 3) ที่หน้าตัด  $x/rd = 0.19 - 4$  พบบริเวณที่มี Activity สูงนั้นจะล้อมรอบตัวเจ็ตเช่นกันกับกรณี Sr05

รูปที่ 3.26.1-3.26.3 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตด้วย Contour ของภาพถ่ายเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้านท้าย End view ในกรณีเจ็ตที่ไม่หมุนควง Sr08 ของการทดลองนี้ที่หน้าตัด  $x/rd = 0-4$  โดยจะพบลักษณะของ Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานมีความคล้ายกับกรณี Sr05 ดังนี้ 1) พบความไม่สมมาตรของ Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2) ที่หน้าตัด  $x/rd = 0-0.06$  พบ Local Peak ที่ขอบล่างทางด้าน Pressure มากกว่าด้าน Suction และยังพบการบริเวณที่มีค่า STD ต่ำที่บริเวณใจกลางของเจ็ตมีลักษณะคล้ายรูปไตและจะเอียงไปทางด้าน Suction อย่างไรก็ตามพบว่า Contour STD จะพบเพียง Local Peak เดียวซึ่งต่างจากกรณี Sr05 ที่พบว่ามี 2 Local Peak

โดยการพัฒนาตัวของกรณี Sr08 พบว่ามีความคล้ายกับกรณี Sr05 อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีความแตกต่างที่กรณี Sr08 นั้นจะมีการแผ่ขยายของ Mixed Fluid ที่กว้างขวางกว่ากรณี Sr05 และยังพบว่าค่า Local Peak ของ Contour STD จะพบเพียง Local Peak เดียวซึ่งต่างจากกรณี Sr05 ที่พบว่ามี 2 Local Peak

### 3.3.4 การเปรียบเทียบผลในกรณีเจ็ตไม่หมุนควงกับเจ็ตที่หมุนควง Sr05 และ Sr08 ที่หน้าตัดต่าง ๆ

ในการเปรียบเทียบผลของการหมุนควงที่หน้าตัดต่าง ๆ นั้นจะแสดงด้วย Contour ของภาพเฉลี่ยและ Contour ของภาพถ่ายเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้าน End view ของค่าความเข้มแสงที่ Normalize ด้วยค่าความเข้มแสงสูงสุดที่หน้าตัดใด ๆ ตามตำแหน่ง Downstream (x) เดียวกัน

รูปที่ 3.27(ก-ณ) แสดงการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่าง ๆ ด้วย Contour ของภาพเฉลี่ยต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) โดยรูปที่ 3.21(ก - ค) แสดงช่วงแรกของการพัฒนาตัวของเจ็ตที่อยู่ในช่วง Near field โดยที่หน้าตัด  $x/rd = 0$  เมื่อเพิ่มระดับการหมุนควงเป็นกรณี Sr05 จะพบความไม่สมมาตรของเจ็ตโดยบริเวณความเข้มแสงสูงซึ่งแสดงถึงบริเวณที่มี Mixed Fluid จะมีกระจายเป็นบริเวณที่ใหญ่ทางด้าน Pressure และใน

ขณะเดียวกันบริเวณ unmixed core จะสั้นและต่ำลงโดยผลยิ่งชัดเจขึ้นเมื่อเพิ่มระดับของการหมุนควงเป็นกรณี Sr08 และเมื่อสังเกตที่หน้าตัด  $x/rd = 0.06$  พบลักษณะการกระจายตัวของบริเวณ Mixed Fluid เหมือนกับหน้าตัดก่อนหน้าแต่บริเวณ unmixed core จะสั้นและต่ำลงโดยบิดเบี้ยวไปทางด้าน Suction และยังพบอีกว่า Swirl มีผลทำให้ขอบเจ็ดด้านล่างนั้นหายไปโดยจะสังเกตได้อย่างชัดเจนที่หน้าตัดถัดไปที่  $x/rd = 0.12$  พบว่าขอบเจ็ดทางด้านล่างจะหายไปและในขณะเดียวกันที่บริเวณ unmixed fluid core จะเอียงมาทางด้าน Suction

เมื่อสังเกตที่หน้าตัด  $x/rd = 0.19-0.38$  นั้นพบอีกว่า Swirl มีผลทำให้บริเวณความเข้มแสงสูงซึ่งแสดงถึงบริเวณที่มี Mixed Fluid กระจายตัวมากที่สุดทางด้าน Pressure โดยพบอีกว่า Local Peak จะอยู่ทางด้าน Pressure เช่นกันซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากผลของการดึง crossflow fluid เขามาผสมที่ต่างกันระหว่าง Suction และ Pressure

รูปที่ 3.27(ง-ฉ) แสดงการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆในช่วง Far field โดยที่หน้าตัด  $x/rd = 0.5 - 0.88$  โดยเมื่อเพิ่มระดับของการหมุนควงเป็นกรณี Sr05 พบว่า Local Peak นั้นจะอยู่ทางด้าน Pressure และผลยังคงเหมือนเดิมเมื่อเพิ่มระดับการหมุนควงเป็นกรณี Sr08 และสังเกตต่อไปที่หน้าตัด  $x/rd = 1.5 - 2$  พบว่าค่าของ Local Peak จะอยู่ทางด้าน suction และยังคงให้ผลเหมือนเดิมเมื่อเพิ่มระดับการหมุนควงเป็นกรณี Sr08 แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าที่  $x/rd = 1$  นั้นตำแหน่ง Local Peak จะอยู่ที่บริเวณตรงกลางของเจ็ด

รูปที่ 3.28(ก-ฉ) แสดงการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆด้วย Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานต่อการพัฒนาตัวของเจ็ดในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) โดยรูปที่ 3.22(ก - ค) นั้นแสดงช่วงแรกของการพัฒนาตัวของเจ็ด Near field โดยเมื่อมีผลของ Swirl พบความไม่สมมาตรของรูปร่าง Contour ของ Standard deviation (STD) และ Swirl ยังส่งผลต่อไปที่หน้าตัด  $x/rd = 0-0.06$  โดยพบว่า Local Peak ของ STD นั้นจะกระจายตัวที่บริเวณขอบทางด้าน Pressure และเมื่อพิจารณาที่หน้าตัดที่  $x/rd = 0.12-0.38$  ก็ยังคงพบว่าบริเวณที่มี Activity สูงอยู่ที่ทางด้าน Pressure และยังพบอีกว่าบริเวณที่  $x/rd = 0.5-4$  มี Activity ต่ำที่กระจายอยู่ใจกลางของเจ็ดนั้นจะเอียงไปทางด้าน Suction

รูปที่ 3.29(ก-ฉ) แสดง Turbulent intensity สำหรับเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) โดยรูปที่ 3.23(ก - ค) ซึ่งนิยามจากอัตราส่วนระหว่างค่า Standard deviation กับค่า Mean แสดงช่วง Near Field ของการพัฒนาตัวของเจ็ดโดยจะสังเกตเห็นว่าเมื่อมีผลของ Swirl จะพบความไม่สมมาตรในตัวเจ็ดโดยสังเกตที่หน้าตัด  $x/rd = 0-0.38$  พบว่า Turbulent intensity ที่สูงนั้นจะอยู่ที่บริเวณขอบทางด้าน Pressure และเมื่อเพิ่มเมื่อระดับการหมุนควงเป็นกรณี Sr08 ค่า Turbulent intensity ที่สูงนั้นจะเด่นชัดที่ขอบด้าน Pressure โดยจะกระจายขึ้นไปจนถึงขอบด้านบนของเจ็ดสำหรับในหน้าตัดไกลออกไปค่าของ

Turbulent intensity นั้นก็จะพบที่บริเวณขอบทางด้านข้างไปจนถึงด้านบนของเจ็ตเช่นเดียวกับที่บริเวณ Near Field

### 3.3.5 ผลของทิศทางของการหมุนควง

รูปที่ 3.30 แสดงผลของทิศทางการหมุนควงจาก Contour ของภาพเฉลี่ยทางด้าน End View ของค่าความเข้มแสงที่ Normalize ด้วยค่าความเข้มแสงสูงสุดที่หน้าตัดนั้นๆ โดยทำการเปรียบเทียบการหมุนในทิศ  $-y$  และ  $+y$  สำหรับกรณี Sr05 และ Sr08 ซึ่งพบการเปลี่ยนแปลงของเจ็ตอย่างชัดเจนว่าไม่ว่าจะมีการหมุนไปในทิศทางใด พบว่าบริเวณความเข้มแสงสูงซึ่งแสดงถึงบริเวณที่มี Mixed Fluid จะกระจายตัวมากที่สุดทางด้าน Pressure

### 3.3.6 เส้นทางการเดินทางของเจ็ต

ในการศึกษาคุณลักษณะโดยรวมนั้นจะศึกษาโดยใช้เส้นทางของเจ็ตในกระแสมวง ซึ่งจะพิจารณาจากตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของรูปร่างเจ็ต [Centroid Trajectory:  $(\bar{y}_c, \bar{z}_c)$ ] และ Center of mass [Center of mass Trajectory:  $(\bar{y}_m, \bar{z}_m)$ ] คือตำแหน่งที่แสดงจุดศูนย์กลางมวลของระบบในที่นี้คือตำแหน่งซึ่งผลรวมของโมเมนต์ของความเข้มแสง ณ ตำแหน่งนั้นเป็นศูนย์โดยกำหนดขอบเจ็ตที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าความเข้มสูงสุดนิยามจากค่าเฉลี่ยของจำนวน pixel ที่มีค่าสูงสุดต่อจำนวน pixel ทั้งหมดในพื้นที่ของเจ็ตโดยทั้งสองจุดนี้นิยามจาก

$$\bar{y}_c = \frac{\int y dA}{\int_{A_{jet}} dA} \quad (3.1)$$

$$\bar{z}_c = \frac{\int z dA}{\int_{A_{jet}} dA} \quad (3.2)$$

$$\bar{y}_m = \frac{\int y C dA}{\int_{A_{jet}} C dA} \quad (3.3)$$

$$\bar{z}_m = \frac{\int z C dA}{\int_{A_{jet}} C dA} \quad (3.4)$$

โดย  $\bar{y}_c$  คือตำแหน่งของจุดศูนย์กลางรูปร่างเจ็ตตามแนวแกน  $y$   
 $\bar{z}_c$  คือตำแหน่งของจุดศูนย์กลางรูปร่างเจ็ตตามแนวแกน  $z$



$\bar{y}_m$	คือตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของความเข้มแสงตามแนวแกน $y$
$\bar{z}_m$	คือตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของความเข้มแสงตามแนวแกน $z$
$C$	คือค่าความเข้มแสง
$A_{jet}$	คือพื้นที่หน้าตัดของเจ็ต (โดยมีขอบเป็น 10 % ของความเข้มสูงสุด)

รูปที่ 3.31 แสดง Center of mass Trajectory ของค่าความเข้มแสงบนระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_m$ ) x-y view เปรียบเทียบกันในกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08 โดยรูปที่ 3.31ก แสดงบนสเกลเชิงเส้น และรูปที่ 3.31ข แสดงบนสเกล log-log พบว่าเส้นทางการเดินนั้นมีการกระจายเป็นแบบ Power law ตามความสัมพันธ์  $(y/rd)=A(x/rd)^m$  โดยมีค่า  $A$  เป็น 1.17, 1.12, 0.96 และ  $m$  เป็น 0.32, 0.29, 0.22 เรียงลำดับตาม Sr0, Sr05, Sr08 ได้แสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 3.1 โดยเมื่อพิจารณาสเกลเชิงเส้นและบนสเกล log-log แล้วพบว่า Swirl นั้นมีผลทำให้เส้นทางการเดินของ Center of mass Trajectory ต่ำลงเล็กน้อยสำหรับกรณี Sr05 และ trajectory ต่ำลงอีกเมื่อเพิ่มระดับการหมุนควงเป็นกรณี Sr08

รูปที่ 3.32 แสดง Centroid Trajectory ของค่าความเข้มแสงบนระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_c$ ) x-y view เปรียบเทียบกันในกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08 โดยรูปที่ 3.32ก แสดงบนสเกลเชิงเส้น และรูปที่ 3.32ข แสดงบนสเกล log-log พบลักษณะของเส้นทางการเดินนั้นคล้ายกันกับ Center of mass Trajectory และมีค่า  $A$  เป็น 1.26, 1.17, 1.01 และค่า  $m$  เป็น 0.27, 0.26, 0.25 เรียงลำดับตาม Sr0, Sr05, Sr08 โดย Swirl นั้นมีผลทำให้ Centroid Trajectory ต่ำลงเล็กน้อยสำหรับกรณี Sr05 และ trajectory ต่ำลงมากยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มระดับการหมุนเป็นกรณี Sr08

เมื่อสังเกตค่า CM และ CC ของทุกกรณีพบว่ามีความใกล้เคียงกันแสดงว่าขอบโดย Geometry นั้นขยายขนาดประมาณว่าใกล้เคียงกับการกระจายของความเข้มแสง

รูปที่ 3.33(ก-ข) แสดง Center of mass Trajectory และ Centroid Trajectory ของค่าความเข้มแสงบนระนาบสมมาตร ( $\bar{z}_m$ ) และ ( $\bar{z}_c$ ) บน x-z view เปรียบเทียบกันในกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08 พบว่าในกรณี Sr0 มีการเบี่ยงเบนไปทางด้าน Pressure +z เล็กน้อย และเมื่อเพิ่มระดับในการหมุนควงเป็นกรณี Sr05 จะพบว่าเส้นทางการเบี่ยงเบนจากด้าน pressure ไปสู่ด้าน suction และชัดเจนขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนควงเป็นกรณี Sr08

รูปที่ 3.34(ก-ข) แสดง Center of mass และ Centroid Trajectory ของค่าความเข้มแสงบนระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_m$ ) และ ( $\bar{y}_c$ ) บน x-y view โดยรูปที่ 3.34ก แสดงบนสเกลเชิงเส้น และรูปที่ 3.34ข แสดงบนสเกล log-log ของกรณี Sr0 เปรียบเทียบกับ Passive Scalar ของ Smith and Mungal (1998) พบว่าค่า CM และ CC ของงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีความสัมพันธ์แบบ Power law ดังที่กล่าวมาแล้วโดยมีค่า  $A$  เท่ากับ 1.17 และ  $m$  เท่ากับ 0.32 สำหรับ CM และค่า



เท่ากับ 1.26 และ 0.27 สำหรับ CC โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ Passive Scalar ของ Smith and Mungal (1998) แล้วพบว่า CM และ CC ของงานวิจัยนี้จะต่ำกว่า Passive Scalar ของ Smith and Mungal (1998) ทั้ง Near Field และ Far Field โดยมีค่าความแตกต่างของค่าคงที่  $A$  ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และ  $m$  ประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 3.35 แสดงการเปรียบเทียบผลของ Swirl โดยดูค่าของ Maximum decay ตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr0, Sr05, Sr08 โดยจะสังเกตเห็นถึงความไม่แน่นอนที่บริเวณ Near Field และเมื่อสังเกตที่บริเวณ Far Field ยังพบว่า Swirl มีผลทำให้ระดับของค่า Maximum ต่ำลงโดยจะต่ำสุดที่กรณี Sr08

เมื่อเปรียบเทียบผลของ Swirl จะสังเกตเห็นได้ว่า Swirl มีผลต่อโครงสร้างของ Mixed Fluid ที่บริเวณใกล้ปากเจ็ต โดยจะพบความไม่สมมาตรของเจ็ตได้อย่างชัดเจนตรงที่บริเวณ Mixed Fluid นั้นจะกระจายตัวมากทางด้าน Pressure ซึ่งเป็นด้านเดียวกับที่เกิด Local Peak และยังเป็นตำแหน่งเดียวกันกับที่พบว่ามี Activity สูงด้วยโดยในขณะเดียวกันบริเวณ unmixed core นั้นก็จะสั้นและต่ำลง ทั้งหมดนี้น่าจะเป็นเพราะ Swirl ทำให้เกิดการผสมมากที่บริเวณ Near Field โดยยังคงส่งผลต่อไปยัง Far Field โดยสังเกตได้จากเส้นทางการเดินของเจ็ตนั้นจะต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Yuan and Street (1998) ที่ว่าการดึง Crossflow Fluid เข้าไปในเจ็ตหรือการ Entrainment เป็นกลไกสำคัญต่อเส้นทางการเดินของเจ็ต

### 3.4 ผลการถ่ายภาพทางด้านข้าง (Side View)

รูปที่ 3.36 แสดงภาพขณะใดๆทางด้าน (Side View) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Spanwise( $z$ ) ( $z/rd=0.12, 0$  และ  $-0.12$ ) สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08

สำหรับกรณี Sr0 ที่ทุกหน้าตัดจะสังเกตเห็น Large scale structure ที่บริเวณตัวเจ็ตโดย ณ บางเวลาพบว่าจะมี Crossflow Fluid แทรกตัวเข้าสู่เจ็ตซึ่งตามข้อสังเกตของ Yuan *et al.* (1999) ที่เสนอแนะว่าเป็นบริเวณ Large scale structure ดึงเอา Crossflow Fluid เข้ามาผสมในขณะเดียวกันจะพบบริเวณ unmixed core ที่แกนกลางโดยจะมีลักษณะเรียวยาวแหลมแล้วโค้งเข้าสู่ crossflow

เมื่อเพิ่มระดับของการหมุนควงเป็นกรณี Sr05 ที่หน้าตัด Center จะสังเกตเห็นร่องของการ penetrate ลึกขึ้นและยังคงพบบริเวณ unmixed core และในขณะเดียวกันที่หน้าตัดทางด้าน suction นั้นบริเวณ unmixed core จะมีลักษณะผอมและเอียงลู่เข้าสู่ crossflow และในทางตรงกันข้ามนั้นจะไม่พบบริเวณ unmixed core ที่ทางด้าน pressure และเมื่อเพิ่มระดับการหมุนควงเป็นกรณี Sr08 พบว่าขอบเจ็ตทางด้านล่างบางส่วนจะต่ำจนติดกับพื้นของส่วนทดลองซึ่ง

ยังคงพบบริเวณ unmixed core ที่ center เจ็ดโดยจะไม่พบบริเวณ unmixed core เมื่อสังเกตที่หน้าตัดทางด้าน Pressure

รูปที่ 3.37 แสดงภาพเฉื่อยทางด้าน(Side View)ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Spanwise(z) ( $z/rd=0.12, 0$  และ  $-0.12$ ) สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08

สำหรับกรณี Sr0 ที่ center พบว่าที่ขอบด้าน windward นั้นจะค่อยๆโค้งแล้วลู่เข้าสู่แนว crossflow ส่วนขอบทางด้าน leeward นั้นจะตรงขึ้นมาแล้วจะหักเข้าสู่แนว crossflow อย่างกะทันหันในทางตรงกันข้ามหน้าตัดทางด้าน Pressure พบว่าขอบด้าน leeward นั้นจะโค้งแล้วลู่เข้าสู่แนว crossflow ในขณะเดียวกันบริเวณ unmixed core จะมีลักษณะเรียวยาวแหลมตรงขึ้นมาจากเจ็ดแล้วโค้งเข้าสู่แนว crossflow โดยเมื่อเพิ่มระดับของการหมุนควงเป็นกรณี Sr05 ที่หน้าตัด center พบว่าขอบเจ็ดทางด้าน Windward นั้นจะลู่เข้าสู่ Crossflow เช่นเดียวกับกรณี Sr0 แต่ในทางตรงกันข้ามขอบเจ็ดด้าน leeward จะพบการหักตัวของเจ็ดเกิดที่ระยะ  $y/rd$  ที่ต่ำกว่ากรณี Sr0 และต่ำลงอีกเมื่อเพิ่ม Swirl เป็นกรณี Sr08 ในขณะเดียวกันจะพบว่าบริเวณ unmixed core จะสั้นและต่ำลง

รูปที่ 3.38 แสดง Contour ของภาพเฉื่อยทางด้าน (Side View) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Spanwise(z) ( $z/rd=0.12, 0$  และ  $-0.12$ ) สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08

สำหรับกรณี Sr0 หน้าตัดที่ Center พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงตามแนว traverse (y) จะมากกว่าในแนว trajectory และพบอีกว่าขอบเจ็ดด้าน windward นั้นจะค่อยๆโค้งแล้วลู่เข้าสู่แนว crossflow ส่วนขอบทางด้าน leeward นั้นจะตรงขึ้นมาแล้วจะหักเข้าสู่แนว crossflow อย่างกะทันหันในทางตรงกันข้ามหน้าตัดทางด้าน Pressure พบว่าขอบด้าน leeward นั้นจะโค้งแล้วลู่เข้าสู่แนว crossflow และเมื่อสังเกต Contour Level ประมาณ 0.6-0.7 พบส่วนที่ตัดตรงที่บริเวณด้านหน้าในขณะที่ Contour Level ประมาณ 0.8-0.9 จะกลมและมนกว่าซึ่งในขณะเดียวกันยังคงสังเกตได้ถึงบริเวณ unmixed core และยังพบอีกว่า Local Peak ซึ่งแสดงถึงบริเวณที่มีการผสมและเกิดเป็น Mixed Fluid จะกระจายอยู่ภายในตัวเจ็ดซึ่งสังเกตได้ในทุกหน้าตัดของเจ็ด

เมื่อเพิ่มระดับของการหมุนควงเป็นกรณี Sr05 ที่หน้าตัด Center เจ็ดพบว่าขอบเจ็ดทางด้าน leeward นั้นจะหักเข้าสู่แนว Crossflow ที่ระยะ  $y/rd$  ที่ต่ำกว่ากรณี Sr0 และต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่ม Swirl เป็นกรณี Sr08 และนอกจากนี้ที่หน้าตัดทางด้าน Suction และ Pressure พบว่าขอบเจ็ดทางด้าน Leeward นั้นจะหักตัวเข้าสู่ Crossflow อย่างรวดเร็วในขณะเดียวกันที่หน้าตัด Center ยังคงพบว่าบริเวณ unmixed core แต่จะสั้นและต่ำลงเมื่อเทียบกับกรณี Sr0 และจะสั้นลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่ม Swirl เป็นกรณี Sr08

รูปที่ 3.39 แสดงภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้าน (Side View) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Spanwise(z) ( $z/rd=0.12, 0$  และ  $-0.12$ ) สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08 ในทุกกรณีจะสังเกตได้ถึงบริเวณที่มีค่าของ Standard deviation (STD) ซึ่งประมาณว่าเป็นบริเวณที่มี Activity สูงที่ทางด้าน windward และทางด้าน leeward

รูปที่ 3.40 แสดง Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้าน (Side View) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Spanwise(z) ( $z/rd=0.12, 0$  และ  $-0.12$ ) สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08 เมื่อสังเกตทุกกรณีพบว่า Standard deviation สูงพบ Local Peak มี 2 Lobe ซ้อนกันคือด้าน windward และ Leeward โดย Lobe ด้าน windward นั้นมี Local Peak สูงกว่า Lobe ด้าน Leeward

รูปที่ 3.41 แสดง Contour Turbulent intensity ทางด้าน Side view ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Spanwise(z) ( $z/rd=0.12, 0$  และ  $-0.12$ ) สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08 ซึ่งนิยามจากอัตราส่วนระหว่างค่า STD กับค่า Mean สำหรับกรณี Sr0 ที่ทุกหน้าตัดพบบริเวณที่มี Turbulent intensity นั้นกระจายอยู่ที่บริเวณขอบด้าน windward ที่โค้งเข้าสู่แนว Crossflow และเมื่อเพิ่มระดับการหมุนคงเป็นกรณี Sr05 ที่ทุกหน้าตัดบริเวณ Turbulent intensity สูงด้าน windward นั้นจะบางและเล็กลงโดยเมื่อเพิ่มระดับของการหมุนคงเป็นกรณี Sr08 ที่หน้าตัดทางด้าน Pressure พบบริเวณขอบด้าน windward ที่มีการกระจายตัวของ Turbulent intensity นั้นจะโค้งมาทางด้าน  $-x/rd$  เล็กน้อย

รูปที่ 3.42 แสดง Traverse profile ของค่าความเข้มแสงในแต่ละหน้าตัดตามแนว Spanwise(z) ( $z/rd=0.12, 0$  และ  $-0.12$ ) สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08 โดยทำการตัดค่าความเข้มชั้นตามแนวแกน  $y$  กรณี  $r_{eff}$  เท่ากับ 4.13 ที่ระยะ  $x/rd=0.5, 1, 1.5, 2, 2.5$  และ 3 สำหรับกรณี Sr0 ที่ทุกหน้าตัดพบว่าค่าความเข้มแสงจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1$  และจะลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่เดียวกันตำแหน่งของค่า Maximum นั้นจะลอยตัวสูงขึ้นด้วยเมื่อค่า  $x/rd$  เพิ่มมากขึ้น

โดยเมื่อมีผลของการหมุนคงเป็นกรณี Sr05 ในทุกหน้าตัดพบว่าค่าของความเข้มแสงในทุกๆตำแหน่งจะมีค่าน้อยกว่ากรณี Sr0 แต่เมื่อสังเกตที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  พบว่าค่า Maximum จะมีค่ามากขึ้นมาใกล้เคียงกับค่าที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1$  โดยเมื่อเพิ่ม Swirl เป็นกรณี Sr08 พบว่าค่า Maximum ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 0.5$  จะมีค่าเท่ากับกับค่า Maximum ที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1$  ในทุกๆหน้าตัด

รูปที่ 3.43 แสดง Traverse profile สำหรับเปรียบเทียบผลของ Swirl ratio ตาม Downstream (x) ที่หน้าตัดตามแนว Spanwise(z) ( $z/rd=0.12, 0$  และ  $-0.12$ ) สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08 สำหรับที่หน้าตัดทางด้าน Center และด้าน Pressure ที่  $x/rd = 0.5-3$  พบว่าโดย

ส่วนใหญ่ค่าความเข้มข้นจะสูงสุดที่กรณี Sr0 มีค่ารองลงมาที่กรณี Sr05 และมีค่าต่ำสุดที่กรณี Sr08 ในทางตรงกันข้ามที่หน้าตัดทางด้าน Suction พบว่ากรณี Sr05 นั้นจะมีค่าความเข้มข้นต่ำกว่า Sr08 ในทุกระยะตามแนว Downstream (x) และยังพบอีกว่าเมื่อมีผลของ Swirl แล้ว ตำแหน่งของค่า Maximum จะต่ำลง

รูปที่ 3.44 – 3.46 แสดงเส้นทางการเดินเปรียบเทียบผลของ Swirl ที่หน้าตัดตามแนว Spanwise(z) ที่ ( $z/rd=0.12, 0$  และ  $-0.12$ ) สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08 เมื่อพิจารณาที่เส้นทางการเดินของเจ็ตในงานวิจัยนี้พบว่า Swirl นั้นมีผลทำให้ trajectory นั้นต่ำ กว่ากรณี Sr0 เล็กน้อยและเมื่อเพิ่ม Swirl สูงขึ้นเป็นกรณี Sr08 ก็จะมีผลทำให้ trajectory นั้นต่ำ กว่ากรณี Sr0 แสดงความสัมพันธ์แบบ Power law โดยใช้ Curve fitting โดยมีรายละเอียดของค่าคงที่ A และ m เรียงลำดับตามกรณีดังนี้ Sr0, Sr05, Sr08 โดยมีค่า A ที่หน้าตัด Pressure เท่ากับ 1.39, 1.27, 1.07 และ m 0.25, 0.24, 0.22 A ที่หน้าตัด Center เท่ากับ 1.37, 1.25, 1.01 และ m 0.22, 0.23, 0.21 และ A ที่หน้าตัด Suction เท่ากับ 1.36, 1.21, 0.98 และ m 0.21, 0.22, 0.19 โดยจะสังเกตได้ว่าในทุกหน้าตัดกรณี Sr0 จะมีค่า A สูงสุด และต่ำสุดที่กรณี Sr08 และยังพบอีกว่ากรณี Sr08 นั้นจะมีค่า m ที่ต่ำสุดเช่นกันนั่นหมายความว่ากรณี Sr0 มีจุดตัดบนแกน y ที่สูงสุดและต่ำสุดที่กรณี Sr08 เมื่อพิจารณาบน log-log scale โดยกรณี Sr08 นั้นจะมีค่า Slope ที่น้อยที่สุด โดยได้แสดงค่า A และ m ไว้ในตารางที่ 3.1

รูปที่ 3.47 แสดงเส้นทางการเดินของ Center plane trajectory ของภาพทางด้าน Side view และ Centroid trajectory

เปรียบเทียบ Product formation ในงานวิจัยนี้กับผลของ Centroid-temperature ของ Wangiraniran (2001) และ Kamotani and Greber (1972) พบว่าในช่วงแรกนั้น Centroid trajectory (CC) จะมีใกล้เคียงกันกับ Wangiraniran (2001) และ Kamotani and Greber (1972) ในขณะที่ช่วง Far Field นั้น CC ของการทดลองนี้จะสูงกว่า Wangiraniran (2001) และ Kamotani and Greber (1972) และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง Product formation ของ Centerplane-trajectory ในงานวิจัยนี้กับผลของ Centerplane-temperature ของ Wangiraniran (2001) พบว่าเส้นทางการเดินที่บริเวณ Near Field ของงานวิจัยนี้จะสูงกว่า Wangiraniran (2001) และเมื่อสังเกตต่อไปที่บริเวณ Far Field พบว่ามีความสูงค่อนข้างใกล้เคียงกัน

รูปที่ 3.48 เปรียบเทียบ CM กับ CC ของงานวิจัยนี้กับ Passive Scalar ของ Smith and Mungal (1998) พบว่าเส้นทางการเดินของงานวิจัยนี้จะต่ำกว่า Passive Scalar ของ Smith and Mungal (1998) แสดงว่าเส้นทางการเดินของ product formation นั้นจะเกิดการผสมจากทางด้าน leeward ไปสู่ด้าน windward แสดง diagram ของการผสมดังรูปที่ 3.54



รูปที่ 3.49 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Center of mass trajectory กับ Centroid trajectory สำหรับกรณี Sr0 และ Sr05 พบว่า CM และ CC จะใกล้เคียงกันในทางตรงกันข้ามกรณี Sr08 นั้นพบว่าตำแหน่งของ CM จะต่ำกว่า CC นั้นหมายความว่า Mixed Fluid จะกระจายตัวอยู่ทางด้านล่างของเจ็ต ดังตัวอย่าง diagram แสดงการกระจายตัวของ mixed fluid ดังรูปที่ 3.55

รูปที่ 3.50-3.52 แสดง Maximun decay ของสัญญาณทางด้าน Sideview ที่หน้าตัดตามแนว Spanwise(z) ที่ ( $z/rd=0.12, 0$  และ  $-0.12$ ) สำหรับกรณี Sr0 พบว่ามีค่าความเข้มแสงสูงสุดที่ตำแหน่ง  $x/rd = 1$  ในทุกๆหน้าตัด และลดลงอย่างต่อเนื่องตาม Downstream (x) และค่าความเข้มแสงนั้นจะต่ำลงเมื่อมีผลของ Swirl และต่ำลงที่สุดที่กรณี Sr08 ยกเว้นหน้าตัดทางด้าน Suction ที่กรณี Sr05 นั้นจะมีค่าความเข้มแสงที่ต่ำกว่ากรณี Sr08

รูปที่ 3.53 แสดงผลรวมของสัญญาณแสงในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) ของภาพด้าน End view เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08 พบว่าที่หน้าตัด  $x/rd=0-1$  ผลรวมของสัญญาณแสงของกรณี Sr05 และ Sr08 นั้นจะมีค่าสูงกว่ากรณี Sr0 โดยค่าผลรวมของสัญญาณแสงของกรณี Sr05 และ Sr08 จะเริ่มมีค่าน้อยกว่ากรณี Sr0 ที่หน้าตัด  $x/rd > 1$  แสดงว่า Swirl นั้นจะทำให้เกิดปริมาณ Mixed Fluid มากในบริเวณใกล้ปากเจ็ตแต่จะพบปริมาณ Mixed Fluid น้อยกว่ากรณี Sr0 ในบริเวณที่ไกลปากเจ็ต

เมื่อพิจารณาทางด้าน Side view จะสังเกตเห็น Large scale structure ที่บริเวณตัวเจ็ต และพบว่าจะมี Crossflow fluid แทรกตัวเข้าสู่เจ็ตและเมื่อมีผลของ Swirl แล้วพบร่องของการ Penetrate ลึกขึ้นและยังพบว่า Swirl มีผลต่อโครงสร้างของ Mixed Fluid มากที่บริเวณ Near Field โดยยังคงส่งผลต่อไปยัง Far Field สังเกตได้จากเส้นทางการเดินของเจ็ตนั้นจะต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Yuan and Street (1998) ที่ว่าการดึง Crossflow Fluid เข้าไปในเจ็ตหรือการ Entrainment เป็นกลไกสำคัญต่อเส้นทางการเดินของเจ็ตและในขณะเดียวกันยังเป็นผลทำให้บริเวณ unmixed core นั้นสั้นและต่ำลง



## บทที่ 4

### อภิปรายผลการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้เป็นการใช้เทคนิคการ Scatter แสงออกมาของอนุภาค Smoke fluid (Mie Scatter) ซึ่งต่างจาก Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) , Yingjaroen *et al.*(2006) และ Niederhaus *et al.* (1997) ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าต่างๆเช่น ค่า Maximum concentration ที่บริเวณ Near Field ของงานวิจัยนี้จะบอกถึงบริเวณที่มีอนุภาคนิวเคลียสที่ต่ำซึ่งจะพบกลุ่มของควันมากบริเวณนั้น

เมื่อสังเกตผลของงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) ที่ใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) ในการทำให้เจ็ดเกิดความเร็วในการหมุนควงส่งผลให้ Initial velocity มีคุณลักษณะการไหลที่ปากเจ็ดเป็นแบบ (NZT/NZC) ในขณะที่ Niederhaus *et al.* (1997) ได้ใช้ใบพัดกววนอากาศในการทำให้เจ็ดเกิดความเร็วในการหมุนควง ส่งผลให้มีคุณลักษณะการไหลที่ปากเจ็ดเป็นแบบ (ZT/ZC)

ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ที่เป็น Product Formation พบว่า Mixed Fluid ทางด้าน Pressure มากกว่าทางด้าน Suction ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001)ซึ่งพบค่า high temperature สูงทางด้าน Suction ในขณะที่ Niederhaus *et al.* (1997) พบบริเวณที่มีระดับ Concentration สูงที่ด้าน Pressure และพบบริเวณที่มีระดับ Concentration ต่ำที่ด้าน Suction ซึ่งลักษณะที่ตรงข้ามกันดังกล่าว อาจเกิดจากความแตกต่างของลักษณะสภาวะเริ่มต้นที่เป็น Zero และ Non-zero circulation อาจชี้แนะได้ว่าเมื่อสภาวะเริ่มต้นเป็นแบบ Non-zero circulation มีผลต่อการเกิด Skewed mixing layer ที่ขอบด้าน Pressure โดยจะพบลักษณะ Kelvin-Helmholtz (K-H) instability จำนวนมากทางด้าน Pressure ดังรูป 3.6 สำหรับกรณี Sr05 ที่ตำแหน่ง  $y/r_d=0.05$  และ 0.10

เมื่อเปรียบเทียบเส้นทางการเดินของ product formation กับ passive scalar สังเกตได้ว่า product formation จะต่ำกว่า passive scalar ดังรูป 3.56 แสดงว่าการผสมนั้นเกิดขึ้นมากทางด้าน leeward โดยมีทิศทางการผสมจาก leeward ไปสู่ windward ทั้งนี้อาจจะเป็นได้หลายสาเหตุเช่น ประเด็นแรกอาจเกิดจากการผสมจากทางด้านข้างแล้วเกิดการพาไปสู่ด้านล่าง หรือประเด็นสองเป็นไปได้ว่าที่บริเวณ leeward มี mechanism ที่ช่วยทำให้เกิดการผสม (hanging vortices) โดยเราเชื่อว่าประเด็นที่สองน่าจะมีผลต่อโครงการผสมมากกว่าประเด็นที่หนึ่ง

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้เป็นการศึกษาโครงสร้างของการผสมของเจ็ตในการผสมขวางและเจ็ตหมุนควงในกระแสมวลแบบความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสไม่เป็นศูนย์และ *circulation* ไม่เป็นศูนย์ (NZT/NZC) ด้วยการวิเคราะห์ทางภาพถ่ายของ mixed fluid ที่ถ่ายโดยใช้หลักการ mie scattering โดยมีค่า Swirl ratio (*Sr*) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.80 ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลคงที่ที่ 4.13 ในช่วง  $x/rd = 0.05 - 4$  (end view),  $y/rd = 0.05-0.6$  (top view) และ  $z/rd = 0.12, 0, -0.12$  (side view) ซึ่งอยู่บริเวณ ไกล่ปากเจ็ต และ ไกล่ปากเจ็ต โดยมีค่า Reynolds number ของเจ็ต ( $Re_j = \bar{u}_j d / \nu$ ) ประมาณ 14,000 และ Reynolds number ของกระแสมวล ( $Re_{cf} = \bar{u}_{cf} d / \nu$ ) ประมาณ 4,600 ส่วนค่า Densimetric Froude number (*Fr*) ประมาณ 0.16 ทั้งนี้ในการทดลองจะให้ความร้อนกับอากาศจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของกระแสมวล แล้วทำการฉีด smoke fluid เข้าไปผสมกับอากาศร้อนจนกลายเป็นไอ จากนั้นจึงฉีดเป็นเจ็ตขึ้นมาตั้งฉากกับกระแสมวล ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (อุณหภูมิต่ำ) จึงเกิดการผสมทำให้ส่วนผสมเย็นตัวลง ส่งผลให้ smoke fluid เกิดการกลั่นตัวกลับกลายเป็นละอองอนุภาคเล็กๆ (product formation) ดังนั้นภาพถ่ายของโครงสร้างการไหลที่ได้จึงเป็นภาพถ่ายของโครงสร้างของ mixed fluid

#### Top view

สำหรับผลการทดลองทางด้าน top view ของเจ็ตในกระแสมวล *Sr*0 พบโครงสร้าง Azimuthal Structure ที่รอบๆปากเจ็ต (รูปที่3.6ก) โดยพบ Kelvin-Helmholtz (K-H) vortical roll-up ของ mixed fluid ในภาพขณะใดๆก่อนตั้งแต่  $y/rd = 0.05$  ในขณะที่ในภาพเฉลี่ยจะยังไม่พบเห็นโครงสร้าง K-H จนกว่าจะถึงหน้าตัด  $y/rd = 0.15$  (รูปที่3.7ก) ในขณะที่พบ unmixed core(บริเวณที่ยังไม่มีการผสม)ในทุกๆหน้าตัดตั้งแต่หน้าตัดแรกจนถึงหน้าตัดสุดท้ายที่  $y/rd = 0.6$  อย่างไรก็ตาม ที่หน้าตัดสุดท้ายนั้น unmixed core มีขนาดเล็กมากจนเกือบหายไป (รูปที่3.7ก)

เมื่อพิจารณาผลของ swirl พบโครงสร้าง Kelvin-Helmholtz (K-H) vortical roll-up ของ mixed fluid และปริมาณ mixed fluid ทางด้าน pressure จะมากกว่าด้าน suction (รูปที่ 3.6ก) นอกจากนั้นยังพบ local peak (รูปที่3.8ก) และ turbulent intensity (รูปที่3.11ก) ที่มีค่าสูงทางด้าน pressure ในบริเวณเดียวกับโครงสร้าง K-H (รูปที่3.6ก) เมื่อมีผลของ swirl ยังพบว่าบริเวณ unmixed core มีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีผลของ swirl โดยจะเห็นผลอย่างชัดเจนขึ้นเมื่อเพิ่มระดับการหมุนควงเป็นกรณี *Sr*08 (รูปที่3.8ก เช่นตำแหน่ง  $y/rd = 0.05-0.2$ ) ดังนั้นอาจจะสรุปได้ว่า การเพิ่มระดับการหมุนควง ทำให้ turbulent intensity สูงทางด้าน pressure มากกว่าทางด้าน suction และทำให้เกิดการผสมทางด้าน pressure มากกว่า

ด้าน suction ในขณะที่เดียวกันการหมุนควงนั้นยังทำให้เกิดการดึงเอา crossflow fluid เข้าสู่บริเวณแกนกลางของเจ็ต และเกิดการผสม จึงทำให้บริเวณ unmixed core มีขนาดเล็กลง

### End view

เมื่อพิจารณาภาพขณะใดๆทางด้าน end view กรณี  $Sr0$  พบ jet shear layer vortical roll-up ทางด้านข้างบริเวณใกล้ปากเจ็ต (รูปที่ 3.12.1 เช่นที่ตำแหน่ง  $x/r_d = 0.06$ ) ในทางตรงกันข้าม เมื่อสังเกตที่บริเวณไกลปากเจ็ตจะพบโครงสร้างของ wake structure ของ mixed fluid ทอดตัวยาว และเชื่อมต่อกับตัวเจ็ตลงมาจากพื้นซึ่งแสดงว่ามี jet fluid ใน wake structure และ wake structure เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างการผสม (รูปที่ 3.12.3 เช่นที่ตำแหน่ง  $x/r_d = 2.5-4$ ) โดยเมื่อพิจารณาจากภาพเฉลี่ย จะพบโครงสร้างของ mixed fluid ที่บริเวณใกล้ปากเจ็ตมากทางด้านข้าง และด้านล่างของโครงสร้างการผสม เมื่อเปรียบเทียบกับด้านบน (รูปที่ 3.13.1) โดยสังเกตพบปริมาณ mixed fluid สูงสุดที่บริเวณการม้วนตัว (roll-up) ของ lateral vortical structure (รูปที่ 3.13.1 เช่นที่ตำแหน่ง  $x/r_d = 0.06-0.12$ ) ในขณะเดียวกันจะปรากฏบริเวณ unmixed core ที่บริเวณแกนกลางของเจ็ตทำให้โครงสร้างการผสมมีรูปร่างคล้ายเกือบแก้ว (รูปที่ 3.13.1 เช่นที่ตำแหน่ง  $x/r_d = 0.06$ ) โดยที่หน้าตัด  $x/r_d = 0-0.38$  พบ local peak สองตำแหน่ง (รูปที่ 3.14.1) ซึ่งเมื่อเจ็ตนั้นพัฒนาตัวไปตาม downstream ( $x$ ) บริเวณ unmixed core จะหายไป และโครงสร้างของ mixed fluid จะพัฒนาตัวไปเป็นรูปไต CVP (รูปที่ 3.14.1-3.14.3)

เมื่อมีผลของการหมุนควงสำหรับ  $Sr05$  พบปริมาณ mixed fluid มากทางด้าน pressure ในบริเวณใกล้ปากเจ็ต (รูปที่ 3.17.1) และพบว่า turbulent intensity สูงจะอยู่ทางด้าน pressure มากกว่าทางด้าน suction ในทุกหน้าตัด (รูปที่ 3.29ก) ในขณะเดียวกันจะพบว่าบริเวณ unmixed core จะสั้นและต่ำลง และหายไปทีหน้าตัดไกลออกไป (รูปที่ 3.19.1) โดยเมื่อเพิ่มระดับการหมุนควงสูงสุดเป็นกรณี  $Sr08$  พบว่ามีความคล้ายกับกรณี  $Sr05$  อย่างไรก็ตามกรณี  $Sr08$  นั้นบริเวณ mixed fluid จะกว้างกว่ากรณี  $Sr05$  (รูปที่ 3.27 หรือ รูปที่ 3.17.1 และ 3.22.1) และยังพบ local peak ของ contour rms ที่เด่นชัดเพียงตำแหน่งเดียว (ด้าน pressure) ซึ่งต่างจากกรณี  $Sr05$  ที่พบสองตำแหน่ง (ด้าน pressure และด้าน suction ตอนล่าง) (รูปที่ 3.28ข-ค)

เมื่อเปรียบเทียบผลของงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) และ Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ที่ใช้ท่อหมุน (rotating pipe) เหมือนกันซึ่งทำให้ Initial tangential velocity profile เป็นแบบ NZT/NZC กับ Niederhaus *et al.* (1997) ซึ่งใช้ใบพัดควงอากาศในการทำให้ Initial tangential velocity profile เป็นแบบ ZT/ZC พบว่างานวิจัยนี้เป็น product formation จะพบ mixed fluid ทางด้าน pressure มากกว่าทางด้าน suction ซึ่งแสดงว่าด้าน pressure ผสมดีกว่า สอดคล้องกับผลการทดลองของ Wangjiraniran and Bunyajitradulya (2001) และ Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005) ซึ่งพบบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำทางด้าน pressure ในขณะที่พบบริเวณที่

มีอุณหภูมิสูงทางด้าน suction (ซึ่งแสดงว่าด้าน pressure ผสมดีกว่า) ในทางตรงกันข้าม Niederhaus *et al.* (1997) พบบริเวณที่มีระดับ concentration ของ passive scalar สูงทางด้าน pressure และ ต่ำทางด้าน suction ซึ่งชี้แนะว่าการผสมด้าน suction นั้นดีกว่าด้าน pressure

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลงานวิจัยในกรณี NZT/NZC กับ ZT/ZC ดังกล่าวข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่า Initial velocity profile โดยเฉพาะ Initial tangential velocity profile จะมีผลต่อโครงสร้างการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีการหมุนควง โดยความแตกต่างของโครงสร้างการผสมของเจ็ตที่มีลักษณะการหมุนควงที่ไม่เหมือนกันในสองลักษณะนี้สันนิษฐานว่ามีสาเหตุมาจากการพัฒนาตัวของโครงสร้างที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากลักษณะของ shear layer, strength ของ shear layer และการกระจายตัวของ vorticity รอบปากเจ็ตที่ไม่เหมือนกัน เนื่องจากมี Initial tangential velocity profile ที่ไม่เหมือนกัน

### Side view และ Trajectory

เมื่อพิจารณาภาพขณะใดๆทางด้าน side view กรณี Sr0 ในทุกหน้าตัด พบ crossflow fluid แทรกตัวเข้าสู่แกนกลางของเจ็ต(รูปที่3.36) โดยเมื่อมีผลของ swirl จะสังเกตว่า crossflow fluid จะแทรกตัวเข้าสู่แกนกลางเจ็ตได้ลึกขึ้น และยังพบว่า swirl มีผลต่อเส้นทางเดินของเจ็ตโดยทำให้เส้นทางเดินของเจ็ตนั้นต่ำลง(รูปที่3.44-3.46) ในขณะเดียวกันยังมีผลทำให้บริเวณ unmixed core นั้นสั้นและต่ำลง (รูปที่3.37)

เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบเส้นทางเดินของ CM กับ CC ของงานวิจัยนี้กับ passive scalar ของ Smith and Mungal (1998) พบว่าเส้นทางเดินของงานวิจัยนี้จะต่ำกว่าเส้นทางเดินของ passive scalar ของ Smith and Mungal (1998) (รูปที่3.48) ประเด็นนี้ชี้แนะว่าการผสมของเจ็ตในกระแสลมขวางนั้นจะเกิดการผสมจากด้าน leeward ไปสู่ด้าน windward (รูปที่3.54 และรูปที่3.56)

เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบระหว่าง CM กับ CC สำหรับกรณี Sr0 และ Sr05 พบว่าเส้นทางเดิน CM และ CC จะใกล้เคียงกัน ในทางตรงกันข้ามกรณี Sr08 พบว่าตำแหน่งและเส้นทางเดินของ CM จะต่ำกว่า CC ซึ่งแสดงว่า mixed fluid ในกรณี Sr08 จะกระจายตัวอยู่ทางด้านล่างของบริเวณของเจ็ต มากกว่าในกรณี Sr0 และ Sr05 (รูปที่3.49 และ รูปที่3.55)

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ สำหรับเจ็ตในกระแสลมขวางที่มีการหมุนควงแบบ NZT/NZC พบว่าการผสมทางด้าน pressure จะดีกว่าทางด้าน suction ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลของ Initial tangential velocity profile ที่ก่อให้เกิด shear layer ที่มี strength สูงทางด้าน pressure มากกว่าด้าน suction จึงสามารถดึง(Entrain)เอา crossflow fluid เข้ามาผสมทางด้าน pressure ได้ดีกว่าและยัง promote turbulence intensity ให้สูงกว่าด้วย



ประมวลตาราง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
1	Pratte and Baines (1967)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาเส้นทาง, อัตราการลดลงตามแนวแกน และการขยายตัวของเจ็ต</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม</li> <li>ปากเจ็ตอยู่ติดกับแผ่นราบขนาดรัศมี 6 นิ้วซึ่งอยู่สูงจากพื้น 8 นิ้ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 5, 15, 25, 35</math></li> <li><math>d = 0.158, 0.248, 0.362</math> นิ้ว</li> </ul>	<p>เส้นทางของความเร็วสามารถยุบรวมเป็นเส้นเดียวกันได้ที่อัตราส่วนความเร็วต่างๆกันเมื่อสเกลด้วย <math>rd</math></p> <p>อัตราส่วนของความกว้างต่อความสูงของเจ็ตในบริเวณ Vortex zone เป็นค่าคงที่ที่ประมาณ 1.4 ในแต่ละหน้าตัดตามแนวแกน เจ็ต แสดงถึง Similarity</p> <p>ใน Vortex zone อัตราการกระจายจะถูกควบคุมโดย Turbulent mixing และการพาของ Vortex</p>

ตารางที่ 1.1 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะเจ็ตในกระแสลมขวาง

(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
2	Kamotani and Greber (1972)	<ul style="list-style-type: none"><li>ศึกษาเส้นทางและคุณลักษณะการผสม</li><li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วและอุณหภูมิในอุโมงค์ลม</li><li>ปากเจ็ตอยู่ติดกับแผ่นราบซึ่งอยู่สูงจากผนังพื้น 2.5 นิ้วและอยู่ห่างจากขอบด้านหน้าของแผ่นราบ 2 นิ้ว</li><li>ใช้ Hot-wire ในการวัดความเร็วและ ใช้ Thermocouple ในการวัดอุณหภูมิ</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li><math>J = \frac{\rho_j U_j^2}{\rho_0 U_0^2} = 15.3, 59.6</math></li><li><math>T_j - T_0 = 0, 75, 320 \text{ }^\circ\text{F}</math></li><li><math>\text{Re}_0 = \frac{U_0 D}{\nu} = 2800-4200</math></li><li><math>\frac{\rho_j}{\rho_0} = 0.73</math></li><li>สำหรับ <math>0 \leq \frac{x}{D} \leq 20</math></li><li><math>\bar{u} = ((U) - U_o) / ((U)_{\max} - u_o)</math></li><li><math>\bar{\theta} = ((T) - T_0) / ((T)_{\max} - T_0)</math></li></ul>	<p>อัตราส่วนโมเมนต์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิ</p> <p>อัตราส่วนความหนาแน่นมีผลต่อเส้นทางของอุณหภูมิล็กน้อยแต่ไม่ผลต่อเส้นทางของความเร็ว</p> <p>เส้นทางของอุณหภูมิต่ำกว่าเส้นทางของความเร็วที่อัตราส่วนโมเมนต์เดียวกัน</p> <p>ปริมาณ Turbulence ของเจ็ตเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโมเมนต์</p> <p>สรุปความสัมพันธ์ของเส้นทางการเคลื่อนที่ของความเร็วและอุณหภูมิดังนี้</p> <p>สรุปความสัมพันธ์ของเส้นทางการเคลื่อนที่ของความเร็วและอุณหภูมิดังนี้</p> <p><math>\frac{Z_V}{D} = a_v \left( \frac{X}{D} \right)^{b_v}</math> สำหรับกรณีของความเร็ว</p>

( ต่อ )

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
				$\frac{Z_V}{D} = a_T \left( \frac{x}{D} \right)^{b_T}$ สำหรับกรณีของอุณหภูมิต่ำโดยที่ $a_V, b_V, b_T$ เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนของโมเมนต์มีส่วนค่า $a_T$ ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนของโมเมนต์เป็นหลักแต่ค่าของอัตราส่วนของความหนาแน่นก็มีผลด้วย
3	Fric and Roshko (1994)	<ul style="list-style-type: none"><li>ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสมขวาง</li><li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม</li><li>ใช้ Smoke-wire ในการศึกษารูปแบบของการไหล และใช้ Hot-wire ในการวัดความเร็ว</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li><math>r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 2-10</math></li><li><math>Re_j = \frac{u_j d}{\nu} = 7600-11400</math></li><li><math>Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu} = 3800-11400</math></li></ul>	Wake vortices เกิดภายในชั้นการไหลแบบราบเรียบของกระแสมขวางซึ่งปรากฏทางด้าน Downstream ค่าความถี่ Strouhal ซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนความเร็ว นั้น สอดคล้องกับความถี่ที่วัดได้จาก "Separation events"

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
4	Kelso et al. (1996)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสดมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลมและอุโมงค์น้ำ</li> <li>ใช้การฉีดสีและ Smoke-wire ในการศึกษารูปแบบของการไหลและใช้ Flying-hotwire ในการวัดความเร็ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>r = \frac{u_j}{u_{cf}} = 2 - 6</math></li> <li><math>Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu} = 440 - 6200</math></li> </ul>	<p><b>CVP</b> เกิดจากการแยกตัวของเจ็ตอากาศภายในท่อ นอกจากนี้การโค้งตัวของ Vortex ring เนื่องจากผลของ กระแสดมขวาง และ Vorticity ที่เกิดจากผนังของพื้นต่างเป็นองค์ประกอบที่ช่วยในการเกิด CVP</p> <p>Wake vortices เกิดจากการแยกตัวของชั้นขอบเขตที่ผนังพื้น</p>

(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
5	Smith and Mungal (1998)	<ul style="list-style-type: none"><li>ศึกษาคุณลักษณะการผสมของเจ็ตใน กระแสลมขวาง</li><li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณ Scalar concentration ในอุโมงค์ลม</li><li>ใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li><math>r = \left( \frac{\rho_j u_j^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2} \right)^{1/2}</math> = 5 - 25</li><li><math>Re_j = \frac{u_j d}{\nu}</math> = 8400 - 41500</li></ul>	<p>การลดลงของ Scalar concentration บนระนาบสมมาตรแปรตาม <math>(s/rd)^{-1.3}</math> ในบริเวณ Near field และแปรตาม <math>(s/rd)^{-2.3}</math> ในบริเวณ Far field โดยมีจุดแบ่ง (branch point) อยู่ที่ <math>s = 0.3r^2d</math> (<math>s</math> คือ ระยะทางตามแนวแกนเจ็ตบนระนาบสมมาตร</p> <p>จุดแบ่งดังกล่าวยังพิจารณาได้จากลักษณะการกระจายของ p.d.f. โดยมีลักษณะ Non-marching ที่ Near field และมีลักษณะ Tilted ที่ Far field</p>

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
6	Yuan and Street (1998)	<ul style="list-style-type: none"><li>ศึกษา Trajectory และ Entrainment ของ เจ็ต ใน Cross flow</li><li>ทำ Simulation โดยศึกษา Scalar concentration</li><li>ใช้ Large eddy simulation (LES)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li><math>r = \frac{u_j}{u_{cf}}</math>, <math>r = 2</math>, 3.3</li><li><math>Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu}</math>,</li><li><math>Re_{cf} = 1050</math>, 2100</li></ul>	<p>Trajectory ของ Center plane บริเวณห่างจากปากเจ็ต ที่ Velocity ratio ต่างกัน Collapse เป็นเส้นเดียวโดยมีลักษณะเป็น Power law</p> <p>ในบริเวณ Power law การดึง Cross flow fluid เข้าไปในเจ็ต fluid (Entrainment) เป็นกลไกสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนทิศทางของเจ็ต ส่วนบริเวณปากเจ็ต (บริเวณ Upstream ของบริเวณ Power law) Pressure drag</p> <p>สัมภาระแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการ Entrainment กับเส้นทางการเคลื่อนที่ของเจ็ต</p> $\frac{V_{jet}}{V_0} = 1 + \frac{R}{Ab} \left( \frac{x}{R} \right)^{1-b}$ <p>การโค้งตัวของเจ็ตในบริเวณ Near field เกิดจาก Pressure drag ส่วน Far field เกิดจากการ Entrainment ของเจ็ตในกระแสลมขวาง</p>

(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
7	Yuan et al. (1999)	<ul style="list-style-type: none"><li>ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field</li><li>ทำ Simulation โดยศึกษาปริมาณเฉลี่ยและ Fluctuation</li><li>ใช้ Large eddy simulation (LES)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li><math>r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 2, 3.3</math></li><li><math>Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu} = 1050, 2100</math></li></ul>	พบโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field ได้แก่ Hanging vortices, Spanwise rollers และ Vertical streaks CVP เกิดจากการที่ Hanging vortices ซึ่งเกิดขึ้นจาก Skewed mixing layer ที่ขอบเจ็ตได้รับผลของ Adverse pressure gradient ทำให้เกิดการ Breakdown จนกลายเป็น CVP และพัฒนาตัวตามเส้นทางของเจ็ต

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
8	Cortelezzi and Karagozian (2001)	<ul style="list-style-type: none"><li>ศึกษาการก่อตัวและการพัฒนาตัวของ Vortical structure ในสนามการไหลโดยเฉพาะ CVP โดยใช้ 3D vortex element</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li><math>\frac{D}{2} = \text{Charecteristic length}</math></li><li><math>\frac{D}{2u_\infty} = \text{Charecteristic time}</math></li><li><math>\frac{\delta}{D} = 0.5, 1, 2</math></li><li><math>\frac{u_{jet}}{u_\infty} = 2.5, 5.4, 10.8</math></li><li><math>St_{mean} = \frac{2fD}{(u_{jet} + u_\infty)}</math> <math>= 1.14 \text{ For } \frac{u_{jet}}{u_\infty} = 2.5</math> <math>= 0.89 \text{ For } \frac{u_{jet}}{u_\infty} = 10.8</math></li><li><math>\bar{\omega} = 4.0, 25, 27, 30, 32</math></li></ul>	<p>พบว่าที่บริเวณ Near field นั้น Vortical structure มีการม้วนตัวขึ้นเป็น Vortex ring และกลายเป็น CVP ในที่สุด</p> <p>การ Entrain crossflow ในบริเวณ Far field พบสัดส่วนของ Crossflow fluid ที่เพิ่มขึ้นในบริเวณ Downstream เนื่องจาก CVP จะช่วยเพิ่มความสามารรถในการ Entrainment ของ Crossflow fluid เข้ามาผสมในเจ็ต</p>

(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
9	Sau et al.(2004)	ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field ของเจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยม ใช้ Direct numerical simulation (DNS)	Re =255 และ 300 R=2.5 และ 3.5 (อัตราส่วนของความเร็วประสิทธิผล) $u = v = w = 0$ ที่ผนัง	CVP นั้นเกิดจาก Skewed mixing layer ที่พัฒนาตัวจากทางผนังด้านข้างของเจ็ตไม่ได้เกิดขึ้นจาก Vortex ring พบ Wake vortice structure ที่บริเวณ DownstreamHorse shoe ก่อตัวขึ้นทางด้าน Upstreamซึ่งเป็นผลของการปฏิสัมพันธ์ของ Shear layer ที่พันกับเจ็ต

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
1	Zaman and Foss (1997)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลของการติด Vortex generators แบบ Tab รูปสามเหลี่ยม ซึ่งติดอยู่บนขอบปากเจ็ตรูปวงกลม โดยปากเจ็ตรอยู่ในระดับเดียวกับพื้น Test section</li> <li>ทำการทดลองศึกษาปริมาณความเร็ว และ Vorticity ที่หน้าตัดๆ ซึ่งตั้งฉากกับแนวแกน Streamwise โดยใช้ hot-wire anemometer ในการวัด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>J = \left( \frac{\rho_j u_j}{\rho_{cf} u_{cf}} \right)^2 = 21.1, 54.4</math></li> </ul>	<p>การติด Tab รูปสามเหลี่ยมด้านหน้าของปากเจ็ตร ส่งผลให้ Penetration depth ลดลง เนื่องจากการสันนิษฐานบริเวณด้านหน้าปากเจ็ตรมีความดันสถิตยสูง ประกอบกับบริเวณผนังปากเจ็ตรด้านในซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ติด Tab เป็นบริเวณที่มี Pressure gradient สูงที่เรียกว่า “ Pressure hill ” อีกด้วย จึงทำให้บริเวณที่ติด Tab นี้เป็น Primary source ของ Streamwise vorticity โดย</p>

ตารางที่ 1.2 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตร(JICF)ในกระแสลมขวางที่มีการติด Tab บริเวณปากทางออก



(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
		<ul style="list-style-type: none"><li>• ความเร็ว กระแสลมขวาง , <math>U_T = 6.77, 4.18</math> m/s</li><li>• ความเร็วเจ็ต , <math>V_j = 31</math> m/s</li><li>• Tab รูปสามเหลี่ยมซึ่งฐานติดอยู่กับขอบปากเจ็ตมีมุมยอดเท่ากับ <math>90^\circ</math> และระนาบของ Tab เอียงทำมุม <math>45^\circ</math> กับทิศทางการไหลของเจ็ต</li><li>• Tab มี area blockage ratio = 2.8 % ของพื้นที่ปากเจ็ต</li></ul>		<p>vorticity นี้จะมีทิศทางหักล้างกับ CVP ทำให้ CVP มีกำลังลดลง ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ Penetration depth ลดลงตามด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติด Tab</p> <p>ในขณะที่การติด Tab ด้านหลังของปากเจ็ตจะไม่ค่อย ส่งผลต่อ Penetration depth เนื่องจากบริเวณพื้นด้านหลังของปากเจ็ตมีความดันสถิตย์ต่ำ จึงไม่ช่วยเสริม Pressure gradient ด้านในปากเจ็ต ดังนั้นจึงส่งผลให้บริเวณดังกล่าว ไม่มี Pressure gradient สูงพอที่จะทำให้เกิด Streamwise vorticity ซึ่งมีกำลังมากพอในการหักล้างหรือเสริมกับ CVP ได้</p>

(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
2	Bunyajitradulya and Sathapornnanon (2005)	<ul style="list-style-type: none"><li>ศึกษาผลกระทบของ Tab ต่อโครงสร้าง Mean flow ของกรณีเจ็ตที่ไม่มีการหมุนควงในกระแสลมขวาง (JICF) และ เจ็ตที่มีการหมุนควง (SJICF)</li><li>ใช้เจ็ตร้อนในการศึกษาโดยทำการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิของเจ็ตที่หน้าตัดตาม Downstream. ซึ่งจะทำการวัดจนถึงระยะ <math>\frac{x}{rd} = 1.0</math></li></ul>	$d = 32\text{mm}$ $\frac{x}{rd} = 0.25, 0.5, 1.0$ $u_{cf} = 2.2 \pm 0.01 \frac{m}{s}$ $\bar{u}_j = 9.5 \pm 0.3 \frac{m}{s}$ $crossflow\ temperature = 29.7 \pm 1.8c^\circ$ $T_j = 77.8 \pm 1.7c^\circ$ $r = \left[ \frac{(\rho_j \bar{u}_j^2)}{\rho_{cf} u_{cf}^2} \right]^{\frac{1}{2}} = 4$ $\frac{\rho_j}{\rho_{cf}} = 0.86$ $Re_j = 15000$ $Re_{cf} = 4400$ $Fr = \left[ \frac{(\rho_{cf} - \rho_j)gd}{\rho_j u_j^2} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.02$ $Sr = \frac{w_p}{u_j}$ $C_{TG} = \frac{(T - T_{cf})}{(\bar{T}_j - T_{cf})}$	กรณีเจ็ตไม่หมุนควงซึ่งติด Tab ที่ตำแหน่งต่างๆ 8 ตำแหน่งนั้นสามารถสรุปได้ข้อสังเกต 5 ประเด็นดังนี้ 1) กรณีติด Tab ที่ Sr0-W และ Sr0-L การกระจายตัวของอุณหภูมิจะมีรูปร่างคล้ายกับกรณีที่ไม่ติด Tab คือมีลักษณะเป็นรูปไตที่สมมาตร 2) กรณีติด Tab ที่กรณี Sr0-PW(SW) พบว่ามีรูปร่างแตกต่างไปจากกรณีที่ไม่ติด Tab มีความคล้ายคลึงกับ CVP น้อยลงมากและไม่มีสมมาตรมากขึ้นและผลของการติด Tab ที่ตำแหน่งนี้มีข้อสังเกตที่สำคัญคือจะมีผลต่อโครงสร้างของเจ็ตโดยรวมเป็นอย่างมากและแบบค่อนข้างถาวร 3) กรณีติด Tab ที่ Sr0-P(S) มีรูปร่างขอบเจ็ตนั้นจะคล้ายรูปไตที่ไม่สมมาตรเจ็ตด้านที่ติด Tab นั้นจะมีอุณหภูมิโดยรวมต่ำกว่าและ Lobe จะอยู่ต่ำกว่า Lobe ด้านที่ไม่ติด Tab ซึ่งจะมีอุณหภูมิโดยรวมสูงกว่าและจะอยู่สูงกว่ามีลักษณะของโครงสร้างเป็นรูป

(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
				<p>จุลภาค</p> <p>4) กรณีติด Tab ที่ SrO-PL(SL)พบว่ารูปร่างของเจ็ดคล้ายกับกรณี SrO-P (S) แต่ขอบด้านล่างของ Lobe ด้านที่ติด Tab นั้นจะอยู่ต่ำกว่าด้านที่ไม่ติด Tab</p> <p>5) กรณีติด Tab ที่ ด้านข้างในทุกกรณีพบว่า จะทำให้รูปร่างของเจ็ดไม่สมมาตร Lobe ด้านที่ ติด Tab จะมีอุณหภูมิโดยรวมต่ำกว่าและขอบด้านล่าง จะอยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่า Lobe ด้านที่ไม่ติด Tab</p> <p>กรณีเจ็ดหมุนควงซึ่งติดTabที่ตำแหน่ง ต่างๆ 8 ตำแหน่งนั้นสามารถสรุปได้ข้อสังเกต 2 ประเด็นดังนี้ 1)กรณีติด Tab ที่ตำแหน่ง (P,PW,W,SW)พบว่ามีการพัฒนาตัวในลักษณะที่แตกต่างจากกรณีที่ไม่ติด Tab ค่อนข้างมาก กล่าวคือการพัฒนาตัวจากหน้าตัดหนึ่งไปยังอีกหน้า ตัดหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงการพัฒนาตัวทำให้รูปร่าง เปลี่ยนแปลงไปตลอดการพัฒนาตัวของเจ็ด</p>

(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของภาวศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
				<p>2)กรณีติด Tab ที่ตำแหน่ง(S,SL,LและPL)พบว่า เจ็ตนั้นมีรูปร่างการกระจายตัวคล้ายกับกรณีที่ไม่ติด Tab ทั้งนี้ในกรณีที่ติด Tab ที่ตำแหน่ง S และ SL พบว่ามีรูปร่างคล้ายกันมากและทั้งสองกรณียังพบ ลักษณะ Core ที่ฉีกขาดเป็นสองส่วนในบางหน้าตัด อีกด้วย</p> <p>พบว่าอุณหภูมิสูงจะอยู่ที่ตำแหน่งด้าน Suction ในบริเวณที่มีความไวต่อโครงสร้างการไหลมากที่สุดก็คือตรงกลางระหว่างตำแหน่งPressure windward (PW) ไปจนถึง Windward (W) แนะนำว่าการพัฒนาตัวของ.Skewed mixing layer เป็นผลให้เกิดการก่อตัวของ CVP</p>

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
1	Kavsaoglu and Schetz (1989)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลกระทบของ Initial swirl และ High turbulence ที่มีต่อคุณลักษณะการผสมของเจ็ตในกระแสมขวง</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาการกระจายของความดันสถิตยที่พื้นผิว Test section บริเวณรอบปากเจ็ตและความเร็ว ที่ระนาบขวางตรงกลาง ที่วางตัวอยู่ตามแนว Streamwise</li> <li>ใช้ Yaw probe ในการวัดความเร็ว</li> <li>ใช้การฉีดอากาศด้านข้างในการทำให้เจ็ตเกิดการหมุนควง</li> </ul>	$r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 2.2, 4, 8$ <ul style="list-style-type: none"> <li><math>Sr = \frac{w_R}{u_j} = 0.4, 0.58</math></li> <li>Turbulence = 3% , 10-16%</li> </ul>	<p>เจ็ตที่มี High turbulence มีผลทำให้ความดันสถิตยที่พื้นผิว Test section บริเวณรอบปากเจ็ตต่ำกว่าความดันบรรยากาศ.และยังลด Penetration ของ เจ็ตลงอีกด้วย</p> <p>เจ็ตที่มี Swirl.เพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันสถิตยที่พื้นผิว Test section บริเวณรอบปาก เจ็ต มีความไม่สมมาตรเพิ่มขึ้นโดยมีความดันสถิตยต่ำด้าน Suction และจะลด Penetration ของเจ็ต ลงอีกด้วย</p> <p>ผลของ Swirl.ดังกล่าวจะชัดเจนเมื่อเจ็ตมีอัตราส่วนความเร็วต่ำ, High turbulence และที่บริเวณใกล้ปากเจ็ต</p>

ตารางที่ 1.3 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาคุณลักษณะของเจ็ต(JICF) ที่มีการหมุนควงในกระแสมขวง



(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
2	Yoshizako et.al. (1991)	<ul style="list-style-type: none"><li>• ศึกษาผล Swirl ที่มีต่อ เจ็ต ใน กระแสลมขวาง ในอุโมงค์น้ำ</li><li>• ทดลองหา Velocity vector และ Concentration profile ของ Swirling เจ็ต โดยใช้เทคนิค Image processing วิธีการคือ ปลดย่อยอนุภาคเล็กๆ เข้าไปพร้อมกับเจ็ตพร้อมกับฉายระนาบของแสงตัดลงไปตรงบริเวณที่ต้องการ แล้วทำการถ่ายรูป</li><li>• ความเร็วกระแสลมขวาง, <math>U_{cf} = 50</math> mm/s</li><li>• ความเร็วเจ็ต, <math>V_j = 200</math> mm/s</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Swirl number, <math>Sw = 0, 0.34, 0.76, 1.54</math></li></ul>	เมื่อเพิ่ม Swirl number ขึ้นเจ็ตจะมีการกระจายตัวได้มากขึ้นในบริเวณใกล้ปากเจ็ตและ Penetration depth จะลดลงกระแสลมขวางซึ่งมีลักษณะเป็น Uniform flow จะถูกเร่งทางด้านเดียวกับทิศทางความเร็วในแนวสัมผัสของ Swirling jet (ด้าน Suction)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
		<ul style="list-style-type: none"><li>เส้นผ่านศูนย์กลางปาก เจ็ต=60mm.</li><li>ใช้ Guide vane ที่สามารถปรับมุมได้ ในการทำให้เกิด Swirl</li></ul>		
3	Niederhaus et.al. (1997)	<ul style="list-style-type: none"><li>ศึกษาผลของ Swirl ที่มีต่อคุณลักษณะการผสม</li><li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณ Scalar concentration ในอุโมงค์น้ำ</li><li>ใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF)</li><li>ใช้ใบพัดกวนเจ็ตน้ำเพื่อให้เกิด Swirl</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li><math>r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 4.9-11.1</math></li><li><math>Sn = \frac{G_\theta}{G_u R} = 0-0.17</math></li><li><math>Re_j = 1.3 \times 10^4</math></li></ul>	ลักษณะของ CVP เปลี่ยนจากรูปร่างสมมาตรในกรณีที่ไม่มี Swirl ไปเป็นลักษณะที่ Vortex ด้านหนึ่งมีขนาดโตกว่าอีกด้านหนึ่ง ทำให้รูปร่างของ CVP เปลี่ยนจากรูป Kidney เป็นรูป Comma เจ็ตที่มี Swirl ทำให้ Penetration ลดลงเล็กน้อย และ ไม่มีผลต่อการลดลงของ Maximum mean concentration ของ เจ็ต ในช่วงที่ทดลองพบว่าความเข้มข้นสูงๆ นั้นจะอยู่ที่ด้าน Pressure

(ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
4	Denev et.al (2004)	<ul style="list-style-type: none"><li>ศึกษาโครงสร้างและการผสมของเจ็ตหมุนควงในกระแสลมขวาง และศึกษาที่ Swirling number 0 จนถึง 0.6</li><li>ใช้วิธี LES ศึกษาสนามการไหล</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Swirl number(s) = <math display="block">\frac{\int_0^{D/2} \rho U_a U_t r^2 dr}{\frac{D}{2} \int_0^{D/2} \rho U_a^2 r dr} = 0 - 0.6</math></li><li><math display="block">m_{jet} = U_{jet} \frac{\rho \pi d^2}{4}</math></li><li><math display="block">U_m = \sqrt{(u^2 + v^2 + w^2)}</math></li><li><math display="block">U_{rms} = \sqrt{((u_m - \langle u_m \rangle))}</math></li></ul> <p>โดยที่ <math>\langle \dots \rangle</math> คือ เวลาเฉลี่ย และสอดคล้องกับค่า Fluctuation</p> <ul style="list-style-type: none"><li>Re = 2100</li><li><math display="block">r = \frac{U_{jet}}{U_\infty} = 3.3</math></li></ul>	<p>การไหลและสนามความเข้มจะบิดเบี้ยวไปเมื่อมี Swirling แต่มีผลต่อการผสมในหน้าตัดเพียงเล็กน้อย</p> <p>Swirling ไม่ได้ช่วยในการผสมให้ดีขึ้น หรือมีผลน้อยมากต่อการผสม</p>

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พารามิเตอร์	กรณีเจ็ตไม่หมุนควง Sr0	กรณีเจ็ตไม่หมุน ควง Sr05	กรณีเจ็ตไม่หมุน ควง Sr08	ค่าเฉลี่ยของทุก กรณี
ความเร็วเฉลี่ย ( $\bar{u}_j$ , m/s)	9.98 ± 0.20	10.43 ± 0.16	10.40 ± 0.16	10.27 ± 0.17
ความเร็วที่จุดกึ่งกลางเจ็ต ( $u_{j,c}$ , m/s)	10.01 ± 0.1	9.30 ± 0.1	9.30 ± 0.1	9.5 ± 1.0
ความเร็วของกระแสลมขวาง ( $u_{cf}$ , m/s)	2.16 ± 0.0	2.16 ± 0.0	2.16 ± 0.0	2.16 ± 0.0
อุณหภูมิเฉลี่ย ( $\bar{T}_j$ , °C)	132.05 ± 0.31	131.87 ± 0.31	131.28 ± 0.31	131.73 ± 0.31
อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางเจ็ต ( $T_{j,c}$ , °C)	149.50 ± 0.31	149.20 ± 0.31	149.00 ± 0.31	149.23 ± 0.31
อุณหภูมิของกระแสลมขวาง ( $T_{cf}$ , °C)	31.00 ± 0.31	30.00 ± 0.31	31.00 ± 0.31	30.60 ± 0.31
อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r_{eff}$ )	4.01 ± 0.29	4.20 ± 0.30	4.19 ± 0.30	4.13 ± 0.29
Densimetric Froude number ( $Fr$ )	0.24 ± 0.0	0.13 ± 0.0	0.13 ± 0.0	0.16 ± 0.0
Reynolds number ของเจ็ต ( $Re_j$ )	14,000 ± 160	14,690 ± 176	14,640 ± 176	14,440 ± 176
Reynolds number ของกระแสลมขวาง ( $Re_{cf}$ )	4,600 ± 0	4,600 ± 0	4,600 ± 0	4,600 ± 0

ตาราง 2.1 รายละเอียดพารามิเตอร์ในการทดลองและความคลาดเคลื่อนในแต่ละกรณี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

		Swirl	$A$	$m$
side view	Pressure Side	sr0	1.39	0.25
		sr05	1.27	0.24
		sr08	1.07	0.22
	Center	sr0	1.37	0.22
		sr05	1.25	0.23
		sr08	1.01	0.21
	Suction Side	sr0	1.36	0.21
		sr05	1.21	0.22
		sr08	0.98	0.19
End view	Center of mass trajectory	sr0	1.19	0.29
		sr05	1.13	0.27
		sr08	0.97	0.2
	Centroid trajectory	sr0	1.21	0.29
		sr05	1.14	0.27
		sr08	1.04	0.21

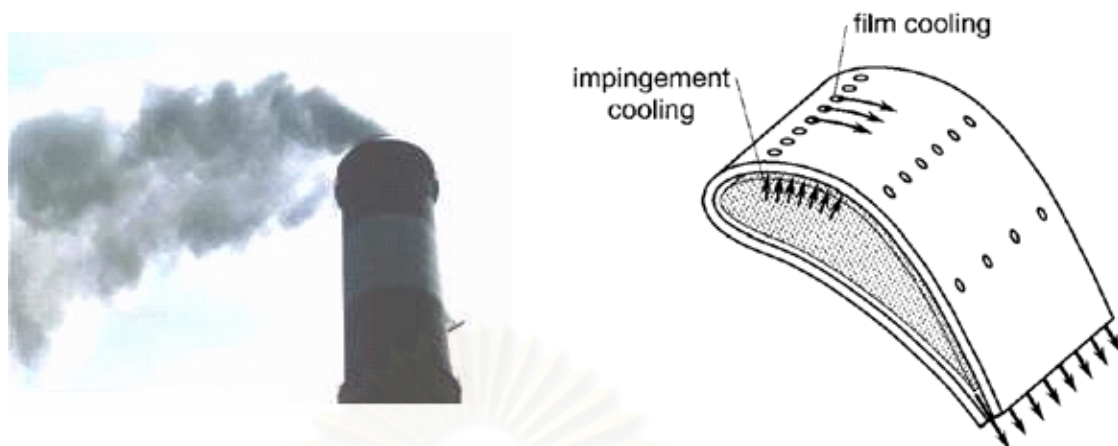
ตาราง 3.1 แสดงค่า  $A$  และ  $m$  ผลการทดลองกรณี Swirl ต่างๆ ที่  $r_{eff}$  เท่ากับ 4.1



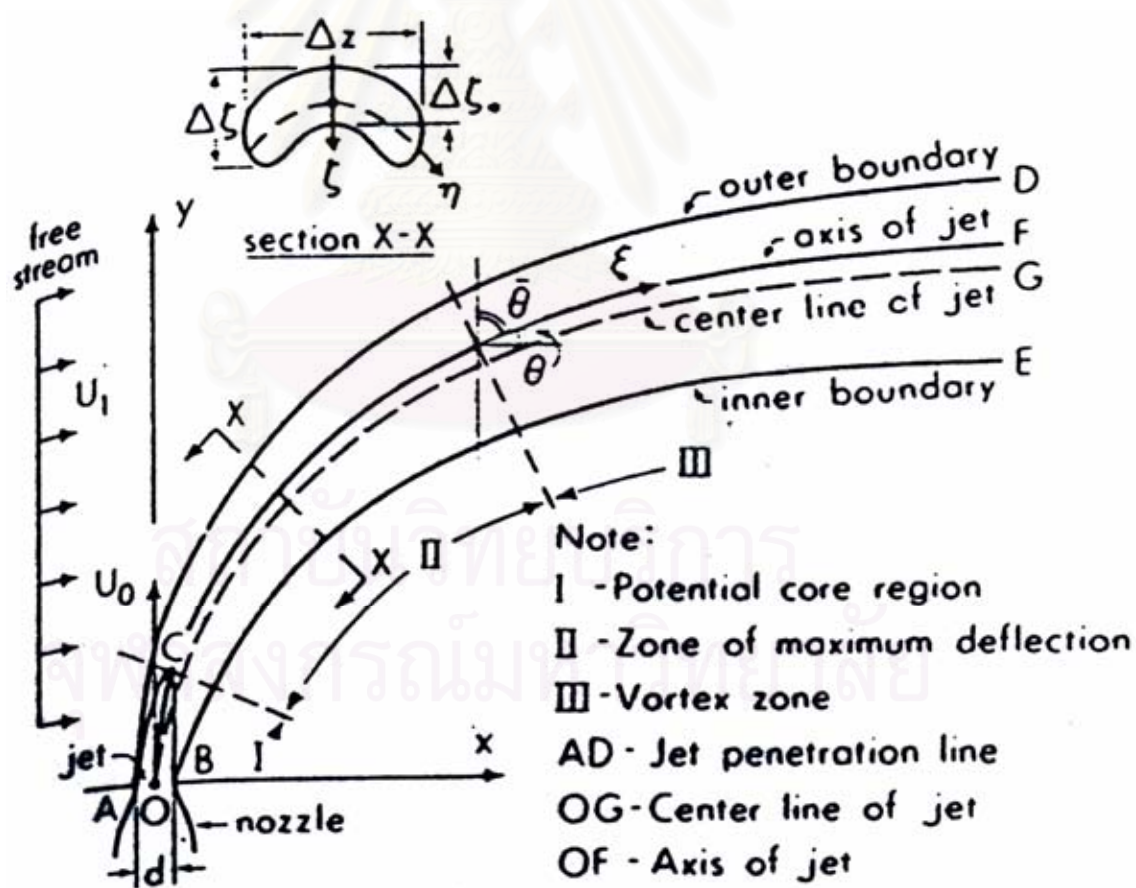


## ประมวลรูปภาพ

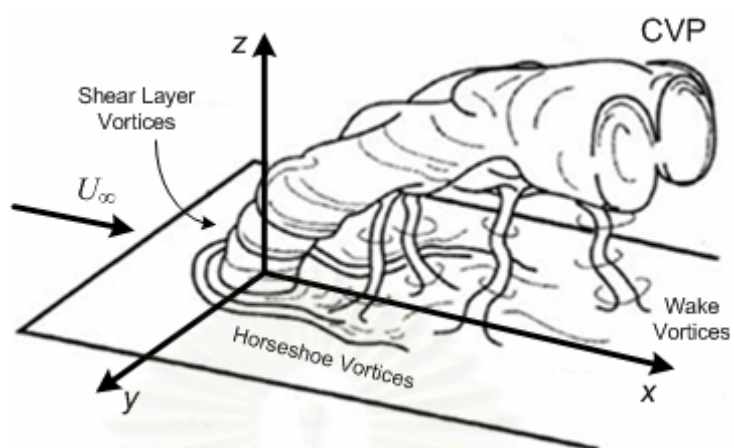
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



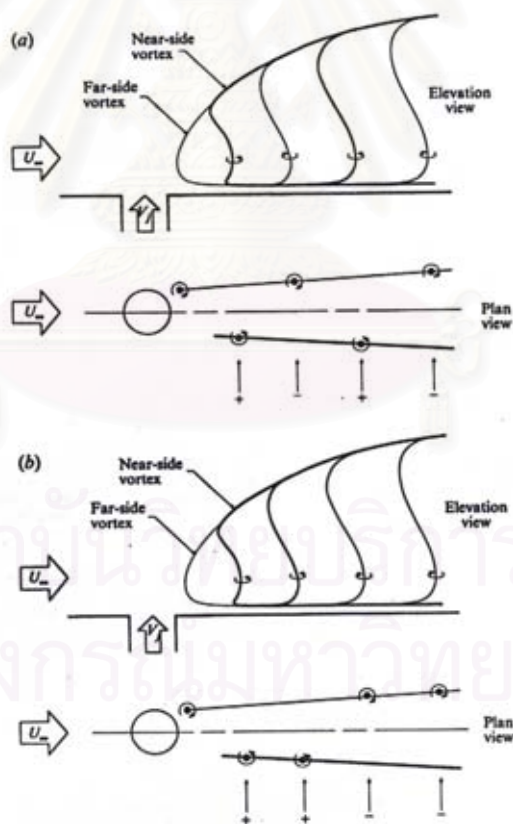
รูปที่ 1.1 การไหลแบบเจ็ตในกระแสมขวางที่เกิดจากการระบายอากาศเสียจากปล่องควัน และการระบายความร้อนที่ผิวของ Turbine blade



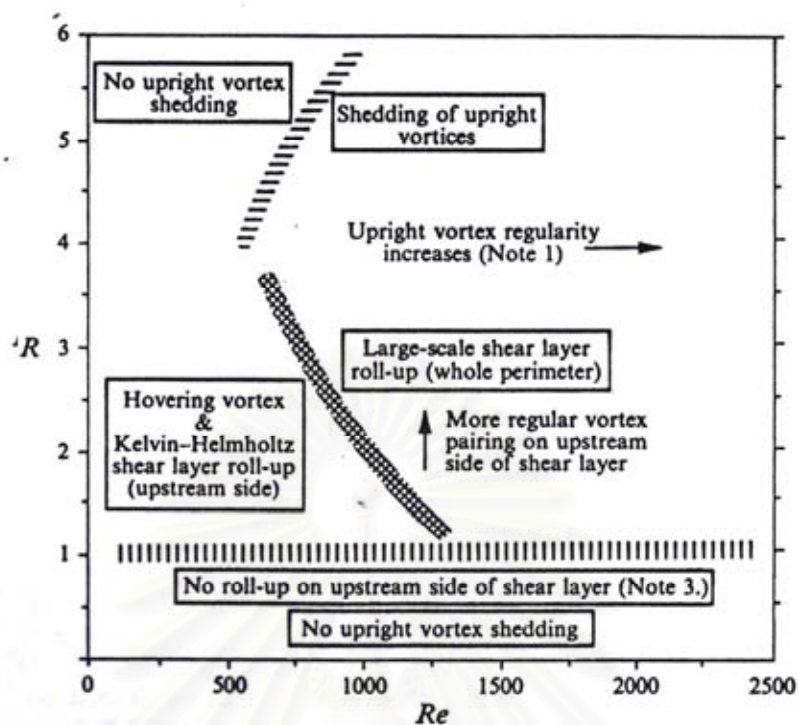
รูปที่ 1.2 ลักษณะของ Jet ใน Cross flow (Rajaratnam, 1976)



รูปที่ 1.3 โครงสร้างของ Vortical structure ของ Jet ใน Cross flow (Fric and Roshko, 1994)



รูปที่ 1.4 ลักษณะของ Wake vortices (Upright vortices) a) von Kaman vortex street, b) Mushroom-like upright vortex structure, c) Alternative Mushroom-like upright (Kelso *et al.*, 1996)



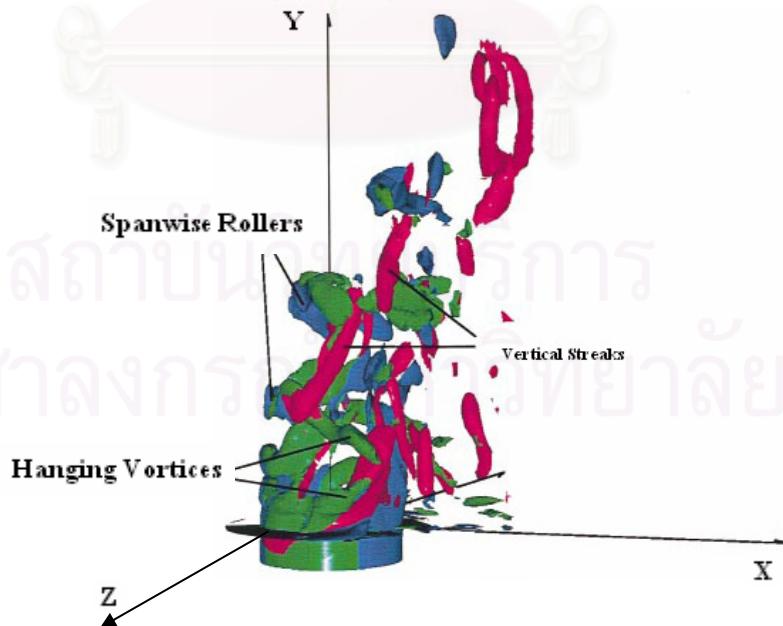
รูปที่ 1.5 ลักษณะโครงสร้างของ Jet ใน Cross flow ที่สภาวะต่างๆ (Kelso et al., 1996)

Note:1) โดยทั่วไป Upright vortices เกิดที่ Velocity ratio ประมาณ 4

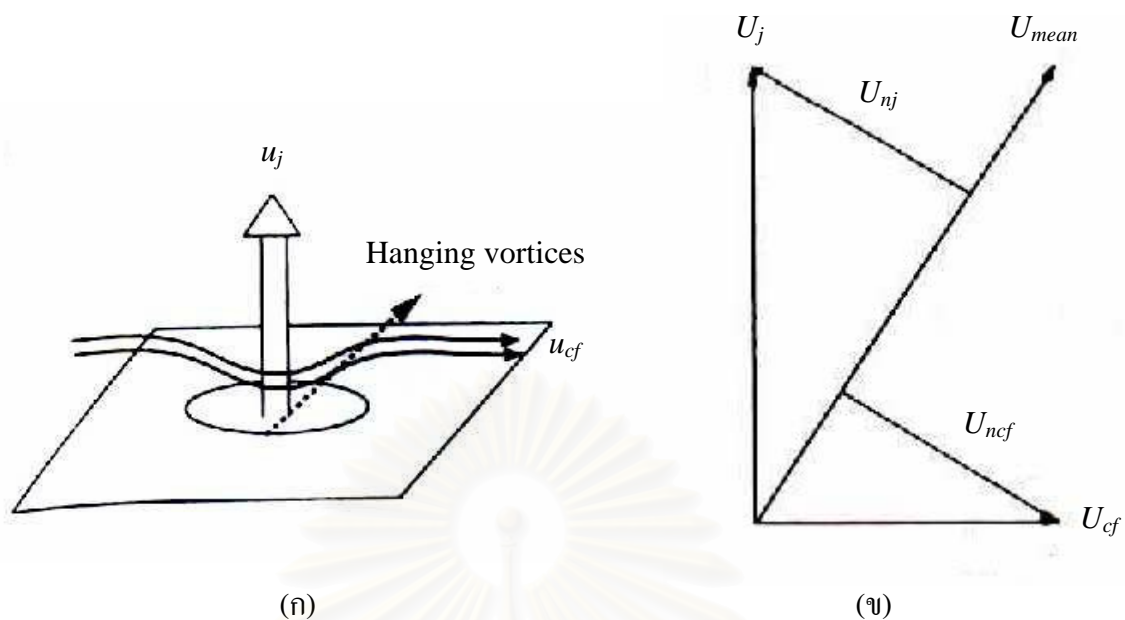
2) เกิด Vortex breakdown ที่ Velocity ratio  $> 3$

3) จาก Lim et al. (1992)

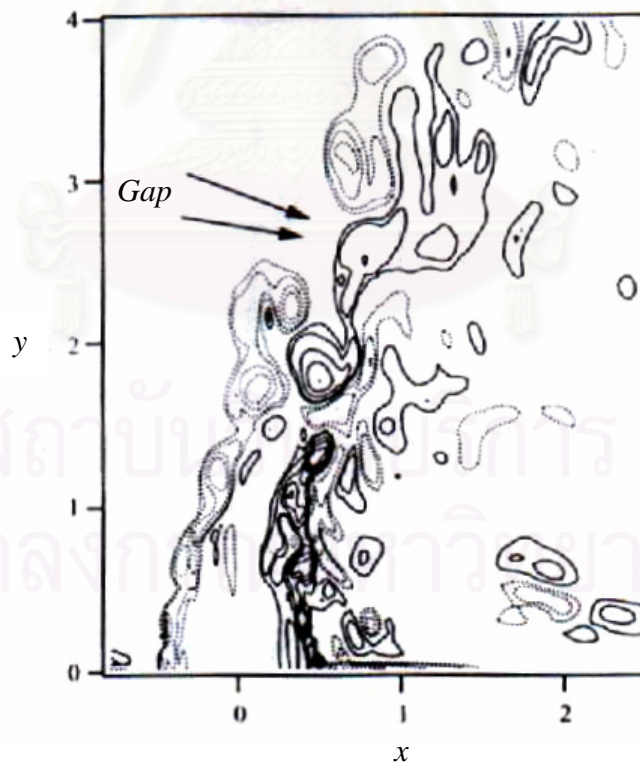
4)  $R = r = \text{Velocity ratio}$



รูปที่ 1.6 โครงสร้างบริเวณ Near field ของเจ็ตในกระแสลมขวาง ซึ่งแสดงเป็น Isosurface ของ Vorticity (Yuan et al., 1999)

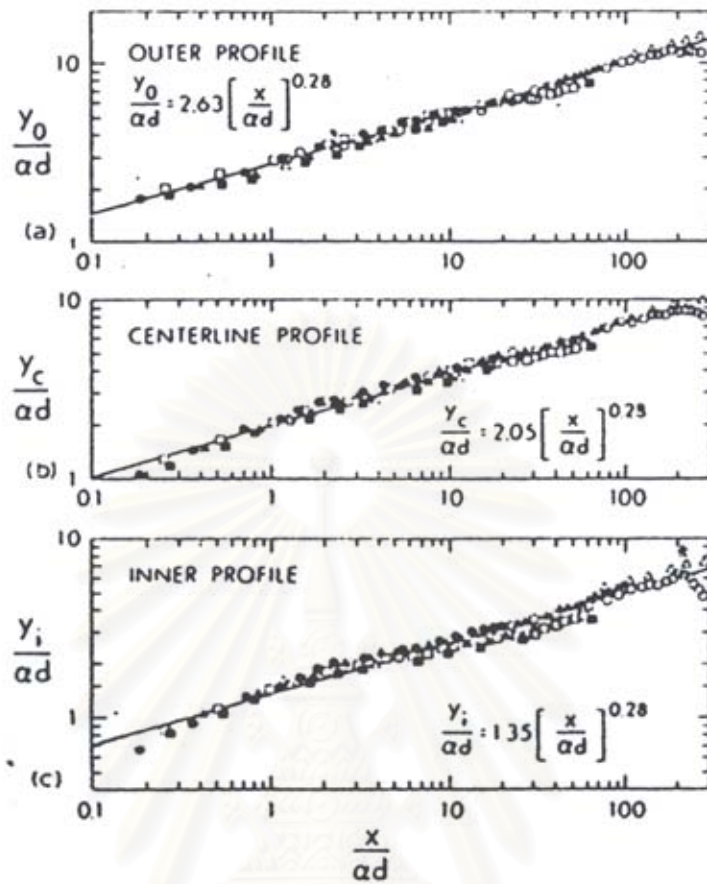


รูปที่ 1.7 โครงสร้างของ Hanging vortices (Yuan et al., 1999)  
 (ก) รูป Schematic ของ Hanging vortices  
 (ข) Vector ความเร็วซึ่งแสดงกลไกของการเกิด Hanging vortices

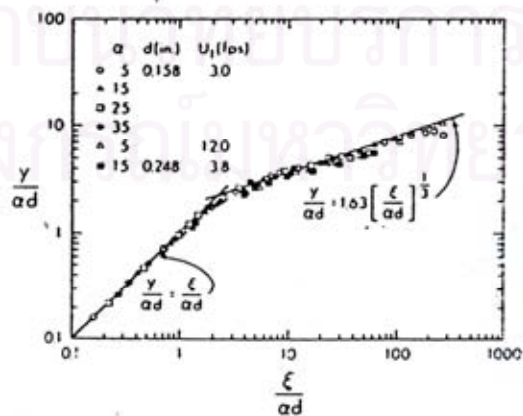


รูปที่ 1.8 โครงสร้างของ Spanwise rollers ซึ่งแสดงเป็น Instantaneous contour ของ Spanwise vorticity ( $\omega_z$ ) โดยเส้นประแสดงค่าลบ (Yuan et al., 1999)

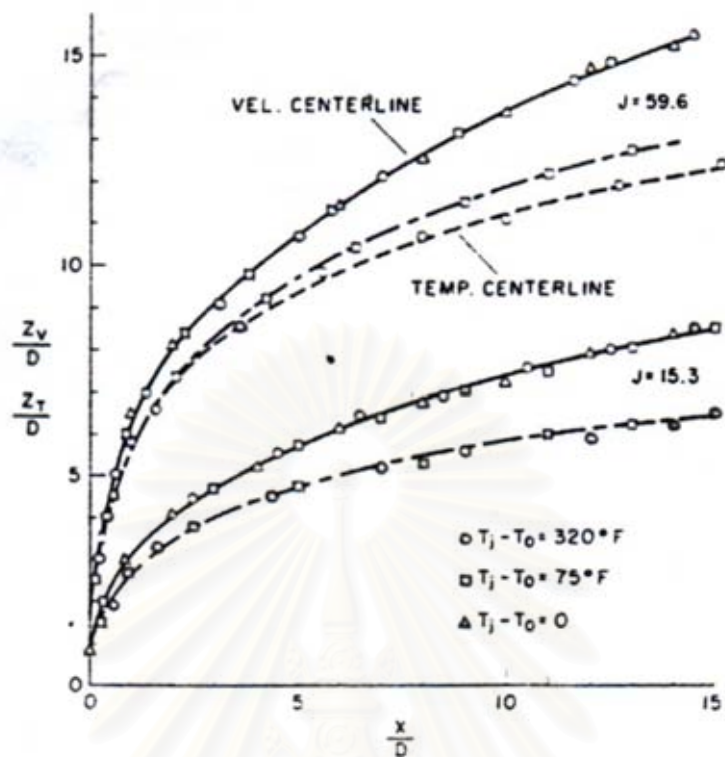




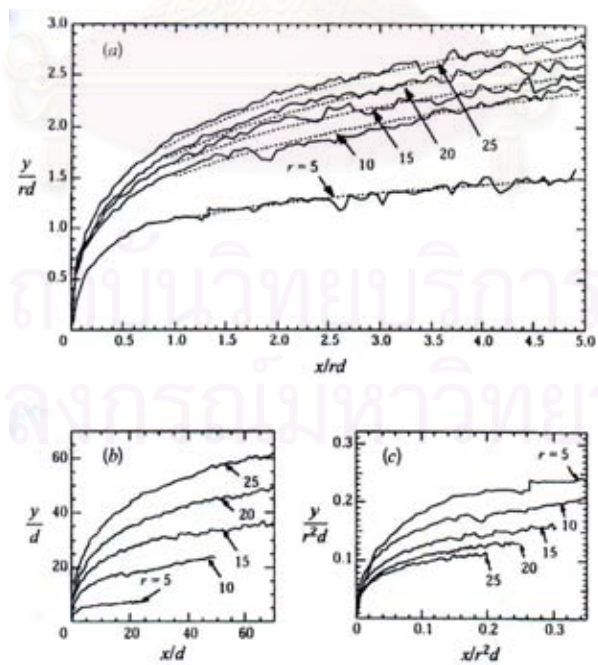
รูปที่ 1.9 Trajectory ของ Jet ใน Cross Flow (Pratte and Baines, 1967)



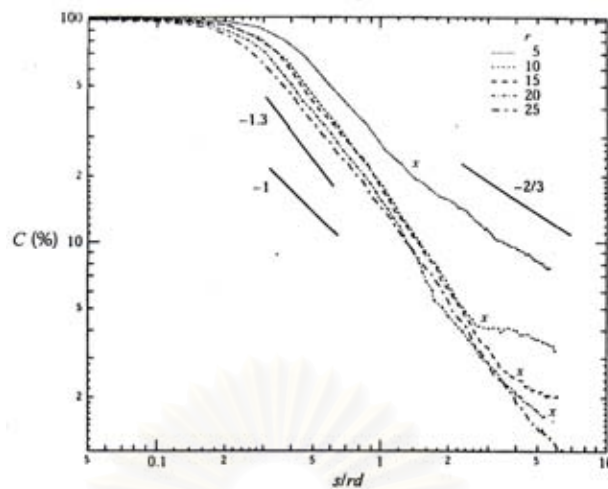
รูปที่ 1.10 Centerline Trajectory ตามแนวแกน Jet ของ Jet ใน Cross Flow



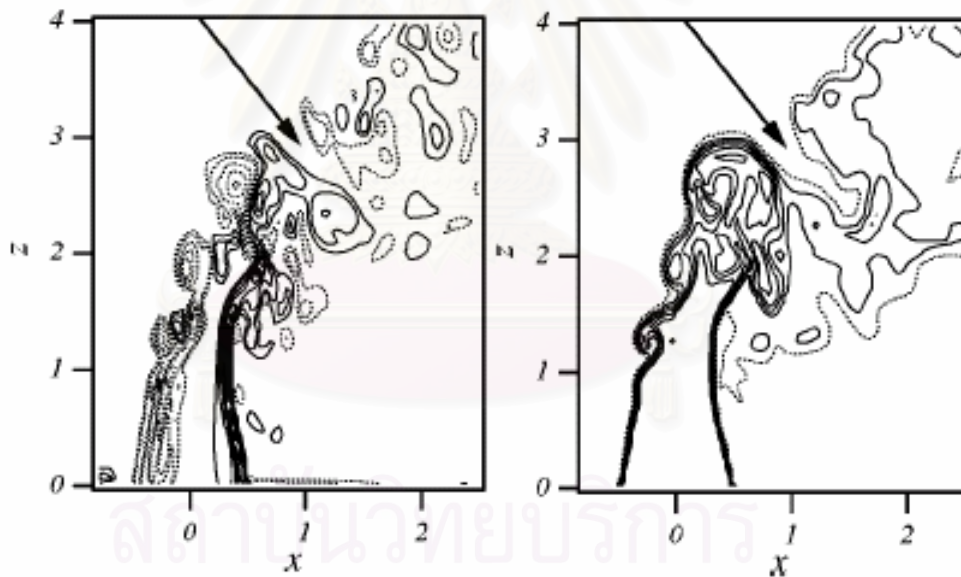
รูปที่ 1.11 Trajectory ของความเร็วและอุณหภูมิในกรณี  $T_j - T_o = 0$ ,  $T_j - T_o = 75$  F และ  $T_j - T_o = 320$  F (Kamotani and Greber, 1972)



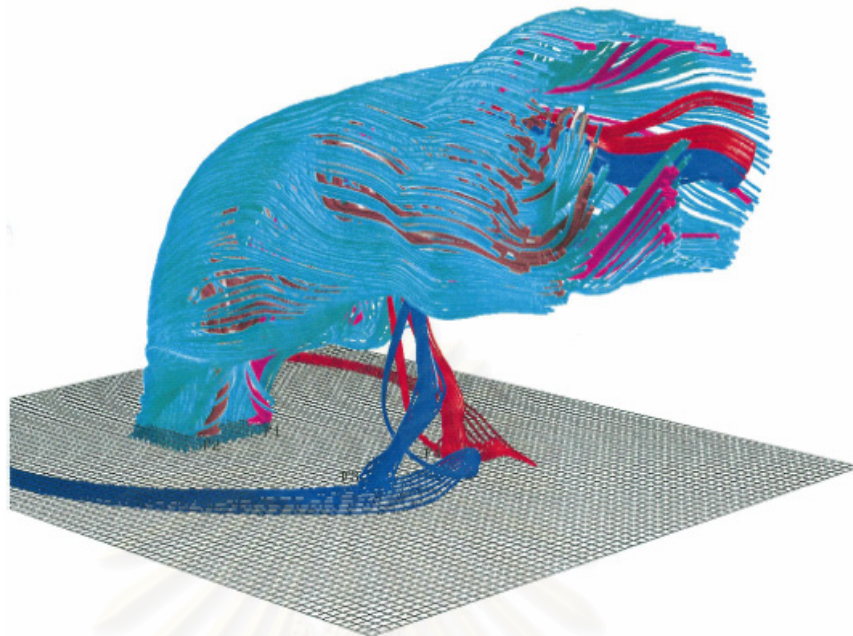
รูปที่ 1.12 Centerline trajectory (Smith and Mungal, 1998)



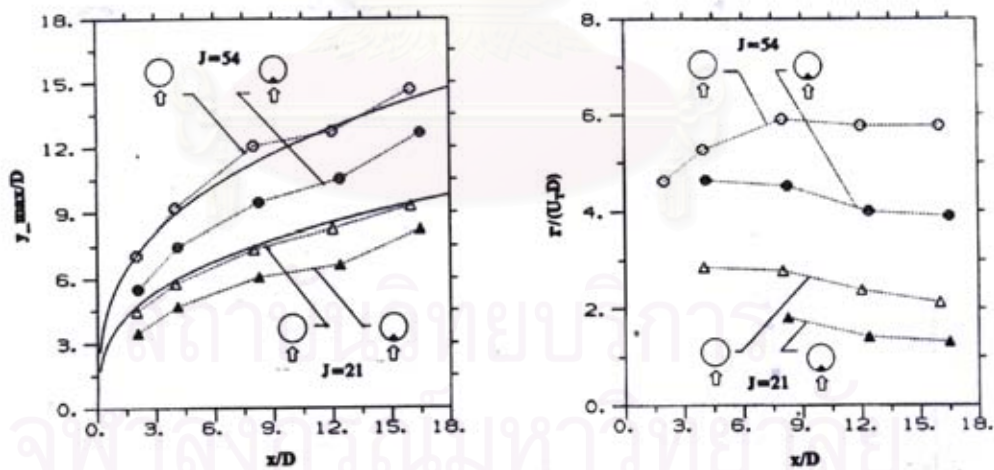
รูปที่ 1.13 แสดง Centerline concentration decay ตามแนว  $S$  (Smith and Mungal, 1998)



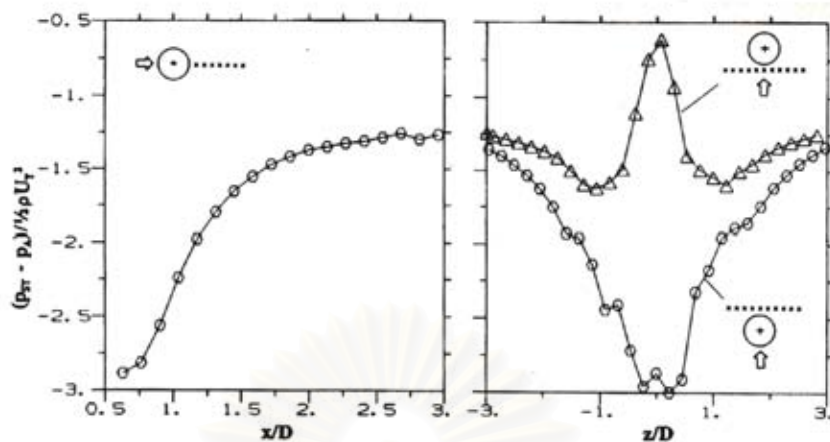
รูปที่ 1.14 แสดง Contour ของ Instantaneous spanwise vorticity (ซ้าย) และ Contour ของ Scalar concentration (ขวา) บน Centerplane (Yuan and Street, 1998)



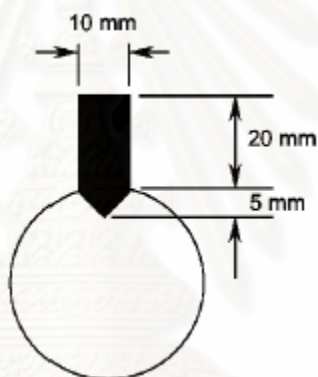
รูปที่ 1.15 โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตที่มีปากทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยม  
Sau *et al.* (2004)



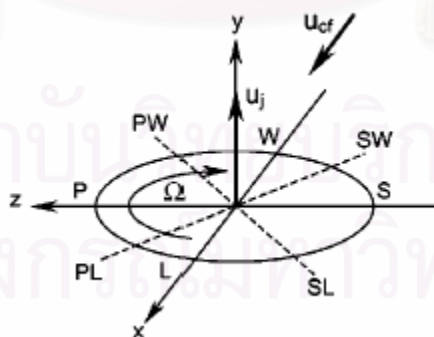
รูปที่ 1.16 Trajectory ของ Maximum mean velocity บน Centerplane (ซ้าย)  
และ Circulation ( $\Gamma = \iint \omega_x dydz$ ) ที่ด้านหนึ่งของแกนสมมาตร (ขวา)  
(Zaman and Foss, 1997)



รูปที่ 1.17 การกระจายของ Static pressure ในทิศทางต่างๆ (Zaman and Foss, 1997)



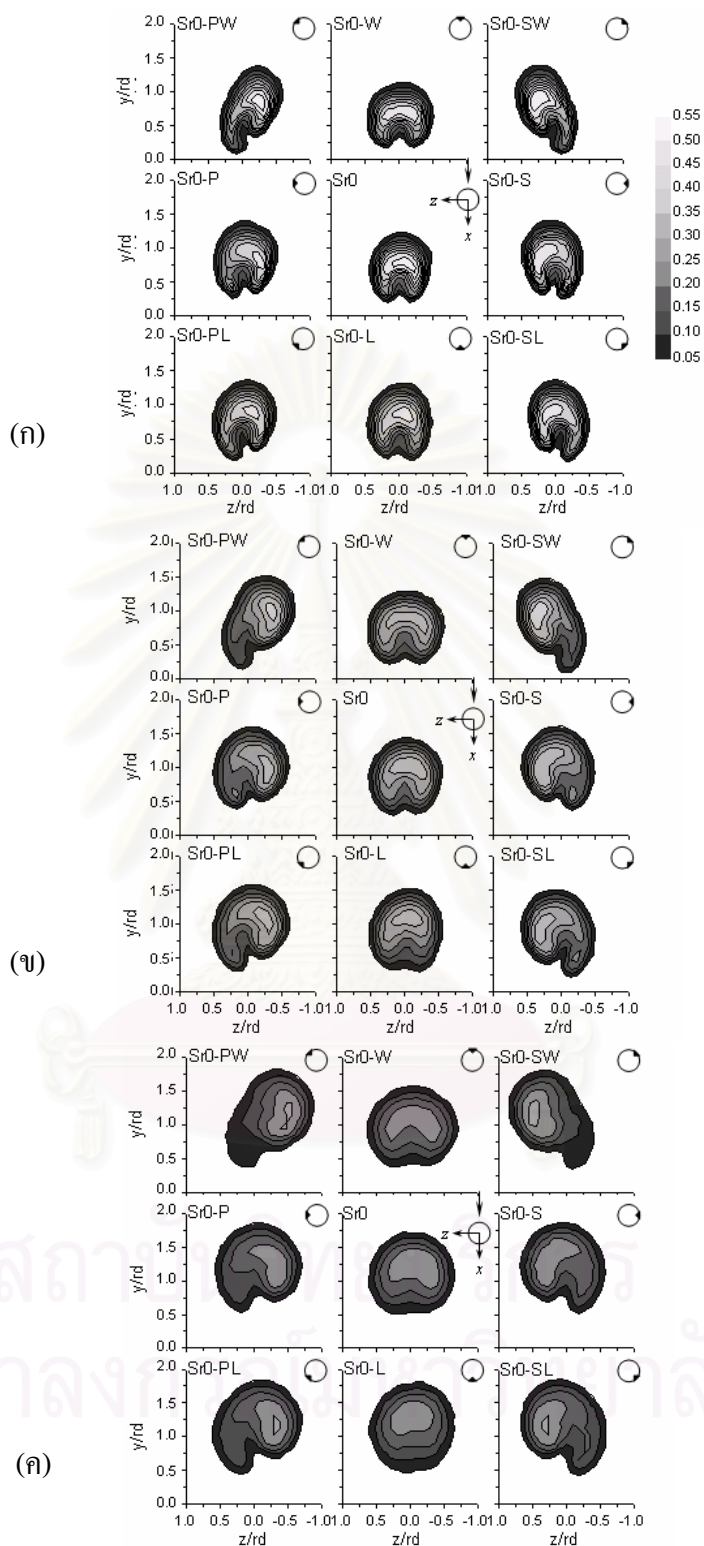
ก



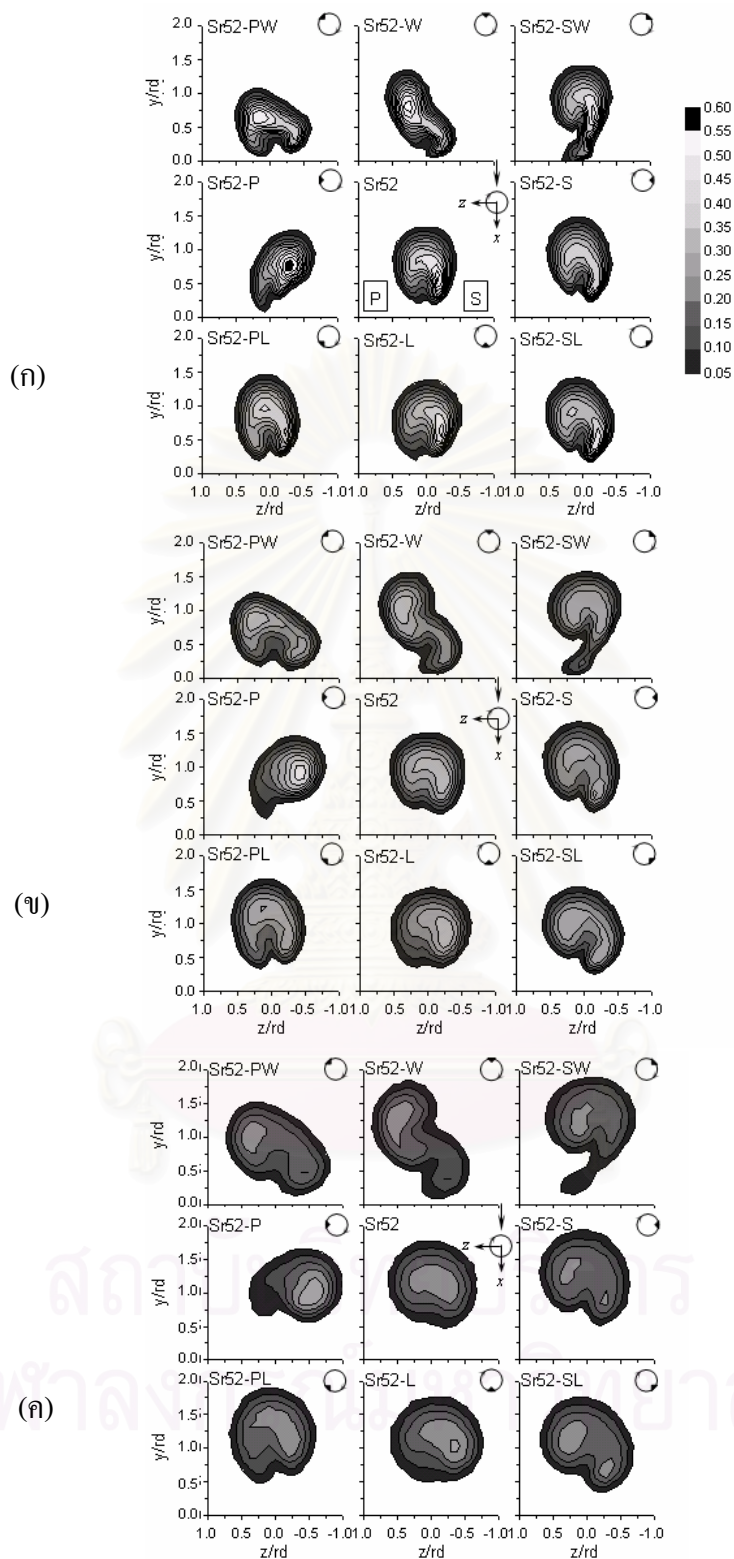
ข

รูปที่ 1.18 (ก) Tab และการติดตั้ง Tab (ข) ระบบแกน ตั้งฉากกับทิศทางการหมุน (Bunyajitradulya and Sathapornnanon ,2005)

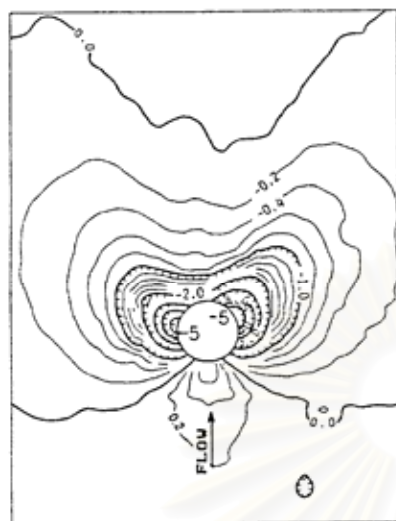




รูปที่ 1.19 การกระจายตัวของอุณหภูมิ  $C_{TG}$  ใน Cross plane ตามทิศทาง Downstream ที่ปากทางออกของเจ็ตกรณีไม่หมุนควงที่ระยะ  $x/rd =$  (ก)0.25, (ข)0.5, (ค)1.0 (Bunyajitradulya and Sathapornnanon, 2005)



รูปที่ 1.20 การกระจายตัวของอุณหภูมิ  $C_{TG}$  ใน Cross plane ตามทิศทาง Downstream ที่ปากทางออก ของเจ็ทกรณีหมุนควงที่ระยะ  $x/rd =$  (ก)0.25, (ข)0.5, (ค)1.0 ( Bunyajitradulya and Sathapornnanon ,2005)



Surface pressures, low-turbulence jet,  $R = 4.0$

(ก)



Surface pressures, high-turbulence jet,  $R = 4.0$

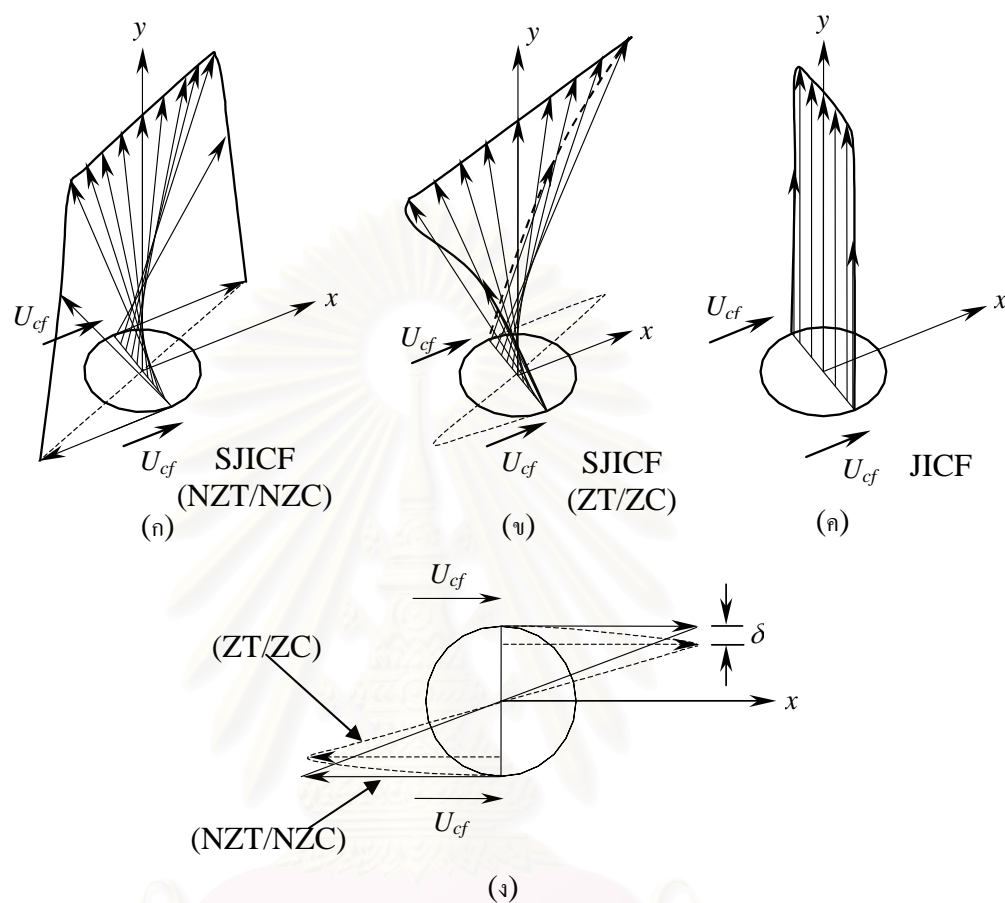
(ข)



Surface pressures, 58% swirl jet,  $R = 4.0$

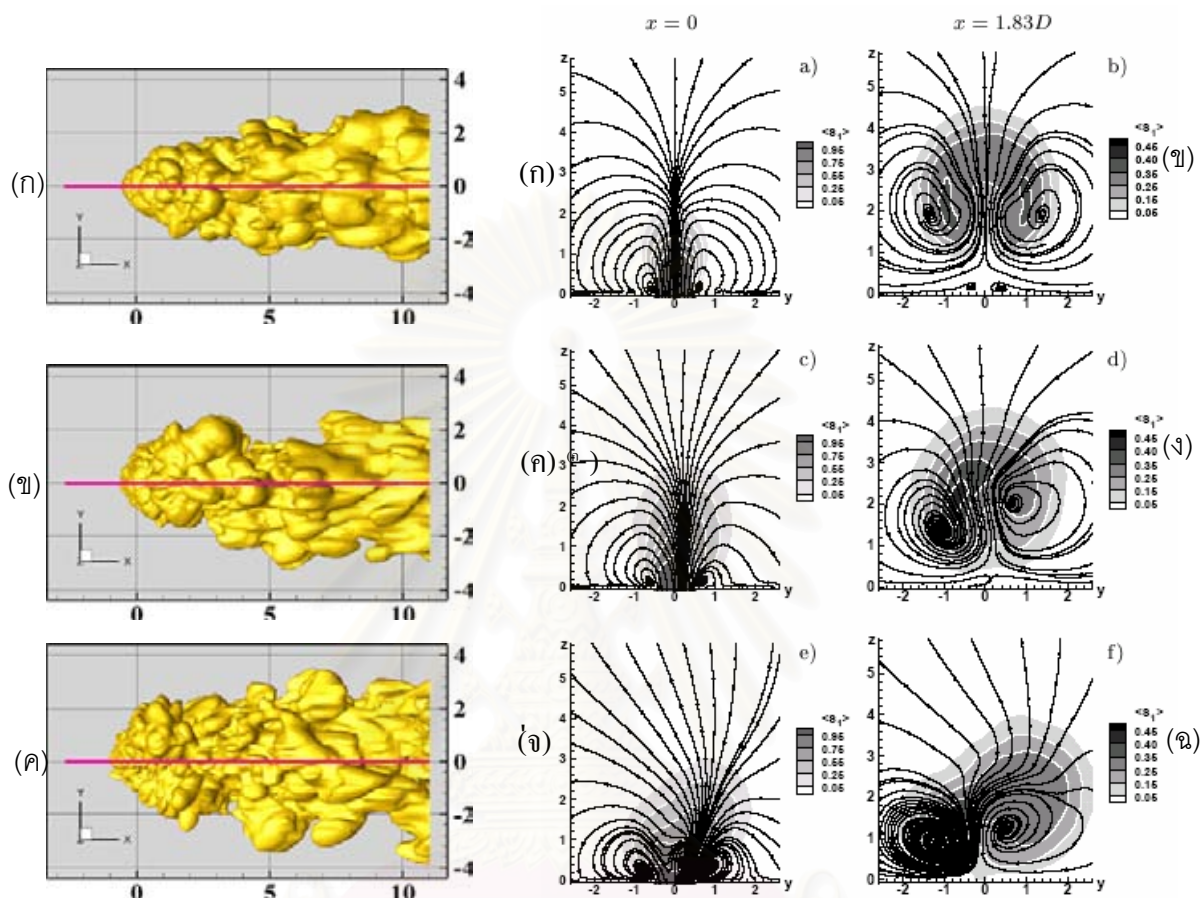
(ค)

รูปที่ 1.21 การกระจายตัวของความดันสถิตยที่พื้นผิว Test section บริเวณรอบขอบปากเจ็ตโดยรูป(ก)และ(ข)แสดงกรณีที่เจ็ตไม่มีการหมุนควงรูป(ค)แสดงกรณีที่เจ็ตมีการหมุนควง (Kavsoglu and Schetz ,1989)



รูปที่ 1.22 การกระจายของความเร็วเริ่มต้นที่ปากเจ็ตของเจ็ตในกระแสลมขวางโดย (Wangjiraniran and Bunyajitradulya ,2001)

- (ก) กรณีที่ความเร็วในแนวสัมผัสที่ขอบเจ็ตและค่า Circulation รอบเจ็ตไม่เท่ากับ 0 (เช่น การใช้ท่อหมุนในงานวิจัยนี้)
- (ข) กรณีที่ความเร็วในแนวสัมผัสที่ขอบเจ็ตและค่า Circulation รอบเจ็ตเท่ากับ 0 (เช่น การใช้ Guide vane และการฉีดของไหลในแนวสัมผัส)
- (ค) กรณีเจ็ตที่ไม่หมุนควงในกระแสลมขวาง
- (ง) เปรียบเทียบการกระจายของความเร็วในแนวสัมผัสระหว่างกรณี (ก) และ (ข)



รูปที่ 1.23 Instantaneous iso-concentration

surface โดย  $S_1 = 0.1$  Top view

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

(Denev *et al.* (2004))

รูปที่ 1.24

ภาพเฉลี่ยของ Streamline และค่า

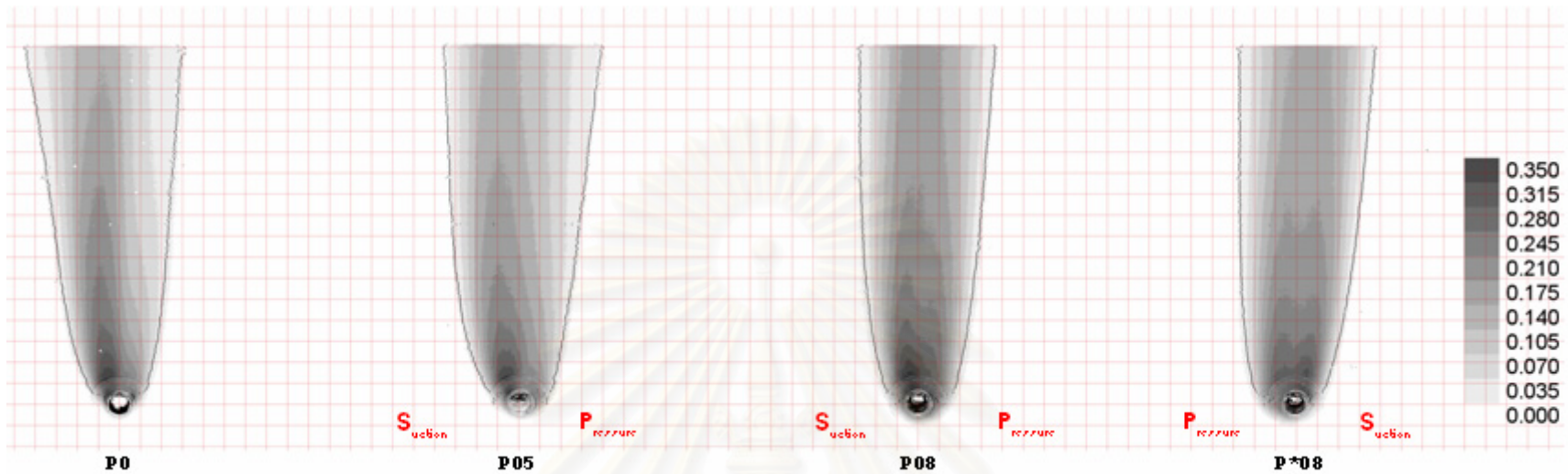
ความเข้มข้นที่  $x=0$  และ  $x=1.83D$

Top view ก,ข)  $S=0$  , ค,ง)  $S=0.4$ ,

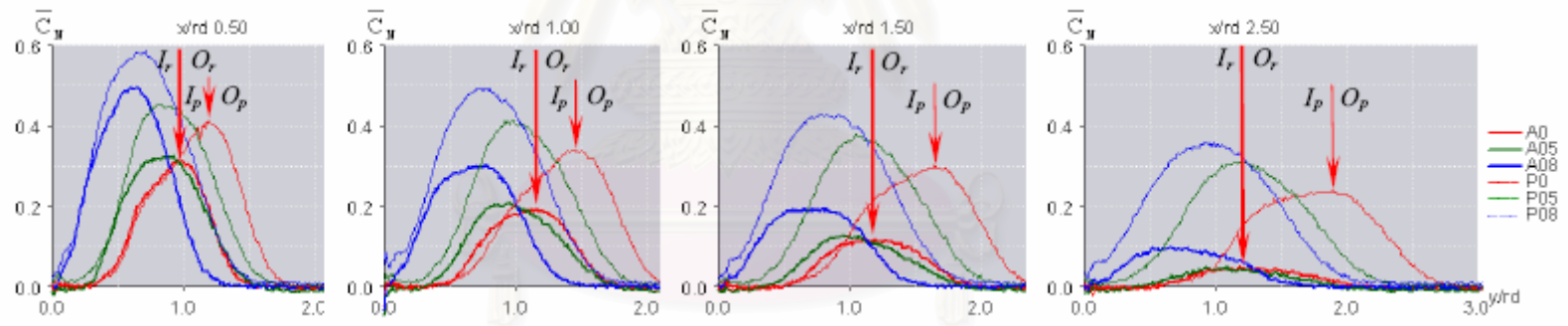
จ,ฉ)  $S=0.6$ (Denev *et al.* (2004))

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



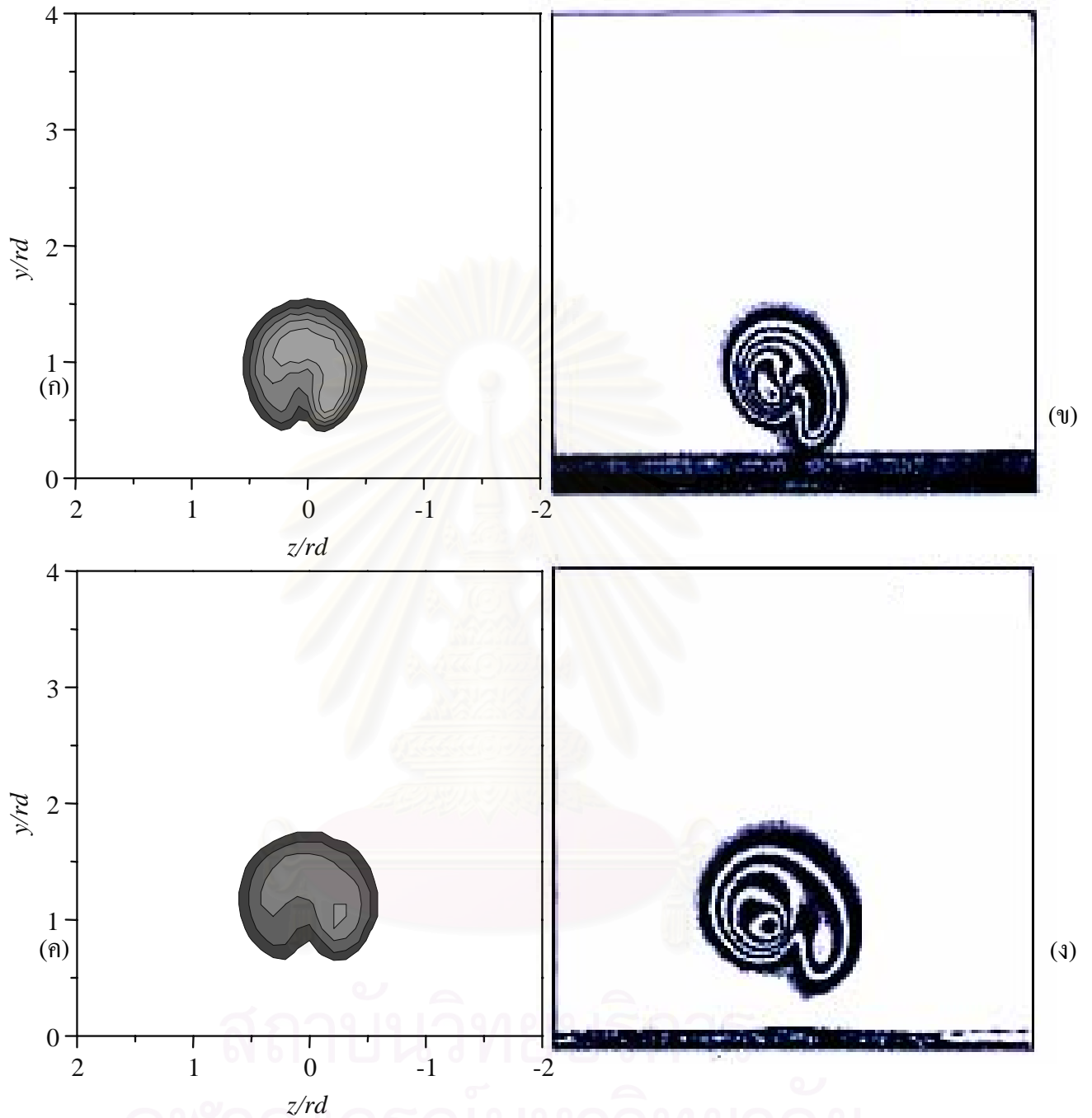


(ก)

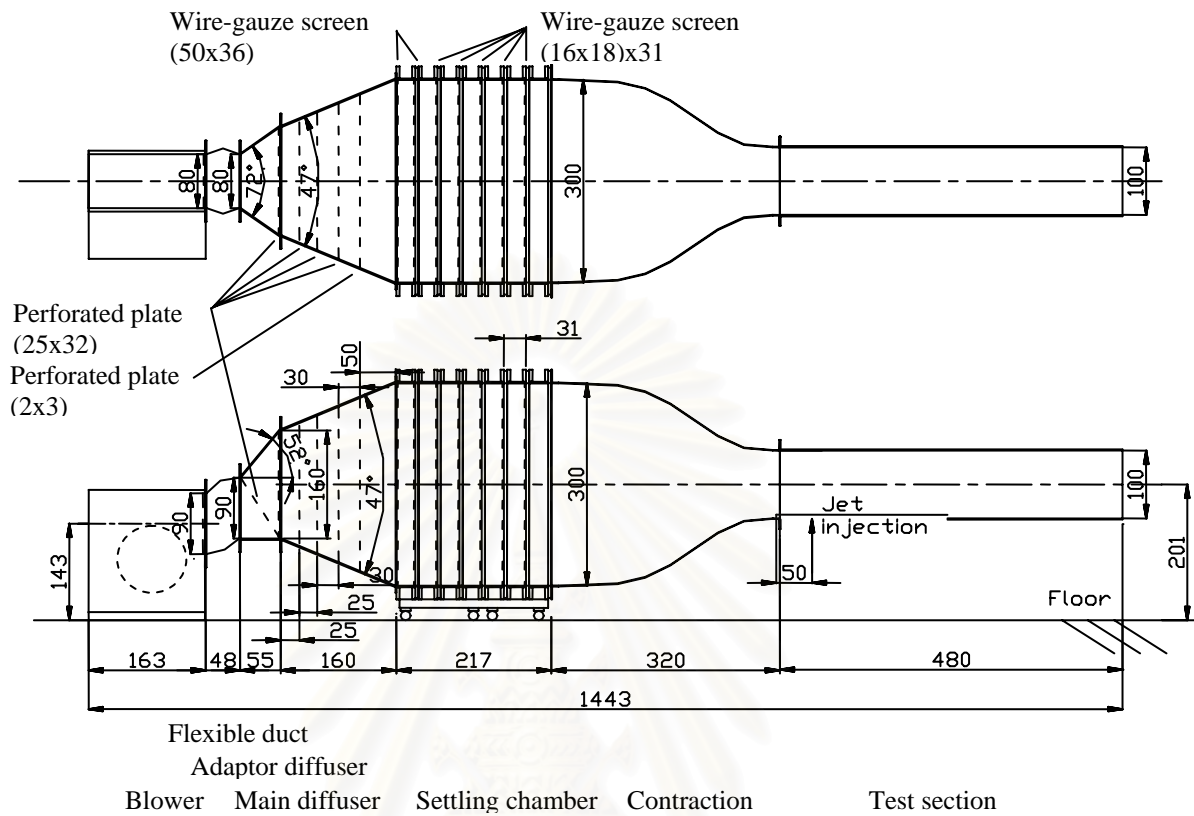


(ข)

รูปที่ 1.25 (ก) แสดงการแผ่กระจายของเจ็ตในแต่ละกรณีด้วย Passive Scalar Technique  
 (ข) แสดง Traverse profile (Side view)ของการเปรียบเทียบระหว่าง Passive กับ reactive ที่ Swirl ratio ต่างๆ โดย Yingjaroen *et al.* (2006)



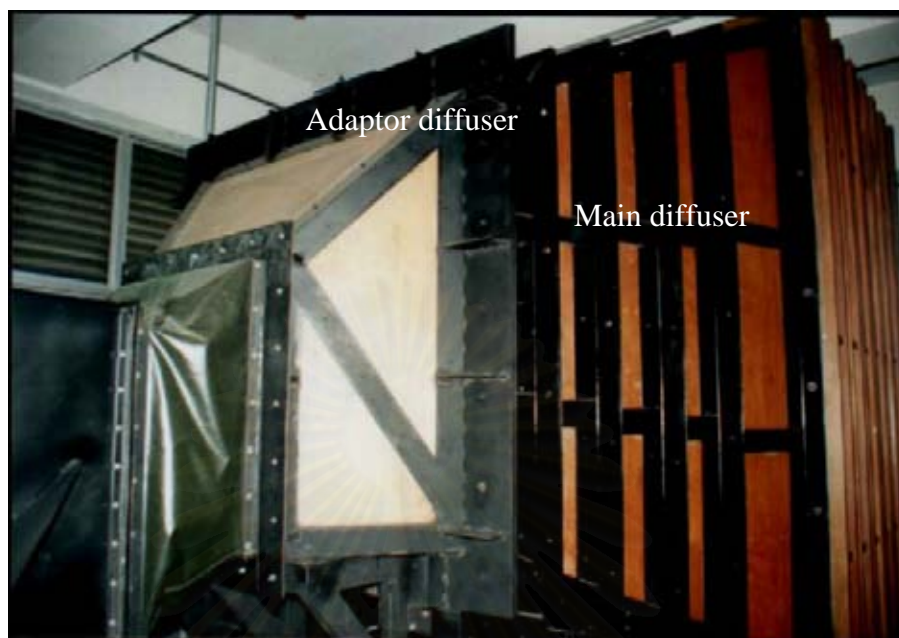
รูปที่ 1.26 รูปร่าง Contour ของจุดหมุนในงานวิจัย Bunyajitradulya and Wangjiraniran (2001) ที่ (ก)  $x/rd \approx 0.5$  และ (ค)  $x/rd \approx 1$  เปรียบเทียบกับ Contour ของปริมาณ Scalar concentration จาก Niederhaus et al. (1997) ที่ (ข)  $x/rd \approx 0.5$  และ (ง)  $x/rd \approx 1$  ที่ Swirl number (Sn) ประมาณ 0.17



รูปที่ 2.1 Schematic ของอุโมงค์ลม (หน่วยเซนติเมตร)



รูปที่ 2.2 พัดลมหยอขัง (Centrifugal Blower) ชนิดใบพัดแบบ Backward-curved airfoil ขนาด 30 กิโลวัตต์ที่ใช้สำหรับอุโมงค์ลม

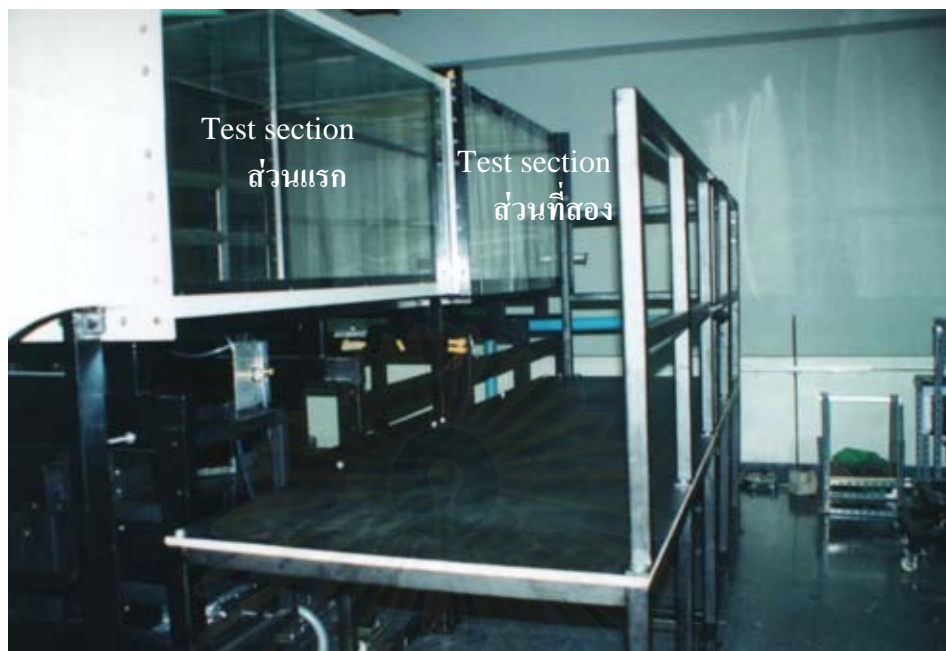


รูปที่ 2.3 ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัดซึ่งประกอบด้วย Main diffuser และ Adaptor diffuser

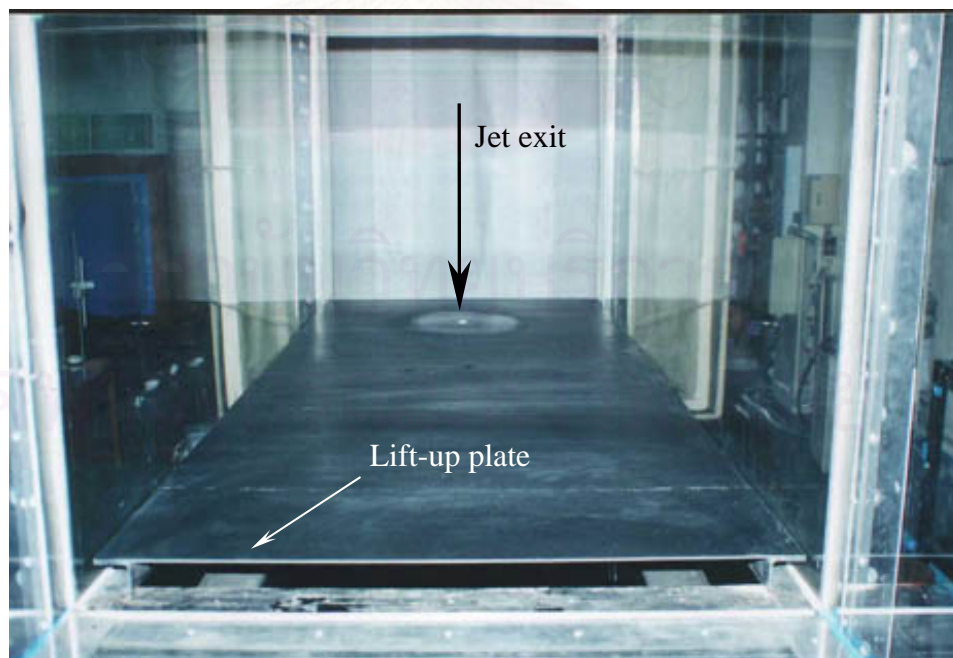


รูปที่ 2.4 ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) และ Contraction ของอุโมงค์ลม



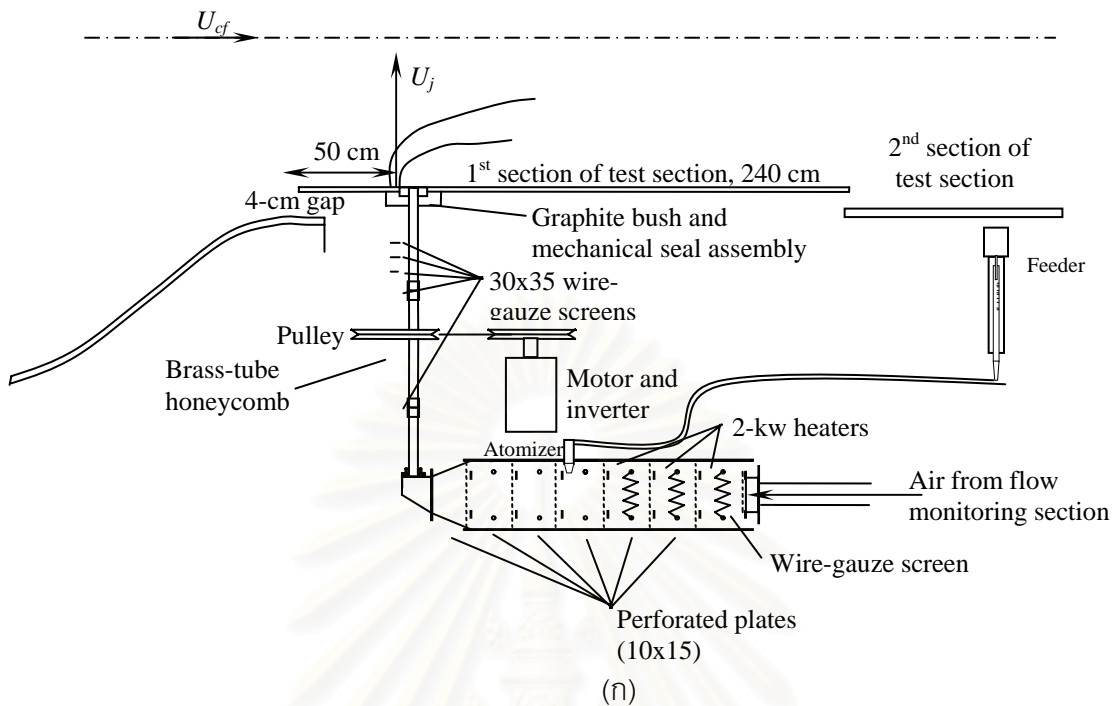


รูปที่ 2.5 หน้าตัดทดสอบ (Test section) ทั้ง 2 ส่วนของอุโมงค์ลม

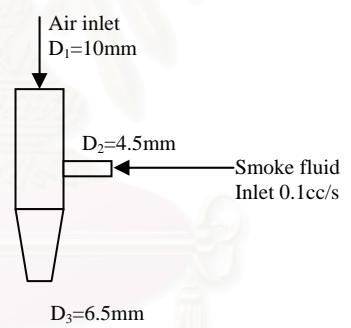


รูปที่ 2.6 ภายในหน้าตัดทดสอบ (Test section) ส่วนแรก

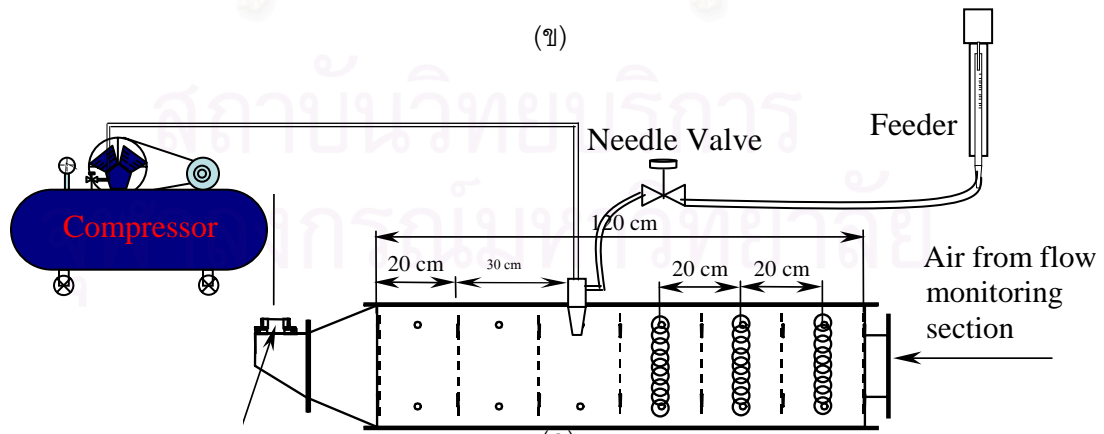




(ก)

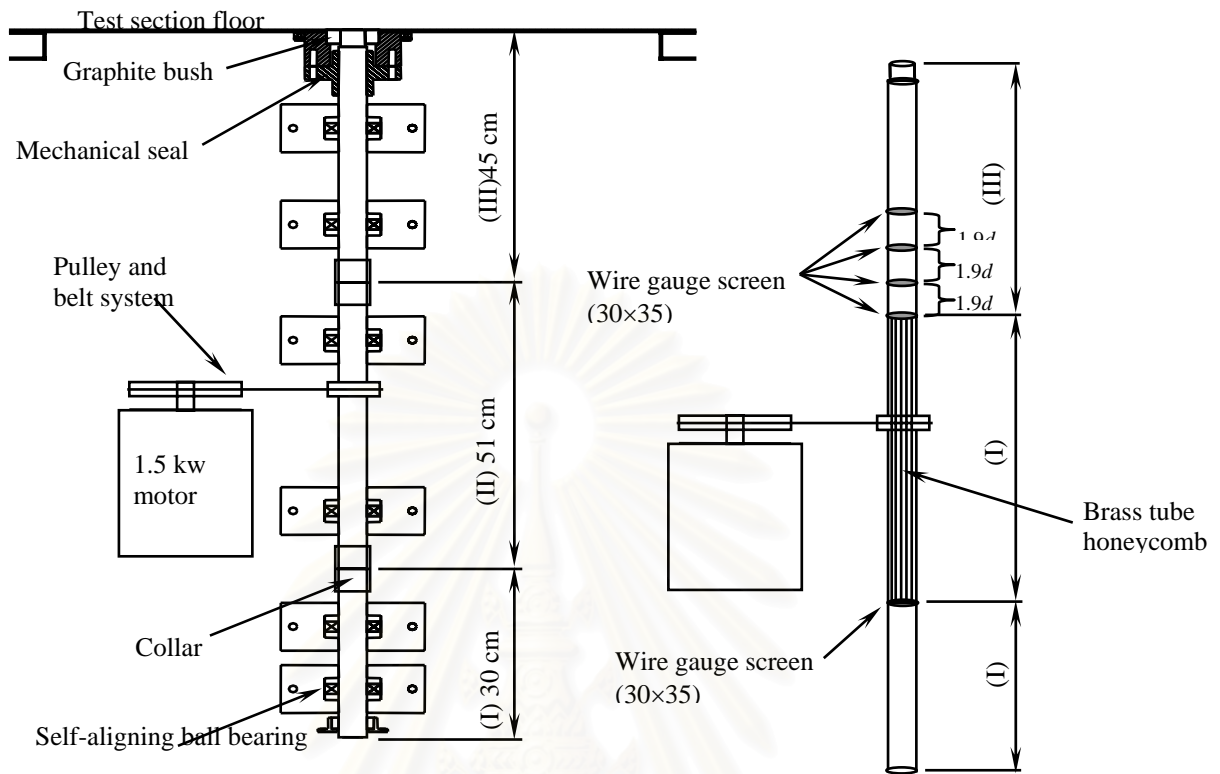


(ข)



(ค)

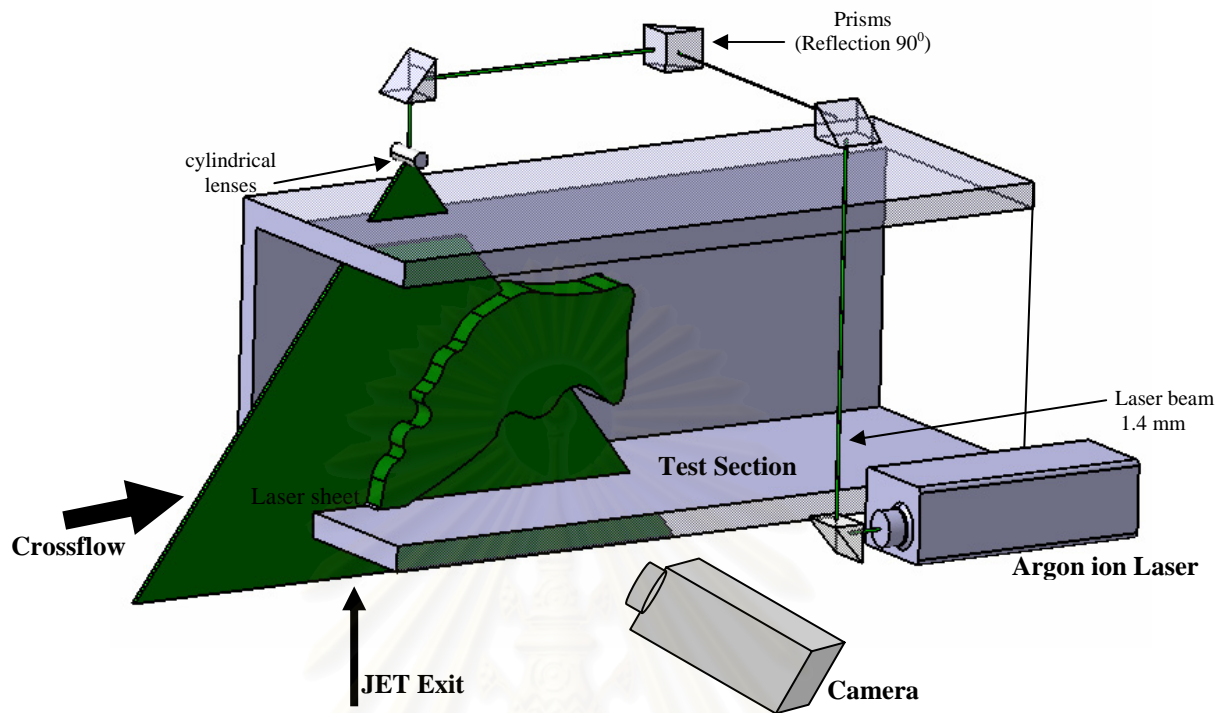
รูปที่ 2.7 รูป Schematic ของ (ก)ชุดเจ็ตแบบท่อหมุน (ข)Atomizer (ค)ชุดฉีดน้ำยาทำควัน Feeder



รูปที่ 2.8 รูป Schematic ของส่วนท่อหมุน (Rotating pipe)

(ก) ส่วนประกอบต่างๆ

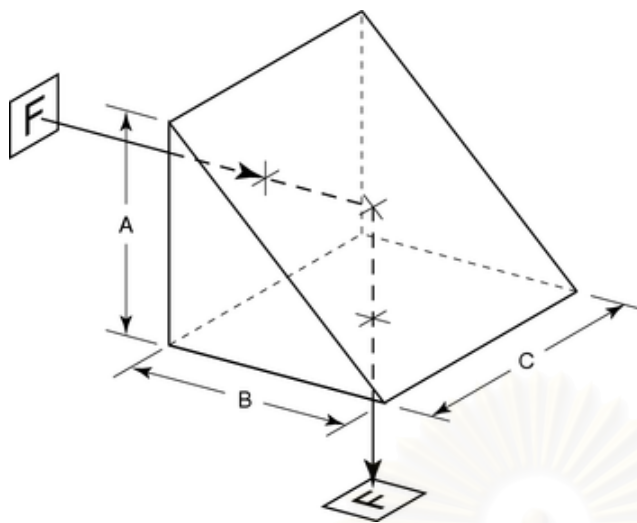
(ข) ส่วนประกอบสำหรับปรับสภาวะการไหล



รูปที่ 2.9 Schematic Laser Visualization System



รูปที่ 2.10 รูปถ่ายชุด Laser Beam (Model Stabilite 2017)

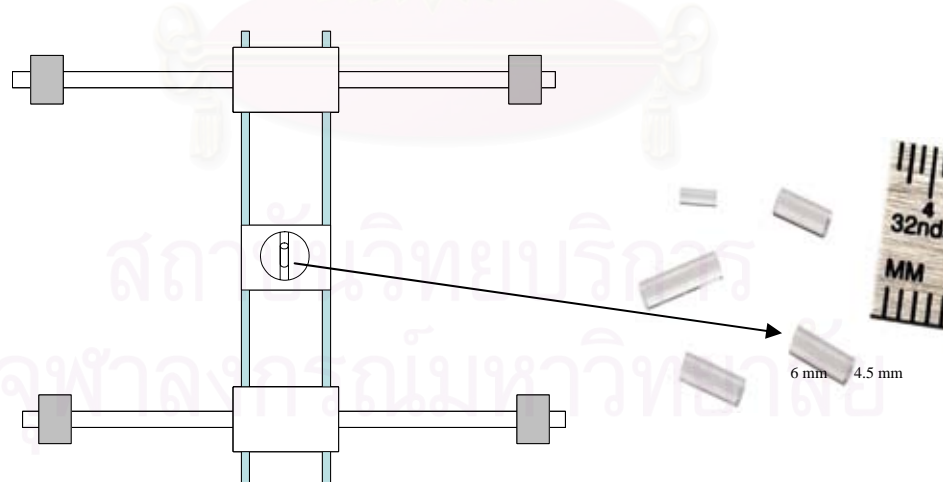


(ก)

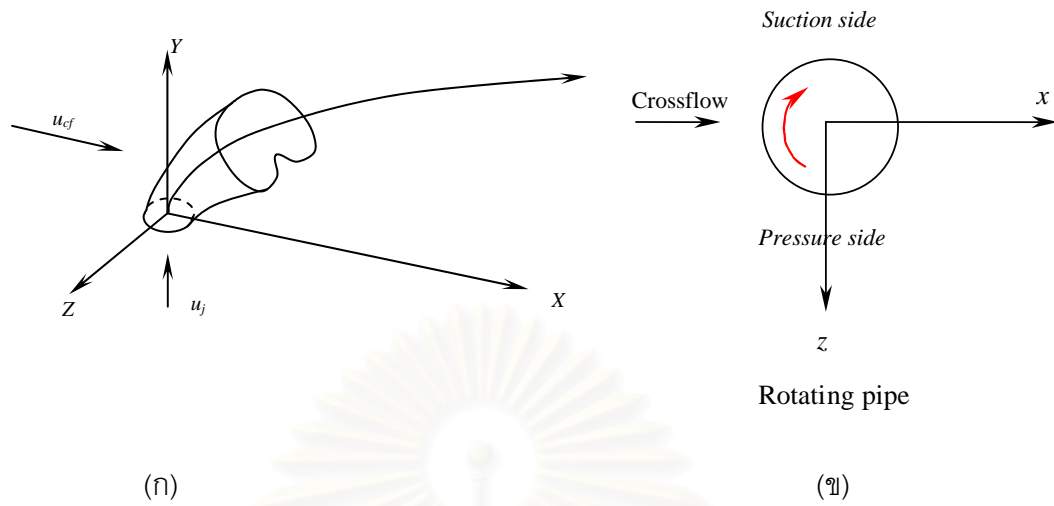


(ข)

รูปที่ 2.11 ชุดถ่ายส่งลำแสงแบบ Prisms ที่ใช้ในงานวิจัยนี้  
 (ก) รูป Schematic Right-Angle Prisms ( $90^{\circ}$  Reflection)  
 ขนาด  $32.5 \times 32.5 \times 22.5$  mm  
 (ข) รูปถ่าย Right-Angle Prisms ( $90^{\circ}$  Reflection)  
 ขนาด  $32.5 \times 32.5 \times 22.5$  mm

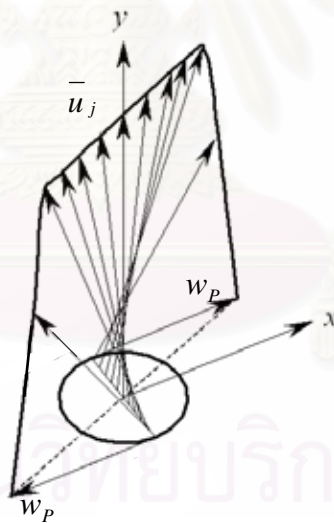


รูปที่ 2.12 Schematic ชุดรางเลื่อนและชุดถ่ายส่งลำแสงแบบ Cylindrical lenses  
 มุมบานที่ 50 องศาขนาด  $6 \times 4.5$  mm



(ก)

(ข)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

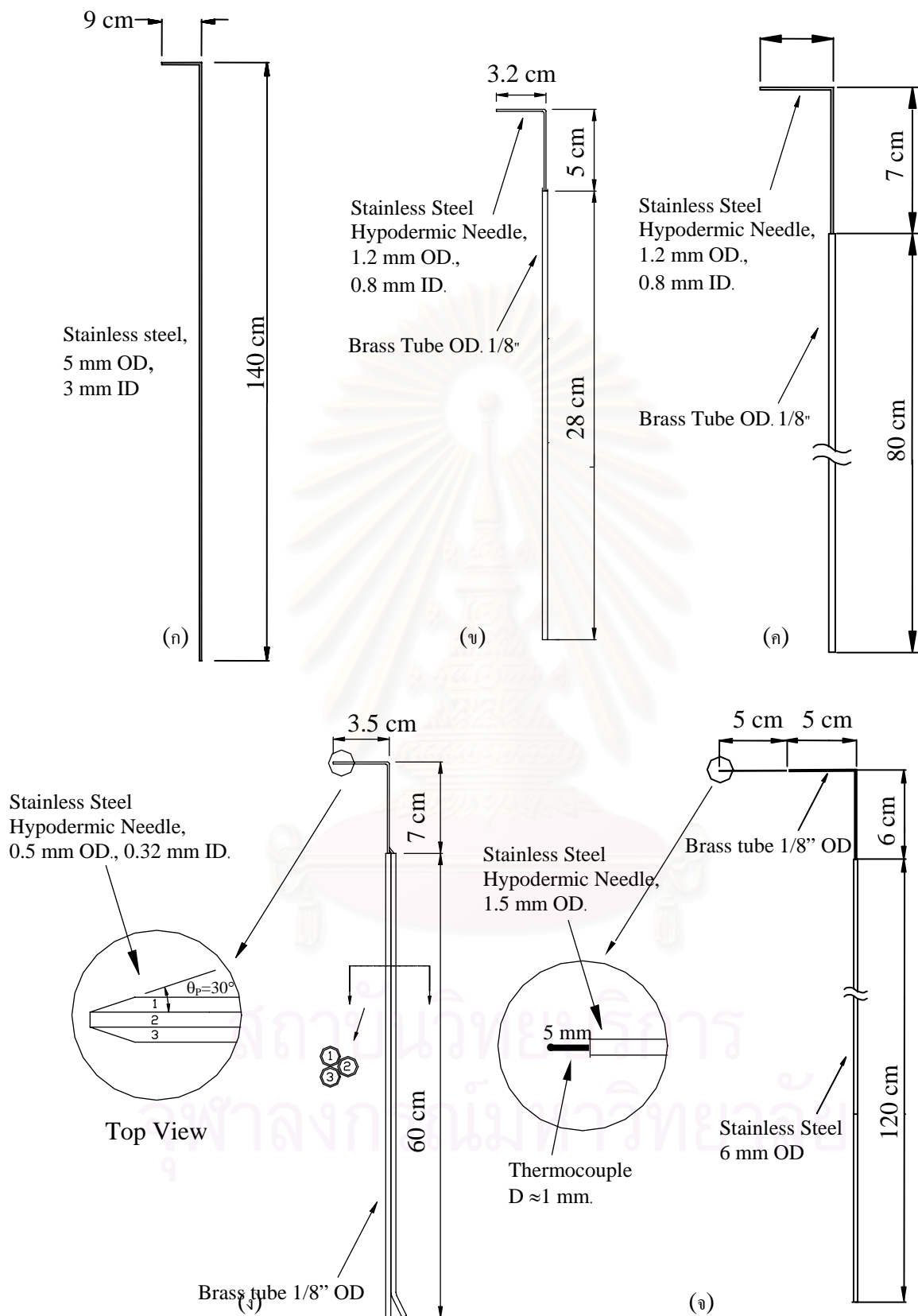
รูปที่ 2.13 พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลองและคำศัพท์ที่ใช้

(ก) พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง

(ข) การนิยามด้าน Pressure และ Suction

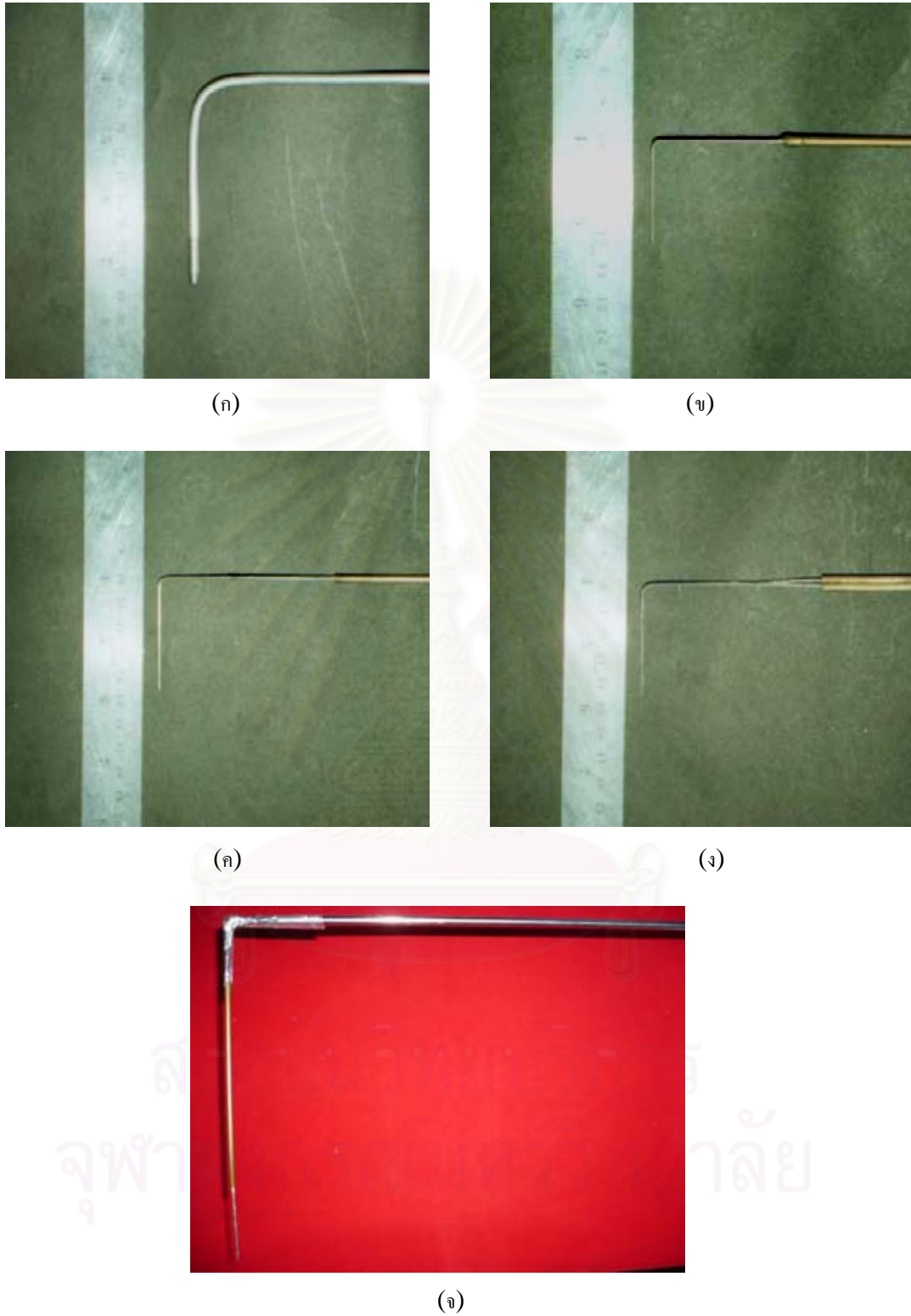
(ค) Schematic แสดงอัตราส่วน  $w_p / \bar{u}_j$





รูปที่ 2.14 รูป Schematic ของ Probe ที่ใช้วัด (ก)-(ค) Pitot probe A, B และ C ตามลำดับ

(ง) Yaw probe และ (จ) Thermocouple probe



รูปที่ 2.15 รูปถ่ายของ Probe ที่ใช้วัด (ก)-(ค) Pitot probe A,B และ C ตามลำดับ  
 (ง) Yaw probe และ (จ) Thermocouple probe



(ก)

(ข)



(ค)

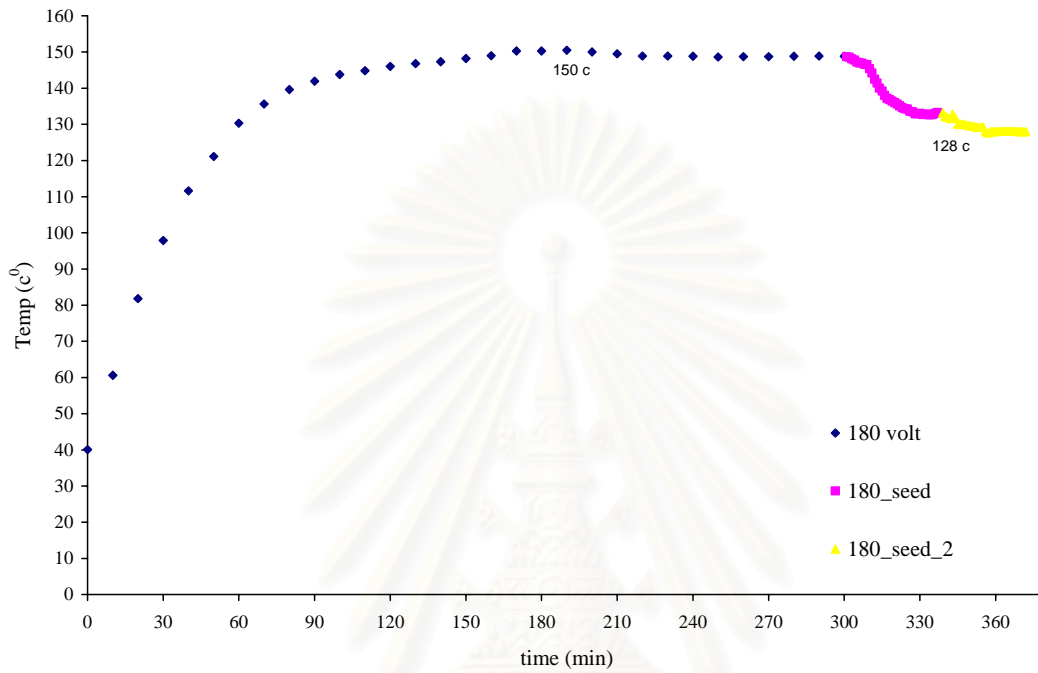


(ง)

รูปที่ 2.16 อุปกรณ์การวัดอื่นๆ

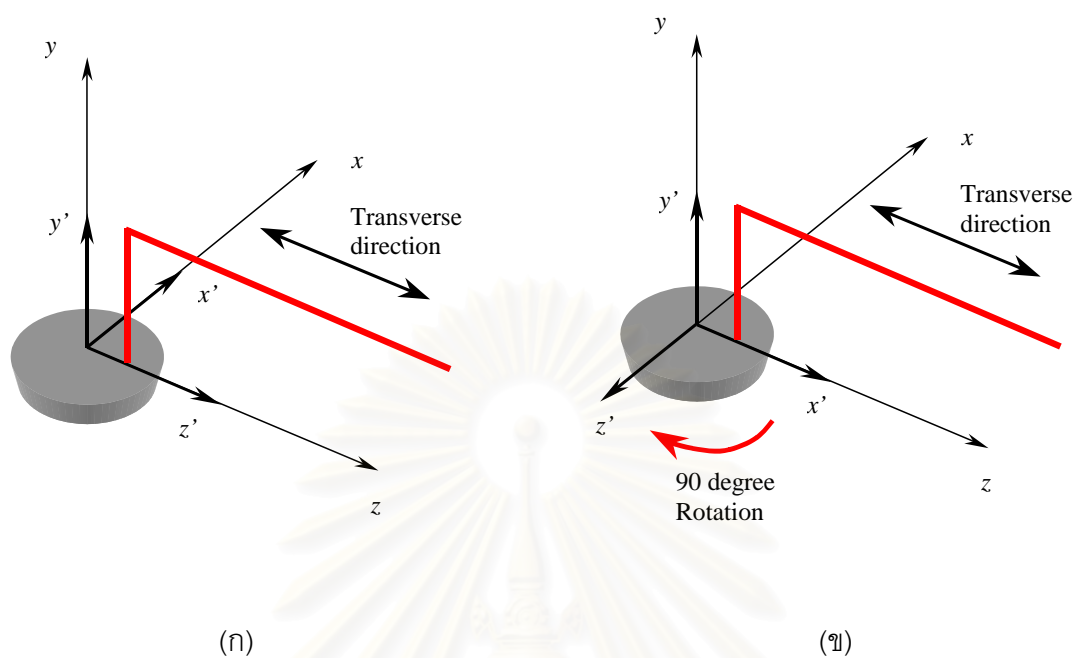
(ก) Pressure transducer (ข) Digital multimeter

(ค) Optical Tachometer (ง) ตัวอ่านอุณหภูมิจาก Thermocouple

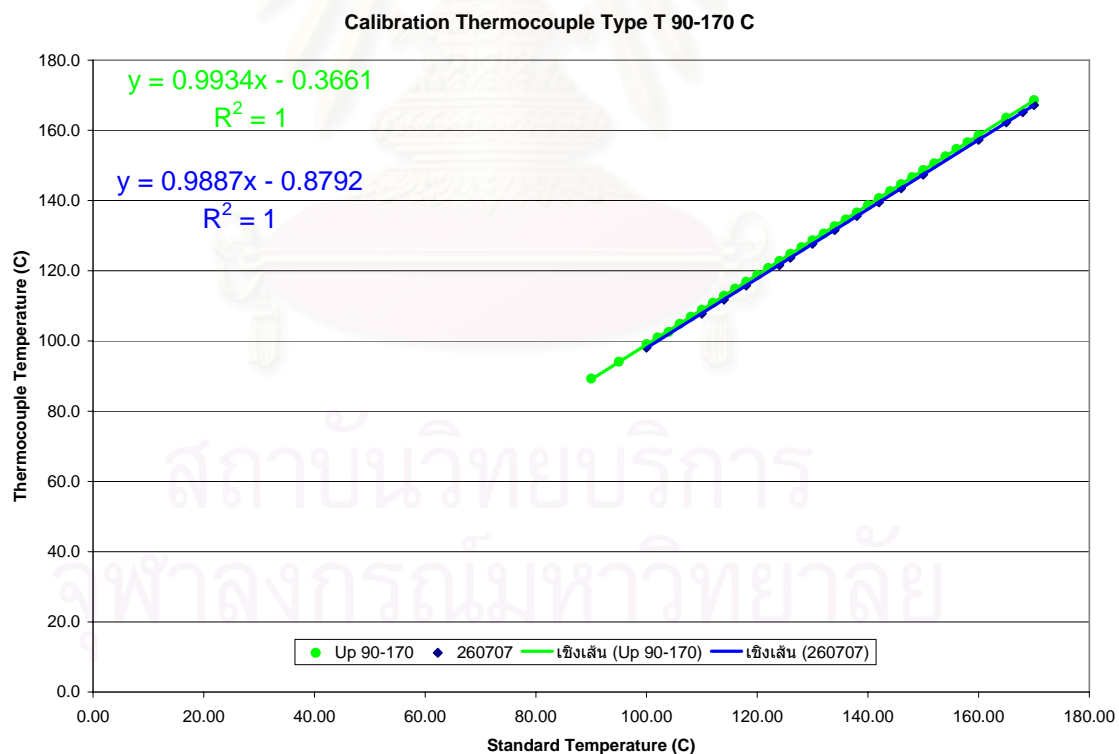


รูปที่ 2.16 คุณหมุมิของเจ็ตขณะทำการฉีด Smoke fluid

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

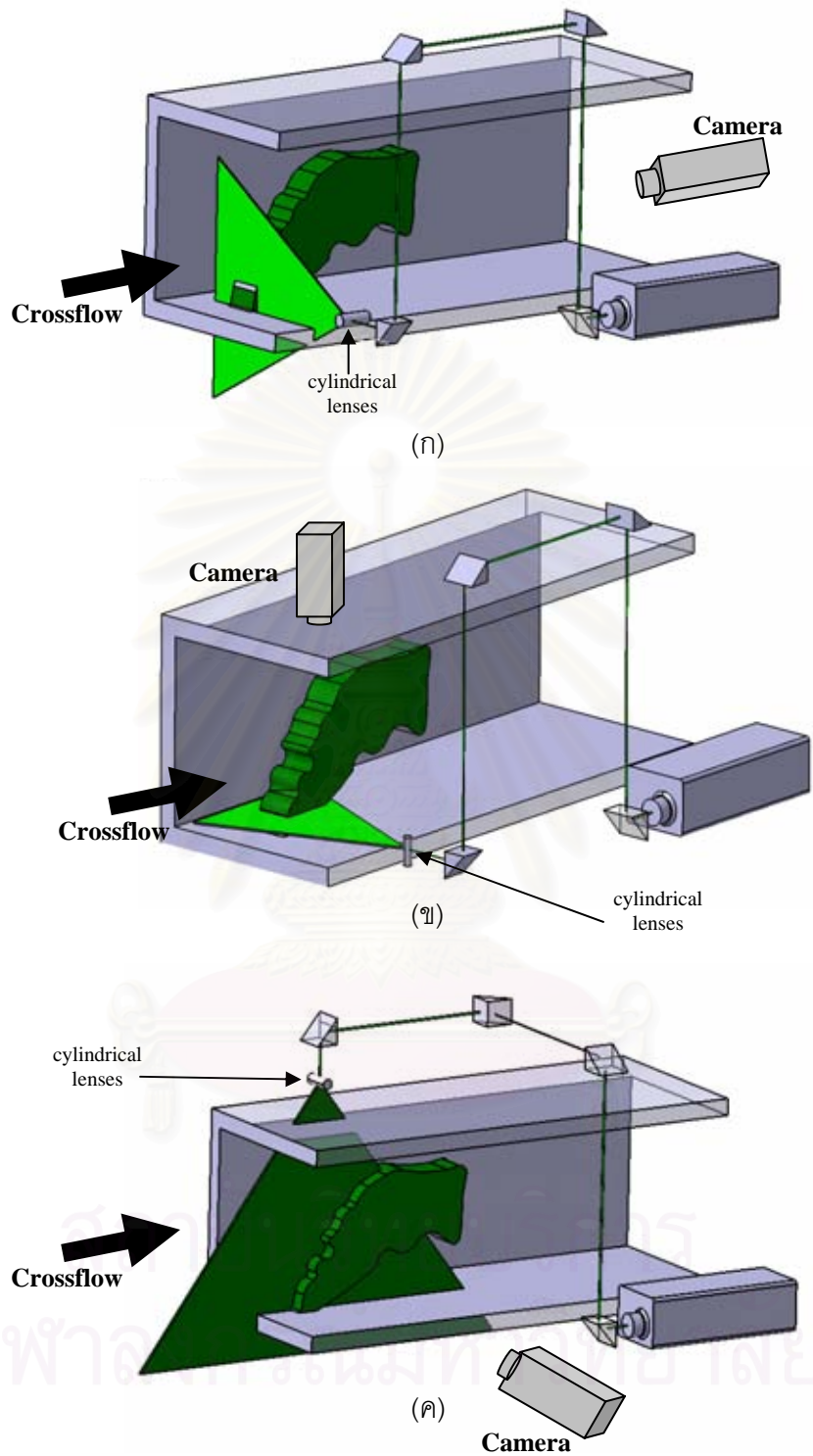


รูปที่ 2.18 ลักษณะการวัดสภาวะเริ่มต้นที่ปากเจ็ท (ก) ตามแนว  $z'$  (ข) ตามแนว  $x'$

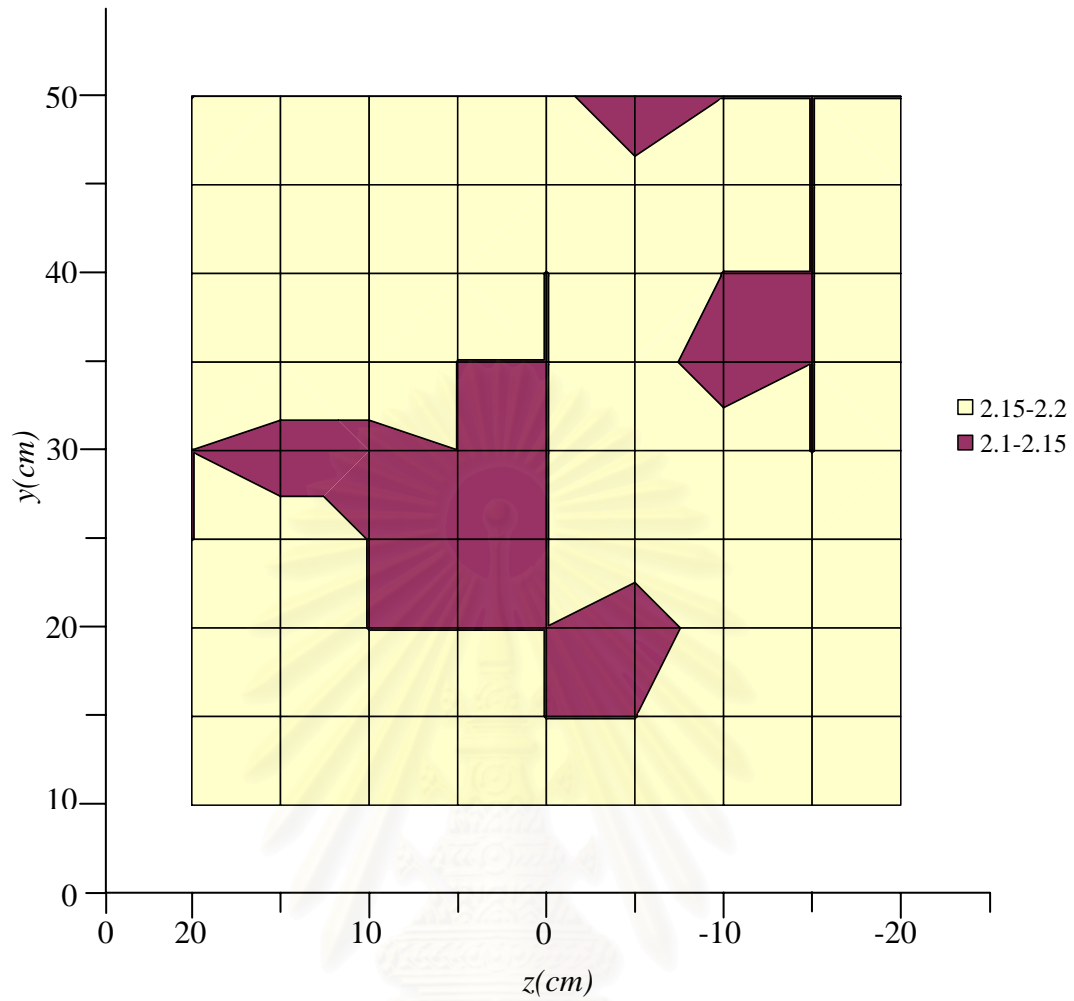


รูปที่ 2.19 ผลการสอบเทียบ Thermocouple เทียบกับอุปกรณ์มาตรฐานคือ Drywell Calibrator



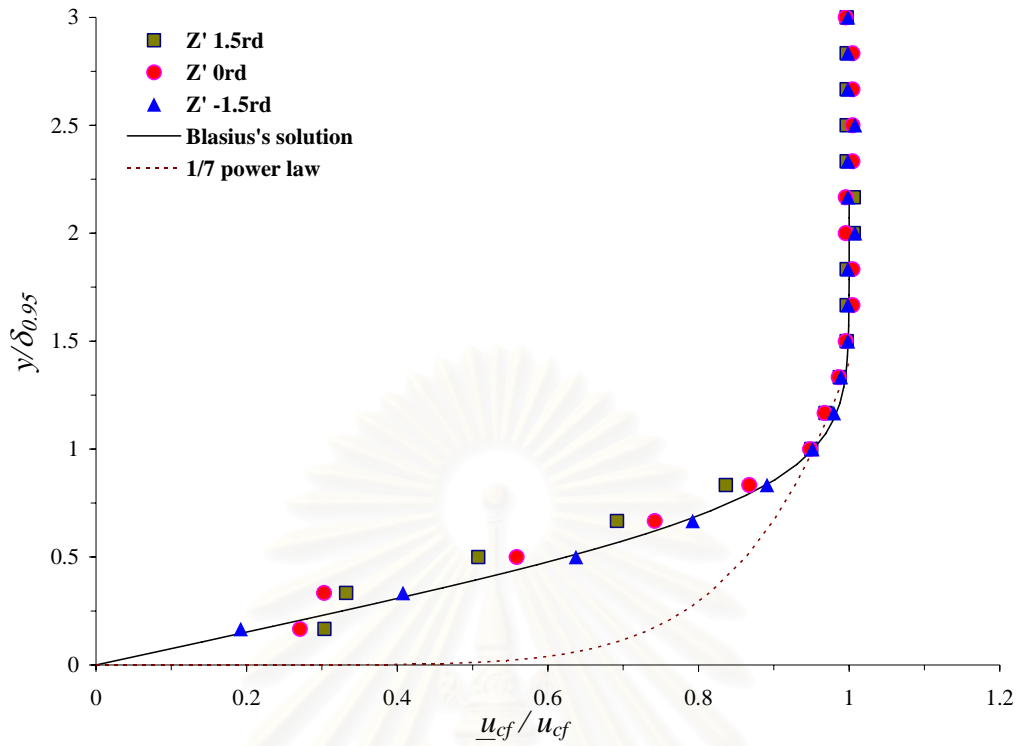


รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการวางชุดปริซึม เลนส์ทรงกระบอกและกล้องบันทึกภาพ สำหรับการทดลอง (ก) End view (ข) Top view และ (ค) Side view

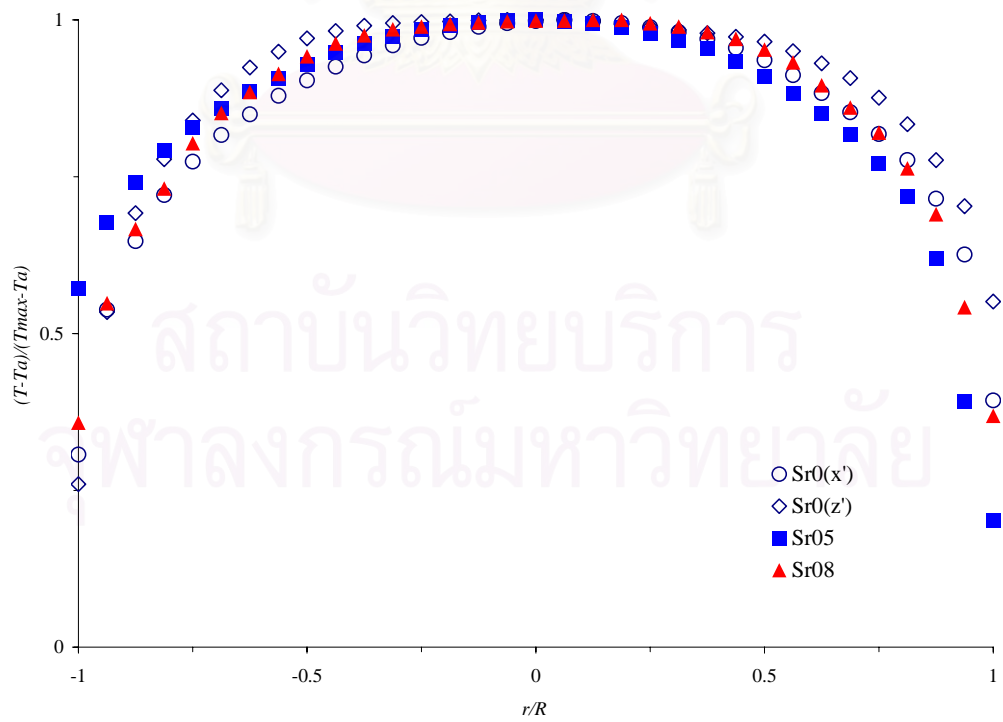


รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของความเร็วจนเฉลี่ยตามแนวแกน  $x(u)$  ของกระแสมขวาง  
ที่  $x = -15$  cm ของบริเวณที่ทำการศึกษา (3rdx3rd)

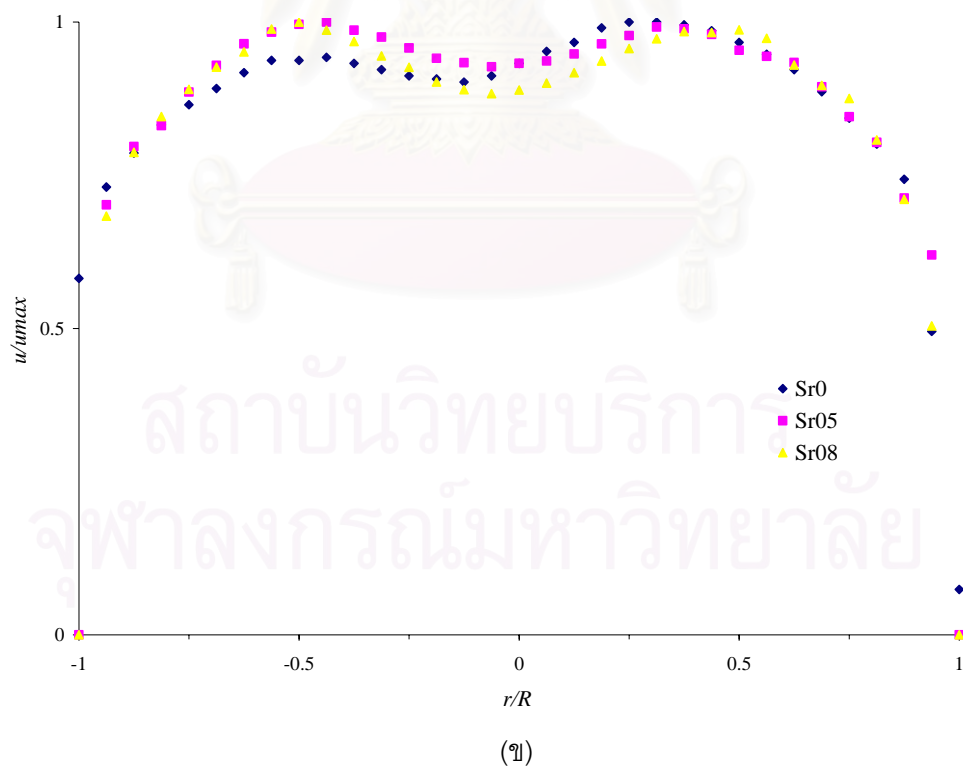
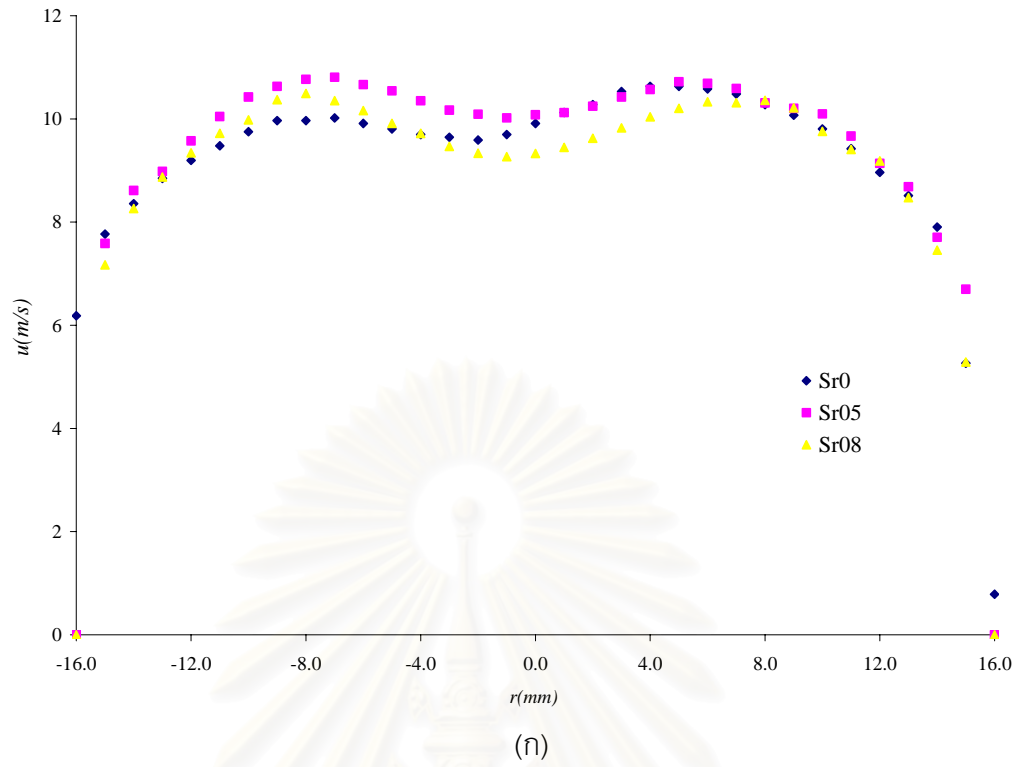
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 รูปร่างของชั้นขอบเขต (Boundary layer ;  $\bar{u}_{cf} / u_{cf}$ ,  $u_{cf} = 2.16$  m/s) ที่  $(x,z) = (-0.5rd, 1.5rd), (-0.5rd, 0rd), (-0.5rd, -1.5rd)$

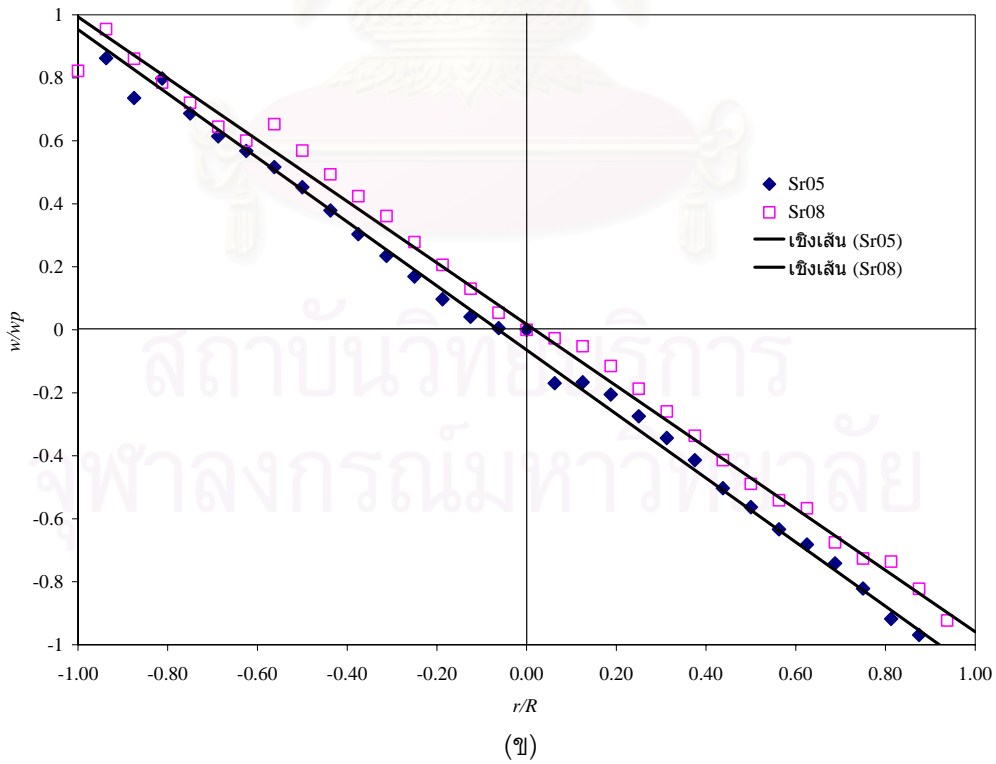
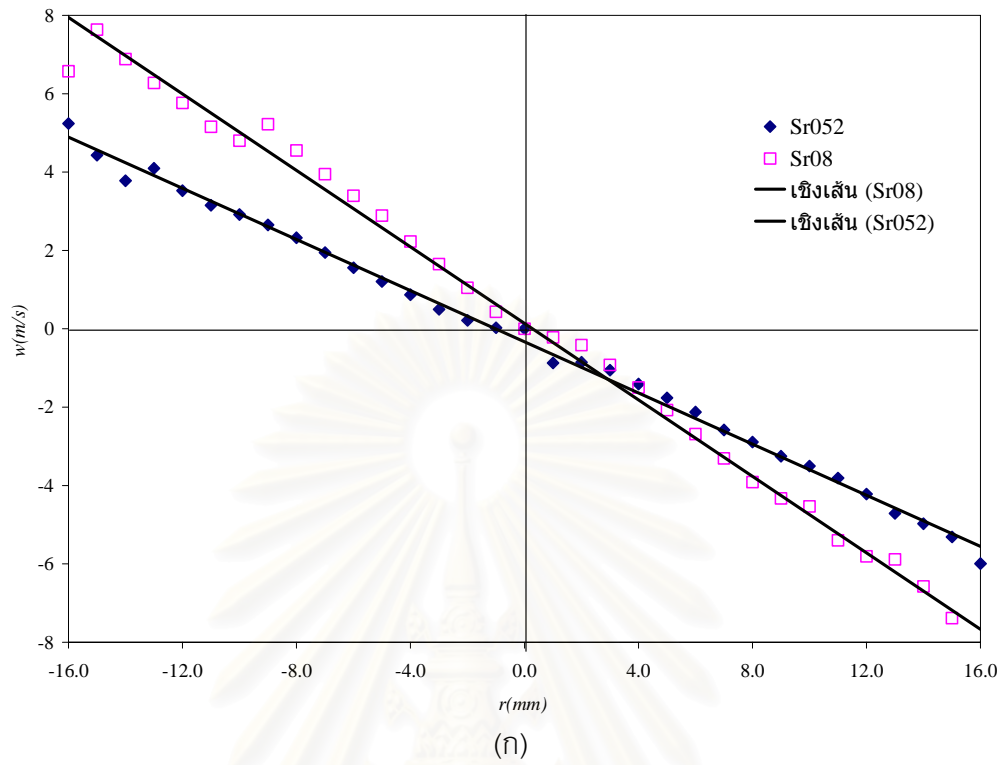


รูปที่ 3.3 รูปร่างการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ปากทางออกของเจ็ต



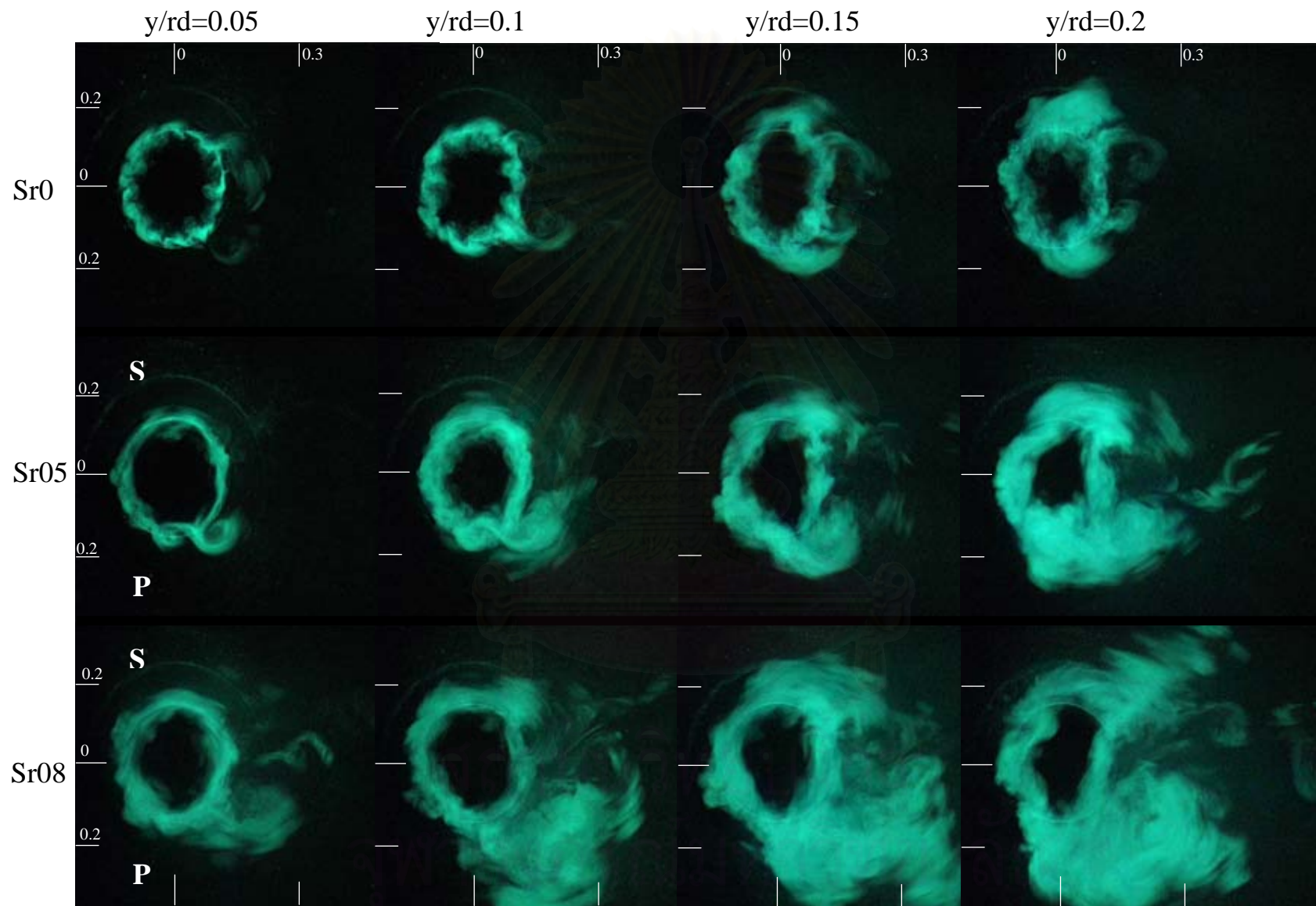
รูปที่ 3.4 รูปร่างของความเร็วในแนวแกนของเจ็ตอากาศที่ปากทางออกของเจ็ต

(ก)  $u$  (ข)  $u/u_{max}$

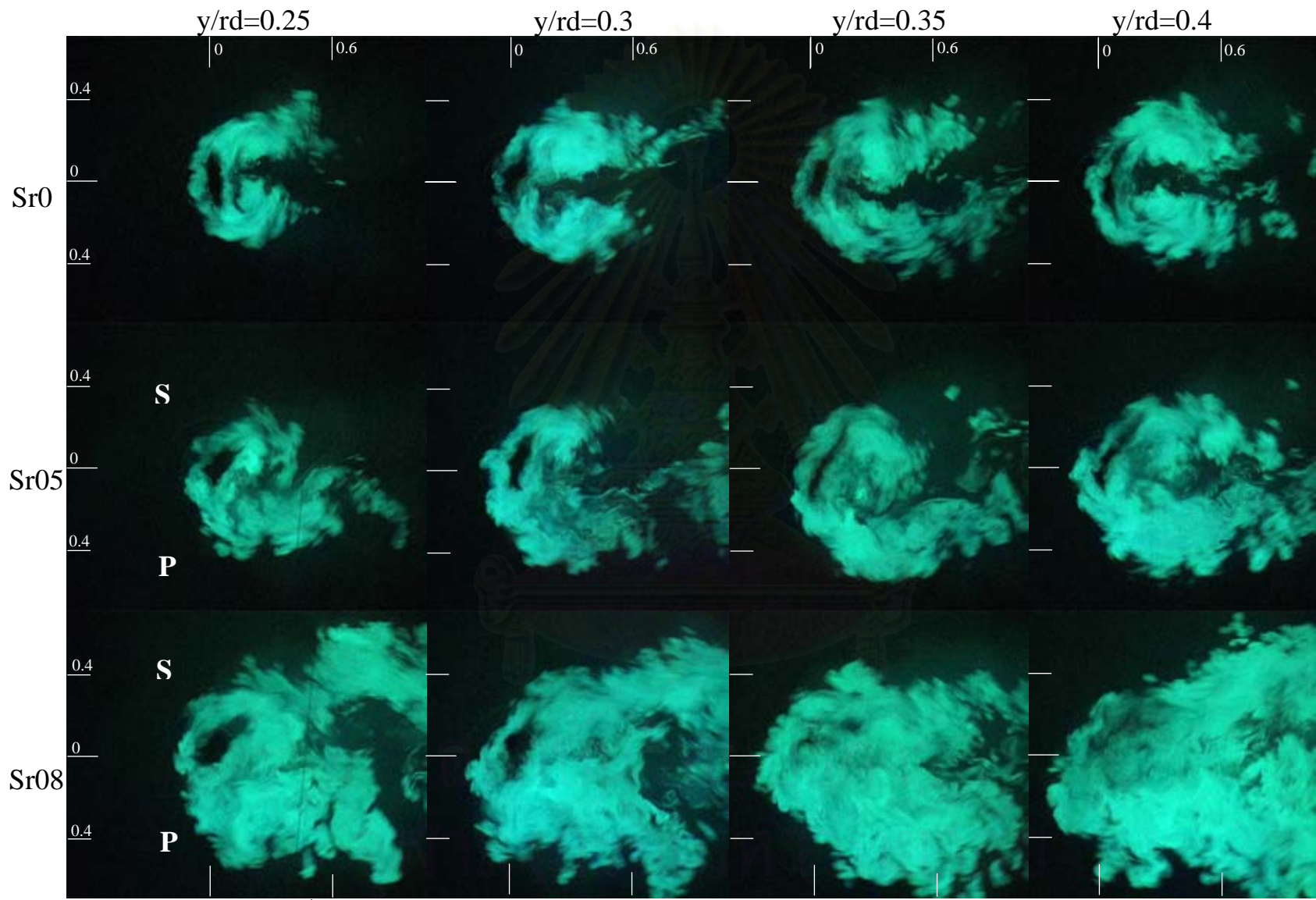


รูปที่ 3.5 รูปร่างของความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ตอากาศที่ปากทางออกของเจ็ต  
(ก)  $w$  (ข)  $w/w_p$



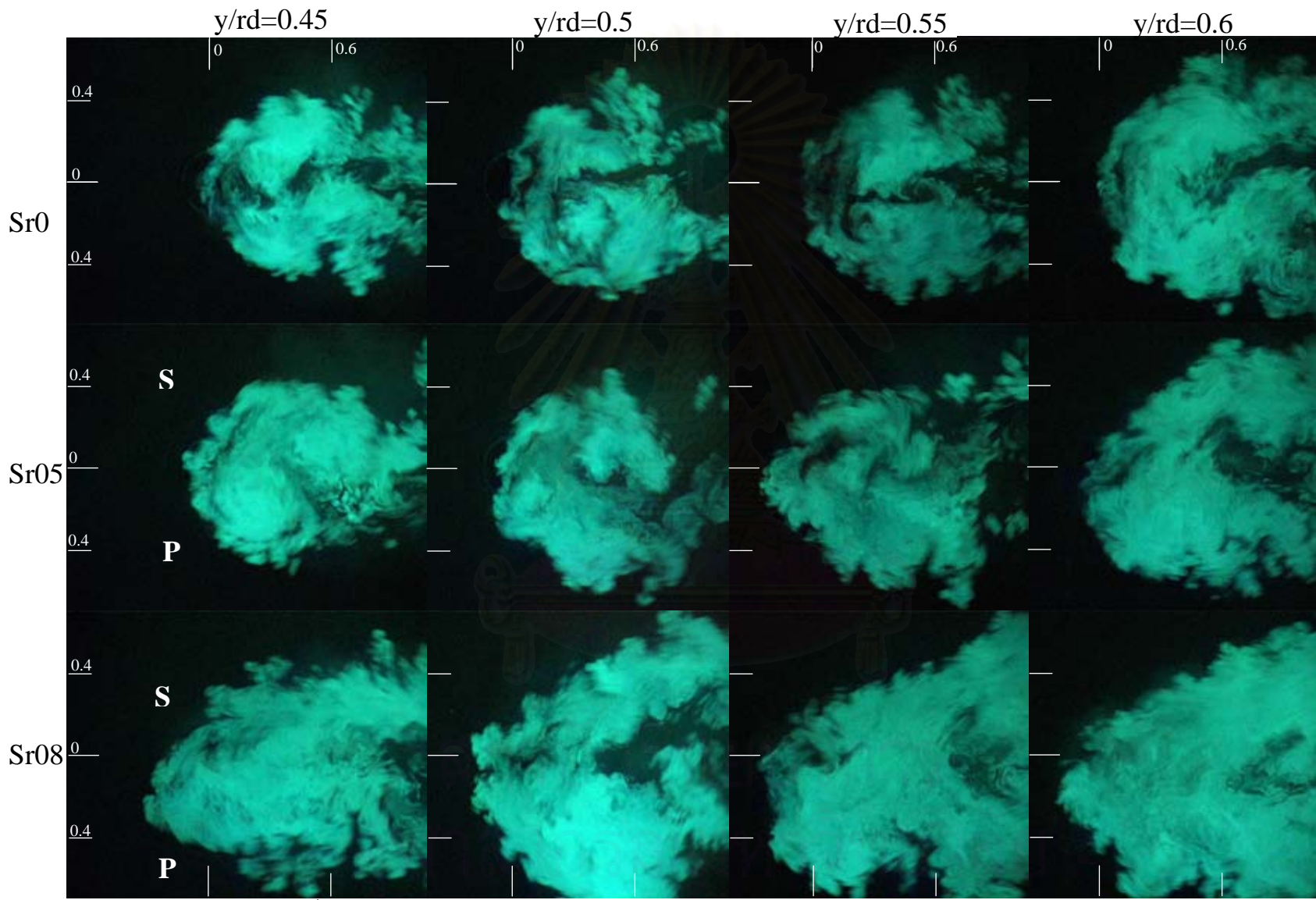


รูปที่ 3.6ก ภาพขณะใดๆทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าต่างตัดได้ๆสำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08

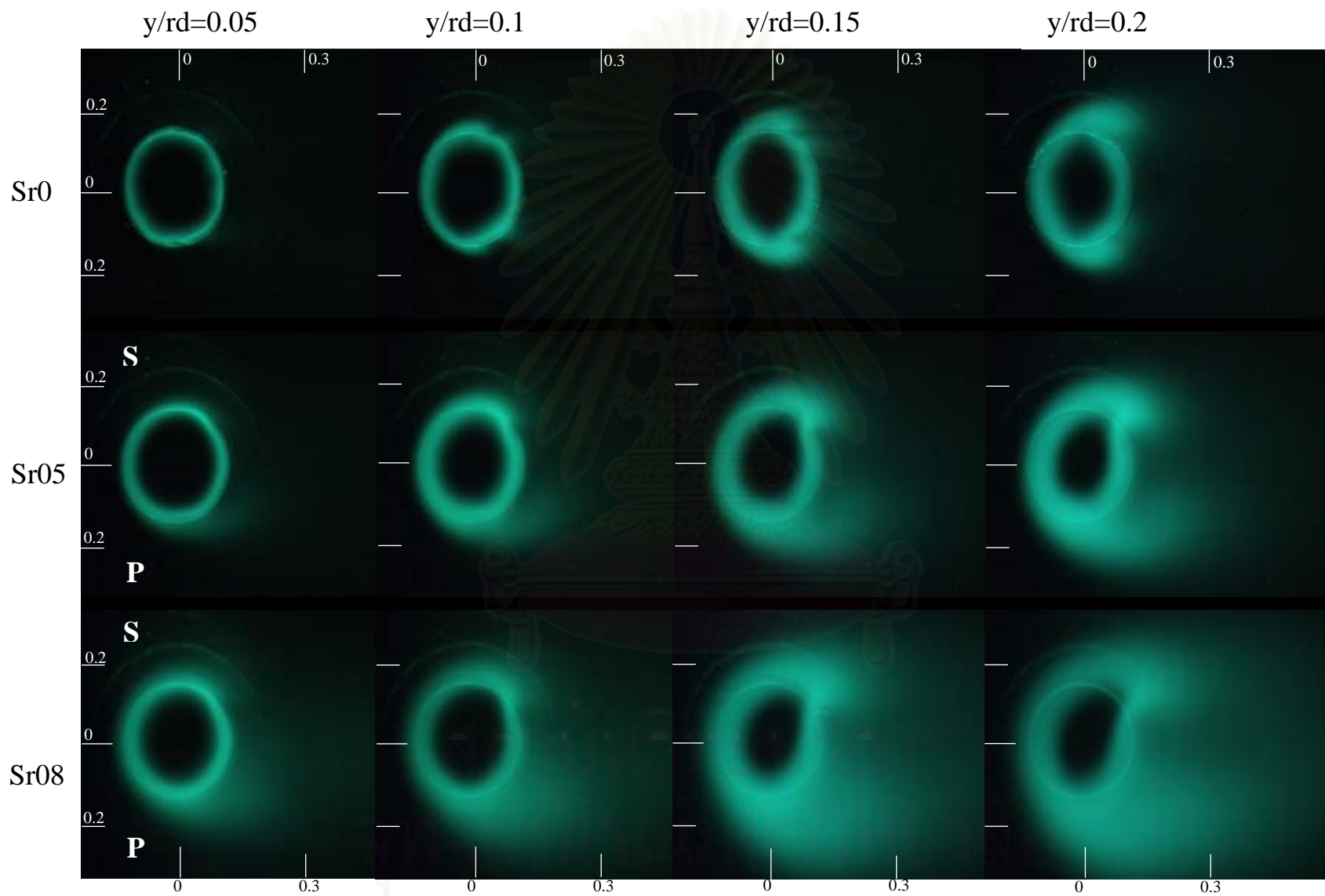


รูปที่ 3.6x ภาพขณะใดๆทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าต่างตัดโตๆสำหรับกรณี  $Sr0$ ,  $Sr05$  และ  $Sr08$

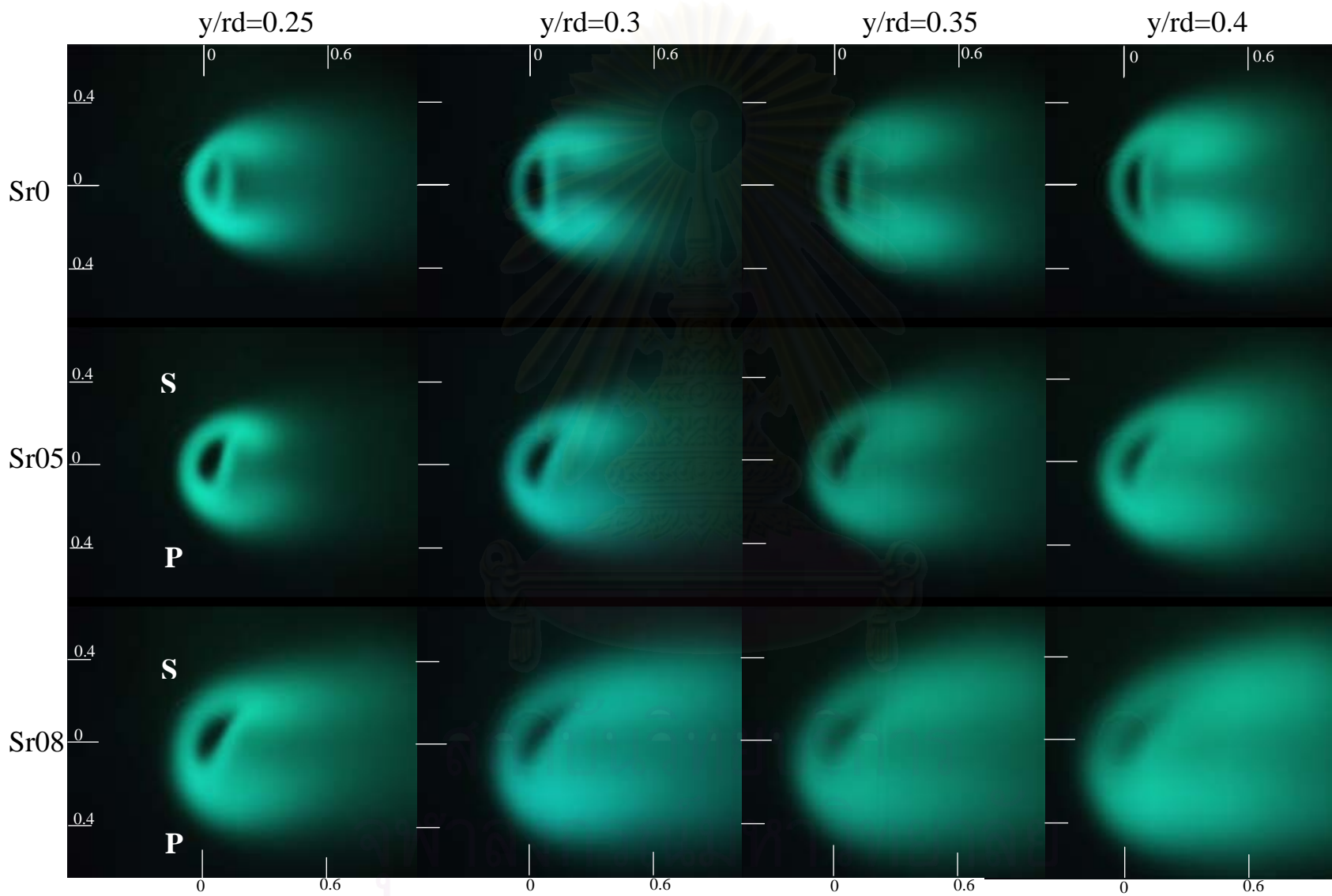




รูปที่ 3.6 ค ภาพขณะใดๆทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08

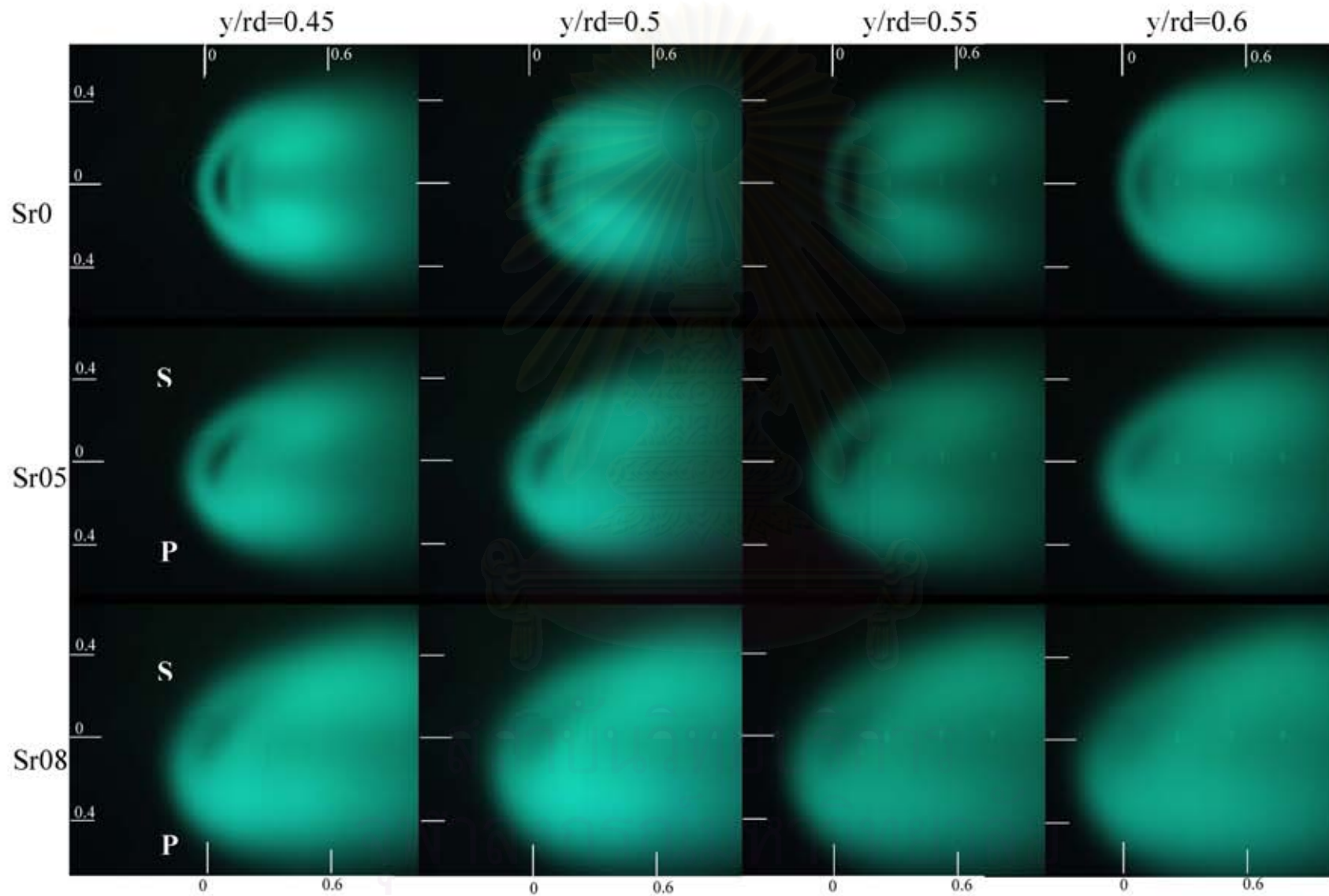


รูปที่ 3.7ก ภาพเฉลี่ยทางด้าน Topview ในแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08

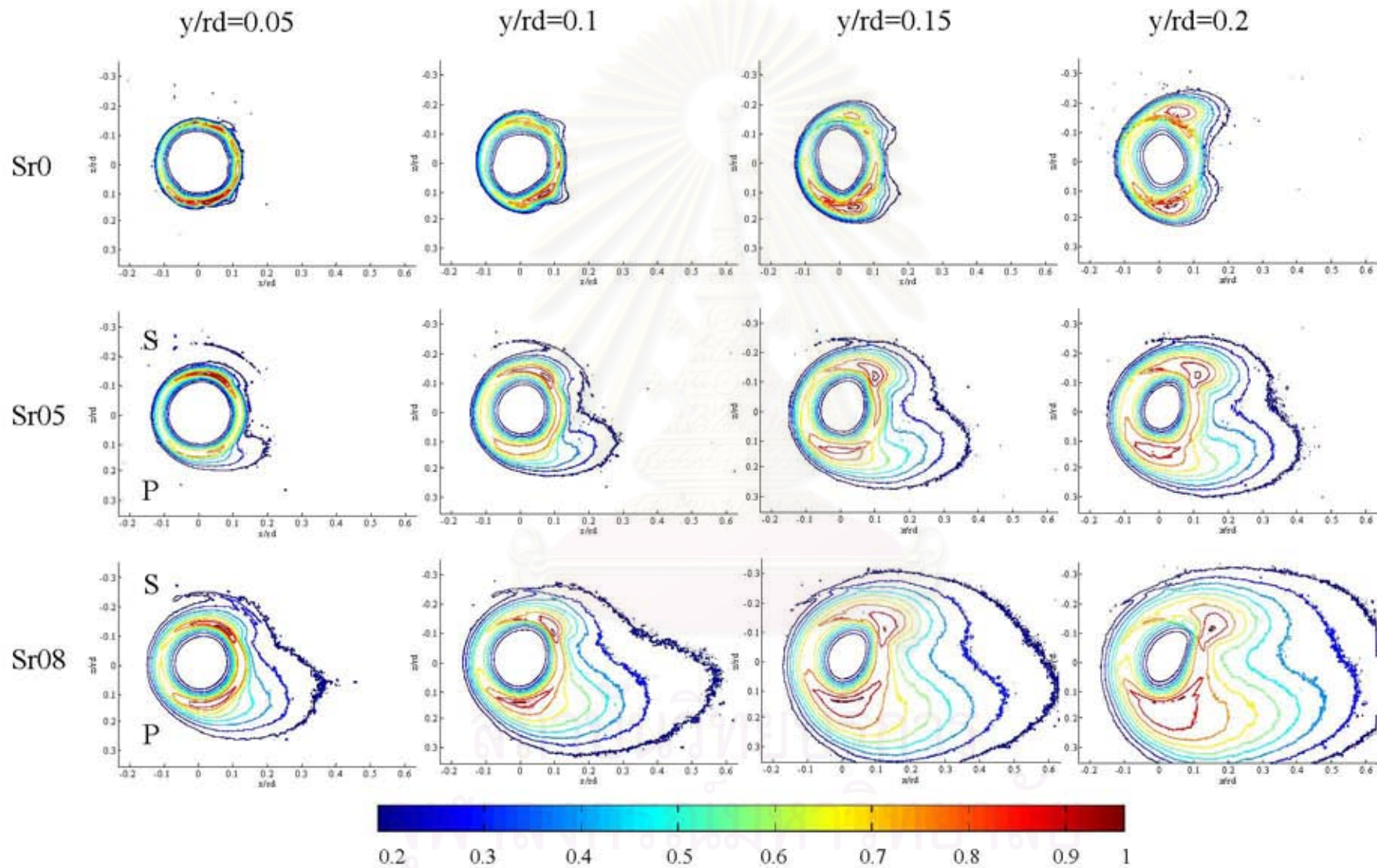


รูปที่ 3.7ข ภาพเฉื่อยทางด้าน Topview ในแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08

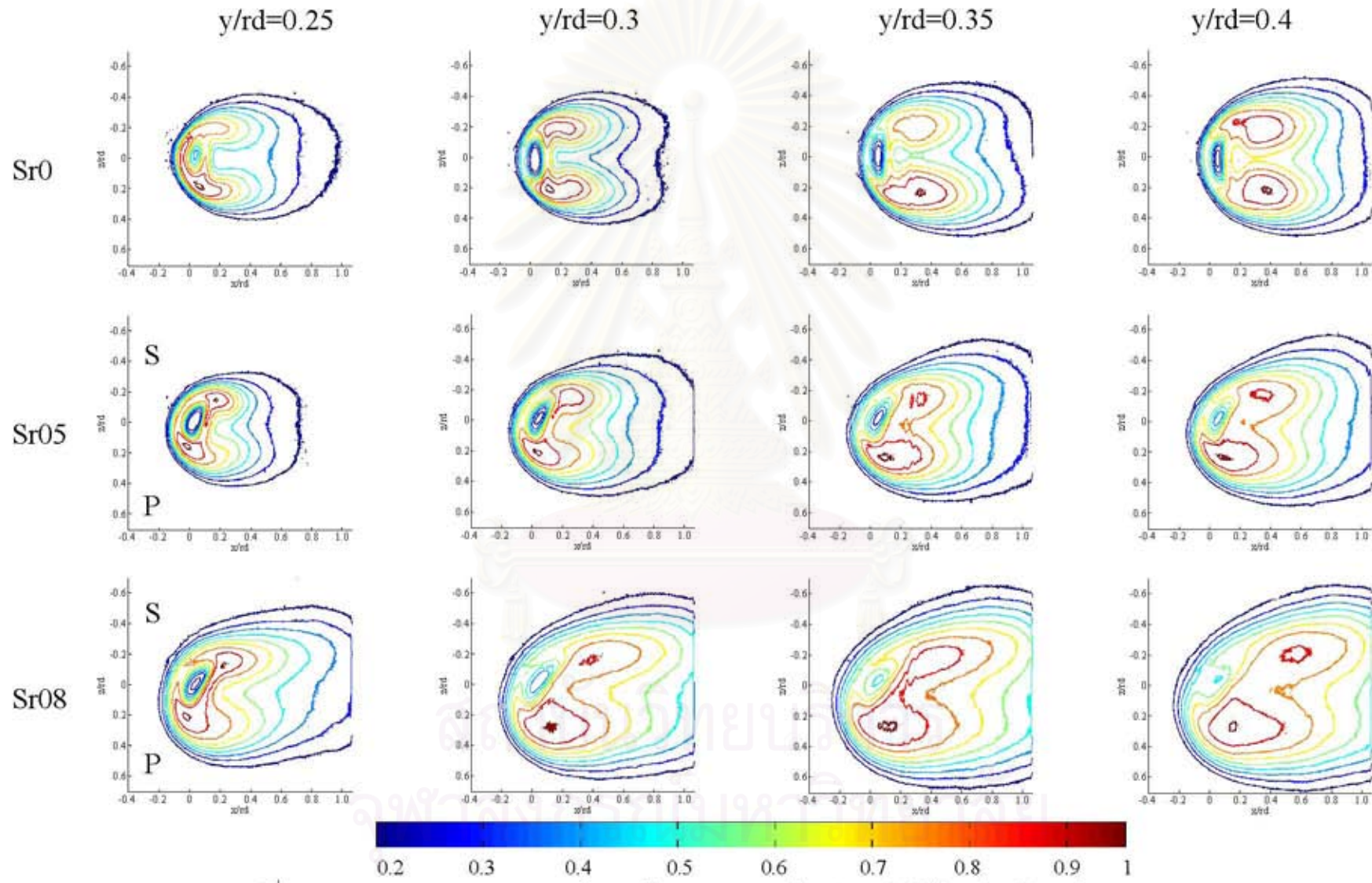




รูปที่ 3.7ค ภาพเฉลี่ยทางด้าน Topview ในแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08



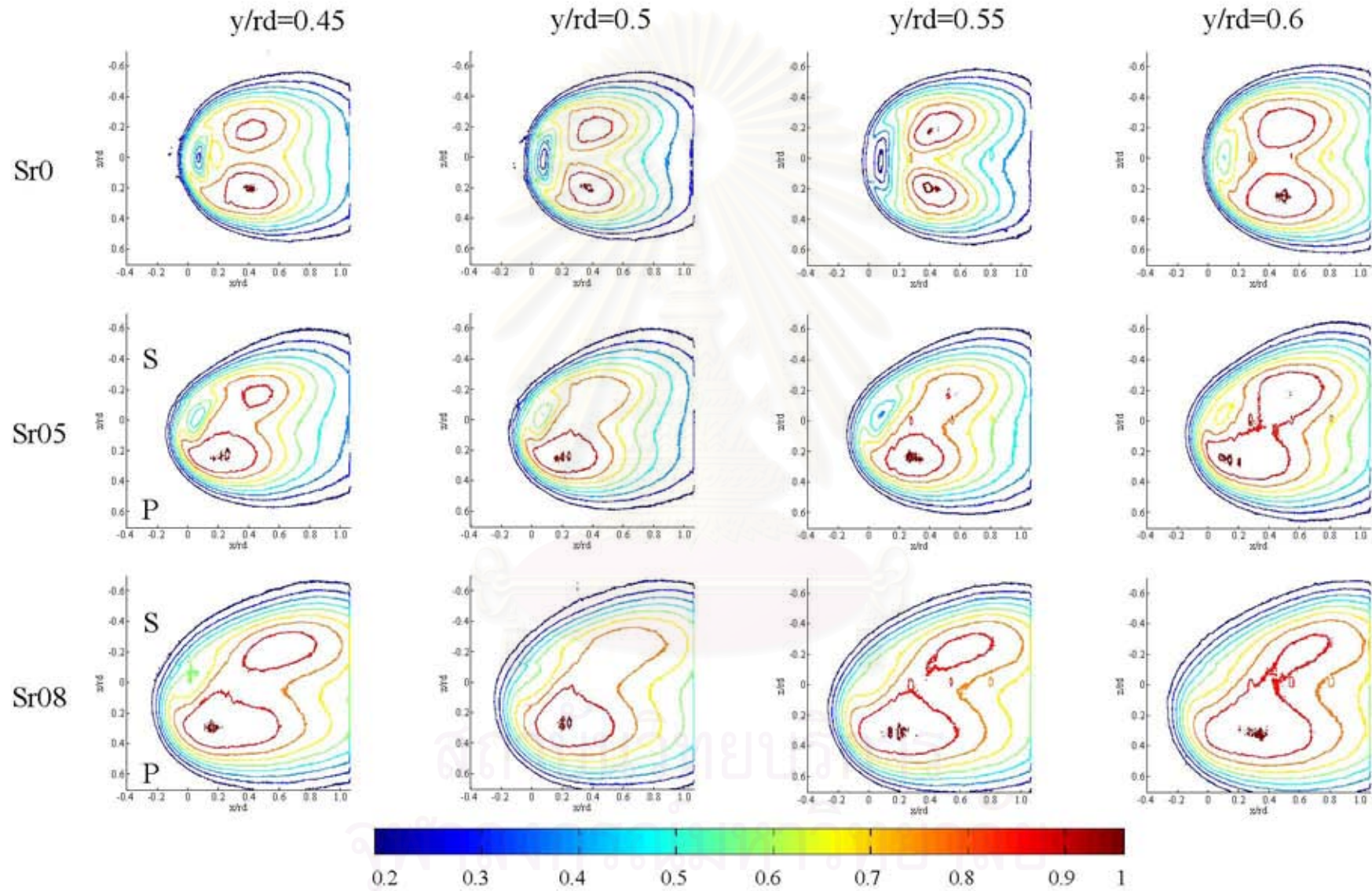
รูปที่ 3.8ก Contour ของภาพเฉลี่ยทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆ สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08



รูปที่ 3.8๗

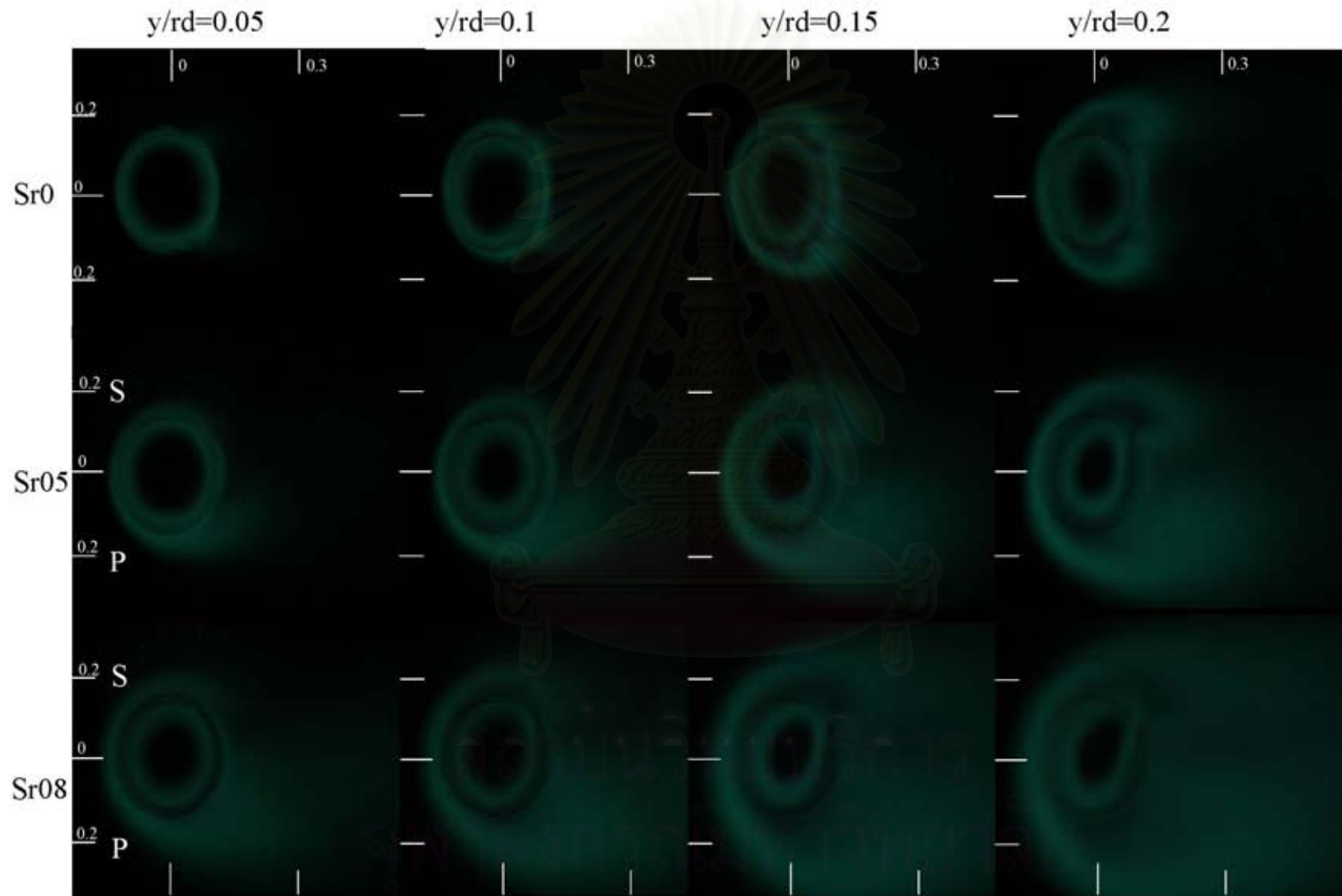
Contour ของภาพเฉลี่ยทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆ สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08





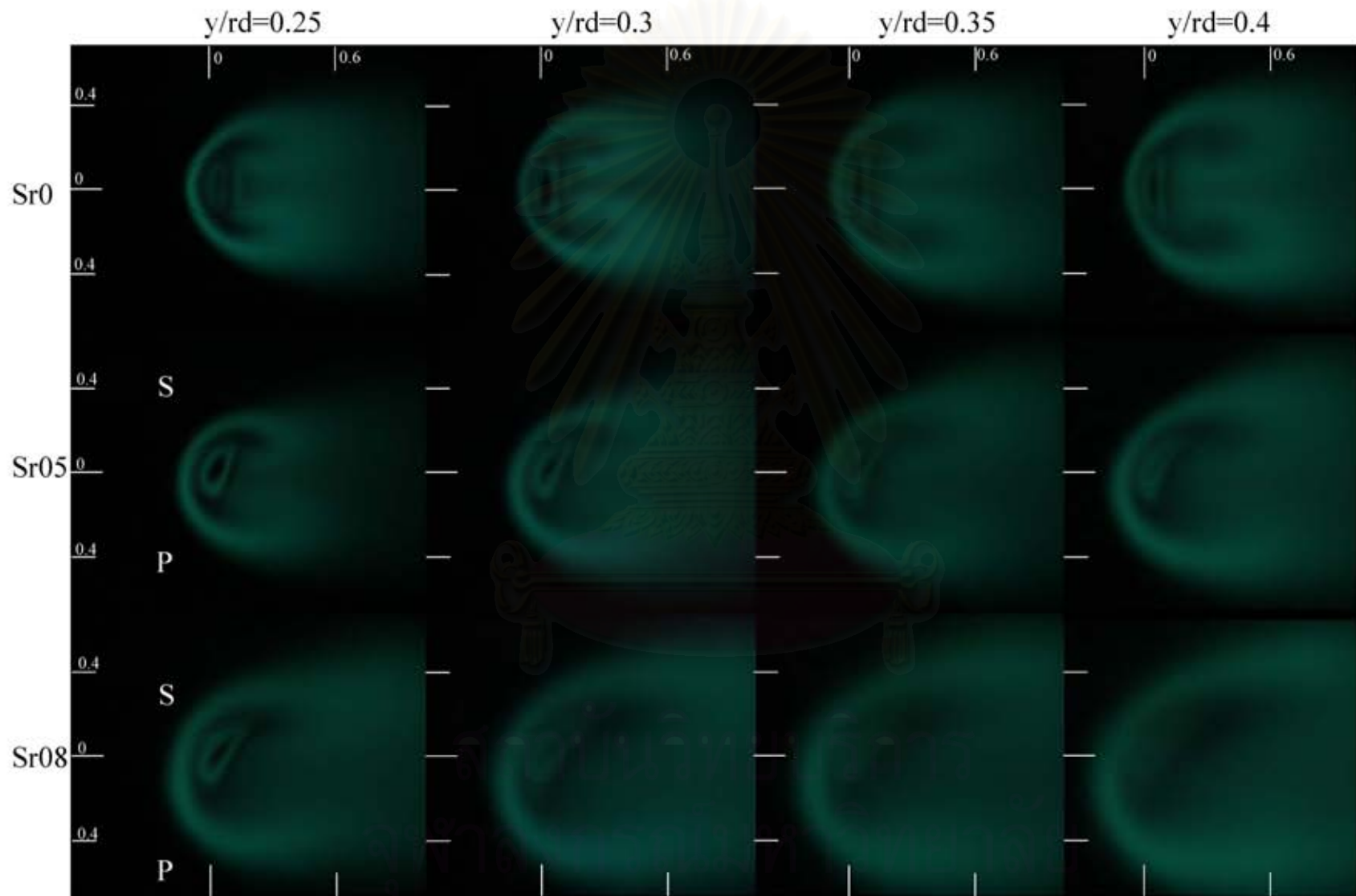
รูปที่ 3.8ค

Contour ของภาพเฉลี่ยทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆ สำหรับกรณี Sr0, Sr5 และ Sr8

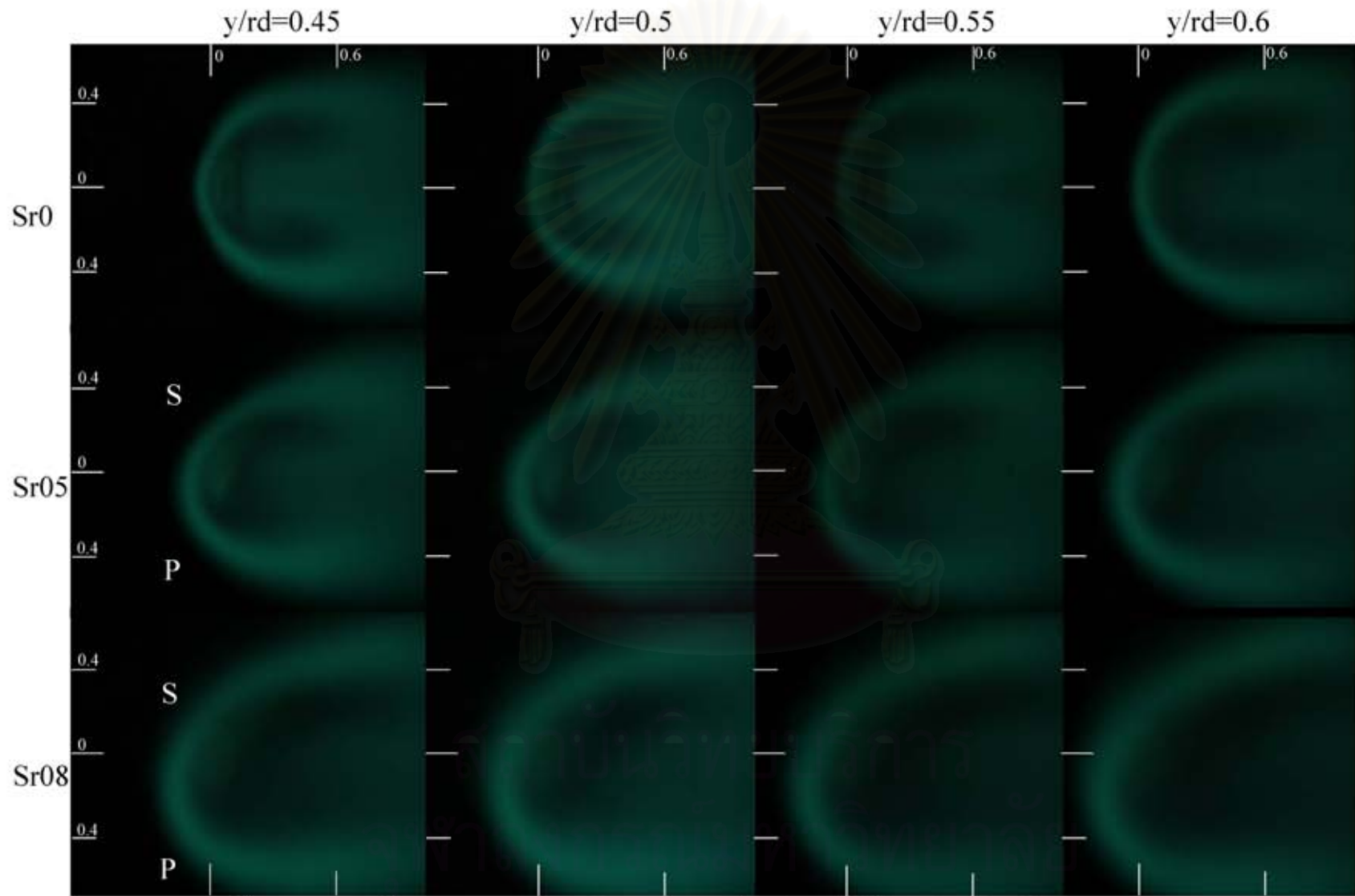


รูปที่ 3.9ก ภาพเขียนบนมาตรฐานทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าต่างใดๆ สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08

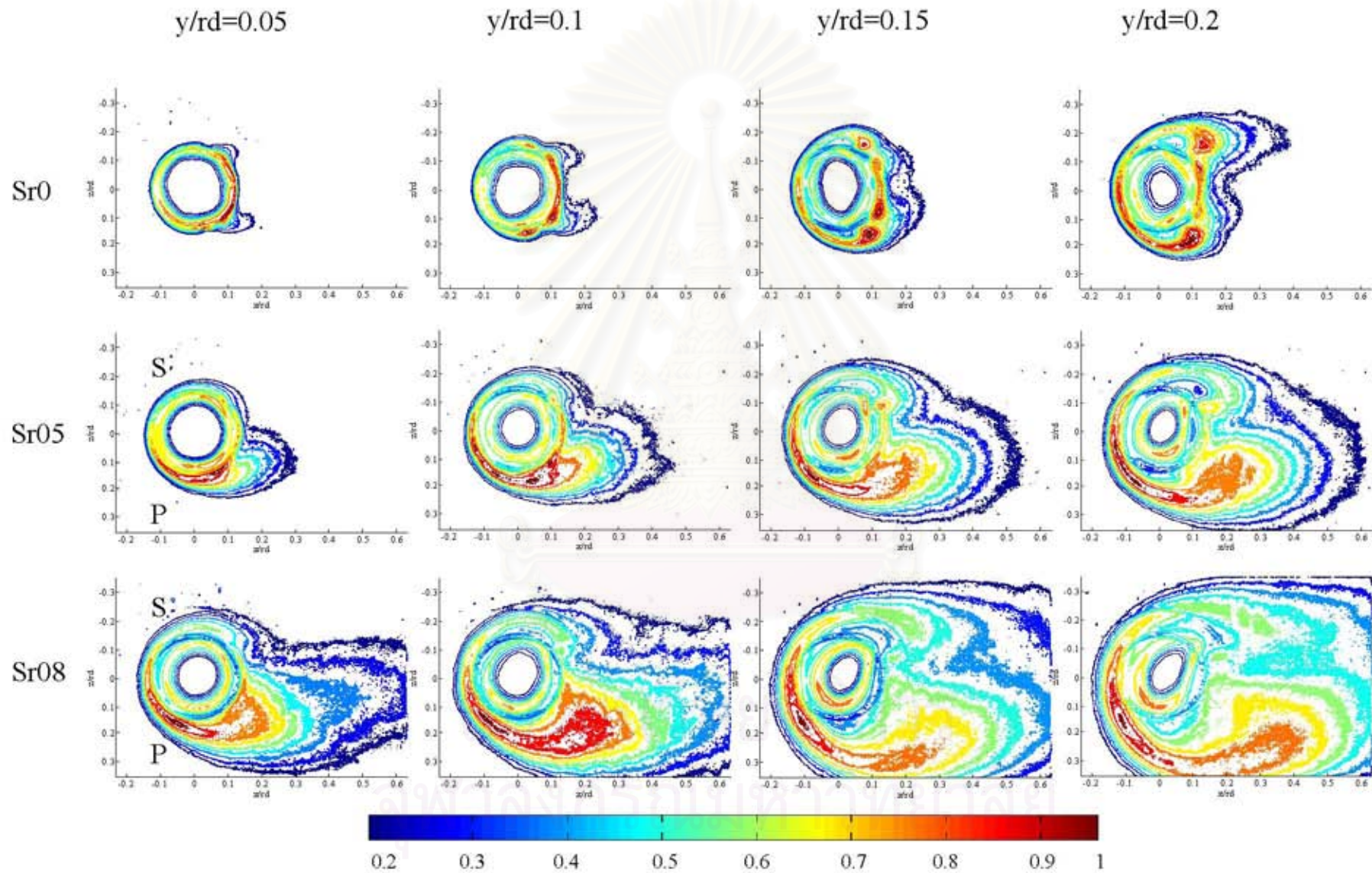




รูปที่ 3.9ข ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆ สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08

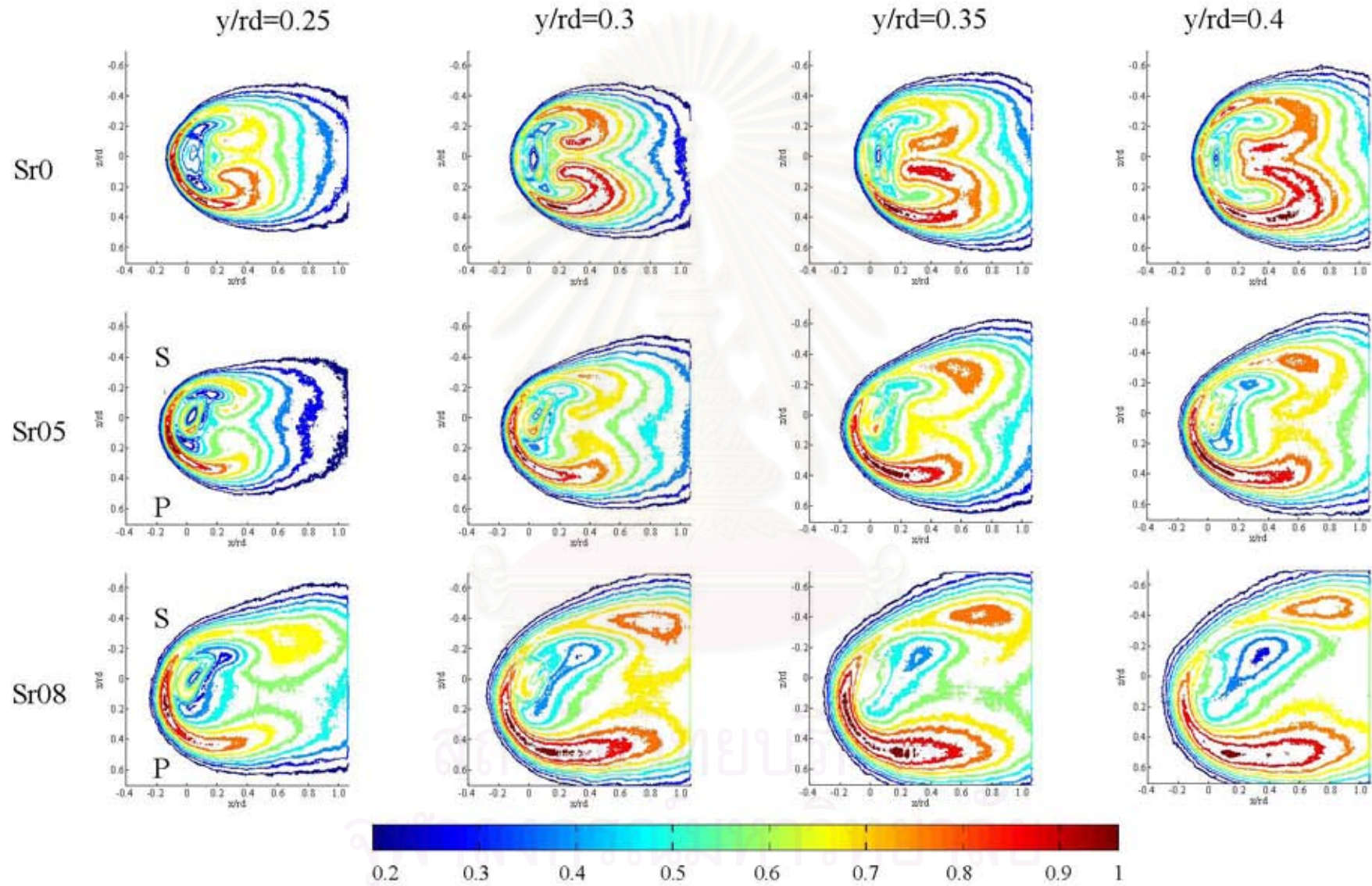


รูปที่ 3.9ค ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆ สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08

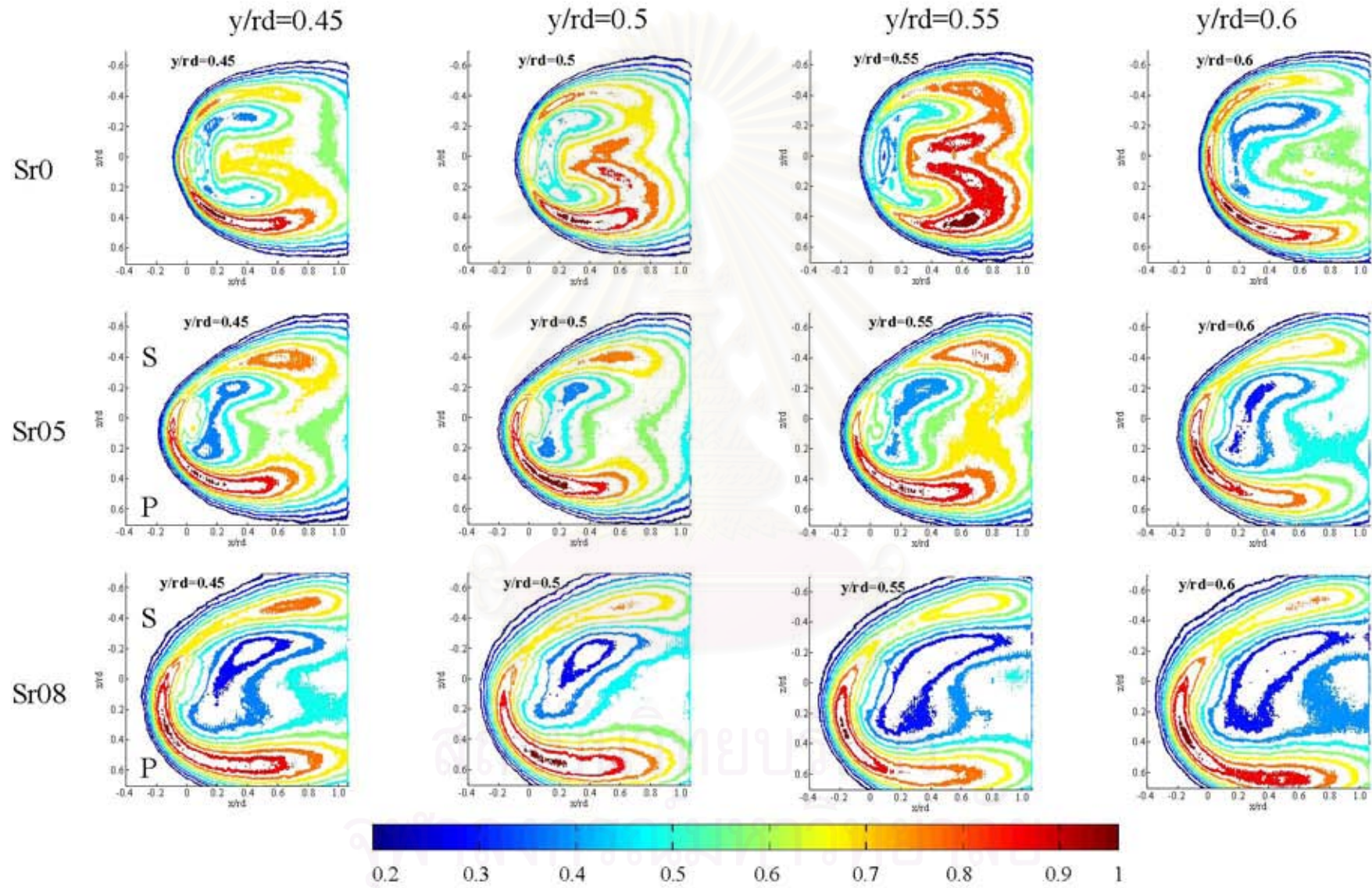


รูปที่ 3.10 ก Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08



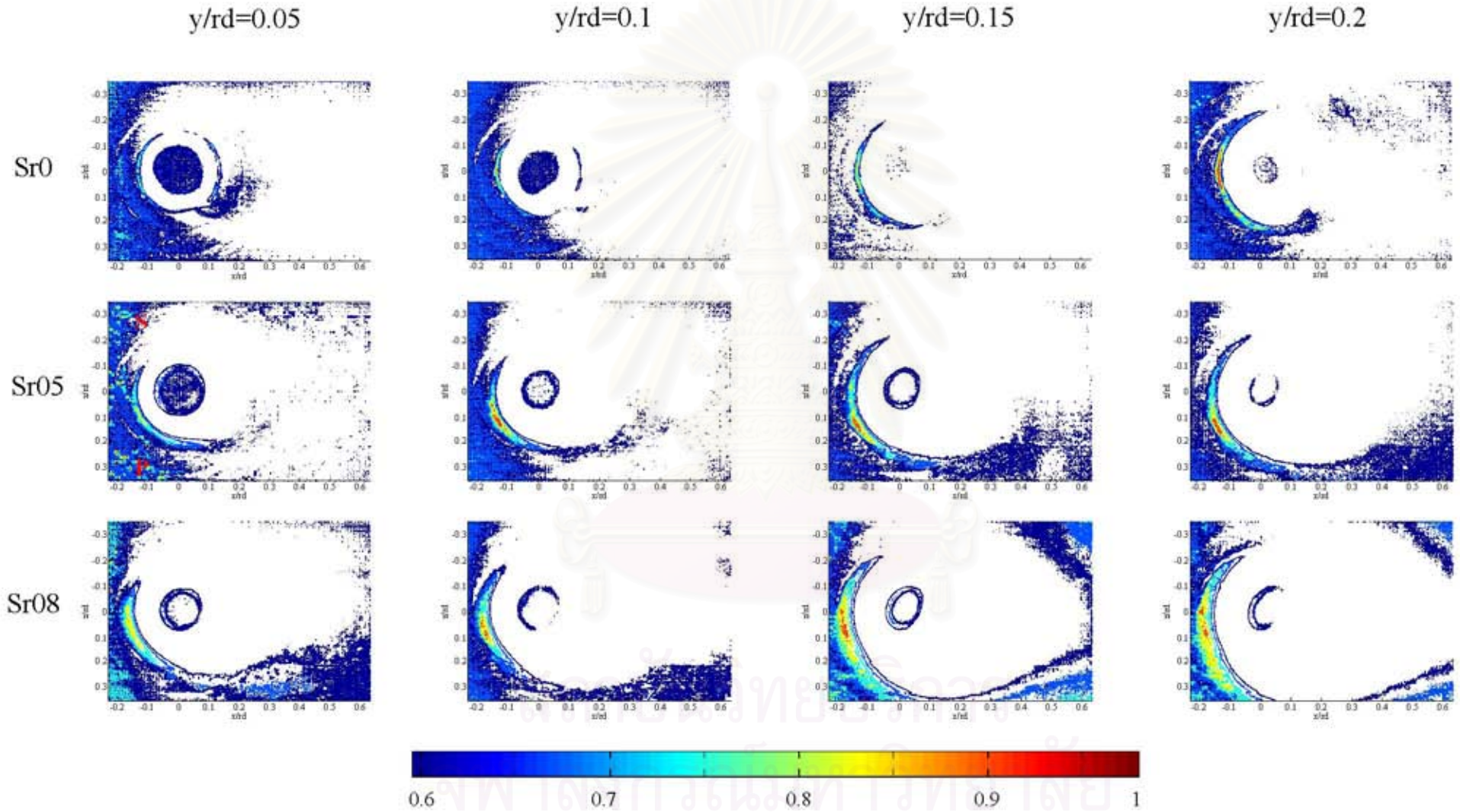


รูปที่ 3.10 ข Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆ สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08

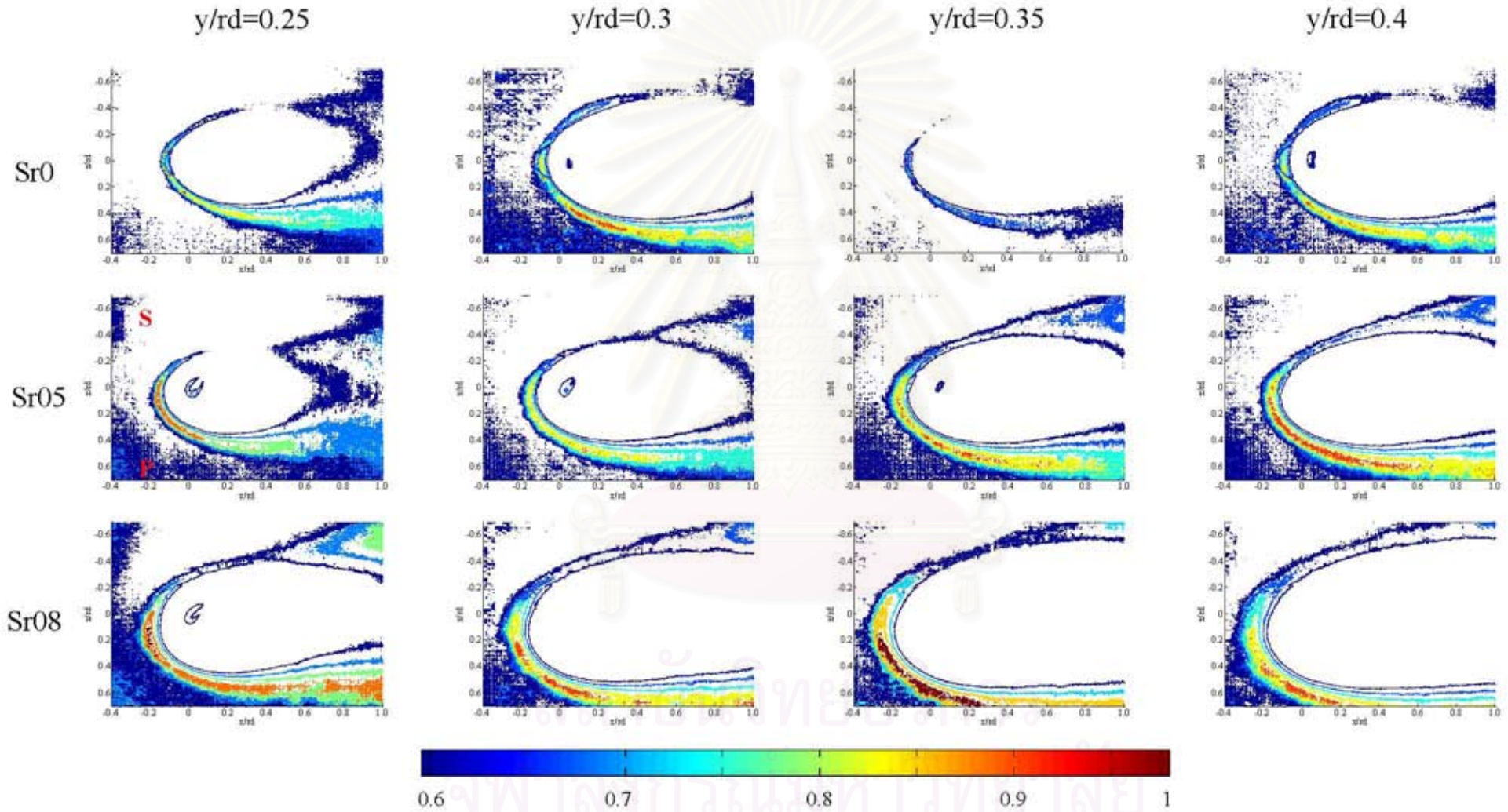


รูปที่ 3.10ค Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าต่างใดๆสำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08



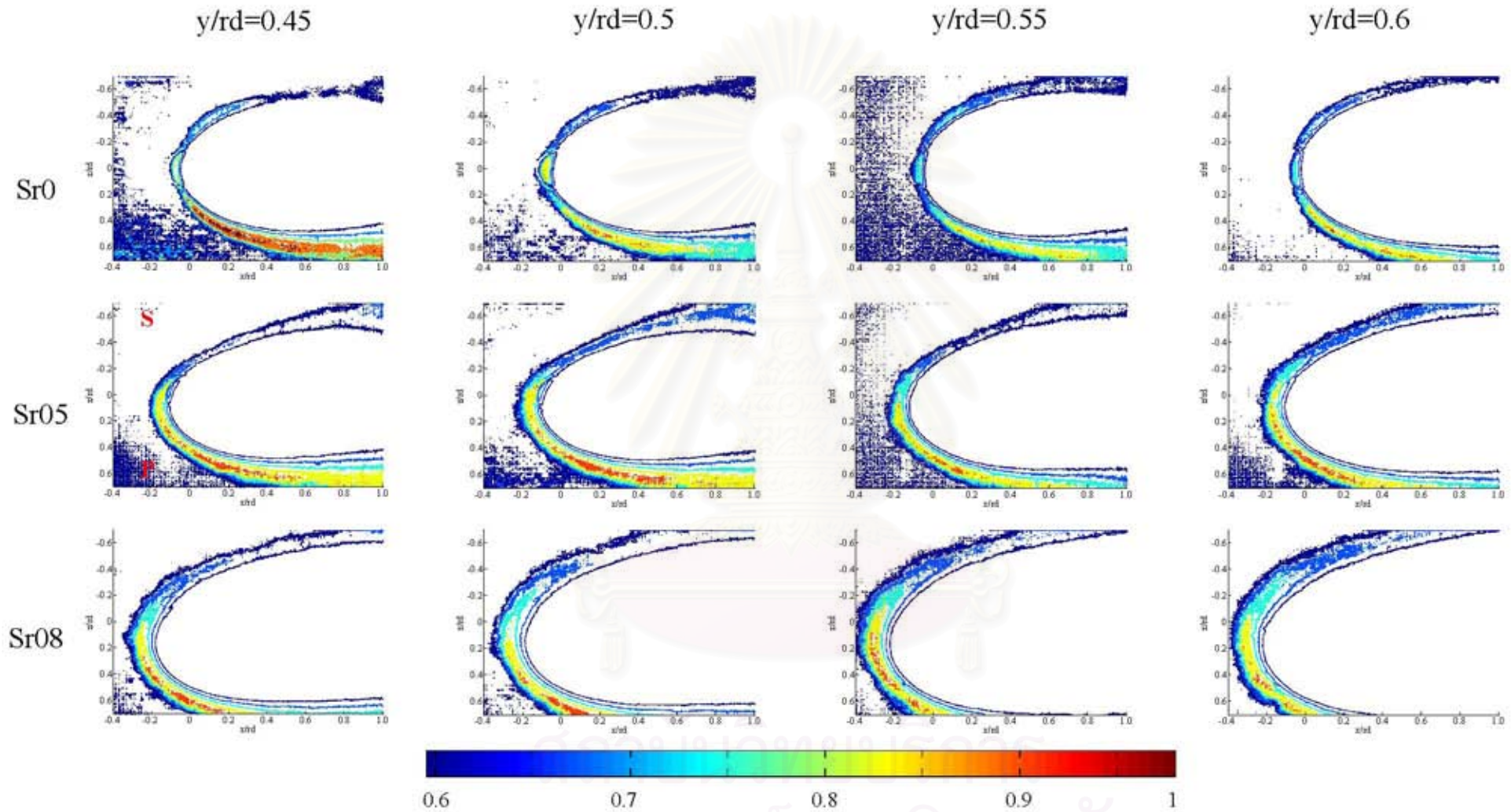


รูปที่ 3.11ก Contour ของภาพ Turbulent intensity ทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆ สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08

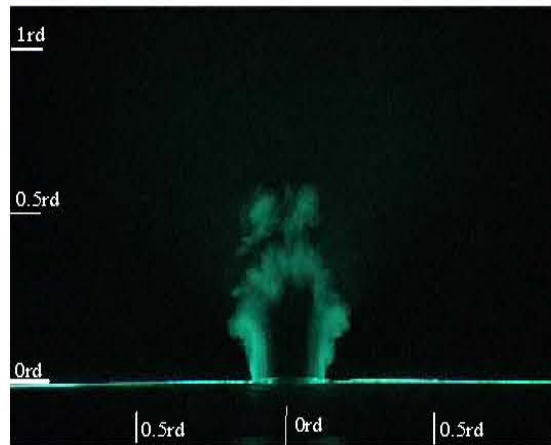


รูปที่ 3.11 ข Contour ของภาพ Turbulent intensity ทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆ สำหรับกรณี Sr0, Sr05 และ Sr08

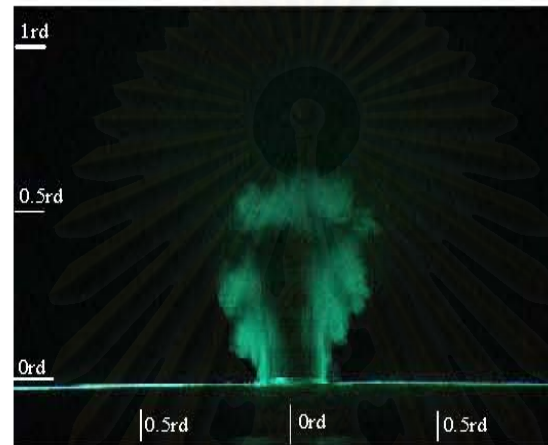




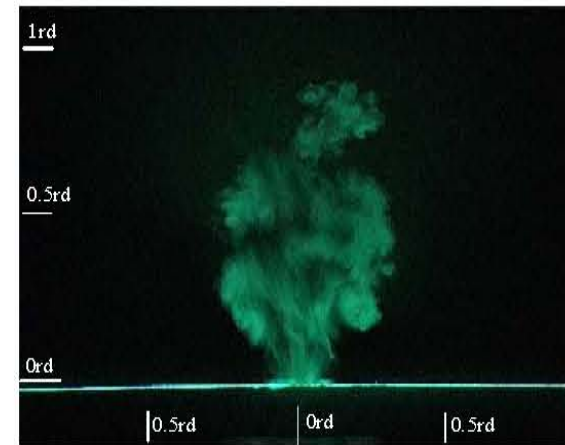
รูปที่ 3.11ค Contour ของภาพ Turbulent intensity ทางด้าน Top view ในแต่ละหน้าตัดใดๆ สำหรับกรณี  $Sr0$ ,  $Sr05$  และ  $Sr08$



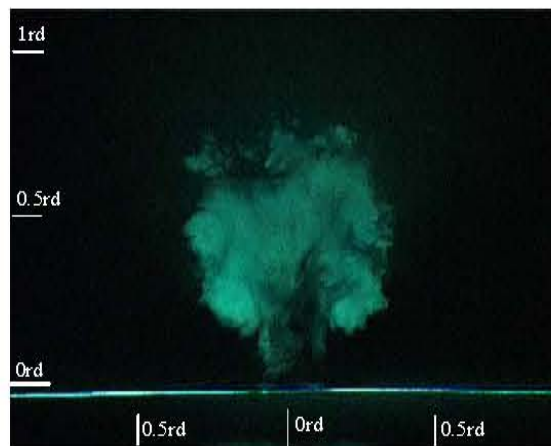
(ก) 0rd



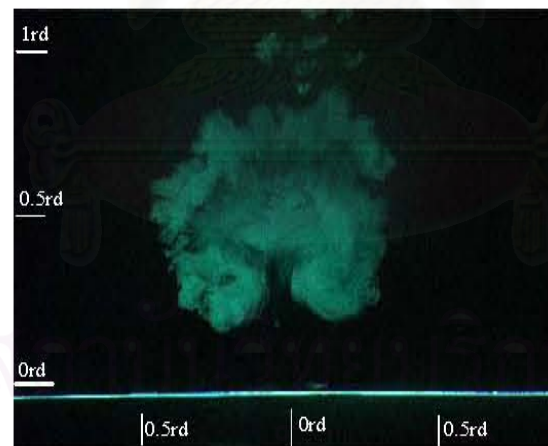
(ข) 0.06rd



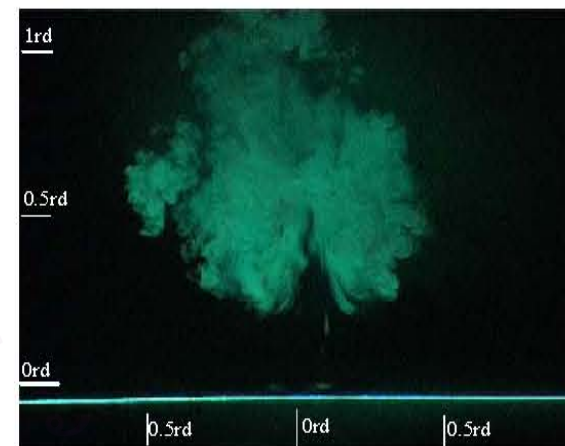
(ค) 0.12rd



(ง) 0.19rd

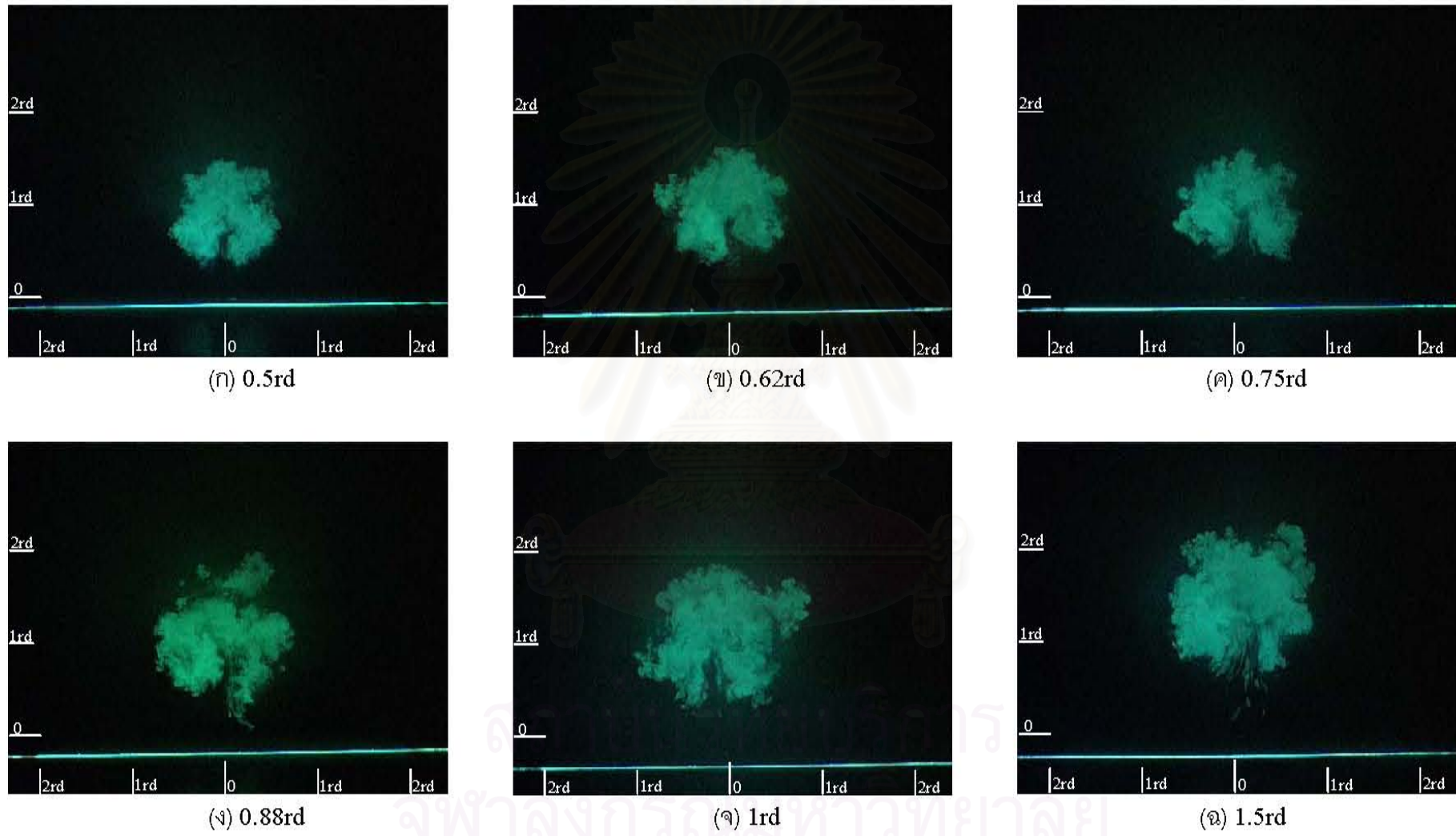


(จ) 0.25rd



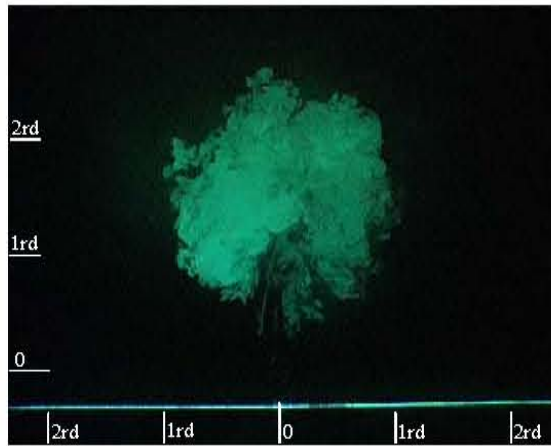
(ฉ) 0.38rd

รูปที่ 3.12.1 ภาพขณะใด ๆ ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr0

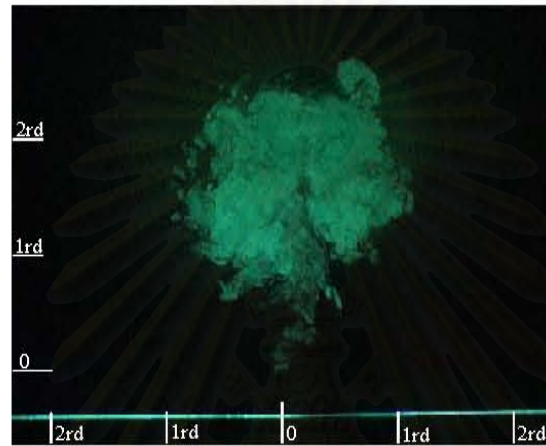


รูปที่ 3.12.2 ภาพขณะใดๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr0

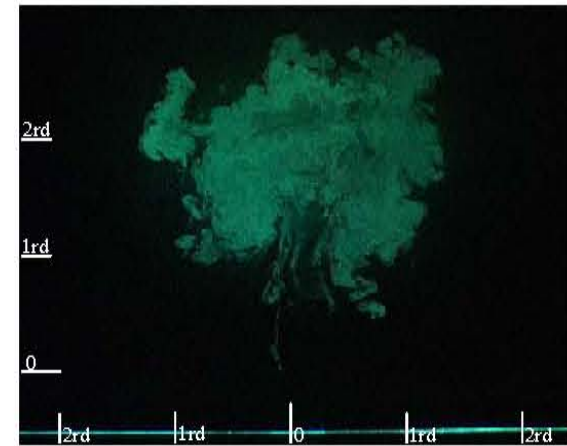




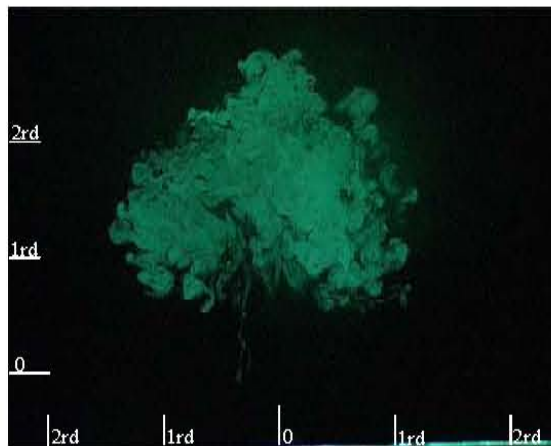
(ก) 2rd



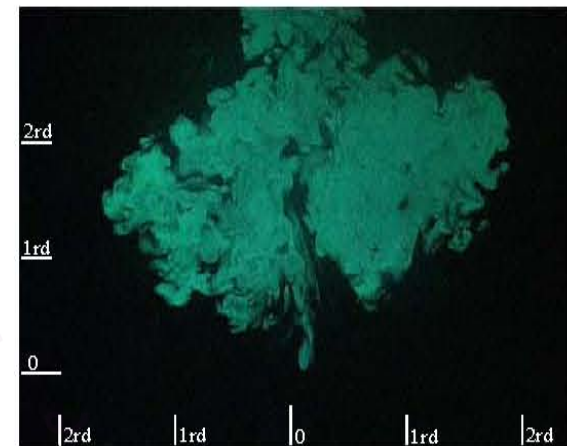
(ข) 2.5rd



(ค) 3rd

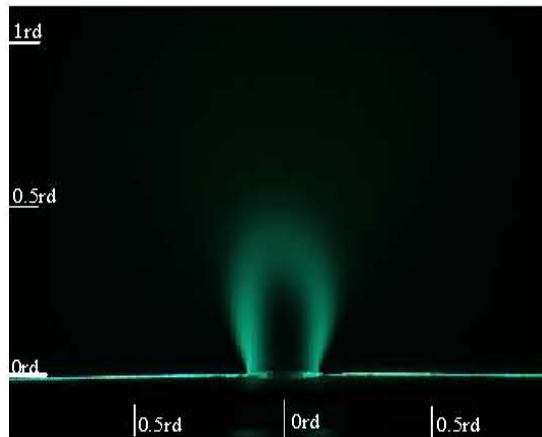


(ง) 3.5rd

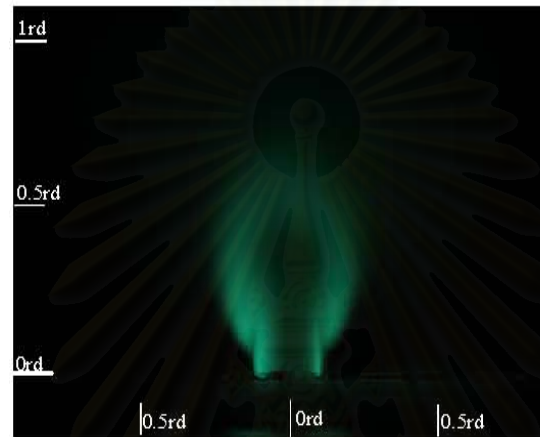


(ฉ) 4rd

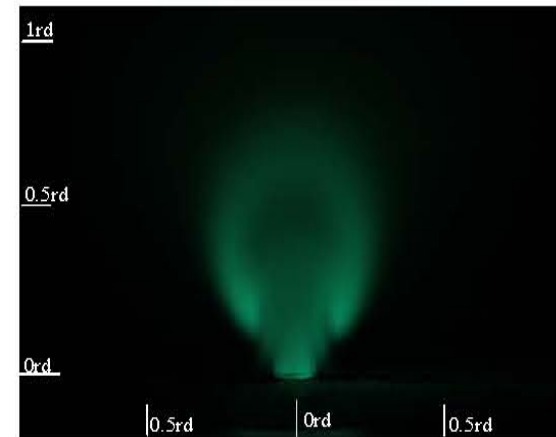
รูปที่ 3.12.3 ภาพขณะใด ๆ ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr0



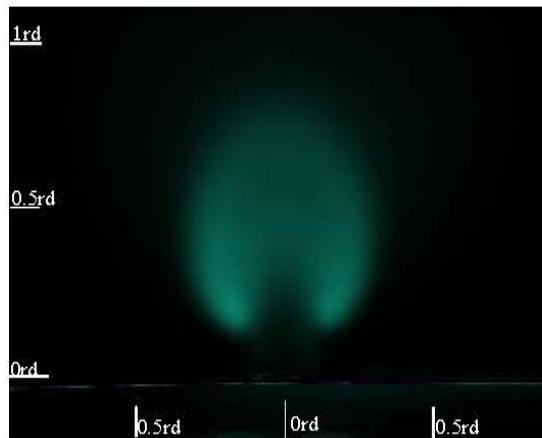
(ก) 0rd



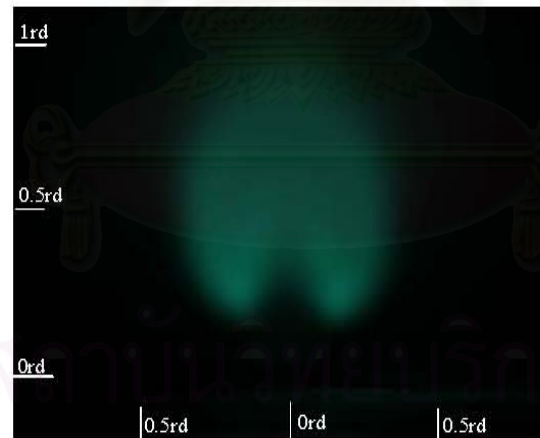
(ข) 0.06rd



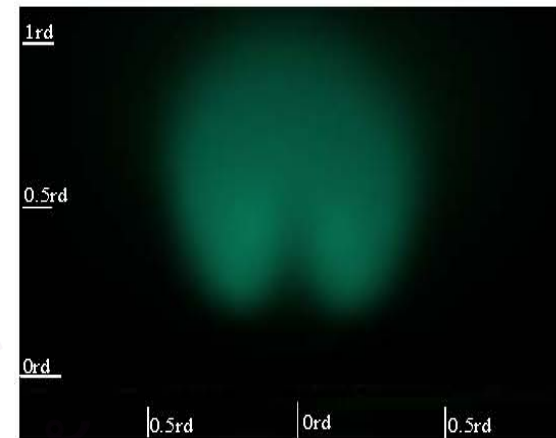
(ค) 0.12rd



(ง) 0.19rd

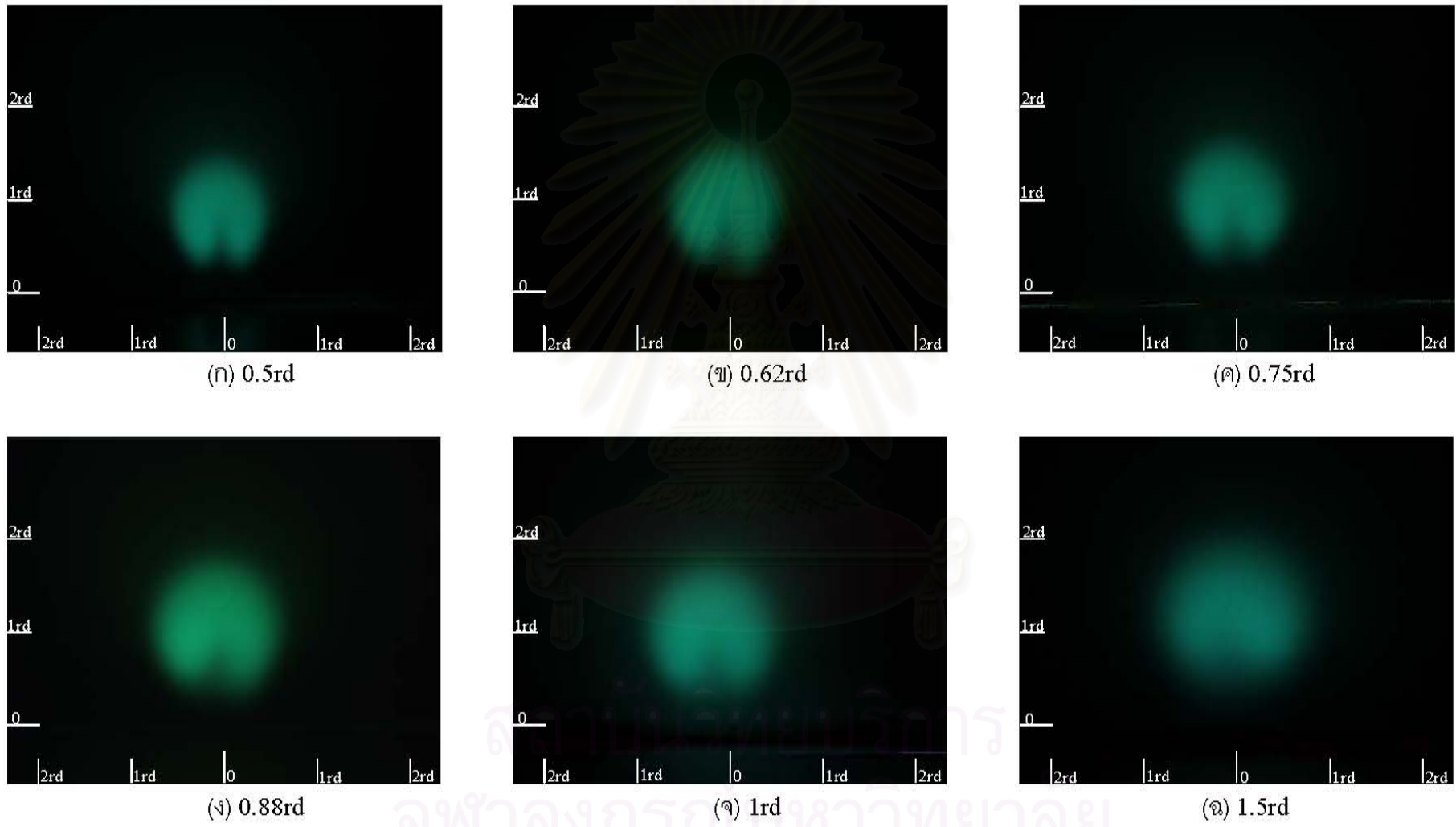


(จ) 0.25rd

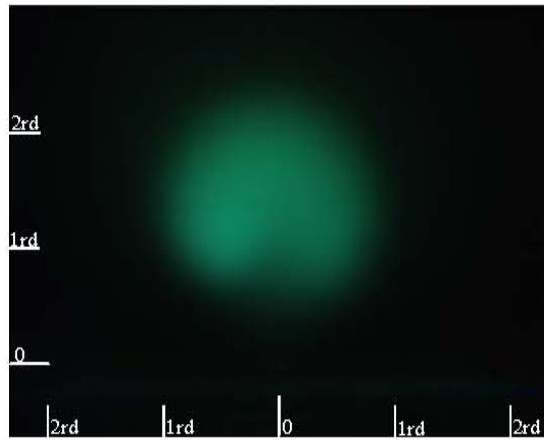


(ฉ) 0.38rd

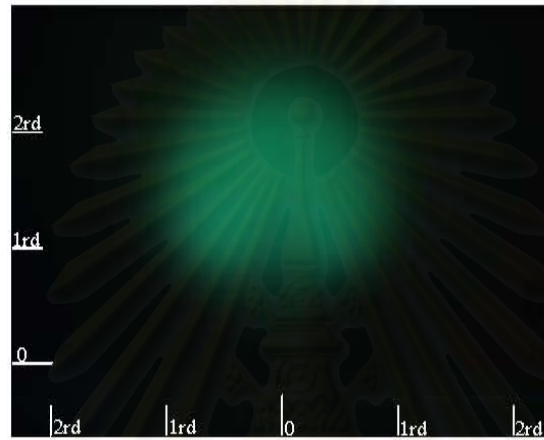
รูปที่ 3.13.1 ภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr0



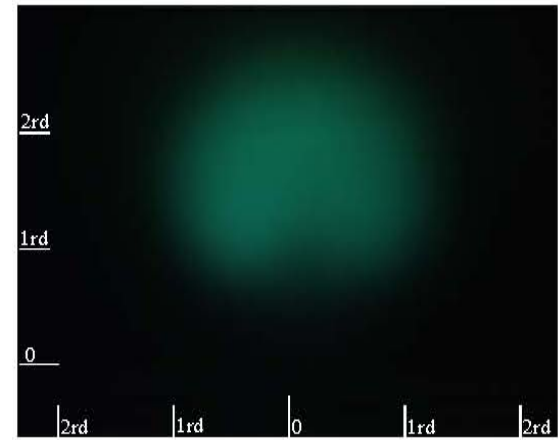
รูปที่ 3.13.2 ภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr0



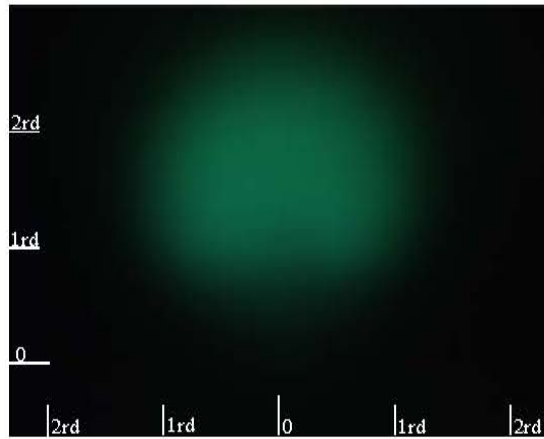
(ข) 2rd



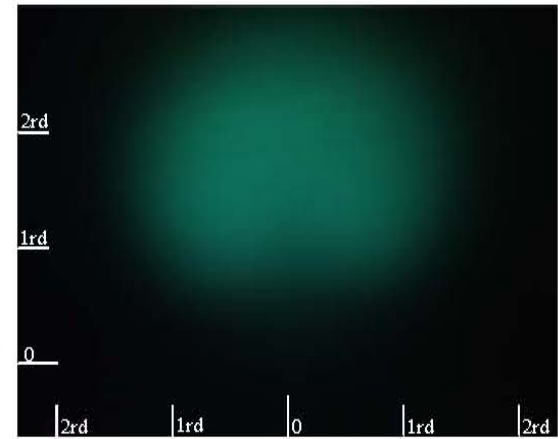
(ค) 2.5rd



(ง) 3rd

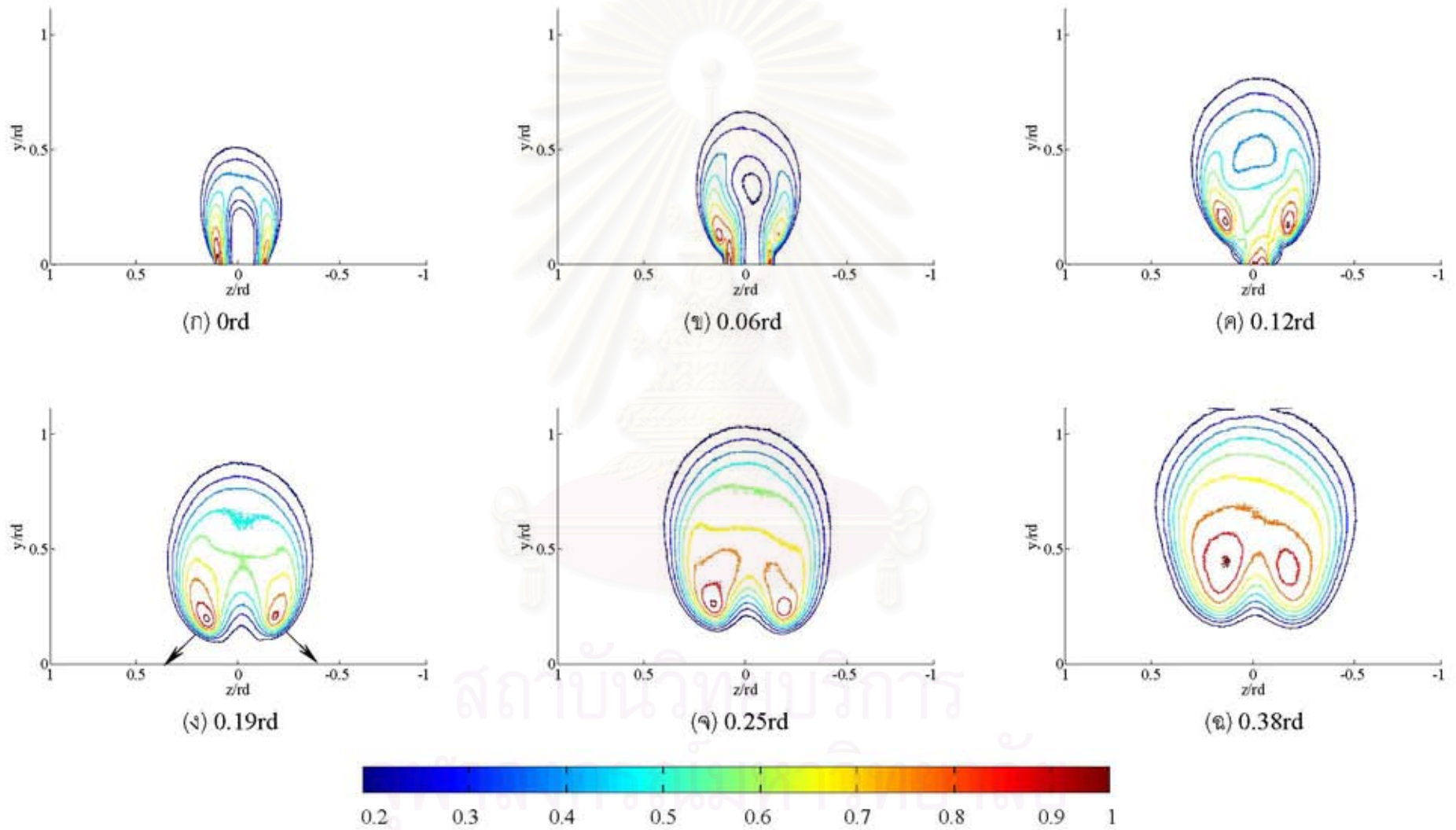


(จ) 3.5rd



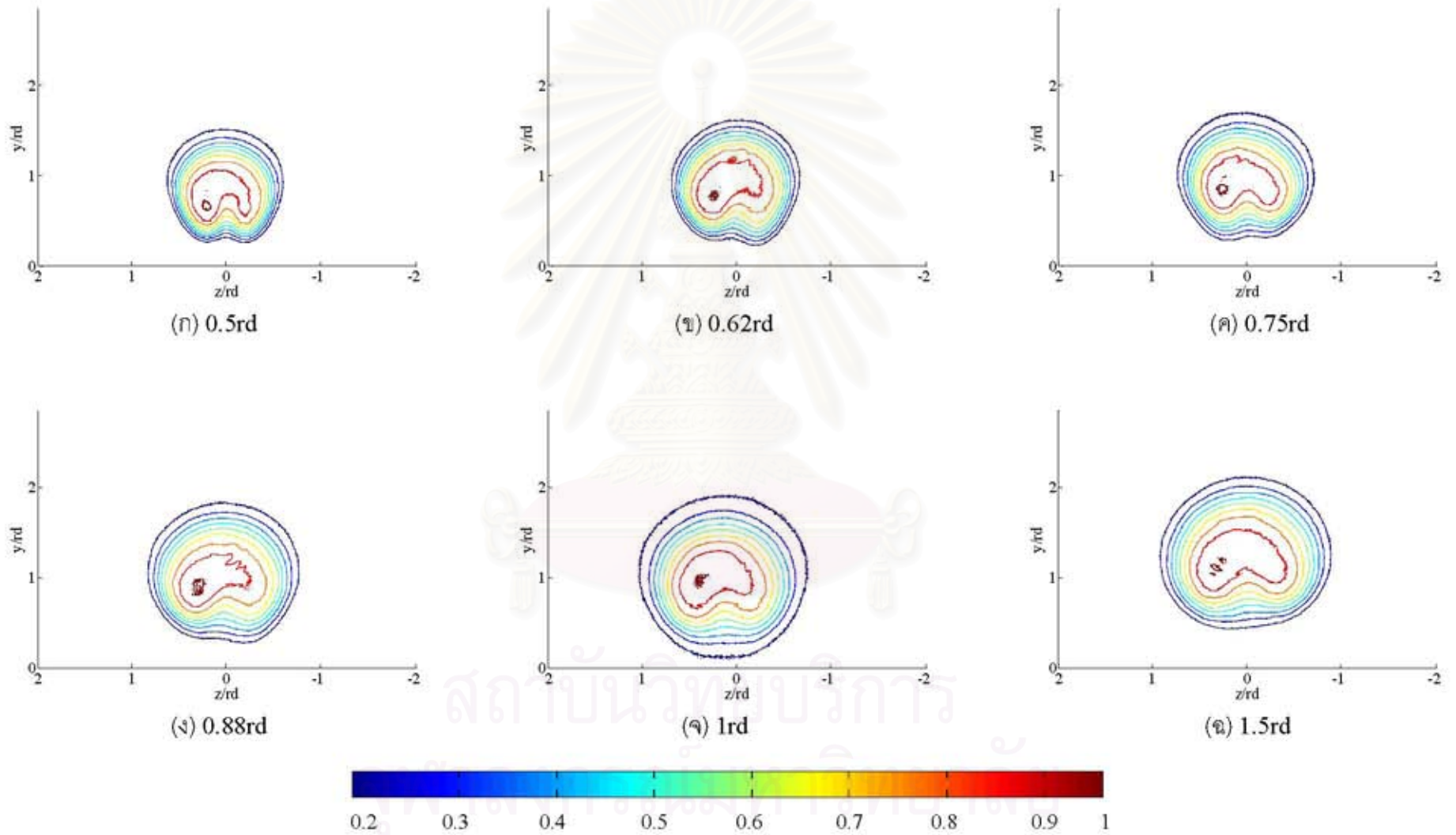
(ฉ) 4rd

รูปที่ 3.13.3 ภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr0

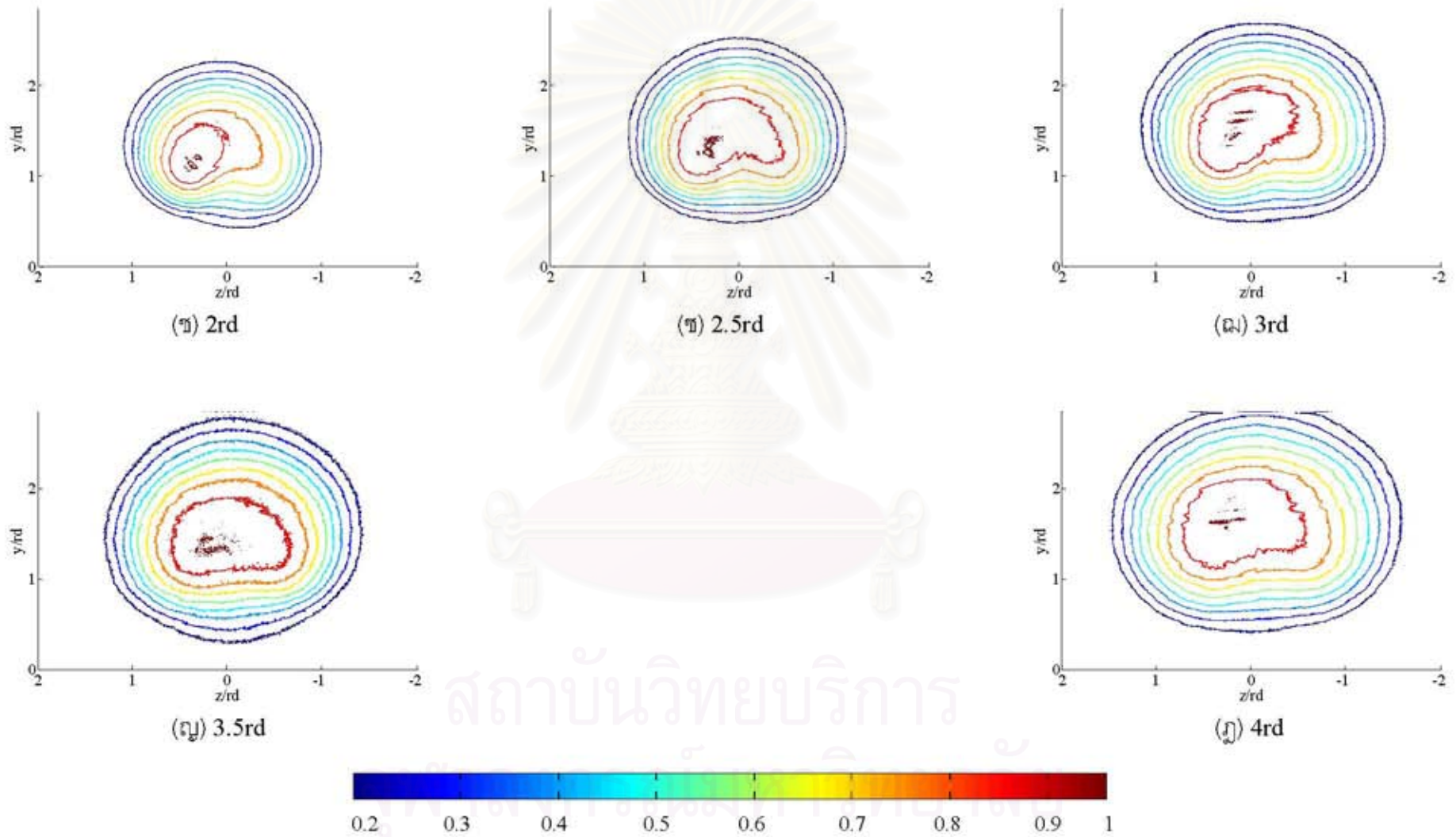


รูปที่ 3.14.1 Contour ของภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr0

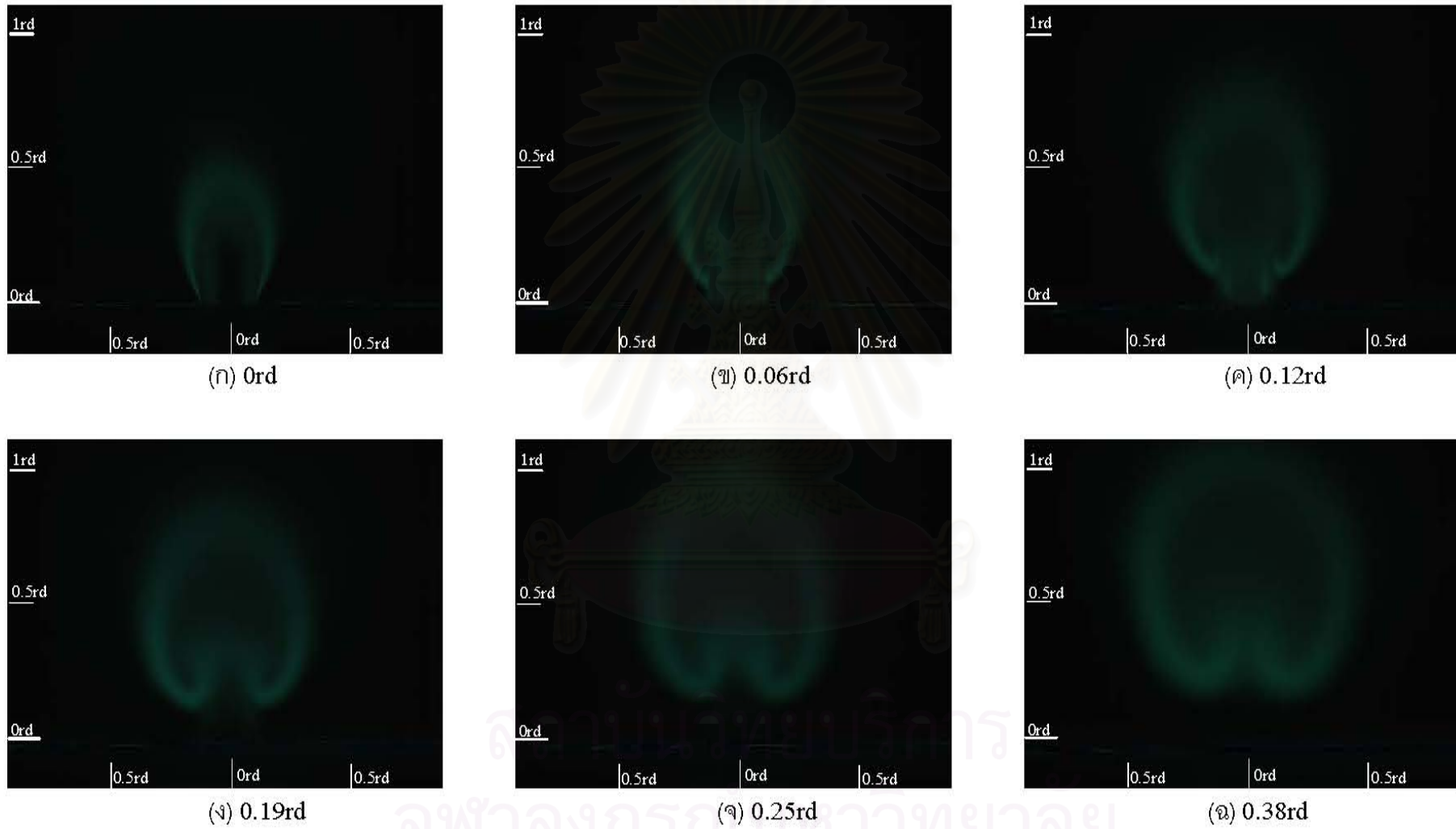




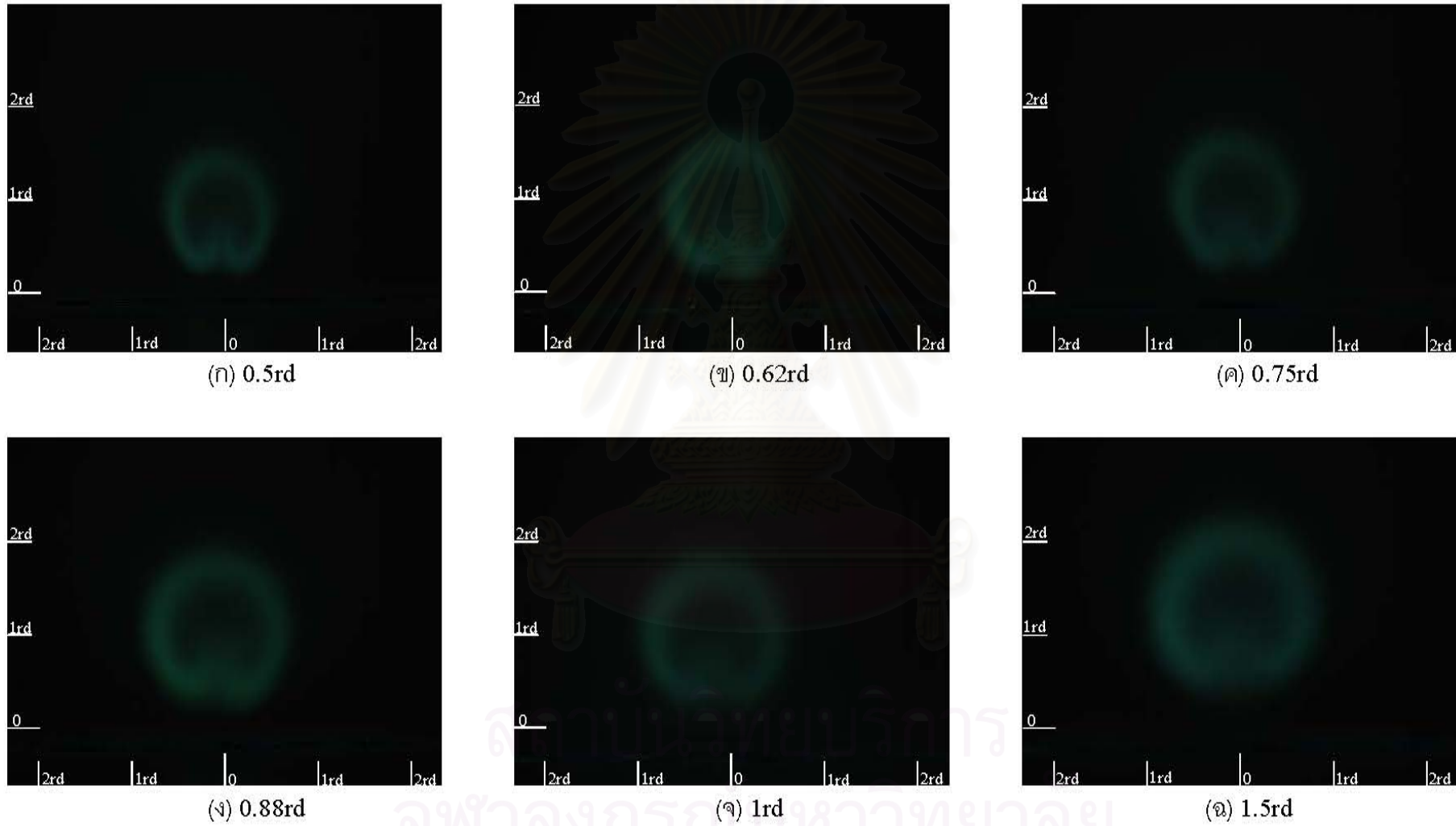
รูปที่ 3.14.2 Contour ของภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี  $Sr_0$



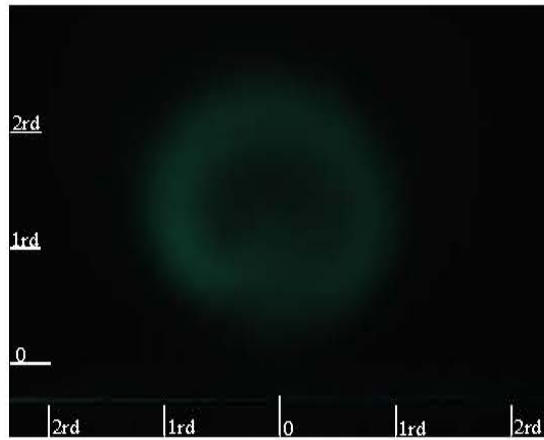
รูปที่ 3.14.3 Contour ของภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี  $Sr_0$



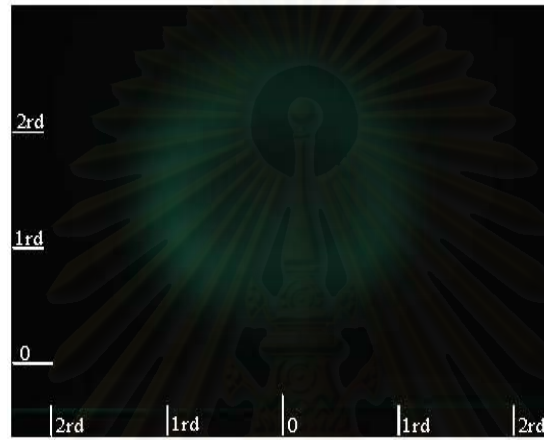
รูปที่ 3.15.1 ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr0



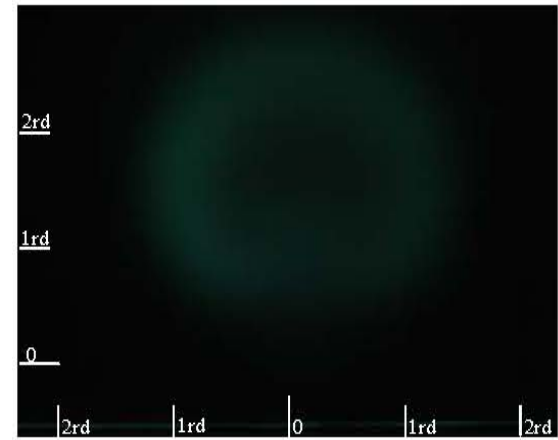
รูปที่ 3.15.2 ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr0



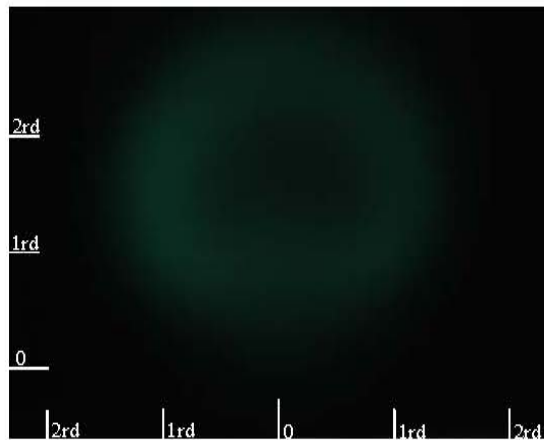
(ก) 2rd



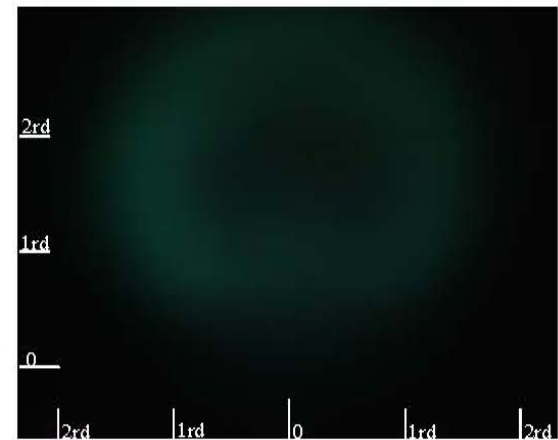
(ข) 2.5rd



(ค) 3rd



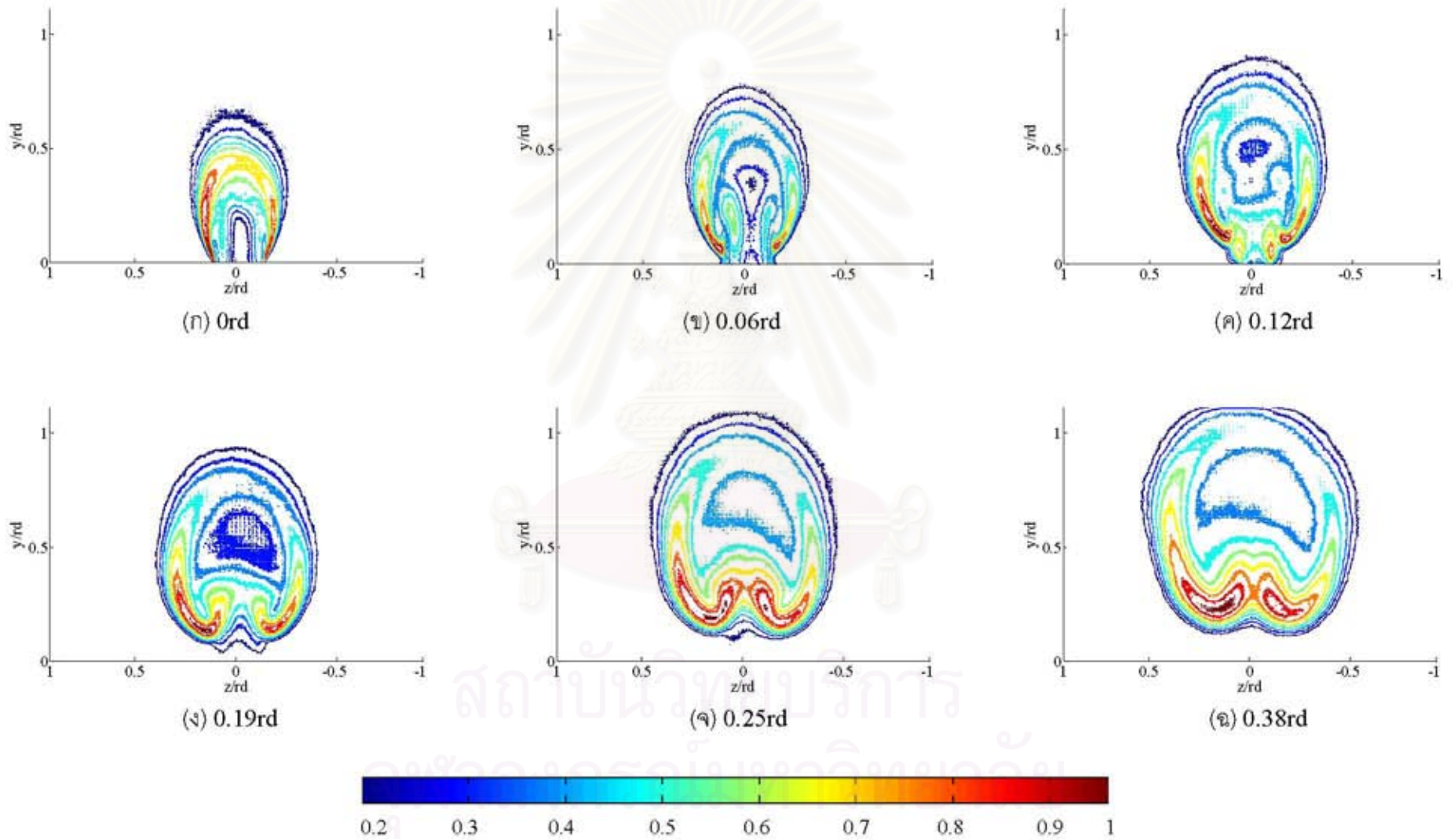
(ง) 3.5rd



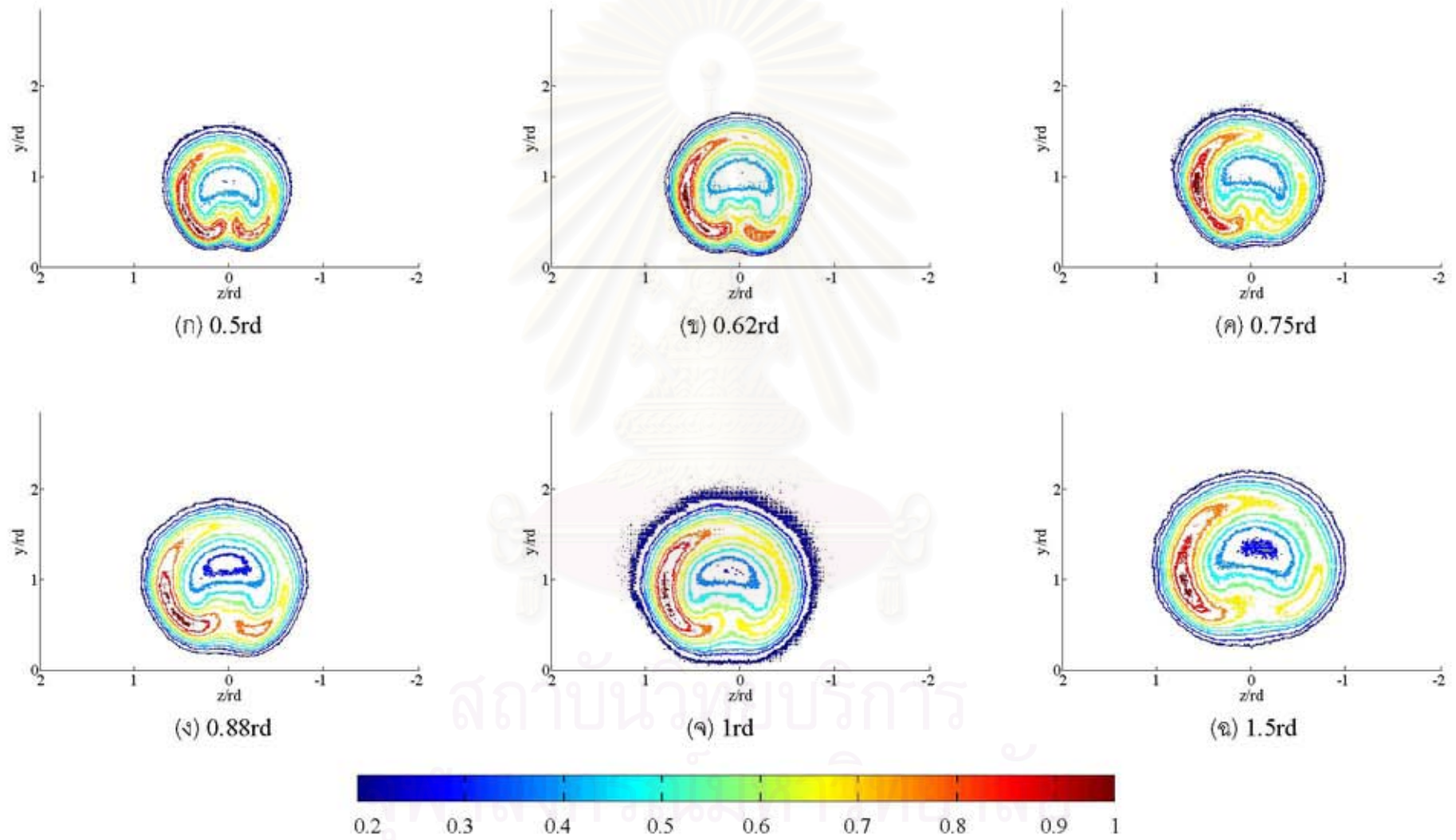
(จ) 4rd

รูปที่ 3.15.3 ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr0

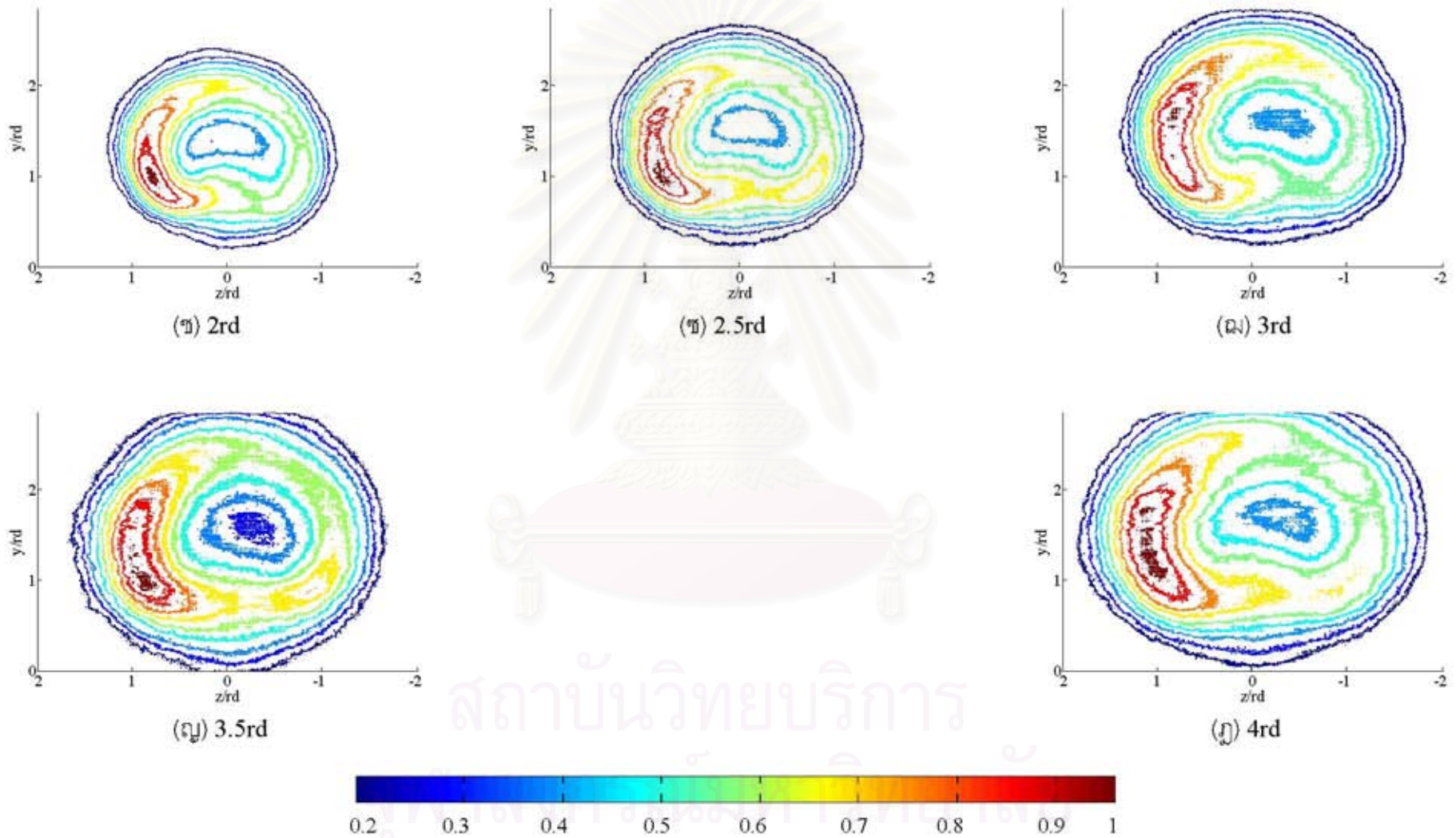




รูปที่ 3.16.1 Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr0

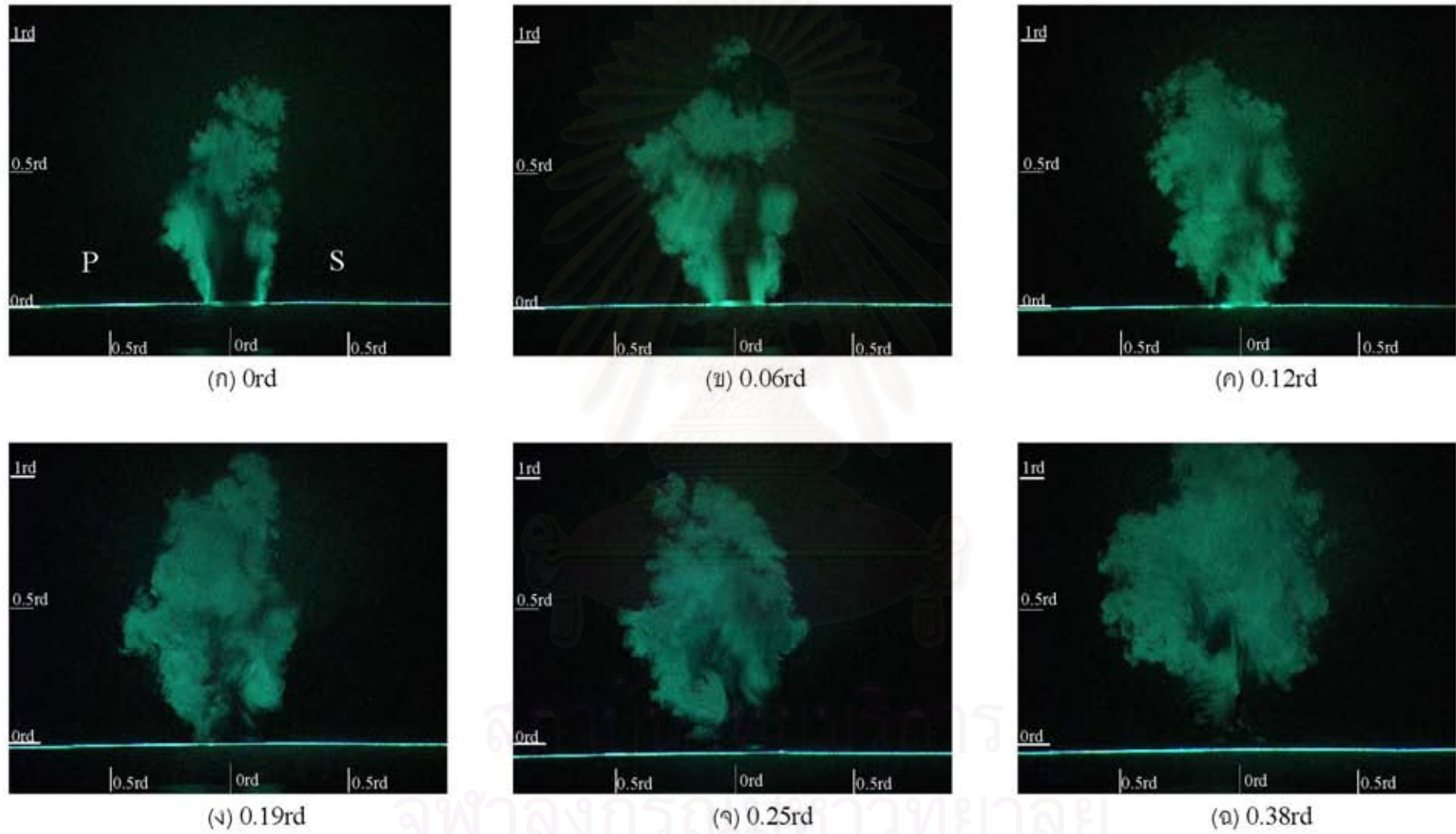


รูปที่ 3.16.2 Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr0

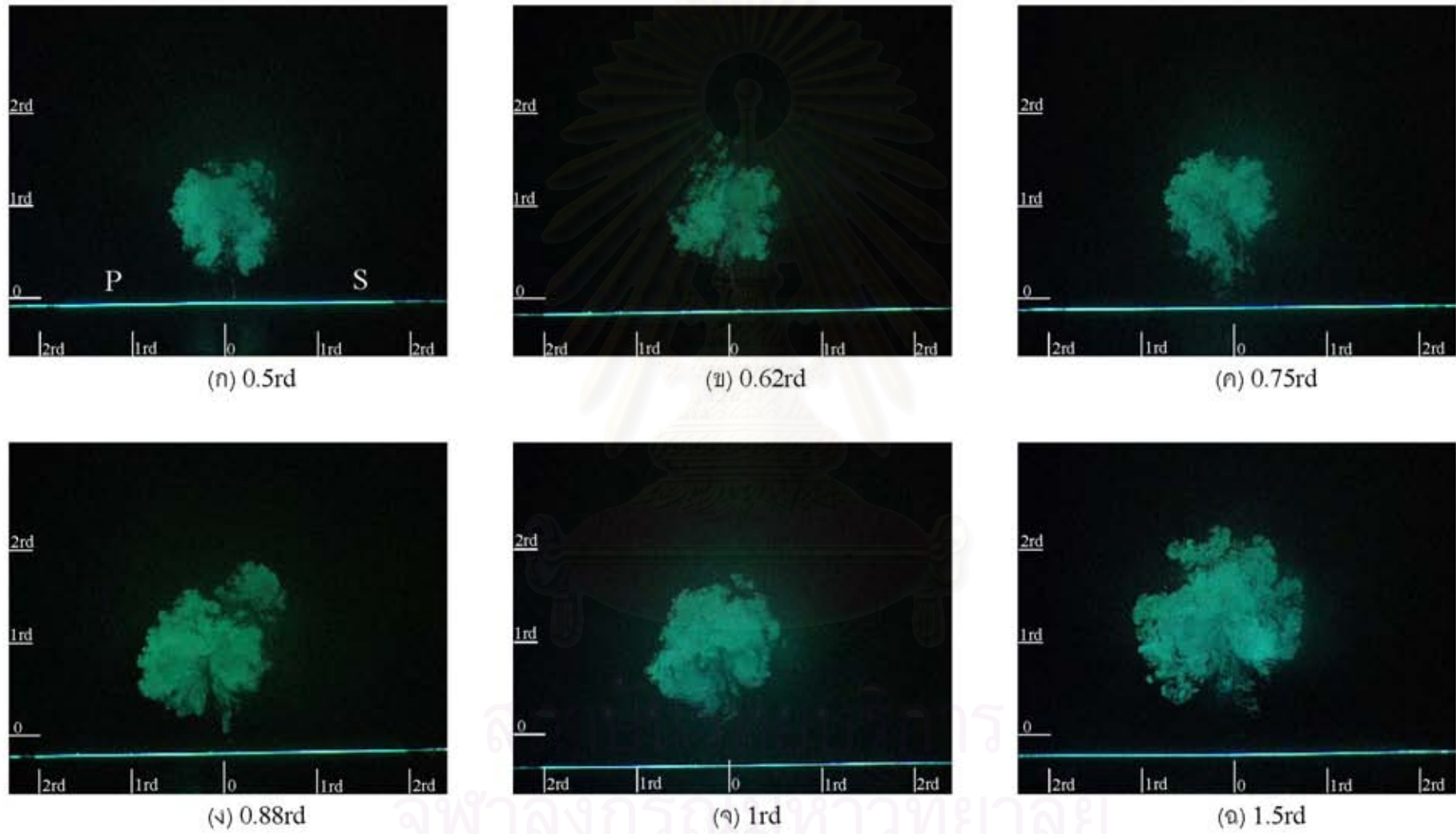


รูปที่ 3.16.3 Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr0



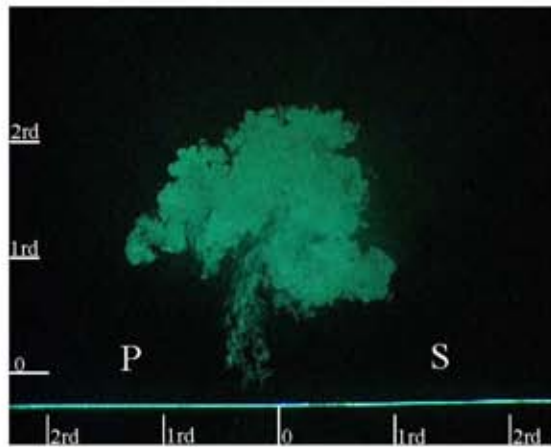


รูปที่ 3.17.1 ภาพขณะใดๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr05

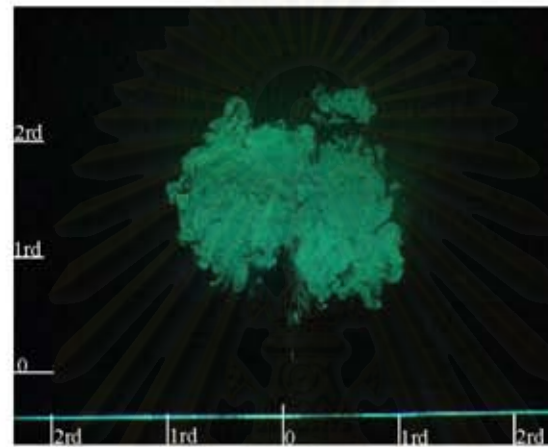


รูปที่ 3.17.2 ภาพขณะใดๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr05

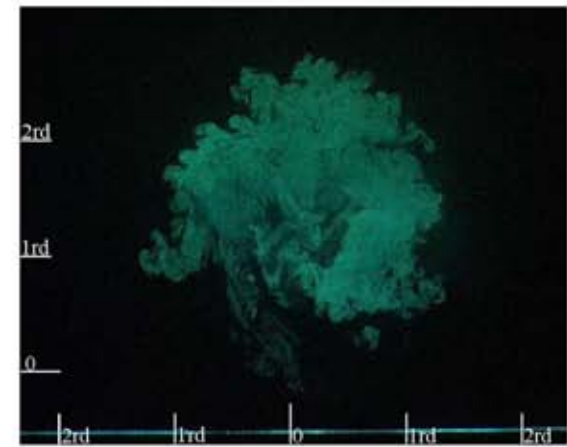




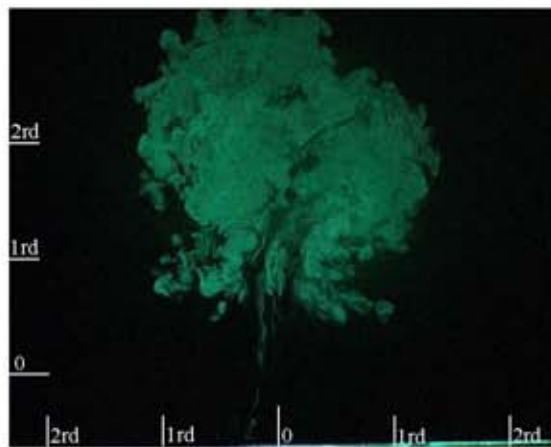
(ข) 2rd



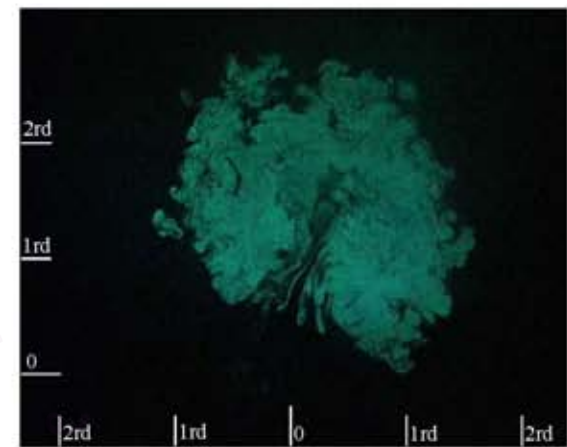
(ค) 2.5rd



(ง) 3rd

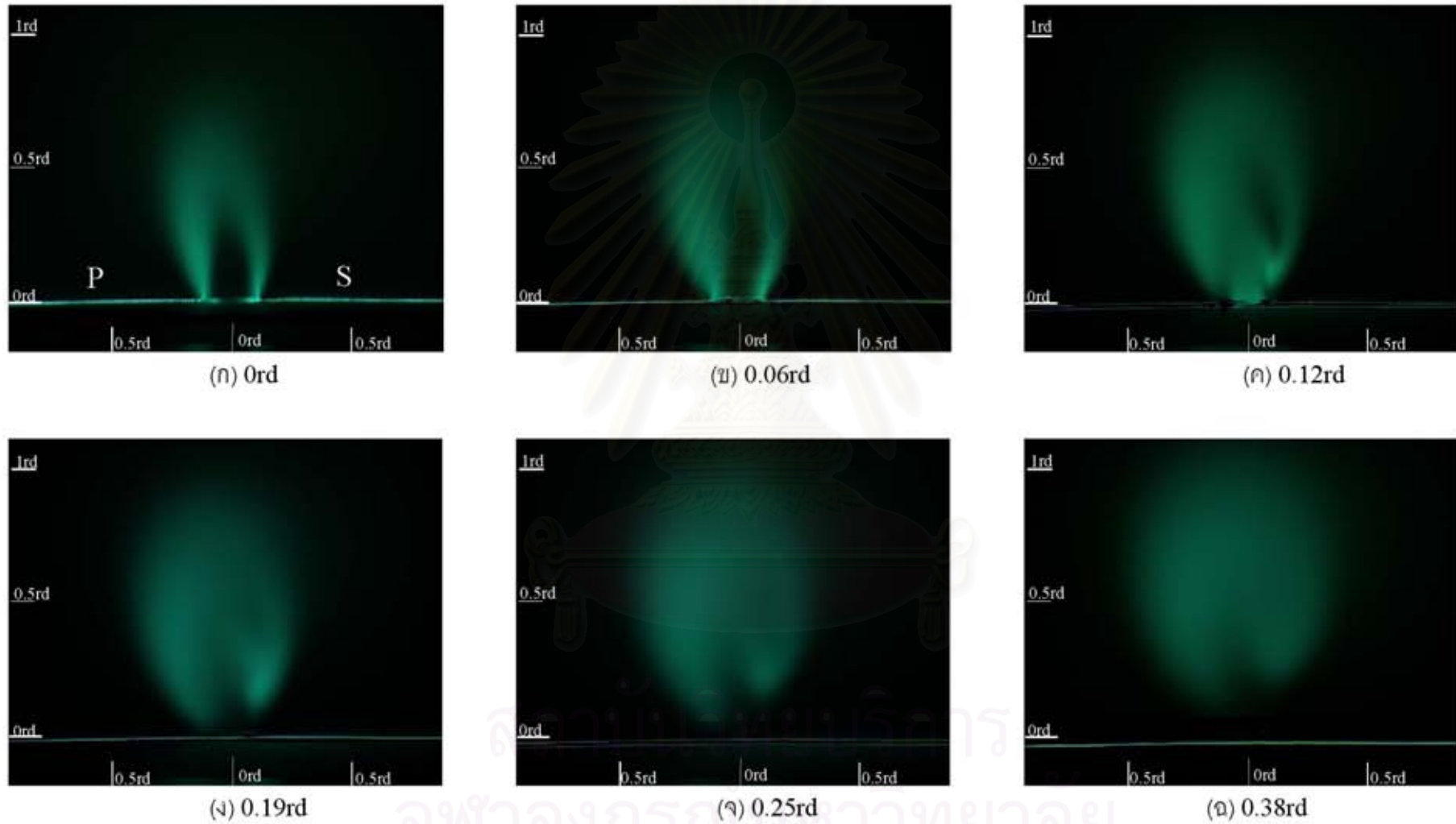


(ฉ) 3.5rd

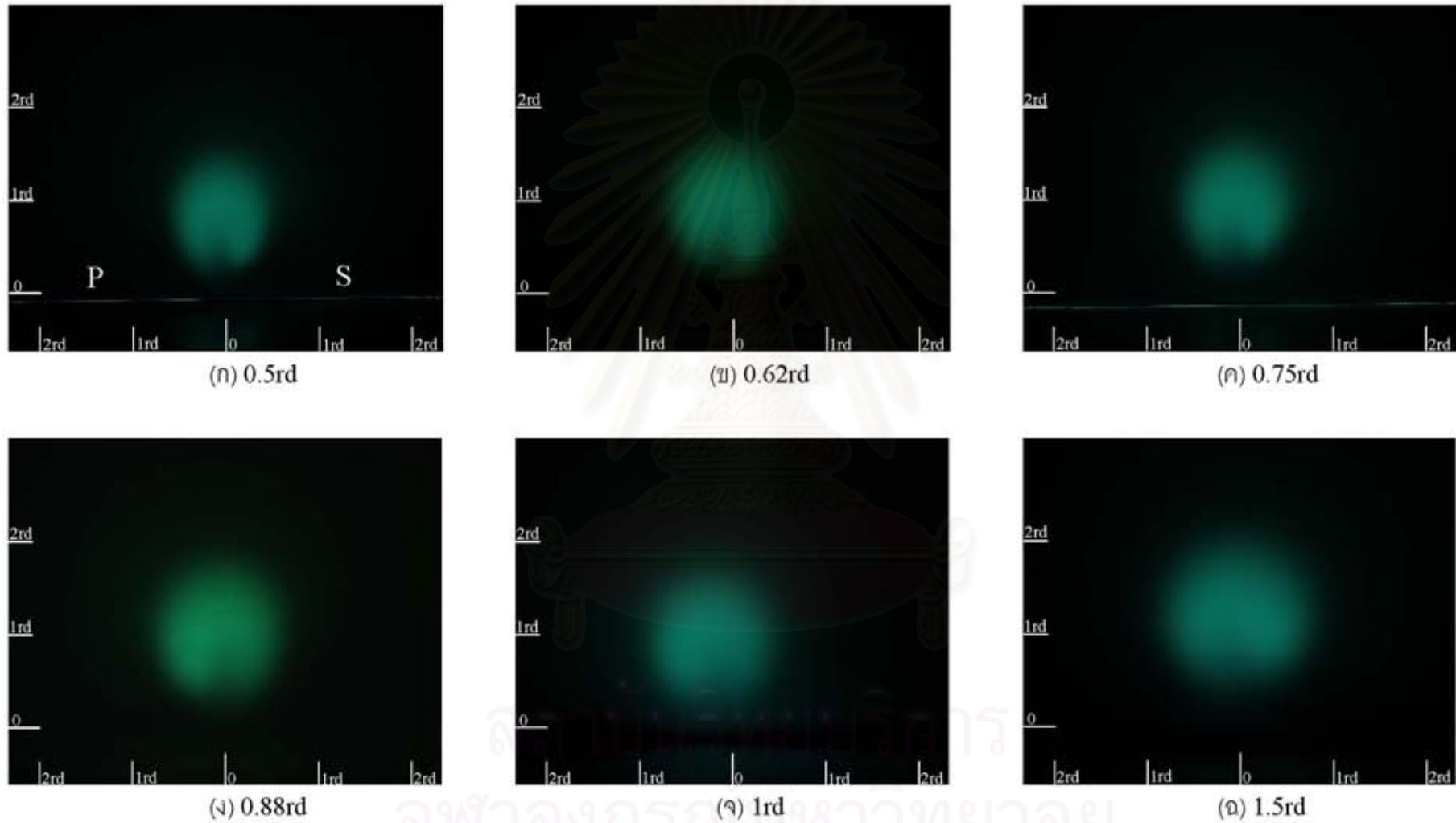


(จ) 4rd

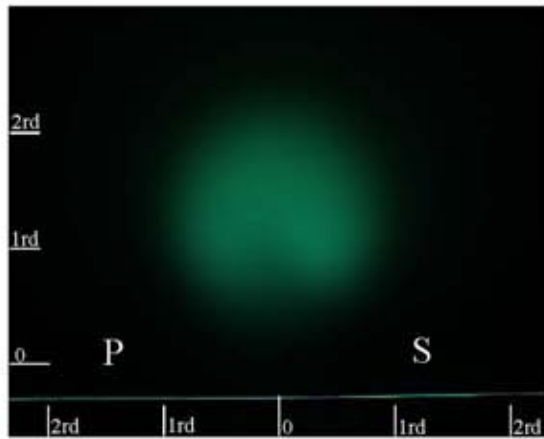
รูปที่ 3.17.3 ภาพขณะใดๆใน แต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr05



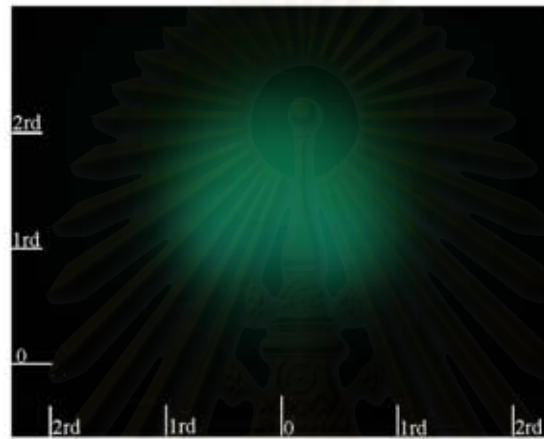
รูปที่ 3.18.1 ภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr05



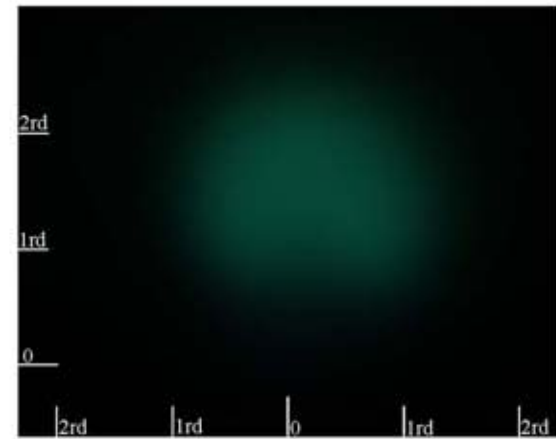
รูปที่ 3.18.2 ภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr05



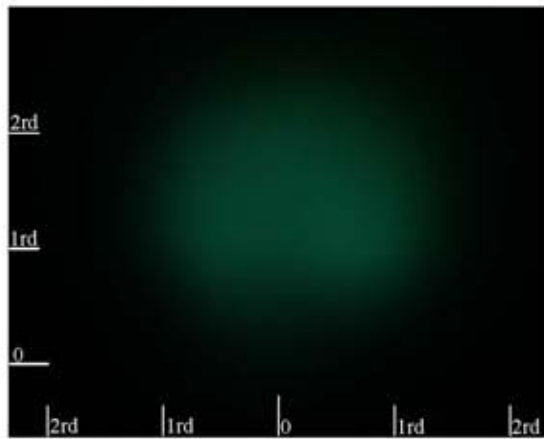
(ข) 2rd



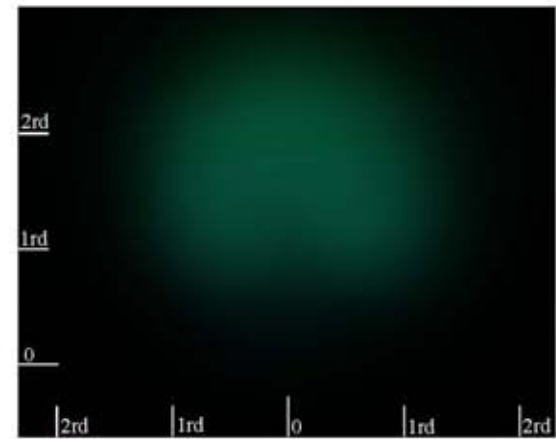
(ค) 2.5rd



(ง) 3rd

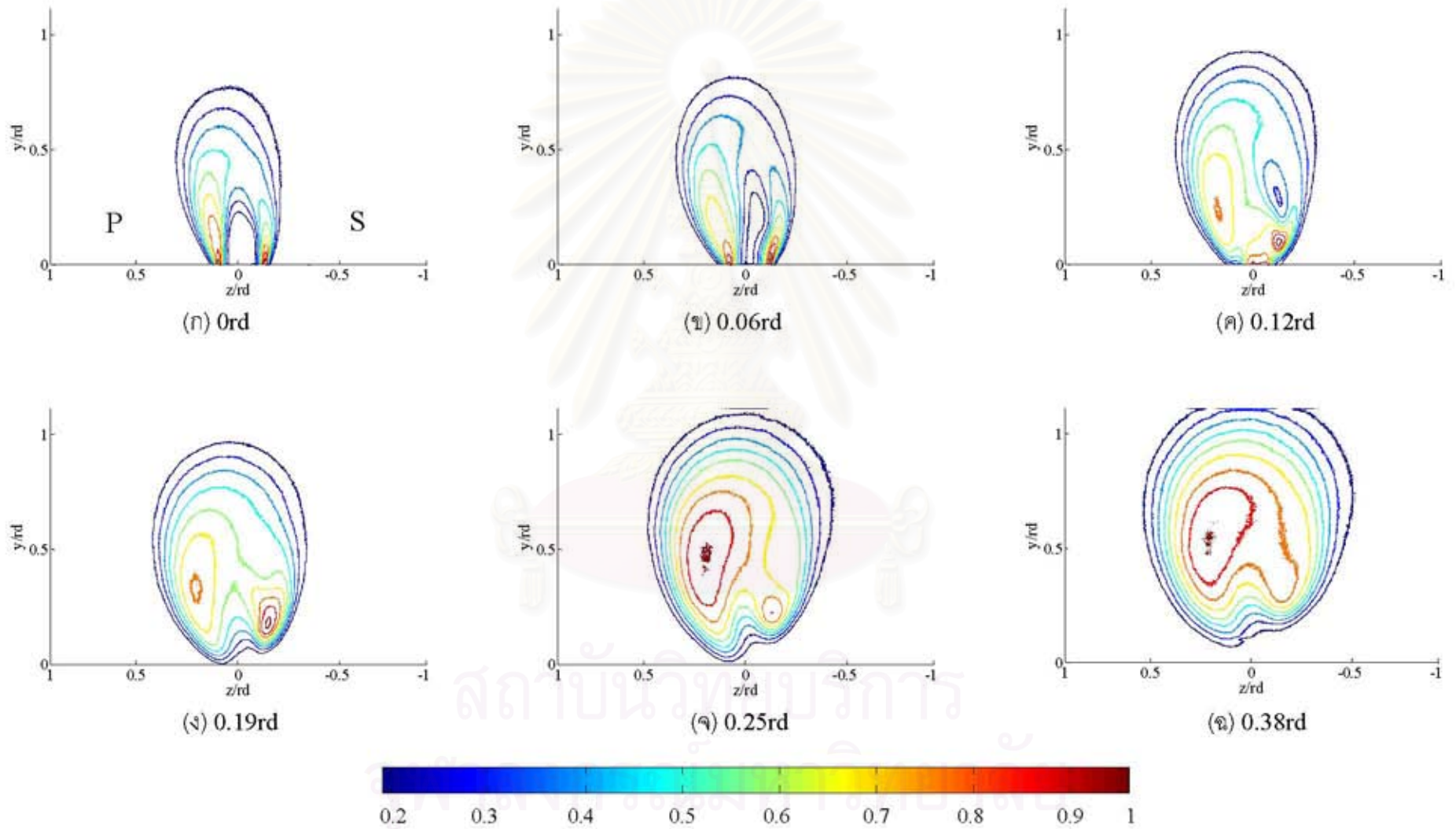


(ฉ) 3.5rd



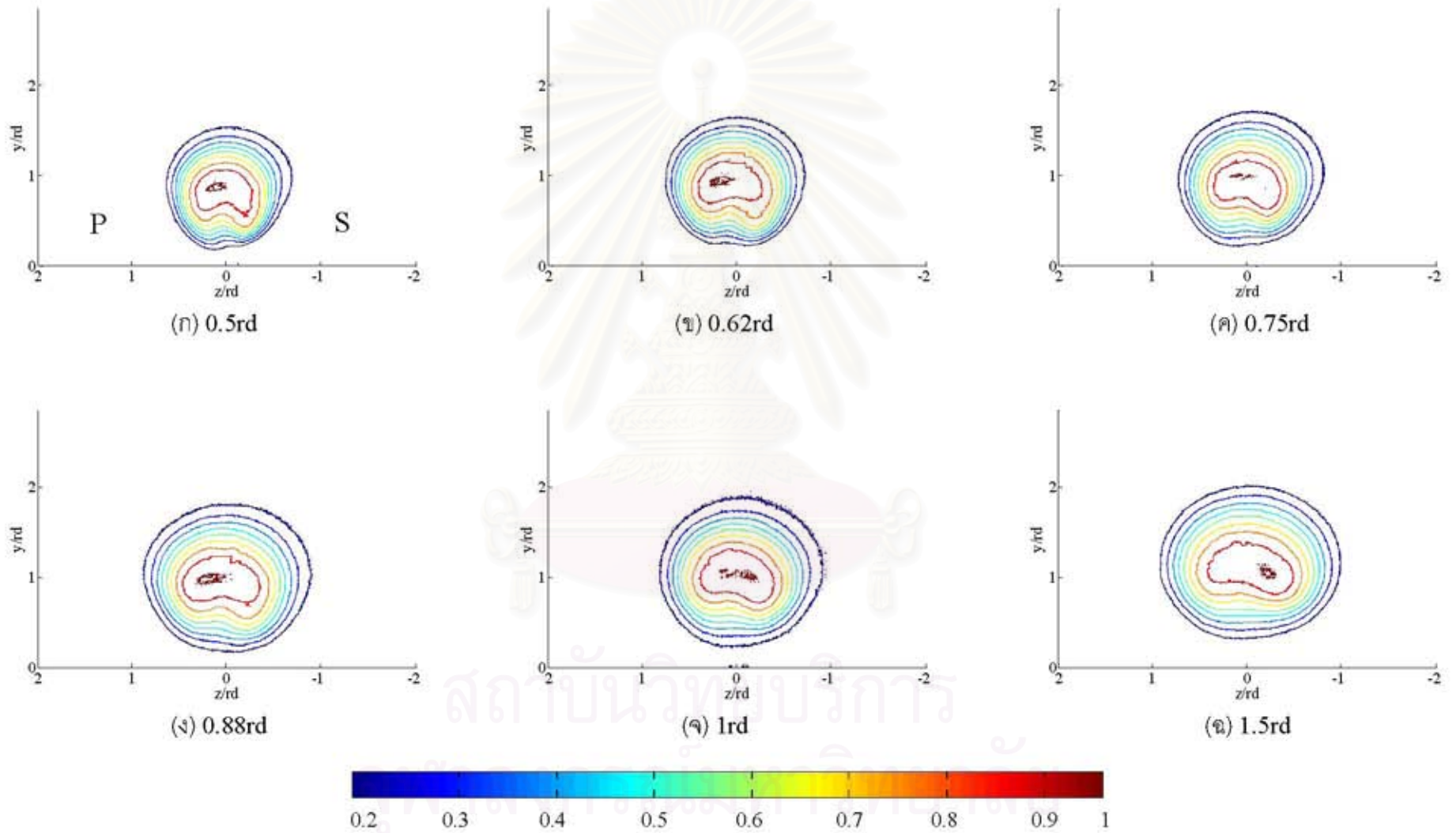
(จ) 4rd

รูปที่ 3.18.3 ภาพเจลีใน แต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr05

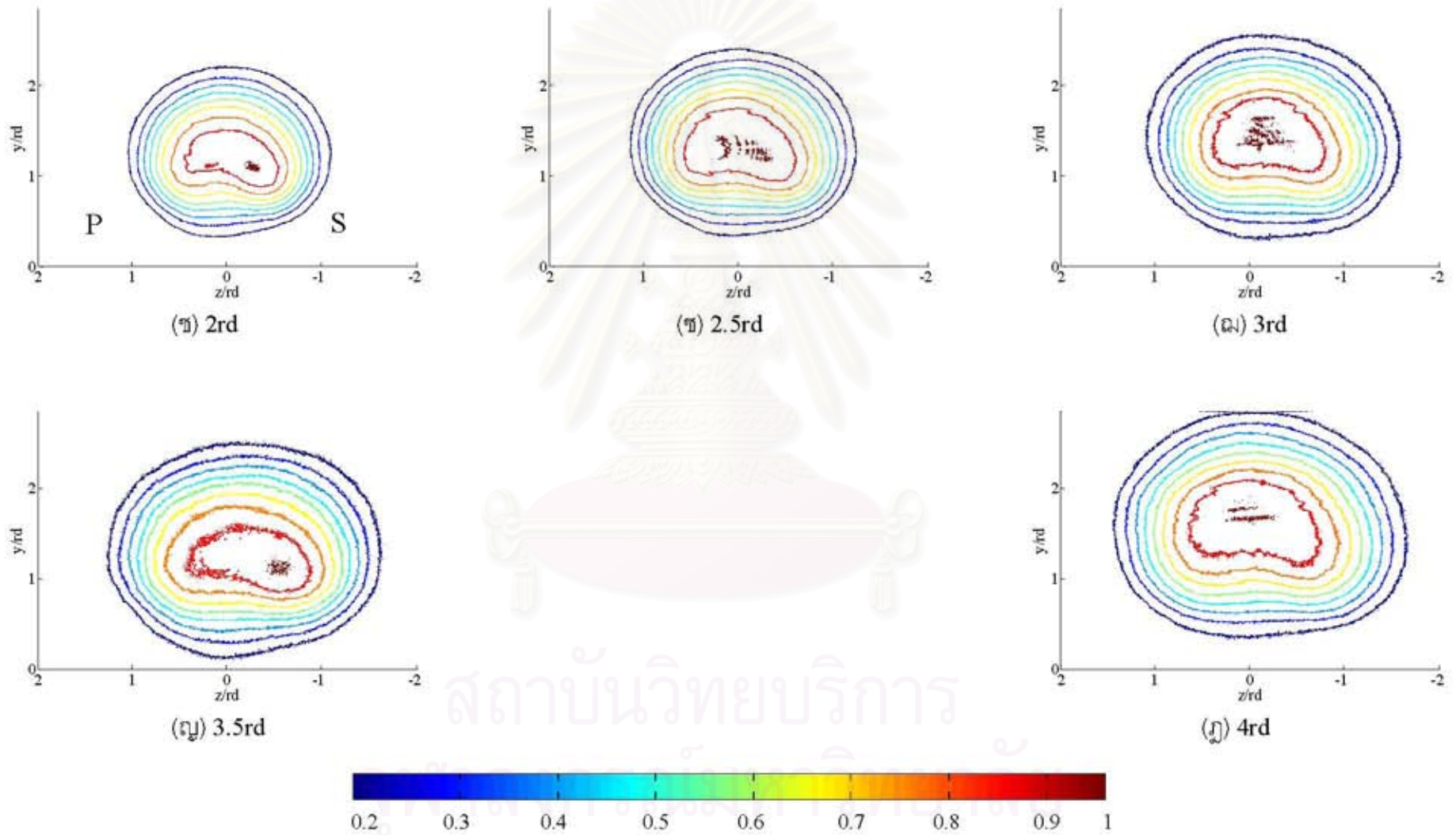


รูปที่ 3.19.1 Contour ของภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr05

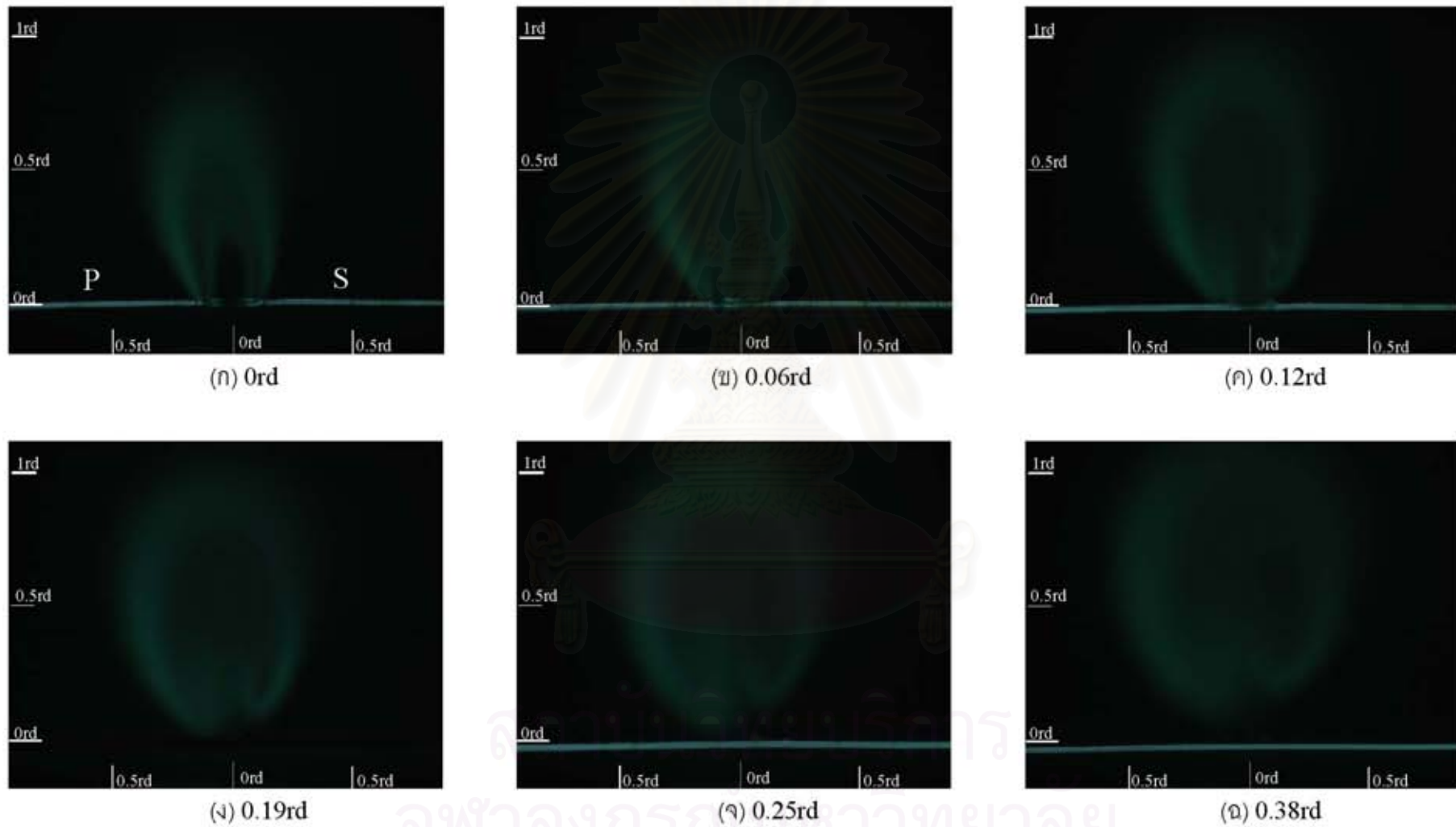




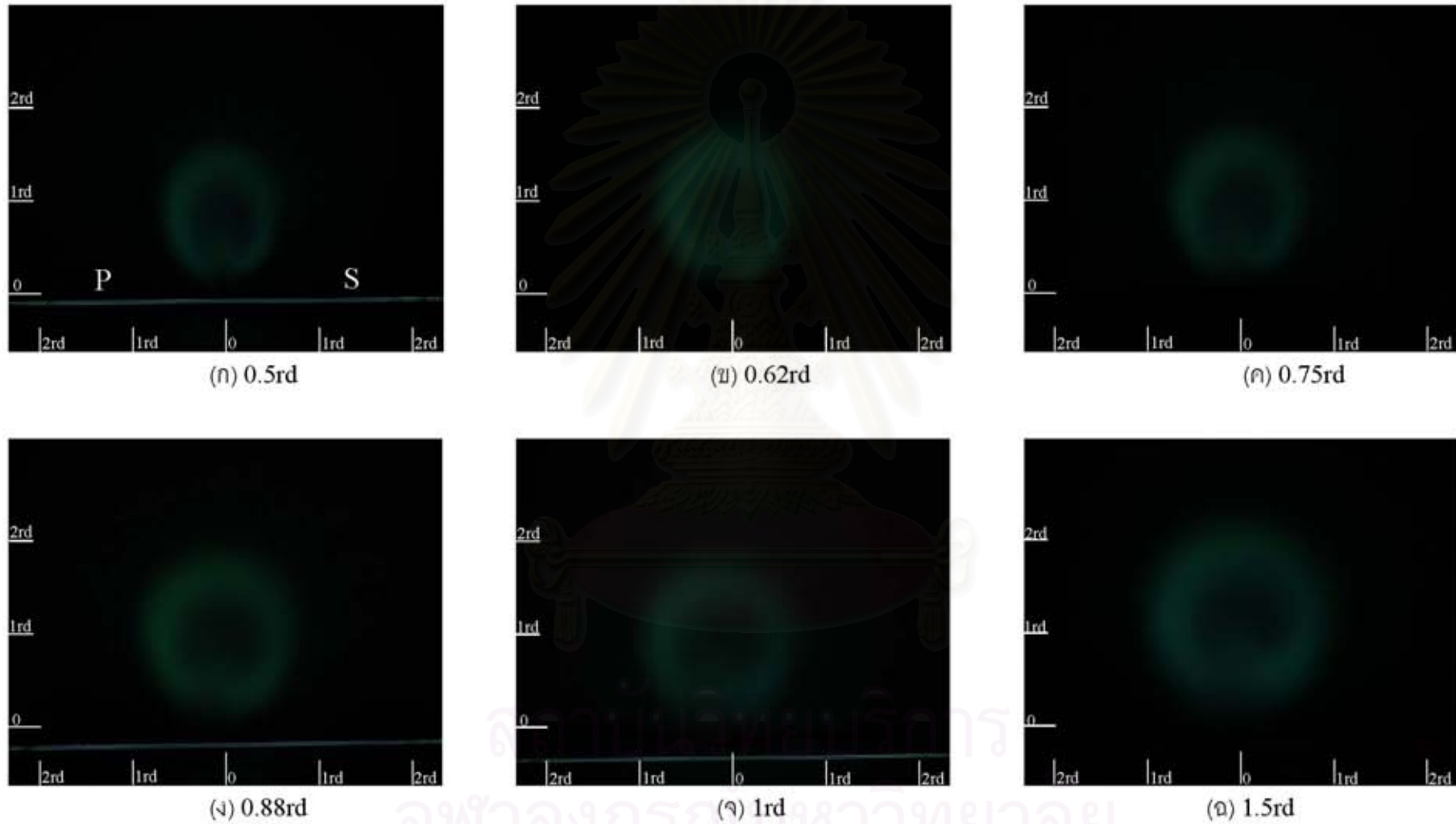
รูปที่ 3.19.2 Contour ของภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr05



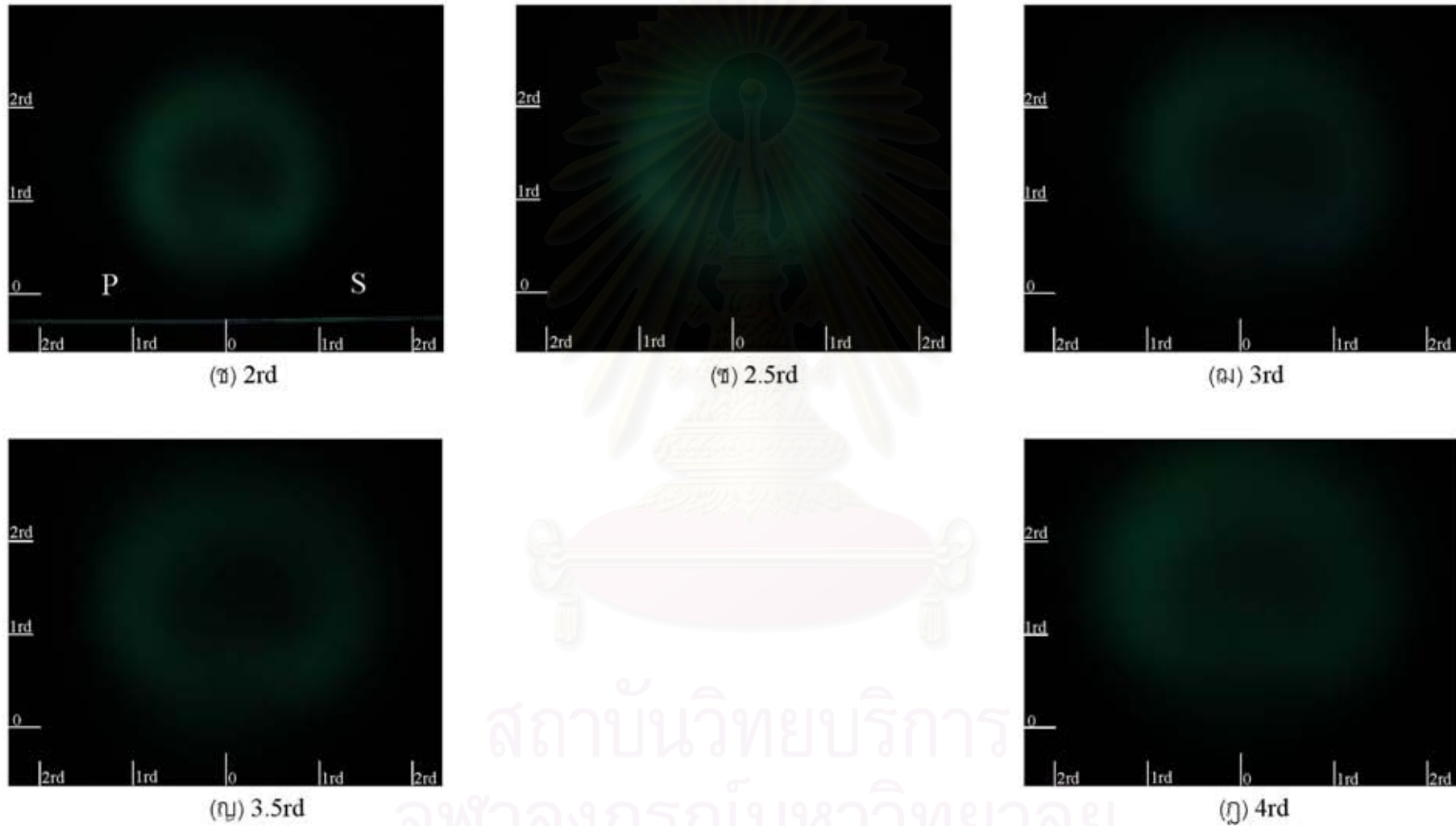
รูปที่ 3.19.3 Contour ของภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr05



รูปที่ 3.20.1 ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr05

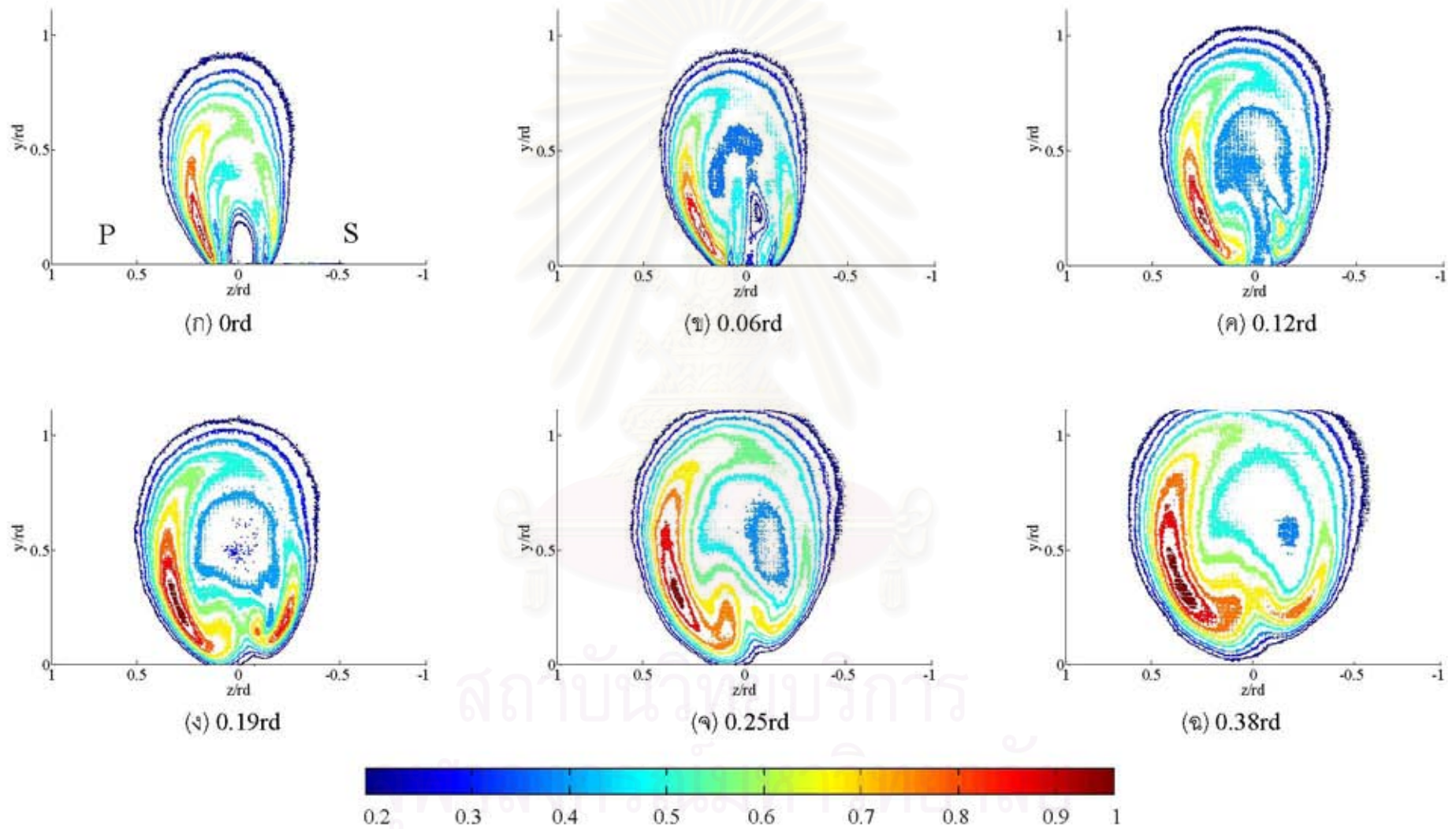


รูปที่ 3.20.2 ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr05

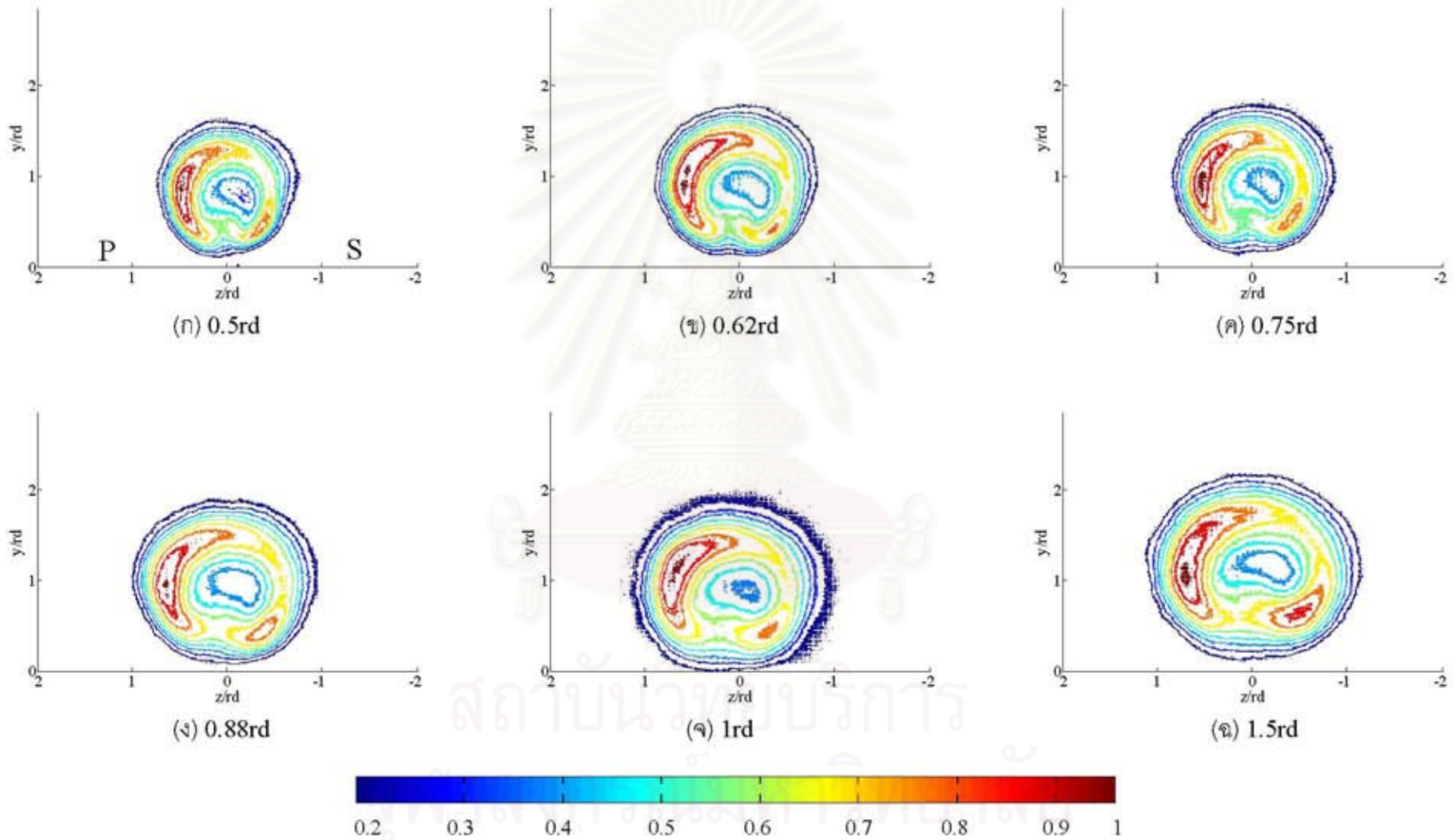


รูปที่ 3.20.3 ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr05

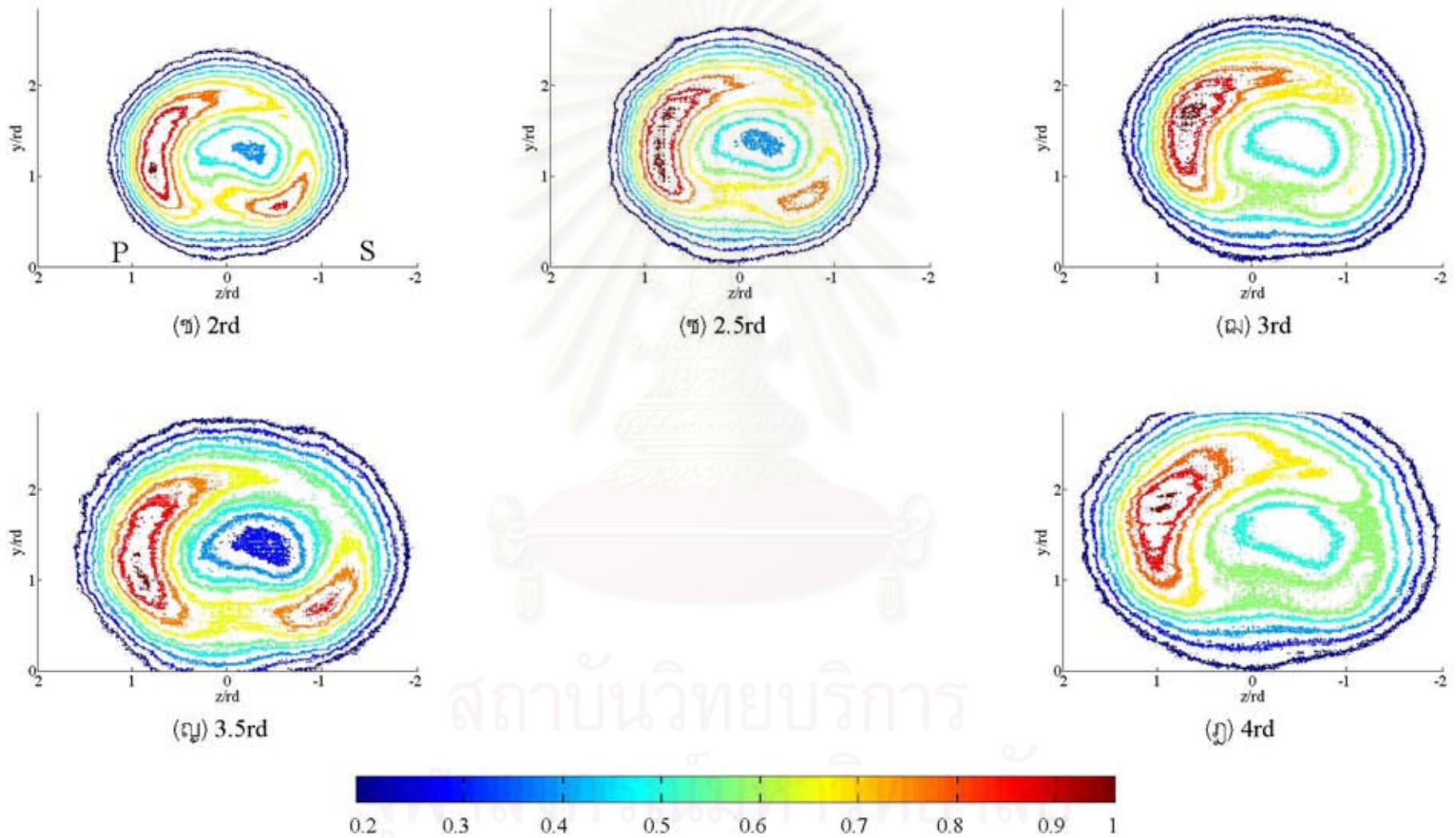




รูปที่ 3.21.1 Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr05

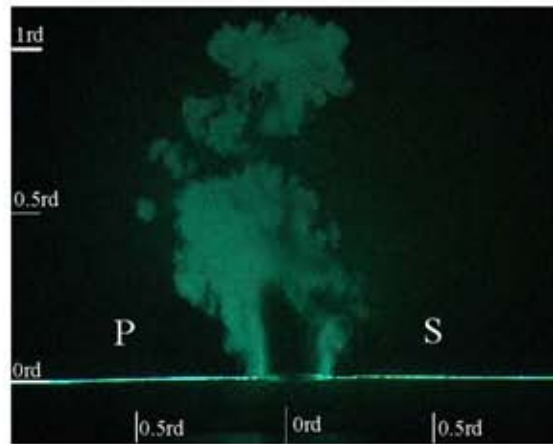


รูปที่ 3.21.2 Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr05

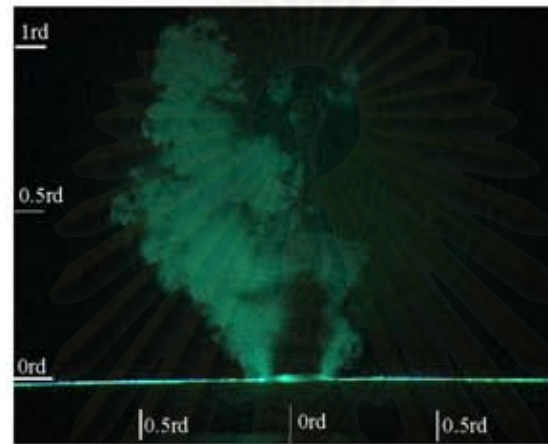


รูปที่ 3.21.3 Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr05

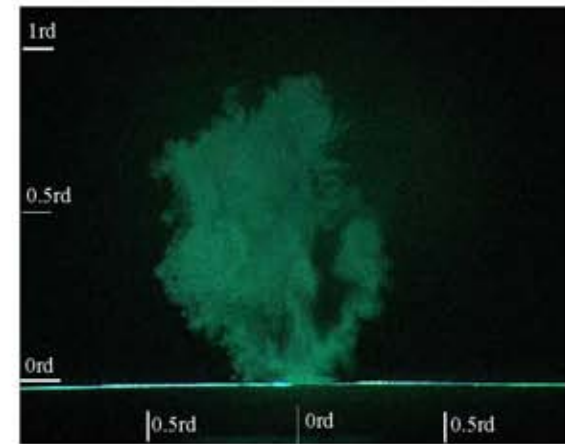




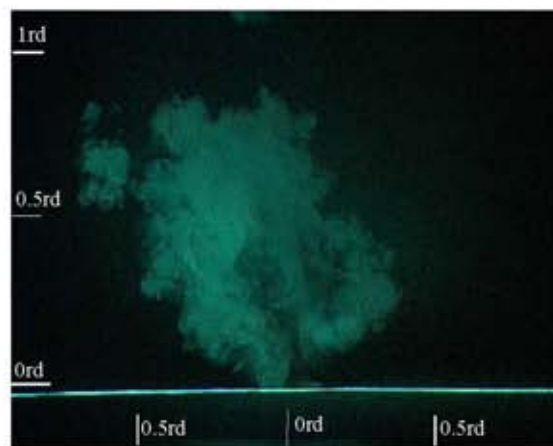
(ก) 0rd



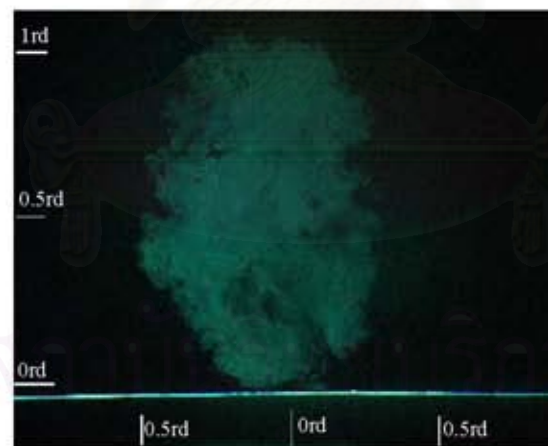
(ข) 0.06rd



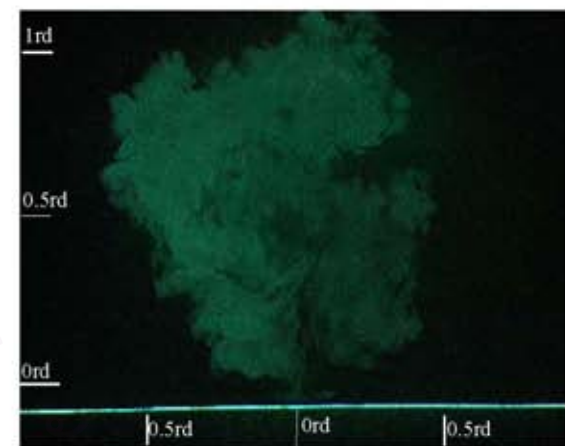
(ค) 0.12rd



(ง) 0.19rd

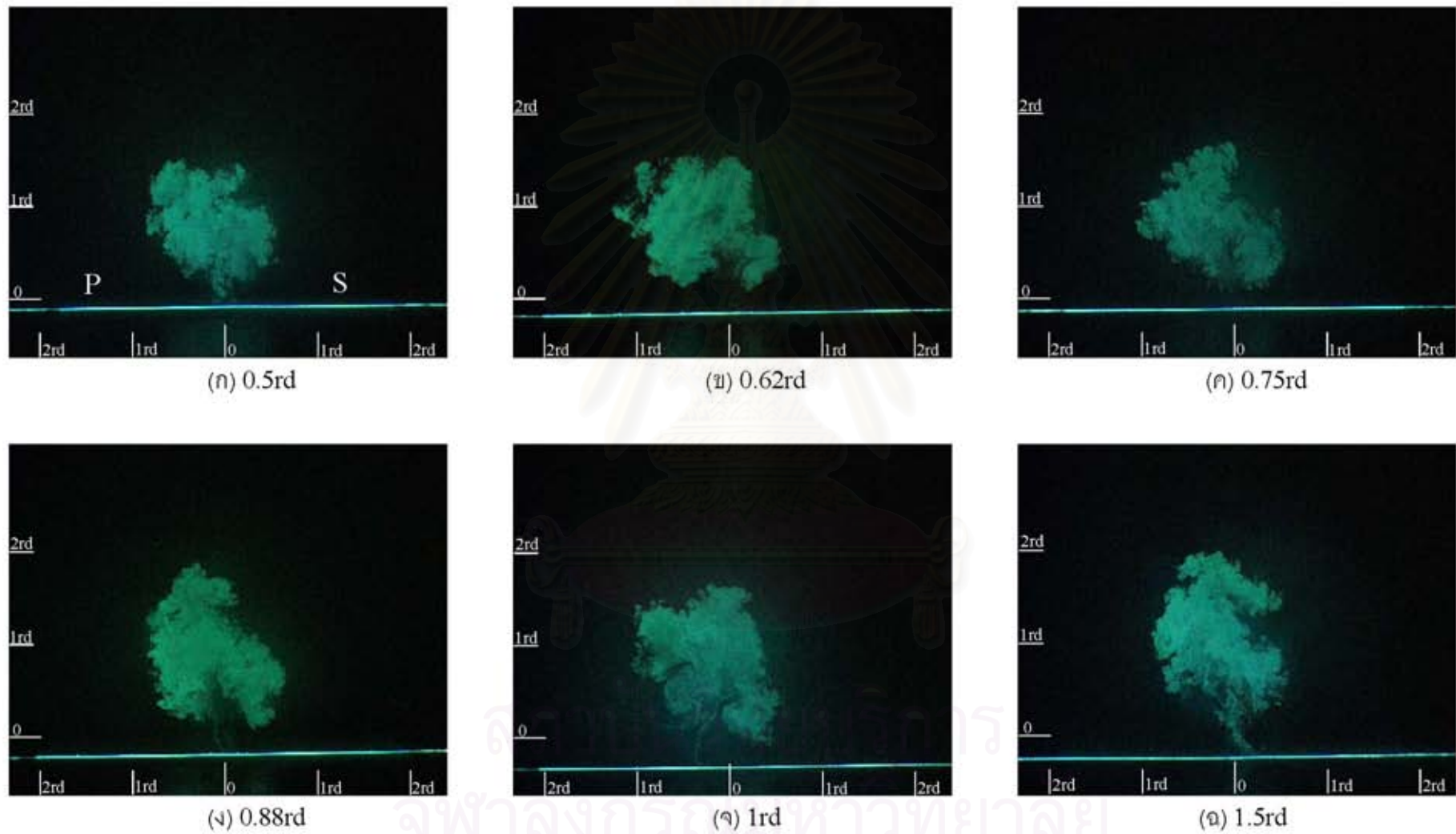


(ฉ) 0.25rd



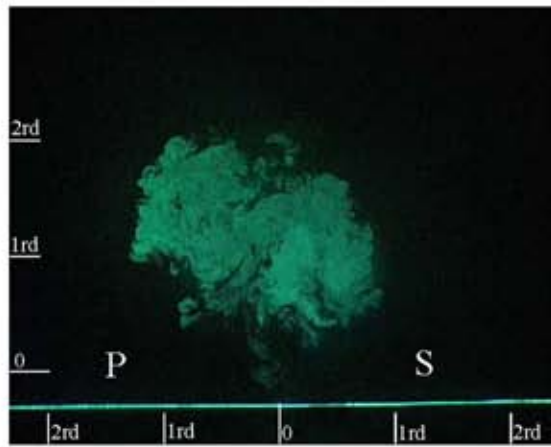
(จ) 0.38rd

รูปที่ 3.22.1 ภาพขณะใด ๆ ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr08

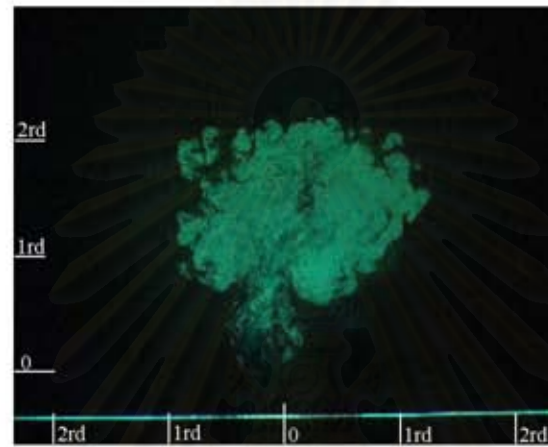


รูปที่ 3.22.2 ภาพขณะใด ๆ ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr08

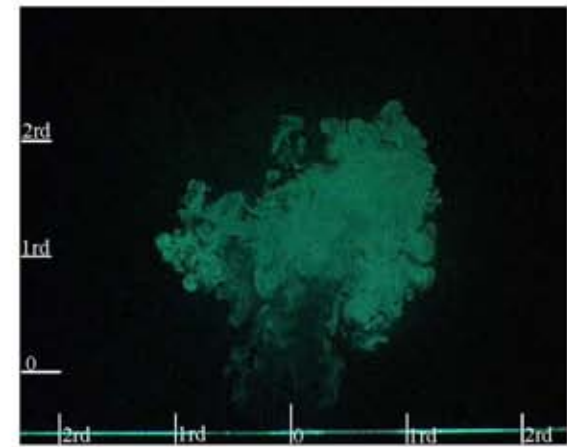




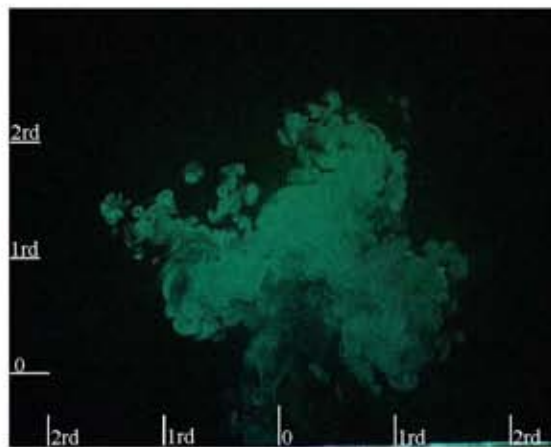
(ข) 2rd



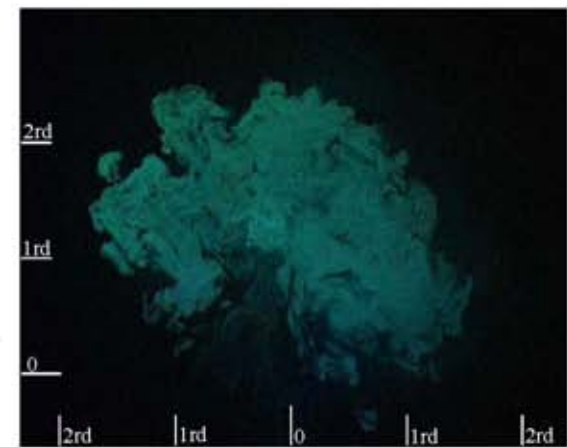
(ค) 2.5rd



(ง) 3rd

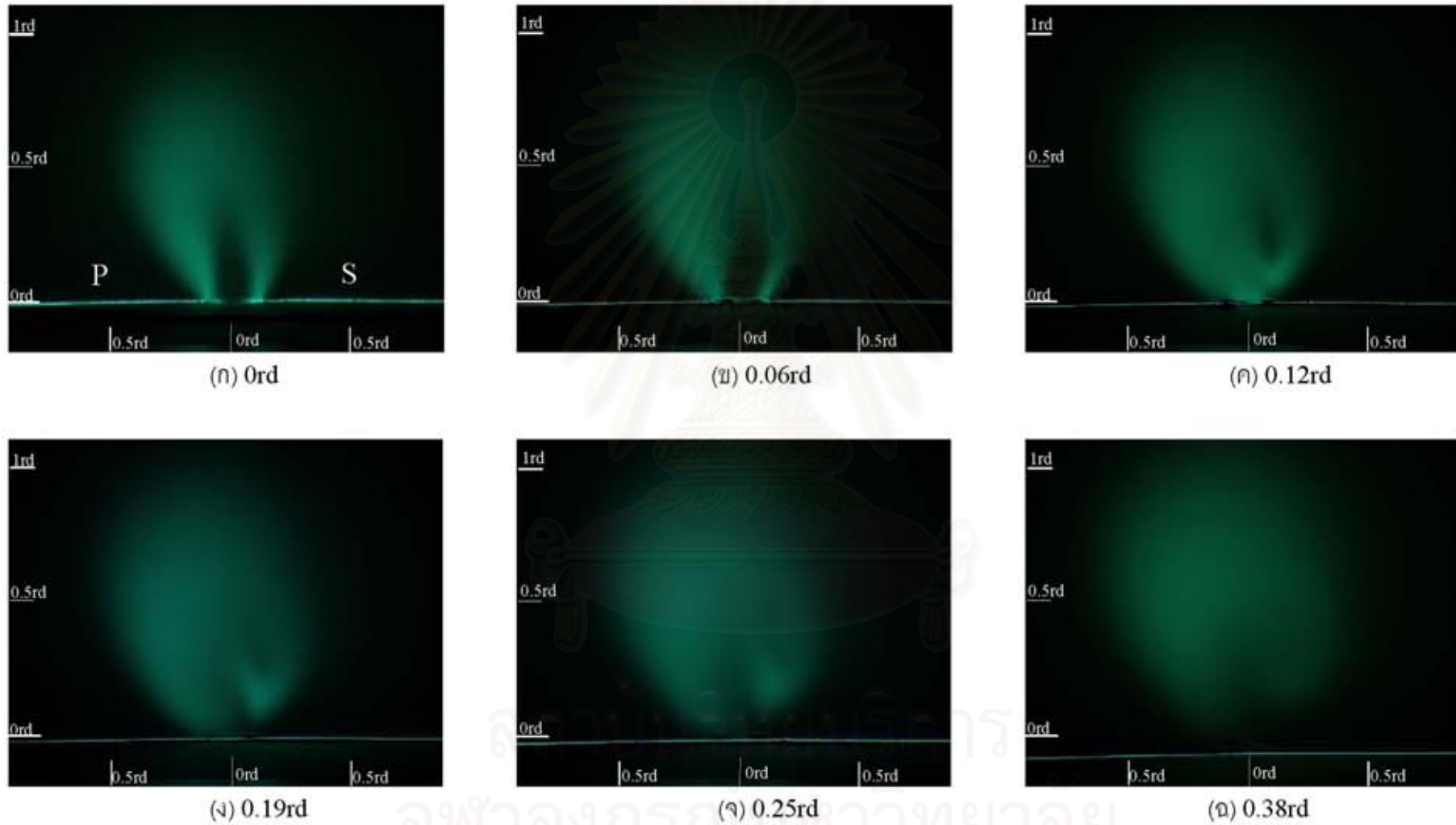


(ฉ) 3.5rd

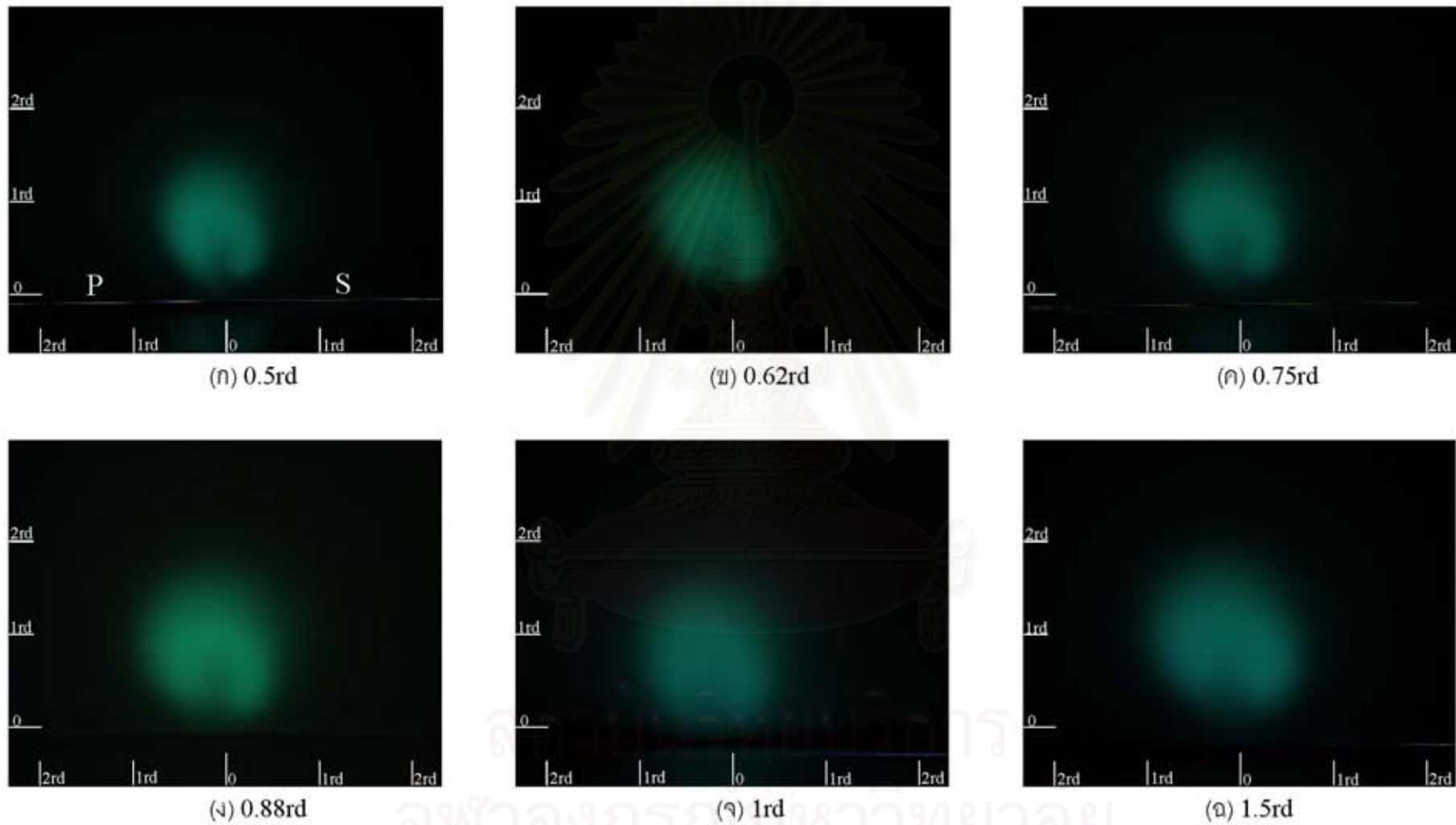


(จ) 4rd

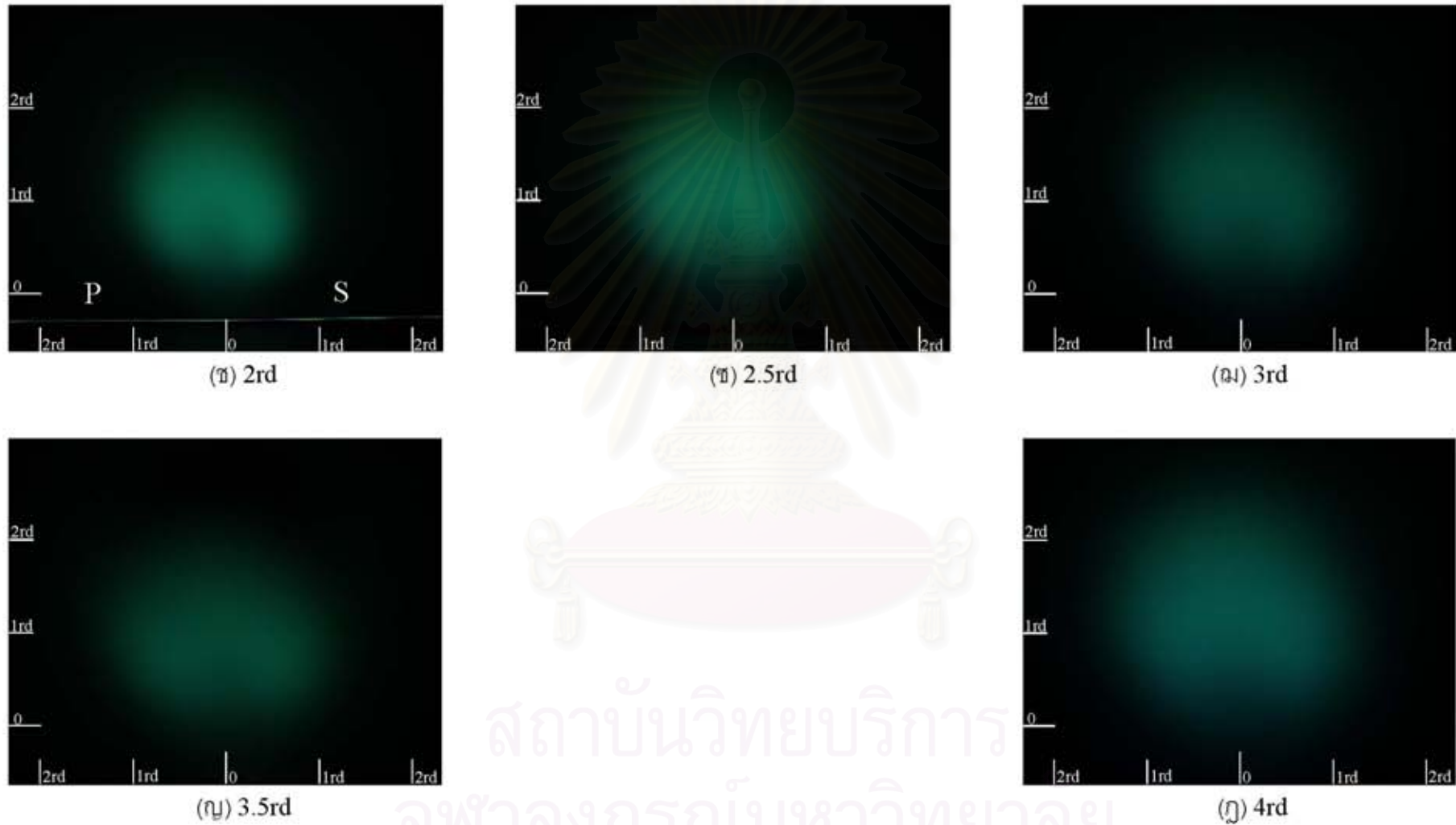
รูปที่ 3.22.3 ภาพขณะไตไน แต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr08



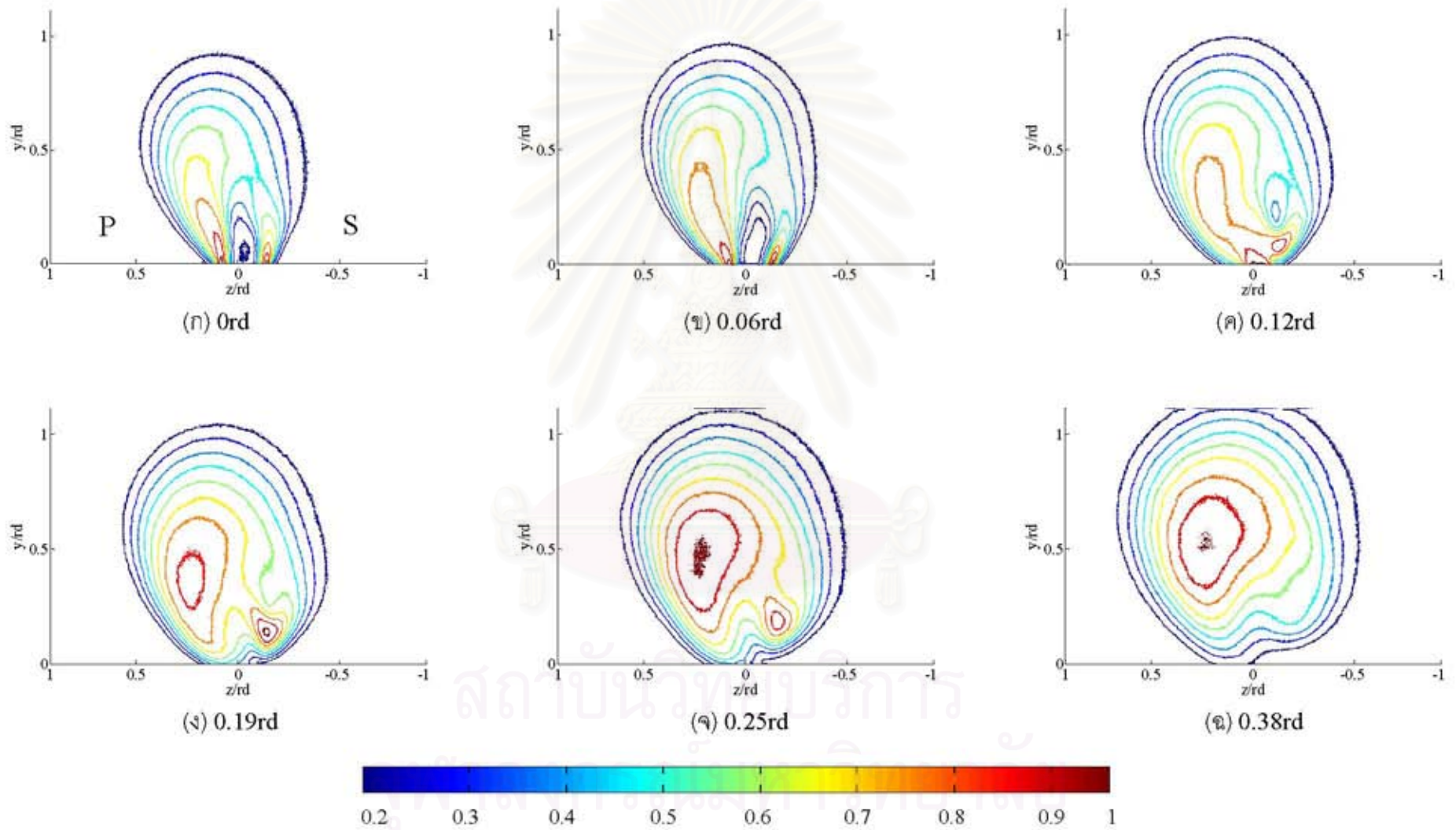
รูปที่ 3.23.1 ภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr08



รูปที่ 3.23.2 ภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr08

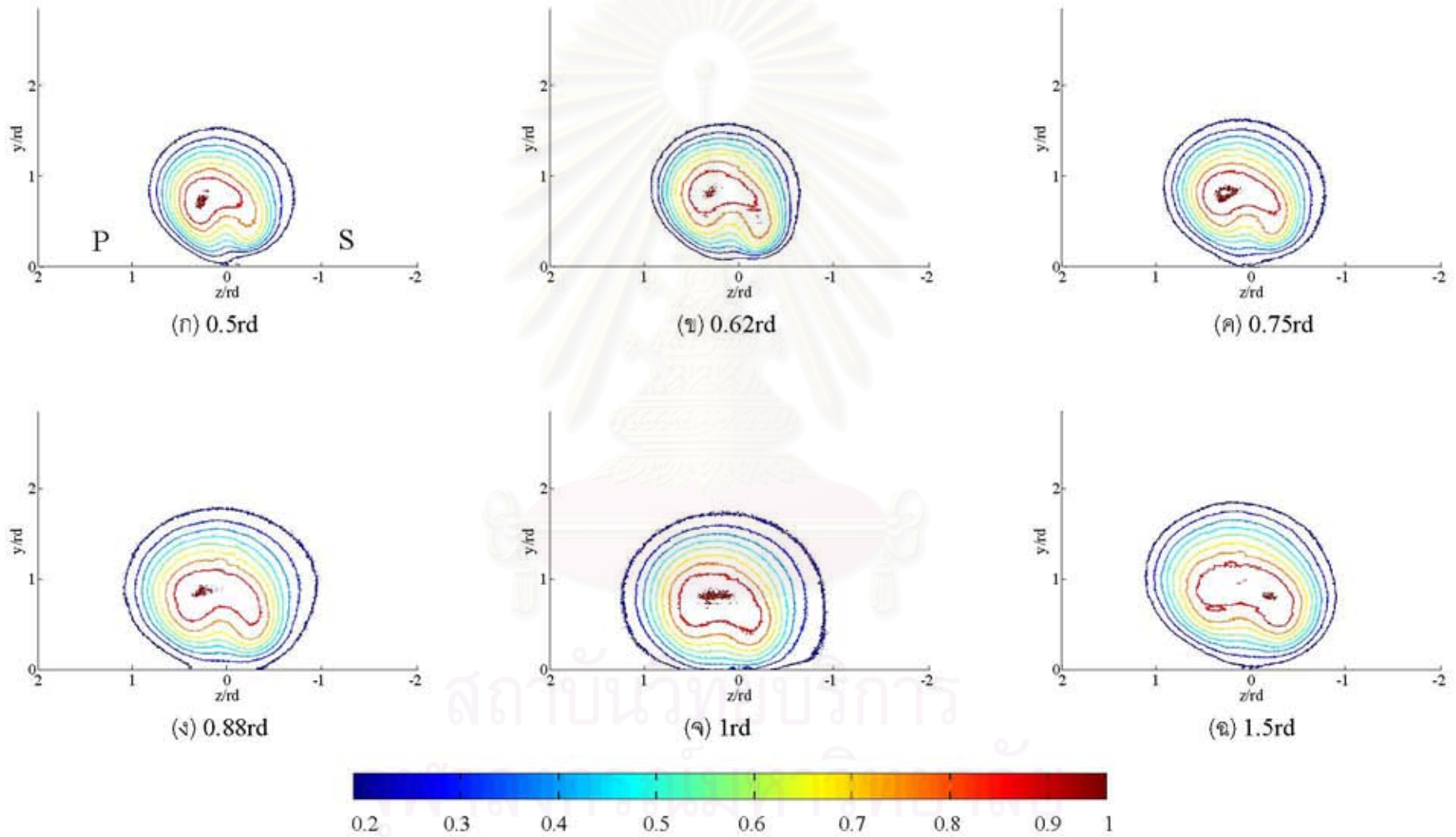


รูปที่ 3.23.3 ภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr08

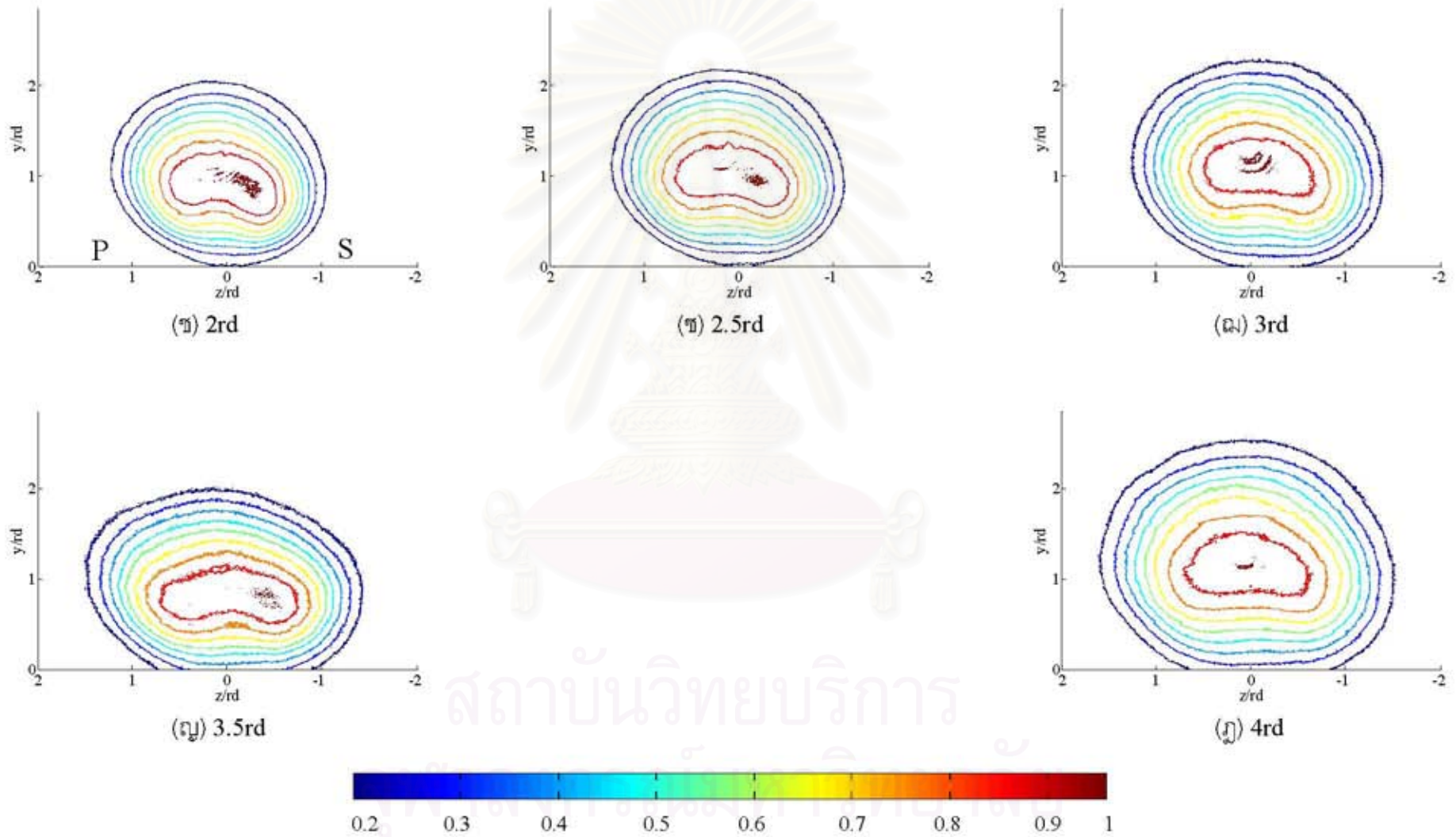


รูปที่ 3.24.1 Contour ของภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr08

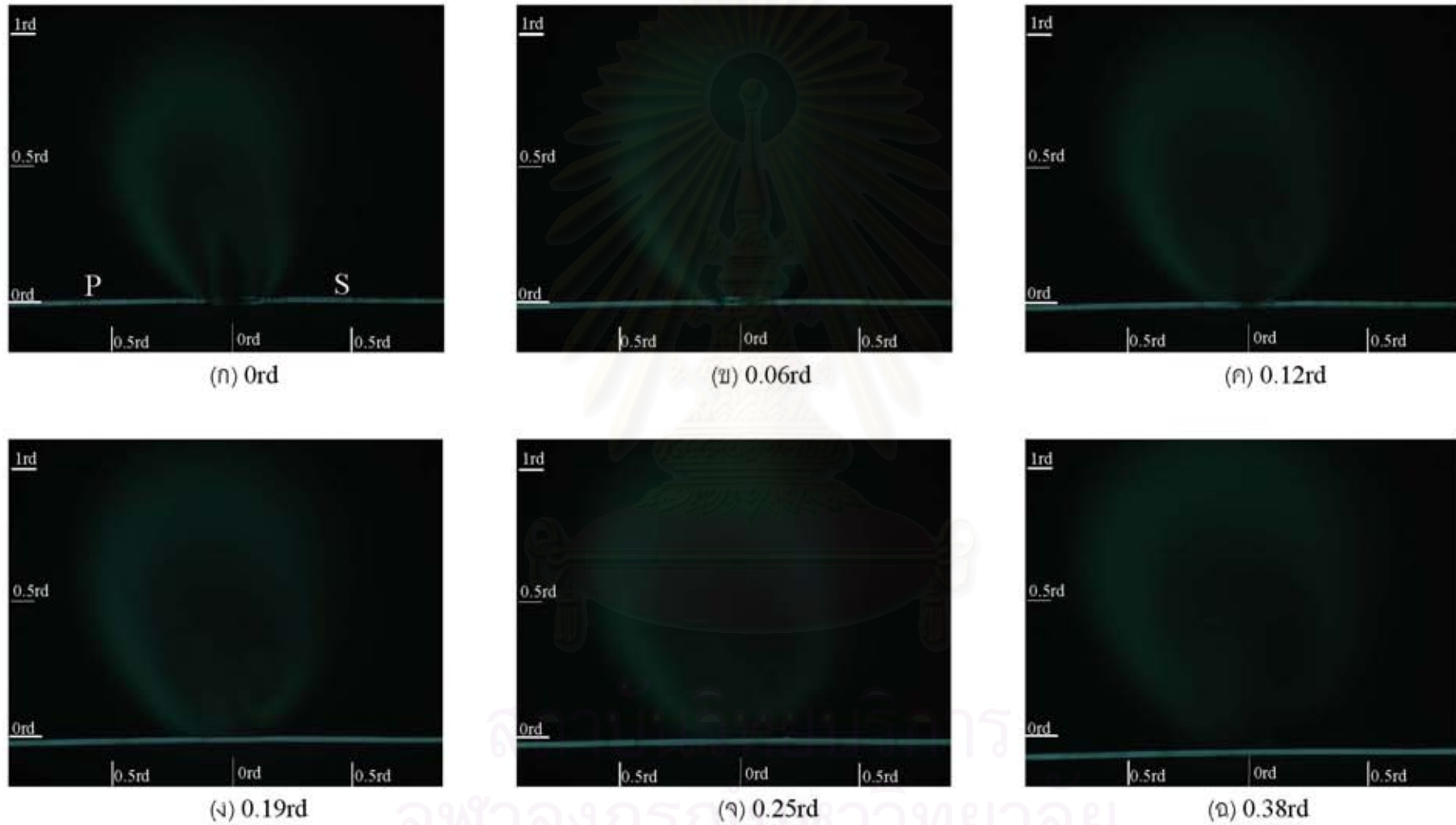




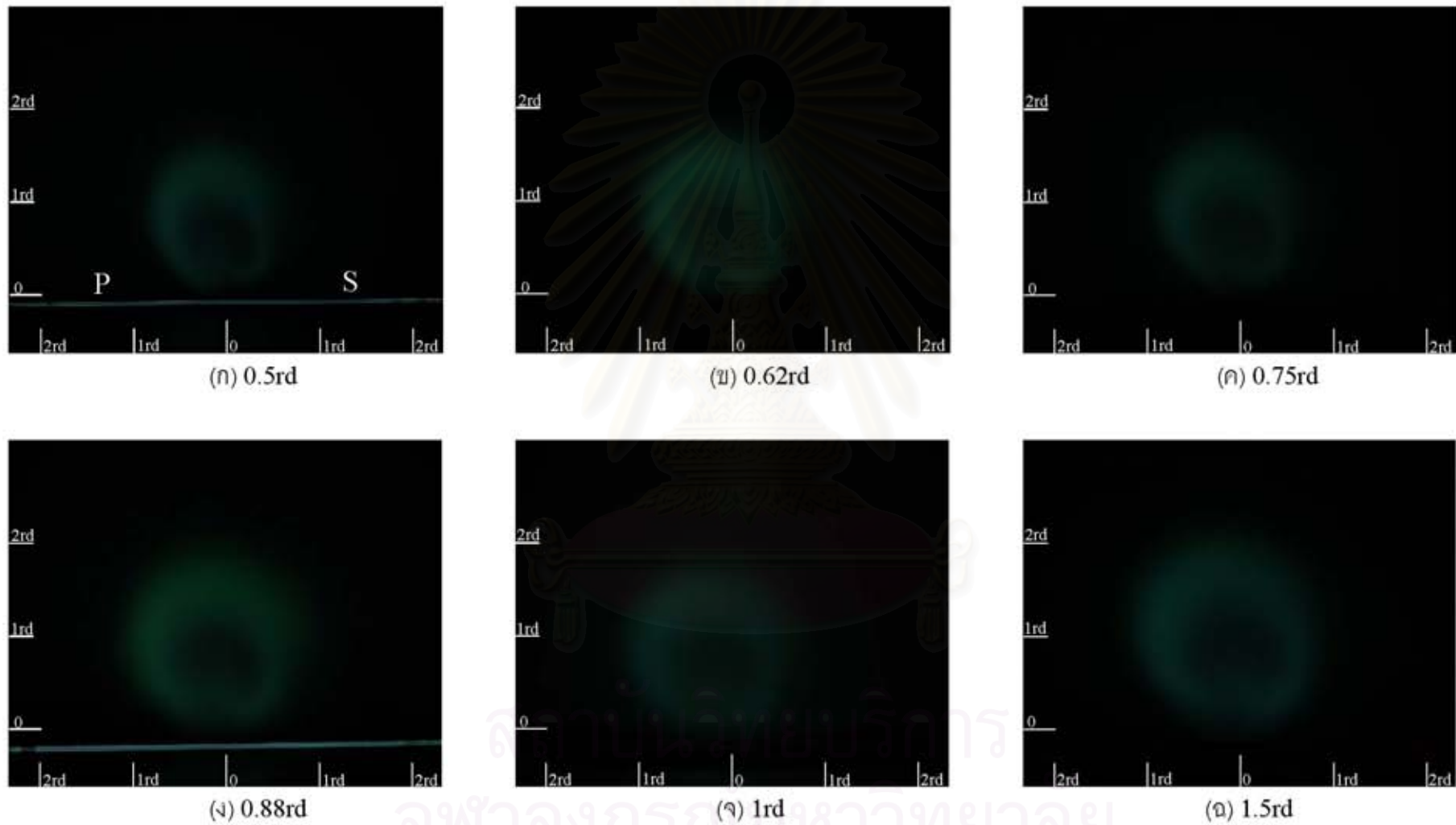
รูปที่ 3.24.2 Contour ของภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr08



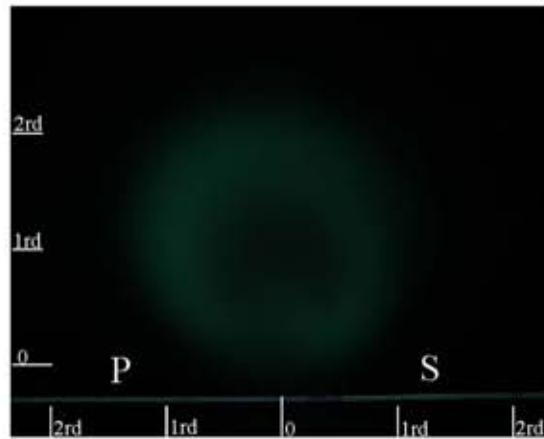
รูปที่ 3.24.3 Contour ของภาพเฉลี่ยในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr08



รูปที่ 3.25.1 ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานใน แต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr08



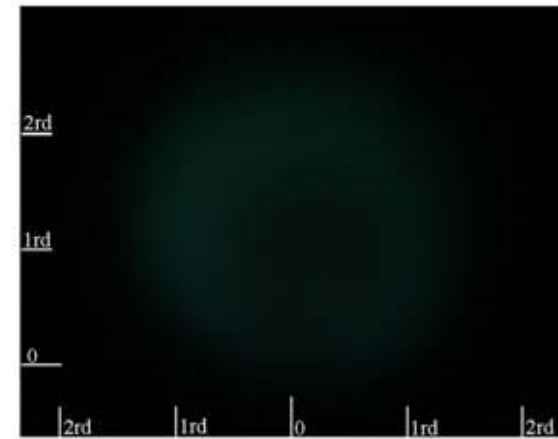
รูปที่ 3.25.2 ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานใน แต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr08



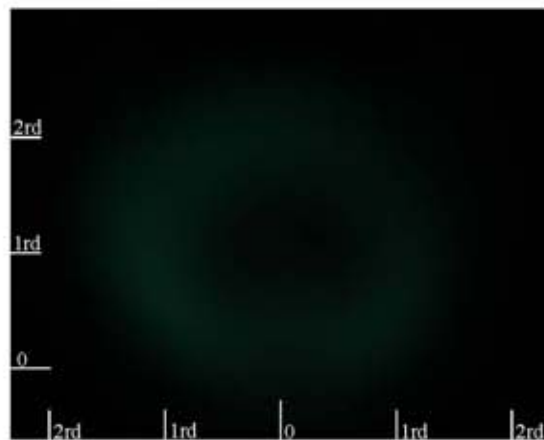
(ก) 2rd



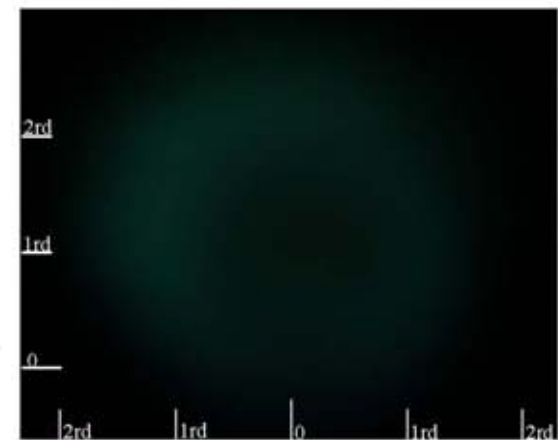
(ข) 2.5rd



(ค) 3rd



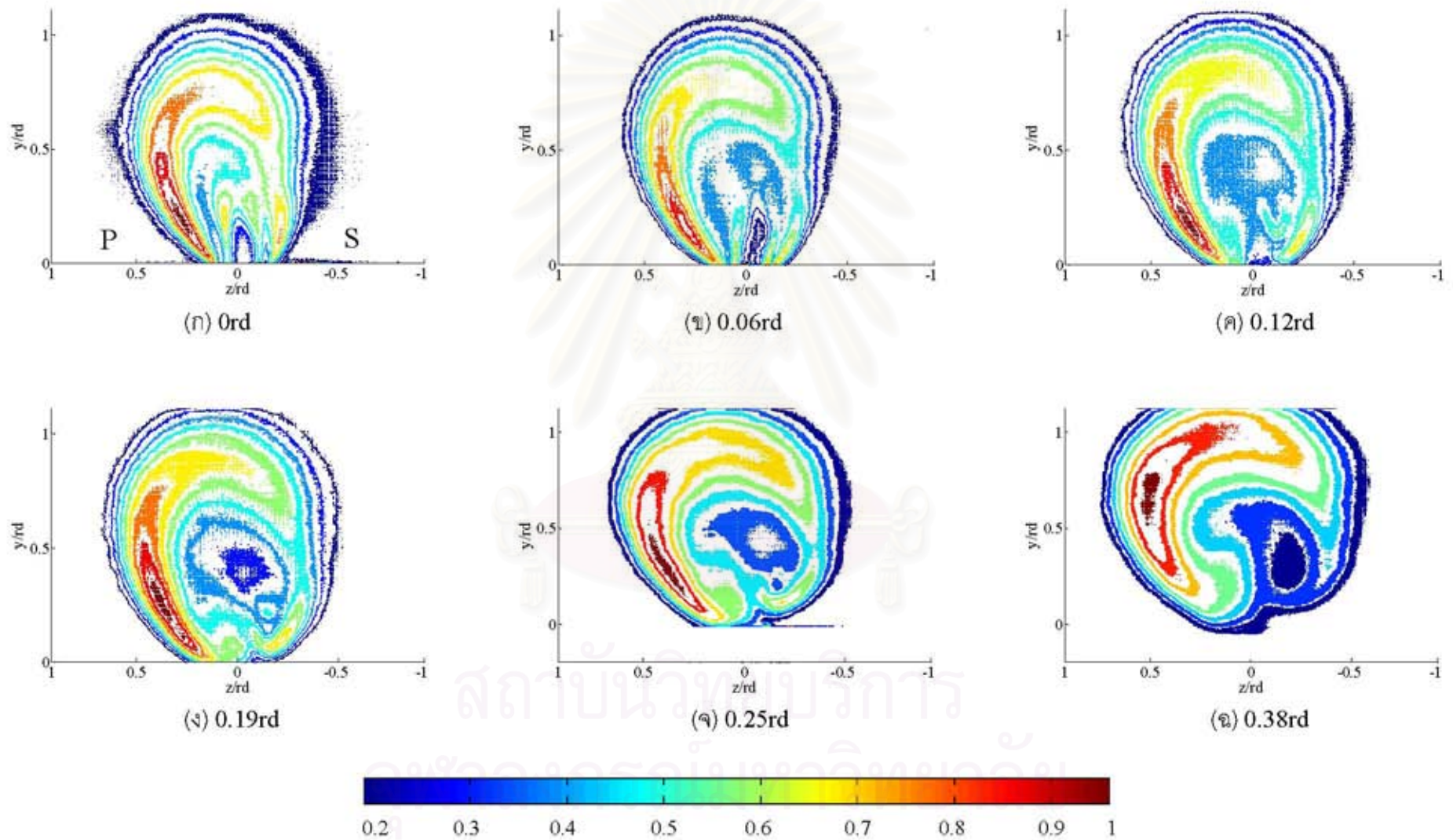
(ง) 3.5rd



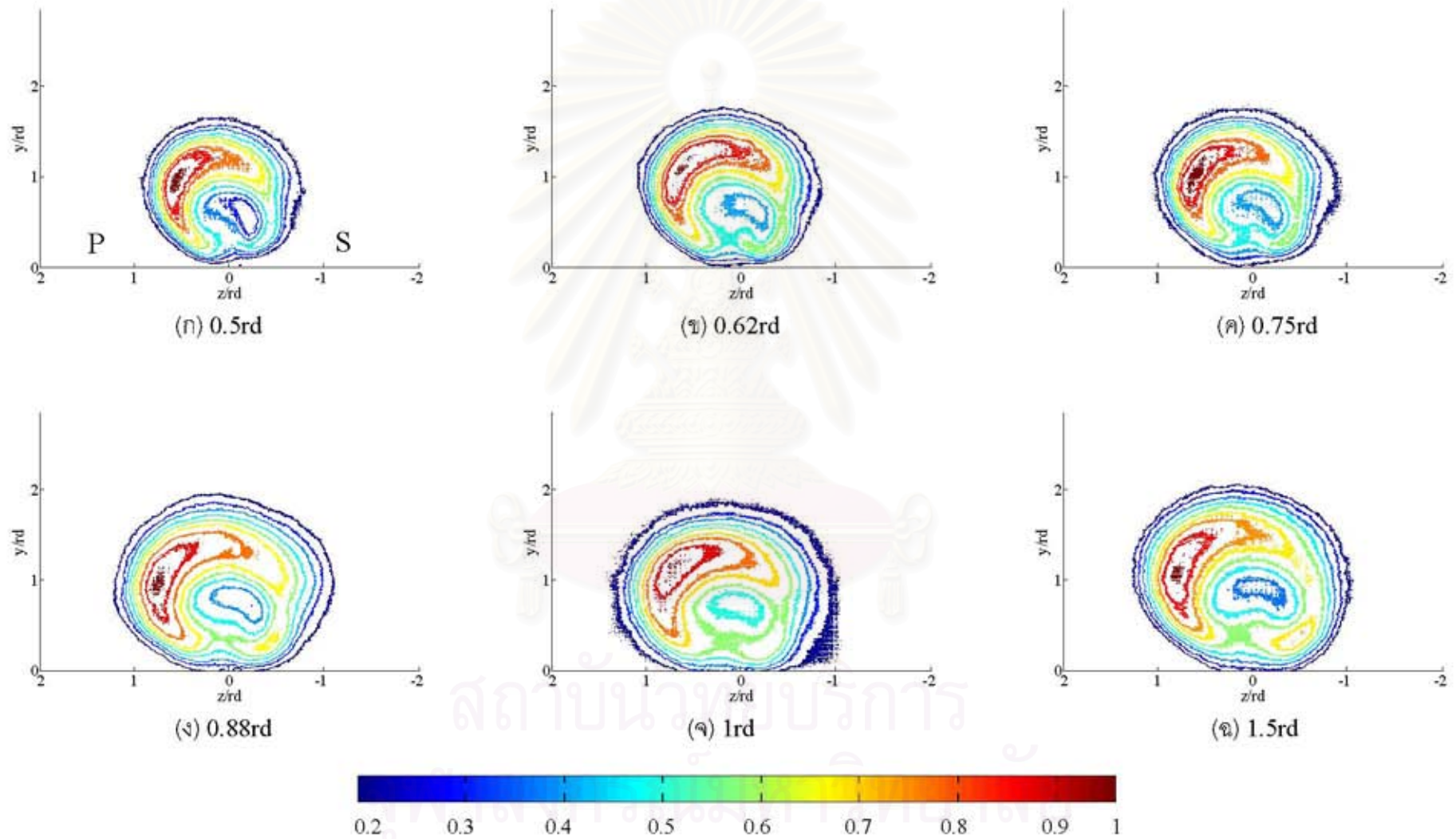
(จ) 4rd

รูปที่ 3.25.3 ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr08

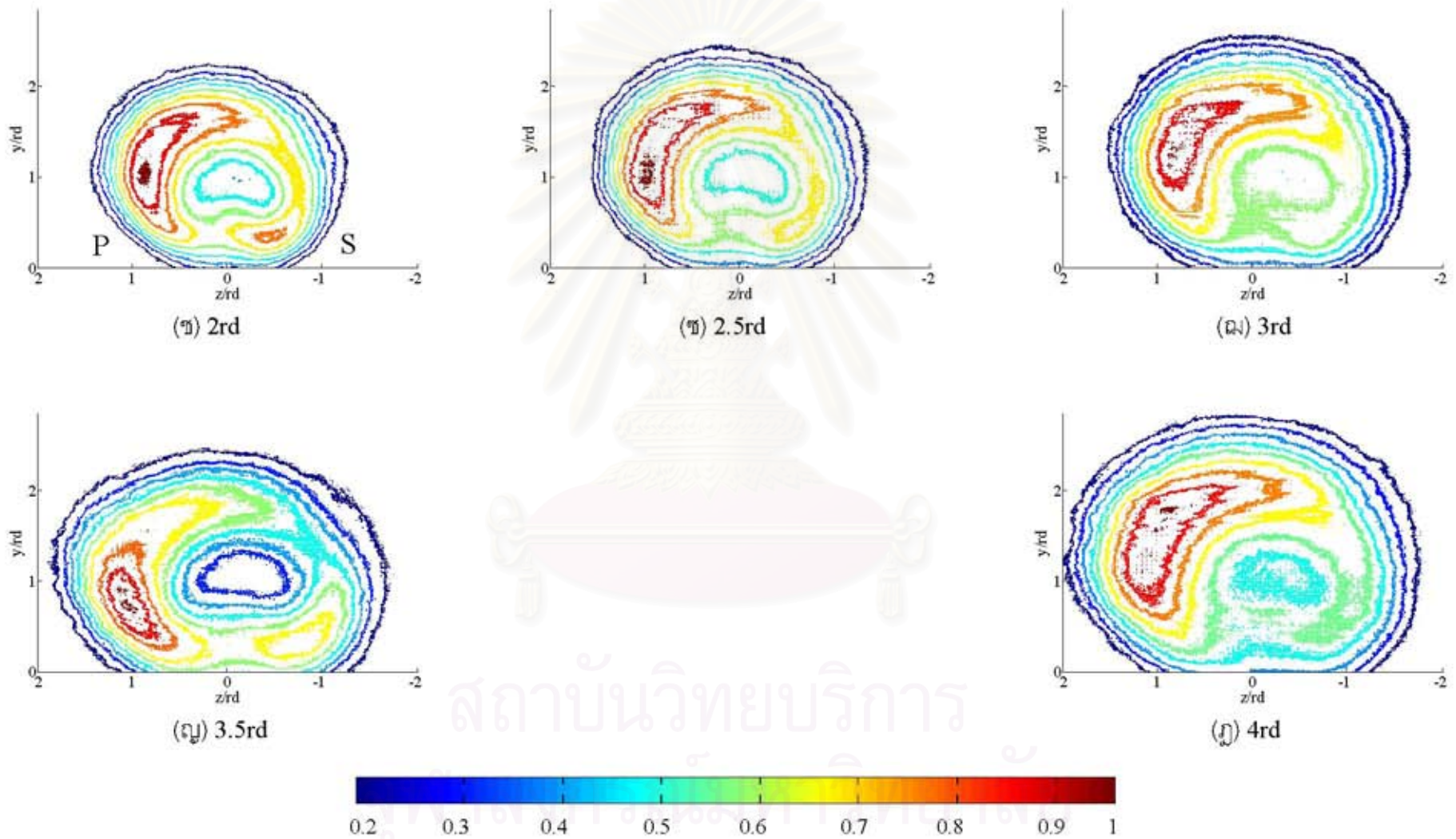




รูปที่ 3.26.1 Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr08

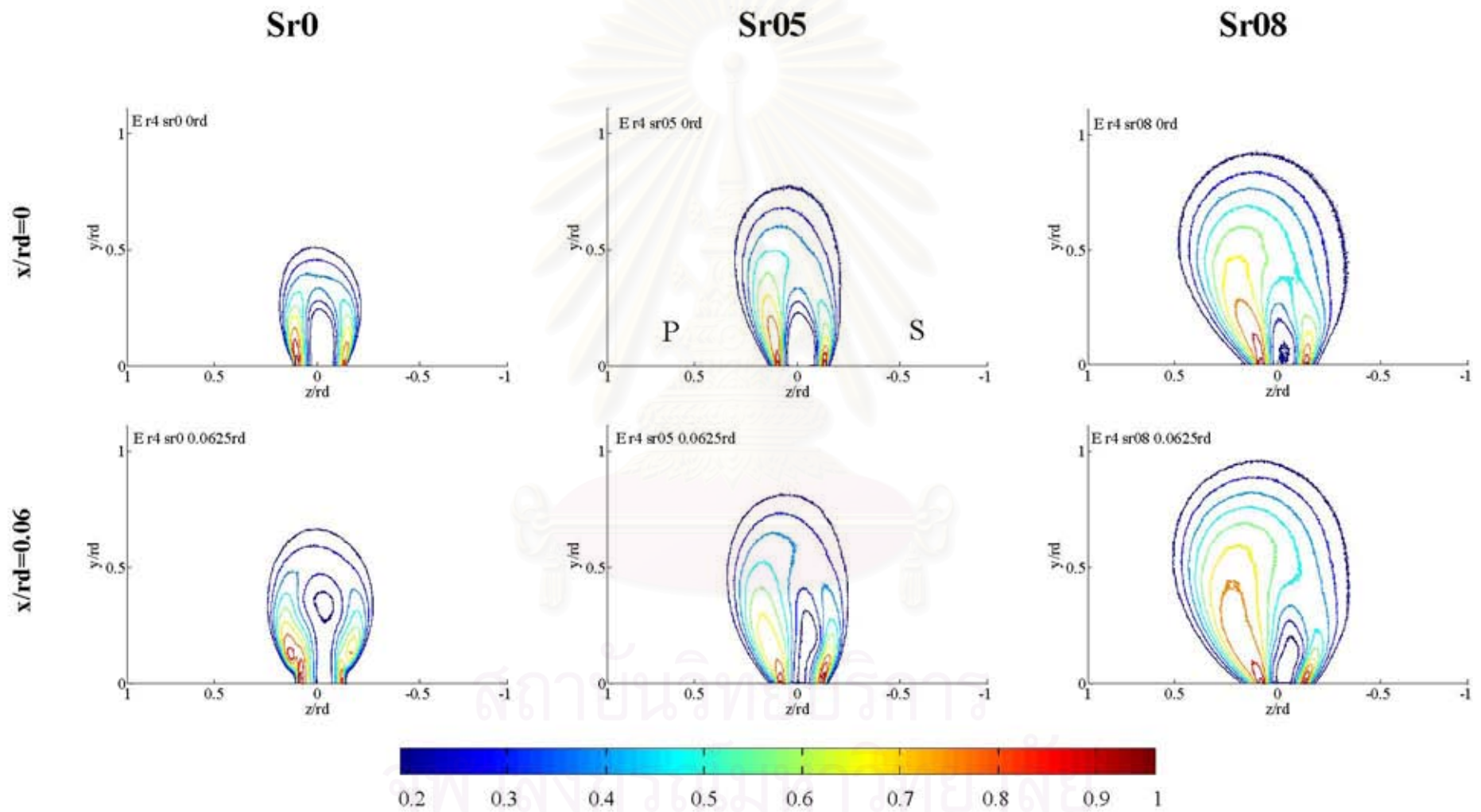


รูปที่ 3.26.2 Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr08

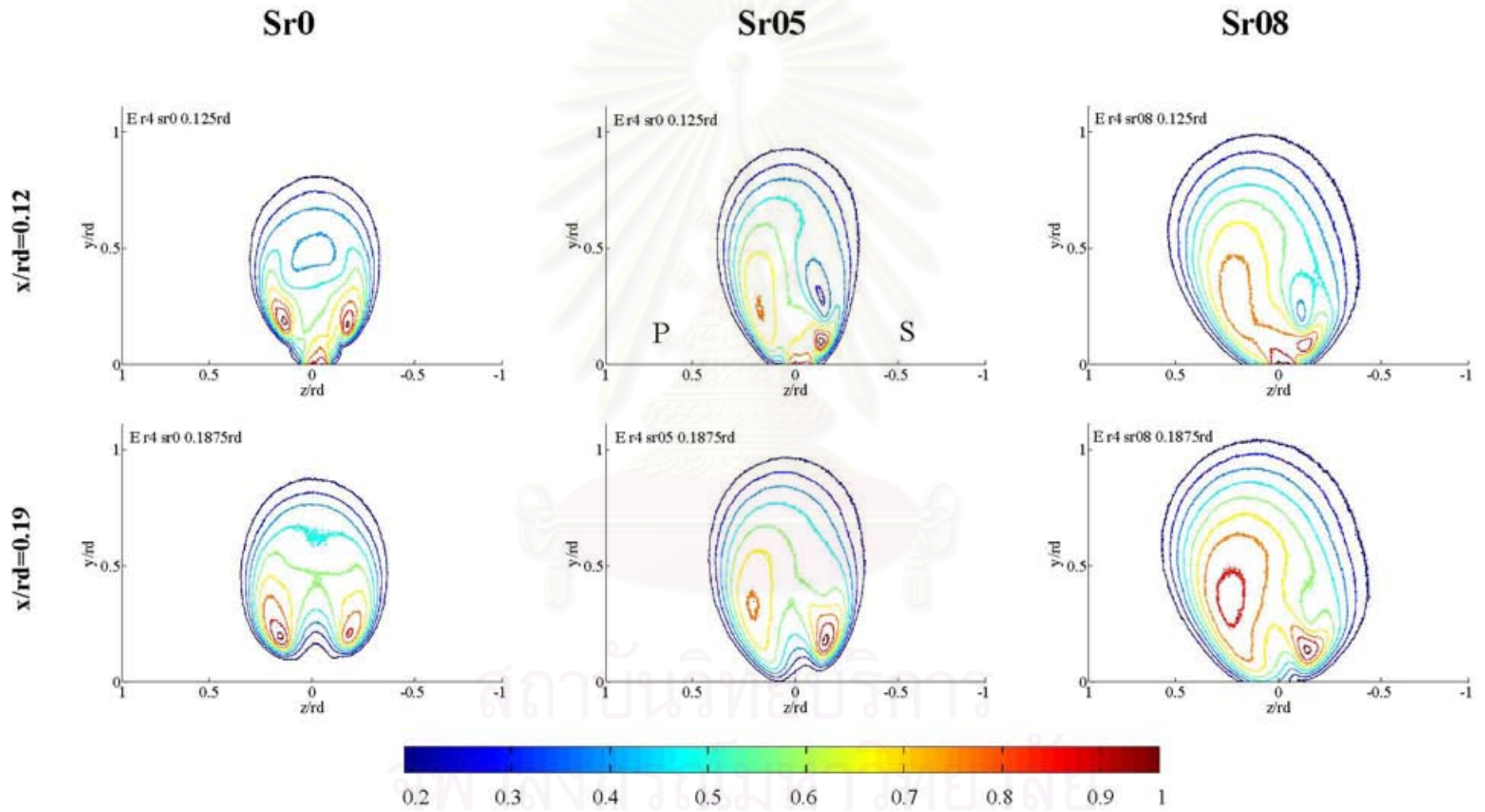


รูปที่ 3.26.3 Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr08



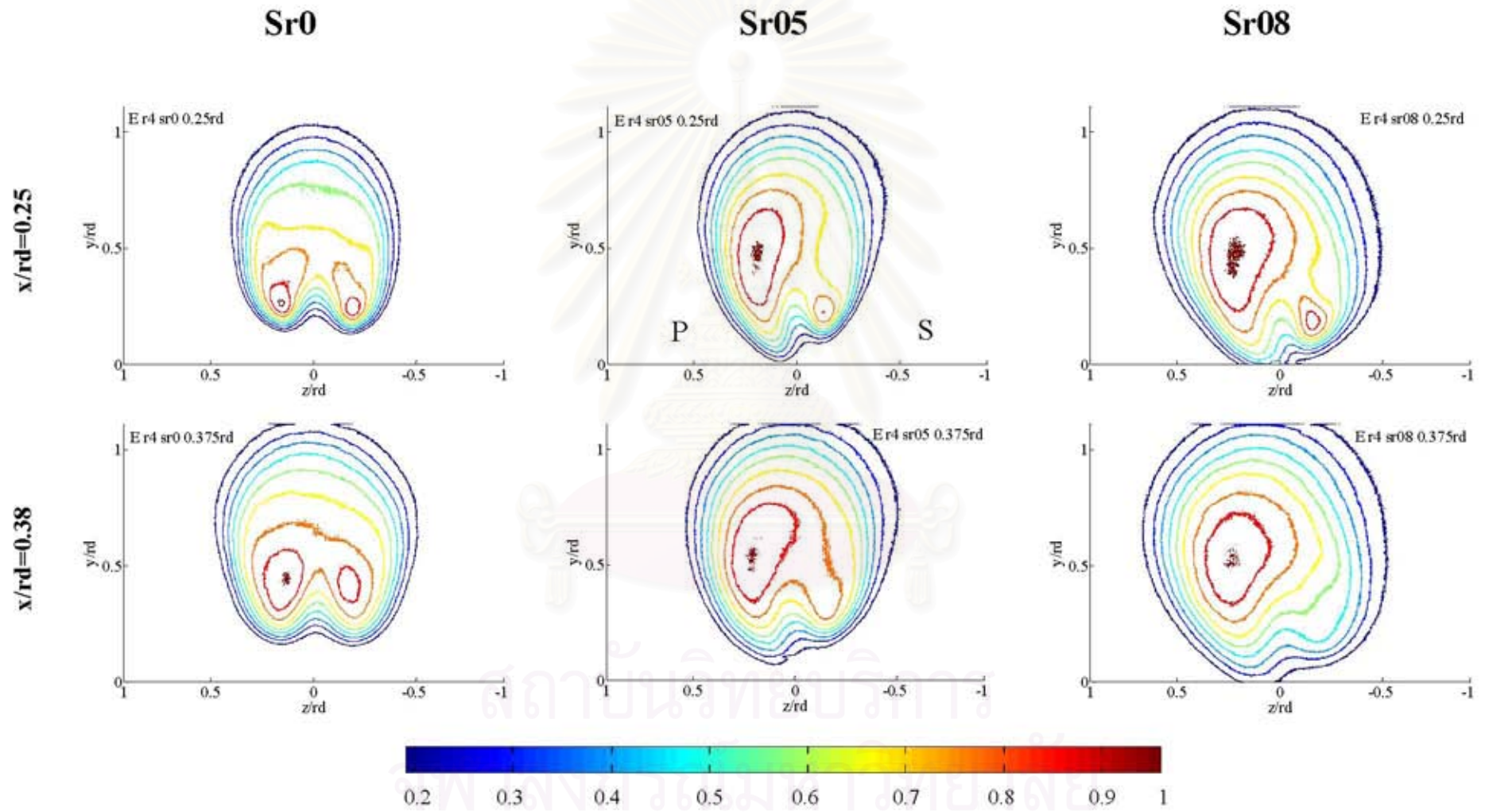


รูปที่ 3.27ก Contourภาพเฉลี่ยสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)

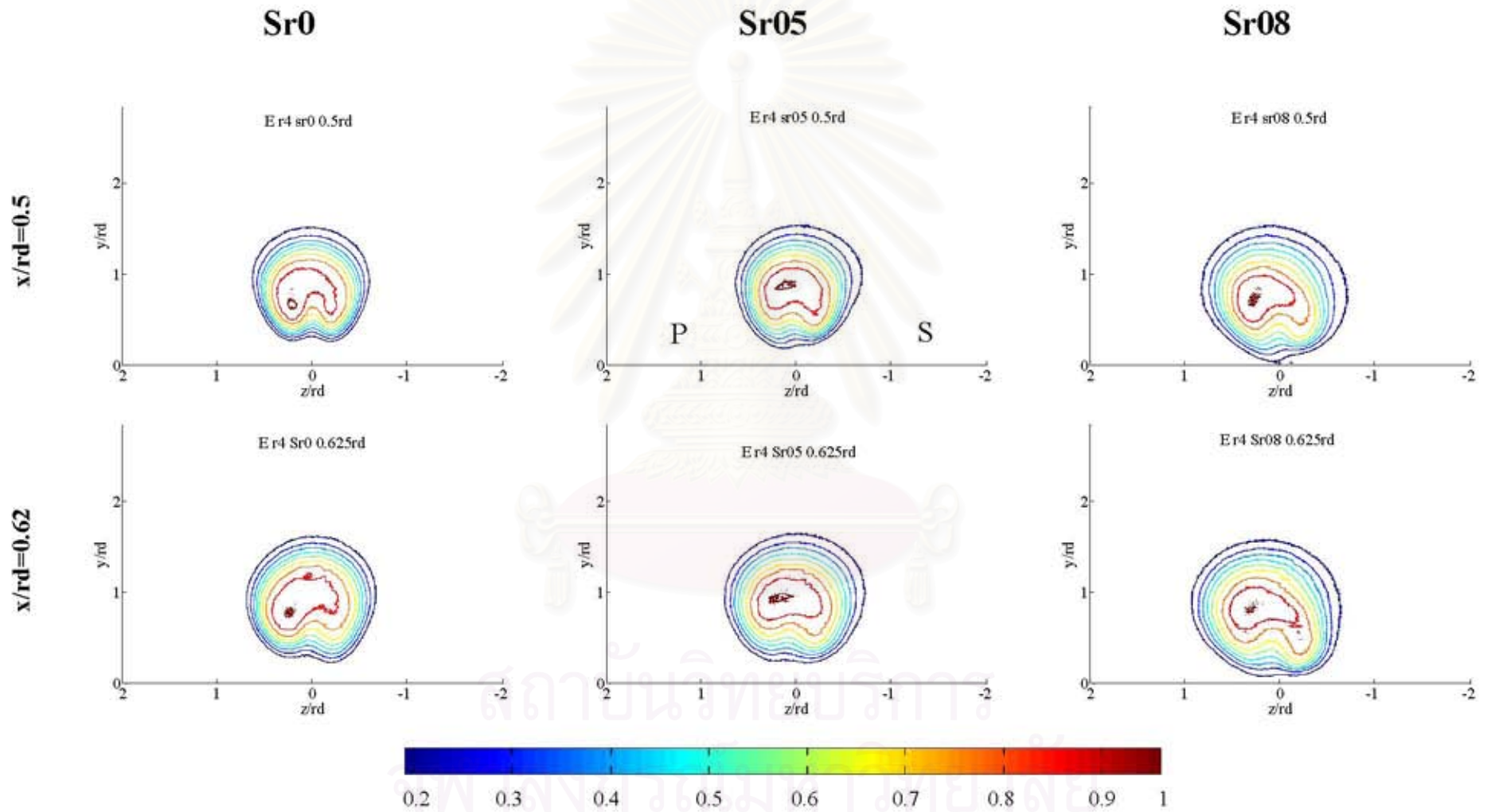


รูปที่ 3.27ข Contourภาพเฉลี่ยสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)

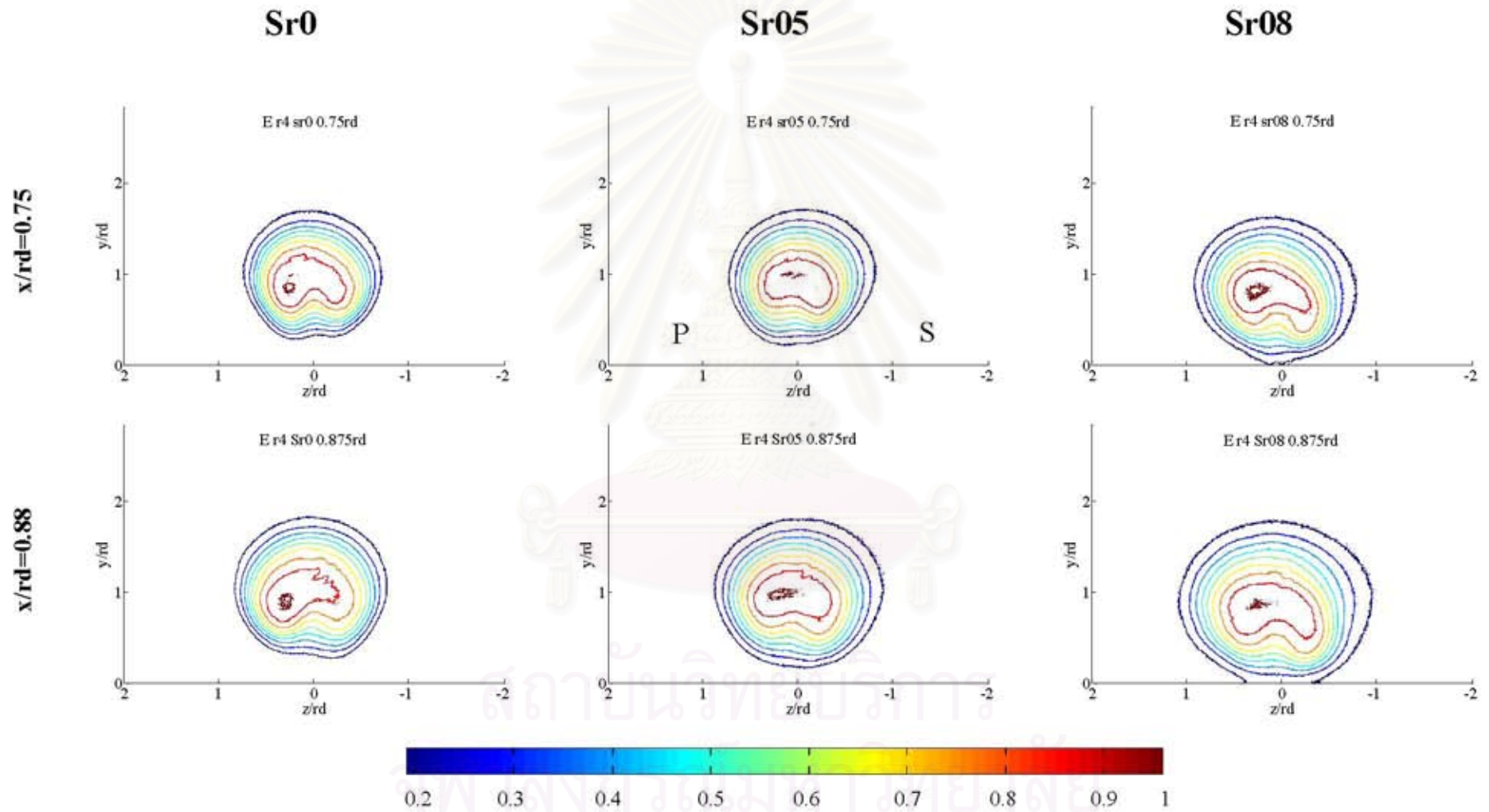




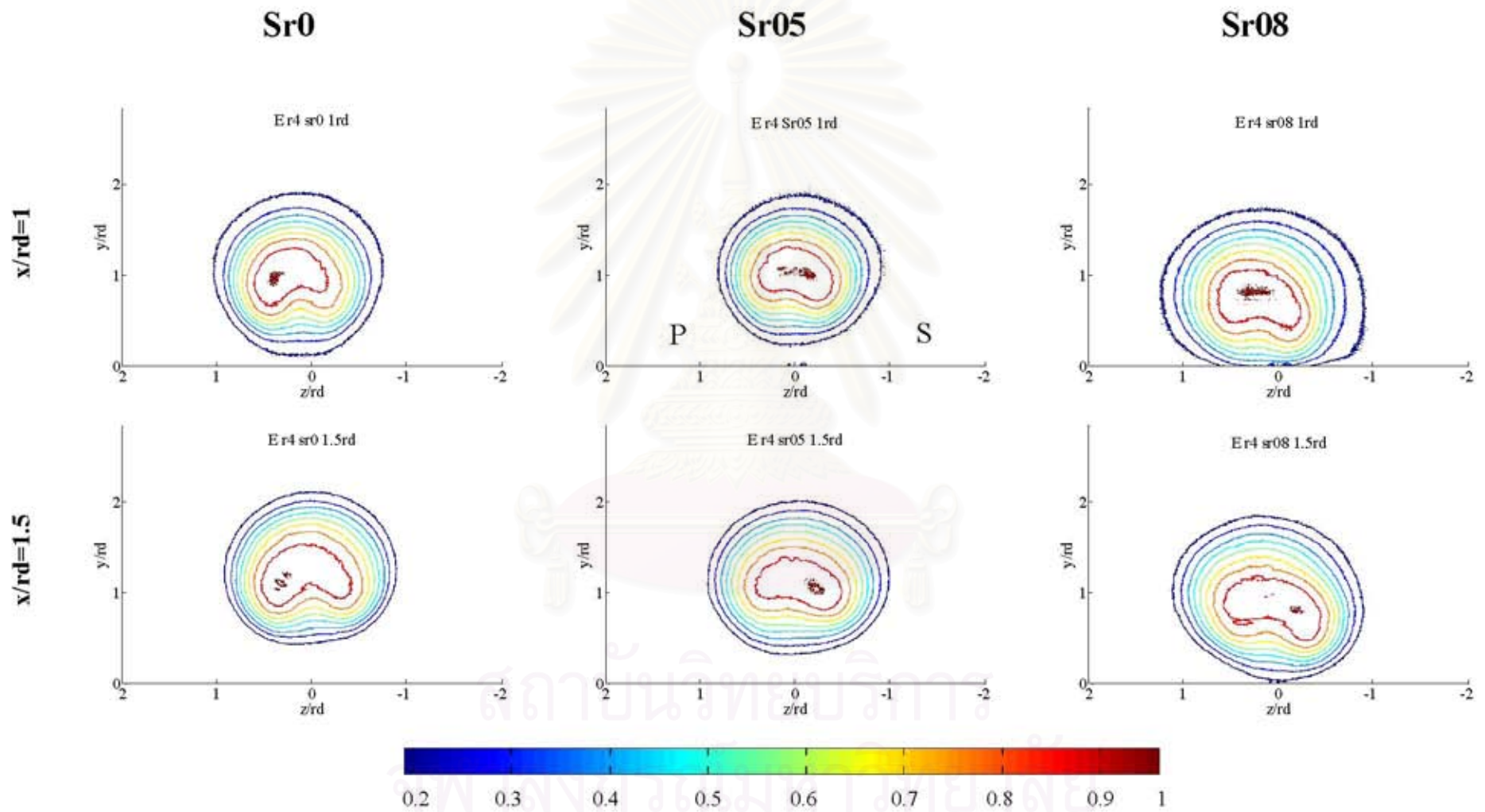
รูปที่ 3.27ค Contourภาพเฉลี่ยสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)



รูปที่ 3.27ง Contourภาพเฉลี่ยสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)

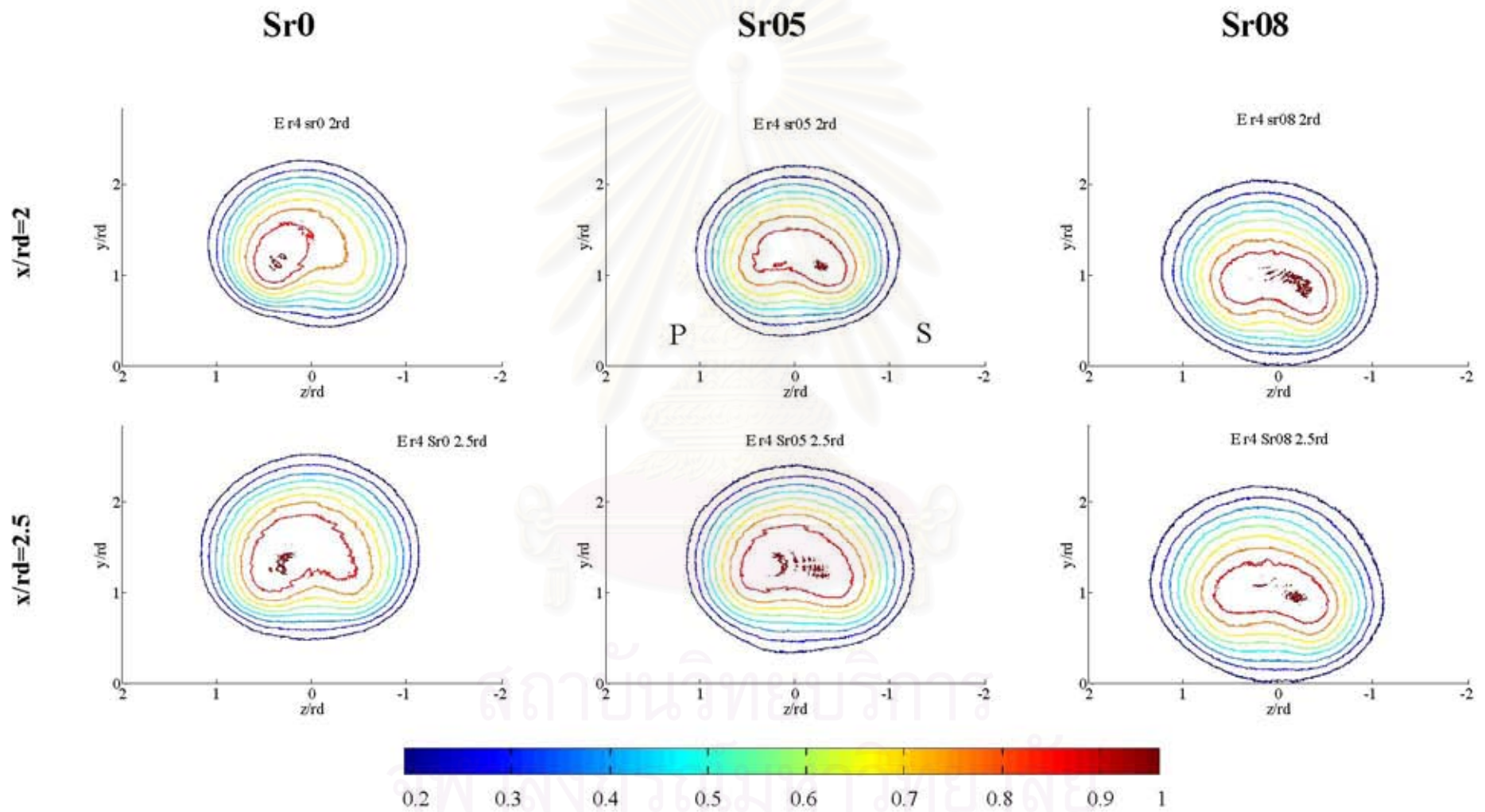


รูปที่ 3.27จ Contourภาพเฉลี่ยสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)

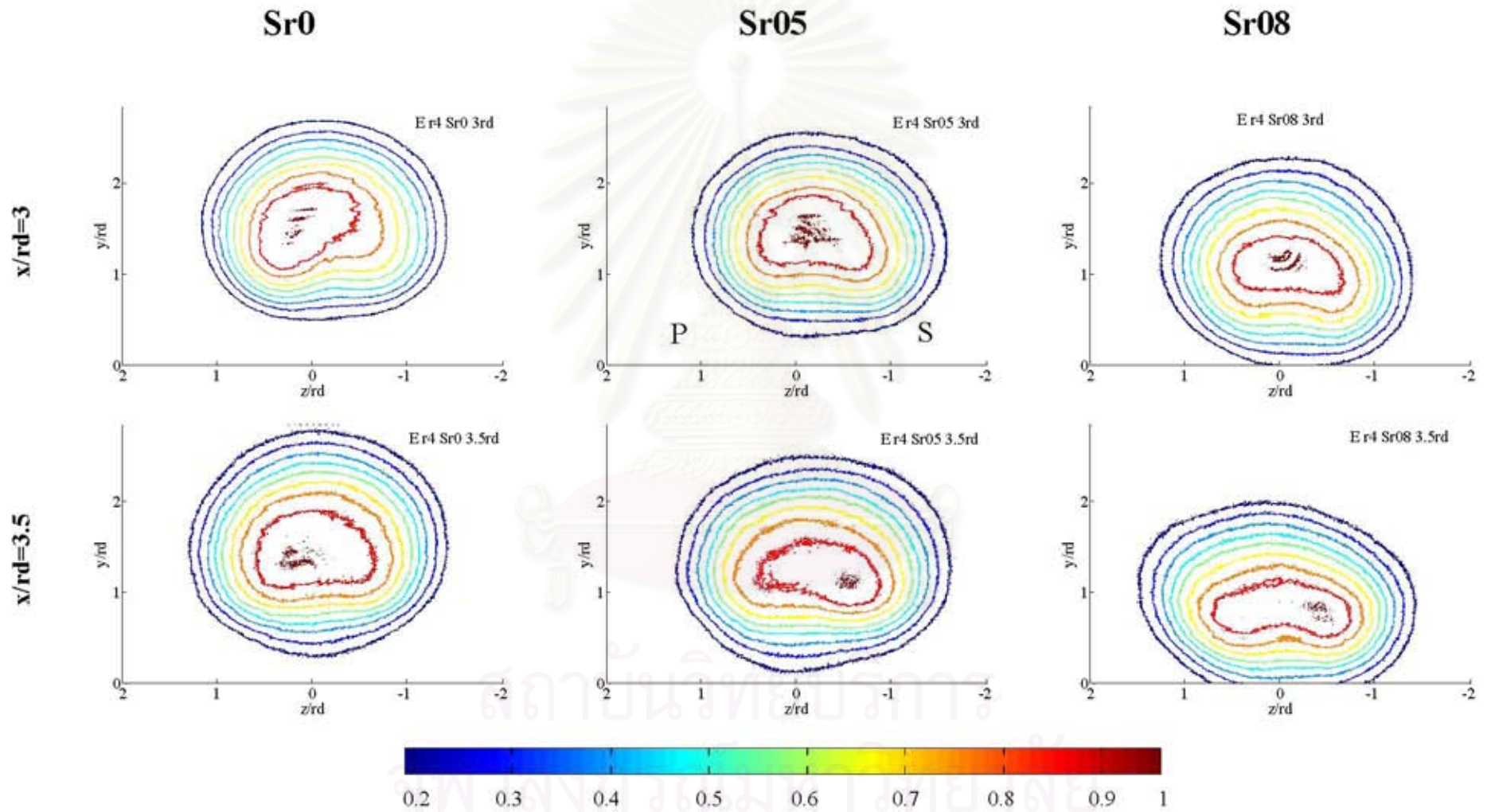


รูปที่ 3.27จ Contourภาพเฉลี่ยสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)

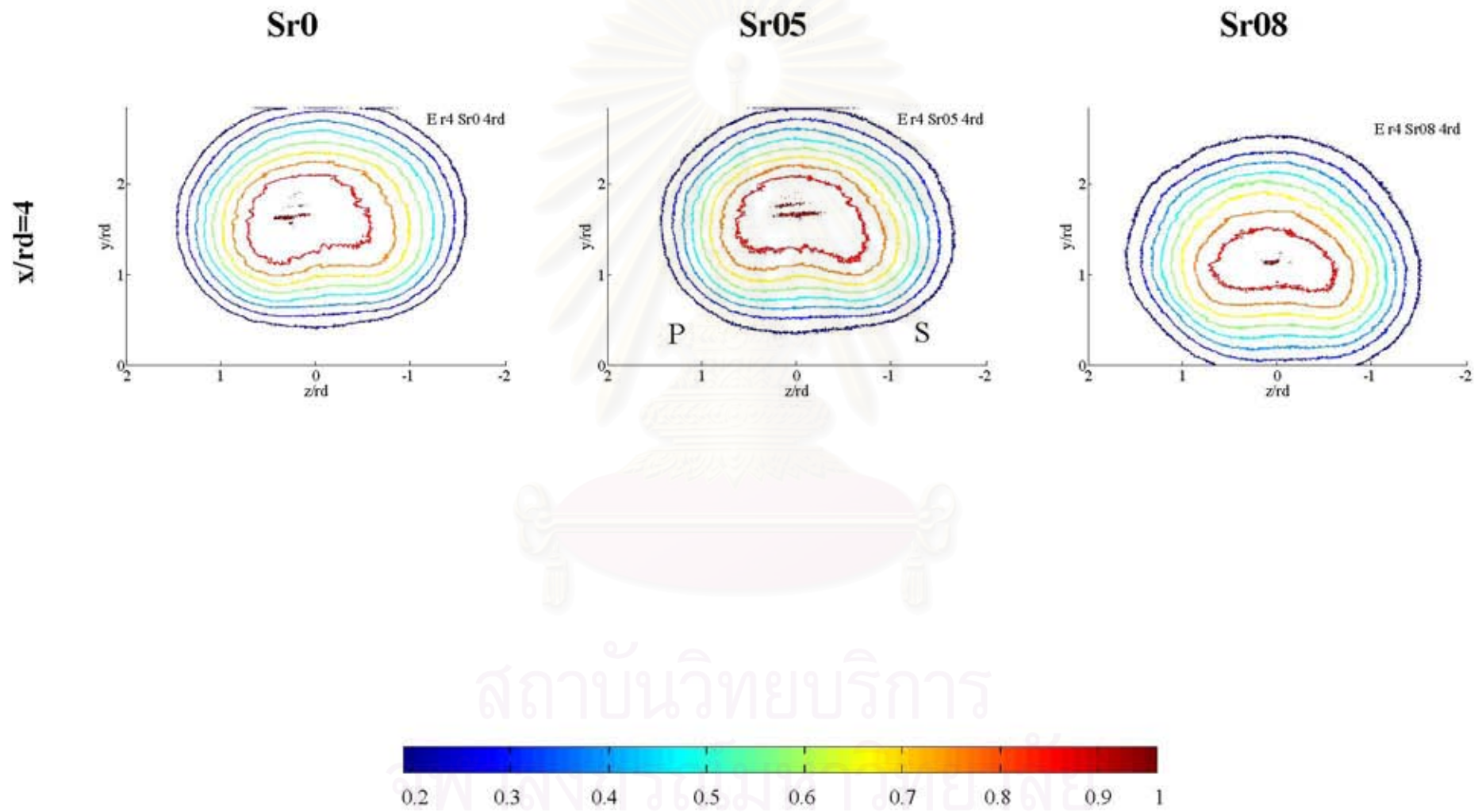




รูปที่ 3.27ข Contourภาพเฉลี่ยสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)

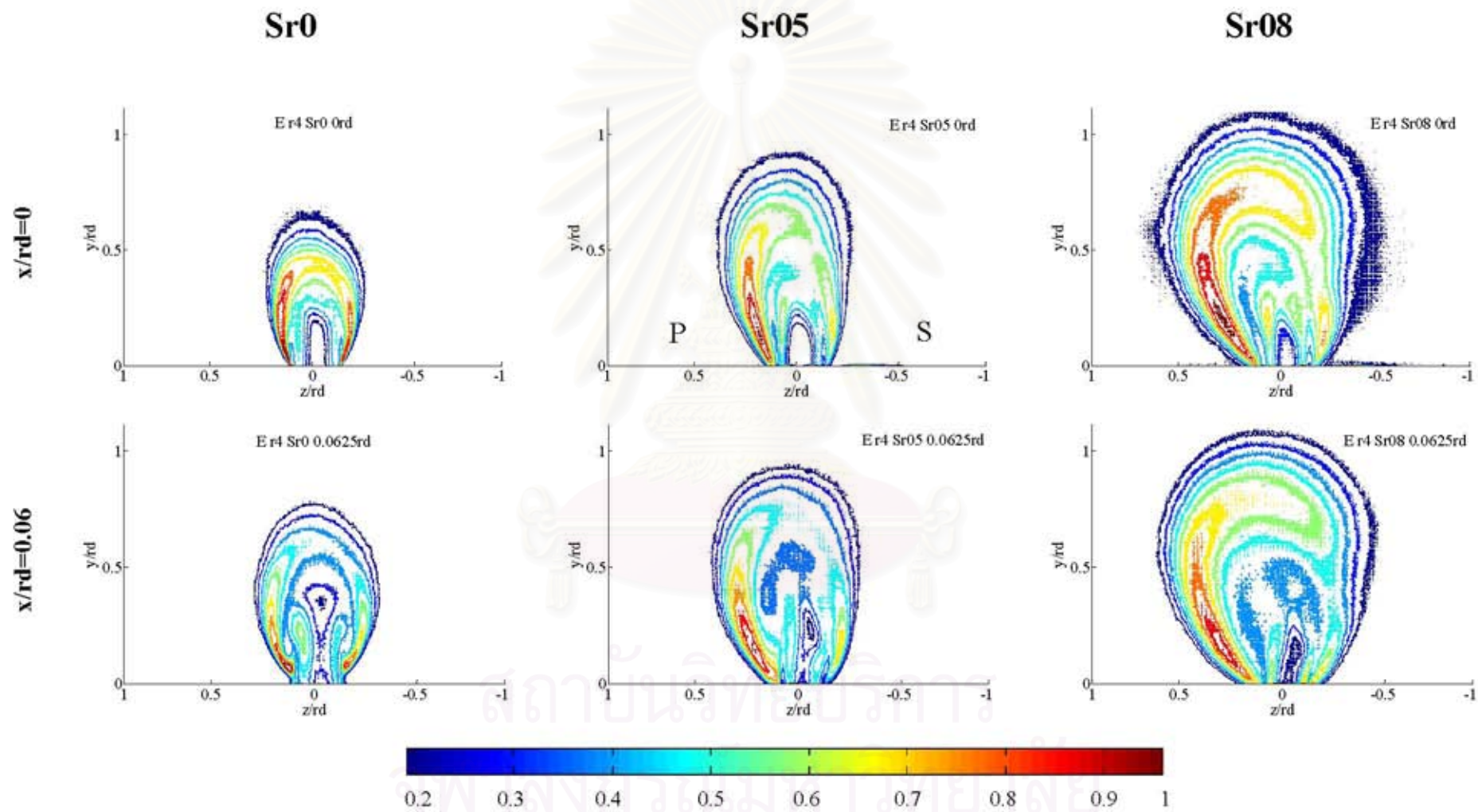


รูปที่ 3.27ข Contourภาพเฉลี่ยสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)



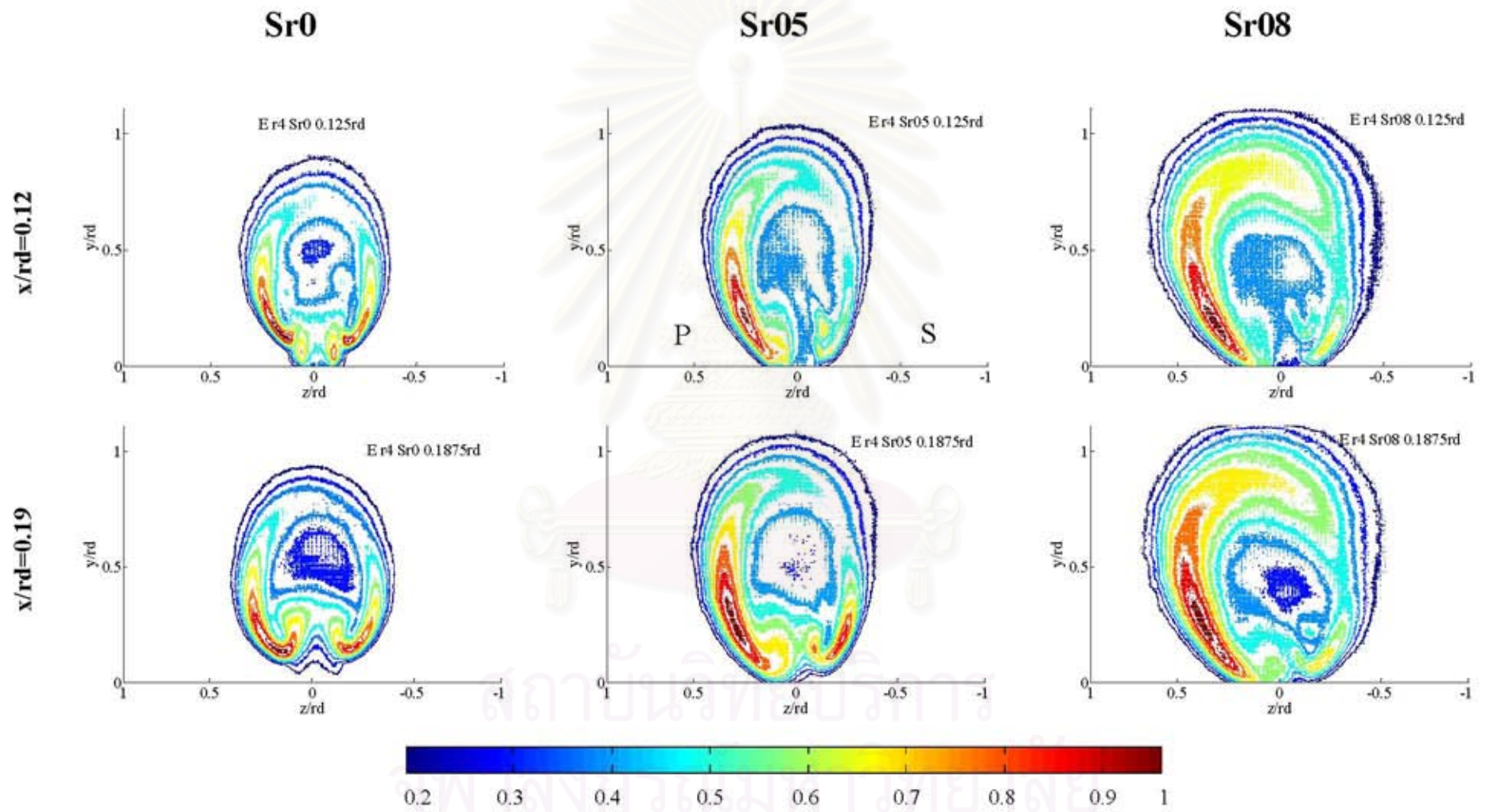
รูปที่ 3.27 ฉ Contour ภาพเฉลี่ยสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)



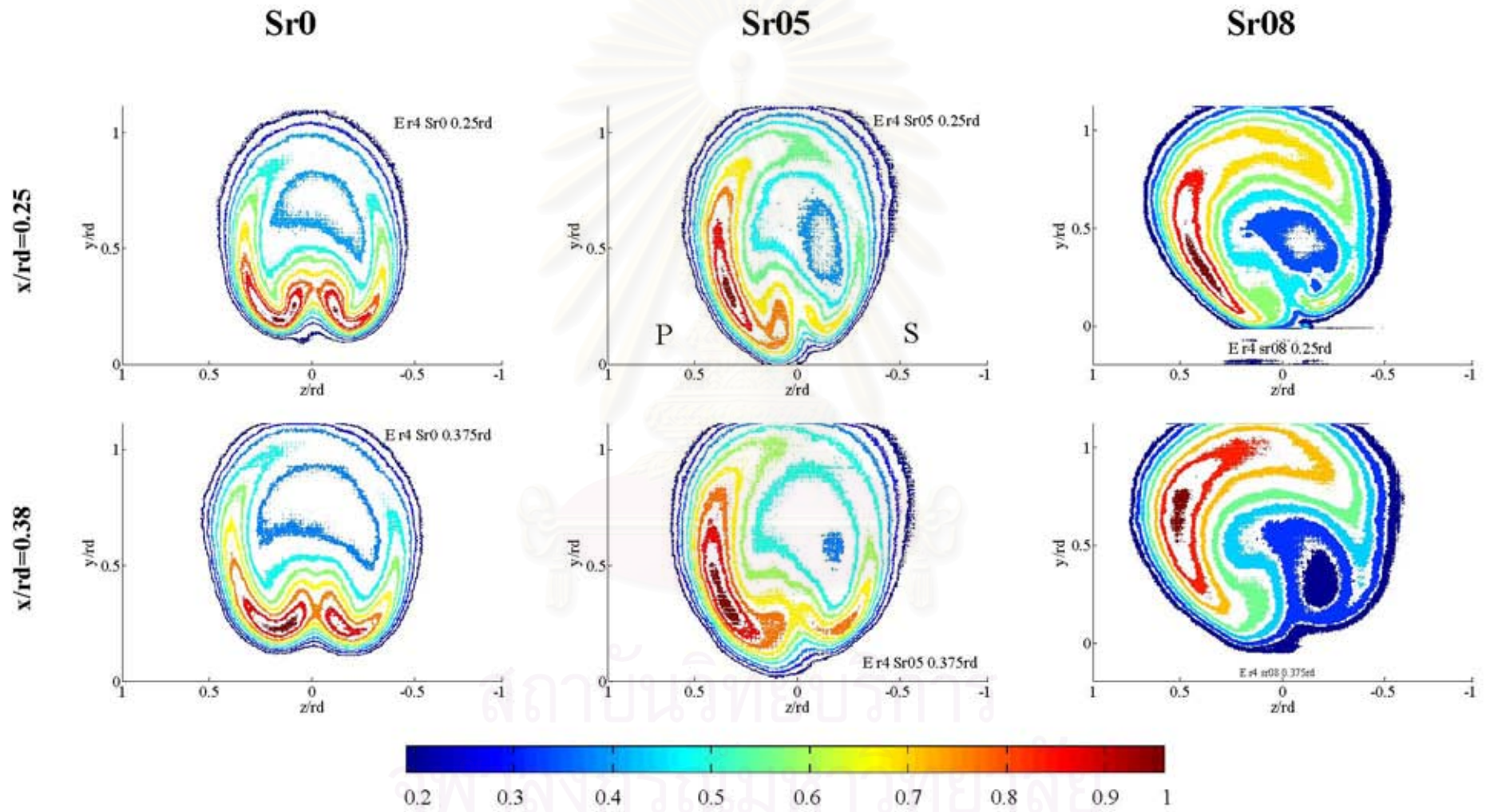


รูปที่ 3.28ก Contourภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ )

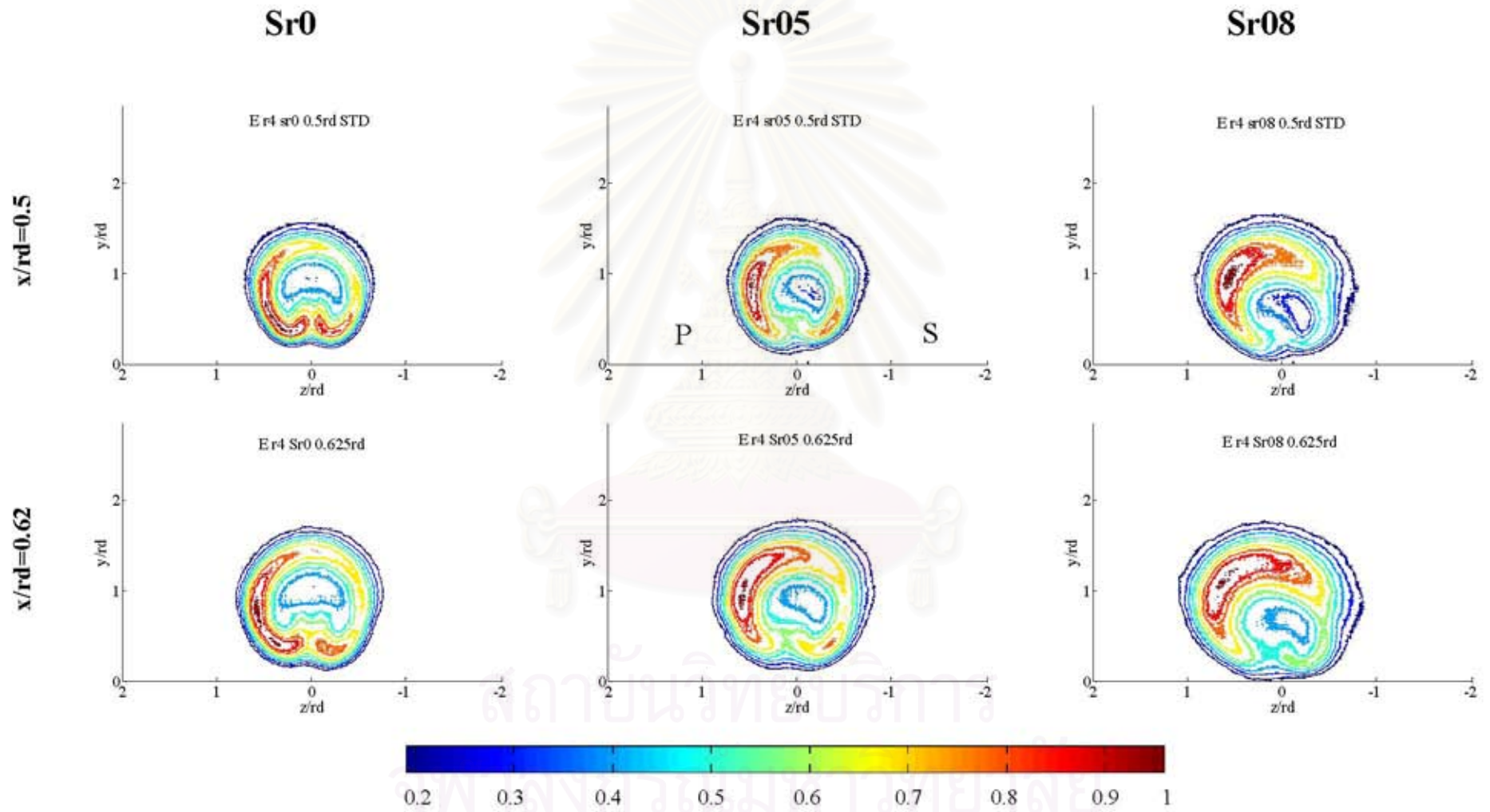




รูปที่ 3.28 ข Contour ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)

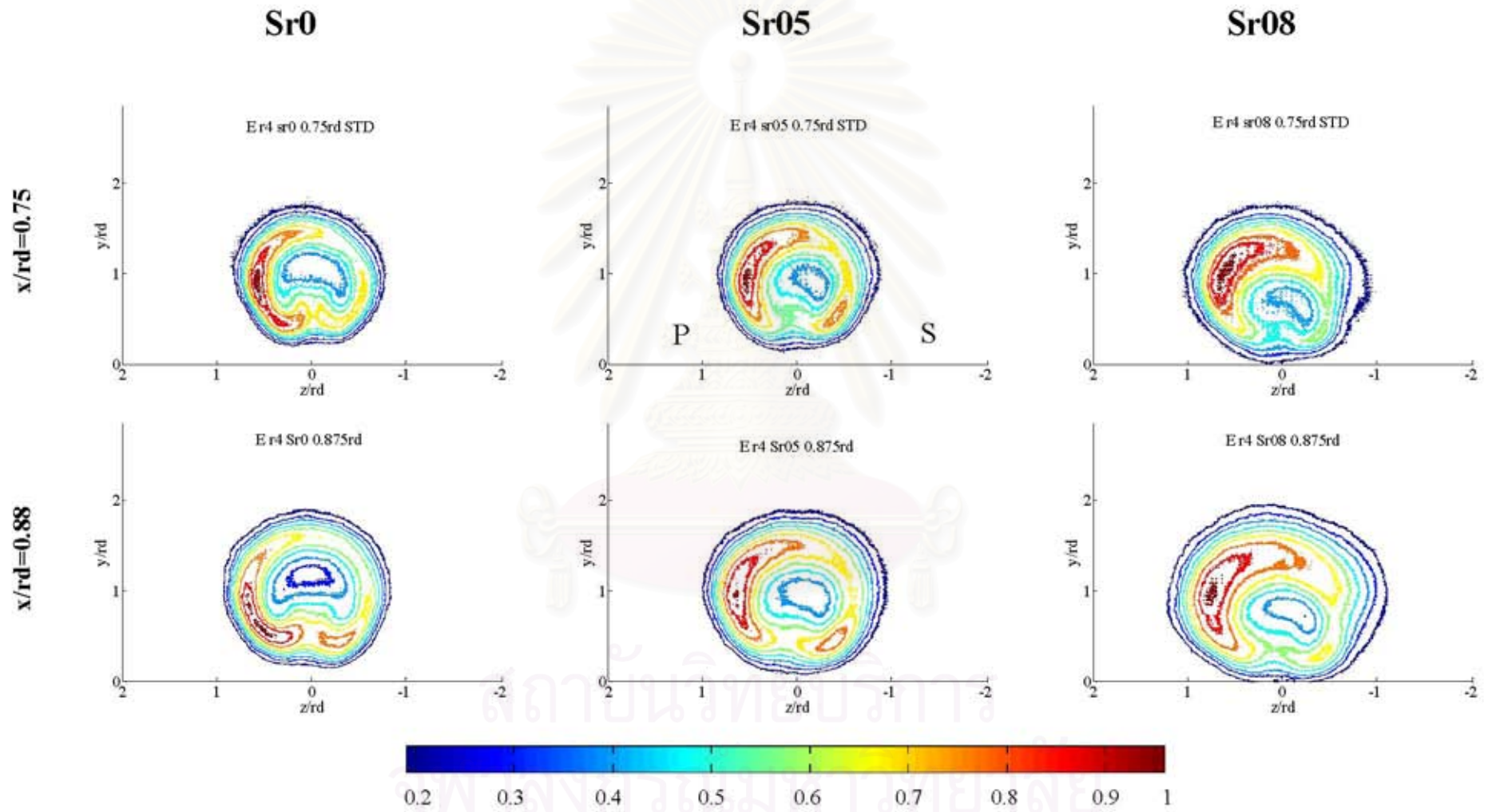


รูปที่ 3.28ค Contourภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)



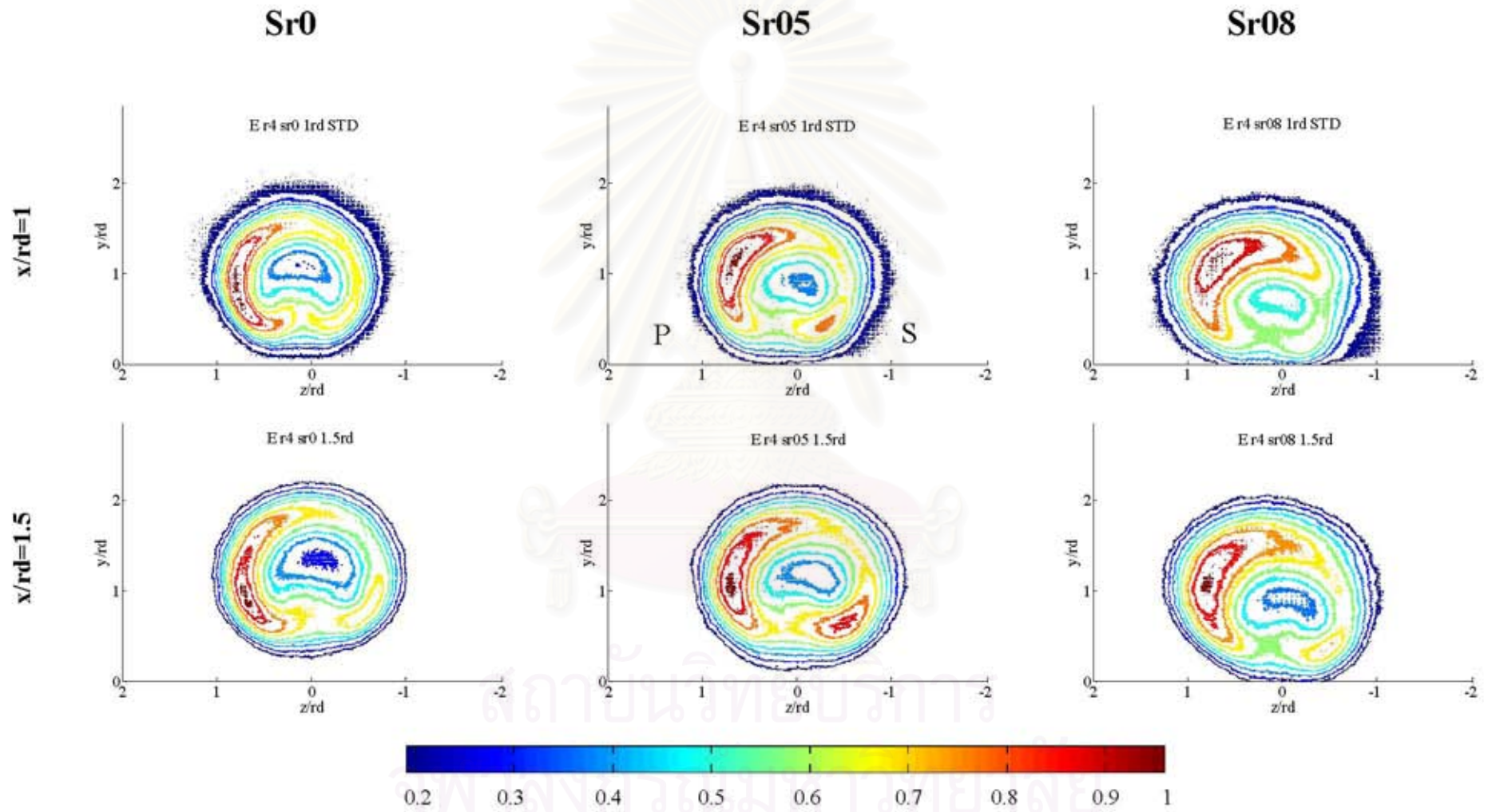
รูปที่ 3.28ง Contourภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)



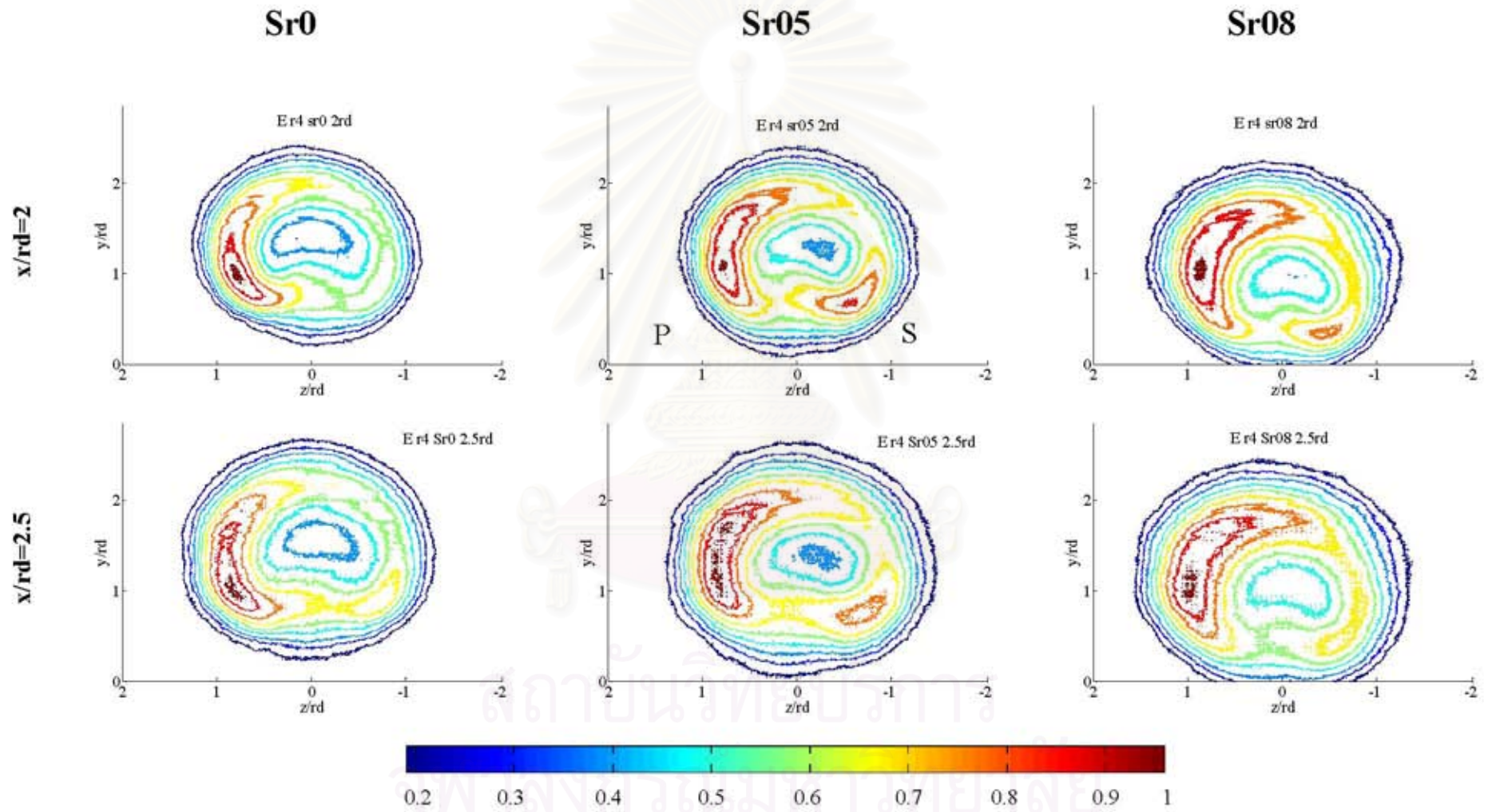


รูปที่ 3.28จ Contourภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ )



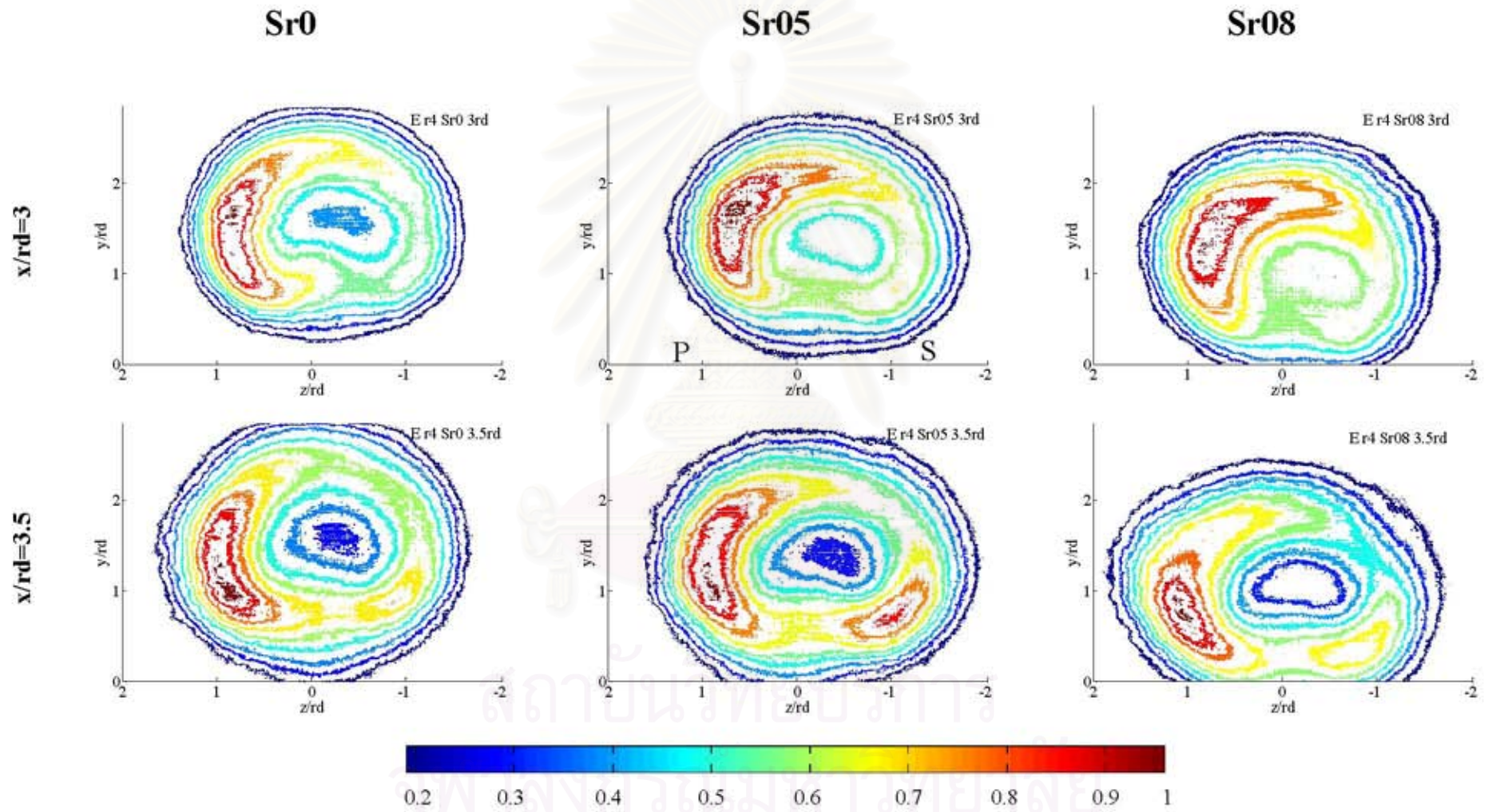


รูปที่ 3.28ด Contourภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)

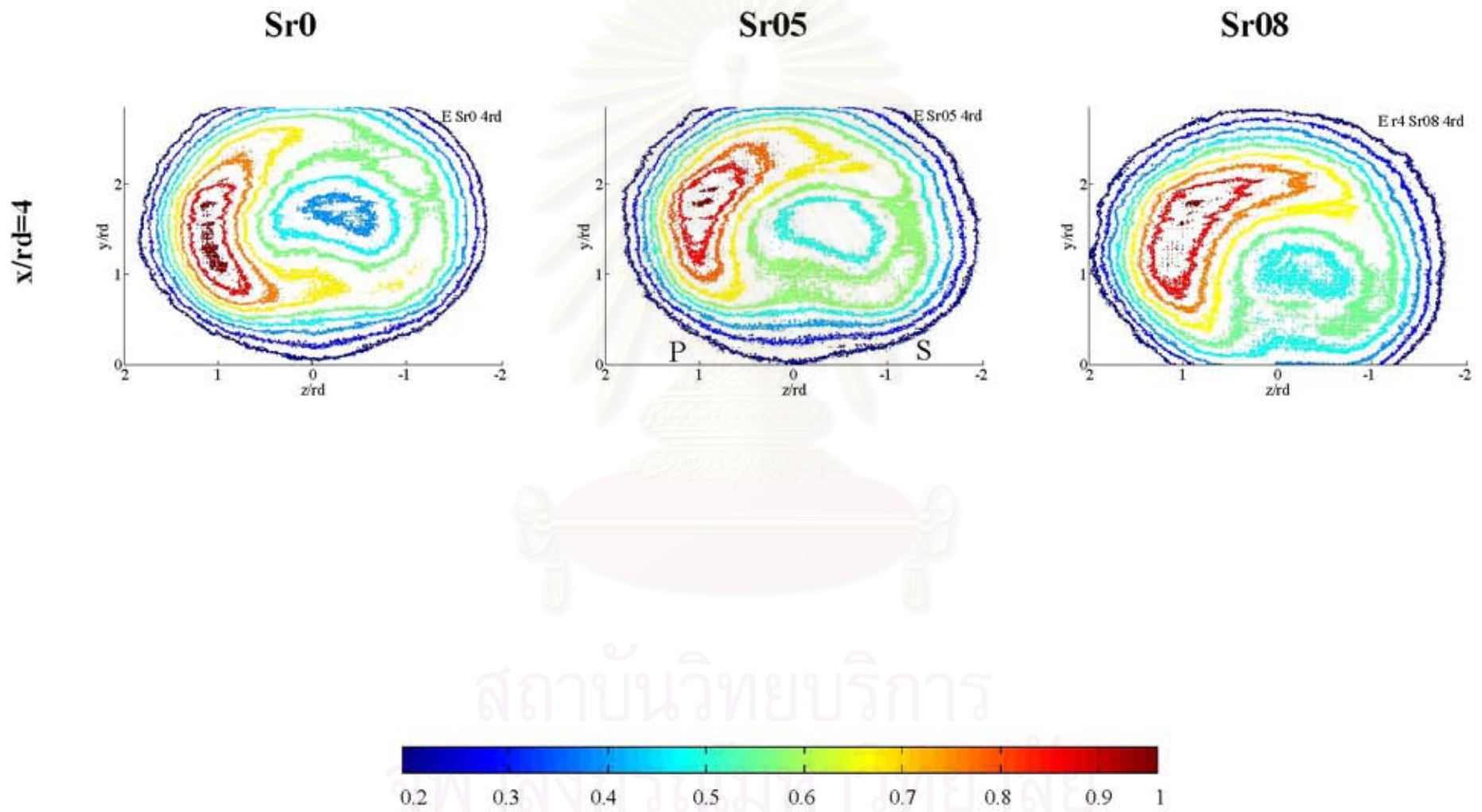


รูปที่ 3.28ข Contourภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)



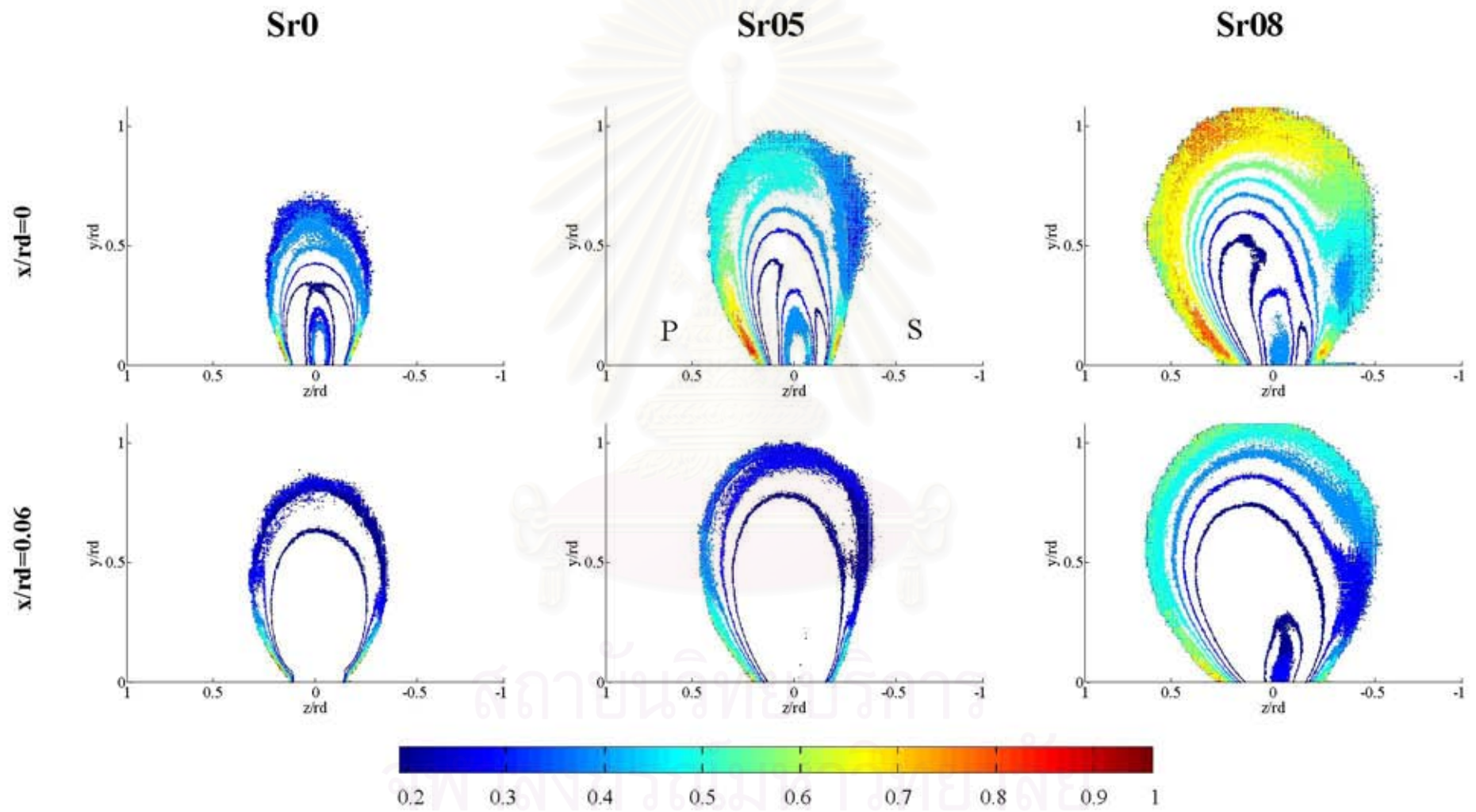


รูปที่ 3.28 ข Contourภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)

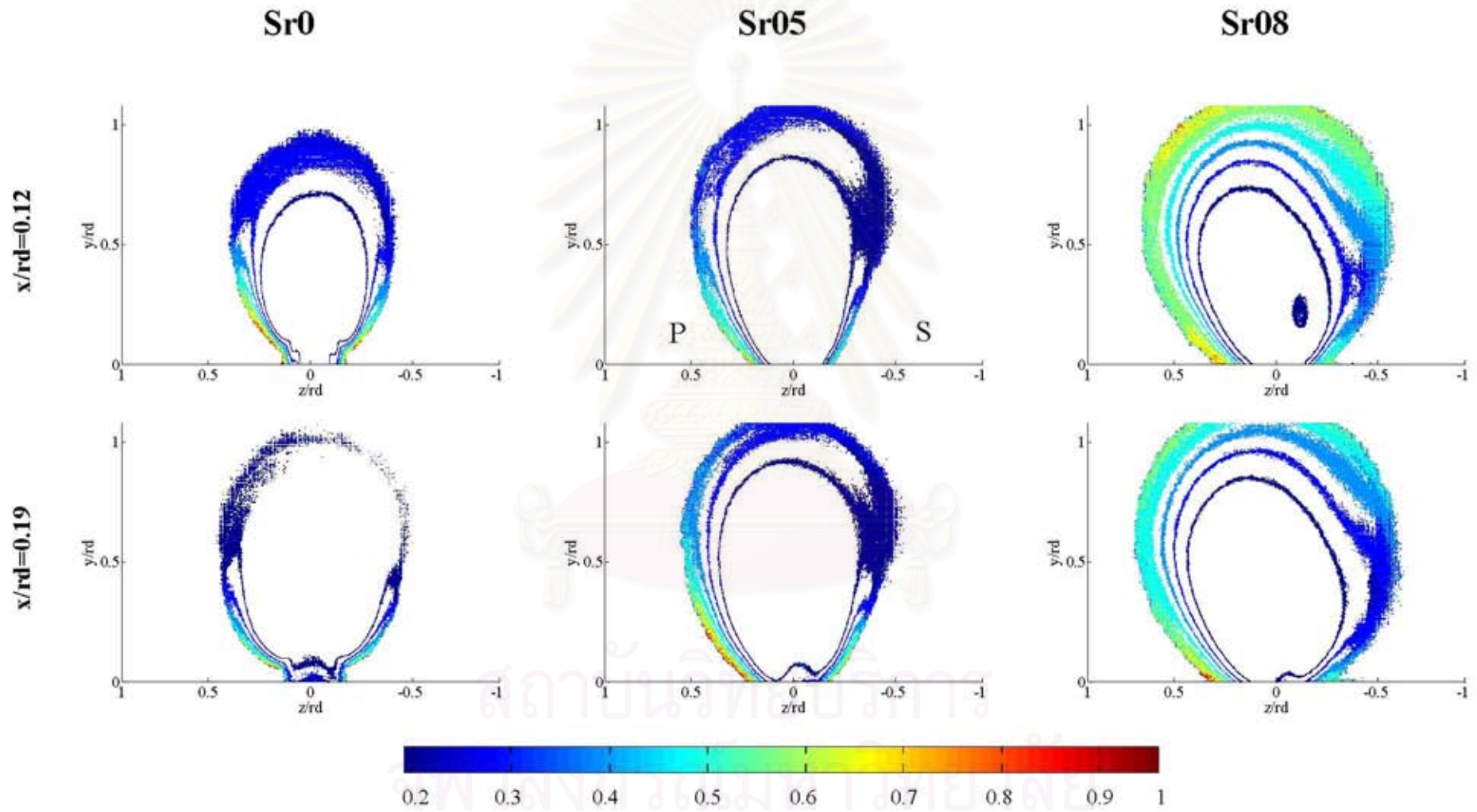


รูปที่ 3.28ฉ Contourภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)

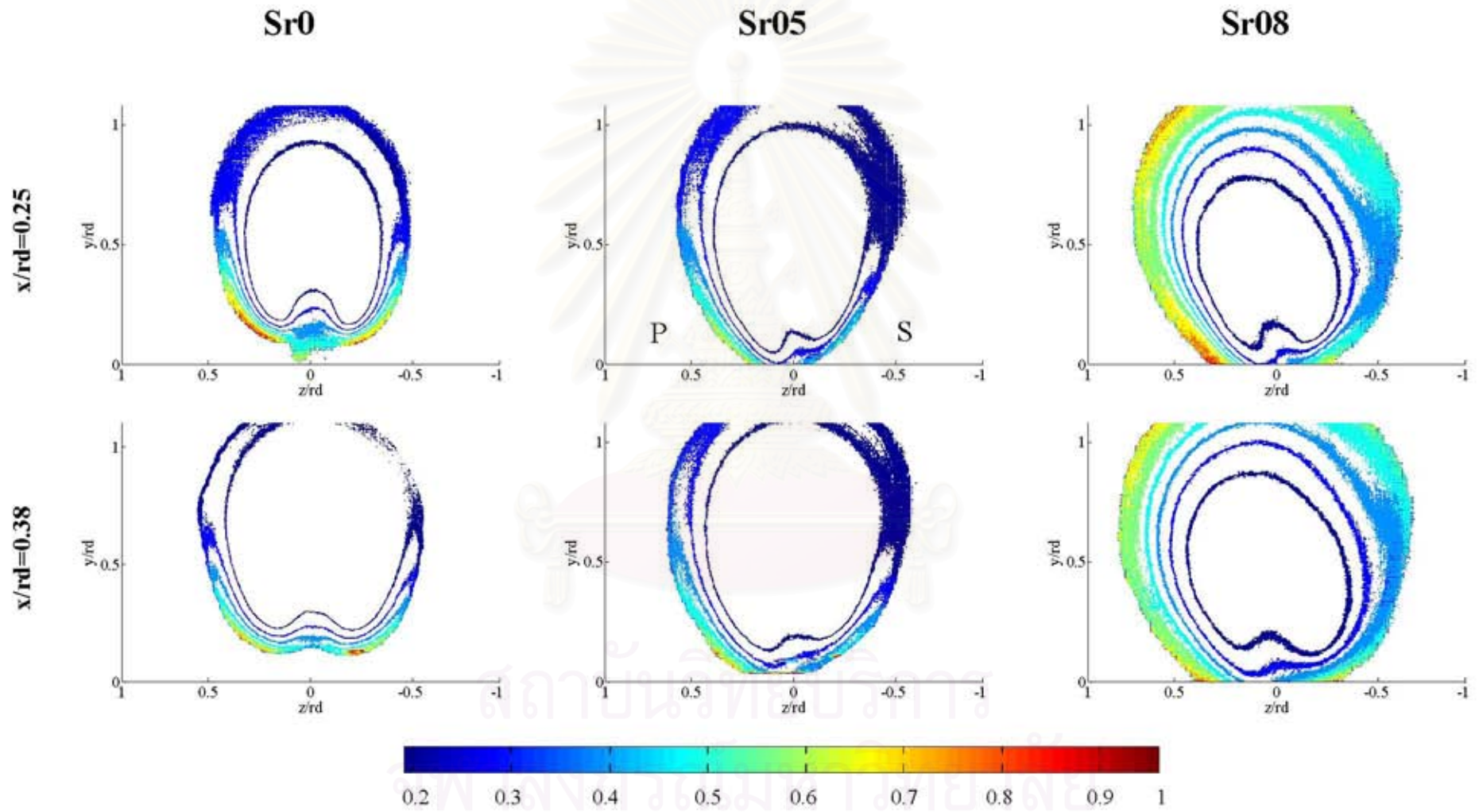




รูปที่ 3.29ก Contourภาพ Turbulent intensity สำหรับเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)

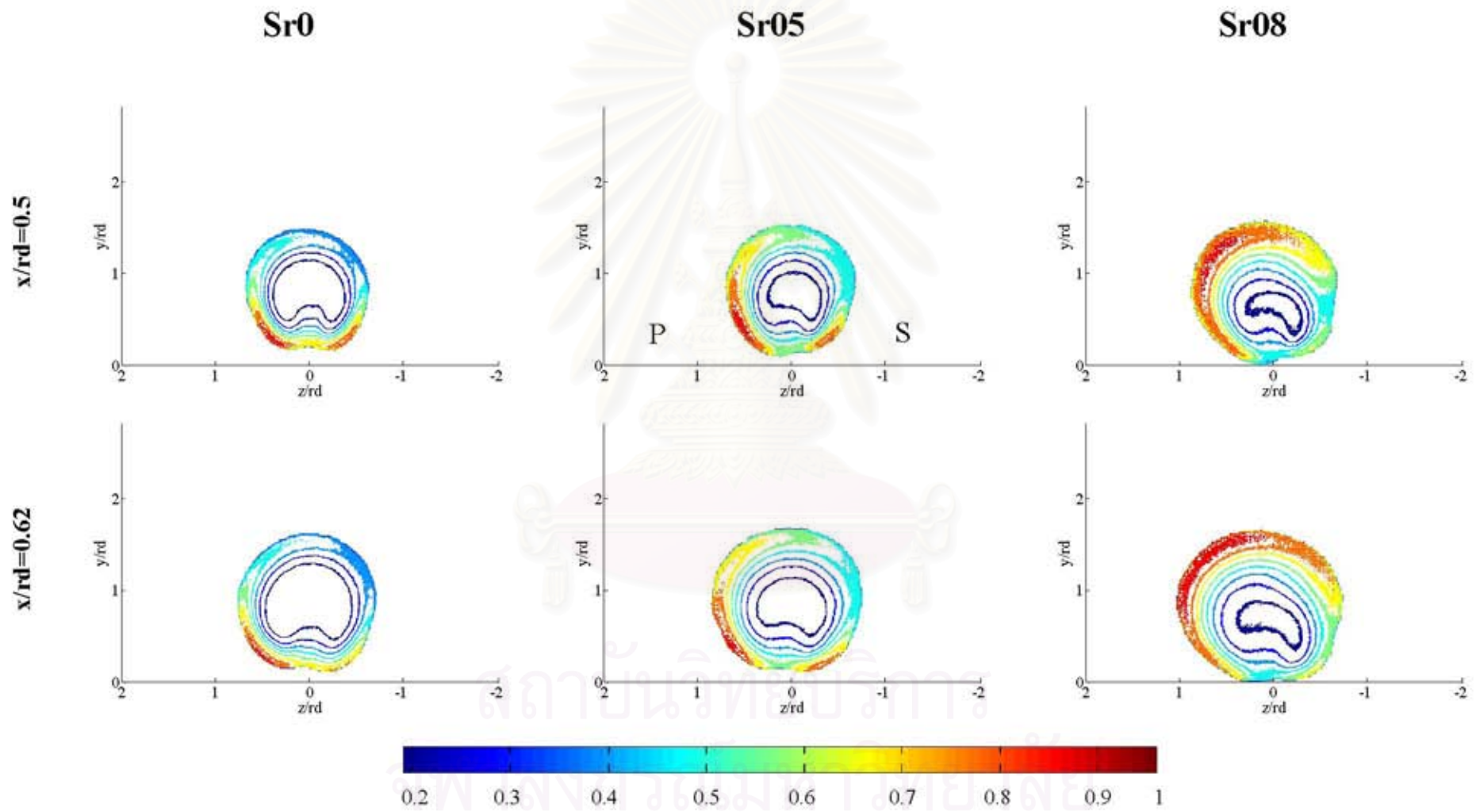


รูปที่ 3.29x Contourภาพ Turbulent intensity สำหรับเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)



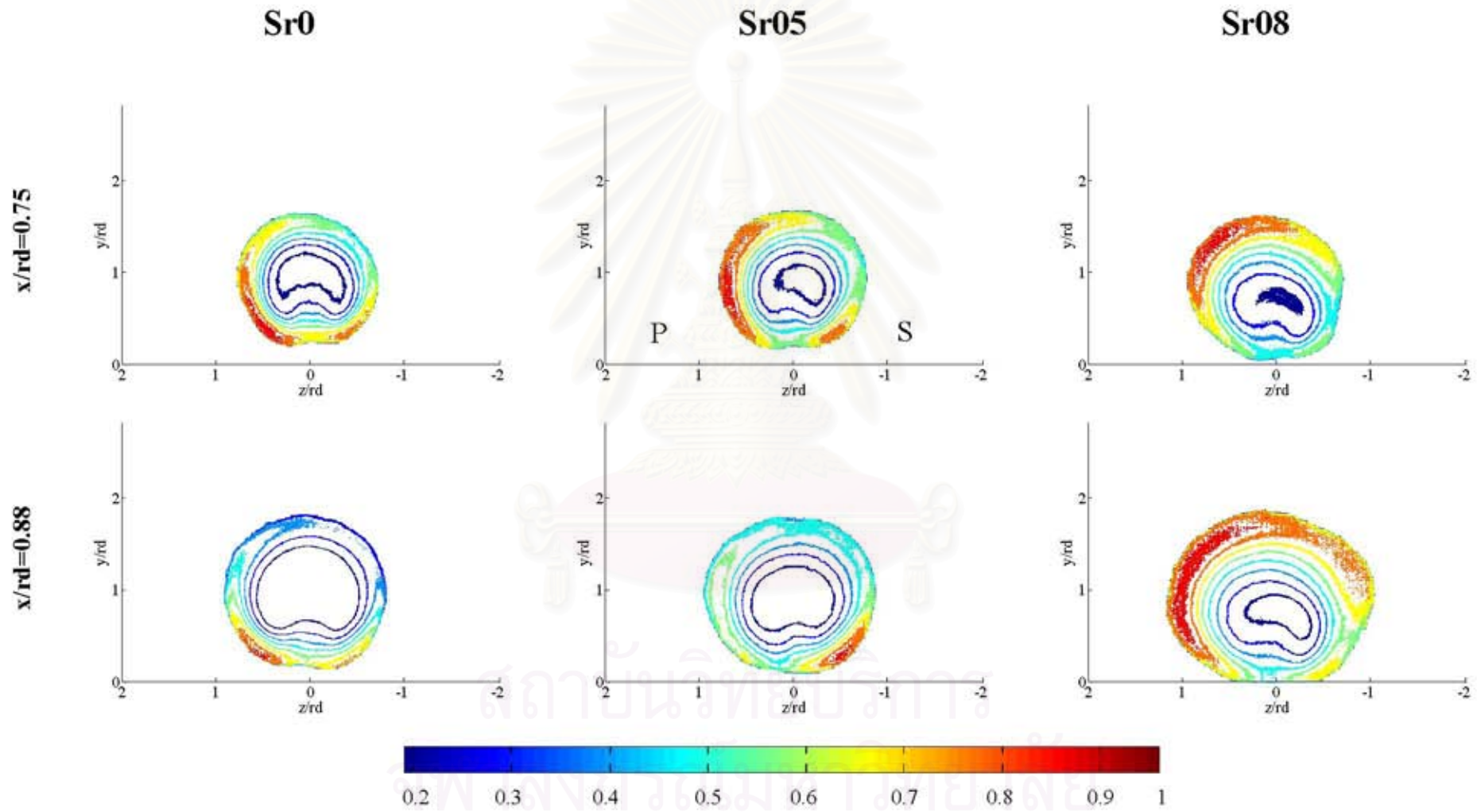
รูปที่ 3.29ค Contourภาพ Turbulent intensity สำหรับเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)



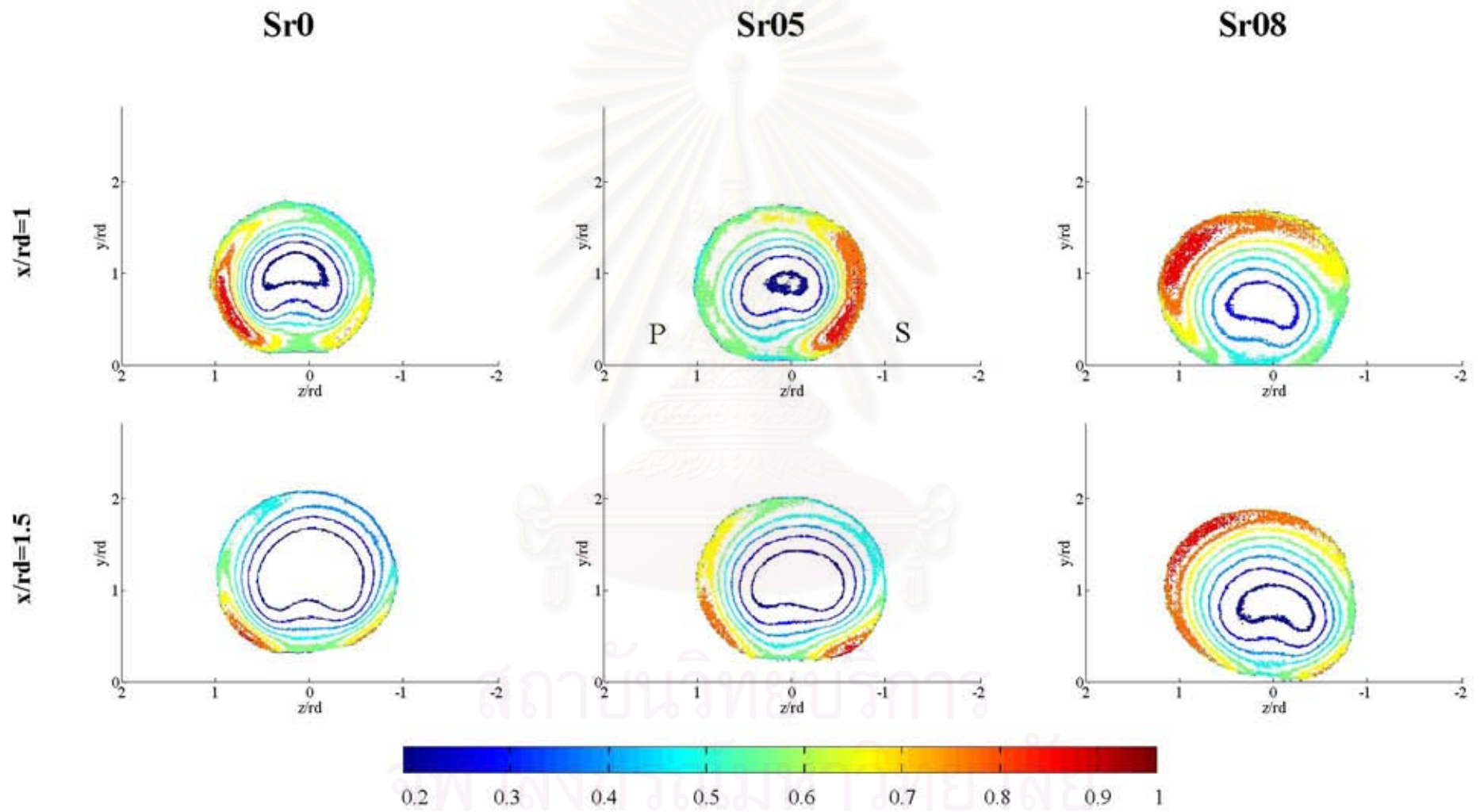


รูปที่ 3.29ง Contourภาพ Turbulent intensity สำหรับเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)

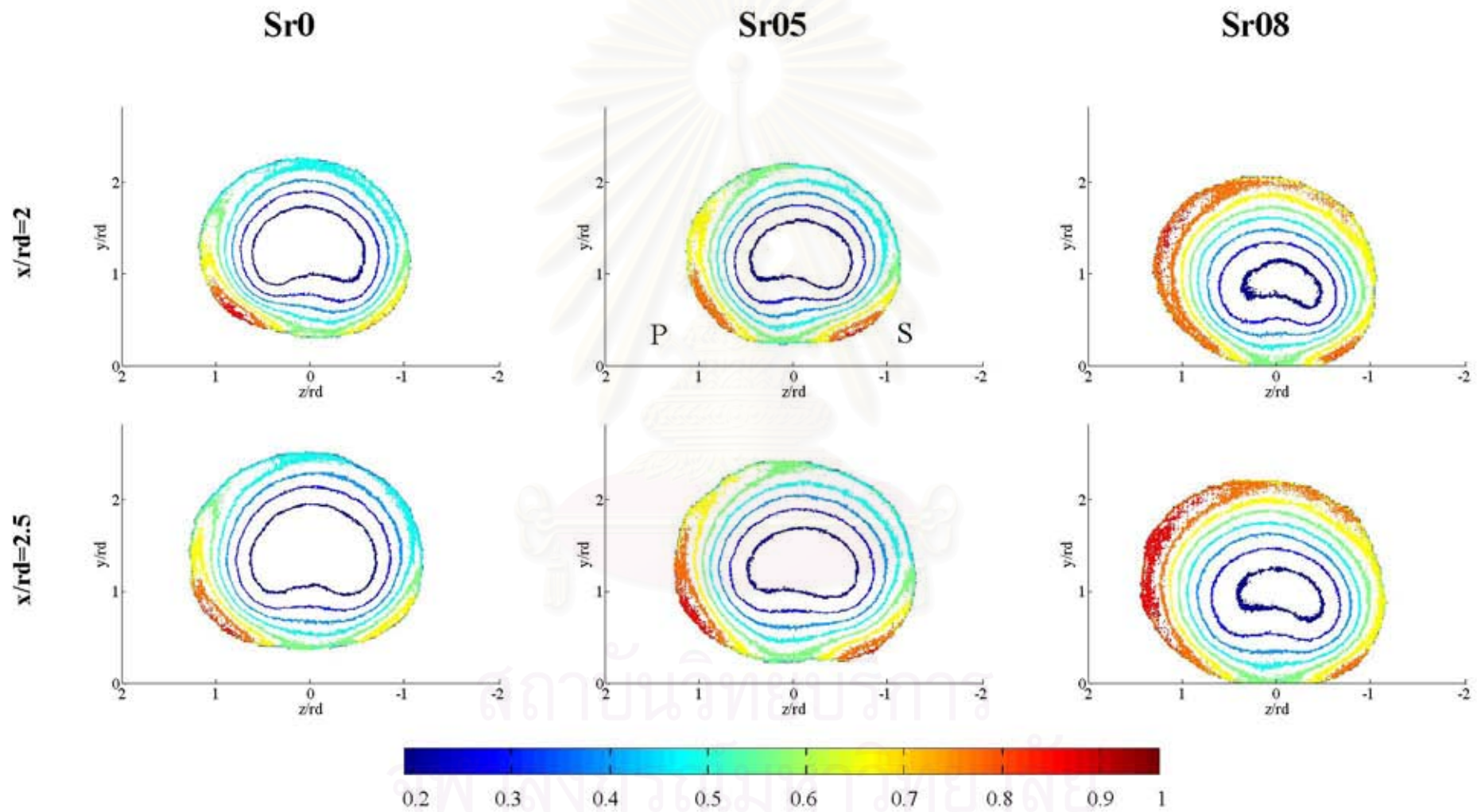




รูปที่ 3.29จ Contourภาพ Turbulent intensity สำหรับเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)

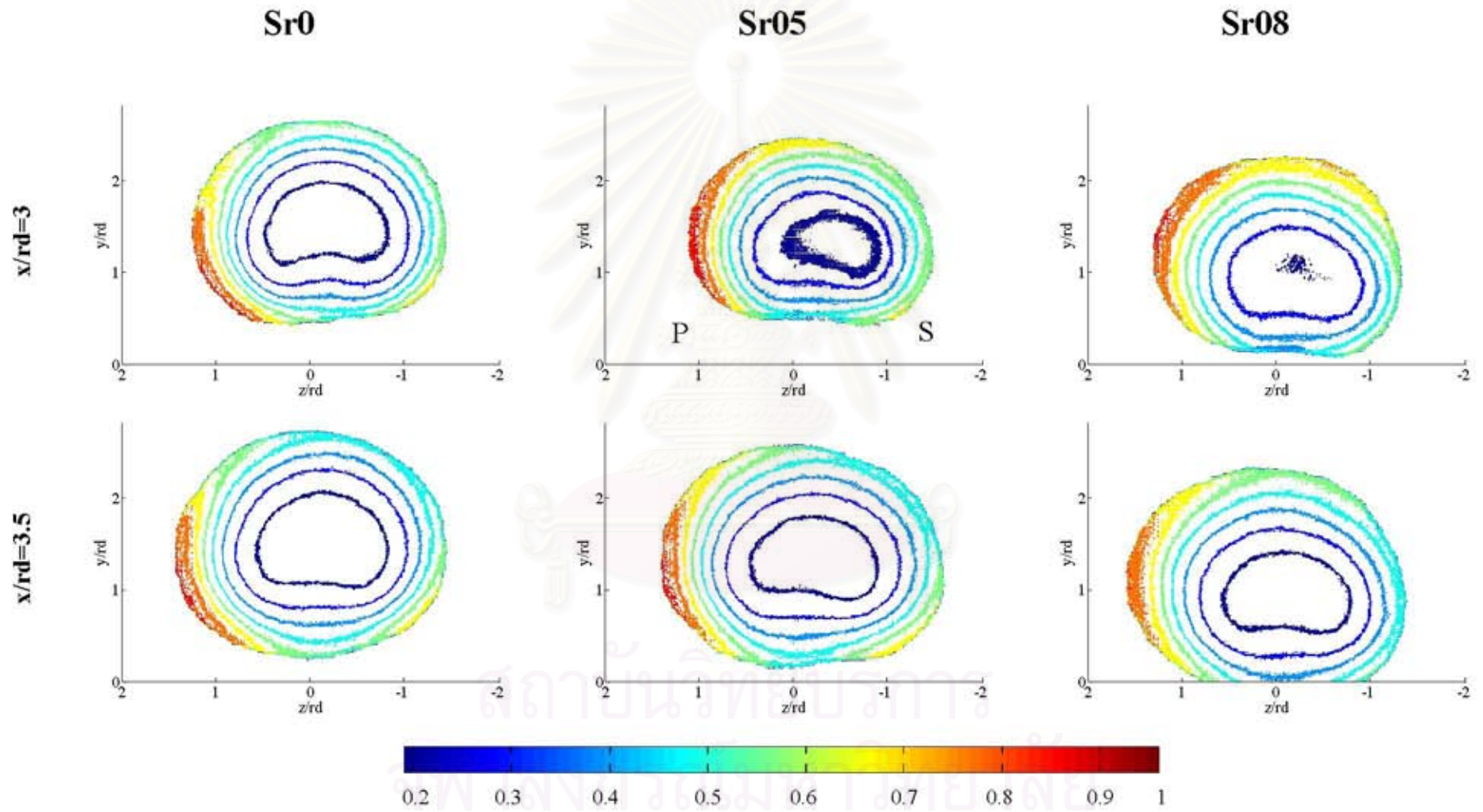


รูปที่ 3.29จ Contourภาพ Turbulent intensity สำหรับเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)



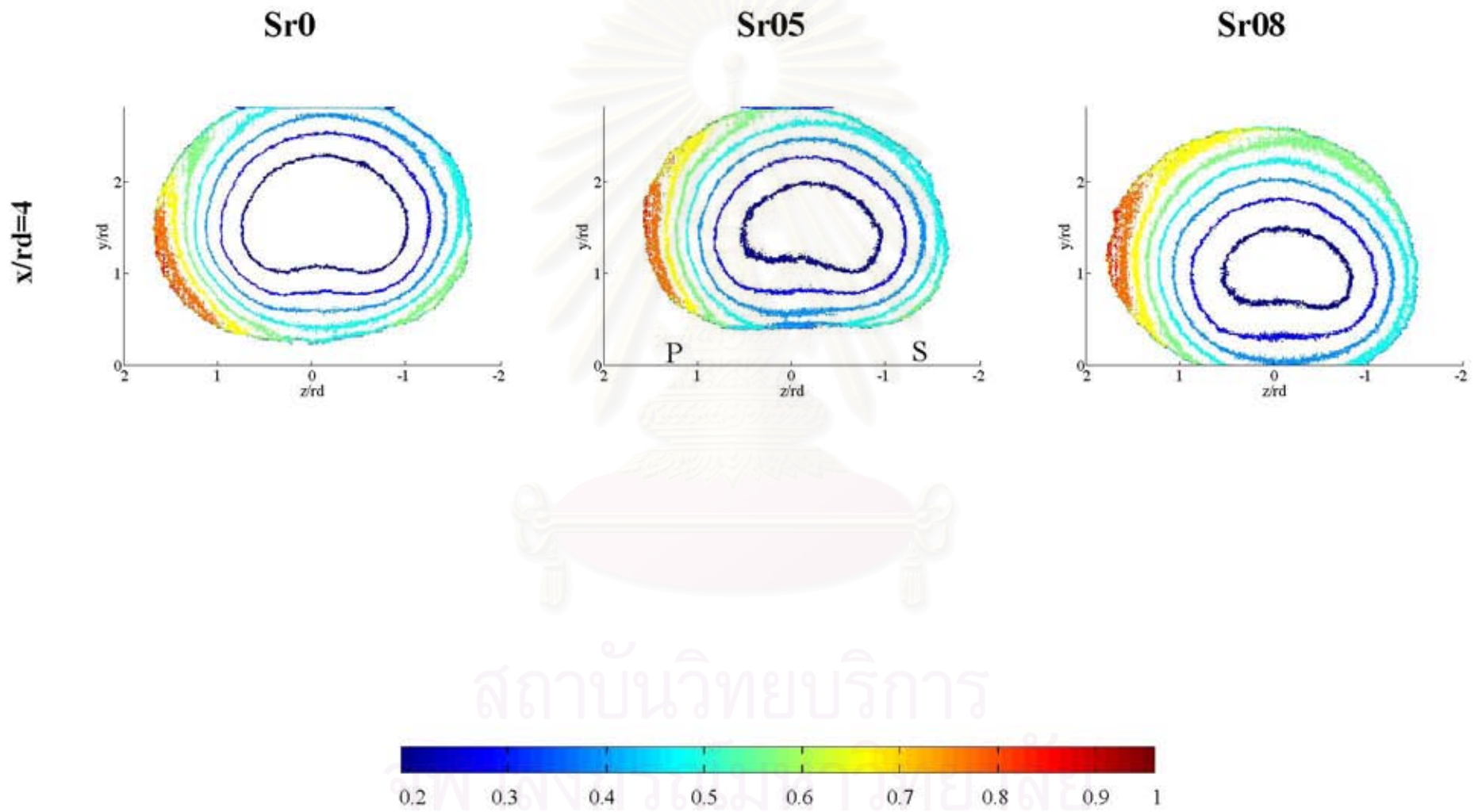
รูปที่ 3.29ข Contourภาพ Turbulent intensity สำหรับเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)



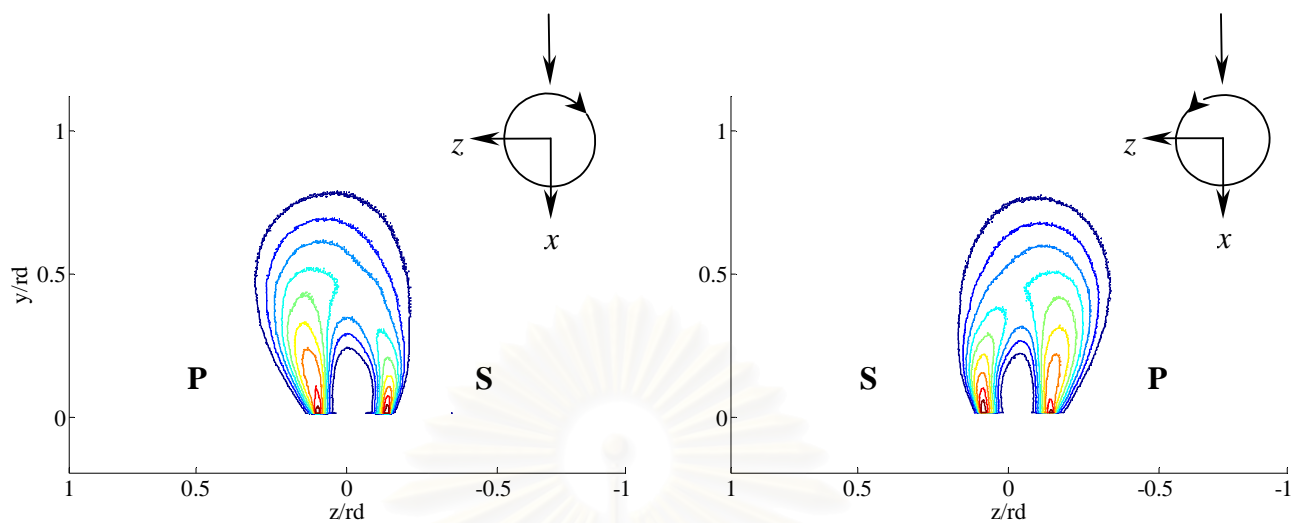


รูปที่ 3.29 ข Contour ภาพ Turbulent intensity สำหรับเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆ ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)



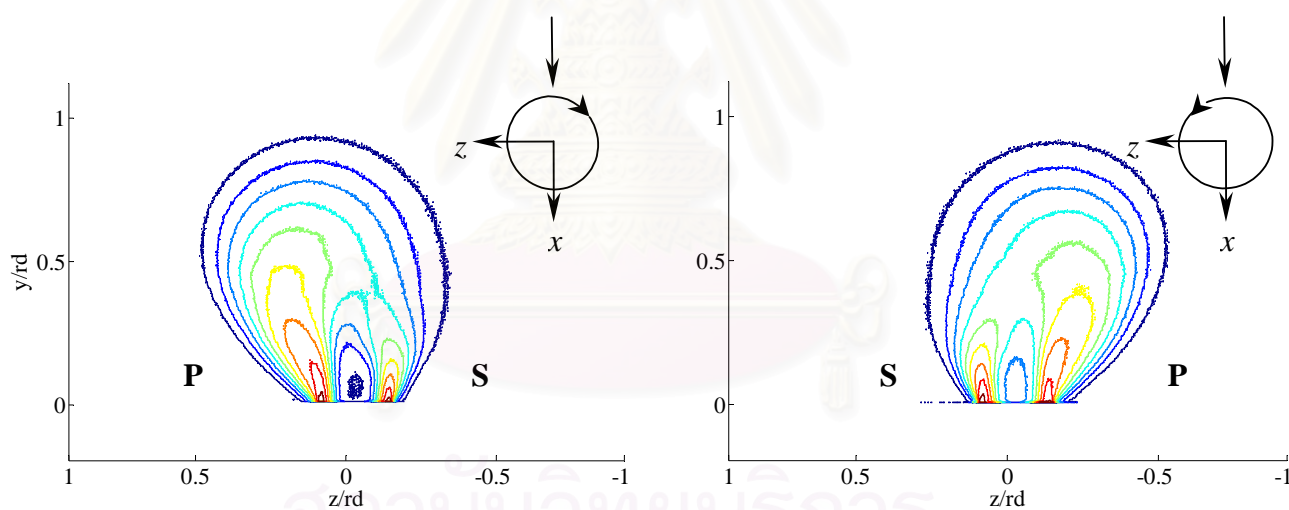


รูปที่ 3.29ฉ Contourภาพ Turbulent intensity สำหรับเปรียบเทียบผลของ Swirl ต่างๆในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x)



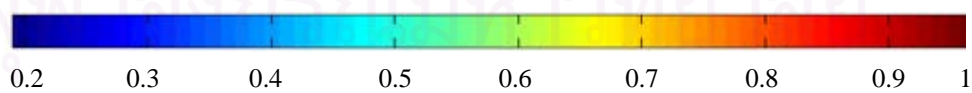
(ก) กรณี Sr05

(ข) กรณี Sr05\*

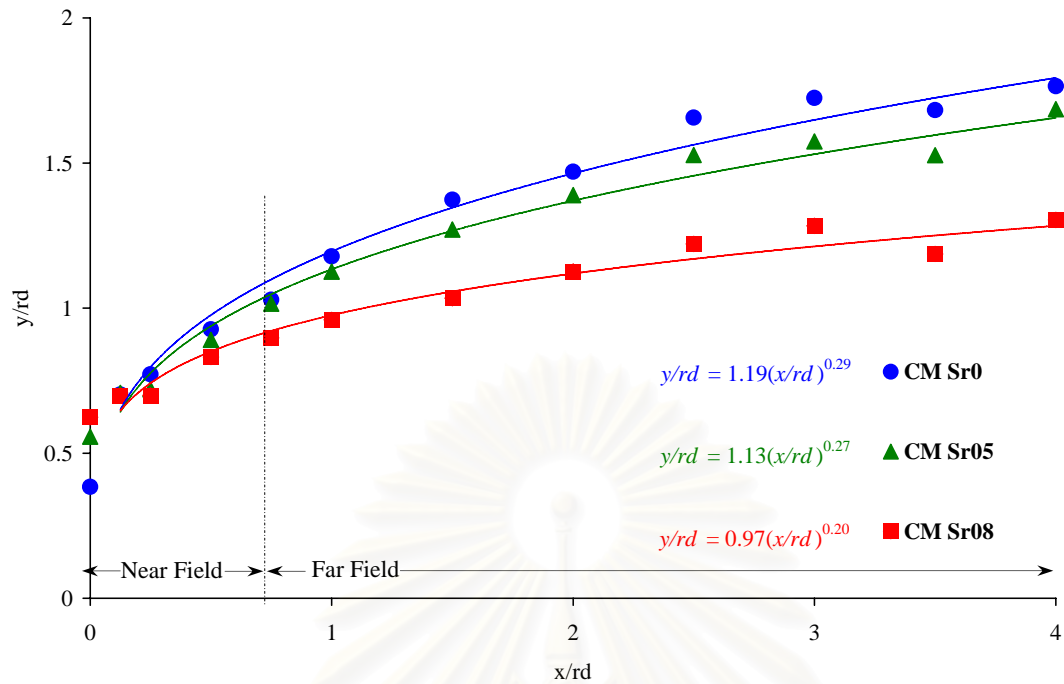


(ก) กรณี Sr08

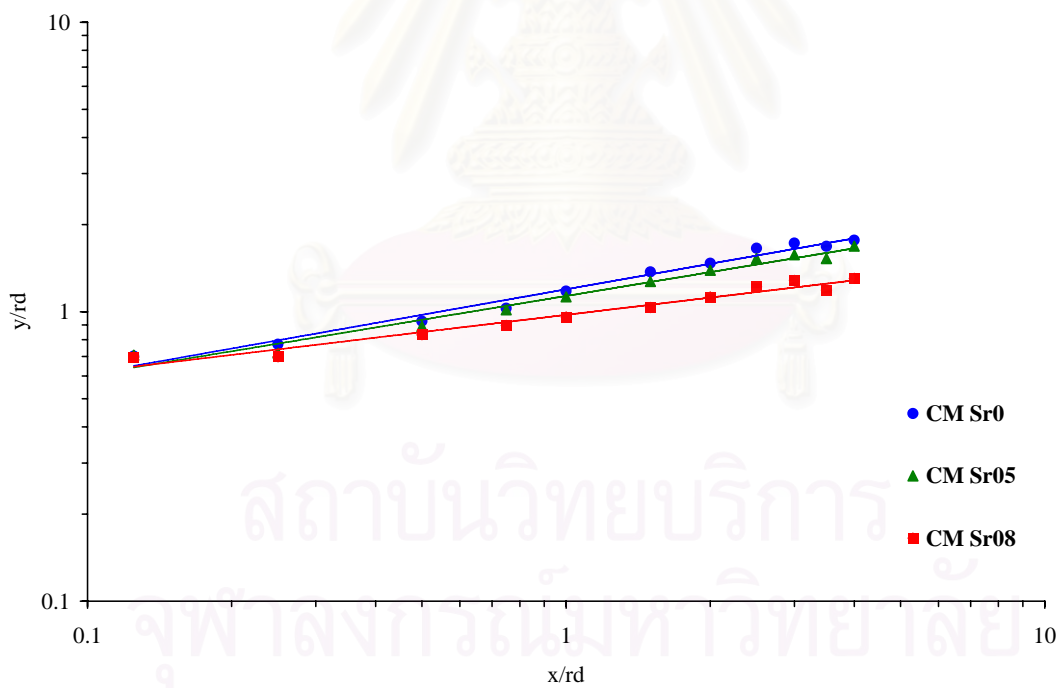
(ข) กรณี Sr08\*



รูปที่ 3.30 Contour ของภาพเฉลี่ยโดยการเปรียบเทียบทิศทางการหมุนของท่อเจ็ตที่  $x/rd = 0$  สำหรับกรณี Sr05 และ Sr08

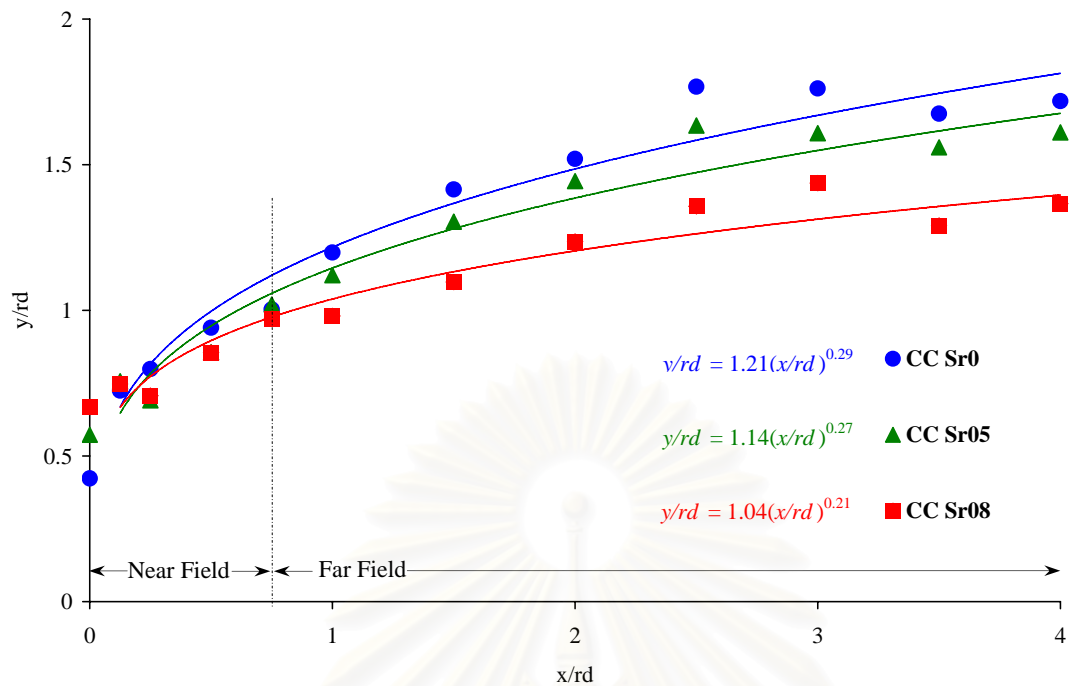


(ก)

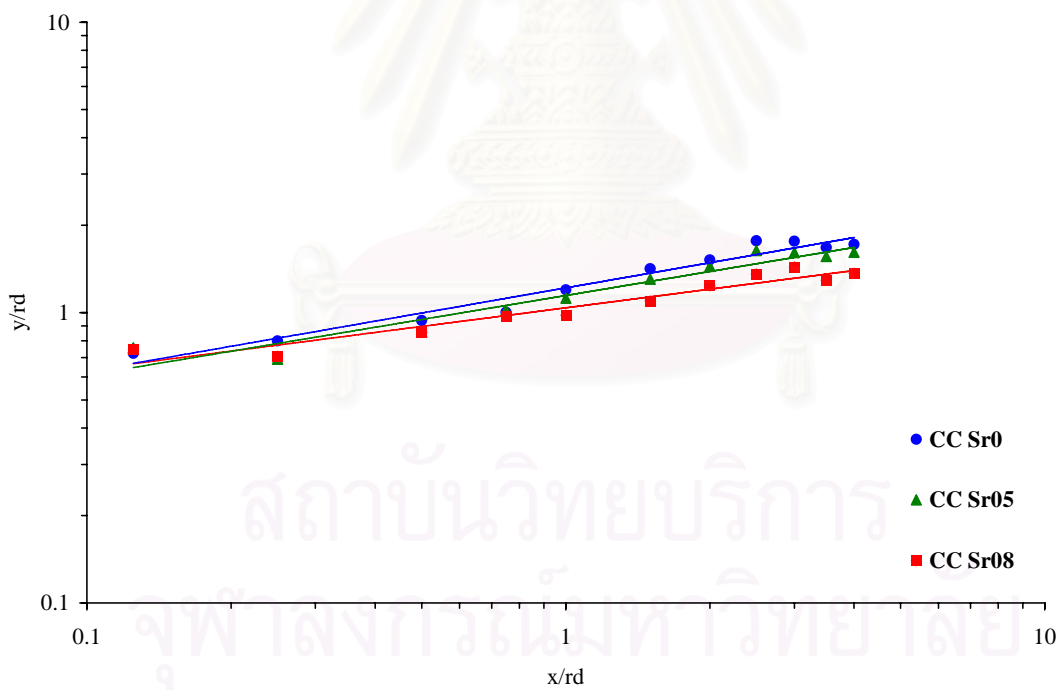


(ข)

รูปที่ 3.31 Center of Mass Trajectory ของภาพเฉลี่ยด้าน End view เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี (ก) บนสเกลเชิงเส้น (ข) บนสเกล log-log



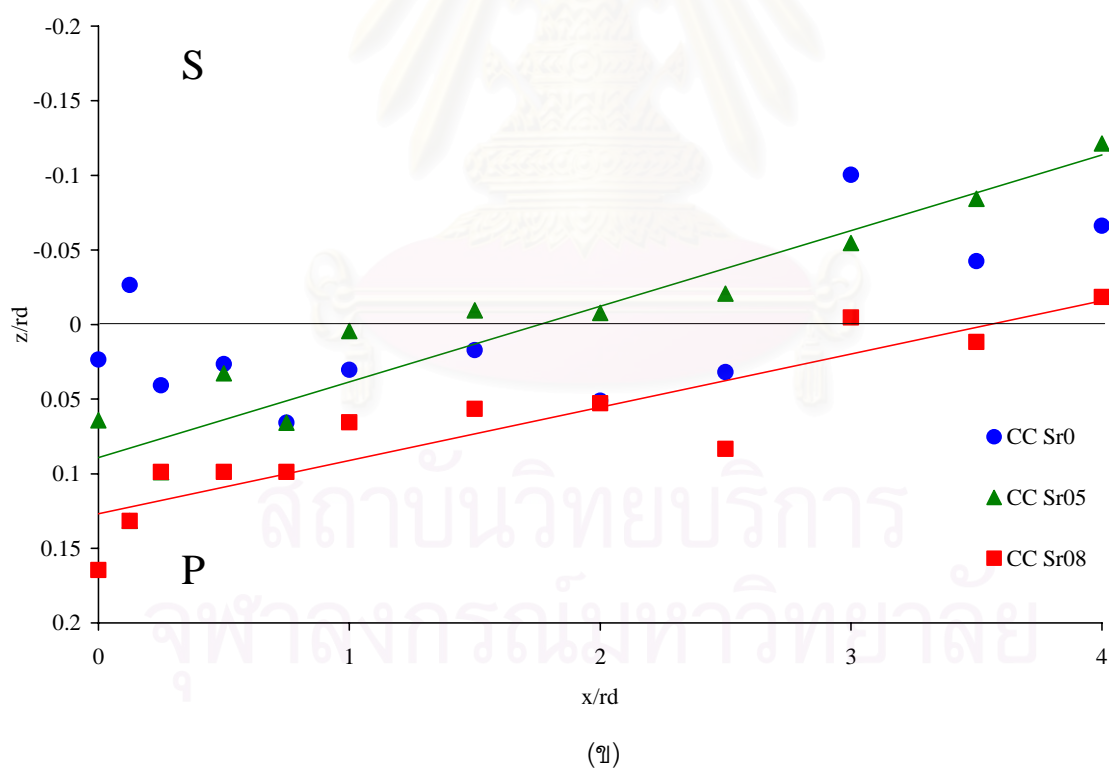
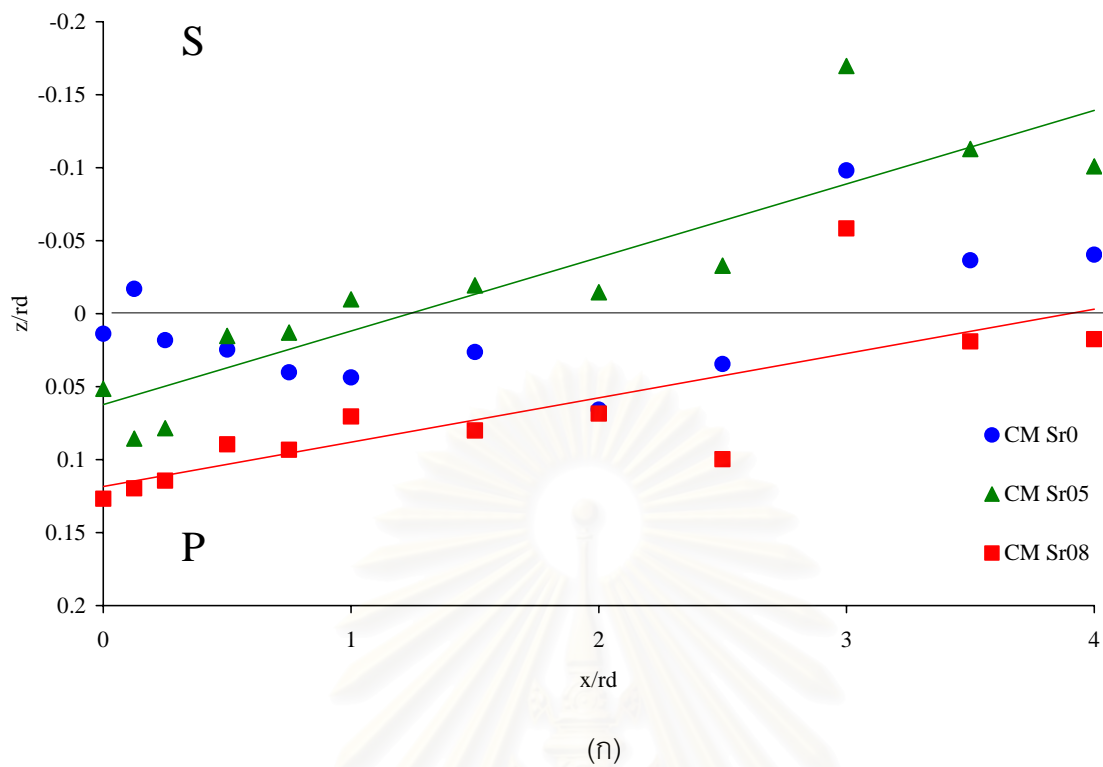
(ก)



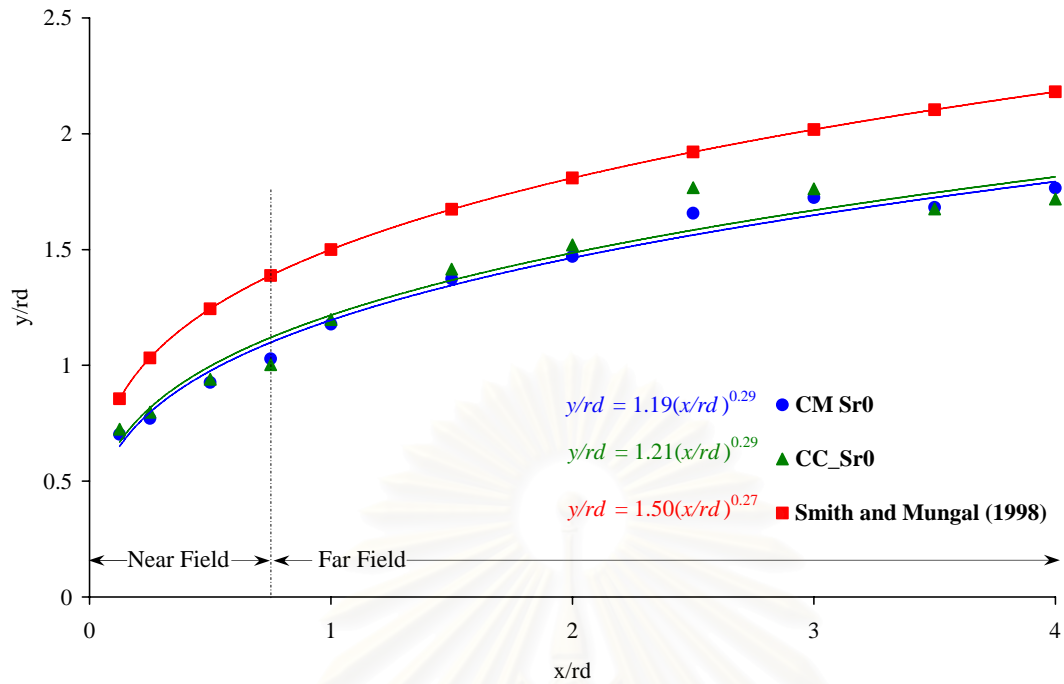
(ข)

รูปที่ 3.32 Centroid Trajectory ของภาพเฉลี่ยด้าน End view เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี (ก) บนสเกลเชิงเส้น (ข) บนสเกล log-log

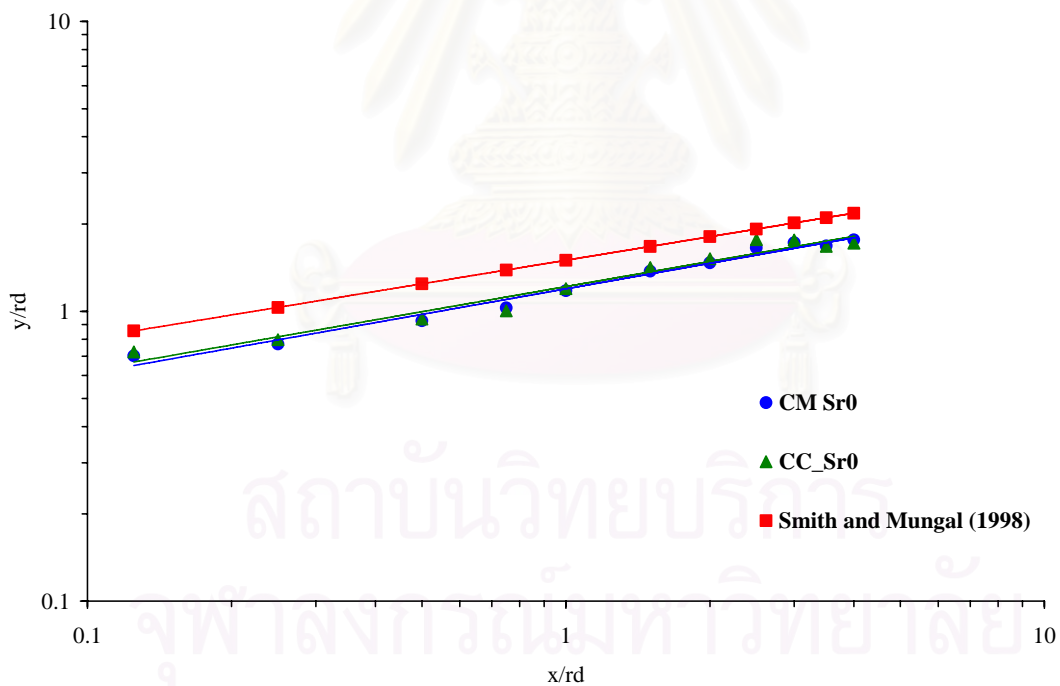




รูปที่ 3.33 Trajectory ของภาพเฉลี่ยด้าน End view เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีบน  
ระนาบแนวนอน x-z view (ก) Center of mass (ข) Centroid trajectory

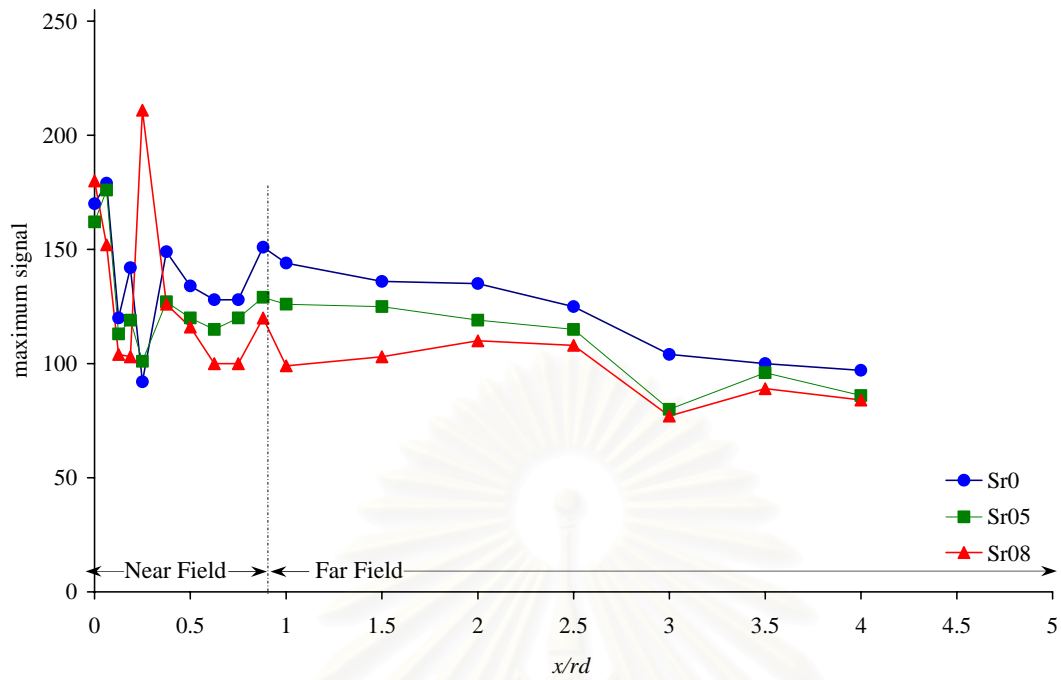


(ก)



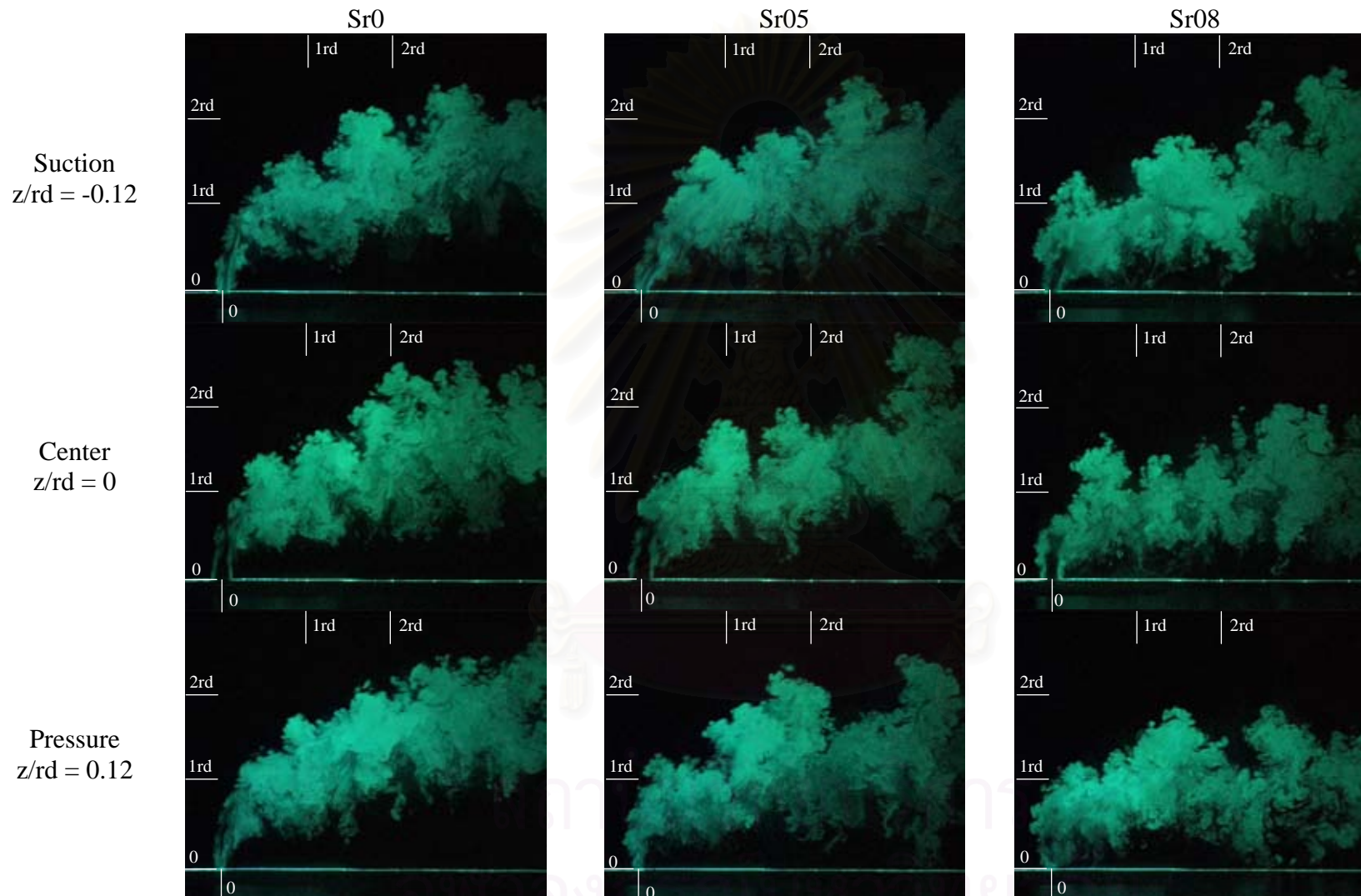
(ข)

รูปที่ 3.34 Center of mass และ Centroid Trajectory ของภาพเฉลี่ยทางด้าน End view เปรียบเทียบกับ Passive scalar ของ Smith and Mungal (1998) (ก) บนสเกลเชิงเส้น (ข) บนสเกล log-log



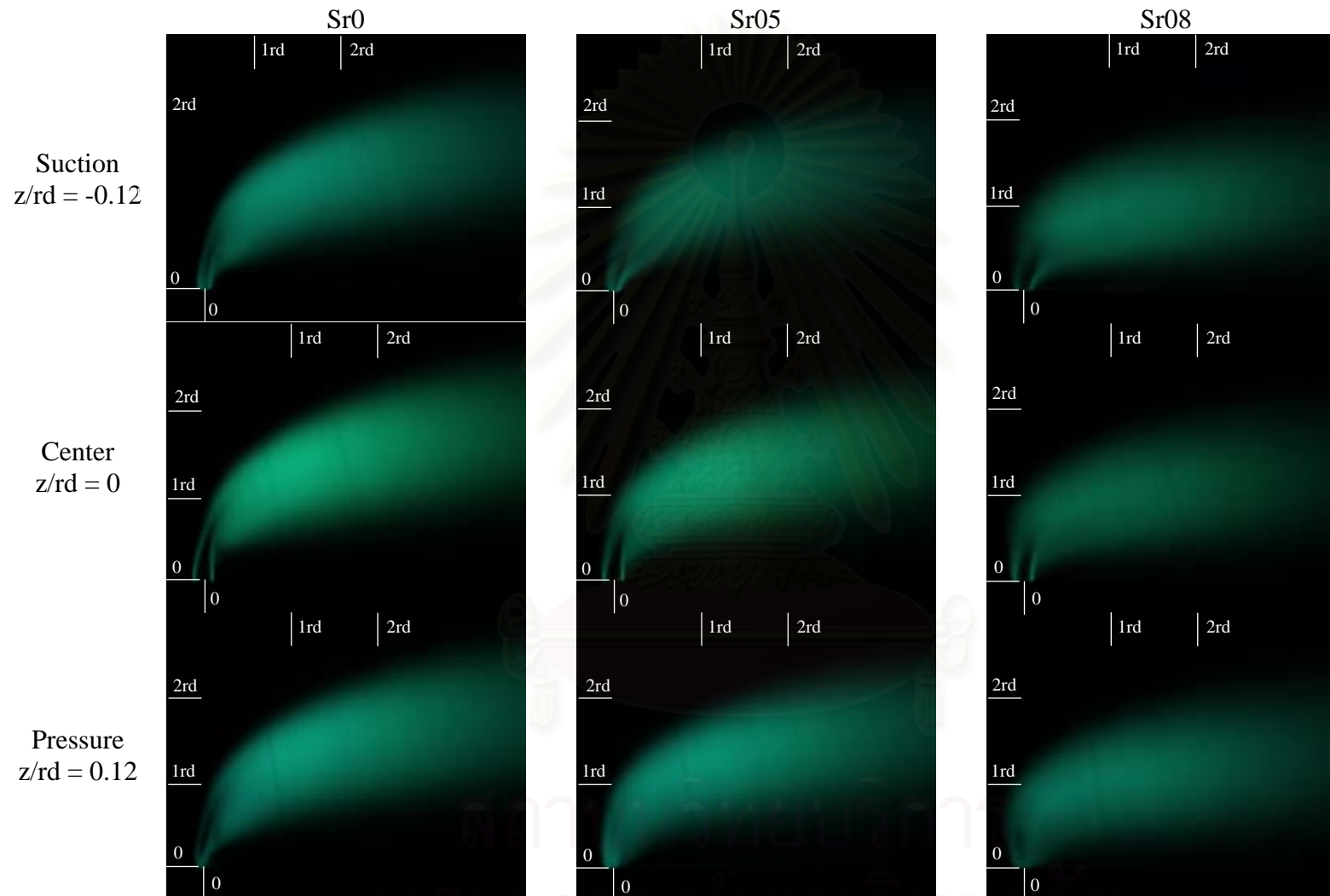
รูปที่ 3.35 Maximum decay ตามแนว Downstream ( $x$ ) ในแต่ละกรณีต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

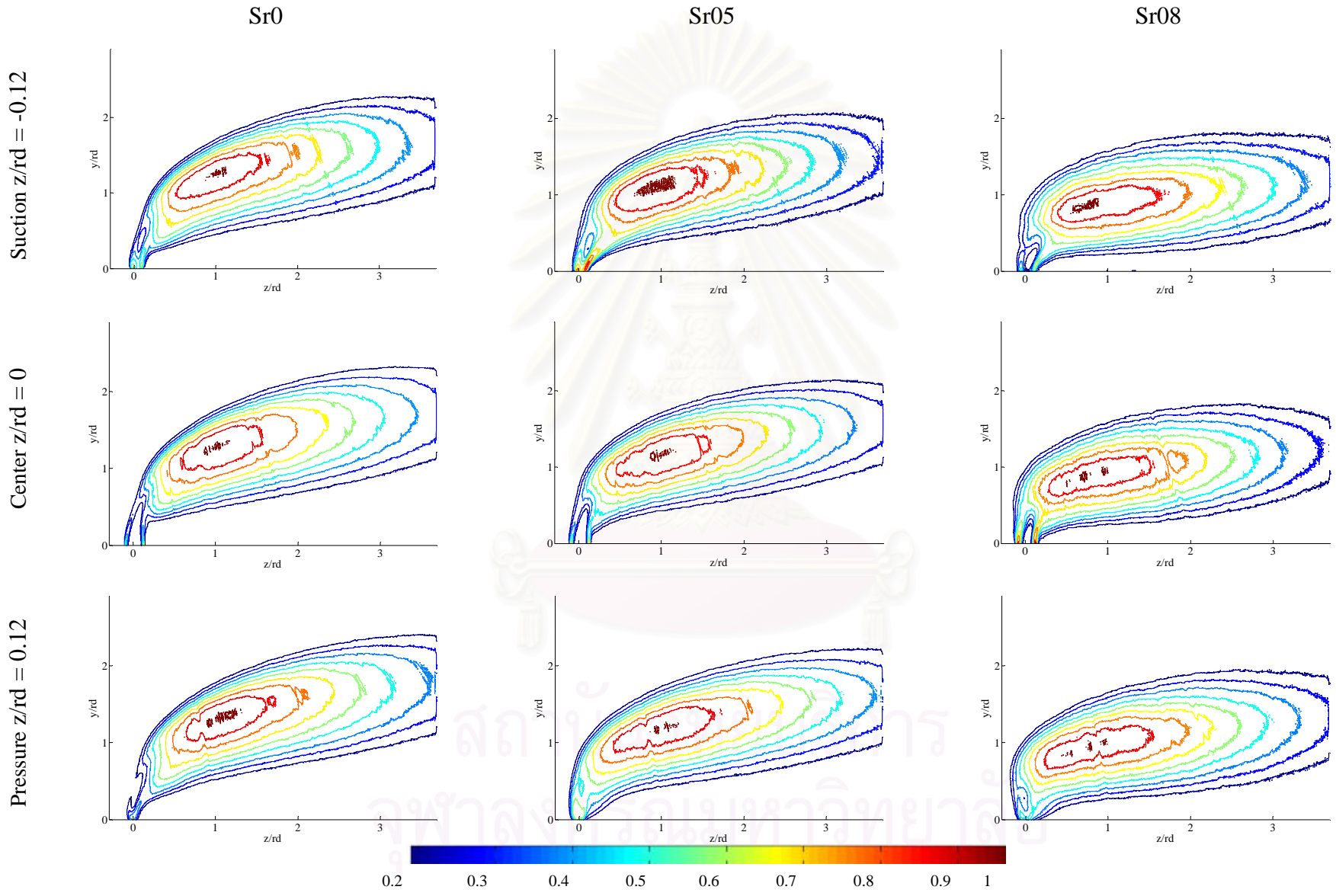


รูปที่ 3.36 ภาพขณะใดๆทางด้านข้างของแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับกรณี JICF Sr05 และ Sr08

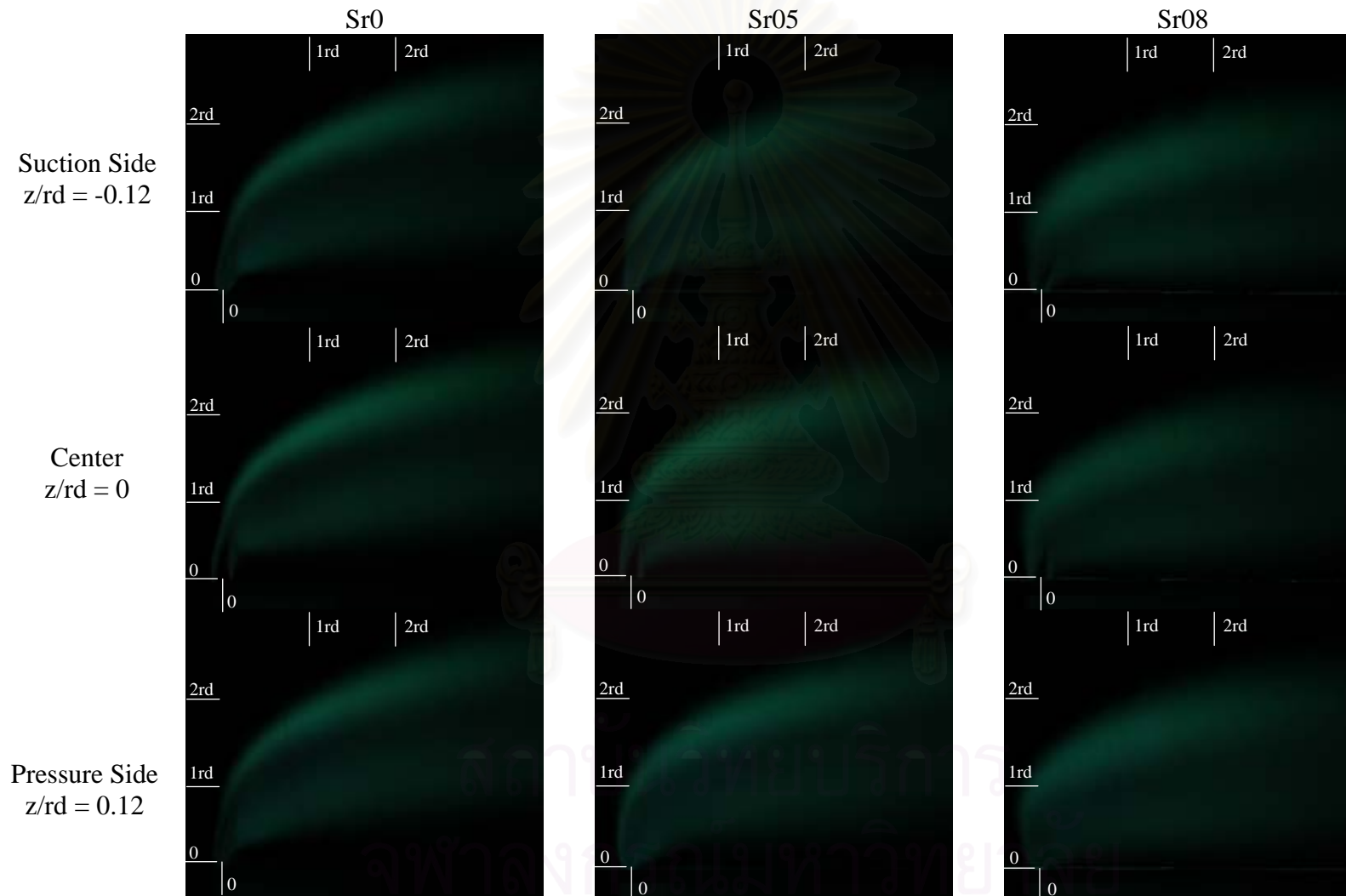




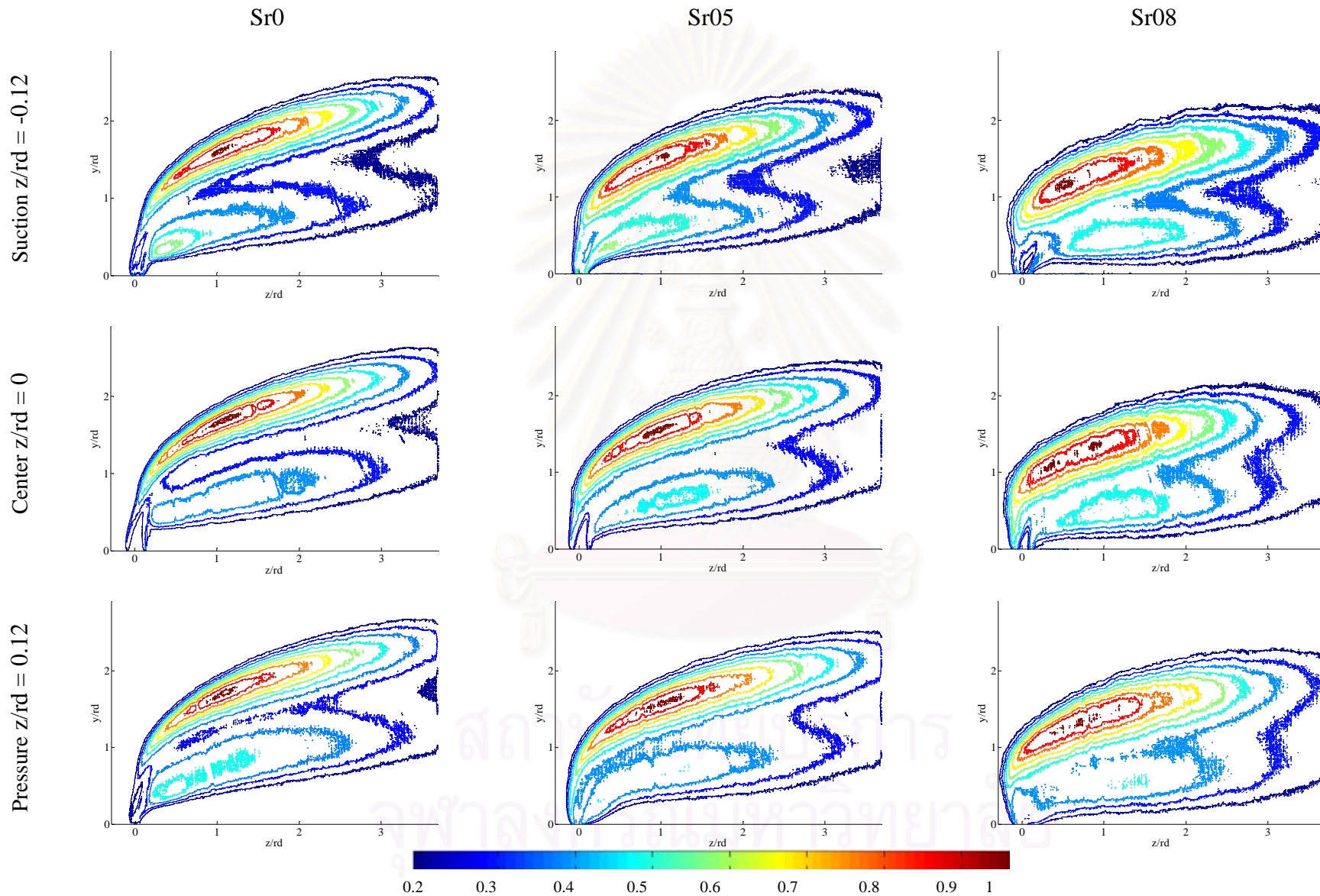
รูปที่ 3.37 ภาพเฉลี่ยทางด้านข้างของแต่ละหน้าตัดใดๆ สำหรับกรณี JICF Sr05 และ Sr08



รูปที่ 3.38 Contour ภาพเฉลี่ยทางด้านข้างของแต่ละหน้าตัดใดๆ สำหรับกรณี JICF Sr05 และ Sr08

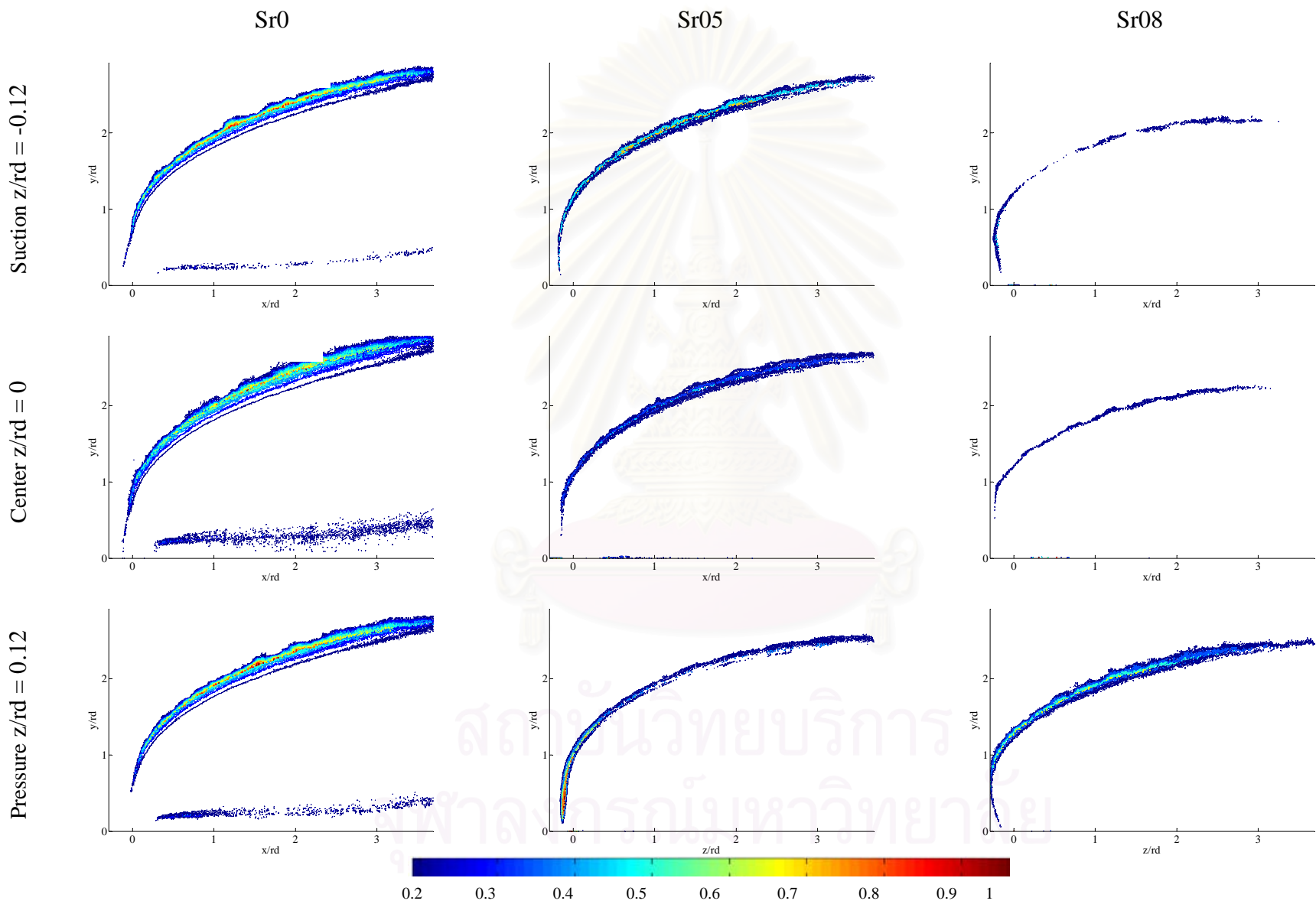


รูปที่ 3.39 ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้านข้างของแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับกรณี JICF Sr05 และ Sr08

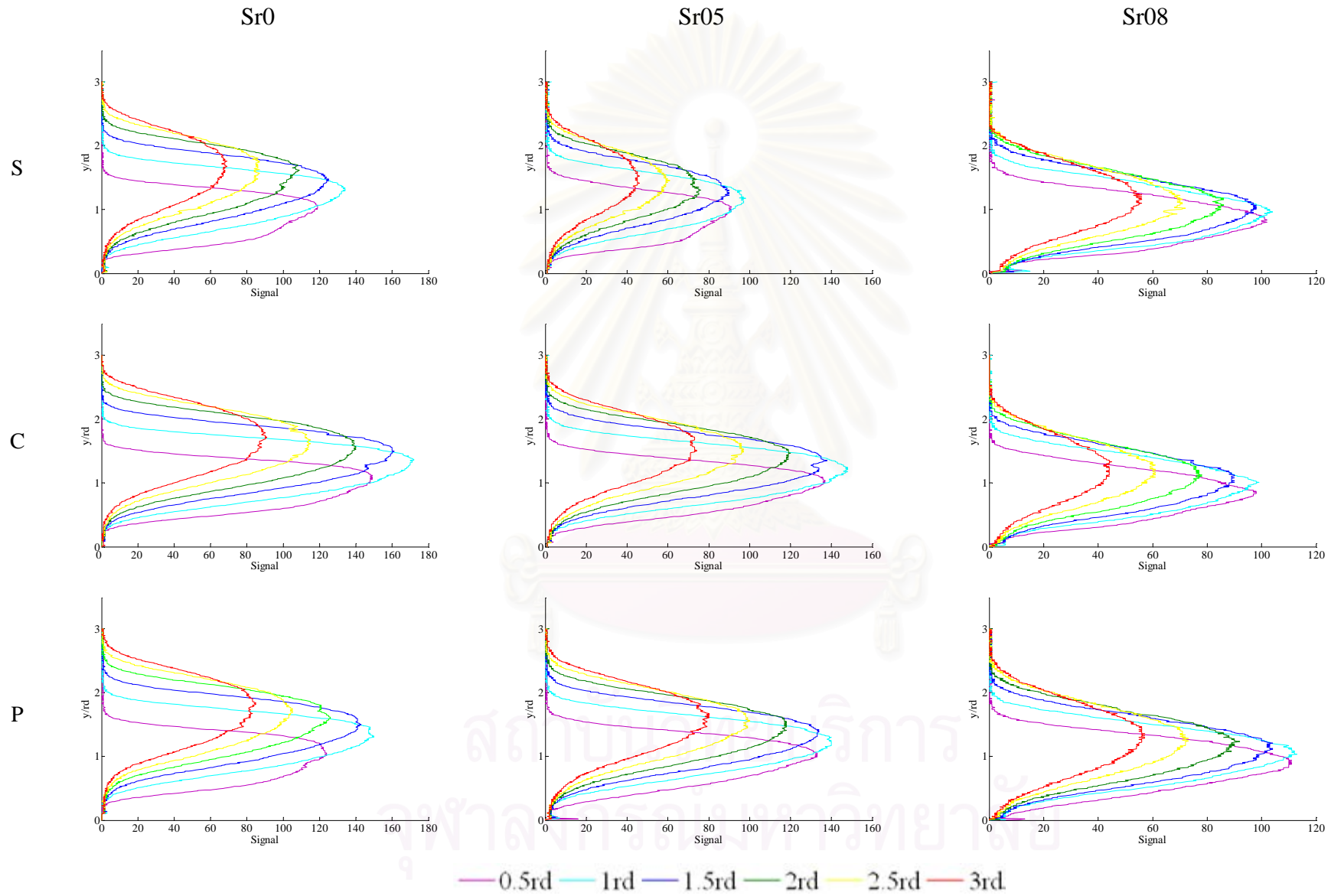


รูปที่ 3.40 Contour ของภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานทางด้านข้างของแต่ละหน้าตัดต่างๆสำหรับกรณี JICF Sr05 และ Sr08

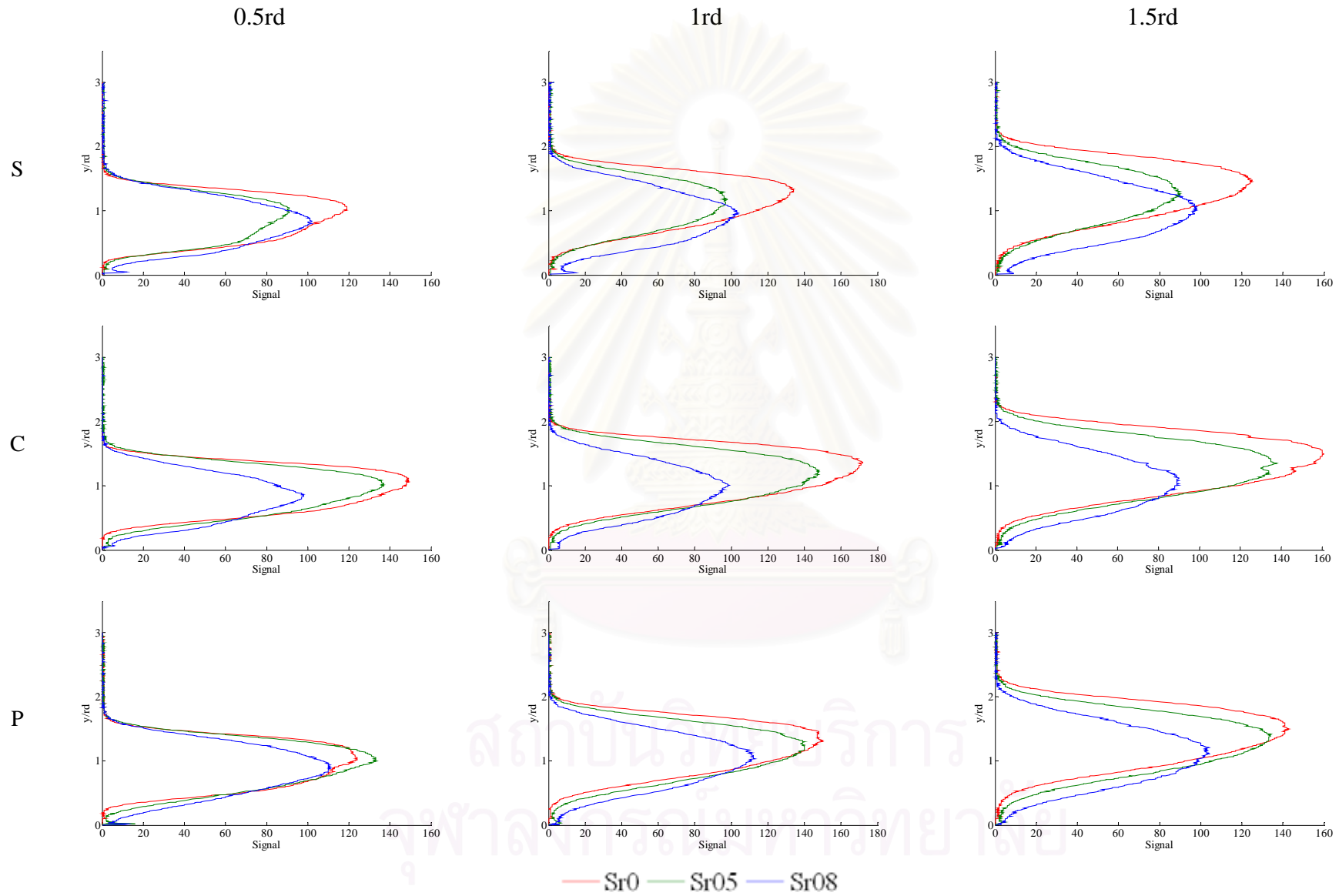




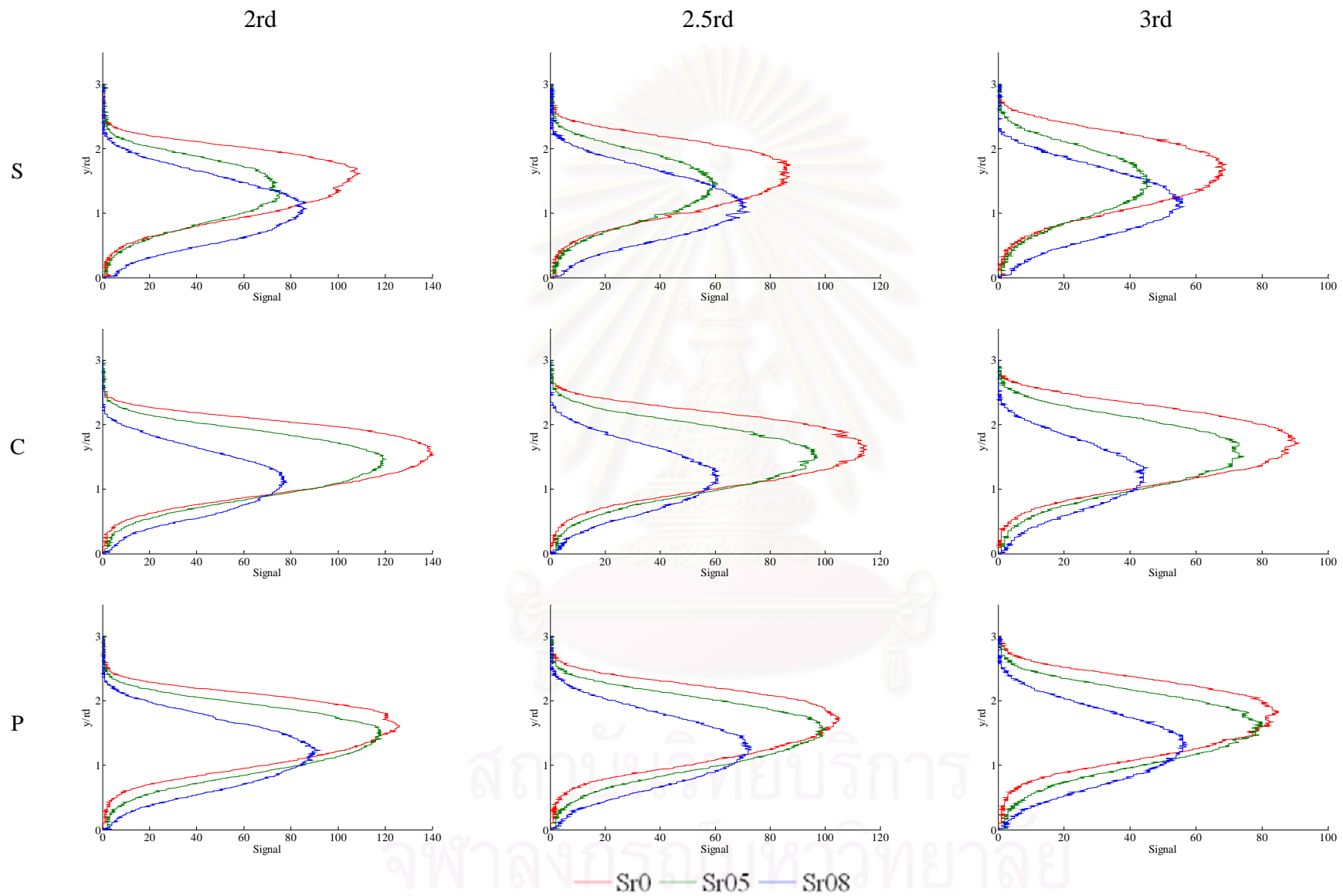
รูปที่ 3.41 Contour ของภาพ Turbulent intensity ทางด้านข้างของแต่ละหน้าตัดใดๆสำหรับกรณี JICF Sr05 และ Sr08



รูปที่ 3.42 ค่าความเข้มชั้นของแสงที่ตำแหน่ง Traverse ใดๆของเจ็ตในกระแสมขวาง กรณี Sr05 และ Sr08



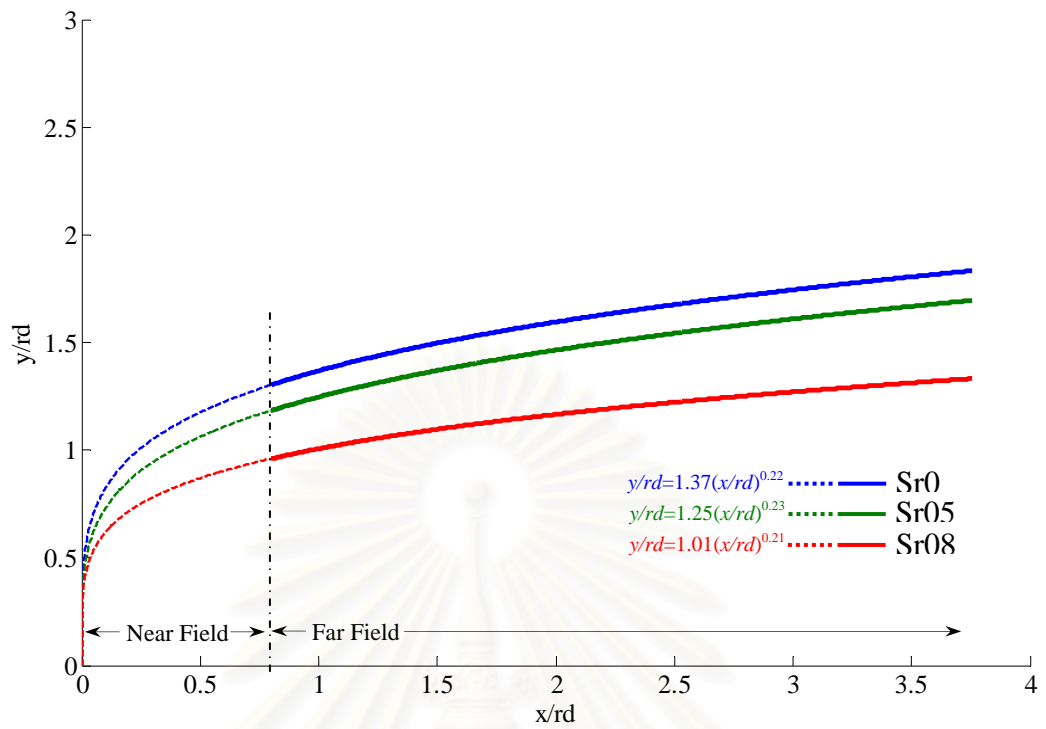
รูปที่ 3.43ก เปรียบเทียบผลของ Swirl ratio ต่างๆ ตามตำแหน่ง Downstream(x) ที่ Travers ใดๆ



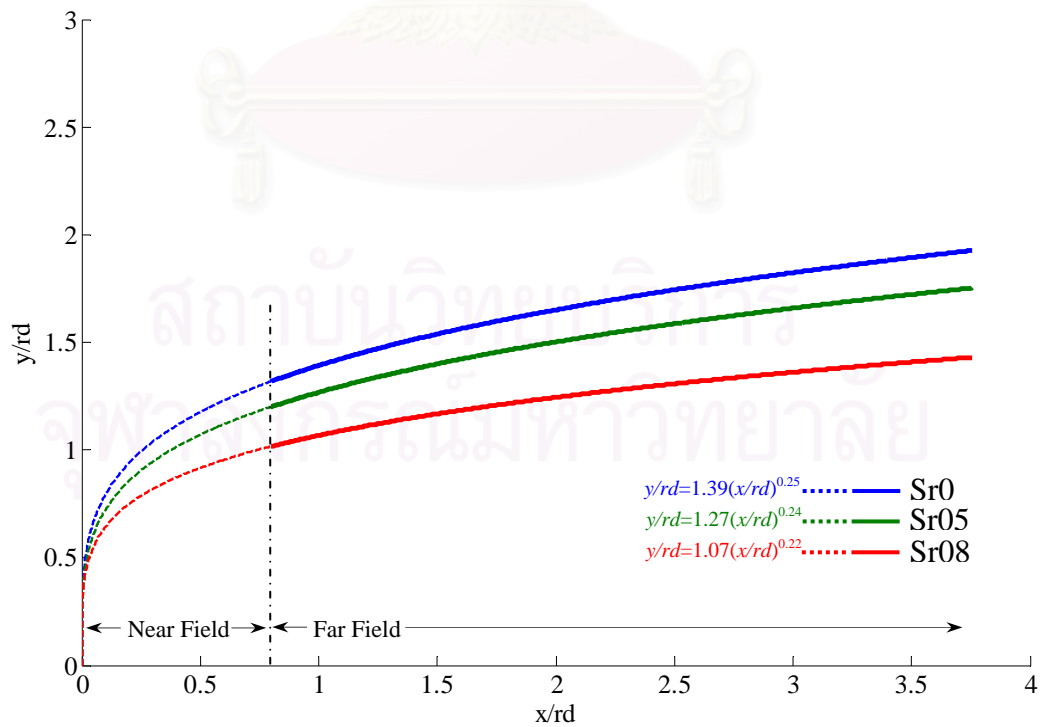
รูปที่ 3.43 ข

เปรียบเทียบผลของ Swirl ratio ต่างๆ ตามตำแหน่ง Downstream(x) ที่ Travers ใดๆ

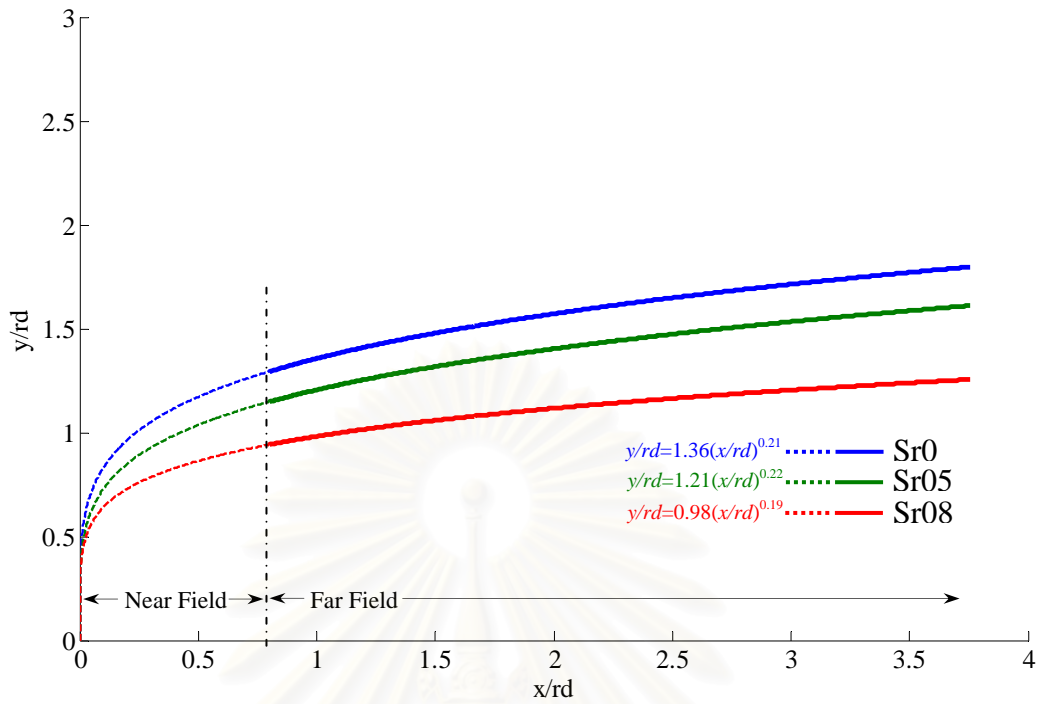




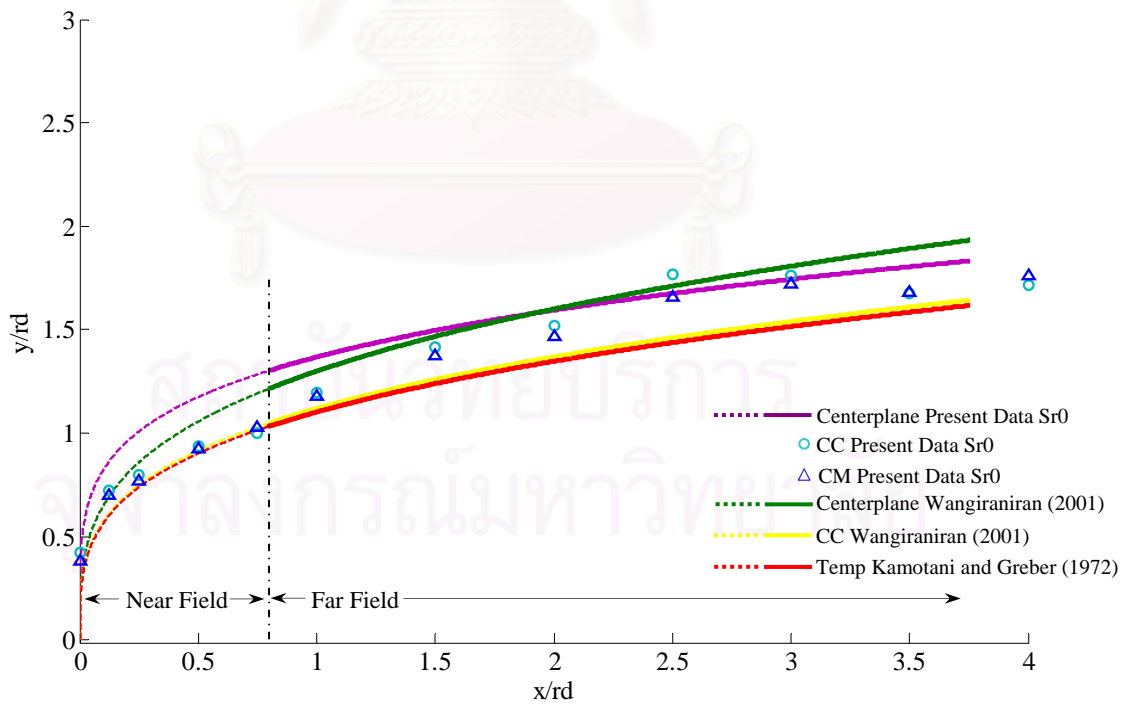
รูปที่ 3.44 ผลของ Swirl ที่หน้าตัดตามแนว Spanwise(z) สำหรับตำแหน่งที่ Centerplane



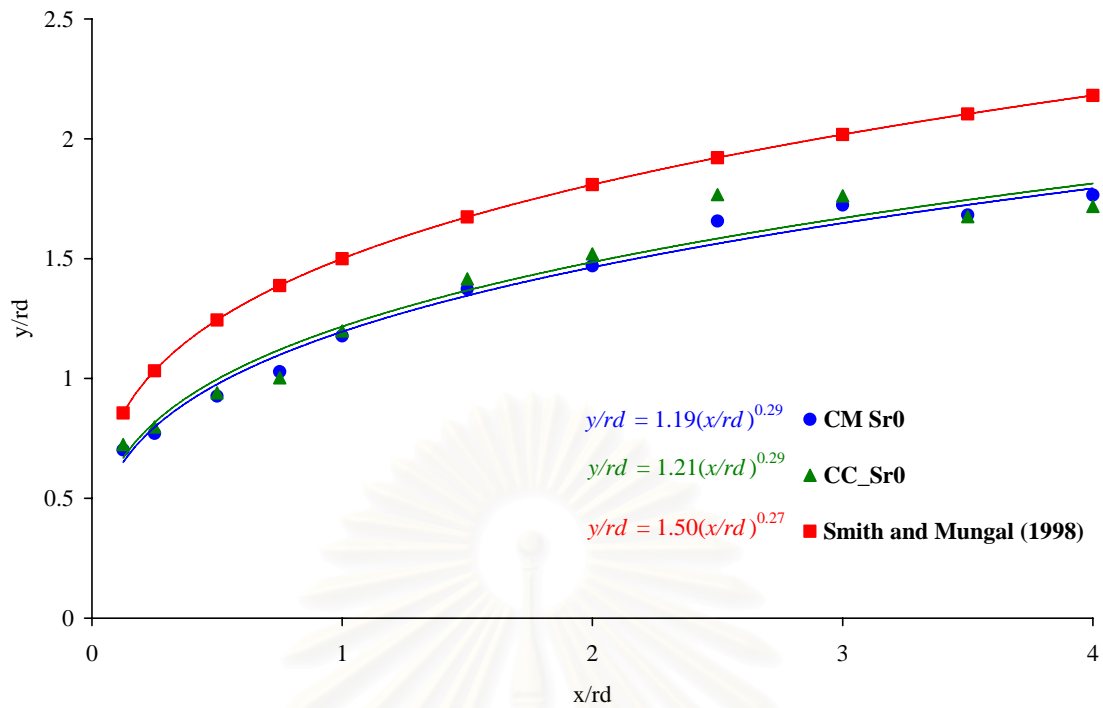
รูปที่ 3.45 ผลของ Swirl ที่หน้าตัดตามแนว Spanwise(z) สำหรับตำแหน่งที่ Pressure side



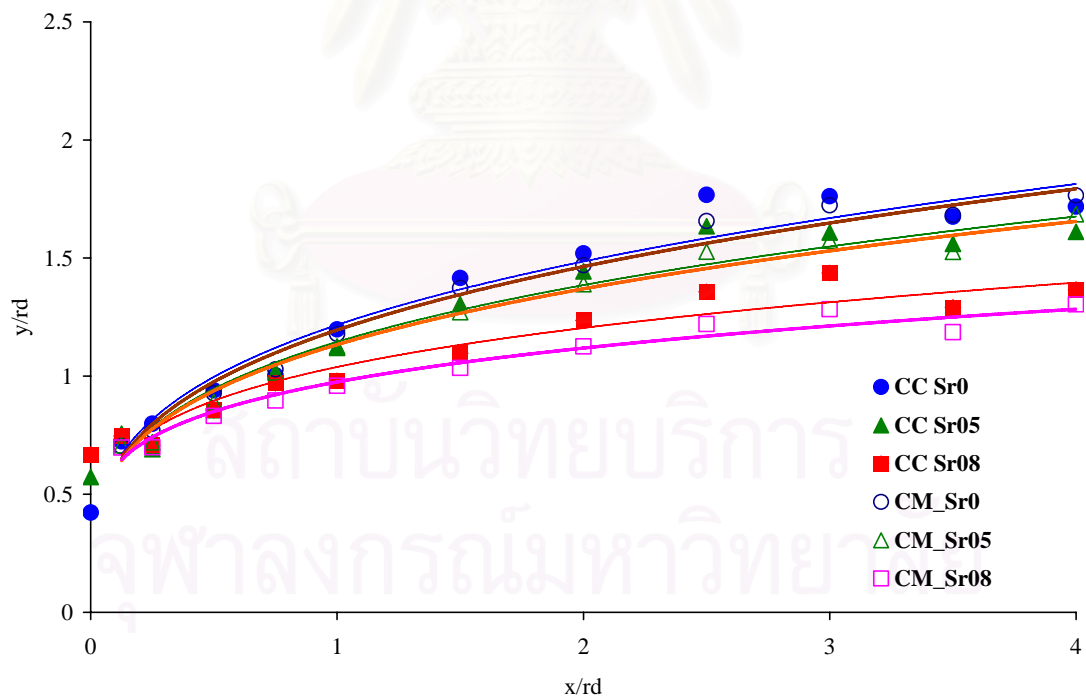
รูปที่ 3.46 ผลของ Swirl ที่หน้าตัดตามแนว Spanwise(z) สำหรับตำแหน่งที่ Scution side



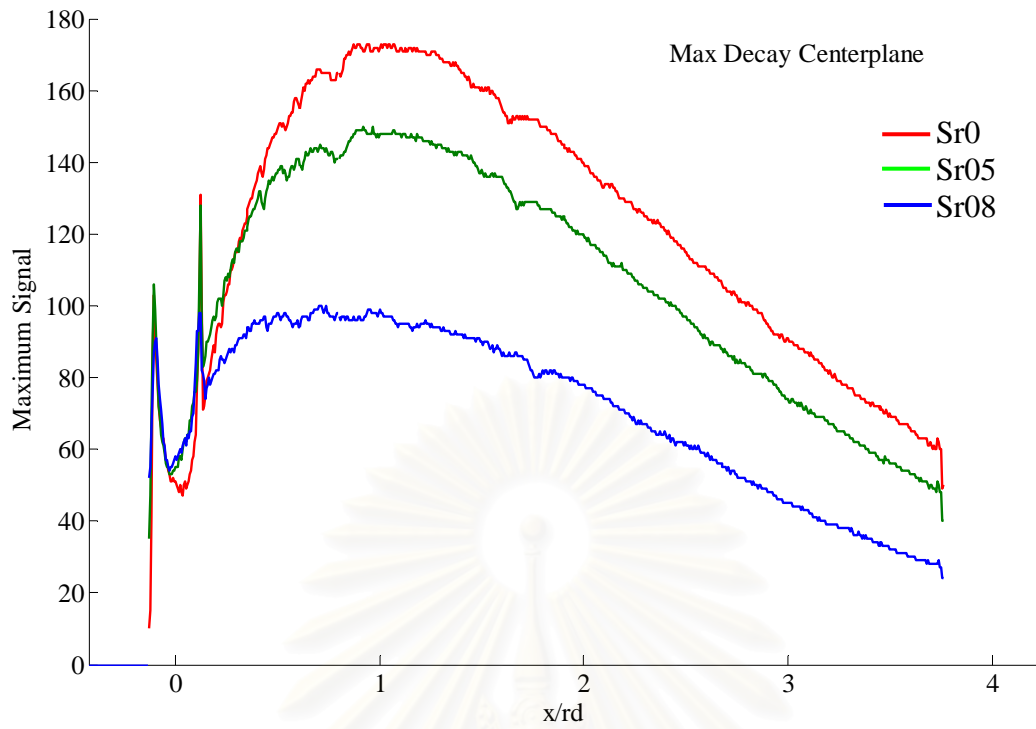
รูปที่ 3.47 Centerplane trajectory ของสัญญาณทางด้าน Sideview และ Centroid trajectory x-y ของสัญญาณทางด้าน Endview เปรียบเทียบกับ Wangiraniran(2001) และ Kamotani and Greber (1972)



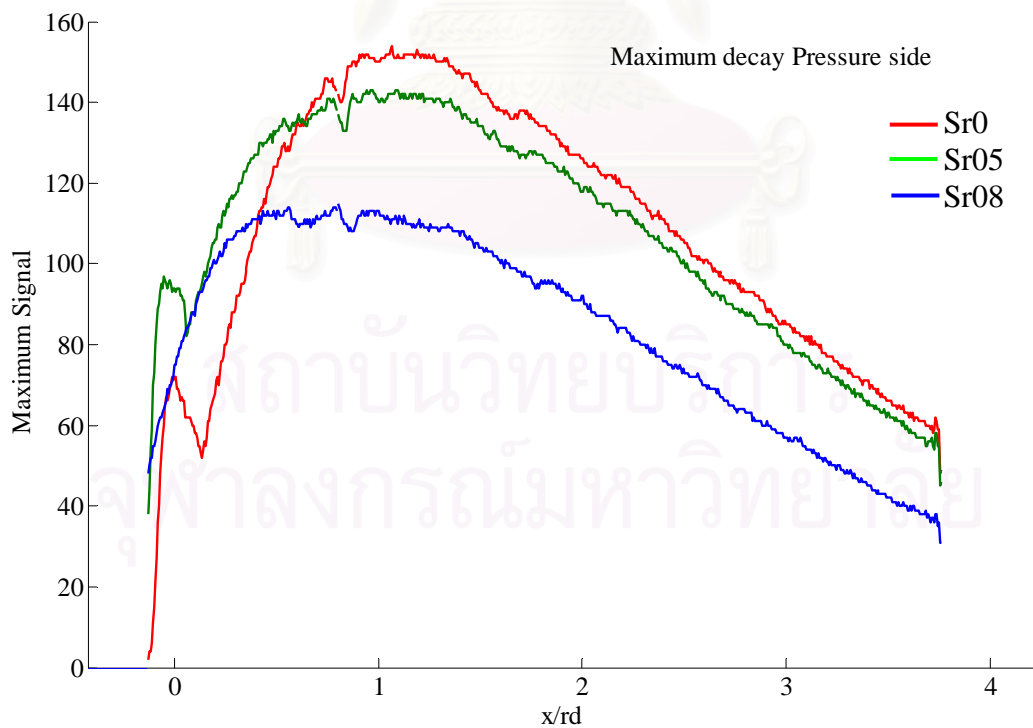
รูปที่ 3.48 เปรียบเทียบ CM กับ CC ของงานวิจัยนี้กับ Passive Scalar ของ Smith and Mungal (1998)



รูปที่ 3.49 เปรียบเทียบผลของ Swirl ระหว่าง Center of mass trajectory กับ Centroid trajectory

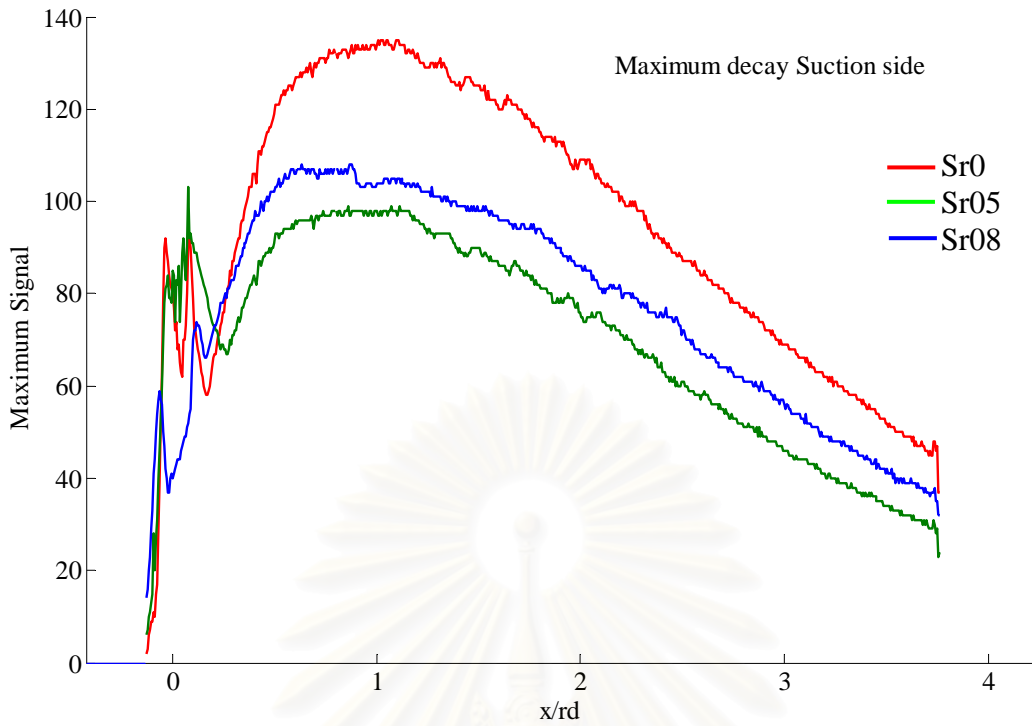


รูปที่ 3.50 Maximun decay ของสัญญาณทางด้าน Sideview ที่หน้าตัดตามแนว Spanwise(z) สำหรับตำแหน่งที่ Centerplane

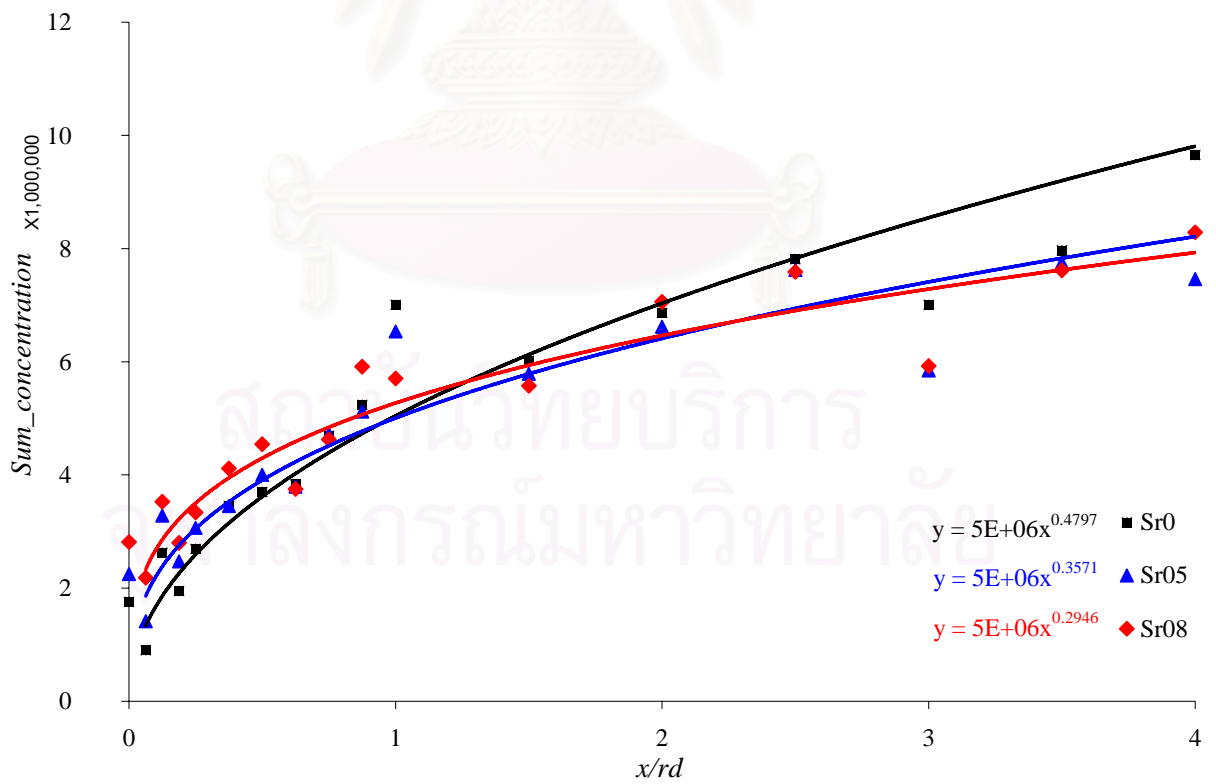


รูปที่ 3.51 Maximun decay ของสัญญาณทางด้าน Sideview ที่หน้าตัดตามแนว Spanwise(z) สำหรับตำแหน่งที่ Pressure side

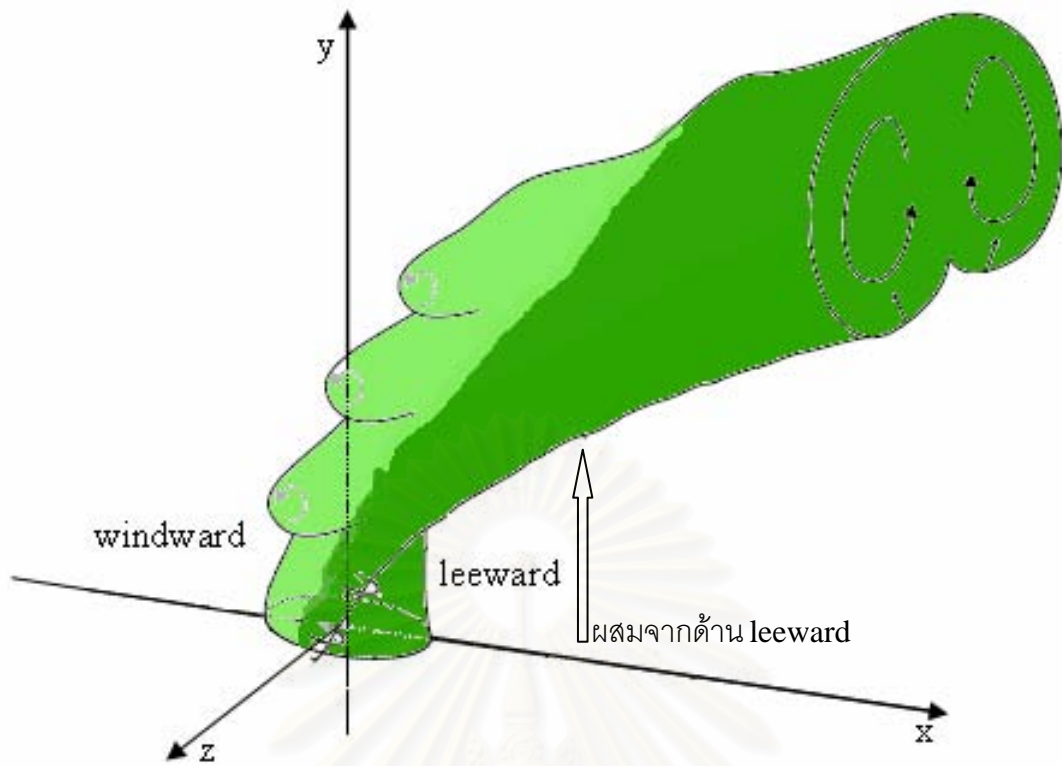




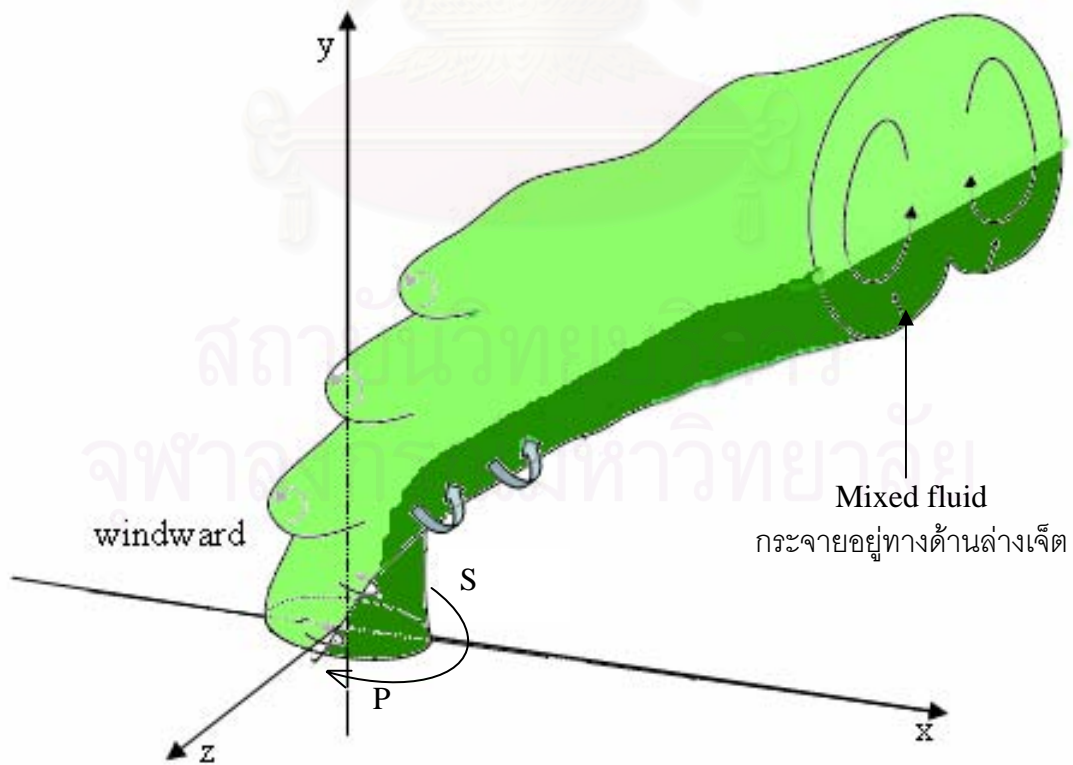
รูปที่ 3.52 Maximun decay ของสัญญาณทางด้าน Sideview ที่หน้าตัดตามแนว Spanwise(z) สำหรับตำแหน่งที่ Scution side



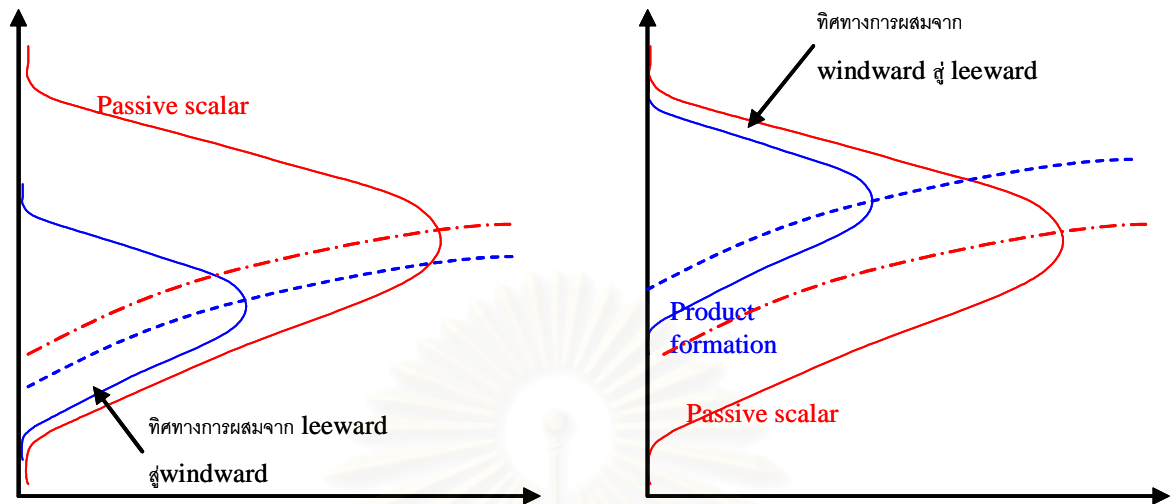
รูปที่ 3.53 ผลรวมของ Concentration ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) ของภาพด้าน End view



รูปที่3.54 Diagram ของการผสมที่เกิดขึ้นจากทางด้าน leeward ไปสู่ด้าน windward



รูปที่3.55 Diagram การกระจายตัวของ mixed fluid สำหรับกรณี Sr08



รูปที่ 3.56 Diagram แสดงการเปรียบเทียบทิศทางการผสมจากทิศทาง leeward ไปสู่ windward และ จากทิศทาง windward ไปสู่ leeward

## รายการอ้างอิง

- 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.
- Coelho, S.L.V., and Hunt, J.C.R., (1989), "The dynamics of the near field of strong jets In crossflows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 200, pp. 95-120.
- Denev, J., Frohlich, J., and Bockhorn, H., 2005, "Structure and mixing of a swirling transverse jet into a crossflow," In Humphrey *et al.* (eds.), *Procs. of 4<sup>th</sup> Int. Symp. on Turbulent Shear Flow Phenomena*, Williamsburg, June 27-29 2005, 1255-1260.
- Feyedelem, M.S., and Sarpkaya, T., (1997), "Free and near-free-surface swirling turbulent jets," *AIAA Paper* No. 97-0438.
- Fric, T.F., (1990), "Structure in the near field of the transverse jet," *Ph.D. thesis*, California Institute of Technology.
- Fric, T.F., and Roshko, A., (1989), "Structure in the near field of the transverse jet," *Seventh Symposium on Turbulent Shear Flows*, pp. 6.4.1-6.4.6.
- Fric, T.F., and Roshko, A., (1994), "Vortical structure in the wake of a transverse jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 279, pp. 1-47.
- Kamotani, Y., and Greber, I., (1972), "Experiments on a Turbulent Jet in a Cross Flow," *AIAA Journal*, Vol. 11, pp. 1425 –1429.
- Kavsaoğlu, M.S., and Schetz, J.A., (1989), "Effects of swirl and high intensity turbulence on a jet in a crossflow," *Journal of Aircraft*, Vol.26, No.6, pp.539-546.
- Keffer J.F., and Baines, W.D., (1963), "The round turbulent jet in a cross-wind," *J. Fluid Mech.*, Vol.15, pp. 481-496.
- Kelso, R.M., Lim, T.T., and Perry, A.E., (1996), "An experimental study of round jets in cross-flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 17, pp. 770-775.
- Lim, T.T., New ,T.H.,and Luo, S.C.,(2001) "On the development of large scale structures of a jet in a crossflow ," *J. Fluid Mech.*, Vol. 306, pp. 111-144.
- Liscinsky, D.S, True, B., and Holdeman, J.D., (1995), "Effects of initial conditions on a single jet in crossflow," *AIAA Journal*, 95-2998, 31<sup>st</sup> Joint Propulsion Conference, San Diego, 10-12 July 1995.
- Margason, R. J., (1968) "The path of a jet directed at large angles to a subsonic freestream," *Technical Report TN D-4919*, NASA.
- Milanovic, Ivana M., and Zaman, K.B.M.Q., (2004), "Fluid dynamics of highly pitchedand yawed Jets in Crosssflow," *AIAA Journal*, Vol.42, pp.874-882.
- Narayanan, S., Barooah, P., and Cohen, J.M., (2003), "Fluid dynamics of highly pitchedand yawed Jets in Crosssflow," *AIAA Journal*, Vol.41, pp.2316-2330.
- Naughton, J.W., Cattafesta, L.N., and Settles, G.S., (1997), "An experiment study of compressible turbulent mixing enhancement in swirling jets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 330, pp. 271-305.
- New ,T.H., Lim, T.T., and Luo, S.C., (2003) "Elliptic jets in cross flow ," *J. Fluid Mech.*, Vol. 494, pp. 119-140.
- Niederhaus, C.E., Champagne, F.H., and Jacobs, J.W., (1997), "Scalar transport in a swirling transverse jet," *AIAA Journal*, Vol.35, No.11, pp.1697-1704.
- Pratte, B.D., and Baines, W.D., (1967), "Profiles of the round turbulent jets in a cross flow," *Proc. A.S.C.E., J. Hydraul. Div.*, Vol. 92, pp. 53-64.



- Rajaratnam, N., (1976), Turbulent jets, Eisevier Scientific Publishing Company, New York.
- Reeder, M.F., and Samimy, M., (1996), "The evolution of a jet with vortex-generating tabs : real-time visualization and quantitative measurements," *J. Fluid Mech.*, Vol. 311, pp. 73-118.
- Sherif, S.A., and Pletcher, R.H., (1989), "Measurements of the thermal characteristics of heated turbulent jets in crossflow," *J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp.897-903.
- Sivadas, V., Pani, B.S., Butefisch, K.A., and Meier, G.E.A., (1997), "Flow visualisation studies on growth of area of deflected jets," *Exp. Fluids*, Vol. 13, pp.105-112.
- 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.
- Sau, A., Sheu, W.H., Hwang, R., and yang , W.C., (2004) "Tree dimensional simulation of square jets in crossflow,"*Physical Review*,E69, 066302.
- Tenneke, H. and Lumley, J.L., (1972), A First course in Turbulence, M.I.T. Press, Cambridge.
- Wangjiraniran, W., Uppathamnarakorn, P., and Bunyajitradulya, A., (1999), "On the decay of Characteristic Mean Temperature of A Heated Swirling Jet," *Proceeding of the 13<sup>th</sup> National Mechanical Engineering Conference*, Vol. 1, pp. 17-21.
- Wangjiraniran, W., and Bunyajitradulya, A., (2001), "Effects of Swirl Number on Mixing Characteristics of A Heated Swirling Jet in Crossflow," Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.
- Yoshizako, H., Yoshida, K., and Akiyama, I., (1991), "Diffusion of a Jet Injected Perpendicularly into Uniform Crossflow," *JSME (B)* , No.90-0442 B , pp.354-359.
- Yuan, L.L., and Street, R.L., (1998), "Trajectory and entrainment of a round jet in crossflow," *Phys. fluids*, Vol. 10, No. 9, pp. 2323-2335.
- Yuan, L.L., Street, R.L., and Ferziger, J.H., (1999), "Large-eddy simulations of a round jet in crossflow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 379, pp. 71-104.
- Zaman, K.B.M.Q., Samimy, M., and Reeder, M.F., "Control of an axisymmetric jet using vortex generators," *Phys Fluids*, Vol. 6, No. 2, Feb. 1994.
- 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, pp.106-114.

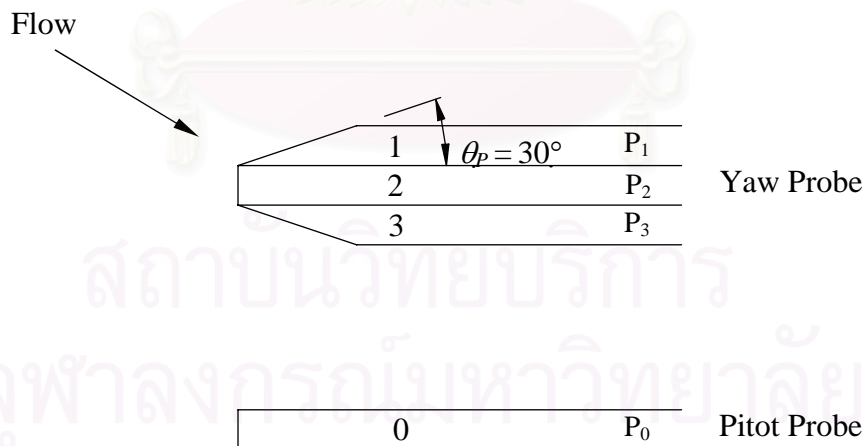
## ภาคผนวก ก

### การเปรียบเทียบและคำนวณความเร็วการไหลจากการวัดด้วย Yaw Probe

#### ก.1 ลักษณะและรายละเอียดของ Yaw Probe

โดยทั่วไป Pitot Probe สามารถใช้งานได้ดีกับการวัดความเร็วของของไหลที่มีลักษณะเป็น Parallel flow และผู้วัดทราบทิศทางการไหลแน่นอน แต่สำหรับการไหลแบบหมุนวน ดังเช่นในงานวิจัยนี้ที่ของไหลมีความเร็วในสองมิติ และไม่ทราบทิศทางการไหล จึงไม่สามารถใช้ Pitot Probe ในการวัดความเร็วได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สร้าง Yaw Probe ขึ้นเพื่อวัดการไหลโดยสามารถวัดความเร็วในสองมิติที่ไม่ทราบทิศทางที่แน่นอนได้

สำหรับ Yaw Probe ที่ใช้ทำขึ้นจากเข็มฉีดยาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 0.5 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.32 มิลลิเมตร จำนวน 3 อัน เรียงติดกัน โดยเข็มอันที่ 1 และ 3 ถูกฝนให้มีมุมเอียง  $\theta_p$  เท่ากับ 30 องศา และติดเข้ากับเข็มอันที่ 2 ที่ฝนให้มีมุม 90 องศาที่อยู่ตรงกลาง ดังแสดงในรูปที่ ก.1 เข็มทั้ง 3 ถูกเชื่อมติดกันและงอโค้งเป็นมุมฉาก โดยมีระยะจากปลายเข็มถึงก้านเข็มยาว 35 มิลลิเมตร เข็มแต่ละอันต่อเข้ากับท่อทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3 มิลลิเมตร หนา 0.5 มิลลิเมตร ท่อทองเหลืองทั้ง 3 อันถูกเชื่อมเข้าไว้ด้วยกันเพื่อใช้เป็นก้าน Probe ซึ่งความดันที่วัดได้ระหว่างเข็มแต่ละอันจะนำไปคำนวณหาความเร็วของการไหลในทิศทางต่างๆ



รูปที่ ก.1 แสดงลักษณะของ Yaw Probe

### ก.1 การเปรียบเทียบ Yaw Probe

ในการวัดความเร็วของการไหลได้มีการเปรียบเทียบ Yaw Probe เพื่อหาความสัมพันธ์ของผลต่างความดันที่วัดได้จากเข็มแต่ละคู่กับค่าความเร็วตามแนวแกนและแนวสัมผัส โดยทำการเปรียบเทียบในอุโมงค์ลมขนาดหน้าตัด  $50 \times 50$  เซนติเมตร ที่ความเร็ว 8, 10 และ 12 เมตรต่อวินาที แล้ววัดผลต่างความดันระหว่างเข็มแต่ละคู่ของ Yaw Probe ได้แก่ ค่า  $P_1-P_2$ , ค่า  $P_3-P_2$  และค่า  $P_1-P_3$  รวมทั้งผลต่างความดันระหว่าง Pitot Probe กับเข็มหมายเลข 2 ของ Yaw Probe ได้แก่ค่า  $P_0-P_2$  นอกจากนี้ยังวัดค่าความดันจลน์ของการไหลโดยวัดผลต่างความดันระหว่าง Pitot Probe กับความดันสถิตที่ผนังของอุโมงค์ลม

ในการเปรียบเทียบได้ควบคุมให้การไหลมีความดันจลน์คงที่แล้วปรับเปลี่ยนมุมปะทะ ( $\alpha$ ) ของการไหลกับ Yaw Probe โดยหมุน Yaw Probe ไปทีละ 5 องศา โดยมีช่วงของการเปรียบเทียบ ( $\alpha$ ) ระหว่าง -85 องศา ถึง 85 องศา และผลต่างความดันที่วัดได้จะสัมพันธ์กันตามสมการ (ก.1) ถึง (ก.3) (Chue, 1975)

$$P_1 = P_0 + K_1 \Delta P \quad (\text{ก.1})$$

$$P_2 = P_0 + K_2 \Delta P \quad (\text{ก.2})$$

$$P_3 = P_0 + K_3 \Delta P \quad (\text{ก.3})$$

โดย	$P_0$	คือค่าความดันรวมจริง
	$\Delta P$	คือค่าความดันจลน์ของการทดลอง
	$K_1, K_2, K_3$	คือ Calibration Function

จากสมการ ก.1 ถึง ก.3 นั้นสามารถกำหนดความสัมพันธ์ของ Calibration function  $K_0$ ,  $1/K_0$ ,  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ได้ตามสมการ

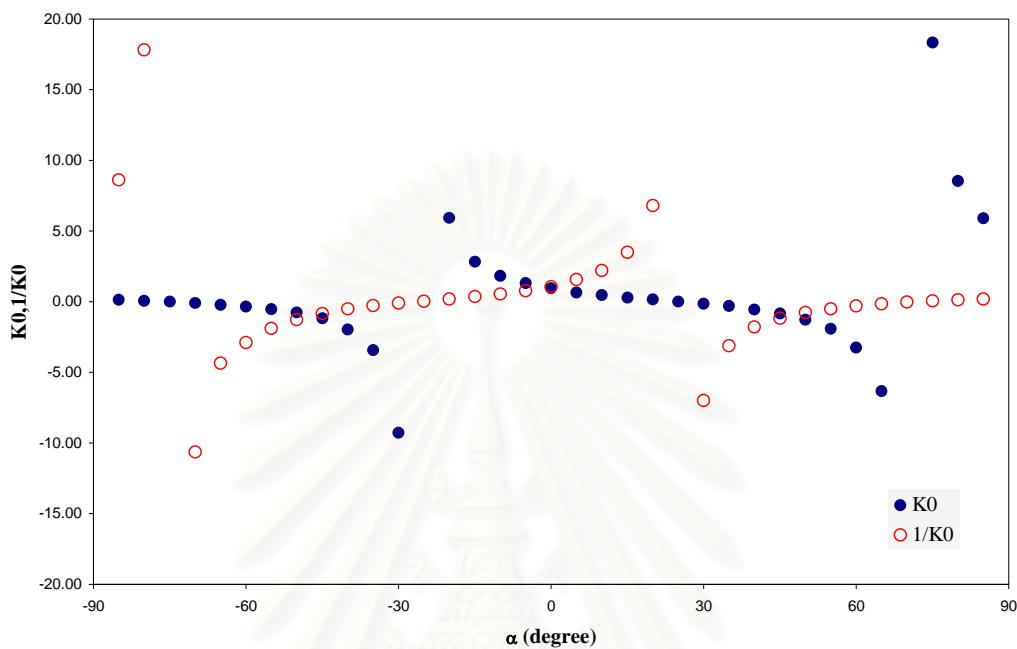
$$K_{12} = K_1 - K_2 = \frac{P_1 - P_2}{\Delta P} \quad (\text{ก.4})$$

$$K_{32} = K_3 - K_2 = \frac{P_3 - P_2}{\Delta P} \quad (\text{ก.5})$$

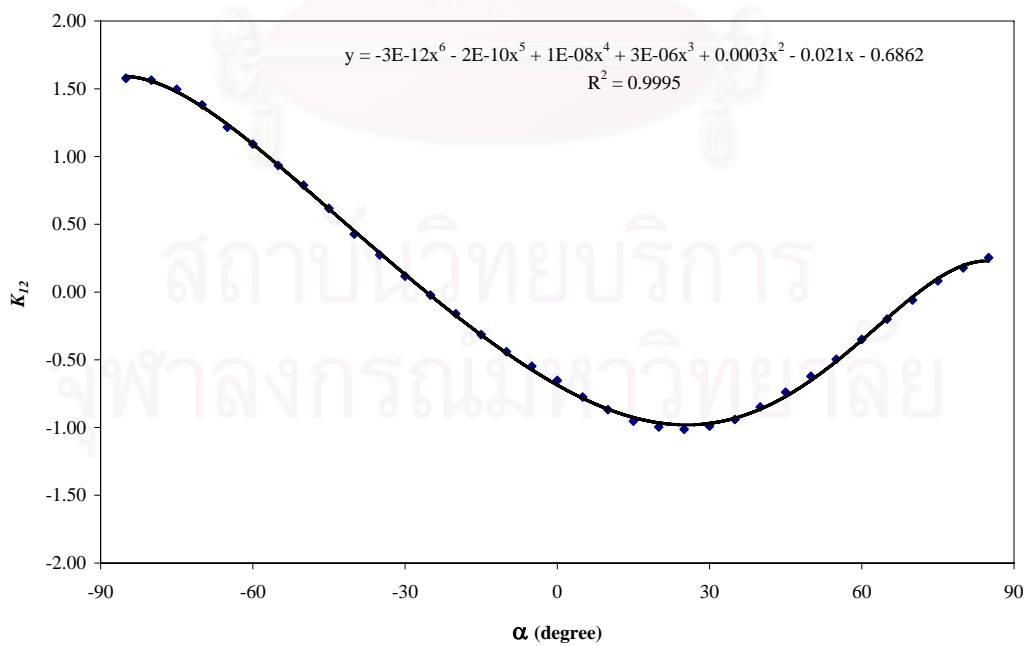
$$K_0 = \frac{(K_3 - K_2)}{(K_1 - K_2)} = \frac{(P_3 - P_2)}{(P_1 - P_2)} \quad (\text{ก.6-1})$$

$$1/K_0 = \frac{(K_1 - K_2)}{(K_3 - K_2)} = \frac{(P_1 - P_2)}{(P_3 - P_2)} \quad (\text{ก.6-2})$$

โดยสามารถหาค่า  $K_0$  ,  $1/K_0$  ,  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ที่มุมปะทะ ( $\alpha$ ) ต่างๆได้จากค่าความดันแตกต่างที่วัดและค่าความดันจลน์ของการทดลอง โดยแสดงความสัมพันธ์ของ  $K_0$  ,  $1/K_0$  ,  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ที่มุมปะทะ ( $\alpha$ ) ต่างๆดังรูปที่ ก.2

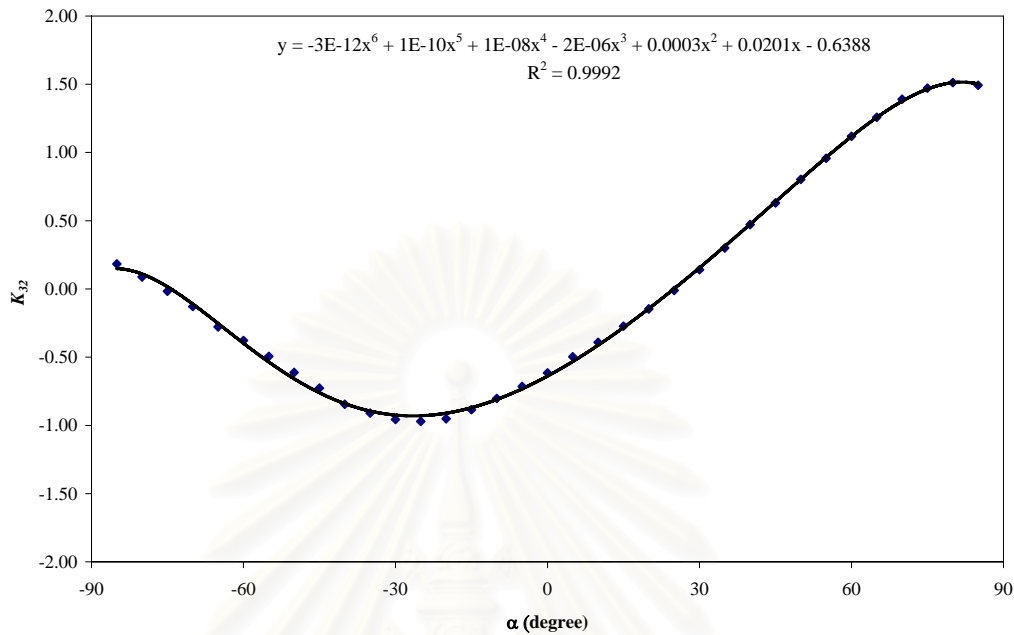


รูปที่ ก.2 (ก) ความสัมพันธ์ของ Calibration function,  $K_0$  และ  $1/K_0$  กับมุมปะทะของการไหล ( $\alpha$ )



รูปที่ ก.2 (ข) ความสัมพันธ์ของ Calibration function,  $K_{12}$  กับมุมปะทะของการไหล ( $\alpha$ )





รูปที่ ก.2 (ค) ความสัมพันธ์ของ Calibration function,  $K_{32}$  กับมุมปะทะของการไหล ( $\alpha$ )

### ก.3 การคำนวณความเร็วจากการวัดด้วย Yaw probe

ในการหาความเร็วจากการวัดด้วย Yaw probe นั้น เริ่มจากการวัดความแตกต่างของความดันในแต่ละคู่ นั่นคือ  $P_1-P_2$ , และ  $P_3-P_2$  จากนั้นจะสามารถหาค่า  $K_0$  และ  $1/K_0$  ได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (ก.6) และหาค่ามุมปะทะ ( $\alpha$ ) ของการไหลได้จากความสัมพันธ์ของ  $K_0$  และ  $1/K_0$  และมุมปะทะ ( $\alpha$ ) โดยใช้ Curve fitting จากข้อมูลที่ได้จากการปรับเทียบ ซึ่งผลการใช้ Curve fitting ในช่วง  $K_0$  ต่างๆ แสดงดังรูปที่ ก.3 จากนั้นจะสามารถหาค่า  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ได้จากความสัมพันธ์ของ  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  กับมุมปะทะ ( $\alpha$ ) โดยใช้ Curve fitting จากข้อมูลที่ได้จากการ Calibrate ซึ่งผลการใช้ Curve fitting แสดงดังรูปที่ ก.2 โดยจากการวัดความแตกต่างความดันและค่า  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ที่คำนวณได้ รวมทั้งความสัมพันธ์ตามสมการ ก.4 และ ก.5 นั้นทำให้สามารถหาค่าความดันจลน์ ( $\Delta P$ ) ของการทดลองได้จาก

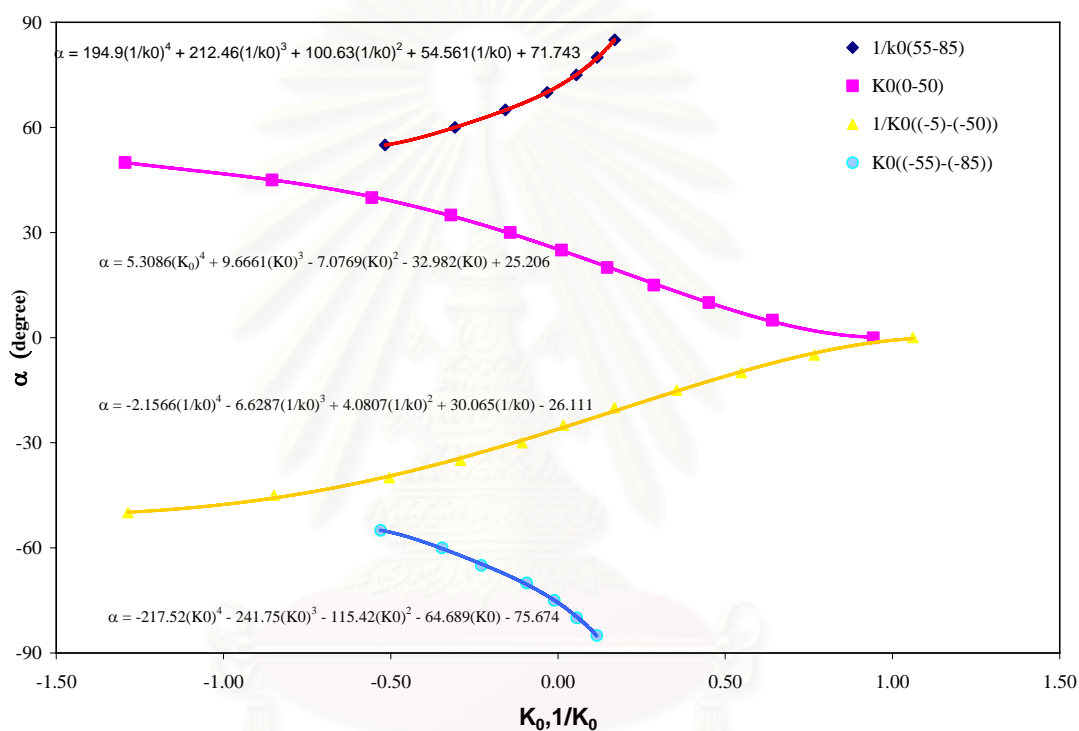
$$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{K_{12}} \quad (\text{ก.7})$$

$$\Delta P = \frac{P_3 - P_2}{K_{32}} \quad (\text{ก.8})$$

จากนั้นสามารถคำนวณหาค่าความเร็วตามแนวแกน ( $u$ ) และความเร็วตามแนวสัมผัส ( $w$ ) ได้จากค่าความดันจลน์ ( $\Delta P$ ) และมุมปะทะ ( $\alpha$ ) ที่คำนวณข้างต้นตามสมการ

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \cos \alpha \quad (\text{ก.9})$$

$$w = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \sin \alpha \quad (\text{ก.10})$$



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ของมุมปะทะของการไหล ( $\alpha$ ) กับ Calibration function  $K_0$  และ  $1/K_0$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ข.**  
**การคำนวณค่าความไม่แน่นอน**

**ข.1 ค่าความไม่แน่นอนของความเร็ว**

**ข.1.1 ความไม่แน่นอนของความเร็วจากการวัดด้วย Pitot Probe**

การคำนวณความเร็วของการไหลด้วย Pitot Probe ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ  $\Delta P$  เป็นความดันจลน์ของการไหล  
 $\rho$  เป็นความหนาแน่นของอากาศ

จากการประมาณค่าความไม่แน่นอนโดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ ความเร็ว ( $\delta_u$ ) ตามสมการ

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial(\Delta P)} \delta_{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial \rho} \delta_{\rho}\right)^2}$$

แทนค่า  $u$  ตามสมการ ข.1 จะได้

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{\delta_{\Delta P}}{\rho u}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P \delta_{\rho}}{\rho^2 u}\right)^2} \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่ความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่าความดัน  $\delta_{\Delta P}$  มีค่าประมาณ  $\pm 0.1$  mmWG และให้ค่า  $\delta_{\rho}$  มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ  $\delta_{\Delta P}$  เมื่อเลือกจุดบริเวณกึ่งกลางที่ปากเจ็ทคือที่  $r = 0$  ในกรณี Sr0 ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆคือ  $u = 9.98$  m/s,  $\rho = 0.88$  kg/m<sup>3</sup> แทนในสมการ ข.2

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{1Pa}{0.88kg/m^3 \times 9.98m/s}\right)^2} \approx 0.11m/s$$

และเมื่อเลือกจุดบริเวณใกล้ขอบที่ปากเจ็ทคือที่ระยะ  $r = +15$  mm ในกรณี Sr0 ซึ่งมีค่าความไม่แน่นอนมากที่สุด ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆคือ  $u = 6$  m/s,  $\rho = 0.88$  kg/m<sup>3</sup> แทนในสมการ ข.2 จะได้

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{1Pa}{0.88kg/m^3 \times 6m/s}\right)^2} \approx 0.18 \text{ m/s}$$

ความไม่แน่นอนของค่าความเร็วจากการวัดด้วย Pitot Probe มีค่าประมาณ  $\pm 0.2 \text{ m/s}$

### ข.1.2 ความไม่แน่นอนของความเร็วจากการวัดด้วย Yaw Probe

การคำนวณค่าความเร็วจาก Yaw Probe ได้ทำการปรับเทียบเพื่อหา Calibration Function ตามความสัมพันธ์

$$K_{12} = K_1 - K_2 = \frac{P_1 - P_2}{\Delta P} \quad (ข.3)$$

$$K_{32} = K_3 - K_2 = \frac{P_3 - P_2}{\Delta P} \quad (ข.4)$$

$$K_0 = \frac{(K_3 - K_2)}{(K_1 - K_2)} = \frac{(P_3 - P_2)}{(P_1 - P_2)} \quad (ข.5)$$

เมื่อ  $P_1 - P_2$  เป็นความแตกต่างความดันระหว่างเข็ม 1 และ 2 ของ Yaw Probe

$P_3 - P_2$  เป็นความแตกต่างความดันระหว่างเข็ม 3 และ 2 ของ Yaw Probe

$\Delta P$  เป็นค่าความดันเฉลี่ยของการปรับเทียบเครื่องมือ

จากการประมาณค่าความไม่แน่นอนโดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของค่า Calibration Function ในการปรับเทียบเครื่องมือเป็น

$$\delta_{K_0} = \sqrt{\left[\frac{\delta_{P_3-P_2}}{(P_1 - P_2)}\right]^2 + \left[\frac{(P_3 - P_2)\delta_{P_1-P_2}}{(P_1 - P_2)^2}\right]^2} \quad (ข.6)$$

และจากความสัมพันธ์ของ Calibration function  $K_0$  และ  $\alpha$  ในหัวข้อ ข.2 และรูปที่ ข.2 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของ  $\alpha$  ตามความสัมพันธ์

$$\delta_\alpha = \frac{d\alpha}{dK_0} \delta_{K_0} \quad (ข.7)$$

และจากความสัมพันธ์ของ Calibration function  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  กับ  $\alpha$  ในหัวข้อ ข.3 และรูปที่ ข.3 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของ  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ตามความสัมพันธ์

$$\delta_{K_{12}} = \frac{dK_{12}}{d\alpha} \delta_\alpha \quad (ข.8)$$



$$\delta_{K_{32}} = \frac{dK_{32}}{d\alpha} \delta_\alpha \quad (1.9)$$

สำหรับการคำนวณความเร็วจากการวัดด้วย Yaw Probe ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$V = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(K_{12})}} \quad \text{หรือ} \quad V = \sqrt{\frac{2(P_3 - P_2)}{\rho(K_{32})}} \quad (1.10)$$

ซึ่งได้ความไม่แน่นอนของค่าความเร็วเป็น

$$\delta_V = \sqrt{\frac{(\delta_{P_1-P_2})^2}{2\rho(P_1 - P_2)(K_{12})} + \frac{(P_1 - P_2)(\delta_{K_{12}})^2}{2\rho(K_{12})^3}} \quad (1.11)$$

จากความเร็ว  $V$  ที่คำนวณได้จาก Yaw Probe สามารถคำนวณความเร็วตามแนวแกน ( $u$ ) และความเร็วตามแนวสัมผัส ( $w$ ) ได้ตามความสัมพันธ์

$$u = V \cos \alpha \quad (1.12)$$

$$w = V \sin \alpha \quad (1.13)$$

และสามารถคำนวณความไม่แน่นอนของความเร็วตามแนวแกน  $\delta_u$  และความเร็วตามแนวสัมผัส  $\delta_w$  ได้จาก

$$\delta_u = \sqrt{[(\cos \alpha)(\delta_V)]^2 + [(V \sin \alpha)(\delta_\alpha)]^2} \quad (1.14)$$

$$\delta_w = \sqrt{[(\sin \alpha)(\delta_V)]^2 + [(V \cos \alpha)(\delta_\alpha)]^2} \quad (1.15)$$

โดยในแต่ละจุดที่ปากเจ็ทนั้น มีค่าความไม่แน่นอนของความเร็วแตกต่างกัน ตามการกระจายของ Calibration curve ซึ่งในที่นี้ได้ยกตัวอย่างการคำนวณ โดยเลือกเป็นตำแหน่ง  $r = 8$  mm ที่ปากเจ็ท ในกรณี Sr051 โดยมีค่าความดัน  $P_1 - P_2 = -2.45$  mmWG,  $P_3 - P_2 = -1.06$  mmWG ซึ่งจากการคำนวณในภาคผนวก ก. จะได้  $K_0 = 0.43$ ,  $\alpha = 10.40$  องศา,  $K_{12} = -0.87$ ,  $V = 11.64$ ,  $u = 11.45$  และ  $w = 2.10$  ตามลำดับ โดยมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดความดัน ซึ่งพิจารณาจากค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของเครื่องมือวัดประมาณ

$$\delta_{P_1-P_2} = \delta_{P_3-P_2} = 0.254 \text{ mmWG}$$

และจากสมการ ข.6 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของ  $K_0 (\delta_{K_0})$  ประมาณ 0.1 และจากสมการ ข.7 และ Calibration curve ดังรูป ข.2 จะได้  $\delta_\alpha$  ประมาณ 1.6 องศา และจากสมการ ข.8 และ Calibration curve ดังรูป ข.3 จะได้  $\delta_{K_{12}}$  ประมาณ 0.07 และจากสมการ ข.11 จะได้  $\delta_V$  ประมาณ 0.2 และจากสมการ ข.14-ข.15 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของความเร็วในแนวแกนและแนวสัมผัสประมาณ 1.8 และ 4 m/s ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวจะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริงเนื่องจากวิธีการประมาณ โดยการนำค่าความไม่แน่นอนในแต่ละส่วนมาบวกกันเสมอ ทั้งนี้จากการตรวจสอบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วย Pitot probe ในกรณีของความเร็วในแนวแกน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

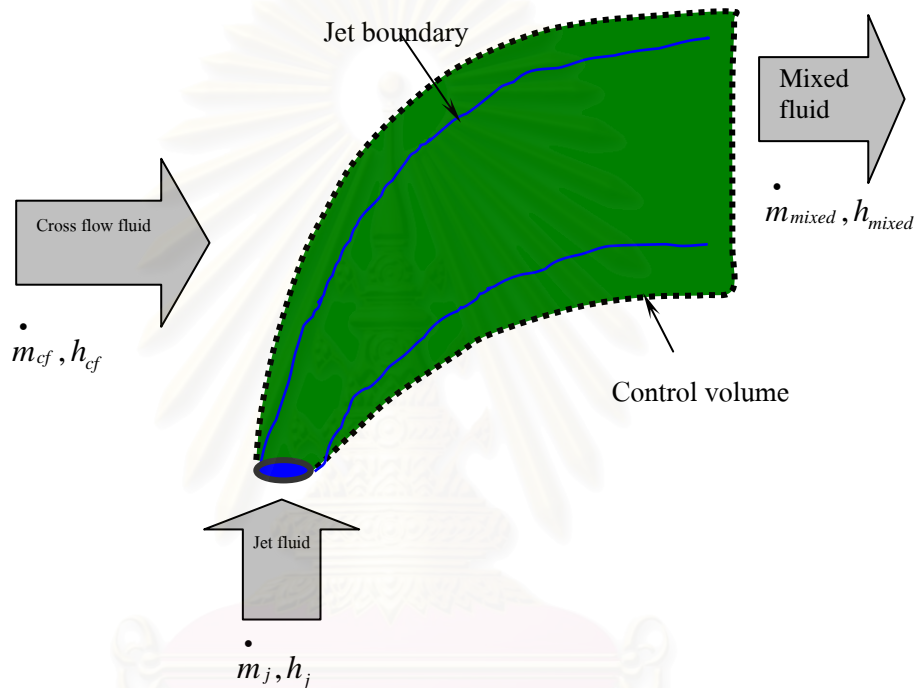


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

### Stoichiometric ratios

Stoichiometric ratios ถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนมวลของของไหลจาก jet ต่อของไหลจาก crossflow ที่เข้ามาผสมกัน โดยเราทำการประมาณค่า Stoichiometric ratios ได้ดังนี้



พิจารณาปริมาตรควบคุม (Control volume) จากกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์พลังงานในรูปแบบอินทิกรัล แสดงดังสมการ

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} (\rho \bar{u} \cdot d\bar{A}) \quad (ค.1)$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \left( e + \frac{u^2}{2} + gz \right) (\rho dV) + \int_{CS} \left( h + \frac{u^2}{2} + gz \right) (\rho \bar{u} \cdot d\bar{A}) \quad (ค.2)$$

โดยให้มีข้อสมมติ (Assumption) คือ

1. การไหลเป็นแบบสภาวะอยู่ตัวโดยเฉลี่ย การไหลอยู่ตัวโดยเฉลี่ย (Steady-state and Steady flow in mean)
2. ไม่มีการถ่ายเทความร้อน ( $\dot{Q} = 0$ ) และการทำงาน ( $\dot{W} = 0$ ) ผ่านพื้นผิวของปริมาตรควบคุม

3. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ระหว่างการเข้าและออกปริมาตรควบคุม
4. ปริมาณต่างๆคิดเป็นค่าเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัด

จากข้อสมมติข้างต้น สมการ ค.1 และ ค.2 จะลดรูปเป็น

$$0 = \dot{m}_j + \dot{m}_{cf} - \dot{m}_{mixed} \quad (\text{ค.3})$$

$$0 = \dot{m}_j h_j + \dot{m}_{cf} h_{cf} - \dot{m}_{mixed} h_{mixed} \quad (\text{ค.4})$$

โดยการแทนสมการ ค.3 ในสมการ ค.4 จะได้

$$0 = \dot{m}_j h_j + \dot{m}_{cf} h_{cf} - (\dot{m}_j + \dot{m}_{df}) h_{mixed}$$

$$\dot{m}_j h_j + \dot{m}_{cf} h_{cf} = (\dot{m}_j + \dot{m}_{df}) h_{mixed}$$

เนื่องจาก  $dh = Cp dT$  โดยที่  $Cp$  คือความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ และกำหนดให้  $Cp$  เป็นค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สมการข้างต้นจะเขียนได้เป็น

$$\dot{m}_j Cp_j T_j + \dot{m}_{cf} Cp_{cf} T_{cf} = (\dot{m}_j + \dot{m}_{df}) Cp_{mixed} T_{mixed}$$

$$\dot{m}_j (Cp_j T_j - Cp_{mixed} T_{mixed}) = \dot{m}_{cf} (Cp_{mixed} T_{mixed} - Cp_{cf} T_{cf})$$

$$\frac{\dot{m}_j}{\dot{m}_{cf}} = \frac{(Cp_{mixed} T_{mixed} - Cp_{cf} T_{cf})}{(Cp_j T_j - Cp_{mixed} T_{mixed})}$$

จะได้

Stoichiometric ratios = 4.61

	Jet	Crossflow	Mixed
temperature (K)	413	303	393
Cp (kJ/kg.K)	1.013	1.005	1.013
volume flow rate(kg/s)	0.008042	0.001215649	0.00910868
density (kg/m <sup>3</sup> )	0.81	1.16	0.87
mass flow rate(kg/s)	0.006514	0.001410153	0.00792456
enthalpy (kJ)	2.725426	0.429412794	3.154838538

ตารางแสดงค่าที่ใช้ในการคำนวณค่า Stoichiometric ratios



## ประวัติผู้เขียน

นาย ปราโมทย์ ลิ่มดำรงธรรม เกิดวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตคลองหก ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย