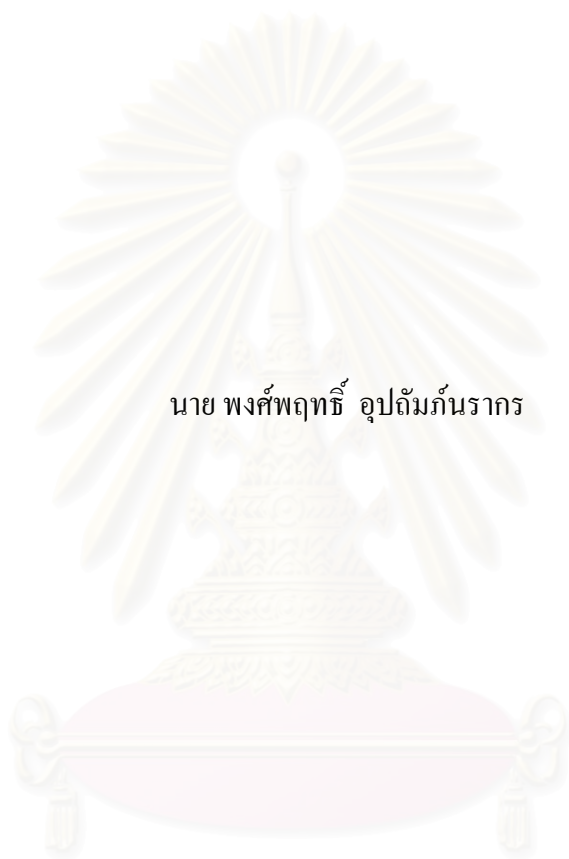


ผลกระทบของสเวิร์ลนัมเบอร์ต่อคุณลักษณะการผสม
ของเจ็ตร้อนที่หมุนควงในกระแสลมทวน



นาย พงศ์พฤทธิ์ อุปถัมภ์นรากร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

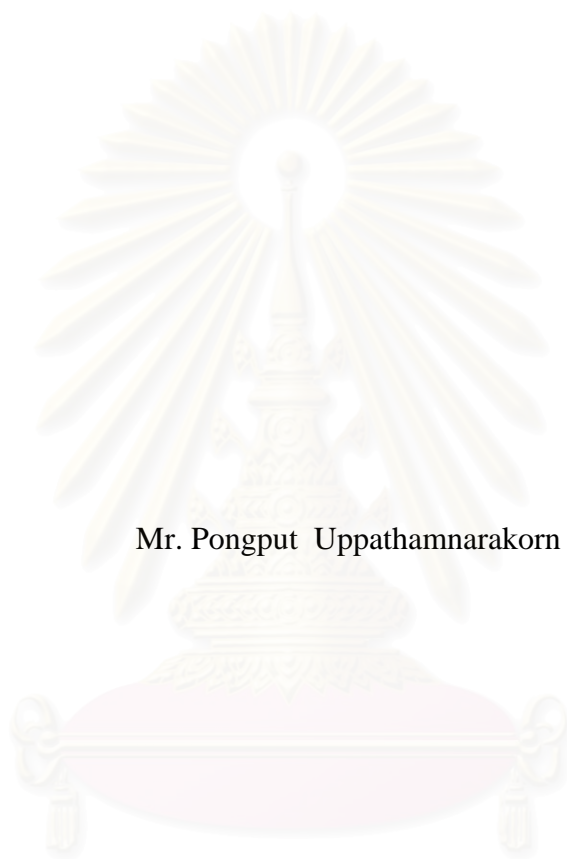
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1514-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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



Mr. Pongput Uppathamnarakorn

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 974-03-1514-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของสวิตช์โหมดเบอร์ต่อคุณลักษณะการผสมของเจ็ดร้อนที่หมุน
ควงในกระแสลมทวน
โดย นาย พงศ์พัทธ์ อุปถัมภ์นรากร
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราคุลย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราคุลย์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดำรงศักดิ์ มลิลา)

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

พงศ์พุทธิ อุปถัมภ์รกร : ผลกระทบของสเวิร์ลน์มเบอร์ต่อคุณลักษณะการผสมของเจ็ตร้อนที่หมุนควงในกระแสสวน

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

อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อสิ บุญจิตราคุลย์ ; 187 หน้า

ISBN 974-03-1514-3

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะการไหลของเจ็ตร้อนที่หมุนควงในกระแสสวน ซึ่งมุ่งเน้นที่ผลกระทบของความเร็วในการหมุนควงต่อคุณลักษณะการผสมของเจ็ตร้อน โดยใช้ค่า **Swirl ratio (Sr)** เป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับการหมุนควง สำหรับเจ็ตร้อนที่หมุนควงนั้นได้จากการเป่าอากาศร้อนผ่านชุดท่อหมุนซึ่งภายในบรรจุ **Honeycomb** ทำให้การไหลมีความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ตร้อนที่ขอบปากเจ็ตร้อนและผลรวมของค่า **Circulation** รอบปากเจ็ตร้อนไม่เป็นศูนย์ ในการทดลองได้วัดการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยเฉลี่ยบนระนาบหน้าตัดตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเจ็ตร้อนที่ตำแหน่งต่างๆตามแนว **Downstream** เพื่อศึกษาคุณลักษณะการผสมเฉพาะหน้าตัดและคุณลักษณะการผสมโดยรวม โดยทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลคงที่ที่ **4.62** และทำการเปลี่ยนค่า **Swirl ratio** เพื่อศึกษาผลของการหมุนควงทั้งหมด 4 ค่า คือที่ **Swirl ratio** เท่ากับ 0 (กรณีที่เจ็ตร้อนไม่มีการหมุนควง), 0.11, 0.22 และ 0.33 และที่ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ตร้อนประมาณ **10,000** สำหรับผลการทดลองดังกล่าวได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในกรณีการไหลแบบเจ็ตร้อนวนอิสระ ซึ่งได้ทำควบคู่กันไปเพื่อใช้เป็นกรณีพื้นฐานสำหรับการเปรียบเทียบ

จากผลการทดลองในกรณีการไหลแบบเจ็ตร้อนวนอิสระพบว่า การหมุนควงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมของเจ็ตร้อนให้ดียิ่งขึ้น โดยเจ็ตร้อนจะมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้น และมีอุณหภูมิตามแนวแกนลดลงอย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงเพิ่มขึ้น แต่การหมุนควงจะไม่ส่งผลให้รูปร่างการกระจายตัวของเจ็ตร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก โดยในกรณีที่มีการหมุนควง เจ็ตร้อนจะมีรูปร่างการกระจายตัวที่มีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตรเช่นเดียวกับการไหลในกรณีที่ไม่มีการหมุนควง

สำหรับผลการทดลองในกรณีการไหลแบบเจ็ตร้อนวนในกระแสสวนพบว่า การหมุนควงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมของเจ็ตร้อนในกระแสสวนให้ดียิ่งขึ้น โดยทำให้การไหลแบบเจ็ตร้อนวนในกระแสสวนมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้น มีอุณหภูมิตามแนวแกนลดลงได้รวดเร็วขึ้น และมีระยะ **Penetration depth** สั้นลง เมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการหมุนควงจะไม่ส่งผลต่อรูปร่างการกระจายตัวของเจ็ตร้อนของการไหลแบบเจ็ตร้อนวนในกระแสสวน ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับการไหลแบบเจ็ตร้อนวนอิสระ

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของการหมุนควงในการไหลแบบเจ็ตร้อนวนอิสระเปรียบเทียบกับในการไหลแบบเจ็ตร้อนวนในกระแสสวนพบว่า การหมุนควงจะส่งผลต่อการไหลแบบเจ็ตร้อนวนอิสระมากกว่าการไหลแบบเจ็ตร้อนวนในกระแสสวน โดยเมื่อเพิ่มระดับการหมุนควงในปริมาณที่เท่ากันแล้ว การไหลแบบเจ็ตร้อนวนอิสระจะมีการลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกนมากกว่า ซึ่งสังเกตได้จากในกรณีการไหลแบบเจ็ตร้อนวนอิสระจะมีระยะทางในการสลายตัวของอุณหภูมิที่สั้นลงได้มากกว่าในกรณีการไหลแบบเจ็ตร้อนวนในกระแสสวน โดยเมื่อเพิ่มระดับการหมุนควงจาก **Swirl ratio** เท่ากับ 0 (ไม่มีการหมุนควง) เป็น 0.33 นั้น การไหลแบบเจ็ตร้อนวนอิสระจะมีระยะที่อุณหภูมิส่วนเกินที่แกนเจ็ตร้อนลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิส่วนเกินทั้งหมด (ระยะที่ $C_T = 0.5$) สั้นลงไปประมาณ 27% ในขณะที่การไหลแบบเจ็ตร้อนวนในกระแสสวนจะมีระยะที่ $C_T = 0.5$ สั้นลงไปเพียง 17% เท่านั้น

นอกจากนี้ในการศึกษาวิจัยในกรณีการไหลแบบเจ็ตร้อนวนในกระแสสวนยังพบว่า ระยะ **Penetration depth** (x_p) กับค่า **Swirl ratio** (Sr) จะมีความสัมพันธ์กันประมาณเป็นฟังก์ชันพาราโบลา ตามสมการ $x_p/d = -10.33Sr^2 - 2.5Sr + 12.63$ โดยที่ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางปากเจ็ตร้อน

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2544 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

41704178121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD : SWIRLING JET/ JET IN COUNTERFLOW/ HEATED JET/
TEMPERATURE DISTRIBUTION/ ROTATING PIPE/
MIXING

PONGPUT UPPATHAMNARAKORN: EFFECTS OF THE SWIRL
NUMBER ON MIXING CHARACTERISTICS OF A HEATED SWIRLING
JET IN COUNTERFLOW

THESIS ADVISOR: ASST. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA, Ph.D.,187 pp.
ISBN 974-03-1514-3

Experiments for the investigation of the effect of swirl on the mixing characteristics of a heated swirling jet in counterflow were conducted. The heated swirling jet with non-zero tangential velocity, non-zero circulation was generated by passing hot air through a rotating pipe with honeycomb. 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 4.62 and the swirl ratios (Sr) of 0 (no swirl), 0.11, 0.22, and 0.33, at a Reynolds number of approximately 10,000. The results were compared with those of the investigation of the effect of swirl on the mixing characteristics of a free swirling jet that were conducted in parallel.

For free swirling jet, the results indicated that swirl enhanced jet mixing further from that of non-swirling jet. This was shown through increases in jet spreading and centerline temperature decay as swirl ratio was increased. On the other hand, swirl had little influence on the shape of average temperature distribution, both free swirling jet and non-swirling jet had symmetric, circular temperature distribution.

For swirling jet in counterflow, the results indicated that swirl enhanced jet mixing even further from that of a jet in counterflow. This was shown through increases in jet spreading and centerline temperature decay and decrease in penetration depth as swirl ratio was increased. Similar to the free swirling jet case, swirl had little influence on the shape of average temperature distribution, being symmetric and circular as in the case of a jet in counterflow.

When the effects of swirl on free swirling jet were compared to those on swirling jet in counterflow, they revealed that swirl had more influence on free swirling jet than swirling jet in counterflow. Specifically, the centerline temperature of free swirling jet decayed faster than that of swirling jet in counterflow, when comparison was made at the same amount of increase in swirl ratio. In particular, as swirl ratio increased from 0 (no swirl) to 0.33, the fifty-percent decay length, the length at which the excess temperature reduced to half of the original value at the jet exit ($C_T = 0.5$), was shortened by 27% in swirling jet case and by 17% in swirling jet with counterflow case.

In addition, the present study revealed that the effect of swirl on the penetration depth (x_p) of a swirling jet in counterflow could be approximated by a parabolic relation: $x_p/d = -10.33Sr^2 - 2.5Sr + 12.63$, where d was a diameter of the jet exit.

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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลือในทุกๆด้าน จากอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราคุลย์ ซึ่งได้คอยประสิทธิ์ประสาทความรู้ และคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างสูงต่อการทำวิจัย อีกทั้งยังเป็นผู้มอบโอกาสที่ดีต่างๆ ในการเรียนรู้สิ่งที่เป็นประโยชน์ทั้งในการศึกษาและการดำเนินชีวิตของผู้วิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ หัวหน้าภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ศักดิ์ มลิลลา และ ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เฉชะอำไพ ที่ได้เอื้อเฟื้อและแนะนำสิ่งต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ในเนื้อหามากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน กองทุนส่งเสริมการวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และกองทุนบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ณ เวลาที่ศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ผู้วิจัยได้รับกำลังใจ และความเอื้ออาทรจาก พี่ เพื่อน และน้อง ที่ห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ พี่สุธรรม ม้าศรี พี่เกียรติศักดิ์ กอบกาญจนกร พี่ทศพล สถิตดวงศ์กุล และพี่อลงกรณ์ พิมพ์พิณ ที่ให้คำปรึกษาในทุกๆด้าน วีรินทร์ หวังจิรนิรันดร์ สุทธิโชค นันทสุขเกษม และ สุเมธ ไตรภพสกุล ที่ได้ฝ่าฟันอุปสรรคตลอดการทำงานมาด้วยกัน รวมทั้ง ปรมะ พรหมสุทธิรักษ์ ปิติพงศ์ เย็นจิตต์ ชมพิชาน์ คูหิรัญ สิทธิพงษ์ สถาพรนานนท์ และ สุพจน์ เทพพิพัฒน์ ที่ให้ความช่วยเหลือต่อผู้วิจัยเป็นอย่างดีเสมอมา อีกทั้งขอขอบพระคุณบุคลากรทุกคน ซึ่งไม่สามารถยกมากล่าวได้หมดในที่นี้ ที่ช่วยเหลืองานในด้านต่างๆ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

และในท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และญาติพี่น้องทุกท่าน ที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆต่อผู้วิจัยเป็นอย่างดีตลอดช่วงการทำวิจัย ทำให้ผู้วิจัยมีทั้งร่างกายแรงใจในการทำงาน และไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้น

พงศ์พฤทธิ์ อุปถัมภ์นรากร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
รายการสัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 งานวิจัยในอดีต.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	15
1.4 แนวทางการทำวิจัย.....	15
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	18
บทที่ 2 ชุดทดลองและการทดลอง.....	19
2.1 ชุดทดลอง.....	19
2.2 พิกัดอ้างอิงที่ใช้การทดลอง.....	23
2.3 สภาพะของการทดลอง.....	24
2.4 วิธีการทดลองและอุปกรณ์การวัด.....	26
บทที่ 3 ผลการทดลอง.....	32
3.1 ผลการวัดสถานะเริ่มต้น.....	32
3.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะหน้าตัด.....	38
3.3 ผลการศึกษาคุณลักษณะโดยรวม.....	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 อภิปรายผลการทดลอง.....	65
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	67
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	70
ประมวลตาราง.....	72
ประมวลรูปภาพ.....	79
รายการอ้างอิง.....	154
ภาคผนวก.....	157
ภาคผนวก ก.....	158
ภาคผนวก ข.....	164
ภาคผนวก ค.....	170
ภาคผนวก ง.....	175
ภาคผนวก จ.....	178
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	187

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวน.....	73
ตารางที่ 2.1	รายละเอียดของปริมาณต่างๆในแต่ละกรณี.....	77
ตารางที่ 2.2	รายละเอียดพารามิเตอร์ในการทดลองและความคลาดเคลื่อนในแต่ละกรณี.....	77
ตารางที่ 2.3	ความละเอียดและจำนวนจุดที่วัดในแต่ละกรณีการทดลอง.....	78



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1	ลักษณะการไหลของ Circular turbulent jet (Rajaratnam, 1976) 80
รูปที่ 1.2	ลักษณะการไหลโดยเฉลี่ยของเจ็ตในกระแสวน (Bernero, 2000)..... 80
รูปที่ 1.3	ภาพแสดงกรณีการไหลคงตัวของเจ็ตในกระแสวน ที่ $r_v = 1.3$ (Bernero, 2000) 81
รูปที่ 1.4	ภาพแสดงกรณีการไหลไม่คงตัวของเจ็ตในกระแสวน ที่ $r_v = 3.4$ (Bernero, 2000) 81
รูปที่ 1.5	ลักษณะการกระจายตัวความเข้มข้นตามแนวแกนของเจ็ตในกระแสวนที่ $r_v = 2.5$ (Lam and Chan, 1995)..... 82
รูปที่ 1.6	ภาพตัดขวางแสดงการกระจายตัวของความเข้มข้นตามแนวรัศมีในกรณี $r_v = 3.4$ ที่ตำแหน่ง $x/d = 2$ และ $x/d = 5.1$ (Bernero, 2000)..... 83
รูปที่ 1.7	ผลของ Re_j ที่มีต่อคุณลักษณะตามแนวแกนของเจ็ตในกระแสวน (Bernero, 2000) 83
รูปที่ 1.8	ผลของ Re_j ที่มีต่อคุณลักษณะตามแนวแกนของเจ็ตในกระแสวน (Bernero, 2000) 84
รูปที่ 1.9	ผลเนื่องจากมุมปะทะของเจ็ตในกระแสวนต่อระยะ Penetration depth ที่ค่า r_v ต่างๆ (Bernero, 2000)..... 84
รูปที่ 1.10	ภาพแสดงความไม่เสถียรภาพของการไหลแบบเจ็ตในกระแสวน (Lam et al., 1991) 85
รูปที่ 1.11	การลดลงของความเร็วตามแนวแกนที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลอง (Chan and Lam, 1998)..... 85
รูปที่ 1.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Penetration depth กับ r_v ที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลอง และผลจากงานวิจัยอื่นๆ (Chan and Lam, 1988) 86
รูปที่ 2.1	รูป Schematic ของอุโมงค์ลม 87
รูปที่ 2.2	พัดลมหอยโข่ง (Centrifugal Blower) ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ 87
รูปที่ 2.3	ท่อจัดปรับการไหล (Settling duct) และส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (Diffuser) ของอุโมงค์ลม 88
รูปที่ 2.4	ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) และ Contraction ของอุโมงค์ลม 88
รูปที่ 2.5	หน้าตัดทดสอบ (Test section) ของอุโมงค์ลม 89

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.6	ช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ผนังด้านข้างของหน้าตัดทดสอบ.....89
รูปที่ 2.7	รูป Schematic ของชุดเจ็ดแบบท่อหมุน.....90
รูปที่ 2.8	ชุดเจ็ดแบบท่อหมุน.....90
รูปที่ 2.9	ส่วนพัดลม (Blower) และ Orifice ของชุดเจ็ดแบบท่อหมุน.....91
รูปที่ 2.10	ส่วน Heating chamber ของชุดเจ็ดแบบท่อหมุน.....92
รูปที่ 2.11	รูป Schematic ของส่วนท่อหมุน (Rotating pipe).....93
รูปที่ 2.12	รูปถ่ายของส่วนท่อหมุน (Rotating pipe).....94
รูปที่ 2.13	วงจรที่ใช้ควบคุมความเร็วของท่อหมุน.....95
รูปที่ 2.14	ภาพแสดงลักษณะการติดตั้งชุดเจ็ดแบบหมุนควงเข้ากับส่วนหน้าตัด ทดสอบ.....96
รูปที่ 2.15	พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง.....97
รูปที่ 2.16	รูป Schematic ของ Probe ที่ใช้ในการวัดความเร็ว.....98
รูปที่ 2.17	ภาพถ่ายของ Probe ที่ใช้ในการวัดความเร็ว.....99
รูปที่ 2.18	อุปกรณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการวัดความเร็ว.....100
รูปที่ 2.19	การวัดสภาวะเริ่มต้นที่ปากเจ็ด.....101
รูปที่ 2.20	รูป Schematic ของ Thermocouple probe ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ.....102
รูปที่ 2.21	ภาพถ่ายของ Thermocouple probe ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ.....103
รูปที่ 2.22	ตัวอ่านค่าอุณหภูมิ (Thermocouple thermometer) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 52- 2.....104
รูปที่ 2.23	ผลการสอบเทียบ Thermocouple probe เทียบกับอุปกรณ์มาตรฐานคือ Thermometer.....105
รูปที่ 2.24	ลักษณะการวัดการกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัด.....106
รูปที่ 2.25	ลักษณะการวัดเป็นเมตริกโดยใช้ Thermocouple probe แบบ B.....106
รูปที่ 2.26	ลักษณะการวัดการลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกน.....107
รูปที่ 3.1	ความสม่ำเสมอของความเร็วกระแสลมทวน (u_p) ที่ตำแหน่ง $x = 40$ cm108
รูปที่ 3.2	ชั้นขอบเขต (Boundary layer) บนผนังทั้ง 4 ด้าน ที่ตำแหน่ง $x = 40$ cm109
รูปที่ 3.3	รูปร่างความเร็วในแนวแกนของเจ็ดอากาศที่ตำแหน่งปากทางออก110
รูปที่ 3.4	รูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ดอากาศที่ตำแหน่งปากทางออก111

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.5	รูปร่างอุณหภูมิของเจ็ทอากาศตามแนวรัศมี (r) ที่ตำแหน่งปากทางออก112
รูปที่ 3.6	ปริมาณควบคุมในการวิเคราะห์คุณลักษณะการผสมของการไหล ที่แสดงโดย C_{TG}113
รูปที่ 3.7	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัด ตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr0$114
รูปที่ 3.8	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัดตาม แนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr11$115
รูปที่ 3.9	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัด ตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr22$116
รูปที่ 3.10	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัด ตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr33$117
รูปที่ 3.11	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัด ตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr0cf$118
รูปที่ 3.12	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัด ตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr11cf$119
รูปที่ 3.13	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัด ตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr22cf$120
รูปที่ 3.14	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัด ตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr33cf$121
รูปที่ 3.15	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัด ตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr0$122
รูปที่ 3.16	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัด ตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr11$123
รูปที่ 3.17	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัด ตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr22$124
รูปที่ 3.18	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัด ตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr33$125

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.19	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr0cf.....	126
รูปที่ 3.20	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr11cf.....	127
รูปที่ 3.21	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr22cf.....	128
รูปที่ 3.22	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr33cf.....	129
รูปที่ 3.23	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ x/d เท่ากับ 1.5.....	130
รูปที่ 3.24	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ x/d เท่ากับ 4.....	131
รูปที่ 3.25	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ x/d เท่ากับ 6.....	132
รูปที่ 3.26	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ x/d เท่ากับ 8.....	133
รูปที่ 3.27	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ x/d เท่ากับ 10.....	134
รูปที่ 3.28	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ x/d เท่ากับ 12.....	135
รูปที่ 3.29	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ x/d เท่ากับ 14.....	136
รูปที่ 3.30	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ x/d เท่ากับ 16.....	137
รูปที่ 3.31	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ x/d เท่ากับ 1.5.....	138

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.32	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) เปรียบเทียบกัน ในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 4.....139
รูปที่ 3.33	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) เปรียบเทียบกัน ในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 6.....140
รูปที่ 3.34	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) เปรียบเทียบกัน ในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 8.....141
รูปที่ 3.35	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) เปรียบเทียบกัน ในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 10.....142
รูปที่ 3.36	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) เปรียบเทียบกัน ในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 12.....143
รูปที่ 3.37	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) เปรียบเทียบกัน ในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 14.....144
รูปที่ 3.38	การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) เปรียบเทียบกัน ในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 16.....145
รูปที่ 3.39	Centroid Trajectory ของอุณหภูมิ เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี.....146
รูปที่ 3.40	การสลายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนของเจ็ต.....147
รูปที่ 3.41	อัตราการสลายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนของเจ็ต.....147
รูปที่ 3.42	ระยะ Potential core ของเจ็ต.....148
รูปที่ 3.43	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Penetration depth กับอัตราส่วนความเร็วประสิทธิ ผล (r) ที่ได้จากการแบบจำลองการไหลของ Chan and Lam (1998) เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ.....149
รูปที่ 3.44	การสลายตัวของอุณหภูมิตามแนว Centerline ของเจ็ตในกรณีการไหลที่ มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf}).....149
รูปที่ 3.45	ระยะ Penetration depth ของกรณีการไหลที่มีกระแสลมทวน (Sr_{xxcf}) ที่ ได้จากการศึกษาวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต.....150
รูปที่ 3.46	ความสัมพันธ์ระหว่าง Penetration depth (x_p) กับค่า Swirl ratio (Sr) ของ การไหลแบบเจ็ตในกระแสลมทวนที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) = 4.62.....150

รูปที่ 3.47	การขยายตัวของเจ็ดตามแนว Downstream ในกรณีของเจ็ด อิสระ(Sr_{xx}).....	151
รูปที่ 3.48	การขยายตัวของเจ็ดตามแนว Downstream ในกรณีของเจ็ดในกระแ ลมทวน (Sr_{xxcf}).....	152
รูปที่ 3.49	การขยายตัวของเจ็ดตามแนว Downstream เปรียบเทียบกันในแต่ละ กรณีการทดลอง.....	153



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดรวมของเจ็ต
b	ระยะตามแนวรัศมีที่มีความเร็วส่วนเกินมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วส่วนเกินสูงสุด
B	ความกว้างของช่องกระแสลมทวน
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}	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (Global coefficient of temperature)
C_{TL}	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะหน้าตัด (Local coefficient of temperature)
d	ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางกลางปากเจ็ต
D_w	ระยะห่างจากผนังหน้าตัดทดสอบ
Fr	Densimetric Froude number
g	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก
G_x	ฟลักซ์ตามแนวแกนเจ็ตของโมเมนตัมตามแนวแกนเจ็ต (Axial momentum flux of axial momentum)
G_θ	ฟลักซ์ตามแนวแกนเจ็ตของโมเมนตัมเชิงมุม (Axial momentum flux of angular momentum)
h, h_j, h_{cf}	เอนทาลปีของเจ็ตอากาศหลังการผสม, เอนทาลปีเริ่มต้นของเจ็ต และ เอนทาลปีเริ่มต้นของกระแสลมทวน
K	Calibration function จากการสอบเทียบ Yaw probe
L	ความยาวของ Honeycomb
l	ความยาวเส้นรอบรูปของท่อเจ็ต
l_d	ระยะการพัฒนาตัวของการไหลภายในท่อหลังจากออกจาก Honeycomb
$\dot{m}, \dot{m}_j, \dot{m}_{cf}$	อัตราการไหลโดยมวลของเจ็ตอากาศหลังการผสม, อัตราการไหลโดยมวลเริ่มต้นของเจ็ต และอัตราการไหลโดยมวลเริ่มต้นของกระแสลมทวน
Nu	ค่า Nusselt number
p	ค่าความดันรวมที่ตำแหน่งใดๆ
p_r	ระยะพิทซ์ที่การไหลหมุนตัวครบหนึ่งรอบ

P_C	ค่าความดันรวมที่ตำแหน่งกึ่งกลางที่ปากทางออกของเจ็ต
P_E	ค่าความดันรวมเฉลี่ยระหว่าง 2 จุดที่ขอบของเจ็ต
P_0	ค่าความดันรวมจริงจาก Pitot probe ในการสอบเทียบ Yaw probe
P_1, P_2, P_3	ค่าความดันรวมของจากเซ็นเซอร์ที่ 1, 2 และ 3 ของ Yaw probe
P_S	ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งต่างๆบน Test section
P_{ref}	ค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งหน้าตัดอ้างอิง
P_{dyn}	ค่าความดันจลน์ที่ตำแหน่งหน้าตัดอ้างอิง
ΔP	ค่าความดันจลน์ในการสอบเทียบ Yaw probe
Q	โมเมนต์ดัมพลิกซ์โดยรวม (Total momentum flux)
r	อัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพ (Effective velocity Ratio) ระยะตามแนวรัศมีของเจ็ต
r_d	อัตราส่วนความหนาแน่นระหว่างเจ็ตและกระแสลมทวน (Density ratio)
r_m	อัตราส่วนโมเมนต์ดัมพลิกซ์ระหว่างเจ็ตและกระแสลมทวน (Momentum ratio)
r_v	อัตราส่วนความเร็วระหว่างเจ็ตและกระแสลมทวน (Velocity ratio)
R	รัศมีของปากเจ็ต
$R_{0.3}$	รัศมีสมมูลของพื้นที่วงกลมซึ่งครอบคลุมพื้นที่ภายในบริเวณ $C_{TL} = 0.3$
$R_{0.5}$	รัศมีสมมูลของพื้นที่วงกลมซึ่งครอบคลุมพื้นที่ภายในบริเวณ $C_{TL} = 0.5$
Re	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds Number) เทียบกับความเร็วในแนวแกนของการไหล
Re_{cf}	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds Number) เทียบกับความเร็วในแนวแกนของกระแสลมทวน
Re_j	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds Number) เทียบกับความเร็วในแนวแกนของเจ็ต
Sn	สเวิร์ลนัมเบอร์ (Swirl number)
Sr	อัตราส่วนสเวิร์ล (Swirl ratio)
T_a	อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม
T_{cf}	อุณหภูมิของกระแสลมทวน
T_j	อุณหภูมิของเจ็ตอากาศที่ปากเจ็ต
$T_{j,c}$	อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางปากทางออกเจ็ต
\bar{T}_j	อุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged temperature) ที่ปากเจ็ต
T_{max}	อุณหภูมิสูงสุดตามแนวที่ทำการวัด
T_r	อุณหภูมิบรรยากาศ (Room temperature)
u	ความเร็วในแนวแกนที่ตำแหน่งใดๆ

$u(r)$	รูปร่างความเร็วตามแนวแกนซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะในแนวรัศมี
$u(x, r)$	รูปร่างความเร็วตามแนวแกนซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะในแนวแกนและระยะในแนวรัศมี
u_{cf}	ความเร็วของกระแสลมทวน
\bar{u}_{cf}	ความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขตของกระแสลมทวน
$ \bar{u}_{cf} $	ขนาดความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขตของกระแสลมทวน
u_j	ความเร็วตามแนวแกนของเจ็ต
\bar{u}_j	ความเร็วตามแนวแกนเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged axial velocity) ที่ปากเจ็ต
$u_{j,c}$	ความเร็วที่จุดกึ่งกลางปากทางออกเจ็ต
u_{max}	ความเร็วตามแนวแกนสูงสุดตามแนวที่ทำกรวัด
u_{ref}	ความเร็วของกระแสลมทวนที่ตำแหน่งหน้าตัดอ้างอิง
w	ความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ตที่ตำแหน่งใดๆ
w_p	ความเร็วตามแนวสัมผัสของท่อเจ็ต
w_R	ความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ตที่ขอบท่อเจ็ต
X	ระยะห่างจากปาก Contraction ตามทิศทางการไหลของกระแสลมทวน
x, y, z	ระยะตามแนว Downstream, Transverse และ Spanwise ตามพิกัดอ้างอิง
$x_{50\%}$	ระยะตามแนว Downstream ที่อุณหภูมิลดลงครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิที่ปากเจ็ต
x_p	ระยะที่ไปได้ไกลที่สุดของเจ็ตในกระแสทวนในทิศทางตามแนวแกน
x'_p, y'_p	ระยะตามแนว Downstream, Transverse และ Spanwise ของจุด Penetration depth ที่เวลาใดๆ
x_Q	ระยะตามแนวแกนของความกว้างสูงสุดในการกระจายตัวที่พิจารณาจากเส้น $Q = 0$
y_Q	ระยะครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดในการกระจายตัวที่พิจารณาจากเส้น $Q = 0$
\bar{y}_T	Centroid trajectory ของอุณหภูมิบนระนาบสมมาตร (ระนาบ $x-y$)
\bar{z}_T	Centroid trajectory ของอุณหภูมิบนระนาบแนวนอน (ระนาบ $x-z$)
Z	อัตราส่วน โมเมนตัมฟลักซ์ของเจ็ตต่อกระแสทวน (Jet-to-counterflow momentum flux ratio)

อักษรกรีก

ω	ความเร็วเชิงมุมของท่อเจ็ต
δ	ค่าความไม่แน่นอนในการทดลอง (Uncertainty)
ρ_{cf}	ค่าความหนาแน่นของกระแสทวน
ρ_j	ค่าความหนาแน่นของเจ็ตอากาศ
ν	ค่าความหนืดจลน์ของของไหล (m^2/s)
α	มุมเอียงระหว่างเจ็ตกับกระแสทวน มุมเอียงของเข็ม Yaw probe
θ	มุมการหมุนของท่อเทียบกับแกน y
β	อัตราส่วนช่องเปิดของ Orifice
$\delta_{0.95}$	ความหนาของชั้นขอบเขตซึ่งนิยามให้เป็นตำแหน่งที่มีความเร็วเป็น 95% ของความเร็วเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขตกระแสทวน
Γ	ค่า Circulation ของเจ็ตอากาศรอบปากเจ็ต

อักษรย่อ

LDA	Laser doppler anemometry
LIF	Laser induced fluorescence
PVC	Polyvinyl chloride
SWG	British standard wire gauge

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การไหลแบบเจ็ตอิสระ (Free jet) เป็นการไหลพื้นฐานที่พบบ่อยมากในงานวิศวกรรม ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการไหลแบบเจ็ตอิสระกันอย่างแพร่หลาย แต่ในการประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการไหลแบบเจ็ตในอุปกรณ์ต่างๆที่พบเห็น โดยทั่วไปนั้นมักจะมีกระแสการไหลของไหลรอบข้างเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งการไหลแบบเจ็ตในกระแสรอบข้างนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายลักษณะ แต่โดยทั่วไปแล้วมักจะแบ่งตามทิศทางของกระแสรอบข้างหรือแบ่งตามรูปร่างและลักษณะการไหลที่ปรากฏ จากที่กล่าวมานี้ทำให้สามารถแบ่งการไหลของเจ็ตกับกระแสรอบข้างออกได้เป็น 3 ลักษณะด้วยกันคือ 1) เจ็ตในกระแสลมตาม (Jet in coflow) จะเป็นการไหลที่มีกระแสรอบข้างไหลในทิศทางเดียวกับเจ็ต, 2) เจ็ตในกระแสลมขวาง (Jet in crossflow) จะเป็นการไหลที่กระแสรอบข้างมีทิศตั้งฉากกับเจ็ต และ 3) เจ็ตในกระแสลมทวน (Jet in counterflow) จะเป็นการไหลที่กระแสรอบข้างมีทิศสวนทางกับเจ็ต ซึ่งรูปร่างการไหลทั้ง 3 แบบนั้นจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป โดยขึ้นอยู่กับมุมปะทะระหว่างการไหลของเจ็ตและกระแสรอบข้างเป็นสำคัญ นั่นคือเมื่อเจ็ตกับกระแสรอบข้างไม่มีมุมปะทะระหว่างกันหรือมีมุมปะทะเพียงเล็กน้อย ลักษณะการไหลจะเป็นแบบเจ็ตในกระแสลมตาม ซึ่งการไหลในลักษณะนี้จะส่งผลให้การกระจายตัวและการดึงเอาอากาศรอบข้างเข้ามาผสมกับตัวเจ็ตมีลักษณะที่แตกต่างไปจากกรณีของเจ็ตอิสระ โดยในการไหลแบบเจ็ตในกระแสลมตามนั้น เจ็ตจะมีการกระจายตัวลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการดึงเอาอากาศรอบข้างเข้ามาผสมได้น้อยกว่าในกรณีของเจ็ตอิสระ เมื่อมุมปะทะระหว่างเจ็ตกับกระแสรอบข้างมีค่าเพิ่มขึ้นมากพอแล้วนั้น การไหลแบบเจ็ตในกระแสลมตามก็จะเปลี่ยนรูปแบบเป็นการไหลแบบเจ็ตในกระแสลมขวาง ซึ่งการไหลลักษณะนี้จะมี Streamwise vortex ขนาดใหญ่เกิดขึ้นในการไหล โดยมีลักษณะคล้ายรูปไตเมื่อดูที่หน้าตัดไหลออกไปตามแนว Downstream และเมื่อมุมปะทะของกระแสรอบข้างมีค่าเพิ่มขึ้นอีกจนมีค่าใกล้เคียงหรือประมาณเท่ากับ 180° แล้วนั้น การไหลของเจ็ตก็จะเปลี่ยนรูปแบบเป็นการไหลแบบเจ็ตในกระแสลมทวน ซึ่งทำให้เจ็ตมีลักษณะการไหลเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมคือ เจ็ตจะมีระยะการไหลที่หดสั้นลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการไหลของเจ็ตได้ถูกกระแสมทวนพัดสวนทางกลับไปจนหมด

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการไหลแบบเจ็ตในกระแสมตามและเจ็ตในกระแสมขวางกันอย่างแพร่หลาย แต่สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับการไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวน นั้นกลับมีอยู่น้อยมาก ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากความไม่มีเสถียรภาพ (Instability) ของการไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การศึกษาในแขนงนี้ทำได้ยากลำบากทั้งในด้านการทดลองและการวิเคราะห์ในเชิงทฤษฎี อย่างไรก็ตามยังพบว่าลักษณะการไหลที่ซับซ้อนนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมให้ดีขึ้น จึงทำให้การไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวนมีความน่าสนใจในเชิงของการนำไปประยุกต์ใช้ในห้องเผาไหม้ หรืองานที่เกี่ยวข้องกับการผสมโดยทั่วไป

นอกจากนี้ เป็นที่ทราบกันดีว่าการไหลแบบหมุนควง (Swirling flow) มีส่วนอย่างมากในการเพิ่มประสิทธิภาพการผสม ดังจะเห็นได้จากผลการศึกษาวิจัยในอดีต (Feyedelem and Sarpkaya (1997) และ Billant et al. (1998) เป็นต้น) และการประยุกต์ใช้การไหลแบบหมุนควงในงานจริงในปัจจุบันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งจะทำให้การเผาไหม้ในเครื่องยนต์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ด้วยปัจจัยทางด้านปริมาณผลการวิจัยที่มีอยู่น้อยในเรื่องของเจ็ตในกระแสมทวน และเรียกได้ว่าแทบจะไม่มีเลยในเรื่องของเจ็ตหมุนควงในกระแสมทวน ซึ่งคุณลักษณะของการไหลรูปแบบนี้อาจเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประสิทธิภาพในการผสมอันจะนำมาซึ่งการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น ดังนั้น ความรู้ ความเข้าใจ และข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวกับการไหลแบบเจ็ตที่หมุนควงในกระแสมทวนจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์ เช่น หัวฉีดเชื้อเพลิง หัวฉีดสารเคมีเพื่อการผสม ฯลฯ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาวิจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้องในลำดับต่อไป ดังที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งจะทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะการผสมของเจ็ตแบบหมุนควงในกระแสมทวน โดยมุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงผลของความเร็วในการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะการผสมของเจ็ต

1.2 งานวิจัยในอดีต

1.2.1 เจ็ตอิสระ (Free jet) และเจ็ตอิสระที่หมุนควง (Swirling jet)

Rajaratnam (1976) ได้แบ่งลักษณะของเจ็ตอิสระ (Free jet) ออกเป็น 3 บริเวณดังรูปที่ 1.1 ได้แก่ 1) บริเวณ Potential core ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วสม่ำเสมอ ยังไม่ได้รับผลของ Shear layer ที่ปากเจ็ต 2) บริเวณ Flow development ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการพัฒนาของ Shear layer ที่เกิดจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วระหว่างเจ็ต และบรรยากาศ โดยบริเวณนี้ครอบคลุมจากบริเวณปากเจ็ตถึงบริเวณปลายของ Potential core และ 3) บริเวณ Fully developed flow ซึ่งเป็นบริเวณที่มีคุณ

สมบัติ Similarity เช่นเดียวกับที่ได้พบในงานของ Corrsin (1946), Hinze and Zijnen (1949), Albertson et al. (1950) และ Abramovich (1963) และจากการวิเคราะห์โดยใช้คุณสมบัติ Similarity ดังกล่าว Townsend (1956) และ Tennekes and Lumley (1972) พบว่าการขยายตัว (Spread rate) ของ Turbulent jet ซึ่งแสดงโดยความหนาของเจ็ตแปรตามระยะทางตามแนวแกนเจ็ต ส่วนความเร็วในแนวแกนของเจ็ตจะแปรผกผันกับระยะทางตามแนวแกนเจ็ต ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองของ Liepmann and Laufer (1947)

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตอิสระ และพบว่าการเปลี่ยนแปลงสถานะเริ่มต้นที่ปากเจ็ตมีผลต่อคุณลักษณะดังกล่าว ดังนั้นจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติที่ปากเจ็ตรูปแบบต่างๆ เช่น การเปลี่ยนรูปร่างปากทางออกของเจ็ต (Han and Taghavi, 1998; Gutmark and Grinstein, 1999 และ Zaman, 1999) การติดตั้ง Vortex generator ที่ปากเจ็ต เช่น (Bradbury and Khadem, 1975 และ Zaman et al., 1994) และอื่นๆ โดยรูปแบบหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจและมีการศึกษาอย่างกว้างขวางคือ การประยุกต์ใช้การไหลแบบหมุนควง (Swirling flow) กับเจ็ตอิสระ ซึ่งจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับคุณลักษณะการผสม โดยมีรายละเอียดของการศึกษาเจ็ตอิสระที่หมุนควง (Swirling jet) ดังนี้

Feyedelem and Sarpkaya (1997) ได้สรุปคุณลักษณะของเจ็ตอิสระที่หมุนควง (Swirling jet) จากการศึกษาที่ผ่านมา โดยพบว่าเจ็ตอิสระที่หมุนควงจะมีการขยายตัว (Spread rate) และการลดลงของความเร็วตามแนวแกนเจ็ต (Decay rate) รวมทั้งปริมาณ Turbulence intensity มากกว่าเจ็ตอิสระที่ไม่มีการหมุนควง ซึ่งแสดงถึงการผสมที่ดีกว่าเจ็ตอิสระที่ไม่มีการหมุนควง ในการศึกษาพบว่าพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะของเจ็ตที่หมุนควงบริเวณ Near field คือ ค่า Swirl number ซึ่งแสดงถึงระดับของการหมุนควงและนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ตามแนวแกนเจ็ตของโมเมนตัมเชิงมุมรอบแกนเจ็ตกับฟลักซ์ตามแนวแกนเจ็ตของโมเมนตัมเชิงเส้นในแนวแกนของเจ็ต นอกจากนี้ยังพบว่ารูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสที่ปากทางออก (Initial tangential velocity profile) ของการไหลแบบเจ็ตที่มีการหมุนควงก็มีผลอย่างมากต่อลักษณะการไหลในช่วง Near field เช่นกัน (Farokhi and Taghavi, 1989) จึงกล่าวได้ว่าค่า Swirl number เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะบอกถึงลักษณะการไหลโดยรวมของเจ็ตที่มีการหมุนควงได้ ซึ่งในการศึกษาโดยทั่วไปนั้นจะต้องระบุ Initial tangential velocity profile ของเจ็ตแบบหมุนควงนั้นด้วย

เมื่อพิจารณาถึงคุณลักษณะการผสม พบว่าการไหลแบบเจ็ตที่มีการหมุนควงจะมีคุณลักษณะการผสมที่แตกต่างไปจากการไหลแบบเจ็ตอิสระ โดยในการไหลแบบเจ็ตที่มีการหมุนควงจะมีความโค้งของเส้นทางการไหล (Streamline curvature) ซึ่งเกิดขึ้นจากความเร็วของการหมุนควงในแนวสัมผัส Streamline curvature นี้จะทำให้การไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับความดันสถิต (Pressure gradient) ทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี ซึ่ง Pressure gradient ที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นกลไกหลักที่ทำให้เกิดการผสมในช่วง Near field ในการไหลแบบเจ็ตหมุนควง และเมื่อ Pressure gradient

สลายตัวไป Mixing layer ก็จะเป็นกลไกหลักที่ทำให้เกิดการผสมกันต่อไปในช่วง far field แต่สำหรับการไหลแบบเจ็ตอิสระจะไม่มี Pressure gradient เกิดขึ้นในการไหล จึงทำให้การผสมของเจ็ตกับอากาศรอบข้างนั้นเป็นผลมาจาก Mixing layer ระหว่างเจ็ตกับอากาศเพียงอย่างเดียวตลอดทั้งการไหล

นอกจากนี้ยังพบว่า เจ็ตหมุนควงที่มีค่า Swirl number สูงๆจะทำให้เส้นทางของความเร็วยุ่สูงสุดเลื่อนออกจากแนวแกนเจ็ต และหากมีค่าสูงพอ (ประมาณ 0.48-0.50) และอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมแล้ว ก็อาจจะมีปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Vortex breakdown เกิดขึ้นในการไหล ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ความเร็วตามแนวแกนเจ็ต (u) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน และอาจเกิดบริเวณหมุนวน (Recirculation zone) ในตัวเจ็ตได้ ซึ่งการเกิด Breakdown นี้จะส่งผลต่อลักษณะการผสมในการไหลนั้นด้วยโดยขึ้นอยู่กับลักษณะและรูปแบบของการเกิด Breakdown นั้นๆ

Billant et al. (1998) ได้ศึกษา Vortex breakdown ชนิดต่างๆในเจ็ตน้ำที่หมุนควง และพบว่าปรากฏการณ์ Vortex breakdown นี้เริ่มเกิดขึ้นที่ค่า Swirl number ประมาณ 1.3 – 1.4 โดยไม่ขึ้นกับค่า Reynolds number (Re) ที่ใช้ในช่วงการทดลอง นอกจากนี้ยังพบลักษณะต่างๆของการเกิด Vortex breakdown ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นแบบ Bubble และแบบ Cone โดยที่ Reynolds number สูงๆจะมีลักษณะของการเกิด Vortex breakdown เป็นแบบ Asymmetric bubble และ Asymmetric cone ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า Reynolds number จะส่งผลต่อลักษณะรูปร่างของ Vortex breakdown แต่ไม่ส่งผลต่อตำแหน่งและการเกิดขึ้นของ Vortex breakdown นั้นๆ

ปัจจัยที่สำคัญอีกอันหนึ่งที่มีผลต่อการเกิด Vortex breakdown นอกเหนือจากค่า Swirl number ก็คือ การมี Adverse pressure gradient ตามแนวแกนของการไหล ซึ่งพบว่าในการไหลที่มีระดับ Adverse pressure gradient มากกว่า จะทำให้ Swirl number ที่ทำให้เกิดการ Breakdown มีค่าลดลง ซึ่งได้ผลที่สอดคล้องกับการศึกษาของ Sarpkaya (1974) และ Escudier and Zehnder (1982) สำหรับการเกิด Adverse pressure gradient นั้นสามารถพบได้ในการไหลในท่อที่มีลักษณะบานออกที่ด้านท้าย (Diverging cylindrical tube) และยังพบอีกว่าการเพิ่ม Adverse pressure gradient ในการไหลจะทำให้ตำแหน่งของการเกิด Breakdown เลื่อนจากตำแหน่งเดิมขึ้นมาในบริเวณ Upstream

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

1.2.2 เจ็ตในกระแสสวนทวน (Jet in counterflow)

สำหรับการศึกษเกี่ยวกับเจ็ตในกระแสสวนทวนนั้นได้เริ่มขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1950-60 (Arendt et al. (1956), Vulis and Leonteva (1955), Sui and Ivanov (1959), Sui (1961), Ilizarova และ Ginevskii (1962)) หลังจากนั้นก็ได้มีผู้ทำการศึกษาต่อเรื่อยมาทั้งในด้านการทดลองและด้านการวิเคราะห์ในเชิงทฤษฎี เพื่อนำผลที่ได้มาปรับปรุงและสนับสนุนผลการศึกษาในช่วงแรกให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ดังเช่นในงานของ Sekundov (1969) และ Beltaos and Rajaratnam (1973) และในช่วงที่ผ่านมาไม่นานนี้ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับเจ็ตในกระแสสวนทวนเพิ่มมากขึ้น ดังเห็นได้จากงานของ Lam (1991), Lam et al. (1991), Konig and Fiedler (1991), Chan and Lam (1994), Lam and Chan (1995), Yoda and Fiedler (1996), Lam and Chan (1997), Chan and Lam (1998), Chan (1998) และ Chan and Lam (1999)

ลักษณะโครงสร้างของเจ็ตในกระแสสวนทวน

สำหรับลักษณะโครงสร้างของการไหลแบบเจ็ตในกระแสสวนทวนที่ผู้ทำการศึกษาในอดีตส่วนใหญ่นิยมใช้กันนั้นจะมีลักษณะดังรูปที่ 1.2 (Bernero, 2000) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการไหลของ เจ็ตจะพุ่งเข้าไปในกระแสสวนทวนเป็นระยะทางที่เรียกว่า Penetration depth (x_p) หลังจากนั้นการไหลของเจ็ตก็จะถูกกระแสสวนทวนพัดสวนกลับไปจนหมดในเวลาต่อมา โดยในการศึกษาของ Rajaratnam (1976) พบว่าระยะ Penetration depth (x_p) จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเร็วในการไหล (r_v) ซึ่งนิยามให้เป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดความเร็วเฉลี่ยของเจ็ต (\bar{u}_j) ต่อขนาดความเร็วเฉลี่ยกระแสสวนทวน ($|\bar{u}_{cf}|$), $r_v = \frac{\bar{u}_j}{|\bar{u}_{cf}|}$ สำหรับลักษณะการไหลในรูปที่ 1.2 นี้จะเป็นลักษณะการไหลโดยเฉลี่ยตามเวลาที่พบโดยทั่วไปในการไหลแบบเจ็ตในกระแสสวนทวน แต่ถ้าหากพิจารณาลักษณะการไหลที่เวลาใดๆ (Instantaneous flow) โดยใช้อัตราส่วนความเร็ว (r_v) เป็นเกณฑ์จะสามารถแบ่งการไหลแบบเจ็ตในกระแสสวนทวนได้เป็น 2 ลักษณะที่แตกต่างกันคือ กรณีการไหลคงตัว (Stable case) และกรณีการไหลไม่คงตัว (Unstable case) ซึ่งการไหลทั้ง 2 ลักษณะนี้อาจเกิดขึ้นพร้อมๆกันได้ถ้าอัตราส่วนความเร็ว (r_v) บางค่าที่อยู่ในช่วงเปลี่ยนแปลงของการไหลทั้งสองแบบ แต่ถ้าหากไม่อยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงนี้แล้วจะสามารถแบ่งการไหลได้เป็น 2 ลักษณะดังที่กล่าวไว้ข้างต้น (Bernero, 2000) ซึ่งจะมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนดังนี้

กรณีการไหลคงตัว (Stable case) เป็นลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนความเร็วในการไหล (r_v) มีค่าต่ำมากๆ ซึ่งการไหลในลักษณะนี้ เจ็ตจะมีการม้วนตัวเป็นรูปร่างแหวน (Vortex

ring) โดยเกิดขึ้นเพียงวงเดียวที่บริเวณใกล้ปากทางออกของเจ็ต (แสดงในรูปที่ 1.3) ซึ่ง Vortex ring ดังกล่าวจะมีลักษณะค่อนข้างสมมาตร และมันตัวเป็นวงคงรูปอยู่ตลอดเวลา สำหรับการไหลในลักษณะนี้โดยปกติจะมีระยะ Penetration depth ที่ค่อนข้างคงที่ แต่มีระยะที่สั้นมาก และมีเส้นแบ่งขอบการไหลของเจ็ตออกจากกระแสลมทวนเห็นได้อย่างชัดเจน ซึ่งที่บริเวณขอบการไหลนี้จะไม่มีการผสมเกิดขึ้น แต่จะเกิดการผสมขึ้นเฉพาะในบริเวณ Vortex ring และบริเวณถัดไปทางด้านหลังที่มีลักษณะเป็น Wake ที่เกิดขึ้นจากตัว Vortex ring นั้นเอง

กรณีการไหลไม่คงตัว (Unstable case) เป็นลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนของการไหล (r_v) มีค่าสูงพอ ซึ่งจะทำให้การไหลมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปจากกรณีการไหลคงตัว คือ ระยะ Penetration depth (x_p) ของการไหลลักษณะนี้จะมีค่าไม่คงที่และมีการสั้นไปมาอยู่ตลอดเวลา แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยของระยะ x_p ในกรณีการไหลไม่คงตัวพบว่า โดยส่วนใหญ่จะมีระยะเฉลี่ยที่ไกลกว่ากรณีการไหลคงตัว สำหรับกรณีการไหลไม่คงตัวนี้เจ็ตจะสั้นไปมาอย่างรุนแรงตลอดทั้งการไหลทั้งในแนวแกน (Axial direction) และแนวรัศมี (Radial direction) (ดังแสดงในรูปที่ 1.4) และสามารถแบ่งบริเวณการไหลตามลักษณะของการไหลออกได้เป็น 2 บริเวณ คือ 1) บริเวณใกล้ปากทางออกเจ็ต (Near field) จะมีลักษณะการไหลคล้ายกับกรณีของเจ็ตอิสระ และ 2) บริเวณไกลจากปากทางออกเจ็ต (Far field) จะเป็นช่วงที่ความเร็วของเจ็ตมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการปะทะกันของเจ็ตและกระแสลมทวน โดยผลของการปะทะกันนี้ทำให้การไหลของเจ็ตในช่วง Far field เกิดการสั้นไปมาและมีการไหลเบนออกไปทางด้านข้างอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเจ็ตจะมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง พร้อมกับมีความเร็วตามแนวแกนลดลงอย่างต่อเนื่อง และในที่สุดเจ็ตก็จะถูกกระแสลมทวนพัดสวนกลับไปจนมีทิศทางและความเร็วเดียวกับการไหลของกระแสลมทวนในเวลาต่อมา สำหรับการไหลเบนไปมาของเจ็ตนั้นไม่มีขนาดและทิศทางที่แน่นอนตายตัว โดยเมื่อพิจารณาที่จุดปลายของเจ็ตพบว่าจะมีการเบนไปมาออกทางด้านข้างด้วยความถี่ต่ำๆอย่างไม่เป็นระเบียบ นอกจากนี้ยังพบว่า การสั้นไปมาของการไหลไม่คงตัวนี้เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความแตกต่างกันอย่างมากระหว่างค่าเฉลี่ยตามเวลากับค่าที่เวลาใดเวลาหนึ่ง โดยจะมีความแตกต่างเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี ดังแสดงในรูปที่ 1.5 และ 1.6 ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การศึกษาที่ผ่านๆมาไม่สามารถอธิบายหรือทำความเข้าใจเกี่ยวกับการไหลลักษณะนี้ได้ อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการนำไปประยุกต์ใช้

Hopkins and Robertson (1967) ได้ศึกษาการไหลของเจ็ตในกระแสลมทวนแบบสองมิติพบว่า กรณีการไหลคงตัว (Stable case) ของเจ็ตในกระแสลมทวนนั้นจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เมื่ออัตราส่วนความเร็วในการไหล (r_v) มีค่าไม่เกิน 1.72 ซึ่งถ้าหากอัตราส่วนความเร็วมีค่าเกินกว่านี้แล้ว การไหล

ก็จะเริ่มเปลี่ยนเป็นการไหลแบบไม่คงตัว (Unstable case) แบบเป็นครั้งคราว และในที่สุดก็จะเปลี่ยนเป็นแบบกรณีการไหลไม่คงตัวอย่างสมบูรณ์เมื่ออัตราส่วนความเร็วมีค่าสูงๆ

ต่อมา Konig and Fiedler (1991) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการไหลของเจ็ตที่ออกมาในกระแสนวนพบว่า กรณีการไหลไม่คงตัวเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนความเร็วมีค่าประมาณ 1.4 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Yoda and Fiedler (1996) ที่ได้เสนอผลเพิ่มเติมว่า การไหลไม่คงตัวจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนความเร็วอยู่ในช่วง 1.3-1.4 และจะเกิดขึ้นเรื่อยๆตามค่าอัตราส่วนความเร็ว (r_v) ที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งกลายเป็นกรณีการไหลไม่คงตัวอย่างสมบูรณ์เมื่ออัตราส่วนความเร็วมีค่าเกินกว่า 3.4

ผลเนื่องจากสถานะเริ่มต้น

ในการศึกษาการไหลแบบเจ็ตในกระแสนวนพบว่า ผลของผนังของช่องกระแสนวนมีส่วนสำคัญต่อการไหลอย่างมาก โดยผลของผนังนี้ทำให้แบ่งลักษณะการไหลของเจ็ตในกระแสนวนได้เป็น 2 ลักษณะคือ 1) แบบจำกัดขอบเขต (Confined channel flow) จะเป็นการไหลที่ผนังกระแสนวนมีผลต่อลักษณะการไหลโดยรวม 2) แบบไม่จำกัดขอบเขต (Unconfined channel flow) จะเป็นการไหลที่ผนังของกระแสนวนไม่ส่งผลกระทบต่อลักษณะการไหลโดยรวม ซึ่งลักษณะการไหลทั้ง 2 แบบนี้จะพิจารณาจากความกว้างของช่องกระแสนวนเป็นสำคัญ โดยในการศึกษาของ Sekundov (1969) พบว่าความกว้างของช่องกระแสนวน (B) ควรมีค่าเป็น 2 เท่าของระยะ Penetration depth (x_p) เป็นอย่างน้อย จึงถือว่าการไหลนั้นเป็นการไหลแบบไม่จำกัดขอบเขต

นอกจากนี้ Morgan et al. (1976) ได้ศึกษาถึงผลของผนัง โดยทดลองเปลี่ยนขนาดของเจ็ตนอซเซิลและขนาดช่องผนังกระแสนวนหลายๆขนาด จนได้ข้อสรุปสำหรับค่าโมเมนตัมฟลักซ์ของเจ็ตต่อกระแสนวน (Jet-to-counterflow momentum flux ratio, Z) ซึ่งนิยามเป็น

$$Z = \left(\frac{u_j d}{|u_{cf}| B} \right)^2 \quad (1.1)$$

โดยพบว่าเมื่อสถานะของการทดลองมีค่า Z น้อยกว่า 0.25 แล้ว แสดงว่าการไหลจะไม่มีผลของผนังเข้ามาเกี่ยวข้อง และจะได้ความสัมพันธ์ของระยะ Penetration depth (x_p) กับอัตราส่วนความเร็วของการไหล (r_v) เป็นดังสมการ คือ

$$\frac{x_p}{d} = k' r_v = k' \frac{u_j}{|u_{cf}|} \quad (1.2)$$

โดยที่ k' คือ ค่าคงที่ของสมการ และทำให้สรุปได้ว่า ระยะ Penetration depth จะแปรผันโดยตรงกับ อัตราส่วนความเร็วของการไหลถ้าหากการไหลนั้นไม่มีผลของผนังเข้ามาเกี่ยวข้อง

ในส่วนของรูปร่างความเร็วที่ปากทางออกเจ็ต Yoda and Fiedler (1996) ได้ศึกษาผลของรูปร่างความเร็วที่ตำแหน่งปากทางออกเจ็ตที่มีต่อลักษณะการไหลของเจ็ตในกระแสวน โดยนำผลการทดลองที่ได้จากการปล่อยเจ็ตออกจากน็อสเซิล ซึ่งมีรูปร่างความเร็วตามแนวแกนที่ปากทางออกมีค่าเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด (Uniform profile) นำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการปล่อยเจ็ตออกจากท่อกลมยาว ซึ่งมีรูปร่างความเร็วตามแนวแกนที่ปากทางออกเป็นแบบ Fully developed (Fully-developed profile) โดยได้ทำการทดลองที่ค่าอัตราส่วนความเร็ว (r_v) เดียวกัน พบว่า รูปร่างความเร็วในการไหลนั้นจะไม่ส่งผลใดๆต่อระยะ Penetration depth (x_p) โดยในการไหลทั้ง 2 กรณี นั้น จะมีระยะ x_p ประมาณเท่ากันที่ค่า r_v เดียวกัน ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 1.2 โดยได้ค่าคงที่ k' ของการไหลทั้ง 2 กรณีมีค่าเท่ากันประมาณ 2.8 ซึ่ง Yoda and Fiedler (1996) ได้สรุปไว้ว่าค่า k' ที่ได้นี้มีค่าใกล้เคียงกับทั้งผลการทดลองทั้งของ Rajaratnam (1976) ที่ได้ค่า k' เท่ากับ 2.7 สำหรับรูปร่างความเร็วแบบ Uniform profile และของ Beltaos and Rajaratnam (1973) ที่ได้ค่า k' เท่ากับ 2.6 สำหรับรูปร่างความเร็วแบบ Fully-developed profile แต่ในเวลาต่อมา Bernero (2000) ได้โต้แย้งว่าการเปลี่ยนรูปร่างความเร็วที่ปากทางออกเจ็ตจะทำให้ลักษณะการไหลเปลี่ยนแปลงไปบ้าง ถึงแม้จะมีค่าไม่มากก็ตาม ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก Initial momentum thickness ที่เปลี่ยนแปลงไปตามรูปร่างความเร็วปากทางออกเจ็ต จากผลการทดลองพบว่าเมื่อ Initial momentum thickness มีค่าเพิ่มขึ้น (เปลี่ยนจาก Uniform profile เป็น Fully-developed profile) จะทำให้เจ็ตมีอัตราการกระจายตัวที่ช้าลง โดยสังเกตได้จากเจ็ตจะมีระยะ x_p ที่เพิ่มขึ้นและมีความกว้างของการกระจายตัวลดลง

สำหรับผลของค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re) ที่มีต่อการไหลแบบเจ็ตในกระแสวน จากการศึกษาของ Morgan et al. (1976) พบว่าการเปลี่ยนค่า Re ของการไหลจะไม่ส่งผลใดๆต่อระยะ Penetration depth ถ้าหากในการไหลนั้นมีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ต ($Re_j = u_j d / \nu$) และเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของกระแสวน ($Re_{cf} = |u_{cf}| B / \nu$) มีค่าเกินกว่า 3,000 และ 10,000 ตามลำดับ ซึ่งผลนี้ได้ถูกตรวจสอบโดย Bernero (2000) ที่ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบค่า Re_{cf} ของการไหลระหว่าง 30,000 และ 39,000 ($Re_{cf} > 10,000$) ที่ค่าอัตราส่วนความเร็ว (r_v) เท่ากัน จากผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 1.7 พบว่า ค่า Re_{cf} ที่เปลี่ยนไปจะไม่ส่งผลใดๆต่อลักษณะการไหลทั้งในส่วนของความเร็วตามแนวแกนและระดับความปั่นป่วนของการไหล โดยได้ค่าที่ใกล้เคียงกันทั้ง 2 กรณี นอกจากนี้ Bernero (2000) ยังได้ทำการทดลองเปรียบเทียบค่า Re_j ของการไหลในช่วงประมาณ 2,000 ถึง 10,000 และจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 1.8 พบว่า ในการไหลกรณีที่มีค่าน้อยกว่า

3,000 นั้นจะได้ผลที่แตกต่างไปจากกรณีอื่นๆอยู่บ้างทั้งในส่วน of ค่าความเร็วตามแนวแกนและระดับความปั่นป่วนของการไหล ซึ่งได้ผลสอดคล้องกับที่ Morgan et al. (1976) ได้กล่าวไว้

สำหรับผลเนื่องจากมุมเอียงของเจ็ตในกระแสนวนนั้น Bernero (2000) ได้ทำการศึกษาเพื่อดูผลเนื่องจากมุมเอียงของเจ็ตในกระแสนวนที่มีต่อลักษณะการไหล โดยทำการทดลองเปลี่ยนมุมปะทะระหว่างเจ็ตกับกระแสนวน (α) ที่อัตราส่วนระหว่างความเร็ว (r_v) ต่างๆ จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 1.9 พบว่ามุม α จะมีผลอย่างมากต่อระยะ Penetration depth (x_p) ในกรณีที่ r_v มีค่าต่ำๆ ($r_v < 3$) ซึ่งการเปลี่ยนมุม α ในช่วง 2.4° - 9.5° จะทำให้ระยะ x_p ลดลงได้ถึง 60% เมื่อเทียบกับกรณีพื้นฐาน ($\alpha = 0$) และ α จะส่งผลต่อลักษณะการไหลน้อยลงเมื่อ r_v มีค่าเพิ่มขึ้น

ระยะ Penetration depth และการกระจายตัวของเจ็ตในกระแสนวน

ในการศึกษาเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของระยะ Penetration depth (x_p) ได้เริ่มขึ้นโดย Arendt et al. (1956) ซึ่งเป็นผู้ค้นพบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่า x_p กับ r_v ดังเช่นในสมการที่ 1.2 ได้เป็นคนแรกโดยใช้ Dimensional analysis และนำความสัมพันธ์ที่ได้มาตรวจสอบกับผลการทดลองหลายครั้งจนมั่นใจ ซึ่งผู้ที่ได้ทำการศึกษาในเวลาต่อมาพบว่า ค่าคงที่ k' ในสมการ (ความชันของสมการ) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 2.4-2.9 โดยขึ้นอยู่กับ การทดลองของผู้ศึกษาแต่ละคน ดังตัวอย่างเช่น Rajaratnam (1976) ที่ได้ค่า k' จากการทดลองเท่ากับ 2.7 ซึ่ง Rajaratnam (1976) ได้กล่าวไว้ว่า ความสัมพันธ์เชิงเส้นนี้จะใช้ได้กับการทดลองที่มี r_v มากกว่า 3-4 และมีโมเมนตัมฟลักซ์ของเจ็ตต่อกระแสนวน (Z) ดังสมการที่ 1.1 มีค่าไม่เกิน 0.25 เท่านั้น หาก Z มีค่าเกินกว่านี้จะทำให้ค่า k' มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง และเมื่อ Z มีค่ามากกว่า 2.5 ความสัมพันธ์ของสมการจะอยู่ในรูปของ Power law กำลัง 1/3 (Morgan et al., 1976) ซึ่งความสัมพันธ์ทั้งหมดดังกล่าวนี้จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ Reynolds number ของเจ็ต (Re_j) มีค่ามากกว่า 3,000 และ Reynolds number ของกระแสนวน (Re_{cp}) มีค่ามากกว่า 10,000

สำหรับการกระจายตัวของการไหลแบบเจ็ตในกระแสนวนนั้นสามารถพิจารณาได้จากขอบเขตการกระจายตัวในแนวรัศมี (Radial extent of the mixing region) ของการไหลแบบเจ็ตในกระแสนวน โดยในอดีตที่ผ่านมาได้มีการนิยามขอบเขตการกระจายตัวในแนวรัศมีไว้ด้วยกันหลายลักษณะ ซึ่งจะแตกต่างกันไปในแต่ละการศึกษา แต่ที่พบเห็นโดยทั่วไปนั้นมักจะนิยามจากเส้นแบ่งทิศทางการไหลไปข้างหน้ากับการไหลย้อนกลับ (เส้น $u = 0$ ในรูปที่ 1.2) หรือนิยามจากเส้นที่อยู่บนจุดที่กระแสนวนไม่ถูกรบกวนหรือมีความเร็วเป็น 95% ของกระแสนวน ซึ่งเส้นดังกล่าวในการนิยามทั้ง 2 แบบนี้ในการทดลองจริงจะหาได้ยากมาก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากความปั่นป่วน

และไม่มีเสถียรภาพของการไหลแบบเจ็ตในกระแสวน ดังนั้น Beltaos and Rajaratnam (1973) จึงได้นิยามเส้น Stagnation stream surface ขึ้นมาเพื่อใช้พิจารณาการกระจายตัวของเจ็ต โดยนิยามให้เป็นเส้นที่มีโมเมนตัมฟลักซ์โดยรวม (Total momentum flux, Q) มีค่าเท่ากับศูนย์ (เส้น $Q=0$ ในรูปที่ 1.2) โดยจะเป็นเส้นบนจุดที่มีระยะตามแนวรัศมีเท่ากับ y^* ซึ่งจะทำให้ Q มีค่าเท่ากับ 0 ดังสมการคือ

$$Q = \int_0^{y^*} 2\pi r u dr = 0 \quad (1.3)$$

โดยที่ u เป็นรูปร่างความเร็วตามแนวแกนของเจ็ตตลอดแนวรัศมี ดังนั้นในการหา Stagnation stream surface จึงจำเป็นต้องรูรูปร่างความเร็ว u ตลอดทั้งแนวการไหลเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณ และเนื่องจากการหา Stagnation stream surface นั้นจะใช้ความเร็ว u เพียงอย่างเดียวในการคำนวณหา จึงทำให้ขอบที่ได้มานี้อาจจะไม่ตรงกับขอบการผสมของเจ็ตที่แท้จริง อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็ยังคงได้รับการยอมรับจากผู้ทำการศึกษาส่วนใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากจะให้ผลที่แตกต่างไปจากขอบจริงไม่มากนัก และง่ายสำหรับใช้คำนวณหาขอบเขตของเจ็ต ซึ่งในการพิจารณาถึงการกระจายตัวอย่างสังเขปของเจ็ตนั้นสามารถดูได้จากตำแหน่งตามแนวการไหลของความกว้างสูงสุดและขนาดครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของเส้น $Q=0$ ซึ่งนิยามให้เป็นระยะ x_0 และ y_0 ตามลำดับ (แสดงในรูปที่ 1.2) และจากงานของ Beltaos and Rajaratnam (1973) ที่ได้ศึกษาโดยใช้ Empirical model เพื่อดูการกระจายตัวของการไหลแบบเจ็ตในกระแสวน พบว่าค่า x_0 และ y_0 มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า x_p โดยมีค่าเท่ากับ $0.75x_p$ และ $0.3x_p$ ตามลำดับ โดยผลที่ได้นี้ได้นำมาตรวจสอบกับการทดลองเพียงกรณีเดียวของตนเอง ซึ่งงานวิจัยของ Beltaos and Rajaratnam (1973) นี้จะได้ผลที่แตกต่างไปจากงานของ Konig and Fiedler (1991) ที่ได้ทำการศึกษารายละเอียดของเจ็ตในกระแสวนโดยใช้เทคนิค Flow visualization กับชุดทดลองน้ำ เพื่อหา x_0 และ y_0 จากค่าเฉลี่ยที่ได้จากภาพการไหลพบว่า x_0 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนความเร็ว (r_v) ที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่ $0.7x_p$ แต่สำหรับ y_0 จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อ r_v เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่ $0.4x_p$ ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Lam and Chan (1995) ที่ใช้เทคนิค Laser induced fluorescence (LIF) ตรวจสอบการกระจายตัวของการไหลโดยกำหนดให้ขอบของการกระจายตัวมีค่าความสว่างหรือความเข้มขึ้นของแสงเป็น e^{-1} เท่าของค่าที่ตำแหน่งศูนย์กลางการไหล นอกจากนี้ Yoda and Fiedler (1996) ได้ทำการทดลองโดยใช้เทคนิค LIF และกำหนดให้ขอบของการไหลมีค่าความเข้มขึ้นของการกระจายตัวเป็น 10% ของค่าที่แนวศูนย์กลาง พบว่าระยะครึ่งหนึ่งของการกระจายตัวหรือ y_0 มีค่าประมาณคงที่เท่ากับ $0.42x_p$ ในกรณีใช้อัตราส่วนความเร็ว (r_v) มีค่าอยู่ในช่วง 3.4-10

สำหรับอัตราการกระจายตัวของการไหลแบบเจ็ตในกระแสวนนั้น สามารถพิจารณาได้จากรูปร่างความเร็วตามแนวแกนในแต่ละหน้าตัดของการไหล ($u(x,r)$) ซึ่งในการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาใช้นิยามใช้เส้นต่อจุดค่า b ในการพิจารณาหาอัตราการกระจายตัวของการไหล โดยนิยามให้ b เป็นระยะตามแนวรัศมีที่ทำให้ความเร็วตามแนวแกนของการไหล ($u(r)$) สอดคล้องกับสมการ

$$\frac{u(r) - u_{cf}}{u_{max} - u_{cf}} = \alpha \quad (1.4)$$

โดยนิยามใช้ค่า α เป็น 0.5 งานวิจัยของ Sui (1961) และ Beltaos and Rajaratnam (1973) ได้ใช้ค่า b ในการพิจารณาการกระจายตัวของการไหลเปรียบเทียบกับระหว่างการไหลแบบเจ็ตในกระแสวนและการไหลแบบเจ็ตอิสระพบว่า การไหลทั้ง 2 แบบนี้จะมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นตามระยะในแนวแกนเจ็ต, x โดยที่การไหลแบบเจ็ตในกระแสวนจะมีอัตราการกระจายตัวที่เร็วกว่าในกรณีของเจ็ตอิสระ ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการกระจายตัวที่ได้จากการทดลองของ Chan (1998) ที่ได้เสนอผลเพิ่มเติมว่าอัตราการกระจายตัวของเจ็ตในกระแสวนจะเริ่มลดลงเมื่อระยะตามแนวแกนมีค่าเกิน $0.7x_p$

นอกจากนี้ในการศึกษาหลายๆครั้งที่ผ่านมายังพบว่า การไหลแบบเจ็ตในกระแสวนนั้นจะมีรูปร่างความเร็วตามแนวแกนในแต่ละหน้าตัดที่มีความคล้ายคลึงกัน (มี Self-similarity) ในบางบริเวณ ถ้าหากใช้ค่า b ในการ Normalize ระยะของการไหลในแนวรัศมี ดังจะเห็นได้จากงานของ Sui and Ivanov (1959), Beltaos and Rajaratnam (1973) และ Chan (1998) ซึ่งทั้งหมดพบว่า การไหลแบบเจ็ตในกระแสวนนั้นมี Self-similarity แต่จะมีเฉพาะบริเวณภายในการไหลของเจ็ตหรือที่เรียกกันว่า Inner jet region เท่านั้น โดยจะไม่พบ Self-similarity ที่บริเวณขอบการไหลของเจ็ตหรือที่บริเวณการไหลอื่นๆนอกเหนือจากนี้ ซึ่งผลที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัดความเข้มข้นของ Yoda and Fiedler (1996) ที่ได้เสนอผลเพิ่มเติมอีกว่า Self-similarity ของการไหลแบบเจ็ตในกระแสวนนั้นจะมีอยู่ในบริเวณ Inner jet region บนหน้าตัดการไหลที่มีระยะตามแนวแกนไม่เกิน $0.7x_p$

การลดลงของความเร็วและความเข้มข้นตามแนวแกน

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการลดลงของความเร็วตามแนวแกน (Velocity decay) และการลดลงของความเข้มข้นตามแนวแกน (Concentration decay) ของการไหลแบบเจ็ตในกระแสวนกันอย่างแพร่หลาย โดยในการประมาณผลอย่างสังเขปพบว่าการลดลงของปริมาณทั้ง 2 อย่างนี้จะแปรผกผันกับระยะทางตามแนวแกน, x (มีความสัมพันธ์กันแบบไฮเปอร์โบลิกฟังก์ชัน) ซึ่งคล้ายกับกรณีการไหลแบบเจ็ตอิสระ แต่จะมีความแตกต่างกันอยู่บ้างในบริเวณช่วงท้ายของการไหล (ช่วง $0.8x_p - 1x_p$) โดยในการไหลแบบเจ็ตในกระแสวนนั้นจะมีการลดลงของปริมาณต่างๆอย่างรวดเร็วในช่วงนี้

Beltaos and Rajaratnam (1973) ได้ใช้ไฮเปอร์โบลิกฟังก์ชันในการประมาณการลดลงของความเร็วตามแนวแกนของการไหลแบบเจ็ตในกระแสวน พบว่าสมการไฮเปอร์โบลิกสามารถใช้ประมาณการลดลงของความเร็วในการไหลแบบเจ็ตในกระแสวนได้ค่อนข้างดี โดยได้ค่าคงที่ของสมการมีค่าประมาณ 5.83 ซึ่งค่าคงที่ที่ได้นี้มีค่าน้อยกว่าการไหลของเจ็ตอิสระที่มีค่าคงที่ของสมการไฮเปอร์โบลิกประมาณ 6.30 ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่า การไหลแบบเจ็ตในกระแสวนจะมีความเร็วตามแนวแกนลดลงได้อย่างรวดเร็วกว่าในกรณีของเจ็ตอิสระ ซึ่งผลการลดลงของความเร็วที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองวัดความเข้มข้นของการไหลในงานของ Yoda and Fiedler (1996) ที่พบว่าการลดลงของความเข้มข้นตามแนวแกนของการไหลแบบเจ็ตในกระแสวนนั้น จะอยู่ในรูปของสมการไฮเปอร์โบลิกที่มีค่าคงที่ของสมการประมาณ 4 ซึ่งจะน้อยกว่าในกรณีของเจ็ตอิสระที่มีค่าคงที่ของสมการประมาณ 5.4 (Dahm and Dimotakis, 1990)

การสั่นไปมาและเสถียรภาพของการไหล

เนื่องจากความซับซ้อนในเสถียรภาพการไหลของเจ็ตในกระแสวน จึงทำให้การศึกษาทั้งในด้านการทดลองและในด้านการคำนวณเกี่ยวกับการไหลลักษณะนี้ทำได้ค่อนข้างลำบาก ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพของการไหลมาบ้างดังนี้

Lam (1991) ได้ใช้ทฤษฎี Inviscid linearised stability ในการวิเคราะห์ถึงผลของกระแสวนทวนที่มีต่อเสถียรภาพการไหลของเจ็ต แล้วเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับการทดลองที่ใช้ Laser Doppler Anemometer (LDA) ในการวัดความเร็วและใช้สารเรืองแสง (Dye) ในการทำ Flow visualization ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าทฤษฎี Inviscid linearised stability สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์การรบกวน (Disturbance) ที่เกิดขึ้นในการไหลแบบเจ็ตในกระแสวนที่มีความเร็วต่ำได้ และผลจากการคำนวณพบว่าการเพิ่มความเร็วของกระแสวนจะทำให้เกิด Disturbance มากขึ้น ซึ่งหมายถึงเจ็ตจะมีเสถียรภาพน้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อกระแสวนมีความเร็วเพิ่มขึ้นจะทำ

ให้ความถี่ของโครงสร้างในระดับ Large scale ลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อดูจากภาพ Flow visualization ดังรูปที่ 1.10 โดยที่ช่วงของการเกิด Unstable frequency จะแคบลงเมื่อกระแสวนมีความเร็วเพิ่มขึ้น

Lam and Chan (1997) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง Penetration depth ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการสั่นไปมาของการไหล โดยได้ทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วของการไหล (r_v) ในช่วง 3-20 และนิยามให้คู่อันดับ (x_p', y_p') เป็นตำแหน่งของจุดปลาย Penetration depth ณ เวลาใดๆ เทียบกับพิกัดอ้างอิงที่ปากเจ็ต จากการทดลองพบว่าเกิดการสั่นของตำแหน่งดังกล่าวอย่างมาก โดยในส่วนของค่า x_p' และ y_p' นั้นจะมีค่า rms คิดได้เป็น 12% และ 15% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การสั่นไปมาของตำแหน่งของการกระจายตัวสูงสุด (x_D) และระยะครึ่งหนึ่งของ การกระจายตัวสูงสุด (y_D) ในการไหลนั้นจะมีค่า rms คิดได้เป็น 11% และ 13% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการไหลแบบเจ็ตในกระแสวนนั้นจะมีการสั่นไปมาอย่างรุนแรงตลอดทั้งการไหล ซึ่งการสั่นไหวที่รุนแรงนี้จะป็นอุปสรรคสำคัญต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการความมีเสถียรภาพ ความถูกต้อง และความละเอียดสูง ตัวอย่างเช่นงานที่เกี่ยวข้องกับข้อกำหนดในการแพร่กระจายของมลภาวะ โดยค่าการกระจายตัวสูงสุดและระยะ Penetration depth ของการไหลในบางเวลา อาจจะมีค่าเกินกว่าค่าเฉลี่ยได้ถึง 30% และ 100% ตามลำดับ

การศึกษาโดยการคำนวณเชิงตัวเลข

ในอดีตมีผู้ศึกษาหลายท่านใช้แบบจำลองการไหล (Flow models) ในการศึกษาเกี่ยวกับการไหลแบบเจ็ตในกระแสวน ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณส่วนใหญ่เมื่อเทียบกับผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Flow model สามารถประมาณค่าได้ดีในการศึกษาเชิงคุณภาพ (Qualitative) และได้ผลพอใช้กับการศึกษาเชิงปริมาณ (Quantitative) โดยมีตัวอย่างของผู้ที่ทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลองการไหลดังนี้

Abramovich (1963) ที่ทำการศึกษการไหลของเจ็ตในกระแสวน โดยใช้ทฤษฎีของ Tollmien ซึ่งเป็นการ Superposition ของเจ็ต 2 ลำที่ไหลสวนทางกันพบว่า ผลการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ระเบียบวิธีการนี้จะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับการทดลองในเชิงคุณภาพ

Hopkins and Robertson (1967) ได้ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการเคลื่อนที่ทางกลศาสตร์กับทฤษฎี Helmholtz free-streamline theory ในการศึกษาการไหลแบบเจ็ตในกระแสวนในกรณีการไหลที่มีอัตราส่วนความเร็ว (r_v) มีค่าต่ำซึ่งจะมีลักษณะเป็นการไหลแบบคงตัว (ไม่คิดผลของ Viscous และ ไม่มีการผสมกันระหว่างเส้นแบ่งการไหลของเจ็ตและกระแสวน) จากผลที่ได้พบว่าทฤษฎีดังกล่าวสามารถใช้ประมาณค่าได้ดีเฉพาะกรณีที่มีค่า r_v ต่ำๆบางกรณีเท่านั้น

Sekundov (1969) ศึกษาโดยการ Integrate สมการความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-โตกซ์ และแบ่งการไหลออกเป็นบริเวณต่างๆ ซึ่งแต่ละบริเวณจะต้องมีรูปร่างความเร็วประมาณใกล้เคียงเส้นตรง จากผลการคำนวณพบว่า ในบริเวณที่มีความเร็วตามแนวแกนของเจ็ทมีค่ามากกว่าขนาดความเร็วของกระแสทวน ($|u_{cf}|$) นั้น การกระจายตัวตามแนวแกนเจ็ทมีความคล้ายคลึงกับกรณีการไหลของเจ็ทอิสระคือมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะในแนวแกน และเมื่อความเร็วตามแนวแกนเริ่มมีค่าน้อยกว่า $|u_{cf}|$ พบว่าการกระจายตัวของความเร็วเริ่มมีค่าลดลง ในขณะเดียวกัน ค่าความดันสถิตก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการไหลถูกหักเหทิศทางไป นอกจากนี้ยังพบว่า แบบจำลองการไหลนี้สามารถใช้ประมาณระยะ Penetration depth ของการไหลแบบเจ็ทในกระแสทวนได้ดีทั้งในกรณีที่มีผลของผนังและไม่มีผลของผนังเข้ามาเกี่ยวข้อง

แบบจำลองการไหลที่สามารถใช้ประมาณค่าของการไหลแบบเจ็ทในกระแสทวนได้ดีที่สุดนั้นถูกคิดขึ้นโดย Chan (Chan and Lam, 1994; Chan and Lam, 1998; Chan, 1998; Chan and Lam, 1999) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถใช้ประมาณค่าความเร็วและความเข้มข้นของการไหลได้ทั้งบริเวณ โดยในส่วนของการลดลงของความเร็วตามแนวแกนนั้นจะหาได้โดยการแยกพิจารณาการไหลออกเป็น 2 บริเวณ คือ 1) บริเวณที่มีความเร็วคงที่ใน Potential core ซึ่งระยะ Potential core นี้จะถูกกดให้มีระยะที่สั้นลงเมื่อกระแสทวนมีความเร็วเพิ่มขึ้น และ 2) บริเวณที่ตัดออกมาจากบริเวณ Potential core ซึ่งจะมีความเร็วลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะในแนวแกนของ เจ็ท ซึ่งในการคำนวณทำโดยพิจารณาการไหลโดยวิธี Lagrangian และใช้ Advection hypothesis เพื่อพิจารณาผลของกระแสทวนที่มากกระทำต่ออนุภาคของเจ็ท และเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ใช้ LDA เป็นเครื่องมือวัดคังแสดงในรูปที่ 1.11 พบว่า สมการที่ได้สามารถใช้ประมาณค่าความเร็วในแนวแกนได้อย่างถูกต้องแม่นยำทุกอัตราส่วนความเร็ว (r_v) ยกเว้นในบริเวณที่ติดกับปากทางออกเจ็ท ซึ่งจะมีค่าผิดพลาดไปจากผลการทดลองไปบ้าง ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณดังกล่าวอยู่ในช่วง Transition ซึ่งยังไม่เข้าสู่ Self-similarity อย่างเต็มที่ และในส่วนของแบบจำลองที่ใช้หาการกระจายตัวและความเข้มข้นของการไหลแบบเจ็ทในกระแสทวนนั้นทำได้โดยใช้สมการความต่อเนื่องและสมการนาเวียร์-โตกซ์ ผนวกกับสมมติฐานบางประการ และการปรับปรุงแบบจำลองในบางส่วน ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า แบบจำลองสามารถประมาณค่าต่างๆของการไหลได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง โดยในส่วนของคุณค่า x_p และ r_v นั้นจะไม่พบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างกัน ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 1.12 ซึ่งแตกต่างไปจากผลการทดลองของผู้วิจัยท่านอื่นๆ

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

จากการศึกษาที่ผ่านมาจะเห็นว่า การไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวนสามารถใช้เพิ่มประสิทธิภาพการผสมได้ในระดับหนึ่ง เช่นเดียวกับการไหลแบบเจ็ตหมุนควงที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผสมได้ดียิ่งขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น วิทยานิพนธ์นี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลการหมุนควงของเจ็ตที่มีต่อลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของการไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวน ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะการผสมของการไหลแบบเจ็ตที่หมุนควงในกระแสมทวน โดยจะพิจารณาจากปริมาณปริมาณบ่งชี้ต่างๆ คือ การกระจายตัวของอนุภาคเป็นหน้าตัด ระยะทางที่ไปได้ไกลที่สุดของเจ็ต (Penetration depth) อัตราการลดลงตามแนวแกน (Decay rate) และการขยายตัว (Spread rate) ของเจ็ต

1.4 แนวทางการทำวิจัย

ในช่วงต้นของการศึกษาได้ทำการศึกษาเบื้องต้นดังแสดงในภาคผนวก ก เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ของงานวิจัย พารามิเตอร์ที่เหมาะสมและข้อบกพร่องต่างๆที่อาจมีผลต่อการทดลองและนำผลที่ได้ไปใช้ช่วยในการออกแบบชุดทดลอง เช่น การออกแบบขนาดสเกล และการปรับสภาวะของการไหลที่เหมาะสม รวมทั้งยังช่วยในการออกแบบการทดลอง เช่น การกำหนดช่วงของพารามิเตอร์และขอบเขตในการทดลองที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยให้ความร้อนกับเจ็ตอากาศจนวนมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าอนุภาคของกระแสมทวนประมาณ 45 องศาเซลเซียส และวัดอุณหภูมิเป็นหน้าตัดตามแนว Downstream (x) โดยใช้ Thermocouple เป็นเครื่องมือวัด ทั้งนี้เพื่อศึกษาคุณลักษณะการผสมเฉพาะหน้าตัด (Local characteristic) ได้แก่ การกระจายตัวของอนุภาคและการพัฒนาตัวของเจ็ตตามแนวการไหล รวมถึงคุณลักษณะการผสมโดยรวม (Global characteristic) อันได้แก่ อัตราการลดลง (Decay rate) และการกระจายตัวของเจ็ต (Spreading) และเนื่องจากในการศึกษาวิจัยนี้จะมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเจ็ตอากาศและกระแสมทวน ซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นของเจ็ตอากาศมีค่าไม่เท่ากับความหนาแน่นของกระแสมทวน ดังนั้นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะดังกล่าว คือ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r), Swirl number (Sn) และ Densimetric Froude number (Fr) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ในการศึกษาการไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวนนั้น พารามิเตอร์อันหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการไหลลักษณะนี้คือ อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ซึ่งนิยามเป็นรากที่สองของอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ของเจ็ตต่อโมเมนต์ของกระแสมทวนดังสมการ

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

เมื่อ \bar{u}_j คือความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-average) ในแนวแกนของเจ็ต

\bar{u}_{cf} คือความเร็วของกระแสลมทวน

ρ_j คือค่าความหนาแน่นของเจ็ตอากาศ

ρ_{cf} คือค่าความหนาแน่นของกระแสลมทวน

สำหรับการศึกษาในอดีตส่วนใหญ่ที่มีอุณหภูมิของเจ็ตอากาศและกระแสลมทวนเท่ากันนั้น ($\rho_j = \rho_{cf}$) ค่า r ในสมการที่ 1.5 จะลดรูปลงเป็น \bar{u}_j / \bar{u}_{cf} ซึ่งก็คืออัตราส่วนความเร็ว (r_v) นั่นเอง

ในการศึกษาผลของความเร็วในการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะการผสมข้างต้น ได้ทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) คงที่ และเปลี่ยนความเร็วในการหมุนควง โดยพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงระดับของการหมุนควงได้มีผู้นิยามในหลายลักษณะ ที่นิยมใช้คือค่า Swirl Number (Sn) ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนของฟลักซ์ตามแนวแกนเจ็ตของโมเมนตัมเชิงมุม (Axial flux of angular momentum, G_θ) 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 คือความเร็วในแนวแกนของเจ็ตที่ตำแหน่งรัศมีของท่อ (r)

w คือความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ตที่ตำแหน่งรัศมีของท่อ (r)

R คือรัศมีของปากเจ็ต

นอกจากนี้ยังมีการแสดงระดับการหมุนควงในอีกลักษณะหนึ่ง คือแสดงโดยค่า Swirl ratio (Sr) 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 คือความหนาแน่นในแนวสัมผัสของท่อหมุน
 \bar{u}_j คือความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ในแนวแกนเจ็ต

เนื่องจากวิธีการในการทำให้เกิดการหมุนควงนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการหมุนท่อเจ็ต (Rotating pipe) ซึ่งมีความแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการใช้การตีใบพัดในการหมุนควงของไหล หรือการฉีดของไหลตามแนวสัมผัส ซึ่งจะมีผลทำให้ความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ตที่ขอบปากเจ็ต และผลรวมของ Circulation ที่ทางออกของเจ็ตเท่ากับศูนย์ ในขณะที่วิธีท่อหมุนนั้นจะมีความเร็วตามแนวสัมผัสของเจ็ตที่ขอบปากเจ็ต และผลรวมของ Circulation ที่ทางออกของเจ็ตไม่เท่ากับศูนย์ ด้วยเหตุผลนี้ กอปรกับเพื่อความสะดวกในการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้ Swirl ratio (Sr) เป็นพารามิเตอร์ที่บอกระดับการหมุนควงของเจ็ต

นอกจากนี้ในการศึกษาวิจัยยังได้มีการให้ความร้อนกับเจ็ตอากาศ ทำให้มีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของเจ็ตและกระแสลมทวน ดังนั้นจึงพิจารณาผลของแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นจากค่า Densimetric Froude number (Fr) ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวของเจ็ตอากาศกับแรงเฉื่อยของกระแสลมทวน ดังสมการ

$$Fr = \left[\frac{(\rho_{cf} - \rho_j)gd}{\rho_{cf}u_{cf}^2} \right]^{1/2} \quad (1.8)$$

และค่า Fr/r ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวของเจ็ตอากาศกับแรงเฉื่อยของเจ็ตอากาศ ดังสมการ

$$Fr/r = \left[\frac{(\rho_{cf} - \rho_j)gd}{\rho_j u_j^2} \right]^{1/2} \quad (1.9)$$

สำหรับการศึกษาการไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสลมทวนในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) มีค่าคงที่ที่ประมาณ 4.62 โดยมีค่า Reynolds number ของเจ็ต (Re_j) ประมาณ 10,000 และมีค่า Reynolds number ของกระแสลมทวน (Re_{cf}) ประมาณ 58,000 และทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของการหมุนควงที่ Swirl ratio (Sr) ต่างๆทั้งหมด 4 ระดับ

ด้วยกันคือ ที่ Swirl ratio เท่ากับ 0 (ไม่มีการหมุนควง), 0.11, 0.22 และ 0.33 โดยในทุกกรณีการทดลองจะมีค่า Fr ประมาณ 0.09 และมีค่า Fr/r ประมาณ 0.02 นั่นก็คือ ผลเนื่องจากแรงลอยตัวของเจ็ตร้อนจะมีค่าประมาณ 9% ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของกระแสลมทวนและมีค่าประมาณ 2% ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของเจ็ต

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นความรู้ ความเข้าใจ และข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับผลของการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะการผสมของการไหลในรูปแบบของเจ็ตในกระแสลมทวน และจะเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอื่นๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน อันจะเป็นประโยชน์ในเชิงวิชาการ

ข้อมูลในเชิงวิชาการดังกล่าวจะเป็นแนวทางในการประยุกต์พัฒนาการออกแบบและการปรับปรุงประสิทธิภาพของการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับกระบวนการเผาไหม้ใน Combustor การปรับปรุงการระบายความร้อนของ Gas turbine blade การพัฒนาทางด้านอากาศพลศาสตร์ พัฒนาประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน รวมถึงแนวทางในการควบคุมมลภาวะในสิ่งแวดล้อม เช่น ลักษณะที่เหมาะสมของการปล่อยน้ำร้อนลงสู่แม่น้ำเพื่อให้ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์รอบข้างน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังอาจนำไปใช้เป็นแนวทางในการควบคุมการไหล (Flow control) ในแบบต่างๆ ได้ อันจะเป็นประโยชน์ในเชิงประยุกต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ชุดทดลองและการทดลอง

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะของเจ็ตที่หมุนควงในกระแสลมทวน ซึ่งจะศึกษาถึงผลของความเร็วในการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะของเจ็ตในกระแสลมทวน โดยการเปลี่ยนความเร็วในการหมุนควงซึ่งแสดงโดยค่า Swirl ratio (Sr) ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) คงที่ โดยในการทดลองจะให้ความร้อนกับเจ็ตอากาศจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของกระแสลมทวนประมาณ 45 องศาเซลเซียส และวัดอุณหภูมิเป็นหน้าตัดตามแนว Downstream เพื่อพิจารณาถึงคุณลักษณะการไหลของเจ็ตแบบหมุนควงในกระแสลมทวน โดยมีรายละเอียดของชุดทดลองและการทดลองดังนี้

2.1 ชุดทดลอง

ชุดทดลองในงานวิจัยนี้ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยชุดทดลองประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ อุโมงค์ลมที่มีขนาดหน้าตัดทดสอบ 50×50 ตารางเซนติเมตร และชุดเจ็ตแบบท่อหมุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d) 21.4 มิลลิเมตร

2.1.1 อุโมงค์ลม (Wind tunnel)

อุโมงค์ลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีหน้าที่สร้างกระแสลมทวน โดยแสดงเป็นลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ พัดลมแบบหอยโข่ง (Centrifugal Blower) ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ท่ออ่อน (Flexible duct) ท่อจัดปรับการไหล (Settling duct) ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (Diffuser) ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) ขนาด 100×100 ตารางเซนติเมตร Contraction ที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดด้านทางเข้าต่อด้านทางออกเท่ากับ 4 และหน้าตัดทดสอบ (Test section) ขนาด 50×50 ตารางเซนติเมตร

การทำงานของอุโมงค์ลมเริ่มจากอากาศจะถูกดูดผ่านพัดลมหอยโข่ง (Centrifugal Blower) ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งมีขนาดทางออกกว้าง 30 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร และถูกควบคุมความเร็วรอบเพื่อปรับอัตราการไหลโดยเครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (Inverter) จากนั้นอากาศจะไหลผ่านท่ออ่อน (Flexible duct) ซึ่งทำหน้าที่ลดแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากพัดลมไม่ให้ส่งผลต่อ

ส่วนอื่นๆของอุโมงค์ลม

ต่อจากนั้นอากาศจะไหลไปสู่ท่อจัดปรับการไหล (Settling duct) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งมีลักษณะหน้าตัดทางเข้าและทางออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 45×45 ตารางเซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร ภายในประกอบไปด้วยตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh \times SWG เท่ากับ $(16 \times 18) \times 31$ และ 2.5×21 อย่างละ 1 แผ่น วางซ้อนกันที่ปากทางเข้า และตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh \times SWG เท่ากับ 2.5×21 อีก 1 แผ่น ปิดที่ด้านทางออก ทั้งนี้เพื่อช่วยปรับปรุง Boundary layer บนผนังทั้ง 4 ด้าน ทำให้การไหลมีความเร็วสม่ำเสมอยิ่งขึ้น และลดการหมุนวนของอากาศที่ออกจากพัดลม

เมื่อผ่าน Settling duct แล้ว อากาศก็จะไหลต่อไปยังส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (Diffuser) ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งทำหน้าที่ลดความเร็วของอากาศ โดยมีลักษณะหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดทางเข้า 45×45 ตารางเซนติเมตร ขนาดทางออก 100×100 ตารางเซนติเมตร ยาว 130 เซนติเมตร กัดเป็นอัตราส่วนพื้นที่เท่ากับ 4.9 และมีมุมเอียงรวม 26 องศา ภายใน Diffuser ประกอบไปด้วยตาข่ายอลูมิเนียม (Household screen) ที่มีขนาด Mesh \times SWG เท่ากับ 8×26 จำนวน 3 แผ่น โดยแต่ละแผ่นมีระยะห่างจากด้านทางเข้าเท่ากับ 28, 48 และ 88 เซนติเมตร ตาข่ายอลูมิเนียมมีไว้เพื่อป้องกันการเกิด Separation และทำให้อากาศกระจายเต็มพื้นที่หน้าตัดของ Diffuser

หลังจากอากาศถูกลดความเร็วใน Diffuser แล้ว ก็จะผ่านเข้าไปยังห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) ที่มีขนาด 100×100 ตารางเซนติเมตร ยาว 125 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.4 ภายในประกอบไปด้วยตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh \times SWG เท่ากับ 4×24 ที่ทางเข้า ถัดไปเป็น Honeycomb ที่ทำจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 15 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร วางเรียงอยู่เต็มหน้าตัดการไหล ถัดจาก Honeycomb จะมีตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh \times SWG เท่ากับ $(16 \times 18) \times 31$ จำนวน 7 แผ่น แต่ละแผ่นวางห่างกันประมาณ 12.6 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อปรับทิศทางการไหลและทำให้อากาศมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด ต่อจากนั้นอากาศจะไหลผ่านเข้าไปยังส่วน Contraction ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดด้านทางเข้ากับด้านทางออกเท่ากับ 4 โดยรูปร่างเส้นโค้งของ Contraction นั้นได้ออกแบบตามสมการ Polynomial ดีกรี 4 มีจุดเปลี่ยนความโค้งที่ระยะ $2/3$ เท่าของความยาว 170 เซนติเมตร ซึ่ง Contraction จะทำหน้าที่เร่งให้อากาศมีความเร็วสูงขึ้นจนได้ความเร็วภายในหน้าตัดทดสอบ (Test section) ตามที่ต้องการ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอและลดปริมาณความปั่นป่วนของอากาศก่อนไหลเข้าสู่ Test section

สำหรับ Test section นั้นแสดงไว้ดังรูปที่ 2.5 จะมีขนาดหน้าตัด 50×50 ตารางเซนติเมตร ยาว 240 เซนติเมตร มีผนังทั้ง 4 ด้านทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 1.5 เซนติเมตร ที่ด้านท้ายของ Test section จะมีชุดเจ็ดแบบท่อหมุนประกอบอยู่ ทั้งนี้เพื่อให้การไหลอยู่ในลักษณะของเจ็ดหมุนควงในกระแสวนซึ่งเป็นลักษณะที่ใช้ในการศึกษาวิจัย โดยที่บริเวณผนังด้านข้างตรงส่วนท้ายของ Test section ได้ทำการเจาะอะคริลิกเป็นช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าไว้ที่ผนังทั้ง 2 ด้านละ 2 ช่อง ดัง

ภาพถ่ายในรูปที่ 2.6ก และแสดงรายละเอียดเป็นรูป Schematic ในรูปที่ 2.6ข ทั้งนี้ก็เพื่อรักษาระดับความดันสถิตในการไหล (Static pressure gradient) ของกระแสลมทวนภายใน Test section ไม่ให้มีความดันลดลงมากเกินไป ซึ่งการลดลงของ Static pressure gradient นี้เกิดขึ้นจากการมีชุดเจ็ดแบบท่อหมุนเข้ามาขวางการไหลของกระแสลมทวนที่บริเวณด้านท้ายของ Test section การรักษาระดับความดันสถิตนั้นจะทำโดยปล่อยให้อากาศส่วนหนึ่งของกระแสลมทวนไหลออกไปภายนอก Test section โดยผ่านทางช่องเปิดที่ทำไว้ และเพื่อป้องกันไม่ให้กระแสลมที่ไหลวนอยู่ภายนอก Test section ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องวัดการไหลที่อยู่ภายใน จึงได้ใช้ตาข่ายอลูมิเนียมขนาด Mesh×SWG เท่ากับ $(16 \times 18) \times 31$ ปิดทับที่บริเวณช่องเปิดไว้อีกชั้นหนึ่ง ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อมีช่องเปิดที่ด้านข้างของ Test section จะทำให้ระดับ Static pressure gradient ของกระแสลมทวนตลอดทั้งการไหลมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งอ้างอิงไม่เกิน $\pm 7\%$ ของค่าความดันพลศาสตร์ภายใน Test section ซึ่งให้ผลที่ดีกว่าตอนที่ไม่มีช่องเปิด โดยในตอนที่ยังไม่มีช่องเปิดนั้นจะมีระดับ Static pressure gradient ตลอดทั้งการไหลมีค่าลดต่ำลงจากจุดอ้างอิงได้ถึง 34% ของค่าความดันพลศาสตร์ ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

2.1.2 ชุดเจ็ดแบบท่อหมุน

ชุดเจ็ดแบบท่อหมุนได้แสดงเป็นลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.7 และภาพถ่ายดังรูปที่ 2.8 มีส่วนประกอบทั้งหมด 3 ส่วนคือ ส่วนพัดลมและ Orifice, ส่วน Heating chamber และส่วนท่อหมุน (Rotating pipe)

ในส่วนพัดลมและ Orifice นั้นจะใช้ควมคุมและตรวจสอบอัตราการไหลของเจ็ด ซึ่งแสดงดังภาพถ่ายในรูปที่ 2.9 โดยอากาศจะถูกเป่าจากพัดลมแบบความดันสูง (High pressure blower) ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ผ่านท่ออ่อน (Flexible duct) เพื่อลดการสั่นสะเทือนจากพัดลมที่จะส่งผลไปยังส่วนอื่นๆของชุดทดลอง จากนั้นอากาศจะไหลผ่านท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว (Nominal size) ก่อนเข้าสู่ท่อลดขนาด 2 นิ้วไปยังวาล์วแบบประตู (Gate valve) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของเจ็ดอากาศ ต่อจากนั้นอากาศจะไหลผ่านช่องอ PVC ขนาด 3 นิ้ว ไปยัง Honeycomb ซึ่งทำจากหลอดพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 250 มิลลิเมตร วางเรียงจนเต็มหน้าตัดท่อ แล้วประกบปลายทั้งสองข้างด้วยตาข่ายอลูมิเนียม (Household screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ $(16 \times 18) \times 31$ ทั้งนี้เพื่อปรับทิศทางการไหลและทำให้อากาศมีความเร็วสม่ำเสมอก่อนไหลผ่าน Orifice ที่มีอัตราส่วนช่องเปิด (β) เท่ากับ 0.54 ซึ่งจะใช้ในการตรวจสอบอัตราการไหลของเจ็ดให้มีค่าคงที่ตลอดช่วงการทดลอง

ในส่วน Heating chamber นั้นเป็นส่วนที่ทำให้ความร้อนกับเจ็ทอากาศแสดงลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.10ก โดยมีลักษณะเป็นห้องยาวรวม 100 เซนติเมตร ในส่วนทางเข้าของ Heating chamber จะมีลักษณะเป็นหน้าแปลนสำหรับใส่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 นิ้ว ซึ่งจะใช้ต่อเข้ากับท่อ PVC ในส่วนของพัคลมและ Orifice สำหรับด้านทางออกของ Heating chamber ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ต่อเข้ากับส่วนท่อหมุนนั้นได้ทำการเจาะรูกลมที่ผนังด้านท้ายห้องให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร แล้วทำการปิดทับด้วยแผ่นอลูมิเนียมขนาด 80×120 ตาราง มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร ซึ่งได้ทำการกลึงเป็นรูกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้สวมได้เกือบพอดีกับท่อสแตนเลสของส่วนท่อหมุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร โดยให้มีอากาศรั่วออกจากห้องน้อยที่สุดและไม่เกิดการเสียดสีกันเวลาสวม ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.10ข สำหรับ Heating chamber นี้จะมีขนาดหน้าตัดในช่วงแรกเท่ากับ 20×20 ตารางเซนติเมตร ก่อนที่จะขยายเป็น 30×30 ตารางเมตรในช่วงถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้อากาศได้ไหลผ่าน Heater ไฟฟ้าทุกขนาดที่ติดตั้งอยู่ภายในห้องให้ได้มากที่สุด ซึ่งประกอบไปด้วย Heater ไฟฟ้าขนาด 500 วัตต์ จำนวน 1 ตัว และ 2000 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.10ค ซึ่ง Heater ไฟฟ้าทั้งหมดนี้สามารถให้กำลังความร้อนสูงสุดได้เท่ากับ 4500 วัตต์ และควบคุมกำลังได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Variac แบบ 1 เฟส ขนาด 10 kVA ดังรูปที่ 2.10ง ถัดจาก Heater ไฟฟ้าไปจะมีแผ่นเหล็กเจาะรู (Perforated plate) ที่มีขนาดรู (มิลลิเมตร)×ระยะระหว่างรู (มิลลิเมตร) เท่ากับ 10×15 และมีอัตราส่วนช่องเปิด 50% จำนวน 3 แผ่น โดยแต่ละแผ่นวางห่างกันประมาณ 10 เซนติเมตร เพื่อให้อากาศมีการผสมกันอย่างทั่วถึงและทำให้อุณหภูมิของอากาศมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัดก่อนที่อากาศจะไหลผ่านไปสู่อุณหภูมิหมุน (Rotating pipe) นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งฉนวนชนิดแผ่นใยหินที่ผนังด้านนอกทุกด้านของ Heating chamber เพื่อลดการสูญเสียพลังงานความร้อนออกสู่ภายนอก

ในส่วนท่อหมุน (Rotating pipe) จะเป็นส่วนที่ทำให้เจ็ทอากาศมีความเร็วในแนวสัมผัส และทำให้เกิดการหมุนควง ซึ่งได้แสดงเป็นลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.11 และภาพถ่ายดังรูปที่ 2.12 สำหรับท่อที่ใช้เป็นท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d) เท่ากับ 21.4 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร จำนวนทั้งหมด 3 ท่อน ท่อแต่ละท่อนจะสวมอยู่กับตลับลูกปืนชนิดปรับแนวได้เอง (Self-aligning ball bearings) แบบมีปลอกสวม (Adaptor sleeve) ยี่ห้อ SKF รุ่น 1206EK ท่อนละ 2 ชุด และท่อแต่ละท่อนจะถูกยึดติดกันด้วย Collar ที่ทำจากท่อเหล็ก โดยใช้ Set screw ในการยึด ทำให้ท่อทั้ง 3 ท่อนหมุนไปพร้อมกันในการทดลอง

สำหรับท่อท่อนแรกมีความยาว 30 เซนติเมตร ($14d$) ปลายด้านหนึ่งของท่อถูกสวมเข้ากับส่วนทางออกของ Heating chamber ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะประกบติดเข้ากับท่อท่อนที่สอง ซึ่งมีความยาว 40 เซนติเมตร ($19d$) ภายในท่อท่อนที่สองประกอบไปด้วย Honeycomb ที่ทำจากท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 2.2 มิลลิเมตร หนา 0.5 มิลลิเมตร เรียงอยู่เต็มหน้าตัด

ตลอดทั้งความยาวท่อ โดยมีตาข่ายสแตนเลส (Screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ 30×35 ปะกบที่ปลายทั้งสองด้าน ทั้ง Honeycomb และ Screen ในท่อส่วนที่สองนี้มีหน้าที่ทำให้อากาศเกิดการหมุนควงมีความเร็วในแนวสัมผัส และทำให้อากาศมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเต็มหน้าตัด สำหรับท่อตอนที่สามนั้นจะเป็นท่อที่มีความยาวมากที่สุด โดยมีความยาวถึง 115 เซนติเมตร (54*d*) ทั้งนี้เพื่อให้รูปร่างความเร็วของอากาศที่มีความสม่ำเสมอจากท่อตอนที่สองพัฒนาตัวไปอย่างเต็มที่เมื่อไหลผ่านท่อตอนที่สาม ส่งผลให้รูปร่างความเร็วตามแนวแกนที่ปากทางออกเจ็ตเป็นแบบ Fully-developed profile ซึ่งเป็นรูปร่างความเร็วที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ โดยในท่อตอนที่สามนี้จะวางตลับลูกปืนชุดสุดท้ายที่ยึดอยู่กับท่อให้มีระยะห่างจากปากเจ็ตประมาณ 25 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสถานะเบื้องต้นของการไหลที่บริเวณปากทางออกเจ็ต

ในการหมุนขับท่อได้ใช้สายพานชนิดร่องต่อเข้ากับ Pulley แบบ Timing ขับจากเพลลาของมอเตอร์ ยี่ห้อ Crompton Greaves แบบ AD90S ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ 2830 รอบต่อนาที โดยส่งกำลังขับไปยังท่อตอนที่สอง ซึ่งมีอัตราทดความเร็วรอบของมอเตอร์ต่อความเร็วรอบของท่อหมุนเท่ากับ 1 ต่อ 2.2 และควบคุมความเร็วรอบของท่อหมุนโดยใช้เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (Inverter) ยี่ห้อ T-VERTER รุ่น N1-202-M ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ โดยวงจรที่ใช้ควบคุมความเร็วรอบของท่อหมุนได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.13

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้นำชุดทดลองทั้งในส่วนของชุดเจ็ตแบบท่อหมุนและชุดอุโมงค์ลมมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยนำส่วนปลายท่อในชุดเจ็ตท่อหมุนมาประกอบเข้าที่ส่วนท้ายของ Test section ให้แนวแกนของชุดเจ็ตแบบท่อหมุนวางอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางและขนานไปกับแนวของ Test section และใช้โครงสร้างเหล็กรูปตัวซีเป็นตัวยึดชุดทดลองทั้งสองส่วนให้ติดแน่นเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ทั้งนี้เพื่อทำให้การไหลอยู่ในรูปแบบของเจ็ตที่หมุนควงในกระแสมทวน ซึ่งเป็นรูปแบบของการไหลที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้

2.2 พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้กำหนดระบบแกน (Coordinate system) ที่ใช้อ้างอิงในการวัด ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ประกอบไปด้วยพิกัด x , y และ z โดยกำหนดให้มีจุดกำเนิดอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางปากทางออกเจ็ต และให้แกน x มีทิศทางไปตามแนวการไหลของเจ็ต ทำให้การไหลของเจ็ตอากาศในการทดลองมีทิศเป็นบวก และการไหลของกระแสมทวนมีทิศเป็นลบ นอกจากนี้ยังได้นิยามพิกัด x , r และ θ ให้มีจุดกำเนิดอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางปากทางออกเจ็ต โดยที่ r เป็นระยะตามแนวรัศมี ส่วน θ เป็นมุมที่กระทำกับแกน y ซึ่งจะมีค่าเป็นบวกตามทิศทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งในการศึกษา

วิจัยนี้ได้หมุนท่อทั้งหมดในส่วนชุดเจ็ตท่อหมุนให้มีทิศวนเข็มนาฬิกา จึงทำให้ความเร็วเชิงมุมของท่อ (ω) ที่ได้มีค่าเป็นบวก

2.3 สภาพะของการทดลอง

ในการศึกษาวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาผลของการหมุนควงที่มีต่อลักษณะการไหล โดยพิจารณาจากระดับของการหมุนควงซึ่งแสดงโดยค่า Swirl ratio (Sr) ที่นิยามให้เป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วในแนวสัมผัสของท่อเจ็ตกับความเร็วเฉลี่ยในแนวแกนของเจ็ต ($Sr = w_p / \bar{u}_j$) ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อดูผลของการหมุนควงที่มีต่อคุณลักษณะการไหลรวมทั้งหมด 8 กรณี โดยแบ่งเป็นการทดลองการไหลแบบเจ็ตหมุนควงอิสระ (Swirling jet) 4 กรณี เพื่อศึกษาผลของการหมุนควงที่มีต่อการไหลแบบเจ็ตอิสระ ซึ่งจะใช้เป็นการทดลองในกรณีพื้นฐาน และการทดลองการไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสสวนทวน (Swirling jet in counterflow) อีก 4 กรณี เพื่อศึกษาผลของการหมุนควงที่มีต่อการไหลแบบเจ็ตในกระแสสวนทวน โดยในการทดลองการไหลทั้งสองลักษณะนั้นได้ทำการเปลี่ยนค่า Swirl ratio ทั้งหมด 4 ค่าคือที่ Swirl ratio เท่ากับ 0 (ไม่มีการหมุนควง), 0.11, 0.22 และ 0.33 โดยได้เรียกกรณีการทดลองที่มีค่า Swirl ratio ต่างๆกันนี้เป็น $Sr0$, $Sr11$, $Sr22$ และ $Sr33$ สำหรับกรณีการทดลองการไหลแบบเจ็ตหมุนควงอิสระ และ $Sr0cf$, $Sr11cf$, $Sr22cf$ และ $Sr33cf$ สำหรับกรณีการทดลองการไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสสวนทวน ซึ่งการหมุนควงทั้ง 4 ระดับนี้คิดเป็นค่า Swirl number (Sn) ได้เท่ากับ 0, 0.04, 0.07 และ 0.12 ตามลำดับ และเนื่องจากในการศึกษาวิจัยนี้ได้ใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) ในการทำให้เกิดการหมุนควง จึงทำให้ผลรวมของค่า Circulation ที่ปากเจ็ตในกรณีที่มีการหมุนควงมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้จะมีผลรวม Circulation รอบปากเจ็ต ($\Gamma = w_p l$) ของการหมุนควงทั้ง 4 ระดับมีค่าเป็น 0 (ไม่มีการหมุนควง), 0.14, 0.42 และ 0.67 m^2/s โดยในส่วนของรายละเอียดของปริมาณต่างๆในแต่ละกรณีนั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 และเพื่อความสะดวกในการกล่าวถึงกรณีการทดลองในลำดับต่อไป ผู้วิจัยจะใช้สัญลักษณ์ xx แทนตัวเลขในกรณีการทดลองของการไหลในแต่ละลักษณะ โดย Sr_{xx} นั้นจะใช้แทนกรณีการทดลองการไหลแบบเจ็ตหมุนควงอิสระ (กรณีการทดลองที่ไม่มีกระแสสวนทวน) และ Sr_{xxcf} แทนกรณีการทดลองของการไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสสวนทวน (กรณีการทดลองที่มีกระแสสวนทวนร่วมอยู่)

สำหรับการทดลองในทุกกรณีนั้น (Sr_{xx} , Sr_{xxcf}) ได้ทำการทดลองที่ความเร็วของเจ็ตมีค่าคงที่ ซึ่งพิจารณาจากค่าเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area average) ซึ่งนิยามจาก

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

โดยในทุกกรณีการทดลองจะทำให้ \bar{u}_j มีค่าประมาณ 9.88 เมตรต่อวินาที มีความเร็วที่จุดกึ่งกลาง ($u_{j,c}$) ประมาณ 12.6 เมตรต่อวินาที และมีอุณหภูมิของเจ็ตซึ่งพิจารณาจากค่าเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area average) ซึ่งนิยามจาก

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

โดยในทุกกรณีการทดลองจะมีค่า \bar{T}_j ประมาณ 76.8 °C มีอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลาง ($T_{j,c}$) ประมาณ 81.5 °C และมีค่า Reynolds number ของเจ็ต ($Re_j = \bar{u}_j d / \nu$) ประมาณ 10,000

สำหรับกรณีการทดลองที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่นั้น (Sr_{xxcf}) จะทำการทดลองโดยให้สถานะการไหลของกระแสลมทวนที่หน้าตัดอ้างอิงมีค่าคงที่ประมาณเท่ากันในทุกกรณี ซึ่งที่ตำแหน่งหน้าตัดอ้างอิงนี้จะมีระยะห่างจากปากทางเข้าของ Test section (X) 20 เซนติเมตร ($X = 20$ cm หรือ $x = 200$ cm) ดังแสดงในรูปที่ ข.3 ในภาคผนวก ข. โดยในการทดลองได้ใช้ความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมทวน ($|\bar{u}_{cf}|$) ที่หน้าตัดอ้างอิงประมาณ 1.98 เมตรต่อวินาที มีอุณหภูมิของกระแสลมทวน (T_{cf}) ประมาณ 30.3 °C และมีค่า Reynolds number ของกระแสลมทวน ($Re_{cf} = |\bar{u}_{cf}| B / \nu$) ประมาณ 58,000 โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล ($r = (\rho_j \bar{u}_j^2 / \rho_{cf} \bar{u}_{cf}^2)^{1/2}$) มีค่าคงที่ที่ประมาณ 4.62, อัตราส่วนความเร็ว ($r_v = \bar{u}_j / |\bar{u}_{cf}|$) ประมาณ 4.97 และ อัตราส่วนความหนาแน่น ($r_d = \rho_j / \rho_{cf}$) ประมาณ 0.87 สำหรับรายละเอียดของสถานะการทดลองและความคลาดเคลื่อนในแต่ละกรณีทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

เนื่องจากการให้ความร้อนกับเจ็ตอากาศทำให้มีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของเจ็ตและกระแสลมทวน ดังนั้นจึงพิจารณาผลของแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นจากค่า Densimetric Froude number (Fr) ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวของเจ็ตอากาศกับแรงเฉื่อยของกระแสลมทวนโดย

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

ซึ่งในการทดลองมีค่า Fr เท่ากับ 0.09 และค่า Fr/r ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวของเจ็ตอากาศกับแรงเฉื่อยของเจ็ตอากาศโดย

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

ซึ่งในการทดลองมีค่า Fr/r เท่ากับ 0.02 นั่นคือผลของแรงลอยตัวเนื่องจากเจ็ตร้อนนั้นมีค่าประมาณ 9% ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของกระแสลมทวนและมีค่าประมาณ 2% ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของเจ็ทที่บริเวณปากทางออก

2.4 วิธีการทดลองและอุปกรณ์การวัด

การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือการวัดสภาวะเริ่มต้นและการวัดคุณลักษณะการกระจายของอุณหภูมิโดยเฉลี่ย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 การวัดสภาวะเริ่มต้น

การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมทวน

การวัดสภาวะเริ่มต้นของกระแสลมทวนในการศึกษานี้ ประกอบไปด้วยการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วภายในหน้าตัดทดสอบ และการวัดความหนาของชั้นขอบเขตที่ผนังทั้ง 4 ด้านของหน้าตัดทดสอบ

สำหรับการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วกระแสลมทวนภายในหน้าตัดทดสอบ (Test section) จะวัดเป็นเมตริกซ์ขนาด 9 จุด \times 9 จุด แต่ละจุดห่างกัน 5 เซนติเมตร โดยทำการวัดที่ตำแหน่งหน้าปากเจ็ท 40 เซนติเมตร ($x = 40$ cm หรือ $x/d = 19d$) ที่ความเร็วกระแสลมทวนเฉลี่ยภายในหน้าตัดทดสอบที่หน้าตัดอ้างอิง ($x = 200$ cm) มีค่าประมาณ 1.98 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วที่ใช้ทดลองในกรณีที่มีกระแสลมทวน (Sr_{xxcf}) ในการทดลองได้ใช้ Pitot probe (แบบ A) ดังรูป Schematic ในรูปที่ 2.16ก และภาพถ่ายในรูปที่ 2.17ก เป็นเครื่องมือในการวัด โดยวัดเทียบกับความดันสถิตที่ตำแหน่ง $x = 40$ cm ผ่าน Pressure tab ที่ทำจากท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 2.2 mm หนา 0.5 mm ยาว 3 cm สำหรับ Probe ดังกล่าวทำขึ้นจากท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 3 มิลลิเมตร คัดโค้งให้เป็นมุมฉาก ให้มีระยะจากปลาย Probe ถึงแนวก้าน 90 มิลลิเมตร (18 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของปลาย Probe) และมีก้าน

Probe ยาว 120 เซนติเมตร ความดันที่วัดได้จาก Pitot probe นี้จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer ชนิด Differential ยี่ห้อ SETRA รุ่น 264 ที่มีช่วงการวัดความดันขาเข้า ± 0.05 นิ้วน้ำ และแปลงเป็นช่วงแรงดันไฟฟ้าด้านทางออกได้ 0-5 Volts มีความถูกต้อง (Accuracy) เท่ากับ $\pm 0.5\%$ Full scale ดังรูปที่ 2.18ก จากนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าจะถูกอ่านเป็นค่าเฉลี่ยโดยใช้ Digital multimeter ยี่ห้อ Fluke รุ่น 19 ดังรูปที่ 2.18ข ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้นี้จะถูกนำมาแปลงกลับให้เป็นความดันจลน์ (Dynamic Pressure) ของการไหล ซึ่งจะนำมาใช้หาความเร็วของการไหลได้

สำหรับการวัดความหนาของชั้นขอบเขตนั้นจะวัดตามแนว Transverse ออกจากผนัง ที่บริเวณกึ่งกลางผนังทั้ง 4 ด้านของหน้าตัดทดสอบ ที่ระยะ $x = 40$ เซนติเมตร โดยทำการวัดที่ความเร็วกระแสสทวนเฉลี่ยบริเวณตำแหน่งอ้างอิงมีค่าประมาณ 1.98 เมตรต่อวินาที (สภาวะเดียวกับการวัดความสม่ำเสมอของความเร็ว) โดยใช้ความละเอียด (Resolution) ในการวัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ในส่วนของเครื่องมือวัดนั้นได้ใช้ Pitot probe (แบบ B) ดังรูป Schematic ในรูปที่ 2.16ข และภาพถ่ายในรูปที่ 2.17ข เป็นเครื่องมือในการวัด โดยวัดเทียบกับความดันสถิตของ Pressure tap ที่ตำแหน่ง $x = 40$ cm สำหรับ Probe ดังกล่าวทำขึ้นจากเข็มสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 1.2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.8 มิลลิเมตร ดัดโค้งเป็นมุมฉาก ให้มีระยะจากปลายเข็มถึงแนวก้าน 45 มิลลิเมตร (38 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของเข็ม) เข็มสแตนเลสจะถูกต่อเข้ากับท่อทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3.2 มิลลิเมตร ยาว 80 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นก้าน Probe ทำให้มีความยาวรวมของก้าน Probe ประมาณ 87 เซนติเมตร สำหรับความดันที่วัดได้จาก Pitot probe นี้จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer ยี่ห้อ SETRA รุ่น 264 และอ่านค่าโดยใช้ Digital multimeter ยี่ห้อ Fluke รุ่น 19 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ชุดเดียวกับที่ใช้ในการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วกระแสสทวน ดังแสดงในรูปที่ 2.18ก และ 2.18ข ตามลำดับ

การวัดสถานะเริ่มต้นของเจ็ต

ในส่วนของสถานะเริ่มต้นของเจ็ตนั้นจะทำการวัดเมื่อพารามิเตอร์ทุกอย่างในการทดลองมีสถานะที่คงที่ (Steady state) ตามที่กำหนดไว้ในแต่ละกรณี โดยได้กำหนดให้อุณหภูมิที่กึ่งกลางปากเจ็ตของทุกกรณีมีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 81 องศาเซลเซียส สำหรับการวัดสถานะเริ่มต้นของเจ็ตนั้นประกอบไปด้วยการวัดการกระจายของความเร็วและการวัดอุณหภูมิ ซึ่งจะทำการวัดที่ตำแหน่งปากทางออกของเจ็ต ($x/d = 0$) โดยใช้ Pitot probe และ Yaw probe ในการวัดความเร็ว และใช้ Thermocouple ในการวัดอุณหภูมิ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สำหรับการวัดความเร็วในกรณีที่ไม่มีการหมุนควง ($Sr=0$ และ $Sr=0cf$) จะใช้ Pitot probe ในการวัดความเร็วในแนวแกน (u) ที่ตำแหน่งปากทางออกของเจ็ต โดยใส่ Probe เข้าทางด้านบนของหน้าตัดทดสอบ (ผนังด้าน $+y$) และวัดไปตามแนว y ดังรูปที่ 2.19 และใช้ความละเอียดในการวัด (Resolution) เท่ากับ 1 มิลลิเมตร สำหรับ Pitot probe (แบบ C) ที่ใช้ในการวัดนั้น ได้แสดงเป็นลักษณะ Schematic ในรูปที่ 2.16ค และภาพถ่ายในรูปที่ 2.17ค โดยวัดเทียบกับความดันสถิตของ Pressure tap ที่ตำแหน่งปากเจ็ต สำหรับ Probe ดังกล่าวทำขึ้นจากเข็มสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 1.2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.8 มิลลิเมตร คัดโค้งเป็นมุมฉาก ให้มีระยะจากปลายเข็มถึงแนวก้าน 35 มิลลิเมตร (29 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของเข็ม) เข็มสแตนเลสจะถูกต่อเข้ากับท่อทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3.2 มิลลิเมตร ยาว 50 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นก้าน Probe ทำให้มีความยาวรวมของก้าน Probe 54 เซนติเมตร ซึ่งความดันที่วัดได้จาก Pitot probe จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดย Pressure transducer ยี่ห้อ SETRA รุ่น 264 ที่มีช่วงการวัดความดันขาเข้า ± 0.5 นิ้วน้ำ และแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าด้านทางออกได้ 0-5 volt แรงดันไฟฟ้าที่ได้นี้จะถูกอ่านเป็นค่าเฉลี่ยโดยใช้ Digital multimeter ยี่ห้อ Fluke รุ่น 19 ซึ่งเป็นตัวเดียวกับที่ใช้ในการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วของกระแสลมทวน ดังแสดงในรูปที่ 2.18ข

สำหรับการวัดความเร็วในกรณีที่มีการหมุนควง ($Sr=11$, $Sr=22$, $Sr=33$, $Sr=11cf$, $Sr=22cf$ และ $Sr=33cf$) ได้ใช้ Yaw probe แบบ Three-tube cobra probe ลักษณะเดียวกับของ Chue (1975) ในการวัดความเร็วตามแนวแกน (u) และความเร็วตามแนวสัมผัส (w) โดยใส่ Probe เข้าทางผนังด้านบนของหน้าตัดทดสอบ (ผนังด้าน $+y$) และทำการวัดตามแนว y ในลักษณะเดียวกับการวัดความเร็วที่ไม่มีการหมุนควง ดังในรูป 2.19 โดยใช้ความละเอียด (Resolution) ในการวัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ในส่วนของ Yaw probe ที่ใช้นั้นแสดงดังรูป Schematic ในรูปที่ 2.16ง และภาพถ่ายในรูปที่ 2.17ง ทำขึ้นจากเข็มสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 0.5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางใน 0.32 มิลลิเมตร จำนวน 3 อันยึดติดกัน โดยเข็มด้านข้างทั้ง 2 ด้านถูกฝนให้มีมุมเอียง (α) เท่ากับ 30 องศา และคัดโค้งเป็นมุมฉาก ให้มีระยะจากปลายเข็มถึงแนวก้าน 32 มิลลิเมตร ก้านเข็มสแตนเลสแต่ละก้านถูกต่อเข้ากับท่อทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3.2 มิลลิเมตร หนา 0.5 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นก้าน Probe ทำให้ก้าน Probe มีความยาวรวม 77 เซนติเมตร ซึ่งความดันแตกต่างที่วัดได้จาก Yaw probe จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ Pressure transducer ยี่ห้อ SETRA รุ่น 247 ที่มีช่วงการวัดความดันขาเข้า ± 0.5 นิ้วน้ำและอ่านค่าเฉลี่ยโดยใช้ Digital multimeter ยี่ห้อ Fluke รุ่น 19 ดังแสดงในรูปที่ 2.18ข (ตัวเดียวกับที่ใช้ในการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วของกระแสลมทวน) ซึ่ง Yaw probe ที่ทำขึ้นนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับ Pitot-Static Probe แบบมาตรฐานที่ความเร็ว 12 และ 15 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิตั้ง และเนื่องจากเป็นการวัดเจ็ตอากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิตั้ง ดังนั้นในการคำนวณความเร็วจึงได้พิจารณาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเนื่องจากอุณหภูมิของเจ็ตอากาศดังกล่าวด้วย โดยแสดงรายละเอียดของการเปรียบเทียบและการ

คำนวณความเร็วในภาคผนวก ค สำหรับการวัดความเร็วรอบของท่อหมุนได้ใช้ Optical tachometer ยี่ห้อ SKF รุ่น TMOT6 ดังแสดงในรูปที่ 2.18

สำหรับการวัดอุณหภูมิของสภาวะเริ่มต้นนั้น ได้ใช้ Thermocouple probe เป็นอุปกรณ์การวัด โดยใส่ Probe เข้าทางผนังด้านบนของหน้าตัดทดสอบ และทำการวัดตามแนว y ในลักษณะเดียวกับการวัดความเร็วสภาวะเริ่มต้นที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.19 สำหรับ Thermocouple probe (แบบ A) ที่ใช้นั้นได้แสดงเป็นลักษณะ Schematic ดังรูปที่ 2.20 และภาพถ่ายในรูปที่ 2.21 ก มีก้าน Probe ทำจากท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5 มิลลิเมตร มีความยาวรวม 70 เซนติเมตร สำหรับส่วนปลายของ Probe ทำจากท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3.2 มิลลิเมตร ถูกดัดโค้งให้เป็นมุมฉาก และมีระยะจากปลาย Probe ถึงแนวก้าน 7 เซนติเมตร สำหรับ Thermocouple probe นี้จะมี Sensor เป็นลวด Thermocouple ชนิด Type K (Chromel-alumel) ยี่ห้อ OMEGA รุ่น TT-K-24 ที่มีช่วงของการวัดอุณหภูมิอยู่ระหว่าง -200 ถึง 1372 องศาเซลเซียส ลวด Thermocouple นี้จะถูกสอดเข้าไปใน Probe โดยให้ปลายลวด Thermocouple ที่เป็นจุดวัดอุณหภูมิอยู่เลยออกมาจากปลาย Probe ประมาณ 6 มิลลิเมตร เพื่อไม่ให้ปลาย Probe ส่งผลกระทบต่อกรรไกร ซึ่งสัญญาณที่ได้จากลวด Thermocouple นี้จะถูกส่งเข้าไปในตัวอ่านค่าอุณหภูมิ (Thermocouple thermometer) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 52-2 ดังรูปที่ 2.22 มีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 0.1 องศาเซลเซียส สำหรับค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของเครื่องมือวัดนี้ถูกจำกัดโดยลวด Thermocouple ซึ่งมีค่าประมาณ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ที่อุณหภูมิสูงสุดที่ทำการทดลองคือประมาณ 81°C และได้ทำการสอบเทียบ (Calibrate) Thermocouple ดังกล่าวกับอุปกรณ์มาตรฐานคือ Thermometer ในอ่างน้ำทำความร้อน โดยทำการสอบเทียบทุก 2 องศาเซลเซียส ดังแสดงผลการสอบเทียบดังรูปที่ 2.23 จากผลที่ได้พบว่าอุณหภูมิที่อ่านได้จาก Thermocouple มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิที่อ่านได้จากอุปกรณ์มาตรฐาน โดยมีความชันของกราฟเท่ากับ 1 และระยะตัดแกนเท่ากับ 0.25

2.4.2 การวัดคุณลักษณะการกระจายของอุณหภูมิโดยเฉลี่ย

การวัดคุณลักษณะการกระจายของอุณหภูมิโดยเฉลี่ยในการศึกษานี้ ประกอบไปด้วยการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นหน้าตัด และการวัดการลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกนของเจ็ต โดยได้ทำการวัดทั้งสองลักษณะนี้ในทุกกรณีการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นหน้าตัดนั้น ทำขึ้นเพื่อศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัวและการผสมของเจ็ดหมุนควงในกระแสนวนโดยละเอียด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดการกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัดบนระนาบ $y-z$ ที่ระยะ x/d ต่างๆ จำนวน 8 หน้าตัดในทุกๆ กรณีการทดลอง คือที่ระยะ x/d เท่ากับ 1.5, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 โดยทำการวัดเป็นเมตริกจตุรัส ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ซึ่งใช้ความละเอียดในการวัด (Resolution) แตกต่างกันไปตามขนาดการกระจายตัวของเจ็ดอากาศในแต่ละหน้าตัด สำหรับความละเอียดและจำนวนจุดที่ได้ทำการวัดในแต่ละหน้าตัดทดลองนั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 และเพื่อความสะดวกรวดเร็วในการวัดอุณหภูมิเป็นเมตริกในลักษณะดังกล่าว จึงได้จัดทำ Thermocouple probe แบบ B ที่สามารถวัดอุณหภูมิได้คราวละหลายๆ จุด ดังที่ได้แสดงเป็นลักษณะ Schematic ในรูปที่ 2.20ข และภาพถ่ายในรูปที่ 2.21ข โดยมีก้าน Probe ทำจากท่อสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6 มิลลิเมตร มีความยาวรวม 80 เซนติเมตร สำหรับส่วนปลายของ Probe ทำขึ้นจากเข็มสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1 มิลลิเมตร ยาว 10 เซนติเมตร จำนวน 11 อัน วางเรียงในแนวเดียวกัน โดยแต่ละอันห่างกัน 1 เซนติเมตร และทำมุมฉากกับก้าน Probe สำหรับ Thermocouple probe นี้จะมี Sensor เป็นลวด Thermocouple ชนิด Type T (Copper-Constantan) ยี่ห้อ OMEGA รุ่น TT-T-30 ที่มีช่วงของการวัดอุณหภูมิอยู่ระหว่าง -250 ถึง 400 องศาเซลเซียส ซึ่งลวด Thermocouple นี้จะถูกร้อยอยู่ใน Probe โดยร้อยผ่านเข็มสแตนเลสแต่ละอัน ให้ปลายของ Thermocouple ที่ใช้เป็นจุดวัดอุณหภูมิอยู่เลยจากปลายของ Probe ประมาณ 3 มิลลิเมตร เพื่อลดผลกระทบจากปลาย Probe ที่จะมีต่อการไหลในการวัดจะทำโดยใส่ Probe เข้าทางผนังด้านข้างของหน้าตัดทดสอบ (ผนังด้าน $+z$) ทำการวัดโดยเลื่อน Probe ไปตามแนวแกน y และแนวแกน z ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.25 เพื่อให้ได้ตำแหน่งของการวัดตรงตาม Resolution ที่กำหนดไว้ ซึ่งได้ทำการวัดในลักษณะดังกล่าวที่ทุกหน้าตัดการทดลอง สำหรับสัญญาณที่ได้จากลวด Thermocouple ในแต่ละเส้นจะถูกอ่านค่าโดยใช้ตัวอ่านค่าอุณหภูมิยี่ห้อ Fluke รุ่น 52-2 ซึ่งเป็นตัวเดียวกับที่ใช้ในการวัดสถานะเริ่มต้นของอุณหภูมิที่ปากเจ็ด โดยจะทำการอ่านค่าจากสาย Thermocouple ที่ละเส้นจนครบ

นอกจากนี้ในการทดลองยังได้จัดสร้าง Thermocouple probe แบบ C ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า Thermocouple probe แบบ B ดังแสดงเป็นลักษณะ Schematic ในรูปที่ 2.20ค และภาพถ่ายในรูป 2.21ค โดยมีก้าน Probe ทำจากท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6 มิลลิเมตร และมีความยาวรวม 90 เซนติเมตร สำหรับส่วนปลายของ Probe ทำจากเข็มสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.2 มิลลิเมตร ต่อเข้ากับท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3.2 มิลลิเมตร โดยส่วนปลาย Probe ได้ถูกดัดงอให้เป็นรูปตัวแอลยื่นออกจากแนวแกน 11 เซนติเมตร สำหรับ Thermocouple probe นี้มี Sensor เป็นลวด Thermocouple ชนิด Type T (Copper-Constantan) ยี่ห้อ OMEGA รุ่น TT-T-30 ร้อยอยู่ใน โดยให้จุดปลายของ Thermocouple ที่ใช้วัดอุณหภูมิอยู่เลยจากปลายของ Probe ประมาณ 3 มิลลิเมตร ซึ่ง Thermocouple probe แบบ C นี้จัดทำ

ขึ้นเพื่อใช้ตรวจสอบค่าที่วัดได้จาก Thermocouple probe แบบ B ที่มีขนาดของ Probe ใหญ่กว่า และมีจำนวนจุดวัดมากกว่าแบบ C เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบเนื่องจากขนาดและรูปร่างของ Thermocouple probe แบบ B ที่มีต่อการไหลโดยรวม โดยในการตรวจสอบได้ใช้ Thermocouple แบบ C มาทำการวัดตรวจสอบค่าอุณหภูมิเป็นบางจุด ซึ่งในการวัดตรวจสอบนี้จะทำเฉพาะในการทดลองกรณีที่มีกระแสลมทวน และนำค่าที่วัดได้นี้ไปเปรียบเทียบกับผลของอุณหภูมิที่วัดโดยใช้ Thermocouple probe แบบ B จากผลการวัดตรวจสอบพบว่า ขนาดและรูปร่างของ Thermocouple probe แบบ B นั้นส่งผลกระทบต่อลักษณะการไหลโดยรวมเพียงเล็กน้อย โดยคิดเป็นค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก Thermocouple แบบ C พบว่ามีค่าแตกต่างกันไม่เกิน $\pm 5\%$ ของค่าเป็น $^{\circ}\text{C}$ ในทุกกรณีการทดลอง ดังที่ได้แสดงผลโดยละเอียดในภาคผนวก ง

ในส่วนของการสอบเทียบ Thermocouple probe แบบ B และ แบบ C กับ Thermometer มาตรฐานนั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.23ข และ 2.23ค ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่อ่านได้จาก Thermocouple probe ทั้งสองแบบมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิที่อ่านได้จาก Thermometer มาตรฐาน โดยผลของ Thermocouple probe แบบ B ในรูป 2.23ข นั้นพบว่า ผลการสอบเทียบ Thermocouple ทั้ง 11 เส้นจะมีความชันของกราฟประมาณเท่ากับ 1 โดยมีระยะตัดแกนของ Thermocouple ทุกเส้นอยู่ในช่วง -0.09 ถึง -0.22°C สำหรับผลของ Thermocouple แบบ C ในรูป 2.23ค นั้นพบว่า จะมีความชันของกราฟเท่ากับ 1 เช่นกัน และมีระยะตัดแกนเท่ากับ -0.1

สำหรับการวัดการลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกนนั้น วัดเพื่อศึกษาถึงอัตราการลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกนโดยละเอียด เพื่อนำผลที่ได้นี้มาตรวจสอบและสนับสนุนผลการวัดการกระจายตัวเป็นหน้าตัด โดยในการวัดได้ใช้ Thermocouple probe แบบ C และตัวอ่านอุณหภูมิจี่ห้อ Fluke 52-2 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเป็นเครื่องมือในการวัด ซึ่งจะทำการวัดโดยใช้ Probe เข้าทางผนังด้านซ้ายของหน้าตัดทดสอบ (ผนังด้าน $+z$) แล้วเลื่อน Probe ไปตามแนวแกน x ในลักษณะที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.26 โดยจะทำการวัดตั้งแต่ระยะ x/d เท่ากับ 0 (ปากทางออกของเจ็ต) ไปจนถึงระยะ x/d เท่ากับ 20 และใช้ความละเอียดในการวัด (Resolution) เท่ากับ 10.7 มิลลิเมตร ($0.5d$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ผลการทดลอง

ผลการทดลองในการศึกษาวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นผลการวัดสถานะเริ่มต้นในการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วยสถานะเริ่มต้นของกระแสลมทวนที่ถูกสร้างขึ้นจากอุโมงค์ลม และสถานะเริ่มต้นของเจ็ตอากาศที่ปากทางออก ส่วนที่สองเป็นผลการศึกษาลักษณะเฉพาะหน้าตัด (Local characteristics) ซึ่งพิจารณาจากลักษณะการกระจายของอนุภาคน้ำในแตละหน้าตัด และส่วนที่สามเป็นผลการศึกษาลักษณะโดยรวม (Global characteristics) ซึ่งพิจารณาจากระยะที่ไปได้ไกลที่สุดของเจ็ต (Penetration depth) อัตราการลดลงตามแนวแกน (Decay rate) การกระจายตัว (Spreading) และอัตราการกระจายตัว (Spread rate) ของการไหล โดยผลในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ผลการวัดสถานะเริ่มต้น

3.1.1 ผลการวัดสถานะเริ่มต้นของกระแสลมทวน

รูปที่ 3.1 แสดงผลการวัดความสม่ำเสมอของความเร็วกระแสลมทวน ($|u_{cf}|$) ภายใน Test section ที่ตำแหน่งถัดจากปากเจ็ต 40 เซนติเมตร ($x = 40$ cm) ซึ่งเป็นตำแหน่งหน้าตัดด้านท้ายของบริเวณที่ใช้ในการศึกษาวิจัย (บริเวณที่ใช้ในการศึกษาวิจัยอยู่ในช่วง $x = 0$ ถึง 40 cm) โดยในการทดลองได้ใช้ความเร็วของกระแสลมทวนภายในหน้าตัดทดสอบที่ตำแหน่งอ้างอิงเท่ากับ 1.98 เมตรต่อวินาที และทำการวัดความเร็วของกระแสลมทวน ($|u_{cf}|$) ที่นอกชั้นขอบเขตของผนัง Test section โดยวัดเป็นเมตริกซ์ขนาด 9 จุด \times 9 จุด มีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 5 เซนติเมตร \times 5 เซนติเมตร สำหรับการแสดงผลในรูปที่ 3.1 นั้นได้ใช้กรอบด้านนอก (เส้นทึบ) แสดงผนังของหน้าตัดทดสอบทั้ง 4 ด้าน และกรอบด้านใน (เส้นประ) แสดงบริเวณพื้นที่หน้าตัดที่ครอบคลุมการทดลองทั้งหมดในการศึกษาวิจัย ซึ่งมีขนาดประมาณ $12d \times 12d$ จากผลการทดลองพบว่า ในบริเวณพื้นที่ครอบคลุมการทดลอง (เส้นประ) จะมีความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมทวน ($\bar{|u_{cf}|}$) อยู่ในช่วงประมาณ 1.93 ± 0.02 เมตรต่อวินาที หรือมีค่าความไม่สม่ำเสมอ (Non-uniformity) อยู่ในช่วง $\pm 1\%$ ของความเร็วเฉลี่ยกระแสลมทวน

รูปที่ 3.2 แสดงชั้นขอบเขต (Boundary layer) บนผนังทั้ง 4 ด้าน ซึ่งได้ทำการทดลองที่ความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมทวนภายในหน้าตัดทดสอบเท่ากับ 1.98 เมตรต่อวินาที (สภาวะเดียวกับการวัดความสม่ำเสมอของความเร็ว) โดยในการทดลองได้ทำการวัดความเร็วของกระแสลมทวนที่ระยะห่างต่างๆจากผนัง (Distance from wall, D_w) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางผนังทั้ง 4 ด้าน บนหน้าตัด $x = 40$ เซนติเมตร (หน้าตัดเดียวกับการวัดความสม่ำเสมอของความเร็ว) โดยเริ่มวัดจากตำแหน่งติดผนังก่อน ($D_w = 0$) ต่อจากนั้นจะเพิ่มระยะห่างจากผนังขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งถึงบริเวณที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วเฉลี่ยของกระแสลมทวน ซึ่งได้ผลการวัดชั้นขอบเขตดังนี้

รูปที่ 3.2ก แสดงรูปร่างการกระจายตัวของความเร็วภายในชั้นขอบเขตและความหนาของชั้นขอบเขต ($\delta_{0.95}$) บนผนังทั้ง 4 ด้าน ที่ตำแหน่ง $x = 40$ เซนติเมตร โดยนิยามให้ $\delta_{0.95}$ เป็นระยะห่างจากผนัง (D_w) ที่ทำให้ขนาดความเร็วของกระแสลมทวน ($|u_{cf}|$) มีค่าเป็น 95% ของขนาดความเร็วกระแสลมทวนเฉลี่ยนอกชั้นขอบเขตการไหล ($|\bar{u}_{cf}|$) จากผลการทดลองพบว่า ค่า $\delta_{0.95}$ บนผนังทั้ง 4 ด้านจะมีความหนาไม่เกิน 25 มิลลิเมตร โดยที่ผนังด้านล่างจะมีค่า $\delta_{0.95}$ มากที่สุด คือมีความหนาประมาณ 24 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผนังด้านบนที่มีค่า $\delta_{0.95}$ ประมาณ 23 มิลลิเมตร สำหรับผนังด้านขวาและด้านซ้ายนั้นจะมีค่า $\delta_{0.95}$ ประมาณ 19 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ผนังด้านขวาและด้านซ้ายจะมีความหนาของชั้นขอบเขตน้อยกว่าที่ผนังด้านบนและด้านล่างของหน้าตัดทดสอบ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากตรงบริเวณที่ทำการทดลอง (ที่หน้าตัด $x = 40$ cm) กระแสลมได้ไหลผ่านช่องเปิดด้านข้าง (ด้านซ้ายและด้านขวา) ของ Test section มาแล้วช่วงหนึ่ง ก่อนที่จะไหลผ่านมายังบริเวณที่ทำการทดลอง (ตำแหน่งของช่องเปิดแสดงไว้ในรูปที่ 2.6) การไหลผ่านช่องเปิดนี้จะทำให้ชั้นขอบเขตและกระแสลมทวนส่วนหนึ่งไหลออกไปนอก Test section หรืออีกนัยหนึ่งเกิดการ Suction ของชั้นขอบเขต จึงทำให้การพัฒนาความหนาชั้นขอบเขตบนผนังด้านข้างของ Test section ต้องหยุดชะงักลง และจะเริ่มมีการพัฒนาความหนาขึ้นใหม่อีกครั้งเมื่อกระแสลมทวนได้ไหลผ่านช่องเปิดไปเรียบร้อยแล้ว แต่สำหรับที่ผนังด้านบนและผนังด้านล่างของ Test section ที่ไม่ได้ทำการเจาะช่องเปิดไว้ ความหนาของชั้นขอบเขตจะมีการพัฒนาตัวมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปากทางเข้าของ Test section ไปจนถึงบริเวณที่ทำการทดลอง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ชั้นขอบเขตที่ผนังทั้งด้านบนและด้านล่างของ Test section มีความหนามากกว่าที่ผนังด้านข้างอย่างเห็นได้ชัด สำหรับความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างความหนาชั้นขอบเขตบนผนังด้านข้างของ Test section นั้น สันนิษฐานว่าเกิดจากความไม่สมมาตรในการจัดสร้างช่องเปิด โดยอาจจะมิขนาดและตำแหน่งของช่องเปิดบนผนังทั้งสองด้านไม่เท่ากัน

รูปที่ 3.2ข แสดงรูปร่างของชั้นขอบเขตบนผนังหน้าตัดทดสอบทั้ง 4 ด้าน โดยแสดงอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติระหว่างค่า $D_w/\delta_{0.95}$ กับ $|u_{cf}|/\bar{u}_{cf}|$ เพื่อพิจารณาให้เห็นถึงรูปร่างการไหลภายในชั้นขอบเขต โดยได้นำไปเปรียบเทียบกับผลเฉลยของ Blasius สำหรับรูปร่างการไหลแบบ

Laminar และผลเฉลยในรูปแบบ 1/7-Power law สำหรับรูปร่างการไหลแบบ Turbulent จากผลการทดลองพบว่า รูปร่างการไหลภายในชั้นขอบเขตบนผนัง Test section ทั้ง 4 ด้าน มีความสอดคล้องกับผลเฉลยในรูปแบบ 1/7-Power law กล่าวคือที่ผนังทั้ง 4 ด้านมีลักษณะชั้นขอบเขตของการไหลเป็นแบบ Turbulent

3.1.2 ผลการวัดสถานะเริ่มต้นของเจ็ต

สำหรับสถานะเริ่มต้นของเจ็ตได้ทำการวัดการกระจายของความเร็วในแนวแกน (u), ความเร็วในแนวสัมผัส (w) (ในกรณีที่มีการหมุนควง) และการกระจายของอุณหภูมิ ตามแนวรัศมีของเจ็ต โดยมีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 3.3ก แสดงผลการวัดการกระจายของความเร็วในแนวแกน (u) ตามแนวรัศมี (r) ที่ตำแหน่งปากทางออกของเจ็ต จากผลการทดลองพบว่า การไหลของเจ็ตในแต่ละกรณีการทดลองจะมีขนาดของความเร็วแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยมีความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ (\bar{u}_j) ประมาณ 9.88 ± 0.4 เมตรต่อวินาที หรือมีค่าความแตกต่างระหว่างกรณีไม่เกิน $\pm 4\%$ และมีความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของเจ็ต (u_{max}) ประมาณ 12.6 ± 0.3 เมตรต่อวินาที หรือมีค่าความแตกต่างไม่เกิน $\pm 2\%$ โดยในทุกกรณีการทดลองจะมีค่า Reynolds number ของเจ็ต (Re_j) ประมาณ 10,000 สำหรับกรณี $Sr=0$ และ $Sr=0.5$ ที่ใช้ Pitot Probe เป็นเครื่องมือในวัดความเร็วจะมีค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ในการวัดประมาณ ± 0.1 เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็น $\pm 1.2\%$ ของความเร็วเฉลี่ยเจ็ต (แสดงการคำนวณในภาคผนวก จ.)

รูปที่ 3.3ข แสดงรูปร่างความเร็วตามแนวแกนของเจ็ตอากาศที่ตำแหน่งปากทางออก โดยแสดงอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติระหว่างค่า u/u_{max} กับ r/R โดยที่ R คือ รัศมีของปากเจ็ตมีค่าเท่ากับ 10.7 มิลลิเมตร ผลที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลเฉลยของการไหลภายในท่อที่พัฒนาตัวอย่างเต็มที่แล้วทั้งแบบ Laminar (Laminar fully-developed flow) และแบบ Turbulent (Turbulent fully-developed flow) โดยผลเฉลยการไหลแบบ Laminar fully-developed flow จะเป็นดังสมการ

$$\frac{u}{u_{max}} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (3.1)$$

และผลเฉลยการไหลแบบ Turbulent fully-developed flow เป็นดังสมการ

$$\frac{u}{u_{max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.2)$$

ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า รูปร่างความเร็วของเจ็ตอากาศที่ตำแหน่งปากทางออกในแต่ละกรณีจะมีลักษณะการไหลที่คล้ายคลึงกัน โดยมีรูปร่างความเร็วสอดคล้องกับผลเฉลยการไหลแบบ Turbulent fully-developed flow ดังสมการที่ 3.2 ซึ่งมีค่า n เฉลี่ยที่ได้จากการ Fit สมการในแต่ละกรณีการทดลองมีค่าเท่ากับ 7

จากกราฟรูปที่ 3.3x นี้มีข้อสังเกตประการหนึ่งคือ ในกรณีการไหลที่มีการหมุนควงนั้น ความเร็วที่บริเวณใกล้ผนังท่อจะมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ไม่มีการหมุนควง หรืออีกนัยหนึ่ง การไหลในกรณีที่มีการหมุนควงจะมีรูปร่างความเร็วใกล้เคียงกับการไหลแบบ Laminar flow มากกว่า ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเกิดจากผลของการหมุนควงที่ไประงับ Turbulent fluctuation จึงส่งผลให้รูปร่างความเร็วของการไหลมีลักษณะคล้าย Laminar flow มากขึ้น (Nishibori et al., 1987)

รูปที่ 3.4ก แสดงผลการวัดการกระจายของความเร็วในแนวสัมผัส (w) ตามแนวรัศมี (r) ที่ตำแหน่งปากทางออกของเจ็ต โดยทำการวัดในกรณีการทดลองที่มีการหมุนควง ซึ่งประกอบไปด้วยกรณี $Sr11$, $Sr22$, $Sr33$, $Sr11cf$, $Sr22cf$ และ $Sr33cf$ จากผลการทดลองพบว่า การกระจายของความเร็วในแนวสัมผัสในแต่ละกรณีจะมีค่าแตกต่างกันไปตามระดับของการหมุนควง ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองที่ระดับการหมุนควงทั้งหมด 3 ระดับด้วยกันคือ 1) ที่ Sr (Swirl ratio) = 0.11 ในกรณี $Sr11$ และ $Sr11cf$, 2) ที่ $Sr = 0.22$ ในกรณี $Sr22$ และ $Sr22cf$ และ 3) ที่ $Sr = 0.33$ ในกรณี $Sr33$ และ $Sr33cf$ โดยในทุกกรณีการทดลองจะมีค่าความเร็วในแนวสัมผัสประมาณเท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของปากท่อ ($r = 0$) และจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะในแนวรัศมี (r) จนกระทั่งมีความเร็วเท่ากับความเร็วตามแนวสัมผัสของท่อ (w_p) เมื่อมีระยะตามแนวรัศมีเท่ากับรัศมีของปากท่อ ($r = 10.7$ mm) โดยในกรณีที่มี Sr เท่ากับ 0.11, 0.22 และ 0.33 นั้นจะมีความเร็วตามแนวสัมผัสของท่อ (w_p) เท่ากับ 1.02, 2.04 และ 3.06 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ความเร็วในแนวสัมผัสในแต่ละกรณีการทดลองจะมีอัตราการเพิ่มของความเร็วที่ช้าตรงบริเวณจุดศูนย์กลางของปากท่อ (ความชันของกราฟมีค่าน้อย) และจะมีอัตราการเพิ่มที่เร็วขึ้นเมื่อระยะตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่เร็วที่สุดเมื่อมีระยะตามแนวรัศมีใกล้กับบริเวณขอบท่อ (ความชันของกราฟมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งใกล้ขอบท่อ) ซึ่งความเร็วในแนวสัมผัสนี้จะมีอัตราการเพิ่มความเร็วที่สูงขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงสูงขึ้น (ความชันของกราฟมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงสูงขึ้น)

รูปที่ 3.4x แสดงรูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งปากทางออกของเจ็ตแบบท่อหมุน โดยแสดงอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติระหว่างค่า w/w_p กับ r/R จากผลการทดลองพบว่า รูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสในแต่ละกรณีการทดลองนั้น มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากงานวิจัยของ Nishibori et al. (1987) ที่ได้ทำการทดลองวัดความเร็วในแนวสัมผัสของอากาศในท่อหมุน โดยผลการวิจัยของ Nishibori et al. (1987) พบว่ารูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสของการไหลภายในท่อหมุนนั้น จะพัฒนาตัวอย่างต่อเนื่องตามระยะการไหลที่เพิ่มขึ้นภายในท่อ และในที่สุดที่ระยะไกลออกไปก็จะมีรูปร่างความเร็วคงที่เป็นฟังก์ชันพาราโบลาดังสมการ

$$\frac{w}{w_p} = \left| \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right| \quad (3.3)$$

และเมื่อนำผลของ Nishibori et al (1987) มาเปรียบเทียบกับผลของรูปร่างความเร็วที่วัดได้จากการศึกษาวิจัยนี้พบว่า ได้ผลของรูปร่างความเร็วที่มีความสอดคล้องกัน คือมีมีรูปร่างความเร็วใกล้เคียงกับฟังก์ชันพาราโบลาดังสมการที่ 3.3 โดยมีรูปร่างใกล้เคียงที่สุดในกรณีที่มี Swirl ratio (Sr) เท่ากับ 0.33 ($Sr33$ และ $Sr33cf$) และมีความใกล้เคียงรองลงมาในกรณีที่มี Sr เท่ากับ 0.22 ($Sr22$ และ $Sr22cf$) และมีความใกล้เคียงน้อยที่สุดในกรณีที่มี Sr เท่ากับ 0.11 ($Sr11$ และ $Sr11cf$) ทำให้เกิดข้อสันนิษฐานขั้นต้นสองประการคือ 1) ความเร็วรอบของท่อหมุนมีผลต่อรูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสท่อ โดยในกรณีที่ความเร็วรอบท่อสูงขึ้นจะทำให้รูปร่างความเร็วมีความใกล้เคียงกับสมการที่ 3.3 มากขึ้น หรือ 2) ระยะทางสัมผัส (l_d/p_r) ในการพัฒนาตัวของการไหลหลังจากออกจาก Honeycomb มีผลต่อรูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสท่อ (เมื่อ l_d คือ ระยะการพัฒนาตัวของการไหล ซึ่งในที่นี้คือความยาวท่อหลังจากออกจาก Honeycomb และ p_r คือ ระยะพิทช์ (Pitch) ที่การไหลหมุนตัวครบหนึ่งรอบ) โดยเมื่อระยะทางสัมผัสในการพัฒนาตัวมากขึ้น จะทำให้รูปร่างความเร็วมีความใกล้เคียงกับสมการที่ 3.3 มากขึ้น

ในข้อสันนิษฐานแรก สำหรับผลของความเร็วรอบท่อหมุนนั้นพบว่า เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นจะทำให้จำนวนรอบของเจ็ตอากาศที่ถูกบังคับให้หมุนคงอยู่ภายใน Honeycomb เพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์

$$n = \frac{L}{\pi d} Sr \quad (3.4)$$

โดยที่ n คือจำนวนรอบที่เจ็ตอากาศถูกบังคับให้หมุนคงอยู่ภายใน Honeycomb
 Sr คือค่า Swirl ratio
 L คือความยาวของ Honeycomb

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อเจ็ต

โดยในกรณีที่มี Sr เท่ากับ 0.11, 0.22 และ 0.33 นั้นจะมีจำนวนรอบที่เจ็ตอากาศหมุนควงอยู่ใน Honeycomb เท่ากับ 0.7, 1.3 และ 2.0 รอบ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยของ Wangiraniran (2001) พบว่า ความเร็วตามแนวสัมผัสที่บริเวณใกล้ทางออกของ Honeycomb จะมีรูปร่างใกล้เคียงกับ Rigid-body rotation แม้ว่าการหมุนจะไม่ครบหนึ่งรอบก็ตาม และเมื่อจำนวนรอบของการหมุนควงภายใน Honeycomb มากขึ้น ความเร็วในแนวสัมผัสก็จะมีรูปร่างใกล้เคียง Rigid-body rotation มากขึ้น

เช่นนี้จึงนำมาสู่ข้อสันนิษฐานที่สองคือ รูปร่างความเร็วตามแนวสัมผัสเมื่อออกมาจาก Honeycomb จะมีรูปร่างใกล้เคียง Rigid-body rotation แต่เมื่อการไหลพัฒนาตัวภายในท่อหลังจากออกจาก Honeycomb แล้ว จะพัฒนาตัวเข้าสู่รูปร่างตามฟังก์ชันพาราโบลา ดังนี้จึงเชื่อว่า ระยะทางสัมผัสในการพัฒนาตัวของการไหลจะมีผลต่อรูปร่างความเร็วตามแนวสัมผัส กล่าวคือ เมื่อระยะทางสัมผัสในการพัฒนาตัวมากขึ้น รูปร่างความเร็วตามแนวสัมผัสจะใกล้เคียงกับสมการที่ 3.3 มากขึ้น สังเกตว่าระยะทางสัมผัสนี้มีความสัมพันธ์กับค่า Swirl ratio (Sr) ตามสมการคือ

$$\frac{l_d}{p_r} = \frac{l_d Sr}{\pi d} \quad (3.5)$$

โดยที่ l_d คือระยะทางการพัฒนาตัวของการไหลภายในท่อหลังจากออกจาก Honeycomb
 p_r คือระยะพิทซ์ของการหมุนตัวครบหนึ่งรอบ, $p_r = \pi d / Sr$

โดยในกรณีที่มี Sr เท่ากับ 0.11, 0.22 และ 0.33 นั้นจะมีระยะทางสัมผัสในการพัฒนาตัว (l_d/p_r) เท่ากับ 1.9, 3.8 และ 5.6 ตามลำดับ

รูปที่ 3.5 แสดงรูปร่างการกระจายของอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งปากทางออก ($x/d = 0$) โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (C_T) ซึ่งนิยามเป็น

$$C_T = \frac{T - T_a}{T_{max} - T_a} \quad (3.6)$$

โดยที่ T คืออุณหภูมิที่ทำการวัดตามแนวรัศมีของเจ็ต
 T_{max} คืออุณหภูมิสูงสุดตามแนวรัศมีของเจ็ต

T_a คืออุณหภูมิสถานะแวดล้อมขณะที่ทำการวัด โดยในกรณีการทดลองที่ไม่มีกระแสทวน (Sr_{xx}) T_a จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง (T_r) และสำหรับกรณีการทดลองที่มีกระแสทวน (Sr_{xxcf}) T_a จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระแสทวน (T_{cp})

จากผลที่ได้พบว่า การทดลองในแต่ละกรณีจะมีค่า C_T ที่ตำแหน่งเดียวกันแตกต่างกันเล็กน้อย โดยที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางปากทางออกเจ็ด ($r/R = 0$) จะยังไม่มี ความแตกต่างของค่า C_T แต่เมื่อระยะตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้นค่าความแตกต่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และที่ตำแหน่งขอบเจ็ดพอดี ($r/R = 1$) จะมีความแตกต่างของค่า C_T มากที่สุด ซึ่งมีค่า C_T ของแต่ละกรณีแตกต่างกันไปจากค่าเฉลี่ยไม่เกิน ± 0.06 โดยมีค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของ C_T ข้างต้นมีค่าประมาณ 0.05 (แสดงในภาคผนวก จ.) สำหรับค่า C_T ที่มีความแตกต่างกันมากที่สุดตรงขอบเจ็ดนั้น สันนิษฐานว่าเป็นเพราะกระแสลมทวนและการหมุนควงได้ส่งผลให้บริเวณผิวด้านนอกของท่อที่มีการพาความร้อนที่ดีขึ้น จึงทำให้การไหลที่บริเวณผิวท่อในกรณีที่มีกระแสลมทวนหรือมีการหมุนควงมีอุณหภูมิต่ำกว่าการไหลในกรณีที่ไม่มีทั้งกระแสลมทวนและการหมุนควง ดังจะสังเกตได้จากผลการทดลองในกรณี Sr_{33cf} ที่มีทั้งกระแสลมทวนและการหมุนควงในระดับสูงสุดนั้นจะมีค่า C_T ที่ตำแหน่งขอบเจ็ดน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ ในขณะที่กรณี $Sr=0$ ซึ่งไม่มีทั้งกระแสลมทวนและการหมุนควงนั้นจะมีค่า C_T ที่ตำแหน่งขอบเจ็ดมากที่สุด อย่างไรก็ตามในการศึกษาวิจัยนี้ได้ใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ด (\bar{T}_j) ของการทดลองในแต่ละกรณีมีค่าประมาณเท่ากัน โดยมีค่าประมาณ $76.8^\circ\text{C} \pm 4\%$ และมีอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางปากเจ็ดประมาณ $81.5^\circ\text{C} \pm 2\%$

3.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะหน้าตัด (Local characteristics)

ในการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะหน้าตัด (Local characteristics) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัดนั้นจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (Global coefficient of temperature; C_{TG}) ซึ่งนิยามเป็น

$$C_{TG} = \frac{T - T_a}{\bar{T}_j - T_a} \quad (3.7)$$

โดย T คืออุณหภูมิที่ทำการวัด
 \bar{T}_j คืออุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ที่ปากเจ็ด
 T_a คืออุณหภูมิของสถานะแวดล้อมที่ทำการวัด

โดยค่า C_{TG} ดังกล่าวจะแสดงระดับของอุณหภูมิส่วนเกิน (Excess temperature) ที่ตำแหน่งใดๆ ($T - T_a$) เทียบกับระดับของอุณหภูมิส่วนเกินที่ปากเจ็ต ($\bar{T}_j - T_a$) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์รวม (Global parameter) ของการไหล นอกจากนี้ค่า C_{TG} ยังแสดงถึงคุณลักษณะการผสมที่ตำแหน่งหน้าตัดใดๆ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากแบบจำลองดังนี้

พิจารณาปริมาตรควบคุม (Control volume) ดังรูปที่ 3.6 โดยในรูปที่ 3.6ก แสดงปริมาตรควบคุมสำหรับการทดลองที่ไม่มีกระแสลมทวน และรูปที่ 3.6ข แสดงปริมาตรควบคุมสำหรับการทดลองที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ โดยในการพิจารณาได้ใช้กฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์พลังงานในรูปอินทิกรัล ดังสมการ

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} (\rho \vec{u} \cdot d\vec{A}) \quad (3.8)$$

$$\dot{Q} + \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \left(e + \frac{u^2}{2} + gz \right) (\rho dV) + \int_{CS} \left(h + \frac{u^2}{2} + gz \right) (\rho \vec{u} \cdot d\vec{A}) \quad (3.9)$$

โดยมีสมมติฐาน (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 3.8 และ 3.9 จะลดรูปเป็น

$$0 = \dot{m}_j + \dot{m}_a - \dot{m} \quad (3.10)$$

$$0 = \dot{m}_j h_j + \dot{m}_a h_a - \dot{m} h \quad (3.11)$$

- โดยที่
- \dot{m}_j คืออัตราการไหลโดยมวลของเจ็ตเริ่มต้น
 - \dot{m}_a คืออัตราการไหลโดยมวลของอากาศรอบข้างที่ถูกดึงเข้ามาผสม (Entrained air)
 - \dot{m} คืออัตราการไหลโดยมวลของเจ็ตอากาศหลังการผสม
 - h_j คือเอนทาลปีของเจ็ตเริ่มต้น
 - h_a คือเอนทาลปีของอากาศรอบข้างที่ถูกดึงเข้ามาผสม

h คือเอนทาลปีของเจ็ตอากาศหลังการผสม

โดยการแทนสมการ 3.10 ในสมการ 3.11 จะได้

$$\begin{aligned} 0 &= \dot{m}_j h_j + \dot{m}_a h_a - (\dot{m}_j + \dot{m}_a) h \\ \dot{m}_j (h_j - h) &= \dot{m}_a (h - h_a) \\ \dot{m}_j (h_j - h_a) - \dot{m}_j (h - h_a) &= \dot{m}_a (h - h_a) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \dot{m}_j (T_j - T_a) - \dot{m}_j (T - T_a) &= \dot{m}_a (T - T_a) \\ \frac{T - T_a}{T_j - T_a} &= \frac{\dot{m}_j}{\dot{m}_j + \dot{m}_a} = C_{TG} \end{aligned} \quad (3.12)$$

สมการ 3.12 แสดงว่าค่า C_{TG} เปลี่ยนบนพื้นที่หน้าตัดสามารถใช้ออกถึงอัตราการไหลโดยมวลของเจ็ตเริ่มต้นเทียบกับอัตราการไหลโดยมวลของเจ็ตผสมที่หน้าตัดใดๆ หรืออีกนัยหนึ่ง C_{TG} แปรผกผันกับอัตราการดึงมวลของอากาศรอบข้างเข้าไปในเจ็ตผสม (Entrainment) ที่หน้าตัดใดๆ นั่นคือเมื่อมีการดึงมวลของอากาศรอบข้างเข้าไปในตัวเจ็ตผสมมากขึ้น จะส่งผลให้ C_{TG} มีค่าลดลง

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

$$C_{TL} = \frac{T - T_a}{T_{max} - T_a} \quad (3.13)$$

โดย T คืออุณหภูมิที่ทำการวัด
 T_{max} คืออุณหภูมิสูงสุดในแต่ละหน้าตัด
 T_a คืออุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมในขณะที่ทำการวัด

โดยค่า C_{TL} จะแสดงระดับของอุณหภูมิเกิน (Excess temperature) ที่ตำแหน่งใดๆ ($T - T_a$) เทียบกับระดับของอุณหภูมิเกินสูงสุดที่หน้าตัดนั้น ($T_{max} - T_a$) ดังนั้น C_{TL} จึงเป็นพารามิเตอร์เฉพาะที่หน้าตัด

ใดๆ (Local parameter) ของการไหล ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัว (Spreading) อัตราการกระจายตัว (Spread rate) ของอนุกรมในการไหล และยังสามารถนำมาใช้เปรียบเทียบรูปร่างการกระจายตัวของอนุกรมที่หน้าตัดต่างๆได้

3.2.1 การพัฒนาตัวของเจ็ต

ในการศึกษาการพัฒนาตัวของเจ็ตสามารถพิจารณาได้จาก Contour ด้าน End view ของค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมรวม (C_{TG}) ดังรูปที่ 3.7 ถึง 3.14 ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงขนาดของการกระจายและการสลายตัวของอนุกรมในการไหล โดยในรูปที่ 3.7 ถึง 3.10 เป็นผลการทดลองในกรณีการไหลที่ไม่มีกระแสลมทวน (Sr_{xx}) ซึ่งประกอบไปด้วยกรณี Sr_0 , Sr_{11} , Sr_{22} และ Sr_{33} และในรูปที่ 3.11 ถึง 3.14 เป็นผลการทดลองในกรณีการไหลที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf}) ซึ่งประกอบไปด้วยกรณี Sr_{0cf} , Sr_{11cf} , Sr_{22cf} และ Sr_{33cf} ตามลำดับ โดยผลการทดลองในแต่ละกรณีจะแสดงที่ตำแหน่ง Downstream ต่างๆกัน คือที่ x/d เท่ากับ 1.5, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 โดยกราฟที่ใช้แสดงผลนั้นมีอัตราส่วนของแกน y และ z (Aspect ratio) เท่ากับ 1 ดังนั้นรูปร่างของ Contour จึงแสดงรูปร่างจริงของเจ็ต โดยในแต่ละหน้าตัดทดลองจะมีจุดศูนย์กลางของเจ็ตบนแนว Centerline อยู่ที่พิกัด ($y/d, z/d$) เท่ากับ (0,0) สำหรับค่าความไม่แน่นอนของ C_{TG} นั้นมีค่าประมาณ 0.05 (แสดงในภาคผนวก จ) ในการนำเสนอผลของค่า C_{TG} นี้ได้ใช้ความละเอียดของระดับ Contour เท่ากับ 0.1 ซึ่งมากกว่าค่าความไม่แน่นอนของ C_{TG} และได้กำหนดขอบของบริเวณที่ทำการศึกษาไว้ที่ C_{TG} เท่ากับ 0.1 สำหรับการนำเสนอผลการพัฒนาตัวของเจ็ตที่พิจารณาจาก Contour ของ C_{TG} นั้นได้แบ่งออกเป็นสองส่วนตามลักษณะการไหล ซึ่งประกอบไปด้วย การพัฒนาตัวของเจ็ตในกรณีการทดลองที่ไม่มีกระแสลมทวน (รูปที่ 3.7 ถึง 3.10) และการพัฒนาตัวของเจ็ตในกรณีการทดลองที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ (รูปที่ 3.11 ถึง 3.14) โดยมีรายละเอียดดังนี้

การพัฒนาตัวของเจ็ตโดยพิจารณาจาก Contour ของ C_{TG} ในกรณีการทดลองที่ไม่มีกระแสลมทวน (Sr_{xx})

รูปที่ 3.7 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ต จาก Contour ของ C_{TG} ในกรณี Sr_0 ซึ่งไม่มีทั้งผลของการหมุนควงและผลของกระแสลมทวนพบว่า รูปร่างของ Contour ในทุกๆหน้าตัดการทดลองมีลักษณะที่ค่อนข้างกลมและมีความสมมาตร แต่จะมีขนาดไม่เท่ากันในแต่ละหน้าตัด โดยในหน้าตัดที่ x/d เท่ากับ 1.5 นั้นจะมีขนาดของ Contour เล็กที่สุด โดยมีรัศมีการกระจายตัวของเจ็ตประมาณ $1d$ จากนั้น Contour จะมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream จนกระทั่งที่หน้าตัดสุดท้ายที่ทำการทดลองวัด คือที่ x/d เท่ากับ 16 นั้นจะมีขนาดของ Contour ใหญ่ที่สุด โดยมีรัศมีการกระจาย

ตัวของเจ็ตประมาณ $3d$ ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้มีข้อสังเกตคือ ที่หน้าตัดแรกๆของการทดลองนั้น รูปร่างของ Contour จะมีลักษณะค่อนข้างกลมอย่างสมบูรณ์ คือ Contour จะมีความกว้างในแนว Transverse (y) ใกล้เคียงกับแนว Spanwise (z) แต่เมื่อพิจารณาที่หน้าตัดไกลออกมาตามแนว Downstream โดยเฉพาะที่ x/d เท่ากับ 16 นั้นพบว่า รูปร่าง Contour จะมีลักษณะเปลี่ยนเป็นวงรีมากขึ้น โดยมีความกว้างในแนว Transverse (y) มากกว่าแนว Spanwise (z) เล็กน้อย ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นเพราะการไหลได้มีผลเนื่องจากแรงลอยตัวของเจ็ตร้อนเกิดขึ้น โดยได้ส่งผลให้การไหลของเจ็ตที่บริเวณขอบ (บริเวณที่มีค่า C_{TG} อยู่ในช่วง 0.1-0.2) มีแนวโน้มที่จะลอยตัวสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่บริเวณขอบเจ็ตในหน้าตัดทดลองด้านท้ายๆนั้นจะมีความเร็วตามแนวแกน (u_j) ในการไหลค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ผลของแรงลอยตัวมีอิทธิพลต่อการไหลในบริเวณนี้มาก โดยส่งผลให้เจ็ตอากาศตรงบริเวณขอบที่มีความเร็วในการไหลต่ำเกิดการลอยตัวขึ้นไปสู่ด้านบน (+ y) ทำให้รูปร่าง Contour ของ C_{TG} เกิดการเปลี่ยนแปลงจนมีลักษณะคล้ายวงรีดังกล่าว สำหรับบริเวณการไหลของเจ็ตที่ถัดเข้ามาจากบริเวณขอบ (บริเวณที่มีค่า C_{TG} ตั้งแต่ 0.2 ขึ้นไป) จะไม่พบผลเนื่องจากแรงลอยตัวของเจ็ตร้อนแต่อย่างใด ดังสังเกตได้จากการรูปร่างของ Contour ที่มีค่า C_{TG} ตั้งแต่ 0.2 ขึ้นไปนั้นยังคงมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตรไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้สันนิษฐานได้ว่าความเร็วของเจ็ตร้อน (u_j) ในบริเวณการไหลนี้ ($C_{TG}/0.2$) ยังคงมีค่ามากพอ จึงทำให้แรงลอยตัวไม่ส่งผลกระทบต่อ การไหลให้เห็นได้อย่างชัดเจน

นอกจากนี้ยังพบว่า หน้าตัดบริเวณ Upstream จะมี Gradient ของ C_{TG} ที่ตำแหน่งต่างๆในหน้าตัดสูงกว่าที่หน้าตัดบริเวณ Downstream (สามารถประมาณค่า Gradient อย่างคร่าวๆได้จาก ระยะห่างของเส้นแบ่งระดับค่า C_{TG} โดยถ้ามีระยะห่างระหว่างกันน้อยแสดงว่ามี Gradient ของ อุณหภูมิสูง) ซึ่งในกรณี $Sr0$ นี้พบว่า Gradient มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream โดยในหน้าตัดสุดท้ายที่ทำการทดลองวัด คือที่หน้าตัด x/d เท่ากับ 16 นั้นพบว่าจะมี Gradient ของ C_{TG} น้อยที่สุด ซึ่งแสดงว่าการไหลของเจ็ตในหน้าตัดนี้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในทุกๆหน้าตัดที่ผ่านมา และเมื่อพิจารณาโดยสังเขปถึงค่า C_{TG} เฉลี่ยทั้งหน้าตัดจะพบว่า ค่า C_{TG} เฉลี่ยมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เจ็ตสามารถดึงเอาอากาศรอบข้างภายในห้องทดลองเข้ามาผสม (Entrain) ในตัวเจ็ตได้เพิ่มขึ้น เมื่อพัฒนาตัวไปตามแนว Downstream ซึ่งเป็นไปตามการวิเคราะห์ในสมการ 3.12 โดยในหน้าตัดที่ x/d เท่ากับ 1.5 นั้นจะมีระดับของ C_{TG} สูงสุดบนหน้าตัดประมาณ 1.0-1.1 ซึ่งยังคงมีค่าใกล้เคียงกับ C_{TG} เฉลี่ยที่ปากเจ็ตที่มีค่าประมาณหนึ่ง ดังนั้นเมื่อพิจารณาความหมายของ C_{TG} ตามสมการที่ 3.12 (C_{TG} เฉลี่ยทั้งหน้าตัด) แสดงให้เห็นว่าการไหลในหน้าตัด x/d เท่ากับ 1.5 จะมีการดึงเอาอากาศรอบข้างเข้ามาผสมภายในตัวเจ็ตได้น้อยมาก แต่เมื่อพิจารณาในหน้าตัดที่ x/d เท่ากับ 12 พบว่าระดับ C_{TG} สูงสุดบนหน้าตัดมีค่าเหลือประมาณ 0.4-0.5 ทำให้มีค่า C_{TG} เฉลี่ยทั้งหน้าตัดมีค่าเหลือเพียงไม่ถึง 40-50 % ของค่าที่ปากเจ็ต แสดงให้เห็นว่าที่หน้าตัด x/d เท่ากับ 12 นั้น เจ็ตสามารถดึงเอาอากาศภายนอกเข้ามาผสมได้มากกว่า 100 % ของมวล

เริ่มต้นของเจ็ต และที่หน้าตัดหน้าตัดสุดท้ายที่ได้ทำการทดลองวัด คือที่หน้าตัด x/d เท่ากับ 16 พบว่า ระดับของ C_{TG} เหลือมีค่าเหลือเพียงไม่ถึง 30-40 % ของค่าที่ปากเจ็ต ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับหน้าตัดที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่า เจ็ตสามารถดึงเอาอากาศรอบข้างเข้ามาผสมได้เพิ่มขึ้นตามระยะในแนว Downstream

รูปที่ 3.8 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ต จาก Contour ของ C_{TG} ในกรณี $Sr=11$ ซึ่งเป็นการทดลองในกรณีของเจ็ตอิสระที่มีการหมุนควงอยู่ในระดับต่ำนั้นพบว่า รูปร่างของ Contour และ Gradient ของอุณหภูมิส่วนเกิน (Excess temperature) มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับกรณีเจ็ตอิสระที่ไม่หมุนควง ($Sr=0$) โดยมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย คือที่หน้าตัด $x/d = 14$ ระดับอุณหภูมิสูงสุดบนหน้าตัดจะมีค่าลดลงจากกรณี $Sr=0$ เล็กน้อย โดยจะมีค่าลดลงจาก 40-50 % ในกรณี $Sr=0$ จนเหลือ 30-40 % ในกรณี $Sr=11$ อย่างไรก็ตามระดับอุณหภูมิสูงสุดบนหน้าตัดที่หายไปในการกรณี $Sr=11$ นั้นยังครอบคลุมพื้นที่อยู่น้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการหมุนควงในระดับต่ำจะยังไม่มีผลต่อการไหลแบบเจ็ตอิสระอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าที่หน้าตัดท้ายๆของการทดลอง ($x/d = 14$ และ 16) ในกรณี $Sr=11$ นั้นจะเห็นผลกระทบเนื่องจากแรงลอยตัวของเจ็ตร้อนได้อย่างชัดเจนขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี $Sr=0$ ดังเห็นได้จากรูปร่างของ Contour ที่หน้าตัดท้ายๆในการกรณี $Sr=11$ นั้นจะมีอัตราส่วนของความกว้างในแนว Transverse (y) ต่อความกว้างแนว Spanwise (z) มากกว่าในการกรณี $Sr=0$ อยู่เล็กน้อย ซึ่งผลเนื่องจากแรงลอยตัวที่เห็นได้อย่างชัดเจนขึ้นนี้แสดงให้เห็นว่าความเร็วตามแนวแกนของเจ็ต (u_j) ที่บริเวณขอบการไหลมีการลดลงอย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อการไหลมีการหมุนควง ซึ่งได้ส่งผลให้ลอยตัวมีอิทธิพลต่อการไหลเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการไหลที่ไม่มีการหมุนควง ($Sr=0$)

รูปที่ 3.9 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ต จาก Contour ของ C_{TG} สำหรับกรณี $Sr=22$ พบว่ารูปร่างของ Contour และ Gradient ของอุณหภูมิส่วนเกินมีความคล้ายคลึงกับกรณี $Sr=11$ โดยมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีข้อสังเกตคือที่หน้าตัด x/d เท่ากับ 8 และ 10 นั้น ระดับอุณหภูมิส่วนเกินสูงสุดบนหน้าตัดจะมีค่าลดลงจากกรณี $Sr=11$ เล็กน้อย โดยที่หน้าตัด x/d เท่ากับ 8 จะมีค่าลดลงจาก 60-70 % ในกรณี $Sr=11$ จนเหลือ 50-60 % ในกรณี $Sr=22$ และที่ x/d เท่ากับ 10 มีค่าลดลงจาก 50-60 % ในกรณี $Sr=11$ จนเหลือ 40-50 % ในกรณี $Sr=22$ ซึ่งการลดลงของค่า C_{TG} สูงสุดในหน้าตัดที่กล่าวมาข้างต้นนี้ทำให้สามารถสรุปโดยสังเขปได้ว่า การไหลในกรณี $Sr=22$ สามารถดึงเอาอากาศในบริเวณรอบข้างเข้ามาผสมกับตัวเจ็ตได้ดีกว่าในกรณี $Sr=11$ และเมื่อพิจารณาถึงผลของแรงลอยตัวที่หน้าตัดการทดลองท้ายๆ ($x/d = 12, 14$ และ 16) พบว่า ที่บริเวณขอบการไหล ซึ่งมีค่า C_{TG} อยู่ในช่วง 0.1-0.2 นั้นจะเห็นผลกระทบเนื่องจากแรงลอยตัวได้อย่างชัดเจนขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี $Sr=0$ และ $Sr=11$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความเร็วตามแนวแกนที่บริเวณขอบของเจ็ตจะลดลงได้อย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อการไหลมีการหมุนควงในระดับที่สูงขึ้น

รูปที่ 3.10 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ต จาก Contour ของ C_{TG} สำหรับกรณี Sr33 ซึ่งเป็นการไหลของเจ็ตอิสระที่มีระดับการหมุนควงสูงสุดนั้นพบว่า รูปร่างของ Contour และ Gradient ของอุณหภูมิส่วนเกินยังคงมีความคล้ายคลึงกับกรณี Sr22 แต่จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในหน้าตัด x/d เท่ากับ 4, 6 และ 12 ซึ่งในกรณี Sr33 จะมีระดับของ C_{TG} สูงสุดในทุกหน้าตัดที่กล่าวมามีค่าน้อยกว่าในกรณี Sr22 อยู่ประมาณ 0.1 ทำให้สามารถสรุปโดยสังเขปได้ว่า การไหลในกรณี Sr33 จะมีความสามารถในการดึงเอาอากาศบริเวณรอบข้างเข้ามาผสมกับเจ็ตได้ดีกว่าในกรณี Sr22 ซึ่งในกรณี Sr33 นี้จะเห็นผลกระทบของแรงลอยตัวที่มีต่อการไหลบริเวณขอบเจ็ตที่หน้าตัดด้านท้ายๆ ($x/d = 12, 14$ และ 16) ได้อย่างชัดเจนที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี Sr0, Sr11 และ Sr22 ซึ่งเป็นการยืนยันว่าความเร็วตามแนวแกนของเจ็ตที่บริเวณขอบจะลดลงได้อย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อการไหลมีความเร็วในการหมุนควงเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.7 ถึง 3.10 ซึ่งแสดงถึงการพัฒนาตัวของเจ็ตในกรณีการทดลองที่ไม่มีกระแสลมทวน (Srxx) โดยใช้ Contour ของค่า C_{TG} ในการพิจารณานั้น สามารถสรุปได้ว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นหน้าตัดตามแนว Downstream จะมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตร โดยผลของการหมุนควงนั้นจะไม่ส่งผลให้ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก โดยยังคงมีความสมมาตรและไม่เกิดการบิดเบี้ยวไปด้านใดด้านหนึ่งเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงสูงขึ้น สำหรับขนาดพื้นที่การกระจายตัวของอุณหภูมินั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนวการไหล ในขณะที่ระดับอุณหภูมิสูงสุดบนหน้าตัดมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream (มีการสลายตัวของอุณหภูมิตามแนว Downstream) ซึ่งการลดลงของอุณหภูมิจะมีอัตราการลดลงที่รวดเร็วขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าเจ็ตสามารถดึงเอาอากาศรอบข้างเข้ามาผสมได้เพิ่มมากขึ้นเมื่อการไหลของเจ็ตมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น สำหรับผลของแรงลอยตัวของเจ็ตร้อนนั้นจะพบได้อย่างชัดเจนที่บริเวณขอบเจ็ตในหน้าตัดที่ไหลออกไปตามแนว Downstream ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเร็วการไหลตามแนวแกนค่อนข้างต่ำ โดยจะพบผลของแรงลอยตัวได้อย่างชัดเจนขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่าความเร็วตามแนวแกนของเจ็ตในบริเวณนี้มีอัตราการลดลงที่รวดเร็วขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงเพิ่มขึ้น

การพัฒนาตัวของเจ็ตโดยพิจารณาจาก Contour ของ C_{TG} ในกรณีการทดลองที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf})

รูปที่ 3.11 แสดงถึงการพัฒนาตัวของเจ็ตในกรณี Sr_{0cf} ซึ่งเป็นการไหลแบบเจ็ตในกระแสลมทวนที่ไม่มีผลของการหมุนควง จาก Contour ของค่า C_{TG} พบว่า รูปร่างของ Contour ในทุกๆ หน้าตัดทดลองจะมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตร เช่นเดียวกับกรณีการไหลที่ไม่มีกระแสลมทวน (Sr_{xx}) สำหรับกรณี Sr_{0cf} นี้จะมีขนาดของ Contour ในแต่ละหน้าตัดแตกต่างกันไป โดยในหน้าตัด x/d เท่ากับ 1.5 จะมีขนาดของ Contour เล็กที่สุด ซึ่งจะมีรัศมีการกระจายตัวของเจ็ตประมาณ $1.3d$ จากนั้น Contour จะมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream จนกระทั่งที่หน้าตัด x/d เท่ากับ 10 นั้นพบว่าจะมีขนาด Contour ใหญ่ที่สุด โดยมีรัศมีการกระจายตัวของเจ็ตประมาณ $3.5d$ หลังจากนั้น Contour ของ C_{TG} จะมีขนาดเล็กลงอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream และหายไปในที่สุดที่หน้าตัด x/d เท่ากับ 16 ซึ่งเป็นหน้าตัดสุดท้ายที่ทำการทดลองวัด ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าในหน้าตัด x/d เท่ากับ 16 จะมีระดับของค่า C_{TG} บนหน้าตัดไม่เกิน 0.1 ซึ่งต่ำกว่าค่า C_{TG} ของขอบ Contour ที่ได้กำหนดไว้ที่ $C_{TG} = 0.1$ การหายไปของ Contour ของค่า C_{TG} บนหน้าตัดนี้สามารถอธิบายโดยสังเขปได้ว่า การไหลของเจ็ตร้อนได้ถูกการไหลของกระแสลมพัดสวนทางกลับไป จนทำให้ที่หน้าตัดสุดท้ายนี้เหลือมวลอากาศของเจ็ตร้อนอยู่น้อยมาก โดยการทดลองในกรณี Sr_{0cf} นี้จะไม่พบผลเนื่องจากแรงลอยตัวที่เห็นได้อย่างเด่นชัดในทุกๆ หน้าตัดทดลอง ซึ่งแตกต่างกับกรณีการทดลองที่ไม่มีกระแสลมทวน (Sr_{xx}) ที่พบผลของแรงลอยตัวที่บริเวณขอบเจ็ตในหน้าตัดการทดลองด้วยซ้ำๆ ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเนื่องจากการไหลแบบเจ็ตในกระแสมวลนั้น มีเสถียรภาพในการไหลน้อย โดยการไหลจะมีการสั่นไปมาในบริเวณต่างๆ อยู่ตลอดเวลา ส่งผลให้โดยเฉลี่ยแล้วการไหลในรูปแบบนี้ไม่มีบริเวณความเร็วต่ำอย่างแท้จริง ทำให้ผลของการพา (Convection) เนื่องจากการสั่นยังคงมีมากกว่าผลของแรงลอยตัว (Buoyancy force) ซึ่งทำให้แรงลอยตัวที่เกิดขึ้นในการไหลนี้ไม่ส่งผลใดๆ ต่อลักษณะการไหลโดยรวม

นอกจากนี้ยังพบว่า หน้าตัดบริเวณ Downstream จะมี Gradient ของ C_{TG} ที่ตำแหน่งต่างๆ ต่ำกว่าหน้าตัดในบริเวณ Upstream ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Gradient ของ C_{TG} จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream โดยในหน้าตัดที่ x/d เท่ากับ 16 ที่ไม่มี Contour ของ C_{TG} เหลืออยู่เลยนั้นจะมี Gradient น้อยที่สุด โดยมีระดับ C_{TG} สูงสุดบนหน้าตัดมีค่าไม่เกิน 10 % ของค่าเฉลี่ยที่ปากเจ็ต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในหน้าตัดสุดท้ายนี้จะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิบนหน้าตัดมีความสม่ำเสมอมากที่สุด คือจะมีอุณหภูมิการกระจายตัวของเจ็ตบนหน้าตัดใกล้เคียงกับอุณหภูมิของกระแสลมทวนมากที่สุด สำหรับอัตราการลดลงของค่า C_{TG} สูงสุดบนหน้าตัดนั้นพบว่า ที่หน้าตัดของการไหลในช่วงแรก ($x/d = 1.5-8$) จะมีอัตราการลดลงของค่า C_{TG} สูงสุดบนหน้าตัดที่รวดเร็วกว่าในช่วงหน้าตัดด้านท้ายๆ ($x/d = 10-16$) โดยในหน้าตัดของการไหลในช่วงแรกจะมีค่า C_{TG} สูงสุดบนหน้าตัดลด

ลงจาก 1.0-1.1 ในหน้าตัด $x/d = 1.5$ จนเหลือค่าประมาณ 0.3-0.4 ในหน้าตัด $x/d = 8$ ซึ่งภายในระยะทางประมาณ $6.5d$ นั้น ค่า C_{TG} สูงสุดบนหน้าตัดจะมีค่าลดลงได้ถึงประมาณ 0.7 แต่สำหรับหน้าตัดการไหลด้านท้ายๆ นั้นจะมีค่า C_{TG} สูงสุดลดลงจาก 0.2-0.3 ในหน้าตัด $x/d = 10$ จนเหลือค่าประมาณไม่ถึง 0.1 ในหน้าตัด $x/d = 16$ ซึ่งภายในระยะทางประมาณ $6d$ นั้น ค่า C_{TG} สูงสุดมีค่าลดลงไปเพียงประมาณ 0.2 เท่านั้น

รูปที่ 3.12 แสดงถึงการพัฒนาตัวของเจ็ตในกรณี $Sr11cf$ ซึ่งเป็นการไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวนที่มีระดับการหมุนควงต่ำ จาก Contour ของค่า C_{TG} พบว่า การไหลในกรณี $Sr11cf$ นี้มีรูปร่างของ Contour และ Gradient ของอุณหภูมิส่วนเกินใกล้เคียงกับกรณี $Sr0cf$ เป็นอย่างมาก โดยในกรณี $Sr11cf$ จะมีรูปร่างของ Contour มีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตรในทุกๆ หน้าตัด ทดลอง และมีขนาดของ Contour ในแต่ละหน้าตัดแตกต่างกันไป โดยในช่วงแรกนั้น Contour จะมีการพัฒนาขนาดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream จนกระทั่งมีขนาดใหญ่ที่สุดที่หน้าตัด x/d เท่ากับ 10 หลังจากนั้น Contour ก็จะมีขนาดลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream และหายไปในที่สุดที่หน้าตัด x/d เท่ากับ 16 สำหรับ Gradient ของอุณหภูมิส่วนเกินนั้นพบว่า Gradient มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับกรณี $Sr0cf$ และเมื่อพิจารณาถึงระดับ C_{TG} สูงสุดบนหน้าตัดในกรณี $Sr11cf$ พบว่า จะมีค่า C_{TG} สูงสุดในแต่ละหน้าตัดใกล้เคียงกับกรณี $Sr0cf$ เป็นอย่างมาก โดยที่หน้าตัดการทดลองเดียวกันนั้น ทั้งสองกรณีจะมี C_{TG} สูงสุดบนหน้าตัดมีค่าประมาณเท่ากัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการไหลในกรณี $Sr0cf$ และ $Sr11cf$ มีอัตราการลดลงของค่าอุณหภูมิสูงสุดบนหน้าตัดประมาณเท่ากัน นอกจากนี้ยังพบว่า ในทุกๆ หน้าตัดการทดลองจะไม่มีผลของแรงลอยตัวเกิดขึ้นอย่างชัดเจน เช่นเดียวกับกรณี $Sr0cf$

รูปที่ 3.13 แสดงถึงการพัฒนาตัวของเจ็ตในกรณี $Sr22cf$ จาก Contour ของค่า C_{TG} พบว่าการไหลในกรณี $Sr22cf$ นี้จะมีรูปร่างของ Contour และ Gradient ของอุณหภูมิส่วนเกินใกล้เคียงกับกรณี $Sr11cf$ โดยมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ซึ่งสังเกตได้ที่หน้าตัด $x/d = 4$ จะมีระดับของ C_{TG} สูงสุดบนหน้าตัดลดลงจากกรณี $Sr11cf$ เล็กน้อย กล่าวคือมีค่าลดลงจาก 0.8-0.9 ในกรณี $Sr11cf$ จนเหลือ 0.7-0.8 ในกรณี $Sr22cf$ อย่างไรก็ตามระดับ C_{TG} สูงสุดบนหน้าตัดที่หายไปกรณี $Sr11cf$ นั้นยังครอบคลุมพื้นที่น้อย โดยในกรณี $Sr22cf$ นี้จะไม่พบผลเนื่องจากแรงลอยตัวในทุกๆ หน้าตัดการทดลองเช่นเดียวกับในกรณี $Sr0cf$ และ $Sr11cf$

รูปที่ 3.14 แสดงถึงการพัฒนาตัวของเจ็ตในกรณี $Sr33cf$ ซึ่งเป็นการไหลของเจ็ตในกระแสมทวนที่มีระดับการหมุนควงสูงสุด จาก Contour ของค่า C_{TG} พบว่า การไหลในกรณี $Sr33cf$ นี้จะมีรูปร่างของ Contour และ Gradient ของอุณหภูมิส่วนเกินใกล้เคียงกับกรณี $Sr22cf$ คือรูปร่างของ

Contour จะมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตรในทุกหน้าตัดการทดลอง และ Gradient ของอุณหภูมิส่วนเกินจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream แต่ยังคงพบความแตกต่างกับกรณี *Sr22cf* อยู่บ้างที่หน้าตัด x/d เท่ากับ 4, 6 และ 12 โดยในกรณี *Sr33cf* นั้นจะมีระดับ C_{TG} สูงสุดที่หน้าตัดดังกล่าวมีค่าลดลงจากกรณี *Sr22cf* ไปประมาณ 0.1 อย่างไรก็ตามระดับ C_{TG} สูงสุดบนหน้าตัดที่หายไปในการณ์ *Sr33cf* นั้นยังครอบคลุมพื้นที่น้อย สำหรับความแตกต่างที่เห็นได้อย่างชัดเจนในการณ์ *Sr33cf* เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี *Sr22cf* คือที่หน้าตัด x/d เท่ากับ 14 โดยในการณ์ *Sr33cf* นั้นจะไม่มีบริเวณพื้นที่ Contour ของ C_{TG} เหลืออยู่เลย ซึ่งต่างจากกรณี *Sr22cf* ความแตกต่างที่พบทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่าการไหลในการณ์ *Sr33cf* ที่มีระดับของการหมุนควงสูงสุดสามารถดึงเอาอากาศเข้ามาผสมในตัวเจ็ตได้ดีกว่ากรณี *Sr22cf* ซึ่งมีระดับการหมุนควงที่ต่ำกว่า และเช่นเดียวกับกรณี *Sr0cf*, *Sr11cf* และ *Sr22cf* คือในการณ์ *Sr33cf* จะไม่มีผลของแรงลอยตัวให้เห็นอย่างชัดเจนในทุกๆหน้าตัดการทดลอง

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.11 ถึง 3.14 ซึ่งแสดงถึงการพัฒนาตัวของเจ็ตในการณ์การทดลองที่มีกระแสสวนร่วมอยู่ (*Srxxcf*) โดยใช้ Contour ของค่า C_{TG} ในการพิจารณานั้น สามารถสรุปได้ว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นหน้าตัดตามแนว Downstream จะมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตร โดยผลของการหมุนควงนั้นจะไม่ทำให้ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งยังคงมีความสมมาตรและไม่เกิดการบิดเบี้ยวไปด้านใดด้านหนึ่งเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น สำหรับขนาดพื้นที่การกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นหน้าตัดนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงแบ่งได้เป็นสองช่วง โดยในช่วงแรก เจ็ตจะมีขนาดพื้นที่การกระจายตัวของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream และในช่วงต่อมา เจ็ตจะเริ่มมีขนาดการกระจายตัวที่เล็กลงอย่างต่อเนื่องตามแนวการไหล และสลายตัวไปจนหมดในเวลาต่อมา ซึ่งพบว่า เจ็ตจะสลายตัวไปจนหมดได้อย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น สำหรับระดับอุณหภูมิสูงสุดบนหน้าตัดนั้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะในแนว Downstream โดยมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วในบริเวณการไหลช่วงแรก (บริเวณ Near fields) ประมาณ $x/d = 1.5-8$ และจะมีอัตราการลดลงที่ช้าลงอย่างเห็นได้ชัดในบริเวณการไหลที่ไกลออกไป (บริเวณ Far fields) ในช่วง $x/d = 10-16$ ซึ่งทำให้สามารถสรุปโดยสังเขปได้ว่า การไหลในการณ์ที่มีกระแสสวนนี้สามารถดึงเอากระแสสวนเข้ามาผสมในตัวเจ็ตได้เป็นอย่างดีในช่วง Near fields และจะดึงเข้ามาผสมได้น้อยลงในบริเวณการไหลที่ไกลออกไปในช่วง Far fields ซึ่งระดับอุณหภูมิสูงสุดบนหน้าตัดนี้จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น ทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการดึงเอากระแสสวนเข้ามาผสมกับเจ็ตมีเพิ่มมากขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น โดยในการไหลแบบเจ็ตที่มีกระแสสวนร่วมอยู่นี้จะไม่พบผลเนื่องจากแรงลอยตัวของเจ็ตร้อนเลยตลอดทั้งการไหล สันนิษฐานว่าอาจเป็นเพราะการไหลแบบเจ็ตในกระแสสวนไม่มี

เสถียรภาพในการไหลน้อยและมีการสั้นไหวไปมาตลอดทั้งการไหล จึงทำให้ไม่มีบริเวณการไหลที่มีความเร็วต่ำอย่างแท้จริง ซึ่งส่งผลของการพา (Convection) ยังคงมีมากกว่าผลของแรงลอยตัว (Buoyancy force) จึงทำให้ผลของแรงลอยตัวไม่ปรากฏในการไหลลักษณะนี้

นอกจากการศึกษาการพัฒนาตัวของเจ็ตจาก Contour ของ C_{TG} แล้ว ในการศึกษาวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาการพัฒนาตัวของเจ็ตจาก Contour ของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจำเพาะ (C_{TL}) ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงรูปร่างการกระจายตัว (Spreading) และอัตราการกระจายตัว (Spread rate) ของการไหลในกรณีทดลองต่างๆ โดยแสดงผลในลักษณะเดียวกับค่า C_{TG} ที่ได้เสนอไปแล้ว สำหรับผล Contour ของค่า C_{TL} ในกรณีการทดลองต่างๆนั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.15-3.22 โดยในรูปที่ 3.15 ถึง 3.18 เป็นผลการทดลองในกรณี $Sr=0$, $Sr=11$, $Sr=22$ และ $Sr=33$ และในรูปที่ 3.19 ถึง 3.22 จะเป็นผลการทดลองในกรณี $Sr=0cf$, $Sr=11cf$, $Sr=22cf$ และ $Sr=33cf$ ตามลำดับ สำหรับความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของ C_{TL} นั้นมีค่าประมาณ 0.1 (แสดงในภาคผนวก จ.) ซึ่งใช้เป็นค่าสำหรับแบ่งระดับ Contour ของ C_{TL} ในการนำเสนอนี้ โดยกำหนดขอบของบริเวณที่ศึกษาไว้ที่ $C_{TL} = 0.3$ ในการนำเสนอผลการพัฒนาตัวของเจ็ตจาก Contour ของ C_{TL} นั้นได้แบ่งออกเป็นสองส่วน ซึ่งประกอบไปด้วย ผลในกรณีการทดลองที่ไม่มีกระแสลมทวน (Sr_{xxx}) และผลในกรณีการทดลองที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ (Sr_{xxxcf}) โดยมีรายละเอียดดังนี้

การพัฒนาตัวของเจ็ตโดยพิจารณาจาก Contour ของ C_{TL} ในกรณีการทดลองที่ไม่มีกระแสลมทวน (Sr_{xxx})

รูปที่ 3.15 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตในกรณี $Sr=0$ จาก Contour ของ C_{TL} พบว่า รูปร่างของ Contour ในทุกหน้าตัดการทดลองจะมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตร แต่จะมีขนาดไม่เท่ากันในแต่ละหน้าตัด โดยในหน้าตัดแรกที่ทำกรวัด คือที่ $x/d = 1.5$ จะมีขนาดของ Contour เล็กที่สุด และจะมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream จนกระทั่งที่ $x/d = 16$ ซึ่งเป็นหน้าตัดสุดท้ายที่ทดลองวัดนั้นก็จะมีความยาวของ Contour ใหญ่ที่สุด แสดงให้เห็นว่าเจ็ตมีการกระจายตัว (Spreading) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream ซึ่งการกระจายตัวของเจ็ตสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณลักษณะการผสมได้ในระดับหนึ่ง โดยจะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการผสมระหว่างการไหลของเจ็ตกับบริเวณอากาศรอบข้างว่าเป็นไปได้อย่างรวดเร็วเพียงใด โดยดูได้จากในกรณีการไหลที่มีการกระจายตัวได้อย่างรวดเร็วกว่าหรือมีอัตราการกระจายตัว (Spread rate) มากกว่านั้นจะมีการดึงเอาอากาศบริเวณรอบข้างเข้ามาผสมได้ดีกว่าและรวดเร็วกว่าในกรณีที่มีอัตราการกระจายตัวช้า

สำหรับรูปร่างเส้น Contour ของค่า C_{TL} ในทุกระดับอุณหภูมินั้นจะมีลักษณะค่อนข้างกลม และมีความสมมาตรในทุกๆหน้าตัดทดลอง ซึ่งแสดงว่ารูปร่างการกระจายตัวของอุณหภูมิในระดับต่างๆจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะในแนว Downstream

รูปที่ 3.16 ถึง 3.18 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตในกรณีการไหลแบบเจ็ตอิสระที่มีการหมุนควงในกรณี $Sr11$, $Sr22$ และ $Sr33$ ตามลำดับ จาก Contour ของ C_{TL} พบว่ารูปร่าง Contour ของ C_{TL} ในทุกกรณีจะมีลักษณะที่คล้ายกับกรณี $Sr0$ คือมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตร และจะมีขนาดไม่เท่ากันในแต่ละหน้าตัด โดย Contour จะมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะในแนว Downstream ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าเจ็ตมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนวการไหล ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับในกรณี $Sr0$ อย่างไรก็ตามยังคงพบความแตกต่างจากกรณี $Sr0$ บ้างเล็กน้อย โดยในหน้าตัดสุดท้ายที่ทำการทดลองวัด คือที่หน้าตัด $x/d = 16$ ของกรณี $Sr11$, $Sr22$ และ $Sr33$ นั้นจะพบผลของแรงลอยตัวเกิดขึ้นที่บริเวณขอบของการไหลในบริเวณที่ C_{TL} มีค่าเท่ากับ 0.3-0.4 และจะพบผลของแรงลอยตัวได้อย่างชัดเจนขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงสูงขึ้น โดยจะเห็นผลของแรงลอยตัวได้อย่างชัดเจนที่สุดในกรณี $Sr33$ นอกจากนี้ยังพบว่า รูปร่างเส้น Contour ของ C_{TL} ในทุกระดับอุณหภูมิในกรณี $Sr11$, $Sr22$ และ $Sr33$ นั้นจะมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตรในทุกๆหน้าตัดการทดลอง ซึ่งจะคล้ายกับในกรณี $Sr0$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การหมุนควงจะไม่ส่งผลต่อรูปร่างการกระจายตัวของอุณหภูมิในระดับต่างๆแต่อย่างใด

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.15 ถึง 3.18 ซึ่งแสดงถึงการพัฒนาตัวของเจ็ตในกรณีการทดลองที่ไม่มีกระแสสวน (Sr_{xx}) โดยใช้ Contour ของค่า C_{TL} ในการพิจารณานั้น สามารถสรุปได้ว่า รูปร่างการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นหน้าตัดตามแนว Downstream จะมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตร โดยที่เจ็ตจะมีการกระจายตัว (Spreading) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream สำหรับผลของการหมุนควงนั้นจะไม่ทำให้รูปร่างการกระจายของอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด นอกจากนี้ยังพบผลของแรงลอยตัวอยู่บ้างที่บริเวณขอบเจ็ต ($C_{TL} = 0.3-0.4$) ในช่วง Far fields โดยจะพบผลของแรงลอยตัวได้อย่างชัดเจนมากขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงเพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากการลดลงของความเร็วตามแนวแกน

การพัฒนาตัวของเจ็ตโดยพิจารณาจาก Contour ของ C_{TL} ในกรณีการทดลองที่มีกระแสสวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf})

รูปที่ 3.19 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตในกรณี $Sr0cf$ จาก Contour ของ C_{TL} พบว่า รูปร่างของ Contour ในแต่ละหน้าตัดจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป โดยในหน้าตัดที่ $x/d = 1.5$ ถึง 12

รูปร่างของ Contour จะมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตร และมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream โดยมีจะขนาดใหญ่ที่สุดในหน้าตัดที่ $x/d = 12$ แต่ในช่วงต่อมา คือที่หน้าตัด $x/d = 14$ นั้นสังเกตได้ว่ารูปร่างเส้น Contour ของ C_{TL} ในทุกระดับอุณหภูมิจะเริ่มมีการบิดเบี้ยวเกิดขึ้น แต่ยังคงเห็นเค้าโครงที่มีลักษณะค่อนข้างกลมอยู่ ซึ่งที่หน้าตัดนี้จะมีขนาดของ Contour เล็กกว่าในหน้าตัดที่ $x/d = 12$ สำหรับในหน้าตัดสุดท้ายที่ทำการวัด คือที่หน้าตัด $x/d = 16$ นั้นพบว่าการบิดเบี้ยวของรูปร่างมีเพิ่มมากขึ้น โดยจะมีขนาดของ Contour เล็กลงอีกจากหน้าตัดที่ $x/d = 14$ ซึ่งทั้งหมดนี้แสดงในเห็นว่าการไหลในช่วงแรก ($x/d = 1.5$ ถึง 12) เจ็ตมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream โดยในช่วงต่อมา ($x/d = 14-16$) เจ็ตจะมีขนาดการกระจายตัวที่เล็กลงอย่างต่อเนื่องตามแนวการไหล ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการไหลของเจ็ตในบริเวณหน้าตัดด้านท้ายๆ นี้ได้ถูกกระแสมทวนพัดสวนทางจนไหลย้อนกลับไป จึงทำให้การกระจายตัวของเจ็ตมีขนาดเล็กลงอย่างต่อเนื่องในช่วงนี้ สำหรับรูปร่างเส้นของ Contour ที่บิดเบี้ยวไปในหน้าตัดด้านท้ายๆ ของการทดลอง ($x/d = 14-16$) สันนิษฐานว่าเกิดจากความไม่มีเสถียรภาพของการไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวน ซึ่งเป็นลักษณะโดยปกติที่เกิดขึ้นในการไหลรูปแบบนี้ โดยมีส่วนทำให้ค่าของอุณหภูมิที่ทำการวัดเกิดความผิดพลาดได้ง่าย เนื่องจากจะต้องใช้เวลาในการวัดอย่างยาวนานเพื่อให้ค่าที่ได้จากการวัดเข้าใกล้กับค่าเฉลี่ยที่แท้จริง ดังนั้นรูปร่างของ Contour ที่บิดเบี้ยวไปนี้จึงสามารถใช้แสดงให้เห็นถึงความไม่มีเสถียรภาพได้ในระดับหนึ่ง โดยในบริเวณช่วงท้ายของการไหล ($x/d = 14$ และ 16) ที่มีความบิดเบี้ยวของเส้น Contour เกิดขึ้นอาจเป็นบริเวณที่การไหลไม่มีเสถียรภาพมากที่สุด

รูปที่ 3.20 ถึง 3.22 แสดงการพัฒนาตัวของเจ็ตในกรณีการไหลในกระแสมทวนที่มีการหมุนควงในกรณี $Sr11cf$, $Sr22cf$ และ $Sr33cf$ ตามลำดับ จาก Contour ของ C_{TL} พบว่ารูปร่าง Contour ของ C_{TL} ในทุกกรณีดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกับกรณี $Sr0cf$ คือ การไหลในช่วงแรก ($x/d = 1.5$ ถึง 12) รูปร่างของ Contour จะมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตร โดยมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream และจะมีขนาด Contour ใหญ่ที่สุดที่ประมาณ $x/d = 12$ สำหรับการไหลในช่วงต่อมา ($x/d = 14$ ถึง 16) พบว่า Contour ของ C_{TL} นั้นมีขนาดเล็กลงอย่างต่อเนื่องพร้อมกับมีความบิดเบี้ยวของรูปร่างเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนที่สุดในกรณี $Sr33cf$ ซึ่งที่หน้าตัด $x/d = 16$ นั้นพบว่า รูปร่าง Contour ของ C_{TL} จะมีขนาดเล็กลงจากหน้าตัดที่ $x/d = 14$ เป็นอย่างมาก อีกทั้งยังไม่มี ความสมมาตรและไม่มีเค้าโครงที่มีลักษณะค่อนข้างกลมเหลืออยู่เลย ทำให้สันนิษฐานได้ว่า ส่วนหนึ่งน่าจะเกิดขึ้นจากความไม่มีเสถียรภาพของการไหลในกรณี $Sr33cf$ ดังที่กล่าวไว้ ผนวกกับที่บริเวณการไหลในหน้าตัดสุดท้ายนี้เหลือบริเวณการไหลของเจ็ตอยู่น้อยมาก เนื่องจากถูกกระแสมทวนพัดสวนกลับไปเกือบหมด ดังเห็นได้จากผล Contour ของ C_{TG} ในกรณี $Sr33cf$ ในรูปที่ 3.14 นั้นจะไม่มีบริเวณ Contour ของ C_{TG} เหลืออยู่เลยที่หน้าตัด

ด้านท้ายๆของการไหล ($x/d = 14$ และ 16) และเนื่องจากผลรูปร่าง Contour ของ C_{TL} ในแต่ละกรณีที่มีความคล้ายคลึงกัน โดยเฉพาะที่หน้าตัด $x/d = 1.5-12$ นั้น แสดงให้เห็นว่าการหมุนควงจะไม่ส่งผลใดๆต่อรูปร่างการกระจายตัวของค่า C_{TL} ในทุกระดับ อย่างไรก็ตามที่หน้าตัดด้านท้ายของการทดลอง คือที่หน้าตัด $x/d = 14$ และ 16 นั้นจะสังเกตเห็นความแตกต่างของรูปร่างการกระจายตัวของ C_{TL} อยู่บ้าง จึงคาดว่าอาจเกิดจากปัจจัยสองส่วนด้วยกันคือ ส่วนหนึ่งคงเป็นผลเนื่องจากความไม่มีเสถียรภาพในการไหล และอีกส่วนอาจเกิดจากผลของการหมุนควง

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.19 ถึง 3.22 ซึ่งแสดงถึงการพัฒนาตัวของเจ็ตในกรณีการทดลองที่ไม่มีกระแสสวน (Sr_{xxcf}) โดยใช้ Contour ของค่า C_{TL} ในการพิจารณานั้น สามารถสรุปได้ว่าการไหลของเจ็ตในกระแสสวนจะมีรูปร่างการกระจายตัวของอนุกรมที่มีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตร โดยในช่วงแรกจะมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream ไปได้ระยะหนึ่ง หลังจากนั้นเจ็ตจะมีการกระจายตัวลดลงอย่างต่อเนื่องในระยะการไหลถัดมา ซึ่งในบริเวณที่เจ็ตมีการกระจายตัวลดลงนี้คาดว่า การไหลของเจ็ตจะมีการสั้นไปมาอยู่ตลอดเวลา ทำให้การไหลในบริเวณนี้มีเสถียรภาพในการไหลน้อยกว่าในบริเวณอื่นๆ สำหรับผลของการหมุนควงโดยรวมนั้นจะไม่ทำให้รูปร่างการกระจายตัวของอนุกรมเกิดการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด เว้นแต่บริเวณการไหลด้านท้าย (Downstream) ที่อาจมีผลของการหมุนควงอยู่บ้าง แต่ข้อมูลในขั้นนี้ยังไม่พอเพียงเพื่อสรุปผลดังกล่าว

3.2.2 การเปรียบเทียบผลของกระแสสวนและผลของการหมุนควงในแต่ละหน้าตัด

ในการเปรียบเทียบผลของกระแสสวนและผลของการหมุนควงที่หน้าตัดต่างๆนั้น จะทำโดยการเปรียบเทียบกันระหว่าง Contour ด้าน End view ของค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมรวม (C_{TG}) ในแต่ละกรณีการทดลองที่หน้าตัดทดสอบเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.23 ถึง 3.30 ซึ่งจะประกอบไปด้วยผล Contour ของค่า C_{TG} ที่หน้าตัด x/d เท่ากับ 1.5, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 ตามลำดับ ในการนำเสนอผลการทดลองนั้นจะแสดงผลการทดลองในกรณีที่ไม่มีกระแสสวน (Sr_{xx}) ที่แถวบน และแสดงผลการทดลองในกรณีที่มีกระแสสวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf}) ที่แถวล่าง โดยจะเรียงลำดับจากซ้ายไปขวาตามระดับการหมุนควงที่เพิ่มขึ้น และเพื่อให้เกิดความสะดวกและกระชับยิ่งขึ้นในการกล่าวถึงกรณีการทดลองในลำดับต่อไป ทางผู้จัดทำจะใช้สัญลักษณ์ Sr_{xx} เรียกแทนกรณีการทดลองที่ไม่มีกระแสสวนร่วมอยู่ และใช้สัญลักษณ์ Sr_{xxcf} เรียกแทนกรณีการทดลองที่มีกระแสสวนร่วมอยู่

รูปที่ 3.23 แสดงลักษณะการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ทำหน้าตัด $x/d = 1.5$ จากลักษณะ Contour ที่นำมาเปรียบเทียบกันพบว่า ระดับการหมุนควงจะไม่ส่งผลต่อรูปร่าง Contour ของค่า C_{TG} ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีกระแสลมทวน โดยรูปร่างของ Contour จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น โดยจะยังคงมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตรเช่นเดียวกับรูปร่าง Contour ในกรณีการไหลที่ไม่มีการหมุนควง ($Sr0$ และ $Sr0cf$) แต่จะมีข้อสังเกตคือ เมื่อระดับการหมุนควงมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาด Contour ของ C_{TG} ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ($C_{TG} = 1.0-1.1$) มีขนาดเล็กลง ทำให้สันนิษฐานได้ว่าระดับการหมุนควงที่เพิ่มขึ้นนั้นจะช่วยทำให้เจ็ดดิ่งอากาศเข้ามาผสมได้ดีขึ้นตั้งแต่หน้าตัดแรกที่ได้ทำการทดลอง อย่างไรก็ตามระดับอุณหภูมิสูงสุดที่มีขนาดเล็กลงนี้ยังครอบคลุมพื้นที่น้อยจึงยังคงไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อพิจารณาถึงผลของกระแสลมทวนนั้นพบว่า กระแสลมทวนจะมีส่วนช่วยทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิเจ็ดดิ่งมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ขอบการไหลในบริเวณที่ระดับอุณหภูมิมิค่าต่ำ ($C_{TG} = 0.1-0.2$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระแสลมทวนมีส่วนช่วยให้การไหลของเจ็ดดิ่งมีการกระจายตัวที่ดีขึ้นตั้งแต่หน้าตัดแรกที่ได้ทำการทดลองวัด

รูปที่ 3.24 แสดงลักษณะการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ทำหน้าตัด $x/d = 4$ จากลักษณะ Contour ที่นำมาเปรียบเทียบกันพบว่า เมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงเพิ่มขึ้นจะทำให้ระดับอุณหภูมิสูงสุดบนหน้าตัดมีค่าลดลง โดยในการไหลที่ไม่มีกระแสลมทวน ($Srxx$) จะมีค่า C_{TG} ลดลงจาก 0.9-1.0 ในกรณี $Sr0$ (ไม่มีการหมุนควง) จนเหลือ 0.8-0.9 ในกรณีการไหล $Sr33$ (มีระดับการหมุนควงสูงสุด) ซึ่งจะมีระดับค่า C_{TG} สูงสุดลดลงไปประมาณ 0.1 สำหรับการไหลที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ ($Srxxcf$) ผลของการหมุนควงจะทำให้ค่า C_{TG} ลดลงจาก 0.8-0.9 ในกรณี $Sr0cf$ จนเหลือ 0.6-0.7 ในกรณี $Sr33cf$ ซึ่งจะมีระดับของค่า C_{TG} สูงสุดลดลงไปประมาณ 0.2 ทั้งนี้ทำให้สามารถสรุปโดยสังเขปได้ว่า ที่หน้าตัด $x/d = 4$ นั้น ผลของการหมุนควงจะทำให้ระดับอุณหภูมิสูงสุดในกรณีการทดลองที่มีกระแสลมทวน ($Srxxcf$) ลดลงไปได้อย่างรวดเร็วกว่าในกรณีที่ไม่มีกระแสลมทวน ($Srxx$) สำหรับผลของกระแสลมทวนนั้นพบว่า ได้ผลที่คล้ายคลึงกับที่ทำหน้าตัด $x/d = 1.5$ นั่นคือ ที่ระดับการหมุนเดียวกันนั้น การไหลของเจ็ดดิ่งที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ ($Srxxcf$) จะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิมากกว่าการไหลในกรณีที่ไม่มีกระแสลมทวน ($Srxx$) นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระดับการหมุนควงเดียวกันนั้น กรณีการไหลที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ ($Srxxcf$) จะมีระดับอุณหภูมิสูงสุดบนหน้าตัดมีค่าต่ำกว่าในกรณีการไหลที่ไม่มีกระแสลมทวน ($Srxx$) แสดงให้เห็นว่ากระแสลมทวนจะช่วยทำให้เจ็ดดิ่งอากาศรอบข้างเข้ามาผสมได้ดียิ่งขึ้น

รูปที่ 3.25-3.27 แสดงลักษณะการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่หน้าตัด $x/d = 6, 8$ และ 10 ตามลำดับ จากลักษณะ Contour ที่นำมาเปรียบเทียบกันในแต่ละหน้าตัดพบว่า ได้ผลการทดลองที่คล้ายคลึงกับผลที่ได้ในหน้าตัดที่ $x/d = 4$ นั่นคือผลของการหมุนควงจะทำให้ระดับอุณหภูมิสูงสุดบนหน้าตัดมีค่าลดลงทั้งในกรณีการไหลที่มีและไม่มีการผสมทวนร่วมอยู่ แต่จะมีความแตกต่างกับผลในหน้าตัดที่ $x/d = 4$ อยู่บ้างตรงที่ผลของการหมุนควงในหน้าตัดที่ $x/d = 6-10$ นั้นจะส่งผลต่อการไหลกรณีที่ไม่มีการผสมทวน (Sr_{xx}) ได้อย่างชัดเจนกว่าในกรณีที่มีการผสมทวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf}) โดยสังเกตได้จากระดับของอุณหภูมิสูงสุดบนหน้าตัดในกรณีที่ไม่มีการผสมทวน (Sr_{xx}) จะมีการลดลงที่รวดเร็วกว่ากรณีการไหลที่มีการผสมทวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf}) เมื่อระดับการหมุนควงมีค่าสูงขึ้นในปริมาณที่เท่ากัน ยกตัวอย่างในหน้าตัดที่ $x/d = 6$ สำหรับกรณีการไหลที่ไม่มีการผสมทวนนั้นจะมีค่า C_{TG} สูงสุดลดลงจาก 0.8-0.9 ในกรณี $Sr=0$ จนเหลือ 0.6-0.7 ในกรณีการไหล $Sr=33$ ซึ่งจะมีระดับค่า C_{TG} สูงสุดลดลงไปประมาณ 0.2 และสำหรับการไหลที่มีการผสมทวนร่วมอยู่นั้น ผลของการหมุนควงจะทำให้ค่า C_{TG} สูงสุดลดลงจาก 0.5-0.6 ในกรณี $Sr=0cf$ จนเหลือ 0.4-0.5 ในกรณี $Sr=33cf$ ซึ่งมีระดับของค่า C_{TG} สูงสุดลดลงไปประมาณ 0.1 แสดงให้เห็นว่าที่หน้าตัด $x/d = 6-10$ นั้น ผลของการหมุนควงจะทำให้ระดับอุณหภูมิสูงสุดในกรณีการไหลที่ไม่มีการผสมทวน (Sr_{xx}) ลดลงไปได้อย่างรวดเร็วกว่าในกรณีที่มีการผสมทวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf}) ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองในหน้าตัด $x/d = 4$ ที่ได้ผลในทางกลับกัน สำหรับผลของการผสมทวนนั้นพบว่า ในหน้าตัดที่ $x/d = 6-10$ จะได้ผลที่คล้ายคลึงกับที่หน้าตัด $x/d = 4$ นั่นคือ การไหลในกรณีที่มีการผสมทวน (Sr_{xxcf}) จะมีขนาดการกระจายของอุณหภูมิมากกว่าการไหลในกรณีที่ไม่มีการผสมทวน (Sr_{xx}) พร้อมกันนี้ในกรณี Sr_{xxcf} ก็จะมีระดับอุณหภูมิสูงสุดบนหน้าตัดมีค่าต่ำกว่ากรณี Sr_{xx} เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับการหมุนควงเดียวกันทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่า การผสมทวนมีส่วนช่วยทำให้เจ็ดสามารถดึงเอาอากาศรอบข้างเข้ามาผสมได้ดีและรวดเร็วยิ่งขึ้น

รูปที่ 3.28 แสดงลักษณะการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่หน้าตัด $x/d = 12$ จากลักษณะ Contour ที่นำมาเปรียบเทียบกันพบว่า ได้ผลการทดลองที่คล้ายคลึงกับหน้าตัดที่ $x/d = 6, 8$ และ 10 ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น นั่นคือระดับของอุณหภูมิสูงสุดบนหน้าตัดจะลดลงได้อย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อการไหลของเจ็ดมีระดับการหมุนควงที่เพิ่มขึ้นหรือเมื่อมีการไหลของการผสมทวนร่วมอยู่ โดยผลของการหมุนควงนั้นจะทำให้ค่า C_{TG} สูงสุดบนหน้าตัดทั้งในกรณีที่มีและไม่มีการผสมทวน (Sr_{xxcf}, Sr_{xx}) มีค่าลดลงประมาณเท่ากันเท่ากับ 0.1 ซึ่งแตกต่างไปจากผลที่ได้จากหน้าตัดก่อนหน้า ($x/d = 6, 8$ และ 10) ที่มีค่า C_{TG} สูงสุดในกรณีการไหลที่ไม่มีการผสมทวนลดลงได้อย่างรวดเร็วกว่าเมื่อระดับการหมุนควงมีค่าเพิ่มขึ้นในปริมาณที่เท่ากัน

รูปที่ 3.29 ถึง 3.30 แสดงลักษณะการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่หน้าตัด $x/d = 14$ และ 16 ตามลำดับ จากลักษณะ Contour ที่นำมาเปรียบเทียบกันในแต่ละหน้าตัดพบว่า ที่หน้าตัดบริเวณด้านท้ายนี้ จะพบผลของกระแสลมทวนได้อย่างชัดเจนกว่าผลของการหมุนควง โดยในหน้าตัดที่ $x/d = 14$ นั้น ผลของกระแสลมทวนจะทำให้ระดับ Contour ของ C_{TG} สลายตัวไปอย่างรวดเร็ว โดยจะสลายตัวหายไปจนหมดในกรณี $Sr33cf$ และในหน้าตัดที่ $x/d = 16$ นั้น พบว่าผลของกระแสลมทวนจะทำให้ Contour ของ C_{TG} ในกรณี $Srxx$ สลายหายไปหมดในกรณี $Srxxcf$ สำหรับผลของการหมุนควงในหน้าตัดที่ $x/d = 14$ และ 16 นั้นพบว่าระดับการหมุนควงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อระดับอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดเพียงเล็กน้อย โดยในหน้าตัดที่ $x/d = 14$ นั้นจะมีผลทำให้ค่า C_{TG} สูงสุดในกรณีที่ไม่มีลมทวน ($Sr0, Sr0cf$) มีค่าลดลงไปประมาณ 0.1 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีระดับการหมุนควงสูงสุด ($Sr33, Sr33cf$) และในหน้าตัดที่ $x/d = 16$ นั้น สำหรับกรณีการไหลที่ไม่มีกระแสลมทวน ($Srxx$) พบว่า ระดับการหมุนควงที่เพิ่มขึ้นจะไม่ทำให้ระดับอุณหภูมิสูงสุดของหน้าตัดมีค่าลดลงเลย อย่างไรก็ตามยังคงพบว่า เมื่อระดับการหมุนควงเพิ่มขึ้นจะทำให้บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัด ($C_{TG} = 0.3-0.4$) มีขนาดของพื้นที่ที่เล็กลง และบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ($C_{TG} = 0.1-0.2$) มีขนาดของพื้นที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังเห็นผลของแรงลอยตัวเพิ่มขึ้นอีกด้วย ทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่าระดับการหมุนควงยังคงมีส่วนทำให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งหน้าตัดมีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่าในหน้าตัดการไหลนี้ การเพิ่มขึ้นของระดับการหมุนควงยังคงมีส่วนช่วยให้เจ็ดคิงเอากะแสลมทวนเข้ามาผสมได้ดียิ่งขึ้น สำหรับกรณีการไหลที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ ($Srxxcf$) ในหน้าตัดที่ $x/d = 16$ นั้น Contour ของ C_{TG} ในหน้าตัดจะหายไปจนหมดในทุกระดับการหมุนควง

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.23 ถึง 3.30 ซึ่งแสดงผลของการหมุนควงและผลของกระแสลมทวนที่มีต่อการไหล โดยใช้ Contour ของค่า C_{TG} ในการพิจารณานั้น สามารถสรุปได้ว่าทั้งการหมุนควงและกระแสลมทวนจะส่งผลให้อุณหภูมิของเจ็ดคิงมีการสลายตัวไปได้อย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการไหลแบบเจ็ดคิงอิสระที่ไม่มีทั้งการหมุนควงและกระแสลมทวน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการไหลแบบเจ็ดคิงที่มีการหมุนควงในกระแสลมทวนจะมีคุณลักษณะการผสมที่ดีกว่าการไหลแบบเจ็ดคิงอิสระ โดยในการไหลแบบเจ็ดคิงที่มีการหมุนควงในกระแสลมทวนนั้น เจ็ดคิงจะสามารถดึงเอาอากาศในบริเวณรอบข้างเข้ามาผสมได้ดีกว่าการไหลแบบเจ็ดคิงอิสระ

นอกจากนี้ ในการศึกษาวิจัยยังได้เปรียบเทียบผลของกระแสลมทวนและผลของการหมุนควงที่หน้าตัดต่างๆ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ดังรูปที่ 3.31-3.38 ซึ่งประกอบไปด้วยผล Contour ของ C_{TL} ที่หน้าตัด x/d เท่ากับ 1.5, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 ตามลำดับ โดยจะนำเสนอในลักษณะเดียวกับค่า C_{TG} ข้างต้น จากผลของ Contour ในแต่ละหน้าตัดพบว่า ที่หน้าตัด $x/d =$

1.5 (รูปที่ 3.31) ซึ่งเป็นหน้าตัดแรกที่ทำการทดลองวัดนั้นยังไม่พบผลใดๆจากระดับการหมุนควงที่เพิ่มขึ้นหรือการมีอยู่ของกระแสลมทวน โดยสังเกตได้จาก Contour ของ C_{TL} บนหน้าตัดนี้ยังคงมีลักษณะรูปร่างที่คล้ายคลึงกันมากในทุกกรณีการทดลอง อย่างไรก็ตามจะเห็นผลได้อย่างชัดเจนขึ้นเมื่อพิจารณาจากรูปร่าง Contour ของ C_{TL} ในหน้าตัดถัดออกไป โดยในหน้าตัดที่ $x/d = 4$ ถึง 14 (รูปที่ 3.32 ถึง 3.37) จะเห็นผลเนื่องจากกระแสลมทวนได้อย่างชัดเจนในทุกหน้าตัดการทดลอง ซึ่งสังเกตได้จากในแต่ละหน้าตัดการทดลองนั้น Contour ของค่า C_{TL} ในกรณีการไหลที่มีกระแสลมทวน (Sr_{xxcf}) จะมีขนาดพื้นที่ใหญ่ขึ้นกว่าในกรณีที่ไม่มีการกระแสลมทวน (Sr_{xx}) ซึ่งขนาดของ Contour ที่ใหญ่ขึ้นนี้แสดงให้เห็นว่า การไหลแบบเจ็ตในกระแสลมทวน (Sr_{xxcf}) จะมีการกระจายตัวได้อย่างรวดเร็วกว่าการไหลแบบเจ็ตอิสระ (Sr_{xx}) สำหรับผลเนื่องจากกระแสลมทวนในหน้าตัดที่ $x/d = 16$ (รูปที่ 3.38) จะได้ผลที่แตกต่างไปจากหน้าตัดอื่นๆคือ Contour ของค่า C_{TL} ในกรณีการไหลที่มีกระแสลมทวน (Sr_{xxcf}) จะมีขนาดพื้นที่ประมาณเท่ากันหรือเล็กกว่าในกรณีที่ไม่มีการกระแสลมทวน (Sr_{xx}) ทั้งนี้เนื่องมาจากการไหลของเจ็ตในกรณี Sr_{xxcf} ได้ถูกระแสลมทวนพัดสวนกลับไปเกือบหมด จึงส่งผลให้เจ็ตมีบริเวณพื้นที่การกระจายตัวเหลืออยู่น้อย

สำหรับผลของระดับการหมุนควงในหน้าตัดที่ $x/d = 4-16$ ในกรณีการไหลที่ไม่มีการกระแสลมทวน (Sr_{xx}) พบว่า ระดับการหมุนควงที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ Contour ของ C_{TL} มีขนาดใหญ่มากขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงว่าระดับการหมุนควงจะส่งผลต่อการกระจายตัวของเจ็ตบนหน้าตัดเพียงเล็กน้อย โดยเจ็ตจะมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบผลของระดับการหมุนควงที่มีต่อผลของแรงลอยตัวได้อย่างชัดเจนในหน้าตัดที่ x/d เท่ากับ 16 โดยระดับการหมุนควงที่สูงขึ้นจะทำให้การไหลของเจ็ตที่บริเวณขอบมีการลอยตัวสูงขึ้น

สำหรับผลของระดับการหมุนควงในหน้าตัดที่ $x/d = 4-16$ ในกรณีการไหลที่มีกระแสลมทวน (Sr_{xxcf}) พบว่า Contour ของ C_{TL} ในแต่ละหน้าตัดจะได้รับผลเนื่องจากระดับการหมุนควงที่สูงขึ้นแตกต่างกันไป โดยในหน้าตัดที่ $x/d = 4-8$ นั้น เจ็ตจะมีการกระจายตัวกระจายตัวได้อย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อมีระดับการหมุนควงที่เพิ่มขึ้น ต่อมาในหน้าตัดที่ $x/d = 10$ และ 12 นั้น ผลของระดับการหมุนควงที่เพิ่มจะไม่ส่งผลต่อรูปร่างการกระจายตัวของเจ็ตแต่อย่างใด โดยเจ็ตจะมีการกระจายตัวได้ใกล้เคียงกันในทุกระดับการหมุนควง และในช่วงสุดท้ายที่หน้าตัด $x/d = 14$ และ 16 นั้น พบว่าระดับการหมุนควงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เจ็ตมีขนาดการกระจายตัวลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะระดับการหมุนควงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เจ็ตมีการสลายตัวของความเร็วตามแนวแกนเร็วขึ้น การไหลของเจ็ตจึงถูกพัดสวนกลับไปได้อย่างรวดเร็วขึ้น ทำให้เหลือบริเวณพื้นที่การกระจายตัวน้อยกว่าเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น

จากผลการทดลองในรูปที่ 3.31 ถึง 3.38 ซึ่งแสดงผลของการหมุนควงและผลของกระแสลมทวนที่มีต่อการไหล โดยใช้ Contour ของค่า C_{TL} ในการพิจารณานั้น สามารถสรุปได้ว่าทั้งการหมุนควงและกระแสลมทวนจะส่งผลให้เกิดมีการกระจายตัวได้อย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการไหลแบบเจ็ตอิสระที่ไม่มีทั้งการหมุนควงและกระแสลมทวน ซึ่งการกระจายตัวที่เพิ่มขึ้นนี้แสดงให้เห็นว่าการไหลแบบเจ็ตในกระแสลมทวนจะมีคุณลักษณะการผสมที่ดีกว่าการไหลแบบเจ็ตอิสระ

3.3 ผลการศึกษาคุณลักษณะโดยรวม (Global characteristic)

3.3.1 เส้นทางของการไหล

สำหรับการพิจารณาเส้นทางของการไหลในการศึกษาวิจัยนี้ ทำขึ้นเพื่อผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อเส้นทางของการไหลในแต่ละกรณีการทดลอง โดยดูจากตำแหน่งจุดศูนย์กลางของอนุภาคน้ำ [Centroid trajectory: (\bar{y}_T, \bar{z}_T)] ซึ่งจุดนี้นิยามจาก

$$\bar{y}_T = \frac{\int_A y C_{TG} dA}{\int_A C_{TG} dA} \quad (3.14)$$

$$\bar{z}_T = \frac{\int_A z C_{TG} dA}{\int_A C_{TG} dA} \quad (3.15)$$

โดย \bar{y}_T คือตำแหน่งของจุดศูนย์กลางอนุภาคน้ำตามแนวแกน y
 \bar{z}_T คือตำแหน่งของจุดศูนย์กลางอนุภาคน้ำตามแนวแกน z

รูปที่ 3.39ก แสดง Centroid trajectory บนระนาบ x - y (\bar{y}_T) ของการไหลในแต่ละกรณีการทดลอง จากกราฟพบว่า ในการไหลในกรณีที่ไม่มีการหมุนควง (Sr_{xx}) จะมีเส้นทางไหลยกตัวสูงขึ้นจากแนว Centerline โดยมีการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเกิดจากผลของแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นในการไหล ซึ่งจะเห็นผลได้อย่างชัดเจนในบริเวณการไหลที่มีความเร็วในแนวแกนต่ำ (บริเวณการไหลในช่วง Far fields) นอกจากนี้ยังพบว่า เส้นทางไหลจะมีอัตราการยกตัวเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น โดยสังเกตได้จากที่ระยะ x/d เท่ากับ 16 นั้น เส้นทางไหลในกรณี $Sr=0$ จะยกตัวสูงขึ้นจากแนว Centerline ประมาณ $0.4d$ และเมื่อมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้นในกรณี $Sr=11$, $Sr=22$ และ $Sr=33$ เส้นทางไหลก็จะยกตัวสูงขึ้นอย่าง

ต่อเนื่อง โดยจะมีความสูงจากแนว Centerline ประมาณ $0.9d$, $1.2d$ และ $1.7d$ ตามลำดับ ทำให้สรุปโดยสังเขปได้ว่าระดับการหมุนควงที่เพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้ความเร็วตามแนวแกนของเจ็ตลดลงได้อย่างรวดเร็วขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณขอบการไหลของเจ็ต จึงทำให้ผลของแรงลอยตัวในกรณีที่มีระดับการหมุนควงสูงเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและชัดเจนกว่าในกรณีที่มีระดับการหมุนควงต่ำ สำหรับการไหลในกรณีที่มีกระแสสวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf}) พบว่าจะมีเส้นทางการไหลยกตัวสูงขึ้นตามแนว Downstream เช่นเดียวกับการไหลในกรณีที่ไม่มีการสวนร่วม (Sr_{xx}) แต่ระดับของการหมุนควงจะไม่ส่งผลต่อเส้นทางการไหลมากนักเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการหมุนควง โดยจะมีการยกตัวสูงขึ้นประมาณเท่ากันในทุกะดับการหมุนควง ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นเพราะความไม่มีเสถียรภาพของการไหลแบบเจ็ตในกระแสสวนร่วมที่มีส่วนทำให้การไหลในลักษณะนี้ไม่มีบริเวณการไหลที่มีความเร็วต่ำอย่างแท้จริง (โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณขอบเจ็ต) จึงทำให้ไม่เกิดผลของแรงลอยตัวเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น

รูปที่ 3.39x แสดง Centroid trajectory บนระนาบ $x-z$ (\bar{z}_T) ของการไหลในแต่ละกรณีการทดลอง จากกราฟพบว่า ในกรณีที่ไม่มีการสวนร่วมอยู่ (Sr_{xx}) การไหลในแต่ละระดับการหมุนควงนั้นจะมีลักษณะเส้นทางการไหลค่อนข้างตรงและมีทิศทางไหลไปในทิศเดียวกัน โดยจะอยู่บนแนว Centerline ของเจ็ตพอดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระดับของการหมุนควงในช่วงทดลอง ($Sr = 0.11-0.33$) ไม่มีผลทำให้เส้นทางการไหลเลื่อนออกไปจากแนว Centerline มากนัก ซึ่งแตกต่างจากกรณีการไหลที่มีการสวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf}) โดยในกรณีการไหลที่มีการสวนร่วมนั้นพบว่า เส้นทางการไหลจะเบนออกไปจากแนว Centerline มากขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเบนออกไปจากแนว Centerline นี้มีระยะเพียงเล็กน้อย โดยมีระยะการเบนออกไปมากที่สุดไม่เกิน $0.25d$ ซึ่งการเบนออกจากแนว Centerline นี้สันนิษฐานว่าอาจเกิดขึ้นจากความไม่สมบูรณ์แบบในการศึกษาด้วยวิธีการทดลอง หรืออาจเกิดจากธรรมชาติในการไหลของเจ็ตเองก็ได้ ดังเห็นได้จากการไหลของเจ็ตอิสระที่มีระดับการหมุนควงสูงนั้น เส้นทางการไหลเร็วสูงสุดอาจเลื่อนออกจากแนว Centerline ได้ (Feyedelem and Sarpkaya, 1997) และเมื่อผนวกเข้ากับผลของกระแสสวนร่วมดังกล่าวนี้ จึงส่งผลให้เส้นทางการไหลสามารถเบนออกจากแนว Centerline ได้แม้มีระดับการหมุนควงไม่สูงนัก (มีการเบนออกตั้งแต่ Sr ในช่วง $0.11-0.33$) อย่างไรก็ตามในที่นี้ยังไม่สามารถหาข้อสรุปที่แน่ชัดได้ แต่ถ้าหากเป็นไปตามข้อสันนิษฐานในกรณีหลังจะทำให้สามารถสรุปโดยสังเขปได้ว่า ระดับของการหมุนควงในช่วงทดลอง ($Sr = 0.11-0.33$) จะมีผลต่อเส้นทางการไหลของเจ็ตในกรณีที่มีการสวนร่วม โดยทำให้เส้นทางการไหลเบนออกจากแนว Centerline มากขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงสูงขึ้น ซึ่งระยะการเบนออกไปนี้ถือว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะทางการไหลโดยรวมตามแนวแกน

จากการศึกษาเส้นทางการไหล โดยพิจารณาจากจุดศูนย์กลางของอุณหภูมิตั้ง (Centroid trajectory) สามารถสรุปได้ว่าทั้งกรณีการทดลองที่มีกระแสลมทวนและกรณีการทดลองที่ไม่มีกระแสลมทวนจะมีเส้นทางการไหลยกตัวสูงขึ้นจากแนว Centerline ของเจ็ต ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นเพราะความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิตั้งกับกระแสลมทวน สำหรับผลของการหมุนควงนั้นจะส่งผลทำให้การไหลในกรณีที่ไม่มีกระแสลมทวนมีอัตราการยกตัวสูงขึ้นที่บริเวณการไหลในช่วงท้ายๆ แต่จะไม่ส่งผลต่อการไหลในกรณีที่มีกระแสลมทวน โดยในการไหลรูปแบบนี้ เส้นทางการไหลจะมีการยกตัวสูงขึ้นประมาณเท่ากันในทุกระดับการหมุนควง สำหรับการเบนออกของเส้นทางการไหลนั้น ระดับการหมุนควงในช่วงทดลอง ($Sr = 0.11-0.33$) จะไม่ส่งผลต่อการเบนออกของเส้นทางการไหลในกรณีที่ไม่มีกระแสลมทวน แต่จะส่งผลต่อการไหลในกรณีที่มีกระแสลมทวน โดยระดับการหมุนควงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นทางการไหลในกรณีที่มีกระแสลมทวนเบนออกไปทางด้านข้างได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามข้อสรุปนี้ยังไม่สามารถยืนยันได้อย่างชัดเจน

3.3.2 การลดลงของอุณหภูมิตั้งตามแนวแกน

ในการศึกษาการลดลงของอุณหภูมิตั้งตามแนวแกนจะพิจารณาจากการลดลงของค่า C_T บนแนว Centerline ของเจ็ต ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการสลายตัวของอุณหภูมิตั้งตามแนวแกน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

รูปที่ 3.40 แสดงการสลายตัวของอุณหภูมิตั้งตามแนวแกนของเจ็ตในแต่ละกรณี จากกราฟพบว่า ทั้งกระแสลมทวนและการหมุนควงมีผลทำให้อุณหภูมิตั้งตามแนวแกนของเจ็ตลดลงอย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีเจ็ตธรรมดาที่ไม่มีทั้งกระแสลมทวนและการหมุนควง ($Sr=0$) ซึ่งเป็นเครื่องบ่งชี้ว่าเจ็ตที่มีการหมุนควงในกระแสลมทวนจะมีคุณลักษณะการผสมที่ดีกว่าเจ็ตธรรมดา โดยผลของกระแสลมทวนอย่างเดียว (ที่ $r = 4.62$) จะทำให้ระยะที่อุณหภูมิตั้งส่วนเกิน ($T-T_a$) ที่แกนเจ็ตลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิตั้งส่วนเกินทั้งหมด ($T_{j,c}-T_a$) (ระยะที่ $C_T = 0.5$) ลดลงจากระยะประมาณ $11d$ ในกรณี $Sr=0$ เหลือเพียงประมาณ $6d$ ในกรณี $Sr=0.33cf$ และเหลือเพียงประมาณ $5d$ เมื่อผนวกผลของการหมุนควงที่ Swirl ratio เท่ากับ 0.33 ในกรณี $Sr=0.33cf$ ในอีกแง่มุมหนึ่งเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งเดียวกัน เช่นที่ $x/d = 5$ จะพบว่า ผลของการหมุนควงที่เพิ่มขึ้นจาก Swirl ratio เท่ากับ 0 ในกรณี $Sr=0.33cf$ จนเท่ากับ 0.33 ในกรณี $Sr=0.33cf$ จะทำให้อุณหภูมิตั้งส่วนเกินลดลงจากร้อยละประมาณ 0.63 เหลือเพียงร้อยละ 0.50 ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่า ผลของการหมุนควงจะส่งผลต่อการลดลงของอุณหภูมิตั้งตามแนวแกนในการไหลที่ไม่มีกระแสลมทวน ($Sr=xx$) มากกว่าการไหลในกรณีที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ ($Sr=xxcf$)

ดังจะเห็นได้จาก เมื่อเพิ่มระดับในการหมุนควงจาก Swirl ratio เท่ากับ 0 เป็น 0.33 นั้น ในกรณีที่ไม่มีการผสมทวนร่วมอยู่ (Sr_{xx}) จะมีระยะที่ $C_T = 0.5$ ลดลงจากระยะประมาณ $11d$ ในกรณี $Sr0$ เหลือเพียงประมาณ $8d$ ในกรณี $Sr33$ ซึ่งมีระยะที่ $C_T = 0.5$ ลดลงไปถึง $3d$ หรือลดลงไปประมาณ 27% ของกรณีที่ไม่มีการหมุนควง ($Sr0$) แต่ในกรณีที่มีการผสมทวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf}) จะมีระยะที่ $C_T = 0.5$ ลดลงจากระยะประมาณ $6d$ ในกรณี $Sr0cf$ เหลือเพียงประมาณ $5d$ ในกรณี $Sr33cf$ ซึ่งมีระยะ $C_T = 0.5$ ลดไปแค่ประมาณ $1d$ หรือลดลงไปประมาณ 17% ของกรณีที่ไม่มีการหมุนควง ($Sr0cf$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในกรณีการไหลที่ไม่มีการผสมทวน (Sr_{xx}) จะมีการสลายตัวของอนุกรมตามแนวแกนมากกว่าในกรณีการไหลที่มีการผสมทวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf}) เมื่อเพิ่มระดับการหมุนควงของการไหลในปริมาณที่เท่ากัน

รูปที่ 3.41 แสดงอัตราการสลายตัวของอนุกรมตามแนวแกนของเจ็ต โดยนำค่าการสลายตัวของอนุกรมตามแนวแกนเจ็ตมาพล็อตใหม่บนสเกล log-log เพื่อให้เห็นลักษณะการสลายตัวของอนุกรมได้ดีขึ้น และจะนำผลการพล็อตที่ได้มาเปรียบเทียบกับสมการ โมเดล คือ

$$C_T = \frac{1}{1 + a(x - x_o)^n} \quad (3.16)$$

จากกราฟพบว่า ในกรณีการไหลที่ไม่มีการผสมทวน (Sr_{xx}) เจ็ตจะมีการสลายตัวด้วยอัตราโดยประมาณขึ้นต้นใกล้เคียงกัน โดยไม่เปลี่ยนไปตามระดับการหมุนควงที่เพิ่มขึ้น และเมื่อนำสมการโมเดลในสมการที่ 3.16 มาพล็อตกำกับพบว่า อัตราอัตราการสลายตัวของเจ็ตในกรณี Sr_{xx} นี้จะมีค่า n ประมาณ 1.15 โดยในส่วนของกรณีการไหลที่มีการผสมทวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf}) ก็จะได้ผลในลักษณะเช่นเดียวกับการไหลในกรณี Sr_{xx} คือเจ็ตจะมีการสลายตัวด้วยอัตราโดยประมาณขึ้นต้นใกล้เคียงกัน โดยไม่ขึ้นกับผลของการหมุนควง แต่จะมีความแตกต่างกันอยู่บ้างคือเมื่อใช้สมการที่ 3.16 มาพล็อตกำกับพบว่า ในกรณี Sr_{xxcf} นี้จะมีอัตราการสลายตัวของเจ็ต n ที่มีค่าประมาณ 1.40 ซึ่งอัตราการสลายตัวนี้มากกว่าค่า 1.15 ในกรณีของ Sr_{xx} แต่ค่า n ประมาณ 1.40 นี้จะใช้ประมาณการสลายตัวได้ดีเพียงในบริเวณการไหลในช่วง $x/d = 3$ ถึง 10 เท่านั้น โดยหลังจากบริเวณนี้ไปแล้วเจ็ตจะมีการสลายตัวอย่างรวดเร็วขึ้น ดังเห็นได้จากค่าความชันของกราฟในกรณี Sr_{xxcf} จะมีความชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อ $x/d > 10$

รูปที่ 3.42 แสดงระยะ Potential core ของเจ็ตในแต่ละกรณี โดยนิยามให้ระยะ Potential core เป็นระยะความยาวของการไหลที่มีค่า C_T ประมาณคงที่ที่ 1 ใกล้ปากเจ็ต โดยในการพิจารณานั้นได้นำค่าการสลายตัวของอนุกรมตามแนวแกนเจ็ตมาพล็อตใหม่บนสเกล Semi-log เพื่อให้เห็น

การสลายตัวของระยะ Potential core ได้ดียิ่งขึ้น จากผลการทดลองพบว่า ทั้งกระแสลมทวนและการหมุนควงมีผลทำให้ระยะ Potential core ของเจ็ตหดสั้นลงได้อย่างรวดเร็วขึ้น โดยสังเกตได้จากกรณี $Sr0$ ที่ไม่มีทั้งกระแสลมทวนและการหมุนควงนั้นจะมีระยะ Potential core ยาวที่สุด ซึ่งจะยาวกว่าในกรณี $Sr0cf$ ที่มีการไหลของกระแสลมทวนร่วมอยู่ และในกรณี $Sr33cf$ ที่มีทั้งกระแสลมทวนและการหมุนควงในระดับสูงสุดนั้นจะมีระยะ Potential core สั้นที่สุด

จากการศึกษาการลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกน ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ทั้งกระแสลมทวนและการหมุนควงมีผลทำให้อุณหภูมิตามแนวแกนเจ็ตลดลงได้อย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเจ็ตอิสระที่ไม่มีทั้งกระแสลมทวนและการหมุนควง โดยระดับของการหมุนควงนั้นจะส่งผลต่อการไหลในกรณีที่ไม่มีกระแสลมทวนมากกว่าการไหลในกรณีที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ คือเมื่อระดับของการหมุนควงมีค่าเพิ่มขึ้นในปริมาณที่เท่ากันแล้ว การไหลในกรณีที่ไม่มีกระแสลมทวนจะมีการลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกนมากกว่าการไหลในกรณีที่มีกระแสลมทวน

3.3.3 ระยะ Penetration depth ของการไหล

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค้นลักษณะการไหลของเจ็ตหมุนควงในกระแสลมทวน โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาเรียกได้ว่าแทบไม่มีเลยสำหรับการศึกษาการไหลแบบเจ็ตในกระแสลมทวนโดยการวัดอุณหภูมิในลักษณะนี้ จึงทำให้ไม่มีนิยามที่แน่ชัดสำหรับระยะ Penetration depth ที่ใช้ค่าอุณหภูมิเป็นตัวกำหนด ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้จึงได้นำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับการศึกษาในอดีตที่ผ่านมา โดยอ้างอิงจากแบบจำลองการไหล (Model) ของ Chan and Lam (1998) ดังแสดงในรูปที่ 3.43 ซึ่งยอมรับกันว่าเป็นแบบจำลองการไหลที่สามารถประมาณค่าการไหลแบบเจ็ตในกระแสลมทวนได้ดีที่สุด โดยเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4.62 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ จากแบบจำลองการไหลของ Chan and Lam (1998) พบว่า ระยะ Penetration depth (x_p) ของการไหลแบบเจ็ตในกระแสลมทวนจะมีค่าเท่ากับ $12.6d$ และเมื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟแสดงการลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกนในกรณีการไหลที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ ($Srxxcf$) ในการศึกษาวิจัยนี้ (แสดงในรูปที่ 3.44) โดยเปรียบเทียบกับการไหลในกรณี $Sr0cf$ ซึ่งเป็นการไหลแบบเจ็ตในกระแสลมทวนที่ไม่มี การหมุนควง พบว่า ที่ระยะ $x/d = 12.6$ ระดับอุณหภูมิตามแนวแกนบนแนว Centerline ของเจ็ตในกรณี $Sr0cf$ จะลดลงอยู่ที่ค่า $C_T = 0.2$ ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้จึงใช้ค่า $C_T = 0.2$ ในการนิยามระยะ Penetration depth ของการไหลในกรณีที่เหลือ ($Sr11cf$, $Sr22cf$ และ $Sr33cf$) โดยนิยามให้เป็นระยะตามแนวแกนที่ทำให้ค่า C_T บนแนว Centerline ของเจ็ตในกรณีการไหลที่มีกระแสลมทวน ($Srxxcf$) มีค่าลดลงเหลือ 0.2 ($C_T = 0.2$) ดังแสดงในรูปที่ 3.44 ซึ่งทำให้ได้ระยะ

Penetration depth ของการไหลในกรณี $Sr0cf$, $Sr11cf$, $Sr22cf$ และ $Sr33cf$ เท่ากับ 12.6d, 12.3d, 11.5d และ 10.7d ตามลำดับ

รูปที่ 3.45 แสดงระยะ Penetration depth ในกรณีการไหลที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ ($Sr_{xxx}cf$) ที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองการไหลของ Chan and Lam (1998) จากกราฟพบว่า การไหลแบบเจ็ตในกระแสลมทวนที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) เท่ากับ 4.62 จะมีระยะ Penetration depth สั้นลงอย่างต่อเนื่องเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มระดับการหมุนควงจาก Swirl ratio เท่ากับ 0 เป็น 0.33 นั้น ในการไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสลมทวนจะมีระยะ Penetration depth ลดลงจากระยะประมาณ 12.6d ในกรณี $Sr0cf$ (ผลที่ได้สอดคล้องกับสมการแบบจำลองการไหลของ Chan and Lam, 1998) เหลือเพียงประมาณ 10.7d ในกรณี $Sr33cf$ ซึ่งมีระยะ Penetration depth ของการไหลลดลงไปประมาณ 1.9d หรือลดลงไปประมาณ 15% ของกรณีที่ไม่มีกรหมุนควง ($Sr0cf$) แสดงให้เห็นว่าเจ็ตจะสลายตัวได้อย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงสูงขึ้น

รูปที่ 3.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Penetration depth (x_p) กับค่า Swirl ratio (Sr) ของการไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสลมทวนที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลคงที่ที่ 4.62 จากผลที่ได้พบว่า ระยะ Penetration depth มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อการไหลมีค่า Swirl ratio เพิ่มขึ้น และพบว่า ระยะ Penetration depth (x_p) กับค่า Swirl ratio (Sr) ในการศึกษาวิจัยนี้จะมีความสัมพันธ์กันแบบพาราโบลา โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการคือ

$$\frac{x_p}{d} = -10.33Sr^2 - 2.5Sr + 12.63 \quad (3.17)$$

ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถใช้ประมาณระยะ Penetration depth ได้ดีสำหรับการไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสลมทวนที่มีค่า Swirl ratio อยู่ในช่วง 0-0.33 ที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) คงที่ที่ 4.62 ดังนี้เมื่อขยายผลสู่ในกรณีทั่วไป จึงสามารถประมาณระยะ Penetration depth ของการไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสลมทวนได้ดังสมการ

$$\frac{x_p}{d} = aSr^2 + bSr + \left(\frac{x_p}{d} \right)_{Sr=0} \quad (3.18)$$

โดยที่ $(x_p / d)_{Sr=0}$ คือระยะ Penetration depth ของการไหลแบบเจ็ดในกระแสมทวนที่ไม่มีการหมุนควง ซึ่งอาจประมาณจากแบบจำลองการไหลของ Chan and Lam (1998) โดยที่ a และ b อาจเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r)

จากการศึกษา ระยะ Penetration depth ของการไหล ทำให้สรุปได้ว่า การไหลแบบเจ็ดหมุนควงในกระแสมทวนจะมีระยะ Penetration depth ตื้นลงเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าเจ็ดมีการกระจายและสลายตัวไปจนหมดได้อย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงสูงขึ้น โดยในการศึกษาวิจัยนี้พบว่า ในการไหลแบบเจ็ดหมุนควงในกระแสมทวนที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลเท่ากับ 4.62 ระยะ Penetration depth (x_p) กับระดับการหมุนควงที่มีค่า Swirl ratio (Sr) เป็นตัวบ่งชี้ จะมีความสัมพันธ์กันแบบพาราโบลา ดังสมการ

$$\frac{x_p}{d} = -10.33Sr^2 - 2.5Sr + 12.63$$

โดยที่ d คือระยะเส้นผ่านศูนย์กลางปากเจ็ด

3.3.4 การกระจายตัวของเจ็ด

ในการศึกษาการขยายตัวของเจ็ดจะพิจารณาจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่การกระจายตัวของเจ็ดในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream ซึ่งแสดงโดยรัศมีเทียบเท่าของวงกลมที่มีพื้นที่เทียบเท่ากับพื้นที่ที่ครอบคลุมระดับของ C_{TL} ที่กำหนด ($R_{C_{TL}}$) โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาที่ระดับอุณหภูมิ $C_{TL} = 0.5$ ซึ่งเป็นระดับที่งานวิจัยส่วนมากใช้ในการนิยามความกว้างของเจ็ด เนื่องจากเป็นระดับที่มี Gradient สูง ทำให้สามารถระบุตำแหน่งของขอบเจ็ดได้สะดวก นอกจากนี้ยังได้พิจารณาที่ระดับอุณหภูมิต่ำตรงบริเวณขอบการไหล คือที่ $C_{TL} = 0.3$ เพื่อศึกษาผลของการหมุนควงที่มีต่อการขยายตัวของเจ็ดที่ระดับอุณหภูมิต่ำ ซึ่งแสดงเป็นค่า $R_{0.5}$ และ $R_{0.3}$ ตามลำดับ ตามความสัมพันธ์ดังสมการ

$$R_{0.5} = \left(\frac{Area_{C_{TL} \geq 0.5}}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.19)$$

$$R_{0.3} = \left(\frac{Area_{C_{TL} \geq 0.3}}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.20)$$

โดยที่ $Area_{C_{TL} \geq 0.5}$ และ $Area_{C_{TL} \geq 0.3}$ คือพื้นที่ที่ครอบคลุมระดับของ C_{TL} ที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 และ 0.3 ตามลำดับ ในการคำนวณพื้นที่นั้นได้ใช้ Image processing toolbox ในโปรแกรม Matlab และอัตราการกระจายตัวของเจ็ดหาได้จากการใช้ Curve fitting โดยใช้ความสัมพันธ์แบบ Exponential ในการพิจารณา (แสดงผลบนสเกล Semi-log)

รูปที่ 3.47 แสดงการกระจายตัวของเจ็ดตามแนว Downstream ในกรณีการไหลที่ไม่มีกระแสลมทวน (Sr_{xx}) โดยรูปที่ 3.47ก แสดงบนสเกลเชิงเส้น และรูปที่ 3.47ข แสดงบนสเกล Semi-log จากกราฟพบว่า ในทุกกรณีที่ระดับอุณหภูมิ $C_{TL} = 0.5$ และ 0.3 เจ็ดมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream โดยระดับการหมุนควงที่สูงขึ้นนั้นจะทำให้เจ็ดมีอัตราการกระจายตัวเพิ่มขึ้น (ดูได้จากความชันบนกราฟ Semi-log) โดยในกรณี $Sr0$, $Sr11$, $Sr22$ และ $Sr33$ นั้นจะมีอัตราการกระจายตัวของ $R_{0.5}$ ประมาณ 0.038, 0.039, 0.043 และ 0.047 ตามลำดับ และมีอัตราการกระจายตัวของ $R_{0.3}$ ประมาณ 0.041, 0.043, 0.047 และ 0.053 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า เจ็ดจะมีอัตราการกระจายตัวเพิ่มขึ้นตามระดับการหมุนควงที่เพิ่มขึ้น

รูปที่ 3.48 แสดงการกระจายตัวของเจ็ดตามแนว Downstream ในกรณีการไหลที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf}) จากกราฟพบว่า ในทุกกรณีที่ระดับ $C_{TL} = 0.5$ และ 0.3 เจ็ดมีการกระจายตัวแบ่งเป็นสองช่วง โดยในช่วงแรก ($x/d = 1.5$ ถึง 12) เจ็ดจะมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream ซึ่งในช่วงการไหลนี้เจ็ดจะมีอัตราการกระจายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น และในช่วงถัดมา ($x/d = 12$ ถึง 16) เจ็ดจะเริ่มมีการกระจายตัวลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream ทั้งนี้เนื่องจากเจ็ดได้ถูกกระแสลมทวนพัดสวนทางกลับไปจนทำให้เจ็ดมีบริเวณการกระจายตัวลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจากกราฟประมาณได้ว่าเจ็ดจะถูกพัดกลับไปจนหมดได้อย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น

รูปที่ 3.49 แสดงการกระจายตัวของเจ็ดตามแนว Downstream เปรียบเทียบกันระหว่างกรณีการไหลที่ไม่มีกระแสลมทวน (Sr_{xx}) กับกรณีการไหลที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf}) โดยในรูปที่ 3.49ก เป็นการกระจายตัวที่พิจารณาโดยเส้น $R_{0.3}$ และรูปที่ 3.49ข เป็นการกระจายตัวที่พิจารณาโดยเส้น $R_{0.5}$ จากกราฟพบว่า การกระจายตัวของเจ็ดที่พิจารณาโดยเส้น $R_{0.3}$ และ $R_{0.5}$ จะได้ผลในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยในช่วงแรก ($x/d = 1.5$ ถึง 12) การไหลในกรณี Sr_{xxcf} จะมีการกระจายตัวมากกว่าการไหลในกรณี Sr_{xx} และการไหลในช่วงถัดมา ($x/d = 12$ ถึง 16) พบว่า การไหลในกรณี Sr_{xxcf} จะเริ่มมีการกระจายตัวลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream ในขณะที่การไหลในกรณี Sr_{xx} ยังคงมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

จากการศึกษาการกระจายตัวของเจ็ด ทำให้สรุปได้ว่าเมื่อมีกระแสลมทวนหรือมีการหมุน
ควง เจ็ดจะมีอัตราการกระจายตัวที่รวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งอัตราการเติบโตที่เร็วขึ้นนี้ เป็นเครื่องบ่งชี้ว่าเจ็ดมี
คุณลักษณะการผสมที่ดีและรวดเร็วยิ่งขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

อภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการไหลของเจ็ตที่หมุนควงในกระแสลมทวน ซึ่งได้ทำการทดลองโดยกำหนดให้การไหลของเจ็ตมีอุณหภูมิสูงกว่ากระแสลมทวน จึงส่งผลให้ลักษณะการไหลที่ปรากฏออกมามีผลเนื่องจากแรงลอยตัว (Buoyancy force) เกิดขึ้น โดยในการไหลของเจ็ตที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นของอากาศน้อยกว่าในการไหลของกระแสลมทวนที่มีอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้แรงลอยตัวของเจ็ตมีทิศทางพุ่งขึ้น และทำให้การไหลของเจ็ตมีแนวโน้มที่จะลอยตัวสูงขึ้น ซึ่งผลเนื่องจากแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลในทางบวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในงานทั่วไปที่มีสถานะการไหลที่คล้ายคลึงกัน ดังเช่นในงานทางด้านการผสมสารเคมีที่มีความหนาแน่นต่างกัน หรืองานที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมที่มีการปล่อยน้ำเสียอุณหภูมิสูงลงสู่แม่น้ำหรือมหาสมุทรที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เป็นต้น ซึ่งการนำไปประยุกต์ใช้ในงานดังกล่าวจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาวิจัย แต่ถ้าหากนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานที่มีสถานะการไหลที่แตกต่างไปจากการทดลอง ดังเช่นในงานที่การไหลของเจ็ตมีอุณหภูมิเท่ากันหรือต่ำกว่าหรือมีความหนาแน่นมากกว่าการไหลของกระแสลมทวนก็อาจทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแตกต่างไปจากผลการทดลองอยู่บ้าง ทั้งนี้เนื่องจากผลของแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางที่ตรงกันข้ามกัน โดยในสถานะการไหลที่เจ็ตมีความหนาแน่นมากกว่ากระแสลมทวนนี้แรงลอยตัวของเจ็ตจะมีทิศทางพุ่งลง ซึ่งส่งผลให้การไหลของเจ็ตมีแนวโน้มที่จะจมตัวต่ำลงจากแนว Centerline

อย่างไรก็ตามคาดว่าผลที่ได้จะไม่แตกต่างไปจากผลที่ได้ในงานวิจัยมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากในทุกกรณีการทดลองจะมีค่า Densimetric Froude number (Fr) ประมาณ 0.09 และมีค่า Fr/r ประมาณ 0.02 นั่นคือผลเนื่องจากแรงลอยตัวของเจ็ตร้อนจะมีค่าประมาณ 9% ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของกระแสลมทวน และมีค่าเพียง 2% ของแรงเฉื่อยเนื่องจากความเร็วของเจ็ตเท่านั้น นอกจากนี้จากผลการทดลองที่ได้ยังพบว่า บริเวณที่มีผลของแรงลอยตัวเกิดขึ้นอย่างชัดเจนนั้นจะมีเฉพาะที่บริเวณขอบการไหลของเจ็ตเท่านั้น โดยจะไม่พบผลของแรงลอยตัวอยู่เลยในบริเวณการไหลส่วนใหญ่ที่ถัดเข้ามาจากบริเวณขอบ จึงทำให้สันนิษฐานได้ว่า ผลการทดลองส่วนใหญ่ที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังคงสามารถใช้ประมาณค่าได้ดีในสถานะการไหลที่เจ็ตมีความหนาแน่นเท่ากับหรือมากกว่ากระแสลมทวน ทั้งในส่วนของคุณลักษณะการไหลเฉพาะหน้าตัดในช่วง Near field, การลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกนการไหล หรือแม้แต่ผลการกระจายตัวของเจ็ต

เมื่อพิจารณาในส่วนของความเร็วในการหมุนควง จากงานของ Farokhi and Taghavi (1989) พบว่า คุณสมบัติการไหลโดยรวมของการไหลแบบเจ็ตหมุนควงอิสระจะขึ้นอยู่กับสถานะเริ่มต้นของการไหล (Initial condition) โดยขึ้นกับค่า Swirl number และรูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสที่ตำแหน่งปากทางออก (Initial tangential velocity profile) เป็นสำคัญ ดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้ ถ้าหากมีสถานะเริ่มต้นของการไหลแตกต่างกันไปจากที่ระบุไว้ในการศึกษาข้างต้นอาจทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแตกต่างไปจากผลการทดลองอยู่บ้าง อย่างไรก็ตามในการศึกษาวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการผสมในการไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวนโดยใช้กลไกการหมุนควงเข้ามาช่วย ซึ่งคาดว่าแนวทางดังกล่าวจะยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมในการไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวนได้ถึงแม้ว่าการนำไปประยุกต์ใช้จะมีสถานะเริ่มต้นของการหมุนควงที่แตกต่างไปจากที่ระบุไว้ในการศึกษาวิจัยนี้ก็ตาม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของความเร็วในการหมุนควงซึ่งแสดงโดยค่า Swirl ratio (Sr) ที่มีต่อคุณลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิและการผสมของเจ็ดในกระแสมทวน โดยทดลองที่ค่า Swirl ratio (Sr) ตั้งแต่ 0 ถึง 0.33 ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลคงที่ที่ 4.62 ในช่วง $x/d = 1.5$ ถึง 16 โดยใช้ท่อหมุนในการทำให้เกิดการหมุนควง ซึ่งมีความเร็วตามแนวสัมผัสและผลรวมของค่า Circulation รอบเจ็ดไม่เท่ากับศูนย์ (Non-zero circulation) ผลการทดลองจะแสดงจากคุณลักษณะเฉพาะหน้าตัด (Local characteristic) ได้แก่ การกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัด และคุณลักษณะโดยรวม (Global Characteristic) ได้แก่ เส้นทาง (Trajectory) และการสลายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน (Centerline temperature decay) และอัตราการกระจายตัวของเจ็ด (Spread rate) โดยผลการทดลองดังกล่าวได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในกรณีการไหลแบบเจ็ดหมุนควงอิสระที่ไม่มีกรไหลของกระแสมทวนร่วมอยู่ ซึ่งได้ทำควบคู่กันไปเพื่อใช้ในการทดลองในกรณีพื้นฐานและใช้สำหรับเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนควง โดยเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีการไหลที่มีและไม่มีกระแสมทวนร่วมอยู่

จากผลการทดลองในกรณีการไหลแบบเจ็ดหมุนควงอิสระพบว่า ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา โดยพบว่า การหมุนควงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมของเจ็ดให้ดียิ่งขึ้น ดังจะเห็นได้จากการไหลของเจ็ดที่มีระดับการหมุนควงสูงจะมีการกระจายตัวที่รวดเร็วกว่าการไหลของเจ็ดที่มีระดับการหมุนควงต่ำ (รูปที่ 3.46) และอุณหภูมิตามแนวแกนเจ็ดจะลดลงได้อย่างรวดเร็วขึ้นเมื่อระดับการหมุนควงเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.40) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการหมุนควงจะช่วยให้เจ็ดสามารถดึงเอาอากาศจากรอบข้างเข้ามาผสมได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การหมุนควงจะไม่ส่งผลให้รูปร่างการกระจายตัวของเจ็ดเกิดการเปลี่ยนแปลงไปแต่อย่างใด โดยในการไหลแบบเจ็ดอิสระที่มีการหมุนควงจะมีรูปร่างการกระจายตัวที่มีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตรเช่นเดียวกับการไหลของเจ็ดอิสระที่ไม่มีกรหมุนควง (รูปที่ 3.31-3.38, แลวบน)

จากผลการทดลองในกรณีการไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสมทวนพบว่า ทั้งกระแสมทวนและการหมุนควงมีผลทำให้ลักษณะการไหลและคุณลักษณะการผสมของเจ็ตเปลี่ยนแปลงไปจากการไหลแบบเจ็ตอิสระที่ไม่มีทั้งกระแสมทวนและการหมุนควงดังนี้

เมื่อพิจารณาถึงผลของกระแสมทวนเพียงอย่างเดียวพบว่า กระแสมทวนได้ส่งผลทำให้การไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวนมีลักษณะที่แตกต่างไปจากการไหลแบบเจ็ตอิสระ โดยในการไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวนนั้น เจ็ตจะมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงแรกไปได้ระยะหนึ่ง หลังจากนั้นเจ็ตจะเริ่มมีขนาดการกระจายที่ลดลงอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream ทั้งนี้เนื่องจากการไหลของเจ็ตได้ถูกกระแสมทวนพัดสวนกลับไปทีละน้อย จนในที่สุดก็จะไม่มีบริเวณการกระจายตัวของเจ็ตเหลืออยู่ ซึ่งแตกต่างไปจากการไหลแบบเจ็ตหมุนควงอิสระ ที่จะมีการกระจายตัวของเจ็ตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามแนว Downstream นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสมทวนมีผลทำให้เจ็ตมีอัตราการกระจายตัวเพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้จากการไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวนจะมีการกระจายตัวได้อย่างรวดเร็วกว่าการไหลแบบเจ็ตอิสระ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเจ็ตสามารถดึงอากาศจากบริเวณรอบข้างเข้ามาผสมได้ดียิ่งขึ้นเมื่อมีการไหลของกระแสมทวนร่วมอยู่ (รูปที่ 3.48)

และเมื่อพิจารณาผลของการหมุนควงผนวกเข้าไปด้วยพบว่า การไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวนจะมีอุณหภูมิตามแนวแกนลดลงเร็วขึ้น มีระยะ Penetration depth สั้นลง และมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น (รูปที่ 3.40, 3.45 และ 3.47) โดยในส่วนของระยะ Penetration depth (x_p) ในการศึกษาวิจัยนี้พบว่า จะมีความสัมพันธ์กับค่า Swirl ratio (Sr) ดังสมการคือ

$$\frac{x_p}{d} = -10.33Sr^2 - 2.5Sr + 12.63$$

โดยที่ d คือระยะเส้นผ่านศูนย์กลางปากเจ็ต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการหมุนควงยังคงส่งผลต่อคุณลักษณะการผสมในการไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวน โดยมีส่วนช่วยทำให้การไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวนมีประสิทธิภาพในการผสมที่ดียิ่งขึ้นเมื่อการไหลมีระดับการหมุนควงที่สูงขึ้น และเช่นเดียวกับการไหลแบบเจ็ตหมุนควงอิสระ คือการหมุนควงจะไม่มีผลต่อรูปร่างการกระจายตัวในการไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสมทวน (รูปที่ 3.31-3.38, แฉวล่าง) โดยในการไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวนที่มีการหมุนควงจะมีรูปร่างการกระจายตัวที่มีลักษณะค่อนข้างกลมและมีความสมมาตรเช่นเดียวกับการไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวนที่ไม่มีการหมุนควง

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของการหมุนควงในการไหลแบบเจ็ตหมุนควงอิสระเปรียบเทียบกับการไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสมทวนพบว่า การหมุนควงจะส่งผลต่อการไหลแบบ

เจ็ทอิสระมากกว่าการไหลแบบเจ็ทในกระแสมทวน โดยเมื่อเพิ่มระดับการหมุนควงในปริมาณที่เท่ากันแล้ว การไหลแบบเจ็ทหมุนควงอิสระจะมีการลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกนมากกว่าการไหลแบบเจ็ทหมุนควงในกระแสมทวน ดังจะเห็นได้จากการไหลแบบเจ็ทหมุนควงอิสระจะมีระยะทางในการสลายตัวของอุณหภูมิลดสั้นลงได้มากกว่าในการไหลแบบเจ็ทหมุนควงในกระแสมทวน (รูปที่ 3.40) คือเมื่อเพิ่มระดับการหมุนควงจาก Swirl ratio เท่ากับ 0 (ไม่มีการหมุนควง) เป็น 0.33 นั้น การไหลแบบเจ็ทหมุนควงอิสระจะมีระยะที่อุณหภูมิลดสั้นลงที่แกนเจ็ทลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิลดสั้นลงทั้งหมด (ระยะที่ $C_T = 0.5$) สั้นลงประมาณ 27% ในขณะที่การไหลแบบเจ็ทหมุนควงในกระแสมทวนจะมีระยะที่ $C_T = 0.5$ สั้นลงเพียง 17% เท่านั้น

อนึ่ง งานวิจัยนี้วัดการกระจายตัวของอุณหภูมิลดสั้นลง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การหมุนควงไม่มีผลต่อรูปร่างการกระจายตัวเท่าใดนัก อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิต่อเวลาใดๆอาจให้ผลที่แตกต่างไปได้

สำหรับอัตราการลดลงของอุณหภูมิตามแนว Centerline ของเจ็ททั้งในการไหลแบบเจ็ทหมุนควงอิสระและการไหลแบบเจ็ทหมุนควงในกระแสมทวนนั้น สามารถประมาณค่าอย่างสังเขปได้จากสมการโมเดล

$$C_T = \frac{1}{1 + a(x - x_0)^n}$$

โดยเมื่อนำสมการโมเดลข้างต้นมาพล็อตค่ากับพบว่า (รูปที่ 3.41) ในการไหลแบบเจ็ทหมุนควงอิสระจะมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิลดสั้นลงค่า n ประมาณ 1.15 และสำหรับการไหลแบบเจ็ทหมุนควงในกระแสมทวนนั้นจะมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิลดสั้นลงค่า n ประมาณ 1.40 โดยอัตราการลดลงของอุณหภูมิลดสั้นลง (n) ในการไหลทั้งสองกรณีจะไม่ขึ้นกับระดับการหมุนควงมากนัก และเนื่องจากค่า n ของการไหลแบบเจ็ทหมุนควงในกระแสมทวนมีค่ามากกว่าของการไหลแบบเจ็ทหมุนควงอิสระ แสดงให้เห็นว่าการไหลแบบเจ็ทหมุนควงในกระแสมทวนจะมีการสลายตัวของอุณหภูมิลดสั้นลงอย่างรวดเร็วกว่าการไหลแบบเจ็ทหมุนควงอิสระ อย่างไรก็ตาม ค่า $n = 1.40$ นี้จะใช้ประมาณได้ดีเพียงในบริเวณการไหลในช่วง $x/d = 3$ ถึง 10 เท่านั้น โดยหลังจากนี้ไปแล้วการไหลแบบเจ็ทหมุนควงในกระแสมทวนจะมีการสลายตัวได้อย่างรวดเร็วขึ้น (ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นเมื่อ $x/d > 10$)

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ในอดีตที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวนกันน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการศึกษาที่เกี่ยวกับลักษณะการไหลในแบบอื่นๆ เช่นการไหลแบบเจ็ตในกระแสมตาม หรือการไหลแบบเจ็ตในกระแสมขวาง และเรียกได้ว่าแทบไม่มีเลยสำหรับการศึกษาเกี่ยวกับการไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสมทวน ซึ่งความรู้ ความเข้าใจ และข้อมูลขั้นต้นที่มีอยู่น้อยนี้ทำให้การไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสมทวนยังคงมีประเด็นที่น่าสนใจสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมอยู่อีกหลายประเด็น ดังนี้

ช่วงความเร็วในการหมุนควงที่มีผลต่อการไหล ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทดลองที่ค่า Swirl ratio ประมาณ 0-0.33 พบว่า ระดับการหมุนควงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสมทวนมีประสิทธิภาพการผสมที่ดียิ่งขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการผสมได้อีกโดยการเพิ่มระดับของการหมุนควงให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมนี้คงจะมีขีดจำกัดอยู่ที่ค่า Swirl ratio ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นประเด็นที่น่าทำการศึกษาต่อไป

ในการศึกษาการไหลที่มีความเร็วในการหมุนควงด้วยนั้น ประเด็นหนึ่งที่มีความน่าสนใจคือการเกิด Vortex Breakdown ในการไหลที่มีระดับการหมุนควงสูง โดยในงานของ Feyedelem and Sarpkaya (1997) พบว่าการไหลแบบเจ็ตหมุนควงอิสระจะเกิด Vortex breakdown เมื่อการไหลมีค่า Swirl number ประมาณ 0.48-0.50 ซึ่งเป็นที่น่าสนใจว่าการไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสมทวนนั้นจะมีปรากฏการณ์ Vortex breakdown เกิดขึ้นหรือไม่ และถ้ามีจะเกิดที่ระดับการหมุนควงของเจ็ตเท่าไร ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลแบบเจ็ตหมุนควงในกระแสมทวนที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลประมาณ 4.62 โดยทดลองที่ค่า Swirl number สูงสุดประมาณ 0.12 แต่ยังไม่สามารถตรวจสอบปรากฏการณ์ Vortex breakdown ได้ว่าเกิดขึ้นหรือไม่ และถ้าไม่แล้ว Vortex breakdown จะเกิดขึ้นที่ค่า Swirl number เท่าไร จากข้อมูลการวิจัยในอดีตที่ผ่านมาคาดว่า ถ้าหากเกิด Vortex breakdown ขึ้นอาจเกิดที่ค่า Swirl number น้อยกว่าในการไหลแบบเจ็ตหมุนควงอิสระ ทั้งนี้เนื่องจากการไหลในกรณีที่มีกระแสมทวนนั้นจะมี Adverse pressure gradient เกิดขึ้นในการไหล โดยในงานของ Billant et al. (1998) พบว่า Adverse pressure gradient ของการไหลจะส่งผลให้ปรากฏการณ์ Vortex breakdown เกิดขึ้นที่ Swirl number มีค่าต่ำลง

นอกจากนี้ข้อมูลในงานวิจัยนี้น่าจะเป็นแนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมการไหลในแบบอื่น ไม่ว่าจะเป็นในแบบ Active หรือ Passive control หรือทั้ง 2 แบบควบคู่กัน เช่นการติด

Vortex generator ควบคุมกับการใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) รวมทั้งยังเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้สำหรับการไหลในลักษณะอื่นๆได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประมวลตาราง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
1	Beltaos and Rajaratnam (1973)	<ul style="list-style-type: none"> ใช้ Empirical model เพื่อศึกษาคุณลักษณะการไหลแบบเจ็ตในกระแสนวนและนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง 	$r_v = 1-8$ $Re_j = 24,800$	<ul style="list-style-type: none"> ระยะ Penetration depth (x_p) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราส่วนความเร็ว (r_v) โดยได้ค่าคงที่ของสมการ (k) เท่ากับ 2.6 ตำแหน่งของการกระจายตัวสูงสุดและระยะครึ่งหนึ่งของการกระจายตัวสูงสุด (x_o และ y_o) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า x_p โดยมีค่าเท่ากับ $0.75x_p$ และ $0.3x_p$ ตามลำดับ ไฮเปอร์โบลิกฟังก์ชันสามารถใช้ประมาณการลดลงของความเร็วตามแนวแกนของการไหลแบบเจ็ตในกระแสนวน โดยได้ค่าคงที่ของสมการเท่ากับ 5.83 ซึ่งน้อยกว่าในกรณีเจ็ตอิสระที่มีค่าคงที่ของสมการไฮเปอร์โบลิกเท่ากับ 6.3

ตารางที่ 1.1 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา : การศึกษาการไหลแบบเจ็ตในกระแสนวน

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
2	Konig and Fiedler (1991)	<ul style="list-style-type: none"> ทำการทดลองโดยใช้เทคนิค Flow visualization กับชุดทดลองน้ำเพื่อศึกษาคุณลักษณะการกระจายตัวของการไหลแบบเจ็ตในกระแสวน 	$r_v = 1-8$ $Re_j = 5,000-20,000$	<ul style="list-style-type: none"> ลักษณะการไหลแบบไม่คงตัว (Stable case) จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนความเร็ว (r_v) มีค่าประมาณ 1.4 ตำแหน่งของการกระจายตัวสูงสุดและระยะครึ่งหนึ่งของการกระจายตัวสูงสุด (x_Q และ y_Q) จะแปรผันตามระยะ Penetration depth (x_p) โดยในส่วนของ x_Q จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อ r_v เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่ $0.7x_p$ แต่สำหรับ y_Q จะมีค่าลดลงเรื่อยๆเมื่อ r_v เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่ $0.4x_p$
3	Lam et al. (1991)	<ul style="list-style-type: none"> ทำการทดลองโดยปล่อยเจ็ตน้ำจากท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. ในกระแสวน โดยทำการทดลองภายในแท่งขนาด $0.3 \times 0.3 \times 5 \text{ m}^3$ ใช้ทฤษฎี Inviscid linearised stability ในการวิเคราะห์ผลของกระแสวนที่มีต่อเสถียรภาพในการไหลของเจ็ตที่กลมแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง 	$r_v = 10, 20$ $u_{cr} = 0, 0.05u_j, 0.1u_j$ Constant $u_j = 9.2 \text{ cm/s}$	<ul style="list-style-type: none"> ทฤษฎี Inviscid linearised stability สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ Disturbance ของเจ็ตในกระแสวนที่มีความเร็วต่ำได้ การเพิ่มกระแสวนจะทำให้เกิด Disturbance มากขึ้น ซึ่งหมายถึงเจ็ตมีเสถียรภาพน้อยลง โดยมี Quasi frequency ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อดูจาก Flow visualization

ตารางที่ 1.1 (ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
4	Lam and Chan (1995)	<ul style="list-style-type: none"> • ทำการศึกษาเกี่ยวกับระยะ Penetration Depth และการกระจายตัวของการไหลแบบเจ็ตในกระแสนวน • ใช้ Nozzle ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. วางในแนวระดับ และปล่อยเจ็ตน้ำเข้าสู่กระแสนวนที่ไหลอยู่ในท่อขนาด 10 x 0.45 x 0.3 m³ 	$r_v = 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 18$ Constant $u_{cf} = 5 \text{ cm/s}$	<ul style="list-style-type: none"> • ระยะ Penetration depth (x_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของความเร็วเจ็ตต่อกระแสนวน (r_v) เพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง • การเพิ่มอัตราส่วนความเร็ว (r_v) ทำให้อัตราการกระจายตัวของเจ็ต (Spread rate) มีอัตราที่ลดลงเมื่อ Normalize เทียบกับระยะ x_p
5	Lam and Chan (1997)	<ul style="list-style-type: none"> • ทำการศึกษาเกี่ยวกับระดับความปั่นป่วนของการไหลแบบเจ็ตในกระแสนวนโดยใช้ LDA เป็นเครื่องมือในการวัดทั้งค่าของความเร็วและระดับความปั่นป่วนของการไหล 	$r_v = 3-20$ $Re_j = 3,000-20,000$	<ul style="list-style-type: none"> • ตำแหน่งของจุดปลาย Penetration depth ณ เวลาใดๆ ซึ่งนิยามให้เป็นคู่อันดับ (x_p', y_p') จะมีการสั่นอย่างรุนแรงตลอดทั้งการไหล โดยที่ x_p' และ y_p' มีค่า rms ของการสั่นเท่ากับ 12% และ 15% ตามลำดับ • การสั่นไปมาของตำแหน่งการกระจายตัวสูงสุดและระยะครึ่งหนึ่งของการกระจายตัวสูงสุด (x_o, y_o) จะมีค่า rms คิดได้เป็น 11% และ 13% ตามลำดับ • ค่าเฉลี่ยของระยะ x', y', x_o และ y_o ที่ได้จากภาพ ณ เวลาใดๆ อาจไม่เท่ากับค่าที่ได้จากภาพเฉลี่ยตลอดเวลาก็ได้ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการสั่นไปมาที่รุนแรงตลอดทั้งการไหล

ตารางที่ 1.1 (ต่อ)

ลำดับ	ผู้ศึกษา	รายละเอียดของการศึกษา	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
6	Yoda and Fiedler (1997)	<ul style="list-style-type: none"> ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของการไหลแบบเจ็ตในกระแสวน ใช้ Nozzle ขนาด $d = 0.5$ ซม. และ $d = 1.0$ ซม. เพื่อศึกษาผลของค่า Reynolds ที่มีต่อลักษณะการไหลของเจ็ตในกระแสวน โดยทำการทดลองปล่อยเจ็ตน้ำในแนวตั้งเข้าสู่ Test section ขนาด $30 \times 30 \times 120 \text{ cm}^3$ 	$r_v = 1.3-10$ Constant $u_{cf} = 13 \text{ cm/s}$ $\theta = 5^\circ$	<ul style="list-style-type: none"> จากการศึกษาโดยเปลี่ยนขนาดและรูปร่างปากเจ็ตพบว่า ระยะ Penetration depth จะไม่ขึ้นกับค่า Reynolds number และรูปร่างความเร็วของเจ็ตที่ปากทางออก การไหลจะมีเสถียรภาพเป็นอย่างมากเมื่อ r_v มีค่าน้อยกว่า 1.4 และจะเริ่มไม่มีเสถียรภาพเมื่อ r_v มากกว่า 1.4 ลักษณะการไหลแบบเจ็ตในกระแสวนจะขึ้นกับมุมปะทะระหว่างเจ็ตและกระแสวนเป็นอย่างมากเมื่อ r_v มีค่าน้อยกว่า 3 ค่าเฉลี่ยของระยะครึ่งหนึ่งของการกระจายตัวสูงสุด ($y_{0.5}$) จะมีค่าไม่เกิน 40% ของระยะ Penetration depth เฉลี่ย โดยไม่ขึ้นกับค่า r_v
7	Chan and Lam (1998)	<ul style="list-style-type: none"> ทำการศึกษาในเชิงวิเคราะห์โดยใช้ Advection hypothesis เพื่อหาการลดลงของความเร็วในแนวแกนของเจ็ตในกระแสวนแล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ใช้ Nozzle ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. วางในแนวระดับและปล่อยเจ็ตเข้าสู่กระแสวนที่ไหลอยู่ภายในแท่งขนาด $10 \times 0.45 \times 0.3 \text{ m}^3$ 	$r_v = 3-15$ $Re_j = 3,000-15,000$ Constant $u_{cf} = 10 \text{ cm/s}$	<ul style="list-style-type: none"> สมการที่ได้สามารถประมาณค่าความเร็วตามแนวแกนของการไหลแบบเจ็ตในกระแสวนได้อย่างแม่นยำเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ค่า r_v ต่างๆ ยกเว้นที่บริเวณใกล้ปากเจ็ต ซึ่งเป็นบริเวณที่การไหลยังอยู่ในช่วง Transition และยังไม่เข้าสู่ช่วงที่มี Self-similarity อย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 1.1 (ต่อ)

กรณีศึกษา	Swirl ratio (Sr)	Swirl number (Sr)	Circulation (m^2/s)
$Sr0, Sr0cf$	0.00	0.00	0.00
$Sr11, Sr11cf$	0.11	0.04	0.07
$Sr22, Sr22cf$	0.22	0.07	0.15
$Sr33, Sr33cf$	0.33	0.12	0.22

ตาราง 2.1 รายละเอียดของปริมาณต่างๆในแต่ละกรณี

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ยในแต่ละกรณี การทดลอง	ความแตกต่างมากที่สุด ในแต่ละกรณี (%)
ในทุกกรณีการทดลอง (Sr_{xx}, Sr_{xxcf})		
ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ต (\bar{u}_j)	9.88 m/s	$\pm 4 \%$
ความเร็วที่จุดกึ่งกลางปากเจ็ต ($u_{j,c}$)	12.6 m/s	$\pm 2 \%$ ของค่าเป็น $^{\circ}C$
อุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ต (\bar{T}_j)	76.8 $^{\circ}C$	$\pm 4 \%$ ของค่าเป็น $^{\circ}C$
อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางปากเจ็ต ($T_{j,c}$)	81.5 $^{\circ}C$	$\pm 2 \%$
ในกรณีที่มีกระแสสวนวน (Sr_{xxcf})		
ความเร็วของกระแสสวนวน ($ \bar{u}_{cf} $)	1.98 m/s	$\pm 2 \%$
อุณหภูมิของกระแสสวนวน (\bar{T}_{cf})	30.3 $^{\circ}C$	$\pm 3 \%$ ของค่าเป็น $^{\circ}C$
อัตราส่วนความเร็วประสิทธิภาพ (r)	4.62	$\pm 4 \%$
อัตราส่วนความเร็ว (r_v)	4.97	$\pm 4 \%$
อัตราส่วนความหนาแน่น (r_d)	0.87	$\pm 1 \%$

ตาราง 2.2 รายละเอียดพารามิเตอร์ในการทดลองและความคลาดเคลื่อนในแต่ละกรณี

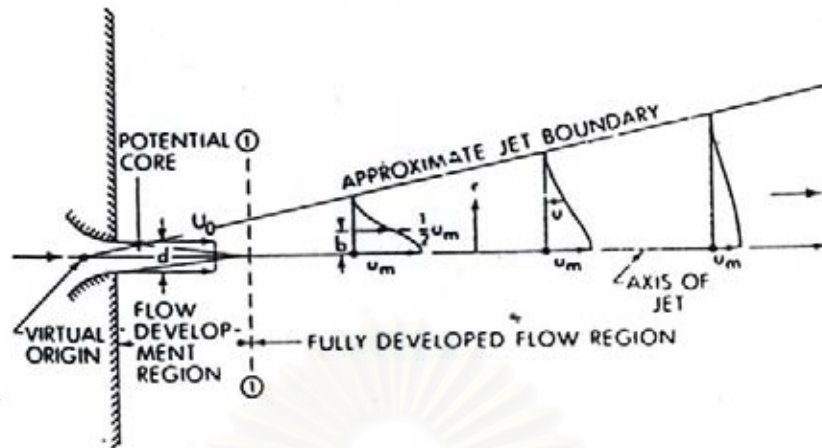
กรณีการทดลองที่ไม่มีกระแสลมทวน (Sr_{xx})			
หน้าตัดที่	x/d	ความละเอียด ($\Delta y \times \Delta z$)	จำนวนจุด ($y \times z$)
1	1.5	2.5 mm \times 2.5 mm	19 จุด \times 19 จุด
2	4	5 mm \times 5 mm	15 จุด \times 15 จุด
3	6	5 mm \times 5 mm	17 จุด \times 17 จุด
4	8	5 mm \times 5 mm	21 จุด \times 21 จุด
5	10	5 mm \times 5 mm	21 จุด \times 21 จุด
6	12	10 mm \times 10 mm	15 จุด \times 15 จุด
7	14	10 mm \times 10 mm	17 จุด \times 17 จุด
8	16	10 mm \times 10 mm	21 จุด \times 21 จุด
กรณีการทดลองที่มีกระแสลมทวน (Sr_{xxcf})			
หน้าตัดที่	x/d	ความละเอียด ($\Delta y \times \Delta z$)	จำนวนจุด ($y \times z$)
1	1.5	2.5 mm \times 2.5 mm	25 จุด \times 25 จุด
2	4	5 mm \times 5 mm	21 จุด \times 21 จุด
3	6	10 mm \times 10 mm	15 จุด \times 15 จุด
4	8	10 mm \times 10 mm	19 จุด \times 19 จุด
5	10	10 mm \times 10 mm	21 จุด \times 21 จุด
6	12	10 mm \times 10 mm	21 จุด \times 21 จุด
7	14	10 mm \times 10 mm	21 จุด \times 21 จุด
8	16	10 mm \times 10 mm	21 จุด \times 21 จุด

ตารางที่ 2.3 ความละเอียดและจำนวนจุดที่วัดในแต่ละกรณีการทดลอง

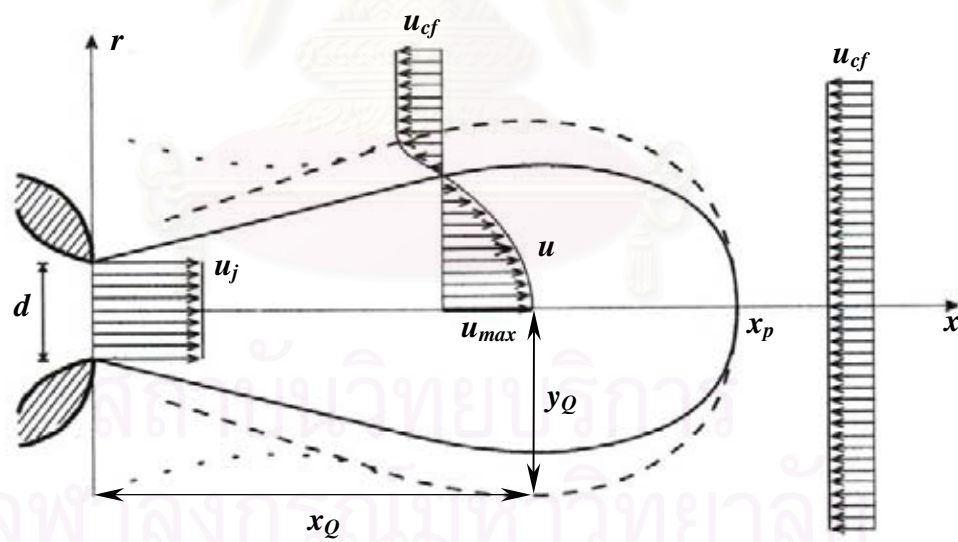
ประมวลรูปภาพ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

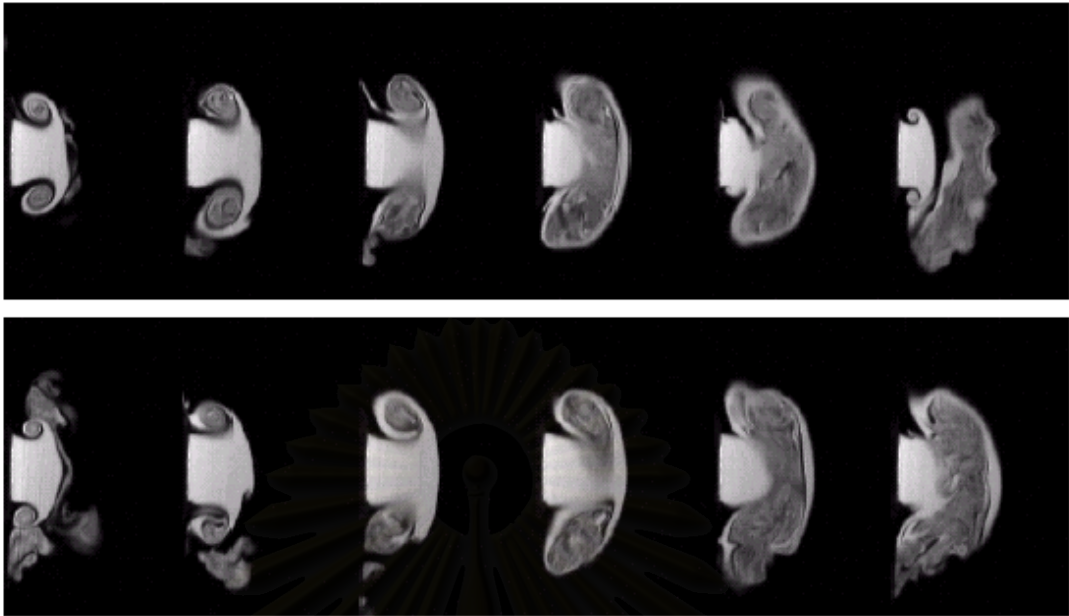


รูปที่ 1.1 ลักษณะการไหลของ Circular turbulent jet (Rajaratnam, 1976)

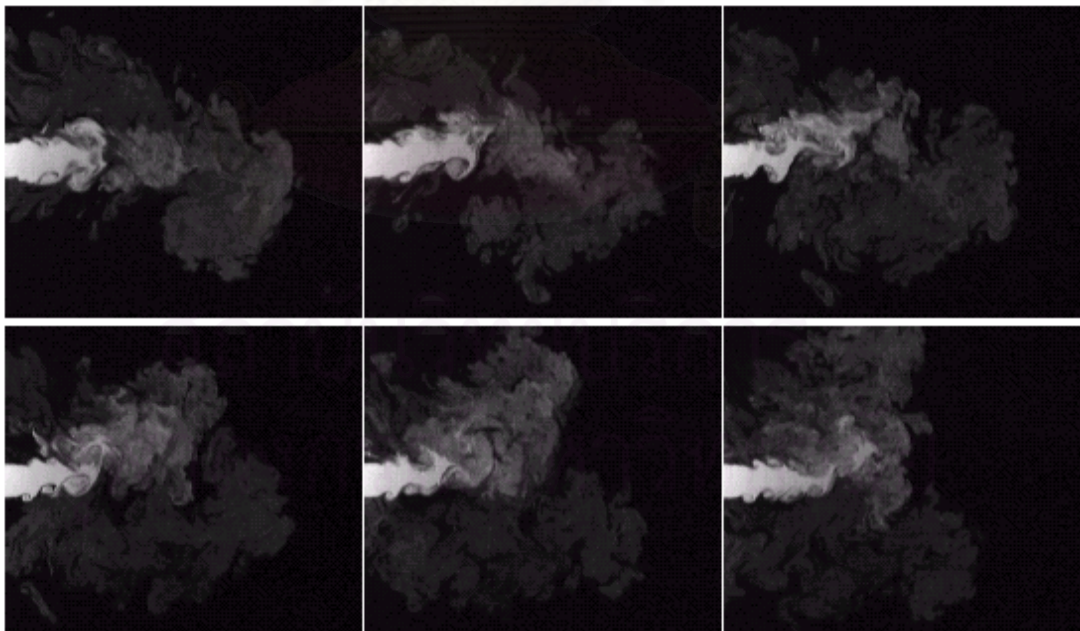


รูปที่ 1.2 ลักษณะการไหลโดยเฉลี่ยของเจ็ตในกระแสวน (Bernero, 2000);

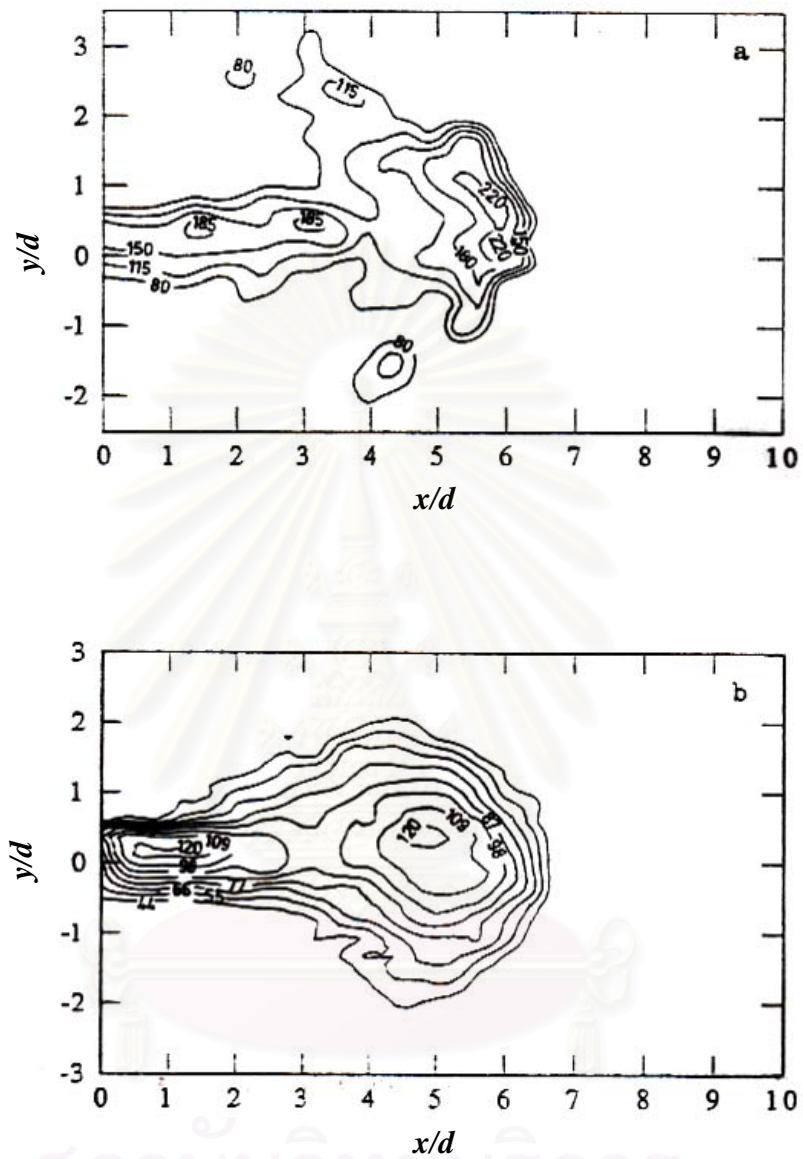
— $u = 0$, - - - Stagnation stream surface ($Q = 0$)



รูปที่ 1.3 ภาพแสดงกรณีการไหลคงตัวของเจ็ตในกระแสวน ที่ $r_v = 1.3$ ซึ่งแต่ละภาพถ่ายที่เวลาห่างกัน 0.08 วินาที เรียงลำดับจากซ้ายไปขวา บนไปล่าง (Bernero, 2000)

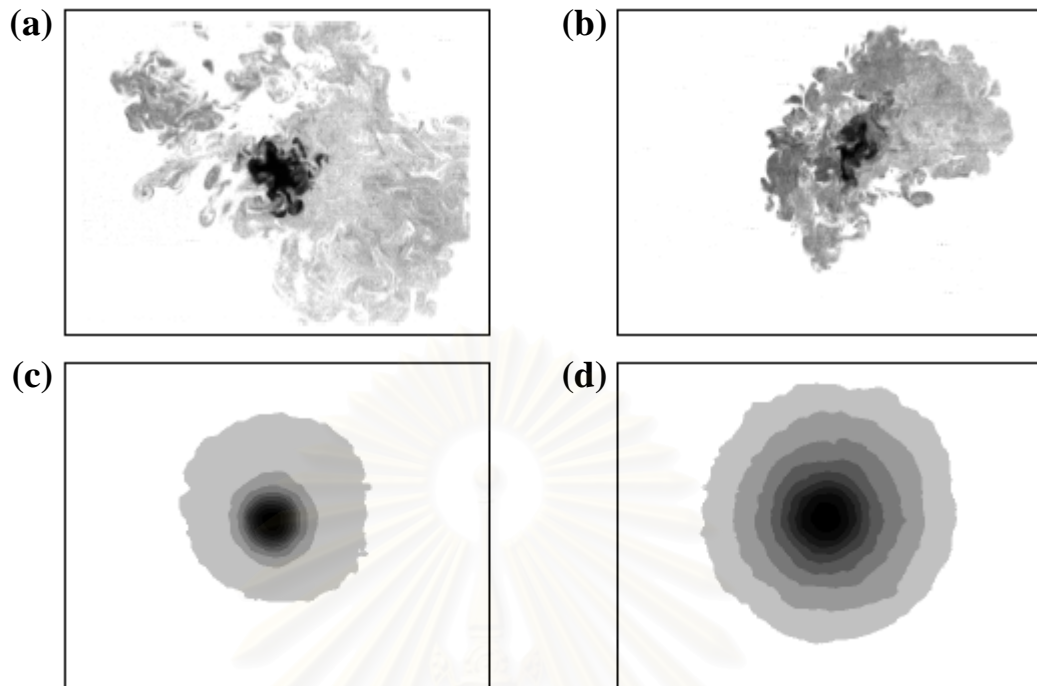


รูปที่ 1.4 ภาพแสดงกรณีการไหลไม่คงตัวของเจ็ตในกระแสวน ที่ $r_v = 3.4$ ซึ่งแต่ละภาพถ่ายที่เวลาห่างกัน 0.12 วินาที เรียงลำดับจากซ้ายไปขวา บนไปล่าง (Bernero, 2000)

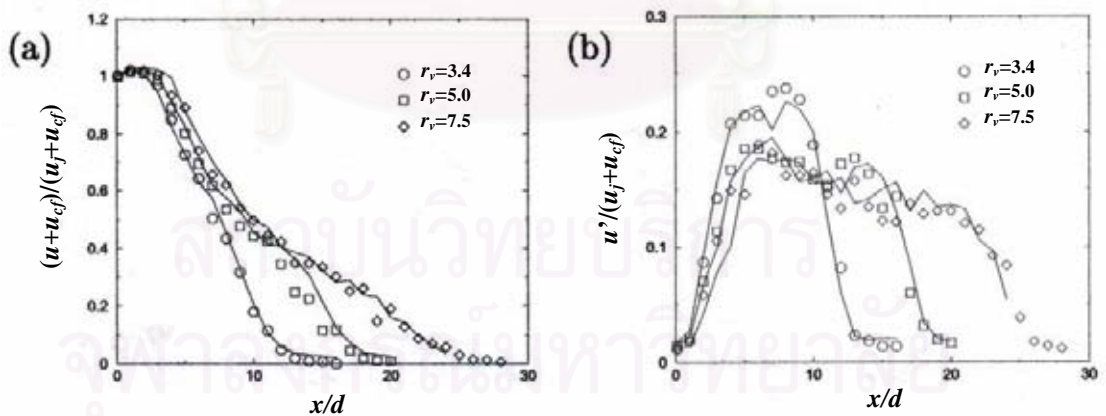


รูปที่ 1.5 ลักษณะการกระจายความเข้มข้นตามแนวแกนของเจ็ตในกระแสนวน
ที่ $r_v = 2.5$ (Lam and Chan, 1995)

a) ภาพตัวอย่าง ณ เวลาหนึ่ง, b) ภาพเฉลี่ยตลอดทั้งการไหล

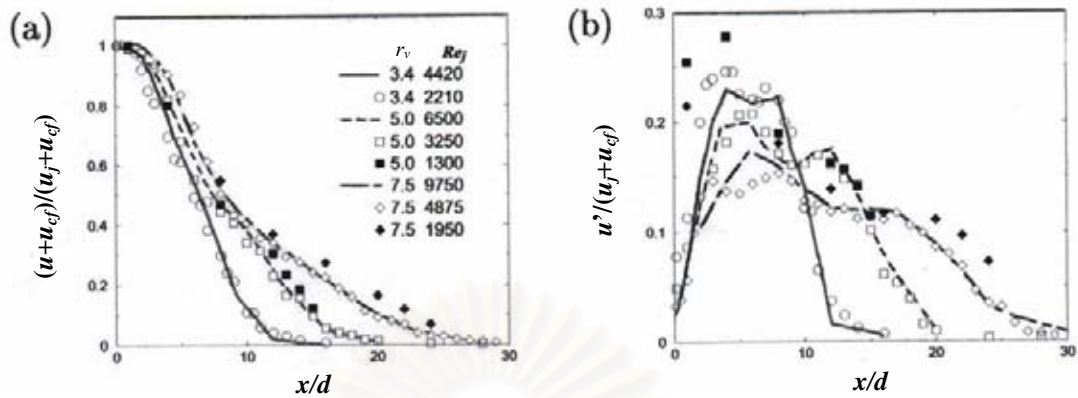


รูปที่ 1.6 ภาพตัดขวางแสดงการกระจายตัวของความเข้มข้นตามแนวรัศมีในกรณี $r_v = 3.4$ ที่ตำแหน่ง $x/d = 2$ (a,c) และ $x/d = 5.1$ (b,d) โดยที่ a,b เป็นตัวอย่างการไหลในเวลาหนึ่งๆ และ c,d เป็นภาพเฉลี่ยตลอดทั้งการไหล (Bernero, 2000)

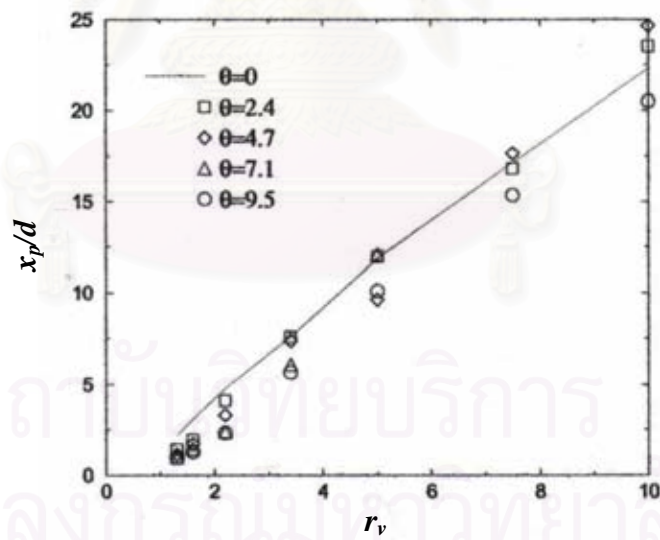


รูปที่ 1.7 ผลของ Re_{cf} ที่มีต่อคุณลักษณะตามแนวแกนของเจ็ตในกระแสวน โดยที่เส้นทึบแสดงการไหลที่มีค่า $Re_{cf} = 39,000$ และสัญลักษณ์แสดงการไหลที่มีค่า $Re_{cf} = 30,000$ (Bernero, 2000)

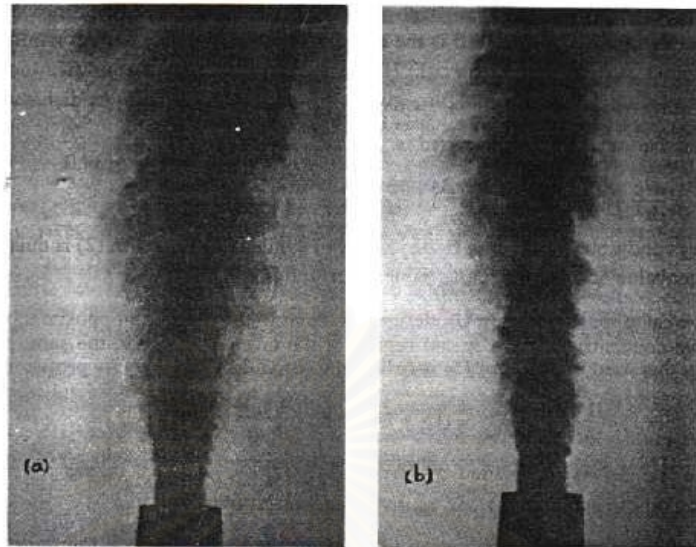
a) ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน, b) ค่าการสั่นของความเร็วตามแนวแกน (Velocity fluctuations)



รูปที่ 1.8 ผลของ Re_j ที่มีต่อคุณลักษณะตามแนวแกนของเจ็ตในกระแสวน (Bernero, 2000)
 a) ความเร็วเฉลี่ยตามแนวแกน, b) ค่าการสั่นของความเร็วมตามแนวแกน (Velocity fluctuations) และใช้สัญลักษณ์เดียวกับรูป a)

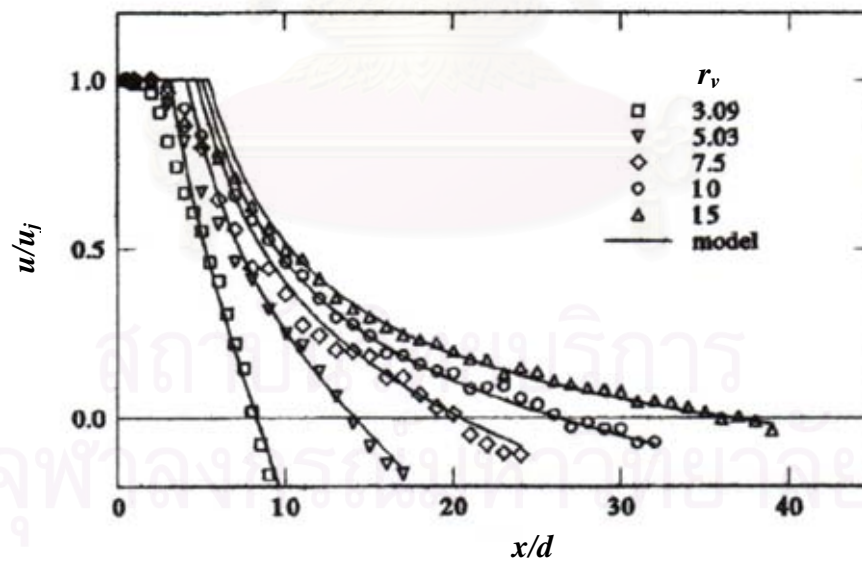


รูปที่ 1.9 ผลเนื่องมาจากมุมปะทะของเจ็ตในกระแสวนต่อระยะ Penetration depth ที่ค่า r_v ต่างๆ (Bernero, 2000)

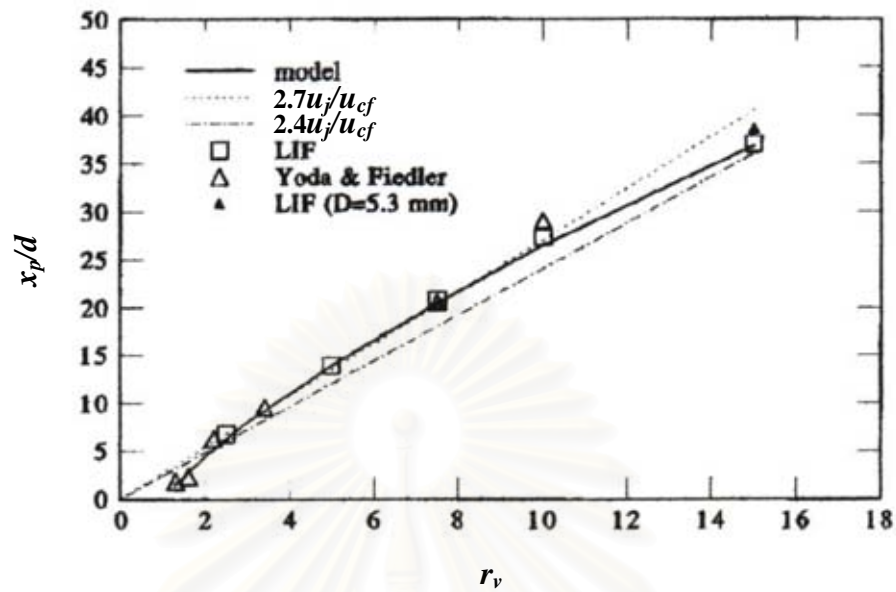


รูปที่ 1.10 ภาพแสดงความไม่เสถียรภาพของการไหลแบบเจ็ตในกระแสนวน (Lam et al., 1991)

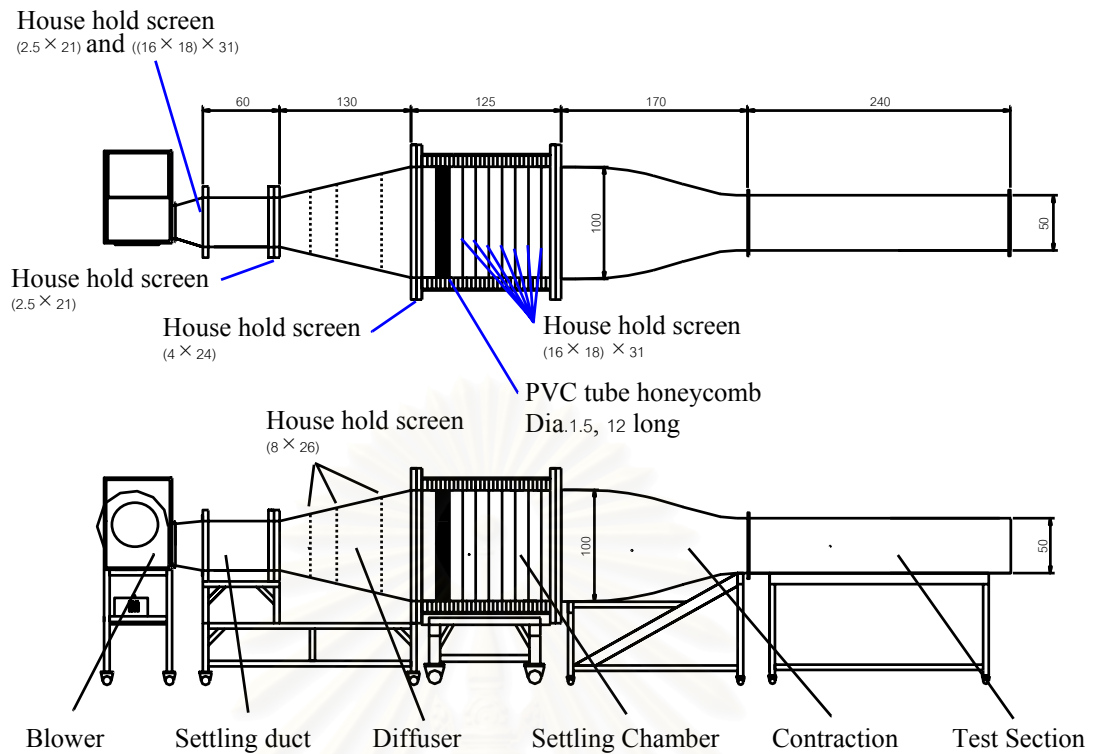
(a) $u_{cf} = 0.05u_j$; (b) $u_{cf} = 0.1u_j$



รูปที่ 1.11 การลดลงของความเร็วตามแนวแกนที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลอง (Chan and Lam, 1998)



รูปที่ 1.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Penetration depth กับ r_v ที่ได้จากการคำนวณ เปรียบเทียบกับผลการทดลอง และงานวิจัยอื่นๆ (Chan and Lam, 1998)

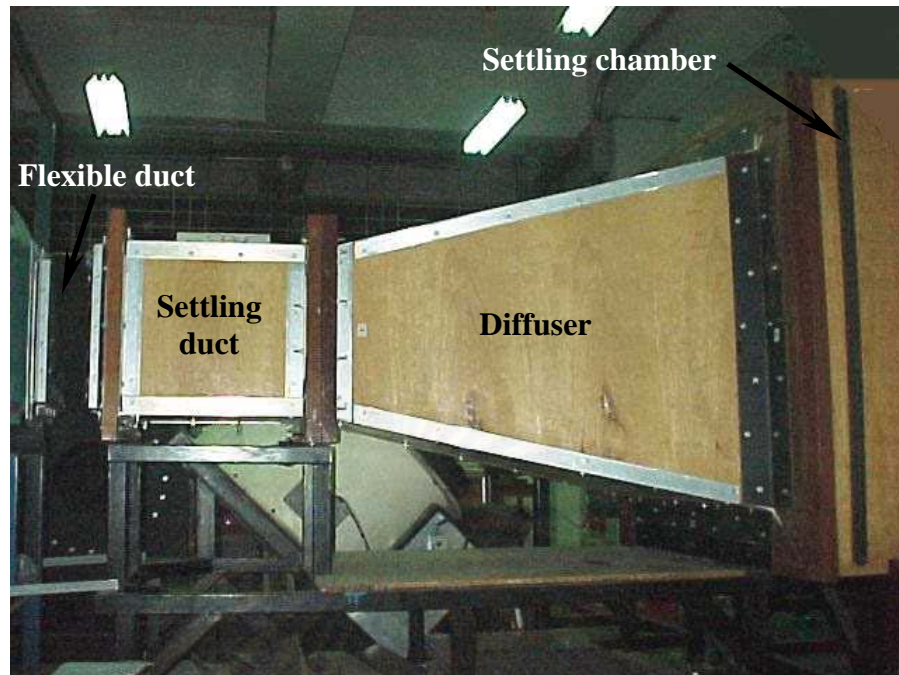


All dimensions are in cm unless specified

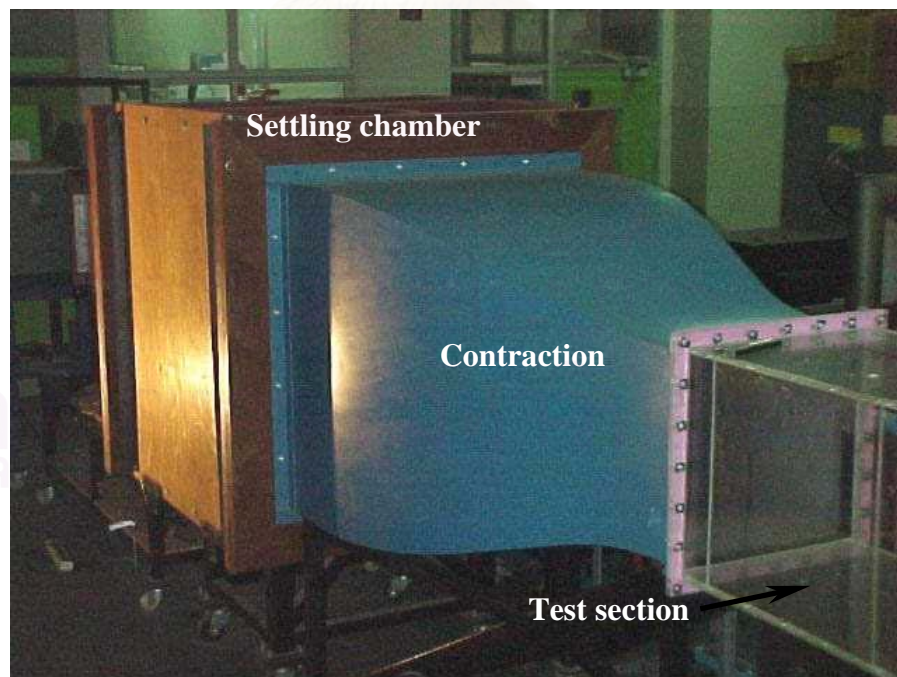
รูปที่ 2.1 รูป Schematic ของอุโมงค์ลม



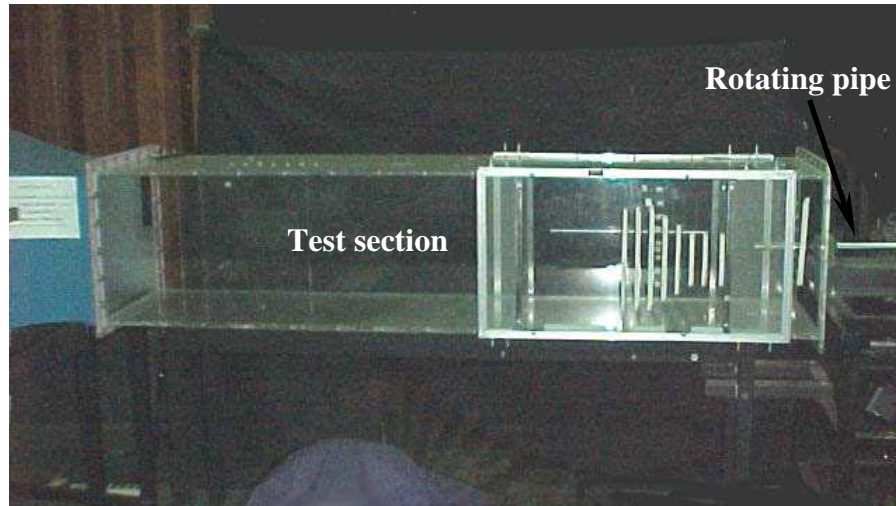
รูปที่ 2.2 พัดลมทอยโข่ง (Centrifugal Blower) ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ที่ใช้ในอุโมงค์ลม



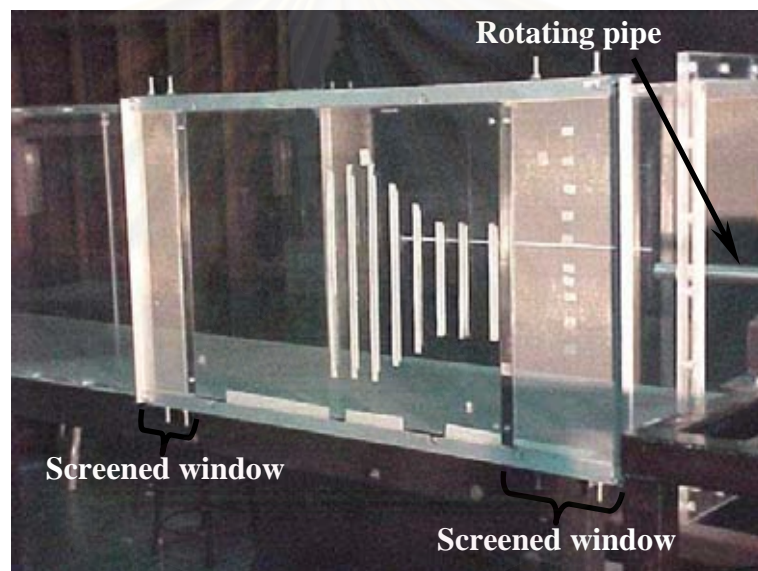
รูปที่ 2.3 ท่อจัดปรับการไหล (Settling duct) และ ส่วนขยายพื้นที่หน้าตัด (Diffuser) ของอุโมงค์ลม



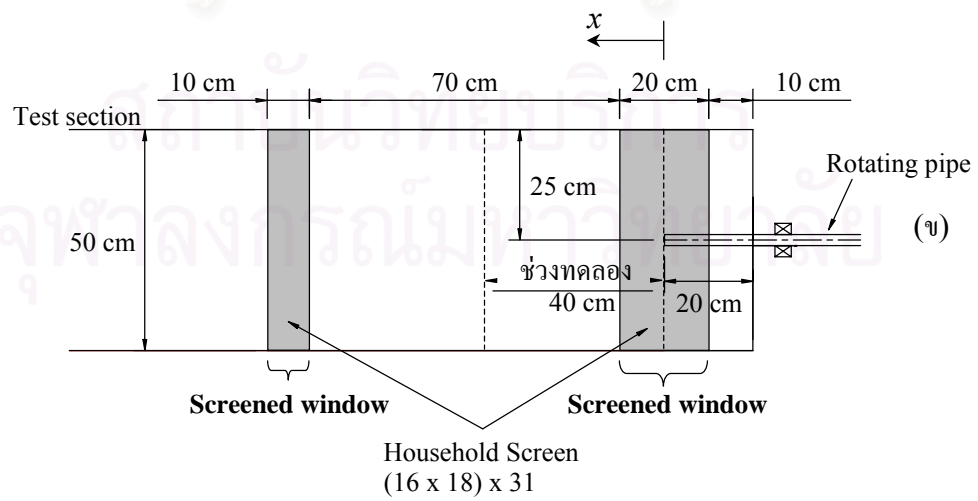
รูปที่ 2.4 ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) และ Contraction ของอุโมงค์ลม



รูปที่ 2.5 หน้าตัดทดสอบ (Test section) ของอุโมงค์ลม



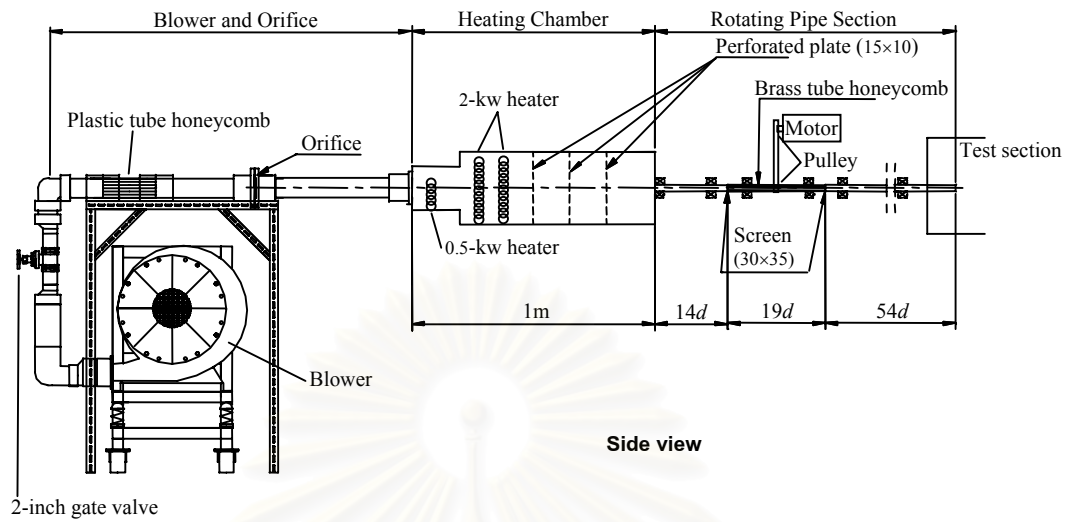
(ก)



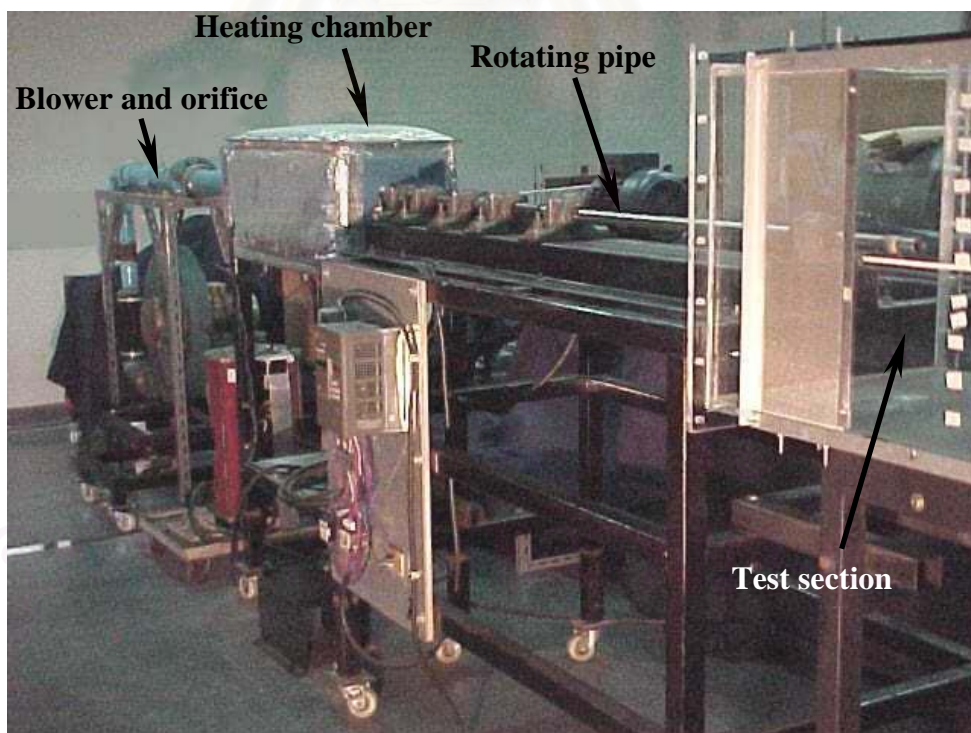
(ข)

รูปที่ 2.6 ช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ผนังด้านข้างของหน้าตัดทดสอบ (Test section)

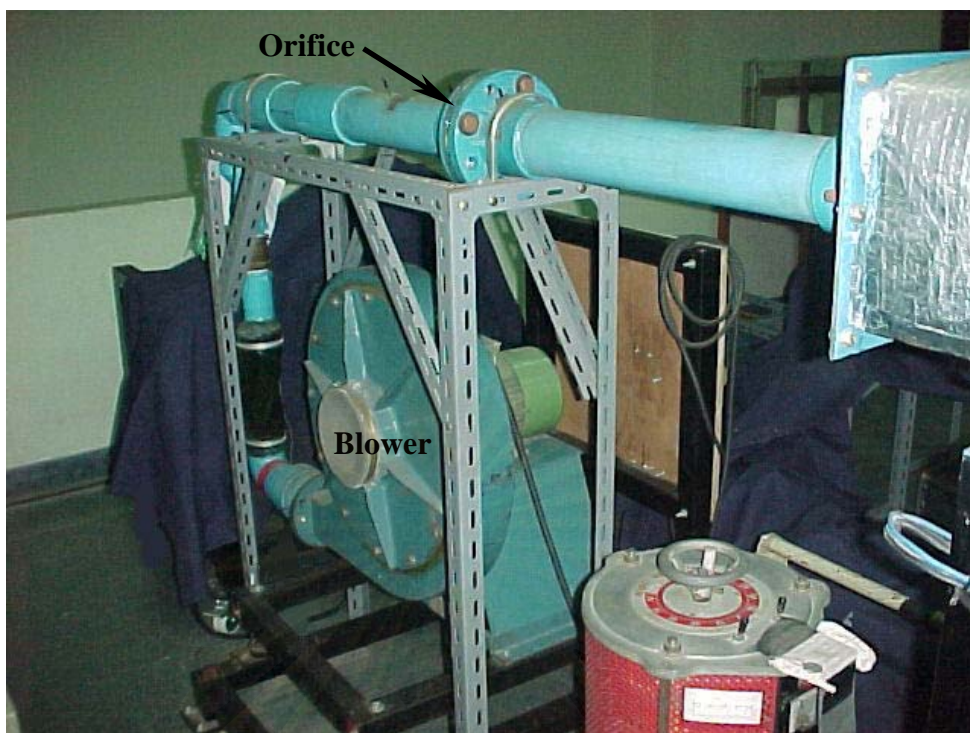
(ก) ภาพถ่าย (ข) รูป Schematic



รูปที่ 2.7 รูป Schematic ของชุดเจ็ตแบบท่อหมุน

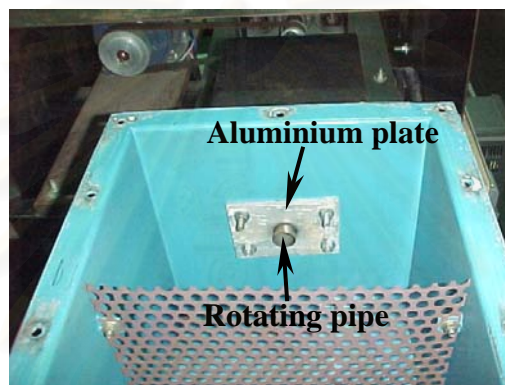
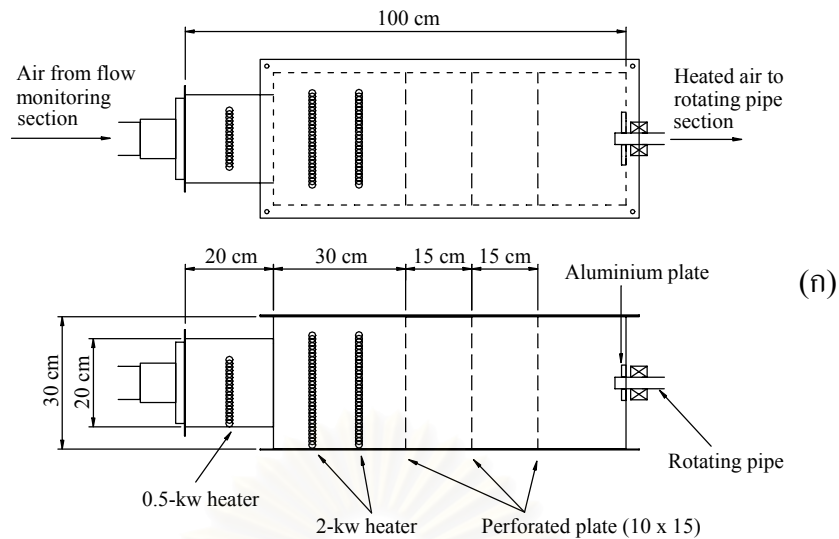


รูปที่ 2.8 ชุดเจ็ตแบบท่อหมุนทั้ง 3 ส่วนคือ ส่วนพัดลมและ Orifice, ส่วน Heating chamber และส่วนท่อหมุน (Rotating pipe)

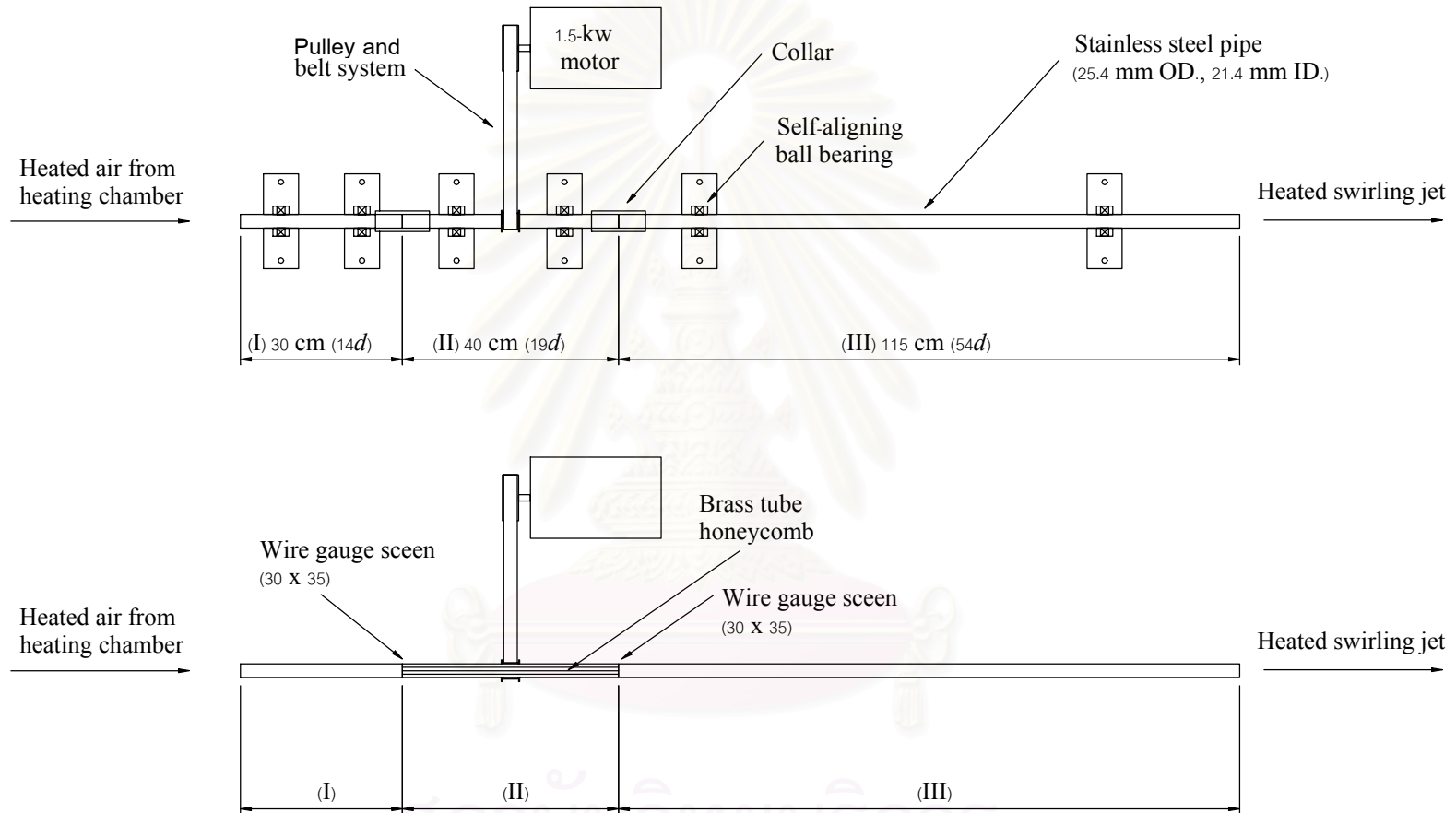


รูปที่ 2.9 ส่วนพัดลม (Blower) และ Orifice ของชุดเจ็ตแบบท่อหมุน

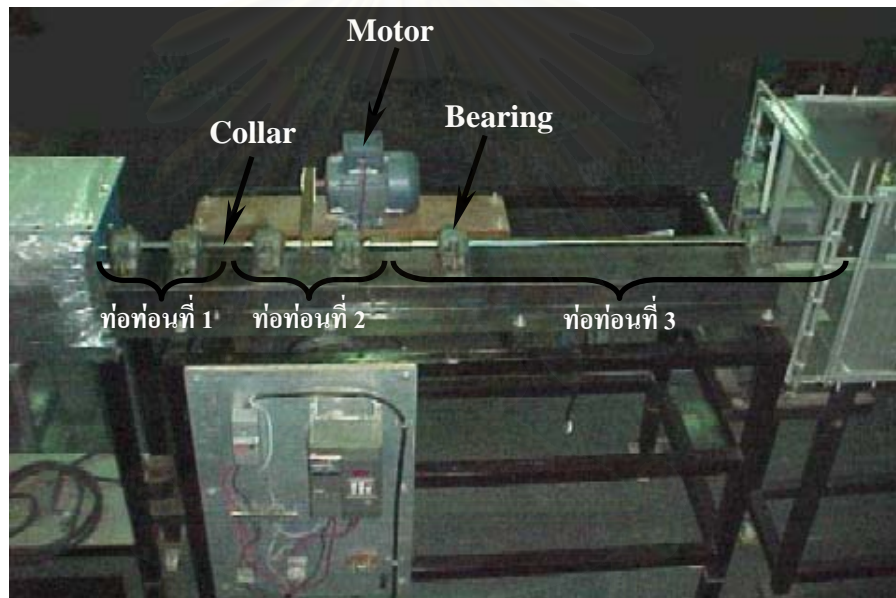
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 ส่วน Heating chamber ของชุดเจ็ดแบบท่อหมุน (ก) รูป Schematic (ข) ภาพถ่ายแสดงการประกอบเข้ากับท่อหมุน (ค) ภาพถ่ายแสดงส่วนประกอบภายใน (ง) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Variac ที่ใช้สำหรับ Heater

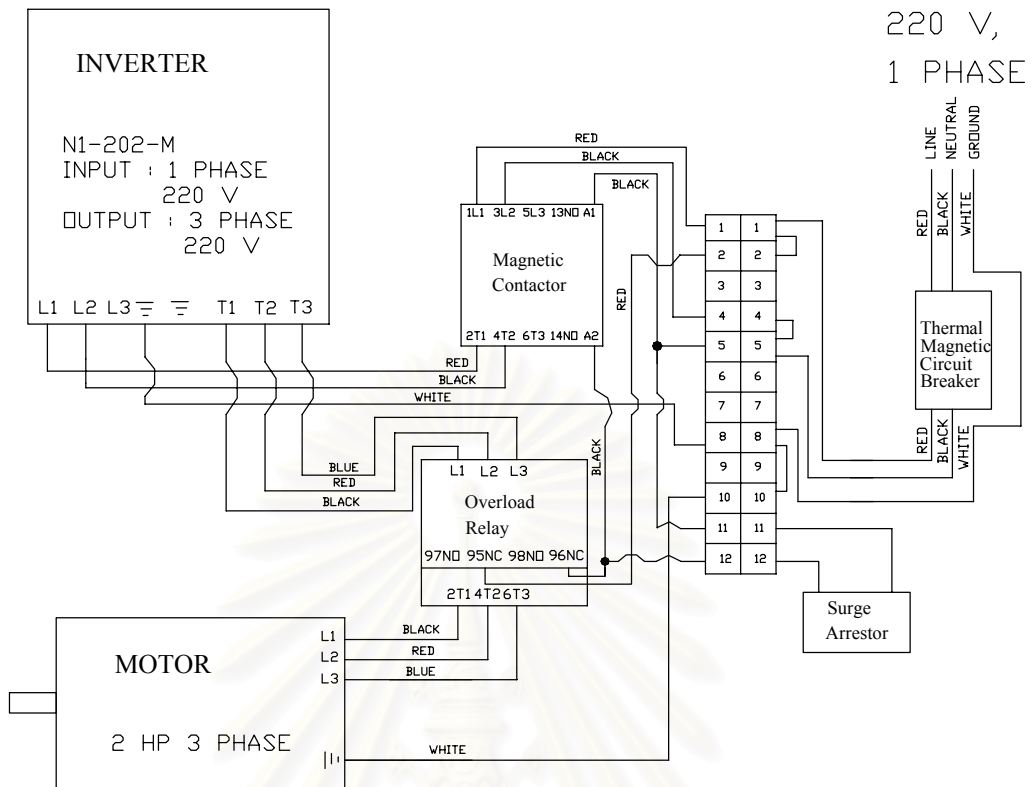


รูปที่ 2.11 รูป Schematic ของส่วนท่อหมุน (Rotating pipe)
 (ก) ส่วนประกอบต่างๆ (ข) ส่วนประกอบสำหรับปรับสภาวะการไหล



รูปที่ 2.12 รูปถ่ายของส่วนท่อหมุน (Rotating pipe)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

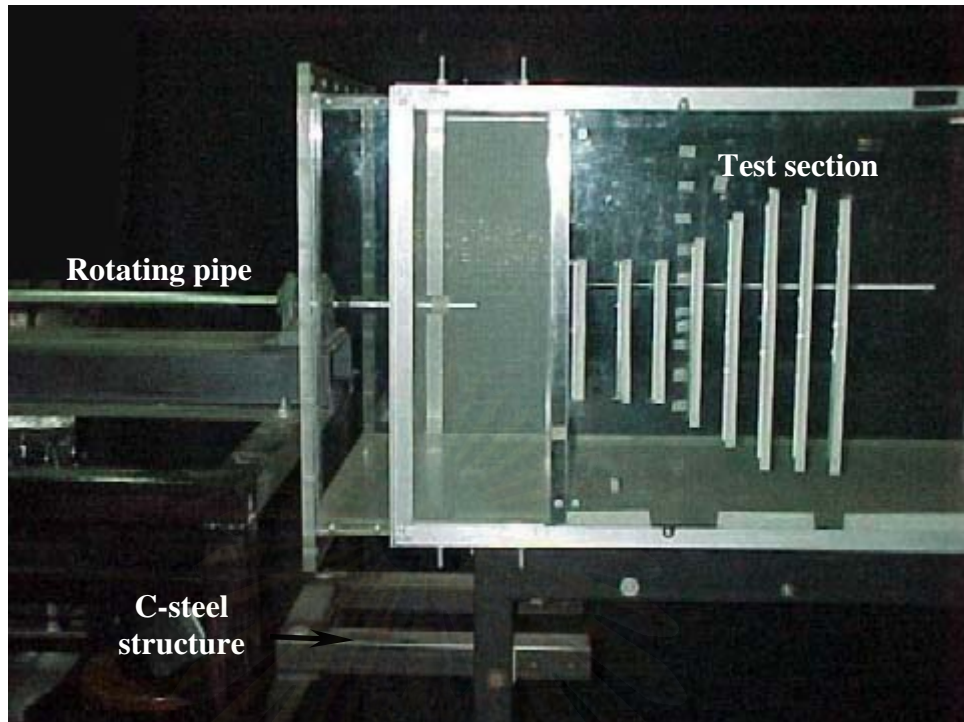


(ก)

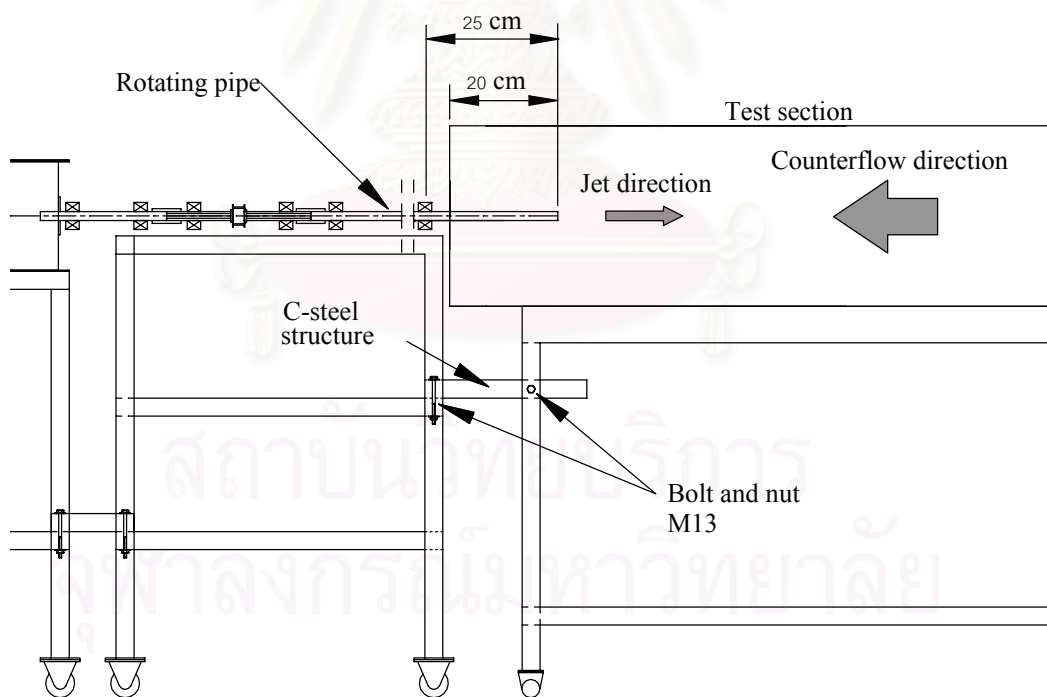


(ข)

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

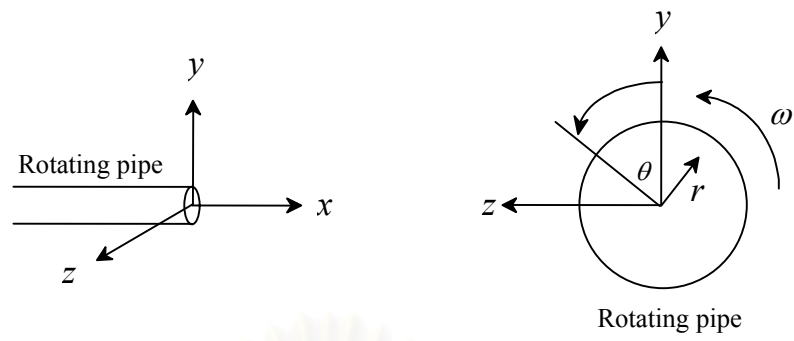


(ก)



(ข)

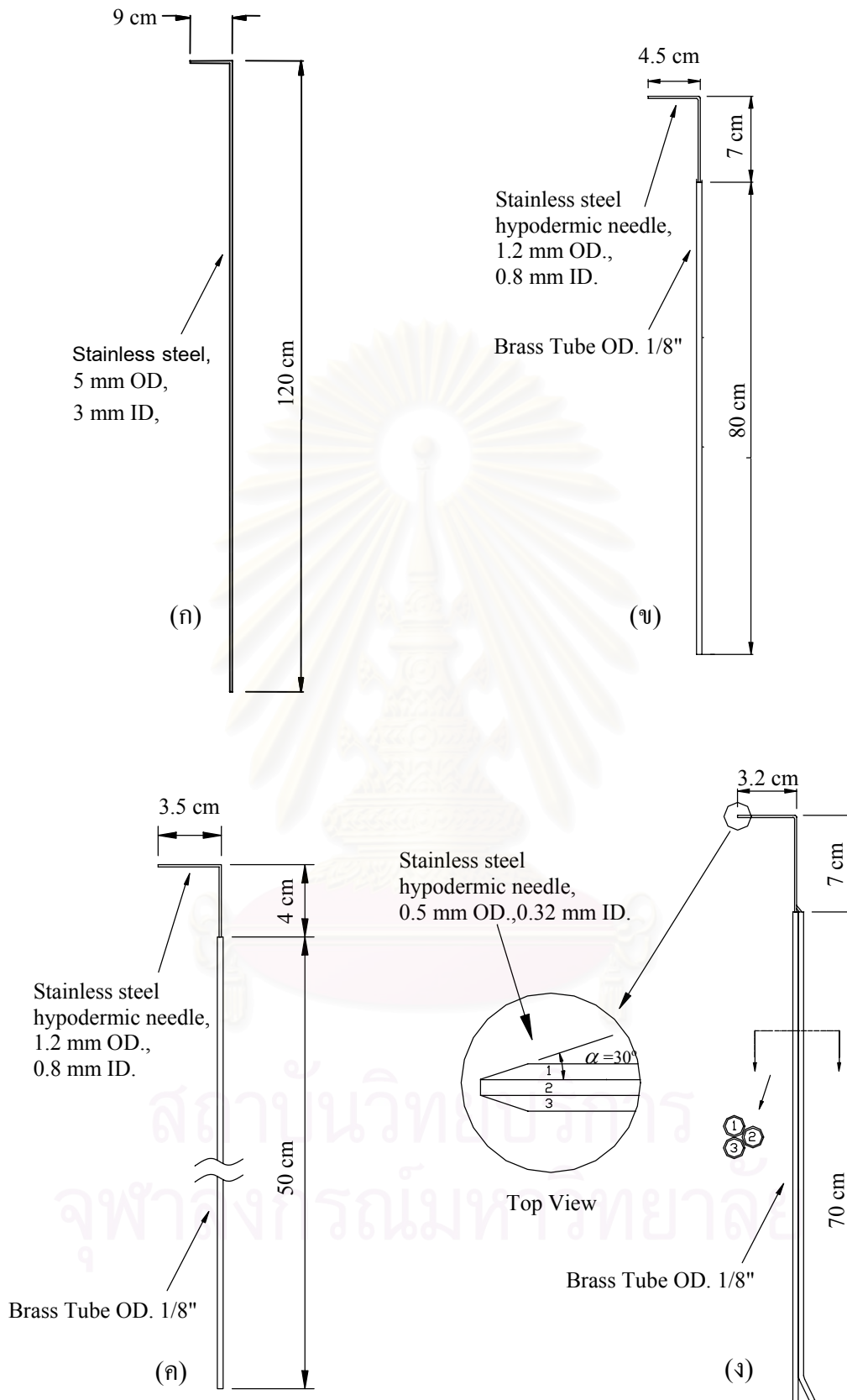
รูปที่ 2.14 ภาพแสดงลักษณะการติดตั้งชุดเจ็ตแบบหมุนควงเข้ากับส่วนหน้าตัดทดสอบของอุโมงค์ลม (ก) ภาพถ่าย, (ข) รูป Schematics



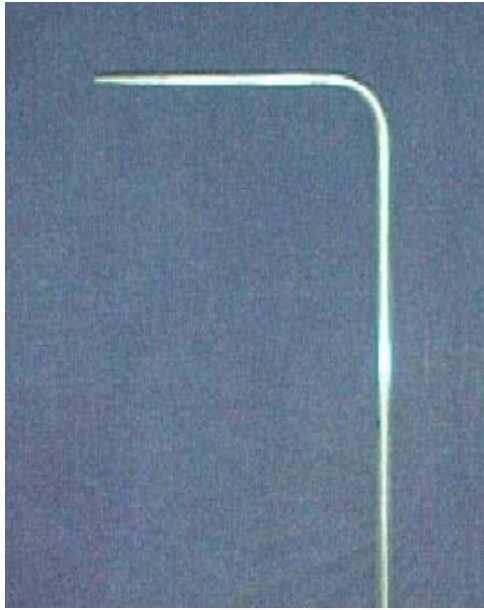
รูปที่ 2.15 พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง



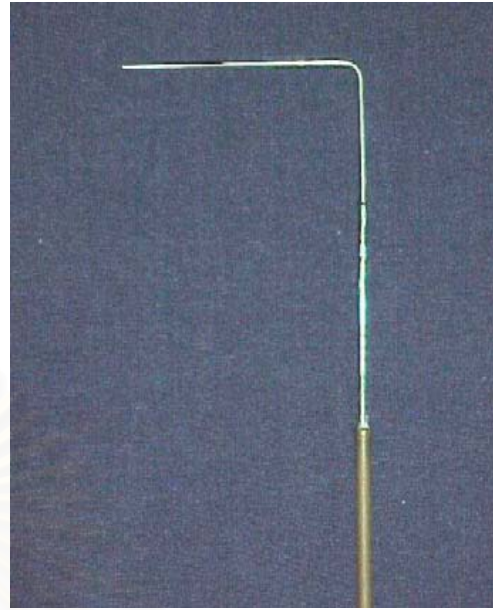
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



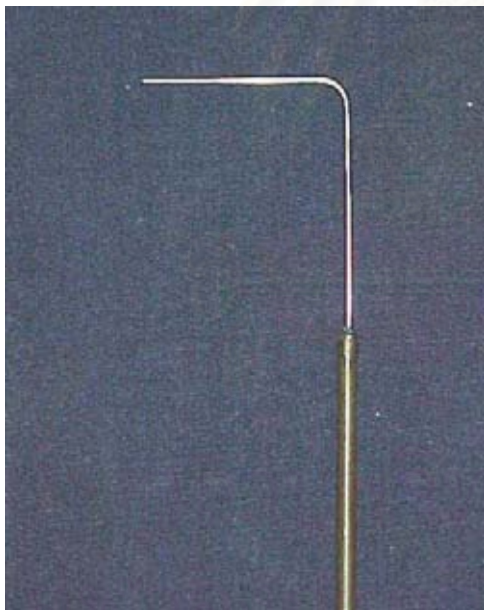
รูปที่ 2.16 รูป Schematic ของ Probe ที่ใช้ในการวัดความเร็ว (ก) – (ค) Pitot probe แบบ A, B และ C ตามลำดับ, (ง) Yaw probe



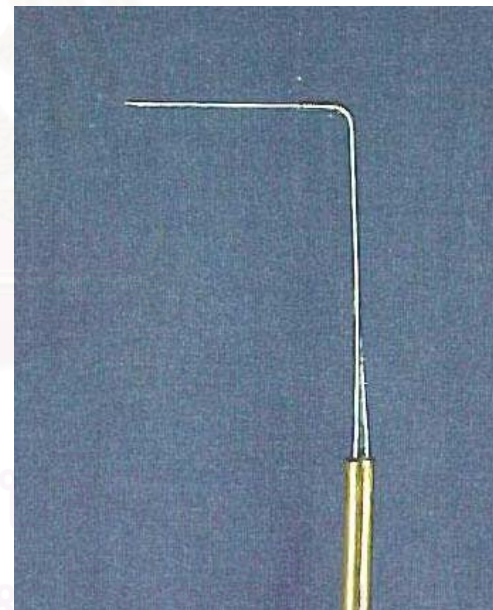
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.17 ภาพถ่ายของ Probe ที่ใช้ในการวัดความเร็ว (ก) – (ค) Pitot probe แบบ A, B และ C ตามลำดับ, (ง) Yaw probe



(ก)

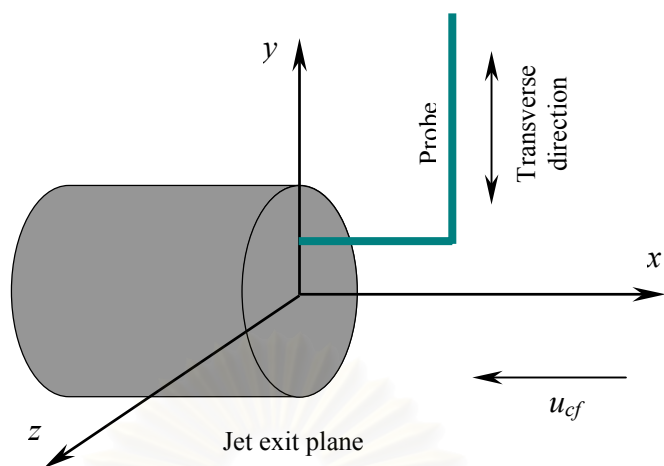


(ข)



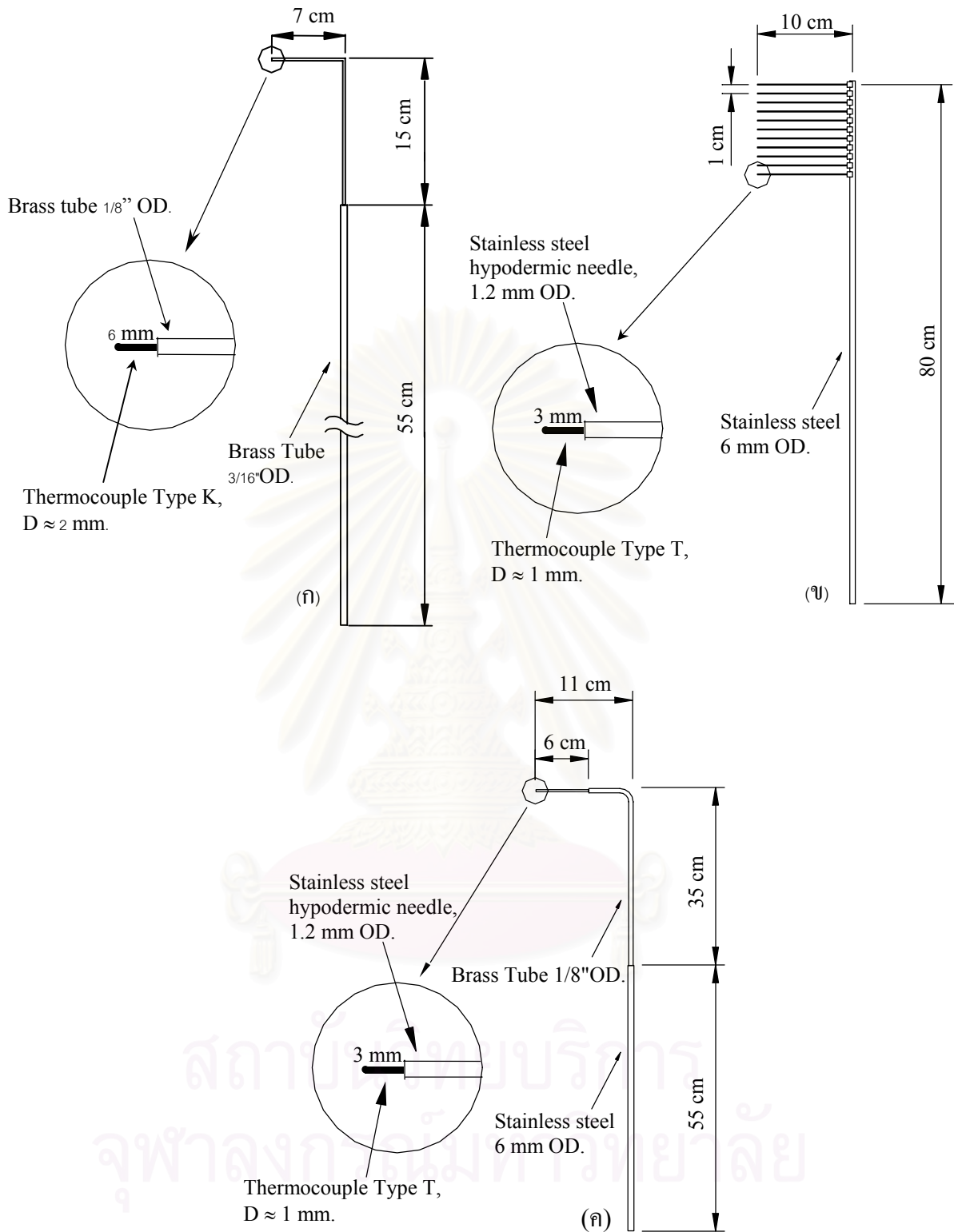
(ค)

รูปที่ 2.18 อุปกรณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการวัดความเร็ว (ก) Pressure transducer, (ข) Digital multimeter, (ค) Optical Tachometer

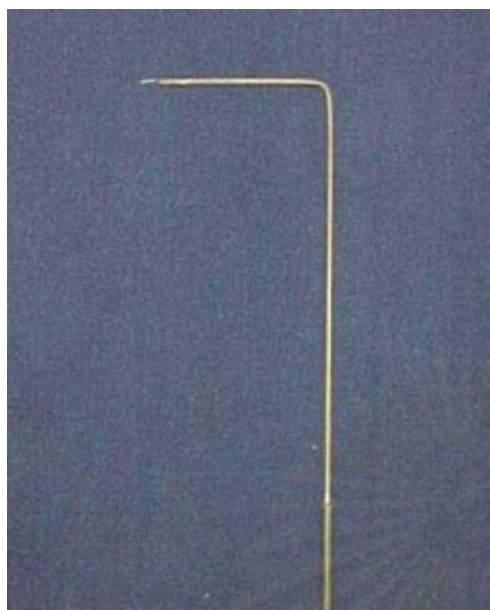


รูปที่ 2.19 การวัดสภาวะเริ่มต้นที่ปากเจ็ต

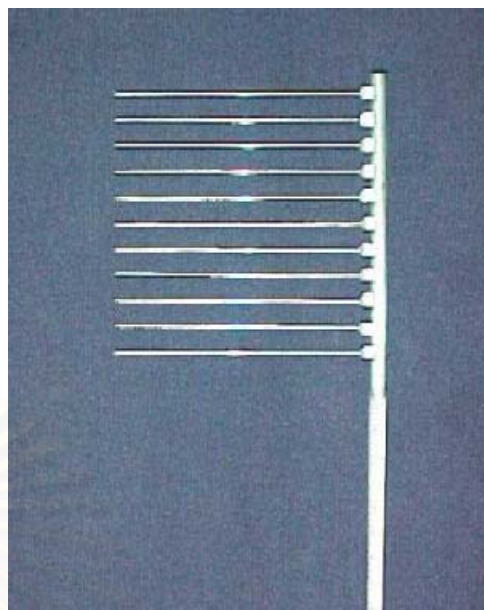
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



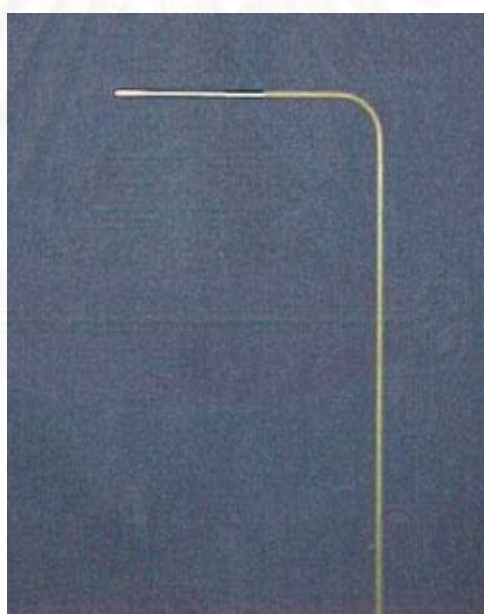
รูปที่ 2.20 รูป Schematic ของ Thermocouple probe ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ
(ก) แบบ A, (ข) แบบ B และ (ค) แบบ C



(ก)

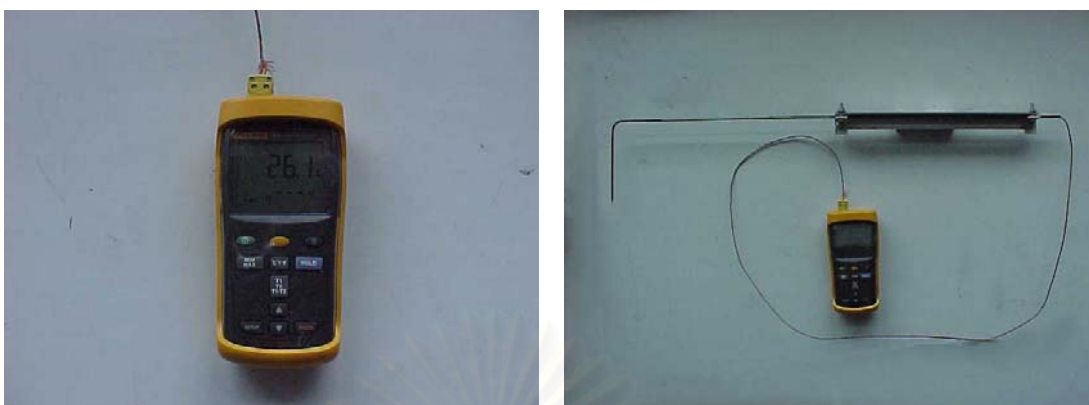


(ข)



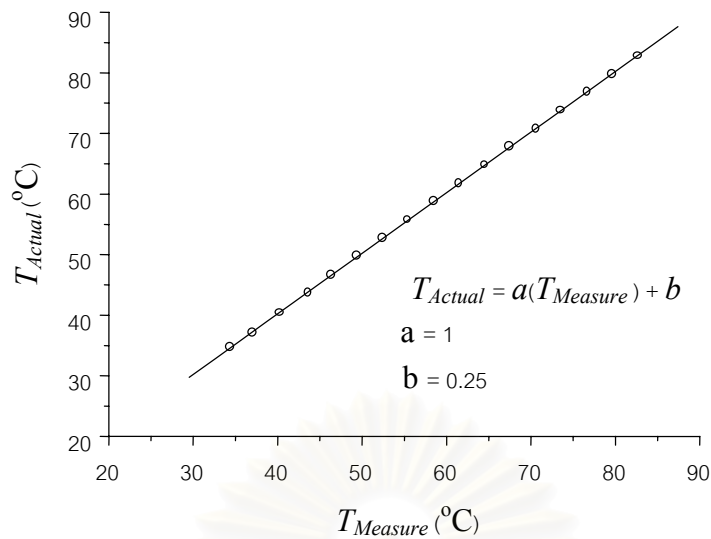
(ค)

รูปที่ 2.21 ภาพถ่ายของ Thermocouple probe ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ
(ก) แบบ A, (ข) แบบ B และ (ค) แบบ C

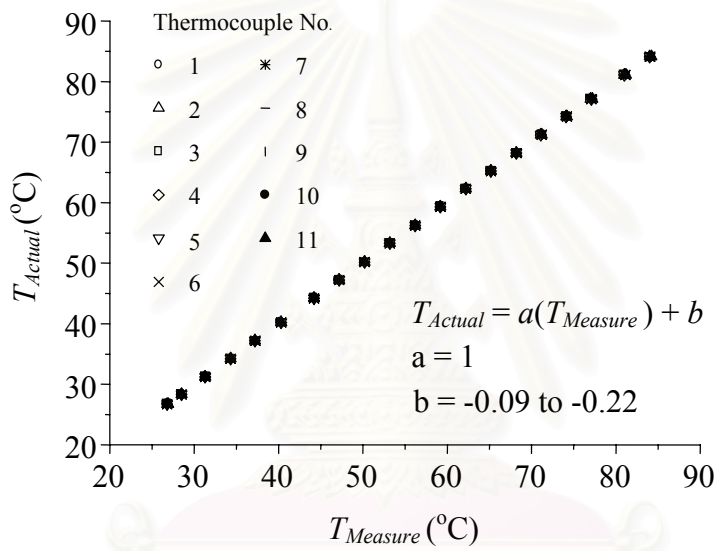


รูปที่ 2.22 ตัวอ่านค่าอุณหภูมิ (Thermocouple thermometer) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 52-2
และการใช้งานร่วมกับ Thermocouple probe

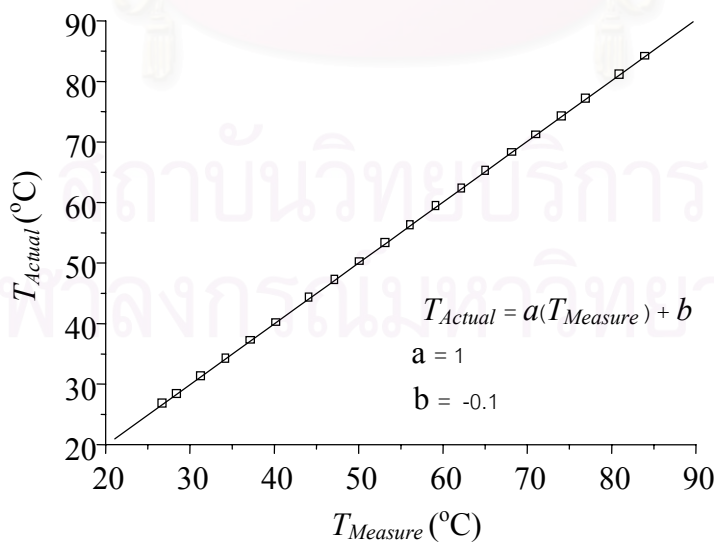
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) แบบ A

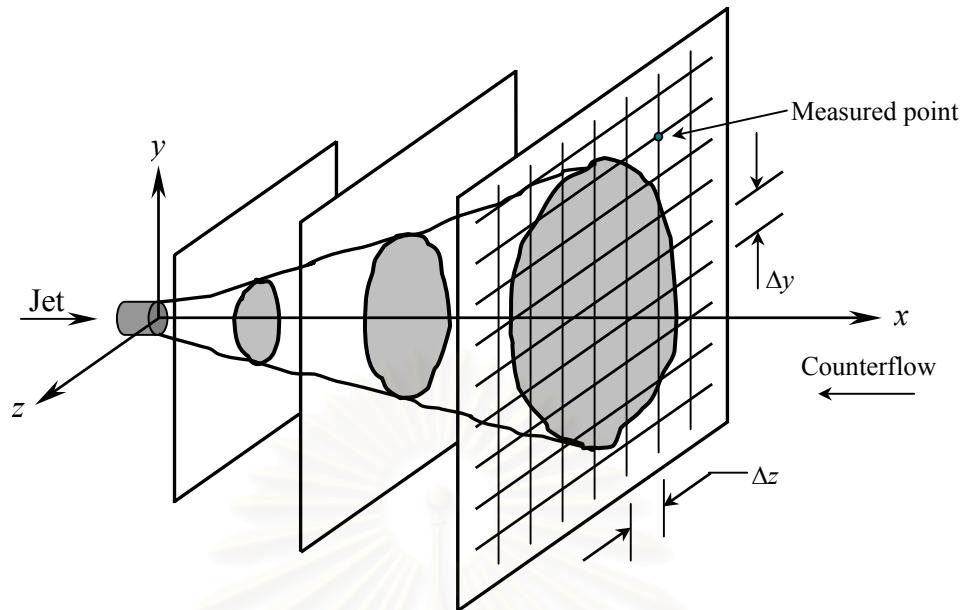


ข) แบบ B

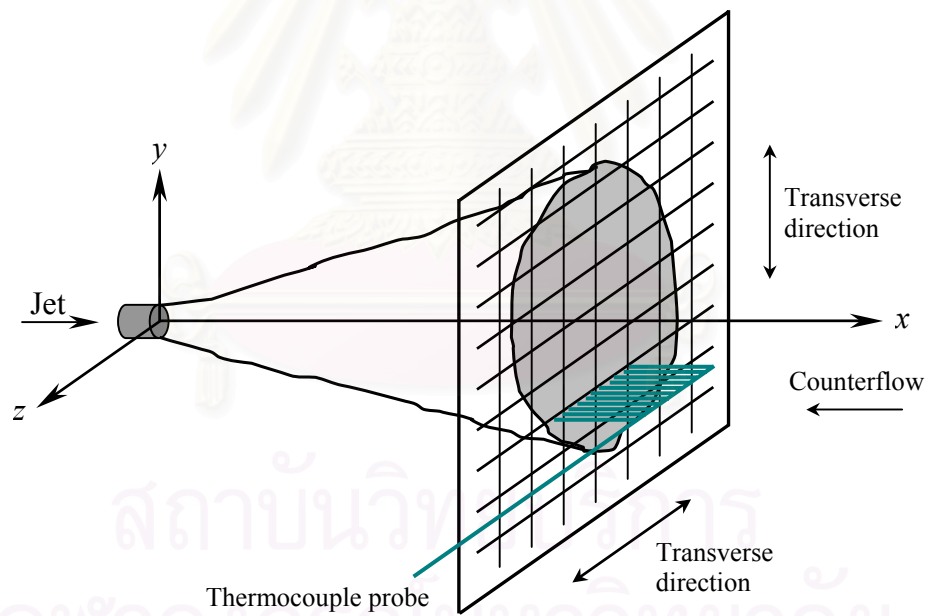


ค) แบบ C

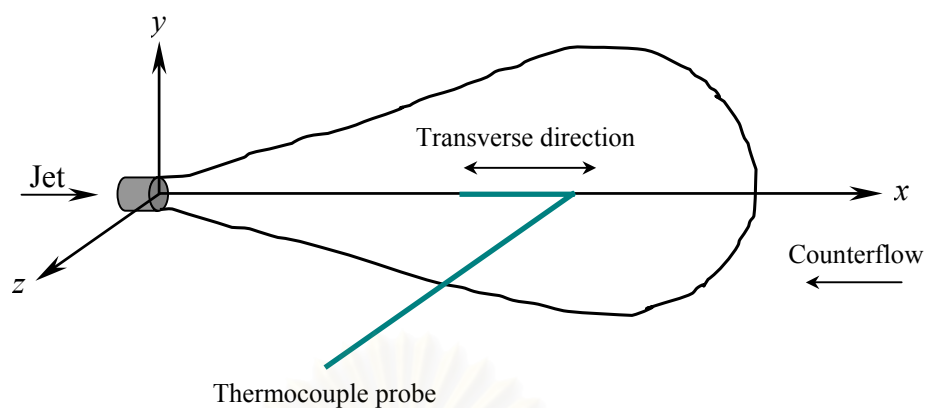
รูปที่ 2.23 ผลการสอบเทียบ Thermocouple probe เทียบกับอุปกรณ์มาตรฐานคือ Thermometer ก) แบบ A, ข) แบบ B และ ค) แบบ C



รูปที่ 2.24 ลักษณะการวัดการกระจายของอุณหภูมิเป็นหน้าตัด

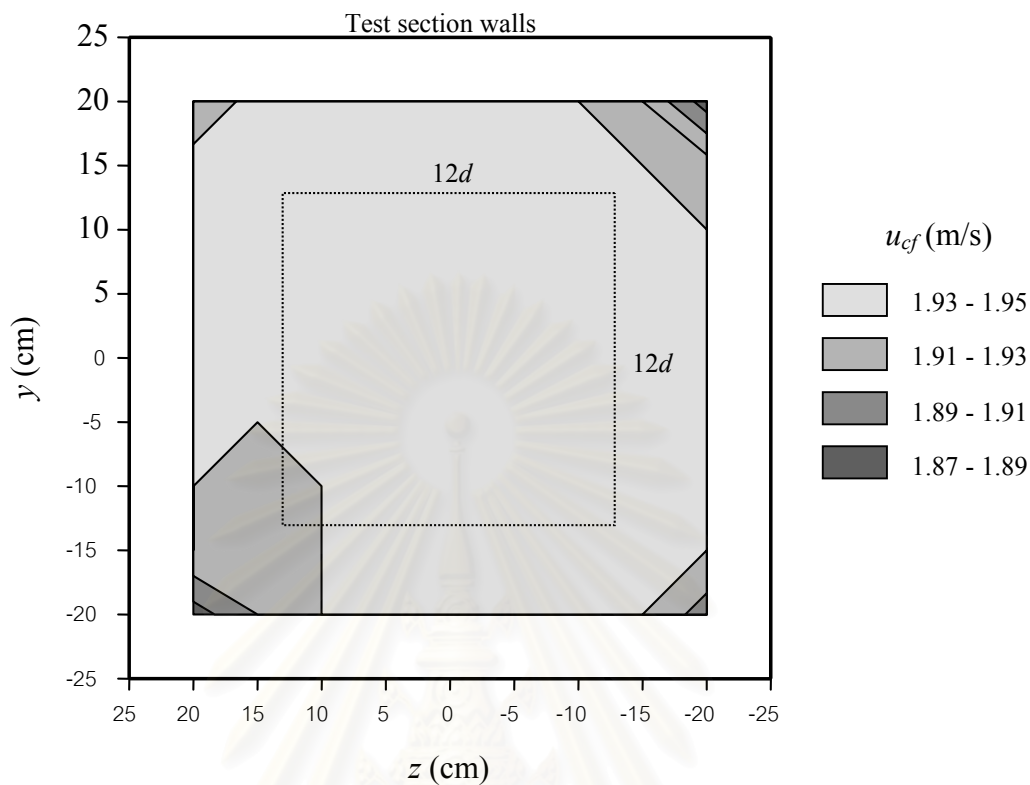


รูปที่ 2.25 ลักษณะการวัดเป็นเมตริกโดยใช้ Thermocouple probe แบบ B



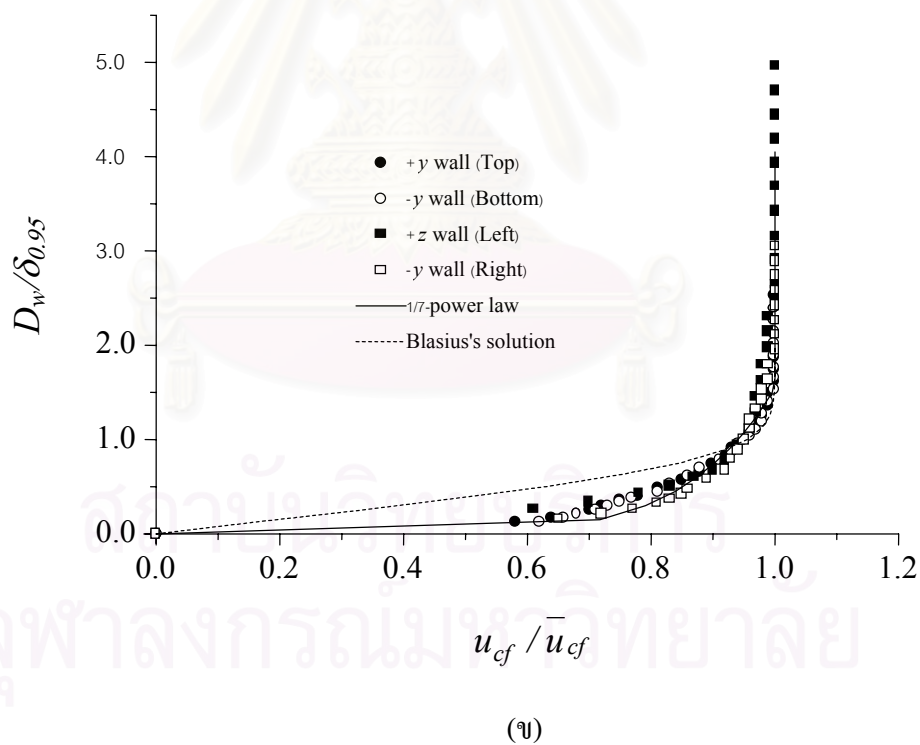
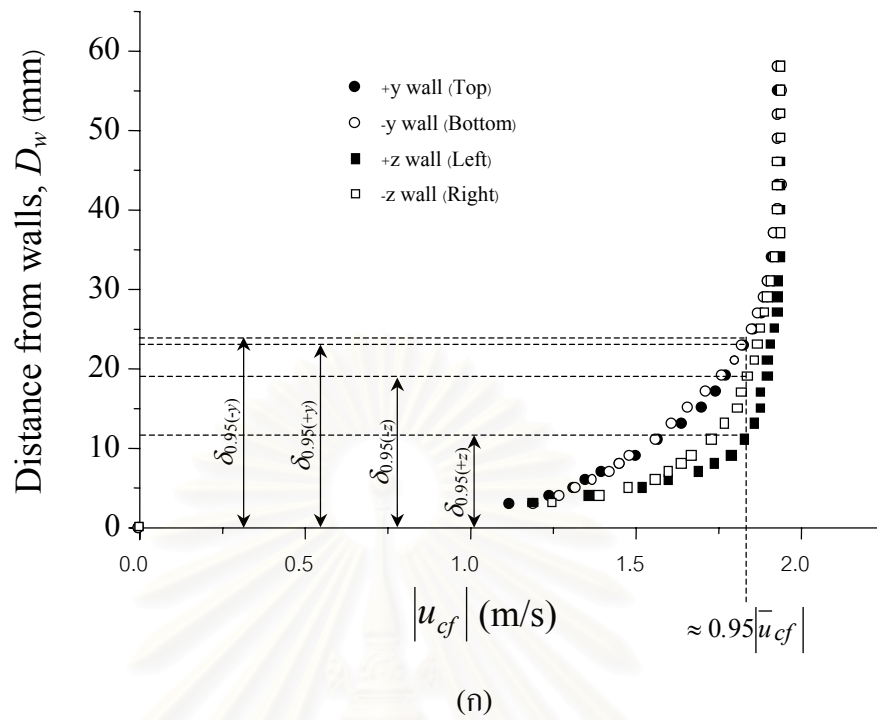
รูปที่ 2.26 ลักษณะการวัดการลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

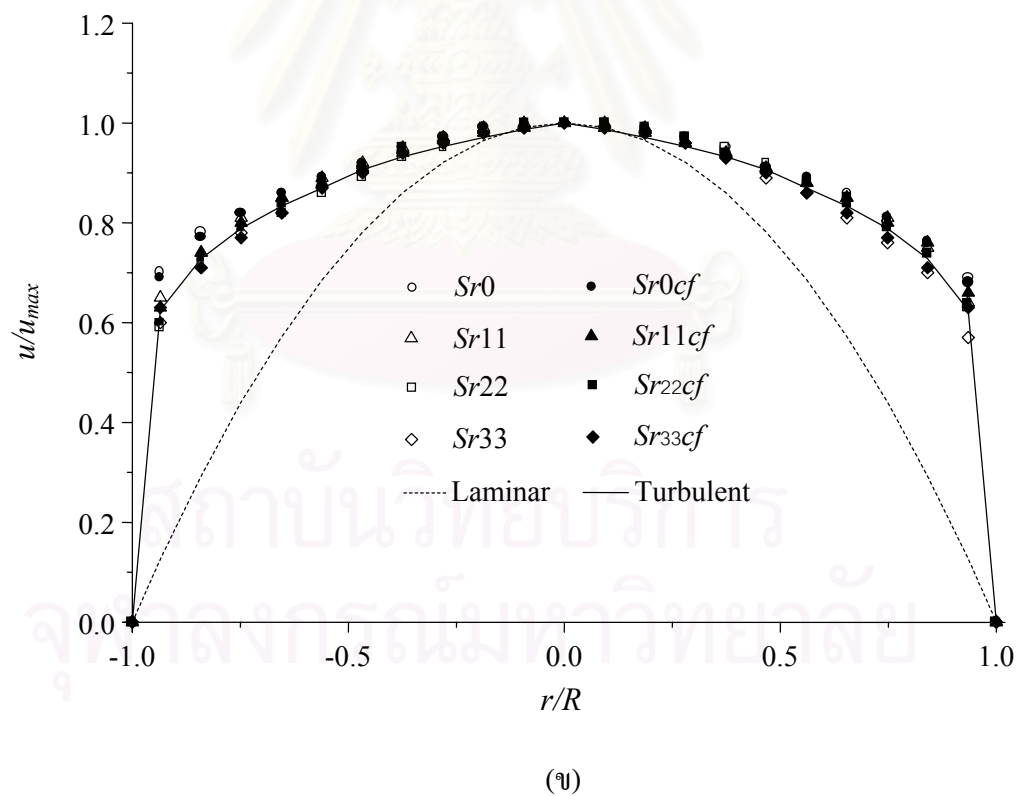
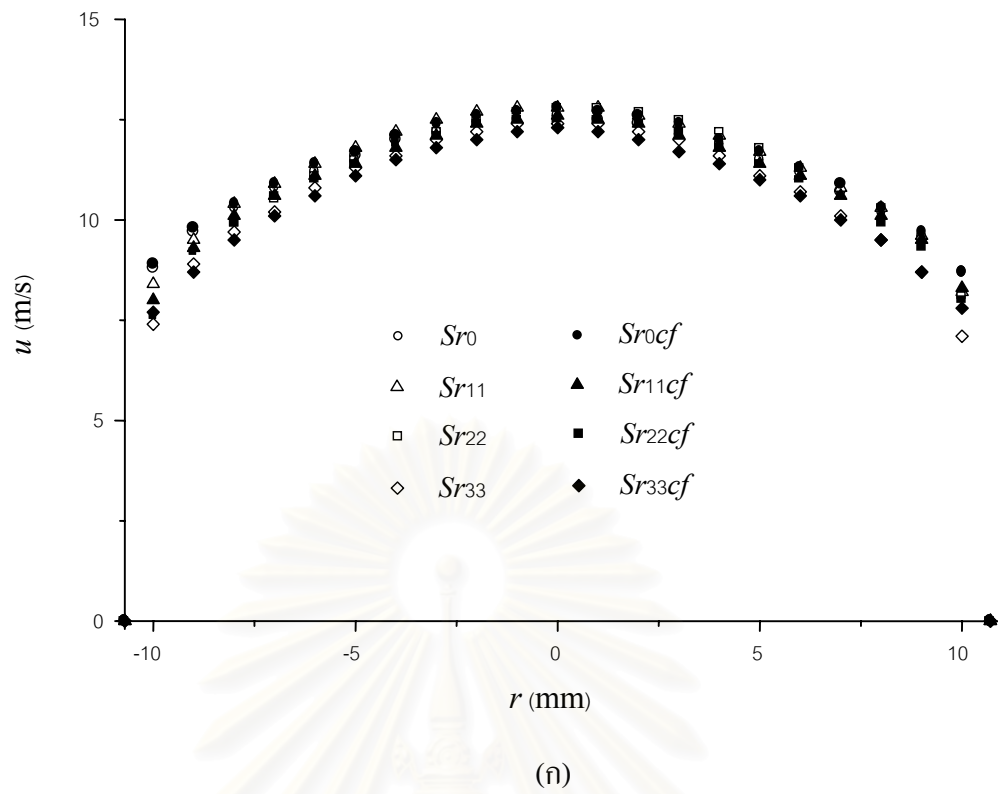


รูปที่ 3.1 ความสม่ำเสมอของความเร็วกระแสลมทวน (u_{cf}) ณ ตำแหน่ง $x = 40$ cm โดยมีความเร็วของกระแสลมทวนที่ตำแหน่งอ้างอิงเท่ากับ 1.98 เมตรต่อวินาที

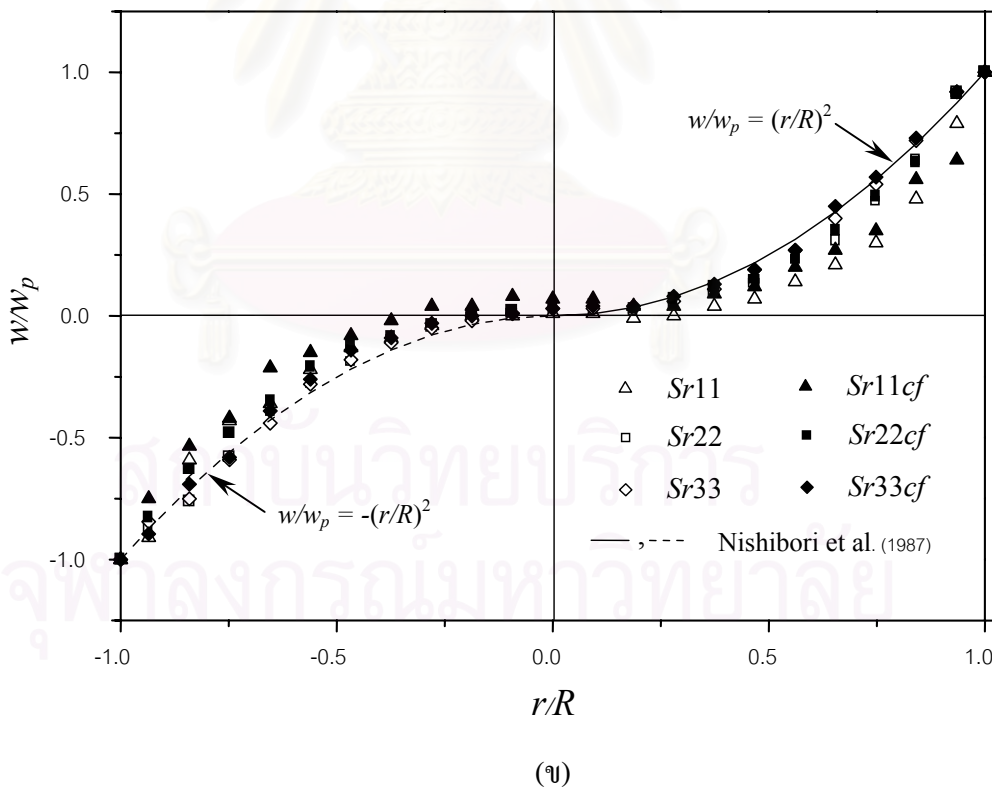
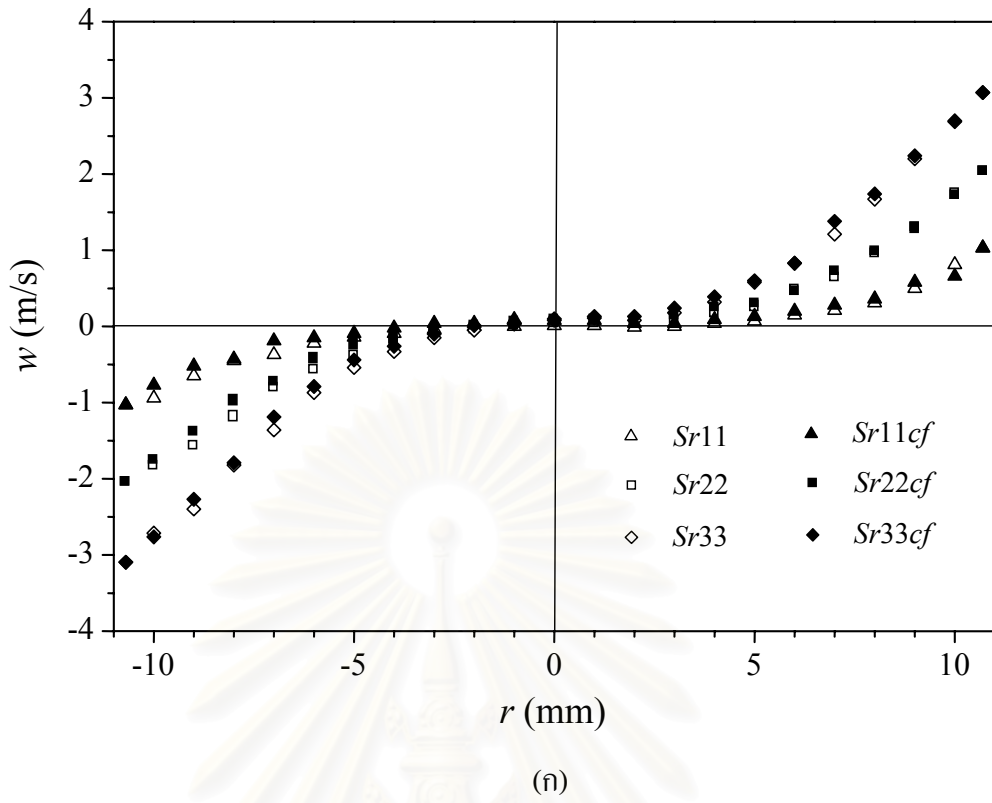
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



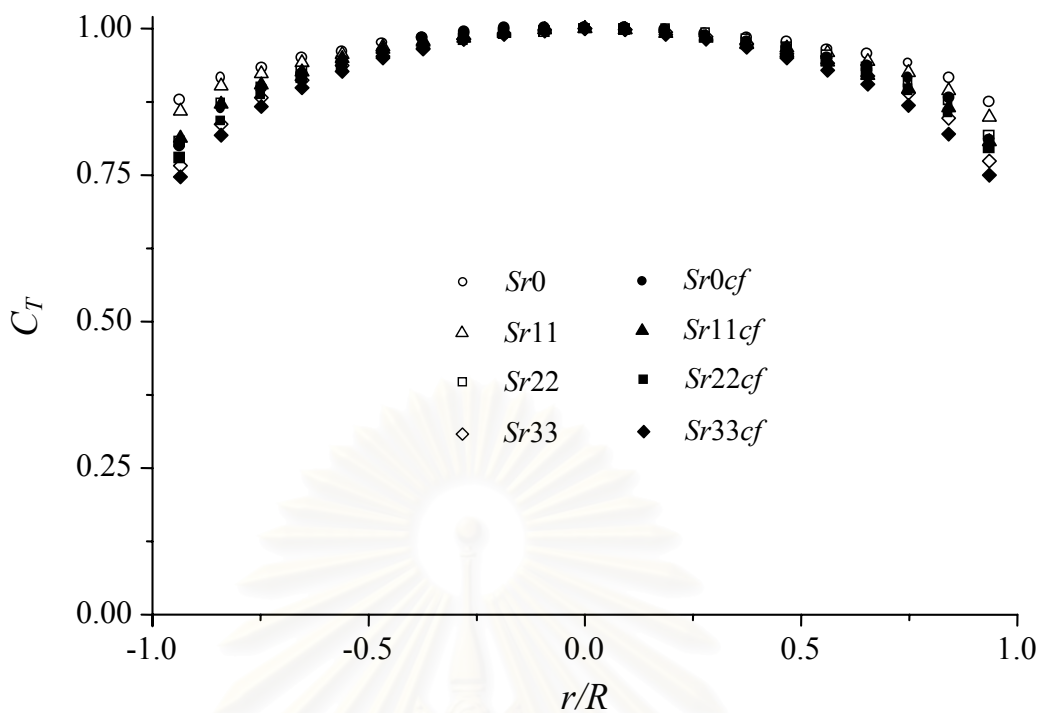
รูปที่ 3.2 ชั้นขอบเขต (Boundary layer) บนผนังทั้ง 4 ด้าน ที่ตำแหน่ง $x = 40$ เซนติเมตร โดย ทดลองที่ความเร็วกระแสลมทวนที่ตำแหน่งอ้างอิงเท่ากับ 1.98 เมตรต่อวินาที (ก) ความหนาของชั้นขอบเขต ($\delta_{0.95}$), (ข) รูปร่างของชั้นขอบเขต



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

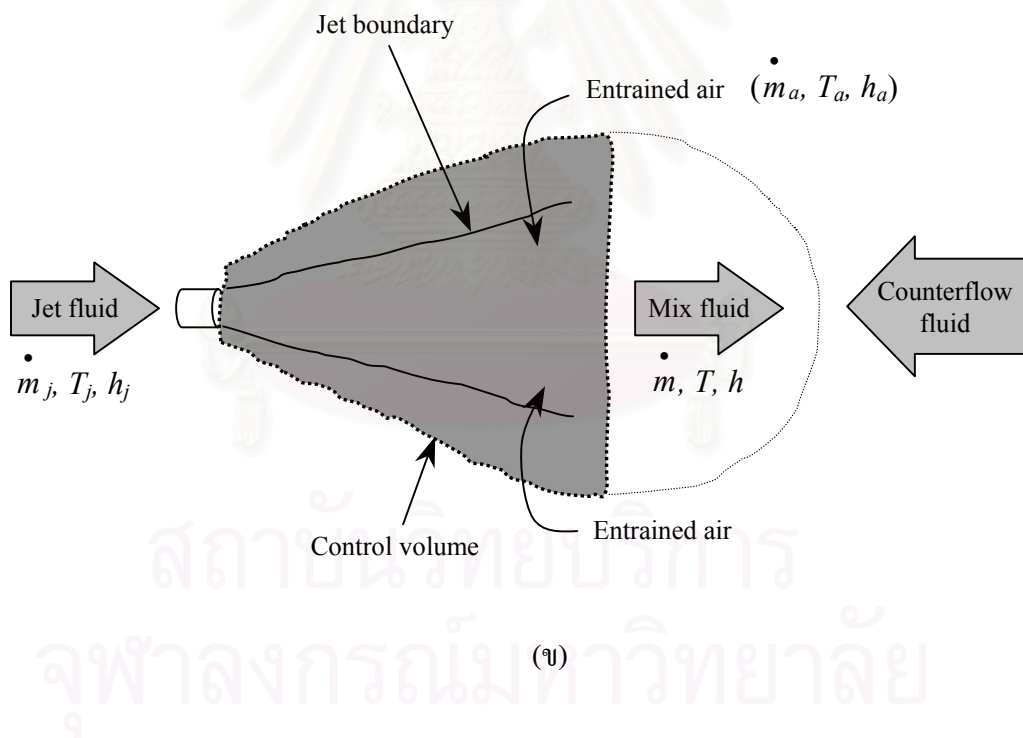
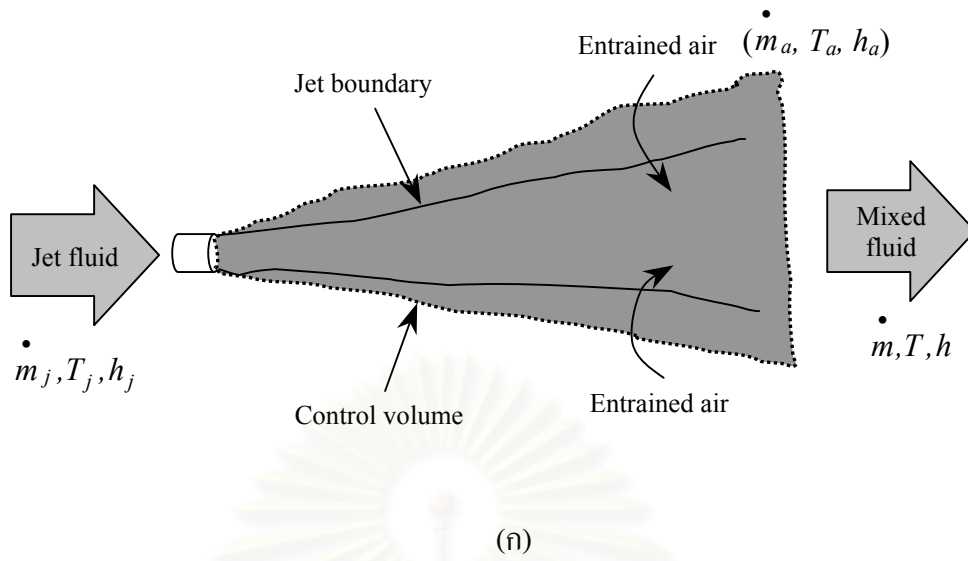


รูปที่ 3.4 รูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสของเจ็ตอากาศที่ตำแหน่งปากทางออก (ก) w , (ข) w/w_p

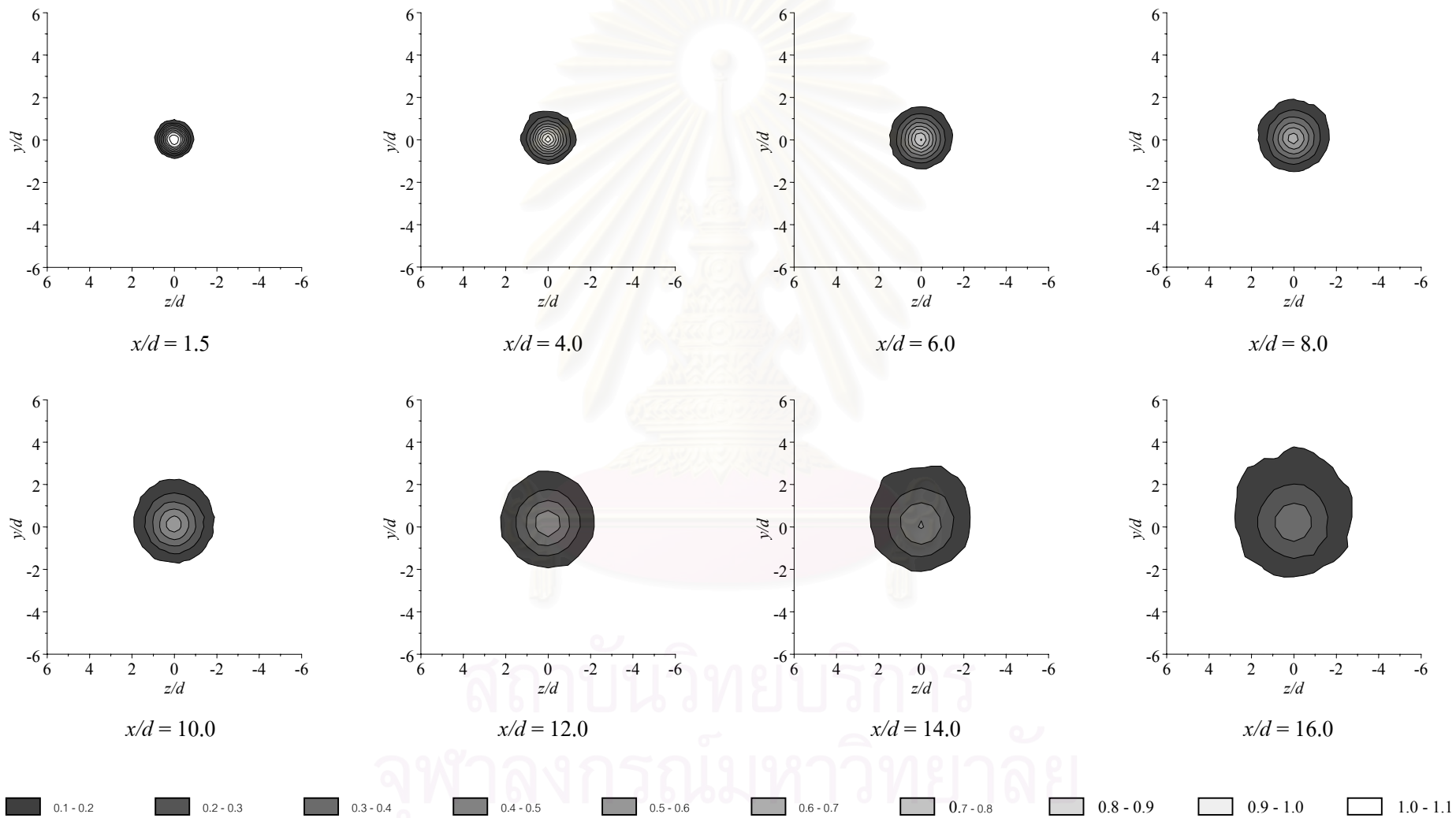


รูปที่ 3.5 รูปร่างอุณหภูมิจึงอากาศตามแนวรัศมี (r) ที่ตำแหน่งปากทางออก

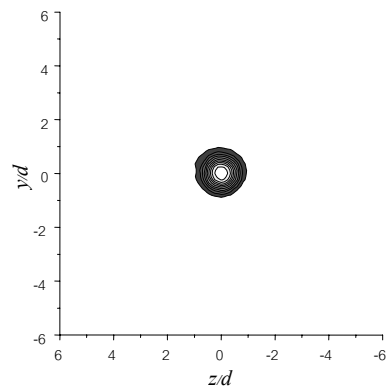
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



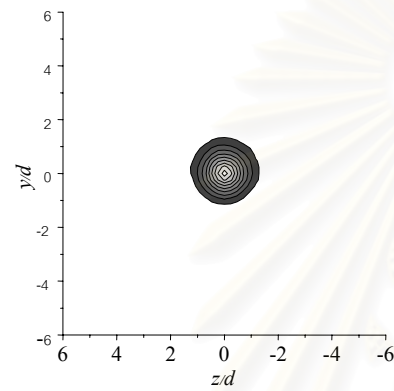
รูปที่ 3.6 ปริมาตรควบคุมในการวิเคราะห์คุณลักษณะการผสมของการไหลที่แสดงโดย C_{TG}
 (ก) กรณีการทดลองที่ไม่มีกระแสสวนทวน (Sr_{xx})
 (ข) กรณีการทดลองที่มีกระแสสวนทวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf})



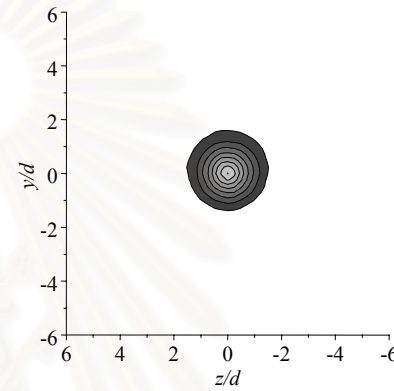
รูปที่ 3.7 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr=0$



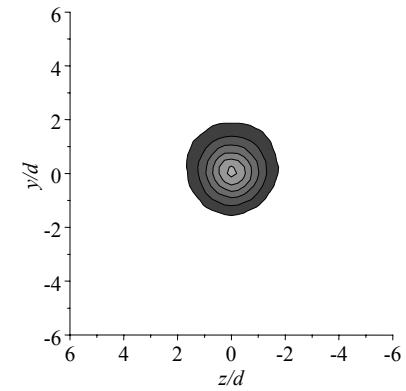
$x/d = 1.5$



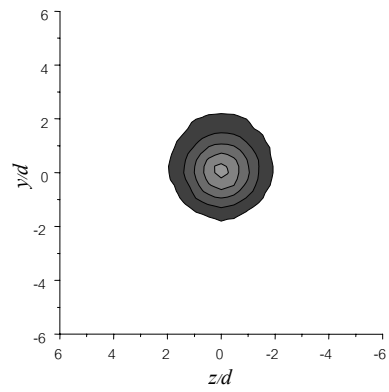
$x/d = 4.0$



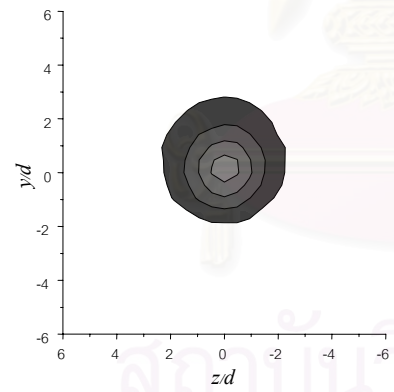
$x/d = 6.0$



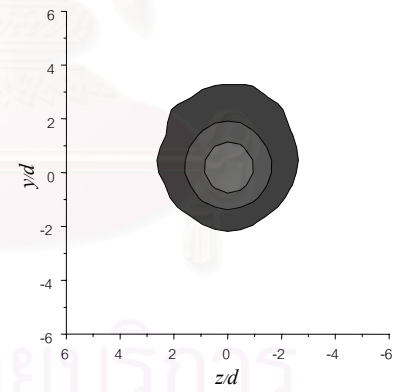
$x/d = 8.0$



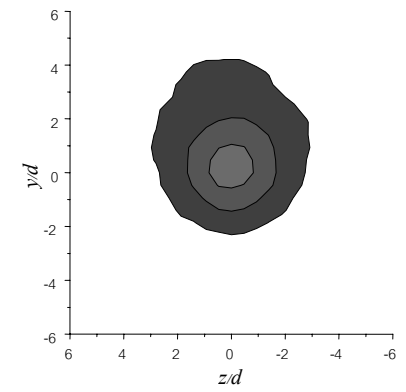
$x/d = 10.0$



$x/d = 12.0$



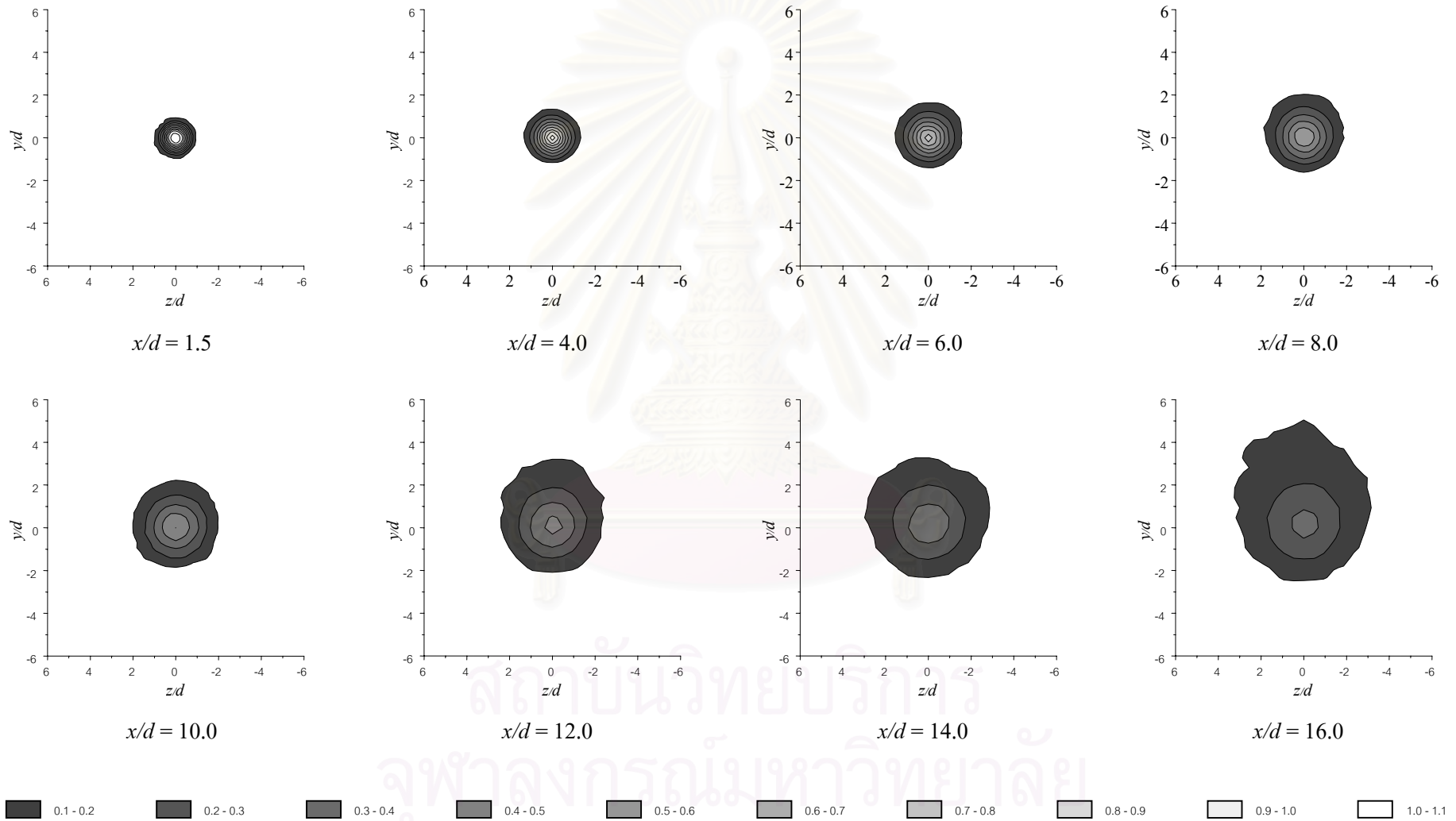
$x/d = 14.0$



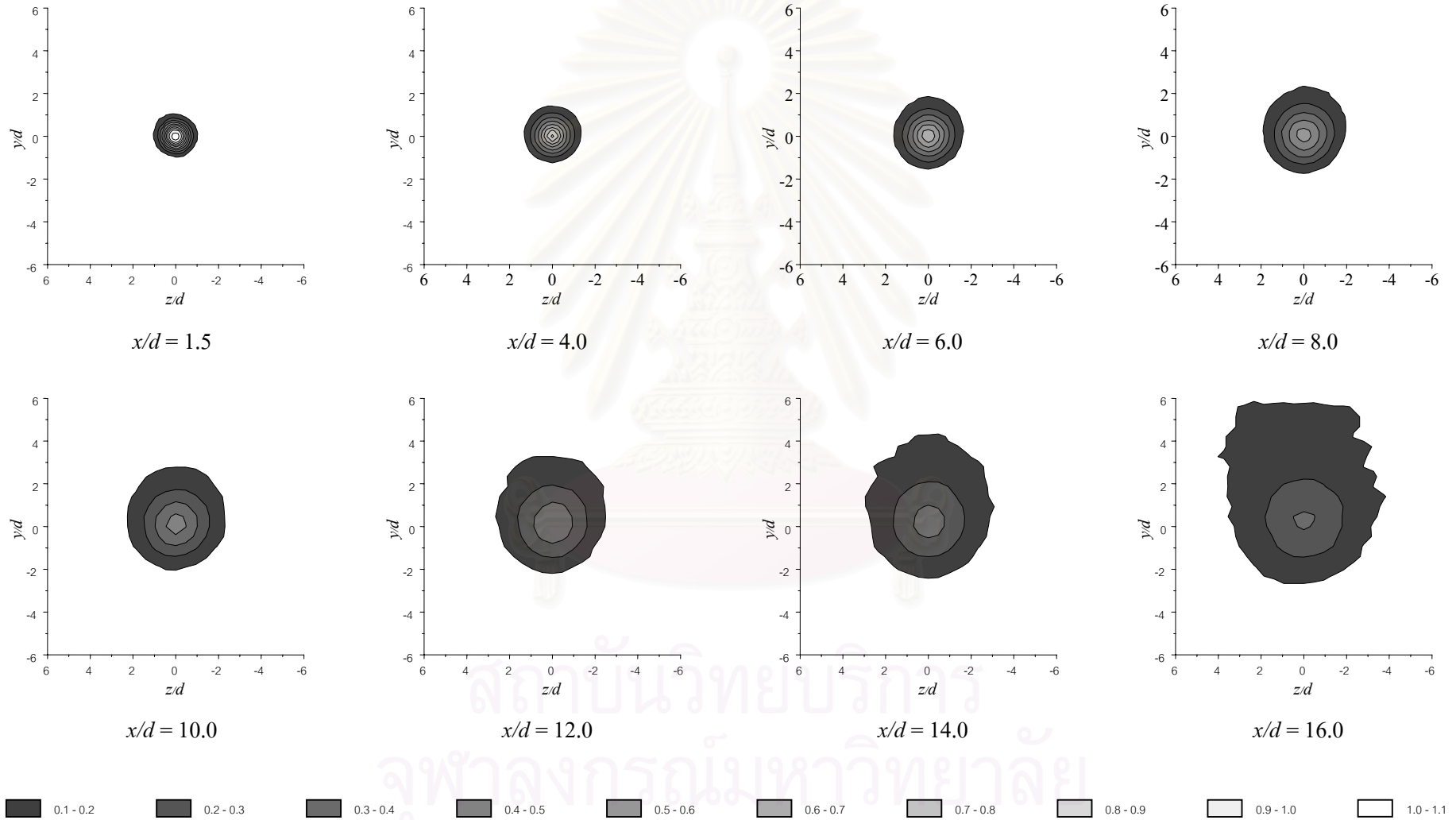
$x/d = 16.0$



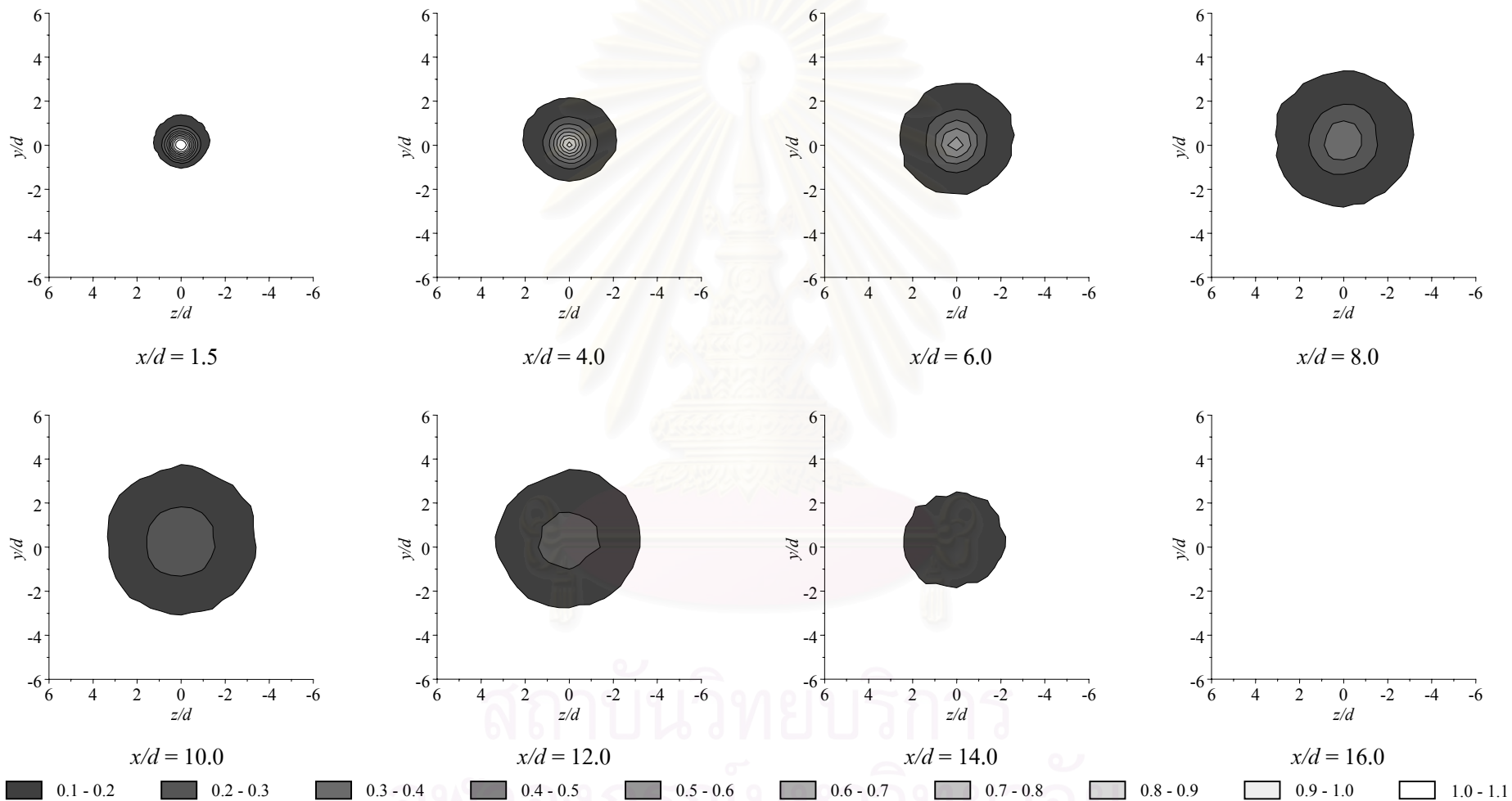
รูปที่ 3.8 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr_{11}



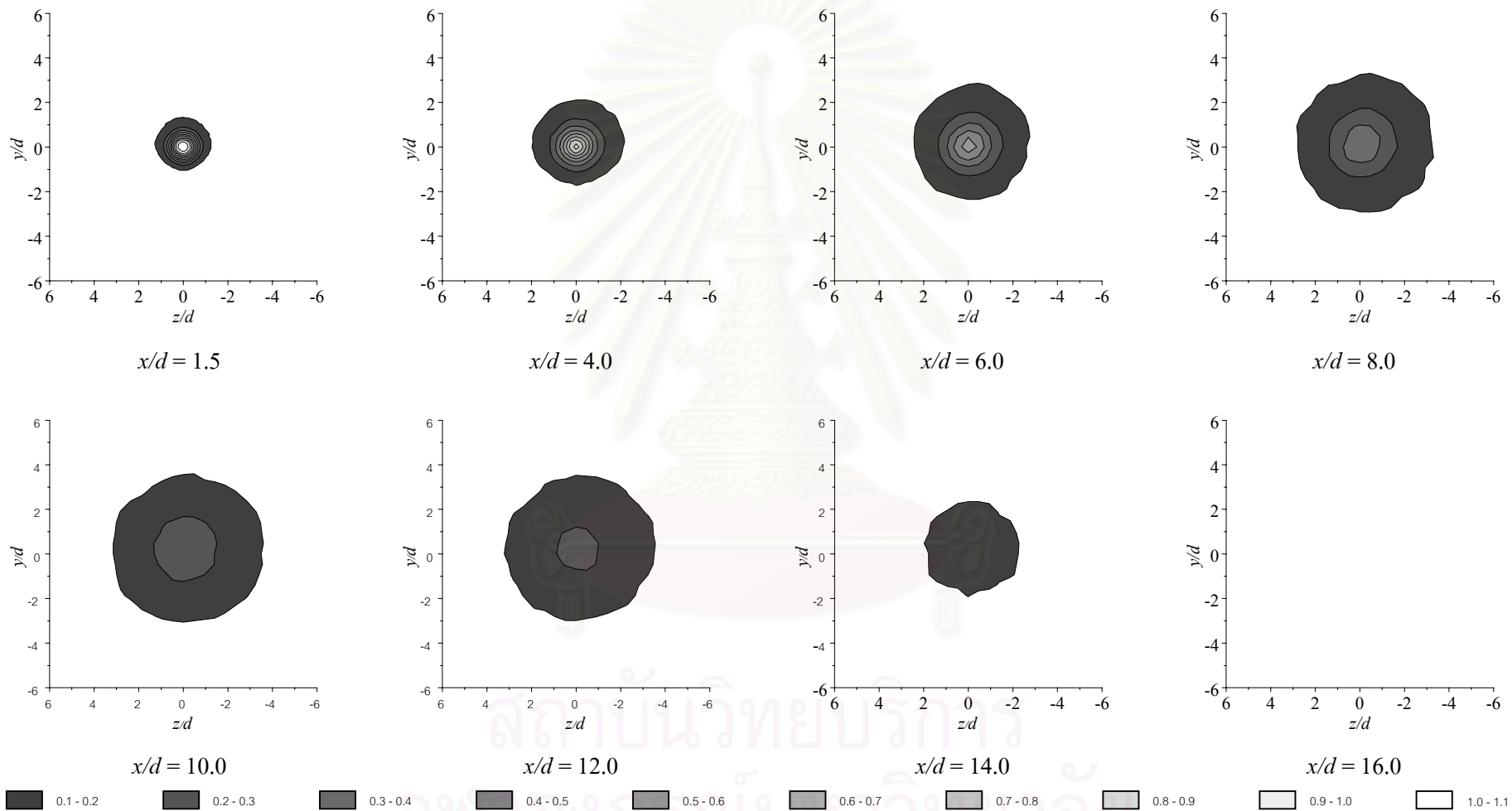
รูปที่ 3.9 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr_{22}



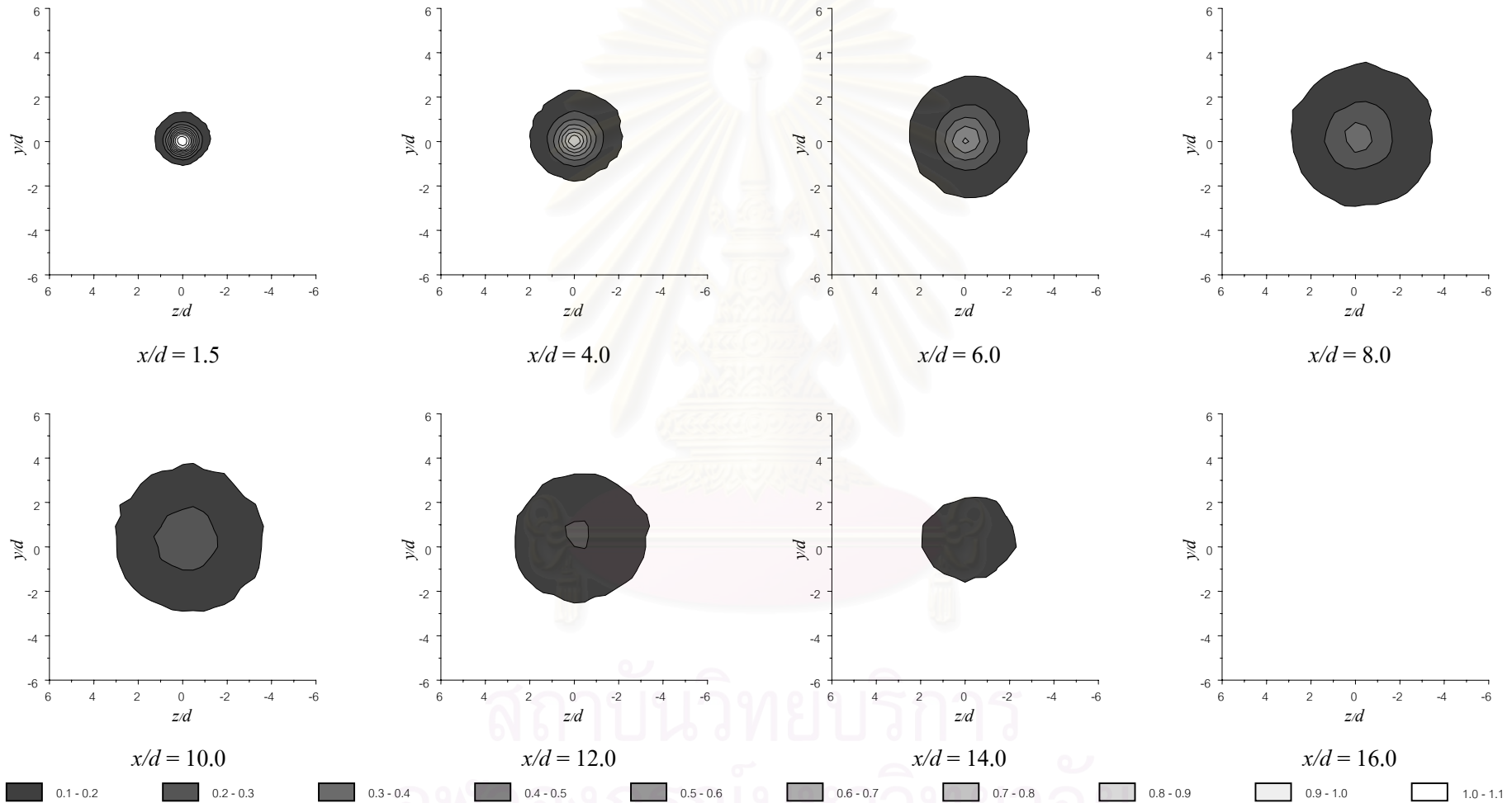
รูปที่ 3.10 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $S=33$



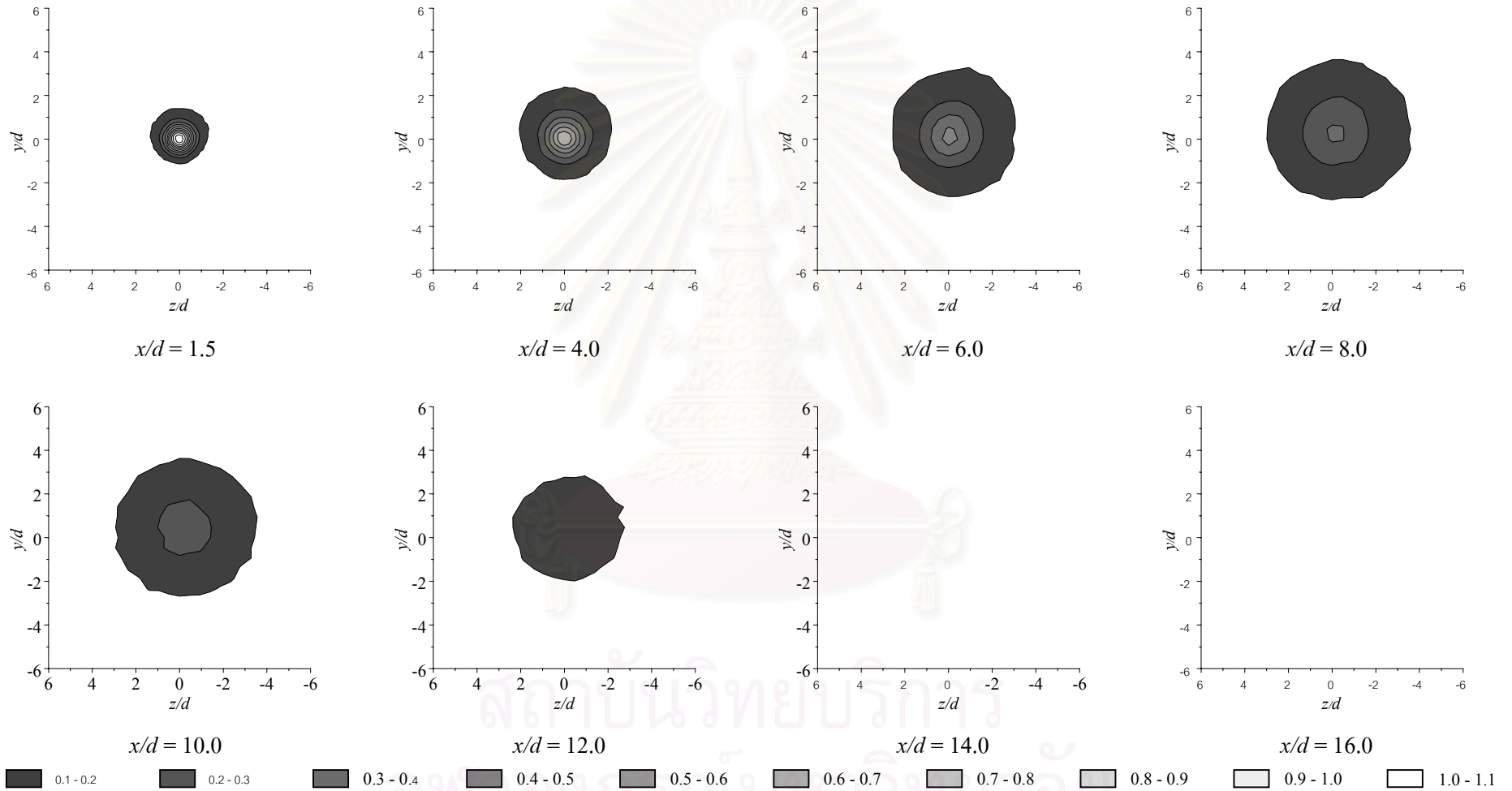
รูปที่ 3.11 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจำนวนรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr0cf$ (ในกรณีกราฟที่ว่างไว้แสดงว่าระดับของ C_{TG} ในหน้าตัดลดลงต่ำกว่า 0.1)



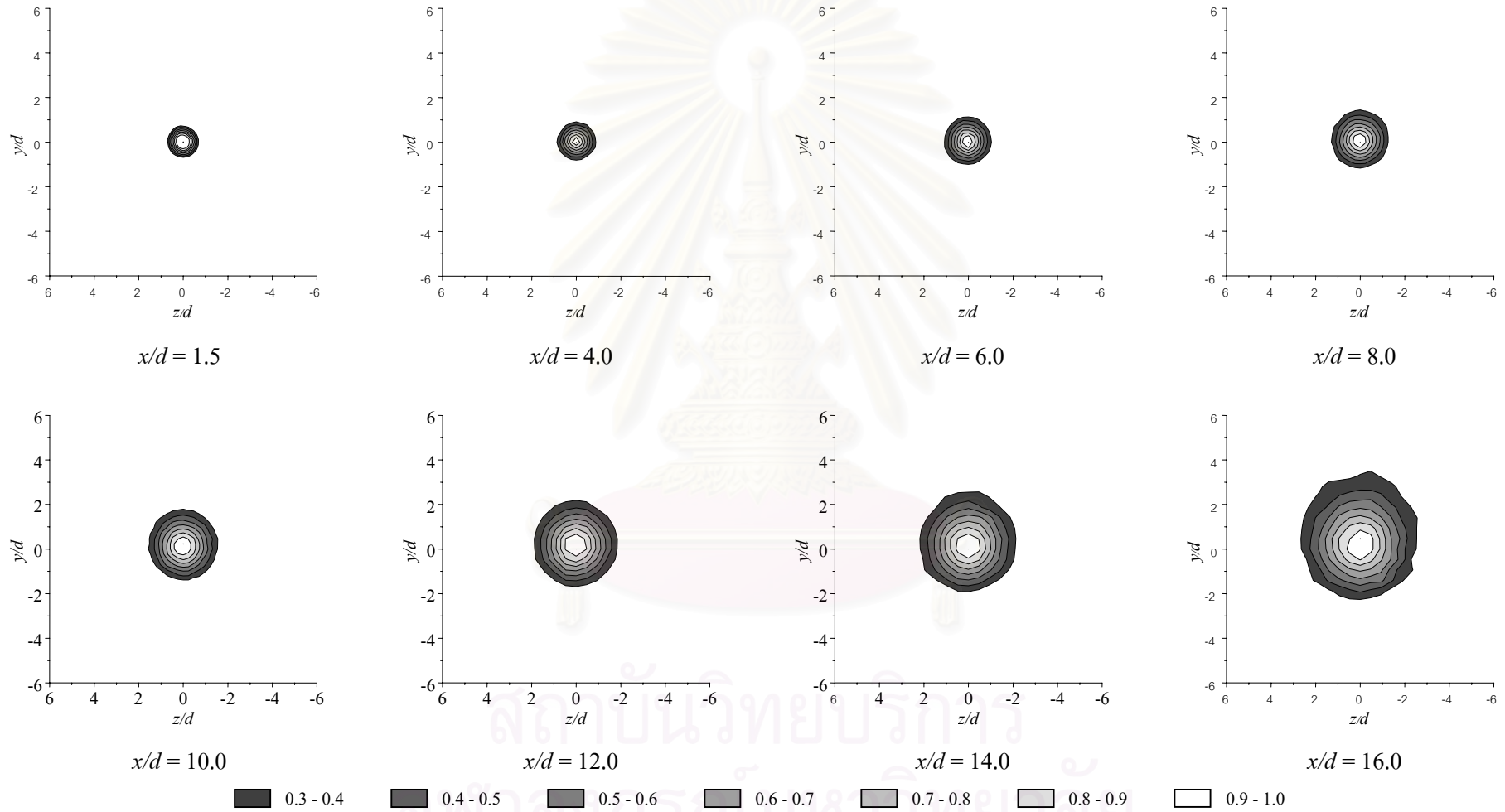
รูปที่ 3.12 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr=11cf$ (ในกรณีกราฟที่วางไว้แสดงว่าระดับของ C_{TG} ในหน้าตัดลดลงต่ำกว่า 0.1)



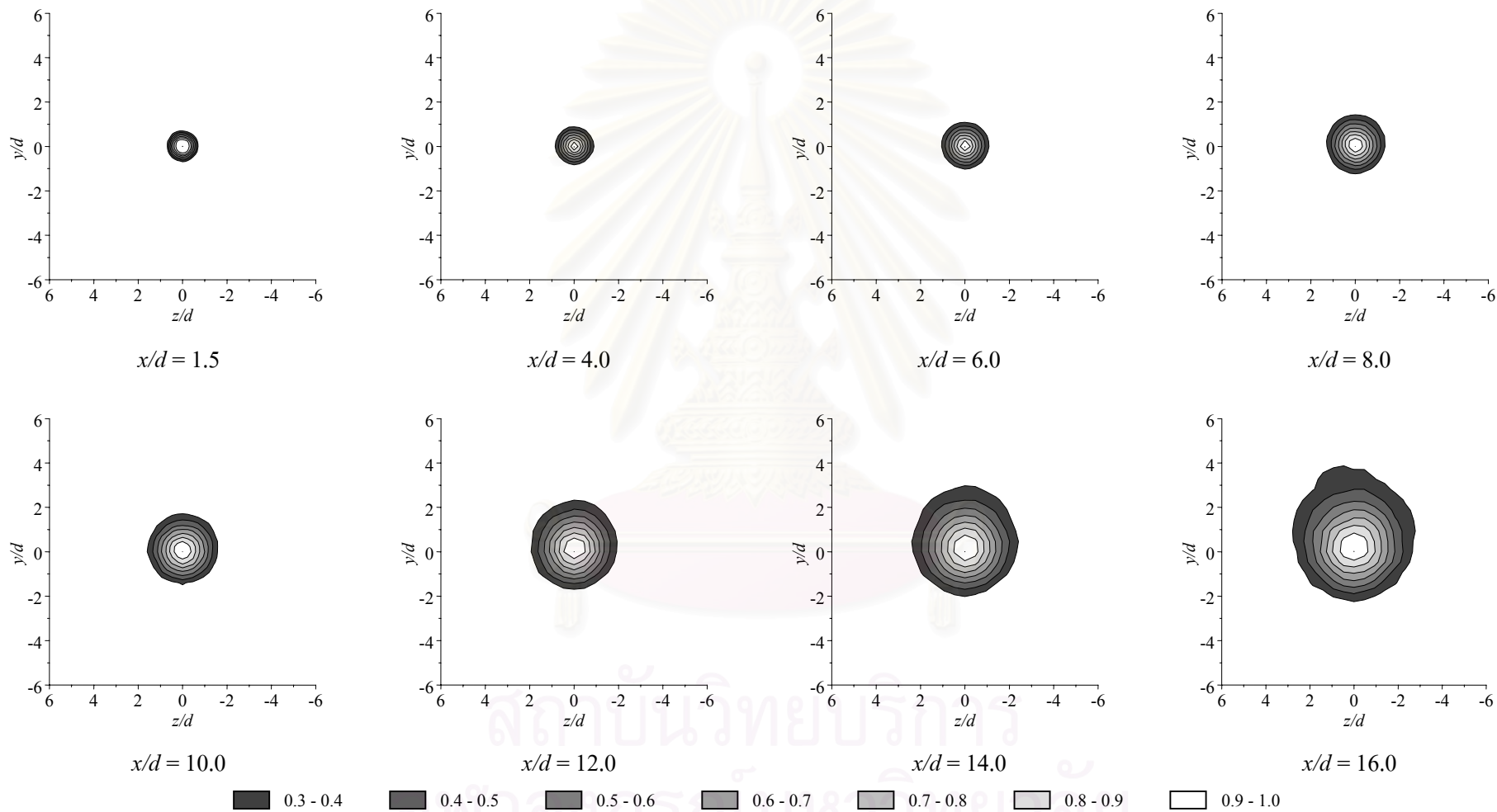
รูปที่ 3.13 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr_{22cf} (ในกรณีกราฟที่วางไว้แสดงว่าระดับของ C_{TG} ในหน้าตัดลดลงต่ำกว่า 0.1)



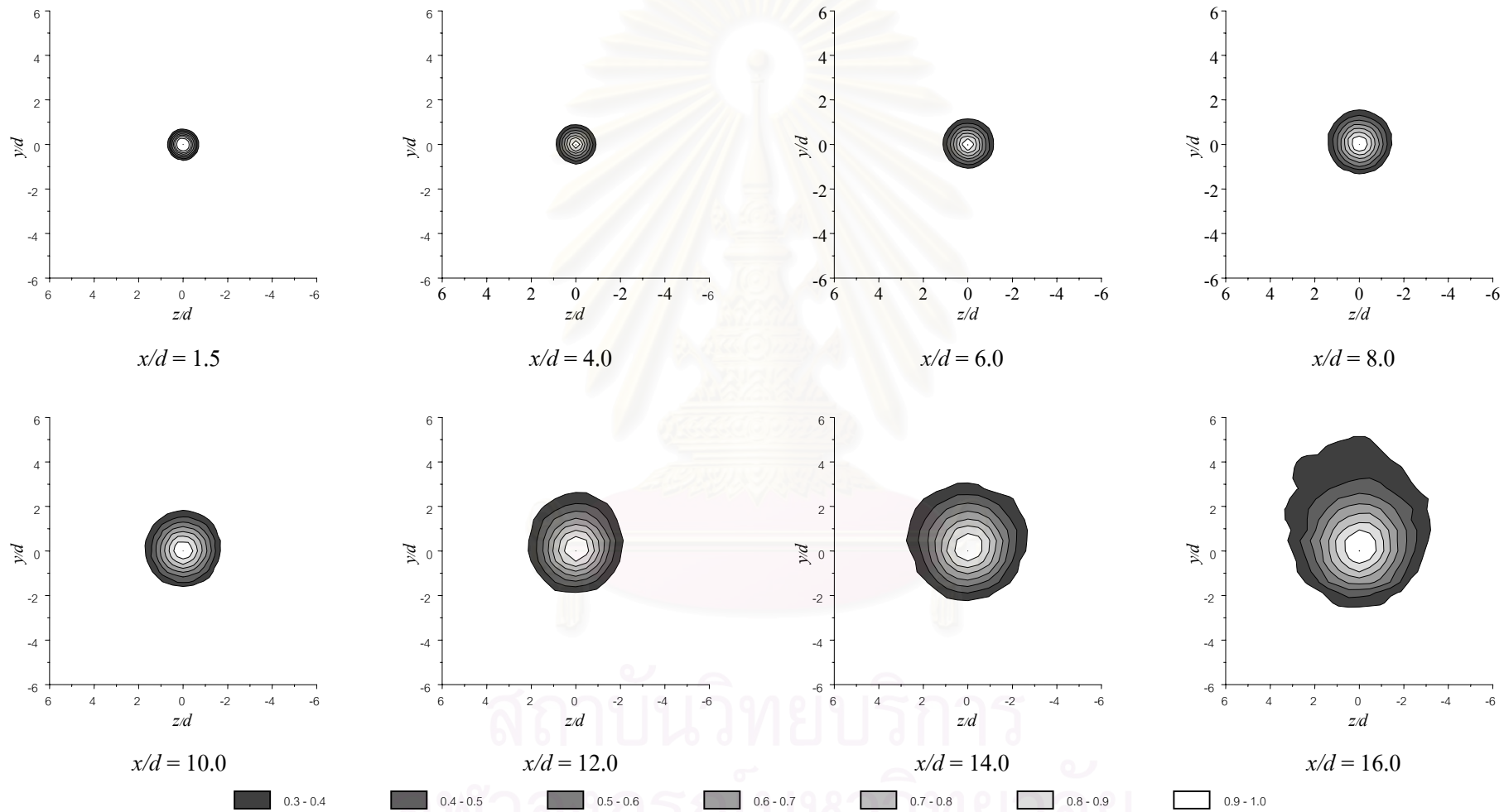
รูปที่ 3.14 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr_{33cf} (ในกรณีกราฟที่วางไว้แสดงว่าระดับของ C_{TG} ในหน้าตัดลดลงต่ำกว่า 0.1)



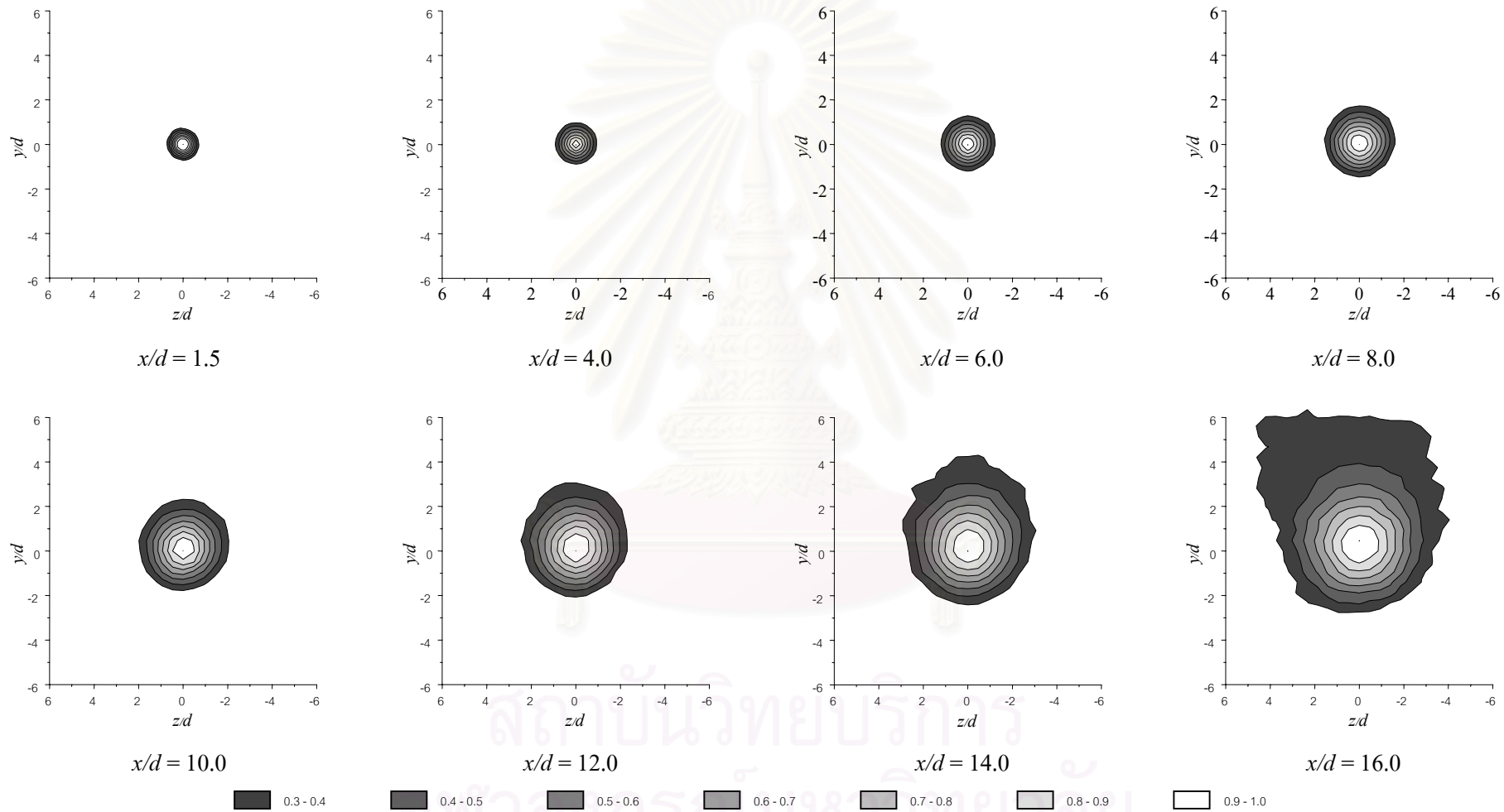
รูปที่ 3.15 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr_0



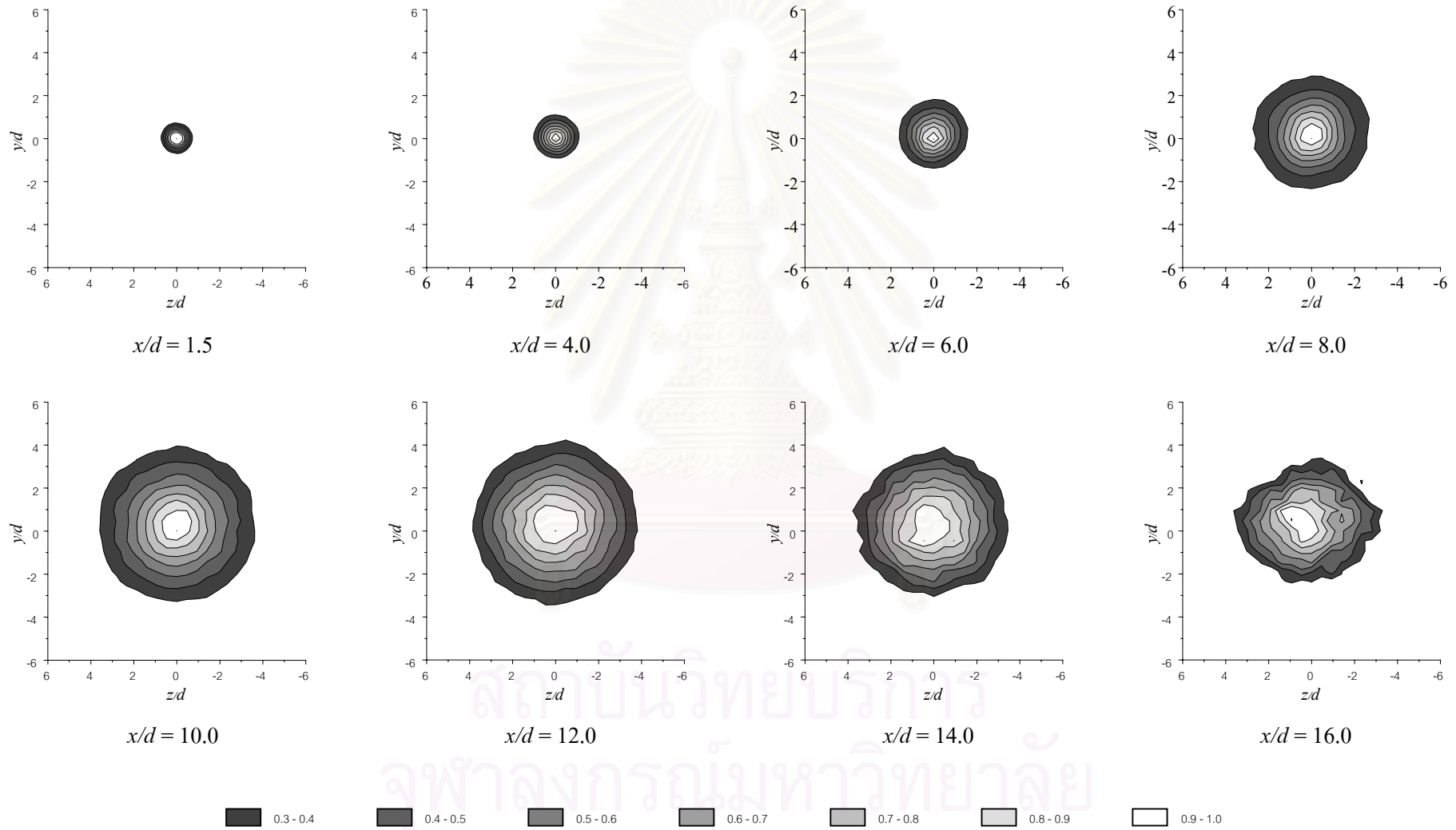
รูปที่ 3.16 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr_{11}



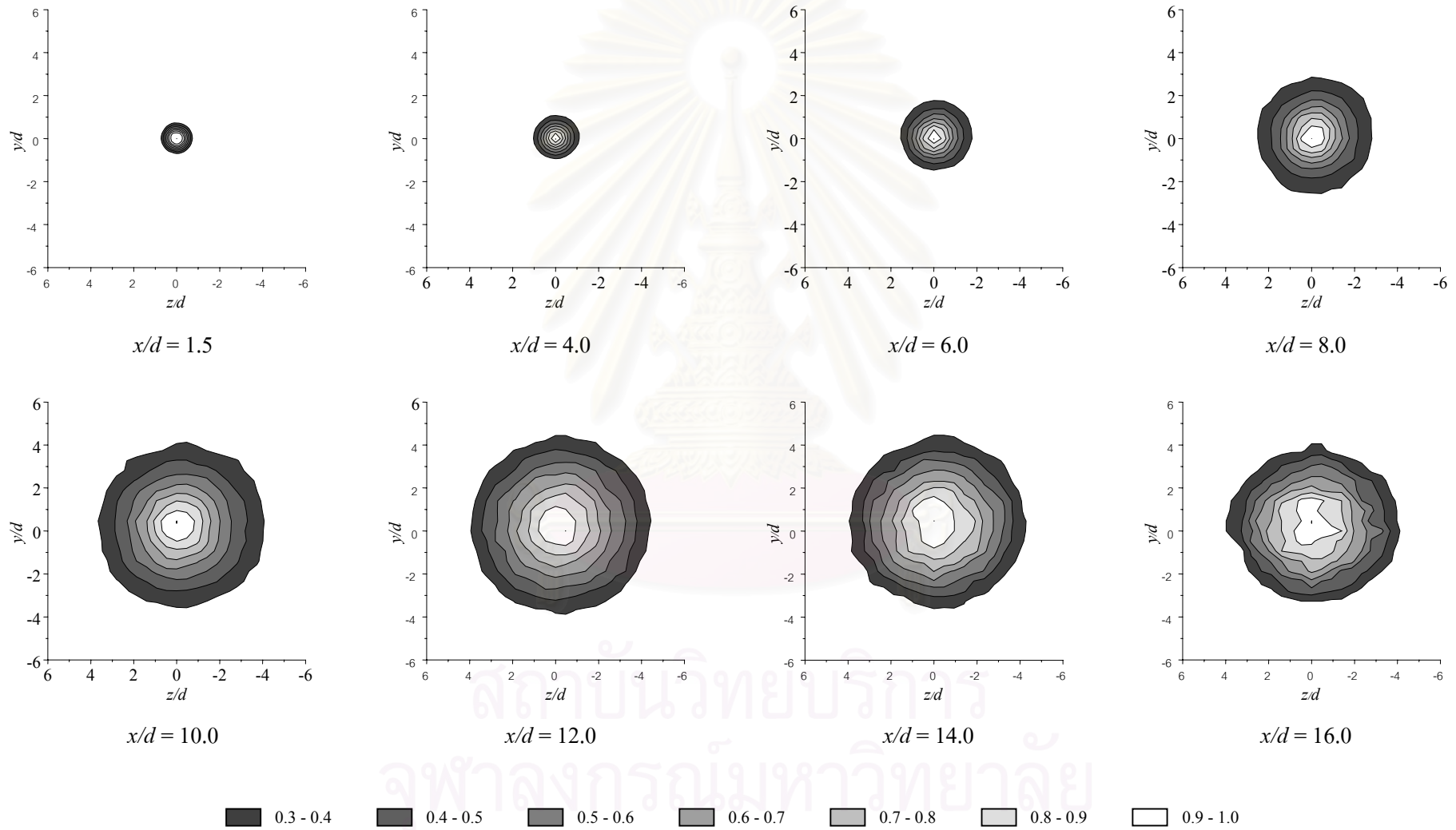
รูปที่ 3.17 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr=22$



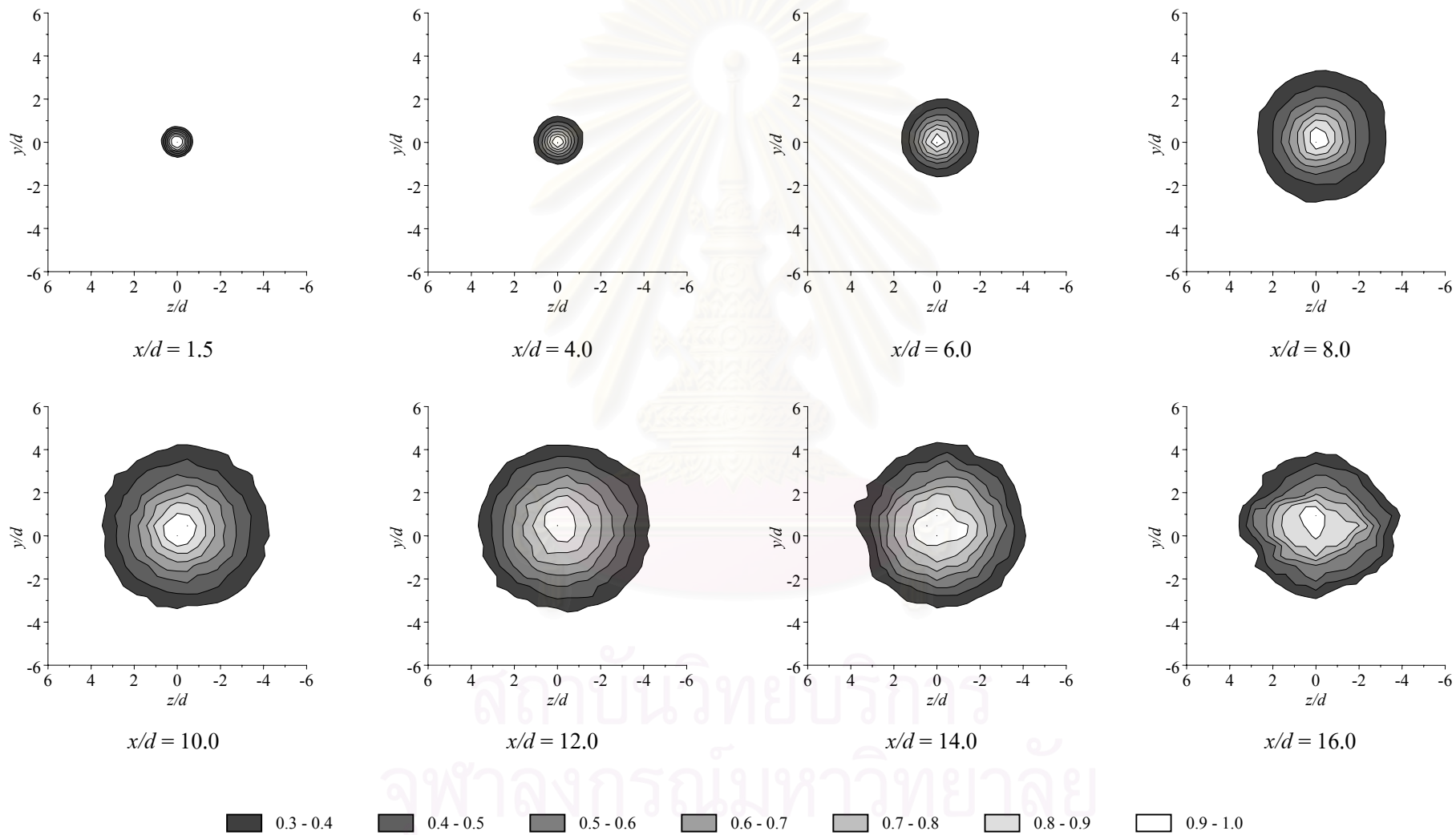
รูปที่ 3.18 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี Sr_{33}



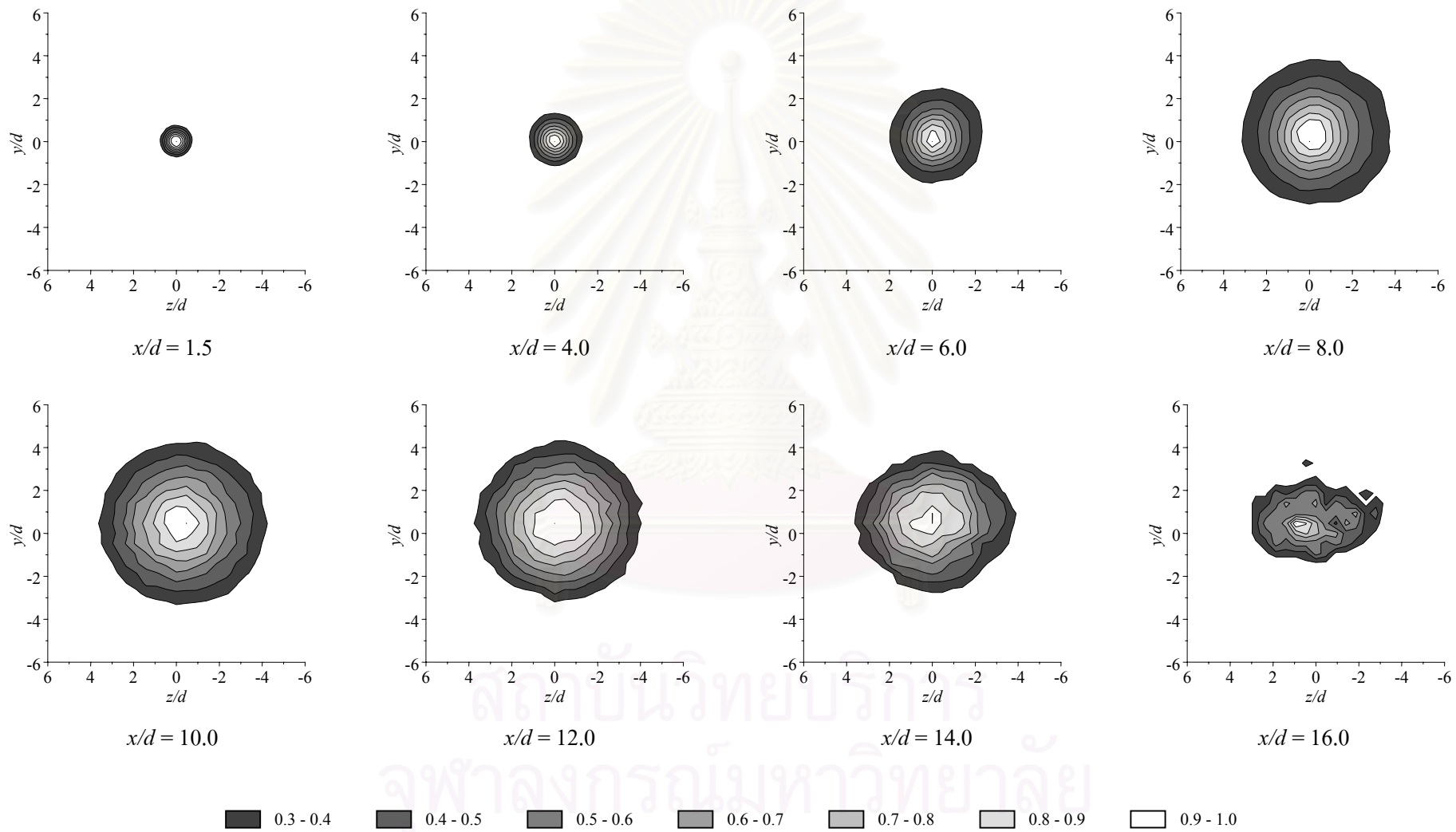
รูปที่ 3.19 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr=0.1$



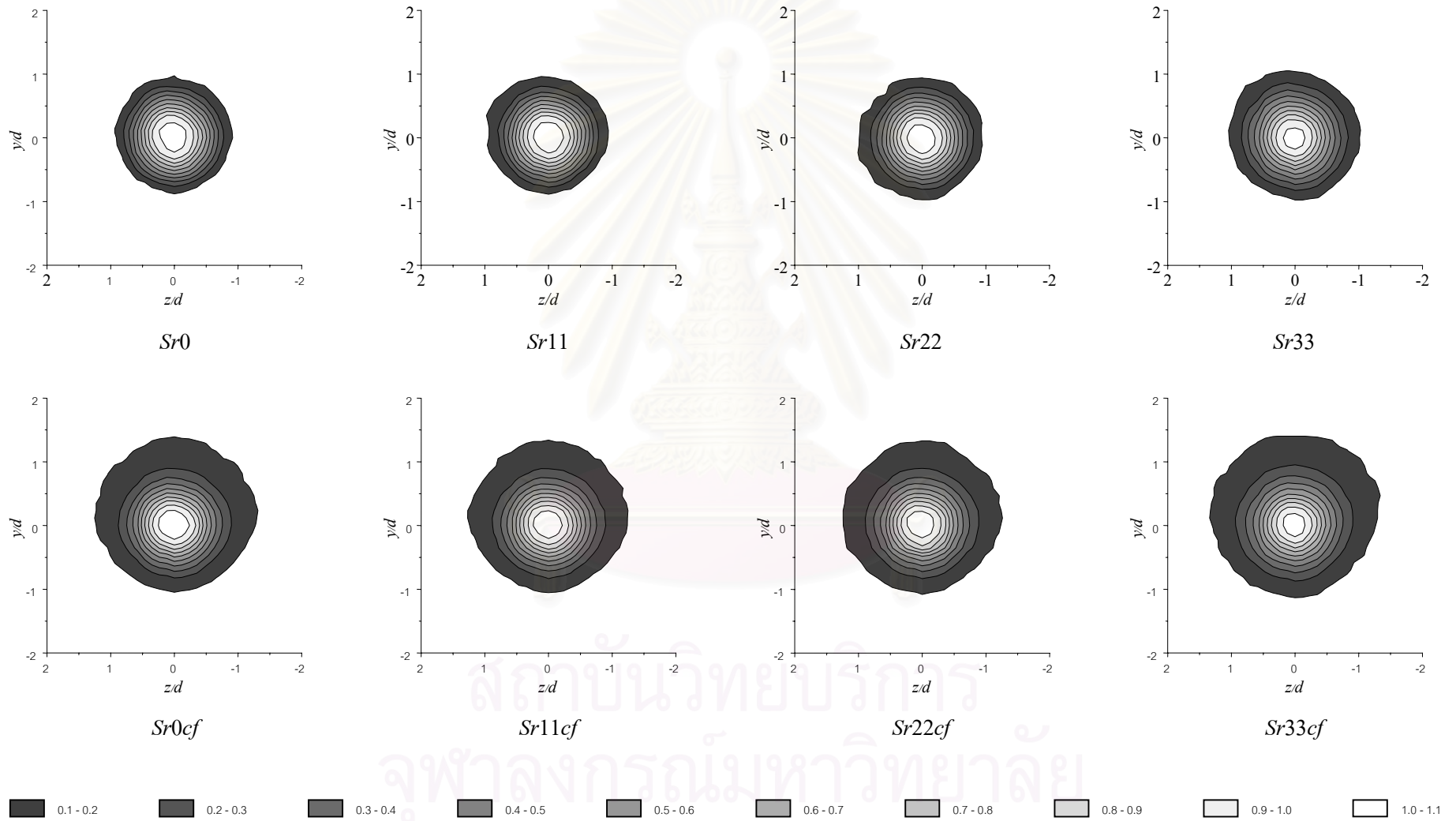
รูปที่ 3.20 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr11cf$



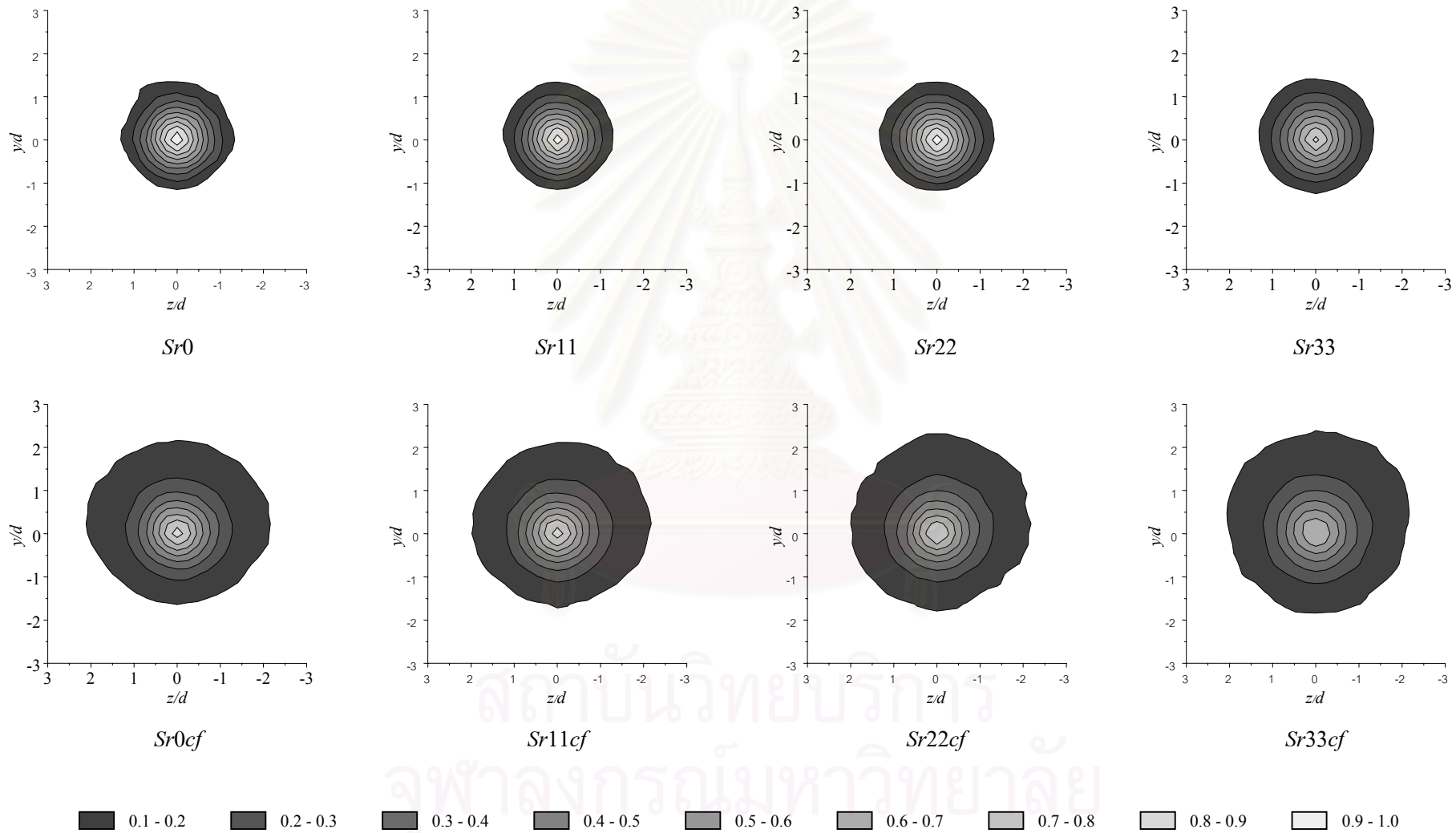
รูปที่ 3.21 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr22cf$



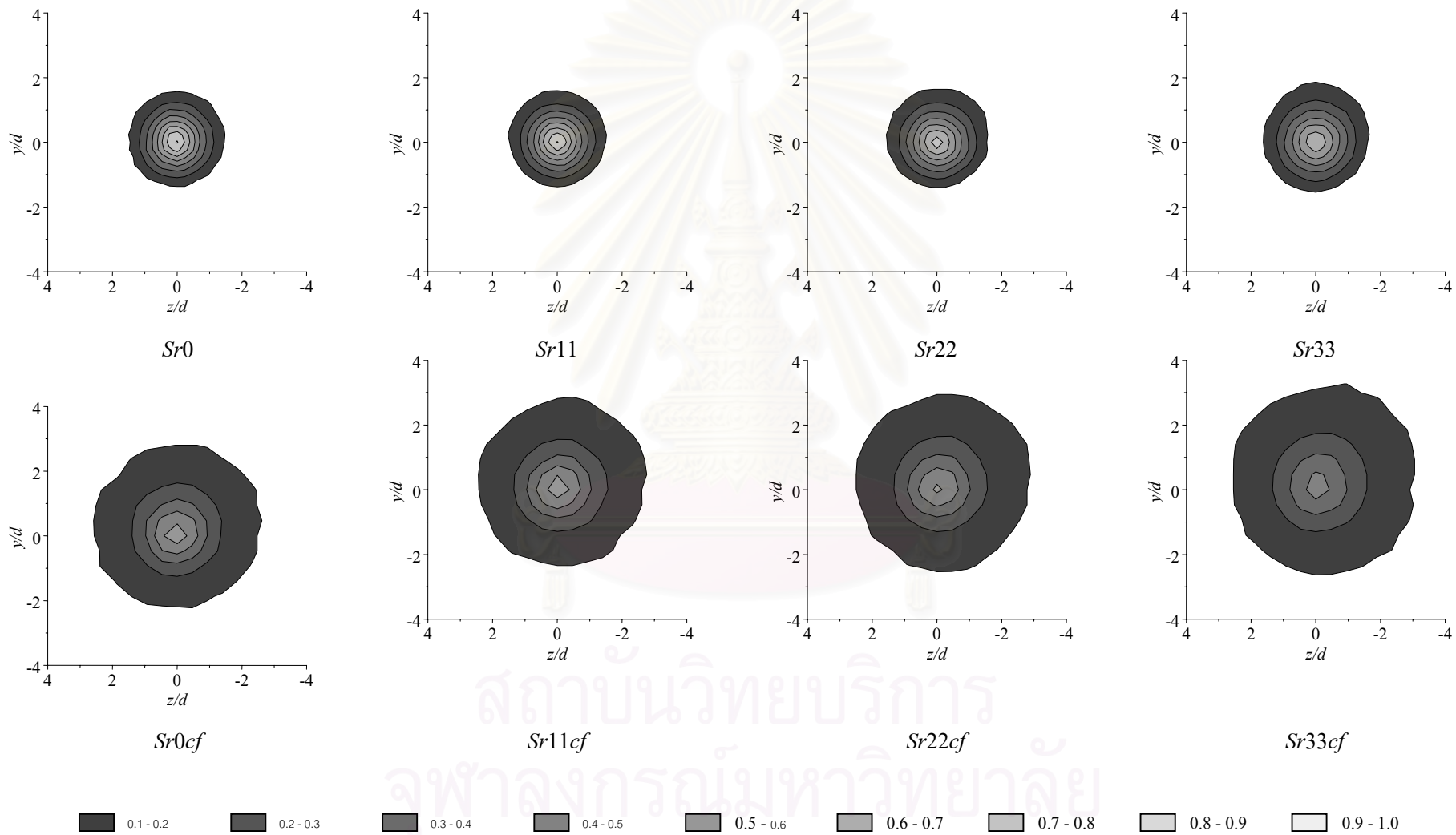
รูปที่ 3.22 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตามแนว Downstream (x) สำหรับกรณี $Sr33cf$



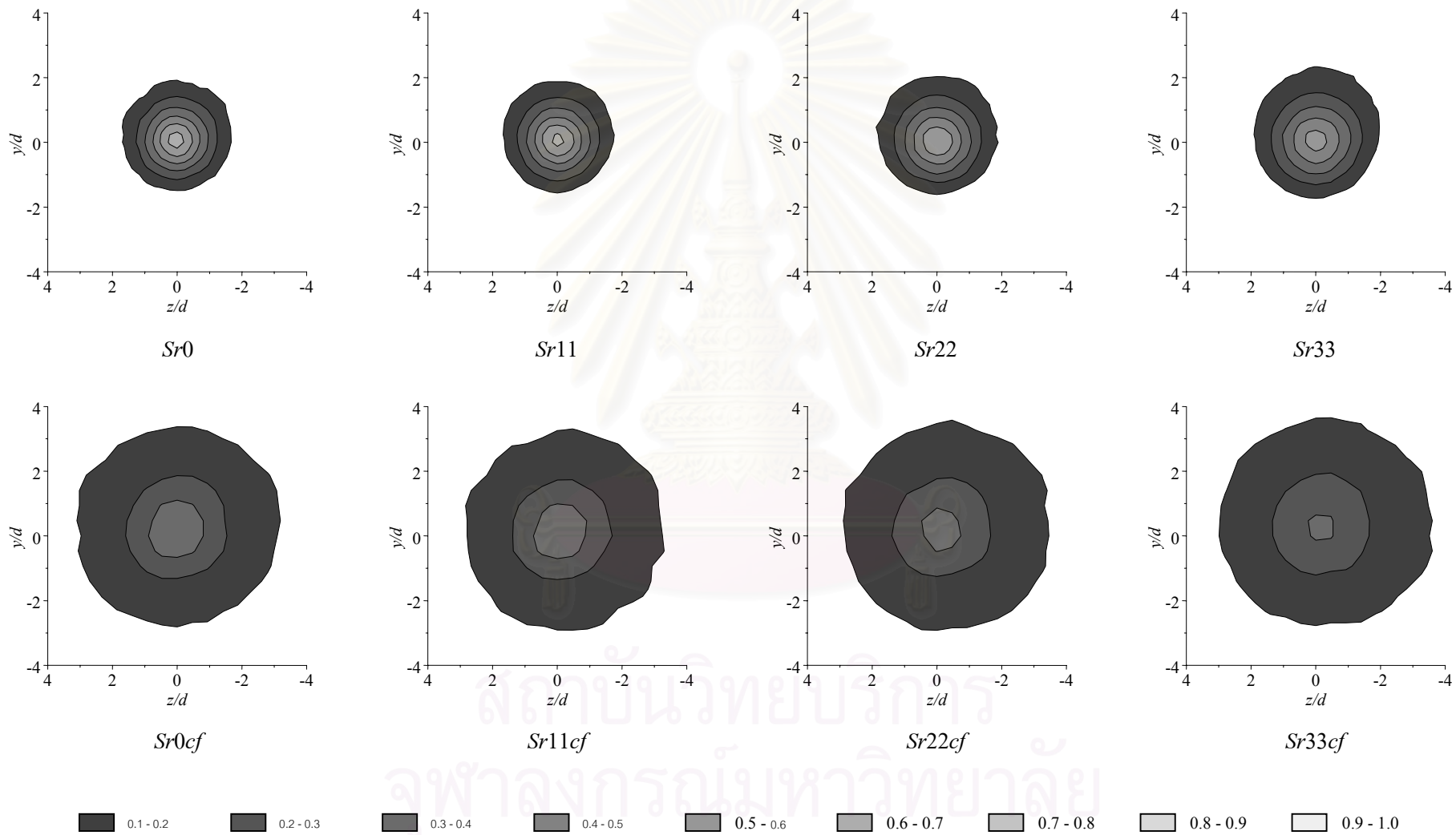
รูปที่ 3.23 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 1.5



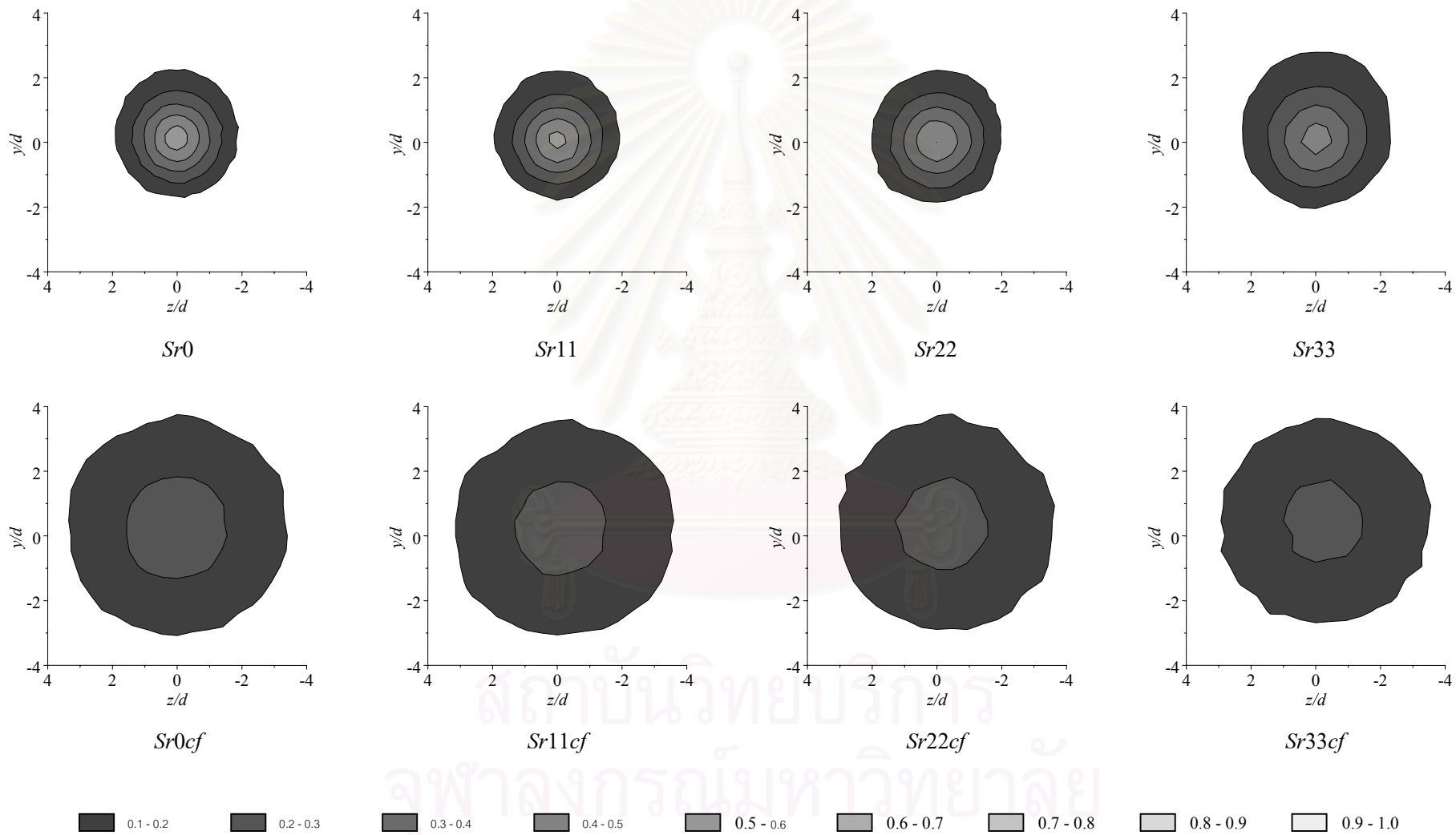
รูปที่ 3.24 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 4



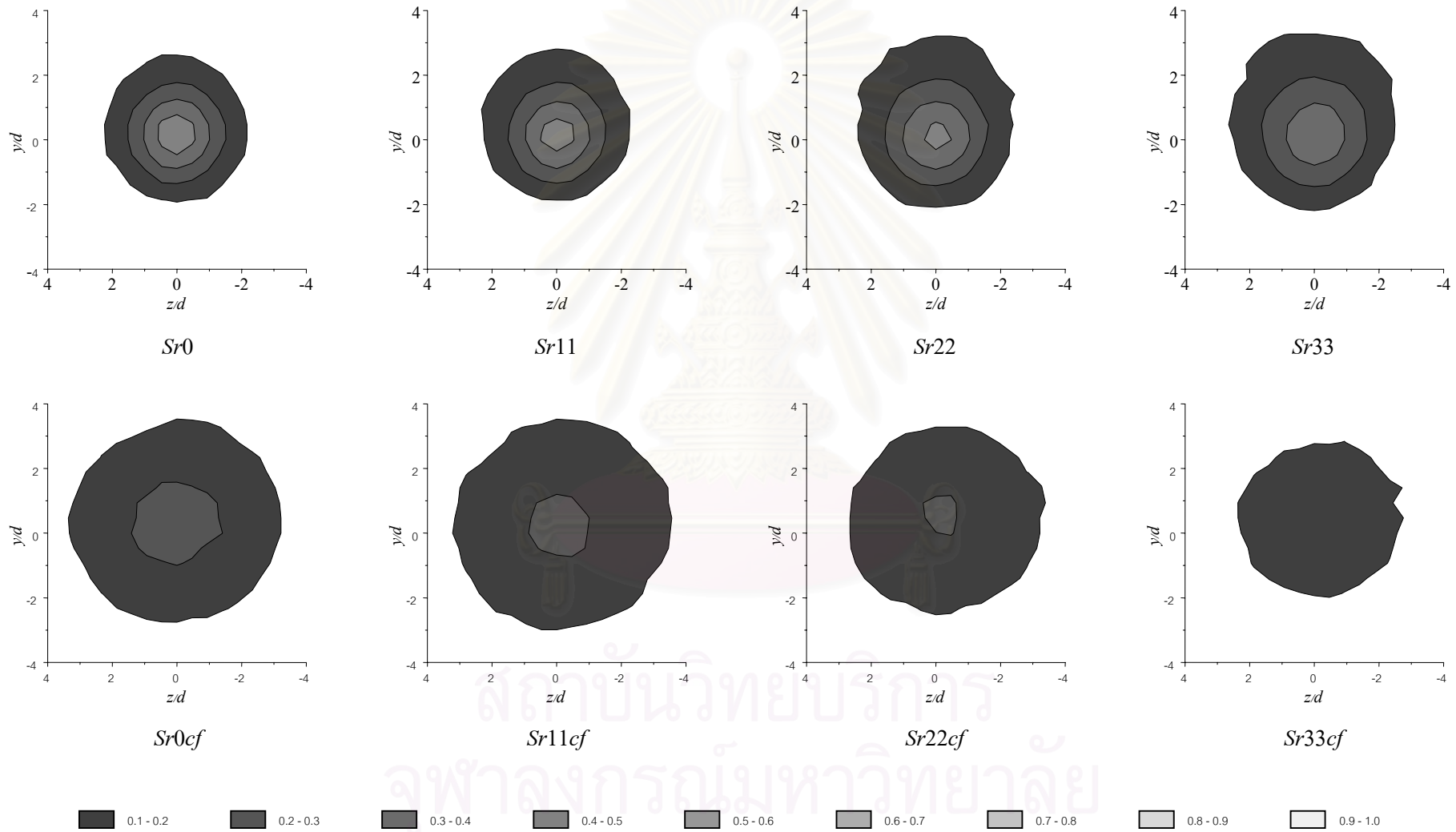
รูปที่ 3.25 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี ที่ x/d เท่ากับ 6



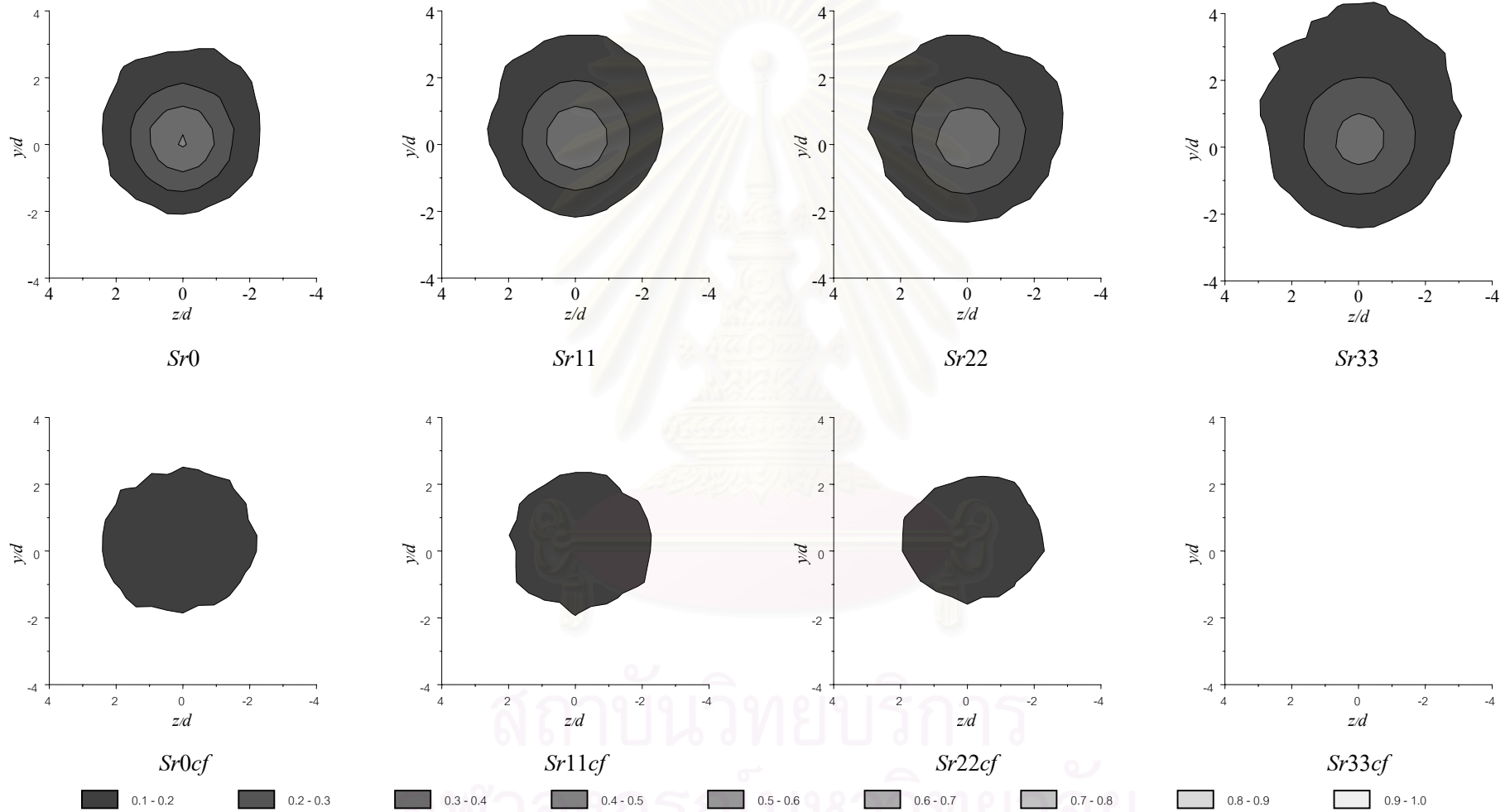
รูปที่ 3.26 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 8



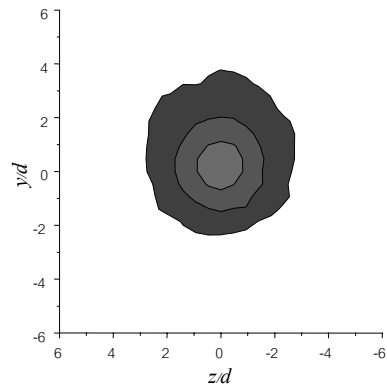
รูปที่ 3.27 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 10



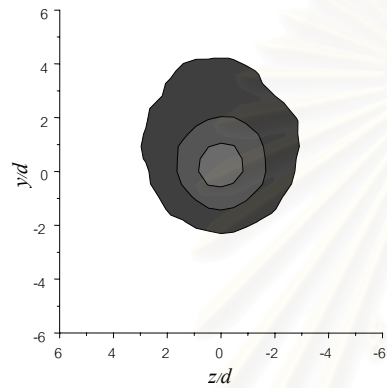
รูปที่ 3.28 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 12



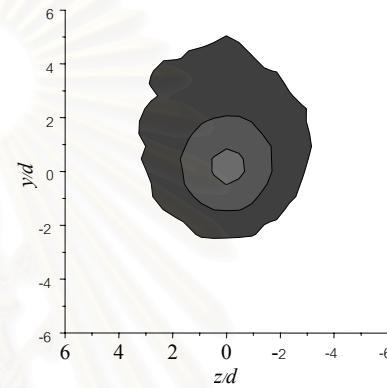
รูปที่ 3.29 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 14 (ในกรณีกราฟที่ว่างไว้แสดงว่าระดับของ C_{TG} ในหน้าตัดลดลงต่ำกว่า 0.1)



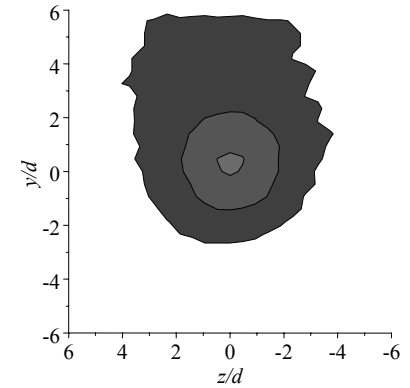
Sr0



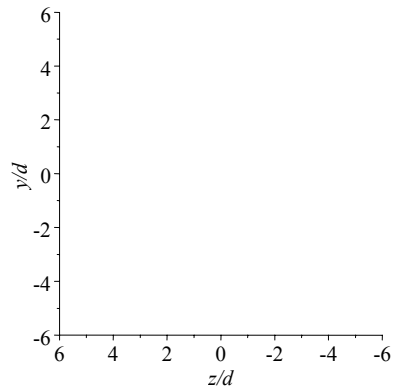
Sr11



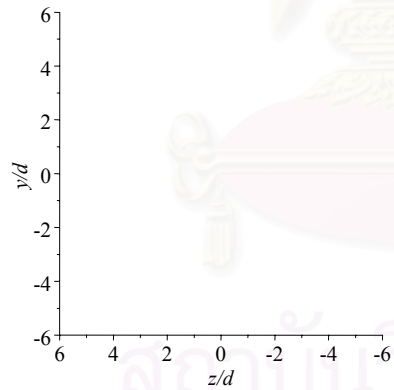
Sr22



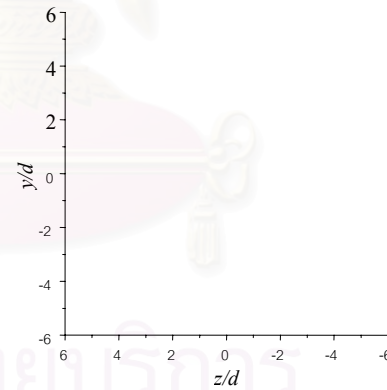
Sr33



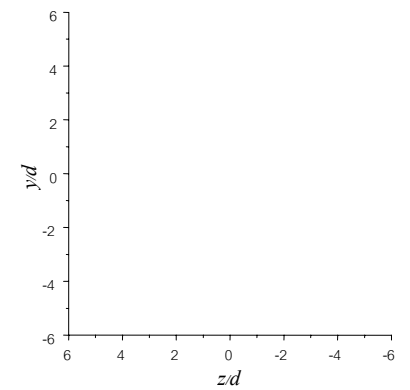
Sr0cf



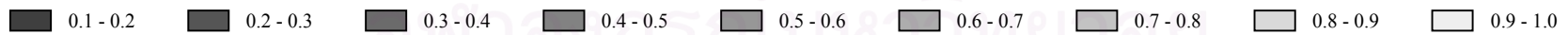
Sr11cf



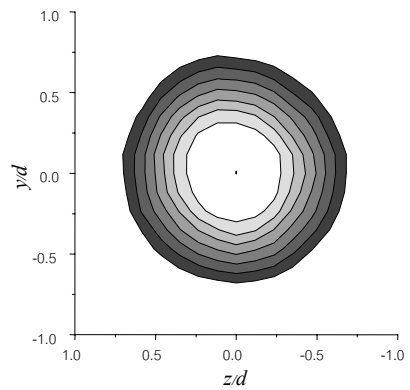
Sr22cf



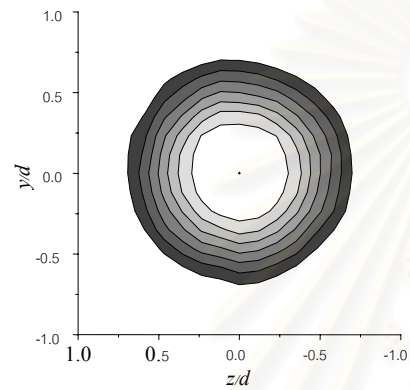
Sr33cf



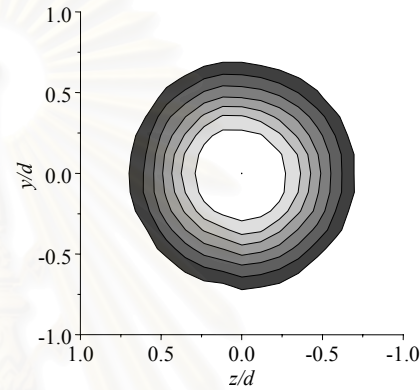
รูปที่ 3.30 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิมรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 16 (ในกรณีกราฟที่ว่างไว้แสดงว่าระดับของ C_{TG} ในหน้าตัดลดลงต่ำกว่า 0.1)



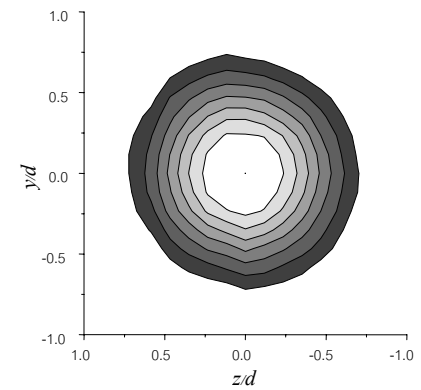
Sr0



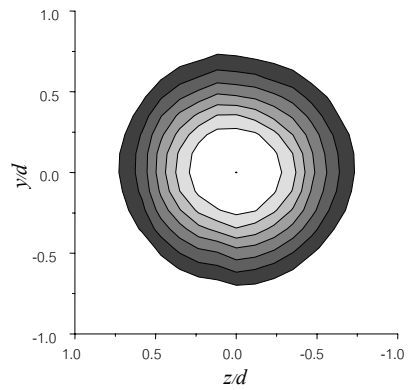
Sr11



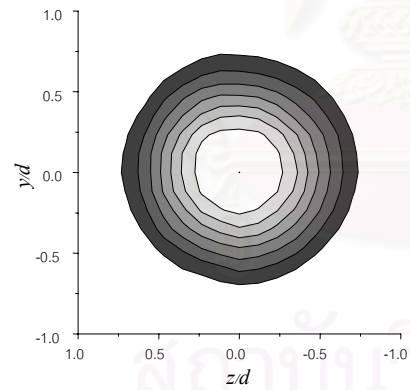
Sr22



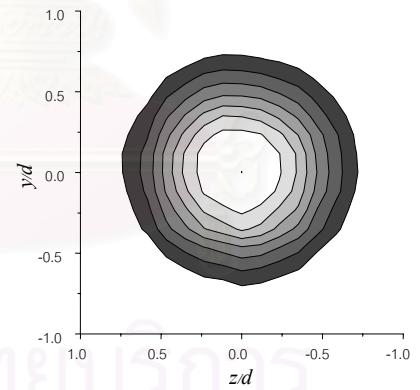
Sr33



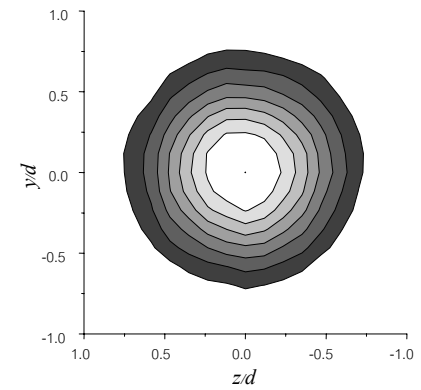
Sr0cf



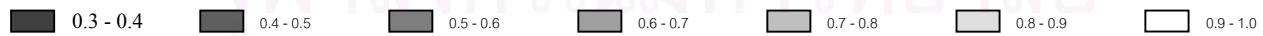
Sr11cf



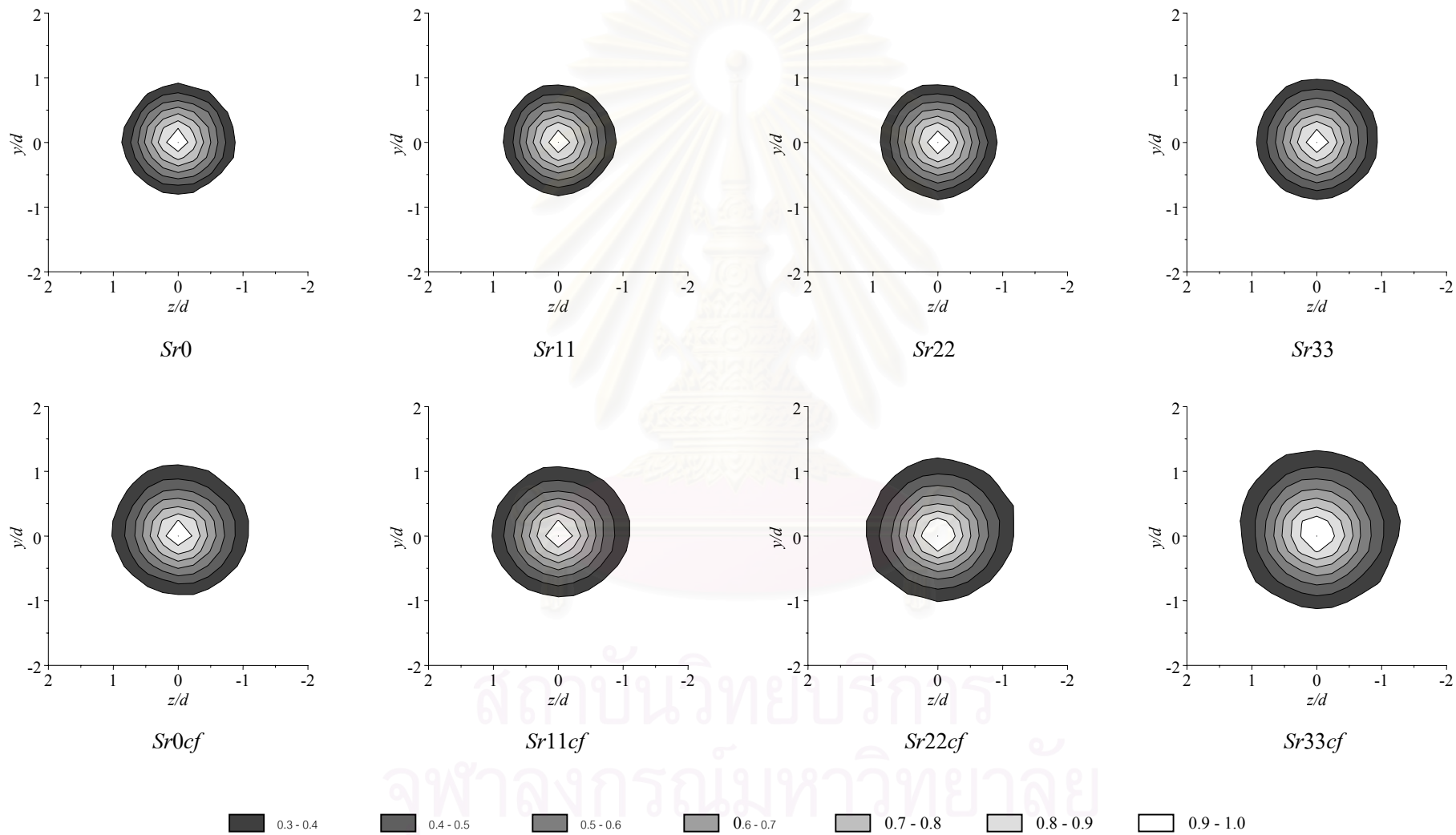
Sr22cf



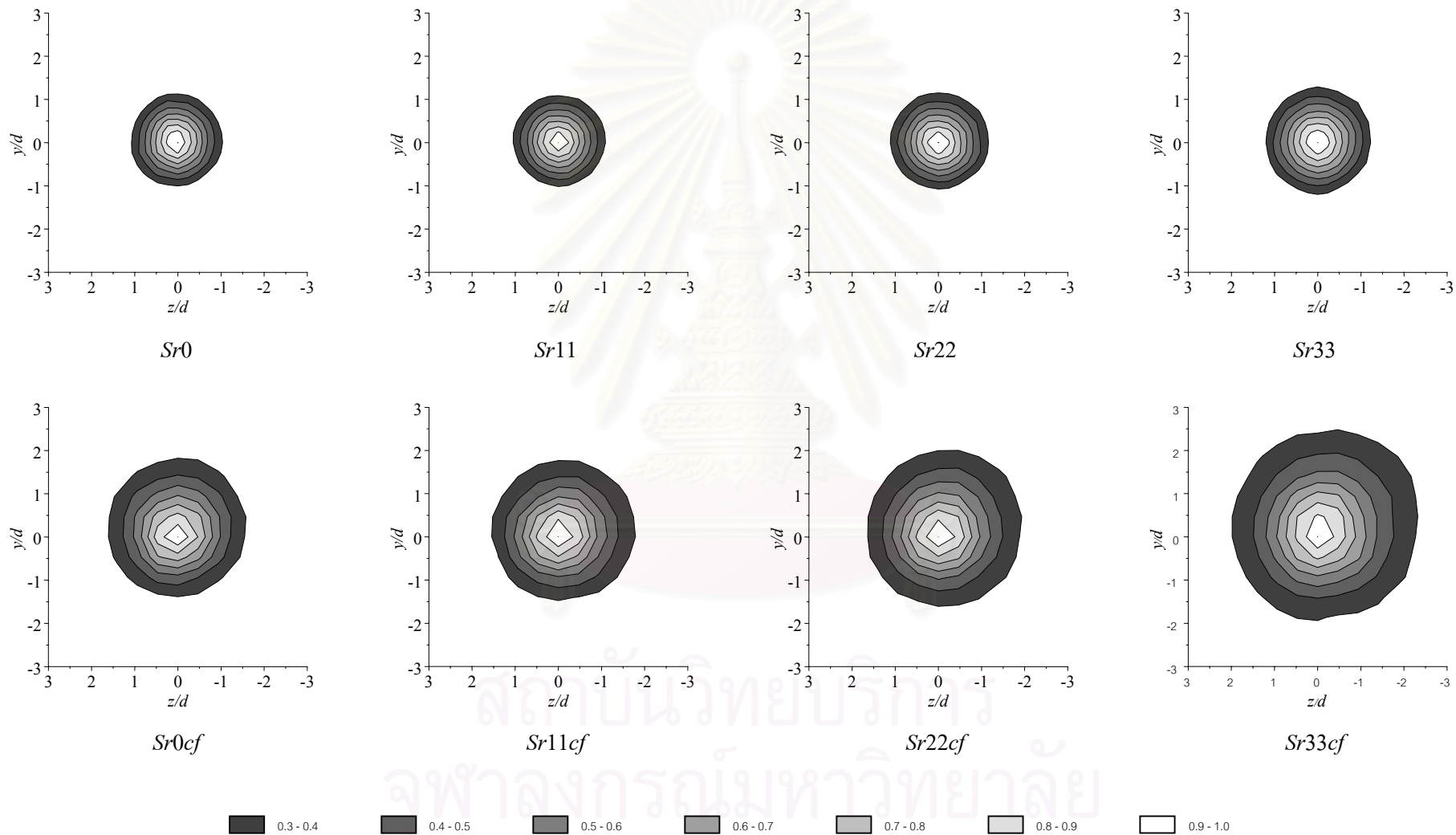
Sr33cf



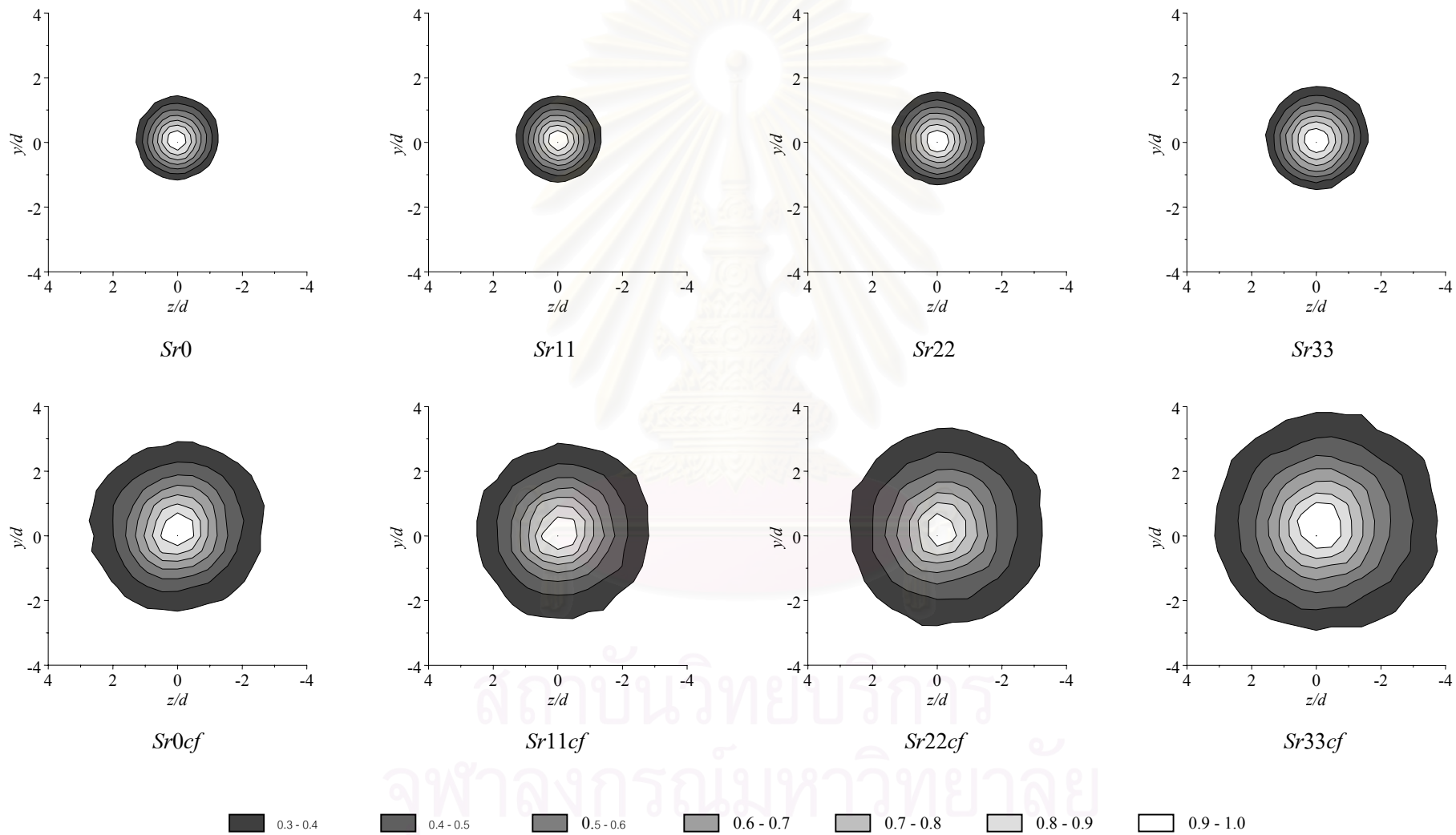
รูปที่ 3.31 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเพาะ (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 1.5



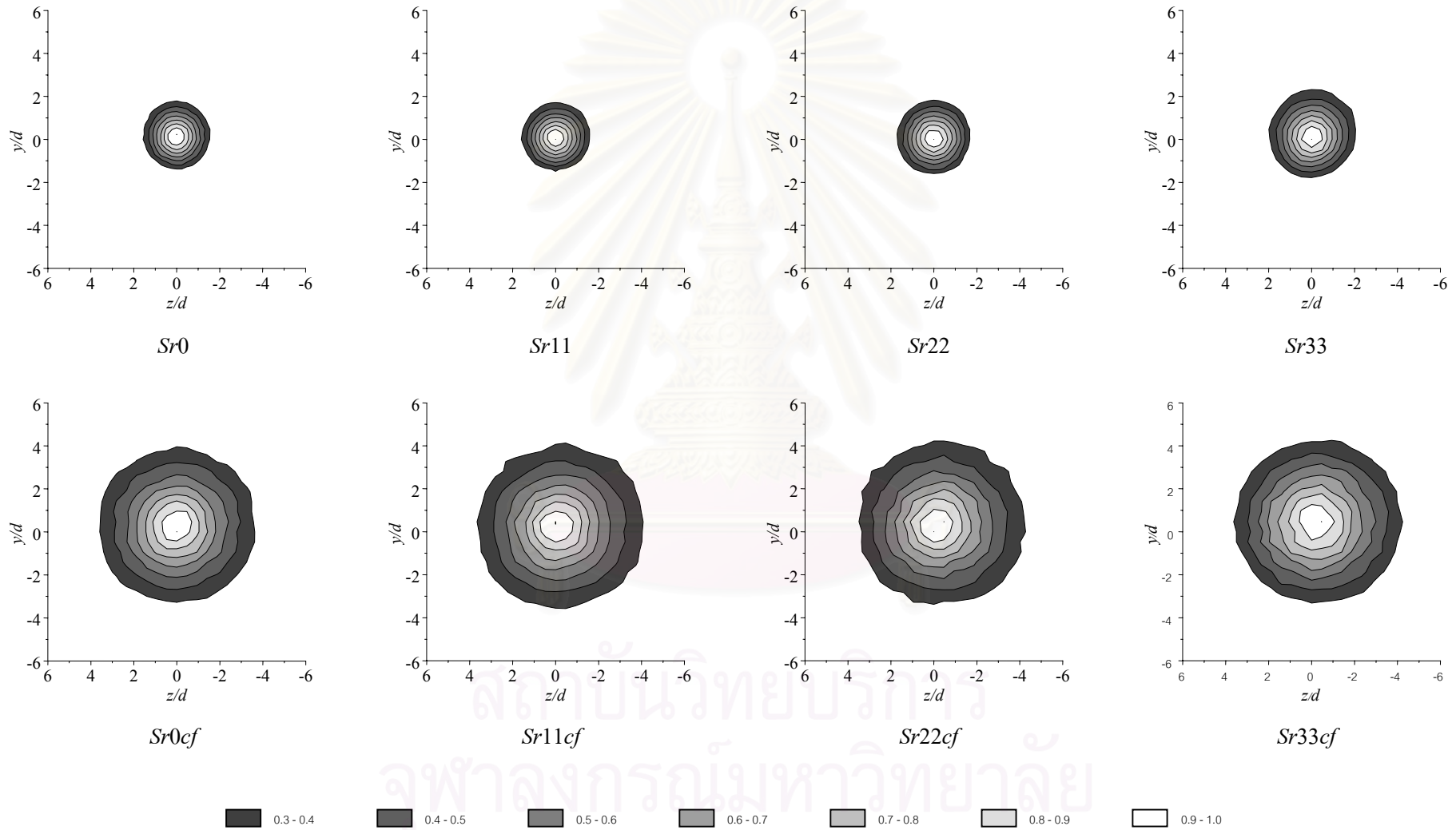
รูปที่ 3.32 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_L) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 4.0



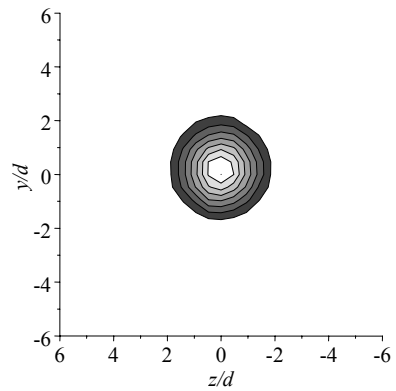
รูปที่ 3.33 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 6.0



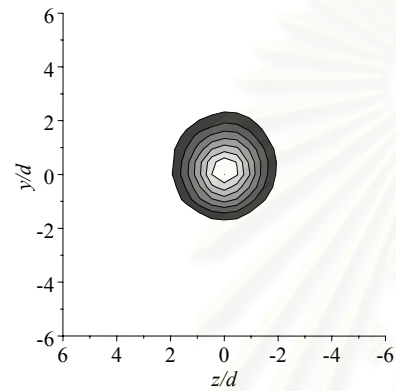
รูปที่ 3.34 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจาะ (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 8.0



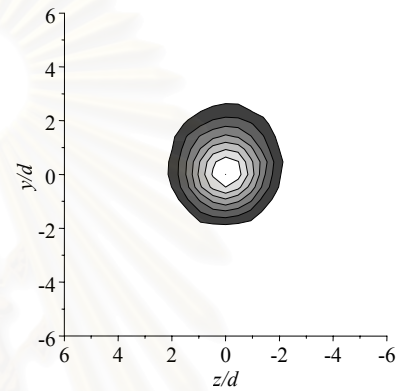
รูปที่ 3.35 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 10.0



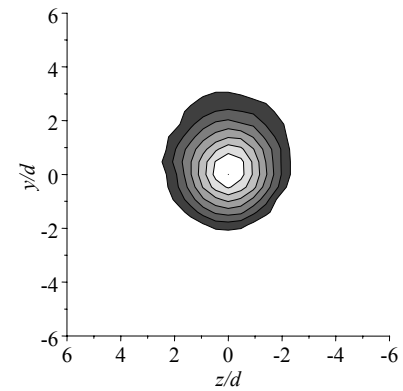
Sr0



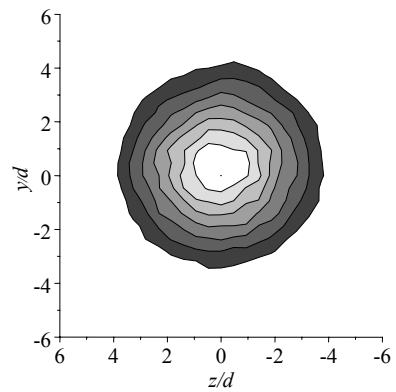
Sr11



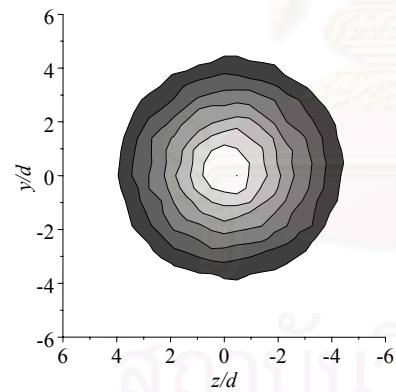
Sr22



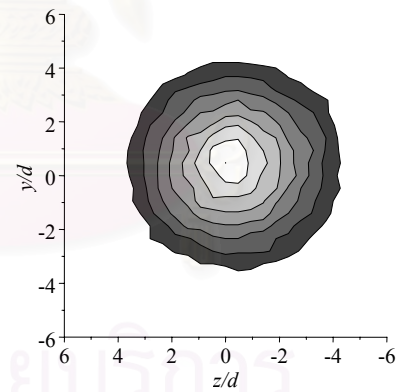
Sr33



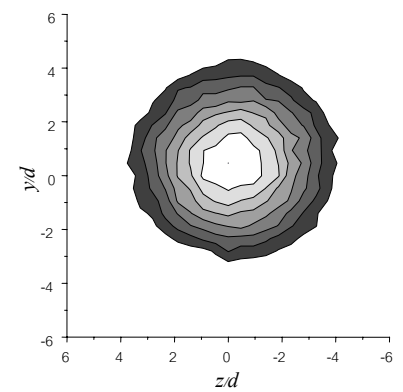
Sr0cf



Sr11cf



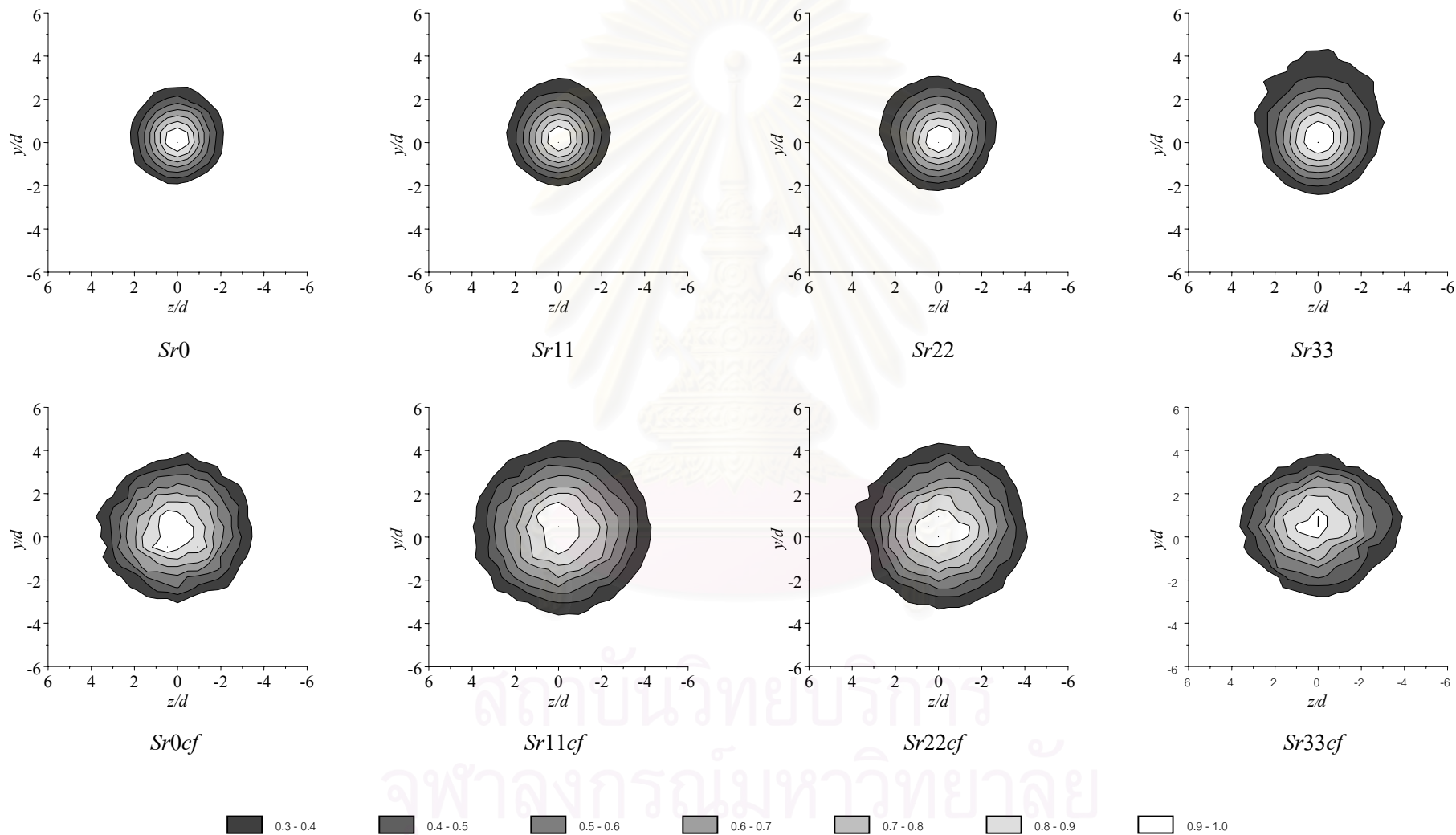
Sr22cf



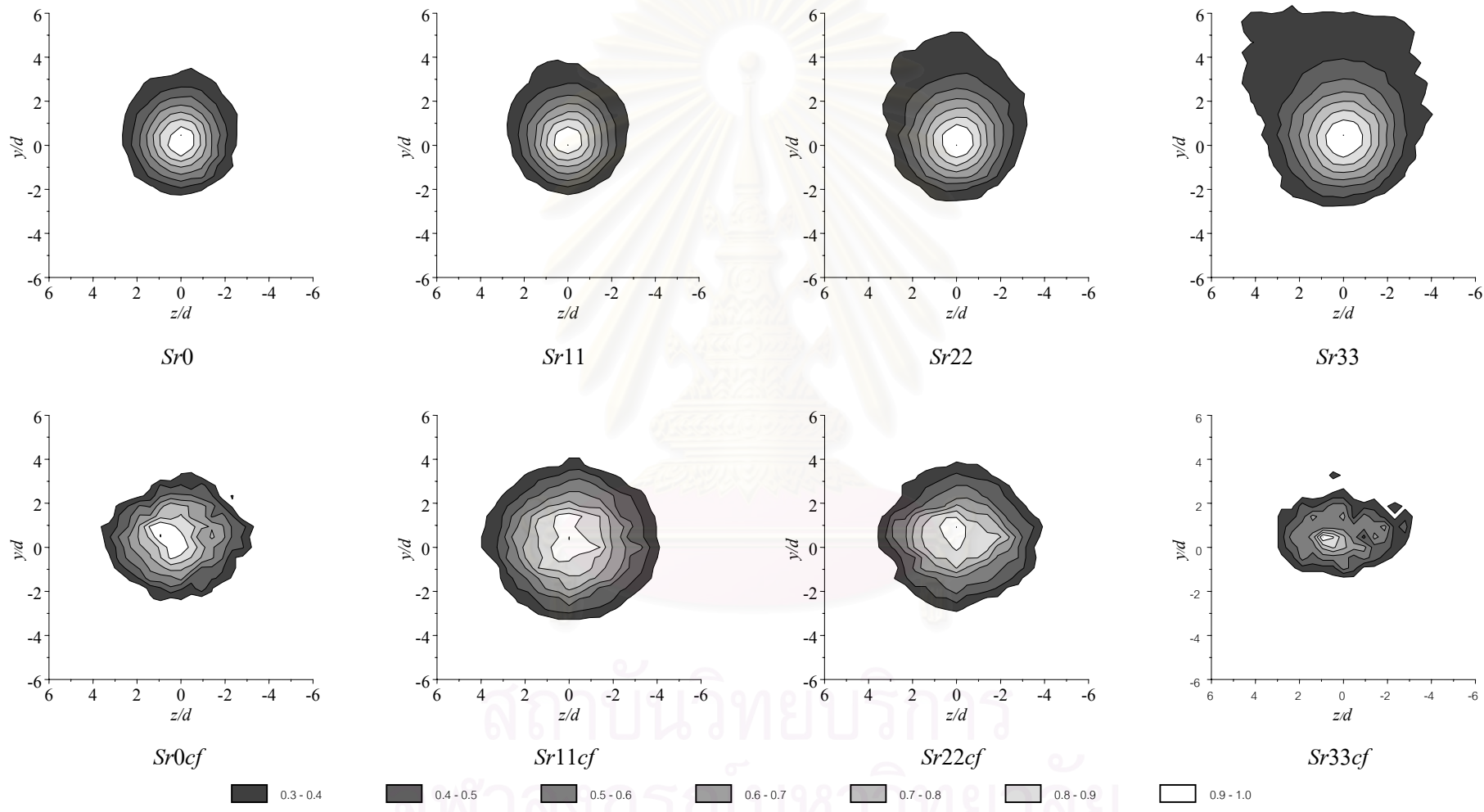
Sr33cf



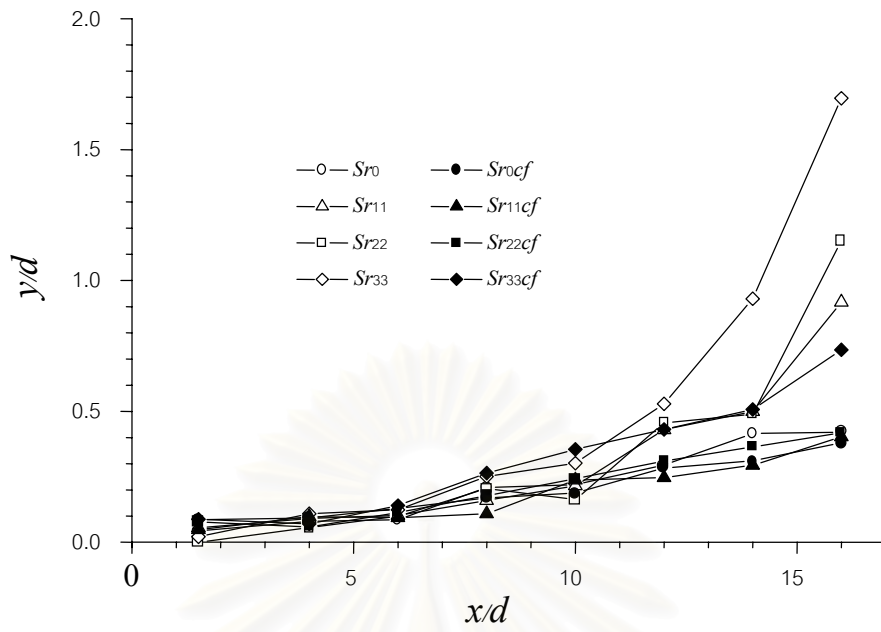
รูปที่ 3.36 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 12.0



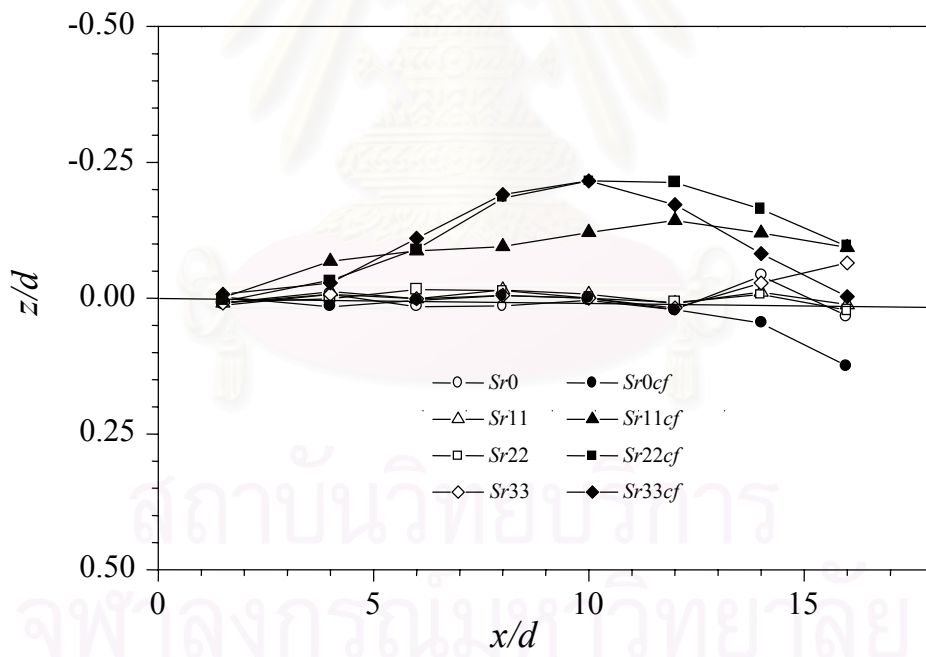
รูปที่ 3.37 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 14.0



รูปที่ 3.38 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจเฉพาะ (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ x/d เท่ากับ 16.0

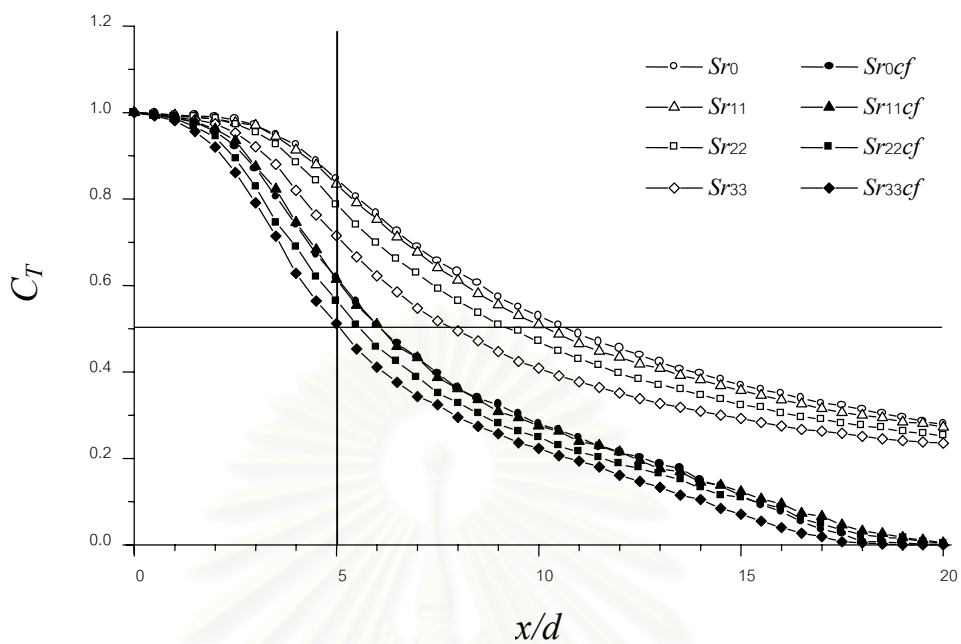


(ก)

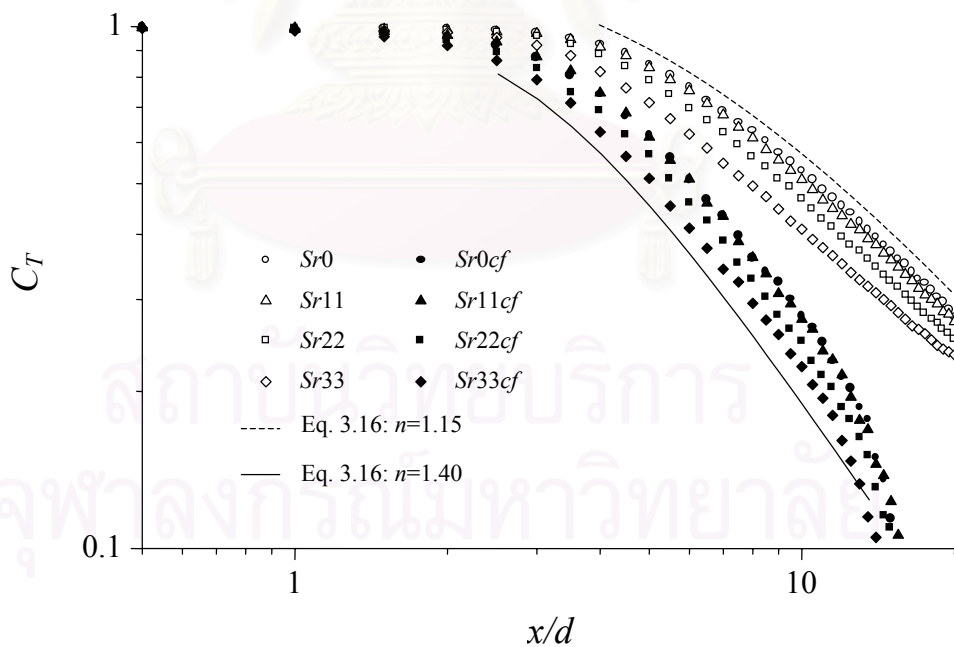


(ข)

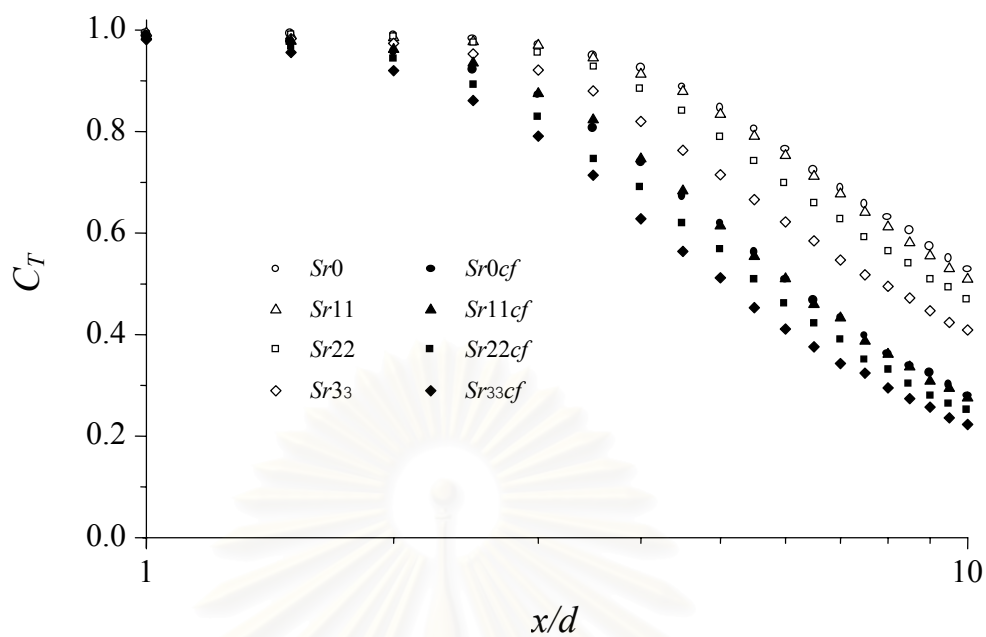
รูปที่ 3.39 Centroid Trajectory ของอนุหภูมิ เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณี
 (ก) บนระนาบสมมาตร (\bar{y}_T), (ข) บนระนาบนอน (\bar{z}_T)



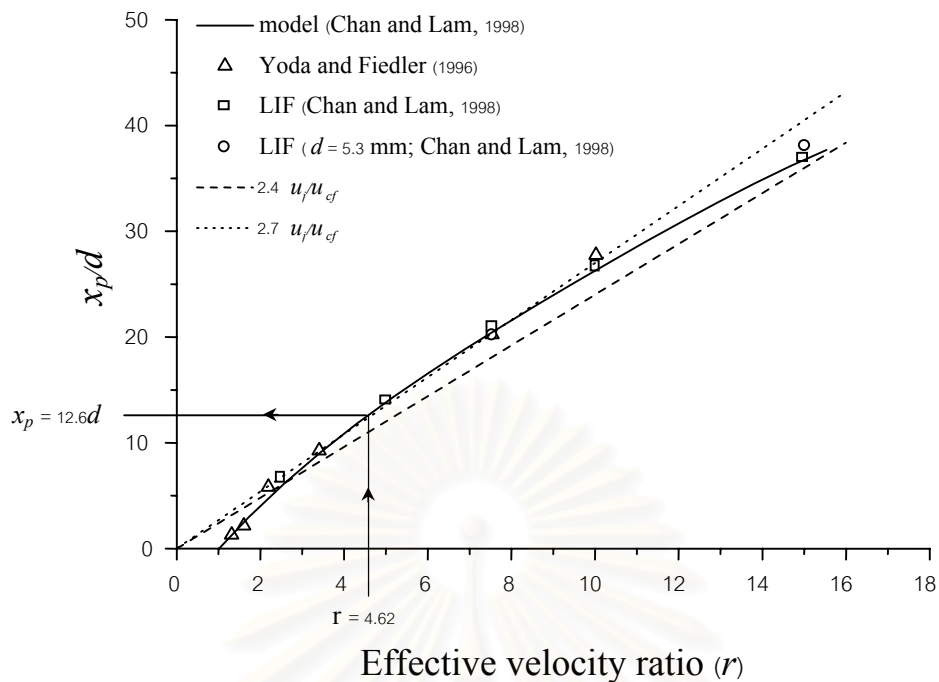
รูปที่ 3.40 การสลายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนของเจ็ต



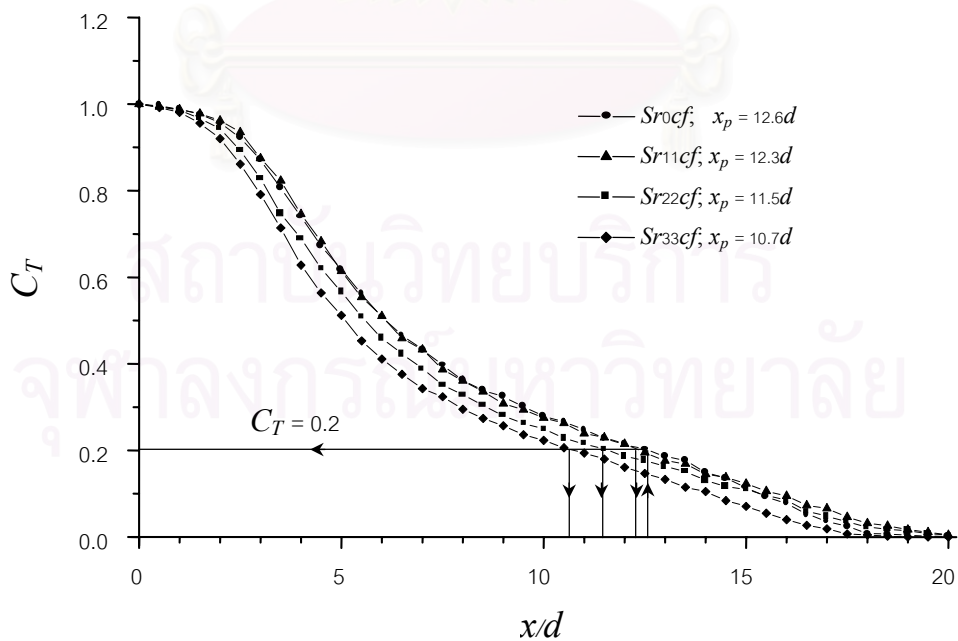
รูปที่ 3.41 อัตราการสลายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนของเจ็ต



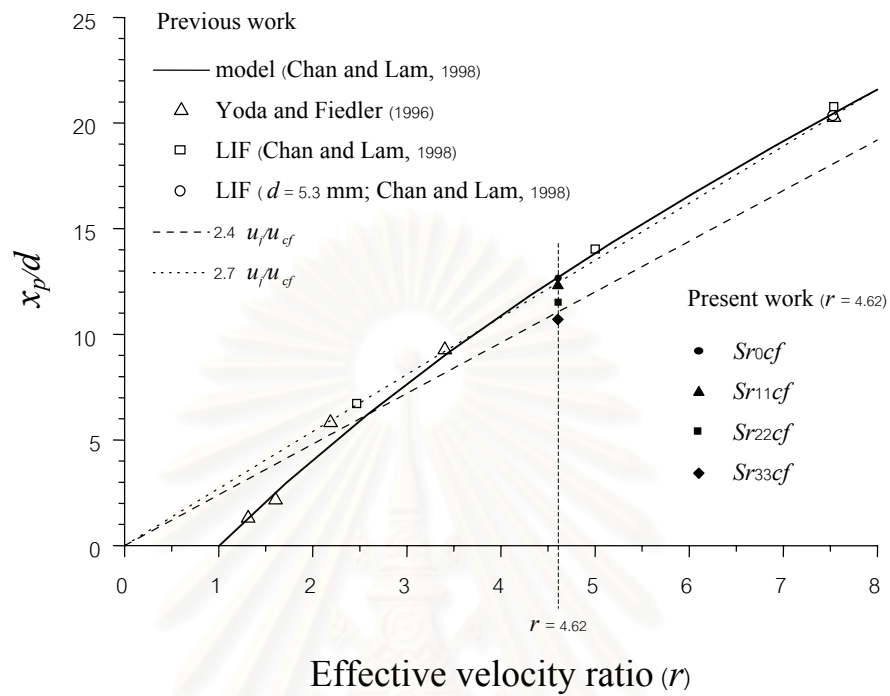
รูปที่ 3.42 ระยะ Potential core ของเจ็ต



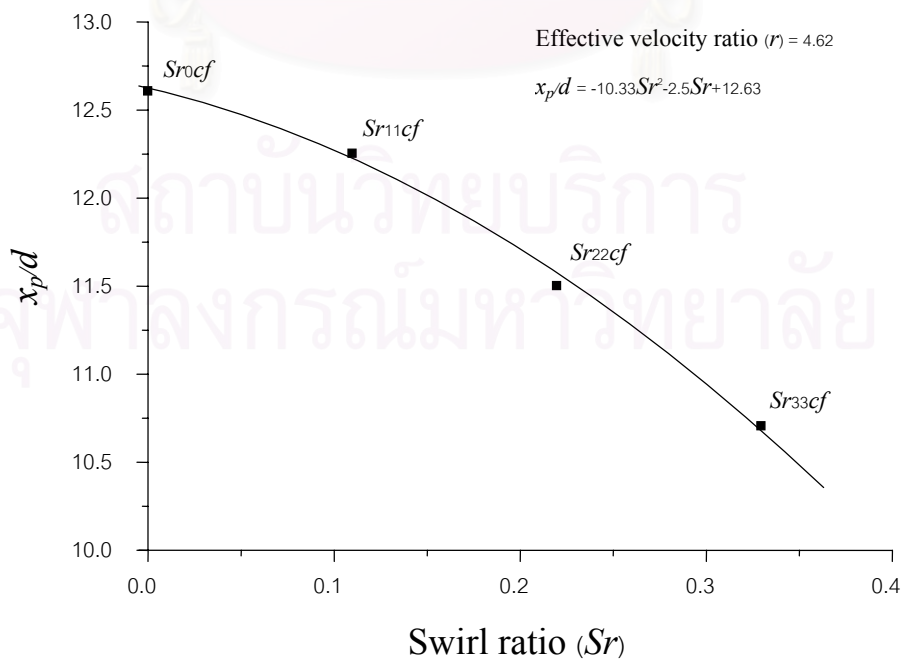
รูปที่ 3.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Penetration depth กับอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) ที่ได้จากสมการแบบจำลองการไหลของ Chan and Lam (1998) เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ



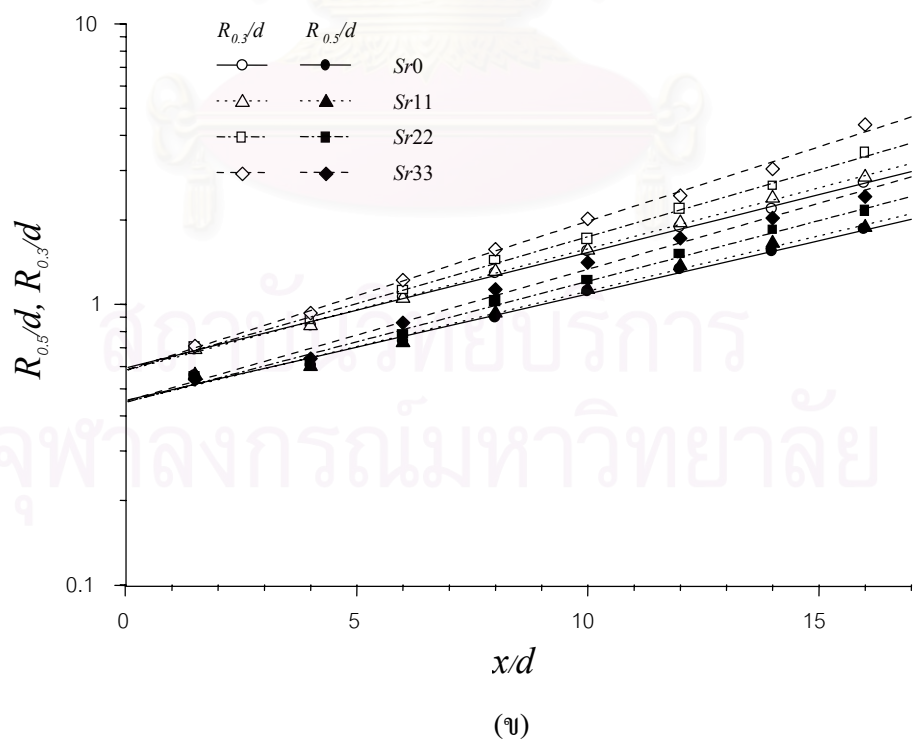
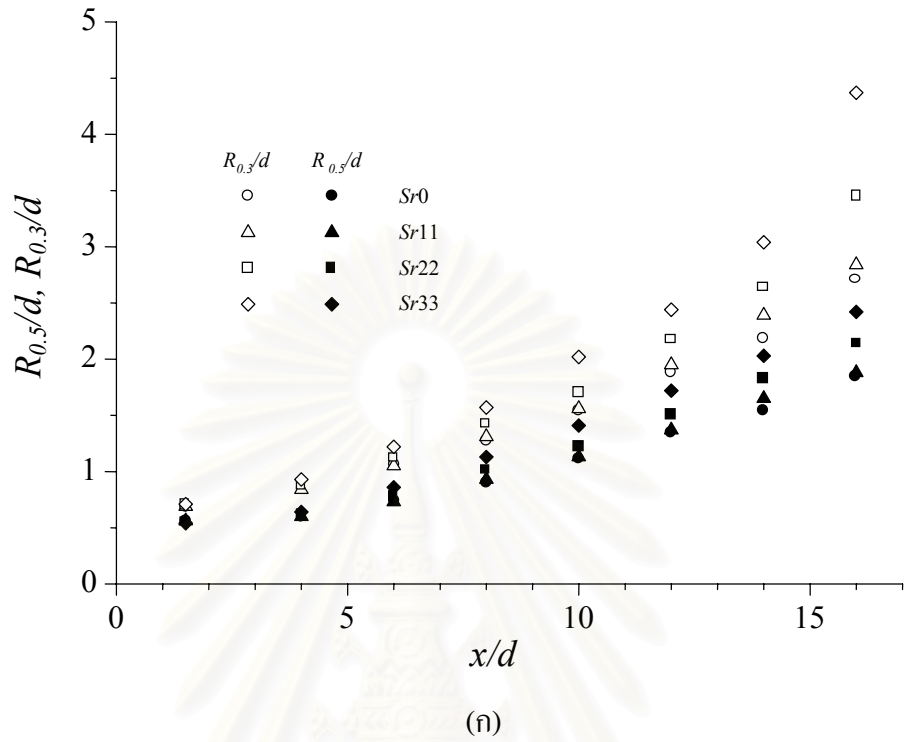
รูปที่ 3.44 การสลายตัวของอนุกรมตามแนว Centerline ของเจ็ตในกรณีการไหลที่มีกระแสลมทวนร่วมอยู่ (Sr_{xxcf})



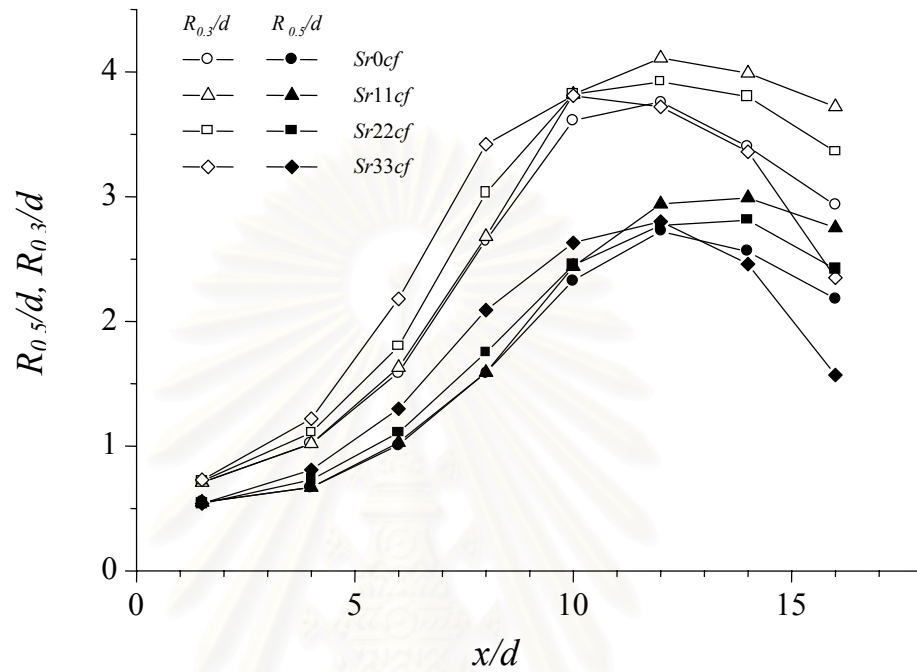
รูปที่ 3.45 ระยะ Penetration depth ของกรณีการไหลที่มีกระแสลมทวน (Sr_{xxcf}) ที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีต



รูปที่ 3.46 ความสัมพันธ์ระหว่าง Penetration depth (x_p) กับค่า Swirl ratio (Sr) ของการไหลแบบเจ็ตในกระแสมทวนที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (r) = 4.62

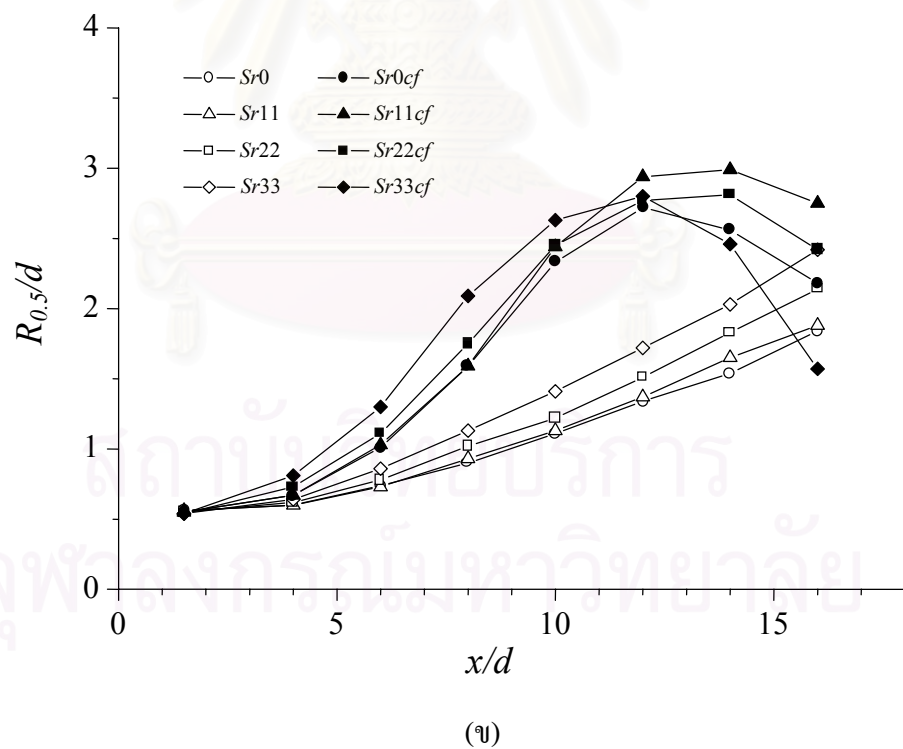
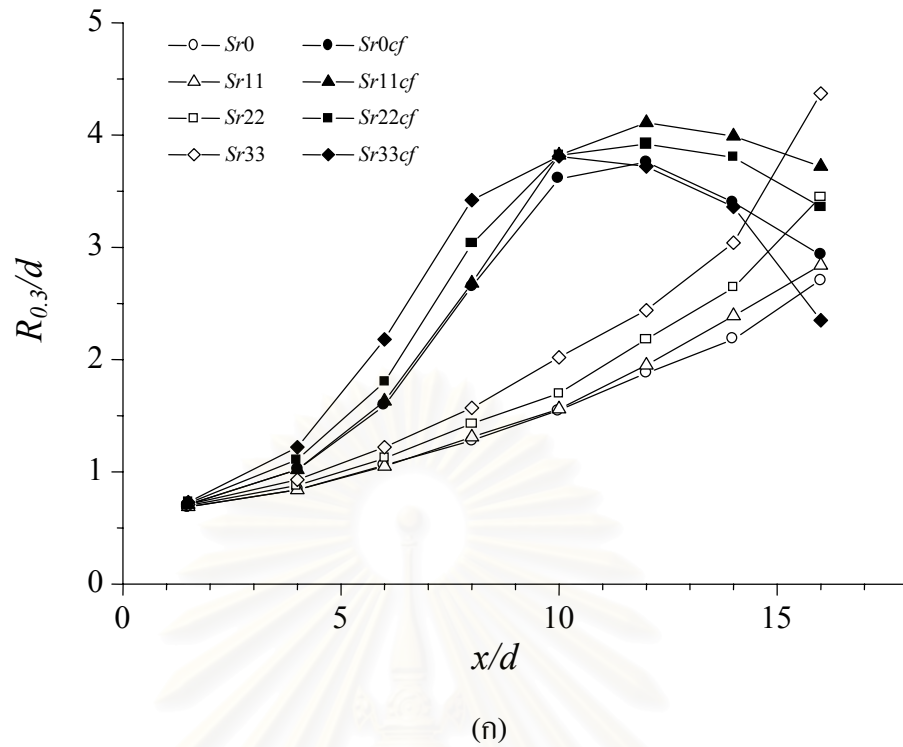


รูปที่ 3.47 การขยายตัวของเจ็ตตามแนว Downstream ในกรณีของเจ็ตอิสระ (Sr_{xx})
(ก) บนสเกลเชิงเส้น, (ข) บนสเกล Semi-log



รูปที่ 3.48 การขยายตัวของเจ็ตตามแนว Downstream ในกรณีของเจ็ตในกระแสมทวน (Sr_{xxcf})

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.49 การขยายตัวของเจ็ตตามแนว Downstream เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีการทดลอง
(ก) พิจารณาที่ $R_{0.3}$, (ข) พิจารณาที่ $R_{0.5}$

รายการอ้างอิง

- Abramovich, G.N., (1963), The theory of turbulent jets, English Translation published by M.I.T. Press, Meassachusetts, pp. 671.
- Albertson, M.L., Dai, Y.B., Jensen, R.A. and Rouse, H., (1950), "Diffusion of submerged jets," *Tran. A.S.C.E.*, Vol. 115, pp. 639-697.
- Arendt, J., Babcock, H.A., and Schuster, J., (1956), "Penetration of a jet into a counterflow," *Proc. ASCE J. Hydr.*, Division 82, 1038-8-11.
- Beltaos, S. and Rajaratnam, N., (1973), "Circular turbulent jet in an opposing infinite stream," In *Proc. 1st Can. Hydr. Conf., Edmonton*, pp. 220-237.
- Benero, S., (2000), "A turbulent jet in counterflow," Ph.D. thesis, Technical University of Berlin, Germany.
- 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.
- Bradbury, L.J.S, and Khadem, A.H., (1975), "The distortion of a jet by tabs," *J. Fluid Mech.*, Vol. 70, pp. 801-813.
- Chan, H.C. and Lam, K.M., (1994), "A model on the penetration of an axisymmetric counter-flowing jet," In *Proc. 1st Int. Conf. Science and Art*, (eds. Ko, Fiedler, and Lee), pp. 516-519.
- Chan, H.C. and Lam, K.M., (1998), "Centerline velocity decay of a circular jet in a counterflowing stream," *Phys. Fluid*, Vol. 10, pp. 637-344.
- Chan, H.C. and Lam, K.M., (1999), "The velocity field of a circular jet in a counterflow," In *Environmental Hydraulics*, (eds. Lee, Jayawardena, and Wang), A.A.Balkema, pp. 223-228.
- Chan, H.C., (1998), "Investigation of a round jet into a counterflow," Ph.D. thesis, Univ. of Hong Kong.
- Chue, S. H., (1975), "Pressure probes for fluid measurement," *Prog. Aerospace Sci.*, Vol. 16, No. 2, pp.147-223.
- Corrsin, S., (1946), "Investigation of flow in an axially symmetric heated jet of air," *N.A.C.A. Wartime Report*, W-94.
- Dahm, W.J.A. and Dimotakis, P.E., (1990), "Mixing at large Schmidt number in the self-similar far field of turbulent jets," *Ind. Eng. Chem.* 49, 12, 2063-2066.
- Escudier, M.P. and Zehnder, N., (1982), "Vortex-flow regimes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 115, pp. 105-121.
- Farokhi, S. and Taghavi, R., (1989), "Effect of initial swirl distribution on the evolution of a turbulent jet," *AIAA Journal*, Vol. 27, No. 6, pp. 700-706.
- 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*.
- Ginevskii, A. S., (1962), "Turbulent jet streams with reversr liquid flows," *Promyslennaja aerodinamika*, Oborongiz 23, pp. 80-98.
- 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. Ref. Fluid Mech.*, Vol. 4, pp. 195-217.
- Han, S., and Taghavi, R., (1998), "Computational study of subsonic jet evolution from different nozzle geometries," *AIAA 98-0215, 36th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Jan. 12-15.

- Hinze, J.O. and Zijnen, B.G., (1949), "Transfer of heat and matter in the turbulent mixing zone of an axially symmetrical jet," *J. Appl. Sci. Res. A1*, pp. 435-461.
- Hopkings, D.F. and Robertson, J.M., (1967), "Two-dimensional incompressible fluid jet penetration," *J. Fluid Mech.* 29, pp. 273-287.
- Iizarova, L.I. and Ginevskii, A.S., (1962), "The experimental investigation of jets in an opposing stream," *Promyslennaja aerodinamika, Oborongiz* 23, pp. 107-118.
- Konig, O. and Fiedler, H.E., (1991), "The structure of round turbulent jets in counterflow: a flow visualization study," In *Advances in Turbulence III*, (eds. Johansson and Alfredsson), Kluwer Academic Publishers, pp. 61-66.
- Lam, K.M., (1991), "Penetration of submerged round jet into a counter-flowing current," In: *Environmental Hydraulics*. Proceeding of Int. Sym. on Environmental Htdraulics, Hong Kong, pp. 115-120.
- Lam, K.M. and Chan, H.C., (1995), "Investigation of turbulent jet s issuing into a counterflowing stream using digital image processing," *Exp. Fluids.*, Vol. 18, pp. 210-212.
- Lam, K.M. and Chan, H.C., (1997), "Round jet in ambient counter-flowing stream," *ASME Journ. of Hydr. Eng.*, Vol. 123, pp. 895-903.
- Lam, K.M., Tang, S.K., Ko, N.W.M., (1991), "The instability of a circular jet in a weak opposing stream. In: *Computational Mechanics*. Proceeding of Asian Pacific Conference on Computational Mechanics, Hong Kong, pp. 1435-1439.
- Leibovich, S., (1978), "The structure of vortex breakdown," *Ann.Rev. Fluid Mech.*, Vol. 10, pp. 221-246.
- Liepmann, H.W. and Laufer, J., (1974), "Investigation of free turbulent mixing," *N.A.C.A., Tech. Note*, 1257.
- Morgan, W.D., Brinkworth, B.J. and Evans, G.V., (1976), "Upstream penetration of an enclosed counterflowing jet," *Ind Eng Chem Fundam* 15, 2, pp. 125-127.
- 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.
- Nishibori, K., Kikuyama, K. and Murakami M., (1987), "Laminarization of turbulent flow in the inlet region of an axially rotating pipe," *Bull. JSME.*, Vol. 30, No. 260, pp. 255-262.
- Panda, J., and McLaughlin, D.K., (1994), "Experiments on the instabilities of a swirling jet," *Phys. Fluids*, Vol. 6, pp. 263-276.
- Rajaratnam, N., (1976), *Turbulent Jets* (Elsevier, Amsterdam).
- Sarpkaya, T., (1971), "On stationary and travelling vortex breakdowns," *J. Fluid Mech.*, Vol. 45, pp. 545-559.
- Sarpkaya, T., (1974), "Effect of the adverse pressure gradient on vortex breakdown," *AIAA J.*, Vol. 12, pp. 602-607.
- Sekundov, A.N., (1969), "The propagation of a turbulent jet in an opposing stream," In: G.N. Abramovich (Editor), *Turbulent Jets of Air Plasma and Real Gas*. English translation published by Consultants Bureau, New York., pp. 99-107.
- Sui, K.N. and Ivanov, Y.V., (1959), "The investigation of the development of a circular jet in the initial region of an opposing jet of large dimensions. *Isv Akad Nauk Est SSR, Ser Tekhni FizMat Nauk* 8, pp. 78-83.
- Sui, K.N., (1961), "The investigation of the development of circular and plane jets in parallel and opposing stream," *Isv Est SSR, Ser Tekhni FizMat Nauk* 10, pp. 215-223.

- Tenneke, 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.
- Vulis, L.A. and Leonateva, T.P., (1995), "On parallel and opposing turbulent jets," *Izv. Akad. Nauk Kaz. SSR, Ser. Energ.* 9, pp. 109-122.
- 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.
- White, F.M., (1991), Viscous Fluid Flow, 2nd 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.
- Yoda, M. and Fiedler, H.E., (1996), "The round jet in a uniform counterflow: Flow visualization and mean concentration measurements," *Exp. Fluids.*, Vol. 21, pp. 427-436.
- 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.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก. การศึกษาเบื้องต้น

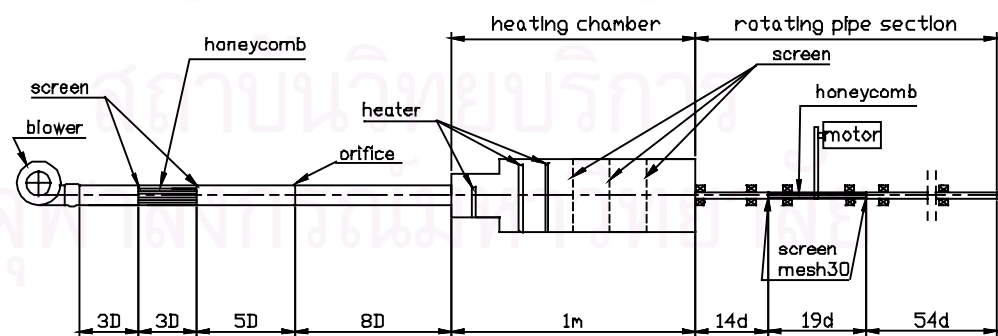
สำหรับผลการศึกษาเบื้องต้นนี้ได้ถูกนำเสนอในงานสัมมนาทางวิชาการเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 ระหว่างวันที่ 2-3 ธันวาคม 2542 พร้อมทั้งตีพิมพ์ในหนังสือบทความทางวิชาการในการสัมมนาดังกล่าว (Wangjiraniran, W., Uppathamarakorn, P., and Bunyajitradulya, A., (1999), On the decay of Characteristic Mean Temperature 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 ของเจ็ตรูปวงกลม โดยใช้ปริมาณ บ่งชี้คือการลดลงของ Characteristic mean temperature ตามแนว Downstream และใช้ท่อหมุน (Rotating pipe) ในการทำให้อากาศเกิดการหมุนควง

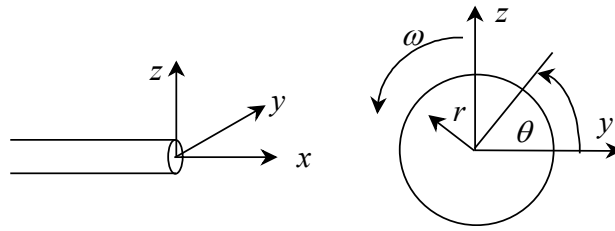
ก.2 ชุดทดลอง

ชุดทดลองของการศึกษาเบื้องต้นนี้อยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังรูปที่ ก.1 และพิกัดอ้างอิงที่ใช้ดังรูปที่ ก.2 โดยชุดทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนพัสดลมและ 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) เพื่อช่วยลดการสั่นสะเทือนจากพัดลมไปยังส่วนอื่นๆของชุดทดลอง จากนั้นอากาศจะไหลผ่าน Honeycomb ซึ่งทำจากหลอดพลาสติกและปะกบด้วยตาข่ายอลูมิเนียม (Household Screen) ขนาด Mesh×SWG เท่ากับ (16×18) ×31 เพื่อปรับทิศทางการไหลและช่วยให้อากาศมีความเร็วสม่ำเสมอก่อนเข้า Orifice

หลังจากนั้นอากาศจะผ่านเข้าไปในส่วน Heating chamber ซึ่งภายในจะติด Heater ขนาด 500 วัตต์ จำนวน 1 ตัว และขนาด 2000 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ซึ่งจะถูกรักษาอุณหภูมิความร้อนโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Variac ขนาด 10 kVA เมื่ออากาศถูกทำให้ร้อนแล้ว จะไหลผ่านแผ่นเหล็กเจาะรู (Perforated plate) ซึ่งมีขนาดรู (มิลลิเมตร) × ระยะระหว่างรู (มิลลิเมตร) เท่ากับ 10×15 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 30×35 ปะกบ และส่วนที่ 3 มีความยาว $54d$ เพื่อให้สภาวะของการไหลมีลักษณะเป็น Fully developed ที่ปากทางออกเจ็ตซึ่งท่อทั้ง 3 ท่อนจะถูกขับโดยมอเตอร์ขนาด 1.5 กิโลวัตต์, 2830 รอบต่อนาที และปรับความเร็วรอบโดยใช้เครื่องแปลงความถี่ไฟฟ้า (Inverter)

ก.3 พารามิเตอร์ของการทดลอง

ในการศึกษาเบื้องต้นได้ศึกษาผลของการหมุนควงซึ่งแสดงในรูปของ Swirl ratio ($Sr = w_p / u_j$) ที่มีต่อคุณลักษณะการผสมของ Swirling jet โดยการใช้การลดลงของอุณหภูมิคุณลักษณะเฉลี่ยซึ่งแสดงในรูปของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (C_p)

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

โดย T คืออุณหภูมิในตำแหน่งที่ทำกรวัด,
 T_r คืออุณหภูมิห้อง ซึ่งในการทดลองมีค่าประมาณ 32-33 °C
 T_j คืออุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางปากเจ็ตซึ่งในการทดลองมีค่าประมาณ 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 คือค่าความดันรวมในตำแหน่งที่ทำกรวัด
 p_C คือค่าความดันรวมตรงกึ่งกลางที่ปากทางออกของเจ็ต
 p_E คือค่าความดันรวมเฉลี่ยระหว่าง 2 จุดที่ขอบของปากเจ็ต
 ซึ่งค่าความดันรวมในแนวแกนเจ็ตแสดงในรูปของ 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 และสำหรับการวัดอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิคุณลักษณะเฉลี่ยนั้นได้ใช้ Thermocouple

สำหรับสภาวะเริ่มต้นของความดันรวมในแนวแกนนั้นได้ทำการวัดโดยการเลื่อน Probe ทั้งในแนว y และ z โดยหันปลาย Probe ให้มีทิศตามแนวแกนเจ็ต ในทุกกรณี เช่นเดียวกับการวัดสภาวะเริ่มต้นของอุณหภูมิ ในขณะที่การวัดในแนวสัมผัสนั้นได้ทำการวัดโดยการเลื่อน Probe เฉพาะในแนว y โดยหันปลาย Probe ให้มีทิศตามแนวสัมผัสกับตัวเจ็ต สำหรับกรณีที่มีการหมุนควง ซึ่งการวัดสภาวะเริ่มต้นทั้งหมดนั้นได้ใช้ระยะห่างระหว่างจุด 2 มิลลิเมตร

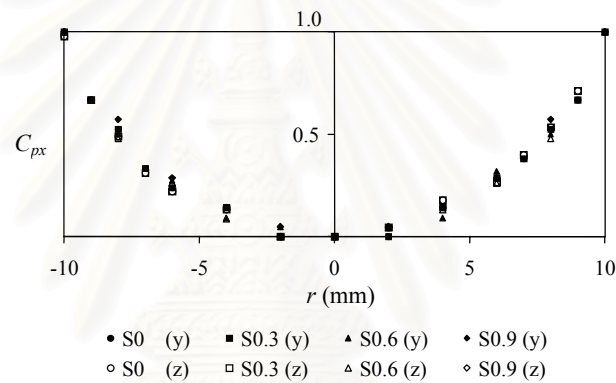
สำหรับอุณหภูมิคุณลักษณะเฉลี่ย (Characteristic mean temperature) นั้นเป็นค่าอุณหภูมิเฉลี่ยมากที่สุดบนแนว z และทำการวัดโดยการเลื่อน Probe วัดอุณหภูมิไปในทิศทาง $\pm z$ ครั้งละ

2 มิลลิเมตรประมาณ 4-5 ตำแหน่ง ซึ่งได้ทำการทดลองที่ระยะตามแนวแกน x ประมาณ $15d$ โดยมีระยะห่างในการวัด $0.5d$ สำหรับระยะทาง 0 ถึง $5d$ และ $1d$ สำหรับระยะทาง $10d$ ถึง $15d$

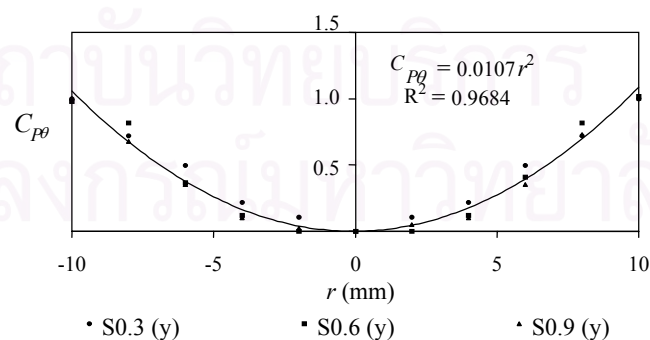
ก.5 ผลการทดลอง

ก.5.1 ผลการวัดสถานะเริ่มต้น

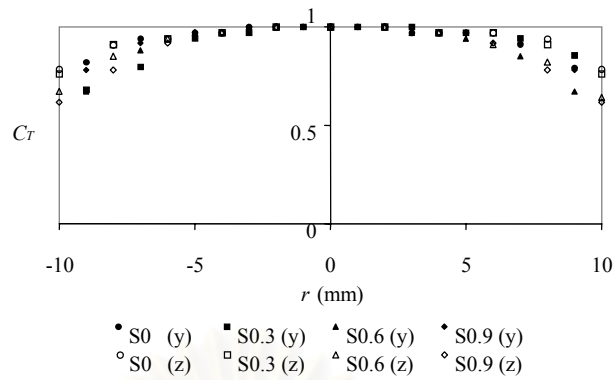
รูปที่ ก.3 ถึง ก.5 แสดงสถานะเริ่มต้นของ C_{px} , $C_{p\theta}$, C_T ตามลำดับ โดยกรณี S0 จะแสดงผลการทดลองที่ไม่มีการหมุนควงและสำหรับกรณี S0.3, S0.6 และ S0.9 จะแสดงผลการทดลองที่มีค่า Swirl ratio (Sr) ประมาณ 0.3, 0.6 และ 0.9 ตามลำดับ โดยพบว่า การกระจายของ C_{px} , $C_{p\theta}$ และ C_T ตามแนวรัศมีในแต่ละกรณีนั้นมีค่าใกล้เคียงกันและมีความสมมาตร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



รูปที่ ก.3 การกระจายของค่า C_{px} ตามแนวรัศมี



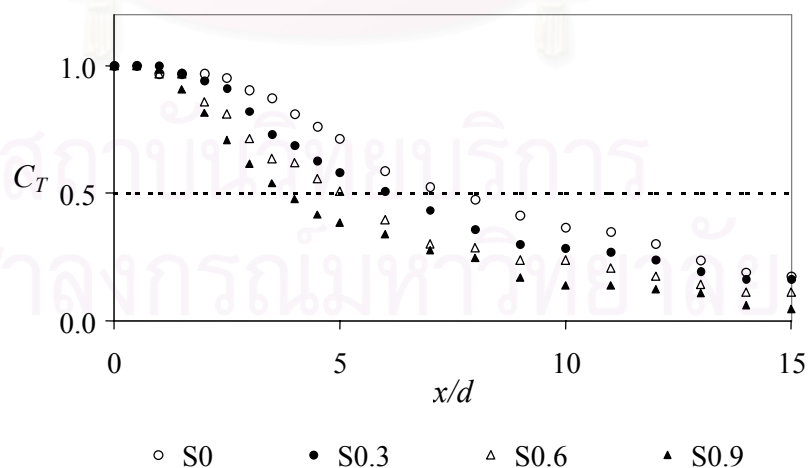
รูปที่ ก.4 การกระจายของค่า $C_{p\theta}$ ตามแนวรัศมี



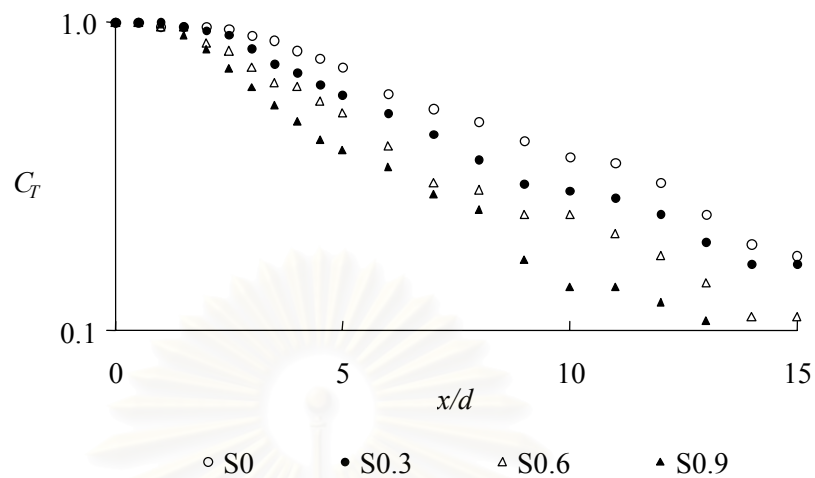
รูปที่ ก.5 การกระจายของค่า C_r ตามแนวรัศมี

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 ที่อุณหภูมิลดลงครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิที่ปากเจ็ต ($x_{50\%}$) 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 การลดลงของอุณหภูมิคุณลักษณะเฉลี่ยตามแนว Downstream บนสเกล semi-log

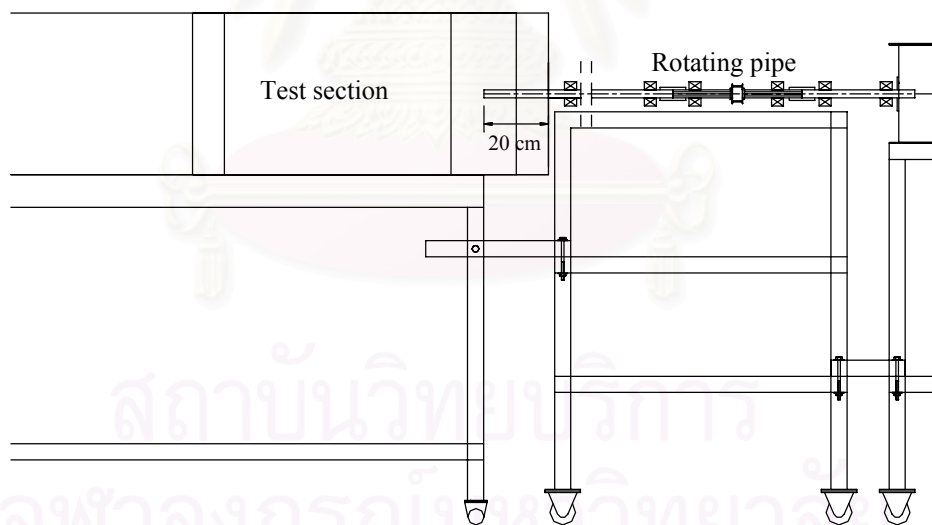
ก.6 สรุปผลการทดลอง

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

ภาคผนวก ข

การเปลี่ยนแปลงความดันสถิตของกระแสทวนในหน้าตัดทดสอบ (Static pressure gradient along the test section)

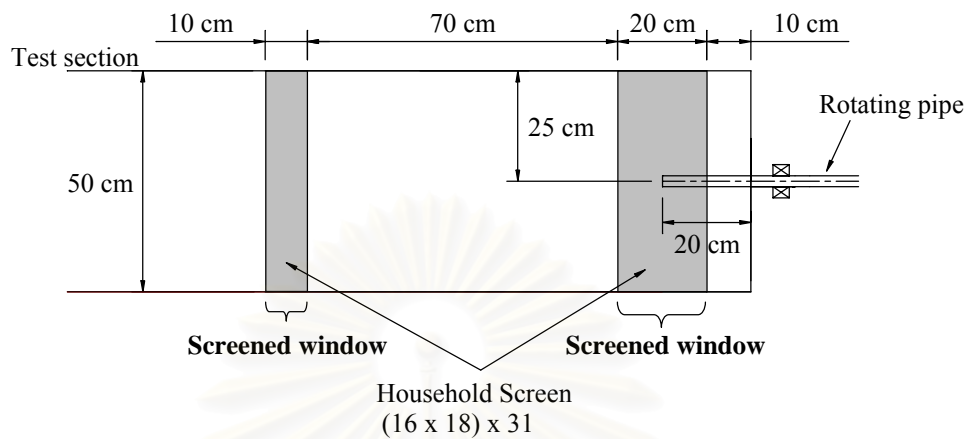
ในการศึกษาวิจัยนี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงความดันสถิตของกระแสทวนตามแนวการไหล ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจาก Blockage effect ของชั้นขอบเขต (Boundary layer) และ Blockage effect เนื่องจากการที่ชุดเจ็ตแบบท่อหมุนได้ขวางการไหลของกระแสทวนที่ด้านท้ายของ Test section ดังแสดงในรูปที่ ข.1 โดย Blockage effect ทั้งสองจะทำให้กระแสทวนมีพื้นที่หน้าตัดในการไหลลดลง ส่งผลให้การไหลนั้นมีความเร็วเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะตรงบริเวณที่โคนขวาง โดยชุดเจ็ต ส่งผลให้ความดันสถิตตามแนวการไหลในบริเวณนี้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับความดันสถิตที่จุดอ้างอิงบริเวณปากทางเข้าของ Test section สำหรับ Blockage effect ที่เกิดขึ้นนี้ทำให้สภาวะของการไหล (ในที่นี้คือระดับความดันสถิตและความเร็วของกระแสทวน) ในบริเวณด้านท้ายของ Test section มีค่าแตกต่างไปจากสภาวะการไหลที่ใช้อ้างอิงตรงบริเวณปากทางเข้า Test section ซึ่งอาจจะทำให้ผลการทดลองที่ได้เกิดความผิดพลาดและคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง



รูปที่ ข.1 การติดตั้งชุดเจ็ตแบบท่อหมุนที่บริเวณด้านท้ายของ Test section

เพื่อขจัดผลของ Blockage effect ดังที่ได้กล่าวมา ในการศึกษาวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับปรุงส่วน Test section โดยการเจาะช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าไว้ที่ผนังทั้ง 2 ด้านๆละ 2 ช่อง และใช้ตาข่ายอลูมิเนียมปิดทับช่องเปิดทั้งหมดไว้ ดังแสดงรายละเอียดเป็นรูป Schematic ในรูปที่ ข.2 ทั้งนี้ก็เพื่อลดผลของ Blockage effect ที่เกิดขึ้น และทำให้สภาวะการไหลของกระแสทวนภายใน Test

section มีค่าใกล้เคียงกันตลอดทั้งการไหล โดยจะเน้นไปที่บริเวณส่วนท้ายของ Test section ซึ่งเป็นบริเวณที่ใช้ทำการศึกษาวิจัย



รูปที่ ข.2 ลักษณะและตำแหน่งของช่องเปิดที่ผนังด้านข้างของ Test section

ในการทดลองเพื่อพิจารณาผลของ Blockage effect ที่เกิดขึ้นในกระแสมทวนนั้น จะประกอบไปด้วยการทดลองวัดความดันสถิตและความเร็วภายใน Test section ในทุกกรณีการทดลองที่มีกระแสมทวนร่วมอยู่ ซึ่งประกอบไปด้วยกรณี Sr0cf, Sr11cf, Sr22cf และ Sr33cf (ความหมายของสัญลักษณ์ในแต่ละกรณีการทดลองได้แสดงไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3) โดยจะทำการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุง Test section (ไม่มีช่องเปิด) และกรณีที่ปรับปรุง Test section เรียบร้อยแล้ว (มีช่องเปิดที่ผนังด้านข้าง) ซึ่งมีรายละเอียดของการทดลองดังต่อไปนี้

สำหรับการทดลองวัดความดันสถิตที่ตำแหน่งหน้าตัดต่างๆของ Test section นั้นจะทำโดยการวัดความดันสถิตผ่านท่อทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 3.2 มิลลิเมตร หนา 0.5 มิลลิเมตร ยาว 3 เซนติเมตร ซึ่งท่อทองเหลืองนี้จะถูกเสียบผ่านรูที่ผนังด้านบนของ Test section โดยไม่ยื่นเข้ามาเกินผิวของผนังด้านใน สำหรับการทดลองนี้จะทำการวัดความดันสถิตที่ตำแหน่งหน้าตัดต่างๆตามแนวการไหลภายใน Test section เทียบกับหน้าตัดอ้างอิง ซึ่งเป็นตำแหน่งหน้าตัดที่มีระยะห่างจากปากทางเข้า Test section (X) เท่ากับ 20 เซนติเมตร ($x = 200$ cm) โดยได้แสดงตำแหน่งหน้าตัดต่างๆที่ทำการวัดได้แสดงไว้ในรูปที่ ข.3 โดยจะเริ่มทำการวัดความดันสถิตที่ตำแหน่งหน้าตัดอ้างอิง ($X = 20$ cm) และวัดห่างออกไปทีละ 20 เซนติเมตร จนถึงตำแหน่งหน้าตัดที่ X เท่ากับ 220 เซนติเมตร ซึ่งเป็นหน้าตัดที่ตรงกับปากทางออกของเจ็ตพอดี้ โดยในการทดลองแต่ละกรณีนั้นจะใช้ความเร็วของกระแสมทวนที่หน้าตัดอ้างอิง (u_{ref}) มีค่าคงที่ประมาณ 1.98 เมตรต่อวินาที และในการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงความดันสถิตตามแนวการไหลภายใน Test section

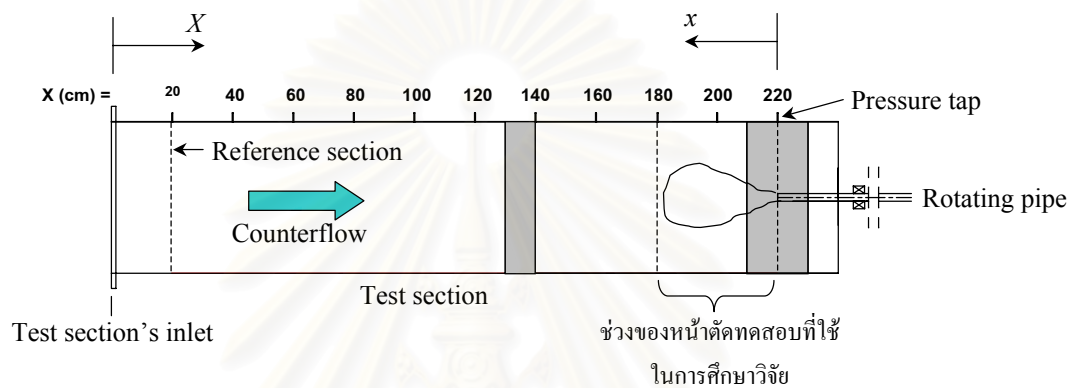
นั้นจะใช้สัมประสิทธิ์ความดันสถิต, C_p เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของความดันสถิตในแต่ละกรณีการทดลอง ซึ่งนิยามดังสมการ

$$C_p = \frac{P_s - P_{ref}}{P_{dyn}}$$

โดย P_s คือค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งต่างๆบน Test section

P_{ref} คือค่าความดันสถิตที่ตำแหน่งหน้าตัดอ้างอิง

P_{dyn} คือค่าความดันจลน์ที่ตำแหน่งหน้าตัดอ้างอิง



รูปที่ ข.3 ภาพแสดงตำแหน่งหน้าตัดต่างๆที่จะทำการทดลองวัดสภาวะการไหลของกระแสวน

สำหรับการทดลองวัดความเร็วที่ตำแหน่งหน้าตัดต่างๆของ Test section นั้น ทำขึ้นเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงความเร็วของกระแสวนในแต่ละหน้าตัดตามแนวการไหลภายใน Test section อันเป็นผลเนื่องมาจาก Blockage effect ที่เกิดขึ้น ในการทดลองนี้จะใช้ Pitot probe เป็นเครื่องมือในการวัดความเร็วของกระแสวน โดยยื่น Probe เข้าทางผนังด้านบนของ Test section แล้วทำการวัดความเร็วเฉลี่ยของกระแสวนที่หน้าตัดทดสอบต่างๆตามแนวการไหลเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยวัดห่างจากผนังประมาณ 10 เซนติเมตร ภายนอกชั้นขอบเขต ที่สภาวะและตำแหน่งหน้าตัดเดียวกับการทดลองวัดความดันสถิตของกระแสวนดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

ในการนำเสนอผลการทดลองนั้นจะใช้สัญลักษณ์ C_w (Closed window) นำหน้าชื่อกรณีการทดลองต่างๆ ($Sr0cf$, $Sr11cf$, $Sr22cf$ และ $Sr33cf$) ทำให้ได้กรณีการทดลองเป็น $Cw-Sr0cf$, $Cw-Sr11cf$, $Cw-Sr22cf$ และ $Cw-Sr33cf$ ซึ่งจะใช้แทนการทดลองในกรณีที่ไม่มีช่องเปิด และ ใช้สัญลักษณ์ O_w (Opened window) นำหน้าชื่อกรณีการทดลองต่างๆ ทำให้ได้กรณีการทดลองเป็น $Ow-Sr0cf$, $Ow-Sr11cf$, $Ow-Sr22cf$ และ $Ow-Sr33cf$ ซึ่งจะใช้แทนการทดลองในกรณีที่มีช่องเปิดที่ผนังด้านข้างของ Test section โดยผลการทดลองวัดความดันสถิตและความเร็วของกระแสวนที่ตำแหน่งหน้าตัดต่างๆตามแนวการไหลนั้น ได้แสดงไว้ดังรูปที่ ข.4 และ ข.5 ตามลำดับ

สำหรับผลการวัดความดันสถิตของกระแสทวนที่ตำแหน่งหน้าตัดต่างๆตามแนวการไหล ดังรูปที่ ข.4 พบว่า ในทุกๆกรณีการทดลองที่ไม่มีช่องเปิดตรงผนังด้านข้างของ Test section นั้น ค่าสัมประสิทธิ์ความดันสถิต (C_p) ตามแนวการไหลของกระแสทวนจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับค่า C_p ที่หน้าตัดอ้างอิง ($X=20$ cm) โดยในช่วงระยะ X ตั้งแต่ 20 cm ถึง 180 cm นั้น ค่า C_p จะมีอัตราการลดลงอย่างช้าๆ จนมีค่าอยู่ที่ประมาณ -0.1 คือมีค่าลดลงจากหน้าตัดอ้างอิงประมาณ 0.1 หรือ 10% ของค่าความดันพลศาสตร์ภายใน Test section แต่เมื่อกระแสทวนไหลเข้าสู่บริเวณที่ใช้ในการศึกษาวิจัย คือที่ช่วง X เท่ากับ 180 cm ถึง 220 cm พบว่า C_p จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว คือมีค่าลดลงจากหน้าตัดอ้างอิงได้ถึง 0.34 หรือ 34% ของค่าความดันพลศาสตร์ ในส่วนของกรณีการทดลองที่มีช่องเปิดตรงผนังด้านข้างของ Test section นั้นพบว่า ค่า C_p จะมีค่าไม่คงที่ตลอดทั้งแนวการไหล โดยในช่วง X ตั้งแต่ 20 cm ถึง 120 cm นั้น C_p จะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย คือมีค่าลดลงจากหน้าตัดอ้างอิงประมาณ 0.02 หรือประมาณ 2% ของค่าความดันพลศาสตร์ และในช่วง X ตั้งแต่ 120 cm ถึง 160 cm C_p จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมากกว่าค่าที่หน้าตัดอ้างอิงประมาณ 0.12 หรือ 12% ของค่าความดันพลศาสตร์ และเมื่อเข้าสู่ช่วง X ตั้งแต่ 160 cm ถึง 220 cm พบว่า C_p จะค่อยๆมีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าน้อยกว่าที่หน้าตัดอ้างอิงประมาณ 0.07 หรือประมาณ 7% ของค่าความดันพลศาสตร์

จากผลการทดลองทำให้สรุปได้ว่า การใช้ช่องเปิดจะทำให้ช่วงหน้าตัดทดสอบที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ($X = 180$ cm ถึง 220 cm) มีค่าความดันสถิตเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่หน้าตัดอ้างอิงไม่มากนัก โดยมีค่าความแตกต่างเพียง +/-7% ของค่าความดันพลศาสตร์ ซึ่งให้ผลที่ดีกว่ากรณีที่ไม่มีช่องเปิดด้านข้าง ที่ในช่วงหน้าตัดทดสอบสำหรับทำการศึกษาวิจัยจะมีค่าความดันสถิตลดลงจากหน้าตัดอ้างอิงได้ถึง 34% ของค่าความดันพลศาสตร์ภายใน Test section

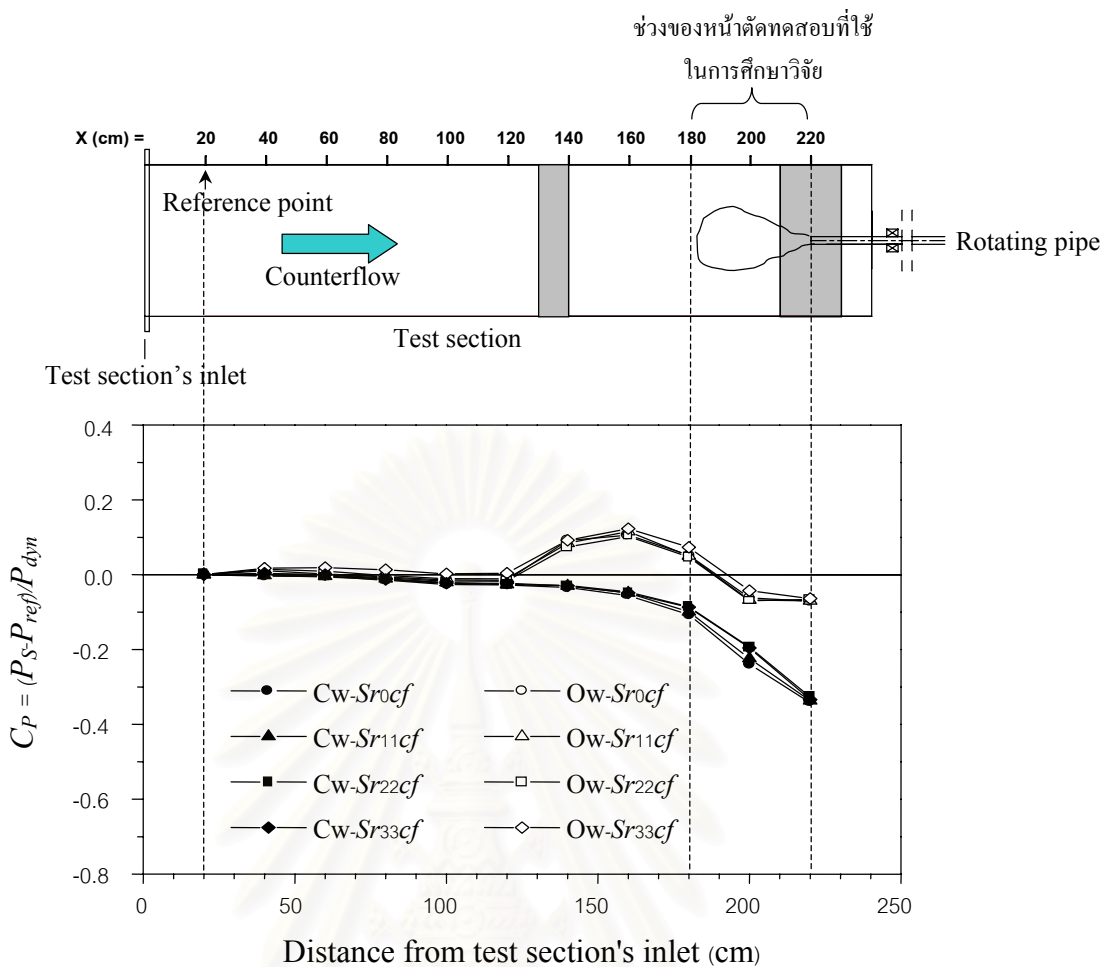
สำหรับผลการวัดความเร็วของกระแสทวนที่ตำแหน่งหน้าตัดต่างๆตามแนวการไหล ดังรูปที่ ข.5 ได้แสดงผลความเร็วของกระแสทวนอยู่ในรูปของค่าที่ Normalize ด้วยความเร็วของกระแสทวนที่หน้าตัดอ้างอิง (u/u_{ref}) จากผลการทดลองพบว่า ในทุกๆกรณีการทดลองที่ไม่มีช่องเปิดตรงผนังด้านข้างของ Test section นั้น ค่า u/u_{ref} ที่ตำแหน่งหน้าตัดต่างๆตามแนวการไหลของกระแสทวนจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับค่า u/u_{ref} ที่หน้าตัดอ้างอิง แสดงให้เห็นถึงความเร็วของกระแสทวนตามแนวการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับความเร็วของกระแสทวนที่หน้าตัดอ้างอิงบริเวณปากทางเข้า Test section โดยในช่วง X ตั้งแต่ 20 cm ถึง 180 cm ค่า u/u_{ref} จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ คือมีค่าเพิ่มขึ้นจากหน้าตัดอ้างอิง 0.02 หรือ 2% แต่เมื่อการไหลเข้าสู่บริเวณที่ใช้ในการทดลอง คือที่ช่วง X เท่ากับ 180 cm ถึง 220 cm พบว่า u/u_{ref} จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว คือมีค่าเพิ่มขึ้นจากหน้าตัดอ้างอิงได้ถึง 0.15 หรือ 15% ในส่วนของกรณีการทดลองที่มีช่องเปิดตรงผนัง

ด้านข้างของ Test section นั้นพบว่า ค่า u/u_{ref} จะมีค่าไม่คงที่ตลอดทั้งแนวการไหล โดยในช่วง X ตั้งแต่ 20 cm ถึง 120 cm นั้น u/u_{ref} จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย คือมีค่าเพิ่มขึ้นจากหน้าตัดอ้างอิงประมาณ 0.01 หรือ 1% และในช่วง X ตั้งแต่ 120 cm ถึง 160 cm u/u_{ref} จะเริ่มมีค่าลดลงจากเดิมอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งมีค่าน้อยกว่าหน้าตัดอ้างอิงประมาณ 0.06 หรือ 6% และเมื่อเข้าสู่ช่วง X ตั้งแต่ 160 cm ถึง 220 cm พบว่า u/u_{ref} จะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีค่ามากกว่าหน้าตัดอ้างอิงประมาณ 0.04 หรือประมาณ 4%

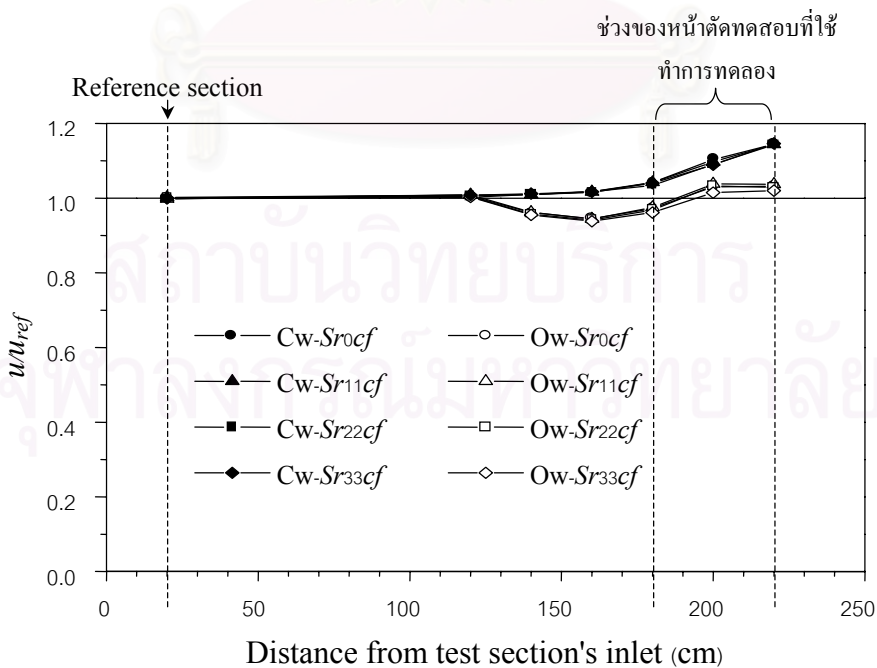
จากผลการทดลองทำให้สรุปได้ว่า การใช้ช่องเปิดจะทำให้ช่วงหน้าตัดทดสอบที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ($X = 180$ cm ถึง 220 cm) มีค่าความเร็วกระแสทวนเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่หน้าตัดอ้างอิงไม่มากนัก โดยมีค่าความแตกต่างอยู่ในช่วง $\pm 4\%$ เท่านั้น ซึ่งให้ผลที่ดีกว่ากรณีที่ไม่มีช่องเปิดด้านข้าง ที่ในช่วงหน้าตัดทดสอบสำหรับทำการศึกษาวิจัยจะมีความเร็วของกระแสทวนเพิ่มขึ้นจากค่าที่หน้าตัดอ้างอิงได้ถึง 15%

ดังนั้นการปรับปรุง Test section โดยการเจาะช่องเปิดที่ผนังด้านข้างของ Test section นั้นจะช่วยลดผลกระทบของ Blockage effect ได้เป็นอย่างดี โดยทำให้สภาวะการไหลของกระแสทวนภายใน Test section มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากเกินไป และอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยในช่วงหน้าตัดที่ใช้ทำการทดลองนั้นจะมีค่าความดันสถิตและความเร็วของกระแสทวนแตกต่างไปจากค่าที่หน้าตัดอ้างอิงไม่เกิน $\pm 7\%$ และ $\pm 4\%$ ตามลำดับ ซึ่งจะให้ผลที่ดีกว่าตอนที่ไม่มีช่องเปิด โดยในกรณีที่ไม่มีช่องเปิดนั้นจะทำให้สภาวะการไหลของกระแสทวนภายใน Test section เปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก โดยในช่วงหน้าตัดที่ใช้ทำการทดลองนั้นจะมีค่าความดันสถิตน้อยกว่าที่หน้าตัดอ้างอิงถึง 34% ของค่าความดันพลศาสตร์ และความเร็วของกระแสทวนจะมีค่ามากกว่าที่หน้าตัดอ้างอิงถึง 15%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.4 การเปลี่ยนแปลงความดันสถิตของกระแสทวนภายใน Test section ที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวการไหล



รูปที่ ข.5 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของกระแสทวนภายใน Test section ที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวการไหล

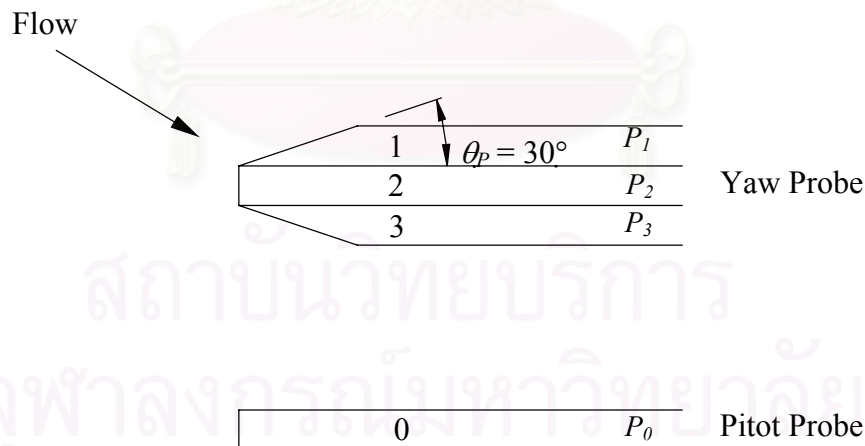
ภาคผนวก ค

การเปรียบเทียบและคำนวณความเร็วการไหลจากการวัดด้วย Yaw Probe

ค.1 ลักษณะและรายละเอียดของ Yaw Probe

โดยทั่วไป Pitot Probe สามารถใช้งานได้ดีกับการวัดความเร็วของของไหลที่มีลักษณะเป็น Parallel flow และผู้วัดทราบทิศทางการไหลแน่นอน แต่สำหรับการไหลแบบหมุนควง ดังเช่นในงานวิจัยนี้ที่ของไหลมีความเร็วในสองมิติ และไม่ทราบทิศทางการไหล จะทำให้ไม่สามารถใช้ Pitot Probe ในการวัดความเร็วได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ Yaw Probe เป็นเครื่องมือสำหรับวัดการไหลซึ่งทำให้วัดความเร็วในสองมิติที่ไม่ทราบทิศทางที่แน่นอนได้

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



รูปที่ ค.1 แสดงลักษณะของ Yaw Probe

ค.2 การปรับเทียบ Yaw Probe

ในการวัดความเร็วของการไหลได้มีการปรับเทียบ Yaw Probe เพื่อหาความสัมพันธ์ของผลต่างความดันที่วัดได้จากเข็มแต่ละคู่กับค่าความเร็วตามแนวแกนและแนวสัมผัส โดยทำการปรับเทียบในอุโมงค์ลมขนาดหน้าตัด 30×30 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 (α) ของการไหลกับ Yaw Probe โดยหมุน Yaw Probe ไปทีละ 5 องศา โดยมีช่วงของการปรับเทียบ (α) ระหว่าง -80 องศา ถึง 80 องศา และผลต่างความดันที่วัดได้จะสัมพันธ์กันตามสมการ (Chue, 1975)

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

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

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

โดย P_0 คือค่าความดันรวมจริง

ΔP คือค่าความดันจลน์จริง

K_1, K_2, K_3 คือ Calibration Function

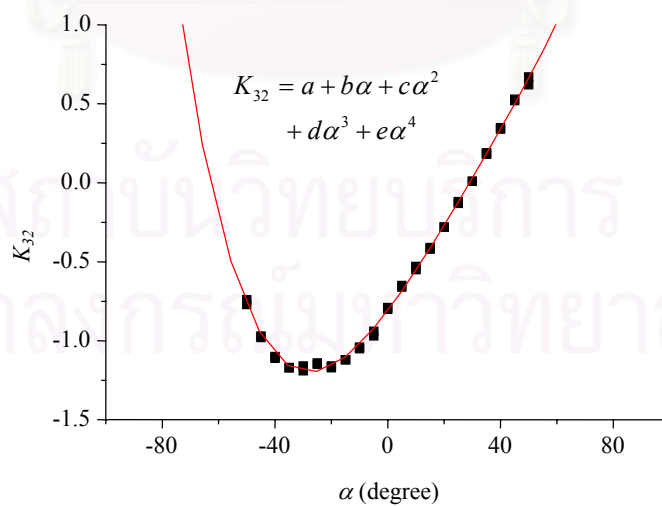
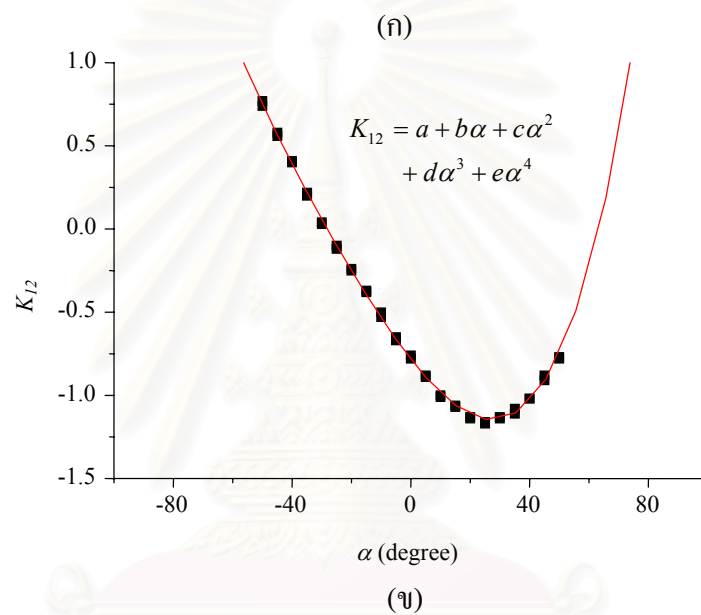
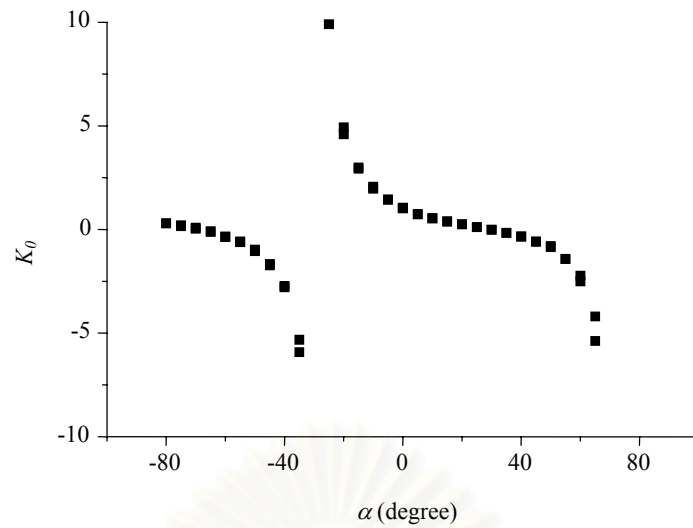
จากสมการ ค.1 ถึง ค.3 นั้นสามารถกำหนดความสัมพันธ์ของ Calibration function K_0, K_{12} และ K_{32} ได้ตามสมการ

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

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

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

โดยสามารถหาค่า K_0, K_{12} และ K_{32} ที่มุมปะทะ (α) ต่างๆได้จากค่าความดันแตกต่างที่วัดและค่าความดันจลน์ของการทดลอง โดยแสดงความสัมพันธ์ของ K_0, K_{12} และ K_{32} ที่มุมปะทะ (α) ต่างๆดังรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ของ Calibration function กับมุมปะทะของการไหล (α)
 (ก) K_0 (ข) K_{12} และ (ค) K_{32} (ค่าคงที่ต่างๆแสดงดังตารางที่ ค.1)

ค.3 การคำนวณความเร็วจากการวัดด้วย Yaw probe

ในการหาความเร็วจากการวัดด้วย Yaw probe นั้น เริ่มจากการวัดความแตกต่างของความดันในแต่ละคู่ นั่นคือ P_1-P_2 และ P_3-P_2 จากนั้นจะสามารถหาค่า K_0 ได้จากความสัมพันธ์ตามสมการ (ค.6) และหาค่ามุมปะทะ (α) ของการไหลได้จากความสัมพันธ์ของ K_0 และมุมปะทะ (α) โดยใช้ Curve fitting จากข้อมูลที่ได้จากการ Calibrate ซึ่งผลการใช้ Curve fitting ในช่วง K_0 ต่างๆ แสดงดังรูปที่ ค.3 และค่าคงที่ต่างๆ ดังตารางที่ ค.1 จากนั้นจะสามารถหาค่า K_{12} และ K_{32} ได้จากความสัมพันธ์ของ K_{12} และ K_{32} กับมุมปะทะ (α) โดยใช้ Curve fitting จากข้อมูลที่ได้จากการ Calibrate ซึ่งผลการใช้ Curve fitting แสดงดังรูปที่ ค.2 และค่าคงที่ต่างๆ ดังตารางที่ ค.1 โดยจากการวัดความแตกต่างความดันและค่า K_{12} และ K_{32} ที่คำนวณได้ รวมทั้งความสัมพันธ์ตามสมการ ค.3 และ ค.4 นั้นทำให้สามารถหาค่าความดันจลน์ (ΔP) ของการทดลองได้จาก

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

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

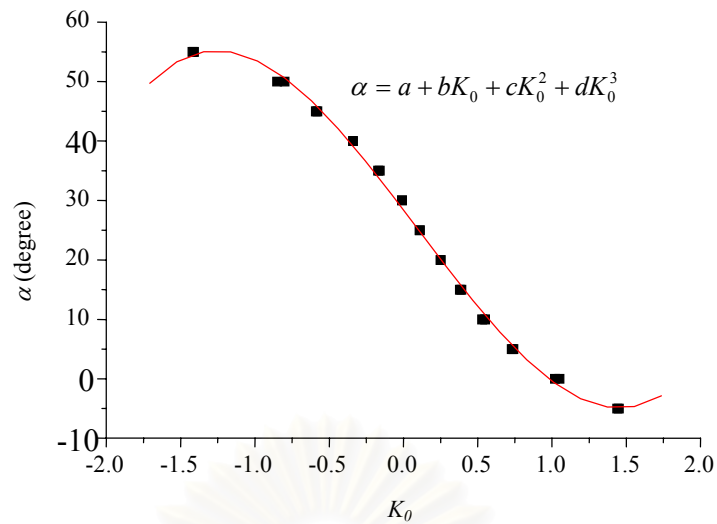
จากนั้นสามารถคำนวณหาค่าความเร็วตามแนวแกน (u) และความเร็วตามแนวสัมผัส (w) ได้จากค่าความดันจลน์ (ΔP) และมุมปะทะ (α) ที่คำนวณข้างต้นตามสมการ

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

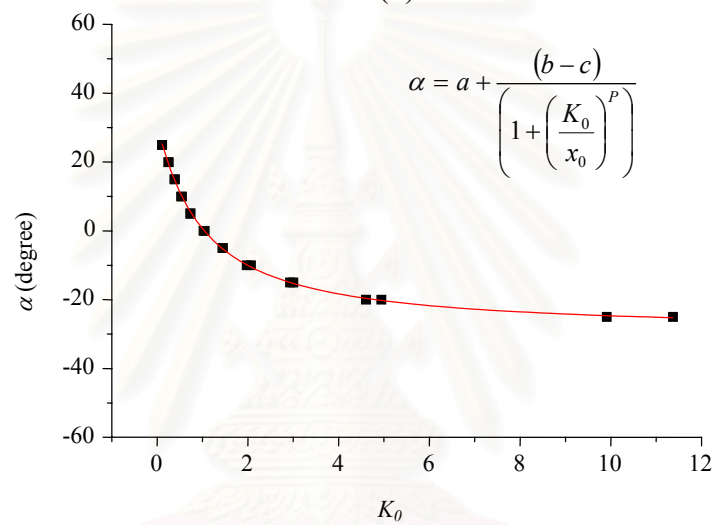
$$w = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \sin \alpha \quad (\text{ค.10})$$

	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

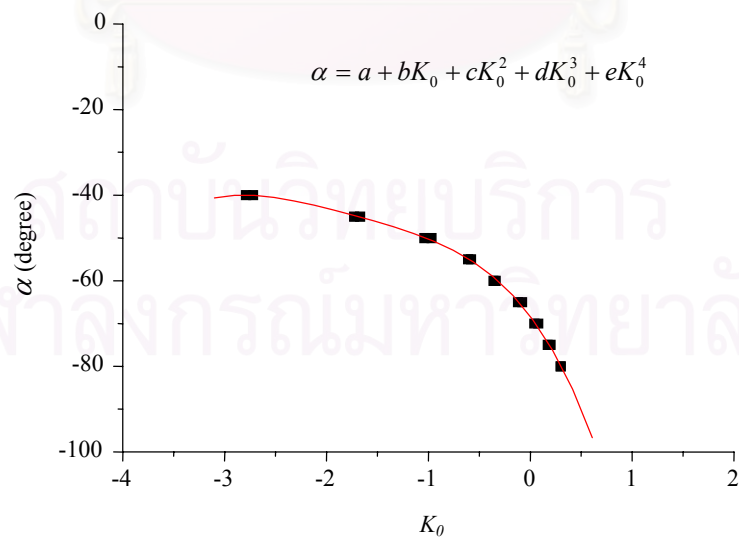
ตารางที่ ค.1 ค่าคงที่ของการใช้ Curve fitting จากข้อมูลที่ได้จากการ Calibrate ตามรูปที่ ค.2 และรูปที่ ค.3



(ก)



(ข)



(ค)

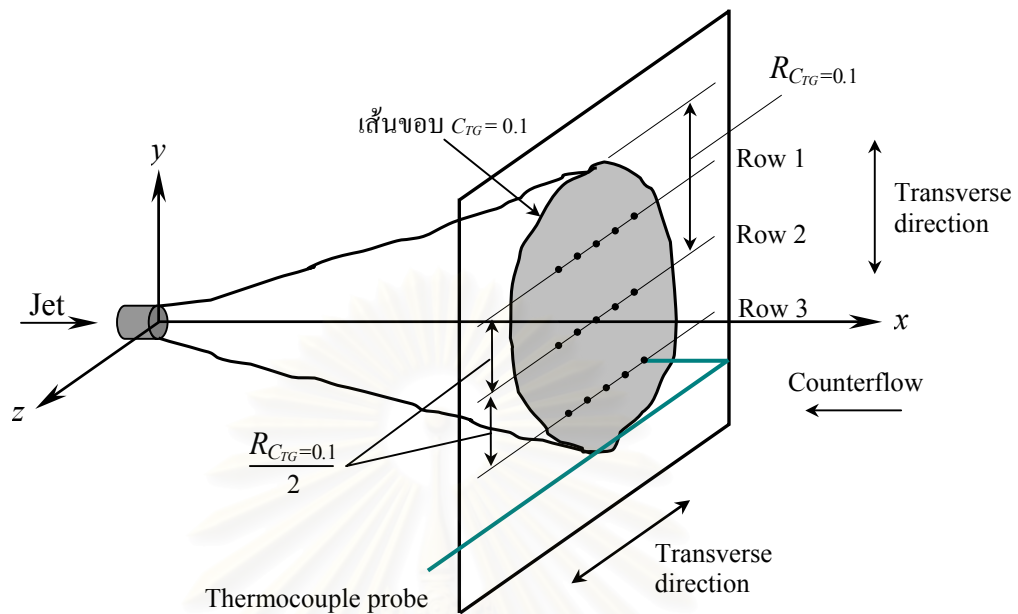
รูปที่ ค.3 ความสัมพันธ์ของมุมปะทะของการไหล (α) กับ Calibration function K_0
 (ก) $-1 < K_0 < 1$ (ข) $1 < K_0 < 10$ และ (ค) $-3 < K_0 < -1$ (ค่าคงที่ต่างๆแสดงดังตารางที่ ค.1)

ภาคผนวก ง
ผลกระทบเนื่องจากขนาดและรูปร่างของ Thermocouple probe
ที่มีต่อการไหล

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการทดลองวัดอุณหภูมิเป็นหน้าตัด โดยใช้ Thermocouple probe แบบ B ที่สามารถวัดอุณหภูมิได้คร่าวหลายจุด ดังแสดงเป็นลักษณะ Schematic ในรูปที่ 2.20x และภาพถ่ายในรูปที่ 2.21x แต่เนื่องจาก Thermocouple probe แบบ B นี้มีขนาดและรูปร่างที่ค่อนข้างใหญ่ ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อลักษณะการไหลโดยรวมได้ โดยเฉพาะในกรณีการไหลที่มีกระแสนวนร่วมอยู่ (*Sr_{xxcf}*) ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้จึงได้จัดสร้าง Thermocouple probe แบบ C ที่มีขนาดของก้าน Probe เล็กกว่า และมีจำนวนจุดวัดเพียงจุดเดียว ดังแสดงเป็นลักษณะ Schematic ในรูปที่ 2.20k และภาพถ่ายในรูปที่ 2.21k มาใช้ในการวัดตรวจสอบค่าอุณหภูมิตามตำแหน่งที่เคยทำการวัดโดยใช้ Thermocouple probe แบบ B เพื่อตรวจสอบผลกระทบเนื่องจากขนาดและรูปร่างของ Thermocouple probe แบบ B ที่มีต่อลักษณะการไหลโดยรวมในกรณีการทดลองที่มีกระแสนวนร่วมอยู่ ซึ่งประกอบไปด้วยกรณี *Sr_{0cf}*, *Sr_{11cf}*, *Sr_{22cf}* และ *Sr_{33cf}* โดยได้ทำการวัดตรวจสอบค่าอุณหภูมิใน 2 ลักษณะ คือ การวัดตรวจสอบค่าแบบเป็นระบบ และการวัดตรวจสอบค่าแบบสุ่มเป็นบางจุด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การวัดตรวจสอบค่าแบบเป็นระบบ จะทำการวัดตรวจสอบค่าในบริเวณที่มีนัยสำคัญบนหน้าตัด คือในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งอยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางของหน้าตัดพอดี และบริเวณที่มี Gradient ของอุณหภูมิสูง ซึ่งอยู่เลยจากตำแหน่งกึ่งกลางของหน้าตัดไปประมาณครึ่งหนึ่งของรัศมีการกระจายตัว (กำหนดขอบการกระจายตัวไว้ที่ $C_{TG} = 0.1$) ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบเนื่องจาก Probe ที่มีต่อการไหลได้อย่างชัดเจนที่สุด โดยในแต่ละหน้าตัดได้ทำการวัดตรวจสอบค่าแบบเป็นระบบทั้งหมด 15 จุด แบ่งเป็น 3 แถวๆละ 5 จุด ดังแสดงในรูปที่ ง.1 โดยวัดตรวจสอบที่บริเวณอุณหภูมิสูงตรงตำแหน่งกึ่งกลางหนึ่งแถว (Row 2) และวัดตรวจสอบที่บริเวณ Gradient ของอุณหภูมิสูง ซึ่งอยู่ถัดจากแถวกึ่งกลางไปทางด้านบนและด้านล่างเป็นระยะประมาณครึ่งหนึ่งของรัศมีการกระจายตัว ($\frac{R_{C_{TG}=0.1}}{2}$) อีกสองแถว (Row 1 และ Row 3)

การวัดตรวจสอบค่าแบบสุ่มเป็นบางจุด จะทำการสุ่มวัดอุณหภูมิที่บริเวณต่างๆของหน้าตัด เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจในบริเวณที่อยู่นอกเหนือจากการวัดตรวจสอบค่าแบบเป็นระบบ โดยในแต่ละหน้าตัดจะทำการวัดตรวจสอบค่าแบบสุ่มทั้งหมดจำนวน 5 จุด ที่ตำแหน่งต่างๆบนหน้าตัดทดลอง



รูปที่ ง.1 ลักษณะการวัดตรวจสอบค่าอุณหภูมิบนหน้าตัดแบบเป็นระบบ

ตารางที่ ง.1 และ ง.2 แสดงผลการวัดตรวจสอบค่าอุณหภูมิแบบเป็นระบบ และผลการวัดตรวจสอบค่าอุณหภูมิแบบสุ่มเป็นบางจุด ตามลำดับ ซึ่งแสดงผลเป็นค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ที่ได้จาก Thermocouple แบบ B เปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก Thermocouple แบบ C จากผลการทดลองพบว่า ค่าอุณหภูมิในแต่ละหน้าตัดที่ได้จากการวัดตรวจสอบค่าแบบเป็นระบบนั้นจะมีค่าความแตกต่างไม่เกิน $\pm 5\%$ ของค่าเป็น $^{\circ}\text{C}$ ในทุกๆกรณีการทดลอง สำหรับค่าอุณหภูมิในแต่ละหน้าตัดที่ได้จากการวัดตรวจสอบค่าแบบสุ่มเป็นบางจุดนั้นจะมีค่าความแตกต่างไม่เกิน $\pm 3\%$ ของค่าเป็น $^{\circ}\text{C}$ ในทุกกรณีการทดลอง

จากผลการวัดตรวจสอบค่าอุณหภูมิข้างต้นทำให้สรุปได้ว่า ขนาดและรูปร่างของ Thermocouple probe แบบ B จะส่งผลกระทบต่อลักษณะการไหลโดยรวมเพียงเล็กน้อย โดยคิดเป็นค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก Thermocouple probe แบบ C พบว่ามีค่าแตกต่างกันไม่เกิน $\pm 5\%$ ของค่าเป็น $^{\circ}\text{C}$ ในทุกกรณีการทดลอง

หน้าตัด	x/d	ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละหน้าตัด (% ของค่าเป็น °C)			
		$Sr0cf$	$Sr11cf$	$Sr22cf$	$Sr33cf$
1	1.5	±5	±3	±3	±5
2	4	±4	±3	±3	±3
3	6	±3	±2	±2	±2
4	8	±2	±2	±4	±1
5	10	±2	±1	±2	±2
6	12	±2	±3	±3	±2
7	14	±2	±3	±2	±1
8	16	±1	±2	±2	±2

ตาราง ง.1 ผลการวัดตรวจสอบค่าอุณหภูมิแบบเป็นระบบ

หน้าตัด	x/d	ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละหน้าตัด (% ของค่าเป็น °C)			
		$Sr0cf$	$Sr11cf$	$Sr22cf$	$Sr33cf$
1	1.5	±1	±1	±2	±1
2	4	±2	±2	±2	±2
3	6	±2	±2	±2	±2
4	8	±1	±2	±1	±2
5	10	±1	±1	±3	±2
6	12	±1	±1	±1	±1
7	14	±1	±2	±1	±1
8	16	±2	±1	±2	±1

ตาราง ง.2 ผลการวัดตรวจสอบค่าอุณหภูมิแบบสุ่มเป็นบางจุด

ภาคผนวก จ

การคำนวณค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)

จ.1 ค่าความไม่แน่นอนของความเร็ว

จ.1.1 ความไม่แน่นอนของความเร็วจากการวัดด้วย Pitot Probe

การคำนวณความเร็วของการไหลด้วย Pitot Probe ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

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

เมื่อ ΔP เป็นความดันจลน์ของการไหล
 ρ เป็นความหนาแน่นของอากาศ

จากการประมาณค่าความไม่แน่นอน โดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของ ความเร็ว (δ_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 จ.1 จะได้

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

โดยที่ความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่าความดัน $\delta_{\Delta P}$ มีค่าประมาณ ± 0.032 mmWG หรือเท่ากับ 0.32 ปาสกาล และให้ค่า δ_{ρ} มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ $\delta_{\Delta P}$ เมื่อเลือกจุดบริเวณกึ่งกลางที่ปากเจ็ตคือที่ $r = 0$ ในกรณี $Sr > 0$ ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆคือ $u_j = 12.28$ m/s, $\rho = 1.00$ kg/m³ ($T_j = 81.4$ °C) แทนในสมการ จ.2

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{0.32 Pa}{1.00 kg/m^3 \times 12.28 m/s}\right)^2} \approx 0.03 \text{ m/s}$$

และเมื่อเลือกจุดบริเวณใกล้ขอบเจ็ตคือที่ระยะ $r = +10 \text{ mm}$ ในกรณี $Sr=0$ ซึ่งมีค่าความไม่แน่นอนมากที่สุด ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่างๆคือ $u = 7.72 \text{ m/s}$, $\rho = 1.04 \text{ kg/m}^3$ ($T_j = 71.2 \text{ }^\circ\text{C}$) แทนในสมการจ.2 จะได้

$$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{0.32 Pa}{1.04 kg/m^3 \times 7.72 m/s}\right)^2} \approx 0.04 \text{ m/s}$$

ดังนั้นความไม่แน่นอนของค่าความเร็วจากการวัดด้วย Pitot Probe จะมีค่าไม่เกิน $\pm 0.05 \text{ m/s}$

จ.1.2 ความไม่แน่นอนของความเร็วจากการวัดด้วย Yaw Probe

การคำนวณค่าความเร็วจาก Yaw Probe ได้ทำการปรับเทียบเพื่อหา Calibration Function ตามความสัมพันธ์

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

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

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

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

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

ΔP เป็นค่าความดันจลน์ของการปรับเทียบเครื่องมือ

จากการประมาณค่าความไม่แน่นอนโดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของค่า Calibration Function ในการปรับเทียบเครื่องมือเป็น

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

และจากความสัมพันธ์ของ Calibration function K_0 และ α ในหัวข้อ ค.2 และรูปที่ ค.2 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของ α ตามความสัมพันธ์

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

และจากความสัมพันธ์ของ Calibration function K_{12} และ K_{32} กับ α ในหัวข้อ ค.3 และรูปที่ ค.3 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของ K_{12} และ K_{32} ตามความสัมพันธ์

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

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

สำหรับการคำนวณความเร็วจากกรวัดด้วย Yaw Probe ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ

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

โดยที่ V คือ ความเร็วสัมบูรณ์ (Absolute velocity) และมีความไม่แน่นอนของค่าความเร็วเป็น

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

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

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

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

และสามารถคำนวณความไม่แน่นอนของความเร็วตามแนวแกน δ_u และความเร็วตามแนวสัมผัส δ_w ได้จาก

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

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

โดยในแต่ละจุดที่ปากเจ็ตนั้น มีค่าความไม่แน่นอนของความเร็วแตกต่างกัน ตามการกระจายของ Calibration curve ซึ่งในที่นี้ได้ยกตัวอย่างการคำนวณ โดยเลือกตำแหน่ง $r = 5 \text{ mm}$ ที่ปากทางออกเจ็ต ในกรณี Sr33 โดยมีค่าความดัน $P_1 - P_2 = -5.64 \text{ mmWG}$, $P_3 - P_2 = -4.63 \text{ mmWG}$ ซึ่งจากการคำนวณในภาคผนวก ก. จะได้ $K_0 = 0.82$, $\alpha = -3.10$ องศา, $K_{12} = -0.89$, $V = 11.15 \text{ m/s}$, $u = 11.14 \text{ m/s}$ และ $w = 0.60 \text{ m/s}$ ตามลำดับ โดยมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดความดัน ซึ่งพิจารณาจากค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของเครื่องมือวัดประมาณ

$$\delta_{P_1-P_2} = \delta_{P_3-P_2} = 0.032 \text{ mmWG}$$

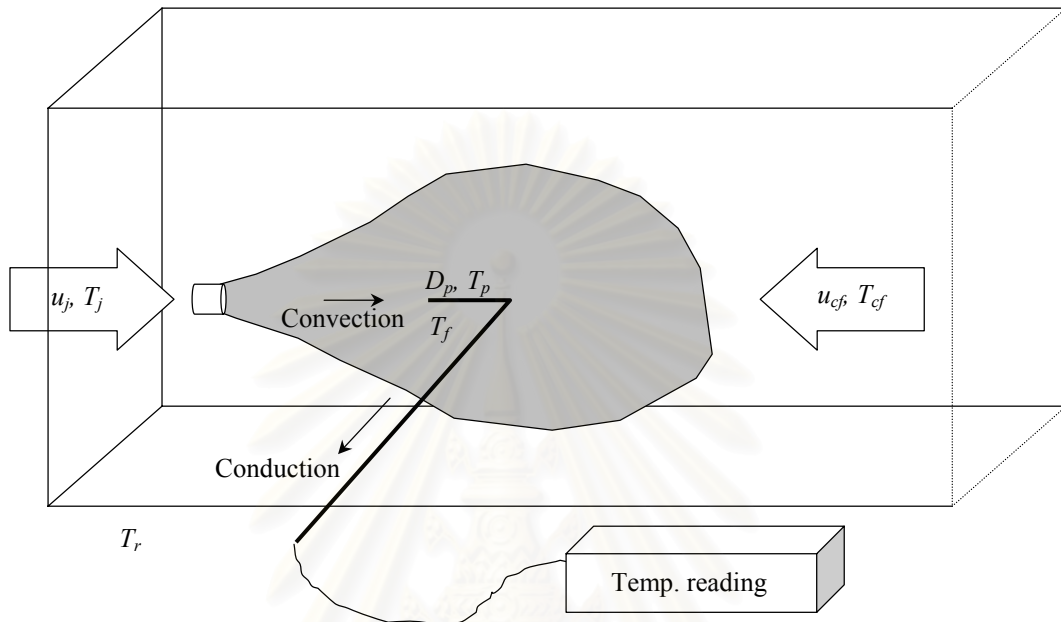
และจากสมการ จ.6 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของ $K_0 (\delta_{K_0})$ ประมาณ 0.01 และจากสมการ จ.7 และ Calibration curve ดังรูป ค.2 จะได้ δ_α ประมาณ 0.2 องศา และจากสมการ จ.8 และ Calibration curve ดังรูป ค.3 จะได้ $\delta_{K_{12}}$ ประมาณ 0.04 และจากสมการ จ.11 จะได้ δ_V ประมาณ 0.01 และจากสมการ จ.14-จ.15 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของความเร็วในแนวแกนและแนวสัมผัสประมาณ 0.12 และ 2.11 m/s ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวจะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง เนื่องจากวิธีการประมาณ โดยการนำค่าความไม่แน่นอนในแต่ละส่วนมาบวกกันเสมอ ทั้งนี้จากการตรวจสอบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วย Pitot probe ในกรณีของความเร็วในแนวแกน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

จ.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 $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ในช่วงที่ทำการทดลอง และตัวอ่านค่าอุณหภูมิ (Thermocouple thermometer) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 52-2 ซึ่งมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบเครื่องมือวัดนี้ถูกจำกัดโดยลวด Thermocouple ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.75% ของค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ หรือประมาณ $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$

การวัดอุณหภูมิสำหรับงานวิจัยนี้เป็นการวัดอุณหภูมิของเจ็ทอากาศที่มีความเร็วทำให้อาจจะได้รับผลของการพา (Convection) ทำให้อุณหภูมิที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อน โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงผลของการพาดังกล่าวด้วยแบบจำลอง (model) ดังรูปที่ จ.1



รูปที่ จ.1 แบบจำลองในการพิจารณาผลของการพา (Convection) ที่มีต่อการวัดอุณหภูมิ

สำหรับแบบจำลองในการพิจารณาผลของการพาที่มีต่อการวัดอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ จ.1 โดยที่ T_f คืออุณหภูมิของอากาศที่ต้องการวัด, T_p คืออุณหภูมิที่อ่านได้จาก Thermocouple และโดยกฎการอนุรักษ์พลังงาน และสมมติฐานที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากลวด Thermocouple สู่อากาศ ทำให้กระบวนการในการถ่ายเทความร้อนในการวัดอุณหภูมินี้เป็นผลจากการพาความร้อนของอากาศ (Convection) และการนำความร้อนของลวด Thermocouple เท่านั้น ดังสมการ

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

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

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

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

$$\text{ที่ } u_j = 9.88 \text{ m/s, } T_j = 76.8 \text{ }^\circ\text{C}; (Re)_{D_p} = \frac{u_j D_p}{\nu_j} = \frac{(9.88 \text{ m/s})(1 \times 10^{-3} \text{ m})}{(2.2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})} \approx 450$$

$$\text{ที่ } u_{cf} = 1.98 \text{ m/s, } T_{cf} = 30.3 \text{ }^\circ\text{C}; (Re)_{D_p} = \frac{u_{cf} D_p}{\nu_{cf}} = \frac{(1.98 \text{ m/s})(1 \times 10^{-3} \text{ m})}{(1.7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})} \approx 116$$

แทนในสมการ จ.17 จะได้ Nusselt number เฉลี่ยมีค่าในช่วง 6.64 ถึง 12.46 และเมื่อแทนค่าในสมการ จ.16 จะได้ค่า $(T_f - T_p)/(T_p - T_r)$ อยู่ในช่วง 0.1-0.2 % นั่นคือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิจริงของของไหลประมาณ 0.1-0.2 % ของอุณหภูมิที่วัด ซึ่งมีค่ามากที่สุดประมาณ 0.2 °C

สำหรับค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิในกรณีการไหลที่ไม่มีกระแสสวน (S_{rxx}) ก็ได้ใช้การคำนวณในลักษณะเดียวกับกรณีการไหลที่มีกระแสสวนร่วมอยู่ (S_{rxxcf}) และจากการคำนวณพบว่า ในกรณี S_{rxx} นั้น จะมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิจริงของของไหลประมาณ 0.2-0.6% ของอุณหภูมิที่วัด ซึ่งมีค่ามากที่สุดประมาณ 0.6 °C

จ.2.1 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG})

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) นิยามโดย

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

โดยที่ T คือ อุณหภูมิที่ทำการทดลองวัด
 T_j คือ อุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ที่ปากทางออกเจ็ด
 T_a คือ อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมขณะที่ทำการวัด (ในกรณีการทดลองที่ไม่มีกระแส
 ทวน (Sr_{xx}) T_a จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง (T_r) และในกรณีการทดลองที่มีกระแส
 ทวน (Sr_{xxcf}) T_a จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระแสลมทวน (T_{cf})
 และจากการประมาณค่าความไม่แน่นอนโดย Kline (1985) สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอน
 ของ C_{TG} ($\delta_{C_{TG}}$) ได้จากความสัมพันธ์

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

แทนค่า C_{TG} จะได้

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

โดยในการทดลองจะกำหนดอุณหภูมิของเจ็ด (T_j) และอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม (T_a) ให้คงที่
 ที่ประมาณ 76 °C และ 30 °C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิที่ทดลอง (T) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 30-76 °C
 โดยค่าความไม่แน่นอนของ T , T_j และ T_a ประมาณได้จากค่าความถูกต้องของ Thermocouple
 จากความถูกต้องของเครื่องมือวัดและผลของการพา (Convection) ดังกล่าว ซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.5 °C
 นั่นคือ

$$\delta_T = \delta_{T_j} = \delta_{T_a} = 0.5^\circ\text{C}$$

จากการคำนวณพบว่าค่าความไม่แน่นอนของ C_{TG} ($\delta_{C_{TG}}$) ในการทดลองอยู่ในช่วง 0.01-0.02 โดย
 งานวิจัยนี้จะระบุค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่ $\delta_{C_{TG}}$ สูงสุดไม่เกิน 0.05

จ.2.2 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะหน้าตัด (C_{TL})

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะหน้าตัด (C_{TL}) นิยามโดย

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

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

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

แทนค่า C_{TL} ได้

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

โดยในการทดลองจะมีอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละหน้าตัด (T_{max}) แตกต่างกันไปคืออยู่ในช่วงประมาณ 33-80 °C โดยอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม (T_a) มีค่าประมาณ 30 °C และอุณหภูมิที่ทดลองอยู่ในช่วงตั้งแต่ 30-80 °C โดยค่าความไม่แน่นอนของ T , T_{max} และ T_a ประมาณได้จากค่าความถูกต้องของ Thermocouple ซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.5 °C นั่นคือ

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

จากการคำนวณพบว่าค่าความไม่แน่นอนของ C_{TL} ($\delta_{C_{TL}}$) ในการทดลองอยู่ในช่วง 0.01-0.23 ซึ่งแสดงดังตาราง จ.1 สำหรับค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวจะมากขึ้นตามระยะทางตามแนวการไหล โดยในหน้าตัดที่ x/d เท่ากับ 1.5 ถึง 14 นั้นจะมีค่า $\delta_{C_{TL}}$ ไม่เกิน 0.10 ในทุกๆกรณีการทดลอง จะมีเฉพาะที่หน้าตัด x/d เท่ากับ 16 เท่านั้นที่มีค่า $\delta_{C_{TL}}$ เกิน 0.10 ที่เป็นเช่นนี้เพราะในหน้าตัดที่ x/d เท่ากับ 16 จะมีค่า T_{max} ต่ำมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีการทดลองที่มีกระแสสวน (Sr_{xxcf}) ซึ่งมีค่า T_{max} ใกล้เคียงกับ T_a (T_{max} มีค่าประมาณ 33-36 °C) ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ค่า $\delta_{C_{TL}}$ ที่หน้าตัด x/d เท่ากับ 16 มีค่ามากกว่า $\delta_{C_{TL}}$ ที่คำนวณได้ในหน้าตัดอื่นๆ ใดๆก็ตาม ในงานวิจัยนี้ได้ระบุค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่ $\delta_{C_{TL}}$ ประมาณ 0.1 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการพิจารณาผลของหน้าตัดการทดลองส่วนใหญ่ที่มีในการศึกษาวิจัยนี้

x/d	ค่า $\delta_{C_{TL}}$ ของทุกกรณีการทดลอง	
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
1.5	0.01	0.02
4	0.02	0.03
6	0.02	0.04
8	0.02	0.05
10	0.03	0.07
12	0.03	0.08
14	0.04	0.10
16	0.04	0.23

ตาราง จ.1 แสดงช่วงของค่าความไม่แน่นอนของค่า C_{TL} ในแต่ละหน้าตัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพงศ์ฤทธิ์ อุปถัมภ์นรากร เกิดวันที่ 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2520 ที่โรงพยาบาลพระมงกุฎเกล้าฯ จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย