

การกระจายตัวของอุณหภูมิด้านท้ายของเจ็ตร้อนสองลำแบบเรียงแถว
ในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง



นาย ปิติพงศ์ เย็นจิตต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

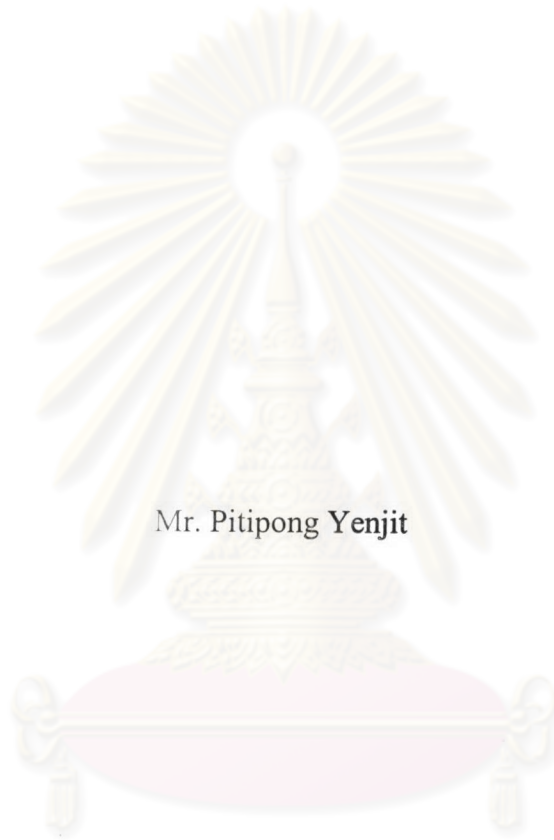
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-9795-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TEMPERATURE DISTRIBUTION DOWNSTREAM OF TWO IN-LINE
HEATED JETS IN SWIRLING PIPE FLOW



Mr. Pitipong Yenjit

ศูนย์วิทยทรัพยากร
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 2002
ISBN 974-17-9795-8

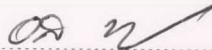
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การกระจายตัวของอุณหภูมิด้านท้ายของเจ็ตร้อนสองลำแบบเรียงแถว
ในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง
โดย นาย ปิติพงศ์ เย็นจิตต์
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.อศิ บุญจิตราคุลย์

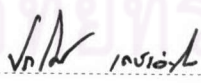
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณะบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะชินันท์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.อศิ บุญจิตราคุลย์)


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


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ไพบูลย์ ศรีภักการ)


ปิดพิงส์ เชนจิตต์: การกระจายตัวของอุณหภูมิด้านท้ายของเจ็ตร้อนสองลำแบบเรียงแถวใน
ท่อที่มีการไหลแบบหมุนควง (TEMPERATURE DISTRIBUTION
DOWNSTREAM OF TWO IN-LINE HEATED JETS IN SWIRLING PIPE
FLOW)

อ.ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. อสี บุญจิตราคุลย์; 233 หน้า ISBN 974-17-9795-8

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิด้านท้ายของเจ็ตร้อนหนึ่งและสองลำแบบเรียงแถวในท่อที่ไม่มีและมีการไหลแบบหมุนควง โดยได้ศึกษาผลของจำนวนเจ็ต (เจ็ตหนึ่งตัวและเจ็ตสองตัวแบบเรียงแถว) ผลของระยะห่างระหว่างเจ็ตสองตัว ($0.5r_{effd}$ และ $1.0r_{effd}$, โดยที่ r_{eff} คืออัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล และ d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเจ็ต) และผลของการไหลแบบหมุนควงของกระแสมขวาง (ความเร็วในการหมุนควงแทนด้วย Swirl ratio, Sr , มีค่าเท่ากับ 0 และ 1.8) ต่อคุณลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิมบนระนาบหน้าตัดขวางด้านท้ายการไหลของเจ็ต ที่อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลคงที่ที่ 6.0 อัตราส่วนโดยมวลคงที่ที่ 2.55 และอัตราส่วนความหนาแน่นคงที่ที่ 0.83 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิมบนระนาบหน้าตัดขวางด้านท้ายการไหลของเจ็ตใช้พารามิเตอร์สามแบบในการสเกลระยะทางคือ r_{effd} -, D -, และ S -scale (โดยที่ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกระแสมขวาง และ S คือระยะห่างระหว่างเจ็ตสองตัว)

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงกรณีที่ดีที่สุดของกรณีเจ็ตสองตัว (กรณีระยะห่างระหว่างเจ็ตสองตัวเท่ากับ $1.0r_{effd}$) ใช้ระยะทางเพื่อให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในหน้าตัดมีความสม่ำเสมออยู่ภายใน $\pm 10\%$ ของอุณหภูมิมส่วนเกินที่ปากเจ็ตสั้นกว่ากรณีเจ็ตหนึ่งตัวเป็นระยะ 50% สำหรับกรณีที่กระแสมขวางไม่มีมีการไหลแบบหมุนควง และสั้นกว่า 30% สำหรับกรณีที่กระแสมขวางมีการไหลแบบหมุนควง เมื่อพิจารณาถึงผลของระยะห่างระหว่างเจ็ตในกรณีเจ็ตสองตัว สำหรับกรณีที่กระแสมขวางไม่มีมีการไหลแบบหมุนควง พบว่ากรณีที่ระยะห่างระหว่างเจ็ตสองตัว $0.5r_{effd}$ ต้องการระยะทางที่สั้นกว่าประมาณ 10% แต่สำหรับกรณีที่กระแสมขวางมีการไหลแบบหมุนควงจะใช้ระยะทางที่เท่ากัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงผลของการหมุนควงของกระแสมขวาง ที่อยู่ในช่วงของตัวแปรที่ได้ศึกษา พบว่าการไหลแบบหมุนควงมีผลให้ระยะทางที่ใช้ลดลงอย่างน้อยประมาณ 50%

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากการกระจายตัวของอุณหภูมิพบว่า สามารถเห็นแนวโน้มให้การไหลแบบหมุนควงในท่อได้ที่ระยะทางหลังจากตำแหน่งที่ฉีดเจ็ต โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิด้านท้ายในกรณีเจ็ตสองตัวในท่อที่ไม่มีมีการไหลแบบหมุนควง โดยแสดงถึงลักษณะการไหลแบบหมุนควงที่มีลักษณะเป็นสองกลุ่มโดยมีทิศทางตรงข้ามกันตลอดพื้นที่หน้าตัดการไหลในท่อ โดยที่การไหลแบบหมุนควงน่าจะเกิดจากการเปลี่ยน โมเมนตัมของเจ็ตที่เกิดจากการชนกันของเจ็ตกับผนังด้านบน นอกจากนี้ได้อธิบายรายละเอียดของการกระจายตัวของอุณหภูมิในแต่ละกรณี

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกลลายมือชื่อ นิสิต 
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกลลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ปีการศึกษา 2545ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4270419121: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

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

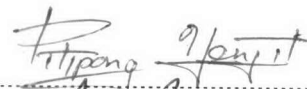

PITIPONG YENJIT: TEMPERATURE DISTRIBUTION DOWNSTREAM OF
TWO IN-LINE HEATED JETS IN SWIRLING PIPE FLOW

THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA, Ph.D., 233
pp. ISBN 974-17-9795-8.

The temperature distributions downstream of one- and two in-line heated jets injected into non-swirling and swirling pipe flows are investigated. In particular, the effects of a number of jets (one and two in-line), the distance between the two jets ($0.5r_{eff}d$ and $1.0r_{eff}d$, where r_{eff} is the effective velocity ratio and d is the inner diameter of the jet), and the swirl of crossflow (Swirl ratio, Sr , of 0 and 1.8) on the characteristics of temperature distribution in the cross planes downstream of the jets are investigated. The experiments are conducted at fixed effective velocity ratio at 6.0, mass flow ratio at 2.55, and density ratio at 0.83. The temperature distributions in the cross planes downstream of the jets are compared in three downstream scaled-distances: $r_{eff}d$ -, D -, and S -scale, where D is the diameter of the pipe and S is the distance between the two jets.

The results show that the slowest case of two jets ($1.0r_{eff}d$ separation) reaches uniform temperature within $\pm 10\%$ of the excess temperature at the jet exit at a downstream distance 50% shorter than that of the case of one jet for the case of non-swirling pipe, and 30% shorter for the case of swirling pipe flow. In addition, comparison for the separation distance between the cases of two jets indicates that, for the case of non-swirling pipe flow, the case of $0.5r_{eff}d$ separation generally requires roughly 10% shorter distance than the case of $1.0r_{eff}d$ separation while, for the case of swirling pipe flow, the two cases requires approximately the same distance. As for the effect of swirl, within the range of parameters in this study, swirl has an effect of reducing the required distance towards uniformity by at approximately 50%.

In addition, the temperature distribution indicates that swirl can be induced in the pipe flow downstream of jet injection. Specifically, from the temperature distribution downstream of the case of two jets in non-swirling flow, it can be inferred that there exists swirl with two counter-rotating cells over the cross section of the pipe. The generation of swirl is attributed to the change in the momentum of the jets as a result of the impact of the jets and the opposite pipe wall. Details of the temperature distribution in each case are discussed.

Department..... Mechanical..... Student's signature..... 
Field of study..... Mechanical..... Advisor's signature..... 
Academic year..... 2002..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลือในทุกๆด้าน จากอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญญจิตราคุลย์ ซึ่งได้คอยประสิทธิ์ประสาทความรู้ และคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างสูงต่อการทำวิจัย อีกทั้งยังเป็นผู้มอบโอกาสที่ดีต่างๆ ในการเรียนรู้สิ่งที่เป็นประโยชน์ทั้งในการศึกษาและการดำเนินชีวิตของผู้วิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ รองศาสตราจารย์ ดำรงศักดิ์ มลิตา ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เฉชะอำไพ และอาจารย์ ดร. ไพบุลย์ ศรีภคการที่ได้ เอื้อเฟื้อและแนะนำสิ่งต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความ สมบูรณ์ในเนื้อหามากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน กองทุนส่งเสริมการวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และจากกองทุนบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ณ เวลาที่ศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ผู้วิจัยได้รับ กำลังใจ และความเอื้ออาทรจาก พี่ เพื่อน และน้อง ที่ห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอ ขอบพระคุณ พี่เกียรติศักดิ์ กอบกาญจนานกร พี่ทศพล สถิต สุวงศ์กุล และพี่อลงกรณ์ พิมพ์พิณ พี่วี รินทร์ หวังจิรนิรันดร์ พี่พงพงศ์พฤทธิ อุปลัมภ์นรากร พี่สุทธิโชค นันทสุขเกษม และ พี่สุเมธ ไตร ภพสกุล ที่ให้คำปรึกษาในทุกๆด้าน ชมพิชาน์ คูหิรัญ ที่ได้ฝ่าฟันอุปสรรคตลอดการทำงานมาด้วย กัน รวมทั้ง พี่ปรมะ พรหมสุทธิรักษ์ สิทธิพงษ์ สถาพรนานนท์ และ สุพจน์ เทพพิพัฒน์ ที่ให้ความ ช่วยเหลือต่อผู้วิจัยเป็นอย่างดีเสมอมา พี่พรชัย เสาวรัตน์ และพี่โกวิท โกพล ที่ให้ความช่วยเหลือใน การทำชุดทดลอง อีกทั้งขอขอบพระคุณบุคลากรทุกคน ซึ่งไม่สามารถยกมากล่าวได้หมดในที่นี้ ที่ ได้ช่วยเหลืองานในด้านต่างๆ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ นางสาว วุฒยา วงษ์สวรรค์ ที่ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการทำงานและไม่ท้อ ถอยต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้น

และในท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ของผู้วิจัยที่ได้ให้การสนับสนุนในด้าน ต่างๆต่อผู้วิจัยเป็นอย่างดีตลอดช่วงการทำวิจัย ทำให้ผู้วิจัยมีทั้งร่างกายและแรงใจในการทำงาน และไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้น

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 งานวิจัยที่ผ่านมา	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	12
1.4 แนวทางการทำวิจัย	12
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์	16
บทที่ 2 ชุดทดลองและการทดลอง	17
2.1 ชุดทดลอง	17
2.2 พิกัดอ้างอิงที่ใช้การทดลอง	20
2.3 สภาวะของการทดลอง	21
2.4 วิธีการทดลองและอุปกรณ์การวัด	23
บทที่ 3 ผลการทดลอง	29
3.1 ผลการวัดสภาวะเริ่มต้น	29
3.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะหน้าตัด	33
3.3 ผลการศึกษาคุณลักษณะโดยรวม	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 อภิปรายผลการทดลอง.....	67
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	75
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	77
ประมวลตาราง.....	80
ประมวลรูปภาพ.....	97
รายการอ้างอิง.....	185
ภาคผนวก.....	188
ภาคผนวก ก.....	189
ภาคผนวก ข.....	199
ภาคผนวก ค.....	204
ภาคผนวก ง.....	206
ภาคผนวก จ.....	214
ภาคผนวก ฉ.....	222
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	233

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	ค่าคงที่ A และ m สำหรับ Trajectory ตามความสัมพันธ์ $y/ad = A(x/ad)^m$ (Pratte and Baines, 1967).....	81
ตารางที่ 1.2	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะเจ็ดในกระแสมขวาง (JICF).....	82
ตารางที่ 1.3	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะเจ็ดในกระแสมขวางที่กระแสมขวางมีพื้นที่จำกัด (JICCF).....	85
ตารางที่ 1.4	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะการไหลแบบหมุนควงในท่อ (SPF).....	89
ตารางที่ 1.5	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคุณลักษณะเจ็ดในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควงโดยเจ็ดและของไหลมีทิศทางเดียวกัน (JICSCF).....	92
ตารางที่ 1.6	การศึกษาคุณลักษณะเจ็ดในท่อที่มีการไหลแบบหมุนควงโดยเจ็ดและของไหลมีทิศทางตั้งฉากกัน (JISPF).....	94
ตารางที่ 2.1	รายละเอียดพารามิเตอร์ในการทดลองและความคลาดเคลื่อนในแต่ละกรณี.....	95
ตารางที่ 3.1	ระยะทางตาม Downstream ที่ใช้เพื่อให้การกระจายตัวของอนุภูมิมี่ความสม่ำเสมอสำหรับกรณีต่างๆ.....	96

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	ลักษณะของ Circular Turbulent Jet (Rajaratnam, 1976).....	98
รูปที่ 1.2	ลักษณะของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Rajaratnam, 1976).....	98
รูปที่ 1.3	โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Fric and Roshko, 1994).....	99
รูปที่ 1.4	ลักษณะของ Wake vortices (Kelso et al., 1996).....	100
รูปที่ 1.5	เส้นทาง (Trajectory) ของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Pratte and Baines, 1967).....	101
รูปที่ 1.6	Centerline Trajectory ตามแนวแกนเจ็ตของเจ็ตในกระแสลมขวาง (Pratte and Baines, 1967).....	101
รูปที่ 1.7	เส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิในกรณี $T_j - T_o = 0$, $T_j - T_o = 75$ F และ $T_j - T_o = 320$ F (Kamotani and Greber, 1972).....	102
รูปที่ 1.8	Centerline trajectory (Smith and Mungal, 1998).....	102
รูปที่ 1.9	พิกัดอ้างอิง Cartesian.....	103
รูปที่ 1.10	การลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกนเจ็ต (ξ) บนระนาบสมมาตร (Kamotani and Graber, 1972).....	103
รูปที่ 1.11	การลดลงของอุณหภูมิตามแนว Downstream (x) บนระนาบสมมาตร (Sherif and Pletcher, 1989).....	104
รูปที่ 1.12	การลดลงของ Concentration ตามแนวแกนเจ็ต (s) (Smith and Mungal, 1998).....	105
รูปที่ 1.13	ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์เส้นทางของเจ็ตใน Channel flow ($L/d_{j0} = 3.05$) (Stoy and Ben-Haim, 1973).....	106
รูปที่ 1.14	ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ จุดตัด (Impingement length) ของเจ็ต ใน Channel flow ($L/d_{j0} = 3.05$) (Stoy and Ben-Haim, 1973).....	106
รูปที่ 2.1	รูป Schematic ของชุดทดสอบการไหล.....	107
รูปที่ 2.2	พัดลมหอยโข่ง (Centrifugal Blower) ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ที่ใช้ในชุด ทดสอบการไหล.....	107
รูปที่ 2.3	ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber).....	108
รูปที่ 2.4	ห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber) และท่อหมุน (Rotating pipe).....	108
รูปที่ 2.5	วงจรที่ใช้ควบคุมความเร็วของท่อหมุน.....	109
รูปที่ 2.6	รายละเอียดชุดท่อหมุน (Rotating pipe).....	110
รูปที่ 2.7	หน้าตัดทดสอบ (Test section) และ Orifice.....	111

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.8	รูปการประกอบ Test section กับชุดท่อหมุน..... 111
รูปที่ 2.9	รูป Schematic แสดงส่วนประกอบของชุดเจ็ด..... 112
รูปที่ 2.10	ชุดเจ็ดทั้งสามส่วนคือส่วนพัดลมและ Orifice ส่วน Heating chamber และ ส่วนข้อลดท่อเจ็ด (Variable duct)..... 112
รูปที่ 2.11	ส่วนพัดลม (Blower) และ Orifice ของชุดเจ็ด..... 113
รูปที่ 2.12	ส่วน Heating chamber ของชุดเจ็ด..... 114
รูปที่ 2.13	หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Variac ที่ใช้สำหรับ Heater..... 115
รูปที่ 2.14	ภาพถ่ายแสดงการประกอบกันระหว่างท่อเจ็ดและหน้าตัดทดสอบ..... 115
รูปที่ 2.15	พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง..... 116
รูปที่ 2.16	การวัดสถานะเริ่มต้นของกระแสลมขวางในกรณีที่ไม่มีการไหลแบบ หมุนควง..... 117
รูปที่ 2.17	รูป Pitot probe ที่ใช้ในการวัดความเร็ว..... 117
รูปที่ 2.18	อุปกรณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการวัดความเร็ว..... 118
รูปที่ 2.19	การวัดสถานะเริ่มต้นของกระแสลมขวางในกรณีที่มีการไหลแบบหมุนควง..... 119
รูปที่ 2.20	รูป Yaw probe ที่ใช้ในการวัดความเร็ว..... 120
รูปที่ 2.21	รูป Schematic ของ Thermocouple probe ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ..... 121
รูปที่ 2.22	รูปถ่ายของ Thermocouple probe ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ..... 122
รูปที่ 2.23	ตัวอ่านค่าอุณหภูมิ (Thermometer thermocouple) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 52-2 และใช้งานร่วมกับ Thermocouple probe..... 123
รูปที่ 2.24	ผลการสอบเทียบ Thermocouple probe เทียบกับ Thermometer..... 123
รูปที่ 2.25	การวัดสถานะเริ่มต้นที่ปากเจ็ด..... 124
รูปที่ 2.26	รูป Inclined manometer..... 124
รูปที่ 2.27	ลักษณะการวัดการกระจายตัวเป็นหน้าตัด..... 125
รูปที่ 2.28	ตำแหน่งวัดในแต่ละหน้าตัด..... 125
รูปที่ 2.29	ที่จับ Thermocouple probe..... 126
รูปที่ 3.1	รูปร่างความเร็วในแนวแกนของกระแสลมขวางที่ตำแหน่ง $0.25D$ ก่อน ถึงเจ็ด..... 127

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.2	รูปร่างความเร็วในแนวสัมผัสของกระแสมขวางที่ตำแหน่ง $0.25D$ ก่อนถึงเจ็ต..... 128
รูปที่ 3.3	รูปร่างอุณหภูมิจากกระแสมขวางที่ตำแหน่ง $0.25D$ ก่อนถึงเจ็ต..... 128
รูปที่ 3.4	การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วกับการกระจายตัวของอุณหภูมิ 129
รูปที่ 3.5	รูปร่างความเร็วในแนวแกนของเจ็ตอากาศที่ตำแหน่งทางออกเจ็ต..... 130
รูปที่ 3.6	รูปร่างอุณหภูมิในแนวแกนของเจ็ตอากาศที่ตำแหน่งทางออกเจ็ต..... 131
รูปที่ 3.7	ปริมาตรควบคุมในการวิเคราะห์คุณลักษณะการผสมของที่แสดงโดย C_{TG} ... 131
รูปที่ 3.8	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S0rd00$ 132
รูปที่ 3.9	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S0rd05$ 135
รูปที่ 3.10	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S0rd10$ 138
รูปที่ 3.11	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S18rd00$ 141
รูปที่ 3.12	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S18rd05$ 144
รูปที่ 3.13	การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะ (C_{TL}) ในแต่ละหน้าตัดตาม Downstream (x) สำหรับกรณี $S18rd10$ 147
รูปที่ 3.14	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกัน ณ ตำแหน่งหลังเจ็ต $x/r_{effd} = 0.25$ ในแต่ละกรณีการไหลสำหรับกรณีที่กระแสมขวางไม่มีการไหลแบบหมุนควง..... 150

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.15	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกัน ณ ตำแหน่งหลังเจ็ต $x/r_{eff}d = 0.25$ ในแต่ละกรณีการไหลสำหรับกรณีที่ กระแสลมขวางมีการไหลแบบหมุนควง.....	151
รูปที่ 3.16	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันใน แต่ละกรณีที่ $x/r_{eff}d = 0.25$	152
รูปที่ 3.17	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันใน แต่ละกรณีที่ $x/r_{eff}d = 1.50$	153
รูปที่ 3.18	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันใน แต่ละกรณีที่ $x/r_{eff}d = 2.00$	154
รูปที่ 3.19	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันใน แต่ละกรณีที่ $x/r_{eff}d = 2.50$	155
รูปที่ 3.20	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันใน แต่ละกรณีที่ $x/r_{eff}d = 3.00$	156
รูปที่ 3.21	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันใน แต่ละกรณีที่ $x/D = 2.52$	157
รูปที่ 3.22	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันใน แต่ละกรณีที่ $x/D = 3.36$	158
รูปที่ 3.23	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันใน แต่ละกรณีที่ $x/S = 0.50$	159
รูปที่ 3.24	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันใน แต่ละกรณีที่ $x/S = 1.50$	160
รูปที่ 3.25	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TG}) เปรียบเทียบกันใน แต่ละกรณีที่ $x/S = 3.00$	161
รูปที่ 3.26	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิรวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกัน ณ ตำแหน่งหลังเจ็ต $x/r_{eff}d = 0.25$ ในแต่ละกรณีการไหลสำหรับกรณีที่ กระแสลมขวางไม่มีการไหลแบบหมุนควง.....	162

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.27	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกัน ณ ตำแหน่งหลังเจ็ต $x/r_{eff}d = 0.25$ ในแต่ละกรณีการไหลสำหรับการไหลแบบหมุนควงที่กระแสมวงมีการไหลแบบหมุนควง.....	163
รูปที่ 3.28	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/r_{eff}d = 0.25$	164
รูปที่ 3.29	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/r_{eff}d = 1.50$	165
รูปที่ 3.30	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/r_{eff}d = 2.00$	166
รูปที่ 3.31	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/r_{eff}d = 2.50$	167
รูปที่ 3.32	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/r_{eff}d = 3.00$	168
รูปที่ 3.33	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/D = 2.52$	169
รูปที่ 3.34	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/D = 3.36$	170
รูปที่ 3.35	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/S = 0.50$	171
รูปที่ 3.36	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/S = 1.50$	172
รูปที่ 3.37	การกระจายของสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (C_{TL}) เปรียบเทียบกันในแต่ละกรณีที่ $x/S = 3.00$	173
รูปที่ 3.38	Maximum Decay – Minimum Increase ตามแนว Downstream (x) ในแต่ละกรณี.....	174
รูปที่ 3.39	การกระจายตัวเฉลี่ยแบบพื้นที่ตามแนว Downstream (x) ในแต่ละกรณี.....	175
รูปที่ 3.40	แสดงลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด สำหรับกรณีที่กระแสมวงไม่มีการไหลแบบหมุนควง ในแต่ละหน้าตัด rd -scale.....	176

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.41	แสดงลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคนิวตรอนสูงสุด-ต่ำสุด สำหรับกรณี ที่กระแสลมขวางมีการไหลแบบหมุนควง ในแต่ละหน้าตัด <i>rd-scale</i> 177
รูปที่ 3.42	แสดงลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคนิวตรอนสูงสุดในแต่ละหน้าตัด <i>rd-scale</i> ในแต่ละกรณี 178
รูปที่ 3.43	แสดงลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคนิวตรอนต่ำสุดในแต่ละหน้าตัด <i>rd-scale</i> ในแต่ละกรณี 179
รูปที่ 3.44	รูปร่างความเร็วในแนวแกนของเจ็ทอากาศที่ตำแหน่งทางออกเจ็ท 180
รูปที่ 4.1	การตั้งศูนย์ของเจ็ทไม่ตรงศูนย์กลาง กรณี <i>S0rd00</i> โดยเจ็ทที่พุ่งขึ้นเอียง ไปด้านขวา (ชนด้านบนที่มุมน้อยกว่า 90 องศา) 181
รูปที่ 4.2	การตั้งศูนย์ของเจ็ทไม่ตรงศูนย์กลางกรณี <i>S0rd05</i> โดยเจ็ทที่พุ่งขึ้นเอียง ไปด้านซ้าย (ชนด้านบนที่มุมมากกว่า 90 องศา) 182
รูปที่ 4.3	การตั้งศูนย์ของเจ็ทไม่ตรงศูนย์กลางกรณี <i>S0rd10</i> โดยเจ็ทที่พุ่งขึ้นเอียง ไปด้านซ้าย (ชนด้านบนที่มุมมากกว่า 90 องศา) 183
รูปที่ 4.4	การเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนในกรณี <i>S0rd05</i> 183
รูปที่ 4.5	การเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลแบบมีเสถียรภาพในกรณี <i>S0rd10</i> 184

รายการสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัดรวมของเจ็ต
C_T	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Coefficient of temperature)
C_{TG}	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวม (Global coefficient of temperature)
$\frac{C_{TG}}{C_{TG}}$	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมিরวมเฉลี่ยแบบพื้นที่
C_{TL}	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเฉพาะหน้าตัด (Local coefficient of temperature)
d	ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ต
D	ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (กระแสมขวาง)
Fr	Densimetric Froude number
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 เอนทาลปีเริ่มต้นของกระแสมขวาง
$\dot{m}, \dot{m}_j, \dot{m}_{cf}$	อัตราการไหลโดยมวลของเจ็ตอากาศหลังการผสม, อัตราการไหลโดยมวลเริ่มต้นของเจ็ต และอัตราการไหลโดยมวลเริ่มต้นของกระแสมขวาง
K	Calibration function จากการสอบเทียบ Yaw probe
p	ค่าความดันรวมที่ตำแหน่งใดๆ
P_0	ค่าความดันรวมจริงจาก Pitot probe ในการสอบเทียบ Yaw probe
P_1, P_2, P_3	ค่าความดันรวมของเข็มอันที่ 1, 2 และ 3 ของ Yaw probe
ΔP	ค่าความดันจลน์ในการสอบเทียบ Yaw probe
Nu	ค่า Nusselt number
r	อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity Ratio). ในกรณีเจ็ตในกระแสมขวาง
r	ระยะตามแนวรัศมี
r_d	อัตราส่วนความหนาแน่นระหว่างเจ็ตและกระแสมขวาง (Density ratio)
r_{eff}	อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity Ratio)
r_m	อัตราส่วนโมเมนตัมระหว่างเจ็ตและกระแสมขวาง (Momentum ratio)
r_m	อัตราส่วนโดยมวลระหว่างกระแสมขวางและเจ็ต (Mass flow ratio)

r_u	อัตราส่วนความเร็วระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวางตามแนวแกน (Velocity ratio)
r_p	อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างเจ็ตและกระแสลมขวาง (Diameter ratio)
R	รัศมีของท่อเจ็ต
Re_{cf}	เรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ (Reynolds Number) เทียบกับความเร็วในแนวแกนของ กระแสลมขวาง
Re_j	เรย์โนลด์สจำนวนเบอร์ (Reynolds Number) เทียบกับความเร็วในแนวแกนของเจ็ต
s	Contraction ตามแนวแกนเจ็ต
S	ระยะห่างระหว่างเจ็ตตัวแรกและเจ็ตตัวที่สอง
Sn	สเวิร์ลนัมเบอร์ (Swirl number)
Sr	อัตราส่วนสเวิร์ล (Swirl ratio)
T	อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใดๆ
T_a	อุณหภูมิบรรยากาศ (Air temperature)
T_{cf}	อุณหภูมิของกระแสลมขวาง
$T_{cf,c}$	อุณหภูมิของกระแสลมขวางที่ตำแหน่งกึ่งกลาง
$\overline{T_{cf}}$	อุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged temperature) ของกระแสลมขวาง
T_j	อุณหภูมิของเจ็ตอากาศที่ปากเจ็ต
$T_{j,c}$	อุณหภูมิของเจ็ตอากาศที่ปากเจ็ตที่ตำแหน่งกึ่งกลาง
$\overline{T_j}$	อุณหภูมิเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged temperature) ที่ปากเจ็ต
T_{max}	อุณหภูมิสูงสุดตามแนวที่ทำกรวัด
u	ความเร็วในแนวแกน ณ ตำแหน่งใดๆ
u_{cf}	ขนาดความเร็วของกระแสลมขวาง
$u_{cf,c}$	ขนาดความเร็วของกระแสลมขวางที่ตำแหน่งกึ่งกลาง
$\overline{u_{cf}}$	ความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged velocity) ของกระแสลมขวาง
u_j	ขนาดความเร็วตามแนวแกนของเจ็ต
$u_{j,c}$	ขนาดความเร็วตามแนวแกนของเจ็ตตำแหน่งกึ่งกลาง
$\overline{u_j}$	ความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged velocity) ตามแนวแกนที่ปากเจ็ต
u_{max}	ความเร็วตามแนวแกนสูงสุดตามแนวที่ทำกรวัด
w	ความเร็วตามแนวสัมผัสของกระแสลมขวางที่ตำแหน่งใดๆ
w_R	ความเร็วตามแนวสัมผัสของกระแสลมขวางที่ขอบท่อ
x, y, z	ระยะตามแนว Downstream, Transverse และ Spanwise ตามพิกัดอ้างอิงหลัก

x', y', z' ระยะตามแนว Downstream, Transverse และ Spanwise ตามพิกัดอ้างอิงกับ
ท่อเจ็ต



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อักษรกรีก

α	มุมเอียงของเข็มของ Yaw probe
ρ_α	ค่าความหนาแน่นของ Freestream
ρ_j	ค่าความหนาแน่นของเจ็ต
ρ_{cf}	ค่าความหนาแน่นของกระแสลมขวาง
ξ, η, ζ	ระยะตามแนว Downstream, Transverse และ Spanwise ตามพิกัดธรรมชาติของเจ็ต
$\eta_{0.5}, \zeta_{0.5}$	ครึ่งหนึ่งของความกว้างตามแนว Transverse และ Spanwise ที่มีอุณหภูมิเป็นครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิมากที่สุดบนแนว Transverse และ Spanwise ตามพิกัดธรรมชาติของเจ็ต
θ	มุมของท่อเทียบกับแกน y
ω	ความเร็วเชิงมุมของท่อเจ็ต

อักษรย่อ

V/STOL	Vertical Short Take Off and Landing
JICF	Jet In Crossflow
JICCF	Jet In Confined Crossflow
SPF	Swirling Pipe Flow
JISPF	Jet In Swirling Pipe Flow
CVP	Counter Rotating Vortex Pair
RQL	Rich-burn/Quick-mix/Lean-burn

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย