

เจ็ดปฐมภูมิที่มีเจ็ดทุติยภูมิจัดแบบพัลส์ตามแนวเส้นรอบวง



นาย สุพจน์ เทพพิพัฒน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5855-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PRIMARY JET WITH CIRCUMFERENTIAL SECONDARY PULSED JETS



Mr. Supot Teppipat

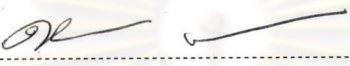
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2003  
ISBN 974-17-5855-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์      เจ็ดปฐมภูมิที่มีเจ็ดทศกัณฐ์มีจิตแบบพัลส์ตามแนวเส้นรอบวง  
โดย                              นาย สุพจน์ เทพพิพัฒน์  
สาขาวิชา                      วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ ดร.อศิ บุญจิตราคุลย์

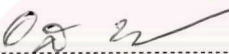
---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
.....  
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

  
.....  
กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เฉชะอำไพ)

ศูนย์พัฒนาระบบบริหาร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

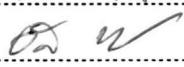
สุพจน์ เทพพิพัฒน์: เจ็ตปฐมภูมิที่มีเจ็ตทุติยภูมิจัดแบบพัลส์ตามแนวเส้นรอบวง  
(PRIMARY JET WITH CIRCUMFERENTIAL SECONDARY PULSED  
JETS)

อ.ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราคุลย์; 175 หน้า ISBN 974-17-5855-3

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะการผสมของเจ็ตปฐมภูมิที่มีการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบคงตัว และแบบพัลส์เข้าผสมตามแนวเส้นรอบวง โดยศึกษาผลของความถี่ (1 Hz และ 5 Hz) และ Duty cycle (25, 50, 75 และ 100 %) ในการฉีดเจ็ตทุติยภูมิที่มีต่อคุณลักษณะของการผสม ในการทดลองได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ อัตราส่วนอัตราการไหลโดยมวล ( $r_m$ ) คงที่เท่ากับ 5.4 อัตราส่วนการผสมโดยมวล (SR) คงที่เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนความหนาแน่น ( $r_\rho$ ) คงที่เท่ากับ 1.0 และค่าเรย์โนลด์สเบอร์เจ็ตรวมสุทธิ ( $Re_{Jf}$ ) คงที่เท่ากับ 6,800 การแสดงคุณลักษณะการผสมใช้วิธีการทำปฏิกิริยาเคมีของสาร (Active Scalar) โดยในการทดลองนี้อาศัยการทำปฏิกิริยาของสารละลายกรด-เบส และมีตัวบ่งชี้การเกิดปฏิกิริยา สารละลายกรดที่ใช้คือสารละลายกรดไนตริก สารละลายเบสคือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้การเกิดปฏิกิริยาคือสารละลายฟีนอล์ฟทาลิน และศึกษาผลการทดลองจากรูปภาพเฉลี่ยและรูปภาพเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ในการศึกษาการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบคงตัว (SSJ) จากรูปภาพเฉลี่ยและรูปภาพเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าการฉีดเจ็ตทุติยภูมิมีผลทำให้เจ็ตแยกออกเป็นสองส่วนและมีระยะการผสม (Flame length) ที่สั้นกว่ากรณีอื่นๆ ซึ่งเป็นแนวทางที่ดีในการนำลักษณะการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบคงตัวมาประยุกต์ใช้กับการผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ โดยการนำเชื้อเพลิงส่วนหนึ่งมาใช้เป็นเจ็ตทุติยภูมิที่มีการฉีดแบบคงตัวจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม

สำหรับการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์ (SJxHxD) พบว่าการผสมมีประสิทธิภาพดีขึ้น เมื่อ 1) การฉีดเจ็ตทุติยภูมิที่ค่าความถี่ต่ำ (1 Hz) ด้วยค่า Duty cycle สูง (75 %) และ 2) การฉีดเจ็ตทุติยภูมิที่ค่าความถี่สูง (5 Hz) ด้วยค่า Duty cycle ต่ำ (25 %) ดังจะเห็นได้จากระยะเวลาการผสมที่หดสั้นลง

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล .....ลายมือชื่อนิสิต ..... สุพจน์ เทพพิพัฒน์ .....  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล .....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  .....  
ปีการศึกษา ..... 2546 .....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## 4370573121: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD: CIRCUMFERENTIAL PULSED JETS/JET MIXING/ACTIVE  
SCALAR/ACID-BASE REACTION/IMAGE PROCESSING

SUPOT TEPPIPAT: PRIMARY JET WITH CIRCUMFERENTIAL  
SECONDARY PULSED JETS

THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. ASI BUNYAJITRADULYA, Ph.D.,  
175 pp. ISBN 974-17-5855-3.

Experiments for the investigation of mixing characteristics of primary jet with circumferential secondary steady jets and pulsed jets. The effects of frequency (1 and 5 Hz) and duty cycle (25, 50, 75 and 100 %) of secondary jets are investigated. The experiments are conducted with fixed mass flow ratio ( $r$ ) at 5.4, stoichiometric ratio ( $SR$ ) at 1.0, density ratio ( $r_\rho$ ) at 1.0, and the effective Reynolds number of jet ( $Re_{j_e}$ ) at 6,800. Flow visualization by active scalar technique that is to acid-base reaction with  $pH$  indicator is employed; the acid used is nitric acid; the base, sodium hydroxide; and the  $pH$  indicator, phenolphthalein. The visualization results in the means and standard deviation of quantitative of active scalar images.

For steady secondary jet injection (SSJ), the mean and standard deviation images show that primary jet separated into two parts with the shortest flame length. As a result this can enhance mixing efficiency of air-fuel combustion by injected some part of fuel as the steady secondary jet into the main part of fuel injection.

For secondary pulsed jet injection (SJxHxD), the mixing efficiency is enhanced by 1) Injected the low frequency (1 Hz) secondary jets with high duty cycle (75 %) and 2) Injected the high frequency (5 Hz) secondary jets with low duty cycle (25 %), consequently the flame length is shorter.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department..... Mechanical ..... Student's signature..... Supot Teppipat  
Field of study..... Mechanical ..... Advisor's signature.....  
Academic year..... 2003 ..... Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

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

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ศักดิ์ มลิตา และศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ ที่ได้เอื้อเฟื้อและแนะนำสิ่งต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ในเนื้อหามากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และจากกองทุนบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ณ เวลาที่ศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์ของไหล ผู้วิจัยได้รับ กำลังใจ และความเอื้ออาทรจาก พี่ เพื่อน และน้อง ที่ห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณ พี่เกียรติศักดิ์ กอบกาญจนานกร พี่ศพล สถิต สุวงศ์กุล และพี่อลงกรณ์ พิมพ์พิน พี่วินทร์ หวังจิรนิรันดร์ พี่พงศ์พฤทธิ์ อุปถัมภ์รากร พี่สุทธิโชค นันทสุขเกษม พี่สุเมธ ไตรภพสกุล พี่ปิติพงศ์ เย็นจิตต์ พี่ชมพิจาน์ คูหิรัญ และพี่ธีรวิลา ยิ่งเจริญที่ให้คำปรึกษาในทุกๆด้าน พี่สิทธิพงศ์ สถาพรนานนท์ ที่ได้ฝ่าฟันอุปสรรคตลอดการทำงานมาด้วยกัน อีกทั้งขอขอบพระคุณบุคลากรทุกคน ซึ่งไม่สามารถยกมากล่าวได้หมดในที่นี้ ที่ได้ช่วยเหลืองานในด้านต่างๆ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ ลุล่วงได้เป็นอย่างดี

และในท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ของผู้วิจัยที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ ต่อผู้วิจัยเป็นอย่างดีตลอดช่วงการทำวิจัย ทำให้ผู้วิจัยมีทั้งแรงกายและแรงใจในการทำงาน และไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ณ
สารบัญรูปภาพ .....	ญ
รายการสัญลักษณ์ .....	ต
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา .....	4
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	13
1.4 แนวทางการทำวิจัย .....	14
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ .....	16
บทที่ 2 ชุดทดลองและการทดลอง .....	17
2.1 ชุดทดลอง .....	17
2.2 พิกัดอ้างอิงที่ใช้การทดลอง .....	20
2.3 สภาพะของการทดลอง .....	20
2.4 การวัดสถานะเริ่มต้น .....	22
2.5 วิธีการทดลองและอุปกรณ์การวัด .....	24
2.6 การให้แสง .....	27
2.7 การวิเคราะห์สัญญาณจากภาพ .....	28
2.8 การทำกระบวนการทางภาพ .....	29
2.9 การสอบเทียบโปรแกรม .....	31
บทที่ 3 ผลการทดลอง .....	32
3.1 ผลการทดลองแสดงรูปภาพเจ็ด .....	32
3.2 ผลการทดลองแสดงลำดับของรูปเจ็ด .....	36
3.3 ผลการศึกษาคุณลักษณะตามแนวการไหลของเจ็ด .....	37



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 อภิปรายผลการทดลอง.....	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	49
ประมวลตาราง.....	52
ประมวลรูปภาพ.....	63
รายการอ้างอิง.....	126
ภาคผนวก.....	129
ภาคผนวก ก.....	130
ภาคผนวก ข.....	144
ภาคผนวก ค.....	147
ภาคผนวก ง.....	150
ภาคผนวก จ.....	153
ภาคผนวก ฉ.....	165
ภาคผนวก ช.....	167
ภาคผนวก ซ.....	173
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	175

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	ค่าคงที่ $A$ และ $m$ สำหรับ Trajectory ตามความสัมพันธ์ $y/\alpha d = A(x/\alpha d)^m$ (Pratte and Baines, 1967).....	53
ตารางที่ 1.2	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคูณลักษณะเจ็ดในกระแสมขวาง (JICF).....	54
ตารางที่ 1.3	สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา: การศึกษาคูณลักษณะพัลส์เจ็ดในกระแสมขวาง (PJICF).....	58
ตารางที่ 2.1	รายละเอียดพารามิเตอร์ในการทดลองและความคลาดเคลื่อนในแต่ละกรณี.....	61
ตารางที่ 2.2	จำนวนภาพเจ็ดและภาพฉากหลัง (Background) ที่ใช้ในการหาภาพเฉลี่ย.....	62



คุรุวิทยุทยทรุพยากร  
จุฬาลงกรณมหาวุทยาลัย

## สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	ลักษณะของการแบ่งบริเวณเจ็ต (Beer and Chigier, 1972).....	64
รูปที่ 1.2	ลักษณะของ Circular Turbulent Jet (Rajaratnam, 1976).....	64
รูปที่ 1.3	เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนความหนาแน่นของเจ็ต Russ and Strykowski (1993).....	65
รูปที่ 1.4	เปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะที่ปากทางออกเจ็ต Russ and Strykowski (1993).....	65
รูปที่ 1.5	เปรียบเทียบค่าอัตราการ Entrainment ของเจ็ตที่สภาวะการทดลองต่าง Russ and Strykowski (1993).....	66
รูปที่ 1.6	ลักษณะของเจ็ตในกระแสมขวาง (Rajaratnam, 1976).....	67
รูปที่ 1.7	โครงสร้างของ Vortical structure ของเจ็ตในกระแสมขวาง (Fric and Roshko, 1994).....	67
รูปที่ 1.8	ลักษณะของ Wake vortices (Kelso et al., 1996).....	68
รูปที่ 1.9	เส้นทาง (Trajectory) ของเจ็ตในกระแสมขวาง (Pratte and Baines, 1967).....	69
รูปที่ 1.10	Centerline Trajectory ตามแนวแกนเจ็ตของเจ็ตในกระแสมขวาง (Pratte and Baines, 1967).....	69
รูปที่ 1.11	เส้นทางของความเร็วและอุณหภูมิในกรณี $T_j - T_o = 0$ , $T_j - T_o = 75$ F และ $T_j - T_o = 320$ F (Kamotani and Greber, 1972).....	70
รูปที่ 1.12	Centerline trajectory (Smith and Mungal, 1998).....	70
รูปที่ 1.13	พิกัดอ้างอิง Cartesian.....	71
รูปที่ 1.14	การลดลงของอุณหภูมิตามแนวแกนเจ็ต ( $\zeta$ ) บนระนาบสมมาตร (Kamotani and Greber, 1972).....	71
รูปที่ 1.15	การลดลงของอุณหภูมิตามแนว Downstream ( $x$ ) บนระนาบสมมาตร (Sherif and Pletcher, 1989).....	72
รูปที่ 1.16	การลดลงของ Concentration ตามแนวแกนเจ็ต ( $s$ ) (Smith and Mungal, 1998).....	73
รูปที่ 1.17	ผลของค่าความถี่, Duty Cycle และระยะเวลาฉีดเจ็ตต่อระยะ Penetration Depth ของ PJICF (Hermanson et al.,(1998).....	74
รูปที่ 1.18	ภาพ Flow Visualization เปรียบเทียบคุณลักษณะของ JICF และ PJICF กรณีที่มีระยะเวลาฉีดเจ็ตยาวและระยะเวลาฉีดเจ็ตสั้น.....	75
รูปที่ 1.19	ผลของค่า Duty Cycle และระยะเวลาฉีดเจ็ตต่อระยะ Penetration Depth ของ PJICF (Johari et al.,(1998).....	76

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 1.20	ผลของค่าความถี่ และ Duty Cycle ต่อระยะ Penetration Depth ของ PJICF (Johari et al.,(1998).....	77
รูปที่ 1.21	ภาพ Flow Visualization เปรียบเทียบคุณลักษณะของ JICF และ PJICF แสดงผลของความถี่ ที่ค่า Velocity Ratio ต่ำ .....	77
รูปที่ 1.22	ภาพ Flow Visualization เปรียบเทียบคุณลักษณะของ JICF และ PJICF แสดงผลของความถี่ ที่ค่า Velocity Ratio สูง .....	78
รูปที่ 2.1	รูป Schematic ของชุดอุโมงค์น้ำ.....	79
รูปที่ 2.2	เครื่องสูบน้ำแบบ Submersible Water Pump ขนาด 130 วัตต์ ที่ใช้ในชุดอุโมงค์น้ำ.....	79
รูปที่ 2.3	ท่ออะคลิลิกจ่ายน้ำเข้าสู่อุโมงค์น้ำ.....	78
รูปที่ 2.4	ฟองน้ำหุ้มท่ออะคลิลิก.....	80
รูปที่ 2.5	ส่วนแรกของอุโมงค์น้ำและห้องจัดปรับการไหล (Settling chamber).....	81
รูปที่ 2.6	หน้าตัดทดสอบ (Test section)และท่อเจ็ต.....	81
รูปที่ 2.7	ส่วนควบคุมระดับน้ำล้นให้คงที่ด้วยช่อง Overflow.....	82
รูปที่ 2.8	รูป Schematic ของเจ็ตปฐมภูมิ.....	82
รูปที่ 2.9	เครื่องสูบน้ำแบบ Submersible Water Pump ขนาด 150 วัตต์ ที่ใช้ในชุดเจ็ตปฐมภูมิ.....	83
รูปที่ 2.10	ถังจ่ายน้ำของระบบเจ็ตปฐมภูมิแบบ Constant Head.....	83
รูปที่ 2.11	ท่อเจ็ตปฐมภูมิ.....	84
รูปที่ 2.12	รูป Schematic ของเจ็ตทุติยภูมิ.....	84
รูปที่ 2.13	เครื่องสูบน้ำแบบ Submersible Water Pump ขนาด 125 วัตต์ ที่ใช้ในชุดเจ็ตทุติยภูมิ.....	85
รูปที่ 2.14	ห้องขยายหน้าตัดการไหล (Expansion Chamber).....	85
รูปที่ 2.15	ชุดวาล์วควบคุมการไหลของเจ็ตทุติยภูมิ.....	86
รูปที่ 2.16	ชุดวงจรควบคุมการเปิด-ปิดโซลินอยด์วาล์ว.....	86
รูปที่ 2.17	วงจรของกล่องควบคุมที่ใช้ในการเปิด-ปิดโซลินอยด์วาล์ว.....	87
รูปที่ 2.18	รูป Schematic ของหัวฉีด.....	88
รูปที่ 2.19	พิกัดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง.....	88



## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.20	กราฟไตเตรชัน (Titration Curve) ระหว่างสารละลายกรด $HNO_3$ กับสารละลายเบส $NaOH$ .....	89
รูปที่ 2.21	กล้องดิจิทัลวิดีโอไฮยี่ท้อ Sony รุ่น DCR-TRV320E .....	89
รูปที่ 2.22	ช่วงของความถี่แสงและความยาวคลื่นในการมองเห็นของตาคน .....	90
รูปที่ 2.23	ระบบสีและการรวมกันของสี .....	90
รูปที่ 2.24	หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้ในการให้แสงถ่ายภาพ .....	91
รูปที่ 2.25	การให้แสงฉากหลัง (Background) ในการถ่ายภาพ .....	91
รูปที่ 2.26	ค่าระดับความเข้มแสง (Intensity) ของฉากหลัง (Background) .....	92
รูปที่ 2.27	เปรียบเทียบสัญญาณของภาพเจ็ดและสัญญาณของภาพฉากรับแสง .....	93
รูปที่ 3.1	รูปภาพของเจ็ดกรณี SJ0 .....	94
รูปที่ 3.2	รูปภาพของเจ็ดกรณี SSJ .....	94
รูปที่ 3.3	รูปภาพของเจ็ดกรณี SJ0, SJ1H25D, SJ1H50D, SJ1H75D .....	95
รูปที่ 3.4	รูปภาพของเจ็ดกรณี SJ0, SJ5H25D, SJ5H50D, SJ5H75D .....	96
รูปที่ 3.5	รูปภาพของเจ็ดกรณี SJ0, SJ1H25D, SJ5H25D .....	97
รูปที่ 3.6	รูปภาพของเจ็ดกรณี SJ0, SJ1H50D, SJ5H50D .....	98
รูปที่ 3.7	รูปภาพของเจ็ดกรณี SJ0, SJ1H75D, SJ5H75D .....	99
รูปที่ 3.8	ลำดับของรูปภาพของเจ็ดกรณี SJ0 .....	100
รูปที่ 3.9	ลำดับของรูปภาพของเจ็ดกรณี SSJ .....	101
รูปที่ 3.10	ลำดับของรูปภาพของเจ็ดกรณี SJ1H25D .....	102
รูปที่ 3.11	ลำดับของรูปภาพของเจ็ดกรณี SJ1H50D .....	103
รูปที่ 3.12	ลำดับของรูปภาพของเจ็ดกรณี SJ1H75D .....	104
รูปที่ 3.13	ลำดับของรูปภาพของเจ็ดกรณี SJ5H25D .....	105
รูปที่ 3.14	ลำดับของรูปภาพของเจ็ดกรณี SJ5H50D .....	106
รูปที่ 3.15	ลำดับของรูปภาพของเจ็ดกรณี SJ5H75D .....	107
รูปที่ 3.16	รูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ดตามแนวการไหล .....	108
รูปที่ 3.17	รูปร่างความไม่คงที่ของการดูดซับแสงของเจ็ดตามแนวการไหล .....	109
รูปที่ 3.18	เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H25D, SJ1H50D และ SJ1H75D .....	110



## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.19	เปรียบเทียบรูปร่างความไม่คงที่ของการดูดซับแสงของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H25D, SJ1H50D และ SJ1H75D.....	111
รูปที่ 3.20	เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ5H25D, SJ5H50 และ SJ5H75D.....	112
รูปที่ 3.21	เปรียบเทียบรูปร่างความไม่คงที่ของการดูดซับแสงของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ5H25D, SJ5H50D และ SJ5H75D.....	113
รูปที่ 3.22	เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H25D, SJ5H25D.....	114
รูปที่ 3.23	เปรียบเทียบรูปร่างความไม่คงที่ของการดูดซับแสงของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H25D และ SJ5H25D.....	115
รูปที่ 3.24	เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H50D, SJ5H50D.....	116
รูปที่ 3.25	เปรียบเทียบรูปร่างความไม่คงที่ของการดูดซับแสงของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H50D และ SJ5H50D.....	117
รูปที่ 3.26	เปรียบเทียบรูปร่างการพัฒนาตัวของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H75D, SJ5H75D.....	118
รูปที่ 3.27	เปรียบเทียบรูปร่างความไม่คงที่ของการดูดซับแสงของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H75D และ SJ5H75D.....	119
รูปที่ 3.28	เปรียบเทียบการลดลงของค่าการดูดซับแสงในแนวแกนของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H25D, SJ1H50D และ SJ1H75D.....	120
รูปที่ 3.29	เปรียบเทียบความไม่คงที่ของการดูดซับแสงในแนวแกนของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H25D, SJ1H50D และ SJ1H75D.....	120
รูปที่ 3.30	เปรียบเทียบการลดลงของค่าการดูดซับแสงในแนวแกนของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ5H25D, SJ5H50D และ SJ5H75D.....	121
รูปที่ 3.31	เปรียบเทียบความไม่คงที่ของการดูดซับแสงในแนวแกนของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ5H25D, SJ5H50D และ SJ5H75D.....	121
รูปที่ 3.32	เปรียบเทียบการลดลงของค่าการดูดซับแสงในแนวแกนของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H25D และ SJ5H25D.....	122
รูปที่ 3.33	เปรียบเทียบความไม่คงที่ของการดูดซับแสงในแนวแกนของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H25D และ SJ5H25D.....	122

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.34	เปรียบเทียบการลดลงของค่าการดูดซับแสงในแนวแกนของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H50D และ SJ5H50D.....123
รูปที่ 3.35	เปรียบเทียบความไม่คงที่ของการดูดซับแสงในแนวแกนของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H50D และ SJ5H50D.....123
รูปที่ 3.36	เปรียบเทียบการลดลงของค่าการดูดซับแสงในแนวแกนของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H75D และ SJ5H75D.....124
รูปที่ 3.37	เปรียบเทียบความไม่คงที่ของการดูดซับแสงในแนวแกนของเจ็ดกรณี SJ0, SSJ, SJ1H75D และ SJ5H75D.....124
รูปที่ 4.1	ลักษณะของการให้แสงในการทดลอง.....125
รูปที่ 4.2	รูปการไหลย้อนกลับของเจ็ดเมื่อแสดงด้วยปริมาณ Passive scalar.....125

  
 ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการสัญลักษณ์

$A_j, A_j$	พื้นที่หน้าตัดของท่อเจ็ตปฐมภูมิและท่อเจ็ตทุติยภูมิ
$(B_{ij})_1, (B_{ij})_2$	ภาพพื้นหลังของฉากรับแสงที่เวลาก่อนถ่ายและหลังถ่ายภาพเจ็ต
$(\bar{B}_{ij})_1, (\bar{B}_{ij})_2$	ภาพเฉลี่ยของภาพพื้นหลังของฉากรับแสงที่เวลาก่อนถ่ายและหลังถ่ายภาพเจ็ต
$C$	ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการทดลองในหน่วยโมลต่อลิตร (Molarity)
$d$	ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ตทุติยภูมิ
$D$	ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางเจ็ตปฐมภูมิ
$f$	ค่าความถี่ของการฉีดเจ็ตทุติยภูมิ
$I$	ค่าระดับความเข้มของแสง (Intensity)
$I_0$	ค่าระดับความเข้มของแสง (Intensity) ของแหล่งกำเนิดแสง
$J_{ij}$	ภาพเจ็ตจากกล้องดิจิทัลวีดีโอ
$\bar{X}_{ij}$	ภาพเฉลี่ยของภาพเจ็ตจากกล้องดิจิทัลวีดีโอ
$\dot{m}_j, \dot{m}_j, \dot{m}_{cf}$	อัตราการไหลโดยมวลของเจ็ตปฐมภูมิ เจ็ตทุติยภูมิและอัตราการไหลโดยมวลของกระแสน้ำตามในอุโมงค์น้ำ
$M$	ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ระบุจากขวดในหน่วยโมลต่อลิตร (Molarity)
$Mw$	มวลโมเลกุลของสาร
$N$	จำนวนภาพที่นำมาหาภาพเฉลี่ย
$n$	จำนวนเจ็ตทุติยภูมิ
$pH$	ค่าแสดงความเป็นกรด-เบสของสาร
$Q_j, Q_j, Q_{cf}$	อัตราการไหลโดยปริมาตรของเจ็ตปฐมภูมิ เจ็ตทุติยภูมิและกระแสน้ำตาม
$r_\rho$	อัตราส่วนความหนาแน่นระหว่างเจ็ตและกระแสน้ำตาม (Density ratio)
$r_{eff}$	อัตราส่วนความเร็วประสิทธิผล (Effective velocity Ratio) ระหว่างเจ็ตทุติยภูมิและเจ็ตปฐมภูมิ
$r_m$	อัตราส่วนการไหลโดยมวลระหว่างกระแสน้ำตามและเจ็ต (Mass flow ratio)
$r_{1j}$	อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างเจ็ตปฐมภูมิและเจ็ตทุติยภูมิ
$Re_{cf}$	เรย์โนลด์สเบอร์ (Reynolds Number) เทียบกับความเร็วในแนวแกนของกระแสน้ำตาม
$Re_j$	เรย์โนลด์สเบอร์ (Reynolds Number) เทียบกับความเร็วในแนวแกนของเจ็ตปฐมภูมิ
$Re_j$	เรย์โนลด์สเบอร์ (Reynolds Number) เทียบกับความเร็วในแนวแกนของ

	เจ็ดตุติภูมิ
$Re_{,j}$	เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number) เทียบกับความเร็วในแนวแกนของเจ็ดรวมสุทธิ
$SR$	อัตราส่วนการผสมโดยมวล (Stoichimetric Ratio) ระหว่างเจ็ดและกระแสน้ำตาม
$St$	ค่า Strouhal Number
$\frac{u_{cf}}{u_{cf}}$	ขนาดความเร็วของกระแสน้ำตาม ความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged velocity) ของกระแสน้ำตาม
$\frac{u_j}{u_j}$	ขนาดความเร็วตามแนวแกนของเจ็ดปฐมภูมิ ความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged velocity) ตามแนวแกนของเจ็ดปฐมภูมิ
$\frac{u_j}{u_j}$	ขนาดความเร็วตามแนวแกนของเจ็ดตุติภูมิ ความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged velocity) ตามแนวแกนของเจ็ดตุติภูมิ
$\overline{U_{,j}}$	ความเร็วเฉลี่ยแบบพื้นที่ (Area-averaged velocity) ตามแนวแกนรวมสุทธิของเจ็ดปฐมภูมิและเจ็ดตุติภูมิ
$W$	ขนาดความกว้างของหน้าตัดทดสอบ (Test Section)
$x, y, z$	ระยะตามแนว Downstream, Transverse และ Spanwise ตามพิกัดอ้างอิงหลัก



## อักษรกรีก

$\varepsilon$	สัมประสิทธิ์การดูดซับแสง
$\alpha$	ค่า Duty cycle ของการฉีดเจ็ตทุติยภูมิแบบพัลส์
$\rho$	ความหนาแน่นของสารละลาย
$\rho_{cf}$	ค่าความหนาแน่นของกระแสน้ำตาม
$\rho_j$	ค่าความหนาแน่นของเจ็ตปฐมภูมิ
$\rho_j$	ค่าความหนาแน่นของเจ็ตทุติยภูมิ
$\sigma_{X_{ij}}$	ภาพเบี่ยงเบนมาตรฐานของเจ็ต

## อักษรย่อ

JICF	Jet In Crossflow
PJICF	Pulsed Jet In Crossflow
CVP	Counter Rotating Vortex Pair
RGB	Red-Green-Blue
CCDs	Charge Coupled Devices
S/N	Signal to Noise Ratio

## สูตรเคมี

$C_{20}H_{14}O_4$	สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน
$C_2H_5OH$	สารละลายเอทานอล
$HNO_3$	สารละลายกรดไนตริก
$H_2O$	น้ำ
$NaNO_3$	สารละลายเกลือ โซเดียมไนเตรท
$NaOH$	สารละลายเบส โซเดียมไฮดรอกไซด์

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย