

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาผลกระทบจากการฉีดไอน้ำเข้าร่วมระบบเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์โดยการจำลอง

Simulation behavior and effect of steam injection in gas turbine engine



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **103111**  
วัน,เดือน,ปี..... **28 ส.ค. 2552**

บ.....
ค.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **Simulation behavior and effect of steam injection in gas turbine engine**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2008**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษาการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาผลกระทบจากการฉีดไอน้ำเข้าร่วมระบบเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์โดยการจำลอง

Simulation behavior and effect of steam injection in gas turbine engine

ผู้จัดทำ

- |                 |                     |              |          |
|-----------------|---------------------|--------------|----------|
| 1. นายโยธิน     | จะโนรัตน์           | รหัสประจำตัว | 49015504 |
| 2. นายธีรสิทธิ์ | มานะพัฒนานุกุล      | รหัสประจำตัว | 49015528 |
| 3. นายบรรพันธ์  | แพรวพิพัฒน์มงคล     | รหัสประจำตัว | 49015532 |
| 4. นายอดิศักดิ์ | พาณิชย์สิริไพฑูริย์ | รหัสประจำตัว | 49015550 |

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาผลกระทบจากการฉีดไอน้ำเข้าร่วมระบบเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์โดยการจำลอง

นายโยธิน จะโนรัตน์

นายธีรสิทธิ์ มานะพัฒนานุกุล

นายบรรพพันธ์ แพร์พิพัฒน์มงคล

นายอดิศักดิ์ พาณิชย์ศิริไพบุลย์

รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2551

### บทคัดย่อ

ปฏิญานិพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับหลักการออกแบบการสร้างห้องเผาไหม้ และระบบสนับสนุนอันประกอบไปด้วย ระบบหล่อลื่น ระบบป้อนน้ำ ระบบระบายความร้อน และระบบสร้างไอน้ำที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ เพื่อนำเอาอุปกรณ์เหล่านั้นมาทดลองและศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการฉีดไอน้ำเข้าสู่ระบบของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลของอากาศ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิง ต่างๆ ตั้งแต่ 5 ลิตร ต่อนาที ถึง 20 ลิตร ต่อนาที ณ ความดัน 4 ถึง 6 บาร์ และเปรียบเทียบผลของการฉีดไอน้ำและไม่ได้ฉีดว่าส่งผลอย่างไรต่อพารามิเตอร์ที่ศึกษา จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดพารามิเตอร์ต่างๆ มีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงแบบไม่เป็นเส้นตรง งานที่คอมเพรสเซอร์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นกว่าการที่ไม่ได้ฉีดไอน้ำ

## Simulation behavior and effect of steam injection in gas turbine engine

**Yothin Janorat**

**Teerasit Manapattnanukul**

**Bowonpan Papiputmongkol**

**Adisak Phanichsiripaiboon**

**Associate Prof. Jaruwat charoensuk Advisor**

**Education Year 2008**

### Abstract

This thesis concerns with a study on basic concept of design and fabrication of the combustor and the supporting subsystem of the gas turbine engine. The unit consists of the lubrication, water feeding, heat rejection and steam generation sub-units. The system is operated under controlled conditions aiming to find out the effect of water injection on various aspects of gas turbine performances. Temperatures and pressures at different monitoring locations are monitored at different thermal throughput. The feeding rate of LPG varies from 5 up to 20 liter/min at the feeding pressure varies from 4 to 6 bars. The experimental result suggests that the temperature down and the parameter varies is non linear work of compressor increased more than no steam injection.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีทั้งนี้ก็เพราะได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข ทั้งนี้อาจารย์ที่ปรึกษานั้นท่านได้ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ทางกลุ่มของข้าพเจ้ามาโดยตลอด ขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) หน่วยงานศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (Mtec) ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องของวัสดุ เครื่องมือ และ อุปกรณ์ขอบุคณพี ๆ และเพื่อนทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลืออยู่เรื่อยมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพอย่างยิ่ง ตลอดจนครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาท วิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้พวกข้าพเจ้ามาโดยตลอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
ความสำคัญและที่มา	3
วัตถุประสงค์	3
ขอบเขตของโครงการ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์</b>	<b>4</b>
หลักการทำงานของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์	4
การคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์	4
ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของการขยายตัว	4
ประสิทธิภาพของการเผาไหม้	6
การวัดและการคำนวณคุณสมบัติของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องยนต์	6
การวัดอุณหภูมิของของไหล	6
การวัดความดันของการไหลของของไหล	7
การคำนวณหาความเร็วการไหล	8
การคำนวณหาความหนาแน่นของอากาศหลังจากถูกอัดโดยประมาณ	9
การคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของของไหล	9
ทฤษฎีการหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและการวัดค่าโดยเครื่องมือวัด	11
การคำนวณหาความหนาแน่นของก๊าซที่เผาไหม้แล้ว	12
การวัดและคำนวณแรงขับเคลื่อนและการคำนวณหากำลังงานทางกล	13
<b>บทที่ 3 ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ในห้องเผาไหม้</b>	<b>14</b>
3.1 บทนำ	14
3.2 ลักษณะการสูญเสียความดัน	14
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและการสูญเสียความดัน	16
3.3.1 ห้องเผาไหม้ชั้นนอก	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ห้องเผาไหม้ชั้นใน	16
3.4 การไหลผ่านในท่อวงแหวน	19
3.4.1 มัคนัมเบอร์ ณ ตำแหน่งการไหลต่าง ๆ และระบบพื้นที่การเผาไหม้	21
3.4.2 การไหลผ่านรูเสื่อใน	22
3.5 อากาศพลศาสตร์ของการหมุนวนเป็นเกลียว	25
3.6 ชนิดของอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียว	26
3.7 รูปแบบการไหล	27
3.8 ขนาดของบริเวณการหมุนวน	28
3.9 ค่าตัวเลขของการหมุนวนเป็นเกลียว	30
3.10 การไหลย้อนกลับ	32
3.11 Flow entrainment	34
3.12 การสูญเสียความดัน	34
3.13 รูปร่างของหัวฉีด	35
3.14 การแยกตัวของการหมุนวนในหัวฉีดเว้าออก	37
3.15 การกระจายอากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้ชั้นใน	38
<b>บทที่ 4 ทฤษฎีหลักการของการฉีดไอน้ำและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อสร้างไอน้ำ</b>	<b>41</b>
4.1 ทฤษฎีและหลักการของการฉีดไอน้ำ	41
4.1.1 การทำงานของวาล์วจักร	42
4.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อสร้างไอน้ำ	43
4.2.1 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในการออกแบบหม้อไอน้ำ	44
4.2.2 การหาความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละทิศทาง	44
4.3 ทฤษฎีของการแลกเปลี่ยนความร้อนในถังไอน้ำ	46
4.3.1 วิเคราะห์อุปกรณ์การแลกเปลี่ยนความร้อน	46
4.3.2 สหพันธ์การพาความร้อน: การไหลแบบลามินาร์ในท่อกลมช่วงบริเวณที่มี การปรับตัวเต็มที่แล้ว	48
4.3.3 สหพันธ์การพาความร้อน : การไหลแบบเทอร์บูเลนต์ในท่อกลม	49
<b>บทที่ 5 การสร้างห้องเผาไหม้และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อสร้างไอน้ำ</b>	<b>50</b>
5.1 การสร้างห้องเผาไหม้	50
5.1.2 เทอร์โบชาร์จ	50
5.1.3 ศึกษาารูปแบบและลักษณะของห้องเผาไหม้	50
5.1.3.1 เสื่อนอก	51
5.1.3.2 เสื่อใน	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3.3 หัวฉีดเชื้อเพลิง	52
5.1.2.4 ระบบจุดระเบิดด้วยหัวเทียน	53
5.1.3 ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในแท่นทดสอบ	54
5.1.4 วัสดุที่ใช้ในการสร้างห้องเผาไหม้	54
5.1.5 เชื้อเพลิง	54
5.1. 6 ความปลอดภัย	54
5.1.7 รูปแบบการปรับปรุงรูปร่างของห้องเผาไหม้	55
5.1.8 ระบบหล่อลื่นแกนเทอร์โบชาร์จ	55
5.2 การคำนวณหาขนาดห้องเผาไหม้	56
5.3 หลักการคำนวณหาขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	62
5.4 การคำนวณหาขนาดถังไอน้ำ	63
<b>บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง</b>	<b>65</b>
6.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง	65
6.2 ขั้นตอนการสตาร์ทเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ	65
6.3 ขั้นตอนการทดลอง	65
6.4 รูปและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลอง	67
6.4 ผลการทดลอง	69
6.5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	81
<b>บรรณานุกรม</b>	
<b>ภาคผนวก</b>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการทำงานของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไบน์	4
รูปที่ 2.2 แสดงแผนภูมิการอัด	4
รูปที่ 2.3 แสดงแผนภูมิการขยายตัว	5
รูปที่ 2.3.1 เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ(Data locker)	7
รูปที่ 2.4 Pitot Static tube	8
รูปที่ 2.5 เครื่องมือวัดความเร็วลมแบบคิจิตอล	9
รูปที่ 2.6 การวัดอัตราการไหลด้วยออร์ฟิส	11
รูปที่ 2.7 เครื่องมือวัดอัตราการไหล LPGแบบเข็มและเกจวัดความดันถังแก๊ส	12
รูปที่ 3.1 ผลกระทบของการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ทั้งหมด	19
รูปที่ 3.2 ควบคุมการไหลผ่านรู Dilution	21
รูปที่ 3.3 Mach number	22
รูปที่ 3.4 แสดงการไหลผ่านรูของเผาไหม้ชั้นใน	23
รูปที่ 3.5 แสดงผลกระทบของรูปร่างของรูในทางปฏิบัติ	25
รูปที่ 3.6 แสดงDouble Swirler	26
รูปที่ 3.7 แบบกริบแบน	27
รูปที่ 3.8 บริเวณ Recirculation ในสนามการไหลวน	28
รูปที่ 3.9 แสดงความเร็วในแนวแกนและความเร็วของ Swirl เป็นส่วนประกอบสนามการไหล	28
รูปที่ 3.10 ผลกระทบจากรูปร่างใบพัด Recirculation, 16 ใบ มุมใบ 60°	29
รูปที่ 3.11 ผลของมุมใบพัด(Vane)มีผลต่อการหมุนตามแกน Recirculation zone 16 กริบ โค้ง, อัตราส่วนรูปร่าง=0.4	29
รูปที่ 3.12 ผลของอัตราส่วนรูปร่างต่อขนาดการไหลหมุนวนตามแนวแกน (Recirculation)=12 ใบพัด(Vane) โค้งมุมใบพัด(Vane) 60°	30
รูปที่ 3.13 แสดง Guide Vane ไหลแบบตามแนวแกน (axial tube flow)	31
รูปที่ 3.14 Swirl number มีผลต่ออัตราการไหลสูงสุด	33
รูปที่ 3.15 มุมใบพัดมีผลกระทบต่ออัตราการไหลสูงสุด	33
รูปที่ 3.16 การสูญเสียความดันที่มุมใบพัดต่าง ๆ	35
รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบวิธีกระจายการกระจายของความเร็วในบริเวณ Vortex	36

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.18 สังเกตรูปแบบการไหลสำหรับ Swirling jets และการออกของเปลวไฟแบบหัวฉีดแบบเว้า	37
รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงวัฏจักรการทำงานของการฉีดไอน้ำ	42
รูปที่ 4.2 แสดงถึงทิศทางของความดันที่เกิดขึ้น ในแต่ละทิศทาง	44
รูปที่ 4.3 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางของเส้นรอบวง	45
รูปที่ 4.4 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นตามแนวแกน	45
รูปที่ 4.5 ภาพการแสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนกัน	47
รูปที่ 4.6 แสดงรูปร่างของอุณหภูมิตามกันและการไหลสวนทางกันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนกัน	47
รูปที่ 4.7 ท่อซ้อนกันรูปวงแหวน	48
รูปที่ 5.1 ห้องเผาไหม้ชั้นนอก	51
รูปที่ 5.2 ลักษณะของหัวฉีดเชื้อเพลิง	53
รูปที่ 6.1 เทอร์โบชาร์จ Holset รุ่น HX-50	67
รูปที่ 6.2 เครื่องอัดอากาศ(Blower)	67
รูปที่ 6.3 ลักษณะของเครื่องกำเนิดไอน้ำและการติดตั้ง	68
รูปที่ 6.4 แสดงถึงอุปกรณ์วัดความดันและอัตราการไหลเชื้อเพลิง	68
รูปที่ 6.5 การวัดอุณหภูมิทางเข้าคอมเพรสเซอร์	69
รูปที่ 6.6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้	76
รูปที่ 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างงานจากคอมเพรสเซอร์และอัตราการไหลของเชื้อเพลิง	77
รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและงานทางกล	78
รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและความเร็วรอบ	79
รูปที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ T4 และอัตราการไหลของเชื้อเพลิง	79
รูปที่ 6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันทางเข้าห้องเผาไหม้และอัตราการไหลของเชื้อเพลิง	80

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงการสูญเสียความดันในห้องใหม่ในทางปฏิบัติ	16
ตารางที่ 4.1 คำสำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อซ้อนกันรูปวงแหวน	49
ตารางผลการทดลอง	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันและในอนาคตข้างหน้าเชื้อเพลิงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างมากในการใช้ขับเคลื่อนของเครื่องยนต์หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องต้นกำลัง เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเครื่องจักรใหญ่ ๆ ที่ต้องการกำลังขับสูง เป็นต้น เครื่องยนต์เหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วใช้น้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งในปัจจุบันเชื้อเพลิงเหล่านี้มีแนวโน้มที่มีปริมาณที่ลดลงจากโลกและมีราคาที่สูงขึ้นดังนั้นมนุษย์เรามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องหาเชื้อเพลิงชนิดอื่นมาใช้เป็นพลังงานทดแทนและพัฒนาเครื่องยนต์เหล่านั้นให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์หรือเครื่องยนต์กังหันแก๊สนั้นเป็นเครื่องยนต์ชนิดหนึ่งซึ่งถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพราะเป็นเครื่องยนต์ที่ให้กำลังในการขับเคลื่อนสูง ดังนั้น โน โครงานนี้จะศึกษาหลักการทำงาน การออกแบบ การสร้างห้องเผาไหม้และศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการฉีดไอน้ำเข้าร่วมกับห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องยนต์โดยมีหลักการคือเป็นการเพิ่มความหนาแน่นให้กับอากาศนั่นเอง โดยที่เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นมามีข้อแตกต่างและประยุกต์ใช้ดังนี้

1. ใช้เทอร์โบชาร์จเจอร์ของรถยนต์เป็นคอมเพรสเซอร์ ( Compressor ) และ เทอร์ไบน์ ( Turbine ) ที่ใช้ในการอัดอากาศและรับแรงขับจากการขยายตัวของก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

2. ใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิงซึ่งโดยปกติทั่วไปเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์จะใช้น้ำมันก๊าดเป็นเชื้อเพลิงเป็นส่วนใหญ่ในการขับเคลื่อนทั้งนี้สาเหตุที่เลือกใช้ก๊าซเพราะก๊าซ LPG เพราะหาซื้อได้ง่ายและเป็นพลังงานทางเลือกอีกทางหนึ่งของประเทศ

เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์เป็นเครื่องยนต์ทางความร้อน ( Heat engine ) ซึ่งทำงานโดยมีกระบวนการทำงานแบบต่อเนื่อง ประกอบด้วยการอัดอากาศจากบรรยากาศปกติ แล้วอุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เผาไหม้ส่วนมากเป็นน้ำมันก๊าด ก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงเมื่อถูกสันดาปจะขยายตัวและไปขับจุดกังหันให้หมุนเพื่อไปขับเพลาลูกสูบซึ่งการสันดาปจะเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลาต่างจากเครื่องยนต์แบบลูกสูบและงานที่ได้ออกมาจะเป็นงานในลักษณะของกระบวนการไหลสม่ำเสมอ

1.1 ข้อดีของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ที่ดีกว่าเครื่องยนต์แบบลูกสูบ

1. การหมุนของเพลามีความสมดุลอย่างสมบูรณ์

2. ในเครื่องยนต์แบบลูกสูบจะมีจังหวะการทำงาน 1 ครั้ง ต้องการหมุนครบรอบวัฏจักร เช่น ในกรณีเครื่องยนต์ 4 จังหวะ จะมีจังหวะงานในช่วงจังหวะระเบิด ส่วนในจังหวะดูดอัดคายจะไม่ได้งานแต่สำหรับเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์จะได้นานสม่ำเสมอและต่อเนื่องตลอดเวลาที่เพลากลับไป

3. ในเครื่องยนต์แบบใช้ลูกสูบจะมีการสูญเสียกำลังเนื่องจากความฝืดที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างแหวนลูกสูบกับกระบอกสูบแต่เครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไบน์จะไม่มีการสูญเสียในลักษณะนี้
4. ในเครื่องยนต์ลูกสูบการใช้ไปนาน ๆ การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะเพิ่มสูงขึ้นเพราะการสึกหรอของเครื่องยนต์ทำให้ส่วนผสมของอากาศกับน้ำมันรั่วไหลออกไปได้แต่ในเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไบน์จะไม่มีการสึกหรอในลักษณะนี้
5. เครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไบน์จะได้รับความเร็วของเพลงานสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์แบบใช้ลูกสูบเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไบน์สามารถใช้เชื้อเพลิงคุณภาพต่ำได้
6. ในเครื่องยนต์แบบใช้ลูกสูบการอัดการจุดระเบิดและการขยายตัว และเกิดขึ้นภายในกระบอกสูบและลูกสูบซึ่งเป็นหน่วยเดียวกัน แต่สำหรับเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไบน์นั้น ได้จัดอากาศห้องเผาไหม้และชุดเทอร์โบไบน์แยกกันไป จึงง่ายต่อการสร้างและการออกแบบ

## 1.2 ข้อเสียของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไบน์

1. ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงต่อการเผาไหม้ที่สูงเท่าเครื่องยนต์ลูกสูบ
2. ชุดเทอร์โบไบน์ใบพัดที่ถูกขับจากก๊าซมีลักษณะบางมากดังนั้นวัสดุที่ใช้สร้างจึงต้องออกแบบเป็นพิเศษเพื่อให้ทนต่ออุณหภูมิที่สูงต่อก๊าซร้อน
3. ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไบน์ขนาดเล็กจะต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ลูกสูบเนื่องจากทำงานที่ความดันต่ำกว่า

จากการที่เครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไบน์เป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งใน โรงจักรต้นกำลัง เครื่องบิน เรือขนาดใหญ่ หรือแม้แตารถถัง จึงเริ่มมีการพัฒนาและปรับปรุงมาตลอดด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เพิ่มมากขึ้นและหนึ่งในวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องยนต์นั้นมีอีกวิธีหนึ่งที่เราเริ่มนำมาใช้งานกันคือ การฉีดไอน้ำเข้าไปร่วมกับการเผาไหม้เพื่อเป็นการเพิ่มความหนาแน่นให้กับอากาศซึ่งใน เครื่องงานนี้จะศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการฉีดไอน้ำเข้าไปในห้องเผาไหม้ ในกรณีของการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการฉีดไอน้ำเข้าร่วมกับห้องเผาไหม้นั้นจะได้ไอน้ำที่เกิดขึ้นนั้น ได้มาจากการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน(Heat exchanger) ซึ่งเป็นความร้อนที่ได้จากไอเสียของเครื่องยนต์โดยทำการทดลองด้วยกัน 3 กรณี คือ

1. ฉีดน้ำในสถานะของเหลวอุณหภูมิปกติทั่วไปที่ความดันสูง ในบริเวณก่อนทางเข้าคอมเพรสเซอร์
2. ฉีดน้ำในสถานะเป็น ไออุณหภูมิสูงและความดันสูงบริเวณก่อนทางเข้าห้องเผาไหม้
3. ฉีดน้ำในสถานะเป็น ไออุณหภูมิสูงและความดันสูงบริเวณก่อนทางเข้าเทอร์โบไบน์

### 1.3 วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและสร้างห้องเผาไหม้ เพื่อประยุกต์ใช้กับเทอร์โบชาร์จ ให้เป็นเครื่องยนต์กังหัน ก๊าซขนาดเล็ก
2. สร้างระบบสนับสนุนเครื่องยนต์ อันประกอบไปด้วย ระบบหล่อลื่น ระบบป้อนน้ำ ระบบระบายความร้อน
3. ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการฉีดไอน้ำเข้าห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ

### 1.4 ขอบเขตของโครงการ

1. ออกแบบและสร้างเพื่อปรับปรุงรูปร่างของห้องเผาไหม้โดยใช้โครงการที่เคยทำมาก่อนเป็นแนวทางและอ้างอิงเพื่อใช้ในการออกแบบ
2. ศึกษาผลกระทบจากการฉีดน้ำและไอน้ำเข้าห้องเผาไหม้และเปรียบเทียบระหว่างฉีดไอน้ำและไม่ได้ฉีดมีข้อแตกต่างกันเช่นไร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

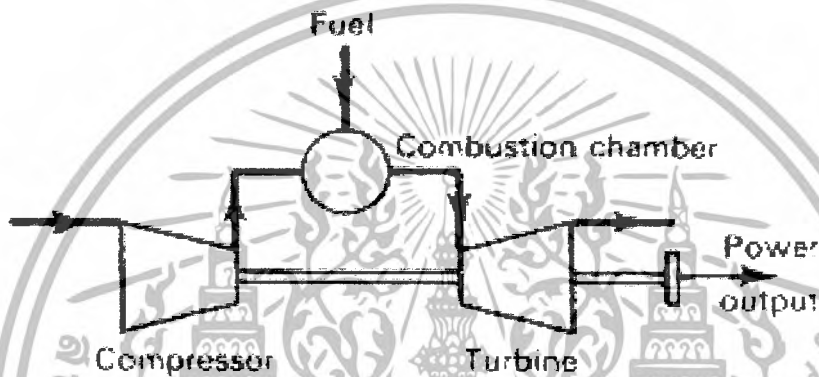
## บทที่ 2

## ทฤษฎีเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์

## 2.1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์

การทำงานของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ เริ่มจากการดูดอากาศเข้าที่จุด 1 ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศและถูกอัดผ่านเครื่องอัดทำให้มีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้นจุดที่ 2 และผ่านเข้าไปในห้องเผาไหม้ซึ่งมีหัวฉีดก๊าซเชื้อเพลิงออกมาผสมกับอากาศ และจุดระเบิดให้เกิดการเผาไหม้ทำให้เกิดงานที่ได้จากการขยายตัวของก๊าซผสม ทำให้มีแรงไปหมุนกังหันซึ่งมีเพลตต่อกับเครื่องอัด จากนั้นก๊าซไอเสียที่ยังมีความดัน อุณหภูมิและพลังงานจลน์เหลือก็ก็จะไหลออกไปสู่บรรยากาศที่จุด 4 ดังรูปที่

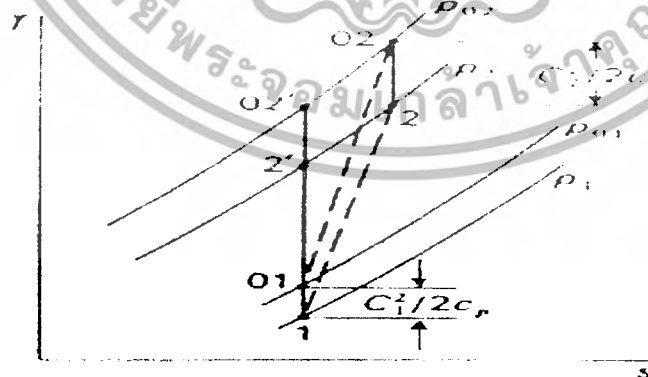
2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการทำงานของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์

## 2.2 การคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์

## 2.2.1 ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของการอัด (Isentropic Efficiency of Compression)



รูปที่ 2.2 แสดงแผนภูมิการอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่ากระบวนการอัดจากจุด 01 ไปจุด 02 นั้นเป็นกระบวนการอัดที่เอนโทรปีไม่คงที่ซึ่งอุณหภูมิที่ 02 จะสูงกว่า 02' ที่ได้จากการอัดแบบไอเซนโทรปิก ทำให้งานที่ใช้ในการอัดต้องเพิ่มขึ้น

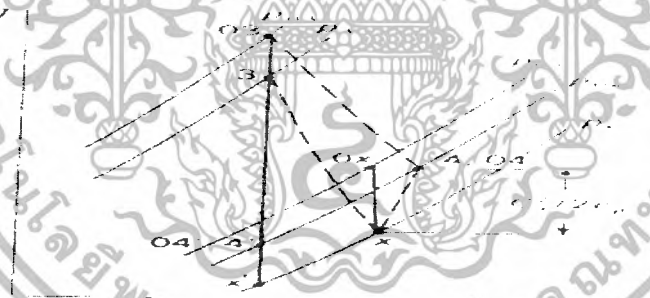
ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของการอัด หาได้จากสมการ

$$T_{02} - T_{01} = \frac{T_{01}}{\eta_c} \left[ \left( \frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right]$$

เมื่อ  $\eta_c$  = ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของการอัด

$\gamma$  = ค่าคงที่ของอากาศ = 1.4

## 2.2.2 ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของการขยายตัว ( Isentropic Efficiency of Expansion )



รูปที่ 2.3 แสดงแผนภูมิการขยายตัว

เช่นเดียวกับการอัด การขยายตัวจากจุด 03 ไปยังจุด 04 โดยเอนโทรปีเปลี่ยนแปลงจะได้งานออกแบบมาต่ำกว่าการขยายไปยังจุด 04' ซึ่งมีประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของการขยายตัวหาได้จากสมการ

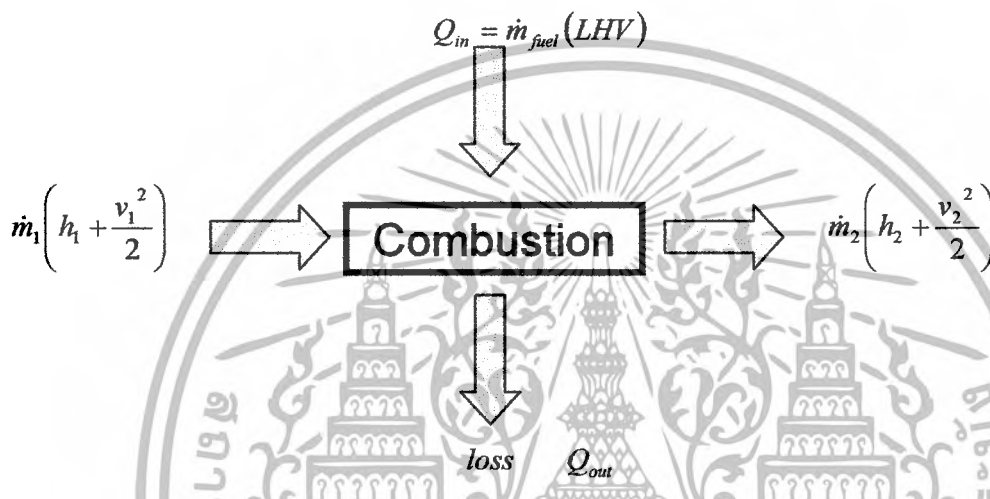
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{03} - T_{04} = \eta_T T_{03} \left[ 1 - \left( \frac{1}{p_{03}/p_{04}} \right)^{(y-1)/y} \right]$$

เมื่อ  $\eta_T$  = ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของการขยายตัว

$\gamma$  = ค่าคงที่ของก๊าซผสม ซึ่งแตกต่างกันสำหรับเชื้อเพลิงแต่ละประเภท

### 2.2.3 ประสิทธิภาพของการเผาไหม้



ดังนั้นจะได้สมการดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการเผาไหม้} = \left[ \dot{m}_2 \left( h_2 + \frac{v_2^2}{2} \right) - \dot{m}_1 \left( h_1 + \frac{v_1^2}{2} \right) \right] / Q_{in}$$

## 2.3 การวัดและการคำนวณคุณสมบัติของของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องยนต์

### 2.3.1 การวัดอุณหภูมิของของไหล (Fluid Temperature)

เพื่อเป็นค่าเริ่มต้นของการประเมินและวิเคราะห์เครื่องยนต์โดยอาศัยทฤษฎีของวัฏจักรเบรตัน (Braton's cycle) โดยจะวัดอุณหภูมิในรูปของอุณหภูมิสถณนชั้น ( Stagnation Temperature ) ซึ่งนิยามมาจาก

$$T_0 = T + \frac{v^2}{2C_p}$$

โดย  $T_0$  คืออุณหภูมิสถณนชั้น (K)

$T$  คืออุณหภูมิสถณนชั้นที่ได้จากการวัด (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V$  คือความเร็วการไหลของของไหล ในที่นี้คืออากาศ (m/s)

$C_p$  คือค่าความจุความร้อนของของไหลที่ความดันคงที่ (อากาศ = 1.405 kJ/kg.k)

ตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิประกอบด้วยตำแหน่งก่อนเข้าห้องเผาไหม้ (01) หลังการอัดตัวตำแหน่งก่อนเข้าห้องเผาไหม้ (02) ทางออกห้องเผาไหม้ (03) ทางออกของเทอร์ไบน์ (04) และตำแหน่งสุดท้ายคือตำแหน่งทางออกของท่อไอเสีย (05)

การวัดอุณหภูมินั้นเครื่องมือที่ใช้วัดและอ่านค่าอุณหภูมิประกอบไปด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลสำหรับวัดอุณหภูมิและเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ (Data locker) โดยค่าที่วัดได้เป็น Static temperature ซึ่งต้องมีการคำนวณเพื่อให้ได้ค่า Stagnation Temperature



รูปที่ 2.3.1 เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ (Data locker)

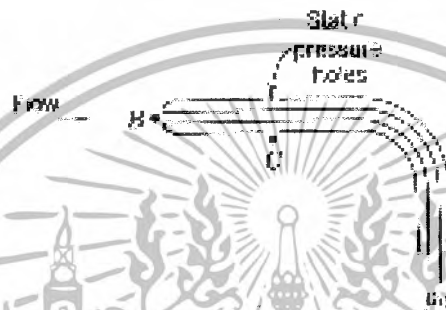
### 2.3.2 การวัดความดันของการไหลของของไหล (Fluid Flow Pressure)

เนื่องจากการวิเคราะห์ โดยหลักการของวัฏจักรเบรตันนั้นตั้งอยู่บนเงื่อนไขว่ากระบวนการอัดตัวและการขยายตัว เป็นกระบวนการไอเซนโทรปิก ( Isentropic Process ) หรือกระบวนการเอนเดียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถคำนวณค่าของอุณหภูมิจึงและความดันหลังการอัดหรือการขยายตัวได้โดยไม่ต้องทำการวัดแต่ในความเป็นจริงไม่เป็นไปตามนั้น กระบวนการจริงจะเกิดขึ้น โดยกระบวนการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจึงและความดันหลังกระบวนการ ซึ่งกำหนดโดยค่าประสิทธิภาพทางไอเซนโทรปิก ดังนั้นเราจึงต้องทำการวัดความดันการไหลแบบสแตกเนชันประกอบกับอุณหภูมิจึงสแตกเนชันในทุก ๆ จุดข้างต้น

ความดันสแตกเนชันในจุด 01 หรือทางเข้าเครื่องยนต์สามารถแทนได้ด้วยความดันบรรยากาศ() ได้เช่นเดียวกับกรณีของอุณหภูมิจึง สำหรับตำแหน่งหลังการอัด 02 วัดได้โดยการใช้ Pitot Static Tube ดังรูป



รูปที่ 2.4 Pitot static Tube

### 2.3.3 การคำนวณหาความเร็วการไหล ( Velocity flow)

จากหัวข้อที่ผ่านมา Pitot static Tube จะสามารถวัดค่าความดันสแตติก (Static Pressure) และสแตกเนชัน (Stagnation Pressure) ได้พร้อมกันเมื่อหาค่าความแตกต่างของความดัน (Pressure different) ระหว่างความดันสแตติกกับความดันสแตกเนชัน จะได้ความดันไดนามิก (Dynamic Pressure) ซึ่งอยู่ในรูปของความเร็วในการไหลดังสมการ

$$P_0 = P + \frac{\rho V^2}{2}$$

โดย	$P_0$	คือความดันสแตกเนชัน (K)
	$P$	คือความดันสแตติกที่ได้จากการวัด ( k )
	$V$	คือความเร็วการไหลของอากาศที่ทางเข้า m / s
	$\rho$	คือความหนาแน่นของอากาศ (kg / m <sup>3</sup> )

โดยที่  $\frac{\rho V^2}{2}$  คือความดันไดนามิก ดังนั้นเมื่อหาความแตกต่างของ  $P_0$  และ  $P$  ได้ก็จะสามารถหาความเร็วในการไหลได้

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นการคำนวณหาความเร็วการไหลของห้องเผาไหม้นั้นสามารถคำนวณหาได้โดยใช้ท่อ Pitot static Tube เพื่อหาค่าความเร็วได้ดังสมการที่กล่าวมาและจะสามารถหาค่าได้โดยอีกหลายวิธีทั้งนี้ในการนำเสนอข้อมูลนั้นเพื่อต้องการให้ผู้อ่านได้รู้ข้อมูลวิธีหาในหลาย

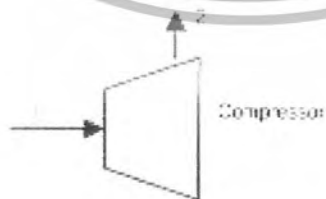
หลายด้านซึ่งในการทดลองจริงนั้น ได้ใช้เครื่องมือวัดความเร็วลมเป็นแบบดิจิตอลเพื่อความสะดวกถ่ายภาพ



รูปที่ 2.5 เครื่องมือวัดความเร็วลมแบบดิจิตอล (Anemometer)

#### 2.3.4 การคำนวณหาความหนาแน่นของอากาศหลังจากถูกอัดโดยประมาณ (Compressed air approximated density)

เนื่องจากอากาศไหลผ่านกระบวนการอัดในเครื่องอัดตั้งรูป ทำให้ค่าความหนาแน่นเปลี่ยนไปเมื่อสมมุติโดยประมาณ ให้อากาศที่สภาวะนี้เป็นก๊าซอุดมคติคำนวณได้จากสมการของก๊าซอุดมคติ



รูปที่ 2.6 กระบวนการอัดโดยเครื่องอัดอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\frac{P_1}{\rho_1 T_1} = \frac{P_2}{\rho_2 T_2}$$

เมื่อ ตัวห้อย 1 หมายถึง ตำแหน่งทางเข้าเครื่องอัด

ตัวห้อย 2 หมายถึง ตำแหน่งหลังจากการอัด

### 2.3.5 การคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของของไหล (Fluid mass flow rate)

$$\dot{m} = \rho \bar{U} A$$

เมื่อ	$\dot{m}$	อัตราการไหลของอากาศ ( $kg/s$ )
	$\rho$	ค่าความหนาแน่นของอากาศ ( $kg/m^3$ )
	$\bar{U}$	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล ( $m/s$ )
	$A$	พื้นที่หน้าตัดของการไหล ( $m^2$ )

ดังนั้นเมื่อวัดความเร็วการไหลของอากาศหลังการอัดได้ก็จะสามารถคำนวณค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศได้จากสมการดังที่กล่าวมา

### 2.3.6 ทฤษฎีการหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิง (Fuel mass flow rate)

ทฤษฎีการคำนวณหาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงนั้นจะสามารถคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงได้โดยการใช้แผ่นออริฟิสจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางติดตั้งอยู่ระหว่างคريبของท่อเนื่องจากลักษณะการออกแบบเป็นการออกแบบอย่างง่าย ทำให้มีราคาถูกและง่ายในการติดตั้งและถอดเปลี่ยนซึ่งที่ขอบแหลมของออริฟิสไม่สกปรกต่อแยกความดันของออริฟิสจะติดตั้งอยู่ในตำแหน่งเฉพาะที่ ดังรูปที่ 2.4 เนื่องจากตำแหน่งของท่อแยกความดันมีผลกระทบต่อการทำงานของหัวสัมประสิทธิ์การไหลต้องเลือกค่า K และค่า C โยสมการที่ใช้ออริฟิสแบบแนวศูนย์กลางร่วมที่ประกอบท่อแยกที่มุมคือ

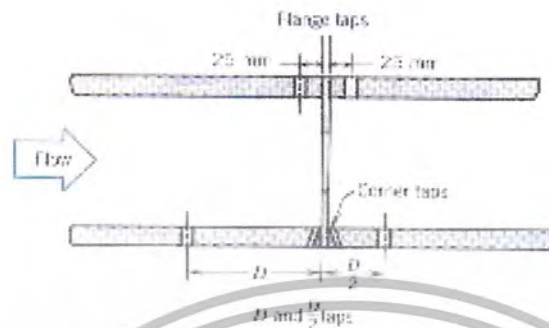
$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + \frac{91.71\beta^{2.5}}{\text{Re}_{D1}^{0.75}}$$

$$K = \frac{C}{\sqrt{1 + \beta^4}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเทอมของสัมประสิทธิ์ การไหลอัตราการไหลจริงดังสมการนี้

$$\dot{m} = K A_1 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}$$



รูปที่ 2.6 การวัดอัตราการไหลด้วยออร์โพล

ในส่วนการทดลองนั้นเพื่อความสะดวกในการวัดอัตราการไหลได้นำเอาเครื่องมือวัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิง โดยใช้เครื่องมือวัดเป็นแบบอนาล็อกวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรซึ่งมีหน่วยเป็น ลิตรต่อนาทีจากนั้นจึงจะนำเอาค่าที่ได้มาแปลงหน่วยเป็นอัตราการไหลเชิงมวลเพื่อใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 2.7 เครื่องมือวัดอัตราการไหล LPG แบบเข็มและเกจวัดความดันถึงแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการวัดของเครื่องมือวัดอัตราการไหลนั้นจะเป็นหน่วยลิตรต่อนาที  $l/min$  ดังนั้นค่าที่ใช้ในการคำนวณจะต้องนำมาแปลค่าเพื่อใช้ในการคำนวณในหน่วย กิโลกรัมต่อวินาที  $kg/s$  ซึ่งจะสามารถคำนวณหาในหน่วย  $kg/s$  ดังนี้

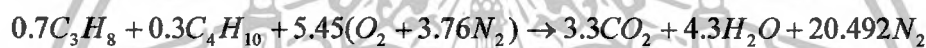
$$\dot{m} = Q \times \rho$$

เมื่อ  $Q =$  การไหลเชิงปริมาตร ( $m^3/s$ )

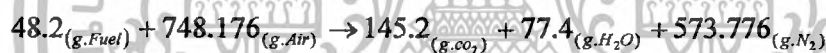
$\rho =$  ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ( $kg/m^3$ )

### 2.3.7 การคำนวณหาความหนาแน่นของก๊าซที่เผาไหม้แล้ว (Mixed-gas Density)

โดยทั่วไปแล้วก๊าซเชื้อเพลิง LPG จะมีส่วนผสมระหว่างโพรเพน (Propane,  $C_3H_8$ ) และ บิวเทน (Butane,  $C_4H_{10}$ ) ซึ่งอัตราส่วนการผสมก็จะแตกต่างกันออกไปแล้วแต่บริษัทผู้ผลิตแต่ในที่นี้กำหนดให้ส่วนผสมเป็น 70 : 30 โดยมวลเพื่อใช้ในการคำนวณ จะได้สมการ (Stoichiometric combustion) การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ซึ่งมีส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงพอดีในรูปของโมลดังนี้



หรือในรูปของมวลดังนี้



หารด้วย 48.2 เพื่อต้องการหาอากาศที่ใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงใน  $1 kg/s$  จะได้ดังนี้



จะได้ดังนี้คือ การเผาไหม้เชื้อเพลิง  $1 kg/s$  ต้องการส่วนผสมของอากาศที่พอดีเท่ากับ  $15.52 kg/s$  ดังนั้นการทดลองที่เผาไหม้เชื้อเพลิง  $\dot{m}_f kg/s$  จึงต้องการอากาศพอดีคือ  $15.52 \times \dot{m}_f kg/s$  ซึ่งจะมีอากาศเหลือ  $\dot{m}_a - 15.52 \times \dot{m}_f kg/s$

### 2.3.8 การวัดคำนวณแรงขับเคลื่อนและกำลังงานทางกล

การวัดและการคำนวณหาแรงขับเคลื่อนนั้นจะต้องทำการวัดความเร็วของก๊าซผสมที่เผาไหม้แล้วโดยการนำ Pitot Static Tube ไปวัดที่ทางออกของเครื่องยนต์ (04) ซึ่งความแตกต่างของความดันสถิตและสแตตเนชั่นที่จุดนี้ จากค่าความหนาแน่นที่หาได้ จะสามารถคำนวณความเร็วของไหลของก๊าซไอเสียที่เป็นความเร็วขับเคลื่อนได้และคำนวณแรงขับเคลื่อนได้จากสมการดังต่อไปนี้

จาก

$$F_T = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) \bar{U}_4$$

โดยที่	$F_T$	คือแรงขับเคลื่อน ( $N$ )
	$\dot{m}_a$	คืออัตราการไหลโดยมวลของอากาศ ( $kg/s$ )
	$\dot{m}_f$	คืออัตราการไหลโดยมวลของเชื้อเพลิง ( $kg/s$ )
	$\bar{U}_4$	คือความเร็วของก๊าซไอเสีย ( $m/s$ )

และกำลังงานทางกลสามารถคำนวณหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

จะได้  $mechanical\_work = P \times Q$

เมื่อ  $P =$  ความดันในแต่หละจุดที่ต้องการหา ( $N/m^2$ )  
 $Q = V \times A$  เมื่อ  $V$  คือความเร็ว  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดในจุดนั้น ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ทฤษฎี อากาศพลศาสตร์ ในห้องเผาไหม้ (Aerodynamics in combustion chamber)

#### 3.1 บทนำ

ผลของอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) ที่สำคัญอย่างมากในการออกแบบสมรรถนะของห้องเผาไหม้เครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบเป็นการออกแบบที่เหมาะสมระบบการฉีดเชื้อเพลิง ห้องเผาไหม้หลายชนิดแตกต่างกันไปทั้งขนาดและระบบเชื้อเพลิงก็มีหลายแบบ ในการกระจายและ annulus มีจุดประสงค์หลักเพื่อลดความเร็วการไหลเป็นตัวห่วงการไหลและแพร่กระจายอากาศตามคำแนะนำทุกส่วนของห้องเผาไหม้ซึ่งเงื่อนไขการรักษารูปแบบการไหลไม่เป็นตัวห่วงการไหลหรือไม่เกี่ยวข้องกับการหมุนวนบางชนิดในการเผาไหม้ชั้นใน (combustion liner) จุดสำคัญจากขนาดการไหลหมุนวนมีผลต่อการเสถียรภาพของเปลวไฟ มีผลต่อการเผาไหม้ส่วนเจือจาง (dilution) และประสิทธิภาพหล่อเย็นของอากาศตามผนังห้องเผาไหม้ชั้นใน

ผลการคลุกเคล้า (Mixing) มีความสำคัญอย่างมากในการเผาไหม้และส่วน dilution ในส่วน primary การคลุกเคล้าที่ดีมีความจำเป็นอัตราการเผาไหม้สูงและลดเข้ามาในโตรเจนออกไซด์ให้น้อยที่สุด ขณะความพอใจการกระจายอุณหภูมิไอเสียของแก๊ส อาศัยระดับการคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับการเผาไหม้ส่วนเจือจาง (dilution Zone) จุดประสงค์ออกแบบห้องเผาไหม้ปฐมนุญมิให้เกิดการคลุกเคล้าภายในห้องเผาไหม้ชั้นในและรูปแบบการไหลมั่นคงทั้งหมด ไม่มี parasitic losses และความยาวสั้นที่สุดและสูญเสียความดันน้อยที่สุด

#### 3.2 ลักษณะการสูญเสียความดัน (Pressure Losses parameter)

ใน 2 มิติ ตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียความดัน (pressure loss) ในการออกแบบห้องเผาไหม้หนึ่งนั้นคืออัตราส่วนความดันลดลง (pressure drop) ในหน้าตัดของห้องเผาไหม้ ผลรวมความดัน ( $\Delta P_{3-4}/P_3$ ) ตรงทางเข้าและอัตราส่วนของผลรวมของห้องเผาไหม้ ซึ่งมาจาก dynamics pressure ( $\Delta P_{3-4}/P_{ref}$ ) ซึ่ง 2 ตัวแปรจะมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3} = \frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} \frac{R}{2} \left( \frac{m^3 T_3^{0.5}}{A_{ref} P_3} \right)^2 \quad (3.1)$$

จากสมการ (1) ทางด้านซ้ายมือโดยปกติจะกล่าวถึงการสูญเสียความดันทั้งหมด (overall pressure loss) ปกติจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่าจะอยู่ช่วง 4-10% ปกติมันจะไม่รวมกันกับการสูญเสียความร้อน (hot loss) ความดันที่สูญเสียจะเป็นตัวบ่งบอกสมรรถนะของห้องเผาไหม้

ในเทอมของ  $\Delta P_{3-4}/P_{ref}$  จะเรียกว่า pressure loss factor มีความสำคัญในการเผาไหม้วิศวกรต้องให้ความสำคัญ ดังนั้นมันจะเป็นตัวบ่งบอกถึงการต้านทานการไหลในช่วงแรก ลักษณะ airstream ระหว่างทางออกของคอมเพรสเซอร์ (compressor) และทางเข้า turbine การไหลของอากาศจะถูกมองเหมือนเป็นสัมประสิทธิ์แรงต้าน (drag coefficient) ซึ่งมันจะไม่เหมือนกับ overall pressure loss ซึ่งต้องอาศัยขอบเขตในการทำงาน pressure loss จะเป็นตัวแปรในการกำหนดคุณสมบัติของการเผาไหม้ มันใช้แทนแสดงผลรวม 2 เทอมของการสูญเสียความดัน 1) ความดันลดลงในการกระจาย (diffusion) และ

2) ความดันลดลงในพื้นที่หน้าตัดในผนังด้านใน

$$\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} = \frac{\Delta P_{diff}}{q_{ref}} + \frac{\Delta P_L}{q_{ref}} \quad (3.2)$$

ค่าดังกล่าว ควรให้มันน้อยที่สุด เนื่องจากการสูญเสียความดันใน diffuser จะเป็นอุปสรรคต่อการเผาไหม้ ในทางปฏิบัติควรทำความสูญเสียใน diffuser ให้มันน้อยที่สุด การสูญเสียความดันห้องเผาไหม้ชั้นในต้องน้อยที่สุดเหมือนกัน ปัจจัยการสูญเสียความดันหาได้โดยผลของพื้นที่รูทั้งหมดในห้องเผาไหม้ชั้นใน

$$\frac{\Delta P_L}{\rho_3} = \frac{U_3^2}{2} \quad (3.3)$$

$$\text{หรือ } \frac{\Delta P_L}{\rho_3} = \frac{K}{2} \left( \frac{\rho_3 T_3^{0.5}}{A_{h,eff} P_3} \right)^2 \quad (3.4)$$

แทนทางขวามือของสมการ (3.4) ในสมการ (3.1) ได้

$$\frac{\Delta P_L}{q_{ref}} = \left( \frac{A_{ref}}{A_{h,eff}} \right)^2 \quad (3.5)$$

ผลทั้งหมดของพื้นที่รูของห้องเผาไหม้ชั้นในถูกควบคุมพื้นที่ห้องเผาไหม้ชั้นนอก

$$A_{h,eff} = \frac{A_{ref}}{\left(\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} - \frac{\Delta A_{diff}}{q_{ref}}\right)^{0.5}} \quad (3.6)$$

ผลพื้นที่รูของห้องเผาไหม้ชั้นในอาจจะคำนวณจาก

$$A_{h,eff} = \sum_{i=0}^n C_{D,i} A_{h,i} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $C_{D,i} A_{h,i}$  = ผลพื้นที่ของรู  
 $n$  = จำนวนรูทั้งหมด

ค่าของอากาศเย็น (cold) การสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ในทางปฏิบัติที่นำมาในตาราง (3.1) มี 3 แถวแสดง ห้องเผาไหม้แบบ annular ซึ่งมีค่าการสูญเสียความดันน้อยที่สุดในตารางค่าปัจจัยการสูญเสียความดันจะถูกใช้ในการหาพื้นที่ ( $A_{ref}$ ) สามารถใช้ค่า 20 สำหรับห้องเผาไหม้แบบ annular ส่วนค่า 40 ใช้สำหรับห้องเผาไหม้แบบ tubular ในทางปฏิบัติจริงค่า ซึ่งแปรผันตามการสูญเสียความดันของพื้นที่ห้องเผาไหม้ชั้นใน ค่าการสูญเสียความดันในตาราง (3.1) จะบอกลถึงการสูญเสียของลมเย็นเท่านั้น ซึ่งมาจากการไหลแบบปั่นป่วน (turbulence) ซึ่งแสดงค่าในตาราง (3.1) ได้จากการทดลอง

Type of chamber	$\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3}$	$\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}}$	$\frac{m_3 T_3^{0.5}}{A_{ref} P_3}$
Turbular	0.07	37	0.0036
Tuboannular	0.06	28	0.0039
Annular	0.06	20	0.0046

ตารางที่ 3.1 แสดงการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ในทางปฏิบัติ

### 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและการสูญเสียความดัน

#### 3.3.1 ห้องเผาไหม้ชั้นนอก (Casing Area)

ห้องเผาไหม้ที่แข็งแรงจะต้องมีภาคตัดของพื้นที่ที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากการสูญเสียความดันทั้งหมดเพราะภาระของห้องเผาไหม้พื้นที่ที่ห่อหุ้มด้านนอกเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเผาไหม้ภายใต้การสูญเสียความดันทั้งหมด ขนาดและพื้นที่หาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$A_{ref} = \left[ \frac{R}{2} \left( \frac{m_3 T_3^{0.5}}{P_3} \right)^2 \frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} \left( \frac{\Delta P_{3-4}}{P_3} \right)^{-1} \right]^{0.5} \quad (3.8)$$

### 3.3.2 ห้องเผาไหม้ชั้นใน (Liner)

ข้อดีของการสร้างห้องเผาไหม้ชั้นใน (Liner) ให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดใหญ่ ก็คือทำให้การไหลภายในห้องเผาไหม้มีความเร็วต่ำและส่งผลให้มี resident time ยาวนาน ตัวแปรเหล่านี้ทำให้การจุดระเบิดทำได้ง่ายรวมทั้งทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพ

แต่วิธีนี้ไม่สามารถนำไปประยุกต์กับเครื่องยนต์อากาศยาน เพราะเครื่องยนต์อากาศยานนั้นจะต้องมีขนาดเล็กและพื้นที่การติดตั้งจำกัด การขยายขนาดของห้องเผาไหม้ชั้นนอก (Casing) เพื่อให้เหมาะสมกับขนาดของห้องเผาไหม้ชั้นใน (Liner) เป็นไปได้ยาก ดังนั้นหากเพิ่มขนาดของห้องเผาไหม้ชั้นในขึ้น แต่ขนาดของห้องเผาไหม้ชั้นนอกคงเดิม จะทำให้พื้นที่ระหว่างห้องเผาไหม้ชั้นในและชั้นนอกแคบลง ความเร็วของอากาศที่ไหลระหว่างพื้นที่นี้จะสูงขึ้น ทำให้เกิด static pressure drop สูงภายในบริเวณห้องเผาไหม้ชั้นในและห้องเผาไหม้ชั้นนอก การเกิด static pressure drop ในบริเวณระหว่างห้องเผาไหม้ชั้นในและห้องเผาไหม้ชั้นนอกสูง จะทำให้อากาศไม่สามารถผ่านรูที่เจาะบนผนังห้องเผาไหม้ชั้นใน เข้าไปเผาไหม้ได้เพราะการไหลของอากาศผ่านรูบนห้องเผาไหม้ชั้นใน อากาศจะสูญเสีย static pressure drop บริเวณที่อากาศไหลผ่าน (เพราะอากาศไหลผ่านรูด้วยความเร็วสูง) อากาศที่ไหลผ่านรูเข้าลูกเคล็ด (mixing) กับก๊าซร้อนภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งหากอากาศเกิดการสูญเสีย static pressure drop ภายในบริเวณห้องเผาไหม้ชั้นในและชั้นนอกสูง จะทำให้ static pressure ในอากาศลดน้อยลง จนไม่สามารถไหลผ่านรูได้

หลักการพิจารณาค่า static pressure drop ที่เหมาะสมในการไหลผ่านรูบนห้องเผาไหม้ชั้นในมีหลักดังนี้คือเราต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง  $k$  และ  $\Delta p_L / q_{pz}$  ซึ่ง

$$K = \frac{\text{Liner Crosssectional Area}}{\text{Casing Crosssectional Area}}$$

$\Delta p_L$  = ความดันสถิตที่ตกลงระหว่างผ่านรูบนห้องเผาไหม้

$q_{pz}$  = ความดันจลน์ (dynamics pressure) ภายใน primary zone

กรณีนี้ เราจะหาค่า  $k$  ที่เหมาะสมที่จะให้  $\Delta p_L/q_{pz}$  ที่สูงที่สุด โดยที่ตัวแปรทั้ง 2 มีความสัมพันธ์ดังนี้

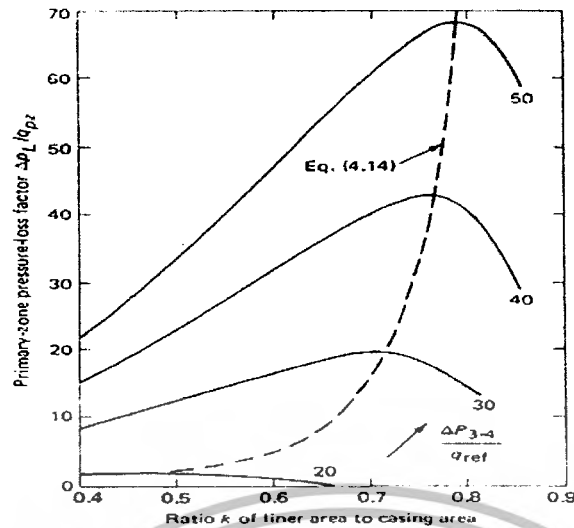
$$\frac{\Delta p_L}{q_{pz}} = 1 + \frac{T_3}{T_{pz}} \frac{k^2}{m_p^2} \left[ \frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} - \frac{(1-m_{sn})^2 + \lambda[r^2(1-k)^2 - 1]}{(1-k)^2} \right] \quad (3.9)$$

จากสมการค่า  $T_3$ ,  $T_{pz}$ ,  $\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}}$ ,  $m_p$ ,  $\lambda$  และ  $r$  นั้นค่าเหล่านี้จำเป็นต้องกำหนดขึ้นก่อน ที่เราจะทำการออกแบบห้องเผาไหม้ รูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของค่า  $\Delta p_L/q_{ref}$  ที่มีผลต่อ  $\Delta p_L/q_{pz}$  ที่ระดับค่า  $k$  ต่างกัน เห็นได้ว่าเมื่อ เพิ่มมากขึ้น(ระยะห่างระหว่างห้องเผาไหม้ชั้นในกับชั้นนอกลดลง)เราจำเป็นต้องออกแบบให้ห้องเผาไหม้มี  $\Delta P_{3-4}/q_{ref}$  สูงขึ้น เพื่อให้ได้ค่า  $\Delta p_L/q_{pz}$  สูงขึ้น(มีความดันสถิตเพียงพอที่จะไหลผ่านรูบนห้องเผาไหม้ชั้นใน)ซึ่งการเพิ่ม นี้ทำให้การรูดกลับมีประสิทธิภาพขึ้นด้วยค่า  $k$  ที่เหมาะสม  $k_{opt}$  อาจหาได้โดยทำการ diff สมการ 3.9 ให้เท่ากับ 0 ได้

$$K_{opt} = 1 - \left[ \frac{(1-m_{sn})^2 - \lambda}{\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} - \lambda r^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.10)$$

$$\text{และ } A_L = K_{opt} \cdot A_{ref} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ผลกระทบของการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ทั้งหมดที่

$$m_{st} = 0.12, m_p = 0.2, r = 6.0, \lambda = 0.5, T_{pz} = 2400K$$

### 3.4 การไหลในท่อวงแหวน (Flow in annulus)

เงื่อนไขในการไหลในท่อวงแหวน (annulus) นั้นมีอิทธิพลต่อรูปการไหลของอากาศภายในห้องเผาไหม้ชั้นใน และมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผนังห้องเผาไหม้ โดยความเร็วเฉลี่ยภายในท่อวงแหวนนี้ถูกควบคุมโดย ความเร็วการเผาไหม้และอัตราส่วนของพื้นที่ห้องเผาไหม้ชั้นในกับพื้นที่ห้องเผาไหม้ชั้นนอก การเปลี่ยนแปลงความเร็วบริเวณทางเข้าห้องเผาไหม้ชั้นในมีผลอย่างมาก ความเร็วที่ปรากฏภายในท่อวงแหวน การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหล และอากาศที่ถูกดูดไหลผ่านรูเป็นแถวและร่องรูการหล่อเย็น ถึงแม้ว่าเราต้องการการไหลภายใน annulus ให้มีความเร็วสูงพอเพื่อระบายความร้อนของห้องเผาไหม้ชั้นใน โดยใช้หลักการพาความร้อน (convection) แต่เราก็จำเป็นต้องให้การไหลในบริเวณนี้มีความเร็วต่ำ เหตุเพราะ

1. เมื่อมีความเร็วต่ำจะมีความดันสถิต ทำให้มั่นใจได้ว่าการไหลของอากาศผ่านในท่อซึ่งเป็นแถวเดียวกันจะมีลักษณะเหมือนกัน
2. สัมประสิทธิ์ที่รูทางออกมีค่าสูง
3. การพ่นกระจายของ Jet ที่ออกจากรูใกล้เคียงมุมฉาก (Steeper angle) ทำมุมสูงขึ้น
4. แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบริเวณผิวจะมีค่าต่ำ
5. การสูญเสียอันเกิดจากปรากฏการณ์ Sudden-expansion บริเวณทางออกของรูบนห้องเผาไหม้ชั้นในและร่องระบายความร้อน (cooling slots) มีค่าต่ำ

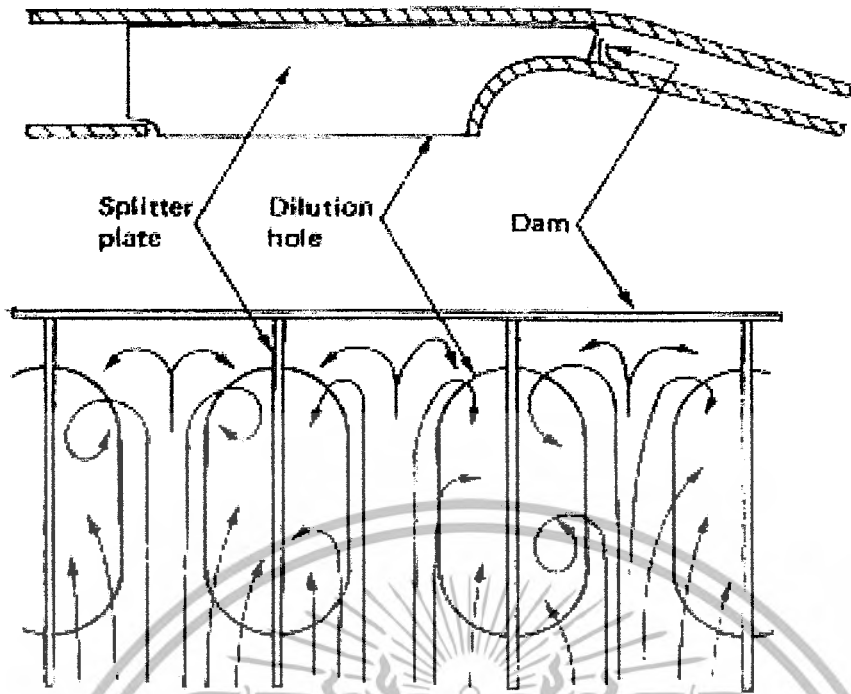
ห้องเผาไหม้ส่วนมากมีพื้นที่วิกฤตที่จุดบริเวณของต้นกระแสของห้องชั้นใน และบริเวณใกล้เคียง *dilution* ซึ่งที่ต้นของสายธาร อากาศจะถูกปล่อยออกมาจากช่วงที่ (*diffuser*) บางครั้งอาจเกิดขึ้น *boundary* ที่มีขนาดใหญ่ทำให้ขัดขวาง การหล่อเย็นด้วยความดันสถิตในช่องหล่อเย็น ในการทำให้ *total-head* ของช่องหล่อเย็นสม่ำเสมอ อาจเกิดปัญหาขึ้นจากการตกค้าง ทำให้เกิดการไหลแยกตัว ทำให้เกิดการโค้งงอที่จุดเชื่อมของช่วงบนที่บานออกและของท่อวงแหวน เนื่องจากกระบวนการไหล ผ่านตามแนวของท่อวงแหวนลักษณะของความเร็วจะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากอากาศไหลผ่านช่องมีลักษณะต่างกัน อย่างไรก็ตาม ถ้าอากาศที่ไหลผ่านอยู่นอกเหนือการควบคุม เข้าสู่ภายในช่อง ทำให้เกิดการไหลตามกระแส เกิดการเจือจางได้ โดยการไหลที่ไม่เป็นระเบียบสามารถเพิ่มขึ้นจาก การที่อากาศในส่วนที่ไปไหลย้อนของด้านต้นสายธารภายในท่อวงแหวน เกิดการไหลไม่ต่อเนื่องและไหลแบบสุม โดยห้องเผาไหม้แบบ *Turboannular* โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจเกิดความรุนแรงขึ้น ในบางกรณีของห้องเผาไหม้ชั้นในที่รับการไหลของอากาศที่มีทิศทางต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการบิดเบือนของการไหลภายในเท่านั้น แต่จะทำให้การเปลี่ยนแปลงเป็นตามเวลาด้วย

วิธีหนึ่งที่ช่วยบรรเทาปัญหานี้คือ การสวม *Backstop* ที่ช่วงปลายสายธารของ *dilution* โดยการออกแบบแผ่นวงแหวนอย่างง่าย เมื่อสวมเข้าไประหว่างด้านในและด้านนอกท่อของห้องเผาไหม้โดยการเจาะที่บริเวณรอบๆ ท่อตามความเหมาะสม และการกำหนดให้อากาศไหลผ่านเพื่อระบายความร้อนต่อบริเวณปลายสายธาร ซึ่งแผ่นนี้จะมีผลกระทบมากในการต่อต้านการเกิดไหลย้อนกลับภายในท่อวงแหวน

บริเวณภายในของท่อวงแหวนห้องเผาไหม้ชั้นในนั้น *backstop* มักติดตั้งกับแบบต่อเนื่องเพื่อกีดขวางใกล้ช่วงปลายของสายธารของ *dilution* ทันที โดยติดตั้งประมาณ 2 ใน 3 ของพื้นที่วงแหวน อีกวิธีหนึ่งในการควบคุมการไหลภายใน *dilution* คือการทำให้ผนังภายในของทางออกของห้องเผาไหม้ชั้นในมีลักษณะเรียวเพื่อป้องกันการขยายออกท่อวงแหวนตรงทางที่ติดต่อกับรู

ถ้าตำแหน่งระยะของ *dilution* มีขนาดใหญ่กว่าความสูงของท่อวงแหวน การไหลหมุนวน (*vortex*) สามารถเกิดขึ้นในการไหลเข้าในรู โดยที่การเปลี่ยนแปลงรูการทะลุ (*penetration*) และการผสมกัน (*mixing*) ของลำกระแสอากาศ (*jet*) ที่ *dilution* ความรุนแรงของการหมุนวนนี้ขึ้นอยู่กับอัตราพื้นที่วงแหวน ซึ่งวัดในระนาบของรูถึงพื้นที่ของรู ถ้ามีอัตราพื้นที่สูงจะทำให้ยับยั้งการก่อตัวการหมุนวน (*vortex*) ซึ่งแนวทางนี้ก็เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบห้องเผาไหม้ให้มี *pressure drop* ที่เหมาะสม

การหมุนวน (*vortex*) นั้น สามารถเกิดได้ทั้ง *tubular* และ *annular* การทำลายหรือการลดโดยการสวมแผ่นที่เป็นร่อง (*splitter plate*) ตามความยาวขวางแต่ *dilution* ซึ่งแผ่นนี้จะติดอยู่กับห้องเผาไหม้ชั้นในหรือชั้นด้านนอกห้องเผาไหม้ชั้นนอกได้ผล โดยเฉพาะการใช้ร่วมกับวงแหวนเข้าด้วยกัน หรือการกีดกันดังรูปที่ 3.2

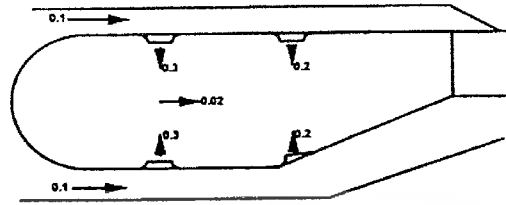


รูปที่ 3.2 ควบคุมการไหลผ่านรู dilution

#### 3.4.1 มัคนัมเบอร์ ณ ตำแหน่งการไหลต่างๆและระบบพื้นที่การเผาไหม้ (Local Mach numbers and combustion system areas)[3]

แนวทางออกแบบสำหรับ Mach number เฉพาะจุด (Local Mach number) แสดงในรูปที่ 3.3 Mach number ในด้านนอกและด้านในของท่อวงแหวน (annulus) ลำดับแรกที่ primary zone การฉีดพ่นควรเป็น 0.1 เท่ากันตลอดตามความยาวท่อวงแหวน ดังนั้นพื้นที่แต่ละท่อวงแหวนหาโดยเงื่อนไขที่ใช้จาก Q curves ส่วน Mach number ท่อวงแหวนที่ต่ำ จำเป็นต้องรักษาระดับ Mach number ไว้สำหรับการฉีดพ่นราวประมาณ 0.3 เนื่องจากอัตราการฉีดพ่นที่ Mach number ท่อวงแหวนควรมากกว่า 2.5 การฉีดพ่น Mach number 0.3 ย่อมให้ความดันตกคร่อมน้อยที่สุดทำให้การไหลซึมอากาศดี ครั้งของอากาศที่ไหลเข้าที่ primary zone และอีกครั้งหนึ่งไหลเข้า secondary zone (Intermediate zone) การฉีดพ่นที่ Mach number เฉลี่ยแนวแกนที่ออกจาก primary zone ควรเป็น 0.02 - 0.05

ภายหลังจาก primary zone อัตราการไหลอากาศมีการชักนำ Mach number เข้าสู่เปลวไฟ Mach number อาจสูงประมาณ 0.075 - 0.1 ในที่สุดการไหลอากาศส่วนของ tertiary (dilution zone) ถูกเร่งความเร็วจนถึงทางเข้า turbine ประมาณ 0.2 จนถึง guide vane



รูปภาพที่ 3.3 Mach number ห้องเผาไหม้

### 3.4.2 การไหลผ่านรูเสื่อชั้นใน (Flow through holes)

การไหลผ่านรูของห้องเผาไหม้ชั้นใน อาศัยขนาดของรูและความดันตกคร่อมไม่เพียงพอต่อรูปร่างของท่อและเงื่อนไขการไหลในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งมีอำนาจรุนแรง มีผลต่อพื้นที่การไหล

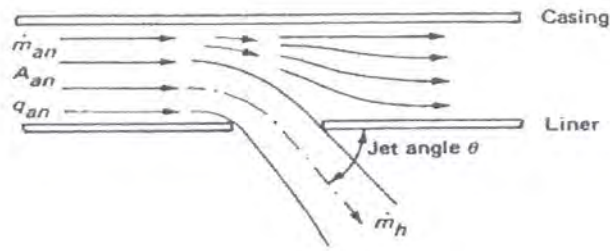
ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยืนยันยอมได้ (Discharge Coefficient)

สมการพื้นฐานสำหรับการไหลผ่านรูอาจเป็นดังนี้

$$\dot{m}_h = C_D A_{h,geom} [2\rho_3 (P_t - p_j)]^{0.5} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $P_t$  – total pressure upstream of hole

$p_j$  = static pressure downstream of hole



รูปที่ 3.4 แสดงการไหลผ่านรูของห้องเผาไหม้ชั้นใน

$$\alpha = \frac{\dot{m}_h}{\dot{m}_{an}}$$

$$A_r = \frac{(A_h)_{geom}}{A_{an}}$$

$$K = 1 + \frac{\Delta P_L}{q_{an}}$$

$$C_D = \text{สัมประสิทธิ์ของรูที่ยอมได้} = \frac{\alpha}{A_r K^{0.5}}$$

สำหรับโดยมากรูของห้องเผาไหม้ไม่มีทิศทาง การไหลต้นทางขนานระนาบของรูตามรูปที่และสมการ อาจจะเขียนดังนี้

$$\frac{\dot{m}_h}{\dot{m}_{an}} \frac{(A_h)_{geom}}{A_{an}} = C_D \left( \frac{P_{an} - P_i}{q_{an}} \right)^{0.5} \quad (3.13)$$

$$\frac{\dot{m}_h}{\dot{m}_{an}} \frac{(A_h)_{geom}}{A_{an}} = C_D \left( 1 + \frac{\Delta P_L}{q_{an}} \right)^{0.5} \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{หรือ } \frac{\alpha}{A_r} = C_D K^{0.5} \quad (3.15)$$

จากการสังเกตการณ์หักของคันทางการไหลเกิดบริเวณรูของห้องเผาไหม้ชั้นในที่ขอบเขตอาศัยรูปร่างของระบบ รูปร่างใกล้เคียงความเร็วและความดันตกคร่อมขวางห้องเผาไหม้ชั้นใน ในทางปฏิบัติค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมรับได้ของรูขึ้นอยู่กับ

- 1 ชนิดรู (แบบเรียบ แบบรอยขุบ อื่นๆ)
- 2 รูปร่าง (วงกลม สี่เหลี่ยม อื่นๆ)
- 3 อัตราช่องว่างรูที่ส่วนสูง ท่อวงแหวน
- 4 ความดันตกคร่อมของห้องเผาไหม้ชั้นใน
- 5 การกระจายของความดันสถิต รอบๆภายในรู
- 6 การปรากฏตัว ของการหมุนวนเป็นเกลียว (swirl) ในกระแสการไหล
- 7 ตำแหน่งความเร็วอากาศท่อวงแหวน

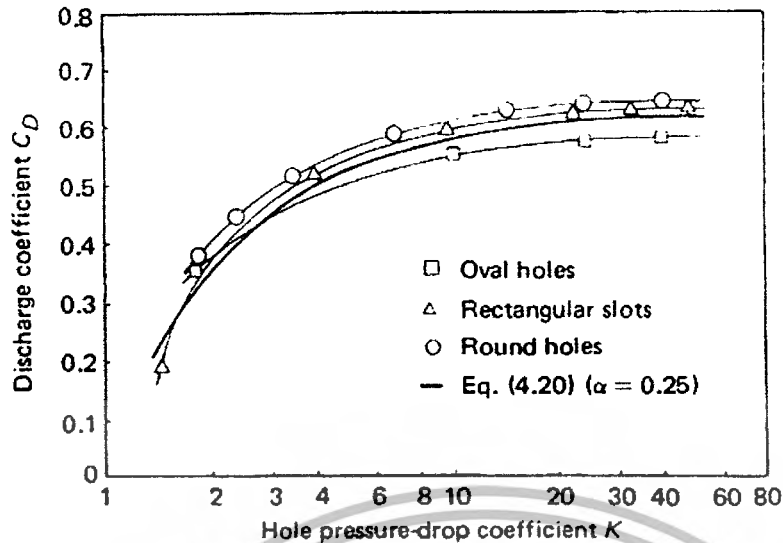
ในข้อสุดท้าย ให้เหตุผลทำไมค่าสัมประสิทธิ์บ่อยครั้งต่ำกว่ารูแถวแรก และต่ำกว่าในตำแหน่งรูที่ไกลออกไปตามปลายทาง

จากการวิเคราะห์แฟกเตอร์ควบคุมการไหลของลำกระแสน้ำหนึ่ง Kaddah [1] สำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้ การไหลไม่มีการหมุนวนเป็นเกลียว (swirl) ค่าสัมประสิทธิ์ สำหรับรูวงกลมเรียบ วงรีเรียบและสี่เหลี่ยมเรียบหาได้โดย

$$C_D = \frac{1.25(K-1)}{[4k^2 - k(2-\alpha)]^{0.5}} \quad (3.16)$$

ขอบเขตการไหลและทฤษฎีในการวิเคราะห์ของชนิดรูปแบบและรูเกี่ยวกับการทดลอง ดูได้จากรูปที่

3.5



รูปที่ 3.5 แสดงผลกระทบของรูปร่างของรูในทางปฏิบัติ

### 3.5 อากาศพลศาสตร์ของการหมุนวนเป็นเกลียว (Swirler aerodynamics)

ข้อกำหนดพื้นฐานของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ แก๊สเทอร์ไบน์ ก็คือการสร้างเปลวไฟให้เสถียรและมีขนาดที่เหมาะสมในการเผาไหม้ โดยเฉพาะห้องเผาไหม้ของเครื่องบินซึ่งคลุมด้วยเสื่อนอก ตรงบริเวณนี้จะมีความดันต่ำ อุณหภูมิต่ำ ในช่วงของ Primary Zone ลักษณะการไหลของอากาศจะมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการทำให้เปลวไฟเสถียร

การไหลของอากาศจะมีหลายแบบที่แตกต่างกันออกไป แต่ส่วนที่สำคัญคือต้องสร้างให้เกิดการหมุนวนตรงช่วงแรกที่เข้าห้องเผาไหม้ อากาศกับเชื้อเพลิงจะรวมตัวกันในห้องเผาไหม้เพื่อสันดาป ซึ่งทำให้ผลผลิตจากห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิสูง

การไหลหมุนวนต่อเนื่องแบบ Vortex อากาศผ่านรูที่เจาะเข้ามาในผนังเสื่อห้องเผาไหม้ เพื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ โดยอากาศไหลผ่านอุปกรณ์การหมุนวนและร่องรูหล่อเย็น ผลกระทบส่วนมากที่ทำให้เกิดการไหลแบบ Recirculation ในช่วงของ Primary Zone ในการกำหนด อุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียวรอบๆหัวฉีดเชื้อเพลิง การหมุนวนแบบ Vortex จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ breakdown ซึ่งจะเป็นที่รู้กันดีอยู่แล้วในการไหลหมุนวนแบบเป็นเกลียว ปรากฏการณ์ breakdown เป็นสาเหตุการเกิด การไหลหมุนวนแบบ recirculation จะเป็นตัวบ่งบอกถึงบริเวณแกนกลางซึ่งจะมีการรวมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงทำให้เกิดอัตราการไหลที่สูง ที่เป็นแบบหมุนวน ที่รวมตัวกันได้ดีกว่าแบบธรรมดาเพราะว่าส่วนประกอบของการหมุนวนผลที่ได้คือการตัดเฉือนบริเวณต่างๆของอากาศกับเชื้อเพลิง ทำให้เกิดปั่นป่วน (turbulence) ที่สูงและการผสมที่รวดเร็วเป็นลักษณะพิเศษของการหมุนวนแบบตามยาว และตัวควบคุมที่ใช้งานได้จริงในห้องเผา

ใหม่ เพื่อให้เปลวไฟเสถียรและความแรง ซึ่งตัวควบคุมจะต้องบอกถึงขนาดและรูปร่างในการกำหนดส่วนต่างๆของเปลวไฟ

### 3.6 ชนิดของอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียว (Swirler type)

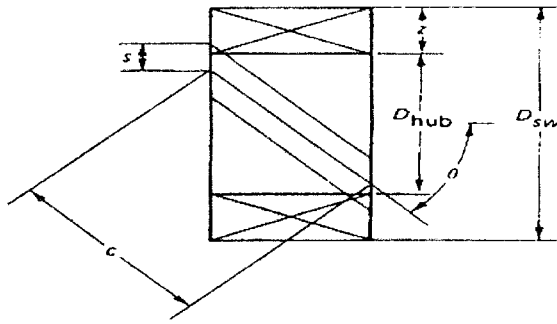
อุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียว มีใช้กว้างขวางใน Tubular และ annular ทั้งคู่ ในตัวห้องเผาไหม้ อุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียว มีทั้งแบบ Single swirlers และ Double swirlers ซึ่งถูกเตรียมเพื่อช่วยให้ corotating หรือ contrarotating ในอากาศไหล เป็นประโยชน์ในการอธิบายแบบ Single Swirlers ในห้องเผาไหม้

แม้ว่ารัศมีของอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียว บางครั้งจะมีลักษณะพิเศษ ซึ่งจะเป็นไปตามลักษณะของห้องเผาไหม้ ตามแนวแกนการไหลของอากาศ ใบของอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียวแบบแผ่นแบนง่ายต่อการสร้าง แต่ในบางครั้งใบพัดที่เป็นแบบแผ่นโค้งจะเหมาะสมและมีคุณสมบัติทางอากาศศาสตร์ได้ดีกว่า

ตัวอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียว (Swirler) จะเป็นไปตามการกำหนดตามรูป ซึ่งรูปของใบอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียวแบบแผ่นแบน มุมของใบจะมีค่าคงที่และจะมีค่าเท่ากับ  $\theta$  แต่รูปของใบอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียวแบบแผ่นโค้ง ในตรงทางอากาศเข้าใบ (Blade) จะมีค่ามุม  $\theta = 0$  และตรงทางออกของอากาศมุมจะเท่ากับ  $\theta$



รูปที่ 3.6 แสดง Double swirler

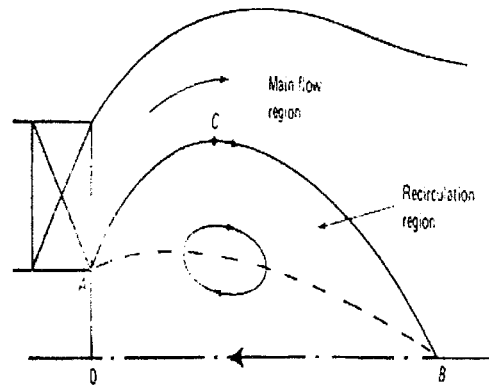


รูปที่ 3.7 แบบครีบนวนของ

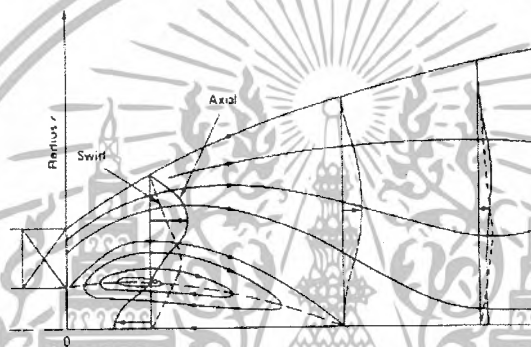
### 3.7 รูปแบบการไหล (Flow Pattern)

บริเวณขอบเขตการไหลหมุนวนแบบ recirculation ที่เกิดการหมุนวนอย่างอิสระดังรูป 3.8 ฉะนั้นจึงสันนิษฐานการไหลตามแนวแกนเป็นรูปแบบเรขาคณิต ถ้าคิดการไหลแค่ครั้งเดียวลักษณะของรูปแบบการไหล ในการพิจารณาการหมุนวนแบบ recirculation ตรงบริเวณนี้ กำหนดเป็น OACB ซึ่งจุด B จะเรียกว่าจุด Stagnation ข้างนอกของการไหล OACB จะเป็นการไหลหลักที่สำคัญ ดังนั้นการทำให้เกิด recirculation ตาม solid curve AB ค่า stresses จะมีค่าสูงสุดจะปรากฏอยู่ที่ใกล้จุด A ตามแนวขอบเขตของ recirculation ความเร็วตามแนวแกนเท่ากับศูนย์ แสดงด้วยเส้นประตรง AB

รูปแบบความเร็วตามแนวแกนและความเร็วของการหมุนวนเป็นเกลียว แสดงในรูปที่ 3.9 ส่วนประกอบความเร็วทั้งหมดลดลงในทิศทางของกระแสการไหล ภายหลังจากจุด stagnation (จุด B) ความเร็วที่หมุนย้อนกลับตามแกนจะหายไป และจุดที่ห่างออกกระแสการไหล ที่จุดสูงสุดของความเร็วนั้นแนวแกนย้ายไปที่จุดศูนย์กลาง(centerline)จะมีผลกระทบต่อกรหมุนวนเป็นเกลียว น้อยลง



รูปที่ 3.8 บริเวณ Recirculation ในสนามการไหลวน



รูปที่ 3.9 แสดงความเร็วในแนวแกนและความเร็วของ Swirl เป็นส่วนประกอบ

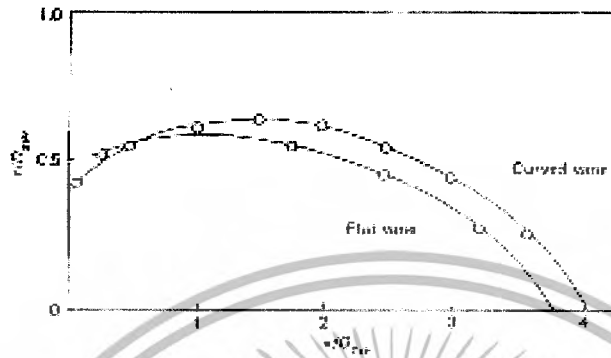
สนามการไหล

### 3.8 ขนาดของบริเวณการหมุนวน (Size of Recirculation Zone)

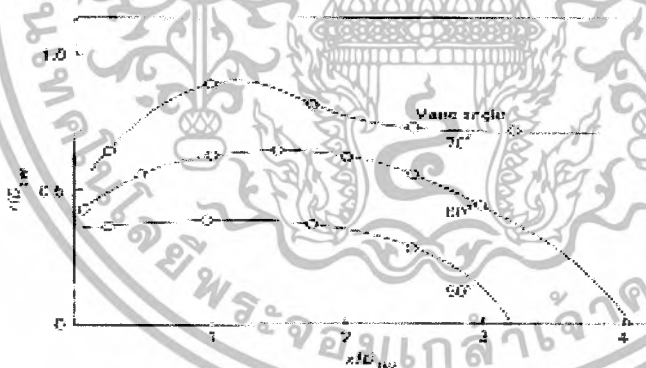
ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการกำหนดขนาดของ recirculation zone ถูกสร้างโดยกระแสวนไหลของอุปกรณ์การสร้างการหมุนวนเป็นเกลียว ถูกศึกษาโดยนักวิจัย Kilik [1] ผู้ซึ่งตรวจสอบวิเคราะห์อย่างละเอียดถึงผลกระทบที่แตกต่างกันออกไป ของ recirculation zone ซึ่งจะแปรผันตามรูปแบบของใบพัด มุมของใบพัด อัตราส่วนรูปร่างของใบพัด ผลการทดลองบางส่วนที่เห็นในรูปที่แสดงถึงขนาดของ recirculation zone ถูกเพิ่มขึ้นโดย

1. มุมของใบพัดจะเพิ่มขึ้น
2. จำนวนใบพัดเพิ่มขึ้น แต่ space / chord ratio จะลดลง
3. aspect ratio ของใบพัดลดลง
4. เปลี่ยนจากใบพัดแบบแบนแบน(flat vanes) เป็นใบพัดแบบแผ่นโค้ง (curved vanes)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

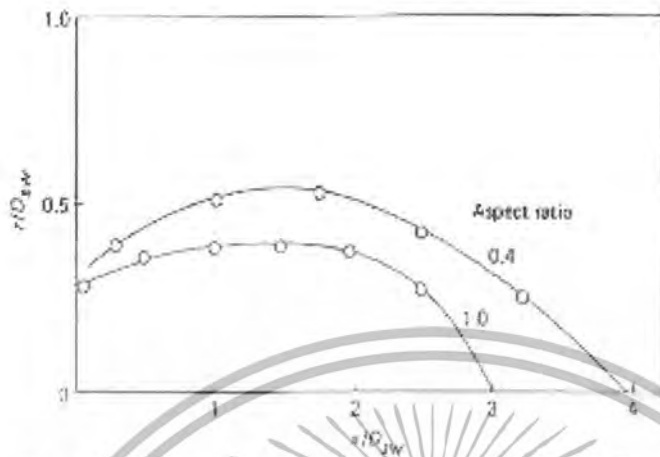


รูปที่ 3.10 ผลกระทบ จากรูปปร่างใบพัด (Recirculation), 16 ใบ, มุมใบ  $60^\circ$  ร่องใบ



รูปที่ 3.11 ผลของมุมใบพัด (vane) มีผลต่อการหมุนตามแกน (Recirculation zone), 16 ครีบลัด, อัตราส่วนรูปร่าง = 0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ผลของอัตราส่วนรูปร่างต่อขนาดการไหลหมุนวนตามแนวแกน (Recirculation): 12 ใบพัด (vane) โค้งมุมใบพัด (vane)  $60^\circ$

### 3.9 ค่าตัวเลขของการหมุนวนเป็นเกลียว (Swirler Number)

Beer และ chigie[1] เสนอมาตรฐานที่ไม่มีขนาดแน่นอนจะบ่งบอกถึงคุณสมบัติ ผลรวมการหมุนวนตามแนวแกนการไหล

$$S_n = \frac{2G_m}{D_{sw}G_t} \quad (3.17)$$

เมื่อ  $G_m$  = axial flux of angular momen  
 $G_t$  = axial thrust

สามารถเขียนได้

$$G_m = \int_0^{D_{sw}/2} 2\pi r W_r \rho dr \quad (3.18)$$

$$G_t = \int_0^{D_{sw}/2} 2\pi r \rho u^2 dr + \int_0^{D_{sw}/2} 2\pi r p dr \quad (3.19)$$

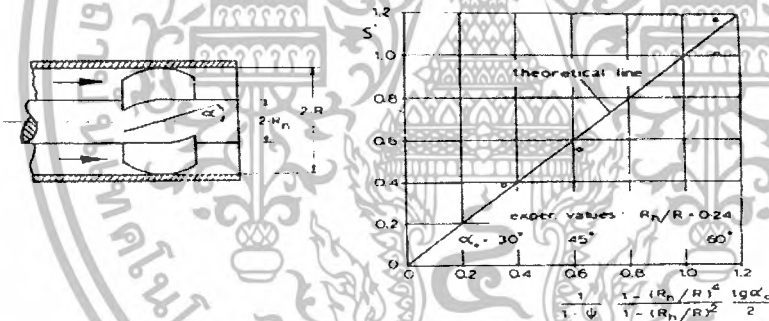
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $U$ ,  $W$  และ  $p$  ตามแนวแกนและเป็นส่วนประกอบสัมผัสความเร็วและ static pressure ตามลำดับ ในพื้นที่หน้าตัดของ jet

สำหรับค่า Swirler number บริเวณรอบต้องน้อยกว่า 0.4 ไม่มีการไหลแบบ recirculation ในการแทนค่าและอธิบายได้ว่าการหมุนวนมีจุดอ่อน เมื่อ Streamline มีลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อการพิจารณา แต่ถ้าไม่เกิดการหมุนวนในทอมนของการหมุนวนก็จะเบาบาง ซึ่งเป็นบริเวณที่สอดคล้องกับหารไหลหมุนวนอยู่ระหว่าง 0.4 และ 0.6  $S_n$  ตัว Swirler เป็นสิ่งที่หน้าสนใจมันจะทำให้เกิดเงื่อนไขของการเกิดการหมุนวนที่แรงหรือ  $S_n \gg 0.6$  ในการคิด Swirler number รูปแบบของตัว Swirler จะเป็นตัวกำหนดและแปรเปลี่ยนของการเกิดการไหลแบบหมุนวน

### 3.9.1 อุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียว (Swirl generator)[2]

เมื่อประยุกต์ใช้ guide vane ในการไหลของอากาศตามแนวแกนโดยให้ปลายบนสุดของ vane พอดีกับผนังท่อด้านในมุมของ guide vane ก็ต้องเหมาะสมจึงจะทำให้การไหลของอากาศเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.13 แสดง guide vane ไหลแบบตามแนวแกน (axial tube flow)

$$S' = \frac{2}{3} \left[ \frac{1 - (R_h/R)^3}{1 - (R_h/R)^2} \right] \tan \alpha \quad (3.20)$$

$S$  = Swirl number ของเครื่องกำเนิด

$R_h$  = Hub of radius

$R$  — Radius of tube

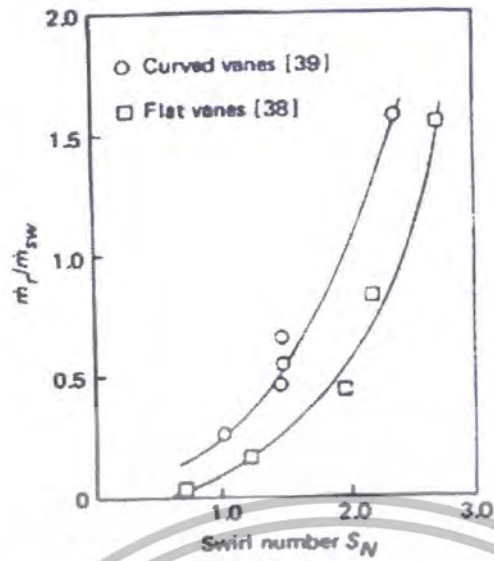
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.10 การไหลย้อนกลับ (Flow Reversal)

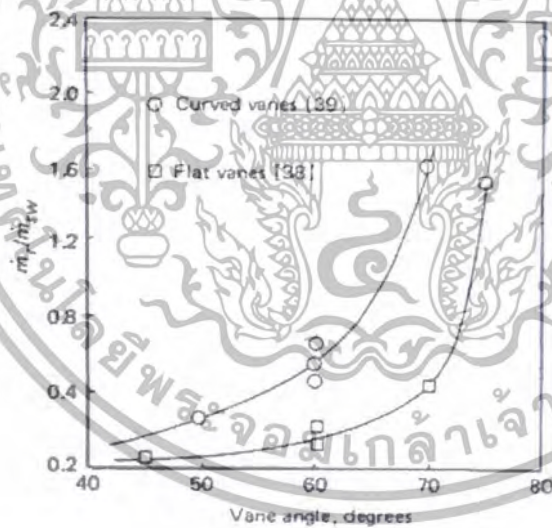
ในช่วงแรก หน้าที่ย่างหนึ่งของอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียว คือนำผลิตภัณฑ์การเผาไหม้ ที่อยู่ใน Upstream ไปรวมตัวกับอากาศและเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้ามา สำหรับการไหลหมุนวนเป็นเกลียวอ่อนๆ ไม่มีการเกิดการไหลหมุนวนตามแนวแกน (recirculation) หรือถ้ามีก็มีน้อย แต่เมื่อมี Swirler number เพิ่มขึ้นแทนค่า  $S_n > 0.6$  ความดันสถิต (static pressure) ในแกนกลาง กระแสการไหลของอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียว มีค่าความดันต่ำพอสร้างการหมุนวนตามแนวแกน Kilik[1] ค้นพบว่าในการออกแบบจากความเร็วตามแนวแกนมีผลต่อตัวแปรรูปร่างของอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียว ต่อมวลอัตราการไหลย้อนกลับ จากผลการทดลองของ Kilik แสดงว่า ใบพัดแบบแผ่นโค้ง จะมีมวลการไหลกลับที่มากกว่าใบพัดแบบแผ่นแบน การไหลย้อนกลับจะเพิ่มขึ้นโดย

1. การเพิ่มมุมของใบพัด
2. การเพิ่มจำนวนใบ
3. ค่า aspect ratio ลดลง

ผลกระทบของค่า Swirl number และมุมของใบพัดต่อมวลการไหลสูงสุดแสดงอยู่ในรูปที่ 3.14 รูป 3.15 เหล่านี้ประกอบไปด้วยข้อมูลของ Kilik สำหรับใบพัดแบบแผ่นโค้ง (Curved - vane) และ Mathur,[1] ได้แสดงผลของใบพัดแบบแผ่นแบน (flat - vane) พวกเขาได้แสดงให้เห็นว่ามุมของใบพัดและชนิดของใบพัดมีผลต่ออัตราการไหลหมุนวนในทางทฤษฎีจะเป็นการศึกษาภายใต้สภาวะการไหลย้อนกลับของมวลที่ถูกสร้างโดยใบพัดที่มีความถูกต้องจากอัตราการไหลของใบพัด



รูปที่ 3.14 Swirl number มีผลต่ออัตราการไหลสูงสุด



รูปที่ 3.15 มุมใบพัดมีผลกระทบต่ออัตราการไหลสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.11 Flow entrainment

ประสิทธิภาพของห้องเผาไหม้มีผลโดยตรงต่อปริมาณของการไหลออกของอุปกรณ์สร้าง การหมุนวนเป็นเกลียว ต่อผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ เพราะความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของอากาศและผลิตภัณฑ์ที่ถูกเผาไหม้ ในช่วงเริ่มต้นของการไหลหมุนวนตามแนวแกน ควบคุมอุณหภูมิและอัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศของขบวนการเผาไหม้ และดังนั้นการควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาและการเกิดเขม่า ได้มีการทดลองโดย Kern และ Fraser[1] จากการทดลองพบว่ามวลการไหลมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น กับระยะ X ของ downstream ตามความสัมพันธ์

$$\frac{m^{\circ}e}{m^{\circ}sw} = (0.35 + 1.4S_n) \frac{n}{deff} \quad (3.21)$$

$$\text{เมื่อ } deff = (D_{sw}^2 - D_{hub}^2)^{1.5}$$

Chigier และ Chervinsky[1] ได้พิสูจน์อัตราส่วนนี้โดยการอินทิเกรต วัสดุรูปแบบความเร็วตามแนวแกนของอุปกรณ์สร้างการหมุนวนเป็นเกลียว ซึ่งผลที่ได้เปรียบเทียบกับทฤษฎีของ Kern และ Fraser[1] ตามสมการ

$$\frac{m^{\circ}e}{m^{\circ}sw} = (0.32 + 0.8S_n) \frac{n}{D_{sw}} \quad (3.22)$$

### 3.12 การสูญเสียความดัน (Pressure Loss)

เมื่อพิจารณาตามหลักของกฎอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงาน Knight และ Walker[1] ได้พิสูจน์สมการความดันสูญเสียตามแนวแกนของใบพัดแบบ thin-vaned ได้ดังนี้

$$\Delta P_{sw} = K_{sw} q_{ref} \left[ \left( \frac{A_{ref}}{A_{sw}} \right)^2 \sec^2 \theta - \left( \frac{A_{ref}}{A_L} \right)^2 \right] \left( \frac{m^{\circ}sw}{m^{\circ}e} \right)^2 \quad (3.23)$$

เมื่อ  $\Delta P_{sw}$  = ความดันตกคล่อมระหว่าง

$A_{sw}$  = พื้นที่ใบพัดด้านน้ำ

$\theta$  = มุมของใบพัด

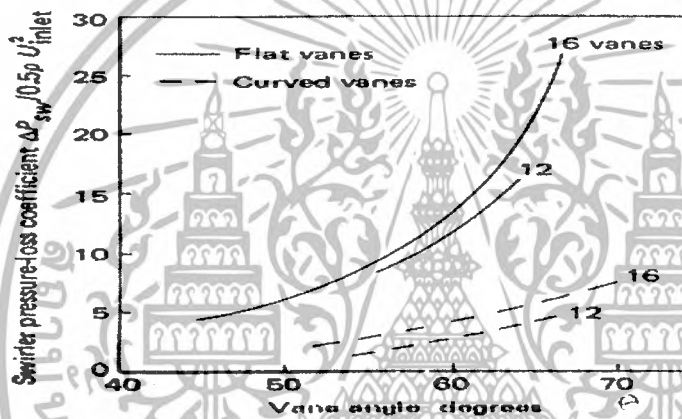
$K_{sw}$  = 1.3 สำหรับ flat vane, 1.15 สำหรับ curved vane

จากการออกแบบสามารถเขียนอยู่ในรูปอย่างง่ายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_{SW}^{\circ} = \left[ \frac{2\rho_3 \Delta P_{SW}}{K_{SW} \left( \frac{\sec \theta}{A_{SW}} \right)^2 \frac{1}{A_L z}} \right] \quad (3.24)$$

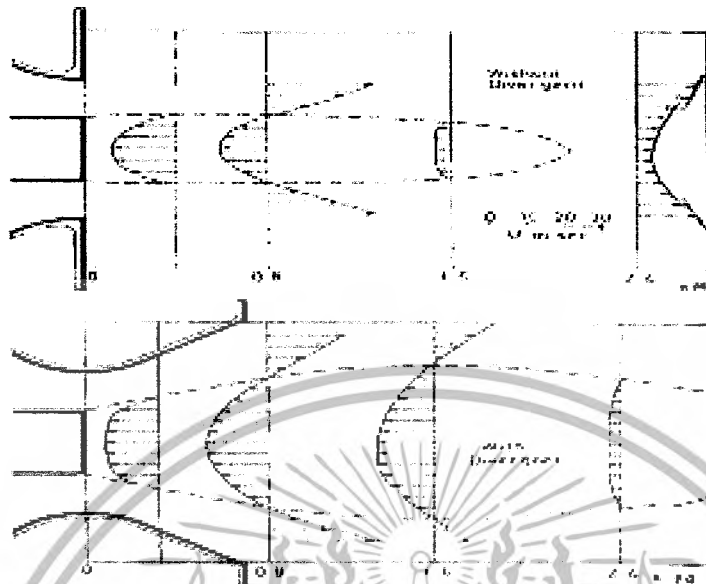
Kilik[1] ได้ศึกษาความดันสูญเสียตามลักษณะแนวแกนของใบพัด โดยทดลองออกแบบแยกผลกระทบของชนิดใบพัดออกจากมุมของใบพัดผลที่ได้แสดงในรูป 3.16 จากรูปแสดงให้เห็นว่าใบพัดแบบแผ่นโค้ง (curved vane) จะมีความดันสูญเสียน้อยกว่าใบพัดแบบแผ่นแบน (flat vane) ความแตกต่างนี้จะเพิ่มขึ้นตามมุมของใบพัดสำหรับใบพัดทั้ง 2 ชนิด การเพิ่มพื้นที่ว่าง / chord ratio (อื่นๆ เช่น ลดจำนวนใบพัด) ความเสียดทานจะน้อยลงสำหรับใบพัดแบบแผ่นโค้ง ถ้าหากลดพื้นที่ของใบพัดลง



รูปที่ 3.16 การสูญเสียความดันที่มุมใบพัดต่างๆ

### 3.13 รูปร่างหัวฉีด (The Nozzle Geometry)[2]

รูปร่างของปลายทางออกหัวฉีด ทั้งแบบที่แผ่ขยายออก หรือแบบที่ถูกปิดกั้นโดยหลอดทรงกระบอก (pressure jet oil gun) หรือจะเป็นแผ่นกลม จะมีผลต่อรูปแบบการไหลของการพ่นของอากาศที่หมุนวน จากรูปที่ 3.17 แทนการกระจายตามรัศมีของความเร็วตามแนวแกน สิ้นสัมผัสและรัศมีส่วนประกอบของความเร็วตามแนวแกน ในการพ่นและตำแหน่งโซนอากาศไหลสำหรับการพ่นหัวออก



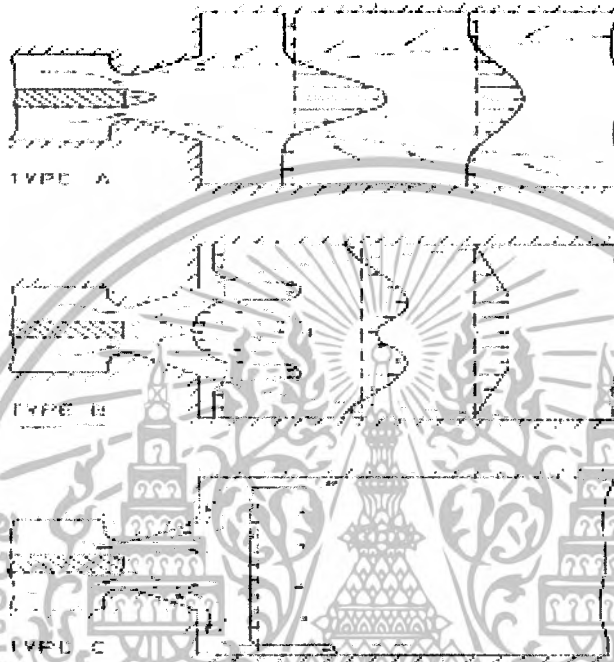
รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบปริศมการกระจายของความเร็วในบริเวณ Vortex

การใช้หัวฉีดแบบเว้าออก (divergent nozzle) จะส่งผลกระทบต่อตรง โดยการเพิ่มรัศมีของการเผาระหว่างขอบแกนและความเร็วระดั้มผัส และการเพิ่มอัตราไหลกลับของมวลการทดลองครึ่งมุมและความยาวของการเร่งขยายออกและการปิดกั้นหัวฉีดถูกเปลี่ยนแสดงการเร่งขยายออกครึ่งมุมแผ่ขยายออกประมาณ  $35^\circ$  และความยาว  $L = 1.2d$  จะดีที่สุด เมื่อ  $d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอดของหัวฉีด

รูปแบบการไหลในปริมาณการไหลย้อนกลับถูกผลกระทบโดยการป้องกันโดย bluff body ที่มันคงหรือโดยพ่นเชื้อเพลิงหรือความดัน พ่นน้ำมันที่ค่า swirl number ต่ำ ( $S < 0.6$ ) การปิดกั้นเป็นเครื่องมือในการเริ่มบริเวณการไหลกลับ ดังนั้นระดับลมวนถูกเพิ่มขึ้น จากผลของการปิดกั้นขนาดบริเวณของการไหลกลับเหลือเพียงเล็กน้อย แต่ที่ระดับอากาศวนสูงมาก หรือเมื่อปลายหัวฉีดเว้าออก การไหลของอากาศวนรวมกัน การปิดกั้นคอคอดหัวฉีดอาจมีตรงกันข้าม คือความแข็งแรงและขนาดของ recirculating vortex ในศูนย์กลางการฉีดพ่น

### 3.14 การแยกตัวของการไหลวนในหัวฉีดหัวออก (Separation of swirling flow in divergent nozzle)[2]

ระหว่างการวิจัยพบว่า ถ้าฉีดรูปร่างเรขาคณิตและการไหลวนอากาศมีผลกระทบต่อกัน ชนิดของการไหลโดยพื้นฐานมี 3 แบบ จะสังเกตในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 สังเกตรูปแบบการไหลสำหรับ Swirling jets และ การออกของเปลวไฟจาก หัวฉีดแบบเว้า

ชนิด A กรณีความหนาแน่นของอากาศส่วนน้อยหรือเป็นศูนย์ การไหลแยกตัวจากผิวหัวฉีดใกล้คอขวดหัวฉีด ผลแบบนี้การไหลของสารพัดคล้ายคลึงกับการพ่นปราศจากการหมุนวนเป็นเกลียว เปลวไฟที่ได้มีลักษณะเปลวไฟแกว่งไปมา

ชนิด B กรณีอากาศวนระดับปานกลางหรือระดับสูง การไหลอากาศวนมันคง ติดกับผนังหัวฉีดเข้าออกและสวมรอบลมวนร้อน ในโซนการไหลย้อนกลับ ในศูนย์กลางของการพ่น โดยทั่วไปต้องการการไหลแบบนี้ผลิตเปลวไฟเสถียรภาพสูง การไหลแบบนี้ทำให้ปั่นป่วน (turbulence) รุนแรงสูง ซึ่งความเข้มข้นของเชื้อเพลิงมีสูง เป็นผลทำให้ความรุนแรงของการเผาไหม้สูง

ชนิด C รูปแบบการไหลแบบนี้ แทนการพ่นผนังรัศมีเปลวไฟที่ผลิตได้ของการไหลแบบนี้ถูกติดผนัง burner และผนังของห้องเผาไหม้ รูปร่างปากแตร มุมกว้างและหัวฉีดเว้าออกสั้น เปลวไฟที่ได้เหมาะกับเตาหลอมโลหะ

### 3.15 การกระจายอากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้ชั้นใน (Airflow distribution within liner)

ความสำคัญการออกแบบรูปร่างของห้องเผาไหม้ ที่การหาจำนวน ขนาด รูปร่าง ตำแหน่งที่ตั้งรู ที่สร้างขึ้น รูปร่างอากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้ชั้นใน นั้นจะต้องง่าย และประสิทธิภาพและเสถียรภาพของห้องเผาไหม้ การหล่อเย็นที่ผนังและการส่งแก๊สเข้าเทอร์ไบน์ที่อุณหภูมิเหมาะสม ถ้าผนังชั้นในประกอบด้วยแถว มี  $n$  รูซึ่งมีผลต่อขนาด  $d_j$  และอัตราการไหลทั้งหมด  $m_j$  ของอากาศไหลผ่านรูหาได้โดย

$$m_j = \frac{\pi}{4} n d_j^2 \rho_3 U_3 \quad (3.25)$$

$$m_j = \frac{\pi}{4} n d_j^2 (2\rho_3 \Delta P_L)^{0.5} \quad (3.26)$$

$$n d_j^2 = \frac{15.25 m_j}{(\rho_3 \Delta P_L / T_3)^{0.5}} \quad (3.27)$$

$$d_j = \frac{d_j}{C_D^{0.5}} \quad (3.28)$$

เมื่อ  $C_D$  มาจากรูปที่ 3.4 สมการที่ 3.27 และ 3.28 ถูกใช้หาขนาดของรูและจำนวนรูที่เหมาะสมที่สุดของรูอันดับที่ 2 ห้องเผาไหม้ สำหรับห้องเผาไหม้ชั้นในแบบ turbulent ขนาด  $d_j$  อาจจะคำนวณโดยใช้สมการ 3.27 และ 3.28 จำนวนรูที่เหมาะสมค่า  $n$  ใช้ 6 หรือ 8

## ระบบการจำแนกชื่อ (Nomenclature)

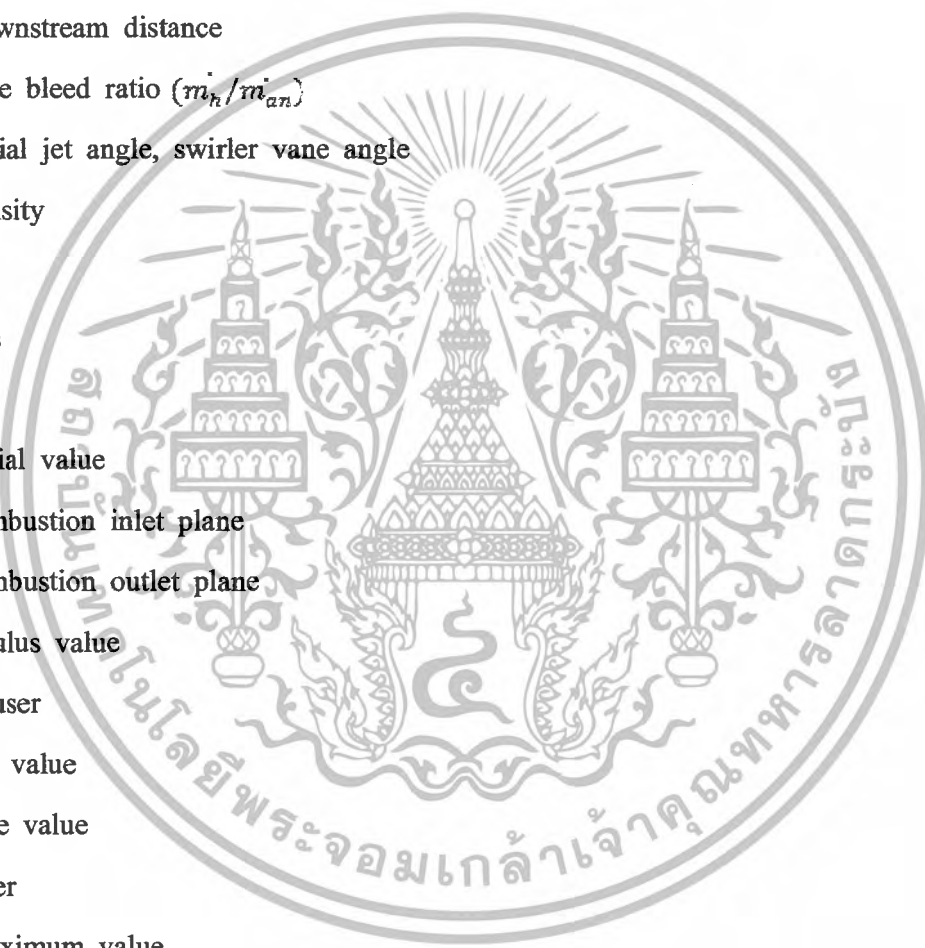
$A$	area
$A_{h,geom}$	hole area, geometric
$A_{h,eff}$	total effective liner hole area
$A_{ann}$	annulus area
$A_r$	area ratio ( $A_{h,geom}/A_{ann}$ )
$C_D$	discharge coefficient
$D_{hub}$	swirler hub diameter (รูปที่ 3.7)
$D_L$	liner diameter or height
$D_i$	inner liner diameter of annular combustor
$D_{sw}$	swirler diameter
$d$	diameter, m
$d_s$	diameter of secondary hole
$K$	hole pressure drop coefficient ( $1+\Delta P_L/\rho_{an}$ )
$k$	ratio of liner to casing area
$L$	length
$M$	Mach number
$\dot{m}$	air mass flow rate
$\dot{m}_e$	entrained mass flow rate
$\dot{m}_f$	fuel flow rate
$m_p$	ratio of primary – zone air flow to total chamber airflow
$\dot{m}_{pr}$	primary – zone recirculation flow rate
$\dot{m}_r$	maximum reverse mass flow rate
$\dot{m}_s$	flow rate through secondary hole
$m_{sn}$	ratio of air entering snout to total chamber airflow
$n$	number of hole

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P	total pressure, Pa
p	static pressure, Pa
q	dynamic pressure, Pa
R	gas constant, 286.9 Nm/(kg.K)
r	radius
$S_N$	swirl number
T	total temperature, K
X	distance downstream of hole
x	downstream distance
$\alpha$	hole bleed ratio ( $\dot{m}_h/\dot{m}_{an}$ )
$\theta$	initial jet angle, swirler vane angle
$\rho$	density

### Subscripts

0	initial value
3	combustion inlet plane
4	combustion outlet plane
an	annulus value
diff	diffuser
g	gas value
h	hole value
L	liner
max	maximum value
pz	primary – zone value
ref	reference value
sw	swirler



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

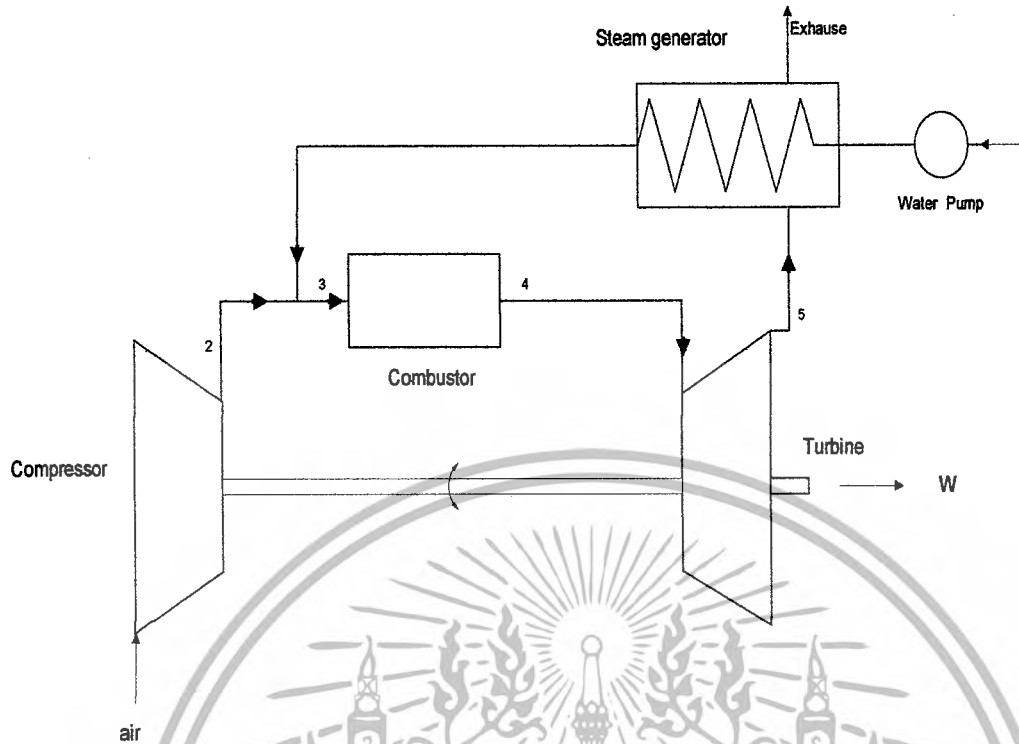
### ทฤษฎีหลักการของการฉีดไอน้ำและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้เป็นเครื่องต้นกำเนิดไอ

#### 4.1 ทฤษฎีและหลักการของการฉีดไอน้ำ

เริ่มมีการนำเอาวิธีการฉีดไอน้ำมาเก็บใช้กับเครื่องยนต์แบบลูกสูบและเครื่องยนต์แบบแก๊สเทอร์ไบน์มาเมื่อไม่นานนัก วัตถุประสงค์นี้จะมีความสัมพันธ์กันระหว่างปริมาณของมลพิษและประสิทธิภาพที่เพิ่มสูงขึ้น และแน่นอนว่าเมื่อมีส่วนผสมที่เกิดจากน้ำปัญหาหลัก ๆ ที่เกิดขึ้นกับระบบนี้ก็คือการกัดกร่อน ดังที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ว่าวิธีการนี้อาศัยแนวคิดแบบง่าย ๆ และตรงไปตรงมา คือ เป็นการฉีดไอน้ำเข้าไปผสมกับอากาศและเชื้อเพลิงที่กำลังเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงอยู่นั้นเพื่อเพิ่มอัตราการไหลของมวลที่ไหลผ่านไปยังเทอร์ไบน์ ซึ่งวิธีการที่นำมาใช้ในการฉีดไอน้ำเข้าร่วมกับระบบสามารถทำได้หลายรูปแบบที่แตกต่างกันออกไปหลายกรณีด้วยกันซึ่งในโครงการนี้จะทดสอบและศึกษาผลกระทบจากการฉีดน้ำและฉีดไอน้ำด้วยกัน 3 กรณี คือ

1. ฉีดน้ำในสถานะของเหลวอุณหภูมิปกติโดยไม่มีการให้ความร้อนแต่จะเป็นน้ำที่มีความดันสูงที่ตำแหน่งก่อนทางเข้าคอมเพรสเซอร์
2. ฉีดน้ำในสถานะไอที่มีอุณหภูมิสูงและความดันสูงที่ตำแหน่งก่อนทางเข้าห้องเผาไหม้
3. ฉีดน้ำในสถานะไอที่มีอุณหภูมิสูงและความดันสูงที่ตำแหน่งก่อนทางเข้าของเทอร์ไบน์

ในกรณีของฉีดน้ำในสถานะของเหลวนั้นเป็นเพียงการนำเอาน้ำที่มีความดันสูงมาฉีดให้เป็นฝอยละอองให้ไหลผ่านเข้าไปยังคอมเพรสเซอร์แล้วศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นซึ่งไม่มีอะไรซับซ้อนนักดังนั้นจะขอกล่าวถึงหลักการสร้างไอน้ำและวิธีการ ใน 2 กรณีหลัง เนื่องจากการฉีดไอน้ำนั้นไอน้ำจะเริ่มฉีดไปตามทิศทางอากาศของคอมเพรสเซอร์ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มงานให้กับคอมเพรสเซอร์เพื่อใช้ในการอัดอากาศ ไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการนี้เกิดขึ้นจากความร้อนของแก๊สไอเสียของเทอร์ไบน์และเครื่องกำเนิดไอน้ำ โดยที่ความดันบรรยากาศนั้นน้ำที่ทางเข้าของปั๊มน้ำจะมีความดันที่  $14.7 \text{ psia} (1 \text{ Bar})$  และอุณหภูมิที่  $80^\circ \text{F} (26.7^\circ \text{C})$  และเมื่อน้ำผ่านเข้าสู่เครื่องกำเนิดไอน้ำและได้รับความร้อนจากแก๊สไอเสียจะทำให้ความดันเพิ่มสูงขึ้นซึ่งสูงกว่าความดันที่ทางออกของคอมเพรสเซอร์อัดอากาศแต่จะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงเพราะอากาศเกิดการอัดตัวทำให้ร้อนขึ้น ไอน้ำจะถูกฉีดออกไปหลังจากเกิดการอัดตัวแต่ทั้งนี้จะต้องมีระยะห่างที่เหมาะสมจากห้องเผาไหม้เพื่อให้เกิดการผสมคลุกเคล้ากันระหว่างไอน้ำกับอากาศที่สมบูรณ์ก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ซึ่งหากเป็นไปตามกระบวนการดังกล่าวแล้วจะส่งผลให้แนวบริเวณช่วงแรกที่ทางเข้าของห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิที่ลดลงและจะส่งผลทำให้ค่ามลพิษ  $\text{NO}_x$  ที่เกิดจากความร้อนในการเผาไหม้มีค่าลดลงตามมาด้วยแผนภูมิรูปภาพประกอบวัฏจักรของการฉีดไอน้ำนั้นจะแสดงให้เห็นดังภาพต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ไอพ่น

#### 4.1.1 การทำงานของวัฏจักร

จากรูปแสดงให้เห็นถึงวัฏจักรการฉีดไอน้ำในกรณีที่มีตำแหน่งและจุดต่าง ๆ ดังภาพซึ่งการทำงานของวัฏจักรจะเริ่มจากตำแหน่งที่ 1 คือ อากาศไหลเข้าคอมเพรสเซอร์ (Compressor) และจะอัดอากาศส่งออกไปยังตำแหน่งที่ 2 และในขณะเดียวกันไอน้ำที่เกิดจากความร้อนของแก๊สไอเสียนั้นจะรวมตัวและคลุกเคล้าก่อนเข้าไประหว่างห้องเผาไหม้ยังตำแหน่งที่ 3 และแก๊สที่ขยายตัวออกจากห้องเผาไหม้ที่ตำแหน่ง 4 จะถูกส่งต่อไปยังเทอร์ไบน์ (Turbine) และขับออกมายังตำแหน่งที่ 5 และแก๊สไอเสียนั้นในตำแหน่งที่ 5 นี้จะถูกนำไปใช้ให้ความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับแหล่งกำเนิดไอน้ำ (Steam generator) ในขณะเดียวกัน ปั๊มน้ำ (Water pump) ก็จะส่งน้ำไปยังแหล่งกำเนิดไอน้ำ (Steam generator) อยู่ตลอดเวลาสำหรับค่าของตัวแปรต่าง ๆ นั้นจะสามารถหาค่าได้ดังต่อไปนี้ค่าเอนทัลปีที่สภาวะ 3 ( $h_3$ ) ของอากาศและไอน้ำนั้นจะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการ

$$h_3 = \frac{(\dot{m}_a h_{2a} + \dot{m}_s h_{3a})}{(\dot{m}_a + \dot{m}_s)} \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอนทัลปีที่ทางเข้าของเทอร์ไบน์นั้น จะได้

$$h_4 = \frac{(\dot{m}_a + \dot{m}_s)h_{4a} + \dot{m}_s h_{4s}}{(\dot{m}_a + \dot{m}_f + \dot{m}_s)} \quad (4.2)$$

อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงที่ต้องการในระบบจะได้ดังนี้

$$\dot{m}_f = \frac{h_4 - h_3}{\eta_b(LHV)} \quad (4.4)$$

เอนทัลปีที่ทางออกของเทอร์ไบน์คือ

$$h_5 = \frac{(\dot{m}_a + \dot{m}_f)h_{5a} + \dot{m}_s h_{5s}}{(\dot{m}_a + \dot{m}_f + \dot{m}_s)} \quad (4.5)$$

ดังนั้นจะสามารถหาทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากเทอร์ไบน์ได้ดังนี้

$$W_t = (\dot{m}_a + \dot{m}_s + \dot{m}_f)(h_4 - h_5)\eta_t \quad (4.6)$$

และจะได้ประสิทธิภาพทั้งหมดของระบบดังนี้

$$\eta_{cyc} = \frac{W_t - W_c}{\dot{m}_f(LHV)} \quad (4.7)$$

#### 4.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อสร้างไอน้ำ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้สร้างไอน้ำเป็นวิธีการที่เกิดจากการนำเอาแก๊สไอเสียร้อนที่ได้จากการเผาไหม้นั้นมาแลกเปลี่ยนอุณหภูมิกันระหว่างน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกับแก๊สไอเสียที่มีอุณหภูมิสูงโดยกำหนดอัตราการไหลของน้ำให้มีอัตราการไหลที่ต่ำเพื่อให้เกิดช่วงเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนมากที่สุดเพื่อที่น้ำนั้นจะได้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอน้ำ

พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนได้แก่

1. พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน

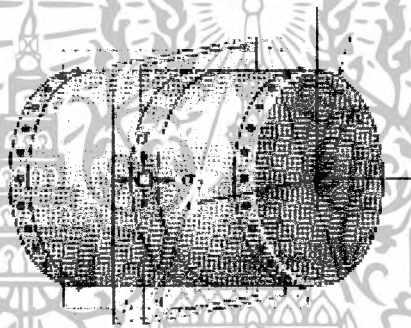
2. ความแตกต่างของอุณหภูมิ
3. ค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อ

#### 4.2.1 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในการออกแบบความดันในถังไอน้ำ

ในการออกแบบหม้อไอน้ำนั้นแน่นอนว่าสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอันดับต้น ๆ คือ พื้นที่แลกเปลี่ยน ความร้อนและอุณหภูมิคงที่ได้กล่าวมาและที่ขาดไม่ได้เลยคือการออกแบบในที่นี่ต้องคำนึงถึงความดันในถังที่ใช้งานด้วยเพื่อความปลอดภัยซึ่งวัสดุที่ใช้ทำนั้น เป็น Stainless 304 ซึ่งมีค่า Yield Strength ( $\sigma_y$ ) เป็น 270 MPa ซึ่งความดันที่เกิดขึ้นในผนังนั้นมีลักษณะที่เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือ

1. ความดันที่เกิดขึ้นในทิศทางของเส้นรอบวง (Circumferential pressure)
2. ความดันที่เกิดขึ้นนั้นตามแนวแกน (Axial direction pressure)

ความดันที่เกิดขึ้นในแต่ละลักษณะนั้นจะทำให้เกิดความเค้น (Stress) ขึ้นในทั้งสองทิศทางซึ่งในการออกแบบนั้นจะต้องคำนึงถึงความเค้นทั้งสองทิศทางเป็นหลัก โดยใช้ค่า ( $\sigma_y$ ) เป็นค่าอ้างอิงเพื่อหาค่า Safety factor มาใช้พิจารณาว่ามีความปลอดภัยอย่างน้อยเพียงใด



รูปที่ 4.2 แสดงถึงทิศทางของความดันที่เกิดขึ้นในแต่ละทิศทาง

#### 4.2.2 การหาความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละทิศทาง

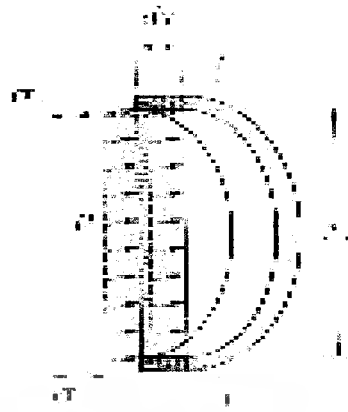
1. ความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางของเส้นรอบวง (Circumferential stress)

$$\sum F_x = 0; \quad 2[\sigma_1(tdy)] - p(2r dy) = 0$$

ดังนั้นจะได้

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t} \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางของเส้นรอบวง

2. ความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางตามแนวแกน (Axial stress)

$$\sum F_y = 0;$$

ดังนั้นจะได้

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2t}$$

$$\sigma_2[(2\pi r t)] - p(\pi r^2) = 0$$

(4.9)

รูปที่ 4.4 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นตามแนวแกน

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\sigma_1, \sigma_2$  = ความเค้นดึงจากที่เกิดขึ้นภายในทิศทางของเส้นรอบวงและตามแนวแกนตามลำดับ

$p$  = ความดันเกจที่เกิดขึ้นภายในถัง

$r$  = รัศมีภายในของถังทรงกระบอก

$t$  = ความหนาของผนัง

ในการคำนวณหาค่านั้นจะได้ค่าความเค้นเป็น 2 กรณีคือค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางของเส้นรอบวง (Circumferential stress)  $\sigma_1$  และค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางตามแนวแกน (Axial stress)  $\sigma_2$  ซึ่งในการคำนวณนั้นค่าที่เกิดขึ้นสูงสุดคือค่า  $\sigma_1$  ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า  $\sigma_2$  ถึง 2 เท่าซึ่งจะสามารถพิสูจน์ได้ด้วยการข้างบนที่ได้กล่าวมาดังนั้นเป็นที่แน่นอนแล้วว่าเมื่อค่าความเค้นที่เกิดขึ้นตามแนวแกนมีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นที่ Yield Strength ( $\sigma_y$ ) แสดงว่าถังดังกล่าวก็จะสามารถรับความดันนี้ได้แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยที่เกิดขึ้นด้วยว่าถังดังกล่าวเมื่อนำมาคำนวณแล้วมีค่า Safety factor มากน้อยเพียงใดเมื่อเทียบกับค่า Yield Strength ( $\sigma_y$ )

### 4.3 ทฤษฎีของการแลกเปลี่ยนความร้อนในถังไอน้ำ

#### 4.3.1 วิเคราะห์อุปกรณ์การแลกเปลี่ยนความร้อน

วิธีความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม (Log mean temperature Difference, LMTD)

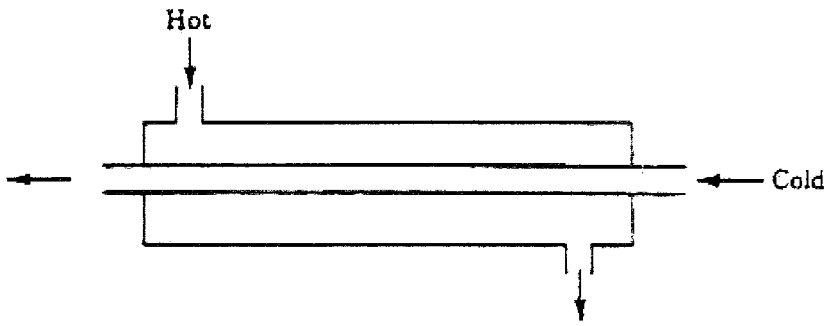
พิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนกัน ตามรูปที่ 1 โดยของไหลอาจจะไหลแบบ Parallel flow หรือ counterflow ก็ได้ และรูปร่างของอุณหภูมิสำหรับการไหลทั้ง 2 กรณี แสดงตามรูปที่ 2 เราสามารถหาการถ่ายเทความร้อนของท่อซ้อนกันได้

$$q = UA\Delta T$$

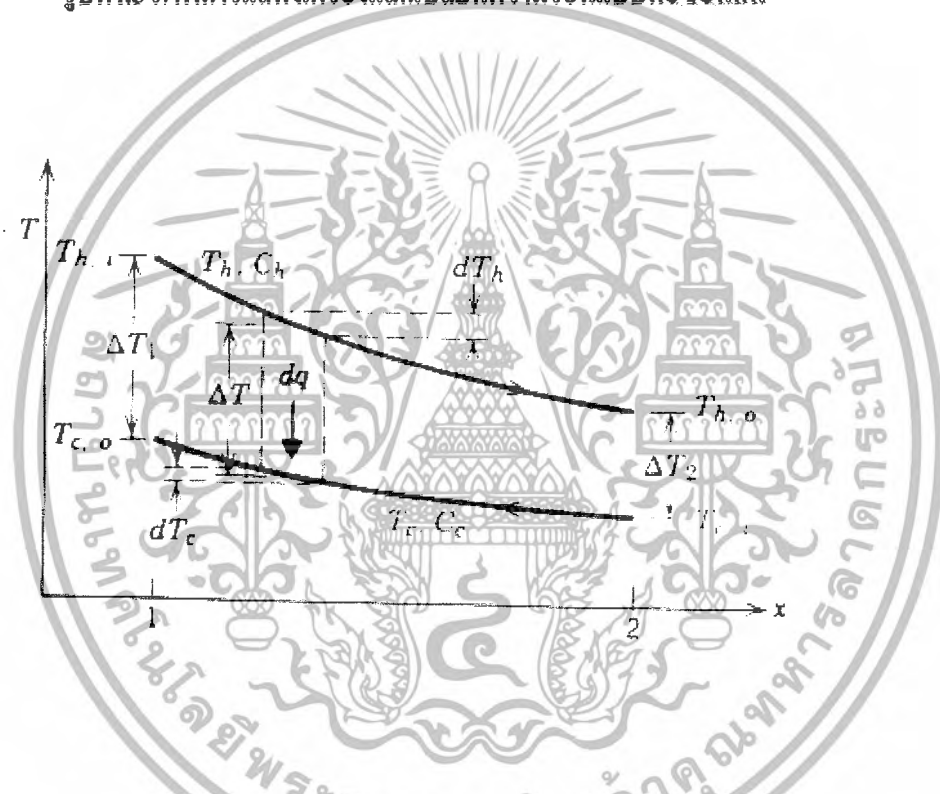
$U$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

$A$  = พื้นผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อน

$\Delta T$  = ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยที่เหมาะสมผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 4.5 ภาพการแสดงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่้อ้อนกัน



รูปที่ 4.6 แสดงรูปร่างของอุณหภูมิสำหรับการไหลตามกันและการไหลสวนทางกันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่้อ้อนกัน

ตามรูปแสดงที่ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็นแปรเปลี่ยนระหว่างทางเข้าและทางออก ดังนั้น เราต้องคำนวณหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้สามารถใช้ได้กับสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 สหพันธ์การพาความร้อน : การไหลแบบลามินาร์ในท่อกลมช่วงบริเวณที่มีการปรับตัวเต็มที่แล้ว (Fully developed region)

การไหลภายในท่อซ้อนกันรูปวงแหวน (Concentric tube annulus)



เมื่อ

$$D_h = D_o - D_i$$

$N_{ui}$  = Nusselt Number

$k$  = Thermal conductivity

$h_i$  = Heat transfer coefficient

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$D_i/D_o$	$Nu_i$	$Nu_o$
0	-	3.66
0.05	17.46	4.06
0.10	11.56	4.11
0.25	7.37	4.23
0.50	5.74	4.43
1.00	4.86	4.86

ตารางที่ 4.1 ค่า สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อซ้อนกัน รูปวงแหวน

#### 4.3.3 สหพันธ์การพาความร้อน : การไหลแบบเทอร์บูเลนต์ในท่อกลม

สมการสำหรับหาสำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลมเรียบ

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n$$

โดยที่  $n = 0.4$  สำหรับการทำให้ร้อน ( $T_s > T_m$ )

และ  $n = 0.3$  สำหรับการทำให้เย็น ( $T_s < T_m$ )



## บทที่ 5

### การสร้างห้องเผาไหม้และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับสร้างไอน้ำ

#### 5.1 การสร้างห้องเผาไหม้

วัตถุประสงค์ของการสร้างห้องเผาไหม้เพื่อใช้ในการทดลองและศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการฉีดไอน้ำเข้าร่วมกับห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบชาร์จนี้ห้องเผาไหม้ที่ได้ทำการสร้างขึ้นนี้ได้พัฒนามาจากปริญญาโทปีการศึกษา 2544 โดยมีการปรับแต่งเพื่อให้มีขนาดและลักษณะที่เหมาะสมกับขนาดและอัตราการไหลอากาศของเทอร์โบชาร์จที่ใช้ในการอัดอากาศเข้าห้องเผาไหม้ นอกจากนี้แล้วห้องเผาไหม้ยังถูกออกแบบให้มีลักษณะที่ปัจจัยส่งผลต่อการเกิดการหมุนวนของอากาศเพื่อคลุกเคล้าส่วนผสมให้ดีมากยิ่งขึ้นซึ่งในการสร้างห้องเผาไหม้จะมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

1. หาขนาดเทอร์โบชาร์จเพื่อนำมาใช้อ้างอิงในการหาขนาดของห้องเผาไหม้
2. ศึกษารูปแบบและลักษณะของห้องเผาไหม้ที่จะทำการสร้าง
3. ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในแท่นทดสอบ
4. วัสดุที่ใช้ในการสร้างห้องเผาไหม้
5. เชื้อเพลิง
6. ความปลอดภัย
7. รูปแบบการปรับปรุงรูปร่างของห้องเผาไหม้
8. ระบบหล่อลื่นเทอร์โบชาร์จ

#### 5.1.2 เทอร์โบชาร์จ

ในการออกแบบและหาขนาดของห้องเผาไหม้จำเป็นต้องทราบถึงขนาดและคุณสมบัติการทำงานของเทอร์โบชาร์จซึ่งในปริญญาโทฉบับที่นำมาเป็นแนวทางและพัฒนานั้นเทอร์โบชาร์จที่ใช้ในนั้นคือ IHI รุ่น RHC 9 ซึ่งจากการค้นหาข้อมูลเบื้องต้นมีอัตราการไหลของอากาศเป็น  $0.5 \text{ kg/s}$  แต่ว่าเทอร์โบที่จะใช้ทำการสร้างห้องเผาไหม้ในที่นี้คือ Holset HX 50 ซึ่งมีอัตราการไหลของอากาศที่สูงกว่าคือ  $0.75 \text{ kg/s}$  ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มขนาดของห้องเผาไหม้ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

#### 5.1.3 ศึกษา รูปแบบและลักษณะของห้องเผาไหม้

ดังที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นแล้วว่าห้องเผาไหม้ในโครงการนี้ได้นำเอาห้องเผาไหม้เก่าที่สร้างไว้แล้วมาเป็นแนวทางในการสร้างห้องเผาไหม้ขึ้นซึ่งลักษณะของห้องเผาไหม้ที่จะทำการสร้างขึ้นนี้เป็นห้องเผาไหม้แบบ 2 ชั้น ส่วนในลักษณะและรูปร่างของห้องเผาไหม้นั้นจะมีลักษณะที่แตกต่างจากเดิมทั้งนี้ถูกออกแบบมาให้เกิดการคลุกเคล้ากับอากาศให้ดียิ่งขึ้นเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์โดยชิ้นส่วนประกอบไปด้วยส่วนหลักคือ

1. เสื้อนอก (Casing)
2. เสื้อใน (Liner)
3. หัวฉีดเชื้อเพลิง(Fuel injection)
4. ระบบจุดระเบิดด้วยหัวเทียน (Glow plug)

### 5.1.3.1 เสื้อนอก (Casing)

เสื้อนอก คือ ส่วนของห้องเผาไหม้ชั้นนอกซึ่งห้องเผาไหม้ชั้นนอกนี้ได้ถูกออกแบบและปรับเปลี่ยนให้มีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมคือลักษณะของเสื้อนอกนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนแรกจะมีลักษณะที่ใหญ่คล้ายกับ diffuser การที่ส่วนแรกของห้องเผาไหม้ชั้นนอกถูกออกแบบให้มีลักษณะเช่นนี้ก็เพราะเพื่อให้มีพื้นที่รับอากาศที่ถูกอัดเข้ามาโดยเทอร์โบชาร์จมากขึ้นและเพื่อติดตั้งท่ออากาศด้านข้างของห้องเผาไหม้และให้อากาศในบริเวณนี้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำให้อากาศไหลผ่านเข้าไปในห้องเผาไหม้ชั้นในและเกิดการลุกเผาไหม้ของอากาศและเชื้อเพลิงและเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นและบริเวณด้านข้างของห้องเผาไหม้ชั้นนอกที่ออกแบบให้อากาศเข้าด้านข้างและติดตั้งท่ออากาศให้มีลักษณะเป็นแบบแนวสัมผัสวงกลม (Tangent) เพื่อให้อากาศที่ถูกอัดจากเทอร์โบชาร์จเกิดการหมุนวนขึ้นในห้องเผาไหม้ ส่วนในห้องเผาไหม้ชั้นนอกในส่วนที่ 2 นั้น ออกแบบให้มีลักษณะที่เป็นทรงกระบอกธรรมดาซึ่งรูปแบบและขนาดของห้องเผาไหม้มีรายละเอียดค่อนข้างซับซ้อนดังจะเห็นได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 ห้องเผาไหม้ชั้นนอก

### 5.1.3.2 เสื้ออิน (Liner)

ห้องเผาไหม้ชั้นในเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญมากต่อการเผาไหม้เพราะห้องเผาไหม้ชั้นในจะมี ส่วนผสมของเชื้อเพลิงและอากาศไหลผ่านและทำการสันดาปทำให้อุณหภูมิสูงจึงมีผลต่ออัตราของ ห้องเผาไหม้ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นห้องเผาไหม้ชั้นนี้ถูกปรับเปลี่ยนมาจากห้องเผาไหม้รุ่นก่อน ๆ ดังนั้นการปรับเปลี่ยนเพื่อให้เหมาะสมกับขนาดของเทอร์โบชาร์จึงทำการเพิ่มขนาดของห้องเผา ไหม้ โดยขนาดของห้องเผาไหม้ชั้นนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเสื้ออิน 140 mm ยาว 490 mm โดย ออกแบบให้ห้องเผาไหม้ชั้นในนี้สามารถถอดประกอบเข้าออกจากห้องเผาไหม้ชั้นนอกได้อย่าง สะดวกทั้งนี้ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะเพื่อความสะดวกในการแก้ไขเมื่อพบข้อบกพร่อง ห้องเผาไหม้ชั้นในนั้น ออกแบบให้มีโซน ของการเผาไหม้อยู่ด้วยกัน 3 โซนคือ

1. Primary zone เป็น โซนของการเผาไหม้ในช่วงแรกซึ่งออกแบบให้มีอากาศไหลผ่านเข้า ไปในรู ปริมาณ 20 % ของอากาศทั้งหมดที่ไหลผ่านเข้าไปในห้องเผาไหม้ ในการทดลองครั้งแรกนั้น เจาะรูขนาด 11 มิลลิเมตร จำนวน 8 รูตามทฤษฎี ซึ่งจากการทดลองแล้วนั้นเปลวไฟในการเผาไหม้ นั้นไม่เสถียรซึ่งจากการตรวจสอบสีของเปลวไฟออกมาเป็นสีส้มและเหลืองส่วนสาเหตุนี้เกิดจาก อากาศภายในห้องเผาไหม้ไม่พอและจำนวนรูที่เจาะน้อยเกินไป และต้องเจาะรูเพิ่ม เป็น 24 รู

2. Intermediate zone เป็น โซนของการเผาไหม้ในส่วนที่ 2 ออกแบบให้มีอากาศไหลผ่าน เข้าไปในรู ปริมาณ 50 % ของอากาศทั้งหมดที่ไหลผ่านเข้าไปในห้องเผาไหม้ เจาะรูขนาด 13 มิลลิเมตร จำนวน 16 รูตามทฤษฎีทั้งนี้หลังจากการทดลองออกมาเป็นเหมือนในช่วง Primary zone อากาศ เข้าห้องเผาไหม้ไม่พอเปลวไฟมีสีเหลืองและส้มจึงทำการแก้ไขเจาะจำนวนรูเพิ่มเป็น 46 รู

3. Dilution zone เป็น โซนการเผาไหม้ส่วนที่ 3 และเป็นส่วนสุดท้ายของการเผาไหม้และ เป็นโซนของการระบายความร้อนก่อนที่จะถูกส่งไปขับเทอร์โบน์โดยการออกแบบการเผาไหม้ใน โซนนี้ให้อากาศผ่านเข้าไปในรูเป็น ปริมาณ 30 % ของอากาศทั้งหมดและทำการเจาะรูห้องเผาไหม้ ขนาด 10 มิลลิเมตร จำนวน 16 รูตามทฤษฎีและจากการทดลองเปลวไฟยังไม่เสถียรเช่นเดิมจึงทำการ เจาะรูขนาด 12 มิลลิเมตรเพิ่มอีกจำนวน 16 รูเปลวไฟจึงมีสีน้ำเงินและไม่สุกกลมออกไปยังเทอร์โบน์ ซึ่งจะส่งผลเสียหายต่อเทอร์โบน์อย่างมาก

จากลักษณะของห้องเผาไหม้ด้านในที่ได้กล่าวมาเบื้องต้นนั้นห้องเผาไหม้ชั้นในนั้นยังมี ลักษณะพิเศษคือมีคอคอดระหว่างช่วง Intermediate zone กับ Dilution zone ซึ่งออกแบบมาให้เกิด การเพิ่มความเร็วก่อนเข้า เทอร์โบน์และจากการเจาะรูห้องเผาไหม้เบื้องต้นตามทฤษฎีและทำการ ทดลองนั้นสาเหตุที่ต้องเจาะรูเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากก็เพราะว่าความดันในห้องเผาไหม้มีปริมาณที่ น้อยกว่าความดันที่ท่ายเอาไว้ภายในห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการคำนวณดังนั้นเพื่อให้อากาศมีปริมาณ ที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ดังนั้นจึงต้องเพิ่มปริมาณจำนวนรูให้กับห้องเผาไหม้ชั้นใน

### 5.1.3.3 หัวฉีดเชื้อเพลิง

หัวฉีดเชื้อเพลิงมีความสำคัญมากเช่นกัน ไม่น้อยไปกว่าอุปกรณ์อย่างอื่นเพราะเปลวไฟจะ ยาวหรือสั้นก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของหัวฉีดที่ทำการออกแบบหากเปลวไฟยาวจะส่งผลต่อเทอร์โบน์

เป็นอย่างมากเนื่องจากเปลวไฟจะลามไปยังเทอร์ไบน์ส่งผลให้เทอร์ไบน์รับความร้อนเกินไปและทำให้เกิดความเสียหายกับเทอร์ไบน์ในที่สุด เช่น ใบของของเทอร์ไบน์บิดเบี้ยว หรือร้ายแรงสุดคืออาจทำให้ใบของเทอร์ไบน์หลอมละลาย สำหรับหัวฉีดในโครงการนี้ได้นำเอาหัวเผาทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาดมาดัดแปลงเป็นหัวฉีดของเชื้อเพลิงซึ่งสะดวกสบายกว่าเพราะมีอุปกรณ์ครบเกือบทุกอย่าง เช่น สายต่อแก๊สที่ใช้ต่อเข้ากับถังแก๊ส วาล์วควบคุมอัตราการไหลเป็นต้น การออกแบบและดัดแปลงหัวฉีดนั้นได้ทำการติดตั้ง Swirl blade หรือใบมีดที่ทำให้อากาศหมุนวนเพื่อให้เกิดการคลุกเคล้าอากาศกับเชื้อเพลิงมากขึ้น โดยติดตั้ง Swirl blade ในหัวฉีดนี้ จำนวน 6 ใบ และออกแบบให้หัวฉีดนี้ยึดกับฝาปิดห้องเผาไหม้และสามารถถอดได้เพื่อให้ง่ายต่อการแก้ไขหากมีข้อบกพร่องเกิดขึ้น



รูปที่ 5.2 ลักษณะของหัวฉีดเชื้อเพลิง

#### 5.1.2.4 ระบบจุดระเบิดด้วยหัวเทียน

หัวเทียนที่ใช้ทำการจุดระเบิดนั้นใช้หัวเทียนของมอเตอร์ไซค์เป็นแบบเกลียวยาวซึ่งมีขายตามท้องตลาดทั่วไปติดตั้งโดยการสร้างแผ่นสแตนเลส โดยการทำให้เกลียวขึ้นให้มีขนาดเดียวกับขนาดของเกลียวหัวเทียนจากนั้นทำการเชื่อมยึดติดบริเวณเสี้ยนนอกของห้องเผาไหม้และจากนั้นใช้เสตนเลสต่อกับแจ๊วหัวเทียน โดยเจาะรูและยึดน็อตจากนั้นก็เจาะบริเวณห้องเผาไหม้ด้านในเพื่อให้แจ๊วที่ต่อมาจากหัวเทียนสามารถผ่านทะลุลงมาถึงบริเวณหัวฉีดโดยใช้ฉนวนทนความร้อนสูงหุ้มบริเวณที่ผ่านห้องเผาไหม้ด้านในเข้ามา และจากนั้นทำแจ๊วเสตนเลสอีกหนึ่งตัวเชื่อมติดกับห้องเผาไหม้ด้านในตั้งระยะห่างให้พอดีและต่อวงจร โดยกระแสไฟจะไหลผ่านแจ๊วหัวเทียนส่วนอีกด้านเป็นแจ๊วที่ติดกับห้องเผาไหม้ชั้นในจะเป็นตัวลงกราวด์โดยวงจรไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการจุดระเบิดนี้ได้นำเอาเครื่อง

ช็อตไฟฟ้ามาเป็นตัวสปาร์กในการจุดระเบิดซึ่งแรงดันไฟฟ้ามีมากพอที่จะทำการสปาร์กให้เกิดประกายไฟเพื่อใช้ในการจุดระเบิดได้

### 5.1.3 ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในแท่นทดสอบ

การติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ในแท่นทดสอบนั้นเริ่มจากติดตั้งตำแหน่งของเทอร์โบชาร์จโดยวางตำแหน่งของเทอร์โบชาร์จไว้ตรงแท่นด้านบนสุดและปรับตำแหน่งของชุดหล่อลื่นแกนเทอร์โบให้มีทิศทางที่เอียงลงด้านล่างเพื่อให้น้ำมันหล่อลื่นไหลตามแรงโน้มถ่วงของโลกป้องกันการรั่วซึมเข้าไปสู่ห้องเผาไหม้และเทอร์โบในส่วนห้องเผาไหม้นั้นวางในแนวอนติคกับเทอร์โบชาร์จ ส่วนชุดหล่อลื่นจะประกอบไปด้วยถังน้ำมันหล่อลื่น ปั้มน้ำมัน จะอยู่ตรงส่วนบริเวณด้านล่างของแท่นทดสอบ

### 5.1.4 วัสดุที่ใช้ในการสร้างห้องเผาไหม้

วัสดุที่ใช้ในการสร้างห้องเผาไหม้นั้นเป็นสแตนเลส 304 เหตุผลที่เลือกใช้นั้นเพราะสามารถทนความร้อนได้สูงเพราะเนื่องจากบริเวณเสื่อในจะมีการสันดาปเกิดขึ้นภายในผนังด้านในของเสื่อในจะร้อนเพราะการเผาไหม้แต่ว่าผนังด้านนอกจะถูกหล่อเย็นด้วยอากาศมีลักษณะคล้ายฟิล์มห่อหุ้มเสื่อในจึงทำให้เสื่อในสามารถทนอุณหภูมิที่สูงได้เพราะเกิดจากการหล่อเย็นนั่นเอง

### 5.1.5 เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นก๊าซ LPG ซึ่งจะไวต่อการจุดระเบิด โดยถังแก๊สที่ใช้มีขนาด 30 kg เมื่อทำการสตาร์ทนั้นต้องอาศัยเทคนิคในการจุดและใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษทั้งนี้เนื่องจากโครงการนี้ต่างจากเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบทั่วไปเพราะมีชุดอุปกรณ์สร้างไอน้ำเพิ่มเข้ามาซึ่งมีลักษณะเป็นท่อยาวคล้ายท่อไอเสีย เมื่อเปิดเชื้อเพลิงแล้วหากกดสตาร์ทแล้ว 3 - 4 ครั้งแล้วยังสตาร์ทไม่ติดจะทำให้เกิดการสะสมของแก๊สเป็นจำนวนมากหากทำการสตาร์ทต่อเมื่อเครื่องยนต์ติดจะทำให้เกิดเสียงดังมากอาจก่อให้เกิดอันตราย ดังนั้นเมื่อกดสตาร์ทแล้ว 3 - 4 ครั้งแล้วเครื่องยังไม่ติดควรเปิดบอลเป่าลมให้ไล่แก๊สที่ตกค้างออกไปให้หมดเสียก่อนเพื่อความปลอดภัย ในการทดลองนั้นประสบปัญหาคือเมื่อใช้ถังแก๊สไปประมาณ 30 – 40 นาทีอย่างต่อเนื่องถึงจะเย็นและความดันในถังแก๊สจะลดลงทำให้ส่งผลต่ออัตราการไหลของก๊าซลดลงตามไปด้วย แนวทางในการลดปัญหาเพื่อแก้้ไขการเกิดความดันลดอย่างรวดเร็วคือ นำถังแก๊สไปแช่น้ำไว้ขณะที่ทดลองจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิระหว่างถังแก๊สและน้ำทำให้ถังแก๊สอุณหภูมิไม่ลดลงมากเกินไปและสามารถใช้ได้นานขึ้น

### 5.1.6 ความปลอดภัย

สำหรับอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในการทดลองนั้นปัจจัยที่จะทำให้เกิดอุบัติเหตุหรืออันตรายขึ้นได้นั้นมีปัจจัยหลัก ๆ คือ เรื่องของเชื้อเพลิงเนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในการจุดระเบิดนั้นเป็นวัสดุที่

ไวไฟมากดังนั้นการทดลองจึงควรจะทำทดลองในสถานที่ ๆ โลงอากาศถ่ายเทได้สะดวกเนื่องจากการเผาไหม้จะเกิดแก๊สไอเสียและเกิดมลพิษซ้ำยังอาจเกิดการลุกไหม้ของเชื้อเพลิงเนื่องจากการรั่วซึมของแก๊สดังนั้นควรเช็คตรวจสอบข้อต่อและสายของแก๊สเสมอเพื่อป้องกันการเกิดอันตรายและต้องอาศัยความเข้าใจในการจุดระเบิดเพื่อป้องกันการสะสมของ

แก๊สในห้องเผาไหม้มากเกินไปซึ่งการจุดระเบิดจะทำให้เกิดเสียงดังมากและส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ของห้องเผาไหม้เสียหายอีกด้วย

เมื่อเกิดก๊าซรั่วตามบริเวณข้อต่อต่าง ๆ ถ้าหากว่าอยู่ที่ใด ๆ มีอากาศถ่ายเทสะดวกจะไม่เกิดการลุกติดไฟแต่หากอยู่ในห้องเมื่อก๊าซรั่วอากาศและเชื้อเพลิงมีส่วนผสมที่พอเหมาะจะเกิดการลุกติดไฟหรือระเบิดขึ้นได้ ดังนั้นก่อนการสตาร์ทเครื่องทุกครั้งระดับเพลิงควรอยู่ในสภาพพร้อมใช้งานอยู่เสมอ ๆ

### 5.1.7 รูปแบบการปรับปรุงรูปร่างของห้องเผาไหม้

การออกแบบให้ชิ้นส่วนของห้องเผาไหม้สามารถถอดแยกชิ้นส่วนได้นั้นก็เพื่อต้องการให้สะดวกและง่ายต่อการแก้ไขข้อบกพร่องหรือทำให้เปลวไฟในห้องเผาไหม้เสถียรเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์และยังรวมไปถึง Swirl blade ที่ติดตั้งอยู่กับหัวฉีดเชื้อเพลิงเพื่อต้องการทำให้อากาศเกิดการหมุนวนและคลุกเคล้ากับอากาศให้มากที่สุดรวมไปถึงการออกแบบให้เสื่อนอกมีลักษณะรูปร่างที่ใหญ่และผิวโค้งเพื่อให้เกิดการหมุนวนของอากาศได้อย่างสะดวกและในอีกจุดหนึ่งก็คือท่ออากาศที่ต่อมาจากเทอร์โบชาร์จเจอร์นั้นที่ต่อเข้ากับเสื่อนอกนั้นออกแบบให้มีลักษณะแนวสัมผัสวงกลม (Tangent) เพื่ออากาศจะได้เกิดการหมุนวนและคลุกเคล้าได้ดียิ่งขึ้นและยังไม่ส่งผลกระทบต่อเปลวไฟมากเกินไป รูของเสื่อในที่นี้จะทำการปรับแต่งให้มีลักษณะที่อากาศสามารถเข้าได้ง่าย ซึ่งจาก ๆ หลายจุดที่ทำการปรับปรุงนั้นจะเห็นได้จากการทดลองว่าเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้นั้นมีสีเป็นสีน้ำเงินทุกจุดตลอดจนถึงทางออกของเทอร์โบชาร์จเจอร์นั้นก่อนข้างจะต่างไปจากทฤษฎีมากทั้งนี้เกิดจากความดันในห้องเผาไหม้มีค่าน้อยดังที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

### 5.1.8 ระบบหล่อลื่นแกนเทอร์โบชาร์จเจอร์

ระบบหล่อลื่นของแกนเทอร์โบชาร์จเจอร์นั้นมีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากแกนเทอร์โบได้รับอุณหภูมิสูงมากซึ่งจำเป็นต้องได้รับการหล่อลื่นและระบายความร้อนไม่เช่นนั้นแล้วจะเกิดความเสียหายกับเทอร์โบชาร์จเจอร์อย่างแน่นอน ระบบหล่อลื่นของเทอร์โบชาร์จเจอร์ประกอบไปด้วย

1. ป้อนน้ำมันหล่อลื่น
2. ออยล์คูลเลอร์
3. ถังเก็บน้ำมันหล่อลื่น
4. วาล์วควบคุมอัตราการไหล
5. มอเตอร์ขับป้อนน้ำมันหล่อลื่น

ในการทดลองสาร์ทเครื่องยนต์นั้นและทดสอบการหล่อลื่นแกนเทอร์โบชาร์จนั้นเมื่อครั้งเริ่มทำการทดลองสาร์ทเครื่องยนต์เมื่อเครื่องยนต์ติดปรากฏปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นไหลผ่านเข้าไปในแกนเทอร์โบชาร์จเป็นจำนวนมากจึงทำให้แตรูน้ำมันในแกนมีขนาดเล็กจึงทำให้น้ำมันรั่วซึมอย่างมากส่งผลทำให้เกิดควันและความหนืดสูงทำให้เครื่องยนต์ไม่สามารถงานได้ด้วยตัวเองต้องคอยใช้โบล้อดอากาศหล่อเลี้ยงเพื่อให้จุดระเบิดอยู่ตลอดเวลาเมื่อทราบถึงสาเหตุจึงทำการแก้ไขโดยการต่อแยกเป็น 3 ทาง คิดตั้งวาล์วที่สามารถปรับอัตราการไหลได้ที่ตำแหน่งก่อนเข้าแกนเทอร์โบชาร์จและอีก 1 ทาง ใหลกลับลงถึงอยู่ตลอดเวลาทั้งนี้เพราะปริมาณที่ปั๊มส่งน้ำมันหล่อลื่นมามีปริมาณที่มากจนเกินไปเมื่อแก้ไขแล้วจึงทำให้เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ด้วยตัวเองและควันลดน้อยลง

## 5.2 การคำนวณหาขนาดห้องเผาไหม้

การหาขนาดของเสื้อนอก(Casing) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าขนาดของห้องเผาไหม้นั้นได้ถูกปรับแต่งพัฒนามาจากปริณญาณิพนธ์ปี 2544 ซึ่งได้นำมาปรับเปลี่ยนให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสื้อนอกและเสื้อในนั้นจะสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$A_{ref} = \left[ \frac{R}{2} \left( \frac{m_3 T_3^{0.5}}{P_3} \right)^2 \frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} \left( \frac{\Delta P_{3-4}}{P_3} \right)^{-1} \right]^{0.5}$$

ซึ่งค่า  $\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3}$  และค่า  $\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}}$  ได้มาจากตารางที่ 3.1 โดยที่ค่า  $m_3$  และ  $T_{03}$  มาจากการใช้วิธีทำนายไว้ว่าความดันที่ทางเข้าของห้องเผาไหม้นั้นมีค่าเป็น 3 bar

จากสมการ

$$R = 287 \text{ Nm/(kg.k)}$$

$$\dot{m}_3 = 0.969 \text{ kg/s}$$

$$T_3 = 429.9612 \text{ k}$$

$$P_3 = 303900 \text{ N/m}^2$$

$$\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} = 40$$

$$\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3} = 0.07$$

จะได้  $A_{ref} = 0.018932 \text{ m}^2$  ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสื้อนอก  $D_{ref} = 0.15526 \text{ m}$

จากข้อมูลข้างต้นในการคำนวณจะเห็นได้ว่าค่า  $\dot{m}_3 = 0.969 \text{ kg/s}$  ทั้งนี้เนื่องจากปริณญาณิพนธ์ปี 2544 นั้นว่าสุม่อตราการไหลของเทอร์โบชาร์จเนื่องจากไม่ทราบย่านความถี่แต่ทางกลุ่มของ

เราจากการค้นหาข้อมูลเทอร์โบ IHI รุ่น RHC 9 มีอัตราการไหลเพียง  $0.5 \text{ kg/s}$  จึงได้ทำการตัดสินใจทำการเพิ่มขนาดของห้องเผาไหม้ขึ้น เป็น 2.5 เท่าซึ่งจะได้  $D_{ref} = 0.190m$  โดยประมาณ

### การหาขนาดเสื้อชั้นใน (Liner)

การหาขนาดห้องเผาไหม้ชั้นในนั้นค่าสามารถหาได้โดยการนำเอาค่าพื้นที่หน้าตัดของห้องเผาไหม้ชั้นนอกมาคูณกับค่าแฟกเตอร์  $K_{opt}$  ซึ่งมาจากค่าสูงสุดในรูปแบบที่ 3.11 มีค่า  $K_{opt} = 0.768c$  แล้วจากนั้นแทนค่าในสมการที่ 3.11

จะได้

$$A_L = 0.768 \times 0.018932 = 0.0145397m^2$$

ดังนั้น

$$D_L = 0.13606m$$

แต่เนื่องจาก P.P Walsh และ P. Fletcher แนะนำว่าช่องว่างระหว่างเสื้อนอกและเสื้อใน การไหลของอากาศควรมี Mach number เป็น 0.1 และค่า Q Curves หาได้จากตารางที่ 1 ในภาคผนวก มีค่าเท่ากับ 6.9414 และสามารถหาค่า  $A_{out}$  ได้จากสมการดังต่อไปนี้

แทนค่า

$$Q_{curv} = \frac{\sqrt{K}}{A_{out} \times P_3}$$

$$6.9414 = \frac{0.969 \times \sqrt{429.9612}}{A_{out} \times 303.9}$$

จะได้

$$A_{out} = 0.0095249m^2$$

ทำการหาเส้นผ่านศูนย์กลางของ  $D_L$  ที่ทำให้ช่องว่างระหว่าง Casing กับ Liner มีค่า Mach number เป็น 0.1

จะได้

$$0.0095249 = \frac{\pi}{4}(0.15526^2 - D_L^2)$$

ดังนั้นจะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ  $D_L$  คือ

$$D_L = 0.1094 \text{ m}$$

เนื่องจากต้องการขยายขนาดของห้องเผาไหม้เป็น 2.5 เท่า ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต้องการคือ

$$D_L = 0.140 \text{ m}$$

การหาขนาดของรูที่อากาศไหลผ่านในช่วง Primary zone

การคำนวณเพื่อหาขนาดของรูที่จะทำการเจาะนั้นได้ออกแบบให้การไหลของอากาศในช่วงนี้ที่ 20% ของอัตราการไหลของอากาศที่  $0.75 \text{ kg/s}$  และเลือกจำนวนรูที่จะเจาะในช่วงนี้เป็น 8 รู โดยใช้สมการที่ 3.27

จากสมการ

$$nd_j^2 = \frac{15.25m_j}{(P_3 \Delta P_L / T_3)^{0.5}}$$

โดยหาค่า  $q_{ref}$  จาก

$$\Delta P_{3-4} = 0.07 \times 303900 \text{ Pa}$$

จะได้

$$\Delta P_{3-4} = 21273 \text{ Pa}$$

จากสมการ

$$q_{ref} = \frac{\Delta P_{3-4}}{40}$$

ดังนั้นจะได้

$$q_{ref} = 531.825 \text{ Pa}$$

จากสมการที่ 3.2

$$\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} = \frac{\Delta P_{diff}}{q_{ref}} + \frac{\Delta P_L}{q_{ref}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าที่อยู่ในรูปของ  $\frac{\Delta P_{diff}}{q_{ref}}$  มีค่าน้อยมากเพราะ  $\Delta P_{diff}$  ควรมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากการสูญเสียความดันใน diffuser เป็นอุปสรรคต่อการเผาไหม้ในภาคปฏิบัติควรทำความเข้าใจความดันสูญเสียใน diffuser ให้มีน้อยที่สุดการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ต้องให้มีค่าน้อยที่สุดเหมือนกัน โดยปัจจัยการสูญเสียความดันหาได้โดยผลของพื้นที่รูทั้งหมดในห้องเผาไหม้ชั้นใน ดังนั้นจะได้

$$\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} \approx \frac{\Delta P_L}{q_{ref}}$$

$$\Delta P_L = 40 \times 531.825$$

เลือกจำนวนรู = 8รู

$$T_3 = 429.9612K$$

$$\dot{m}_j = 0.2 \times 0.969 = 0.1938 kg/s$$

แทนค่าลงในสมการ

$$nd_j^2 = \frac{15.25\dot{m}_j}{(P_3\Delta P_L/T_3)^{0.5}}$$

$$8 \times d_j^2 = \frac{15.25 \times 0.1938}{(303900 \times 21273 / 429.9612)^{0.5}}$$

$$d_j = 0.008587$$

แทนค่า  $d_j = 0.008587$  ลงในสมการที่ 3.28 และเลือกค่า  $C_D$  จากรูปที่ 3.5

จากสมการ

$$d_h = \frac{d_j}{C_D^{0.5}}$$

แทนค่า

$$d_h = \frac{d_j}{0.6^{0.5}}$$

$$d_h = 0.0110m$$

ดังนั้นจะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูในช่วง Primary zone เท่ากับ 0.0110 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การหาขนาดของรูที่อากาศไหลผ่านในช่วง Intermediate zone

การคำนวณเพื่อหาขนาดของรูที่จะทำการเจาะนั้นได้ออกแบบให้การไหลของอากาศในช่วงนี้ที่ 50% ของอัตราการไหลของอากาศที่  $0.75 \text{ kg/s}$  และเลือกจำนวนรูที่จะเจาะในช่วงนี้เป็น 16 รู โดยใช้สมการที่ 3.27

จากสมการ

$$nd_j^2 = \frac{15.25\dot{m}_j}{(P_3\Delta P_L / T_3)^{0.5}}$$

แทนค่า

$$= \frac{15.25 \times 0.375}{(303900 \times 21273 / 429.9612)^{0.5}}$$

$$d_j = 0.00960 \text{ m}$$

แทนค่า  $d_j = 0.00960 \text{ m}$  ลงในสมการที่ 3.28 และเลือกค่า CD จากรูปที่ 3.5

จากสมการ

$$d_h = \frac{d_j}{C_D^{0.5}}$$

แทนค่า

$$d_h = \frac{0.00960}{0.6^{0.5}}$$

$$d_h = 0.01239 \text{ m}$$

ดังนั้นจะได้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางใน Intermediate zone เท่ากับ  $0.01239 \text{ m}$

### การหาขนาดรูที่อากาศไหลผ่านในช่วง Dilution zone

การคำนวณเพื่อหาขนาดของรูที่จะทำการเจาะนั้นได้ออกแบบให้การไหลของอากาศในช่วงนี้ที่ 30% ของอัตราการไหลของอากาศที่  $0.75 \text{ kg/s}$  และเลือกจำนวนรูที่จะเจาะในช่วงนี้เป็น 16 รู โดยใช้สมการที่ 3.27

จากสมการ

$$nd_j^2 = \frac{15.25\dot{m}_j}{(P_3\Delta P_L / T_3)^{0.5}}$$

แทนค่า

$$= \frac{15.25 \times 0.225}{(303900 \times 21273 / 429.9612)^{0.5}}$$

$$d_j = 0.007436m$$

แทนค่า  $d_j = 0.007436m$  ลงในสมการที่ 3.28 และเลือกค่า CD จากรูปที่ 3.

$$d_h = \frac{d_j}{C_D^{0.5}}$$

$$d_h = \frac{0.007436}{0.6^{0.5}}$$

$$= 0.00959m$$

ดังนั้นจะได้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง Dilution zone เท่ากับ 0.00959 m

จากทฤษฎีที่นำมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาขนาดของรูที่จะทำการเจาะบนห้องเผาไหม้ชั้นในนั้นเมื่อทำการเจาะตามทฤษฎีที่ทำการคำนวณหาค่าออกมาได้นั้นแล้วนำไปทดลองไปผลปรากฏว่าเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้นั้นไม่เสถียรเมื่อมองจากช่องมองไฟนั้นจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนถึงสีของเปลวไฟที่ออกมาเป็นสีเหลืองและสีส้มซึ่งเป็นสีของเปลวไฟที่มีความร้อนปานกลางและสังเกตเห็นถึงเปลวไฟที่ลุกลามไปยังบริเวณทางออกของเทอร์ไบน์ซึ่งส่งผลให้ท่อที่ต่อระหว่างเทอร์ไบน์กับห้องเผาไหม้ได้รับความร้อนที่สูงมากทั้งนี้สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นก็เพราะว่าความดันในห้องเผาไหม้มีค่าน้อยกว่าความดัน  $P_3$  ที่ทำนายเอาไว้ในการคำนวณหาขนาดก่อนทางเข้าห้องเผาไหม้มากซึ่งแน่นอนว่าแนวทางแก้ไขก็ต้องเพิ่มจำนวนรูซึ่งจะเห็นได้จากสมการด้านล่าง

$$nd_j^2 = \frac{15.25\dot{m}_j}{(P_3\Delta P_L / T_3)^{0.5}}$$

เมื่อ  $P_3$  มีค่าน้อยจะส่งผลทำให้ขนาดของรูที่ต้องเจาะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและจำนวนรูที่เจาะเพิ่มนั้นต้องเจาะเพิ่มมากขึ้นจากเดิมถึง 3 เท่าจากเดิมที่คำนวณได้จากทฤษฎีเมื่อทำการเจาะแล้วผลปรากฏว่าเปลวไฟเสถียรมากขึ้น สีของเปลวไฟที่มองจากช่องมองไฟ มีสีน้ำเงินไปจนสุดเปลวไฟซึ่งส่งผลให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้นอย่างมาก

### 5.3 หลักการคำนวณหาขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)

$$\text{จากสูตร } \dot{q} = \dot{m}_c c_p \Delta T$$

$$\begin{aligned} \dot{q} &= 8.3162 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \times 2.0118 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \times (140 - 120.21) \text{ K} \\ &= 0.03311 \text{ kW} \end{aligned}$$

ต้องใช้พลังงานความร้อนในการอุ่นน้ำเท่ากับ 0.03311 กิโลวัตต์

$$\text{จากสูตร } \dot{q} = U A \Delta T_{\text{lm}}$$

$$\Delta T_{\text{lm}} = \frac{374.79 - 360}{\ln \left( \frac{374.79}{360} \right)} = 367.345 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$U = \frac{1}{\left( \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \right)}$$

สำหรับไอเสียไหลผ่านท่อ

$$\begin{aligned} Re_D &= \frac{4\dot{m}_h}{\pi D_i \mu} = \frac{4 \times 0.75}{\pi \times 0.0762 \times 360.832 \times 10^{-7}} \\ &= 347305.2635 \end{aligned}$$

แสดงว่าเป็นการไหลแบบเทอร์บูแลนต์

$$\begin{aligned} Nu_D &= 0.023 Re_D^{4/5} Pr^{0.3} = 0.023 \times 347305.2635^{4/5} \times 0.70487^{0.3} \\ &= 562.43 \end{aligned}$$

$$h_i = Nu_D \frac{k}{D_i} = \frac{560.70 \times 55.854 \times 10^{-3}}{0.0762}$$

$$= 411.208 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

สำหรับน้ำไหลผ่านท่อวงแหวน

$$\begin{aligned} Re_D &= \frac{4\dot{m}_c}{\pi(D_o + D_i)\mu} = \frac{4 \times 8.3167 \times 10^{-4}}{\pi(0.0762 + 0.1778) \times 135.524 \times 10^{-7}} \\ &= 307.6176 \end{aligned}$$

แสดงว่าเป็นการไหลแบบลามินาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{D_i}{D_o} = 0.4285$$

จากตารางได้

$$Nu_o = 4.3728 ; D_h = D_o - D_i = 0.1016 \text{ m}$$

$$h_o = \frac{Nu_o k}{D_h} = \frac{4.3728 \times 26.336 \times 10^{-3}}{0.1016}$$

$$= 1.1334 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{1.1334} + \frac{1}{411.208}}$$

$$= 1.13028$$

$$L = \frac{q}{\pi U D_i \Delta T_{lm}} = \frac{83.1117}{\pi \times 1.13028 \times 0.0762 \times 357.345} = 33.31 \text{ cm}$$

คำนวณหาขนาดถังไอน้ำ

$$\Sigma F_x = 0;$$

จากสมการที่

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t}$$

ความดันใช้งานที่ต้องการเท่ากับ 3 บาร์แต่ในการออกแบบให้ถังมีซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นมากที่สุดจะเกิดขึ้นตามแนวแกนวัสดุที่ใช้ทำถังไอน้ำนั้นเป็น Stainless 304 และวัสดุที่จะใช้ทำมีความหนาเท่ากับ 1.5 mm และมีค่า Yield Strength ( $\sigma_y$ ) เป็น 270 MPa เพื่อความปลอดภัยได้กำหนดค่า Safety factor เท่ากับ 14 ที่กำหนดให้ค่า Safety factor มีค่ามากถึงเพียงนี้ก็เพราะว่าถังที่ใช้สร้างไอน้ำนั้นไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจเช็คทางวัสดุถึงรอยร้าวหรือตามคด้วยเครื่องมือที่ทันสมัยดังนั้นเพื่อให้เกิดความปลอดภัยจึงต้องกำหนดให้ค่า safety factor มีค่ามากไว้ก่อนดังนั้นจะได้

$$\sigma_y = 270 \text{ แทนค่าในสมการที่ 4.8}$$

จะได้

$$\frac{270 \times 10^6 \text{ Pa}}{14} = \frac{3 \times 10^5 \text{ Pa} \times r}{(1.5/1000)}$$

$$r = \frac{270 \times 10^6 \text{ Pa} (1.5/1000) \text{ m}}{(3 \times 10^5) \text{ Pa} \times 14}$$

$$r = 0.0964 \text{ m}$$

ดังนั้นค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากความดันในถังจะได้เป็น

$$\sigma_1 = \frac{Pr}{t}$$

$$\sigma_1 = \frac{3 \times 10^5 \text{ Pa} \times 0.0964 \text{ m}}{(1.5/1000) \text{ m}}$$

$$= 19.28 \text{ MPa}$$

ค่าของความเค้นที่เกิดขึ้นในทิศทางของเส้นรอบวงสามารถหาค่าได้เช่นกันโดยคำนวณดัง

ตัวอย่างด้านบน (Circumferential stress)

$$\sum F_x = 0; \quad 2[\sigma_1(tdy)] - p(2r dy) = 0$$

จะได้

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t}$$

## บทที่ 6

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 6.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

- 6.1.1 เพื่อหาสมรรถนะของห้องเผาไหม้ที่ทำการสร้างขึ้น
- 6.1.2 เพื่อศึกษาผลกระทบจากการฉีดไอน้ำเข้าร่วมกับห้องเผาไหม้
- 6.1.3 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของการเผาไหม้ระหว่างฉีดไอน้ำและไม่มีการฉีด

#### 6.2 ขั้นตอนการสาร์ทเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ

ขั้นตอนที่ 1 ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เริ่มจากต่อสายแก๊ส LPG เข้ากับถังแก๊สเพื่อจะทำการส่งเชื้อเพลิงเข้าไปยังห้องเผาไหม้

ขั้นตอนที่ 2 เปิดระบบหล่อลื่นแก๊สเทอร์โบชาร์จโดยการเสียบปลั๊กไฟมอเตอร์ให้ไปขับปั๊มน้ำมันหล่อลื่น

ขั้นตอนที่ 3 เปิดโบลเป่าลมเพื่อส่งอากาศไปยังห้องเผาไหม้โดยย่านที่เครื่องสตาร์ทติดจะอยู่ในตำแหน่งที่โบลเป่าลมใกล้ปิดสุดเพราะหากเปิดลมแรงไปจะทำให้เป่าแก๊สแรงส่งผลให้จุดระเบิดไม่ติด

ขั้นตอนที่ 4 เปิดเชื้อเพลิง LPG ให้ผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศโดย ในการทดลองตำแหน่งที่สตาร์ทติดได้ง่าย อัตราการไหลเชิง ปริมาตรของเชื้อเพลิงอยู่ที่ 7-7.5 ลิตร ต่อ นาที พร้อมทั้ง กดปุ่มวงจรสปาร์กไฟเพื่อจุดระเบิดพร้อมกับสังเกตระว่างหากกดสวิทช์จุดระเบิดประมาณ 3-4 ครั้งแล้วยังสตาร์ทไม่ติดให้ปิดแก๊สก่อนและเปิด โบลเพื่อไล่แก๊สเพราะหากสตาร์ทตอนแก๊สสะสมกันมากจะทำให้เกิดการระเบิดเสียงดังมากและอาจก่อให้เกิดอันตราย

ขั้นตอนที่ 5 หากสตาร์ทไม่ติดให้ปรับส่วนผสมของอากาศลดลงในตำแหน่งที่ต่ำสุดและเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงหรือเช็กระบบจุดระเบิดอาจมีปัญหาระบบดังกล่าว

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อทำการสตาร์ทติดแล้วให้ปรับตำแหน่งของโบลเป่าลมไปที่เปิดสุดและสังเกตเปลวไฟที่ช่องมองไฟและการหมุนของใบพัดและเสียงของเทอร์โบชาร์จหากเปลวไฟเริ่มเสถียรและมีเสียงวี๊ดของเทอร์โบชาร์จให้ปิดโบลเป่าลมและดึงออกจากนั้นก็เร่งเครื่องให้ได้อุปกรณ์ตามที่ต้องการ

#### 6.3 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองนั้นจะแบ่งออกเป็น 4 กรณี ดังนี้ คือ

1. ทดลองเครื่องที่สภาวะปกติโดยไม่มีฉีดไอน้ำเข้าไปภายในระบบ
2. ทดลอง โดยการฉีดไอน้ำก่อนเข้าห้องเผาไหม้ที่ความดัน 3bar
3. ทดลอง โดยการฉีดไอน้ำทางออกห้องเผาไหม้ที่ความดัน 3bar
4. ทดลอง โดยการฉีดน้ำที่สถานะของเหลวอุณหภูมิห้องก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ขั้นตอนที่ 1** เมื่อเครื่องยนต์สตาร์ทติดแล้วจะเร่งเครื่องยนต์ไปประมาณ 3 นาที เพื่อให้รอบคงที่จากนั้นเริ่มบันทึกค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ 5 จุด คือ 1 อุณหภูมิที่ทางเข้าคอมเพรสเซอร์ 2 อุณหภูมิที่ทางเข้าห้องเผาไหม้ 3 อุณหภูมิที่ทางออกห้องเผาไหม้ 4 อุณหภูมิที่ทางออกเทอร์ไบน์ 5 อุณหภูมิที่ทางออกท่อไอเสีย

**ขั้นตอนที่ 2** จากนั้นทำการบันทึกค่าความดันทั้งหมด 6 จุด ซึ่งอ่านค่าจาก manometer และเกจวัดความดันซึ่งได้แก่ 1 ค่าความดันก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์ 2 ค่าความดันก่อนทางเข้าห้องเผาไหม้ 3 ค่าความดันที่ทางออกของห้องเผาไหม้ 4 ค่าความดันที่ทางออกของเทอร์ไบน์ และความดันอีก 2 จุดสุดท้าย คือจุดที่ 5 และ 6 จะเป็นความดัน สแตติก (Static) และเป็นค่าความดัน สแตกเนชัน (Stagnation) เพื่อนำค่า 2 ค่านี้มาหาค่าความเร็วที่ออกจากเทอร์ไบน์

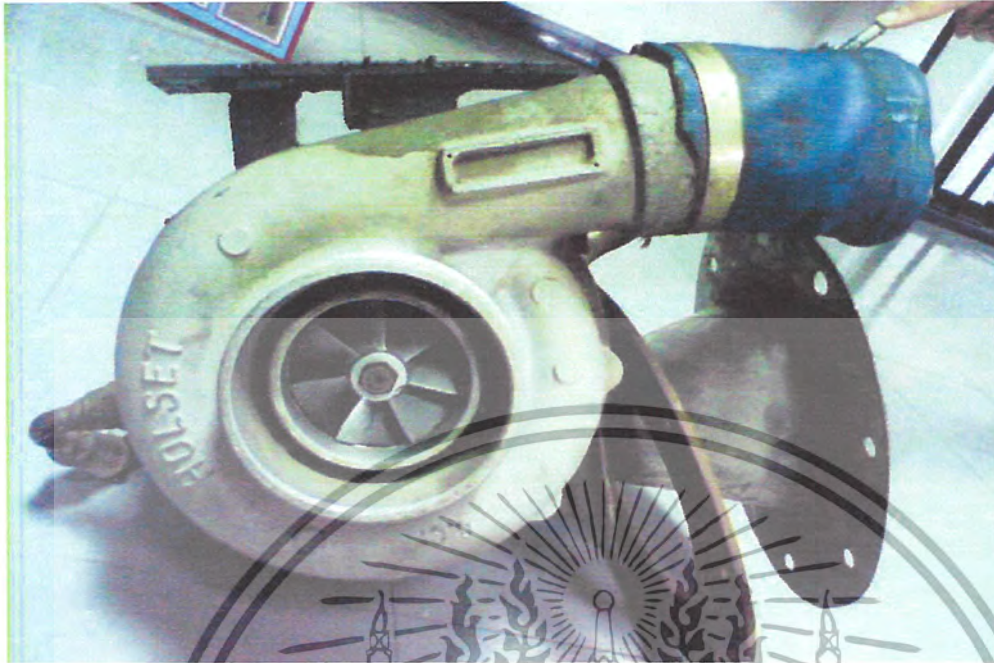
**ขั้นตอนที่ 3** วัดค่าความเร็วรอบโดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วรอบวัดที่ทางเข้าคอมเพรสเซอร์และบันทึกค่าผลที่ได้

**ขั้นตอนที่ 4** วัดความเร็วของอากาศที่ทางเข้าคอมเพรสเซอร์โดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วลมและบันทึกผลที่ได้

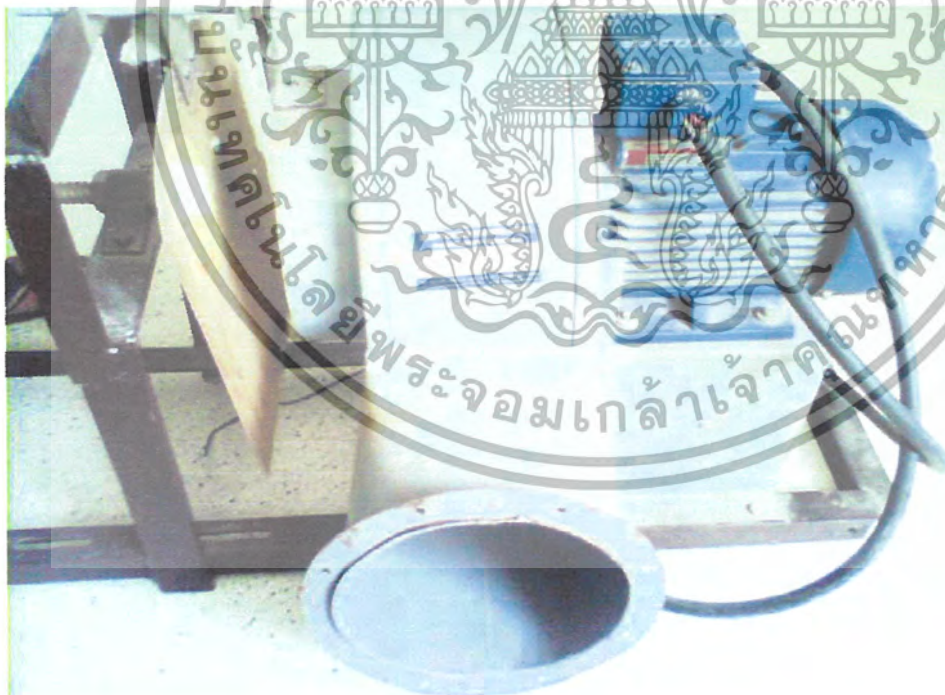
**ขั้นตอนที่ 5** บันทึกอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงและบันทึกค่าความดันเกจในถังแก๊สทุกครั้งเพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง

ในการทดลองกรณีที่ 2 3 และ 4 นั้นขั้นตอนการทดลองนั้นทำเหมือนกันกับในกรณีที่ 1 เพียงแต่มีข้อแตกต่างคือจะฉีดไอน้ำและน้ำเพิ่มในจุดต่าง ๆ และในขั้นตอนของการฉีดไอน้ำนั้นต้องควบคุมให้ไอน้ำโดยการปล่อยไอน้ำออกจากวาล์วเพื่อควบคุมความดันในถังเพื่อความปลอดภัยและให้เป็นไปตามเงื่อนไขการทดลอง

#### 6.4 รูปและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลอง



รูปที่ 6.1 เทอร์โบชาร์จ Holset รุ่น HX-50

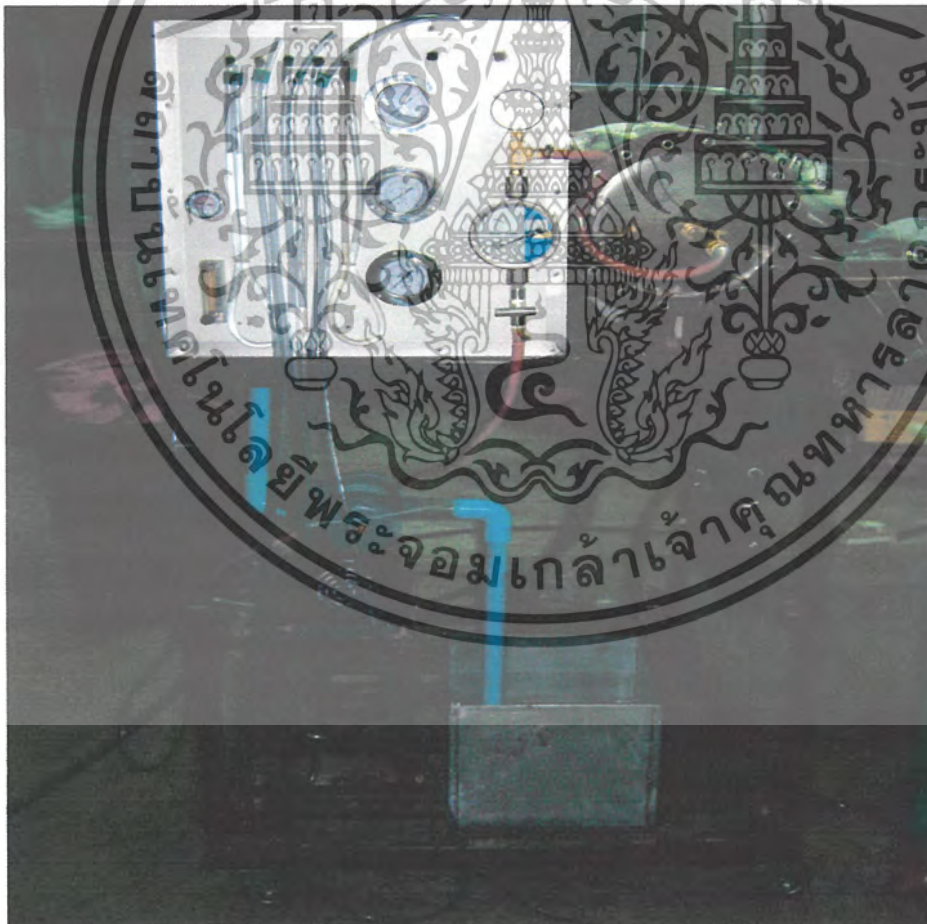


รูปที่ 6.2 เครื่องอัดอากาศ (Blower)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

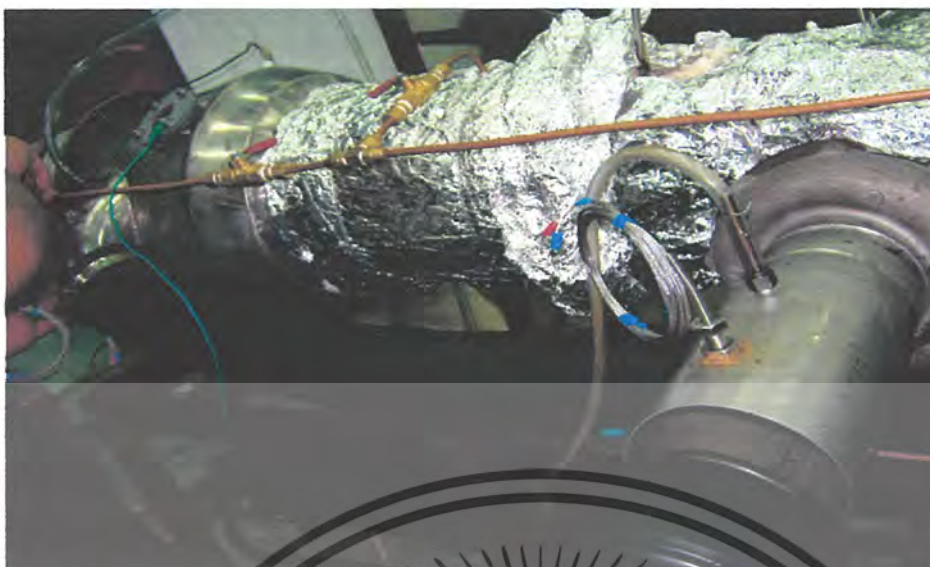


รูปที่ 6.3 ลักษณะของเครื่องกำเนิดไฮโดรเจนและการติดตั้ง



รูปที่ 6.4 แสดงถึงอุปกรณ์วัดความดันและอัตราการไหลเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 การวัดอุณหภูมิทางเข้าคอมเพรสเซอร์

#### 6.4 ผลการทดลอง

##### ไม่มีการเกิดไอน้ำและน้ำ

เชื้อเพลิง g/min	อากาศที่ ทางเข้า m/s	$T_1$ $^{\circ}\text{C}$	$T_2$ $^{\circ}\text{C}$	$T_3$ $^{\circ}\text{C}$	$T_4$ $^{\circ}\text{C}$	$T_5$ $^{\circ}\text{C}$	$P_s$ Static mm	$P_s$ Stag mm	$P_1$ mm	$P_2$ mm	$P_3$ mm	$P_4$ mm	ความเร็ว รอบ RPM	ความดัน ในถังแก๊ส bar
5	7.5	36.1	43.2	793.9	535.4	510.8	10	25	-3	310	267	9	15553	5
7.5	8	36.4	47	785.9	533.7	510.4	10	32	-5	395	310	9	17155	5
10	9.8	36.1	47.5	727.5	530.5	503.9	15	45	-7	585	470	12	21007	5
12.5	11.8	36.7	48.3	676.5	529.4	510.2	15	60	-8	683	528	15	22542	5
15	12	36.6	50.7	675.6	527.7	510.0	20	75	-9	1000	700	17	25688	5
17.5	15	37.2	53.7	672.9	519.4	501.9	30	95	-10	1250	920	22	30989	5
20	20.5	37	54.2	637.1	458.5	442.8	50	165	-20	2000	2000	30	37016	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ฉีดน้ำที่ตำแหน่งก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์

เชื้อเพลิง l/min	อากาศที่ ทางเข้า m/s	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$P_5$ Static	$P_5$ Stag	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	ความเร็ว รอบ RPM	ความดัน ในถังแก๊ส
5	5.1	28.9	34.9	520.1	517.8	508.9	6	20	-1.5	225	185	6	13571	5
7.5	6.2	28.4	35.2	566.4	491.8	482.1	9	32	-2	360	280	7	17060	5
10	7.4	28.3	35.2	597.2	490.1	471.5	11	39	-4.5	490	354	9	18953	5
12.5	7.9	28.1	35.5	652.6	478.2	461.1	19	55	-5	670	530	14	21993	5
15	9.8	28.3	36.4	679.0	496.0	482.4	17	73	-5	1000	1000	15	25047	5
17.5	13.3	28.3	38.9	781.9	486.4	475.4	18	90	-10	1300	1250	26	28849	5
20	17.0	28.1	37.9	887.5	512.8	508.7	30	101	-10	1400	1250	17	31744	5

### ฉีดไอน้ำที่ตำแหน่งก่อนเข้าห้องเผาไหม้

เชื้อเพลิง l/min	อากาศที่ ทางเข้า m/s	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$P_5$ Static	$P_5$ Stag	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	ความเร็วรอบ RPM	ความ ดันใน ถังแก๊ส
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7.5	6.4	33.0	44.7	870.8	584.4	567.3	7.5	27	-2.5	314	266	8	14949	4.5
10	6.9	33.8	44.3	922.0	614.1	593.6	9	31	-3	346	303	8	16747	4.5
12.5	9.6	34.2	45.4	810.1	580.4	561.2	10	38	-6	590	530	9	17886	4.5
15	10.2	34.6	47.5	903.7	554.9	535.9	15	55	-12	700	700	13	22051	5
17.5	15.1	35.4	50.7	808.9	529.1	505.5	25	90	-16	800	800	18	28283	5
20	20.4	35.9	53.2	607.8	483.0	456.7	48	160	-18	2000	2000	30	35816	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ฉีดน้ำที่ทางออกของห้องเผาไหม้ก่อนเข้าเทอร์ไบน์

เชื้อเพลิง l/min	อากาศที่ ทางเข้า m/s	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$P_5$ Static	$P_5$ Stag	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	ความเร็วรอบ RPM	ความ ดันใน ถังแก๊ส
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7.5	6.5	33.2	44.3	874.2	588.6	571.7	7	29	-2	315	265	8	15126	4
10	7.5	33.2	44.5	923.0	592.9	575.9	10	34	-2.5	394	343	8	17214	4
12.5	11.3	34.4	43.1	907.0	578.8	550.5	15	62	-5	710	605	11	20753	4.5
15	14.6	34.7	45.5	894.7	561.6	538.7	17	64	-7	730	660	14	22725	5
17.5	15.8	35.5	53.1	698.9	498.7	470.7	33	110	-10	1000	1000	19	26952	5
20	19.8	36.2	56.6	608.5	481.9	452.5	46	155	-11	1900	1900	26	34400	5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณทำงานที่สภาวะปกติ

72

อัตราไหล เชื้อเพลิง (kg/s)	อัตราการ ไหลอากาศ (kg/s)	งานที่ทางเข้า compressor (kw)	work compressor (kw)	heat input (kw)	work turbine (kw)	q stream (kw)	leave the exhaust pipe (kw)	mechanical power (kw)	internal energy (kw)	ความเร็วรอบ (RPM)
0.000959	0.069367	0.777322	0.500239	53.858998	-18.622513	-1.760440	34.753606	0.015394	34.738211	15553
0.001439	0.073906	0.850794	0.794123	56.513554	-19.377361	-1.776936	37.004174	0.016484	36.987689	17155
0.001918	0.090605	1.017115	1.049344	63.878521	-18.664985	-2.489234	44.790761	0.030098	44.760662	21007
0.002398	0.108874	1.290333	1.309392	71.056859	-16.910870	-2.161697	54.584018	0.036491	54.547526	22542
0.002878	0.110756	1.301613	1.543245	71.982072	-17.292483	-2.027518	55.506929	0.049646	55.457282	25688
0.003358	0.138450	1.712780	2.324284	89.290578	-22.612886	-2.506582	68.208175	0.091699	68.116476	30989
0.003837	0.188747	2.320480	3.329671	115.552374	-36.145473	-3.088174	81.968878	0.191765	81.777112	37016

ผลการคำนวณฉีดน้ำก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์

73

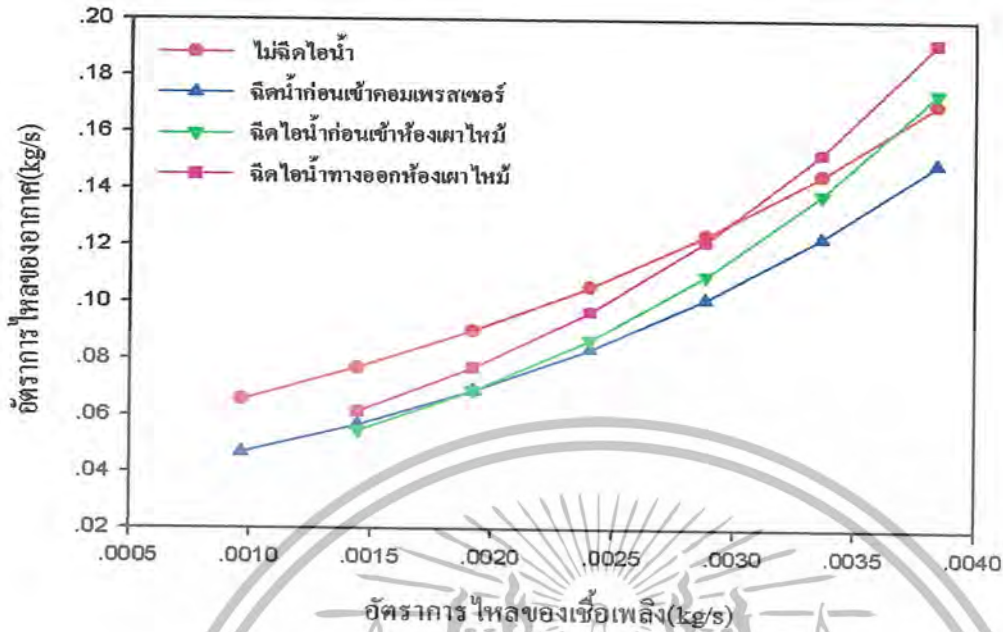
อัตราไหล เชื้อเพลิง (kg/s)	อัตราการ ไหลอากาศ (kg/s)	งานที่ทางเข้า compressor (kw)	work compressor (kw)	heat input (kw)	work turbine (kw)	q stream (kw)	leave the exhaust pipe (kw)	mechanical power (kw)	internal energy (kw)	ความเร็วรอบ (RPM)
0.000959	0.048301	0.190324	0.293239	24.186654	-0.137593	-0.443126	24.089497	0.006456	24.083040	13571
0.001439	0.058814	0.202499	0.405183	32.267324	-4.570470	-0.588287	27.716249	0.011437	27.704812	17060
0.001918	0.070204	0.235218	0.491815	40.790068	-7.840599	-1.347151	32.329351	0.016494	32.312857	18953
0.002398	0.074994	0.236449	0.563516	47.869128	-13.608465	-1.323334	33.737295	0.030121	33.707173	21993
0.002878	0.092969	0.313410	0.766528	61.898012	-17.769174	-1.306087	43.902689	0.034352	43.868336	25047
0.003358	0.126112	0.430236	1.365498	97.542136	-39.148335	-1.435814	58.753722	0.048672	58.705049	28849
0.003837	0.161318	0.526898	1.631044	143.715722	-64.252324	-0.688553	80.932787	0.107961	80.824825	31744

## ผลการคำนวณฉีดไอน้ำก่อนเข้าห้องเผาไหม้

อัตราไหล เชื้อเพลิง (kg/s)	อัตราการ ไหลอากาศ (kg/s)	งานที่ทางเข้า compressor (kw)	work compressor (kw)	heat input (kw)	work turbine (kw)	q stream (kw)	leave the exhaust pipe (kw)	mechanical power (kw)	internal energy (kw)	ความเร็วรอบ (RPM)
0.000959	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.001439	0.059796	0.482943	0.707316	51.054225	-17.756306	-1.054555	33.433623	0.010780	33.422842	14949
0.001918	0.064296	0.571302	0.683274	58.357428	-20.551635	-1.359773	37.700596	0.014424	37.686172	16747
0.002398	0.089314	0.831557	1.016011	70.811090	-21.450210	-1.771421	49.437028	0.021367	49.415661	17886
0.002878	0.094718	0.920589	1.240664	84.163877	-34.497510	-1.859608	49.968012	0.033056	49.934955	22051
0.003358	0.139803	1.480069	2.186893	110.78251	-41.474043	-3.421213	69.554224	0.077704	69.476520	28283
0.003837	0.188531	2.108606	3.344398	119.72686	-35.411194	-5.166537	84.602139	0.187495	84.414644	35816

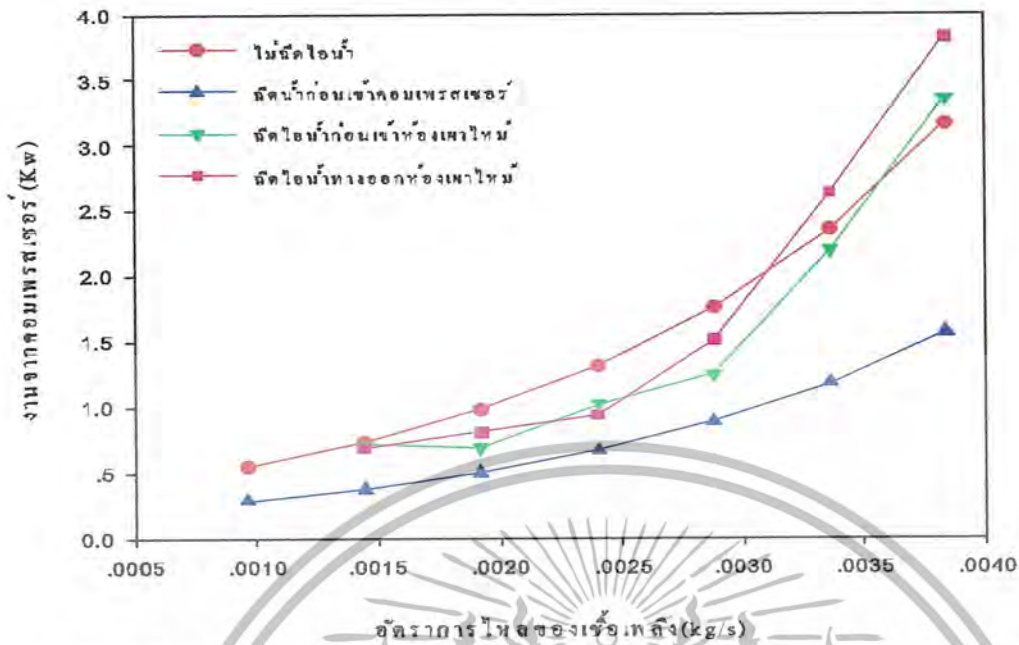
## ผลการคำนวณฉีดไอน้ำทางออกของห้องเผาไหม้

อัตราไหล เชื้อเพลิง (L/min)	อัตราการ ไหลอากาศ (kg/s)	งานที่ทางเข้า compressor (kw)	work compressor (kw)	heat input (kw)	work turbine (kw)	q stream (kw)	leave the exhaust pipe (kw)	mechanical power (kw)	internal energy (kw)	ความเร็วรอบ (RPM)
0.000959	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.001439	0.060600	0.502455	0.681335	52.062901	-17.976897	-1.057909	34.211885	0.010263	34.201621	15126
0.001918	0.070028	0.580219	0.801250	63.655050	-24.017263	-1.228437	39.790819	0.017057	39.773762	17214
0.002398	0.105071	1.001297	0.933923	94.336866	-36.153008	-3.074931	57.044147	0.037057	57.007089	20753
0.002878	0.135598	1.338962	1.503978	120.322307	-47.841447	-3.219059	72.104740	0.053330	72.051410	22725
0.003358	0.146320	1.565386	2.629884	98.765904	-31.160961	-4.250009	67.550204	0.102367	67.447836	26952
0.003837	0.182931	2.099031	3.816105	105.944807	-25.012353	-5.600113	81.247477	0.173481	81.073996	34400



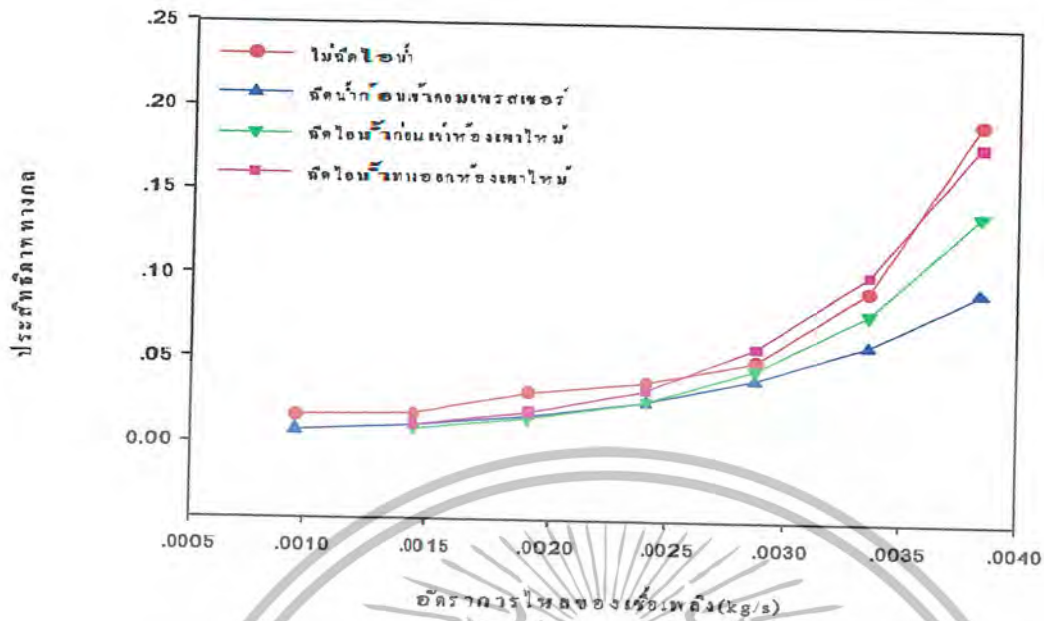
รูปที่ 6.6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ไอน้ำของเครื่องจักรและอากาศที่ค่าต่าง ๆ โดยเซตค่าอัตราการใช้ไอน้ำของเครื่องจักรที่มีปริมาณที่คงที่ซึ่งจากกราฟนั้นจะเห็นว่า การฉีดไอน้ำส่งผลไม่มากนักกับอัตราการใช้ไอน้ำของเครื่องจักรที่แสดงนั้นมาจากวิธีการ fitting curve จึงทำให้ปริมาณอากาศที่อยู่ในกรณีของฉีดไอน้ำทางออกห้องเผาไหม้ ได้สูงสุดแต่ในความเป็นจริงอากาศที่มีปริมาณมากที่สุดอยู่ในกรณีของไม่ฉีดไอน้ำ



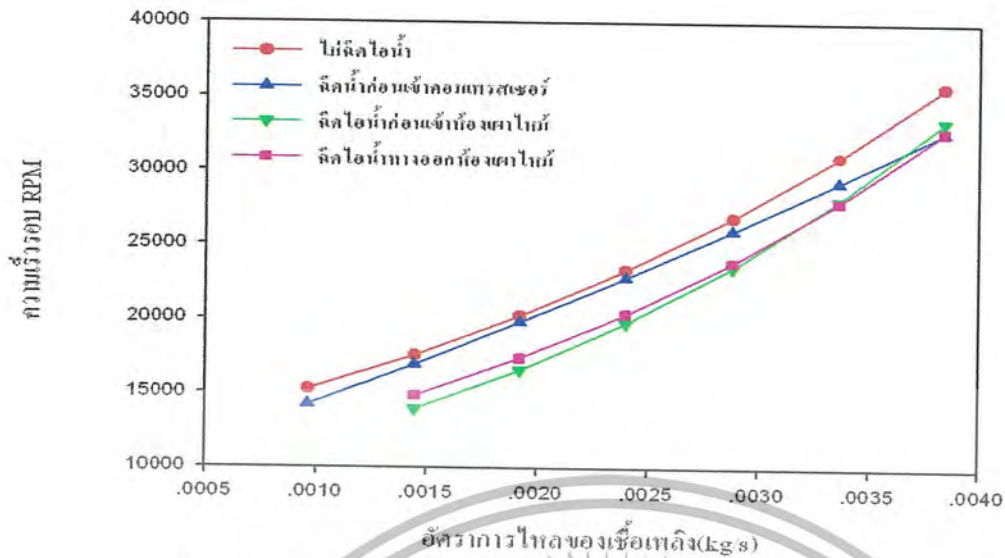
รูปที่ 6.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างงานจากคอมเพรสเซอร์และอัตราการไหลของเชื้อเพลิง

รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างคอมเพรสเซอร์กับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงในกรณีของฉีดไอน้ำทางออกของเทอร์ไบน์และก่อนเข้าห้องเผาไหม้เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของที่ไม่มีกรฉีดไอน้ำกรณีของฉีดไอน้ำได้งานจากคอมเพรสเซอร์มีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นแต่ในส่วนของกรณีฉีดน้ำคอมเพรสเซอร์จะทำให้งานที่ได้จากคอมเพรสเซอร์ลดลงจากเดิมทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้งานลดลงเกิดจากการฉีดน้ำหน้าคอมเพรสเซอร์ส่งผลต่อการเผาไหม้เป็นอย่างมากทำให้เปลวไฟเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและสีส้มจึงทำให้แรงขับที่ได้จากการเผาไหม้ลดลงด้วย



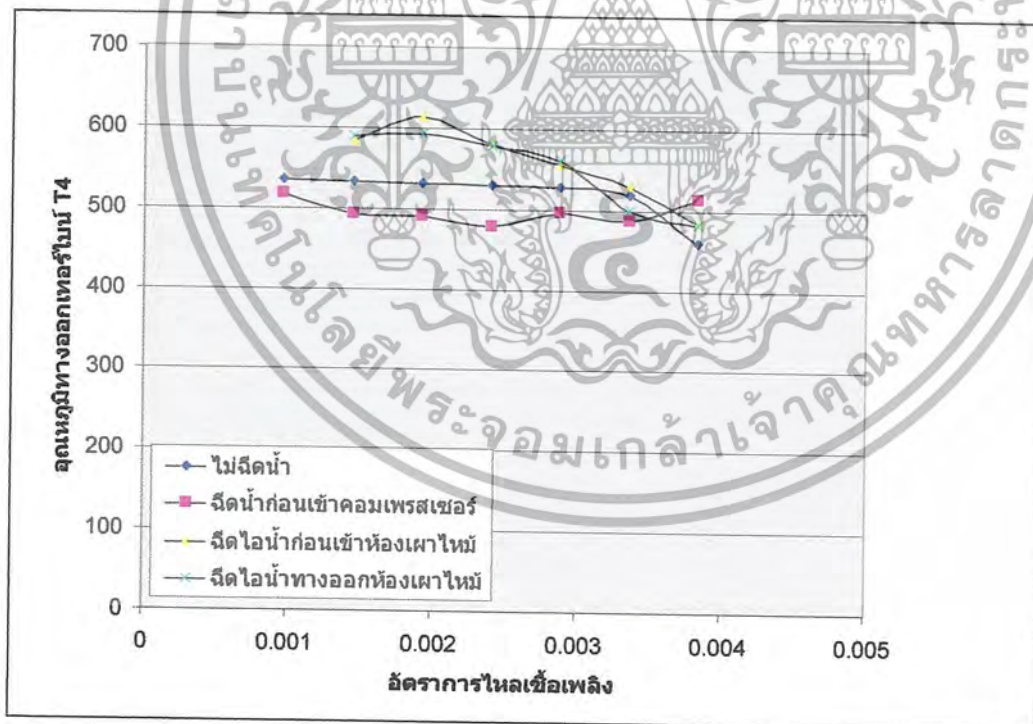
รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราคาราโบลของเครื่องดื่มและประสิทธิภาพเชิงกล

ประสิทธิภาพทางกลนั้นยังไม่เป็นที่แน่ชัดมากแต่เมื่อพิจารณาจากกราฟแล้วนั้นการฉีดน้ำที่ทางออกของเทอร์ไบน์มีแนวโน้มที่ค่าจะ ได้งานเพิ่มมากขึ้นแต่ในกรณีของฉีดก่อนเข้าห้องเผาไหม้นั้นมีปริมาณที่ต่ำกว่าทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับระยะทางที่ติดตั้งตำแหน่งฉีดไอน้ำซึ่งอยู่ใกล้ทางเข้าห้องเผาไหม้เกินไปในส่วนของฉีดน้ำเข้าคอมเพรสเซอร์นั้นประสิทธิภาพลดลงอย่างชัดเจน



รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้เชื้อเพลิงและความเร็วรอบ

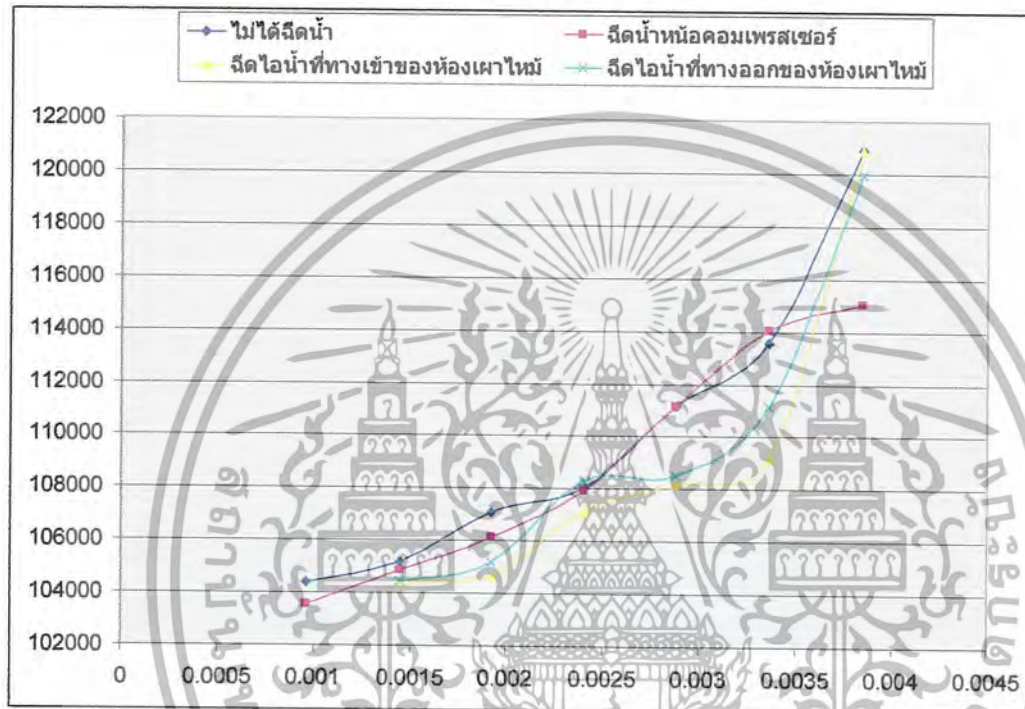
ความเร็วรอบของเครื่องยนต์นั้นเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละกรณีแล้วความเร็วรอบค่อนข้างเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงแต่ในกรณีของไม่ฉีดไอน้ำยังมีความเร็วรอบที่สูงสุดและฉีดน้ำหน้าคอมเพรสเซอร์มีค่าความเร็วรอบที่มีค่าต่ำสุด



รูปที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ T4 และอัตราการใช้เชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ทางออกของเทอร์โมไบนและอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ 3 กรณีนี้อย่างไรก็ตาม ในทุกจุดนั้นมีแนวโน้มเหมือนกันคือ เมื่ออัตราการไหลของแก๊ส LPG มีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นอุณหภูมิที่วัดค่าได้โดยเทอร์โมไบนก็เปิดกลับมีค่าลดลงทั้งนี้ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าเกิดจากเปลวไฟที่ลามยาวมาถึงเทอร์โมไบนเปิดและการเผาไหม้ที่มีลักษณะอากาศเกินเมื่อการเผาไหม้มีอากาศมากอุณหภูมิจึงลดลงและในขณะเดียวกันเปลวไฟก็มีความยาวที่สั้นลงด้วยเมื่อปริมาณอากาศไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในปริมาณที่มากเกินไป



6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันทางเข้าห้องเผาไหม้และอัตราการไหลของเชื้อเพลิง

รูปที่ 6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันทางเข้าห้องเผาไหม้และอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเมื่อพิจารณาจากกราฟด้านบนในกรณีของนิมน้ำหน้าคอมเพรสเซอร์มีค่าความความดันต่ำสุดแต่ในอีก 3 กรณี มีค่าความดันของห้องเผาไหม้ที่ทางเข้าห้องเผาไหม้ใกล้เคียงกันแต่การฉีดน้ำ 2 กรณีจะมีความดันที่เพิ่มขึ้นค่อนข้างราบเรียบน้อยเส้นกราฟจึงมีลักษณะเป็นเส้นโค้งไปมา

## 6.5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

เมื่อทำการทดลองโดยการฉีดน้ำและฉีดไอน้ำในกรณีต่าง ๆ ด้วยกัน 3 กรณีนั้นสิ่งแรกที่สังเกตเห็นได้ก่อนในการทดลองโดยไม่มีกรบันทึกค่าคือเปลวไฟที่มีสีของเปลวไฟแสดงให้เห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ว่ากรีดน้ำและฉีดไอน้ำส่งผลกระทบต่ออาคารเผาไหม้อย่างแน่นอนและในการทดลองค่าที่ได้มาจากการทดลองเมื่อทำการฉีดไอน้ำที่เห็นได้ค่อนข้างชัดเจนคือ งานที่ได้จากคอมเพรสเซอร์ งานที่ได้ทางกลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่แนวโน้มที่ขึ้นนั้นมีไม่มากนักหากมีการทดลองในช่วงเวลาที่ยาวนานและปรับค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิง ได้ละเอียดยิ่งขึ้นคงจะทำให้เห็นผลที่ชัดเจนมากกว่านี้ในส่วนของการฉีดน้ำหน้าคอมเพรสเซอร์จากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าการกลับส่งผลให้ค่าต่าง ๆ ในการทดลองมีค่าที่ลดลงกว่าเดิม ทั้งนี้สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นก็เพราะน้ำมีอุณหภูมิที่ต่ำเมื่อไหลผ่านเข้าไปสู่ห้องเผาไหม้จึงส่งผลกระทบต่ออาคารเผาไหม้อย่างชัดเจนทำให้ค่าต่าง ๆ เช่น งานทางกล งานจากคอมเพรสเซอร์ และอุณหภูมิ เป็นต้น

### วิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าที่ต่างไปจากทฤษฎีของการเผาไหม้โดยเฉพาะค่าอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิ T3 ที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลติดตั้งตรงบริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ก่อนทางเข้าเทอร์ไบน์ความผิดพลาดเกิดขึ้นคือเมื่อเพิ่มปริมาณเชื้อเพลิงมากขึ้นแต่อุณหภูมิทางออกของห้องเผาไหม้ที่วัดค่าโดยเทอร์โมคัปเปิ้ลกลับมีค่าอุณหภูมิที่ลดลง เมื่อผลที่ได้ออกมามีค่าเช่นนี้แล้วจึงส่งผลทำให้ไม่สามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ ในส่วนของค่าการทดลองอื่นก็มีค่าความดันซึ่งการวัดความดันจะใช้เป็นมานอร์มิเตอร์และเพรสเชอร์เกจเมื่อที่ความเร็วรอบสูง ๆ จะไม่สามารถใช้มานอร์มิเตอร์วัดค่า ได้จึงจำเป็นต้องสลับเปลี่ยนมาใช้เป็นแบบเพรสเชอร์เกจดังนั้นแน่นอนว่าจะต้องเกิดความผิดพลาดขึ้นอย่างแน่นอนไม่มากนัก

### แนวทางการพัฒนาแนะนำและปรับปรุงแก้ไข

สิ่งที่ต้องปรับปรุงและพัฒนาต่อไปก็คือ

1. สร้างห้องเผาไหม้ชั้นในขึ้นมาใหม่โดยปรับปรุงและเจาะรูให้สามารถวัดค่าอุณหภูมิ T 3 ได้  
อย่างถูกต้อง
2. หัวฉีดเชื้อเพลิงสามารถเพิ่มขนาดให้มีอัตราการไหลที่มีปริมาณที่มากขึ้นได้เพราะในปัจจุบันหัวฉีดที่ใช้มีส่วนผสมที่บางมากแต่เปลวในการเผาไหม้นั้นก็สมบูรณ์เป็นสีน้ำเงินเกือบสุด  
เปลว
3. ควบคุมอุณหภูมิถังแก๊สและควบคุมความดันในถังแก๊สให้คงที่เพื่อใช้ในการทดลอง
4. แก้ไขระบบป้อนน้ำจากปั๊มเข้าสู่ถังไอน้ำให้มีอัตราการไหลที่คงที่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DO NOT SCALE DRAWING

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

FINISH:  
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

TITLE:

SIGNATURE

NAME

DATE

DRAWN

CHKD

APPVD

MFG

QA

MATERIAL:

DWG NO.

# ห้องเผาไหม้

WEIGHT:

SCALE:1:10

SHEET 1 OF 1

A4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



REVISION

DO NOT SCALE DRAWING

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

FINISH:

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS

SURFACE FINISH:

TOLERANCES:

LINEAR:

ANGULAR:

SIGNATURE

NAME

DATE

DRAWN

CHKD

APPVD

MFG

Q/A

TITLE:

หัวฉีด

DWG NO.

MATERIAL:

Q/A

SHEET 1 OF 1

SCALE:1:2

WEIGHT:

2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A4

A

B

C

D

# บรรณานุกรม

- [1] R.C.Hibberler ,“**Engineering Mechanics Static**”, prentice Hall Inc.Singapore, 1995
- [2] Yunus A.cengel,Michael A.Boles, “**Thermodynamic and Engineering An Engineering Approach 5<sup>rd</sup> Edition**”, McGraw Hill,New York, 2006
- [3] Stephen R. Turns’An ,“**Introduction to Combustion**”, McGraw Hill, New York, 1996
- [4] M.M.El.Wakil ,“**Powerplant Technology**”, McGraw Hill, New York, 1984
- [5] Bruce R.Munson,Donald F.Young,Theodore H.Okiishi “**Fundamentals of fluid mechanic**”, John Wiley & Sons. Inc, 1974
- [6] M.V. Heitor, “**Velocity and Scalar Measurement in Model and Real Gas Turbine Combustors**”,Portugal,1987
- [7] Hawthorne, W. R., ed. “**Aerodynamics of Turbines and Compressor**”, Oxford U.P,1964
- [8] FIELDING,D. and TOPPS,J. E. C., “**Thermodynamic Data for the Calculation of Gas Turbine Performance**”, H.M.S.O., A.R.C., R & M., 1959
- [9] BENSON, R. S. “**A review of methods for assessing loss coefficients in radial gas turbine**”, Int. J. mech. Sci.,1970
- [10] Arthur H. Lefebvre, “**Gas Turbine Combustion**”, West Lafayette Indiana, 1983
- [11] Bach T. Vu and F.C. Gouldin, “**Flow Measurement in a Model Swirl Combustor**”,AIAA Journal,1981
- [12] J. P. HOLMAN, “**Heat Transfer**”, McGrew Hill, New York, 1989
- [13] Inropera, Frank P., and David P. Dewitt, “**Fundamentals of heat and Mass Transfer**”, Wiley, New York, 1990
- [14] Wolf, Helmut, “**Heat Transfer**”, Harper & Row, London, 1983
- [15] ศศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์, “**การถ่ายเทความร้อน**”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้