

ผลกระทบของสเวิร์ลนัมเบอร์ต่อคุณลักษณะการผสม  
ของเจ็ตร้อนที่หมุนควงในกระแสลมขวาง



นาย วีรินทร์ หวังจิรนิรันดร์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

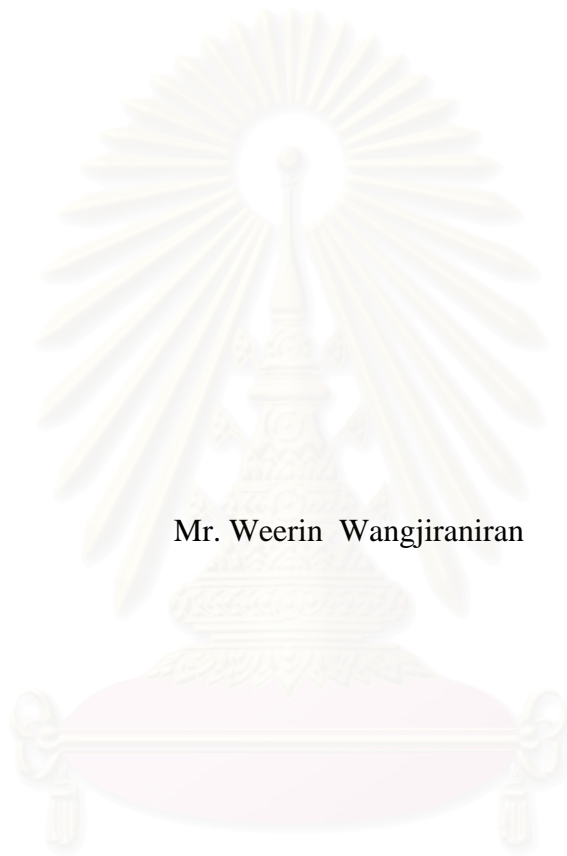
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0299-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF THE SWIRL NUMBER ON MIXING CHARACTERISTICS  
OF A HEATED SWIRLING JET IN CROSSFLOW



Mr. Weerin Wangjiraniran

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2001  
ISBN 974-03-0299-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของสเวิร์ลนัมเบอร์ต่อคุณลักษณะการผสมของเจ็ตร้อนที่หมุน  
ควงในกระแสลมขวาง  
โดย นาย วีรินทร์ หวังจิรนิรันดร์  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิ บุญจิตราดุลย์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิ บุญจิตราดุลย์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดำรงศักดิ์ มลิลิต)

..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ)

วรินทร์ หวังจิรนิรันดร์ : ผลกระทบของสเวิร์ลนัมเบอร์ต่อคุณลักษณะการผสมของเจ็ตร้อนที่หมุน  
ควงในกระแสลมขวาง

(EFFECTS OF THE SWIRL NUMBER ON MIXING CHARACTERISTICS OF A  
HEATED SWIRLING JET IN CROSSFLOW)

อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิ บุญจิตราคุลย์ ; 150 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตร้อนที่หมุนควงในกระแสลมขวางโดยทั่วไป และศึกษาผลกระทบของ  
ความเร็วในการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะการผสมของเจ็ตร้อน โดยเฉพาะ โดยเจ็ตร้อนที่หมุนควงที่มีผลรวมของ Circulation  
รอบปากเจ็ตร้อนไม่เป็นศูนย์ ถูกสร้างขึ้นด้วยท่อหมุนซึ่งภายในบรรจุ Honeycomb และทำการวัดการกระจายของอุณหภูมิบน  
ระนาบหน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแสลมขวางตามแนวการไหลของเจ็ตร้อน เพื่อศึกษาคุณลักษณะการผสมเฉพาะหน้า  
ตัดและคุณลักษณะการผสมโดยรวม การทดลองได้ทำที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเป็นค่าคงที่ที่ 4.1 โดยเปลี่ยน  
ความเร็วในการหมุนควงซึ่งแสดงเป็นค่าอัตราส่วนสเวิร์ลในช่วงตั้งแต่ 0 (กรณีเจ็ตร้อนที่หมุนควง) ถึง 0.82 ที่เรโนลด์สนัม  
เบอร์ประมาณ 12,000

จากผลการทดลองพบว่า การหมุนควงทำให้ลักษณะโครงสร้างของเจ็ตร้อนมีความไม่สมมาตรซึ่งแสดงจากการกระจาย  
ของอุณหภูมิบนหน้าตัด โดยพบบริเวณที่มีอุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงทางด้านที่ความเร็วตามแนว  
สัมผัสของเจ็ตร้อนอากาศมีทิศทางเดียวกับความเร็วของกระแสลมขวาง (ด้าน Suction) ในขณะที่พบบริเวณที่มีอุณหภูมิและ  
อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่ำทางด้านที่ความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ตร้อนอากาศมีทิศทางตรงกันข้ามกับความเร็วของ  
กระแสลมขวาง (ด้าน Pressure) ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ชี้แนะให้เห็นว่าคุณลักษณะเช่นนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างใน  
ลักษณะการเกิดของ Skewed mixing layer ที่ขอบด้านข้างทั้งสองด้านของเจ็ตร้อน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตร้อน  
นอกจากนี้ยังพบว่าความไม่สมมาตรดังกล่าวเพิ่มขึ้นตามความเร็วในการหมุนควง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการหมุนควงจะมี  
ผลต่อลักษณะของความไม่สมมาตรภายในเจ็ตร้อน แต่การหมุนควงดังกล่าวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความสมมาตร  
ภายนอกของเจ็ตร้อนซึ่งแสดงโดยเส้นขอบเขตของบริเวณระดับอุณหภูมิที่ารอบเจ็ตร้อน

นอกจากนี้ยังพบว่า ในช่วงของพารามิเตอร์ที่ศึกษานั้น การหมุนควงส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อคุณลักษณะโดยรวม  
ของเจ็ตร้อน เช่น การขยายตัวของเจ็ตร้อน และรูปร่างและตำแหน่งของขอบเจ็ตร้อนดังกล่าวข้างต้น และส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อ  
คุณลักษณะบนระนาบสมมาตรแนวตั้ง ดังจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของเส้นทางของอุณหภูมิสูงสุดบน  
ระนาบสมมาตร, เส้นทางของจุดศูนย์กลางอุณหภูมิ, และการลดลงของอุณหภูมิสูงสุดบนระนาบสมมาตร และการลดลง  
ของอุณหภูมิสูงสุด ในทางตรงกันข้าม พบว่าการหมุนควงส่งผลที่มีนัยสำคัญต่อคุณลักษณะของเจ็ตร้อนบนระนาบแนวนอน ดัง  
จะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของ เส้นทางของจุดศูนย์กลางอุณหภูมิตั้งบนระนาบแนวนอน ซึ่งพบการ  
เบี่ยงเบนออกจากแนวของระนาบสมมาตรแนวตั้งมากขึ้น เมื่อความเร็วในการหมุนควงเพิ่มมากขึ้น ผลการศึกษานี้ชี้แนะให้  
เห็นถึงความแตกต่างของอิทธิพลของอัตราส่วนสเวิร์ลและอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตร้อนที่หมุนควง  
ในกระแสลมขวาง

ภาควิชา .....วิศวกรรมเครื่องกล .....ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา .....วิศวกรรมเครื่องกล .....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา ..... 2544 .....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## 4170535121: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD : SWIRLING JET/ JET IN CROSSFLOW/ TEMPERATURE  
DISTRIBUTION/ ROTATING PIPE/ MIXING

WEERIN WANGJIRANIRAN: EFFECTS OF THE SWIRL NUMBER ON MIXING  
CHARACTERISTICS OF A HEATED SWIRLING JET IN CROSSFLOW

THESIS ADVISOR: ASST. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA, Ph.D.,150 pp.

Characteristics of swirling jet in crossflow were studied in general and the effects of swirl on the characteristics were investigated in particular. Heated swirling jet with non-zero circulation generated from a rotating pipe with honeycomb was used and temperature distributions in the cross planes downstream of the jet were surveyed in order to investigate both local and global mixing characteristics. The experiments were conducted at a fixed effective velocity ratio of 4.1, swirl ratio ranged from 0 (no swirl) to 0.82, and at Reynolds number of 12,000.

The results indicated that, swirl caused asymmetry in the jet structures and, hence, the temperature distribution within the jet, creating a region of high temperature and temperature gradient on the side which the jet tangential velocity was in the same direction as the crossflow velocity (suction side) and a corresponding region of low temperature and temperature gradient on side which the jet tangential velocity was in the opposite direction to the crossflow velocity (pressure side). This was attributed to the development, and the contrasting effect of swirl velocity on the development, of a skew mixing layer on each lateral edge of the jet. The degree of asymmetry was observed to increase with swirl. Nonetheless, it was also observed that, albeit the effects of swirl in the asymmetry of temperature distribution within the jet, the low temperature envelop describing the edge of the jet was relatively unchanged and symmetric.

The results showed that, within the present range of parameters, swirl had little influence on the global characteristics of the jet such as the spreading rate and the low temperature envelope mentioned above. In addition, the results also indicated that swirl had little influence on the global characteristics in the centerplane of the jet. This was seen through little change in the trajectory of maximum centerplane temperature, the projected-trajectory of centroid temperature, the decay of maximum centerplane temperature, and the decay of the projected maximum temperature, with swirl. On the other hand, the effects of swirl on the global characteristics in the horizontal crossplane were pronounced. This was seen through significant change in the projected trajectory of centroid temperature with swirl. These results pointed out to the distinctive roles and effects of swirl and of the effective velocity ratio on the characteristic of swirling jet in crossflow.

Department..... Mechanical..... Student's signature.....  
Field of study ..... Mechanical..... Advisor's signature.....  
Academic year ..... 2001..... Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลือในทุกๆด้าน จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราคุลย์ ซึ่งได้คอยประสิทธิ์ประสาทความรู้ และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างสูงต่อการทำวิจัย อีกทั้งยังเป็นผู้มอบโอกาสที่ดีต่างๆ ในการเรียนรู้สิ่งที่เป็นประโยชน์ ทั้งในการศึกษาและการดำเนินชีวิตของผู้วิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล รองศาสตราจารย์ ดำรงศักดิ์ มลิลลา และ ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ ที่ได้เอื้อเฟื้อและแนะนำสิ่งต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ในเนื้อหามากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน และจากโครงการอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท-เอก ในสถาบันอุดมศึกษาของรัฐ ของทบวงมหาวิทยาลัย และจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย นอกจากนี้ยังได้รับความอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการทำวิจัยคือ Mechanical seal จากบริษัท ซิลเทค อินดัสทรี ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ณ เวลาที่ศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ผู้วิจัยได้รับความใส่ใจ และความเอื้ออาทรจาก พี่ เพื่อน และน้อง ที่ห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ พี่เกียรติศักดิ์ กอบกาญจนานกร พี่ทศพล สถิต สุวงศ์กุล และพี่อลงกรณ์ พิมพ์พิณ ที่ให้คำปรึกษาในทุกๆด้าน พงศ์ฤทธิ์ อุปถัมภ์ นรากร สุทธิโชค นันทสุขเกษม สุเมธ ไตรภพสกุล และสิทธิพงษ์ สถาพรนานนท์ที่ได้ฝ่าฟันอุปสรรคตลอดการทำงานมาด้วยกัน รวมทั้ง กฤษณพงษ์ วงศ์สว่าง ธีระนันท์ เจริญศิลป์ ชาย เปรมพันธ์พงษ์ ปรมะ พรหมสุทธิรักษ์ ปิติพงษ์ เย็นจิตต์ ชมพิชานันท์ คูหิรัญ สุพจน์ เทพพิพัฒน์ และฐิติกาญจน์ งามวุฒิวงศ์ อีกทั้งขอขอบพระคุณบุคลากรทุกคน ซึ่งไม่สามารถขมกมากกล่าวได้หมดในที่นี้ ที่ได้ช่วยเหลืองานในด้านต่างๆ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

และในท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ของผู้วิจัยที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ มาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีแรงใจในการทำงานและไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้น

วีรินทร์ หวังจิรนิรันดร์



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
รายการสัญลักษณ์.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	11
1.4 แนวทางการทำวิจัย.....	11
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	13
บทที่ 2 ชุดทดลองและการทดลอง.....	15
2.1 ชุดทดลอง.....	15
2.2 พิกัดอ้างอิงที่ใช้การทดลอง.....	18
2.3 สภาพะของการทดลอง.....	19
2.4 วิธีการทดลองและอุปกรณ์การวัด.....	20
บทที่ 3 ผลการทดลอง.....	25
3.1 ผลการวัดสถานะเริ่มต้น.....	25
3.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะหน้าตัด.....	28
3.3 ผลการศึกษาคุณลักษณะโดยรวม.....	37

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 อภิปรายผลการทดลอง.....	42
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	47
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	48
ประมวลตาราง.....	50
ประมวลรูปภาพ.....	57
รายการอ้างอิง.....	127
ภาคผนวก.....	130
ภาคผนวก ก.....	131
ภาคผนวก ข.....	137
ภาคผนวก ค.....	142
ประวัติผู้เขียน.....	150

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1.1	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะของเจ็ดในกระแสมขวาง.....	51
ตารางที่ 1.2	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อ คุณลักษณะของเจ็ดในกระแสมขวาง.....	54
ตารางที่ 2.1	รายละเอียดพารามิเตอร์ในการทดลองและความคลาดเคลื่อนในแต่ละกรณี.....	56
ตารางที่ 2.2	รายละเอียดของปริมาณต่างๆในแต่ละกรณี.....	56



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1	การใช้งานที่พบการไหลแบบเจ็ตในกระแสมขวาง ..... 58
รูปที่ 1.2	ลักษณะของ Circular Turbulent Jet (Rajaratnam, 1976) ..... 58
รูปที่ 1.3	ลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวาง (Rajaratnam, 1976) ..... 59
รูปที่ 1.4	โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสมขวาง (Fric and Roshko, 1994) ..... 59
รูปที่ 1.5	ลักษณะของ Wake vortices (Kelso et al., 1996) ..... 60
รูปที่ 1.6	โครงสร้างบริเวณ Near field ของเจ็ตในกระแสมขวาง ซึ่งแสดงเป็น Isosurface ของ Vorticity (Yuan et al., 1999) ..... 61
รูปที่ 1.7	โครงสร้างของ Hanging vortices (Yuan et al., 1999) ..... 61
รูปที่ 1.8	โครงสร้างของ Spanwise rollers ซึ่งแสดงเป็น Instantaneous contour ของ Spanwise vorticity โดยเส้นประแสดงค่าลบ (Yuan et al., 1999) .... 62
รูปที่ 1.9	เส้นทางของเจ็ตในกระแสมขวาง (Pratte and Baines, 1967) ..... 63
รูปที่ 1.10	เส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิในกรณี $T_j - T_o = 0$ , $T_j - T_o = 75 F$ และ $T_j - T_o = 320 F$ (Kamotani and Greber, 1972) ..... 64
รูปที่ 1.11	Centerline trajectory ของ Scalar concentration (Smith and Mungal, 1998) ..... 64
รูปที่ 1.12	การลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกนเจ็ต ( $\xi$ ) บนระนาบสมมาตร (Kamotani and Graber, 1972) ..... 65
รูปที่ 1.13	การลดลงของอุณหภูมิตามแนว Downstream ( $x$ ) บนระนาบสมมาตร (Sherif and Pletcher, 1989) ..... 65
รูปที่ 1.14	การลดลงของ Concentration ตามแนวแกนเจ็ต ( $s$ ) (Smith and Mungal, 1998) ..... 66
รูปที่ 1.15	ผลของการติด Tab ที่มีต่อเจ็ตในกระแสมขวาง (Zaman and Foss, 1997) ..... 67
รูปที่ 1.16	การกระจายของความผันผวนในทิศทางต่างๆ (Zaman and Foss, 1997) ..... 67
รูปที่ 1.17	ผลของระดับความปั่นป่วนและการหมุนควงที่มีต่อความผันผวนที่ อัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 4 ..... 68
รูปที่ 1.18	Contour ของ Mean concentration (Niederhaus et al., 1997) ..... 69
รูปที่ 1.19	คุณลักษณะการผสมของ Concentration (Niederhaus et al., 1997) ..... 70
รูปที่ 1.20	ผลของการหมุนควงที่มีต่อการผสม (Niederhaus et al., 1997) ..... 70
รูปที่ 2.1	รูป Schematic ของอุโมงค์ลม (หน่วยเซนติเมตร) ..... 71

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.2	พัดลมหอยโข่ง (Centrifugal Blower) ชนิดใบพัดแบบ Backward-curved airfoil ขนาด 30 กิโลวัตต์ที่ใช้สำหรับอุโมงค์ลม.....71
รูปที่ 2.3	ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัดซึ่งประกอบด้วย Main diffuser และ Adapter diffuser.....72
รูปที่ 2.4	ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) และ Contraction ของอุโมงค์ลม.....72
รูปที่ 2.5	หน้าตัดทดสอบ (Test section) ทั้ง 2 ส่วนของอุโมงค์ลม.....73
รูปที่ 2.6	ภายในหน้าตัดทดสอบ (Test section) ส่วนแรก.....73
รูปที่ 2.7	รูป Schematic ของชุดเจ็ทแบบท่อหมุน.....74
รูปที่ 2.8	ชุดเจ็ทแบบท่อหมุนทั้ง 3 ส่วนคือ Orifice section, Heating chamber และ Rotating pipe.....74
รูปที่ 2.9	ส่วนของพัดลมและ Orifice.....75
รูปที่ 2.10	ส่วน Heating chamber.....76
รูปที่ 2.11	รูป Schematic ของส่วนท่อหมุน (Rotating pipe).....77
รูปที่ 2.12	รูปถ่ายส่วนท่อหมุน (Rotating pipe).....78
รูปที่ 2.13	วงจรที่ใช้ควบคุมความเร็วของท่อหมุน.....79
รูปที่ 2.14	พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง.....80
รูปที่ 2.15	รูป Schematic ของ Probe ที่ใช้วัด.....81
รูปที่ 2.16	รูปถ่ายของ Probe ที่ใช้วัด.....82
รูปที่ 2.17	อุปกรณ์การวัดอื่นๆ.....83
รูปที่ 2.18	ลักษณะการวัดสถานะเริ่มต้นที่ปากเจ็ท.....84
รูปที่ 2.19	ผลการสอบเทียบ Thermocouple เทียบกับอุปกรณ์มาตรฐานคือ Thermometer.....84
รูปที่ 2.20	ลักษณะการวัดการกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัด.....85
รูปที่ 3.1	ความสม่ำเสมอของความเร็วในแนวแกนเฉลี่ย ( $u$ ) ของกระแสลมขวางที่หน้าตัด $x = -15$ cm.....86
รูปที่ 3.2	รูปร่างของ Boundary layer บนผนังทั้ง 4 ด้านในหน้าตัดทดสอบ.....87
รูปที่ 3.3	รูปร่างความเร็วในแนวแกนของเจ็ทอากาศที่ทางออกเจ็ท.....88
รูปที่ 3.4	รูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทอากาศที่ทางออกเจ็ท.....89
รูปที่ 3.5	รูปร่างอุณหภูมิของเจ็ทอากาศที่ทางออกเจ็ท.....90
รูปที่ 3.6	ปริมาตรควบคุมในการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะการผสมที่แสดงโดย $C_{TG}$ .....90

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7	การนิยามด้าน Pressure และ Suction..... 91
รูปที่ 3.8	Centerplane Trajectory ( $y_T$ ) และ Centroid Trajectory ( $\bar{y}_T$ ) ของอุณหภูมิตำหรับกรณี Sr0..... 91
รูปที่ 3.9	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม ( $C_{TG}$ ) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr0..... 92
รูปที่ 3.10	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม ( $C_{TG}$ ) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr17..... 93
รูปที่ 3.11	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม ( $C_{TG}$ ) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr52..... 94
รูปที่ 3.12	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม ( $C_{TG}$ ) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr82..... 95
รูปที่ 3.13	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ ( $C_{TL}$ ) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr0..... 96
รูปที่ 3.14	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ ( $C_{TL}$ ) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr17..... 97
รูปที่ 3.15	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ ( $C_{TL}$ ) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr52..... 98
รูปที่ 3.16	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ ( $C_{TL}$ ) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr82..... 99
รูปที่ 3.17	การพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละกรณีโดยเปรียบเทียบที่หน้าตัดต่างๆกันที่ $C_{TL} = 0.8$ ..... 100
รูปที่ 3.18	การพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละกรณีโดยเปรียบเทียบที่หน้าตัดต่างๆกันที่ $C_{TL} = 0.5$ ..... 101
รูปที่ 3.19	การพัฒนาตัวของเจ็ตในแต่ละกรณีโดยเปรียบเทียบที่หน้าตัดต่างๆกันที่ $C_{TL} = 0.2$ ..... 102
รูปที่ 3.20	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม ( $C_{TG}$ ) เปรียบเทียบกัน ในแต่ละกรณี..... 103
รูปที่ 3.21	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ ( $C_{TL}$ ) เปรียบเทียบกัน ในแต่ละกรณี..... 106

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.22	การเปรียบเทียบระดับของการหมุนควงที่มีต่อระดับอุณหภูมิที่ $C_{TL} = 0.8$ ตามแนว Downstream ( $x$ ).....109
รูปที่ 3.23	การเปรียบเทียบระดับของการหมุนควงที่มีต่อระดับอุณหภูมิที่ $C_{TL} = 0.5$ ตามแนว Downstream ( $x$ ).....110
รูปที่ 3.24	การเปรียบเทียบระดับของการหมุนควงที่มีต่อระดับอุณหภูมิที่ $C_{TL} = 0.2$ ตามแนว Downstream ( $x$ ).....111
รูปที่ 3.25	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม ( $C_{TG}$ ) โดยเปรียบเทียบทิศทาง การหมุนของท่อเจ็ตในกรณี Sr52 และ Sr82 ที่ $x/r_d = 0.25$ .....112
รูปที่ 3.26	Centerplane Trajectory ( $y_T$ ) และ Centroid Trajectory ( $\bar{y}_T$ ) ของอุณหภูมิ สำหรับกรณี Sr0 เปรียบเทียบกับ Centerline Trajectory ของอุณหภูมิ ( $y_T$ ) และความเร็ว ( $y_U$ ) ของ Kamotani and Greber (1972).....113
รูปที่ 3.27	Centerplane Trajectory ของอุณหภูมิ ( $y_T$ ) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี.....113
รูปที่ 3.28	Centroid Trajectory ของอุณหภูมิ เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี.....114
รูปที่ 3.29	Centerplane decay ตามแนว Downstream ( $x$ ) ในแต่ละกรณี.....115
รูปที่ 3.30	Centerplane decay ตามแนวแกนเจ็ต ( $s$ ) ในแต่ละกรณี.....116
รูปที่ 3.31	Maximum decay ตามแนว Downstream ( $x$ ) ในแต่ละกรณี.....117
รูปที่ 3.32	Maximum decay ตามแนวแกนเจ็ต ( $s$ ) บนสเกลเชิงเส้น ในแต่ละกรณี.....118
รูปที่ 3.33	การขยายตัวของเจ็ตตามแนว Downstream ( $x$ ) ในแต่ละกรณี.....119
รูปที่ 3.34	การขยายตัวของเจ็ตตามแนวแกนเจ็ต ( $s$ ) ในแต่ละกรณี.....120
รูปที่ 4.1	Vector ความเร็วซึ่งทำให้เกิด Skewed mixing layer ที่ปากเจ็ต.....121
รูปที่ 4.2	การเปลี่ยนทิศทางของ $\bar{u}_{mcs}$ ที่ Swirl ratio ต่างๆ.....122
รูปที่ 4.3	การเปลี่ยนแปลงของค่า $\beta$ ตาม Swirl ratio ที่ $r_v = 4$ .....123
รูปที่ 4.4	การเปลี่ยนแปลงของค่า $\beta$ ตาม Swirl ratio โดยเปรียบเทียบที่ $r_v$ ต่างๆ.....123
รูปที่ 4.5	แบบจำลองของการเกิดแรงเนื่องจากความดัน.....124
รูปที่ 4.6	รูปร่าง Contour ของอุณหภูมิในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับ Contour ของปริมาณ Scalar concentration จาก Niederhaus et al. (1997) .....125
รูปที่ 5.1	การกระจายของความเร็วเริ่มต้นที่ปากเจ็ตของเจ็ตในกระแสมขวาง .....126

## รายการสัญลักษณ์

$A$	พื้นที่หน้าตัดรวมของเจ็ต
$C_{px}$	ค่าสัมประสิทธิ์ความดันรวมของ Pitot (Coefficient of pitot pressure) ในแนวแกน
$C_{p\theta}$	ค่าสัมประสิทธิ์ความดันรวมของ Pitot (Coefficient of pitot pressure) ในแนวสัมผัส
$C_T$	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Coefficient of temperature)
$C_{TG}$	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (Global coefficient of temperature)
$C_{TL}$	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะหน้าตัด (Local coefficient of temperature)
$d$	ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต
$Fr$	Densimetric Froude number
$G_x$	ฟลักซ์ตามแนวแกนเจ็ตของโมเมนตัมตามแนวแกนเจ็ต (Axial momentum flux of axial momentum)
$G_\theta$	ฟลักซ์ตามแนวแกนเจ็ตของโมเมนตัมเชิงมุม (Axial momentum flux of angular momentum)
$h, h_j, h_{cf}$	เอนทาลปีของเจ็ตอากาศหลังการผสม, เอนทาลปีเริ่มต้นของเจ็ต และ เอนทาลปีเริ่มต้นของ กระแสลมขวาง
$K$	Calibration function จากการสอบเทียบ Yaw probe
$l$	ความยาวเส้นรอบรูปของท่อเจ็ต
$\dot{m}, \dot{m}_j, \dot{m}_{cf}$	อัตราการไหลโดยมวลของเจ็ตอากาศหลังการผสม, อัตราการไหลโดยมวลเริ่มต้นของเจ็ต และอัตราการไหลโดยมวลเริ่มต้นของกระแสลมขวาง
$p$	ค่าความดันรวมที่ตำแหน่งใดๆ
$p_C$	ค่าความดันรวมที่ตำแหน่งกึ่งกลางที่ปากทางออกของเจ็ต
$p_E$	ค่าความดันรวมเฉลี่ยระหว่าง 2 จุดที่ขอบของเจ็ต
$P_0$	ค่าความดันรวมจริงจาก Pitot probe ในการสอบเทียบ Yaw probe
$P_1, P_2, P_3$	ค่าความดันรวมของจากเข็มอันที่ 1, 2 และ 3 ของ Yaw probe
$\Delta P$	ค่าความดันจลน์ในการสอบเทียบ Yaw probe
$Nu$	ค่า Nusselt number
$r$	อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity Ratio) ระยะตามแนวรัศมีของเจ็ต
$r_d$	อัตราส่วนความหนาแน่นระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง (Density ratio)
$r_m$	อัตราส่วนโมเมนตัมระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง (Momentum ratio)
$r_v$	อัตราส่วนความเร็วระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง (Velocity ratio)
$R$	รัศมีของท่อเจ็ต



$R_{0.2}$	รัศมีสมมูลของพื้นที่วงกลมซึ่งครอบคลุมพื้นที่ภายในบริเวณ $C_{TL} = 0.2$
$R_{0.5}$	รัศมีสมมูลของพื้นที่วงกลมซึ่งครอบคลุมพื้นที่ภายในบริเวณ $C_{TL} = 0.5$
$Re_{cf}$	เรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ (Reynolds Number) เทียบกับความเร็วในแนวแกนของกระแสลมขวาง
$Re_j$	เรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ (Reynolds Number) เทียบกับความเร็วในแนวแกนของเจ็ต
$s$	ระยะตามแนวแกนธรรมชาติเจ็ตบนระนาบสมมาตร
$Sn$	สเวิร์ลนัมเบอร์ (Swirl number)
$Sr$	อัตราส่วนสเวิร์ล (Swirl ratio)
$T_j$	อุณหภูมิของเจ็ตอากาศที่ปากเจ็ต
$\bar{T}_j$	อุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged temperature) ที่ปากเจ็ต
$T_{cf}$	อุณหภูมิของกระแสลมขวาง
$T_{max}$	อุณหภูมิสูงสุดตามแนวที่ทำกรวัด
$T_r$	อุณหภูมิบรรยากาศ (Room temperature)
$u$	ความเร็วในแนวแกนที่ตำแหน่งใดๆ
$u_{cf}$	ขนาดความเร็วของกระแสลมขวาง
$\bar{u}_{cf}$	ความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขตของกระแสลมขวาง
$\bar{u}_{cf}$	เวกเตอร์ความเร็วของกระแสลมขวาง
$u_j$	ขนาดความเร็วตามแนวแกนของเจ็ต
$\bar{u}_j$	ความเร็วตามแนวแกนเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged axial velocity) ที่ปากเจ็ต
$\bar{u}_j$	เวกเตอร์ความเร็วในแนวแกนของเจ็ต
$\bar{u}_{js}$	เวกเตอร์รวมระหว่าง $\bar{u}_j$ และ $\bar{u}_s$
$u_{max}$	ความเร็วตามแนวแกนสูงสุดตามแนวที่ทำกรวัด
$\bar{u}_{mc}$	เวกเตอร์รวมระหว่าง $\bar{u}_j$ และ $\bar{u}_{cf}$ (Mean convective velocity vector of jet in crossflow)
$u_{mc}$	ขนาดของ $\bar{u}_{mc}$
$\bar{u}_{mcs}$	เวกเตอร์รวมระหว่าง $\bar{u}_{js}$ และ $\bar{u}_{cf}$ (Mean convective velocity vector of swirling jet in crossflow)
$u_{mcs}$	ขนาดของ $\bar{u}_{mcs}$
$\bar{u}_{ncf}$	ส่วนประกอบในแนวตั้งฉากของ $\bar{u}_{cf}$ บน $\bar{u}_{mcs}$
$u_{ncf}$	ขนาดของ $\bar{u}_{ncf}$
$\bar{u}_{njs}$	ส่วนประกอบในแนวตั้งฉากของ $\bar{u}_{js}$ บน $\bar{u}_{mcs}$
$u_{njs}$	ขนาดของ $\bar{u}_{njs}$
$\bar{u}_s$	เวกเตอร์ความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ตที่ขอบท่อเจ็ต



$\bar{u}_s(s)$	เวกเตอร์ความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ตที่ระยะตามแนวแกนเจ็ต ( $s$ ) ใดๆ
$w$	ความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ตที่ตำแหน่งใดๆ
$w_P$	ความเร็วตามแนวสัมผัสของท่อเจ็ต
$w_R$	ความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ตที่ขอบท่อเจ็ต
$x, y, z$	ระยะตามแนว Downstream, Transverse และ Spanwise ตามพิกัดอ้างอิงหลัก
$x', y', z'$	ระยะตามแนว Downstream, Transverse และ Spanwise ตามพิกัดอ้างอิงกับท่อเจ็ต
$x_{50\%}$	ระยะตามแนว Downstream ที่อุณหภูมิลดลงครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิที่ปากเจ็ต
$y_T$	Centerplane trajectory ของอุณหภูมิมบประมาณสมมาตร (ระนาบ $x$ - $y$ )
$y_U$	Centerplane trajectory ของความเร็วบนระนาบสมมาตร (ระนาบ $x$ - $y$ )
$\bar{y}_T$	Centroid trajectory ของอุณหภูมิมบประมาณสมมาตร (ระนาบ $x$ - $y$ )
$\bar{z}_T$	Centroid trajectory ของอุณหภูมิมบประมาณแนวอน (ระนาบ $x$ - $z$ )

**อักษรกรีก**

$\Omega$	ความเร็วเชิงมุมของท่อเจ็ต
$\alpha$	มุมเอียงของเข็มของ Yaw probe
$\beta$	กำลังของ Skewed mixing layer
$\delta$	ค่าความไม่แน่นอนในการทดลอง (Uncertainty)
$\delta_{0.95}$	ความหนาของชั้นขอบเขตที่ตำแหน่งซึ่งมีความเร็วเป็น 95% ของความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขตของกระแสขวาง
$\gamma_{mcs}$	มุมของ $\bar{u}_{mcs}$ เทียบกับแกน $y$
$\Gamma$	ค่า Circulation ของเจ็ตอากาศรอบปากเจ็ต
$\eta_{0.5}, \zeta_{0.5}$	ครึ่งหนึ่งของความกว้างตามแนว Transverse และ Spanwise ที่มีอุณหภูมิมบประมาณเป็นครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิมบประมาณที่ศูนย์กลางแนว Transverse และ Spanwise ตามพิกัดธรรมชาติของเจ็ต
$\theta_{js}$	มุมของ $\bar{u}_j$ เทียบกับแกน $y$
$\rho_j$	ค่าความหนาแน่นของเจ็ตอากาศ
$\rho_{cf}$	ค่าความหนาแน่นของกระแสลมขวาง
$\xi, \eta, \zeta$	ระยะตามแนว Downstream, Transverse และ Spanwise ตามพิกัดธรรมชาติของเจ็ต

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การไหลแบบเจ็ตในกระแสมขวางเป็นการไหลพื้นฐานที่พบอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม เช่น การฉีดเชื้อเพลิงเข้าผสมกับอากาศในกระบวนการเผาไหม้ใน Combustor, การระบายความร้อนบริเวณพื้นผิว (Film cooling) ของใบพัดใน Gas turbine, การผสมสารเคมีในถังกวน และยังพบในการใช้งานทางด้านอากาศยาน เช่น การควบคุมการขึ้นลงในแนวดิ่งของเครื่องบินแบบ V/STOL (Vertical Short Take Off and Landing) นอกจากนี้ยังพบในการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมและมลภาวะ เช่น การระบายความร้อนจากท่อน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมสู่แหล่งน้ำ และการระบายอากาศเสียจากปล่องควัน โดยแสดงลักษณะที่พบในการใช้งานต่างๆดังรูปที่ 1

ในงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาถึงคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวางซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาคุณลักษณะด้านการผสม เช่น งานวิจัยของ Pratte and Baines (1967), Smith and Mungal (1998) และ Yuan and Street (1998) โดยได้มีการพิจารณาและเปรียบเทียบคุณลักษณะของการผสมดังกล่าวจากปริมาณบ่งชี้ต่างๆ เช่น การแผ่ขยายของเจ็ต, การลดลงของความเร็วเฉลี่ย และระดับความปั่นป่วนของการไหล นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับเส้นทางของเจ็ตที่พุ่งทะลุเข้าไปในกระแสมขวาง ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จะเป็นข้อมูลโดยตรงในการออกแบบลักษณะของห้องเผาไหม้

เนื่องจากการไหลแบบนี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อน จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของการไหลแบบเจ็ตในกระแสมขวาง (Fric and Roshko, 1994) เพื่อให้เกิดความเข้าใจในลักษณะและที่มาของรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น อันจะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมการไหลและการปรับปรุงประสิทธิภาพการผสมให้ดียิ่งขึ้น

นอกจากนี้ ในงานวิจัยที่ผ่านมา Yuan et al. (1999) พบว่าการเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหลเริ่มต้นที่ปากเจ็ตมีผลต่อการพัฒนาตัวของเจ็ตในกระแสมขวางเป็นอย่างมาก จึงได้มีการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงสภาวะเริ่มต้นดังกล่าวในรูปแบบต่างๆอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะการไหลแบบหมุนควง (Swirling flow) อันเป็นที่ทราบดีว่า มีส่วนอย่างมากในการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของเจ็ตอิสระ (Free jet) เช่น จากงานวิจัยของ Naughton et al. (1997), Feyedelem and Sarpkaya (1997) และ Wangjiraniran et al. (1999) อันจะเห็นได้จากการประยุกต์ใช้การไหลแบบหมุนควงในการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามในกรณีของการไหลแบบหมุนควงของเจ็ตใน

กระแสมวลของยังมีผู้ศึกษาน้อย โดยมีการใช้การฉีดอากาศในแนวสัมผัส (Kavsaoglu and Schetz, 1989) และการใช้ใบพัด (Niederhaus et al., 1997) ในการควบคุมการหมุนควง ซึ่งจะ ทำให้มีผลรวมของค่า Circulation รอบปากเจ็ตเท่ากับศูนย์ (Zero circulation) ดังนั้น จึงยังไม่มี ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับคุณลักษณะของการไหลดังกล่าวเพียงพอ โดยเฉพาะกรณีที่สภาวะเริ่มต้นของ เจ็ตที่มีผลรวมของค่า Circulation รอบปากเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์ (Non-zero circulation) ซึ่งอาจ เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประสิทธิภาพของการผสมอันจะนำมาซึ่งการใช้พลังงานให้มี ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นต่อไป

## 1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

### 1.2.1 เจ็ตอิสระ (Free jet) และเจ็ตอิสระที่หมุนควง (Swirling jet)

Rajaratnam (1976) ได้แบ่งลักษณะของเจ็ตอิสระ (Free jet) ออกเป็น 3 บริเวณดังรูปที่ 1.2 ได้แก่ 1) บริเวณ Potential core ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วสม่ำเสมอ ยังไม่ได้รับผลของ Shear layer ที่ปากเจ็ต 2) บริเวณ Flow development ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการพัฒนาของ Shear layer ที่เกิดจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วระหว่างเจ็ต และบรรยากาศ โดยบริเวณนี้ครอบคลุม จากบริเวณปากเจ็ตถึงบริเวณปลายของ Potential core และ 3) บริเวณ Fully developed flow ซึ่งเป็นบริเวณที่มีคุณสมบัติ Similarity ดังผลการทดลองของ Corrsin (1946), Hinze and Zijnen (1949), Albertson et al. (1950) และ Abramovich (1963) จากการวิเคราะห์โดยการ ใช้คุณสมบัติ Similarity ดังกล่าว Townsend (1956) และ Tennekes and Lumley (1972) พบว่าการขยายตัว (Spread rate) ของ Turbulent jet ซึ่งแสดงโดยความหนาของเจ็ตแปรตาม ระยะทางตามแนวแกนเจ็ต และความเร็วในแนวแกนของเจ็ตแปรผกผันกับระยะทางตามแนวแกน เจ็ตอีกด้วย

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตอิสระ และพบว่าการ เปลี่ยนแปลงสภาวะเริ่มต้นที่ปากเจ็ตมีผลต่อคุณลักษณะดังกล่าว ดังนั้นจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับการ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติที่ปากเจ็ตรูปแบบต่างๆ เช่น การเปลี่ยนรูปร่างของเจ็ต (Han and Taghavi, 1998; Gutmark and Grinstein, 1999 และ Zaman, 1999) การติดตั้ง Vortex generator ที่ ปากเจ็ต เช่น (Bradbury and Khadem, 1975 และ Zaman et al., 1994) และอื่นๆ โดยรูปแบบ หนึ่งที่ได้รับความสนใจและมีการศึกษาอย่างกว้างขวางคือ การประยุกต์ใช้การไหลแบบหมุนควง (Swirling flow) กับเจ็ตอิสระ ซึ่งจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับคุณลักษณะการผสมโดยมีรายละเอียด ของการศึกษาเจ็ตอิสระที่หมุนควง (Swirling jet) ดังนี้

Feyedelem and Sarpkaya (1997) ได้สรุปคุณลักษณะของเจ็ตอิสระที่หมุนควง (Swirling jet) จากการศึกษามาก่อน โดยพบว่าเจ็ตอิสระที่หมุนควงจะมีการขยายตัว (Spread

rate) และการลดลงของความเร็วดตามแนวแกนเจ็ด (Decay rate) รวมทั้งปริมาณ Turbulence intensity มากกว่าเจ็ดอิสระที่ไม่มีการหมุนควง ซึ่งแสดงถึงการผสมที่ดีกว่าเจ็ดอิสระที่ไม่มีการหมุนควง นอกจากนี้ยังพบว่าพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะของเจ็ดที่หมุนควงบริเวณ Near field คือ ค่า Swirl number ซึ่งแสดงถึงระดับของการหมุนควงและนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ตามแนวแกนเจ็ดของโมเมนตัมเชิงมุมรอบแกนเจ็ดกับฟลักซ์ตามแนวแกนเจ็ดของโมเมนตัมเชิงเส้นในแนวแกนของเจ็ด นอกจากนี้รูปแบบการกระจายตัวของความเร็วเริ่มต้นของเจ็ดนั้นก็มีส่วนสำคัญต่อการพัฒนาตัวของเจ็ดด้วย และยังพบว่าการขยายตัว (Spread rate) ของเจ็ดอิสระที่หมุนควงนั้น ได้รับอิทธิพลของ Static pressure gradient ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการโค้งตัวของ Streamline ของเจ็ดมากกว่าอิทธิพลของ Turbulent mixing ซึ่งต่างจากในกรณีของเจ็ดที่ไม่หมุนควง และที่ค่า Swirl number สูงๆจะทำให้เส้นทางของความเร็วสูงสุดเลื่อนออกจากแนวแกนเจ็ด และหากอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมคือที่ Swirl number ประมาณ 0.48-0.50 จะเกิด Vortex breakdown ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของความเร็วในแนวแกน ( $u$ ) และอาจเกิดบริเวณที่มีการหมุนวน (Recirculation zone) ในตัวเจ็ดได้

Billant et al. (1998) ได้ศึกษา Vortex breakdown ชนิดต่างๆในเจ็ดน้ำที่หมุนควง และพบว่าปรากฏการณ์ Vortex breakdown นี้เริ่มเกิดขึ้นที่ค่า Swirl number ประมาณ 1.3 – 1.4 นอกจากนี้ยังพบลักษณะต่างๆของการเกิด Vortex breakdown ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นแบบ Bubble และแบบ Cone โดยที่ Reynolds number สูงๆจะมีลักษณะของการเกิด Vortex breakdown เป็นแบบ Asymmetric bubble และ Asymmetric cone

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับ Vortex breakdown เช่น Hall (1972), Leibovich (1978) และ Escudier and Zehnder (1982) และที่เกี่ยวข้องกับเจ็ดที่หมุนควง เช่น Farokhi et al. (1988), Wu et al. (1992), Panda and Mclaughlin (1994) และ Naughton et al. (1997)

## 1.2.2 เจ็ดในกระแสมขวาง

การศึกษาเจ็ดในกระแสมขวางนั้น มีผู้ศึกษาคุณลักษณะต่างๆไม่ว่าจะเป็นลักษณะโครงสร้าง (Flow structure) เช่น Fric and Roshko (1994), เส้นทางของเจ็ด (Trajectory) เช่น Pratte and Baines (1967), การผสม (Mixing and entrainment) เช่น Yuan and Street (1998), การขยายตัวของเจ็ด (Spread rate) เช่น Pratte and Baines (1967) และการลดลงของปริมาณต่างๆตามแนวแกนเจ็ด (Decay rate) เช่น Smith and Mungal (1998)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อคุณลักษณะดังกล่าว (Parametric study) โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความเร็วของเจ็ดและกระแสมขวาง ( $r_v$ ) เช่น การศึกษาของ Pratte and Baines (1967) และอัตราส่วนระหว่างโมเมนตัมของเจ็ดและ



กระแสลมขวาง ( $r_m$ ) โดยเฉพาะกรณีที่มีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของเจ็ตและกระแสลมขวาง เช่นการศึกษาของ Kamotani and Greber (1972) นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงต่างๆที่เกิดขึ้นบริเวณปากเจ็ตนั้นจะมีผลอย่างมากต่อคุณลักษณะและการพัฒนาตัวของเจ็ต ทำให้มีการศึกษาผลของสภาวะเริ่มต้นของเจ็ตอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาผลของรูปร่างของปากเจ็ต เช่น งานวิจัยของ Sivadas et al. (1997) และ Findlay et al. (1999) ผลของการติด Vortex generator บริเวณปากเจ็ต เช่น งานวิจัยของ Zaman and Foss (1997), ผลจากการใส่สภาวะที่ไม่คงตัว (Unsteady) เช่น งานวิจัยของ Raud et al. (1999) และอื่นๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

### ลักษณะและโครงสร้างของเจ็ตในกระแสลมขวาง

Rajaratnam (1976) ได้แบ่งลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางออกเป็น 3 บริเวณดังรูปที่ 1.3 ได้แก่ 1) บริเวณ Potential core ซึ่งเป็นบริเวณกึ่งกลางของ Shear layer ของเจ็ตในช่วงต้นซึ่งมีค่าความดันรวมสม่ำเสมอ โดย Keffer and Baines (1963) พบว่าที่อัตราส่วนความเร็วมากกว่า 4 นั้น แกนของ Potential core จะยังคงอยู่ในแนวแกนของเจ็ต ในขณะที่เมื่ออัตราส่วนความเร็ว ( $r_v$ ) น้อยกว่า 4 นั้น แกนของ Potential core จะเริ่มเลื่อนไปตามทิศทางของกระแสลมขวาง นอกจากนี้ Pratte and Baines (1967) ยังพบว่าที่อัตราส่วนความเร็วสูงๆ ความยาวของ Potential core ของเจ็ตในกระแสลมขวางจะมีขนาดเข้าใกล้กรณีของเจ็ตอิสระ และต่อจาก Potential core การไหลจะพัฒนาตัวเข้าสู่ 2) บริเวณที่มีการเลี้ยวเบนมากที่สุด (Zone of maximum deflection) ซึ่งเป็นบริเวณที่มี Pressure gradient, อัตราการผสม (Entrainment rate) และการเปลี่ยนทิศทางของเจ็ตมากที่สุด ต่อจากนั้นจะเข้าสู่ 3) บริเวณ Vortex zone ซึ่งจะเห็นโครงสร้างของ Vortical structure อย่างชัดเจน นอกจากนี้ Pratte and Baines (1967) ยังพบโครงสร้างดังกล่าวที่ระยะทางถึง  $1000d$  จากปากเจ็ต

Fric and Roshko (1994) ได้สรุปโครงสร้างของ Vortical structure ที่เกิดขึ้นในเจ็ตในกระแสลมขวางโดยแบ่งเป็น 4 ลักษณะดังรูปที่ 1.4 ได้แก่ 1) Jet shear layer vortices ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ Vortex ring ของเจ็ต โดยเกิดจากการแยกตัว (Separation) ของ Shear layer บริเวณปากเจ็ต 2) Horseshoe vortices โดยเป็นการม้วนตัวของกระแสลมขวางในบริเวณชั้นขอบเขตที่พื้นรอบปากเจ็ต ซึ่งเกิดจากการที่กระแสลมขวางได้รับผลของ Adverse pressure gradient ที่เกิดจากการกีดขวางการไหลโดยเจ็ตที่พุ่งออกมา ประกอบกับผลของความหนาแน่นของชั้นขอบเขตของพื้นบริเวณปากเจ็ต 3) Wake vortices ซึ่งมีลักษณะคล้าย Wake ของการไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอก โดยที่ Reynolds number สูง Kelso et al. (1996) พบลักษณะการเกิดของ Wake vortices 3 ลักษณะคือ von Karman vortex street, Mushroom-like upright vortex และ Alternative mushroom-like upright vortex ดังรูป 1.5 โดยที่ผ่านมาได้มีแนวคิดสำหรับ

กลไกในการเกิด Wake ดังกล่าว คือเนื่องจาก Vorticity ไม่สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อไม่มี Solid boundary ดังนั้น Wake vortices จะต้องมีการกำเนิดมาจาก Vorticity ที่พื้นหรือผนังของเจ็ต หรือที่ผนังที่พื้นและผนังของเจ็ต (Fric and Roshko, 1989, 1994 และ Fric, 1990) และ 4) Counter-rotating vortex pair (CVP) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เป็นกลไกสำคัญในการผสมโดยเฉพาะในบริเวณ Far field

นอกจากนี้ Yuan et al. (1999) ได้พบโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field 3 ลักษณะดังรูปที่ 1.6 ได้แก่ 1) Hanging vortices ซึ่งเป็นการม้วนตัวของกระแสลมขวางทางด้านข้างเข้ามาในตัวเจ็ต โดยมีแกนการม้วนตัวตามทิศทางของผลรวมระหว่างความเร็วเจ็ตและกระแสลมขวาง ( $\bar{u}_{mc}$ ) ดังรูปที่ 1.7ก ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วระหว่างเจ็ตกับกระแสลมขวางในทิศทางตั้งฉากกับ  $\bar{u}_{mc}$  ( $\bar{u}_{nj}$  และ  $\bar{u}_{ncf}$ ) หรือที่เรียกว่า Skewed mixing layer ดังรูปที่ 1.7ข ประกอบกับการได้รับผลของการพา (Convection) จาก  $\bar{u}_{mc}$  2) Spanwise rollers ซึ่งมีลักษณะเดียวกับการม้วนตัวของ Vortex ring ของเจ็ตอิสระ แต่เนื่องจากผลของกระแสลมขวางทำให้คุณสมบัติตามเส้นรอบวงที่ขอบเจ็ตไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะด้านข้างเจ็ตซึ่งความเร็วของกระแสลมขวางจะถูกเร่งและหน่วงเมื่อผ่านตัวเจ็ต ทำให้พบลักษณะของ Spanwise rollers เฉพาะด้านหน้าและด้านหลังเจ็ต ดังรูปที่ 1.8 และ 3) Vertical streaks ซึ่งมีแกนการม้วนตัวในแนวตั้ง โดยเกิดจากการเปลี่ยนทิศทางของ Spanwise rollers ด้านหน้าเนื่องจาก ผลของ Perturbation และ Gradient ของความเร็วในแนวตั้งตามแนว Downstream

ในการศึกษาการไหลแบบเจ็ตในกระแสลมขวาง ประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจคือ ลักษณะโครงสร้างและกลไกในการเกิด CVP เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีผลต่อคุณลักษณะต่างๆ ของเจ็ตอย่างมาก โดยที่ผ่านมามีแนวคิดหลักเกี่ยวกับต้นกำเนิดของ CVP สอดคล้องกันคือเกิดจาก Shear layer ของเจ็ต (Moussa et al., 1977; Andreopoulos, 1984, 1985; Andreopoulos and Rodi, 1984; Sykes et al., 1986 และ Coelho and Hunt, 1989) อย่างไรก็ตามรายละเอียดเกี่ยวกับกลไกในการเกิด CVP ยังมีความแตกต่างกัน โดย Haven (1996) เสนอว่า CVP เกิดจาก Vorticity ที่ขอบเจ็ตด้านข้าง ได้รับผลของ Gradient ของความเร็วในแนวตั้งทำให้ Vorticity ดังกล่าวเปลี่ยนทิศทางและพัฒนาตัวเป็น CVP Kelso et al. (1996) เสนอว่า CVP เกิดจากการม้วนตัวของ Shear layer ของเจ็ต โดยผ่านกลไกของการเกิด Vortex breakdown และเมื่อไม่นานนี้ Yuan et al. (1999) เสนอว่า CVP เกิดจากการที่ Hanging vortices ซึ่งเกิดจาก Skewed mixing layer ที่ขอบเจ็ตด้านข้าง ได้รับผลของ Adverse pressure gradient ทำให้เกิด Vortex Breakdown และพัฒนาตัวกลายเป็น CVP

### เส้นทางของเจ็ตในกระแสมขวาง

ที่ผ่านมามีการศึกษาเส้นทางของเจ็ตในกระแสมขวางค่อนข้างมาก โดยมีความแตกต่างกันทั้งวิธีการศึกษาและผลการศึกษาซึ่งมักแสดงเป็นสมการของความสัมพันธ์ (Correlation) Margason (1968) ได้สรุปผลการศึกษาต่างๆ และแสดงความสัมพันธ์ (Correlation) ของเส้นทางในรูป

$$\frac{y}{rd} = A \left( \frac{x}{rd} \right)^m \quad (1.1)$$

โดย  $A$  และ  $m$  เป็นค่าคงที่ของสมการ มีค่าประมาณ 1.6 และ 1/3 ตามลำดับ  $d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ต และ  $r$  เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงอัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพ (Effective velocity ratio) ซึ่งนิยามโดย

$$r = \left( \frac{\rho_j u_j^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2} \right)^{1/2} \quad (1.2)$$

โดย  $u_j$  คือความเร็วของเจ็ตอากาศ  
 $u_{cf}$  คือความเร็วของกระแสมขวาง  
 $\rho_j$  คือความหนาแน่นของเจ็ตอากาศ  
 $\rho_{cf}$  คือความหนาแน่นของกระแสมขวาง

Pratte and Baines (1967) ได้ศึกษาเส้นทางของเจ็ต โดยใช้การถ่ายรูปควันที่ออกมาจากเจ็ต ในช่วงอัตราส่วนความเร็ว ( $r_v = u_j / u_{cf}$ ) ตั้งแต่ 4 ถึง 35 ดังรูปที่ 1.9 โดยเส้นทางของขอบเจ็ตนิยามจากตำแหน่งขอบของควันในรูปถ่ายบน Coordinate paper และเส้นทางของ Centerline นิยามจากตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างเส้นทางของขอบเจ็ต โดยพบว่าเมื่อใช้ผลคูณของอัตราส่วนความเร็วและเส้นผ่าศูนย์กลางเจ็ต ( $rd$ ) เป็น Length scale นั้น เส้นทางของเจ็ตไม่ขึ้นกับอัตราส่วนความเร็ว และได้ความสัมพันธ์ตามสมการ 1.1 โดยมีค่าคงที่  $A = 2.63, 2.05$  และ  $1.35$  สำหรับเส้นทางของขอบเจ็ตด้านบน, เส้นทางของ Centerline และเส้นทางของขอบเจ็ตด้านล่างตามลำดับ และค่าคงที่  $m$  มีค่าเท่ากับ 0.28

Kamotani and Greber (1972) ได้ศึกษาเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิของเจ็ต โดยให้ความร้อนกับเจ็ตจนมีอุณหภูมิสูงกว่ากระแสมขวางประมาณ  $75^\circ\text{F}$  และ  $320^\circ\text{F}$  ที่อัตราส่วนโมเมนต์ ( $r_m = \rho_j u_j^2 / \rho_{cf} u_{cf}^2$ ) เท่ากับ 15.3 และ 59.3 ดังรูปที่ 1.10 โดยเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิ นิยามเป็นตำแหน่งของจุดที่มีความเร็วและอุณหภูมิสูงที่สุดบนระนาบสมมาตร พบว่า



ที่อัตราส่วนโมเมนต์เดียวกัน เส้นทางการอนุกรมอยู่ต่ำกว่าเส้นทางการความเร็ว และยังพบว่า อัตราส่วนโมเมนต์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและส่งผลต่อเส้นทางการความเร็วและอนุกรม ในขณะที่อัตราส่วนความหนาแน่นไม่ส่งผลต่อเส้นทางการความเร็ว โดยส่งผลต่อเส้นทางการอนุกรมเล็กน้อย โดยแสดงความสัมพันธ์ของเส้นทางการความเร็วและอนุกรมดังสมการ

$$\frac{y_U}{d} = 0.89r_m^{0.47} \left( \frac{x}{d} \right)^{0.36} \quad (1.3)$$

$$\frac{y_T}{d} = 0.73r_m^{0.52} \left( \frac{\rho_j}{\rho_{cf}} \right)^{0.11} \left( \frac{x}{d} \right)^{0.29} \quad (1.4)$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปของผลคูณระหว่างความเร็วประสิทธิภาพและเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต ( $rd$ -scale) ได้เป็น

$$\frac{y_U}{rd} = 0.89r^{0.3} \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.36} \quad (1.5)$$

$$\frac{y_T}{rd} = 0.73r^{0.33} \left( \frac{\rho_j}{\rho_{cf}} \right)^{0.11} \left( \frac{x}{rd} \right)^{0.29} \quad (1.6)$$

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาเส้นทางการของ Scalar concentration โดยใช้ Planar laser-induced fluorescence (PLIF) ในช่วงอัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพ ( $r$ ) ตั้งแต่ 5 ถึง 25 โดยการศึกษาจะเป็นลักษณะปากเจ็ตอยู่ที่พื้นของ Test section ซึ่งต่อกับ Contraction โดยตรง และใช้ Length scale เป็น  $d$ ,  $rd$  และ  $r^2d$  ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 1.11 พบว่าเส้นทางการของ Scalar concentration ซึ่งนิยามจากตำแหน่งของจุดที่มี Concentration มากที่สุดบนระนาบสมมาตร ขึ้นกับอัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพ ( $r$ ) เมื่อใช้  $rd$  เป็น Length scale ซึ่งต่างจากผลการทดลองของ Pratte and Baines (1967) โดย Smith and Mungal (1998) อธิบายว่าเป็นผลของชั้นขอบเขตที่พื้น และผลของบริเวณความดันต่ำด้านหลังปากเจ็ตที่มีค่าขึ้นกับอัตราส่วนความเร็ว Fric and Roshko (1994) พบบริเวณที่มีความดันต่ำดังกล่าวที่อัตราส่วนความเร็ว ( $r_v$ ) น้อยกว่า 8

#### การผสมของเจ็ตในกระแสมขวาง

การศึกษากการผสมสำหรับเจ็ตในกระแสมขวางนั้นมีความซับซ้อนค่อนข้างมากเนื่องจากการไหลมีลักษณะเป็น 3 มิติ โดยการดึงกระแสมขวางเข้าไปในตัวเจ็ต (Entrainment) จะเป็นกลไกสำคัญในการผสม ซึ่งการศึกษาที่ผ่านมาจะพิจารณาจากปริมาณบ่งชี้ต่างๆได้แก่ การขยายตัวของเจ็ต (Spread rate) และการลดลง (Decay rate) ของปริมาณต่างๆตามแนวแกนเจ็ตไม่ว่าจะ

เป็น ความเร็ว, อุณหภูมิ และ Scalar concentration ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ มีความเชื่อมโยงกับการผสม อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยของ Ricou and Spalding (1961) ได้ทำการวัดอัตราการดึงอากาศเข้าไปผสม (Entrainment rate) ของมวลโดยตรง โดยใช้วิธีการฉีดของไหลผ่านวัสดุพอร์นเข้าไปในตัวเจ็ตและวัดปริมาณของไหลดังกล่าวจนไม่มีความแตกต่างของความดัน

Pratte and Baines (1967) พบความสัมพันธ์ของความหนาของเจ็ตในแนว Spanwise ( $\Delta z$ ) ในพิกัด Cartesian ดังรูปที่ 2.14 ตามสมการ  $(\Delta z/rd) = A(x/rd)^m$  โดยค่าคงที่  $A = 1.25$  และ  $m = 0.4$  และยังพบความสัมพันธ์ของความหนาของเจ็ตในแนว Transverse ( $\Delta \eta$ ) ในพิกัดของเจ็ต (Natural coordinate) ดังรูปที่ 2.14 ตามสมการ  $(\Delta \eta/rd) = A(x/rd)^m$  โดยค่าคงที่  $A = 0.92$  และ  $m = 0.4$

Kamotani and Greber (1972) (ในที่นี้จะใช้สัญลักษณ์ KG ในการกล่าวถึงต่อไป) พบว่า ในช่วงต้นของการพัฒนาตัว เจ็ตในกระแสลมขวางมีการขยายตัวและอัตราการลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกนเจ็ต ( $\xi$ ) บนระนาบสมมาตร มากกว่ากรณีของเจ็ตอิสระและจะเข้าใกล้กรณีของเจ็ตอิสระบริเวณไกลปากเจ็ต ดังรูปที่ 1.12 โดยทดลองถึงระยะตามแนวแกนเจ็ต ( $\xi$ ) ประมาณ  $70 \xi/d$  นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายของอุณหภูมิซึ่งอยู่ในรูป  $(T - T_{cf})/(T_{max} - T_{cf})$  ตามแนว Transverse ซึ่งเขียนในรูป  $\eta/\eta_{0.5}$  บนระนาบสมมาตรนั้นจะตกลงบนเส้นเดียวกัน ที่ระยะตามแนวแกนเจ็ต ( $\xi$ ) ต่างๆกัน แสดงถึงคุณสมบัติ Similarity โดยมีลักษณะเช่นเดียวกับผลของการวัดความเร็วโดย Keffer and Baines (1963) ซึ่งแสดงการกระจายของความเร็วซึ่งเขียนในรูป  $(u - u_{cf})/(u_{max} - u_{cf})$  ตามแนว Lateral ซึ่งเขียนในรูป  $\zeta/\zeta_{0.5}$

Sherif and Pletcher (1989) ได้ศึกษาการลดลงของอุณหภูมิของเจ็ตน้ำในอุโมงค์น้ำ โดยใช้ Cold film anemometer ในการวัดอุณหภูมิ ที่อัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 1, 4 และ 7 โดยให้ความร้อนกับเจ็ตจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิในอุโมงค์น้ำในช่วง 28 ถึง 32 °C พบว่าอุณหภูมิส่วนเกินซึ่งนิยามจาก  $(T - T_{cf})/(T_j - T_{cf})$  สูงสุดบนระนาบสมมาตรแปรตาม  $(x/d)^{-0.5}$  ดังรูปที่ 1.13 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ramsey and Goldstein (1970) และ Andreopoulos (1983)

Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาการลดลงของ Scalar concentration ตามแนวแกนเจ็ตโดยใช้  $r^2d$  scale ดังรูปที่ 1.14 พบว่าการลดลงตามแนวแกนเจ็ตสามารถแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ Near field และ Far field โดยมีจุดแบ่งที่  $s/r^2d = 0.3$  และเมื่อใช้  $rd$  scale ดังรูปที่ 1.14 พบว่าบริเวณ Near field มีอัตราการลดลงแปรตาม  $(s/rd)^{-1.3}$  ซึ่งสูงกว่ากรณีของเจ็ตอิสระที่มีอัตราการลดลงแปรตาม  $(s/rd)^{-1}$  ในขณะที่บริเวณ Far field มีอัตราการลดลงแปรตาม  $(s/rd)^{-2/3}$  ซึ่งต่ำกว่าในช่วงแรกและกรณีของเจ็ต แสดงถึงการผสมที่ดีในช่วง Near field และมีการผสมลดลงในช่วง Far field ทำให้สรุปได้ว่า CVP ที่มีการพัฒนาตัวเต็มที่ในบริเวณ Far field นั้น ไม่ช่วย

เพิ่มการผสมของเจ็ดในกระแสมขวาง ในขณะที่บริเวณ Near field ซึ่งเป็นบริเวณที่ CVP กำลังพัฒนาตัวจะมีการผสมมากกว่า

Yuan et al. (1999) พบว่ากลไกของการผสมสำหรับเจ็ดในกระแสมขวางนั้นได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงของ Large coherent structure ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการเกิด Turbulent mixing โดยจากรูปที่ 1.8 ในช่วงต้นของการผสม ( $y/d < 3$ ) โครงสร้างของ Spanwise rollers ที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผิวสัมผัส (Interface) ระหว่างเจ็ดและกระแสมขวาง ทำให้เกิดการผสมในระดับ Large scale ต่อมาในบริเวณที่เจ็ดเริ่มมีการโค้งตัว กระแสมขวางจะถูกดึงเข้าไปในเจ็ดอากาศ (Entrain) ทำให้เกิดช่องว่างภายในเจ็ดอากาศ (Gap) ซึ่งจะทำให้เกิดการผสมในระดับ Large scale เช่นเดียวกัน และเมื่อเจ็ดอากาศพัฒนาตัวไปจนถึงบริเวณ Vortex zone โครงสร้างของ CVP จะเป็นกลไกสำคัญของการผสม โดยกระแสมขวางจะถูกดึงเข้าไปในตัวเจ็ด (Entrain) ตามทิศทางการหมุนวนของ CVP

### 1.2.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงสถานะเริ่มต้นที่มีต่อเจ็ดในกระแสมขวาง

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะของเจ็ดอิสระ และพบว่า การเปลี่ยนแปลงสถานะเริ่มต้นที่ปากเจ็ดมีผลต่อคุณลักษณะดังกล่าว ดังนั้นจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติที่ปากเจ็ดรูปแบบต่างๆ เช่น การเปลี่ยนรูปร่างของเจ็ด (Sivadas et al., 1997 และ Findley et al., 1999) การติดตั้ง Vortex generator ที่ปากเจ็ด (Zaman and Foss, 1997) ผลของการหมุนควงและอื่นๆ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

Sivadas et al. (1997) ได้ศึกษาผลของรูปร่างของปากเจ็ดที่มีต่อเส้นทางและการขยายตัวของเจ็ด โดยใช้ปากเจ็ดรูปสี่เหลี่ยมที่มีอัตราส่วนรูปร่าง (Aspect-ratio) ต่างๆ พบว่าปากเจ็ดรูปสี่เหลี่ยมทำให้เจ็ดอากาศทะลุเข้าไปในกระแสมขวางได้น้อยลงและการขยายตัวของเจ็ดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปากเจ็ดรูปวงกลม ซึ่งแสดงถึงการผสมที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเพิ่มความยาวของด้านที่ปะทะกับกระแสมขวาง ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างเจ็ดอากาศและกระแสมขวาง

Zaman and Foss (1997) ได้ศึกษาผลของการติดตั้ง Vortex generators แบบ Tab รูปสามเหลี่ยมบริเวณปากเจ็ด โดยพบว่า การติดตั้ง Tab ด้านหน้าเจ็ดนั้นทำให้เจ็ดมี Penetration น้อยลง และยังทำให้ความแข็งแรง (Strength) ของ CVP ลดลง ในขณะที่การติดตั้ง Tab ด้านหลังเจ็ดไม่ส่งผลต่อ Penetration และความแข็งแรง (Strength) ของ CVP ดังรูปที่ 1.15 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Liscinsky (1995) ทั้งนี้เนื่องจากด้านหน้าเจ็ดเป็นบริเวณที่มีความดันสถิตสูงที่เรียกว่า "Pressure hill" ซึ่งจะเป็ต้นกำลังสำคัญของการสร้าง Streamwise vorticity ในขณะที่บริเวณด้านหลังเจ็ดเป็นบริเวณที่มีความดันสถิตต่ำดังรูป 1.16

สำหรับการศึกษาผลของการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสมวลขวางนั้น พารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญคือ ค่า Swirl number ( $S_n$ ) ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนของพลิกซ์ตามแนวแกนของโมเมนตัมเชิงมุมตามแนวแกนต่อผลคูณของ Length Scale ของการไหลกับพลิกซ์ตามแนวแกนของโมเมนตัมเชิงเส้นในแนวแกนของเจ็ต นอกจากนี้ยังมีการศึกษาโดยใช้ค่า Swirl ratio ( $S_r$ ) ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วในแนวสัมผัสที่ขอบเจ็ตกับความเร็วในแนวแกนเฉลี่ยของเจ็ต โดยมีวิธีการที่ทำให้เจ็ตเกิดการหมุนควงในหลายลักษณะ เช่น การให้ของไหลผ่าน Guide vane, การติดใบพัดเพื่อการหมุนควงของไหล และการฉีดของไหลในแนวสัมผัส

Kavsoglu and Schetz (1989) ได้ศึกษาผลของการหมุนควงและปริมาณความปั่นป่วนที่มีต่อความดันพื้นผิวและความเร็วของเจ็ตในกระแสมวลขวาง ที่อัตราส่วนความเร็ว ( $r_v$ ) เท่ากับ 2.2, 4 และ 8 โดยมีปริมาณความปั่นป่วน 3% สำหรับกรณีความปั่นป่วนต่ำ และ 10-16% สำหรับกรณีความปั่นป่วนสูง และใช้ Screen ในการควบคุมปริมาณความปั่นป่วน และที่ค่า Swirl ratio ( $S_r$ ) เท่ากับ 0.4 และ 0.58 โดยใช้การฉีดอากาศจากด้านข้างในการทำให้เกิดการหมุนควง จากผลการทดลองดังรูปที่ 1.17ก และ 1.17ข พบว่าเจ็ตที่มีความปั่นป่วนสูงนั้น ทำให้พื้นที่ซึ่งครอบคลุมบริเวณที่มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (Negative pressure) ลดลง และยังทำให้เจ็ตมี Penetration ลดลงด้วย และเมื่อพิจารณาผลของการหมุนควงซึ่งแสดงดังรูปที่ 1.17ค พบว่า เจ็ตที่มีการหมุนควงจะทำให้ความดันพื้นผิวมีความไม่สมมาตรเพิ่มขึ้น และยังทำให้เจ็ตมี Penetration ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการหมุนควง โดยผลของการหมุนควงดังกล่าวจะมีมากในสถานะที่มีอัตราส่วนความเร็ว ( $r_v$ ) ต่ำ และปริมาณความปั่นป่วนสูง โดยเฉพาะที่บริเวณใกล้ปากเจ็ต

Niederhaus et al. (1997) (ในที่นี้จะใช้สัญลักษณ์ NH ในการกล่าวถึงต่อไป) ได้ศึกษาผลของการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ตน้ำในอุโมงค์น้ำ โดยใช้ Planar laser-induced fluorescence (PLIF) โดยศึกษาปริมาณ Scalar concentration ที่อัตราส่วนความเร็วในช่วง 4.9 ถึง 11.1 และค่า Swirl number ( $S_n$ ) ในช่วง 0 ถึง 0.17 โดยใช้ใบพัดกวาดเจ็ตอากาศเพื่อให้เกิดการหมุนควง สำหรับสถานะเริ่มต้นที่ปากเจ็ตนั้น ความเร็วในแนวแกนมีรูปร่างเป็นแบบ Top hat และความเร็วในแนวสัมผัสมีรูปร่างเป็น Solid body rotation เฉพาะที่บริเวณกึ่งกลางเจ็ต จากผลการทดลองพบว่า ในกรณีที่เจ็ตมีการหมุนควง ลักษณะของ CVP เปลี่ยนไปจากลักษณะที่สมมาตร ในกรณีที่เจ็ตไม่มีการหมุนควงไปเป็นลักษณะที่ Vortex ด้านหนึ่งของ CVP มีขนาดโตขึ้นในขณะที่อีกด้านหนึ่งมีขนาดลดลง ทำให้ CVP มีรูปร่างคล้าย Comma โดยผลดังกล่าวจะมากขึ้นตามค่า Swirl number ( $S_n$ ) ดังรูปที่ 1.18 นอกจากนี้ยังศึกษาเส้นทาง, อัตราการลดลงตามแนวแกนและการขยายตัวของเจ็ตของปริมาณ Scalar concentration โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิจาก KG และพบว่าเส้นทางและการขยายตัวของปริมาณ Scalar concentration นั้นมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลอุณหภูมิจาก KG ในขณะที่การลดลงตามแนวแกนนั้นแตกต่างจากข้อมูลอุณหภูมิดังรูป 1.19ก และ 1.19ข นอกจากนี้สำหรับผลของการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะดังกล่าวพบว่า



Centroid Trajectory ในกรณีเจ็ตที่หมุนควงนั้นอยู่ต่ำกว่าเจ็ตที่ไม่หมุนควงเล็กน้อย โดยผลของการหมุนควงดังกล่าวจะลดลงเมื่ออัตราส่วนความเร็ว ( $r_v$ ) สูงขึ้นดังรูปที่ 1.20ก นอกจากนี้ยังพบว่า การหมุนควงไม่มีผลต่ออัตราการลดลงตามแนวแกนและการขยายตัวของเจ็ตในช่วงที่ทดลองดังรูปที่ 1.20ข และ 1.20ค ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าที่ผ่านมาได้มีการศึกษาถึงคุณลักษณะต่างๆของเจ็ตในกระแสมขวางดังตารางที่ 1.1 และผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีคุณลักษณะดังกล่าวดังตารางที่ 1.2 อย่างไรก็ตามในกรณีของการไหลแบบหมุนควงของเจ็ตในกระแสมขวางยังมีผู้ศึกษาน้อย จึงยังไม่มีข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับคุณลักษณะการผสมของการไหลลักษณะดังกล่าว กอปรกับที่ผ่านมาก็ได้มีการศึกษาปริมาณความเร็วและ Scalar concentration และใช้วิธีการควบคุมการหมุนควง โดยการฉีดของไหลในแนวสัมผัส และการใช้ใบพัดกวน โดยทั้ง 2 วิธีดังกล่าว ทำให้เจ็ตอากาศบริเวณขอบท่อมมีความเร็วในแนวสัมผัสเท่ากับศูนย์นั้นคือมีผลรวมของค่า Circulation ที่ปากเจ็ตเท่ากับศูนย์ (Zero circulation) อย่างไรก็ตามการควบคุมการหมุนควงของเจ็ตสามารถทำได้อีกวิธีหนึ่งโดยการใช้ท่อหมุน ซึ่งวิธีนี้จะทำให้มีพารามิเตอร์พื้นฐานที่แตกต่างจากวิธีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น คือทำให้เจ็ตอากาศที่ขอบท่อมมีความเร็วในแนวสัมผัสเท่ากับความเร็วของท่อหมุนนั้นคือมีผลรวมของค่า Circulation ที่ปากเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์ (Non-zero circulation) ด้วยปัจจัยดังกล่าวมานี้ การศึกษาวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่การศึกษาต่อคุณลักษณะเจ็ตที่หมุนควงในกระแสมขวาง โดยศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียส และใช้ท่อหมุน ( R o t a t i n g p i p e )

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตที่หมุนควงในกระแสมขวางแบบ Non-Zero circulation โดยทั่วไปและศึกษาผลของความเร็วในการหมุนควงซึ่งแสดงในรูปของ Swirl ratio ที่มีต่อคุณลักษณะการผสมโดยเฉพาะ ซึ่งคุณลักษณะการผสมนี้จะแสดงจากปริมาณบ่งชี้ต่างๆ ได้แก่ การกระจายของอนุภาคนิวเคลียสเป็นหน้าตัด เส้นทาง (Trajectory) อัตราการลดลงตามแนวแกน (Decay rate) และการขยายตัว (Spread rate) ของเจ็ตในกระแสมขวาง

### 1.4 แนวทางการทำวิจัย

ในช่วงต้นของการศึกษาได้ทำการศึกษาเบื้องต้นดังแสดงในภาคผนวก ก เพื่อพิจารณาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและข้อบกพร่องต่างๆที่อาจมีผลต่อการทดลองและนำผลที่ได้ไปใช้ช่วยในการออกแบบชุดทดลอง เช่น การออกแบบขนาดสเกล และการปรับสภาวะของการไหลที่เหมาะสม

รวมทั้งยังช่วยในการออกแบบการทดลอง เช่น การกำหนดช่วงของพารามิเตอร์และขอบเขตในการวัดที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยให้ความร้อนกับเจ็ตอากาศจนมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าอุณหภูมิของกระแสลมขวางประมาณ 40 องศาเซลเซียส และวัดอุณหภูมิเป็นหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) โดยใช้ Thermocouple เป็นเครื่องมือวัด ทั้งนี้ก็เพื่อศึกษาคุณลักษณะการผสมเฉพาะหน้าตัด (Local characteristic) ได้แก่ การกระจายตัวของอุณหภูมิและการพัฒนาตัวของเจ็ตตามแนวการไหล รวมถึงคุณลักษณะการผสมโดยรวม (Global characteristic) ได้แก่ เส้นทาง (Trajectory) อัตราการลดลง (Decay rate) และการขยายตัวของเจ็ต (Spread rate) โดยพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะดังกล่าว คืออัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Smith and Mungal, 1998) ซึ่งนิยามจากรากที่สองของอัตราส่วนระหว่างโมเมนตัมของเจ็ตต่อโมเมนตัมของกระแสลมขวางดังสมการ

$$r = \left( \frac{\rho_j \bar{u}_j}{\rho_{cf} \bar{u}_{cf}} \right)^{1/2} \quad (1.5)$$

เมื่อ	$\bar{u}_j$	คือความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-average) ในแนวแกนของเจ็ต
	$\bar{u}_{cf}$	คือความเร็วของกระแสลมขวาง
	$\rho_j$	ความหนาแน่นของเจ็ตอากาศ
	$\rho_{cf}$	ความหนาแน่นของกระแสลมขวาง

ในการศึกษาผลของความเร็วในการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะการผสมข้างต้น ได้ทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) คงที่ และเปลี่ยนความเร็วในการหมุนควง โดยพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงระดับของการหมุนควงได้มีผู้นิยามในหลายลักษณะ ที่นิยมใช้คือค่า Swirl Number ( $Sn$ ) ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนของฟลักซ์ตามแนวแกนของโมเมนตัมเชิงมุมตามแนวแกน (Axial flux of angular momentum;  $G_\theta$ ) ต่อผลคูณของรัศมีท่อซึ่งเป็น Length Scale ของการไหลกับฟลักซ์ตามแนวแกนของโมเมนตัมเชิงเส้นตามแนวแกน (Axial flux of axial momentum;  $G_x$ ) ดังสมการ 1.6

$$Sn = \frac{\int_0^R uwr^2 dr}{R \int_0^R u^2 r dr} = \frac{G_\theta}{RG_x} \quad (1.6)$$

เมื่อ	$u$	เป็นความเร็วในแนวแกนของเจ็ตที่ตำแหน่งรัศมีของท่อ ( $r$ )
	$w$	เป็นความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ตที่ตำแหน่งรัศมีของท่อ ( $r$ )
	$R$	รัศมีของปากเจ็ต

นอกจากนี้ยังมีการแสดงระดับการหมุนควงในอีกลักษณะหนึ่ง คือแสดงโดยค่า Swirl ratio ( $Sr$ ) ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้เนื่องจากความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ โดยนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ตที่ขอบเจ็ตกับความเร็วเฉลี่ยในแนวแกนเจ็ต โดยสำหรับกรณีของท่อหมุนในงานวิจัยนี้ ความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ตที่ขอบเจ็ตนั้นมีค่าเท่ากับความเร็วในแนวสัมผัสของท่อหมุน ดังนั้นค่า Swirl ratio ( $Sr$ ) จึงแสดงดังสมการ

$$Sr = \frac{w_R}{u_j} = \frac{w_p}{u_j} \quad (1.7)$$

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

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

$$Sn = \frac{\Omega R}{2u_j} = \frac{w_p}{u_j} = \frac{Sr}{2} \quad (1.8)$$

สำหรับวิธีการในการทำให้เกิดการหมุนควงนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการหมุนท่อเจ็ต (Rotating pipe) ซึ่งมีความแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการใช้การตีใบพัดในการหมุนควงของไหล และการฉีดของไหลตามแนวสัมผัส ซึ่งจะมีผลรวมของ Circulation ที่ทางออกของเจ็ตเท่ากับศูนย์ ในขณะที่วิธีท่อหมุนนั้น จะมีผลรวมของ Circulation ที่ทางออกของเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นความรู้ ความเข้าใจ และข้อมูลพื้นฐาน เกี่ยวกับผลของการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะการผสมของการไหลในรูปแบบของเจ็ตในกระแสมขวาง และจะเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน อันจะเป็นประโยชน์ในเชิงวิชาการ



ข้อมูลในเชิงวิชาการดังกล่าว น่าจะเป็นแนวทางในการประยุกต์พัฒนาการออกแบบและการปรับปรุงประสิทธิภาพของการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับกระบวนการเผาไหม้ใน Combustor การปรับปรุงการระบายความร้อนของ Gas turbine blade การพัฒนาทางด้านอากาศพลศาสตร์ รวมถึงแนวทางในการควบคุมมลภาวะในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังอาจนำไปใช้เป็นแนวทางในการควบคุมการไหล (Flow control) ในแบบต่างๆได้ อันจะเป็นประโยชน์ในเชิงประยุกต์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ชุดทดลองและการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตที่หมุนควงในกระแสลมขวาง และผลของความเร็วในการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง โดยการเปลี่ยนความเร็วในการหมุนควงซึ่งแสดงโดยค่า Swirl ratio (Sr) ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) คงที่ ซึ่งการทดลองจะให้ความร้อนกับเจ็ตอากาศจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของกระแสลมขวางประมาณ 40 องศาเซลเซียส และวัดอุณหภูมิเป็นหน้าตัดตามแนว Downstream โดยมีรายละเอียดของชุดทดลองและการทดลองดังนี้

#### 2.1 ชุดทดลอง

ชุดทดลองในงานวิจัยนี้ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยชุดทดลองประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ อุโมงค์ลมที่มีขนาดหน้าตัดทดสอบ  $100 \times 100$  ตารางเซนติเมตร และชุดเจ็ตแบบท่อหมุนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร

##### 2.1.1 อุโมงค์ลม (Wind tunnel)

อุโมงค์ลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีหน้าที่สร้างกระแสลมขวาง โดยแสดงเป็นลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ พัดลมแบบหอยโข่ง (Centrifugal Blower) ขนาด 30 กิโลวัตต์ ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (Diffuser) ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) ขนาด  $300 \times 300$  ตารางเซนติเมตร Contraction ที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดด้านทางเข้าต่อด้านทางออกเท่ากับ 9 และหน้าตัดทดสอบ (Test section) ขนาด  $100 \times 100$  ตารางเซนติเมตร

การทำงานของอุโมงค์ลมเริ่มจากอากาศจะถูกดูดจากบรรยากาศของห้องผ่านพัดลมหอยโข่ง (Centrifugal Blower) ชนิดใบพัดแบบ Backward-curved airfoil blade ขนาด 30 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 2.2 มีขนาดทางออกกว้าง 80 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร ซึ่งถูกควบคุมความเร็วรอบโดยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (Inverter) จากนั้นอากาศจะไหลผ่านท่ออ่อน (Flexible duct) ซึ่งทำหน้าที่ลดผลของแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากพัดลมออกจากส่วนอื่นๆของอุโมงค์ลม

หลังจากนั้นอากาศจะผ่านเข้าไปในส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (Main diffuser) ดังรูปที่ 2.3 เพื่อลดความเร็วของอากาศ โดยมี Adaptor diffuser เป็นส่วนต่อระหว่าง Flexible duct กับ

Main Diffuser โดย Main Diffuser มีลักษณะหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดทางเข้า  $160 \times 160$  ตารางเซนติเมตร ขนาดทางออก  $300 \times 300$  ตารางเซนติเมตร ยาว 160 เซนติเมตร กิดเป็นอัตราส่วนพื้นที่เท่ากับ 3.5 และมีมุมเอียงรวม 47 องศา โดยภายใน Diffuser นั้นมีส่วนประกอบสำหรับปรับการไหลได้แก่ แผ่นเหล็กเจาะรู (Perforated plate) ที่มี ขนาดรู (มิลลิเมตร)  $\times$  ระยะระหว่างรู (มิลลิเมตร) เท่ากับ  $25 \times 32$  มีอัตราส่วนช่องเปิด 55 % จำนวน 4 แผ่น และแผ่นเหล็กเจาะรูที่มีขนาด  $2 \times 3$  มีอัตราส่วนช่องเปิด 40 % จำนวน 1 แผ่น ที่ระยะจากทางเข้า Main Diffuser เท่ากับ 0, 25, 50, 80 และ 110 เซนติเมตรตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิด Separation, ทำให้อากาศกระจายเต็มพื้นที่หน้าตัดของ Diffuser และลดการหมุนวนของอากาศที่ออกจากพัดลม

หลังจากอากาศถูกลดความเร็วใน Diffuser แล้ว จะผ่านเข้าไปยังห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) ที่มีขนาด  $300 \times 300$  ตารางเซนติเมตร ยาว 217 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.4 โดยภายในมีส่วนประกอบสำหรับปรับการไหลได้แก่ ตาข่ายสแตนเลส (Screen) ขนาด Mesh  $\times$  SWG เท่ากับ  $50 \times 36$  จำนวน 2 แผ่น และตาข่ายอลูมิเนียม (Household screen) ขนาด Mesh  $\times$  SWG เท่ากับ  $(16 \times 18) \times 31$  จำนวน 5 แผ่น โดยมีระยะห่างกันประมาณ 31 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อปรับทิศทางการไหลและเพิ่มความสม่ำเสมอของความเร็วของอากาศ จากนั้นอากาศจะไหลผ่าน Contraction ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดด้านทางเข้ากับด้านทางออกเท่ากับ 9 โดยรูปร่างเส้นโค้งของ Contraction นั้นออกแบบตามสมการ Polynomial ดีกรี 4 โดยมีจุดเปลี่ยนความโค้งที่ระยะ  $2/3$  เท่าของความยาว 300 เซนติเมตร โดยที่ด้านเข้าและด้านออกของส่วนโค้งจะต่อส่วนตรงขนานกับทิศทางการไหลยาวออกมาอีกด้านละ 10 เซนติเมตร ทำให้ Contraction มีความยาวรวมจริง 320 เซนติเมตร Contraction ทำหน้าที่เร่งให้อากาศมีความเร็วสูงขึ้นจนได้ความเร็วภายในหน้าตัดทดสอบ (Test section) ที่ต้องการ และยังช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอและลดปริมาณความปั่นป่วนของอากาศก่อนไหลเข้าสู่ Test section

สำหรับ Test section ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.5 มีขนาดหน้าตัด  $98.5 \times 98.5$  ตารางเซนติเมตร ประกอบด้วย 2 ท่อน แต่ละท่อนมีความยาว 240 เซนติเมตร สำหรับท่อนแรกแสดงดังรูปที่ 2.6 เป็นท่อนที่ทำการทดลอง ซึ่งผนังด้านบนและด้านข้างทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 1 เซนติเมตร และพื้นด้านล่างซึ่งเป็นส่วนที่ต่อกับชุดเจ็ตแบบท่อหมุนนั้นทำจากเหล็กแผ่นหนา 5 มิลลิเมตร กว้าง 97.5 เซนติเมตร ซึ่งกว้างน้อยกว่าระยะห่างระหว่างผนังข้าง ทำให้มีช่องว่างระหว่างพื้นด้านล่างกับผนังของ Test section ด้านละประมาณ 5 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันผลของการไหลแบบหมุนวนบริเวณมุม (Conner flow) โดยพื้นด้านล่างยื่นไปใน Contraction 10 เซนติเมตร และยกสูงขึ้นมาจากโครงด้านล่างของหน้าตัดทดสอบ 4.5 เซนติเมตร เพื่อลดผลของความหนาของชั้นขอบเขตที่พื้นที่เติบโตขึ้นภายใน Contraction ทำให้ขนาดหน้าตัดทดสอบส่วนแรกมีความกว้าง 98.5 เซนติเมตรและสูง 94 เซนติเมตร โดยชุดเจ็ตแบบหมุนจะติดตั้งที่ระยะ 50 เซนติเมตร จากขอบ

ด้านหน้าของแผ่นเหล็กด้านล่าง สำหรับ Test section ส่วนที่สองมีหน้าที่ป้องกันผลของเจ็ดที่ปลายทางออกที่อาจมีผลต่อการวัด โดยผนังทั้ง 4 ด้านทำจากแผ่น อะคริลิกหนา 1 เซนติเมตร และมีขนาดหน้าตัด 98.5×98.5 ตารางเซนติเมตร

### 2.1.2 ชุดเจ็ดแบบท่อหมุน

ชุดเจ็ดแบบท่อหมุนแสดงเป็นลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.7 และภาพถ่ายดังรูปที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนได้แก่ ส่วนพัลลมและ Orifice ส่วน Heating chamber และส่วนท่อหมุน (Rotating pipe)

ในส่วนพัลลมและ Orifice นี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมและตรวจสอบอัตราการไหลของเจ็ดซึ่งแสดงดังภาพถ่ายในรูปที่ 2.9 โดยอากาศจะถูกเป่าจากพัลลมแบบความดันสูง (High pressure blower) ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ผ่านท่ออ่อน (Flexible duct) เพื่อลดการสั่นสะเทือนจากพัลลมไปยังส่วนอื่นๆของชุดทดลอง ผ่านระบบท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3, 4 และ 5 นิ้ว (Nominal size) โดยมีวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly valve) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของเจ็ดอากาศ ต่อจากนั้นอากาศจะผ่าน Honeycomb ซึ่งทำจากหลอดพลาสติกเรียงเต็มหน้าตัดของท่อปะกบปลายทั้งสองด้วยตาข่ายอลูมิเนียม (Household screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ (16×18)×31 เพื่อปรับทิศทางการไหลและทำให้อากาศมีความเร็วสม่ำเสมอผ่าน Orifice ซึ่งมีอัตราส่วนช่องเปิด ( $\beta$ ) เท่ากับ 0.7 เพื่อตรวจสอบอัตราการไหลของเจ็ด

ในส่วน Heating chamber นั้นเป็นส่วนที่ให้ความร้อนกับเจ็ดอากาศแสดงดังรูปที่ 2.10 โดยมีลักษณะเป็นห้องขนาดหน้าตัด 30×30 ตารางเซนติเมตร ยาว 120 เซนติเมตร โดยทางเข้ามีลักษณะเป็นหน้าแปลนขนาดท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว (Nominal size) ซึ่งต่อกับท่อพลาสติกของส่วนพัลลมและ Orifice โดยติดตั้งตาข่ายสแตนเลส (Screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ 50×36 เพื่อเป็น Filter สำหรับกรองฝุ่น สำหรับทางออกได้ติดตั้ง Bush ซึ่งทำจากวัสดุผสมของคาร์บอนและกราไฟท์เกรด JP1300 เพื่อต่อรองรับท่อหมุน ภายใน Heating chamber ได้ติดตั้ง Heater ไฟฟ้าขนาด 2 กิโลวัตต์ จำนวน 3 ตัว ซึ่งจะถูกรักษาอุณหภูมิโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Variac แบบ 3 เฟส ขนาด 27 kVA (0-480 V / 30A) ดังรูปที่ 2.10ค และระหว่าง Heater แต่ละตัวจะมีแผ่นเหล็กเจาะรูที่มีขนาดรู (มิลลิเมตร)×ระยะระหว่างรู (มิลลิเมตร) เท่ากับ 10×15 และมีอัตราส่วนช่องเปิด 50% ทั้งนี้ก็เพื่อทำให้อุณหภูมิของอากาศมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดก่อนผ่าน Heater แต่ละตัว และหลังจาก Heater ตัวสุดท้ายจะมีแผ่นเหล็กเจาะรูดังกล่าวอีก 4 แผ่น ทำให้อากาศมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอก่อนเข้าไปในส่วนของท่อหมุน (Rotating pipe) นอกจากนี้ที่ผนังด้านนอกทุกด้านของห้องจะติดตั้งฉนวนชนิดแผ่นใยหินเพื่อลดการสูญเสียพลังงานความร้อนออกสู่ภายนอก

ในส่วนท่อหมุน (Rotating pipe) เป็นส่วนที่ทำให้เจ็ทอากาศมีความเร็วในแนวสัมผัส และทำให้เกิดการหมุนควง โดยแสดงเป็นลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.11 และภาพถ่ายดังรูปที่ 2.12 สำหรับท่อที่ใช้เป็นท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน ( $d$ ) เท่ากับ 32 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร โดยแบ่งเป็น 3 ท่อนดังรูปที่ 2.12ก และรูปที่ 2.12ข ซึ่งท่อแต่ละท่อนสวมอยู่กับคัลเลอร์ ลูกปืนชนิดปรับแนวได้เอง (Self-aligning ball bearings) แบบมีปลอกสวม (Adaptor sleeve) ยี่ห้อ SKF รุ่น 1209EK ท่อนละ 2 ชุดและท่อแต่ละท่อนถูกยึดติดกันด้วย Coupling ซึ่งทำจากท่อเหล็กและใช้ Set screw ในการยึด

สำหรับท่อท่อนแรกมีความยาว 30 เซนติเมตร ( $9.4d$ ) ปลายด้านล่างสวมด้วย Bush ซึ่งติดตั้งที่ทางออกของ Heating chamber ท่อท่อนที่สองมีความยาว 51 เซนติเมตร ( $15.9d$ ) ซึ่งภายในบรรจุ Honeycomb โดยทำจากท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 4.5 มิลลิเมตร บรรจุเต็มหน้าตัดท่อและยาวตลอดความยาวของท่อนที่สอง โดยมีตาข่ายสแตนเลส (Screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ 30×35 ปะกบ สำหรับท่อท่อนที่สามมีความยาว 45 เซนติเมตร ( $14d$ ) ภายในบรรจุตาข่ายสแตนเลส (Screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ 30×35 จำนวน 3 อัน โดยอันแรกติดตั้งที่ระยะห่างจากปลาย Honeycomb 6 เซนติเมตร ( $1.9d$ ) แต่ละอันห่างกัน 6 เซนติเมตร ( $1.9d$ ) ทำให้อันสุดท้ายอยู่ห่างจากปากเจ็ท 27 เซนติเมตร ( $8.4d$ ) ตาข่ายดังกล่าวมีหน้าที่ลดความปั่นป่วนของอากาศหลังจากผ่าน Honeycomb นอกจากนี้ที่ปลายด้านบนของท่อท่อนที่สามได้ต่อเข้ากับพื้นด้านล่างของ Test section ของอุโมงค์ลมด้วย Bush ซึ่งทำจากวัสดุผสมของคาร์บอนและกราฟไฟท์เกรด JP1300 และใช้ Mechanical seal ยี่ห้อ Zero-leak แบบ Double cartridge seal ขนาด 40 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันอากาศรั่วระหว่างท่อหมุนกับพื้นด้านล่างของหน้าตัดดังรูปที่ 2.12ค โดยใช้น้ำในการหล่อเย็นหน้าสัมผัสของ Mechanical seal ซึ่งทำจาก Silicon carbide และแสดงอุปกรณ์ในการหล่อเย็นดังรูปที่ 2.12ง

ในการหมุนขับเคลื่อนท่อได้ใช้สายพานชนิดร่องวีต่อเข้ากับ Pulley แบบ Taper lock ขับจากเพลาของมอเตอร์ ยี่ห้อ Crompton Greaves แบบ AD90S ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ 2830 รอบต่อนาที โดยส่งกำลังไปยังท่อท่อนที่สอง ซึ่งมีอัตราทดความเร็วรอบของมอเตอร์ต่อความเร็วรอบของท่อหมุนเท่ากับ 1 ต่อ 2.2 และควบคุมความเร็วรอบของท่อหมุนโดยใช้เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (Inverter) ยี่ห้อ T-VERETR รุ่น N1-202-M ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ โดยวงจรที่ใช้ควบคุมความเร็วรอบของท่อหมุนแสดงดังรูปที่ 2.13

## 2.2 พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง



พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.14 โดยพิกัด  $x$ ,  $y$  และ  $z$  นั้นเป็นพิกัดอ้างอิงหลักซึ่งเทียบกับหน้าตัดทดสอบ โดยมีตำแหน่งกึ่งกลางเจ็ตเป็นจุดเริ่มต้น และพิกัด  $x'$ ,  $y'$  และ  $z'$  นั้นเป็นพิกัดที่อ้างอิงกับท่อเจ็ต มีตำแหน่งกึ่งกลางเจ็ตเป็นจุดเริ่มต้น ดังนั้นในกรณีที่ไม่มีลมหมุน ท่อเจ็ตพิกัดอ้างอิงเทียบกับท่อเจ็ตจะทับกับพิกัดอ้างอิงหลัก นอกจากนี้ยังได้นิยามพิกัด  $s$  หรือ  $\xi$ ,  $\eta$  และ  $\zeta$  ซึ่งเป็นพิกัดที่อ้างอิงที่เทียบกับเส้นทางตามแนวแกนเจ็ต ( $s$ ) โดยเส้นทางดังกล่าวนิยามจากตำแหน่งของจุดศูนย์กลางอุณหภูมิตั้งแต่หน้าตัดบนระนาบสมมาตร (Projected-centroid trajectory)

### 2.3 สภาพของการทดลอง

การทดลองได้ทำที่ความเร็วของกระแสลมขวางประมาณ 1.82 เมตรต่อวินาที และความเร็วของเจ็ตซึ่งพิจารณาจากค่าเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area average) ซึ่งนิยามจาก

$$\bar{u}_j = \frac{1}{A} \int u dA \quad (2.1)$$

โดย  $\bar{u}_j$  ในการทดลองมีค่าประมาณ 7.9 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วที่จุดกึ่งกลางประมาณ 9.4 เมตรต่อวินาที และมีอุณหภูมิของกระแสลมขวางประมาณ  $31.2 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3\%$  และอุณหภูมิของเจ็ตซึ่งพิจารณาจากค่าเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area average) ซึ่งนิยามจาก

$$\bar{T}_j = \frac{1}{A} \int T dA \quad (2.2)$$

โดย  $\bar{T}_j$  ในการทดลองมีค่าประมาณ  $69.3 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1\%$  โดยมีอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางประมาณ  $75.1 \text{ }^\circ\text{C}$  ทำให้ได้อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล  $r = (\rho_j \bar{u}_j^2 / \rho_{cf} \bar{u}_{cf}^2)^{1/2}$  คงที่ที่ประมาณ 4.1 และอัตราส่วนความเร็ว  $r_v = \bar{u}_j / \bar{u}_{cf}$  ประมาณ 4.35 อัตราส่วนความหนาแน่น  $r_d = \rho_j / \rho_{cf}$  ประมาณ 0.89 โดยมีค่า Reynolds number ของเจ็ต  $Re_j = \bar{u}_j d / \nu$  ประมาณ 12,000 และ Reynolds number ของกระแสลมขวาง  $Re_{cf} = \bar{u}_{cf} d / \nu$  ประมาณ 3,400 โดยแสดงรายละเอียดของสภาวะการทดลองและความคลาดเคลื่อนในแต่ละกรณีที่ทดลองดังตารางที่ 2.1

เนื่องจากการให้ความร้อนกับเจ็ตอากาศทำให้มีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของเจ็ตและกระแสลมขวาง ดังนั้นจึงพิจารณาผลของแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นจากค่า 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 0.1 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 0.025 นั่นคือผลของแรงลอยตัวเนื่องจากเจ็ตร้อนนั้นมีค่าประมาณ 10% ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของกระแสลมขวางและมีค่าประมาณ 2.5% ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของเจ็ต

ในการศึกษาผลของการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวางนั้น จะพิจารณาจากระดับของการหมุนควงซึ่งแสดงโดยค่า Swirl ratio (Sr) นิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วในแนวสัมผัสของท่อเจ็ตกับความเร็วเฉลี่ยในแนวแกนของเจ็ต ( $Sr = w_p / \bar{u}_j$ ) ซึ่งการทดลองได้เปลี่ยนค่า Swirl ratio แบ่งเป็น 4 กรณี คือ Sr0, Sr17, Sr52 และ Sr82 โดยมีค่า Swirl ratio (Sr) เท่ากับ 0.17, 0.52 และ 0.82 และค่า Swirl number (Sn) เท่ากับ 0.07, 0.17 และ 0.28 ตามลำดับ และเนื่องจากลักษณะของการใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) ในการทำให้เกิดการหมุนควงนั้นทำให้ผลรวมของค่า Circulation ที่ปากเจ็ตมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ในที่นี้ผลรวมของค่า Circulation รอบปากเจ็ต ( $\Gamma = w_p l$ ) ของแต่ละกรณีเป็น 0, 0.14, 0.42 และ 0.67 m<sup>2</sup>/s สำหรับกรณี Sr0, Sr17, Sr52 และ Sr82 ตามลำดับ โดยแสดงรายละเอียดของปริมาณต่างๆ ในแต่ละกรณี ดังตารางที่ 2.2

## 2.4 วิธีการทดลองและอุปกรณ์การวัด

การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือการวัดสถานะเริ่มต้นและการวัดการกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 2.4.1 การวัดสถานะเริ่มต้น

การวัดสถานะเริ่มต้นของกระแสลมขวาง



การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมขวางในการศึกษานี้ ได้ทำการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วภายในหน้าตัดทดสอบ และการวัดความหนาของชั้นขอบเขตที่ผนังทั้ง 4 ด้านของหน้าตัดทดสอบ

สำหรับการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วภายใน Test section นั้น จะวัดเป็นเมตริกซ์ขนาด 9 จุด  $\times$  9 จุด ห่างกัน 10 เซนติเมตร ที่ระยะ  $x = -15$  เซนติเมตร และวัดที่ความเร็วเฉลี่ยภายในหน้าตัดทดสอบประมาณ 1.8 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วที่ใช้ในการทดลอง และที่ความเร็วสูงคือ 7.9 เมตรต่อวินาทีเพื่อยืนยันผลการวัด โดยใช้ Pitot probe (แบบ A) ดังรูป Schematic ในรูปที่ 2.15ก และภาพถ่ายในรูปที่ 2.16ก เป็นเครื่องมือวัด โดย Probe ดังกล่าวทำขึ้นจากท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 3 มิลลิเมตร คัดให้โค้งเป็นมุมฉาก มีระยะจากปลาย Probe ถึงแนวก้าน 90 มิลลิเมตร (19 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของปลาย Probe) และก้าน Probe ยาว 140 เซนติเมตร ความดันที่วัดได้จาก Pitot probe จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer ชนิด Differential โดยในการวัดที่ความเร็ว 1.8 เมตรต่อวินาทีนั้นใช้ Transducer (ยี่ห้อ SETRA รุ่น 264) ที่มีช่วงการวัดความดันขาเข้า  $\pm 0.05$  นิ้วน้ำ ช่วงแรงดันไฟฟ้าด้านทางออก 0-5 Volts และความถูกต้อง (Accuracy) เท่ากับ  $\pm 0.5\%$  Full scale ในขณะที่ความเร็ว 7.9 เมตรต่อวินาทีนั้นใช้ Transducer (ยี่ห้อ OMEGA รุ่น PX653-0.25BD5V) ที่มีช่วงการวัดความดันขาเข้า  $\pm 0.25$  นิ้วน้ำ ช่วงแรงดันไฟฟ้าด้านทางออก 1-5 Volts และความถูกต้อง (Accuracy) เท่ากับ  $\pm 0.5\%$  Full scale ดังรูปที่ 2.17ก จากนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าง่ายดังกล่าวจะถูกอ่านค่าโดยใช้ Digital multimeter ยี่ห้อ Fluke รุ่น 19 ดังรูปที่ 2.17ข

สำหรับการวัดความหนาของชั้นขอบเขตนั้น จะวัดตามแนว Transverse ออกจากผนังที่กึ่งกลางผนังทั้ง 4 ด้านของหน้าตัดทดสอบ ที่ระยะ  $x = -10$  เซนติเมตร  $[(z, x) = (0, -0.7rd)]$  และที่ตำแหน่งข้างปากเจ็ตของพื้นล่าง ห่างจากปากเจ็ต 10 เซนติเมตร  $[(z, x) = (0.7rd, 0)]$  ที่ความเร็วเฉลี่ยภายในหน้าตัดทดสอบประมาณ 1.8 และ 7.9 เมตรต่อวินาที โดยใช้ความละเอียด (Resolution) ในการวัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร สำหรับเครื่องมือวัดนั้นใช้ Pitot probe (แบบ B) ดังรูป Schematic ในรูปที่ 2.15ข และภาพถ่ายในรูปที่ 2.16ข เป็นเครื่องมือวัด โดย Probe ดังกล่าวทำขึ้นจากเข็มสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 1.2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.8 มิลลิเมตร โดยเข็มถูกคัดให้โค้งเป็นมุมฉาก และมีระยะจากปลายเข็มถึงแนวก้าน 32 มิลลิเมตร (53 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของเข็ม) โดยเข็มสแตนเลสถูกต่อเข้ากับท่อทองเหลืองเพื่อใช้เป็นก้าน Probe มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3.2 มิลลิเมตร ทำให้มีความยาวรวมของก้าน Probe ประมาณ 33 เซนติเมตร ความดันที่วัดได้จาก Pitot probe จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer (ช่วงการวัดความดันขาเข้า  $\pm 0.05$  นิ้วน้ำ สำหรับการวัดที่ความเร็ว 1.8 เมตร

ต่อวินาที และช่วงการวัดความดันเข้า  $\pm 0.25$  นิ้วน้ำ สำหรับการวัดที่ความเร็ว 7.9 เมตรต่อวินาที) และถูกอ่านค่าโดยใช้ Digital multimeter (Fluke-19) ซึ่ง Pressure transducer และ Multimeter ที่ใช้นั้นเป็นชุดเดียวกันกับที่ใช้ในการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วของกระแสมขวาง)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### การวัดสถานะเริ่มต้นของเจ็ต

สถานะเริ่มต้นของเจ็ตได้ทำการวัดขณะที่ไม่มีกระแสลมขวางและให้ความร้อนกับเจ็ตจนมีอุณหภูมิที่กึ่งกลางเจ็ตประมาณ 75.1 องศาเซลเซียส ประกอบด้วยการวัดการกระจายของความเร็วและอุณหภูมิ โดยใช้ Pitot probe และ Yaw probe ในการวัดความเร็ว และใช้ Thermocouple ในการวัดอุณหภูมิ โดยมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับการวัดความเร็ว ในกรณี Sr0 นั้น ได้ใช้ Pitot probe ในการวัดความเร็วในแนวแกน ( $u$ ) ตามแนว  $z'$  และ  $x'$  ซึ่งในการวัดนั้นได้ใส่ Probe ทางด้านข้างของหน้าตัดทดสอบ (ผนังด้าน  $+z$ ) และเลื่อน Probe ตามแนว  $z'$  ในขณะที่การวัดตามแนว  $x'$  นั้นใช้การหมุนต่อ 90 องศาเพื่อให้แนว  $x'$  อยู่ในแนวเดียวกับการเลื่อน Probe ดังรูปที่ 2.18 โดยใช้ความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร โดยใช้ Pitot Probe (แบบ C) ดังรูป Schematic ในรูปที่ 2.15ค และภาพถ่ายในรูปที่ 2.16ค 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 (ช่วงการวัดความดันเข้า  $\pm 0.25$  นิ้วน้ำ) และถูกอ่านค่าโดยใช้ Digital multimeter (Fluke-19)

สำหรับการวัดความเร็ว ในกรณี Sr17, Sr52 และ Sr82 นั้นได้ใช้ Yaw probe แบบ Three-tube cobra probe ลักษณะเดียวกับของ Chue (1975) ในการวัดความเร็วแนวแกน ( $u$ ) และความเร็วแนวสัมผัส ( $w$ ) โดยวัดตามแนว  $z'$  ดังรูปที่ 2.18 ก โดยใช้ความละเอียด (Resolution) ในการวัดเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร สำหรับ Yaw probe ที่ใช้นั้นแสดงดังรูป Schematic ในรูปที่ 2.15ง และภาพถ่ายในรูปที่ 2.16ง ทำขึ้นจากเข็มสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 0.5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.32 มิลลิเมตร จำนวน 3 อันยึดติดกัน โดยเข็มนั้นด้านข้างทั้ง 2 ด้านถูกฝนให้มีมุมเอียง ( $\alpha$ ) เท่ากับ 30 องศา และถูกตัดโค้งเป็นมุมฉาก โดยมีระยะจากปลายเข็มถึงแนวก้าน 35 มิลลิเมตร ซึ่งก้านเข็มสแตนเลสแต่ละก้านถูกต่อเข้ากับท่อทองเหลืองเพื่อใช้เป็นก้าน Probe มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3 มิลลิเมตร หนา 0.5 มิลลิเมตร ทำให้ก้าน Probe มีความยาวรวม 77 เซนติเมตร ซึ่งความดันแตกต่างที่วัดได้จาก Yaw probe แต่ละด้านจะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure (ช่วงการวัดความดันเข้า  $\pm 0.25$  นิ้วน้ำ) และถูกอ่านค่าโดยใช้ Digital multimeter (Fluke-19) โดย Yaw probe ที่ทำขึ้นนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับ Pitot-Static Probe แบบมาตรฐานที่ความเร็ว 12 และ 15 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิห้อง และเนื่องจากเป็นการวัดเจ็ตอากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นในการคำนวณความเร็วจึงได้

พิจารณาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเนื่องจากอุณหภูมิของเจ็ตอากาศดังกล่าวด้วย โดยแสดงรายละเอียดของการเปรียบเทียบและการคำนวณความเร็วในภาคผนวก ข และในการวัดความเร็วรอบของท่อหมุนได้ใช้ Optical tachometer ยี่ห้อ SKF รุ่น TMOT6 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.16 ค

สำหรับการวัดอุณหภูมิในทุกกรณีนั้นได้ใช้ Thermocouple เป็นอุปกรณ์การวัด โดยวัดตามแนว  $z'$  และ  $x'$  สำหรับกรณี Sr0 และวัดตามแนว  $z'$  สำหรับกรณี Sr17, Sr52 และ Sr82 ดังรูปที่ 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 ดังรูป Schematic ในรูปที่ 2.15จ และภาพถ่ายในรูปที่ 2.16จ ซึ่งก้าน Probe ทำจากท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $6$  มิลลิเมตร และมีความยาวรวม  $126$  เซนติเมตร เพื่อให้มีการโค้งงอที่น้อยที่สุด และส่วนปลาย Probe ทำจากท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก  $3$  มิลลิเมตร และเข็มฉีดยาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก  $1.5$  มิลลิเมตร โดยตัดให้ส่วนปลายงอเป็นรูปตัวแอลยื่นออกจากแนวแกน  $10$  เซนติเมตร และให้ปลายของ Thermocouple อยู่เลยจากปลาย Probe ประมาณ  $5$  มิลลิเมตร เพื่อให้ Probe มีผลต่อการไหลน้อยที่สุด โดยสัญญาณที่ได้จากลวด Thermocouple จะถูกส่งเข้าไปในตัวอ่านค่าอุณหภูมิ (Thermocouple thermometer) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 52-2 ดังรูปที่ 2.17ง ซึ่งมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ  $0.1$  องศาเซลเซียส โดยค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบเครื่องมือวัดนี้ถูกจำกัดโดยลวด Thermocouple ซึ่งมีค่าประมาณ  $\pm 0.5$  °C ที่อุณหภูมิสูงสุดที่ทำการทดลองคือประมาณ  $75$  °C โดย Thermocouple ดังกล่าวได้ทำการสอบเทียบ (Calibrate) กับอุปกรณ์มาตรฐานคือ Thermometer โดยใช้อ่างน้ำทำความร้อนและทำการสอบเทียบทุก  $2$  องศาเซลเซียส ดังแสดงผลการสอบเทียบดังรูปที่ 2.19 พบว่าอุณหภูมิที่อ่านได้จาก Thermocouple มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิที่อ่านได้จากอุปกรณ์มาตรฐาน โดยมีความชันของกราฟเท่ากับ  $1$  และระยะตัดแกนเท่ากับ  $-0.21$  และ  $-0.37$  °C สำหรับการสอบเทียบก่อนและหลังการทดลองตามลำดับ

#### 2.4.2 การวัดการกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัด

ในงานวิจัยนี้ สำหรับทุกกรณีที่ศึกษา ได้ทำการวัดการกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัดบนระนาบ  $y-z$  ที่ระยะ  $x/r_d$  เท่ากับ  $0.25$ ,  $0.5$ ,  $0.75$ ,  $1$ ,  $1.5$  และ  $2$  ดังรูปที่ 2.20 โดยใช้ Thermocouple และตัวอ่านอุณหภูมิ ชุดเดียวกันกับการวัดสถานะเริ่มต้นของอุณหภูมิที่ปากเจ็ต โดยวัดเป็นเมตริกซ์ และมีความละเอียดในการวัด (Resolution) เปลี่ยนตามขนาดของการกระจายของเจ็ตอากาศในแต่ละหน้าตัดกล่าวคือ ที่ระยะ  $x/r_d$  เท่ากับ  $0.25$  และ  $0.5$  ใช้ความละเอียด

$(\Delta y \times \Delta z) = (10 \text{ มิลลิเมตร} \times 10 \text{ มิลลิเมตร})$  โดยมีจำนวนจุดในการวัดแต่ละหน้าตัดประมาณ  $17 \text{ จุด} \times 17 \text{ จุด}$  ที่ระยะ  $x/rd$  เท่ากับ 0.75 และ 1 ใช้ความละเอียด  $(\Delta y \times \Delta z) = (14 \text{ มิลลิเมตร} \times 14 \text{ มิลลิเมตร})$  โดยมีจำนวนจุดในการวัดแต่ละหน้าตัดประมาณ  $15 \text{ จุด} \times 15 \text{ จุด}$  และที่ระยะ  $x/rd$  เท่ากับ 1.5 และ 2 ใช้ความละเอียด  $(\Delta y \times \Delta z) = (16 \text{ มิลลิเมตร} \times 16 \text{ มิลลิเมตร})$  โดยมีจำนวนจุดในการวัดแต่ละหน้าตัดประมาณ  $15 \text{ จุด} \times 15 \text{ จุด}$



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 3

### ผลการทดลอง

ผลการทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นผลการวัดสถานะเริ่มต้นในการทดลอง ซึ่งประกอบด้วย สถานะเริ่มต้นของกระแสลมขวางที่ถูกสร้างขึ้นจากอุโมงค์ลม และสถานะเริ่มต้นของเจ็ตอากาศที่ปากเจ็ต ส่วนที่สองเป็นผลการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะหน้าตัด (Local characteristics) ซึ่งพิจารณาจากการกระจายของอนุภาคน้ำในแต่ละหน้าตัด และส่วนที่สามเป็นผลการศึกษาคุณลักษณะโดยรวม (Global characteristics) ซึ่งพิจารณาจากเส้นทาง (Trajectory) อัตราการลดลงตามแนวแกน (Decay rate) และอัตราการขยายตัว (Spread rate) ของเจ็ต โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 ผลการวัดสถานะเริ่มต้น

##### 3.1.1 ผลการวัดสถานะเริ่มต้นของกระแสลมขวาง

รูปที่ 3.1 แสดงผลการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วเฉลี่ย ( $\bar{u}_{cf}$ ) ใน Test section ของอุโมงค์ลม ที่ตำแหน่งหน้าปากเจ็ต 15 เซนติเมตร ( $x/d = -4.7$  หรือ  $x/rd = -1.5$ ) ที่ความเร็วประมาณ 1.8 และ 7.9 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 3.1ก และ 3.1ข ตามลำดับ โดยวัดเป็นเมตริกซ์ขนาด 9 จุด  $\times$  9 จุด และมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 10 เซนติเมตร  $\times$  10 เซนติเมตร นอกชั้นขอบเขตของผนัง Test section โดยกรอบด้านนอก (เส้นทึบ) แสดงผนังของหน้าตัดทดสอบทั้ง 4 ด้าน และกรอบด้านใน (เส้นประ) แสดงบริเวณที่ครอบคลุมการทดลองทั้งหมด ซึ่งมีขนาดประมาณ  $2rd \times 2rd$  จากผลการวัดดังรูปที่ 3.1ก แสดงในกรณีความเร็วต่ำซึ่งเป็นความเร็วที่กำหนดสำหรับกระแสลมขวางพบว่า มีความเร็วเฉลี่ย ( $\bar{u}_{cf}$ ) ประมาณ  $1.81 \pm 0.02$  เมตรต่อวินาที หรือมีค่าความไม่สม่ำเสมอ (Non-uniformity) อยู่ในช่วง  $\pm 1\%$  ของความเร็วเฉลี่ย และรูปที่ 3.1ข ซึ่งแสดงในกรณีความเร็วสูงพบว่า มีความเร็วเฉลี่ย ( $\bar{u}_{cf}$ ) ประมาณ  $7.9 \pm 0.05$  เมตรต่อวินาที หรือมีค่าความไม่สม่ำเสมอ (Non-uniformity) อยู่ในช่วง  $\pm 1\%$  ของความเร็วเฉลี่ยเช่นเดียวกัน

รูปที่ 3.2 แสดงรูปร่างของชั้นขอบเขต ( $u/\bar{u}_{cf}$ ) ตามแนว Transverse ซึ่งแสดงโดยค่า  $y/\delta_{0.95}$  โดยที่  $\delta_{0.95}$  เป็นความหนาของชั้นขอบเขตซึ่งนิยามจากระยะ  $y$  ที่มีความเร็วเป็น 95% ของความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขต ที่ความเร็ว 1.8 และ 7.9 เมตรต่อวินาที (สถานะเดียวกับการวัดความสม่ำเสมอของความเร็ว) ดังรูปที่ 3.2ก และ 3.2ข ตามลำดับ โดยวัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของผนังทั้ง 4 ด้าน หน้าปากเจ็ต 10 เซนติเมตร  $(z, x) = (0, -0.7rd)$  และที่ตำแหน่งข้างปากเจ็ตของพื้นล่าง ห่างจากปากเจ็ต 10 เซนติเมตร  $(z, x) = (0.7rd, 0)$  โดยผลการวัดดังกล่าวได้เปรียบเทียบกับผลเฉลย

ของ Blasius สำหรับชั้นขอบเขตแบบ Laminar และผลเฉลยในรูปแบบ 1/7 power law สำหรับชั้นขอบเขตแบบ Turbulent

รูปที่ 3.2ก แสดงผลการวัดที่ความเร็ว 1.8 เมตรต่อวินาที พบว่าชั้นขอบเขตที่ผนังทั้ง 4 ด้าน สอดคล้องกับผลเฉลยของ Blasius กล่าวคือที่ผนังทั้ง 4 ด้านมีลักษณะชั้นขอบเขตการไหลแบบ Laminar โดยผนังด้านล่างซึ่งเป็นผนังด้านที่สนใจและมีเจ็ทอากาศพุ่งเข้ามานั้น ที่ตำแหน่งหน้าปากเจ็ท  $(z, x) = (0, -0.7rd)$  มีความหนาของชั้นขอบเขต  $(\delta_{0.95})$  ประมาณ 7.8 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งข้างปากเจ็ท  $(z, x) = (0.7rd, 0)$  มีความหนาขอบเขต  $(\delta_{0.95})$  ประมาณ 9 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.2ข แสดงผลการวัดที่ความเร็ว 7.9 เมตรต่อวินาที พบว่าชั้นขอบเขตที่ผนังด้านข้าง (+z และ -z) และด้านล่าง (-y) มีลักษณะชั้นขอบเขตการไหลแบบ Laminar ในขณะที่ผนังด้านบน (+y) มีลักษณะชั้นขอบเขตการไหลแบบ Turbulent ทั้งนี้เนื่องจากการสะดุดของรอยต่อระหว่าง Contraction กับ Test section ที่ผนังด้านบน อย่างไรก็ตามที่ผนังด้านล่างซึ่งเป็นผนังด้านที่สนใจและมีเจ็ทอากาศพุ่งเข้ามานั้น มีชั้นขอบเขตเป็นแบบ Laminar โดยที่ตำแหน่งหน้าปากเจ็ท  $(z, x) = (0, -0.7rd)$  มีความหนาของชั้นขอบเขต  $(\delta_{0.95})$  ประมาณ 3 มิลลิเมตร

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของชั้นขอบเขตที่ความเร็ว 1.8 และ 7.9 เมตรต่อวินาที พบว่าที่ผนังด้านข้างและด้านล่างทั้ง 2 ความเร็วมีลักษณะชั้นขอบเขตเช่นเดียวกันคือเป็นแบบ Laminar ในขณะที่ผนังด้านบน เมื่อเพิ่มความเร็วจาก 1.8 เมตรต่อวินาที เป็น 7.9 เมตรต่อวินาที พบว่าลักษณะชั้นขอบเขตมีการเปลี่ยนแปลงจากแบบ Laminar ไปเป็นแบบ Turbulent เนื่องจากการสะดุดของรอยต่อระหว่าง Contraction กับ Test section และค่า Reynolds number ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น

### 3.1.2 ผลการวัดสถานะเริ่มต้นของเจ็ท

สำหรับสถานะเริ่มต้นของเจ็ทได้ทำการวัดการกระจายของความเร็วในแนวแกน ( $u$ ), ความเร็วในแนวสัมผัส ( $w$ ) (ในกรณีที่มีการหมุนควง) และการกระจายของอุณหภูมิ ตามแนวรัศมีของเจ็ท โดยมีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 3.3ก แสดงผลการวัดการกระจายของความเร็วในแนวแกน ( $u$ ) ตามแนวรัศมี พบว่าในแต่ละกรณีมีขนาดของความเร็วแตกต่างกันเล็กน้อย โดยมีความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged) ประมาณ  $7.9 \pm 0.3$  เมตรต่อวินาที หรือมีความแตกต่างกันไม่เกิน  $\pm 4\%$  ระหว่างกรณี โดยมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดความเร็ว (Uncertainty) สำหรับกรณี Sr0 โดยใช้ Pitot probe ประมาณ  $\pm 0.1$  เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็น  $\pm 1.2\%$  ของความเร็วเฉลี่ย (แสดงในภาคผนวก ก.) นอกจากนี้ยังได้แสดงเป็นค่าที่สเกลด้วยค่าสูงสุดในการวัดแต่ละแนว ( $u/u_{\max}$ ) ดังรูปที่ 3.3ข พบว่า

ในทุกกรณี รูปร่างของการกระจายตัวมีลักษณะเดียวกันคือเป็นแบบ Top hat และค่อนข้างสมมาตรตามแนวรัศมี โดยที่บริเวณกึ่งกลางมีค่าต่ำกว่าที่ขอบเล็กน้อย

รูปที่ 3.4ก แสดงผลการวัดการกระจายของความเร็วในแนวสัมผัส ( $w$ ) ตามแนวรัศมีในกรณี Sr17, Sr52 และ Sr82 เปรียบเทียบกับการกระจายแบบเชิงเส้นที่มีความเร็วที่ขอบเจ็ดเท่ากับความเร็วตามแนวสัมผัสของท่อ และยังคงเป็นค่าที่สเกลด้วยความเร็วในแนวสัมผัสของท่อ ( $w/w_p$ ) ดังรูปที่ 3.4ข พบว่าในทุกกรณี รูปร่างของการกระจายตัวมีลักษณะใกล้เคียงกับการกระจายแบบเชิงเส้นนั่นคือมีการไหลเป็นแบบ Solid-body rotation โดยค่าเฉลี่ยจากการใช้ Curve fitting ของข้อมูลที่วัดได้มีความเร็วเชิงมุมต่ำกว่าค่าที่ได้จากการกระจายแบบสมบูรณ์ประมาณ 5%, 2% และ 1% สำหรับกรณี Sr17, Sr52 และ Sr82 ตามลำดับ นั่นคือที่ความเร็วรอบท่อสูงจะมีการกระจายใกล้เคียงกับแบบเชิงเส้นมากขึ้น โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบของเจ็ทอากาศที่ถูกบังคับให้หมุนควงอยู่ใน Honeycomb ตามความสัมพันธ์

$$n = \frac{L}{\pi d} Sr \quad (3.1)$$

โดยที่ $n$	คือจำนวนรอบที่เจ็ทอากาศถูกบังคับให้หมุนควงอยู่ใน Honeycomb
$Sr$	คือค่า Swirl ratio
$L$	คือความยาวของ Honeycomb
$d$	คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท

โดยจำนวนรอบที่เจ็ทอากาศหมุนควงอยู่ใน Honeycomb นั้นเท่ากับ 0.9, 2.6 และ 4.2 รอบสำหรับกรณี Sr17, Sr52 และ Sr82 ตามลำดับ นั่นคือการเพิ่มจำนวนรอบที่อากาศหมุนควงอยู่ใน Honeycomb จะช่วยให้ความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ท ( $w$ ) มีการกระจายใกล้เคียงแบบเชิงเส้นมากขึ้นหรือช่วยให้เจ็ทอากาศมีการไหลแบบ Solid-body rotation มากขึ้นนั่นเอง

รูปที่ 3.5 แสดงผลการวัดการกระจายของอุณหภูมิตามแนวรัศมี โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ ( $C_T$ ) ซึ่งนิยามเป็น

$$C_T = \frac{T - T_a}{T_{max} - T_a} \quad (3.2)$$

โดยที่ $T$	คืออุณหภูมิที่ทำการวัดตามแนวรัศมีของเจ็ท
$T_{max}$	คืออุณหภูมิสูงสุดตามแนวรัศมีของเจ็ท
$T_a$	คืออุณหภูมิบรรยากาศขณะทำการวัด

พบว่าในแต่ละกรณีมีค่า  $C_T$  ที่ตำแหน่งเดียวกันแตกต่างกันเล็กน้อย โดยมีความแตกต่างกันไม่เกิน  $\pm 0.02$  สำหรับค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของ  $C_T$  ข้างต้นมีค่าประมาณ 0.05 (แสดงในภาคผนวก ค.) และเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟกระจายของความเร็วในแนวแกนดังรูปที่ 3.3 พบว่าบริเวณที่เป็นชั้นขอบเขตของอุณหภูมินั้นมีความหนามากกว่าชั้นขอบเขตของความเร็วในแนวแกน ซึ่งแสดงว่ารูปร่างของการกระจายตัวของอุณหภูมิมิมีการพัฒนาตัวเต็มที่กว่ารูปร่างของความเร็วในแนวแกน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการใส่ลวดตาข่าย (Screen) เพื่อปรับการไหลภายในส่วนของท่อหมุน ส่งผลต่อการพัฒนาการไหลของความเร็ว คือมีผลทำให้ความเร็วสม่ำเสมอมากขึ้นแต่ไม่ส่งผลต่อการพัฒนาตัวอุณหภูมิ

### 3.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะหน้าตัด (Local characteristics)

ในการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะหน้าตัด (Local characteristics) ซึ่งแสดงโดย การกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัดนั้นจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (Global coefficient of temperature;  $C_{TG}$ ) ซึ่งนิยามเป็น

$$C_{TG} = \frac{T - T_{cf}}{T_j - T_{cf}} \quad (3.3)$$

โดย	$T$	คืออุณหภูมิที่ทำการวัด
	$T_j$	คืออุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ที่ปากเจ็ต
	$T_{cf}$	คืออุณหภูมิของกระแสลมขวาง

โดยค่า  $C_{TG}$  ดังกล่าวจะแสดงระดับของอุณหภูมิเกิน (Excess temperature) ที่ตำแหน่งใดๆเทียบกับระดับของอุณหภูมิเกินที่ปากเจ็ต ซึ่งเป็นพารามิเตอร์รวม (Global parameter) ของการไหล นอกจากนี้ค่า  $C_{TG}$  ยังแสดงถึงคุณลักษณะการผสมที่ตำแหน่งหน้าตัดใดๆ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากแบบจำลองดังนี้

พิจารณาปริมาตรควบคุม (Control volume) ดังรูปที่ 3.6 จากกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์พลังงานในรูปอินทิกรัล แสดงดังสมการ

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \oint_{CS} (\rho \bar{u} \cdot d\bar{A}) \quad (3.4)$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \left( e + \frac{u^2}{2} + gz \right) (\rho dV) + \oint_{CS} \left( h + \frac{u^2}{2} + gz \right) (\rho \bar{u} \cdot d\bar{A}) \quad (3.5)$$

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 3.4 และ 3.5 จะลดรูปเป็น

$$0 = \dot{m}_j + \dot{m}_{cf} - \dot{m} \quad (3.6)$$

$$0 = \dot{m}_j h_j + \dot{m}_{cf} h_{cf} - \dot{m} h \quad (3.7)$$

โดยการแทนสมการ 3.6 ในสมการ 3.7 จะได้

$$\begin{aligned} 0 &= \dot{m}_j h_j + \dot{m}_{cf} h_{cf} - (\dot{m}_j + \dot{m}_{cf}) h \\ \dot{m}_j (h_j - h) &= \dot{m}_{cf} (h - h_{cf}) \\ \dot{m}_j (h_j - h_{cf}) - \dot{m}_j (h - h_{cf}) &= \dot{m}_{cf} (h - h_{cf}) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \dot{m}_j (T_j - T_{cf}) - \dot{m}_j (T - T_{cf}) &= \dot{m}_{cf} (T - T_{cf}) \\ \frac{T - T_{cf}}{T_j - T_{cf}} &= \frac{\dot{m}_j}{\dot{m}_j + \dot{m}_{cf}} = C_{TG} \end{aligned} \quad (3.8)$$

สมการ 3.8 แสดงว่าค่า  $C_{TG}$  เฉลี่ยบนพื้นที่หน้าตัดบ่งบอกถึงอัตราการไหลโดยมวลของเจ็ตเริ่มต้นเทียบกับอัตราการไหลโดยมวลของเจ็ตผสมที่หน้าตัดใดๆ หรืออีกนัยหนึ่งแสดงถึงอัตราการจัดมวลของกระแสลมขวางเข้าไปในเจ็ตผสม (Entrainment) ที่หน้าตัดใดๆ นั่นคือเมื่อมีการดึงมวลของกระแสลมขวางเข้าไปในตัวเจ็ตผสมมากขึ้น จะส่งผลทำให้  $C_{TG}$  มีค่าลดลง

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการกระจายของอุณหภูมิบนหน้าตัดโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (Local coefficient of temperature;  $C_{TL}$ ) ซึ่งนิยามเป็น



$$C_{TL} = \frac{T - T_{cf}}{T_m - T_{cf}} \quad (3.9)$$

โดย	$T$	คืออุณหภูมิที่ทำการวัด
	$T_m$	คืออุณหภูมิสูงสุดในแต่ละหน้าตัด
	$T_{cf}$	คืออุณหภูมิของกระแสลมขวาง

โดยค่า  $C_{TL}$  จะแสดงระดับของอุณหภูมิเกิน (Excess temperature) ที่ตำแหน่งใดๆเทียบกับระดับของอุณหภูมิเกินสูงสุดที่หน้าตัดนั้น  $C_{TL}$  จึงเป็นพารามิเตอร์เฉพาะที่หน้าตัดใดๆ (Local parameter) ของการไหล และสามารถนำมาเปรียบเทียบรูปร่างของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่หน้าตัดต่างๆได้

เนื่องจากการทำให้เจ็ทอากาศเกิดการหมุนควงในกระแสลมขวางโดยใช้ท่อหมุนนั้น ทำให้ลักษณะการไหลของเจ็ทคล้ายกับการหมุนควงของทรงกระบอกในกระแสลมขวาง ซึ่งในกรณีหลังนี้จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Magnus effect” ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยด้านที่ทิศทางของความเร็วในแนวสัมผัสของการหมุนมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางของกระแสลมขวาง จะทำให้กระแสลมขวางมีความเร็วมากขึ้น ส่งผลให้มีความดันลดลงจนเกิดความดันต่ำด้าน B (ด้าน Suction) ในขณะที่ด้านที่ทิศทางของความเร็วมุมสัมผัสของการหมุนมีทิศทางตรงข้ามกับความเร็วของกระแสลมขวาง จะทำให้กระแสลมขวางมีความเร็วลดลง ส่งผลให้มีความดันเพิ่มขึ้นจนเกิดความดันสูงด้าน A (ด้าน Pressure) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะยึดศัพท์ของปรากฏการณ์ “Magnus effect” โดยจะเรียกด้านที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสของการหมุนมีทิศทางเดียวกันกับความเร็วของกระแสลมขวางว่า “ด้าน Suction” และด้านที่ความเร็วตามแนวสัมผัสของการหมุนมีทิศทางตรงข้ามกับความเร็วของกระแสลมขวางว่า “ด้าน Pressure”

### 3.2.1 การพัฒนาตัวของเจ็ท

จากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการพัฒนาตัวของเจ็ทบริเวณใกล้ปากเจ็ท (Near field) จะมีความแตกต่างจากการพัฒนาตัวบริเวณไกลปากเจ็ท (Far field) โดย Smith and Mungal (1998) พบจุดแบ่งระหว่าง Near field และ Far field ดังกล่าวที่  $s/r^2d = 0.3$  ( $s$  คือระยะทางตามแนวแกนเจ็ท) ในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองในช่วง  $x/rd = 0.25-2$  ( $s/r^2d \approx 0.2-0.67$ ) ซึ่งอยู่ในช่วงต่อระหว่าง Near field และ Far field โดยแสดงเส้นแบ่งระหว่าง Near field และ Far field เป็นเส้นประดังรูปที่ 3.8 ซึ่งแสดงเส้นทางของอุณหภูมิสูงสุดบนระนาบสมมาตร ( $y_T$ ) และเส้นทางของจุดศูนย์กลางอุณหภูมิ ( $\bar{y}_T$ ) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.1 ต่อไป

ในการศึกษาการพัฒนาตัวของเจ็ดนั้นสามารถพิจารณาได้จาก Contour ด้าน End view ของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม ( $C_{TG}$ ) ดังรูปที่ 3.9 ถึง 3.12 สำหรับกรณี Sr0, Sr17, Sr52 และ Sr82 ตามลำดับ ที่ตำแหน่งตามแนว Downstream ต่างๆคือที่  $x/rd$  ประมาณ 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5 และ 2 โดยกราฟมีอัตราส่วนของแกน  $y$  และ  $z$  (Aspect ratio) เท่ากับ 1 ดังนั้นรูปร่างของ Contour จึงแสดงรูปร่างจริงของเจ็ด โดยที่  $y/rd = 0$  เป็นตำแหน่งของพื้น Test section และ Diagram ทางขวาของรูปแรกในแต่ละกรณีแสดงทิศทางการหมุนของท่อเจ็ด (มองจาก Top view) ซึ่งมีทิศทางการหมุนไปในทาง  $-y$  สำหรับค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{TG}$  มีค่าประมาณ 0.05 (แสดงในภาคผนวก ค) ซึ่งใช้แสดงเป็นระดับของ Contour ของ  $C_{TG}$  โดยกำหนดขอบของบริเวณที่ศึกษาไว้ที่  $C_{TG} = 0.05$

รูปที่ 3.9 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ด จาก Contour ของ  $C_{TG}$  สำหรับกรณี Sr0 ซึ่งไม่มีผลของการหมุนควง พบว่า Contour ของหน้าตัดตั้งแต่  $x/rd = 0.25$  ถึง 2 มีรูปร่างเป็นรูปไต (Kidney-shape) ซึ่งเป็นลักษณะที่พบโดยทั่วไปสำหรับการไหลแบบเจ็ดในกระแสมขวาง เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะตามแนว Downstream ต่างๆกันพบว่าในช่วงแรกของการพัฒนาตัว ( $x/rd = 0.25$  และ 0.5) รูปร่างของขอบเจ็ดมีความกว้างในแนว Transverse ( $y$ ) มากกว่าในแนว Spanwise ( $z$ ) ทั้งนี้เนื่องจากการวัดการกระจายของอุณหภูมินี้เป็นการวัดบนระนาบ  $y-z$  และบริเวณดังกล่าวยังอยู่ในช่วงที่เจ็ดมีการโค้งตัวดังแสดงในผลการศึกษาเส้นทางดังรูปที่ 3.8 จึงมีส่วนทำให้รูปร่างของขอบเจ็ดมีลักษณะดังกล่าว ในช่วงต่อมา ( $x/rd = 0.75$  และ 1) รูปร่างของขอบเจ็ดมีลักษณะค่อนข้างกลม และในช่วงสุดท้ายที่ทำการทดลอง ( $x/rd = 1.5$  และ 2) ซึ่งมีทิศทางการเจ็ดใกล้เคียงกับทิศทางการไหลของกระแสมขวางนั้น รูปร่างของขอบเจ็ดมีความกว้างในแนว Spanwise ( $z$ ) มากกว่าในแนว Transverse ( $y$ ) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Pratte and Baines (1967) ที่พบว่าในบริเวณที่การไหลมีการพัฒนาเต็มที่ รูปร่างของเจ็ดจะมีความกว้างตามแนว Spanwise ( $z$ ) มากกว่าในแนว Transverse ( $y$ )

นอกจากนี้หน้าตัดบริเวณ Upstream จะมี Gradient ของ  $C_{TG}$  ที่ตำแหน่งต่างๆในหน้าตัดสูงกว่าที่หน้าตัดบริเวณ Downstream โดย Gradient มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream จนที่  $x/rd = 2$  นั้นมีการกระจายของ  $C_{TG}$  ค่อนข้างสม่ำเสมอ และเมื่อพิจารณาอย่างสังเขปถึงค่า  $C_{TG}$  เฉลี่ยทั้งหน้าตัดจะพบว่าค่า  $C_{TG}$  เฉลี่ยมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream ซึ่งแสดงว่าขณะที่เจ็ดมีการพัฒนาตัวตามแนว Downstream นั้น กระแสมขวางได้ถูกดึงเข้ามาผสม (Entrain) ในตัวเจ็ดเพิ่มขึ้น ตามการวิเคราะห์ดังแสดงในสมการ 3.8 นอกจากนี้ยังเป็นที่น่าสนใจว่าที่  $x/rd = 0.25$  ระดับของ  $C_{TG}$  สูงสุดบนหน้าตัดลดลงจากค่าประมาณหนึ่งซึ่งปากเจ็ดจนมีค่าเหลือประมาณ 40-45% ของค่าที่ปากเจ็ด ดังนี้เมื่อพิจารณาความหมายของ  $C_{TG}$  ตามสมการ 3.8 ( $C_{TG}$  เฉลี่ยทั้งหน้าตัด) จะพบว่าที่ระยะตามแนว Downstream ของเจ็ดเพียง  $0.25rd$  เจ็ดก็สามารถดึงอากาศภายนอกเข้ามาผสมได้มากกว่า 100 % ของมวลเริ่มต้นของเจ็ด และ

เมื่อพิจารณาที่  $x/rd = 2$  พบว่าระดับของ  $C_{TG}$  เฉลี่ยมีค่าเหลือเพียงไม่ถึง 10-15 % ของค่าที่ปากเจ็ด

รูปที่ 3.10 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ด จาก Contour ของ  $C_{TG}$  สำหรับกรณี Sr17 ซึ่งมีระดับการหมุนควงต่ำพบว่า รูปร่างของ Contour และ Gradient ของอุณหภูมิส่วนเกิน (Excess temperature) ใกล้เคียงกับกรณีเจ็ดที่ไม่หมุนควง (Sr0) โดยมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีข้อสังเกตคือที่  $x/rd = 0.5$  และ  $0.75$  ระดับอุณหภูมิสูงสุดบนหน้าตัดมีค่าลดลงจากกรณี Sr0 เล็กน้อย กล่าวคือมีค่าลดลงจาก 30-35% ในกรณี Sr0 จนเหลือ 25-30% ในกรณี Sr17 และที่  $x/rd = 0.75$  มีค่าลดลงจาก 25-30% ในกรณี Sr0 จนเหลือ 20-25% ในกรณี Sr17 อย่างไรก็ตาม ระดับอุณหภูมิสูงสุดบนหน้าตัดที่หายไปกรณี Sr17 นั้นยังครอบคลุมพื้นที่น้อย

รูปที่ 3.11 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ด จาก Contour ของ  $C_{TG}$  สำหรับกรณี Sr52 พบว่ารูปร่างของ Contour และ Gradient ของอุณหภูมิส่วนเกิน มีความแตกต่างจากกรณี Sr0 และ Sr17 อย่างชัดเจน โดยรูปร่าง Contour ของระดับอุณหภูมิสูงจะเอียงไปทางด้าน Suction (ด้านขวา) โดยเฉพาะหน้าตัดที่เป็นช่วงแรกของการพัฒนาตัว (Near field) ในขณะที่ Contour ของระดับอุณหภูมิต่ำยังคงค่อนข้างสมมาตร เป็นผลทำให้ Gradient ของอุณหภูมิส่วนเกินทางด้าน Suction มีค่าสูงกว่าทางด้าน Pressure อย่างชัดเจน ซึ่งแสดงว่าด้าน Suction และด้าน Pressure มีปริมาณการดึงกระแสลมขวาง (Entrain) เข้ามาผสมในอัตราที่แตกต่างกัน โดยความแตกต่างของ Gradient ดังกล่าวจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream

รูปที่ 3.12 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ด จาก Contour ของ  $C_{TG}$  สำหรับกรณี Sr82 พบว่ารูปร่างของ Contour และ Gradient ของอุณหภูมิส่วนเกิน มีความคล้ายคลึงกับกรณี Sr52 แต่รูปร่าง Contour ของระดับอุณหภูมิสูงจะเอียงไปทางด้าน Suction มากขึ้น ในขณะที่ Contour ของระดับอุณหภูมิต่ำยังคงค่อนข้างสมมาตรเช่นเดิม เป็นผลทำให้ Gradient ของอุณหภูมิส่วนเกินทางด้าน Suction มีค่าสูงกว่าทางด้าน Pressure มากยิ่งขึ้น โดยมีความแตกต่างมากกว่ากรณี Sr52 นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตคือ ที่  $x/rd = 0.25$  ค่า  $C_{TG}$  สูงสุดบนหน้าตัดจะอยู่ในช่วง 45-50% ของค่าที่ปากเจ็ด ซึ่งสูงกว่ากรณี Sr0, Sr17 และ Sr52 บริเวณดังกล่าวได้แสดงเป็นแถบ Contour สีดำ ดังรูปที่ 3.12ก

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการพัฒนาตัวของเจ็ดจาก ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ ( $C_{TL}$ ) ดังรูปที่ 3.13 ถึง 3.16 ซึ่งแสดงในลักษณะเดียวกับค่า  $C_{TG}$  ข้างต้น และมีความไม่แน่นอนของ  $C_{TL}$  ประมาณ 0.2 (แสดงในภาคผนวก ก) ดังใช้แสดงเป็นระดับของ Contour ของ  $C_{TL}$  โดยกำหนดขอบของบริเวณที่ศึกษาไว้ที่  $C_{TL} = 0.2$  จะพบผลการทดลองดังนี้

รูปที่ 3.13 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ด จาก Contour ของ  $C_{TL}$  สำหรับกรณี Sr0 พบว่า Contour ของหน้าตัดตั้งแต่  $x/rd = 0.25$  ถึง 2 มีรูปร่างเป็นรูปไต (Kidney-shape) เช่นเดียวกับผลการวัดที่แสดงโดย  $C_{TG}$  โดย Contour ของระดับที่มีอุณหภูมิสูงมีความไม่สมมาตรและเอียงไป

ทางด้านซ้ายเล็กน้อย จนถึงที่  $x/rd = 2$  ในขณะที่ Contour ของระดับที่มีอุณหภูมิต่ำค่อนข้างสมมาตร Smith and Mungal (1998) ได้ศึกษาปริมาณ Scalar concentration (ในช่วง  $x/rd = 1$  ถึง 4) และพบลักษณะของความไม่สมมาตรเช่นเดียวกัน โดยให้ความเห็นว่าอาจเกิดจากความไม่สมมาตรแบบในการศึกษาโดยวิธีทำการทดลองหรืออาจเกิดจากธรรมชาติของการไหลของเจ็ตเอง อย่างไรก็ตาม Smith and Mungal (1998) พบว่าความไม่สมมาตรจะเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนความเร็วและระยะทางตามแนว Downstream

รูปที่ 3.14 ถึง 3.16 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ต จาก Contour ของ  $C_{TL}$  ในกรณีที่เจ็ตมีการหมุนควงคือกรณี Sr17, Sr52 และ Sr82 ตามลำดับ พบว่ารูปร่างของ Contour ของ  $C_{TL}$  มีลักษณะคล้ายกับกรณีของ  $C_{TG}$  กล่าวคือในกรณี Sr17 ดังรูปที่ 3.14 รูปร่างของ Contour ของระดับที่มีอุณหภูมิสูงมีความไม่สมมาตรและเอียงไปทางด้าน Suction เล็กน้อย เมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนควงไปจนถึงกรณี Sr52 ดังรูปที่ 3.15 พบว่ารูปร่างของ Contour ของระดับที่มีอุณหภูมิสูงเอียงไปทางด้าน Suction อย่างชัดเจนและส่งผลจนถึงตำแหน่งสุดท้ายของการวัดที่  $x/rd = 2$  และเมื่อเพิ่มความเร็วของการหมุนควงขึ้นไปอีกจนถึงกรณี Sr82 ดังรูปที่ 3.16 พบว่ารูปร่างของ Contour ของระดับที่มีอุณหภูมิสูงเอียงไปทางด้าน Suction มากขึ้นในขณะที่ในทุกกรณีนั้น Contour ของระดับที่มีอุณหภูมิต่ำยังคงค่อนข้างสมมาตร สังเกตว่าความไม่สมมาตรของ Contour ของระดับที่มีอุณหภูมิสูงของกรณี Sr52 และ Sr82 นั้นยังคงอยู่แม้ว่าเจ็ตจะมีการพัฒนาตัวมาถึงตำแหน่งที่  $x/rd = 2$  แล้วก็ตาม ซึ่งความไม่สมมาตรนี้จะแสดงให้เห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาจากผลของ  $C_{TL}$  แต่จะไม่ปรากฏชัดเจนถ้าพิจารณาจากผลของ  $C_{TG}$

จากผลการศึกษาการกระจายของอุณหภูมิบนหน้าตัดตามแนว Downstream ซึ่งแสดงโดย  $C_{TG}$  และ  $C_{TL}$  นั้น สามารถสรุปได้ว่า ในกรณีเจ็ตที่หมุนควง การกระจายของอุณหภูมิจะมีความไม่สมมาตรเกิดขึ้น โดยจะพบบริเวณที่มีระดับอุณหภูมิและ Gradient ของอุณหภูมิสูงทางด้าน Suction ในขณะที่พบบริเวณที่มีระดับอุณหภูมิและ Gradient ของอุณหภูมิต่ำทางด้าน Pressure

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการพัฒนาตัวของเจ็ตโดยพิจารณาจากเส้น Contour ด้าน End view ที่ระดับอุณหภูมิ  $C_{TL} = 0.2, 0.5$  และ  $0.8$  ดังรูปที่ 3.17-3.19 ตามลำดับโดยเปรียบเทียบที่หน้าตัดต่างๆกัน ในแต่ละกรณี โดยทางขวาของรูปแสดงด้าน Suction และทางซ้ายของรูปแสดงด้าน Pressure

รูปที่ 3.17 แสดงเส้น Contour ที่ระดับอุณหภูมิสูง ( $C_{TL} = 0.8$ ) โดยกรณี Sr0 (กรณีเจ็ตที่ไม่หมุนควง) แสดงดังรูปที่ 3.17ก พบว่าเส้น Contour มีรูปร่างค่อนข้างสมมาตร และเมื่อพิจารณาตามแนว Downstream พบว่าเจ็ตมีการขยายตัวและยกตัวสูงจากพื้นมากขึ้น โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเส้น Contour จากเริ่มต้นจนคล้ายรูปไต (Kidney-shape) มากขึ้นในช่วง



ท้าย เมื่อมีผลของความเร็วในการหมุนควงต่ำในกรณี Sr17 ดังรูปที่ 3.17ข พบว่าเส้น Contour มีรูปร่างและการพัฒนาตัวคล้ายกับกรณี Sr0 แต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนควงไปอีกจนถึงกรณี Sr52 ดังรูปที่ 3.17ค พบว่าเส้น Contour มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนจากทั้ง 2 กรณีข้างต้น โดยมีรูปร่างเอียงไปทางด้าน Suction และมีข้อสังเกตคือที่  $x/rd = 2$  จะพบบริเวณของเส้น  $C_{TL} = 0.8$  เฉพาะด้าน Suction เท่านั้น และเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนควงขึ้นไปอีกจนถึงกรณี Sr82 ดังรูปที่ 3.17ง จะพบบริเวณของเส้น  $C_{TL} = 0.8$  เฉพาะด้าน Suction เท่านั้นตลอดระยะตามแนว Downstream

จากผลการศึกษาเส้น Contour ที่ระดับอุณหภูมิสูง ( $C_{TL} = 0.8$ ) ข้างต้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อความเร็วในการหมุนควงเพิ่มมากขึ้น บริเวณแกน (Core) อุณหภูมิสูงของเจ็ทจะเอียงมาทางด้าน Suction มากขึ้น

รูปที่ 3.18 แสดงเส้น Contour ที่ระดับอุณหภูมิ  $C_{TL} = 0.5$  โดยกรณี Sr0 (กรณีเจ็ทที่ไม่หมุนควง) แสดงดังรูปที่ 3.18ก พบว่าเส้น Contour มีรูปร่างค่อนข้างสมมาตร และเมื่อพิจารณาตามแนว Downstream พบว่าเจ็ทมีการขยายตัวและยกตัวสูงจากพื้นมากขึ้น โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเส้น Contour จากเริ่มต้นจนคล้ายรูปไต (Kidney-shape) เช่นเดียวกับที่ระดับอุณหภูมิ  $C_{TL} = 0.8$  เมื่อมีผลของความเร็วในการหมุนควงต่ำในกรณี Sr17 ดังรูปที่ 3.18ข พบว่าเส้น Contour มีรูปร่างและการพัฒนาตัวคล้ายกับกรณี Sr0 แต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนควงไปจนถึงกรณี Sr52 ดังรูปที่ 3.18ค พบว่าเส้น Contour เอียงไปทางด้าน Suction เล็กน้อยในช่วงต้นของการพัฒนาตัว ( $x/rd = 0.25-0.5$ ) อย่างไรก็ตามเส้น Contour ดังกล่าวจะกลับมามีความสมมาตรอีกครั้งในช่วงท้ายของการพัฒนาตัว (ตั้งแต่  $x/rd = 0.75$ ) และเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนควงขึ้นไปอีกจนถึงกรณี Sr82 ดังรูปที่ 3.18ง พบว่าเส้น Contour เอียงไปทางด้าน Suction อย่างชัดเจนโดยเฉพาะช่วงต้นของการพัฒนาตัว ( $x/rd = 0.25-0.5$ ) และผลดังกล่าวยังคงอยู่ถึง  $x/rd = 2$

รูปที่ 3.19 แสดงเส้น Contour ที่ระดับอุณหภูมิ  $C_{TL} = 0.2$  พบว่าเส้น Contour ในทุกกรณีมีรูปร่างและการพัฒนาตัวตามแนว Downstream ใกล้เคียงกัน กล่าวคือมีรูปร่างค่อนข้างสมมาตร และเจ็ทมีการขยายตัวและยกตัวสูงจากพื้นมากขึ้นตามแนว Downstream โดยมีข้อสังเกตว่า ในกรณี Sr82 ที่  $x/rd = 2$  มีการเลื่อนตำแหน่งของเส้น  $C_{TL} = 0.2$  ไปทางด้าน Suction เล็กน้อย

จากผลการศึกษาเส้น Contour ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆข้างต้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อความเร็วในการหมุนควงเพิ่มมากขึ้น เส้น Contour ที่ระดับอุณหภูมิสูงที่เป็นแกนของอุณหภูมิจะเอียงมาทางด้าน Suction มากขึ้น ในขณะที่เส้น Contour ที่ระดับอุณหภูมิต่ำที่เป็นขอบเจ็ทจะยังคงมีลักษณะสมมาตร



### 3.2.2 การเปรียบเทียบผลของการหมุนควงที่หน้าตัดต่างๆ

ในการเปรียบเทียบผลของการหมุนควงที่หน้าตัดต่างๆนั้นแสดงโดย Contour ด้าน End view ของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม ( $C_{TG}$ ) ดังรูปที่ 3.20 เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ตำแหน่งตามแนว Downstream เดียวกัน และ Diagram ทางขวาในแต่ละกรณีแสดงทิศทางการหมุนของท่อเจ็ต (มองจาก Top view) ซึ่งมีทิศทางการหมุน -y

รูปที่ 3.20 แสดงการเปรียบเทียบผลของความเร็วในการหมุนควง โดยรูปที่ 3.20ก แสดงช่วงแรกของการพัฒนาตัวซึ่งอยู่ในช่วง Near field ( $x/rd = 0.25$  และ  $0.5$ ) พบว่าที่  $x/rd = 0.25$  เมื่อเพิ่มความเร็วของการหมุนควง Contour ของระดับที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความไม่สมมาตรเพิ่มขึ้น โดยเอียงไปทางด้าน Suction ในขณะที่ Contour ของระดับที่มีอุณหภูมิต่ำ ( $C_{TG} = 0.05$ ) จะยังคงมีความสมมาตร นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อความเร็วในการหมุนควงมากขึ้นจะทำให้ Gradient ของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆบนหน้าตัดมีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น โดยบริเวณที่มี Gradient ของอุณหภูมิสูงจะอยู่ทางด้าน Suction ในขณะที่บริเวณที่มี Gradient ของอุณหภูมิต่ำจะอยู่ทางด้าน Pressure นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตคือในกรณี Sr82 ระดับของค่า  $C_{TG}$  สูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 45-50% ซึ่งสูงกว่ากรณี Sr0, Sr17 และ Sr52 ที่มีค่าอยู่ในช่วง 40-45% โดยแสดงเป็นแถบ Contour สีดำ และที่ระยะต่อมาก็คือที่  $x/rd = 0.5$  พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนควง Contour ของอุณหภูมิมิลักษณะเดียวกันกับที่  $x/rd = 0.25$  กล่าวคือระดับที่มีอุณหภูมิสูงและบริเวณที่มี Gradient สูงเอียงมาทางด้าน Suction มากขึ้น นอกจากนี้ในกรณี Sr82 ระดับของค่า  $C_{TG}$  สูงสุดจะยังคงมีค่าสูงกว่ากรณีอื่นๆ กล่าวคือในกรณี Sr82 ค่า  $C_{TG}$  สูงสุดอยู่ในช่วง 30-40% ในขณะที่กรณีอื่น ๆ มีค่าอยู่ในช่วง 25-35%

รูปที่ 3.20ข และ 3.20ค แสดงการเปรียบเทียบผลของความเร็วในการหมุนควง ในช่วง Far field ( $x/rd = 0.75-2$ ) พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนควง Contour ของอุณหภูมิมิจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับในช่วง Near field ( $x/rd = 0.25$  และ  $0.5$ ) กล่าวคือระดับที่มีอุณหภูมิสูงและบริเวณที่มี Gradient สูงจะเอียงมาทางด้าน Suction มากขึ้นตามความเร็วในการหมุนควง นอกจากนี้ในกรณี Sr82 ที่  $x/rd = 2$  จะยังคงพบผลของความไม่สมมาตรดังกล่าว ซึ่งแสดงว่าความเร็วในการหมุนควงที่ระดับ Swirl ratio ( $Sr$ ) = 0.82 ยังคงส่งผลต่อ Contour อยู่ถึงบริเวณ Far field ( $x/rd = 2$ ) และระดับของค่า  $C_{TG}$  สูงสุดในกรณี Sr82 ยังคงมีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงกว่ากรณีอื่นๆเช่นเดียวกับที่บริเวณ Near field ( $x/rd = 0.25$  และ  $0.5$ ) โดยในกรณี Sr82 (ตัวเลขในวงเล็บแสดงค่าในกรณีอื่นๆ) ที่  $x/rd = 0.75, 1, 1.5$  และ  $2$  มีค่า  $C_{TG}$  สูงสุดอยู่ในช่วง 25-30% (20-30%), 20-30% (15-25%), 20-25% (15-20%) และ 15-20% (10-15%) ของค่าที่ปากเจ็ตตามลำดับ

นอกจากนี้ยังได้แสดงการเปรียบเทียบผลของความเร็วในการหมุนควงจาก ค่าสัมประสิทธิ์ อุณหภูมิเฉพาะ ( $C_{TL}$ ) ดังรูปที่ 3.21 โดยแสดงในลักษณะเดียวกับค่า  $C_{TG}$  ข้างต้น พบว่าตั้งแต่ช่วง Near field ( $x/rd = 0.25$  และ  $0.5$ ) จนถึง Far field ( $x/rd = 0.75-2$ ) นั้นรูปร่างของ Contour มีลักษณะเดียวกันกับที่แสดงโดย  $C_{TG}$  กล่าวคือ เมื่อความเร็วในการหมุนควงเพิ่มขึ้น ระดับที่มี อุณหภูมิสูงและบริเวณที่มี Gradient สูงจะเอียงมาทางด้าน Suction มากขึ้น ในขณะที่ Contour ของระดับที่มีอุณหภูมิต่ำ ( $C_{TL} = 0.05$ ) ยังคงมีความสมมาตร

เมื่อเปรียบเทียบผลของความเร็วหมุนควงโดยพิจารณาจากเส้นของ Contour ที่ระดับ อุณหภูมิ  $C_{TL} = 0.8, 0.5$  และ  $0.2$  ดังรูปที่ 3.22 ถึง 3.24 ตามลำดับ ที่หน้าตัด  $x/rd$  ต่างๆกัน พบว่า ความเร็วในการหมุนควงมีผลต่อรูปร่างของระดับอุณหภูมิสูง ( $C_{TL} = 0.8$ ) อย่างชัดเจน โดยเส้น Contour จะเอียงไปทางด้าน Suction มากขึ้นตามระดับของความเร็วหมุนควง และมีผลต่อรูปร่าง ของระดับอุณหภูมิ  $C_{TL} = 0.5$  เฉพาะในช่วงต้นของการพัฒนาตัว ( $x/rd = 0.25$  และ  $0.5$ ) ในขณะที่ ไม่ส่งผลมากนักต่อรูปร่างของระดับอุณหภูมิต่ำ ( $C_{TL} = 0.2$ )

### 3.2.3 ผลของทิศทางการหมุนควง

รูปที่ 3.25 แสดงผลของทิศทางการหมุนควงจาก Contour ด้าน End view ของค่า สัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม ( $C_{TG}$ ) ที่  $x/rd = 0.25$  โดยเปรียบเทียบการหมุนในทิศทาง  $-y$  กับ  $+y$  สำหรับกรณี Sr52 และ Sr82 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัวของอุณหภูมิอย่างชัดเจน พบว่า ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของเจ็ต แต่ Contour ของบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงและ Gradient สูงจะยังคงเอียงไปทางด้าน Suction เสมอ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดในหัวข้อ 3.2.1 และ 3.2.2

จากการศึกษาผลของความเร็วในการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะเฉพาะหน้าตัด (Local characteristic) ซึ่งแสดงจากการพัฒนาตัวของเจ็ตและการกระจายตัวในแต่ละหน้าตัดในหัวข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 ดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่าการหมุนควงและการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการ หมุนควงมีผลต่อการพัฒนาตัวอย่างชัดเจนโดย 1) เกิดความไม่สมมาตรของการกระจายตัวของ อุณหภูมิภายในเจ็ต โดย 2) บริเวณที่มีระดับอุณหภูมิและ Gradient ของอุณหภูมิสูงจะอยู่ทางด้าน Suction ในขณะที่บริเวณที่มีระดับอุณหภูมิและ Gradient ของอุณหภูมิต่ำจะอยู่ทางด้าน Pressure 3) แกนของเจ็ตที่มีอุณหภูมิสูง ( $C_{TL} = 0.8$ ) จะไม่สมมาตรและเอียงไปทางด้าน Suction 4) ความไม่สมมาตรนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของการหมุนควงเพิ่มขึ้น 5) อย่างไรก็ตาม การหมุน ควงจะไม่ส่งผลต่อขนาดและรูปร่างของบริเวณอุณหภูมิต่ำที่เป็นขอบของเจ็ต ( $C_{TG} = 0.5$  และ  $C_{TL} = 0.2$ )

### 3.3 ผลการศึกษาคุณลักษณะโดยรวม (Global characteristic)

#### 3.3.1 เส้นทางของเจ็ตในกระแสมขวาง

ในการศึกษาเส้นทางของเจ็ตในกระแสมขวาง จะพิจารณาจากตำแหน่งของจุดที่มีคุณสมบัติที่ต้องการศึกษา ในที่นี้ได้แก่ ตำแหน่งของจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดบนระนาบสมมาตร [Centerplane Trajectory:  $(y_T, z_T = 0)$ ] แต่เนื่องจากการกระจายของอุณหภูมิในแต่ละหน้าตัดมีความไม่สมมาตร โดยเฉพาะกรณีที่มีการหมุนควง ดังนั้นจึงได้ศึกษาเส้นทางที่แสดงตำแหน่งของจุดศูนย์กลางอุณหภูมิ [Centroid Trajectory:  $(\bar{y}_T, \bar{z}_T)$ ] อีกด้วย ซึ่งจุดนี้นิยามจาก

$$\bar{y}_T = \frac{\int_A y C_{TG} dA}{\int_A C_{TG} dA} \quad (3.9)$$

$$\bar{z}_T = \frac{\int_A z C_{TG} dA}{\int_A C_{TG} dA} \quad (3.10)$$

โดย  $\bar{y}_T$  คือตำแหน่งของจุดศูนย์กลางอุณหภูมิตามแนวแกน  $y$   
 $\bar{z}_T$  คือตำแหน่งของจุดศูนย์กลางอุณหภูมิตามแนวแกน  $z$

รูปที่ 3.26 แสดง Centerplane Trajectory ( $y_T, z_T = 0$ ) และ Centroid Trajectory ( $\bar{y}_T$ ) ในกรณี Sr0 (เจ็ตที่ไม่หมุนควง) เปรียบเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิและความเร็วของ Kamotani and Greber (1972) ซึ่งต่อจากนี้ไปจะอ้างอิงถึงเป็น KG พบว่า Centerplane และ Centroid Trajectory มีลักษณะการกระจายเป็นแบบ Power law ตามความสัมพันธ์  $(y/rd) = A(x/rd)^m$  โดยมีค่าคงที่ A เป็น 1.3 และ m เป็น 0.3 สำหรับ Centerplane Trajectory และ A เป็น 1.12 และ m เป็น 0.29 สำหรับ Centroid Trajectory และเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลของ KG พบว่า Centerplane Trajectory ของอุณหภูมิที่ได้ อยู่สูงกว่าของ KG เล็กน้อย โดยมีความแตกต่างของค่าคงที่ A  $\approx 13\%$  และ m  $\approx 3\%$  และเมื่อคิดผลของความไม่แน่นอนในวัด (Uncertainty) ซึ่งมีค่าประมาณ  $\pm 0.14 rd$  นั้นพบว่าเส้นทางจากการทดลองใกล้เคียงกับ KG

รูปที่ 3.27 แสดงผลของการหมุนควงที่มีต่อ Centerplane Trajectory ( $y_T, z_T = 0$ ) พบว่า Centerplane Trajectory ในกรณีเจ็ตที่หมุนควง (Sr = 0.17- 0.82) มีค่าใกล้เคียงกับเจ็ตที่

ไม่หมุนควง (Sr0) โดยข้อมูลมีลักษณะกระจายและไม่พบแนวโน้มที่ชัดเจน และอยู่ในช่วงของความไม่แน่นอน (Uncertainty) ในขั้นนี้จึงสรุปว่าการหมุนควงไม่มีผลต่อ Centerplane Trajectory ภายในช่วงที่ทำการทดลองคือช่วง Swirl ratio (Sr) = 0.17- 0.82

รูปที่ 3.28ก แสดงผลของการหมุนควงที่มีต่อ Centroid Trajectory บนระนาบ  $x-y$  ( $\bar{y}_T$ ) พบว่า Centroid Trajectory ในกรณีเจ็ตที่ไม่หมุนควง (Sr = 0.17- 0.82) มีค่าใกล้เคียงกับเจ็ตที่ไม่หมุนควง (Sr0) เช่นเดียวกับ Centerplane Trajectory โดยข้อมูลอยู่ในช่วงของความไม่แน่นอน (Uncertainty) ในการวัด อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ Curve fitting จากความสัมพันธ์แบบ Power law ดังสมการ 1.1 จะได้ค่าคงที่  $A = 1.12, 1.17, 1.20, 1.12$  และค่าคงที่  $m = 0.29, 0.30, 0.29, 0.25$  สำหรับกรณี Sr0, Sr17, Sr52 และ Sr82 ตามลำดับ โดย Niederhaus et al. (1997) พบว่า Centroid Trajectory ที่ระดับการหมุนควง  $Sr = 0.17$  (ในงานวิจัยนี้คือที่  $Sr = 0.52$ ) นั้นอยู่ต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีการหมุนควงประมาณ 5%

รูปที่ 3.28ข แสดงผลของการหมุนควงที่มีต่อ Centroid Trajectory บนระนาบ  $x-z$  ( $\bar{z}_T$ ) ซึ่งบ่งบอกถึงการเบี่ยงเบนของแนวแกนเจ็ตออกจากระนาบสมมาตร ( $z = 0$ ) พบว่า Centroid Trajectory ( $\bar{z}_T$ ) สำหรับเจ็ตที่ไม่หมุนควง (Sr0) มีการเบี่ยงเบนไปทางด้าน  $+z$  เล็กน้อย และเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนควงพบว่าเส้นทางดังกล่าวมีการเบี่ยงเบนไปทางด้าน Suction ( $-z$ ) มากขึ้น โดยเฉพาะกรณี Sr82 ซึ่งมีการเบี่ยงเบนอย่างชัดเจน และยังพบแนวโน้มของการเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นตามแนว Downstream ในทุกกรณีของการหมุนควง

### 3.3.2 การลดลงของอุณหภูมิ

ในการศึกษาการลดลงของอุณหภูมิจะพิจารณาจาก การลดลงของ  $C_{TG}$  ที่มีค่ามากที่สุดบนระนาบสมมาตร (Centerplane decay) และการลดลงของ  $C_{TG}$  ที่มีค่ามากที่สุดในแต่ละหน้าตัด (Maximum decay) ตามแนว Downstream ( $x$ ) และตามแนวแกนเจ็ต ( $s$ ) โดยแนวแกนเจ็ต  $s$  นิยามจาก Centroid Trajectory ( $\bar{y}_T$ ) แต่ในที่นี้ได้ฉายภาพ (Projection) ของระยะทางตามแนวแกนเจ็ตจริงลงบนระนาบสมมาตร ทำให้ค่า  $s$  ที่ได้มีความแตกต่างจากระยะตามแนวแกนเจ็ตจริงเล็กน้อย โดยเฉพาะกรณีที่เจ็ตมีการเบี่ยงเบนออกจากระนาบสมมาตรมากซึ่งได้แก่กรณี Sr82 ดังรูปที่ 3 2 8ข

รูปที่ 3.29ก แสดง Centerplane decay ตามแนว Downstream ( $x$ ) บนสเกลเชิงเส้น พบว่า ในกรณี Sr0 ค่าของ  $C_{TG}$  สูงสุดบนระนาบสมมาตร ลดลงจากค่าประมาณหนึ่งที่ปากเจ็ตจนมีค่าเหลือประมาณ 40-45% ที่  $x/rd = 0.25$  และลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเหลือเพียง 10-15 % ที่  $x/rd = 2$  ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากเส้นแบ่งบริเวณ Near field และ Far field ซึ่งแสดงเป็นเส้นประ นั้นพบว่าอัตราการลดลงของ  $C_{TG}$  ที่มีค่ามากที่สุดบนระนาบสมมาตร ในบริเวณ Near field ( $x/rd$



= 0.25 และ 0.5) มีอัตราการลดลงสูงกว่าในบริเวณ Far field ( $x/rd = 0.75-2$ ) และเมื่อมีการหมุนควงพบว่า ภายในความไม่แน่นอนของการวัด  $C_{TG}$  มีอัตราการลดลงใกล้เคียงกับกรณีที่เกิดที่ไม่หมุนควง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาบนสเกล log-log ดังรูปที่ 3.29 พบว่า ในกรณี Sr0 มีการลดลงของอุณหภูมิเกิน (Excess temperature) ประมาณได้เป็นแบบ Power law โดยมีอัตราการลดลงประมาณ  $-0.51$  (ในช่วง  $x/rd = 0.25-2$ ) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Sherif and Pletcher (1989) ที่มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิส่วนเกิน (Excess temperature) ประมาณ  $-0.50$  ( $x/rd < 5$ ) ดังแสดงในรูปที่ 1.13 และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีการหมุนควง พบว่ากรณี Sr0, Sr17, Sr52 และกรณี Sr82 มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิส่วนเกิน ประมาณ  $-0.51, -0.54, -0.53$  และ  $-0.48$  ตามลำดับ โดยมีข้อสังเกตคือกรณี Sr82 ที่มีความเร็วการหมุนควงสูงสุดนั้นมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิส่วนเกินต่ำกว่ากรณีอื่นเล็กน้อย

รูปที่ 3.30ก แสดง Centerplane decay ตามแนวแกนเจ็ต ( $s$ ) บนสเกลเชิงเส้น โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลของ KG ซึ่งแสดงเป็นเส้นประ ( $s$  ของ KG นิยามจาก Centerplane Trajectory ของความเร็ว) พบว่าทุกกรณีมีค่าอุณหภูมิส่วนเกินตามแนวแกนเจ็ตใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิส่วนเกินสอดคล้องกับของ KG นอกจากนี้เมื่อพิจารณาบนสเกล log-log ดังรูปที่ 3.30ข พบว่าในกรณี Sr0 การลดลงของอุณหภูมิส่วนเกิน (Excess temperature) เป็นแบบ Power law โดยมีอัตราการลดลงประมาณ  $-0.91$  (ในช่วง  $x/rd = 0.25-2$  หรือ  $s/r^2d \approx 0.2 - 0.65$ ) และเมื่อเปรียบเทียบกับ Smith and Mungal (1998) พบว่าอัตราการลดลงของอุณหภูมิเกินในงานวิจัยนี้อยู่ระหว่างอัตราการลดลงของ Scalar concentration ในช่วง Near field กับ Far field ของ Smith and Mungal (1998) ซึ่งมีค่าประมาณ  $-1.3$  และ  $-2/3$  ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีการหมุนควง พบว่ากรณี Sr0, Sr17, Sr52 และ Sr82 มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิเกินประมาณ  $-0.91, -0.95, -0.98$  และ  $-0.88$  ตามลำดับ โดยมีข้อสังเกตคือกรณี Sr82 ที่มีความเร็วการหมุนควงสูงสุดนั้นมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิส่วนเกินต่ำกว่ากรณีอื่น

รูปที่ 3.31ก แสดง Maximum decay ตามแนว Downstream ( $x$ ) บนสเกลเชิงเส้น โดยในกรณี Sr0 พบว่า ค่าของ  $C_{TG}$  สูงสุดระนาบสมมาตร ลดลงจากค่าประมาณหนึ่งที่ปากเจ็ตจนมีค่าเหลือประมาณ 45% ที่  $x/rd = 0.25$  และลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเหลือเพียง 15 % ที่  $x/rd = 2$  และยังพบว่าในบริเวณ Near field ( $x/rd = 0.25$  และ  $0.5$ )  $C_{TG}$  มีอัตราการลดลงสูงกว่าในบริเวณ Far field ( $x/rd = 0.75-2$ ) โดยในกรณีที่มีการหมุนควงพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับกรณี Sr0 เช่นเดียวกับกรณีของ Centerplane decay และเมื่อพิจารณาบนสเกล log-log ดังรูปที่ 3.31ข พบว่า ในกรณี Sr0 การลดลงของ  $C_{TG}$  เป็นแบบ Power law โดยมีอัตราการลดลงประมาณ  $-0.52$  (ในช่วง  $x/rd = 0.25-2$ ) และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีการหมุนควง พบว่ากรณี Sr0, Sr17, Sr52 และ Sr82 มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิส่วนเกินประมาณ  $-0.52, -0.54, -0.50$  และ  $-0.46$



ตามลำดับ โดยมีข้อสังเกตคือกรณี Sr82 ที่มีความเร็วการหมุนควงสูงสุดนั้นมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิส่วนเกินต่ำกว่ากรณีอื่นซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

รูปที่ 3.32ก แสดง Maximum decay ตามแนวแกนเจ็ต ( $s$ ) บนสเกลเชิงเส้น พบว่าในทุกกรณีมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิเกินในบริเวณ Near field ( $x/rd = 0.25$  และ  $0.5$ ) สูงกว่าในบริเวณ Far field ( $x/rd = 0.75-2$ ) และจากรูปที่ 3.32ข แสดงบนสเกล log-log พบว่า ในทุกกรณีการลดลงของ  $C_{TG}$  เป็นแบบ Power law โดยในกรณี Sr0, Sr17, Sr52 และ Sr82 มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิเกินประมาณ  $-0.91$ ,  $-0.95$ ,  $-0.90$  และ  $-0.83$  ตามลำดับ โดยมีข้อสังเกตคือกรณี Sr82 ที่มีความเร็วการหมุนควงสูงสุดนั้นมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิส่วนเกินต่ำกว่ากรณีอื่นซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน โดย Niederhaus et al. (1997) พบว่าการหมุนควงไม่มีผลต่อ Maximum decay ตามแนว  $s$  ในช่วง Swirl number ( $Sn$ ) = 0-0.17

จากการศึกษาผลของความเร็วในการหมุนควงที่มีต่อการลดลงของอุณหภูมิซึ่งแสดงจาก Centerplane decay และ Maximum decay ข้างต้นพบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการหมุนควงในช่วง Swirl ratio ( $Sr$ ) = 0 ถึง 0.52 แทบจะไม่มีผลต่ออัตราการลดลงของอุณหภูมิ ในขณะที่ Swirl ratio ( $Sr$ ) = 0.82 พบว่าการหมุนควงจะมีผลเล็กน้อยต่ออัตราการลดลงของอุณหภูมิ โดยจะทำให้อัตราการลดลงของอุณหภูมิลดลง

### 3.3.3 การขยายตัวของเจ็ต

ในการศึกษาการขยายตัวของเจ็ตจะพิจารณาจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ของเจ็ตในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ซึ่งแสดงโดย รัศมีเทียบเท่าของวงกลมที่มีพื้นที่ที่เทียบเท่ากับพื้นที่ที่ครอบคลุมระดับของ  $C_{TL}$  ที่กำหนด ( $R_{C_{TL}}$ ) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาที่ระดับอุณหภูมิ  $C_{TL} = 0.5$  ซึ่งเป็นระดับที่งานวิจัยส่วนมากใช้ในการนิยามความกว้างของเจ็ต เนื่องจากเป็นระดับที่มี Gradient สูง จึงทำให้สามารถระบุตำแหน่งของขอบเจ็ตได้สะดวก นอกจากนี้ยังได้พิจารณาที่ระดับอุณหภูมิต่ำคือที่  $C_{TL} = 0.2$  เพื่อศึกษาผลของการหมุนควงที่มีต่อการขยายตัวของเจ็ตที่ระดับอุณหภูมิต่ำ ซึ่งแสดงเป็นค่า  $R_{0.5}$  และ  $R_{0.2}$  ตามลำดับตามความสัมพันธ์

$$R_{0.5} = \left( \frac{Area_{C_{TL} \geq 0.5}}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.11)$$

$$R_{0.2} = \left( \frac{Area_{C_{TL} \geq 0.2}}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.12)$$

โดยที่  $Area_{C_{TL} \geq 0.5}$  และ  $Area_{C_{TL} \geq 0.2}$  คือพื้นที่ที่ครอบคลุมระดับของ  $C_{TL}$  ที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 และ 0.2 ตามลำดับ ในการคำนวณพื้นที่นั้นได้ใช้ Image processing toolbox ในโปรแกรม Matlab และอัตราการขยายตัวของเจ็ตหาได้จากการใช้ Curve fitting โดยใช้ความสัมพันธ์แบบ Power law

รูปที่ 3.33 แสดงการขยายตัวของเจ็ตตามแนว Downstream ( $x$ ) โดยรูปที่ 3.33ก แสดงบนสเกลเชิงเส้น และรูปที่ 3.33ข แสดงบนสเกล log-log พบว่า ในทุกกรณีที่ระดับอุณหภูมิ  $C_{TL} = 0.5$  และ 0.2 เจ็ตมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นตามแนว Downstream โดยในกรณี Sr0, Sr17 และ Sr52 มีอัตราการขยายตัวของ  $R_{0.5}$  และ  $R_{0.2}$  ใกล้เคียงกัน สำหรับ  $R_{0.5}$  มีอัตราการขยายตัวประมาณ 0.25, 0.26 และ 0.24 ตามลำดับ และ  $R_{0.2}$  มีอัตราการขยายตัวประมาณ 0.24, 0.23, 0.21 ตามลำดับ ในขณะที่กรณี Sr82 มีอัตราการขยายตัวน้อยกว่ากรณีอื่น กล่าวคือมีค่าประมาณ 0.18 และ 0.16 สำหรับ  $R_{0.5}$  และ  $R_{0.2}$  ตามลำดับ

รูปที่ 3.34 แสดงการขยายตัวของเจ็ตตามแนวแกนเจ็ต ( $s$ ) โดยรูปที่ 3.34ก แสดงบนสเกลเชิงเส้น และรูปที่ 3.34ข แสดงบนสเกล log-log พบว่า ในทุกกรณีที่ระดับอุณหภูมิ  $C_{TL} = 0.5$  และ 0.2 เจ็ตมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นตามแนว Downstream โดยในกรณี Sr0, Sr17 และ Sr52 มีอัตราการขยายตัวของ  $R_{0.5}$  และ  $R_{0.2}$  ใกล้เคียงกัน สำหรับ  $R_{0.5}$  มีอัตราการขยายตัวประมาณ 0.45, 0.46 และ 0.43 ตามลำดับ และ  $R_{0.2}$  มีอัตราการขยายตัวประมาณ 0.42, 0.41, 0.39 ตามลำดับ ในขณะที่กรณี Sr82 มีอัตราการขยายตัวน้อยกว่ากรณีอื่น กล่าวคือมีค่าประมาณ 0.33 และ 0.30 สำหรับ  $R_{0.5}$  และ  $R_{0.2}$  ตามลำดับ

จากการศึกษาผลของความเร็วในการหมุนควงที่มีต่อการขยายตัวของอุณหภูมิซึ่งแสดงจากพื้นที่ที่ครอบคลุมระดับอุณหภูมิ  $C_{TL} = 0.5$  และ 0.2 ข้างต้นพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการหมุนควงในช่วง Swirl ratio (Sr) = 0-0.52 แทบจะไม่มีผลต่ออัตราการขยายตัวของอุณหภูมิ ในขณะที่ Swirl ratio (Sr) = 0.82 การหมุนควงมีผลทำให้อัตราการขยายตัวของเจ็ตลดลงเล็กน้อยมีผลเล็กน้อยต่ออัตราการขยายตัวของอุณหภูมิดังกล่าว

จากผลการศึกษาคุณลักษณะโดยรวม (Global characteristic) ข้างต้นพบว่าความเร็วในการหมุนควงในช่วง Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.52 แทบจะไม่มีผลต่อเส้นทาง (Trajectory) อัตราการลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกน (Decay rate) และอัตราการขยายตัวของเจ็ต (Spread rate) บนระนาบสมมาตรในแนวคิ่ง ในขณะที่ Swirl ratio (Sr) เท่ากับ 0.82 ทำให้อัตราการลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกน (Decay rate) และอัตราการขยายของเจ็ต (Spread rate) ลดลงเล็กน้อยจากกรณีเจ็ตที่ไม่หมุนควง นอกจากนี้จากผลการศึกษา Centroid Trajectory ( $\bar{z}_T$ ) บนระนาบในแนวนอน พบว่าเมื่อความเร็วในการหมุนควงเพิ่มขึ้น เส้นทางมีการเบี่ยงเบนไปทางด้าน Suction

มากขึ้น โดยเฉพาะกรณี Sr82 ซึ่งพบการเบี่ยงเบนอย่างชัดเจน และยังพบแนวโน้มของการเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นตามแนว Downstream ทำให้สรุปได้ว่าความเร็วในการหมุนควงมีผลต่อคุณลักษณะบนระนาบสมมาตรในแนวตั้งน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคุณลักษณะบนระนาบในแนวนอน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### อภิปรายผลการทดลอง

เนื่องจากโครงสร้างของ Counter rotating vortex pair (CVP) เป็น Vortical structure ที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาตัวและคุณลักษณะการผสมของเจ็ทในกระแสลมขวาง ดังนั้นจึงพิจารณากลไกในการเกิด CVP เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ผลการทดลอง จากการศึกษาของ Yuan et al. (1999) พบว่าโครงสร้างของ CVP นั้นเกิดจากผลต่างของความเร็วเจ็ทและกระแสลมขวาง ซึ่งทำให้เกิด Skewed mixing layer ที่ขอบเจ็ทด้านข้าง และพัฒนาตัวเป็น Hanging vortices และเมื่อ Hanging vortices ได้รับผลของ Adverse pressure gradient จะเกิดปรากฏการณ์ Vortex breakdown และพัฒนาตัวกลายเป็น CVP สำหรับกลไกการเกิด Skewed mixing layer ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 1.7x โดยเนื่องจากสถานะเริ่มต้นของเจ็ทและกระแสลมขวางมีทิศทางไม่ขนานกันทำให้เกิดความแตกต่างของความเร็วมากกว่าหนึ่งทิศทาง โดย Lu (1995) และ Yuan et al. (1999) พบว่าในกรณีของเจ็ทที่ไม่หมุนควง Mean convective velocity ( $\bar{u}_{mc}$ ) จะมีค่าประมาณใกล้เคียงกับผลรวมของ Vector ความเร็วเจ็ท ( $\bar{u}_j$ ) และความเร็วของกระแสลมขวาง ( $\bar{u}_{cf}$ ) ในขณะที่ความแตกต่างของความเร็วของเจ็ทและความเร็วของกระแสลม (ใช้สัญลักษณ์  $\bar{u}_{nj}$  และ  $\bar{u}_{ncf}$  ตามลำดับ) ขวางในทิศทางตั้งฉากกับ  $\bar{u}_{mc}$  จะเป็นตัวทำให้เกิด Skewed mixing layer และ Hanging vortex ซึ่งมีกำลัง (Strength) แปรตามผลต่างของความเร็วของ ( $\bar{u}_{nj} - \bar{u}_{ncf}$ ) โดย  $\bar{u}_{mc}$  ดังกล่าวจะทำให้เกิดการพา (Convection) ของไหลไปตามแนวแกนของ Vortex ที่เกิดขึ้น ดังนั้น Skewed mixing layer ซึ่งเกิดจาก  $\bar{u}_{nj}$  และ  $\bar{u}_{ncf}$  จึงเป็นส่วนสำคัญในการทำให้เกิด CVP

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) ในการทำให้เกิดความเร็วในการหมุนควง ซึ่งการสร้างการหมุนควงด้วยท่อหมุนนี้ทำให้เจ็ทมี Circulation ที่ไม่เป็นศูนย์ (Non-zero circulation) โดยลักษณะดังกล่าวจะทำให้ Skewed mixing layer ที่ขอบเจ็ทด้านข้างมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้โครงสร้างของ CVP ที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ข้างมีความไม่สมมาตร และส่งผลต่อการกระจายของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ลักษณะการเกิดของ Skewed mixing layer ภายใต้อิทธิพลของความเร็วในการหมุนควง จากแบบจำลองของการไหลได้

ในการวิเคราะห์เพื่อศึกษาผลของการหมุนควงที่มีต่อโครงสร้างของ CVP นี้จะพิจารณาจาก Vector ของความเร็วซึ่งทำให้เกิด Skewed mixing layer ที่ปากเจ็ท โดยไม่คิดผลของความหนาของชั้นขอบเขต บริเวณปากเจ็ท และจากเงื่อนไขของ No-slip condition ทำให้ความเร็วของเจ็ทอากาศที่ขอบมีค่าเท่ากับความเร็วสัมผัสของท่อหมุน (Rotating pipe) นอกจากนี้เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์จะพิจารณาโดยละทิ้งผลของความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของเจ็ทและกระแสลมขวาง ( $r = r_v$ ) รูปที่ 4.1ก และ 4.1ข แสดง Vector ความเร็วสำหรับด้าน Suction

ในกรณี  $u_s < u_{cf}$  และ  $u_s > u_{cf}$  ตามลำดับ และรูปที่ 4.1ค และ 4.1ง สำหรับด้าน Pressure ในกรณี  $u_s < u_{cf}$  และ  $u_s > u_{cf}$  ตามลำดับ โดย  $\vec{u}_j$  คือ Vector ความเร็วในแนวแกนของเจ็ท  $\Omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมของท่อหมุน  $\vec{u}_s$  คือความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ทอากาศที่ขอบท่อหมุน  $\vec{u}_{js}$  คือผลรวมของ  $\vec{u}_j$  และ  $\vec{u}_s$  และ  $\theta_{js}$  คือมุมที่  $\vec{u}_{js}$  กระทบกับแนวแกนเจ็ทตามแนวตั้งตามสมการ

$$\vec{u}_{js} = \vec{u}_j + \vec{u}_s \quad (4.1)$$

$$\theta_{js} = \arctan(Sr) \quad (4.2)$$

จากการศึกษาของ Lu (1995) และ Yuan et al. (1999) พบว่า ผลของความเร็วของกระแสลมขวาง ( $\vec{u}_{cf}$ ) จะทำให้เกิด Skewed mixing layer ซึ่งจะมีแกนไปตามทิศทางของ Mean convective velocity ดังนั้นในกรณีของเจ็ทที่มีการหมุนควงนี้ Mean convective velocity จะแปรโดยตรงกับผลรวมของความเร็วเจ็ท ( $\vec{u}_{js}$ ) และความเร็วของกระแสลมขวาง ( $\vec{u}_{cf}$ ) ตามสมการ

$$\vec{u}_{mcs} = \vec{u}_{js} + \vec{u}_{cf} \quad (4.3)$$

โดยที่  $\vec{u}_{mcs}$  นี้จะทำมุมกับแนวตั้งเท่ากับ  $\gamma_{mcs}$  ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันระหว่างด้าน Suction และด้าน Pressure ตามสมการ

$$\text{ด้าน Suction:} \quad \gamma_{mcs} = \arctan\left(Sr + \frac{1}{r_v}\right) \quad (4.4ก)$$

$$\text{ด้าน Pressure:} \quad \gamma_{mcs} = \arctan\left(Sr - \frac{1}{r_v}\right) \quad (4.4ข)$$

ทั้งนี้ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงทิศทางของ  $\vec{u}_{mcs}$  ข้างต้น ซึ่งจะบอกถึงทิศทางของแกนของ Skewed mixing layer ในช่วงที่ทดลองคือที่  $Sr = 0, 0.17, 0.52$  และ  $0.82$  ในรูปที่ 4.2 เนื่องจากกำลัง (Strength) ของ Skewed mixing layer จะมีค่าแปรโดยตรงกับผลต่างของความเร็วในแนวตั้งฉากกับ  $\vec{u}_{mcs}$  ของความเร็วเจ็ท ( $\vec{u}_{js}$ ) และความเร็วของกระแสลมขวาง ( $\vec{u}_{cf}$ ) ดังนั้นจึงนิยามส่วนประกอบของความเร็วทั้งสองเป็น  $\vec{u}_{njs}$  และ  $\vec{u}_{ncf}$  ตามลำดับ และนิยามกำลังของ Skewed mixing layer ( $\beta$ ) เป็น

$$\beta = \frac{u_{njs} + u_{ncf}}{u_{mcs}}$$

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ Swirl ratio (Sr) และอัตราส่วนความเร็ว ( $r_v$ ) ได้เป็น



$$\text{ด้าน Suction:} \quad \beta = \frac{2}{r_v \left[ 1 + \left( Sr + \frac{1}{r_v} \right)^2 \right]} \quad (4.5ก)$$

$$\text{ด้าน Pressure:} \quad \beta = \frac{2}{r_v \left[ 1 + \left( Sr - \frac{1}{r_v} \right)^2 \right]} \quad (4.5ข)$$

จากสมการ 4.5ก และ 4.5ข จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนความเร็ว ( $r_v$ ) คงที่ที่ค่าใดๆ เมื่อ Sr เพิ่มขึ้น กำลังของ Skewed mixing layer ทางด้าน Suction จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่กำลังของ Skewed mixing layer ทางด้าน Pressure จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่  $Sr = 1/r_v$  และจะมีค่าลดลงต่อมา

โดยผลการวิเคราะห์จากสมการ 4.5 ได้แสดงดังรูปที่ 4.3 สำหรับอัตราส่วนความเร็วที่ทำการทดลอง ( $r_v$ ) = 4 โดยเปรียบเทียบที่ Swirl ratio (Sr) ต่างๆ พบว่าในกรณีเงืงที่ไม่หมุนควง ค่า  $\beta$  ทางด้าน Suction จะ มีค่าเท่ากับทางด้าน Pressure แสดงว่า Skewed mixing layer ทั้ง 2 ข้างมีความสมมาตร ในขณะที่กรณีเงืงที่หมุนควง ค่า  $\beta$  ทางด้าน Suction จะ มีค่าต่ำกว่าทางด้าน Pressure ซึ่งแสดงลักษณะของความไม่สมมาตร โดยด้าน Suction นั้นค่า  $\beta$  จะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนควง แสดงว่ากำลังของ Mixing layer มีน้อยลง ทำให้มีการดึงอากาศ (Entrain) เข้ามาผสมลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองดังรูปที่ 3.9-3.16 โดยเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนควง จะพบบริเวณที่มีระดับอุณหภูมิและ Gradient ของอุณหภูมิสูงมากขึ้น เนื่องจากกำลังของ Mixing layer ( $\beta$ ) มีน้อย ส่งผลให้อุณหภูมิมีการสลายตัวช้า ทำให้บริเวณที่มีระดับของอุณหภูมิสูงยังคงอยู่ ในขณะที่ด้าน Pressure จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนควง ค่า  $\beta$  จะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจนมีค่าสูงสุดที่ Swirl ratio ประมาณ 0.25 ซึ่งเป็นสภาวะที่ความเร็วในการหมุนควงเท่ากับความเร็วของกระแสลมขวาง หลังจากนั้น ค่า  $\beta$  จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อความเร็วในการหมุนควงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในช่วงที่ทดลองคือ Swirl ratio = 0-0.82 ค่า  $\beta$  ทางด้าน Pressure มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงของ  $\beta$  ทางด้าน Suction

นอกจากนี้ ยังได้เปรียบเทียบผลของความเร็วในการหมุนควงที่อัตราส่วนความเร็ว ( $r_v$ ) ต่างๆ จากการวิเคราะห์ตามสมการ 4.5 ดังรูปที่ 4.4 โดยพบว่า การหมุนควงจะมีผลต่อกำลังของ Mixing layer ( $\beta$ ) อย่างชัดเจนที่อัตราส่วนความเร็วต่ำ และจะมีผลต่อ  $\beta$  ลดลงเมื่ออัตราส่วนความเร็วเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้ที่อัตราส่วนความเร็วต่ำนั้น สามารถเห็นผลของการหมุนควงชัดเจน ในขณะที่ที่อัตราส่วนความเร็วสูงนั้น ผลของการหมุนควงจะมีน้อย ทำให้การไหลของเงืงที่มี

ลักษณะคล้ายกับการไหลแบบเจ็ทในกระแสลมขวางที่ไม่มีผลของการหมุนควง ซึ่งผลนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Kavsaoglu and Schetz (1989) และ Niederhaus et al. (1997)

นอกจากการวิเคราะห์ด้วยลักษณะการเกิด Skewed mixing layer ข้างต้น ซึ่งบ่งบอกถึงความแตกต่างของกำลังของ Mixing layer ทางด้าน Suction และ Pressure และส่งผลต่อการกระจายของอุณหภูมิดังกล่าวนั้น ในลำดับต่อไปจะพิจารณาผลของความดันซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหมุนควง ในบริเวณต่างๆที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ท โดยมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับบริเวณปากเจ็ท เมื่อเจ็ทมีความเร็วในการหมุนควงเพิ่มขึ้นจากการหมุนต่อ จะทำให้เจ็ทอากาศที่บริเวณขอบด้านข้างของท่อเจ็ทมีความดันแตกต่างกัน โดยจากหลักการของ “Magnus effect” และผลการศึกษาการกระจายของความดันพื้นผิวโดย Kavsaoglu and Schetz (1989) แสดงดังรูปที่ 1.17ค พบว่าความดันพื้นผิวทางด้าน Pressure มีค่าสูงกว่าด้าน Suction

สำหรับบริเวณที่เจ็ทมีการพัฒนาตัวไปตามแนว Downstream ในกรณีที่มีความเร็วในการหมุนควงสูง จะพิจารณาจากแบบจำลองดังรูปที่ 4.5 ทั้งนี้จากการศึกษาที่ผ่านมาและการวิเคราะห์โดยใช้ลักษณะของ Skewed mixing layer ข้างต้นพบว่า ที่ความเร็วในการหมุนควงสูง Vortex ด้านหนึ่งของ CVP จะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนมีอิทธิพลต่อการไหลมากกว่า Vortex อีกด้านหนึ่ง ดังนั้นในที่นี้จะพิจารณาจาก Vortex ตัวที่มีอิทธิพลดังกล่าว จากรูปที่ 4.5ก โดยเจ็ทอากาศที่ถูกทำให้มีการหมุนควงที่ปากเจ็ทจะถูกพา (Convect) ไปตามทิศทางของ Axial flow ด้วยโมเมนตัมของเจ็ทและกระแสลมขวาง ทำให้ขณะที่เจ็ทอากาศกำลังพัฒนาตัว เจ็ทยังคงมีลักษณะของการหมุนควงรอบแกนการหมุนเช่นเดียวกับที่บริเวณปากเจ็ท เมื่อพิจารณาระนาบ A ซึ่งเป็นระนาบบนพิภพธรรมชาติของเจ็ท ดังรูปที่ 4.5ข ซึ่งแสดงทิศทางของความเร็ว ที่ขอบของแกนการหมุนของเจ็ททางด้าน Pressure (จุด P) และด้าน Suction (จุด S) ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วในแนวสัมผัส  $\vec{u}_s(s)$  และความเร็วของกระแสลมขวาง  $\vec{u}_c$  พบว่าความเร็วของเจ็ทตามแนวสัมผัสบนระนาบทางด้าน Pressure จะถูกหน่วงโดยความเร็วของกระแสลมขวาง ทำให้ความเร็วลดลง และความดันเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเร็วของเจ็ทตามแนวสัมผัสบนระนาบทางด้าน Suction จะไม่ถูกหน่วงแต่จะถูกเสริมด้วยความเร็วของกระแสลมขวาง ทำให้มีความเร็วเพิ่มขึ้นและความดันลดลงเป็นผลทำให้เกิดแรงในแนว Spanwise ( $\zeta$ ) จากด้านที่มีความดันสูงกว่า (ด้าน Pressure) ไปทางด้านที่มีความดันต่ำกว่า (ด้าน Suction) จึงทำให้บริเวณที่เป็นแกนเจ็ทเบี่ยงเบนออกจากแนวแกนเดิม (กรณีเจ็ทที่ไม่หมุนควง) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดเส้น Contour ที่ระดับอุณหภูมิสูงที่มีลักษณะเป็นแกนของการหมุน (รูปที่ 3.17) โดยพบการเบี่ยงเบนของบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปทางด้าน Suction มากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนควง โดยเฉพาะกรณี Sr82 นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผล

การศึกษา Centroid Trajectory ( $\bar{z}_T$ ) บนระนาบ  $x-z$  ดังรูปที่ 3.28 ที่มีการเบี่ยงเบนไปทางด้าน Suction มากขึ้นตามความเร็วในการหมุนควง โดยเฉพาะกรณี Sr82

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองนี้กับการศึกษาของ NH ที่ Swirl number ( $Sn$ ) ประมาณ 0.17 (ตรงกับกรณี Sr52) แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยรูปที่ 4.6ก และ 4.6ข แสดงผลการเปรียบเทียบที่  $x/r_d$  ประมาณ 0.5 และรูปที่ 4.6ค และ 4.6ง แสดงที่  $x/r_d$  ประมาณ 1 โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการกระจายของอุณหภูมิส่วนเกิน (Excess temperature) และใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) ซึ่งมีลักษณะ Non-zero circulation ในการทำให้เกิดความเร็วในการหมุนควง ส่วน NH ได้ศึกษาการกระจายของ Scalar concentration และใช้ใบพัดคววนอากาศ ซึ่งมีลักษณะ Zero circulation ในการทำให้เกิดความเร็วในการหมุนควงพบว่า สำหรับงานวิจัยนี้ พบบริเวณที่มีระดับอุณหภูมิ และ Gradient ของอุณหภูมิสูงที่ด้าน Suction และพบบริเวณที่มีระดับอุณหภูมิและ Gradient ของอุณหภูมิต่ำที่ด้าน Pressure ในขณะที่ NH พบบริเวณที่มีระดับ Concentration สูงและ Contour ใหญ่ที่ด้าน Pressure และพบบริเวณที่มีระดับ Concentration ต่ำและ Contour เล็กที่ด้าน Suction

ทั้งนี้ยังไม่สามารถสรุปสาเหตุของความแตกต่างดังกล่าวได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างของปริมาณที่ศึกษาระหว่างอุณหภูมิและ Scalar concentration หรือความแตกต่างของลักษณะสถานะเริ่มต้นที่เป็น Zero และ Non-zero circulation อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาจากมุมมองของการเกิด Skewed mixing layer แล้วจะเห็นว่าความแตกต่างของรูปแบบการกระจายตัวของความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ทหรืออีกนัยหนึ่งคือ Zero และ Non-zero circulation น่าจะมีผลอย่างสูง

จากผลการทดลองพบว่า การหมุนควงส่งผลอย่างชัดเจนต่อการกระจายตัวที่ระดับอุณหภูมิสูงบนหน้าตัด และ Centroid trajectory บนระนาบนอน (ระนาบ  $x-z$ ) ขณะที่การหมุนควงส่งผลเล็กน้อยต่อการกระจายตัวที่ระดับอุณหภูมิต่ำบนหน้าตัด และคุณลักษณะโดยรวมบนระนาบสมมาตร (ระนาบ  $x-y$ ) ซึ่งได้แก่ เส้นทาง อัตราการลดลงของอุณหภูมิ และอัตราการขยายตัวของเจ็ท แสดงว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการกระจายตัวเป็นหน้าตัดที่ระดับอุณหภูมิสูงและคุณลักษณะบนระนาบนอน (ระนาบ  $x-z$ ) คือค่า Swirl ratio (Sr) โดยพารามิเตอร์ที่น่าจะส่งผลต่อการกระจายตัวเป็นหน้าตัดที่ระดับอุณหภูมิต่ำและคุณลักษณะโดยรวมบนระนาบสมมาตร (ระนาบ  $x-y$ ) คือ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ ) ทั้งนี้มีข้อสังเกตคือ การที่เจ็ทอากาศพุ่งทะลุเข้าไปในกระแสมขวาง เป็นการเพิ่มฟลักซ์ในแนวแกนของโมเมนตัมในแนวแกนเจ็ท เข้าไปในกระแสมขวาง ในขณะที่เมื่อมีผลของการหมุนควงจากการใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) จะเป็นการเพิ่มฟลักซ์ในแนวแกนของโมเมนตัมเชิงมุมด้วย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของความเร็วในการหมุนวงซึ่งแสดงโดยค่า Swirl ratio (Sr) ที่มีต่อคุณลักษณะของอนุหภูมิและการผสมของเจ็ทในกระแสลมขวาง โดยทดลองที่ค่า Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.82 ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลคงที่ที่ 4.1 ในช่วง  $x/r_d = 0.25-2$  ซึ่งอยู่ระหว่างบริเวณ Near field และ Far field โดยใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) ในการทำให้เกิดการหมุนวง ซึ่งมีผลรวมของค่า Circulation รอบเจ็ทไม่เท่ากับศูนย์ (Non-zero circulation) ในขณะที่วิธีการทำให้เกิดการหมุนวงอื่นๆ เช่น ใช้ใบพัดกววนเจ็ทอากาศ (Niederhaus et al., 1997) และการฉีดของไหลจากด้านข้าง (Kavsaoglu and Schetz, 1989) จะมีผลรวมของค่า Circulation รอบปากเจ็ทเท่ากับศูนย์ (Zero circulation) ซึ่งแสดงความแตกต่างดังกล่าวในรูปที่ 5.1 ผลการทดลองจะแสดงจากคุณลักษณะเฉพาะหน้าตัด (Local characteristic) ได้แก่ การกระจายของอนุหภูมิเป็นหน้าตัด และคุณลักษณะโดยรวม (Global characteristic) ได้แก่ เส้นทาง (Trajectory) อัตราลดลงของอนุหภูมิตามแนวแกน (Decay rate) และอัตราการขยายตัวของเจ็ท (Spread rate)

จากผลการทดลองในกรณีเจ็ทที่ไม่หมุนวง (Sr0) พบว่าข้อมูลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา โดยทำการเปรียบเทียบจาก เส้นทาง (Trajectory) และอัตราการลดลงของอนุหภูมิตามแนวแกน (Decay rate)

จากผลการทดลองพบว่าการหมุนวงทำให้ลักษณะการกระจายของอนุหภูมิบนหน้าตัดมีความไม่สมมาตร โดยพบบริเวณที่มีอนุหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอนุหภูมิสูงทางด้านที่ความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ทอากาศมีทิศทางเดียวกับความเร็วของกระแสลมขวาง (ด้าน Suction) ในขณะที่พบบริเวณที่มีอนุหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอนุหภูมิต่ำทางด้านที่ความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ทอากาศมีทิศทางตรงกันข้ามกับความเร็วของกระแสลมขวาง (ด้าน Pressure) ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ชี้แนะให้เห็นว่าคุณลักษณะเช่นนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างในลักษณะการเกิดของ Skewed mixing layer ที่ขอบด้านข้างทั้งสองด้านของเจ็ท ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการพัฒนาตัวของเจ็ท นอกจากนี้ยังพบว่าความไม่สมมาตรดังกล่าวเพิ่มขึ้นตามความเร็วในการหมุนวง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการหมุนวงจะมีผลต่อลักษณะของความไม่สมมาตรภายในเจ็ท แต่การหมุนวงดังกล่าวไม่มีผลต่อตำแหน่ง และรูปร่างภายนอกของเจ็ทซึ่งแสดงโดยเส้นขอบเขตของบริเวณระดับอนุหภูมิต่ำรอบเจ็ท



นอกจากนี้ยังพบว่า ในช่วงของพารามิเตอร์ที่ศึกษานั้น การหมุนควงส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อคุณลักษณะโดยรวมของเจ็ท เช่น การขยายตัวของเจ็ท (Jet spreading) และรูปร่างและตำแหน่งของขอบเจ็ทดังกล่าวข้างต้น และส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อคุณลักษณะบนระนาบสมมาตรแนวตั้ง (ระนาบ  $x-y$ ) ดังจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของเส้นทางของอนุกรมสูงสุดบนระนาบสมมาตร (Centerplane trajectory), เส้นทางของจุดศูนย์กลางอนุกรม (Centroid trajectory), และการลดลงของอนุกรมสูงสุดบนระนาบสมมาตร (Centerplane decay) และการลดลงของอนุกรมสูงสุด (Maximum decay) ในทางตรงกันข้าม พบว่าการหมุนควงส่งผลที่มีนัยสำคัญต่อคุณลักษณะของเจ็ทบนระนาบแนวนอน (ระนาบ  $x-z$ ) ดังจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของเส้นทางของจุดศูนย์กลางอนุกรม (Centroid trajectory) บนระนาบแนวนอน (ระนาบ  $x-z$ ) ซึ่งพบการเบี่ยงเบนออกจากแนวของระนาบสมมาตรแนวตั้งมากขึ้นเมื่อความเร็วในการหมุนควงเพิ่มมากขึ้น

ผลการศึกษานี้ชี้แนะให้เห็นถึงความแตกต่างของอิทธิพลของอัตราส่วนเสวิร์ลและอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลต่อคุณลักษณะของเจ็ทที่หมุนควงในกระแสลมขวาง

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ในการศึกษาการไหลแบบเจ็ทในกระแสลมขวาง ประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจคือ การศึกษาลักษณะโครงสร้างและกลไกในการเกิด CVP เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีผลต่อคุณลักษณะต่างๆอย่างมาก และเป็นโครงสร้างหลักโดยเฉพาะในช่วงที่การไหลมีการพัฒนาเต็มที่ โดยที่ผ่านมามีแนวคิดเกี่ยวกับต้นกำเนิดของ CVP และจากหลักฐานต่างๆแสดงให้เห็นว่า CVP มีต้นกำเนิดบริเวณใกล้ปากเจ็ท จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมการไหลโดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะที่ปากเจ็ท ซึ่งงานวิจัยนี้ก็เป็นส่วนหนึ่งในการศึกษาเพื่อควบคุมการไหล และสามารถควบคุมโครงสร้างของ CVP ได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังมีประเด็นที่น่าสนใจหลายประเด็นซึ่งเกิดจากการศึกษาวิจัยนี้ ดังนี้

จากผลการศึกษาที่พบความไม่สมมาตรของเจ็ทที่บริเวณ Far field ( $x/rd = 2$ ) ของกรณี Sr52 และ Sr82 จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจว่า ผลของการหมุนควงจะยังคงปรากฏในช่วงที่การไหลมีการพัฒนาเต็มที่หรือไม่ อย่างไรและ ใกล้เคียงใด ซึ่งประเด็นนี้จะเกี่ยวข้องกับการควบคุมการไหลในระยะไกลและถาวร และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการเผาไหม้และการควบคุมมลภาวะในสิ่งแวดล้อมและอื่นๆ

ช่วงความเร็วในการหมุนควงที่มีผลต่อการไหล ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าความเร็วในการหมุนควงจะเริ่มมีผลต่อการกระจายตัวของอนุกรมในแง่ของความสมมาตร ที่ Swirl ratio ประมาณ



0.17-0.52 โดยยังไม่มีข้อมูลที่เด่นชัดเกี่ยวกับขีดจำกัดบนของความเร็วในการหมุนควง ที่มีผลต่อการไหล ซึ่งงานวิจัยนี้ทดลองถึงที่ Swirl ratio ประมาณ 0.82 และ Kavsaoğlu and Schetz (1989) ทดลองถึงที่ Swirl ratio ประมาณ 0.58 โดยข้อมูลที่ได้อาจจะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้กว้างขวางขึ้น

เนื่องจากผลที่ได้ในงานวิจัยนี้แตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Niederhaus et al., 1997) ซึ่งอาจเป็นเพราะศึกษาปริมาณที่ต่างกัน หรืออาจเป็นเพราะความแตกต่างของวิธีการทำให้เกิดการหมุนควง ซึ่งมีผลต่อสถานะเริ่มต้นในการศึกษา โดยงานวิจัยนี้ได้แสดงถึงความแตกต่างของ Zero circulation และ Non-zero circulation บางส่วน แต่เนื่องจากการศึกษาเจ้าหน้าที่หมุนควงในกระแสมขวางยังมีไม่มากนัก ดังนั้นผลการศึกษาในลักษณะใกล้เคียงกันนี้จะเป็นการยืนยันสาเหตุของความแตกต่างดังกล่าว

นอกจากนี้ข้อมูลในงานวิจัยนี้น่าจะเป็นแนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมการไหลในแบบอื่น ไม่ว่าจะเป็นในแบบ Active หรือ Passive control หรือทั้ง 2 แบบควบคู่กัน เช่นการติด Vortex generator ควบคู่กับการใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) รวมทั้งยังเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้สำหรับการไหลในลักษณะอื่นๆได้



# ประมวลตาราง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
1	Pratte and Baines (1967)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาเส้นทาง, อัตราการลดลงตามแนวแกน และการขยายตัวของเจ็ท</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม</li> <li>ปากเจ็ทอยู่ติดกับแผ่นราบขนาดครึ่งมี 6 นิ้วซึ่งอยู่สูงจากพื้น 8 นิ้ว</li> </ul>	$r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 5, 15, 25, 35$ $d = 0.158, 0.248, 0.362 \text{ นิ้ว}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>เส้นทางของความเร็วสามารถยุบรวมเป็นเส้นเดียวกันได้ที่อัตราส่วนความเร็วต่างๆกันเมื่อสเกลด้วย <math>rd</math></li> <li>อัตราส่วนของความกว้างต่อความสูงของเจ็ทในบริเวณ Vortex zone เป็นค่าคงที่ที่ประมาณ 1.4 ในแต่ละหน้าตัดตามแนวแกนเจ็ทแสดงถึง Similarity</li> <li>ใน Vortex zone อัตราการกระจายจะถูกควบคุมโดย Turbulent mixing และการพาของ Vortex</li> </ul>
2	Kamotani and Greber (1972)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาเส้นทางและคุณลักษณะการผสม</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วและอุณหภูมิในอุโมงค์ลม</li> <li>ปากเจ็ทอยู่ติดกับแผ่นราบซึ่งอยู่สูงจากผนังพื้น 2.5 นิ้วและอยู่ห่างจากขอบด้านหน้าของแผ่นราบ 2 นิ้ว</li> <li>ใช้ Hot-wire ในการวัดความเร็วและใช้ Thermocouple ในการวัดอุณหภูมิ</li> </ul>	$r_m = \frac{\rho_j u_j^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2} = 15.3, 59.6$ $T_j - T_{cf} = 0, 75, 320 \text{ }^\circ\text{F}$ $\text{Re}_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu} = 2800-4200$	<ul style="list-style-type: none"> <li>อัตราส่วนโมเมนตัมเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับเส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิ</li> <li>อัตราส่วนความหนาแน่นมีผลต่อเส้นทางของอุณหภูมิล็กน้อยแต่ไม่ผลต่อเส้นทางของความเร็ว</li> <li>เส้นทางของอุณหภูมิต่ำกว่าเส้นทางของความเร็วที่อัตราส่วนโมเมนตัมเดียวกัน</li> <li>ปริมาณความปั่นป่วนของเจ็ทเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโมเมนตัม</li> </ul>

ตารางที่ 1.1 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะของเจ็ทในกระแสลมขวาง

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
3	Fric and Roshko (1994)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ทในกระแสลมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม</li> <li>ใช้ Smoke-wire ในการศึกษาารูปแบบของการไหล และใช้ Hot-wire ในการวัดความเร็ว</li> </ul>	$r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 2-10$ $Re_j = \frac{u_j d}{\nu} = 7600-11400$ $Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu} = 3800-11400$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wake vortices เกิดจากการโค้งตัวของเจ็ทอากาศทำให้เกิด Adverse pressure gradient ที่พื้นด้านข้างของเจ็ทและเกิด “Seperation events” ภายในชั้นขอบเขตของผนังที่พื้น และกลายเป็นโครงสร้างของ Wake ด้านหลังเจ็ท</li> <li>ค่าความถี่ Strouhal ซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนความเร็วนั้น สอดคล้องกับความถี่ที่วัดได้จาก “Seperation events”</li> </ul>
4	Kelso et al. (1996)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ทในกระแสลมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลมและอุโมงค์น้ำ</li> <li>ใช้การฉีดสีและ Smoke-wire ในการศึกษาารูปแบบของการไหล และใช้ Flying-hotwire ในการวัดความเร็ว</li> </ul>	$r = \frac{u_j}{u_{cf}} = 2 - 6$ $Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu} = 440 - 6200$	<ul style="list-style-type: none"> <li>CVP เกิดจากการแยกตัวของเจ็ทอากาศภายในท่อนอกจากนี้การโค้งตัวของ Vortex ring เนื่องจากผลของกระแสลมขวางและ Vorticity ที่เกิดจากผนังของพื้นต่างเป็นองค์ประกอบที่ช่วยในการเกิด CVP</li> <li>Wake vortice เกิดจากการแยกตัวของชั้นขอบเขตที่ผนังของพื้น</li> </ul>

ตารางที่ 1.1 (ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
5	Smith and Mungal (1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาคุณลักษณะการผสมของเจ็ทในกระแสมขวาง</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณ Scalar concentration ในอุโมงค์ลม</li> <li>ใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF)</li> </ul>	$r = \left( \frac{\rho_j u_j^2}{\rho_{cf} u_{cf}^2} \right)^{1/2} = 5 - 25$ $Re_j = \frac{u_j d}{\nu} = 8400 - 41500$	<ul style="list-style-type: none"> <li>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> คือระยะทางตามแนวแกนเจ็ทบนระนาบสมมาตร)</li> <li>จุดแบ่งดังกล่าวยังพิจารณาได้จากลักษณะการกระจายของ p.d.f. โดยมีลักษณะ Non-marching ที่ Near field และมีลักษณะ Tilted ที่ Far field</li> </ul>
6	Yuan et al. (1999)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาโครงสร้างของ Vortical structure บริเวณ Near field</li> <li>ทำ Simulation โดยศึกษาปริมาณเฉลี่ย และ Fluctuation</li> <li>ใช้ Large eddy simulation (LES)</li> </ul>	$r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 2, 3.3$ $Re_{cf} = \frac{u_{cf} d}{\nu} = 1050, 2100$	<ul style="list-style-type: none"> <li>พบโครงสร้างของ Vertical structure บริเวณ Near field ได้แก่ Hanging vortices, Spanwise rollers และ Vertical streaks</li> <li>CVP เกิดจากการที่ Hanging vortices ซึ่งเกิดขึ้นจาก Skewed mixing layer ที่ขอบเจ็ท ได้รับผลของ Adverse pressure gradient ทำให้เกิดการ Breakdown จนกลายเป็น CVP และพัฒนาตัวตามเส้นทางของเจ็ท</li> </ul>

ตารางที่ 1.1 (ต่อ)



ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
1	Zaman and Foss (1997)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลของการติด Vortex generators ซึ่งใช้เป็นแท่งรูปสามเหลี่ยม ที่มีต่อเส้นทางและการผสม</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม</li> <li>ใช้ X-wire anemometer</li> </ul>	$J = \left( \frac{\rho_j u_j}{\rho_{cf} u_{cf}} \right)^2 = 21.1, 54.4$	<ul style="list-style-type: none"> <li>พบว่า การติด Tap รูปสามเหลี่ยมด้านหน้าปากเจ็ททำให้ Jet penetration ลดลงรวมทั้งลดกำลังของ CVP เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ติด Tap ในขณะที่การติดด้านหลังไม่ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะดังกล่าว เนื่องจากด้านหน้า ปากเจ็ทเป็นบริเวณที่มีความดันสถิตสูงที่เรียกว่า “Pressure hill” ซึ่งเป็น Primary source ของ Streamwise vorticity</li> </ul>
2	Sivadas et al. (1997)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลของรูปร่างของปากเจ็ทที่มีต่อเส้นทางและการขยายตัวของเจ็ท</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณความเร็วในอุโมงค์ลม</li> <li>ใช้ Laser light sheet visualization และ Image processing</li> </ul>	$r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 3.9, 5.9, 7.8$	<ul style="list-style-type: none"> <li>ปากเจ็ทรูปสี่เหลี่ยมนี้มีการผสมดีกว่าปากเจ็ทรูปวงกลม โดยเฉพาะเมื่อมีเพิ่มอัตราส่วนรูปร่างสำหรับด้านที่สัมผัสกับกระแสลมขวาง</li> <li>ไม่พบโครงสร้างของ Horseshoe vortex ในกรณีที่ปากเจ็ทเป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งต่างจากลักษณะของปากเจ็ทรูปวงกลม</li> </ul>

ตารางที่ 1.2 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ทในกระแสลมขวาง

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
3	Kavsaoglu and Schetz (1989)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลของการหมุนควงและปริมาณความปั่นป่วนที่มีต่อคุณลักษณะการผสม</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาการกระจายของความดันพื้นผิวและความเร็ว</li> <li>ใช้ Yaw probe ในการวัดความเร็ว</li> <li>ใช้การฉีดอากาศด้านข้างในการทำให้เกิดการหมุนควง</li> </ul>	$r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 2.2, 4, 8$ $Sr = \frac{w_R}{u_j} = 0.4, 0.58$ <p>ปริมาณความปั่นป่วน = 3% และ 10-16%</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>เจ็ทที่มีความปั่นป่วนสูงมีผลทำให้พื้นที่ซึ่งครอบคลุมบริเวณที่มีความดันพื้นผิวดำกว่าบรรยากาศนั้นลดลงและยังลด Penetration ของเจ็ทด้วย</li> <li>เจ็ทที่หมุนควงนั้นทำให้ความดันพื้นผิวมีความไม่สมมาตรเพิ่มขึ้น และลด Penetration ของเจ็ท โดยผลของการหมุนควงดังกล่าวจะชัดเจนที่อัตราส่วนความเร็วต่ำ, ปริมาณความปั่นป่วนสูง และที่บริเวณใกล้ปากเจ็ท</li> </ul>
4	Niederhaus et.al. (1997)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ศึกษาผลของการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะการผสม</li> <li>ทำการทดลองโดยศึกษาปริมาณ Scalar concentration ในอุโมงค์น้ำ</li> <li>ใช้เทคนิค Planar laser-induced fluorescence (PLIF)</li> <li>ใช้ใบพัดกวนเจ็ทอากาศเพื่อให้เกิดการหมุนควง</li> </ul>	$r_v = \frac{u_j}{u_{cf}} = 4.9 - 11.1$ $Sn = \frac{G_\theta}{G_u R} = 0 - 0.17$	<ul style="list-style-type: none"> <li>ลักษณะของ CVP เปลี่ยนจากสมมาตรในกรณีที่ไม่มีการหมุนควงเป็นลักษณะที่ Vortex ด้านหนึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอีกด้านหนึ่ง ทำให้รูปร่างของ CVP เปลี่ยนจากรูป Kidney เป็นรูป Comma</li> <li>เจ็ทที่หมุนควงทำให้ Penetration ลดลงเล็กน้อย</li> <li>เจ็ทที่หมุนควงไม่มีผลต่อการลดลงและการขยายตัวของเจ็ทในช่วงที่ทดลอง</li> </ul>

ตารางที่ 1.2 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ยของทุกกรณี	ความแตกต่างมากที่สุดในแต่ละกรณี (%)
ความเร็วเฉลี่ย ( $\bar{u}_j$ )	7.9 m/s	± 4%
ความเร็วที่จุดกึ่งกลางเจ็ท ( $u_{j,c}$ )	9.4 m/s	± 5%
ความเร็วของกระแสลมขวาง ( $u_{cf}$ )	1.82 m/s	-
อุณหภูมิเฉลี่ย ( $\bar{T}_j$ )	69.3 °C	± 1%
อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางเจ็ท ( $T_{j,c}$ )	75.1 °C	± 1%
อุณหภูมิของกระแสลมขวาง ( $T_{cf}$ )	31.2 °C	± 3%
อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ( $r$ )	4.1	± 4%
อัตราส่วนความเร็ว ( $r_v$ )	4.35	± 4%
อัตราส่วนความหนาแน่น ( $r_d$ )	0.89	± 1%

ตาราง 2.1 รายละเอียดพารามิเตอร์ในการทดลองและความคลาดเคลื่อนในแต่ละกรณี

กรณีศึกษา	Swirl ratio ( $Sr$ )	Swirl number ( $Sn$ )	Circulation ( $m^2/s$ )
Sr0	0	0	0
Sr17	0.17	0.07	0.14
Sr52	0.52	0.17	0.42
Sr82	0.82	0.28	0.67

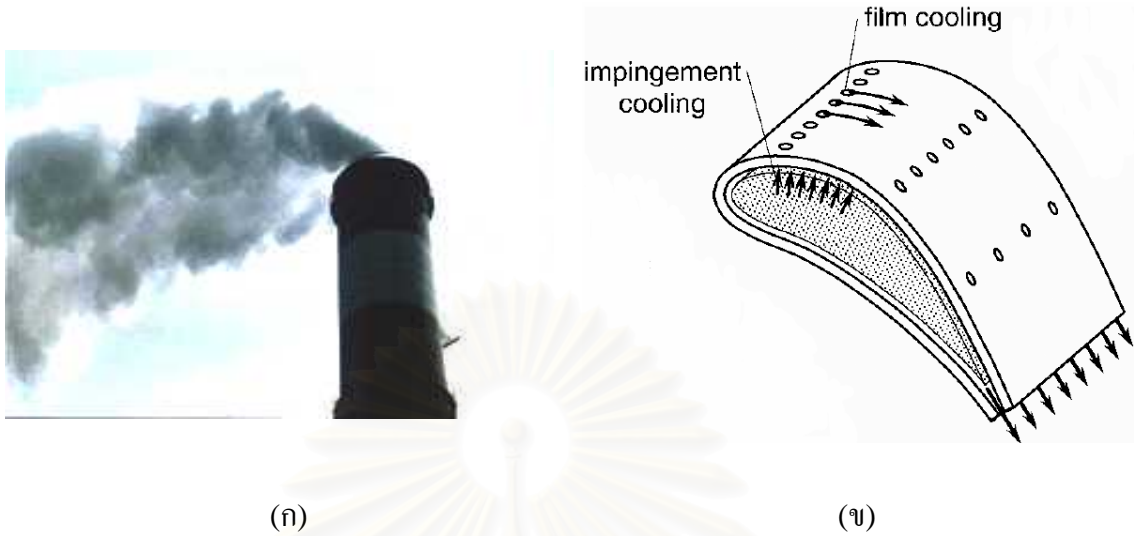
ตาราง 2.2 รายละเอียดของปริมาณต่างๆในแต่ละกรณี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



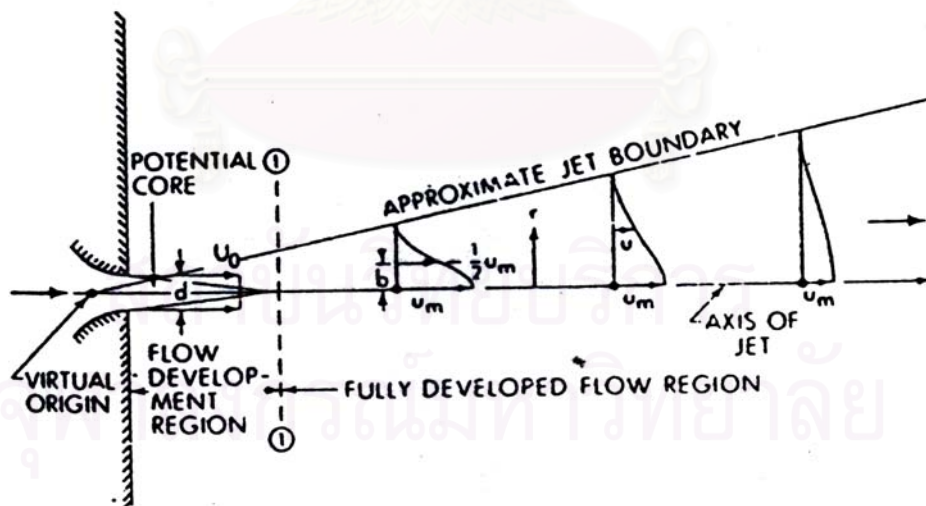
## ประมวตรูปภาพ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



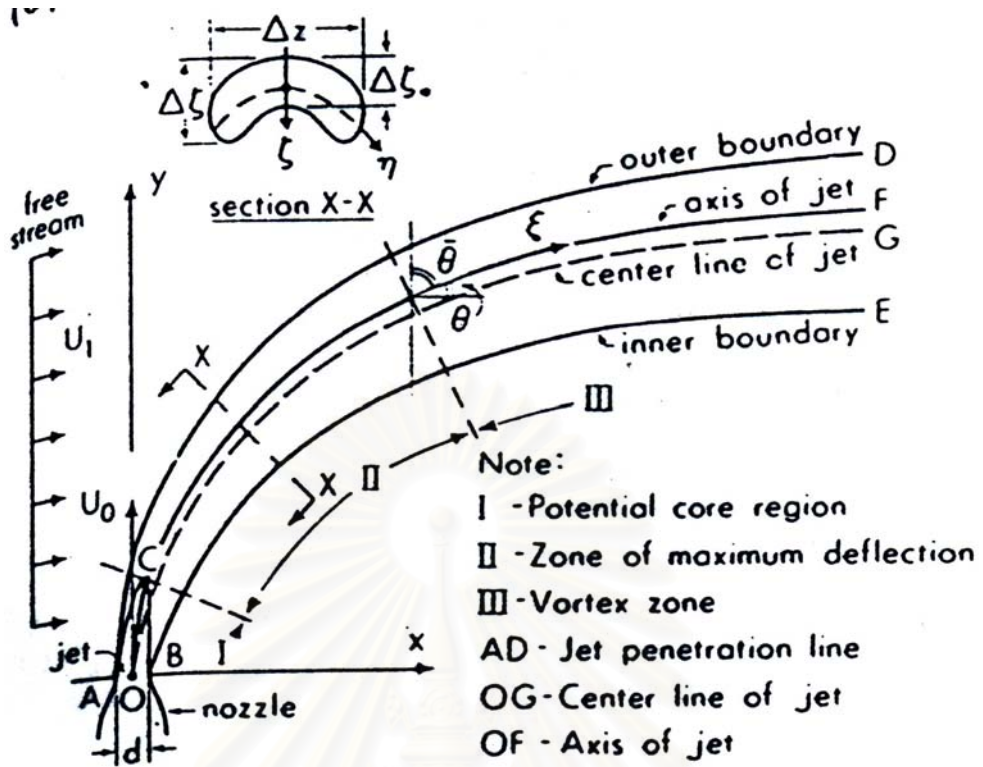
รูปที่ 1.1 การใช้งานที่พบการไหลแบบเจ็ทในกระแสมขวาง

- (ก) การระบายอากาศเสียจากปล่องควัน
- (ข) การระบายความร้อนบริเวณพื้นผิว (Film cooling)

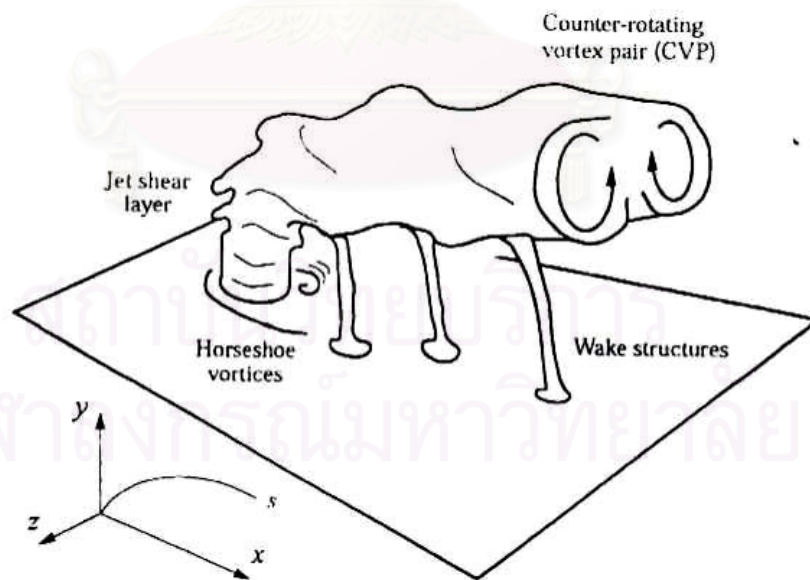


รูปที่ 1.2 ลักษณะของ Circular Turbulent Jet (Rajaratnam, 1976)

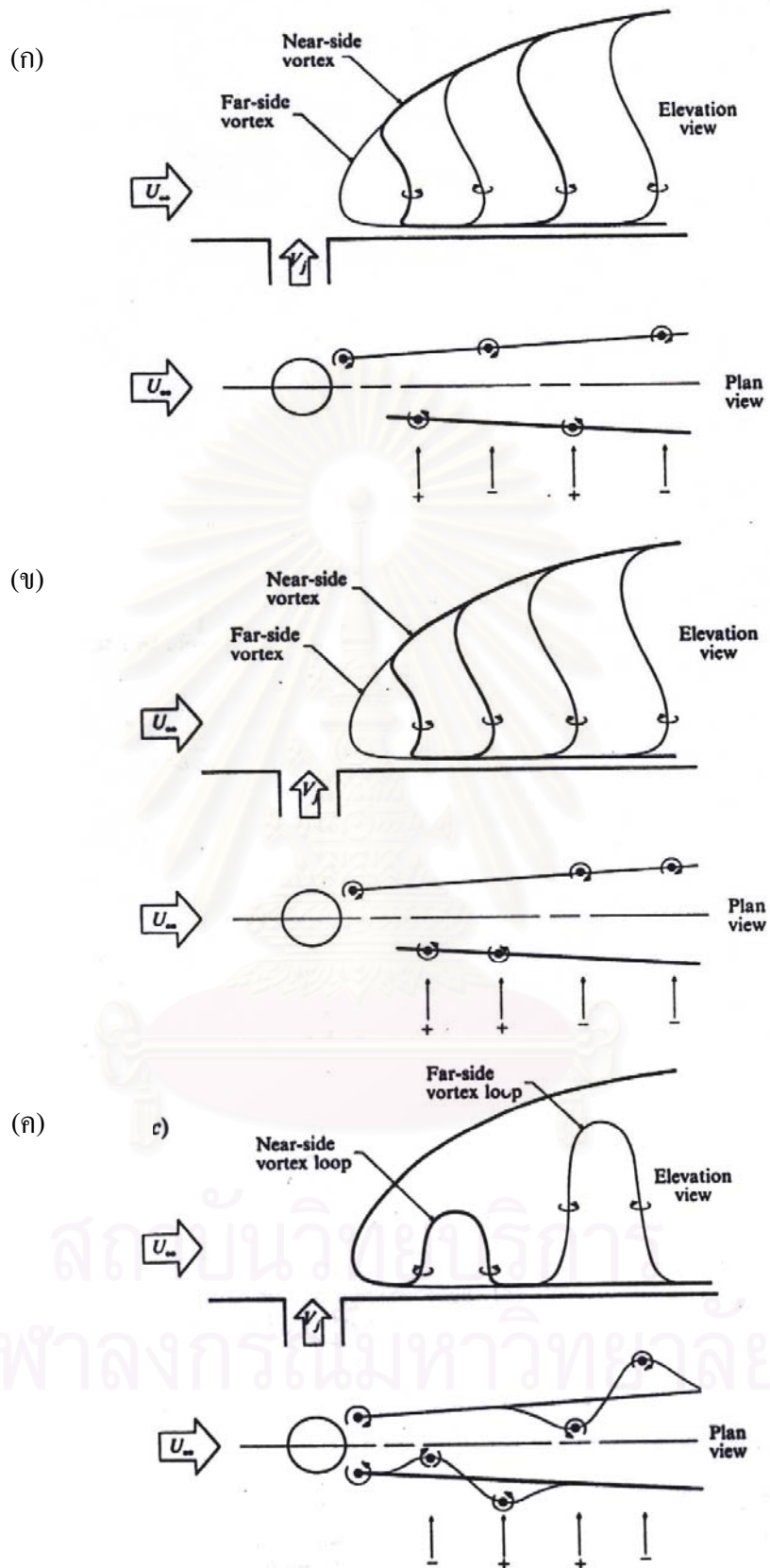




รูปที่ 1.3 ลักษณะของเจ็ทในกระแสลมขวาง (Rajaratnam, 1976)



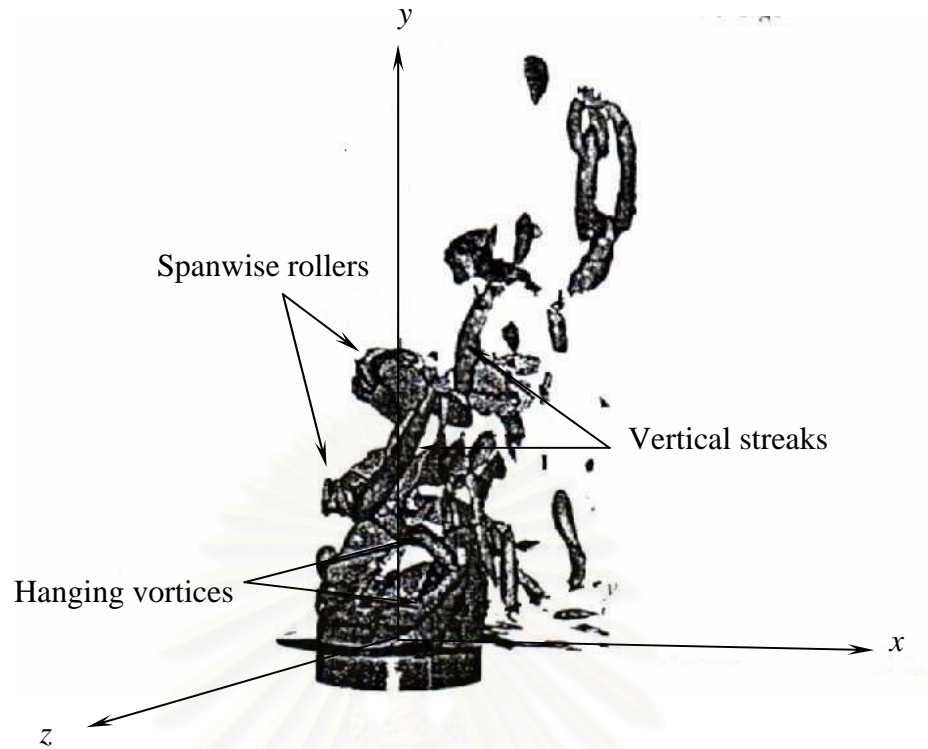
รูปที่ 1.4 โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ทในกระแสลมขวาง (Fric and Roshko, 1994)



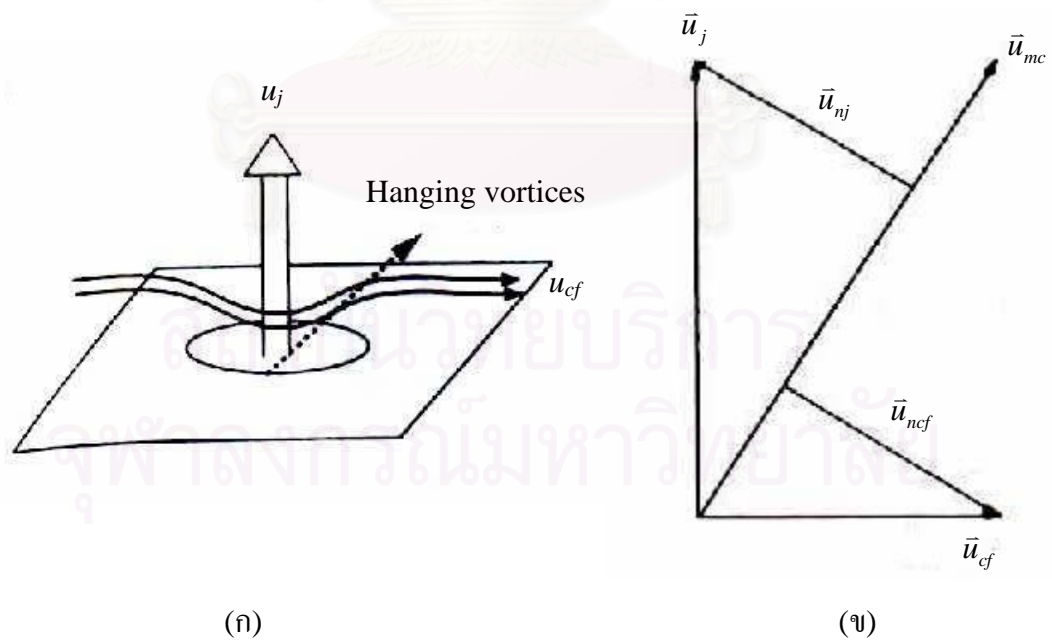
รูปที่ 1.5 ลักษณะของ Wake vortices (Kelso et al., 1996)

(ก) von Kaman vortex street (ข) Mushroom-like upright vortex structure

(ค) Alternative Mushroom-like upright



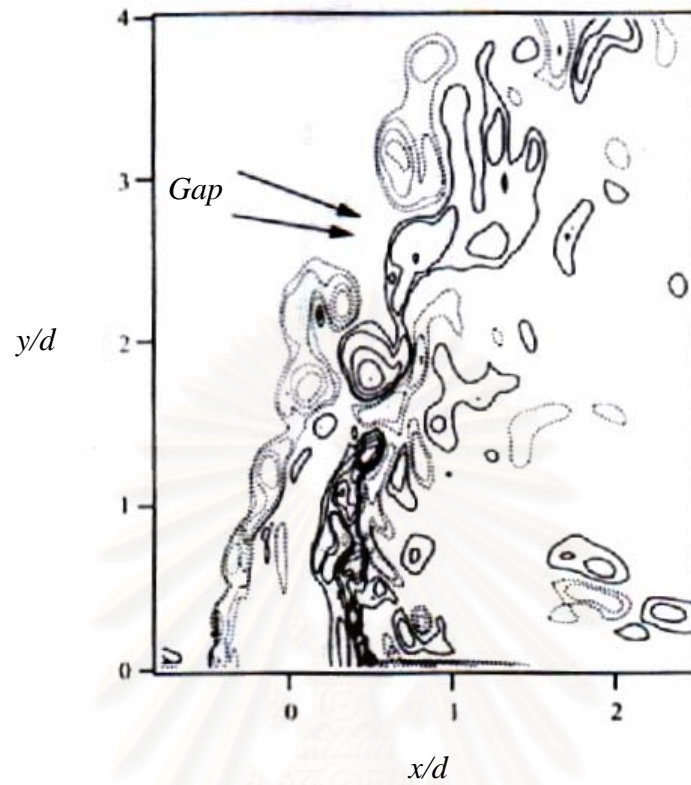
รูปที่ 1.6 โครงสร้างบริเวณ Near field ของเจ็ทในกระแสมขวาง ซึ่งแสดงเป็น Isosurface ของ Vorticity (Yuan et al., 1999)



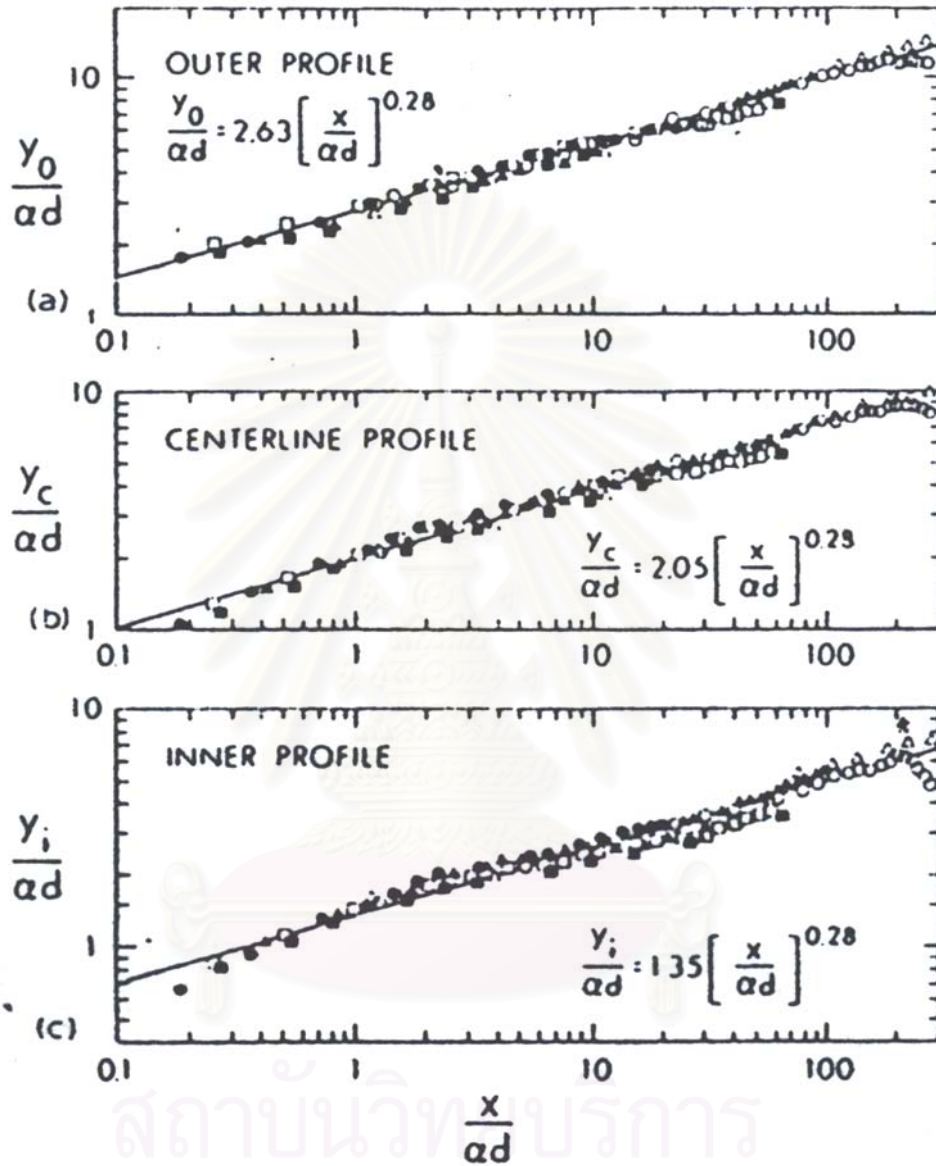
รูปที่ 1.7 โครงสร้างของ Hanging vortices (Yuan et al., 1999)

(ก) รูป Schematic ของ Hanging vortices

(ข) Vector ความเร็วซึ่งแสดงกลไกของการเกิด Hanging vortices



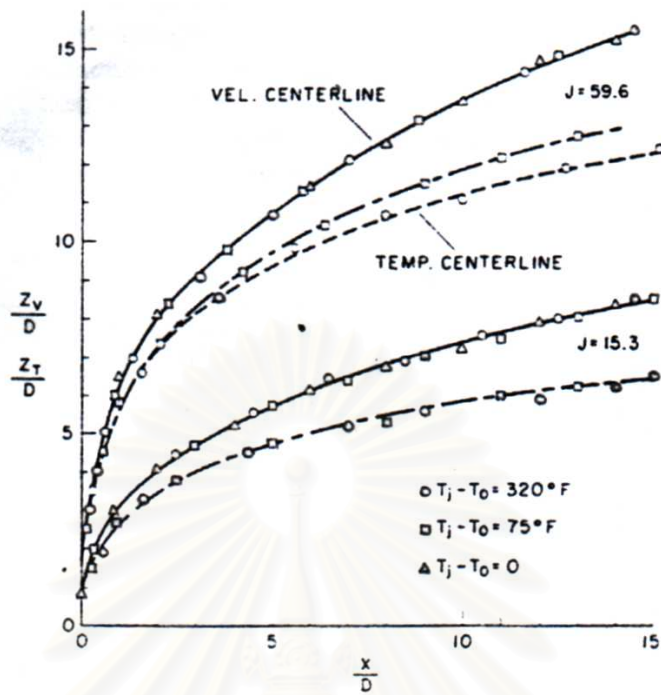
รูปที่ 1.8 โครงสร้างของ Spanwise rollers ซึ่งแสดงเป็น Instantaneous contour ของ Spanwise vorticity ( $\omega_z$ ) โดยเส้นประแสดงค่าลบ (Yuan et al., 1999)



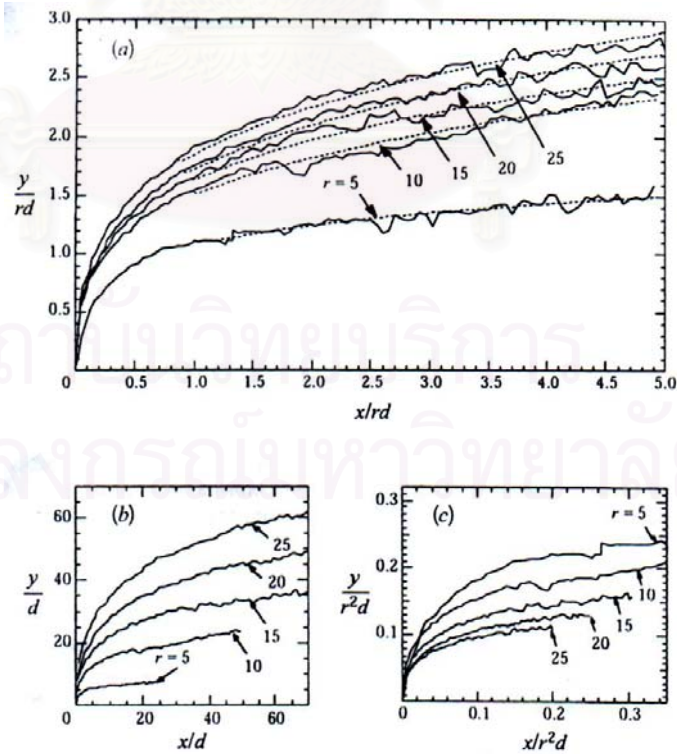
$\alpha$	$d(\text{in.})$	$U_1(\text{fps})$	$\alpha$	$d(\text{in.})$	$U_1(\text{fps})$
○	5	30	○	35	
▲	15		▲	5	120
□	25		■	15	0.248 38

รูปที่ 1.9 เส้นทางของเจ็ทในกระแสลมขวาง (Pratte and Baines, 1967)

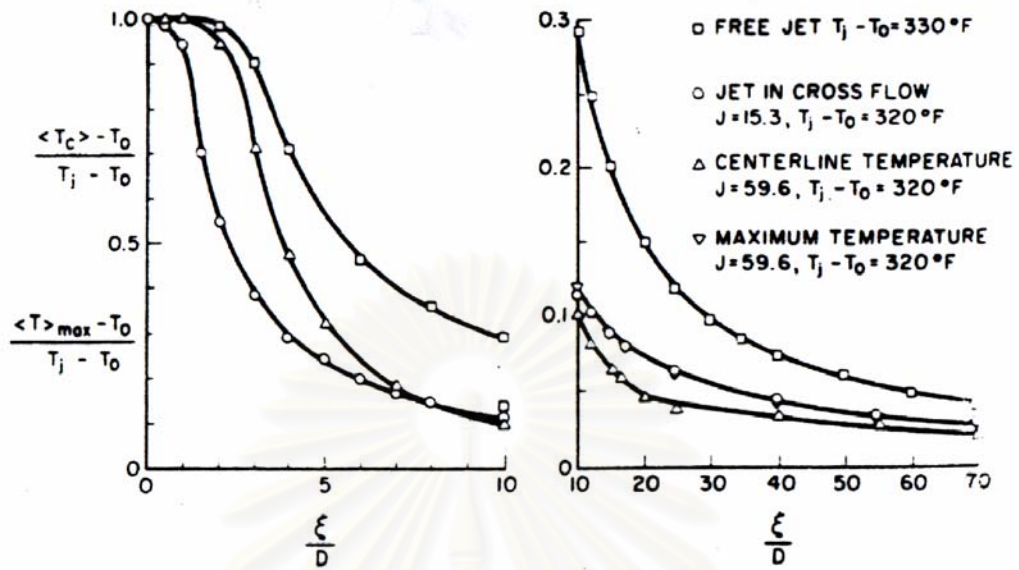




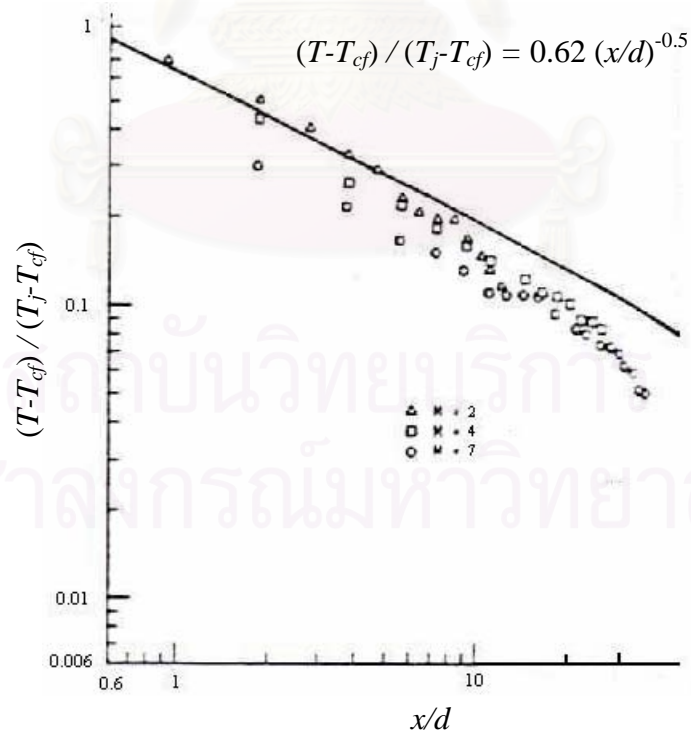
รูปที่ 1.10 เส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิในกรณี  $T_j - T_o = 0$ ,  $T_j - T_o = 75$  F และ  $T_j - T_o = 320$  F (Kamotani and Greber, 1972)



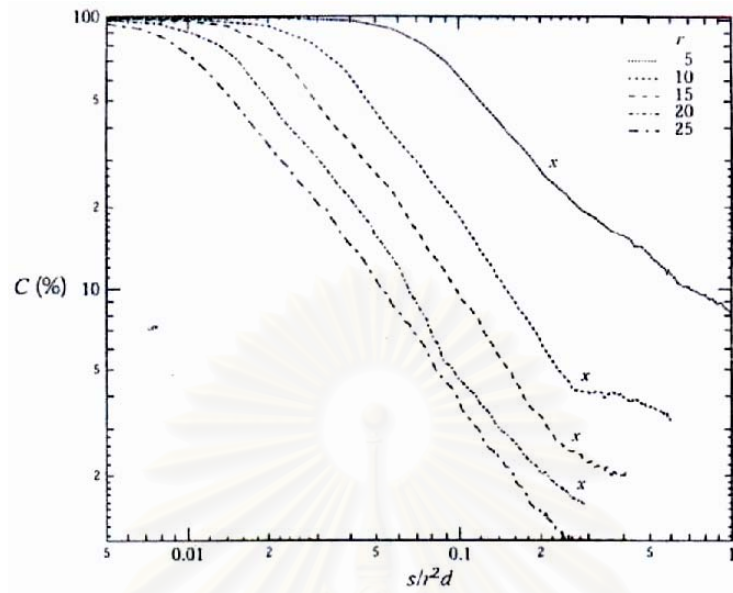
รูปที่ 1.11 Centerline trajectory ของ Scalar concentration (Smith and Mungal, 1998)



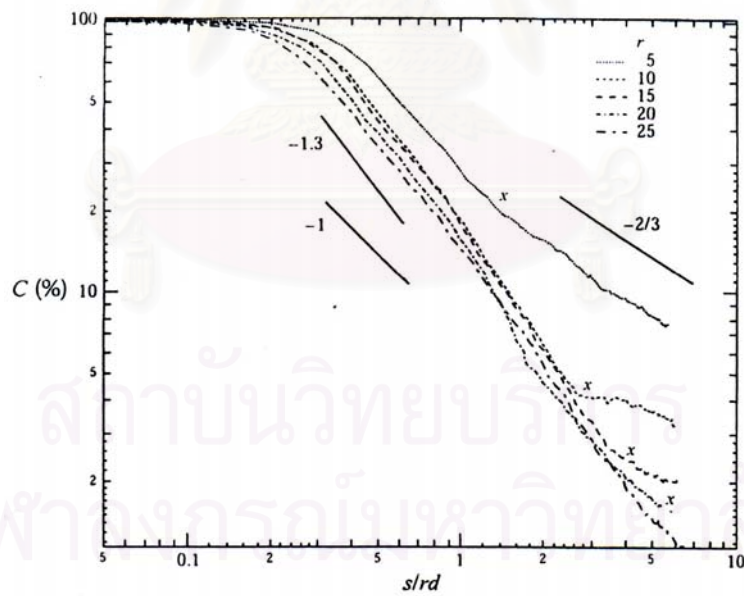
รูปที่ 1.12 การลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกนเจ็ท ( $\xi$ ) บนระนาบสมมาตร (Kamotani and Graber, 1972)



รูปที่ 1.13 การลดลงของอุณหภูมิตามแนว Downstream ( $x$ ) บนระนาบสมมาตร (Sherif and Pletcher, 1989)



(ก)

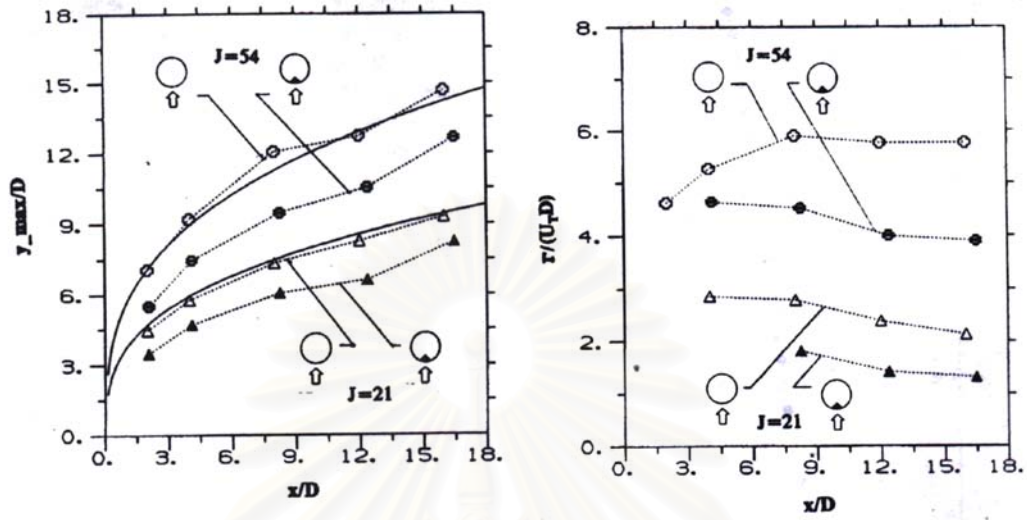


(ข)

รูปที่ 1.14 การลดลงของ Concentration ตามแนวแกนเจ็ท ( $s$ ) (Smith and Mungal, 1998)

(ก) สเกลด้วย  $r^2 d$

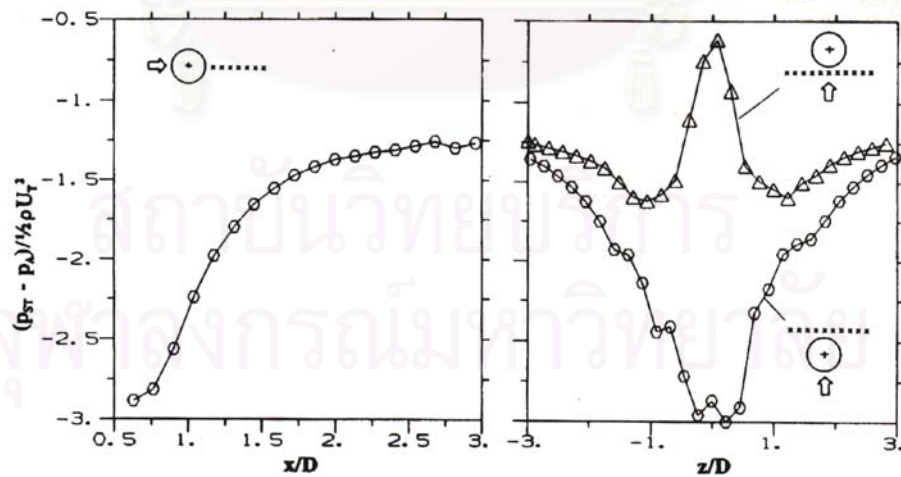
(ข) สเกลด้วย  $r d$



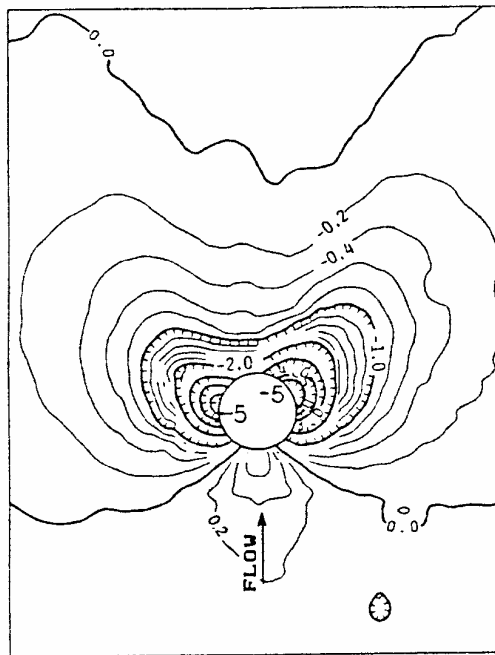
รูปที่ 1.15 ผลของการติด Tab ที่มีต่อเจ็ทในกระแสมขวาง (Zaman and Foss, 1997)

(ก) เส้นทางของค่ามากที่สุดของความเร็วเฉลี่ยบนระนาบสมมาตร

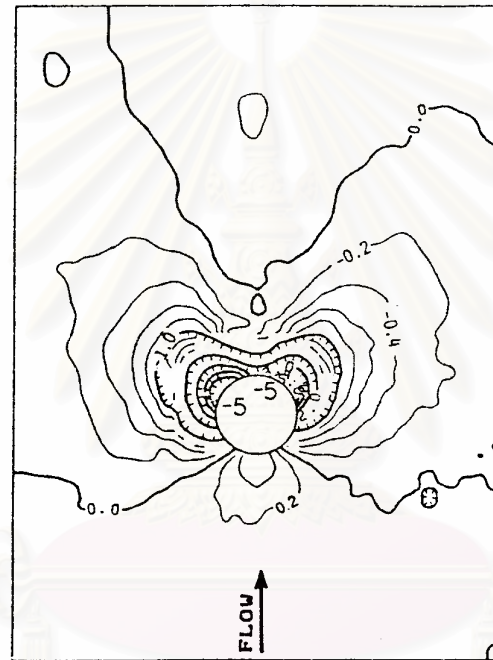
(ข) การกระจายของค่า Circulation ในทิศทาง  $x$  ตามแนว Downstream ( $x$ ) ที่ด้านหนึ่งของแกนสมมาตร



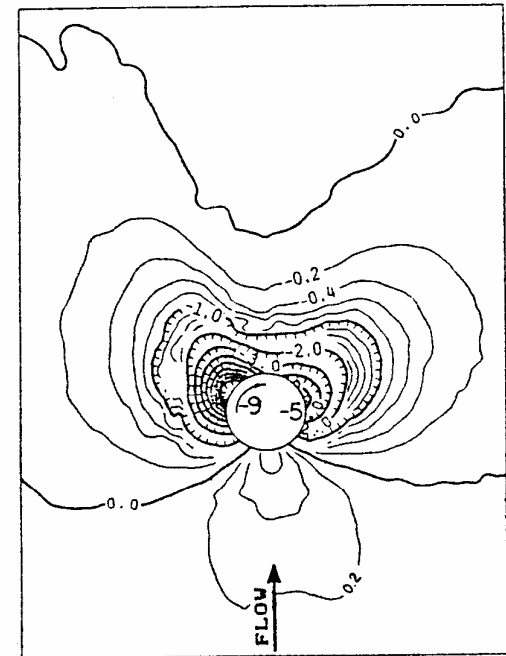
รูปที่ 1.16 การกระจายของความดันสถิตในทิศทางต่างๆ (Zaman and Foss, 1997)



(ก)



(ข)

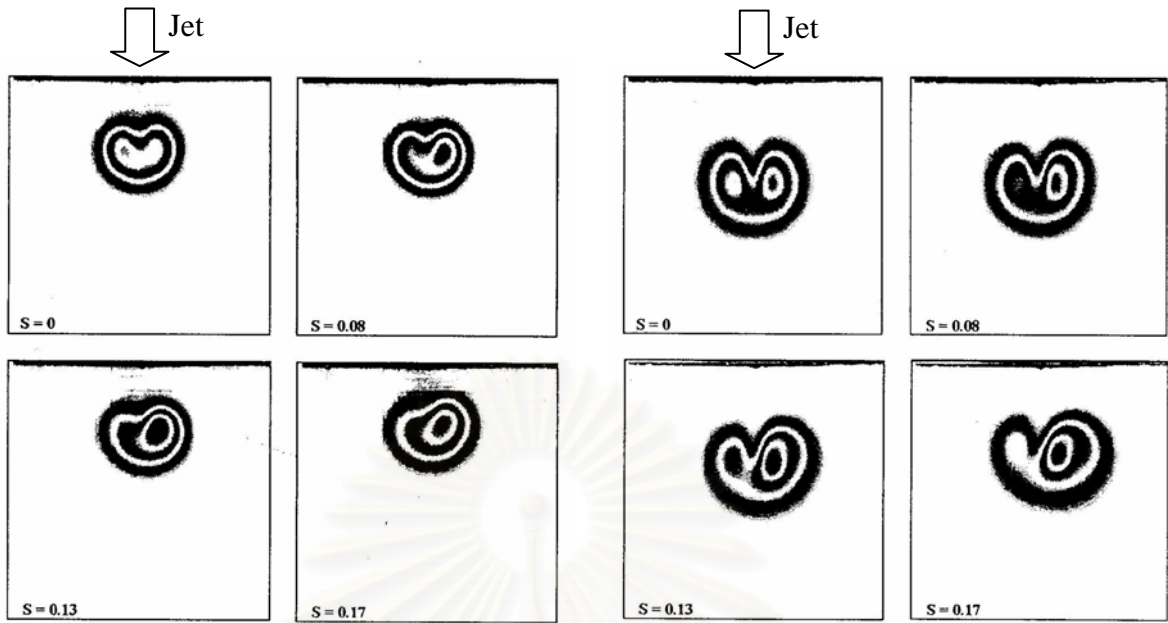
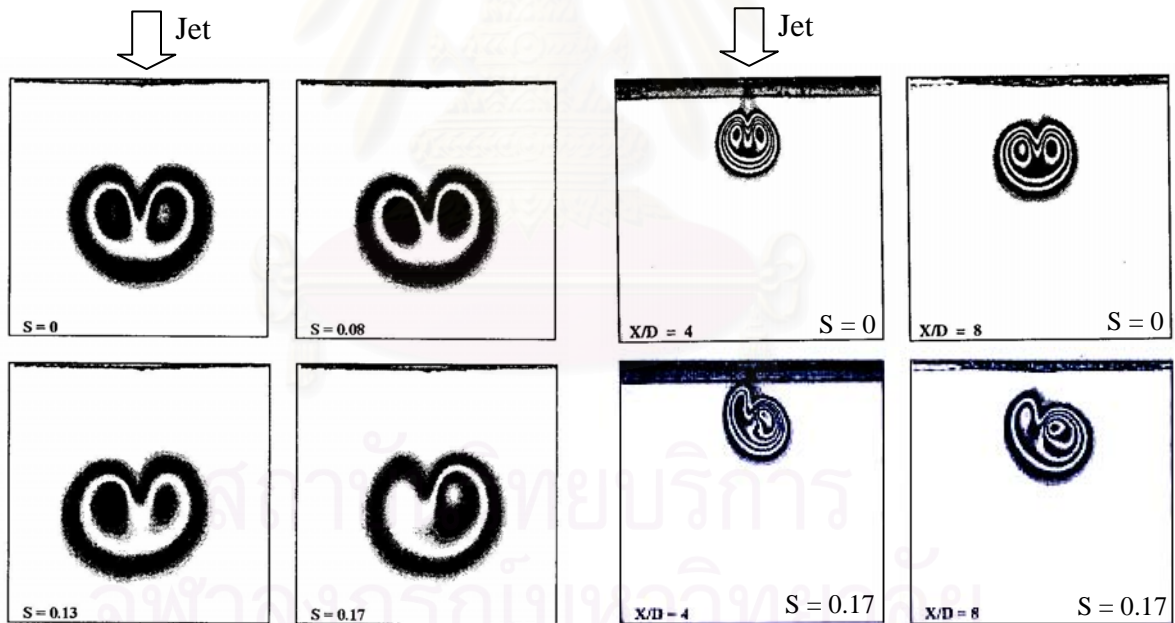


(ค)

รูปที่ 1.17 ผลของระดับความปั่นป่วนและการหมุนควงที่มีต่อความดันพื้นผิวที่อัตราส่วนความเร็ว ( $r$ ) = 4

(ก) กรณีที่มีความปั่นป่วนต่ำ (3%) (ข) กรณีที่มีความปั่นป่วนสูง (10-16%) (ค) กรณีที่ Swirl ratio ( $Sr$ ) = 58%



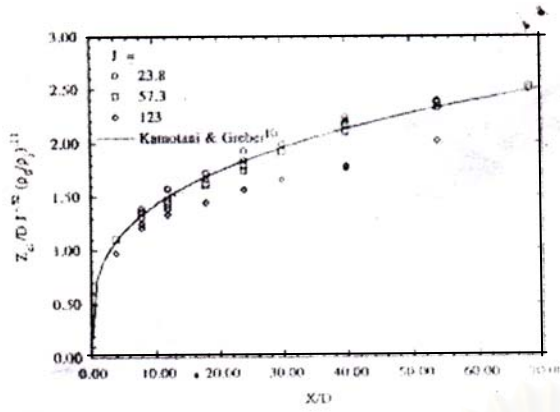
(ก)  $r_v = 4.9$ (ข)  $r_v = 7.6$ (ค)  $r_v = 11.1$ 

(ง)

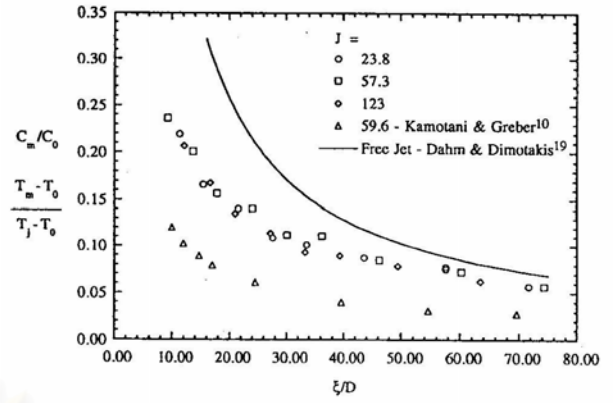
รูปที่ 1.18 Contour ของ Mean concentration (รูป end view, ด้านซ้ายแสดงด้านที่ความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทมีทิศทางเดียวกับกระแสลมขวาง (Niederhaus et al., 1997)

(ก) - (ค) เปรียบเทียบผลของ Swirl number (S) ที่  $x/d = 24$

(ง) เปรียบเทียบผลของ Swirl number (S) ที่  $r_v = 7.6$  และ  $x/d = 4$  และ 8



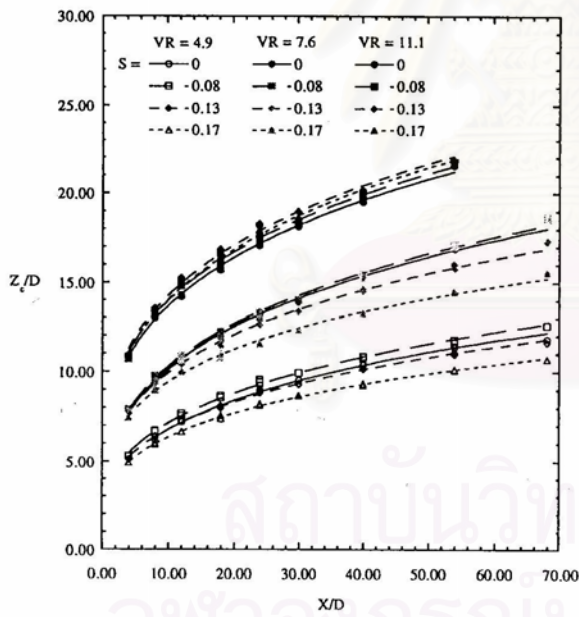
(ก)



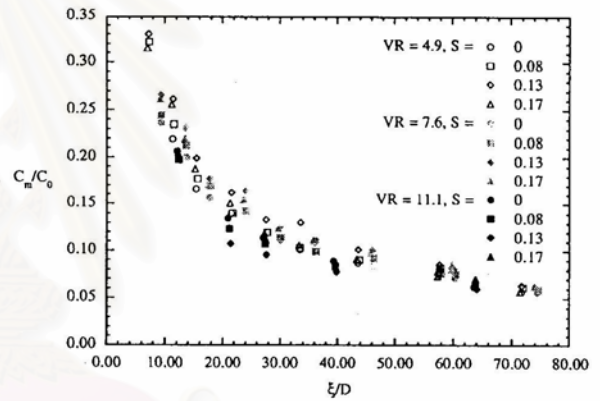
(ข)

รูปที่ 1.19 คุณลักษณะการผสมของ Concentration (Niederhaus et al., 1997)

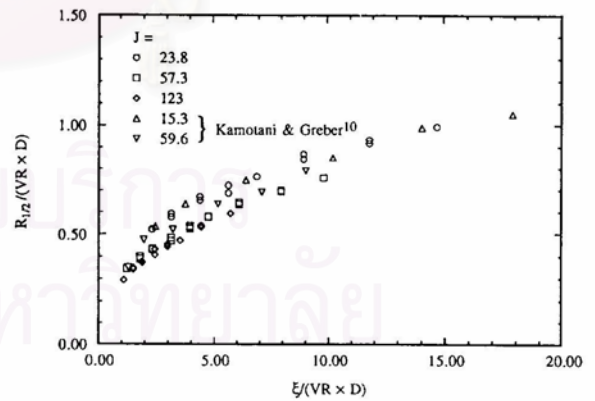
(ก) Centerplane trajectory (ข) การลดลงตามแนวแกนเจ็ท



(ก)



(ข)

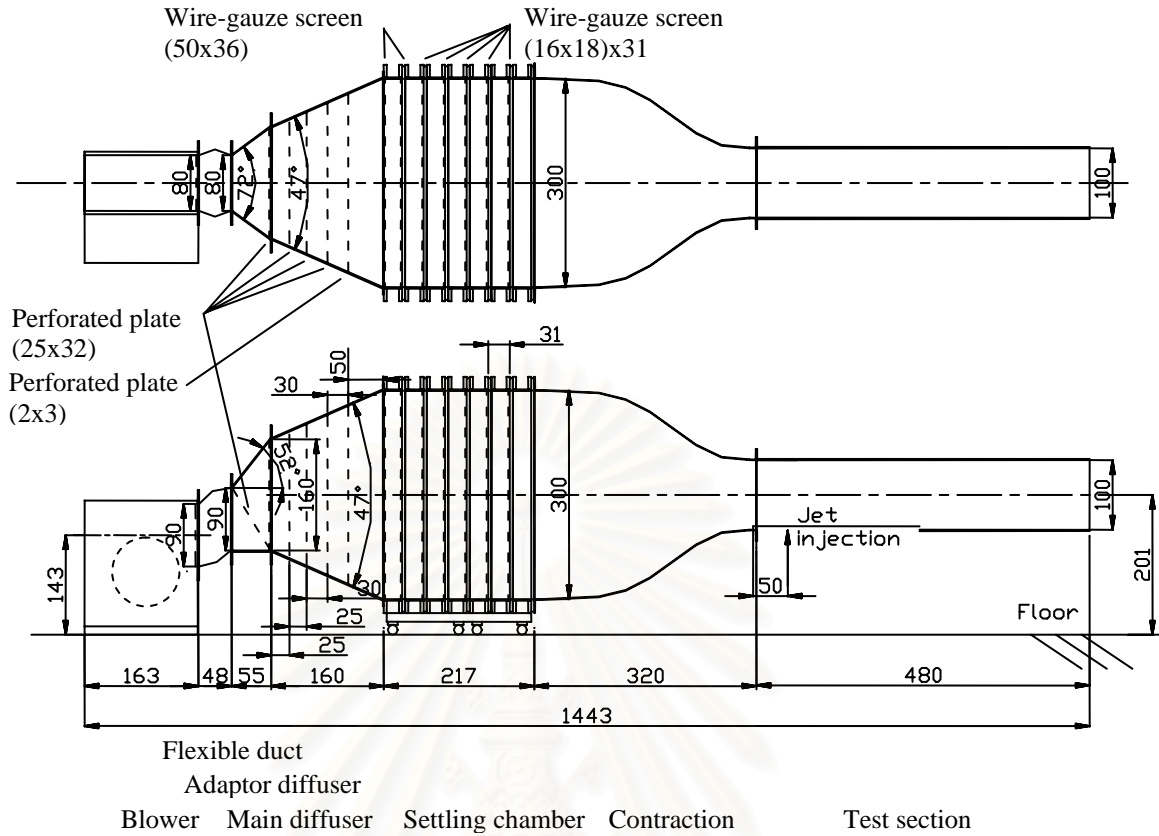


(ค)

รูปที่ 1.20 ผลของการหมุนควงที่มีต่อการผสม (Niederhaus et al., 1997)

(ก) เส้นทางของจุด Centroid บนระนาบสมมาตร

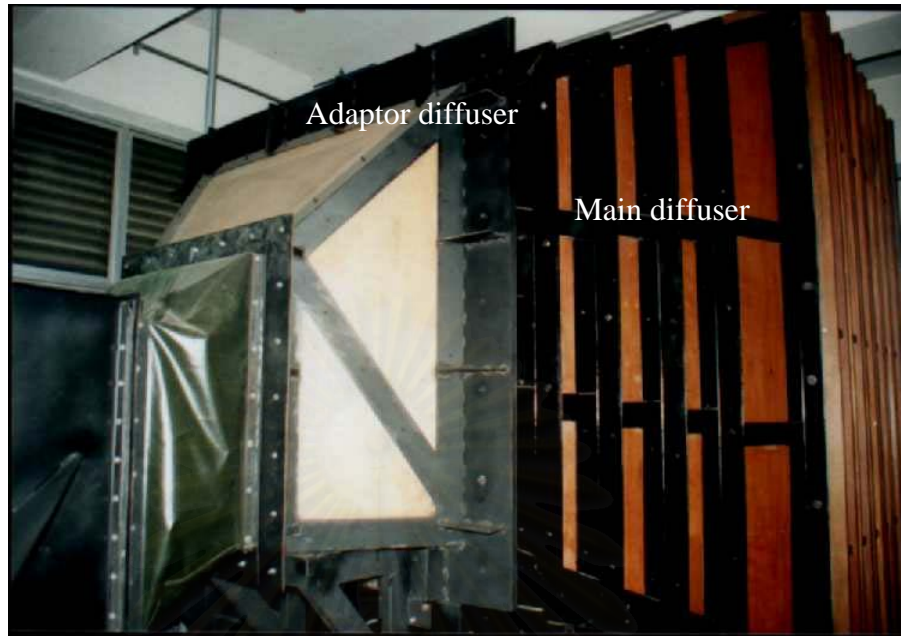
(ข) การลดลงตามแนวแกนเจ็ท (ค) การขยายตัวตามแนวแกนเจ็ท



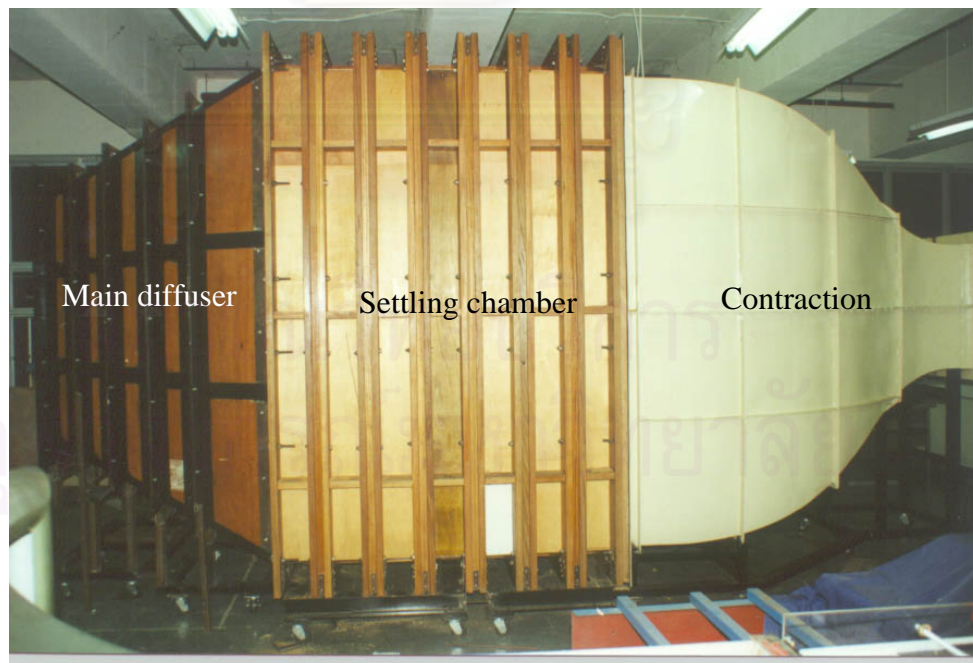
รูปที่ 2.1 รูป Schematic ของอุโมงค์ลม (หน่วยเซนติเมตร)



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

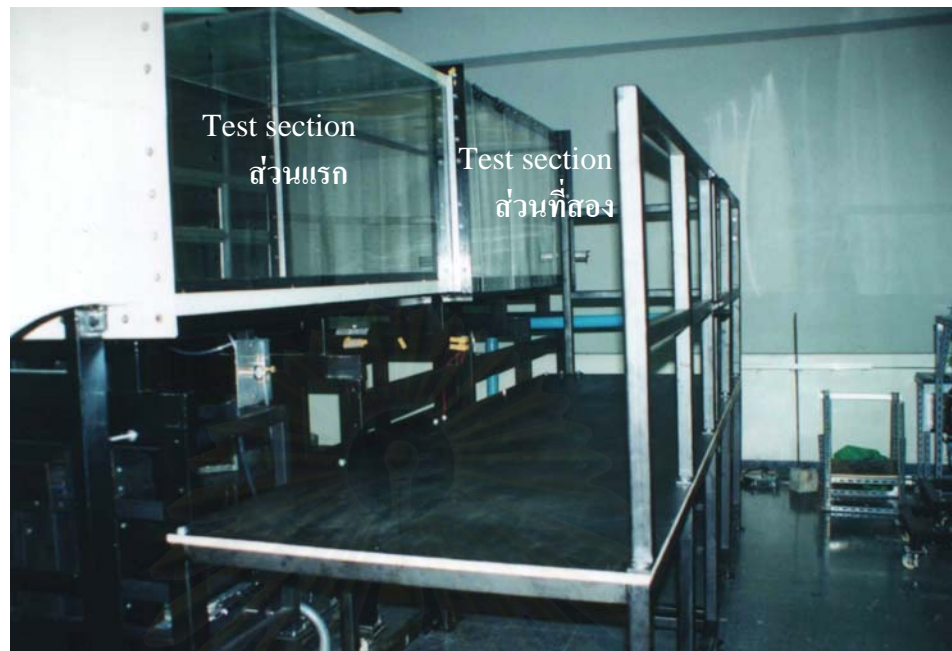


รูปที่ 2.3 ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัดซึ่งประกอบด้วย Main diffuser และ Adaptor diffuser

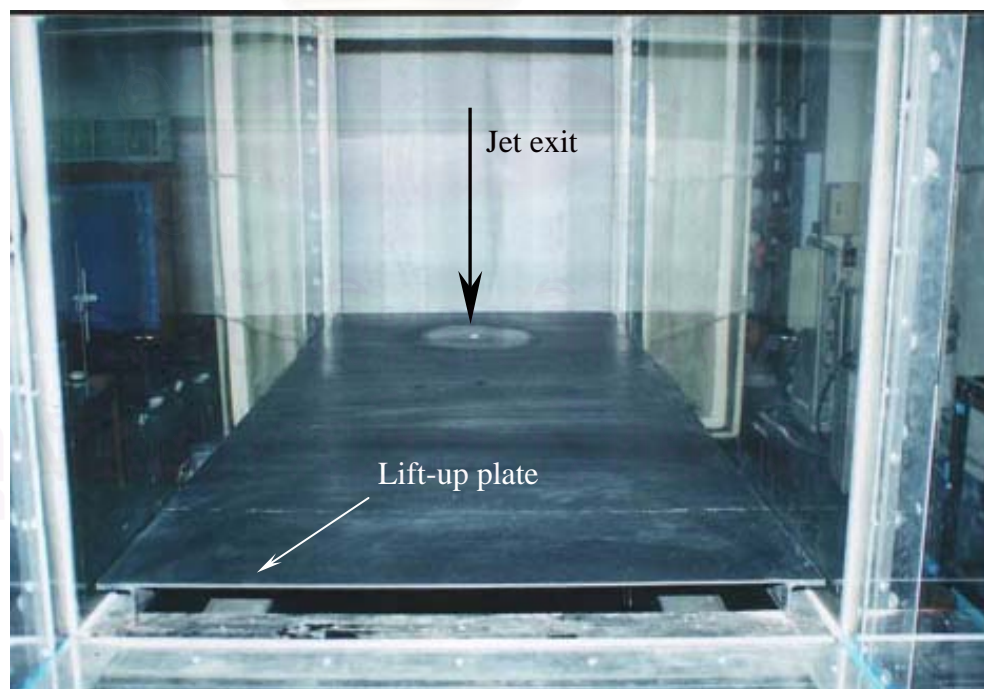


รูปที่ 2.4 ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) และ Contraction ของอุโมงค์ลม



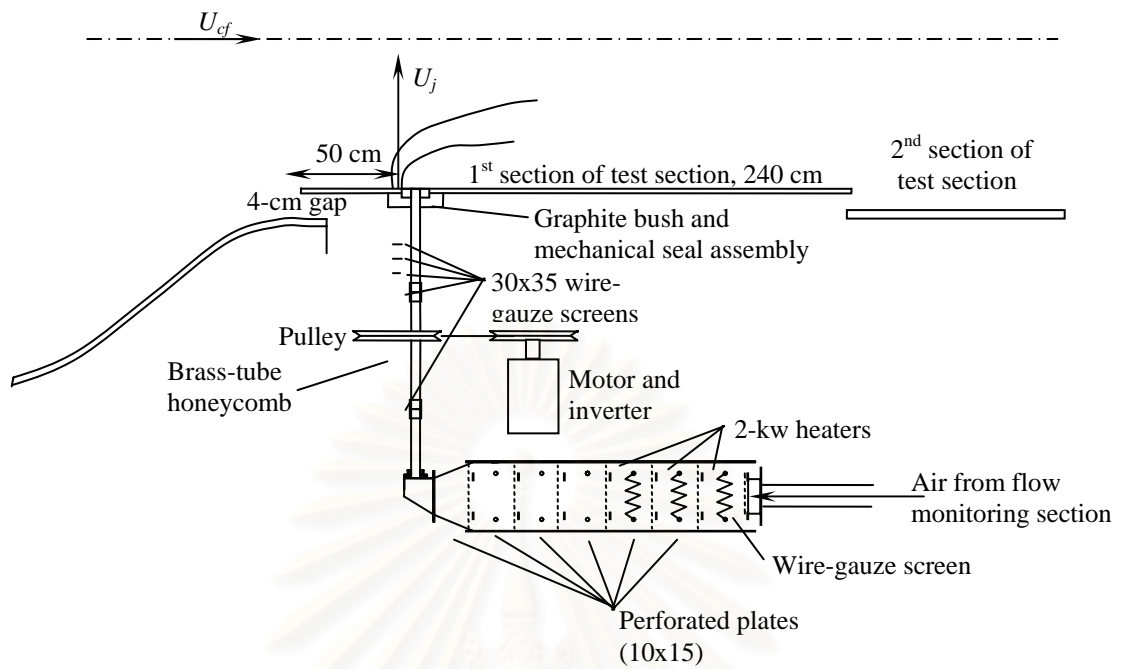


รูปที่ 2.5 หน้าตัดทดสอบ (Test section) ทั้ง 2 ส่วนของอุโมงค์ลม

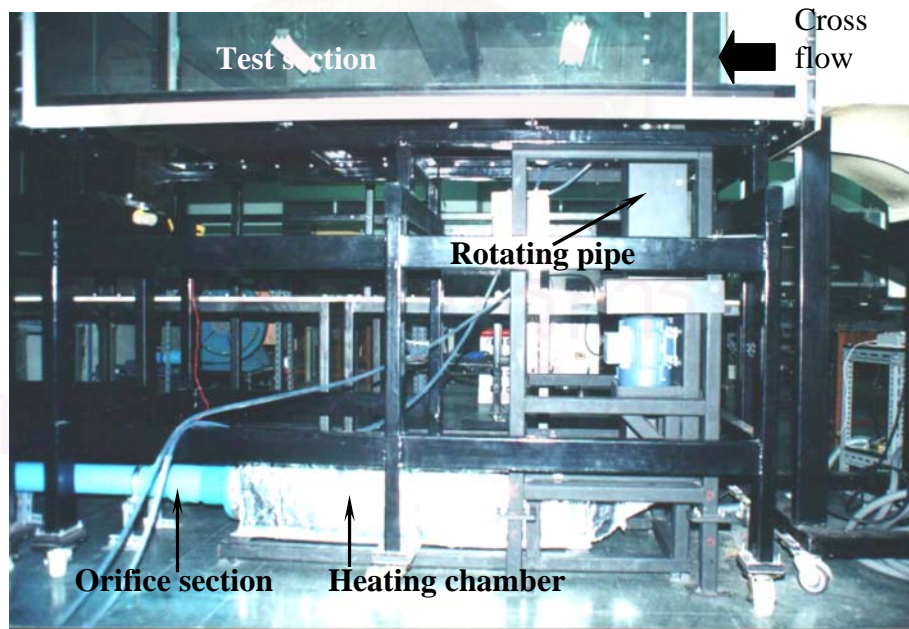


รูปที่ 2.6 ภายในหน้าตัดทดสอบ (Test section) ส่วนแรก

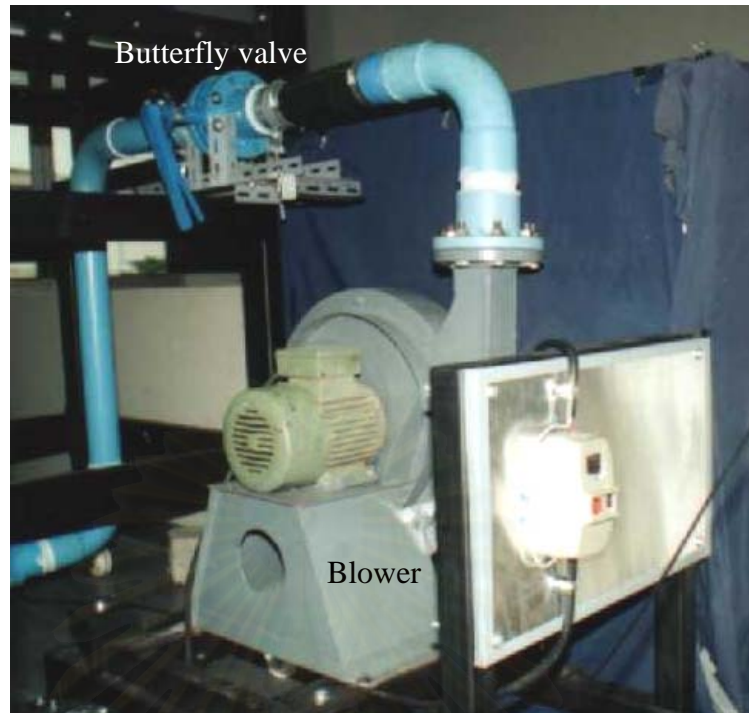




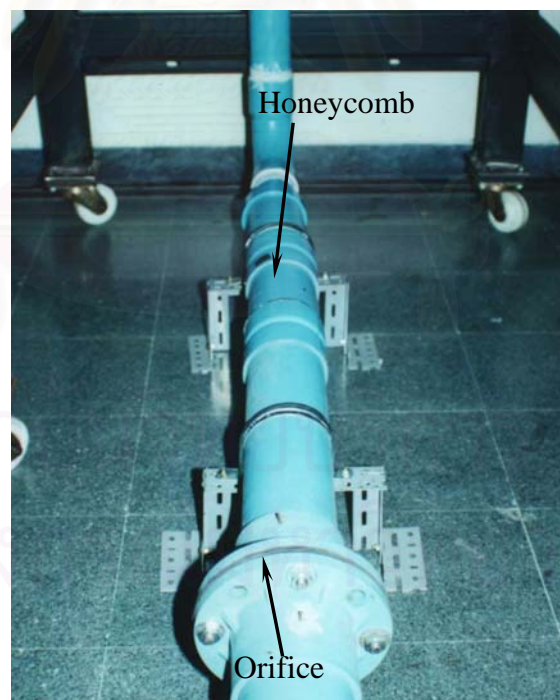
รูปที่ 2.7 รูป Schematic ของชุดเจ็ทแบบท่อหมุน



รูปที่ 2.8 ชุดเจ็ทแบบท่อหมุนทั้ง 3 ส่วนคือ Orifice section, Heating chamber และ Rotating pipe



(ก)

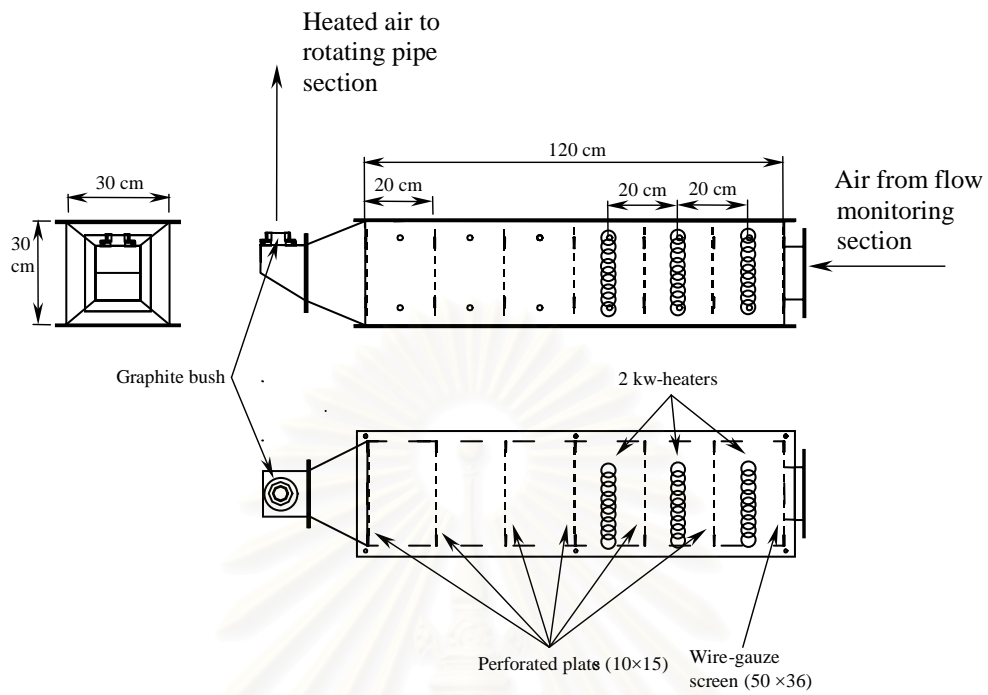


(ข)

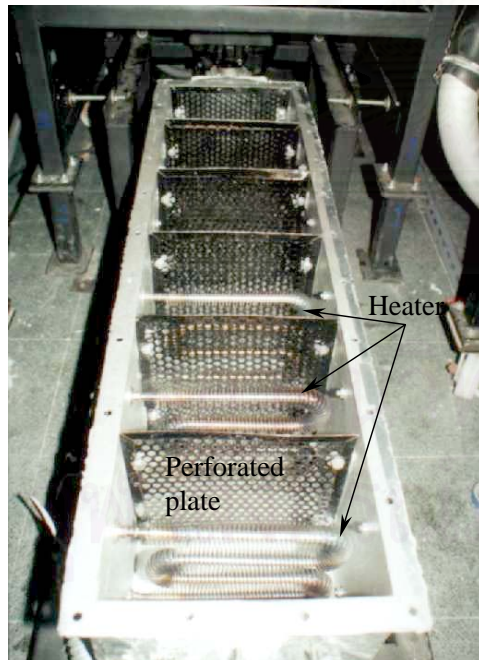
รูปที่ 2.9 ส่วนของพัดลมและ Orifice

(ก) พัดลมหอยโข่ง (Centrifugal blower) และวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly valve)

(ข) Honeycomb และ Orifice



(ก)

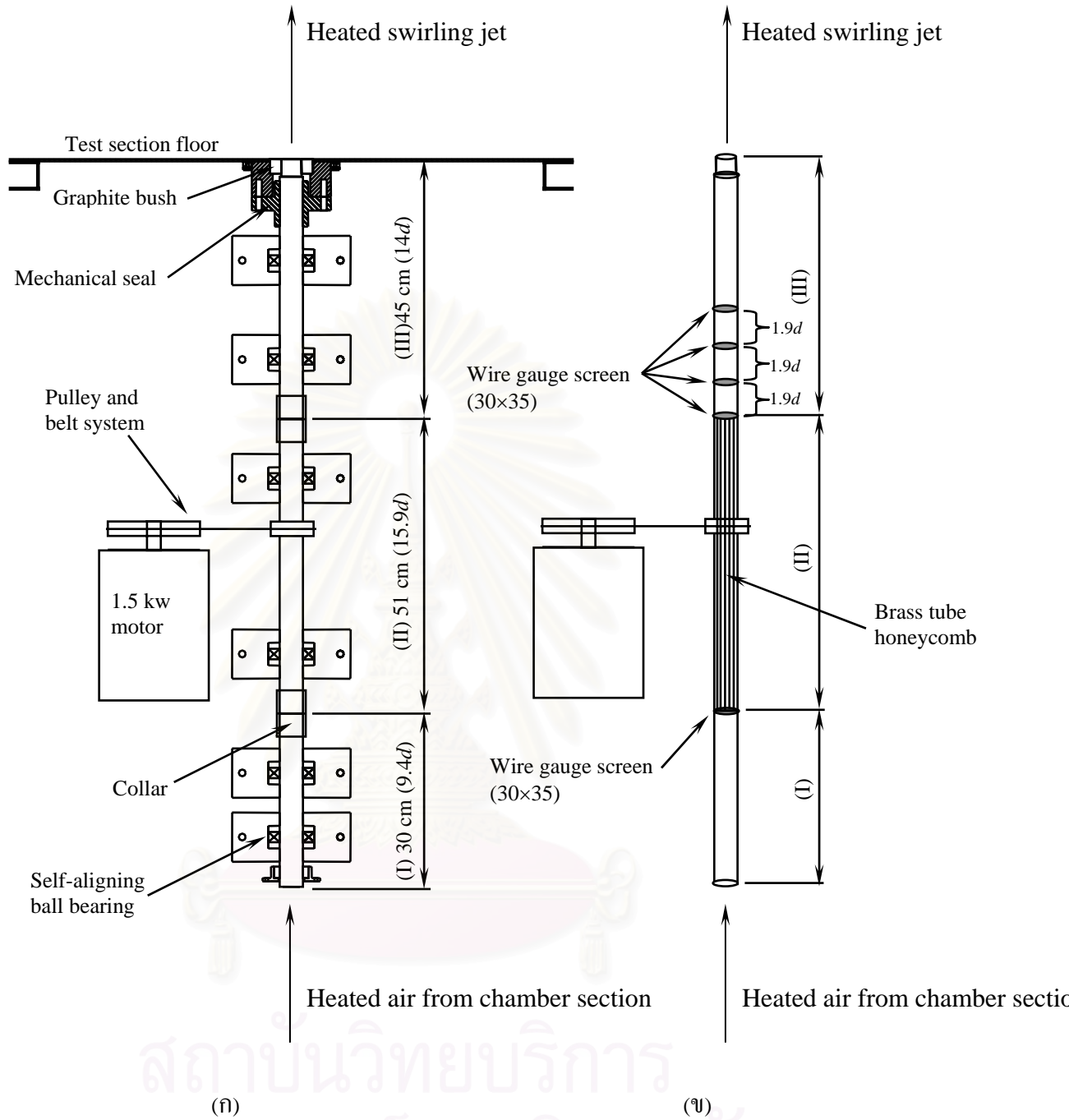


(ข)



(ค)

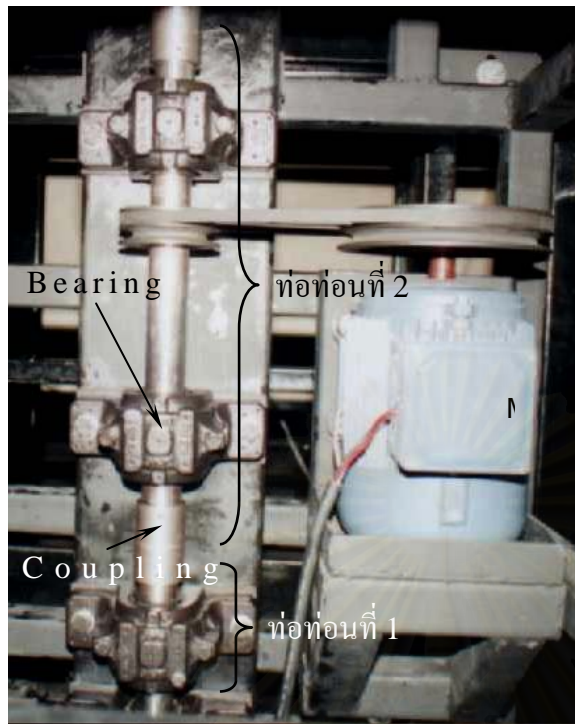
รูปที่ 2.10 ส่วน Heating chamber (ก) รูป Schematic, (ข) รูปถ่ายภาพใน และ (ค) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Variac ที่ใช้สำหรับ Heater



รูปที่ 2.11 รูป Schematic ของส่วนท่อหมุน (Rotating pipe)

(ก) ส่วนประกอบต่างๆ (ข) ส่วนประกอบสำหรับปรับสภาวะการไหล





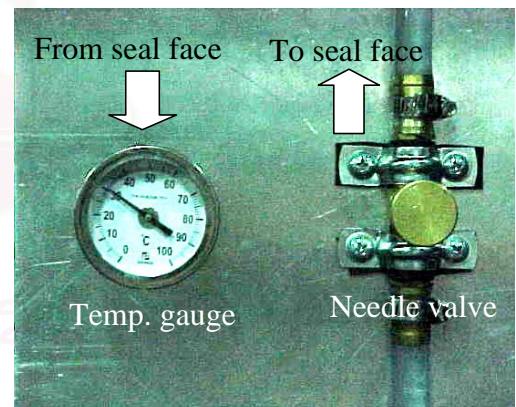
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.12 รูปถ่ายของส่วนท่อหมุน (Rotating pipe)

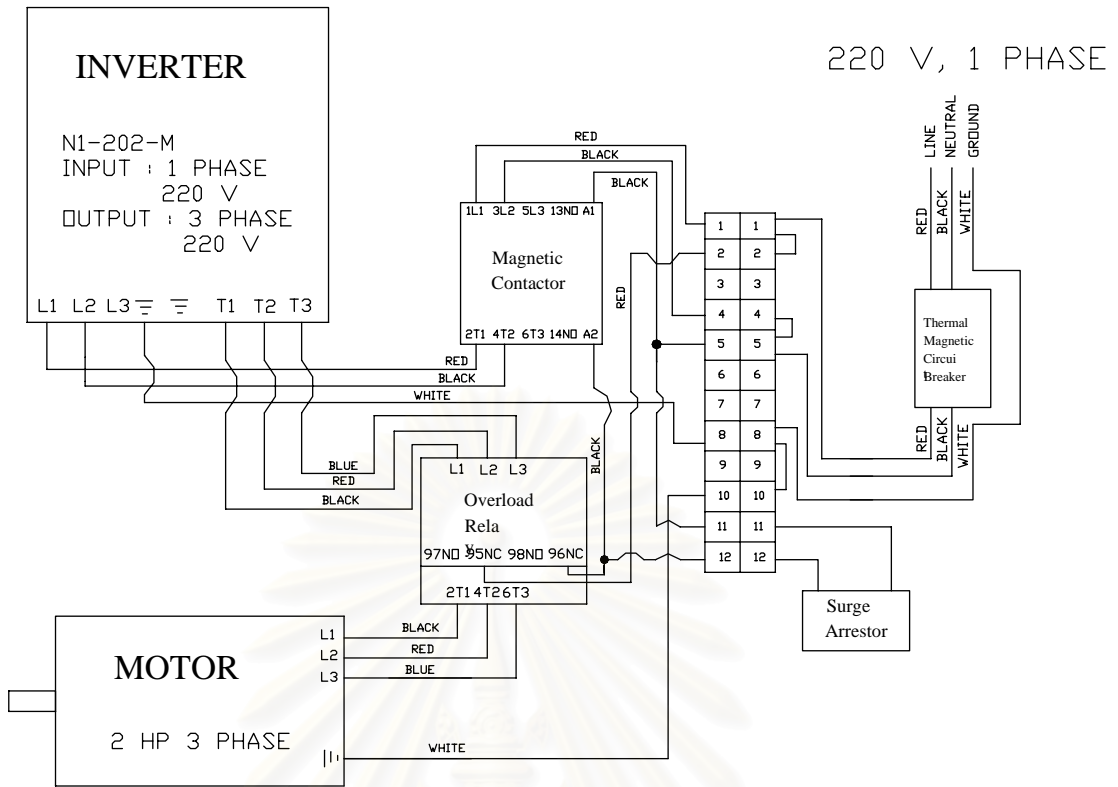
(ก) ท่อส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สองและการส่งกำลังโดย Pulley และสายพาน

(ข) ท่อส่วนที่สองและส่วนที่สาม

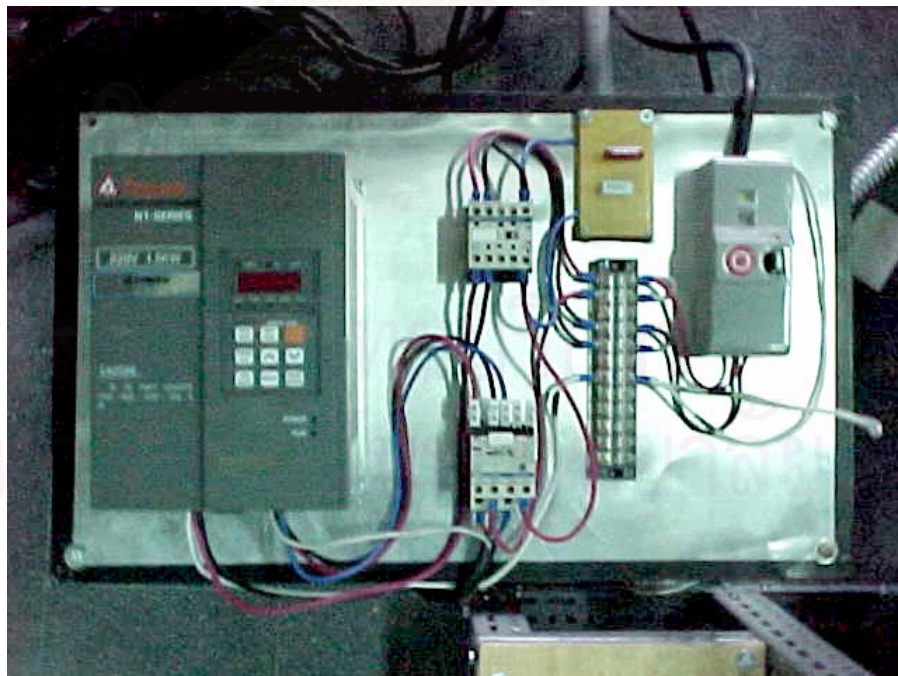
(ค) Mechanical seal และการประกอปกันของท่อหมุนกับพื้นล่างของ Test section

(ง) เกจวัดอุณหภูมิและ Needle valve สำหรับการหล่อเย็นของ Mechanical seal



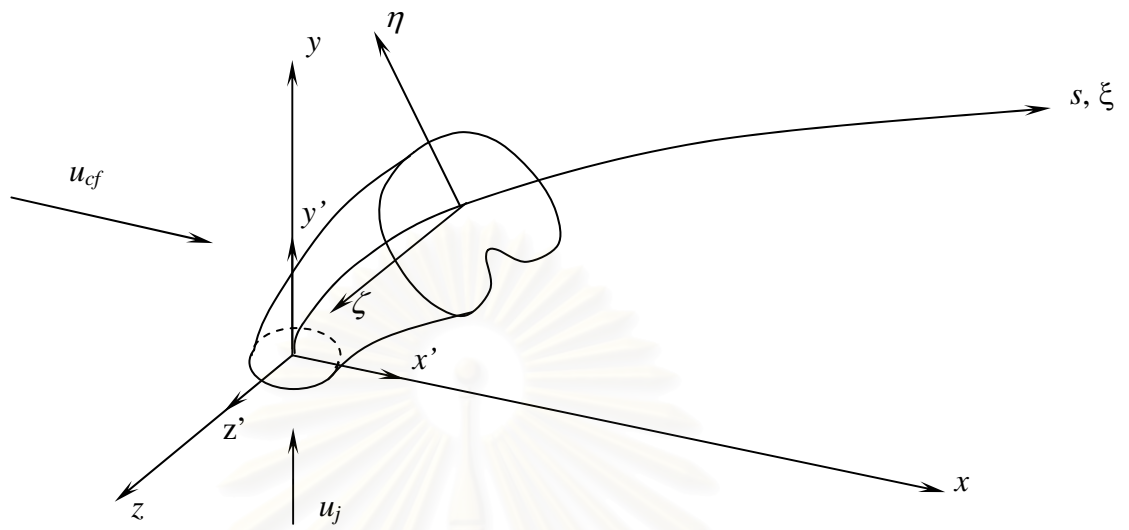


(ก)



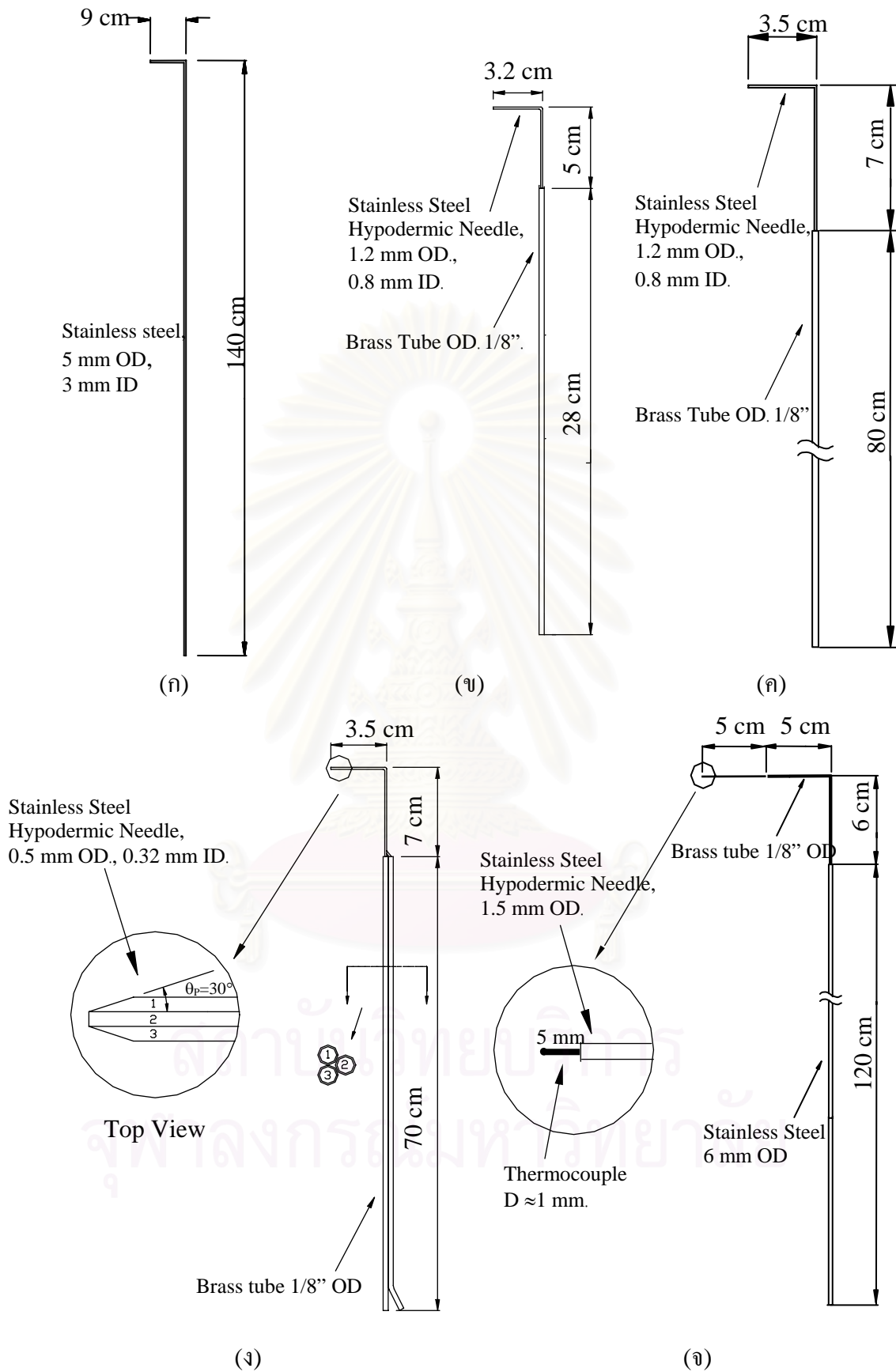
(ข)

รูปที่ 2.13 วงจรที่ใช้ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ (ก) รูป Schematic, (ข) ภาพถ่าย

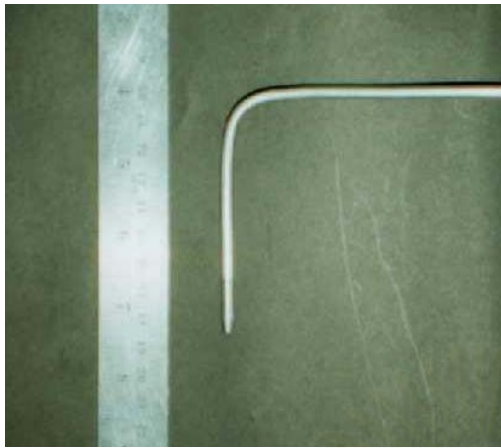


รูปที่ 2.14 พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



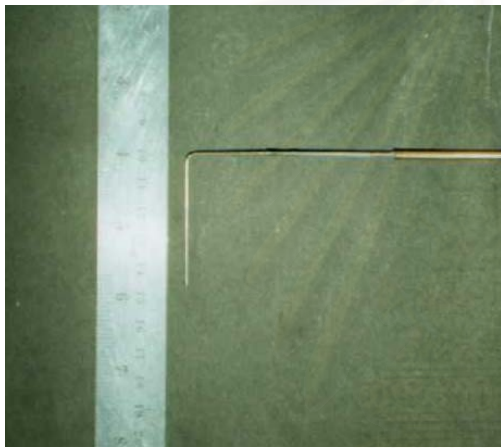
รูปที่ 2.15 รูป Schematic ของ Probe ที่ใช้วัด (ก) - (ค) Pitot probe A, B และ C ตามลำดับ  
(ง) Yaw probe และ (จ) Thermocouple probe



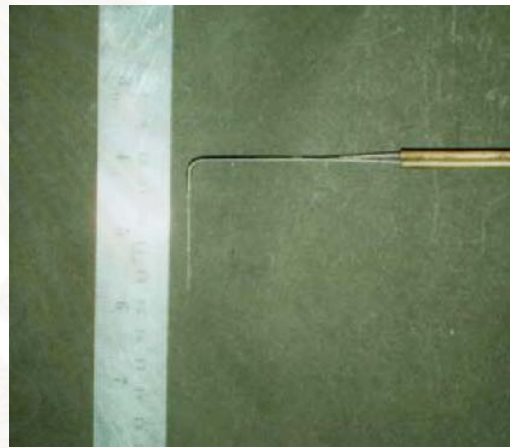
(ก)



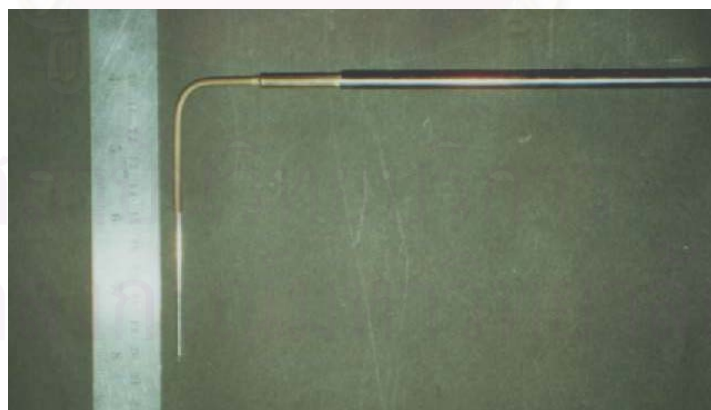
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 2.16 รูปถ่ายของ Probe ที่ใช้วัด (ก)-(ค) Pitot probe A, B และ C ตามลำดับ  
(ง) Yaw probe และ (จ) Thermocouple probe



(ก)



(ข)



(ค)



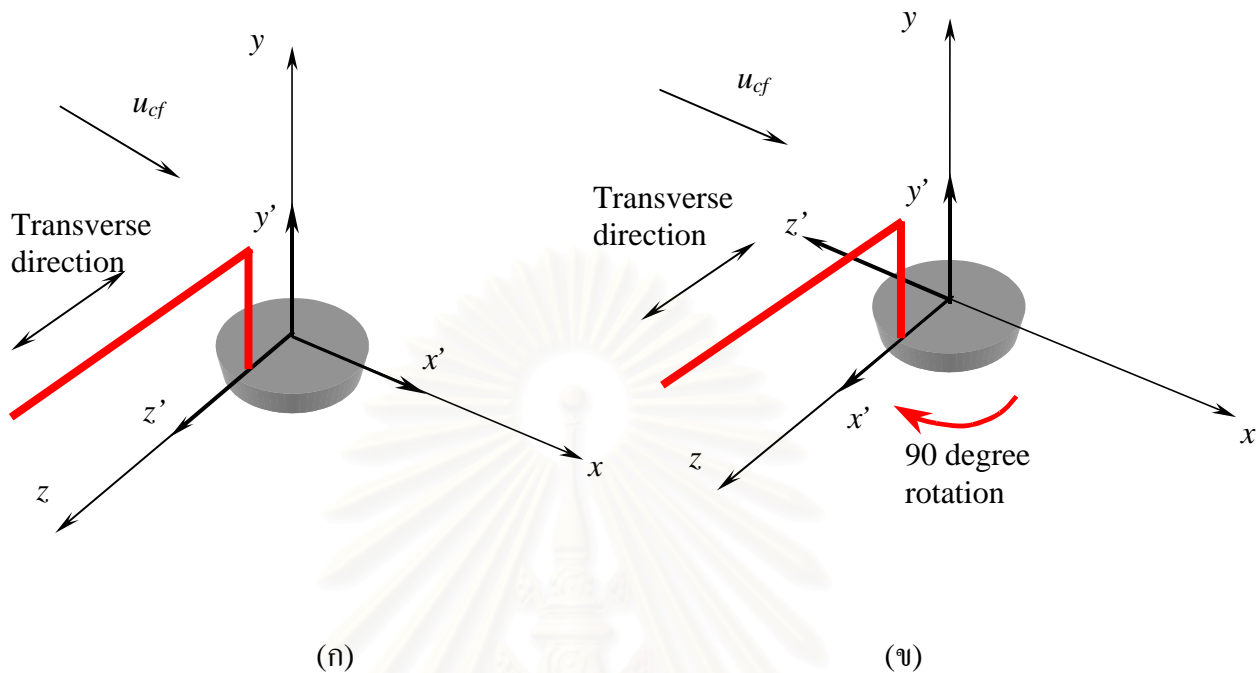
(ง)

รูปที่ 2.17 อุปกรณ์การวัดอื่นๆ

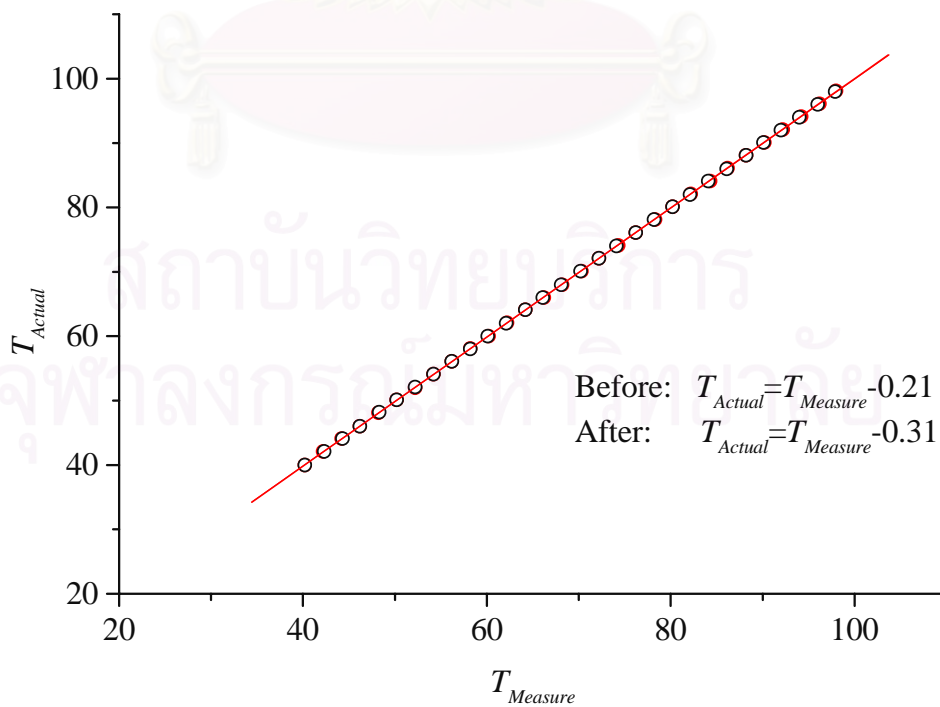
(ก) Pressure transducer (ข) Digital multimeter

(ค) Optical Tachometer (ง) ตัวอ่านอุณหภูมิจาก Thermocouple

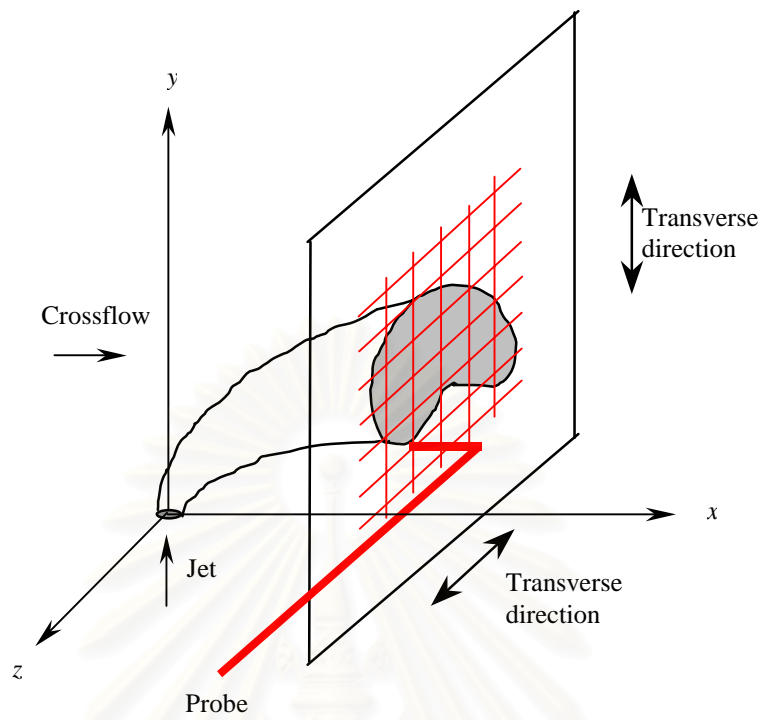




รูปที่ 2.18 ลักษณะการวัดสถานะเริ่มต้นที่ปากเจ็ท (ก) ตามแนว  $z'$  (ข) ตามแนว  $x'$

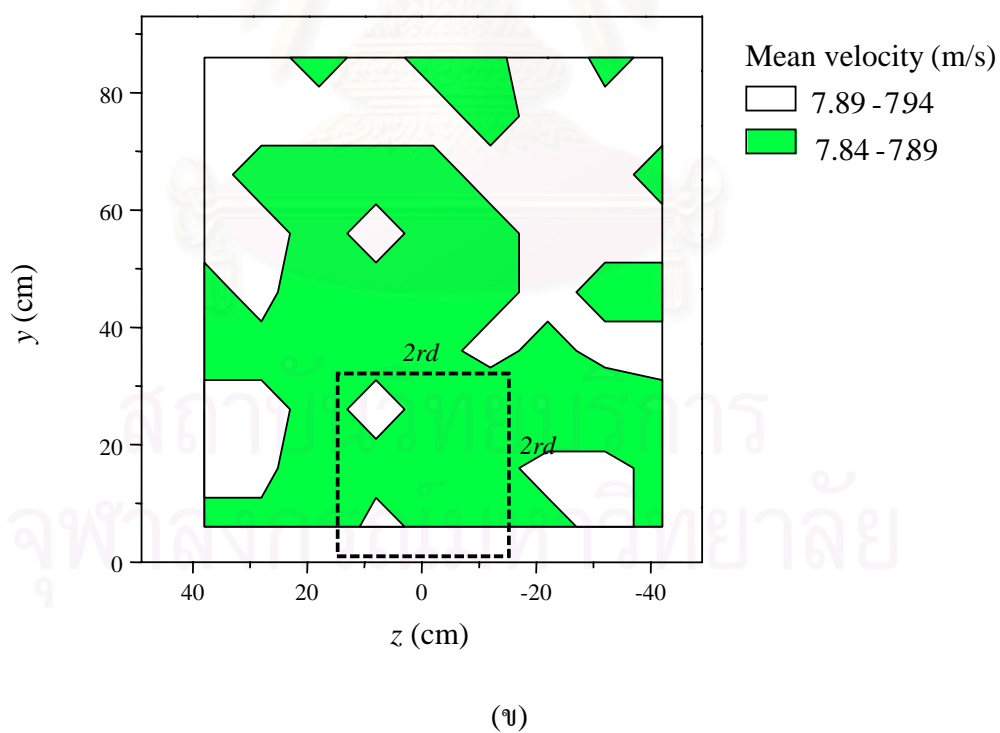
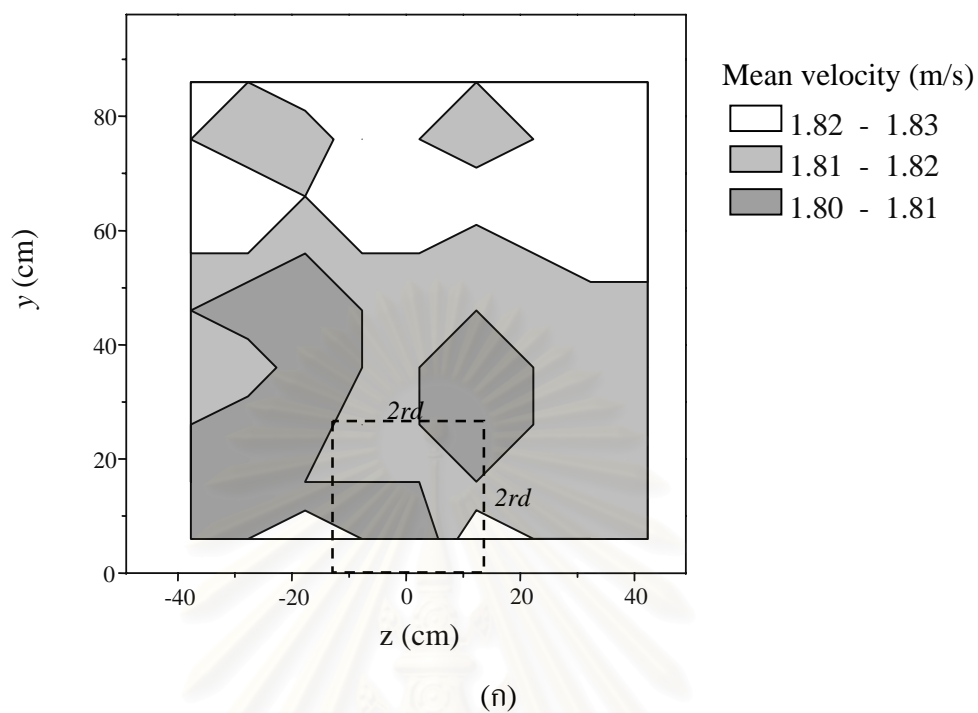


รูปที่ 2.19 ลักษณะการวัดการกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัด



รูปที่ 2.20 ผลการสอบเทียบ Thermocouple เทียบกับอุปกรณ์มาตรฐานคือ Thermometer

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

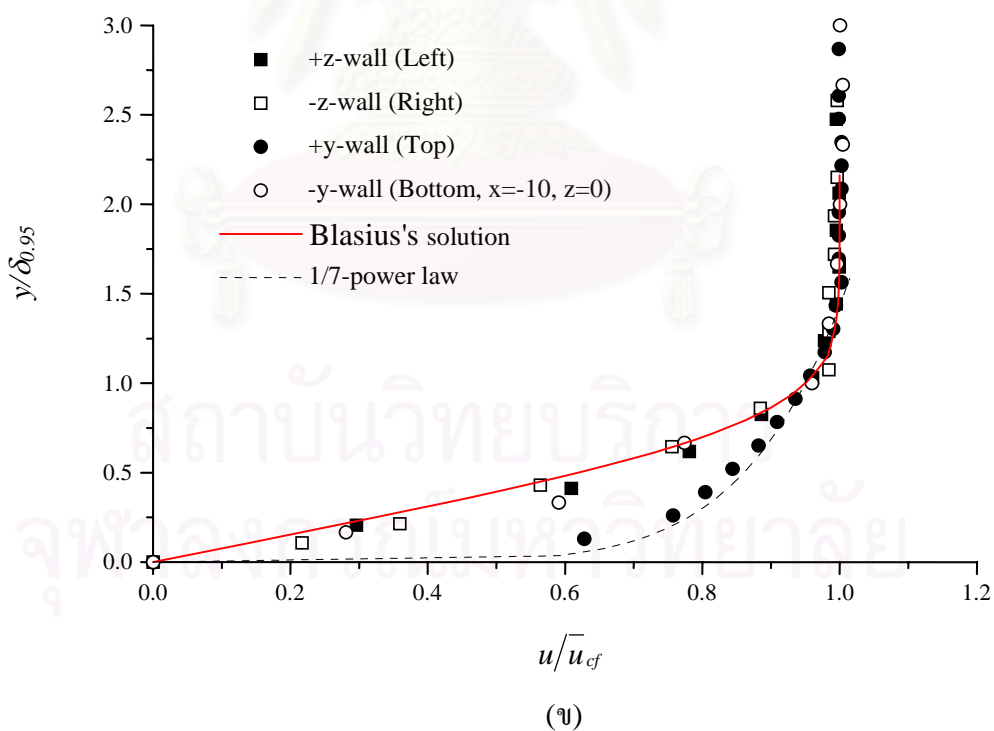
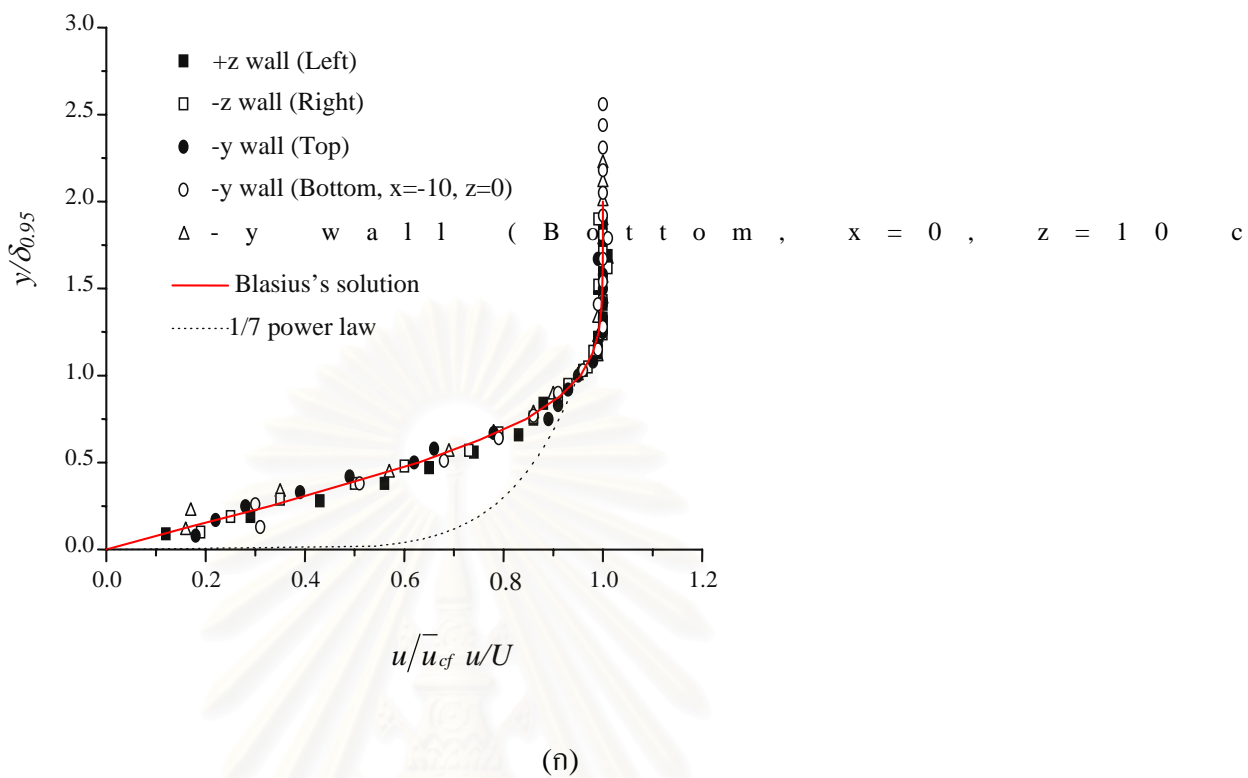


รูปที่ 3.1 ความสม่ำเสมอของความเร็วในแนวแกนเฉลี่ย ( $u$ ) ของกระแสดมขวางที่  $x = -15$  cm

(ก) ที่ความเร็ว 1.8 เมตรต่อวินาที (ข) ที่ความเร็ว 7.9 เมตรต่อวินาที

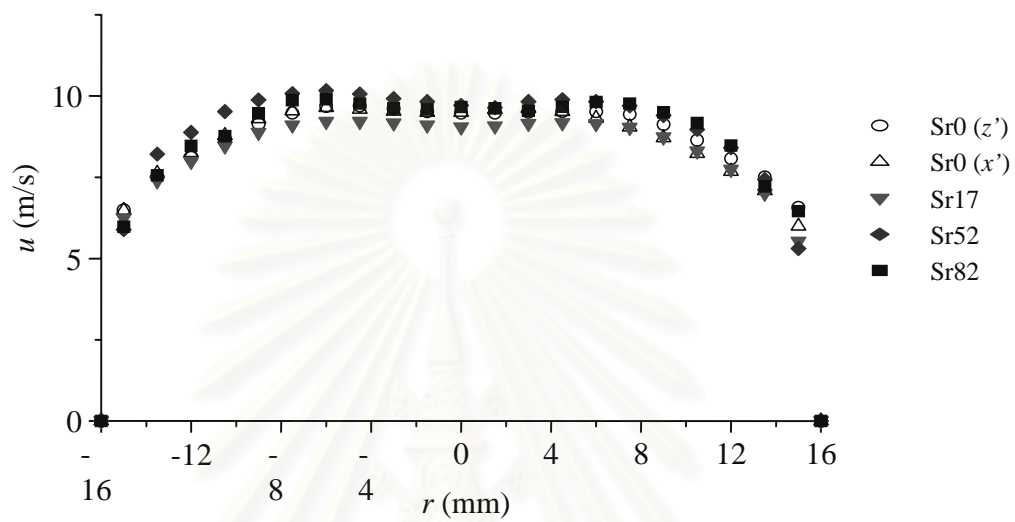


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

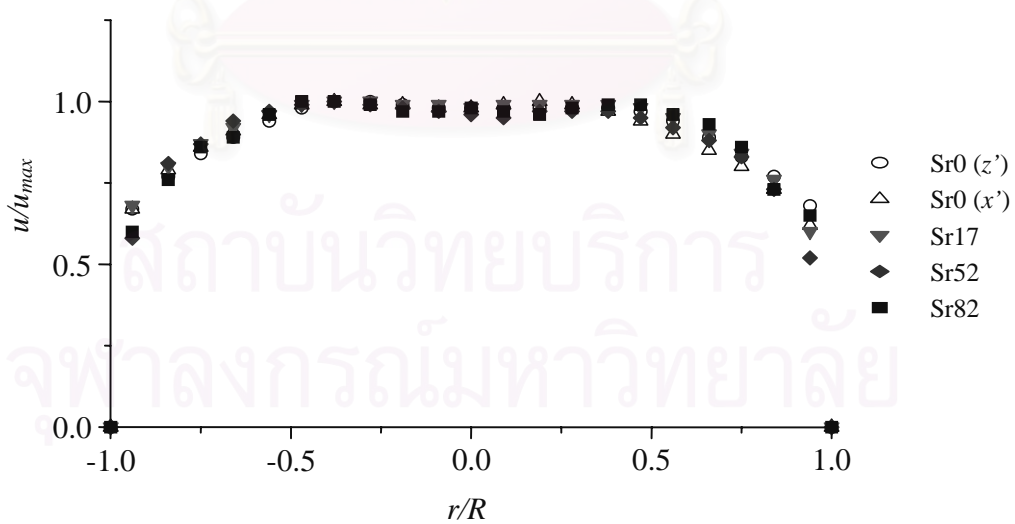


รูปที่ 3.2 รูปร่างของ Boundary layer บนผนังทั้ง 4 ด้านในหน้าตัดทดสอบ (ก) ที่ความเร็ว 1.8 เมตรต่อวินาที (ข) ที่ความเร็ว 7.9 เมตรต่อวินาที



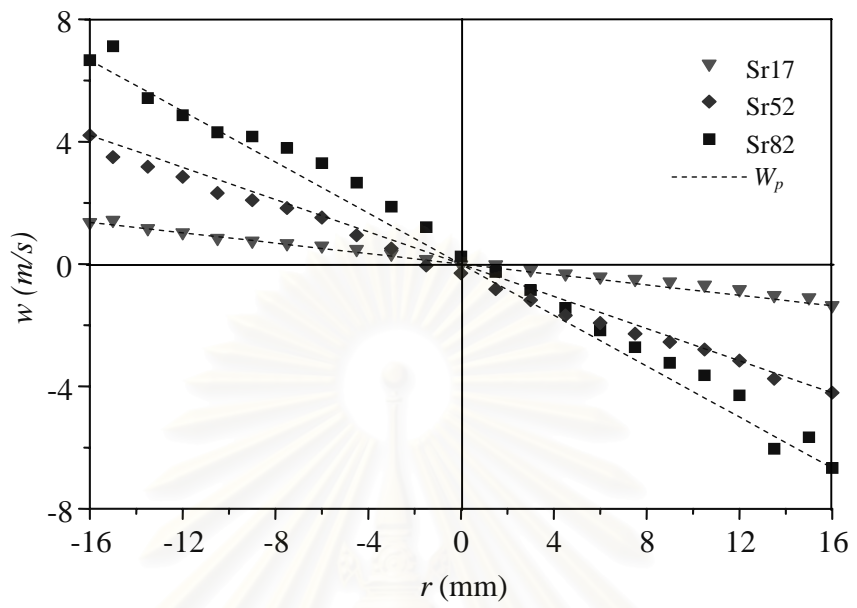


(ก)

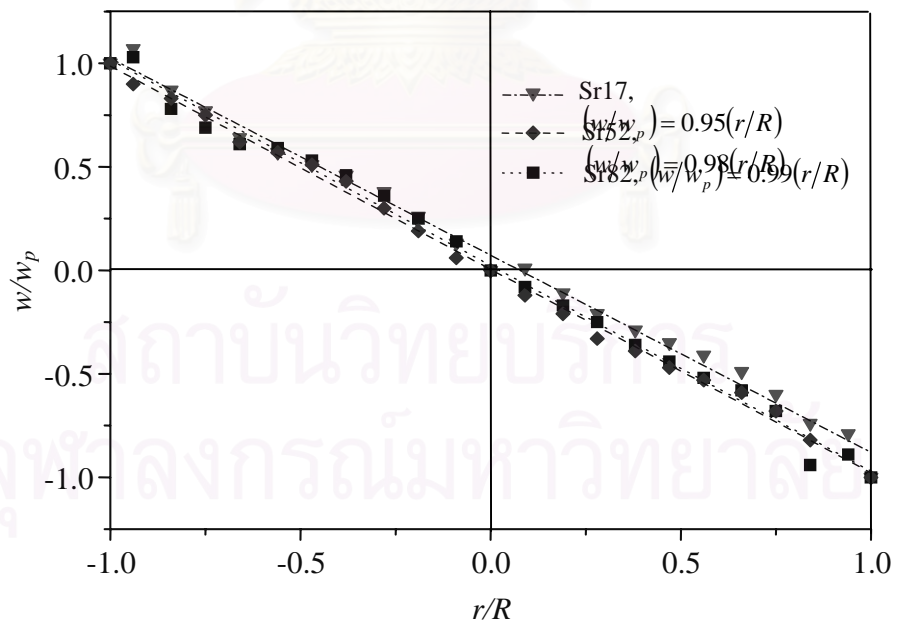


(ข)

รูปที่ 3.3 รูปร่างความเร็วในแนวแกนของเจ็ทอากาศที่ทางออกเจ็ท (ก)  $u$ , (ข)  $u/u_{max}$

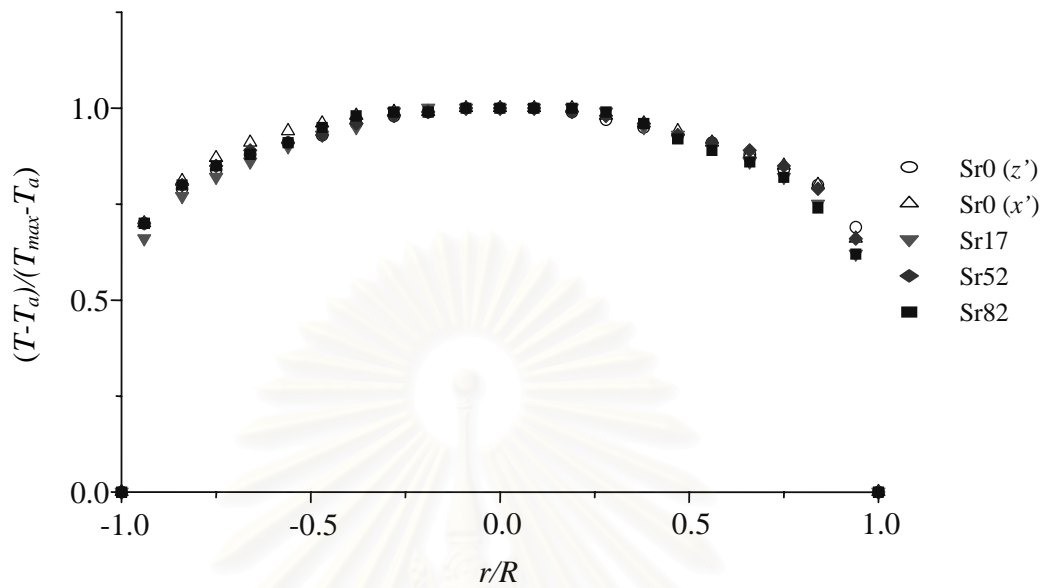


(ก)

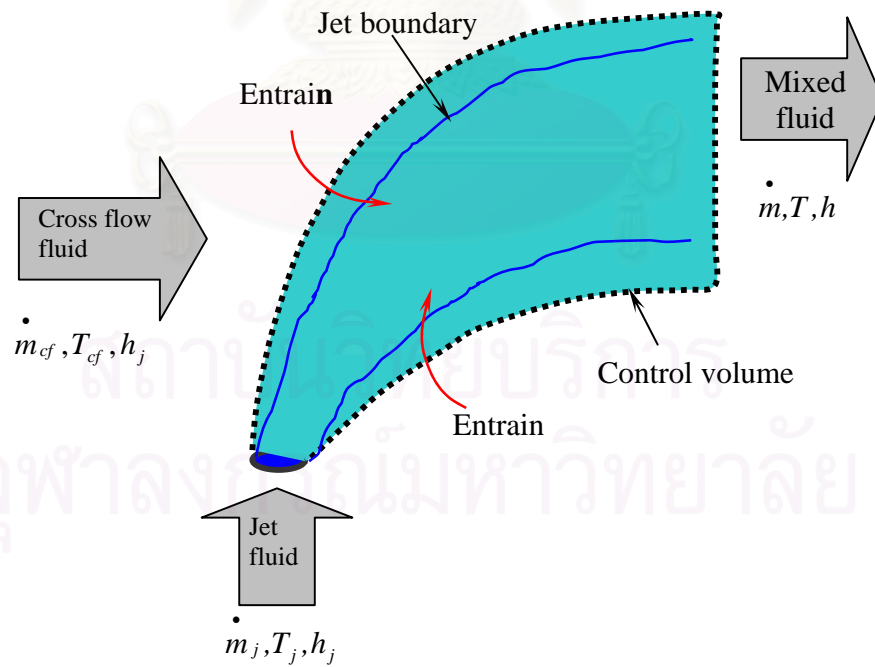


(ข)

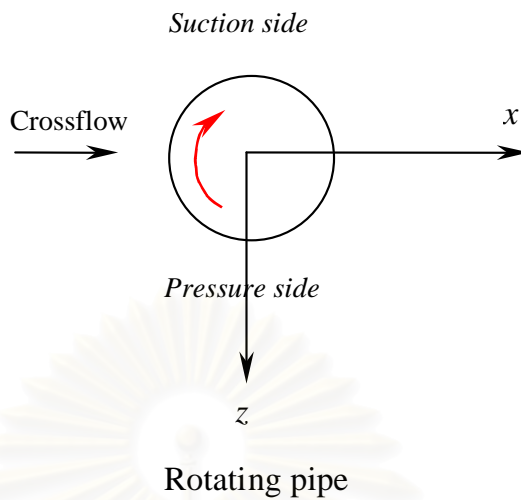
รูปที่ 3.4 รูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ทอากาศที่ทางออกเจ็ท (ก)  $w$ , (ข)  $w/w_p$



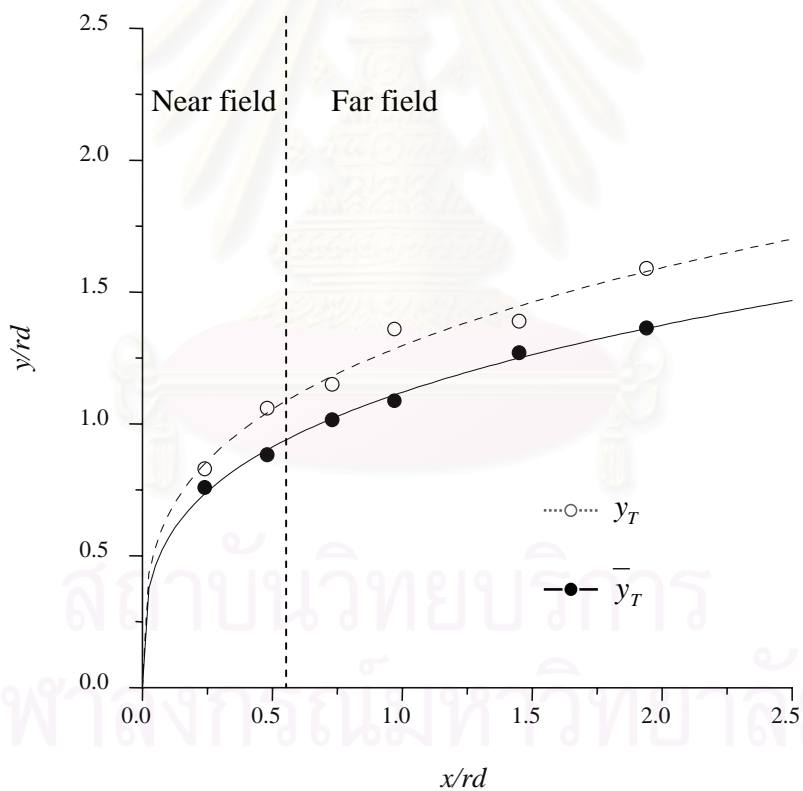
รูปที่ 3.5 รูปร่างอุณหภูมิของเจ็ทอากาศที่ทางออกเจ็ท



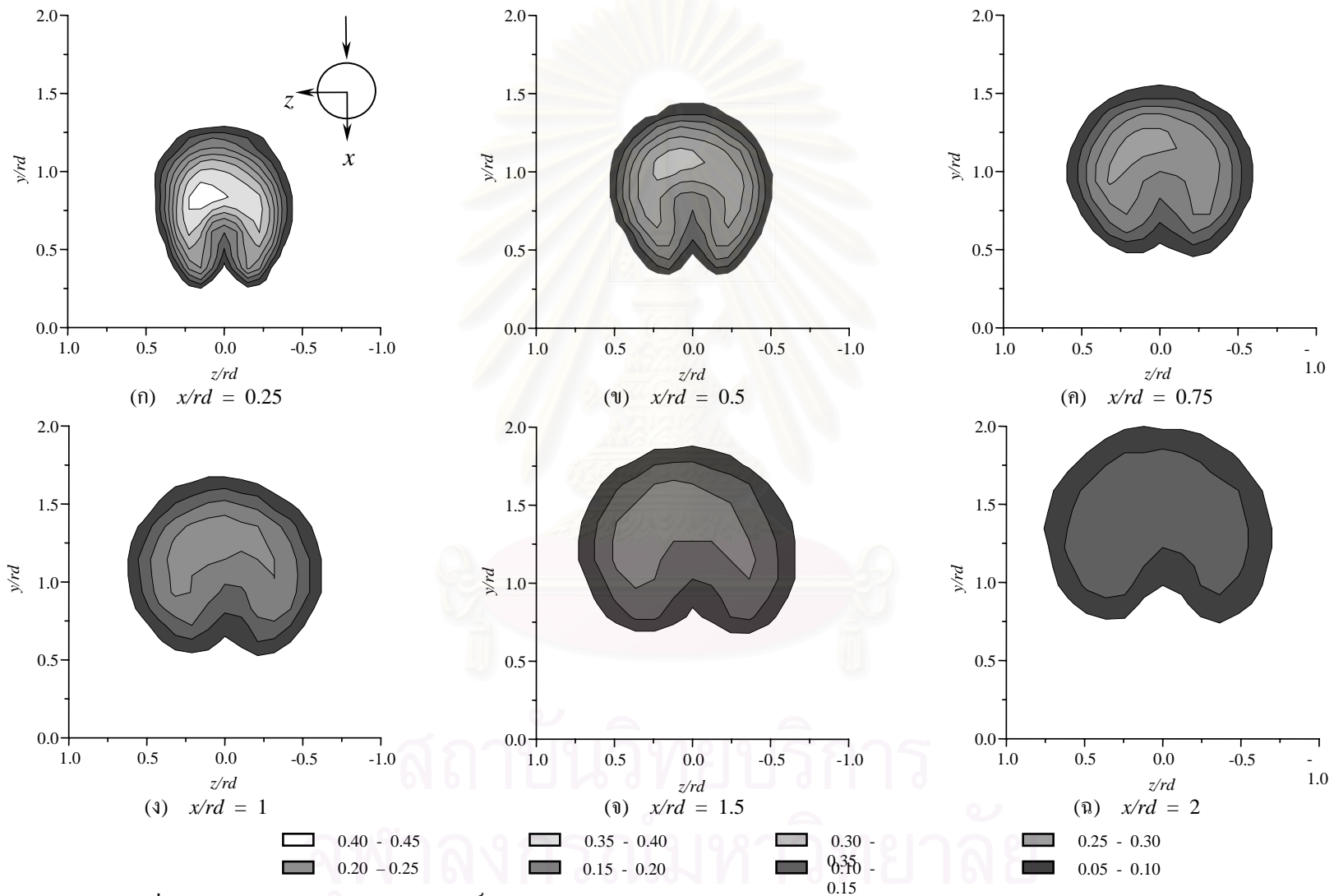
รูปที่ 3.6 ปริมาตรควบคุมในการวิเคราะห์คุณลักษณะการผสมของที่แสดงโดย  $C_{TG}$



รูปที่ 3.7 การนิยามด้าน Pressure และ Suction

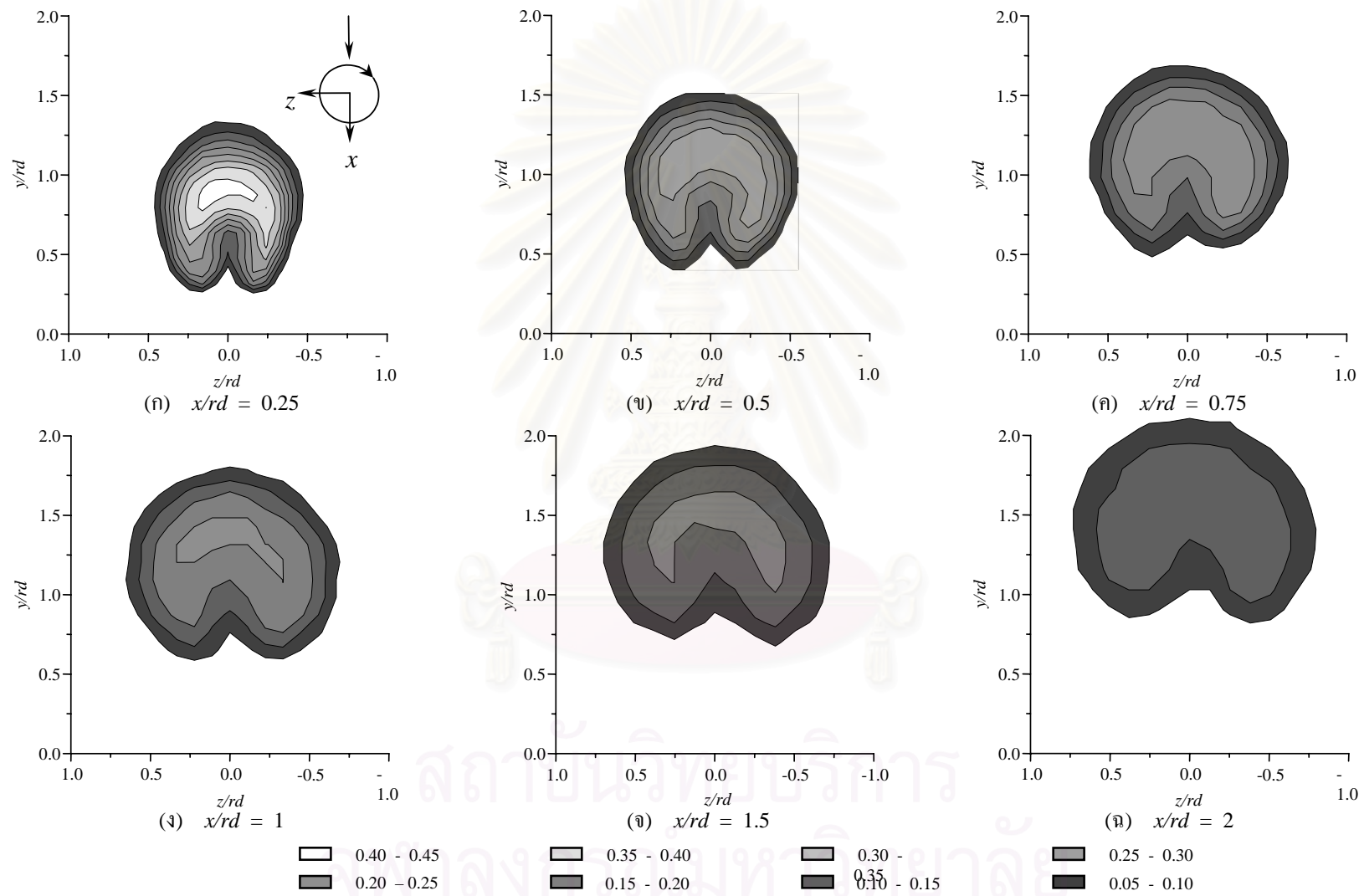


รูปที่ 3.8 Centerplane Trajectory ของอนุหภูมิ ( $y_T$ ) และ Centroid Trajectory ของอนุหภูมิ ( $\bar{y}_T$ ) สำหรับกรณี  $Sr=0$

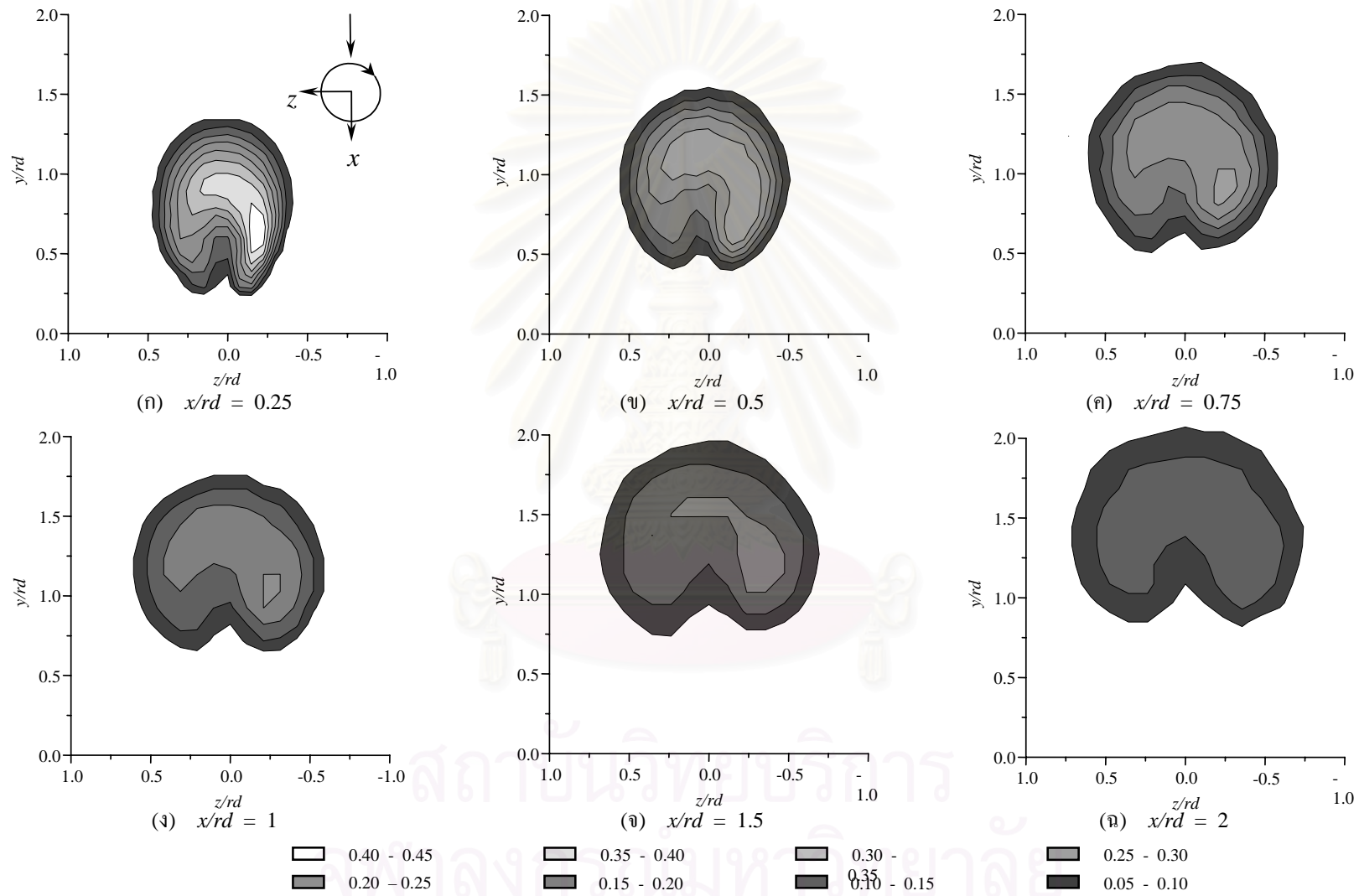


รูปที่ 3.9 การกระจายของสัมประสิทธิ์ความปั่นป่วนรวม ( $C_{TG}$ ) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr0

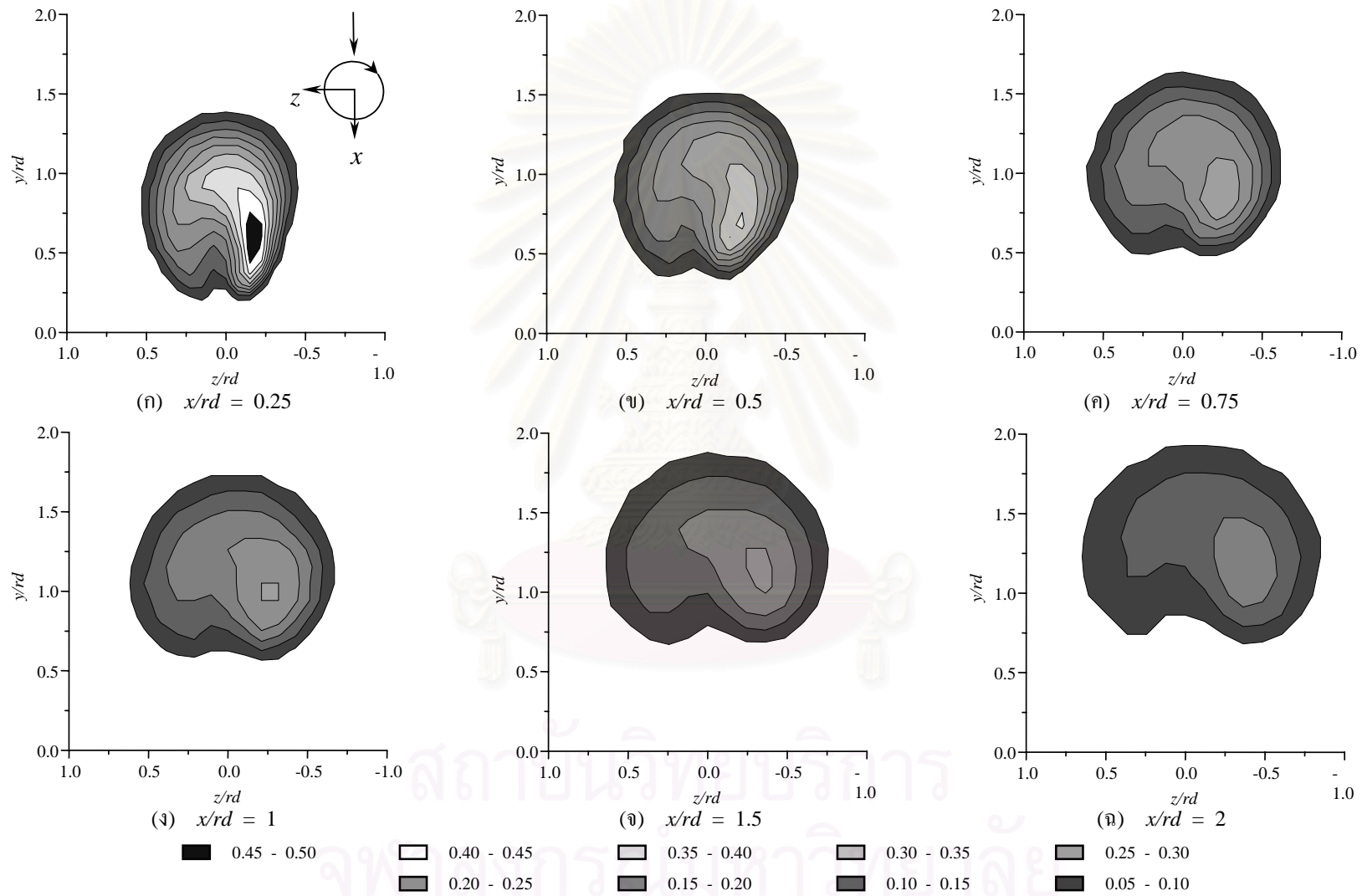




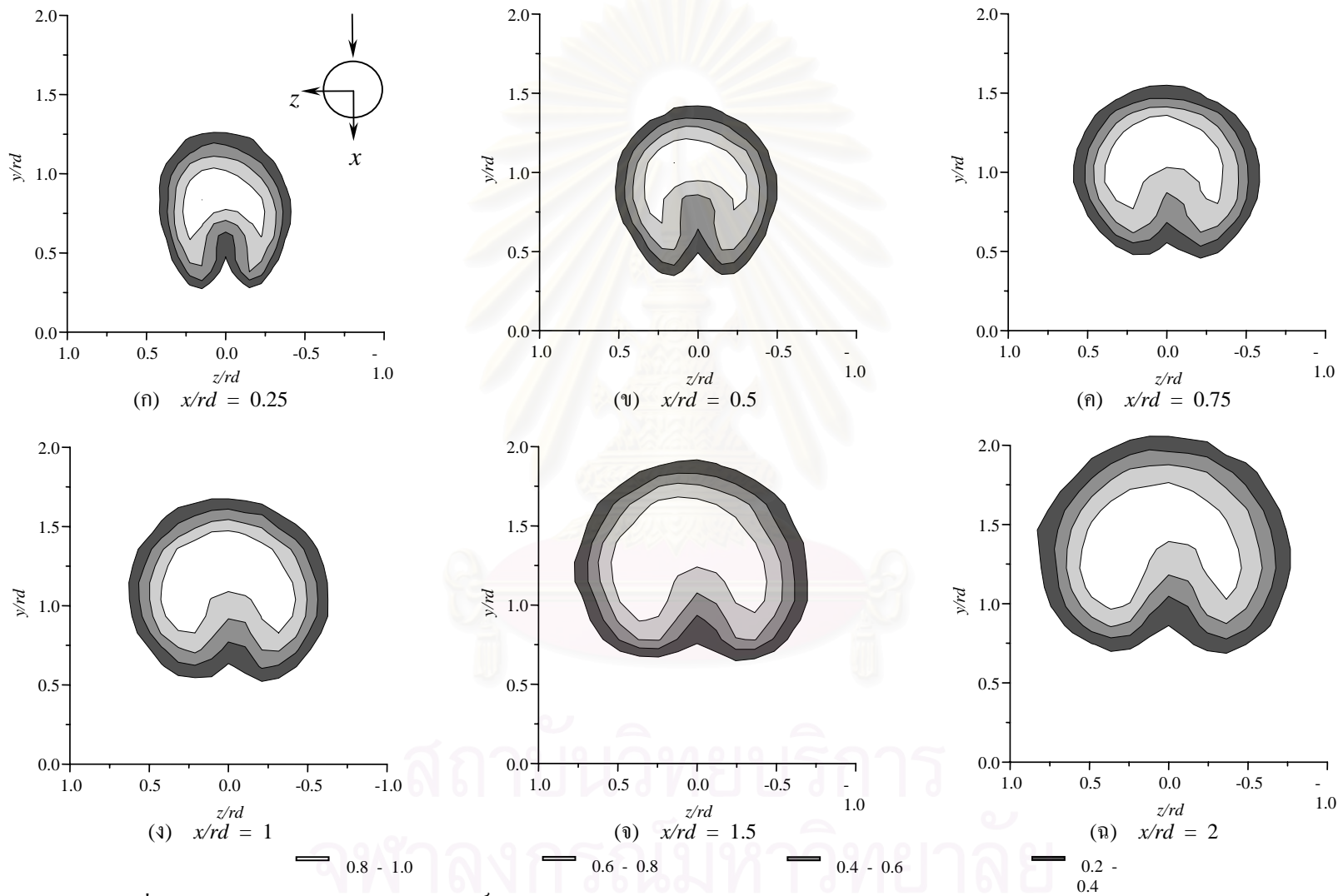
รูปที่ 3.10 การกระจายของสัมประสิทธิ์รบกวนหมุนรวม ( $C_{TG}$ ) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr17



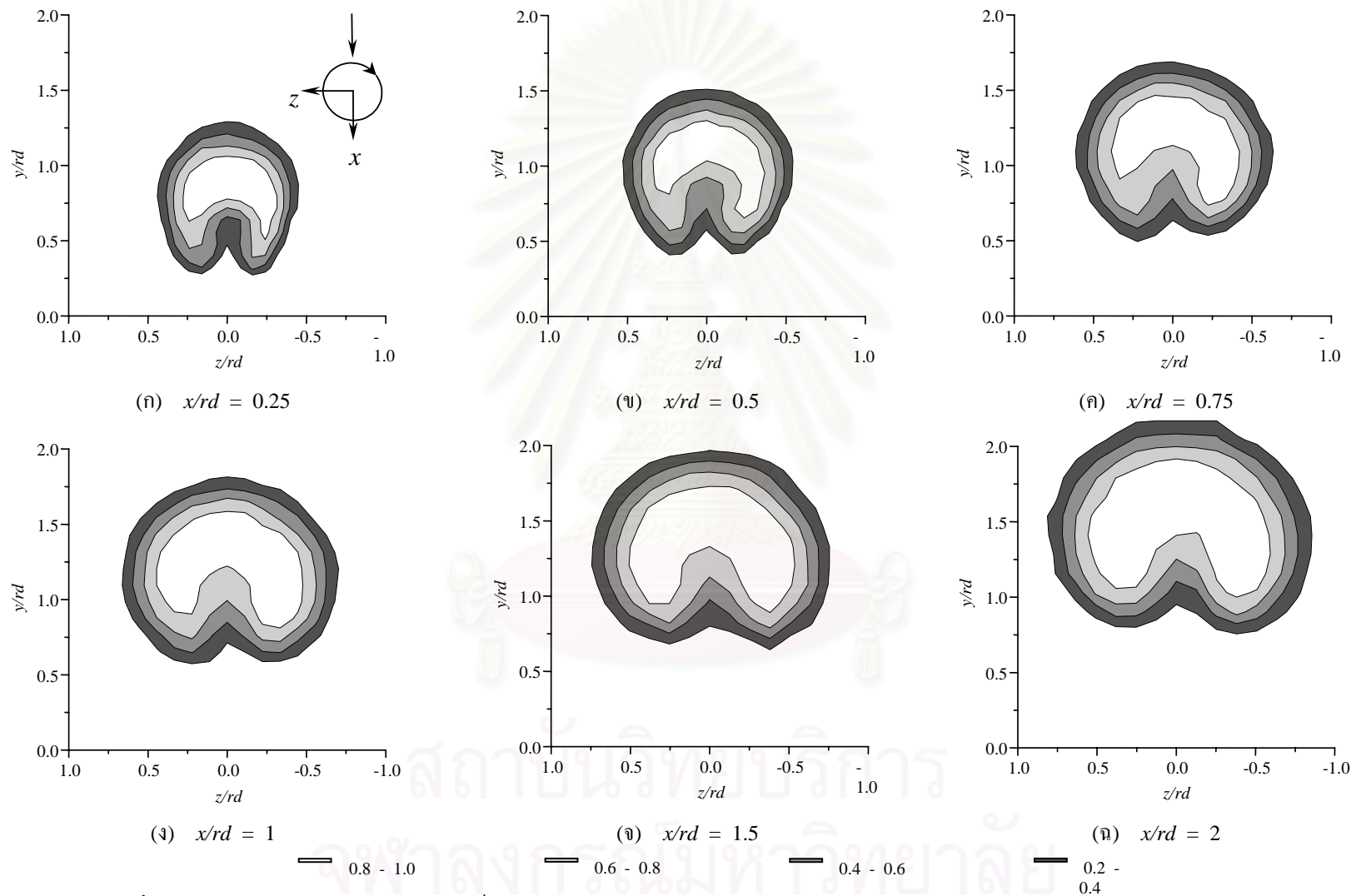
รูปที่ 3.11 การกระจายของสัมประสิทธิ์ความปั่นป่วนรวม ( $C_{TG}$ ) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr52



รูปที่ 3.12 การกระจายของสัมประสิทธิ์รบกวนหมุนรวม ( $C_{TG}$ ) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr82

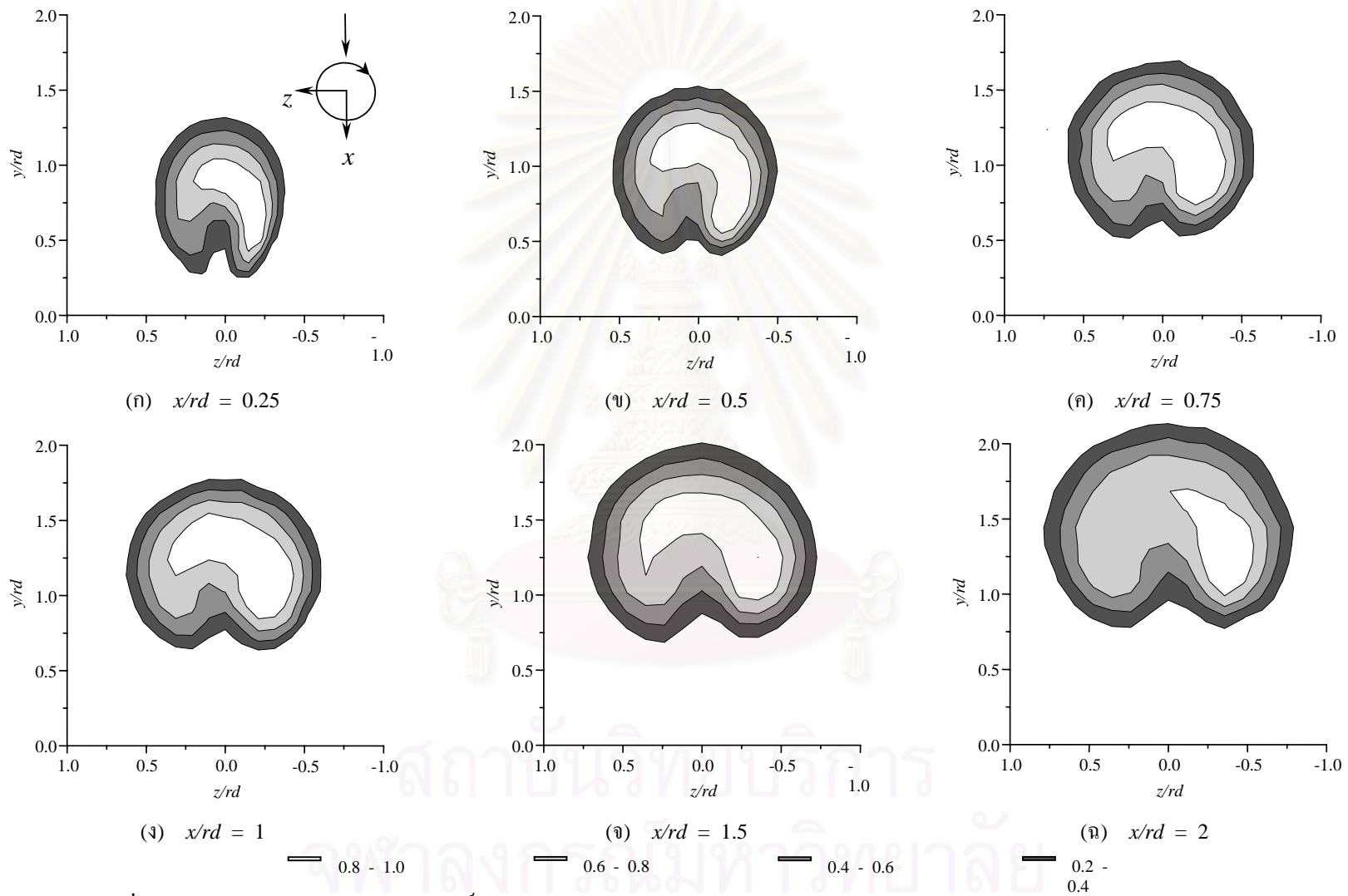


รูปที่ 3.13 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจำเพาะ ( $C_{TL}$ ) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี  $Sr0$

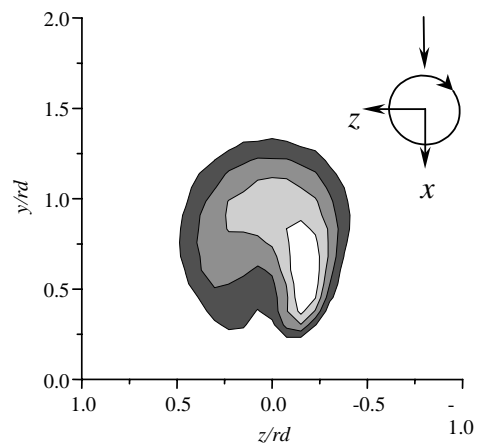


รูปที่ 3.14 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจานวนเฉพาะ ( $C_{TL}$ ) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr17

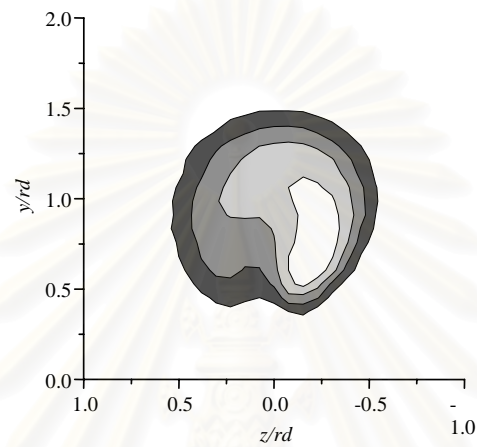




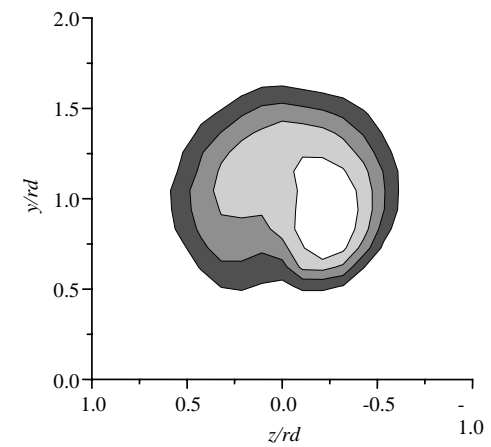
รูปที่ 3.15 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ ( $C_{TL}$ ) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ( $x$ ) สำหรับกรณี Sr52



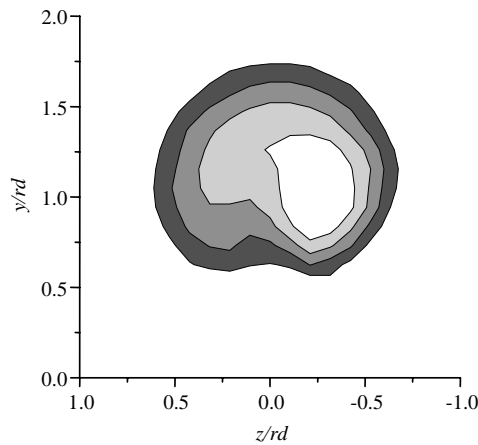
(ก)  $x/rd = 0.25$



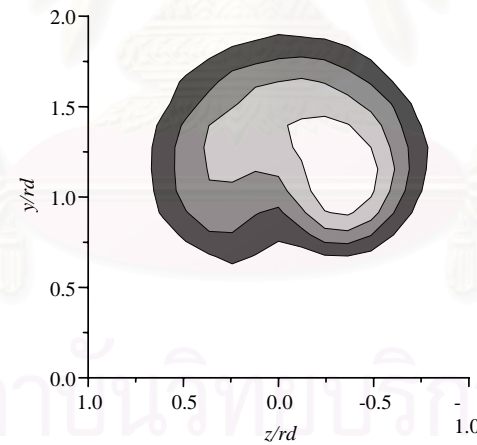
(ข)  $x/rd = 0.5$



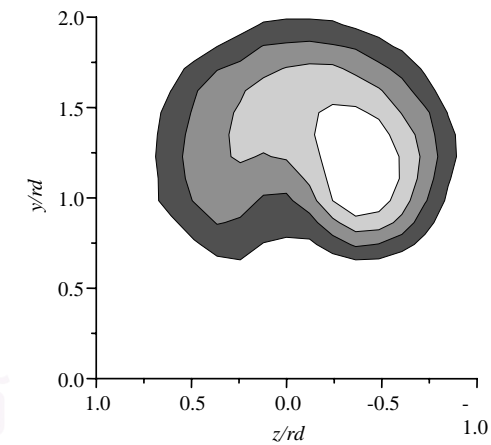
(ค)  $x/rd = 0.75$



(ง)  $x/rd = 1$



(จ)  $x/rd = 1.5$



(ฉ)  $x/rd = 2$

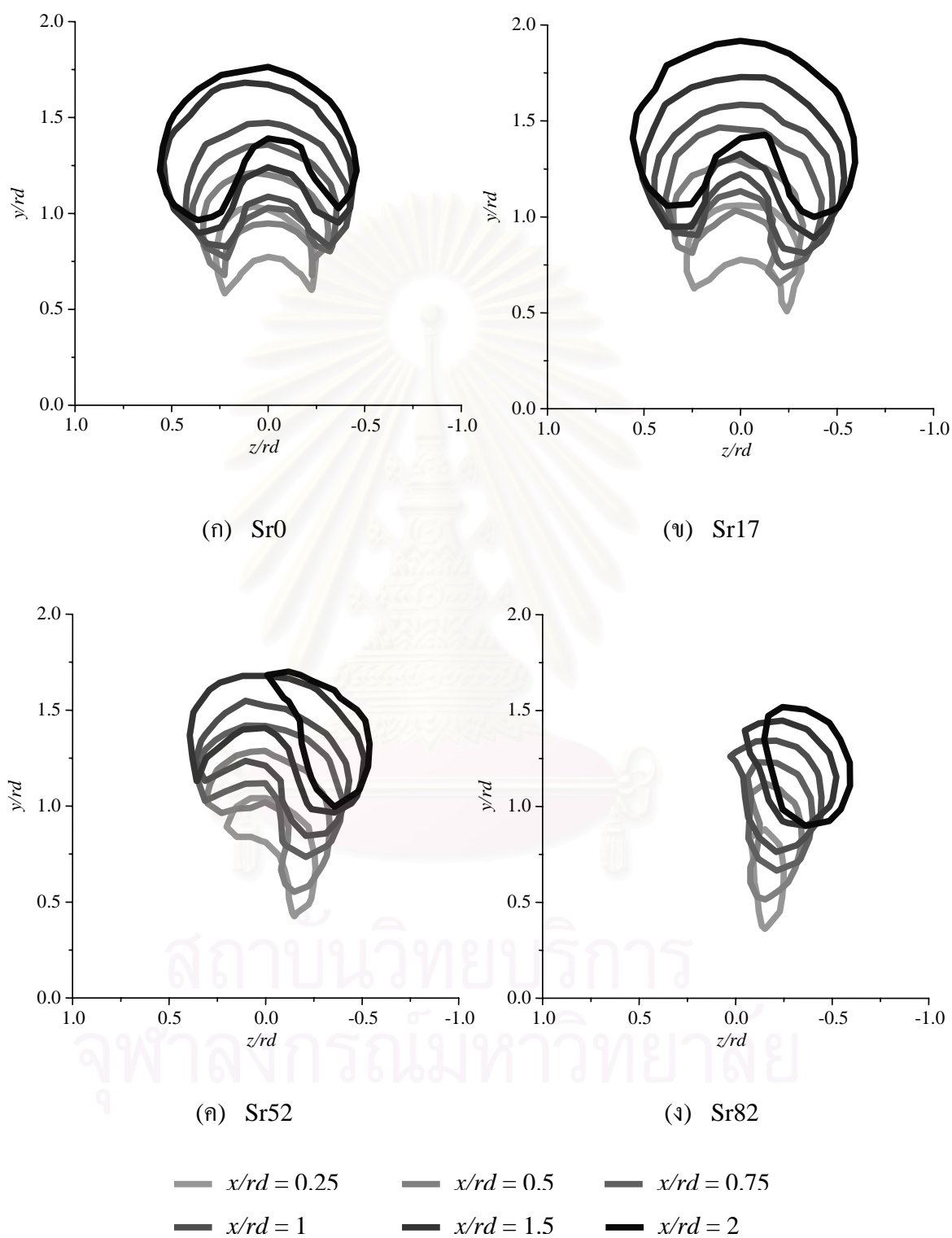
0.8 - 1.0

0.6 - 0.8

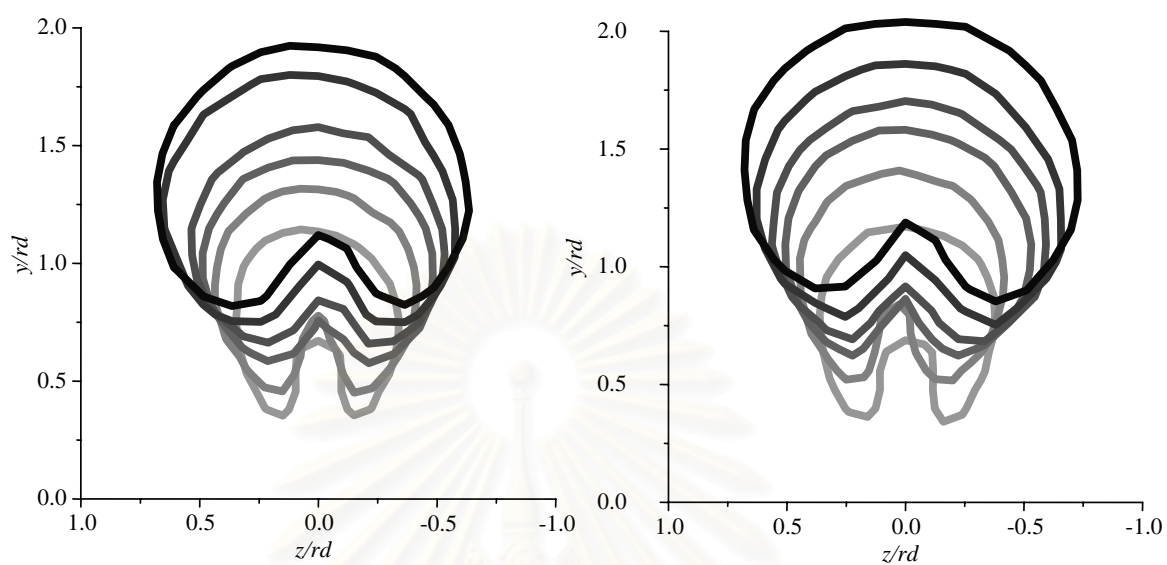
0.4 - 0.6

0.2 - 0.4

รูปที่ 3.16 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจุด (CTL) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr82

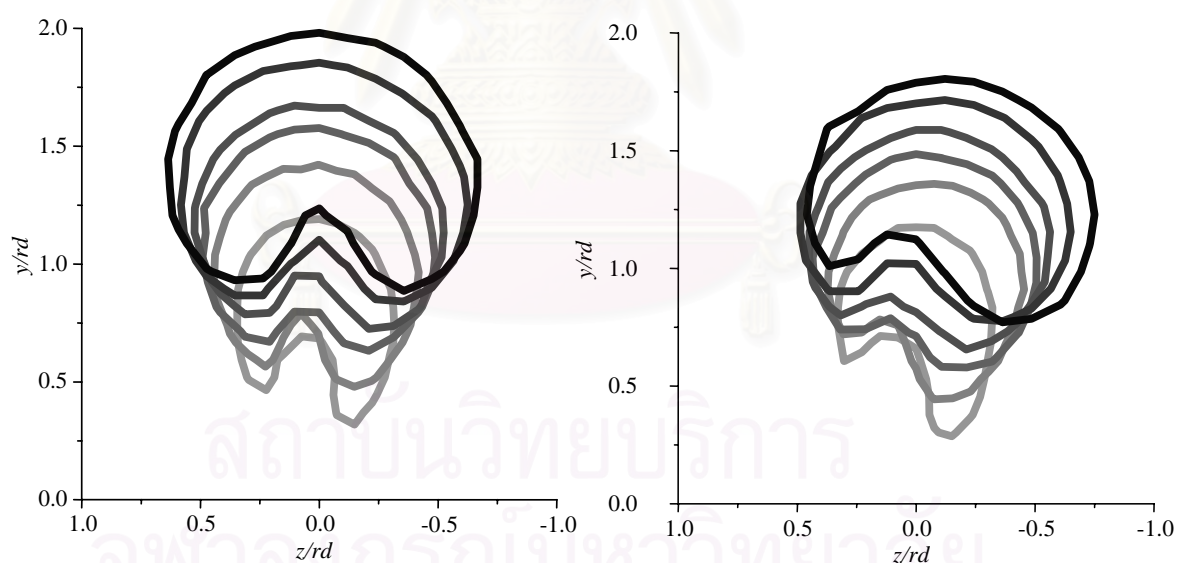


รูปที่ 3.17 การพัฒนาตัวของเจ็ทในแต่ละกรณีโดยเปรียบเทียบที่หน้าตัดต่าง ๆ กันที่  $C_{TL} = 0.8$



(ก) Sr0

(ข) Sr17

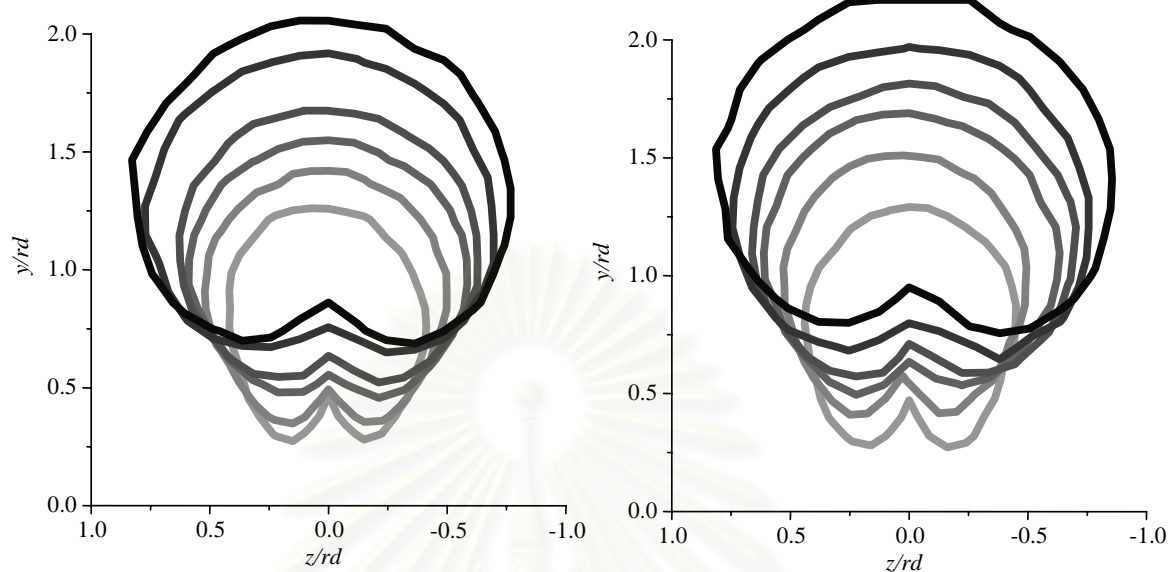


(ค) Sr52

(ง) Sr82

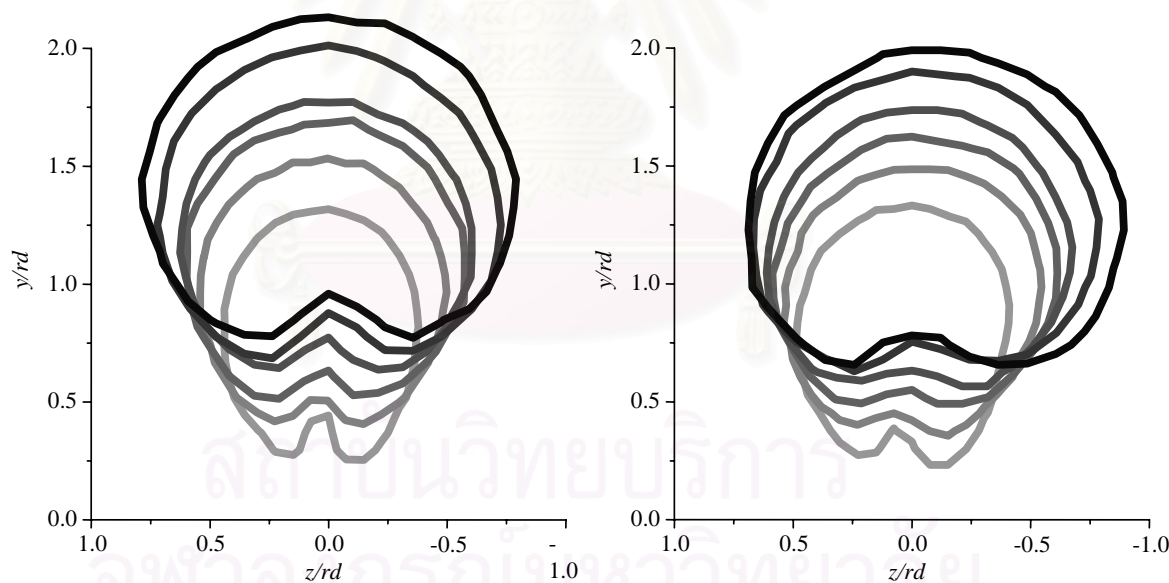
—  $x/rd = 0.25$       —  $x/rd = 0.5$       —  $x/rd = 0.75$   
 —  $x/rd = 1$       —  $x/rd = 1.5$       —  $x/rd = 2$

รูปที่ 3.18 การพัฒนาตัวของเจ็ทในแต่ละกรณีโดยเปรียบเทียบที่หน้าตัดต่าง ๆ กันที่  $C_{TL} = 0.5$



(ก) Sr0

(ข) Sr17



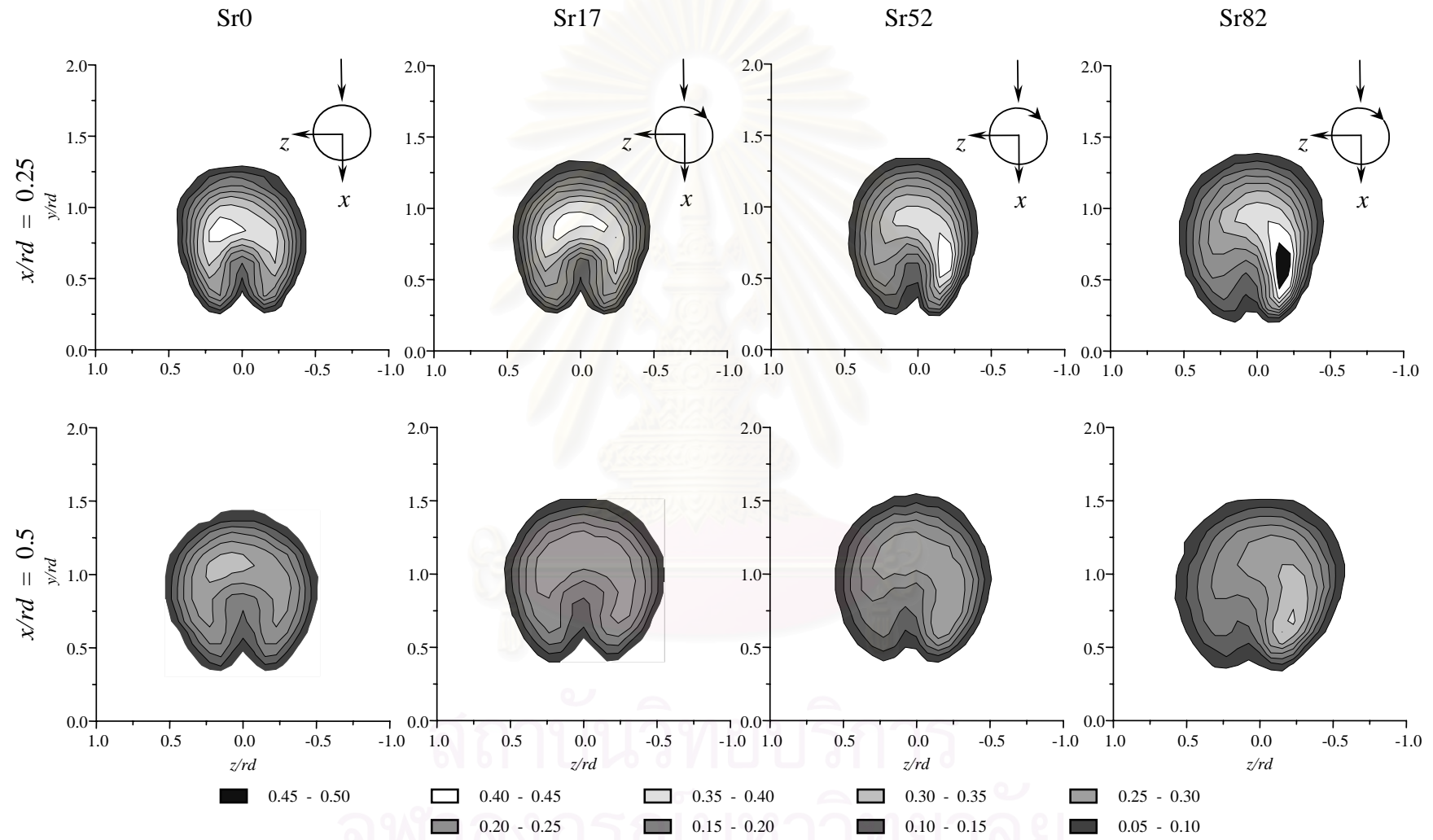
(ค) Sr52

(ง) Sr82

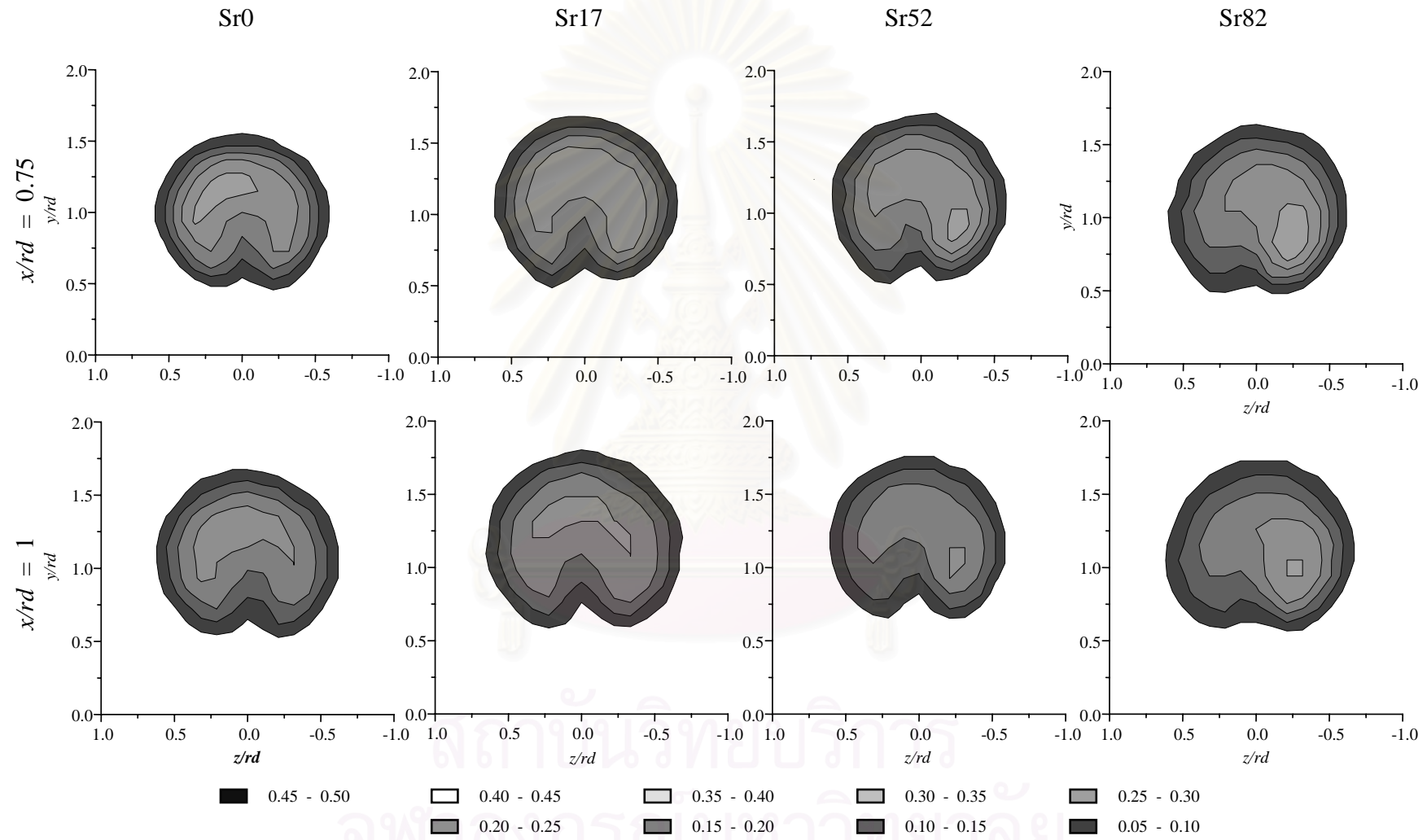
—  $x/rd = 0.25$       —  $x/rd = 0.5$       —  $x/rd = 0.75$   
 —  $x/rd = 1$       —  $x/rd = 1.5$       —  $x/rd = 2$

รูปที่ 3.19 การพัฒนาตัวของเจ็ทในแต่ละกรณีโดยเปรียบเทียบที่หน้าตัดต่าง ๆ กันที่  $C_{TL} = 0.2$

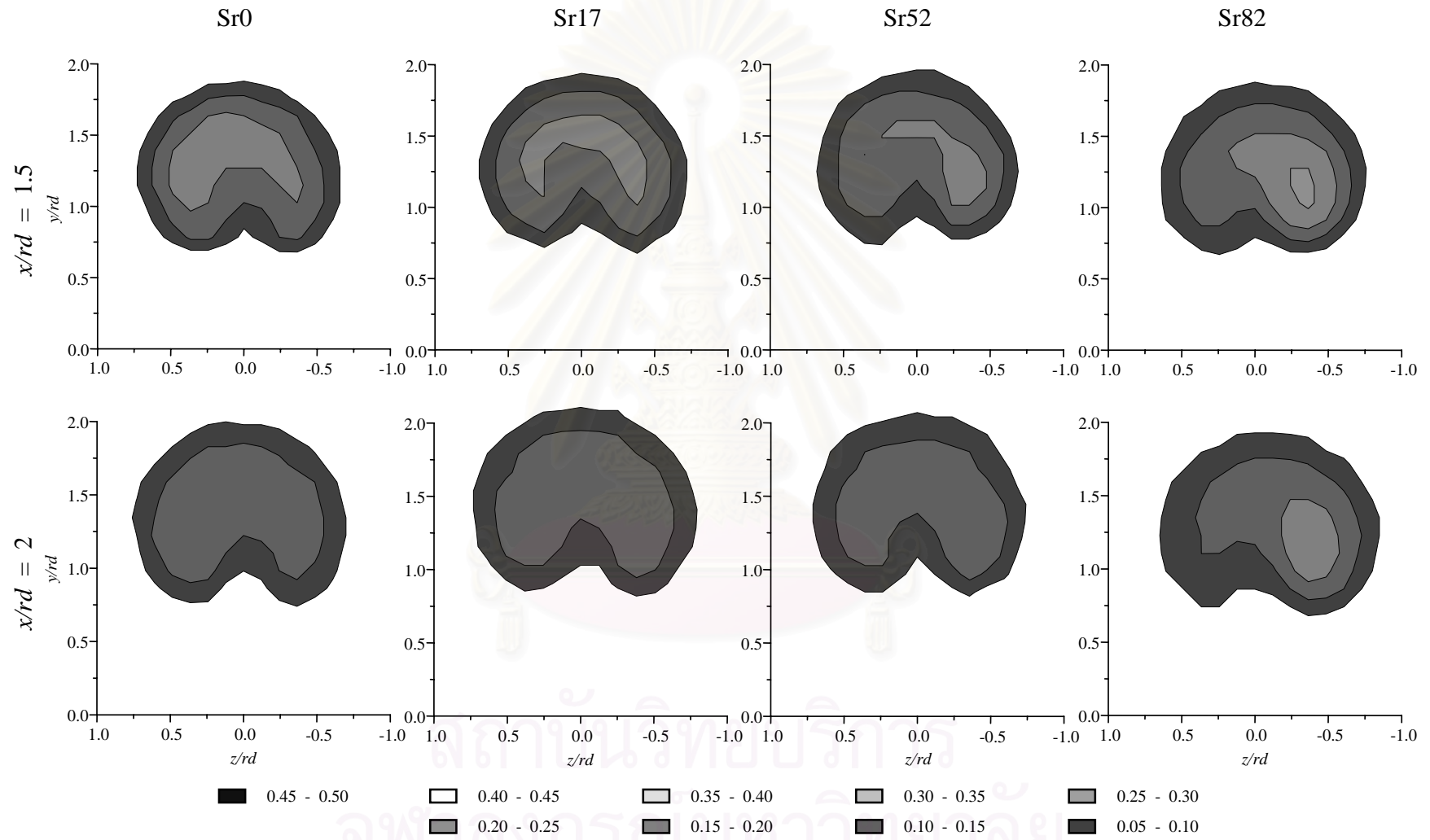




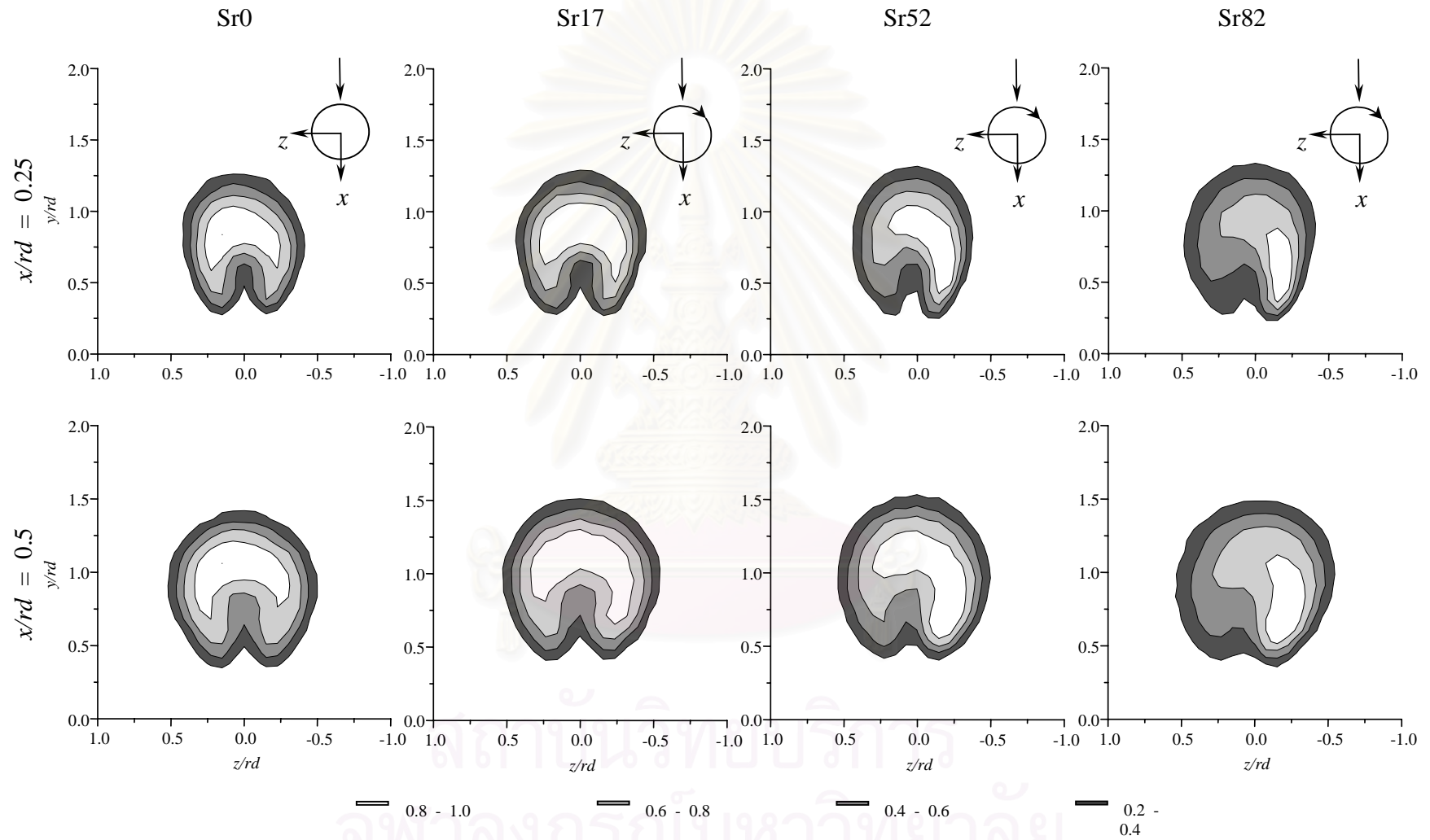
รูปที่ 3.20ก การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม ( $C_{TG}$ ) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่  $x/rd = 0.25$  และ  $0.5$



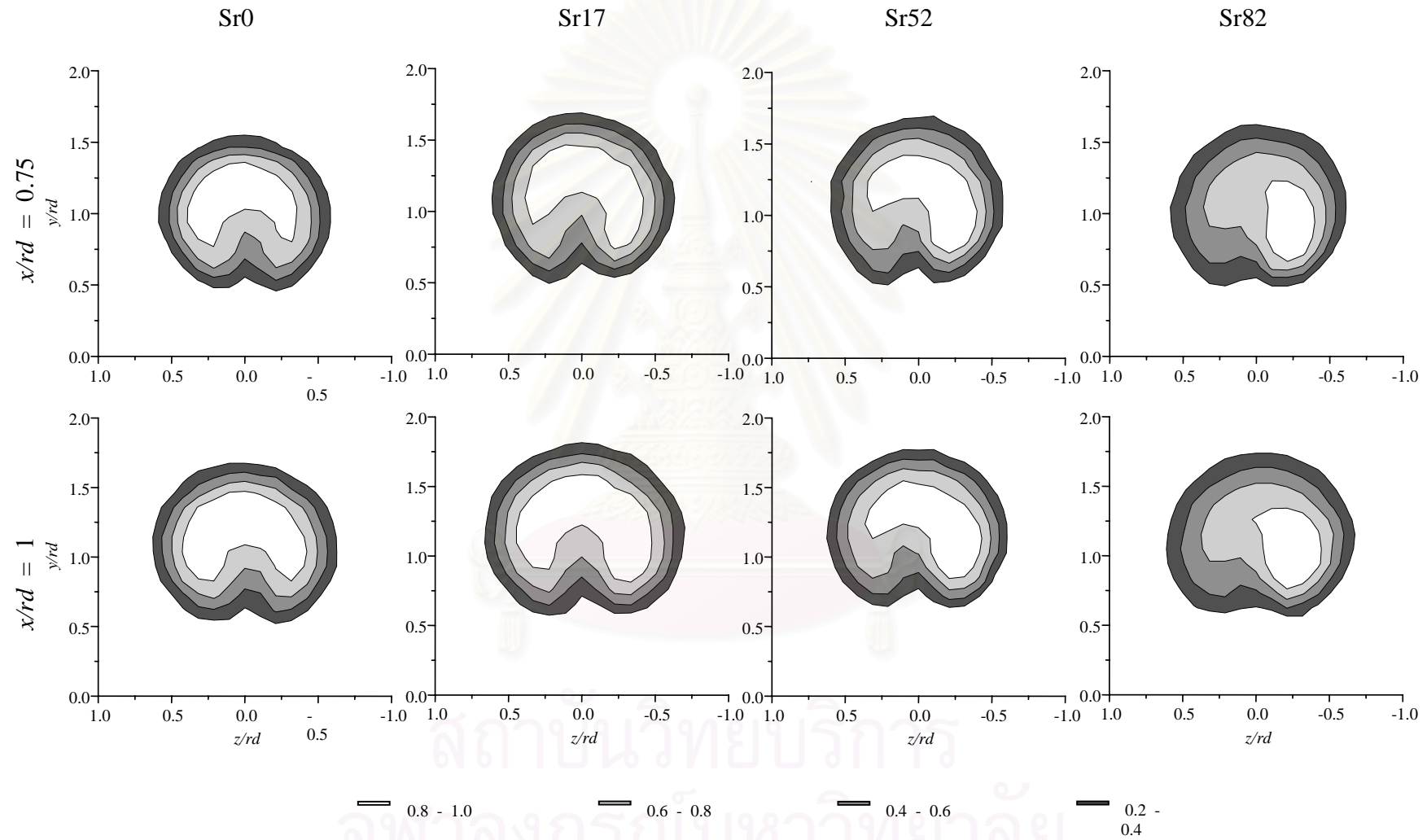
รูปที่ 3.20ข การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม ( $C_{TG}$ ) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่  $x/rd = 0.75$  และ 1



รูปที่ 3.20ค การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม ( $C_{TG}$ ) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่  $x/rd = 1.5$  และ 2

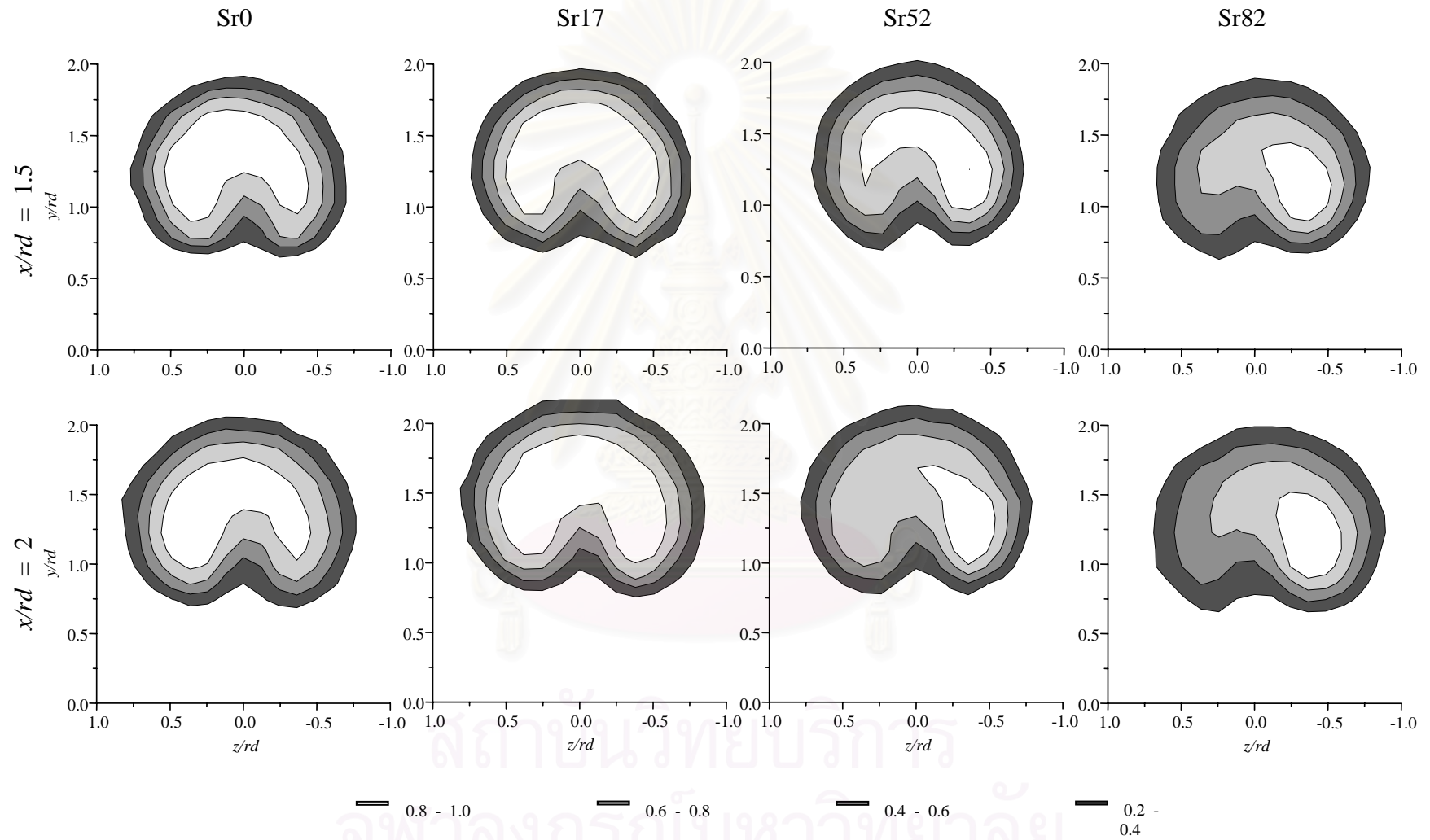


รูปที่ 3.21ก การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ ( $C_{TL}$ ) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่  $x/rd = 0.25$  และ  $0.5$

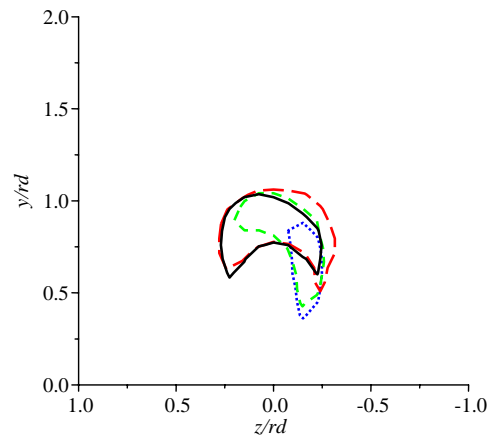


รูปที่ 3.21x การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ ( $C_{TL}$ ) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที  $x/rd = 0.75$  และ 1

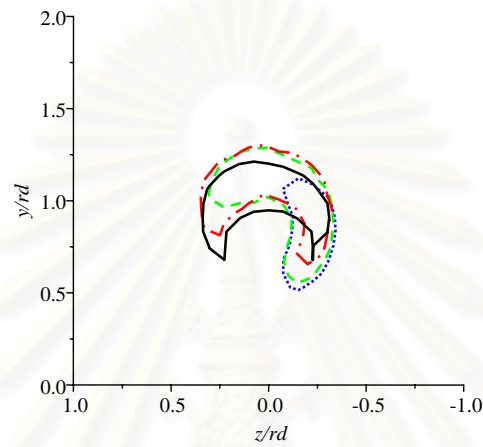




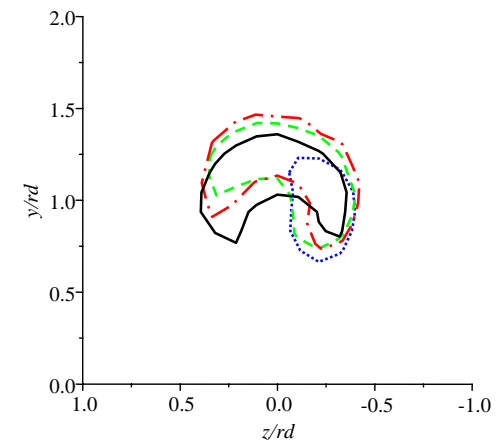
รูปที่ 3.21ค การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ ( $C_{TL}$ ) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่  $x/rd = 1.5$  และ 2



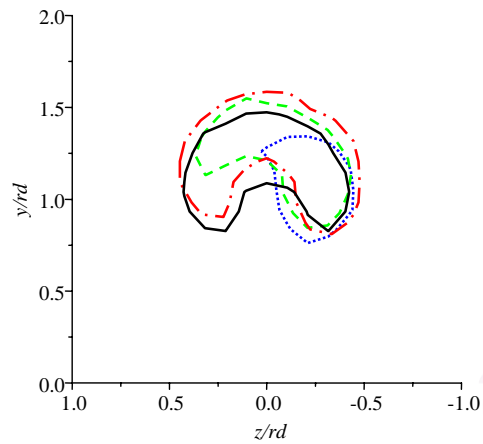
(ก)  $x/rd = 0.25$



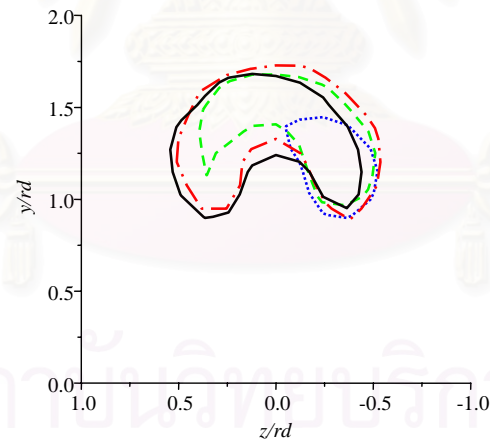
(ข)  $x/rd = 0.5$



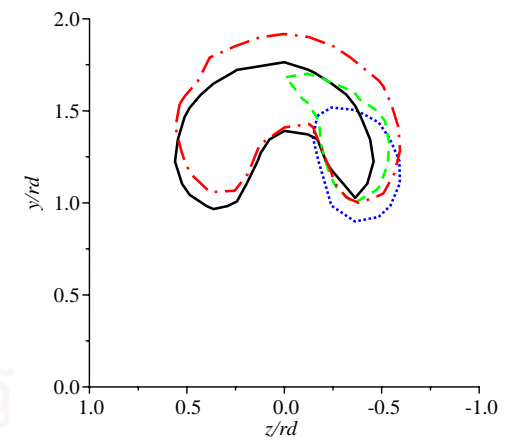
(ค)  $x/rd = 0.75$



(ง)  $x/rd = 1$



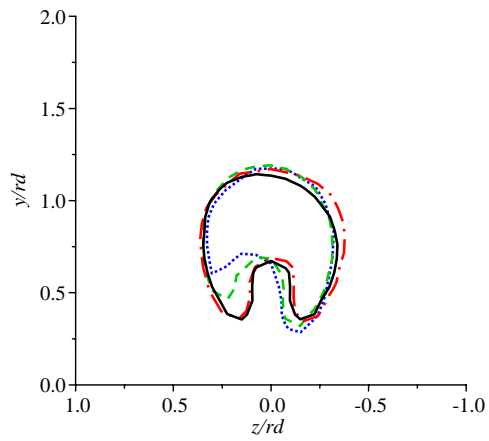
(จ)  $x/rd = 1.5$



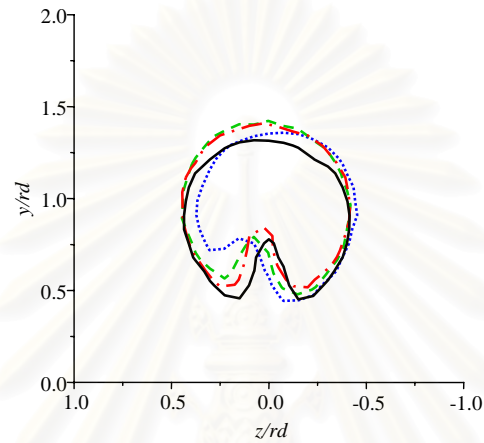
(ฉ)  $x/rd = 2$

— Sr0    -.- Sr17    - - - Sr52    ..... Sr82

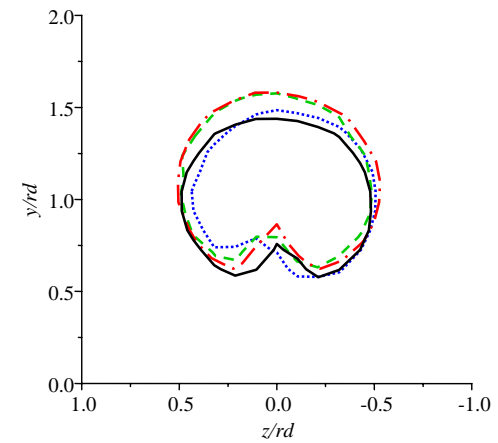
รูปที่ 3.22 การเปรียบเทียบระดับของการหมุนควงที่มีต่อระดับอุณหภูมิที่  $C_{TL} = 0.8$  ตามแนว Downstream (x)



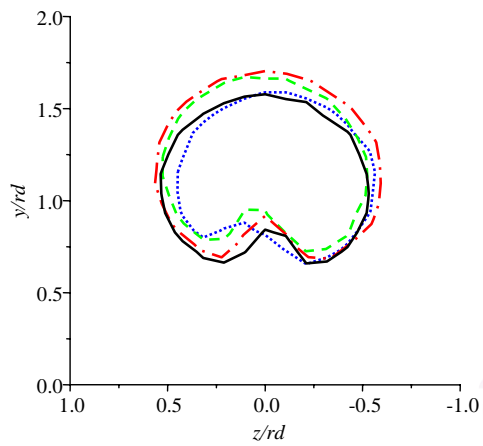
(ก)  $x/rd = 0.25$



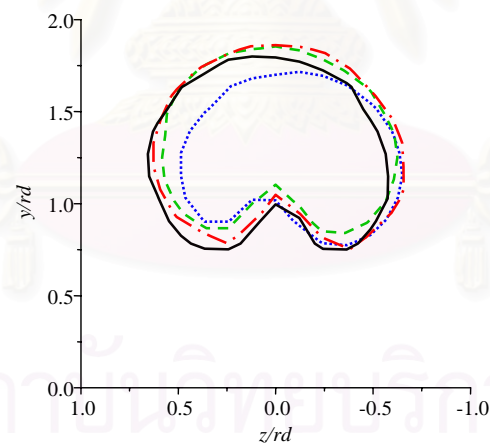
(ข)  $x/rd = 0.5$



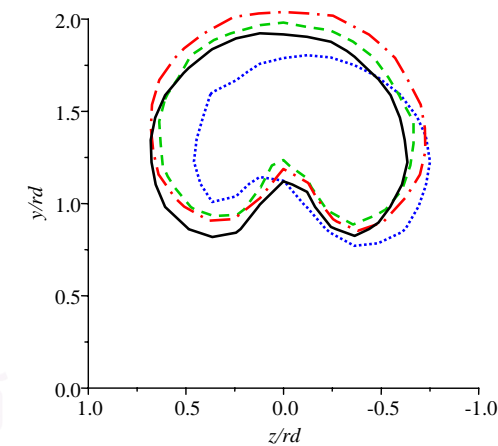
(ค)  $x/rd = 0.75$



(ง)  $x/rd = 1$



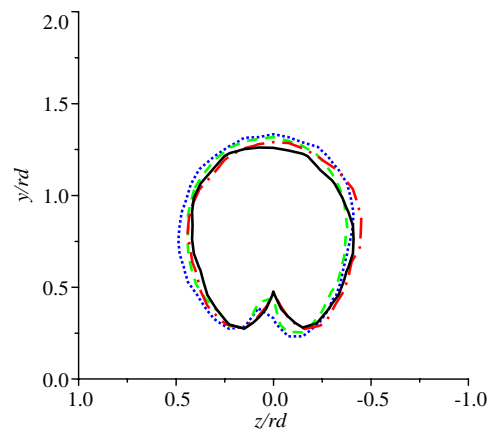
(จ)  $x/rd = 1.5$



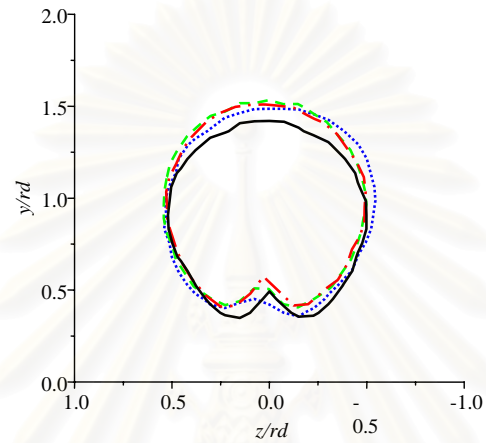
(ฉ)  $x/rd = 2$

— Sr0    -.-.- Sr17    - - - Sr52    ..... Sr82

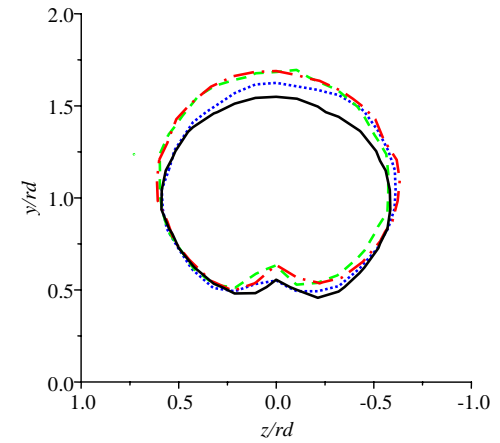
รูปที่ 3.23 การเปรียบเทียบระดับของการหมุนควงที่มีต่อระดับอุณหภูมิที่  $C_{TL} = 0.5$  ตามแนว Downstream (x)



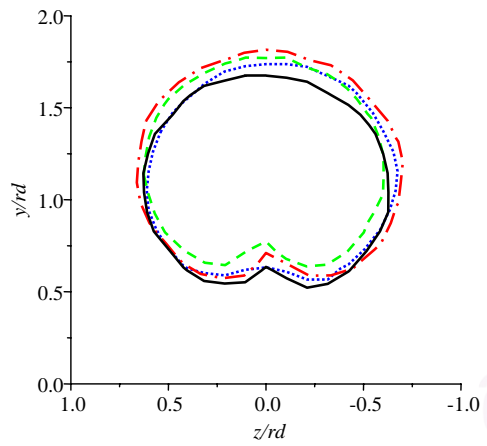
(ก)  $x/rd = 0.25$



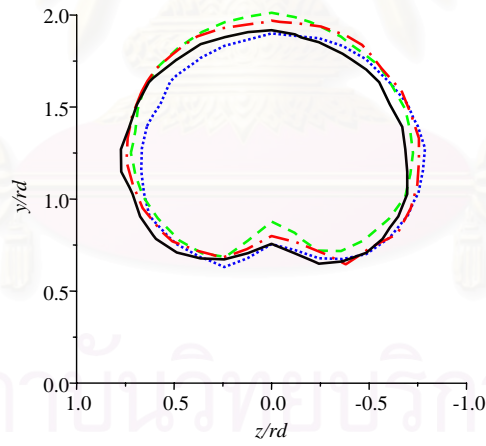
(ข)  $x/rd = 0.5$



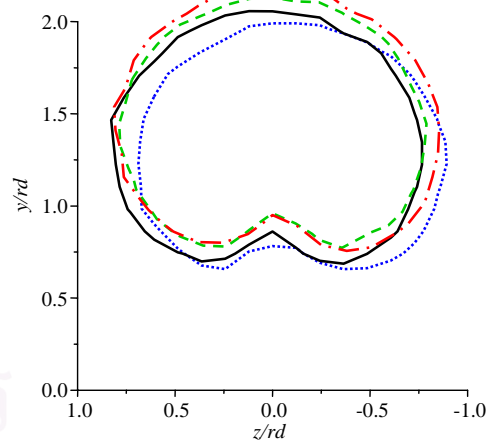
(ค)  $x/rd = 0.75$



(ง)  $x/rd = 1$



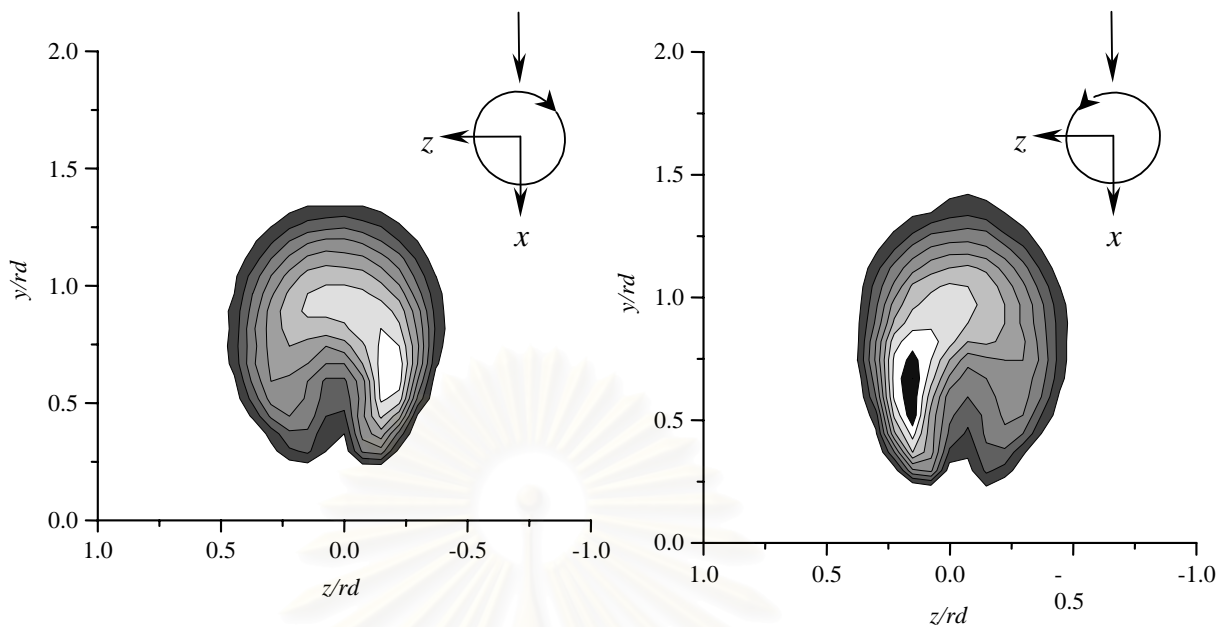
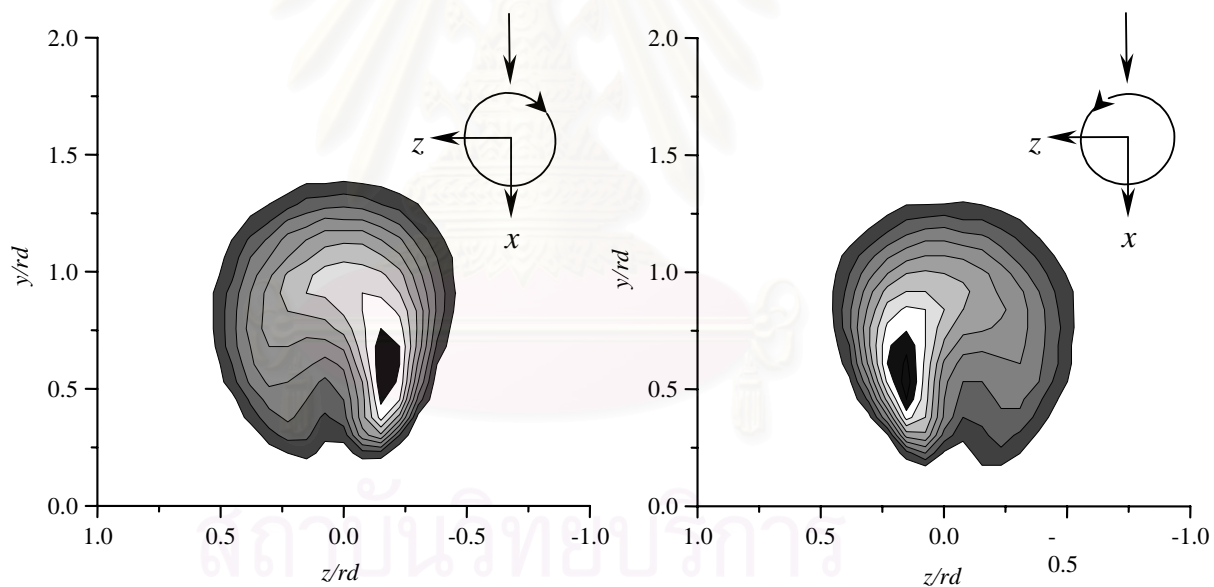
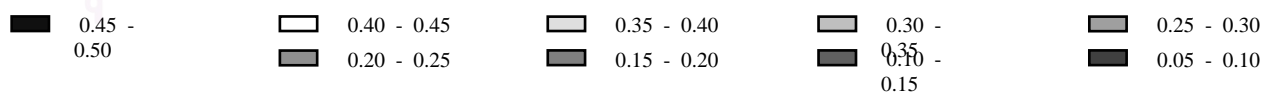
(จ)  $x/rd = 1.5$



(ฉ)  $x/rd = 2$

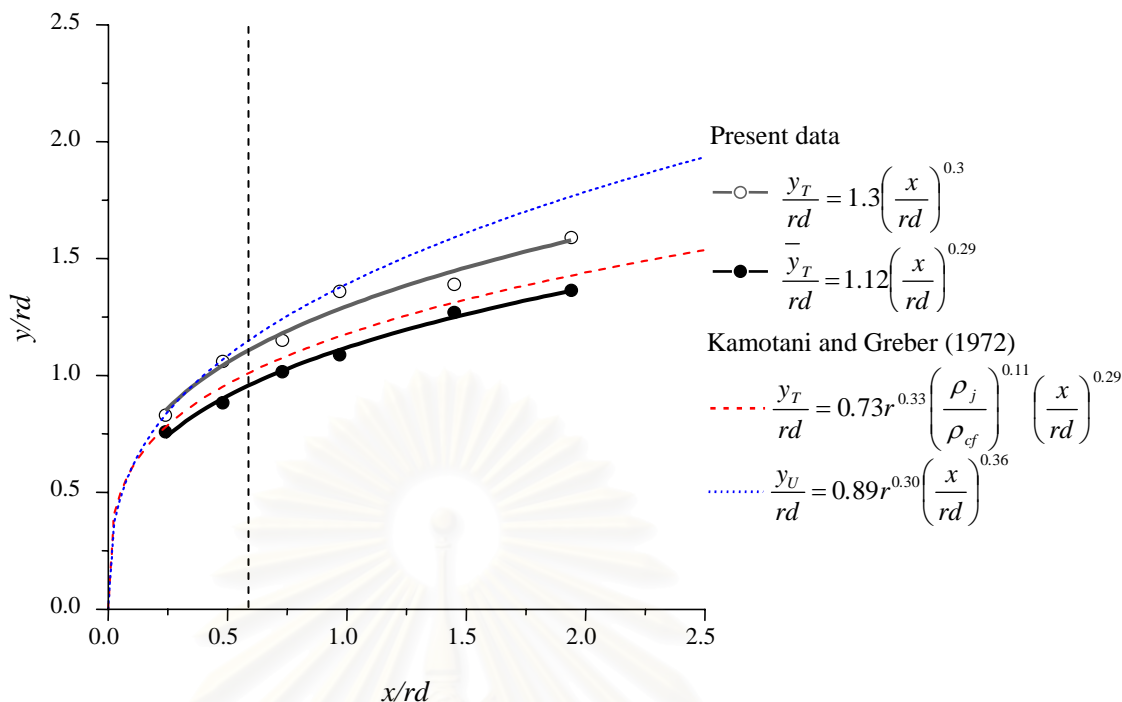
— Sr0    - - - Sr17    - - - Sr52    ..... Sr82

รูปที่ 3.24 การเปรียบเทียบระดับของการหมุนควงที่มีต่อระดับอุณหภูมิที่  $C_{TL} = 0.2$  ตามแนว Downstream (x)

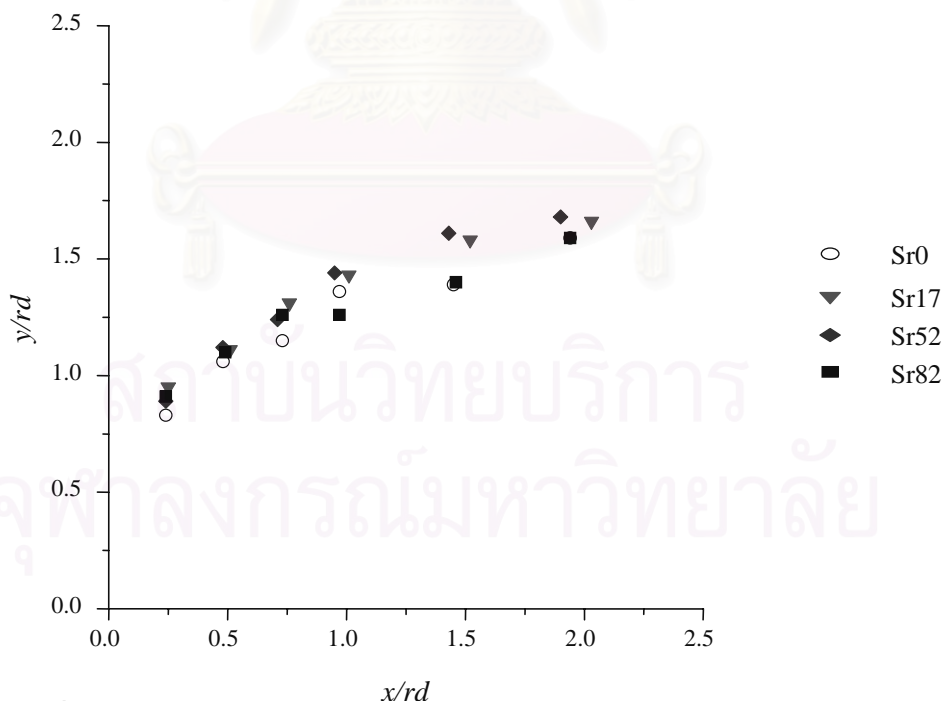
(ก) กรณี Sr52 ทิศทางการหมุน  $-y$ (ข) กรณี Sr52 ทิศทางการหมุน  $+y$ (ค) กรณี Sr82 ทิศทางการหมุน  $-y$ (ง) กรณี Sr82 ทิศทางการหมุน  $+y$ 

รูปที่ 3.25 การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม ( $C_{TG}$ ) โดยเปรียบเทียบทิศทางการหมุนของท่อเจ็ทในกรณี Sr52 และ Sr82 ที่  $x/rd = 0.25$

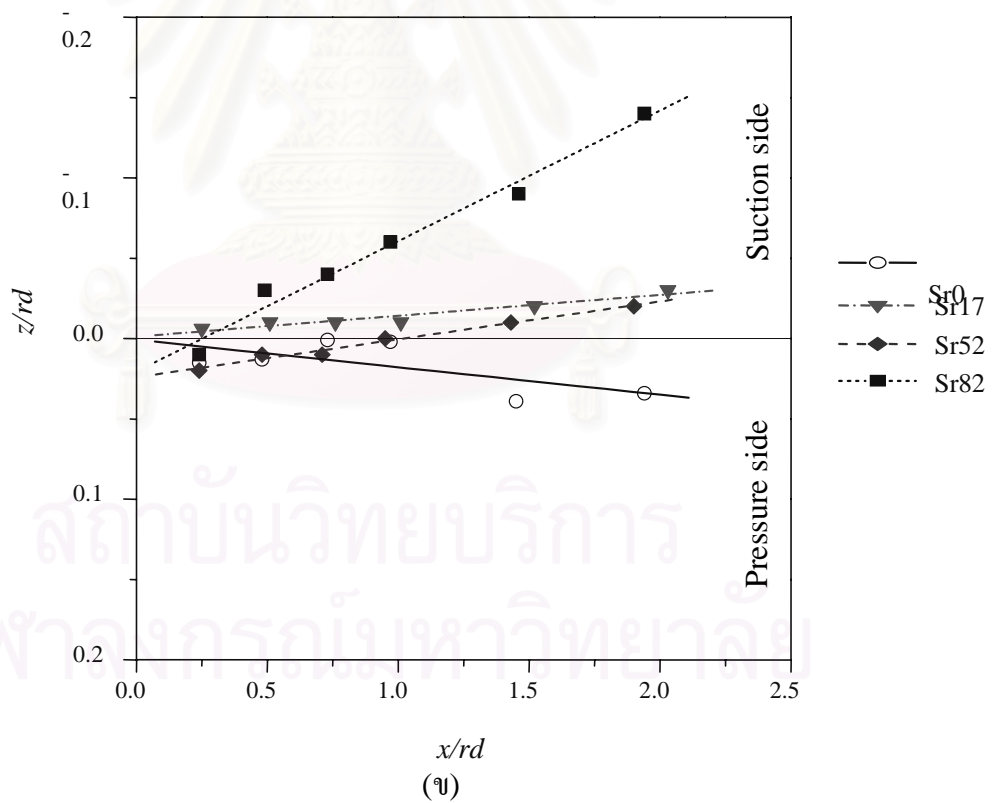
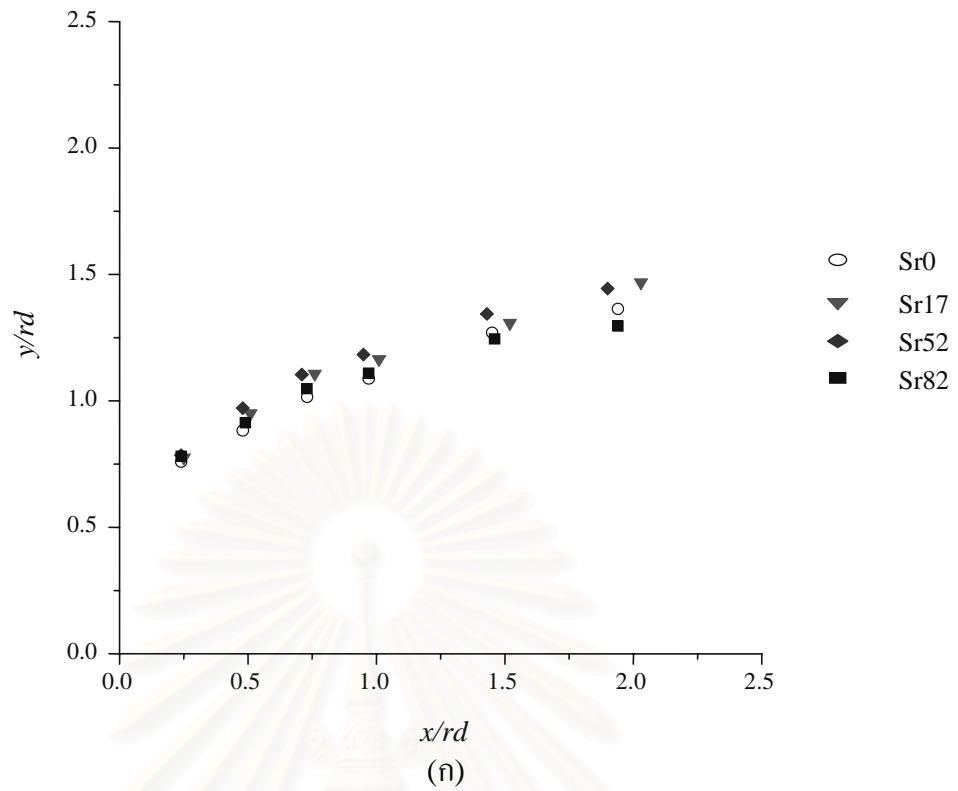




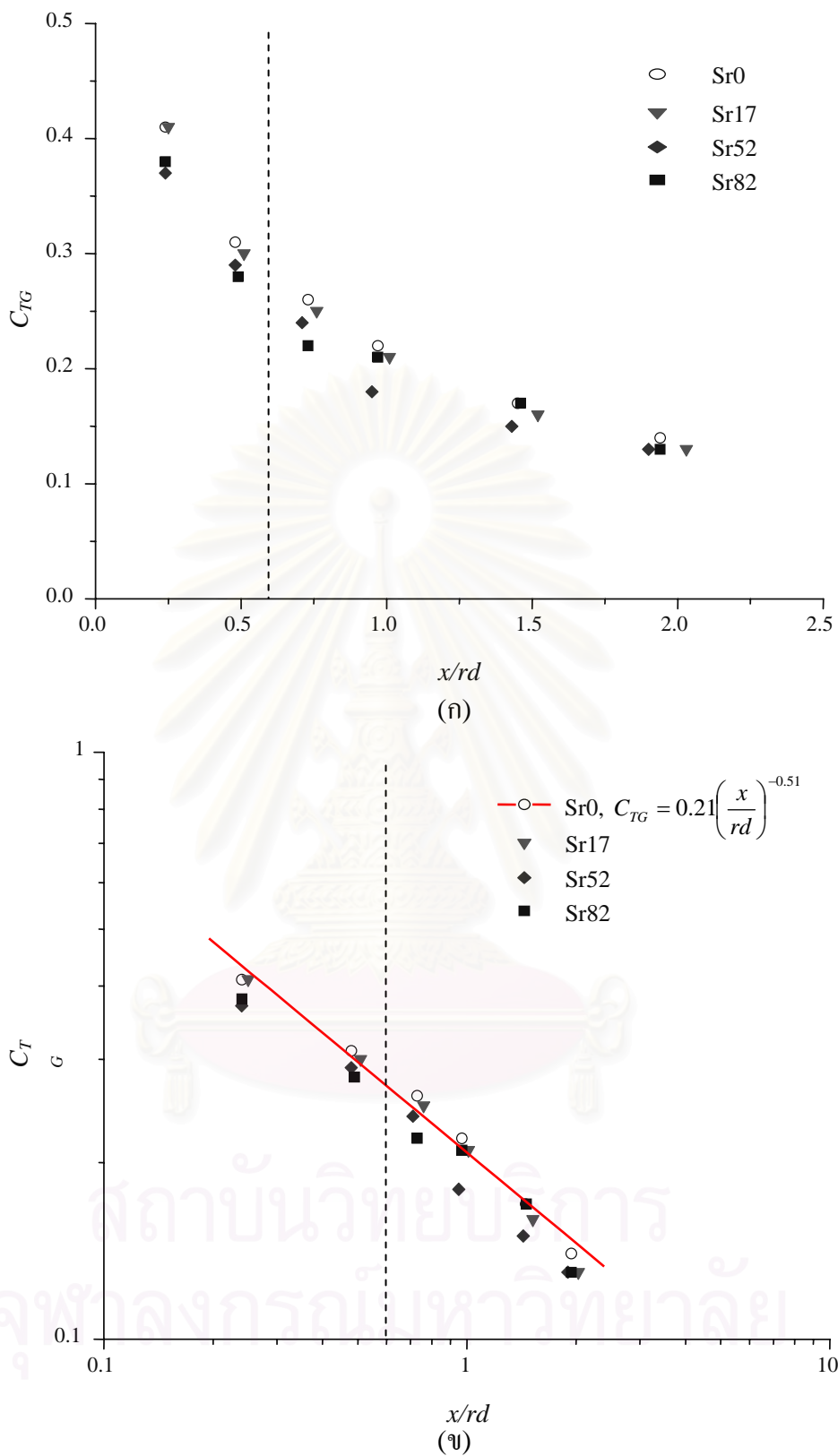
รูปที่ 3.26 Centerplane Trajectory ของอุณหภูมิจึง ( $y_T$ ) และ Centroid Trajectory ของอุณหภูมิจึง ( $\bar{y}_T$ ) สำหรับกรณี Sr0 เปรียบเทียบกับ Trajectory ของอุณหภูมิจึง ( $y_T$ ) และความเร็วจึง ( $y_U$ ) ของ Kamotani and Greber (1972)



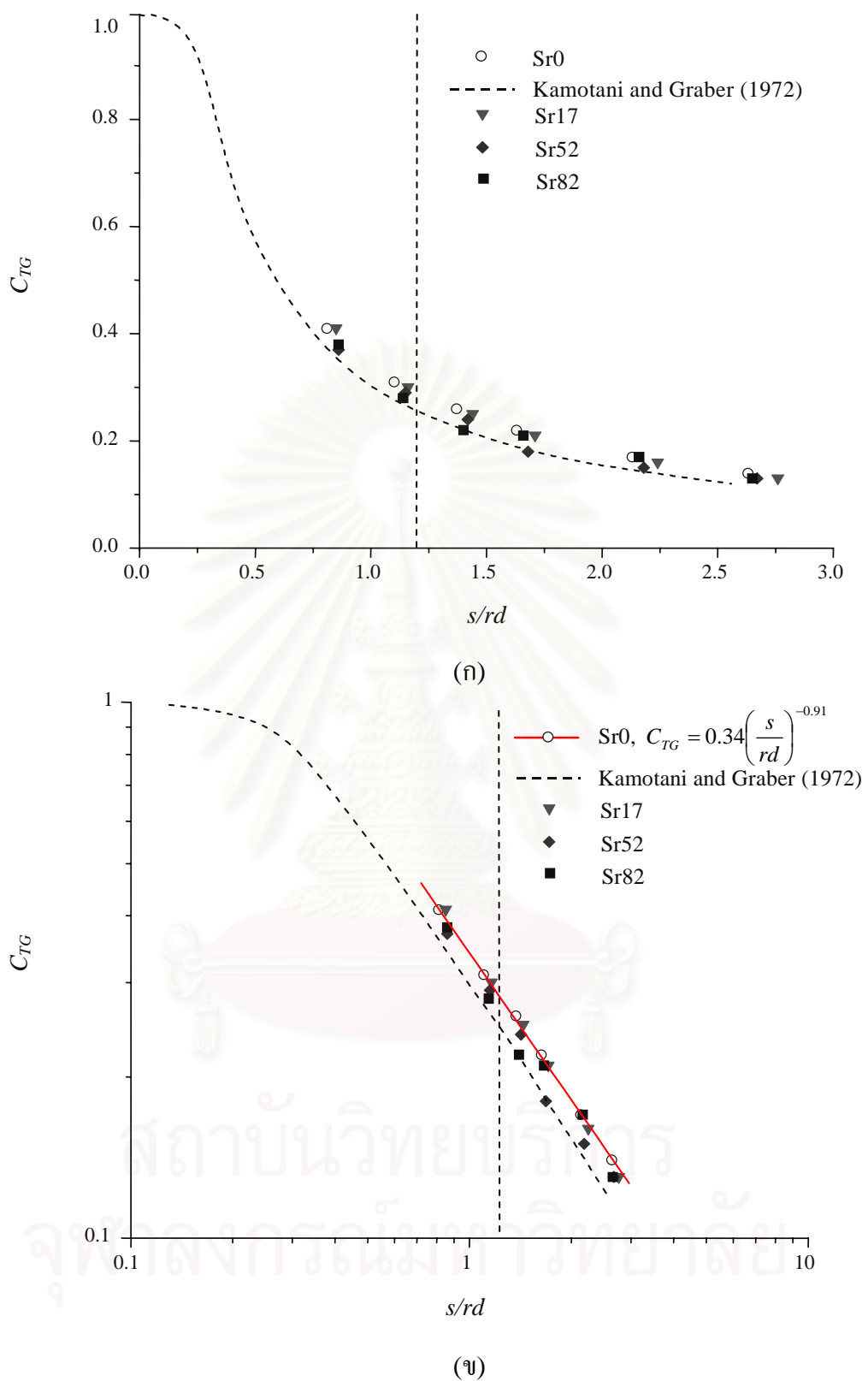
รูปที่ 3.27 Centerplane Trajectory ของอุณหภูมิจึง ( $y_T$ ) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี



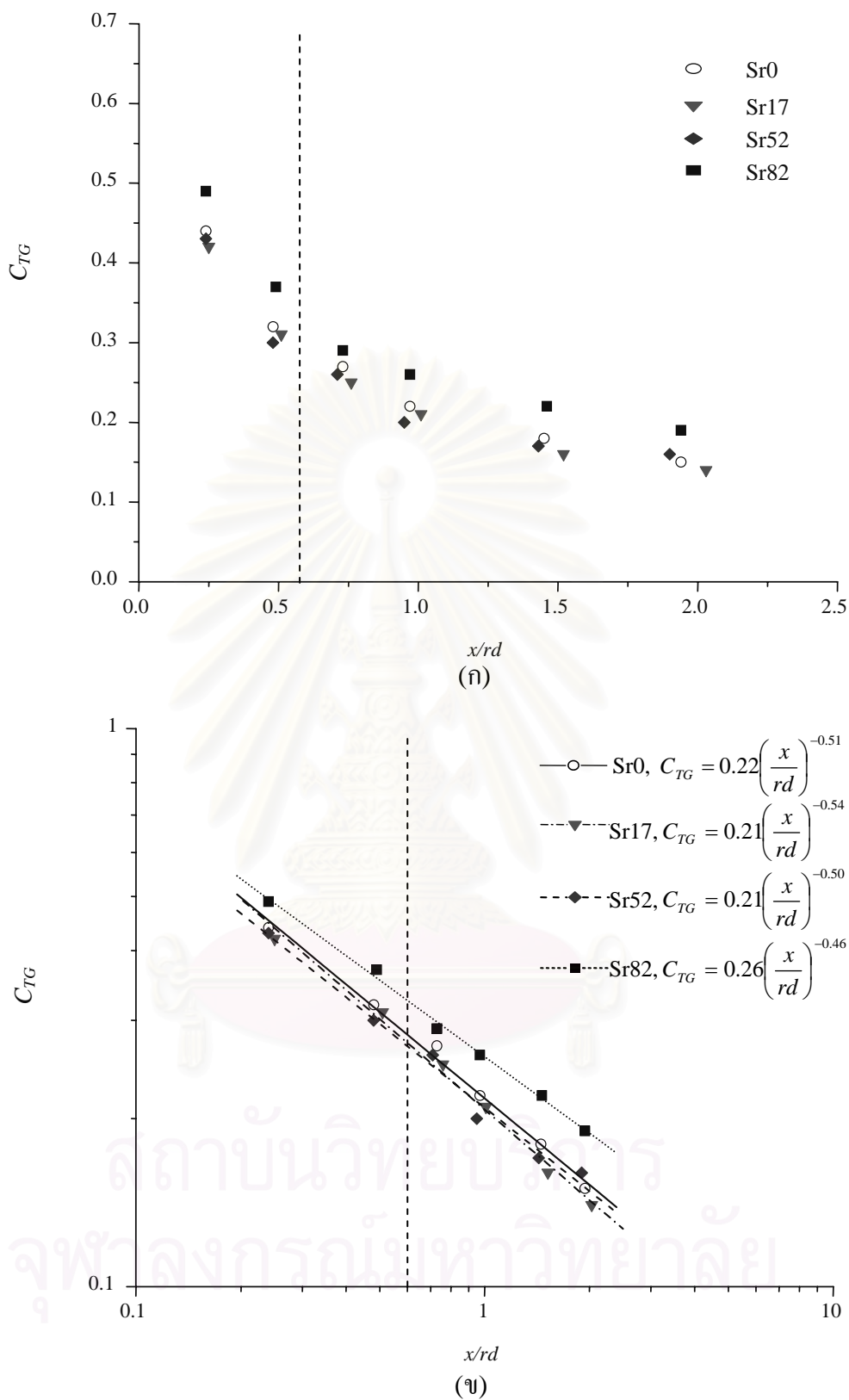
รูปที่ 3.28 Centroid Trajectory ของอนุภาคนิวตันเปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี  
 (ก) บนระนาบสมมาตร ( $\bar{y}_T$ ), (ข) บนระนาบนอน ( $\bar{z}_T$ )



รูปที่ 3.29 Centerplane decay ตามแนว Downstream ( $x$ ) ในแต่ละกรณี  
 (ก) บนสเกลเชิงเส้น, (ข) บนสเกล log-log

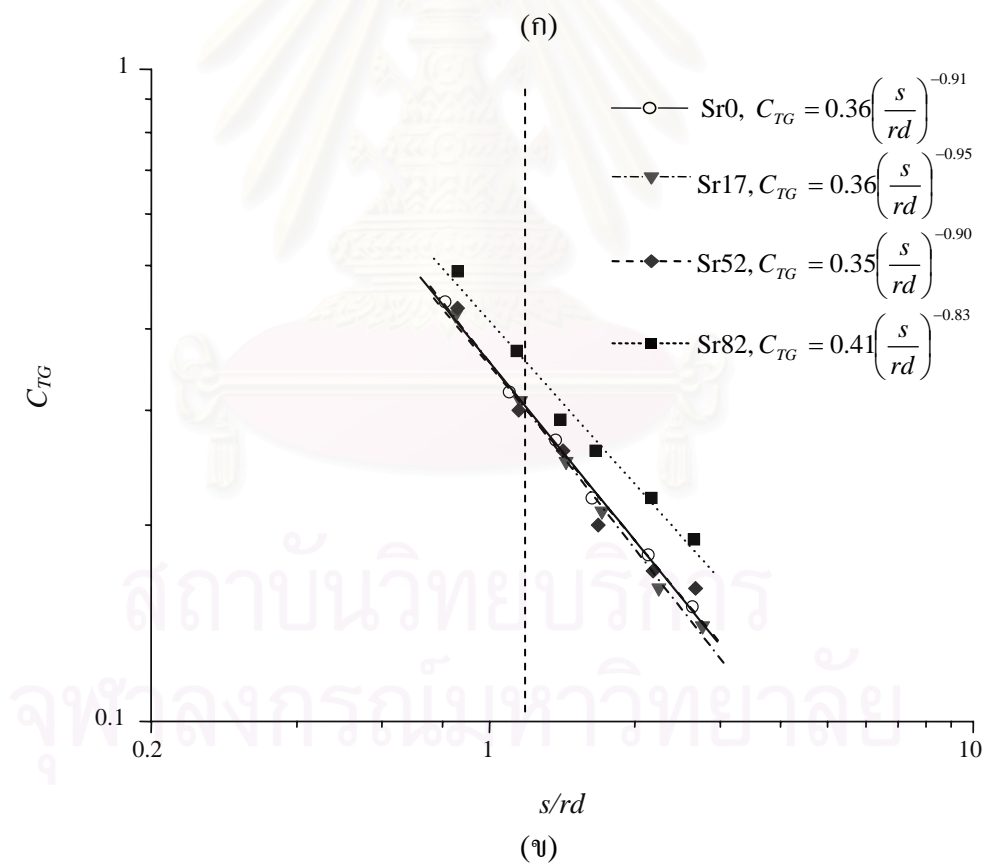
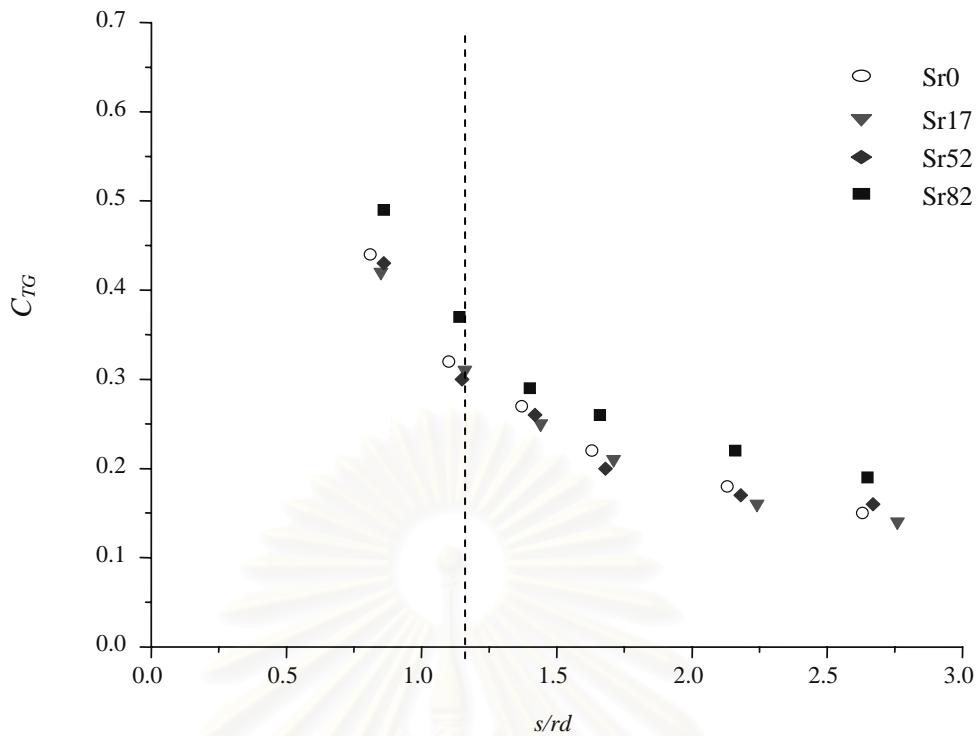


รูปที่ 3.30 Centerplane decay ตามแนวแกนเจ็ท ( $s$ ) ในแต่ละกรณี  
 (ก) บนสเกลเชิงเส้น, (ข) บนสเกล log-log

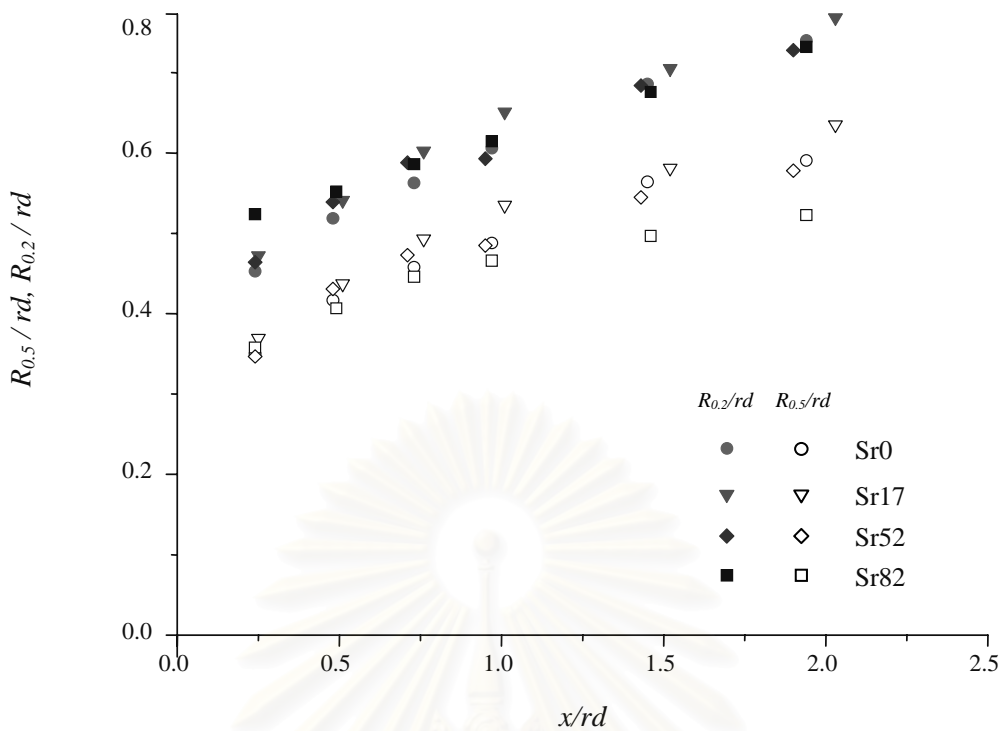


รูปที่ 3.31 Maximum decay ตามแนว Downstream ( $x$ ) ในแต่ละกรณี  
(ก) บนสเกลเชิงเส้น, (ข) บนสเกล log-log

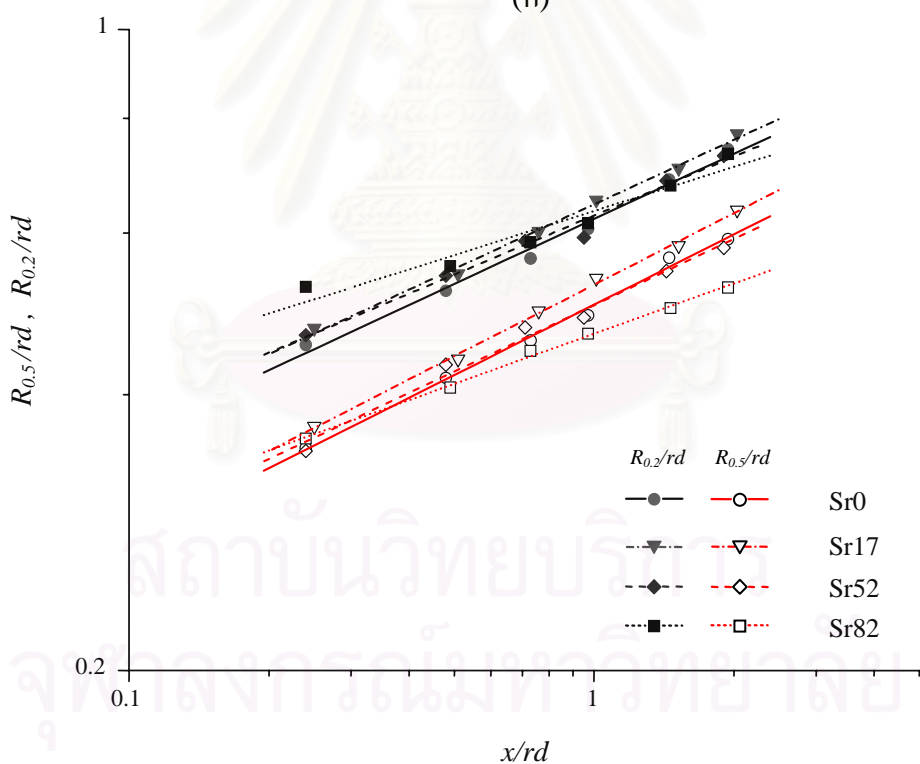




รูปที่ 3.32 Maximum decay ตามแนวแกนเจ็ท ( $s$ ) ในแต่ละกรณี  
 (ก) บนสเกลเชิงเส้น, (ข) บนสเกล log-log

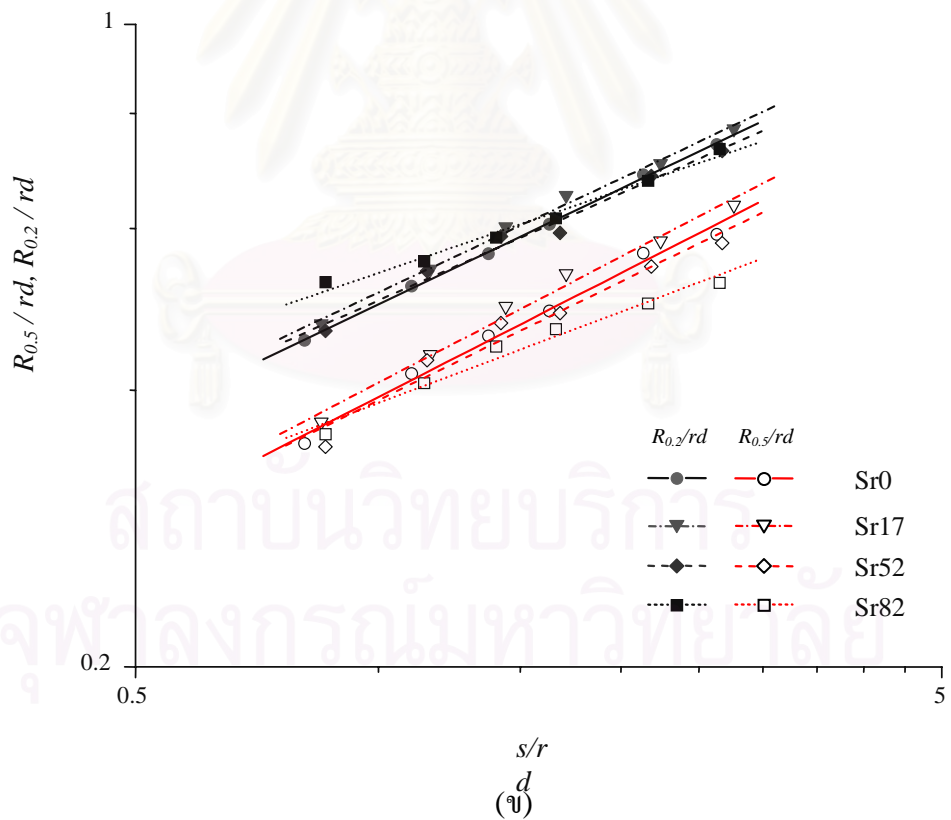
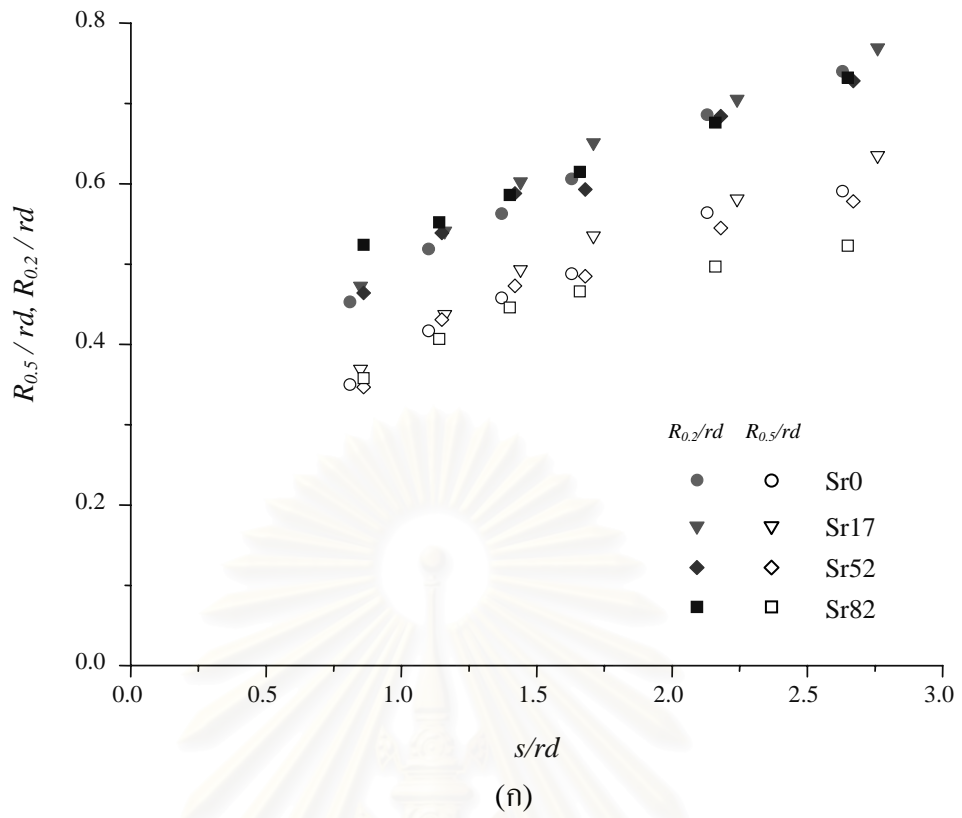


(ก)

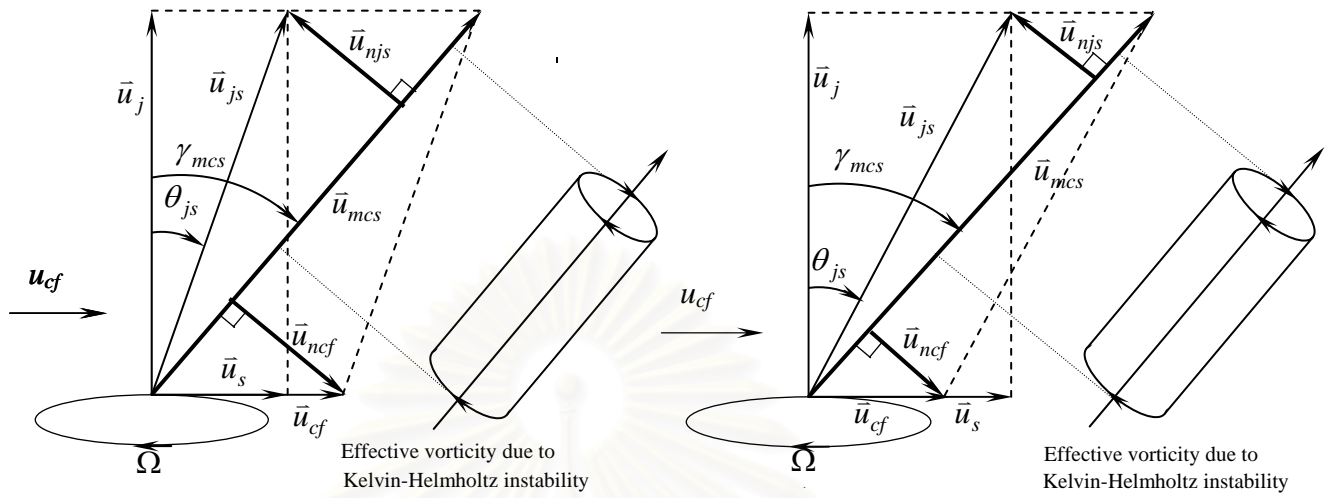


(ข)

รูปที่ 3.33 การขยายตัวของเงื้อมตามแนว Downstream (ก) บนสเกลเชิงเส้น, (ข) บนสเกล log-log

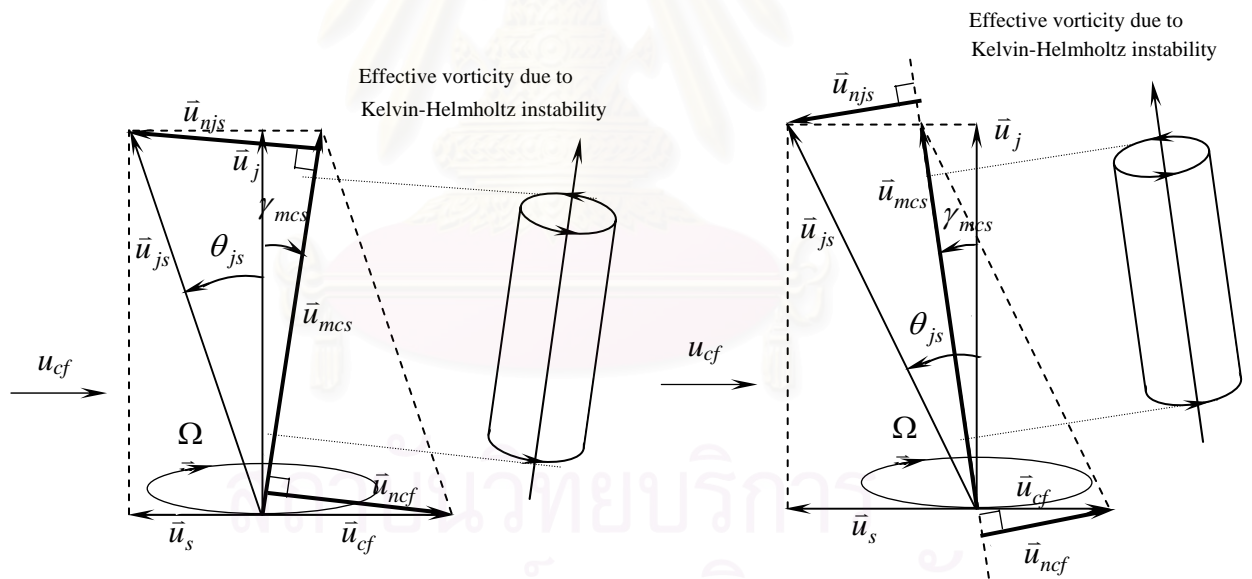


รูปที่ 3.34 การขยายตัวของเจ็ทตามแนวแกนเจ็ท (ก) บนสเกลเชิงเส้น, (ข) บนสเกล log-log



(ก) ด้าน Suction เมื่อ  $u_s < u_{cf}$

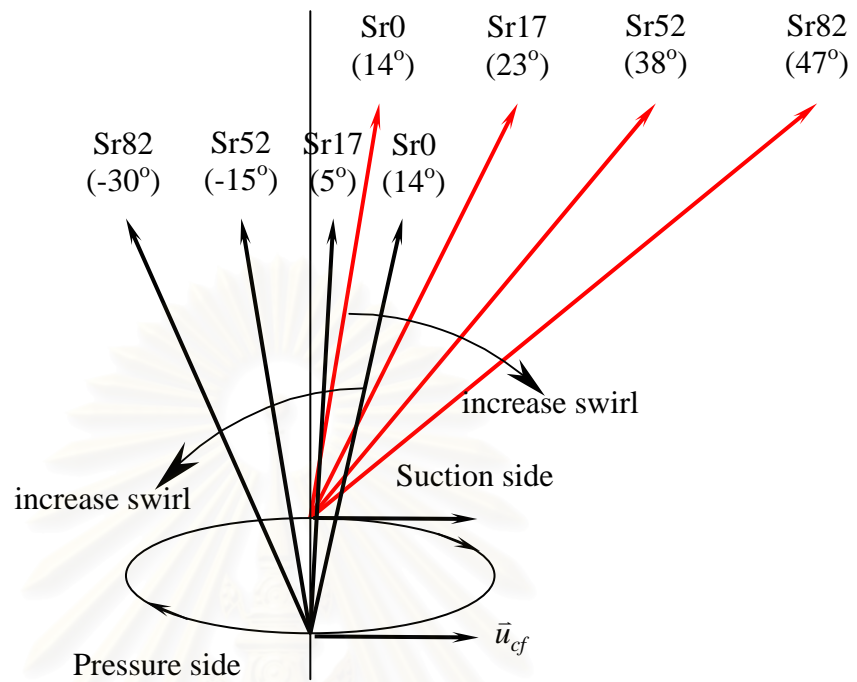
(ข) ด้าน Suction เมื่อ  $u_s > u_{cf}$



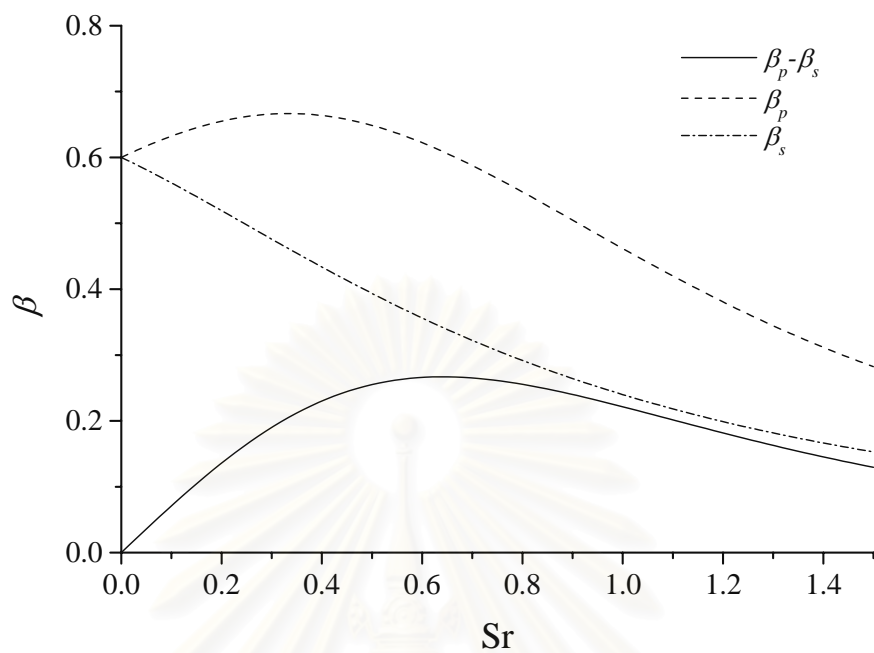
(ค) ด้าน Pressure เมื่อ  $u_s < u_{cf}$

(ง) ด้าน Pressure เมื่อ  $u_s > u_{cf}$

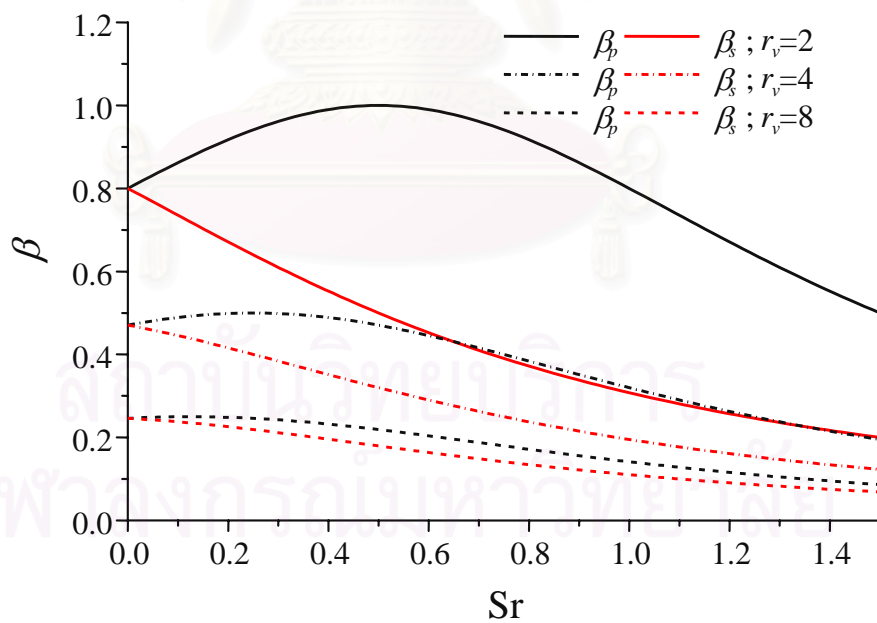
รูปที่ 4.1 Vector ความเร็วซึ่งทำให้เกิด Skewed mixing layer ที่ปากเจ็ท



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนทิศทางของ  $\vec{u}_{mcs}$  ที่ Swirl ratio ต่างๆ (ตัวเลขในวงเล็บแสดงมุม  $\gamma_{mcs}$ )

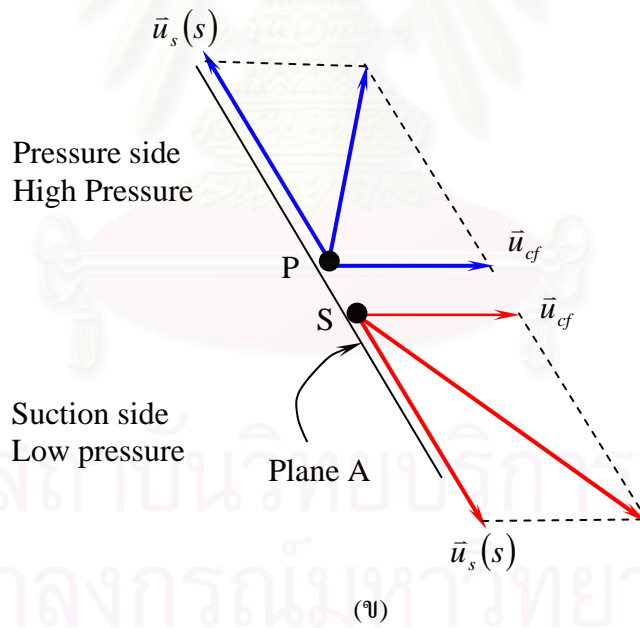
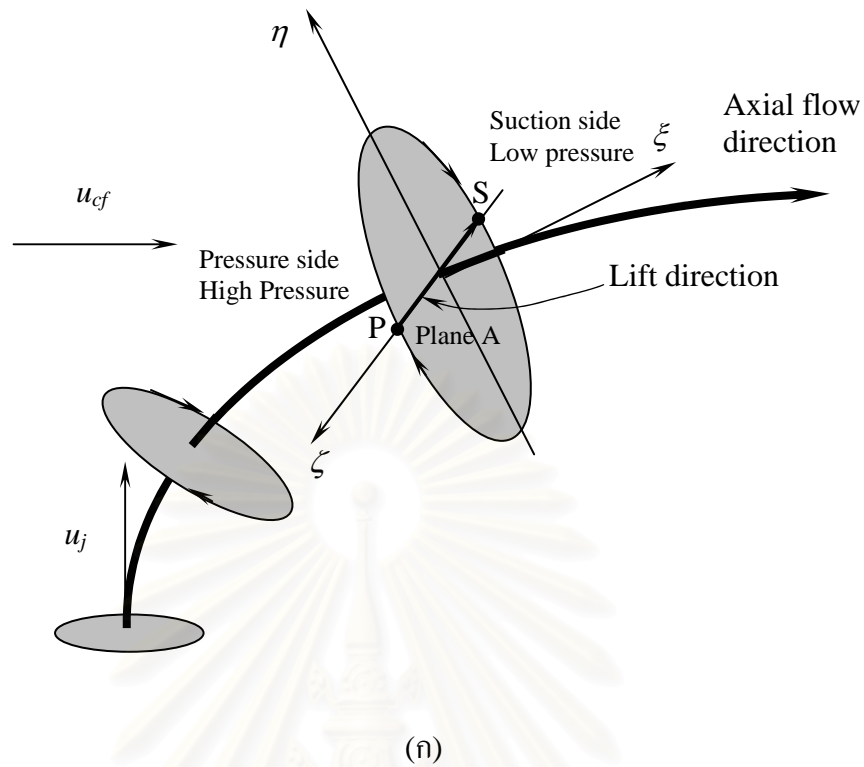


รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของค่า  $\beta$  ตาม Swirl ratio ที่  $r_v = 4$



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของค่า  $\beta$  ตาม Swirl ratio โดยเปรียบเทียบที่  $r_v$  ต่างๆ

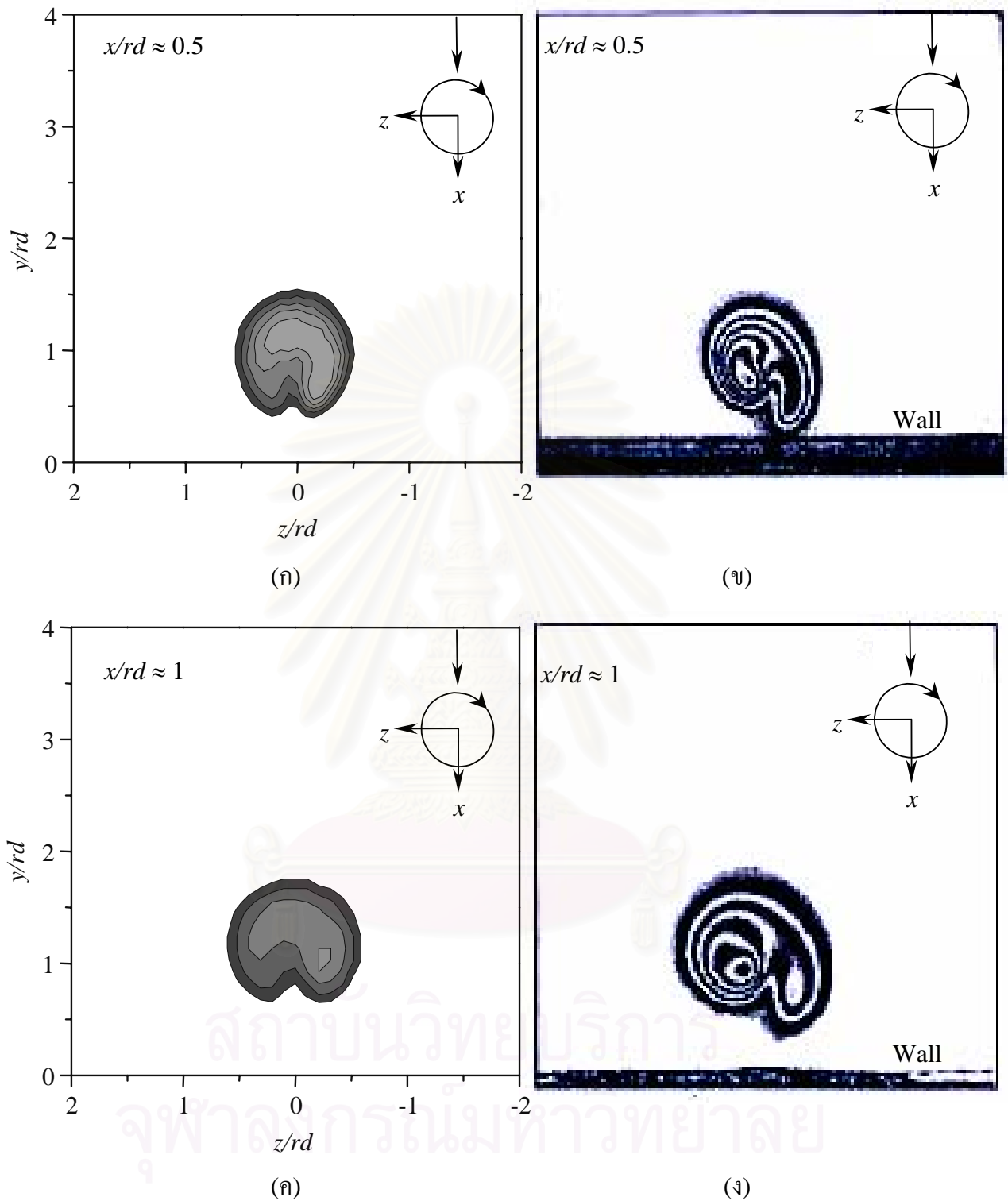




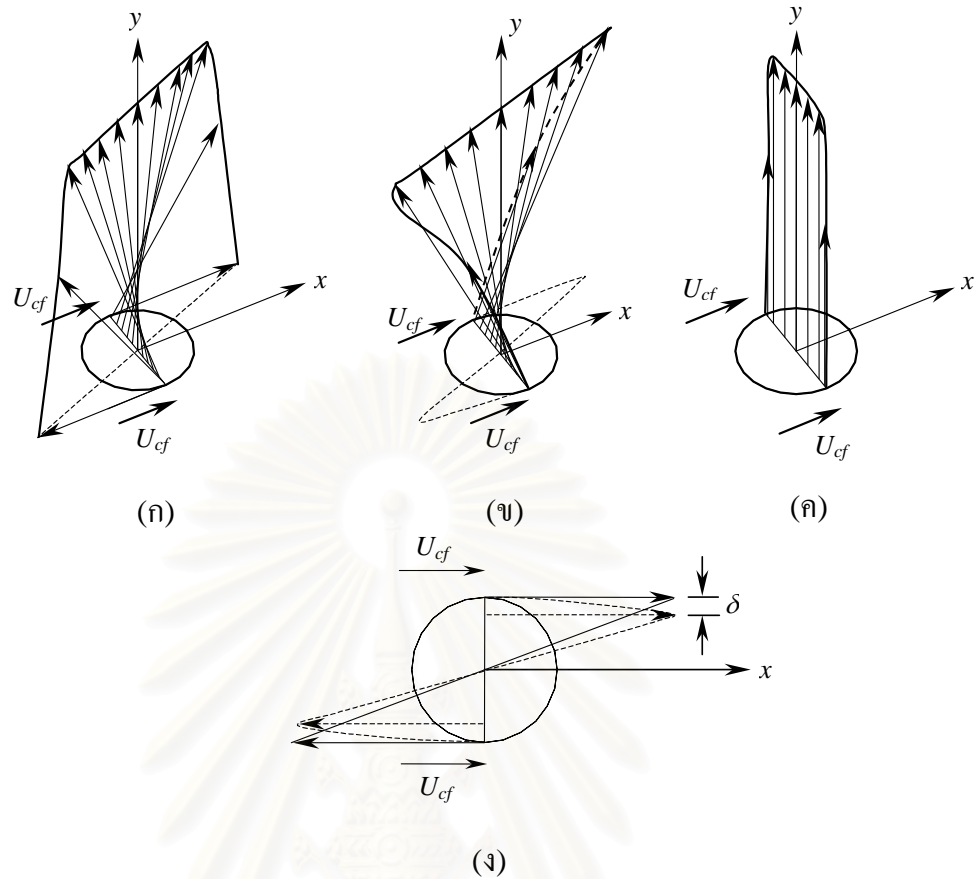
รูปที่ 4.5 แบบจำลองของการเกิดแรงเนื่องจากความดัน

(ก) การพาแกนของ Vortex โดย Axial flow

(ข) เวกเตอร์ความเร็วแสดงความแตกต่างของความดันระหว่างจุด P และจุด S



รูปที่ 4.6 รูปร่าง Contour ของอนุกรมวิธานงานวิจัยนี้ ที่ (ก)  $x/r_d \approx 0.5$  และ (ค)  $x/r_d \approx 1$  เปรียบเทียบกับ Contour ของปริมาณ Scalar concentration จาก Niederhaus et al. (1997) ที่ (ข)  $x/r_d \approx 0.5$  และ (ง)  $x/r_d \approx 1$  ที่ Swirl number ( $S_n$ ) ประมาณ 0.17



รูปที่ 5.1 การกระจายของความเร็วเริ่มต้นที่ปากเงี้ยวของเงี้ยวในกระแสมขวางโดย

- (ก) กรณีที่ความเร็วในแนวสัมผัสที่ขอบเงี้ยวและค่า Circulation รอบเงี้ยวไม่เท่ากับ 0 (เช่น การใช้ท่อหมุนในงานวิจัยนี้)
- (ข) กรณีที่ความเร็วในแนวสัมผัสที่ขอบเงี้ยวและค่า Circulation รอบเงี้ยวเท่ากับ 0 (เช่น การใช้ Guide vane และการฉีดของไหลในแนวสัมผัส)
- (ค) กรณีเงี้ยวที่ไม่หมุนควงในกระแสมขวาง
- (ง) เปรียบเทียบการกระจายของความเร็วในแนวสัมผัสระหว่างกรณี (ก) และ (ข)

## รายการอ้างอิง

- Abramovich, G.N., (1963), The Theory of Turbulent Jets, English Translation published by M.I.T. Press, Massachusetts.
- Albertson, M.L., Dai, Y.B., Jensen, R.A., and Rouse, H., (1950), "Diffusion of submerged jets," *Trans. A.S.C.E.*, Vol. 115, pp. 639-697.
- Andreopoulos, J., (1983), "Heat transfer measurements in a heated jet pipe flow issuing into a cold cross-stream," *Phys Fluids*, Vol. 26, pp. 3201-3210.
- Andreopoulos, J., (1984), "Initial conditions, Reynolds number effects and the near field characteristics of the round jet in a cross flow," *J. Flight Sci. Space Res.*, Vol. 8.
- Andreopoulos, J., (1985), "On the structure of jets in crossflow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 157, pp. 163-197.
- Andreopoulos, J., and Rodi, W., (1984), "Experimental investigation of jets in a cross flow," *J. Fluid Mech.*, Vol.138, pp. 93-127.
- Bradbury, L.J.S, and Khadem, A.H., (1975), "The distortion of a jet by tabs," *J. Fluid Mech.*, Vol. 70, pp. 801-813.
- Billant, P., Chomaz, J.M., and Huerre, P., (1998), "Experimental study of vortex breakdown in swirling jets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 376, pp. 183-219.
- Chue, S. H., (1975), "Pressure probes for fluid measurement," *Prog. Aerospace Sci.*, Vol. 16, No. 2, pp.147-223.
- 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.
- Corrsin, S., (1946), "Investigation of flow in an axially symmetric heated jet of air," *N.A.C.A. Wartime Report*, W-49.
- Escudier, M.P., and Zehnder, N., (1982), "Vortex flow regimes," *J. Fluid. Mech.*, Vol. 115, pp. 105-121.
- Farokhi, S., Taghavi, R., and Rice, E.J., (1988), "Effect of initial swirl distribution on the evolution of a turbulent jet," *AIAA Journal*, Vol. 27, pp. 700-706.
- Feyedelem, M.S., and Sarpkaya, T., (1997), "Free and near-free-surface swirling turbulent jets," *AIAA Paper* No. 97-0438.
- Findlay, M.J., Salcudean, M., and Gartshore, I.S., (1999), "Jets in a Crossflow: Effects of Geometry and Blowing Ratio," *J. Fluids Eng.*, Vol.121, pp. 373-378.
- 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.
- Gutmark, E.J., and Grinstein, F.F., (1999), "Flow control with noncircular jets," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 31, pp. 239-272.
- Hall, M.G., (1972), "Vortex breakdown," *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, Vol. 4, pp. 195-218.
- Han, S., and Taghavi, R., (1998), "Computational study of subsonic jet evolution from different nozzle geometries," *AIAA 98-0215, 36<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan. 12-15*

- Haven, B.A., (1996), "The effect of hole geometry on the near field characteristics of crossflow jets," PhD thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, University of Washington, Seattle, WA.
- Hinze, J.O., and Zijnen, B.G., (1949), "Transfer of heat and matter in the turbulent mixing zone of an axially symmetric jet," *J. Appl. Sci. Res.*, A1, pp. 435-461.
- Kamotani, Y, and Greber, I, (1972), "Experiments on a Turbulent Jet in a Cross Flow," *AIAA Journal*, Vol. 11, pp. 1425 –1429.
- Kavsaoglu, 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. 306, pp. 111-144.
- Kline, S.J., (1985), "The purposes of uncertainty analysis," *Trans. ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 153-160.
- Leibovich, S., (1978), "The structure of vortex breakdown," *Ann.Rev. Fluid Mech.*, Vol. 10, pp. 221-246.
- Liscinsky, D.S, True, B., and Holdeman, J.D., (1995), "Effects of initial conditions on a single jet in crossflow," *AIAA paper 95-2998*, 31<sup>st</sup> Joint Propulsion Conference, San Diego, 10-12 July 1995.
- Lu, G., (1995), "A numerical investigation of skewed mixing layers," *PhD thesis*, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, CA.
- Margason, R. J., (1968) "The path of a jet directed at large angles to a subsonic freestream," *Technical Report TN D-4919*, NASA.
- Moussa, Z.M., Trischka, J.W., and Eskinazi, S., (1977), "The near field in the mixing of a round jet with a cross-stream," *J. Fluid Mech.*, Vol. 80, pp. 49-80.
- 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.
- 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.
- Panda, J., and McLaughlin, D.K., (1994), "Experiments on the instabilities of a swirling jet," *Phys. Fluids*, Vol. 6, pp. 263-276.
- 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.
- Ramsey, J.W., and Goldstein, R.J., (1970), "Interaction of a heat jet with a deflecting stream," *NASA CR - 72613*.
- Raud, N., Bury, Y., Bazile, R., Boree, J., and Charnay, G., (1999), "Experimental Study of the Behavior of Confined Variable Density Jets in a Time Varying Crossflow," *J. Fluids Eng.*, Vol. 121, pp. 65-72.
- Ricou, F. P. and D. B. Spalding (1961), "Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 11, No. 1, pp. 21–32.
- 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.
- Sykes, R.I., Lewellen, W.S., and Parker, S.F., (1986), "On the vorticity dynamics of a turbulent jet in a crossflow," *J. Fluid Mech.*, Vol.80, pp. 49-80.
- Tennekes, H. and Lumley, J.L., (1972), A First course in Turbulence, M.I.T. Press, Cambridge.
- Townsend, A.A., (1956), The Structure of Turbulent Shear Flow, Cambridge University 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.
- White, F.M., (1991), Viscous Fluid Flow, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill.
- Wu, M.M., Garcia, A., Chomaz, J.M., and Huerre, P., (1992), "Instabilities in a swirling water jet," *Bull Am. Phys. Soc.*, Vol. 37, p. 1789.
- 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., (1999), "Spreading characteristics of compressible jets from nozzles of various geometries," *J. Fluid Mech.*, Vol. 383, pp. 197-228.
- Zaman, K.B.M.Q., Samimy, M., and Reeder, M.F., (1994), "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**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก. การศึกษาเบื้องต้น

สำหรับผลการศึกษาเบื้องต้นนี้ได้ถูกนำเสนอในงานสัมมนาทางวิชาการเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 ระหว่างวันที่ 2-3 ธันวาคม 2542 พร้อมทั้งตีพิมพ์ในหนังสือบทความทางวิชาการในการสัมมนาดังกล่าว (Wangjiraniran, W., Uppathamnarakorn, P., and Bunyajitradulya, A., (1999), On the decay of Characteristic Mean Temperature of A Heated Swirling Jet,” *Proceeding of the 13th National Mechanical Engineering Conference*, Vol. 1, pp. 17-21.)

### ก.1

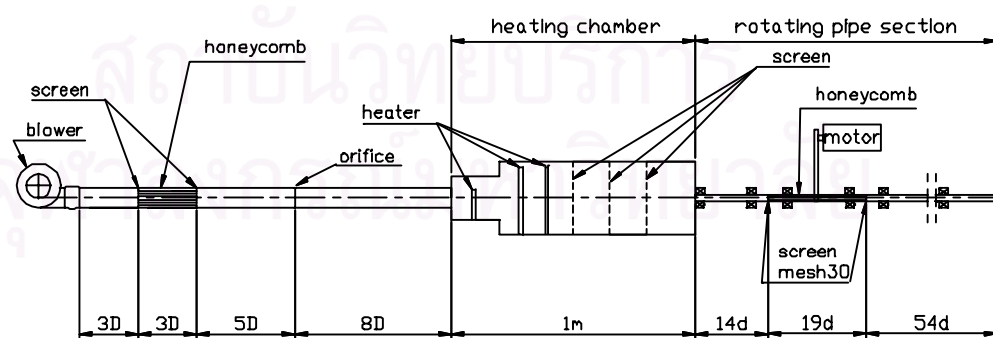
### บทนำ

การศึกษาเบื้องต้นนี้ เป็นการศึกษาผลของการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะการผสมในระดับ Large scale ของเจ็ทรูปวงกลมโดยใช้ปริมาณบ่งชี้คือการลดลงของ Characteristic mean temperature ตามแนว Downstream และใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) ในการทำให้อากาศเกิดการหมุนควง

### ก.2

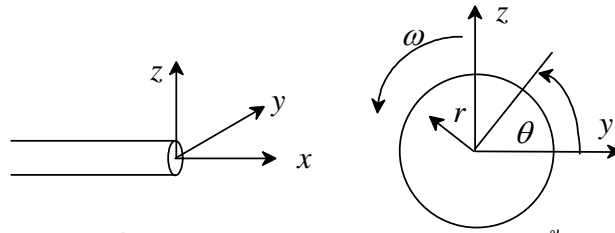
### ชุดทดลอง

ชุดทดลองของการศึกษาเบื้องต้นนี้อยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังรูปที่ ก.1 และพิคัดอ้างอิงที่ใช้ดังรูปที่ ก.2 โดยชุดทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนพัดลมและ Orifice, ส่วน Heating chamber และส่วนท่อหมุน (Rotating pipe)



รูปที่ ก.1 ชุดเจ็ทแบบท่อหมุนที่ใช้ในการศึกษาเบื้องต้น

( $D = 75$  มิลลิเมตร,  $d = 21$  มิลลิเมตร)



รูปที่ ก.2 พิกัดอ้างอิงสำหรับการศึกษาเบื้องต้น

ในส่วนพัดลมและ Orifice นั้นเป็นส่วนที่ใช้ในการวัดอัตราการไหล โดยอากาศจะถูกเป่าจาก พัดลมหอยโข่งขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ผ่านท่ออ่อน (Flexible duct) เพื่อช่วยลดการสั่นสะเทือนจาก พัดลมไปยังส่วนอื่นๆของชุดทดลอง จากนั้นอากาศจะไหลผ่าน Honeycomb ซึ่งทำจากหลอดพลาสติกและประกบด้วยตาข่ายอลูมิเนียม (Household Screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ  $(16 \times 18) \times 31$  เพื่อปรับทิศทางการไหลและช่วยให้อากาศมีความเร็วสม่ำเสมอก่อนเข้า Orifice

หลังจากนั้นอากาศจะผ่านเข้าไปในส่วน Heating chamber ซึ่งภายในจะติด Heater ขนาด 500 วัตต์ จำนวน 1 ตัว และขนาด 2000 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ซึ่งจะถูกควบคุมปริมาณความร้อนโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Variac ขนาด 10 kVA เมื่ออากาศถูกทำให้ร้อนแล้ว จะไหลผ่านแผ่นเหล็กเจาะรู (Perforated plate) ซึ่งมีขนาดรู (มิลลิเมตร) × ระยะระหว่างรู (มิลลิเมตร) เท่ากับ  $10 \times 15$  และอัตราส่วนช่องเปิด 50 % จำนวน 3 แผ่นเพื่อให้อากาศมีการกระจายของอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดก่อนเข้าไปในส่วนของท่อหมุน

ในส่วนของท่อหมุนได้ใช้ท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน ( $d$ ) 21.4 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก ( $D$ ) 25 มิลลิเมตร จำนวน 3 ท่อน ยึดติดกันด้วย Coupling ซึ่งทำจากท่อเหล็กและใช้การยึดแบบ Set screw โดยท่อนแรกมีความยาว  $14d$ , ท่อนที่สองมีความยาว  $19d$  โดยบรรจุ Honeycomb ซึ่งทำจากท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใน 3.5 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางนอก 4.5 มิลลิเมตร บรรจุเต็มหน้าตัดท่อ โดยมีตาข่ายสแตนเลส (Screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ  $30 \times 35$  ประกบ และส่วนที่ 3 มีความยาว  $54d$  เพื่อให้สภาวะของการไหลมีลักษณะเป็น Fully developed ที่ปากทางออก જેซึ่งท่อทั้ง 3 ท่อนจะถูกขับโดยมอเตอร์ขนาด 1.5 กิโลวัตต์, 2830 รอบต่อนาที และปรับความเร็วรอบโดยใช้เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (Inverter)

### ก.3 จูฟาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พารามิเตอร์ของการทดลอง

ในการศึกษาเบื้องต้นได้ศึกษาผลของการหมุนควงซึ่งแสดงในรูปของ Swirl ratio ( $Sr = w_p / u_j$ ) ที่มีต่อคุณลักษณะการผสมของ Swirling jet โดยการใช้การลดลงของอุณหภูมิ คุณลักษณะเฉลี่ยซึ่งแสดงในรูปของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ( $C_T$ )

$$C_T = \frac{T - T_r}{T_j - T_r} \quad (ก.1)$$

โดย	$T$	คืออุณหภูมิในตำแหน่งที่ทำการวัด,
	$T_r$	คืออุณหภูมิห้อง ซึ่งในการทดลองมีค่าประมาณ 32-33 °C
	$T_j$	คืออุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางปากเจ็ทซึ่งในการทดลองมีค่าประมาณ 64-66 °C

โดย Farokhi et. al. (1988) พบว่าคุณลักษณะของ Turbulent swirling jet นั้นขึ้นกับค่า Swirl number (Sn) และลักษณะของสภาวะเริ่มต้นด้วย โดยในการศึกษานี้จะแสดงสภาวะเริ่มต้นเป็นการกระจายของค่าความดันรวมที่อ่านได้จาก Pitot probe ในรูปของ Coefficient of pitot pressure ( $C_P$ ) ซึ่งนิยามเป็น

$$C_P = \frac{P - P_C}{P_E - P_C} \quad (\text{ก.2})$$

โดย	$p$	คือค่าความดันรวมในตำแหน่งที่ทำการวัด
	$p_C$	คือค่าความดันรวมตรงกึ่งกลางที่ปากทางออกของเจ็ท
	$p_E$	คือค่าความดันรวมเฉลี่ยระหว่าง 2 จุดที่ขอบของปากเจ็ท

ซึ่งค่าความดันรวมในแนวแกนเจ็ทแสดงในรูปของ  $C_{px}$  และค่าความดันรวมในแนวสัมผัสแสดงในรูปของ  $C_{p\theta}$  และได้แสดงสภาวะเริ่มต้นของอุณหภูมิในรูปของ Temperature coefficient ( $C_T$ ) ซึ่งนิยามตามสมการ ก.1

#### ก.4

#### รายละเอียดของการวัด

สำหรับอุปกรณ์การวัดสภาวะเริ่มต้นของความดันรวมได้ใช้ Pitot probe ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใน 0.8 มิลลิเมตรและเส้นผ่าศูนย์กลางนอก 1.2 มิลลิเมตร และสำหรับการวัดอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิกุณลักษณะเฉลี่ยนั้นได้ใช้ Thermocouple

สำหรับสภาวะเริ่มต้นของความดันรวมในแนวแกนนั้นได้ทำการวัดโดยการเลื่อน Probe ทั้งในแนว  $y$  และ  $z$  โดยหันปลาย Probe ให้มีทิศทางตามแนวแกนเจ็ท ในทุกกรณี เช่นเดียวกับการวัดสภาวะเริ่มต้นของอุณหภูมิ ในขณะที่การวัดในแนวสัมผัสนั้นได้ทำการวัดโดยการเลื่อน Probe เฉพาะในแนว  $y$  โดยหันปลาย Probe ให้มีทิศทางตามแนวสัมผัสกับตัวเจ็ท สำหรับกรณีที่มีการหมุนควง ซึ่งการวัดสภาวะเริ่มต้นทั้งหมดนั้นได้ใช้ระยะห่างระหว่างจุด 2 มิลลิเมตร

สำหรับอุณหภูมิกุณลักษณะเฉลี่ย (Characteristic mean temperature) นั้นเป็นค่าอุณหภูมิเฉลี่ยมากที่สุดบนแนว  $z$  และทำการวัดโดยการเลื่อน Probe วัดอุณหภูมิไปในทิศทาง  $\pm z$  ครั้งละ 2 มิลลิเมตรประมาณ 4-5 ตำแหน่ง ซึ่งได้ทำการทดลองที่ระยะตามแนวแกน  $x$  ประมาณ 15d โดยมีระยะห่างในการวัด 0.5d สำหรับระยะทาง 0 ถึง 5d และ 1d สำหรับระยะทาง 10d ถึง 15d

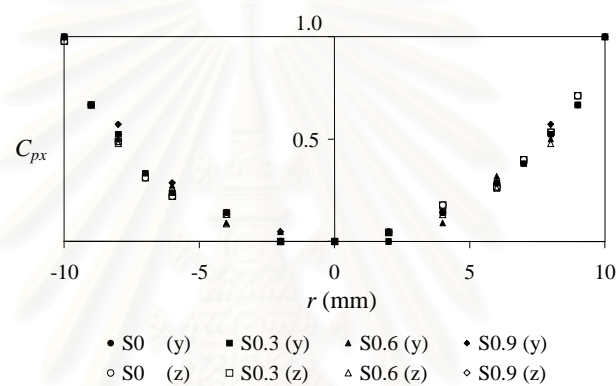
ก.

5

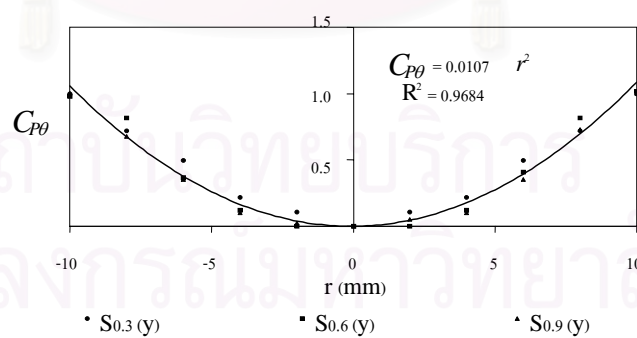
ผลการทดลอง

### ก.5.1 ผลการวัดสถานะเริ่มต้น

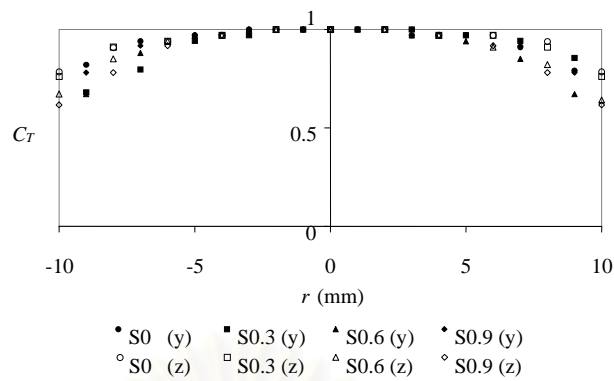
รูปที่ ก.3 ถึง ก.5 แสดงสถานะเริ่มต้นของ  $C_{px}$ ,  $C_{p\theta}$ ,  $C_T$  ตามลำดับ โดยกรณี Sr0 จะแสดงผลการทดลองที่ไม่มีการหมุนควงและสำหรับกรณี S0.3, S0.6 และ S0.9 จะแสดงผลการทดลองที่มีค่า Swirl ratio (Sr) ประมาณ 0.3, 0.6 และ 0.9 ตามลำดับ โดยพบว่า การกระจายของ  $C_{px}$ ,  $C_{p\theta}$  และ  $C_T$  ตามแนวรัศมีในแต่ละกรณีนั้นมีความใกล้เคียงกันและมีความสมมาตร โดยการกระจายของ  $C_T$  ในแต่ละกรณีนั้นมีความแตกต่างกันเล็กน้อยบริเวณขอบเขต



รูปที่ ก.3 การกระจายของค่า  $C_{px}$  ตามแนวรัศมี



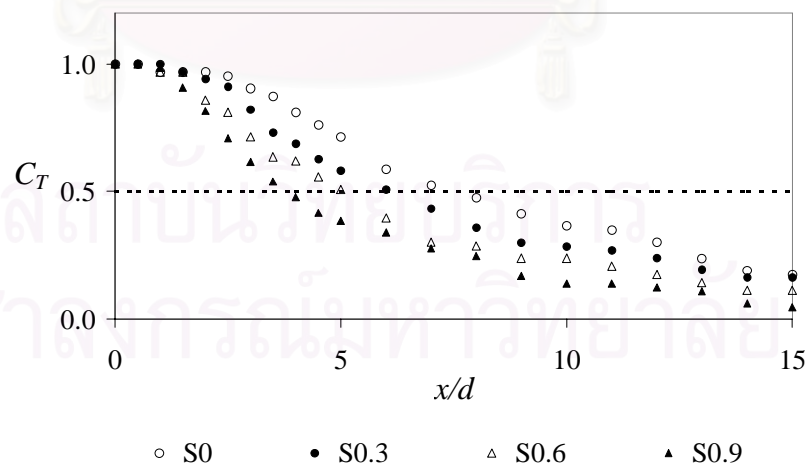
รูปที่ ก.4 การกระจายของค่า  $C_{p\theta}$  ตามแนวรัศมี



รูปที่ ก.5 การกระจายของค่า  $C_T$  ตามแนวรัศมี

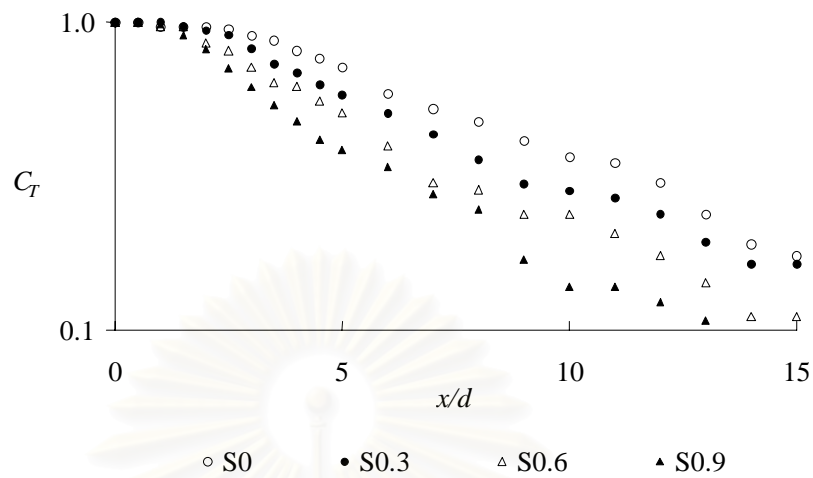
### ก.5.2 ผลการวัดอุณหภูมิคุณลักษณะเฉลี่ย (Characteristic mean temperature)

รูปที่ ก.6 และ ก.7 แสดงการกระจายของอุณหภูมิคุณลักษณะเฉลี่ยตามแนว Downstream พบว่า อัตราการลดลงของอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มค่า Swirl ratio โดยเฉพาะในช่วง  $5d$  ถึง  $6d$  แรก โดยระยะตามแนว Downstream ที่อุณหภูมิลดลงครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิที่ปากเจ็ท ( $x_{50\%}$ ) มีค่าเท่ากับ  $7.5d$ ,  $6d$ ,  $5d$  และ  $4d$  ในกรณี S0, S0.3, S0.6 และ S0.9 ตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ของ  $x_{50\%}$  และ Swirl number มีลักษณะผกผันและเป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงถึงการลดลงของขนาด Potential core เมื่อเพิ่มค่า Swirl ratio



รูปที่ ก.6 การลดลงของอุณหภูมิคุณลักษณะเฉลี่ยตามแนว Downstream





รูปที่ ก.7 การลดลงของอนุหภูมิคุณลักษณะเฉลี่ยตามแนว Downstream บนสเกล semi-log

## ก.6

## สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงถึงอัตราการลดลงของอนุหภูมิคุณลักษณะเฉลี่ยที่มากขึ้น และการลดลงของขนาด Potential core เมื่อเพิ่มค่า Swirl ratio ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการผสมที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่า Swirl ratio นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของ  $x_{50\%}$  และค่า Swirl ratio ที่มีลักษณะเชิงเส้นนั้นแสดงถึงแนวโน้มและความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมเมื่อเพิ่มค่า Swirl ratio มากกว่าช่วงที่ทำการทดลองคือ 0.9

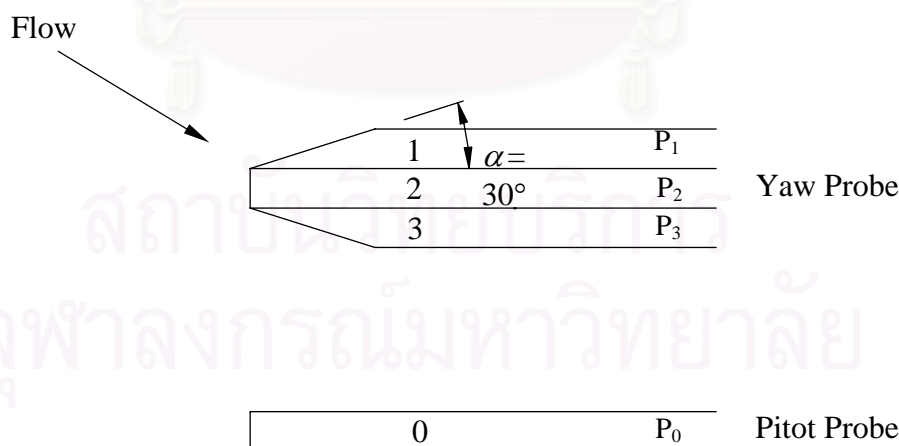
## ภาคผนวก ข

### การเปรียบเทียบและคำนวณความเร็วการไหลจากการวัดด้วย Yaw Probe

#### ข.1 ลักษณะและรายละเอียดของ Yaw Probe

โดยทั่วไป Pitot Probe สามารถใช้งานได้ดีกับการวัดความเร็วของของไหลที่มีลักษณะเป็น Parallel flow และผู้วัดทราบทิศทางการไหลแน่นอน แต่สำหรับการไหลแบบหมุนควง ดังเช่นในงานวิจัยนี้ที่ของไหลมีความเร็วในสองมิติ และไม่ทราบทิศทางการไหล จะทำให้ไม่สามารถใช้ Pitot Probe ในการวัดความเร็วได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้จัดทำ Yaw Probe ขึ้นเพื่อวัดการไหลซึ่งสามารถวัดความเร็วในสองมิติที่ไม่ทราบทิศทางที่แน่นอนได้

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



รูปที่ ข.1 แสดงลักษณะของ Yaw Probe

## ข.2 การปรับเทียบ Yaw Probe

ในการวัดความเร็วของการไหลได้มีการปรับเทียบ Yaw Probe เพื่อหาความสัมพันธ์ของผลต่างความดันที่วัดได้จากเข็มแต่ละคู่กับค่าความเร็วตามแนวแกนและแนวสัมผัส โดยทำการปรับเทียบในอุโมงค์ลมขนาดหน้าตัด  $30 \times 30$  เซนติเมตร ที่ความเร็ว 12 และ 15 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

ในการปรับเทียบได้ควบคุมให้การไหลมีความดันจลน์คงที่แล้วปรับเปลี่ยนมุมปะทะ ( $\alpha$ ) ของการไหลกับ Yaw Probe โดยหมุน Yaw Probe ไปทีละ 5 องศา โดยมีช่วงของการปรับเทียบ ( $\alpha$ ) ระหว่าง  $-80$  องศา ถึง  $80$  องศา และผลต่างความดันที่วัดได้จะสัมพันธ์กันตามสมการ (Chue, 1975)

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

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

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

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

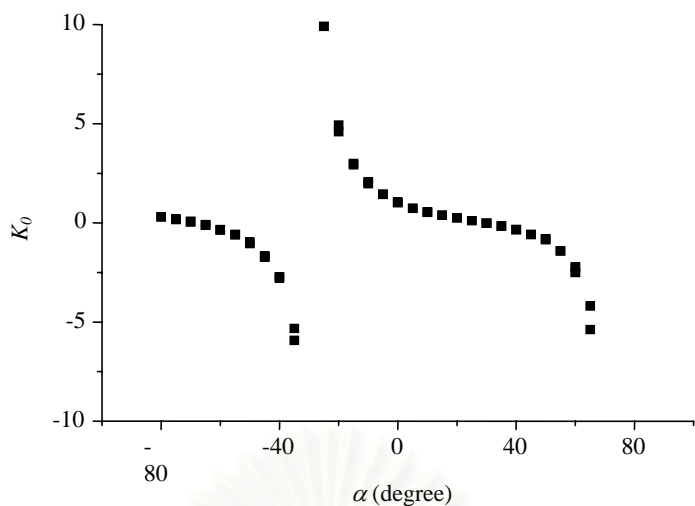
จากสมการ ข.1 ถึง ข.3 นั้นสามารถกำหนดความสัมพันธ์ของ Calibration function  $K_0$ ,  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ได้ตามสมการ

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

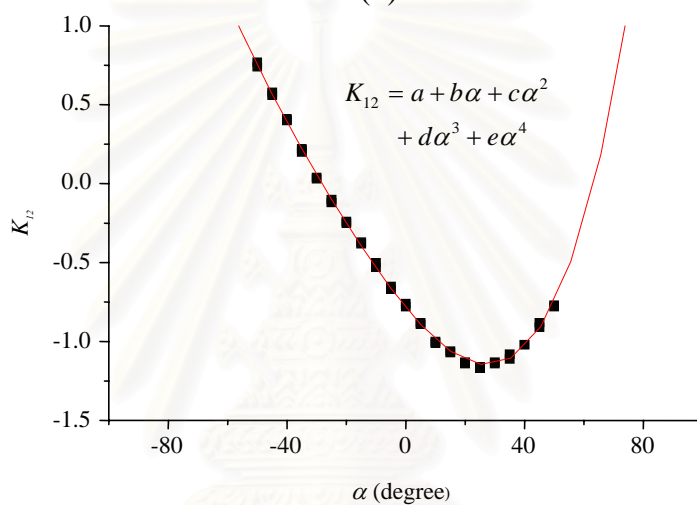
$$K_{32} = K_3 - K_2 = \frac{P_3 - P_2}{\Delta P} \quad (\text{ข.5})$$

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

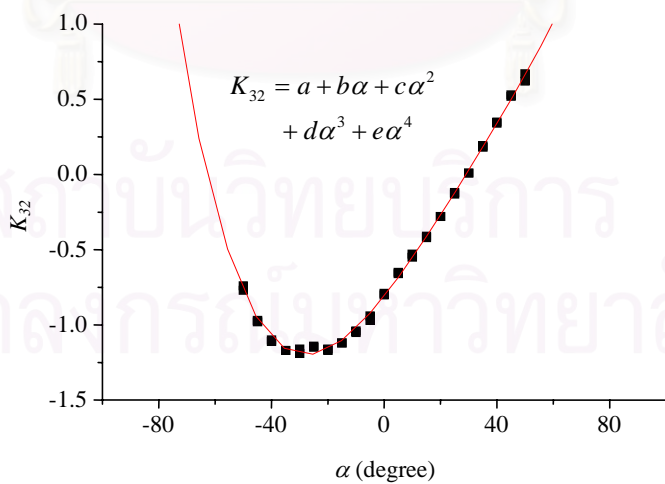
โดยสามารถหาค่า  $K_0$ ,  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ที่มุมปะทะ ( $\alpha$ ) ต่างๆได้ จากค่าความดันแตกต่างที่วัดและค่าความดันจลน์ของการทดลอง โดยแสดงความสัมพันธ์ของ  $K_0$ ,  $K_{12}$  และ  $K_{32}$  ที่มุมปะทะ ( $\alpha$ ) ต่างๆดังรูปที่ ข.2



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ของ Calibration function กับมุมปะทะของการไหล ( $\alpha$ )  
 (ก)  $K_0$  (ข)  $K_{12}$  และ (ค)  $K_{32}$  (ค่าคงที่ต่างๆแสดงดังตารางที่ ข1)

### ข.3 การคำนวณความเร็วจากการวัดด้วย Yaw probe

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

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

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

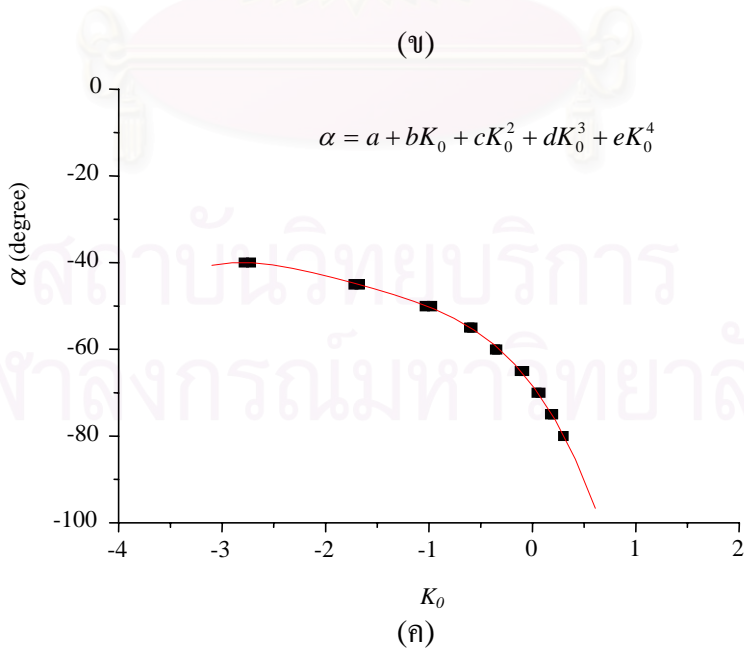
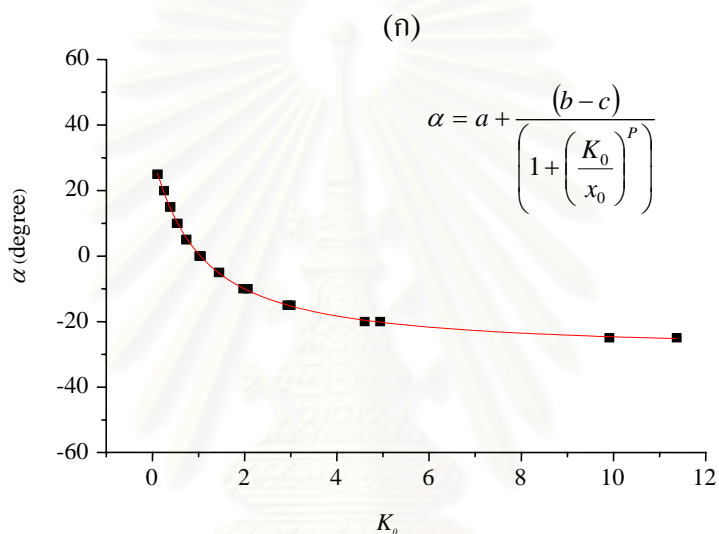
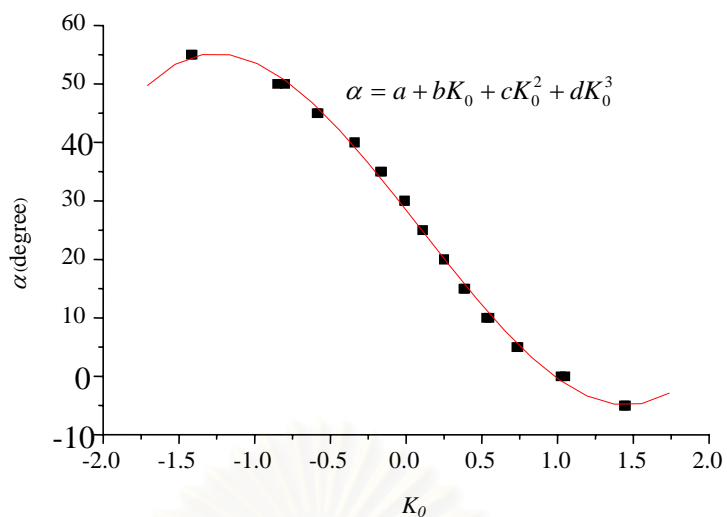
จากนั้นสามารถคำนวณหาค่าความเร็วตามแนวแกน ( $u$ ) และความเร็วตามแนวสัมผัส ( $w$ ) ได้จากค่าความดันจลน์ ( $\Delta P$ ) และมุมปะทะ ( $\alpha$ ) ที่คำนวณข้างต้นตามสมการ

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

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

	a	b	c	d	e
$K_{12}$	0.78319	-0.02287	2.402019E-4	3.14279E-9	2.8837E-8
$K_{23}$	-0.81007	0.02382	2.24772E-4	-3.78137E-6	3.07803E-8
$K_0 (-1 < K_0 < 1)$	28.45205	-33.03427	-1.79549	6.00744	-
$K_0 (1 < K_0 < 10)$	30.28764	-29.27774	1.00825	1.08041	-
$K_0 (-3 < K_0 < -1)$	-68.32768	-31.68877	-19.70396	-7.08489	-0.99935

ตารางที่ ข.1 ค่าคงที่ของการใช้ Curve fitting จากข้อมูลที่ได้จากการ Calibrate ตามรูปที่ ข.2 และรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ของมุมปะทะของการไหล ( $\alpha$ ) กับ Calibration function  $K_0$   
 (ก)  $-1 < K_0 < 1$  (ข)  $1 < K_0 < 10$  และ (ค)  $-3 < K_0 < -1$  (ค่าคงที่ต่างๆแสดงดังตารางที่ ข.1)



## ภาคผนวก ค.

### การคำนวณค่าความไม่แน่นอน

#### ค.1 ค่าความไม่แน่นอนของความเร็ว

##### ค.1.1 ความไม่แน่นอนของความเร็วจากการวัดด้วย Pitot Probe

การคำนวณความเร็วของการไหลด้วย Pitot Probe ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

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

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 ค.1 จะได้

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

โดยที่ความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่าความดัน  $\delta_{\Delta P}$  มีค่าประมาณ  $\pm 0.065$  mmWG และให้ค่า  $\delta_{\rho}$  มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ  $\delta_{\Delta P}$  เมื่อเลือกจุดบริเวณกึ่งกลางที่ปากเจ็ทคือที่  $r = 0$  ในกรณี Sr0 ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆคือ  $u = 9.5$  m/s,  $\rho = 1.01$  kg/m<sup>3</sup> แทนในสมการ ค.2

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{0.65 \text{ Pa}}{1.01 \text{ kg/m}^3 \times 9.5 \text{ m/s}}\right)^2} \approx 0.07 \text{ m/s}$$

และเมื่อเลือกจุดบริเวณใกล้ขอบที่ปากเจ็ทคือที่ระยะ  $r = +15$  mm ในกรณี Sr0 ซึ่งมีค่าความไม่แน่นอนมากที่สุด ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆคือ  $u = 6$  m/s,  $\rho = 1.06$  kg/m<sup>3</sup> แทนในสมการ ค.2 จะได้

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{0.65 Pa}{1.06 kg/m^3 \times 6m/s}\right)^2} \approx 0.1 \text{ m/s}$$

ความไม่แน่นอนของค่าความเร็วจากการวัดด้วย Pitot Probe มีค่าประมาณ  $\pm 0.1 \text{ m/s}$

### ค.1.2 ความไม่แน่นอนของความเร็วจากการวัดด้วย Yaw Probe

การคำนวณค่าความเร็วจาก Yaw Probe ได้ทำการปรับเทียบเพื่อหา Calibration Function ตามความสัมพันธ์

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\delta_{K_{32}} = \frac{dK_{32}}{d\alpha} \delta_{\alpha} \quad (\text{ก.9})$$

สำหรับการคำนวณความเร็วจากการวัดด้วย Yaw Probe ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

$$V = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(K_{12})}} \quad \text{หรือ} \quad V = \sqrt{\frac{2(P_3 - P_2)}{\rho(K_{32})}} \quad (\text{ก.10})$$

ซึ่งได้ความไม่แน่นอนของค่าความเร็วเป็น

$$\delta_V = \sqrt{\frac{(\delta_{P_1-P_2})^2}{2\rho(P_1 - P_2)(K_{12})} + \frac{(P_1 - P_2)(\delta_{K_{12}})^2}{2\rho(K_{12})^3}} \quad (\text{ก.11})$$

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

$$u = V \cos \alpha \quad (\text{ก.12})$$

$$w = V \sin \alpha \quad (\text{ก.13})$$

และสามารถคำนวณความไม่แน่นอนของความเร็วตามแนวแกน  $\delta_u$  และความเร็วตามแนวสัมผัส  $\delta_w$  ได้จาก

$$\delta_u = \sqrt{[(\cos \alpha)(\delta_V)]^2 + [(V \sin \alpha)(\delta_{\alpha})]^2} \quad (\text{ก.14})$$

$$\delta_w = \sqrt{[(\sin \alpha)(\delta_V)]^2 + [(V \cos \alpha)(\delta_{\alpha})]^2} \quad (\text{ก.15})$$

โดยในแต่ละจุดที่ปากเจ็ทนั้น มีค่าความไม่แน่นอนของความเร็วแตกต่างกัน ตามการกระจายของ Calibration curve ซึ่งในที่นี้ได้ยกตัวอย่างการคำนวณ โดยเลือกเป็นตำแหน่ง  $z' = 7.5 \text{ mm}$  ที่ปากเจ็ท ในกรณี Sr82 โดยมีค่าความดัน  $P_1 - P_2 = -1.98 \text{ mmWG}$ ,  $P_3 - P_2 = -6.1 \text{ mmWG}$  ซึ่งจากการคำนวณในภาคผนวก ข. จะได้  $K_0 = 3.08$ ,  $\alpha = -15.5$  องศา,  $K_{12} = -0.38$ ,  $V = 51.2$ ,  $u = 9.77$  และ  $w = -2.72$  ตามลำดับ โดยมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดความดัน ซึ่งพิจารณาจากค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของเครื่องมือวัดประมาณ

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

และจากสมการ ก.6 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของ  $K_0$  ( $\delta_{K_0}$ ) ประมาณ 0.1 และจากสมการ ก.7 และ Calibration curve ดังรูป ข.2 จะได้  $\delta_{\alpha}$  ประมาณ 0.18 องศา และจากสมการ

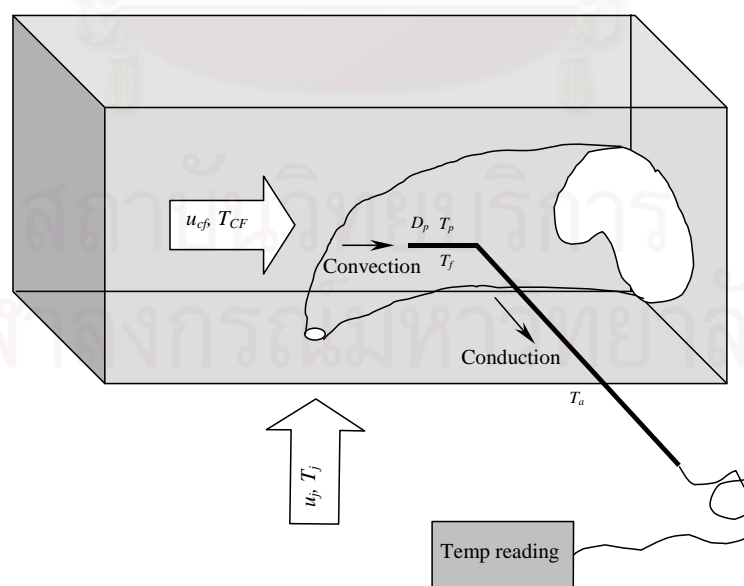
ค.8 และ Calibration curve ดังรูป ข.3 จะได้  $\delta_{K_{12}}$  ประมาณ 0.04 และจากสมการ ค.11 จะได้  $\delta_v$  ประมาณ 0.15 และจากสมการ ค.14-ค.15 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของความเร็วในแนวแกน และแนวสัมผัสประมาณ 0.5 และ 1.7 m/s ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวจะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง เนื่องจากวิธีการประมาณ โดยการนำค่าความไม่แน่นอนในแต่ละส่วนมาบวกกันเสมอ ทั้งนี้จากการตรวจสอบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วย Pitot probe ในกรณีของความเร็วในแนวแกน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

## ค.2 ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิ

ค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิในที่นี้จะพิจารณาจากความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบเครื่องมือวัดซึ่งประกอบด้วย Sensor คือลวด Thermocouple Type T (Copper-Constantan) ยี่ห้อ OMEGA รุ่น TT-T-30 ที่มีช่วงของการวัดอุณหภูมิอยู่ระหว่าง  $-270$  ถึง  $400$  องศาเซลเซียส และที่มีค่าความถูกต้อง (Accuracy) ประมาณ  $0.3$  °C ในช่วงที่ทำการทดลอง และตัวอ่านค่าอุณหภูมิ (Thermocouple thermometer) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 52-2 ซึ่งมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ  $0.1$  °C โดยค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบเครื่องมือวัดนี้ถูกจำกัดโดยลวด Thermocouple ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.75$  % ของค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ หรือประมาณ  $0.3$  °C

การวัดอุณหภูมิสำหรับงานวิจัยนี้เป็นการวัดอุณหภูมิของเจ็ทอากาศที่มีความเร็วทำให้อาจจะได้รับผลของการพา (Convection) ทำให้อุณหภูมิที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อน โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงผลของการพาดังกล่าวด้วยแบบจำลอง (model) ดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 แบบจำลองในการพิจารณาผลของการพา (Convection) ที่มีต่อการวัดอุณหภูมิ

สำหรับแบบจำลองในการพิจารณาผลของการพาที่มีต่อการวัดอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ ค.1 โดยที่  $T_f$  คืออุณหภูมิของอากาศที่ต้องการวัด,  $T_p$  คืออุณหภูมิที่อ่านได้จาก Thermocouple และโดยจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน และสมมติฐานที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากลวด Thermocouple สู่อากาศ ทำให้กระบวนการในการถ่ายเทความร้อนในการวัดอุณหภูมินี้ เป็นผลจากการพาความร้อนของอากาศ (Convection) และการนำความร้อนของลวด Thermocouple เท่านั้น ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 q_{conv} &= q_{cond} \\
 hAdT &= kA \frac{dT}{dx} \\
 hA(T_f - T_p) &= \frac{kA}{L}(T_p - T_a) \\
 \frac{T_f - T_p}{T_p - T_a} &= \frac{k}{hL} = \left(\frac{k}{hD}\right)\left(\frac{D}{L}\right) \\
 \therefore \frac{T_f - T_p}{T_p - T_a} &= \frac{1}{Nu}\left(\frac{D}{L}\right) \quad (ค.16)
 \end{aligned}$$

โดย  $D$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของปลาย Thermocouple มีค่าประมาณ 1 mm,  $L$  คือความยาวของ Thermocouple มีค่าประมาณ 1 m และ  $Nu$  คือค่า Nusselt number ซึ่งประมาณจากความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนผ่านรูปทรงกลม (Sphere) จาก White (1991) ตามสมการ

$$Nu_{m,sphere} \approx 2.0 + 0.3Pr^{1/3} Re^{3/5} \quad (ค.17)$$

สำหรับอากาศที่อุณหภูมิ 0 ถึง 100 °C มีค่า  $Pr = 0.71$  และ

$$\text{ที่ } u_j = 8 \text{ m/s, } T_j = 75^\circ \text{C; } (Re)_{D_p} = \frac{u_j D_p}{\nu_a} = \frac{(8 \text{ m/s})(1 \times 10^{-3} \text{ m})}{(2.2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})} \approx 360$$

$$\text{ที่ } u_{cf} = 1.82 \text{ m/s, } T_j = 32^\circ \text{C; } (Re)_{D_p} = \frac{u_{cf} D_p}{\nu_a} = \frac{(1.82 \text{ m/s})(1 \times 10^{-3} \text{ m})}{(1.7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})} \approx 107$$

แทนในสมการ ค.17 จะได้ Nusselt number เฉลี่ยมีค่าในช่วง 2 ถึง 11.15 และเมื่อแทนค่าในสมการ ค.16 จะได้ค่า  $(T_f - T_p)/(T_p - T_a)$  อยู่ในช่วง 0.1 - 0.5 % นั่นคือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิจริงของของไหลประมาณ 0.1 - 0.5 % ของอุณหภูมิที่วัด ซึ่งมีค่ามากที่สุดประมาณ 0.2 °C

### ค.2.1 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม ( $C_{TG}$ )

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม ( $C_{TG}$ ) นิยามโดย

$$C_{TG} = \frac{T - T_{cf}}{T_j - T_{cf}} = C_{TG}(T, T_j, T_{cf})$$

จากการประมาณค่าความไม่แน่นอนโดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{TG}$  ( $\delta_{C_{TG}}$ ) ได้จากความสัมพันธ์

$$\delta_{C_{TG}} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_{TG}}{\partial T} \delta_T\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TG}}{\partial T_j} \delta_{T_j}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TG}}{\partial T_{cf}} \delta_{T_{cf}}\right)^2}$$

แทนค่า  $C_{TG}$  จะได้

$$\therefore \delta_{C_{TG}} = \sqrt{\left(\frac{1}{T_j - T_{ref}} \delta_T\right)^2 + \left(\frac{-(T - T_{ref})}{(T_j - T_{ref})^2} \delta_{T_j}\right)^2 + \left(\frac{-(T_j - T_{ref}) + (T - T_{ref})}{(T_j - T_{ref})^2} \delta_{T_{ref}}\right)^2}$$

โดยในการทดลองจะกำหนดอุณหภูมิของเจ็ท ( $T_j$ ) และอุณหภูมิของกระแสลมขวาง ( $T_{cf}$ ) ให้คงที่ที่ประมาณ  $75^\circ C$  และ  $32^\circ C$  และอุณหภูมิที่ทดลองอยู่ในช่วงตั้งแต่  $32-60^\circ C$  โดยค่าความไม่แน่นอนของ  $T$ ,  $T_j$  และ  $T_{cf}$  ประมาณได้จากค่าความถูกต้องของ Thermocouple จากความถูกต้องของเครื่องมือวัดและผลของการพา (Convection) ดังกล่าว ซึ่งมีค่าไม่เกิน  $0.5^\circ C$  นั่นคือ

$$\delta_T = \delta_{T_j} = \delta_{T_{cf}} = 0.5^\circ C$$

จากการคำนวณพบว่าค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{TG}$  ( $\delta_{C_{TG}}$ ) ในการทดลองอยู่ในช่วง 0.01-0.03 โดยงานวิจัยนี้จะระบุค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่  $\delta_{C_{TG}}$  สูงสุดไม่เกิน 0.05

### ค.2.2 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะหน้าตัด ( $C_{TL}$ )

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะหน้าตัด ( $C_{TL}$ ) นิยามโดย

$$C_{TL} = \frac{T - T_{cf}}{T_{max} - T_{cf}} = C_{TL}(T, T_{max}, T_{cf})$$

จากการประมาณค่าความไม่แน่นอนโดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{TL}$  ( $\delta_{C_{TL}}$ ) ได้จากความสัมพันธ์



$$\delta_{C_{TL}} = \sqrt{\left(\frac{\partial C_{TL}}{\partial T} \delta_T\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TL}}{\partial T_{max}} \delta_{T_{max}}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{TL}}{\partial T_{cf}} \delta_{T_{cf}}\right)^2}$$

แทนค่า  $C_{TL}$  ได้

$$\therefore \delta_{C_{TL}} = \sqrt{\left(\frac{1}{T_{max} - T_{cf}} \delta_T\right)^2 + \left(\frac{-(T - T_{cf})}{(T_{max} - T_{cf})^2} \delta_{T_{max}}\right)^2 + \left(\frac{-(T_{max} - T_{cf}) + (T - T_{cf})}{(T_{max} - T_{cf})^2} \delta_{T_{cf}}\right)^2}$$

โดยในการทดลองจะมีอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละหน้าตัด ( $T_{max}$ ) แตกต่างกันไปคืออยู่ในช่วงประมาณ 37-48 °C โดยอุณหภูมิของกระแสลมขวาง ( $T_{cf}$ ) มีค่าประมาณ 32 °C และอุณหภูมิที่ทดลองอยู่ในช่วงตั้งแต่ 32 - 48 °C โดยค่าความไม่แน่นอนของ  $T$ ,  $T_{max}$  และ  $T_{cf}$  ประมาณได้จากค่าความถูกต้องของ Thermocouple ซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.5 °C นั่นคือ

$$\delta_T = \delta_{T_{max}} = \delta_{T_{cf}} = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

จากการคำนวณพบว่าค่าความไม่แน่นอนของ  $C_{TL}$  ( $\delta_{C_{TL}}$ ) ในการทดลองอยู่ในช่วง 0.04-0.24 ซึ่งแสดงดังตาราง ค.1 โดยค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวจะมากขึ้นตามระยะทางตามแนวการไหล อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้ระบุค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่  $\delta_{C_{TL}}$  ประมาณ 0.2

$x/rd$	$T_{max}$	ค่า $\delta_{C_{TL}}$	
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
0.25	48	0.008	0.04
0.5	43	0.11	0.06
0.75	41	0.14	0.08
1	39	0.17	0.10
1.5	38	0.20	0.12
2	37	0.24	0.14

ตาราง ค.1 แสดงช่วงของค่าความไม่แน่นอนของค่า  $C_{TL}$  ในแต่ละหน้าตัด

### ค.3 ค่าความไม่แน่นอนของระยะทาง

#### การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของ Trajectory

สำหรับ Centerline Trajectory นั้นแสดงจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุดบนระนาบสมมาตร โดย  $y/rd = F(y,r)$  และจาก Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ  $y/rd$  ได้จากความสัมพันธ์

$$\delta_{(y/rd)} = \sqrt{\left(\frac{\delta_y}{rd}\right)^2 + \left(\frac{y\delta_r}{r^2d}\right)^2} \quad (\text{ค.18})$$

โดยค่าความไม่แน่นอนของ  $\delta_y$  ประมาณจากความละเอียด (Resolution) ในการวัดซึ่งมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 16 mm และ  $\delta_r$  จากความแตกต่างของ r ในแต่ละกรณี (ไม่เกิน 5% ของค่าที่ใช้ในการทดลองคือ 4.1) ซึ่ง มีค่าประมาณ 0.2 นั่นคือ

$$\delta_y = 16 \text{ mm} \text{ และ } \delta_r = 0.2$$

แทนค่าในสมการ ค.18 จะได้  $\delta_{(y/rd)}$  มีค่าประมาณ 0.14

สำหรับ Centroid Trajectory นั้นแสดงจากตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของอนุกรมทั้งหมดบนระนาบสมมาตร ( $\bar{y}/rd$ ) และระนาบนอน ( $\bar{z}/rd$ ) ตามแนวการไหล  $x/rd$  โดย  $\bar{y}/rd = F(\bar{y}, r)$  และ  $\bar{z}/rd = G(\bar{z}, r)$  และจาก Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ  $\bar{y}/rd$  และ  $\bar{z}/rd$  ได้จากความสัมพันธ์

$$\omega_{(\bar{y}/rd)} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{\bar{y}}}{rd}\right)^2 + \left(\frac{\bar{y}\delta_r}{r^2d}\right)^2} \quad (\text{ค.19})$$

$$\delta_{(\bar{z}/rd)} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{\bar{z}}}{rd}\right)^2 + \left(\frac{\bar{z}\delta_r}{r^2d}\right)^2} \quad (\text{ค.20})$$

โดย  $\bar{y}$  และ  $\bar{z}$  ข้างต้นเป็นการหาค่าเฉลี่ยของการวัดทั้งหมดที่ตัดตั้งสมการ 3.8 และ 3.9 ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาจากค่าความไม่แน่นอนในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัดซึ่งมีค่าประมาณ  $\delta_{\bar{y}} = \delta_{\bar{z}} = 5$  มิลลิเมตร และ  $\delta_r$  จากความแตกต่างของ r ในแต่ละกรณี (ไม่เกิน 5% ของค่าที่ใช้ในการทดลองคือ 4.1) ซึ่ง มีค่าประมาณ 0.2 นั่นคือ

$$\delta_{\bar{y}} = \delta_{\bar{z}} = 5 \text{ mm} \text{ และ } \delta_r = 0.2$$

แทนค่าในสมการ ค.20 และ ค.21 จะได้  $\delta_{(\bar{y}/rd)}$  และ  $\delta_{(\bar{z}/rd)}$  มีค่าประมาณ 0.08

## ประวัติผู้เขียน

นาย วีรินทร์ หวังจิรนิรันดร์ เกิดวันที่ 22 กันยายน พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย