

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน
ของห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันแก๊ส

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



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 64208
วัน,เดือน,ปี..... - 7 ก.ย. 2549

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ประจำปีการศึกษา 2547
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน
ของห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันแก๊ส

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



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา.2547
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

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

ผู้จัดทำ

1. นายชาญชัย เงินวิวัฒน์กุล รหัสประจำตัว 45015413
2. นายวชิร เหมินทร์ รหัสประจำตัว 45015472



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกน
ของห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันแก๊ส

นายชาญชัย เงินวิวัฒน์กุล

นายวชิร เหมินทร์

ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซเทอร์โบอินที่อัตราความเร็วรอบของเชื้อเพลิงต่าง ๆ กันเพื่อสร้างให้ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของเชื้อเพลิงกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ โดยมีเป้าหมายของการศึกษาคือ เงื่อนไขการทำงานที่ทำให้เปลวไฟเกิดขึ้นอย่างมีเสถียรภาพนอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงห้องเผาไหม้ให้มีการเผาไหม้ที่ดียิ่งขึ้น โดยการสังเกตเปลวไฟในห้องเผาไหม้ จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่าอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จะลดลงตามสัดส่วนของแอลพีจี และในห้องเผาไหม้ที่ได้จัดทำขึ้นใหม่ จากการสังเกตยังพบอีกว่าปริมาณของแอลกอฮอล์จะหลุดออกนอกห้องเผาไหม้น้อยลง ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้สูงขึ้น

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

Mr.Chanchai ngoenwiwatkul

Mr.Vashira Hamin

Assist. Prof. Dr. Jaruwat Jareonsuk Advisor

ABSTRACT

This research is the study of the dispersion of temperature in axis line of the combustion chamber in gas turbine engine with the flow rate of different kinds of fuels in order to see the connection of flow rate of het fuels and the temperature occurred inside the combustion chamber. The purpose of this study is to find the condition to make the flame in the chamber stable. Moreover, there is an improvement made in the combustion chamber to make it more combustive by observing the flame in the combustion chamber. From the study, it is also found that the temperature in the combustion chamber will decrease in proportion with the LPG gas in every result of the experiment and in the combustion chamber that has been rebuilt. From the observation, it is found that the amount of particles of the liquid of alcohol out of the combustion chamber is less. This makes the temperature in the combustion chamber higher.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับการช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ ผศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และคอยช่วยเหลือมาตลอดจนโครงการนี้สำเร็จได้ด้วยดีรวมทั้ง รศ.ทวี ทรัพย์เจริญ และ อาจารย์ คำวิทย์ จันทร์แสงสุก ที่คอยให้ความรู้และให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ มากมาย ขอบคุณที่หนุ่ม พี่หนุ่ม และ คุณ ฉวีวรรณ เมฆสนั่น ที่ให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือ ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังในเสมอมา

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

นายชาญชัย เงินวิวัฒน์กุล
นายวชิร เหมินทร์

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1. ความสำคัญและที่มา	1
2. วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
3. ขอบเขตการทดลอง	1
4. วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์	
2.1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์	3
2.2 วัฏจักรในอุดมคติ	4
2.3 วัฏจักรที่แท้จริง	5
2.4 ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์	6
2.5 การสูญเสียความดัน	7
2.6 การสูญเสียทางกล	8
2.7 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะ	8
บทที่ 3 แก๊สเชื้อเพลิงและการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง	
3.1 เชื้อเพลิงก๊าซ	10
3.2 คุณสมบัติการสันดาป	15
3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส	16
3.4 ตะกียงบุนเซน	20
3.5 เปลวไฟดับ	24

3.6 ความอยู่ตัวของเปลวไฟตะเกียงบนเซน	25
3.7 เปลวไฟแก๊สชนิดแพร่	26
3.8 ปฏิกิริยาอุกโช	26
3.9 การจำแนกปรากฏการณ์การเผาไหม้	27
3.10 นิยามการติดไฟ	28
3.11 ชนิดของการติดไฟ	29
3.12 การติดไฟแบบบังคับ	29
3.13 ขอบเขตการติดไฟ	31
3.14 การแตกตัวเป็นละออง	35
3.15 สภาวะที่ผิวของของเหลวขณะระเหยกลายเป็นไอกรณีที่มีและไม่มีการเผาไหม้	35
3.16 ระบบการเผาไหม้ในเตาห้องต้มและอุตสาหกรรม	37
3.17 หัวเผาในบรรยากาศเปิด	38
3.18 การออกแบบคอกอด และท่อผสม	40
3.19 การออกแบบช่องเปลวไฟ	41
3.20 หัวเผาแก๊สผสมอากาศในบรรยากาศเปิดแบบต่าง ๆ	42
3.21 หัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิดอากาศดึงแก๊ส	43
3.22 หัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิดผสมในอุโมงค์	45
3.23 หัวเผาชนิดแก๊สผสมอากาศภายหลังหรือเปลวไฟชนิดแพร่	46
บทที่ 4 ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์	
4.1 บทนำ	48
4.2 ลักษณะการสูญเสียความดัน	48
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและการสูญเสียความดัน	50
4.4 การไหลในท่อวงแหวน	51
4.5 การแยกตัวของการไหลวนในหัวฉีดเว้าออก	54
4.6 การกระจายอากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้ชั้นใน	55
บทที่ 5 แก๊สผสมและการคำนวณ	
5.1 องค์ประกอบของแก๊สผสม	57
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง P-V-T ของแก๊สผสม แก๊สอุดมคติและแก๊สจริง	58
5.3 สมการค่าความร้อนของสารผสม	59
5.4 ตัวอย่างการคำนวณ	59

บทที่ 6 ชุดทดลองห้องเผาไหม้ การทดลองและผลการทดลอง

6.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ	60
6.2 ขอบเขตการทดลอง	60
6.3 การสตาร์ทเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์	60
6.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	72
6.5 การสร้างห้องเผาไหม้ตัวใหม่และจุดที่ได้รับการแก้ไข	72
ภาคผนวก	74
บรรณานุกรม	78



สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 3.1 ขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟ และความเร็วของเปลวไฟของแก๊ส เชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ	20
ตารางที่ 3.2 ระยระดับเปลวไฟของแก๊สเชื้อเพลิง (การทดลองที่ 101 กิโลปาสกาล , 20 องศาเซลเซียส)	25
ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างข้อมูลเกี่ยวกับการติดไฟของเชื้อเพลิงต่างๆ ในอากาศ	33
ตารางที่ 3.4 แสดงจุดวาบไฟ และจุดติดไฟและสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว ชนิดต่าง ๆ ไว้	34
ตารางที่ 3.5 แสดงจุดวาบไฟ และจุดติดไฟและสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว ชนิดต่าง ๆ	34
ตารางที่ 4.1 แสดงการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ในทางปฏิบัติ	50
ตารางที่ 6.1 ข้อมูลการปรับอัตราการไหลเชื้อเพลิง	65
ตารางที่ 6.2 ข้อมูลการปรับอัตราการไหลอากาศและค่าอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ที่ทำการทดลอง	66

สารบัญรูปภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 2.1 วัฏจักรเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ	3
รูปที่ 2.2 การทำงานของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบ และแผนภาพ T-S	4
รูปที่ 2.3 วัฏจักรทางทฤษฎีของคอมเพรสเซอร์และเทอร์โบ	6
รูปที่ 3.1 เส้นโค้งอุณหภูมิและความเข้มข้นขององค์ประกอบในเปลวไฟอะเดียแบติกแก๊สผสมแบบราบเรียบหนึ่งมิติ	18
รูปที่ 3.2 ความเร็วของเปลวไฟที่ส่วนผสมแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ	19
รูปที่ 3.3 (ก) ตะเกียงบุนเซนและลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้น (ข) การพิสูจน์เปลวไฟแยกเป็นสองชั้นโดยวิธี สมิทเทิลส์	21
รูปที่ 3.4 เส้นกระแสผ่านเปลวไฟแก๊สผสมอากาศแบบราบเรียบ และความสัมพันธ์ของความเร็วของ เปลวไฟและมุมของกรวยแนวเปลวไฟ	22
รูปที่ 3.5 เส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเปลวไฟและของแก๊สผสมอากาศบริเวณขอบหัวเผา	23
รูปที่ 3.6 ผังรูปแสดงขีดจำกัดของปรากฏการณ์เปลวไฟแก๊สผสมอากาศ	24
รูปที่ 3.7 ขีดจำกัดความเร็วเฉลี่ยของแก๊สและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเผาบนเซนเพื่อให้ได้เปลวไฟอยู่ตัว	26
รูปที่ 3.8 การติดไฟแบบบังคับ	30
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างขอบเขตการติดไฟของส่วนผสมที่ต่างกันสองชนิด	31
รูปที่ 3.10 เส้นโค้งความเข้มข้นของเชื้อเพลิงออกซิเจน และผลผลิตปฏิกิริยาตามแนวตัดขวางของเปลวไฟชนิดแพร่	36
รูปที่ 3.11 ผังรูปแสดงโครงสร้างของเปลวไฟชนิดแพร่แบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนที่สัมพันธ์กับอัตราเร็วของการไหล	36
รูปที่ 3.12 ภาพแสดงส่วนประกอบหัวฉีดเผาถึงอากาศเข้าในบรรยากาศปิด	38
รูปที่ 3.13 การดึงอากาศเข้าผสมโดย Confined Jet ในตะเกียงบุนเซน	39
รูปที่ 3.14 สัดส่วนของคอคอดและท่อผสม	41
รูปที่ 3.15 ช่องเปลวไฟรูปร่างและลักษณะต่าง ๆ กัน	42
รูปที่ 3.16 หัวเผาและหัวฉีดแก๊สผสมอากาศชนิดความดันต่ำบางแบบ	43
รูปที่ 3.17 หลักการและเทอมที่ใช้กับหัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิดอากาศดึงแก๊ส	44
รูปที่ 3.18 ระบบการป้อนแก๊สที่ความดันบรรยากาศสู่หัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิด	

อากาศดิ่งแก๊ส	45
รูปที่ 3.19 ตัวอย่างหัวเผาชนิดผสมในท่ออุโมงค์	45
รูปที่ 3.20 หัวเผาเบรย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม	46
รูปที่ 3.21 หัวเผารูปเข็ม	46
รูปที่ 3.22 หัวเผาเมทริกซ์	47
รูปที่ 4.1 ควบคุมการไหลผ่านรู Dilution	53
รูปที่ 4.2 ตัวเลขเชิงมวลห้องเผาไหม้	53
รูปที่ 4.3 แสดงการไหลผ่านรูของห้องเผาไหม้ชั้นใน	54
รูปที่ 4.4 สังเกตรูปแบบการไหลสำหรับหัวฉีดแบบหมุนวน และการออกของเปลวไฟ จากหัวฉีดเว้าออก	55
รูปที่ 6.1 แสดงส่วนประกอบของห้องเผาไหม้	61
รูปที่ 6.2 รูปแสดงชุดอ่านเทอร์โมคัปเปิ้ล	62
รูปที่ 6.3 รูปแสดงชุดโคมคัปเปิ้ล	63
รูปที่ 6.4 รูปแสดงชุดวัดความเร็วลม	63
รูปที่ 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุด L/D และสัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวใหม่ที่ AF Ratio = 30	67
รูปที่ 6.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและสัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวใหม่ที่ AF Ratio = 30	67
รูปที่ 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุด L/D และสัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวใหม่ที่ AF Ratio = 40	68
รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และสัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวใหม่ที่ AF Ratio = 40	68
รูปที่ 6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุด L/D และสัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวใหม่ที่ AF Ratio = 50	69
รูปที่ 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และสัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวใหม่ที่ AF Ratio = 50	69
รูปที่ 6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุด L/D และสัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวเดิมที่ AF Ratio = 30	70
รูปที่ 6.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และสัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวเดิมที่ AF Ratio = 30	70

- รูปที่ 6.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุด L/D และสัดส่วนของ LPG
ของห้องเผาไหม้ตัวเดิมที่ AF Ratio = 40 71
- รูปที่ 6.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และสัดส่วนของ LPG
ของห้องเผาไหม้ตัวเดิมที่ AF Ratio = 40 71
- รูปที่ 6.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุด L/D และสัดส่วนของ LPG
ของห้องเผาไหม้ตัวเดิมที่ AF Ratio = 50 72
- รูปที่ 6.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และสัดส่วนของ LPG
ของห้องเผาไหม้ตัวเดิมที่ AF Ratio = 50 72
- รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิมบริเวณเปลวไฟและสัดส่วนเชื้อเพลิงที่
AF ratio ต่างๆ ในห้องเผาไหม้เดิม 73
- รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิมบริเวณเปลวไฟและสัดส่วนเชื้อเพลิงที่
AF ratio ต่างๆ ในห้องเผาไหม้ตัวใหม่ 73



บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันและในอนาคตข้างหน้าเชื้อเพลิงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างมากในการขับเคลื่อนของเครื่องยนต์หรือเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องต้นกำลัง เช่น เครื่องบิน เรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น ทำให้เป็นเครื่องยนต์ชนิดหนึ่งซึ่งถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเชื้อเพลิงที่ใช้นั้นมีทั้งแบบของเหลวและแก๊ส และในโครงการนี้จะศึกษาผลของการใช้เชื้อเพลิงระหว่างของเหลวและแก๊ส โดยของเหลวที่ใช้คือเมธิลแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่หาได้ง่ายความท้อคงเสถียรและมีราคาถูกในส่วนของเชื้อเพลิงแก๊สนั้นได้เลือกใช้เชื้อเพลิงแอลพีจีซึ่งมีราคาถูกเช่นเดียวกัน ซึ่งการศึกษานี้จะมุ่งเน้นไปที่การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนภายในห้องเผาไหม้ว่ามีผลกระทบเช่นไรในการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงโดยยึดเชื้อเพลิงแอลพีจีเป็นหลักในการทดลอง

ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงนั้นจะยึดค่าความร้อนค่าหนึ่งเป็นหลักตลอดการทดลองซึ่งจะได้กล่าวในบทที่ 6 ถึงหลักการเลือกและการคำนวณ

ในส่วนเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ที่ใช้ในการทดลองนั้นจะมีการคำนึงทางด้านความปลอดภัย จึงได้มีการจำลองระบบขึ้น ซึ่งในระบบนี้จะมีการทำงานคล้ายกับในส่วนเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์นั่นคือจะใช้เครื่องเป่าลม(Blower)ทำการเป่าลมเข้าไปยังห้องเผาไหม้และเมื่อเผาไหม้เสร็จจะปล่อยออกสู่บรรยากาศทันที ซึ่งห้องเผาไหม้จะมีด้วยกัน 2 ชุดคือห้องเผาไหม้ที่ได้จัดสร้างขึ้นเองและห้องเผาไหม้ที่ได้ทดลองมาก่อนในปีที่ผ่านมา

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. วิเคราะห์ผลของการกระจายอุณหภูมิเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์ และ แก๊ส LPG ภายใต้อัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงและอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงต่าง ๆ

3. ขอบเขตการทดลอง

1. การทดลองนี้จะจำกัดอยู่ที่ความดันบรรยากาศ
2. จะทำการทดลองเปรียบเทียบห้องเผาไหม้ตัวเดิมกับห้องเผาไหม้ที่ได้ทำการออกแบบเอง
3. ปรับอัตราส่วนที่ใช้ในการทดสอบ โดยใช้แอลกอฮอล์เหลวกับ LPG โดยการเพิ่มเมทิลแอลกอฮอล์ที่ละ 10 % จาก 0 -100 % และวิเคราะห์ผลที่ได้
4. ศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนเชื้อเพลิงโดยให้การเผาไหม้จำกัดอยู่ในช่วงของห้องเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ค่า AF Ratio ที่ใช้ในการทดลองคือที่ 30, 40, 50 ทำการเลือกภายในย่านการทดลองที่เริ่มติดไฟ

7. ค่า Q ที่เลือกใช้คือ 1.765 KJ/S

4. วิธีการดำเนินงาน

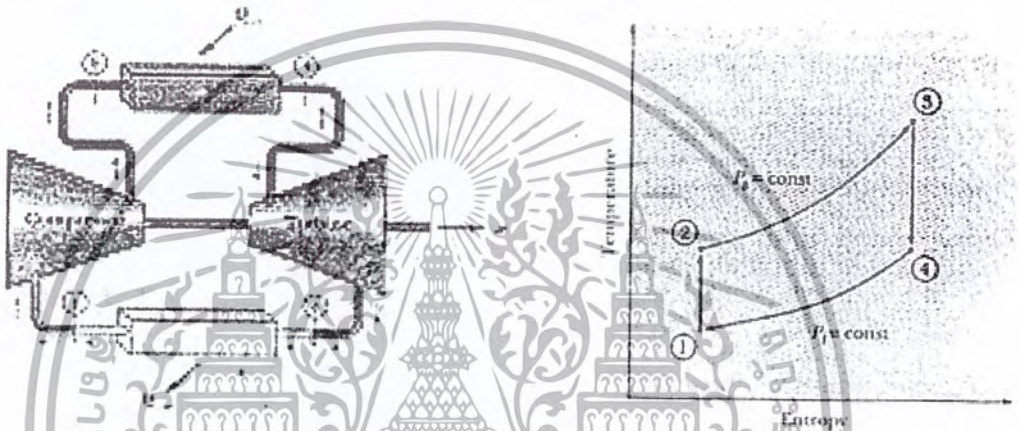
ได้ทำการจัดสร้างเครื่องที่ใช้ทดลองโดยจัดสร้างให้ใช้ได้กับห้องเผาไหม้ของปีที่ผ่านมาจากนั้นทำการทดลอง และจัดสร้างห้องเผาไหม้ขึ้นมาใหม่อีกชุดหนึ่ง จากนั้นทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง



บทที่ 2

เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์

2.1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์



รูปที่ 2.1 วงจรเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์

โดยหลักการทำงานของเครื่องยนต์ฟาวเวอร์แก๊สเทอร์ไบน์สามารถสรุปได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1 ขบวนการอัด (Compression) เริ่มจากอากาศภายนอก (จุด 1) ที่ อุณหภูมิและความดันบรรยากาศจะถูกคอมเพรสเซอร์ทำการดูดและอัดให้มีความดันเพิ่มมากขึ้น เพื่อส่งต่อไปยังห้องเผาไหม้ (จุด 2) โดยกระบวนการอัดที่เกิดขึ้นเป็นแบบอะไดแบติก (Adiabatic) ซึ่งจะทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นอีกด้วย

2 ขบวนการสันดาป (Combustion) ภายในห้องเผาไหม้หัวฉีดแก๊สเชื้อเพลิงจะทำการจ่ายเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อไปผสมกับอากาศที่ถูกดูดเข้ามาด้วยความเร็วจากการอัดของคอมเพรสเซอร์และจุดระเบิด ทำให้เกิดการสันดาปภายในห้องเผาไหม้ เกิดแก๊สร้อนไปยังทางเข้าเทอร์ไบน์ (จุด 3)

3 ขบวนการขยายตัวครั้งที่ 1 (Expansion) แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งมีความดันและอุณหภูมิที่สูงจะขยายตัวผ่านเทอร์ไบน์ทำให้ใบพัดเทอร์ไบน์หมุน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนพลังงานของของไหลให้เป็นพลังงานกล โดยงานที่ได้จะถูกส่งกลับไปให้คอมเพรสเซอร์เพื่อทำการอัดอากาศเข้าห้องเผาไหม้เป็นวัฏจักรต่อไป และพลังงานที่เหลือซึ่งอยู่ในรูปของไอเสียยังคงมีความเร็วและอุณหภูมิที่สูง จะถูกปล่อยเข้าสู่ทางเข้าฟาวเวอร์เทอร์ไบน์ (จุด 4) แทนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยตรง

4 ขบวนการขยายตัวครั้งที่ 2 (Expansion) ไอเสียที่เหลือจะขยายตัวออกสู่บรรยากาศ (จุด 4)

2.2 วัฏจักรในอุดมคติ (Ideal Cycle)

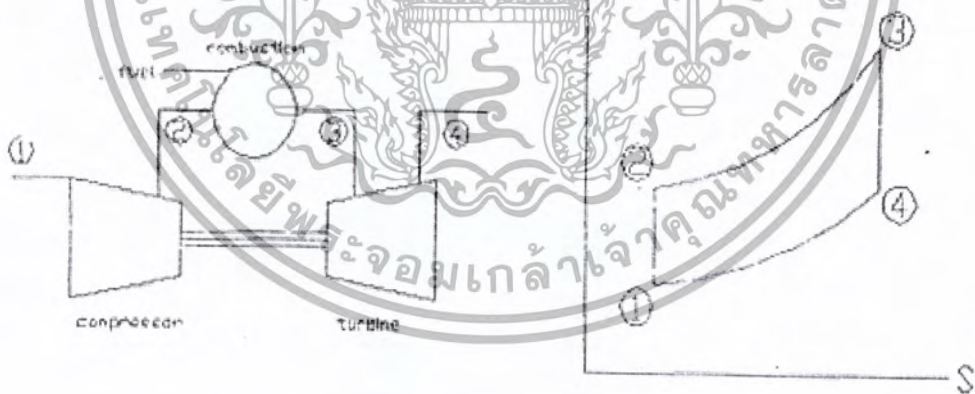
การพิจารณาพลังงานที่ได้ และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์เพื่อให้ง่ายจึงต้องคิดในลักษณะของวัฏจักรไอศติก่อน ซึ่งในสภาวะนี้แต่ละองค์ประกอบของเครื่องยนต์จะแยกกันคิดงานที่ได้ของแต่ละชนิด (Specific Work) และประสิทธิภาพของวัฏจักรขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความดันและอุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรเท่านั้น หลังจากนั้นจึงทำการพิจารณาให้ถูกต้องมากขึ้นในภายหลัง

จากเทอร์โมไดนามิกส์ที่กล่าวถึงเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ได้ตั้งข้อสมมุติฐาน ไว้ดังนี้

- 1.) ขบวนการอัดและการขยายตัวเป็นแบบอะไดแบติกชนิดย้อนกลับได้
- 2.) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของสารตัวกลางระหว่างทางเข้าและทางออกของแต่ละส่วนของอุปกรณ์
- 3.) ไม่มีการสูญเสียความดันในอุปกรณ์ต่าง ๆ
- 4.) กำหนดให้สารตัวกลางมีองค์ประกอบไม่เปลี่ยนแปลงตลอดวัฏจักรและเป็นแก๊สสมบูรณ์ ที่มีค่าความร้อนเฉพาะ (Specific Heat) คงที่ได้
- 5.) มวลที่ไหลตลอดวัฏจักรมีค่าคงที่

โดยเราจะแยกพิจารณาระหว่างเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์กับเครื่องยนต์พาวเวอร์แก๊สเทอร์ไบน์

2.2.1 วัฏจักรเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์



รูปที่ 2.2 การทำงานของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ และแผนภาพ T-S

เมื่อทำการพิจารณาในแต่ละอุปกรณ์จะได้

จากจุดที่ 1-2 เป็นขบวนการอัดตัวแบบอะไดแบติก จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์จะได้

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

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 ของเทอร์โมไดนามิกส์ จะได้

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

เมื่อ Q และ W เป็นความร้อนและงานที่ถ่ายเทจากระบบต่อหนึ่งหน่วยมวลทำให้ประสิทธิภาพความร้อนของวัฏจักร (Thermal Efficiency, η_t) เป็น

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

2.3 วัฏจักรที่แท้จริง (Actual Cycle)

ข้อแตกต่างของการทำงานของวัฏจักรที่แท้จริงของเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์จะไม่เป็นไปตามวัฏจักรในอุดมคติ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าในวัฏจักรที่เกิดขึ้นจริงๆ นั้น มีตัวแปรหลายอย่างที่ทำให้วัฏจักรไม่เป็นไปตามทฤษฎี ดังนั้นในการคำนวณหาค่าต่างๆ ของวัฏจักรจึงต้องคำนึงถึงข้อแตกต่างเหล่านั้น ดังนี้

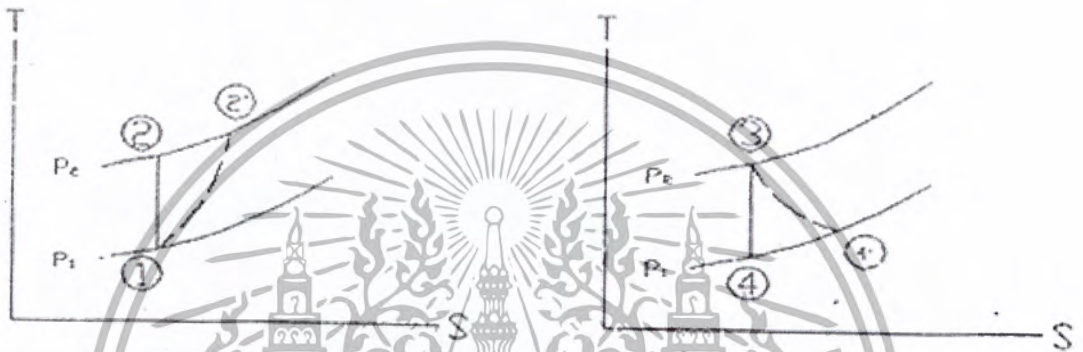
- 1.) เนื่องจากการไหลของมวลในอุปกรณ์มีความเร็วสูง มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ระหว่างทางเข้าและทางออกมาก ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องออกแบบเครื่องมีวัดความดันและอุณหภูมิที่สแตกเนชัน (Stagnation) ซึ่งเป็นการพิจารณาพลังงานที่เกิดขึ้นทั้งหมด
- 2.) ขบวนการที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการอัดตัวในคอมเพรสเซอร์และการขยายตัวในเทอร์ไบน์เป็นขบวนการอะไดแบติกแบบย้อนกลับไม่ได้ จึงเป็นการเพิ่มเอนโทรปี (Entropy)
- 3.) ผลจากความเสียด จึงทำให้มีการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ ตลอดจนในท่อทางเข้าและทางออกของห้องเผาไหม้
- 4.) ต้องป้อนงานให้กับคอมเพรสเซอร์มากกว่าทางทฤษฎี เนื่องจากการสูญเสียพลังงานที่แท้จริง การต้านของแรงลม และการสูญเสียในระบบการส่งกำลังระหว่างคอมเพรสเซอร์
- 5.) ค่าของ C_p และ γ ของสารตัวกลาง ขณะทำงานตลอดวัฏจักรเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ และตามองค์ประกอบทางเคมีของสารของไหล
- 6.) การเผาไหม้ ไม่มีความสมบูรณ์ ดังนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้มีมากกว่ามวลของอากาศที่ออกจากคอมเพรสเซอร์ เนื่องจากมวลของเชื้อเพลิงที่ผสมเข้าไป ในทางปฏิบัติ มวลจะมีเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 1-2 % เนื่องจากมีค่าเล็กน้อยจึงเป็นการสมมุติว่า มวลไหลผ่านคอมเพรสเซอร์ และ เทอร์ไบน์เท่านั้น

2.4 ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์

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



รูปที่ 2.3 วัฏจักรทางทฤษฎีของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์

ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์ทั่วไป จะอยู่ในรูปอัตราส่วนของงานจริงต่องานทางทฤษฎี ซึ่งอาจจะเขียนในเทอมของเอนทัลปีสแตกเนชัน (Stagnation Enthalpy) หรืออุณหภูมิสแตกเนชัน (Stagnation Temperature) ซึ่งเป็นผลรวมพลังงานจลน์ที่เปลี่ยนแปลงของของไหลระหว่างทางเข้าและทางออก

$$\eta = \frac{W_{theory}}{W_{Actual}} = \frac{W'}{W} = \frac{\Delta h'_o}{\Delta h_o} = \frac{T_{02}' - T_{01}}{T_{02} - T_{01}}$$

ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์

$$= \frac{T_{01}}{T_{02} - T_{01}} \times \left(\frac{T_{02}'}{T_{01}} - 1 \right)$$

จากการอัดแบบไอเซนโทรปิกระหว่างทางเข้า 1 และ ทางออก 2' จะได้

$$\frac{T_{02}'}{T_{01}} = \left[\frac{P_{02}'}{P_{01}} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\frac{T_{02}}{T_{02} - T_{01}} = \left[\frac{P_{02}}{P_{01}} \right]^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} - 1 \quad (2.6)$$

เมื่อ $\gamma =$ ค่าคงที่ของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.4

ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์

$$\eta = \frac{W_{theory}}{W_{Actual}} = \frac{W'}{W} = \frac{\Delta h'_o}{\Delta h_o} = \frac{T_{03} - T_{04}}{T_{03} - T_{04}}$$

$$\eta = (T_{03} - T_{04}) \times \left[\frac{1}{T_{03} \left[1 - \frac{T_{04}}{T_{03}} \right]} \right]$$

จากการขยายแบบไอเซน ไทโรบิก ระหว่างทางเข้า 3 และทางออก 4 จะได้

$$\frac{T_{04}}{T_{04}} = \left[\frac{P_{04}}{P_{03}} \right]^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}$$

ดังนั้น

$$\eta = \frac{T_{03} - T_{04}}{1 - \left(\frac{P_{04}}{P_{03}} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}} \quad (2.7)$$

เมื่อ $\gamma =$ ค่าคงที่ของแก๊สผสมมีค่าเท่ากับ 1.35

โดยเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ที่นำมาทดสอบนี้มีท่อทางเข้าสั้นมากจนอาจไม่คิดได้ จึงสามารถเริ่มคำนวณที่คอมเพรสเซอร์ได้เลย ทำให้เทอม P_0 และ T_0 จากสมการ 2.8 จะมีค่าเท่ากับ P_a และ T_a ตามลำดับ เนื่องจากความเร็วของอากาศที่ทางเข้าคอมเพรสเซอร์เป็น 0

โดยสมการข้างต้นเป็นการเกิดการอัดตัวและขยายตัวแบบอะไดแบติก ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ในโครงการนี้ได้ เนื่องจากมีความร้อนสูญเสีย

2.5 การสูญเสียความดัน

ความดันที่สูญเสียในเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ เกิดขึ้นได้ทางด้านไอดี ไอเสีย จุดต่อท่อทางและ

ในท่อแนวใหม่ ทำให้เกิดการสูญเสียเป็นแบบ ความดันสแตกเนชั่น ซึ่งเกิดจากความต้านทานทางไดนามิก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอุปกรณ์อีกทั้งการเปลี่ยนโมเมนตัมที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ ความดันที่สูญเสียนี้มีผลทำให้ อัตราส่วนความดันในเทอร์ไบน์ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับที่คอมเพรสเซอร์ จึงมีส่วนทำให้งานที่ได้จาก เทอร์ไบน์ลดลง วัฏจักรของแก๊สเทอร์ไบน์มีโอกาเป็นขบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้ เนื่องจากงานสุทธิที่ได้แตกต่างจากทฤษฎีมาก (อัตราส่วนของงานต่ำ) ดังนั้นความดันที่สูญเสียจึงมีผลอย่างชัดเจนต่อ สมรรถนะของวัฏจักร ดังนั้นเพื่อความถูกต้องยิ่งขึ้นจึงทำการติดตั้งเครื่องมือวัดความดันที่ทางเข้าและ ทางออกของห้องเผาไหม้ ทำให้สามารถนำค่าที่ได้ไปคำนวณได้เลย

2.6 การสูญเสียทางกล

เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ทุกประเภท กำลังที่เอาไปขับคอมเพรสเซอร์จะได้อาจมาจากการต่อกำลัง ผ่านมาจากเทอร์ไบน์โดยใช้เพลลา และไม่มีเกียร์ทด ดังนั้นการสูญเสียทางกลจึงเกิดจากความเสียดทาน ของ แบริ่งและการต้านลมเท่านั้น ดังนั้นงานที่ใช้ขับคอมเพรสเซอร์ หาได้จาก

$$W_{ic} = \frac{1}{\eta \times C_p (T_{02} - T_{01})} \quad (2.8)$$

2.7 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนจำเพาะ

คุณสมบัติของ C_p และ γ เป็นส่วนสำคัญในการประมาณสมรรถนะของวัฏจักร และ จำเป็นต้องใช้ค่าซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงนี้ในการหาสถานะของวัฏจักร วิสัยโดยทั่วไปของจริงที่ทำงาน ในช่วงของอุณหภูมิและความดัน ค่าของ C_p เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิแต่เพียงอย่างเดียวและทำให้ค่า ของ γ เปลี่ยนแปลงไปเช่นเดียวกับ C_p ตามสมการต่อไปนี้

$$\frac{\gamma - 1}{\gamma} = \frac{R_0}{M \times C_p} \quad (2.9)$$

เมื่อ R_0 คือ ค่าคงที่ของแก๊สใด ๆ (Universal Gas Constat) และ M คือมวลโมเลกุล (Molecular Weight)

การเปลี่ยนแปลงค่า C_p และ γ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนในเทอร์ไบน์ของวัฏจักรเปิด สารตัวกลางเป็นส่วนผสมของแก๊สในห้องเผาไหม้ โดยมีองค์ประกอบเป็น $C_n H_m$ ใช้ C_p และ γ เฉลี่ยในการคำนวณอย่างง่าย ค่า C_p และ γ จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม F/A ratio แต่อย่างไรก็ตามค่าของไฮโดรคาร์บอนแตกต่างจาก อากาศน้อยมาก ดังนั้น C_p และ γ จึงมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด ตามสมการโดยที่

$$\frac{R_0}{M} = R_{air} = 0.287 \text{ KJ/Kg} \cdot \text{K} \quad (2.10)$$

การคำนวณค่าเพื่อวิเคราะห์ไอเสียจะยากขึ้นเมื่อพิจารณาการแยกตัวขององค์ประกอบไอเสีย C_p และ γ จะกลายเป็นฟังก์ชันของความดันเช่นเดียวกับอุณหภูมิ การคำนวณที่ถูกต้องจะต้องใช้คอมพิวเตอร์มาช่วย คิด การแยกตัวออกจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 1500 K และอุณหภูมิสูงกว่านี้ ตามรูปที่ 2.4 สามารถ

เอกสารนี้เป็นงานได้เพียงที่ความดัน 1 bar เท่านั้น ในความจริงแล้ว ที่อุณหภูมิ 1800 k ทั้งอากาศและ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้เกิดขึ้นที่ส่วนผสมบาง การลดความดันเป็น 0.01 bar จะเพิ่มค่า C_p โดยประมาณ 4 % และเมื่อเพิ่มความดันเป็น 100 bar ค่า C_p จะลดลงโดยประมาณ 1 % ส่วนการเปลี่ยนแปลงของ γ นั้นน้อยกว่า ในการพิจารณาต่อไปจะไม่คิดการเปลี่ยนแปลง C_p และ γ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดัน เพราะว่ามีเฉพาะเครื่องยนต์แก๊สเทอร์โบที่ใช้กับเครื่องบินเท่านั้น ที่มีอุณหภูมิแก๊สเข้าเทอร์โบสูงถึง 1500 k

การคำนวณที่ต้องการความถูกต้องมากยิ่งขึ้นต้องใช้วิธีทาง Numerical เพื่อหาค่าของ γ เฉลี่ยที่ถูกต้อง ในทางปฏิบัติความถูกต้องจะมากขึ้นเมื่อใช้ค่าในตารางหรือจากกราฟของแอนทาลปีและเอนโทรปีอย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกอาจสมมุติให้ค่าของ C_p และ γ คงที่ ดังนี้

$$\text{อากาศ} \quad C_{p,Air} = 1.005 \frac{kJ}{kg \times K} \quad \gamma_a = 1.40 \quad \left[\frac{\gamma}{\gamma-1} \right]_a = 3.5$$

$$\text{แก๊สจากการเผาไหม้} \quad C_{p,g} = 1.002 \frac{kJ}{kg \times K} \quad \gamma_g = 1.35 \quad \left[\frac{\gamma}{\gamma-1} \right]_g = 4.0$$

ในการวิเคราะห์ เราสนใจในการหางานของคอมเพรสเซอร์และเทอร์โบไบน์จากผลของ $C_p \Delta T$ สมมุติว่า อุณหภูมิที่มีค่า C_p และ γ ถูกต้องและต่ำกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยจริงทำให้ γ สูงกว่าค่าที่ควรจะเป็น และค่า ΔT สูงกว่าที่คาดไว้ เหล่านี้จะชดเชยผลจาก $C_p \Delta T$ ซึ่งมี $C_p \Delta T$ ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น แต่อุณหภูมิจริงที่จุดต่าง ๆ ของวัฏจักรจะไม่ถูกต้องนัก อย่างไรก็ตามรายละเอียดของการออกแบบอุปกรณ์นั้น จะต้องรู้เงื่อนไขที่แท้จริงของสารตัวกลางจะทำให้ได้ความถูกต้องมากขึ้น

บทที่ 3

แก๊สเชื้อเพลิงและการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง

3.1 เชื้อเพลิงก๊าซ

เชื้อเพลิงก๊าซ (Gaseous Fuel) หมายถึงก๊าซทุกชนิดที่มีปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วเกิดการเผาไหม้ทำให้ได้พลังงานความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ก๊าซที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

3.1.1 ประเภทของก๊าซ

ก๊าซที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมีหลายชนิดและมีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไป บางชนิดมีส่วนประกอบคล้ายกัน แต่มีชื่อแตกต่างกัน

1. ก๊าซชีวมวล (Bio-Mass) เป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิตโดยใช้ถ่านหินเป็นวัตถุดิบ
2. ก๊าซชีวภาพ (Bio-Gas) คือ ก๊าซที่เกิดจากการหมัก และการย่อยสลายของสารอินทรีย์ (Organic Substance) เช่น มูลสัตว์ประเภทต่างๆ ตลอดจนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น วัชพืชและเศษอาหาร อาทิเช่น แอตทกอฮอลล์ (เอทีเอ็มแอตทกอฮอลล์ หรือ สุรา)
3. ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่ง โดยที่ธาตุคาร์บอนกับธาตุไฮโดรเจนจับตัวกันเป็นโมเลกุลเช่นเดียวกับน้ำมัน แต่มีสถานะในรูปของแก๊ส แบ่งออกเป็นชนิดใหญ่ ๆ ได้ 2 ชนิด คือ ก๊าซธรรมชาติแห้ง (Dry Natural Gas) และก๊าซธรรมชาติชื้นหรือเปียก (Wet Natural Gas)
4. ก๊าซน้ำมัน (Oil Gas) เป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการผลิต โดยใช้น้ำมันหรือก๊าซจากการเผาโดยมีอากาศและไอน้ำเป็นตัวสำคัญในการผลิต
5. ก๊าซที่ได้รับจากการกลั่นน้ำมันดิบ หรือที่เรียกย่อ ๆ ว่า ก๊าซ LPG (Liquefied Petroleum Gas) หรือ ก๊าซหุงต้ม

3.1.2 ก๊าซ LPG

ปัจจุบันนี้เชื้อเพลิงก๊าซได้เข้ามามีบทบาททดแทนเชื้อเพลิงแข็งและ เชื้อเพลิงเหลวมากขึ้นอันเนื่องมาจากการได้รับการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องควบคุมก๊าซจึงทำให้ผู้ความสะดวกและปลอดภัยมากขึ้น โดยเฉพาะก๊าซที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งจะประกอบไปด้วยก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพรเพนและก๊าซบิวเทนก๊าซหุงต้มที่ใช้กันในปัจจุบันนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบหรือที่เรียกว่าก๊าซปิโตรเลียมเหลว อันเป็นส่วนประกอบของ ก๊าซโพรเพนและก๊าซบิวเทน ในอัตราส่วน 30 : 70 ก๊าซทั้งสองชนิดดังกล่าวนี้ สามารถนำมาแยกเป็นก๊าซหุงต้มได้ โดยนำก๊าซธรรมชาติมาผ่านกระบวนการแยกก๊าซในโรงแยกก๊าซ

คำว่า LPG เป็นศัพท์ทางการที่ใช้ในการเรียกก๊าซปิโตรเลียมเหลวแต่ที่เรารู้จักกันทั่วไปคือ ก๊าซหุงต้ม ก๊าซชนิดนี้จะมีสถานะเป็นไอ (Vapour) แต่ถ้าอยู่ภายใต้ความดันสูงก๊าซจะมีลักษณะเป็นของเหลว

กระบวนการผลิตก๊าซ LPG

ก๊าซ LPG มี 2 ชนิด คือ ชนิดก๊าซบ่อน้ำมัน ที่ได้จากการแยก และกลั่นก๊าซธรรมชาติกับชนิดก๊าซโรงกลั่นน้ำมัน ที่ได้จากการแยกก๊าซ ซึ่งเป็นผลพลอยได้ ที่เกิดจากการกลั่นน้ำมันดิบเนื่องจากก๊าซ LPG มีสภาพ เป็นก๊าซที่อุณหภูมิสูงและความดันปกติ จึงต้องทำให้เป็นของเหลวอยู่เสมอ โดยการอัดความดัน หรือแช่แข็ง และต้องขนส่งด้วยเรือที่ทำงานเพื่อให้บรรทุก๊าซ LPG

คุณสมบัติของก๊าซ LPG

สี ก๊าซ LPG จะไม่มีสี เมื่อก๊าซเกิดการรั่วจากถังเราจึงไม่สามารถที่จะมองเห็นก๊าซที่รั่วออกมาได้ นอกจากก๊าซจะรั่วออกมามาก เราจึงจะเห็นเป็นละอองขาวซึ่งละอองขาวนี้ก็คือ ไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศทำการกลั่นตัวเป็นละอองเมื่อ ได้รับความเย็นจัดจากการระเหยตัวของก๊าซ

ความเป็นพิษ ก๊าซชนิดนี้จะไม่เป็นพิษ เมื่อนำไปเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะไม่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์หรือก๊าซพิษ เนื่องจากก๊าซนี้มีน้ำหนักมากกว่าอากาศ ดังนั้นเมื่อเกิดการรั่วภายในห้องแคบแล้ว มันจะเข้าไปแทนที่อากาศ ทำให้ออกซิเจนในบริเวณนั้นมีไม่เพียงพอ ผู้ที่สูดดมก๊าซเข้าไปอาจจะมีอาการวิงเวียนคลื่นเหียนและเป็นลมได้

กลิ่น เป็นก๊าซที่ไม่มีกลิ่นเนื่องจากก๊าซที่ผลิตได้นี้ไม่มีกลิ่นจึงมีความจำเป็นต้องใส่สารที่มีกลิ่นจุนลงไปเพื่อเป็นการเตือนเมื่อเกิดก๊าซรั่ว สารที่เติมในส่วนมากจะใช้ เอทิลเมอร์แคปแทน (C_2H_5SH)

น้ำหนัก เป็นก๊าซที่เบากว่าน้ำและหนักกว่าอากาศ เมื่อก๊าซรั่วลงในตู้ น้ำ ท่อน้ำ หรือแม่น้ำมันอาจลอยไปติดไฟ ณ จุดที่ห่างออกไป แล้วลุกลามมายังจุดที่ก๊าซรั่วได้อย่างรวดเร็ว เมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นไอ ไอก๊าซจะหนักเกือบประมาณ 2 เท่าของอากาศ ดังนั้น เมื่อก๊าซรั่ว ก๊าซจะเคลื่อนตัวไหลไปรวมตัวในที่ที่ต่ำกว่า

จุดเดือด จุดเดือดของก๊าซจะต่ำ มีจุดเดือดประมาณ 0 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิเฉลี่ยของบ้านเราประมาณ 20 องศาเซลเซียส ดังนั้น เมื่อก๊าซถูกปล่อยออกจากภาชนะบรรจุก็จะเดือด โดยเปลี่ยนสถานะจากของเหลว ที่ถูกดันอยู่กลายเป็นไอทันที การที่ก๊าซเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเป็นต้องดึงดูความร้อนจากบริเวณใกล้เคียง ซึ่งจะทำให้บริเวณนั้นหรือบริเวณปลายท่อที่ปล่อยไอแก๊ซออกจะมีน้ำแข็งเกาะจนทำให้ท่อเกิดการตัน

ความชื้นใน แก๊ซ LPG มีความชื้นในค่า จึงทำให้แก๊ซรั่วได้ง่าย ดังนั้น อุปกรณ์ใช้กับแก๊ซจึงต้องออกแบบให้แข็งแรง ทนต่อความดันสูง ดังนั้น การใช้ภาชนะ เช่น ถังบรรจุแก๊ซที่ไม่ได้มาตรฐานตามที่กำหนดอาจจะเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงขึ้นได้

อัตราการขยายตัว แก๊ซ LPG มีอัตราการขยายตัวสูง ดังนั้น การเติมแก๊ซใส่ลงในภาชนะจึงไม่ควรเติมให้เต็ม ต้องมีช่องว่างสำหรับการขยายตัวของแก๊ซ เมื่อได้รับความร้อน อัตราการขยายตัวสูงจากแก๊ซที่สถานะของเหลวกลายเป็นแก๊ซที่สถานะไอ คือ แก๊ซเหลว 1 หน่วยปริมาณจะเปลี่ยนเป็นไอแก๊ซได้ประมาณ 250 หน่วยปริมาณ ดังนั้น เมื่อแก๊ซเหลวรั่วจะมีอันตรายมากกว่าไอแก๊ซรั่ว

ส่วนผสมของแก๊ซกับอากาศที่ทำให้ติดไฟได้ อัตราส่วนของแก๊ซในอากาศที่ทำให้ติดไฟ คือ ประมาณ 1.5 - 9 ส่วนในส่วนผสม 100 ส่วน จะเห็นได้ว่าหากมีอากาศน้อยหรือมากกว่าสัดส่วนดังกล่าวแก๊ซจะไม่ติดไฟ

ค่าออกเทนัมเบอร์ (Octane Number) แก๊ซ LPG มีค่าออกเทนัมเบอร์ สูงเมื่อวัดโดยวิธีงานวิจัยจะได้ค่าออกเทนัมเบอร์ของโพรเพนเท่ากับ 111.4 ไอโซบิวเทนเท่ากับ 102.4 และนอร์มัลบิวเทนเท่ากับ 94.0 ซึ่งสูงกว่าของน้ำมันเบนซิน โดยทั่วไปประมาณ 10 - 20 ฉะนั้น แก๊ซ LPG จึงเหมาะกับการใช้เป็นเชื้อเพลิงของรถยนต์มาก

คุณสมบัติทางปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากแก๊ซ LPG มีสมบัติละลายสารจำพวกยางธรรมชาติได้ดี ฉะนั้นจึงควรใช้สารที่มีความทนต่อแก๊ซ LPG หนึ่ง ถ้าเก็บแก๊ซ LPG ซึ่งมีโพรพิลีนและบิวทิลีนผสมอยู่ไว้ในถังอาจเกิดสารพวดยางหรือน้ำมันดิน (TAR) ขึ้นได้

3.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมกับอุณหภูมิและความดัน เชื้อเพลิงเหลว แอลกอฮอล์

แอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงทดแทนที่ดีมาก เป็นพลังงานที่ดีมาก เป็นพลังงานที่ได้จากธรรมชาติ และการผลิตเมทานอล (เมทิลแอลกอฮอล์) และ เอทานอล (เอทิลแอลกอฮอล์) เช่น แอลกอฮอล์ ที่ได้จากพืชธรรมชาติ เพื่อที่จะมีการพัฒนาเพื่อพัฒนาเพื่อการใช้งานในเครื่องยนต์

ข้อดีของการใช้แอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิง คือ

1. สามารถผลิตได้จากหลายแหล่ง ทั้งธรรมชาติและการผลิตโดยจากการกลั่นปิโตรเลียม
2. เป็นสารเชื้อเพลิงที่มีค่า ON สูง มีค่าเกิน 100 เครื่องยนต์ที่ใช้ ON สูงจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า โดยใช้อัตราส่วนการอัดที่สูงขึ้น
3. เพื่อเปรียบเทียบกับแก๊สใช้โซลีนหลังมีแก๊สมลพิษน้อยกว่า แก๊ส โซลีนและดีเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เมื่อมีการเผาไหม้จะมีของเสียมากจะทำให้ความร้อนสูง และมีกำลังมากกว่าในจังหวะการขยายตัวของลูกสูบ
5. มีคุณสมบัติค่าระเหยตัวสูง (h) โดยการเปลี่ยนจากของเหลวกลายเป็นไอ ทำให้ขบวนการดูดไอดี และการอัดมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพทางปริมาตรของเครื่องยนต์ และอีกทั้งยังลดงานในการอัดได้อีก
6. มีกำมะถันในเชื้อเพลิงต่ำ

ข้อเสียของการใช้แอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิง คือ

1. มีค่า HV (Heating Value) ค่าทางความร้อนต่ำ การที่จะได้ค่าความร้อนเท่าเชื้อเพลิงแก๊สใช้โซลีนจะต้องใช้เชื้อเพลิงถึง 2 เท่า เมื่อเตรียมแอลกอฮอล์เชื้อเพลิงเข้ากันจะสามารถใช้เวลาสั้นกว่าครึ่งหนึ่งของการเติมแก๊สโซลีน
2. มีพอลดีไฮด์ในไอเสียมาก มากกว่าแก๊สโซลีนถึงสองเท่า และเป็นแก๊สไอเสียจะเป็นมลภาวะที่หนัก
3. แอลกอฮอล์มีคุณสมบัติในการกัดกร่อน โลหะมากกว่า เชื้อเพลิงแก๊สโซลีน โดยเฉพาะกับทองแดง ทองเหลือง อะลูมิเนียม ยางและพลาสติก หลายประเภทเป็นการจำกัดการออกแบบจะใช้วัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนของแอลกอฮอล์ได้
4. เมื่ออากาศเย็นเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์จะทำให้เครื่องยนต์ยาก เพราะมีคุณสมบัติในการลดความร้อนบริเวณด้านข้าง และทำให้อุ่นตัวก่อนติดเครื่องยนต์ได้มาก ที่อุณหภูมิต่ำที่ 10°C
5. คุณสมบัติในการติดไฟต่ำกว่าแก๊สโซลีน
6. เมื่อทำการติดไฟแล้วจะไม่สามารถมองเห็นเปลวไฟ
7. กลิ่นไอเสียรุนแรงทำให้เป็นอันตรายต่อระบบประสาท
8. มักจะเกิดการขยายตัวในทางตั้ง (Vapor Lock) ในระบบส่งเชื้อเพลิง

ก๊าซ LPG ที่บรรจุอยู่ในถัง จะมีโมเลกุลของโพรเพนและบิวเทนเคลื่อนตัวอยู่ และจะต้องมีการเคลื่อนตัวไปชนกับผนังของถังด้วย ความแรงของการชนคิดเป็นกิโลกรัม / ตารางเซนติเมตรเรียกกันว่าความดันไอของก๊าซ ซึ่งสามารถถือได้ว่าเป็นความดันของก๊าซ LPG ในถังนั่นเอง และที่อุณหภูมิเดียวกันถ้าปริมาณของก๊าซโพรเพนเพิ่มขึ้น 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) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ความดันก็สูงขึ้น การเคลื่อนที่ของ โมเลกุลจะเกิดขึ้น โมเลกุลจะชนกับฝาผนังของภาชนะแรงขึ้น ผลก็คือ ความดันจะสูงขึ้น อนึ่ง ในทางกลับกัน ถ้าอุณหภูมิต่ำลง การเคลื่อนที่ก็จะช้าลงเรื่อย ๆ และเมื่อทำให้อุณหภูมิต่ำมากขึ้น การเคลื่อนที่ก็จะช้าลง
2. ถ้ามีส่วนประกอบของโพรเพนมาก ความดันจะสูงขึ้น เนื่องจาก โมเลกุลของโพรเพนเคลื่อนที่ได้ดีกว่า โมเลกุลของบิวเทน ดังนั้น ในกรณีที่อุณหภูมิเท่ากัน ก๊าซ LPG ที่มีส่วนประกอบของโพรเพนมากกว่า จะมีความดันสูงกว่า
3. ปริมาตรของของเหลวไม่มีความสัมพันธ์กับความดัน ไม่ว่าจะมีส่วนประกอบของ LPG อยู่เต็มถังหรือมีเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยก็ตาม ถ้าอุณหภูมิและองค์ประกอบไม่เปลี่ยนแปลงแล้ว ความดันก็ไม่เปลี่ยน ดังนั้น สิ่งที่จะทำให้ความดันภายในถังเปลี่ยนไป จะมีแต่อุณหภูมิและอัตราส่วนของก๊าซผสมเท่านั้น เนื่องจากโดยทั่วไป อุณหภูมิจะเป็นอุณหภูมิของบรรยากาศ ฉะนั้น สิ่งที่จะเปลี่ยนแปลงได้โดยฝีมือคนก็คือ อัตราส่วนผสมเท่านั้น

การขยายตัวของก๊าซ เนื่องจากก๊าซ LPG มีอัตราขยายตัวในสถานะที่เป็นของเหลวสูงเมื่อเทียบกับน้ำ ดังนั้นการบรรจุใส่ภาชนะจำเป็นต้องทิ้งที่ว่างไว้ในระดับที่คงที่เพื่อการขยายตัว

ความถ่วงจำเพาะ ก๊าซ LPG มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2 ชนิด คือ ในสถานะที่เป็นของเหลวและสถานะที่เป็นก๊าซ ความถ่วงจำเพาะในสถานะของ จะเปรียบเทียบกับน้ำที่ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งให้มีความถ่วงจำเพาะ 1.2 ส่วนความถ่วงจำเพาะในสถานะก๊าซ จะเปรียบเทียบกับอากาศที่ 0 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ ซึ่งให้มีความถ่วงจำเพาะเป็น 1.0

ความถ่วงจำเพาะในสถานะที่เป็นของเหลวจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามอุณหภูมิมิมีค่าตัวสูงขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะก็จะยิ่งลดลง ที่อุณหภูมิปกติ (15 องศาเซลเซียส) โพรเพนเหลวมีความถ่วงจำเพาะเป็น 0.508 ส่วนบิวเทนเหลวมีความถ่วงจำเพาะเป็น 0.584 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความถ่วงจำเพาะในสถานะที่เป็นของเหลวตามอุณหภูมิ

ความถ่วงจำเพาะในสถานะที่เป็นก๊าซหรือไอ ความถ่วงจำเพาะในสถานะที่เป็นก๊าซของโพรเพนเป็น 1.55 และของบิวเทนเป็น 2.07 ซึ่งหนักเกือบเป็น 2 เท่าของอากาศ ก๊าซที่รั่วออกมาจะสะสมอยู่ที่ต่ำลงนั้นจำเป็นต้องระวังให้มาก ตัวอย่างเช่น ที่ความดันบรรยากาศ จะเกิดก๊าซโพรเพนประมาณ 0.5

ลูกบาศก์เมตร จากโพรเพนเหลว 1 กิโลกรัม และก๊าซบิวเทนประมาณ 0.4 ลูกบาศก์เมตรจากบิวเทนเหลว 1 กิโลกรัม นั่นคือ ในกรณีที่ของเหลว 1 ลิตร เกิดรั่วขึ้นก็จะกลายเป็นก๊าซได้ ประมาณ 0.25 ลูกบาศก์เมตร ฉะนั้นต้องระวังเกี่ยวกับการรั่วไหลของของเหลวให้มาก

3.2 คุณสมบัติการสันดาป

1. ค่าความร้อน เป็นตัวเลขสำคัญที่บอกให้รู้ถึงคุณค่า และสมรรถนะของเชื้อเพลิง ค่าความร้อนของก๊าซ LPG มีประมาณ 12,000 kcal / kg เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเบนซินแล้วจะมากกว่าอยู่ประมาณ 600 – 800 kcal / kg เพื่อให้เกิดพลังงานจำนวนเท่ากันปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (ต่อหน่วย นน.) ของก๊าซ LPG จะน้อยกว่าของน้ำมันเบนซิน จึงพูดได้ว่าประหยัดกว่า

2. ปริมาณอากาศที่ใช้ในการสันดาป ถ้าสันดาป ก๊าซ LPG อย่างสมบูรณ์ ทั้งหมดจะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ การเปลี่ยนแปลงนี้เขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



ดังเห็นได้จากสมการเหล่านี้ ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อการสันดาปอย่างสมบูรณ์จะเป็น 5 เท่าในกรณีของโพรเพน และ 6.5 เท่าในกรณีของบิวเทน เนื่องจากปริมาณออกซิเจนในอากาศมีประมาณ 21% ฉะนั้นในการสันดาปโพรเพนอย่างสมบูรณ์ จะต้องใช้อากาศ 24 m³ ต่อโพรเพน 1 m³ และอากาศ 31 m³ ต่อบิวเทน 1 m³ ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเบนซินแล้วก๊าซ LPG ต้องการปริมาณอากาศมากกว่าเล็กน้อย

3. ช่วงการลุกไหม้ ก๊าซที่สันดาปได้จะมีช่วงส่วนผสมกับอากาศเพียงช่วงเดียวที่จุดไฟแล้วลุกไหม้ได้ เพราะมีอากาศผสมอยู่ในปริมาณพอเหมาะ ช่วงการลุกไหม้ จะแสดงค่าเป็นอัตราส่วนร้อยละ (%) ของปริมาตรก๊าซต่ออากาศ

4. จุดวาบไฟ (Flash Point), จุดติดไฟ (Ignition Point) ช่วงการลุกไหม้จะมีค่าคงที่สำหรับเชื้อเพลิงและชนิด เช่น ในกรณีของน้ำมันเบนซิน อุณหภูมิที่สูงพอที่ทำให้เกิดไอจากน้ำมันเบนซินไปผสมกับอากาศกลายเป็นไอดีเมื่อค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิให้กับเชื้อเพลิงจนเลยอุณหภูมิค่าหนึ่งแล้วแม้จะไม่มีสาเหตุของการติดไฟ เชื้อเพลิงก็จะเริ่มลุกไหม้ตามธรรมชาติ อุณหภูมิต่ำสุดที่เริ่มเกิดการลุกไหม้ตามธรรมชาตินี้เรียกว่าจุดติดไฟ เนื่องจากจุดติดไฟของโพรเพนคือ 490 – 550 °C และของบิวเทนคือ 470 – 540 °C ก๊าซ LPG จึงติดไฟได้ยากเมื่อเทียบกับน้ำมันเบนซินซึ่งมีจุดติดไฟ 360 – 380 °C เมื่อคิดรวมเรื่องนี้กับช่วงการลุกไหม้แล้วจึงพูดได้ว่าก๊าซ LPG มีความปลอดภัยค่อนข้างสูง

5. ส่วนประกอบของก๊าซ LPG

ถ้าทราบอุณหภูมิและความดัน ก็จะสามารถบอกส่วนประกอบของก๊าซ LPG ได้อย่างคร่าว ๆ

อนึ่งเพื่อให้ส่วนประกอบของก๊าซ LPG เป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน มาตรฐานอุตสาหกรรมของญี่ปุ่น ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น และไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังหน่วยงานราชการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดมาตรฐานคุณภาพของก๊าซ LPG ไว้ดังแสดงในตาราง หากส่วนประกอบของก๊าซ LPG มีเพียงตัวเดียว ความดันไอของก๊าซ LPG ในภาชนะจะไม่เปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะมีปริมาณของเหลวในถังมากน้อยเท่าไรก็ตาม แต่โดยทั่วไปเนื่องจากก๊าซ LPG เป็นสารผสม การระเหยจะเริ่มจากสารที่ระเหยได้ง่าย ดังนั้นความดันไอของก๊าซ LPG ที่เหลือจะค่อย ๆ ลดลง

ประเภท	ลักษณะส่วนประกอบ	การใช้งานส่วนใหญ่
เบอร์ 1	โพรเพนเป็นองค์ประกอบหลัก	เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม
เบอร์ 2	โพรเพนและโพรพิลีนเป็นองค์ประกอบหลัก	เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม
เบอร์ 3	ปริมาณของโพรเพนและโพรพิลีนมีมากกว่าของบิวเทนและบิวทิลีน	เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน , เชื้อเพลิงในสำนักงาน
เบอร์ 4	ปริมาณของโพรเพนและโพรพิลีนมีมากกว่าของบิวเทนและบิวทิลีน	เป็นเชื้อเพลิงใช้กับรถยนต์
เบอร์ 5	บิวเทนและบิวทิลีนเป็นองค์ประกอบ	เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม , เชื้อเพลิงใช้กับของรถยนต์
เบอร์ 6	บิวเทนเป็นองค์ประกอบหลัก	เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม , เชื้อเพลิงใช้กับรถยนต์ให้เป็นสารช่วยในการอัดพ่น

3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส เปลวไฟแก๊ส

ถ้ามีส่วนผสมระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศที่อยู่ในช่วงขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟอยู่ จะสามารถจุดระเบิดให้เกิดการเผาไหม้ได้ และถ้ามีการไหลของส่วนผสมเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง การเผาไหม้นั้นก็จะดำเนินไปได้เอง (spontaneous combustion) ถ้าระบบการเผาไหม้อยู่ที่ความดันปกติ บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาจะเป็นบริเวณที่ลุกสว่าง (luminous) สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เรียก เปลวไฟ (flames) เราสามารถทำให้เกิดเปลวไฟได้สองลักษณะ คือ ให้เปลวไฟเคลื่อนที่เข้าหาส่วนผสมซึ่งอยู่กับที่ เช่น มีส่วนผสมอยู่ภายในท่อผสม แล้วจุดระเบิดให้เกิดเปลวไฟซึ่งเคลื่อนที่ (propagate) จากจุดเริ่มต้นเข้าหาส่วนผสมที่เหลืออยู่ภายในท่อ หรือ ป้อนส่วนผสมให้แก่เปลวไฟซึ่งอยู่กับที่ ในกรณีนี้เปลวไฟจะอยู่กับที่ได้ต่อเมื่อมีอัตราการป้อนและส่วนผสมระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและอากาศให้แก่เปลวไฟตลอดเวลา ด้วยอัตราการที่ซึ่งกระทำได้โดยใช้ หัวเผา (burner) ภาพของหัวเผาที่คุ้นตา ได้แก่ หัวเผาของเตาหุงต้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยแก๊สที่ใช้ตามบ้านเรือนและตามร้านค้าทั่วไป และเปลวไฟที่เห็นว่าอยู่กับที่ก็คือบริเวณที่เรียกกันทั่วไปว่าหัวเตา นั่นเอง

1. เปลวไฟของแก๊สผสมอากาศแบบราบเรียบ (laminar premixed flames)

คุณสมบัติและพลังงานเบื้องต้นลองพิจารณาที่ส่วนผสมที่มีส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศบรรจุอยู่ในท่อ และมีเปลวไฟเกิดขึ้นอยู่กับที่ที่ตำแหน่งหนึ่งภายในท่อ ถ้าไม่คำนึงถึงการสูญเสียและแรงต้านทานการไหลที่ผนังท่อถือเป็นกรณีอุดมคติเบื้องต้นของเปลวไฟที่อยู่กับที่ ซึ่งมีแก๊สผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศไหลเข้าสู่เปลวไฟ และมีแก๊สผลผลิตจากการเผาไหม้ไหลออกจากเปลวไฟอย่างต่อเนื่องและอยู่ในสภาวะคงที่ได้เปลวไฟ และมีแก๊สผลผลิตจากการเผาไหม้ไหลออกจากเปลวไฟอย่างต่อเนื่องและอยู่ในสภาวะคงที่ได้เปลวไฟแบบราบเรียบหนึ่งมิติ (one dimensional laminar flame) แนวเปลวไฟ (flame front) ที่เกิดขึ้นเป็นแนวแบบราบ (planar) และตั้งฉากกับแนวการไหลของแก๊สผสม

จากกฎอนุรักษ์มวล (law of the conservation of mass) ได้ว่า

$$\rho_u S_u = \rho_b S_b = m \tag{3.1}$$

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 เวลาใดๆ ที่สภาวะคงที่ มวลรวมของแก๊สผสมที่ป้อนเข้าสู่พื้นที่เปลวไฟ ย่อมเท่ากับมวลรวมของแก๊สผลผลิตจากการเผาไหม้ที่ออกจากพื้นที่เปลวไฟนั้น

การที่เปลวไฟหยุดอยู่กับที่ (stationary) ได้ แสดงว่าเปลวไฟเคลื่อนที่เข้าหาแก๊สผสมในแนวตั้งฉากด้วยอัตราเร็ว เท่ากับ อัตราเร็วของแก๊สผสมที่เคลื่อนที่เข้าเปลวไฟ แต่ในทิศทางตรงกันข้ามกันนั่นคือ เท่ากับ S_u จึงเรียกค่านี้ว่า ความเร็วของเปลวไฟ (flame velocity หรือ burning velocity)

จากกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (law of the conservation of momentum) ได้ว่า

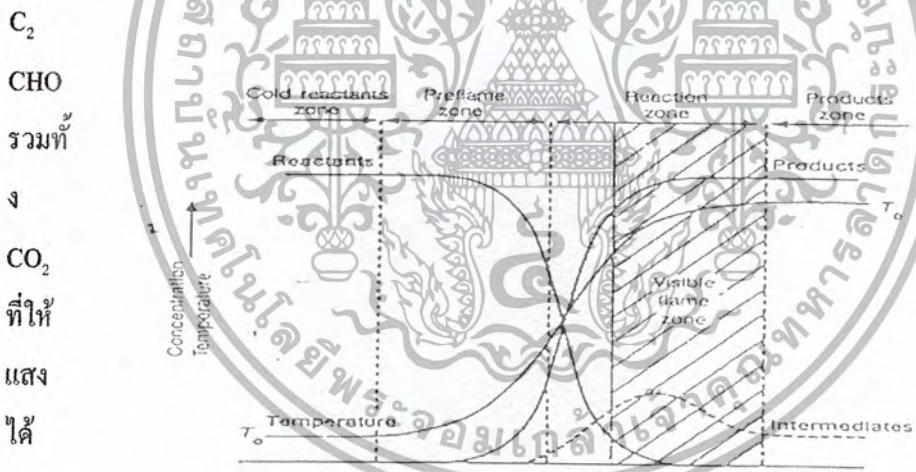
$$P_u + \rho_u S_u^2 = P_b + \rho_b S_b^2 \tag{3.2}$$

เมื่อ P_u, P_b = ความดันของแก๊สผสมที่ไหลเข้าสู่เปลวไฟ และ ของแก๊สผลผลิตที่ไหลออกจากเปลวไฟตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ของสมการ แสดงว่า ความดันของแก๊สผลผลิตต้องลดลงและความเร็วต้องเพิ่มขึ้น ซึ่งถูกต้อง เพราะหลังการเผาไหม้ได้แก๊สผลผลิตที่อุณหภูมิสูง จึงไหลออกจากพื้นที่เปลวไฟด้วย

ความเร็วสูงขึ้นในขณะที่ความดันลดลงและความหนาแน่นลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากแก๊สร้อนขยายตัว แต่ในความเป็นจริง ความแตกต่างระหว่างความดันและความหนาแน่นของแก๊สกระแสน้ำเข้าและออกน้อยมาก ถ้ามองภาพขยายบริเวณเปลวไฟ จะสามารถแบ่งบริเวณและแสดงเส้นโค้งการเปลี่ยนแปลง (profile) ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังแสดงในรูป คือ บริเวณด้านหน้า (cold reactants zone) บริเวณก่อนถึงเปลว

ไฟ (preflame zone) บริเวณปฏิกิริยา (reaction zone) และบริเวณด้านหลัง (products zone) โดยเส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาและผลผลิตจากสภาวะเริ่มต้นไปยังสภาวะสุดท้ายลดลงและเพิ่มขึ้นตามลำดับอย่างสม่ำเสมอ คือ ในบริเวณปฏิกิริยาตัวทำปฏิกิริยาถูกใช้หมดไปพร้อม ๆ กับเกิดผลผลิตขึ้น ในขณะที่เส้นโค้งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นช้าในบริเวณก่อนเกิดเปลวไฟ เพิ่มขึ้นรวดเร็วในบริเวณปฏิกิริยาจนกระทั่งเข้าสู่ค่าคงที่ในช่วงหลังปฏิกิริยา การกำหนดบริเวณต่าง ๆ นี้พิจารณาจากจุดเปลี่ยนความชัน (point of inflection) ของเส้นโค้งอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงทั้งอุณหภูมิ ปริมาณตัวทำปฏิกิริยาและผลผลิตถูกควบคุม โดยทั้งการถ่ายโอนมวลและความร้อน และจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาส่วนที่มองเห็นเป็นเปลวไฟนั้นอยู่ภายในบริเวณปฏิกิริยา การเปลวแสงที่ตามองเห็นเกิดจากอนุภาคที่ถูกเร่งขึ้นไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่าตกกลับสู่สภาวะพื้น (ground state) เช่นอนุภาค CH CN



รูปที่ 3.1 เส้นโค้งอุณหภูมิและความเข้มข้นขององค์ประกอบในเปลวไฟอะเดียเบติกแก๊สผสมแบบราบเรียบหนึ่งมิติ

ความเข้มข้นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในผลผลิตควรต้องเข้าสู่สมดุลทางอุณหพลศาสตร์ แต่เนื่องจากระยะเวลาสั้น และการหยุดยั้งปฏิกิริยาถูกใจที่อุณหภูมิสูงต้องอาศัยการชนกันของอนุภาคอิสระสามอนุภาคเป็นหลัก ซึ่งช้า ดังนั้นในที่สุดแล้วพบว่าความเข้มข้นของอนุภาคถึงกลางกลับมีค่าสูงกว่าที่สมดุล

2. ความเร็วของเปลวไฟ

สมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญมากชนิดหนึ่งของเปลวไฟแก๊สผสมอากาศแบบราบเรียบ คือ ความเร็วของเปลวไฟ

ความเร็วของเปลวไฟผสมอากาศชนิดราบเรียบ คือ ความเร็วในแนวตั้งฉากที่แนวเปลวไฟเคลื่อนที่เข้าหาแก๊สผสม (เชื้อเพลิง + อากาศ) ที่ยังไม่เผาไหม้ที่อยู่ชิดกับแนวเปลวไฟนั้น

เนื่องจากส่วนผสมที่เผาไหม้ได้ระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งกับอากาศมิได้เป็นช่วงกว้างคือภายในช่วงขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟ และส่วนผสมหนึ่ง จะให้ความเร็วของเปลวไฟค่าหนึ่ง เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งจึงมีความเร็วเปลวไฟได้หลายค่าตลอดช่วงส่วนผสม ส่วนผสมที่มีเชื้อเพลิงเจือจาง หรือ เข้มข้น ความเร็วของเปลวไฟจะมีค่าต่ำและจะมีค่าสูงที่สุดที่ส่วนผสมอยู่ระหว่างนั้นเมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเปลวไฟและความเข้มข้นของเชื้อเพลิงในส่วนผสมเป็นกราฟจึงมีรูปคล้ายระฆังคว่ำดังรูปแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ความเร็วของเปลวไฟที่ส่วนผสมแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

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

ดังนั้นในการระบุความเร็วของเปลวไฟแก๊สเชื้อเพลิงจึงต้องระบุเป็นความเร็วสูงสุดและระบุส่วนผสมที่วัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่อผู้รู้เห็นแจ้งขอสงวนสิทธิ์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วนั้น อีกประการหนึ่ง ค่าความเร็วของเปลวไฟยังขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ด้วย ในการรายงานค่าจึงต้องระบุนรายละเอียดและเงื่อนไขการทดลองไว้เสมอ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

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	92	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 ₂ H ₆ + air	3.1	15	5.4	2244*	0.40
C ₃ H ₈ + air	2.2	5.5	3.8	2250*	0.43
n-C ₄ H ₁₀ + air	1.9	8.5	3.1	2365*	0.41
C ₆ 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 ขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟ และความเร็วของเปลวไฟของแก๊สเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

3. ความอยู่ตัวของเปลวไฟบนหัวเผา

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

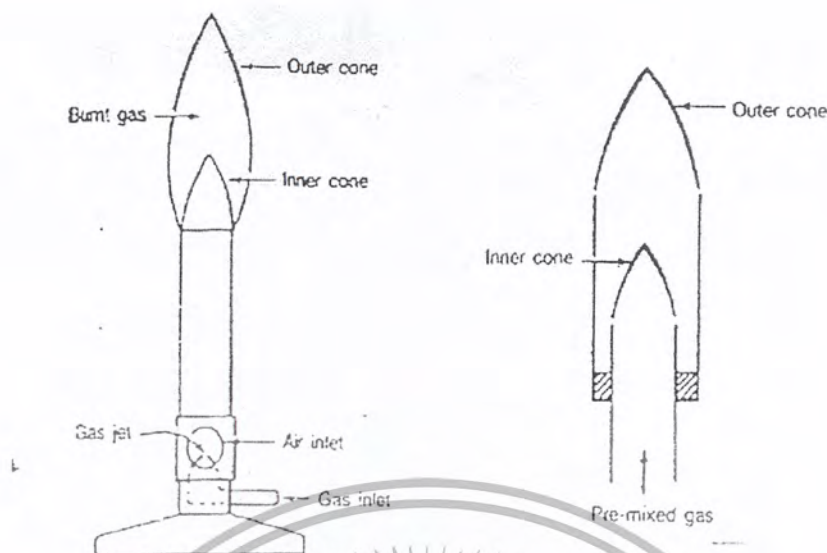
3.4 ตะเกียงบุนเซน (Bunsen burner)

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

เมื่อจุดด้วยไม้ขีดหรือแหล่งจุดระเบิดอื่นก็จะเกิดเปลวไฟขึ้น เปลวไฟที่เกิดขึ้นจะเป็นเปลวไฟสองชั้น เปลวไฟชั้นใน (inner cone) เป็นเปลวไฟแก๊สผสมอากาศ (premixed flame) ที่ออกมาจากปากท่อหรือหัวเผา แต่เป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เพราะอากาศไม่เพียงพอ กลายเป็นผลผลิตที่ยังไหม้ได้ (combustibles)

ซึ่งจะเผาไหม้ต่อไปในเปลวไฟชั้นนอก (outer cone) เปลวไฟนี้เกิดจากการแพร่เข้าหากันระหว่างผลผลิต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ก) ตะเกียงนูนเขนและลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้น

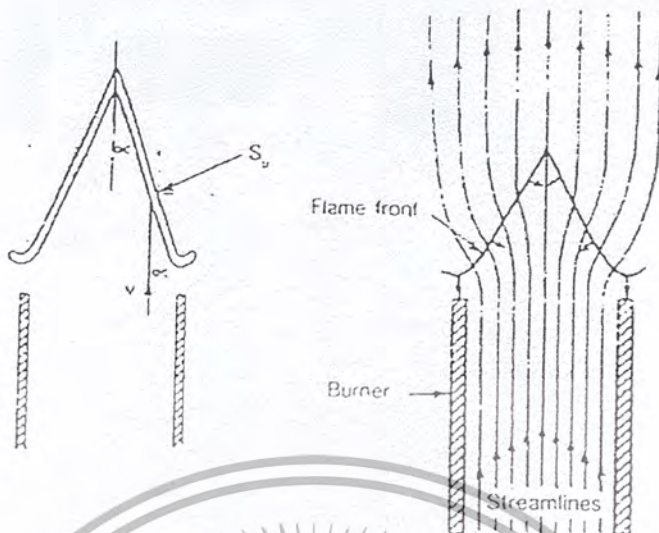
ข) การที่เปลวไฟแยกเป็นสองชั้นโดยวิธี สมิทเทลล์

ที่ยังเผาไหม้ได้จากเปลวไฟชั้นในและอากาศที่อยู่โดยรอบ เรียกว่า เปลวไฟชนิดแพร่ (diffusion flame) ฐานของเปลวไฟทั้งสองมาจรดกันที่ปากหัวเผา แต่สามารถที่สูงนี้ได้จะมีการเผาไหม้แยกออกจากกันอย่างอิสระโดยใช้หัวเผา ทดลองของสมิทเทลล์ (Smithells separator) ซึ่งใช้หลอดแก้วต่างขนาดกันสองหลอดสวมกันเป็นปากหัวเผา เมื่อเกิดเปลวไฟแล้วค่อยๆ ยกหลอดแก้วชั้นนอกขึ้นทำให้เปลวไฟชั้นนอกถูกยกตามปากหลอดแก้วขึ้นไปแยกออกจากเปลวไฟชั้นในอย่างสมบูรณ์ ฐานของเปลวไฟไม่อยู่ติดกับปากหัวเผา ระยะห่างนี้เรียกว่า ระยะตายตัว (dead space)

รูปร่างของเปลวไฟที่เกิดขึ้นนี้เมื่อพิจารณาอย่างใกล้ชิดจะพบว่า มีรูปคล้ายกรวยคว่ำและสัมพันธ์กับเส้นโค้งความเร็วพาราโบลิกของการไหลของแก๊สแบบราบเรียบ (laminar parabolic velocity profile) ซึ่งมีความเร็วสูงสุดที่กลางท่อและเข้าสู่ศูนย์ที่ริมท่อ ดังรูปที่ 3.5 แต่รูปร่างของเปลวไฟมีด้านยอดมนและที่ฐานบานออกคล้ายรูปประฆังคว่ำ ที่ทุก ๆ จุดบนแนวเปลวไฟ ยกเว้นที่ยอดและที่ฐานความเร็วของแก๊สในแนวตั้งสูงกว่าความเร็วของเปลวไฟ ดังนั้นแนวเปลวไฟจึงถูกดันขึ้นจนกระทั่งความเร็วของเปลวไฟมีค่าเท่ากับความเร็วของแก๊สที่ตกในแนวตั้งจากกับแนวเปลวไฟนั่นคือ

$$S_u = U_g \sin \alpha \quad (3.3)$$

เมื่อ	S_u	=	ความเร็วของเปลวไฟ
	U_g	=	ความเร็วของแก๊สในแนวตั้ง
	α	=	มุมของกรวยแนวเปลวไฟที่ทำกับแนวตั้ง



รูปที่ 3.4 เส้นกระแสผ่านเปลวไฟแก๊สผสมอากาศแบบราบเรียบ และความสัมพันธ์ของความเร็วของเปลวไฟและมุมของกรวยแนวเปลวไฟ

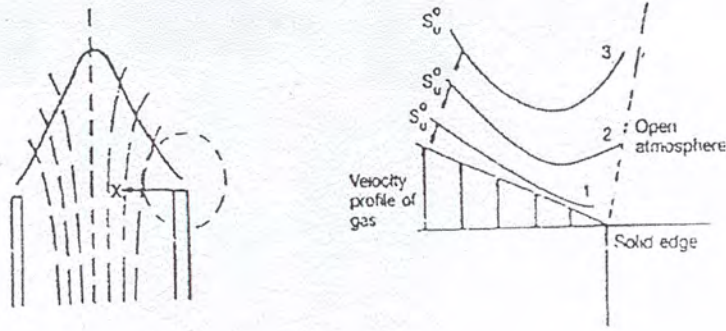
เราสามารถให้ความสัมพันธ์นี้หาความเร็วของเปลวไฟได้โดยใช้หัวใจพิเศษที่ทำให้เส้นโค้งแนวเปลวไฟที่แบน ทำให้กำหนดแนวเปลวไฟและรัศมี α ได้ชัดเจน จัดเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้วัดความเร็วของเปลวไฟได้

การที่เปลวไฟถูกยึดติดอยู่ได้ที่เหนือปากหัวเผาที่ตำแหน่งคงที่เนื่องจากอิทธิพลของขอบหรือริมของหัวเผา (burner rim) ซึ่งทำหน้าที่ทำลายอนุภาคนิวตรอนที่ว่องไว และเป็นแอ่งรับความร้อน (heat sink) จากเปลวไฟ ถ้าเปลวไฟอยู่ในตำแหน่งสูงกว่าเดิม อนุภาคนิวตรอนวิ่งมาชนขอบหัวเผาและถูกทำลายน้อยลง และขอบหัวเผารับความร้อนจากเปลวไฟน้อยลง เนื่องจากอยู่ห่างจากขอบหัวเผามากขึ้น ความเร็วของเปลวไฟจะเพิ่มขึ้นจนสูงกว่าความเร็วของแก๊ส ณ ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งจะดันเปลวไฟให้ตกกลับลงมาอีก แต่ถ้าเปลวไฟอยู่ในตำแหน่งต่ำกว่าเดิม อนุภาคนิวตรอนวิ่งมาชนขอบหัวเผาและถูกทำลายมากขึ้นและกว่าความเร็วของแก๊ส ณ บริเวณเดียวกัน เปลวไฟจะถูกดันกลับขึ้นไปอีก จึงมีตำแหน่งที่เปลวไฟอยู่กับที่ได้เพียงตำแหน่งเดียวคือตำแหน่งเดิมนั่นเอง อิทธิพลของขอบหัวเผานี้สามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์อื่นๆ ของเปลวไฟแก๊สผสมอากาศได้ดังรูปที่ 3.6

เปลวไฟของแก๊สผสมอากาศสามารถถูกยึดติดอยู่ที่เหนือขอบหัวเผาได้ในช่วงความเร็วหนึ่งเท่านั้นจึงเกิดปรากฏการณ์ทำให้เปลวไฟไม่อยู่นิ่งหรือดับไปได้หลายประการ

เปลวไฟย้อนกลับ (flash back)

ถ้าลดความเร็วของแก๊สผสมอากาศลงจนถึงจุดจุดหนึ่งที่มีความเร็วของเปลวไฟสูงกว่าความเร็วของแก๊สผสมอากาศ ณ ตำแหน่งหนึ่งตำแหน่งใด เปลวไฟจะดันกลับเข้าไปในท่อผสมเพื่อใช้แก๊สผสมซึ่ง



รูปที่ 3.5 เส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเปลวไฟและของแก๊สผสมอากาศบริเวณขอบหัวเผา

ไหลออกมาช้ากว่าอัตราเร็วของการเผาไหม้แล้วเปลวไฟจะดับ เรียกว่า เกิดเปลวไฟย้อนกลับ (ก่อนเกิดเปลวไฟย้อนกลับอาจเกิดเปลวไฟเอียง (tilted flame) ก่อนเนื่องจากเมื่อลดความเร็วลง แนวเปลวไฟย้อนเข้าไปในบริเวณผนังภายในท่อซึ่งมีความเร็วต่ำกว่าบริเวณกลางท่อ จึงยึดเปลวไฟอยู่ในตำแหน่งเอียง)

เปลวไฟถูกเป่าดับ (blow-off)

ในเชิงเปลวไฟอยู่ตัวถ้าเพิ่มความเร็วของแก๊สผสมอากาศขึ้น ในช่วงแรกจะเกิดปรากฏการณ์เปลวไฟยกตัว (flame lift) เนื่องจากเมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้น ความเร็วของเปลวไฟจะเกิดขึ้นตามไปด้วยเปลวไฟจึงต้องยกตัวขึ้น (เพื่ออยู่ห่างจากขอบหัวเผามากขึ้น) มีผลให้เกิดการดึงอากาศเข้าผสมที่บริเวณฐานเปลวไฟมากขึ้น ซึ่งทำให้ความเร็วของเปลวไฟกลับลดลงมาอีก เนื่องจากส่วนผสมเจือจาง ดังนั้นเราจะเห็นไฟยกตัวสูงขึ้นและอยู่ในตำแหน่งที่ยกตัวนั้นได้ (lift flame) เมื่อเพิ่มความเร็วแก๊สอย่างต่อเนื่องจะถึงจุดหนึ่งที่เปลวไฟยกตัวแล้วหลุดออกไปจากปากหัวเผาอย่างรวดเร็ว คือปรากฏการณ์เปลวไฟถูกเป่าดับ เปลวไฟยกตัวนี้อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้สองแบบ คือ ถ้าลดความเร็วของแก๊สลงเปลวไฟจะลดต่ำลง (drop back) แต่เปลวไฟยกตัวที่ความสูงอาจดับไปเลย (blowout)

ในบริเวณใกล้กับขอบหัวเผา (1 มิลลิเมตร) เมื่อมองภาพขยายแสดงได้ว่า เส้นโค้งแสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของแก๊สเป็นเส้นตรง จะ ได้ความสัมพันธ์

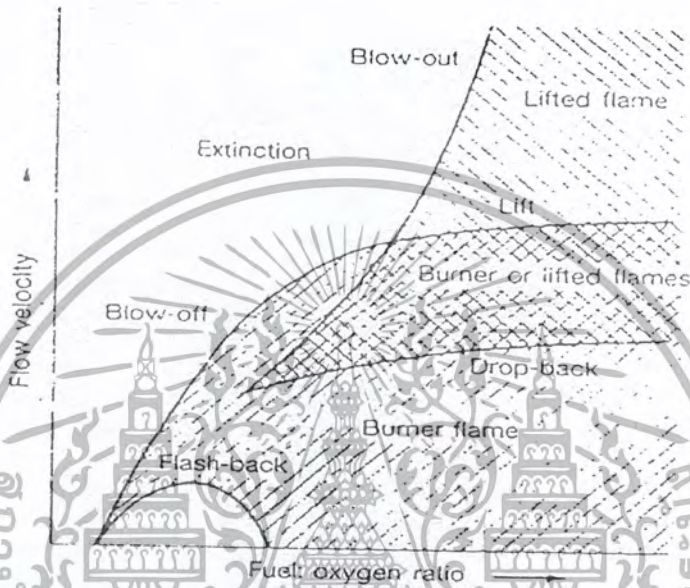
$$U_g = gy \tag{3.4}$$

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

$$g = \frac{d \times U_g}{dy} \tag{3.5}$$

ในกรณีเปลวไฟย้อนกลับ ความเร็วของแก๊สลดลง เส้นโค้งการเปลี่ยนแปลงแบนราบลงจนถึงจุดที่ต่ำกว่าความเร็วเปลวไฟ ค่าความชัน ณ จุดนี้คือ critical boundary velocity gradient at flashback, g_f ซึ่งสามารถแสดงได้ว่าเปลวไฟของหัวเผาที่เป็นท่อกลม g_f มีค่าเท่ากับ $8U_{AV} / d$ เช่นเดียวกัน

ความเร็วของเปลวไฟของแก๊สเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนเชื้อเพลิง - อากาศ หรือ ร้อยละของเชื้อเพลิงในอากาศด้วย ดังนั้นความอยู่ตัวของเปลวไฟจึงขึ้นอยู่กับทั้งความเร็วและอัตราส่วนเชื้อเพลิง - อากาศ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ผังรูปแสดงขีดจำกัดของปรากฏการณ์เปลวไฟแก๊สผสมอากาศ

3.5 เปลวไฟดับ (flame quenching)

การเคลื่อนที่ของเปลวไฟกระทำได้สองวิธี คือ ให้เปลวไฟเคลื่อนที่เข้าหาส่วนผสมแก๊สและอากาศที่ไหลอยู่ภายในท่อ หรือให้ส่วนผสมไหลออกมาสู่ปากท่อแล้วจุดให้เกิดเปลวไฟเหนือปากท่อซึ่งทำหน้าที่เป็นหัวเผา เปลวไฟจะอยู่ได้ต่อเมื่ออัตราการสูญเสียอนุโมลอิสระที่ว่องไวและความร้อนน้อยกว่าอัตราการผลิต บริเวณพื้นผิวที่อยู่ใกล้กับแนวเปลวไฟจะทำหน้าที่ทำลายอนุโมลอิสระที่ว่องไวเนื่องจากจะวิ่งมาชนและถูกจับไว้ และพื้นผิวจะทำหน้าที่เป็นอ่างรับความร้อนทำให้เปลวไฟเย็นลงจนดับไประยะระหว่างพื้นผิวกับแนวเปลวไฟที่ทำให้เปลวไฟดับนี้ เรียกว่า ระยะดับเปลวไฟ (quenching distance, D_q) ซึ่งได้จากการทดลองให้แก๊สผสมอากาศไหลตามช่องว่างระหว่างแผ่นวัสดุสองแผ่น จุดระเบิดให้แนวเปลวไฟไหลผ่าน แล้ววัดระยะระหว่างแผ่นวัสดุจนกระทั่งเปลวไฟไม่สามารถไหลผ่านได้ 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
		$i-C_8H_{18} + \text{air}$	2.6
		$C_6H_6 + \text{air}$	1.9

ตารางที่ 3.2 าระดับเปลวไฟของแก๊สเชื้อเพลิง (การทดลองที่ 101 KPa , 20 C)

ถ้าทำการทดลองให้เกิดเปลวไฟเหนือปากท่อ จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่เปลวไฟไม่สามารถเกิดเหนือปากท่อได้เช่นเดียวกัน เรียกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางดับเปลวไฟ (quenching diameter, D_q) ระยะทางดังกล่าวมีความสัมพันธ์กันคือ

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

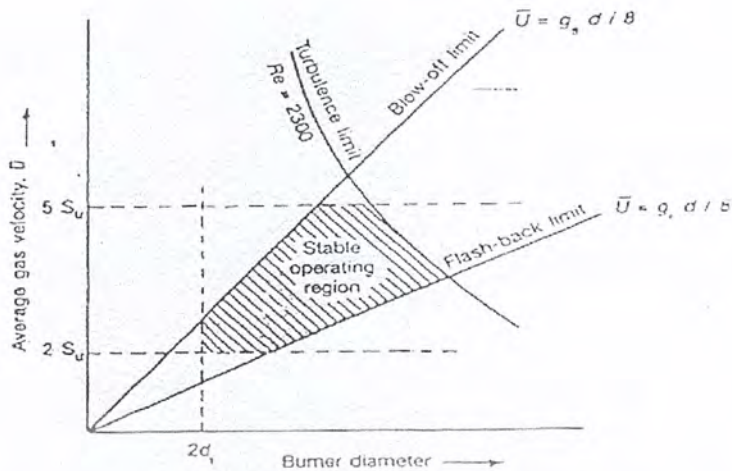
การที่พื้นที่ผิวทำหน้าที่ดับเปลวไฟได้ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนของแก๊สที่ยังไม่เผาไหม้ (thermal diffusivity, α) และความเร็วเปลวไฟ โดยสัมพันธ์กับระดับเปลวไฟเป็นเลขไรหน่วย คือ เลขเพกเลต (Peclet no.)

$$P_e = \frac{D_q S_u}{\alpha} \quad (3.7)$$

การแพร่และการถ่ายโอนความร้อนสัมพันธ์เป็นส่วนกลับของความดัน ในขณะที่ความเร็วเปลวไฟไม่ขึ้นอยู่กับความดัน ดังนั้นระดับเปลวไฟจึงขึ้นอยู่กับส่วนกลับของความดัน เปลวไฟที่มีความเร็วสูงมีค่าระดับเปลวไฟต่ำ ซึ่งพบว่าตรงกับการทดลอง ส่วนเลขเพกเลตมีค่าระหว่าง 40 – 50

3.6 ความอยู่ตัวของเปลวไฟตะเกียงเบนเซน

เมื่อคำนึงถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อความอยู่ตัวของเปลวไฟที่กล่าวมาแล้ว รวมทั้งข้อจำกัดของเส้นผ่านศูนย์กลางดับเปลวไฟ (เมื่อเป็น 2 เท่าของค่า D_q) พฤติกรรมการไหลแบบราบเรียบ (เลขเรโนลด์ ไม่เกิน 2,300) และการเกิดเปลวไฟที่ติดบนหัวเผาเบนเซน (ความเร็วของแก๊สอยู่ระหว่าง $2S_u$ และ $5S_u$) สามารถแสดงข้อจำกัดด้วยกราฟดังรูปที่ 3.8 ดังนั้น จึงมีบริเวณที่จำกัดความเร็วของแก๊สและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเผาเพื่อให้ได้เปลวไฟอยู่ตัว ซึ่งใช้ออกแบบหัวเผาพื้นฐานได้ เช่น สำหรับไฮโดรคาร์บอนผสม อากาศ ความเร็วเปลวไฟประมาณ 0.4 เมตร/วินาที ดังนั้นความเร็วแก๊สสูงสุดที่ใช้ออกแบบหัวเผาเบนเซนคือ 0.2 เมตร/วินาที เป็นต้น



รูปที่ 3.7 ขีดจำกัดความเร็วเฉลี่ยของแก๊สและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเผาบนเซนเพื่อให้ได้เปลวไฟอยู่ตัว

3.7 เปลวไฟแก๊สชนิดแพร่ (diffusion flame)

เป็นเปลวไฟที่เกิดจากการผสมระหว่างแก๊สกับอากาศเหนือปากหัวเผา โดยแยกป้อนแก๊สกับอากาศหัวเผาเพียงแต่ทำหน้าที่ป้อนแก๊ส การผสมเกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่ (diffusion) ของโมเลกุลของเชื้อเพลิงและอากาศเข้าหากัน ถ้าเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) การแพร่เป็นระดับโมเลกุล ซึ่งจะช้ามาก เช่น เปลวไฟของเทียนไข การผสมเกิดขึ้นของโมเลกุลที่แตกตัวจากเทียนไขที่ระเหยออกจากไส้เทียนไขพบกับอากาศที่อยู่รอบ ๆ สำหรับแก๊สเชื้อเพลิงและในงานอุตสาหกรรม ใช้การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ทำให้การผสมเร็วขึ้นมาก เช่น ในหัวเผาอุตสาหกรรม และกักเก็บแก๊ส ใช้หลักคิดจากอากาศพลศาสตร์ (aerodynamics) ของระบบ

หัวเผามีบทบาทน้อยมากในการทำให้เปลวไฟอยู่ตัว เมื่อเปรียบเทียบกับหัวเผาของเปลวไฟแก๊สผสมอากาศ เพราะเปลวไฟเกิดตลอดบริเวณที่มีการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศในสัดส่วนที่พอเหมาะไม่สามารถเกิดเปลวไฟย้อนกลับได้ ยกเว้นหัวฉีดที่มีขนาดเล็กมาก และเมื่อเพิ่มความเร็วแก๊สเปลวไฟจะไม่ถูกเป่าดับแต่ความสูงจะเพิ่มขึ้น

3.8 ปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain Reactions)

ปฏิกิริยาการเผาไหม้สามารถเกิดขึ้นในขั้นตอนเดียวหรือเป็นปฏิกิริยาอย่างง่าย (simple reaction) นั่นทั้งนี้ก็เพื่อให้การศึกษาง่ายขึ้น โดยที่ยังคงสาระสำคัญของปฏิกิริยาไว้ได้ อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริงนั้นไม่ได้เกิดขึ้นอย่างขั้นตอนเดียวแต่จะเกิดขึ้นอย่างหลายขั้นตอน (multi-step) โดยจะประกอบไปด้วยปฏิกิริยาย่อยหลายๆ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างพร้อมๆ กัน หรืออาจเป็นลำดับขั้น จะขาดขั้นตอนหนึ่งไปไม่ได้ปฏิกิริยาจะหยุดลงทันที เรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาลูกโซ่

เงื่อนไขสำคัญของการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ คือ ต้องมีตัวก่อปฏิกิริยาลูกโซ่เสมอ ซึ่งมีความไม่เสถียรสูงมาก ตัวก่อปฏิกิริยาลูกโซ่อาจเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ของธาตุในปฏิกิริยาหรืออาจเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ก็ได้ ที่สำคัญเช่น CH_3 , C_2H และ OH เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนชื่อและนามสกุลโดยหน่วยงานราชการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขเริ่มต้นของการเผาไหม้ เช่น การจุดระเบิด หรือเกิดขึ้นเองโดยอัตโนมัติหลังจากที่ปฏิกิริยาถูกไขได้เริ่มต้นเกิดขึ้นแล้ว ในระหว่างที่ปฏิกิริยาถูกไขกำลังดำเนินไปอยู่นั้น ถ้าตัวก่อปฏิกิริยาถูกไขถูกดึงออกจากปฏิกิริยา หรือถูกทำให้เสถียรภาพ ปฏิกิริยาจะหยุดลงทันที

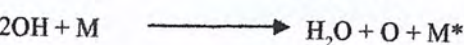
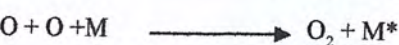
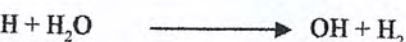
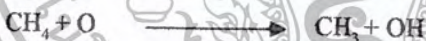
ระหว่างที่ปฏิกิริยาถูกไขกำลังดำเนินไปนั้นจะเกิดสารชั้นกลางจำนวนมาก ซึ่งเป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยาในขั้นต่างๆ ระหว่างที่ปฏิกิริยาถูกไขดำเนินไปและยังไม่สิ้นสุดอย่างสมบูรณ์หรือเข้าสู่สภาวะสมดุลทางเคมี สารชั้นกลางดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่งในสิ่งที่จะนำไปใช้เพื่ออธิบายกลไกการเผาไหม้และหาสมการแสดงอัตราการเผาไหม้ (rate equation) ของปฏิกิริยาได้ จากการศึกษาปฏิกิริยามีสารชั้นกลางเข้ามาเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาถูกไข จึงทำให้อันดับของปฏิกิริยาถูกไขแตกต่างไปจากอันดับของปฏิกิริยาอย่างง่ายเป็นอย่างมาก ซึ่งปฏิกิริยาอย่างง่ายมีแนวคิดมาจากปฏิกิริยาเป็นแบบรวม (over-all หรือ global reaction) และเป็นไปตามกฎการกระทำของมวลคงที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น ดังนั้นในหลายกรณีของการเผาไหม้ที่แท้จริงจะพบว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างซับซ้อนมากจนอันดับของปฏิกิริยาเป็นตัวเลขเศษส่วนหรือให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สามารถอินทิเกรตได้เหมือนเช่นของปฏิกิริยาอย่างง่ายดังที่ได้กล่าวมา

ตัวอย่างของปฏิกิริยาถูกไขที่ประกอบด้วยหลายๆ ปฏิกิริยาอย่างง่ายที่เกิดขึ้นอย่างมีลำดับขั้นที่แน่นอน และพบเห็นได้ง่ายมีดังนี้

(ก) การเผาไหม้แก๊สมีเทน CH_4 กับแก๊สออกซิเจน O_2
กรณีที่เป็นปฏิกิริยาอย่างง่าย คือ



กรณีที่เป็นปฏิกิริยาถูกไข



3.9 การจำแนกประเภทการเผาไหม้

ในการศึกษาเกี่ยวกับการติดไฟจำเป็นต้องทราบการจำแนกประเภทการเผาไหม้เสียก่อน ซึ่งแบ่งออกได้เป็นสามแบบ คือ การเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยจลนศาสตร์เคมี (chemical kinetics) เป็นหลัก เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจุดไฟ (ignition) การระเบิด (explosion) การดับไฟ (extinction) และการหล่อเย็นเปลวไฟ (flame quenching) เป็นต้น

การเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ (diffusion) การไหล (flow) ตลอดจนขบวนการผสม (mixing) เป็นหลัก เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส การเผาไหม้ตะอองสเปรย์ หรือหยดน้ำมันเชื้อเพลิง การเผาไหม้อนุภาคถ่าน และการเผาไหม้แท่งเทียนไข เป็นต้น

การเผาไหม้ที่ถูกควบคุมแบบผสมทั้งโดยจลน์ทางเคมีและโดยการแพร่ การไหล ตลอดจนขบวนการผสม เช่น การเผาไหม้ในเครื่องยนต์แก๊สดีเซล การเผาไหม้ของเปลวไฟตะเกียงเบนเซน เป็นต้น ซึ่งล้วนแต่เป็นการเผาไหม้ที่มีการผสมเชื้อเพลิงกับออกซิไดเซอร์จนเป็นเนื้อเดียวกันอย่างดีเสียก่อนการเผาไหม้จะเกิดขึ้น

เพื่อที่จะระบุได้อย่างเชิงปริมาณ (quantitative estimation) ของปรากฏการณ์การเผาไหม้ใดๆ ที่กำหนดมาให้ว่าถูกควบคุมโดยจลน์ทางเคมีหรือถูกควบคุมโดยการแพร่จำเป็นต้องทราบความหมายของคำว่าถูกควบคุมโดยจลน์ทางเคมีและถูกควบคุมโดยการแพร่ให้ดีเสียก่อน

3.10 นิยามการติดไฟ (Ignition)

การติดไฟ คือปรากฏการณ์ที่ส่วนผสม หรือ ไอศที่มีคุณสมบัติเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้อยู่ในสถานะที่เหมาะสมทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้น อุณหภูมิของส่วนผสมจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วจนกระทั่งให้การเผาไหม้ที่ต่อเนื่องพร้อมปลดปล่อยความร้อนออกมาสูงมากภายในเวลาอันสั้น ที่สถานะนี้เรียกว่าได้เกิดการติดไฟแล้ว สถานะที่เหมาะสมนั้นอาจเป็น (1) อุณหภูมิที่สูงเหมาะสมค่าหนึ่งและทำให้เกิดเงื่อนไขทำให้อัตราการเกิดความร้อนมากกว่าอัตราการสูญเสียความร้อนออกจากส่วนผสม ความร้อนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้สูงขึ้นและต่อเนื่องจนเกิดการติดไฟ เรียกการติดไฟชนิดนี้ว่าการติดไฟเชิงความร้อน (thermal ignition) เช่น การติดไฟโดยประกายไฟจากไฟฟ้าแรงสูง ใช้ภาชนะอุณหภูมิสูงบรรจุส่วนผสมและใช้การอัด และรวมถึงการระเบิดที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงมากจนไม่สามารถควบคุมได้ก็มีความหมายคล้ายๆ กับการติดไฟ ขณะที่ส่วนผสมเกิดติดไฟ เป็นต้น (2) มีตัวก่อปฏิกิริยาถูกใส่ที่เหมาะสมและทำให้เกิดเงื่อนไขที่สำคัญ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาถูกใส่สูงกว่าอัตราการสิ้นสุดตัวก่อปฏิกิริยาถูกใส่ แม้ว่าอุณหภูมิของส่วนผสมจะลงที่ก็ตามก็ยังจะสามารถเกิดการติดไฟได้ การทำให้เกิดตัวก่อปฏิกิริยาถูกใส่ได้นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องได้รับพลังงานจากภายนอกในรูปความร้อนหรือพลังงานโฟตอนเสียก่อน เช่น อะตอมของ Cl และ H เป็นตัวก่อปฏิกิริยาถูกใส่ของปฏิกิริยาถูกใส่ข้างล่างนี้



+

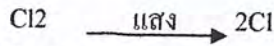


+



+

CI ตอนเริ่มต้นมาจากการทำให้ CI2 แยกตัวด้วยแสง



ตัวก่อปฏิกิริยาถูกใช้โดยทั่วไปคืออะตอมอิสระหรืออนุมูลอิสระที่มีความไม่เสถียรสูงพบได้ในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนทั่วไป อนุมูลอิสระเหล่านี้ เช่น CH_3 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ เป็นต้น ในหนังสือเล่มนี้ จะกล่าวเน้นเฉพาะการติดไฟเชิงความร้อนเท่านั้น ซึ่งมีการประยุกต์ใช้งานในทางอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก

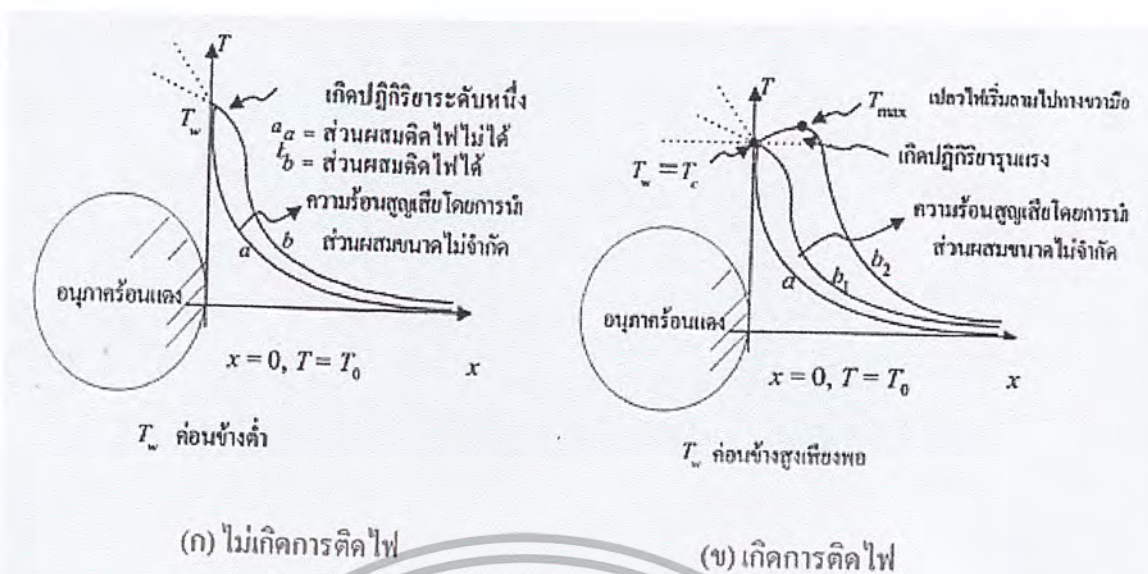
3.11 ชนิดของการติดไฟ

การติดไฟมีสองชนิด คือการติดไฟด้วยตัวเอง (เป็นการให้ความร้อนทั้งก้อน (bulk heating) แก่ส่วนผสม) และการติดไฟแบบบังคับ (เป็นการให้ความร้อนเฉพาะตำแหน่ง (local heating) แก่ส่วนผสม) การติดไฟด้วยตัวเองเกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิของส่วนผสม โดยการบรรจุส่วนผสมลงในภาชนะที่ร้อนหรือโดยการอัดส่วนผสมแบบแอเดียเบติกจนกระทั่งบรรลุเงื่อนไขสำคัญของการติดไฟขึ้น คืออัตราการเกิดความร้อน (rate of heat generation) มากกว่าอัตราการสูญเสียความร้อนออกจากส่วนผสม (rate of heat loss) จึงก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วยตัวของมันเอง โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนจากแหล่งภายนอกอีกต่อไป ตัวอย่างเช่น การติดไฟในเครื่องยนต์ดีเซล ในเครื่องยนต์เรมเจ็ต และเทอร์โบเจ็ต ในห้องสันดาปท้ายเครื่องยนต์กังหัน แก๊สของเครื่องยนต์ไอพ่น ในเตาแก๊สหุงต้มและในการน็อกของเครื่องยนต์แก๊โซลีน เป็นต้น ส่วนการติดไฟแบบบังคับเกิดจากการเพิ่มพลังงานจากแหล่งภายนอกเข้าไปที่จุดใดๆ ในส่วนผสม เช่น ใช้หลอดความร้อนด้วยไฟฟ้า ใช้การสปาร์กด้วยขั้วไฟฟ้า ใช้สะเก็ดไฟ หรือใช้เปลวไฟล่อ (pilot flame) เป็นต้น เปลวไฟเล็กๆ จะเริ่มต้นเกิดขึ้นบริเวณใกล้แหล่งจุดประกายไฟแล้วจะสามาถออกไปหาส่วนผสมที่เหลือโดยรอบทั้งหมด ตัวอย่างเช่น การติดไฟ หรือการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ แก๊โซลีนในรถยนต์ โดยใช้หัวเทียนสปาร์กด้วยไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น แม้ว่า การติดไฟของทั้งสองแบบดูเหมือนว่ามีความแตกต่างกันในเรื่องต้น แต่ก็มีส่วนคล้ายกันในแง่ที่ว่า ต้องมีพลังงานจากแหล่งภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้องเหมือนกัน

3.12 การติดไฟแบบบังคับ (Forced Ignition)

แนวคิดการติดไฟแบบบังคับเป็นการทำให้ส่วนผสมเกิดการติดไฟขึ้นมาได้โดยการให้ความร้อนแก่ส่วนผสมที่ตำแหน่งใดๆ ซึ่งกระทำได้โดยใช้ เช่น สะเก็ดหรืออนุภาคร้อนแดง (incandescent solid particle) เส้นหลอดความร้อนด้วยไฟฟ้า การสปาร์กด้วยไฟฟ้าแรงสูง แก๊สร้อน หรือเปลวล่อ (pilot flame) เป็นต้น จุ่มลงในส่วนผสมที่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง ถ้าอุณหภูมิของสิ่งเหล่านั้นสูงเพียงพอก็จะทำให้เกิดเปลวไฟลามจากจุดนั้น ไปหาส่วนผสมที่อยู่โดยรอบทั้งหมดได้

ก่อนอื่นมาพิจารณาเปรียบเทียบเมื่อมีอนุภาคร้อนแดงจุ่มลงในส่วนผสมที่ติดไฟไม่ได้ a และ ส่วนผสมติดไฟได้ b ขนาดไม่จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 การติดไฟแบบบังคับ

เมื่อ T_w มีค่าค่อนข้างต่ำ หรือ $T_w < T_c$ (Tignition) (รูป 3.9 (ก)) จะเกิดสภาวะคงที่ อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง ความร้อนส่งผ่านจากผนังของอนุภาคไปยังส่วนผสมที่ไม่ติดไฟ (a) มีค่ามาก ในขณะที่ความร้อนที่ส่งผ่านจากผนังไปยังส่วนผสมที่ติดไฟได้ (b) มีค่าน้อย ปฏิกริยาเกิดขึ้นในระดับหนึ่งเท่านั้น แต่ไม่เพียงพอจึงไม่เกิดการลามของเปลวไฟไปหาส่วนผสมที่เหลือโดยรอบ เพราะไม่บรรลุเงื่อนไขสำคัญของการติดไฟที่ว่าอัตราการเกิดความร้อนมีค่ามากกว่าอัตราการสูญเสียความร้อน (โดยการนำ)

เมื่อ T_w มีค่าค่อนข้างสูง หรือ $T_w > T_c$ (Tignition) (รูป 3.9 (ข)) ในกรณีของส่วนผสมที่ติดไฟได้ (b) ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านไปให้ส่วนผสม โดยรอบมากกว่าส่งไปให้ผนังของอนุภาคจึงเกิดปฏิกริยาอย่างรุนแรง ที่จุดนี้เรียกว่าได้เกิดการติดไฟแบบบังคับอย่างสมบูรณ์แล้วจึงเกิดการลามของเปลวไฟไปหาส่วนผสมที่อยู่โดยรอบเพราะบรรลุเงื่อนไขสำคัญของการติดไฟดังที่กล่าวมา

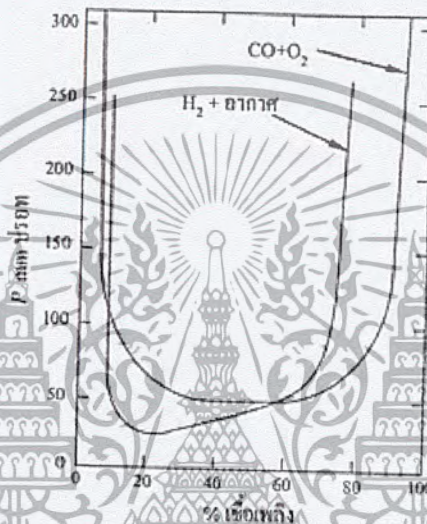
ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหัวใจสำคัญของการติดไฟแบบบังคับโดยสะเก็ดไฟร้อนแดง คืออุณหภูมิผนัง T_w ของอนุภาคต้องสูงเพียงพอ สะเก็ดไฟยิ่งเล็ก T_w ยิ่งต้องสูง มิฉะนั้นแล้วเปลวไฟจะไม่สามารถลามจากผนังสะเก็ดไฟไปหาส่วนผสมที่อยู่โดยรอบได้ทั้งนี้เพราะเมื่อพิจารณาโพไฟล์อุณหภูมิความร้อนและความเข้มข้นภายในชั้นขอบเขตที่บางใกล้ผิวของสะเก็ดไฟร้อนแดงจะมีทั้งเกรเดียนต์ของอุณหภูมิและเกรเดียนต์ของความเข้มข้น (ดูรูปที่ 3.9 ประกอบ) ซึ่งเป็นเหตุผลทำให้เปลวไฟไม่จำเป็นต้องลามออกจากผิวของผนังสะเก็ดไฟไปสู่ส่วนผสมโดยรอบเสมอไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วในการแพร่ของส่วนผสมที่ยังไม่เผาไหม้เข้าหาผิวสะเก็ดไฟ หรือความเร็วในการแพร่ของแก๊สต่างๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ออกจากบริเวณเผาไหม้ไปหาส่วนผสมที่ยังไม่เผาไหม้ ในกรณีที่อนุภาคมีขนาดเล็กค่าหนึ่งอุณหภูมิและความเข้มข้นตกลงมาอย่างรวดเร็วใกล้ผิวสะเก็ดไฟแม้ว่าอุณหภูมิที่ผิวจะสูงแต่ความเข้มข้นของส่วนผสมมีค่าเป็นศูนย์ทำให้ความเร็วในการแพร่ของส่วนผสมเข้ามาหาผิวสะเก็ดไฟมากกว่าความเร็วการแพร่ของแก๊ส

นอกจากบริเวณเผาไหม้ เปลวไฟจึงไม่สามารถลามออกจากผิวสะเก็ดไฟได้ ปรากฏการณ์นี้ค้นพบโดย

Davy ในปี 1812 ที่ประเทศอังกฤษ เกี่ยวกับชิ้นถ่านร้อนแดงขนาดเล็กที่ไม่สามารถทำให้เกิดการติดไฟในส่วนผสมได้

3.13 ขอบเขตการติดไฟ (Range of Ignition Flammability Limits)

การติดไฟที่ง่ายและเชื้อถือได้สูงในเตาเผาอุตสาหกรรมและเครื่องยนต์แบบต่างๆ ตลอดจนการป้องกันการระเบิดของเชื้อเพลิง สารเคมี หรือป้องกันอัคคีภัยชนิดต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องศึกษาและเข้าใจขอบเขตการติดไฟของส่วนผสมให้ได้อย่างถ่องแท้เสียก่อน



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างขอบเขตการติดไฟของส่วนผสมที่ต่างกันสองชนิด

รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างขอบเขตการติดไฟของส่วนผสมที่ต่างกันสองชนิด ขอบเขตการติดไฟ คือ ช่วงของ อุณหภูมิ ความดัน และองค์ประกอบของส่วนผสมที่ทำให้การติดไฟเป็นไปได้ เช่นกรณีของการติดไฟด้วยตัวเองดังแสดงในรูปที่ 3.9 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{min} และค่า % เชื้อเพลิง ก็ตาม แต่ว่าค่า E_{min} ยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ และความดัน

เราสามารถสรุปเกี่ยวกับขอบเขตการติดไฟของส่วนผสมได้ดังนี้ (ให้ดูรูปที่ 3.20 ประกอบ) ค่า E_{min} และค่า % เชื้อเพลิงในบริเวณพื้นที่เหนือเส้นกราฟจะทำให้การติดไฟเป็นไปได้ในขณะที่บริเวณที่อยู่นอกพื้นที่ดังกล่าวไม่สามารถทำให้การติดไฟเป็นไปได้

การติดไฟจะเป็นไปไม่ได้เลยถ้าหากว่าส่วนผสมมีคุณสมบัติที่เจือจางหรือเข้มข้นมากเกินไปจนเกินค่าขอบเขตบางและขอบเขตหนาคตามลำดับ ค่าขอบเขตบางและขอบเขตหนานี้เป็นคุณลักษณะตามธรรมชาติของส่วนผสม แสดงตัวอย่างข้อมูลเกี่ยวกับการติดไฟของเชื้อเพลิงต่างๆ

ที่ค่าพลังงานจุดระเบิด E_I ที่กำหนดใดๆ การติดไฟจะเป็นไปได้เฉพาะช่วงของ % เชื้อเพลิงที่อยู่ระหว่างจุด A และจุด B เท่านั้น

ช่วงการติดไฟได้ AB จะแคบลงตามค่า E_I ที่ลดลง จนกระทั่งค่า E_I เท่ากับค่าวิกฤติค่าหนึ่งๆ การติดไฟก็

จะเป็นไปไม่ได้อีกต่อไป

ถ้าแปรเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองที่ค่า ความดัน และอุณหภูมิ T_0 หลายๆค่า แล้วนำมาเขียนกราฟระหว่างค่า P และค่า % เชื้อเพลิง หรือระหว่างค่า T_0 และค่า % เชื้อเพลิงได้ ดังนั้นขอบเขตการติดไฟของกรณีการติดไฟแบบบังคับก็สามารถแสดงเป็นรูปคล้ายตัวยู (U-sharp) เหมือนกับของกรณีการติดไฟด้วยตัวเองทุกประการ เนื่องจากว่า $E_{min} * P^{-2}$ ดังนั้นสามารถจินตนาการได้ว่าถ้าลด P ลงไปเรื่อยๆ จนถึงค่าค่าหนึ่ง ขอบเขตบางและขอบเขตหนาจะเลื่อนมาทับกันพอดี และได้ความดันต่ำสุดที่ยังคงทำให้เกิดการติดไฟได้ ถ้าเพิ่มอุณหภูมิเริ่มต้น T_0 ของส่วนผสมให้สูงขึ้นจะทำให้ช่วงการติดไฟได้ขยายกว้างออกไปทั้งสองด้าน กล่าวคือ ขอบเขตบางจะลดลงขณะที่ขอบเขตหนาจะเพิ่มสูงขึ้น ปรากฏการณ์นี้เป็นที่ทราบกันดีสำหรับการเผาไหม้ของส่วนผสมระหว่างอากาศ และเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนทั่วไป

การเพิ่มปริมาณแก๊สเฉื่อยเข้าไปในส่วนผสมทำให้ช่วงการติดไฟได้แคบลงเพราะความเร็วการลามของเปลวไฟช้าลง ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วน C/K ดังนั้นแก๊สเฉื่อยที่ดีต้องมีค่า C สูง แต่ K ต่ำ (หรือ C/K มีค่าสูงๆ) เพราะจะทำให้ความเร็วการลามของเปลวไฟช้าลงได้ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการเลือกชนิดของสารดับเพลิงเป็นอย่างมาก

ข้อสังเกตเบื้องต้น ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว

เชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลวจัดอยู่ในประเภทเดียวกัน กล่าวคือมีอุณหภูมิต่ำกว่าเป็นสถานะแก๊สหรืออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดติดไฟด้วยตัวเองของส่วนผสมระหว่างไอเชื้อเพลิงนั้นกับอากาศ ดังนั้นการเผาไหม้ส่วนใหญ่หรือบางที่เกือบทั้งหมดเกือบทั้งหมดเกิดขึ้นในสถานะแก๊สเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเชื้อเพลิง เช่น กรณีเชื้อเพลิงเหลวที่เบา (light weight liquid fuels) และระเหยง่ายเหมือนเช่นน้ำมันแก๊ซโซลีนจะระเหยอย่างสมบูรณ์แล้วผสมกับอากาศในคาร์บูเรเตอร์ของรถยนต์ก่อนที่จะถูกป้อนเข้าไปในกระบอกสูบเพื่อเผาไหม้ให้ลักษณะเปลวไฟชนิดผสมมาก่อน แต่ถ้าเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่เบาเช่นเคมีแต่ระเหยยาก เช่นน้ำมันดีเซลที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลจะระเหยไปพร้อมๆ กับการเผาไหม้ทันทีที่น้ำมันถูกฉีดเข้าไปในอากาศที่ถูกอัดจนร้อนในกระบอกสูบ แต่ในกรณีเชื้อเพลิงเหลวที่หนักหรือเชื้อเพลิงแข็งนั้น ก่อนการเผาไหม้จะต้องเกิดการแยกสลายด้วยความร้อนเสียก่อน เนื่องจากว่าขณะเกิดการเผาไหม้อุณหภูมิที่ผิวของเชื้อเพลิงมีค่าต่ำกว่าจุดเดือดเล็กน้อย และจุดเดือดของเชื้อเพลิงเหล่านี้มักไม่คงที่ ดังนั้นจึงเผาไหม้ที่สภาวะอุณหภูมิจุดเดือดค่อนข้างสูงจึงแยกสลายตัว

ชื่อเพลิง	น้ำหนัก โมเลกุล	คอลลอกิโอมครี (% คอลลอก)	ขอบเขตการคิดไฟ		อุณหภูมิติด ไฟด้วยตัวเรา (°C)	พลังงานคิดไฟ		ระดับเปลวไฟ	
			ขอบเขตที่ 1	ขอบเขตที่ 2		คอลลอก (10 cal)	ค่าจุด คอลลอก	คอลลอก ค่าจุด มิถุนคร	ค่าจุด มิถุนคร
อะเซทอลดีไฮด์	44.1	0.0772	-	-	-	8.99	-	2.29	-
อะซีโตน	58.1	0.0497	59	233	561.1	27.48	-	3.81	-
อะซีทิลีน	26.0	0.0772	31	-	305.0	0.72	-	0.76	-
อะโครลีน	56.1	0.0564	48	752	277.8	4.18	-	1.52	-
อะครายโลไนลริก	53.1	0.0528	87	-	481.1	8.6	3.82	2.29	1.52
แอมโมเนีย	17.0	0.2181	-	-	651.1	-	-	-	-
อะนิลีน	93.1	0.0263	-	-	593.3	-	-	-	-
เบนซีน	78.1	0.0277	43	336	591.7	13.15	5.38	2.79	1.78
เบนซิล แอลกอฮอล์	108.1	0.0240	-	-	427.8	-	-	-	-
1,2-นิวลาโคอิน (methylallene)	54.1	0.0366	-	-	-	5.60	-	1.30	-
นอร์มอลบิวเทน	58.1	0.0312	54	330	430.6	18.16	6.21	3.05	1.78
นิวทาโนน (methyl ethyl ketone)	72.1	0.0366	-	-	-	12.67	6.69	2.54	2.03
1-บิวทีน	56.1	0.0377	53	353	443.3	-	-	-	-
๘-แคมเพอร์	152.2	0.0153	-	-	466.1	-	-	-	-
คาร์บอนไดซัลไฟด์	76.1	0.0652	18	1,120	120.0	0.36	-	0.51	-
คาร์บอนมอนอกไซด์	28.0	0.2950	34	676	608.9	-	-	-	-
ไซโคลบิวเทน	56.1	0.0377	-	-	-	-	-	-	-
ไซโคลเฮกเซน	84.2	0.0227	48	401	270.0	32.98	5.33	4.06	1.78
ไซโคลเฮกซีน	82.1	0.0240	-	-	-	20.55	-	3.30	-
ไซโคลเพนเทน	70.1	0.0271	-	-	355.0	19.84	-	3.30	-
ไซโคลโพรเพน	42.1	0.0444	58	276	497.8	5.74	5.50	1.78	1.78
ทรานส์-คาลิน	138.2	0.0142	-	-	271.7	-	-	-	-
นอร์มอลคีน	142.3	0.0133	45	356	231.7	-	-	2.06	-
ไดเอธิลอีเทอร์	74.1	0.0337	55	2,640	185.6	11.71	6.69	2.54	2.03
อีเทน	30.1	0.0564	50	272	472.2	10.04	5.74	2.29	1.78
เอทิลอะซิเตต	88.1	0.0402	61	236	486.1	33.94	11.47	4.32	2.54
เอทานอล	46.1	0.0652	-	-	392.2	6.99	-	-	-
เอทิลกลีคอล	45.1	0.0528	-	-	-	-	-	-	-
เอทิลนอกรีซ	44.1	0.0772	-	-	428.9	57.36	-	5.33	-
ฟูราน	68.1	0.0444	-	-	-	2.51	1.48	1.27	1.02
นอร์มอลเฮกเซน	100.2	0.0367	53	450	247.2	27.99	5.74	3.81	1.78
นอร์มอลเฮกเซน	86.2	0.0216	51	400	260.6	22.71	5.50	3.56	1.78
ไฮโดรเจน	2.0	0.2950	-	-	571.1	0.36	0.36	0.51	0.51
ไอโซโพรพีน	60.1	0.0444	-	-	455.6	15.44	-	2.79	-
ทีราซีน (น้ำมันถั่ว)	154.0	-	-	-	-	-	-	-	-
มีเทน	16.0	0.0947	46	164	632.2	7.89	6.93	2.54	2.03
เมทานอล	32.0	0.1224	48	408	470.0	5.14	3.35	1.78	1.52
เมทิลฟอร์มม	60.1	0.0947	-	-	-	14.82	-	2.97	-
นอร์มอลโนเนน	138.3	0.0147	47	434	238.9	-	-	-	-
นอร์มอลออกเทน	114.2	0.0165	51	425	240.0	-	-	-	-
นอร์มอลเพนเทน	72.1	0.0255	54	359	284.4	19.6	5.26	3.30	1.78
1-เพนทีน	70.1	0.0271	47	370	298.3	-	-	-	-
โพรเพน	44.1	0.0402	51	283	504.4	7.29	-	2.03	1.78
โพรพิลีน	42.1	0.0444	48	272	557.8	6.74	-	2.03	-
นอร์มอลโพรพานอล	60.1	0.0444	-	-	433.3	-	-	-	-
โทลูอิน	92.1	0.0227	43	322	567.8	-	-	-	-
ไดเอทิลกลีคอล	101.2	0.0210	-	-	-	27.48	-	3.81	-
เทอร์เพนโทล	-	-	-	-	252.2	-	-	-	-
ซายลีน	106.0	-	-	-	-	-	-	-	-
แกโซลีน 73 ออกเทน	120.0	-	-	-	298.9	-	-	-	-
แกโซลีน 100 ออกเทน	-	-	-	-	468.3	-	-	-	-
เชื้อเพลิงเจ็ท JP1	150.0	0.0130	-	-	248.9	-	-	-	-
JP3	112.0	0.0170	-	-	-	-	-	-	-
JP4	126.0	0.0150	-	-	261.1	-	-	-	-
JP5	170.0	0.0110	-	-	242.2	-	-	-	-

ตาราง 3.3 ตัวอย่างข้อมูลเกี่ยวกับการคิดไฟของเชื้อเพลิงต่างๆ ในอากาศ

ให้การเผาไหม้ของไอน้ำมันที่เบา

และตามด้วยการด้วยการเผาไหม้ของอากาศที่เหลือ

เหมือนกับเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งส่วนใหญ่

ในทางกลับกันเชื้อเพลิงแข็งที่ระเหยหรือหลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายง่ายจะให้การเผาไหม้ที่เหมือนกับกรณีเชื้อเพลิงเหลวระเหยง่ายนั่นเอง ตารางที่ 3.3 และ 3.4 แสดง
จุดวาบไฟ และจุดติดไฟและสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงเหลวชนิดต่างๆ ไว้

ตารางที่ 3.4 แสดงจุดวาบไฟ และจุดติดไฟและสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงเหลวชนิดต่างๆ ไว้

เชื้อเพลิง	T_{flash} °C	T_{fire} °C	T_B °C	$(T_{fire} - T_{flash})$ °C
เอทิลแอลกอฮอล์	10	69-76	78	59-66
นอร์มอลบิวทิล แอลกอฮอล์	34	105	117	71
อะซิโตน	-20	55	56	75
ปิโตรเลียม	30	-	-	-
น้ำมันดีเซล	148	-	-	-
น้ำมันเครื่องจักร	196	-	-	-
น้ำมันไฮดรอลิก	215	-	-	-
แกโซลีน	10	16	100-150	6
น้ำมันหล่อลื่น	285	344	-	59

สมบัติทางความร้อนและทางเคมีความร้อนของเชื้อเพลิงเหลวชนิดต่างๆ

เชื้อเพลิง	ρ_r		L	C_p	$C_{p,app}$	T_B	ΔH	f
	M	gm/cm ³						
นอร์มอลเพนเทน	72	0.631	87.1	0.557	0.397	36.0	10.82	0.314
นอร์มอลเฮกเซน	86	0.664	87.1	0.536	0.398	68.0	10.69	0.314
นอร์มอลเฮปเทน	100	0.688	87.1	0.525	0.399	98.5	10.62	0.314
นอร์มอลออกเทน	114	0.707	86.5	0.526	0.400	125.0	10.60	0.316
ไอโซออกเทน	114	0.702	78.4	0.515	0.400	125.0	10.59	0.316
นอร์มอลเดเคน	142	0.734	86.0	0.523	0.400	174.0	10.56	0.317
นอร์มอลดีโอดีเคน	170	0.753	85.5	0.521	0.400	200.0 †	10.54	0.319
ออกทีน	112	0.710	80.5	0.525	0.400	121.0	10.59	0.322
เบนซีน	78	0.884	103.2	0.411	0.277	80.0	9.56	0.359
เมทานอล	32	0.796	263.0	0.566	0.410	64.5	4.74	0.726
เอทานอล	46	0.794	200.0	0.560 †	0.460	78.5	6.40	0.528
แกโซลีน	120 †	0.720 †	81.0	0.490	0.400 †	155.0	10.54	0.318
น้ำมันก๊าด	154	0.825	69.5	0.460	0.400 †	250.0	10.30	0.316
น้ำมันดีเซล (เบา)	170	0.876	63.9	0.450	0.400 †	250.0 †	10.12	0.316
ดีเซล (กลาง)	184	0.920	58.4	0.430	0.400 †	260.0 †	10.00	0.315
ดีเซล (หนัก)	198	0.960	55.5	0.420	0.400 †	270.0 †	9.88	0.318
อะซิโตน	58	0.791	125.0	0.506	0.340 †	56.7	7.36	0.453
โทลูอิน	92	0.870	84.0	0.386	0.400 †	110.6	10.16	0.320
ซาบลิ้น	106	0.870	80.0	0.411	0.400 †	130.0	10.30	0.319

† ค่าโดยประมาณ

ตารางที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.14 การแตกตัวเป็นละออง (Atomization)

การแตกตัวเป็นละอองที่สำคัญ 2 ประการ คือต้องทำให้เชื้อเพลิงเป็นแผ่นฟิล์มบางก่อนแล้วจึงตามด้วยการฉีกขาดแตกกระจายของแผ่นฟิล์มบางกลายเป็นละอองเล็กมากอย่างอัตโนมัติ ขั้นตอนทั้ง 2 จะต้องทำให้เกิดขึ้นเสมอไม่ว่าจะอาศัยพลังงานรูปแบบใดก็ตาม

การแตกตัวเป็นละอองโดยอาศัยพลังงานศักย์หรือความดัน (Pressure Atomization)

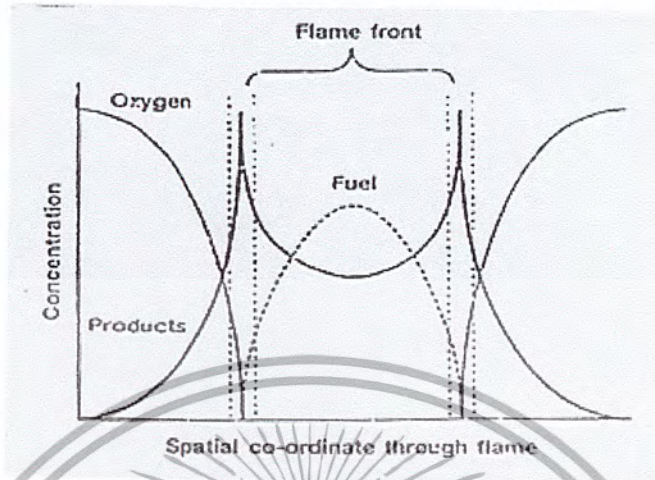
วิธีนี้จะอาศัยความดันทำให้เชื้อเพลิงเหลวไหลผ่านออร์ฟิฟขนาดเล็กด้วยความเร็วสูง และในบางครั้งยังบังคับให้เชื้อเพลิงเกิดการหมุนวน ขณะที่ไหลผ่านออร์ฟิฟนั้นทำให้ได้แผ่นฟิล์มที่บางเป็นรูปทรงกรวยกลวงอย่างมีประสิทธิภาพก่อนฉีกขาดตามลำดับขั้นจากที่มีลักษณะเป็นแถบกว้าง และแตกตัวเป็นละอองที่ละเอียดในที่สุด หลักการแตกตัวเป็นละอองชนิดนี้ใช้มากกับหัวฉีดในเครื่องยนต์กังหันแก๊ส

3.15 สภาวะที่ผิวของของเหลวขณะระเหยกลายเป็นไอกรณีที่มีและไม่มีการเผาไหม้

การศึกษาการระเหยและการเผาไหม้ของละอองเชื้อเพลิงเดี่ยว (single droplet) นับได้ว่าเป็นพื้นฐานสำคัญของการศึกษาการระเหยและการเผาไหม้ของละอองสเปรย์ (droplet spray) ดังนั้นในหัวข้อนี้จะพิจารณาเฉพาะละอองเชื้อเพลิงเดี่ยวเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการระเหยและอัตราการเผาไหม้ซึ่งเป็นที่สำคัญมากของการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว เพราะมีอิทธิพลต่อสมรรถนะและขนาดของห้องเผาไหม้โดยตรง อัตราการระเหยของละอองเชื้อเพลิงเดี่ยวส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับชนิดเชื้อเพลิง ขนาดละออง อุณหภูมิและส่วนประกอบของบรรยากาศ โดยรอบละอองนั้น ดังนั้นในการหาค่าอัตราการระเหยของละอองจำเป็นต้องพิจารณาพารามิเตอร์ที่รอบโพรวไฟต์อุณหภูมิและโพรวไฟต์ส่วนประกอบทั้งที่อยู่ในเนื้อของละอองและในแก๊สที่อยู่โดยรอบละอองนั้น ซึ่งต้องแก่สมการอนุพันธ์พลังงานและสมการอนุพันธ์มวลด้วย นอกจากนั้นแล้วยังจำเป็นต้องทราบเงื่อนไขขอบเขตเพื่อใช้หาค่าคงตัวที่เกิดจากการอินทิเกรตสมการทั้งสองดังกล่าวอีกด้วย ดังนั้นในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นการหาค่าอัตราการระเหยของละอองเดี่ยวภายใต้สภาวะคงที่นั้นจำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์ที่รอบโพรวไฟต์อุณหภูมิหรือโพรวไฟต์ส่วนประกอบที่บริเวณรอยต่อระหว่างผิวสัมผัสของละอองและแก๊สที่อยู่โดยรอบนั้น ถ้าพิจารณาส่วนตัดขวางของเปลวไฟชนิดนี้จะพบว่าความเข้มข้นของเชื้อเพลิงสูงสุดที่แนวแกน และลดลงอย่างรวดเร็วที่ขอบเขตเปลวไฟ เช่นเดียวกัน ความเข้มข้นของออกซิเจนลดลงในบริเวณใกล้เปลวไฟ และถูกใช้หมดไปที่ขอบเขตเปลวไฟ ในขณะที่ผลผลิตปฏิกิริยาเกิดสูงสุดที่ขอบเขตและลดลงเมื่อเข้าสู่แนวบรรยากาศล้อมรอบ ดังรูปที่ 3.9 ขอบเขตเปลวไฟเป็นบริเวณพื้นผิวที่ปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์ แต่เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดเร็วมาก จึงกำหนดให้เป็นแนวที่เชื้อเพลิงและอากาศเข้าผสมกันได้พอดีตามมวลสารสัมพันธ์ เนื่องจากเชื้อเพลิงถูกใช้ในขอบเขตเปลวไฟไปตามแนวแกน ขอบเขตเปลวไฟจึงรวมเข้าหากันเมื่อเชื้อเพลิงถูกใช้หมดไป เปลวไฟจึงมีรูปร่างเป็นกรวยยาว ขอบเขตเปลวไฟมีลักษณะเป็นแนวเปลวไฟบางและราบเรียบคล้ายกับเปลวไฟแก๊สผสมอากาศ เปลวไฟนี้เกิดขึ้นได้เมื่อทั้งแก๊สและอากาศไหลขึ้นสู่ด้านบนด้วยความเร็วเท่ากัน ซึ่งได้จากหัวเผาทั้งสองชั้น (concentric burners) แต่โดยทั่วไปมักใช้หัวเผาที่เป็นหัวฉีด (nozzle) ฉีดเชื้อเพลิงออกมาสู่บรรยากาศ ในลักษณะดังกล่าวที่ขอบเขตเปลวไฟจะเกิดระเหยหมดไปและการเผาจะกลับรวดเร็วขึ้นทำให้เปลวไฟสั้นลง ผลที่เกิดขึ้นด้านการค้ำ

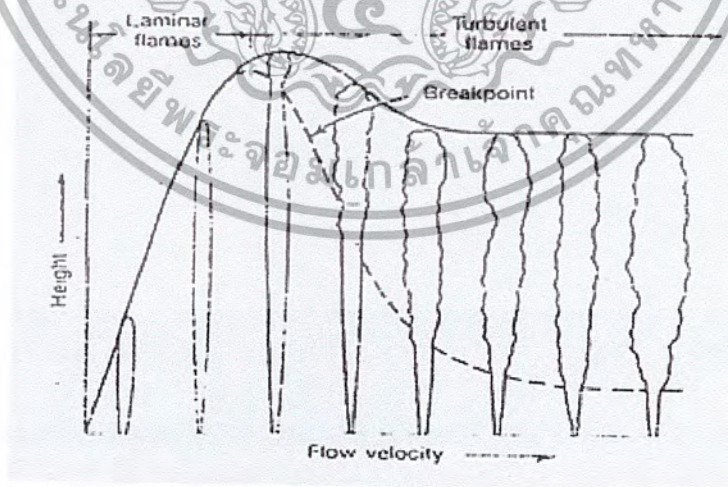
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือเราจะเห็นเปลวไฟไหว (flicker) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเปลวไฟชนิดนี้



รูปที่ 3.10 เส้นโค้งความเข้มข้นของเชื้อเพลิงออกซิเจน และผลผลิตปฏิกิริยาตามแนวตัดขวางของเปลวไฟชนิดแพร่

การศึกษาเกี่ยวกับเปลวไฟชนิดแพร่กระทำได้ยากมากเพราะเปลวไฟชนิดนี้ไม่มีลักษณะและพารามิเตอร์เฉพาะคั้งเช่นเปลวไฟแก๊สผสมอากาศ ซึ่งมีค่าความเร็วเปลวไฟเป็นค่าเฉพาะที่สำคัญ อย่างไรก็ตามเราสามารถแสดงค่า ความสูงของเปลวไฟ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วของแก๊สและเลข เรโนลด์ส์ในช่วงการไหลแบบราบเรียบและเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อมีการไหลเปลี่ยนเป็นแบบปั่นป่วน ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 ผังรูปแสดงโครงสร้างของเปลวไฟชนิดแพร่แบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนที่สัมพันธ์กับอัตราเร็วของการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ ความสูงของเปลวไฟเพิ่มขึ้นไปตามอัตราเร็วเป็นสัดส่วนเส้นตรงจนกระทั่งเริ่มเข้าสู่การไหลแบบปั่นป่วน จะเห็นแนวเปลวไฟที่ยอดไม่ราบเรียบเกิดรอยย่น (wrinkle) ขึ้น ความสูงของเปลวไฟเริ่มลดลงจนเข้าสู่ค่าคงที่ ในขณะที่ช่วงเปลวไฟไม่ราบเรียบกว้างขึ้น รอยต่อระหว่างเปลวไฟที่ราบเรียบกับเปลวไฟที่มีรอยย่นเรียกว่า จุดหัก (break point) ซึ่งจะลดตำแหน่งลงตามลำดับจนเข้าสู่ค่าคงที่เช่นกัน ดังนั้นเปลวไฟแบบแพร่ของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งจะมีความสูงเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่งไม่ว่าจะเพิ่มความเร็วมากขึ้นเพียงใดก็ตาม อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ดีในความเป็นจริงแล้ว ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนจะเกิดปรากฏการณ์เปลวไฟยกตัวได้เช่นเดียวกับเปลวไฟแก๊สผสมอากาศ ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากโมเมนตัมของแก๊สที่พุ่งออกจากหัวฉีดที่สูงขึ้น จึงดึงอากาศเข้ามาผสมมากขึ้นจนเกิดส่วนผสมในช่วงขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟ จึงมีปรากฏการณ์คล้ายกันเมื่อเพิ่มความเร็วต่อไปอีก จะเกิดเปลวไฟยกตัวอย่างถาวร นั่นคือเกิดเปลวไฟดับ ในทางปฏิบัติควบคุมไม่ให้เกิดเปลวไฟดับโดยบังคับทิศทางการไหลของแก๊ส และอากาศให้เกิดการปะทะกัน หรือให้กระแสหนึ่งกระแสใดไหลอย่างปั่นป่วน หรือปั่นป่วนหมุนวน (swirl) เข้ามา

3.16 ระบบการเผาไหม้ในเตาหุงต้มและอุตสาหกรรม

แก๊สเชื้อเพลิงต่างจากเชื้อเพลิงชนิดอื่นเนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่รู้จักกันดีและมีการใช้งานกันแพร่หลาย ตั้งแต่การใช้งานขนาดเล็กตามบ้านเรือนเพื่อหุงต้ม ทำน้ำร้อน ทำอากาศอุ่นในบ้านการใช้งานขนาดปานกลางเพื่อการพาณิชย์เพื่อประโยชน์เดียวกัน ไปจนถึงการใช้งานขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรม ทั้งนี้เพราะแก๊สเชื้อเพลิงมีข้อได้เปรียบหลายประการ ได้แก่

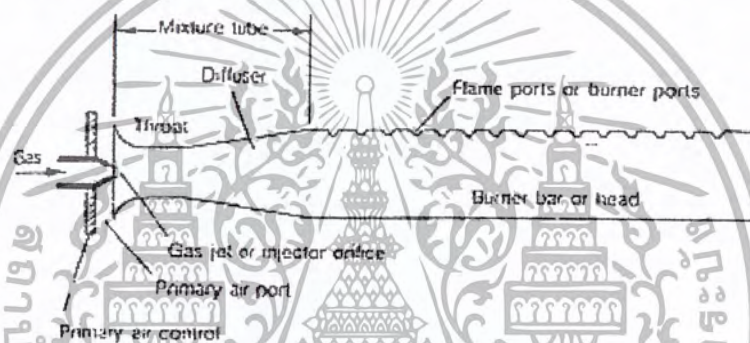
1. เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด องค์ประกอบ ไม่เปลี่ยนแปลงมาก ให้ค่าความร้อนสูง
2. การผสมระหว่างแก๊สและอากาศง่าย ทำให้เผาไหม้ได้สมบูรณ์โดยไม่ต้องใช้อากาศเกินพอหรือใช้เพียงเล็กน้อย
3. การใช้และควบคุมอัตราการป้อนแก๊สเข้าสู่อุปกรณ์กระทำได้ง่าย
4. การเผาไหม้สะอาด ได้ไฟแก๊สที่สะอาด ไม่มีเถ้า ไม่มีแก๊สกรด จึงไม่ต้องมีค่าใช้จ่ายด้านการกำจัดสารมลพิษ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

แก๊สเชื้อเพลิงมีข้อจำกัดอยู่บ้าง ได้แก่ ราคาสูงที่สุดเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอื่น การขนส่งและการเก็บต้องคำนึงถึงความปลอดภัย และใช้อุปกรณ์ที่มีมาตรฐานสูง และต้องตรวจสอบเป็นประจำ เพื่อป้องกันอันตรายจากการรั่วไหล และการเกิดอัคคีภัย นอกจากนี้เปลวไฟจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงให้ความร้อนชนิดแผ่รังสีต่ำกว่าเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็ง ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนจึงต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความสะดวกและความสะอาด ตลอดจนบรรยากาศการเผาไหม้ควบคุมง่าย แก๊สเชื้อเพลิงจึงเป็นเชื้อเพลิงที่ดีที่สุดในการให้ความร้อนในภาคเศรษฐกิจต่าง ๆ

3.17 หัวเผาในบรรยากาศเปิด (Atmospheric (open) burners)

หัวเผากลุ่มนี้มีให้เห็นทั่วไป เช่น หัวเตาแก๊สหุงต้มที่มีช่องเปลวไฟออกเป็นรูปวงกลมโดยรอบเหมือนโดนัท หัวเตาอบแก๊สที่ใช้รอบขนมที่มีช่องเปลวไฟออกแนวยาวหลายแนวขนานกัน ทั้งที่ทำในประเทศและที่นำเข้า หัวเผากลุ่มนี้เป็นหัวเผาชนิดเปลวไฟแก๊สผสมอากาศ (premixed flames) ใช้หลักการเดียวกับตะเกียงเบนเซน คือใช้โมเมนตัมของแก๊สที่พุ่งผ่านหัวฉีดออกมาถึงอากาศส่วนแรกเข้าผสมเป็นส่วนผสมแรก เกิดเปลวไฟขึ้นในเหนือหัวเผา แล้วเกิดเปลวไฟขึ้นนอกโดยการพาของอากาศที่อยู่ล้อมรอบเข้าหาผลผลิตที่ยังเผาไหม้ได้ที่ออกมาจากเปลวไฟขึ้นใน เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ เนื่องจากเป็นหัวเผาที่ใช้งานกันทั่วไป จึงควรทำความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการเบื้องต้นก่อนการออกแบบเบื้องต้น

หลักการของตะเกียงเบนเซน คือการดึงอากาศเข้าผสมกับเชื้อเพลิงโดยอาศัยโมเมนตัมของเชื้อเพลิงจึงเรียกหัวเผานี้ว่า หัวเผาดึงอากาศเข้าในบรรยากาศเปิด (atmospheric aerated burners) รูปที่ 3.13 แสดงส่วนประกอบหลักของหัวเผานี้



รูปที่ 3.12 ภาพแสดงส่วนประกอบหัวฉีดเผาดีดอากาศเข้าในบรรยากาศเปิด

ส่วนประกอบสำคัญของหัวเผาดึงอากาศเข้าในบรรยากาศเปิด มี 5 ส่วน คือ

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

1. หัวฉีดแก๊ส

เตาหุงต้มทั่วไปใช้แก๊สที่มีความดันต่ำ ประมาณ 625-2,000 ปาสคัล (5.5-8 นิ้วน้ำ) ป้อนผ่านแก๊สผ่านท่อเข้ามาที่หัวฉีด (nozzle หรือ orifice) อัตราเร็วของแก๊สที่ไหลออกจากหัวฉีดแดงได้โดยใช้สมการของ

$$Q = fA_0 (H_0/sp gr)^{1/2} \quad (3.8)$$

เมื่อ Q_v = อัตราเร็วโดยปริมาตรของแก๊ส (volumetric flow rate) m^3/hr
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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))

เนื่องจากการไหลของแก๊สผ่านหัวฉีดมีแรงต้านทางเนื่องจากความเสียดทาน ซึ่งมีผลต่อการต้านทานการไหลของแก๊สต่างกัน และมีการออกแบบหัวฉีดให้ท่อทำมุมสอบเข้าหาปลายหัวฉีดได้ต่าง ๆ กัน ดังนั้นจึงมีผลกับค่าพื้นที่หน้าตัดของเจ็ท โดยมีเทอมสัมประสิทธิ์การปล่อยแก๊สผ่านของหัวฉีด (discharge coefficient of orifice, C_{d0}) เพิ่มเข้าไปในสมการ เมื่อแทนค่าในระบบหน่วยเอส ไอ ได้ว่า

$$Q = 0.046 A_0 C_{d0} (H_0/\text{sp gr})^{1/2} \tag{3.9}$$

นั่นคือ $A_j = A_0 C_{d0}$ และ C_{d0} มีค่าอยู่ระหว่าง 0.85-0.95

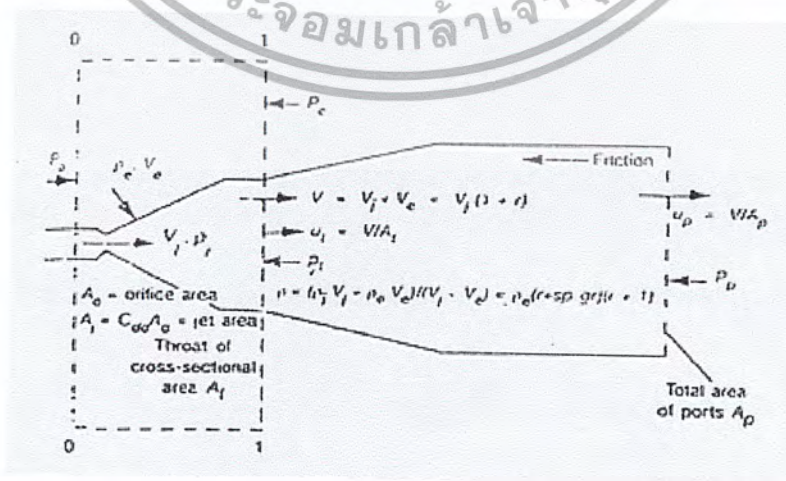
เมื่อแทน Q ด้วย I โดยคูณสมการด้วยค่าความร้อนของแก๊สและแทนด้วยค่าอวเบ

$$\begin{aligned} (Q)(\text{HHV}) &= 0.046 A_0 C_{d0} \text{HHV} (H_0/\text{sp gr})^{1/2} \\ I &= 0.046 A_0 C_{d0} W (H_0)^{1/2} \end{aligned} \tag{3.10}$$

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

2. ช่องเปลวไฟและช่องเปิดให้อากาศส่วนแรกเข้า

การฉีดแก๊สผ่านออกมาจากหัวฉีดเข้าไปในส่วนที่เป็นคอคอด เป็นกรณีของ confined jet ซึ่งจะมี ความดันลดที่บริเวณปลายหัวฉีด อากาศจึงถูกดึงเข้ามาผสมรูปที่ 3.14 แสดงบริเวณและสัญลักษณ์ของตัวแปรต่าง ๆ



รูปที่ 3.13 การดึงอากาศเข้าผสมโดย confined jet ในตะเกียงเบนเซน

จากทฤษฎี confined jet เมื่อทำคูล โมเมนตัมระหว่างตำแหน่งปลายหัวฉีด และตำแหน่งปลายท่อผสม หลังคอคอด สามารถแสดงได้ว่า ถ้าความดันที่ทั้งสองตำแหน่งเท่ากัน (เท่ากับบรรยากาศ) อัตราส่วนระหว่างอากาศที่ถูกดึงเข้ามาผสมต่อแก๊สที่ผ่านหัวฉีด จะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของแก๊สและจะสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดของเจ็ท คอคอด และปลายท่อผสม ดังสมการ

$$(r+1)(r+sp\ gr) = 2\ sp\ gr.(A_i/A_j)/[1+K(A_i/A_j)]^2 \quad (3.11)$$

เมื่อ r = อัตราส่วนระหว่างอากาศที่ถูกดึงเข้ามาผสมและแก๊สที่ผ่านหัวฉีด
 $sp\ gr$ = ความถ่วงจำเพาะของแก๊สเชื้อเพลิง
 A_i = พื้นที่หน้าตัดของคอคอด
 A_j = พื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด
 A_p = พื้นที่หน้าตัดของส่วนปลายท่อผสม (นั่นคือช่องแปลวไฟ)
 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

$$1 - K(A_i/A_j)^2 = 0$$

$$(A_i/A_j) = K^{-1/2}$$

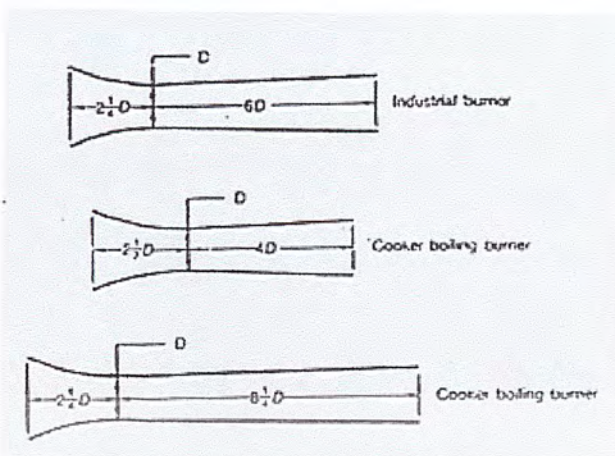
รวมสมการเข้าด้วยกันได้ว่า

$$(r+1)(r+sp\ gr) = (sp\ gr.A_i)/A_j \quad (3.12)$$

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

3.18 การออกแบบคอคอด และท่อผสม

ออกแบบให้สัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดของคอคอด ซึ่งคำนวณพื้นที่หน้าตัดของเจ็ท มักใช้สัดส่วนดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 สัดส่วนของกอกอกและท่อผสม

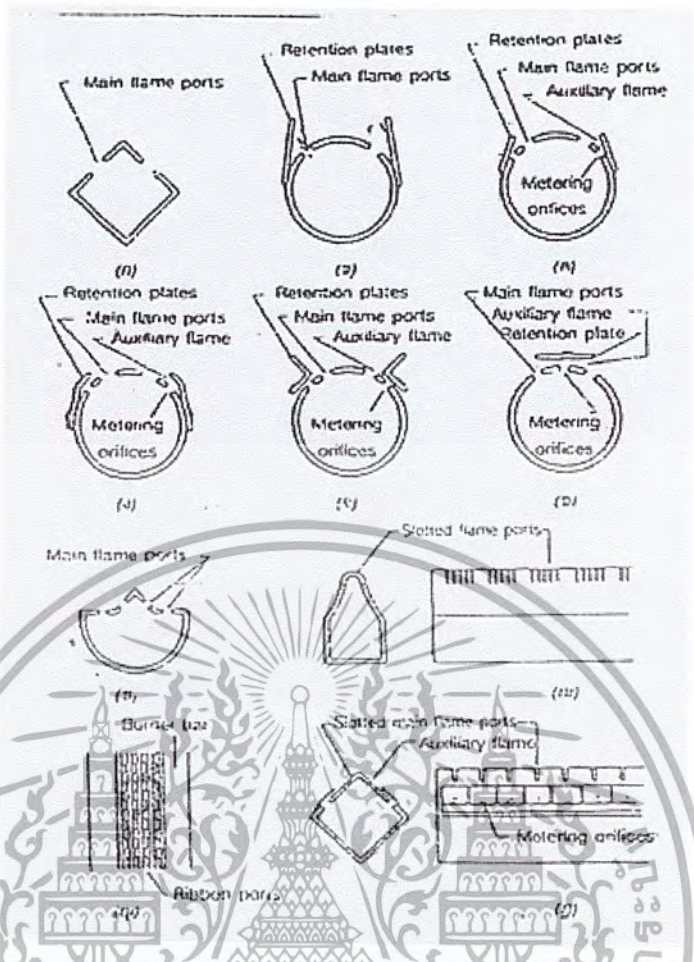
3.19 การออกแบบช่องเปลวไฟ

ตามหลักการเปลวไฟอยู่ตัว ช่องเปลวไฟต้องมีขนาดเล็ก (เล็กกว่า ระยะดับเปลวไฟ) เพื่อป้องกันเปลวไฟไหลย้อนกลับเข้าไปในท่อผสม แต่ในทางปฏิบัติสร้างได้ยาก และอุดต้นได้ง่ายขณะใช้งาน จึงถือเป็นแนวปฏิบัติให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง 2.5-3.0 มิลลิเมตร แต่ละช่องห่างกันเป็นสัดส่วนกับขนาดของช่องเปลวไฟ คือ

เส้นผ่านศูนย์กลางช่องเปลวไฟ (มิลลิเมตร)	ระยะดับเปลวไฟจุดศูนย์กลางช่องเปลวไฟ (มิลลิเมตร)
1.6	8.4
2.4	11.4
3.2	16.5

สำหรับการป้องกันเปลวไฟถูกเป่าดับ โดยเฉพาะแก๊สที่มีความเร็วของเปลวไฟต่ำ เช่น แก๊สธรรมชาติ แก๊สปิโตรเลียมเหลว จำเป็นต้องมีการออกแบบที่ช่วยให้ความร้อน (และอนุมูลอิสระ) สะท้อนกลับที่เปลวไฟ เช่น มีแผ่นโลหะเล็ก ๆ (retention plates) ที่ฐานเปลวไฟ หรือมีเปลวไฟเล็ก ๆ (auxiliary flames) หรือออกแบบให้เปลวไฟปะทะกันเพื่อช่วยยึดเปลวไฟไว้บนหัวเผา ดังรูปที่ 3.16

การออกแบบรูปร่างลักษณะ และการจัดวางช่องเปลวไฟ ต้องสอดคล้องกับขนาดหัวเตาและลักษณะการใช้งานด้วย เช่น เตากลม (ring burner) อาจออกแบบให้มีช่องเปลวไฟสองชั้น เพื่อไม่ให้ขนาดของหัว



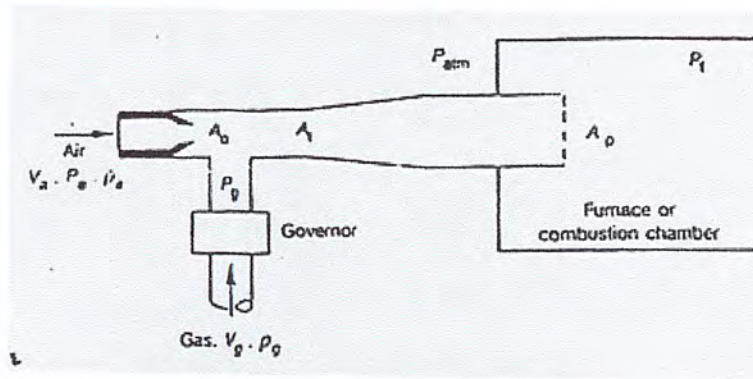
รูปที่ 3.15 ช่องเปลวไฟรูปร่างและลักษณะต่างๆกัน

เตาใหญ่เกินไป และเพื่อให้การใช้งานสะดวกสามารถควบคุมการป้อนแก๊สแยกกันได้ เตาขาว (bar burner) อาจออกแบบหัวเตาให้เป็นที่นอนกลม หรือเป็นแท่งแบนยาว และช่องเปลวไฟเป็นร่องลึกแบน เพื่อให้เปลวไฟยาวสูง เหมาะกับการใช้งาน เช่น ผ่านขึ้นไประหว่างช่องว่างของท่อน้ำเพื่อทำน้ำร้อน ช่องว่างในเตาอบขนม หรือเตาเผาต่างๆ เป็นต้น

จากค่า A_p ซึ่งเป็นพื้นที่รวมของช่องเปลวไฟ ต้องนำมาจัดแบ่งและจัดวางให้เป็นช่องเปลวไฟเล็ก ๆ ที่มีรูปร่างและลักษณะเปลวไฟที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยพื้นที่หน้าตัดของช่องเปลวไฟเล็ก ๆ รวมกันทั้งหมดแล้วต้องเท่ากับพื้นที่รวมของช่องเปลวไฟที่คำนวณได้

3.20 หัวเผาแก๊สผสมอากาศในบรรยากาศเปิดแบบต่าง ๆ

แบบความดันต่ำ (low-pressure aerated burner) ใช้แก๊สที่มีความดันต่ำ ประมาณ 625-2,000 ปาสกาล (2.5-8 นิ้ว) มีแบบและบริษัทผู้ผลิตจำหน่ายอยู่มากมาย โดยมีหลักการออกแบบคล้ายกับที่แสดงไว้แล้ว มีบางแบบออกแบบให้เปลี่ยนหัวฉีดได้เอง หรือสวมหัวฉีดซ้อนเข้าไป เพื่อให้สามารถปรับใช้กับแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าวอบเบ และความเร็วของเปลวไฟต่างกันได้ เช่น สลับใช้ระหว่างแก๊สธรรมชาติ และแก๊ส



รูปที่ 3.17 หลักการและเทอมที่ใช้กับหัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิดอากาศดิ่งแก๊ส

1. ได้สัดส่วนการผสมที่ต้องการตามทฤษฎี
2. ปรับอัตราการป้อน (throughput) ได้ง่ายโดยปรับเพียงอากาศ
3. มีอัตราส่วนการป้อนระหว่างสูงที่สุดคือค่าที่สูด 0 สูง
4. ส่วนผสมที่ช่องเปลวไฟมีความดันสูงจึงทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ เปลวไฟสั้นต้องการ ปริมาตรห้องเผาไหม้น้อย
5. ฟลูแก๊สมีโมเมนตัมสูงทำให้เกิดการกระจายของแก๊สร้อนไปทั่วเตาเผา และการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาดีกว่า
6. เปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงได้สะดวก

หลักการดิ่งแก๊สเข้ามาผสมกับเจ็ทของอากาศเช่นเดียวกับการดิ่งอากาศเข้ามาผสมกับเจ็ทของแก๊ส แต่ในบริเวณปลายหัวฉีดมีท่อน้ำแก๊สเข้ามาแทนช่องอากาศ ดังนั้นสามารถใช้สมการปรับปรุงได้เป็น

$$Q_{air} = 0.046 A_0 C_{dao} (H_0 / \text{sp gr})^{1/2} \quad (3.13)$$

เมื่อ C_{dao} = มีค่าระหว่าง 0.85-0.95

H_0 = เป็นความดันของอากาศที่ป้อนเข้าออริฟิซ ประมาณ 2.5-7.5 กิโลปาสกาล

sp gr = เป็นความถ่วงจำเพาะของอากาศ ซึ่ง = 1

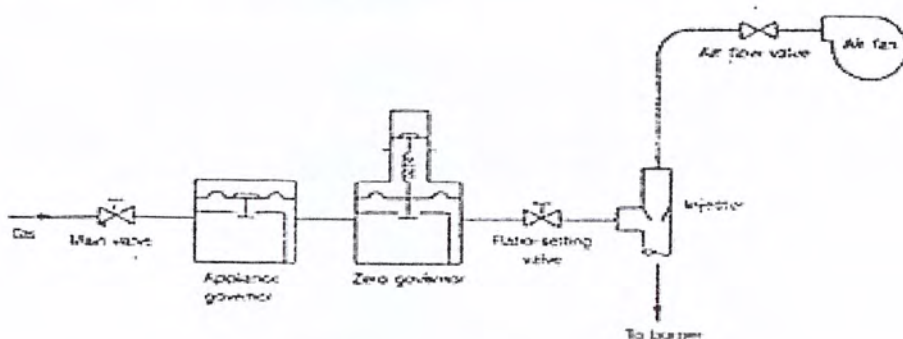
และเนื่องจาก $Q_{air} = Q_{gas}$

ดังนั้น $r Q_{gas} = 0.046 A_0 C_{dao} (H_0)^{1/2} \quad (3.14)$

จากรูปทฤษฎี confined jet แสดงได้ว่าถ้าความดันที่ปลายหัวฉีดเท่ากับความดันที่ปลายท่อผสม (ช่องเปลวไฟ) แล้วค่า r จะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนอากาศผ่านหัวฉีด (Q_{air}) นั่นคือ ถ้าแก๊สเข้าที่ความดันบรรยากาศ (P_g) และช่องเปลวไฟ (ซึ่งอยู่ในเตาเผา) อยู่ที่ความดัน (P) เช่นกันแล้ว อากาศจะสามารถดิ่งแก๊สเข้ามาผสมที่อัตราส่วนระหว่างอากาศและแก๊สคงที่ตลอดเวลา การจัดให้แก๊สเข้ามาผสมที่ความดันบรรยากาศกระทำได้โดยให้แก๊สผ่านอุปกรณ์ควบคุมความดันคงที่ที่เรียกว่า zero governor ซึ่งใช้หลักการของลวดสปริง (tension-spring type) หรือแผ่นไดอะแฟรม (diaphragm type) ดันให้หัวถั่วเปิดหรือปิด เพื่อ

ปล่อยให้แก๊สผ่าน ไปยังหัวฉีดที่ความดันคงที่ตลอดเวลา
 อากาศชนิดอากาศดึงแก๊สจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.19

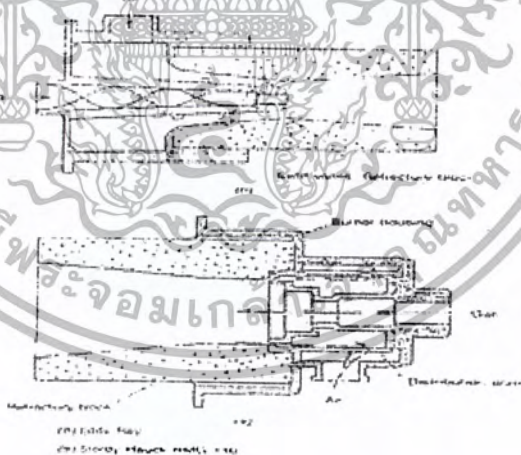
ดังนั้นระบบการป้อนแก๊สสู่หัวเผาแก๊สผสม



รูปที่ 3.18 ระบบการป้อนแก๊สที่ความดันบรรยากาศสู่หัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิดอากาศดึงแก๊ส

3.22 หัวเผาแก๊สผสมอากาศชนิดผสมในอุโมงค์ (Tunnel mixing air burners)

การผสมระหว่างแก๊สและอากาศกระทำ ได้ โดยพ่นทั้งแก๊สและอากาศเข้ามา กระแสทั้งสองถูกบีบให้เข้าผสมกันภายในท่อที่มีลักษณะแคบยาวเหมือนอุโมงค์แล้วเกิดการเผาไหม้ ณ บริเวณนั้น หัวเผากลุ่มนี้มีข้อดี ที่จะ ไม่เกิดเปลวไฟย้อนกลับ ช่วยให้เปลวไฟอยู่ตัวและยึดอยู่กับที่ได้ในช่วงกว้าง สามารถใช้อากาศที่อุ่นก่อนและมีความดันต่ำได้ รูปที่ 3.20 แสดงหัวเผาที่ใช้หลักการดังกล่าว



รูปที่ 3.19 ตัวอย่างหัวเผานิดผสมในท่ออุโมงค์

- แบบ ก แก๊สถูกบีบเข้ามาในหัวฉีด อากาศถูกบีบเข้ามาโดยครีบบีบ (swirl vanes) ที่ติดอยู่โดยรอบหัวฉีด แต่การบีบอากาศมีน้อย ส่วนใหญ่ของอากาศไหลในแนวแกน
- แบบ ข อากาศเข้ามาแยกกันถึง 3 ตำแหน่ง ในแนวสัมผัส แนวแกนตรงกลาง และแนวแกนในช่องว่างระหว่างท่อ นำแก๊สเข้า

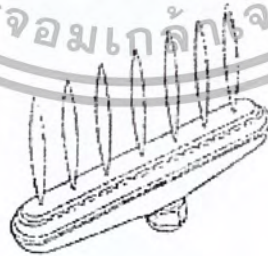
3.23 หัวเผาชนิดแก๊สผสมอากาศภายหลังหรือเปลวไฟชนิดแพร่ (Post aerated หรือ diffusion flame burners)

หัวเผาชนิดนี้ฉีดแก๊สเข้ามาบริเวณปากหัวเผาแล้วจึงมาพบกับอากาศจากภายนอก หรืออากาศที่นำเข้ามาผสม มีทั้งชนิดที่มีการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน ลักษณะสำคัญของหัวเผาชนิดนี้ คือ ให้เปลวไฟสุกสว่าง ไม่เกิดเปลวไฟย้อนกลับ จึงให้อัตราส่วนการป้อนสูงที่สุดต่อต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังมีขนาดกะทัดรัดและไม่มีเสียงดังเหมือนหัวเผาชนิดแก๊สผสมอากาศ (เสียงฟูที่เกิดจากการดึงอากาศเข้าผสม) รวมทั้งหัวเผาไม่ร้อนจึงไม่เกิดการอุดตันที่ช่องเปลวไฟ เนื่องจากการเผาไหม้ไม่เข้มข้นเฉพาะบริเวณปากหัวเผา แต่เกิดขึ้นตลอดความยาวของเตาเผา

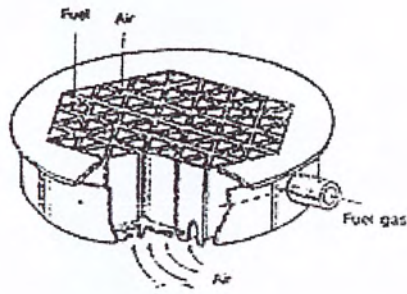
เนื่องจากหัวเผาในกลุ่มนี้ไม่มีผลต่อความอยู่ตัวของเปลวไฟ มีผลต่อรูปร่างและขนาดเท่านั้น จึงขอ ยกตัวอย่างเฉพาะชนิดการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งใช้กันมากในการใช้งานขนาดเล็กตลอดจนการใช้งานในอุตสาหกรรมด้วย รูปที่ 3.21 แสดงหัวเผาเบรย์ (bray burner) ที่นิยมใช้กันมาก รูปที่ 3.22 แสดงหัวเผารูเข็ม (pinhole burner) และรูปที่ 3.23 แสดงหัวเผาเมทริกซ์ (matrix burner) ตามลำดับ



รูปที่ 3.20 หัวเผาเบรย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม



รูปที่ 3.21 หัวเผารูปเข็ม



รูปที่ 3.22 หัวเผาเมทริกซ์

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

หัวเผารูเข็มทำด้วยเหล็กกล้าเจาะรูขนาด 0.3-0.4 มิลลิเมตร เป็นเปลวไฟหลักและมีเปลวไฟเสริมที่ฐาน โดยรอบ

หัวเผาเมทริกซ์มีการออกแบบที่น่าสนใจ โดยจัดวางให้ช่องแก๊สออกจากช่องว่าง โดยรอบช่องอากาศที่จัดเป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งด้านล่างเปิดให้อากาศจากด้านล่างไหลผ่านขึ้นมาได้เนื่องจากผลของ chimney effects เพราะขณะเกิดการเผาไหม้ด้านบนจะร้อนกว่าด้านล่าง อากาศที่เย็นกว่าจะไหลขึ้นมาแทนที่ตลอดเวลา การออกแบบเป็นเมทริกซ์ทำให้ขยายพื้นที่เกิดเปลวไฟออกไปได้มาก และสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิดตั้งแต่ที่มีอัตราการเกิดเปลวไฟต่ำ เช่น ไฮโดรคาร์บอน ไปจนถึงสูง เช่น ไฮโดรเจน โดยเปลวไฟมีความสูงไม่กี่มิลลิเมตร แต่หัวเผานี้สร้างได้ยาก จึงมีราคาแพง และเปลวไฟที่เกิดขึ้นไม่ค่อยอยู่ตัว คับง่าย

บทที่ 4

ทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics)

4.1 บทนำ

ผลของอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) ที่สำคัญอย่างมากในการออกแบบสมรรถนะของระบบ เครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์ การออกแบบที่เหมาะสมระบบการฉีดเชื้อเพลิง ห้องเผาไหม้หลายชนิดแตกต่างกันไปทั้งขนาดและระบบการฉีดเชื้อเพลิงมีหลายแบบ ในการกระจายและ Annulus มีจุดประสงค์หลักเพื่อลดความเร็วการไหลและการแพร่กระจายของอากาศตามคำแนะนำทุกส่วนของห้องเผาไหม้ ซึ่งเงื่อนไขการรักษาแบบการไหลไม่เป็นตัวถ่วงการไหล หรือไม่เกี่ยวข้องกับการหมุนวนบางชนิดภายใน การเผาไหม้ชั้นใน (Combustion liner) จุดสำคัญมาจากขนาดการไหลหมุนวนมีผลต่อการเสถียรภาพของ เปลวไฟ มีผลต่อการเผาไหม้ส่วนเชื้อเพลิง (Dilution) และประสิทธิภาพหล่อเย็นของอากาศตามผนังห้องเผาไหม้ชั้นใน

ผลของการคลุกเคล้า (Mixing) มีความสำคัญอย่างมากในการเผาไหม้และส่วน Dilution ในส่วน การคลุกเคล้าที่ดีมีความจำเป็นต่ออัตราการเผาไหม้สูง และลดเขม่ากับไนโตรเจนออกไซด์ให้น้อยที่สุด ขณะความพอใจการกระจายอุณหภูมิห้องของไอเสียของแก๊สอาศัยระดับการคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับการเผาไหม้ในส่วนเชื้อเพลิง จุดประสงค์ออกแบบห้องเผาไหม้ป้อนอุณหภูมิเพื่อให้เกิดการคลุกเคล้าภายในห้องเผาไหม้ชั้นใน และรูปแบบการไหลมันคงทั้งหมด ไม่มี parasitic losses และความยาวสั้นที่สุดและสูญเสียความดันน้อยที่สุด

4.2 ลักษณะการสูญเสียความดัน (Pressure Losses parameter)

ใน 2 มิติ ตัวแปรที่สำคัญทำให้เกิดการสูญเสียความดัน (pressure loss) ในการออกแบบห้องเผาไหม้หนึ่งนั้นคือ อัตราส่วนความดันลดลง (pressure drop) ในหน้าตัดของห้องเผาไหม้ ผลรวมความดัน $\Delta P_{3-4}/P_3$ ตรงทางเข้าและอัตราส่วนของผลรวมของห้องเผาไหม้ ซึ่งมากจาก dynamics pressure $\Delta P_{3-4}/q_{ref}$ ซึ่ง 2 ตัวแปรจะความสัมพันธ์ดังสมการ

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

จากสมการ (1) ทางด้านซ้ายมือ โดยปกติจะกล่าวถึงการสูญเสียความดันทั้งหมด (Overall pressure loss) ปกติจะเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่าจะอยู่ช่วง 4-10% ปกติมันจะไม่รวมกับการสูญเสียความร้อน (Heat loss) ความดันที่สูญเสียจะเป็นตัวบ่งบอกของการเผาไหม้

ในเทอมของ $\Delta P_{3-4}/q_{ref}$ จะเรียกว่า Pressure loss factor มีความสำคัญในการเผาไหม้ วิศวกรต้องให้ความสำคัญ ดังนั้นมันจะเป็นตัวบ่งบอกถึงการต้านทานการไหลในช่วงแรก ลักษณะ Air Stream ระหว่างทางออกของคอมเพรสเซอร์ และทางเข้าเทอร์ไบน์ การไหลของอากาศจะถูกมองเหมือนเป็นสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient) ซึ่งมันจะไม่เหมือนกับ Overall pressure loss ซึ่งต้องอาศัยขอบเขตในการทำงาน pressure loss จะเป็นตัวแปรในการกำหนดคุณสมบัติของการเผาไหม้ มันใช้แทนแสดงผลรวม 2 เทอมของการสูญเสียความดัน ความดันลดลงในการกระจาย และความดันลดลงในพื้นที่หน้าตัดในผนังด้านใน

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

ควรให้ น้อยที่สุด เนื่องจากการสูญเสียความดันใน Diffuser จะเป็นอุปสรรคต่อการเผาไหม้ในทางปฏิบัติ ควรทำความดันสูญเสียใน ให้ น้อยที่สุด การสูญเสียความดันห้องเผาไหม้ชั้นในต้องให้น้อยที่สุด เหมือนกัน ปัจจัยการสูญเสียความดันหาได้โดยผลของพื้นที่รูทั้งหมดในห้องเผาไหม้ชั้นใน

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

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

แทนทางขวามือของสมการ (4.4) ในสมการ (4.1)

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

ผลทั้งหมดของพื้นที่รูห้องเผาไหม้ชั้นในถูกควบคุมพื้นที่ห้องเผาไหม้ชั้นนอก

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

ผลพื้นที่รูห้องเผาไหม้ชั้นในอาจจะคำนวณจาก

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

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

ค่าของอากาศเย็น การสูญเสียความดัน ในห้องเผาไหม้ในทางปฏิบัติที่ให้มาในตาราง (4.1) มี 3 แถว แสดง 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 ซึ่งมากจากการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) ซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 4.1 ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4.1 แสดงการสูญเสียความดันในห้องเผาไหม้ในทางปฏิบัติ

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

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและการสูญเสียความดัน

4.3.1 ห้องเผาไหม้ชั้นนอก (Casing Area)

ห้องเผาไหม้ที่แข็งแรงจะต้องมีภาคตัดของพื้นที่ที่เหมาะสม โดยพิจารณาการสูญเสียความดันทั้งหมด เพราะภาระของการเผาไหม้พื้นที่ที่ห่อหุ้มด้านนอกเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเผาไหม้ภายใต้การสูญเสียความดันทั้งหมด ขนาดพื้นที่หาได้จาก

$$A_{ref} = \left[\frac{R \left(\frac{m_3^0 T_3^{0.5}}{P_3} \right)^2 \cdot \frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} \left(\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3} \right)^{-1} \right]^{0.5} \quad (4.8)$$

4.3.2 ห้องเผาไหม้ชั้นใน (Liner)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของการสร้างห้องเผาไหม้ชั้นใน ให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดใหญ่ ก็คือทำให้การไหลภายในห้องเผาไหม้มีความเร็วต่ำ ส่งผลให้มี Resident time ยาวนาน ตัวแปรเหล่านี้ทำให้การจุดระเบิดทำได้ง่าย รวมทั้งทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ และเสถียรภาพ

แต่วิธีนี้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องยนต์อากาศยานเพราะเครื่องยนต์อากาศยานนั้นจะต้องมีขนาดเล็กและมีพื้นที่การติดตั้งจำกัด การขยายขนาดของห้องเผาไหม้ชั้นนอกเพื่อให้เหมาะสมกับขนาดของห้องเผาไหม้ชั้นในเป็นไปได้ยาก ดังนั้นหากเพิ่มขนาดของห้องเผาไหม้ชั้นในขึ้นแต่ขนาดของห้องเผาไหม้ของห้องชั้นนอกคงเดิมจะทำให้พื้นที่ระหว่างห้องเผาไหม้ชั้นในและห้องเผาไหม้ชั้นนอกแคบลง ความเร็วของอากาศที่ไหลระหว่างพื้นที่นี้จะสูงขึ้นทำให้เกิด Static Pressure drop สูง ภายในบริเวณห้องเผาไหม้ชั้นในและห้องเผาไหม้ชั้นนอกการเกิดเกิด Static Pressure drop สูง ทำให้อากาศไม่สามารถผ่านรูที่เจาะบนผนังห้องเผาไหม้ชั้นใน เข้าไปบริเวณรูที่อากาศผ่าน อากาศที่ไหลผ่านรูจะเข้าไปคลุกเคล้ากับแก๊สร้อนภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งหากอากาศเกิด Static Pressure drop สูง จะทำให้ Static Pressure ในอากาศลดน้อยลงจนไม่สามารถไหลผ่านรูได้ หลักการพิจารณาค่า Static Pressure drop ที่เหมาะสมในการไหลผ่านรูบนห้องเผาไหม้ชั้นใน มีหลักดังนี้ นั่นคือ เราต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง k และ $\Delta P_l / q_{pz}$ ซึ่งสมการเป็นดังนี้

$$K = \frac{\text{Line Cross Area}}{\text{Ca sin g Cross Area}} \quad (4.9)$$

Δp = ความสัณฐานที่ตกลงผ่านระหว่างรูบนห้องเผาไหม้ชั้นใน

q_{pz} = ความดันจลนภายใน primary zone

4.4 การไหลในท่อวงแหวน

เงื่อนไขในการไหลในท่อวงแหวนนั้นมีอิทธิพลต่อรูปแบบการไหลของอากาศภายในห้องเผาไหม้ชั้นในและมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผนังห้องเผาไหม้ โดยความเร็วเฉลี่ยภายในท่อวงแหวนนี้ถูกควบคุมโดยความเร็วการเผาไหม้และอัตราส่วนของพื้นที่ห้องเผาไหม้ชั้นในกับห้องเผาไหม้ชั้นนอก การเปลี่ยนแปลงการกระจายความเร็วทางเข้าห้องเผาไหม้ชั้นในมีผลอย่างมาก ความเร็วที่ปรากฏภายในท่อวงแหวน การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหล และอากาศที่ถูกดูดไหลผ่านรูเป็นแถว ถึงแม้ว่าเราต้องการการไหลภายในท่อวงแหวนให้มีความเร็วสูงเพื่อระบายความร้อนของห้องเผาไหม้ชั้นใน โดยใช้หลักการการพาความร้อน แต่เราจำเป็นต้องให้การไหลในบริเวณนี้มีความเร็วต่ำ เพราะ

1. เมื่อมีความเร็วต่ำจะมีความดันสถิตทำให้มั่นใจได้ว่าการไหลของอากาศผ่านในท่อ ซึ่งเป็นแถวเดียวกันจะมีลักษณะเหมือนกัน
2. สัมประสิทธิ์ที่รูทางออกมีค่าสูง
3. แรงเสียดทานที่ทำให้เกิดขึ้นบริเวณผิวจะมีค่าต่ำ
4. การสูญเสียอันเกิดจากการปรากฏการณ์ Sudden-expansion บริเวณทางออกของรูบนห้องเผาไหม้ชั้นใน และร่องระบายความร้อนมีค่าต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ห้องเผาไหม้ส่วนมากมีพื้นที่วิกฤตที่จุดบริเวณของต้นกระแสนของห้องเผาไหม้ชั้นในและบริเวณใกล้เคียง บริเวณเริ่ม steam line อากาศจะถูกปล่อยออกจากช่วงที่ (Diffuser) บางครั้งอาจเกิด boundary ชั้นที่ขนาดใหญ่ ทำให้ขัดขวางการหล่อเย็นด้วยความดันสถิตในช่องหล่อเย็น ในการทำให้ total head ของช่องหล่อสม่ำเสมอ อาจเกิดปัญหาขึ้นจากคอค้าง ทำให้เกิดการไหลแยกตัว ทำให้เกิดการโค้งงอที่จุดเชื่อมของช่วงที่บานออกและของท่อวงแหวน เนื่องจากกระบวนการไหลผ่านตามแนวของท่อวงแหวน ลักษณะของความเร็วจะค่อยๆลดลง เนื่องจากอากาศไหลผ่านช่องที่ลักษณะต่างกัน อย่างไรก็ตามถ้าอากาศที่ไหลผ่านอยู่นอกเหนือการควบคุมเข้าสู่ภายในช่องทำให้เกิดการไหลตามกระแสเกิดการเงื้องาจได้ โดยการไหลที่ไม่เป็นระเบียบสามารถเพิ่มขึ้น จากการที่อากาศในส่วนที่ไปไหลย้อนของด้านต้นสายธารภายในท่อวงแหวนเกิดไหลไม่ต่อเนื่องและไหลประเภทสุมโดยห้องเผาไหม้แบบเทอร์โบแอนนูลาร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจเกิดความรุนแรงขึ้น ในบางกรณีของห้องเผาไหม้ชั้นในที่รับการไหลของอากาศที่มีทิศทางที่ต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการบิดเบือนการไหลผ่านในเท่านั้น แต่จะทำให้เปลี่ยนแปลงเป็นตามเวลาด้วย

วิธีหนึ่งที่จะช่วยบรรเทาปัญหานี้ได้คือ การสวม Backstop ที่ช่วงปลายสายธารโดยการออกแบบแผ่นวงแหวนอย่างง่าย เมื่อสวมเข้าไประหว่างด้านใน และด้านนอกของห้องเผาไหม้ โดยการเจาะที่บริเวณรอบ ๆ ท่อตามความเหมาะสม และการกำหนดให้อากาศไหลผ่านเพื่อระบายความร้อนของท่อบริเวณปลายสายธาร ซึ่งแผ่นนี้จะมีผลกระทบมากในการต่อต้านการเกิด ไหลย้อนกลับภายในท่อวงแหวน

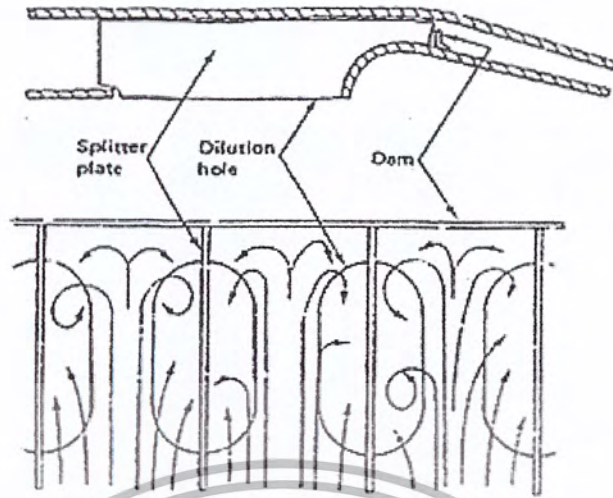
ที่บริเวณภายในของท่อวงแหวนห้องเผาไหม้ชั้นในนั้น Backstop มักติดตั้งกันแบบต่อเนื่องเพื่อกีดขวางใกล้ช่วงปลายสายธารของรู Dilution ชั้นที่ โดยติดตั้งประมาณ 2 ใน 3 ของพื้นที่วงแหวน อีกวิธีหนึ่งในการควบคุมการไหลภายในรู Dilution คือการทำให้ผนังภายในของทางออกห้องเผาไหม้ชั้นในมีลักษณะเรียบเพื่อป้องกันการขยายออกของท่อวงแหวนตรงทางที่ติดต่อกับรู

ถ้าตำแหน่งระยะของรู Dilution มีขนาดใหญ่กว่าความสูงท่อวงแหวน การไหลหมุนวน (vortex) สามารถเกิดขึ้นในรู โดยที่การเปลี่ยนแปลงรูปการทะลวง (Penetration) และการผสมกันของลำกระแสอากาศที่ Dilution ความรุนแรงของการหมุนวนนี้ขึ้นอยู่กับอัตราพื้นที่วงแหวน ซึ่งวัดในระนาบของรูถึงพื้นที่รู ถ้ามีอัตราพื้นที่นี้สูงจะทำให้ยับยั้งการก่อตัวการหมุนวน ซึ่งแนวทางนี้ก็เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบห้องเผาไหม้ชั้นในของห้องเผาไหม้ชั้นใน ให้มี Pressure drop ที่เหมาะสม

การหมุนวน (Vortex) นั้นสามารถเกิดได้ทั้ง Tubular และ Annular การทำลายหรือการลดโดยการสวมแผ่นที่เป็นร่อง (Splitter plate) ตามยาวยาวแต่รู Dilution ซึ่งแผ่นนี้ที่จะติดอยู่กับห้องเผาไหม้ชั้นในหรือด้านนอกห้องเผาไหม้ชั้นนอกได้ผล โดยเฉพาะการใช้การรวมแผ่นวงแหวนเข้าด้วยกัน หรือการกีดกันดังรูปที่ 4.1

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

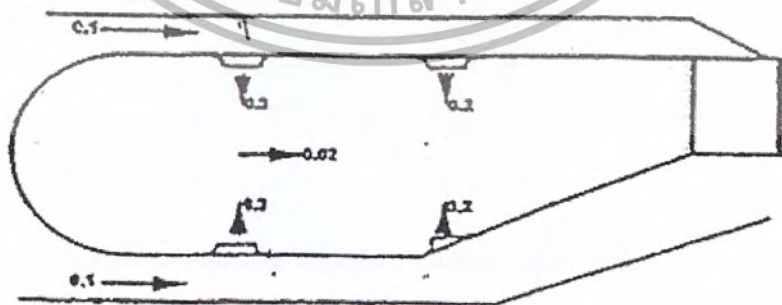
แนวทางออกแบบสำหรับ Mach number เฉพาะจุด (Local Mach number) แสดงในรูปที่ 4.2 Mach number ในด้านนอกและด้านในของท่อวงแหวน (Annular) ลำดับแรกที่ Primary zone การฉีดพ่นควรเป็น



รูปที่ 4.1 ถังผสมการไหลผ่านรู Dilution

0.1 เท่ากันตลอดตามความยาวของแหวน ดังนั้นพื้นที่แต่ละท่อวงแหวนหาโดยเงื่อนไขที่ใช้จาก Q curves ส่วน Mach number ที่วงแหวนที่ต่ำจำเป็นต้องรักษาระดับ Mach number ไว้สำหรับการฉีดพ่นราวประมาณ 0.3 เนื่องจากอัตราการฉีดพ่นที่ Mach number ที่วงแหวนควรมากกว่า 2.5 การฉีดพ่น Mach number 0.3 ย่อมให้ความดันตกคร่อมน้อยที่สุด ทำให้การไหลซึมอากาศดี ครึ่งของอากาศที่ไหลเข้าที่ Primary zone และอีกครึ่งหนึ่งไหลเข้า Secondary zone (Intermediate zone) การฉีดพ่นที่ Mach number เฉลี่ยแนวแกนที่ออกจาก Primary zone ควรเป็น 0.02-0.05

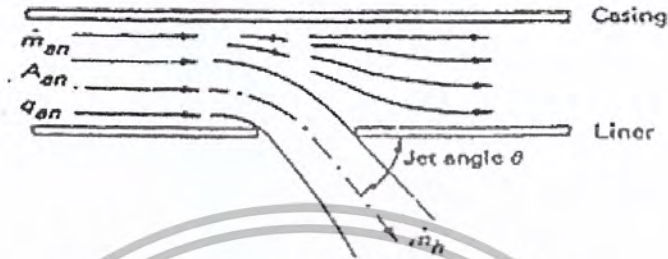
ภายหลังจาก Primary zone อัตราการไหลมีการชักนำ mass number เข้าสู่เปลวไฟ mass number อาจสูงประมาณ 0.075-0.1 ในที่สุดการไหลอากาศส่วนของ Tertiary (Dilution zone) ถูกเร่งความเร็วจนเข้าเทอร์ไบน์ประมาณ 0.2 จนถึง Guide vane



รูปที่ 4.2 mass number ห้องเผาไหม้

4.4.2 การไหลผ่านรูเสี้ยนใน (Flow through liner holes)

การไหลผ่านรูห้องเผาไหม้ชั้นในในอากาศยานความเร็วสูงมีความดันตกคร่อมไม่เพียงพอ แต่รูปร่างของท่อและเงื่อนไขการไหลในบริเวณรู ซึ่งมีอำนาจรุนแรง มีผลต่อพื้นที่การไหล ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยินยอมได้ (Discharge coefficient)



รูปที่ 4.3 แสดงการไหลผ่านรูของห้องเผาไหม้ชั้นใน

สำหรับ โดยขนาดรูมากห้องเผาไหม้ชั้นในมีทิศทางการไหลคั่นทาง ขนาดระนาบรูปตามรูปที่ 4.3 และจากสมการอาจเขียนได้ดังนี้

จากการสังเกตการหักเหคั่นทางการไหลเกิดบริเวณรูของห้องเผาไหม้ชั้นในที่ขอบเขตรูปร่างของระบบ รูปร่างใกล้เคียงความเร็วและความดันตกคร่อมขวางห้องเผาไหม้ชั้นในในทางปฏิบัติ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ยอมรับได้ของรูชั้นในอยู่กับ

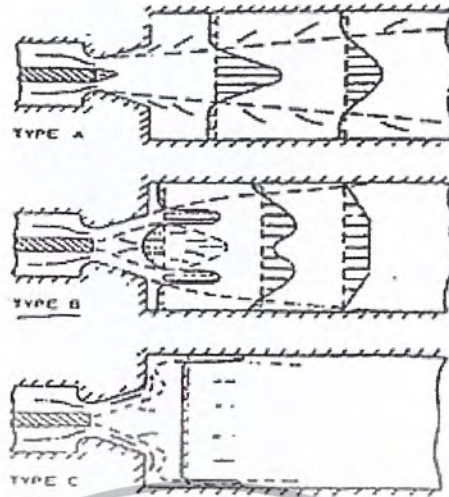
1. ชนิดรู (แบบราบเรียบ แบบรอยย่น อื่น ๆ)
2. รูปร่าง (วงกลม สี่เหลี่ยม อื่น ๆ)
3. อัตราช่องว่างรูที่สูง ท่อวงแหวน
4. ความดันตกคร่อมของห้องเผาไหม้ชั้นใน
5. การกระจายของความดันสถิต รอบ ๆ ภายในรู
6. การปรากฏตัวของกัมมันตภาพรังสีในเกลียวของกระแสการไหล
7. ตำแหน่งความเร็วอากาศท่่วงแหวน

ในข้อสุดท้ายให้เหตุผลว่าทำไมค่าสัมประสิทธิ์บ่อยครั้งต่ำกว่ารูแถวแรก และต่ำกว่าในตำแหน่งรูที่ไกลออกไป

จากวิเคราะห์แฟลตเตอร์การควบคุมการไหลของลำกระแสผ่านผนัง, Kaddah [1] สำหรับการไหลอัดตัวไม่ได้ การไหลที่ไม่มีกัมมันตภาพรังสีเป็นเกลียว (swirl) ค่าของสัมประสิทธิ์ สำหรับรูวงกลมเรียบ วงรีเรียบ และสี่เหลี่ยมเรียบ หาได้โดย

4.5 การแยกตัวของการไหลวนในหัวฉีดเว้าออก (Separation of flow in divergent nozzle)

ระหว่างการวิจัยพบว่า ถ้ามีรูปร่างเรขาคณิตและการไหลวนของอากาศมีผลกระทบต่อกัน ชนิดของการไหลโดยพื้นฐานมี 3 แบบ จะสังเกตในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 สังกะรูปแบบการไหลสำหรับ Swirling jets และการออกของเปลวไฟจากหัวฉีดเว้าออก

ชนิด A. กรณีความหนาแน่นของอากาศส่วนน้อยหรือเป็นศูนย์ การไหลอากาศแยกตัวจากผิวหัวฉีดใกล้คอออกหัวฉีด ผลแบบนี้การไหลของการปั่นคล้ายคลึงกับการปั่นปราศจากหมุนวนเป็นเกลียวเปลวไฟที่ได้มีลักษณะเปลวไฟแกว่งไปแกว่งมา

ชนิด B. กรณีอากาศวนระดับปานกลางหรือระดับสูง การไหลอากาศวนมันคง ติดกับผนังหัวฉีดเข้าออกและสวมรอบคอบความร้อน ในโซนการไหลย้อนกลับ ในศูนย์กลางของการปั่น โดยทั่วไปต้องการไหลแบบนี้ผลิตเปลวไฟเสถียรภาพสูง การไหลแบบนี้ทำให้เกิดปั่นป่วน (Turbulence) รุนแรงสูง ซึ่งความเข้มข้นของเชื้อเพลิงมีสูง เป็นผลความรุนแรงการเผาไหม้สูง

ชนิด C. รูปแบบการไหลแบบนี้ แทนการปั่นผนังรัศมีเปลวไฟที่ผลิตได้ของการไหลแบบนี้ถูกคิดผนังหัวฉีดและผนังห้องเผาไหม้ รูปร่างปากแตร มุมกว้างและหัวฉีดเว้าออกสั้น เปลวไฟที่ได้เหมาะกับเตาหลอมเหลวโลหะ

4.6 การกระจายอากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้ชั้นใน (Air flow distribution within liner)

ความสำคัญการออกแบบรูปร่างห้องเผาไหม้ ที่การหาจำนวน ขนาด รูปร่าง ตำแหน่งของรูที่สร้างขึ้น รูปร่างอากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้ชั้นในนั้นจะต้องง่ายและเบา ประสิทธิภาพและเสถียรภาพของการเผาไหม้ การหล่อเย็นที่ผนังและการส่งแก๊สเข้าเทอร์ไบน์ที่อุณหภูมิเหมาะสม ถ้าผนังชั้นในประกอบด้วยแถว มี n รู ซึ่งมีผลต่อขนาด d_j และอัตราการไหลทั้งหมด m_j ของอากาศไหลผ่านรูปหาได้โดย

$$m_j^o = \frac{\pi}{4} n d_j^2 \rho_3 u_j \quad (4.10)$$

$$m_j^o = \frac{\pi}{4} n d_j^2 (2\rho_3 \Delta p_L)^{0.5} \quad (4.11)$$

$$d_h = \frac{d_j}{C_D^{0.5}} \quad (4.12)$$

เมื่อค่า C_D มาจากรูปที่ 4.4 สมการที่ 4.10 และ 4.11 ถูกใช้หาขนาดของรูและจำนวนรูที่เหมาะสมที่สุดของรูในอันดับที่ 2 สำหรับห้องเผาไหม้ชั้นในแบบ Turbular ขนาด d_j อาจคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 4.10 และ 4.11 โดยที่ให้ $n = 6$ หรือ 8



บทที่ 5

แก๊สผสมและการคำนวณ

5.1 องค์ประกอบของแก๊สผสม

5.1.1 สัดส่วนเชิงมวลและโมล

ในการหาค่าสมบัติของแก๊สผสม

เราจำเป็นต้องทราบองค์ประกอบแก๊สผสมและค่าสมบัติของ

ส่วนประกอบแต่ละตัว

องค์ประกอบของแก๊สผสมสามารถระบุได้ 2 วิธี

1.1.1 โดยระบุด้วยจำนวนโมลของส่วนประกอบ เรียกว่าการวิเคราะห์เชิงโมล (Molar Analysis)

1.1.2 โดยระบุด้วยมวลของสารประกอบแต่ละตัวเรียกว่าการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก (Gravimetric Analysis)

1.2 มวลรวมของแก๊สผสม m_m นี้จะมีค่าเท่ากับมวลรวมของแต่ละส่วนขององค์ประกอบแต่ละชนิดและโมลรวมของแก๊สผสม n_m จะมีค่าเท่ากับผลรวมของ โมลของส่วนประกอบ

$$\begin{aligned} m_m &= \sum_{i=1}^k m_i \\ n_m &= \sum_{i=1}^k n_i \quad i=1,2,3 \end{aligned} \quad (5.1)$$

อัตราส่วนผสมระหว่างมวลของส่วนประกอบต่อมวลทั้งหมดเรียกว่าสัดส่วนเชิงมวล (Mass fraction, m_f)

$$m_f = \frac{m_i}{m_m} \quad (5.2)$$

อัตราส่วนระหว่างจำนวน โมลของส่วนประกอบต่อจำนวน โมลของแก๊สผสมจะถูกเรียกว่าสัดส่วนเชิงโมล (Mole fraction, y)

$$y_i = \frac{n_i}{n_m} \quad (5.3)$$

และจำได้ว่า

$$\sum_{i=1}^k m_f = 1$$

$$\sum_{i=1}^k y_i = 1$$

กำหนดให้ n =จำนวน โมล

M =Molecular weight

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$M_m = \frac{m_m}{n_m} = \frac{\sum_{i=1}^k m_i}{n_m} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i m_i}{n_m} = \sum_{i=1}^k y_i m_i \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right) \quad (5.4)$$

ค่าคงที่ของแก๊สคำนวณได้จาก

$$R_m = \frac{R_u}{M_m} \quad (5.5)$$

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง P-V-T ของแก๊สผสม แก๊สอุดมคติและแก๊สจริง

5.2.1 ความดันที่เพิ่มขึ้นตามกฎของ Dollton

ความดันของแก๊สผสม จะมีค่าเท่ากับผลรวมของความดันของแก๊สแต่ละชนิดที่มีอยู่ในแก๊สผสมนั้น

ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นตามกฎของ Amagatt

ปริมาตรรวมของแก๊สผสมจะมีค่าเท่ากับผลรวมของปริมาตรของแก๊สแต่ละชนิดที่มีอยู่ในแก๊สผสมนั้น

จากกฎของคอลตันและอามาแกตจะเป็นจริงถ้าแก๊สผสมนั้นเป็นอุดมคติ

กฎของ Dollton

$$P_m = \sum_{i=1}^k P_i(T_m, V_m) \quad (5.6)$$

กฎของ Amagatt

$$V_m = \sum_{i=1}^k V_i(T_m, P_m) \quad (5.7)$$

5.2.2 แก๊สผสมอุดมคติ (Ideal gases – Mixtures)

ในแก๊สผสมอุดมคติเราสามารถแสดงในรูป สมการแก๊สผสมอุดมคติดังนี้

$$\frac{P_i(T_m, V_m)}{P_m} = \frac{n_i R_u T_m / V_m}{n_m R_u T_m / V_m} = \frac{n_i}{n_m} = y_i = \frac{P_i}{P_m} \quad (5.8)$$

5.2.3 แก๊สผสมจริง

ในการคำนวณหาความดันของส่วนประกอบและปริมาตรของส่วนประกอบจะต้องใช้ได้กับแก๊สจริงและมักมีความถูกต้องสูง แต่การคำนวณหาความดันของสารประกอบและปริมาตรของสารประกอบจะต้องใช้สมการค่าเบี่ยงเบนของสารประกอบแต่ละชนิดจากแก๊สอุดมคติ ดังสมการ

$$PV = ZnR_u T \quad (5.9)$$

ค่าแฟคเตอร์สภาพอัดตัวได้ของแก๊สผสม Z_m สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Z_m = \sum_{i=1}^k y_i z_i \quad (5.10)$$

เมื่อ Z_i ของแก๊สแต่ละชนิดสามารถทำได้จากทั้งสภาวะ T_m, P_m, V_m เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 สมการค่าความร้อนของสารผสม

$$Q = \dot{M}_{LPG} \times HV_{LPG} + \dot{M}_{AL} \times HV_{AL} \quad (5.11)$$

เมื่อ Q = ค่าความร้อน KJ/S

\dot{M}_{LPG} = อัตราการไหลเชื้อเพลิง LPG Kg/S

\dot{M}_{AL} = อัตราการไหลเชื้อเพลิง แอลกอฮอล์ Kg/S

LHV_{LPG} = 50,384 $KJ/Kg \times S$

LHV_{AL} = 22,540 $KJ/Kg \times S$

5.4 ตัวอย่างการคำนวณ

การหาอัตราการไหลเข้าของอากาศ

$$\dot{M}_{Air} = AF \times \dot{M}_{Fuel}$$

เมื่อ $AF = 30$ (เฉพาะตัวอย่าง)

$$\dot{M}_{Fuel} = \text{ผลรวมของเชื้อเพลิงที่เปอร์เซ็นต์ต่าง LPG ต่างๆ เช่นที่ 100 \% = 3.50487 \times 10^{-5} \text{ KG/S}$$

แทนค่าได้ $\dot{M}_{Air} = 30 \times 3.50487 \times 10^{-5} = 0.001051 \text{ M/S}$

การคำนวณหาความเร็วอากาศเข้าห้องเผาไหม้

จากสูตร $\dot{M}_{AIR} = \rho_{Air} \times V \times Area$

ดังนั้น $V = \frac{\dot{M}_{Air}}{\rho_{Air} \times Area}$

เมื่อ $\rho_{Air} = 1.22 \text{ Kg/M}^3$

$$Area = \frac{\pi \times 0.25^2}{4} =$$

$$\dot{M}_{Air} = 0.001051 \text{ M/S}$$

บทที่ 6

ชุดทดลองห้องเผาไหม้ การทดลองและผลการทดลอง

6.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) วิเคราะห์ผลของการกระจายอุณหภูมิเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์ และ ก๊าซ LPG ภายใต้อัตราการเผาผลาญเชื้อเพลิงและอัตราส่วนผสม เชื้อเพลิงต่างๆ

6.2 ขอบเขตการทดลอง

- 1) การทดลองนี้จะทดลองที่ความดันบรรยากาศ
- 2) ศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนเชื้อเพลิง โดยให้การเผาไหม้จำกัดอยู่ในช่วงของห้องเผาไหม้
- 3) สร้างห้องเผาไหม้ตัวใหม่และทำการทดสอบ
- 4) สมการที่ใช้ในการกำหนดอัตราส่วนผสมคือ $Q = \dot{M}_{LPG} \times HV_{LPG} + \dot{M}_{AL} \times HV_{AL}$
ตัวแปรควบคุมคือ ค่า AF Ratio , อัตราการป้อนเชื้อเพลิง \dot{M}
ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ
 - 1) อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิง LPG และ แอลกอฮอล์
 - 2) การกระจายอุณหภูมิ ตามแนวแกน
- 5) ค่า AF Ratio ที่ใช้ในการทดลองคือที่ 30, 40, 50 ทำการเลือกภายในย่านการทดลองที่เริ่มติดไฟ(ค่าที่ได้เลือกมานี้เป็นค่า AF Ratio ในย่านที่เกิดขึ้นจริงในห้องเผาไหม้แก๊สเทอร์ไบน์ ในโครงการปี 2545)
- 6) ค่า Q ที่เลือกใช้คือ 1.765 KJ/S

6.3 ขั้นตอนที่ 1 การสตาร์ทเครื่องยนต์แก๊สเทอร์ไบน์

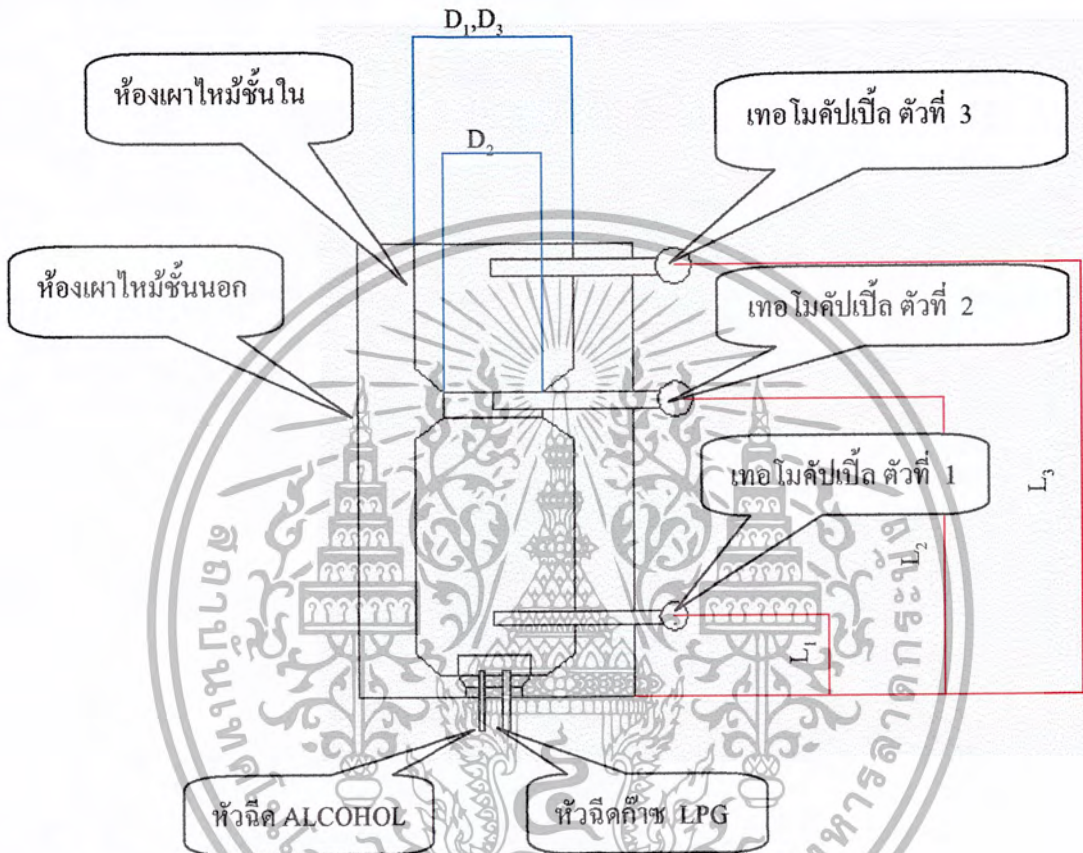
เนื่องจากการสตาร์ทเครื่องยนต์ค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากมีหลายขั้นตอนและถ้ามีการผิดพลาดอาจเกิดอันตราย เพื่อความปลอดภัยควรปฏิบัติดังนี้

1. เปิด Blower เพื่อช่วยอัดอากาศเข้าคอมเพรสเซอร์
2. ปรับหัวจ่ายแก๊สที่ดัง
3. ปรับความดันในถังแก๊สและท่อแก๊สที่ LPG Regulator
4. เปิดหัวเทียน
5. เปิดหัวจ่ายแก๊สอันเล็ก เพื่อให้เกิดเปลวไฟก่อนที่จะจุดหัวจ่ายแก๊สหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เปิดหัวจ่ายแก๊สหลัก ปิดหัวจ่ายแก๊สอันเล็ก และปิดหัวเทียน
7. ปรับหัวจ่ายแก๊สหลักจนรอบเทอร์โบสูงพอที่จะทำให้เครื่องสามารถทำงานได้ด้วยตนเอง
8. ปิด Blower

6.3.1 รูปแสดงห้องเผาไหม้



รูปที่ 6.1 แสดงส่วนประกอบของห้องเผาไหม้

รายละเอียดของห้องเผาไหม้ตัวเดิมมีดังนี้

L1= 17 L2= 26 L3= 45

D1= 17 D2= 9 D3= 17

และของห้องเผาไหม้ตัวใหม่มีดังนี้

L1= 17 L2= 51 L3= 91

D1= 25 D2= 20 D3= 25

ซึ่ง L1, L2, L3 คือ ระยะจากหัวฉีดเชื้อเพลิงมาที่เทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1, 2, 3 ตามลำดับของห้องเผาไหม้ตัวเดิมและใหม่

L1, L2, L3 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่จุดเทอร์โมคัปเปิ้ลตัวที่ 1, 2, 3 ตามลำดับของห้องเผาไหม้ตัวเดิมและใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระยะรูเจาะของห้องเผาไหม้ตัวเดิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 6 mm.
 ระยะรูเจาะของห้องเผาไหม้ตัวใหม่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 10 mm.

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการทดลองที่ AF = 30 LPG 80 % = 2.80E-05 Kg/S
 แอลกอฮอล์ = 1.56E-05 Kg/S
 2. จากตารางที่ 3.1 ทำการปรับ LPG ไปที่ 2.80E-05 Kg/S
 3. จากตารางที่ 3.2 ปรับความเร็วของเครื่องเป่าลม ไปที่ 0.022 M/S
 โดยการใช้เครื่องมือวัดความเร็วลม
 4. ทำการเปิด LPG
 5. ทำการจุดไฟ
 6. รอนค่าอุณหภูมิที่ได้มีความเสถียร
 7. ทำการจดอุณหภูมิ T_1, T_2, T_3
 8. ดับเครื่องเตรียมการทดลองครั้งใหม่
 9. นำข้อมูลที่ได้อ่านมาเขียนกราฟการทดลองเทียบกับค่าต่างๆ เช่น Length/Diameter (L/D) Ratio
- 6.3.2 รูปแสดงเครื่องมือวัด



รูปที่ 6.2 รูปแสดงชุดอ่านเทอร์โมคัปเปิ้ล

6.3.2.1 ชุดวัดอุณหภูมิ

ลักษณะของเครื่องวัด

ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลที่มีช่องของอุณหภูมิระหว่าง (300-1,500 K)

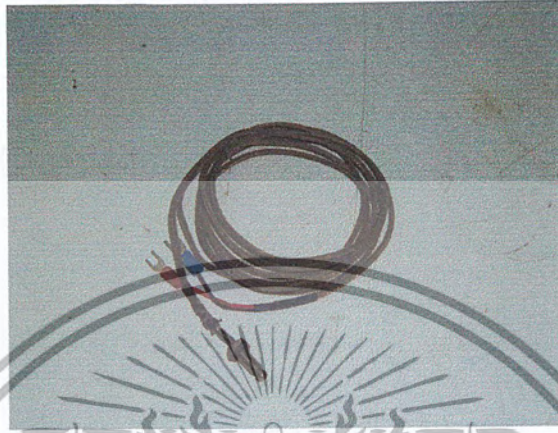
ลักษณะของการวัด

ทำการวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล ต่อเข้ากับห้องเผาไหม้ในช่วงดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Primary Zone (T1)
2. Orifice Zone (T2)
3. Secondary Zone (T3)

แล้วอ่านค่าที่ได้จากชุดอ่านเทอโมคัปเปิ้ล



รูปที่ 6.3 รูปแสดงชุดโมคัปเปิ้ล



รูปที่ 6.4 รูปแสดงชุดวัดความเร็วลม

6.3.2.2 การวัดความเร็วลม

ลักษณะของเครื่องวัด

โดยใช้เครื่องวัดความเร็วลมที่มีช่วงวัดความเร็ว (0.1-10.0 m/s)

ลักษณะของการวัด

1. โดยการวัดในช่วงตำแหน่งเปิดสุด เปิดปานกลาง เปิดน้อยที่สุด ดังนี้

ระยะเปิดสุด 6 รอบของสกรู(ปิด-เปิด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเปิดปานกลาง	3 รอบของสกรู(ปิด-เปิด)
ระยะเปิดน้อยที่สุด	1 รอบของสกรู(ปิด-เปิด)

6.3.3 ขั้นตอนการคำนวณค่า อัตราการไหล เชื้อเพลิง และ อากาศ

1) ทำการเลือกค่าอัตราการไหลของ LPG ขึ้นมาค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในย่านที่สามารถทดลองได้ ในที่นี้คือ 3.504689×10^5 Kg/S เหตุผลที่เลือกค่านีเพราะ

1. เป็นค่าที่อยู่ในย่านที่เครื่องสามารถทดลองได้
2. เป็นค่าที่มี สเกลอยู่สามารถปรับกลับมาเมื่อไรก็ได้

เมื่อได้ค่า LPG ที่เป็นค่าหลักแล้วทำการแบ่งเป็น 10 ค่า โดยทำการลดค่าทีละ 10 % ดังแสดงในตารางข้อมูลปรับอัตราการไหลเชื้อเพลิง

2) นำค่าอัตราการไหล LPG ที่ได้เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าความร้อนอ้างอิงตามสูตรที่ 5.11 โดยอัตราการไหล แอลกอฮอล์ เป็น 0 จะได้ค่า ความร้อน Q คือ

$$3.504689 \times 10^{-5} \times 50,384 = 1.7965 \text{ KJ/S}$$

3) นำค่า Q ที่ได้มาคำนวณหาค่า แอลกอฮอล์ ที่ต้องใช้เมื่อเปลี่ยน อัตราการไหลเชิงมวล LPG เป็น % ต่างๆซึ่งค่าอัตราการไหลเชิงมวล ที่ได้แสดงไว้ในตารางข้อมูลเช่นเดียวกัน

4) เมื่อได้อัตราการไหลเชื้อเพลิงแล้วจะหาอัตราการไหลของอากาศที่ต้องใช้ไปคำนวณโดยใช้สูตร

$$\dot{M}_{air} = AF \times \dot{M}_{Fuel}$$

ซึ่งค่า AF ที่ใช้ในการทดลองคือ 30 , 40 , 50 เมื่อแทนค่าแล้วได้ผลคำนวณดังแสดงในตารางข้อมูลอัตราการไหลของอากาศ

5) จากแต่ละอัตราการไหลที่ได้ต้องคำนวณหาอัตราความเร็วลมที่ต้องใช้ตามสูตร

$$V = \frac{\dot{M}_{Air}}{(Area \times \rho_{air})}$$

$$\text{เมื่อ } A = \frac{\pi \times 0.25^2}{4}$$

$$\rho_{Air} = 1.22 \text{ Kg/M}^3$$

ค่าความเร็ว V ที่คำนวณได้แสดงไว้ในตารางข้อมูลการปรับอัตราการไหลอากาศเช่นเดียวกัน

6) ทำการทดลองโดยปรับค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$\dot{M}_{LPG} , \dot{M}_{AL} , \text{ ความเร็วของอากาศ}$$

ซึ่งได้ผลการทดลองดังได้แสดงไว้ในกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 ข้อมูลการปรับอัตราการใช้เชื้อเพลิง

อัตราการใช้ของ LPG % โดย มวล	อัตราการใช้ของ LPG (Kg/S)	อัตราการใช้ของ แอลกอฮอล์ (Kg/S)	อัตราการใช้ ทั้งหมด (Kg/S)
100	3.50E-05	0	3.504E-05
90	3.15E-05	7.83E-06	3.937E-05
80	2.80E-05	1.56E-05	4.370E-05
70	2.45E-05	2.35E-05	4.803E-05
60	2.10E-05	3.13E-05	5.236E-05
50	1.75E-05	3.91E-05	5.669E-05
40	1.40E-05	4.70E-05	6.102E-05
30	1.05E-05	5.48E-05	6.535E-05
20	7.00E-06	6.26E-05	6.968E-05
10	3.50E-06	7.05E-05	7.401E-05
0	0	7.88E-05	7.880E-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

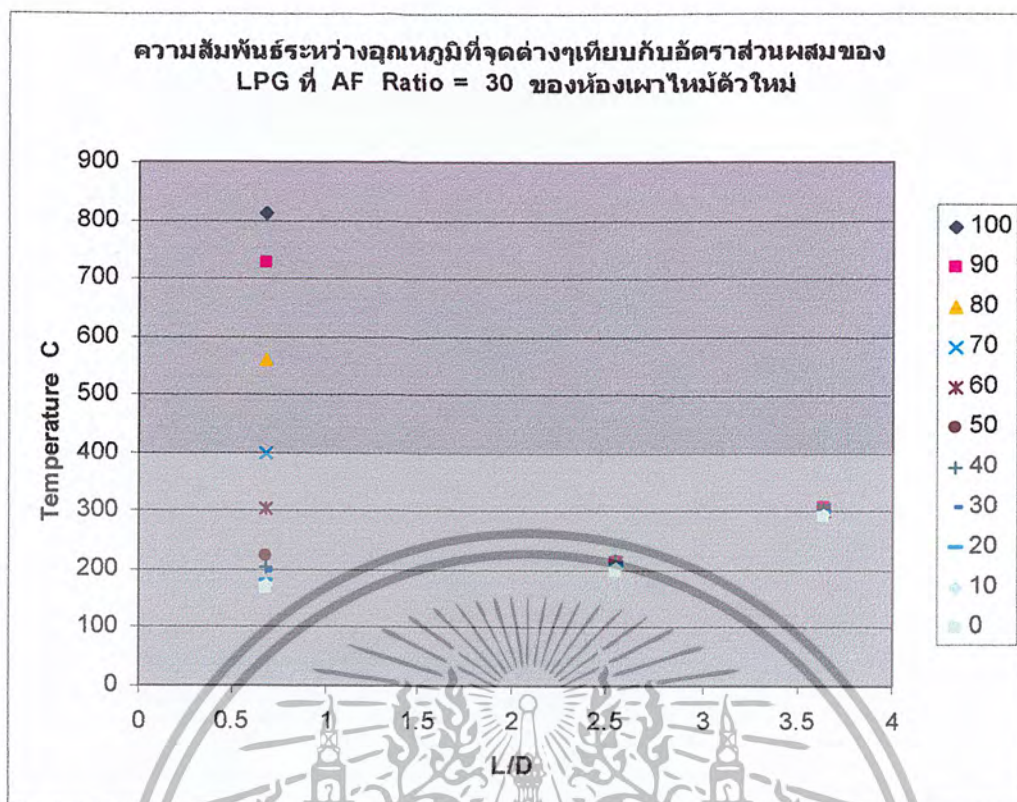
ตารางที่ 6.2 ข้อมูลการปรับอัตราการใช้ AIR และ ค่า AF Ratio ที่ทำการทดลอง

ความเร็วอากาศ (m/s)	อัตราการใช้ของ LPG % โดยมวล	อัตราการใช้ ของ Air (Kg/S)	อัตราการใช้ ของFuel (Kg/S)	AF ACTURL
0.017	100	0.0010	3.50E-05	30
0.020	90	0.0011	3.93E-05	30
0.022	80	0.0013	4.37E-05	30
0.024	70	0.0014	4.80E-05	30
0.026	60	0.0015	5.23E-05	30
0.028	50	0.0017	5.66E-05	30
0.030	40	0.0018	6.10E-05	30
0.032	30	0.0019	6.53E-05	30
0.035	20	0.0020	6.96E-05	30
0.037	10	0.0022	7.40E-05	30
0.039	0	0.0023	7.83E-05	30

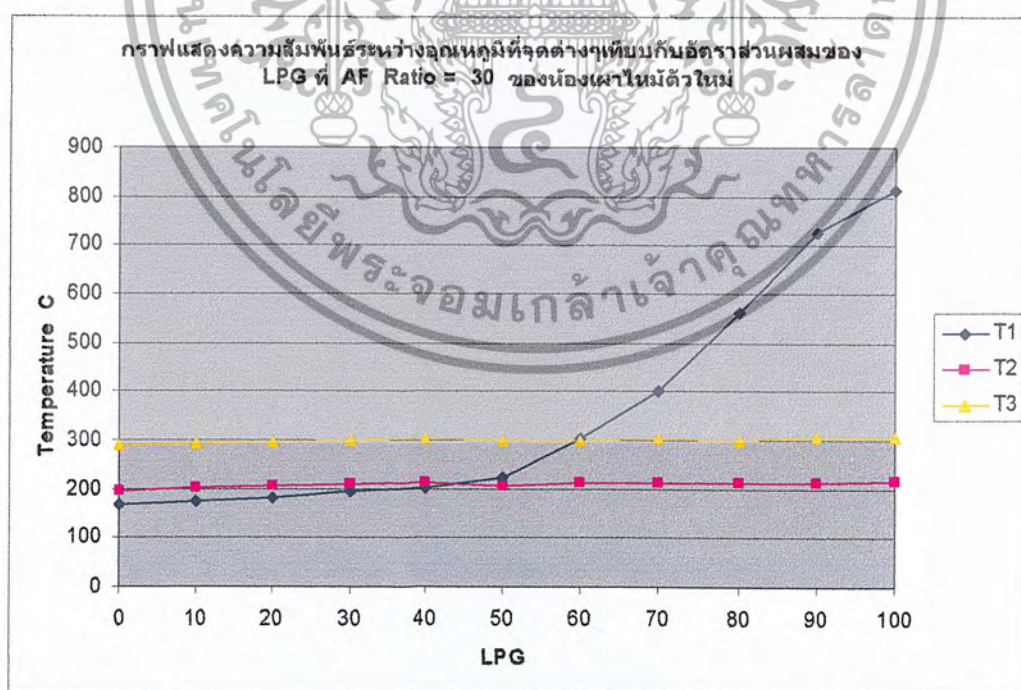
ความเร็วอากาศ (m/s)	อัตราการใช้ของ LPG % โดยมวล	อัตราการใช้ ของ Air (Kg/S)	อัตราการใช้ ของFuel (Kg/S)	AF ACTURL
0.023	100	0.0014	3.50E-05	40
0.026	90	0.0015	3.93E-05	40
0.029	80	0.0017	4.37E-05	40
0.032	70	0.0019	4.80E-05	40
0.035	60	0.0020	5.23E-05	40
0.038	50	0.0022	5.66E-05	40
0.040	40	0.0024	6.10E-05	40
0.043	30	0.0026	6.53E-05	40
0.046	20	0.0027	6.96E-05	40
0.049	10	0.0029	7.40E-05	40
0.052	0	0.0031	7.83E-05	40

ความเร็วอากาศ (m/s)	อัตราการใช้ของ LPG % โดยมวล	อัตราการใช้ ของ Air (Kg/S)	อัตราการใช้ ของFuel (Kg/S)	AF ACTURL
0.029	100	0.0017	3.50E-05	50
0.033	90	0.0019	3.93E-05	50
0.036	80	0.0021	4.37E-05	50
0.040	70	0.0024	4.80E-05	50
0.043	60	0.0026	5.23E-05	50
0.047	50	0.0028	5.66E-05	50
0.051	40	0.0030	6.10E-05	50
0.054	30	0.0032	6.53E-05	50
0.058	20	0.0034	6.96E-05	50
0.061	10	0.0037	7.40E-05	50
0.065	0	0.0039	7.83E-05	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

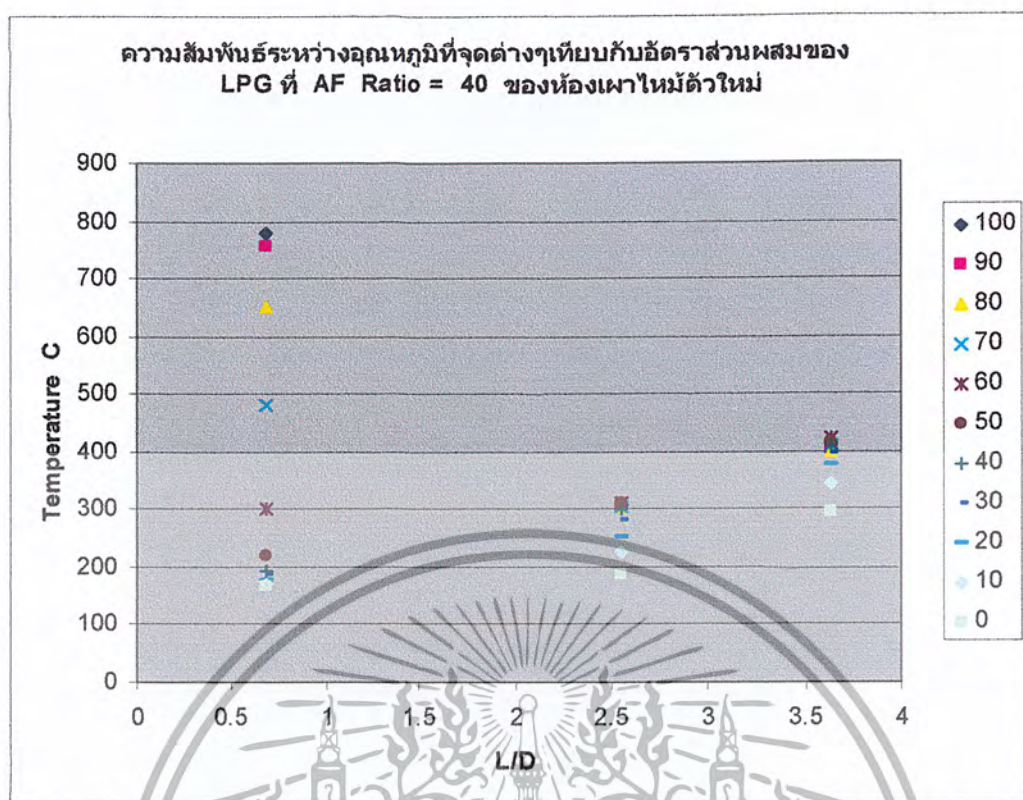


รูปที่ 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุด L/D และ สัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวใหม่ที่ AF Ratio = 30

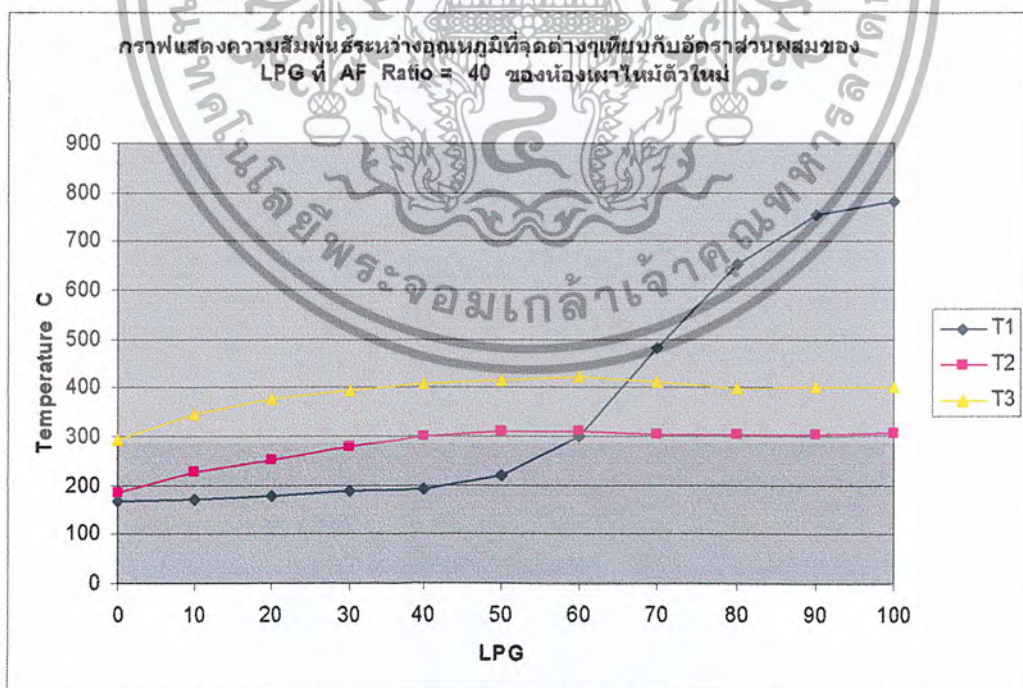


รูปที่ 6.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุดบริเวณเปลวไฟ (T_1) บริเวณคอกอด (T_2) และ บริเวณทางออก (T_3) และ สัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวใหม่ที่ AF Ratio = 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

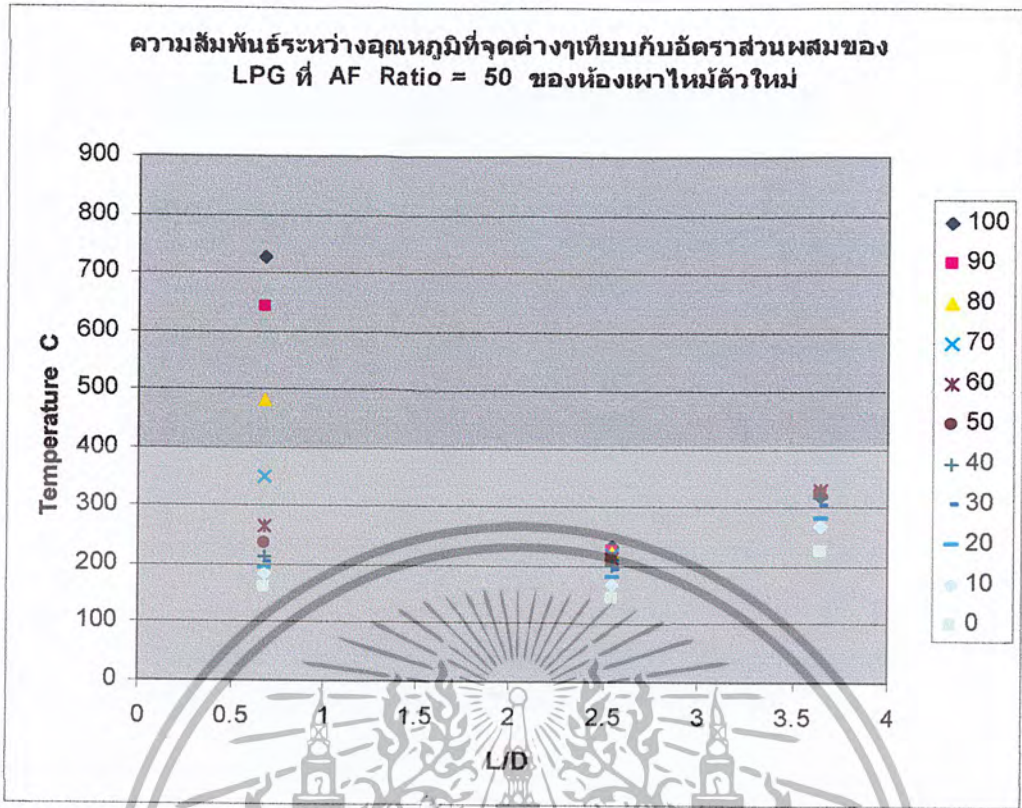


รูปที่ 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุด L/D และ สัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวใหม่ที่ AF Ratio = 40

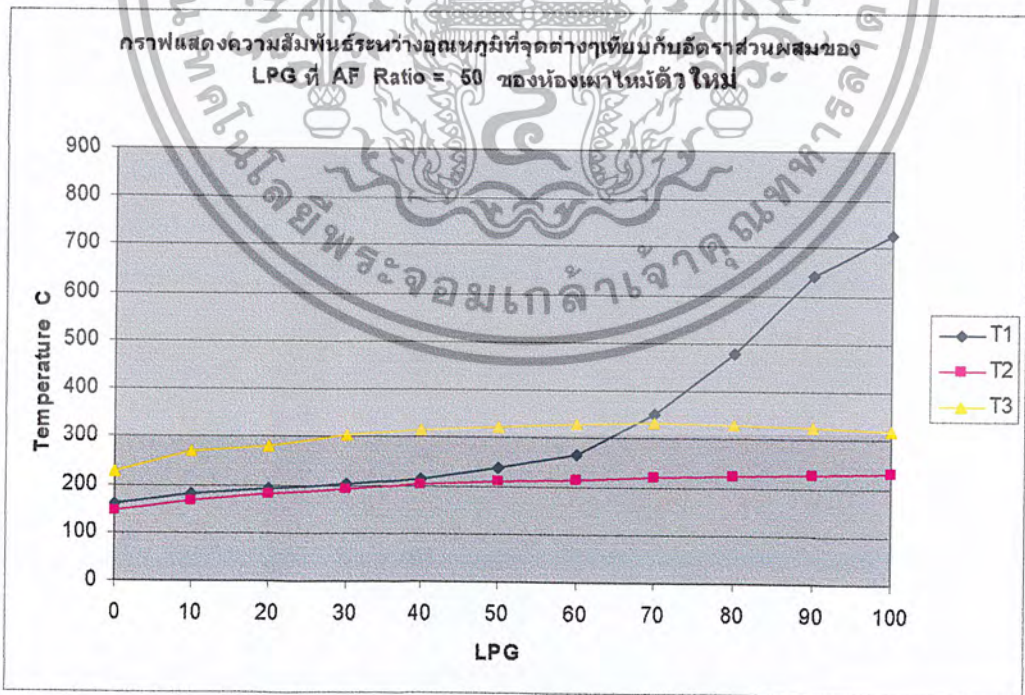


รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุดบริเวณเปลวไฟ (T_1) บริเวณคอคอด (T_2) และ บริเวณทางออก (T_3) และ สัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวใหม่ที่ AF Ratio = 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

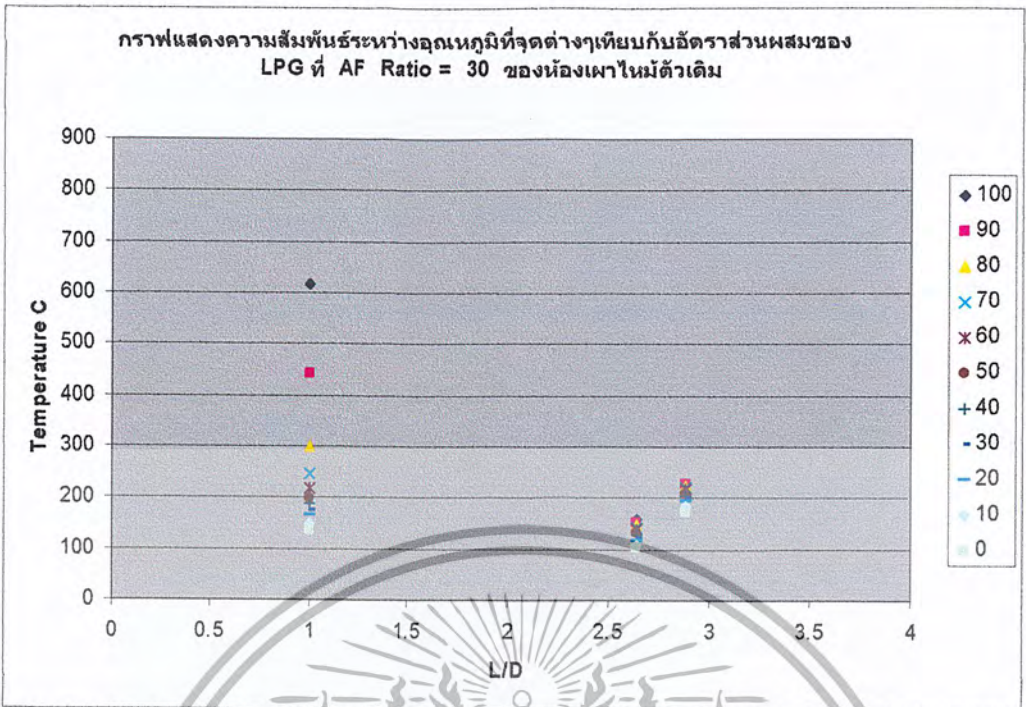


รูปที่ 6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุด L/D และ สัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวใหม่ที่ AF Ratio = 50

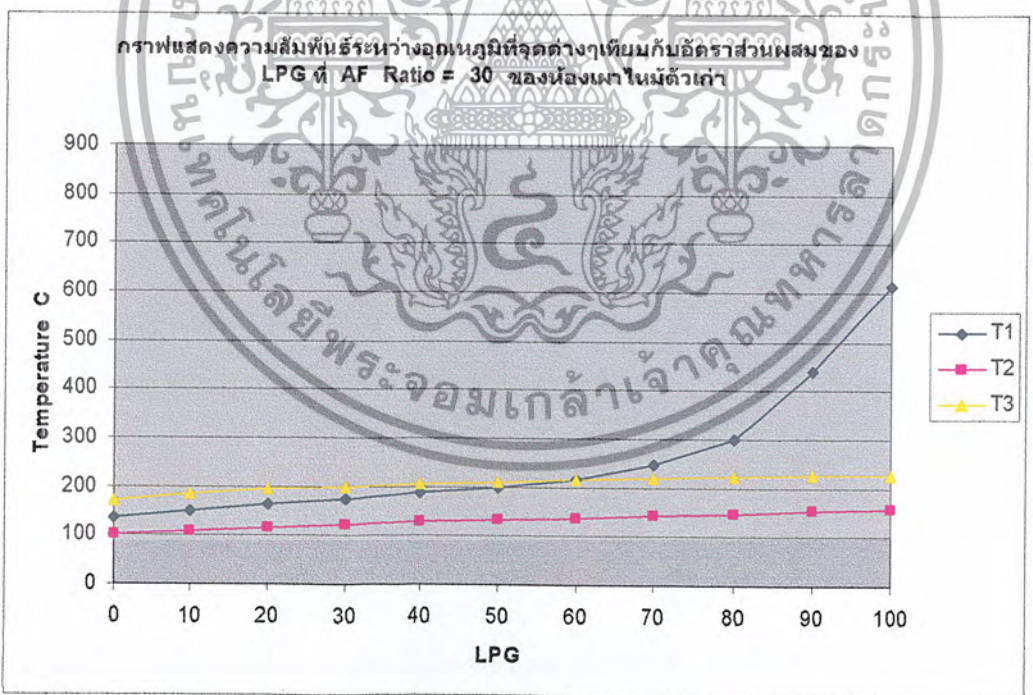


รูปที่ 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุดบริเวณเปลวไฟ (T₁) บริเวณคอคอด (T₂) และ บริเวณทางออก (T₃) และ สัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวใหม่ที่ AF Ratio = 50

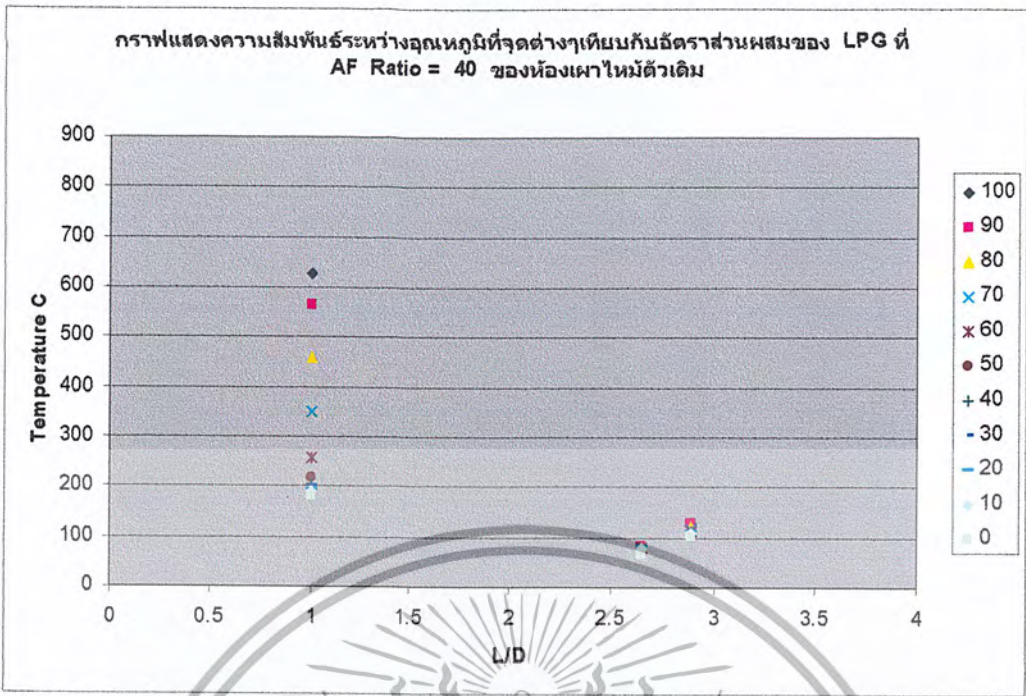
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



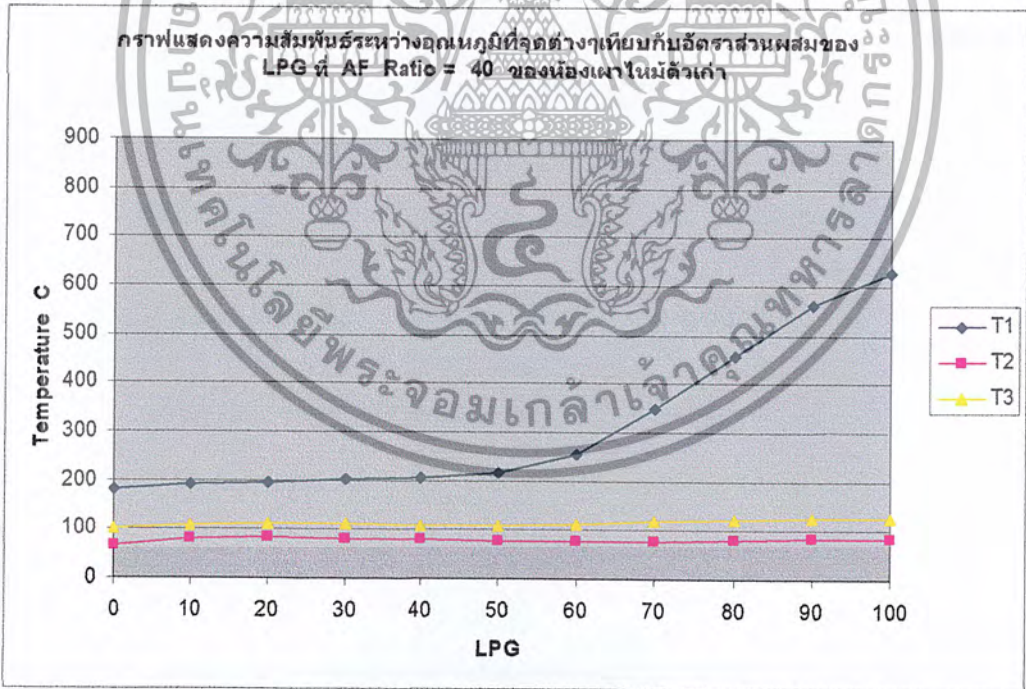
รูปที่ 6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุด L/D และ สัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวเดิมที่ AF Ratio = 30



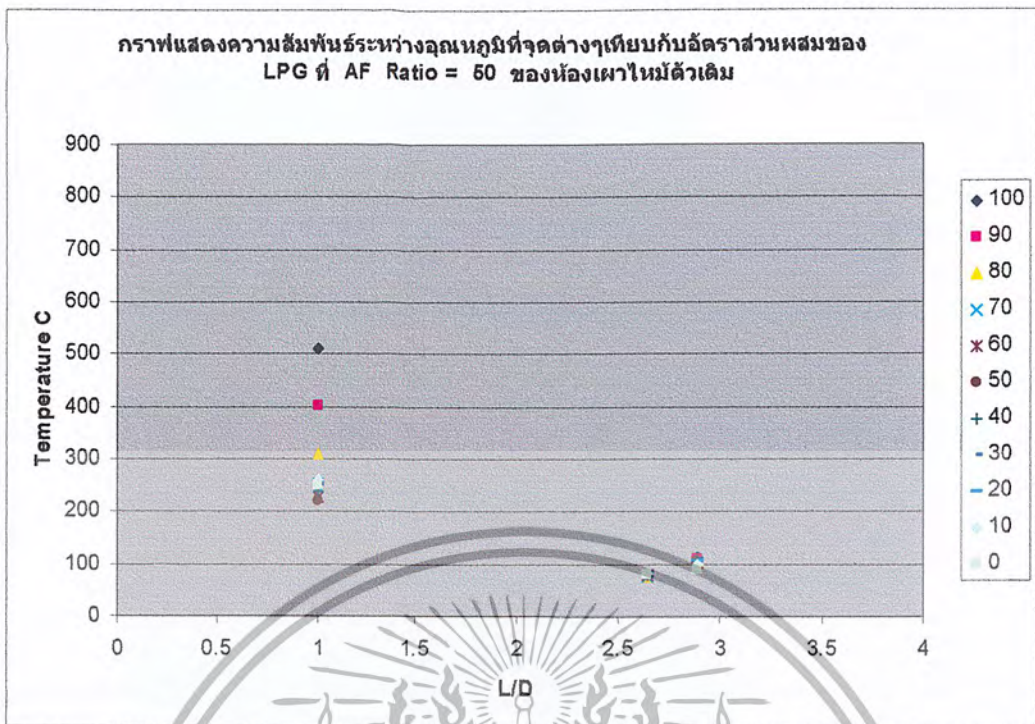
รูปที่ 6.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุดบริเวณเปลวไฟ (T₁), บริเวณกอกอด (T₂) และ บริเวณทางออก (T₃) และ สัดส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวเดิมที่ AF Ratio = 30



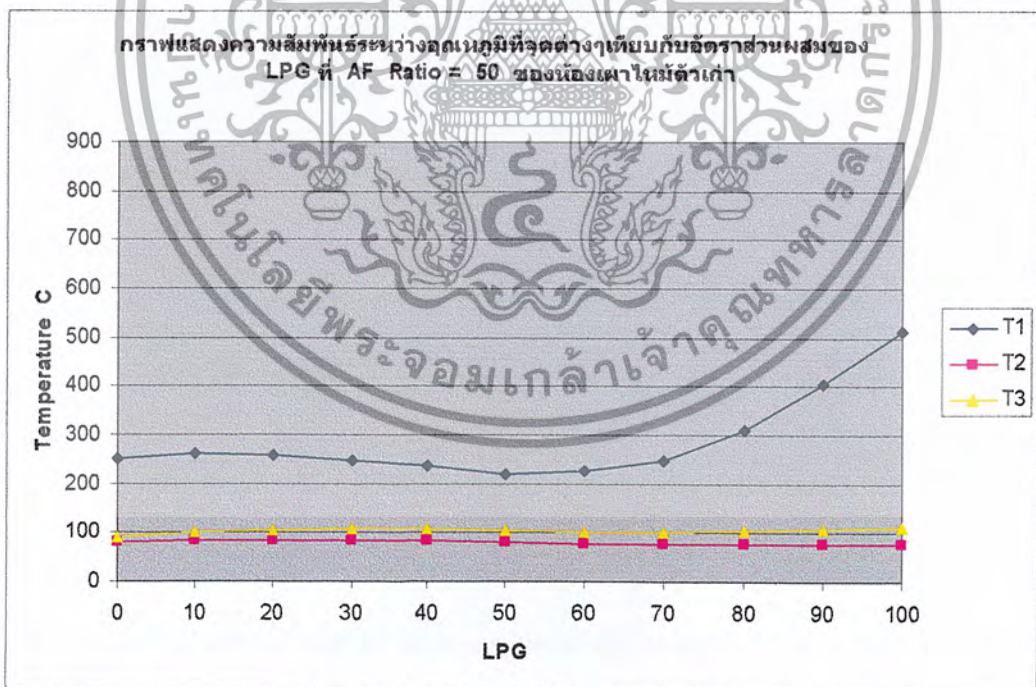
รูปที่ 6.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุด L/D และ อัตราส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวเดิมที่ AF Ratio = 40



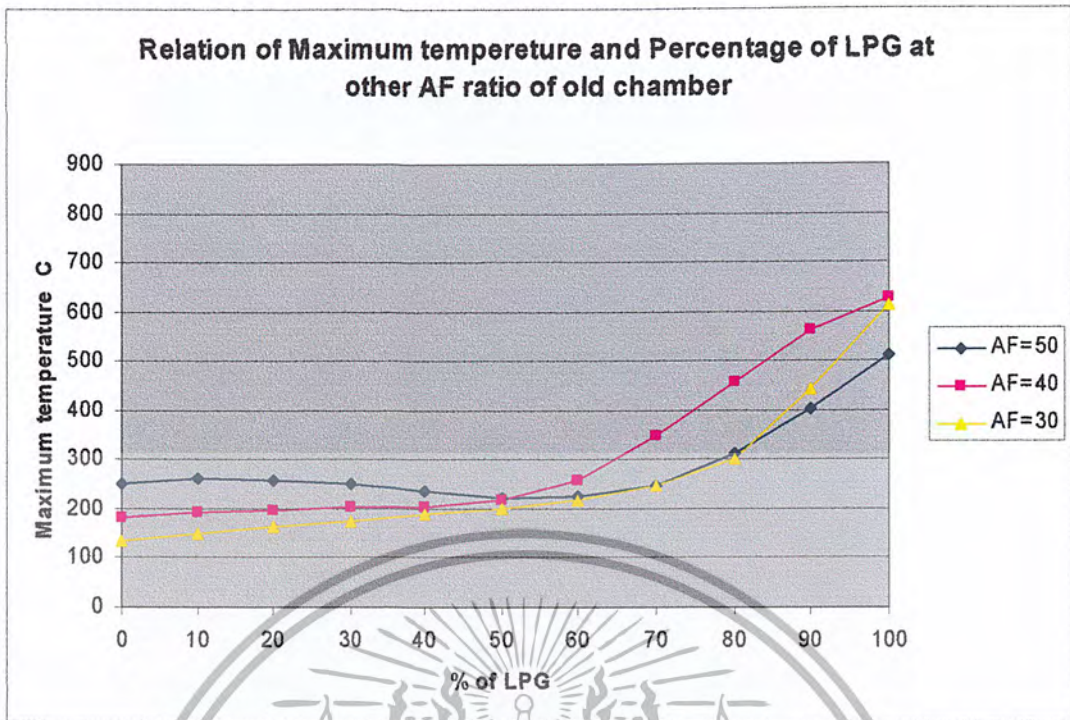
รูปที่ 6.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุดบริเวณเปลวไฟ (T₁) บริเวณกอกอด (T₂) และ บริเวณทางออก (T₃) และ อัตราส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวเดิมที่ AF Ratio = 40



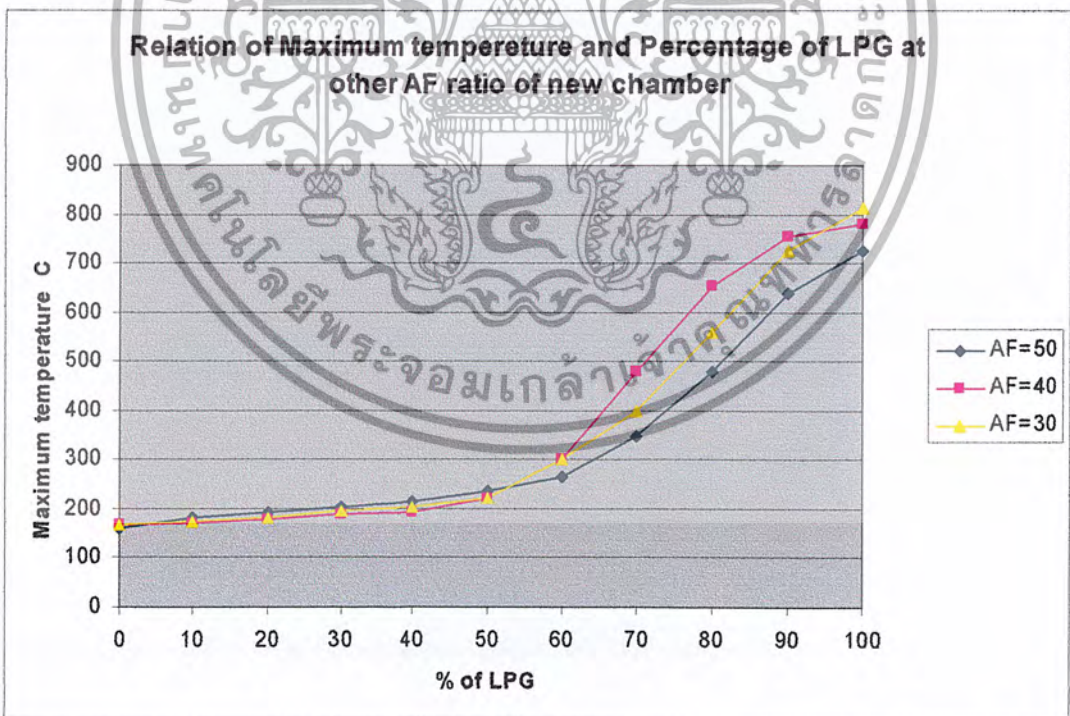
รูปที่ 6.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุด L/D และ อัตราส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวเดิมที่ AF Ratio = 50



รูปที่ 6.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุดบริเวณเปลวไฟ (T₁) บริเวณคอคอด (T₂) และ บริเวณทางออก (T₃) และ อัตราส่วนของ LPG ของห้องเผาไหม้ตัวเดิมที่ AF Ratio = 50



รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบริเวณเปลวไฟและสัดส่วนเชื้อเพลิงที่ AF ratio ต่างๆ ในห้องเผาไหม้เดิม



รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบริเวณเปลวไฟและสัดส่วนเชื้อเพลิงที่ AF ratio ต่างๆ ในห้องเผาไหม้ตัวใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

พิจารณาในรูปที่ 6.11 ถึงรูปที่ 6.16 ของห้องเผาไหม้ชุดเดิมจะพบว่าอุณหภูมิบริเวณหัวเผาจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อ AF Ratio มีค่ามากขึ้นซึ่งเป็นจริงตลอดทุกสัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงและเมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่จุดคอคอด และ อุณหภูมิที่จุดทางออกของห้องเผาไหม้จะพบว่าอุณหภูมิที่จุดคอคอดจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดทางออกทั้งที่อยู่ใกล้เปลวไฟมากกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะบริเวณคอคอดมีความเร็วของลมสูงกว่าบริเวณช่วงอื่นๆ ประกอบกับอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้เป็นอากาศเย็น (27-29 C) ก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จะถูกพาออกอย่างรวดเร็ว โดยอากาศที่ไหลเข้าซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าทำให้อุณหภูมิที่วัดได้บริเวณคอคอดจึงต่ำกว่าบริเวณอื่นๆ และเมื่อก๊าซร้อนพ้นจากคอคอดแล้วความเร็วจะลดลงทำให้มีก๊าซร้อนและอากาศเย็นมีการผสมตัวกันมากขึ้นอุณหภูมิที่วัดได้บริเวณนี้จะมีค่าสูงกว่าบริเวณคอคอด

อีกจุดหนึ่งซึ่งเป็นจุดที่น่าสนใจคือเส้นกราฟของอุณหภูมิ T_1 ของทั้ง 3 การทดลอง (AF Ratio = 30, 40, 50) จะพบว่า เมื่อเรลดอัตราส่วนผสมก๊าซ LPG ลดจะทำให้อุณหภูมิ T_1 ลดลงด้วยในช่วงแรก โดยในช่วงแรกอุณหภูมิจะลดลงอย่างมากเมื่อลด LPG ลงและเมื่อเข้าสู่ช่วงหนึ่งจะเริ่มคงที่ โดยจากกราฟช่วงอัตราการไหลของ LPG ที่เริ่มทำให้อุณหภูมิเริ่มคงที่นี้จะอยู่ในช่วง LPG ประมาณ 50 – 70 % โดยมวล ดังนั้นต้องการผสมก๊าซ LPG เข้ากับแอลกอฮอล์จะเห็นว่าควรจะมีส่วนผสมของ LPG มากกว่า 50% โดยมวลขึ้นจึงจะมีผลในเรื่องของอุณหภูมิ

พิจารณาจากกราฟของห้องเผาไหม้ที่ได้จัดสร้างขึ้นจะพบว่า จากรูปที่ 6.5 ถึงรูปที่ 6.10 นั้นลักษณะของกราฟจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับห้องเผาไหม้ตัวแรก แต่ค่าอุณหภูมิจะมีค่าสูงกว่าทั้งนี้เป็นเพราะห้องเผาไหม้ตัวแรกนั้น บางช่วงการทดลองการเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์กว่าคือ จะมีอนุภาคของเหลวของแอลกอฮอล์ที่เผาไหม้ไม่หมดจะหลุดลอยออกไปนอกห้องเผาไหม้ทั้งนี้อนุภาคที่ไม่ได้เกิดการเผาไหม้นั้นจะดูดความร้อนภายในห้องเผาไหม้ เพื่อการระเหยตัวทำให้อุณหภูมิลายในห้องเผาไหม้มีค่าต่ำซึ่งในการสร้างห้องเผาไหม้ใหม่จะมีการปรับขนาดของห้องเผาไหม้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ซึ่งผลการทดลองพบว่าปริมาณอนุภาคที่หลุดลอยออกนอกห้องเผาไหม้ลดน้อยลงอย่างมากเป็นผลทำให้อุณหภูมิที่ได้มีค่าสูงขึ้นเพราะการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นนั่นเอง

6.5 การสร้างห้องเผาไหม้ตัวใหม่และจุดที่ได้รับการแก้ไข

การสร้างห้องเผาไหม้ตัวใหม่นั้นได้ทำการปรับปรุงขนาดของห้องเผาไหม้ให้มีขนาดที่ใหญ่และยาวมากขึ้น โดยมีแนวทางการตัดสินใจดังนี้

1. เราไม่สามารถปรับปรุงหัวฉีดให้ฉีดได้เป็นอนุภาคที่เล็กกว่านี้เพราะเป็นชิ้นส่วนมาตรฐาน
2. เครื่องอัดอากาศซึ่งส่งผลต่อความเร็วของอากาศโดยตรงไม่สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วได้มากนักด้วยข้อจำกัด 2 ข้อนี้จึงมีการปรับเปลี่ยนขนาดของห้องเผาไหม้แทน
3. ทำการปรับขนาดของห้องเผาไหม้กล่าวคือสร้างห้องเผาไหม้ใหม่ให้มีช่วง Primary zone

ยาวขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาจากกราฟผลการทดลองที่ได้จะพบว่าจำนวนอนุภาคที่หลุดลอยออกไปนอกระบบมีจำนวนลดน้อยลงและอุณหภูมิบริเวณเปลวไฟมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิที่บริเวณคอคอดและบริเวณทางออกยังไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE A-1

Molar mass, gas constant, and critical-point properties

Substance	Formula	Molar mass, M kg/kmol	Gas constant, R kJ/(kg · K)*	Critical-point properties		
				Tempera- ture, K	Pressure, MPa	Volume, m ³ /kmol
Air	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Ammonia	NH ₃	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argon	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benzene	C ₆ H ₆	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromine	Br ₂	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
n-Butane	C ₄ H ₁₀	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Carbon dioxide	CO ₂	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Carbon monoxide	CO	28.011	0.2968	133	3.50	0.0930
Carbon tetrachloride	CCl ₄	153.82	0.05405	556.4	4.56	0.2759
Chlorine	Cl ₂	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Chloroform	CHCl ₃	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2403
Dichlorodifluoromethane (R-12)	CCl ₂ F ₂	120.91	0.06876	384.7	4.01	0.2179
Dichlorofluoromethane (R-21)	CHCl ₂ F	102.92	0.08078	451.7	5.17	0.1973
Ethane	C ₂ H ₆	30.070	0.2765	305.5	4.48	0.1480
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH	46.07	0.1805	516	6.38	0.1673
Ethylene	C ₂ H ₄	28.054	0.2964	282.4	5.12	0.1242
Helium	He	4.003	2.0769	5.3	0.23	0.0578
n-Hexane	C ₆ H ₁₄	86.179	0.09647	507.9	3.03	0.3677
Hydrogen (normal)	H ₂	2.016	4.1240	33.3	1.30	0.0649
Krypton	Kr	83.80	0.09921	209.4	5.50	0.0924
Methane	CH ₄	16.043	0.5182	191.1	4.64	0.0993
Methyl alcohol	CH ₃ OH	32.042	0.2595	513.2	7.95	0.1180
Methyl chloride	CH ₃ Cl	50.488	0.1647	416.3	6.68	0.1430
Neon	Ne	20.183	0.4119	44.5	2.73	0.0417
Nitrogen	N ₂	28.013	0.2968	126.2	3.39	0.0899
Nitrous oxide	N ₂ O	44.013	0.1889	309.7	7.27	0.0961
Oxygen	O ₂	31.999	0.2598	154.8	5.08	0.0780
Propane	C ₃ H ₈	44.097	0.1885	370	4.26	0.1998
Propylene	C ₃ H ₆	42.081	0.1976	365	4.62	0.1810
Sulfur dioxide	SO ₂	64.063	0.1298	430.7	7.88	0.1217
Tetrafluoroethane (R-134a)	CF ₃ CH ₂ F	102.03	0.08149	374.3	4.067	0.1847
Trichlorofluoromethane (R-11)	CCl ₃ F	137.37	0.06052	471.2	4.38	0.2478
Water	H ₂ O	18.015	0.4615	647.3	22.09	0.0568
Xenon	Xe	131.30	0.06332	289.8	5.88	0.1186

*The unit kJ/(kg · K) is equivalent to kPa · m³/(kg · K). The gas constant is calculated from $R = R_u/M$, where $R_u = 8.314$ kJ/(kmol · K) and M is the molar mass.

Source: K. A. Koba and R. E. Lynn, Jr., *Chemical Review* 52 (1955), pp. 117–236; and ASHRAE, *Handbook of Fundamentals*, (Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993), pp. 16.4 and 36.1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง A AVERAGE HEATING VALUE

ผลิตภัณฑ์	ความหนาแน่น	ความถ่วงจำเพาะ	ค่าความร้อน(calorific value gross)		
			BTU/LB	BTU/KG	BTU/L
LPG โพรเพน:บิวเทน 50:50%VOL	0.5422	0.542	21305	46978	25471
LPG โพรเพน:บิวเทน 60:40%VOL	0.5353	0.535	21343	47061	25187
LPG โพรเพน:บิวเทน 70:30%VOL	0.545	0.515	21382	47147	24903
แก๊สธรรมชาติเหลว (NGL STAB)	0.6639	0.664	22670	49900	34080
น้ำมันก๊าด (KEROSENE)	0.8036	0.804	20421	45000	36184
น้ำมันดีเซลชนิดเร็ว (HIGH SPEED DIESEL)	0.8242	0.8246	19361	42300	35186
น้ำมันดีเซลชนิดช้า (LOW SPEED DIESEL)	0.8692	0.8697	19201	42336	36798
น้ำมันเตาชนิดที่ 1 (HFO 600)	0.9390	0.9396	18984	41859	39305
น้ำมันเตาชนิดที่ 4 (HFO 1500)	0.9510	0.95421	18894	41661	39619
น้ำมันเตาชนิดที่ 5 (HFO 2000)	0.9415	0.925	18497	39300	38399
น้ำมันเตาชนิดที่ 6 (HFO 26000)	-	0.926	19075	42000	38940
ก๊าซธรรมชาติ (NATURAL GAS)	-	-	19518	43030	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง B องค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซธรรมชาติ

องค์ประกอบ (%)	ก๊าซธรรมชาติชนิดแห้ง	ก๊าซธรรมชาติชนิดชื้น
C_nH_{2n+2}	75 – 92.5	99
C_mH_n	0 – 0.2	-
CO_2	-	0.3
O_2	0.1 – 0.8	-
N_2	0 – 0.05	-
ค่าความร้อน(kJ/m^3)	37800 – 39900	43680 - 50400

หมายเหตุ C_nH_{2n+2} คือ มีเทน CH_4 , อีเทน C_2H_6 , โพรเพน C_3H_8 เป็นต้น

C_mH_n คือ เอทิลีน C_2H_4 , โพรพิลีน C_3H_6 เป็นต้น

ตาราง C คุณสมบัติขององค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติ

องค์ประกอบ	สูตรโมเลกุล	ค่าความร้อน (kJ/m^3)	ความถ่วงจำเพาะ (เทียบกับอากาศ)	ความหนาแน่น (kg/m^3)
มีเทน	CH_4	39984	0.554	0.7168
อีเทน	C_2H_6	70770	1.049	1.356
โพรเพน	C_3H_8	101472	1.550	2.004
เอทิลีน	C_2H_4	63630	0.9750	1.2604
โพรพิลีน	C_3H_6	93870	1.481	1.9370
คาร์บอนไดออกไซด์	CO_2	-	1.5291	1.9769
ออกซิเจน	O_2	-	1.1053	1.4290
ไนโตรเจน	N_2	-	0.9673	1.2505

ความหนาแน่นของอากาศแห้งในสภาวะมาตรฐาน = 1.293 kg/m^3

บรรณานุกรม

- 1). เชื้อ ชูขำ และ อุส่าห์ จิลากรณ์, “เครื่องยนต์สันดาปภายใน”, 2542
- 2). สำเริง จักรใจ , “การเผาไหม้”, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- 3). มนต์ชัย กาทอง เอกสารวิชาเทอร์โมไดนามิกส์ 2 ,2537
- 4). Yunus A. CenGel and Michael A. Boles , “Thermodynamic” 3th ,McMacGraw-Hill Book Company
- 5). M.M. El-Wakil, “Power Plant Technology”, McMacGraw-Hill Book Company ,1960



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้