

การศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนเข้มข้น
Study on effect of oxygen-enriched combustion



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนเข้มข้น



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON EFFECT OF OXYGEN-ENRICHED COMBUSTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาเบเซประยชนดานการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ACADEMIC YEAR 2023

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนเข้มข้น		
นักศึกษา	นายปลวรัช เสมจิตร์	รหัสนักศึกษา	63010577
	นายภคิน จินพวด	รหัสนักศึกษา	63010723
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. อนุรักษ์ ฤกษ์เกษมสันต์		
ปริญญานิพนธ์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร. อนุรักษ์ ฤกษ์เกษมสันต์)

กรรมการ

(ผศ.ดร. รัชรัตน์ สมนามูลย์)

อลังกร วัฒนธัมพร **ฉันทธัมพร**

กรรมการ

(รศ.ดร. วลัยรัตน์ ฉันทธัมพร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนเข้มข้น		
นักศึกษา	นายปลวัชร เสมจิตร	รหัสนักศึกษา	63010577
	นายภคิน จินพวด	รหัสนักศึกษา	63010723
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ปีการศึกษา	2566		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันต์		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้มุ่งเน้นศึกษาความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ด้วยแก๊สออกซิเจนที่มีความเข้มข้น 21 ถึง 28 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยปริญญานิพนธ์นี้ใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ด้วยเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส ซึ่งจะนำปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้มาเปรียบเทียบกับความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการปรับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้ โดยเริ่มต้นการออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการปรับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนด้วยโปรแกรม SketchUp จากการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการปรับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน มีปัญหาในส่วนของที่ไม่เกิดการเผาไหม้ อันเนื่องมาจากปริมาณของแก๊สออกซิเจนที่สามารถส่งเข้าสู่ระบบการเผาไหม้ ไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ของเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส โดยการทดลองนี้สามารถทำความเข้มข้นของออกซิเจนสูงสุดเพียง 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และผลจากการศึกษาพบว่าพลังงานความร้อนต่อหนึ่งหน่วยเชื้อเพลิง การประหยัดเชื้อเพลิง และต้นทุนในการดำเนินการเผาไหม้ให้ได้พลังงานความร้อนจำนวนหนึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งจากการทดลอง มีพลังงานความร้อนต่อหนึ่งหน่วยเชื้อเพลิงสูงสุดเท่ากับ 24.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัมเชื้อเพลิง การประหยัดเชื้อเพลิงสูงสุดที่ 9.5 เปอร์เซ็นต์ และ ต้นทุนในการดำเนินการสูงสุดที่ 5.67 บาทต่อหนึ่งกิโลกรัมไอน้ำ ที่ความเข้มข้นออกซิเจน 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งต้นทุนในการดำเนินการมากกว่าการใช้ออกซิเจนเข้มข้น 21 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรหรือการใช้เพียงอากาศเป็นแหล่งออกซิเจนหลักที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้ที่ 3.24 บาทต่อกิโลกรัมไอน้ำ

คำสำคัญ : การเผาไหม้, ออกซิเจนเข้มข้น, เครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส

Thesis Title	Study on Effect of Oxygen-Enriched Combustion		
Student	Polawat Semjit	Student ID	63010577
	Pakin Chinphuad	Student ID	63010723
Degree	Bachelor of Engineering		
Program	Chemical Engineering		
Year	2023		
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Nuttapol Lerkkasemsan		

W

ABSTRACT

This research focuses on studying heat from fuel combustion with oxygen gas concentrations ranging from 21 to 28.1 percent by volume. It utilizes liquefied petroleum gas as the fuel for combustion in a gas water boiler. Additionally, consideration in the economy is related to the heat generated across any concentration range of oxygen gas, which will increase economic benefits. Furthermore, the researchers developed a prototype system for adjusting the concentration of oxygen gas for combustion by using the SketchUp program to design the prototype. When creating a prototype system to adjust the concentration of oxygen gas, we encountered an issue with the amount of oxygen. It was found insufficient for the combustion requirements of the gas water boiler. This experiment was able to achieve a maximum oxygen concentration of only 28.1 percent by volume. The study results indicated that the heat per unit of fuel, Fuel saving, and Operating cost tend to increase along with the concentration of oxygen gas used in combustion. From the experiments conducted, it was observed that the highest heat energy per unit of fuel reaches 24.4 megajoules per kilogram of fuel, The highest fuel saving is 9.5 percent, and the highest operating cost is 5.67 baht per kilogram of steam at an oxygen concentration of 28.1 percent by volume, which is higher than using oxygen concentration of 21 percent by volume or using only air as the source of oxygen used in combustion 3.24 baht per kilogram of steam.

Keywords: Combustion, Oxygen-enrichment, Gas water boiler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการส่งเสริม และการสนับสนุนจาก ผศ.ดร. ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันต์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนวทางการแก้ไขปัญหา และการอนุเคราะห์ทุนในการจัดซื้ออุปกรณ์อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้ความรู้ และประสบการณ์แก่ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ตลอดภาคการศึกษา

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธัชรัตน์ สมานมุลย์ และ รศ.ดร.วัลย์รัตน์ จันทระอัมพร คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ เพื่อช่วยทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคุณพิมใจ ภูชนะกิจ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ และคุณสุกานต์ภิรมย์ ศรีวงษ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนความช่วยเหลือในด้านเอกสารสำหรับการเบิกจ่ายต่างๆ และความช่วยเหลือในด้านอื่นๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนบุคคลภายในครอบครัวที่สนับสนุนด้านการศึกษาตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา และให้กำลังใจกับผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ อาจารย์ภายในภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ได้ให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดี รวมทั้งเพื่อนนักศึกษาภายในภาควิชาที่คอยช่วยเหลือ ซึ่งเป็นส่วนช่วยให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ จะมีประโยชน์และมีคุณค่าทางการศึกษาต่อผู้ที่สนใจต่อไป

นายปลวัชร เสมจิตร
นายภคิน จินพวด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญรูป (ต่อ).....	VIII
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion Reaction).....	3
2.1.1 การเผาไหม้สมบูรณ์ (Complete Combustion)	3
2.1.2 การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion).....	3
2.2 แก๊สออกซิเจนเข้มข้น (Oxygen-Enriched)	4
2.2.1 กระบวนการในการผลิตออกซิเจนเข้มข้น	4
2.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	5
2.3.1 การนำความร้อน (Conduction)	5
2.3.2 การพาความร้อน (Convection).....	5
2.3.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)	7
2.4 การวัดพลังงานความร้อน	7
2.5 กฎของแก๊สอุดมคติ (Ideal gas law).....	7
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3	วิธีการดำเนินการ.....	17
3.1	การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน สำหรับการเผาไหม้	17
3.1.1	แผนภาพอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน สำหรับการทดลอง.....	20
3.2	การศึกษาผลจากการเผาไหม้ด้วยแก๊สออกซิเจนเข้มข้น	20
3.2.1	สารเคมี	20
3.2.2	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	20
3.2.3	ขั้นตอนการปรับความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนสำหรับเผาไหม้.....	21
3.2.4	ขั้นตอนการทดลองการเผาไหม้ ด้วยแก๊สออกซิเจนเข้มข้น	21
บทที่ 4	ผลการทดลอง และอภิปรายผล	22
4.1	อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน สำหรับการเผาไหม้.....	22
4.2	ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนต่อพลังงานจากการเผาไหม้.....	24
4.3	ความสามารถในการลดการใช้เชื้อเพลิง	26
4.4	ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์.....	27
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	29
5.1	สรุปผลการทดลอง	29
5.2	ข้อเสนอแนะ	29
	เอกสารอ้างอิง	31
	ภาคผนวก	33
	ภาคผนวก ก. ผลการทดลองการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนในอากาศ	34
	ภาคผนวก ข. ผลการทดลองการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนเข้มข้น	38
	ภาคผนวก ค. ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างการเผาไหม้.....	43
	ภาคผนวก ง. ตัวอย่างการคำนวณ	45
	ภาคผนวก จ. คำสั่งสำหรับการอ่านค่าอัตราการไหลด้วยโรตاميเตอร์	48

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อัตราการไหลของแก๊สธรรมชาติ,อากาศ,แก๊สออกซิเจน และความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนของการทดลองชุดที่ 1	14
2.2 อัตราการไหลของแก๊สธรรมชาติ อัตราการไหลของอากาศ อัตราการไหลของอากาศร้อน อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน และความเข้มข้นแก๊สออกซิเจน	15
3.1 ตำแหน่งองค์ประกอบของเครื่องทำน้ำร้อนยี่ห้อ Rinnai รุ่น REU-3237WC-ASN.....	18
3.2 รหัสการ เปิด – ปิดสวิตช์ เพื่อควบคุมอุณหภูมิเครื่องทำน้ำร้อน	19
4.1 ตารางแสดงปริมาณการใช้เชื้อเพลิงสำหรับการระเหยน้ำ 1 กิโลกรัม ออกจากสารละลายน้ำตาล เพื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายน้ำตาลจาก 10.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็น 21.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวล	26
ก.1 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 1 ครั้งที่ 1.....	35
ก.2 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 1 ครั้งที่ 2.....	36
ก.3 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 1 ครั้งที่ 3.....	37
ข.1 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 2 ครั้งที่ 1.....	39
ข.2 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 2 ครั้งที่ 2.....	40
ข.3 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 2 ครั้งที่ 3.....	41
ข.4 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 2 ครั้งที่ 4.....	42
ค.1 อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนระหว่างการทดลองที่ 1 ครั้งที่ 1.....	44
ง.1 ต้นทุนวัตถุดิบในการเผาไหม้.....	46

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟแสดงอุณหภูมิเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ เทียบกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้	8
2.2 กราฟแสดงสัดส่วนการลดพลังงานสูญเสีย เทียบกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้	9
2.3 กราฟแสดงปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก เทียบกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้	9
2.4 แผนภาพการทดลองการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนเข้มข้น	10
2.5 กราฟแสดงระยะเวลาในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจนถึง 1,200 องศาเซลเซียสในเตาเผาที่มีความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	10
2.6 กราฟแสดงความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และความเข้มข้นสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	11
2.7 กราฟแสดงความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิสูงสุดของเตาเผาที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	11
2.8 กราฟแสดงความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	12
2.9 กราฟแสดงความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และความเข้มข้นสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส	12
2.10 กราฟแสดงอุณหภูมิสูงสุดในเตาเผา ที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	13
2.11 แผนภาพการทดลองชุดที่ 1	13
2.12 แผนภาพการทดลองชุดที่ 2	14
2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลวไฟกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน ตั้งแต่ 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรในห้องเผาไหม้ที่ 1 และ 2	15
2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารประกอบแก๊สไนโตรเจนออกไซด์กับอุณหภูมิของเปลวไฟในห้องเผาไหม้ที่ 1 และ 2	16
3.1 องค์ประกอบเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส	17
3.2 ตำแหน่งสวิตช์ตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำร้อน	18
3.3 การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน	19
3.4 แผนภาพอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นแก๊สออกซิเจน	20
4.1 อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน (ด้านหน้า)	22
4.2 อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน (ด้านข้าง)	23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แก๊สสีดำที่ออกทางช่องระบายแก๊สไอเสีย.....	23
4.4 กราฟแสดงอัตราการไหลของเชื้อเพลิงแก๊สเครื่องทำน้ำร้อนแก๊สเทียบกับเวลาในการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยออกซิเจนเข้มข้น 21 เปอร์เซ็นต์.....	24
4.5 กราฟแสดงอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนเทียบกับเวลาในการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิง ด้วยออกซิเจนเข้มข้น 21 เปอร์เซ็นต์.....	25
4.6 กราฟแสดงค่าพลังงานความร้อนต่อหน่วยเชื้อเพลิงที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ	25
4.7 กราฟแสดงค่าการประหยัดเชื้อเพลิงที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนต่างๆ.....	27
4.8 กราฟแสดงต้นทุนในการระเหยน้ำ 1 กิโลกรัม ออกจากสารละลายน้ำตาลเพื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 10.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็น 21.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวลที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนต่างๆ.....	28

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษ

A_c	พื้นที่ของตัวกลางที่ตั้งฉากกับทิศทางการนำความร้อน (m^2)
c_p	ความร้อนจำเพาะ ($kJ/kg \cdot K$)
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot K$)
$H_{product}$	เอนทาลปีของสารตั้งต้น (kJ/mol)
$H_{reactant}$	เอนทาลปีของผลิตภัณฑ์ (kJ/mol)
k	ค่าการนำความร้อนของวัสดุ ($W/m \cdot K$)
L	ความร้อนแฝงจำเพาะ (kJ/kg)
L_c	มิติของความยาว (m)
m	มวล (kg)
n	จำนวนโมลของแก๊ส (mol)
P	ความดันของแก๊ส (atm)
$Q_{Fuel,i}$	พลังงานความร้อนต่อหน่วยเชื้อเพลิงซึ่งเผาไหม้ด้วยออกซิเจนเข้มข้น i เปอร์เซ็นต์
\dot{Q}_x	อัตราการนำความร้อนในทิศทางตามแนวแกน x (W)
R	ค่าคงตัวของแก๊สอุดมคติ มีค่าเท่ากับ 0.0821 ($atm \cdot L/mol \cdot K$)
T	อุณหภูมิ (K)
T_s	อุณหภูมิที่พื้นผิวของวัตถุ (K)
V	ปริมาตรของแก๊ส (L)
%FE	ค่าการประหยัดพลังงาน (%)

สัญลักษณ์ภาษากรีก

α	สัมประสิทธิ์การแพร่ของความร้อน
β	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน ($1/K$)
ν	สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเมนตัม
σ	ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลทซ์มานน์ มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} ($W/m^2 \cdot K^4$)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญต่อการทำกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์¹ ไม่ว่าจะในด้านการผลิต การขนส่ง หรือการทำความร้อน ถือได้ว่าเป็นต้นทุนที่สำคัญอย่างหนึ่งของภาคอุตสาหกรรม ซึ่งแหล่งที่มาของพลังงานมีอยู่มากมาย ไม่ว่าจะเป็น พลังงานจากการไหลของน้ำ พลังงาน ความร้อนจากแสงอาทิตย์ และพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหลักที่ถูกใช้งานในปัจจุบัน²

พลังงานความร้อนซึ่งได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง จะถูกใช้นำไปใช้ประโยชน์อย่าง หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการผลิตพลังงานไฟฟ้า หรือเป็นแหล่งพลังงานให้กับหน่วยปฏิบัติการต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตและระบบสาธารณูปโภค แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ ส่งผลให้เกิดการสะสมของแก๊สเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุของปรากฏการณ์ เรือนกระจก (Greenhouse effect) และปัญหาภาวะโลกร้อน

ทำให้ในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนหลากหลายรูปแบบ เพื่อมาแทนที่ พลังงานจากเชื้อเพลิง นอกจากนี้ การใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น นับเป็นอีกหนึ่ง แนวทางในการลดการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อไปเป็นแหล่งพลังงาน

เพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานจากการเผาไหม้³ จำเป็นต้องมีองค์ประกอบ 3 องค์ประกอบ ได้แก่ ความร้อน เชื้อเพลิง และแก๊สออกซิเจนซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ในกระบวนการเผาไหม้ โดยทั่วไปจะใช้อากาศซึ่งมีแก๊สออกซิเจนในการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามสิ่งที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยา คือแก๊สออกซิเจนซึ่งมีอยู่ในอากาศ 21 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ ในขณะที่แก๊สไนโตรเจนในอากาศ ประพฤติตัวเป็นแก๊สเฉื่อย ส่งผลให้พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ ต้องสูญเสียไปกับความร้อน สัมผัส (Sensible heat) ของแก๊สไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศ และพลังงานบางส่วนจะถูกพาออกไป พร้อมกับแก๊สไอเสีย การเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้ จะทำให้สามารถลดการ สูญเสียพลังงานในส่วนที่เกิดขึ้นจากการใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ในการเผาไหม้

เพื่อเป็นการสร้างความมั่นคงทางพลังงานให้กับประเทศ และตอบรับนโยบายการเป็นกลาง ทางคาร์บอนของสหประชาชาติที่กำลังรณรงค์ในเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้ การพัฒนากระบวนการใน การเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยการใช้แก๊สออกซิเจนเข้มข้นภายในปฏิกิริยาปฏิกิริยา นี้ จึงเป็นแนวทางในการลด การใช้เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด และเป็นทรัพยากรที่สำคัญสำหรับ ทั้งภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เชื้อเพลิงให้มากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการควบคุมความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ใช้สำหรับการเผาไหม้
2. เพื่อศึกษาผลของการเผาไหม้ด้วยแก๊สออกซิเจนเข้มข้น และเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ที่ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนแตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. พัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการปรับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน ที่ใช้สำหรับเผาไหม้ในหม้อต้มน้ำ ซึ่งใช้ได้กับเชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะแก๊ส คือ แก๊สปิโตรเลียมเหลว
2. ออกแบบและทำการทดลอง เพื่อศึกษาผลของการเผาไหม้ด้วยการใช้แก๊สออกซิเจนที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 21 จนถึง 28 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. เพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เชื้อเพลิง ในกิจกรรมที่มีการใช้พลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้
2. ลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก ที่เกิดจากอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนเข้มข้น ประกอบไปด้วยทฤษฎี และงานวิจัยที่ข้องดังต่อไปนี้

2.1 ปฏิกริยาการเผาไหม้ (Combustion Reaction)

การเผาไหม้³ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ โดยมีเชื้อเพลิงเป็นตัวรีดิวซ์ และแก๊สออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการเผาไหม้ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) น้ำ และความร้อน

ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ เกิดจากพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะของเชื้อเพลิงมีปริมาณน้อยกว่าพลังงานที่เกิดขึ้นจากการสร้างพันธะของผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลต่างของพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะของสารตั้งต้นกับพลังงานที่ใช้ในการเกิดพันธะของผลิตภัณฑ์คือ ความร้อนของปฏิกิริยา (Heat of reaction: ΔH) ซึ่งบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีในปฏิกิริยาเคมี โดยสามารถคำนวณความร้อนของปฏิกิริยาได้จากสมการที่ 2.1

$$\Delta H = \sum H_{\text{product}} - \sum H_{\text{reactant}} \quad (2.1)$$

กรณีที่ความร้อนของปฏิกิริยาเป็นบวก บ่งบอกว่าปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน หากค่าเป็นลบ บ่งบอกว่าปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งค่ามากหรือน้อยนั้นบ่งบอกถึงปริมาณความร้อนของปฏิกิริยา

สำหรับการเผาไหม้แก๊สไฮโดรเจนเหลว ซึ่งประกอบไปด้วยแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน การเผาไหม้จะให้ความร้อนจากปฏิกิริยาที่แตกต่างกันตามสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน ซึ่งความร้อนของปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์ของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนมีค่าเท่ากับ -2,220.0 kJ/mol และ -2,878.5 kJ/mol ตามลำดับ

โดยรูปแบบการเผาไหม้มี 2 ประเภท ได้แก่

2.1.1 การเผาไหม้สมบูรณ์ (Complete Combustion)

เกิดขึ้นเมื่อแก๊สออกซิเจนมีปริมาณเพียงพอหรือมีปริมาณมากเกินไป สำหรับการเผาไหม้ที่จะเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนของเชื้อเพลิงให้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ทั้งหมด ดังสมการเคมีที่ 2.2



2.1.2 การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion)

เกิดขึ้นเมื่อแก๊สออกซิเจนมีปริมาณไม่เพียงพอสำหรับการเผาไหม้เพื่อเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนของเชื้อเพลิงให้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ทั้งหมด ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จึงเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และน้ำ ดังสมการเคมีที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์สามารถก่อให้เกิดเขม่าคาร์บอน ได้ซึ่งเป็นผลมาจากแก๊สออกซิเจนที่ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงมีปริมาณไม่เพียงพอในการเปลี่ยนอะตอมคาร์บอนภายในเชื้อเพลิงเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้มีอะตอมคาร์บอนหลงเหลือจากการเผาไหม้ อีกทั้งการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของสารอินทรีย์⁴ ก่อให้เกิดสารประกอบไดออกซิน (PCDD/Fs) สารประกอบโพลีคลอรีเนตแนฟทาซีน (PCNs) สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ซึ่งสารประกอบดังกล่าวเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตอย่างรุนแรง และสามารถก่อให้เกิดมะเร็งได้

ในด้านของพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ พลังงานที่เกิดจากการเผาไหม้สมบูรณ์มีปริมาณที่มากกว่าพลังงานที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เช่น ในการเผาไหม้สมบูรณ์ของคาร์บอน ก่อให้เกิดพลังงานจากการเผาไหม้ 33,053.60 kJ/kg แต่ในการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของคาร์บอนก่อให้เกิดพลังงานจากการเผาไหม้เพียง 8,792.28 kJ/kg⁵

2.2 แก๊สออกซิเจนเข้มข้น (Oxygen-Enriched)

สำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้ แก๊สออกซิเจนถือว่าเป็นหนึ่งในองค์ประกอบสำคัญ ซึ่งโดยทั่วไปการเผาไหม้จะใช้แก๊สออกซิเจนในบรรยากาศที่มีความเข้มข้นของแก๊สไนโตรเจน 79 เปอร์เซ็นต์และแก๊สออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แต่การใช้แก๊สออกซิเจนจากบรรยากาศมีข้อเสีย คือ จะสูญเสียพลังงานบางส่วนที่ได้จากการเผาไหม้ให้กับแก๊สไนโตรเจนที่ปะปนอยู่ในบรรยากาศที่นำมาใช้

ดังนั้นการเผาไหม้ที่มีจุดประสงค์ที่ต้องการนำพลังงานจากการเผาไหม้มาใช้ จึงมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ใช้ มาเป็นแก๊สออกซิเจนเข้มข้น (Oxygen-enriched) ที่มีความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนมากกว่า 21 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถ⁶

- 1) ลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิง เนื่องจากปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่จะไปนำความร้อนออกจากเตาเผา ลดลง ทำให้สามารถนำความร้อนมาใช้ได้มากขึ้น
- 2) ช่วยเพิ่มความเสถียรของปฏิกิริยาการเผาไหม้ และเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนไปสู่สายกระบวนการ
- 3) ลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก

2.2.1 กระบวนการในการผลิตออกซิเจนเข้มข้น

ในปัจจุบันมีการพัฒนากระบวนการในการผลิตออกซิเจนเข้มข้นด้วยกันหลายวิธี ซึ่งกระบวนการที่ได้รับความนิยมในการผลิตแก๊สออกซิเจนเข้มข้น มีอยู่ด้วยกัน 3 กระบวนการ⁷

1) การกลั่นที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic distillation)⁸ เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตออกซิเจนที่ความบริสุทธิ์มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ โดยอาศัยความต่างของอุณหภูมิอิ่มตัวขององค์ประกอบภายในอากาศ แต่มีการใช้พลังงานที่สูงต่อหน่วยงานผลิตเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น ทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่สูง

2) การดูดซับสลับความดัน (Pressure swing adsorption)⁸ เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานที่ต่ำ โดยใช้วัสดุดูดซับที่มีรูพรุนในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนออกจากอากาศภายใต้แรงดัน ทำให้อากาศที่ออกมา มีอัตราส่วนของแก๊สออกซิเจนมากขึ้น ซึ่งความบริสุทธิ์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะประมาณ 94 เปอร์เซ็นต์หรือต่ำกว่า

3) การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation) ⁷ เป็นกระบวนการที่เหมาะสมต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่มีการใช้พลังงานและต้นทุนที่ต่ำ อาศัยความสามารถในการเลือกผ่านของเยื่อเลือกผ่าน มีความบริสุทธิ์ของออกซิเจนประมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์

2.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

ความร้อนถือว่าเป็นหนึ่งในรูปแบบของพลังงาน ⁹ ซึ่งเป็นปริมาณเวกเตอร์ที่มีทั้งขนาดและทิศทาง การถ่ายเทความร้อนเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างระบบเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิมาก อัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยระบบจะมีการถ่ายเทความร้อนจากระบบที่มีอุณหภูมิสูงไปยังระบบที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะสิ้นสุดเมื่อระบบทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับ กฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์ที่กล่าวถึงทิศทางการไหลของความร้อนที่มีทิศทางเพื่อเพิ่มเอนโทรปี (Entropy : S) หรือความไม่เป็นระเบียบของระบบโดยรวม

กล่าวคือเมื่อมีการถ่ายเทความร้อนแก่วัตถุเย็นจะส่งผลให้โมเลกุลภายในระบบเกิดการสั่นและเคลื่อนที่เร็วขึ้น ซึ่งหมายถึงวัตถุเย็นมีความไม่เป็นระเบียบมากขึ้น เอนโทรปีของวัตถุเย็นจึงเพิ่มขึ้น ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนแก่วัตถุเย็นจึงนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของเอนโทรปี โดยการถ่ายเทความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ 3 รูปแบบ ได้แก่

2.3.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน ¹⁰ เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางที่หยุดนิ่ง โดยถ่ายเทความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่อง สามารถเกิดได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็งของเหลว และแก๊ส โดยอัตราการนำความร้อนผ่านตัวกลางในทิศทางใดๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในทิศทางการถ่ายเทความร้อนนั้นผ่านพื้นที่ของตัวกลางที่ตั้งฉากกับทิศทางการนำความร้อน

ซึ่งเป็นไปตามกฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์ (Fourier's law of heat conduction) ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของการนำความร้อนในทิศทางเดียว “ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state)” ดังสมการที่ 2.4

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

จากกฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์ ทำให้ทราบว่าวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง อัตราการถ่ายเทความร้อนก็จะมีปริมาณที่สูงเช่นกัน

2.3.2 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อน ¹¹ เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางที่มีการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านพื้นที่ผิวของวัตถุ ดังนั้นจึงเกิดได้ในตัวกลางที่เป็นของไหลเท่านั้น เนื่องจากโมเลกุลของของแข็งไม่มีการเคลื่อนที่ โดยอัตราการพาความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน (T_s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับอุณหภูมิของของไหล (T_∞) ซึ่งเป็นไปตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ดังสมการที่ 2.5

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.5)$$

โดยรูปแบบการพาความร้อนของของไหลจะแตกต่างกันตามการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งสามารถจำแนกรูปแบบการพาความร้อนได้ออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

2.3.2.1 การพาความร้อนตามธรรมชาติหรือแบบอิสระ (Natural/Free convection)

ไม่มีแรงภายนอกมากระทำทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่การเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากตัวของของไหลเอง เช่น แรงลอยตัวของของไหล ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหล เมื่ออุณหภูมิของของไหลมีการเปลี่ยนแปลง

2.3.2.2 การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection)

มีแรงจากภายนอกมากระทำทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการพาความร้อนแบบบังคับได้ 2 รูปแบบได้แก่ การพาความร้อนแบบบังคับภายในท่อ (Internal forced convection) และการพาความร้อนแบบบังคับภายนอกท่อ (External forced convection)

การคำนวณหาอัตราการพาความร้อนจะมีความเกี่ยวข้องกับตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless number) 4 ตัว ได้แก่

- 1) เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number : Re) บ่งบอกถึงอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงหนืดของของไหล
- 2) เลขพรันด์เทิล (Prandtl number : Pr) บ่งบอกถึงความหนาแน่นสัมพัทธ์ของความเร็วและชั้นขอบเขตของความร้อน
- 3) เลขนัสเซลต์ (Nusselt number : Nu) บ่งบอกถึงการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นของของไหลอันเป็นผลมาจากการพาความร้อนต่อการนำความร้อนผ่านของไหลเดียวกัน
- 4) เลขเรย์ลี (Rayleigh number : Ra_L) บ่งบอกถึงอัตราส่วนของแรงลอยตัวจากความร้อนกับโมเมนตัมการแพร่

ซึ่งความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติทั้ง 4 สามารถหาได้จากสมการที่ 2.6 ถึง 2.9

$$Re = \frac{\rho v L_c}{\mu} \quad (2.6)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\alpha} \quad (2.7)$$

$$Nu = \frac{h L_c}{k} \quad (2.8)$$

$$Ra_L = Gr_L Pr_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{\nu \alpha} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยไม่อาศัยตัวกลาง โดยเป็นการถ่ายเทความร้อนออกจากรังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

อัตราการแผ่รังสีความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของพื้นผิวยกกำลังสี่ ซึ่งเป็นไปตามกฎของสเตฟาน-โบลทซ์มานน์ ดังสมการที่ 2.10

$$\frac{Q}{A} = \sigma \epsilon T_s^4 \quad (2.10)$$

2.4 การวัดพลังงานความร้อน

ความร้อนของสารเป็นค่าที่ไม่สามารถวัดออกมาได้โดยตรง โดยทั่วไปแล้วการวัดปริมาณความร้อนจะอาศัยสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อระบบได้รับหรือสูญเสียความร้อน โดยจะถูกแสดงออกผ่านสมบัติ 2 รูปแบบ ได้แก่

1. ความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ปริมาณความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิของสารมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งปริมาณความร้อนนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับมวลของสารกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ดังสมการที่ 2.11

$$Q = mc_p \Delta T \quad (2.11)$$

2. ความร้อนแฝง (Latent heat) ปริมาณความร้อนที่ทำให้สารมีการเปลี่ยนแปลงสถานะสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.12

$$Q = mL \quad (2.12)$$

2.5 กฎของแก๊สอุดมคติ (Ideal gas law)

สถานะของสารประกอบด้วย 3 สถานะได้แก่ สถานะของแข็ง สถานะของเหลว และสถานะแก๊ส โดยสารแต่ละสถานะมีพฤติกรรมและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งแก๊สเป็นหนึ่งในสถานะของสารที่มีปริมาตรเปลี่ยนแปลงไปตามภาชนะที่บรรจุ หนึ่งในกฎที่สามารถใช้ประมาณการพฤติกรรมของแก๊สได้คือ กฎแก๊สอุดมคติ (Ideal gas law) ซึ่งตั้งอยู่ในสมมติฐานดังนี้

1. แก๊สไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลต่อกัน
2. โมเลกุลมีการเคลื่อนที่แบบสุ่มตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
3. แก๊สมีปริมาตรน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาตรภาชนะบรรจุ
4. การชนกันระหว่างโมเลกุลหรือระหว่างโมเลกุลกับผนังของภาชนะบรรจุเป็นการชนแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์ (ไม่มีการสูญเสียพลังงาน)
5. แก๊สไม่เปลี่ยนสถานะ

โดยกฎแก๊สอุดมคติเป็นกฎที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดัน และปริมาตรของแก๊ส ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.13

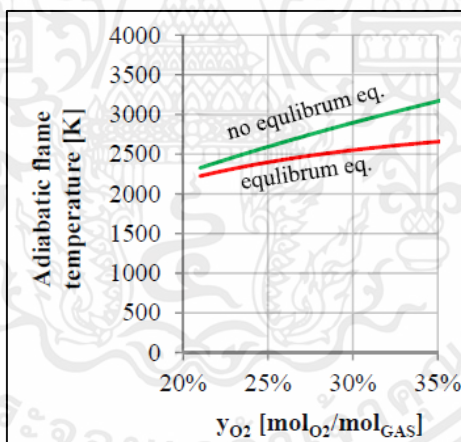
$$PV = nRT \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

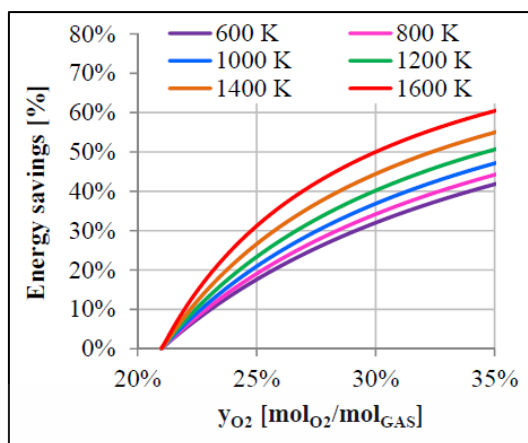
ในความเป็นจริงพฤติกรรมของแก๊สไม่ได้เป็นดังสมมติฐานของกฎแก๊สอุดมคติ เนื่องจากแก๊สจริงมีแรงระหว่างโมเลกุลกระทำต่อกัน การชนกันระหว่างโมเลกุลของแก๊สจริง ไม่เป็นการชนแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์เสมอไป แก๊สจริงสามารถเปลี่ยนสถานะได้ แต่ในสภาวะที่มีความดันต่ำและอุณหภูมิสูง แก๊สจริงจะมีพฤติกรรมคล้ายกับแก๊สอุดมคติ ดังนั้นในสภาวะดังกล่าวจึงสามารถประมาณการพฤติกรรมของแก๊สจริงด้วยกฎแก๊สอุดมคติได้ เนื่องจากที่สภาวะความดันต่ำและอุณหภูมิสูงนั้น โมเลกุลของแก๊สอยู่จะห่างกันและโมเลกุลของแก๊สจะมีการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วจึงทำให้แรงระหว่างโมเลกุลมีปริมาณที่น้อย

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

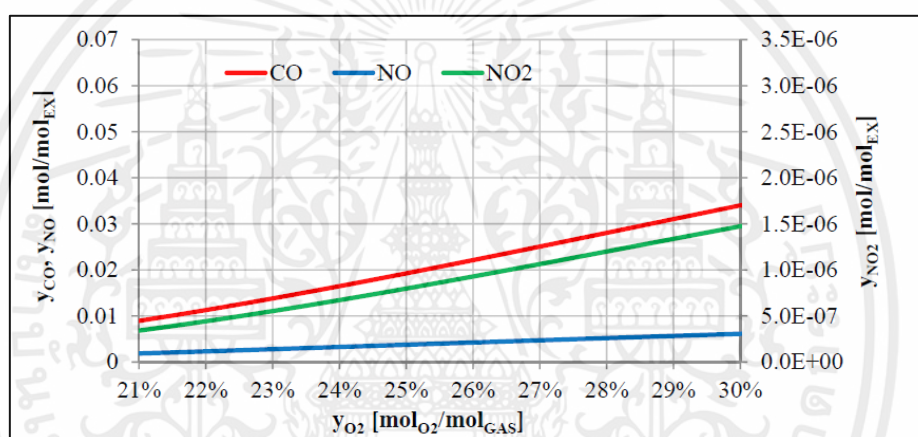
Xinyu Ming และคณะ¹² ทำการศึกษาผลจากการเผาไหม้แก๊สธรรมชาติด้วยออกซิเจนที่ค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 21 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ ผ่านตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อุณหภูมิของเปลวไฟ สัดส่วนการประหยัดเชื้อเพลิง และปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก ด้วยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม CHEMKIN ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับการแก้ปัญหาทางจลนพลศาสตร์ทางเคมี โดยการตั้งสมมติฐาน ดังต่อไปนี้ 1. ปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นในระบบอะเดียแบติก ซึ่งระบบไม่มีการสูญเสียความร้อน 2. พลังงานที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่เปลี่ยนรูปแบบเป็นงาน พลังงานจลน์และพลังงานศักย์ 3. อุณหภูมิของแก๊สไอเสียมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของเตาเผา ได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงอุณหภูมิเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ เทียบกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงสัดส่วนการลดพลังงานสูญเสีย เทียบกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้

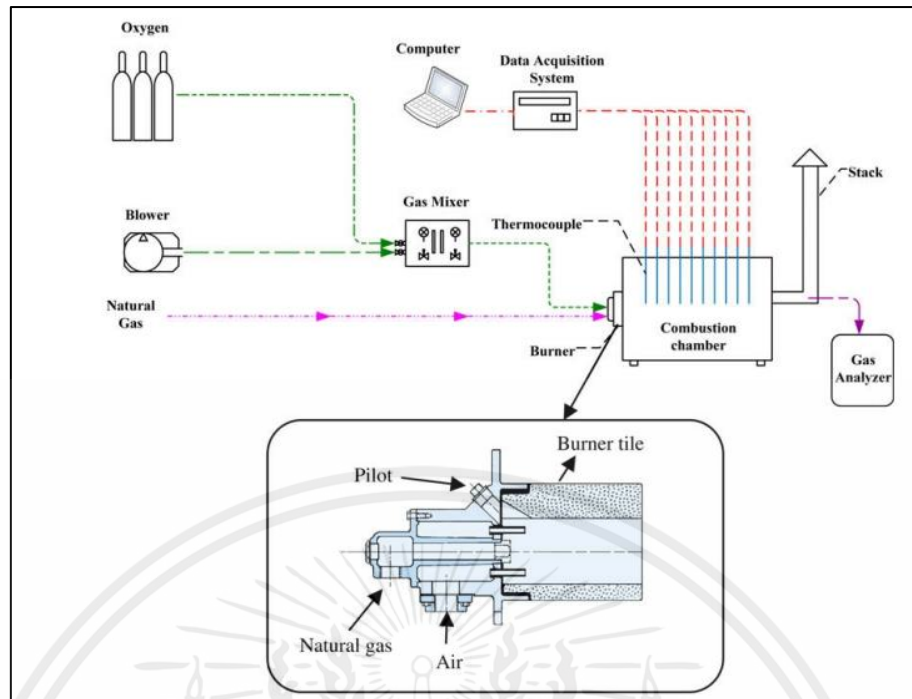


รูปที่ 2.3 กราฟแสดงปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก เทียบกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้

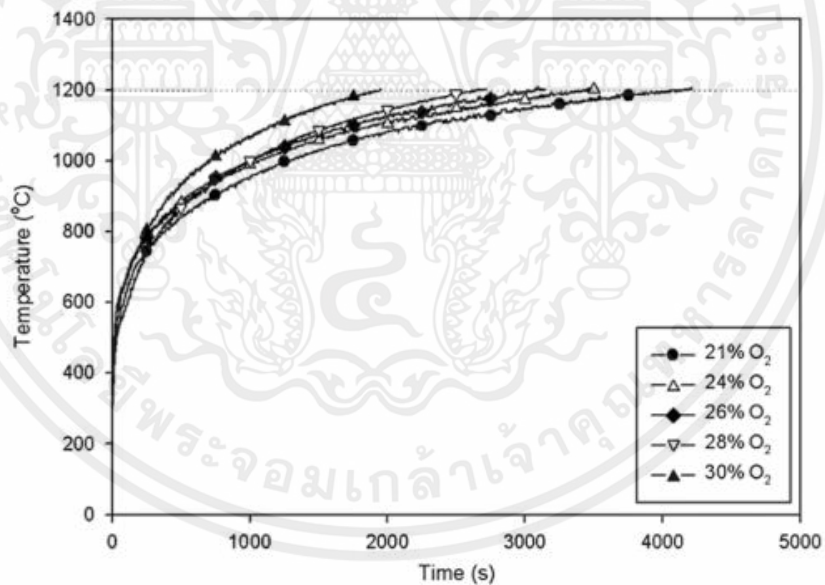
พบว่า การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้ จะทำให้อุณหภูมิเปลวไฟที่เกิดขึ้นในเตาเผา มีค่าสูงขึ้น และลดการสูญเสียพลังงานจากแก๊สไอเสียมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณการปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนดังกล่าว ปริมาณออกซิเจนในอากาศที่ใช้เผาไหม้ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งช่วยประหยัดพลังงานได้กว่า 20 เปอร์เซ็นต์

Kuo-Kuang Wu และคณะ¹³ ทำการศึกษาการเผาไหม้แก๊สออกซิเจนที่ความเข้มข้น 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรในเตาเผา ว่าส่งผลต่ออัตราการให้ความร้อน การปล่อยมลพิษ อุณหภูมิสูงสุดในเตาเผา และปริมาณแก๊สธรรมชาติที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้อย่างไร ซึ่งทำการทดลองโดยป้อนแก๊สออกซิเจนเข้มข้นเข้าสู่เตาเผาพร้อมกับแก๊สธรรมชาติที่เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้พร้อมทำการตรวจวัดตัวแปรที่ต้องการศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และผลลัพธ์จากการทดลองดังรูปที่ 2.5 ถึง 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

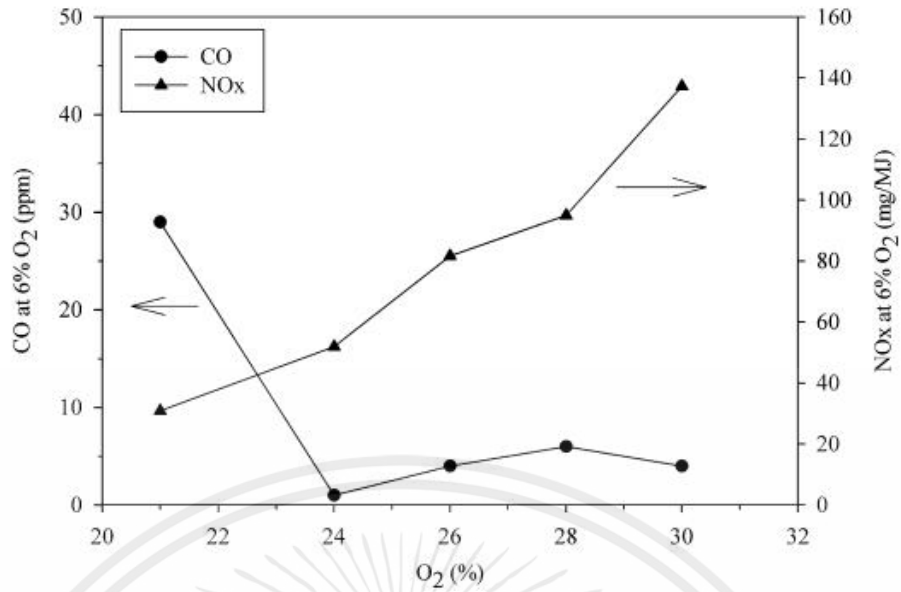


รูปที่ 2.4 แผนภาพการทดลองการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนเข้มข้น

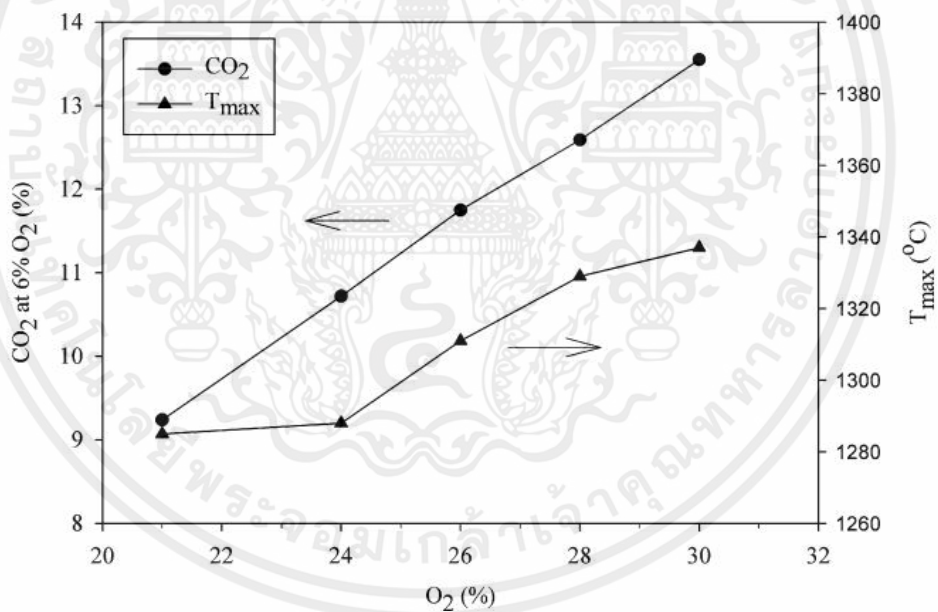


รูปที่ 2.5 กราฟแสดงระยะเวลาในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจนถึง 1,200 องศาเซลเซียสในเตาเผาที่มีความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

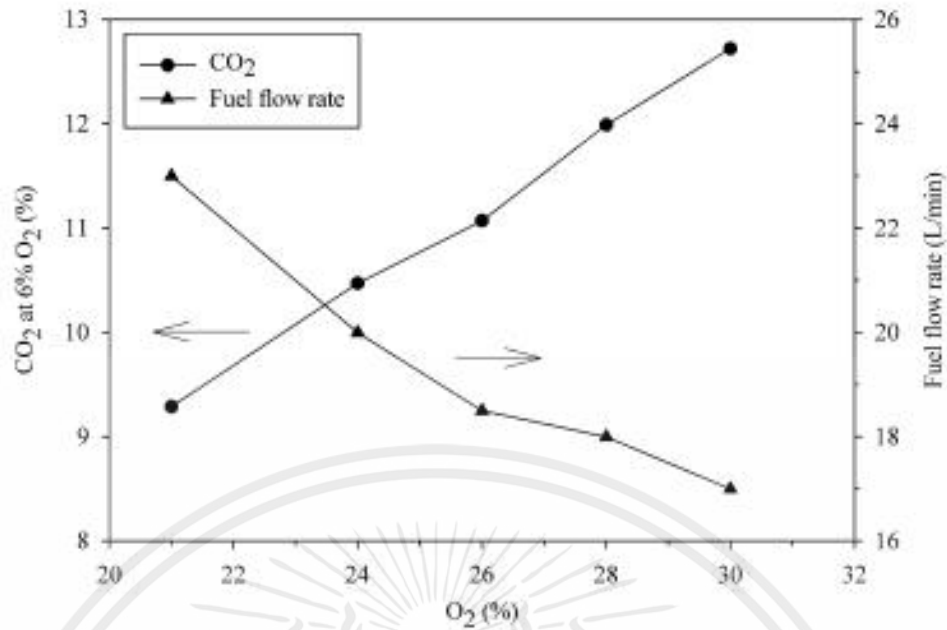


รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และความเข้มข้นสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

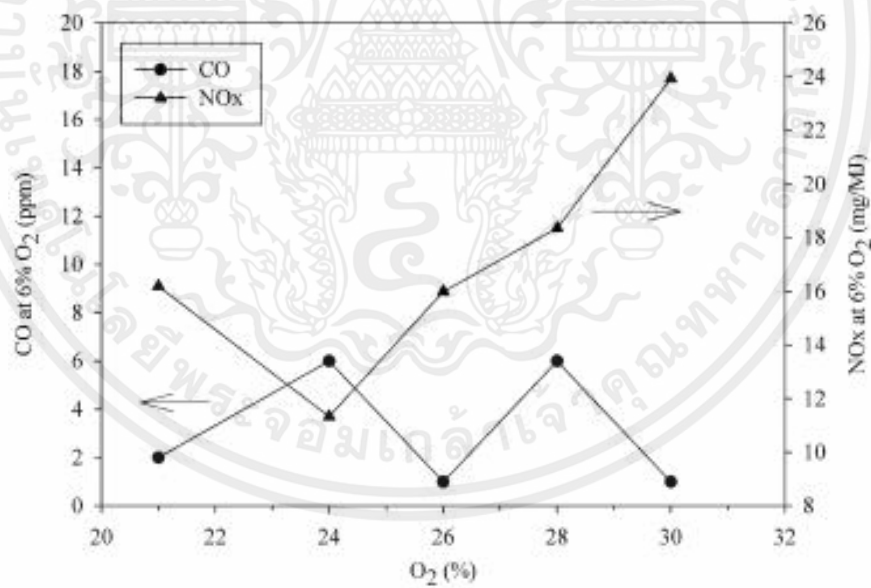


รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิสูงสุดของเตาเผาที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

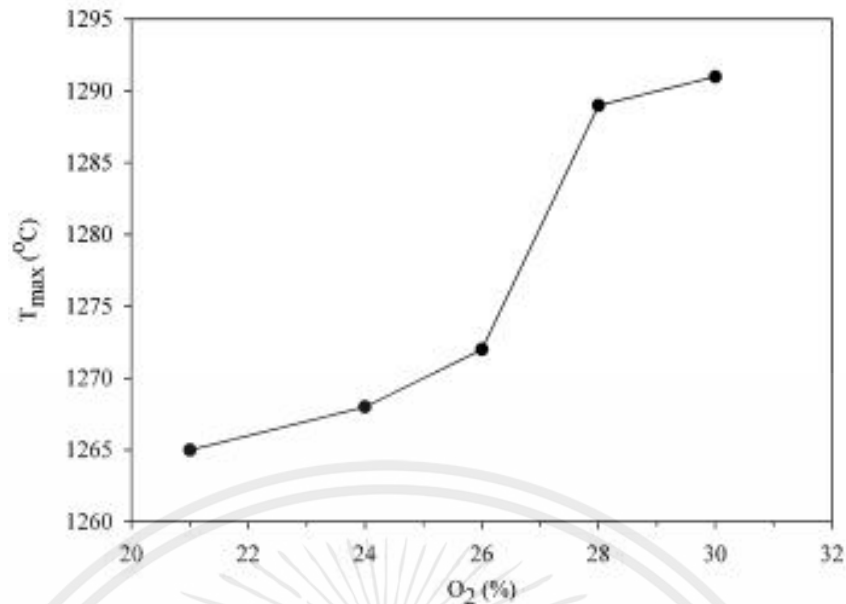


รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และความเข้มข้นสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

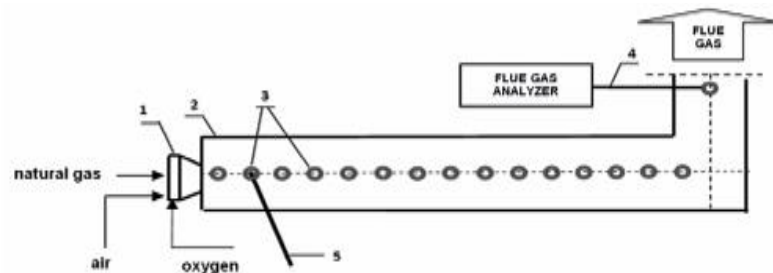
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงอุณหภูมิสูงสุดในเตาเผา ที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

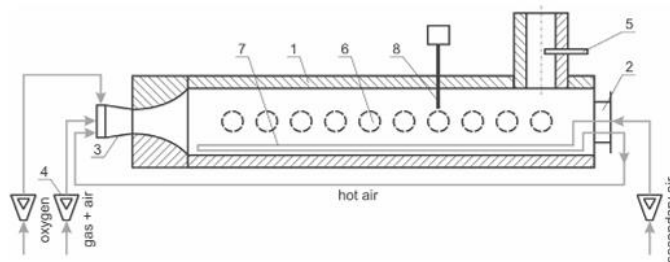
จากผลการทดลองที่แสดงข้างต้น พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแก๊สออกซิเจน อัตราการให้ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้มีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของแก๊สอื่นๆที่เข้าสู่กระบวนการเผาไหม้มีปริมาณที่ลดลง ความร้อนที่สูญเสียให้กับแก๊สเหล่านั้นจึงลดลง ความเข้มข้นสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น เป็น 4.4 เท่า ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณที่ลดลง อีกทั้งความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าเมื่อปริมาณแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นรูปแบบการเผาไหม้มีแนวโน้มที่จะเป็นการเผาไหม้สมบูรณ์ อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงลดลง โดยที่อัตราการบริโภคเชื้อเพลิงที่ความเข้มข้นออกซิเจน 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณลดลง 26.1 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงที่ความเข้มข้นออกซิเจน 21 เปอร์เซ็นต์

A.Poskart และคณะ¹⁴ ศึกษาการเกิดสารประกอบแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ที่เป็นผลมาจากการเผาไหม้แก๊สออกซิเจนความเข้มข้น 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยใช้แก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ทรงกระบอก ซึ่งทำการทดลอง 2 ชุดดังรูปที่ 2.11 และ 2.22 และผลลัพธ์จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.13 และ 2.14



รูปที่ 2.11 แผนภาพการทดลองชุดที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แผนภาพการทดลองชุดที่ 2

การทดลองชุดที่ 1 เริ่มต้นการทดลองด้วยการอุ่นห้องเผาไหม้ให้มีอุณหภูมิ 1300°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยทำการป้อนอากาศ แก๊สออกซิเจน และแก๊สธรรมชาติเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ทำการวัดอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ ณ ตำแหน่งต่างๆ และตรวจวัดปริมาณสารประกอบแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ บริเวณช่องระบายอากาศของห้องเผาไหม้ โดยกำหนดปริมาณการป้อนแก๊สธรรมชาติ, อากาศ, แก๊สออกซิเจน และความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 อัตราการไหลของแก๊สธรรมชาติ, อากาศ, แก๊สออกซิเจน และความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนของการทดลองชุดที่ 1

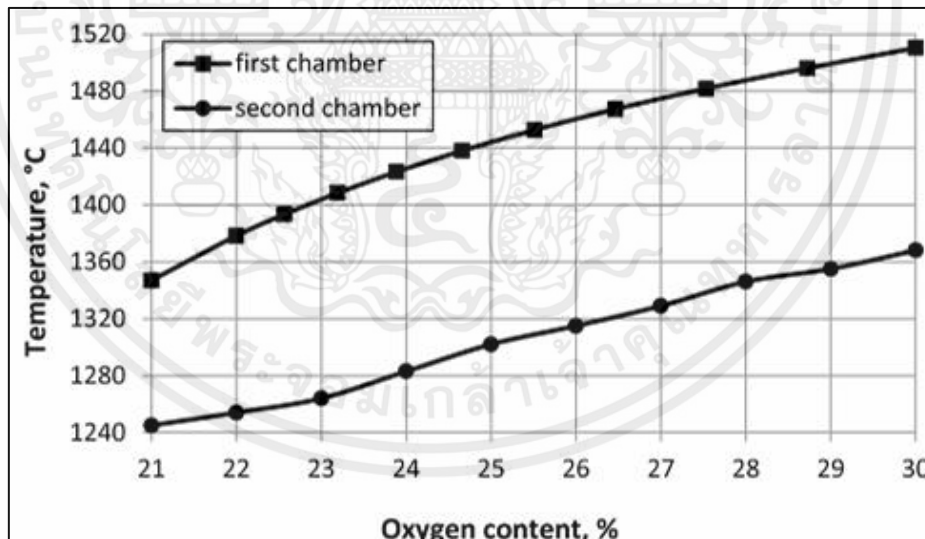
อัตราการไหลแก๊สธรรมชาติ	อัตราการไหลของอากาศ	อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน	ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจน
ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง	ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง	ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง	%
1.62	17.37	0.0	21.0
1.62	15.68	0.2	22.0
1.62	14.84	0.3	22.6
1.62	14.01	0.4	23.2
1.62	13.18	0.5	23.9
1.62	12.36	0.6	24.7
1.62	11.56	0.7	25.5
1.62	10.76	0.8	26.5
1.62	9.99	0.9	27.5
1.62	9.23	1.0	28.7
1.62	8.49	1.1	30.0

การทดลองชุดที่ 2 เริ่มต้นด้วยการอุ่นห้องเผาไหม้ให้มีอุณหภูมิ 1300°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ป้อนอากาศกับแก๊สธรรมชาติด้วยพัดลมไฟฟ้า ป้อนแก๊สออกซิเจนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และป้อนอากาศอุณหภูมิ 230°C เข้าสู่ห้องเผาไหม้ ทำการวัดอุณหภูมิและตรวจวัดปริมาณสารประกอบแก๊สไนโตรเจนออกไซด์บริเวณช่องระบายอากาศของห้องเผาไหม้ โดยกำหนดปริมาณการป้อนแก๊สธรรมชาติ, อากาศ, อากาศร้อน, แก๊สออกซิเจน และความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนดังตาราง 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

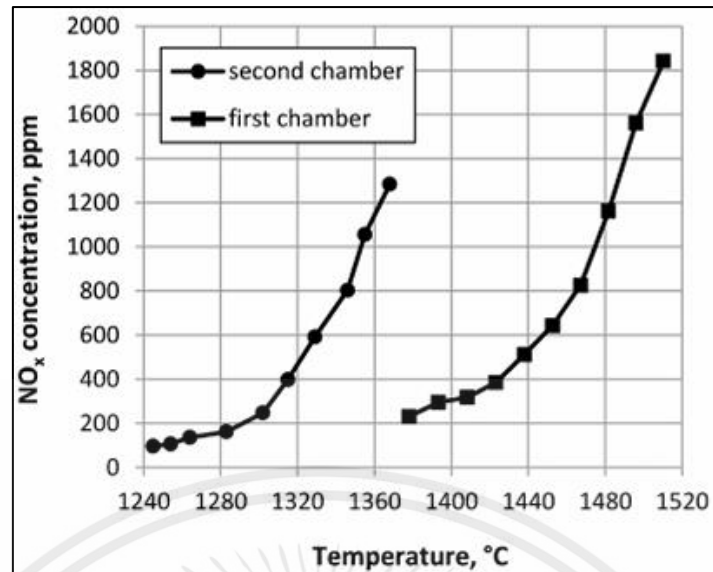
ตารางที่ 2.2 อัตราการไหลของแก๊สธรรมชาติ อัตราการไหลของอากาศ อัตราการไหลของอากาศร้อน อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน และความเข้มข้นแก๊สออกซิเจน

อัตราการไหล แก๊สธรรมชาติ	อัตราการไหล ของอากาศ	อัตราการไหล ของอากาศร้อน	อัตราการไหลของ แก๊สออกซิเจน	ความเข้มข้น แก๊สออกซิเจน
ลูกบาศก์เมตร/ ชั่วโมง	ลูกบาศก์เมตร/ ชั่วโมง	ลูกบาศก์เมตร/ ชั่วโมง	ลูกบาศก์เมตร/ ชั่วโมง	%
3.38	19.25	17	0.00	21.0
3.38	17.11	17	0.45	22.0
3.38	15.20	17	0.85	23.0
3.38	13.30	17	1.25	24.0
3.38	11.87	17	1.55	25.0
3.38	10.44	17	1.85	26.0
3.38	9.01	17	2.15	27.0
3.38	7.82	17	2.40	28.0
3.38	6.63	17	2.65	29.0
3.38	5.44	17	2.90	30.0



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเปลวไฟกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน ตั้งแต่ 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรในห้องเผาไหม้ที่ 1 และ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารประกอบแก๊สไนโตรเจนออกไซด์กับอุณหภูมิของเปลวไฟในห้องเผาไหม้ที่ 1 และ 2

จากผลการทดลองทั้ง 2 การทดลอง พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นแก๊สออกซิเจน ส่งผลให้อุณหภูมิของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.13 อีกทั้งยังส่งผลต่อการเกิดสารประกอบแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนดังรูปที่ 2.14 ซึ่งตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสารประกอบแก๊สไนโตรเจนออกไซด์คืออุณหภูมิ และแก๊สออกซิเจนที่ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ในปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ จึงเข้าไปเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ตามความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาผลของการเพิ่มความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยศึกษาผ่านพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยศึกษาความร้อนที่น้ำซึ่งเป็นสื่อกลางความร้อนได้รับ จากการแลกเปลี่ยนผ่านเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส

3.1 การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน สำหรับการเผาไหม้

เครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส เป็นอุปกรณ์เผาไหม้เชื้อเพลิง โดยใช้โบลวเออร์ในการป้อนอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และมีจุดป้อนแก๊ส LPG ที่เป็นเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส

ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งองค์ประกอบของเครื่องทำน้ำร้อนยี่ห้อ Rinnai รุ่น REU-3237WC-ASN

หมายเลข	อุปกรณ์
1	เครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส
2	ห้องเผาไหม้
3	พัดลมโบลเวอร์
4	จุดป้อนแก๊ส LPG
5	จุดป้อนน้ำเย็น
6	ทางออกน้ำร้อน
7	สวิตช์ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำร้อน

ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำร้อน สามารถตั้งค่าสวิตช์ได้บริเวณตำแหน่งดังแสดง
 ในรูปที่ 3.2 และรหัสการตั้งค่าอุณหภูมิสามารถตั้งค่าได้ดังตารางที่ 3.2



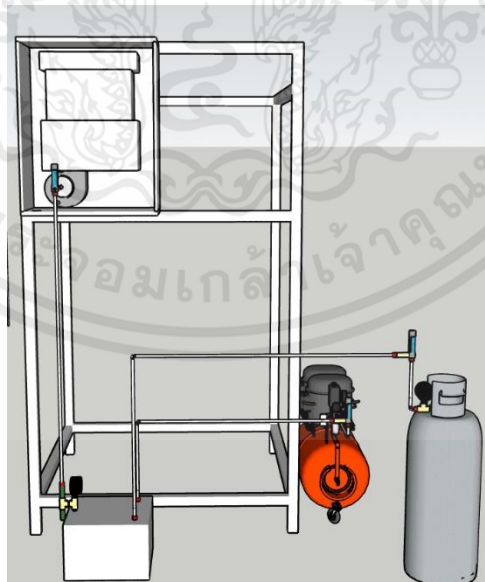
รูปที่ 3.2 ตำแหน่งสวิตช์ตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 รหัสการ เปิด - ปิดสวิตช์ เพื่อควบคุมอุณหภูมิเครื่องทำน้ำร้อน

สวิตช์ตัวที่	อุณหภูมิ									
	40	42	50	55	60	65	70	75	85	95
1	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←
2	→	←	←	←	←	←	→	←	←	←
3	←	→	←	←	→	←	→	→	→	←
4	→	←	←	←	→	→	→	←	→	→
5	→	→	→	←	←	←	→	←	→	→
6	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
7	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←
8	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←

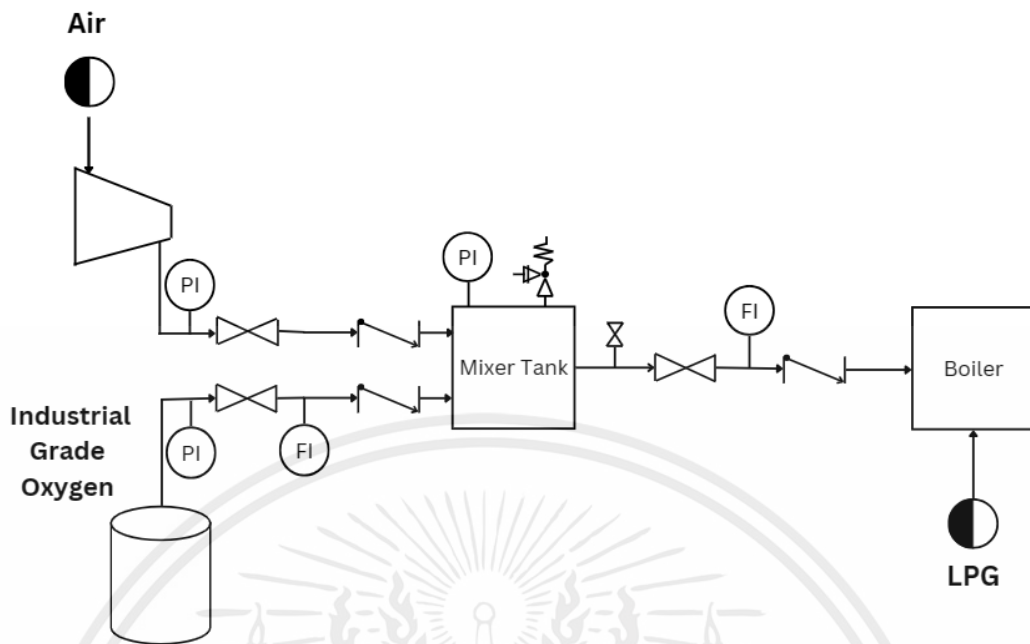
การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน ที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ จัดทำขึ้นมาเพื่อใช้ในการศึกษาและการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิง ด้วยแก๊สออกซิเจนเข้มข้นที่แตกต่าง กันสำหรับเครื่องน้ำร้อนแก๊ส โดยการออกแบบเบื้องต้นเริ่มโดยการถอดพัดลมโบลเวอร์ออกเนื่องจาก ต้องการต่อแก๊สออกซิเจนเข้มข้นเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยตรง จากนั้นซีลกรอบของพัดลมโบลเวอร์ด้วย แผ่นเหล็ก แล้วใช้ถังผสมแก๊สเป็นที่ผสมแก๊สออกซิเจนให้ได้ความเข้มข้นตามที่ต้องการ โดยการต่อ แก๊สออกซิเจนจากถังแก๊สออกซิเจนเข้าสู่ถังผสม โดยอากาศที่นำมาผสมกับแก๊สออกซิเจนในถังผสม มาจากการต่อท่อจากปั๊มลมไร้น้ำมัน ที่ใช้ป้อนอากาศเข้าสู่ถังผสม เมื่อแก๊สออกซิเจนในถังผสมมีความ เข้มข้นตามที่ต้องการแล้ว จะถูกส่งไปยังห้องเผาไหม้โดยตรงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 แผนภาพอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน สำหรับการทดลอง



รูปที่ 3.4 แผนภาพอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นแก๊สออกซิเจน

3.2 การศึกษาผลจากการเผาไหม้ด้วยแก๊สออกซิเจนเข้มข้น

3.2.1 สารเคมี

- 1) แก๊สปิโตรเลียมเหลว สำหรับเป็นเชื้อเพลิง
- 2) แก๊สออกซิเจน เกรดอุตสาหกรรม
- 3) น้ำ

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส
- 2) ปั๊มลมไร้น้ำมัน ขนาด 0.75 แรงม้า
- 3) ถังทนแรงดัน
- 4) อุปกรณ์วิเคราะห์ความเข้มข้นออกซิเจน
- 5) โรตารีมอเตอร์
- 6) เกจวัดความดัน
- 7) เทอร์โมมิเตอร์ แบบตัวไอ
- 8) เทอร์โมมิเตอร์ชนิดอินฟราเรด
- 9) หัวปรับความดันแก๊ส (Regulator)
- 10) วาล์วกันย้อนกลับ
- 11) บอลวาล์ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ขั้นตอนการปรับความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนสำหรับเผาไหม้

- 1) เริ่มการทำงานของปั๊มลม สังเกตเกจวัดความดันของถังลม เปิดวาล์วปั๊มลมให้ได้ตามสัดส่วนการทำปฏิกิริยาเผาไหม้
- 2) เปิดวาล์วถังออกซิเจน ปรับความดันและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน เพื่อปรับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในถังผสม
- 3) เมื่อได้ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนตามที่ต้องการ โดยการวัดค่าความเข้มข้นด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ความเข้มข้นออกซิเจน เปิดวาล์วถังผสม ปรับความดันและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนความเข้มข้นสูง ให้ได้ตามสัดส่วนการทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับเชื้อเพลิง

3.2.4 ขั้นตอนการทดลองการเผาไหม้ ด้วยแก๊สออกซิเจนเข้มข้น

เมื่อปรับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้ได้ตามที่ต้องการ ในช่วง 21 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

- 1) บันทึกอุณหภูมิและระดับความสูงของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ของระบบเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส ก่อนการดำเนินการ
- 2) ตั้งค่าอุณหภูมิของการต้มน้ำ ด้วยระบบเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส ก่อนการเดินเครื่องต้มน้ำร้อนแก๊ส ปรับสวิตช์ควบคุมอุณหภูมิของการต้มน้ำ ตามรหัสที่จะแสดงไว้ในตารางที่ 3.2
- 3) เปิดวาล์วถังแก๊สปิโตรเลียมเหลว ที่ส่งเข้าระบบเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส
- 4) เปิดวาล์วถังผสมแก๊ส เพื่อให้ออกซิเจนเข้มข้นเข้าสู่ระบบเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส
- 5) เดินเครื่องต้มน้ำร้อนแก๊ส กดสวิตช์ควบคุมการทำงานของปั๊มน้ำ เข้าสู่ระบบเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส เพื่อรับความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้
- 6) บันทึกระยะเวลา และอัตราการไหลของแก๊สปิโตรเลียมเหลวในระหว่างที่ระบบเครื่องทำน้ำร้อนแก๊สทำงาน
- 7) เมื่ออุณหภูมิของน้ำถึงจุดที่ตั้งค่าเอาไว้ ระบบเครื่องทำน้ำร้อนแก๊สจะหยุดการทำงาน บันทึกอุณหภูมิและความสูงสุดท้ายของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ของระบบเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส

บทที่ 4

ผลการทดลอง และอภิปรายผล

การศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนเข้มข้น โดยพิจารณาความเข้มข้นโดยปริมาตรของแก๊สออกซิเจน ซึ่งใช้เป็นตัวออกซิไดซ์สำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้ ด้วยการออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการปรับค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน จากแก๊สออกซิเจนในอากาศและแก๊สออกซิเจนอุตสาหกรรม ซึ่งนำมาใช้ทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิง ด้วยเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส

4.1 อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน สำหรับการเผาไหม้

อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน ในการปรับค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ก่อนนำเข้าสู่เครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส ประกอบไปด้วยแก๊สขาเข้า 2 สาย ได้แก่

1. แก๊สออกซิเจนในอากาศ ซึ่งใช้ปั๊มลมชนิดไร้น้ำมัน ขนาด 0.75 แรงม้า เป็นแหล่งในการเพิ่มพลังงานในการไหลของอากาศเข้าสู่อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน
2. แก๊สออกซิเจนอุตสาหกรรม ความเข้มข้น 93.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใช้แก๊สอุตสาหกรรมบรรจุถังขนาด 1.5 ลูกบาศก์เมตร

ซึ่งสามารถปรับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนสำหรับเผาไหม้ด้วยหัวปรับความดันแก๊สบริเวณถังบรรจุแก๊สออกซิเจนอุตสาหกรรม และบอลวาล์วระหว่างท่อแก๊ส



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน (ด้านหน้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน(ด้านข้าง)

จากการทดลองการใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับควบคุมความเข้มข้นออกซิเจน ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง พบว่าบีมลม ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานสำหรับสร้างการไหลให้กับอากาศ สามารถสร้างอัตราการไหลของอากาศได้ 15 ลิตรต่อนาที ซึ่งไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเผาไหม้ภายในเครื่องทำน้ำร้อน ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในระยะเวลาที่สั้นมาก ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำภายในระบบของเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส และเกิดแก๊สสีดำออกทางช่องระบายแก๊สไอเสีย ดังรูปที่ 4.3

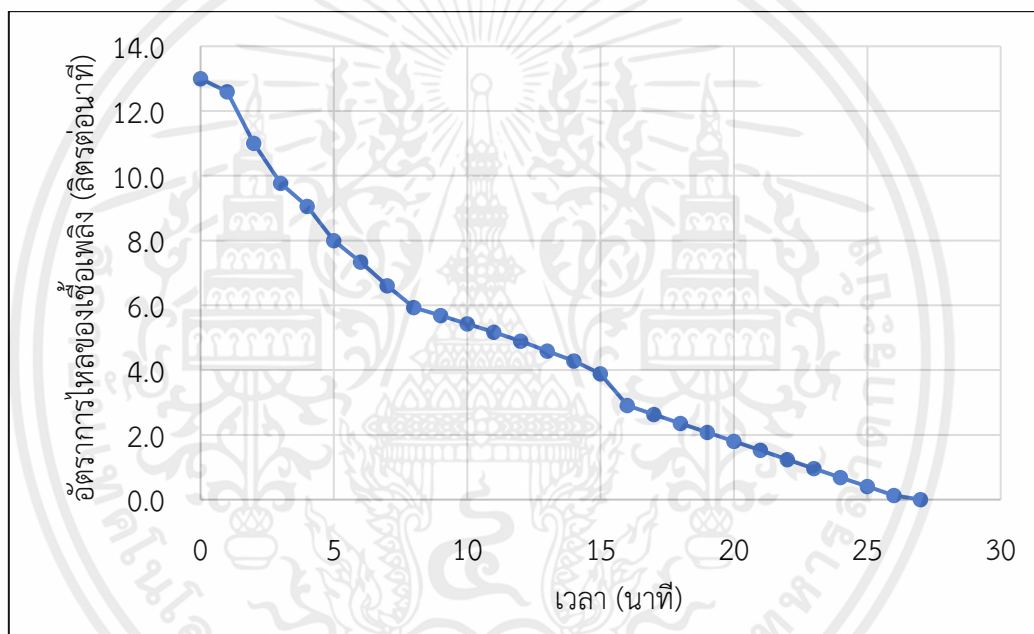


รูปที่ 4.3 แก๊สสีดำที่ออกทางช่องระบายแก๊สไอเสีย

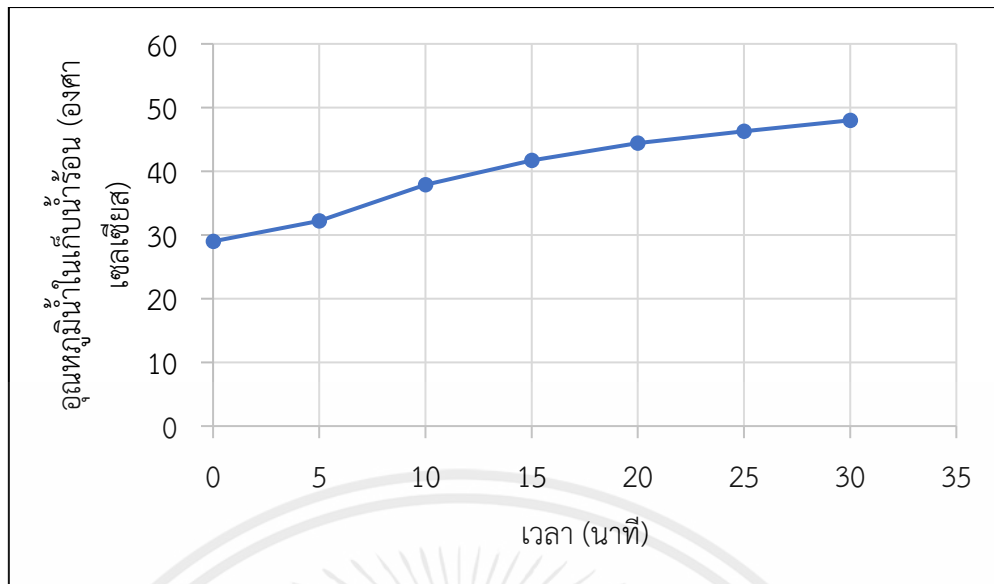
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนต่อพลังงานจากการเผาไหม้

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้ เพื่อศึกษาพลังงานความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยการป้อนแก๊สออกซิเจนอุตสาหกรรมร่วมกับอากาศ ผ่านพัดลมโบลเวอร์ของเครื่องทำน้ำร้อนแก๊สในอัตราส่วนต่างๆ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงแก๊สปิโตรเลียมเหลวในห้องเผาไหม้ ซึ่งอัตราการไหลของเชื้อเพลิงแก๊สถูกวัดด้วยโรตารีมิเตอร์ กราฟแสดงอัตราการไหลของเชื้อเพลิงแก๊ส จะถูกแสดงดังรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส มีระบบควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงแก๊ส ซึ่งจะปรับค่าตามอุณหภูมิของน้ำขาเข้าเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส ทำให้ในช่วงแรกของการทดลองอัตราการไหลของเชื้อเพลิงแก๊สจะมีค่าที่สูงที่สุด แล้วจะค่อย ๆ ลดลงไปตามอุณหภูมิของน้ำขาเข้าเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส ที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการทดลอง ซึ่งถูกแสดงดังรูปที่ 4.5

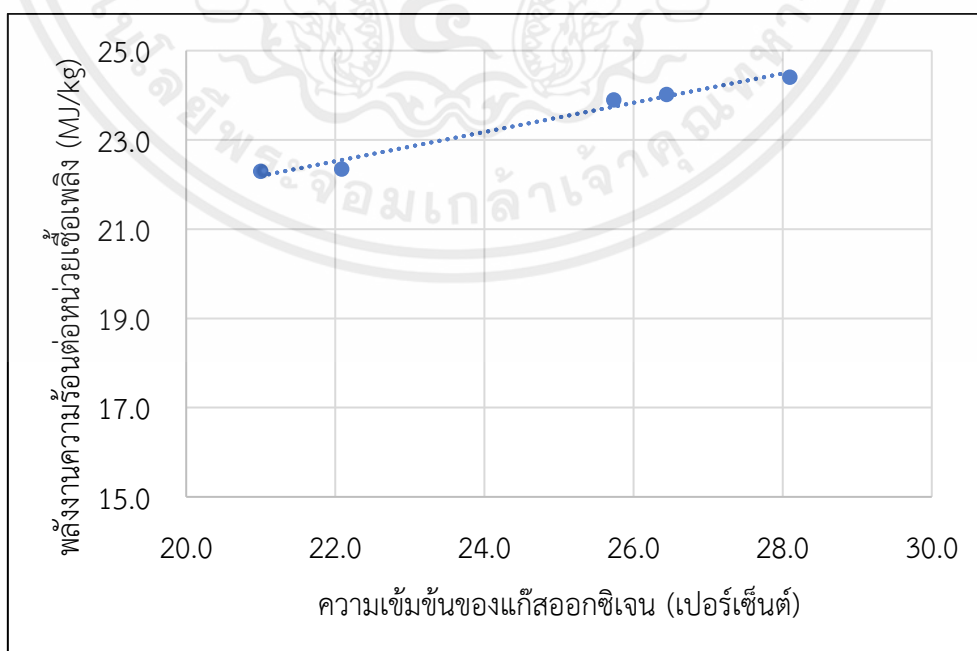


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงอัตราการไหลของเชื้อเพลิงแก๊สเครื่องทำน้ำร้อนแก๊สเทียบกับเวลาในการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยออกซิเจนเข้มข้น 21 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงอุณหภูมิไอน้ำในถังเก็บน้ำร้อนเทียบกับเวลาในการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยออกซิเจนเข้มข้น 21 เปอร์เซ็นต์

พลังงานความร้อนที่ได้จะถูกเก็บในรูปของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งรับความร้อนผ่านห้องเผาไหม้ของเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส นำมาวิเคราะห์พลังงานที่ได้รับจากปฏิกิริยาต่อหน่วยเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ กราฟแสดงค่าพลังงานความร้อนต่อหน่วยเชื้อเพลิงที่ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้ที่แตกต่างกัน จะถูกแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อค่าความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าพลังงานความร้อนต่อหน่วยเชื้อเพลิงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ซึ่งที่แก๊สออกซิเจนเข้มข้นเท่ากับ 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะมีค่าพลังงานความร้อนต่อหน่วยเชื้อเพลิงสูงสุดเท่ากับ 24.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัมเชื้อเพลิง



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าพลังงานความร้อนต่อหน่วยเชื้อเพลิงที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนต่าง ๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

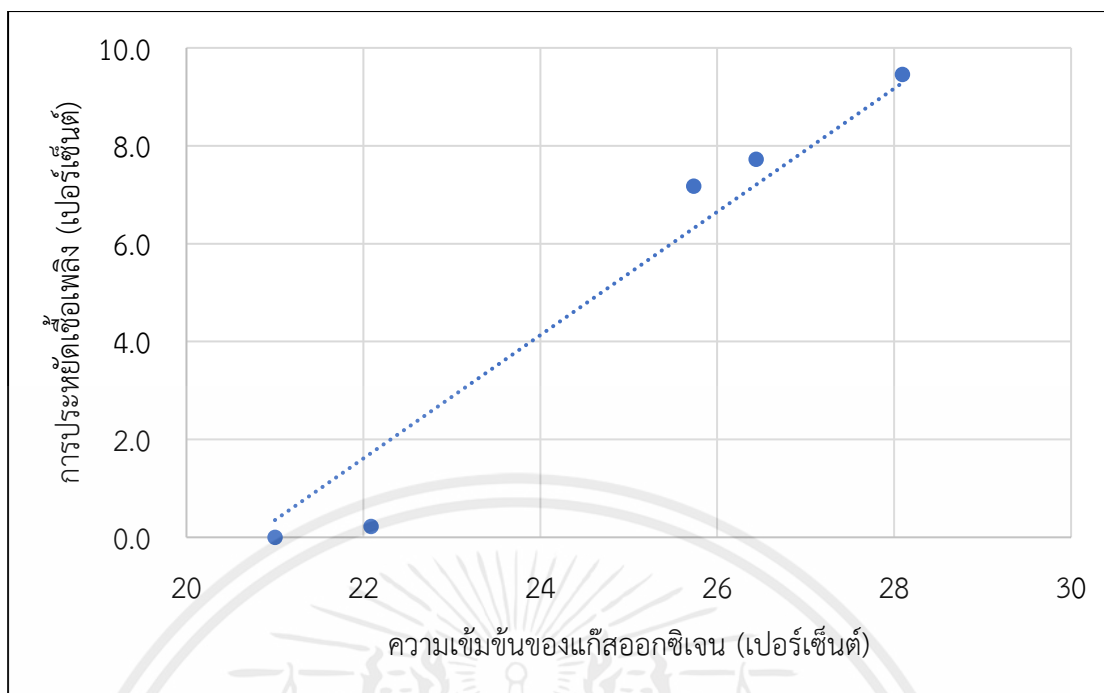
4.3 ความสามารถในการลดการใช้เชื้อเพลิง

จากการทดลองการเพิ่มความเข้มข้นออกซิเจนในระบบการเผาไหม้ด้วยแก๊สปิโตรเลียมเหลว โดยเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส เมื่อนำข้อมูลพลังงานความร้อนต่อหน่วยเชื้อเพลิงในแต่ละความเข้มข้นของ ก๊าซออกซิเจน มาคำนวณเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงสำหรับการระเหยน้ำ 1 กิโลกรัม¹⁵ ออก จากสารละลายน้ำตาลเพื่อเพิ่มความเข้มข้นสำหรับเครื่องเหยทั่วไปและเครื่องระเหยชั้นแบบฟิล์มบาง โดยใช้ ออกซิเจนเข้มข้น 21.0 และ 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงปริมาณพลังงานที่ใช้สำหรับการระเหยน้ำ 1 กิโลกรัม ออกจากสารละลาย น้ำตาลเพื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายในกระบวนการผลิตน้ำตาล

ชนิดเครื่องระเหย	ความเข้มข้น ออกซิเจน (เปอร์เซ็นต์)	พลังงาน ความร้อน (กิโลจูล)	พลังงานไฟฟ้า (กิโลจูล)	พลังงานทั้งหมด (กิโลจูล)
เครื่องระเหยทั่วไป	21	5497	-	5497
เครื่องระเหยทั่วไป	28.1	5022	-	5022
เครื่องระเหยชั้นแบบ ฟิล์มบาง	21	3859	3567	7426
เครื่องระเหยชั้นแบบ ฟิล์มบาง	28.1	3525	3567	7092

สามารถนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการประหยัดเชื้อเพลิงกับความเข้มข้นของ แก๊สออกซิเจนซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าการประหยัดเชื้อเพลิงมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันตรงกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้ เพิ่มขึ้น ทำให้การประหยัดเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน

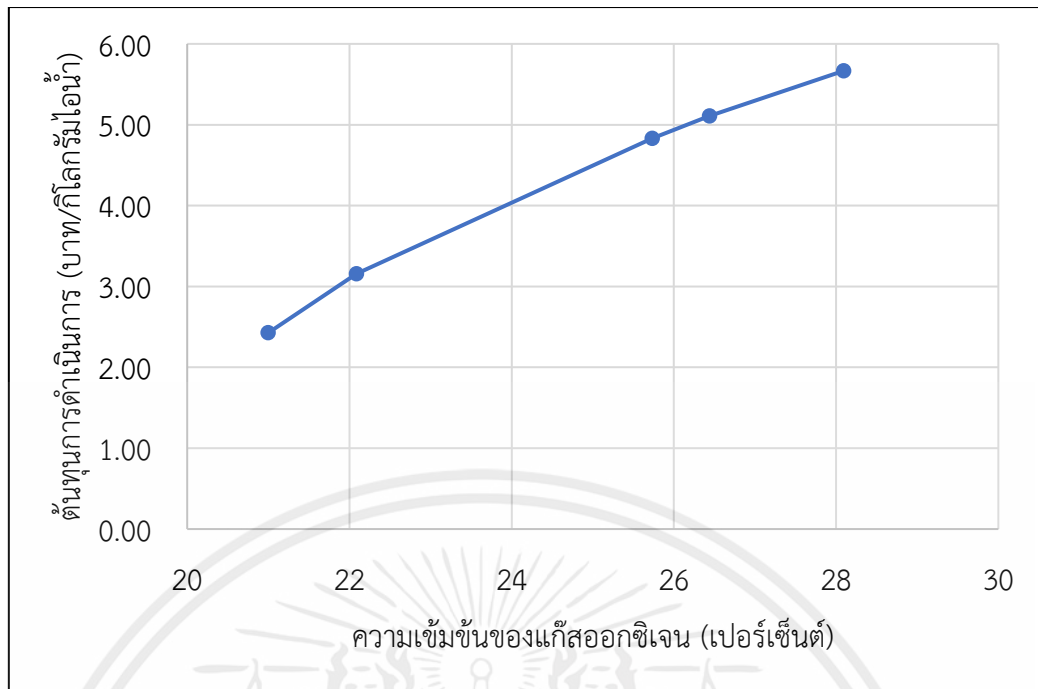


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าการประหยัดเชื้อเพลิงที่ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนต่างๆ

4.4 ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

การนำแก๊สออกซิเจนอุตสาหกรรมมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้ ส่งผลให้แก๊สออกซิเจนเป็นอีกหนึ่งต้นทุนที่สำคัญในกระบวนการเผาไหม้ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของการนำแก๊สออกซิเจนมาใช้ในการเผาไหม้ ในกระบวนการจริง โดยจะเปรียบเทียบต้นทุนของเชื้อเพลิงแก๊สที่ลดลงและต้นทุนของแก๊สออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น

เมื่อนำต้นทุนวัตถุดิบมาคำนวณกับปริมาณการใช้วัตถุดิบในแต่ละความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน สำหรับระเหยน้ำ 1 กิโลกรัม ออกจากสารละลายน้ำตาลเพื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 10.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็น 21.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวลด้วยเครื่องระเหยชั้นแบบฟิล์มบาง จะได้ราคาต้นทุนของเชื้อเพลิงและแก๊สออกซิเจนอุตสาหกรรม ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้ ส่งผลให้ต้นทุนในการระเหยน้ำ 1 กิโลกรัม ออกจากสารละลายน้ำตาลเพื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 10.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็น 21.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวลมีค่ามากกว่าการเผาไหม้ทั่วไป ซึ่งใช้เพียงแก๊สออกซิเจนในอากาศมาใช้ในการเผาไหม้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงต้นทุนการดำเนินการในการระเหยน้ำ 1 กิโลกรัม ออกจากสารละลายน้ำตาล เพื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 10.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็น 21.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวลที่ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ออกซิเจนเข้มข้น 21 ถึง 28 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง ในเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการควบคุมความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ และศึกษาผลของการเผาไหม้ด้วยแก๊สออกซิเจนเข้มข้น

การพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการควบคุมความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน จากการทดลองใช้อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการควบคุมความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในการเผาไหม้ด้วยเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส พบว่าเกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้เพียงช่วงสั้นๆ และเกิดแก๊สสีดำขึ้นระหว่างการเผาไหม้ ในส่วนของการทดลองเพื่อศึกษาพลังงานความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้นั้น ความเข้มข้นของออกซิเจนสูงสุดที่สามารถทำได้คือ 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการเผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้ โดยในการทดลองมีค่าพลังงานความร้อนต่อเชื้อเพลิงสูงสุดเท่ากับ 24.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัมเชื้อเพลิง ที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในด้านของความสามารถในการลดการใช้เชื้อเพลิง พบว่าการใช้เครื่องระเหยชั้นแบบฟิล์มบางร่วมกับการใช้ออกซิเจนเข้มข้น 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรในการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนแก่น้ำร้อนที่นำไปแลกเปลี่ยนความร้อนให้เครื่องระเหยชั้นแบบฟิล์มบาง มีการใช้เชื้อเพลิงที่น้อยกว่าการใช้เครื่องระเหยทั่วไปและเครื่องระเหยชั้นแบบฟิล์มบางที่ใช้ออกซิเจนเข้มข้น 21 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น แนวโน้มของการประหยัดการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น โดยมีค่าการประหยัดพลังงานสูงสุดที่ 9.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนการดำเนินการกับความเข้มข้นของออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้ เป็นแบบแปรผกผันตรง กล่าวคือเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ต้นทุนในการดำเนินการก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยจากการทดลองนี้ต้นทุนในการดำเนินการสูงสุด 5.67 บาทต่อกิโลกรัมไอน้ำ ที่ออกซิเจนเข้มข้น 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งมากกว่าการใช้ออกซิเจนเข้มข้น 21 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรหรือการใช้เพียงอากาศเป็นแหล่งออกซิเจนหลักที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้ 3.24 บาทต่อกิโลกรัมไอน้ำ

ค่าพลังงานความร้อนต่อเชื้อเพลิง การประหยัดการใช้เชื้อเพลิง และต้นทุนในการดำเนินการเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการควบคุมความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่พัฒนาขึ้นมาในปริญญานิพนธ์นี้ ยังไม่สามารถทำอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเข้มข้นได้เพียงพอต่อการเผาไหม้ด้วยเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส เนื่องจากปั๊มขนาด 0.75 แรงม้า มีกำลังไม่เพียงพอในการเพิ่มอัตรา

การไหลของอากาศ ดังนั้นจึงควรเลือกอุปกรณ์สำหรับการเพิ่มอัตราการไหลให้กับอากาศให้เพียงพอต่อการใช้สำหรับการเผาไหม้ด้วยเครื่องทำน้ำแก๊ส

2. แก๊สออกซิเจนอุตสาหกรรมบรรจุถึงขนาด 1.5 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งถูกนำมาใช้ในการทดลองการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนเข้มข้น มีปริมาณออกซิเจนที่น้อยไปในการทำการทดลองดังกล่าว ทำให้สามารถเพิ่มความเข้มข้นออกซิเจนในกระบวนการเผาไหม้ได้มากที่สุดเพียง 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เพื่อให้แก๊สออกซิเจนเพียงพอต่อการเผาไหม้ตลอดระยะเวลาในการทดลอง ดังนั้นในการทดลองที่ความเข้มข้นของออกซิเจนมากกว่า 28.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มแหล่งแก๊สออกซิเจน ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มขนาดถังบรรจุแก๊สออกซิเจนอุตสาหกรรม หรือการเพิ่มจำนวนถังบรรจุแก๊สออกซิเจนอุตสาหกรรม
3. เครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส ซึ่งใช้ในการศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์ มีระบบควบคุมอัตโนมัติ ในการควบคุมระหว่างการเผาไหม้ ซึ่งจะปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงแก๊ส อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านห้องเผาไหม้ ความเร็วของพัดลมโบลเวอร์ตามความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำขาเข้าเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส (Process Value) และอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้กับระบบของเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส (Set Value) ส่งผลให้ค่าของตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองมีความซับซ้อน และบันทึกข้อมูลได้ยาก
4. เครื่องมือวัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงแก๊ส ซึ่งในการศึกษานี้คือ โรตารีมิเตอร์ ขนาด 25 ลิตร ต่อนาที จึงมีข้อจำกัดในการวัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงอยู่ที่เครื่องมือวัดดังกล่าว ทำให้ไม่สามารถทดลอง โดยการตั้งค่าเครื่องทำน้ำร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 60 องศาเซลเซียสได้ เนื่องจากการทดลองตั้งค่าเครื่องทำน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส จะทำให้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเกินขอบเขตความสามารถในการวัดของอุปกรณ์วัดได้

เอกสารอ้างอิง

- (1) Onar, O. C.; Khaligh, A. Energy Sources. *Alternative Energy in Power Electronics* **2015**, 81–154. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416714-8.00002-0>.
- (2) Ang, T. Z.; Salem, M.; Kamarol, M.; Das, H. S.; Nazari, M. A.; Prabakaran, N. A Comprehensive Study of Renewable Energy Sources: Classifications, Challenges and Suggestions. *Energy Strategy Reviews* **2022**, 43. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>.
- (3) Felder, R. M.; Rousseau, R. W. Fuel and Combustion. In *Elementary Principles of Chemical Processes.*; R.R. Donnelly & Sons, 2005; pp 464–474.
- (4) Jin, R.; Zheng, M.; Yang, L.; Zhang, Q.; Fu, J.; Yang, R.; Liu, Q.; Shi, J.; Liu, G.; Jiang, G. Indoor Exposure to Products of Incomplete Combustion of Household Fuels in Rural Tibetan Plateau. *Environ Sci Technol* **2022**, 56 (8), 4711–4714. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.1C05298>.
- (5) Kongprasert, N.; Wangphanich, P.; Jutilarptavorn, A. Charcoal Briquettes from Madan Wood Waste as an Alternative Energy in Thailand. In *Procedia Manufacturing*; Elsevier B.V., 2019; Vol. 30, pp 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.019>.
- (6) Atkinson, M.; Barry, J.; Ciampini, M.; Greene, J.; Marker, A. Oxygen-Enriched Combustion. In *Improving Process Heating System Performance: A Sourcebook for Industry*; DOE and the Industrial Heating Equipment Association (IHEA): Washington, 2005.
- (7) Micari, M.; Varoon Agrawal, K. Oxygen Enrichment of Air: Performance Guidelines for Membranes Based on Techno-Economic Assessment. *J Memb Sci* **2022**, 641, 376–7388. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119883>.
- (8) Reinhardt, H.-J.; Obermeyer, H.-D.; Schreiner, B.; Wolf, S. *Oxygen Enrichment for Intensification of Air Oxidation Reactions.*; Linde GmbH: Kaufbeuren, 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (9) Cengel, Y. A.; Ghajar, A. J. Heat Transfer. In *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*; McGraw-Hill Education: New York, 2019; pp 2–2.
- (10) Cengel, Y. A.; Ghajar, A. J. Heat Conduction. In *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*; McGraw-Hill Education, 2019; pp 78–79.
- (11) Cengel, Y. A.; Ghajar, A. J. Fundamentals of Convection. In *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*; McGraw-Hill Education, 2019; pp 392–556.
- (12) Ming, X.; Borgnakke, D. S.; Campos, M. A.; Olszewski, P.; Atreya, A.; Borgnakke, C. Possibility of Combustion Furnace Operation with Oxygen-Enriched Gas from Nitrogen Generator. *American Council for an Energy-Efficient Economy* **2013**.
- (13) Wu, K. K.; Chang, Y. C.; Chen, C. H.; Chen, Y. Da. High-Efficiency Combustion of Natural Gas with 21-30% Oxygen-Enriched Air. *Fuel* **2010**, *89* (9), 2455–2462. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.02.002>.
- (14) Poskart, A.; Radomiak, H.; Niegodajew, P.; Zajemska, M.; Musiał, D. The Analysis of Nitrogen Oxides Formation during Oxygen-Enriched Combustion of Natural Gas. *Archives of Metallurgy and Materials* **2016**, *61* (4), 1925–1930. <https://doi.org/10.1515/amm-2016-0309>.
- (15) Madaeni, S. S.; Zereshki, S. Energy Consumption for Sugar Manufacturing. Part I: Evaporation versus Reverse Osmosis. *Energy Convers Manag* **2010**, *51* (6), 1270–1276. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.002>.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.
ผลการทดลองการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนในอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 1 การเผาไหม้ด้วยออกซิเจนในอากาศ

การทดลองครั้งที่ 1

ความดันเชื้อเพลิง 1.80 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

อุณหภูมิน้ำก่อนทำการทดลอง 29 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิน้ำหลังทำการทดลอง 48 องศาเซลเซียส

ปริมาตรน้ำในถังเก็บน้ำร้อน 207 ลิตร

ตารางที่ ก.1 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 1 ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (ลิตรต่อนาที)	เวลา (นาที)	อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (ลิตรต่อนาที)
0	13.0	14	4.3
1	12.6	15	3.9
2	11.0	16	2.9
3	9.8	17	2.6
4	9.1	18	2.4
5	8.0	19	2.1
6	7.3	20	1.8
7	6.6	21	1.5
8	5.9	22	1.2
9	5.7	23	1.0
10	5.4	24	0.7
11	5.2	25	0.4
12	4.9	26	0.1
13	4.6	27	0.0

พลังงานความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ 16.4 เมกะจูล

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ 0.73 กิโลกรัม

อัตราส่วนพลังงานความร้อนต่อปริมาณเชื้อเพลิง 22.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 2

ความดันเชื้อเพลิง 1.80 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

อุณหภูมิน้ำก่อนทำการทดลอง 28 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิน้ำหลังทำการทดลอง 51 องศาเซลเซียส

ปริมาตรน้ำ 207 ลิตร

ตารางที่ ก.2 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 1 ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (ลิตรต่อนาที)	เวลา (นาที)	อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (ลิตรต่อนาที)
0	13.0	15	4.6
1	13.3	16	4.4
2	12.1	17	4.3
3	10.8	18	4.1
4	9.8	19	3.8
5	9.0	20	3.2
6	8.5	21	2.8
7	8.1	22	2.4
8	7.6	23	2.0
9	7.0	24	1.7
10	6.3	25	1.3
11	5.8	26	1.0
12	5.4	27	0.6
13	5.0	28	0.3
14	4.8	29	0.0

พลังงานความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ เท่ากับ 19.8 เมกะจูล

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ 0.87 กิโลกรัม

อัตราส่วนพลังงานความร้อนต่อปริมาณเชื้อเพลิง 22.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 3

ความดันเชื้อเพลิง 2.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

อุณหภูมิน้ำก่อนทำการทดลอง 29 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิน้ำหลังทำการทดลอง 52 องศาเซลเซียส

ปริมาตรน้ำ 175 ลิตร

ตารางที่ ก.3 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 1 ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (ลิตรต่อนาที)	เวลา (นาที)	อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (ลิตรต่อนาที)
0	25.0	13	2.9
1	16.4	14	2.6
2	13.1	15	2.3
3	11.4	16	2.1
4	9.4	17	1.8
5	8.0	18	1.6
6	7.0	19	1.3
7	6.2	20	1.1
8	5.0	21	0.8
9	4.7	22	0.5
10	4.4	23	0.3
11	4.1	24	0.0
12	3.4		

พลังงานความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ เท่ากับ 16.8 เมกะจูล

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ 0.75 กิโลกรัม

อัตราส่วนพลังงานความร้อนต่อปริมาณเชื้อเพลิง 22.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัม



ภาคผนวก ข.

ผลการทดลองการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 2 การเผาไหม้ด้วยออกซิเจนเข้มข้น

การทดลองครั้งที่ 1

ความดันเชื้อเพลิง 1.80 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

อุณหภูมิน้ำก่อนทำการทดลอง 26 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิน้ำหลังทำการทดลอง 50 องศาเซลเซียส

ปริมาตรน้ำ 207 ลิตร

อัตราการไหลออกซิเจน 5.6 ลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข.1 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 2 ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (ลิตรต่อนาที)	เวลา (นาที)	อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (ลิตรต่อนาที)
0	25.0	17	4.2
1	13.6	18	4.0
2	13.0	19	3.7
3	11.7	20	3.5
4	10.6	21	3.2
5	9.7	22	3.9
6	8.4	23	3.1
7	8.0	24	2.7
8	7.5	25	2.4
9	6.8	26	2.0
10	6.3	27	1.7
11	5.8	28	1.4
12	5.3	29	1.0
13	6.0	30	0.7
14	9.9	31	0.4
15	4.8	32	0.0
16	4.5		

พลังงานความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ เท่ากับ 20.7 เมกะจูล

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ 0.92 กิโลกรัม

อัตราส่วนพลังงานความร้อนต่อปริมาณเชื้อเพลิง 22.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 2

ความดันเชื้อเพลิง 1.80 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

อุณหภูมิน้ำก่อนทำการทดลอง 29 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิน้ำหลังทำการทดลอง 49 องศาเซลเซียส

ปริมาตรน้ำ 207 ลิตร

อัตราการไหลออกซิเจน 22.2 ลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข.2 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 2 ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (ลิตรต่อนาที)	เวลา (นาที)	อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (ลิตรต่อนาที)
0	19.5	15	4.2
1	10.4	16	3.9
2	9.8	17	3.7
3	8.8	18	3.5
4	7.9	19	3.2
5	8.0	20	2.9
6	6.8	21	2.6
7	5.8	22	2.3
8	5.4	23	1.9
9	5.2	24	1.6
10	5.3	25	1.3
11	8.4	26	1.0
12	4.5	27	0.7
13	4.5	28	0.3
14	4.5	29	0.0

พลังงานความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ เท่ากับ 17.3 เมกะจูล

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ 0.72 กิโลกรัม

อัตราส่วนพลังงานความร้อนต่อปริมาณเชื้อเพลิง 23.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 3

ความดันเชื้อเพลิง 2.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

อุณหภูมิน้ำก่อนทำการทดลอง 31 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิน้ำหลังทำการทดลอง 49 องศาเซลเซียส

ปริมาตรน้ำ 207 ลิตร

อัตราการไหลออกซิเจน 51.3 ลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข.3 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 2 ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (ลิตรต่อนาที)	เวลา (นาที)	อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (ลิตรต่อนาที)
0	25.0	10	8.7
1	10.0	11	8.6
2	9.6	12	7.3
3	9.9	13	5.7
4	9.0	14	3.8
5	6.2	15	3.0
6	10.0	16	3.0
7	9.2	17	0.8
8	9.2	18	1.1
9	8.9	19	0.0

พลังงานความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ เท่ากับ 15.8 เมกะจูล

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ 0.65 กิโลกรัม

อัตราส่วนพลังงานความร้อนต่อปริมาณเชื้อเพลิง 24.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

การทดลองครั้งที่ 4

ความดันเชื้อเพลิง 2.00 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

อุณหภูมิน้ำก่อนทำการทดลอง 29 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิน้ำหลังทำการทดลอง 51 องศาเซลเซียส

ปริมาตรน้ำ 175 ลิตร

อัตราการไหลออกซิเจน 23.7 ลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข.4 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในการทดลองที่ 2 ครั้งที่ 4


เวลา (นาที)	อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (ลิตรต่อนาที)	เวลา (นาที)	อัตราการไหลของ เชื้อเพลิง (ลิตรต่อนาที)
0	25.0	15	3.7
1	7.8	16	3.4
2	7.5	17	3.2
3	7.0	18	2.9
4	6.7	19	2.6
5	6.2	20	2.2
6	5.5	21	1.9
7	5.3	22	1.6
8	5.2	23	1.3
9	5.0	24	0.9
10	4.9	25	0.6
11	4.7	26	0.3
12	4.6	27	1.0
13	4.4	28	1.1
14	4.0	29	0.0

พลังงานความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ เท่ากับ 16.0 เมกะจูล

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ 0.67 กิโลกรัม

อัตราส่วนพลังงานความร้อนต่อปริมาณเชื้อเพลิง 24.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค.
ผลการเปลี่ยนแปลงอนุมัติน้ำระหว่างการเผาไหม้


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกข้อมูลอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน ในการทดลองที่ 1 ครั้งที่ 1 ทุก 5 นาที ระหว่างการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนแก๊ส

ตารางที่ ค.1 อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนระหว่างการทดลองที่ 1 ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	อุณหภูมิน้ำในถัง (องศาเซลเซียส)
0	29.0
5	32.2
10	37.9
15	41.7
20	44.4
25	46.3
30	48.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง.
ตัวอย่างการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณการประหยัดเชื้อเพลิง

เพื่อเปรียบเทียบผลการลดลงของการใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ด้วยแก๊สออกซิเจนเข้มข้นเทียบกับการเผาไหม้ด้วยแก๊สออกซิเจนในอากาศ

จากข้อมูลการทดลองที่ 1 และ 2 แสดงให้เห็นว่า

ค่าพลังงานความร้อนต่อหน่วยเชื้อเพลิงซึ่งเผาไหม้ด้วยออกซิเจน 28 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเท่ากับ 24.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัมเชื้อเพลิง

ค่าพลังงานความร้อนต่อหน่วยเชื้อเพลิงซึ่งเผาไหม้ด้วยอากาศ มีค่าเท่ากับ 22.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัมเชื้อเพลิง

คำนวณค่าการประหยัดเชื้อเพลิงของการเผาไหม้ด้วยออกซิเจน 28 เปอร์เซ็นต์ ได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} \%FE &= \frac{Q_{\text{Fuel},28} - Q_{\text{Fuel},21}}{Q_{\text{Fuel},21}} \times 100 \\ &= \frac{24.4 - 22.3}{22.3} \times 100 \\ &= 9.4 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าการประหยัดเชื้อเพลิงของการเผาไหม้ด้วยออกซิเจน 28 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเท่ากับ 9.4 เปอร์เซ็นต์

การคำนวณต้นทุนการดำเนินการในการระเหยน้ำ 1 กิโลกรัมออกจากสารละลายน้ำตาลเพื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 10.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็น 21.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

ปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการเผาไหม้ด้วยแก๊สออกซิเจนเข้มข้น 28 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการระเหยน้ำ 1 กิโลกรัมออกจากสารละลายน้ำตาลเพื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 10.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็น 21.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวล มีค่าเท่ากับ 70 กรัม

ซึ่งต้องใช้แก๊สออกซิเจนอุตสาหกรรม 68 ลิตร เพื่อให้เพียงพอปรับความเข้มข้นและการเผาไหม้

ตารางที่ ง.1 ต้นทุนวัตถุดิบในการเผาไหม้


วัตถุดิบ	ราคา (บาท)	จำนวน	หน่วย
เชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลว	475	15	กิโลกรัม
แก๊สออกซิเจนอุตสาหกรรม	80	1.5	ลูกบาศก์เมตร

$$\begin{aligned}
 \text{ต้นทุนแก๊สออกซิเจน} &= \text{ปริมาณแก๊สออกซิเจน} \times \text{ต้นทุนต่อหน่วยแก๊สออกซิเจน} \\
 &= \frac{68 \text{ ลิตร}}{1500 \text{ ลิตร}} \left| \frac{80 \text{ บาท}}{1500 \text{ ลิตร}} \right. \\
 &= 3.63 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ต้นทุนเชื้อเพลิง} &= \text{ปริมาณเชื้อเพลิง} \times \text{ต้นทุนต่อหน่วยเชื้อเพลิง} \\
 &= \frac{70 \text{ กรัม}}{15 \text{ กิโลกรัม}} \left| \frac{475 \text{ บาท}}{15 \text{ กิโลกรัม}} \right| \left. \frac{1 \text{ กิโลกรัม}}{1000 \text{ กรัม}} \right. \\
 &= 2.22 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ต้นทุนการดำเนินการ} &= \text{ต้นทุนเชื้อเพลิง} + \text{ต้นทุนแก๊สออกซิเจน} \\
 &= 3.63 \text{ บาท} + 2.22 \text{ บาท} \\
 &= 5.85 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ต้นทุนการดำเนินการสำหรับสร้าง ในการระเหยน้ำ 1 กิโลกรัมออกจากสารละลายน้ำตาลเพื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 10.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็น 21.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวล



ภาคผนวก จ.
คำสั่งสำหรับการอ่านค่าอัตราการไหลด้วยโรตاميเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสั่งและฟังก์ชันภายในไฟล์สคริปต์สำหรับการอ่านอัตราการไหลด้วยโรตاميเตอร์ จากวิดีโอ บันทึกผลการทดลอง โดยใช้ OpenCV (Open source Computer Vision) ไลบรารีฟังก์ชันการเขียนโปรแกรมภาษาไพทอน

ฟังก์ชันสำหรับการนำเข้าข้อมูลวิดีโอ

```
import cv2
vid = r"VID.mp4"
cap = cv2.VideoCapture(vid)
```

ฟังก์ชันสำหรับการเก็บรายละเอียดวิดีโอ

```
frame_width = cap.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH)
frame_height = cap.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT)
fourcc = cv2.VideoWriter_fourcc(*'XVID')
done, CurrentFrame = cap.read()
done, NextFrame = cap.read()
```

ฟังก์ชันสำหรับจับความเคลื่อนไหวและตำแหน่งลูกลอยของโรตاميเตอร์

```
y_read = [ ]
frame = 0
while cap.isOpened():
    if done == True:
        diff = cv2.absdiff(CurrentFrame, NextFrame)
        gray = cv2.cvtColor(diff, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
        blurred_img = cv2.GaussianBlur(gray, (5, 5), 0)
        threshold, binary_img = cv2.threshold(blurred_img, 10, 255,
        cv2.THRESH_BINARY)
        dilated = cv2.dilate(binary_img, None, iterations=12)
        contours, hierarchy = cv2.findContours(dilated, cv2.RETR_TREE,
        cv2.CHAIN_APPROX_NONE)
        img_current = dilated[300:380, :]
        im = cv2.cvtColor(img_current, cv2.COLOR_BGR2RGB)
        y_not_detect = False
        for contour in contours:
            y_not_detect = True
            (x, y, w, h) = cv2.boundingRect(contour)
            if cv2.contourArea(contour) < 1000:
                y_not_detect = True
                continue
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if y+(h/2) >370:
    continue
y_not_detect = False
cv2.rectangle(CurrentFrame, (x, y), (x+w, y+h), (0, 255, 0), 2)
cv2.putText(CurrentFrame, str(y+(h/2)), (x, y-10),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.7, (0,255,0), 2)
y_read.append(y+(h/2))
print(y+(h/2), frame)
if(not(y_not_detect)):
    y_read.append(y_read[-1])
cv2.imshow("frame", CurrentFrame)
frame+=1
CurrentFrame = NextFrame
done, NextFrame = cap.read()
if cv2.waitKey(30) == 27:
    break
else: break
cv2.destroyAllWindows()
cap.release()

```

ฟังก์ชันสำหรับส่งออกข้อมูลวิดีโอซึ่งแสดงตำแหน่งของลูกกลอยของโรตารี

```

print(max(y_read), " ", min(y_read), " ",frame)
import pandas as pd
arr_read = pd.DataFrame(y_read).to_csv("read_y.csv")

```