

พฤติกรรมการเผาไหม้ในหัวเผาที่มีวัสดุพรุนและตัวสร้างการหมุนควง
สำหรับเชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำ

COMBUSTION BEHAVIORS IN POUROUS MEDIA AND SWIRLER BURNER
FOR GAS HAVING LOW CALORIFIC VALUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-030-135

พฤติกรรมการณ์เผาไหม้ในหัวเผาที่มีวัสดุพรุนและตัวสร้างการหมุนควง
สำหรับเชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำ

COMBUSTION BEHAVIORS IN POUROUS MEDIA AND SWIRLER BURNER
FOR GAS HAVING LOW CALORIFIC VALUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-030-135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMBUSTION BEHAVIORS IN POUROUS MEDIA AND SWIRLER BURNER
FOR GAS HAVING LOW CALORIFIC VALUE



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

2017

KMITL-2017-EN-M-030-135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ พฤติกรรมการเผาไหม้ในหัวเผาที่มีวัสดุพอร์นและตัวสร้างการหมุนควงสำหรับเชื้อเพลิง
ก๊าซค่าความร้อนต่ำ
Thesis Title Combustion Behaviors in Porous Media and Swirler Buner for Gas Having
Low Calorific Value
นักศึกษา นางสาวตฤษฐพร แก้วสุก
รหัสประจำตัว 55610908
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-030-135

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ประสาน	สถิตย์เรืองศักดิ์	
รศ.ดร.ชินรักษ์	เชียรพงษ์	
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	
ผศ.ดร.สุตาภัทร	แคว้นเขาเม็ง	
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ห้อง HM-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร. คมตัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกนอกระบบโดยไม่ได้รับอนุญาต
คนบตี คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมการเผาไหม้ในหัวเผาที่มีวัสดุพอร์นและตัวสร้างการหมุน ควงสำหรับเชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำ
นักศึกษา	นางสาวตฤณฐพร แก้วสุก
รหัสประจำตัว	55610908
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำในวัสดุพอร์น โดยการนำก๊าซหุงต้มมาผสมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเป็นเชื้อเพลิงตัวอย่างในการทดสอบ โดยการศึกษาลักษณะการเผาไหม้ในวัสดุพอร์น อิทธิพลของมุม Swirl ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะในการเผาไหม้ อิทธิพลของการปรับเปลี่ยนปริมาณเปอร์เซ็นต์ของอากาศที่ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ และอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลเพื่อศึกษาผลกระทบต่อสมรรถนะการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำ จากการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำในวัสดุพอร์นโดยเทียบกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม อัตราการไหลเดียวกัน คือ 4.781×10^{-5} kg/s 7.172×10^{-5} kg/s และ 9.652×10^{-5} kg/s ที่อัตราส่วนสมมูล 0.6 พบว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างมีเสถียรภาพให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูง และเกิดการถ่ายเทความร้อนบริเวณวัสดุพอร์นได้ดี สำหรับการศึกษาอิทธิพลของมุม Swirl ซึ่งจะใช้ที่ 24 องศา และ 45 องศา การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรุนแรงที่มุมองศา Swirl ที่ 45 องศา เปลวไฟยังมีลักษณะที่สั้นลงเนื่องจากการไหลหมุนควงทำให้เปลวไฟขยายตัวตามแนวรัศมีและอัตราการผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่รุนแรงขึ้น นอกจากนี้ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากกระแสการไหลของอากาศส่วนที่สองในแนวรัศมีไหลเข้ามาปะทะกับส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศส่วนที่หนึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่มีเสถียรภาพเมื่อพิจารณาผลจากการปรับเปลี่ยนปริมาณเปอร์เซ็นต์ของอากาศที่ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ที่ 70% 80% 100% 120% 150% พบว่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่ง และส่งผลต่อความร้อนในห้องเผาไหม้ ซึ่งความร้อนนั้นเกิดจากการถ่ายเทแบบการพาเนื่องจากส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนที่หนึ่งมีความเร็วสูงขึ้น ทำให้ความร้อนถูกถ่ายเทออกมาจากวัสดุพอร์นกับก๊าซไอเสียมากขึ้น จากการทดลองจึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งมีผลต่อการเผาไหม้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6, 0.5 และ 0.4 พบว่าการเพิ่มอากาศส่วนเกินส่งผลทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ลดลงเนื่องจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ในหัวเผาวัสดุพอร์น นอกจากนี้ยังส่งผลให้อุณหภูมิก๊าซไอเสียมีค่าต่ำเนื่องจากการสูญเสียความร้อนให้กับปริมาณอากาศที่เหลือจากการเผาไหม้

Thesis	Combustion Behaviors in Pours Media and Swirler Burner for Gas Having Low Calorific Value
Student	Miss, Tritthaporn Kaewsook
Student ID.	55610908
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Jaruwat Charoensuk

ABSTRACT

This research presents combustion of fuel with low heating value (FLHV) in a porous media. The calorific value of the fuel was adjusted by mixing liquid petroleum gas (LPG) with carbon dioxide. Three factors influencing performance of the burner were investigated; swirl angle of secondary air, percentage of premixed air and finally total equivalent ratio. The experiment were conducted at fuel flow rate of 4.871×10^{-5} kg/s, 7.172×10^{-5} kg/s and 9.652×10^{-5} kg/s were at equivalent ratio 0.6. From experiments, it was found that the FLHV combustion was stable on porous burner but the temperature of exhaust gas was lower than LPG. When swirl number was varied by adding swirl blade having angle at 24° and 45° , more intense combustion took place at swirl angle 45° with shorter flame than those observed with 24° swirl angle. When %Premixed of combustion air was varied at 70%, 80%, 100%, 120% and 150%, it was found that the temperature of flue gas had increased while CO emission had decreased as mixing was promoted inside porous domain. In addition, effect of equivalence ratio variation, at 0.6, 0.5 and 0.4, to flue gas temperature and carbon monoxide were reported decreased with reducing equivalence ratio. It was found that CO emission had decreased when increasing equivalence ratio. At equivalence ratio of 0.4 the combustion is stable with minimum CO emission.

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งเงินทุนอุดหนุนการวิจัย จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 ทำให้งานวิจัยดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยคำแนะนำ ความช่วยเหลือ และการชี้แนะแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข

ขอขอบคุณ ดร.ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล ที่ให้การช่วยเหลือในการทำงานวิจัยรวมทั้งการทำการทดลองต่างๆในการทำวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณนักศึกษาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ช่วยเหลือในการสร้างชุดทดลองและช่วยเหลือในการเก็บผลการทดลองจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนและทำวิจัยของผู้วิจัยรวมถึงเป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาในการฟันฝ่าปัญหาและอุปสรรคต่างๆเสมอมาและขอขอบคุณผู้ที่ให้การสนับสนุนทุกท่านที่มีได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ด้วย

ถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้ งานวิจัยฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันมีค่าจากงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอำนวยการความสุขสวัสดิ์จึงมีแต่ทุกท่าน

นางสาวตฤณพร แก้วสุก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	6
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	15
3.1 การเผาไหม้.....	15
3.1.1 การเผาไหม้ทางทฤษฎี.....	15
3.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้.....	16
3.1.3 เสถียรภาพเปลวไฟ.....	17
3.2 เชื้อเพลิงก๊าซ.....	19
3.2.1 คุณสมบัติของก๊าซปิโตรเลียมเหลว.....	19
3.3 การเผาไหม้ในวัสดุพอรุน.....	20
3.4 การทำให้เปลวไฟเสถียร.....	24
3.4.1 การเสถียรของเปลวไฟบุนเซน.....	25
3.4.2 วิธีล่อเปลวไฟ.....	26
3.4.3 วิธีขวางกั้น.....	27
3.4.3 วิธีไหลหมุนเวียนย้อนกลับ.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว.....	28
3.5.1 ความรุนแรงของการหมุนวนเป็นเกลียว.....	29
3.5.2 การไหลวนย้อนกลับตามแนวแกน.....	29
3.5.3 Vortex Breakdown.....	30
3.5.4 ลักษณะของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวที่ต้องการในการเผาไหม้.....	31
3.5.5 ตัวสร้างกระแสของการหมุนวนเป็นเกลียว.....	31
3.6 มลพิษ.....	32
3.6.1 ผลกระทบของมลพิษ.....	32
3.6.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน.....	33
3.6.2.1 Thermal NO _x	34
3.6.2.2 Prompt NO _x	35
3.6.2.3 Fuel NO _x	36
3.6.2.4 NO _x ที่เกิดจาก N ₂ O.....	36
3.6.3 คาร์บอนมอนอกไซด์.....	37
บทที่ 4 การคำนวณและการออกแบบ.....	38
4.1 เชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลวผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	38
4.2 อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลวผสมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์....	39
4.3 อัตราการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่.....	39
4.4 ปริมาณอากาศและอากาศส่วนเกิน.....	40
4.5 เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน.....	40
4.6 การวัดค่าวัสดุพูน.....	42
4.7 การออกแบบอุปกรณ์สร้างกระแสการหมุนวนเป็นเกลียว.....	43
4.7.1 การคำนวณค่าความรุนแรงของการไหลหมุนวนเป็นเกลียว.....	43
บทที่ 5 เงื่อนไขและอุปกรณ์การทดลอง.....	45
5.1 เงื่อนไขการทดลอง.....	45
5.1.1 ชุดการทดลองสำหรับการทดลองภายใต้การควบคุมอากาศในการเผาไหม้.....	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 อุปกรณ์ในการทดลอง	47
5.2.1 ห้องเผาไหม้.....	47
5.2.2 กล้องลำเลียงอากาศส่วนที่สอง.....	49
5.2.3 ตัวสร้างกระแสการหมุนวนเป็นเกลียว.....	50
5.2.4 หัวเผาวัสดุพอรุน	50
5.2.5 หัวฉีดเชื้อเพลิง.....	51
5.2.6 ระบบป้อนเชื้อเพลิง	52
5.2.7 อุปกรณ์การวัดและบันทึกผล.....	53
5.2.7.1 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	53
5.2.7.2 การวัดก๊าซไอเสีย.....	54
5.2.7.3 อุปกรณ์วัดแรงดัน.....	54
5.2.7.4 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล.....	55
บทที่ 6 ผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง.....	57
6.1 การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำในหัวเผาวัสดุพอรุน.....	57
6.1.1 ลักษณะของเปลวไฟ.....	57
6.1.2 การกระจายอุณหภูมิ.....	59
6.1.3 ปริมาณก๊าซไอเสีย.....	63
6.2 อิทธิพลของการปรับเปลี่ยนมุมของอุปกรณ์สร้างกระแสการหมุนวน	64
6.2.1 ลักษณะของเปลวไฟ.....	65
6.2.2 การกระจายอุณหภูมิ.....	66
6.2.3 ปริมาณมลพิษ.....	70
6.3 อิทธิพลของปริมาณอากาศซึ่งใช้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้.....	71
6.3.1 ลักษณะของเปลวไฟ.....	71
6.3.2 การกระจายอุณหภูมิ.....	74
6.3.3 ปริมาณมลพิษ.....	77
6.4 อิทธิพลการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการเผาไหม้	78

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.4.1 ลักษณะของเปลวไฟ.....	78
6.4.2 การกระจายอุณหภูมิ.....	78
6.4.3 ปริมาณมลพิษ.....	81
บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง.....	83
7.1 สรุปผลการทดลอง.....	83
7.1.1 การศึกษาลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำในวัสดุพูน.....	83
7.1.2 การศึกษาผลกระทบของการปรับเปลี่ยนมุมของ Swirl ต่อสมรรถนะการเผาไหม้ ของเชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำ.....	83
7.1.3 การศึกษาอิทธิพลจากการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศที่ผสมกับเชื้อเพลิง ก่อนการเผาไหม้.....	84
7.1.4 อิทธิพลการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะ การเผาไหม้.....	84
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	85
เอกสารอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก. แบบสังผลิต.....	92
ภาคผนวก ข. งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	96
ประวัติผู้เขียน.....	108

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางแสดงค่าความร้อนและเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิด.....	2
2.1 ข้อสรุปย่านการใช้งานที่เหมาะสมจากงานวิจัยที่ผ่านมา.....	14
3.1 คุณสมบัติของก๊าซหุงต้ม.....	20
3.2 คุณสมบัติของ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) อะลูมินาออกไซด์ Al_2O_3 และเซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO_2).....	24
4.1 เงื่อนไขเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ.....	40
4.2 เงื่อนไขเชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้สำหรับการทดลองภายใต้การควบคุมอากาศในการเผาไหม้.....	42
4.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองจากการคำนวณค่า Swirl Number.....	44
5.1 เงื่อนไขการทดลองและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองภายใต้การควบคุมอากาศในการเผาไหม้.....	48



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 (a) หัวฉีดเชื้อเพลิงแบบ 3 หัว (b) หัวฉีดเชื้อเพลิงแบบหัวเดียว.....	8
2.2 (a) การเกิดปฏิกิริยาเมื่อ Premixed 30% (b) การเกิดปฏิกิริยาเมื่อ Non-Premixed.....	9
2.3 ลักษณะของการนำหัวเผาวัสดุพอรมาประยุกต์ใช้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ.....	10
2.4 ลักษณะการเผาไหม้ในวัสดุพอร.....	10
2.5 การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ 0.366 0.630 0.978 1.427.....	12
3.1 แสดงโปรไฟล์ความเร็วขณะเกิดเปลวไฟย้อนกลับ.....	18
3.2 แสดงโปรไฟล์ความเร็วขณะเกิดเปลวไฟหลุดลอย.....	18
3.3 กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในการเผาไหม้วัสดุพอร.....	21
3.4 การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพอร.....	22
3.5 อุณหภูมิสูงสุดจากการเผาไหม้.....	23
3.6 การเสถียรของเปลวไฟตะเกียงบุนเซนใกล้เคียงบุนเซน.....	25
3.7 อิทธิพลของค่า du_{sw} / dr ต่อการเสถียรของเปลวไฟตะเกียงบุนเซน.....	26
3.8 วิธีล่อเปลวไฟโดยใช้แก๊สเฉื่อยอุณหภูมิสูง.....	26
3.9 การทำให้เปลวไฟเสถียรด้วยวัสดุขวางกั้น.....	27
3.10 การทำให้เปลวไฟเสถียรด้วยวิธีเจ็ทไหลสวนทาง.....	27
3.11 การทำให้เปลวไฟเสถียรด้วยวิธีการไหลหมุนวนย้อนกลับ.....	28
3.12 การไหลแบบหมุนวนรุนแรง.....	28
3.13 เส้นการไหลแบบหมุนวนรุนแรง.....	30
3.14 ขนาดของวอร์เทกซ์ที่ค่า Swirl Number ต่างกัน.....	30
3.15 สนามการไหลที่เกิดจาก Swirl.....	30
3.16 ลักษณะการไหลที่ Swirl Number ต่างกัน.....	31
3.17 Swirl แบบ Axial Type และ Radial Type.....	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19 ความเข้มข้นที่สมดุล N_2O ที่มีส่วนประกอบของออกซิเจนในก๊าซที่แตกต่างกัน.....	33
3.20 ผลการคำนวณและผลการทดลองหาค่า Thermal NO_x และ Prompt NO_x	36
4.1 การทดลองหาค่าความพรุน.....	43
5.1 ไดอะแกรมชุดทดลองกรณีมีตัวสร้างกระแสการหมุนวนเป็นเกลียว	46
5.2 ไดอะแกรมชุดทดลองกรณีไม่ติดตั้งตัวสร้างกระแสการหมุนวนเป็นเกลียว.....	47
5.3 ห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลอง	49
5.4 กล้องลำเลียงอากาศส่วนที่สอง	50
5.5 Swirl	50
5.6 หัวเผาวัสดุพรุนแบบทรงกระบอกเจาะรู.....	51
5.7 ส่วนประกอบของหัวฉีดเชื้อเพลิง	52
5.8 ระบบป้อนเชื้อเพลิงอากาศ	53
5.9 เทอร์โมคัปเปิ้ลประเภทเคและหน่วยแสดงผล.....	53
5.10 เครื่องวัดก๊าซ Testo รุ่น 350 XL.....	54
5.11 อุปกรณ์วัดแรงดัน.....	54
5.12 อุปกรณ์วัดแรงดันของอากาศ.....	55
5.13 อุปกรณ์วัดแรงดันจากถังปิโตรเลียมเหลว.....	55
5.14 อุปกรณ์วัดแรงดันจากถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	55
5.15 อุปกรณ์ปรับอัตราการไหล.....	56
6.1 ลักษณะเปลวไฟของการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำเปรียบเทียบกับ กับการเผาไหม้ก๊าซหุงต้ม.....	58
6.2 การกระจายอุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มในวัสดุพรุน ที่อัตราส่วนสมมูล 0.6	60
6.3 พลศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนรอบหัวเผา.....	60
6.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ตามระดับความสูง ของก๊าซเชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำ.....	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.5 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ตามระดับความสูงของก๊าซเชื้อเพลิงก๊าซ หุงต้ม	62
6.6 ลักษณะการแพร่กระจายของอุณหภูมิในหัวเผาวัสดุพูน.....	62
6.7 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เปรียบเทียบระหว่างการเผาไหม้ก๊าซหุงต้มและการเผาไหม้เชื้อเพลิง ที่มีค่าความร้อนต่ำ	64
6.8 ลักษณะของเปลวไฟของการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำในกรณีที่ไม่มี Swirl และที่ Swirler ที่มุม 24° และ 45° ตามลำดับ.....	65
6.9 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิเปรียบเทียบระหว่างการเผาไหม้ที่ไม่มีการติดตั้ง Swirl และมี การติดตั้ง Swirl ที่มุม Swirl 24 และ 45 องศา.....	68
6.10 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำในกรณีไม่มีการ ติดตั้ง Swirler ที่มุม 24, 25 องศา ตามลำดับ	69
6.11 ผลการทดลองจากงานวิจัย Gao.....	70
6.12 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เปรียบเทียบการเผาไหม้ระหว่างกรณีที่มีการติดตั้ง Swirler ที่มุม 24 องศา และ 45 องศา และกรณีการเผาไหม้ที่ไม่มีการติดตั้ง Swirl.....	71
6.13 ลักษณะของเปลวไฟเมื่อทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ ที่ 70%, 80%, 100%, 120%, 150% ของปริมาณอากาศทั้งหมด.....	73
6.14 การกระจายอุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำ เมื่อทำการปรับเปลี่ยน เปอร์เซ็นต์การผสมก่อนการเผาไหม้	75
6.15 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำเมื่อทำการ ปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้.....	76
6.16 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำโดยการปรับเปลี่ยน ปริมาณอากาศผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้	77
6.17 ลักษณะเปลวไฟของการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำเมื่อทำการปรับเปลี่ยน อัตราส่วนสมมูลที่ 0.6, 0.5, 0.4 ตามลำดับ.....	79
6.18 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิตามระดับความสูงที่ตำแหน่ง $r/D = 0$ และ $r/D = 2.78$ สำหรับ กรณีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูล 0.6, 0.5, 0.4 ตามลำดับ.....	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.19 ลักษณะของการกระจายอุณหภูมิในกรณีปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6, 0.5 และ 0.4 ตามลำดับ.....	81
6.20 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำโดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6, 0.5 และ 0.4 ตามลำดับ.....	82
7.1 ลักษณะของเปลวไฟที่ดีและมีเสถียรภาพตามเป้าหมายของงานวิจัย.....	85
ก1 Schematic Diagram.....	93
ก2 Swirl Box.....	93
ก3 ปล่องจ่ายอากาศส่วนที่สอง.....	94
ก4 ท่อเชื้อเพลิง.....	94
ก5 Swirl ที่มุม 45 องศา.....	95
ก6 Swirl ที่มุม 24 องศา.....	95

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเครื่องยนต์กังหันแก๊สที่กำลังผลิต 15 – 300 kW ซึ่งจัดเป็นเครื่องยนต์กังหันแก๊สขนาดเล็ก [19] ได้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่การศึกษาออกแบบจนถึงการสร้างเครื่องยนต์กังหันแก๊สขนาดเล็กต้นแบบที่กำลังผลิต 60 kW [20-25] โดยมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาเครื่องยนต์กังหันแก๊สขนาดเล็กให้สามารถนำไปใช้ได้จริงสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าในระดับชุมชน เนื่องจากเครื่องยนต์กังหันแก๊สขนาดเล็กนั้นเป็นเครื่องยนต์ที่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยเหตุเพราะเครื่องยนต์กังหันแก๊สมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าและสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย โดยปกติเครื่องยนต์กังหันแก๊สนั้นสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงก๊าซ ซึ่งเมื่อเผาไหม้จะไม่มีเศษตกค้างในรูปของแข็ง เพื่อหลีกเลี่ยงอันตรายที่จะเกิดกับชิ้นส่วนของกังหันแก๊ส เชื้อเพลิงที่พบเห็นทั่วไป ได้แก่ ก๊าซหุงต้ม, ก๊าซธรรมชาติ, โพรเพน, น้ำมันดีเซล, น้ำมันเบนซิน และ ก๊าซสังเคราะห์จากชีวมวล [19]

จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกใน 10 ปี (พ.ศ 2555-2564) ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน [2] ซึ่งมุ่งเป้าไปที่การใช้พลังงานจากชีวมวลซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมจึงทำให้มีชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการพัฒนาเครื่องยนต์กังหันแก๊สขนาดเล็กเพื่อผลิตไฟฟ้าในระดับชุมชนจึงมุ่งเน้นในการนำเชื้อเพลิงจากชีวมวลมาใช้ในการเผาไหม้เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องยนต์กังหันแก๊สขนาดเล็กซึ่งตอบสนองเป้าหมายการใช้พลังงานในระดับชุมชน

ในการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ในเครื่องยนต์กังหันแก๊สนั้น เราจำเป็นต้องทำให้อยู่ในรูปของก๊าซเชื้อเพลิง (Gasifier) หรือก๊าซสังเคราะห์ (Synthetic gas) ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการเผาไหม้โดยการนำเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มผสมด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเชื้อเพลิงตัวอย่างในการศึกษาเพื่อลดขั้นตอนของกรวิจัย เนื่องจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นมีค่าที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม ดังนั้นการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาเจือจางเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มจึงทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจากชีวมวลซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [7] โดยค่าความร้อนของชีวมวลที่นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงค่าความร้อนและเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิด [29]

ชนิด	ชีวมวล	ค่าความร้อน (LHV) (MJ/kg)
อ้อย	ชานอ้อย	14.40
	ยอดและใบ	17.39
ข้าว	แกลบ	14.27
	ฟางข้าว	10.24
ถั่วเหลือง	ต้น/เปลือก/ใบ	19.44
	ซัง	18.04
ข้าวโพด	ลำต้น	18.04
	ทะลายเปล่า	17.86
ปาล์มน้ำมัน	ใบ	17.62
	กะลา	18.46
	ก้าน	9.83
มันสำปะหลัง	ลำต้น	18.42
	เหง้า	18.42
มะพร้าว	ก้าน	15.40
	กาบ	16.23
	กะลา	17.93

ที่ผ่านมาในกลุ่มวิจัยเครื่องยนต์กังหันก๊าซของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนั้นได้มีการวิเคราะห์หวัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่มีกำลังผลิต 60 kW โดยวิธีการออฟติไมเซชันสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมของเครื่องยนต์ ที่ประสิทธิภาพความร้อน 25% เครื่องยนต์จะต้องการปริมาณความร้อน 240 kW [7] และพบว่าอัตราส่วนของเชื้อเพลิงตัวอย่างที่ 40% โดยปริมาตรของก๊าซเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม และ 60% โดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะทำให้ค่าความร้อนซึ่งพิจารณาจากค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (LHV) มีค่าเท่ากับ 18.4 MJ/kg ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงจากชีวมวล ดังแสดงในตารางที่ 1.1 จากงานวิจัยหลายๆงานวิจัยเรียกเชื้อเพลิงที่ค่าความร้อนอยู่ในย่านเหล่านี้ว่าเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ [9-11] ซึ่งจากเงื่อนไขของการวิเคราะห์การวิเคราะห์หวัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กนั้นจึงทำให้

ปัญหาความเสถียรภาพของการเผาไหม้ การหลุดลอยของเปลวไฟ เช่น ในปี 2554 เจซนิฟิช และคณะ ได้ทำการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำปรากฏว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของก๊าซไนโตรเจน (N₂) จะส่งผลต่อความเสถียรภาพของเปลวไฟ เนื่องจากก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำนั้นเมื่อนำมาใช้ในการเผาไหม้ทำให้ต้องจ่ายก๊าซเข้าสู่ห้องเผาไหม้ในปริมาณมากกว่าเชื้อเพลิงที่ความร้อนสูง [23] จากการศึกษาพบว่าการเผาไหม้นั้นอาศัยปัจจัยหลัก ได้แก่ เชื้อเพลิงและอากาศ ซึ่งในการเผาไหม้นั้นจะมีเกิดการมีเสถียรภาพนั้นการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม

ลักษณะของเปลวไฟที่ติดนั้นโดยทั่วไปจะเป็นเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ มีเสถียรภาพ และมีอุณหภูมิสูง อนุภาคของคาร์บอนหลงเหลืออยู่น้อยที่สุด โดยหากสังเกตลักษณะทางกายภาพของเปลวไฟจะเห็นเปลวเปลวไฟสีฟ้า นอกจากนี้เปลวไฟเกิดเผาไหม้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าการเผาไหม้โดยการใช้หัวเผาวัสดุพอร์ซเลนซึ่งทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างมีเสถียรภาพ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นภายในโพรงวัสดุพอร์ซเลน ทำให้ก๊าซไอเสียกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งโครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุพอร์ซเลนมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดีซึ่งทำให้การเผาไหม้มีการหมุนเวียนความร้อนในตัวเองจึงทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ เพิ่มความเข้มข้นในการเผาไหม้และขยายขอบเขตการเผาไหม้ให้สามารถใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำได้ [27-28] นอกจากนี้การเพิ่มสมรรถนะการเผาไหม้สำหรับการใช้เชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นยังสามารถแก้ไขได้ โดยการปรับปรุงพลศาสตร์ของอากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสมผสานระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง โดยการใช้ตัวสร้างกระแสหมุนวนซึ่งทำให้การผสมผสานระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงดีขึ้น [11],[16]

จากข้อดีของการเผาไหม้ในวัสดุพอร์ซเลนและการใช้ตัวสร้างกระแสของการหมุนวน ในงานวิจัยฉบับนี้จึงได้มีการนำเอาวัสดุพอร์ซเลนมาประยุกต์ใช้กับหัวเผาแบบอากาศกับเชื้อเพลิงผสมก่อนการเผาไหม้ และได้ติดตั้งตัวสร้างกระแสการหมุนวนในแนวรัศมี ภายใต้การสันนิษฐานว่าการเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างมีเสถียรภาพ เปลวไฟมีลักษณะสั้น เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น การปลดปล่อยมลพิษต่ำ ให้การกระจายตัวอุณหภูมิก๊าซไอเสียในห้องเผาไหม้สม่ำเสมอ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำโดยใช้หัวเผาวัสดุพอร์ซเลน ภายใต้การควบคุมปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงเดียวกัน

1.2.2 ศึกษาผลกระทบต่อสมรรถนะในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำโดยใช้หัวเผาวัสดุพอร์ซเลนเมื่อทำการปรับเปลี่ยนมุมของอุปกรณ์สร้างกระแสหมุนวน ภายใต้การควบคุมปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงเดียวกัน

1.2.3 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณของอากาศที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้โดยคิดจากปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด ($\% \text{Premixed}_{\text{total access air}}$) ที่ส่งผลต่อสมรรถนะในการเผา

ไหม้ของเชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำโดยใช้หัวเผาวัสดุพูน ภายใต้การควบคุมปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงเดียวกัน

1.2.4 ศึกษาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำ ภายใต้อัตราการไหลเดียวกัน

โดยข้อมูลและความรู้ที่ได้จากศึกษานี้นำไปประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนาการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ กังหันแก๊สขนาดเล็กต่อไปในอนาคต

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1 การนำวัสดุพูนมาประยุกต์ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำทำให้เกิดการเผาไหม้ได้อย่างมีเสถียรภาพ รวมถึงลดการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้

1.3.2 ตัวสร้างกระแสการหมุนวนของอากาศทำให้การคลุกเคล้าอากาศในห้องเผาไหม้และเชื้อเพลิงซึ่งมีการผสมกับอากาศบางส่วนก่อนการเผาไหม้โดยคาดหมายว่ากระแสการหมุนวนที่เกิดขึ้นจะทำให้เปลวไฟสั้นลงและทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น

1.3.3 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการผสมกับเชื้อเพลิงก่อนเผาไหม้ส่งผลต่อเสถียรภาพของการเผาไหม้

1.3.4 การลดอัตราส่วนผสมซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอากาศส่วนเกินที่มากขึ้นส่งผลทำให้ต่ออุณหภูมิของก๊าซไอเสียและปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าต่ำลง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 การทดลองถูกทำในหัวเผาแบบอากาศและเชื้อเพลิงผสมก่อนการเผาไหม้และเป็นการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้

1.4.2 เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำโดยที่จะใช้ก๊าซหุงต้มผสมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราส่วน 40:60

1.4.3 ย่านอัตราการไหลเชื้อเพลิงในการทดลองได้แก่ 1.5 L/min 2 L/min และ 3 L/min ที่ความดันใช้งาน 0.5 บาร์

1.4.4 ทดสอบที่อัตราส่วนผสม 0.6 โดยสอดคล้องกับปริมาณอากาศส่วนเกิน (%Excess air) ที่ 64.25%

1.4.5 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ (%Premixed_{@total access air}) ที่ 100% ของปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด

1.4.6 ทางออกของตัวสร้างกระแสหมุนวนของอากาศทำมุม 45 องศา และ 24 องศา

1.4.7 ตัวสร้างกระแสการหมุนวนอากาศไหลออกตามแนวรัศมี

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยของการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำ
2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวเผาวัสดุพูนมาประยุกต์ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำ
3. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำตัวสร้างกระแสการหมุนวนมาใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำ
4. ทำการออกแบบตัวสร้างกระแสการหมุนวน โดยกำหนดเงื่อนไขจากข้อมูลโดยการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
5. นำหัวเผาวัสดุพูนมาและตัวสร้างกระแสการหมุนวนมาใช้ในการทดลอง โดยระบุเงื่อนไขการทดลองอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
6. ทำการทดลองและเก็บข้อมูลตามเงื่อนไขที่กำหนด
7. วิเคราะห์ผลการทดลอง
8. สรุปผลการวิจัยและจัดทำรายงานการวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงปรากฏการณ์การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำในหัวเผาวัสดุพูนโดยมีตัวสร้างกระแสการหมุนวนของอากาศภายในห้องเผาไหม้
2. นำความรู้ที่ได้ในการศึกษาพฤติกรรมของการไหลและพฤติกรรมของการเผาไหม้นำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องยนต์กังหันแก๊สขนาดเล็กในอนาคต

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

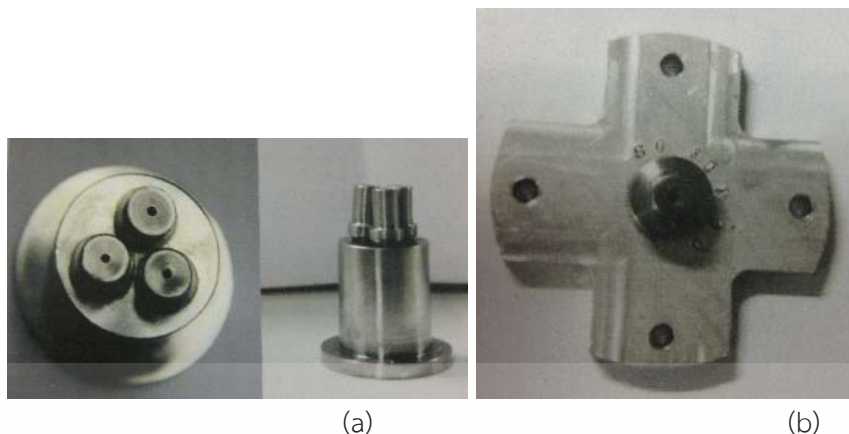
จากบทที่หนึ่งซึ่งกล่าวถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัยซึ่งมุ่งเน้นในด้านของการศึกษาสมรรถนะการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำโดยการนำวัสดุพอรุนมาประยุกต์ใช้ร่วมไปถึงการนำอุปกรณ์สร้างกระแสการไหลวนมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ด้วย ซึ่งในการวิจัยนั้นจำเป็นต้องศึกษาหลักการและคุณสมบัติต่างๆ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึงการศึกษางานวิจัยที่มีผู้ทำมาก่อน เพื่อให้ทราบถึงแนวคิดและปัจจัยต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำ ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันมีนักวิจัยทั้งในและต่างประเทศได้ศึกษาในเรื่องที่ผู้วิจัยกำลังศึกษามากมาย อาทิเช่น

ทรงศักดิ์ สมนาและคณะ [7] ได้วิเคราะห์ห้วงจักรทางอุณหพลศาสตร์ของระบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กโดยใช้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำโดยการนำก๊าซหุงต้ม(LPG) ผสมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งใช้วิธีอพติไมเซชันในการหาจุดที่เหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์โดยกำหนดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เป็นฟังก์ชันเป้าหมาย ผลการทำอพติไมเซชันค่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์อยู่ที่ร้อยละ 25 ซึ่งในการศึกษาพบว่าการวิเคราะห์ห้วงจักรนั้นการใช้สัดส่วนของเชื้อเพลิง คือ ก๊าซหุงต้มต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 40 % LPG และ 60% CO_2 ให้ค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงจากชีวมวล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 18.4 MJ/kg

กนกกาญจน์ ว่องวัชรพร และคณะ [6] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการเชื้อเพลิงผสมระหว่างก๊าซสังเคราะห์จากชีวมวลกับก๊าซในหัวเผาวัสดุพอรุนแบบสองชั้นซึ่งหัวเผาวัสดุพอรุนได้ออกแบบให้ทาง Upstream มีขนาดของช่องว่างเล็ก ($Pe < 65$) ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการเกิดเปลวไฟย้อนกลับ ในขณะที่ทางด้าน Downstream ช่องว่างจะมีขนาดใหญ่ ($Pe > 65$) เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่บริเวณนี้ ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่สัดส่วนระหว่างแก๊สสังเคราะห์กับแก๊สหุงต้มและอัตราการป้อนอากาศ โดยทำการอุ่นหัวเผาวัสดุพอรุนด้วยความร้อนจากการเผาไหม้แก๊สหุงต้มจากนั้นจึงปรับลดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สหุงต้มที่เงื่อนไขอัตราการป้อนแก๊สหุงต้มเท่ากับ 1.68 kW และแก๊สสังเคราะห์เท่ากับ 1.29 kW ที่อัตราการไหลอากาศ 15 20 และ 25 L/min ตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้จะมีค่าสูงขึ้นแปรผันตามปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศดีขึ้น และในกรณีป้อนเชื้อเพลิงแก๊สสังเคราะห์เพียงอย่างเดียวที่ 1.1.32 kW อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 20 L/min พบว่าการเผาไหม้สามารถเกิดขึ้นได้อย่างมีเสถียรภาพภายในหัวเผาวัสดุพอรุน

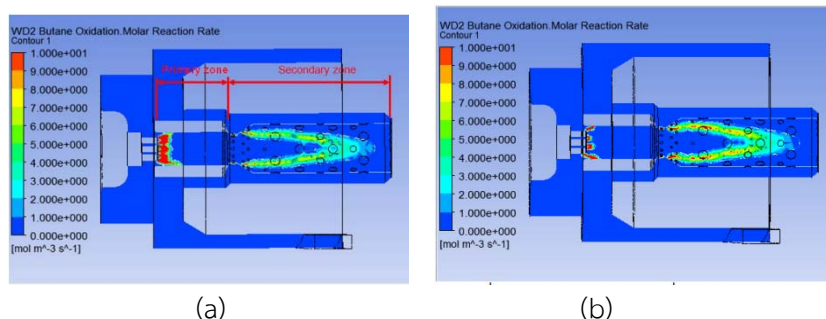
ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล [26] ศึกษาและพัฒนาหัวเผาแก๊สหุงต้มในอุตสาหกรรมเซรามิกส์โดยการปรับปรุงหัวฉีดเชื้อเพลิงเพื่อสามารถเหนี่ยวนำอากาศส่วนที่นำมาผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้แบบอิสระมีอัตราที่เพิ่มขึ้นโดยการปรับโครงสร้างทางออกของเจ็ทเชื้อเพลิงให้มีหน้าตัดวงแหวนเพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนขนาดทางออกเชื้อเพลิงให้สัมพันธ์กับสมดุลแรงสปริงและแรงเชื้อเพลิงที่กระทำบนแป้นรับแรงภายในหัวฉีด ซึ่งผลการทดลองพบว่าปริมาณอากาศที่เหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น 25% โดยสอดคล้องกับรูปแบบเจ็ทที่เปลี่ยนไปและลำเจ็ทแบบวงแหวนสามารถรักษาโมเมนตัมทำให้ลำเจ็ทแทรกเข้าสู่ท่อผสมได้ดีช่วย สำหรับสมรรถนะในการเผาไหม้นั้นพบว่าเปลวไฟมีเสถียรภาพดีขึ้นโดยสังเกตจากสีของเปลวไฟที่มีลักษณะเป็นสีฟ้า แต่เนื่องจากเปลวไฟที่ทำการทดลองนั้นเป็นเปลวไฟอิสระจึงทำให้การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ไม่สม่ำเสมอจากปัญหาดังกล่าว ในปี 2558 [27] จึงนำมาสู่การนำวัสดุพอร์มาประยุกต์ใช้ในการเผาไหม้โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดลองภายใต้เงื่อนไขการเหนี่ยวนำอากาศแบบอิสระและภายใต้เงื่อนไขการควบคุมปริมาณอากาศในการเผาไหม้ ซึ่งจากการทดลองในส่วนแรกนั้นพบว่าในกรณีวัสดุพอร์ทรงกระบอกเจาะรูสามารถทำหน้าที่เป็นฐานยึดเปลวไฟได้ดีและความหนาแน่นช่องว่างที่มีขนาด 15 ppi ส่งผลทำให้การเผาไหม้มีเสถียรภาพในส่วนการทดลองส่วนที่สองนั้นพบว่า หัวเผาวัสดุพอร์ที่อัตราส่วนสมมูล 0.6, 0.7 และ 0.8 ภายใต้เปอร์เซ็นต์การผสมก่อนการเผาไหม้ 100% ที่อัตราส่วนสมมูล 0.6 จะให้อุณหภูมิในการเผาไหม้สูงสุดและปริมาณ CO จะลดลง เนื่องจากสัดส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงมากขึ้น อีกทั้งมีแนวโน้มเผาไหม้ได้ดีขึ้นที่อัตราการเผาไหม้สูงเนื่องจากการเผาไหม้ที่รุนแรง

เจตนิพัทธ์ ดวงมารดาและคณะ [23] ทำการพัฒนาหัวฉีดสำหรับใช้เชื้อเพลิงความร้อนต่ำโดยใช้ก๊าซหุงต้มผสมกับก๊าซไนโตรเจนเพื่อเป็นตัวอย่างของเชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำโดยทำการทดลองหาอัตราส่วนผสมของแก๊สหุงต้มและก๊าซไนโตรเจนเพื่อให้ได้ค่าความร้อนต่ำอยู่ในช่วงของค่าความร้อนต่ำของก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนเป็นส่วนผสมโดยค่าความร้อนที่ต้องการนั้นประมาณ 9,000-20,000 kJ/kg หัวฉีดนั้นจะทำขึ้นใหม่ 2 แบบคือแบบมีหัวเดียวและมีสามหัว โดยใช้เกณฑ์ของกระแสลำเจ็ทที่ออกจากรูหัวฉีดมีความเร็วเท่าเดิม ในการทดลองจะทำการทดลองใน 2 กรณีคือนอกห้องเผาไหม้เพื่อดูสีของเปลวไฟ, ความยาวของเปลวไฟและความเสถียรของเปลวไฟ จากนั้นทำการทดลองในห้องเผาไหม้ โดยอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ใช้คือ 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 SCFH เมื่อนำแก๊สหุงต้มมาผสมกับก๊าซไนโตรเจนจะทำให้ค่าความร้อนลดลงได้ต่ำสุด 28,222.85 kJ/kg ที่อัตราการไหลของก๊าซหุงต้ม 30 SCFH ไนโตรเจน 45 SCFH เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของแก๊สหุงต้ม 46,607 kJ/kg ซึ่งพบว่าค่าความร้อนต่ำลดลงไป 18,384.15 kJ/kg คิดเป็น 39.45% และจากการทดลองพบว่าหัวฉีดแบบ 1 หัวนั้นมีประสิทธิภาพดีที่สุดและให้เปลวไฟที่เสถียรมากกว่าหัวฉีดแบบ 3 หัว



รูปที่ 2.1 (a) หัวฉีดเชื้อเพลิงแบบ 3 หัว (b) หัวฉีดเชื้อเพลิงแบบหัวเดียว

สุวิชัย กิจสำราญกุล [5] ได้ศึกษาและพัฒนาหัวฉีดแบบผสมอากาศก่อนการเผาไหม้ (Premixed Combustion) สำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซต้นแบบ เนื่องจากหัวฉีดแบบเดิมนั้นมีปัญหาต้องใช้อากาศภายนอกมาผสมกับก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) โดยทำการพัฒนาโดยการฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ช่องทางเดินแก๊สด้วยความเร็วสูงมีลักษณะเป็นเจ็ทปั๊ม (Jet Pump) ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำอากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิง ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณอากาศที่นำไปผสมก่อนการเผาไหม้โดยการกำหนดระยะระหว่างหัวฉีดเชื้อเพลิงกับห้องผสม (Mixing Chamber) ที่ระยะ 0 mm, 5 mm, 10 mm อัตราการไหลของเชื้อเพลิง 0.042 จนถึง 0.110 kg/min และอัตราการไหลอากาศ 2.7, 4.0, 5.5, และ 7.0 kg/min ทั้งนี้เชื้อเพลิงจะคลุกเคล้ากับอากาศส่วนหนึ่งในห้องผสมก่อนถูกปล่อยเข้าไปสู่หัวเผาที่ตั้งอยู่ในห้องเผาไหม้เดิมซึ่งการพัฒนานี้ต้องการให้เปลวไฟมีเสถียรภาพและเผาไหม้หมดภายในช่วงความยาวของห้องเผาไหม้เดิม การจำลองการเผาไหม้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้เข้าใจปรากฏการณ์ได้ดีขึ้นโดยสังเกตเห็นการเผาไหม้ที่ช่วงแรกของห้องเผาไหม้สำหรับกรณีผสมอากาศก่อนการเผาไหม้ หลังจากการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์ Premix จะลดลงเมื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงมากขึ้น ความยาวและสีของเปลวไฟจะดีขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์ Premix มากขึ้น และอัตราการเหนี่ยวนำเพิ่มมากขึ้นเมื่อปรับระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับทางเข้าห้องเผาไหม้และการเผาไหม้ใน Primary zone นั้นดีขึ้น



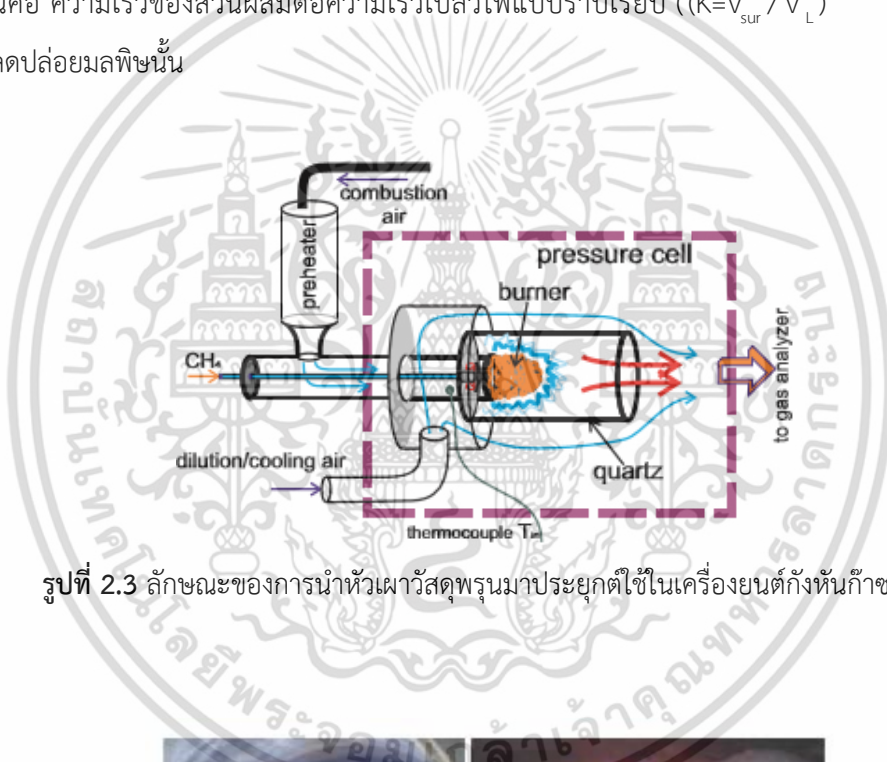
รูปที่ 2.2 (a) การเกิดปฏิกิริยาเมื่อ Premixed 30% (b) การเกิดปฏิกิริยาเมื่อ Non-premixed

I.Hudak และคณะ [8] วิเคราะห์ผลกระทบของแก๊สเฉื่อยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ในหัวเผาเปลวไฟอิสระ ซึ่งใช้ซอฟต์แวร์ CHEMCAD ในการวิเคราะห์ โดยใช้แก๊สค่าความความต่ำเป็นเพลิงโดยวิธีการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมกับแก๊สธรรมชาติ ซึ่งศึกษายานความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 30-60% จากการศึกษาพบว่าปริมาณความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลต่อขอบเขตของการติดไฟ ซึ่งที่ความเข้มข้นสูงจะติดไฟยาก แต่ในทางกลับกันสามารถลดค่าความร้อนของแก๊สธรรมชาติสอดคล้องกับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 60% ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงเท่ากับ 14.52 MJ นอกจากนี้ผลกระทบจากความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยมลพิษนั้นคือปริมาณของ CO ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

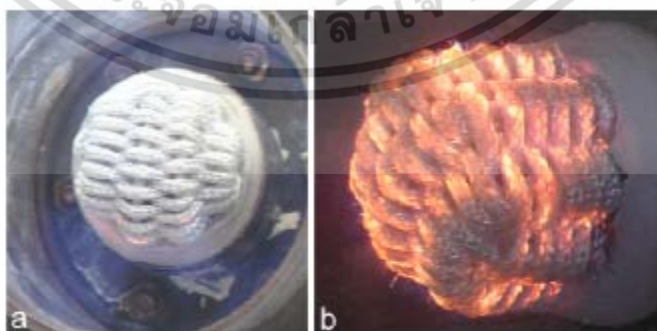
K.A. Al-attab และคณะ [9] ได้ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซสังเคราะห์จากชีวมวลที่อัตราส่วนผลวมบางในหัวเผาวัสดุพอร์นแบบสองชั้นซึ่งชั้นล่างจะใช้วัสดุพอร์นอะลูมินาเม็ดบอลกลมขนาด 10 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตรในชั้นบน เงื่อนไขที่กำหนดสำหรับการศึกษานั้นคือ อัตราความร้อนที่ 5 MJ/m^3 อัตราส่วนสมมูลที่ $0.33 < \Phi < 0.71$ ซึ่งในการทดลองจะปรับเปลี่ยนระยะความสูงของวัสดุพอร์นชั้นที่สองคือ 80 110 140 และ 170 มิลลิเมตรตามลำดับ เพื่อศึกษาสมรรถนะในการเผาไหม้จากการศึกษาที่อัตราส่วนสมมูล 0.71 ทำให้เปลวไฟมีความเสถียรทุกย่านการปรับเปลี่ยนความสูงอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ 1530 K 1426 K 1396 K 1376 K ที่อัตราส่วนสมมูล 0.71 0.57 0.48 0.42 ตามลำดับ สำหรับการปลดปล่อยมลพิษนั้นปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลงตามอัตราส่วนสมมูล ในขณะที่อุณหภูมิสูงทำให้การเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำเนื่องจากการก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นบริเวณอุณหภูมิสูงจึงมีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ ในขณะที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ในปริมาณสูงและจะสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของความสูงเนื่องจากทำให้เกิดการแพร่ของอุณหภูมิรวมไปถึงการเพิ่มระยะเวลาในการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V.N. Kornilov และคณะ [13] ได้ทำศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงมีเทนเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ โดยทำการนำหัวเผาวัสดุพอร์ซเลนโครมาเซรามิกส์มาประยุกต์โดยมีการถักเส้นใย Fe-Cr-Al ให้เป็นลักษณะคล้ายตะกร้าครอบหัวเผาไว้เพื่อรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟ นอกจากนี้มีการอุ่นอากาศส่วนที่ใช้ในการผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ ทำทดลองภายใต้อุณหภูมิตั้งแต่ 22 ถึง 740 องศาเซลเซียส ความดัน 1 ถึง 3 บาร์ อัตราความร้อน 4 kW ถึง 32 kW และอัตราส่วนสมมูลที่ 0.28 ถึง 0.95 พารามิเตอร์ในศึกษาคือความเสถียรภาพของเปลวไฟโดยจากการทดลองพบว่าที่ความเร็วของส่วนผสมต่ำไหลผ่านผิวหน้าหัวเผาจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟไปสู่หัวเผาอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ความเร็วของส่วนผสมสูงเปลวไฟเกิดการยกตัวขึ้นจากผิวหน้าหัวเผาซึ่งทำให้เกิดการเป่าดับได้ ดังนั้นเพื่อให้สามารถควบคุมความเสถียรภาพของเปลวไฟพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการปรับเปลี่ยนนั้นคือ ความเร็วของส่วนผสมต่อความเร็วเปลวไฟแบบราบเรียบ ($K=V_{sur}/V_L$) ในส่วนการปลดปล่อยมลพิษนั้น



รูปที่ 2.3 ลักษณะของการนำหัวเผาวัสดุพอร์ซเลนมาประยุกต์ใช้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ [13]



ก.

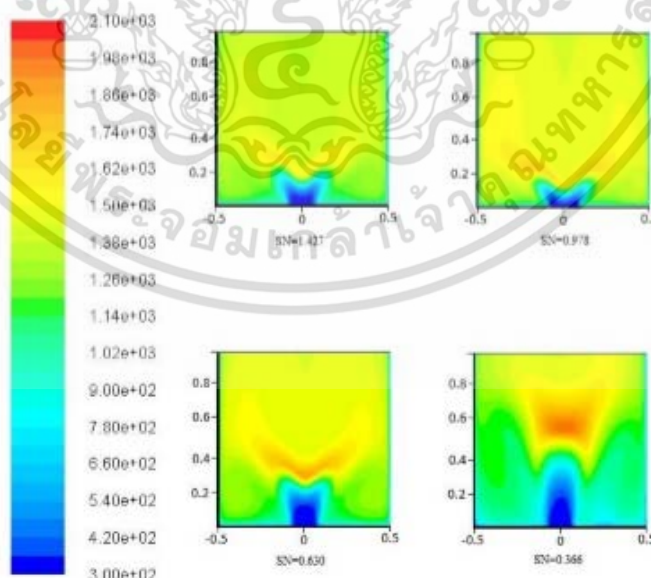
ข.

รูปที่ 2.4 ลักษณะการเผาไหม้ในวัสดุพอร์ซเลน : ก). ที่เงื่อนไขส่วนผสมบาง ข). ที่เงื่อนไขเข้าใกล้อัตราส่วนทางทฤษฎี [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

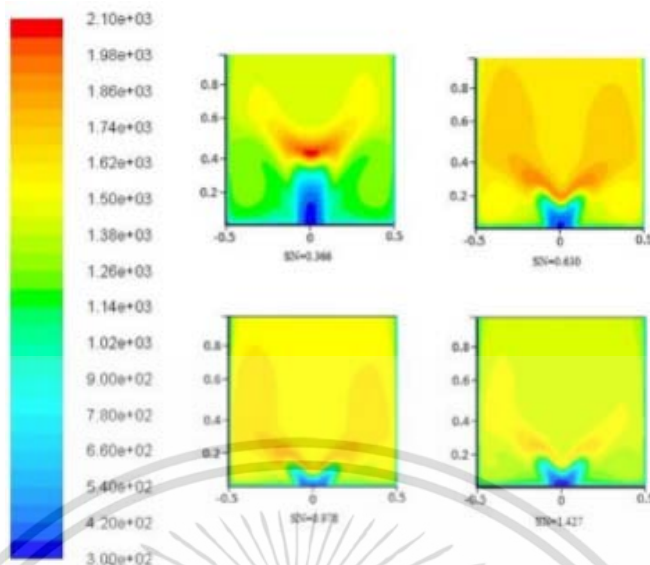
ในกรณีที่อุณหภูมิเปลวไฟต่ำความสมบูรณ์ของการเผาไหม้จะลดลงอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดไนโตรเจนออกไซด์มากกว่า 100 ppm ในขณะที่อุณหภูมิเปลวไฟสูงยังสามารถรักษาระดับการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ไว้ได้ที่ต่ำกว่า 40 ppm

Mohamad Shaiful Ashrul Isha และคณะ [14] งานวิจัยได้ศึกษาการกระจายของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้โดยวิธีการจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีการอุ่นอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 100 เคลวิน และ 250 เคลวิน และมีทำการปรับเปลี่ยนมุมไบบิตของอุปกรณ์สร้างกระแสหมุนวน (Swirler) ที่ 30 องศา 40 องศา และ 50 องศา ค่าความรุนแรงการหมุนวน (Swirl Number, S_N) ที่มุมไบบิตดังกล่าวคือ 0.366 0.630 0.978 และ 1.427 ตามลำดับ โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำให้อากาศผสมกับเชื้อเพลิงได้ดีขึ้นทำให้ส่งผลให้เปลวไฟมีเสถียรภาพ ในการวิเคราะห์พฤติกรรมกรไหลโดย Ansys Fluent ซึ่งวิเคราะห์ที่บริเวณทางออกหัวฉีดห้องเผาไหม้ตามแนวแกนของห้องเผาไหม้ จากการศึกษาพบว่าเมื่อส่วนผสมถูกพ่นออกจากหัวฉีดที่ตำแหน่ง $z/D = 0.2$ การกระจายตัวของอุณหภูมิแพร่กระจายทั่วห้องเผาไหม้ แต่ในกรณีของ S_N ต่ำ อุณหภูมิจะลอยตัวขึ้นไปเหนือแนวแกนและบริเวณตรงกลางห้องเผาไหม้จะมีอุณหภูมิต่ำเนื่องจากไม่มีการเผาไหม้เกิดขึ้น นอกจากนี้ที่ S_N สูงนั้นเปลวไฟมีความกว้างและสั้นเพื่อลดเวลาและระยะทางสำหรับการเผาไหม้ การกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอตั้งรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่ง z/D ใด ที่ S_N 0.366 0.630 0.978 และ 1.427 นอกจากนี้ยังช่วยลดอุณหภูมิสูงสุดเนื่องจากเปลวไฟเพื่อให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ทั้งหมดไม่ถึงจุดที่ NO_x เริ่มก่อตัวขึ้นในขณะที่การอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 100 K และ 250 K จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหมุนวน



ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข.

รูปที่ 2.5 การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่ S_N 0.366, 0.630, 0.978 และ 1.427: ก). การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้กรณีไม่มีการอุ่นอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ ข). การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้กรณีอุ่นอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ที่ 100 K [14]

ยูริกะ มิคาโมและคณะ[30] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มในหัวเผาวัสดุพูนซึ่งมีพื้นฐานมาจากการใช้งานหัวเผาแบบผสมกันมาก่อนสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกส์ วัสดุพูนที่ใช้ในการทดสอบทำมาจากอะลูมิน่า มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ ขึ้นรูปเป็นลักษณะทรงกระบอกเจาะรู โดยวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้เมื่อมีการนำหลักการหมุนควงของอากาศมาประยุกต์ใช้ ในการทดสอบได้ปรับเปลี่ยนอัตราการไหลก๊าซหุงต้มที่ 1 , 1.5 และ 2 L/min ภายใต้การควบคุมปริมาณอากาศส่วนเกิน 64.25 เปอร์เซ็นต์ โดยสอดคล้องกับอัตราส่วนสมมูล 0.6 และบันทึกลักษณะเปลวไฟที่มองเห็น การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ตามระดับความสูงจากปากหัวเผาขึ้นไป ปริมาณก๊าซไอเสียได้แก่เปอร์เซ็นต์ออกซิเจนหลังการเผาไหม้ ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ และสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการจ่ายอากาศส่วนที่สองแบบมีการหมุนควงของอากาศ จะส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ดีขึ้น และ มีการเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้นเนื่องจากการผสมกันที่ดีขึ้นระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงที่หลงเหลือจากการเผาไหม้ในขั้นต้น ซึ่งทำให้ปริมาณก๊าซไอเสียลดลงด้วย

สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการมุ่งเน้นศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำโดยการใช้ก๊าซหุงต้มกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิงตัวอย่าง เพื่อนำไปทดสอบการเผาไหม้ โดยใช้อัตราส่วน 40% โดยปริมาตรของก๊าซหุงต้ม และ 60% โดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงพบว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มมีค่าลดลงเท่ากับ 18.4 MJ/kg ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปัจจุบันทางทีมนิวิจัยได้ศึกษาพบว่าห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ต้นแบบนั้น เกิดความดันสูญเสียในห้องเผาไหม้มากเกินไปส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ได้ไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้งเปลวไฟที่ไม่เสถียรเกิดการดับในขณะการเผาไหม้ เนื่องจากความเร็วของเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นทำให้การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศไม่ดีพอและยังให้เปลวไฟที่ยาวเลยบริเวณห้องเผาไหม้ ซึ่งทำให้ผนังบริเวณทางออกของห้องเผาไหม้เกิดความเสียหาย โดยทั่วไปลักษณะของเปลวไฟที่นั่นต้องเป็นเปลวไฟเกิดจากการเผาไหม้ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ โดยอนุภาคที่เหลือจากการเผาไหม้น้อย มีอุณหภูมิสูง หากสังเกตลักษณะทางกายภาพจะเห็นเป็นลักษณะของเปลวไฟสีฟ้า

จากปัญหาดังกล่าวได้นำมาสู่การศึกษางานวิจัยต่างๆเพื่อนำความรู้ที่ได้มาใช้ในการศึกษาและทดสอบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ เนื่องจาก ในการใช้หัวเผาวัสดุพอร์ซันซึ่งมีข้อดีที่เหนือกว่าหัวเผาที่ให้เปลวไฟอิสระทั่วไปกล่าวคือก่อให้เกิดการอุ่นไอดีตามธรรมชาติและมีการหมุนเวียนความร้อนภายในวัสดุพอร์ซันระหว่างก๊าซไอเสียกับวัสดุพอร์ซัน ซึ่งทำให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอ อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ไม่สูงมากนัก สามารถกักเก็บความร้อนได้ดี จึงทำให้เผาไหม้ในสภาวะไอดีบางมากได้ ด้วยคุณสมบัติของวัสดุพอร์ซันดังกล่าวมานั้น จึงสามารถใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถออกแบบห้องเผาไหม้ที่มีขนาดกะทัดรัดช่วยลดต้นทุนและพื้นที่ในการติดตั้งและปลดปล่อยปริมาณมลพิษ CO และ NO_x ต่ำ

นอกจากนี้การใช้อุปกรณ์สร้างกระแสการไหลหมุนของอากาศซึ่งจะช่วยให้การผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศก่อนการเผาไหม้ให้คลุกเคล้ากันได้ดีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้และใช้การไหลแบบหมุนวนเวียนเปลวไฟเพื่อให้ได้ลักษณะของเปลวไฟที่สั้นลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำวัสดุพอร์ซันมาประยุกต์ใช้ร่วมกับหัวฉีดเชื้อเพลิงเพื่อพัฒนาและศึกษาสมรรถนะของการเผาไหม้ ลักษณะของการเผาไหม้และผลกระทบต่อความเสถียรของเปลวไฟ รวมทั้งคุณลักษณะต่างๆที่ส่งผลต่อการเผาไหม้เพื่อให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ใช้เชื้อเพลิงให้เกิดความคุ้มค่าและก่อให้เกิดมลพิษน้อยที่สุด

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปลักษณะที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อสรุปย่านการใช้งานที่เหมาะสมจากงานวิจัยที่ผ่านมา

พารามิเตอร์ที่พิจารณา	ค่าที่ดีที่สุด	ลักษณะเด่นที่พบ
อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	40% LPG : 60% CO_2	ให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกับค่าความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวล
วัสดุพูน	- ค่าความพูนที่ 0.9 - ค่าความหนาแน่นของวัสดุพูนที่ 15 ppi - วัสดุของวัสดุพูน Al_2O_3	- ประสิทธิภาพทางความร้อนสูง - ในขณะที่มีการปลดปล่อยมลพิษต่ำ - ย่านความเสถียรกว้าง - ให้อุณหภูมิสูงและรักษาเสถียรภาพได้ดี
อัตราส่วนผสม	การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำจะนิยมในกรณีของอัตราส่วนผสมบาง ที่อัตราส่วนผสม $0.7 \leq \Phi \leq 0.3$	อุณหภูมิสูงและปลดปล่อยมลพิษต่ำ การเผาไหม้มีเสถียรภาพที่อัตราส่วนผสม 0.6
ปริมาณอากาศที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ (%Premixed)	%Premixed ที่ 100% ของปริมาณอากาศที่ใช้ในเผาไหม้ทั้งหมด (Total excess air)	อุณหภูมิสูงและเปลวไฟมีเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

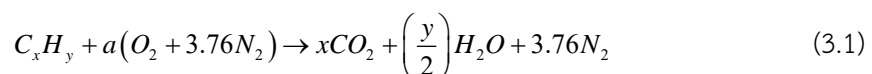
3.1 การเผาไหม้ [15],[13],[26]

การเผาไหม้ (combustion) เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนกับเชื้อเพลิงเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงภายในเวลาอันรวดเร็ว สารที่สามารถเผาไหม้ในเชื้อเพลิงคือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และกำมะถัน (S) โดยการเผาไหม้นั้นจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาหรือเรียกว่า กระบวนการคายความร้อน (Exothermic process) ดังนั้นเมื่อการเผาไหม้ดำเนินไปอย่างต่อเนื่องการปลดปล่อยพลังงานจะอยู่ในรูปแบบความร้อน ในขณะที่เดียวกันก็จะแปรสภาพไปเป็นสารประกอบออกไซด์หรือผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน อุณหภูมิ และความดัน

เปลวไฟ (flame) เป็นส่วนสำคัญของการเผาไหม้ บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีการคายความร้อน (Exothermic chemical reaction) อย่างรวดเร็ว โดยการเผาไหม้สามารถให้เปลวไฟได้สองแบบคือเปลวไฟแบบผสมกันมาก่อน (Premixed flame) และเปลวไฟแบบแพร่ (diffusion flame) แต่ละแบบอาจจำแนกได้เป็นเปลวไฟแบบอยู่นิ่ง (stationary flame) และเปลวไฟลุกลามเคลื่อนที่ (propagating flame) และเปลวไฟต้องมีความเร็วในการเผาไหม้ (burning velocity) อาจเป็นความเร็วการเผาไหม้แบบราบเรียบ (Laminar burning velocity) หรือความเร็วการเผาไหม้แบบปั่นป่วน (Turbulent burning velocity) ซึ่งปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นในอัตราเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนและอุณหภูมิของการเข้าทำปฏิกิริยา เป็นต้น

3.1.1 การเผาไหม้ทางทฤษฎี (Stoichiometry combustion)

เป็นการคำนวณปริมาณออกซิไดเซอร์ที่พอดีในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นถ้าปริมาณออกซิไดเซอร์มากกว่าสตอยชิโอเมตริกหมายความว่า การเผาไหม้นั้นมีส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงแบบบาง (Lean mixture) ในทางกลับกันเมื่อมีปริมาณออกซิไดเซอร์น้อยกว่าสตอยชิโอเมตริกหมายความว่า ส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงแบบหนา (Rich mixture) การหาความสัมพันธ์แบบสตอยชิโอเมตริกทำได้โดยการเขียนสมการเผาไหม้ สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนสามารถหาได้ดังนี้



เมื่อ

$$a = \frac{x + y}{4}$$

โดยที่ a = จำนวนโมลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทางทฤษฎี

สัดส่วนของปริมาณออกซิเจนในอากาศซึ่งมักนิยมพิจารณาให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เป็นอากาศแห้งประกอบไปด้วย ออกซิเจน 21% โดยปริมาตรและไนโตรเจน 79% โดยปริมาตร นั่นคือแต่ละโมลของออกซิเจนมีไนโตรเจน 3.76 โมล การหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎีสามารถหาได้จากสมการที่ 3.2

$$(A/F)_{stoi} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right)_{stoi} = \frac{4.76 MW_{air}}{1 MW_{fuel}} \quad (3.2)$$

นอกจากนี้ยังมีปริมาณที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ดังนี้

- อัตราส่วนสมมูล (Equivalent ratio, Φ) เป็นค่าที่บ่งบอกส่วนผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.3

$$\Phi = \frac{(A/F)_{stoi}}{(A/F)_{actual}} = \frac{(F/A)_{actual}}{(F/A)_{stoi}} \quad (3.3)$$

เมื่อ

$\Phi > 1$ ส่วนผสมหนา

$\Phi < 1$ ส่วนผสมบาง

$\Phi = 1$ ส่วนผสมพอดี

- เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (Percent excess air) เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินเป็นปริมาณบ่งบอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินที่เปอร์เซ็นต์โดยคิดจากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100 โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 3.4

$$\text{เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (\%Excess air)} = \frac{(1-\Phi)}{\Phi} \times 100\% \quad (3.4)$$

3.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้

- ปริมาณอากาศที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ (Sufficient air to combustion) ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้สมบูรณ์จำเป็นต้องมีสัดส่วนของอากาศหรือออกซิเจนที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเผาไหม้โดยปริมาณอากาศที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์เรียกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี

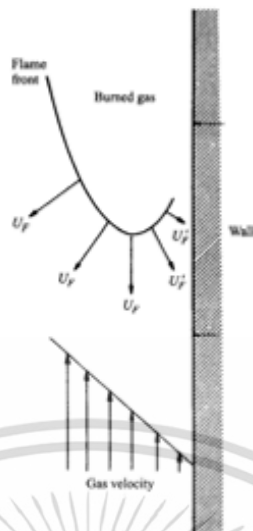
- ระยะเวลาในการเผาไหม้ (Burning time) เนื่องจากในการทำปฏิกิริยาจำเป็นต้องอาศัยเวลาเพื่อที่จะทำให้ได้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ซึ่งหากระยะเวลาในการเผาไหม้ไม่เพียงพอจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงต่ำและนับว่าเป็นการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงด้วย

- ความปั่นป่วนระหว่างการเผาไหม้ (Turbulent) เนื่องจากในการเผาไหม้นั้นเป็นการทำปฏิกิริยาของเชื้อเพลิงและออกซิเจนในอากาศซึ่งหากระหว่างการเผาไหม้มีความปั่นป่วนเกิดขึ้นจะทำให้เกิดการคลุกเคล้ากันอย่างดีของเชื้อเพลิงและออกซิเจนทำให้โอกาสที่ออกซิเจนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงและเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มีมากขึ้น

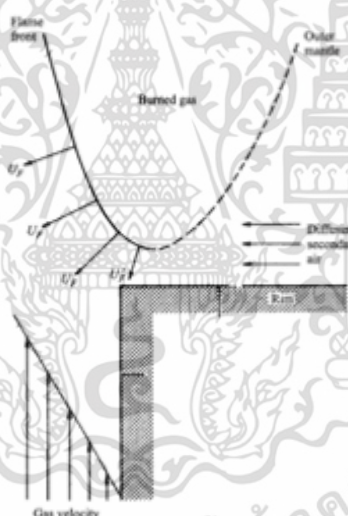
3.1.3 เสถียรภาพเปลวไฟ (Flame stability)

สิ่งสำคัญที่ควรหลีกเลี่ยงในการออกแบบหัวเผาก๊าซ คือปรากฏการณ์เปลวไฟย้อนกลับและเปลวไฟหลุดลอย (lift off) เปลวไฟย้อนกลับคือปรากฏการณ์ที่เปลวไฟลามไปในท่อผสมโดยไม่ดับซึ่งไม่เพียงสร้างความรำคาญเท่านั้นแต่ยังเป็นสาเหตุของการระเบิดเนื่องมาจากการขยายปริมาตรของก๊าซและเปลวไฟหลุดลอยคือปรากฏการณ์ที่เกิดช่องว่างระหว่างฐานของเปลวไฟและท่อ แต่ในขณะเดียวกันก็ยังเกิดการเผาไหม้อยู่ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เมื่อก๊าซผสมไหลออกจากช่องระหว่างเปลวไฟกับท่อและทำให้จุดติดไฟยาก ถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดีหลักการของทั้งสองปรากฏการณ์นี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานของความเร็วเปลวไฟแบบลามินาร์ในแต่ละกรณี จากรูปที่ 3.1 แสดงถึง โปรไฟล์เวกเตอร์ของเปลวไฟย้อนกลับ โดยมากมักเกิดขึ้นระหว่างการหรี่หรือหยุดการป้อนเชื้อเพลิง ทำให้ความเร็วของเปลวไฟมีมากกว่าอัตราการไหลของผสมส่งผลให้เปลวไฟลามไปยังต้นทางมากกว่าที่จะดับ ดังนั้นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ ชนิดของเชื้อเพลิง อัตราส่วนผสม อัตราการไหลและลักษณะทางกายภาพของหัวเผา เป็นต้น

เราสามารถกล่าวได้ว่าปรากฏการณ์เปลวไฟหลุดลอยนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของเปลวไฟและอัตราการไหลบริเวณขอบของหัวเผาคือเมื่อพิจารณาให้เปลวไฟมีเสถียรภาพที่ขอบของหัวเผาที่อัตราการไหลต่ำ ฐานของเปลวไฟจะอยู่ติดกับหัวเผา แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหล จะสังเกตเห็นว่ามุมของโคนเปลวไฟมีขนาดเล็กลงและเริ่มออกห่างจากหัวเผาเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าเปลวไฟหลุดลอย ดังแสดงในรูปที่ 3.2 หากเพิ่มอัตราการไหลไปเรื่อยๆจะทำให้เกิดการเป่าดับ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น



รูปที่ 3.1 แสดงโปรไฟล์ความเร็วขณะเกิดเปลวไฟย้อนกลับ



รูปที่ 3.2 แสดงโปรไฟล์ความเร็วขณะเกิดเปลวไฟหลุดลอย [15]

ดังนั้นการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟคือการรักษาอุณหภูมิในบริเวณเปลวไฟให้มีค่าสูงเพื่อการเผาไหม้เกิดขึ้นได้รวดเร็ว และมีการคายความร้อนที่สูง การรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้วัตถุเข้าขวางการไหล (Bluff body) หรือใช้การไหลแบบหมุนวน (Swirl or recirculation flow)

3.2 เชื้อเพลิงก๊าซ [15],[26]

เชื้อเพลิงก๊าซนิยมใช้ในอุตสาหกรรมและชีวิตประจำวันทั่วไปเนื่องจากมีความสะดวกและสะอาดในการนำมาใช้ เชื้อเพลิงก๊าซมีหลายประเภทและที่มาจากหลากหลายแหล่ง เช่น

- ก๊าซปิโตรเลียมเหลว

ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied petroleum gas, LPG) ประกอบด้วยก๊าซไฮโดรคาร์บอน 2-3 ชนิดหลักๆ ได้แก่ อีเทน, โพรเพนและบิวเทน รวมถึงก๊าซเหลวจากกระบวนการกลั่น เอธิลีน โพรพิลีนและบิวทิลีน ก๊าซเหล่านี้ได้มาจากกระบวนการกลั่นแยกน้ำมันปิโตรเลียมหรือการกลั่นแยก ก๊าซจากโรงกลั่นน้ำมันหรือโรงแยกก๊าซธรรมชาติ ก๊าซปิโตรเลียมบริสุทธิ์ไม่มีสีไม่มีกลิ่น ในการผลิต จำหน่ายมีการเติมสารประกอบที่มีกลิ่นลงไป ก๊าซปิโตรเลียมเหลวมีสภาพเป็นก๊าซที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศมีความหนาแน่นหนักกว่าอากาศเมื่อถูกกดอัดด้วยความดันประมาณ 7 บาร์จะมีสภาพเป็นของเหลวเพื่อสะดวกต่อการกักเก็บและขนส่ง

- ก๊าซธรรมชาติ ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ โดยมีมีเทนเป็นหลัก ที่เหลือเป็น องค์ประกอบส่วนน้อย ซึ่งก๊าซธรรมชาติมักถูกพบบริเวณหินพูนเหนือแหล่งน้ำมันและถูกอัดด้วยความดันสูงอยู่ใต้ดิน สามารถนำมาใช้โดยการอัดและหล่อเย็นจนกระทั่งสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ตัวหนักๆหลายเป็นของเหลวจากนั้นจึงแยกก๊าซธรรมชาติแห้งความดันสูงส่งต่อไปตามท่อเพื่อใช้งาน

- ก๊าซสังเคราะห์ (synthetic gas หรือ producer gas) เกิดจากการอัดอากาศหรือใส่อากาศ ที่มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณที่ต้องการตามทฤษฎีในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ผ่านไปยังชั้นเชื้อเพลิงแข็ง ร้อนๆซึ่งอาจจะเป็นถ่านหิน ไม้ฟืน เศษวัสดุทางการเกษตร ที่กำลังเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง 500 องศาเซลเซียสขึ้นไปในอุปกรณ์ชนิดนี้ โครงสร้างโมเลกุลของเชื้อเพลิงแข็งสลายตัวได้ออกมาเป็นสารระเหย โมเลกุลเบา ก๊าซสังเคราะห์มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจน และ ไนโตรเจน ถ้าใช้ออกซิเจนแทนอากาศจะทำให้ได้ก๊าซสังเคราะห์ที่มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น กระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์ทำไปเพื่อแปลงสภาพเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่สะอาดและสะดวกต่อการ ใช้งาน

3.2.1 คุณสมบัติของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG)

ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอน ที่มีส่วนประกอบของคาร์บอน C3 และ C4 ใน 1 โมเลกุล ไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้ประกอบด้วย

โพรเพน	(propane)	C_3H_8
โพรพิลีน	(propylene)	C_3H_6
บิวเทน	(butane)	C_4H_{10}
บิวทิลีน	(butylene)	C_4H_8

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ปรากฏอยู่ในส่วนผสมของก๊าซปิโตรเลียมเหลว อาจแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ พวงไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbon) และไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว (unsaturated hydrocarbon)

- คุณสมบัติทางกายภาพ

เมื่อพิจารณาในสถานะของเหลว เนื่องจากก๊าซหุงต้มนั้นมีจุดเดือดต่ำมาก คือโพรเพน $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ บิวเทน $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ไอโซบิวเทน $-11.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นจะมีจุดเดือดและมีสถานะเป็นก๊าซที่ความดันบรรยากาศวันแต่จะถูกอัดอยู่ภายในถัง ค่าความดันที่ทำให้เป็นของเหลวคือความดันของก๊าซหุงต้มเอง

เมื่อพิจารณาในสถานะก๊าซช่วงการลุกไหม้ก๊าซที่เผาไหม้ได้มีช่วงส่วนผสมกับอากาศเพียงช่วงเดียวที่จุดไฟและลุกไหม้ได้เพราะอากาศผสมอยู่ในปริมาณที่พอเหมาะช่วงการลุกไหม้จะแสดงค่าเป็นร้อยละของปริมาตรก๊าซต่ออากาศ ค่าความเข้มข้นสูงสุดของการลุกไหม้เรียกว่าขอบบน ส่วนค่าต่ำสุดเรียกว่าขอบล่าง ก๊าซหุงต้มเป็นของผสมระหว่างโพรเพนกับบิวเทน โดยโพรเพนมีช่วงลุกไหม้ 9.5-2.4% ในอากาศและบิวเทนมีช่วงการลุกไหม้ 8.4-1.8% ถ้าส่วนผสมมากหรือน้อยกว่านี้จะไม่ติดไฟ

- ค่าความร้อนของการเผาไหม้

ค่าความร้อนของการเผาไหม้คือปริมาณความร้อนที่เกิดจากการนำเอาก๊าซหุงต้ม 1 หน่วยน้ำหนัก หรือ 1 หน่วยปริมาตรมาทำการเผาไหม้ที่ความดันและอุณหภูมิปกติ ซึ่งคุณสมบัติของก๊าซหุงต้มนั้นแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของก๊าซหุงต้ม [26]

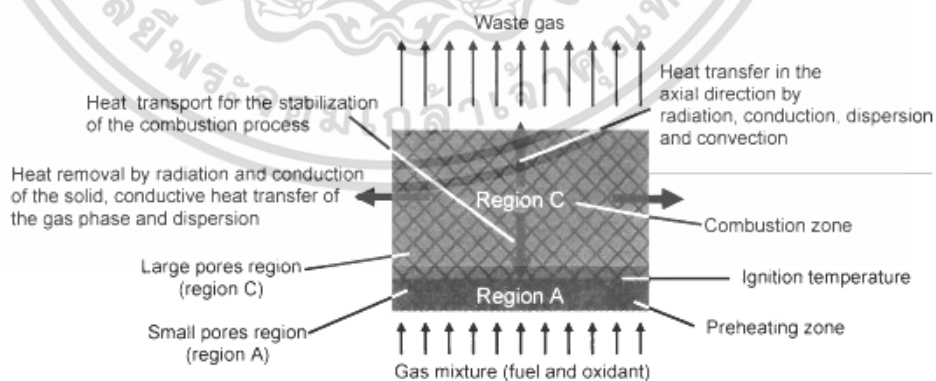
description	Units	LPG
Ignition temperature	$^{\circ}\text{C}$	450
Flameability Limit	%	2.1-9.5
Stoichiometry Air-Fuel ratio	-	15.7
Flame Temperature	$^{\circ}\text{C}$	1,990
Heat of combustion , HHV	MJ / m^2	2.5×10^7
Heat of combustion , LHV	MJ / m^2	2.3×10^7

3.3 การเผาไหม้ในวัสดุพอร์น [6],[12]

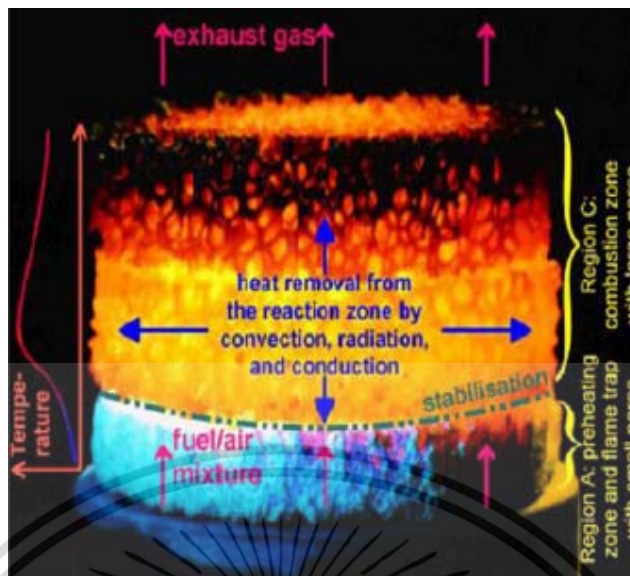
การเผาไหม้ในวัสดุพอร์นจะเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุมีช่องว่างหรือรูพอร์นที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย โดยคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุพอร์นคือมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง (Area to volume ratio) ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนสูงอีกทั้งวัสดุพอร์นเป็นของแข็งที่มีค่าการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนสูงทำให้วัสดุพอร์นสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนได้ดีระหว่างความร้อนในรูปของการพาและการแผ่รังสีจึงกล่าวได้ว่าวัสดุพอร์นเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ที่มีประสิทธิภาพสูงและมีขนาดกะทัดรัดอย่างไรก็ตามแม้ว่าวัสดุพอร์นจะมีอยู่มากมายหลายชนิดแต่วัสดุพอร์นที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ต้องทำมาจากวัสดุที่มีความต้านทานอุณหภูมิสูง (High temperature resistant) และมีอายุการใช้งานยาวนานสามารถทนทานต่อการแตกกร้าวเนื่องจากการยึดหรือหดของโครงสร้างวัสดุพอร์นในช่วงเริ่มทำงาน (Startup) และช่วงดับเตา (Shutdown)

ซึ่งจากคุณสมบัติของวัสดุพอร์นตามที่กล่าวมานั้นจึงทำให้วัสดุพอร์นได้รับความสนใจนำมาประยุกต์ใช้ในการเผาไหม้อย่างแพร่หลาย เทคนิคที่นิยมนำมาใช้นั้นก็คือให้วัสดุพอร์นทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนและใช้เป็นบริเวณที่เกิดการเผาไหม้

การหมุนเวียนความร้อนภายในวัสดุพอร์นเกิดขึ้นผ่านการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยกระบวนการในการแลกเปลี่ยนความร้อนเริ่มจาก ความร้อนจากก๊าซไอเสียซึ่งมีอุณหภูมิสูงถูกถ่ายเทด้วยการพาความร้อนไปยังโครงสร้างวัสดุพอร์น และผ่านเนื้อวัสดุพอร์นไปยังบริเวณที่มีสารตั้งต้นด้วยการนำความร้อน จากนั้นโครงสร้างของแข็งจะแผ่รังสีความร้อนไปสู่ส่วนผสมของสารตั้งต้นในที่สุด ดังนั้นก๊าซผสมจะถูกอุ่นให้มีอุณหภูมิสูงก่อนไหลเข้าสู่บริเวณที่มีการเผาไหม้จึงเป็นสาเหตุให้ความเร็วเปลวไฟสูงกว่าเปลวไฟแบบผสมกันมาก่อน



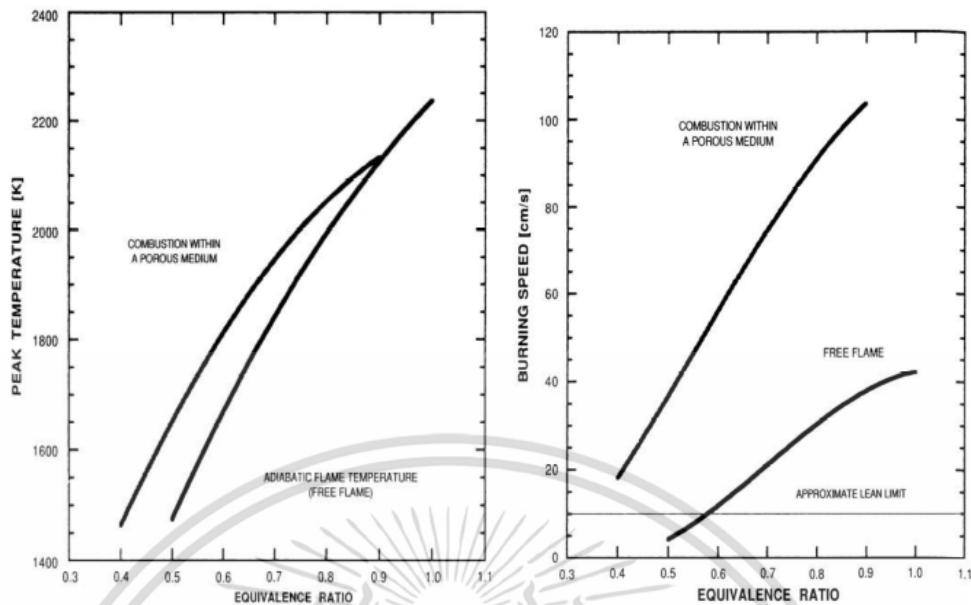
รูปที่ 3.3 กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในการเผาไหม้วัสดุพอร์น [12]



รูปที่ 3.4 แสดงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุน [28]

จากรูปที่ 3.4 แสดงการเผาไหม้อย่างเสถียรภาพภายในวัสดุพรุนและการกระจายอุณหภูมิภายในวัสดุพรุน จากรูปจะเห็นได้ว่าการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นช่วยทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิค่อนข้างสม่ำเสมอส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าไม่สูงมากนัก ทำให้ปริมาณ CO และ NO_x มีปริมาณต่ำ อีกทั้งมีความร้อนส่วนหนึ่งย้อนกลับสู่บริเวณต้นทางของหัวเผาส่งผลให้การอุ่นสารตั้งต้นและเกิดการเผาไหม้อย่างมีเสถียรภาพ

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะการเผาไหม้ระหว่างหัวเผาวัสดุพรุนกับหัวเผาแบบเปลวอิสระของการเผาไหม้ก๊าซมีเทน ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งจะเห็นว่าที่อัตราส่วนสมมูล 0.53-0.91 การเผาไหม้ในวัสดุพรุนสามารถเกิดขึ้นได้อย่างมีเสถียรภาพและให้ความเร็วเปลวไฟที่สูงนอกจากนี้ยังให้อัตราการผลิตพลังงานความร้อนสูงเนื่องจากการเก็บความร้อนของตัวกลางวัสดุพรุน อีกทั้งยังสามารถลดขนาดของหัวเผาลงได้ 10 เท่าเมื่อเทียบในย่านพิกัดความร้อนเดียวกัน



ก.

ข.

รูปที่ 3.5 ก.) อุณหภูมิสูงสุดจากการเผาไหม้ และ ข.) ความเร็วของเปลวไฟ โดยเปรียบเทียบ ระหว่างเปลวไฟแบบอิสระกับเปลวไฟจากวัสดุพรุน [12]

ดังนั้นจากที่กล่าวมาจึงสามารถนำวัสดุพรุนไปประยุกต์ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากการอุ่นส่วนผสมก่อนการเผาไหม้ซึ่งจะส่งผลต่ออุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดย่านอัตราส่วนผสมที่เป็นส่วนผสมบาง ในขณะที่ความเร็วเปลวไฟก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้การเผาไหม้อย่างมีเสถียรภาพภายในวัสดุพรุนยังทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่งผลทำให้ปริมาณ CO และ NO_x ต่ำ

จากคุณลักษณะการเผาไหม้ในวัสดุพรุนดังที่กล่าวมา ทำให้วัสดุพรุนถูกใช้งานภายใต้สภาวะความร้อนและปฏิกิริยาเคมีที่รุนแรง จึงมีความจำเป็นต้องเลือกใช้วัสดุที่ทนทานต่ออุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แก่วัสดุพรุนที่ทำจากเซรามิกส์ ข้อดีก็คือการทนต่ออุณหภูมิและมีค่าการนำความร้อนสูงจึงทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอแต่มีข้อเสีย นั่นก็คือมีความยืดหยุ่นต่ำ โดยเซรามิกส์ที่เลือกใช้เป็นวัสดุพรุนจำพวกโฟมโครงสร้างเป็นตาข่าย ซึ่งข้อดีของวัสดุพรุนประเภทนี้คือ

- โครงสร้างของวัสดุพรุนเป็นแบบเปิด คือ ของไหลสามารถไหลผ่านได้ มีความดันสูญเสีย น้อย
- อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ทำให้เกิดสมดุลทางความร้อน
- น้ำหนักเบา สามารถส่งผ่านความร้อนปรับเปลี่ยนภาวะตามการทำงานได้อย่างรวดเร็ว

จากตารางที่ 3.2 นั้นแสดงคุณสมบัติของวัสดุพรุนซึ่งทำจากวัสดุ Al_2O_3 , SiC , ZrO_2 ตามลำดับ ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุพรุนที่จากวัสดุดังกล่าวมีข้อดีแตกต่างกันดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Aluminium oxide (Al_2O_3) ทนต่ออุณหภูมิสูงประมาณ 1900 C มีส่วนประกอบของ SiO₂ สูงประมาณ 20-40% อีกทั้งสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนและค่าการนำความร้อนเฉลี่ยมีค่าสูง

Silicon carbide (SiC) ทนต่ออุณหภูมิสูงประมาณ 1600 C ทนต่อการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนค่อนข้างสูงเนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนและค่าการนำความร้อนเฉลี่ยมีค่าต่ำ

Zirconium Oxide (ZrO_2) ทนต่ออุณหภูมิสูงประมาณ 2300 C สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงและค่าการนำความร้อนเฉลี่ยมีค่าต่ำ ทำให้การทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนค่อนข้างต่ำ และการกระจายอุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของวัสดุพูนที่ทำจากวัสดุ อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3), ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Al_2O_3) และเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) ตามลำดับ[6]

คุณสมบัติ	หน่วย	Al_2O_3	SiC	ZrO_2
ความร้อนสูงสุด	°C	1900	1600	1800
สัมประสิทธิ์การขยายตัวของความร้อน	$10^{-6}/K$	8	4-5	10-13
ค่าการนำความร้อนที่ 20	W/m-K	20-30	80-150	2-5
ค่าการนำความร้อนที่ 1000	W/m-K	5-6	20-50	2-4
ค่าความจุความร้อน	J/g-K	0.9-1	0.7-0.8	0.5-0.6
อุณหภูมิต่อการขยายตัวหนึ่งหน่วย	K	100	230	230
ค่าความร้อนต่อการขยายตัวหนึ่งหน่วย	$10^3 W/m$	3	23	1
สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีรวมที่ 2000K	-	0.28	0.9	0.31

3.4 การทำให้เปลวไฟเสถียร (Flame stabilization) [15],[22]

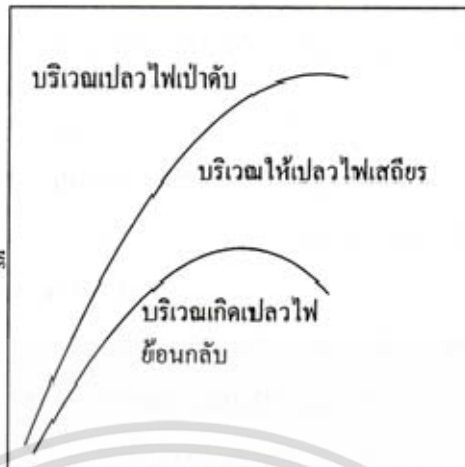
หากความเร็วการไหลของส่วนผสมมากกว่าค่าความเร็วของเปลวไฟ เปลวไฟจะเกิดการเป่าดับ ซึ่งเป็นอันตรายมากโดยเฉพาะเครื่องยนต์กังหันแก๊ส ความเร็วสูงสุดของส่วนผสมที่เกิดการเป่าดับไปของเปลวไฟพอดี เรียกว่า ความเร็วเป่าดับ (blow-off velocity) ความเร็วเป่าดับขึ้นกับตัวแปรต่าง ๆ เช่น ชนิดของเชื้อเพลิงและออกซิโดเซอร์ที่ใช้ อัตราส่วนผสม อุณหภูมิส่วนผสม ความดันห้องเผาไหม้ ความปั่นป่วนของกระแสการไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ รูปร่างห้องเผาไหม้ และความหนาแน่นห้องเผาไหม้ เป็นต้น ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดปรากฏการณ์การเป่าดับของเปลวไฟจึงต้องหาทางให้ความเร็วเป่าดับมีค่าสูงสุดเท่าที่ทำได้โดยการปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ให้เหมาะสม

3.4.1 การเสถียรของเปลวไฟตะเกียงบุนเซน (Stability of a Bunsen flame)

เปลวไฟตะเกียงบุนเซนเกิดการเสถียรขึ้นได้เนื่องจากการสูญเสียความร้อนที่ขอบท่อตะเกียงทำให้บริเวณนั้นเปลวไฟจะถูกเป่าออกดังรูปที่ 3.6 (กรณีเสถียร) ส่วนบริเวณถัดจากขอบท่อเข้ามาข้างในจะมีทั้ง เปลวไฟจะถูกดันเข้าและเป่าออก ดังนั้นเปลวไฟจะสมดุลอยู่ที่ขอบท่อของตัวเอง จากกลไกดังกล่าวสามารถนำมาอธิบายปรากฏการณ์เป่าดับ (blow-off) และย้อนกลับ (flash-back) ของเปลวไฟบุนเซนได้ดังรูปที่ 3.6 เมื่อ U_{sn} คือความเร็วการไหลของส่วนผสมที่แตกทิศทางให้มาอยู่ในแนวที่ตั้งฉากกับแนวเปลวไฟและ S_L คือความเร็วเปลวไฟแบบราบเรียบ จากรูปได้ว่าถ้า $U_{sn} < S_L$ ตลอดหน้าตัดของท่อตะเกียงจะเกิดการเป่าดับของเปลวไฟ ถ้า $U_{sn} > S_L$ ตลอดหน้าตัดของท่อตะเกียงจะเกิดเปลวไฟย้อนกลับ เมื่อ U_{sn} สัมผัส S_L จะเป็นจุดวิกฤตก่อนเกิดการเป่าดับไป แต่เมื่อตัดกับเปลวไฟจะเสถียรมาก



รูปที่ 3.6 การเสถียรของเปลวไฟตะเกียงบุนเซนใกล้ขอบท่อ[22]



เปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิง

รูปที่ 3.7 อิทธิพลของค่า du_{SN} / dr ต่อการเสถียรของเปลวไฟตะเกียงบุนเซน[22]

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นว่า การเสถียรของเปลวไฟขึ้นอยู่กับค่าความลาดชัน du_{SN} / dr ที่ขอบท่อของตะเกียงและเปลวไฟจะถูกทำให้เสถียรได้ในช่วงของ du_{SN} / dr ค่าหนึ่ง ๆ ซึ่งหมายความว่าขึ้นอยู่กับความเร็วการไหลที่อัตราส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิง A/F หรือเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงค่าหนึ่ง ๆ

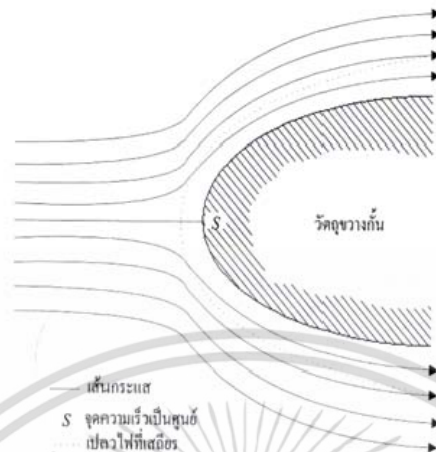
3.4.2 วิธีเปลวไฟล่อ (Pilot flame)



รูปที่ 3.8 วิธีเปลวไฟล่อโดยใช้แก๊สเฉื่อยอุณหภูมิสูง[22]

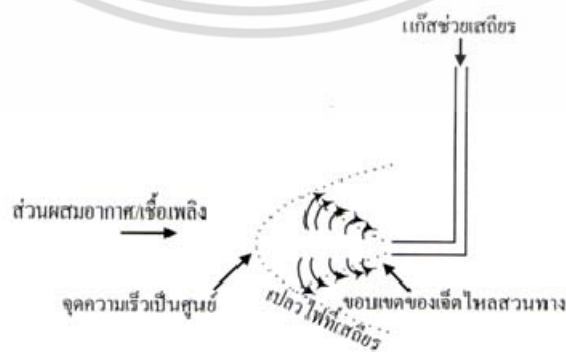
วิธีเปลวไฟล่อหลักการคือการใช้เปลวไฟที่จัดให้มีขึ้นต่างหากหรือใช้แก๊สเฉื่อยร้อนอุณหภูมิสูง T_2 ให้ไหลสัมผัสกับกระแสของส่วนผสมอุณหภูมิต่ำ T_1 เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนและถ่ายโอนมวลข้ามชั้นขอบเขตของกระแสน้ำทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 3.8 ดังนั้นจึงทำให้การเผาไหม้ในกระแสน้ำของส่วนผสมอุณหภูมิต่ำได้ดีขึ้นและการเผาไหม้จะรวดเร็วขึ้น

3.4.3 วิธีวัดถ่วงกัน (Bluff body)



รูปที่ 3.9 การทำให้เปลวไฟเสถียรด้วยวิธีวัดถ่วงกัน[15]

หลักการของวิธีการนี้คือ ลดความเร็วการไหลของส่วนผสมให้ต่ำลงโดยการทำให้เกิดความเร็วเป็นศูนย์ (จุด S ในรูปที่ 3.9) และเกิดชั้นขอบเขตของความเร็วมืดวัตถุขวางกันทำให้บริเวณนั้นมีเวลามากเพียงพอแก่การติดไฟและเผาไหม้ได้ทันโดยไม่ถูกเป่าให้ดับไปเสียก่อน แต่มีข้อเสียคือเกิดแรงดูดและเป็นการลดแรงขับจิ้งแก่ไขโดยใช้เจ็ทไหลสวนทาง (opposing jet) ซึ่งก็ทำให้เกิดจุดความเร็วเป็นศูนย์และชั้นขอบเขตของความเร็วดังรูปที่ 3.10 เช่นเดียวกันและเป็นที่ยอมรับใช้มากในเครื่องยนต์กังหันแก๊ส เจ็ทไหลสวนทางนี้อาจจะเป็นคู่ของส่วนผสมเชื้อเพลิง/อากาศกับอากาศที่ช่วยให้เปลวไฟเสถียร หรืออาจเป็นคู่ของอากาศอัดความดันสูงกับสเปรย์น้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น การเพิ่มความเร็วเป่าดับ U_{BO} ทำได้โดยการเพิ่มความดันของเจ็ทไหลสวนทางทั้งคู่ให้มีค่าสูงขึ้นหรือเพิ่มอุณหภูมิของอากาศที่ช่วยให้เปลวไฟเสถียร เช่นใช้อากาศที่ถูกอุ่นให้ร้อนโดยผนังห้องเผาไหม้มาแล้ว เป็นต้น หรือเลือกชนิดของเชื้อเพลิงที่ให้ความเร็วของเปลวไฟที่มีค่าสูง ๆ

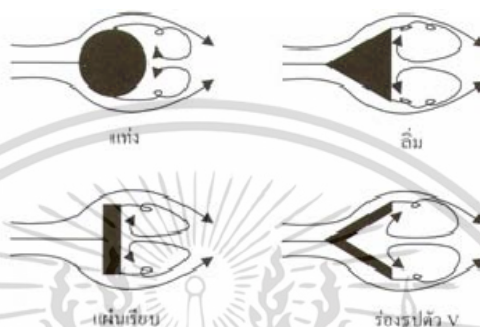


รูปที่ 3.10 การทำให้เปลวไฟเสถียรด้วยวิธีเจ็ทไหลสวนทาง[15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 วิธีการไหลหมุนเวียนย้อนกลับ (Recirculation)

วิธีการนี้มีหลักการคือลดและเปลี่ยนทิศทางความเร็วการไหลของส่วนผสมให้ต่ำลงและไหลหมุนเวียนย้อนกลับจนส่วนผสมมีเวลามากเพียงพอที่จะทำให้เกิดการติดไฟด้วยตัวเองและเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องได้ ทำได้โดยการนำของแข็งรูปทรงต่าง ๆ ไปวางขวางทิศทางการไหลของส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ทำให้เกิดบริเวณที่มีความเร็วต่ำและหมุนเวียนย้อนกลับในกระแสหลักของการไหลของส่วนผสมซึ่งจะช่วยให้เกิดการเสถียรของเปลวไฟได้ดีโดยไม่ถูกเป่าให้ดับไปได้



รูปที่ 3.11 การทำให้เปลวไฟเสถียรด้วยวิธีการไหลหมุนเวียนย้อนกลับ[15]

3.4 การไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว [13],[24]

การไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวดังรูปที่ 3.12 จะช่วยให้การผสมผสานระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงดีขึ้น ซึ่งการไหลแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ คือ การไหลตามแนวแกนและการไหลตามแนวเส้นสัมผัส หากการไหลมีการหมุนวนที่รุนแรงจะก่อให้เกิดความดันย้อนกลับตามแนวแกนและการหมุนวนภายใน



รูปที่ 3.12 แสดงการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวแบบรุนแรง [13]

3.5.1 ความรุนแรงของการหมุนวนเป็นเกลียว

ความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวสามารถแสดงในเชิงปริมาณเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนตัมตามแนวแกน (G_T) และโมเมนตัมในแนวรัศมี (G_{ang}) ซึ่งความสัมพันธ์นี้เรียกว่าค่าความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียว (Swirl Number, S_N) ดังสมการที่ 3.5 [24]

$$S_N = \frac{G_{ang}}{G_T R} \quad (3.5)$$

เมื่อ

$$G_{ang} = 2\pi \int_0^R \rho \omega \bar{u} r^2 dr \quad (3.6)$$

$$G_T = 2\pi \int_0^R \rho \bar{u}^2 r dr \quad (3.7)$$

$$\omega = \bar{u} \tan \theta \quad (3.8)$$

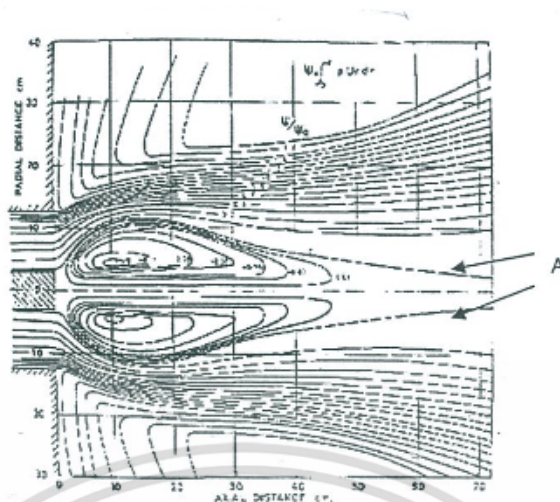
$$R = \frac{R_C}{R_i} \quad (3.9)$$

3.5.2 การไหลหมุนวนย้อนกลับตามแนวแกน

เมื่อทราบค่าเชิงปริมาณของการไหลหมุนวนเป็นเกลียวแล้วจากการศึกษาพบว่าสามารถแบ่งกลุ่มของการไหลหมุนวนเป็นเกลียวได้ 2 กลุ่มคือ

1. การไหลหมุนวนเป็นเกลียวอ่อน (Weak swirl) เป็นการไหลที่มีค่า $S_N < 0.6$ ซึ่งในกรณีนี้จะไม่มีการไหลหมุนวนย้อนกลับตามแนวแกน (Reversed Recirculation Zone) เกิดขึ้น
2. การไหลหมุนวนเป็นเกลียวรุนแรง (Strong Swirl) เป็นการไหลที่มีค่า $S_N > 0.6$ ในกรณีนี้จะมีการไหลหมุนวนย้อนกลับตามแนวแกน (Reversed Recirculation Zone) เกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.13

การไหลหมุนวนย้อนกลับตามแนวแกนเป็นการไหลที่เรียกว่า วอร์เทค หรือ Toroidal Vortex จากรูปที่ 3.13 แสดงเส้นทางการไหล (Stream Line) ได้ดังรูปที่ 3.14



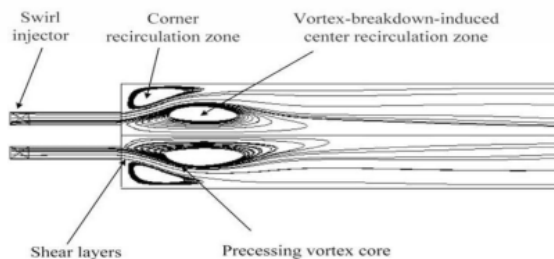
รูปที่ 3.13 แสดงเส้นการไหล (Stream Line) ของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวรุนแรง[24]



รูปที่ 3.14 ขนาดของวอร์เทคที่ค่า S_N ต่างกัน[24]

3.5.3 Vortex Breakdown

เป็นการไหลที่เกิดจากการไหลผ่านตัวสร้างกระแสการหมุนวนเป็นเกลียว (Swirler) และเกิดการหมุนวนขึ้นซึ่งการหมุนวนนั้นก่อให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและความเร็วที่ต่างกันทำให้เกิดการยกตัวและยุบตัวของอากาศกลายเป็นการหมุนวน โดยสามารถแบ่งโซนการไหลได้ดังนี้ Corner Recirculation Zone Processing Vortex Core และ Center Recirculation Zone ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 สนามการไหลที่เกิดจาก Swirler [24]

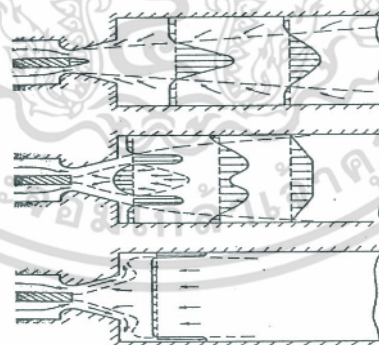
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามการไหลที่สำคัญที่สุดคือ Center Recirculation Zone หรือสนามการไหลวนบริเวณตรงกลางห้องเผาไหม้ โดยบริเวณดังกล่าวจะช่วยให้เชื้อเพลิงกับอากาศผสมกันได้ดีขึ้นและพาเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดกลับมาเผาไหม้อีกครั้ง นอกจากนี้ยังทำให้เปลวไหม้เสถียรภาพ ลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและลดการปลดปล่อยมลพิษ

3.5.4 ลักษณะของการไหลแบบหมุนวนเป็นเกลียวที่ต้องการในการเผาไหม้

สำหรับการเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซนั้นมีปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงที่สูง อีกทั้งการเผาไหม้เกิดขึ้นในระยะใกล้กับหัวเผาทำได้ยาก พลศาสตร์ของอากาศในบริเวณใกล้หัวเผามีความสำคัญต่อการรักษาเสถียรภาพเปลวไฟ ซึ่งในการปรับปรุงพลศาสตร์ของอากาศในห้องเผาไหม้เครื่องยนต์กังหันก๊าซจะนิยมโดยการใช้ Swirler ในการสร้างกระแสการไหลแบบหมุนวนเพื่อส่งเสริมให้อากาศและเชื้อเพลิงนั้นเกิดการผสมคลุกเคล้ากันได้ดี ทำให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้นนอกจากนี้ยังเพิ่มการถ่ายเทความร้อนออกไปทางรัศมีเพื่อทำให้เปลวไฟสั้นลงและสามารถเผาไหม้อยู่ภายในพื้นที่ที่ออกแบบได้

จากที่กล่าวมาการไหลหมุนวนเป็นเกลียวสามารถช่วยเพิ่มการผสมผสาน (Mixing) และประสิทธิภาพในการเผาไหม้ได้ แต่ถ้าการหมุนวนที่มากเกินไปก็จะสามารถทำให้เปลวไฟไม่มีเสถียรภาพได้เช่นกัน ในทางกลับกันหากมีน้อยเกินไปก็จะไม่ทำให้เกิดการไหลหมุนวนย้อนกลับและเปลวไฟจะไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งจากรูปที่ 3.16 นั้นจะเห็นว่าแบบที่แรกนั้นค่า S_N น้อยเกินไปที่จะทำให้เกิดการไหลย้อนกลับ แต่ในขณะที่แบบที่ 3 นั้นมีค่าสูงจนทำให้เกิดการไหลแบบดอกเห็ด (Mushroom Flow) ส่งผลให้เปลวไฟไม่มีเสถียรภาพ



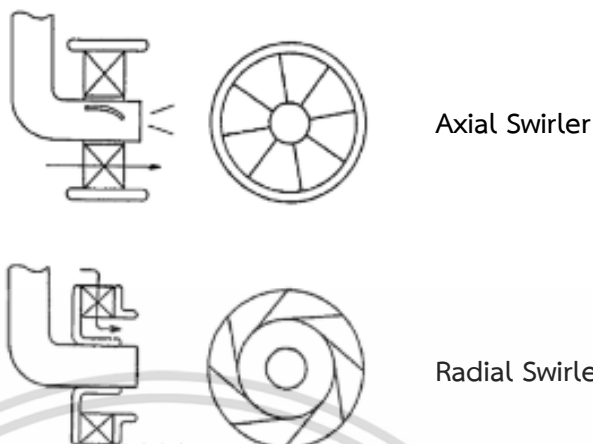
รูปที่ 3.16 แสดงลักษณะของการไหลที่ S_N แตกต่างกัน [24]

3.5.5 ตัวสร้างกระแสหมุนวนเป็นเกลียว (Swirler)

Swirler สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ

1. Axial-Swirler
2. Radial-Swirler

ซึ่งลักษณะของ Swirler แต่ละประเภทแสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 Swirler แบบ Axial Type และ Radial Type [20]

3.6 มลพิษ [15], [16]

มลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน เป็นสาเหตุหลักของการทำลายสิ่งแวดล้อมยังมีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นก็จะยิ่งทำลายมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นการเปลี่ยนรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนจะไม่มี ความหมายต่อการดำรงชีวิตเลยหากไม่ได้ตระหนักถึงผลกระทบจากมลพิษที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

แม้ว่าก๊าซส่วนใหญ่ที่เกิดจากการเผาไหม้คือคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) ซึ่งไม่เป็นพิษแต่ในปัจจุบันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้กลายเป็นสาเหตุหลักของการเกิดภาวะเรือนกระจก ดังนั้นจึงเป็นประเด็นสำคัญที่จะต้องหาทางควบคุมการปล่อยปริมาณก๊าซดังกล่าว

3.6.1 ผลกระทบของมลพิษ

ตัวอย่างผลกระทบที่มีผลต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เช่น

1. ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางลบของสภาพแวดล้อม การเพิ่มขึ้นของปัญหาหมอกควัน และมีผลต่อสภาพแวดล้อมของโลกโดยรวม
2. ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการเจ็บป่วยและการเสียชีวิตของมนุษย์ที่ได้รับมลพิษทั้งทางตรงและทางอ้อม
3. เป็นอันตรายต่อพืช พื้นที่ป่า ท้องทุ่ง แนวปะการัง และแหล่งนิเวศวิทยาอื่นๆ เนื่องจากมีสารพิษประเภท SO_2 และ C_2H_4 เป็นต้น ที่เป็นอันตรายต่อระบบสังเคราะห์แสงของพืช
4. การสัมผัสหรือฝังตัวของมลพิษบนผิวสิ่งปลูกสร้าง วัสดุต่างๆทำให้เสื่อมสภาพและอาจสึกกร่อนได้ ดูไม่สวยงาม

3.6.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)

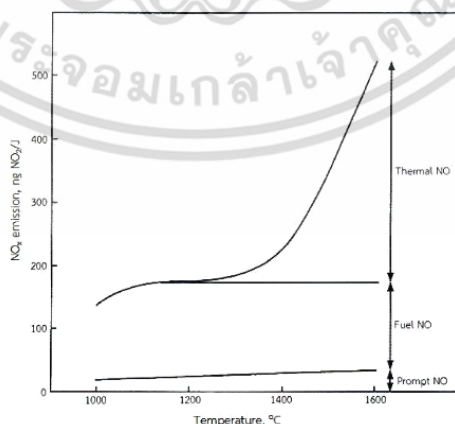
ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนนั้นเป็นสาเหตุการทำให้เกิดหมอกทางโฟโตเคมีหรือก๊าซโอโซนในระดับต่ำซึ่งเกิดจาก NO_x และ HC ที่มาจากไอเสียของรถยนต์เป็นส่วนใหญ่มาทำปฏิกิริยากัน โดยหมอกทางโฟโตเคมีจะทำให้มีปัญหาเกี่ยวกับทางเดินหายใจและไปลดหน้าที่ของเม็ดเลือดแดงในการนำออกซิเจนไปเลี้ยงสมอง เป็นต้น

NO_x นอกจากเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดโอโซนในระดับต่ำที่เป็นพิษแล้ว ยังเป็นตัวทำลายโอโซนที่เป็นประโยชน์ซึ่งอยู่ระดับชั้นบรรยากาศ Stratosphere ของโลกอีกด้วย ดังสมการ



สังเกตได้ว่า NO เพียงโมเลกุลเดียวมีผลต่อการทำลาย O_3 อย่างต่อเนื่องโดยปฏิกิริยารีดักชันเพราะ NO_2 ที่เกิดจากสมการ 3.6 จะถูกรีดิวซ์มาเป็น NO ตามสมการ 3.7 เพื่อย้อนกลับไปทำลาย O_3 ให้เป็น O_2 ต่อไปตามสมการ 3.6 ซึ่งเกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่เช่นนี้อย่างต่อเนื่อง (UV) จากดวงอาทิตย์ที่ส่องสู่ผิวโลก ช่วยลดการเป็นโรคมะเร็งผิวหนังได้

ดังนั้นการหาวิธีลดปริมาณการปล่อย NO_x สู่อากาศจึงกลายเป็นประเด็นที่สำคัญที่สุดของการเผาไหม้ การที่จะทำเช่นนี้ได้ต้องอาศัยความเข้าใจอย่างถ่องแท้ถึงกลไกจลนทางเคมีของการเกิด NO_x พร้อมทั้งเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างจลนทางเคมีกับพลศาสตร์ของไหลด้วย สิ่งเหล่านี้จะเป็นตัวชี้นำไปสู่การค้นพบวิธีใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณการปล่อย NO_x จากการเผาไหม้ ซึ่ง NO_x ที่พบในก๊าซจากการเผาไหม้แบ่งออกเป็น 4 ประเภทคือ NO_x , prompt NO_x , fuel nitrogen oxides และ N_2O



รูปที่ 3.19 ความเข้มข้นที่สมดุลของ N_2O ที่มีส่วนประกอบของออกซิเจนในก๊าซที่แตกต่างกัน [16]

รูปที่ 3.19 แสดงค่าประมาณของการเกิด thermal NO_x, prompt NO_x และ fuel NO_x ที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ผ่านหินซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ จะพบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1300 °C กลไกการเกิด thermal NO_x จะน้อยมากเมื่อเทียบกับอีกสองชนิด ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น thermal NO_x ก็จะเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากกลไกการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนทั้งสามชนิดมีจลนเคมีที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีอัตราการเกิดที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะได้แยกพิจารณาการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนทั้งสามชนิดดังกล่าว

3.6.2.1 Thermal NO_x

Thermal NO_x หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Zeldovich NO_x มีสมการพื้นฐานดังนี้



เมื่อ k คือค่าคงที่

$$k_1 = 1.8 \times 10^{14} \exp(-318 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} / (RT)) \text{ cm}^3 / (\text{mol} \cdot \text{s})$$

$$k_2 = 9.0 \times 10^9 \exp(-27 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} / (RT)) \text{ cm}^3 / (\text{mol} \cdot \text{s})$$

$$k_3 = 2.8 \times 10^{13} \text{ cm}^3 / (\text{mol} \cdot \text{s})$$

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] \quad (3.11)$$

เนื่องจากอัตราการเกิดอะตอมของไนโตรเจนขณะเกิดปฏิกิริยาในสภาวะเสถียรคือ

$$\frac{d[N]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] \approx 0 \quad (3.12)$$

ดังนั้นอัตราการเกิด NO คือ

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[O][N_2] \quad (3.13)$$

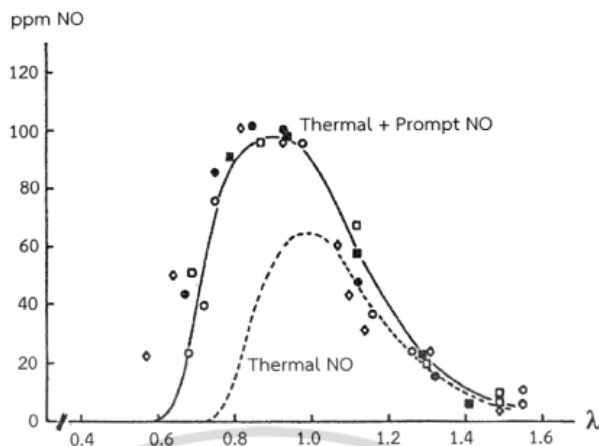
จะเห็นได้ว่าการที่ลดจะปริมาณ thermal NO_x ได้นั้นมีเพียงสองวิธีคือ ลด [N₂] และ [O] หรือลด k₁ ซึ่งมีความหมายคือต้องลดอุณหภูมิในการเผาไหม้นั่นเอง

3.6.2.2 PromptNO_x

เมื่อทำการวัดหาปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ของเปลวไฟแบบราบเรียบจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนจากจุดที่ห่างจากปลายของเปลวไฟเข้าหาแนวของเปลวไฟพบว่าปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ไม่ได้มีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์แต่อย่างใดแต่กลับพบว่ามีไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด (promptly) ที่บริเวณใกล้แนวของเปลวไฟซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่า PromptNO_x เกิดจากอนุมูลอิสระ CH ที่เกิดขึ้นในลักษณะเป็นสารชั้นกลางที่บริเวณแนวของเปลวไฟ จากนั้น CH จะทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนในอากาศทำให้ได้กรดไฮโดรไซยานิค (HCN) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อไปจนเกิด NO ดังสมการต่อไปนี้



PromptNO_x มักเกิดในสภาวะการเผาไหม้แบบผสมล่วงหน้าเท่านั้น ทั้งนี้เพราะอนุมูลอิสระ CH จะเกิดจากอะซีทีลีน (C₂H₂) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารที่เกิดก่อนหน้า ดังนั้น PromptNO_x จะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า thermal NO_x เพราะปฏิกิริยาต้องใช้พลังงานกระตุ้นที่น้อยกว่าที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำประมาณ 1000 K เท่านั้น รูปที่ 3.20 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณและผลการทดลองหาค่า thermal NO_x และ PromptNO_x ของเปลวไฟมีเทนกับอากาศในเตาเผาแบบกวน (well-stirred reactor) และคำนวณโดยกลไกผสมระหว่าง Zeldovich+Fernimore จะเห็นได้ว่าส่วนต่างระหว่าง thermal-prompt NO_x กับ thermal NO_x ก็คือ PromptNO_x นั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองนี้



รูปที่ 3.20 ผลการคำนวณและผลการทดลองหาค่า thermal NO_x และ prompt NO_x ของเปลวไฟมีเทนกับอากาศในเตาเผาไหม้แบบกวน λ หมายถึงอัตราส่วนที่ใช้ จจริงต่ออากาศทางทฤษฎี [16]

3.6.2.3 Fuel NO_x

สำหรับเชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบได้แก่ เชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งถ่านหินอาจมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบได้ถึงร้อยละ 2 ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะเปลี่ยนไปเป็น HCN ในเปลวไฟซึ่งจะเปลี่ยนต่อไปเป็น NH หรือ NH_2 จากนั้นทั้งคู่ก็จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและทำให้เกิด $\text{NO} + \text{H}_2\text{O}$ หรืออาจทำปฏิกิริยากับ NO แล้วเปลี่ยนเป็น N_2 และ H_2O ดังนั้นสัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่หลุดออกมาจากเปลวไฟกลายเป็น NO จะเป็นอิสระต่ออัตราส่วนระหว่าง NO / O_2 ในเปลวไฟ นั่นคือหากรักษาให้สัดส่วนของออกซิเจนในก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงในเปลวไฟให้ต่ำไว้ ก็จะทำให้ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเปลี่ยนไปเป็น NO น้อยลงตามไปด้วย

สัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนไปเป็น NO_x ในแก๊สไอเสียนั้นประมาณได้ว่ามีสัดส่วนประมาณร้อยละ 20 ถึง 50 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะของเตาเผาและอาจขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางเคมีของไนโตรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงอีกด้วย จะเห็นได้ว่าแม้จะทำการวิเคราะห์และศึกษากลไกการเกิด NO แต่ละประเภทแยกออกจากกัน แต่ทั้ง thermal NO_x , prompt NO_x และ Fuel NO_x ต่างก็เกิดขึ้นพร้อมๆกันและมีกลไกการเกิดร่วมกัน

3.6.2.4 NO_x ที่เกิดจาก N_2O

thermal NO_x เกิดขึ้นได้ดีภายใต้สภาวะการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง $>1700 \text{ K}$ ในขณะที่ prompt NO_x เกิดขึ้นได้ดีภายใต้สภาวะการเผาไหม้แบบผสมหนาแต่สำหรับไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดผ่าน N_2O จะเกิดได้ดีที่สภาวะการเผาไหม้แบบผสมบางและอุณหภูมิต่ำเช่นเดียวกับการเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันแก๊สที่มีอุณหภูมิไม่สูงมากพอที่จะส่งผลให้เกิด thermal NO_x ขณะเดียวกันการเผาไหม้ที่สภาวะส่วนผสมบางยังป้องกันไม่ให้เกิดอนุมูลอิสระ CH ซึ่งเท่ากับว่าเป็นการป้องกันการเกิด

prompt NO_x โดยอัตโนมัติ ดังนั้นไนโตรเจนที่เกิดผ่าน N_2O นี้จะมีความคล้ายคลึงกับการเกิด thermal NO_x ในแง่ของอะตอมออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโมเลกุลของไนโตรเจนแต่ต้องอาศัยโมเลกุลที่สาม (M) เป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิด N_2O จากนั้น N_2O จะทำปฏิกิริยากับอะตอมของออกซิเจนต่อไปจนเกิดเป็น NO ตามสมการดังนี้



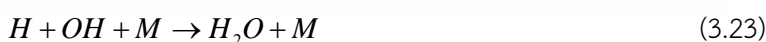
ยิ่งความดันการเผาไหม้มีค่าสูงเท่าไร NO ที่เกิดขึ้นจะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น เพราะไม่เพียงแต่มีพลังงานกระตุ้นที่ต่ำแล้ว อุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำก็ไม่ได้มีผลต่อการยับยั้งการเกิด NO เหมือนเช่น thermal NO_x อีกต่อไป ดังนั้น NO ที่เกิดผ่าน N_2O จึงเป็นสาเหตุหลักของการเผาไหม้ที่ส่วนผสมบางที่ถูกเจือจางด้วยอากาศมากๆ

3.6.3 คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide)

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้มีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น สภาวะการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป การผสมคลุกเคล้ากันไม่ดีพอ ปริมาณอากาศไม่เพียงพอ นอกจากนี้ยังมีสาเหตุจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงจนทำให้เกิดการแตกสลายของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มาเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) ได้ดังสมการ



สาเหตุที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิด CO คือการมีเวลาสั้นเกินไปในโซนการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากต้องระบายไอเสียออกทันที อุณหภูมิและความดันเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ดังนั้น CO จะอยู่ในสภาวะสมดุลบางส่วนมากกว่าที่จะอยู่ในสภาวะสมดุลอย่างสมบูรณ์ ทำให้การเปลี่ยนแปลงจาก CO เป็น CO_2 เกิดขึ้นไม่เต็มที่เพราะถูกจำกัดด้วยการแย่งเข้าทำปฏิกิริยาของ OH กับ H



ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถควบคุมได้จากอัตราส่วนผสมหรือปริมาณออกซิเจนในปฏิกิริยาการเผาไหม้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และเป็นพิษต่อร่างกายอย่างมาก เมื่อร่างกายได้รับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะทำให้ร่างกาย สมอง และกล้ามเนื้อได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ ปฏิกิริยาตอบสนองของร่างกายจะช้าลงและขาดการตัดสินใจที่ดีเมื่อได้รับก๊าซชนิดนี้เข้าไปในปริมาณมากๆสามารถทำให้เสียชีวิตได้

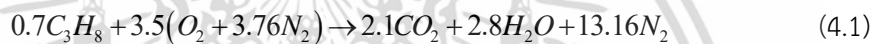
บทที่ 4

การคำนวณและการออกแบบ

ในการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาโดยใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) ผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ประยุกต์นำเอาวัสดุพูนและตัวสร้างกระแสการหมุนวนมาใช้เพื่อรักษาเสถียรภาพการเผาไหม้ ดังนั้นการนำข้อมูลมาวิเคราะห์อย่างมีประสิทธิภาพจึงต้องอาศัยการคำนวณที่ถูกต้องและใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอการคำนวณในส่วนต่างๆ ทั้งเชื้อเพลิงและย่านการทดสอบ

4.1 เชื้อเพลิงแก๊สปิโตรเลียมเหลวผสมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

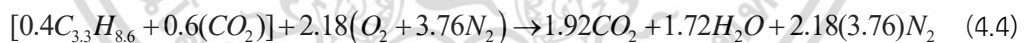
LPG เป็นเชื้อเพลิงที่มีโพรเพนและบิวเทนเป็นองค์ประกอบอยู่ 70 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ สามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้



นำสมการ 4.1 และ 4.2 มารวมกัน



ในการศึกษานั้นจะใช้เชื้อเพลิงแอลพีจี 40 % และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 60 % [2] สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



$\therefore C_{3.3}H_{8.6}$ จำนวน 1 โมล จะมีปริมาณเท่ากับ

$$(0.4 \times 48.2) + (0.6 \times 44) \left(\frac{g}{mole} \times \frac{1kg}{1000g} \right) = 0.04568 kg / mol$$

\therefore อากาศจำนวน 1 โมล จะมีปริมาณเท่ากับ $\frac{2.18(32 + 105.28)}{1000} = 0.29927 kg$

นำไปแทนในสูตรอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี

$$A/F_{stoi} = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} = \frac{0.29927}{0.04568} = 6.55 \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลวผสมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เนื่องจากเชื้อเพลิงจัดเป็นก๊าซที่สามารถอัดตัวได้ สามารถหาความหนาแน่นได้ดังนี้

$$\rho_{fuel} = \frac{P}{RT}$$

การหาอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงสามารถหาได้จาก

$$\dot{m}_{fuel} = \dot{V}_{LPG+CO_2} \times \rho_{LPG+CO_2} \quad (4.6)$$

4.3 อัตราการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

อัตราการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หรือปริมาณความร้อนที่หัวเผาสามารถผลิตได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.7

$$Q = \frac{\dot{m}_{fuel} \times LHV}{A} \quad (4.7)$$

ซึ่งพื้นที่ทางออกของหัวเผามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 52 มิลลิเมตร และค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value) ของเชื้อเพลิงมีค่า 18.68 MJ/kg ตารางสรุปเงื่อนไขการป้อนเชื้อเพลิงสัมพันธ์กับอัตราการเผาไหม้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และสัมพันธ์กับปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลวซึ่งพิจารณาที่ความเร็วของเชื้อเพลิงเท่ากัน โดยที่อัตราการไหลในการทดลองนั้นต้องแปลงเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตรเนื่องจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลในการทดลองนั้นเป็นการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตร โดยหาได้จาก

$$\dot{V} = \frac{mRT}{P}$$

ซึ่งสรุปการคำนวณอัตราการไหลแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขเชื้อเพลิงสำหรับการทดสอบ

\dot{V}_{LPG} (L/min)	\dot{m}_{LPG} (kg/s)	Q_{LPG} (kW)	$\dot{V}_{fuel(LPG+CO_2)}$ (L/min)	$\dot{m}_{fuel(LPG+CO_2)}$ (kg/s)	$Q_{fuel(LPG+CO_2)}$ (kW)
1	4.781×10^{-5}	1.911	1.5	4.781×10^{-5}	0.893
1.5	7.172×10^{-5}	2.6777	2	7.172×10^{-5}	1.339
2	9.562×10^{-5}	3.592	3	9.562×10^{-5}	1.786

4.4 ปริมาณอากาศและอากาศส่วนเกิน (\dot{m}_{air})

ในการทดลองนั้นเป็นการทดลองโดยทำการควบคุมอากาศในการเผาไหม้เพื่อศึกษาสมรรถนะในการเผาไหม้ ได้แก่ ลักษณะของเปลวไฟ การกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และปริมาณมลพิษในก๊าซไอเสีย โดยปรับเปลี่ยนอัตราการเผาไหม้ดังตารางที่ 4.1 จากงานวิจัยที่ผ่านมา[28] พบว่าควบคุมปริมาณอากาศภายใต้อัตราส่วนสมมูล 0.6 ในการเผาไหม้ในหัวเผาวัสดุพุนของเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม โดยอากาศจะถูกป้อนให้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่บริเวณการเผาไหม้ที่ 100% ของปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด (%Premixed = 100%_{total air}) ซึ่งพบว่าการเผาไหม้มีเสถียรภาพ อุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงและปริมาณ CO ต่ำ ดังนั้นจึงเลือกเงื่อนไขเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการทดสอบ ในขณะที่ทำการป้อนอากาศส่วนที่หนึ่งที่ 100% อากาศส่วนที่สองที่ป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ก็คือ 64.25% ซึ่งปริมาณอากาศที่สัมพันธ์กับอัตราส่วนสมมูลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.8

$$\dot{m}_{air} = \frac{(A/F)_{stoi}}{\Phi} \times \dot{m}_{fuel} \quad (4.8)$$

เมื่อทราบปริมาณการใช้อากาศสำหรับการเผาไหม้แล้วสามารถคำนวณหาปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (A/F_{actual}) ได้จากสมการที่ 4.9

$$A/F_{actual} = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} \quad (4.9)$$

4.5 เปอร์เซนต์อากาศส่วนเกิน(%EA)

ในการหาเปอร์เซนต์อากาศส่วนเกินสามารถคำนวณได้ 2 วิธี ดังนี้

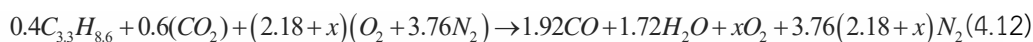
- วิธีที่ 1 การคำนวณเปอร์เซนต์อากาศส่วนเกินได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.10 และ 4.11

$$\Phi = \frac{(A/F)_{stoi}}{(A/F)_{actual}} \quad (4.10)$$

$$\%EA = \frac{(1-\Phi)}{\Phi} \times 100\% \quad (4.11)$$

- วิธีที่ 2 การคำนวณอากาศส่วนเกินจากเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนที่วัดได้บริเวณจุดวัดก๊าซหลังการเผาไหม้

ซึ่งในการทดลองจะเป็นการเผาไหม้แบบอัตราส่วนผสมบาง สมการการเผาไหม้ดังสมการที่ 4.4 เมื่อพิจารณาให้มีอากาศส่วนเกินสามารถเขียนได้ดังนี้



ดังนั้นจะคำนวณค่า x ได้จาก ความสัมพันธ์ของสมการสัดส่วนโดยปริมาตรของออกซิเจนในอากาศไอเสียแบบแห้ง (dry basis) ดังสมการที่ 4.13 ปริมาณออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ ($X_{O_2@reaction}$) สามารถคำนวณได้จาก

$$X_{O_2@reaction} = \frac{x}{1.92 + 1.72 + x + 3.76(2.18 + x)} \quad (\text{dry basis}) \quad (4.13)$$

เมื่อจัดรูปสมการ 4.13 สามารถค่า x ได้ดังสมการที่ 4.14

$$x = \frac{11.8368 X_{O_2@reaction}}{1 - 3.76 X_{O_2@reaction}} \quad (4.14)$$

โดยจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้น [27],[30] ซึ่งได้ศึกษาการเผาไหม้ของก๊าซเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มที่ยานอัตราส่วนสมมูล 0.6 จากงานวิจัยดังกล่าว ในการทดลองของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้น ได้ทดลองภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม ซึ่งจะวัดปริมาณออกซิเจนของไอเสียได้ที่ 8% โดยปริมาตร แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณอากาศส่วนเกินที่สอดคล้องกับอัตราส่วนสมมูล ดังนั้นในการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มของงานวิจัยนี้จึง set up ที่เงื่อนไขเดียวกันกับงานวิจัยดังกล่าว เพื่อใช้เป็นกรณีพื้นฐานในการทำเปรียบเทียบการเผาไหม้

ในคำนวณหาปริมาณอากาศส่วนเกินที่สอดคล้องกับอัตราส่วนสมมูลและปริมาณออกซิเจนที่เหลือในก๊าซไอเสีย เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบปริมาณมลพิษในการศึกษาสำหรับเงื่อนไขต่างๆที่ 8% ดังนั้นในการแสดงผลสำหรับการเปรียบเทียบผลปริมาณมลพิษนั้นจึงจำเป็นต้องเปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 4.15

$$[CO_2] = \frac{(0.21 - 0.08)}{(0.21 - X_{O_2,mea})} \times [CO]_{mea} \quad (4.15)$$

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขเชื้อเพลิงและอากาศที่ใช้สำหรับการทดลองภายใต้การควบคุมอากาศในการเผาไหม้

Q (kW)	Φ	\dot{m}_{fuel} (kg/s)	\dot{m}_{air} (kg/s)	%EA	$O_{2,Exhaust}$ (%)
0.893	0.6	4.781×10^{-5}	5.22×10^{-4}	64.25	7.5
1.339	0.6	7.172×10^{-5}	7.83×10^{-4}	64.25	7.5
1.786	0.6	9.562×10^{-5}	1.04×10^{-3}	64.25	7.5
0.893	0.5	4.781×10^{-5}	6.26×10^{-4}	100	10
1.339	0.5	7.172×10^{-5}	9.40×10^{-4}	100	10
1.786	0.5	9.562×10^{-5}	1.25×10^{-3}	100	10
0.893	0.4	4.781×10^{-5}	7.80×10^{-4}	150	12
1.339	0.4	7.172×10^{-5}	1.17×10^{-3}	150	12
1.786	0.4	9.562×10^{-5}	1.57×10^{-3}	150	12

4.6 การวัดค่าความพรุนของวัสดุพรุน

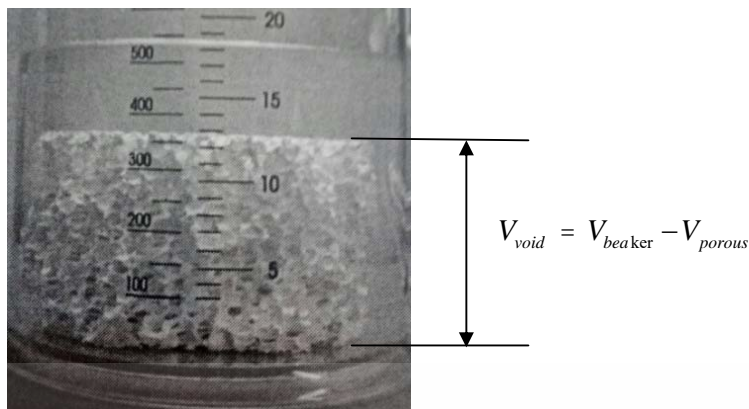
ค่าความพรุนของวัสดุพรุนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความมีเสถียรภาพการเผาไหม้ในการวัสดุพรุน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำวัสดุพรุนที่ใช้ในการทดลองมาหาค่าความพรุนด้วยวิธีนำของเหลวเข้าไปแทนที่ช่องว่างภายในวัสดุพรุนและคำนวณได้ดังสมการที่ 4.16 ซึ่งพบว่าค่าความพรุนมีค่าประมาณ 0.9 ซึ่งถูกพิสูจน์จากงานวิจัยที่ผ่านมาแล้วว่าที่ค่าความพรุนดังกล่าวสามารถรักษาเสถียรภาพการเผาไหม้ได้ดี [28]

$$\mathcal{E} = \frac{V_{void}}{V_{tot}} \quad (4.16)$$

เมื่อ

V_{void} = ปริมาตรน้ำที่เข้ามาแทนที่วัสดุพรุน

V_{total} = ปริมาตรทั้งหมด



รูปที่ 4.1 การทดลองหาค่าความพรุน

4.7 การออกแบบอุปกรณ์สร้างกระแสการไหลหมุนวนเป็นเกลียว (Swirler)

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์ช่วยสร้างการหมุนวนของอากาศภายในการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำเพื่อที่จะทำให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นและจำเป็นต้องมีการคำนวณหาค่าความรุนแรงของการหมุนวนเป็นเกลียว (Swirl Number, S_N) เพื่อนำไปซึ่งการสร้างอุปกรณ์สร้างกระแสการไหลดังกล่าว จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา นั้น พบว่าย่านสำหรับค่า S_N ที่มีค่าความรุนแรงต่ำ (Low Swirl) คือ $0.3 < S_N < 0.5$ และ S_N ที่มีค่าความรุนแรงสูง (High Swirl) คือ $0.6 < S_N < 0.8$ ซึ่งในการศึกษาพบว่าค่า S_N ต่ำ ที่ 0.3 นั้นให้เปลวไฟของการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำที่ดีในย่านของการเผาไหม้แบบส่วนผสมบางจึงนำมาอ้างอิงเป็นเงื่อนไขในการออกแบบอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนเป็นเกลียว นอกจากนี้สำหรับเงื่อนไขสำหรับการศึกษาสำหรับ S_N สูง (High Swirl) จึงเลือก $S_N = 0.8$ มาเป็นเงื่อนไขในการศึกษาและสำหรับการออกแบบอุปกรณ์เช่นกัน

4.7.1 การคำนวณค่าความรุนแรงของการไหลหมุนวนเป็นเกลียว (Swirl Number, S_N)

ค่าความรุนแรงของการไหลหมุนวนเป็นเกลียว (Swirl Number) สามารถหาได้จากสมการที่ 4.17

$$S_N = \frac{G_t}{RG_a} \quad (4.17)$$

เมื่อ	G_{ang}	คือ โมเมนตัมในแนวรัศมี
	G_T	คือ โมเมนตัมในแนวแกน
	R	คือ อัตราส่วนระหว่างรัศมีจากจุดกึ่งกลางถึงทางออกของ Swirler (R_c) กับรัศมีทั้งหมดของ Swirl (R_i)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งตัวแปรดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.6-3.9 หากแทนค่าลงในสมการที่ 4.15 นำมาจัดรูปจะได้ดังสมการที่ 4.18 [21]

$$S_N = \frac{2}{3} \left[\frac{W(R_o^3 - R_i^3)}{R_o V (R_o^2 - R_i^2)} \right] \quad (4.18)$$

ซึ่งจากการคำนวณสามารถสรุปเป็นเงื่อนไขสำหรับการทดลองได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองจากการคำนวณค่า Swirl Number

Q (kW)	Φ	\dot{m}_{fuel} (kg/s)	\dot{m}_{air} (kg/s)	Swirl Number	มุมของใบ Swirl
0.893	0.6	4.781×10^{-5}	5.22×10^{-4}	0.8	45°
1.339	0.6	7.172×10^{-5}	7.83×10^{-4}	0.8	45°
1.786	0.6	9.562×10^{-5}	1.04×10^{-3}	0.8	45°
0.893	0.6	4.781×10^{-5}	5.22×10^{-4}	0.3	24°
1.339	0.6	7.172×10^{-5}	7.83×10^{-4}	0.3	24°
1.786	0.6	9.562×10^{-5}	1.04×10^{-3}	0.3	24°

บทที่ 5

เงื่อนไขและอุปกรณ์การทดลอง

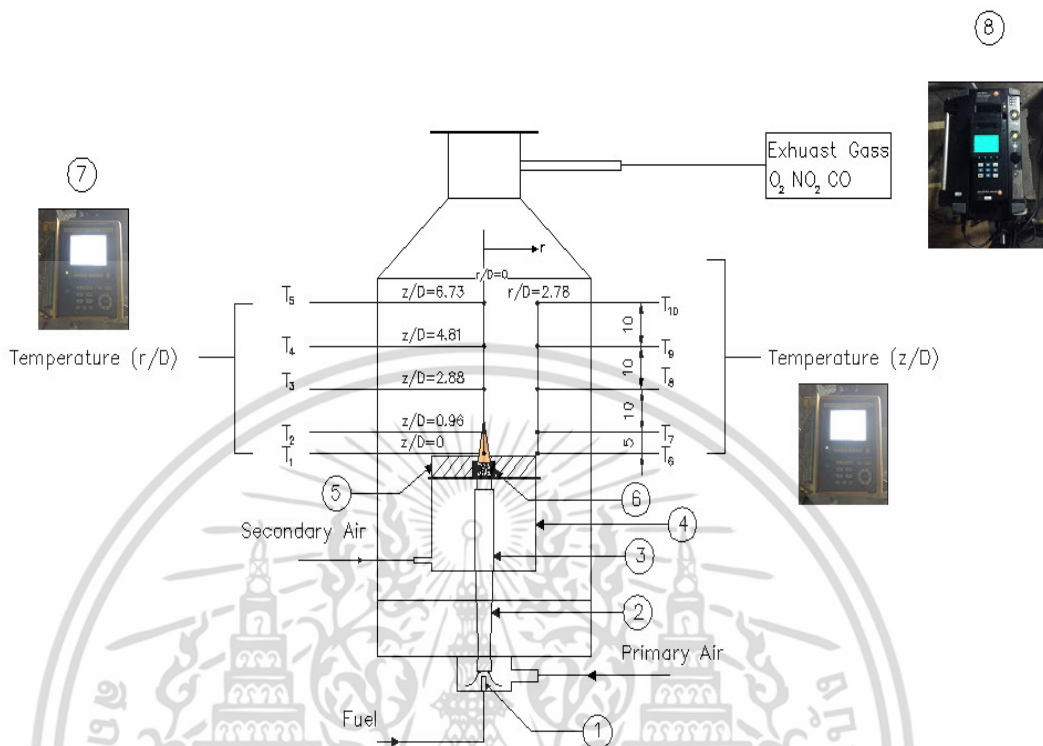
ในการทดสอบสมรรถนะการเผาไหม้หัวเผาโดยการนำวัสดุพูนมาประยุกต์ใช้และทำการติดตั้งตัวสร้างกระแสการหมุนวนเป็นเกลียวสำหรับการทดสอบการเผาไหม้แบบผสมกันมาก่อนโดยใช้ก๊าซหุงต้มผสมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเงื่อนไขและไดอะแกรมการทดลองรวมถึงรายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองซึ่งอธิบายในหัวข้อ 5.1 และ 5.2

5.1 เงื่อนไขการทดลอง

ในการทดลองมุ่งเน้นศึกษาสมรรถนะการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำในวัสดุพูนโดยมีตัวสร้างกระแสการหมุนวนเป็นเกลียวในการเพิ่มการผสมผสานระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ซึ่งเชื้อเพลิงได้มีการผสมกับอากาศบางส่วนก่อนการเผาไหม้ภายใต้การควบคุมปริมาณอากาศในการเผาไหม้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำจะมีเสถียรภาพและการปลดปล่อยมลพิษต่ำที่เงื่อนไขอากาศต่อเชื้อเพลิงแบบบาง โดยที่เงื่อนไขดังกล่าวที่ $\Phi = 0.6$ [28] การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลวในวัสดุพูนให้การกระจายตัวอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงได้ศึกษาที่เงื่อนไขเช่นเดียวกันเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การเผาไหม้ที่เกิดในเชื้อเพลิงค่าความต่ำเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว โดยอากาศที่ถูกบดผสมกับเชื้อเพลิงในสัดส่วนที่กำหนดก่อนการเผาไหม้และการเผาไหม้เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้เพื่อบันทึกผลการกระจายตัวของอุณหภูมิ ปริมาณไอเสียและลักษณะของเปลวไฟเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำโดยเปรียบเทียบกับกรณีการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลวภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งเงื่อนไขต่างๆและวัตถุประสงค์ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 5.1

5.1.1 ชุดการทดลองสำหรับการทดลองภายใต้การควบคุมอากาศในการเผาไหม้

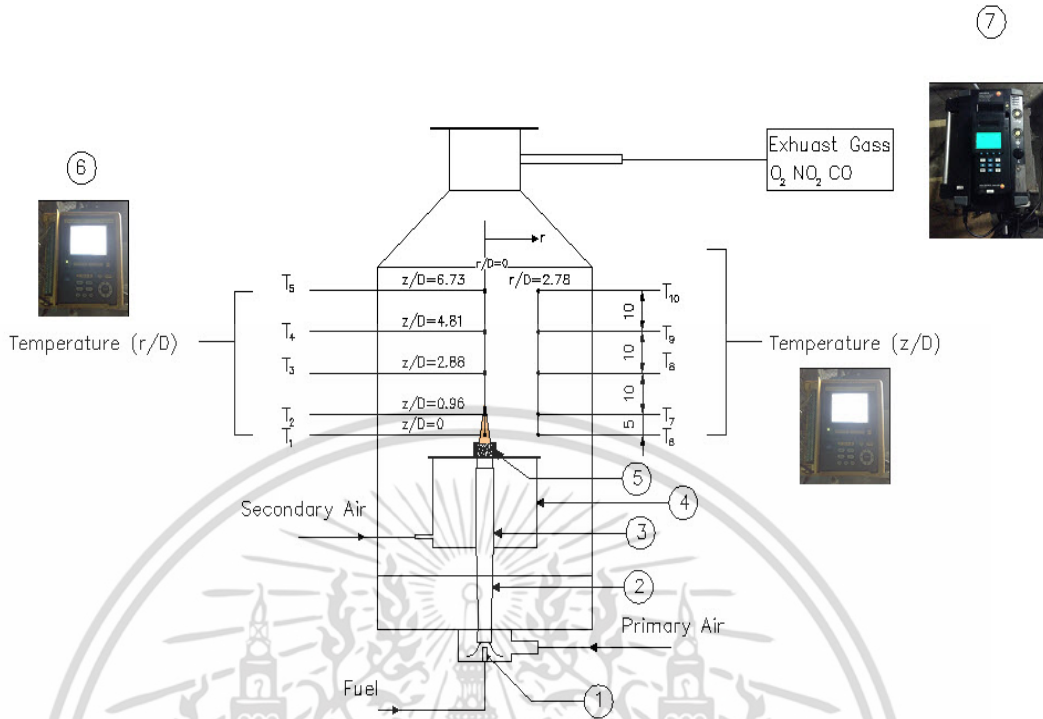
รูปที่ 5.1 และ 5.2 แสดงไดอะแกรมชุดทดลองในการศึกษาครั้งนี้ โดยจะแบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วนนั่นคือกรณีที่ไม่มีตัวสร้างกระแสการหมุนวนเป็นเกลียว (Swirler) และส่วนที่มีตัวสร้างกระแสการหมุนวนเป็นเกลียว โดยอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยการป้อนผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหลโดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ในส่วนที่หนึ่งเข้าสู่เพื่อเข้าผสมกับเชื้อเพลิงในกล่องผสมที่ติดตั้งหัวฉีดเชื้อเพลิงอยู่ภายในและสำหรับอากาศส่วนที่สอง จะถูกจ่ายเข้าไปผสมกับส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนที่หนึ่งในระหว่างการเผาไหม้ โดยปริมาณอากาศในส่วนที่หนึ่ง จะคิดเป็นสัดส่วนจากปริมาณที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด โดยอากาศที่ใช้ในการทดลองนั้นจะมากับลม ในการศึกษาจะบันทึกผลในส่วนของการกระจายอุณหภูมิ ปริมาณก๊าซไอเสีย และลักษณะเปลวไฟ โดยการกระจายตัวของอุณหภูมิทำการบันทึกทั้งหมด 2 แกน นั่นคือการกระจายตัวของอุณหภูมิตามระดับความสูง (z/D) จำนวน 5 จุด และระยะแกนกลางของหัวเผา (r/D) จำนวน 5 จุด



รูปที่ 5.1 ไดอะแกรมชุดทดลองกรณีมีตัวสร้างกระแสการหมุนวนเป็นเกลียว

- | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. หัวฉีดเชื้อเพลิง | 2. ท่อผสม |
| 3. หัวเผา | 4. ช่องการไหลของอากาศส่วนที่ 2 |
| 5. Swirler | 6. วัสดุพอรัน |
| 7. เทอร์โมคัปเปิลและอุปกรณ์อ่านค่า | 8. จุดวัดก๊าซไอเสียและเครื่องวัดก๊าซ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 โดยแกรมชุดทดลองกรณีไม่ติดตั้งตัวสร้างกระแสการหมุนวนเป็นเกลียว

- | | |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| 1. หัวฉีดเชื้อเพลิง | 2. ท่อผสม |
| 3. หัวเผา | 4. ช่องการไหลของอากาศส่วนที่ 2 |
| 5. วัสดุพรุน | 6. เทอร์โมคัปเปิลและอุปกรณ์อ่านค่า |
| 7. จุดวัดก๊าซไอเสียและเครื่องวัดก๊าซ | |

5.2 อุปกรณ์ในการทดลอง

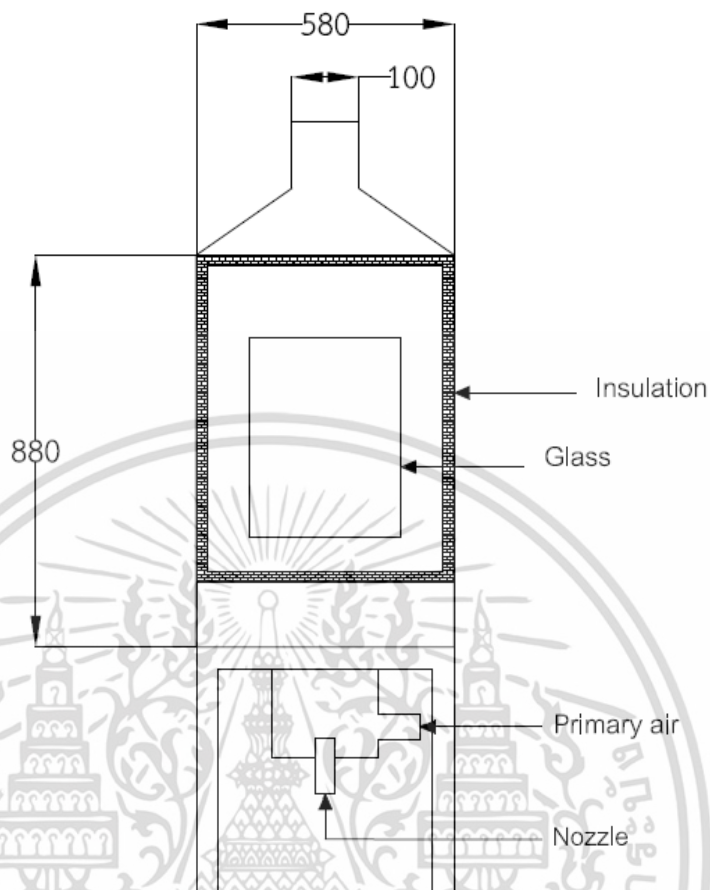
สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้การทดลอง

5.2.1 ห้องเผาไหม้

ห้องเผาไหม้ในการทดสอบการเผาไหม้แสดงในรูปที่ 5.3 จะเป็นแบบปิดลักษณะเป็นตัวถังทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 58 เซนติเมตร สูง 88 เซนติเมตร ภายในหุ้มฉนวนกันความร้อนด้วยเซรามิกส์ ความหนา 1 นิ้ว ตัวถังเชื่อมต่อกับท่อทรงกรวยเพื่อลดขนาดห้องเผาไหม้สำหรับลำเลียงก๊าซไอเสียผ่านท่อขนาด 4 นิ้ว ด้านหน้าติดตั้งกระจกทนความร้อนเพื่อสังเกตลักษณะของเปลวไฟด้านล่างจะเป็นกล่องเพื่อให้อากาศส่วนที่หนึ่งเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ให้เป็นไปตามเงื่อนไขการทดลอง โดยอากาศจะถูกป้อนเข้ามาจากแหล่งผลิต (ปั๊มลม)

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขการทดลองและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองภายใต้การควบคุมอากาศในการเผาไหม้

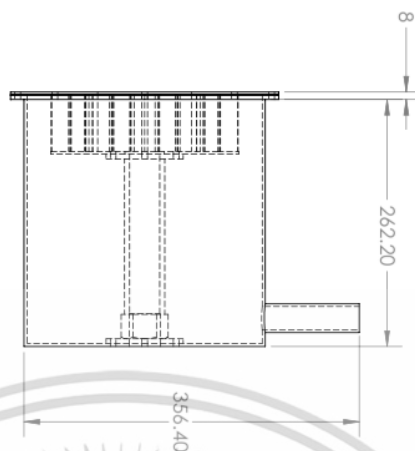
วัตถุประสงค์ที่ศึกษา	ประเภทหัวเผา/อุปกรณ์	เงื่อนไขเชื้อเพลิง	เงื่อนไขอากาศ	การบันทึกผล
การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิง ค่าความต่ำในวัสดุพูน เปรียบเทียบกับเผาไหม้ เชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว	- หัวเผาวัสดุพูนทรงกระบอก เจาะรู ความหนาแน่น 15 ppi ค่าความพูน 0.9 - ไม่มีการติดตั้งตัวสร้างกระแส การหมุนวนเป็นเกลียว	อัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ 4.781×10^{-5} kg/s 7.172×10^{-5} kg/s 9.562×10^{-5} kg/s	ปรับอัตราการไหลอากาศ สอดคล้องกับ $\Phi = 0.6$	1. ลักษณะของเปลวไฟ 2. การกระจายอุณหภูมิตามระดับ ความสูง 3. ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์
การศึกษาอิทธิพลความรุนแรง ของกระแสการหมุนวนเป็น เกลียวที่ส่งกระทบต่อสมรรถนะ การเผาไหม้	- หัวเผาวัสดุพูนทรงกระบอก เจาะรูความหนาแน่น 15 ppi - ติดตั้ง Swirler มุม 24 และ 45 องศา	อัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ 4.781×10^{-5} kg/s 7.172×10^{-5} kg/s 9.562×10^{-5} kg/s	ปรับอัตราการไหลอากาศ สอดคล้องกับ $\Phi = 0.6$	1. ลักษณะของเปลวไฟ 2. การกระจายอุณหภูมิตามระดับ ความสูง 3. ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์
การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วน ของอากาศที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิง ก่อนการเผาไหม้ (% Premix)	- หัวเผาวัสดุพูนทรงกระบอก เจาะรูความหนาแน่น 15 ppi ความหนาแน่น 15 ppi ค่าความพูน 0.9	อัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ 4.781×10^{-5} kg/s 7.172×10^{-5} kg/s 9.562×10^{-5} kg/s	- ปรับอัตราการไหลอากาศ สอดคล้องกับ $\Phi = 0.6$ - ปรับ %Premixed <small>@total excess air</small> ที่ 70% 80% 100% 120% และ 150% ตามลำดับ	1. ลักษณะของเปลวไฟ 2. การกระจายอุณหภูมิตามระดับ ความสูง 3. ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์
การศึกษาอิทธิพลการ ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูล	- หัวเผาวัสดุพูนทรงกระบอก เจาะรู ความหนาแน่น 15 ppi ค่าความพูน 0.9 - ติดตั้ง Swirler ที่มุม 45 องศา	อัตราการไหลเชื้อเพลิงที่ 4.781×10^{-5} kg/s 7.172×10^{-5} kg/s 9.562×10^{-5} kg/s	- ปรับอัตราการไหลอากาศ สอดคล้องกับ $\Phi = 0.6, 0.5$ และ 0.4	1. ลักษณะของเปลวไฟ 2. การกระจายอุณหภูมิตามระดับ ความสูง 3. ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 5.3 ห้องเผาไหม้ที่ใช้ในการทดลอง

5.2.2 กล่องลำเสียงอากาศส่วนที่สอง

กล่องลำเสียงอากาศส่วนสองนั้นใช้สำหรับป้อนอากาศไปผสมกับส่วนผสมของเชื้อเพลิงและอากาศส่วนที่หนึ่ง ภายในมีการติดตั้งแผ่นตาข่ายเพื่อจัดเรียงการไหลของอากาศให้เป็นระเบียบและท่อลำเสียงเชื้อเพลิงกับตัวสร้างกระแสการหมุนวนเป็นเกลียว (Swirler) ถูกติดตั้งภายในกล่องลำเสียงนี้เช่นกัน โดยกล่องลำเสียงอากาศส่วนที่สองนี้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาด 25.6 เซนติเมตร สูง 22 เซนติเมตร ท่อจ่ายลมขนาด 1-1/4 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ก่อสร้างลำเลียงอากาศส่วนที่สอง

5.2.3 ตัวสร้างกระแสการหมุนวนเป็นเกลียว (Swirler)

ตัวสร้างกระแสของการหมุนวนเป็นเกลียวดังรูปที่ 5.5 มีลักษณะการไหลออกของอากาศในแนวรัศมี ซึ่งทำให้ให้อากาศไหลเฉือนเปลวไฟจุดประสงค์เพื่อช่วยในการผสมของอากาศและส่วนผสมของเชื้อเพลิงและอากาศส่วนที่หนึ่งดีขึ้นรวมไปถึงช่วยทำให้เปลวไฟมีความยาวที่สั้นลง โดยจะศึกษาที่ Swirler มุม = 24 องศา และ swirler มุม = 45 องศา



ก.

ข.

รูปที่ 5.5 ก.) Swirler มุม = 45 องศา ข.) Swirler มุม = 24 องศา

5.2.4 หัวเผาวัสดุพูน

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นในการทดสอบสมรรถนะการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำในหัวเผาวัสดุพูนนั้นทำการศึกษาโดยใช้วัสดุพูนที่มีความหนาแน่น 15 ppi ค่าความพูนที่ 0.9 มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ความสูง 5.6 เซนติเมตร ทำการเจาะรูรัศมี 7.6 มิลลิเมตร ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มพบว่า การเผาไหม้ย่านความเสถียรกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

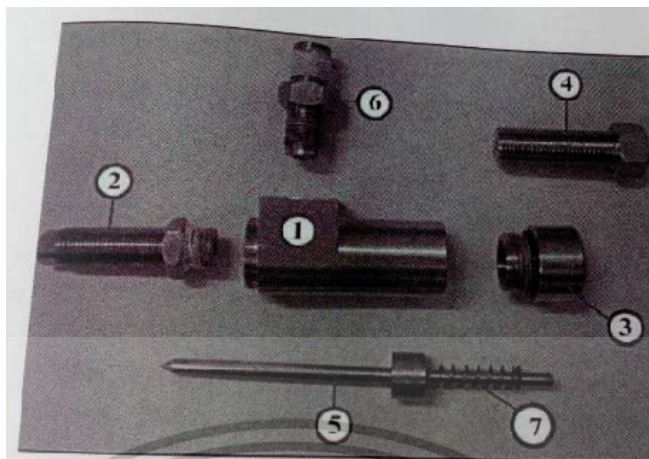
ให้อุณหภูมิสูงและการปลดปล่อยมลพิษต่ำ[28] ดังนั้นจึงเลือกเป็นเงื่อนไขในการทดสอบของเชื้อเพลิงค่าที่มีค่าความร้อนต่ำด้วยเนื่องจากการทดสอบการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงสองชนิดจำเป็นต้องทดสอบภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยวัสดุพูนที่ใช้นั้นแสดงดังรูปที่ 5.6 ซึ่งจะถูกออกแบบให้สวมลงบนหัวเผาปกติได้



รูปที่ 5.6 หัวเผาวัสดุพูนแบบทรงกระบอกเจาะรู

5.2.5 หัวฉีดเชื้อเพลิง

หัวฉีดเชื้อเพลิงเป็นหัวฉีดที่ได้รับการศึกษาและพัฒนาขึ้นจากหัวฉีดปกติซึ่งสามารถสร้างเจ็ทเชื้อเพลิงเป็นรูปวงแหวนบริเวณทางออกโดยอ้างอิงจากงานวิจัย [23] ซึ่งได้ถูกปรับแต่งจากหลักการสมดุลของสปริงที่สัมพันธ์กับพื้นที่ทางออกของเชื้อเพลิงมาประยุกต์ใช้ จากการศึกษาที่พบว่าการพัฒนาดังกล่าวทำให้การเหนี่ยวนำอากาศเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงได้ดีช่วยให้เปลวไฟมีอุณหภูมิสูงขึ้นและทำให้การเผาไหม้มีเสถียรภาพ โครงสร้างของหัวฉีดนั้นประกอบด้วย เลือหัวฉีด ปลายหัวฉีดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 มิลลิเมตร ฝาปิดท้ายหัวฉีด ตัวปรับระยะสปริง เข็มหัวฉีด ช่องทางเข้าของเชื้อเพลิงและสปริง แสดงดังรูปที่ 5.7



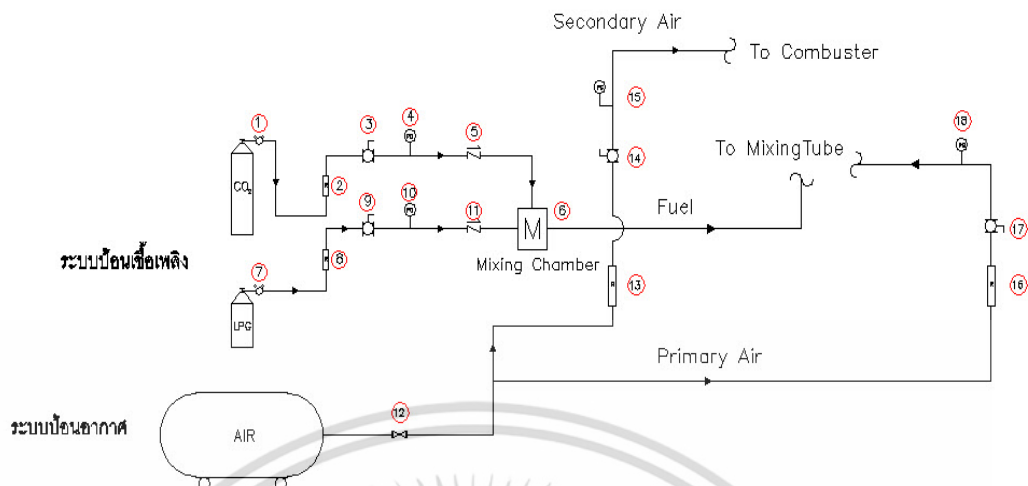
รูปที่ 5.7 ส่วนประกอบของหัวฉีดเชื้อเพลิง

- | | | |
|---------------------|---------------|-------------------------|
| 1. เสื้อหัวฉีด | 2. ปลายหัวฉีด | 3. ฝาปิดท้ายหัวฉีด |
| 4. ตัวปรับระยะสปริง | 5. เข็มหัวฉีด | 6. ทางเข้าของเชื้อเพลิง |

5.2.6 ระบบป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ

สำหรับการทดลองจะมีระบบป้อนเชื้อเพลิงและอากาศแสดงในรูปที่ 5.8 โดยในส่วนของระบบป้อนเชื้อเพลิงจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการป้อนเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มและการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซทั้งสองชนิดจะไหลมาผสมกันในห้องผสม ระบบป้อนเชื้อเพลิงทั้งสองส่วนนั้นมีอุปกรณ์เหมือนกัน คือ ถังบรรจุเชื้อก๊าซ โรตารีเตอร์ วาล์วควบคุมการไหล อุปกรณ์วัดแรงดัน วารวควบคุมทิศทางการไหล อุปกรณ์ในระบบป้อนเชื้อเพลิงถูกติดตั้งเพื่อปรับแต่งอัตราการไหลให้สอดคล้องกับอัตราการเผาไหม้ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอัตราการเผาไหม้แสดงดังตาราง 5.1

ในส่วนของระบบป้อนอากาศนั้นจะแบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนของอากาศส่วนที่หนึ่งซึ่งนำไปผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้และส่วนของการป้อนอากาศส่วนที่สอง สำหรับปริมาณอากาศที่ใช้ในการทดลองในย่านอัตราการไหลต่างๆแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งส่วนประกอบของระบบป้อนอากาศได้แก่ บีมลม วาล์วปรับความดัน โรตารีมิเตอร์ วาล์วควบคุมการไหล ดังแสดงในรูปที่ 5.8

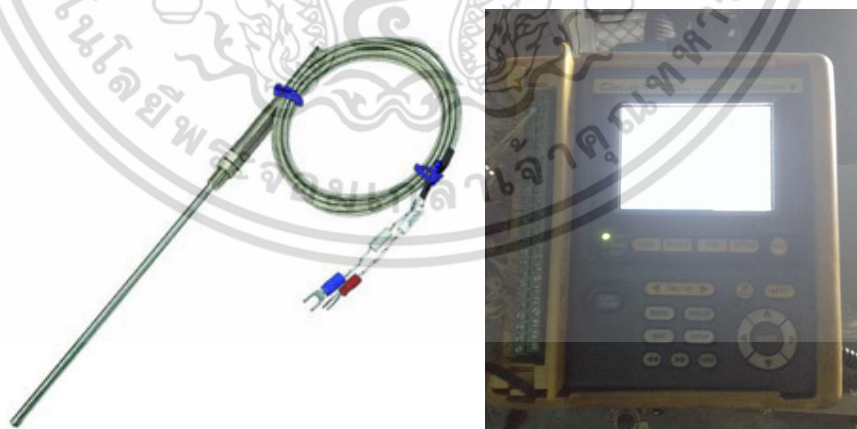


รูปที่ 5.8 ระบบป้อนเชื้อเพลิงและอากาศ

5.2.7 อุปกรณ์การวัดและบันทึกผล

5.2.7.1 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

ในการทดลองทำการวัดอุณหภูมิภายในเตาเผา ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2 โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลประเภทเค (Thermocouple type K) ต่อเข้ากับหน่วยบันทึกผลเป็นอุปกรณ์ในการบันทึกผล ซึ่งจะเก็บบันทึกทั้งหมด 10 จุด ตำแหน่งแรก T1(T6) จะอยู่ติดกับหัวเผาและตำแหน่งที่สอง T2(T7) สูงขึ้นไป 5 เซนติเมตร จากนั้นตำแหน่งที่ T3(T8) ห่างจาก T2(T7) 10 เซนติเมตร จนถึง T5(T10)



รูปที่ 5.9 เทอร์โมมิเตอร์ประเภทเค และหน่วยแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.7.2 การวัดก๊าซไอเสีย

การวัดมลพิษใช้เครื่องมือวัดไอเสียของการเผาไหม้ Testo รุ่น 350 XL ดังแสดงในรูปที่ 5.10 เพื่อวัดปริมาณไอเสียจากปล่องระบายซึ่งแสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2 ก๊าซไอเสียที่ทำการบันทึกประกอบไปด้วย O_2 , CO , NO_x ที่เงื่อนไขควบคุมปริมาณอากาศในการเผาไหม้เดียวกัน



รูปที่ 5.10 เครื่องวัดก๊าซ Testo รุ่น 350 XL

5.2.7.3 อุปกรณ์วัดแรงดัน

อุปกรณ์วัดแรงดันสำหรับการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของเชื้อเพลิงและอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5.11-5.17 ซึ่งอุปกรณ์นี้ทำหน้าที่เพิ่มหรือลดแรงดันจากแหล่งจ่ายให้เหมาะสมกับการใช้งานโดยอุปกรณ์วัดแรงดันของเชื้อเพลิงจะใช้ย่าน 0 ถึง 40 บาร์ สำหรับขาเข้า และ 1 ถึง 6 บาร์ สำหรับขาออก ในขณะที่อากาศย่านการวัดของอุปกรณ์คือ 0 ถึง 10 บาร์



รูปที่ 5.11 อุปกรณ์วัดแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 อุปกรณ์วัดแรงดันของอากาศ



รูปที่ 5.13 อุปกรณ์วัดแรงดันจากถังก๊าซปิโตรเลียมเหลว



รูปที่ 5.14 อุปกรณ์วัดแรงดันจากถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

5.2.7.4 อุปกรณ์ปรับอัตราการไหล

ในการทดลองนั้นทำการติดตั้งอุปกรณ์ปรับอัตราการไหลสองส่วน ได้แก่ เชื้อเพลิงและอากาศ สำหรับเชื้อเพลิงนั้นติดตั้งอุปกรณ์ปรับอัตราการไหลสองตัวซึ่งจะเป็นส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงปิโตรเลียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลวและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ย่านการวัดอุปกรณ์คือ 0-5 L/min ในการควบคุมอัตราการไหล ป้อนเข้าสู่หัวฉีด สำหรับส่วนของอากาศใช้อุปกรณ์ปรับอัตราการไหลที่ย่านการวัดของอุปกรณ์คือ 0-200 SCFH ซึ่งทำการติดตั้งทั้งของอากาศส่วนที่หนึ่งและส่วนที่สองเพื่อควบคุมอัตราการไหลของ อากาศในการป้อนเข้าสู่ห้องผสมและห้องเผาไหม้



รูปที่ 5.15 อุปกรณ์ปรับอัตราการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยซึ่งทำการศึกษากาแฟไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำโดยใช้ก๊าซหุงต้มผสมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในหัวเผาวัสดุพูนสำหรับการศึกษาศมรรถนะในการเผาไหม้ รวมไปถึงการศึกษาปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นในห้องไหม้ เพื่อความรู้ที่ได้ไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในเครื่องยนต์กักกันก๊าซขนาดเล็กในอนาคต ซึ่งเงื่อนไขและรายละเอียดการศึกษาดังตารางที่ 5.1

6.1 การศึกษากาแฟไหม้เชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำในหัวเผาวัสดุพูน

การทดลองในห้องข้อนี้เพื่อศึกษาลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำในหัวเผาวัสดุพูนภายใต้การควบคุมปริมาณอากาศในการเผาไหม้ ที่อัตราส่วนสมมูล 0.6 และไม่มีการติดตั้ง Swirl โดยจะเปรียบเทียบกับกาแฟไหม้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มในวัสดุพูนที่พารามิเตอร์เดียวกัน เพื่อสังเกตลักษณะเปลวไฟ การกระจายตัวของอุณหภูมิและปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น ผลการทดลองแสดงดังหัวข้อที่ 6.1.1 6.1.2 และ 6.1.3 ตามลำดับ

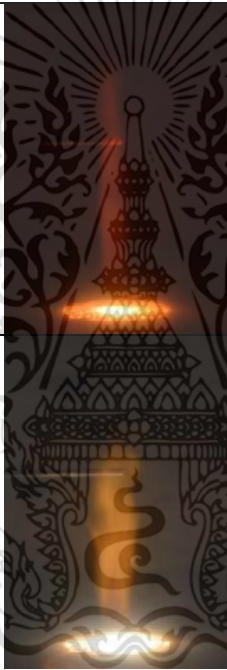

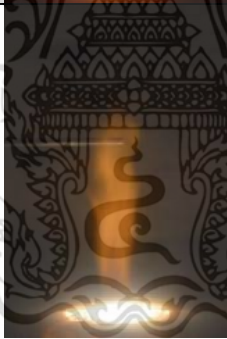


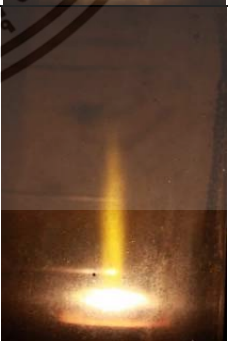
6.1.1 ลักษณะของเปลวไฟ

ในห้องข้อนี้ได้พิจารณาลักษณะของเปลวไฟซึ่งประกอบด้วย สีและความยาวของเปลวไฟที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าของการเผาไหม้กาแฟไหม้คาร์บอนไดออกไซด์โดยทำการเปรียบเทียบกับกาแฟไหม้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม

รูปที่ 6.1 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนกับเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มในหัวเผาวัสดุพูนเมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหล โดยเปลวไฟจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เกิดอยู่ในช่องว่างวัสดุพูนซึ่งทำให้เนื้อวัสดุพูนเกิดความร้อน และส่วนที่เกิดพุ่งออกจากช่องตรงกลางวัสดุพูน

เมื่อพิจารณาเปลวไฟจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำพบว่า เปลวไฟนั้นมีรูปร่างที่เรียวเป็นสีส้มสว่าง มีเสถียรภาพและมีลักษณะสั้น ในขณะที่ความยาวของเปลวไฟจะมีลักษณะยาวขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหล เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นส่งผลให้อิทธิพลของการนั้นพัดพาสูงขึ้น จึงทำให้อนุภาคของคาร์บอนหลุดออกมาเผาไหม้บริเวณตรงกลางของวัสดุพูนส่งผลทำให้เกิดเปลวไฟที่ยาวขึ้น หากสังเกตบริเวณช่องว่างของวัสดุพูนพบว่าความร้อนภายในช่องว่างของวัสดุพูนเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเนื่องจากเกิดการเผาไหม้รุนแรงขึ้นในเนื้อโครงสร้างวัสดุพูน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเปลวไฟของเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำและเปลวไฟของเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มพบว่ารูปร่างยาว มีสีส้ม เป็นเปลวไฟแบบราบเรียบที่อัตราการไหล 4.781×10^{-5} kg/s แล้วจะพัฒนาเป็นเปลวไฟแบบปั่นป่วนเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหล บริเวณภายในช่องว่างวัสดุพอร์นจะมีความสว่างเพิ่มขึ้นเมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลเนื่องจากเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นการเผาไหม้จะเกิดในเนื้อโครงสร้างวัสดุพอร์นมากขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลที่ย่านอัตราการไหลเชื้อเพลิง 9.562×10^{-5} kg/s พบว่าฐานของเปลวไฟของก๊าซหุงต้มมีการยกตัวขึ้นจากฐานเปลวไฟซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของการพาความร้อน

อัตราการไหลเชื้อเพลิง	ก๊าซหุงต้ม	ก๊าซเชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำ (40%LPG+60% CO ₂)
4.781×10^{-5} kg/s		
7.172×10^{-5} kg/s		
9.562×10^{-5} kg/s		

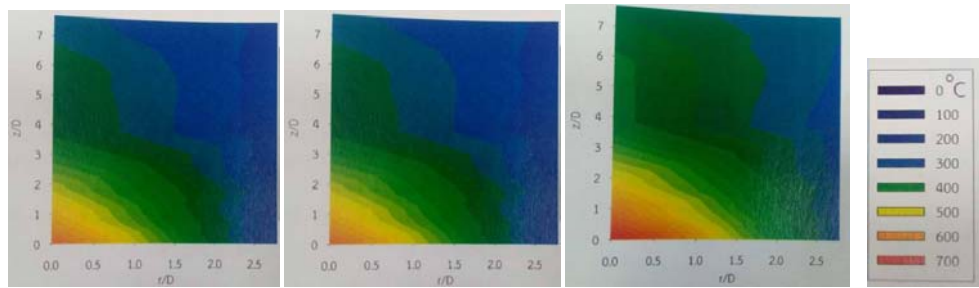
รูปที่ 6.1 ลักษณะเปลวไฟของเชื้อเพลิงค่าที่มีความร้อนต่ำเปรียบเทียบกับก๊าซหุงต้ม

6.1.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิ

รูปที่ 6.4 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ระดับความสูง $z/D = 0, 0.96, 2.88, 4.81$ และ 6.73 cm. ตามลำดับ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของห้องเผาไหม้ $r/D = 0$ และการกระจายของอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ตำแหน่ง $r/D = 2.78$ ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำและก๊าซหุงต้ม ซึ่งย่านอัตราการไหลเชื้อเพลิงคือ 4.781×10^{-5} kg/s 7.172×10^{-5} kg/s และ 9.562×10^{-5} kg/s ตามลำดับ

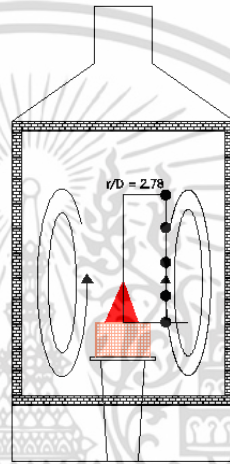
พิจารณาระดับของอุณหภูมิของการเผาไหม้ก๊าซเชื้อเพลิงค่าความร้อนตามระดับความสูงที่ $z/D = 0$ ที่ตำแหน่ง $r/D = 0$ เป็นตำแหน่งการเผาไหม้บริเวณฐานของเปลวไฟ ซึ่งตรงกับเทอร์โมคัปเปิล T_1 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนี้จะมีค่าสูงสุดของทุกย่านอัตราการไหล เนื่องจากเป็นบริเวณด้านบนผิวของวัสดุพูน จากการทดลองพบว่าที่อัตราการไหลเชื้อเพลิง 4.781×10^{-5} kg/s มีระดับอุณหภูมิต่ำกว่าย่านอัตราการไหลเชื้อเพลิงอื่นๆ ซึ่งมีอุณหภูมิที่ 934 °C โดยอุณหภูมิของตำแหน่งนี้จะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหล ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดมีค่า 994.2 °C ที่ย่านอัตราการไหลเชื้อเพลิง 9.562×10^{-5} kg/s เนื่องจากอัตราการไหลของเชื้อเพลิงส่งผลความรุนแรงของการเผาไหม้

พิจารณาระดับอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $r/D = 2.78$ ผลการทดลองสัมพันธ์กันกับการเพิ่มของอัตราการไหลของเชื้อเพลิง ที่ตำแหน่งที่ $z/D = 0$ ถึง 6.78 โดยที่ตำแหน่ง $z/D = 0$ อุณหภูมิจะมีค่าสูงสุดเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ด้านข้างฐานของเปลวไฟและอุณหภูมิก่ออยู่ลดลงตามระดับความสูง โดยการกระจายมีลักษณะที่สม่ำเสมอและใกล้เคียงกันเนื่องจากการพัดพาของก๊าซร้อนที่ลอยตัวขึ้นรอบหัวเผา ซึ่งมีการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมบริเวณด้านข้างค่อนข้างน้อยโดยแสดงดังรูปที่ 6.3 และเนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุพูนที่ทำจาก Al_2O_3 มีคุณสมบัติของการถ่ายเทความร้อนแบบการพาเป็นหลัก เมื่อพิจารณาผลการทดลองเปรียบเทียบกับจากรูปที่ 6.2 เป็นผลการทดลองของ ภรณ์เพ็ญ [27] ผลการคอนทิวรัการกระจายอุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มโดยใช้วัสดุพูนทำจาก Al_2O_3 รูปทรงกระบอกเจาะรู โดยทดลองที่ย่านอัตราการเดียวกันและอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 จะเห็นว่าการกระจายของอุณหภูมิแผ่กระจายตามแนว z/D เป็นบริเวณกว้าง บ่งชี้ได้ว่าวัสดุพูนทำจาก Al_2O_3 มีคุณสมบัติของการถ่ายเทความร้อนโดยการพามากกว่าการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี



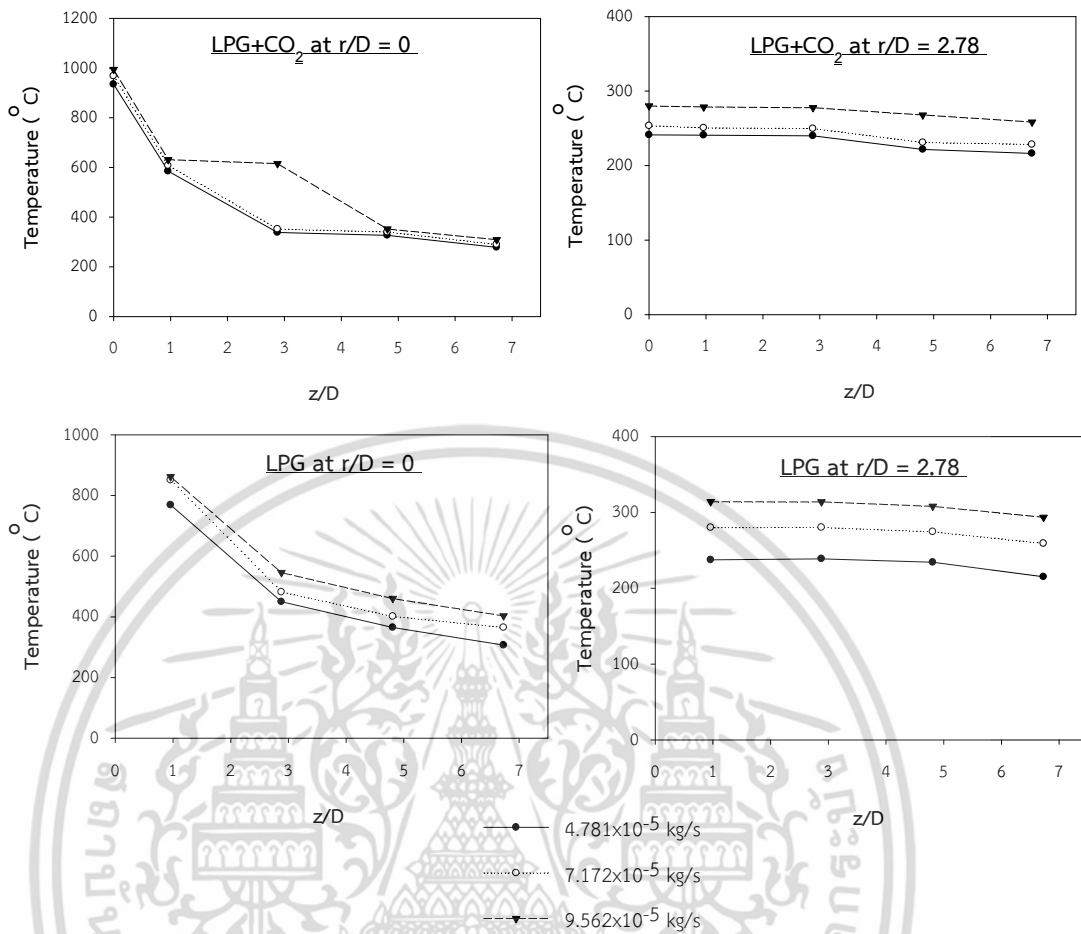
$$\dot{m}_{LPG} = 4.781 \times 10^{-5} \text{ kg/s} \quad \dot{m}_{LPG} = 7.172 \times 10^{-5} \text{ kg/s} \quad \dot{m}_{LPG} = 9.562 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$$

รูปที่ 6.2 การกระจายอุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มในวัสดูดพอรุน ที่อัตราส่วนสมมูล 0.6 [27]

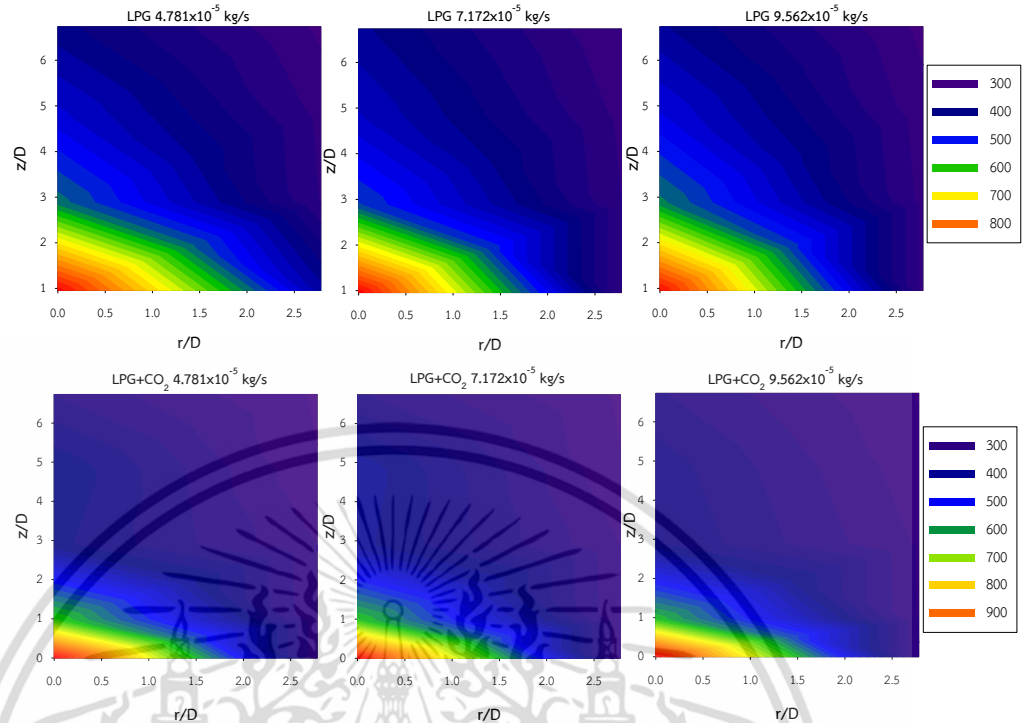


รูปที่ 6.3 แสดงพลศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนรอบหัวเผา

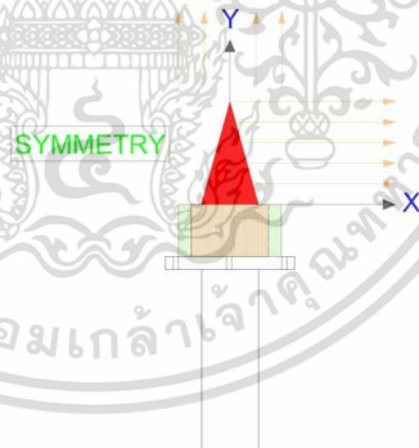
พิจารณาระดับอุณหภูมิที่ระดับความสูง $z/D = 0.96$ สอดคล้องกับตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิ้ล T_2 ที่ตำแหน่ง $r/D = 0$ สำหรับในกรณีของเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม พบว่าอุณหภูมิก๊าซไอเสียนั้นมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิไอเสียของเชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำ ที่ตำแหน่งเดียวกันในแนวกึ่งกลางห้องเผาไหม้ทุกย่านอัตราการใช้และค่อยๆ ลดลงตามระดับความสูง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มนั้นมีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงสูงกว่าเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ



รูปที่ 6.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ที่ตำแหน่ง $r/D = 0$ และ $r/D = 2.78$ ของเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำและเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม



รูปที่ 6.5 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ตามระดับความสูงของก๊าซเชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำและเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม



รูปที่ 6.6 ลักษณะการแพร่กระจายของอุณหภูมิในหัวเผาวัสดุพอรุน

จากรูปที่ 6.5 แสดงถึงลักษณะของการกระจายอุณหภูมิซึ่งเป็นตำแหน่งที่จุดกึ่งกลางบริเวณผิวด้านบนของวัสดุพอรุน ดังแสดงในรูปที่ 6.6 โดยสังเกตว่าในกรณีการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มนั้น เมื่อพิจารณาในแนวแกน z/D จะเห็นว่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมินั้นมีค่าสูงกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำอย่างเห็นได้ชัด โดยสังเกตจากพื้นที่บริเวณที่เป็นสีส้มเป็นค่าอุณหภูมิที่สูงซึ่งมีบริเวณที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

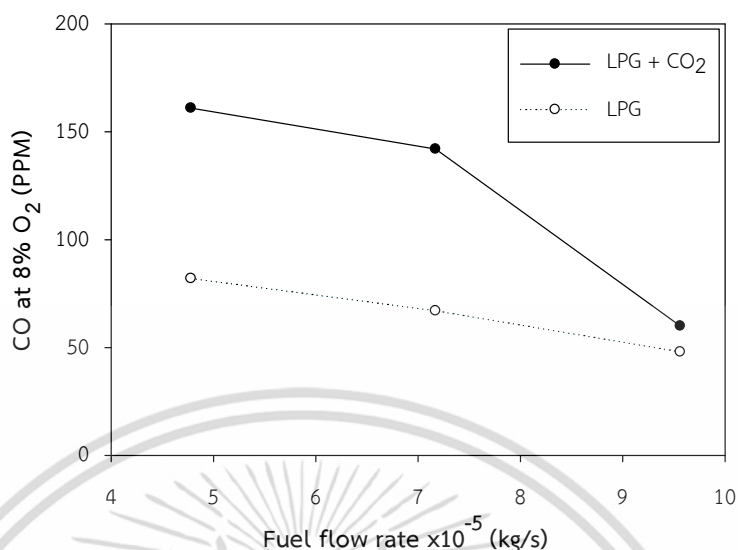
กว้างและเข้าที่ย่านอุณหภูมิต่ำที่ใกล้หัวเผาใน เนื่องจากอิทธิพลของการพาความร้อน ในขณะที่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำเข้าสู่ย่านอุณหภูมิต่ำตั้งแต่ $z/D = 3$

สำหรับลักษณะการกระจายอุณหภูมิในแนวรัศมี หรือในแนวแกน r/D นั้น การเผาไหม้ของก๊าซเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มนั้นมีลักษณะการแผ่กระจายที่ใกล้เคียงกันกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำแต่เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มนั้นจะให้อุณหภูมิที่สูงกว่าซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 6.5

6.1.3 ปริมาณก๊าซไอเสีย

เนื่องจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้น [27],[30] การเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มทำการเปรียบเทียบมลพิษที่มาตรฐานออกซิเจนในไอเสียที่ 8% ดังนั้นในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการเผาไหม้ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน จึงจำเป็นต้องทำการเปรียบเทียบที่มาตรฐานปริมาณออกซิเจนในก๊าซไอเสียที่เท่ากัน โดยคำนวณปรับค่าได้จากสมการที่ 4.15

จากรูปที่ 6.7 เมื่อพิจารณาปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซไอเสียโดยสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนในไอเสียที่ 8% ในขณะที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มและก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ ที่ย่านอัตราการไหลเชิงมวลเดียวกันกับกรณีที่ทดสอบโดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม โดยเปรียบเทียบพบว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำมีปริมาณสูงกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม เนื่องจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำนั้นมีองค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เจือจางให้ส่วนผสมมีค่าความร้อนต่ำลงในปริมาณสูงทำให้เมื่อเชื้อเพลิงที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์จึงหลุดจากบริเวณที่มีการเผาไหม้เข้าสู่ก๊าซไอเสีย กล่าวคือในการเผาไหม้นั้นมีช่วงเวลาในการเผาไหม้ที่สั้น ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลงตามการเพิ่มอัตราการไหลเนื่องจากอัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้น การผสมกันของอากาศและเชื้อเพลิงมีมากขึ้นเกิดปฏิกิริยารุนแรงซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิที่สูงขึ้น เนื่องจากเวลาระยะเวลาในการเผาไหม้เพิ่มขึ้นจึงส่งผลทำให้ปริมาณ CO ลดลง



รูปที่ 6.7 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เปรียบเทียบระหว่างการเผาไหม้ก๊าซหุงต้มและการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ

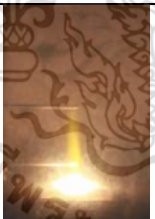
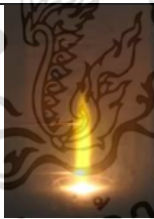
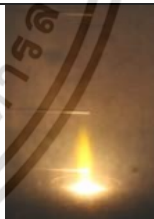
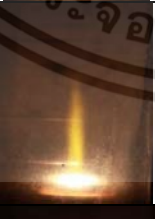
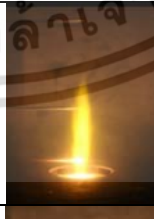
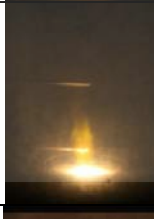



6.2 อิทธิพลของการปรับเปลี่ยนมุมของใบอุปกรณ์สร้างกระแสการหมุนวน

จากหัวข้อ 6.1 ซึ่งได้ทำการศึกษาลักษณะของการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำในหัวเผาวัสดุพอร์ซ ซึ่งพบการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นนั้นให้ลักษณะเปลวไฟที่สั้นและอุณหภูมิค่อนข้างสูง แต่การเผาไหม้ยังไม่ดีพอเนื่องจากให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูง ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้มีการติดตั้ง Swirl สำหรับสร้างกระแสหมุนวนของอากาศส่วนที่สอง ภายใต้ข้อสมมุติฐานที่ว่า การไหลแบบหมุนวนนั้นจะช่วยให้การผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงมีการผสม คลุกเคล้ากันดีขึ้น ซึ่งจะทำให้สมรรถนะดีขึ้นและปริมาณมลพิษต่ำลงว่าใน

หัวข้อนี้จะทำการติดตั้งอุปกรณ์สร้างกระแสการหมุนวนเพื่อศึกษาสมรรถนะการเผาไหม้ของก๊าซเชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำภายใต้สมมุติฐานที่ว่า การไหลของอากาศแบบหมุนวนนั้นจะทำให้การผสมกันของอากาศและเชื้อเพลิงดีขึ้นส่งผลให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและทำให้เปลวไฟมีขนาดสั้นลง ซึ่งพิจารณาที่ย่านอัตราการไหลเชื้อเพลิงเดียวกัน ความดันใช้งาน 0.5 บาร์ โดยเงื่อนไขเชื้อเพลิงสัมพันธ์กับอัตราส่วนสมมูล 0.6 และปริมาณอากาศที่ใช้การผสมก่อนการเผาไหม้ 100% ของปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด โดยใช้ Swirl ที่มุม 24 และ 45 องศา เมื่อนำไปคำนวณหาค่า Swirl Number จะได้เท่ากับ 0.4 และ 0.8 ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบกับ การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำที่ไม่มีอุปกรณ์สร้างกระแสการหมุนวน

6.2.1 ลักษณะของเปลวไฟ

รูปที่ 6.8 แสดงลักษณะของเปลวไฟในการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำในกรณีทำการติดตั้ง Swirler ที่ มุมองศา Swirl 45° (Swirl Number = 0.8) และ 24° (Swirl Number = 0.3) ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง Swirl เมื่อสังเกตเปลวไฟที่ มุมองศา Swirl เท่ากับ 45° จะเห็นว่าเปลวไฟมีลักษณะสั้นลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง Swirler ทุกย่านอัตราการไหลเชื้อเพลิง เปลวไฟมีลักษณะมีเสถียรภาพโดยสังเกตจากเปลวไฟเกิดการแพร่กระจายภายในเนื้อโครงสร้างของวัสดุพอร์ซเลนซึ่งสังเกตได้จากความสว่างภายในโครงสร้างของวัสดุพอร์ซเลน เนื่องจากอากาศส่วนที่สองมีลักษณะการไหลหมุนวนในแนวรัศมี เมื่อจ่ายเข้าสู่พื้นที่การเผาไหม้ ทำให้การผสมกันของอากาศและส่วนผสมของเชื้อเพลิงคลุกเคล้ากันดีขึ้น และทำให้เกิดความร้อนแพร่กระจายในแนวรัศมีของห้องเผาไหม้ และการหมุนวนของอากาศนั้นยังส่งผลให้เกิดการขยายตัวของเปลวไฟตามแนวรัศมีซึ่งด้วยเหตุนี้จึงทำให้เปลวไฟสั้นลง ในขณะที่มุมองศา Swirl 24° เมื่อสังเกตลักษณะของเปลวไฟด้วยตาเปล่าพบว่าเปลวไฟมีการขยายตัวในแนวรัศมีเช่นกันแต่มีความสั้นลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง Swirl เนื่องจากค่า Swirl Number ที่มีค่าน้อยจึงอาจทำให้เกิดกระแสของการหมุนวนที่ต่ำจึงทำให้เปลวไฟเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย

อัตราการไหล เชื้อเพลิง (kg/s)	ไม่มี Swirler	Swirler ที่มุม 24°	Swirler ที่มุม 45°
4.781×10^{-5}			
7.172×10^{-5}			
9.562×10^{-5}			

รูปที่ 6.8 ลักษณะของเปลวไฟของการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำในกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง Swirler และที่ Swirler ที่มุม 24° และ 45°

6.2.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิ

เมื่อพิจารณาการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ของกรณีการใส่ Swirler เพื่อศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อสมรรถนะการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำในหัวเผาวัสดุพูนโดยเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง Swirl ที่เงื่อนไขอัตราส่วนผสมมวล 0.6 ปริมาณอากาศที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ 100% ของปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด ปรับเปลี่ยนอัตราการไหลตั้งแต่ 4.781×10^{-5} kg/s 7.172×10^{-5} kg/s และ 9.562×10^{-5} kg/s ตามลำดับ

รูปที่ 6.9 และ 6.10 ซึ่งเป็นการกระจายของอุณหภูมิซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางพื้นที่ด้านบนหัวเผาวัสดุพูน $r/D = 0$ จากระดับของอุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำในกรณีที่มีการใส่ Swirler โดยมุมของใบ Swirler ที่ 45 องศา อัตราการไหลเชื้อเพลิง 9.562×10^{-5} kg/s ที่ตำแหน่ง $z/D = 0$ พบว่ามีการเผาไหม้อุณหภูมิก๊าซไอเสียอุณหภูมิสูงถึง 1002 องศาเซลเซียส ที่บริเวณผิวบนของวัสดุพูนซึ่งสอดคล้องกับที่ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล T_1 และยังมีอุณหภูมิสูงแผ่กระจายกว้างกว่ากรณีที่ไม่มีการติดตั้ง Swirl เนื่องจากเมื่อมุม Swirler ที่ 45 องศา ส่งผลทำให้โมเมนตัมเชิงมุมที่ค่ามากขึ้นทำให้ ค่า Swirl Number มีค่าเท่ากับ 0.8 ซึ่งอยู่ในย่าน High swirl โดย Swirl number เป็นฟังก์ชันของโมเมนตัมตามแนวแกนต่อโมเมนตัมเชิงมุม ซึ่งส่งผลทำให้เกิดกระแสการหมุนวนที่รุนแรง ทำให้การผสมกันระหว่างอากาศส่วนที่สองและส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนที่หนึ่ง เกิดการคลุกเคล้ากันส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่รุนแรง

นอกจากนี้อุณหภูมิตามแนวแกน r/D นั้นมีค่าที่สูงกว่ากรณีอื่นๆทุกย่านอัตราการไหล โดยสังเกตจากรูปที่ 6.9 ที่ตำแหน่ง $r/D = 2.78$ เนื่องจากอากาศส่วนสองไหลออกจาก Swirl ฟุ้งเหมือนเปลวไฟและเข้าผสมกับส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศส่วนที่หนึ่งตามแนวรัศมีส่งผลให้เปลวไฟมีการขยายตัวออก ดังนั้นจึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมีที่สูงขึ้นและมีความสม่ำเสมอ

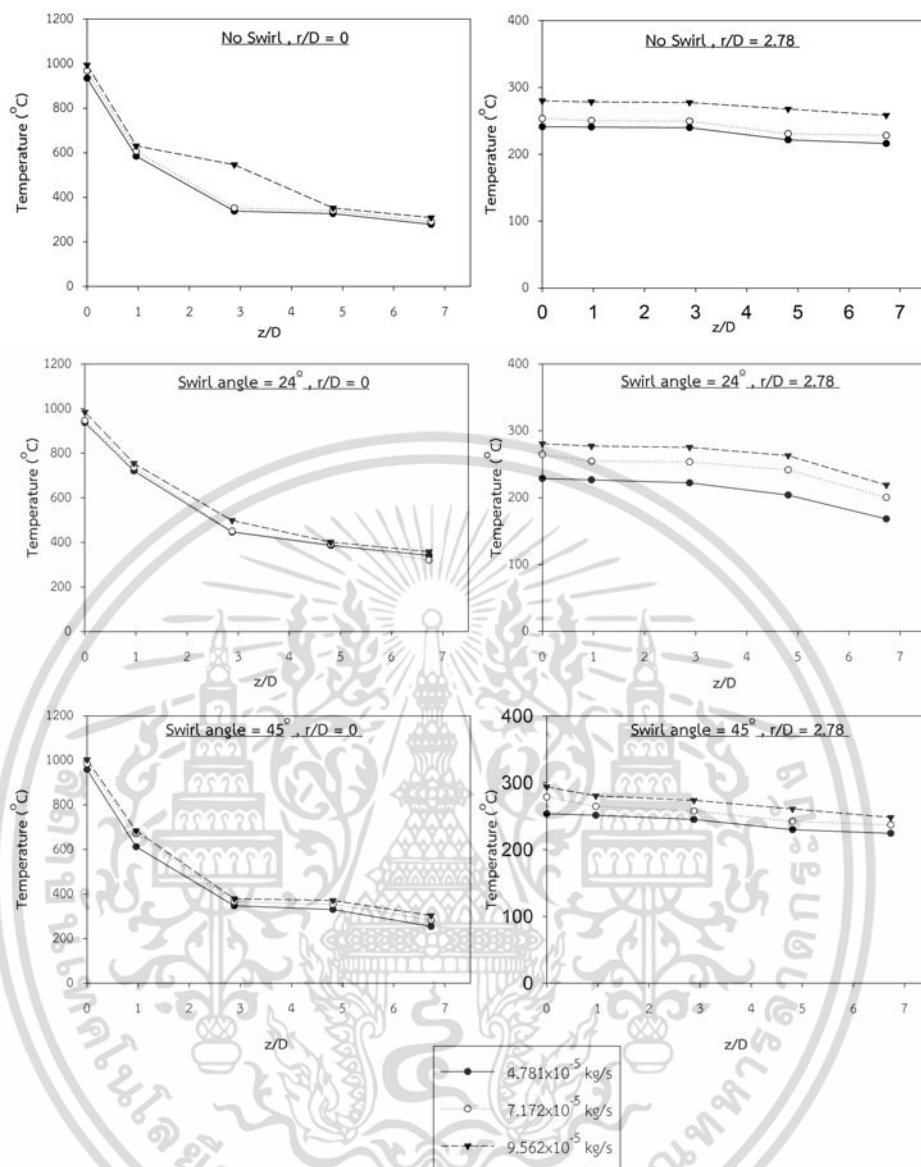
พิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิตามระดับความสูง ที่ $r/D = 0$ สำหรับกรณีติดตั้ง Swirl ที่องศา Swirl 24 นั้นพบว่าอุณหภูมิมิค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการติดตั้ง Swirl เพียงเล็กน้อยทุกย่านอัตราการไหล ในขณะที่อุณหภูมิในแนวรัศมี มีค่าใกล้เคียงกันกับกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง Swirl เนื่องจากอิทธิพลจากการหมุนวนเกิดขึ้นเบาบาง แต่เมื่ออัตราการไหลเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลทำให้การเหนี่ยวนำอากาศส่วนที่สองเข้ามาผสมกันได้ดีขึ้น โดยสอดคล้องกับลักษณะของเปลวไฟที่มีการขยายตัวออกตามแนวรัศมี ซึ่งทำให้การแผ่รังสีออกตามแนวรัศมีนั้นเพิ่มขึ้น สังเกตจากรูปที่ 6.9 ตำแหน่ง $r/D = 2.78$

ในขณะที่อัตราการไหลเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น สังเกตว่าอุณหภูมิของไอเสียไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุพูนมีการหมุนเวียนความร้อนอยู่ภายในและความร้อนส่วนหนึ่งถูกถ่ายเทให้กับเชื้อเพลิงและอากาศบริเวณต้นทาง ดังนั้นการที่สังเกตเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณเหนือหัวเผาซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงการสูญเสียความร้อนภายนอกวัสดุพูนและที่วัสดุพูนพูนสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อมภายนอก ดังนั้นระดับของอุณหภูมิที่แตกต่างกันเพียง

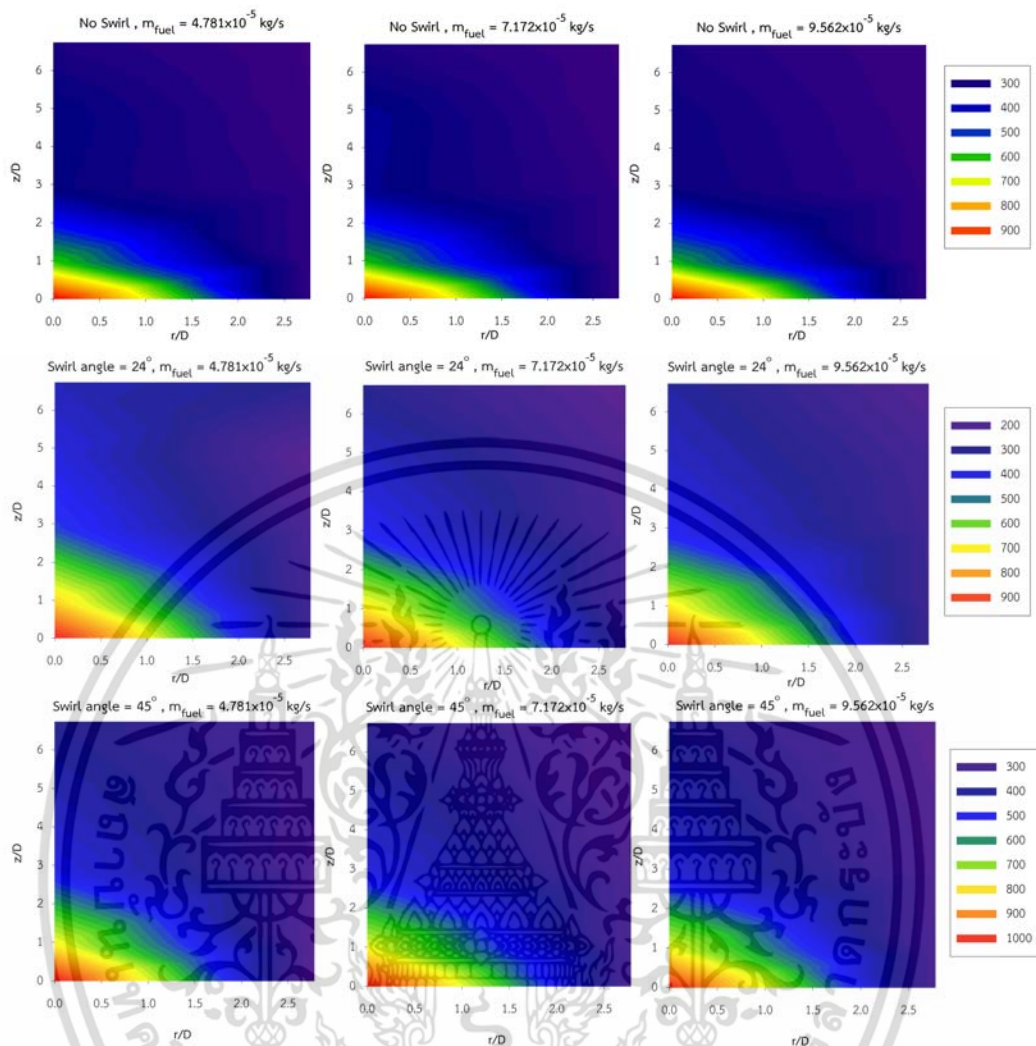
เล็กน้อยเป็นข้อบ่งชี้ถึงการความสูญเสียความร้อนที่ต่างกันไปเล็กน้อย ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่ทำการศึกษาเท่านั้น ซึ่งจากงานวิจัยของ Gao พิจารณาที่การเผาไหม้ที่เกิดในวัสดุพอรุน[31] จากรูปที่ 6.11 เมื่อสังเกตอุณหภูมิในวัสดุพอรุนและเปลวไฟนั้น บ่งชี้ได้ว่าการเผาไหม้ที่เกิดภายในวัสดุพอรุนทำให้เกิดการกักเก็บความร้อนภายในวัสดุพอรุนและมีการถ่ายเทความร้อนส่วนหนึ่งให้กับเชื้อเพลิงกับอากาศบริเวณต้นทาง จึงทำให้ความร้อนที่ถ่ายเทที่ถ่ายเทออกมาภายนอกบริเวณด้านผิวด้านบนวัสดุพอรุนไม่มีค่าไม่แตกต่างกัน

นอกจากนี้เมื่อสังเกตลักษณะของการกระจายอุณหภูมิดังรูปที่ 6.10 นั้น จะเห็นว่า กรณีของการติดตั้ง swirl นั้นทำมีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแนวแกน z/D ที่สูงกว่ากรณีที่ไม่มีการติดตั้ง Swirl ที่มุม Swirl 24 องศา โดยพบว่าเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในแนวแกน z/D ที่กว้างกว่ากรณีอื่นๆทุกอัตราการไหล ซึ่งสังเกตว่าอุณหภูมินั้นจะเข้าสู่ย่านอุณหภูมิต่ำที่ $z/D > 6$ ในขณะที่ กรณีที่ไม่มีการติดตั้ง Swirl นั้น อุณหภูมิจะเข้าสู่ย่านต่ำที่ $z/D > 3$ เนื่องจากอิทธิพลของการพัฒนามีอิทธิพลมากกว่าอิทธิพลของกระแสของการหมุนวน



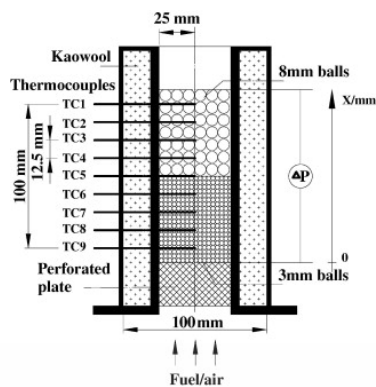


รูปที่ 6.9 การกระจายตัวของอุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำในกรณีไม่มีการติดตั้ง Swirler และมีการติดตั้ง Swirler ที่มุม 24° , 45° องศา ตามลำดับ

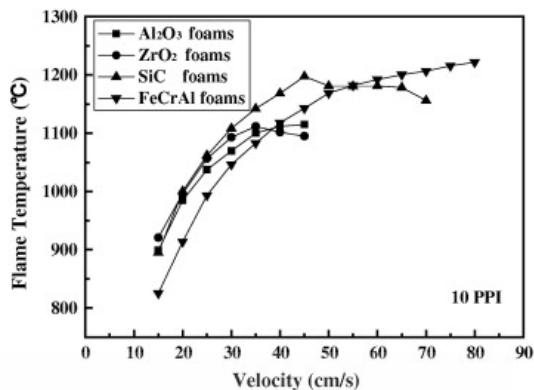


รูปที่ 6.10 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำในกรณีไม่มีการติดตั้ง Swirler และมีการติดตั้ง Swirler ที่มีมุม 24 , 45 องศา ตามลำดับ

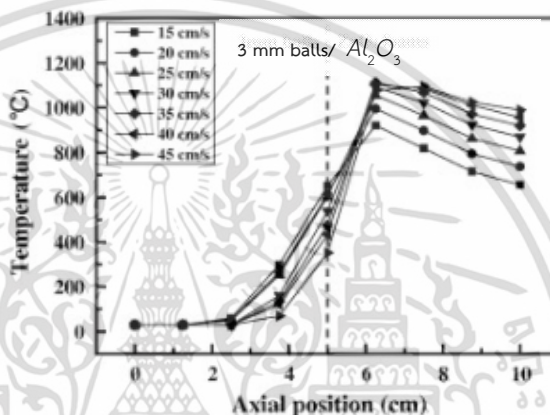
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.



ข.



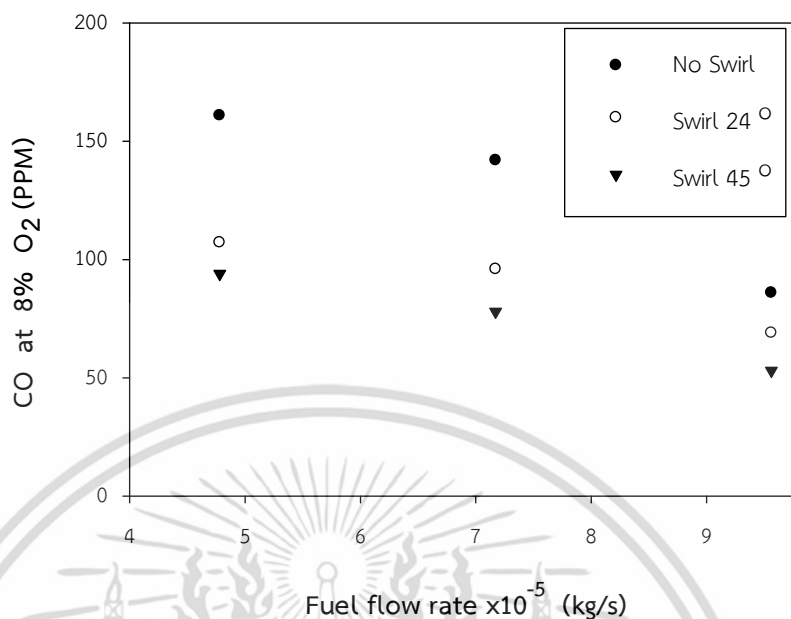
ค.

รูปที่ 6.11 ผลการทดลองจากงานวิจัยของ Gao ก). ชุดการทดลอง ข). อุณหภูมิเปลวไฟของวัสดุพูนชนิดต่างๆ ค). โพรไฟล์อุณหภูมิตามระดับความสูงของห้องเผาไหม้ของ Gao

6.2.3 ปริมาณมลพิษ

จากรูปที่ 6.12 ทำการเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มาตรฐานออกซิเจนในก๊าซไอเสีย 8% จะพบว่าเมื่อมีการจ่ายอากาศส่วนที่สองแบบหมุนวน ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการติดตั้ง Swirler

จากการทดลองที่ Swirler ที่มุม 45 องศา มีปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำสุด เนื่องจากการจ่ายอากาศส่วนที่สองแบบหมุนวนนี้จะทำให้เกิดการผสมกันระหว่างอากาศส่วนที่สองและส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนที่หนึ่งคลุกเคล้ากันดีขึ้นและมีแนวโน้มเผาไหม้ได้ดีที่อัตราการไหลสูงเนื่องจากเกิดการเผาไหม้ที่รุนแรง นอกจากนี้อุณหภูมิที่เผาไหม้ไม่หมดจะสามารถกลับมาเผาไหม้ซ้ำเนื่องจากกระแสการหมุนวนที่พอทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น



รูปที่ 6.12 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เปรียบเทียบการเผาไหม้ระหว่างกรณีที่มีการติดตั้ง Swirler ที่มีมุม 24 องศา และ 45 องศา และกรณีการเผาไหม้ที่ไม่มีการติดตั้ง Swirler

6.3 อิทธิพลของปริมาณอากาศที่ใช้ในการผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการเผาไหม้

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณอากาศที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการเผาไหม้ โดยการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำในหัวเผาวัสดุพอร์ซเลน โดยปริมาณอากาศที่ใช้ในการผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ที่แตกต่างกัน ในการทดลองนั้น จะทดลองที่อัตราส่วนสมมูล 0.6 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอากาศส่วนเกิน 64.25% โดยจ่ายอากาศส่วนที่หนึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ 70% 80% 100%, 120% และ 150% จากปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด ตามลำดับ ดังนั้นปริมาณอากาศส่วนที่สองที่ต้องจ่ายเข้าห้องเผาไหม้คือ 94.25%, 84.25%, 64.25%, 44.25% และ 14.25% ตามลำดับ

6.3.1 ลักษณะของเปลวไฟ

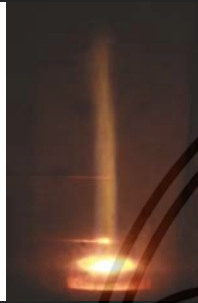
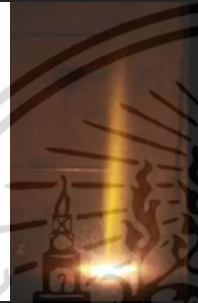




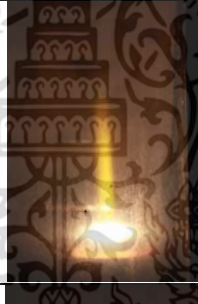



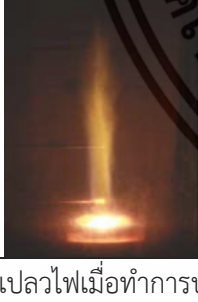




จากรูปที่ 6.13 สังเกตเห็นว่าเปลวไฟยาวเร็วที่อัตราการไหล 4.781×10^{-5} kg/s ลักษณะของเปลวไฟมีลักษณะเป็นพื้นผิวราบเรียบ มีสีส้ม บ่งชี้ว่าเป็นการเผาไหม้ของเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ช่วงแรกของวัสดุพอร์ซเลนและเกิดการหลุดลอยมาเผาไหม้ต่อกับอากาศส่วนที่สองเหนือวัสดุพอร์ซเลน อย่างไรก็ตามที่อัตราการไหล 7.172×10^{-5} kg/s ที่เปอร์เซ็นต์ของอากาศผสมก่อนการเผาไหม้เดียวกัน สังเกตเห็นว่าเปลวไฟมีลักษณะเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งบ่งชี้ว่ามีการเผาไหม้ของเขม่าที่หลงเหลือจากการเผา

ไหม้ส่วนแรกที่น้อย เพลวยังมีลักษณะเป็นแผ่นราบเรียบ เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลที่ 9.562×10^{-5} kg/s พบว่าโครงสร้างของเปลวไฟมีลักษณะเป็นเปลวไฟปั่นป่วน

จากทฤษฎีการเผาไหม้ Turn S.R. [17] เขม่าเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ในช่วงแรกของปฏิกิริยา ทำให้ธาตุคาร์บอนที่อยู่ในปฏิกิริยามารวมกันเป็นเขม่า จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นคาดว่าที่อัตราการไหลต่ำปริมาณอากาศในช่วงแรกของการเผาไหม้ไม่เพียงพอจึงทำให้มีเขม่าเกิดขึ้น ซึ่งเขม่าที่หลุดลอยออกมาทำปฏิกิริยากับอากาศส่วนที่สองจะมีลักษณะเปลวไฟแบบแพร่เหนือบริเวณหัวเผา

ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลจาก 4.781×10^{-5} kg/s เป็น 7.172×10^{-5} kg/s สังเกตว่าเปลวไฟแบบราบเรียบ มีลักษณะที่ยาว สีส้มซึ่งเป็นสีของการเผาไหม้เขม่า นั้น เมื่อเพิ่มอัตราการเผาไหม้ จึงส่งเสริมให้การเผาไหม้เขม่าเกิดขึ้นภายในวัสดุพูน ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหล 7.172×10^{-5} kg/s เป็น 9.562×10^{-5} kg/s เปลวไฟจะเป็นเปลี่ยนแปลงจากเปลวไฟแบบราบเรียบเป็นเปลวไฟแบบปั่นป่วน ทำให้เขม่าเกิดการหลุดลอยออกมาเผาไหม้บริเวณด้านบนของวัสดุพูน เนื่องจากโครงสร้างการเผาไหม้ภายในวัสดุพูนที่เปลี่ยนแปลงไป แต่ทั้งนี้เป็นเพียงการคาดคะเน เนื่องจากยังไม่ทราบแน่ชัดว่าการเปลี่ยนแปลงการเผาไหม้ในโครงสร้างวัสดุพูนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การผสมอากาศก่อนการเผาไหม้ที่ 150% ที่อัตราการไหล 9.560×10^{-5} kg/s พบว่าเกิดการยกตัวของฐานเปลวไฟซึ่งเสี่ยงต่อการเป่าดับของเปลวไฟ และที่อัตราการไหล 4.781×10^{-5} และ 7.172×10^{-5} kg/s การเผาไหม้มีแนวโน้มเกิดอยู่ในบริเวณฐานของวัสดุพูน เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศในการผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ ซึ่งทำให้มีปริมาณอากาศที่มากพอซึ่ง โดยทำให้การเผาไหม้สิ้นสุดภายในวัสดุพูน หากสังเกตความสว่างของวัสดุพูนแตกต่างกันออกไปโดยที่เปอร์เซ็นต์การผสมอากาศก่อนการเผาไหม้ที่ 100% ของปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด มีความสว่างของวัสดุพูนมากที่สุด ดังนั้นปริมาณอากาศที่เข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้นั้นจึงมีผลต่อการเผาไหม้ได้อย่างชัดเจน

อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (kg/s)	Premixed = 70%	Premixed = 80%	Premixed = 100%	Premixed = 120%	Premixed = 150%
4.781×10^{-5}					
7.172×10^{-5}					
9.560×10^{-5}					

รูปที่ 6.13 ลักษณะของเปลวไฟเมื่อทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ ที่ 70%, 80%, 100%, 120% และ 150%

6.3.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิ

จากรูปที่ 6.14 การกระจายตัวของอุณหภูมิก๊าซไอเสียเมื่อทำการปรับเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์การผสมของอากาศก่อนการเผาไหม้

ที่อัตราการไหล 4.781×10^{-5} kg/s พิจารณาระดับอุณหภูมิตามระดับความสูง z/D ตำแหน่ง $r/D = 0$ ที่ปริมาณอากาศของอากาศก่อนการเผาไหม้ที่ 70% ของปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด อุณหภูมิบริเวณผิวบนของวัสดุพูน ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งของ T_1 จะมีค่า 832.5°C เมื่อทำการเพิ่ม %Premixed เป็น 80% พบว่าอุณหภูมิของก๊าซไอเสียสูงขึ้น จนกระทั่งที่ %Premixed ที่ 100% อุณหภูมิไอเสียจะมีค่าสูงสุดคือ 934.8°C และจะลดลงเมื่อเพิ่ม %Premixed ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งนั้นส่งเสริมทำให้เกิดการเผาไหม้ในโครงสร้างของวัสดุพูนเนื่องจากปริมาณอากาศที่ผสมกับเชื้อเพลิงมีมากขึ้นและจากคุณสมบัติของวัสดุพูนนั้นมีการหมุนเวียนความร้อนภายในโครงสร้างวัสดุพูนโดยการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน เมื่อปริมาณอากาศที่ผสมกับเชื้อเพลิงมีเพียงพอต่อการเผาไหม้และได้รับความร้อนจากวัสดุพูน ส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้สิ้นสุดภายในวัสดุพูน ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิจากบริเวณด้านบนของหัวเผาที่ต่ำลง

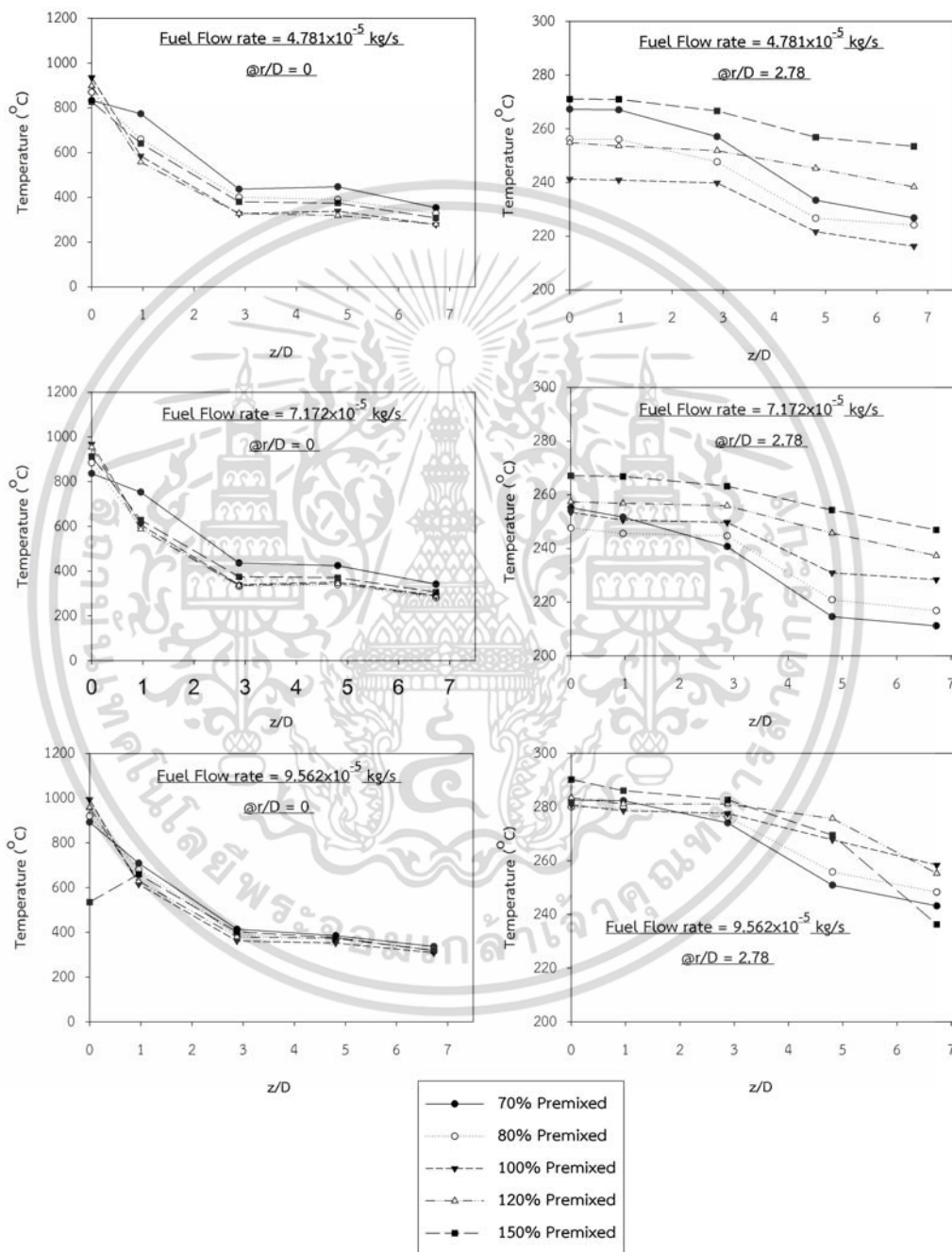
ที่อัตราการไหล 9.562×10^{-5} kg/s พิจารณาระดับอุณหภูมิตามระดับความสูง ตำแหน่ง $r/D = 0$ พบว่าบริเวณผิวบนของวัสดุพูนนั้นเมื่อเพิ่ม %Premixed ที่ 150% อุณหภูมิในตำแหน่งนี้ลดลงแล้วจะเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง $z/D = 0.96$ เนื่องจากเมื่อปริมาณอากาศอากาศเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วของส่วนผสมเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิหลุดลอยออกจากจากฐานเปลวไฟ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของเปลวไฟในรูปที่ 6.13

เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมี ตำแหน่ง $r/D = 2.78$ พบว่าที่ 70%Premixed ที่อัตรา การไหล 4.781×10^{-5} kg/s ค่าอุณหภูมิจะสูงกว่าปริมาณอากาศที่ %Premixed 80% และ 100% ลดต่ำลงเข้าหาบริเวณอุณหภูมิต่ำในลักษณะทันทีทันใดเนื่องจากการอิทธิพลของการพัดพาความร้อนของเปลวไฟจะพุ่งขึ้นสู่ทิศทางตามแนวระดับความสูงมากกว่าการแพร่กระจายออกตามแนวรัศมี

จากรูปที่ 6.15 จะเห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวแกนตามระดับความสูงและตามแนวรัศมีที่ชัดเจน ซึ่งพบว่าที่ 70%Premixed ของทุกย่านอัตราการไหลนั้นมีเกรเดียนท์อุณหภูมิสูงตามแนวแกน z/D และอุณหภูมิสูงแผ่กระจายเป็นบริเวณกว้าง เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่ง การผสมของอากาศก่อนการเผาไหม้เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้ในวัสดุพูนมากขึ้น เกิดเป็นเกรเดียนท์อุณหภูมิต่ำบริเวณเหนือหัวเผาวัสดุพูน

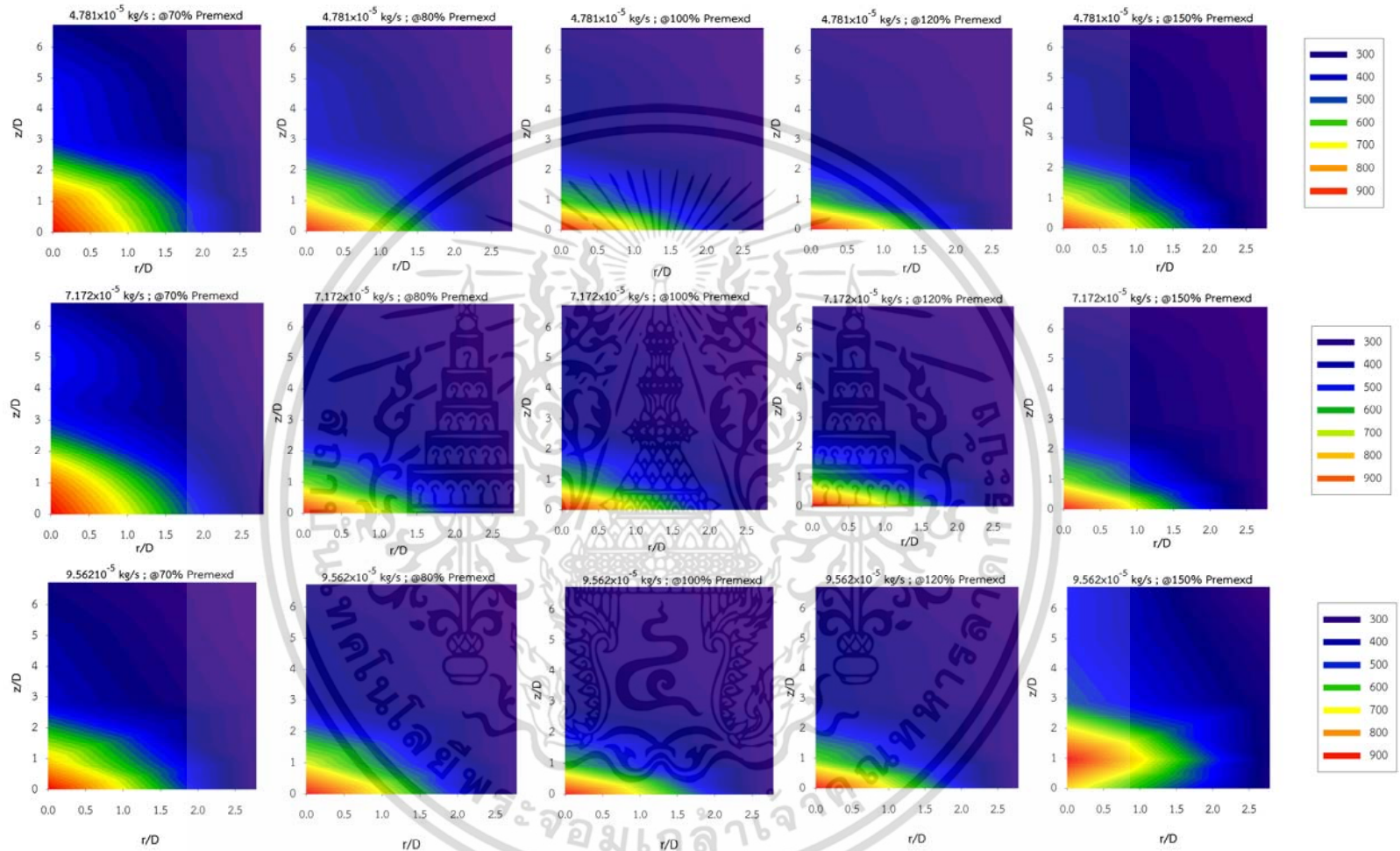
สังเกตที่ปริมาณอากาศที่ใช้ในการผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ที่ 150% ของปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำที่ 9.562×10^{-5} kg/s เกิดการยกตัวขึ้นจากบริเวณผิวด้านบนของวัสดุพูนอยู่ที่ตำแหน่ง $z/D = 0.96$

ซึ่งทำให้มีระดับอุณหภูมิต่ำที่ตำแหน่งผิวด้านบนของวัสดุพูนแล้วเกิดเป็นระดับอุณหภูมิสูงที่ตำแหน่ง $z/D = 0.96$ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณอากาศผสมก่อนการเผาไหม้นั้นมีผลต่อการเผาไหม้ แต่ในขณะที่ปริมาณอากาศที่ใช้ผสมก่อนการเผาไหม้ที่มากเกินไปจนอากาศที่เผาไหม้ไม่หมดภายในวัสดุพูนหลุดลอยและเกิดการยกตัวออกจากผิวด้านบนของวัสดุพูน



รูปที่ 6.14 การกระจายอุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์การผสมอากาศก่อนการเผาไหม้

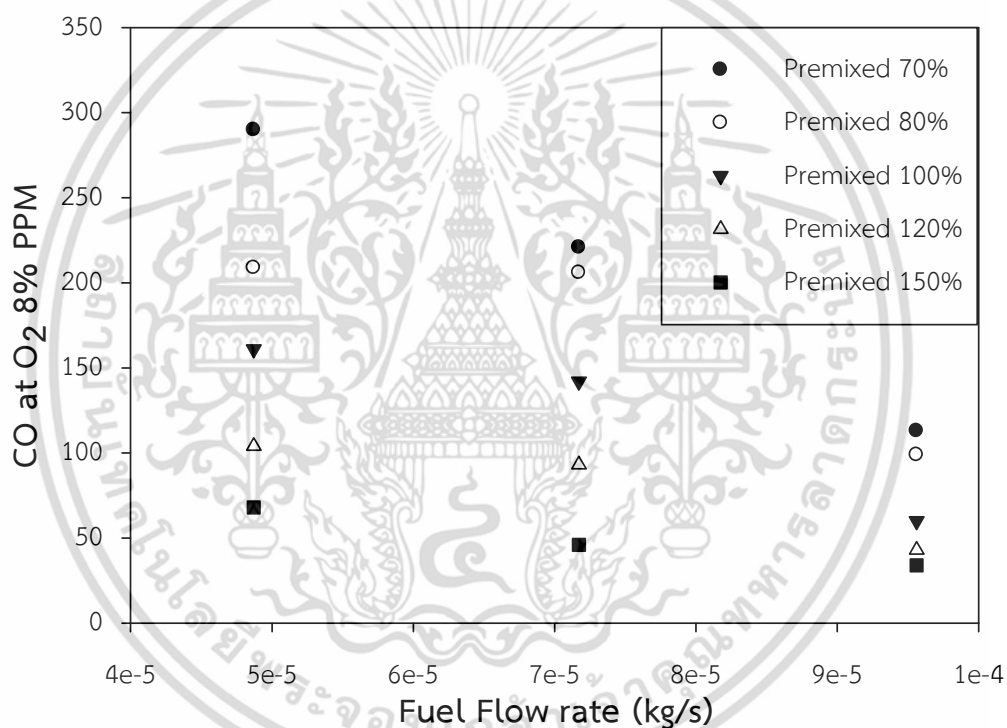
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.15 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำเมื่อทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้

6.3.4 ปริมาณมลพิษ

จากรูปที่ 6.16 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ เนื่องจากอากาศที่เพิ่มขึ้นและมีเพียงพอสำหรับการเผาไหม้จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และรุนแรงมากขึ้นภายในโครงสร้างของวัสดุพูนส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง สืบเนื่องจากปริมาณอากาศที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ที่ 70% ของปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด ซึ่งมีปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูง ที่ย่านอัตราการไหลเชื้อเพลิงต่ำ เนื่องจากสารตั้งต้นมีความเร็วที่ไม่มากนักส่งผลทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้เกิดการเผาไหม้ช้า จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 6.16 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้

6.4 อิทธิพลของปริมาณเปอร์เซ็นต์อากาศที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการเผาไหม้

จากหัวข้อที่ 6.3 ซึ่งพบว่าปริมาณอากาศที่ใช้ในการผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ส่งผลกระทบต่อการเผาไหม้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งหากปริมาณอากาศอากาศที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ที่น้อยเกินไปส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูง ในขณะที่หากมีปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลทำให้เปลวไฟเกิดการยกตัวขึ้นลอยขึ้นเหนือหัวเผาวัสดุพูนที่ยานอัตรการไหลสูง ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาในหัวข้อนี้

สำหรับการทดลองจะปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินที่สอดคล้องกับอัตราส่วนสมมูล ที่ 0.6, 0.5 และ 0.4 ตามลำดับ โดยศึกษาภายใต้เงื่อนไขปริมาณอากาศที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ที่ 100% ของปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด เพื่อศึกษาผลกระทบต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำภายใต้้อตราการไหลเดียวกันและทำการติดตั้ง Swirl ที่มุม 45 องศา เพื่อสังเกตลักษณะเปลวไฟ การกระจายตัวของอุณหภูมิและปริมาณก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้น

6.4.1 ลักษณะของเปลวไฟ

จากรูปที่ 6.17 เมื่อทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนที่สองซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนสมมูล 0.6, 0.5 และ 0.4 ตามลำดับ โดยกระทำภายใต้้อตราการไหลเดียวกันและปริมาณอากาศที่ใช้ในการผสมก่อนการเผาไหม้ที่ 100% ของปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด

พิจารณาที่อัตราส่วนสมมูล 0.5 นั้น เมื่อปริมาณอากาศส่วนที่สองเพิ่มขึ้นโดยไหลผ่าน swirler ทำให้เกิดกระแสการหมุนวน ส่งผลทำให้อุณหภูมิที่เผาไหม้ไม่หมดโดยสังเกตได้จากสีของเปลวไฟที่เป็นสีส้มซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของเขม่าที่เผาไหม้ไม่หมดภายในวัสดุพูนหลุดลอยออกมาเผาไหม้ที่บริเวณผิวด้านบนของวัสดุพูนเกิดการผสมและคลุกเคล้ากับอากาศส่วนที่สองได้ดีและขยายตัวในแนวรัศมีเล็กน้อย เปลวไฟจึงมีลักษณะสั้นลง

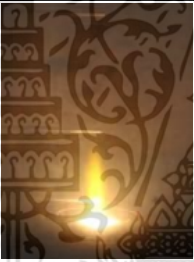








เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนสมมูล 0.4 นั้น พบว่าเปลวไฟในส่วนตรงกลางของวัสดุพูนจะมีสีฟ้าซึ่งเป็นลักษณะของเปลวไฟของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ บ่งชี้ได้ว่าเมื่อปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้รุนแรงภายในวัสดุพูน ซึ่งทำเขม่าเกิดการเผาไหม้ในวัสดุพูนและหลงเหลือมาเผาไหม้บริเวณผิวด้านบนของวัสดุพูนในปริมาณน้อย เนื่องจากปริมาณอากาศที่มากเพียงพอทำให้เขม่าเกิดการเผาไหม้หมดภายในวัสดุพูน

6.4.2 การกระจายอุณหภูมิ

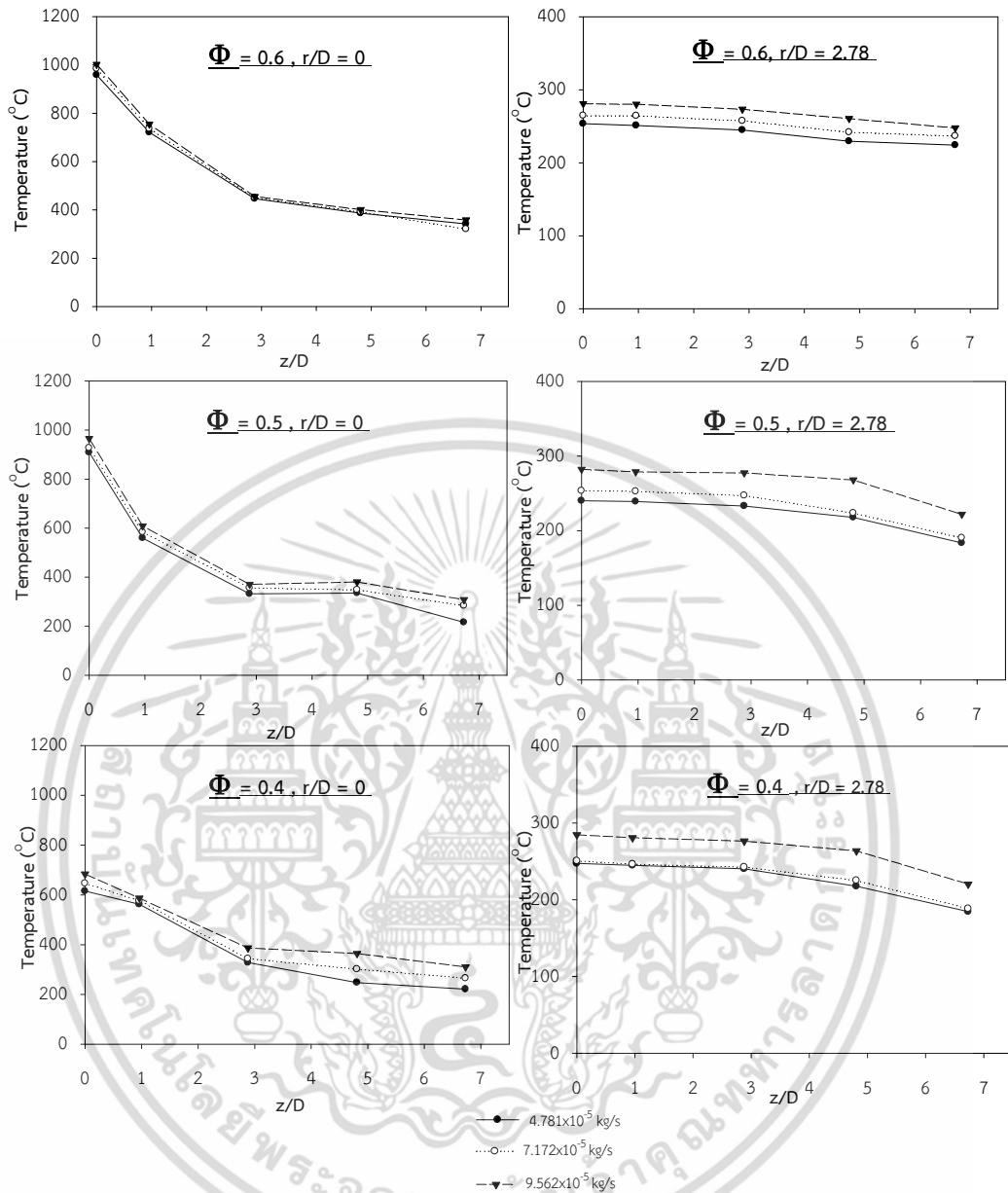
จากรูปที่ 6.18 เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิตามระดับความสูง ที่ตำแหน่งกึ่งกลางหัวเผา $r/D = 0$ นั้น ที่อัตราส่วนสมมูล 0.6 และ 0.5 นั้นจะมียังมีอุณหภูมิที่สูงและค่อยๆลดลงตามระดับความสูงอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากอุณหภูมิที่หลุดลอยออกมาเผาไหม้บริเวณด้านบนของวัสดุพูนใน

ปริมาณที่มากพอเมื่อทำการผสมกับอากาศที่มีลักษณะของการไหลแบบหมุนวน จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่รุนแรง ส่งผลให้เกิดระดับของอุณหภูมิที่มีค่าสูง ณ บริเวณผิวด้านบนของหัวเผาวัสดุพูน

ในขณะที่อัตราส่วนผสม 0.4 สังเกตว่าระดับอุณหภูมิบริเวณผิวบนของวัสดุพูนมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นนั้น ส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และรุนแรงภายในวัสดุพูน ในขณะที่อุณหภูมิที่เผาไหม้ไม่หมดหลุดลอยออกมาเผาไหม้กับอากาศส่วนที่สองซึ่งเป็นการไหลแบบหมุนวนนั้นทำให้การผสมคลุกเคล้ากันได้ดีและมีปริมาณอากาศที่มากเพียงพอในบริเวณผิวด้านบนของวัสดุพูน ดังนั้นจึงทำให้การเผาไหม้เข้ามาที่หลุดลอยออกมาจากวัสดุพูนถูกเผาไหม้ใหม่หมดไป ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ แต่เนื่องจากปริมาณในส่วนที่สองที่มากเกินไปนั้นทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนให้กับปริมาณอากาศที่เหลือจากการเผาไหม้ ซึ่งทำให้ระดับของอุณหภูมิบริเวณด้านบนของหัววัสดุพูนต่ำลง

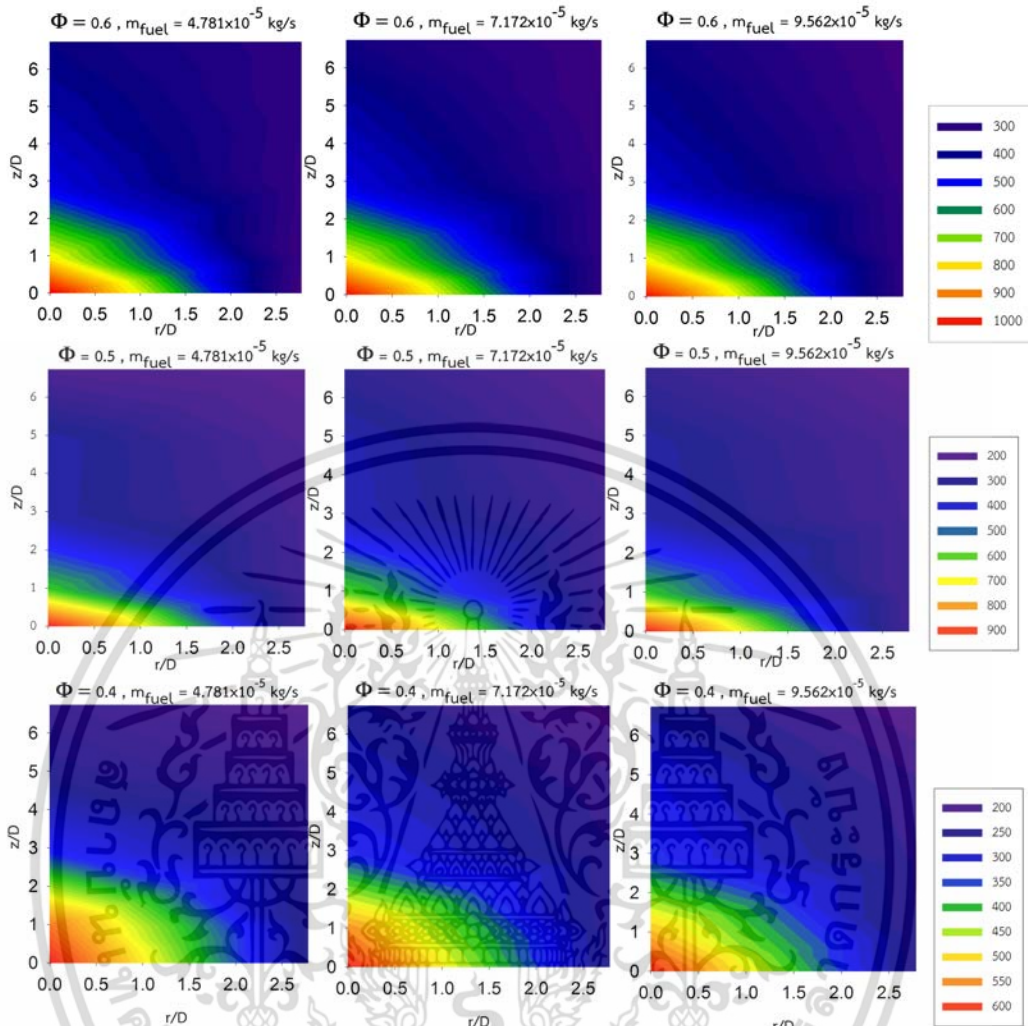
อัตราการไหล เชื้อเพลิง (kg/s)	$\Phi=0.6$	$\Phi=0.5$	$\Phi=0.4$
4.781×10^{-5}			
7.172×10^{-5}			
9.560×10^{-5}			

รูปที่ 6.17 ลักษณะเปลวไฟของการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำเมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมที่ 0.6, 0.5, 0.4 ตามลำดับ



รูปที่ 6.18 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิตามระดับความสูง ที่ตำแหน่ง $r/D = 0$ และ $r/D = 2.78$ สำหรับกรณีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูล 0.6, 0.5 และ 0.4 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

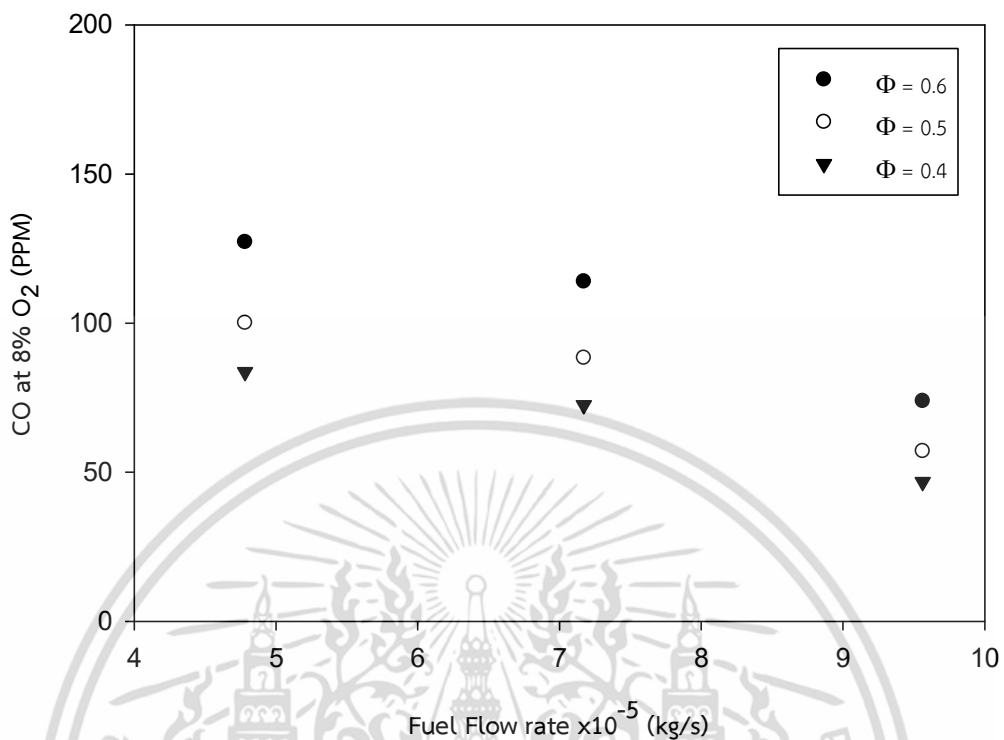


รูปที่ 6.19 ลักษณะของการกระจายอุณหภูมิ ในกรณีทำการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6, 0.5 และ 0.4 ตามลำดับ

6.4.3 ปริมาณมลพิษ

ในการแสดงผลสำหรับเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลนั้น จำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่มาตรฐานเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนเท่ากัน โดยสำหรับงานวิจัยนี้เลือกที่เปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนในก๊าซไอเสีย 8 % พามิเตอร์ที่ใช้คำนวณปรับตามมาตรฐานดังกล่าว แสดงดังสมการที่ 4.15

จากรูปที่ 6.20 พบว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินที่สอดคล้องกับ $\Phi = 0.6$, $\Phi = 0.5$ และ $\Phi = 0.4$ โดยทำการเปรียบเทียบที่ปริมาณออกซิเจนในก๊าซไอเสีย 8% เนื่องจากเมื่อปริมาณอากาศเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่ามีปริมาณอากาศที่มากเพียงพอในการเผาไหม้ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของเปลวไฟในรูปที่ 6.18 ดังนั้นเมื่อเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จึงทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง



รูปที่ 6.20 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำโดย การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6, 0.5 และ 0.4

บทที่ 7

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำโดยการนำหัวเผาวัสดุพูนมาประยุกต์ใช้ เพื่อหาความเป็นได้ในการนำความรู้เหล่านี้ไปพัฒนาสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กต่อไป สำหรับการศึกษานั้นจะศึกษาลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำในวัสดุพูน การศึกษาอิทธิพลผลของการเปลี่ยนแปลงองศาของใบ Swirl อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณอากาศที่ใช้ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ และ การศึกษาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสม โดยจะสรุปผลการทดลองได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

7.1 สรุปผลการทดลอง

7.1.1 การศึกษาการลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำในวัสดุพูน

โดยศึกษาเปรียบเทียบการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม เนื่องจากเชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำนั้นเป็นการนำก๊าซหุงต้มมาเจือจางโดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราส่วน 40% LPG 60% CO₂ โดยการศึกษาภายใต้การควบคุมปริมาณอากาศ และเป็นอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงบางที่อัตราส่วนผสม 0.6 การ จากทดลองสามารถสรุปได้ว่า

ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำสามารถเกิดการเผาไหม้ได้ดีในหัวเผาวัสดุพูน ในการเผาไหม้นั้นให้ลักษณะเปลวไฟที่มีลักษณะสั้น เรียว กว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม การกระจายตัวของอุณหภูมิในแนว z/D และการแผ่รังสีความร้อนในแนวแกน r/D มีค่าสม่ำเสมอ

เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซไอเสียพบว่า การปลดปล่อยคาร์บอนนอกไซด์ของเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำมีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มเนื่องจากเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูง ดังนั้นเมื่อเชื้อเพลิงที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์จึงหลุดจากบริเวณที่มีการเผาไหม้เข้าสู่ก๊าซไอเสีย แต่จะมีปริมาณลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเนื่องจากปฏิกิริยาที่รุนแรงขึ้น

7.1.2 การศึกษาผลกระทบของการปรับเปลี่ยนมุมใบ swirl ต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำ

ในการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยน Swirl มุมองศาของใบที่ 24 องศา และ 45 องศา ภายใต้การเผาไหม้เชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำในหัวเผาวัสดุพูน จากสมมติฐานเบื้องต้นว่าการนำ Swirl มาใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มสมรรถนะการเผาไหม้ในส่วนของการทำหน้าที่ช่วยผสมอากาศส่วนที่สองและส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนที่หนึ่งดีขึ้นและทำให้ความยาวของเปลวไฟสั้นลง

จากการทดลองพบว่าที่มุมองศา Swirl 45 องศา การเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงซึ่งสังเกตได้จากความสว่างของวัสดุพูน โดยอุณหภูมิของไอเสียสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ 1,002 องศาเซลเซียส สำหรับย่านอัตราการไหล 9.562×10^{-5} kg/s เมื่อสังเกตลักษณะของเปลวไฟซึ่งพบว่าเปลวไฟมีลักษณะสั้นลง

ทุกย่านอัตราการไหล นั้นหมายความว่าอากาศส่วนที่สองเกิดการไหลแบบหมุนวนมากพอในแนวรัศมี ทำให้การผสมกันระหว่างอากาศส่วนที่สองและส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนที่หนึ่งเกิดการคลุกเคล้ากันได้ดี ซึ่งสังเกตได้จากเปลวไฟมีการขยายตัว ในขณะที่มุมองศาใบ Swirl เท่ากับ 24 องศา ซึ่งจะพบการเปลี่ยนแปลงน้อยทั้งความสั้นของเปลวไฟและอุณหภูมิในการเผาไหม้

เมื่อพิจารณาปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นพบว่าเมื่อมีการจ่ายอากาศส่วนที่สองแบบหมุนวน ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการจ่ายอากาศส่วนที่สองแบบหมุนวนนี้ทำให้เกิดการผสมและเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างอากาศที่ดีขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้นจึงเกิดการปลดปล่อยมลพิษน้อยลง

7.1.3 การศึกษาอิทธิพลจากการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศที่ผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้

ในการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณเปอร์เซ็นต์ของอากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้โดยปริมาณอากาศจะสัมพันธ์กับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 โดยปริมาณของอากาศที่ใช้ในการผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ ที่ทำการปรับเปลี่ยนได้แก่ 70% 80% 100% 120% 150% จากการทดลองพบว่าอากาศส่วนที่หนึ่งมีผลต่อสมรรถนะการเผาไหม้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาที่ย่าน 70% และ 80% นั้นลักษณะเปลวไฟจะค่อนข้างไม่มีเสถียรภาพ การกระจายอุณหภูมิตามระดับความสูงในแนว z/D ค่อนข้างสูง และการแผ่รัศมีความร้อนในแนว r/D ต่ำ รวมไปถึงปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าสูง เมื่อทำการเพิ่มปริมาณอากาศที่ 100% และ 120% ส่งผลให้การเผาไหม้ดีขึ้น เปลวไฟมีลักษณะที่สั้นลงเนื่องจากการเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดการเผาไหม้ในวัสดุพจน การกระจายตัวของอุณหภูมิจึงมีความสม่ำเสมอ ทั้งยังส่งผลต่อปริมาณก๊าซไอเสียที่ลดลงและสมรรถนะการเผาไหม้ที่ดีขึ้น เนื่องจากปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นและเพียงพอจึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ภายในโครงสร้างของวัสดุพจน

7.1.4 การศึกษาอิทธิพลจากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูล

สำหรับการทดลองนั้นได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูล ที่ 0.6 0.5 และ 0.4 ตามลำดับภายใต้อัตราการไหลเดียวกัน ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนสมมูล 0.6 และ 0.5 เปลวไฟอยู่ในย่านที่มีเสถียรภาพ เกิดการเผาไหม้ที่รุนแรง ซึ่งมีระดับอุณหภูมิสูง และยังเป็น การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสังเกตได้จากสีของเปลวที่เป็นสีส้มซึ่งเป็นสีของเขม่า ในขณะที่ลดอัตราส่วนสมมูลลงที่ 0.4 ซึ่งส่งผลให้ปริมาณของอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้การเผาไหม้ส่วนใหญ่เกิดในวัสดุพจนและเป็นการเผาไหม้ที่ค่อนข้างสมบูรณ์โดยสังเกตจากสีของเปลวไฟที่เป็นสีฟ้า ซึ่งเป็นสีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ ในขณะที่ระดับอุณหภูมิบริเวณผิวด้านบนหัวเผาวัสดุพจนต่ำลง เนื่องจากการสูญเสียความร้อนให้กับอากาศที่เหลือจากการเผาไหม้ แต่ในทางกลับกันปริมาณอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นและอิทธิพลของการไหลแบบหมุนวนส่งผลให้การผสมกันของเชื้อเพลิงและอากาศดีขึ้นและทำให้การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองในงานวิจัยนี้ตั้งหัวข้อที่ 7.1.1-7.1.4 พบว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำนั้นสามารถเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในหัวเผาวัสดุพูน เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุพูนมีการหมุนเวียนความร้อนและการกักเก็บความร้อนผ่านการนำความร้อนและการพาความร้อนผ่านเนื้อโครงสร้างของวัสดุพูนดังนั้นจึงทำให้เผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำได้และเนื่องจากความร้อนที่วัสดุพูนกักเก็บไว้ภายในโครงสร้างของวัสดุพูนนั้นส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ Swirler ช่วยทำให้การผสมของอากาศส่วนที่สองและส่วนผสมระหว่างอากาศส่วนที่หนึ่งกับเชื้อเพลิงนั้นสามารถคลุกเคล้ากันได้ดีในทิศทางตามแนวรัศมีซึ่งส่งผลทำให้เปลวไฟมีลักษณะขยายออกตามแนวรัศมี ดังนั้นเปลวไฟจึงมีลักษณะที่สั้นลง ซึ่งเป็นจุดมุ่งหมายที่ต้องการของการนำไปประยุกต์ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก นอกจากนี้ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ส่งต่อสมรรถนะของการเผาไหม้และตำแหน่งของเปลวไฟ ซึ่งหากน้อยไปจะทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณสูงแต่ในขณะที่มีมากไปส่งผลต่อตำแหน่งของเปลวไฟและเป็นภาระต่อการเผาไหม้ ดังนั้นจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ที่การเผาไหม้สำหรับความมีประสิทธิภาพรวมไปถึงลักษณะเปลวไฟที่สั้นและอุณหภูมิที่ดี และปลดปล่อยปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำนั้นคืออัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ 9.562×10^{-5} kg/s ใช้มุมมอง Swirl ที่ 45 อัตราส่วนสมมูล 0.5 จะแสดงดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 แสดงลักษณะของเปลวไฟที่ดีและตรงตามเป้าหมายของการวิจัย

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากข้อมูลของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่กำลังผลิต 60 kW ซึ่งมีความต้องการกำลังความร้อนที่ 240 kW ซึ่งจากการทดลองปริมาณความร้อนสูงสุดที่หัวเผาสามารถผลิตได้คือ 1.76 kW ต่อ 1 หัวเผา ซึ่งต้องใช้ปริมาณหัวเผาเป็นจำนวนมาก
2. จากการทดลองย่านอัตราการไหลที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเผาไหม้เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กนั้นเป็นย่านอัตราการไหลสูงตั้งแต่ 9.562×10^{-5} kg/s เป็นต้นไป เพื่อลดปริมาณของหัวเผาเมื่อนำไปประยุกต์ใช้เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก ซึ่งสำหรับการทดลองนั้นสามารถเผา

ไหม้ในย่านอัตราการใช้สูงกว่า 9.562×10^{-5} kg/s ได้ แต่เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจึงไม่สามารถทดสอบในย่านดังกล่าวได้

3. ในการวัดอุณหภูมิ ควรเพิ่มตำแหน่งจุดวัดสำหรับการวัดอุณหภูมิภายในหัวเผาวัสดุพูน เพื่อจะได้ทราบถึงสถานะการเผาไหม้ภายในวัสดุพูนที่ชัดเจน

4. ควรทำการตรวจวัดปริมาณ NO_x เพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะของการเผาไหม้ที่ชัดเจน ซึ่งในการศึกษานั้นเครื่องตรวจวัดปริมาณไอเสียได้หมดสภาพการใช้งานในขณะที่ทำการทดลองจึงทำให้ไม่สามารถตรวจวัดได้

5. เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นเพียงศึกษาสมรรถนะของการเผาไหม้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำใกล้เคียงกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลเท่านั้น โดยไม่ได้สนใจถึงคุณสมบัติหรือองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ซึ่งหากมีการศึกษาในอนาคตควรพิจารณาองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการเผาไหม้เพิ่มเติม

6. หากนำหัวเผาวัสดุพูนไปประยุกต์ใช้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กนั้นควรคำนึงถึงความปลอดภัย เนื่องจากการแตกหักของวัสดุพูนในระหว่างการเผาไหม้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Acme International (Thailand) Ltd. 2557. **ตัวกรองเซรามิกซ์**. [Online]. Available: <http://www.acme-inter.com>.
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2560. พลังงานชีวมวล. [Online]. Available: http://www.biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html
- [3] พิศาล บุญเยี่ยมศรี. “การเลือกใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง”. Technology Promotion, Vol. 38, 2554, pp. 61-64.
- [4] A. Laphirattanakul., P. Laphirattanakul, J. Charoensuk (2015), Effect of Porous Geometry on the Performance of the LPG burner of Ceramics Industry, **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29. จังหวัดนครราชสีมา.**
- [5] สุวัชชัย กิจสำราญกุล, 2555. “การพัฒนาหัวฉีดแบบผสมอากาศก่อนการเผาไหม้สำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซต้นแบบ”. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8.**
- [6] กนกกาญจน์ ว่องวัชรพร, 2556. “การศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลในประเทศไทยกับแก๊สหุงต้มในหัวเผาวัสดุพอร์น”. **วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 30 (ฉบับที่ 4)**
- [7] ทรงศักดิ์ สนทนา, ซวลิต ภาพภักดี, จิตรภรณ์ วงศางาม และ จารุวัตร เจริญสุข. 2556. “การวิเคราะห์วัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์โดยวิธีออฟติไมเซชันสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงค่าความร้อนต่ำ”. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27. จังหวัดชลบุรี**
- [8] I.Hudak, P. Belohradsky, P. Skryja. 2015. “Effects of inert gases on NOx formation in the conventional burner”. **Proceedings of the European Combustion Meeting.**

- [9] K.A Al-attab, John Chung Ho, Z.A. Zainal. “Experimental investigation of submerged flame in packed bed porous media burner fueled by low heating value producer gas”. **Experimental Thermal and Fluid Science**. vol. 62, 2015, pp.1-8.
- [10] Bryan M. Jenkins and James M. Ebeling. “Thermochemical properties of biomass fuels : an analysis of 62 kinds of biomass for heat value”. California agriculture. 1985, pp. 14-16.
- [11] Christos Keramiotis, Maria A. Founti. “An experimental investigation of stability and operation of a biogas fueled porous burner”. **Fuel**. vol. 103, 2013, pp. 278-284
- [12] Susie Wood, Andrew T. Harris. “Porous burners for lean-burn applications”. **Progress in energy and Combustion Science**. vol. 34, 2008, pp. 667-684.
- [13] V.N Kornilov, S. Shakariyaants, L.P.H. de Goey. 2012. “Novel burner concept for premixed surface-stabilized combustion”. **Proceedings of ASME Turbo Expo 2012**. Denmark.
- [14] Ishak M. s. a , Mohammad Nazri Mohd Jaafar , Wan Zaidi Wan Omar. 2015. “Numerical Analysis of Effect of Preheat and Swirl of Inlet Air on Temperature Profile in Canister Burner”. **Faculty of Mechanical Engineering,Universiti Teknologi Malaysia**.
- [15] สำเร็จ จักรใจ. 2547. **การเผาไหม้**. กรุงเทพฯ :จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [16] นคร ทิพย์วงศ์. 2550. **พื้นฐานวิศวกรรมกรรมการเผาไหม้**. เชียงใหม่:มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [17] Turns, S.R. 1996. **An introduction to combustion concept and applications**. Singapore: McGraw-Hill.
- [18] Charles E. Baukal, Jr. 2001. **The John Zink Combustion handbook**. United states of America: CRC Press.

- [19] Macro Antonio do Nascimento. et.al. 2014. *Micro Gas Turbine Engine*. Intech open science.
- [20] ศิวะ จันทรเอี่ยม. 2555. การจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาไมโครแก๊สเทอร์โบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [21] ชีรศักดิ์ จินประชา. 2557. การพัฒนาและทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์กังหันแก๊สขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [22] สุวัชชัย กิจสำราญกุล. 2558. ผลกระทบของการเผาไหม้แบบผสมก่อนต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันแก๊สระดับห้องปฏิบัติการ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [23] เจษฎาพิรุณ ดวงมารดา, ทวีริย์ ทะนอก และ ธัญญาพร หิวนทรวงค์, 2554. การพัฒนาหัวฉีดเพื่อใช้เชื้อเพลิงความร้อนต่ำสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [24] ภาณุมาศ อรุณเดชาวัฒน์, 2546. การศึกษาเชิงทดลองของห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบส่วนผสมอากาศเชื้อเพลิงหนาบางเพื่อให้สามารถใช้ก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [25] พงษ์พัฒน์ ตรรัตน์, ศักดิ์สิทธิ์ ปัทมะสุนทร และ อธิรัช วุฒิจรรยารักษ์. 2553. การพัฒนาหัวฉีดเชื้อเพลิงน้ำมันปาล์มและเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์กังหันแก๊ส. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [26] ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล, 2555. การปรับปรุงการผสมและการเผาไหม้จากหัวฉีดดัดแปลงในหัวเผาแอลพีจีแบบผสมล่วงหน้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- [27] ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตน์ากุล, 2560. การศึกษาสมรรถนะการเผาไหม้ของวัสดุพอร์นที่ประยุกต์ใช้กับหัวเผาแอลพีจีแบบผสมบางส่วนก่อนการเผาไหม้. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [28] อารุส ลภีรัตน์ากุล, 2551. สมรรถนะเชิงความร้อนของเตาเผาไหม้แบบวัสดุพอร์นที่มีการจ่ายอากาศเป็นขั้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [29] นาทยา เจริญสุข และ ธนภุช ภัทรเกษวิทย์, 2558. การออกแบบระบบการหมุนเวียนความร้อนที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ในกระบวนการรีดักชันสำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรและสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.
- [30] ยูริกะ มิคามิและคณะ, 2560. การศึกษาการเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษของหัวเผาวัสดุพอร์นทรงกระบอกเจาะรูที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับการป้อนอากาศแบบหมุนควง. ปริญญาวิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [31] Gao H.B., Qu Z.G., Feng X.B. and Tao W.Q. “Methane/air combustion in two layer porous burner with different foam materials” *Fuel*. Vol.115, 2014, pp.154-161.



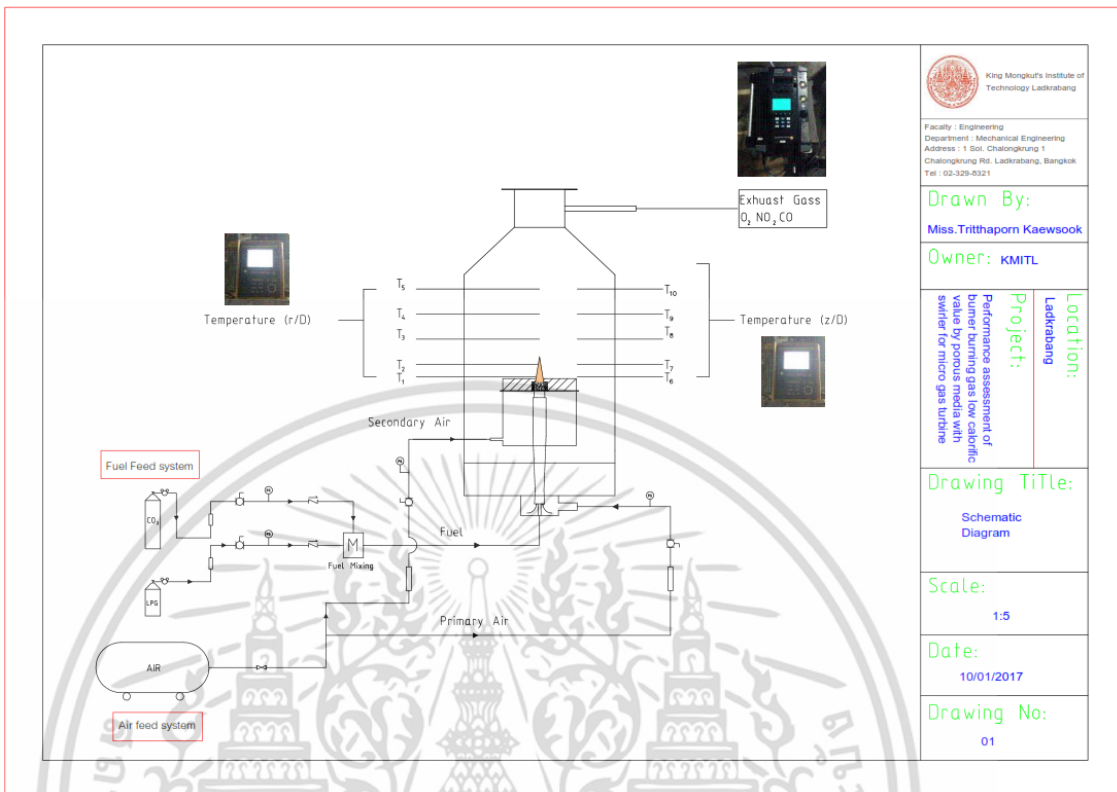
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

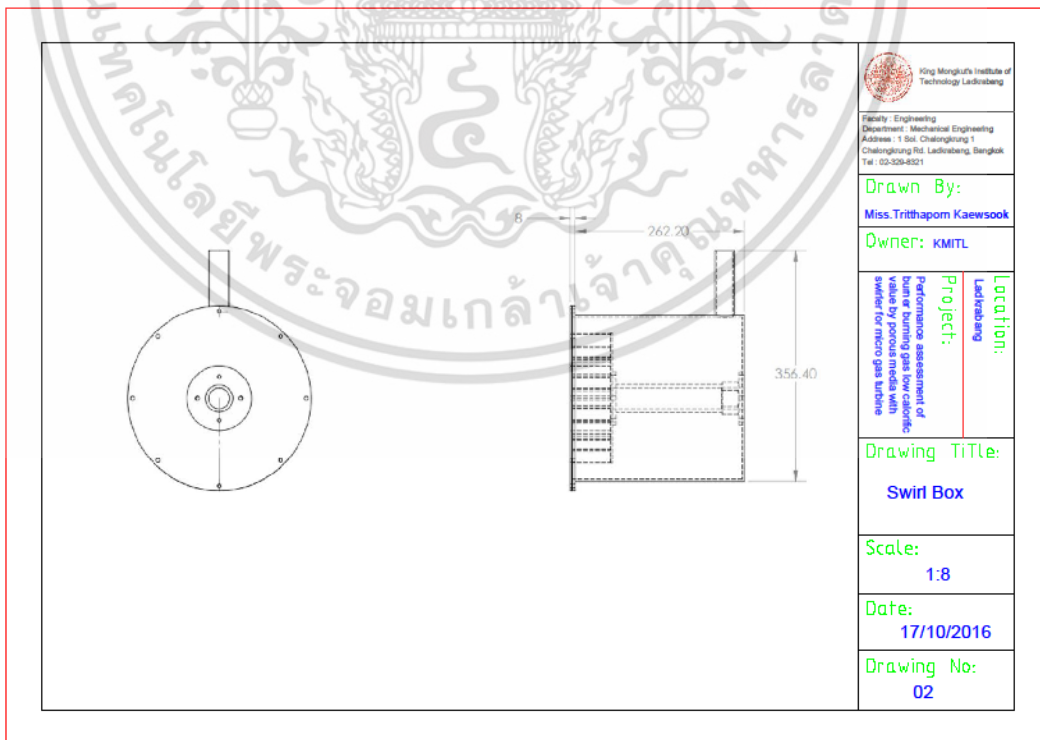


ภาคผนวก ก.
แบบสั่งผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

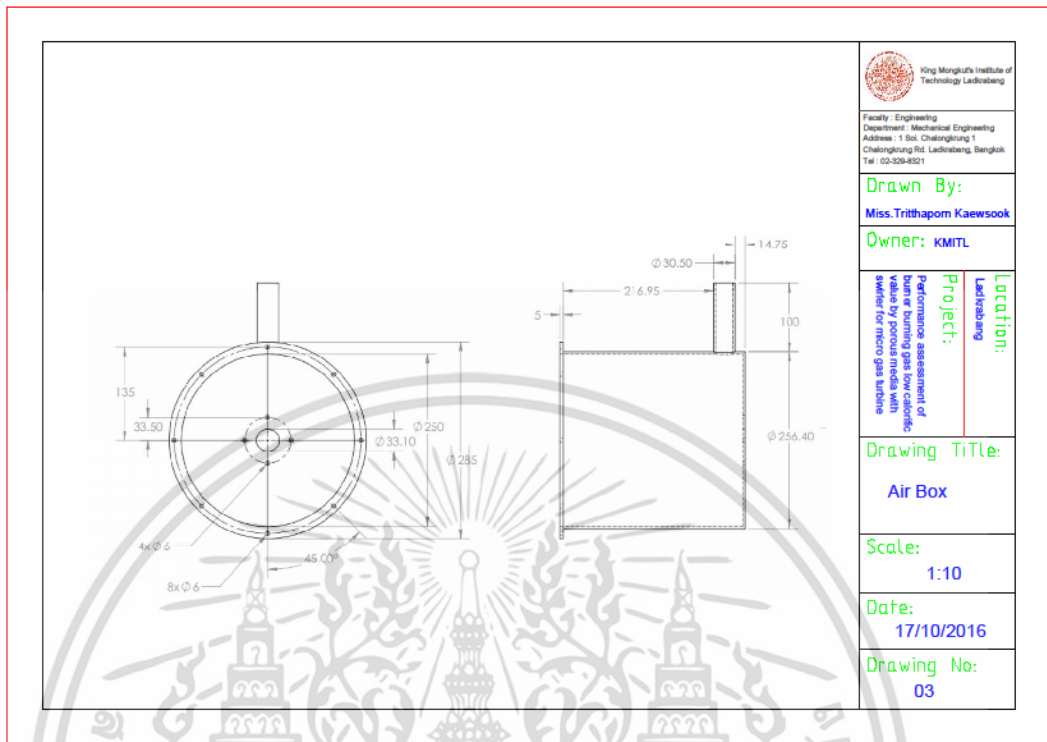


รูปที่ ก1 Schematic Diagram

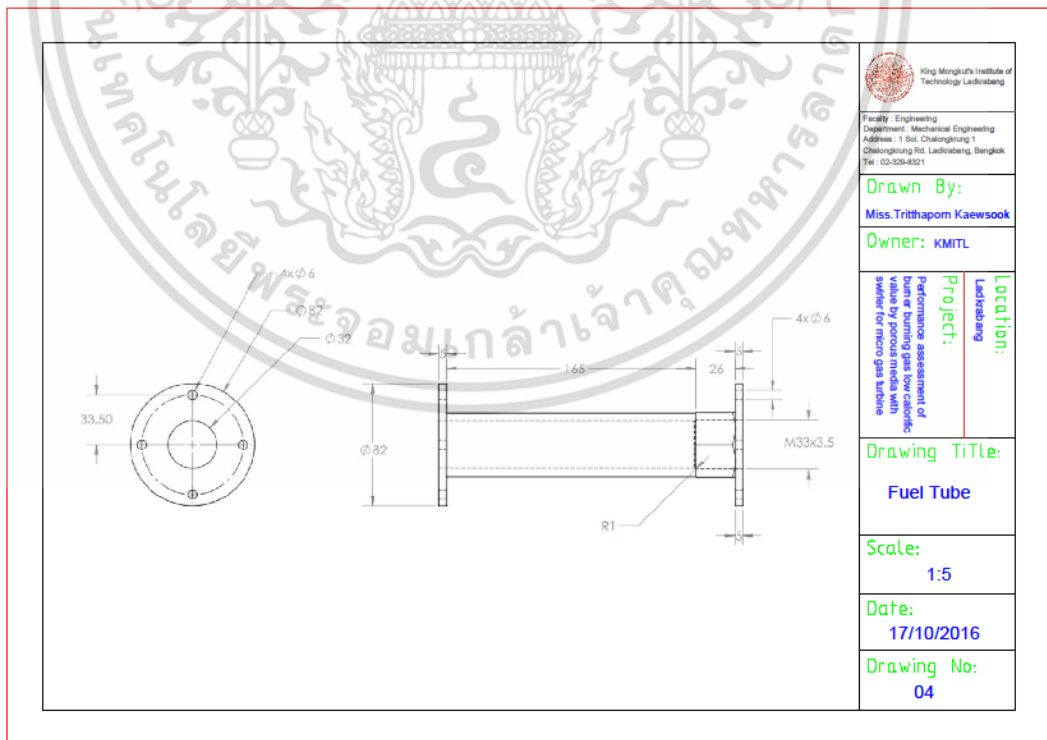


รูปที่ ก2 Swirl Box

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

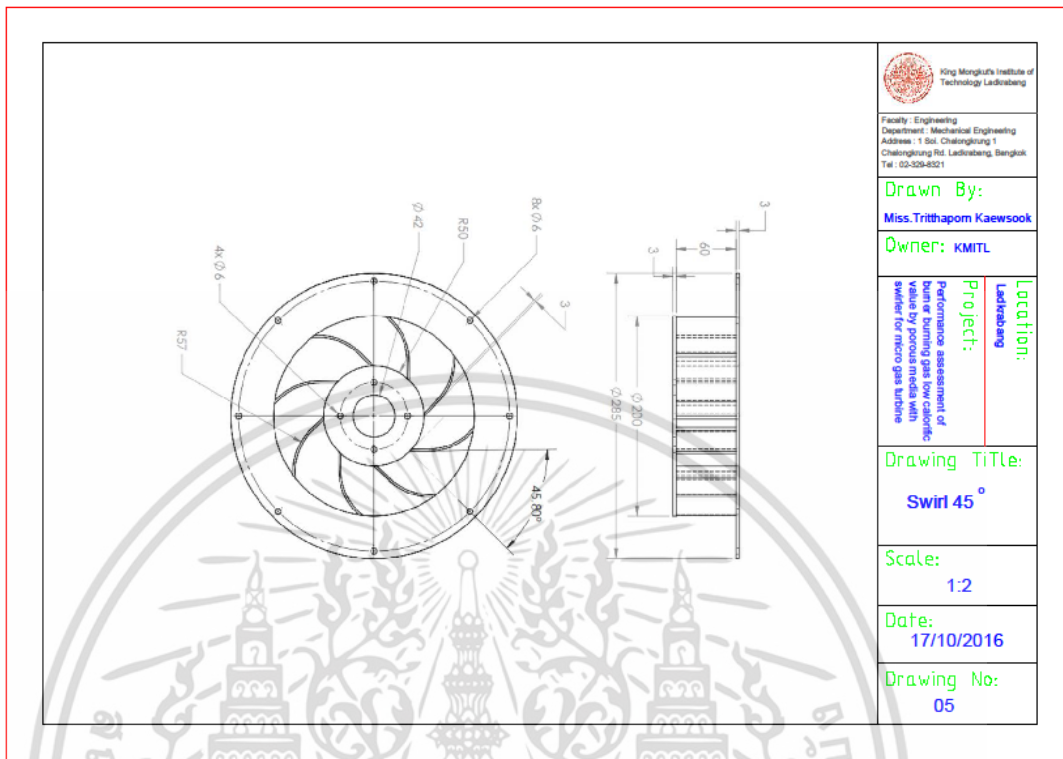


รูปที่ 3 ปล่องจ่ายอากาศส่วนที่สอง

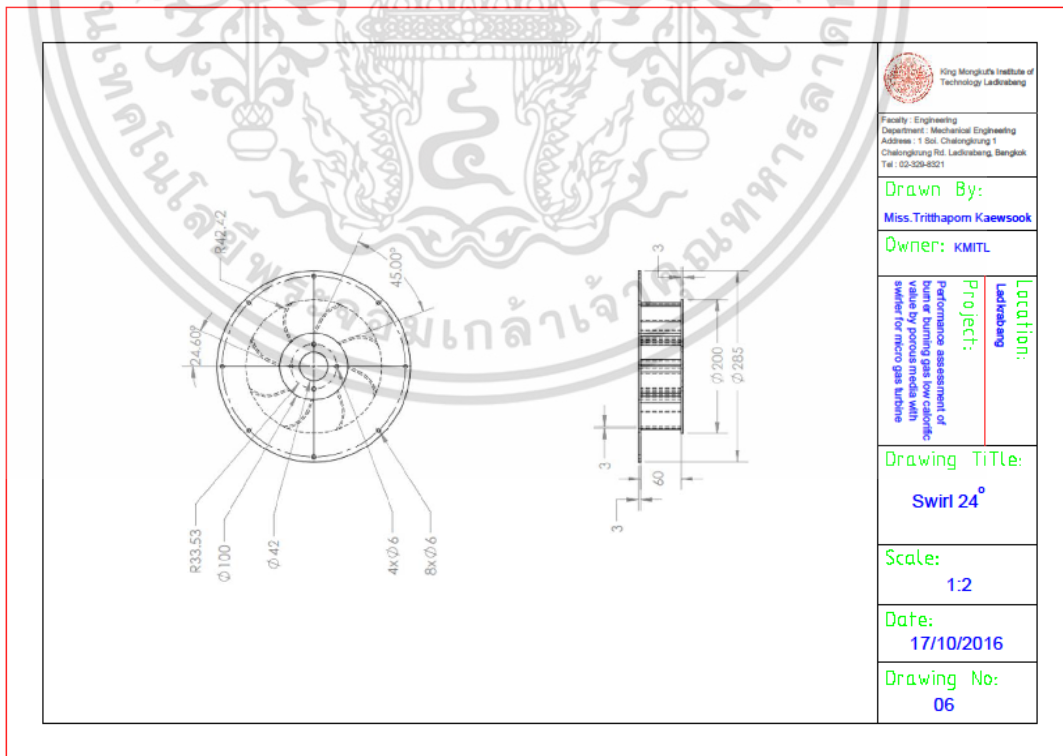


รูปที่ 4 ท่อเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 Swirl ที่มุม 45 องศา



รูปที่ 6 Swirl ที่มุม 24 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการ

เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11

11st Conference On Energy Network of Thailand (E-NETT)

วันที่ 17-19 มิถุนายน 2558

ณ โรงแรมบางเลน เออีทีเอ จังหวัดชลบุรี



จัดการประชุมโดย

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ร่วมกับ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปดหรือดัดแปลงเอกสารนี้

การใช้วัสดุพรุนร่วมกับหัวเผาอุตสาหกรรมในการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำ

Using Porous Media with The Industrial Burner for
combustion of fuel with low calorific valueตฤชฐพร แก้วสุก¹, จารุวัตร เจริญสุข^{1*}¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

*ผู้ติดต่อ: โทรศัพท์ 023 264 197 โทรสาร: 023 264 198

E-mail : kcjaruw@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้หัวเผาวัสดุพรุนในการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำ โดยการนำก๊าซหุงต้มผสมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเป็นตัวอย่างของเชื้อเพลิงก๊าซค่าความร้อนต่ำ ซึ่งค่าความร้อนของเชื้อเพลิงนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณการเจือจางด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการศึกษาภายใต้ย่านการทำงานเดียวกันกับหัวเผาที่ไม่ได้ใช้วัสดุพรุน โดยปรับอัตราการไหลของก๊าซหุงต้มที่ 2 L/min ถึง 4 L/min ซึ่งในย่านอัตราการไหลของก๊าซหุงต้มดังกล่าวจะปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ 1 L/min จนถึง 5 L/min ทำการบันทึกค่าเปอร์เซ็นต์ออกซิเจนก่อนการเผาไหม้และการกระจายอุณหภูมิ พร้อมทั้งสังเกตความยาว สี และรูปแบบของเปลวไฟ จากการทดลองหัวเผาที่ไม่มีวัสดุพรุนนั้นมีการเหนี่ยวนำอากาศสูงซึ่งอากาศส่วนที่หนึ่งมีผลต่อการเผาไหม้มากจึงทำให้การเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงเผาไหม้ได้สมบูรณ์ซึ่งที่อัตราการไหลก๊าซหุงต้มที่ 2 และ 3 L/min ให้เปลวไฟสีน้ำเงิน โดยที่เปอร์เซ็นต์การผสมของอากาศก่อนการเผาไหม้มีแนวโน้มมีตัว ในขณะที่หัวเผาที่มีวัสดุพรุนมีอัตราการเหนี่ยวนำอากาศต่ำกว่า เนื่องจากเนื้อวัสดุพรุนซึ่งเป็นโครงสร้างที่ขวางช่องการไหลก๊าซ ส่งผลให้ความเร็วของก๊าซลดลง แต่จะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลและให้เปลวไฟที่เสถียรกว่าในอัตราการไหลเชื้อเพลิงสูงๆโดยสอดคล้องกับอัตราการเหนี่ยวนำของอากาศ รวมถึงวัสดุพรุนยังทำหน้าที่กักเก็บความร้อนและเป็น Flame holder เพื่อให้การเผาไหม้ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง

คำหลัก: หัวเผาวัสดุพรุน ก๊าซปิโตรเลียมเหลว การเหนี่ยวนำอากาศ การผสมกันก่อนเผาไหม้

Abstract

This paper describes the application of porous burner for fuel with low heating value by diluting the liquid petroleum gas (LPG) with carbon dioxide. The calorific value of the fuel, it is based on dilution by carbon dioxide. Comparison was made between the burner with and without porous flame holder while adjusting LPG flow rate at 2 L/min and 3 L/min and dilution was achieved by adding CO₂ flow rate from 1 - 5 L/min. Oxygen concentration prior to



combustion, temperature distribution including the visible flame length, illumination of porous media and shape of flame were observed. From experiments, it was found that the burner without porous flame holder had higher primary air entrainment and higher flue gas temperature. Short and stable flame was found for both types of burners at the range of low flow rate of LPG (2 L/min) and low addition of CO₂. However at this LPG flow rate with CO₂ flow rate of 4 L/min. However at high LPG flow rate (3 and 4 L/min), the burner without porous foam yielded much longer flame length especially when CO₂ was increased in the fuel stream, while the burner with porous foam characterized illuminous shorter flame length. It can be concluded that porous foam has successfully served as a flame holder at low firing rate and help maintaining shorter and more intense combustion at higher firing rate. In addition, it serve as flame holder for retain heat to help maintain continuous combustion.

Keywords: porous burner, liquid petroleum gas, Primary air entrainment, Premixed combustion

1. บทนำ

จากสถานการณ์ราคาที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ทำให้ประเทศต้องจัดหาพลังงานทดแทนเพื่อใช้ทดแทนแหล่งพลังงานที่ได้จากฟอสซิล อาทิเช่น ปิโตรเลียม, ก๊าซธรรมชาติและถ่านหินซึ่งภาครัฐมีมาตรการและนโยบายที่สนับสนุนให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะการใช้พลังงานทดแทนที่ผลิตได้จากภายในประเทศประกอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังน้ำ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ, ชยะและเชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งนโยบายด้านพลังงานที่เน้นไปในทางสนับสนุนการนำพลังงานทดแทนมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ 2555-2564) ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน[1] ซึ่งมุ่งเป้าไปที่การใช้พลังงานจากชีวมวลจากผลผลิตทางการเกษตรเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรจึงทำให้มีชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากภาค

เกษตรกรรมและอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก

ที่ผ่านมาได้มีการนำวัสดุพอรามาใช้ร่วมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส[2,3]ซึ่งการเผาไหม้นั้นเกิดขึ้นในโพรงของเนื้อของแข็งขณะเกิดการเผาไหม้จะมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างเนื้อก๊าซและเนื้อของแข็งทำให้เกิดการเผาไหม้ในลักษณะที่มีการหมุนเวียนความร้อนภายใน การอุ่นส่วนผสมด้วยความร้อนจากก๊าซไอเสียก่อนการเผาไหม้ทำได้โดยอาศัยโครงสร้างของวัสดุพอรที่ไม่ต้องมีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มเติม การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นนั้นมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีการอุ่นอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ด้วยกลไกการถ่ายเทความร้อนในเนื้อวัสดุพอร อุณหภูมิการเผาไหม้ที่ได้ จึงมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการเผาไหม้แอดิแบติกที่สภาวะมาตรฐาน (Standard State Adiabatic flame temperature) [4] อีกทั้งสามารถทำให้เผาไหม้ในกรณีปริมาณอากาศส่วนเกินสูงหรือเผาไหม้ในเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำได้ดี คุณสมบัติของวัสดุพอรที่ศึกษาคือความสามารถใน



การรักษาเสถียรภาพการเผาไหม้ (Flame Stabilization) โดยลดการเกิดปรากฏการณ์เปลวไฟหลุดลอย (Lift off) และเปลวไฟย้อนกลับ (Flash back) เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุพรมมีลักษณะเป็นโครงข่ายซึ่งจะช่วยชะลอความเร็วของก๊าซที่ไหลสู่บริเวณที่มีการเผาไหม้ ทำให้ความเร็วของเปลวไฟ (Flame speed) เพิ่มขึ้นเพื่อสร้างสมดุลระหว่างความเร็วทั้งสองซึ่งมีทิศทางตรงกันข้าม ส่งผลให้ฐานของเปลวไฟถูกดักอยู่ในวัสดุพรมและลดการเกิดเปลวไฟหลุดลอย[8] รวมทั้งค่าการปลดปล่อยมลภาวะทั้งไนโตรเจนออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ[5] โดยวัสดุพื้นฐานที่ได้รับการนิยมนำไปผลิตเป็นหัวเผาวัสดุพรมในปัจจุบันมี 3 ชนิด คือ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO_2)

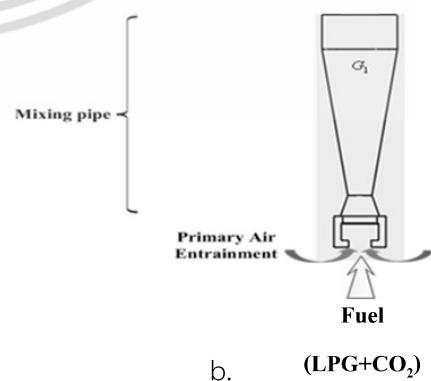
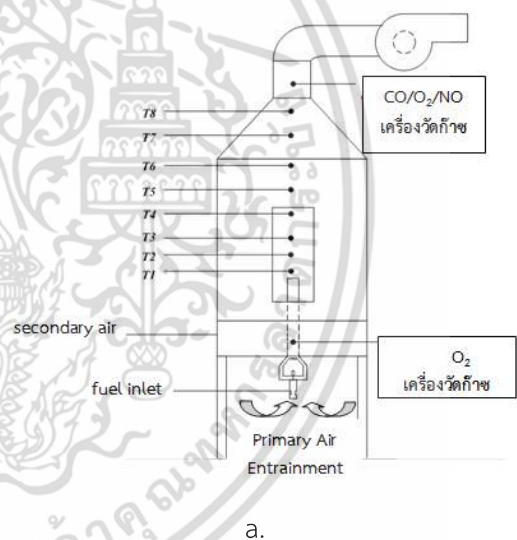
โดยในงานวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซค่าความต่ำ ซึ่งจากในอดีตจนถึงปัจจุบันแม้จะมีผู้วิจัยค้นพบกรรมวิธีอยู่หลายวิธี แต่จากการคำนึงถึงงบประมาณและเวลาที่จำกัด กลุ่มผู้วิจัยจึงเลือกการใช้วัสดุพรมที่ติดตั้งกับหัวเผาเชื้อเพลิงโดยคำนึงถึงการช่วยเพิ่มเสถียรภาพการเผาไหม้ โดยทำการศึกษา การเหนี่ยวนำอากาศส่วนที่ 1 ลักษณะเปลวไฟที่สังเกตเห็นได้ การกระจายตัวอุณหภูมิตามระดับความสูงในห้องเผาไหม้

2. ชุดอุปกรณ์การทดลองและเงื่อนไขการทดลอง

2.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงชุดการทดลองถูกสร้างให้มีการเผาไหม้แบบผสมก่อน (premixed) และแบ่งออกเป็นสามส่วนคือส่วนที่หนึ่งคือ ท่อผสม (mixing tube) ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนที่หนึ่ง ส่วนที่สองคือหัวเผา โดยอากาศส่วนที่สองจะถูกป้อนเข้ามาทางด้าน

ฐานของห้องเผาไหม้กระจายตามแนวรัศมี ในการบันทึกผลอุณหภูมิจะเก็บบันทึกทั้งหมด 8 ตำแหน่งตามระดับความสูง (y) โดย T_1 ห่างจากฐานห้องเผาไหม้ 5 cm จะอยู่ในระดับเดียวกับหัวเผาและสูงขึ้นไปอีกตำแหน่งละ 5 cm จากตำแหน่งก่อนหน้าจนถึงตำแหน่ง T_3 จากนั้นตำแหน่ง T_4 จะห่างจาก T_3 เป็นระยะ 10 cm จนถึง T_8 ในส่วนของเครื่องมือวัดนั้นติดตั้ง flow meter เป็นตัวควบคุมอัตราการไหล Thermocouple type K ติดตั้งสำหรับวัดอุณหภูมิ Data logger เป็นอุปกรณ์ในการบันทึกผลนอกจากนี้ยังวัดก๊าซโดยใช้เครื่องวัดก๊าซ (Testo 350XL) ที่บริเวณทางออกไอเสียอีกด้วย



รูปที่ 1 a. แผนภาพส่วนประกอบต่างๆในชุดทดลอง

b. แผนภาพส่วนประกอบของห้องผสม



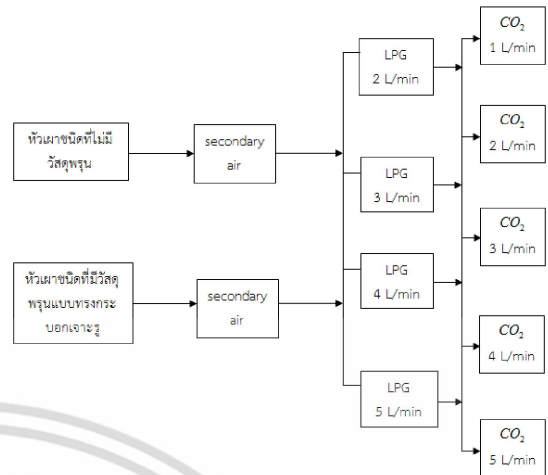
รูปที่ 2 วัสดุพอร์นสำหรับใช้ในหัวเผา

ทำการบันทึกปริมาณออกซิเจนก่อนการเผาไหม้บริเวณท่อผสม

รูปที่ 2 วัสดุพอร์นพอร์นทำมาจากอะลูมินา (Al_2O_3) มีลักษณะภายในเป็นโครงข่ายคล้ายฟองน้ำ ความหนาแน่นความพอร์น 10 ppi (pore per inch) ค่าความพอร์น 0.9 และค่าการนำความร้อน 4-5 W/mK ที่อุณหภูมิ 1000 °C โดยนำมาแกะเป็นรูปร่างทรงกระบอกเจาะรูตรงกลาง

2.2 เงื่อนไขการทดลอง

เชื้อเพลิงแอลพีจีถูกป้อนผ่านหัวฉีดเชื้อเพลิงในย่านอัตราการไหลที่ 2-4 L/min เพิ่มขึ้นทีละ 1 L/min และการทดลองที่อัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี แต่ละย่านนั้น จะถูกเจือจางด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยจะทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 1-5 L/min เพิ่มขึ้นทีละ 1 L/min ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อบันทึกผล อากาศส่วนที่หนึ่งจะถูกเหนี่ยวนำจากบรรยากาศ ในขณะที่อากาศส่วนที่สองจะถูกป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่อัตราการไหล 100 SCFH

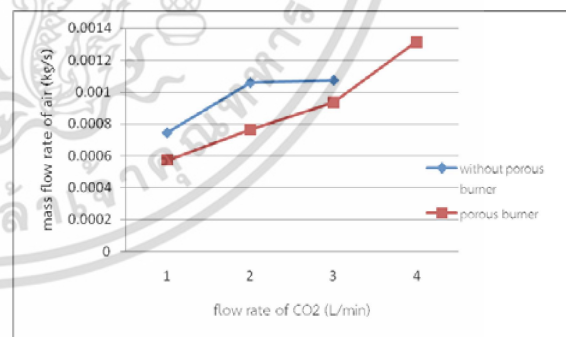


รูปที่ 3 แผนผังการศึกษาศมรรถนะการเผาไหม้

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

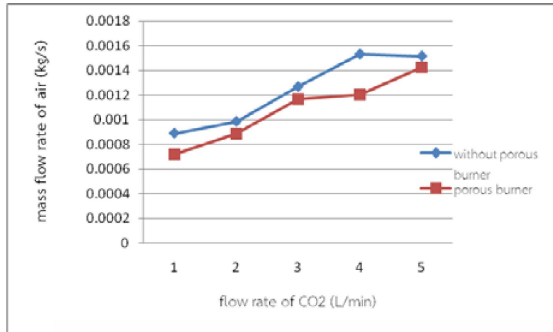
3.1 อัตราการเหนี่ยวนำอากาศ

รูปที่ 4, 5 และ 6 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่วนที่หนึ่งระหว่างหัวเผาที่ไม่มีวัสดุพอร์นและหัวเผาวัสดุพอร์น ที่อัตราการไหลของ LPG 2, 3 และ 4 L/min ตามลำดับ จากการพิจารณากราฟพบว่าหัวเผาที่ไม่มีวัสดุพอร์นมีอัตราการเหนี่ยวนำ

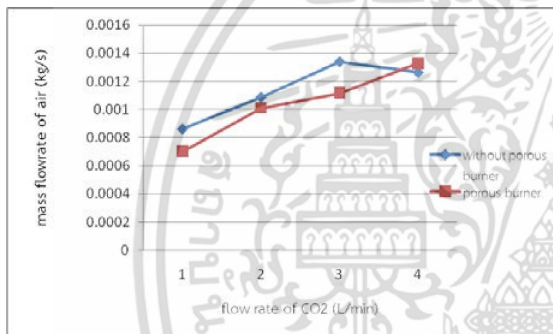


รูปที่ 4 การเหนี่ยวนำอากาศเข้าไปผสมกับ เชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ของหัวเผาแบบไม่มีวัสดุพอร์น ที่อัตราการไหลของ LPG ที่ 2 L/min โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหล CO₂ ที่ 1 ถึง 5 L/min ตามลำดับ





รูปที่ 5 การเหนี่ยวนำอากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ของหัวเผาแบบไม่มีวัสดุพรุน ที่อัตราการไหลของ LPG ที่ 3 L/min โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหล CO₂ ที่ 1 ถึง 5 L/min ตามลำดับ



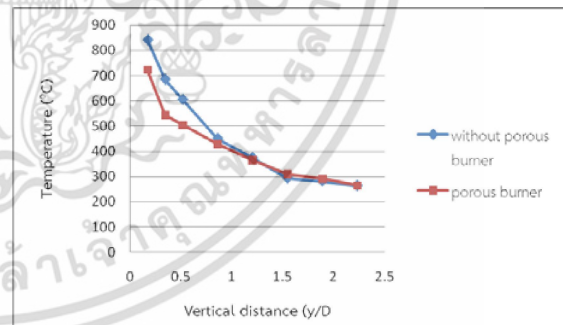
รูปที่ 6 การเหนี่ยวนำอากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ของหัวเผาแบบไม่มีวัสดุพรุน ที่อัตราการไหลของ LPG ที่ 4 L/min โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหล CO₂ ที่ 1 ถึง 5 L/min ตามลำดับ

อากาศได้ดีกว่าหัวเผาที่มีวัสดุพรุนในย่านอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1 ถึง 3 L/min จากนั้นจะค่อยๆลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะที่หัวเผาวัสดุพรุนการเหนี่ยวนำอากาศจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากเนื้อวัสดุพรุนซึ่งเป็นโครงสร้างขวางช่องทางการไหลของก๊าซ ทำให้เกิดความดันตกคร่อมระหว่างผิววัสดุพรุนจึงทำให้การเหนี่ยวนำอากาศที่ต่ำและจากงานวิจัยในทีมวิจัย

ใกล้เคียง[8] พบว่าอุณหภูมิในท้องผสมของหัวเผาที่มีวัสดุพรุนมีค่าสูงกว่าหัวเผาที่ไม่มีวัสดุพรุนจึงทำให้ความหนาแน่นต่ำมีแรงลอยตัวที่มากกว่าจึงสามารถเหนี่ยวนำอากาศเพิ่มขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามยังไม่มีข้อพิสูจน์ว่าเป็นจริงหรือไม่

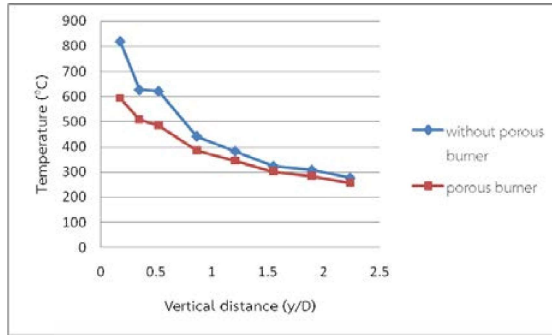
3.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิ

ในรูปที่ 7 ถึง 10 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ จุด T_1 จนถึง T_8 ในทุกๆอัตราการไหลเชื้อเพลิงในหัวเผาทั้งสองชนิด ที่อัตราการไหล LPG 2 L/min พบว่าอุณหภูมิที่จุด T_1 จะมีค่าสูงสุดหลังจากนั้นจึงมีแนวโน้มลดลงตามความสูงของเตาจนลดต่ำสุดที่จุด T_8 ซึ่งสังเกตว่าอุณหภูมิของหัวเผาแบบไม่มีวัสดุพรุนมีค่าสูงกว่าหัวเผาที่มีวัสดุพรุน จากรูปที่ 7 ถึง 9 สังเกตว่าอุณหภูมิของหัวเผาทั้งสองชนิดจะมีค่าใกล้เคียงกันตั้งแต่จุด T_4 จนถึงจุด T_8 รูปที่ 10 เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของ CO₂ 4 L/min ในหัวเผาที่ไม่มีวัสดุพรุน เกิดปรากฏการณ์เปลวไฟดับ ในขณะที่หัวเผาที่มีวัสดุพรุนการเผาไหม้ยังดำเนินต่อไปได้

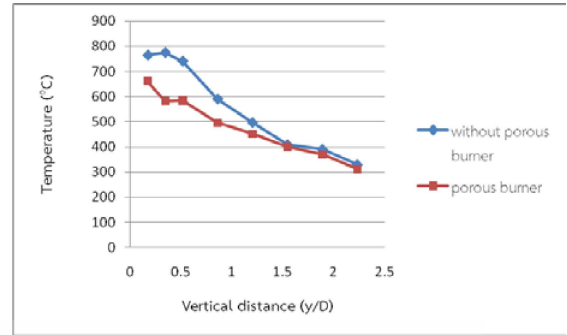


รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิ ณ จุด T_1 ถึง T_8 ที่อัตราการไหล LPG 2 L/min และ CO₂ 1 L/min



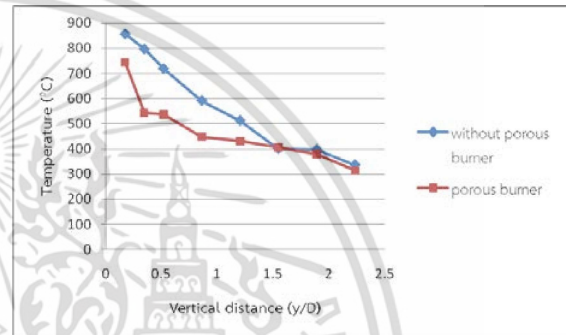


รูปที่ 8 การกระจายอุณหภูมิ ณ จุด T_1 ถึง T_8 ที่อัตราการไหล LPG 2 L/min และ CO_2 2 L/min

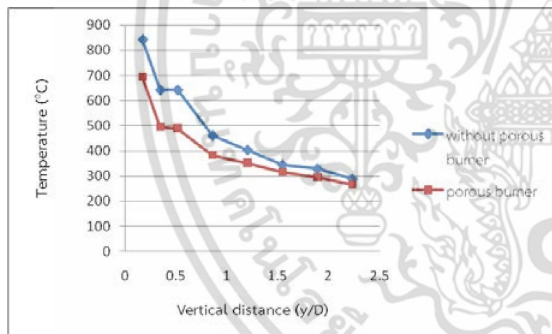


รูปที่ 11 การกระจายอุณหภูมิ ณ จุด T_1 ถึง T_8 ที่อัตราการไหล LPG 3 L/min และ CO_2 1 L/min

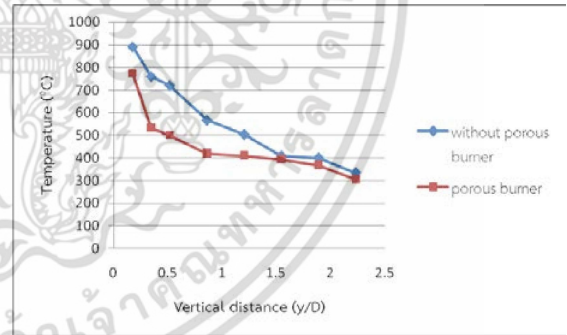
รูปที่ 11 ถึง 15 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ จุด T_1 จนถึง T_8 ในทุกๆอัตราการไหลของ CO_2 ในหัวเผาทั้งสองชนิด ที่อัตราการไหล LPG 3 L/min ซึ่งการกระจายตัวของอุณหภูมิจะคล้ายกันกับที่อัตราการไหลของ LPG 2 L/min แต่มีแนวโน้มใกล้เคียงกันที่



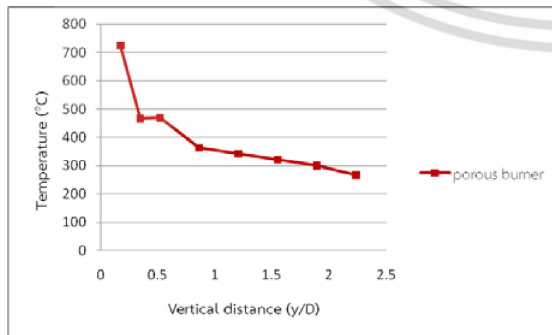
รูปที่ 12 การกระจายอุณหภูมิ ณ จุด T_1 ถึง T_8 ที่อัตราการไหล LPG 3 L/min และ CO_2 2 L/min



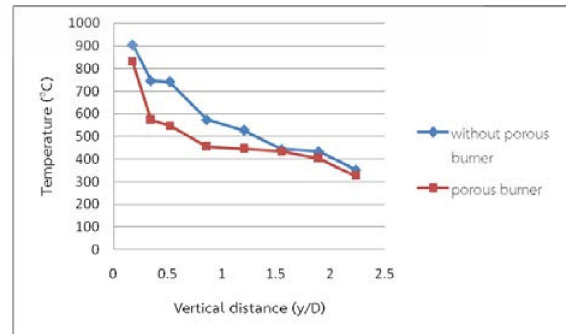
รูปที่ 9 การกระจายอุณหภูมิ ณ จุด T_1 ถึง T_8 ที่อัตราการไหล LPG 2 L/min และ CO_2 3 L/min



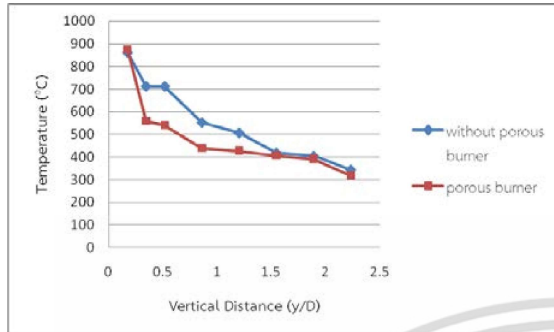
รูปที่ 13 การกระจายอุณหภูมิ ณ จุด T_1 ถึง T_8 ที่อัตราการไหล LPG 3 L/min และ CO_2 3 L/min



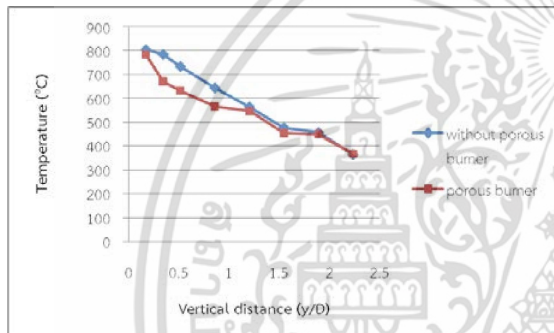
รูปที่ 10 การกระจายอุณหภูมิ ณ จุด T_1 ถึง T_8 ที่อัตราการไหล LPG 2 L/min และ CO_2 4 L/min



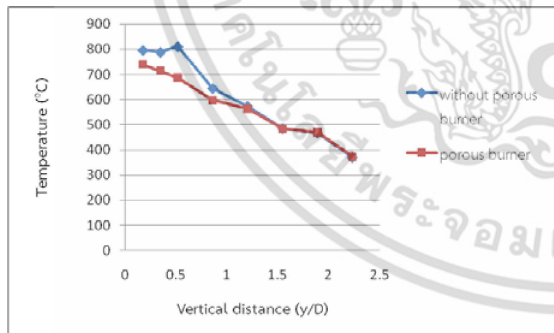
รูปที่ 14 การกระจายอุณหภูมิ ณ จุด T_1 ถึง T_8 ที่ อัตราการไหล LPG 3 L/min และ CO_2 4 L/min



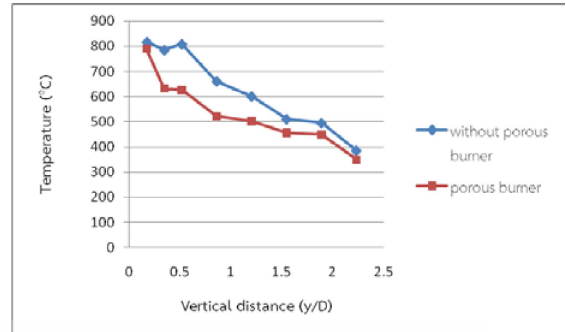
รูปที่ 15 การกระจายอุณหภูมิ ณ จุด T_1 ถึง T_8 ที่ อัตราการไหล LPG 3 L/min และ CO_2 5 L/min



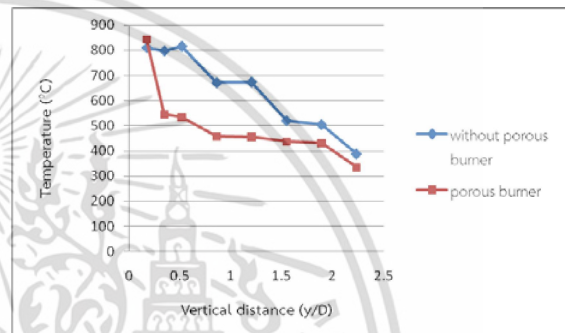
รูปที่ 16 การกระจายอุณหภูมิ ณ จุด T_1 ถึง T_8 ที่ อัตราการไหล LPG 4 L/min และ CO_2 1 L/min



รูปที่ 17 การกระจายอุณหภูมิ ณ จุด T_1 ถึง T_8 ที่ อัตราการไหล LPG 4 L/min และ CO_2 2 L/min

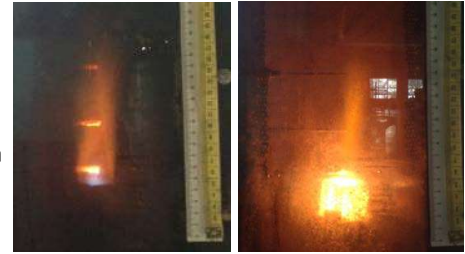


รูปที่ 18 การกระจายอุณหภูมิ ณ จุด T_1 ถึง T_8 ที่ อัตราการไหล LPG 4 L/min และ CO_2 3 L/min



รูปที่ 19 การกระจายอุณหภูมิ ณ จุด T_1 ถึง T_8 ที่ อัตราการไหล LPG 4 L/min และ CO_2 4 L/min

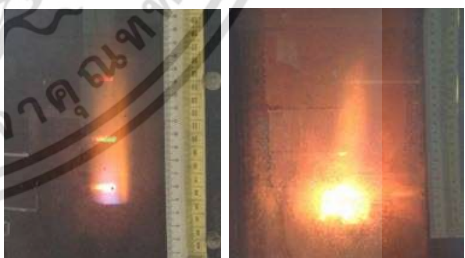


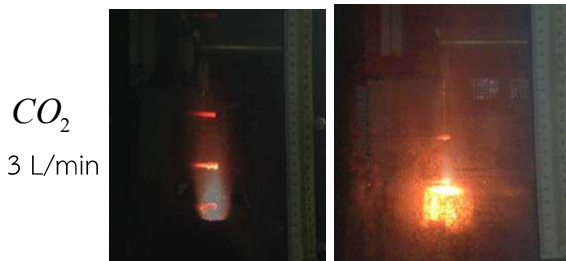


รูปที่ 20 ลักษณะเปลวไฟที่อัตราการไหล LPG
2 L/min และ CO_2 ที่อัตราการไหลต่างๆ



รูปที่ 21 ลักษณะเปลวไฟที่อัตราการไหล LPG
3 L/min และ CO_2 ที่อัตราการไหลต่างๆ





รูปที่ 22 ลักษณะเปลวไฟที่อัตราการไหล LPG 4 L/min และ CO_2 ที่อัตราการไหลต่างๆ

จุด T_6 ถึง T_8 โดยรูปที่ 11 สังเกตอุณหภูมิที่จุด T_3 มีค่าสูงสุดเนื่องจากเกิดการยกตัวของเปลวไฟ รูปที่ 12 ถึง 15 นั้นในกรณีหัวเผาที่มีวัสดุพอรุนจะเกิดการเผาไหม้ในโครงสร้างวัสดุพอรุนโดยสังเกตจากอุณหภูมิ T_1 มีค่าสูงสุดและลดลงอย่างได้ชัดเจนที่จุด T_2

รูปที่ 16 ถึง 19 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ จุด T_1 จนถึง T_8 ในทุกๆอัตราการไหลของ CO_2 ในหัวเผาทั้งสองชนิด ที่อัตราการไหล LPG 4 L/min โดยค่าอุณหภูมิของหัวเผาที่ไม่มีวัสดุพอรุนจะมีค่าสูงกว่าหัวเผาที่มีวัสดุพอรุน จะสังเกตว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันที่จุด T_5 จนถึง T_8 และในหัวเผาที่มีวัสดุพอรุนมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ T_1 และ T_2 มากกว่าหัวเผาที่ไม่มีวัสดุพอรุนเนื่องจากเกิดการเผาไหม้ภายในโครงสร้างเนื้อวัสดุพอรุนเช่นกัน และนอกจากนี้ค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของหัวเผาที่มีวัสดุพอรุนให้การ

กระจายของอุณหภูมิตลอดห้องเผาไหม้สม่ำเสมอกว่าหัวเผาที่ไม่มีวัสดุพอรุน

3.3 ลักษณะเปลวไฟ

รูปที่ 20, 21 และ 22 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของเปลวไฟที่อัตราการไหลของ LPG 2, 3 และ 4 L/min ตามลำดับ โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของที่ 1 ถึง 5 L/min จากการทดลองจะสังเกตว่าในหัวเผาที่มีวัสดุพอรุนนั้นเปลวไฟจะมีความสั้นกว่ากรณีหัวเผาที่ไม่มีวัสดุพอรุนบริเวณวัสดุพอรุนจะร้อนแดงโดยมีการเผาไหม้ภายในช่องว่างของวัสดุพอรุน ทำให้วัสดุพอรุนมีลักษณะเป็นสีส้ม รวมถึงมีเปลวไฟพุ่งออกมาจากรูตรงกลางวัสดุพอรุน โดยที่อัตราการไหลแอลพีจีที่ 2 L/min และอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 4 L/min จะให้เปลวไฟที่มีเสถียรภาพดีโดยสังเกตจากเปลวไฟมีสีฟ้าพุ่งออกจากวัสดุพอรุนและเปลวไฟสั้นแสดงให้เห็นว่าวัสดุพอรุนมีคุณสมบัติขัดเซพลดการเกิดการยกตัวของฐานเปลวไฟที่นำไปสู่ปรากฏการณ์หลุดลอย (Lift off) เมื่ออัตราการไหลเชื้อเพลิงสูงขึ้น ทำให้หัวเผาวัสดุพอรุนสามารถทำงานได้ในย่านอัตราการไหลที่กว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับหัวเผาแบบไม่มีวัสดุพอรุน

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาสมรรถนะเบื้องต้นของหัวเผาทั้งสองชนิดเพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับการใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำ โดยการใช้หัวเผาสองชนิดคือ แบบไม่มีวัสดุพอรุนและแบบมีวัสดุพอรุนเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการเผาไหม้ภายใต้สถานการณ์การทำงานเดียวกัน โดยพิจารณาจากลักษณะเปลวไฟและการกระจายตัวของอุณหภูมิตามระดับความสูงของห้องเผาไหม้



จากการทดลองพบว่าหัวเผาที่ไม่มีวัสดุพรุนสามารถเหนี่ยวนำอากาศได้ดีกว่าหัวเผาแบบมีวัสดุพรุนในช่วงของอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีที่ 2 และ 3 L/min จะลดลงเมื่ออัตราการไหลของแอลพีจีสูงขึ้นซึ่งตรงข้ามกับหัวเผาแบบมีวัสดุพรุนจะมีอัตราการเหนี่ยวนำของอากาศเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหล

จากการสังเกตลักษณะของเปลวไฟกรณีหัวเผาแบบไม่มีวัสดุพรุนจะมีความเสถียรภาพดี กล่าวคือเปลวไฟมีสีฟ้าและสั้นในช่วงอัตราการไหลของแอลพีจีที่ 2 L/min ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 3 L/min เท่านั้นเนื่องจากเมื่ออัตราการไหลสูงทำให้ความเร็วของเชื้อเพลิงสูงขึ้นตามและเปลวไฟกรณีหัวเผาแบบมีวัสดุพรุนเปลวไฟจะอมอยู่รอบๆวัสดุพรุนและอยู่ตรงกลางวัสดุพรุนโดยสังเกตจากวัสดุพรุนจะมีสีส้มเปลวไฟที่ได้จากหัวเผาชนิดนี้มีความเสถียรภาพดีที่สุดในอัตราการไหลแอลพีจี 2 L/min และอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 4 L/min เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของแอลพีจีจะให้เปลวไฟที่ดีและสั้นกว่าหัวเผาแบบไม่มีวัสดุพรุนซึ่งสอดคล้องกับผลของการเหนี่ยวนำอากาศส่วนที่หนึ่ง

เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิหัวเผาแบบไม่มีวัสดุพรุนกับหัวเผาแบบมีวัสดุพรุน พบว่าอุณหภูมิของหัวเผาแบบไม่มีวัสดุพรุนนั้นจะสูงกว่าหัวเผาแบบมีวัสดุพรุนและค่อยๆลดลงตามระดับความสูงในขณะที่หัวเผาแบบมีวัสดุพรุนอุณหภูมิจุดที่ 1 เข้าสู่จุดที่สองจะลดลงอย่างรวดเร็วจากนั้นจะค่อยๆลดลงตามระดับความสูงเนื่องจากการเผาไหม้เกิดขึ้นภายในช่องว่างของวัสดุพรุน ทำให้วัสดุพรุนมีลักษณะเป็นสีส้ม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ให้คำแนะนำและนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://www.dede.go.th> "แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25 % ใน 10 ปี (พ.ศ. 2555-2564)" [ออนไลน์] มิถุนายน 2556 เข้าถึงได้จาก <http://www.dede.go.th/dede/images/stories/aedp25.pdf>
- [2] Al-Hamamre Z, Diezinger S, Talukdar P, von Issendorff F, Trimis D., 2006, Combustion of low calorific value gases from landfills and waste pyrolysis using porous medium burner technology. *Process Saf Environ*, pp .297–308.
- [3] Alavandi SK, Agrawal AK. 2008, Experimental study of combustion of hydrogensyngas/methane fuel mixtures in a porous burner. *Int J Hydrogen Energy*, Vol.33, pp. 1407–15
- [4] Howell, J.R., Hall, M.J. and Ellzey, J.L., 1996, "Combustion Hydrocarbon Fuels within Porous Inert Media", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 22, pp. 121-145.
- [5] Homraruen A , Jugjai S. 2014, " An Experimental Study on Combustion Performance of a Flexible Porous Medium



Burner (FPMB)", The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering.

[6] พีรยุทธ ทองเต็ม, 2551. หัวเผาวัสดุพุนแบบไม่มี การผสมเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับเชื้อเพลิงแก๊ส. บทความวิชาการประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22.

[7] ภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล, 2555. การปรับปรุงการ ผสมและการเผาไหม้จากหัวฉีดดัดแปลงในหัวเผาแอล พีจีแบบผสมลวงหน้า. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง.

[8] อาวุธ ลภีรัตนากุล, 2558. อิทธิพลของรูปทรงวัสดุ พุนที่ส่งผลต่อสมรรถนะของหัวเผาแอลพีจีใน อุตสาหกรรมเซรามิกส์. บทความวิชาการประชุม วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29 (รอกการพิจารณาตีพิมพ์).



RE-1-65

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่สามารถเก็บสะสมพลังงานไว้ภายในเซลล์ Development of Dye-sensitized Solar Cell with Built-in Energy Storage

สุรวุฒิ ลิ้มโยธิน¹, สุรวุฒิ ช่างโชติ^{2,*} และ รุ่งโรจน์ สงค์ประกอบ¹

¹ สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถนนประชาธิปไตย บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

² บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถนนประชาธิปไตย บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

*ผู้ติดต่อ: surawut.chu@kmutt.ac.th, 02-470-8310

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้สามารถเก็บพลังงานไว้ภายในเซลล์ได้ โดยเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาเป็นเซลล์แบบปิดที่ประกอบด้วยกระจกนำไฟฟ้า สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) สีย้อมไวแสง สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และแพลทินัม (Pt) การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น TiO₂ ต่อประสิทธิภาพของเซลล์พบว่า ความหนาของชั้น TiO₂ เท่ากับ 15 μm ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 2.75% การเพิ่มชั้นฟิล์มพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) และขั้วไฟฟ้า (Au) สำหรับการเก็บสะสมพลังงาน พบว่าสามารถเก็บสะสมพลังงานได้สูงสุดเท่ากับ 1.44 μF/cm² เมื่อทำการประกอบเซลล์และทดสอบประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ การเก็บประจุและคายประจุไฟฟ้า รวมไปถึงลักษณะทางไดนามิกส์ของเซลล์ พบว่าเซลล์ที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าและเก็บพลังงานไว้ภายในเซลล์เดียวได้

คำหลัก: เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง/ระบบเก็บสะสมพลังงาน/ไทเทเนียมไดออกไซด์/พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์

Abstract

This paper presents a development of dye-sensitized solar cells (DSSCs) with a built-in energy storage function. The DSSC developed is a close cell comprising of Effect of thickness of photoanode (titanium dioxide (TiO₂) layer) on photovoltaic properties of DSSCs was firstly studied. It was found that the suitable thickness of TiO₂ layer is about 15 μm (for power conversion efficiency of 2.75%). Energy storage function (for charge stored of 1.44μF/cm²) was introduced to DSSCs by addition of a dielectric film made of polyvinylidene fluoride (PVDF) and a middle electrode made of gold (Au). Photovoltaic characterizations, energy storage charge-discharge investigations, and dynamic impedance were carried out. It was found that the device



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวตฤษฐพร แก้วสุก
วัน เดือน ปีเกิด	27 เมษายน 2530
ที่อยู่	27/4 ม.9 ต. สะท้อน อ.นาที จ.สงขลา
ประวัติการศึกษา	2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้