

การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน
ของห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

**THE STUDY OF AXIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION
IN COMBUSTION CHAMBER OF GAS TURBINE ENGINE**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **55001**
วัน,เดือน,ปี - 7 มิ.ย. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เมื่อกรณีสืบค้นข้อมูลดังกล่าวทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน
ของห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ
THE STUDY OF AXIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION
IN COMBUSTION CHAMBER OF GAS TURBINE ENGINE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนของห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

THE STUDY OF AXIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION IN COMBUSTION
CHAMBER OF GAS TURBINE ENGINE

ผู้จัดทำ

1. นาย ชาคิชัย แก้วสุวรรณสุข รหัสประจำตัว 43010615
2. นาย ญาณินท์ สุขสิงขร รหัสประจำตัว 43010620
3. นาย ธีรพงษ์ ผลวัฒน์นะ รหัสประจำตัว 43010627
4. นาย สัมฤทธิ์ ศรีสุวรรณรัตน์ รหัสประจำตัว 43010796



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. ภาณุวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน
ของห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

นาย ชาดิชัย แก้วสุวรรณสุข	43010615
นาย ญาณินท์ สุขสิงขร	43010620
นาย ฉัฐพงษ์ ผลวิริยะ	43010627
นาย สัมฤทธิ์ ศรีสุวรรณรัตน์	43010796
ผศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2546	

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ เป็นการศึกษาถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนของห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงต่าง ๆ กัน เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของเชื้อเพลิงกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ โดยมีเป้าหมายของการศึกษา คือ หาอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่ทำให้การเผาไหม้ในห้องเผาไหม้เป็นไปอย่างมีเสถียรภาพ และนอกจากนี้ยังมีการพัฒนาห้องเผาไหม้ให้มีการผสมกันของอากาศและเชื้อเพลิงในอัตราส่วนที่เหมาะสมโดยการสังเกตลักษณะของเปลวไฟในห้องเผาไหม้

**The study of Axial Temperature Distribution
in Combustion Chamber of Gas Turbine Engine**

Chartchai Kaewsuwatnasuk

Yanin Suksingkhon

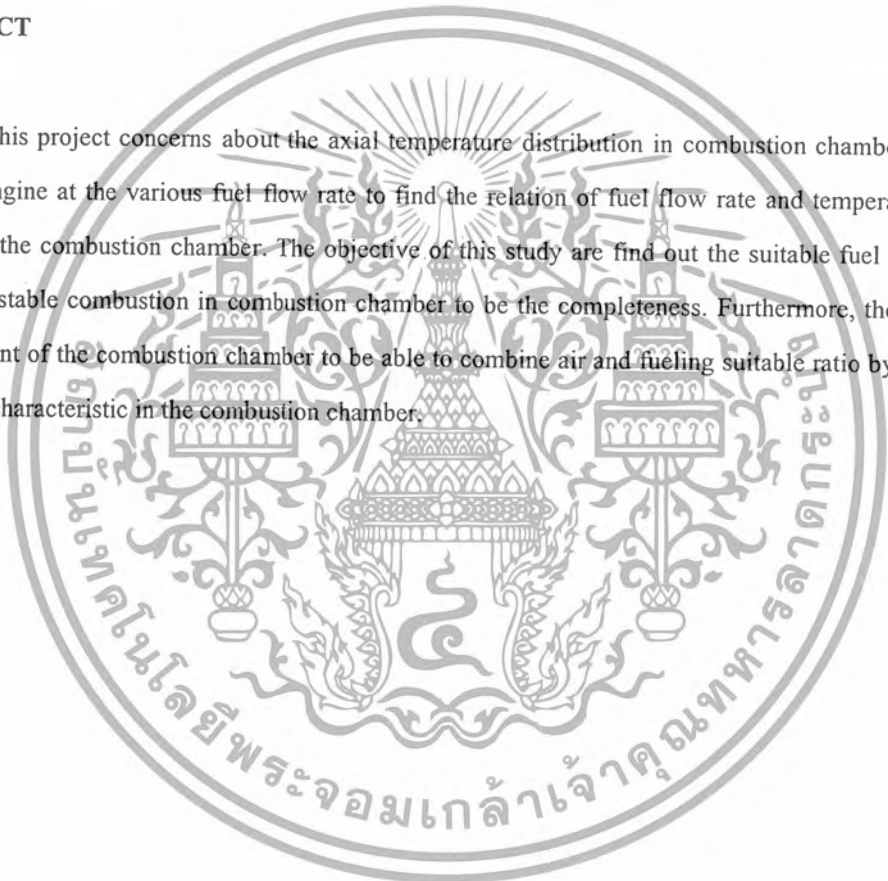
Natthapong Polwatthana

Samlit Srisuwannarat

Assist. Prof. Dr. Jaruwat Jareonsuk Advisor

ABSTRACT

This project concerns about the axial temperature distribution in combustion chamber of Gas Turbine engine at the various fuel flow rate to find the relation of fuel flow rate and temperature that happen in the combustion chamber. The objective of this study are find out the suitable fuel flow rate that favor stable combustion in combustion chamber to be the completeness. Furthermore, there is the development of the combustion chamber to be able to combine air and fueling suitable ratio by observe the flame characteristic in the combustion chamber.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับการช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ ผศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และคอยช่วยเหลือมาตลอดจนโครงการนี้สำเร็จได้ด้วยดี รวมทั้ง ผศ.รวิชัย นาคพิพัฒน์ และ อาจารย์ คำริห์ จันทรแสงสุก ที่คอยให้ความรู้และให้คำแนะนำที่มีประโยชน์มากมาย ขอขอบคุณพี่โก้และพี่มณฑาที่ให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจเสมอมา

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.1.1 ข้อดีของเครื่องยนต์กังหันแก๊สเมื่อติดตั้งทิวเวอร์เทอร์ไบน์	1
1.1.2 ข้อเสียของเครื่องยนต์กังหันแก๊สเมื่อติดตั้งทิวเวอร์เทอร์ไบน์	2
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงาน	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์	4
2.1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์	4
2.1.1 ขบวนการอัด (Compression)	4
2.1.2 ขบวนการสันดาป (Combustion)	4
2.1.3 ขบวนการขยายตัวครั้งที่ 1 (Expansion)	4
2.1.4 ขบวนการขยายตัวครั้งที่ 2 (Expansion)	4
2.2 วัฏจักรในอุดมคติ (Ideal Cycle)	5
2.2.1 วัฏจักรเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์	5
2.3 วัฏจักรที่แท้จริง (Actual Cycle)	6
2.4 ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์	7
2.5 การสูญเสียความดัน	9
2.6 การสูญเสียทางกล	9
2.7 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะ	10
บทที่ 3 แก๊สเชื้อเพลิงและการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง	12
3.1 เชื้อเพลิงก๊าซ	12
3.1.1 ประเภทของก๊าซ	12
3.1.2 ก๊าซ LPG	12
3.2 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	3.2.1	เปลวไฟแก๊ส	17
	3.2.2	ระบบการเผาไหม้ในเตาหุงต้มและอุตสาหกรรม	30
	3.2.3	หัวเผาในบรรยากาศเปิด	30
	3.2.4	หัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิดอากาศดิ่งแก๊ส	37
	3.2.5	หัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิดผสมในอุโมงค์	38
	3.2.6	หัวเผานชนิดแก๊สผสมอากาศภายหลังหรือเปลวไฟชนิดแพร่	39
บทที่	4	ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics)	41
	4.1	บทนำ	41
	4.2	ลักษณะการสูญเสียความดัน (Pressure Losses parameter)	41
	4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและการสูญเสียความดัน	43
	4.3.1	ห้องเผาไหม้ชั้นนอก (Casing Area)	43
	4.3.2	ห้องเผาไหม้ชั้นใน (Liner)	43
	4.4	การไหลในท่อวงแหวน (Flow in Annulus)	45
	4.4.1	มีค่านัมเบอร์ ณ ตำแหน่งการไหลต่าง ๆ และระบบพื้นที่การเผาไหม้	47
	4.4.2	การไหลผ่านรูเชื่อมชั้นใน (Flow through liner holes)	48
	4.5	การแยกตัวของการไหลส่วนในหัวฉีดว้าออก (Separation of flow in divergent nozzle)	50
	4.6	การกระจายอากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้ชั้นใน (Air flow distribution within liner)	51
บทที่	5	ชุดทดลองเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ การทดลองและผลการทดลอง	55
	5.1	วัตถุประสงค์ของการทดลอง	55
	5.2	การทดลอง	55
	5.2.1	ขั้นตอนการสตาร์ทเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์	55
	5.2.2	ขั้นตอนการเก็บผลการทดลอง	55
	5.3	ห้องเผาไหม้ที่นำมาใช้ในการทดลอง	55
	5.3.1	เสถียรภาพของการเผาไหม้	56
	5.3.2	ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการออกแบบห้องเผาไหม้	56
	5.4	การปรับปรุงห้องเผาไหม้	56
	5.5	รูปจากการทดลอง	57
	5.6	ผลการทดลอง	63
บทที่	6	สรุปผลการทดลอง	68
	6.1	สรุปผลการทดลอง	68
	6.2	แนวทางการพัฒนาต่อ	68
บรรณานุกรม			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ซีดจํากัดของการเกิดเปลวไฟ และ ความเร็วของเปลวไฟของแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ	21
ตารางที่ 3.2 ระยระดับเปลวไฟของแก๊สเชื้อเพลิง	26
ตารางที่ 4.1 แสดงการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ในทางปฏิบัติ	43
ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1	63
ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองครั้งที่ 2	63
ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองครั้งที่ 3	64
ตารางที่ 5.4 ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองทั้งสาม	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	วัฏจักรเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์	4
รูปที่ 2.2	การทำงานของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ และแผนภาพ T-s	5
รูปที่ 2.3	วัฏจักรทางทฤษฎีของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์	7
รูปที่ 2.4	ค่า c_p และ γ ของอากาศและแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้	10
รูปที่ 3.1	เปลวไฟอุดมคติที่อยู่กับที่	17
รูปที่ 3.2	เส้นโค้งอุณหภูมิและความเข้มข้นขององค์ประกอบในเปลวไฟอะเดียเบติกแก๊สผสมแบบราบเรียบหนึ่งมิติ	19
รูปที่ 3.3	ความเร็วของเปลวไฟที่ส่วนผสมแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ	20
รูปที่ 3.4 ก)	ตะเกียงบุนเซนและลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้น	22
	ข) การพิสูจน์เปลวไฟแยกเป็นสองชั้นโดยวิธี สมิทเทิลส์	
รูปที่ 3.5	เส้นกระแสผ่านเปลวไฟแก๊สผสมอากาศแบบราบเรียบ และความสัมพันธ์ของความเร็วยังเปลวไฟและมุมของกรวยแนวเปลวไฟ	23
รูปที่ 3.6	เส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเปลวไฟและของแก๊สผสมอากาศบริเวณขอบหัวเผา	24
รูปที่ 3.7	ผังรูปแสดงขีดจำกัดของปรากฏการณ์เปลวไฟแก๊สผสมอากาศ	25
รูปที่ 3.8	ขีดจำกัดความเร็วเฉลี่ยของแก๊สและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเผาบุนเซนเพื่อให้ได้เปลวไฟอยู่ตัว	27
รูปที่ 3.9	เส้นโค้งความเข้มข้นของเชื้อเพลิง ออกซิเจน และผลผลิตปฏิกิริยาตามแนวตัดขวางของเปลวไฟชนิดแพร่	28
รูปที่ 3.10	ผังรูปแสดงโครงสร้างของเปลวไฟชนิดแพร่แบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนที่สัมพันธ์กับอัตราเร็วของการไหล	29
รูปที่ 3.11	ภาพแสดงส่วนประกอบหัวเผาดิ่งอากาศเข้าในบรรยากาศเปิด	31
รูปที่ 3.12	การดึงอากาศเข้าผสมโดย confine jet ในตะเกียงบุนเซน	32
รูปที่ 3.13	สัดส่วนของคอคอดและท่อผสม	34
รูปที่ 3.14	ช่องเปลวไฟรูปร่างและลักษณะต่าง ๆ กัน	35
รูปที่ 3.15	หัวเผาและหัวฉีดแก๊สผสมอากาศชนิดความดันต่ำบางแบบ	36
รูปที่ 3.16	หลักการและเทอมที่ใช้กับหัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิดอากาศดึงแก๊ส	37
รูปที่ 3.17	ระบบการป้อนแก๊สที่ความดันบรรยากาศสู่หัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิดอากาศดึงแก๊ส	38
รูปที่ 3.18	ตัวอย่างหัวเผาชนิดผสมในท่ออุโมงค์	38
รูปที่ 3.19	หัวเผาเบรย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม	39
รูปที่ 3.20	หัวเผารูปเข็ม	39
รูปที่ 3.21	หัวเผาเมทริกซ์	40

รูปที่ 4.1 ผลกระทบของการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการซึ่งไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2	ควบคุมการไหลผ่านรู Dilution	47
รูปที่ 4.3	Mach number ห้องเผาไหม้	48
รูปที่ 4.4	แสดงการไหลผ่านรูของห้องเผาไหม้ชั้นใน	48
รูปที่ 4.5	แสดงผลกระทบของรูปร่างของรูในทางปฏิบัติ	50
รูปที่ 4.6	สังเกตรูปแบบการไหลสำหรับ Swirling jets และการออกของเปลวไฟจากหัวฉีดเว้าออก	51
รูปที่ 5.1	เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์	57
รูปที่ 5.2	ห้องเผาไหม้ ทำการติดตั้ง เทอร์โมคัปเปิล เพื่อวัดอุณหภูมิในส่วนต่างๆ ของห้องเผาไหม้ โดยแบ่งเป็น 3 ช่วง	57
รูปที่ 5.3	คอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์ ทำการต่อเข้าด้วยกัน โดยมีแกนเพลลาเชื่อมให้อุปกรณ์ ทั้งสองหมุนไปด้วยกัน	58
รูปที่ 5.4	Blower ในช่วงเริ่มสตาร์ทจะต้องใช้ Blower ช่วยทำการอัดอากาศให้คอมเพรสเซอร์ จนเครื่องยนต์สามารถเลี้ยงตัวเองได้	58
รูปที่ 5.5	ปั้มน้ำมันหล่อเย็น ทำการปั้มน้ำมันเพื่อใช้หล่อเย็นเบรจที่รองรับแกนเพลลาของ คอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์	59
รูปที่ 5.6	หัวเทียน ใช้ในการจุดไฟตอนเริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์	60
รูปที่ 5.7	ถังแก๊สบรรจุแก๊ส LPG ขนาด 15 กิโลกรัม เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้	61
รูปที่ 5.8	Nozzle หัวจ่ายแก๊สเข้าห้องเผาไหม้	61
รูปที่ 5.9	แผงควบคุมและแสดงผล ทำการต่อสวิตซ์ควบคุมอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ รวมไว้ที่นี้	62
รูปที่ 5.10	LPG Regulator ทำการวัดความในท่อแก๊สและในถังแก๊ส	62
รูปที่ 5.11	แสดงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่อัตราไหลของเชื้อเพลิงต่างๆ จากการทดลองที่ 1	65
รูปที่ 5.12	แสดงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่อัตราไหลของเชื้อเพลิงต่างๆ จากการทดลองที่ 2	65
รูปที่ 5.13	แสดงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่อัตราไหลของเชื้อเพลิงต่างๆ จากการทดลองที่ 3	66
รูปที่ 5.14	แสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนห้องเผาไหม้ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงต่างๆ กัน	66
รูปที่ 5.15	แสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในช่วงต่างๆ ของห้องเผาไหม้ที่อัตราไหลของเชื้อเพลิง เพิ่มมากขึ้น	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันและในอนาคตข้างหน้าเชื้อเพลิงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างมากในการขับเคลื่อนของเครื่องยนต์หรือเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องต้นกำลัง เช่น เครื่องบิน เรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น เครื่องยนต์เหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งนับวันกำลังจะหมดไปจากโลก ดังนั้นมนุษย์เราจำเป็นต้องหาเชื้อเพลิงอื่นมาทดแทน และมีเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถให้กำลังงานมากขึ้นกว่าเดิม

เครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบเป็นเครื่องยนต์ชนิดหนึ่ง ซึ่งถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นในโครงการนี้จะศึกษาการทำงาน และสร้างเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบขึ้นมาเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพ โดยเครื่องยนต์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างนั้นได้มาจากเครื่องยนต์โรตารีของรถยนต์ จากนั้นจึงทำการออกแบบโดยอาศัยหลักการพื้นฐานของเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamics)

เครื่องยนต์สันดาปส่วนใหญ่จะใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการสันดาป ซึ่งในการเพิ่มกำลังให้กับเครื่องยนต์เครื่องหนึ่งนั้นจะต้องเพิ่มปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงเข้าไปภายในห้องเผาไหม้ เครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบในโครงการนี้จะอาศัยหลักการพื้นฐานเดียวกัน โดยเครื่องยนต์ที่สร้างขึ้นจะใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิง

เครื่องยนต์กังหันแก๊สเป็นเครื่องยนต์ความร้อน (Heat Engine) ซึ่งทำงานโดยมีกระบวนการทำงานติดต่อกันไป ประกอบด้วยกระบวนการอัดอากาศจากบรรยากาศ แล้วเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นโดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่ใช้ส่วนมากเป็นน้ำมันก๊าด แก๊สที่มีอุณหภูมิสูงจะไปขับเคลื่อนกังหันให้หมุนเพื่อไปขับงานเพลาลูกต่อนึง ซึ่งการทำงานก็คล้ายกับเครื่องยนต์แก๊สโซลีนและเครื่องยนต์ดีเซลแต่จะแตกต่างกันที่การทำงานของเครื่องยนต์กังหันแก๊สนั้นจะทำงานติดต่อกันไปตลอดเวลา งานที่ได้จากเครื่องยนต์กังหันแก๊สนั้น จะมีงานในลักษณะเป็นงานของกระบวนการที่ไหลสม่ำเสมอ (Flow Work)

เครื่องยนต์กังหันแก๊สอย่างง่าย จะประกอบด้วยเครื่องอัดอากาศหรือคอมเพรสเซอร์ (Compressor) ห้องเผาไหม้ (Combustion Chamber) และชุดกังหันแก๊สหรือเทอร์โบ (Turbine Unit)

ในส่วนพาวเวอร์เทอร์โบ จะนำพลังงานจลน์ที่เหลือจากเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ มาเปลี่ยนรูปพลังงานให้ปรากฏอย่างชัดเจนในรูปพลังงานกล ซึ่งเราอาจนำพลังงานนี้ไปใช้งานด้านต่าง ๆ ได้

1.1.1 ข้อดีของเครื่องยนต์กังหันแก๊สเมื่อติดตั้งพาวเวอร์เทอร์โบ

1. ได้งานจากแกนเพลามากกว่าเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ
2. ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบทั่วไป
3. แก๊สไอเสียสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เครื่องยนต์กังหันแก๊สจะได้รับความเร็วของเพลาดำกว่าเมื่อติดตั้งพาวเวอร์เทอร์ไบน์ ทำให้เพลารับภาระน้อยลง
5. เมื่อติดตั้งพาวเวอร์เทอร์ไบน์จะใช้ความดันในห้องเผาไหม้ต่ำ ดังนั้นจะมีข้อดีตรงที่ว่าวัสดุชิ้นส่วนที่ใช้เกี่ยวกับห้องเผาไหม้ก็ไม่ต้องคำนึงถึงความดันสูงจากการจุดระเบิดที่เกิดขึ้น
6. เครื่องยนต์กังหันแก๊สสามารถใช้เชื้อเพลิงคุณภาพต่ำได้ ซึ่งแม้แต่ถ่านหินที่บดละเอียดเป็นผงก็สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ได้

1.1.2 ข้อเสียของเครื่องยนต์กังหันแก๊สเมื่อติดตั้งพาวเวอร์เทอร์ไบน์

1. ทำให้เครื่องยนต์มีเสถียรภาพน้อยลง
2. ชุดกังหันแก๊สที่ใบพัดที่ถูกขับจากแก๊สร้อนมีลักษณะบางมาก ดังนั้นวัสดุที่ใช้สร้างจึงต้องออกแบบเป็นพิเศษเพื่อให้ทนต่ออุณหภูมิที่สูงของแก๊สร้อน
3. ต้องเดินเครื่องในสภาพที่ต้องใช้เชื้อเพลิงสูงกว่าปกติ
4. เนื่องจากเครื่องยนต์กังหันแก๊สมีความร้อนสูงมาก ดังนั้นเมื่อต้องการใช้งานความเร็วรอบต่ำ จำเป็นต้องใช้เครื่องทดรอบ (Speed Reduction Devices)

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาการทำงานของเครื่องยนต์พาวเวอร์แก๊สเทอร์ไบน์ เพื่อทำการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ ให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัยต่อเครื่องยนต์รวมทั้งผู้ทำการทดลอง
- 1.2.2 ทำการสร้างเครื่องยนต์พาวเวอร์แก๊สเทอร์ไบน์ โดย करना อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีขายในท้องตลาด และหาซื้อได้ง่ายมาทำการประกอบและติดตั้ง
- 1.2.3 คำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์พาวเวอร์แก๊สเทอร์ไบน์ รวมทั้งคุณสมบัติต่าง ๆ เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาโครงการต่อไป

1.3 ขอบเขตของงาน

- 1.3.1 หากำลังงาน แรงบิด ความเร็วรอบที่ได้จากเครื่องยนต์พาวเวอร์แก๊สเทอร์ไบน์
- 1.3.2 หาประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพทางกลของเครื่องยนต์พาวเวอร์แก๊สเทอร์ไบน์ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโครงการต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วิธีการดำเนินงาน

นำความรู้ที่ได้ศึกษามาแล้ว มาประยุกต์ใช้ในการสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ จากนั้นจึงทำการทดลองและพิจารณาพฤติกรรมของเครื่องยนต์ว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางใด ถ้าพฤติกรรมของเครื่องยนต์ไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์แล้ว ก็ต้องมีการปรับปรุงส่วนประกอบบางส่วน เพื่อให้พฤติกรรมของเครื่องยนต์เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้โดยแนวทางการปรับปรุงส่วนประกอบนั้นต้องเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ศึกษามาแล้ว

เมื่อการทดลองเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้แล้ว จากนั้นก็เก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองไว้เพื่อเป็นฐานข้อมูลใช้พัฒนาโครงการต่อไปให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่ง ๆ ขึ้นไป

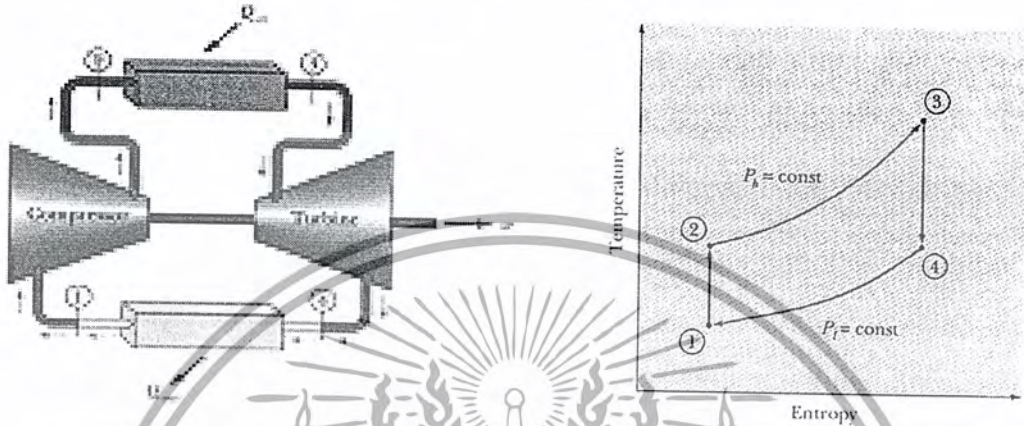


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์

2.1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์



รูปที่ 2.1 วงจรเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์

โดยหลักการทำงานของเครื่องยนต์พาวเวอร์แก๊สเทอร์ไบน์สามารถสรุปได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

- 2.1.1 ขบวนการอัด (Compression) เริ่มจากอากาศจากภายนอก(จุด 1)ที่ อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ จะถูกคอมเพรสเซอร์ทำการดูดและอัดให้มีความดันเพิ่มมากขึ้น เพื่อส่งต่อไปยังห้องเผาไหม้(จุด 2) โดยกระบวนการอัดที่เกิดขึ้นเป็นแบบอะไดแบติก (Adiabatic) ซึ่งจะทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นอีกด้วย
- 2.1.2 ขบวนการสันดาป (Combustion) ภายในห้องเผาไหม้หัวฉีดแก๊สเชื้อเพลิงจะทำการจ่ายเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อไปผสมกับอากาศที่ถูกดูดเข้ามาด้วยความเร็วจากการอัดของคอมเพรสเซอร์ และจุดระเบิด ทำให้เกิดการสันดาปภายในห้องเผาไหม้ เกิดแก๊สร้อนไปยังทางเข้าเทอร์ไบน์(จุด 3)
- 2.1.3 ขบวนการขยายตัวครั้งที่ 1 (Expansion) แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งมีความดันและอุณหภูมิที่สูง จะขยายตัวผ่านเทอร์ไบน์ทำให้ใบพัดเทอร์ไบน์หมุน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนพลังงานของของไหลให้เป็นพลังงานกล โดยงานที่ได้จะถูกส่งกลับไปให้คอมเพรสเซอร์เพื่อทำการอัดอากาศเข้าห้องเผาไหม้เป็นวัฏจักรต่อไป และพลังงานที่เหลือซึ่งอยู่ในรูปของไอเสียยังคงมีความเร็วและอุณหภูมิที่สูง จะถูกล่อยเข้าสู่ทางเข้าพาวเวอร์เทอร์ไบน์(จุด 4) แทนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยตรง
- 2.1.4 ขบวนการขยายตัวครั้งที่ 2 (Expansion) ไอเสียที่เหลือจะขยายตัวออกสู่บรรยากาศ (จุด4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 วัฏจักรในอุดมคติ (Ideal Cycle)

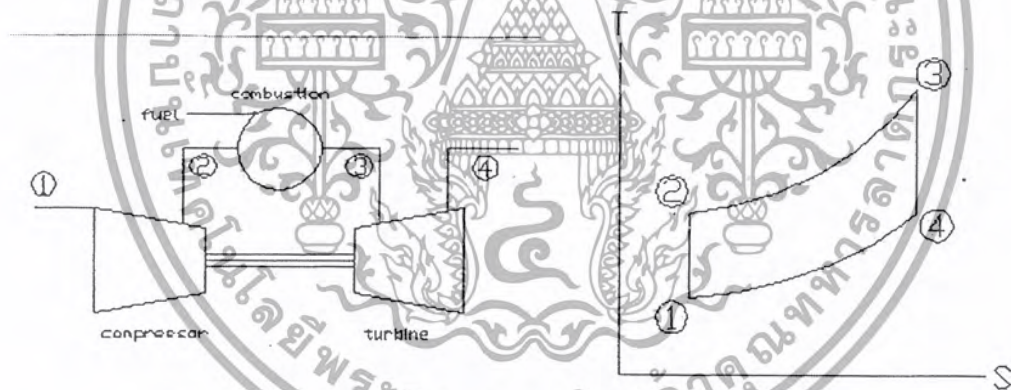
การพิจารณาพลังงานที่ได้ และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์เพื่อให้ง่ายจึงต้องคิดในลักษณะของวัฏจักรไอดีลก่อน ซึ่งในสภาวะนี้แต่ละองค์ประกอบของเครื่องยนต์จะแยกกันคิดงานที่ได้ของแต่ละชนิด (Specific Work) และประสิทธิภาพของวัฏจักรขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความดันและอุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรเท่านั้น หลังจากนั้นจึงทำการพิจารณาให้ถูกต้องมากขึ้นในภายหลัง

จากเทอร์โมไดนามิกส์ที่กล่าวถึงเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ได้ตั้งข้อสมมุติฐานไว้ดังนี้

- 1) ขบวนการอัดและการขยายตัวเป็นแบบอะไดแบติกชนิดย้อนกลับได้
- 2) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของสารตัวกลางระหว่างทางเข้าและทางออกของแต่ละส่วนของอุปกรณ์
- 3) ไม่มีการสูญเสียความดันในอุปกรณ์ต่างๆ
- 4) กำหนดให้สารตัวกลางมีองค์ประกอบไม่เปลี่ยนแปลงตลอดวัฏจักรและเป็นแก๊สสมบูรณ์ ที่มีค่าความร้อนเฉพาะ (Specific Heat) คงที่
- 5) มวลที่ไหลตลอดวัฏจักรมีค่าคงที่

โดยเราจะแยกพิจารณาระหว่างเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์กับเครื่องยนต์พาวเวอร์แก๊สเทอร์ไบน์

2.2.1 วัฏจักรเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์



รูปที่ 2.2 การทำงานของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ และแผนภาพ T-s

เมื่อทำการพิจารณาในแต่ละอุปกรณ์จะได้

จากจุดที่ 1 – 2 เป็นขบวนการอัดตัวแบบอะไดแบติก จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์จะได้

$$W_{12} = -(h_2 - h_1) = -c_p(T_2 - T_1) \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากจุดที่ 2 – 3 เป็นขบวนการให้ความร้อนในแบบความดันคงที่ จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์จะได้

$$Q_{23} = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2) \quad (2.2)$$

จากจุดที่ 3 – 4 เป็นขบวนการขยายตัวแบบอะไดแบติก จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์จะได้

$$W_{34} = h_3 - h_4 = c_p (T_3 - T_4) \quad (2.3)$$

จากจุดที่ 4 – 1 เป็นขบวนการคายความร้อนในแบบความดันคงที่ จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์จะได้

$$Q_{41} = -(h_4 - h_1) = -c_p (T_4 - T_1) \quad (2.4)$$

เมื่อ Q และ W เป็นความร้อนและงานที่ถ่ายเทจากระบบต่อหนึ่งหน่วยมวล ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักร (Thermal Efficiency, η_t) เป็น

$$\eta_t = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = \frac{W_{34} - W_{12}}{Q_{23}} = \frac{c_p (T_3 - T_4) - c_p (T_2 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)} \quad (2.5)$$

2.3 วัฏจักรที่แท้จริง (Actual Cycle)

ข้อแตกต่างของการทำงานของวัฏจักรที่แท้จริง ของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไบนจะไม่เป็นไปตามวัฏจักรในอุดมคติ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าในวัฏจักรที่เกิดขึ้นจริง ๆ นั้น มีตัวแปรหลายอย่างที่ทำให้วัฏจักรไม่เป็นไปตามทฤษฎี ดังนั้นในการคำนวณหาค่าต่าง ๆ ของวัฏจักรจึงต้องคำนึงถึงข้อแตกต่างเหล่านั้น ดังนี้

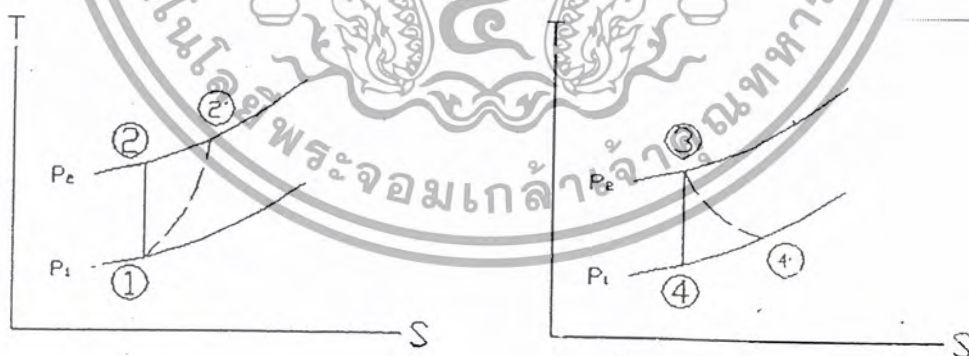
- 1) เนื่องจากการไหลของมวลในอุปกรณ์มีความเร็วสูง มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ระหว่างทางเข้าและทางออกมาก ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องออกแบบเครื่องมือวัดความดันและอุณหภูมิ ที่สแตกเนชัน (Stagnation) ซึ่งเป็นการพิจารณาพลังงานที่เกิดขึ้นทั้งหมด
- 2) ขบวนการที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการอัดตัวในคอมเพรสเซอร์และการขยายตัวในเทอร์โบไบนเป็นขบวนการอะไดแบติกแบบย้อนกลับไม่ได้ จึงเป็นการเพิ่มเอนโทรปี (Entropy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ผลจากความฝืด จึงทำให้มีการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ ตลอดจนในท่อทางเข้าและทางออกของห้องเผาไหม้
- 4) ต้องป้อนงานให้กับคอมเพรสเซอร์มากกว่าทางทฤษฎี เนื่องจากการสูญเสียพลังงานที่แท้จริง การต้านของแรงลม และการสูญเสียในระบบการส่งกำลังระหว่างคอมเพรสเซอร์
- 5) ค่าของ c_p และ γ ของสารตัวกลาง ขณะทำงานตลอดวัฏจักรเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ และตามองค์ประกอบทางเคมีของสารของไหล
- 6) การเผาไหม้ ไม่มีความสมบูรณ์ ดังนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ไม่ถึง 100% จึงมีผลต่อการสิ้นเปลืองแก๊สเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น
- 7) มวลของแก๊สที่ไหลออกจากห้องเผาไหม้มีมากกว่ามวลของอากาศที่ออกจากคอมเพรสเซอร์ เนื่องจากมวลของเชื้อเพลิงที่ผสมเข้าไป ในทางปฏิบัติ มวลจะมีเพิ่มขึ้นประมาณ 1-2 % เนื่องจากมีค่าเล็กน้อยจึงเป็นการสมมุติว่า มวลไหลผ่านคอมเพรสเซอร์ และเทอร์ไบน์เท่ากัน

2.4 ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์

เนื่องจากการอัดอากาศในคอมเพรสเซอร์และการขยายตัวของแก๊สในเทอร์ไบน์ เป็นไปตามขบวนการอะไดแบติกแบบย้อนกลับไม่ได้ ซึ่งมีผลทำให้ค่าเอนโทรปีเพิ่มขึ้น ในวัฏจักรที่แท้จริงจากรูป 2.3 (ก)การอัดตัวจะอัดจากสภาวะที่ 1 ไป 2' และจากรูป 2.3 (ข)การขยายตัวจะขยายจากสภาวะที่ 3 ไป 4'



รูปที่ 2.3 วัฏจักรทางทฤษฎีของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์

ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์ทั่วไป จะอยู่ในรูปอัตราส่วนของงานจริงต่องานทางทฤษฎี ซึ่งอาจจะเขียนในเทอมของเอนทาลปีสแตกเนชัน (Stagmation Enthalpy) หรือ อุณหภูมิสแตกเนชัน (Stagnation Temperature) ซึ่งเป็นผลรวมพลังงานจลน์ที่เปลี่ยนแปลงของของไหลระหว่างทางเข้าและทางออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์

$$\eta_{\text{com}} = \frac{W_{\text{ทฤษฎี}}}{W_{\text{จริง}}} = \frac{W'}{W}$$

$$= \frac{\Delta h'_0}{\Delta h_0} = \frac{c_p \Delta T'_0}{c_p \Delta T_0} = \frac{T'_{02} - T_{01}}{T_{02} - T_{01}}$$

$$\eta_{\text{com}} = \frac{1}{T_{02} - T_{01}} (T_{01}) \left(\frac{T'_{02}}{T_{01}} - 1 \right)$$

จากการอัดแบบไอเซนโทรปิก ระหว่างทางเข้า 1 และทางออก 2' จะได้

ดังนั้น

$$\frac{T'_{02}}{T_{01}} = \left(\frac{P'_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\eta_{\text{com}} = \frac{T_{01}}{T_{02} - T_{01}} \left(\left(\frac{P'_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad (2.8)$$

เมื่อ γ = ค่าคงที่ของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.4

ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์

$$\eta_{\text{tur}} = \frac{W_{\text{จริง}}}{W_{\text{ทฤษฎี}}} = \frac{W}{W'}$$

$$= \frac{\Delta h_0}{\Delta h'_0} = \frac{c_p \Delta T_0}{c_p \Delta T'_0} = \frac{T_{03} - T_{04}}{T'_{03} - T'_{04}}$$

$$\eta_{\text{tur}} = (T_{03} - T_{04}) \frac{1}{T_{03} \left(1 - \frac{T'_{04}}{T_{03}} \right)}$$

จากการขยายแบบไอเซนโทรปิก ระหว่างทางเข้า 3 และทางออก 4' จะได้

$$\frac{T'_{04}}{T_{03}} = \left(\frac{P'_{04}}{P_{03}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ดังนั้น} \quad \eta_{\text{tur}} = \frac{T_{03} - T_{04}}{T_{03} \left[1 - \left(\frac{P'_{04}}{P_{03}} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \right]} \quad (2.9)$$

เมื่อ $\gamma =$ ค่าคงที่ของแก๊สผสมมีค่าเท่ากับ 1.35

โดยเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ที่นำมาทดสอบนี้มีท่อทางเข้าสั้นมากจนอาจไม่คิดได้ จึงสามารถเริ่มคำนวณที่คอมเพรสเซอร์ได้เลย ทำให้เทอม P_0 และ T_0 จากสมการ 2.8 จะมีค่าเท่ากับ P_u และ T_u ตามลำดับ เนื่องจากความเร็วของอากาศที่ทางเข้าคอมเพรสเซอร์เป็น 0

โดยสมการข้างต้นเป็นการเกิดการอัดตัวและขยายตัวแบบอะไดแบติก ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ในโครงการนี้ได้ เนื่องจากมีความร้อนสูญเสีย

2.5 การสูญเสียความดัน

ความดันที่สูญเสียในเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ เกิดขึ้นได้ทั้งทางด้านไอดี ไอเสีย และในห้องเผาไหม้ ทำให้เกิดการสูญเสียเป็นแบบ ความดันสแตกเนชั่น ซึ่งเกิดจากความต้านทางไดนามิกของอุปกรณ์ อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ ความดันที่สูญเสียนี้มีผลทำให้อัตราส่วนความดันในเทอร์ไบน์ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับที่คอมเพรสเซอร์ จึงมีส่วนทำให้งานที่ได้จากเทอร์ไบน์ลดลง วัฏจักรของแก๊สเทอร์ไบน์มีโอกาสเป็นขบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้ เนื่องจากงานสุทธิที่ได้แตกต่างจากทฤษฎีมาก (อัตราส่วนของงานต่ำ) ดังนั้นความดันที่สูญเสียจึงมีผลอย่างชัดเจนต่อสมรรถนะของวัฏจักร ดังนั้นเพื่อความถูกต้องยิ่งขึ้นจึงทำการติดตั้งเครื่องมือวัดความดันที่ทางเข้าและทางออกของห้องเผาไหม้ ทำให้นำค่าที่ได้ไปคำนวณได้เลย

2.6 การสูญเสียทางกล

เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ทุกประเภท กำลังที่เอาไปขับคอมเพรสเซอร์จะได้อาจมาจากการต่อกำลังผ่านมาจากเทอร์ไบน์โดยใช้เพลลา และไม่มีเกียร์ทด ดังนั้นการสูญเสียทางกลจึงเกิดจากความเสียดทานของแบริ่งและการต้านลมเท่านั้น ดังนั้นงานที่ใช้ขับคอมเพรสเซอร์ หาได้จาก

$$W_{\text{tc}} = \frac{1}{\eta_m} c_{p12} (T_{02} - T_{01}) \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

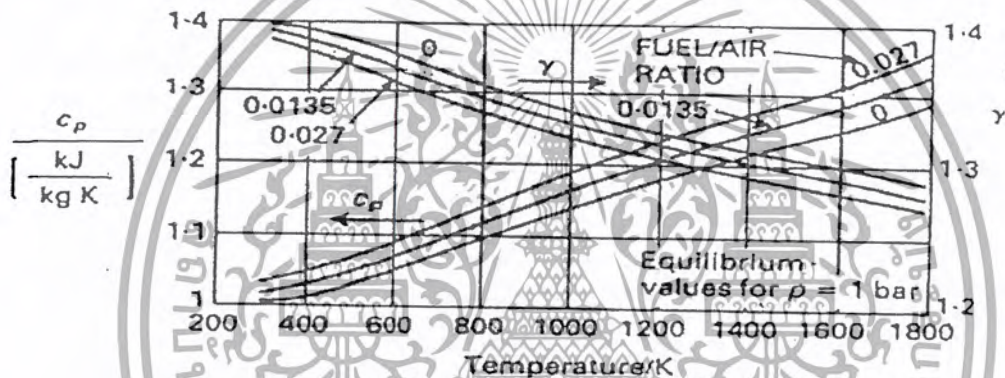
2.7 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะ

คุณสมบัติของ c_p และ γ เป็นส่วนสำคัญในการประมาณสมรรถนะของวัฏจักร และจำเป็นต้องใช้ค่าซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงนี้ในการหาสถานะของวัฏจักร วัสดุโดยทั่วไปของจริงที่ทำงานในช่วงของอุณหภูมิและความดัน ค่าของ c_p เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิแต่เพียงอย่างเดียวและทำให้ค่าของ γ เปลี่ยนแปลงไปเช่นเดียวกันกับ c_p ตามสมการต่อไปนี้

$$\frac{(\gamma - 1)}{\gamma} = \frac{R_0}{M \cdot c_p} \quad (2.11)$$

เมื่อ R_0 คือ ค่าคงที่ของแก๊สใด ๆ (Universal Gas Constant)

และ M คือ มวลโมเลกุล (Molecular Weight)



รูปที่ 2.4 ค่า c_p และ γ ของอากาศและแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้

การเปลี่ยนแปลงค่า c_p และ γ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 เปรียบเทียบกับค่า F/A เปลี่ยนแปลง พิจารณาว่า γ มีค่าลดลงในทุก F/A ratio ขณะที่อุณหภูมิสูง ส่วน c_p มีค่าเพิ่มขึ้นในทุก F/A ratio ขณะที่อุณหภูมิสูง

ในเทอร์ไบน์ของวัฏจักรเบ็ค สารตัวกลางเป็นส่วนผสมของแก๊สในห้องเผาไหม้ โดยมีองค์ประกอบเป็น C_nH_m ใช้ c_p และ γ เฉลี่ยในการคำนวณอย่างง่าย ค่า c_p และ γ จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม F/A ratio ตามรูปที่ 2.4 แต่อย่างไรก็ตามค่าของไฮโดรคาร์บอนแตกต่างจากอากาศน้อยมาก ดังนั้น c_p และ γ จึงมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด ตามสมการ (2.10) โดยที่ $R_0/M = R_{air} = 0.287 \frac{kJ}{kg \cdot K}$

การคำนวณค่าเพื่อวิเคราะห์ไอเสียจะยากขึ้นเมื่อพิจารณาการแยกตัวขององค์ประกอบไอเสีย c_p และ γ จะกลายเป็นฟังก์ชันของความดันเช่นเดียวกับอุณหภูมิ การคำนวณที่ถูกต้องจะต้องใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยคิด การแยกตัวออกจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 1500 K และที่อุณหภูมิสูงกวานี้ ตามรูปที่ 2.4 สามารถใช้งานได้เพียงที่ความดัน 1 bar เท่านั้น ในความจริงแล้ว ที่อุณหภูมิ 1800 K ทั้งอากาศและองค์ประกอบไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้เกิดขึ้นที่ส่วนผสมบาง การลดความดันเป็น 0.01 bar จะเพิ่มค่า c_p โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 4 % และเมื่อเพิ่มความดันเป็น 100 bar ค่า c_p จะลดลงโดยประมาณ 1 % ส่วนการเปลี่ยนแปลงของ γ นั้นน้อยกว่า ในการพิจารณาต่อไปจะไม่คิดการเปลี่ยนแปลง c_p และ γ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดัน เพราะว่ามีเฉพาะเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ที่ใช้กับเครื่องบินเท่านั้น ที่มีอุณหภูมิแก๊สเข้าเทอร์ไบน์สูงถึง 1500 K

การคำนวณที่ต้องการความถูกต้องมากยิ่งขึ้นต้องใช้วิธีทาง Numerical เพื่อหาค่าของ γ เฉลี่ยที่ถูกต้อง ในทางปฏิบัติความถูกต้องจะมากขึ้นเมื่อใช้ค่าในตารางหรือจากกราฟของเอนทัลปีและเอนโทรปี อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกอาจสมมติให้ค่าของ c_p และ γ คงที่ ดังนี้

$$\begin{array}{l} \text{อากาศ} \quad c_{pA} = 1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \quad \gamma_a = 1.40 \quad \text{หรือ} \quad \left[\frac{\gamma}{\gamma-1} \right]_a = 3.5 \\ \text{แก๊สจากการเผาไหม้} \quad c_{pG} = 1.147 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \quad \gamma_g = 1.35 \quad \text{หรือ} \quad \left[\frac{\gamma}{\gamma-1} \right]_g = 4.0 \end{array}$$

ในการวิเคราะห์ เราสนใจในการหางานของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์ จากผลของ $c_p \Delta T$ สมมติว่า อุณหภูมิที่มีค่า c_p และ γ ถูกต้องและต่ำกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยจริง ทำให้ γ สูงกว่าค่าที่ควรจะเป็น และค่า ΔT สูงกว่าที่คาดไว้ เหล่านี้จะแสดงผลจาก $c_p \Delta T$ ซึ่งมี c_p ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น แต่อุณหภูมิจริงที่จุดต่าง ๆ ของวัฏจักรจะไม่ถูกต้องนัก อย่างไรก็ตามรายละเอียดของการออกแบบอุปกรณ์นั้น จะต้องรู้เงื่อนไขที่แท้จริงของสารตัวกลางจะทำให้ได้ความถูกต้องมากขึ้น

บทที่ 3

แก๊สเชื้อเพลิงและการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง

3.1 เชื้อเพลิงก๊าซ

เชื้อเพลิงก๊าซ (Gaseous Fuel) หมายถึง ก๊าซทุกชนิดที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วเกิดการเผาไหม้ทำให้ได้พลังงานความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ก๊าซที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

3.1.1 ประเภทของก๊าซ

ก๊าซที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมีหลายชนิดและมีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไป บางชนิดมีส่วนประกอบคล้ายกัน แต่มีชื่อแตกต่างกัน

1. ก๊าซชีวมวล (Bio Mass) เป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยการใช้ถ่านหินเป็นวัตถุดิบ
2. ก๊าซชีวภาพ (Bio-Gas) คือ ก๊าซที่เกิดจากการหมัก และการย่อยสลายของสารอินทรีย์ (Organic Substance) เช่น มูลสัตว์ประเภทต่าง ๆ ตลอดจนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น วัชพืชและเศษอาหาร
3. ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่ง โดยที่ธาตุคาร์บอนกับธาตุไฮโดรเจนจับตัวกันเป็นโมเลกุลเช่นเดียวกับน้ำมันแต่มีสถานะในรูปของแก๊ส แบ่งออกเป็นชนิดใหญ่ ๆ ได้ 2 ชนิด คือ ก๊าซธรรมชาติแห้ง (Dry Natural Gas) และก๊าซธรรมชาติชื้นหรือเปียก (Wet Natural Gas)
4. ก๊าซน้ำมัน (Oil Gas) เป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิต โดยใช้น้ำมันหรือก๊าซจากการเผา โดยมีอากาศและไอน้ำเป็นตัวสำคัญในการผลิต โดยใช้น้ำมันหรือก๊าซจากการเผา โดยมีอากาศและไอน้ำเป็นตัวสำคัญในการผลิต
5. ก๊าซที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ หรือที่เรียกย่อ ๆ ว่า ก๊าซ LPG (Liquefied Petroleum Gas) หรือ ก๊าซหุงต้ม

3.1.2 ก๊าซ LPG

ปัจจุบันนี้เชื้อเพลิงก๊าซได้เข้ามามีบทบาททดแทนเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลวมากขึ้นอันเนื่องมาจากได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องควบคุมก๊าซ จึงทำให้ผู้ใช้มีความสะดวกและปลอดภัยมากขึ้น โดยเฉพาะ ก๊าซที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งจะประกอบไปด้วย ก๊าซโพรเพนและก๊าซบิวเทน ก๊าซหุงต้มที่ใช้กัน ในปัจจุบันนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบหรือที่เรียกว่า ก๊าซปิโตรเลียมเหลว อันเป็นส่วนประกอบของ ก๊าซโพรเพนและก๊าซบิวเทน ในอัตราส่วน 30 : 70 ก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งสองชนิดดังกล่าวนี้ สามารถนำมาแยกเป็นก๊าซหุงต้มได้ โดยนำก๊าซธรรมชาติมาผ่านกระบวนการแยกก๊าซในโรงแยกก๊าซ

คำว่า LPG เป็นศัพท์ทางการที่ใช้ในการเรียกก๊าซปิโตรเลียมเหลว แต่ที่เรารู้จักกันทั่วไปคือ ก๊าซหุงต้ม ก๊าซชนิดนี้จะมีสถานะเป็นไอ (Vapour) แต่ถ้าอยู่ภายใต้ความดันสูงก๊าซจะมีลักษณะเป็นของเหลว

1 กระบวนการผลิตก๊าซ LPG

ก๊าซ LPG มี 2 ชนิด คือ ชนิดก๊าซบ่อน้ำมัน ที่ได้จากการแยก และกลั่นก๊าซธรรมชาติกับชนิดก๊าซโรงกลั่นน้ำมัน ที่ได้จากการแยกก๊าซ ซึ่งเป็นผลพลอยได้ ที่เกิดจากการกลั่นน้ำมันดิบเนื่องจากก๊าซ LPG มีสภาพ เป็นก๊าซที่อุณหภูมิสูงและความดันปกติ จึงต้องทำให้เป็นของเหลวอยู่เสมอ โดยการอัดความดันหรือแช่แข็ง และต้องขนส่งด้วยเรือที่ทันสมัย เพื่อใช้บรรทุก๊าซ LPG

2 คุณสมบัติของก๊าซ LPG

1. สี ก๊าซ LPG จะไม่มีสี เมื่อก๊าซเกิดการรั่วจากถังเราจึงไม่สามารถที่จะมองเห็นก๊าซที่รั่วออกมาได้ นอกจากก๊าซจะรั่วออกมามาก เราจึงจะเห็นเป็นละอองขาว ซึ่งละอองขาวนี้ก็คือไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศทำการกลั่นตัวเป็นละอองเมื่อได้รับความเย็นจัด จากการระเหยตัวของก๊าซ

2. ความเป็นพิษ ก๊าซชนิดนี้จะไม่เป็นพิษ เมื่อนำไปเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะไม่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์หรือก๊าซพิษ เนื่องจากก๊าซนี้มีน้ำหนักมากกว่าอากาศ ดังนั้นเมื่อเกิดการรั่วภายในห้องแคบแล้ว มันจะเข้าไปแทนที่อากาศ ทำให้ออกซิเจนในบริเวณนั้นมีไม่เพียงพอ ผู้ที่สูดดมก๊าซเข้าไปอาจมีอาการเวียนศีรษะและเป็นลมได้

3. กลิ่น เป็นก๊าซที่ไม่มีกลิ่น เนื่องจากก๊าซที่ผลิตได้นี้ไม่มีกลิ่น จึงมีความจำเป็นต้องใส่สารที่มีกลิ่นจุนลงไปเพื่อเป็นการเตือนเมื่อเกิดก๊าซรั่ว สารที่เติมในส่วนมากจะใช้ เอทิลเมอร์แคปแทน (C_2H_5SH)

4. น้ำหนัก เป็นก๊าซที่เบากว่าน้ำและหนักกว่าอากาศ เมื่อก๊าซอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว ก๊าซจะมีน้ำหนักครึ่งหนึ่งของน้ำ ดังนั้น ก๊าซเหลวจะลอยอยู่บนน้ำ หากก๊าซรั่วลงในน้ำ ท่อน้ำ หรือแม่น้ำ มันอาจลอยไปติดไฟ ณ จุดที่ห่างออกไป แล้วลุกลามมายังจุดที่ก๊าซรั่วได้อย่างรวดเร็ว เมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นไอ ไอก๊าซจะหนักเกือบประมาณ 2 เท่าของอากาศ ดังนั้น เมื่อก๊าซรั่ว ก๊าซจะเคลื่อนตัวไหลไปรวมตัวในที่ที่ต่ำกว่า

5. จุดเดือด จุดเดือดของก๊าซจะต่ำ มีจุดเดือดประมาณ 0 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิเฉลี่ยของบ้านเราประมาณ 20 องศาเซลเซียส ดังนั้น เมื่อก๊าซถูกปล่อยออกจากภาชนะบรรจุก็จะเดือด โดยเปลี่ยนสถานะจากของเหลว ที่ถูกกดดันอยู่กลายเป็นไอทันที การที่ก๊าซเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ จำเป็นต้องดึงดูความร้อนจากบริเวณใกล้เคียง ซึ่งจะทำให้บริเวณนั้นหรือบริเวณปลายท่อที่ปล่อยไอก๊าซออกจะมีน้ำแข็งเกาะจนทำให้ท่อเกิดการตัน

6. ความข้นใส ก๊าซ LPG มีความข้นใสต่ำ จึงทำให้ก๊าซรั่วได้ง่าย ดังนั้น อุปกรณ์ใช้กับก๊าซจึงต้องออกแบบให้แข็งแรง ทนต่อความดันสูง ดังนั้น การใช้ภาชนะ เช่น ถังบรรจุก๊าซที่ไม่ได้มาตรฐานตามที่กำหนดอาจจะเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. อัตราการขยายตัว ก๊าซ LPG มีอัตราการขยายตัวสูง ดังนั้น การเติมก๊าซใส่ลงในภาชนะจึงไม่ควรเติมให้เต็ม ต้องมีช่องว่างสำหรับการขยายตัวของก๊าซ เมื่อได้รับความร้อน อัตราการขยายตัวจากก๊าซที่สถานะของเหลวกลายเป็นก๊าซที่สถานะไอ คือ ก๊าซเหลว 1 หน่วยปริมาณจะเปลี่ยนเป็นไอก๊าซได้ประมาณ 250 หน่วยปริมาณ ดังนั้น เมื่อก๊าซเหลวรั่วจะมีอันตรายมากกว่าไอก๊าซรั่ว

8. ส่วนผสมของก๊าซกับอากาศที่ทำให้ติดไฟได้ อัตราส่วนของก๊าซในอากาศที่ทำให้ติดไฟ คือ ประมาณ 1.5 – 9 ส่วนในส่วนผสม 100 ส่วน จะเห็นได้ว่าหากมีอากาศน้อยหรือมากกว่าสัดส่วนดังกล่าว ก๊าซจะไม่ติดไฟ

9. ค่าออกเทนัมเบอร์ (Octane Number) ก๊าซ LPG มีค่าออกเทนัมเบอร์สูงเมื่อวัดโดยวิธีงานวิจัยจะได้ค่าออกเทนัมเบอร์ของโพรเพนเท่ากับ 111.4 ไอโซบิวเทนเท่ากับ 102.4 และนอร์มัลบิวเทนเท่ากับ 94.0 ซึ่งสูงกว่าของน้ำมันเบนซินโดยทั่วไปประมาณ 10 – 20 ฉะนั้น ก๊าซ LPG จึงเหมาะกับการใช้เป็นเชื้อเพลิงของรถยนต์มาก

10. คุณสมบัติทางปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากก๊าซ LPG มีคุณสมบัติละลายสารจำพวกยางธรรมชาติได้ดี ฉะนั้นจึงควรใช้สารที่มีความทนต่อก๊าซ LPG อนึ่ง ถ้าเก็บก๊าซ LPG ซึ่งมีโพรพิลีนและบิวทิลีนผสมอยู่ไว้ในถัง อาจเกิดสารพวกยางหรือน้ำมันดิน (TAR) ขึ้นได้

3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมกับอุณหภูมิและความดันไอ

ก๊าซ LPG ที่บรรจุอยู่ในถัง จะมีโมเลกุลของโพรเพนและบิวเทนเคลื่อนตัวอยู่ และจะต้องมีการเคลื่อนตัวไปชนกับผนังของถังด้วย ความแรงของการชนคิดเป็นกิโลกรัม / ตารางเซนติเมตรเรียกกันว่าความดันไอของก๊าซ ซึ่งสามารถถือได้ว่าเป็นความดันของก๊าซ LPG ในถังนั่นเอง และที่อุณหภูมิเดียวกัน ถ้าปริมาณของก๊าซโพรเพนเพิ่มขึ้น จะทำให้ความดันไอเพิ่มขึ้น เช่น ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ก๊าซผสมที่มีอัตราส่วนระหว่างโพรเพนกับบิวเทนเป็น 30 : 70 จะมีความดันไอประมาณ 3.8 กิโลกรัม / ตารางเซนติเมตร ถ้าเปลี่ยนอัตราส่วนเป็น 40 : 60 จะมีความดันไอประมาณ 4.3 กิโลกรัม / ตารางเซนติเมตร และถ้าอุณหภูมิของก๊าซเพิ่มขึ้น ก็จะมีผลให้ก๊าซผสมนั้นมีความดันไอสูงขึ้นด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราส่วนปริมาตรของก๊าซโพรเพนและบิวเทน (นอร์มัลบิวเทน) แสดงได้ดังตาราง ซึ่งเป็นอัตราส่วนปริมาตร เมื่อให้ปริมาตรของก๊าซ LPG เหลว ที่ 15 องศาเซลเซียส เป็น 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ชื่อ อุณหภูมิ (°C)	-20	0	10	15	20	30	40	50	60
โพรเพน	91.4	96.2	98.7	100	101.7	104.9	109.1	113.8	119.3
นอร์มัลบิวเทน	94.3	97.4	99.0	100	101.1	103.0	105.2	107.5	109.8

จากตารางสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราส่วนปริมาตร ได้ดังนี้

1. เมื่ออุณหภูมิสูง ความดันก็สูงด้วย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะเกิดขึ้น โมเลกุลจะชนกับฝาผนังของภาชนะแรงขึ้น ผลก็คือ ความดันจะสูงขึ้น อนึ่ง ในทางกลับกัน ถ้าอุณหภูมิต่ำลง การเคลื่อนที่ก็จะช้าลงเรื่อย ๆ และเมื่อทำให้อุณหภูมิต่ำมากขึ้น การเคลื่อนที่ก็จะช้าลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ถ้ามีส่วนประกอบของโพรเพนมากความดันจะสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของโพรเพนเคลื่อนที่ได้ดีกว่าโมเลกุลของบิวเทน ดังนั้นในกรณีที่อุณหภูมิเท่ากัน ก๊าซ LPG ที่มีส่วนประกอบของโพรเพนมากกว่าจะมีความดันสูงกว่า

3. ปริมาตรของของเหลวไม่มีความสัมพันธ์กับความดัน ไม่ว่าจะมีส่วนประกอบของ LPG อยู่เต็มถึงหรือมีเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยก็ตาม ถ้าอุณหภูมิและองค์ประกอบไม่เปลี่ยนแปลงแล้ว ความดันก็ไม่เปลี่ยน ดังนั้นสิ่งที่จะทำให้ความดันภายในถังเปลี่ยนไป จะมีแต่อุณหภูมิและอัตราส่วนของก๊าซผสมเท่านั้น เนื่องจากโดยทั่วไป อุณหภูมิจะเป็นอุณหภูมิของบรรยากาศ ฉะนั้น สิ่งที่จะเปลี่ยนแปลงได้โดยฝีมือคนก็คือ อัตราส่วนผสมเท่านั้น

การขยายตัวของก๊าซ เนื่องจากก๊าซ LPG มีอัตราการขยายตัวในสถานะที่เป็นของเหลวสูงเมื่อเทียบกับน้ำ ดังนั้นการบรรจุใส่ภาชนะจำเป็นต้องทิ้งที่ว่างไว้ในระดับที่คงที่เพื่อการขยายตัว

ความถ่วงจำเพาะ ก๊าซ LPG มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2 ชนิด คือ ในสถานะที่เป็นของเหลวและสถานะที่เป็นก๊าซ ความถ่วงจำเพาะในสถานะของเหลว จะเปรียบเทียบกับน้ำที่ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ความถ่วงจำเพาะ 1.0 ส่วนความถ่วงจำเพาะในสถานะก๊าซ จะเปรียบเทียบกับอากาศที่ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ ซึ่งให้ความถ่วงจำเพาะเป็น 1.0

ความถ่วงจำเพาะในสถานะที่เป็นของเหลว จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ถ้าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามอุณหภูมิมีค่าตัวสูงขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะก็จะยิ่งลดลง ที่อุณหภูมิปกติ (15 องศาเซลเซียส) โพรเพนเหลวมีความถ่วงจำเพาะเป็น 0.508 ส่วนบิวเทนเหลวมีความถ่วงจำเพาะเป็น 0.584 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความถ่วงจำเพาะในสถานะที่เป็นของเหลวตามอุณหภูมิ

ความถ่วงจำเพาะในสถานะที่เป็นก๊าซหรือไอ ความถ่วงจำเพาะในสถานะที่เป็นก๊าซของโพรเพนเป็น 1.55 และของบิวเทนเป็น 2.07 ซึ่งหนักเกือบเป็น 2 เท่าของอากาศ ก๊าซที่รั่วออกมาจะสะสมอยู่ในที่ต่ำ ฉะนั้นจำเป็นต้องระวังให้มาก ตัวอย่างเช่น ที่ความดันบรรยากาศ จะเกิดก๊าซโพรเพนประมาณ 0.5 ลูกบาศก์เมตร จากโพรเพนเหลว 1 กิโลกรัม และก๊าซบิวเทนประมาณ 0.4 ลูกบาศก์เมตรจากบิวเทนเหลว 1 กิโลกรัม นั่นคือ ในกรณีของเหลว 1 ลิตรเกิดรั่วขึ้น ก็จะกลายเป็นก๊าซได้ ประมาณ 0.25 ลูกบาศก์เมตร ฉะนั้นต้องระวังเกี่ยวกับการรั่วไหลของของเหลวให้มาก

4 คุณสมบัติการสันดาป

1. ค่าความร้อน เป็นตัวเลขสำคัญที่บอกให้รู้ถึงคุณค่า และสรรณณะของเชื้อเพลิง ค่าความร้อนของก๊าซ LPG มีประมาณ 12000 kcal / kg เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเบนซินแล้ว จะมากกว่าอยู่ประมาณ 600 – 800 kcal / kg เพื่อให้เกิดพลังงานจำนวนเท่ากัน ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (ต่อหน่วย นน.) ของก๊าซ LPG จะน้อยกว่าของน้ำมันเบนซิน จึงพูดได้ว่าประหยัดกว่า

2. ปริมาณอากาศที่ใช้ในการสันดาป ถ้าสันดาป ก๊าซ LPG อย่างสมบูรณ์ ทั้งหมดจะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ การเปลี่ยนแปลงนี้เขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังเห็นได้จากสมการเหล่านี้ ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อการสันดาปอย่างสมบูรณ์จะเป็น 5 เท่าในกรณีของโพรเพน และ 6.5 เท่าในกรณีของบิวเทน เนื่องจากปริมาณออกซิเจนในอากาศมีประมาณ 21% ฉะนั้นในการสันดาปโพรเพนอย่างสมบูรณ์ จะต้องใช้ใช้อากาศ 24 m^3 ต่อโพรเพน 1 m^3 และอากาศ 31 m^3 ต่อบิวเทน 1 m^3 ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเบนซินแล้วก๊าซ LPG ต้องการปริมาณอากาศมากกว่าเล็กน้อย

3. ช่วงการลุกไหม้ ก๊าซที่สันดาปได้จะมีช่วงส่วนผสมกับอากาศเพียงช่วงเดียวที่จุดไฟแล้วลุกไหม้ได้ เพราะมีอากาศผสมอยู่ในปริมาณพอเหมาะ ช่วงการลุกไหม้ จะแสดงค่าเป็นอัตราส่วนร้อยละ (%) ของปริมาตรก๊าซต่ออากาศ

4. จุดวาบไฟ (Flash Point), จุดติดไฟ (Ignition Point) ช่วงการลุกไหม้จะมีค่าคงที่สำหรับเชื้อเพลิงและชนิดเช่น ในกรณีของน้ำมันเบนซิน อุณหภูมิที่สูงพอที่ทำให้เกิดไอจากน้ำมันเบนซินไปผสมกับอากาศกลายเป็นก๊าซผสมในช่วงการลุกไหม้ เรียกว่า จุดวาบไฟ แต่ถ้าไม่มีสาเหตุให้เกิดการติดไฟ เชื้อเพลิงที่จุดวาบไฟก็จะไม่เกิดการลุกไหม้หรือติดไฟขึ้น อาจกล่าวได้ว่าก๊าซ LPG ที่อุณหภูมิปกติอยู่เหนือจุดวาบไฟเสมอ

อนึ่งเมื่อค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิให้กับเชื้อเพลิงจนเลยอุณหภูมิค่าหนึ่งแล้ว แม้จะไม่มีสาเหตุของการติดไฟ เชื้อเพลิงก็จะเริ่มลุกไหม้ตามธรรมชาติ อุณหภูมิต่ำสุดที่เริ่มเกิดการลุกไหม้ตามธรรมชาตินี้เรียกว่า จุดติดไฟ เนื่องจากจุดติดไฟของโพรเพนคือ $490 - 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และของบิวเทนคือ $470 - 540 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ก๊าซ LPG จึงติดไฟได้ยากเมื่อเทียบกับน้ำมันเบนซินซึ่งมีจุดติดไฟ $360 - 380 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อคิดรวมเรื่องนี้กับช่วงการลุกไหม้แล้วจึงพูดได้ว่าก๊าซ LPG มีความปลอดภัยค่อนข้างสูง

5 ส่วนประกอบของก๊าซ LPG

ถ้าทราบอุณหภูมิและความดัน ก็จะสามารถบอกส่วนประกอบของก๊าซ LPG ได้อย่างคร่าว ๆ หนึ่งเพื่อให้ส่วนประกอบของก๊าซ LPG เป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน มาตรฐานอุตสาหกรรมของญี่ปุ่น ได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพของก๊าซ LPG ไว้ดังแสดงในตาราง

ประเภท	ลักษณะส่วนประกอบ	การใช้งานส่วนใหญ่
เบอร์ 1	โพรเพนเป็นองค์ประกอบหลัก	เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม
เบอร์ 2	โพรเพนและโพรพิลีนเป็นองค์ประกอบหลัก	เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม
เบอร์ 3	ปริมาณของโพรเพนและโพรพิลีนมีมากกว่าของบิวเทนและบิวทีลีน	เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน , เชื้อเพลิงในสำนักงาน
เบอร์ 4	ปริมาณของโพรเพนและโพรพิลีนมีมากกว่าของบิวเทนและบิวทีลีนมาก	เป็นเชื้อเพลิงใช้กับรถยนต์
เบอร์ 5	บิวเทนและบิวทีลีนเป็นองค์ประกอบหลัก	เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม , เชื้อเพลิงใช้กับรถยนต์
เบอร์ 6	บิวเทนเป็นองค์ประกอบหลัก	เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม , เชื้อเพลิงใช้กับรถยนต์ใช้เป็นสารช่วยสเปรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากส่วนประกอบของก๊าซ LPG มีเพียงตัวเดียว ความดันไอของก๊าซ LPG ในภาชนะจะไม่เปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะมีปริมาณของของเหลวในถังมากน้อยเท่าไรก็ตาม แต่โดยทั่วไปเนื่องจากก๊าซ LPG เป็นสารผสม การระเหยจะเริ่มจากสารที่ระเหยได้ง่าย ดังนั้นความดันไอของก๊าซ LPG ที่เหลือจะค่อย ๆ ลดลง

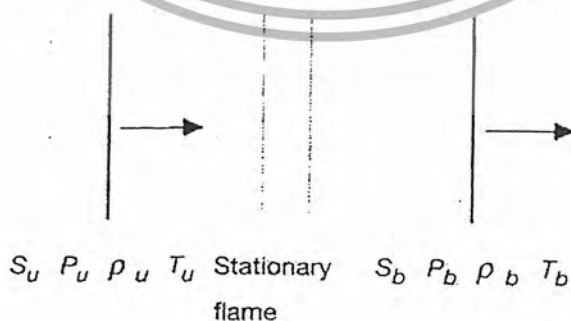
3.2 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส

3.2.1 เปลวไฟแก๊ส

ถ้ามีส่วนผสมระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศที่อยู่ในช่วงขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟอยู่ จะสามารถจุดระเบิดให้เกิดการเผาไหม้ได้ และถ้ามีสารไหลของส่วนผสมเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง การเผาไหม้นั้นก็จะดำเนินไปได้เอง (spontaneous combustion) ถ้าระบบการเผาไหม้อยู่ที่ความดันปกติ บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาจะเป็นบริเวณที่สุกสว่าง (luminous) สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เรียก เปลวไฟ (flames) เราสามารถทำให้เกิดเปลวไฟได้สองลักษณะ คือให้เปลวไฟเคลื่อนที่เข้าหาส่วนผสมซึ่งอยู่กับที่เช่นมีส่วนผสมอยู่ในท่อผสม แล้วจุดระเบิดให้เกิดเปลวไฟซึ่งจะเคลื่อนที่ (propagate) จากจุดเริ่มต้นเข้าหาส่วนผสมที่เหลืออยู่ในท่อ หรือ บ้อนส่วนผสมให้แก่เปลวไฟซึ่งอยู่กับที่ ในกรณีนี้เปลวไฟจะอยู่กับที่ได้ต่อเมื่ออัตราการป้อนและส่วนผสมระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศให้แก่เปลวไฟตลอดเวลาด้วยอัตราคงที่ ซึ่งกระทำได้โดยใช้ หัวเผา (burner) ภาพของหัวเผาทีคุ้นตา ได้แก่ หัวเผาของเตาหุงต้มด้วยแก๊สที่ใช้ตามบ้านเรือนและตามร้านค้าทั่วไป และเปลวไฟที่เห็นว่าจะอยู่กับที่ ก็คือบริเวณที่เรียกกันทั่วไปว่าหัวเตานั้นเอง

1 เปลวไฟของแก๊สผสมอากาศแบบราบเรียบ (laminar premixed flames)

คุณมวลและพลังงานเบื้องต้นพิจารณาที่ส่วนผสมที่มีส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศบรรจุอยู่ในท่อ และมีเปลวไฟเกิดขึ้นอยู่กับที่ที่ตำแหน่งหนึ่งภายในท่อ ถ้าไม่คำนึงถึงการสูญเสียและแรงต้านทานการไหลที่ผนังท่อถือเป็นกรณีอุดมคติเบื้องต้นของเปลวไฟที่อยู่กับที่ ซึ่งมีแก๊สผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศไหลเข้าสู่เปลวไฟ และมีแก๊สผลผลิตจากการเผาไหม้ไหลออกจากเปลวไฟอย่างต่อเนื่องและอยู่ในสภาวะคงที่ได้เปลวไฟแบบราบเรียบหนึ่งมิติ (one dimensional laminar flame) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เปลวไฟอุดมคติที่อยู่กับที่

แนวเปลวไฟ (flame front) ที่เกิดขึ้นเป็นแนวแบนราบ (planar) และตั้งฉากกับแนวการไหลของแก๊สผสม

จากกฎอนุรักษ์มวล (law of the conservation of mass) ได้ว่า

$$\rho_u S_u = \rho_b S_b = m \quad (3.1)$$

เมื่อ m = อัตราเร็ว (ในกรณีนี้มีค่าคงที่) ของมวลแก๊สผสมต่อพื้นที่ที่พิจารณาอยู่ (เปลวไฟ)

ρ_u = ความหนาแน่นของแก๊สผสม (unburned gas)

S_u = อัตราเร็วของแก๊สผสม

ρ_b = ความหนาแน่นของแก๊สผลผลิต (burned gas) และ

S_b = อัตราเร็วของแก๊สผลผลิต

นั่นคือ ณ เวลาใด ๆ ที่สถานะคงที่ มวลรวมของแก๊สผสมที่ป้อนเข้าสู่พื้นที่เปลวไฟ ย่อมเท่ากับมวลรวมของแก๊สผลผลิตจากการเผาไหม้ที่ออกจากพื้นที่เปลวไฟนั้น

การที่เปลวไฟหยุดอยู่กับที่ (stationary) ได้ แสดงว่าเปลวไฟเคลื่อนที่เข้าหาแก๊สผสมในแนวตั้งฉากด้วยอัตราเร็ว เท่ากับ อัตราเร็วของแก๊สผสมที่เคลื่อนที่เข้าหาเปลวไฟ แต่ในทิศทางตรงกันข้ามกัน นั่นคือ เท่ากับ S_u จึงเรียกค่านี้ว่า ความเร็วของเปลวไฟ (flame velocity หรือ burning velocity)

จากกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (law of the conservation of momentum) ได้ว่า

$$P_u + \rho_u S_u^2 = P_b + \rho_b S_b^2 \quad (3.2)$$

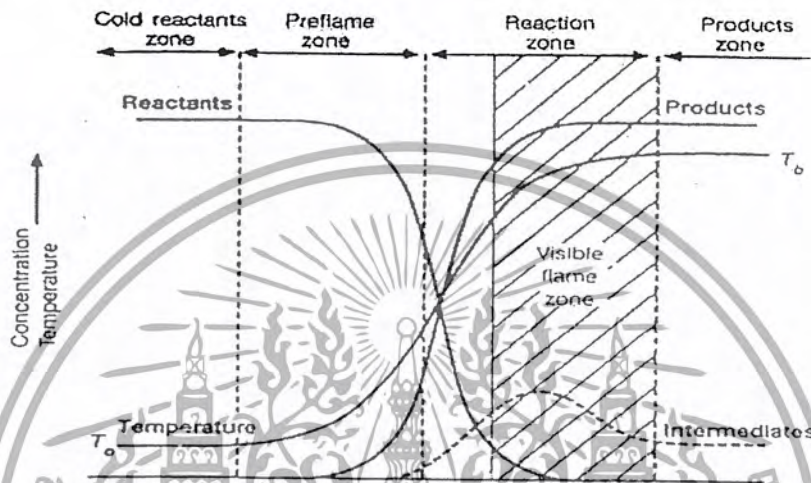
เมื่อ P_u, P_b = ความดันของแก๊สผสมที่ไหลเข้าสู่เปลวไฟ และ ของแก๊สผลผลิตที่ไหลออกจากเปลวไฟตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ของสมการ แสดงว่า ความดันของแก๊สผลผลิตต้องลดลงและความเร็วต้องเพิ่มขึ้น ซึ่งถูกต้อง เพราะหลังการเผาไหม้ได้แก๊สผลผลิตที่อุณหภูมิสูง จึงไหลออกจากพื้นที่เปลวไฟด้วยความเร็วสูงขึ้น ในขณะที่ความดันลดลงและความหนาแน่นลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากแก๊สร้อนขยายตัว แต่ในความเป็นจริง ความแตกต่างระหว่างความดันและความหนาแน่นของแก๊สกระแสน้ำเข้าและออกน้อยมาก

ถ้ามองภาพขยายบริเวณเปลวไฟ จะสามารถแบ่งบริเวณและแสดงเส้นโค้งการเปลี่ยนแปลง (profile) ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังแสดงในรูป คือ บริเวณด้านหน้า (cold reactants zone) บริเวณก่อนถึงเปลวไฟ (pre-flame zone) บริเวณปฏิกิริยา (reaction zone) และบริเวณด้านหลัง (products zone) โดยเส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาและผลผลิตจากสถานะเริ่มต้นไปยังสถานะสุดท้ายลดลงและเพิ่มขึ้นตามลำดับอย่างสม่ำเสมอ คือ ในบริเวณปฏิกิริยาตัวทำปฏิกิริยาถูกใช้หมด

ไปพร้อม ๆ กับเกิดผลผลิตขึ้น ในขณะที่เส้นโค้งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเข้าไปในบริเวณก่อนเกิดเปลวไฟ เพิ่มขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานวิจัยเท่านั้น และผู้จัดทำเอกสารนี้ขอสงวนสิทธิ์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวดเร็วในบริเวณปฏิกิริยาจนกระทั่งเข้าสู่ค่าคงที่ในช่วงหลังปฏิกิริยา การกำหนดบริเวณต่าง ๆ นี้พิจารณาจากจุดเปลี่ยนความชัน (point of inflection) ของเส้นโค้งอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงทั้งอุณหภูมิ ปริมาณตัวทำปฏิกิริยาและผลผลิตถูกควบคุมโดยทั้งการถ่ายโอนมวลและความร้อน และจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา ส่วนที่มองเห็นเป็นเปลวไฟนั้นอยู่ภายในบริเวณปฏิกิริยา การปล่อยแสงที่ตามองเห็นเกิดจากอนุภาคที่ถูกเร่งขึ้นไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่าตกกลับสู่สถานะพื้น (ground state) เช่นอนุภาค CH CN C₂ CHO รวมทั้ง CO₂ ที่ให้แสงได้



รูปที่ 3.2 เส้นโค้งอุณหภูมิและความเข้มข้นขององค์ประกอบในเปลวไฟอะเดียเบติกแก๊สผสมแบบราบเรียบหนึ่งมิติ

ความเข้มข้นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในผลผลิตควรต้องเข้าสู่สมดุลทางอุณหพลศาสตร์ แต่เนื่องจากระยะเวลาสั้น และการหยุดยั้งปฏิกิริยาถูกโซ่ที่อุณหภูมิสูงต้องอาศัยการชนกันของอนุภาคลิอิสระตามอนุภาคเป็นหลัก ซึ่งช้า ดังนั้นในที่สุดแล้วพบว่าความเข้มข้นของอนุภาคลิอิสระและอนุภาคกึ่งกลางกลับมีค่าสูงกว่าที่สมดุล

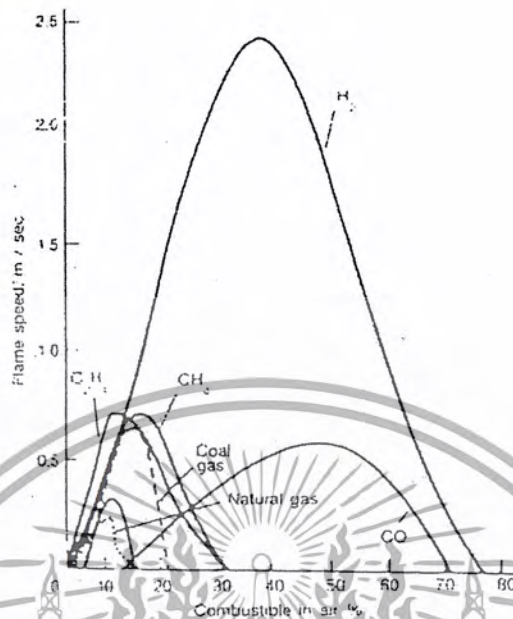
2 ความเร็วของเปลวไฟ

สมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญมากชนิดหนึ่งของเปลวไฟแก๊สผสมอากาศแบบราบเรียบ คือ ความเร็วของเปลวไฟ

ความเร็วของเปลวไฟผสมอากาศชนิดราบเรียบ คือ ความเร็วในแนวตั้งฉากที่แนวเปลวไฟเคลื่อนที่เข้าหาแก๊สผสม (เชื้อเพลิง + อากาศ) ที่ยังไม่เผาไหม้ที่อยู่ชิดกับแนวเปลวไฟนั้น (velocity with which a plane flame front moves normal to its surface through the adjacent unburned gas)

เนื่องจากส่วนผสมที่เผาไหม้ได้ระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งกับอากาศมีได้เป็นช่วงกว้างคือภายในช่วงขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟ และส่วนผสมหนึ่ง จะให้ความเร็วของเปลวไฟค่าหนึ่ง เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งจึงมีความเร็วเปลวไฟได้หลายค่าตลอดช่วงส่วนผสม ส่วนผสมที่มีเชื้อเพลิงเจือจาง หรือ เข้มข้น ความเร็วของเปลวไฟจะมีค่าต่ำและจะมีค่าสูงที่สุดที่ส่วนผสมอยู่ระหว่างนั้น เมื่อแสดงความสัมพันธ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการพิจารณาใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างความเร็วของเปลวไฟและความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในส่วนผสมเป็นกราฟจึงมีรูปคล้ายระฆังคว่ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ความเร็วของเปลวไฟที่ส่วนผสมแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่มวลสารสัมพันธ์พบว่าความเร็วของเปลวไฟมีค่าสูงสุดที่ส่วนผสมที่มีเชื้อเพลิงเข้มข้นกว่าที่มวลสารสัมพันธ์เล็กน้อย เพื่อความสะดวกมักแสดงส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศขณะนั้น เทียบกับ ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศตามมวลสารสัมพันธ์ (ตามทฤษฎี) เรียกอัตราส่วนนี้ว่า อัตราส่วนสมมูล (เชื้อเพลิง-อากาศ) (equivalence ratio, Φ) โดยเรียกแก๊สผสมที่มีเชื้อเพลิงมากกว่าที่ต้องการตามมวลสารสัมพันธ์ว่า fuel-rich นั่นคือ ค่า Φ มากกว่า 1 เช่นเดียวกันเรียกแก๊สผสมที่มีเชื้อเพลิงน้อยกว่าที่ต้องการตามมวลสารสัมพันธ์ว่า fuel-lean นั่นคือ ค่า Φ น้อยกว่า 1 ดังนั้นในการระบุความเร็วของเปลวไฟแก๊สเชื้อเพลิงจึงต้องระบุเป็นความเร็วสูงสุดและระบุส่วนผสมที่วัดความเร็ว นั้น อีกประการหนึ่ง ค่าความเร็วของเปลวไฟยังขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ด้วย ในการรายงานค่าจึงต้องระบุรายละเอียดและเงื่อนไขการทดลองไว้เสมอ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reactants	Flammability limits (% fuel by volume)		Stoichiometric composition (% fuel by volume)	Flame temperature (K)	Maximum burning velocity (m s ⁻¹)
	Lower	Upper			
H ₂ + O ₂	4.0	94	66	3083	11.0
CO + O ₂	15.5	94	66	2973	1.08
CH ₄ + O ₂	5.1	61	33	3010	4.5
C ₂ H ₂ + O ₂	—	—	—	3431	11.4
H ₂ + air	4.0	75	28.5	2380	3.1
CO + air	12.5	74	28.5	2400	0.45
CH ₄ + air	5.3	15	9.0	2222	0.45
C ₂ H ₂ + air	2.5	80	7.4	2513	1.58
C ₂ H ₄ + air	3.1	32	6.25	2375	0.75
C ₃ H ₈ + air	3.1	15	5.4	2244*	0.40
C ₃ H ₆ + air	2.2	9.5	3.8	2250*	0.43
n-C ₄ H ₁₀ + air	1.9	8.5	3.1	2365*	0.41
C ₄ H ₆ + air	1.5	7.5	2.7	2365*	0.41
C ₂ H ₄ O + air	3.0	80	7.75	2411*	1.05

* The flammability limits (after Coward and Jones [18]) apply to upward propagation in tubes. The flame temperatures refer to stoichiometric mixtures, except those marked* which are maximum values.

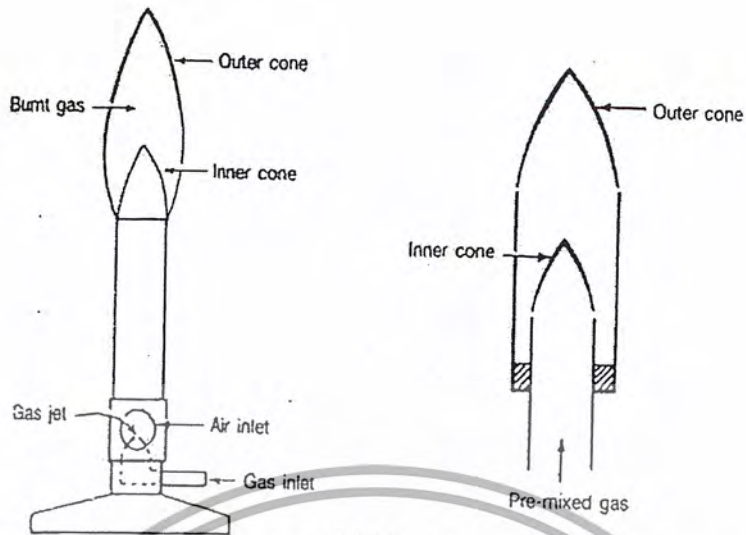
ตารางที่ 3.1 ขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟและ ความเร็วของเปลวไฟของแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

3 ความอยู่ตัวของเปลวไฟบนหัวเผา

ในทางปฏิบัติเราสามารถทำให้เปลวไฟอยู่กับที่ได้โดยใช้หัวเผา และในการใช้งานของแก๊สเชื้อเพลิงจำเป็นอย่างยั้งที่ต้องทำให้เปลวไฟอยู่ตัว (stable) ไม่ดับ หรือเปลี่ยนสภาพไปเมื่อสภาวะการใช้งานเปลี่ยนแปลง เช่นเมื่อเพิ่มหรือลดอัตราการป้อนแก๊ส หรือเมื่อมีกระแสอากาศที่ป้อนเปลี่ยนแปลง การทำให้เปลวไฟอยู่ตัวนี้ มีปัจจัยหลายประการ ส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของเปลวไฟ อีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงและส่วนผสม

4 ตะเกียงบุนเซน (Bunsen burner)

ก่อนอื่น ลองทำความเข้าใจเกี่ยวกับเปลวไฟ และความอยู่ตัวของเปลวไฟบนหัวเผาก่อน หัวเผาชนิดที่ง่ายที่สุดที่เป็นที่คุ้นเคยกันดี โดยเฉพาะในห้องปฏิบัติการ คือ ตะเกียงบุนเซน ดังรูปที่ 3.4 แก๊สเชื้อเพลิงถูกป้อนผ่านท่อเข้าสู่หัวฉีด (nozzle) หรือออริฟิซที่ฐานของตะเกียง เมื่อพ่นผ่านออกมาเกิดเป็นกระแสพุ่งผ่านออกจากหัวฉีดด้วยความดันสูง (gas jet) ทำให้เกิดความดันลดที่บริเวณปลายหัวฉีด อากาศที่อยู่รอบ ๆ จึงถูกดึงเข้ามาโดยไหลผ่านช่องเปิด (air inlet) แล้วเกิดการผสมด้วย Venturi effect ขณะไหลขึ้นไปที่คอคอดของท่อ กลายเป็นส่วนผสมไหลขึ้นสู่ด้านบนของท่อที่เป็นปากหัวเผาส่วนผสมนี้อยู่ในช่วงที่เกิดเปลวไฟได้ แต่จะมีเชื้อเพลิงเข้มข้น

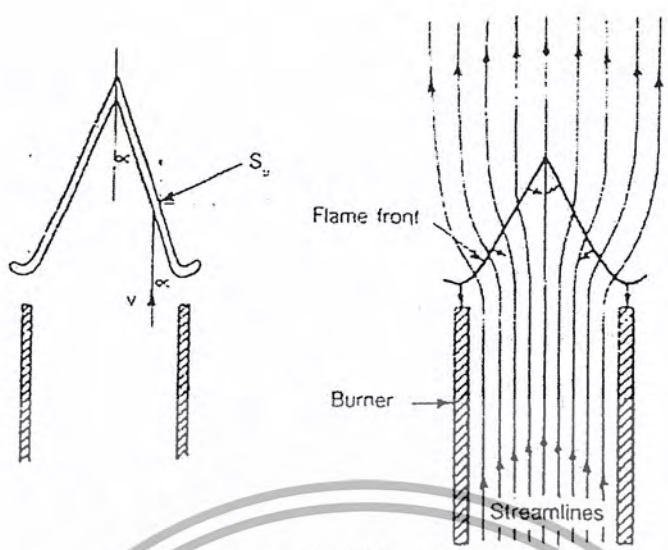


รูปที่ 3.4 ก) ตะเกียงเบนเซนและลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้น

ข) การพิสูจน์เปลวไฟแยกเป็นสองชั้นโดยวิธี สมิทเทลส์

เมื่อจุดด้วยไม้ขีด หรือแหล่งจุดระเบิดอื่น ก็จะเกิดเปลวไฟขึ้น เปลวไฟที่เกิดขึ้นจะเป็นเปลวไฟสองชั้น เปลวไฟชั้นใน (inner cone) เป็นเปลวไฟแก๊สผสมอากาศ (premixed flame) ที่ออกมาจากปากท่อหรือหัวเผา แต่เป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เพราะอากาศไม่เพียงพอ กลายเป็นผลผลิตที่ยังไหม้ได้ (combustibles) ซึ่งจะเผาไหม้ต่อไปในเปลวไฟชั้นนอก (outer cone) เปลวไฟนี้เกิดจากการแพร่เข้าหากันระหว่างผลผลิตที่ยังเผาไหม้ได้จากเปลวไฟชั้นในและอากาศที่อยู่โดยรอบ เรียกว่า เปลวไฟชนิดแพร่ (diffusion flame) ฐานของเปลวไฟทั้งสองมาจรดกันที่ปากหัวเผา แต่สามารถพิสูจน์ได้ว่าการเผาไหม้แยกออกจากกันอย่างอิสระโดยใช้หัวเผา ทดลองของสมิทเทลส์ (Smithells separator) ซึ่งใช้หลอดแก้วต่างขนาดกันสองหลอดสวมกันเป็นปากหัวเผา เมื่อเกิดเปลวไฟแล้วค่อย ๆ ยกหลอดแก้วชั้นนอกขึ้นทำให้เปลวไฟชั้นนอกถูกยกตามปากหลอดแก้วขึ้นไปแยกออกจากเปลวไฟชั้นในอย่างสมบูรณ์ ฐานของเปลวไฟไม่อยู่ติดกับปากหัวเผา ระยะห่างนี้เรียกว่า ระยะตายตัว (dead space)

รูปร่างของเปลวไฟที่เกิดขึ้นนี้เมื่อพิจารณาอย่างใกล้ชิดจะพบว่า มีรูปคล้ายกรวยคว่ำและสัมพันธ์กับเส้นโค้งความเร็วพาราโบลาของการไหลของแก๊สแบบราบเรียบ (laminar parabolic velocity profile) ซึ่งมีความเร็วสูงสุดที่กลางท่อและเข้าสู่ศูนย์ที่ริมท่อดังรูปที่ 3.5 แต่รูปร่างของเปลวไฟมีด้านยอดมนและที่ฐานบานออกคล้ายรูประฆังคว่ำ ที่ทุก ๆ จุดบนแนวเปลวไฟ ยกเว้นที่ยอดและที่ฐานความเร็วของแก๊สในแนวตั้งสูงกว่าความเร็วของเปลวไฟ ดังนั้นแนวเปลวไฟจึงถูกดันขึ้นจนกระทั่งความเร็วของเปลวไฟมีค่าเท่ากับความเร็วของแก๊สที่ตกในแนวตั้งฉากกับแนวเปลวไฟ นั่นคือ



รูปที่ 3.5 เส้นกระแสผ่านเปลวไฟแก๊สผสมอากาศแบบราบเรียบ และความสัมพันธ์ของความเร็วของเปลวไฟและมุมของกรวยแนวเปลวไฟ

$$S_u = U_g \sin \alpha \tag{3.3}$$

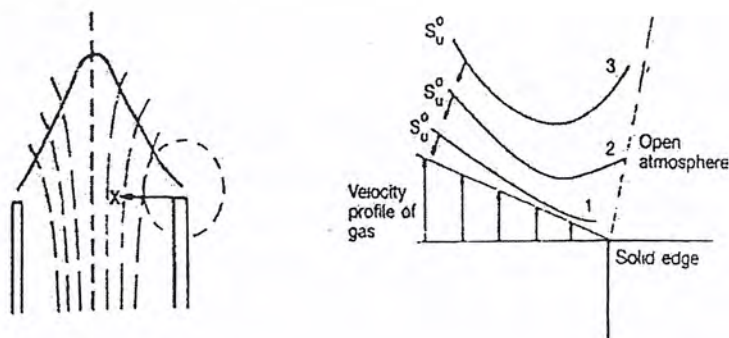
- เมื่อ
- S_u = ความเร็วของเปลวไฟ
 - U_g = ความเร็วของแก๊สในแนวตั้ง
 - α = มุมของกรวยแนวเปลวไฟที่ทำกับแนวตั้ง

เราสามารถใช้อนุพันธ์นี้หาความเร็วของเปลวไฟได้โดยใช้ทฤษฎีเศษที่ทำให้เส้นโค้งแนวเปลวไฟที่แบน ทำให้กำหนดแนวเปลวไฟและรัศมี α ได้ชัดเจน จัดเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้วัดความเร็วของเปลวไฟได้

การที่เปลวไฟถูกยึดติดอยู่ได้เหนือปากหัวเผาที่ตำแหน่งลงที่เนื่องจากอิทธิพลของขอบหรือริมของหัวเผา (burner rim) ซึ่งทำหน้าที่ทำลายอนุโมลอิสระที่ว่องไว และเป็นแอ่งรับความร้อน (heat sink) จากเปลวไฟ ถ้าเปลวไฟอยู่ในตำแหน่งสูงกว่าเดิม อนุโมลอิสระวิ่งมาชนขอบหัวเผาและถูกทำลายน้อยลง และขอบหัวเผารับความร้อนจากเปลวไฟน้อยลง เนื่องจากอยู่ห่างจากขอบหัวเผามากขึ้น ความเร็วของเปลวไฟจะเพิ่มขึ้นจนสูงกว่าความเร็วของแก๊ส ณ ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งจะดันเปลวไฟให้ตกกลับลงมาอีก แต่ถ้าเปลวไฟอยู่ในตำแหน่งต่ำลงมากกว่าเดิม อนุโมลอิสระวิ่งมาชนขอบหัวเผาและถูกทำลายมากขึ้นและขอบหัวเผารับความร้อนมากขึ้น เนื่องจากอยู่ชิดกับขอบหัวเผามากขึ้น ความเร็วของเปลวไฟจะลดลงจนต่ำกว่าความเร็วของแก๊ส ณ บริเวณเดียวกัน เปลวไฟจะถูกดันกลับขึ้นไปอีก จึงมีตำแหน่งที่เปลวไฟอยู่กับที่ได้เพียงตำแหน่งเดียวคือตำแหน่งเดิมนั่นเอง อิทธิพลของขอบหัวเผานี้สามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์อื่นๆ

ของเปลวไฟแก๊สผสมอากาศได้ ดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 เส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเปลวไฟและของแก๊สผสมอากาศบริเวณขอบหัวเผา

เปลวไฟของแก๊สผสมอากาศสามารถถูกยึดอยู่กับที่เหนือขอบหัวเผาได้ในช่วงความเร็วหนึ่งเท่านั้นจึงเกิดปรากฏการณ์ทำให้เปลวไฟไม่อยู่นิ่งหรือดับไปได้หลายประการ

เปลวไฟย้อนกลับ (flash back)

ถ้าลดความเร็วของแก๊สผสมอากาศลงจนถึงจุดจุดหนึ่งที่มีความเร็วของเปลวไฟสูงกว่าความเร็วของแก๊สผสมอากาศ ณ ตำแหน่งหนึ่งตำแหน่งใด เปลวไฟจะดันกลับเข้าไปในท่อผสมเพื่อใช้แก๊สผสมซึ่งไหลออกมาช้ากว่าอัตราเร็วของการเผาไหม้แล้วเปลวไฟจะดับ เรียกว่า เกิดเปลวไฟย้อนกลับ (ก่อนเกิดเปลวไฟย้อนกลับอาจเกิดเปลวไฟเอียง (tilted flame) ก่อนเนื่องจากเมื่อลดความเร็วลง แนวเปลวไฟย้อนเข้าไปในบริเวณผนังภายในท่อซึ่งมีความเร็วต่ำกว่าบริเวณกลางท่อ จึงยึดเปลวไฟอยู่ในตำแหน่งเอียง)

เปลวไฟถูกเป่าดับ (blow-off)

ในเชิงเปลวไฟอยู่ตัวถ้าเพิ่มความเร็วของแก๊สผสมอากาศขึ้น ในช่วงแรกจะเกิดปรากฏการณ์เปลวไฟยกตัว (flame lift) เนื่องจากเมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้น ความเร็วของเปลวไฟจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเปลวไฟจึงต้องยกตัวขึ้น (เพื่ออยู่ห่างจากขอบหัวเผามากขึ้น) มีผลให้เกิดการดึงอากาศเข้าผสมที่บริเวณฐานเปลวไฟมากขึ้น ซึ่งทำให้ความเร็วของเปลวไฟกลับลดลงมาอีก เนื่องจากส่วนผสมเจือจาง ดังนั้นเราจะเห็นเปลวไฟยกตัวสูงขึ้นและอยู่ในตำแหน่งที่ยกตัวนั้นได้ (lift flame) เมื่อเพิ่มความเร็วแก๊สอย่างต่อเนื่องจะถึงจุดหนึ่งที่เปลวไฟยกตัวแล้วหลุดออกไปจากปากหัวเผาอย่างฉิวเฉียด คือปรากฏการณ์เปลวไฟถูกเป่าดับ เปลวไฟยกตัวนี้อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้สองแบบ คือ ถ้าลดความเร็วของแก๊สลงเปลวไฟจะลดต่ำลง (drop back) แต่เปลวไฟยกตัวที่ความเร็วสูงอาจดับไปเลย (blowout)

ในบริเวณใกล้กับขอบหัวเผา (1 มิลลิเมตร) เมื่อมองภาพขยายแสดงได้ว่า เส้นโค้งแสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของแก๊สเป็นเส้นตรง จะได้ความสัมพันธ์

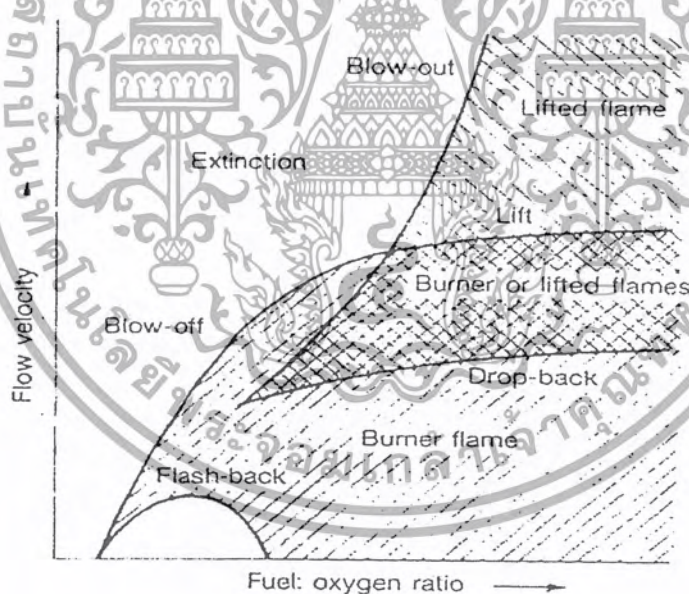
$$U_g = gy \quad (3.4)$$

เมื่อ U_g = ความเร็วของแก๊สที่ยังไม่เผาไหม้
 y = ระยะทางจาก stream boundary
 g = ค่าคงที่ (ค่าความชัน) เรียกว่า boundary velocity gradient

$$g = dU_g / dy \quad (3.5)$$

ในกรณีเปลวไฟย้อนกลับ ความเร็วของแก๊สลดลง เส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงเบนราบลงจนถึงจุดที่ต่ำกว่าความเร็วเปลวไฟ ค่าความชัน ณ จุดนี้คือ critical boundary velocity gradient at flashback, g_F ซึ่งสามารถแสดงได้ว่าเปลวไฟของหัวเผาที่เป็นพ็อกกลม g_F มีค่าเท่ากับ $8U_{AV} / d$ เช่นเดียวกัน

ความเร็วของเปลวไฟของแก๊สเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนเชื้อเพลิง-อากาศ หรือร้อยละของเชื้อเพลิงในอากาศด้วย ดังนั้นความอยู่ตัวของเปลวไฟจึงขึ้นอยู่กับทั้งความเร็วและอัตราส่วนเชื้อเพลิง-อากาศ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 พังรูปแสดงขีดจำกัดของปรากฏการณ์เปลวไฟแก๊สมผสมอากาศ

เปลวไฟดับ (flame quenching)

การเคลื่อนที่ของเปลวไฟกระทำได้สองวิธี คือ ให้เปลวไฟเคลื่อนที่เข้าหาส่วนผสมแก๊สและอากาศที่ไหลอยู่ภายในท่อ หรือให้ส่วนผสมไหลออกมาสู่ปากท่อแล้วจุดให้เกิดเปลวไฟขึ้นเหนือปากท่อ ซึ่งทำหน้าที่เป็นหัวเผา เปลวไฟจะอยู่ตัวได้ต่อเมื่ออัตราการสูญเสียอนุโมลอิสระที่ว่องไวและความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยกว่าอัตราการผลิต บริเวณพื้นผิวที่อยู่ใกล้กับแนวเปลวไฟจะทำหน้าที่ทำลายอนุโมลอิสระที่ว่องไวเนื่องจากจะวิ่งมาชนและถูกจับไว้ และพื้นผิวจะทำหน้าที่เป็นแอ่งรับความร้อนทำให้เปลวไฟเย็นลงจนดับไป ระยะระหว่างพื้นผิวกับแนวเปลวไฟที่ทำให้เปลวไฟดับนี้ เรียกว่า ระยะดับเปลวไฟ (quenching distance, D_q) ซึ่งได้จากการทดลองให้เกิดผสมอากาศไหลตามช่องว่างระหว่างแผ่นวัสดุสองแผ่น จุดระเบิดให้แนวเปลวไฟไหลผ่าน แล้วลดระยะระหว่างแผ่นวัสดุจนกระทั่งเปลวไฟไม่สามารถไหลผ่านได้ เป็นระยะดับเปลวไฟ ดังแสดงค่าที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 3.2

ตัวทำปฏิกิริยา	D_q , mm	ตัวทำปฏิกิริยา	D_q , mm
$H_2 + O_2$	0.2	$H_2 + \text{air}$	0.6
$CH_4 + O_2$	0.3	$CH_4 + \text{air}$	2.5
$C_2H_2 + O_2$	0.2	$C_2H_2 + \text{air}$	0.5
$C_2H_4 + O_2$	0.1	$C_2H_4 + \text{air}$	1.25
$C_3H_8 + O_2$	0.25	$C_3H_8 + \text{air}$	2.1
		$i-C_4H_{10} + \text{air}$	2.6
		$C_5H_6 + \text{air}$	1.9

ตารางที่ 3.2 ระยะดับเปลวไฟของแก๊สเชื้อเพลิง (การทดลองที่ 101 กิโลปาสกัลด 20 องศาเซลเซียส)

ถ้าทำการทดลองให้เกิดเปลวไฟเหนือปากท่อ จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่เปลวไฟไม่สามารถเกิดเหนือปากท่อได้เช่นเดียวกัน เรียกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางดับเปลวไฟ (quenching diameter, D_q) ระยะทางดังกล่าวมีความสัมพันธ์กันคือ

$$D_r = 1.54D_q \quad (3.6)$$

การที่พื้นที่ผิวทำหน้าที่ดับเปลวไฟได้ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนของแก๊สที่ยังไม่เผาไหม้ (thermal diffusivity, α) และความเร็วเปลวไฟ โดยสัมพันธ์กับระยะดับเปลวไฟเป็นเลขไร้มิติ คือ เลขเพกเลต (Peclet no.)

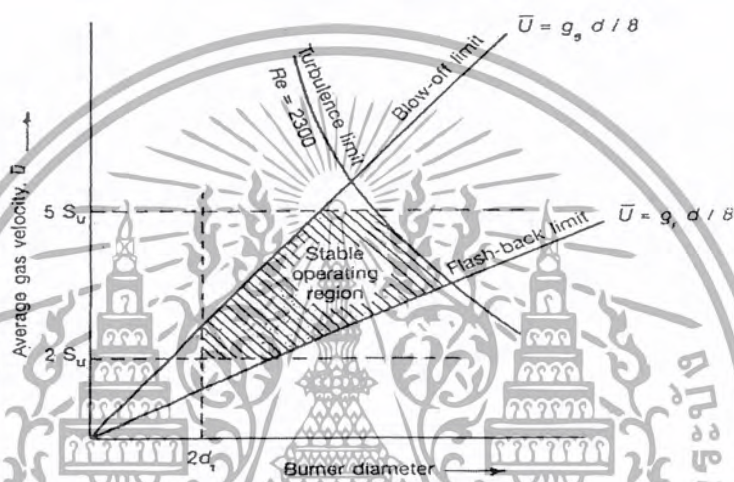
$$Pe = D_0 S_u / \alpha \quad (3.7)$$

การแพร่และการถ่ายโอนความร้อนสัมพันธ์เป็นส่วนกลับของความดัน ในขณะที่ความเร็วเปลวไฟไม่ขึ้นกับความดัน ดังนั้นระยะดับเปลวไฟจึงขึ้นอยู่กัส่วนกลับของความดัน เปลวไฟที่มีความเร็วสูงมีค่า ระยะดับเปลวไฟต่ำ ซึ่งพบว่าตรงกับการทดลอง ส่วนเลขเพกเลตมีค่าระหว่าง 40-50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 ความอยู่ตัวของเปลวไฟตะเกียงเบนเซน

เมื่อคำนึงถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อความอยู่ตัวของเปลวไฟที่กล่าวมาแล้ว รวมทั้งข้อจำกัดของเส้นผ่านศูนย์กลางดับเปลวไฟ (เพื่อเป็น 2 เท่าของค่า D_c) พฤติกรรมการไหลแบบราบเรียบ (เลขเรโนลด์ ไม่เกิน 2,300) และการเกิดเปลวไฟที่ดับบนหัวเผาเบนเซน (ความเร็วของแก๊สอยู่ระหว่าง $2S_u$ และ $5S_u$) สามารถแสดงข้อจำกัดด้วยกราฟดังรูปที่ 3.8 ดังนั้น จึงมีบริเวณที่จำกัดความเร็วของแก๊สและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเผาเพื่อให้ได้เปลวไฟอยู่ตัว ซึ่งใช้ออกแบบหัวเผาพื้นฐานได้ เช่น สำหรับไฮโดรคาร์บอนผสมอากาศ ความเร็วเปลวไฟประมาณ 0.4 เมตร/วินาที ดังนั้นความเร็วแก๊สสูงสุดที่ใช้ออกแบบหัวเผาเบนเซนคือ 2.0 เมตร/วินาที เป็นต้น



รูปที่ 3.8 ขีดจำกัดความเร็วเฉลี่ยของแก๊สและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเผาเบนเซนเพื่อให้ได้เปลวไฟอยู่ตัว

6 เปลวไฟแก๊สนิวติค (diffusion flame)

เป็นเปลวไฟที่เกิดจากการผสมระหว่างแก๊สกับอากาศเหนือปากหัวเผา โดยแยกป้อนแก๊สกับอากาศหัวเผาเพียงแต่ทำหน้าที่ป้อนแก๊ส การผสมเกิดขึ้นเนื่องจากควรรแพร่ (diffusion) ของโมเลกุลของเชื้อเพลิงและอากาศเข้าหากัน ถ้าเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) การแพร่เป็นระดับโมเลกุลซึ่งจะช้ามาก เช่นเปลวไฟของเทียนไข การผสมเกิดขึ้นโดยไอของโมเลกุลที่แตกตัวจากเทียนไขที่ระเหยออกจากไส้เทียนไขพบกับอากาศที่อยู่รอบ ๆ สำหรับแก๊สเชื้อเพลิงและในงานอุตสาหกรรม ใช้การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ทำให้การผสมเร็วขึ้นมาก เช่นในหัวเผาอุตสาหกรรม และกั้นกันแก๊ส ใช้หัวฉีดพ่นเชื้อเพลิงด้วยความเร็วสูงและนำอากาศปั่นเข้าผสม การผสมเป็นระดับใหญ่กว่าโมเลกุลซึ่งเกิดจากอากาศพลศาสตร์ (aerodynamics) ของระบบ

หัวเผามีบทบาทน้อยมากในการทำให้เปลวไฟอยู่ตัว เมื่อเทียบกับหัวเผาของเปลวไฟแก๊สผสมอากาศ เพราะเปลวไฟเกิดตลอดบริเวณที่มีการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศในสัดส่วนที่พอเหมาะ ไม่สามารถเกิดเปลวไฟย้อนกลับได้ ยกเว้นหัวฉีดที่มีขนาดเล็กมาก และเมื่อเพิ่มความเร็วแก๊ส เปลวไฟจะไม่ถูกเป่าดับแต่ความสูงจะเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

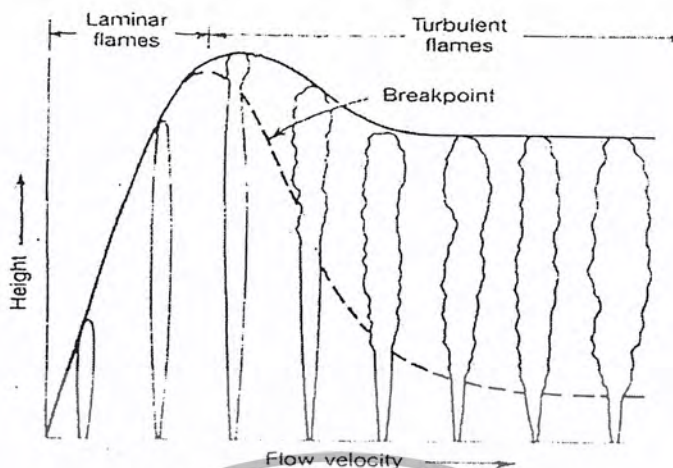
ถ้าพิจารณาส่วนตัดขวางของเปลวไฟชนิดนี้ จะพบว่าความเข้มข้นของเชื้อเพลิงสูงสุดที่แนวแกน และลดลงอย่างรวดเร็วที่ขอบเขตเปลวไฟ เช่นเดียวกัน ความเข้มข้นของออกซิเจนลดลงในบริเวณใกล้ เปลวไฟ และถูกใช้หมดไปที่ขอบเขตเปลวไฟ ในขณะที่ผลผลิตปฏิกิริยาเกิดสูงสุดที่ขอบเขตและลดลงเมื่อ เข้าสู่แนวแกนและสู่บรรยากาศล้อมรอบ ดังรูปที่ 3.9 ขอบเขตเปลวไฟเป็นบริเวณพื้นผิวที่ปฏิกิริยาเกิด สมบูรณ์ แต่เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดเร็วมาก จึงกำหนดให้เป็นแนวที่เชื้อเพลิงและอากาศเข้าผสมกันได้พอดี ตามมวลสารสัมพันธ์ เนื่องจากเชื้อเพลิงถูกใช้ในขอบเขตเปลวไฟไปตามแนวแกน ขอบเขตเปลวไฟจึง รวบเข้าหากันเมื่อเชื้อเพลิงถูกใช้หมดไป เปลวไฟจึงมีรูปร่างเป็นกรวยยาว ขอบเขตเปลวไฟมีลักษณะเป็น แนวเปลวไฟบางและราบเรียบคล้ายกับเปลวไฟแก๊สผสมอากาศ เปลวไฟนี้เกิดขึ้นได้เมื่อทั้งแก๊สและ อากาศไหลขึ้นสู่ด้านบนด้วยความเร็วเท่ากันซึ่งได้จากหัวเผาทั้งสองชั้น (concentric burners) แต่โดยทั่วไป มักใช้หัวเผาที่เป็นหัวฉีด (nozzle) ฉีดเชื้อเพลิงออกมาสู่บรรยากาศ ในลักษณะดังกล่าวที่ขอบเขตเปลวไฟ จะเกิดกระแสหมุนวนเล็ก ๆ ที่เรียกว่า eddies ช่วงขณะซึ่งทำให้การแพร่เข้าหากันช้าลงมีผลให้เปลวไฟสูง ขึ้น แต่เมื่อกระแสหมุนวนหมดไปการแพร่จะกลับรวดเร็วขึ้นทำให้เปลวไฟสั้นลง ผลที่เกิดขึ้นคือเราจะเห็น เปลวไฟไหว (flicker) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเปลวไฟชนิดนี้



รูปที่ 3.9 เส้นโค้งความเข้มข้นของเชื้อเพลิง ออกซิเจน และผลผลิตปฏิกิริยาตามแนวตัดขวางของเปลวไฟ ชนิดแพร่

การศึกษาเกี่ยวกับเปลวไฟชนิดแพร่กระทำได้อย่างมากเพราะเปลวไฟชนิดนี้ไม่มีลักษณะและ พารามิเตอร์เฉพาะดังเช่นเปลวไฟแก๊สผสมอากาศ ซึ่งมีค่าความเร็วเปลวไฟเป็นค่าเฉพาะที่สำคัญ อย่างไรก็ตามสามารถแสดงค่า ความสูงของเปลวไฟ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วของแก๊สและเลขเรโนลด์ในช่วง การไหลแบบราบเรียบและเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อมีการไหลเปลี่ยนเป็นแบบปั่นป่วน ดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ผังรูปแสดงโครงสร้างของเปลวไฟชนิดแพร่แบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนที่สัมพันธ์กับอัตราเร็วของการไหล

ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ ความสูงของเปลวไฟเพิ่มขึ้นไปตามอัตราเร็วเป็นสัดส่วนเส้นตรง จนกระทั่งเริ่มเข้าสู่การไหลแบบปั่นป่วน จะเห็นแนวเปลวไฟที่ยอดไม่ราบเรียบเกิดรอยย่น (wrinkle) ขึ้น ความสูงของเปลวไฟเริ่มลดลงจนเข้าสู่ค่าคงที่ ในขณะที่ช่วงเปลวไฟไม่ราบเรียบกว้างขึ้น รอยต่อระหว่างเปลวไฟที่ราบเรียบกับเปลวไฟที่มีรอยย่นเรียกว่า จุดหัก (break point) ซึ่งจะลดตำแหน่งลงตามลำดับจนเข้าสู่ค่าคงที่เช่นกัน ดังนั้นเปลวไฟแบบแพร่ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งจะมีความสูงเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ไม่ว่าจะเพิ่มความเร็วมากขึ้นเพียงใดก็ตาม อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์เปลวไฟยกตัวได้เช่นเดียวกับเปลวไฟเกิดผสมอากาศ ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากโมเมนตัมของแก๊สที่พุ่งออกจากหัวฉีดที่สูงขึ้น จึงดึงอากาศเข้ามาผสมมากขึ้นจนเกิดส่วนผสมในช่วงขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟ จึงมีปรากฏการณ์คล้ายกันเมื่อเพิ่มความเร็วต่อไปอีก จะเกิดเปลวไฟยกตัวอย่างถาวร นั่นคือเกิดเปลวไฟดับ ในทางปฏิบัติควบคุมไม่ให้เกิดเปลวไฟดับโดยบังคับทิศทางการไหลของแก๊สและอากาศให้เกิดการปะทะกัน หรือให้กระแสหนึ่งกระแสไหลอย่างปั่นป่วน หรือ ปั่นหมุนวน (swirl) เข้ามา

ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ (เลขเรโนลด์ ไม่เกิด 2,300) Hottel แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเปลวไฟกับอัตราเร็วของแก๊ส ไว้ดังนี้

$$H = (\pi d_n^2 U_0 / 4)^{1/2} \quad (3.8)$$

เมื่อ H = ความสูงของเปลวไฟ

d_n = เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด

U_0 = ความเร็วของแก๊สที่ยังไม่เผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ระบบการเผาไหม้ในเตาหุงต้มและอุตสาหกรรม

แก๊สเชื้อเพลิงต่างจากเชื้อเพลิงชนิดอื่นเนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่รู้จักกันดีและมีการใช้งานกันแพร่หลาย ตั้งแต่การใช้งานขนาดเล็กตามบ้านเรือนเพื่อหุงต้ม ทำน้ำร้อน ทำอากาศอุ่นในบ้านการใช้งานขนาดปานกลางเพื่อการพาณิชย์เพื่อประโยชน์เดียวกัน ไปจนถึงการใช้งานขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรม ทั้งนี้เพราะแก๊สเชื้อเพลิงมีข้อได้เปรียบหลายประการ ได้แก่

1. เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด องค์ประกอบไม่เปลี่ยนแปลงมาก ให้ค่าความร้อนสูง
2. การผสมระหว่างแก๊สและอากาศง่าย ทำให้เผาไหม้ได้สมบูรณ์โดยไม่ต้องใช้อากาศเกินพอหรือใช้เพียงเล็กน้อย
3. การใช้และควบคุมอัตราการป้อนแก๊สเข้าสู่อุปกรณ์กระทำได้ง่าย
4. การเผาไหม้สะอาด ได้ฟลูแก๊สที่สะอาด ไม่มีเถ้า ไม่มีแก๊สกรด จึงไม่ต้องมีค่าใช้จ่ายด้านการกำจัดสารมลพิษ
5. สามารถควบคุมบรรยากาศหลังการเผาไหม้ได้ง่าย (ในกรณีหัวเผาอุตสาหกรรม) จึงเหมาะสำหรับการเผาที่ต้องการควบคุมบรรยากาศภายในเตาให้เกิดปฏิกิริยาตามต้องการ

แก๊สเชื้อเพลิงมีข้อจํากัดอยู่บ้าง ได้แก่ ราคาสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอื่น การขนส่งและการเก็บต้องคำนึงถึงความปลอดภัย และใช้อุปกรณ์ที่มีมาตรฐานสูงและต้องตรวจสอบเป็นประจำ เพื่อป้องกันอันตรายจากการรั่วไหล และการเกิดอัคคีภัย นอกจากนี้เปลวไฟจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงให้ความร้อนชนิดแผ่รังสีต่ำกว่าเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็ง ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนจึงต่ำกว่าอย่างไรก็ดี เนื่องจากความสะดวกและความสะอาด ตลอดจนบรรยากาศการเผาไหม้ควบคุมง่าย แก๊สเชื้อเพลิงจึงเป็นเชื้อเพลิงที่ดีที่สุดในการให้ความร้อนในภาคเศรษฐกิจต่าง ๆ

3.2.3 หัวเผาในบรรยากาศเปิด (Atmospheric (open) burners)

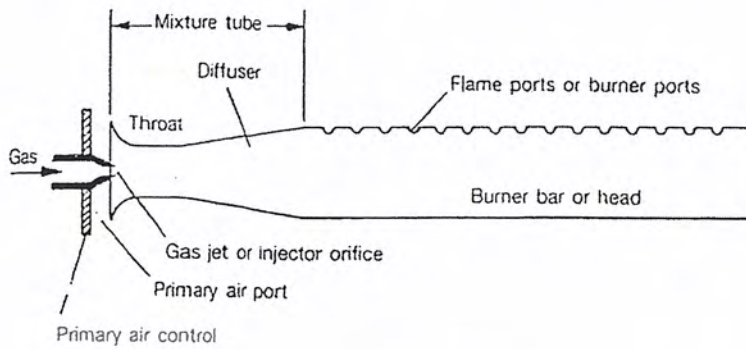
หัวเผากลุ่มนี้ มีให้เห็นทั่วไป เช่น หัวเตาแก๊สหุงต้มที่มีช่องเปลวไฟออกเป็นรูวงกลมโดยรอบเหมือนโดนัท หัวเตาอบแก๊สที่ใช้อบขนม ที่มีช่องเปลวไฟออกเป็นแนวยาวหลายแนวขนานกัน ทั้งที่ทำในประเทศและที่นำเข้า หัวเผากลุ่มนี้เป็นหัวเผานิวเคลียร์เปลวไฟแก๊สผสมอากาศ (premixed flames) ใช้หลักการเดียวกับตะเกียงเบนเซน คือใช้โมเมนตัมของแก๊สที่พุ่งผ่านหัวฉีดออกมาดึงอากาศส่วนแรกเข้าผสมเป็นส่วนผสมแรก เกิดเปลวไฟขึ้นในเหนือหัวเผา แล้วเกิดเปลวไฟขึ้นนอกโดยการแพร่ของอากาศที่อยู่ล้อมรอบเข้าหาผลผลิตที่ยังเผาไหม้ได้ที่ออกมาจากเปลวไฟขึ้นใน เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ เนื่องจากเป็นหัวเผาที่ใช้งานกันทั่วไป จึงควรทำความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการเบื้องต้นก่อน

การออกแบบเบื้องต้น

หลักการของตะเกียงเบนเซนคือการดึงอากาศเข้าผสมกับเชื้อเพลิงโดยอาศัยโมเมนตัมของเชื้อเพลิงจึงเรียกหัวเผานิวเคลียร์ว่า หัวเผาดึงอากาศเข้าในบรรยากาศเปิด (atmospheric aerated burners) รูปที่

3.11 แสดงส่วนประกอบหลักของหัวเผานิวเคลียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ภาพแสดงส่วนประกอบหัวเผาถึงอากาศเข้าในบรรยากาศเปิด

ส่วนประกอบสำคัญของหัวเผาถึงอากาศเข้าในบรรยากาศเปิด มี 5 ส่วนคือ

1. หัวฉีดแก๊ส
2. ช่องเปิดให้อากาศส่วนแรกเข้า (primary air port)
3. ท่อผสม (ส่วนคอคอด และ ท่อแวนทิวรี) (throat and diffuser)
4. ส่วนหัวเตา (burner head)
5. ช่องเปลวไฟ (flame port or burner port)

1. หัวฉีดแก๊ส

เตาหุงต้มทั่วไปใช้แก๊สที่มีความดันต่ำ ประมาณ 625-2,000 ปาสกาล (2.5-8 นิ้วน้ำ) ป้อนแก๊สผ่านท่อเข้ามาที่หัวฉีด (nozzle หรือ orifice) อัตราเร็วของแก๊สที่ไหลออกจากหัวฉีดแสดงได้โดยใช้สมการของ Bernoulli

$$Q = fA_0(H_0 / \text{sp. gr.})^{1/2} \quad (3.9)$$

- เมื่อ
- Q = อัตราเร็วโดยปริมาตรของแก๊ส (volumetric flow rate) m^3/hr
 - A_0 = พื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด (injector orifice cross sectional area) mm^2
 - H_0 = ความดันในท่อแก๊สที่หัวฉีด (static gas pressure at the orifice) mbar
 - Sp gr = ความถ่วงจำเพาะของแก๊ส (specific gravity of gas (air = 1))

เนื่องจากการไหลของแก๊สผ่านหัวฉีดมีแรงต้านทานเนื่องจากความเสียดทาน ซึ่งมีผลต่อการต้านทานการไหลของแก๊สต่างกัน และมีการออกแบบหัวฉีดให้ท่อทำมุมสอบเข้าหาปลายหัวฉีดได้ต่าง ๆ กัน ดังนั้นจึงมีผลกับค่าพื้นที่หน้าตัดของเจ็ท โดยมีเทอมสัมประสิทธิ์การปล่อยแก๊สผ่านของหัวฉีด (discharge coefficient of orifice, C_d)

เพิ่มเข้าไปในสมการ เมื่อแทนค่าในระบบหน่วยเอสไอ ได้ว่า
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เช่าได้เห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q = 0.046A_o C_{do} (H_o / \text{sp gr})^{1/2} \quad (3.10)$$

นั่นคือ $A_j = A_o C_{do}$ และ C_{do} มีค่าอยู่ระหว่าง 0.85-0.95

เมื่อแทน Q ด้วย I โดยคูณสมการด้วยค่าความร้อนของแก๊สและแทนด้วยค่าวอบเบ

$$(Q)(\text{HHV}) = 0.046A_o C_{do} \text{HHV} (H_o / \text{sp gr})^{1/2}$$

$$I = 0.046A_o C_{do} W (H_o)^{1/2} \quad (3.11)$$

เมื่อ $I =$ ความร้อนที่เข้าไปในหัวเผา (heat input to burner) MJ/hr

2. ช่องเปลวไฟและช่องเปิดให้อากาศส่วนแรกเข้า

การฉีดแก๊สผ่านออกมาจากหัวฉีด เข้าไปในส่วนที่เป็นคอคอด เป็นกรณีของ confined jet ซึ่งจะมี ความดันลดที่บริเวณปลายหัวฉีด อากาศจึงถูกดึงเข้ามาผสมรูปที่ 3.12 แสดงบริเวณและสัญลักษณ์ของตัวแปรต่างๆ



รูปที่ 3.12 การดึงอากาศเข้าผสมโดย confine jet ในตะเกียงบุนเซน

จากทฤษฎี confined jet เมื่อทำคูล โมเมนตัมระหว่างตำแหน่งปลายหัวฉีด และ ตำแหน่งปลายท่อผสมหลังคอคอด สามารถแสดงได้ว่า ถ้าความดันที่ทั้งสองตำแหน่งเท่ากัน (เท่ากับบรรยากาศ) อัตราส่วนระหว่างอากาศที่ถูกดึงเข้ามาผสมต่อแก๊สที่ผ่านหัวฉีด จะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของแก๊สและจะสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดของเจ็ท คอคอด และปลายท่อผสม ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(r+1)(r+sp\ gr) = 2sp\ gr.(A_t/A_j)/[1+K(A_t/A_p)]^2 \quad (3.12)$$

- เมื่อ r = อัตราส่วนระหว่าง อากาศที่ถูกดึงเข้ามาผสมและแก๊สที่ผ่านหัวฉีด
 $sp\ gr$ = ความถ่วงจำเพาะของแก๊สเชื้อเพลิง
 A_t = พื้นที่หน้าตัดของคอคอด
 A_j = พื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด
 A_p = พื้นที่หน้าตัดของส่วนปลายท่อผสม (นั่นคือช่องเปลวไฟ)
 K = เป็นค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การปล่อยผ่านของแก๊สที่ท่อผสม (C_{dp}) และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (friction coefficient, C_F) มีค่า

$$K = C_{dp}^{-2} + C_F$$

เราต้องการค่า r ที่สูงสุด นั่นคือ differentiate เทียบค่า A ได้

$$1 - K(A_t/A_p)^2 = 0$$

$$(A_t/A_p) = K^{-1/2}$$

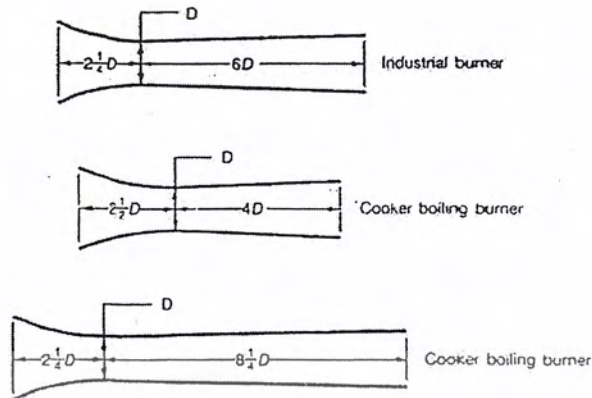
รวมสมการเข้าด้วยกันได้ว่า

$$(r+1)(r+sp\ gr) = (sp\ gr.A_t)/A_j \quad (3.13)$$

ซึ่งใช้หาค่า พื้นที่หน้าตัดของคอคอด A_t ได้ ถ้ารู้ค่า r เช่นเดียวกันถ้ามีหัวเผาอยู่แล้วสามารถหาอัตราการดึงอากาศเข้าผสมได้ โดยทั่วไปค่า r ประมาณ 50-70% ของอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี และ C_{dp} มีค่าประมาณ 0.65 และ C_F มีค่าประมาณ 2 ดังนั้นจะได้ว่า ค่า $K^{-1/2}$ อยู่ระหว่าง 0.45-0.65 และใช้สมการหาค่า A_p ได้

3. การออกแบบคอคอดและท่อผสม

ออกแบบให้สัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดของคอคอด ซึ่งคำนวณจากพื้นที่หน้าตัดของเจ็ท มักใช้สัดส่วนดังแสดงในรูปที่ 3.13



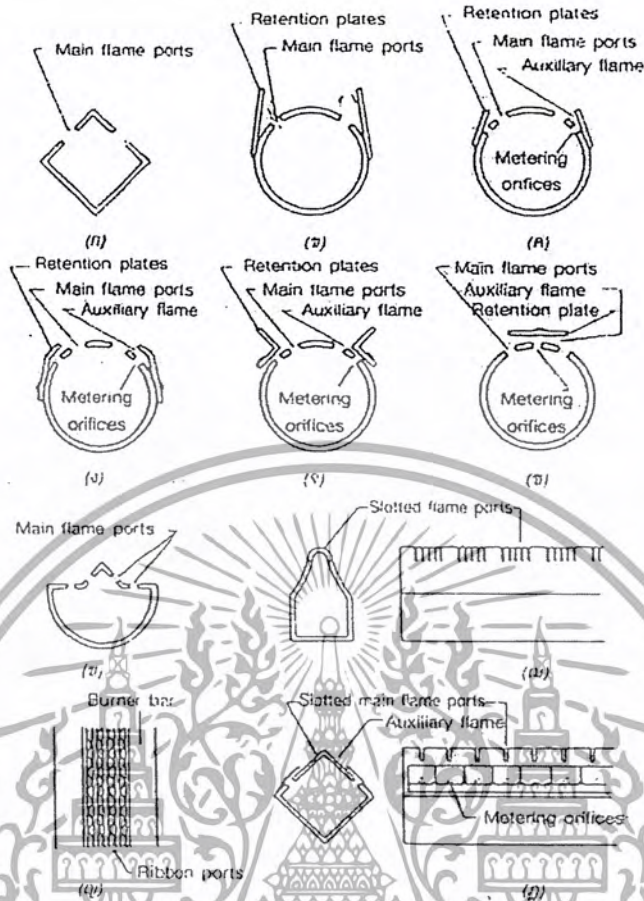
รูปที่ 3.13 สัดส่วนของคอคอดและท่อผสม

4. การออกแบบช่องเปลวไฟ

ตามหลักการเปลวไฟอยู่ตัว ช่องเปลวไฟต้องมีขนาดเล็ก (เล็กกว่า ระยะดับเปลวไฟ) เพื่อป้องกันเปลวไฟไหลย้อนกลับเข้าไปในท่อผสม แต่ในทางปฏิบัติสร้างได้ยาก และถอดมันได้ง่ายขณะใช้งาน จึงถือเป็นแนวปฏิบัติให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5-3.0 มิลลิเมตร แต่ละช่องห่างกันเป็นสัดส่วนกับขนาดของช่องเปลวไฟ คือ

เส้นผ่านศูนย์กลางช่องเปลวไฟ มิลลิเมตร	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางช่องเปลวไฟ มิลลิเมตร
1.6	8.4
2.4	11.4
3.2	16.5

สำหรับการป้องกันเปลวไฟถูกเป่าดับ โดยเฉพาะแก๊สที่มีความเร็วของเปลวไฟต่ำ เช่น แก๊สธรรมชาติ แก๊สปิโตรเลียมเหลว จำเป็นต้องมีการออกแบบที่ช่วยให้ความร้อน (และอนุโมลอิสระ) สะท้อนกลับไปที่เปลวไฟ เช่นมีแผ่นโลหะเล็ก ๆ (retention plates) ที่ฐานเปลวไฟ หรือมีเปลวไฟเล็ก ๆ (auxiliary flames) หรือออกแบบให้เปลวไฟปะทะกันเพื่อช่วยยึดเปลวไฟไว้บนหัวเผา ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ช่องเปลวไฟรูปร่างและลักษณะต่างๆ กัน

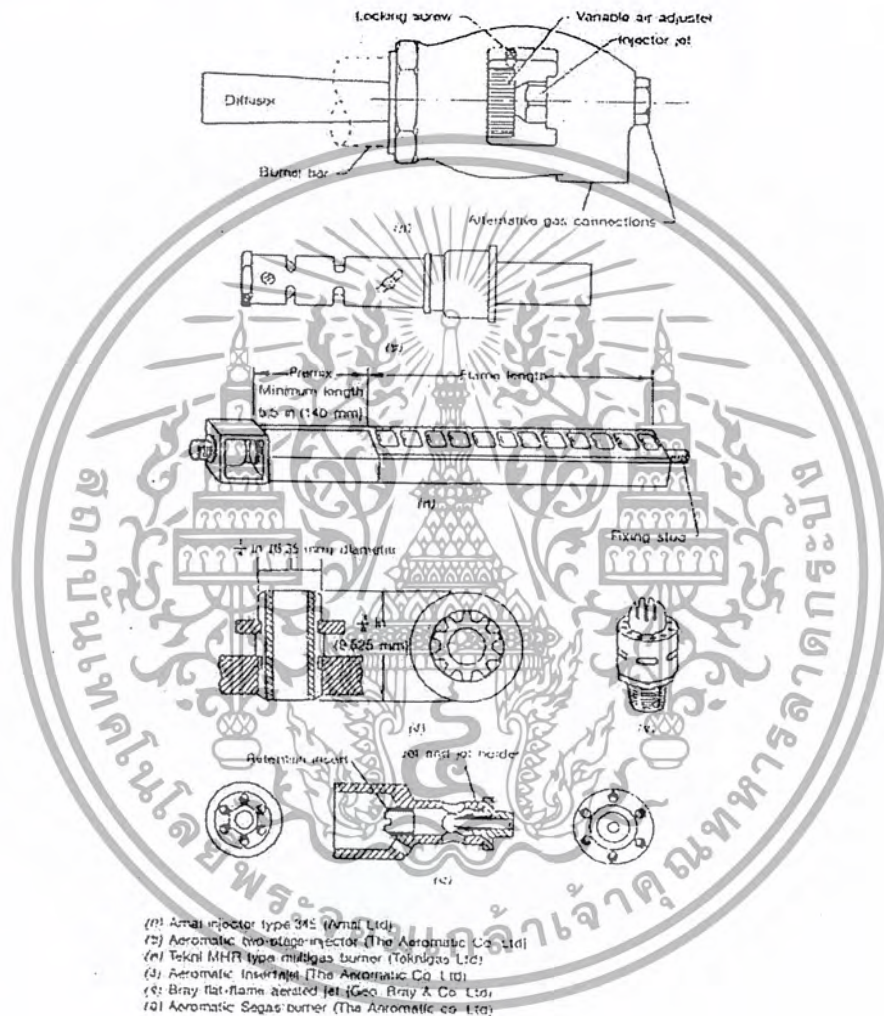
การออกแบบรูปร่างลักษณะ และการจัดวางช่องเปลวไฟ ต้องสอดคล้องกับขนาดหัวเตาและลักษณะการใช้งานด้วย เช่น เตากลม (ring burner) อาจออกแบบให้มีช่องเปลวไฟสองชั้น เพื่อไม่ให้ขนาดของหัวเตาใหญ่เกินไป และเพื่อให้การใช้งานสะดวกสามารถควบคุมการป้อนแก๊สแยกกันได้ เตายาว (bar burner) อาจออกแบบหัวเตาให้เป็นท่อกลม หรือเป็นแท่งแบนยาว และช่องเปลวไฟเป็นร่องลึกแบน เพื่อให้เปลวไฟยาวสูง เหมาะกับการใช้งาน เช่น ผ่านขึ้นไประหว่างช่องว่างของท่อน้ำเพื่อทำน้ำร้อน ช่องว่างในเตาอบขนม หรือเตาเผาต่างๆ เป็นต้น

จากค่า A_p ซึ่งเป็นพื้นที่รวมของช่องเปลวไฟ ต้องนำมาจัดแบ่งและจัดวางให้เป็นช่องเปลวไฟเล็กๆ ที่มีรูปร่างและลักษณะเปลวไฟที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยพื้นที่หน้าตัดของช่องเปลวไฟเล็กๆ รวมกันทั้งหมดแล้วต้องเท่ากับพื้นที่รวมของช่องเปลวไฟที่คำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. หัวเผาแก๊สผสมอากาศในบรรยากาศเปิดแบบต่าง ๆ

แบบความดันต่ำ (low – pressure aerated burner) ใช้แก๊สที่ความดันต่ำ ประมาณ 625-2,000 ปาสกัล (2.5-8 นิ้วน้ำ) มีแบบและบริษัทผู้ผลิตจำหน่ายอยู่มากมาย โดยมีหลักการออกแบบคล้ายกับที่แสดงไว้แล้ว มีบางแบบออกแบบให้เปลี่ยนหัวฉีดได้เอง หรือสวมหัวฉีดซ้อนเข้าไป เพื่อให้สามารถปรับใช้กับแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าวอบเบ และความเร็วของเปลวไฟต่างกันได้ เช่น สลับใช้ระหว่างแก๊สธรรมชาติ และแก๊สปิโตรเลียมเหลวได้ ดังรูปที่ 3.15



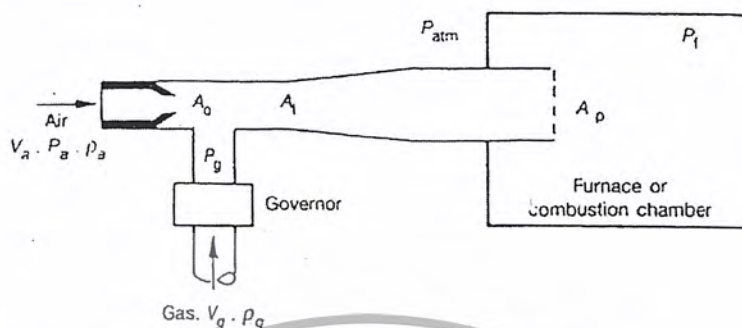
รูปที่ 3.15 หัวเผาและหัวฉีดแก๊สผสมอากาศชนิดความดันต่ำบางแบบ

แบบความดันสูง (high – pressure aerated burner) ใช้แก๊สที่ความดันสูง เช่นแก๊สธรรมชาติที่ขนส่งในท่อมีความดันสูงประมาณ 69-100 กิโลปาสกัล (20.3-29.5 นิ้วปรอท) ซึ่งจะดึงอากาศเข้ามาผสมได้อัตราส่วนสูงมากจนเท่ากับที่ต้องการตามทฤษฎี และให้เปลวไฟที่มีอุณหภูมิสูงกว่าการออกแบบคล้ายกับแบบความดันต่ำแต่ที่ช่องเปลวไฟต้องมีที่อุปกรณ์ช่วยยึดเปลวไฟ ซึ่งคล้ายกับที่ไว้ในหัวเผาชนิดอากาศดึงแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 หัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิดอากาศดิ่งแก๊ส (premixed air blast burner)

หัวเผานี้ใช้อากาศป้อนผ่านท่อเข้ามาที่หัวฉีดและใช้ความดันของอากาศดิ่งเชื้อเพลิงเข้ามาผสมดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 หลักการและเทอมที่ใช้กับหัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิดอากาศดิ่งแก๊ส

โดยที่การเผาไหม้ต้องใช้ปริมาตรของอากาศสูงมากเพื่อเทียบกับของแก๊สเชื้อเพลิง การใช้โมเมนตัมของอากาศดิ่งเชื้อเพลิงเข้าผสมจึงเป็นหลักการการใช้พลังงานจลน์ที่ถูกต้อง หัวเผานี้ใช้กันมากในอุตสาหกรรมเพราะ

1. ได้สัดส่วนการผสมที่ต้องการตามทฤษฎี
2. ปรับอัตราการป้อน (throughput) ได้ง่ายโดยปรับเพียงอากาศ
3. มีอัตราส่วนการป้อนระหว่างสูงที่สุดต่อต่ำที่สุด (turn down ratio) สูง
4. ส่วนผสมที่ช่องเปลวไฟมีความดันสูงจึงทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ เปลวไฟต้องการปริมาตรห้องเผาไหม้น้อย
5. ฟลูแก๊สมีโมเมนตัมสูงทำให้เกิดการกระจายของแก๊สร้อนไปทั่วเตาเผา และการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาดีกว่า
6. เปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงได้สะดวก

หลักการดิ่งแก๊สเข้ามาผสมกับเจ็ทของอากาศเช่นเดียวกับการดิ่งอากาศเข้ามาผสมกับเจ็ทของแก๊ส แต่ในบริเวณปลายหัวฉีดมีท่อนำแก๊สเข้ามาแทนช่องอากาศ ดังนั้นสามารถใช้สมการมาปรับปรุงได้เป็น

$$Q_{\text{air}} = 0.046A_0C_{\text{dao}}(H_0/\text{sp gr})^{1/2} \quad (3.14)$$

เมื่อ C_{dao} = มีค่าระหว่าง 0.85-0.95

H_0 = เป็นความดันของอากาศที่ป้อนเข้าออร์ฟิซ ประมาณ 2.5-7.5 กิโลปาสกาล

Sp gr = เป็นความถ่วงจำเพาะของอากาศ ซึ่ง =1

และ เนื่องจาก

$$Q_{\text{air}} = rQ_{\text{gas}}$$

ดังนั้น

$$rQ_{\text{gas}} = 0.046A_0C_{\text{dao}}(H_0)^{1/2} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

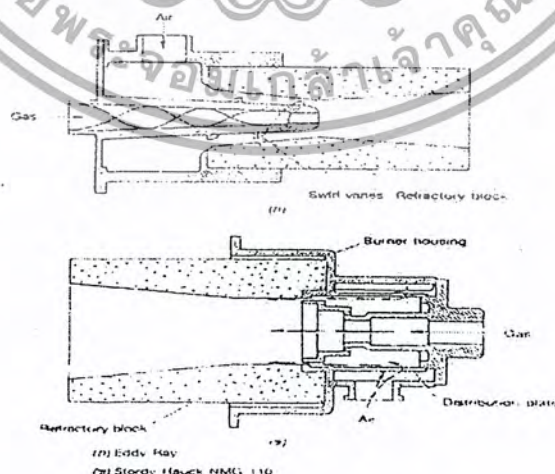
จากรูปทฤษฎี confined jet แสดงได้ว่าถ้าความดันที่ปลายหัวฉีดเท่ากับความดันที่ปลายท่อผสม (ช่องเปลวไฟ) แล้วค่า r จะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนอากาศผ่านหัวฉีด (Q_{air}) นั่นคือ ถ้าแก๊สเข้าที่ความดันบรรยากาศ (P_g) และช่องเปลวไฟ (ซึ่งอยู่ในเตาเผา) อยู่ที่ความดัน (P_g) เช่นกันแล้ว อากาศจะสามารถดึงแก๊สเข้ามาผสมที่อัตราส่วนระหว่างอากาศและแก๊สคงที่ตลอดเวลา การจัดให้แก๊สเข้ามาผสมที่ความดันบรรยากาศกระทำได้โดยให้แก๊สผ่านอุปกรณ์ควบคุมความดันคงที่ที่เรียกว่า zero governor ซึ่งใช้หลักการของลวดสปริง (tension-spring type) หรือแผ่นไดอะแฟรม (diaphragm type) ดันให้วาล์วเปิดหรือปิด เพื่อปล่อยให้แก๊สผ่านไปยังหัวฉีดที่ความดันคงที่ตลอดเวลา ดังนั้นระบบการป้อนแก๊สสู่หัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิดอากาศดึงแก๊สจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ระบบการป้อนแก๊สที่ความดันบรรยากาศสู่หัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิดอากาศดึงแก๊ส

3.2.5 หัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิดผสมในอุโมงค์ (Tunnel mixing air blast burners)

การผสมระหว่างแก๊สและอากาศกระทำได้ โดยพ่นทั้งแก๊สและอากาศเข้ามา กระแสทั้งสองถูกบีบให้เข้าผสมกันภายในท่อที่มีลักษณะแคบยาวเหมือนอุโมงค์แล้วเกิดการเผาไหม้ ณ บริเวณนั้น หัวเผากลุ่มนี้มีข้อดี ที่จะไม่เกิดเปลวไฟย้อนกลับ ช่วยให้เปลวไฟอยู่ตัวและยึดอยู่กับที่ได้ในช่วงกว้าง สามารถใช้อากาศที่อุ่นก่อนและมีความดันต่ำได้ รูปที่ 3.18 แสดงหัวเผาที่ใช้หลักการดังกล่าว



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างหัวเผาชนิดผสมในท่ออุโมงค์

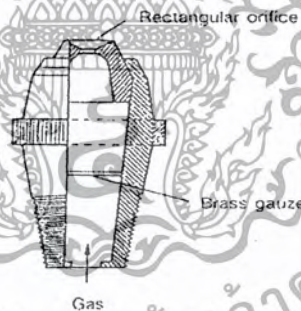
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบ ก แก๊สถูกป้อนเข้ามาในหัวฉีด อากาศถูกป้อนเข้ามาโดยครีบบิ้น (swirl vanes) ที่ติดอยู่โดยรอบหัวฉีด แต่การป้อนอากาศมีน้อย ส่วนใหญ่ของอากาศไหลในแนวแกน
- แบบ ข อากาศเข้ามาแยกกันถึง 3 ตำแหน่ง ในแนวสัมผัส แนวแกนตรงกลาง และแนวแกนในช่องว่างระหว่างท่อ นำแก๊สเข้า

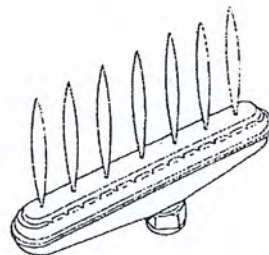
3.2.6 หัวเผาชนิดแก๊สผสมอากาศภายหลังหรือเปลวไฟชนิดแพร่ (Post aerated หรือ diffusion flame burners)

หัวเผาชนิดนี้ฉีดแก๊สเข้ามาบริเวณปากหัวเผาแล้วจึงมาพบกับอากาศจากภายนอก หรืออากาศที่นำเข้ามาผสม มีทั้งชนิดที่มีการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน ลักษณะสำคัญของหัวเผาชนิดนี้คือ ให้เปลวไฟสุกสว่าง ไม่เกิดเปลวไฟย้อนกลับ จึงให้อัตราส่วนการป้อนสูงที่สุดต่อต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังมีขนาดกระทัดรัดและไม่มีเสียงดังเหมือนหัวเผาชนิดแก๊สผสมอากาศ (เสียงฟูที่เกิดจากการดึงอากาศเข้าผสม) รวมทั้งหัวเผาไม่ร้อนจึงไม่เกิดการอุดตันที่ช่องเปลวไฟ เนื่องจากการเผาไหม้ไม่เข้มข้นเฉพาะบริเวณปากหัวเผาแต่เกิดขึ้นตลอดความยาวของเตาเผา

เนื่องจากหัวเผานี้ไม่มีผลต่อความอยู่ตัวของเปลวไฟ มีผลต่อรูปร่างและขนาดเท่านั้น จึงขอยกตัวอย่างเฉพาะชนิดการไหลแบบราบเรียบซึ่งใช้กันมากในการใช้งานขนาดเล็กตลอดจนการใช้งานในอุตสาหกรรมด้วย รูปที่ 3.19 แสดงหัวเผาเบรย์ (Bray burner) ที่นิยมใช้กันมาก รูปที่ 3.20 แสดงหัวเผารูเข็ม (pinhole burner) และรูปที่ 3.21 แสดงหัวเผามทริกซ์ (matrix burner) ตามลำดับ

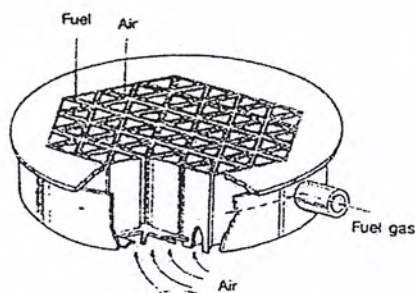


รูปที่ 3.19 หัวเผาเบรย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม



รูปที่ 3.20 หัวเผารูเข็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 หัวเผาเมทริกซ์

หัวเผาเบรย์มักทำด้วยทองเหลือง มีปลายเป็นเซรามิก รูถีดมีรูปร่างแน่นอนทำให้เกิดเปลวไฟแผ่เป็นรูปพัด หรือทำให้เกิดเป็นรูปร่างอื่นตามต้องการได้ง่าย ใช้ความดันแก๊สประมาณ 250-625 ปาสกาล อัตราเร็วระหว่าง 0.018-0.39 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ที่ความดัน 380 ปาสกาล

หัวเผารูเข็มทำด้วยเหล็กกล้าเจาะรูขนาด 0.3-0.4 มิลลิเมตร เป็นเปลวไฟหลักและมีเปลวไฟเสริมที่ฐานโดยรอบ

หัวเผาเมทริกซ์มีการออกแบบที่น่าสนใจ โดยจัดวางให้ช่องแก๊สออกจากช่องว่างโดยรอบช่องอากาศที่จัดเป็นรูปสามเหลี่ยมซึ่งด้านล่างเปิดให้อากาศจากด้านล่างไหลผ่านขึ้นมาได้เนื่องจากผลของ chimney effects เพราะขณะเกิดการเผาไหม้ด้านบนจะร้อนกว่าด้านล่าง อากาศที่เย็นกว่าจะไหลขึ้นมาแทนที่ตลอดเวลา การออกแบบเป็นเมทริกซ์ทำให้ขยายพื้นที่เกิดเปลวไฟออกไปได้มาก และสามารถสลับใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิดตั้งแต่ที่มีอัตราการเกิดเปลวไฟต่ำ เช่น ไฮโดรคาร์บอน ไปจนถึงสูง เช่น ไฮโดรเจน โดยเปลวไฟมีความสูงไม่กี่มิลลิเมตร แต่หัวเผานี้สร้างได้ยาก จึงมีราคาแพง และเปลวไฟที่เกิดไม่ค่อยอยู่ตัว คับง่าย

บทที่ 4

ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics)

4.1 บทนำ

ผลของอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) ที่สำคัญอย่างมากในการออกแบบสมรรถนะของระบบเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ การออกแบบที่เหมาะสมระบบการฉีดเชื้อเพลิง ห้องเผาไหม้หลายชนิดแตกต่างกันไปทั้งขนาดและระบบการฉีดเชื้อเพลิงมีหลายแบบ ในการกระจายและ Annulus มีจุดประสงค์หลักเพื่อลดความเร็วการไหลและแพร่กระจายของอากาศตามคำแนะนำทุกส่วนของห้องเผาไหม้ซึ่งเงื่อนไขการรักษาแบบการไหลไม่เป็นตัวด้วยการไหลหรือไม่เกี่ยวข้องกับการหมุนวนบางชนิดภายใน การเผาไหม้ชั้นใน (Combustion liner) จุดสำคัญมาจากขนาดการไหลหมุนวนมีผลต่อการเสถียรภาพของเปลวไฟ มีผลต่อการเผาไหม้ส่วนเจือจาง (Dilution) และประสิทธิภาพหล่อเย็นของอากาศตามผนังห้องเผาไหม้ชั้นใน

ผลของการคลุกเคล้า (Mixing) มีความสำคัญอย่างมากในการเผาไหม้และส่วน Dilution ในส่วน Primary การคลุกเคล้าที่ดีมีความจำเป็นต่ออัตราการเผาไหม้สูงและลดเขม่าควันในโตรเจนออกไซด์ให้น้อยที่สุด ขณะความพอใจการกระจายอุณหภูมิของไอเสียของแก๊สอาศัยระดับการคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับการเผาไหม้ในส่วนเจือจาง จุดประสงค์ออกแบบห้องเผาไหม้ป้อนเพื่อให้เกิดการคลุกเคล้าภายในห้องเผาไหม้ชั้นในและรูปแบบการไหลมั่นคงทั้งหมด ไม่มี parasitic losses และความยาวสั้นที่สุดและสูญเสียความดันน้อยที่สุด

4.2 ลักษณะการสูญเสียความดัน (Pressure Losses parameter)

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

$$\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3} = \frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} \cdot \frac{R}{2} \left(\frac{m^3 T_3^{0.5}}{A_{ref} P_3} \right)^2 \quad (4.1)$$

จากสมการ (1) ทางด้านซ้ายมือโดยปกติจะกล่าวถึงการสูญเสียความดันทั้งหมด (Overall pressure loss) ปกติจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่าจะอยู่ช่วง 4-10 % ปกติมันจะไม่รวมกับการสูญเสียความร้อน (Heat loss) ความดันที่สูญเสียจะเป็นตัวบ่งบอกของการเผาไหม้

ในทอมของ $(\Delta P_{3-4} / q_{ref})$ จะเรียกว่า Pressure loss factor มีความสำคัญในการเผาไหม้วิศวกรต้องให้ความสำคัญ ดังนั้นมันจะเป็นตัวบ่งบอกถึงการต้านทานการไหลในช่วงแรก ลักษณะ Air

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Stream ระหว่างทางออกของคอมเพรสเซอร์ และทางเข้าเทอร์ไบน์ การไหลของอากาศจะถูกมองเหมือนเป็นสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient) ซึ่งมันจะไม่เหมือนกับ Overall pressure loss ซึ่งต้องอาศัยขอบเขตในการทำงาน Pressure loss จะเป็นตัวแปรในการกำหนดคุณสมบัติของการเผาไหม้ มันใช้แทนแสดงผลรวม 2 เทอมของการสูญเสียความดัน ความดันลดลงในการกระจายและความดันลดลงในพื้นที่หน้าตัดในผนังด้านใน

$$\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} = \frac{\Delta P_{diff}}{q_{ref}} + \frac{\Delta P_L}{q_{ref}} \quad (4.2)$$

ควรให้ Δq_{diff} น้อยที่สุด เนื่องจากการสูญเสียความดันใน Diffuser จะเป็นอุปสรรคต่อการเผาไหม้ในทางปฏิบัติควรทำความดันสูญเสียใน Diffuser ให้น้อยที่สุด การสูญเสียความดันห้องเผาไหม้ชั้นในต้องให้น้อยที่สุดเหมือนกัน ปัจจัยการสูญเสียความดันหาได้โดยผลของพื้นที่รูทั้งหมดในห้องเผาไหม้ชั้นใน

$$\frac{\Delta P_L}{P_3} = \frac{U_j^2}{2} \quad (4.3)$$

หรือ

$$\frac{\Delta P_L}{P_3} = \frac{R \left(\frac{m_3 T_3}{A_{h,eff} P_3} \right)^{0.5}}{2} \quad (4.4)$$

แทนทางขวามือของสมการ (4.4) ในสมการ (4.1) ได้

$$\frac{\Delta P_L}{q_{ref}} = \left(\frac{A_{ref}}{A_{h,eff}} \right)^2 \quad (4.5)$$

ผลทั้งหมดของพื้นที่รูของห้องเผาไหม้ชั้นในถูกควบคุมพื้นที่ห้องเผาไหม้ชั้นนอก

$$A_{h,eff} = \frac{A_{ref}}{\left(\Delta P_{3-4} / q_{ref} - \Delta P_{diff} / q_{ref} \right)^{0.5}} \quad (4.6)$$

ผลพื้นที่รูของห้องเผาไหม้ชั้นในอาจจะคำนวณจาก

$$A_{h,eff} = \sum_{i=1}^{i=n} C_{D,i} \cdot A_{h,i} \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } C_{h,i} A_{h,i} &= \text{ผลพื้นที่ของรู} \\ n &= \text{จำนวนรูทั้งหมด} \end{aligned}$$

ค่าของอากาศเย็น การสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ในทางปฏิบัติที่ให้มาในตาราง (4.1) มี 3 แถวแสดง ห้องเผาไหม้แบบ Annular ซึ่งมีค่าการสูญเสียความดันน้อยที่สุดในตารางค่าปัจจัยการสูญเสียความดันจะถูกใช้ในการหาพื้นที่ A_{ref} สามารถใช้ค่า 20 สำหรับห้องเผาไหม้แบบ annular ส่วนค่า 40 ใช้สำหรับห้องเผาไหม้แบบ tubular ในทางปฏิบัติจริงค่าของ $(\Delta P_{3-4} / q_{ref})$ ซึ่งแปรผันตามการสูญเสียความดันของพื้นที่ห้องเผาไหม้ชั้นใน ค่าการสูญเสียความดันรวมในตารางที่ 4.1 จะบอกถึงการสูญเสียของลมเย็นเท่านั้น ซึ่งมาจากกรไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 4.1 ได้จากการทดลอง

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

ตารางที่ 4.1 แสดงการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ในทางปฏิบัติ

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและการสูญเสียความดัน

4.3.1 ห้องเผาไหม้ชั้นนอก (Casing Area)

ห้องเผาไหม้ที่แข็งแรงจะต้องมีภาคตัดของพื้นที่ที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากการสูญเสียความดันทั้งหมด เพราะภาระของการเผาไหม้พื้นที่ที่ห่อหุ้มด้านนอกเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเผาไหม้ภายใต้การสูญเสียความดันทั้งหมด ขนาดพื้นที่หาได้จาก

$$A_{ref} = \left[\frac{R}{2} \left(\frac{m_3 T_3^{0.5}}{P_3} \right)^2 \frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} \left(\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3} \right)^{-1} \right]^{0.5} \quad (4.8)$$

4.3.2 ห้องเผาไหม้ชั้นใน (Liner)

ข้อดีของการสร้างห้องเผาไหม้ชั้นใน ให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดใหญ่ ก็คือทำให้การไหลภายในห้องเผาไหม้มีความเร็วต่ำ ส่งผลให้มี Resident time ยากนาน ตัวแปรเหล่านี้ทำให้การจุดระเบิดทำได้ง่ายรวมทั้งทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพ

แต่วิธีนี้ไม่สามารถนำไปใช้ประยุกต์กับเครื่องยนต์อากาศยาน เพราะเครื่องยนต์อากาศยานนั้นจะต้องมีขนาดเล็กและมีพื้นที่การติดตั้งจำกัด การขยายขนาดของห้องเผาไหม้ชั้นนอก (Casing) เพื่อให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมกับขนาดของห้องเผาไหม้ชั้นใน (Liner) เป็นไปได้ยาก ดังนั้นหากเพิ่มขนาดของห้องเผาไหม้ชั้นในขึ้น แต่ขนาดของห้องเผาไหม้ชั้นนอกคงเดิม จะทำให้พื้นที่ระหว่างห้องเผาไหม้ชั้นในและห้องเผาไหม้ชั้นนอกแคบลง ความเร็วของอากาศที่ไหลระหว่างพื้นที่นี้จะสูงขึ้น ทำให้เกิด Static pressure drop สูงภายในบริเวณห้องเผาไหม้ชั้นในและชั้นนอก การเกิด Static pressure drop ในบริเวณระหว่างห้องเผาไหม้ชั้นในและห้องเผาไหม้ชั้นนอกสูง ทำให้อากาศไม่สามารถผ่านรูที่เจาะบนผนังห้องเผาไหม้ชั้นใน เข้าไปบริเวณรูที่อากาศผ่าน (เพราะอากาศไหลผ่านรูด้วยความเร็วสูง) อากาศที่ไหลผ่านรูจะเข้าไปคลุกเคล้ากับก๊าซร้อนภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งหากอากาศเกิดการสูญเสีย Static pressure drop ภายในบริเวณห้องเผาไหม้ชั้นในและชั้นนอกสูง จะทำให้ Static pressure ในอากาศลดน้อยลง จนไม่สามารถไหลผ่านรูได้

หลักการพิจารณาค่า Static pressure drop ที่เหมาะสมในการไหลผ่านรูบนห้องเผาไหม้ชั้นในมีหลักดังนี้คือเราต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง k และ $\Delta P_L / q_{pz}$ ซึ่ง

$$K = \frac{\text{Line Cross sectional Area}}{\text{Casing Cross sectional Area}}$$

ΔP = ความสทิตที่ตกลงผ่านระหว่างรูบนห้องเผาไหม้ชั้นใน

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

ต้องการค่า k ที่เหมาะที่จะให้ $\Delta P_L / q_{pz}$ ที่สูงที่สุด โดยที่ตัวแปรทั้ง 2 มีความสัมพันธ์ดังนี้

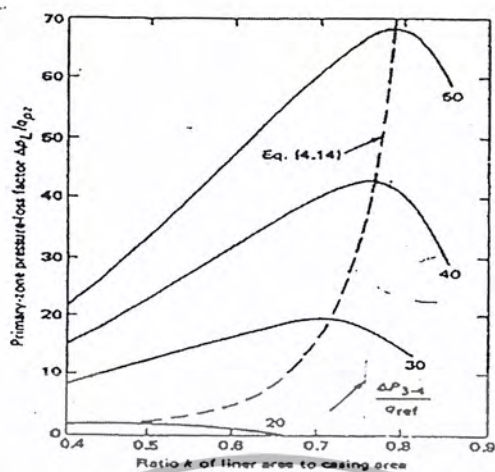
$$\frac{\Delta P_L}{q_{pz}} = 1 + \frac{T_3}{T_{pz}} \cdot \frac{k^2}{m_p} \left[\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} \frac{(1 - m_{sn})^2 + \lambda}{(1 - k)^2} - 1 \right] \quad (4.9)$$

จากสมการค่า T_3 , T_{pz} , $\Delta P_{3-4} / q_{ref}$, m_p , m_{sn} , λ และ r จำเป็นต้องกำหนดขึ้นก่อน ที่เราจะทำการออกแบบห้องเผาไหม้ รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของค่า $\Delta P_L / q_{ref}$ มีผลต่อค่า $\Delta P_L / q_{pz}$ ที่ระดับค่า k ต่างกัน เห็นได้ว่าเมื่อค่า k เพิ่มมากขึ้น (ระยะห่างระหว่างห้องเผาไหม้ชั้นในกับชั้นนอกลดลง) เราจำเป็นต้องออกแบบให้ห้องเผาไหม้มี $\Delta P_L / q_{ref}$ สูงขึ้น เพื่อที่จะให้ได้ค่า $\Delta P_L / q_{pz}$ สูงขึ้น (มีความดันสทิตเพียงพอที่จะไหลผ่านรูบนห้องเผาไหม้ชั้นใน) ซึ่งการเพิ่ม $\Delta P_L / q_{ref}$ นี้ทำให้การคลุกเคล้ามีประสิทธิภาพขึ้นด้วยค่า k ที่เหมาะสม k_{opt} อาจหาได้โดยการ diff สมการ 4.9 ให้เท่ากับ 0 ได้

$$K_{opt} = 1 - \left[\frac{(1 - m_{sn})^2 - \lambda}{\Delta P_{3-4} / q_{ref} - \lambda_r} \right]^{1/3} \quad (4.10)$$

และ $A_L = K_{opt} \cdot A_{ref}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ทั้งหมด

$$m_{sn} = 0.12, m_p = 0.2, r = 6.0, A = 0.5, T_{pz} = 2400 K$$

4.4 การไหลในท่อวงแหวน (Flow in Annulus)

เงื่อนไขในการไหลในท่อวงแหวน (Annulus) นั้นมีอิทธิพลต่อรูปแบบการไหลของอากาศภายในห้องเผาไหม้ชั้นใน และมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผนังห้องเผาไหม้ โดยความเร็วเฉลี่ยภายในท่อวงแหวนนี้ถูกควบคุมโดย ความเร็วการเผาไหม้และอัตราส่วนของพื้นที่ห้องเผาไหม้ชั้นในกับพื้นที่ห้องเผาไหม้ชั้นนอก การเปลี่ยนแปลงการกระจายความเร็วทางเข้าห้องเผาไหม้ชั้นในมีผลอย่างมาก ความเร็วที่ปรากฏภายในท่อวงแหวน การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหล และอากาศที่ออกจากรูเป็นแถวและร่องรูการหล่อเย็น ถึงแม้ว่าเราต้องการไหลภายใน Annulus ให้มีความเร็วสูงเพื่อระบายความร้อนของห้องเผาไหม้ชั้นใน โดยใช้หลักการการพาความร้อน แต่เราก็จำเป็นต้องให้การไหลในบริเวณนี้มีความเร็วต่ำ เหตุเพราะ

1. เมื่อมีความเร็วต่ำจะมีความดันสถิต ทำให้มั่นใจได้ว่าคาร์ไหลของอากาศผ่านในท่อซึ่งเป็นแถวเดียวกัน จะมีลักษณะเหมือนกัน
2. สัมประสิทธิ์ที่รูทางออกมีค่าสูง
3. การพ่นกระจายของ Jet ที่ออกจากรูใกล้เคียงมุมฉาก (Steeper angle) ทำมุมสูงชัน
4. แรงเสียดทานที่ทำให้เกิดขึ้นบริเวณผิวจะมีค่าต่ำ
5. การสูญเสียอันเกิดจากปรากฏการณ์ Sudden-expansion บริเวณทางออกของรูบนห้องเผาไหม้ชั้นในและร่องระบายความร้อนมีค่าต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

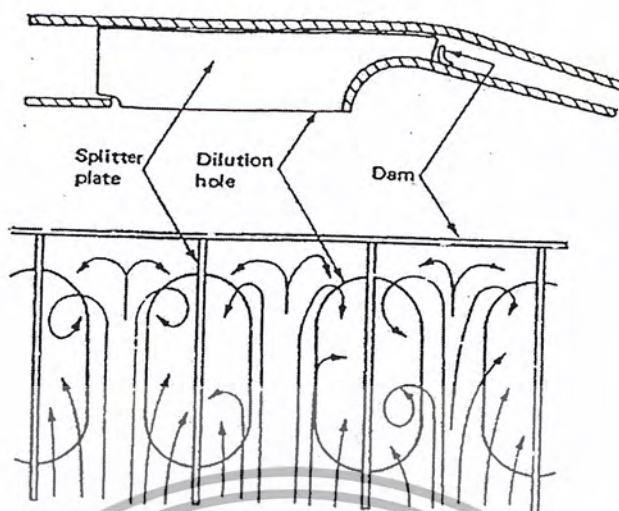
ห้องเผาไหม้ส่วนมากมีพื้นที่วิกฤติที่จุดบริเวณของต้นกระแสดของห้องชั้นใน และบริเวณใกล้เคียง รู Dilution ซึ่งที่ของต้นสายธาร อากาศจะถูกปล่อยออกจากช่วงที่ (Diffuser) บางครั้งอาจเกิด Boundary ชั้น ที่ขนาดใหญ่ทำให้ขัดขวางการหล่อเย็นด้วยความดันสถิตในช่องหล่อเย็น ในการทำให้ Total head ของช่องหล่อสม่ำเสมอ อาจเกิดปัญหาขึ้นจากการตกค้าง ทำให้เกิดการไหลแยกตัว ทำให้เกิดการโค้งงอที่จุดเชื่อมของช่วงที่บานออกและของท่อวงแหวน เนื่องจากกระบวนการไหล ผ่านตามแนวของท่อวงแหวน ลักษณะของความเร็วจะค่อย ๆ ลดลง เนื่องจากอากาศไหลผ่านช่องที่มีลักษณะต่างกัน อย่างไรก็ตาม ถ้าอากาศที่ไหลผ่านอยู่นอกเนื่องการควบคุม เข้าสู่ภายในช่อง ทำให้เกิดการไหลตามกระแส เกิดการเจือจางได้ โดยการไหลที่ไม่เป็นระเบียบสามารถเพิ่มขึ้นจากการที่อากาศในส่วนที่ไปไหลย้อนของด้านต้นสายธารภายในท่อวงแหวน เกิดไหลไม่ต่อเนื่องและไหลประเภทสุม โดยห้องเผาไหม้แบบ Turbo annular โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจเกิดความรุนแรงขึ้น ในบางกรณีของห้องเผาไหม้ชั้นในที่รับการไหลของอากาศที่มีทิศทางที่ต่างกันซึ่งจะทำให้เกิดการบิดเบือนการไหลภายในเท่านั้น แต่จะทำให้เปลี่ยนแปลงเป็นตามเวลาด้วย

วิธีหนึ่งที่จะช่วยบรรเทาปัญหาได้คือ การสวม Backstop ที่ช่วงปลายสายธารของรู Dilution โดยการออกแบบแผ่นวงแหวนอย่างง่าย เมื่อสวมเข้าไปประหว่งด้านในและด้านนอกของห้องเผาไหม้ โดยการเจาะที่บริเวณรอบ ๆ ท่อตามความเหมาะสม และการกำหนดให้อากาศไหลผ่านเพื่อระบายความร้อนที่บริเวณปลายสายธาร ซึ่งแผ่นนี้จะมีผลกระทบมากในการต่อต้านการเกิดไหลย้อนกลับภายในท่อวงแหวน

ที่บริเวณภายในของท่อวงแหวนห้องเผาไหม้ชั้นในนั้น Backstop มักติดตั้งกันแบบต่อเนื่องเพื่อกีดขวางใกล้ช่วงปลายสายธารของรู Dilution ทั้งนี้ โดยคิดตั้งประมาณ 2 ใน 3 ของพื้นที่วงแหวน อีกวิธีหนึ่งในการควบคุมการไหลภายในรู Dilution คือการทำให้ผนังภายในของทางออกห้องเผาไหม้ชั้นในมีลักษณะเรียวเพื่อป้องกันการขยายออกท่อวงแหวนตรงทางที่ติดต่อกับรู

ถ้าตำแหน่งระยะของรู Dilution มีขนาดใหญ่กว่าความสูงท่อวงแหวน การไหลหมุนวน (vertex) สามารถเกิดขึ้นในการไหลเข้าไปในรู โดยที่การเปลี่ยนแปลงรูปการทะลุวง (Penetration) และการผสมกันของลำกระแสดอากาศที่ Dilution ความรุนแรงของการหมุนวนนี้ขึ้นอยู่กับอัตราพื้นที่วงแหวน ซึ่งวัดในระนาบของรูถึงพื้นที่รู ถ้ามีอัตราพื้นที่นี้สูงจะทำให้ยับยั้งการก่อตัวการหมุนวน ซึ่งแนวทางนี้ก็เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบห้องเผาไหม้ชั้นในของห้องเผาไหม้ให้มี Pressure drop ที่เหมาะสม

การหมุนวน (Vertex) นั้น สามารถเกิดได้ทั้ง Tubular และ Annular การทำลายหรือการลดโดยการสวมแผ่นที่เป็นร่อง (Splitter plate) ตามยาวยาวแต่รู Dilution ซึ่งแผ่นนี้จะติดอยู่กับห้องเผาไหม้ชั้นในหรือด้านนอกห้องเผาไหม้ชั้นนอกได้ผล โดยเฉพาะการใช้การรวมแผ่นวงแหวนเข้าด้วยกัน หรือการติดตั้งดังรูปที่ 4.2

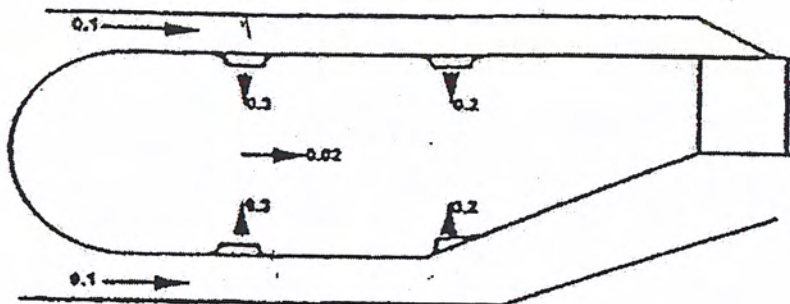


รูปที่ 4.2 ความคุมการไหลผ่านรู Dilution

4.4.1 มัคนัมเบอร์ ณ ตำแหน่งการไหลต่าง ๆ และระบบพื้นที่การเผาไหม้ (Local Mach number and Combustion system Areas)[3]

แนวทางออกแบบสำหรับ Mach number เฉพาะจุด (Local Mach number) แสดงในรูปที่ 4.3 Mach number ในด้านนอกและด้านในของท่อวงแหวน (Annulus) ลำดับแรกที่ Primary zone การฉีดพ่นควรเป็น 0.1 เท่ากันตลอดตามความยาวท่อวงแหวน ดังนั้นพื้นที่แต่ละท่อวงแหวนหาโดยเงื่อนไขที่ใช้จาก Q curves ส่วน Mach number ท่อวงแหวนที่ต่ำจำเป็นต้องรักษาระดับ Mach number ไว้สำหรับการฉีดพ่นราวประมาณ 0.3 เนื่องจากอัตราการฉีดพ่นที่ Mach number ท่อวงแหวนควรมากกว่า 2.5 การฉีดพ่น Mach number 0.3 ย่อมให้ความดันตกคร่อมน้อยที่สุดทำให้การไหลซึมอากาศ ครั้งของอากาศที่ไหลเข้าที่ Primary zone และอีกครั้งหนึ่งไหลเข้า Secondary zone (Intermediate zone) การฉีดพ่นที่ Mach number เฉลี่ยแนวแกนที่ออกจาก Primary zone ควรเป็น 0.02-0.05

ภายหลังจาก Secondary zone อัตราการไหลอากาศมีการชักนำ Mach number เข้าสู่เปลวไฟ Mach number อาจสูงประมาณ 0.075-0.1 ในที่สุดการไหลอากาศส่วนของ Tertiary (Dilution zone) ถูกเร่งความเร็วจนถึงทางเข้า Turbine ประมาณ 0.2 จนถึง Guide vane



รูปที่ 4.3 Mach number ห้องเผาไหม้

4.4.2 การไหลผ่านรูเลื่อนชั้นใน (Flow through liner holes)

การไหลผ่านรูของห้องเผาไหม้ชั้นใน อนุสัยขนาดของรูและความดันตกค่อมไม่เพียงพอแต่รูปร่างของท่อและเงื่อนไขการไหลในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งมันมีอำนาจรุนแรง มีผลต่อพื้นที่การไหล ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยินยอมได้ (Discharge Coefficient)

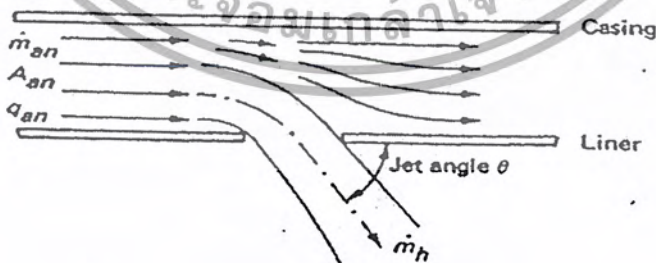
สมการพื้นฐานสำหรับการไหลผ่านรูอาจเป็นดังนี้

$$\dot{m}_h = C_D A_{h,geom} [2\rho(P_i - P_j)]^{0.5} \tag{4.11}$$

เมื่อ

P_i = Total pressure upstream of hole

P_j = Static pressure downstream of hole



รูปที่ 4.4 แสดงการไหลผ่านรูของห้องเผาไหม้ชั้นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \frac{m_h^o}{m_{an}^o}$$

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

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

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

สำหรับโดยมาก รูของห้องเผาไหม้ชั้นใน มีทิศการไหลเส้นทาง ขนานระนาบของรูตามรูปที่ 4.4 และสมการอาจจะเขียนได้ดังนี้

$$\frac{m_h^o}{m_{an}^o} \cdot \frac{(A_h)_{geom}}{A_{an}} = C_D \left(\frac{P_{an} - P_j}{q_{an}} \right)^{0.5} \quad (4.12)$$

$$\frac{m_h^o}{m_{an}^o} \cdot \frac{(A_h)_{geom}}{A_{an}} = C_D \left(1 + \frac{\Delta PL}{q_{an}} \right)^{0.5} \quad (4.13)$$

หรือ
$$\frac{\alpha}{A_r} = C_D \cdot K^{0.5} \quad (4.14)$$

จากการสังเกตการหักของเส้นทางการไหลเกิดบริเวณรูของห้องเผาไหม้ชั้นในที่ขอบเขตอาศัยรูปร่างของระบบ รูปร่างใกล้เคียงความเร็วและความดันตกคร่อมขวางห้องเผาไหม้ชั้นในในทางปฏิบัติ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมรับได้ของรูขึ้นอยู่กับ

1. ชนิดรู (แบบเรียบ แบบรอยขุบ อื่น ๆ)
2. รูปร่าง (วงกลม สี่เหลี่ยม อื่น ๆ)
3. อัตราช่องว่างรูที่ส่วนสูง ท่อวงแหวน
4. ความดันตกคร่อมของห้องเผาไหม้ชั้นใน
5. การกระจายของความดันสถิต รอบ ๆ ภายในรู
6. การปรากฏตัว ของการหมุนวนเป็นเกลียวในกระแสการไหล
7. ตำแหน่งความเร็วอากาศท่อวงแหวน

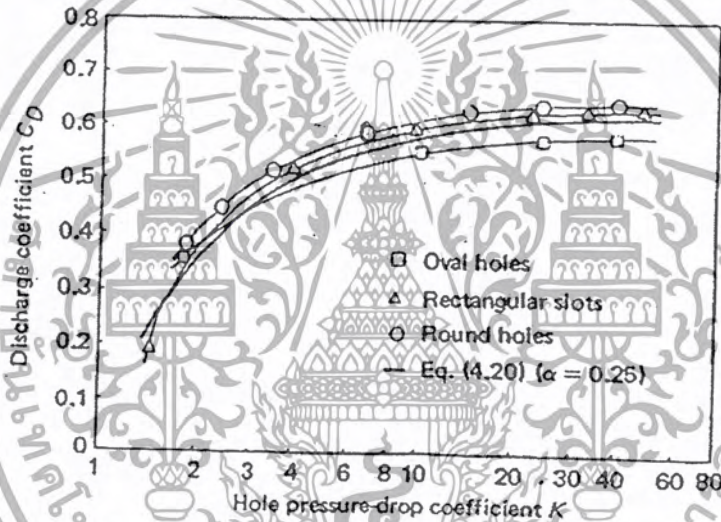
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในข้อสุดท้าย ให้เหตุผลทำไมค่าสัมประสิทธิ์บ้อยครั้งต่ำกว่ารูแถวแรก และต่ำกว่าในตำแหน่งรูที่ไกลออกไปตามปลายทาง

จากวิเคราะห์แฟกเตอร์ควบคุมการไหลของลำกระแสผ่านผนัง, Kaddah [1] สำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้ การไหลไม่มีการหมุนวนเป็นเกลียว (Swirl) ค่าของสัมประสิทธิ์ สำหรับรูวงกลมเรียบ วงรีเรียบ และสี่เหลี่ยมเรียบหาได้โดย

$$C_D = \frac{1.25(k-1)}{[4k^2 - k(2-\alpha)^2]^{0.5}} \quad (4.15)$$

ขอบเขตการไหลและทฤษฎีในการวิเคราะห์ของชนิดรูปร่างและรูเกี่ยวกับการทดลอง ดูได้จากรูปที่ 4.4

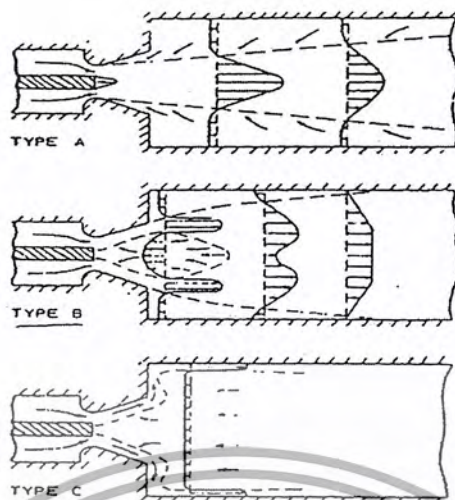


รูปที่ 4.5 แสดงผลกระทบของรูปร่างของรูในทางปฏิบัติ

4.5 การแยกตัวของการไหลวนในหัวฉีดเว้าออก (Separation of flow in divergent nozzle) [2]

ระหว่างการวิจัยพบว่า ถ้าฉีดรูปร่างเรขาคณิตและการไหลวนของอากาศมีผลกระทบต่อกัน ชนิดของการไหลโดยพื้นฐานมี 3 แบบ จะสังเกตในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 สังกศกรูปแบบการไหลสำหรับ Swirling jets และการออกของเปลวไฟจากหัวฉีดเว้าออก

ชนิด A. กรณีความหนาแน่นของอากาศส่วนน้อยหรือเป็นศูนย์ การไหลอากาศแยกตัวจากผิวหัวฉีดใกล้คอคอขวดหัวฉีด ผลแบบนี้การไหลของการพ่นคล้ายคลึงกับการพ่นปราศจากหมุนวนเป็นเกลียว เปลวไฟที่ได้มีลักษณะเปลวไฟแกว่งไปแกว่งมา

ชนิด B. กรณีอากาศวนระดับปานกลางหรือระดับสูง การไหลอากาศวนมั่นคง ติดกับผนังหัวฉีด เข้าออกและสามารถลามวนร้อน ในโซนการไหลย้อนกลับ ในศูนย์กลางของการพ่น โดยทั่วไปต้องการไหลแบบนี้ผลิตเปลวไฟเสถียรภาพสูง การไหลแบบนี้ทำให้ปั่นป่วน (Turbulence) รุนแรงสูง ซึ่งความเข้มข้นของเชื้อเพลิงมีสูง เป็นผลความรุนแรงการเผาไหม้สูง

ชนิด C. รูปแบบการไหลแบบนี้ แทนการพ่นผนังรัศมีเปลวไฟที่ผลิตได้ของการไหลแบบนี้ถูกติดผนังหัวฉีดและผนังห้องเผาไหม้ รูปร่างปากแตร มุมกว้างและหัวฉีดเว้าออกสั้น เปลวไฟที่ได้เหมาะกับเตาหลอมเหลวโลหะ

4.6 การกระจายอากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้ชั้นใน (Air flow distribution within liner)

ความสำคัญการออกแบบรูปร่างห้องเผาไหม้ ที่การหาจำนวน ขนาด รูปร่าง ตำแหน่งของรู ที่สร้างขึ้น รูปร่างอากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้ชั้นในนั้นจะต้องง่ายและเบา ประสิทธิภาพและเสถียรภาพของการเผาไหม้ การหล่อเย็นที่ผนังและการส่งแก๊สเข้าเทอร์ไบน์ที่อุณหภูมิเหมาะสม ถ้าผนังชั้นในประกอบด้วยแถว มี n รู ซึ่งมีผลต่อขนาด d_j และอัตราการไหลทั้งหมด m_j ของอากาศไหลผ่านรูหาได้โดย

$$m_j^0 = \frac{\pi}{4} n d_j^2 \rho_3 U_j \quad (4.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_j^o = \frac{\pi}{4} n d_j^2 (2\rho_3 \Delta P_L)^{0.5} \quad (4.17)$$

$$n d_j^2 = \frac{15.25 m_j^o}{(P_3 \Delta P_L / T_3)^{0.5}} \quad (4.18)$$

$$d_h = \frac{d_j}{C_D^{0.5}} \quad (4.19)$$

เมื่อค่า C_D มาจากรูปที่ 4.4 สมการที่ 4.18 และ 4.19 ถูกใช้หาขนาดของรูและจำนวนรูที่เหมาะสมที่สุดของรูอันดับที่ 2 ห้องเผาไหม้ สำหรับห้องเผาไหม้ชั้นในแบบ Tubular ขนาด d , อาจจะคำนวณโดยใช้สมการ 4.18 และ 4.19 จำนวนรูที่ใช้สำหรับค่า n ใช้ 6 หรือ 8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการจำแนกชื่อ (Nomenclature)

A	=	Area
$A_{h,geom}$	=	hole area, geometric
$A_{h,eff}$	=	Total effective liner hole area
A_{an}	=	Annulus area
A_r	=	Area ratio ($A_{h,geom} / A_{an}$)
C_D	=	Discharge coefficient
D_{hub}	=	Swirler hub diameter (รูปที่ 4.7)
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 ($1 + \Delta P_L / q_{an}$)
k	=	Ratio of liner to casing area
L	=	Length
M	=	Mach number
\dot{m}^0	=	Air mass flow rate
\dot{m}_c^0	=	Entrained mass flow rate
\dot{m}_f^0	=	Fuel flow rate
\dot{m}_p^0	=	Ratio of primary-zone airflow to total chamber airflow
\dot{m}_{pr}^0	=	Primary-zone recirculation flow rate
\dot{m}_r^0	=	Maximum reverse mass flow rate
\dot{m}_s^0	=	Flow rate through secondary hole
\dot{m}_{sn}^0	=	Ratio of air entering snout to total chamber airflow
n	=	number of hole
P	=	Total pressure, Pa
P_s	=	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

U	=	Velocity
X	=	Distance downstream of hole
x	=	Downstream distance
α	=	Hole bleed ratio (m_h^0 / m_{an}^0)
θ	=	initial jet angle, swirl vane angle
λ	=	Diffuser pressure-loss coefficient
ρ	=	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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ชุดทดลองเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไบน์ การทดลองและผลการทดลอง

5.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. ศึกษาการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนห้องเผาไหม้ที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงต่าง ๆ กัน
2. หาอัตราไหลของเชื้อเพลิงที่เหมาะสม ที่ทำให้เครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบสูง

5.2 การทดลอง

เราจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการสตาร์ทเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไบน์ และขั้นตอนการเก็บผลการทดลอง

5.2.1 ขั้นตอนการสตาร์ทเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไบน์

ขั้นตอนที่ 1 การสตาร์ทเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไบน์

เนื่องจากการสตาร์ทเครื่องยนต์ก่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากมีหลายขั้นตอนและถ้ามีการผิดพลาด อาจเกิดอันตราย เพื่อความปลอดภัยควรปฏิบัติดังนี้

1. เปิด Blower เพื่อช่วยอัดอากาศเข้าคอมเพรสเซอร์
2. ปรับหัวจ่ายแก๊สที่ถัง
3. ปรับความดันในถังแก๊สและท่อแก๊สที่ LPG Regulator
4. เปิดหัวเทียน
5. เปิดหัวจ่ายแก๊สอันเล็ก เพื่อให้เกิดเปลวไฟก่อนที่จะจุดหัวจ่ายแก๊สหลัก
6. เปิดหัวจ่ายแก๊สหลัก ปิดหัวจ่ายแก๊สอันเล็ก และปิดหัวเทียน
7. ปรับหัวจ่ายแก๊สหลักจนรอบเทอร์โบสูงพอที่จะทำให้เครื่องสามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง
8. ปิด Blower

5.2.2 ขั้นตอนการเก็บผลการทดลอง

1. เมื่อเครื่องทำงานได้ด้วยตัวเอง กำหนดอัตราไหลของเชื้อเพลิงที่ต่าง ๆ กัน
2. ทำการอ่านค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล แล้วบันทึกผลการทดลอง

5.3 ห้องเผาไหม้ที่นำมาใช้ในการทดลอง

การพัฒนาห้องเผาไหม้ยังมีการพัฒนาโดยการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ไม่ดีนัก มีแต่เพียงการใช้ประสบการณ์ในการพัฒนาออกแบบแล้วทำการทดสอบ โดยห้องเผาไหม้ที่นำมาใช้ในโครงการนี้ได้มาจากโครงการปริญญาโทของคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้มีคำนวณและออกแบบมาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ แบ่งออกเป็น 3 ช่วง

ช่วงแรก **Primary zone** อากาศ 15 - 20 % ผสมกับเชื้อเพลิงเป็นส่วนผสมหนาเกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง

ช่วงสอง **Secondary zone** แก๊สร้อนและเชื้อเพลิงที่เหลือจาก Primary zone ผสมกับอากาศที่เหลือจนหมด

ช่วงสาม **Tertiary zone** แก๊สร้อนจาก Secondary zone ผสมกับอากาศที่เหลือ เพื่อลดอุณหภูมิของแก๊สก่อนเข้าเทอร์ไบน์ เพื่อไม่ให้ร้อนเกินไป จนเป็นอันตรายต่อใบพัด

5.3.1 เสถียรภาพของการเผาไหม้

ในการเผาไหม้เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ เปลวไฟจะติดอยู่ได้เมื่อความเร็วของเปลวไฟเท่ากับความเร็วเปลวของแก๊สผสม ถ้าความเร็วของเปลวไฟต่ำกว่า เปลวไฟจะถูกเป่าดับ ถ้าความเร็วของเปลวไฟสูงกว่า เปลวไฟจะเข้าไปที่คอมเพรสเซอร์

5.3.2 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการออกแบบห้องเผาไหม้

1. ระดับอุณหภูมิของแก๊สหลังจากการเผาไหม้แล้วจะต้องต่ำอย่างเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ทำเทอร์ไบน์

2. ที่ว่างหลังจากแก๊สออกจากห้องเผาไหม้แล้ว การกระจายอุณหภูมิจะต้องเป็นแบบที่สามารถให้สมรรถนะของเทอร์ไบน์สูง จะต้องไม่มีความร้อนมากเฉพาะจุดที่ใบพัดเทอร์ไบน์

3. การเผาไหม้ต้องดำเนินไปอย่างมีเสถียรภาพในช่วงของอัตราส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงที่กว้างซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามภาระสูงสุดจนถึงดินเบา

4. หลักการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์อันก่อให้เกิดเม็ลคาร์บอน ซึ่งก้อนขนาดเล็กของคาร์บอนจะผ่านเข้าไปปะทะใบของเทอร์ไบน์ด้วยความเร็วสูงจะทำให้การกัดเซาะใบพัดทำให้เสียหายได้

5.4 การปรับปรุงห้องเผาไหม้

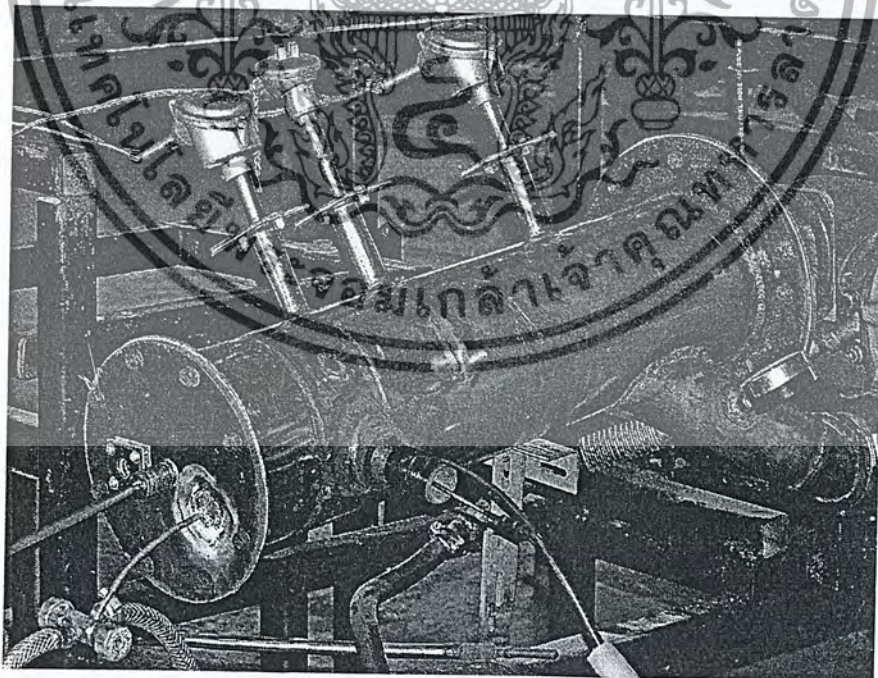
เนื่องจากห้องเผาไหม้ที่นำมาทดสอบนี้ ถึงแม้จะมีการวิเคราะห์และคำนวณมาแล้วทางทฤษฎี แต่เมื่อนำมาใช้จริงยังมีเสถียรภาพของเปลวไฟที่ไม่ดีนัก โดยสังเกตจากลักษณะของเปลวไฟ ซึ่งก่อนที่จะมีการปรับปรุงห้องเผาไหม้ ลักษณะของเปลวไฟภายในห้องเผาไหม้จะมีสีสีแดงและเปลวไฟจะสาดไปมา ซึ่งเป็นผลของการที่อากาศและเชื้อเพลิงผสมกันไม่ได้ดีพอและการผสมกันเป็นลักษณะที่เชื้อเพลิงมากกว่าอากาศ ดังนั้นจึงเริ่มปรับปรุงห้องเผาไหม้ซึ่งได้มีการวางแผนไว้แล้วเป็นขั้นตอน โดยเริ่มแรกขยายรูที่มีอยู่แล้ว ให้กว้างมากขึ้น แล้วนำมาทดลองใหม่ผลปรากฏว่าลักษณะของเปลวไฟจะสาดน้อยลงแต่เปลวไฟยังคงมีสีแดง ซึ่งเป็นลักษณะของเชื้อเพลิงมากกว่าอากาศ จึงได้ทำการเจาะรูโดยเพิ่มในช่วง **Primary zone** หนึ่งแถวรอบห้องเผาไหม้ เมื่อนำมาทดลอง พบว่าเปลวไฟสีเด็กลงกว่าเดิม จากนั้นได้เจาะรูเพิ่มในช่วงที่ 3 **Tertiary zone** เพื่อให้ในช่วงที่ 3 สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ในช่วงแรก และช่วงที่ 2 ได้หมดจด และจากนั้นได้ทำการเจาะรูเพิ่มอีกจนกระทั่งลักษณะของเปลวไฟที่ได้นิ่งและไม่มีการสาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 รูปจากการทดลอง

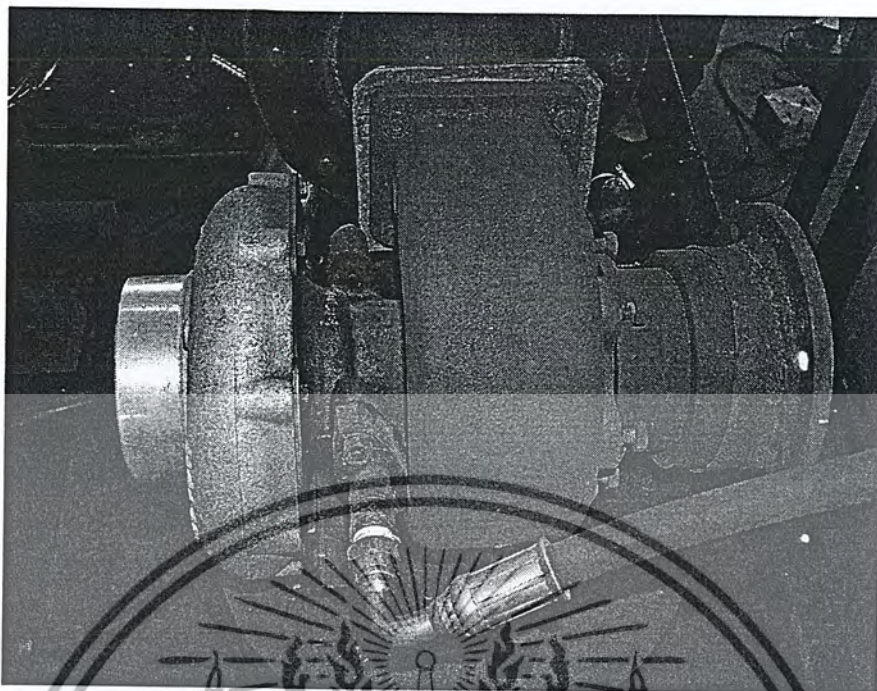


รูปที่ 5.1 เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์

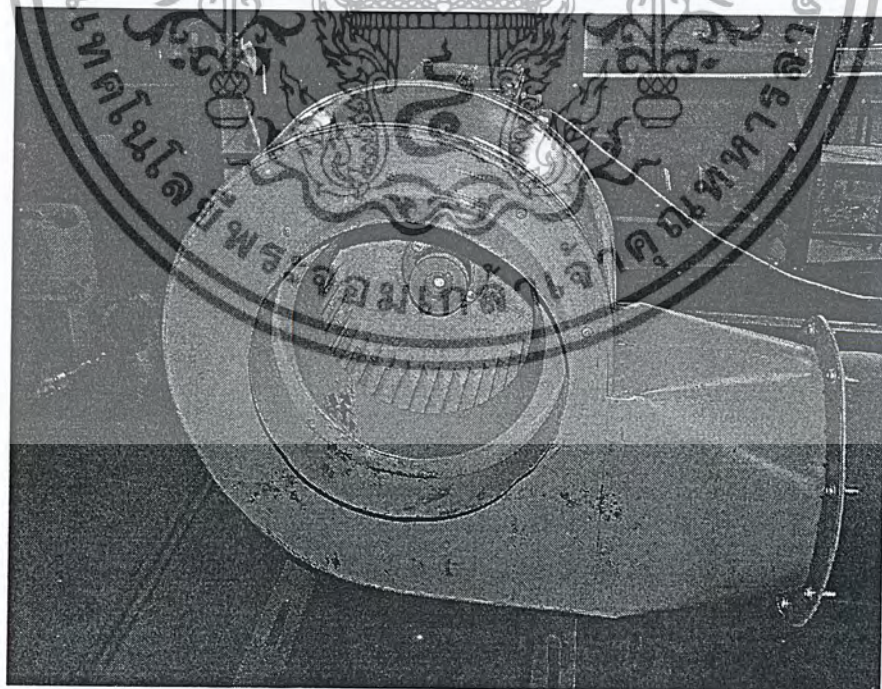


รูปที่ 5.2 ห้องเผาไหม้ ทำการติดตั้ง เทอร์โมคัปเปิล เพื่อวัดอุณหภูมิในส่วนต่างๆ ของห้องเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



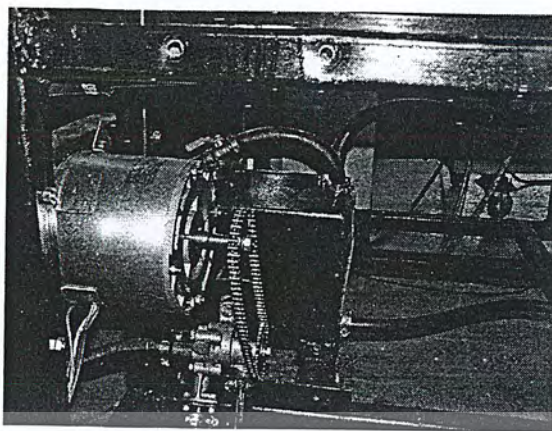
รูปที่ 5.3 คอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์ ทำการต่อเข้าด้วยกันโดยมีแกนเพลลาเชื่อมให้อุปกรณ์ทั้งสอง หมุนไปด้วยกัน



รูปที่ 5.4 Blower ในช่วงเริ่มสตาร์ทจะต้องใช้ Blower ช่วยทำการอัดอากาศให้คอมเพรสเซอร์

จนเครื่องยนต์สามารถเลี้ยงตัวเองได้

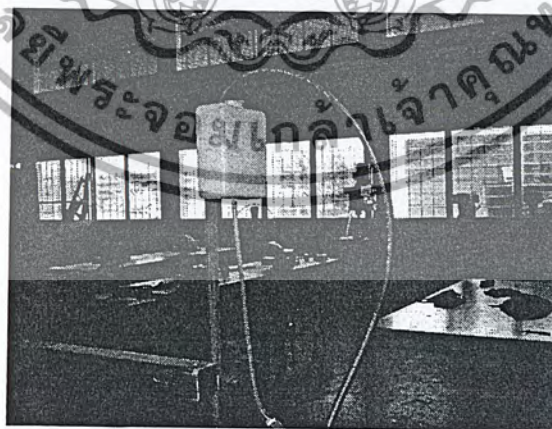
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. ป้อน้ำมัน



ข. ตัวกรองน้ำมัน



ค. ที่พักน้ำมันหล่อลื่น แบบปล่อยไหล

รูปที่ 5.5 ป้อน้ำมันหล่อเย็น ทำการป้อนน้ำมันเพื่อใช้หล่อเย็นเครื่องที่รองรับแกนเพลลาของคอมเพรสเซอร์

และเทอร์ไบน์

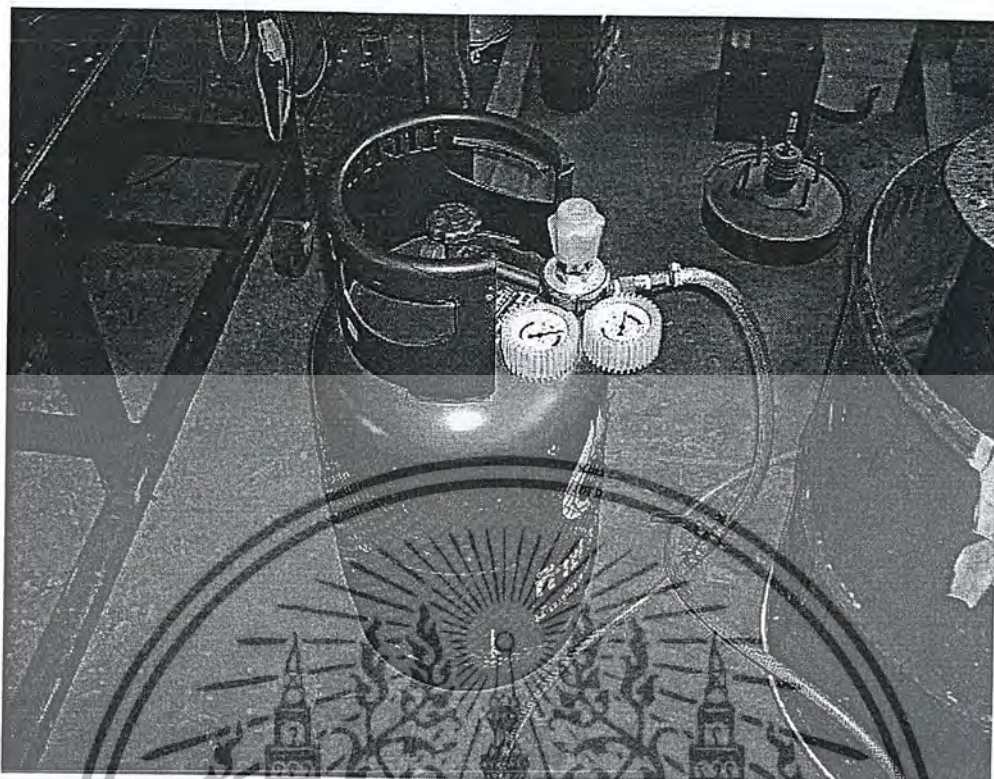
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



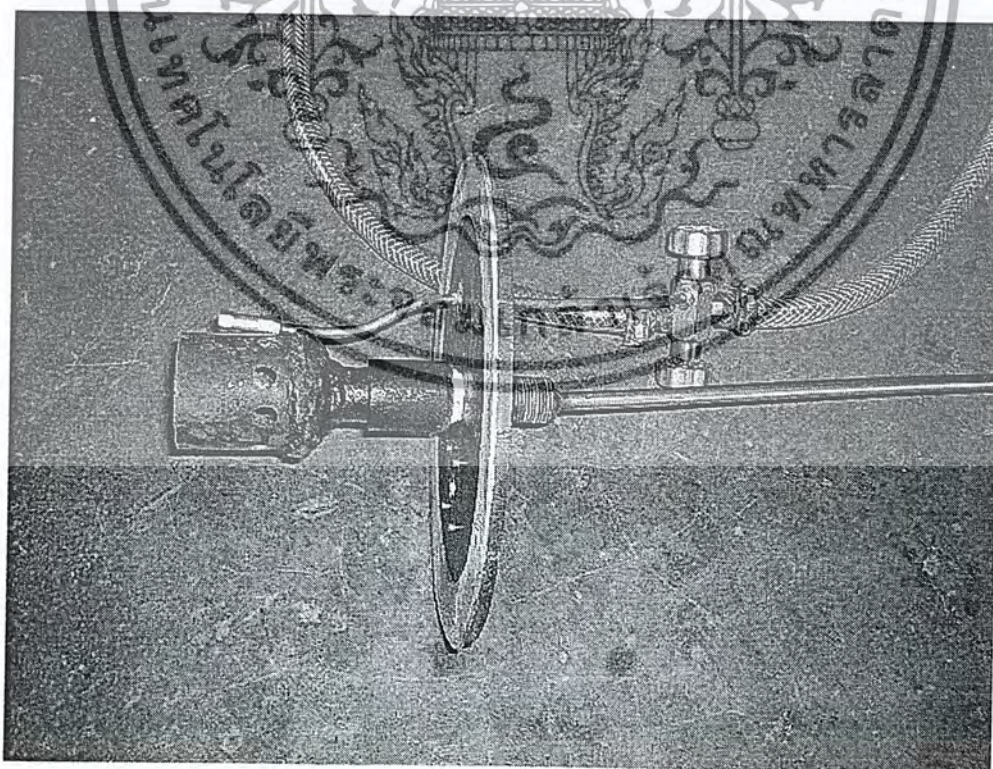
ข. สวิตซ์จุดหัวเทียน

รูปที่ 5.6 หัวเทียน ใช้ในการจุดไฟตอนเริ่มสตาร์ทเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

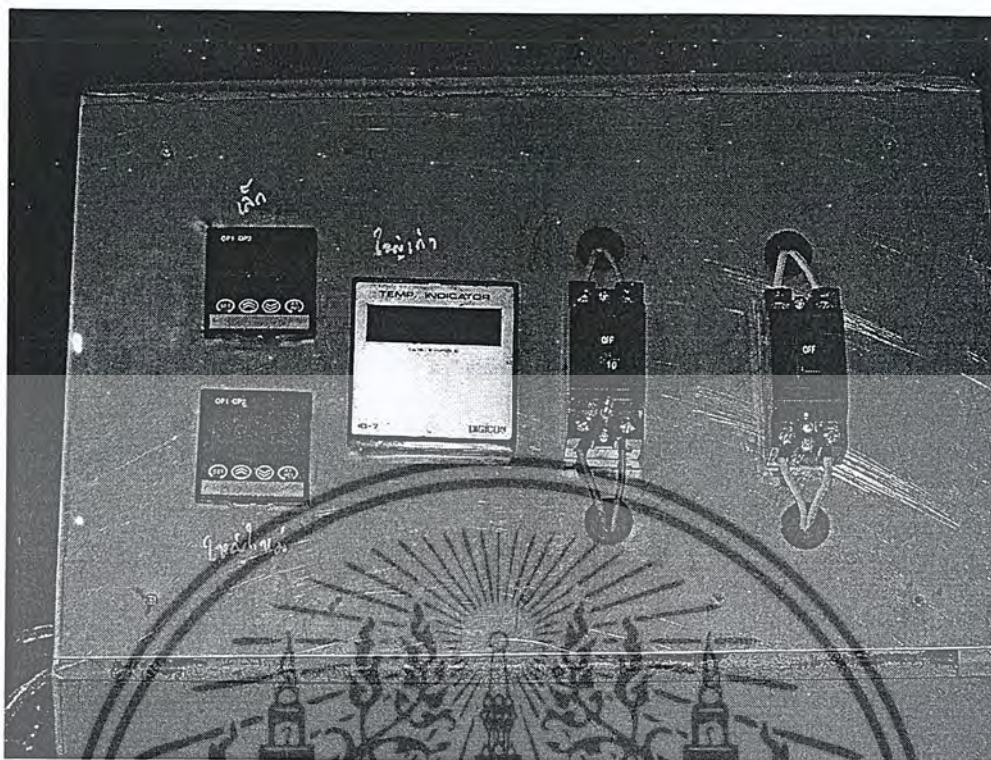


รูปที่ 5.7 ถังแก๊สบรรจุแก๊ส LPG ขนาด 15 กิโลกรัม เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้



รูปที่ 5.8 Nozzle หัวจ่ายแก๊สเข้าห้องเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 แผงควบคุมและแสดงผล ทำการต่อสวิตช์ควบคุมอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ รวมไว้ที่นี้



รูปที่ 5.10 LPG Regulator ทำการวัดความในท่อแก๊สและในถังแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 ผลการทดลอง

อัตราการไหล LPG (kg/s)	อุณหภูมิที่จุด 1 175 mm	อุณหภูมิที่จุด 2 265 mm	อุณหภูมิที่จุด 3 455 mm	RPM
0.0005606	551	825	686	20283
0.0005362	575	824	683	19055
0.0005118	582	826	684	18455
0.0004874	592	831	688	17874
0.0004631	597	830	689	17284
0.0004387	605	845	705	16210
0.0004143	615	843	748	14026
0.0003900	621	838	746	12932

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1

อัตราการไหล LPG (kg/s)	อุณหภูมิที่จุด 1 175 mm	อุณหภูมิที่จุด 2 265 mm	อุณหภูมิที่จุด 3 455 mm	RPM
0.0005606	578	796	680	21543
0.0005362	587	794	685	20843
0.0005118	597	792	681	20033
0.0004874	617	809	691	17852
0.0004631	624	820	698	17238
0.0004387	631	830	709	15716
0.0004143	638	850	747	13737
0.0003900	647	878	800	11908

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

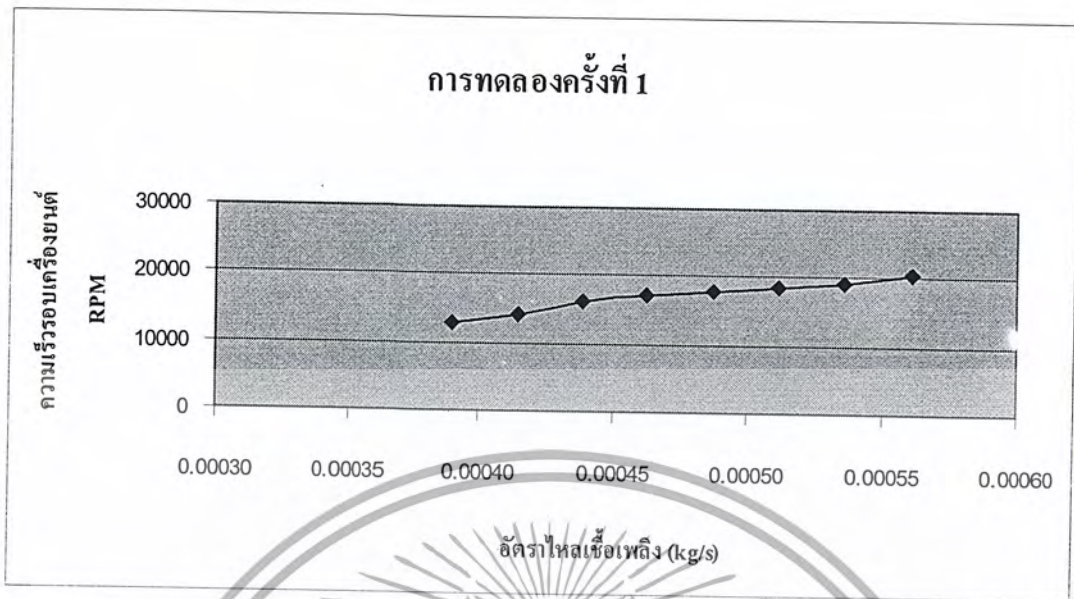
อัตราการไหล LPG (kg/s)	อุณหภูมิที่จุด 1 175 mm	อุณหภูมิที่จุด 2 265 mm	อุณหภูมิที่จุด 3 455 mm	RPM
0.0005606	591	862	706	19266
0.0005362	609	861	710	18013
0.0005118	618	862	714	17824
0.0004874	634	870	726	17173
0.0004631	641	878	741	16430
0.0004387	650	884	758	15847
0.0004143	658	891	769	14989
0.0003900	664	899	781	14123

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองครั้งที่ 3

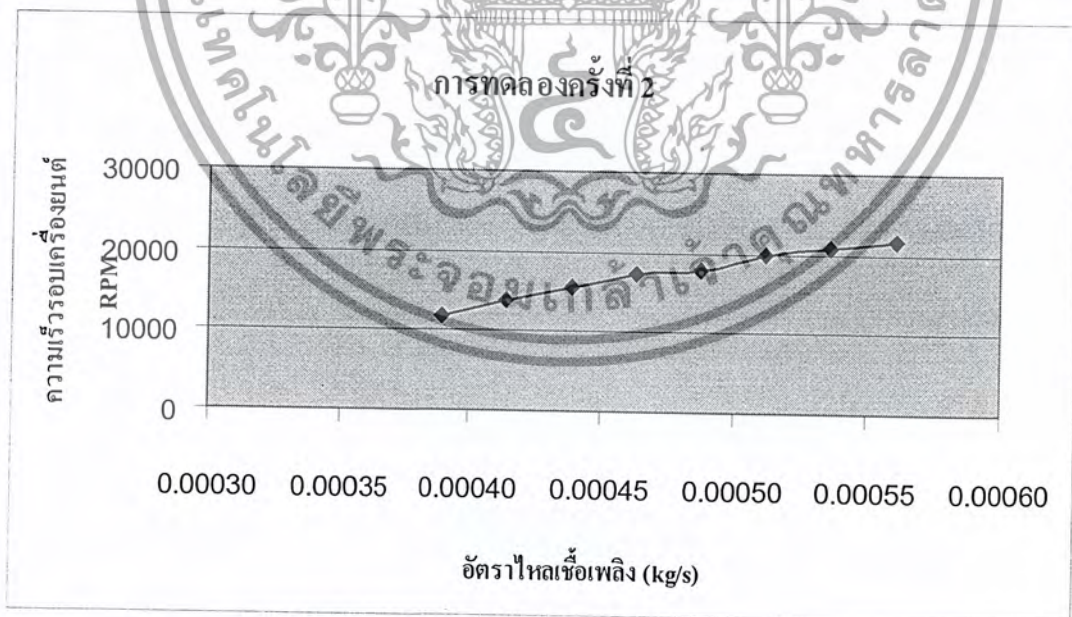
อัตราการไหล LPG (kg/s)	อุณหภูมิที่จุด 1 175 mm	อุณหภูมิที่จุด 2 265 mm	อุณหภูมิที่จุด 3 455 mm	RPM
0.0005606 kg/s	573.33	827.67	690.67	20364.00
0.0005362 kg/s	590.33	826.33	692.67	19303.67
0.0005118 kg/s	599.00	826.67	693.00	18770.67
0.0004874 kg/s	614.33	836.67	701.67	17633.00
0.0004631 kg/s	620.67	842.67	709.33	16984.00
0.0004387 kg/s	628.67	853.00	724.00	15924.33
0.0004143 kg/s	637.00	861.33	754.67	14250.67
0.0003900 kg/s	644.00	871.67	775.67	12987.67

ตารางที่ 5.4 ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองทั้งสาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

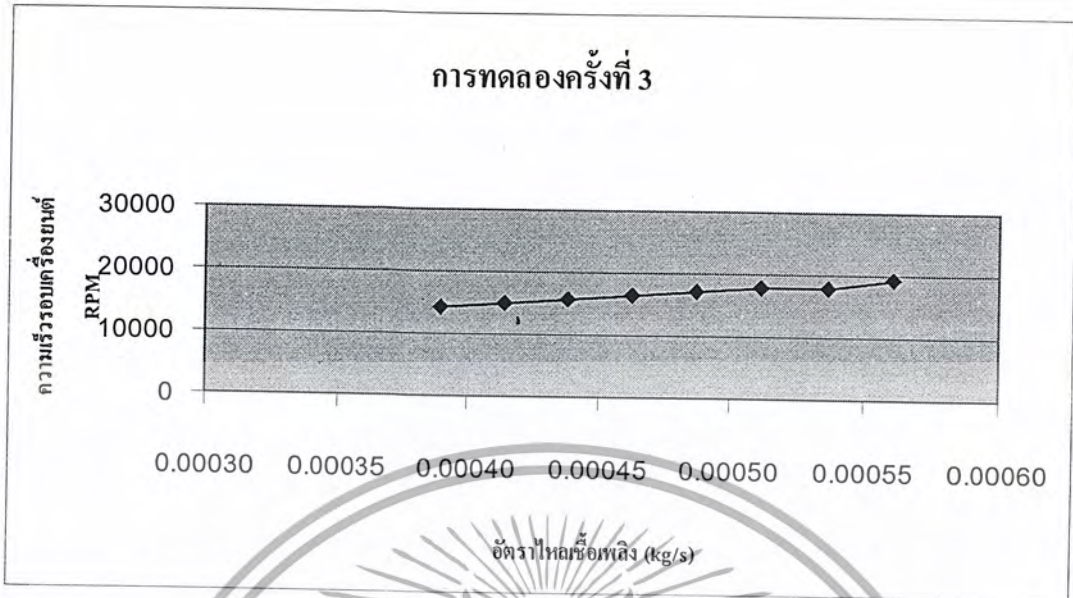


รูปที่ 5.11 แสดงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่อัตราไหลของเชื้อเพลิงต่างๆ จากการทดลองที่ 1



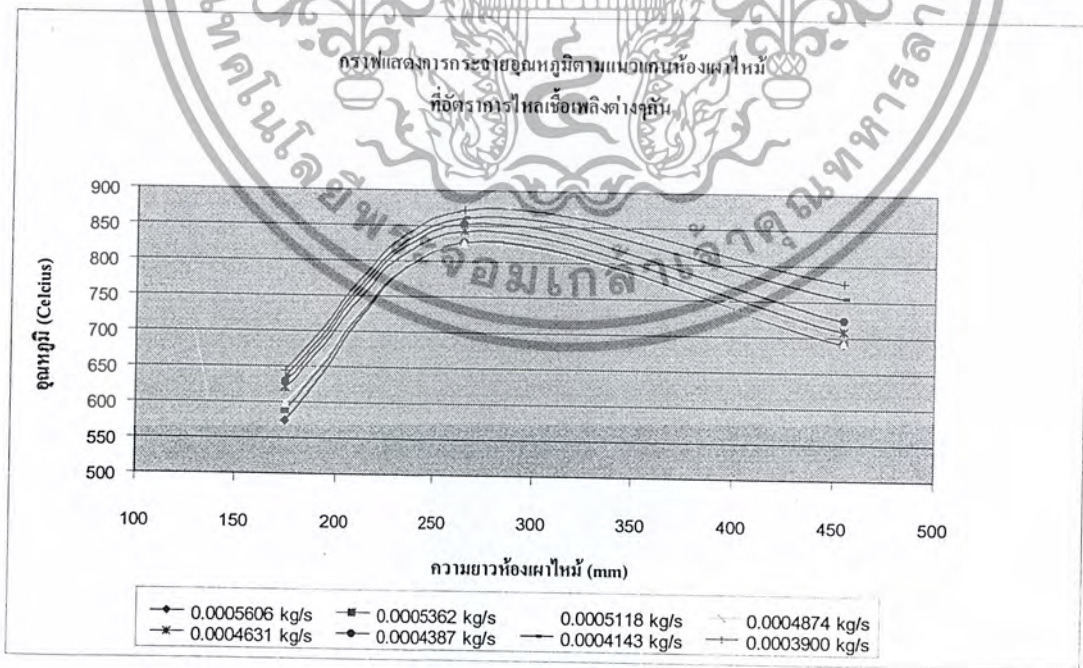
รูปที่ 5.12 แสดงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่อัตราไหลของเชื้อเพลิงต่างๆ จากการทดลองที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 แสดงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่อัตราไหลของเชื้อเพลิงต่างๆ จากการทดลองที่ 3

จากรูปที่ 5.11 - 5.13 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเราเพิ่มอัตราไหลของเชื้อเพลิงมากขึ้น ความเร็วรอบของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไนน์เพิ่มมากขึ้นด้วย และจากลักษณะกราฟทั้งสามแสดงให้เห็นว่าการทำงานของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบไนน์ มีการทำงานที่แน่นอนมีเสถียรภาพ เนื่องการลักษณะของกราฟใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5.14 แสดงการกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนห้องเผาไหม้ที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.14 เป็นการแสดงอุณหภูมิในช่วงต่าง ๆ ของห้องเผาไหม้ ในช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่เปรียบเสมือนเป็นฐานไฟ ซึ่งจะเลี้ยงให้ไฟติดอยู่เสมอ ในช่วงที่ 2 ในช่วงนี้จะมีอุณหภูมิสูงที่สุด เนื่องจากการเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ช่วงนี้ และในช่วงที่ 3 ในช่วงนี้ยังมีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมด และในช่วงนี้อุณหภูมิจะลดต่ำลงมาเพื่อไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไปจนทำให้เป็นอันตรายต่อใบพัด ถ้าลดอัตราไหลของเชื้อเพลิงลง เครื่องจะไม่สามารถเลี้ยงตัวเองอยู่ได้ และถ้าเพิ่มอัตราไหลของเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ไฟจะลามไปที่ใบพัดเทอร์ไบน์ทำให้เป็นอันตรายต่อใบพัดเทอร์ไบน์



รูปที่ 5.15 แสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในช่วงต่างๆ ของห้องเผาไหม้ที่อัตราไหลของเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น

จากรูปที่ 5.15 แสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในช่วงต่าง ๆ ของห้องเผาไหม้ ซึ่งในแต่ละช่วงของห้องเผาไหม้อุณหภูมิมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเผาไหม้เป็นลักษณะที่อากาศเหลือเมื่อการเผาไหม้มีอากาศมากอุณหภูมิจึงลดลง และจากรูปที่ 5.11 - 5.13 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราไหลของเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากว่า ความเร็วรอบของเทอร์ไบน์ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่าง คือ แรงขับเคลื่อนที่เกิดจากแก๊สร้อนจากการเผาไหม้ และแรงขับเคลื่อนที่เกิดจากความดันอากาศภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งในขณะที่อุณหภูมิลดลงแต่ขณะเดียวกันก็มีความดันอากาศเพิ่มขึ้น ก็จะชดเชยให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์เพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

6.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากรูปที่ 5.14 จะเห็นได้ว่า การเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงที่ 2 ของห้องเผาไหม้ (secondary zone) ในช่วงนี้จึงมีอุณหภูมิสูงที่สุด
2. จากรูปที่ 5.11 - 5.13 เมื่อเราเพิ่มอัตราไหลของเชื้อเพลิง ความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะเพิ่มขึ้น
3. จากรูปที่ 5.15 เมื่อเพิ่มอัตราไหลของเชื้อเพลิง อุณหภูมิในแต่ละช่วงของห้องเผาไหม้ลดต่ำลง เนื่องจาก เมื่อเพิ่มอัตราไหลของเชื้อเพลิงทำให้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น จึงทำให้คอมเพรสเซอร์ดูดอากาศได้มากขึ้น การเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้จึงมีอากาศมากกว่าเชื้อเพลิงมาก จึงทำให้อัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศมีเหลือมากเป็นผลให้อุณหภูมิลดต่ำลง ขณะเดียวกันความเร็วรอบของเทอร์ไบน์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากว่าความเร็วรอบของเทอร์ไบน์ขึ้นกับปัจจัย 2 อย่าง คือ แรงขับที่เกิดจากการความเร็วของแก๊สร้อนกับ แรงขับเคลื่อนที่เกิดจากความดันของอากาศในห้องเผาไหม้ ที่อุณหภูมิในแต่ละช่วงลดลงเนื่องจากการเผาไหม้มีอากาศเหลือมากขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็มีความดันเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ความเร็วรอบของเทอร์ไบน์สูงขึ้น
4. ในช่วงอัตราไหลของเชื้อเพลิงที่ทดลองเครื่องยนต์สามารถเลี้ยงตัวเองได้ ถ้าลดอัตราไหลของเชื้อเพลิงต่ำกว่าช่วงที่ทดลองเครื่องยนต์จะไม่สามารถเลี้ยงตัวเองอยู่ได้ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์จะตกลงจนเครื่องดับ และถ้าเพิ่มอัตราไหลของเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นกว่าช่วงที่ทดลองมากขึ้นเรื่อย ๆ ก็จะทำให้ปลวไฟลามออกไปที่ใบพัดเทอร์ไบน์ ซึ่งอาจทำให้ใบพัดเสียหายได้

6.2 แนวทางการพัฒนาต่อ

1. การทำระบบ Preheat เป็นการควบคุมอุณหภูมิของถังแก๊ส เนื่องจากถังแก๊สเวลาจ่ายเชื้อเพลิงนาน ๆ จะทำให้อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงตกลง เนื่องจาก ถังแก๊สเย็นลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันภายในถัง
2. การติดตั้ง Power Turbine เพื่อนำงานที่ได้จากเครื่องยนต์ไปใช้ประโยชน์
3. การออกแบบระบบจ่ายเชื้อเพลิงที่ดีจะช่วยในการคลุกเคล้าส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงทำให้การเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ดีขึ้น
4. การออกแบบห้องเผาไหม้ที่ดีจะทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น โดยมีปัจจัยสำคัญดังนี้
 - 4.1 ระดับอุณหภูมิของแก๊สหลังจากการเผาไหม้แล้วจะต้องต่ำอย่างเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ทำเทอร์ไบน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4.2 ที่ว่างหลังจากแก๊สออกจากห้องเผาไหม้แล้ว การกระจายอุณหภูมิจะต้องเป็นแบบที่สามารถให้สมรรถนะของเทอร์ไบน์สูง จะต้องไม่มีความร้อนมากเฉพาะจุดที่ใบพัดเทอร์ไบน์
- 4.3 การเผาไหม้ต้องดำเนินไปอย่างมีเสถียรภาพในช่วงของอัตราส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงที่กว้างซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามภาระสูงสุดจนถึงเดินเบา
- 4.4 หลีกเลี่ยงการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์อันก่อให้เกิดเม็ดคาร์บอน ซึ่งก่อนขนาดเล็กของคาร์บอนจะผ่านเข้าไปปะทะใบของเทอร์ไบน์ด้วยความเร็วสูงจะทำให้การกัดเซาะใบพัดทำให้เสียหายได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Edward E. Anderson, "Thermodynamics", PWS PUBLISHING COMPANY Boston
- [2] Yunas A. Cengel, Michael A. Boles, "Thermodynamics and Engineering Approach 3rd Edition", McGraw Hill, 1998.
- [3] กัญจนา นุฒยเกียรติ, "เชื้อเพลิงและการเผาไหม้", สำนักพิมพ์ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544
- [4] M.V. Heitor, "Velocity and Scalar Measurement in Model and Real Gas Turbine Combustors", Proceeding of the Nato Advance Study Institute on Instrumentation for Combustion and Flow in Engines Vimeira, Portugal, September 13-26, 1987
- [5] HAWTHORNE, W. R., ed. Aerodynamics of Turbines and Compressor. Oxford U.P., 1964
- [6] 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. No. 3099, 1959
- [7] BENSON, R. S. 'A review of methods for assessing loss coefficients in radial gas turbines', Int. J. mech. Sci., 12, 1970, 905-32.
- [8] Arthur H. Lefebvre, "Gas Turbine Combustion", Thermal Science and Propulsion Center, School of Mechanical Engineering Purdue University, West Lafayette Indiana, 1983
- [9] Bach T. Vu and F.C. Gouldin, "Flow Measurement in a Model Swirl Combustor", AIAA Journal, Vol. 20, No.5, November 1981, pp. 642-651
- [10] Aerodynamic Performance of Radial Inflow Turbines: First (1963) and Second (1964) Reports, Motor Industry Research Association. (Alternatively, the work is summarized in: HIETT, G.F. and JOHNSTON, I.H. 'Experiments concerning the aerodynamic performance of inward radial flow turbine', Proc. Instn mech. Engrs, 178, Part 31(ii), 1964.)
- [11] BENSON, R. S. 'Prediction of performance of radial gas turbine in automotive turbochargers', Am. Soc. Mech. Engrs paper 71-GT-66, 1971
- [12] MOWILL, J. and STROM, S. 'An advanced radial-component in industrial gas turbine', Trans. ASME Jnl of Engng for Power, 105, 1983, 947-52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้