

การศึกษาเชิงทดลองของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบส่วนผสม
อากาศเชื้อเพลิงบางเพื่อให้สามารถใช้ก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำได้

EXPERIMENTAL STUDY OF RICH-LEAN GAS TURBINE COMBUSTOR FOR LOW
CALORIFIC VALUE GAS FUEL

ภาณุมาศ อรุณเดชาวัฒน์
PANUMAS ARUNDACHAWAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-725-4

การศึกษาเชิงทดลองของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบส่วนผสม
อากาศเชื้อเพลิงหนาบางเพื่อให้สามารถใช้ก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำได้

EXPERIMENTAL STUDY OF RICH-LEAN GAS TURBINE COMBUSTOR FOR LOW
CALORIFIC VALUE GAS FUEL



ภาณุมาศ อรุณเดชาวัฒน์
PANUMAS ARUNDACHAWAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-725-4

.b.....
.i.....

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 48368
วัน, เดือน, ปี 24 ต.ค. 2546

**EXPERIMENTAL STUDY OF RICH-LEAN GAS TURBINE COMBUSTOR FOR
LOW CALORIFIC VALUE GAS FUEL**

PANUMAS ARUNDACHAWAT

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MACHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

ISBN 974-324-725-4

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเชิงทดลองของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบ ส่วนผสมอากาศเชื้อเพลิงหนาบางเพื่อให้สามารถใช้ก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำได้
นักศึกษา	นาย ภาณุมาศ อรุณเดชาวัฒน์
รหัสประจำตัว	41062014
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. จารุวัตร เจริญสุข

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นผลการศึกษาเชิงทดลองของการศึกษาเพื่อการพัฒนาห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ สำหรับเชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำ การศึกษานี้มุ่งเน้นการศึกษาอิทธิพลของการฉีดอากาศและเชื้อเพลิงให้มีการหมุนวนเป็นเกลียวแบบร่วมแกนการไหล(Double Concentric Swirl) ที่สภาวะความดันบรรยากาศ ที่มีต่อการกระจายความเร็วภายในบริเวณปฐมภูมิ(Primary Zone) และขนาดการหมุนวนย้อนกลับตามแนวแกนการไหล(Reverse Recirculation zone) อันเป็นส่วนหนึ่งที่ใช้พิจารณาประสิทธิภาพและเสถียรภาพของการเผาไหม้ของการเผาไหม้แบบที่ไม่มีการผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศก่อนการเผาไหม้(non premixed combustion) ในการศึกษาจะทำการปรับเปลี่ยนค่าความรุนแรงของการหมุนวน(S, Swirl Number)ต่างๆกันแต่ไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ ในการทดลองใช้อากาศแทนเชื้อเพลิงที่ค่า $\phi=1.6$ ได้ผลว่าขนาดการหมุนวนย้อนกลับตามแนวแกนการไหล(Reverse Recirculation zone) มีขนาดใหญ่และยาวที่สุดเมื่อการฉีดอากาศ(m_a)และอากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิง(m_f)แบบหมุนวนสวนทางกันเมื่อค่าความรุนแรงของการหมุนวนของอากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิง S_f และค่าความรุนแรงของการหมุนวนของอากาศ S_a มีค่า 0.61 และ 0.65 ตามลำดับ ซึ่งชี้บ่งได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่า S_f สามารถควบคุมการผสมผสานภายในบริเวณปฐมภูมิของห้องเผาไหม้ได้

Thesis Title	Experimental Study of Rich-Lean Gas Turbine Combustor for Low Calorific Value Gas Fuel
Student	Panumas Arundachawat (Mr.)
Student ID.	41062014
Degree	Master Degree
Programme	Mechanical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Asst. Prof. Jaruwat Jaruensuk

ABSTRACT

This paper presents experimental results to the development of a gas turbine combustor for low calorific value gas fuel. By focusing on how double concentric air-fuel swirl flow influences the velocity profiles and reversed recirculation zone size in primary zone under atmospheric pressure. The results are partly determined combustion efficiency and stability for non-premixed combustion. At the beginning; the velocity distribution in primary zone and reversed recirculation zone size will be studied under various swirl numbers of air and air used as fuel under non-reacting condition at $\phi=1.6$. Shortly conclusion is founded that a biggest and longest reversed recirculation zone size is under counter swirl at swirl number of air used as fuel and air, 0.61 and 0.65, consequently. This is evidence to conclude that mixing in primary zone of gas turbine combustor can be controlled by changing S_v of gas injected.

กิตติกรรมประกาศ

ความดีทั้งหมดขอมอบเพื่อทดแทนพระคุณคุณพ่อเกษม และคุณแม่ประดับ อรุณเดชาวัฒน์ ที่ได้อบรมเลี้ยงดูกระผมจนเติบโตมาในวันนี้ และจะขาดเสียไม่ได้คือครูอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผศ. ดร. จารุวัตร เจริญสุข และขอขอบพระคุณ อ. ดร. ศิริพงษ์ อติพันธ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศยาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่คอยให้คำแนะนำเรื่องเครื่องมือวัดการไหลแบบ 3 มิติ ซึ่งเป็นประโยชน์กับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นอย่างยิ่ง

และขาดเสียมิได้ที่ต้องกล่าวขอบคุณอย่างสูงก็คือ สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติหรือ ส.พ.ช. (ชื่อในขณะนั้น) ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนในการทดลองวิจัยในปีงบประมาณ พ.ศ. 2545 ครั้งที่ 1 เป็นจำนวนเงินทั้งสิ้น 80,000 บาท

ที่สำคัญที่จะต้องขอบคุณอย่างสุดซึ้งก็คือ คุณทริญญา จำหริญญ ผู้เป็นคนที่รู้จักที่ช่วยผมทำเอกสารอย่างสุดความสามารถ

ภาณุมาศ อรุณเดชาวัฒน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา.....	2
1.5 ขอบเขตของการทดสอบ.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	4
2.1 พื้นฐานการออกแบบห้องเผาไหม้.....	4
2.2 การไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว.....	8
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.4 ทฤษฎีการเผาไหม้.....	20
2.5 การเผาไหม้แบบไม่มีการผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้.....	25
บทที่ 3 การสร้างอุปกรณ์การทดลองและการทดลอง.....	28
3.1 สมมติฐานที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.2 สภาพที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.3 สภาพที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.4 การคำนวณปริมาณอากาศและอากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.5 หลักการเลือกและการคำนวณขนาดของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียว.....	31
3.6 ผลการคำนวณอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบปรับค่าได้.....	35

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.7 การวัดความเร็วของก๊าซแบบ 3 มิติ.....	36
3.8 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ.....	41
3.9 การคำนวณหาขนาดของออริฟิสที่ใช้ในการทดลอง.....	45
3.10 ภาพรวมของการทดลอง.....	45
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	47
4.1 ขนาดของ Recirculation Zone.....	47
4.2 การกระจายความเร็ว U ตามแนวรัศมี ณ หน้าตัดต่างๆ.....	53
4.3 การทำนายเสถียรภาพการเผาไหม้จากค่า Richardson Number	61
บทที่ 5 บทสรุป.....	66
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	66
5.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	69
5.3 แนวทางการทำวิจัยในอนาคต.....	69
เอกสารอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก ก ห้องเผาไหม้ต้นแบบ พร้อมกับห้องเผาไหม้ที่เราใช้จริง.....	72
ภาคผนวก ข Movable block ที่ใช้ในการทดลอง พร้อมรูปถ่าย.....	73
ภาคผนวก ค ผลการสอบเทียบโพรบ.....	76
ภาคผนวก ง ผลการสอบเทียบOrifice.....	90
ภาคผนวก จ ภาพรวมของการทดลอง	
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง	
ภาคผนวก ช สมการการกระจายค่า ρ และ U กับค่า r/d	
ประวัติผู้เขียน.....	119

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	บรรยากาศมาตรฐานของอเมริกาปี 1976.....20
2.2	การวิเคราะห์อากาศแห้ง.....21
2.3	ค่าความร้อนของการรวมตัวที่ความดันคงที่ของสสารต่าง ๆ.....22
3.1	องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง.....29
3.2	ขนาดของนื้อซเซิลที่ใช้ในการทดลอง.....29
3.3	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง.....31
3.4	ค่า F_1 และ F_2 เมื่อวัดค่า P_1 และ P_2 แบบต่าง ๆ.....44
4.1	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง.....47
5.1	การลดลงของความเร็ว U ณ หน้าตัดต่างๆ.....68
ค-1	ความดันของ Zone 1.....76
ค-2	ความดันของ Zone 2.....81
ค-3	ความดันของ Zone 3.....85
ฉ-1	ผลการทดลองกรณีศึกษา A.....94
ฉ-2	ผลการทดลองกรณีศึกษา B.....97
ฉ-3	ผลการทดลองกรณีศึกษา C.....100
ฉ-3	ผลการทดลองกรณีศึกษา D.....104
ฉ-3	ผลการทดลองกรณีศึกษา E.....107
ช-1	รายละเอียดของค่า R_i ของการทดลองแบบ A110
ช-2	รายละเอียดของค่า R_i ของการทดลองแบบ B.....112
ช-3	รายละเอียดของค่า R_i ของการทดลองแบบ C.....114
ช-4	รายละเอียดของค่า R_i ของการทดลองแบบ D.....116
ช-5	รายละเอียดของค่า R_i ของการทดลองแบบ E.....118

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบโดยรวมของเครื่องยন্ত্রกึ่งหั่นก๊าซ.....4
2.2	พัฒนาการของห้องเผาไหม้ของเครื่องยন্ত্রกึ่งหั่นก๊าซ.....5
2.3	ส่วนต่างๆ ของห้องเผาไหม้.....7
2.4	แสดงห้องเผาไหม้ชนิดต่างๆ (a) Tubular (Single can) , (b) Tubular (Multican) , (c) Tuboannular และ (d) Annular.....8
2.5	การไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวรุนแรง.....9
2.6	รูปด้านข้างของ Steam Line ของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวรุนแรง.....10
2.7	การไหลในวอร์เทค.....11
2.8	การกระจายความเร็ว U เมื่อมีวอร์เทคเกิดขึ้น.....11
2.9	ขนาดของวอร์เทคที่ค่า S_N ต่างๆ กัน.....11
2.10	ลักษณะของการไหลที่ค่า S_N แตกต่างกัน [2].....12
2.11	(a) มุมเอียงของ Swirl Vane 60° ,(b)มุมเอียงของ Swirl Vane 30° และ มีมุมเอียงเข้าสู่ศูนย์กลาง 30°17
2.12	ผลการทดลองของ N.Syred N. A. Chigier และ J.M. Beer [5]18
2.13	ไดอะแกรมเอนทัลปี-อุณหภูมิในการหาค่าเอนทัลปีของการเผาไหม้.....23
2.14	ไดอะแกรมเอนทัลปี-อุณหภูมิในการหาค่าเอนทัลปีของปฏิกิริยา.....24
2.15	โครงสร้างเปลวไฟของการเผาไหม้แบบไม่มีการผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการ เผาไหม้.....26
3.1	การสร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวโดยใช้ก๊าซฉีดเข้าในแนวเส้นสัมผัส[2].....32
3.2	อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบไหลเข้าตามแนวรัศมี [2].....32
3.3	อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบไหลเข้าตามแนวแกนการไหล.....33
3.4	อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบปรับค่าได้ [2].....33
3.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่ปรับ (ζ) และค่า S_N36
3.6	ลักษณะของโพรบแบบ 4 รู.....37
3.7	ลักษณะด้านหน้าของโพรบ.....38
3.8	มุมพิทช์ (Pitch Angle, α) และมุมชอว์ (Yaw Angle).....39
3.9	ตัวอย่างของชาร์ทของการสอบเทียบจากเอกสารอ้างอิงของมุม Yaw ที่บริเวณต่าง ๆ (A) Zone 1 (B) Zone 2 (C) Zone 3.....40

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 ลักษณะมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบออริฟิส.....	41
3.11 ตำแหน่งที่ใช้วัดความดันในการทดลอง.....	42
3.12 รูปร่างการไหลผ่านออริฟิส.....	43
3.13 ห้องเผาไหม้แบบ Rich-Lean.....	45
3.14 ภาพรวมของการทดลอง.....	46
4.1 Internal Recirculation Zone	48
4.2 Internal และ External Recirculation Zone	48
4.3 ขนาดของ Reverse Region และแนวเส้นที่เกิดความเร็วสูงสุดของการทดลองแบบ A.....	49
4.4 ขนาดของ Reverse Region และแนวเส้นที่เกิดความเร็วสูงสุดของการทดลองแบบ B.....	50
4.5 ขนาดของ Reverse Region และแนวเส้นที่เกิดความเร็วสูงสุดของการทดลองแบบ C.....	51
4.6 ขนาดของ Reverse Region และแนวเส้นที่เกิดความเร็วสูงสุดของการทดลองแบบ D.....	52
4.7 ขนาดของ Reverse Region และแนวเส้นที่เกิดความเร็วสูงสุดของการทดลองแบบ E.....	53
4.8 การกระจายความเร็ว $U(m/s)$ ตามแนวรัศมีที่หน้าตัดต่างๆ ของการทดลอง A.....	54
4.9 การกระจายความเร็ว $U(m/s)$ ตามแนวรัศมีที่หน้าตัดต่างๆ ของการทดลอง B.....	56
4.10 การกระจายความเร็ว $U(m/s)$ ตามแนวรัศมีที่หน้าตัดต่างๆ ของการทดลอง C.....	57
4.11 การกระจายความเร็ว $U(m/s)$ ตามแนวรัศมีที่หน้าตัดต่างๆ ของการทดลอง D.....	59
4.12 การกระจายความเร็ว $U(m/s)$ ตามแนวรัศมีที่หน้าตัดต่างๆ ของการทดลอง E.....	60
4.13 การกระจายค่า Ri ของการทดลอง (a) B และ (b) C ที่หน้าตัด x/D_L เท่ากับ 0.0227 ถึง 0.2000.....	63
4.14 การกระจายค่า Ri ของการทดลอง (a) D และ (b)E ที่หน้าตัด x/D_L เท่ากับ 0.0227 ถึง 0.2000.....	65
ก-1 ดันแบบห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลอง.....	72
ก-2 ห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลอง.....	72
ข-1 รูปด้านหน้าของส่วนBlade ของอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว.....	73
ข-2 รูปด้านหน้าของส่วน Block ของอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว.....	74
ข-3 รูปด้านหน้าของส่วน Block ของอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว.....	75
ข-4 รูปด้านหน้าของส่วน Block ของอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว.....	75

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง-1	
เปรียบเทียบอัตราการไหลระหว่าง Orifice และ Anamometer ที่ Re_D ต่างๆ ของ Orifice $d_i=32$ mm.....	90
ง-2	
เปรียบเทียบอัตราการไหลระหว่าง Orifice และ Anamometer ที่ Re_D ต่างๆ ของ Orifice $d_i=34$ mm.....	90
จ-1	
ภาพรวมของการทดลอง 1	91
จ-2	
ภาพรวมของการทดลอง 2	92
จ-3	
ภาพรวมของการทดลอง 3	92
จ-4	
ภาพรวมของการทดลอง 4	93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันนี้ปัญหาเรื่องการพัฒนาพลังงานทดแทนพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล นับว่ามีความสำคัญมาก เหตุเพราะพลังงานที่มาจากฟอสซิลนั้นนับวันก็จะลดน้อยถอยลงและคาดว่าจะหมดไปอย่างสิ้นเชิงไปในอนาคต

ก๊าซเชื้อเพลิง(Gasifier)เป็นพลังงานชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ เหตุเพราะเป็นก๊าซสังเคราะห์ที่ได้มาจากการสังเคราะห์จากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นก๊าซที่ติดไฟได้คือ มีเทน(CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์(CO) ไฮโดรเจน(H_2) และไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ยิ่งไปกว่านั้นก๊าซเชื้อเพลิงนี้มีความเหมาะสมกับประเทศไทยเป็นอย่างยิ่ง เหตุเพราะวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซนั้นสามารถนำเอาเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเช่น แกลบ ชังข้าวโพด ชี้เลี้ยง เปลือกเมล็ดทานตะวัน ฯลฯ มาใช้ได้ อีกทั้งเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตก๊าซนั้นสามารถผลิตขึ้นได้เองภายในประเทศ[10] แนวทางการใช้ประโยชน์จากก๊าซเชื้อเพลิงนั้นมาหลายวิธี เช่นนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เพื่อเอาความร้อนไปใช้งาน หรือเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์เช่น เครื่องยนต์ลูกสูบ(Piston Engine) หรือเครื่องยนต์กังหันก๊าซ(Gas Turbine Engine)

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเน้นที่การนำไปใช้ประโยชน์กับเครื่องยนต์กังหันก๊าซเป็นหลัก เพราะมีข้อดีที่มีส่วนประกอบที่ไม่ซับซ้อน เป็นต้นกำลังในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ดี สามารถประยุกต์ใช้กับใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายมากกว่าเครื่องยนต์ลูกสูบและปัจจุบันสามารถดัดแปลงเอาเทอร์โบชาร์จของรถยนต์มาเป็นเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กได้ เครื่องยนต์ขนาดเล็กนี้สามารถนำไปเป็นต้นกำลังกลส่วนความร้อนที่เหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ตัวอย่างการใช้ประโยชน์นี้อาจนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก เช่น โรงงานอบแห้ง ผลผลิตทางการเกษตรซึ่งต้องการความร้อนในการอบ และต้องการพลังงานกลในการขับเคลื่อนที่ใช้เป่าลมร้อน

แต่ปัญหาที่สำคัญของการใช้ประโยชน์จากก๊าซเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์กังหันก๊าซก็คือ เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ ทำให้ต้องจ่ายก๊าซเข้าสู่ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซเป็นปริมาณโดยมวลมากกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลทั่วไป ทำให้เกิดปัญหาในการควบคุมการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพ[1]

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาผลของการไหลเป็นเกลียวแบบร่วมแกนกัน(Co-flow)แบบไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่มีต่อการผสมผสาน(Mixing) ภายในบริเวณปฐมภูมิภายในห้องเผาไหม้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. ทิศทางของการไหลเป็นเกลียวแบบไหลหมุนตามกัน(Co-swirl)หรือไหลเป็นเกลียวแบบหมุนสวนทางกัน(Counter-swirl) และไหลร่วมแกนกัน(Co-flow) มีอิทธิพลต่อการหมุนวนตามแนวแกนการไหล(Toroidal Recirculation Zone)

2. ทิศทางของการไหลเป็นเกลียวแบบไหลหมุนตามกัน(Co-swirl)หรือไหลเป็นเกลียวแบบหมุนสวนทางกัน(Counter-swirl) และไหลร่วมแกนกัน(Co-flow) มีอิทธิพลต่อการผสมผสาน(Mixing)ของกระแสอากาศและอากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิง

1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

1. การออกแบบอุปกรณ์สร้างการหมุนเป็นเกลียวใช้แบบปรับค่าได้(Movable Block) [2]
2. การออกแบบห้องเผาไหม้ ใช้ห้องเผาไหม้แบบส่วนผสมอากาศเชื้อเพลิงหนาบาง(Rich-Lean Combustor)[4]
3. การประยุกต์ใช้ทฤษฎีเบอร์นูลลีสำหรับการออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดการไหลของก๊าซแบบ 3 มิติ[13] และออริฟิส[11]
4. การประยุกต์ใช้วิธีการทางสถิติ[17,18] เพื่อใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดการไหลของก๊าซแบบ 3 มิติและออริฟิส
5. ทฤษฎีการไหลแบบเจ็ต[2] เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การผสมผสาน(Mixing) ภายในบริเวณปฐมภูมิ (Primary Zone) ของห้องเผาไหม้

1.5 ขอบเขตของการทดสอบ

1. ทำการทดลองแบบไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ตามสภาวะการไหลที่ต้องการศึกษา แล้วทำการวัดขนาดของ การหมุนวนตามแนวแกนการไหล (Toroidal Recirculation Zone) และการกระจายความเร็วทั้ง 3 มิติภายในบริเวณปฐมภูมิ (Primary Zone) ของห้องเผาไหม้

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาข้อมูลเรื่องผลของการไหลหมุนวนแบบร่วมแกนกัน(Co-flow)ต่อการกระจายความเร็วของกระแสอากาศและอากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิง

2. ศึกษาเรื่องห้องเผาไหม้และอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว
3. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการวัดและทฤษฎีการวัดอัตราการไหลและทิศทางของไหล
4. ออกแบบการทดลอง ห้องเผาไหม้และอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว รวมทั้งเครื่องมือวัดในการทดลอง
5. สร้างห้องเผาไหม้และอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว รวมทั้งเครื่องมือวัดในการทดลอง
6. ทำการทดลองเก็บข้อมูลขนาดของ การหมุนวนตามแนวแกนการไหล (Toroidal Recirculation Zone) และการกระจายความเร็วของกระแสอากาศและอากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิงภายในบริเวณปฐมภูมิ (Primary Zone) ของห้องเผาไหม้
7. สรุปผลการทดสอบและเขียนรายงานการวิจัย

บทที่ 2

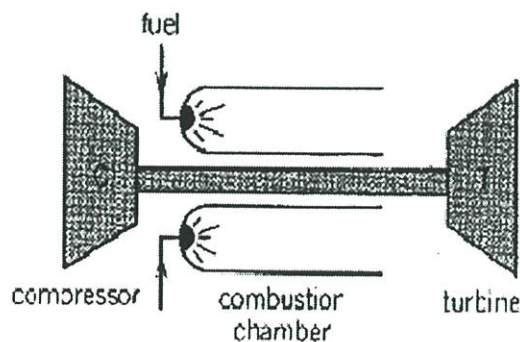
ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 พื้นฐานการออกแบบห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

2.1.1 ลักษณะของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่ดี[1]

โดยพื้นฐานแล้วเครื่องยนต์กังหันก๊าซ(Gas Turbine Engine) มีอุปกรณ์ที่สำคัญ 3 ตัวคือ เครื่องอัดอากาศ(Compressor) ห้องเผาไหม้(Combustion Chamber) กังหัน(Turbine) ดังรูป 2.1 แต่ในวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการศึกษาที่ห้องเผาไหม้(Combustion Chamber)เป็นหลัก ซึ่งลักษณะของห้องเผาไหม้ที่ดีเป็นดังนี้

1. มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง คือ เชื้อเพลิงต้องเผาไหม้สมบูรณ์ภายในห้องเผาไหม้
2. มีการจุดระเบิดที่นุ่มนวลและเชื่อถือได้ คือ ต้องจุดระเบิดได้แม้มีอากาศเบาบาง โดยเฉพาะกรณีของเครื่องยนต์ที่ใช้กับอากาศยาน และการจุดระเบิดแต่ละครั้งต้องไม่ทำให้เครื่องยนต์เกิดการเสียหายจนใช้การไม่ได้
3. มีเสถียรภาพในการเผาไหม้กว้าง คือ สามารถเดินเครื่องได้แม้ว่าจะปรับเปลี่ยนภาระ (Load)ของการเผาไหม้ให้เพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งภาระ(Load)ของการเผาไหม้นี้ก็คือปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงนั่นเอง
4. มีความดันตกในห้องเผาไหม้น้อย
5. มีการกระจายอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่เหมาะสม คือ ก๊าซร้อนที่ออกจากห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงไม่มีอุณหภูมิสูงจนทำให้กังหัน(Turbine)เกิดความเสียหายได้



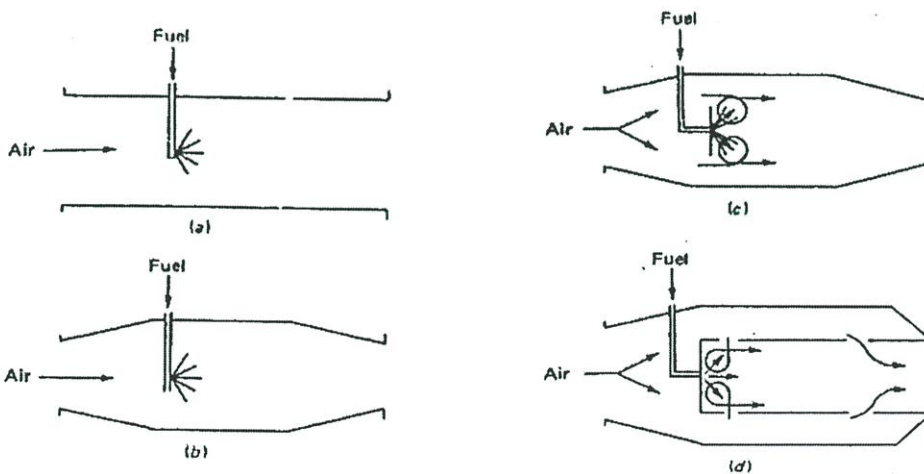
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบโดยรวมของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

2.1.2 รูปแบบพื้นฐานของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

รูปแบบพื้นฐานที่ใช้ในการพิจารณาออกแบบห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ(Gas Turbine Engine) ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้จะช่วยให้สามารถออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ได้ง่ายขึ้น

ดังรูป 2.2(A) เป็นห้องเผาไหม้แบบ ท่อตรง(Straight-walled Duct)ต่อระหว่างเครื่องอัดอากาศ(Compressor)และกังหัน(Turbine)ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ(Gas Turbine Engine) ห้องเผาไหม้แบบนี้เป็นแบบที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน และสร้างได้ง่าย แต่ไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้ในทางปฏิบัติเพราะเกิดความดันตกสูงมากภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งโดยปกติแล้วความดันตกภายในห้องเผาไหม้แปรผันตามค่าความเร็วที่ออกมาจากเครื่องอัดอากาศ(Compressor)ยกกำลังสอง(v^2) และความเร็วที่ออกมาส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 170 เมตรต่อวินาที ซึ่งความเร็วขนาดนี้ทำให้เกิดความดันตกภายในห้องเผาไหม้แบบนี้ถึง 1 ใน 3 ของความดันที่สร้างขึ้นจากเครื่องอัดอากาศ(Compressor) และด้วยความเร็วเช่นนี้ทำให้การควบคุมเสถียรภาพของเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้เป็นไปได้ยาก

รูปที่ 2.2(B)เป็นการปรับปรุงห้องเผาไหม้ให้มี ประสิทธิภาพมากขึ้นจากแบบแรกโดยการติดตั้งอุปกรณ์แปลงความเร็วให้เป็นความดันสถิตย์(Diffuser) ที่ปากทางเข้าห้องเผาไหม้ ทำให้อากาศไหลเข้าห้องเผาไหม้ช้าลง ความดันที่สูญเสียในห้องเผาไหม้จึงลดลงและเปลวไฟในห้องเผาไหม้มีเสถียรภาพมากขึ้น



รูปที่ 2.2 พัฒนาการของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

จากรูปแบบของห้องเผาไหม้ตามรูปที่ 2.2(B) ยังมีข้อเสียที่ไม่มีเสถียรภาพของเปลวไฟกรณีทีภาระ(Load)ของการเผาไหม้เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลง การแก้ปัญหาทำได้โดยการติดตั้ง

แผ่นบางๆ(Plain Baffle)หลังทางออกของหัวฉีดเชื้อเพลิงดังรูปที่ 2.2(C) อุปกรณ์ตัวนี้ทำหน้าที่ขวางกระแสการไหลของอากาศ ก่อให้เกิดการหมุนวนตามแนวแกนการไหล(Toroidal Recirculation หรือ Reversed Recirculation Zone) การหมุนวนนี้ช่วยให้เปลวไฟมีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อภาระ(Load)ของการเผาไหม้เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นห้องเผาไหม้จึงมีความสามารถที่จะทำงานได้แม้เมื่อมีอากาศเบาบาง

การควบคุมอุณหภูมิของก๊าซร้อนให้พอเหมาะก่อนที่จะเข้ากังหัน(Turbine) เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง เพราะหากมีอุณหภูมิสูงเกินไป กังหันก็จะเสื่อมคุณภาพเร็ว การแก้ปัญหาเหล่านี้ทำได้โดยการเพิ่มอุปกรณ์อีกตัวหนึ่งคือท่อหุ้มเปลวไฟ(Liner) เปลวไฟจะเผาไหม้อยู่ภายในอุปกรณ์นี้ และบนอุปกรณ์นี้จะมีรูที่เจาะไว้ขนาดต่างๆกัน รูเหล่านี้ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณอากาศที่จะเข้ามาทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของก๊าซร้อนก่อนที่จะเข้ากังหัน(Turbine)ได้

รูปแบบห้องเผาไหม้แบบท่อตรง(Straight-walled Duct)นี้เป็นรูปแบบที่ใช้กันโดยทั่วไป แต่ทั้งนี้ก็มีอีกปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องในการพิจารณาออกแบบอีกก็คือ มีพื้นที่เพียงพอสำหรับห้องเผาไหม้แบบนี้หรือไม่ โดยปกติแล้วเครื่องยนต์ขนาดใหญ่จะใช้ห้องเผาไหม้แบบนี้ แต่ถ้าเป็นเครื่องยนต์ขนาดเล็ก ซึ่งมีพื้นที่ระหว่างเครื่องอัดอากาศ(Compressor)และกังหัน(Turbine)น้อย ถ้าเป็นเช่นนี้ก็มักจะใช้ห้องเผาไหม้แบบไหลกลับทิศทาง(Reverse-flow)ซึ่งใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย

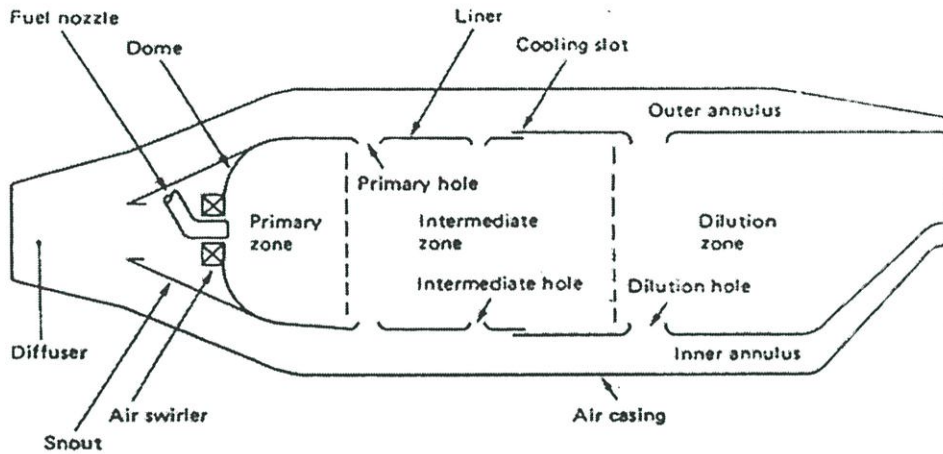
2.1.3 องค์ประกอบของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

องค์ประกอบของห้องเผาไหม้โดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วยอุปกรณ์แพร่อากาศ(Diffuser) ทำหน้าที่ลดความเร็วของอากาศที่ออกมาจากเครื่องอัดอากาศ(Compressor) เสื้อนอก(Casing) เสื้อใน(Liner) และอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว(Swirlers)ซึ่งติดกับน็อกเชิลฉีดเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 2.3 โดยที่เสื้อนอก(Casing)คือส่วนที่อยู่รอบสุดครอบไว้เพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียสู่ข้างนอก รวมทั้งเป็นการป้องกันไม่ให้อากาศรั่วเพราะเป็นบริเวณที่มีความดันสูงกว่าบรรยากาศภายนอก เพราะเป็นบริเวณที่อากาศอัดจากเครื่องอัดอากาศไหลเข้ามา ภายในเสื้อนอก(Casing)เป็นเสื้อใน(Liner) การเผาไหม้ในจะอยู่ในเสื้อใน(Liner)เท่านั้น ระหว่างเสื้อนอก(Casing)กับเสื้อใน(Liner)นั้น มีช่องว่างสำหรับอากาศไหลผ่านเพื่อช่วยพาความร้อนจากเสื้อใน(Liner)

บริเวณเสื้อใน(Liner) จะอยู่ใกล้กับส่วนที่เกิดการเผาไหม้มากที่สุดจึงจำเป็นต้องทำด้วยวัสดุที่ทนความร้อน เสื้อใน(Liner)นี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือบริเวณปฐมภูมิ(Primary zone) ซึ่งเป็นส่วนหลักที่อากาศจะผสมกับเชื้อเพลิงและเริ่มต้นมีการเผาไหม้ ซึ่งบริเวณนี้จำเป็นต้องมีการผสมผสาน(Mixing)ระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่รวดเร็วและเพียงพอต่อการเผาไหม้ บริเวณถัดมาคือบริเวณส่วนกลาง(Secondary zone)เป็นบริเวณที่มีการเติมอากาศเข้ามาและช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่

สมบูรณ์ และส่วนสุดท้ายคือบริเวณเจือจาง(Dilution zone)เป็นบริเวณที่ให้อากาศเข้ามาเพื่อช่วยลดอุณหภูมิให้เหมาะสมก่อนที่จะเข้ากังหัน(Turbine)

ทั้งนี้อากาศที่ไหลระหว่างเสื้อในและนอกนั้นนอกจากจะทำหน้าที่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้แล้ว ยังทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากผนังของ Liner อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.3 พร้อมทั้งแสดงความเร็วของการไหลของก๊าซในส่วนต่างๆ ของห้องเผาไหม้



รูปที่ 2.3 ส่วนต่างๆ ของห้องเผาไหม้

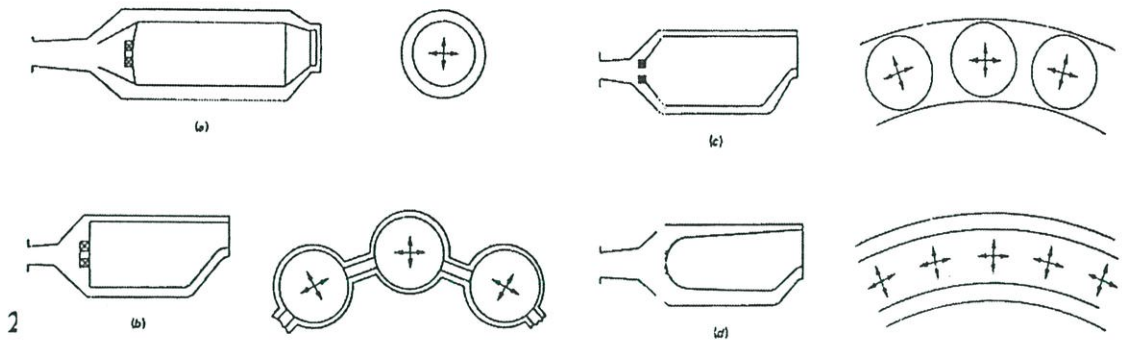
2.1.4 ชนิดของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

ห้องห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบ่งได้เป็น 3 แบบใหญ่ๆ คือ

1. **Tubular Chambers** ประกอบด้วยเสื้อใน(Liner) รูปทรงกระบอกวางอยู่ในเสื้อนอก (Casing) รูปทรงกระบอก ห้องเผาไหม้แบบนี้เป็นห้องเผาไหม้ที่ควบคุมการเผาไหม้ได้ง่าย เครื่องยนต์รุ่นแรกๆจะใช้ห้องเผาไหม้แบบนี้ โดยจะมีจำนวนต่อประมาณ 7 ถึง 16 ต่อต่อเครื่องยนต์ และปัจจุบันนี้ Single Tubular Chamber มักจะใช้กับกังหันก๊าซขนาดเล็กและได้กำลังที่ออกมาเรื่อยๆ

2. **Annular Chambers** เป็นรูปแบบห้องเผาไหม้ ซึ่งทำให้เกิดความดันสูญเสียต่ำกว่าห้องเผาไหม้ชนิดอื่นๆ และยังมีลักษณะตามถูกต้องตามหลักอากาศพลศาสตร์ทำให้รูปแบบความเร็วของอากาศที่เข้ามามีการเปลี่ยนแปลงน้อย ทั้งรองรับอากาศปริมาณมากกว่าห้องเผาไหม้อื่นเมื่อเทียบที่น้ำหนักเท่ากัน แต่ของ ควบคุมประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ยาก

3. **Tuboannular Chambers** เป็นกลุ่มของ Liner ทรงกระบอกที่วางเรียงอยู่ในเสื้อนอกเพียงอันเดียว(Single Annular Casing) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 รูป ห้องเผาไหม้แบบนี้รวมข้อดีของ Annular Chamber กับ Tubular เข้าด้วยกัน ถ้าเปรียบเทียบกับการออกแบบ Annular แล้ว Tuboannular มีข้อเสียคือมีน้ำหนักมากกว่าห้องเผาไหม้แบบ Annular



รูปที่ 2.4 ห้องเผาไหม้ชนิดต่างๆ (a) Tubular (Single can), (b) Tubular (Multican),
(c) Tuboannular และ (d) Annular

2.2 การไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว

2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไป

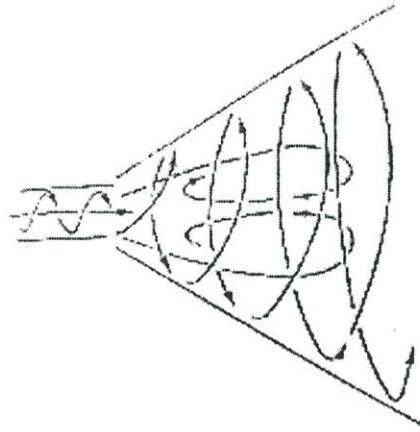
เมื่อพิจารณารูปที่ 2.3 โดยละเอียดแล้วจะพบว่าจะมีส่วนที่เรียกว่า Air Swirl อุปกรณ์ตัวนี้จะทำหน้าที่ฉีดอากาศให้หมุนวนเป็นเกลียว การหมุนวนเป็นเกลียวนี้มีผลต่อการเผาไหม้ภายในบริเวณปฐมภูมิ(Primary Zone)มาก ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงในหัวข้อ 2.3 แต่ในหัวข้อนี้จะมาทำความเข้าใจกันเสียก่อนว่าการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว(Swirl)คืออะไร

ก่อนอื่นนั้นต้องทำความเข้าใจพื้นฐานเสียก่อนว่า เราต้องการให้เปลวไฟในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กักเก็บก๊าซยังคงลุกไหม้อยู่ได้ในช่วงของเงื่อนไซสำหรับการทำงานที่กว้าง ในการออกแบบการไหลในห้องเผาไหม้ ส่วนที่มีความสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ รูปแบบการไหลในส่วนของ บริเวณปฐมภูมิ(Primary Zone) เพราะเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้เปลวไฟเกิดเสถียรภาพ

วิธีการหนึ่งในการสร้างเสถียรภาพภายในบริเวณปฐมภูมิ(Primary zone) ก็คือ การฉีดกระแสอากาศหรือกระแสเชื้อเพลิงเป็นรูปแบบการไหลหมุนวนเป็นเกลียว (Swirling Flow) การหมุนวนนั้น จะช่วยให้การผสมผสานระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงดีขึ้น

การไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว (Swirling Flow) จากรูปที่ 2.5 เป็นรูปด้านข้างของหัวเผาซึ่งเมื่อฉีดอากาศออกจากรีเอจเซิลแล้วเพิ่มโมเมนตัมในแนวเส้นสัมผัส(Tangential Momentum) ให้กับของไหลที่ไหลตามแนวแกน(Axial Flow) ดังนั้น การไหลจึงมีลักษณะไหลเป็น 2 ทิศทาง คือ การไหลตามแนวแกน และการไหลตามแนวเส้นสัมผัส ส่งผลให้เส้นทางการไหลแบบเชื่อมอนุภาคของของไหล (Streak Line) มีรูปร่างเป็นเกลียว(Spiral) การไหลเช่นนี้ส่งผลกระทบต่อต่อสนามของการไหล(Flow

Field) ซึ่งถ้าการไหลมีการหมุนวนที่รุนแรงพอที่จะก่อให้เกิดความดันย้อนกลับตามแนวแกน (Adverse Pressure Gradient) มากพอที่จะก่อให้เกิดการหมุนวนภายใน (Internal Recirculation zone) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวรุนแรง

2.2.2 ความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว

ความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวสามารถแสดงให้เห็นได้ในเชิงปริมาณ [2] อธิบายจากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์เชิงเส้น (G_x) โมเมนต์ตามแนวเส้นสัมผัส (G_ϕ) และรัศมีของน้อซเซิล ซึ่งความสัมพันธ์นี้เรียกว่าค่าความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวหรือ Swirl Number (S_N) ดังสมการที่ 2.1

$$S_N = \frac{G_\phi}{G_x R} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$G_\phi = \int_0^R (Wr) \rho U 2\pi r dr = \text{const} \quad (2.2)$$

$$G_x = \int_0^R (U) \rho U 2\pi r dr + \int_0^R p 2\pi r dr = \text{const} \quad (2.3)$$

โดยที่ค่าจากสมการ 2.2 และ 2.3 เป็นค่าที่ได้จากการวัดที่บริเวณปากทางออกของน้อซเซิล

2.2.3 การไหลหมุนวนย้อนกลับตามแนวแกนการไหล

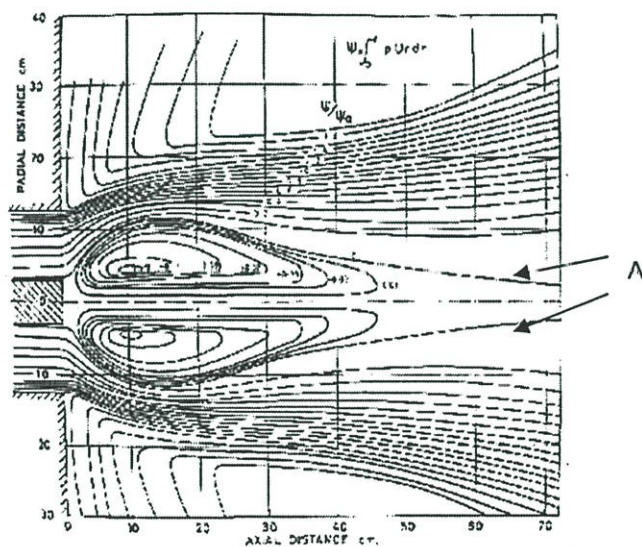
เมื่อเราทราบว่า การไหลหมุนวนเป็นเกลียวสามารถระบุได้เชิงปริมาณแล้ว จากการทดลองสามารถแบ่งกลุ่มของการไหลหมุนวนเป็นเกลียวได้ 2 กลุ่มคือ

1. การไหลหมุนวนเป็นเกลียวไม่รุนแรง(Weak swirl) เป็นการไหลที่ค่า S_N น้อยกว่า 0.6 ซึ่งในกรณีนี้จะไม่มีการไหลหมุนวนย้อนกลับตามแนวแกน(Reversed Recirculation Zone)เกิดขึ้น

2. การไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบรุนแรง(Strong Swirl) เป็นการไหลที่ค่า S_N มากกว่า 0.6 ซึ่งในกรณีนี้จะมีการไหลหมุนวนย้อนกลับตามแนวแกน(Reversed Recirculation Zone)เกิดขึ้น ดังรูปที่

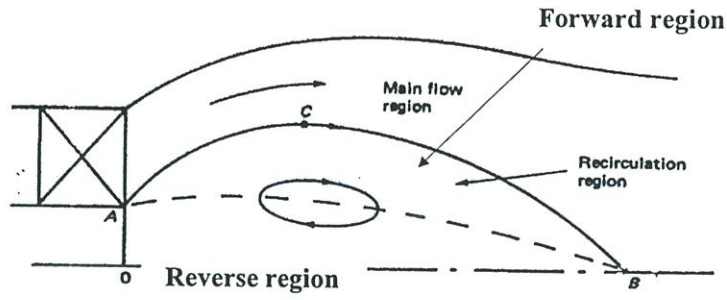
2.5

การไหลหมุนวนย้อนกลับตามแนวแกน(Reversed Recirculation Zone)นี้ เป็นการไหลแบบที่เรียกว่าเป็นวอร์เทค ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกว่า Toroidal Vortex จากรูปที่ 2.5 สามารถแสดงเป็น Stream Line ได้ดังรูปที่ 2.6

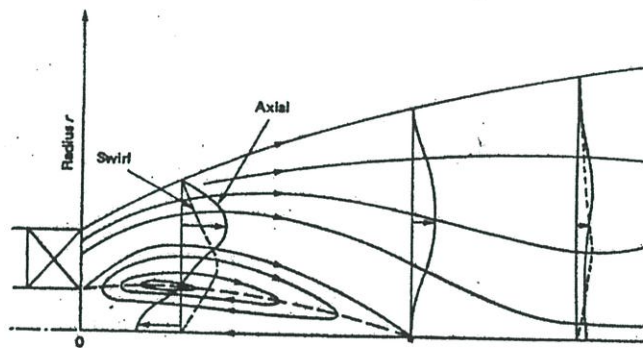


รูปที่ 2.6 รูปด้านข้างของ Steam Line ของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวรุนแรง

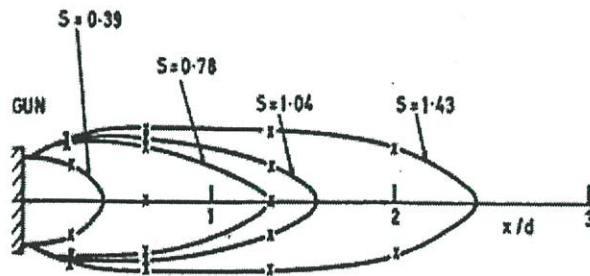
ภายในวอร์เทคนี้การไหลจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ไหลย้อนกลับและส่วนที่ไหลไปข้างหน้าดังรูปที่ 2.7 รูปที่ 2.8 คือการกระจายความเร็วเมื่อมีวอร์เทคเกิดขึ้น อีกทั้งวอร์เทคนี้มีขนาดแปรผันตามค่า S_N ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.7 การไหลในวอร์เทค



รูปที่ 2.8 การกระจายความเร็ว U เมื่อมีวอร์เทคเกิดขึ้น



รูปที่ 2.9 ขนาดของวอร์เทคที่ค่า S_N ต่างๆกัน

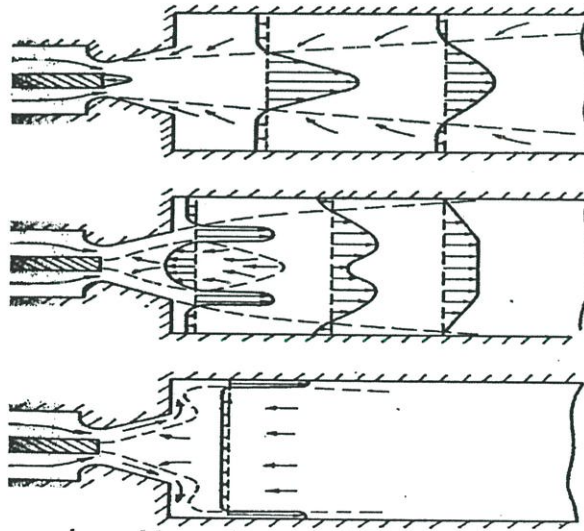
ขนาด Toroidal Vortex จะใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มพจน์ Diffusion [7] ซึ่งเป็นพจน์แรกทางขวามือของสมการการไหลของของไหล[19] ดังสมการ 2.4

$$\frac{\partial (\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (2.4)$$

โดยที่ค่า ϕ เป็นค่าคุณสมบัติของของไหลใดๆ ซึ่งเป็นปริมาณสเกลาร์หรือปริมาณเวกเตอร์ก็ได้ โดยที่บริเวณที่ค่าพจน์ Diffusion สูงนี้จะอยู่ในบริเวณที่เรียกว่า Inter Jet Shear Layer ซึ่งเป็นบริเวณใกล้ปากของ Nozzle และเป็นบริเวณที่กระแสเจ็ตวงในและวงนอกสัมผัสกัน[7] ซึ่งในการทดลองนี้ก็คือ ที่ค่า r/d เท่ากับ 0.5

2.2.4 ลักษณะของไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวที่ต้องการในการเผาไหม้

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าการไหลหมุนวนเป็นเกลียวสามารถช่วยเพิ่มการผสมผสาน(Mixing) และประสิทธิภาพในการเผาไหม้ได้ แต่ถ้ามีการหมุนวนที่รุนแรงเกินไปก็สามารถทำให้เปลวไฟไม่มีเสถียรภาพ ในทางกลับกันถ้ามีน้อยเกินไปก็จะไม่ทำให้เกิดการไหลหมุนวนย้อนกลับเปลวไฟก็ไม่มีเสถียรภาพเช่นกัน ดังนั้นรูปแบบที่ต้องการของการไหลหมุนวนย้อนกลับสรุปได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะของการไหลที่ค่า S_N แตกต่างกัน[2]

จากรูปที่ 2.10 แบบที่ 2 เป็นรูปแบบการไหลหมุนวนย้อนกลับที่ต้องการ เพราะแบบที่ 1 ค่า S_N น้อยเกินไปที่จะทำให้เกิดการไหลหมุนวนย้อนกลับ แต่แบบที่ 3 ค่า S_N สูงเกินไปจนทำให้เกิดรูปแบบการไหลที่เรียกว่า Mushroom Flow [2]ซึ่งทำให้เปลวไฟไม่เสถียร

2.2.5 สมการที่ใช้ในการอธิบายการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว

จากหัวข้อที่ 2.2.1 ถึง 2.2.5 เราได้เข้าใจลักษณะการไหลโดยคร่าวของการไหลหมุนวนเป็นเกลียว ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการอธิบายถึงสมการที่ใช้ในการอธิบายการไหลแบบนี้ กล่าวคือเมื่อเราเพิ่มโมเมนตัมตามแนวแกนเส้นสัมผัสให้กับการไหลตามแนวแกน ทำให้เกิดการไหลเป็นเกลียวขึ้น (Spiral Form) ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความดันสถิตตามแนวรัศมีและความเร็วในแนวเส้นสัมผัสจะเขียนได้ดังสมการ

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\rho W^2}{r} \quad (2.5)$$

โดยที่ p คือ ความดันสถิต

การไหลเช่นนี้ ก่อให้เกิดความดันต่ำที่บริเวณแกนกลางของการหมุน และหากว่าการหมุนวนที่เป็นเกลียวนี้มีความรุนแรงมาก จะทำให้เกิดการไหลหมุนวนในบริเวณแกนกลางนี้ ซึ่งเราเรียกว่า Toroidal Vortex ดังรูป 2.6 การเกิดขึ้นของวอร์เทก(Vortex) นี้ก่อก่อให้เกิดการบานออกอย่างรวดเร็ว(Rapidly Expansion)ของกระแสเจ็ต(Jet) ที่ออกมาจากปากทางออก ขนาดของวอร์เทก(Vortex) นี้จะแปรผันตามขนาดความรุนแรงของการหมุนวนเป็นเกลียว

จากปรากฏการณ์นี้ สมมติว่าเราใส่อนุภาคหนึ่ง เมื่ออนุภาคออกจากรีตเซิล อนุภาคจะลอยหมุนวนไปในทิศทางแนวเส้นสัมผัสเหมือนกับเวลาที่เราก่อนวัตถุที่ผูกติดกับปลายเชือกแล้วปล่อยออก วัตถุจะเคลื่อนที่ออกไปด้วยความเร็วในแนวเส้นสัมผัส(W) และวัตถุนั้นก็จะถูกต้านด้วยแรงต้านเนื่องจากความหนืดของอากาศ ซึ่งปรากฏการณ์อันนี้ก็สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.3 แต่สำหรับอนุภาคที่ออกจากรีตเซิล แรงต้านจะเป็นความดัน

การไหลของอนุภาคนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ Rotational กับ Irrotational ตัวอย่างเช่น สมมติว่าเราปล่อยทุ่นเข้าไปในกระแสน้ำวนแล้วทุ่นนั้นไหลวนไปตามกระแสน้ำพร้อมทั้งหมุนรอบแกนของตัวเอง เราเรียกการไหลนั้นว่า Rotational แต่ถ้าทุ่นนั้นไม่มีหมุนรอบแกนตัวเอง เราเรียกการไหลนั้นว่า Irrotational ในกรณีแรกนั้นค่า Vorticity จะไม่เท่ากับศูนย์ แต่ในกรณีที่ 2 ค่า Vorticity จะเท่ากับศูนย์ ตลอดทั่วทั้งสนามการไหล สมมติว่าค่า W_x, W_y, W_z แทนค่า Vorticity Vector ในแนวแกน x y z เราสามารถเขียนค่า Vorticity ได้ดังนี้

$$(\text{Curl } W)_x = \frac{\partial W_z}{\partial y} - \frac{\partial W_y}{\partial z} \quad (2.6a)$$

$$(\text{Curl } W)_y = \frac{\partial W_x}{\partial z} - \frac{\partial W_z}{\partial x} \quad (2.6b)$$

$$(\text{Curl } W)_z = \frac{\partial W_y}{\partial x} - \frac{\partial W_x}{\partial y} \quad (2.6c)$$

สำหรับของไหลที่เป็น Homogeneous ไม่มีแรงเสียดทานและเป็นการไหล Irrotational เราเรียกว่า Potential flow เราสามารถเขียนค่า Vorticity อยู่ในรูปของฟังก์ชัน Scalar potential $\psi = \psi(r)$ ได้เป็น

$$W_x = \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (2.7a)$$

$$W_y = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (2.7b)$$

$$W_z = \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (2.8c)$$

การไหลจะเป็น Irrotational ก็ต่อเมื่อ

$$(\text{Curl } W)_x = \frac{\partial W_z}{\partial y} - \frac{\partial W_y}{\partial z} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial y} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial y \partial z} = 0 \quad (2.8)$$

ตามทฤษฎี Potential flow จะมีปรากฏการณ์ที่สำคัญคือ ค่า Line integral ระหว่างจุด 2 จุดในสนามการไหล โดยที่ไม่ขึ้นอยู่กับเส้นทางระหว่างจุด 2 จุดนั้น ดังนั้นสมมติว่า ถ้าเราทำการอินทิเกรตไปตามเส้นล้อมรอบปิด (close line) เส้นหนึ่งของการไหลจะได้ตามสมการดังนี้

$$\Gamma = \oint W ds = 0 \quad (2.9)$$

โดยที่ค่า Line integral (Γ) เรียกว่า Circulation

แต่ถ้าเราทำการอินทิเกรตตามเส้นปิดรอบ ของจุด Singular Point ของระบบหนึ่งที่เป็น Potential Vortex ค่า Line integral จะไม่เท่ากับศูนย์ แต่จะเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ไม่ว่าจะสปีดเปลี่ยนแปลงไปเท่าใด ดังสมการ

$$\Gamma = 2r\pi \frac{C}{r} = 2\pi C = \text{const} \quad (2.10)$$

ค่า Circulation ตามสมการที่ 2.10 นี้จะเท่ากับค่า Vorticity ที่ Singular point ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของ Potential vortex เขียนได้ว่า

$$W = \frac{C}{r} = \frac{\Gamma}{2\pi r} \quad (2.11)$$

ขณะที่รูปแบบของเส้นกระแสการไหล (streamline) สามารถหาได้ผลจากการไหลที่เป็น Irrotation ซึ่งระบบนี้เรียกว่า Potential Vortex จากสมการที่ 2.11 ค่า Vorticity จะเป็นอนันต์ ที่ $r = 0$ ซึ่งเป็นความหมายในทางฟิสิกส์เท่านั้น

ถ้าไม่คิดแรงเนื่องจากความหนืดแล้ว ก็จะมีคุณสมบัติเพียงระหว่างแรงจากความดัน และแรงเฉื่อยของการไหลที่มีการหมุนวน ซึ่งสามารถแสดงโดย

$$\frac{dp}{dr} = -\rho \frac{W^2}{r} \quad (2.12)$$

เราสามารถแสดงค่าความสัมพันธ์ของสมการสำหรับความเร็ว W ที่อยู่ในการไหล Free vortex และ Forced vortex แสดงสำหรับ Free vortex จากสมการ 2.11 จะได้

$$\frac{dp}{dr} = -\rho \left(\frac{\Gamma}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{r^3} \quad (2.13)$$

$$p - p_0 = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\Gamma}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{r^2} \quad (2.14)$$

โดยที่ p_0 คือความดันบรรยากาศ และสำหรับการไหล Forced vortex พบว่า

$$W = c'r \quad (2.15)$$

แทนค่าสมการ 2.15 ลงในสมการที่ 2.14

$$\frac{dp}{dr} = -\rho(c'r)^2 \frac{1}{r} = -\rho c'^2 r \quad (2.16)$$

และ

$$p - p_c = -\frac{1}{2} \rho c'^2 r^2 \quad (2.17)$$

จากรูปที่ 2.6 เมื่อนำมาเชื่อมโยงกับสมการที่ 2.5 ถึง 2.17 ที่ได้นำเสนอมานั้น สรุปว่าการไหลภายในที่ล้อมรอบด้วยเส้น A เป็นการไหลแบบ Force Vortex [2] และเมื่อมองภาพด้านหน้าของรูปที่ 2.5 จะพบว่าอาณาบริเวณที่อยู่นอกเส้น A นั้นเป็นการไหลแบบ Free Vortex จากข้อสรุปนี้จึงกล่าวได้ว่า เมื่อวัดความดันภายใน Toroidal Vortex ซึ่งล้อมรอบด้วยเส้น A ค่าความดันสถิตย์ตามแนวรัศมีจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา r^2 เมื่อเข้าใกล้จุดศูนย์กลางดังรูปที่ 2.6 แต่เมื่อวัดค่าความดันสถิตย์บริเวณด้วยนอกแนวด้านนอกซึ่งเป็นการไหลแบบ Free Vortex ความดันในแนวรัศมีจะกระจายเป็นแบบ hyperbolic

2.2.6 เสถียรภาพของการเผาไหม้แบบหมุนวนเป็นเกลียว

เสถียรภาพของการเผาไหม้แบบหมุนวนเป็นเกลียว สามารถบ่งบอกได้จากค่าตัวแปรไร้มิติค่าหนึ่งๆที่เรียกว่าค่า Richardson Number (R^*) ดังสมการที่ 2.16[2] [6] และ [8]

$$R^* = (\text{Centrifugal Force})/(\text{Shear Force}) = \frac{(1/\rho)(\partial \rho / \partial r)(W^2 / r)}{(\partial U / \partial r)^2} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 5 พจน์ของ Shear Force $(\partial U / \partial r)^2$ เป็นพจน์ที่แสดงถึงการเกิดความปั่นป่วน (Turbulence) ซึ่งแปรผันตามค่าสัมบูรณ์ของ $(\partial U / \partial r)$ ดังนั้นหากว่าการไหลแบบใดมีค่านี้สูงแสดงว่ามีความปั่นป่วนสูงและการผสมผสานก็จะสูงขึ้นด้วย

ความสำคัญของค่า R^* ที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพในการเผาไหม้ของการไหลแบบหมุนวน กล่าวไว้ใน [2] ว่าเปลวไฟจากการไหลหมุนวนจะมีเสถียรภาพถ้า Centrifugal Force และ Shear Force อยู่ในสภาวะสมดุล เมื่อค่า R^* หากว่า Centrifugal Force มีค่าสูงกว่า Shear Force มากๆ ($R^* > 1$) ก็จะทำให้ Centrifugal Force หน่วง(Damp)ไม่ให้เกิดความปั่นป่วน ส่งผลให้การผสมผสาน

ลดลง ในทางกลับกันหากว่า Shear Force มีค่าสูงก็จะเกิดความปั่นป่วนสูง แต่ถ้าสูงมากเกินไป Reaction Rate ของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงก็จะทำให้เกิด Flame Quenching แต่ถ้าหาก $R^* < 0$ แสดงว่าการกระจายความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อวัดจากจุดศูนย์กลาง แสดงว่าการเผาไหม้ไม่มีเสถียรภาพ [2] ยังกล่าวอีกว่าถ้า $R^* = 3$ แสดงว่าเป็นจุดที่มี Concentration Gradient สูงที่สุดและเป็นบริเวณขอบเขตสิ้นสุดของเปลวไฟ

2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

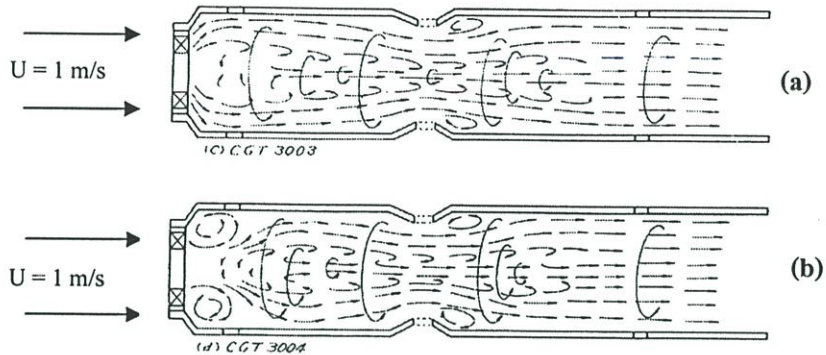
จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่าปัญหาของการนำก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำอย่างเช่นก๊าซเชื้อเพลิงมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นมีปัญหาเรื่องเรื่องการควบคุมประสิทธิภาพการเผาไหม้และเสถียรภาพการเผาไหม้ การแก้ไขปัญหานั้นสามารถทำได้โดยการปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ของการเผาไหม้ (Combustion Aerodynamics) ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมผสาน(Mixing)ระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง โดยมีปัจจัยย่อยอีก 5 ปัจจัย[2]ที่ควบคุมการผสมผสานคือ ความแรงของการหมุนวน (Swirling)ของอากาศและเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ รูปร่างของห้องเผาไหม้(Combustor Geometry) ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง(Fuel Density) การกระจายของอากาศ(Air Distribution)ที่เข้ามาทางรูปฐมภูมิ(Primary Holes)ของห้องเผาไหม้ และอัตราส่วนความเร็วของอากาศและเชื้อเพลิงที่ไหลที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ แต่ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการหมุนวน(Swirling)ของอากาศและเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้เป็นหลัก

การเผาไหม้หลักที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซเกิดขึ้นภายในบริเวณปฐมภูมิ(Primary Zone) ซึ่งรูปแบบอากาศพลศาสตร์การเผาไหม้(Combustion Aerodynamics)ภายในบริเวณนี้เป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการเผาไหม้ของห้องเผาไหม้ [3]

แบบอย่างหนึ่งที่ใช้ให้เห็นความสำคัญของอากาศพลศาสตร์ของการเผาไหม้(Combustion Aerodynamics) แสดงดังรูปที่ 2.11 [4]

การทดลองนี้เป็นการทดลองแบบที่ไม่มีการเผาไหม้ โดยการสร้างห้องเผาไหม้แบบส่วนผสมอากาศเชื้อเพลิงหนาบาง(Rich.Lean Combustor)ที่เป็นอะครีลิก แล้วทำการทดลองภายในอุโมงค์น้ำ โดยใช้ LDA วัดการกระจายความเร็วภายในห้องเผาไหม้ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าห้องเผาไหม้ โดยปรับเปลี่ยนอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียว(Swirler)แบบต่างๆ เมื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำเท่ากัน พบว่าแม้ใบของอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียวมีมุมเอียงน้อยกว่า แต่เมื่อมุมเอียงเข้าหาแกนกลาง(Inward Angle) ก็ทำให้เกิดผลการกระจายความเร็วที่แตกต่าง กล่าวคือจากรูปเห็นได้ว่า แบบ

ที่ 2 จะมีบริเวณการหมุนวนเล็กๆ ซึ่งเรียกว่า Subrecirculation Zone ซึ่งเป็นผลจากมุมเอียงเข้าหาแกนกลาง(Inward Angle) บริเวณนี้ช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบแรก



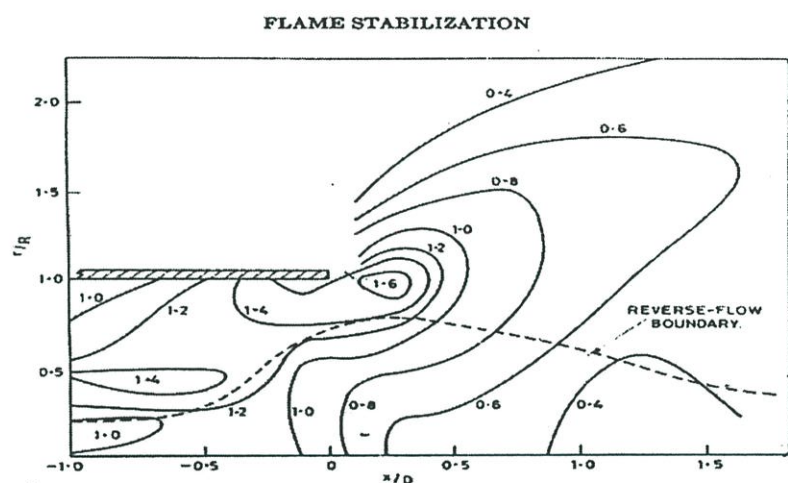
รูปที่ 2.11 (a)มุมเอียงของ Swirl Vane 60° (b) มุมเอียงของ Swirl Vane 30° และมีมุมเอียงเข้าศูนย์กลาง 30°

การเพิ่มการผสมผสาน(Mixing) โดยใช้วิธีการเพิ่มค่าความรุนแรงของการหมุนวน(S_N) ของอากาศทำให้เกิดความปั่นป่วน(Turbulence)สูง และถ้าการไหลมี S_N สูงจนถึงค่าประมาณ 0.6 [2] ก็จะทำให้เกิดการหมุนวนตามแนวแกนการไหล(Recirculation) ซึ่งเป็นการเพิ่มระยะเวลาของการเผาไหม้(Residence Time)ของอากาศและเชื้อเพลิงส่งผลให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพสูงซึ่งวิธีการนี้เป็นที่นิยมใช้ออกแบบหัวเผาอุตสาหกรรมและห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซทั่วไป แต่วิธีการนี้จะทำให้เกิดความดันตก[1] ภายในห้องเผาไหม้สูงอันเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้พลังงานกลสุทธิ(W_{net})ที่ได้จากเครื่องยนต์ลดลง ซึ่งจำเป็นต้องหาวิธีการอื่นที่เพิ่มการผสมผสาน(Mixing)ภายในห้องเผาไหม้ให้มากขึ้น โดยที่เพิ่มค่า S_N ไม่มากนัก

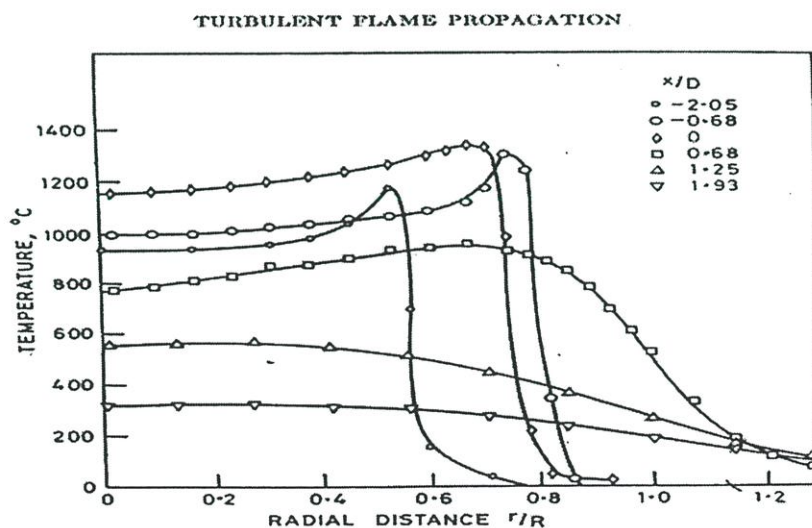
การปรับปรุงการผสมผสาน(Mixing) ดังกล่าวข้างต้นเมื่อนำประยุกต์ใช้ฉีดเชื้อเพลิงให้หมุนวนตาม [5] ได้ผลว่าที่บริเวณภายในใกล้ปากหัวเผามีอุณหภูมิสูงมากเวลาที่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้รวมทั้งมีพลังงานจลน์ของการปั่นป่วน(Turbulence Kinetic Energy, k)สูงซึ่งมีค่านี้น่ามากขึ้นเมื่อเกิดการเผาไหม้ ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อหัวเผาของห้องเผาไหม้ได้

วิธีการควบคุมการเผาไหม้วิธีหนึ่งที่นิยมคือ การฉีดเชื้อเพลิงโดยการเพิ่มหัวจ่ายอากาศที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างการหมุนวน(Swirl Vane)ควบคู่กับ การฉีดเชื้อเพลิงแบบหมุนวน โดยอากาศและเชื้อเพลิงไหลแบบร่วมแกนกัน(Double Concentric Flow) [6] พบว่ามีการกระจายความเร็วและพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน(Turbulence Kinetic Energy, k)ใกล้เคียงกันกับการอากาศหมุนวนเพียงอย่างเดียว($S_N = 1.5$) ทั้งๆที่มีค่า S_N ของกระแสอากาศและเชื้อเพลิงแบบหมุนสวนทางกัน(Counter Swirl)น้อยกว่าการฉีดเชื้อเพลิงหมุนวนเพียงอย่างเดียวมาก

ผลการทดลองที่สำคัญชิ้นหนึ่งได้แก่ทำการทดลองฉีดอากาศและเชื้อเพลิงแบบไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้หมุนสวนทางกัน(Counter Swirl)และหมุนวนทางเดียวกัน(Co-Swirl)เช่นกัน ได้ผลว่ามี Toroidal Vortex เกิดขึ้นเมื่อเป็นการหมุนวนแบบสวนทางกัน(Counter Swirl)เท่านั้น ถึงแม้ว่าการฉีดอากาศและเชื้อเพลิงแบบหมุนสวนทางกัน(Counter Swirl)จะทำให้เกิดการผสมผสาน(Mixing)สูง แต่กลับมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำกว่าการหมุนวนทางเดียวกัน(Co-Swirl) เพราะมีการผสมผสาน(Mixing)สูงมากเกินไปที่จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ [7]



(a)



(b)

รูปที่ 2.12 ผลการทดลองของ N. Syred N. A. Chigier และ J.M. Beer[5] (a)ค่า (b)การกระจาย

อุณหภูมิ

แต่ก็มีผลการวิจัยบางงานที่ได้รับผลที่แตกต่างกันในเรื่องการเกิด Toroidal Vortex ของการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบหมุนตามกันคือ มีการทดลองแบบมีและไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ ของการฉีดเชื้อเพลิงและอากาศแบบหมุนวนทางเดียวและหมุนวนสวนทางกันภายในห้องเผาไหม้ โดยการเผาไหม้เป็นแบบที่มีการผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงก่อน(Premixed) ได้ผลว่าบริเวณ Toroidal Vortex เกิดขึ้นเมื่อเป็นการการฉีดเชื้อเพลิงและอากาศแบบหมุนวนสวนทางกัน แต่กลับพบว่า มี Toroidal Vortex เกิดขึ้นในกรณีที่มีการฉีดอากาศและเชื้อเพลิงหมุนวนทางเดียวกันแบบมีปฏิกิริยาการเผาไหม้ แต่ขนาดความกว้างของ Toroidal Vortex เล็กกว่ากรณีที่หมุนวนสวนทางกันและมีค่า พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน(Turbulence Kinetic Energy,k) ต่ำกว่า [8]

การทำนายการเกิด Toroidal Vortex เป็นประเด็นหนึ่งที่มีผู้ให้ความสนใจศึกษากันมาก จึงได้ทำการทดลองและทำการคำนวณเชิงตัวเลข(Numerical Analysis) [9] แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการทดลอง [7] พบว่า Toroidal Vortex เกิดขึ้นในการหมุนวนทั้งหมุนวนตามกันและสวนทางกัน และได้สรุปว่าเป็นเช่นนี้เพราะปัจจัยที่มีอิทธิพลที่ทำให้เกิด Toroidal Vortex ไม่ได้มีเพียงแค่ว่า S_N เท่านั้น แต่ยังมีปัจจัยเรื่องรูปแบบการกระจายความเร็ว(Velocity Profile)ของความเร็วตามแนวแกนการไหล(U) และความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส(W)ที่บริเวณทางออกของ Nozzle อีกด้วย เช่นถ้าเปรียบเทียบกระแสการไหลหมุนวนคู่หนึ่งที่มีค่า S_N เท่ากัน แต่มีรูปแบบการกระจายความเร็ว(Velocity Profile)ต่างกัน ผลของบริเวณหมุนวนตามแนวแกนการไหล(Toroidal Recirculation Zone)ก็จะแตกต่างกัน ซึ่งถ้าเป็นเช่นนี้แล้วการผสมผสาน(Mixing)ก็แตกต่างกันถึงแม้ว่าจะมีค่า S_N เท่ากัน

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาระดับของค่า S_N ของกระแสอากาศและเชื้อเพลิงต่อการผสมผสาน(Mixing)ภายในบริเวณปฐมภูมิ(Primary Zone)ของห้องเผาไหม้ แบบที่ยังไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ และใช้อากาศแทนเชื้อเพลิง เพื่อดูการกระจายความเร็วภายในบริเวณปฐมภูมิของห้องเผาไหม้ อันเป็นแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพและเสถียรภาพของห้องเผาไหม้โดยการปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ของการเผาไหม้(Combustion aerodynamics) [3]

2.4 ทฤษฎีการเผาไหม้

2.4.1 นิยามของเผาไหม้

การเผาไหม้ คือ การรวมตัวทางเคมีของเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ปกติจะให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงออกมา เชื้อเพลิงที่ใช้กับกังหันก๊าซ โดยปกติ คือ ไฮโดรคาร์บอน โดยทั่วไปมีสูตร คือ C_xH_y

2.4.2 องค์ประกอบของอากาศแห้ง

ออกซิเจนที่ใช้เผาไหม้มาจากอากาศ โดยทั่วไปอากาศมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1 มีน้ำหนักโมเลกุล 28.9644 สำหรับอากาศแห้ง และตารางที่ 2.2 ให้ส่วนประกอบสำหรับคุณสมบัติของอากาศแห้ง

ตารางที่ 2.1 บรรยากาศมาตรฐานของอเมริกา ปี 1967

Constituent Gas (Formula)	Content (% by volume)	Content Variable Relative to Its Normal	Molecular Weight (¹² C = 12.0000)
Nitrogen (N ₂)	78.084	—	28.0134
Oxygen (O ₂)	20.9476	—	31.9988
Argon (Ar)	0.934	—	39.948
Carbon dioxide (CO ₂)	0.0314	*	44.00995
Neon (Ne)	0.001818	—	20.183
Helium (He)	0.000524	—	4.0026
Krypton (Kr)	0.000114	—	83.80
Xenon (Xe)	0.000087	—	131.30
Hydrogen (H ₂)	0.00005	?	2.01594
Methane (CH ₄)	0.0002	*	16.04303
Nitrous oxide (N ₂ O)	0.00005	—	44.0128
Ozone (O ₃)	Summer: 0 to 0.000007	*	47.9982
	Winter: 0 to 0.000002	*	47.9982
Sulfur dioxide (SO ₂)	0 to 0.0001	*	64.0628
Nitrogen dioxide (NO ₂)	0 to 0.000002	*	46.0055
Ammonia (NH ₃)	0 to trace	*	17.03061
Carbon monoxide (CO)	0 to trace	*	28.01055
Iodine (I ₂)	0 to 0.000001	*	253.8088

*The content of these gases may undergo significant variations from time to time or from place to place relative to the normal indicated for the gases.

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์อากาศแห้ง

Constituent	Molecular Weight	Percent by Volume
Nitrogen (N ₂)	28.0134	78.09
Oxygen (O ₂)	31.9988	20.95
Argon (Ar)	39.948	0.93
Carbon dioxide (CO ₂)	44.0100	0.03

2.4.3 การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

การสันดาปอย่างสมบูรณ์ สมการพื้นฐานสำหรับการเผาไหม้คาร์บอน และไฮโดรเจนกับ ออกซิเจนดังสมการ 2.19



สำหรับสมการเผาไหม้สมบูรณ์ของไฮโดรคาร์บอนกับออกซิเจน มีปฏิกิริยา คือ



จำนวนอากาศแห้งที่ต้องการตามทฤษฎี สำหรับสมการ 2.21 คือ

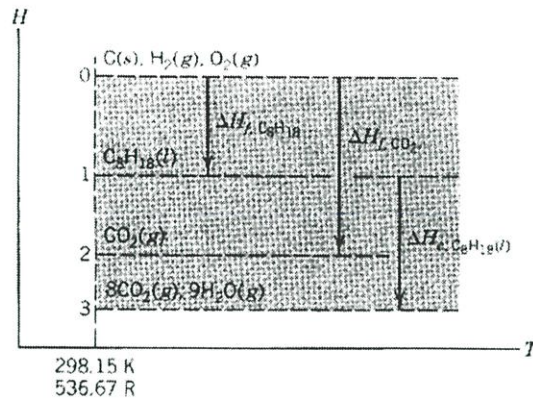
$$\frac{\text{โมลของอากาศแห้ง}}{\text{โมลของ } C_xH_y} = \frac{x + y/4}{0.2095} \quad (2.22)$$

เปอร์เซ็นต์อากาศแห้งเกินที่ใช้ มีนิยาม คือ ผลต่างระหว่างจำนวนอากาศที่ใช้ (S) ต่อจำนวนที่ต้องการตามทฤษฎี (R') หรือ

$$\% \text{ excess air} = \left(\frac{S - R'}{R'}\right) \times 100 \quad (2.23)$$

2.4.3 เอนทาลปีของการรวมตัว (Enthalpy of Formation)

สารประกอบทั้งหมด กำหนด โมลมาตรฐานของค่าเอนทาลปีของการรวมตัว ΔH_f แทน เอนทาลปีที่เปลี่ยนไปเป็นบวกหรือลบ เมื่อ 1 โมลของสารประกอบถูกรวมตัวที่เงื่อนไขมาตรฐานจากธาตุที่รวมตัวกัน เสถียรภาพมากที่สุด เราเรียกว่า ค่าเอนทาลปีของการรวมตัว หรือค่าความร้อนของการรวมตัวที่ความดันคงที่ ค่าเอนทาลปีของการรวมตัวของสสารที่สนใจใช้ในวิชานี้ดังแสดงในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.13 ไคอะแกรมเอนทาลปี-อุณหภูมิในการหาค่าเอนทาลปีของการเผาไหม้

ตารางที่ 2.3 ค่าความร้อนของการรวมตัวที่ความดันคงที่ของสารต่างๆ

Compound	Formula	Formula Weight	State	Constant-Pressure Heat of Formation, ΔH_f	
				(Btu/lb-mol)	(J/mol)
Argon	Ar	39.948	Gas	0	0
Carbon (graphite)	C	12.0112	Solid	0	0
Carbon monoxide	CO	28.0106	Gas	-47,517	-110,525
Carbon dioxide	CO ₂	44.0100	Gas	-169,179	-393,510
Methane	CH ₄	16.0430	Gas	-32,162	-74,809
Ethane	C ₂ H ₆	32.0701	Gas	-36,408	-84,685
Propane	C ₃ H ₈	44.0976	Gas	-44,647	-103,849
n-Butane	C ₄ H ₁₀	58.1248	Liquid	-63,480	-147,655
n-Heptane	C ₇ H ₁₆	100.2064	Liquid	-96,471	-224,392
n-Octane	C ₈ H ₁₈	114.2336	Liquid	-107,462	-249,957
Hydrogen atom	H	1.0080	Gas	93,708	217,965
Hydrogen	H ₂	2.0159	Gas	0	0
Water	H ₂ O	18.0153	Gas	-103,963	-241,818
Helium	He	4.0026	Gas	0	0
Nitrogen atom	N	14.0067	Gas	203,226	472,704
Nitrogen	N ₂	28.0134	Gas	0	0
Nitric oxide	NO	30.0061	Gas	38,800	90,249
Nitrogen dioxide	NO ₂	46.0055	Gas	14,264	33,178
Ammonia	NH ₃	17.0306	Gas	-19,823	-46,108
Oxygen atom	O	15.9994	Gas	107,124	249,170
Oxygen	O ₂	31.9988	Gas	0	0
Hydroxyl	OH	17.0074	Gas	16,747	38,954

^a Values from *Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties*, National Bureau of Standards Technical Note 270-3, 1968, and F. D. Rossini, *Selected Values of Physical and Thermodynamic Properties of Hydrocarbons and Related Compounds*, Carnegie Press, Pittsburgh, Pa., 1953.

จากรูปที่ 2.13 ความร้อนของการรวมตัวของ C₈H₁₈ (ของเหลว) และ CO₂ คือ (จากตารางที่ 2.3)

$$\Delta H_{f,C_8H_{18}} = H_1 - H_0 = 107,462 \text{ Btu/lb-mol} = 249,957 \text{ J/mol}$$

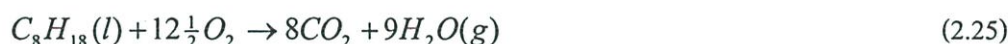
$$\Delta H_{f,CO_2} = H_2 - H_0 = 169,179 \text{ Btu/lb-mol} = 393,510 \text{ J/mol}$$

2.4.4 เอนทาลปีของการสันดาป (Enthalpy of Combustion)

ค่าเอนทาลปีของการสันดาป (ค่าความร้อนการสันดาปที่ความดันคงที่), ΔH_c มีนิยาม คือ การถ่ายเทความร้อนเมื่อสสาร 1 โมล ถูกเผาไหม้สมบูรณ์ที่ความดันคงที่ ก๊าซที่ได้จะเย็นลงเท่า อุณหภูมิเริ่มต้นของเชื้อเพลิง รูปที่ 2.13 ค่าเอนทาลปีของการสันดาปของคาร์บอน C (ค่าจากตาราง 2.3) คือ

$$\Delta H_{c,C} = H_2 - H_0 = 169,179 \text{ Btu/lb-mol} \quad (2.24)$$

ค่าเอนทาลปีของการสันดาป C_8H_{18} (ของเหลว) กับไอน้ำทั้งหมดในก๊าซ รูปที่ 2.13 และสมการ 2.21



$$\Delta H_{c,C_8H_{18}}(l) = H_3 - H_1 \quad (2.26)$$

$$= (H_3 - H_0) - (H_1 - H_0) \quad (2.27a)$$

$$= \sum (n_i \Delta H_{f,i})_{pr} - \sum (n_i \Delta H_{f,i})_{re} \quad (2.27b)$$

$$= (8)(-169,179) + (9)(-103,963) - (1)(-107,462)$$

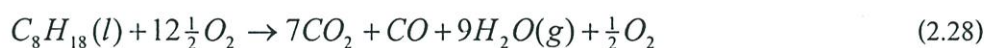
$$= -2,181,637 \text{ Btu/lb-mol } C_8H_{18}$$

$$= -19,098 \text{ Btu/lb}$$

ค่าเอนทาลปีของการสันดาปสามารถหาได้จากสมการ 2.24b สำหรับเชื้อเพลิงใดๆ ภายใต้เงื่อนไขที่พิจารณา

2.4.5 เอนทาลปีของปฏิกิริยา (Enthalpy of Reaction)

นิยาม คือ ความร้อนที่ถ่ายเทสำหรับปฏิกิริยาเคมี, ΔH_r , เฉพาะเมื่อเชื้อเพลิงสันดาป และได้สิ่งที่เหลือจากการสันดาปที่ความดัน และอุณหภูมิคงที่ สำหรับปฏิกิริยา



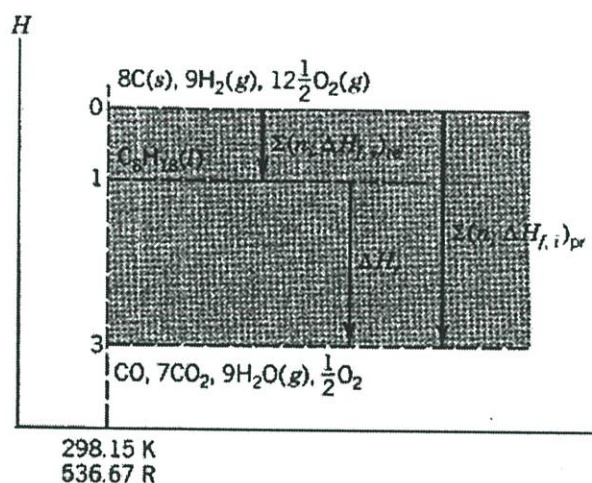
$$\Delta H_r = H_3 - H_1 = (H_3 - H_0) - (H_1 - H_0) \quad (2.29)$$

$$= \sum (n_i \Delta H_{f,i})_{pr} - \sum (n_i \Delta H_{f,i})_{re} \quad (2.30)$$

ใช้สมการ 2.27 หา ΔH_r สำหรับสมการ 2.26 จะได้

$$\begin{aligned} H_3 - H_0 &= (1)(-110,525) + (7)(-393,510) + (9)(-241,818) \\ &= -5,041,457 \text{ J/mol } C_8H_{18} \\ H_1 - H_0 &= -249,957 \text{ J/mol } C_8H_{18} \\ \Delta H_r &= -5,041,457 - (-249,957) \\ &= -4,791,500 \text{ J/mol } C_8H_{18} \end{aligned}$$

จะได้ค่า ΔH_r (ดูรูปที่ 214 ประกอบ)



รูปที่ 2.14 ไดอะแกรมเอนทาลปี-อุณหภูมิในการหาค่าเอนทาลปีของการปฏิกิริยา

2.4.6 อุณหภูมิเปลวที่ความดันคงที่แบบอะเดียแบติก

อุณหภูมิเปลวไฟที่ความดันคงที่แบบอะเดียแบติกเกิดขึ้นเมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาแบบอะเดียแบติกภายใต้กระบวนการความดันคงที่ อุณหภูมิตามอุดมคติสูงสุดที่เกิดขึ้น เมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้สมบูรณ์ สำหรับกระบวนการไหลราบเรียบแบบ adiabatic ไม่มีงานเพลลา

$$Q = 0 = H_{pr} - H_{re} \quad (2.31)$$

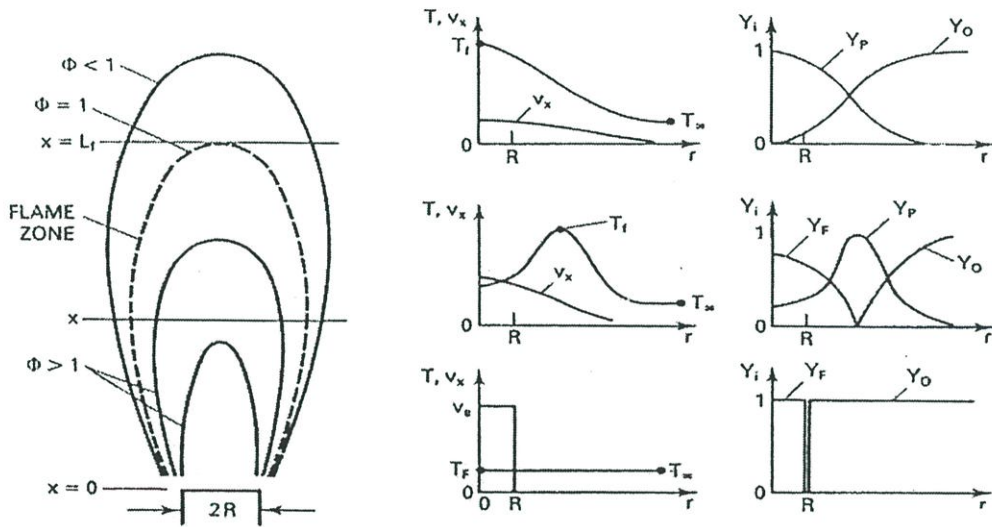
เมื่อ H_{pr} คือ เอนทาลปีของ products

H_{re} คือ เอนทาลปีของ reactants

การหาคำตอบของสมการ 2.28 ใช้วิธี Trial and Error

2.5 การเผาไหม้แบบไม่มีการผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้[16]

การเผาไหม้แบบไม่มีการผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้(Non-premixed Combustion) การเผาไหม้แบบนี้มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.15 เป็น โครงสร้างของเปลวไฟของการเผาไหม้แบบไม่มีการผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้แบบไหลราบเรียบ(Laminar Diffusion Flame) ก่อนที่จะอธิบายรูปที่ 2.5 มีตัวแปรที่ต้องทราบเพิ่มขึ้นสองตัวแปรคือ ϕ และ Y โดยที่



รูปที่ 2.15 โครงสร้างเปลวไฟของการเผาไหม้แบบไม่มีการผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้

$$\phi = \frac{f/A}{f/A_{stoi}} \tag{2.32}$$

ϕ (Equivalent Ratio)คือ อัตราส่วนสมมูลของการเผาไหม้ระหว่างมวลเชื้อเพลิงและมวลอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริงต่อสัดส่วนมวลเชื้อเพลิงและมวลอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้สมบูรณ์ทางทฤษฎี

$$Y_i = \frac{m_i}{m_1 + m_2 + \dots m_i + \dots} = \frac{m_i}{m_{tot}} \tag{2.33}$$

Y_i (Mass fraction of Species i)คือ ค่าสัดส่วนโดยมวลของสสารชนิดหนึ่งต่อสสารทั้งหมดที่มีอยู่ ณ บริเวณปริมาตรปิดใดๆ โดยที่ตัวห้อย Y แสดงว่าเป็นค่า Y ของสสารใด

จากรูปที่ 2.15 โครงสร้างของเปลวไฟ ซึ่งเชื้อเพลิงไหลแบบเจ็ตที่ออกจาก Nozzle ผู้บริเวณอากาศนิ่ง เมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะแพร่(Diffuse)ห่างออกจากแนวการไหลทุกทิศทาง แต่อากาศจะไหลเป็นทิศทางตรงกันข้าม บริเวณที่อากาศและเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์เป็นบริเวณที่เป็นเส้นประดังเห็นในภาพที่ 2.15 บริเวณนี้เป็นบริเวณที่เรียกว่า Flame Sheet บริเวณนี้มีขนาดบวมมาก มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่นๆและมีค่า ϕ เท่ากับ 1 ความยาวที่วัดจากปากทางออกของ Nozzle ตามแนวแกนจนถึงจุดสุดท้ายที่ค่า ϕ เท่ากับ 1 เรียกว่า Flame Length บริเวณ Flame Sheet เป็นบริเวณที่อากาศและเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากัน ก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ที่ Flame Sheet จะไหลเป็น 2 ทิศทางทั้งเข้าสู่และออกจากแนวแกนการไหล

จากรูปสามารถแบ่งโครงสร้างของเปลวไฟได้เป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนที่อยู่เหนือ Flame Length ขึ้นไป เมื่อดูกราฟของอุณหภูมิที่ และ Y_i ที่เปรียบเทียบกับระยะ r พบว่าอุณหภูมิและ Y_{pr} ซึ่งเป็นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ลดลงเมื่อค่า r เพิ่มขึ้น เพราะส่วนนี้ประกอบไปด้วยก๊าซร้อนไหลออกบริเวณ Flame Sheet เมื่อไหลออก ก็จะผสมกับอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่าและไหลเข้าสู่ Flame Sheet ทำให้อุณหภูมิและ Y_{pr} ลดลง ส่วนที่สองเป็นส่วนที่ระยะ x ใดๆ บริเวณนี้ก๊าซร้อนไหลออกจาก Flame Sheet เข้าสู่แนวแกนการไหล บริเวณนี้เชื้อเพลิงที่ไหลเข้าสู่ Flame Sheet เริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้น และมีค่า Y_F ลดเรื่อยๆจนหมดไปเมื่อถึง Flame Sheet อันเนื่องจากการผสมกับก๊าซร้อนที่ออกมาจาก Flame Sheet และเกิดการแตกตัวของเชื้อเพลิงอันเนื่องมาจากความร้อน

ส่วนสุดท้ายเป็นส่วนที่ระยะ x เท่ากับ 0 ซึ่งเป็นทางออก Nozzle มากและส่วนนี้ที่ระยะ r เท่ากับ 0 ถึง r เท่ากับ R จะมีเพียงแค่เชื้อเพลิงเท่านั้น แต่ที่ระยะ r มากกว่า R จะมีเพียงแต่อากาศเท่านั้น และยังไม่มีการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ณ บริเวณนี้

บทที่ 3

การสร้างอุปกรณ์การทดลองและการทดลอง

3.1 สมมติฐานที่ใช้ในการทดลอง

1. การทดลองเป็นการทดลองแบบไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้และใช้อากาศเป็นสารทำงานทั้งหมด รวมทั้งกระแสเชื้อเพลิง
2. ศึกษาการผสมผสาน(Mixing)เพื่อจำลองการไหลของการเผาไหม้แบบไม่มีการผสมอากาศและเชื้อเพลิงกันก่อนการเผาไหม้ (Non-Prmixed) ณ ที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ 25°C
3. บริเวณที่ศึกษาอยู่ภายในบริเวณปฐมภูมิ (Primary Zone) บริเวณนี้มีความยาวประมาณ $0.5D_L$ [1] ซึ่งคือ D_L เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลอง
4. การไหลเป็นการไหลแบบคงตัว(Steady State)
5. เชื้อเพลิงและอากาศมีการไหลแบบร่วมแกนการไหล(Double Concentric Flow) โดยที่กระแสอากาศจะห่อหุ้มกระแสอากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิง อีกทั้งนี้้อชเชิล(Nozzle)ที่ใช้ฉีดอากาศและอากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิงมีรูปร่างเป็นรูปวงแหวน
6. การไหลเป็นการไหลแบบสมมาตร (Axis Symmetric)
7. แรงลอยตัว(Buoyancy Force) ไม่มีผลต่อรูปแบบการไหล(Flow Pattern) ภายในห้องเผาไหม้

3.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

สภาวะที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้มีที่มาจากค่าการคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงที่จำเป็นต้องใช้ในการเผาไหม้เมื่อใช้ก๊าซเชื้อเพลิง[10]เป็นเชื้อเพลิง โดยที่ก๊าซเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของก๊าซและคุณสมบัติอื่นๆดัง แสดงในตารางที่ 3.1

จากค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงดังตารางที่ 3.1 ในทางปฏิบัติถือว่ามีความค่า LHV ค่าดังนั้นจาก[1] จึงแนะนำว่าควรออกแบบห้องเผาไหม้ให้มีการเผาไหม้ภายในบริเวณปฐมภูมิ (Primary zone) มีค่า $\phi=1.6$

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองว่าผลทิศทางของการหมุนวนเป็นเกลียว(Swirl)ของกระแสอากาศและอากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิงรวมความทั้งค่า S_N ภายในห้องเผาไหม้แบบส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิงหนาบาง(Rich-lean Combustor)[4] มีผลต่อผลการกระจายความเร็วและขนาดของ Reverse Recirculation Zone ภายใน Primary Zone ที่ $\phi=1.6$ อย่างไร

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง[10]

องค์ประกอบของก๊าซ	ปริมาณโดยโมล	Enthalpy of formation (kJ/kg)
CO_2	10.5	0
N_2	63	0
CH_4	1.5	-4676.9375
CO	9	-3947.892857
H_2	13.5	0
C_3H_8	2.5	-2360.1591
ค่า LHV ของก๊าซ		4198.29
มวลโมเลกุลของก๊าซเชื้อเพลิง		26.39
ความหนาแน่นที่ $25^{\circ}C$ ความดัน 1 บรรยากาศ		1.079 kg/m^3
อุณหภูมิเปลวอะเดียแบติก		1863.5 K
อัตราส่วนมวลเชื้อเพลิง/มวลอากาศที่การเผาไหม้สมบูรณ์ (f/A_{stoi})		1.55

3.3 การคำนวณปริมาณอากาศและอากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

ก่อนที่จะมีการคำนวณปริมาณอากาศและอากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิงในการทดลองนั้น จำเป็นต้องทำการกำหนดขนาดของห้องเผาไหม้เสียก่อน ซึ่งในการทดลองนี้เลือกใช้รูปร่างของห้องเผาไหม้แบบส่วนผสมอากาศและเชื้อเพลิงหนาบาง (Rich-lean Combustor) [4] แล้วขยายขนาดของห้องเผาไหม้จากแบบที่มีอยู่ให้ใหญ่ขึ้น 2 เท่า ซึ่งรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ก หลังจากนั้นจึงกำหนดขนาดน็อซเซิลที่ใช้ฉีดอากาศและอากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิงมีขนาดดังนี้

ตารางที่ 3.2 ขนาดของน็อซเซิลที่ใช้ในการทดลอง

น็อซเซิล	D_i (mm.)	D_o (mm.)
อากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิง	38	48
อากาศ	60	70

แต่จาก [1] แนะนำให้ภายใน Primary Zone มีการเผาไหม้ที่ $\phi=1.6$ ดังนั้นปริมาณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการเผาไหม้ ใช้สมการที่ 2.29 กำหนดได้ว่า

$$f/A = 2.48 \quad (3.1)$$

จากสมการความต่อเนื่องได้ว่า

$$m_i = \rho VA \quad (3.2)$$

และจาก [2] กล่าวไว้ว่าในกรณีที่เป็นการไหลเป็นกระแสเจ็ตแบบร่วมแกนการไหล (Co-axial Jet) นั้น อัตราส่วนของความเร็วระหว่างกระแสเจ็ตที่อยู่ภายใน และกระแสเจ็ตที่อยู่ภายนอก นั้นถ้ามีค่าดังสมการที่ 3.3 แล้วจะมี การผสมผสาน (Mixing) กันสูงที่สุด

$$\frac{V_i}{V_o} = 4 \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.2 นั้นเราจำเป็นต้องรู้ค่า V จึงจะสามารถคำนวณหาค่า m ได้ ซึ่งจาก [19] แนะนำว่าความเร็วเฉลี่ยของการฉีดเชื้อเพลิงควรมีค่าประมาณ 30-45 m/s ซึ่งในการทดลองนี้เลือกค่า 38 m/s ดังนั้นจากสมการ 3.1 และสมการ 3.2 แทนค่า $\rho_f V_f$ และ A_f เพื่อหาค่า m_a และ m_f ได้ว่า

$$\frac{\rho_f V_f A_f}{m_a} = 2.48 \quad (3.4)$$

ดังนั้นอัตราการไหลเชิงมวลของกระแสอากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิง m_a และ m_f จึงมีค่า 0.0303 kg/s และ 0.0115 kg/s ตามลำดับ ในการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยนค่าของ S_N ของอากาศและอากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิงดังนี้

เหตุที่ไม่ทำการทดลองที่ค่า S_N สูงๆ ก็เพราะในเวลาที่จะออกแบบห้องเผาไหม้จริงนั้น ถ้าหากว่าออกแบบห้องเผาไหม้ที่ค่า S_N สูง จะทำให้มีความดันตกภายในห้องเผาไหม้สูง[1] ส่งผลให้ค่าพลังงานกลสุทธิ (W_{net}) ที่ได้จากเครื่องยนต์มีค่าน้อยลง

ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

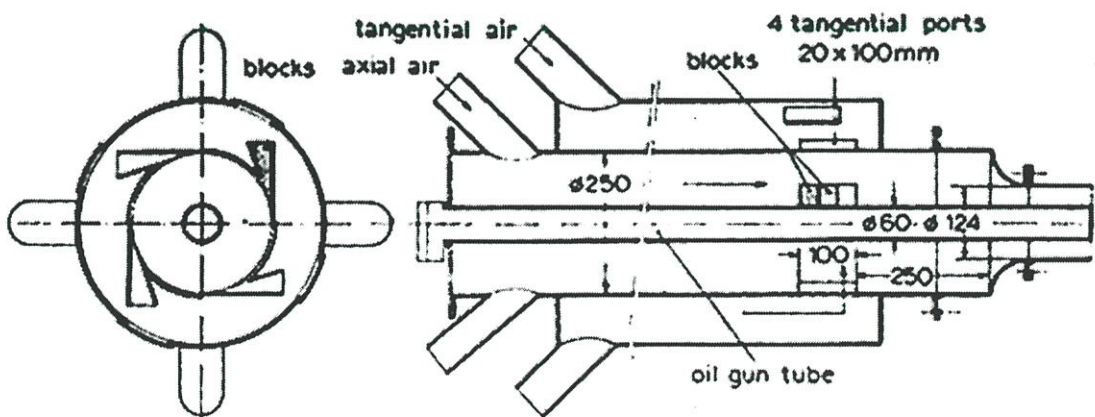
กรณีศึกษา	S_N	
	m_a	m_i
A	ไม่มีการฉีดอากาศ	0.61
B	-0.65	0.61
C	-0.3	0.61
D	0.3	0.61
E	0.65	0.61

3.4 หลักการเลือกและการคำนวณขนาดของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียว

3.4.1 วิธีการสร้างการหมุนวนเป็นเกลียว

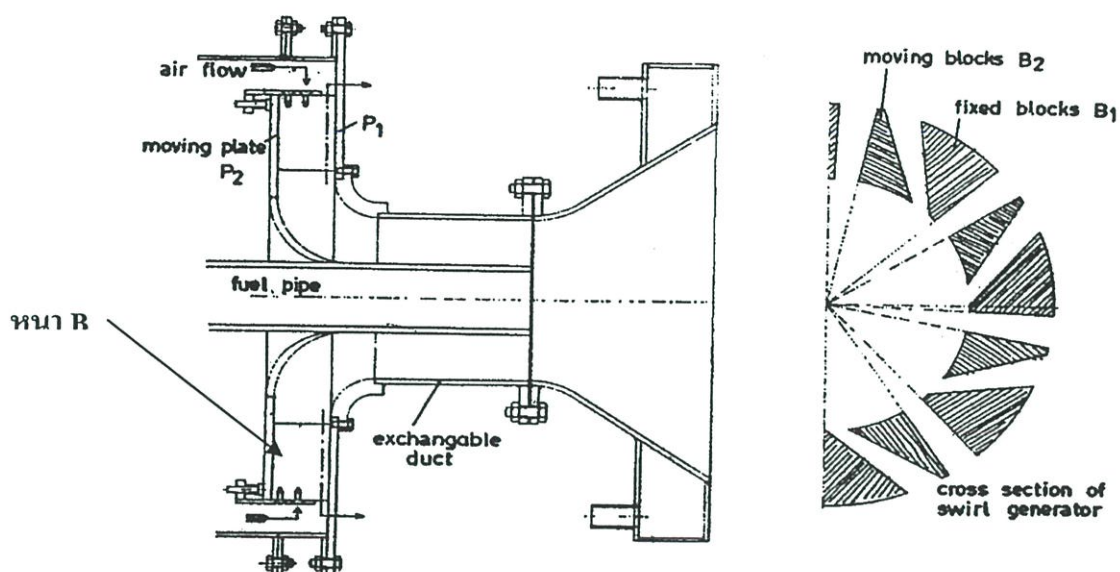
ก่อนที่ทำการเลือกอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียวนั้น จำเป็นต้องทราบก่อนว่าการสร้างการไหลหมุนวนแบบเป็นเกลียวนั้นมีหลักการสร้างได้ 3 หลักดังนี้

1. การฉีดก๊าซเข้าตามแนวเส้นสัมผัสของกระแสดำที่ไหลไปตามแกนการไหล เช่นการฉีดก๊าซเข้าตามแนวเส้นสัมผัสของท่อทรงกระบอก แสดงดังรูปที่ 3.1
2. ใช้ Guide Vane ขวางการไหลที่ไหลตามแนวท่อทรงกระบอก
3. ใช้การฉีดก๊าซไหลผ่านอุปกรณ์ที่ลักษณะคล้ายรังผึ้งที่หมุนด้วยความเร็วค่าหนึ่ง



รูปที่ 3.1 การสร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวโดยใช้ก๊าซฉีดเข้าในแนวเส้นสัมผัส[2]

3. อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบปรับค่าได้ (Movable Block –Type Swirl Generator)



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบปรับค่าได้[2]

3.4.3 การคำนวณค่าความรุนแรงของการหมุนวนเป็นเกลียว

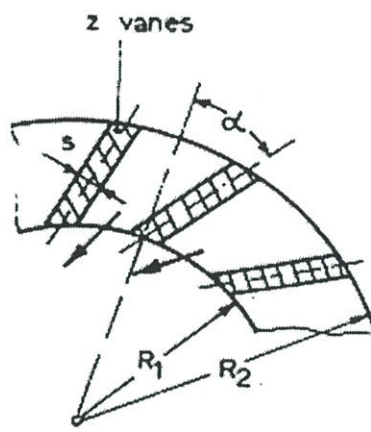
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบปรับค่าได้ (Movable Block) เพราะในการทดลองจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่า S_N ซึ่งหากว่าใช้อุปกรณ์ชนิดอื่นจำเป็นต้องสร้างหลายชิ้นซึ่งไม่สะดวก และเสียค่าใช้จ่ายมาก และหลักการคำนวณค่า S_N นั้นสามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ วัดค่าของการกระจายความเร็วและความดันสถิตย์ (P_0) ที่ปากทางออกของน็อซเซิลที่คำนวณค่า S_N โดยตรงดังสมการ 2.1 ถึง 2.3 ซึ่งวิธีการนี้เราหรือทำการคำนวณค่า S_N จากรูปร่างของชนิดของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวที่เลือกใช้[2]

เห็นได้ว่าจากสมการ 2.1 ถึง 2.3 จำเป็นต้องรู้ค่าโมเมนต์ตามแนวแกนการไหล (G_x) และโมเมนต์ตามแนวเส้นสัมผัส (G_θ) จึงจะสามารถคำนวณหาค่า S_N ได้ แต่ความเป็นจริงแล้วค่า S_N นั้นเป็นผลมาจากรูปร่างของชนิดของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวที่เลือกใช้ ดังนั้นเราสามารถคำนวณค่า S_N ได้จากการกระจายความเร็วของและอัตราการไหลโดยมวลของไหล ณ จุดที่ไหลออกจากใบของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวได้ โดยที่ความดันสถิตย์มีผลต่อค่า S_N น้อยมาก และสามารถเขียนสมการ 2.1 ได้เป็น

3.4.2 การเลือกอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียว

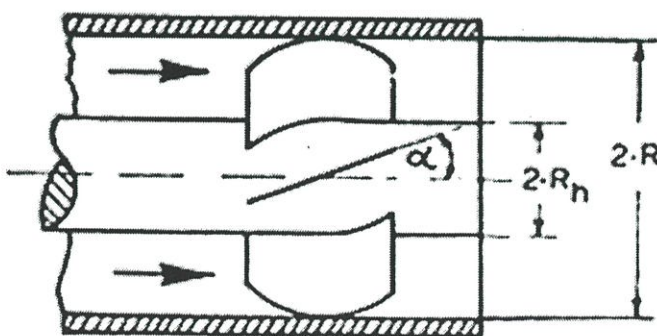
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบ Guide Vane ขวางการไหล ซึ่งแยกย่อยได้อีก 3 ชนิดคือ

1. อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบไหลเข้าตามแนวรัศมี (Guide Vane Cascade in Radial Flow)



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบไหลเข้าตามแนวรัศมี[2]

2. อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบไหลเข้าตามแนวแกนการไหล (Guide Cascade in Axial Tube Flow)



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบไหลเข้าตามแนวแกนการไหล

$$S' = \frac{G_\varphi}{G'_x R} \quad (3.5)$$

เมื่อ

$$G'_x = 2\pi \int_0^R \rho U^2 r dr \quad (3.6)$$

สำหรับค่าโมเมนต์ตามแนวเส้นสัมผัสสามารถเขียนได้เป็น

$$G_\varphi = \sigma \frac{\dot{M}^2}{\rho 2\pi B} \quad (3.7)$$

เมื่อ \dot{M} และ B คือค่าอัตราการไหลเชิงมวลและความหนาของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียว เห็นได้ว่ามีแปรเพิ่มขึ้นมาอีก 1 ตัวคือ σ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเร็วเฉลี่ยตามแนวรัศมี (\bar{V}_l) และความเร็วเฉลี่ยตามแนวเส้นสัมผัส (\bar{W}_l) ณ จุดที่ไหลออกจากใบของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียว ดังนี้

$$\sigma = \frac{\bar{V}_l}{\bar{W}_l} \quad (3.8)$$

เมื่อ

$$\bar{W}_l = \frac{G_\varphi}{\dot{M} R_l} \quad (3.9)$$

และ

$$\bar{V}_l = \frac{\dot{M}}{\rho \pi R_l B} \quad (3.10)$$

จาก[2] กล่าวว่าสมมติว่าค่า σ ไม่ขึ้นกับค่าเลขเรย์โนลด์ แต่ขึ้นอยู่กับรูปร่างและรัศมีของใบอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวเท่านั้น ดังนั้นค่า σ สำหรับอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนแบบปรับค่าได้เขียนได้เป็น

$$\sigma = \frac{2\pi}{Z\xi_m} \sin \alpha \frac{\cos \alpha [1 + \tan \alpha \tan(\xi/2)] (\xi/\xi_m)}{\{1 - [1 - \cos \alpha (1 + \tan \alpha \tan(\xi/2))] \xi/\xi_m\}} \quad (3.11)$$

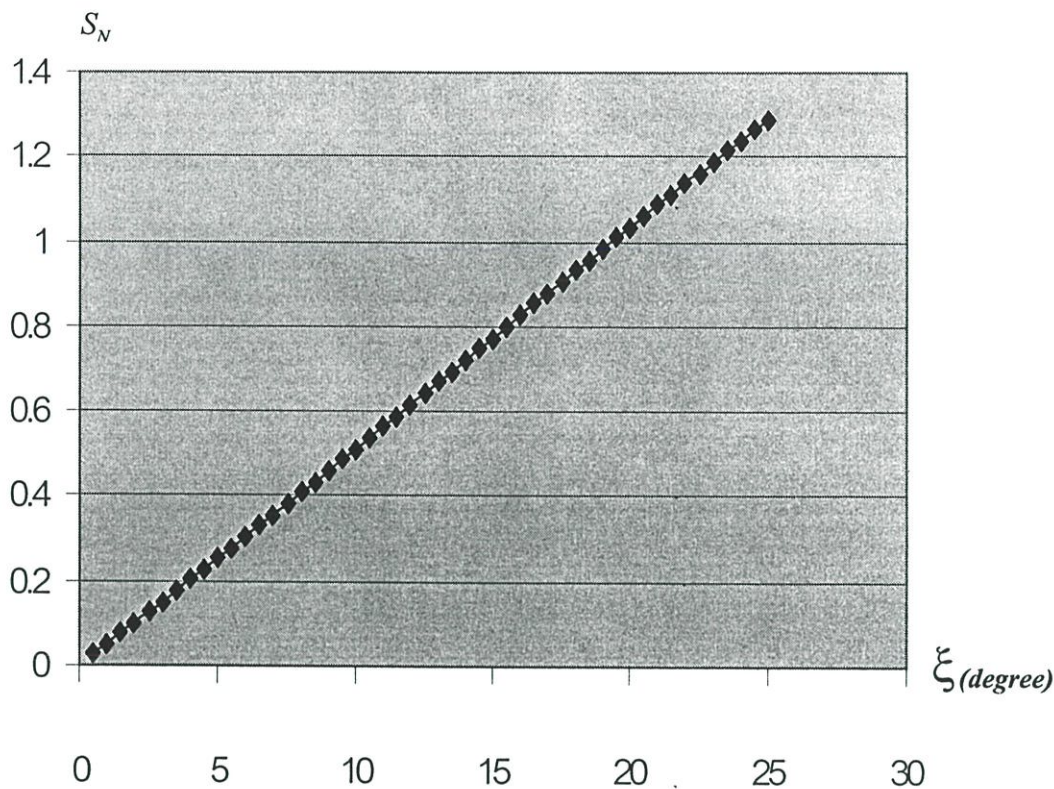
และสุดท้ายสามารถคำนวณค่า S_N ได้เป็น

$$S' = \frac{G_\varphi}{G'_x R} = \sigma \frac{R_2}{2B} \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

3.5 ผลการคำนวณอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบปรับค่าได้

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าการสร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียว(Swirl) นั้นมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแบบปรับค่า S_N ได้(Movable Block) เพราะในการทดลองจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่า S_N ซึ่งหากว่าใช้อุปกรณ์ชนิดอื่น จำเป็นต้องสร้างหลายชิ้นซึ่งไม่สะดวก และเสียค่าใช้จ่ายมาก และหลักการคำนวณค่า S_N ใช้สมการ ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.4

ในการออกแบบสร้างอุปกรณ์การหมุนวนนั้นออกแบบตามสภาวะที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเห็นได้ว่าเป็นการทดลองที่ค่า S_N ไม่สูงมากนัก ซึ่งจากสมการ 3.13 เห็นได้ว่าค่า S_N ขึ้นอยู่กับค่า ความหนา(B) อัตราส่วนรัศมี(R_1/R) จำนวนใบ(n) ความเอียงของใบ(α) และองศาที่ปรับ(ξ) ในการคำนวณอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียวในครั้งนี้มี 3 ชุดด้วยกัน คือ สำหรับอากาศที่ใช้แทน เชื้อเพลิง 1 ชุด สำหรับอากาศ 1 ชุด และ สำหรับอากาศที่ใช้แทนเชื้อเพลิงแต่ทิศทางการไหลสวนทางกับชุดของอากาศ(Counter Swirl) 1 ชุด ในการออกแบบนั้นมีขนาดดังที่กล่าวไว้ข้างต้นเท่ากัน แต่สำหรับชุดที่ 3 นั้นเพียงมีทิศทางการเอียงที่ตรงข้ามกับชุดอื่นๆ ซึ่งข้อมูลรายละเอียดนั้นแสดงใน ภาคผนวก ข จากการคำนวณสามารถสร้างกราฟของอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียวทั้ง 3 แบบ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง S_N และระหว่างองศาที่ปรับ(ξ) ได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่ปรับ(ξ) และ ค่า S_N .

3.6 การวัดความเร็วของก๊าซแบบ 3 มิติ

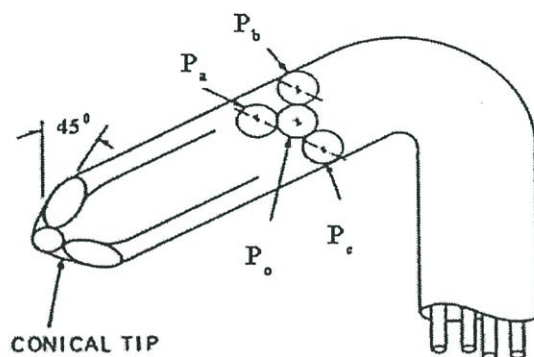
การวัดความเร็วของก๊าซแบบ 3 มิติเป็นหัวใจของงานวิจัยนี้ เพราะในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลของการผสมผสาน(Mixing)อันเกิดจากการปรับเปลี่ยนค่า S_N ของกระแสอากาศ ซึ่งการผสมผสาน(Mixing) นี้เราสามารถดูได้จากการกระจายความเร็วของก๊าซทั้ง 3 ทิศทาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาเครื่องมือวัดการไหลของก๊าซแบบ 3 มิติขึ้นมา

เครื่องมือวัดการไหลของก๊าซแบบ 3 มิติคือ โพรบชนิดหลายรู ซึ่งเป็นที่รู้จักและนิยมใช้ในการวัดความเร็วเฉลี่ยและทิศทางของก๊าซ แต่เดิมนั้นการใช้โพรบแบบหลายรูกระทำโดยการติดตั้งโพรบให้ปลายของโพรบอยู่ ณ ตำแหน่งที่ต้องการ แล้วทำการหมุนโพรบจนกระทั่งความดันของรูที่ล้อมรอบรูกลางมีค่าเท่ากันก็สามารถทราบได้ว่าของไหลที่บริเวณที่ทำการวัดมีความเร็วเฉลี่ย และมีทิศทางการไหลในทิศทางใด[13]

จากวิธีการดังกล่าวข้างต้น จะเกิดความยุ่งยากซับซ้อนและเสียเวลาในการทำการวัดมากกว่าทำการวัดหลายๆจุด เพราะต้องทำการปรับมุมของโพรบทุกครั้งที่ทำกรวัด ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวิธีการวัดใหม่โดยการสอบเทียบโพรบ จากการหมุนโพรบด้วยมุม Pitch และ Yaw ต่างกันๆ แล้วทำเก็บค่าความดันของแต่ละรูของโพรบแล้วนำค่าที่ได้ไปสร้าง Chart เพื่อใช้ในการทำการวัด

จริง จากวิธีการนี้พบว่าโพรบมีการวัดที่เชื่อถือได้เมื่อใช้โพรบวัดการไหลที่ทำมุม Pitch และ Yaw ไม่เกิน $\pm 45^\circ$ [13]

แต่ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นโพรบชนิด 4 รู โดยที่ทำการพัฒนาขึ้นมาใช้ในการเรียนการสอนวิชาอากาศพลศาสตร์ทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงมาก โพรบมีรู 3 รู ล้อมรอบรูที่อยู่ตรงกลางดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะของโพรบแบบ 4 รู

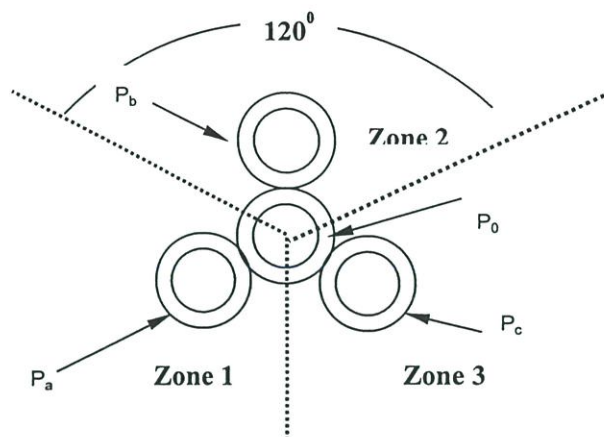
จากรูปที่ 3.6 ปลายของโพรบมีรูปร่างเหมือนปิรามิด 3 เหลี่ยมแต่เป็นปิรามิดหัวตัดเพราะรูตรงกลางจะแบบราบแต่ผิวด้านข้างแต่ละรูที่อยู่ด้านนอกทำมุมเฉียง 45° และแต่ละรูจะทำมุมกัน 120° ดังรูปที่ 3.7

รูตรงกลางของโพรบทำหน้าที่วัดความดันรวม(Total Pressure) ซึ่งถ้ามุมของก๊าซที่มาปะทะปลายโพรบมีมุมที่เข้าใกล้ 90° (Low Incident Angle)กับรูกลาง ความดันที่วัดได้จะเข้าใกล้กับความดันรวมของก๊าซมาก และรูด้านข้างของ โพรบ 3 รูทำหน้าที่วัดมุมของก๊าซที่มาปะทะ[13]

การที่ปลายของโพรบมีรูปร่างเป็นปิรามิดแทนที่จะเป็นทรงกลมตัดครึ่งลูกมีข้อดีคือ สร้างได้ง่าย สามารถวางตำแหน่งของรูด้านข้างได้อย่างแม่นยำ และการที่มีผิวด้านข้างแบนทำให้ไม่มีความดันต่างบนผิวแตกต่างกันไป ซึ่งทำให้ความดันที่วัดได้จากแต่ละรูมีค่าแตกต่างกันน้อยมากเมื่อทำการวัดค่ามุมคงที่แต่เปลี่ยนค่าเลขเรย์โนลด์(Reynold Number) [13] ซึ่งแสดงว่ามุมที่วัดได้ไม่ขึ้นอยู่กับค่าเลขเรย์โนลด์(Reynold Number)

3.6.1 การสร้างโพรบ

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สร้างโพรบประกอบไปด้วยเข็มฉีดยาเบอร์ 16 ใช้ทำบริเวณปลายของโพรบ(tip) ท่อทองเหลืองใช้ทำเป็นก้านต่อกับส่วนปลายและใช้ยึดกับแท่นจับโพรบ เข็มฉีดยาที่ใช้ติดด้านข้างต้องฝนให้ทำมุมเฉียง 45° ส่วนเข็มที่จะใช้ทำรูกลางฝนให้หน้าตัดแบบราบ หลังจากนั้นยึดติดกันด้วยกาว เหตุที่ต้องสร้างโพรบด้วยวิธีนี้เพราะมีราคาถูกและสามารถสร้างได้ง่าย



รูปที่ 3.7 ลักษณะด้านหน้าของโพรบ

3.6.2 การสอบเทียบโพรบ

สิ่งที่ต้องการจากการสอบเทียบคือค่าของความดันที่วัดได้จากแต่ละรูของโพรบ โดยใช้ความเร็วของของอากาศประมาณ 21.6 m/s ในการสอบเทียบ โดยที่รูปของการสอบเทียบแสดงในภาคผนวก ข เมื่อปรับเปลี่ยนค่ามุมพิทช์ (Pitch Angle, α) และมุมยอร์ (Yaw Angle, θ) ที่ละ 5° และอยู่ในช่วง $\pm 41^\circ$ ดังรูปที่ 3 แล้วนำค่าที่ได้ไปทำการสร้างชาร์ทของความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติ $X1$ และ $X2$ สำหรับการหาค่าความเร็ว จำเป็นต้องใช้ตัวแปรไร้มิติ XD และ XT ซึ่งการคำนวณค่าตัวแปรไร้มิติใช้สมการดังนี้ [14]

$$X1 = (P1-P2)/(P0-P3) \quad (3.13)$$

$$X2 = (P2-P3)/(P0-P3) \quad (3.14)$$

$$XD = 0.5 \text{density} V^2 / (P0-P3) \quad (3.15)$$

$$XT = (Pt-P0)/(P0-P3) \quad (3.16)$$

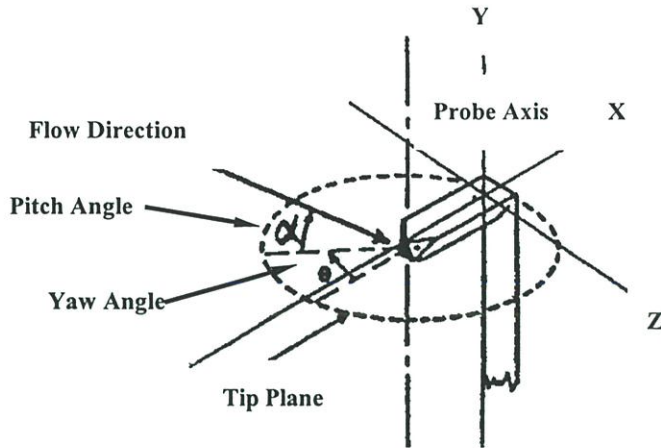
หลังจากนั้นจึงนำมาสร้างชาร์ทการสอบเทียบตามสมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\alpha = f(X1, X2) \quad (3.17)$$

$$\theta = f(X1, X2) \quad (3.18)$$

$$Xt = f(X1, X2) \quad (3.19)$$

$$Xd = f(X1, X2) \quad (3.20)$$



รูปที่ 3.8 มุมพิทช์(Pitch Angle, α)และมุมยอร์ว(Yaw Angle, θ)

ในการสร้างชาร์ทของความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติ จำเป็นต้องแบ่งบริเวณของปลายโพรบออกเป็น 3 บริเวณด้วยกันดังรูปที่ 3.7 แล้วทำการสร้างชาร์ทของแต่ละบริเวณโดยใช้สมการที่ 3.17 ถึง 3.20 ซึ่งเกณฑ์ในการแบ่งบริเวณและการเลือกความดัน P_0 P_1 P_2 และ P_3 ทำดังนี้ โดยที่ P_0 คือค่าความดันของรูกลาง และ P_t เป็นความดันรวม(Total Pressure)ที่ได้จาก Pitote Static Tube อีกอันหนึ่งที่วางขนานกับทิศทางการไหลของก๊าซ และมีมุมปะทะ 0 องศา ($\alpha = 0, \theta = 0$)

การเลือกบริเวณ(Zone) พิจารณาว่าความดันใดมีค่าต่ำที่สุด เช่น P_c มีค่าต่ำสุด แสดงว่าเป็นชาร์ทของบริเวณที่ 3 ดังนั้นต้องกำหนด

$$P_c = P_3 \quad (3.21)$$

$$P_a = P_1 \quad (3.22)$$

$$P_b = P_2 \quad (3.23)$$

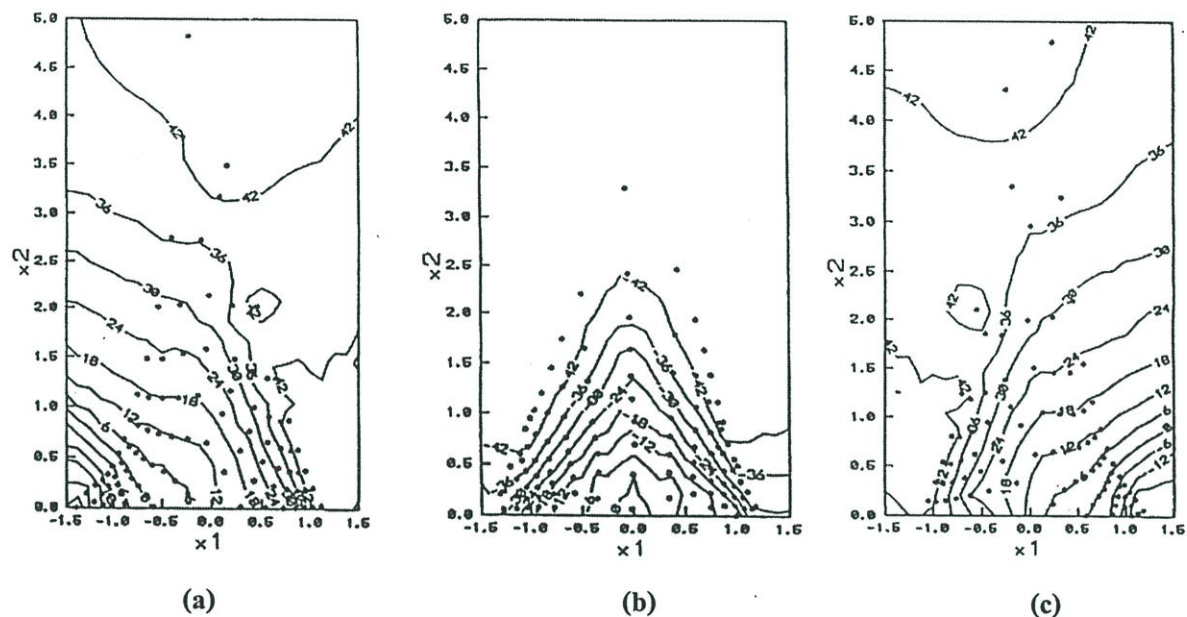
เห็นได้ว่าเป็นการนับแบบตามเข็มนาฬิกาซึ่งเราอาจจะทำการนับทวนเข็มนาฬิกา การกำหนดความดันจะเป็นดังนี้

$$P_c = P_3 \quad (3.24)$$

$$P_b = P_1 \quad (3.25)$$

$$P_c = P_2 \quad (3.26)$$

เมื่อได้ค่าความดันครบทั้ง 4 ค่า ก็นำค่าที่ได้ไปสร้างชาร์ทของการสอบเทียบตามสมการที่ 3.17 ถึง 3.20 ซึ่งตัวอย่างของชาร์ทของการสอบเทียบดังรูปที่ 4 ส่วนรายละเอียดของผลของการสอบเทียบ แสดงในภาคผนวก ค และ[15]



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างของชาร์ทของการสอบเทียบจากเอกสารอ้างอิงของมุม Yaw ที่บริเวณต่างๆ

(a) zone 1 (b) zone 2 (c) zone 3

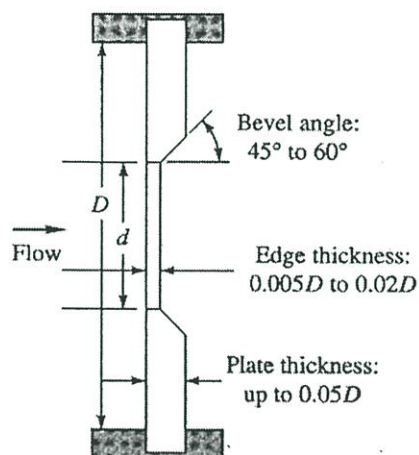
3.7 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ

เครื่องมือวัดอัตราการไหลของก๊าซที่ใช้ในการทดลองนี้เลือกใช้ ออโรฟิส(Orifice)เพราะสามารถสร้างได้ง่ายและมีราคาถูก แต่มีข้อเสียคือถ้าใช้กับก๊าซที่มีอนุภาคของแข็งเล็กๆปะปน จะทำให้เกิดการสึกกร่อนอย่างรวดเร็ว อีกทั้งการใช้ออโรฟิสนี้ทำให้เกิด Head Loss ที่สูงมาก

ออโรฟิสเป็นอุปกรณ์การวัดอัตราการไหลของก๊าซ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วางขวางการไหล โดยที่พื้นที่ของไหลสามารถไหลผ่านออโรฟิสนั้นจะเล็กกว่าพื้นที่หน้าตัดการไหลเดิม ในการวัดนั้นอาศัยหลักการของการวัดความแตกต่างของความดันของก๊าซก่อนและหลังผ่านออโรฟิส หลังจากนั้นจึงนำมาใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซ โดยที่ค่าความดันแตกต่างกันจะแปรผันตามอัตราการไหล กล่าวคือถ้าอัตราการไหลมากความแตกต่างของความดันก็จะมากแต่เมื่ออัตราการไหลน้อยก็จะเกิดเหตุการณ์ตรงกันข้าม

โดยทั่วไปแล้วจะใช้ออโรฟิสในการไหลที่สภาวะคงตัว(Steady State)เท่านั้น ไม่นิยมใช้วัดอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (JIS, Japanese Industrial Standard, Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plate, Nozzle

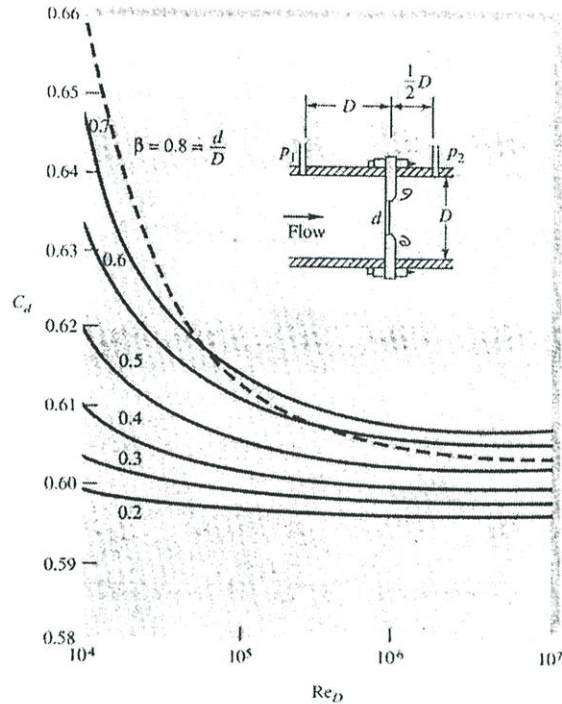
and Venturi Tube JIS Z 8762) ซึ่งการออกแบบรูปร่างของออริฟิสนั้นมี รูปร่างที่ต้องคำนึงถึงดังรูปที่ 3.10 [11]



รูปที่ 3.10 ลักษณะมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบออริฟิส

ในงานวิจัยนี้เลือกการวัดการแตกต่างความดันดังรูปที่ 3.11 คือก่อนก๊าซในท่อกลมจะไหลผ่านออริฟิสมิความเร็วคงที่ทั่วทั้งหน้าตัด VI เมตรต่อวินาที หลังจากที่ก๊าซไหลผ่านออริฟิสลักษณะการไหลจะเป็นรูปลำของไหลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ $D/2$ เมตร ณ บริเวณจุดวัดความดันที่ 2 ซึ่งเป็นจุดที่มีหน้าตัดการไหลน้อยที่สุด (Vena Contracta) และมีความเร็วสูงที่สุดรวมทั้งมีความดันสถิตยตามความสัมพันธ์ของสมการเบอญลี (Bernoulli) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 การวัดความดันที่ตำแหน่งแตกต่างกันจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพ่น (Discharge Coefficient, C_d) ต่างกัน [11]

สมมติฐานของงานวิจัยนี้คือก๊าซที่ไหลภายในท่อไม่มีการอัดตัว (เนื่องจากค่า Mach Number ภายในท่อน้อยกว่า 0.3) ความเร็วของของไหลมีค่าคงที่ตลอดหน้าตัด (โดยที่ไม่คิดบริเวณที่เรียกว่า บริเวณกระแสไหลวน) ของไหลมีความหนืดน้อยมากและการไหลเป็นการไหลแบบคงตัว (Steady State Steady Flow)



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งที่ใช้วัดความดันในการทดลอง

จากข้อสมมติฐานข้างต้นเราสามารถนำสมการเบอญลี(Bernoulli) มาใช้ในการอธิบายคุณสมบัติการไหล ณ จุดต่างๆภายในท่อได้ ดังนั้นจากสมการเบอญลี(Bernoulli) เราสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรได้ดังสมการ

$$Q_{ac} = C_d A_o \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\rho g [1 - (d_o/D)^4]}} \quad (3.27)$$

เมื่อ

P คือ ความดันสถิตย์ของของไหล (N/m^2)

A_o คือ พื้นที่หน้าตัดของรูออริฟิส (m^2)

ρ คือ ความหนาแน่นของก๊าซ (kg/m^3)

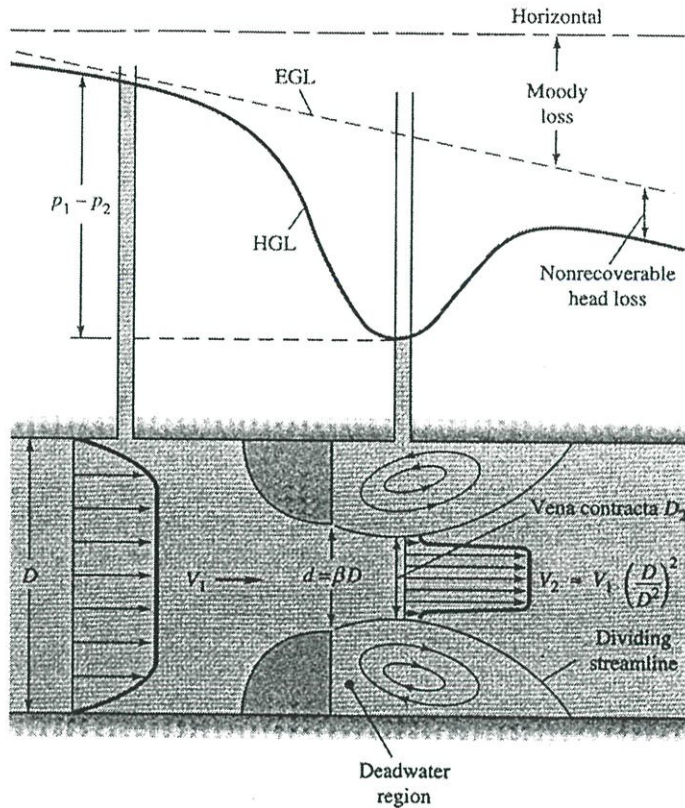
D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อ (m.)

d_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของออริฟิส (m.)

C_d คือ สัมประสิทธิ์การพ่น (Discharge Coefficient)

ตัวห้อย 1 คือ ค่าที่จุดทางทฤษฎีจุดที่ 1

ตัวห้อย 2 คือ ค่าที่จุดทางทฤษฎีจุดที่ 2



รูปที่ 3.12 รูปร่างการไหลผ่านออริฟิส

จากสมการที่ 3.27 เห็นได้ว่ามีค่าตัวแปรใหม่ในสมการคือค่า C_d ซึ่งค่านี้เป็นฟังก์ชันของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของออริฟิส (d_o) จุดที่ทำการวัดความดัน และเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (D) ดังสมการที่ 3.28

$$C_d = f(B) + 91.71B^2 Re_D^{-0.75} + (0.09B^4 / (1-B^4) F_1) - 0.0337B^3 F_2 \quad (3.28)$$

เมื่อ

$$f(B) = 0.5959 + 0.0312B^{2.1} - 0.184B^8 \quad (3.29)$$

$$B = d_o/D \quad (3.30)$$

$$F_1 = 0.4333 \quad (3.31)$$

$$F_2 = 0.47 \quad (3.32)$$

ซึ่งค่า F_1 และ F_2 ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ทำการวัดความดัน ซึ่งในการวัดความดันนั้นจะมีอยู่ 3 จุด วัดจากก่อนที่ก๊าชจะเข้าออริฟิส (P_1) และจุดหลังจากก๊าชออกจากออริฟิส (P_2) ที่นิยามดังสรุปในตารางดังนี้

ตารางที่ 3.4 ค่า F_1 และ F_2 เมื่อวัดค่า P_1 และ P_2 แบบต่างๆ

แบบที่	ตำแหน่งที่วัด P_1	ตำแหน่งที่วัด P_2	F_1	F_2
1	0	0	0	0
2	D	0.5D	0.4333	0.47
3	1 inch	1 inch	1/D (inch) ถ้า $D > 2.3$ inch 0.4335 ถ้า $2.0 \leq D \leq 2.3$ inch	1/D(inch)

ดังนั้นอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซที่ไหลผ่านออร์ฟิสจึงเขียนได้ว่า

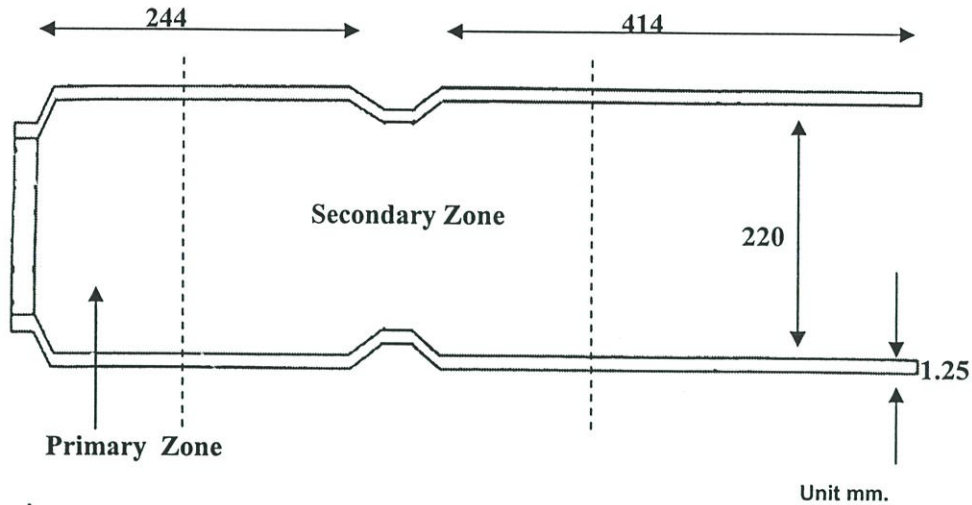
$$m_i = \rho \dot{Q}_{ac} \quad (3.33)$$

3.8 การกำหนดขนาดของออร์ฟิสที่ใช้ในการทดลอง

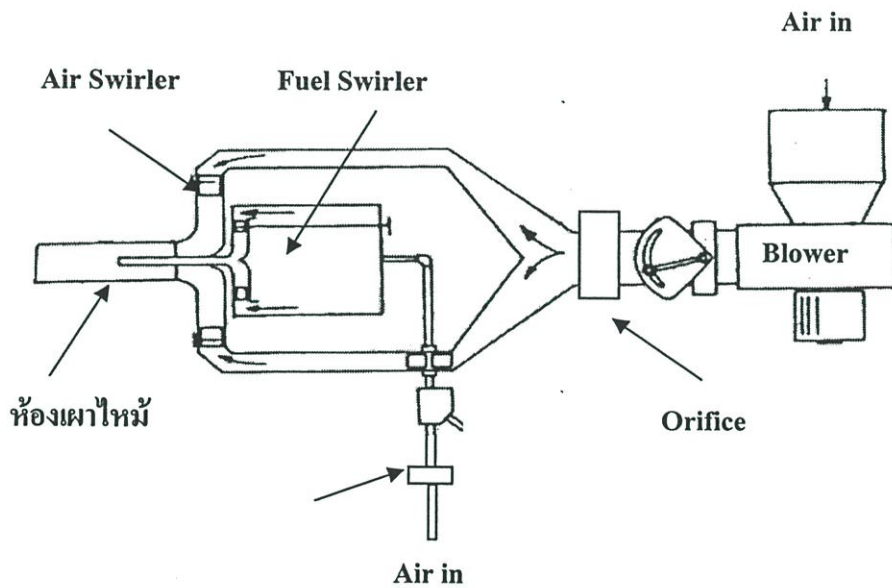
ในการทดลองนี้เลือกใช้ท่อที่ส่งอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $50 \text{ mm.}(D)$ ดังนั้นในการคำนวณเราใช้และจากหัวข้อ 3.7 ได้ว่าเราใช้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ใช้แทนเชื้อและอากาศที่ 0.0303 kg/s และ 0.0115 kg/s ตามลำดับ ดังนั้นเราจึงนำค่านี้มาใช้ในการกำหนดขนาดของรูออร์ฟิส ซึ่งหลักเกณฑ์ในการเลือกจะใช้ขนาดของรูออร์ฟิสเป็นเท่าใดนั้น ขึ้นอยู่กับว่าเมื่อเรากำหนดหาความสูงของระดับน้ำที่เราใช้วัดความดันแล้วไม่มีค่าสูงมากเกินไป หรือมีค่าต่ำเกินไป เพราะจะอ่านค่าได้ยาก ทั้งนี้ถ้าหากว่าออร์ฟิสมีขนาดของรูที่เล็กเกินไปจะทำให้เกิดความดันตกที่สูงมาก และจะทำให้มอเตอร์ของโบลเวอร์ที่นำมาใช้ในการทดลองต้องใช้พลังงานสูง ก่อให้เกิดความร้อนถ่ายเทสู่อากาศที่ผ่าน โบลเวอร์มาก ส่งผลให้ความหนาแน่นของอากาศเปลี่ยนและการทดลองก็จะเกิดความผิดพลาดในที่สุด

3.9 ภาพรวมของการทดลอง

ภาพที่ 3.13 เป็นภาพร่างคร่าวๆของห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลองนี้ ซึ่งขยายจากแบบของ[4] 2 เท่า ซึ่งรูปของห้องเผาไหม้ที่ใช้แสดงในภาคผนวก ก ส่วนภาพที่ 3.14 เป็นภาพรวมของการทดลองและภาพรายละเอียดของการทดลองแสดงในภาคผนวก จ



รูปที่ 3.13 ห้องเผาไหม้แบบ Rich-Lean



รูปที่ 3.14 ภาพรวมของการทดลอง

จากรูปต้องใช้โบลเวอร์จำนวน 2 ตัว ออร์ฟิสสำหรับวัดอัตราการไหลของก๊าซจำนวน 2 ตัว และใช้อุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียวแบบปรับค่าได้ 2 ชุด

ในการทดลองใช้เครื่องวัดความเร็วก๊าซแบบ 3 มิติวัดการกระจายความเร็วภายในบริเวณปฐมภูมิของห้องเผาไหม้ ดังเสนอในรูปที่ 3.13 ซึ่งบริเวณปฐมภูมิมีความยาว $0.5D_L$ จึงวัดการกระจายความเร็วตั้งแต่ปากทางออกของน็อซเซิลจนถึงระยะ 1150 mm. โดยวัดห่างกันหน้าตัดละ 10 mm. และแต่ละหน้าตัดวัดห่างกันจุดละ 2.5 mm. ในรัศมี ในการวัดจะทำการวัดกรณีที่ความดันรูกกลางของเครื่องมือวัด(P0)มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศเท่านั้น เพราะหากว่าบริเวณใดมีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศแสดงว่าบริเวณนั้นเป็นบริเวณที่เป็น Toroidal Vortex ซึ่งเป็น

การไหลย้อนกลับ อันเป็นข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ยังไม่สามารถวัดการกระจายความเร็วในบริเวณนี้
ได้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ดังที่กล่าวมาจากวัตถุประสงค์ในบทที่ 1 ว่าในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาถึงผลของการไหลเป็นเกลียวแบบร่วมแกนกัน(Co-flow)แบบไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่มีต่อการผสมผสาน(Mixing) ภายในบริเวณปฐุมภูมิภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งหลักฐานที่แสดงให้เห็นมีการผสมผสานมากหรือน้อยเพียงใดนั้น ในที่นี้สามารถแสดงให้เห็นได้ 2 ชนิดคือ ขนาดของ Toroidal Vortex และการกระจายความเร็ว โดยในงานวิจัยนี้เราบ่งบอกขนาดของ Toroidal Vortex จากขนาดของ Reverse Region ในหัวข้อที่ 4. 1 ส่วนการกระจายความเร็วภายในบริเวณปฐุมภูมิแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.2

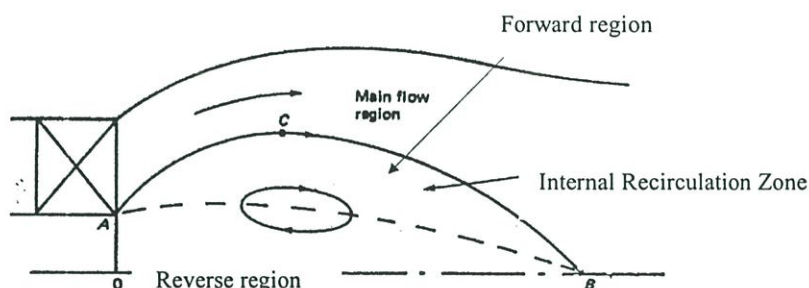
4.1 ขนาดของ Recirculation Zone

Recirculation Zone หาได้โดยการสังเกตความดัน P_0 ของเครื่องมือวัดว่าบริเวณใดมีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศ เพราะบริเวณที่มีค่าความดัน P_0 ต่ำกว่าความดันบรรยากาศเป็นบริเวณ Reverse Region ของ Recirculation Zone เพราะเป็นบริเวณที่มีการไหลย้อนกลับอันเนื่องจากเกิดความดันต่ำบริเวณ Up Stream เมื่อเปรียบเทียบกับ Down Stream และขนาด Recirculation Zone นั้นแปรผันตาม Reverse Region และเพื่อให้ง่ายต่อการอ่านข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จึงขอนำเสนอตารางสรุปสภาวะที่ใช้ในการทดลองซ้ำอีกครั้งหนึ่งดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 4.1 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

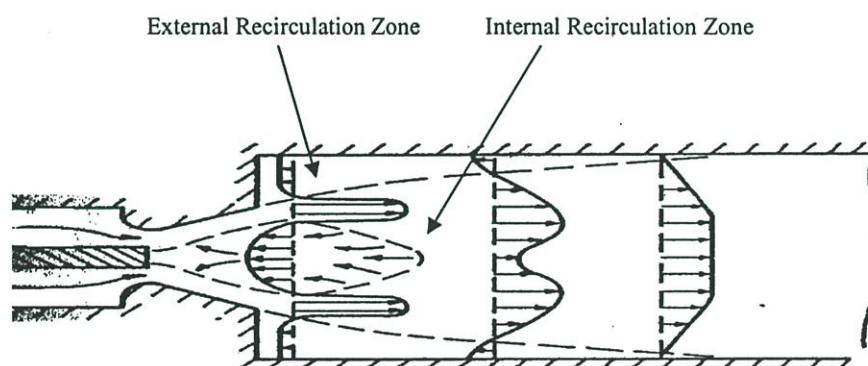
กรณีศึกษา	S_N	
	m_a	m_i
A	ไม่มีการฉีดอากาศ	0.61
B	-0.65	0.61
C	-0.3	0.61
D	0.3	0.61
E	0.65	0.61

แต่เนื่องจากในการทดลองนี้เกิด Recirculation Zone ขึ้นสองส่วนคือ Internal Recirculation Zone และ External Recirculation Zone ซึ่งแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 Internal Recirculation Zone

รูปที่ 4.1 เป็นรูปของ Internal Recirculation Zone หรือ Toroidal Vortex ซึ่งเกิดบริเวณแกนกลางของห้องเผาไหม้ การกระจายความเร็วที่วัดได้ในการทดลองนี้ วัดได้จากบริเวณ Main Flow Region ของ Forward Region ของ Internal Recirculation Zone ยังไม่สามารถวัดความเร็วบริเวณ Reverse Region ได้เพราะเป็นการไหลย้อนกลับ ประโยชน์ของ Toroidal Vortex นั้นได้กล่าวไว้อย่างละเอียด แล้วในบทที่ 2 ว่ามีความสำคัญมากในการช่วยผสมผสานก๊าซภายในห้องเผาไหม้

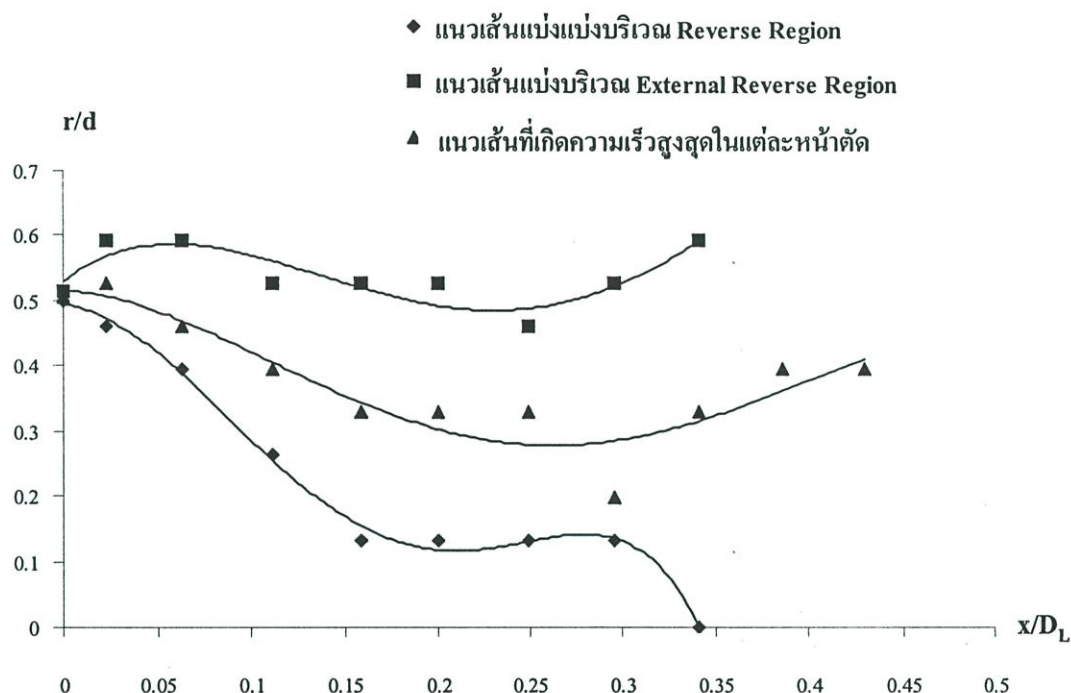


รูปที่ 4.2 Internal และ External Recirculation Zone

รูปที่ 4.2 เป็นรูปที่แสดงให้เห็นถึง Internal Recirculation Zone และ External Recirculation Zone ซึ่งบริเวณ External Recirculation Zone นั้นเป็นบริเวณที่เกิดบริเวณที่ติดกับผนังห้องเผาไหม้ดังรูปที่ 4.2 และบริเวณนี้มีส่วนช่วยให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ[4] ซึ่งกลไกการเกิดบริเวณนี้ขึ้นอยู่กับ

กระจายความเร็วที่บริเวณปากทางออกของห้องเผาไหม้และรูปร่างของห้องเผาไหม้เป็นสำคัญ[9] ผลการทดลองเรื่องขนาดของ Recirculation Zone มีดังนี้

4.1.1 ขนาด Recirculation Zone ของการทดลองแบบ A



รูปที่ 4.3 ขนาดของ Reverse Region และแนวเส้นที่เกิดความเร็วสูงสุดของการทดลองแบบ A

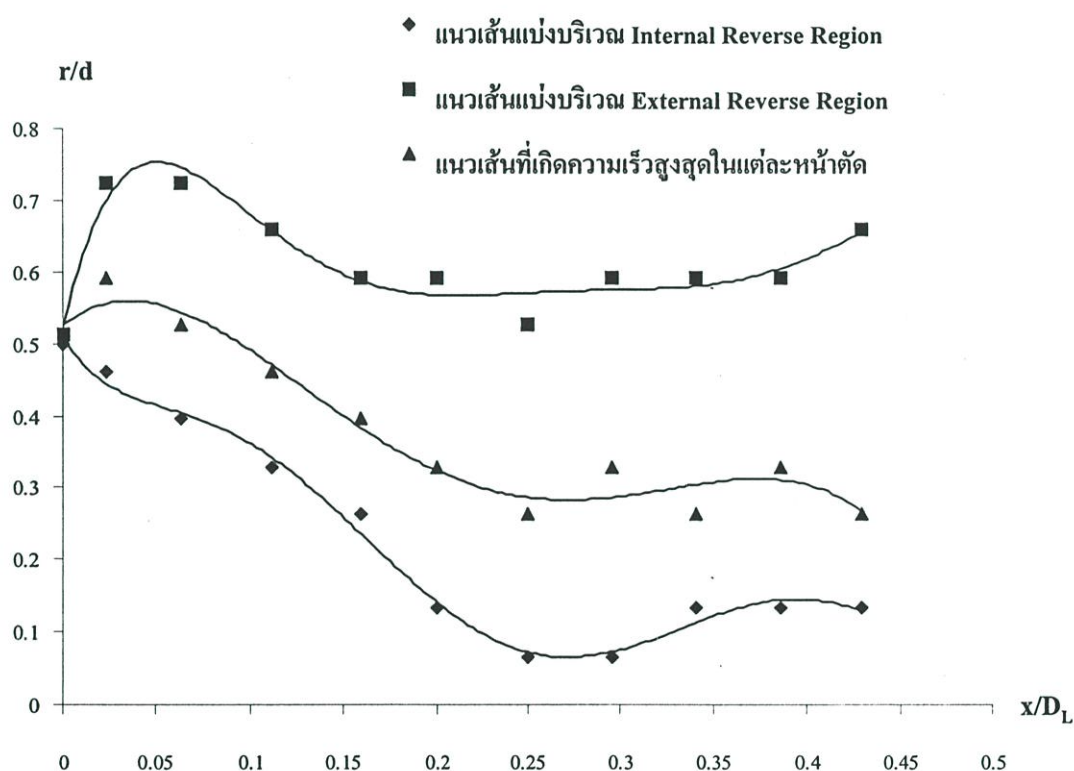
จากรูปที่ 4.3 บริเวณที่อยู่ใต้แนวเส้นแบ่งบริเวณ Reverse Region เป็นบริเวณที่มีการไหลย้อนกลับบริเวณแกนกลางของห้องเผาไหม้ และบริเวณที่อยู่เหนือแนวเส้นแบ่งบริเวณ External Reverse Region เป็นบริเวณที่มีการไหลย้อนกลับบริเวณใกล้กับผนังห้องเผาไหม้ บริเวณที่อยู่ระหว่างสองเส้นนี้เป็นบริเวณที่ก๊าซไหลไปข้างหน้า และแนวเส้นแกน x เป็นแนวแกนกลางของห้องเผาไหม้

แนวเส้นความเร็วสูงสุดในแต่ละหน้าตัด แสดงให้เห็นความบาน(Expansion) ของกระแสดันเนื่องมาจากโมเมนตัมของการไหลตามแนวเส้นสัมผัส และขนาดของ Recirculation Zone ก็แปรผันตามโมเมนตัมนี้[2]

เห็นได้จากรูปนี้ว่าขนาดของ Reverse Region มีความยาวประมาณ 35% ของหน้าตัดของห้องเผาไหม้ และแนวของเส้นความเร็วสูงสุดเข้าไปใกล้แนวแกนของห้องเผาไหม้โดยเฉพาะบริเวณที่เกิด

Toroidal Vortex ซึ่งเป็นเพราะบริเวณนี้มีความดันต่ำจึงมีการเหนี่ยวนำก๊าซเข้าสู่แกนกลางอันเนื่องมาจากแตกต่างของความดัน ซึ่งหากเกิดการเผาไหม้ขึ้นอากาศที่ล้อมรอบกระแสเจ็ตของเชื้อเพลิงนำที่จะถูกเหนี่ยวนำเข้ามาสู่แกนกลางเนื่องจากความแตกต่างของความดันนี้ แต่หลังจากหน้าตัดที่ไม่มี Toroidal Vortex แล้วแนวเส้นความเร็วสูงสุดกลับบานออก ทั้งนี้เนื่องจากเกิด External Recirculation Zone ขึ้น ดังนั้นแนวเส้นความเร็วจึงบานออก

4.1.2 ขนาด Recirculation Zone ของการทดลองแบบ B

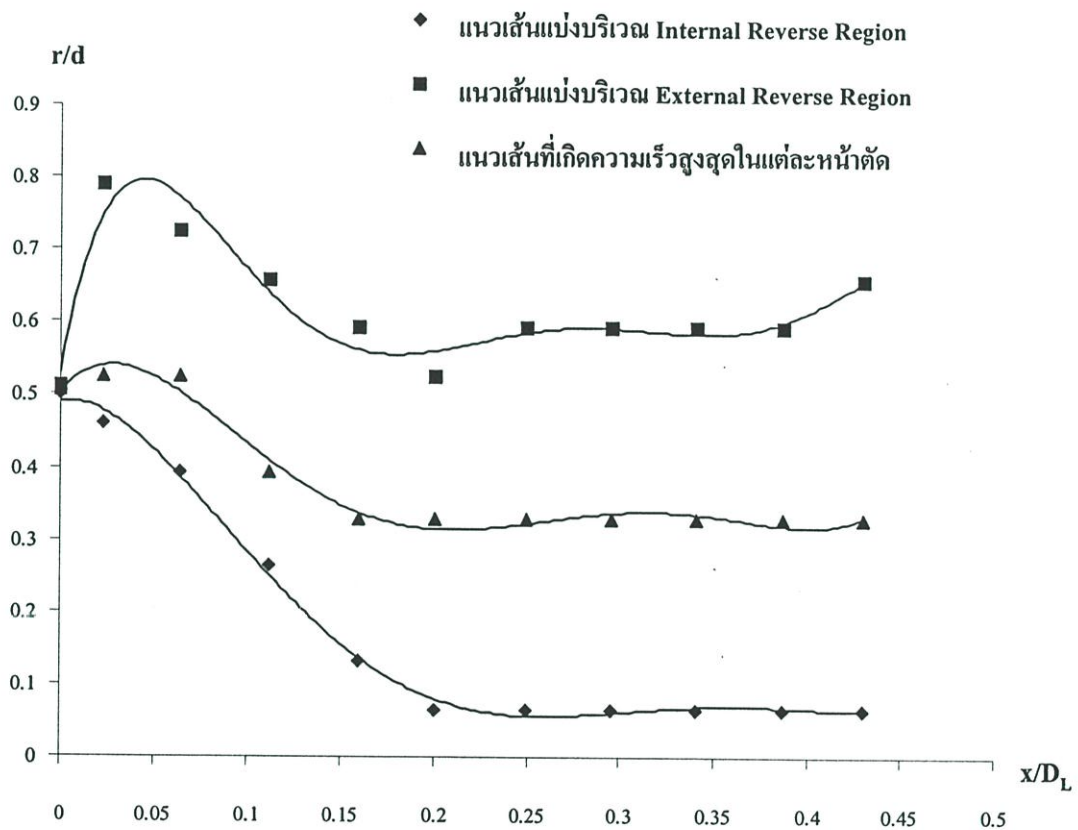


รูปที่ 4.4 ขนาดของ Reverse Region และแนวเส้นที่เกิดความเร็วสูงสุดของการทดลองแบบ B

จากรูปที่ 4.4 เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มการไหลแบบหมุนวนให้ล้อมรอบกระแสเจ็ตที่ไหลอยู่ภายใน รูปร่างการไหลเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ Reverse Region มีความยาวมากกว่าการทดลองแบบ A และเมื่อพิจารณาแต่ละค่า x/D_L พบว่าบริเวณ Reverse Region ค่อนข้างใหญ่กว่าการทดลองแบบ A แสดงว่าขนาดการทดลองแบบ B ย่อมมีขนาดใหญ่กว่าการทดลองแบบ A เช่นกัน

ที่บริเวณที่ใกล้กับปากทางออกของ Nozzle พบว่าการทดลองแบบ B มีกระแสเจ็ตบานออกมากกว่าการทดลองแบบ A แต่ที่บริเวณ Down Stream พบว่ากระแสเจ็ตยังไม่บานออกเหมือนกับการทดลองแบบ A ก็เพราะบริเวณ Reverse Region ของการทดลองแบบ B มีความยาวมากกว่าการทดลองแบบ A จึงส่งผลให้แนวเส้นความเร็วสูงสุดไม่บานออก

4.1.3 ขนาด Recirculation Zone ของการทดลองแบบ C

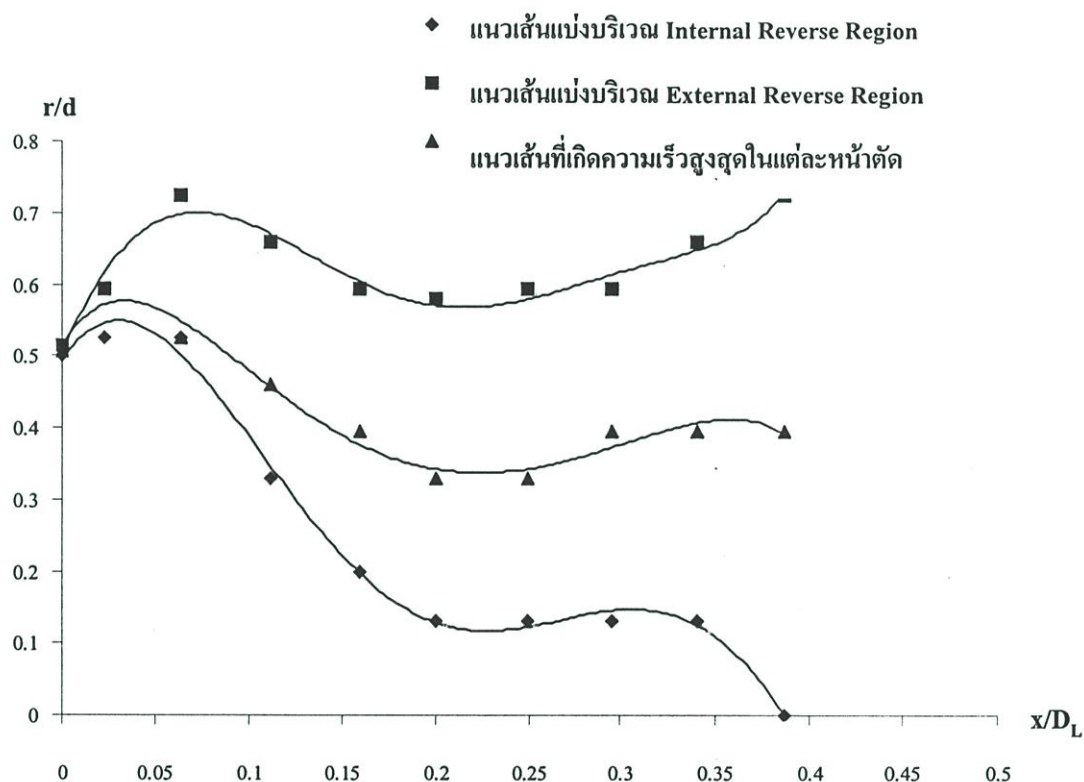


รูปที่ 4.5 ขนาดของ Reverse Region และแนวเส้นที่เกิดความเร็วสูงสุดของการทดลองแบบ C

จากรูปที่ 4.5 แนวเส้นความเร็วสูงสุดของการทดลองแบบ C ที่ใกล้กับปากทางออกของ Nozzle บานน้อยกว่าการทดลองแบบ B เล็กน้อย และขนาดของ Reverse Region มีขนาดเล็กกว่าการทดลองแบบ B แต่มีขนาดใกล้เคียงกับการทดลองแบบ A

แต่เห็นได้ชัดว่าการทดลองแบบ B และ C มีความบานของกระแสเจ็ทมากกว่าการทดลองแบบ A สังเกตได้จากแนวเส้นแบ่งบริเวณ External Reverse Region ของการทดลอง A อยู่ที่ระดับต่ำกว่าค่า r/d เท่ากับ 0.6

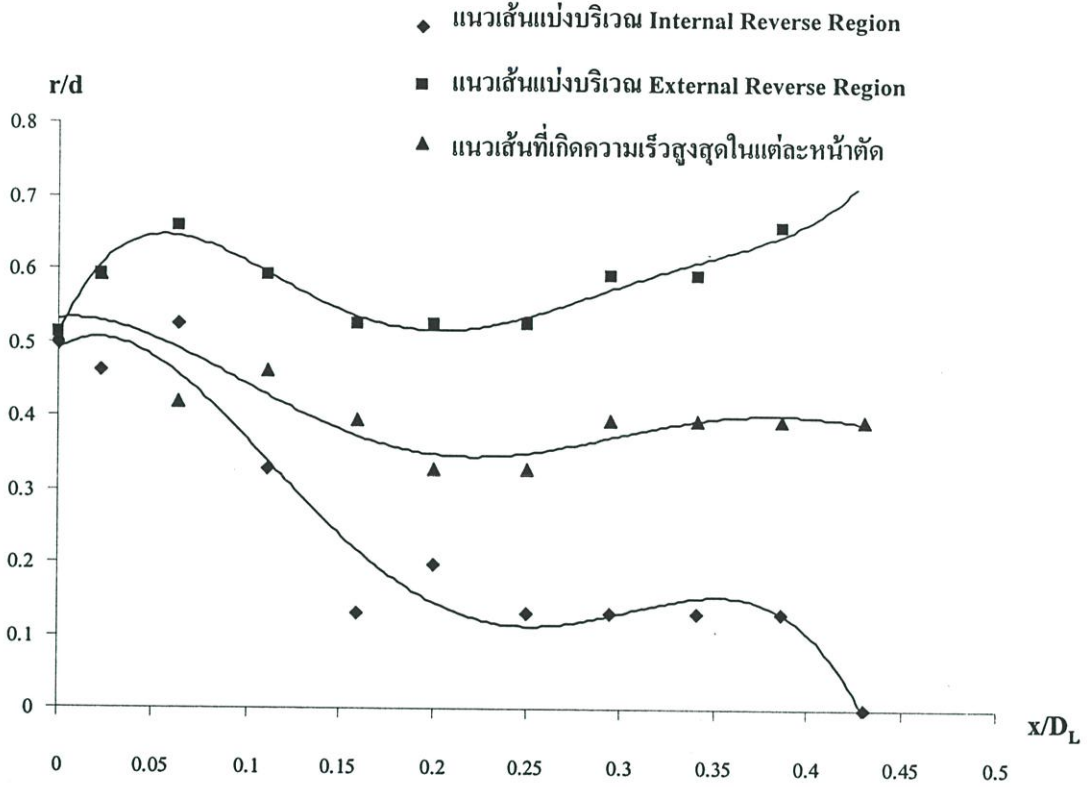
4.1.4 ขนาด Recirculation Zone ของการทดลองแบบ D



รูปที่ 4.6 ขนาดของ Reverse Region และแนวเส้นที่เกิดความเร็วสูงสุดของการทดลองแบบ D

จากรูปที่ 4.6 Reverse Region มีความยาวประมาณ 40% ของเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ ที่บริเวณปากทางออกของ Nozzle มีการบานออกของกระแสเจ็ทน้อยกว่าการทดลองแบบ B และ C แต่มากกว่าการทดลองแบบ A แต่เมื่อเปรียบเทียบความกว้างของขนาด Reverse Region มีความกว้างกว่าการทดลองแบบ B และ C ที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของ Nozzle เมื่อห่างออกมาแล้ว การทดลองแบบ B มีขนาดกว้างกว่า

4.1.5 ขนาด Recirculation Zone ของการทดลองแบบ E



รูปที่ 4.7 ขนาดของ Reverse Region และแนวเส้นที่เกิดความเร็วสูงสุดของการทดลองแบบ E

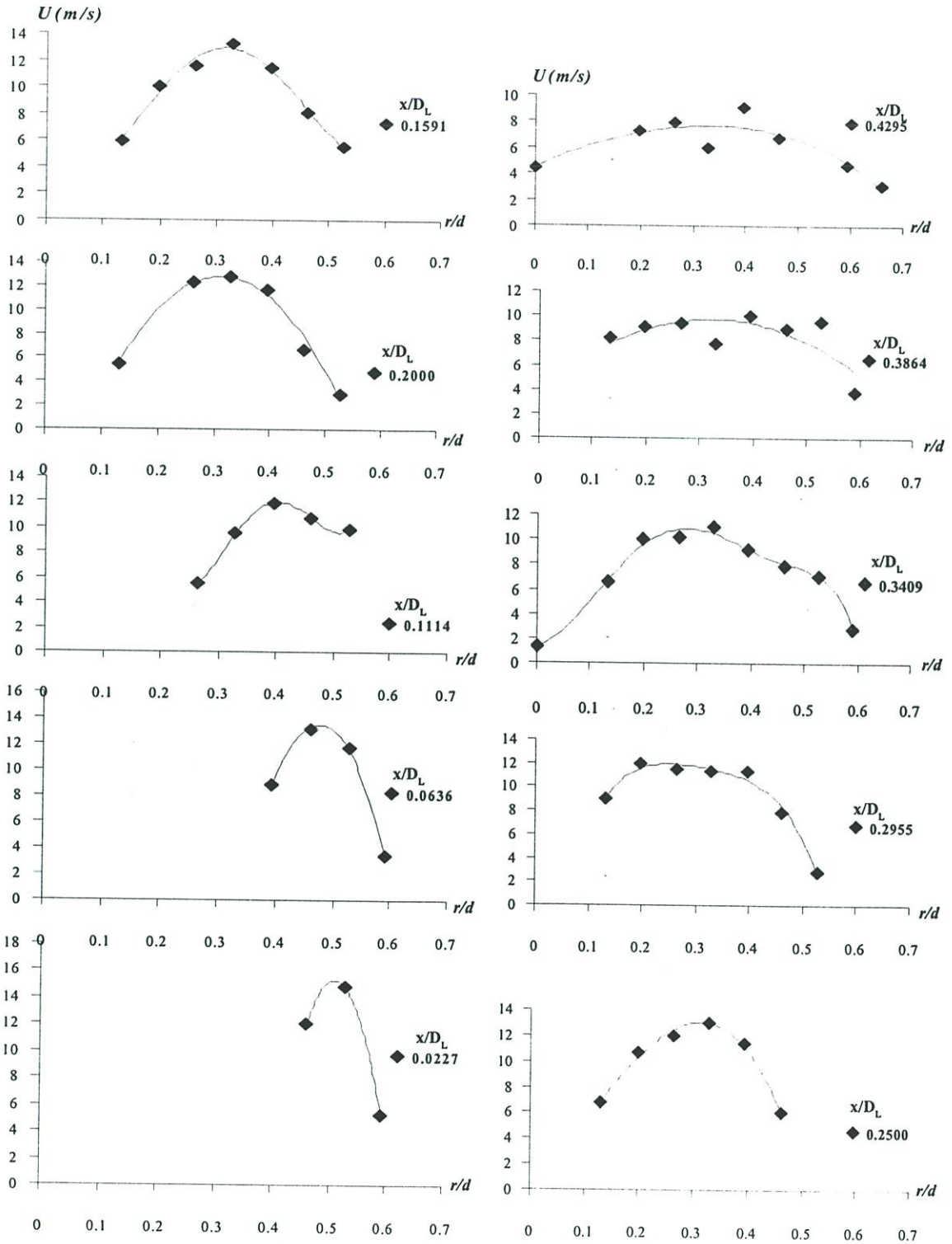
จากรูปที่ 4.7 Reverse Region มีความยาวประมาณ 43% ของเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ ความบานออกของกระแสเจ็ตใกล้เคียงกับการทดลองแบบ D อีกทั้งขนาดความกว้างของ Reverse Region ก็มีขนาดใกล้เคียงกับการทดลองแบบ D

เห็นได้ว่าที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของ Nozzle ขนาดของ Reverse Region ที่แตกต่างกัน แสดงว่าการกระจายความเร็วที่ปากทางออกของ Nozzle อันเนื่องมาจากการฉีดก๊าซให้หมุนวนแตกต่างกัน ส่งผลให้การกระจายความเร็วภายในบริเวณปฐมภูมิของห้องเผาไหม้เปลี่ยนแปลงไป

4.2 การกระจายความเร็ว U ตามแนวรัศมี ณ หน้าตัดต่างๆ

การกระจายความเร็วที่น่าเสนอเพียงการกระจายความเร็ว U เพราะมีความเชื่อมโยงกับการผสมผสาน และเสถียรภาพในของเปลวไฟ ในขณะที่เกิดการเผาไหม้ รายละเอียดในการกระจายความเร็วได้นำเสนอ แยกเป็นแต่ละหน้าตัดดังนี้

4.2.1 การกระจายความเร็ว $U(m/s)$ ตามแนวรัศมีของการทดลอง A



รูปที่ 4.8 การกระจายความเร็ว $U(m/s)$ ตามแนวรัศมีที่หน้าตัดต่างๆ ของการทดลอง A

รูปที่ 4.8 เป็นการกระจายความเร็วตามแนวรัศมี ณ หน้าตัดแกน x ต่างๆกันของการทดลองแบบ A ทั้งนี้ในการทดลองแต่ละกรณีจะทำการวัดจำนวน 10 หน้าตัด ตามแกน x เพื่อให้ครอบคลุมบริเวณปฐภูมิของห้องเผาไหม้

จากรูปเห็นได้ว่าการกระจายความเร็วเป็นรูปคล้ายโค้งระฆังคว่ำโดยที่ 2 หน้าตัดแรกการกระจายความเร็วจะอยู่ในช่วงแคบๆ ความเร็วสูงสุด ณ หน้าตัดแรกคือ 15.2660 m/s และจุดสุดท้ายที่สามารถวัดความเร็วได้ คือที่ r/d ประมาณ 0.6

จุดที่ r/d เท่ากับ 0.5 เป็นจุดที่ฉีดอากาศออกจาก Nozzle ตัวใน เห็นได้ว่าความเร็ว U สูงสุดของก๊าซที่หน้าตัดแรกจะมีค่าสูงที่สุดแล้วลดลงตามลำดับ แต่ที่หน้าตัดที่ x/D_L ประมาณ 0.1114 และ 0.1591 มีความเร็วสูงสุดใกล้เคียงกัน

จุดที่มีความเร็วสูงสุดตามแนวรัศมีบ่งบอกถึงความบาน(Expasion) ซึ่งมีอิทธิพลต่อการผสมผสานดังได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.1 และยิ่งไปกว่านั้นหากว่าการไหลแบบเจ็ตเกิดมีความเร็ว U ลดลง แสดงว่าเกิด Large Scale Eddy ของไหลแบบ Turbulence ขึ้น[19] ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบการไหลแบบเจ็ตที่มีกับไม่มีความเร็ว U ลดลง การไหลแบบเจ็ตที่มีความเร็ว U ลดลงจึงมีการผสมผสานสูงกว่า

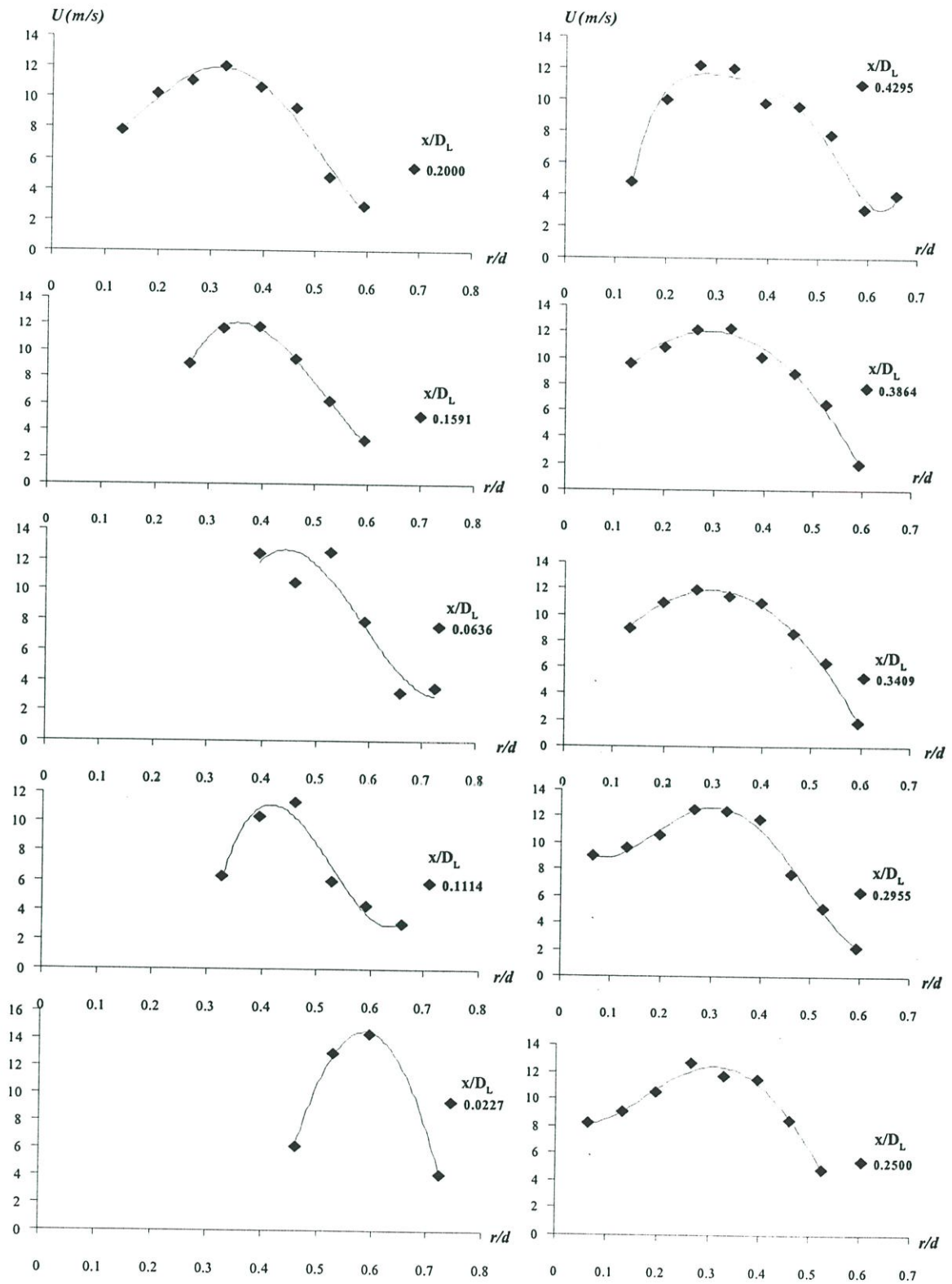
เมื่อสังเกตจากผลการทดลอง A แล้ววิเคราะห์โดยปรากฏการณ์ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการข้างต้น แสดงว่าบริเวณที่ใกล้กับปากทางออกของ Nozzle กระแสเจ็ตมีความบานน้อยทั้งยังมีความเร็ว U ลดลงไม่มากนัก แสดงว่าน่าจะมีการผสมผสานน้อยที่บริเวณนี้

4.2.2 การกระจายความเร็ว U ตามแนวรัศมีของการทดลอง B

รูปที่ 4.9 เป็นการกระจายความเร็ว U ของการทดลองแบบ B ความเร็วสูงสุดของหน้าตัดแรกมีค่า 14.5 m/s สิ่งที่แตกต่างกันที่เห็นได้ชัดกับการทดลองแบบ A ก็คือ การทดลองแบบ B มีกระแสเจ็ตที่บานออกมากกว่า ณ หน้าตัดแรก คือมีค่าความเร็ว U สูงสุดที่ r/d ประมาณ 0.6 และมีช่วงที่สามารถวัดความเร็วได้ กว้างกว่าการทดลองแบบ A

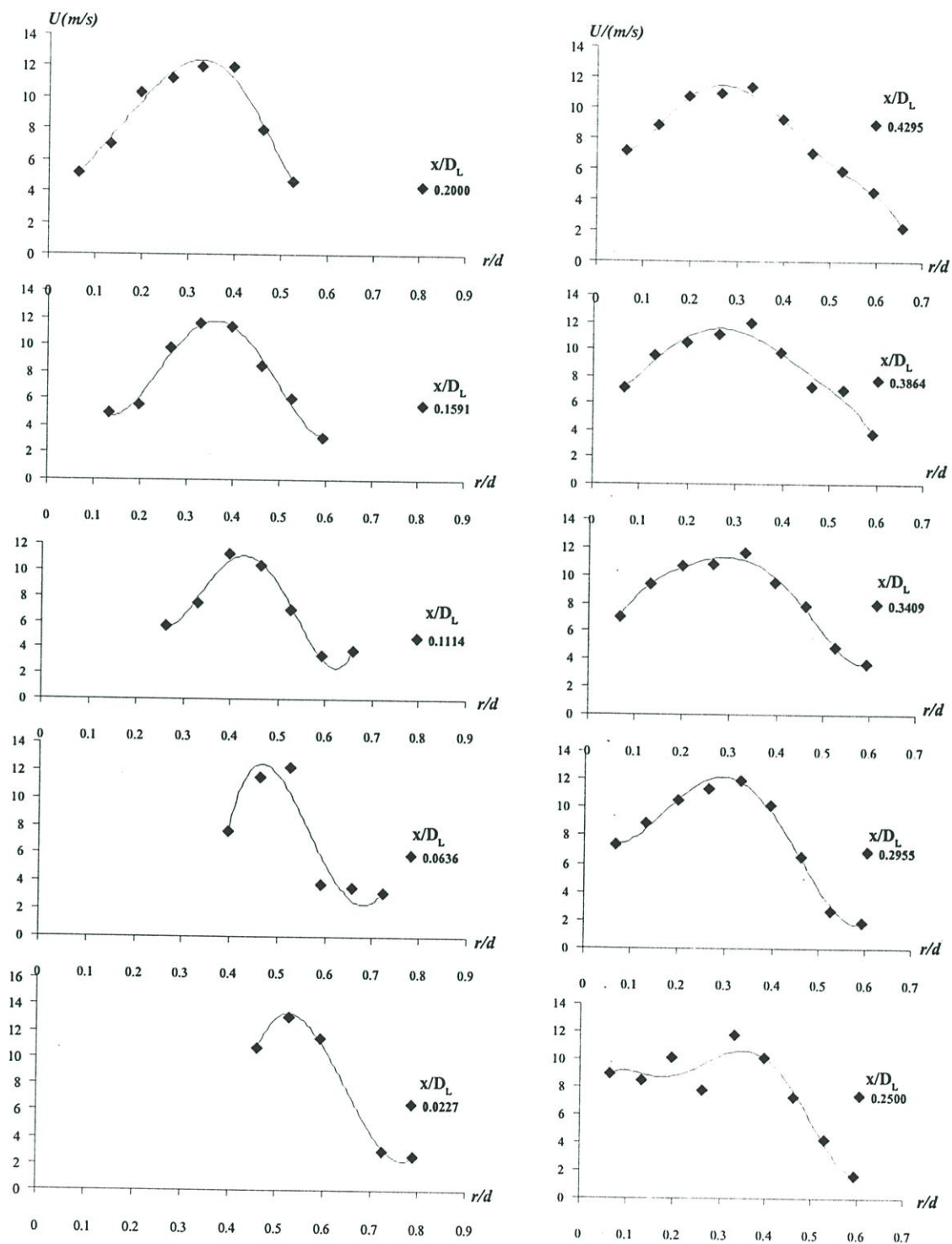
ดังนั้นการฉีดก๊าซจาก Nozzle ตัวนอกให้ไหลหมุนวนเป็นเกลียวร่วมแกนการไหลกับก๊าซที่ฉีดจาก Nozzle ตัวในมีผลทำให้การกระจายความเร็วภายใน Primary Zone ของห้องเผาไหม้มีการเปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งเห็นได้ว่ากระแสเจ็ตของการทดลองแบบ B มีความบานมากกว่าการทดลองแบบ A ที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของ Nozzle ดังนั้นการทดลองแบบ B น่าที่จะมีการผสมผสาน(Mixing) ที่บริเวณใกล้กับปาก Nozzle มากกว่าการทดลองแบบ A

แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 4.1 4.2 และ 4.8 ประกอบพบว่าที่หน้าตัดตั้งแต่ x/D_L ประมาณ 0.2000 จนถึงหน้าตัดสุดท้าย การไหลแบบ B บานออกน้อยกว่าการทดลองแบบ A



รูปที่ 4.9 การกระจายความเร็ว U (m/s) ตามแนวรัศมีที่หน้าตัดต่างๆ ของการทดลอง B

4.2.3 การกระจายความเร็ว U ตามแนวรัศมีของการทดลอง C



รูปที่ 4.10 การกระจายความเร็ว U (m/s) ตามแนวรัศมีที่หน้าตัดต่างๆ ของการทดลอง C

รูปที่ 4.10 ที่หน้าตัดแรกมีความเร็วสูงสุดประมาณ 13.3 m/s ซึ่งต่ำกว่าการทดลองแบบ B และ A อีกทั้งเห็นได้ว่า จุดที่มีความเร็วสูงสุดที่หน้าตัดแรกคือ ที่ค่า r/d ประมาณ 0.52 ซึ่งน้อยกว่าการทดลองแบบ B แสดงว่าการทดลองแบบนี้มีการผสมผสานน้อยกว่าการทดลองแบบ B ที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของ Nozzle

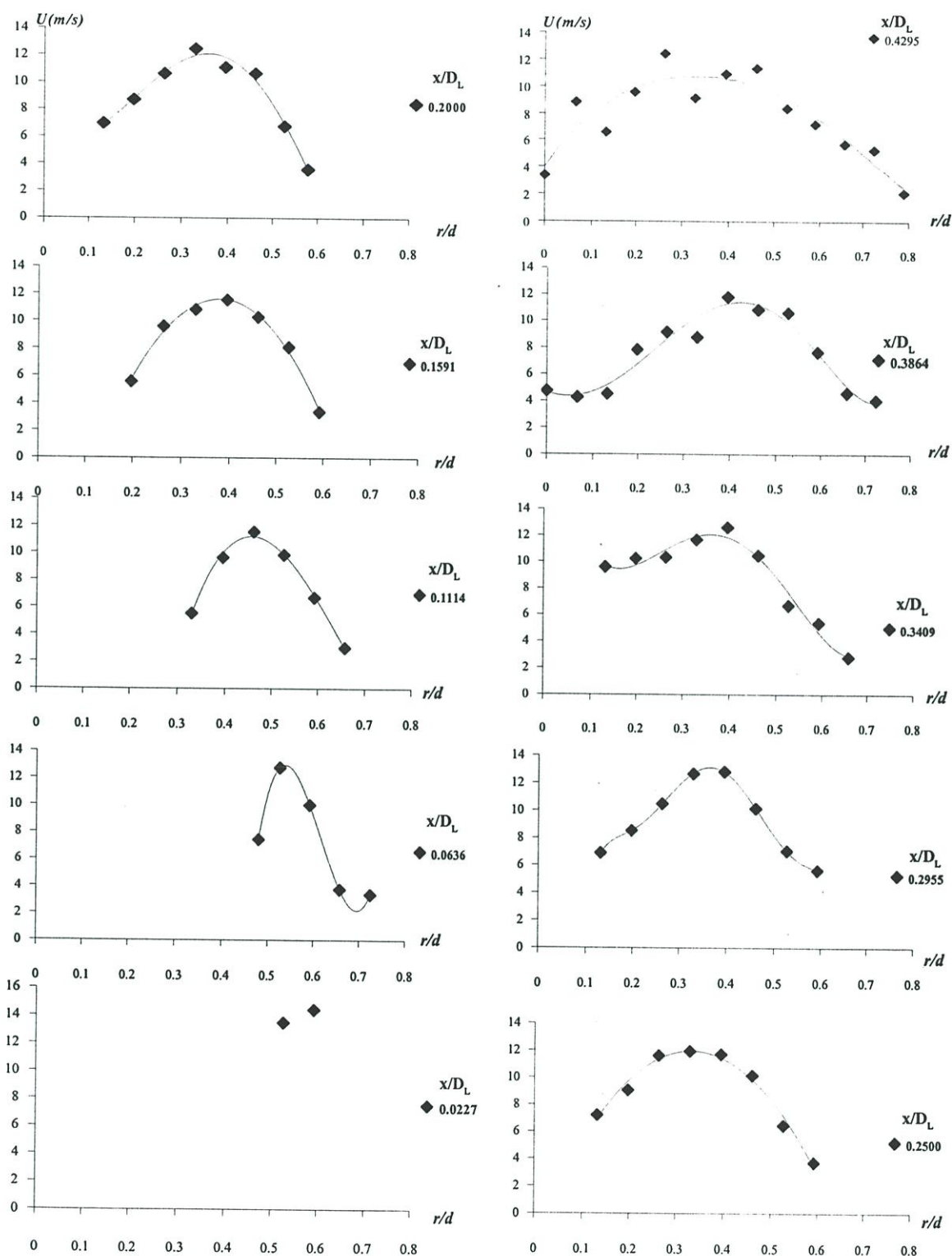
ที่บริเวณหน้าตัดที่ 5 ถึง 10 ความเร็วสูงสุดของช่วงนี้ค่อนข้างคงที่เหมือนกับการทดลอง B อีกทั้งความบานออกของกระแสเจ็ทก็ใกล้เคียงกับการทดลอง B มีก็เพียงเฉพาะหน้าตัดแรกเท่านั้นที่การทดลองแบบ B มีการกระจายความเร็วบานออกมากกว่าการทดลองแบบ C เป็นเพราะว่าการทดลองแบบ C นี้ ฉีดก๊าซออกจาก Nozzle ด้วยค่า S_v น้อยกว่า ดังนั้นการทดลองแบบนี้จึงมีความบานน้อยกว่าการทดลองแบบ B จึงทำให้การผสมผสานที่ปากทางออกของ Nozzle น่าที่จะน้อยกว่าการทดลองแบบ B

4.2.4 การกระจายความเร็ว U ตามแนวรัศมีของการทดลอง D

จากรูป 4.11 ณ ที่หน้าตัดแรกสามารถนำเสนอข้อมูลได้เพียงสองจุดเท่านั้น กระแสเจ็ทที่ใกล้กับปากทางออกของ Nozzle ก็บานออกเช่นกัน แต่น้อยกว่าการทดลองแบบ B และความเร็วในช่วงหน้าตัดต้นๆ ก็ลดลงน้อยกว่า เมื่อพิจารณา ณ หน้าตัด x/D_L เท่ากับ 0.1114 ถึง 0.2500 มีค่าความเร็วสูงสุดไม่ต่างกันมากนัก และเห็นได้ชัดว่าเมื่อมองโดยทั่วไปทุกหน้าตัดแล้วการกระจายความเร็วบานออกจากแกนกลางมากกว่าการทดลองแบบ B และ C ณ บริเวณหน้าตัดที่ x/D_L เท่ากับ 0.2955 จนถึงหน้าตัดสุดท้าย

ต่อจากนั้นได้พิจารณา ณ หน้าตัด x/D_L เท่ากับ 0.2500 ถึง 0.3409 มีค่าความเร็วสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่หน้าตัด x/D_L เท่ากับ 0.3863 มีความเร็วสูงสุดลดลงและความเร็วสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกันระหว่าง 2 หน้าตัดสุดท้าย

ความแตกต่างที่เห็นได้อีกอย่างหนึ่งของการทดลองแบบ D ซึ่งเป็นการไหลแบบหมุนวนตามกัน กับทดลองแบบ B และ C ซึ่งเป็นการไหลแบบหมุนวนแบบสวนทางกันก็คือ ที่สองหน้าตัดสุดท้าย การทดลอง D สามารถวัดความเร็วได้จนถึงค่า r/d เท่ากับ 0 ในขณะที่การทดลอง B และ C นั้นวัดค่าไม่ได้อันเนื่องจากบริเวณใกล้แกนกลางดังกล่าวยังเป็นบริเวณที่มีการไหลย้อนกลับ ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากการไหลแบบหมุนวนสวนทางกัน



รูปที่ 4.11 การกระจายความเร็ว U (m/s) ตามแนวรัศมีที่หน้าตัดต่างๆ ของการทดลอง D

จากรูป 4.12 ณ ที่สองหน้าตัดแรกความเร็วสูงสุดไม่ต่างกันมากนัก แต่เห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรทดลองแบบ B ความเร็วสูงสุดที่หน้าตัดแรกอยู่ ณ ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ r/d เท่ากับ 0.6 และมีความเร็วสูงสุดใกล้เคียงกันคือ การทดลอง B มีความเร็วสูงสุดที่หน้าตัดแรก 14.53965 m/s และการทดลอง E มีความเร็วสูงสุดที่หน้าตัดแรก 14.45709 m/s แสดงว่าการทดลองแบบ B และ E มีความบานของกระแสเจ็ตใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาโดยละเอียดจะพบว่าการทดลองแบบ B มีความเร็วลดลงมากกว่าเมื่อพิจารณาที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของ Nozzle ดังนั้นการทดลอง B น่าจะมีการผสมผสานมากกว่าการทดลอง E ที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของ Nozzle

ที่บริเวณหน้าตัด x/D_L เท่ากับ 0.2000 ถึง 0.2955 มีความเร็วสูงสุดใกล้เคียงกัน แต่ที่สองหน้าตัดสุดท้ายความเร็วสูงสุดลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อมองโดยละเอียดแล้วจะเห็นได้ว่ามีเพียงการทดลองแบบ A และ E เท่านั้นที่มีความเร็ว U สูงสุดลดลงอย่างเห็นได้ชัดบริเวณหน้าตัดสามหน้าตัดสุดท้ายที่ทำการทดลอง หากว่าอธิบายโดยใช้คุณลักษณะการไหลแบบ Turbulence ก็แสดงว่าเกิด Large Turbulence Eddy ดึงพลังงานจาก Mean Flow ที่บริเวณหน้าตัด x/D_L เท่ากับ 0.3409 ถึง 0.4295 [19]หรือเรียกว่าเกิด Vortex Stretching ซึ่งหากว่าทำการทดลองเพิ่มเติมโดยการวัดค่า Turbulence Fluctuation แล้ว บริเวณนี้น่าที่จะมีค่านี้สูงกว่าหน้าตัดอื่นๆ รวมทั้งน่าที่จะมีการผสมผสานสูงกว่าการทดลอง B และ C เช่นกัน

4.3 การทำนายเสถียรภาพการเผาไหม้จากค่า Richardson Number

เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการทดลองแบบมีปฏิกิริยาการเผาไหม้ดังนั้นการบอกว่าการทดลองแบบใดมีเสถียรภาพในการเผาไหม้จึงยังไม่สามารถบอกได้ในขั้นนี้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้สามารถทำนายแนวโน้มของเสถียรภาพการเผาไหม้ได้โดยใช้หลักการดังกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2.6 และใช้แนวทางการอธิบายเรื่องการกระจายความเร็วในกรณีที่มีการเผาไหม้จาก [9] เพื่อให้เข้าใจจึงขอนำเอาสมการที่ 2.16 มาอธิบายดังนี้

$$R^* = (\text{Centrifugal Force})/(\text{Shear Force}) = \frac{(1/\rho)(\partial p/\partial r)(W^2/r)}{(\partial U/\partial r)^2} \quad (4.1)$$

เมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้นในการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว ความเร็ว U จะสูงขึ้น[6] อันสามารถอธิบายได้จากสมการ Continuity ของไหลคือ

$$\dot{m} = \rho \bar{U} A \quad (4.2)$$

เมื่อทำการทดลองที่ m และ A คงที่ แต่เมื่อมีการเผาไหม้ ρ ย่อมลดลง ทำให้ความเร็ว \bar{U} ย่อมเพิ่มมากขึ้นเพื่อรักษา m ให้คงที่

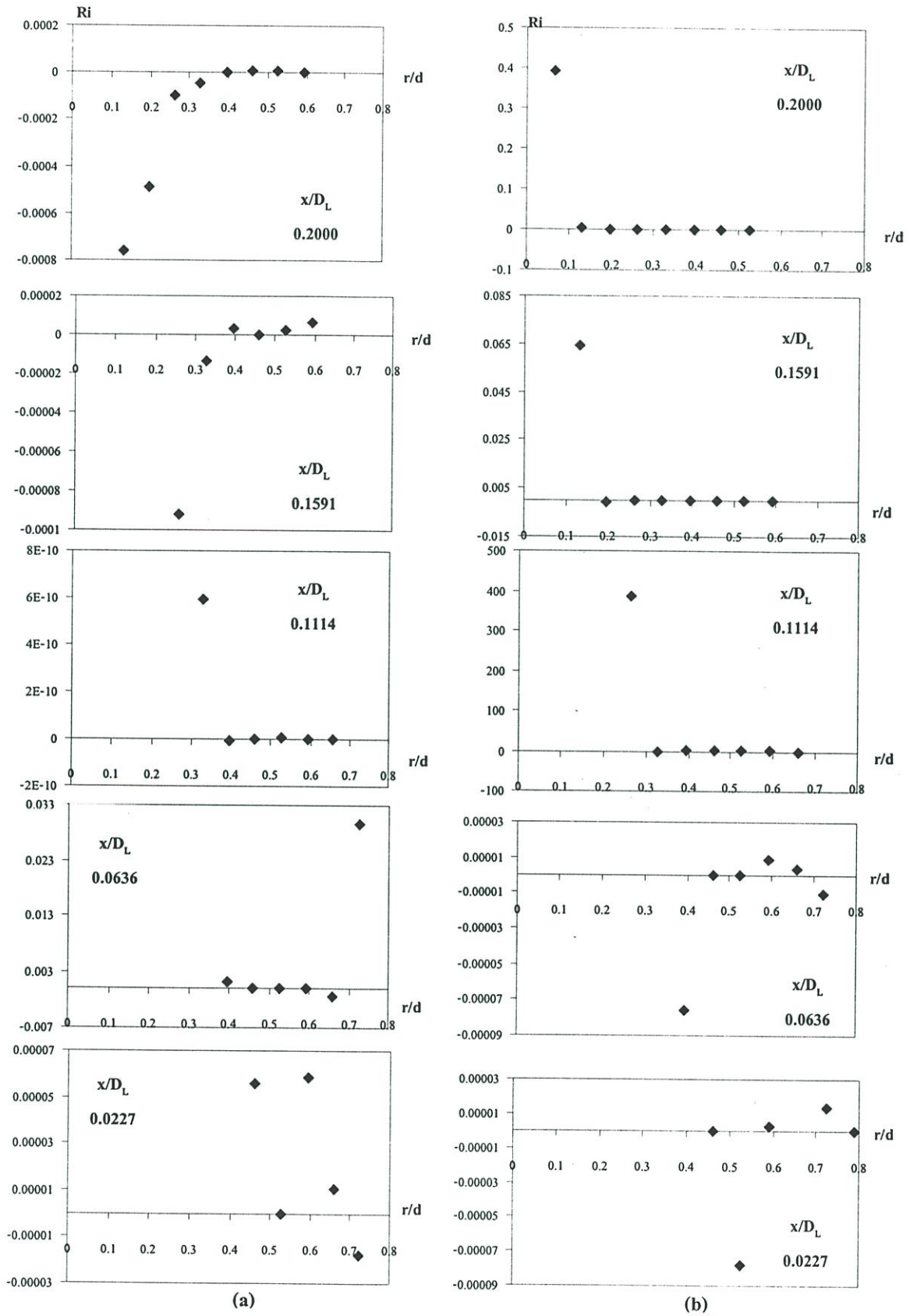
ปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้นทำให้ค่าสัมบูรณ์ของ $\partial U / \partial r$ มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นตาม แต่ค่าความเร็ว W จะลดลง และจากสมการที่ 4.1 ทำให้การเผาไหม้มีเสถียรภาพลดลง ดังนั้นจึงนำหลักการนี้มาใช้ในการทำนายแนวโน้มของเสถียรภาพการเผาไหม้ในงานวิจัยนี้ โดยใช้ข้อมูลที่วัดได้จากโพรบวัดความเร็วแบบ 3 มิติ (ข้อมูลความเร็วและความดันสถิตย์ที่วัดได้แสดงในภาคผนวก ข) ซึ่งวัดข้อมูลได้ความเร็ว UV และ W รวมทั้งความดันสถิตย์ (P_s) แต่จากสมการที่ 4.1 จำเป็นต้องทราบค่า $1/\rho$, $\partial \rho / \partial r$, W^2 / r และ $\partial U / \partial r$ ดังนั้นจึงได้ใช้ทำการคำนวณค่า ρ โดยใช้ความสัมพันธ์ของก๊าซอุดมคติ โดยสมมติให้อุณหภูมิคงที่ที่ 298 K ดังสมการ

$$P = \rho RT \quad (4.2)$$

เมื่อ $R = 287 \text{ J/kg-K}$ แล้วจึงใช้โปรแกรม Excel มาสร้างสมการ ความสัมพันธ์ของ ρ และ U กับค่า r/d ในรูป Polynomial ทำให้สามารถหาค่า $\partial \rho / \partial r$ และ $\partial U / \partial r$ ได้ ซึ่งรายละเอียดของค่า Ri แสดงในภาคผนวก ข

4.3.1 เปรียบเทียบค่า Ri ของการทดลองแบบ B และ C

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 เห็นได้ว่าการทดลอง A มีการบานออกของกระแสเจ็ตน้อยที่สุด ณ บริเวณใกล้กับปากทางออกของ Nozzle ทำให้อาจเกิดการ Blow off ของเปลวไฟหากมีการเผาไหม้เกิดขึ้น[2] ดังนั้นจึงไม่เลือกการทดลองแบบ A มาใช้ในห้องเผาไหม้จริงเพราะเปลวไฟจะไม่เสถียร ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบค่า Ri ของการทดลอง B C D และ E เพียงเท่านั้น ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบว่าถ้ามีการไหลหมุนวนในทิศทางเดียวกัน แต่มีค่า S_N ของกระแสก๊าซที่ไหลภายนอกต่างกัน การทดลองแบบใดน่าที่จะมีแนวโน้มว่าเสถียรภาพมากกว่ากันหากเกิดการเผาไหม้ โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 การกระจายค่า Ri ของการทดลอง (a) B และ (b) C ที่หน้าตัด x/D_L เท่ากับ 0.0227 ถึง 0.2000

จากรูปที่ 4.13 เหตุที่นำเสนอเพียงแค่ 5 หน้าตัดก็เพราะเวลาที่เกิดการเผาไหม้ เปลวไฟไม่ควรจะอยู่ห่างจากปากทางออกของ Nozzle มาก เพราะอาจทำให้เกิดเปลวไฟ Blow-off ได้ หากมีการเผาไหม้

เมื่อเปรียบเทียบแล้วเห็นได้ว่ามีเพียง 2 หน้าตัดแรกเท่านั้นที่การทดลองแบบ B มีค่า Ri สูงกว่าการทดลองแบบ C แต่หลังจากนั้น ค่า Ri ของการทดลองแบบ C จะมีค่าสูงกว่า บริเวณที่มีค่า Ri เป็นบริเวณที่เปลวไฟไม่มีเสถียรภาพ[2] ซึ่งหากพิจารณาแล้วจากสมการที่ 4.1 เป็นเพราะค่า $\partial p / \partial r$ มีค่าเป็นลบ ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลแบบหมุนวน

ผลของการกระจายความดันที่ติดลบนี้อธิบายได้จากหัวข้อที่ 2.2 กล่าวไว้ว่าการไหลแบบหมุนวนทำให้เกิดการไหลแบบ Vortex ขึ้น อันเป็นผลมาจากการกระจายค่าความเร็ว W บริเวณปากทางออกของ Nozzle อีกทั้งการกระจายค่าความเร็วนี้เป็นตัวแปรที่บ่งบอกว่าการไหลแบบหมุนวนเป็นการไหลแบบ Free หรือ Force Vortex ซึ่งจะมีผลต่อการกระจายความดันภายในสนามการไหล และส่งผลต่อการกระจายความดันในที่สุด

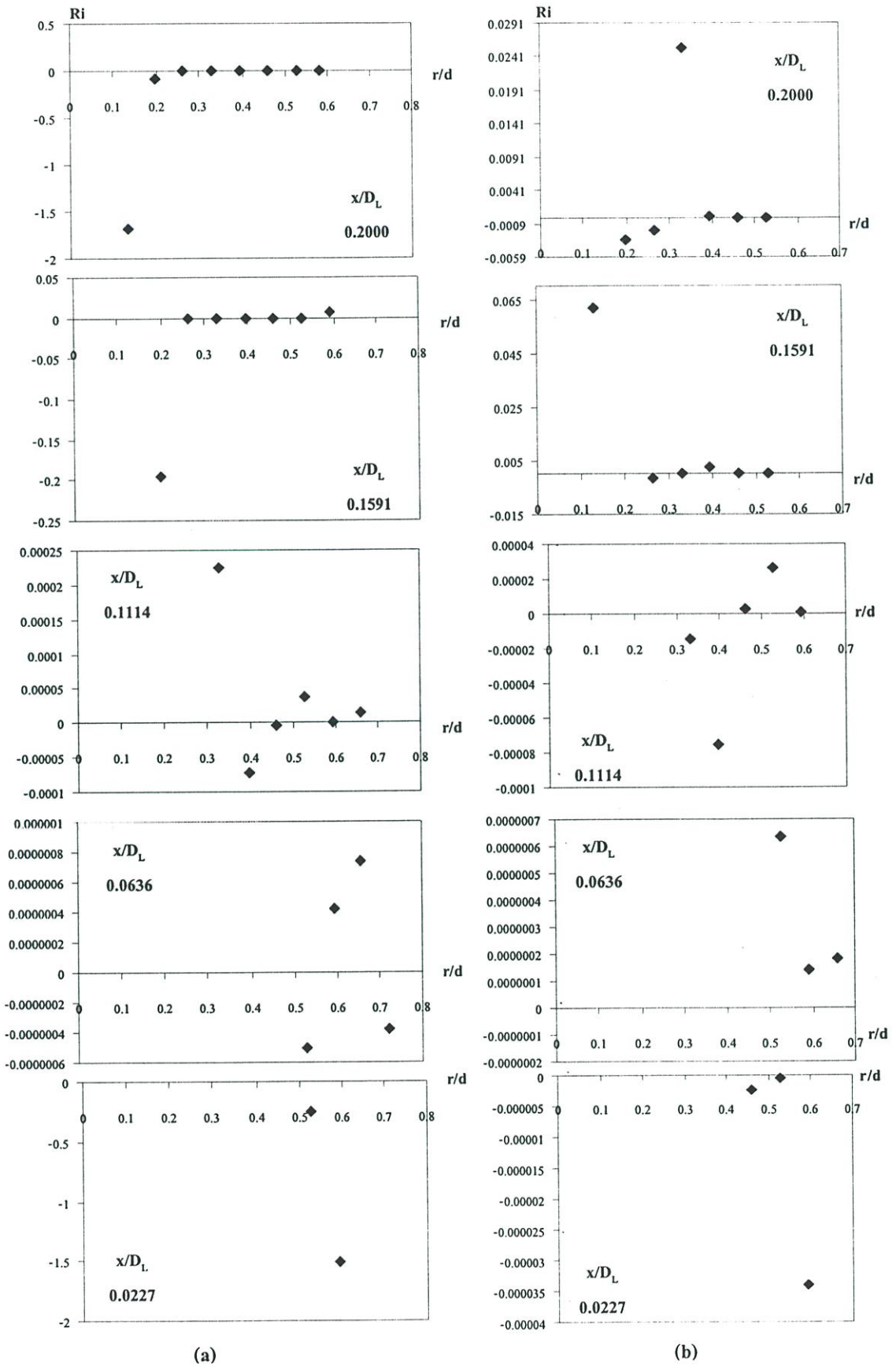
ดังนั้นหากว่าเกิดการเผาไหม้ขึ้นการทดลองแบบ B นำที่จะมีแนวโน้มนี่จะมีเปลวไฟเสถียรอยู่ใกล้กับปากทางออกของ Nozzle มากกว่าการทดลองแบบ C และมีเปลวไฟได้ยาวถึงหน้าตัดที่ x/D_L ถึงค่า 0.1114 หรือ 0.1591

4.3.2 เปรียบเทียบค่า Ri ของการทดลองแบบ D และ E

จากรูปที่ 4.14 พบว่าที่หน้าตัดแรกค่า Ri ของการทดลองทั้งสองกรณีมีค่าติดลบทั้งคู่ ดังนั้นหากเกิดการเผาไหม้ขึ้น การทดลองทั้ง 2 กรณีก็น่าที่จะไม่มีเปลวไฟเสถียรอยู่ได้ เมื่อพิจารณาต่อไปที่หน้าตัด x/D_L เท่ากับ 0.0636 ถึง 0.1114 พบว่าการทดลองแบบ C มีค่า Ri สูงกว่า ซึ่งก็น่าจะมีเปลวไฟเสถียรอยู่ในช่วงนี้มากกว่าการทดลองแบบ E หากมีการเผาไหม้เกิดขึ้น แต่ที่หน้าตัด x/D_L เท่ากับ 0.1591 ถึง 0.2000 การทดลองแบบ E มีค่า Ri ที่เป็นค่าบวกขณะที่การทดลองแบบ C มีค่าเป็นลบเสียส่วนใหญ่ ดังนั้นการทดลองแบบ C จึงน่าที่จะมีช่วงที่เปลวไฟเสถียรเป็นช่วงสั้นกว่าการทดลองแบบ E

4.3.3 เปรียบเทียบค่า Ri ของการทดลองแบบ B และ D

จากรูปที่ 4.14 และ 4.13 พบว่าค่าการทดลองแบบ B นำที่จะมีแนวโน้มนี่ของเสถียรภาพสูงกว่าการทดลองแบบ D ที่บริเวณใกล้กับปากทางออกของ Nozzle เพราะมีค่า Ri สูงกว่าที่บริเวณ 2 หน้าตัดแรก และที่หน้าตัดหลังจากนั้นมีแนวโน้มนี่เปลวไฟจะไม่สามารถเสถียรอยู่ได้ทั้งการทดลองทั้ง 2 กรณี



รูปที่ 4.14 การกระจายค่า Ri ของการทดลอง (a) D และ (b) E ที่หน้าตัด x/D_L เท่ากับ 0.0227 ถึง 0.2000

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในบทที่ 4 เห็นได้ว่าผลของการฉีดเชื้อเพลิงร่วมแกนการไหล โดยหมุนวนตามกันและหมุนวนสวนทางกันมีผลทำให้การกระจายความเร็วภายในบริเวณปฐมภูมิแตกต่างกัน อีกทั้งเมื่อพิจารณาในรายละเอียดโดยเปลี่ยนค่า S_N แล้วเห็นได้ว่าการกระจายความเร็วภายในปฐมภูมิก็น่าสนใจมีความแตกต่างกัน เพื่อชี้ให้เห็นว่าการไหลในแต่ละกรณีที่ทำการทดลองมีผลต่อการไหลภายในบริเวณปฐมภูมิอย่างไร จึงสรุปผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

5.1.1 ขนาดของ Recirculation Zone

จากรูปที่ 4.1 ถึง 4.3 พบว่าการทดลองแบบ B ซึ่งเป็นการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวสวนทางกัน(Counter Swirl) ที่ S_1 และ S_2 0.61 และ 0.65 ตามลำดับ มีขนาดของ Reverse Region ของ Toroidal Vortex ที่มีขนาดใหญ่และยาวที่สุด

การทดลองแบบ D นั้นมีขนาดของ Reverse Region ใกล้เคียงกับขนาด Reverse Region ของกรณีทำการทดลองแบบ B แต่มีขนาดเล็กกว่าเมื่อห่างจากปากทางออกของ Nozzle

ความสำคัญของ Reverse Region ก็คือ เป็นบริเวณที่มี Turbulence intensities สูง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการผสมผสาน(Mixing) ของอากาศและเชื้อเพลิงเป็นอย่างมาก เพราะบริเวณที่เป็น Toroidal Vortex นี้จะทำการเหนี่ยวนำ(Entrain) ก๊าซใดๆที่อยู่ภายนอกบริเวณ Zone นี้ให้เข้าไปอยู่ในบริเวณ Reverse Region [1,2] ดังนั้นถ้าเป็นการทดลองที่มีการเผาไหม้ บริเวณ ที่เป็น Reverse Region จะประกอบไปด้วยสสาร 3 กลุ่มที่แตกต่างกันคือ ก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ก๊าซร้อนที่ยังมีเชื้อเพลิงที่และอากาศที่ยังเผาไหม้ไม่หมด รวมทั้งอากาศและเชื้อเพลิงที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ปฏิกิริยานี้ทำให้ความร้อนที่ได้จากก๊าซกลุ่มแรกถ่ายเทสู่ก๊าซอีก 2 กลุ่มที่เหลือ ส่งผลให้ก๊าซกลุ่มที่ 2 และ 3 มีอุณหภูมิสูงขึ้น และเกิดการเผาไหม้อย่างง่ายดายในบริเวณ Reaction Zone

ขนาดของ Toroidal Vortex นั้นแปรผันตามขนาดของ Reverse Region และ ความสำคัญของขนาดของ Toroidal Vortex ก็คือเป็นปัจจัยที่ชี้บ่งถึงปริมาณการเหนี่ยวนำ(Entrain) ก๊าซที่อยู่ภายนอกเข้ามา ซึ่งปริมาณของก๊าซถูกเหนี่ยวนำ เข้ามานั้นแปรผันตามระยะตามแนวแกนของห้องเผาไหม้[2] ดังนั้นการทดลอง B จึงมีแนวโน้มที่เป็นไปได้ว่าจะมีก๊าซที่เหนี่ยวนำ เข้ามามากที่สุด

การเหนี่ยวนำก๊าซเข้ามาภายใน Toroidal Vortex นี้มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพ และเสถียรภาพ ของการเผาไหม้แบบไม่มีการผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศก่อนเข้าห้อง

เผาไหม้(Non-premixed)มาก กล่าวคือการเผาไหม้แบบนี้ อากาศและเชื้อเพลิงไม่ได้มีการผสมกันก่อนเข้าห้องเผาไหม้มาก่อน ฉะนั้นจึงมีโอกาสสูงมาก ที่จะเกิดปรากฏการณ์ที่อัตราการเกิดการเผาไหม้(Reaction Rate)จะสูงกว่าอัตราการผสมผสาน(Mixing Rate) ทำให้เกิดเหตุการณ์ที่เรียกว่า Flame Lift [16]คือ บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้อยู่ห่างจาก Nozzle ใกล้ปลายห้องเผาไหม้มากขึ้นทำให้เปลวไฟดับได้ง่าย อันเป็นเหตุให้ย่านของการเผาไหม้(Combustion Limit)แคบ อีกทั้งเวลาที่อากาศและเชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ก็จะน้อย ปริมาณเชื้อเพลิงที่ไม่ได้เผาไหม้เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้จึงลดลง[16]

และที่สำคัญอย่างยิ่งก็คือ เนื่องจากผลการทดลองนี้จะนำไปใช้ประโยชน์กับการออกแบบห้องเผาไหม้ที่มีค่าความร้อนต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงเป็นปริมาณมากเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในท้องตลาด หากว่าเชื้อเพลิงและอากาศมีการผสมผสานกันช้าก็จะทำให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพได้ยากดังอธิบายข้างต้น ทำให้เครื่องยนต์กังหันก๊าซมีความยืดหยุ่นต่อภาระกรรม(Load)ต่ำ ซึ่งภาระกรรมของเครื่องยนต์นี้แปรผันกัน โดยตรงต่ออัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ใช้ในห้องเผาไหม้

5.1.2 การกระจายความเร็ว U ภายในบริเวณปฐมภูมิของห้องเผาไหม้

เห็นได้ชัดจากผลการทดลองในบทที่ 4 ว่าการกระจายความเร็ว U มีความแตกต่างกันในการทดลองแต่ละกรณี สิ่งที่สำคัญของการกระจายความเร็ว U ในทิศทางตามแนวแกนการไหล(แกน x) ก็คือความสัมพันธ์ของความเร็ว U ที่ลดลงและการเกิด Large Scale Vortex อันเป็นจุดเริ่มต้นของการไหลแบบ Turbulence (Transition to Turbulence) กล่าวคือ เมื่อความเร็ว U ลดลงตามทิศทางแนวแกนการไหล แสดงว่าเกิด Large Scale Vortex ขึ้นและดึงพลังงานจากการไหล ส่งผลให้ความเร็ว U ลดลง และเป็นที่น่าอนว่าหากเกิดการไหลแบบ Turbulence ขึ้นย่อมเกิดการผสมผสานขึ้น

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 สามารถสรุปผลการลดลงของความเร็ว U ตามแนวแกนการไหลได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปถึงการลดลงของความเร็วที่การไหลใกล้กับปากทางออกของ Nozzle(Up Stream) และที่บริเวณห่างจากNozzle(Down Stream) โดยสรุปเห็นได้ว่าการทดลองแบบ C และ D ความเร็ว U ที่บริเวณหน้าตัดที่ใกล้Nozzleมีความเร็วลดลงน้อยแสดงว่า Large Scale Vortex ดึงเอาพลังงานจากการไหลได้น้อย แสดงว่ามีการผสมผสานน้อย

ตารางที่ 5.1 การลดลงของความเร็ว U ณ หน้าตัดต่างๆ

กรณีศึกษา	หน้าตัดที่ x/D_L เท่ากับ 0.0227 ถึง 0.1114	หน้าตัดที่ x/D_L เท่ากับ 0.3409 ถึง 0.4295
A	ลดลง	ลดลง
B	ลดลง	ค่อนข้างคงที่
C	ลดลงเล็กน้อย	ค่อนข้างคงที่
D	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย
E	ลดลง	ลดลง

เปรียบเทียบการทดลอง A B และ E พบว่าที่บริเวณใกล้ปากทางออกของ Nozzle การทดลองแบบ A มีความเร็วลดลงมากที่สุด ดังนั้นจึงน่าที่จะมีการผสมผสานสูงกว่าการทดลองกรณีอื่นๆ ณ บริเวณนี้

เมื่อพิจารณาที่บริเวณห่างจาก Nozzle พบว่าการทดลองแบบ E มีความเร็วลดลงมากกว่าการทดลองอื่นๆรวมทั้งการทดลองแบบ A ดังนั้นการทดลองแบบ E จึงน่าที่จะมีการผสมผสานสูงกว่าการทดลองกรณีอื่นๆ ณ บริเวณนี้

ในการพิจารณาว่าการไหลแบบใดควรจะนำไปใช้ในห้องเผาไหม้จริงไม่อาจตัดสินได้จากการผสมผสานของก๊าซภายในบริเวณปฐมภูมิได้เพียงอย่างเดียว เพราะบางครั้งก๊าซมีการผสมผสานสูงจนเกินไปก็อาจทำให้เปลวไฟไม่เสถียรได้[9]จึงเป็นต้องมีการพิจารณาเรื่องเสถียรภาพหากเกิดการเผาไหม้ด้วย ดังนั้นเรื่องแนวโน้มของเสถียรภาพหากเกิดการเผาไหม้ของการทดลองหมดจึงได้นำไปสรุปไว้ในหัวข้อที่ 5.1.3

5.1.3 สรุปการทำนายเสถียรภาพการเผาไหม้จากค่า Richardson Number

เมื่อพิจารณาหัวข้อที่ 4.3 แล้วพบว่าการทดลองแบบ B น่าที่จะมีเสถียรภาพในการเผาไหม้ในใกล้กับปากทางออกของ Nozzle และมีแนวโน้มว่าจะมีเปลวไฟที่สั้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นที่ต้องการสำหรับห้องเผาไหม้

จากผลการทดลองแบบไม่มีการเผาไหม้ทำให้เห็นแนวโน้มของการผสมผสาน และเสถียรภาพของการเผาไหม้ได้อย่างคร่าวๆ แต่ทั้งนี้ยังมีอีกปัจจัยสำคัญอีกตัวหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงก่อนที่จะนำองค์ความรู้ที่ได้ไปใช้งานจริงคือประสิทธิภาพในการเผาไหม้ ซึ่งจำเป็นต้องใช้การทดลองแบบมีปฏิกิริยาการเผาไหม้เข้ามาตัดสินว่าการทดลองแบบใดที่จะมีปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพ

จากผลการทดลองในบทที่ 4 และบทสรุปที่กล่าวมาดูเหมือนกับว่าควรที่จะเลือกการทดลองแบบ B ไปใช้ในห้องเผาไหม้ แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการทดลองแบบใดที่เหมาะสมกับการเผาไหม้

ก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำ เพราะประสิทธิภาพของการเผาไหม้นั้นจะสูงเมื่อ อัตราการผสมผสาน (Mixing Rate) ใกล้เคียงกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Reaction Rate) [16]

จากผลการทดลองที่ผ่านมาชี้ให้เห็นได้ว่าอัตราการผสมผสานสามารถควบคุมได้โดยการเพิ่มหรือลดค่า S_v ของก๊าซที่ฉีดออกจาก Nozzle เพราะการเปลี่ยนค่า S_v ทำให้การกระจายความเร็ว W เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ 2 อย่างคือ ความเร็ว U เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งมีผลโดยตรงกับการผสมผสาน และมีผลต่อการกระจายความดัน ดังสมการที่ 2.5

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\rho W^2}{r} \quad (5.1)$$

และการกระจายความดันนี้เองที่ส่งผลต่อการกระจายความหนาแน่น ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพในการเผาไหม้ในที่สุด

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สร้างองค์ความรู้พื้นฐานของรูปแบบการไหลหมุนวนแบบร่วมแกนกัน (Co-axial Flow) ในห้องเผาไหม้
2. องค์ความรู้ที่ได้จากข้อ 1 สามารถนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบหัวเผาสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซหรือหัวเผาอุตสาหกรรมให้สามารถใช้ก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำได้

5.3 แนวทางการทำวิจัยในอนาคต

1. ทำการทดลองเพิ่มเติมในกรณีที่เกิดการเผาไหม้เพื่อสรุปว่าการทดลองกรณีใดเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการออกแบบห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ
2. นำข้อมูลที่ได้มาออกแบบห้องเผาไหม้สำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก ที่ตัดแปลงมาจากเทอร์โบชาร์จเจอร์ของรถยนต์
3. สร้างห้องเผาไหม้และทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์

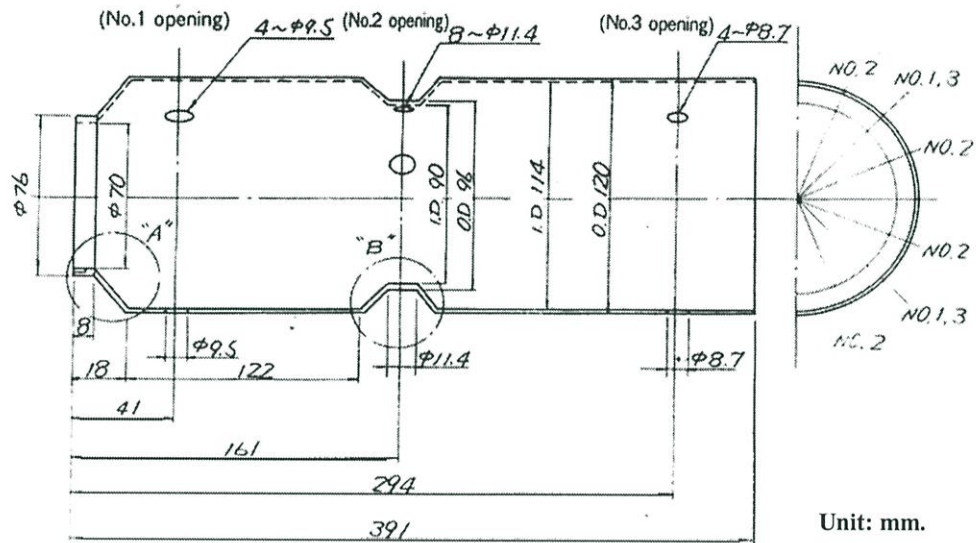
เอกสารอ้างอิง

- [1] Arthur H. Lefebvre, "Gas Turbine Combustion", Thermal Science and Propulsion Center, School of Mechanical Engineering Purdue University, West Lafayette Indiana, 1983
- [2] J.M. Beer and N.A. Chigier, "Combustion Aerodynamics", Fuel and Energy Science Series, 1972
- [3] M.V. Heitor, "Velocity and Scalar Measurements in Model and Real Gas Turbine Combustors", Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Instrumentation for Combustion and Flow in Engines Vimeira, Portugal, September 13-26, 1987
- [4] T. Ninomiya, J. Inumaru., T. Abe and M. Sato, "Flow and Mixing Characteristics of a Gas Turbine Combustor Using a Water-Flow Model (Part-1)", Yokosawa Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry, January 1990
- [5] N. Syred, N.A. Chigier and J.M. Beer, "Flame Stabilization in Recirculation Zones of Jets with Swirl", Thirteenth Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1971, pp. 617-624
- [6] S. Fujii, K. Eguchi and M. Gomi, "Swirling Jets with and without Combustion", AIAA Journal, Vol. 19, No.18, November 1981, pp. 1438-1442
- [7] Bach T. Vu and F.C. Gouldin, "Flow Measurement in a Model Swirl Combustor", AIAA Journal, Vol. 20, No.5, November 1981, pp. 642-651
- [8] F.C. Gouldin J.S. Depsky and S-L. Lee, "Velocity Field Characteristics of a Swirling Flow Combustor", AIAA Journal, Vol. 23, No.1, January 1985, pp. 95-102
- [9] J.I. Ramos และ H. T. Somer, " Swirling Flow in Research Combustor", AIAA Journal, Vol. 23, February 1985, pp. 241-248
- [10] ศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, "โครงการการศึกษาการพัฒนาเตาเผาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับอุตสาหกรรมชนบท", รายงานสำหรับผู้บริหาร เสนอต่อกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวง วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
- [11] Frank M. White, " Fluid Mechanics", Third Edition, University of Rhode Island, McGraw-Hill, Inc.

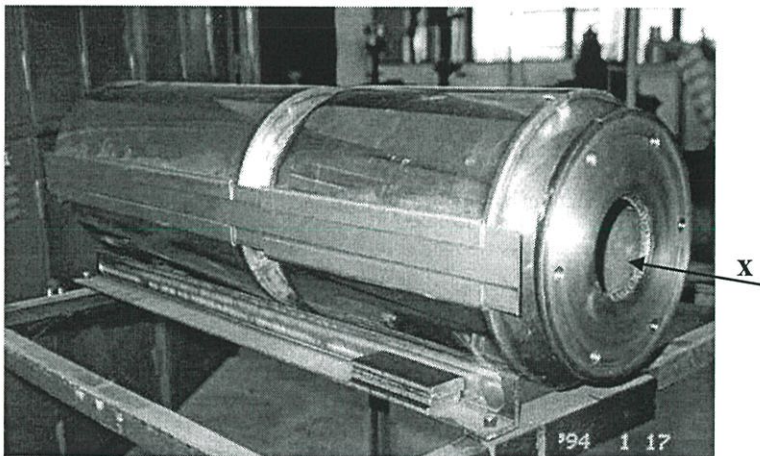
- [12] www.unitedsensorcorp.com
- [13] I.C. Shepherd, “ A Four Hole Pressure Probe for Fluid Flow Measurements in Three Dimensions”, Transactions of the ASME in Journal of Fluid Engineering, December 1981, Vol.103, pp.590-594
- [14] J.D Hooper and A.R. Musgrove, “Multi-Hole Pressure Probes for The Determination of the Total Velocity Vector in Turbulent Single-Phase Flow”, 4th International Symposium Transport Phenomena in Heat and Mass Transfer, July 14-13, 1991, The University of New South Wales Sydney Australia.
- [15] ภาณุมาศ อรุณเดชาวัฒน์ “การพัฒนาเครื่องมือวัดการไหลแบบ 3 มิติ” การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมการบินและอวกาศ แห่งประเทศไทยครั้งที่ 1, 16 กุมภาพันธ์ 2546 โรงเรียนนายเรืออากาศ
- [16] Stephen R. Turns, “ An introduction to combustion”, Propulsion Research Center and Department of Mechanical Engineering, The Pennsylvania State University, McGraw-Hill, Inc. pp 262-265
- [17] Alan S. Morris, “Measurement and calibration for quality assurance”, Department of Control Engineering University of Sheffield, Prentice Hall Inc. , pp 385-436
- [18] J.P. Holman, Professor of Mechanical Engineering Southern Methodist University, “Experimental methods for engineer”, Sixth Edition, McGraw-Hill, Inc. , pp. 281-301
- [19] H.K. Versteeg and W. Malalasekera, “An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method”, Longman Scientific&Technical. , pp. 41-50

ภาคผนวก ก

ห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลอง[2]



รูปที่ ก-1 ดันแบบห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลอง

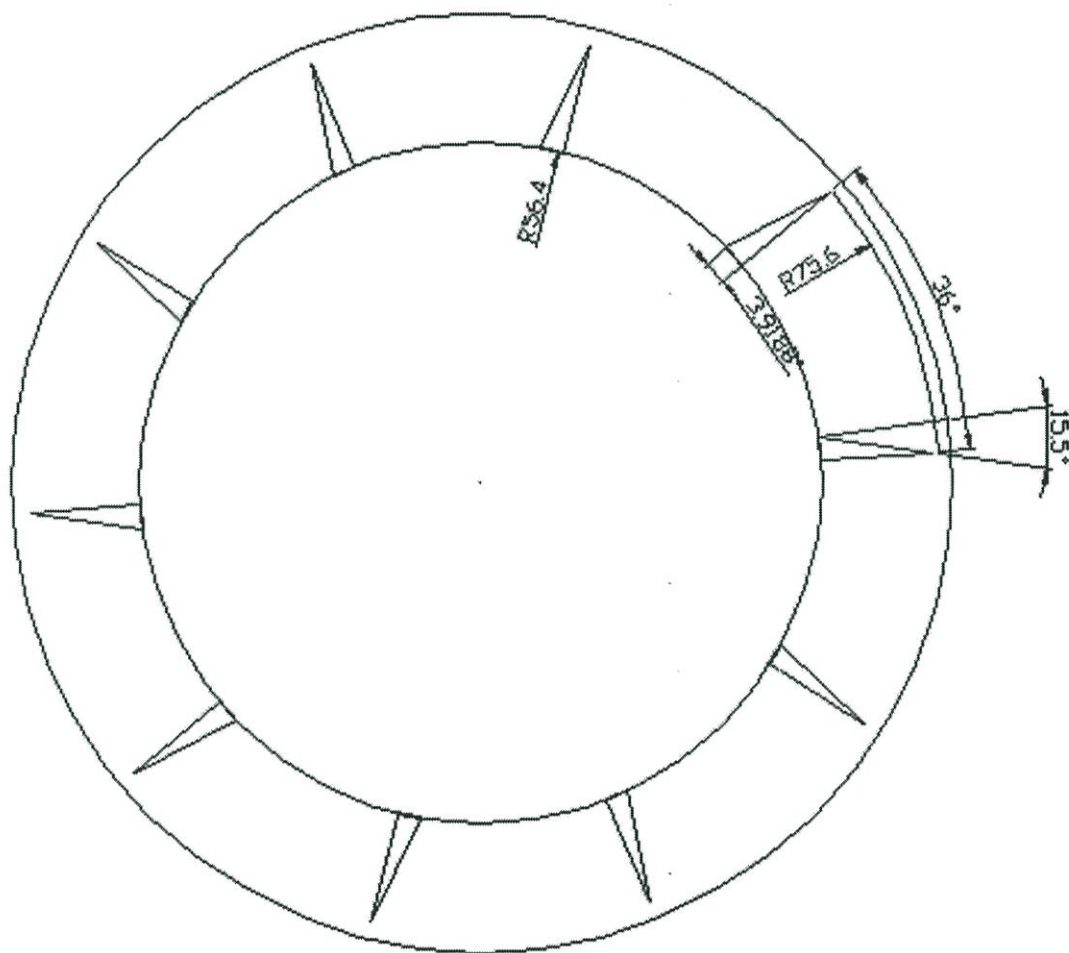


รูปที่ ก-2 ห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลอง

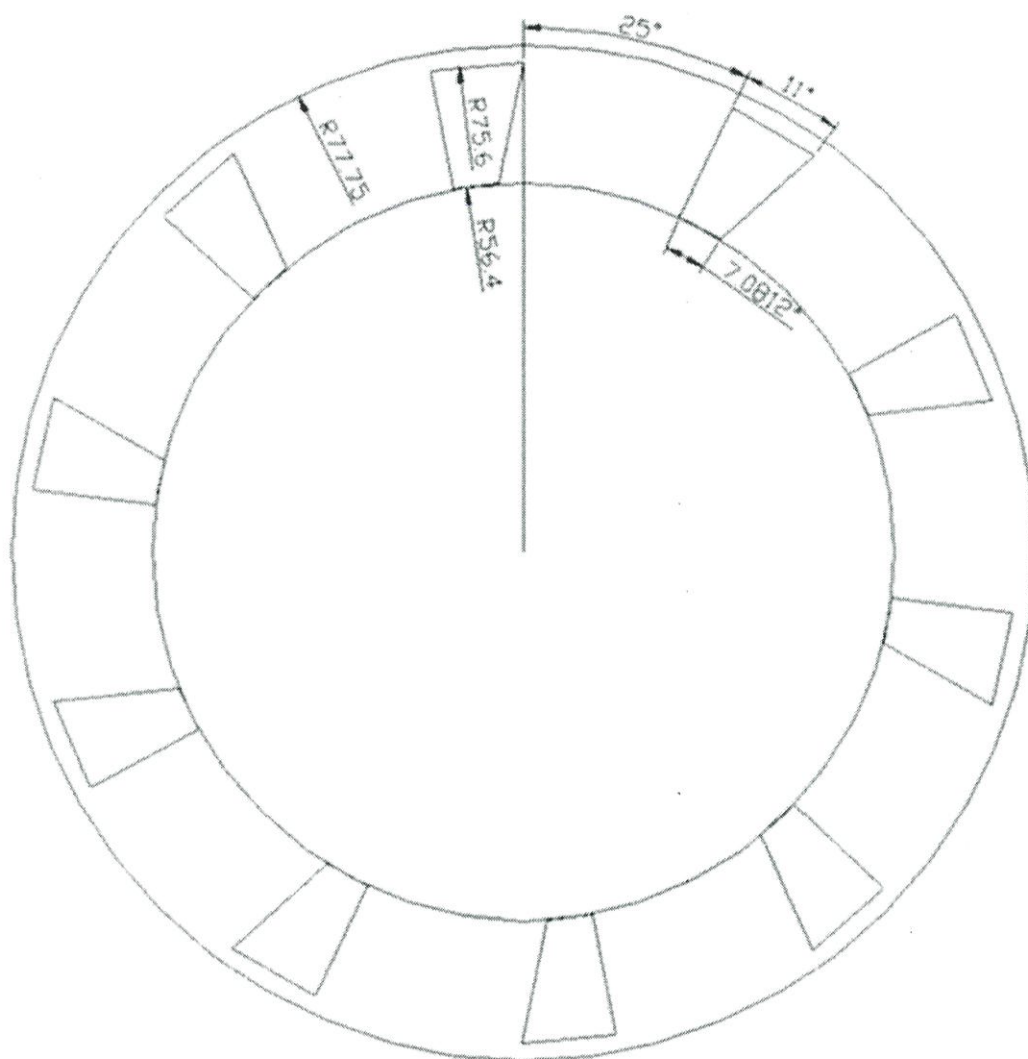
จากรูป ก-2 หัวลูกศรแสดงทิศทางที่ก๊าซไหลออกจากอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนแบบปรับค่าได้ และหัวลูกศรแสดงทิศทางตามแนวแกน x เมื่อค่า x เพิ่มมากขึ้น

ภาคผนวก ข

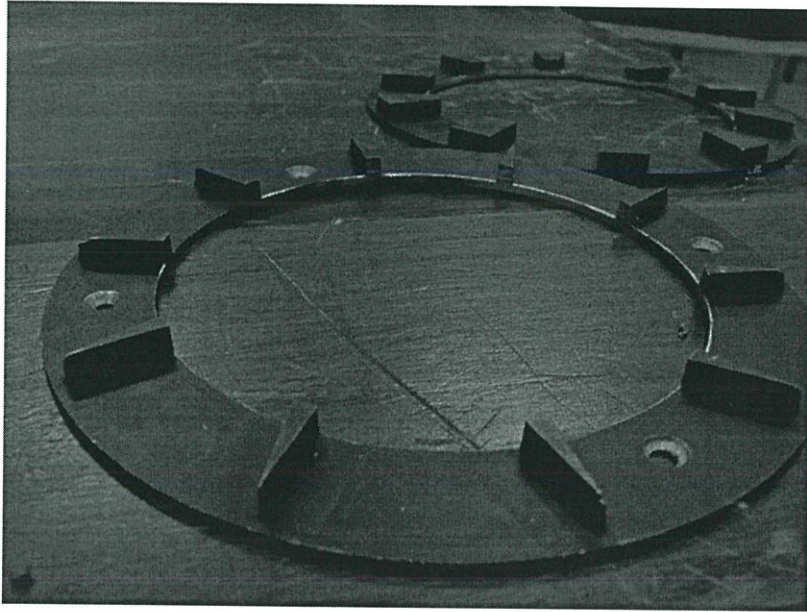
อุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว



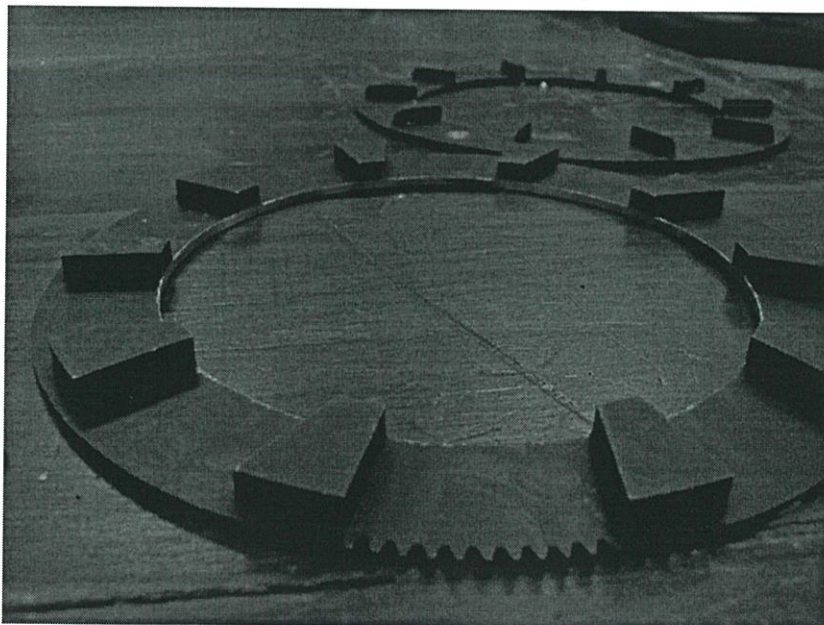
รูปที่ ข-1 รูปด้านหน้าของส่วนBlade ของอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว



รูปที่ ข-2 รูปด้านหน้าของส่วน Block ของอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว



รูปที่ ข-3 รูปด้านหน้าของส่วน Blade ของอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว



รูปที่ ข-4 รูปด้านหน้าของส่วน Block ของอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว

ภาคผนวก ก

ผลการสอบเทียบโพรบที่ความเร็ว 20.57 m/s

ตารางที่ ก-1 ความดันของ Zone 1

Pitch Angle	Yaw Angle	P0 (mm. H ₂ O)	P1 (mm. H ₂ O)	P2 (mm. H ₂ O)	P3 (mm. H ₂ O)
30	41	93.195	-137.34	243.288	-141.264
25	41	112.815	-80.442	252.117	-144.207
25	35	134.397	-71.613	252.117	-88.29
20	41	132.435	-34.335	255.06	-140.283
20	35	173.637	-19.62	255.06	-74.556
20	30	198.162	0	253.098	-24.525
15	41	135.378	-6.867	240.345	-147.15
15	35	168.732	9.81	242.307	-98.1
15	30	194.238	34.335	242.307	-49.05
15	25	212.877	53.955	242.307	1.962
15	20	220.725	63.765	241.326	39.24
10	41	149.112	4.905	238.383	-157.941
10	35	189.333	34.335	233.478	-112.815
10	30	218.763	68.67	232.497	-53.955
10	25	228.573	93.195	225.63	0
10	20	228.573	103.005	223.668	49.05
10	15	227.592	103.005	206.01	83.385
5	41	127.53	14.715	240.345	-181.485
5	35	166.77	63.765	240.345	-117.72
5	30	196.2	98.1	245.25	-88.29

ตารางที่ ก-1 ความดันของ Zone 1 (ต่อ)

Pitch Angle	Yaw Angle	P0 (mm. H ₂ O)	P1 (mm. H ₂ O)	P2 (mm. H ₂ O)	P3 (mm. H ₂ O)
5	25	215.82	127.53	245.25	-39.24
5	20	225.63	137.34	245.25	-9.81
5	15	245.25	137.34	245.25	29.43
5	10	245.25	137.34	191.295	68.67
5	5	242.307	137.34	191.295	107.91
5	0	245.25	137.34	156.96	127.53
0	41	147.15	32.373	264.87	-118.701
0	35	176.58	81.423	257.022	-72.594
0	30	189.333	120.663	252.117	-41.202
0	25	217.782	148.131	237.402	9.81
0	20	221.706	160.884	224.649	35.316
0	15	220.725	165.789	206.991	60.822
0	10	219.744	162.846	187.371	89.271
0	0	215.82	174.618	157.941	107.91
0	0	211.896	162.846	147.15	105.948
0	-5	212.877	154.998	125.568	93.195
-5	41	138.321	68.67	235.44	-58.86
-5	35	186.39	116.739	235.44	-53.955
-5	30	206.01	156.96	225.63	-34.335
-5	25	215.82	184.428	206.01	-34.335
-5	20	220.725	191.295	191.295	14.715
-5	15	216.801	190.314	161.865	44.145
-5	10	216.801	193.257	142.245	68.67
-5	5	215.82	185.409	121.644	93.195

ตารางที่ ก-1 ความดันและค่าตัวแปรไร้มิติของ Zone 1 (ต่อ)

Pitch Angle	Yaw Angle	P0 (mm. H ₂ O)	P1 (mm. H ₂ O)	P2 (mm. H ₂ O)	P3 (mm. H ₂ O)
-5	0	215.82	191.295	107.91	99.081
-10	41	154.998	95.157	220.725	-153.036
-10	35	186.39	148.131	218.763	-122.625
-10	30	204.048	184.428	211.896	-107.91
-10	25	208.953	206.01	196.2	-91.233
-10	20	215.82	213.858	175.599	-61.803
-10	15	221.706	210.915	144.207	-12.753
-10	10	220.725	206.991	107.91	30.411
-10	5	221.706	210.915	88.29	68.67
-15	41	137.34	103.005	186.39	-174.618
-15	35	161.865	152.055	186.39	-164.808
-15	30	184.428	192.276	176.58	-117.72
-15	25	196.2	218.763	154.017	-120.663
-15	20	210.915	217.782	142.245	-83.385
-15	15	210.915	222.687	115.758	-27.468
-15	10	213.858	221.706	88.29	14.715
-15	5	210.915	220.725	56.898	19.62
-20	41	125.568	122.625	141.264	-176.58
-20	35	147.15	176.58	137.34	-171.675
-20	30	176.58	212.877	132.435	-161.865
-20	25	186.39	229.554	117.72	-130.473
-20	20	188.352	225.63	109.872	-102.024
-20	15	194.238	226.611	96.138	-60.822
-20	10	195.219	229.554	60.822	-13.734
-25	41	107.91	122.625	107.91	-193.257

ตารางที่ ค-1 ความดัน 1 (ต่อ)

Pitch Angle	Yaw Angle	P0 (mm. H ₂ O)	P1 (mm. H ₂ O)	P2 (mm. H ₂ O)	P3 (mm. H ₂ O)
-25	35	107.91	174.618	107.91	-181.485
-25	30	98.1	212.877	98.1	-166.77
-25	25	93.195	233.478	93.195	-156.96
-25	20	78.48	245.25	78.48	-112.815
-25	15	53.955	194.238	53.955	-83.385
-25	10	19.62	200.124	19.62	-44.145
-25	5	0	246.231	0	-34.335
-25	0	34.335	248.193	34.335	-19.62
-25	-5	0	243.288	0	-14.715
-30	41	47.088	133.416	41.202	-208.953
-30	35	71.613	178.542	39.24	-199.143
-30	30	101.043	212.877	24.525	-186.39
-30	25	125.568	230.535	19.62	-167.751
-30	20	137.34	235.44	0	-147.15
-30	15	141.264	237.402	-12.753	-115.758
-30	10	145.188	235.44	-36.297	-78.48
-35	41	-26.487	130.473	-18.1485	-294.3
-35	35	-19.62	179.523	-19.1295	-294.3
-35	30	9.81	213.858	-29.43	-274.68
-35	25	25.506	241.326	-39.24	-158.922
-35	20	46.107	255.06	-51.012	-243.288
-35	15	60.822	266.832	-68.67	-227.592
-35	10	68.67	258.984	-88.29	-188.352
-35	5	78.48	260.946	-98.1	-148.131
-41	41	-9.81	129.492	4.905	-225.63

ตารางที่ ก-1 ความดันของ Zone 1 (ต่อ)

Pitch Angle	Yaw Angle	P0 (mm. H ₂ O)	P1 (mm. H ₂ O)	P2 (mm. H ₂ O)	P3 (mm. H ₂ O)
-41	35	29.43	169.713	-14.715	-220.725
-41	30	49.05	196.2	-29.43	-208.953
-41	25	65.727	215.82	-41.202	-186.39
-41	20	81.423	220.725	-66.708	-167.751
-41	15	83.385	222.687	-70.632	-138.321
-41	10	83.385	225.63	-91.233	-119.682
-41	5	80.442	225.63	-99.081	-101.043

ตารางที่ ค-2 ความดันของ Zone 2

Pitch Angle	Yaw Angle	P0 (mm. H ₂ O)	P1 (mm. H ₂ O)	P2 (mm. H ₂ O)	P3 (mm. H ₂ O)
41	41	24.525	-223.668	243.288	-248.193
41	35	49.05	-163.827	232.497	-203.067
41	30	63.765	-120.663	238.383	-196.2
41	25	83.385	-70.632	233.478	-178.542
41	20	83.385	-14.715	228.573	-229.554
41	15	86.328	39.24	208.953	-173.637
41	10	100.062	86.328	181.485	-176.58
41	5	100.062	127.53	147.15	-166.77
41	0	93.195	158.922	112.815	-161.865
41	-5	83.385	184.428	68.67	-218.763
41	-10	88.29	208.953	24.525	-193.257
41	-15	61.803	218.763	-29.43	-196.2
41	-20	49.05	228.573	-88.29	-207.972
41	-25	29.43	228.573	-156.96	-228.573
35	41	58.86	-168.732	240.345	-188.352
35	35	81.423	-137.34	242.307	-173.637
35	30	100.062	-87.309	245.25	-147.15
35	25	114.777	-29.43	243.288	-137.34
35	20	128.511	21.582	242.307	-135.378
35	15	132.435	66.708	243.288	-127.53
35	10	137.34	101.043	230.535	-128.511
35	5	143.226	132.435	201.105	-135.378
35	0	144.207	157.941	166.77	-117.72
35	-5	142.245	143.226	124.587	-117.72
35	-10	136.359	205.029	76.518	-125.568

ตารางที่ ค-2 ความดันของ Zone 2 (ต่อ)

Pitch Angle	Yaw Angle	P0 (mm. H ₂ O)	P1 (mm. H ₂ O)	P2 (mm. H ₂ O)	P3 (mm. H ₂ O)
35	-15	127.53	218.763	29.43	-130.473
35	-20	111.834	220.725	-30.411	-137.34
35	-25	93.195	223.668	-88.29	-149.112
35	-30	68.67	225.63	-158.922	-171.675
30	35	122.625	-93.195	242.307	-109.872
30	30	144.207	-44.145	242.307	-93.195
30	25	163.827	14.715	245.25	-78.48
30	20	177.561	63.765	242.307	-78.48
30	15	176.58	103.005	238.383	-73.575
30	10	183.447	147.15	212.877	-73.575
30	5	180.504	178.542	181.485	-73.575
30	0	175.599	206.991	147.15	-78.48
30	-5	168.732	217.782	107.91	-83.385
30	-10	169.713	227.592	83.385	-83.385
30	-15	140.283	237.402	39.24	-98.1
30	-20	124.587	237.402	-14.715	-117.72
30	-25	105.948	238.383	-83.385	-142.245
30	-30	78.48	233.478	-152.055	-161.865
25	30	161.865	-29.43	255.06	-51.012
25	25	182.466	19.62	255.06	-34.335
25	20	196.2	63.765	252.117	-25.506
25	15	209.934	104.967	250.155	-21.582
25	10	213.858	129.492	247.212	-21.582
25	5	218.763	154.017	222.687	-17.658
25	0	216.801	181.485	192.276	-14.715

ตารางที่ ก-2 ความดันของ Zone 2 (ต่อ)

Pitch Angle	Yaw Angle	P0 (mm. H ₂ O)	P1 (mm. H ₂ O)	P2 (mm. H ₂ O)	P3 (mm. H ₂ O)
25	-5	213.858	181.485	171.675	-14.715
25	-10	208.953	200.124	122.625	-19.62
25	-15	195.219	210.915	76.518	-24.525
25	-20	179.523	218.763	21.582	-36.297
25	-25	154.998	220.725	-29.43	-49.05
20	25	207.972	24.525	247.212	9.81
20	20	213.858	63.765	248.193	19.62
20	15	212.877	112.815	229.554	19.62
20	10	213.858	149.112	213.858	19.62
20	5	213.858	185.409	196.2	19.62
20	0	212.877	193.257	176.58	19.62
20	-5	212.877	203.067	147.15	14.715
20	-10	204.048	207.972	127.53	14.715
20	-15	189.333	208.953	68.67	9.81
20	-20	166.77	208.953	29.43	0
15	15	220.725	78.48	242.307	63.765
15	10	220.725	112.815	236.421	71.613
15	5	222.687	139.302	220.725	73.575
15	0	220.725	154.017	199.143	73.575
15	-5	220.725	180.504	166.77	68.67
15	-10	218.763	185.409	137.34	65.727
15	-15	217.782	192.276	96.138	63.765
15	-20	204.048	196.2	49.05	46.107
10	10	228.573	125.568	183.447	103.005
10	5	223.668	159.903	163.827	107.91

ตารางที่ ก-2 ความดันของ Zone 2 (ต่อ)

Pitch Angle	Yaw Angle	P0 (mm. H₂O)	P1 (mm. H₂O)	P2 (mm. H₂O)	P3 (mm. H₂O)
10	0	218.763	183.447	142.245	98.1
10	-5	212.877	194.238	112.815	93.195

ตารางที่ ก-3 ความดันของ Zone 3

Pitch Angle	Yaw Angle	P0 (mm. H ₂ O)	P1 (mm. H ₂ O)	P2 (mm. H ₂ O)	P3 (mm. H ₂ O)
41	-30	9.81	228.573	-204.048	-223.668
41	-35	-19.62	233.478	-257.022	-271.737
41	-41	-24.525	232.497	-261.927	-301.167
35	-35	29.43	227.592	-190.314	-210.915
35	-41	0	230.535	-220.725	-248.193
30	-35	39.24	233.478	-191.295	-210.915
30	-41	4.905	233.478	-207.972	-230.535
25	-30	137.34	222.687	-63.765	-71.613
25	-35	107.91	220.725	-81.423	-104.967
25	-41	68.67	223.668	-93.195	-142.245
20	-25	149.112	203.067	-14.715	-19.62
20	-30	119.682	199.143	-11.772	-68.67
20	-35	96.138	198.162	-24.525	-98.1
20	-41	81.423	189.333	-24.525	-96.138
10	-10	204.048	201.105	93.195	78.48
10	-15	184.428	199.143	88.29	44.145
10	-20	158.922	199.143	68.67	-39.24
10	-25	140.283	189.333	49.05	-14.715
10	-30	110.853	184.428	24.525	-49.05
10	-35	85.347	178.542	4.905	-88.29
10	-41	78.48	174.618	0	-107.91
5	-5	241.326	152.055	137.34	127.53
5	-10	240.345	161.865	137.34	103.005
5	-15	220.725	166.77	127.53	75.537
5	-20	206.01	166.77	117.72	39.24

ตารางที่ ก-3 ความดันของ Zone 3 (ต่อ)

Pitch Angle	Yaw Angle	P0 (mm. H ₂ O)	P1 (mm. H ₂ O)	P2 (mm. H ₂ O)	P3 (mm. H ₂ O)
5	-25	178.542	168.732	98.1	9.81
5	-30	147.15	166.77	73.575	-19.62
5	-35	117.72	161.865	49.05	-29.43
5	-41	83.385	137.34	29.43	-50.031
0	-10	213.858	113.796	154.998	93.195
0	-15	211.896	122.625	149.112	68.67
0	-20	205.029	123.606	137.34	34.335
0	-25	180.504	127.53	107.91	-2.943
0	-30	108.891	127.53	78.48	-14.715
0	-35	84.366	117.72	49.05	-49.05
0	-41	103.005	107.91	29.43	-68.67
-5	0	221.706	93.195	209.934	83.385
-5	-5	207.972	93.195	210.915	58.86
-5	-10	215.82	122.625	211.896	19.62
-5	-15	213.858	142.245	206.991	-10.791
-5	-20	202.086	149.112	196.2	-39.24
-5	-25	184.428	149.112	176.58	-66.708
-5	-30	157.941	150.093	140.283	-95.157
-5	-35	133.416	149.112	104.967	-114.777
-5	-41	105.948	152.055	7.5	-119.682
-10	0	221.706	93.195	209.934	83.385
-10	-5	207.972	93.195	210.915	58.86
-10	-10	215.82	122.625	211.896	19.62
-10	-15	213.858	142.245	206.991	-10.791
-10	-20	202.086	149.112	196.2	-39.24

ตารางที่ ก-3 ความดันของ Zone 3 (ต่อ)

Pitch Angle	Yaw Angle	P0 (mm. H ₂ O)	P1 (mm. H ₂ O)	P2 (mm. H ₂ O)	P3 (mm. H ₂ O)
-10	-25	184.428	149.112	176.58	-66.708
-10	-30	157.941	150.093	140.283	-95.157
-10	-35	133.416	149.112	104.967	-114.777
-10	-41	105.948	152.055	7.5	-119.682
-15	0	200.124	63.765	222.687	34.335
-15	-5	200.124	73.575	217.782	14.715
-15	-10	204.048	88.29	222.687	-24.525
-15	-15	199.143	107.91	220.725	-49.05
-15	-20	191.295	122.625	212.877	-73.575
-15	-25	166.77	134.397	188.352	-93.195
-15	-30	147.15	139.302	152.055	-112.815
-15	-35	113.796	142.245	124.587	-130.473
-15	-41	91.233	137.34	86.328	-140.283
-20	-35	193.257	10.791	230.535	19.62
-20	-35	191.295	31.392	230.535	3.924
-20	-35	178.542	32.373	230.535	-19.62
-20	-35	186.39	50.031	230.535	-58.86
-20	-35	179.523	71.613	226.611	-88.29
-20	-35	166.77	90.252	221.706	-115.758
-20	-35	146.169	106.929	198.162	-133.416
-20	-35	114.777	110.853	176.58	-142.245
-20	-35	85.347	112.815	137.34	-152.055
-20	-41	78.48	104.967	103.005	-154.998
-25	-10	156.96	14.715	242.307	-73.575
-25	-15	152.055	34.335	233.478	-98.1

ตารางที่ ก-3 ความดันของ Zone 3 (ต่อ)

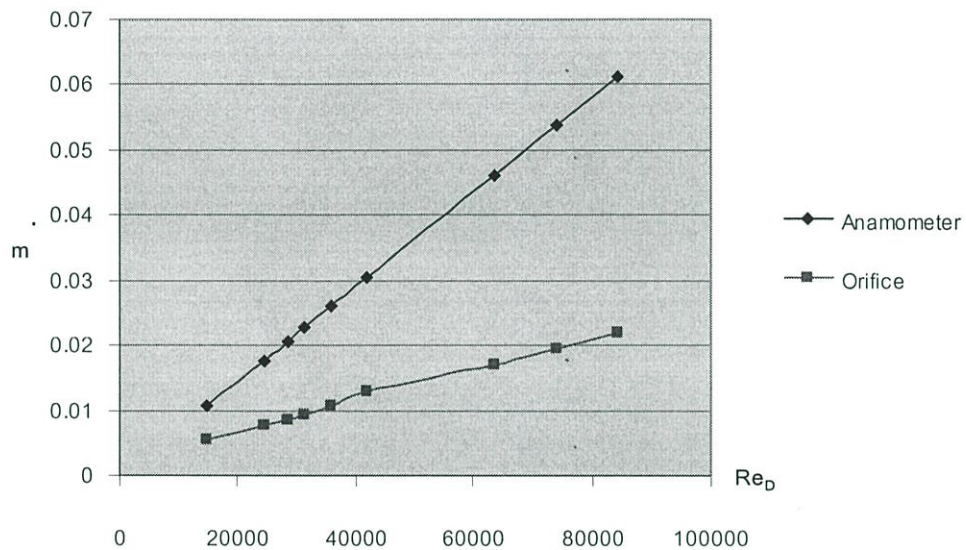
Pitch Angle	Yaw Angle	P0 (mm. H ₂ O)	P1 (mm. H ₂ O)	P2 (mm. H ₂ O)	P3 (mm. H ₂ O)
-25	-20	127.53	53.955	169.713	-117.72
-25	-25	117.72	63.765	199.143	-137.34
-25	-30	93.195	73.575	179.523	-139.302
-25	-35	73.575	73.575	139.302	-150.093
-25	-41	44.145	75.537	114.777	-147.15
-30	5	133.416	-46.107	237.402	-53.955
-30	0	130.473	-22.563	235.44	-73.575
-30	-5	127.53	-1.962	235.44	-96.138
-30	-10	110.853	12.753	235.44	-125.568
-30	-15	145.188	27.468	225.63	-111.834
-30	-20	118.701	39.24	207.972	-137.34
-30	-25	51.993	47.088	186.39	-142.245
-30	-30	39.24	49.05	157.941	-141.264
-30	-35	29.43	46.107	124.587	-138.321
-30	-41	26.487	35.316	112.815	-137.34
-35	0	78.48	-117.72	262.908	-125.568
-35	-5	78.48	-80.442	261.927	-132.435
-35	-10	78.48	-68.67	260.946	-147.15
-35	-15	78.48	-45.126	243.288	-149.112
-35	-20	68.67	-29.43	211.896	-152.055
-35	-25	58.86	0	187.371	-152.055
-35	-30	40.221	19.62	166.77	-152.055
-35	-35	23.544	24.525	132.435	-147.15
-35	-41	0	24.525	104.967	-107.91
-41	0	81.423	-88.29	222.687	-104.967

ตารางที่ ก-3 ความดันของ Zone 3 (ต่อ)

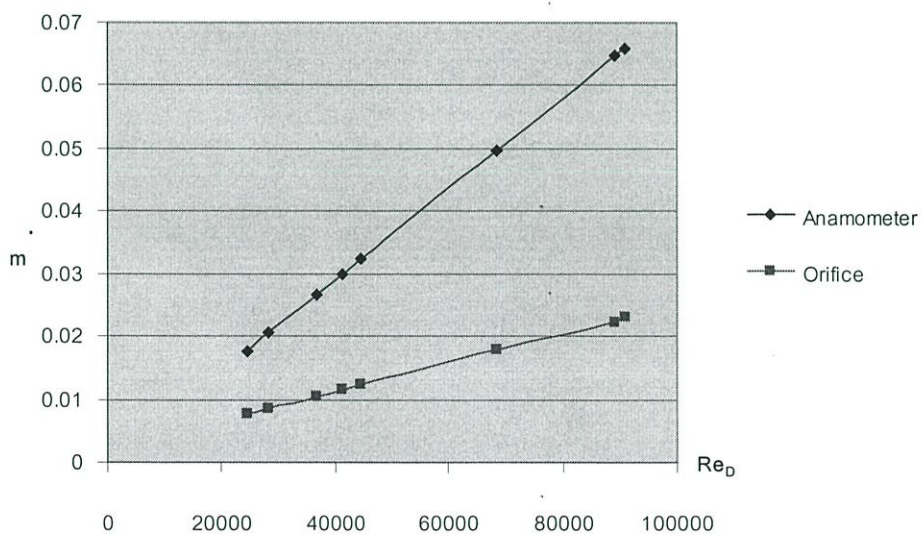
Pitch Angle	Yaw Angle	P0 (mm. H₂O)	P1 (mm. H₂O)	P2 (mm. H₂O)	P3 (mm. H₂O)
-41	-5	78.48	-75.537	214.839	-107.91
-41	-10	76.518	-49.05	208.953	-115.758
-41	-15	86.328	-29.43	199.143	-117.72
-41	-20	66.708	-9.81	179.523	-117.72
-41	-25	49.05	-12.753	166.77	-117.72
-41	-30	27.468	-9.81	142.245	-115.758
-41	-35	7.848	-2.943	120.663	-112.815
-41	-41	-9.81	-1.962	95.157	-107.91

ภาคผนวก ง

ผลการสอบเทียบ Orifice



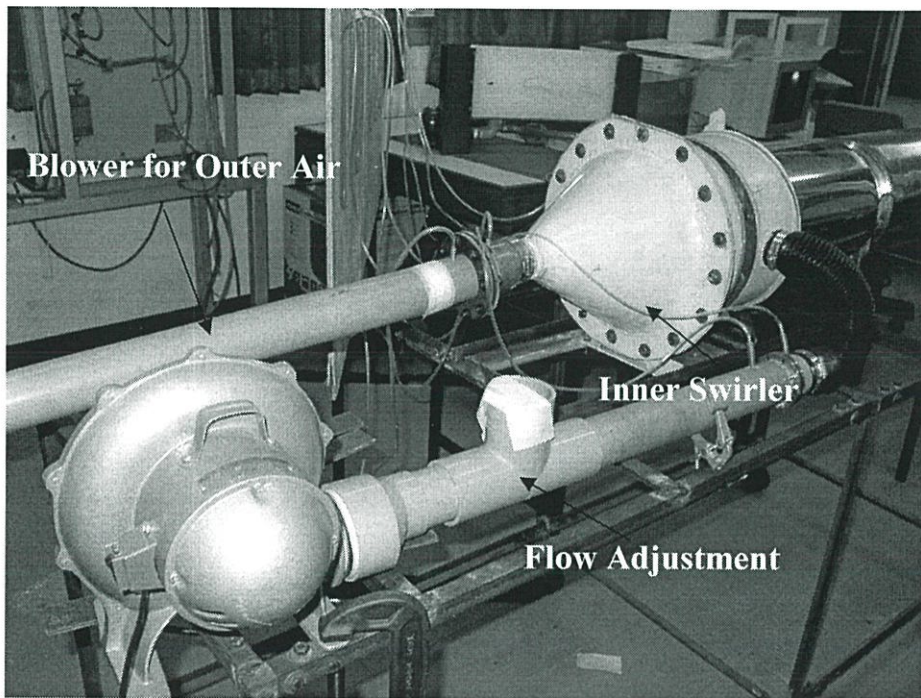
รูปที่ ง-1 เปรียบเทียบอัตราการไหลระหว่าง Orifice และ Anamometer ที่ Re_D ต่างๆ ของ Orifice $d_i=32$ mm.



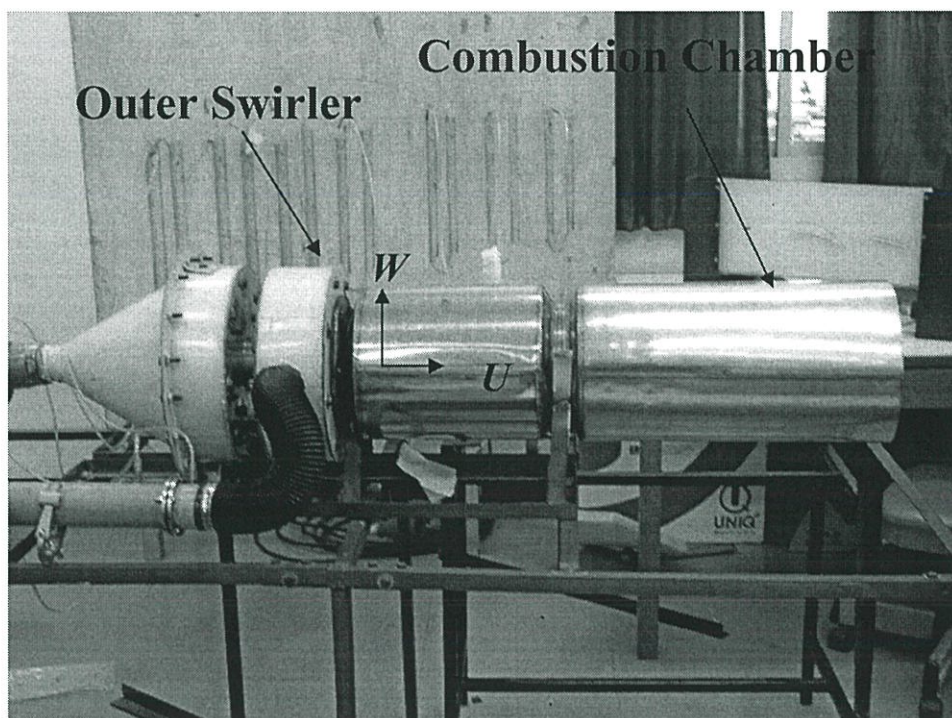
รูปที่ ง-2 เปรียบเทียบอัตราการไหลระหว่าง Orifice และ Anamometer ที่ Re_D ต่างๆ ของ Orifice $d_i=34$ mm.

ภาคผนวก จ

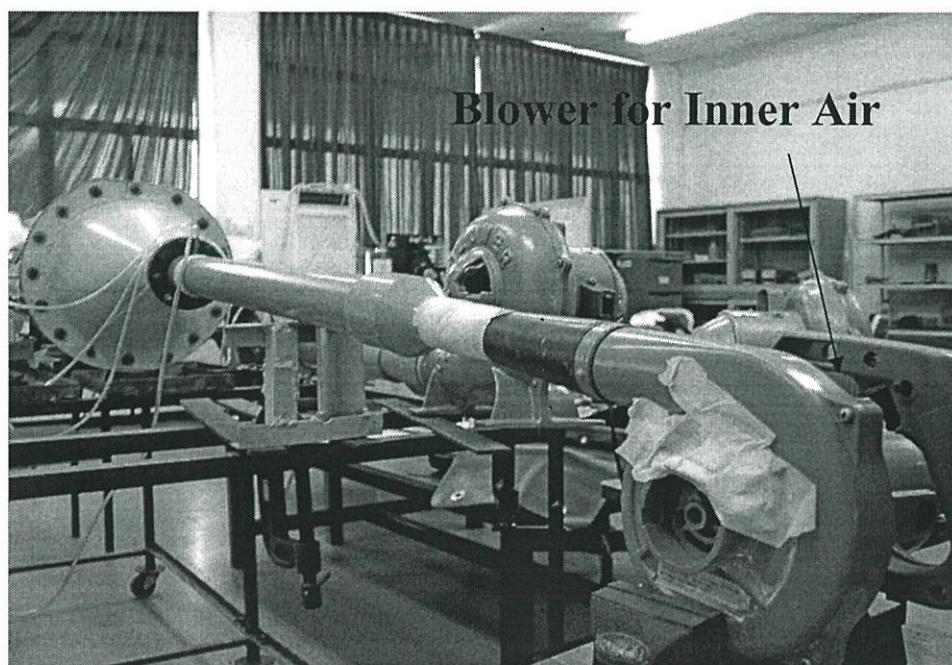
ภาพรวมของการทดลอง



รูปที่ จ-1 ภาพรวมของการทดลอง I



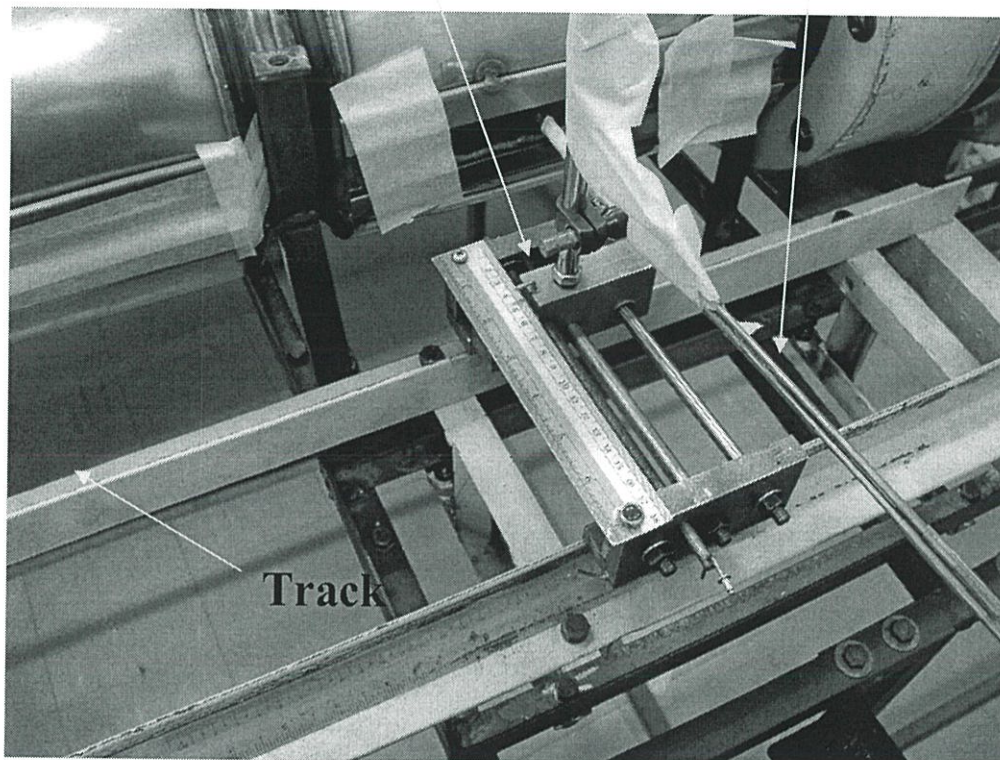
รูปที่ จ-2 ภาพรวมของการทดลอง 2



รูปที่ จ-3 ภาพรวมของการทดลอง 3

Jig for holding 3D Probe

3D Probe



รูปที่ จ-4 ภาพรวมของการทดลอง 4

ภาคผนวก ฉ

ตารางแสดงผลการทดลอง

ตารางที่ ฉ-1 ผลการทดลองกรณีศึกษา A

x/D_L	r/d	$u(m/s)$	$v(m/s)$	$w(m/s)$	$P_s(N/m^2)$
0.022727	0.460526	12.00809	-3.76014	0.076593	-1001.6
0.022727	0.526316	14.82294	-4.63601	0.104372	-1856.2
0.022727	0.592105	5.290932	3.614844	0.485832	-254.213
0.063636	0.394737	8.822813	-5.96855	-1.11186	-563.766
0.063636	0.460526	13.17446	-3.6037	0.778566	-1369.11
0.063636	0.526316	11.72507	-0.23164	0.090945	-1058.29
0.063636	0.592105	3.476483	0.797545	1.410294	-218.425
0.111364	0.263158	5.455928	-5.30801	-3.23017	-254.072
0.111364	0.328947	9.473059	-4.49389	-0.46091	-545.247
0.111364	0.394737	11.98684	-2.1782	0.097692	-1024.51
0.111364	0.460526	10.745	0.186284	-0.37191	-803.783
0.111364	0.526316	9.836462	0.030223	-0.04867	-849.783
0.159091	0.131579	5.873463	-0.56209	-3.47141	-268.746
0.159091	0.197368	9.973449	-1.76324	-0.58202	-729.866
0.159091	0.263158	11.50969	-1.60584	-0.08835	-892.061
0.159091	0.328947	13.26505	-1.25331	-0.02547	-1289.86
0.159091	0.394737	11.4278	0.827434	-0.96942	-969.489
0.159091	0.460526	8.09647	1.536269	-0.86969	-530.673
0.159091	0.526316	5.551163	1.431134	-0.69421	-285.116
0.2000	0.131579	5.481853	-3.01448	-3.31516	-291.688
0.2000	0.197368	5.601644	-3.09167	-4.58082	-114.898

ตารางที่ ฉ-1 ผลการทดลองกรณีศึกษา A (ต่อ)

x/D_L	r/d	$u(m/s)$	$v(m/s)$	$w(m/s)$	$P_s(N/m^2)$
0.2000	0.263158	12.32773	-0.81523	-0.20221	-1070.58
0.2000	0.328947	12.83099	-1.29202	-0.09153	-1142.2
0.2000	0.394737	11.69152	0.046419	-0.40978	-981.234
0.2000	0.460526	6.613455	1.503345	-0.96033	-340.69
0.2000	0.526316	2.971482	2.582541	-1.85561	-105.978
0.2500	0.131579	6.783467	-3.80951	-2.55262	-451.97
0.2500	0.197368	10.63236	-0.2285	-1.83074	-793.742
0.2500	0.263158	12.01514	-1.7154	-1.18817	-1004.11
0.2500	0.328947	12.92709	0.12709	-0.24711	-1265.01
0.2500	0.394737	11.38225	0.975443	-0.00238	-1063.9
0.2500	0.460526	6.100509	1.8182	-0.95874	-325.057
0.295455	0.131579	8.921291	0.884907	-1.68179	-692.399
0.295455	0.197368	11.94386	-0.69531	-0.0851	-1102.07
0.295455	0.263158	11.45716	0.777302	-0.36913	-1029.08
0.295455	0.328947	11.33758	1.861221	-0.80316	-1040.91
0.295455	0.394737	11.27488	2.570388	-0.41569	-1097.07
0.295455	0.460526	7.798502	2.661268	-0.4875	-545.007
0.295455	0.526316	2.874353	0.102619	3.412058	517.3648
0.340909	0	1.331461	2.382161	-3.52482	-132.569
0.340909	0.131579	6.539185	1.062844	-1.94376	-364.599
0.340909	0.197368	9.990657	1.268129	-1.81712	-683.445
0.340909	0.263158	10.14625	0.996029	-0.9401	-737.111
0.340909	0.328947	10.94608	0.707973	-0.34748	-900.744
0.340909	0.394737	9.151019	2.715038	-0.75939	-666.227
0.340909	0.460526	7.954071	2.977431	-0.30726	-570.386
0.340909	0.526316	7.123751	2.365941	-0.03973	-473.502

ตารางที่ ๑-1 ผลการทดลองกรณีศึกษา A (ต่อ)

x/D_L	r/d	$u(m/s)$	$v(m/s)$	$w(m/s)$	$P_s(N/m^2)$
0.340909	0.592105	2.808104	3.205976	-2.41993	-126.759
0.386364	0.131579	8.128731	-0.17262	-0.4676	-565.158
0.386364	0.197368	9.077697	-0.04981	-0.54438	-635.692
0.386364	0.263158	9.358478	1.304595	-0.66383	-723.304
0.386364	0.328947	7.721168	1.579532	-0.79636	-419.362
0.386364	0.394737	10.1012	2.072673	-0.31159	-861.406
0.386364	0.460526	8.96388	2.313764	-0.22081	-690.845
0.386364	0.526316	9.63983	1.547912	-0.092	-869.927
0.386364	0.592105	3.825799	2.720925	-1.31155	-170.32
0.429545	0	4.47056	1.862516	1.899684	-3790.72
0.429545	0.197368	7.238306	0.215236	-0.32233	-417.087
0.429545	0.263158	7.940273	0.324278	-0.40981	-488.217
0.429545	0.328947	6.004525	1.096149	-0.15096	-329.829
0.429545	0.394737	9.061638	2.205711	-0.28406	-733.944
0.429545	0.460526	6.795857	2.508598	-0.03942	-417.145
0.429545	0.526316	10.62369	0.026766	-0.39675	-1050.78
0.429545	0.592105	4.672589	3.1808	-1.49527	-193.46
0.429545	0.657895	3.142774	3.114787	-2.7848	-203.002

ตารางที่ ๑-2 ผลการทดลองกรณีศึกษา B

x/D_L	r/d	$u(m/s)$	$v(m/s)$	$w(m/s)$	$P_s(N/m^2)$
0.022727	0.460526	6.162256	-3.9552	2.378705	-459.41
0.022727	0.526316	12.97433	-3.23751	0.002582	-1132.26
0.022727	0.592105	14.31344	0.30466	0.241444	-1641.08
0.022727	0.657895	3.820631	0.764803	0.467761	-618.775
0.022727	0.723684	4.080826	0.074054	1.140155	-181.75
0.063636	0.394737	12.41698	-9.56866	-3.59229	-2101.33
0.063636	0.460526	10.51102	-5.34113	-0.21984	-690.178
0.063636	0.526316	12.53917	-2.38417	-0.06988	-1082.4
0.063636	0.592105	7.923124	1.013505	0.51042	-460.753
0.063636	0.657895	3.216657	0.722814	0.982283	-5886.58
0.063636	0.723684	3.482881	0.06199	0.307089	-125.198
0.111364	0.328947	6.236387	-5.92106	-2.93248	-279.01
0.111364	0.394737	10.39488	-4.56809	-0.32161	-675.301
0.111364	0.460526	11.29161	-2.43083	0.09087	-895.364
0.111364	0.526316	5.963375	-0.15247	-0.5086	-184.147
0.111364	0.592105	4.248702	0.57437	0.399733	-141.104
0.111364	0.657895	3.124804	-0.18456	0.119015	-100.675
0.159091	0.263158	8.955589	-2.12261	-1.36435	-437.453
0.159091	0.328947	11.71499	-2.32983	-0.18104	-902.512
0.159091	0.394737	11.86821	-1.50891	-0.13435	-928.031
0.159091	0.460526	9.335317	-0.51352	-0.03767	-590.879
0.159091	0.526316	6.159492	0.612979	0.317236	-297.187
0.159091	0.592105	3.228233	0.845112	-0.31215	-95.8157
0.20000	0.131579	7.808312	-2.61898	-2.67356	-527.316
0.20000	0.197368	10.28489	0.26985	-1.65432	-736.981

ตารางที่ ฅ-2 ผลการทดลองกรณีศึกษา B (ต่อ)

x/D_L	r/d	$u(m/s)$	$v(m/s)$	$w(m/s)$	$P_s(N/m^2)$
0.20000	0.263158	11.05531	-0.34965	-0.95121	-802.797
0.20000	0.328947	11.96849	-1.32449	-0.51209	-937.745
0.20000	0.394737	10.64091	-0.21725	-0.13219	-772.82
0.20000	0.460526	9.308704	0.286816	0.384223	-696.167
0.20000	0.526316	4.849896	0.933785	0.278612	-183.559
0.20000	0.592105	2.893053	0.930312	0.020992	-91.8161
0.2500	0.065789	8.17422	-2.11784	-2.87952	-727.795
0.2500	0.131579	9.052261	0.855231	-2.2807	-706.037
0.2500	0.197368	10.4623	0.778279	-1.77796	-826.626
0.2500	0.263158	12.61445	0.31403	-1.05754	-1194.43
0.2500	0.328947	11.71707	0.53626	-0.594	-945.747
0.2500	0.394737	11.49623	0.172965	0.244049	-1052.64
0.2500	0.460526	8.477179	0.789082	0.155703	-582.325
0.2500	0.526316	4.826667	1.044699	0.242362	-194.998
0.295455	0.065789	8.968133	0.495965	-2.03524	-796.661
0.295455	0.131579	9.654275	0.886319	-2.50605	-804.697
0.295455	0.197368	10.62977	0.714014	-1.71955	-859.097
0.295455	0.263158	12.48828	1.054192	-1.11523	-1173.59
0.295455	0.328947	12.38394	0.202252	-0.30269	-1117.27
0.295455	0.394737	11.78718	0.427105	0.311105	-1124.86
0.295455	0.460526	7.626369	1.552198	-0.18011	-462.94
0.295455	0.526316	5.109962	1.063587	0.166103	-223.251
0.295455	0.592105	2.228247	1.023051	-0.1883	-66.0437
0.340909	0.131579	8.971609	0.837397	-2.14672	-681.197
0.340909	0.197368	10.94875	0.553581	-1.46244	-935.82
0.340909	0.263158	11.95476	0.883164	-1.04738	-1076.33

ตารางที่ ฅ-2 ผลการทดลองกรณีศึกษา B (ต่อ)

x/D_L	r/d	$u(m/s)$	$v(m/s)$	$w(m/s)$	$P_s(N/m^2)$
0.340909	0.328947	11.39196	0.370213	-0.3182	-931.993
0.340909	0.394737	10.91683	0.853036	0.216077	-955.23
0.340909	0.460526	8.54329	1.581987	0.003748	-581.432
0.340909	0.526316	6.415905	1.187394	0.152321	-345.413
0.340909	0.592105	1.827242	1.673746	-0.94071	-37.3788
0.386364	0.131579	9.520801	0.906577	-2.13277	-706.049
0.386364	0.197368	10.86715	0.420811	-1.32917	-880.615
0.386364	0.263158	12.19448	-0.06343	-0.86121	-1116.94
0.386364	0.328947	12.30896	0.085246	-0.09253	-1170.09
0.386364	0.394737	10.09742	0.593471	0.317232	-794.704
0.386364	0.460526	8.874173	0.783001	0.241603	-658.156
0.386364	0.526316	6.464113	1.190549	0.412933	-339.165
0.386364	0.592105	1.960247	1.929857	-3.29734	-55.7563
0.429545	0.131579	4.770668	2.965324	-6.08987	-147.58
0.429545	0.197368	10.00469	0.421406	-1.20704	-747.528
0.429545	0.263158	12.1716	-0.42493	-0.22659	-1091.92
0.429545	0.328947	11.9791	-0.08035	0.106666	-1124.19
0.429545	0.394737	9.793409	1.167593	0.061834	-740.392
0.429545	0.460526	9.60403	0.410685	0.356672	-773.271
0.429545	0.526316	7.783097	1.26214	-0.02913	-516.353
0.429545	0.592105	3.091341	1.875597	0.473894	-79.7192
0.429545	0.657895	3.999605	-0.8355	-2.08254	-198.6

ตารางที่ ฉ-3 ผลการทดลองกรณีศึกษา C

x/D_L	r/d	$u(m/s)$	$v(m/s)$	$w(m/s)$	$P_s(N/m^2)$
0.022727	0.460526	10.75464	-4.45567	-0.06059	-770.214
0.022727	0.526316	13.06768	-2.29127	-0.12733	-1132.05
0.022727	0.592105	11.48038	2.368069	-0.28599	-1027.43
0.022727	0.723684	3.011798	-3.07312	-0.53981	-107.438
0.022727	0.789474	2.572796	-2.28597	-0.01281	-70.4161
0.063636	0.394737	7.543951	-6.30758	-2.22826	-450.377
0.063636	0.460526	11.45774	-4.28467	0.027184	-863.378
0.063636	0.526316	12.21833	-0.03568	-0.19113	-1003.15
0.063636	0.592105	3.824013	1.311242	1.046073	-76.2073
0.063636	0.657895	3.603072	-0.34852	0.798018	807.0534
0.063636	0.723684	3.176748	0.237186	0.476826	385.8551
0.111364	0.263158	5.644141	-4.36629	-3.11572	-267.814
0.111364	0.328947	7.422609	-4.90461	-2.76081	-273.301
0.111364	0.394737	11.19465	-3.10151	-0.32142	-813.467
0.111364	0.460526	10.41605	-0.94629	-0.04139	-721.288
0.111364	0.526316	6.987033	0.136098	-0.27264	-313.131
0.111364	0.592105	3.384651	0.369151	0.590343	1396.531
0.111364	0.657895	3.840167	0.982807	0.549222	641.0171
0.159091	0.131579	4.944945	-2.70572	-4.56055	-208.797
0.159091	0.197368	5.546534	-3.95049	-2.69069	-131.671
0.159091	0.263158	9.746084	-2.11039	-0.99459	-537.12
0.159091	0.328947	11.61825	-1.2089	-0.18099	-844.582
0.159091	0.394737	11.2897	-0.97018	-0.36014	-811.172
0.159091	0.460526	8.492537	-0.15858	-0.22409	-455.514
0.159091	0.526316	6.050025	0.188543	0.186953	-277.155
0.159091	0.592105	3.087694	0.493935	-0.07425	-80.0929

ตารางที่ ๓-3 ผลการทดลองกรณีศึกษา C (ต่อ)

x/D_L	r/d	$u(m/s)$	$v(m/s)$	$w(m/s)$	$P_s(N/m^2)$
0.2	0.065789	5.178635	1.601375	-3.26884	-282.745
0.2	0.131579	7.034155	0.947126	-3.00933	-281.97
0.2	0.197368	10.30974	0.317794	-2.00074	-697.743
0.2	0.263158	11.25303	0.756063	-1.62615	-782.314
0.2	0.328947	11.98099	0.500652	-0.6423	-979.346
0.2	0.394737	11.92201	0.632522	-0.07037	-1136.19
0.2	0.460526	7.916246	1.163424	0.028054	-466.644
0.2	0.526316	4.581716	0.887171	0.278584	-158.72
0.25	0.065789	8.977339	-1.01501	-2.70874	-823.913
0.25	0.131579	8.431433	1.062113	-2.55015	-547.965
0.25	0.197368	10.09623	0.82321	-1.94069	-721.4
0.25	0.263158	7.79808	1.417847	-4.12706	-163.049
0.25	0.328947	11.75234	0.369325	-0.33691	-975.789
0.25	0.394737	10.07015	0.578642	0.052194	-765.216
0.25	0.460526	7.278071	1.194072	0.006237	-402.514
0.25	0.526316	4.191113	0.979944	0.201258	-130.351
0.25	0.592105	1.623411	1.101054	-0.09786	-36.1173
0.295455	0.065789	7.318913	0.904262	-2.49262	-504.302
0.295455	0.131579	8.809213	1.499944	-2.12059	-616.672
0.295455	0.197368	10.53369	1.504033	-1.72366	-809.201
0.295455	0.263158	11.34169	1.049849	-0.92024	-894.47
0.295455	0.328947	11.95635	0.600439	-0.26408	-1067.66
0.295455	0.394737	10.14969	0.847492	0.179174	-808.665
0.295455	0.460526	6.523622	1.36329	0.067122	-318.221
0.295455	0.526316	2.642955	1.444894	0.498116	-39.2816
0.295455	0.592105	1.909774	1.332445	-0.40629	-53.7651

ตารางที่ ๓-3 ผลการทดลองกรณีศึกษา C (ต่อ)

x/D_L	r/d	$U(m/s)$	$v(m/s)$	$w(m/s)$	$P_s(N/m^2)$
0.340909	0.065789	6.961275	0.763291	-2.3922	-447.285
0.340909	0.131579	9.358576	0.977086	-2.04873	-711.717
0.340909	0.197368	10.71275	0.936236	-1.5098	-867.152
0.340909	0.263158	10.81968	1.172926	-1.06311	-809.289
0.340909	0.328947	11.63524	0.279005	-0.12961	-1020.93
0.340909	0.394737	9.485917	1.437898	-0.04588	-687.682
0.340909	0.460526	7.803277	1.349462	-0.03867	-478.91
0.340909	0.526316	4.848835	1.17558	0.14478	-188.647
0.340909	0.592105	3.679278	1.08018	-0.02742	-136.462
0.386364	0.065789	7.155843	1.301336	-2.46498	-494.356
0.386364	0.131579	9.576608	0.937115	-1.81815	-764.934
0.386364	0.197368	10.50492	1.283174	-1.20385	-809.183
0.386364	0.263158	11.09074	0.623732	-0.56845	-870.905
0.386364	0.328947	11.88888	-0.00389	0.030768	-1101.99
0.386364	0.394737	9.804179	1.227575	0.087753	-757.845
0.386364	0.460526	7.204427	1.59094	0.059253	-386.429
0.386364	0.526316	6.9506	1.204441	0.013585	-402.008
0.386364	0.592105	3.713708	0.99118	0.093204	-126.357
0.429545	0.065789	7.130039	0.733224	-1.81211	-489.197
0.429545	0.131579	8.867448	0.762875	-1.81195	-616.031
0.429545	0.197368	10.75015	1.084776	-1.01915	-872.622
0.429545	0.263158	10.90848	0.759853	-0.493	-868.307
0.429545	0.328947	11.41144	0.066045	0.025763	-1009.44
0.429545	0.394737	9.292608	1.494502	-0.05954	-668.017
0.429545	0.460526	7.018408	1.69426	0.04483	-360.944
0.429545	0.526316	5.89726	1.221695	0.250896	-264.15

ตารางที่ ฅ-3 ผลการทดลองกรณีศึกษา C (ต่อ)

x/D_L	r/d	$U(\text{m/s})$	$v(\text{m/s})$	$w(\text{m/s})$	$P_s(\text{N/m}^2)$
0.429545	0.592105	4.486499	0.94737	0.213761	-168.738
0.429545	0.657895	2.204316	1.104423	0.450038	-61.0143

ตารางที่ ๓-4 ผลการทดลองกรณีศึกษา D

x/D_L	r/d	$U(m/s)$	$v(m/s)$	$w(m/s)$	$P_s(N/m^2)$
0.022727	0.526316	13.48065	-2.59597	0.092605	-1251.17
0.022727	0.592105	14.40079	0.2613	-0.24219	-1568.54
0.063636	0.526316	12.76734	-2.03763	0.119652	-1137.71
0.063636	0.592105	10.00632	0.594148	0.143961	-791.101
0.063636	0.657895	3.749682	0.414675	0.189915	-127.275
0.063636	0.723684	3.369278	0.379055	-0.14456	-128.212
0.111364	0.328947	5.51801	-5.61865	-3.17017	-246.33
0.111364	0.394737	9.628772	-4.28638	-0.75364	-565.28
0.111364	0.460526	11.53437	-1.58144	-0.22349	-913.04
0.111364	0.526316	9.8363	-0.02115	-0.63236	-684.857
0.111364	0.592105	6.686395	0.195476	-0.14624	-374.275
0.111364	0.657895	3.007363	0.529649	-0.62968	-99.2036
0.159091	0.197368	5.5673	-4.27083	-2.96032	-264.805
0.159091	0.263158	9.607669	-0.76691	-1.77029	-544.355
0.159091	0.328947	10.83866	-1.31406	-0.8535	-708.511
0.159091	0.394737	11.55081	-0.66409	-0.48001	-873.693
0.159091	0.460526	10.28466	0.12712	-0.40474	-741.293
0.159091	0.526316	8.094593	0.652837	-0.12315	-533.555
0.159091	0.592105	3.380144	1.114572	-0.55915	-113.783
0.2	0.131579	6.955877	1.786358	-2.9465	-473.87
0.2	0.197368	8.707106	1.123266	-2.85121	-582.62
0.2	0.263158	10.63938	0.9544	-2.1438	-757.587
0.2	0.328947	12.48491	0.059943	-1.06981	-1128.52
0.2	0.394737	11.11533	0.649407	-0.64926	-845.717
0.2	0.460526	10.66011	2.003219	-0.37003	-963.83
0.2	0.526316	6.759522	1.517319	-0.28811	-391.635

ตารางที่ ๓-4 ผลการทดลองกรณีศึกษา D (ต่อ)

x/D_L	r/d	$u(m/s)$	$v(m/s)$	$w(m/s)$	$P_s(N/m^2)$
0.2	0.578947	3.597336	1.239744	-0.50389	-147.476
0.25	0.131579	7.213463	1.835398	-2.5785	-533.965
0.25	0.197368	9.050115	1.770807	-2.45207	-665.319
0.25	0.263158	11.61837	1.325411	-1.9623	-1032.47
0.25	0.328947	11.93995	1.361115	-1.19288	-1019.29
0.25	0.394737	11.718	0.93479	-0.39152	-1038.05
0.25	0.460526	10.14969	0.945705	-0.00619	-854.065
0.25	0.526316	6.446931	2.012233	-0.51	-371.463
0.25	0.592105	3.721142	1.302553	-0.6892	-148.821
0.295455	0.131579	6.883304	1.82538	-2.17578	-541.19
0.295455	0.197368	8.515655	1.774033	-2.00083	-623.772
0.295455	0.263158	10.48564	1.69804	-1.6408	-828.3
0.295455	0.328947	12.67308	1.330328	-0.75035	-1237.14
0.295455	0.394737	12.82614	0.951286	-0.29592	-1312.91
0.295455	0.460526	10.15166	1.981504	-0.29702	-847.803
0.295455	0.526316	7.051652	2.225532	-0.51131	-436.974
0.295455	0.592105	5.636461	1.603496	-0.45636	-309.075
0.340909	0.131579	9.596349	-0.96825	-1.63615	-1022.13
0.340909	0.197368	10.23275	1.612255	-1.55567	-919.797
0.340909	0.263158	10.32321	1.669096	-1.57619	-825.955
0.340909	0.328947	11.66079	1.284037	-0.87239	-1023.32
0.340909	0.394737	12.6067	0.843627	-0.2904	-1251.13
0.340909	0.460526	10.48478	2.116857	-0.27578	-903.714
0.340909	0.526316	6.701122	2.173647	-0.62591	-357.467
0.340909	0.592105	5.376488	2.090694	-0.40396	-266.702
0.340909	0.657895	2.794604	2.123304	-1.2319	-103.937

ตารางที่ ๓-4 ผลการทดลองกรณีศึกษา D (ต่อ)

x/D_L	r/d	$u(m/s)$	$v(m/s)$	$w(m/s)$	$P_s(N/m^2)$
0.386364	0	4.754391	3.771461	1.743206	-302.816
0.386364	0.065789	4.268545	3.461679	-2.10023	-254.364
0.386364	0.131579	4.515015	3.59852	-0.75994	-286.124
0.386364	0.197368	7.829178	1.696282	-1.04157	-613.019
0.386364	0.263158	9.159562	1.526191	-1.2574	-739.928
0.386364	0.328947	8.767763	1.571793	-1.68885	-546.009
0.386364	0.394737	11.80658	1.256301	-0.62029	-1078.32
0.386364	0.460526	10.85543	1.895338	-0.33388	-937.529
0.386364	0.526316	10.62408	1.94087	-0.17981	-941.357
0.386364	0.592105	7.67044	2.115755	0.035653	-498.454
0.386364	0.657895	4.609949	2.360282	-0.6415	-176.374
0.386364	0.723684	4.06183	1.759555	-0.26826	-179.478
0.429545	0	3.440002	3.00241	2.11792	-150.229
0.429545	0.065789	8.834719	1.979275	0.105388	-815.939
0.429545	0.131579	6.615642	3.348485	-0.40559	-538.89
0.429545	0.197368	9.50796	2.699015	-0.62056	-910.43
0.429545	0.263158	12.42667	0.600144	0.352553	-1467.76
0.429545	0.328947	9.07632	1.390413	-0.87583	-655.548
0.429545	0.394737	10.89084	1.597547	-0.51706	-953.853
0.429545	0.460526	11.32998	1.797602	-0.1199	-1071.74
0.429545	0.526316	8.373804	2.328456	-0.74886	-557.29
0.429545	0.592105	7.257578	2.342656	-0.18004	-457.846
0.429545	0.657895	5.726135	2.081559	-0.26387	-308.9
0.429545	0.723684	5.320077	1.912993	-0.29846	-289.808
0.429545	0.789474	2.1262	2.323973	-1.48513	-79.4305

ตารางที่ ๓-5 ผลการทดลองกรณีศึกษา E

x/D_L	r/d	$u(m/s)$	$v(m/s)$	$w(m/s)$	$P_s(N/m^2)$
0.022727	0.460526	6.341625	-6.76224	0.408979	-423.313
0.022727	0.526316	12.79991	-2.95737	0.108736	-1115.84
0.022727	0.592105	14.3918	0.377264	-0.24386	-1595.56
0.063636	0.526316	12.86522	-2.05179	0.085665	-1169.44
0.063636	0.592105	9.651344	0.773678	0.067295	-753.069
0.063636	0.657895	4.485048	0.864758	-0.10551	-195.516
0.111364	0.328947	8.327736	-4.76514	-0.63226	-432.729
0.111364	0.394737	10.70124	-3.37827	-0.52413	-747.554
0.111364	0.460526	11.14649	-1.1701	-0.13493	-863.896
0.111364	0.526316	8.781199	0.209698	-0.68496	-586.033
0.111364	0.592105	4.883427	0.869795	-0.41578	-216.229
0.159091	0.131579	5.309344	-2.70878	-5.33772	-374.63
0.159091	0.263158	9.304228	-0.65508	-1.71625	-488.136
0.159091	0.328947	11.8708	-3.93231	0.000463	-1027.81
0.159091	0.394737	12.39316	0.828957	-1.13062	-965.143
0.159091	0.460526	9.250697	0.706747	-0.57268	-609.448
0.159091	0.526316	6.775194	0.848132	-0.31288	-393.382
0.2	0.197368	8.687951	0.845115	-2.63859	-527.589
0.2	0.263158	10.37414	0.918166	-2.05111	-749.954
0.2	0.328947	12.12444	0.101927	-0.91822	-1057.4
0.2	0.394737	11.0499	1.106218	-0.61833	-891.596
0.2	0.460526	8.562664	2.043371	-0.45508	-585.121
0.2	0.526316	5.253695	1.630393	-0.58166	-246.879
0.25	0.131579	8.92761	2.23724	-1.80222	-747.44
0.25	0.197368	9.970419	1.788854	-2.03805	-805.88
0.25	0.263158	10.72069	1.698874	-1.73239	-848.147

ตารางที่ ๑-5 ผลการทดลองกรณีศึกษา E (ต่อ)

x/D_L	r/d	$u(m/s)$	$v(m/s)$	$w(m/s)$	$P_s(N/m^2)$
0.25	0.328947	11.6922	1.397193	-1.05487	-998.712
0.25	0.394737	11.95522	1.386814	-0.45352	-1137.05
0.25	0.460526	9.029551	2.198145	-0.52488	-674.364
0.25	0.526316	5.957962	1.858801	-0.67332	-321.832
0.295455	0.131579	6.811964	2.677906	-1.67482	-529.507
0.295455	0.197368	8.97015	1.818609	-1.94842	-685.142
0.295455	0.263158	10.18617	1.958005	-1.75404	-799.272
0.295455	0.328947	11.87196	1.964299	-1.04699	-1095.61
0.295455	0.394737	12.17835	1.727461	-0.46486	-1191.83
0.295455	0.460526	8.655546	2.362022	-0.67428	-602.776
0.295455	0.526316	5.996745	2.359475	-0.49353	-316.607
0.295455	0.592105	3.724044	2.095864	-1.10805	-168.009
0.340909	0.131579	6.870138	2.029606	-1.94616	-479.807
0.340909	0.197368	11.0759	1.16337	-0.5335	-1133.61
0.340909	0.263158	10.80491	2.01258	-1.23868	-1003.03
0.340909	0.328947	11.59484	1.670558	-0.68272	-1114.38
0.340909	0.394737	12.51695	1.958651	-0.38705	-1295.51
0.340909	0.460526	10.59411	2.407736	-0.47806	-922.456
0.340909	0.526316	7.167166	2.538843	-0.65176	-437.684
0.340909	0.592105	6.552131	2.370157	-0.36844	-417.028
0.386364	0.131579	9.041929	2.579205	-0.7009	-869.442
0.386364	0.197368	8.481487	2.322815	-0.7542	-712.372
0.386364	0.263158	5.949236	2.193334	-2.36003	-313.291
0.386364	0.328947	9.404431	1.919438	-1.08544	-729.364
0.386364	0.394737	10.47672	2.460783	-0.63627	-893.971
0.386364	0.460526	9.374041	2.636086	-0.72578	-706.2

ตารางที่ ๓-5 ผลการทดลองกรณีศึกษา E (ต่อ)

x/D_L	r/d	$u(m/s)$	$v(m/s)$	$w(m/s)$	$P_s(N/m^2)$
0.386364	0.526316	9.898379	2.586688	-0.48281	-856.928
0.386364	0.592105	6.017483	2.447594	-0.29177	-317.322
0.386364	0.657895	2.795818	2.970717	-1.56481	-102.604
0.429545	0	5.649116	2.767347	1.066135	-377.142
0.429545	0.065789	6.533439	2.809691	-0.33322	-488.176
0.429545	0.131579	5.330909	3.233537	-1.23936	-329.854
0.429545	0.197368	7.302341	2.401576	-0.76036	-548.589
0.429545	0.263158	7.136747	2.231375	-0.93375	-501.18
0.429545	0.328947	6.052238	2.635816	-0.8398	-354.364
0.429545	0.394737	7.83392	2.710897	-0.4996	-564.454
0.429545	0.460526	10.5731	2.506175	-0.42507	-998.833
0.429545	0.526316	10.96755	2.076035	-0.14098	-1079.06
0.429545	0.592105	7.019217	2.725178	-0.34566	-462.087
0.429545	0.657895	4.735467	2.907995	-0.63083	-218.363
0.429545	0.723684	3.5583	2.124977	-0.78057	-148.731

ภาคผนวก ข

ค่า Ri ของการทดลองแบบต่างๆ

ตารางที่ ข-1 รายละเอียดของค่า Ri ของการทดลองแบบ A

x/D_L	r/d	w^2/r (m/s ²)	Density (kg/m ³)	Ri
0.022727	0.460526	0.012739	1.172724069	-2.15471E-07
0.022727	0.526316	0.020698	1.162731793	4.53472E-07
0.022727	0.592105	0.398632	1.181462793	2.97781E-06
0.063636	0.394737	3.131809	1.177843395	-5.37593E-05
0.063636	0.460526	1.316243	1.168427047	-6.58098E-05
0.063636	0.526316	0.015715	1.17206119	2.89471E-07
0.063636	0.592105	3.35908	1.181881241	-1.58485E-05
0.111364	0.263158	39.64915	1.181464446	0.002477061
0.111364	0.328947	0.645816	1.178059925	-1.68176E-05
0.111364	0.394737	0.024178	1.172456172	-9.06884E-06
0.111364	0.460526	0.300341	1.175037028	1.48941E-05
0.111364	0.526316	0.004501	1.174499179	-5.99202E-07
0.159091	0.131579	91.58506	1.181292875	-0.01346992
0.159091	0.197368	1.716319	1.175901294	2.12994E-05
0.159091	0.263158	0.029661	1.174004856	-2.5698E-06
0.159091	0.328947	0.001971	1.169353651	1.64693E-06
0.159091	0.394737	2.380753	1.173099534	0.000483318
0.159091	0.460526	1.642401	1.178230324	0.00036689
0.159091	0.526316	0.915656	1.181101463	0.001562613
0.2	0.131579	83.52636	1.181024621	0.00730382
0.2	0.197368	106.3186	1.183091709	-0.008186052

ตารางที่ ข-1 รายละเอียดของค่า Ri ของการทดลองแบบ A (ต่อ)

x/D_L	r/d	w^2/r (m/s ²)	Density (kg/m ³)	Ri
0.2	0.263158	0.155371	1.171917512	-2.21759E-05
0.2	0.328947	0.025467	1.171080156	4.75812E-06
0.2	0.394737	0.425405	1.172962214	1.18485E-05
0.2	0.460526	2.002568	1.180451675	6.25406E-05
0.2	0.526316	6.542257	1.183196014	-0.000205815

ตารางที่ ข-2 รายละเอียดของค่า Ri ของการทดลองแบบ B

x/D_L	r/d	w^2/r (m/s ²)	Density (kg/m ³)	Ri
0.022727	0.460526	12.28646	1.179064	5.59E-05
0.022727	0.526316	1.27E-05	1.171196	-5.6E-10
0.022727	0.592105	0.098454	1.165247	5.83E-05
0.022727	0.657895	0.332577	1.1772	1.05E-05
0.022727	0.723684	1.796299	1.18231	-1.8E-05
0.063636	0.394737	32.69144	1.159866	0.001156
0.063636	0.460526	0.104945	1.176365	-9.3E-06
0.063636	0.526316	0.009277	1.171779	4.25E-06
0.063636	0.592105	0.440004	1.179048	-1.4E-05
0.063636	0.657895	1.466617	1.115607	-0.00151
0.063636	0.723684	0.13031	1.182971	0.029573
0.111364	0.328947	26.14225	1.181173	5.97E-10
0.111364	0.394737	0.262026	1.176539	-4.1E-12
0.111364	0.460526	0.01793	1.173966	1.47E-13
0.111364	0.526316	0.491482	1.182282	5.18E-12
0.111364	0.592105	0.269862	1.182785	-2.5E-12
0.111364	0.657895	0.02153	1.183258	6.64E-13
0.159091	0.263158	7.073543	1.17932	-9.2E-05
0.159091	0.328947	0.099639	1.173883	-1.3E-05
0.159091	0.394737	0.045723	1.173584	3.27E-06
0.159091	0.460526	0.003081	1.177526	9.05E-08
0.159091	0.526316	0.191213	1.18096	2.35E-06
0.159091	0.592105	0.164562	1.183315	6.51E-06
0.2	0.131579	54.3244	1.17827	-0.00076
0.2	0.197368	13.86632	1.175818	-0.00049
0.2	0.263158	3.438265	1.175049	-9.8E-05

ตารางที่ ข-2 รายละเอียดของค่า Ri ของการทดลองแบบ B

x/D_L	r/d	w^2/r (m/s ²)	Density (kg/m ³)	Ri
0.2	0.328947	0.797196	1.173471	-4.8E-05
0.2	0.394737	0.04427	1.175399	6.62E-07
0.2	0.460526	0.320563	1.176295	8.5E-06
0.2	0.526316	0.147487	1.182289	4.79E-06
0.2	0.592105	0.000744	1.183362	-7.4E-08

ตารางที่ ข-3 รายละเอียดของค่า Ri ของการทดลองแบบ C

x/D_L	r/d	w^2/r (m/s ²)	Density (kg/m ³)	Ri
0.022727	0.460526	0.007971	1.17543	-8.8E-08
0.022727	0.526316	0.030804	1.171199	-7.8E-05
0.022727	0.592105	0.138138	1.172422	2.11E-06
0.022727	0.723684	0.402657	1.183179	1.31E-05
0.022727	0.789474	0.000208	1.183612	-1.6E-08
0.063636	0.394737	12.57832	1.179169	-7.6E-05
0.063636	0.460526	0.001605	1.17434	-1.4E-08
0.063636	0.526316	0.069411	1.172706	1.49E-07
0.063636	0.592105	1.848098	1.183544	8.79E-06
0.063636	0.657895	0.967985	1.193871	3.75E-06
0.063636	0.723684	0.314174	1.188947	-1E-05
0.111364	0.263158	36.88931	1.181304	385.1721
0.111364	0.328947	23.17111	1.18124	-0.0013
0.111364	0.394737	0.261723	1.174924	2.14E-07
0.111364	0.460526	0.00372	1.176002	1.54E-07
0.111364	0.526316	0.14123	1.180774	4.99E-06
0.111364	0.592105	0.588586	1.200764	0.000104
0.111364	0.657895	0.458501	1.19193	-5.9E-05
0.159091	0.131579	158.0695	1.181994	0.064221
0.159091	0.197368	36.68177	1.182896	-0.0007
0.159091	0.263158	3.758977	1.178155	-0.00012
0.159091	0.328947	0.099583	1.17456	-6.8E-06
0.159091	0.394737	0.328583	1.174951	3.16E-05
0.159091	0.460526	0.10904	1.179109	2.02E-06
0.159091	0.526316	0.066408	1.181195	1.85E-07
0.159091	0.592105	0.009312	1.183499	2.5E-05

ตารางที่ ข-3 รายละเอียดของค่า Ri ของการทดลองแบบ C (ต่อ)

x/D_L	r/d	w^2/r (m/s ²)	Density (kg/m ³)	Ri
0.2	0.065789	162.417	1.181129	0.393179
0.2	0.131579	68.82595	1.181138	0.003272
0.2	0.197368	20.28158	1.176277	-5E-05
0.2	0.263158	10.04864	1.175288	-1.7E-06
0.2	0.328947	1.254151	1.172984	1.12E-08
0.2	0.394737	0.012544	1.17115	1.26E-10
0.2	0.460526	0.001709	1.178979	2.45E-11
0.2	0.526316	0.147457	1.182579	-2E-09

ตารางที่ ข-4 รายละเอียดของค่า Ri ของการทดลองแบบ D

x/D_L	r/d	w^2/r (m/s ²)	Density (kg/m ³)	Ri
0.022727	0.526316	0.016294	1.169806	-0.24696
0.022727	0.592105	0.099064	1.166095	-1.50627
0.063636	0.526316	0.027202	1.171133	-5.1E-07
0.063636	0.592105	0.035002	1.175185	4.16E-07
0.063636	0.657895	0.054823	1.182947	7.41E-07
0.063636	0.723684	0.028877	1.182936	-3.7E-07
0.111364	0.328947	30.55194	1.181555	0.000225
0.111364	0.394737	1.438884	1.177826	-7.3E-05
0.111364	0.460526	0.108455	1.17376	-2.8E-06
0.111364	0.526316	0.75977	1.176428	3.64E-05
0.111364	0.592105	0.03612	1.180059	4.17E-07
0.111364	0.657895	0.602675	1.183275	1.49E-05
0.159091	0.197368	44.40157	1.181339	-0.19604
0.159091	0.263158	11.90898	1.17807	-0.00085
0.159091	0.328947	2.214523	1.176151	-0.00058
0.159091	0.394737	0.583693	1.17422	6.08E-06
0.159091	0.460526	0.355718	1.175768	0.000137
0.159091	0.526316	0.028815	1.178197	1.49E-05
0.159091	0.592105	0.528028	1.183105	0.007639
0.2	0.131579	65.98215	1.178894	-1.67765
0.2	0.197368	41.18885	1.177623	-0.07724
0.2	0.263158	17.46438	1.175577	-0.00091
0.2	0.328947	3.479238	1.17124	-0.00079
0.2	0.394737	1.067891	1.174547	1.06E-05
0.2	0.460526	0.297322	1.173166	0.000121
0.2	0.526316	0.157716	1.179856	0.000101

ตารางที่ ข-4 รายละเอียดของค่า Ri ของการทดลองแบบ D (ต่อ)

x/D_L	r/d	w^2/r (m/s ²)	Density (kg/m ³)	Ri
0.2	0.578947	0.438559	1.182711	0.003835

ตารางที่ ข-5 รายละเอียดของค่า Ri ของการทดลองแบบ E

x/D_L	r/d	w^2/r (m/s ²)	Density (kg/m ³)	Ri
0.022727	0.460526	0.363202	1.179486	-2.4E-06
0.022727	0.526316	0.022465	1.171388	-5.3E-07
0.022727	0.592105	0.100436	1.165779	-3.4E-05
0.063636	0.526316	0.013943	1.170762	6.33E-07
0.063636	0.592105	0.007648	1.17563	1.39E-07
0.063636	0.657895	0.016921	1.182149	1.83E-07
0.111364	0.328947	1.215244	1.179376	-1.4E-05
0.111364	0.394737	0.695944	1.175694	-7.6E-05
0.111364	0.460526	0.039531	1.174334	3.16E-06
0.111364	0.526316	0.891433	1.177583	2.6E-05
0.111364	0.592105	0.291969	1.181907	1.36E-06
0.159091	0.131579	216.5334	1.180055	0.061909
0.159091	0.263158	11.19291	1.178728	-0.00148
0.159091	0.328947	6.51E-07	1.172418	-9.3E-11
0.159091	0.394737	3.238367	1.17315	0.002505
0.159091	0.460526	0.712156	1.177309	2.44E-05
0.159091	0.526316	0.185993	1.179836	3.97E-07
0.2	0.197368	35.27499	1.178266	-0.00323
0.2	0.263158	15.98687	1.175666	-0.00183
0.2	0.328947	2.563111	1.172072	0.025437
0.2	0.394737	0.968574	1.17401	8E-05
0.2	0.460526	0.449694	1.177594	3.17E-05
0.2	0.526316	0.642824	1.181549	-4.1E-05

ประวัติผู้เขียน

นาย ภาณุมาศ อรุณเดชาวัฒน์ เกิดวันที่ 25 มิถุนายน พ.ศ.2519 ที่จังหวัดยะลา สำเร็จปริญญาตรี
วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ.2541
ปัจจุบันเป็นอาจารย์ระดับ 3 ณ ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์