

การทดลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของถ่านหินผสม
ชีวมวลทอร์รีไฟต์ในเตาเผาอุตสาหกรรม

EXPERIMENTAL AND ANALYSIS OF THE COMBUSTION EFFICIENCY OF
BITUMINOUS BLENDED WITH TORREFIED BIOMASS IN AN INDUSTRIAL
FURNACE



ธัญพิสิษฐ์ คงศรี
ประภัสสร ปสันตา
ราเชน สิ้นสันเทียะ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของถ่านหินผสม
ชีวมวลทอร์รีไฟต์ในเตาเผาอุตสาหกรรม

EXPERIMENTAL AND ANALYSIS OF THE COMBUSTION EFFICIENCY OF
BITUMINOUS BLENDED WITH TORREFIED BIOMASS IN AN INDUSTRIAL
FURNACE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPERIMENTAL AND ANALYSIS OF THE COMBUSTION EFFICIENCY OF
BITUMINOUS BLENDED WITH TORREFIED BIOMASS IN AN INDUSTRIAL
FURNACE



TUNPISIT KONGSRI
PRAPHATSORN PASANTA
RACHEN SINSANTHIA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2566

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การทดลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของถ่านหินผสมชีวมวลทอร์รีไฟต์ในเตาเผา
อุตสาหกรรม

EXPERIMENTAL AND ANALYSIS OF THE COMBUSTION EFFICIENCY OF BITUMINOUS
BLENDED WITH TORREFIED BIOMASS IN AN INDUSTRIAL FURNACE

ผู้จัดทำ

1. นายธัญพิสิษฐ์ คงศรี รหัสประจำตัว 63010458
2. นางสาวประภัสสร ปลันตา รหัสประจำตัว 63010568
3. นายราเชน สิ้นสันเทียะ รหัสประจำตัว 63010820



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศ.ดร.จรรูวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของถ่านหินผสมชีวมวลทอร์รีไฟด์ในเตาเผาอุตสาหกรรม

นายฉัญพิสิษฐ์	คงศรี	63010458
นางสาวประภัสสร	ปลันตา	63010568
นายราเชน	สินสันเทียะ	63010820
ศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2566

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดผงระหว่างไม้เบญจพรรณทอร์รีไฟด์ (Torrefied Biomass: T) กับเชื้อเพลิงถ่านหิน (Bituminou: C) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยศึกษาด้วยอัตราส่วนเชื้อเพลิงผสมระหว่างเชื้อเพลิงถ่านหินกับไม้เบญจพรรณทอร์รีไฟด์ ที่อัตราส่วน C90:T10 และ C80:T20 โดยมวล เสริมด้วย การจำลองการเผาไหม้ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Computation Fluid Dynamics) จำลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างเชื้อเพลิงถ่านหินกับไม้เบญจพรรณทอร์รีไฟด์ การทดลองทำให้สามารถทราบการกระจายอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ และการปลดปล่อยมลพิษ ในขณะที่ผลการจำลองแสดงปริมาณของสารระเหยที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ช่วย และผลสนามการไหลภายในเตาเผาอุตสาหกรรม พร้อมทั้งผลการจำลองของอุณหภูมิเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ในขณะที่ความเข้มข้นของออกซิเจนภายในเตา และการเคลื่อนที่ของอนุภาคของถ่านชาร์ ได้จากการจำลอง

จากการทดลอง พบว่าเชื้อเพลิงผสม C90:T10 และ C80:T20 โดยมวล มีอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยเฉลี่ย 1050-1150 °C และ 950-1050 °C ตามลำดับ จากผลของมลพิษที่ได้จากการวัดแก๊สไอเสียพบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ของกรณี C90:T10 วัดได้ 119 ppm และกรณีของ C80:T20 ที่วัดได้ 117 ppm ซึ่งผ่านมาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด คือ 690 ppm ทั้งสองกรณี และผลของปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) เฉลี่ยของกรณี C90:T10 วัดได้ 309 ppm และของกรณี C80:T20 วัดได้ 292 ppm ซึ่งเกินมาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้ คือ 200 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPERIMENTAL AND ANALYSIS OF THE COMBUSTION EFFICIENCY OF BITUMINOUS
BLENDED WITH TORREFIED BIOMASS IN AN INDUSTRIAL FURNACE

Tunpisit Kongsri 63010458

Praphatsorn Pasanta 63010568

Rachen Sinsanthia 63010820

Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk Advisor

Year 2023

ABSTRACT

This thesis concerned with experimental study on the combustion behavior of pulverized blended fuel between torrefied woodchip (T) and bituminous (C) at different ratios. The ratio of mixed fuel between torrefied woodchip and bituminous was at C90:T10 and C80:T20 by mass. A mathematical model (Computation Fluid Dynamics) was used to simulate the combustion of a mixture of torrefied woodchip and bituminous. The experiment yielded temperature distribution and pollutant emission while CFD provided the volatile concentration and the flow field inside an industrial furnace. The simulated temperatures were then compared with the measured result. Oxygen concentration within industrial furnaces and the movement of char particles were also simulated.

From an experiment it was found that the C90:T10 and C80:T20 fuel had average combustion chamber temperatures of 1050-1150 °C and 950-1050 °C, respectively, from the results of pollution obtained from the measurement. The amount of carbon monoxide (CO) gas in the case of C90:T10 was measured at 119 ppm, and in the case of C80:T20 was measured at 117 ppm, which passed the standard set by Pollution Management of Thailand, which is 690 ppm in both cases. Oxides of nitrogen (NO_x) in the C90:T10 case were measured at 309 ppm, and in the C80:T20 was measured at 292 ppm, which exceeds the standard set by Pollution Management of Thailand, which is 200 ppm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะการให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาจาก ศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบคุณและรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งในความอนุเคราะห์ต่อผู้วิจัย

ขอขอบคุณ นายอัครพล ปิมวงศ์ นักศึกษาปริญญาโท ผู้ทุ่มเทร่างกาย แรงใจ ให้ความรู้ ความช่วยเหลือทั้งด้านทฤษฎีและด้านการทดลอง และนักศึกษาปริญญาตรีซึ่งได้ทำการทดลองร่วมกัน ส่งผลให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ดี

ขอขอบคุณบิดา มารดา ผู้ปกครอง ที่อบรมสั่งสอน เลี้ยงดูเสมอมา รวมทั้งให้ทุนทรัพย์สนับสนุนงานวิจัย และเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัย และขอขอบคุณผู้สนับสนุนปริญญาานิพนธ์ทุก ๆ ท่านที่มีได้เอื้อย่นาม ณาโอกาสนี้

นายฉัญพิสิษฐ์ คงศรี
นางสาวประภัสสร ปสันตา
นายราเชน สิ้นสันเทียะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญตาราง	viii
สารบัญภาพ	ix
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	3
บทที่ 2 วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกระบวนการเผาไหม้ในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น.....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
3.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับชีวมวล	6
3.1.1 สมบัติทางเคมีของชีวมวล.....	6
3.1.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยการประมาณค่า (Proximate analysis).....	6
3.1.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยละเอียด (Ultimate analysis)	7
3.1.1.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อนของชีวมวล	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 ขนาดของชีวมวล.....	9
3.1.3 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง.....	9
3.1.4 ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล	10
3.1.5 ทอรรีแฟคชัน	10
3.1.5.1 กระบวนการทอรรีแฟคชัน.....	11
3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการเผาไหม้	12
3.2.1 กระบวนการเผาไหม้	12
3.2.2 สตอยคิโอเมตรีของการเผาไหม้	13
3.2.3 อัตราส่วนสมมูล	13
3.2.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้.....	14
3.3 การปลดปล่อยมลพิษ.....	14
3.3.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂).....	14
3.3.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO _x).....	14
3.3.3 ไนตรัสออกไซด์ (N ₂ O).....	16
3.3.4 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO).....	16
3.3.5 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO _x).....	17
3.4 การชดเชยอุณหภูมิที่ได้รับผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อน	17
3.5 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	19
3.5.1 ข้อได้เปรียบของ CFD เมื่อเทียบกับการทดลอง.....	19
3.5.2 ปัญหาที่เกิดจากการใช้ CFD	19
3.5.3 ขั้นตอนการคำนวณด้วยโปรแกรมทางด้าน CFD	19
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย	21
4.1 เตาเผาอุตสาหกรรมชนิดหัวเผาแบบฝุ่น (Pulverized burner).....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1 อุปกรณ์ในเตาเผาอุตสาหกรรมชนิดหัวเผาแบบฝุ่น	23
4.2 วิธีการทดลอง	26
4.2.1 วิธีการทดลองในเตาเผาอุตสาหกรรมชนิดหัวเผาแบบฝุ่น	26
4.2.1.1 การเตรียมระบบควบคุมแก๊ส	27
4.2.2 การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง.....	28
4.2.2.1 อัตราการไหลของเชื้อเพลิง	28
4.2.2.2 เชื้อเพลิงสำหรับการทดลอง.....	29
4.2.3 เงื่อนไขเริ่มต้นของการจำลองทางคณิตศาสตร์.....	31
4.2.3.1 โครงสร้าง และจำนวนกริด (Geometry and mesh structure)	31
4.2.3.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	32
4.3 การชดเชยอุณหภูมิที่ได้รับผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อน	34
บทที่ 5 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	36
5.1 ผลการจำลองการเผาไหม้ทางคณิตศาสตร์ของเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์.....	36
5.1.1 ผลการจำลองของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเตาเผาอุตสาหกรรม	37
5.1.2 ผลการจำลองของสัดส่วนเชิงมวลของปริมาณสารระเหย	38
5.1.3 ผลการจำลองปริมาณสัดส่วนเชิงมวลของออกซิเจน.....	39
5.1.4 ผลการจำลองสนามการไหล	40
5.1.5 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคคาร์บอน	41
5.2 ผลการทดลองจากหัวเผา	42
5.2.1 ผลการเผาไหม้ที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 เปอร์เซนต์โดยมวล.....	42
5.2.2 ผลการเผาไหม้ที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 80:20 เปอร์เซนต์โดยมวล.....	44
5.2.3 ผลการชดเชยผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อน	46
5.2.4 การเปรียบเทียบผลการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ที่สัดส่วนต่างกัน.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 เปรียบเทียบการเผาไหม้ระหว่างผลการทดลองและผลการจำลอง.....	49
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	50
6.1 สรุปผลการจำลองทางคณิตศาสตร์.....	50
6.2 สรุปผลการเผาไหม้จริงจากชุดทดลอง.....	50
6.3 ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารอ้างอิง.....	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยประมาณและโดยละเอียดของชีวมวล	7
ตารางที่ 4.1 แผนการดำเนินงาน.....	21
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยละเอียดของเชื้อเพลิงเดี่ยวแบบ Dry Basis	29
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยละเอียดของเชื้อเพลิงผสมแบบ Dry Basis	29
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเมื่อผสมเชื้อเพลิง	30
ตารางที่ 4.5 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้ง 2 ส่วน	30
ตารางที่ 4.6 ขอบเขตของการจำลอง (boundary condition)	32
ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติและการแยกธาตุของเชื้อเพลิงผสมที่ใช้ในการจำลอง (species).....	32
ตารางที่ 4.8 มวลของเชื้อเพลิงและความถี่กระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	33
ตารางที่ 5.1 อุณหภูมิที่เซ็นเซอร์วัดได้ตามแนวแกนของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 เปอร์เซนต์โดยมวล	42
ตารางที่ 5.2 อุณหภูมิที่เซ็นเซอร์วัดได้ตามแนวรัศมีของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 เปอร์เซนต์โดยมวล	42
ตารางที่ 5.3 อุณหภูมิที่เซ็นเซอร์วัดได้ตามแนวแกนของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 80:20 เปอร์เซนต์โดยมวล	44
ตารางที่ 5.4 อุณหภูมิที่เซ็นเซอร์วัดได้ตามแนวรัศมีของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 80:20 เปอร์เซนต์โดยมวล	44
ตารางที่ 5.5 การชดเชยผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อนของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 เปอร์เซนต์โดยมวล	46
ตารางที่ 5.6 การชดเชยผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อนของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 80:20 เปอร์เซนต์โดยมวล	46
ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบอุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 และ 80:20 เปอร์เซนต์โดยมวล	47
ตารางที่ 5.8 ตารางแสดงค่าแก๊สไอเสียที่วัดได้จากการทดลอง	47
ตารางที่ 5.9 ตารางแสดงผลแก๊สไอเสีย โดยผ่านการปรับค่าซึ่งอ้างอิงที่ปริมาณออกซิเจน 7%.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 3.1 กระบวนการทอรีรีแฟคชัน.....	12
ภาพที่ 3.2 สมการสหสัมพันธ์หาค่าจำนวน Nusselt สำหรับทรงกระบอก	18
ภาพที่ 4.1 โซโลเก็บเชื้อเพลิงก่อนเข้าเครื่องบด.....	23
ภาพที่ 4.2 เครื่องบดเชื้อเพลิงชนิด Hammer mill.....	23
ภาพที่ 4.3 พัฒมลำเลียงเชื้อเพลิงที่ผ่านการบดแล้ว	24
ภาพที่ 4.4 ถังดักฝุ่นจากการลำเลียงเชื้อเพลิง และ โซโลเก็บเชื้อเพลิงที่ผ่านการบดแล้ว	24
ภาพที่ 4.5 ห้องเผาไหม้ช่วย	24
ภาพที่ 4.6 ห้องเผาไหม้หลัก.....	25
ภาพที่ 4.7 ท่อลำเลียงซีเมนต์.....	25
ภาพที่ 4.8 หอบำบัดอากาศแบบเปียก (Wet scrubber)	25
ภาพที่ 4.9 ท่อไอเสีย.....	26
ภาพที่ 4.10 ระบบบำบัดน้ำเสีย	26
ภาพที่ 4.11 การผสมเชื้อเพลิงสำหรับการทดลอง	27
ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลของเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ 1 ชั่วโมง และความถี่ กระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์.....	28
ภาพที่ 4.13 โครงสร้างกริดของแบบจำลอง.....	31
ภาพที่ 4.14 สมการสหสัมพันธ์หาค่าจำนวน Nusselt สำหรับทรงกระบอก.....	34
ภาพที่ 5.1 แสดงการอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเตาเผาอุตสาหกรรม	37
ภาพที่ 5.2 ปริมาณของสารระเหยที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ช่วย	38
ภาพที่ 5.3 แสดงปริมาณออกซิเจนในห้องเผาไหม้ของเตาเผาอุตสาหกรรม	39
ภาพที่ 5.4 แสดงสนามการไหลภายในเตาเผาอุตสาหกรรม	40
ภาพที่ 5.5 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคของซารินในเตาเผาอุตสาหกรรม	41
ภาพที่ 5.6 อุณหภูมิจากการจำลองเทียบกับที่เซ็นเซอร์วัดได้ของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วน ผสมถ่านหินกับทอรีรีไฟด์ 90:10 เปอร์เซนต์โดยมวล	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 5.7 อุณหภูมิจากการจำลองเทียบกับที่เซ็นเซอร์วัดได้ของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล	45
ภาพที่ 5.8 แสดงการปล่อยแก๊สไอเสียของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 และ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล	47
ภาพที่ 5.9 แสดงการปล่อยแก๊สไอเสียของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 และ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล เมื่อผ่านการปรับค่าซึ่งอ้างอิงที่ปริมาณออกซิเจน 7%	48
ภาพที่ 5.10 อุณหภูมิจากการจำลองและการทดลองของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 และ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล	49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีเป้าหมายในการลดการใช้พลังงานจากฟอสซิล เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และ ก๊าซธรรมชาติ โดยเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกต่อการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายที่ร้อยละ 30 ภายในปี พ.ศ. 2580 (AEDP2018) [1] พบว่าช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนพฤษภาคม ของปี 2566 ประเทศไทย มีการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย 36,795 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เป็นพลังงานทดแทนจำนวน 6,367 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.3 จากปี 2565 แบ่งเป็นการใช้การใช้เชื้อเพลิงชีวภาพจากพลังงานทดแทนปริมาณ 870 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ การใช้พลังงานทดแทนในการผลิตไฟฟ้าปริมาณ 1,597 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ และการใช้พลังงานความร้อนจากพลังงานทดแทนปริมาณ 3,901 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ซึ่งมีการใช้ชีวมวลในการผลิตพลังงานความร้อนปริมาณมากถึง 3,558 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ จากการใช้พลังงานทดแทนที่เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าประเทศไทยให้ความสำคัญกับพลังงานทดแทน โดยเฉพาะการใช้ชีวมวล ซึ่งมีศักยภาพที่จะเป็นหนึ่งในพลังงานหลักของประเทศไทย

พลังงานชีวมวล เป็นการผลิตพลังงานด้วย วัสดุชีวมวล และอินทรีย์วัตถุ ที่ได้จากพืช และสัตว์ เช่น ผลผลิต และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ไม้และเศษไม้ หรือของเหลือจากชุมชน และภาคอุตสาหกรรม เช่น แกลบ ชานอ้อย เศษไม้ กากปาล์ม กากมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด กาบและกะลามะพร้าว เป็นต้น กระบวนการแปรรูปชีวมวล ไปเป็นพลังงาน สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น การเผาไหม้โดยตรง (Combustion) การนำชีวมวลไปเผา จะได้ความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ความร้อนที่ได้จากการเผา (Heating Value) สามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำ หรือไปผลิตไฟฟ้าต่อไป แต่ด้วยชีวมวล มีความแตกต่างหลากหลายชนิด ที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น ค่าความชื้นที่ส่งผลต่อค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้โดยตรง ถ้าค่าความชื้นมาก จะทำให้ค่าความร้อนที่ได้น้อยลง ทำให้เกิดการพัฒนาระบบการที่จะเพิ่มค่าความร้อนให้แก่ชีวมวล คือ กระบวนการทอรรีฟิเคชัน (Torrefaction process) ที่จะช่วยลดค่าความชื้นในชีวมวล เพื่อให้ได้ค่าความร้อนจากการเผาไหม้เทียบเท่าเชื้อเพลิงจากถ่านหินมากที่สุด จากกระบวนการดังกล่าวจะได้เป็น ชีวมวลทอรรีไฟด์ (Torrefied biomass) ที่มีค่าความชื้นต่ำ และให้ค่าความร้อนจากการเผาไหม้สูง แต่ต้นทุนการผลิตชีวมวลทอรรีไฟด์ ยังคงมีราคาสูงกว่าชีวมวลมาก ในปัจจุบันยังคงมีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตชีวมวลทอรรีไฟด์ให้ค่าความร้อนจากการเผาไหม้สูงและต้นทุนในการผลิตที่ถูกลง

ดังนั้นในปฏิญานิพนธ์นี้ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลคือ เบญจพรรณทอรรีไฟต์ (ชีวมวลผ่านกระบวนการทอรรีไฟต์) และเชื้อเพลิงถ่านหิน เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ของการผสมเบญจพรรณทอไฟต์กับเชื้อเพลิงถ่านหิน ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และเป็นการลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิล ที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อนที่ส่งผลกระทบต่อโลกมากขึ้นทุกวัน โดยการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างเชื้อเพลิงถ่านหินกับเบญจพรรณทอรรีไฟต์ ที่อัตราส่วน C90:T10 และ C80:T20 โดยมวล จากนั้นนำเชื้อเพลิงผสมเชื้อเพลิงถ่านหินกับเบญจพรรณทอรรีไฟต์ที่อัตราส่วน C90:T10 และ C80:T20 โดยมวล ทำการเผาในเตาเผาด้วยหัวเผาชนิดฝุ่น (Pulverized burner) และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Computation Fluid Dynamics) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในเตารวมถึง การไหลของอากาศ และสัดส่วนอากาศที่เหมาะสมในการป้อน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในห้องเผาไหม้

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

1. เพื่อศึกษาระบบและการทำงานของเตาเผาอุตสาหกรรม
2. เพื่อศึกษาอุณหภูมิของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมไม้เบญจพรรณทอรรีไฟต์และเชื้อเพลิงถ่านหินที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยมวล ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในห้องเผาไหม้ ด้วยการทดลอง
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมไม้เบญจพรรณทอรรีไฟต์และเชื้อเพลิงถ่านหินด้วยแบบจำลอง (CFD)

1.3 สมมติฐานการศึกษา

1. อัตราส่วนของเบญจพรรณทอรรีไฟต์ในปริมาณมากจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น
2. การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (CFD) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ในเตาเผาแบบชนิดฝุ่น (pulverized burner) จะช่วยในการอธิบายปรากฏการณ์การเผาไหม้ในรายละเอียดที่ไม่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือวัด

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1. นำคุณสมบัติของเชื้อเพลิงมาใช้จำลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงด้วยโปรแกรมทาง CFD เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นถ่านหิน และเชื้อเพลิงชีวมวลเบญจพรรณทอรรีไฟต์
2. เปรียบเทียบอุณหภูมิการเผาไหม้เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมเชื้อเพลิง ทั้งจากการวัดที่เตาเผาและการจำลองด้วยโปรแกรมทาง CFD โดยโปรแกรมทาง CFD ที่ใช้คือโปรแกรม ANSYS และการเผาไหม้จริงจะใช้เตาเผาและหัวพ่นไฟชนิดที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลผงระดับห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาการทำงานและการควบคุมเตาเผาอุตสาหกรรม
2. ศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงถ่านหิน และชีวมวลทอร์รีไฟด์
3. วิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์ที่เลือกใช้
4. นำคุณสมบัติมาทำการจำลองเพื่อวิเคราะห์การเผาไหม้และการไหลด้วยโปรแกรมทาง CFD
5. หาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมเชื้อเพลิงระหว่างเชื้อเพลิงถ่านหินและชีวมวลทอร์รีไฟด์
6. ทดลองการเผาไหม้กับเตาเผาอุตสาหกรรมด้วยเชื้อเพลิงผสม
7. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดที่เตาเผาและการจำลองด้วยโปรแกรมทาง CFD
8. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาไหม้ในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น (Pulverized Burner) ที่นำมาสังเกตพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง รวมถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดฝุ่น (CFD)

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกระบวนการเผาไหม้ในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น (Pulverized Burner)

คณิตกร ทรงแสงธรรม และคณะ [2] ศึกษาการเปรียบเทียบพฤติกรรมทางความร้อน ปริมาณความเข้มข้นของไอเสีย และแนวโน้มการก่อตัวของสแลกกิ้งและฟาวลิง โดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินซับ บิทูมินัสกับกะลาปาล์มในอัตราส่วน 100:0 และ 90:10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยทำการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งบดละเอียดที่อัตรา 300 กิโลวัตต์ ใช้อากาศส่วนเกิน 45% โดยแบ่งอากาศออกเป็นสามส่วนในอัตราส่วน 25:65:10 ผลการทดลองพบว่าการกระจายตัวในห้องเผาไหม้ของการทดลองเชื้อเพลิงผสมมีอุณหภูมิลดลง ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนนอกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์จากไอเสียเพิ่มขึ้นมา 65% และ 33% ตามลำดับ และการใช้ถ่านหินถ่านหินที่มีระดับแนวโน้มการเกิดปัญหาด้านสแลกกิ้งสูง เมื่อนำมาผสมกับกะลาปาล์มแล้ว ค่าดัชนีมีแนวโน้มที่จะลดระดับลงมาอยู่ในระดับกลางในขณะเดียวกัน ถ้าถ่านหินมีค่าดัชนี fouling index สูง เมื่อผสมกับกะลาปาล์มแล้วค่าดัชนีมีแนวโน้มที่จะลดระดับลงมาที่ระดับกลางได้ การเพิ่มสัดส่วนของกะลาปาล์มในเชื้อเพลิงผสมจึงมีโอกาที่จะช่วยลดแนวโน้มการเกิดปัญหาด้านสแลกกิ้งและฟาวลิงได้ขึ้นกับคุณสมบัติของถ่านหินและกะลาปาล์มที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

รังสินันท์ ณ รังสี [3] ศึกษาการปรับปรุงสมรรถนะหัวพ่นเชื้อเพลิงผงโดยการเพิ่มพื้นที่ ช่องการไหลของอากาศปฐมภูมิเป็น 2.25 เท่าของหัวพ่นแบบดั้งเดิม และการเผาไหม้ชีวมวลทอร์รีไฟต์ โดยใช้ชุดทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์การเผาไหม้ กำหนดให้เงื่อนไขของการทดลองที่กำลังความร้อนเทียบเท่า 300 กิโลวัตต์ อากาศส่วนเกินทางทฤษฎี 15 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนอากาศปฐมภูมิ : อากาศทุติยภูมิ : อากาศตติยภูมิ 25 : 65 : 10 เชื้อเพลิงชีวมวล และชีวมวลทอร์ไฟต์ที่บดผ่านตะแกรง 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร ผลการจำลองพบว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทำให้เกิดสนามเวกเตอร์การไหลของการเผาไหม้กระจายออกสู่ผนังเตาด้วยความเร็วสูงของการหมุนควงส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนและคลุกเคล้ากันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงผงที่ดีกว่า รวมถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงดีกว่าการเผาไหม้โดยใช้หัวพ่นแบบดั้งเดิม สำหรับผลการทดลองเผาไหม้จริงพบว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบใหม่ทำให้เกิดการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่ดีกว่าการใช้หัวพ่นเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมโดยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้จากการเผาไหม้ด้วยหัวพ่นเชื้อเพลิงแบบเดิมกับแบบใหม่มีค่า 28.5, 106.6 PPM ตามลำดับ และออกไซด์ของไนโตรเจนที่วัดไม่ต่างกันเท่าไร ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุที่แบล็กเอน์ฮาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จากการเผาไหม้ด้วยหัวฟันท่อเชื้อเพลิงแบบเดิมและแบบใหม่มีค่า 245.8, 214.4 PPM ตามลำดับ นอกจากนี้การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่ในอนาคตที่มีค่าความร้อนต่อหน่วยมวลสูงกว่าชีวมวลด้วยหัวฟันท่อเชื้อเพลิงแบบใหม่

คีต สร้อยทอง [4] ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอร์ไฟด์กับไม้ยางพาราในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น โดยเริ่มศึกษาจากเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (TGA) เพื่อหาอุณหภูมิติดไฟ อุณหภูมิที่เกิดการเผาไหม้สูงสุด (อุณหภูมิที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักมากที่สุด) รวมถึงอุณหภูมิที่สิ้นสุดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอร์ไฟด์ (Torrefied Bamboo:TB) ไม้ยางพารา (Rubber Wood: RW) และเชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอร์ไฟด์กับไม้ยางพาราที่อัตราส่วน TB90:RW10 TB80:RW20 และTB70:RW30 ตามลำดับ พบว่าเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอร์ไฟด์ ไม้ยางพารา และเชื้อเพลิงผสมที่อัตราส่วนTB90:RW10 TB80:RW20 และTB70:RW30 มีอุณหภูมิติดอยู่ที่ 262.4 270.6 267.2 265.2 และ 263.5 องศาเซลเซียสตามลำดับ ต่อมาได้ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอร์ไฟด์กับไม้ยางพาราที่สัดส่วนผสม TB70:RW30 และ TB50:RW50 เพื่อดูผลของสนามการไหล การกระจายอุณหภูมิ สัดส่วนโดยมวลของสารระเหย สัดส่วนโดยมวลของออกไซด์ ซัลเฟอร์ และสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน ที่แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งที่เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ ขึ้นในห้องเผาไหม้ ซึ่งประกอบไปด้วยการปลดปล่อยสารระเหย การเผาไหม้การก่อเกิดมลพิษ ต่อมาได้ทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 และ TB50:RW50 ในเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดฝุ่น โดยสามารถเก็บผลของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วย ห้องเผาไหม้หลักและปริมาณมลพิษจากแก๊สไอเสีย พบว่าเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 สามารถลดระยะห่างของฐานเปลวไฟกับหัวฟันท่อเชื้อเพลิง ซึ่งส่งผลให้ห้องเผาไหม้ช่วยมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 โดยอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิง TB70:RW30 และTB50:RW50 อยู่ที่ 950 และ 1050 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากผลของมลพิษที่ได้จากการวัดแก๊สไอเสียพบว่า CO ของกรณี TB50:RW50 วัดได้ 175 PPM ซึ่งมากกว่ากรณีของ TB70:RW30 ที่วัดได้ 80 PPM และผลของ NO_x จากแก๊สไอเสียในทั้ง 2 กรณีเชื้อเพลิงผสมวัดค่าได้ใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 300 PPM ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ

Jun Li และคณะ [5] ศึกษาการเผาไหม้ร่วมกันของเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์ และถ่านหิน โดยเชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์นี้มีความหนาแน่นของพลังงานสูง มีความสามารถในการไหล และไหลไม่เป็นรูปแบบได้ดีกว่าถ่านหิน กระบวนการทอร์รีไฟด์จะทำให้คุณสมบัติทางเคมี และทางกายภาพของมวลชีวมวลดิบให้ใกล้เคียงกับถ่านหินบิทูมินัส ซึ่งช่วยให้สามารถนำไปใช้ร่วมกับอัตราส่วนการทดแทนชีวมวลในเครื่องกำเนิดไอน้ำที่ใช้ถ่านหินที่มีอยู่เดิมโดยไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนอะไหล่จนเกินไป งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเผาไหม้แตกต่างกัน 5 กรณี ได้แก่ ถ่านหิน 100% ชีวมวล 25% ชีวมวล 50% ชีวมวล 75% และชีวมวล 100% พบว่าการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟด์ไม่ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และความผันผวนของภาระของเครื่องกำเนิดไอน้ำมีค่าน้อย และปริมาณมลพิษลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงชีวมวล

ไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับชีวมวล [6,7]

ชีวมวล (Biomass) คือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นพลังงานได้ เช่น พืช เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร กากจากการผลิตในกระบวนการอุตสาหกรรมการเกษตร

การนำชีวมวลมาใช้ในการผลิตพลังงาน จำเป็นต้องคำนึงถึงสมบัติและลักษณะทางกายภาพมาช่วยพิจารณา เช่น ขนาด ความหนาแน่น ความชื้น เพื่อใช้ในการคัดเลือกชีวมวลที่เหมาะสมกับการใช้งาน

3.1.1 สมบัติทางเคมีของชีวมวล

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของชีวมวล สามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ

3.1.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยการประมาณค่า (Proximate analysis)

วิธีนี้วิเคราะห์จากปริมาณที่เป็นองค์ประกอบของชีวมวล 4 ปริมาณ ได้แก่

- 1.) ความชื้น (Moisture) คือปริมาณน้ำที่อยู่ในชีวมวล ปกติมีความชื้นสูงเนื่องจากเป็นเป็นผลผลิตทางการเกษตร โดยชีวมวลสำหรับเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ควรมีความชื้นไม่เกิน 50%
- 2.) คาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) โครงสร้างโมเลกุลของชีวมวลประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนมาก ชีวมวลที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงที่น้อย จะมีอุณหภูมิจุดติดไฟต่ำ และความเร็วในการติดไฟช้าเนื่องจากมีความชื้นมาก
- 3.) สารระเหย (Volatile Matter) คือส่วนที่เผาไหม้ง่าย ชีวมวลที่มีค่า Volatile Matter สูงจะทำให้ติดไฟได้ง่าย
- 4.) ขี้เถ้า (Ash) เป็นส่วนประกอบอนินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์สมบูรณ์ ชีวมวลส่วนใหญ่มีขี้เถ้า 1-3 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นแกลบและฟางจะมีขี้เถ้า 10-20 เปอร์เซ็นต์ การมีขี้เถ้าจำนวนมากจะลดประสิทธิภาพในการเผาไหม้ จึงต้องมีอุปกรณ์ที่ช่วยพาขี้เถ้าออกจากห้องเผาไหม้

การหาค่าคาร์บอนคงที่ที่สามารถหาได้หากทราบปริมาณของความชื้น สารระเหย และขี้เถ้า ดังที่แสดงในสมการที่ 3.1

$$FC=1-MC-VM-Ash \quad (3.1)$$

เมื่อ FC คือ ปริมาณคาร์บอนคงที่

MC คือ ปริมาณความชื้น

VM คือ ปริมาณสารระเหย

Ash คือ ปริมาณขี้เถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รวมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยละเอียด (Ultimate analysis)

วิธีวิเคราะห์โดยแยกปริมาณธาตุในชีวมวล ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยละเอียดนี้จะรายงานแบบปลอดความชื้นและซัลเฟอร์ ตัวอย่างการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณและโดยละเอียดของของเชื้อเพลิงบางชนิดในประเทศไทยและต่างประเทศ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณและโดยละเอียดของชีวมวล [2]

ชีวมวล (ประเทศ)	องค์ประกอบโดยประมาณ (% น้ำหนักแบบสด)				องค์ประกอบโดยละเอียด (% น้ำหนักปลอดซัลเฟอร์และความชื้น)				
	MC	VM	FC	Ash	C	H	O	N	S
แกลบ (ไทย)	10.30	55.60	20.10	14.00	50.20	6.01	42.80	0.91	0.08
ทะลายปาล์ม (ไทย)	38.40	40.71	17.50	3.39	43.07	5.71	49.74	0.32	1.16
ใยผลปาล์ม (ไทย)	35.00	48.40	12.10	4.50	54.90	6.70	36.80	1.30	0.10
กะลาปาล์ม (ไทย)	10.40	62.70	21.90	1.70	56.80	6.00	35.70	0.20	0.06
เปลือกไม้ (สวีเดน)	50.00	N/A	N/A	6.50	51.88	6.10	41.71	0.31	N/A
กะลามะพร้าว (อินเดีย)	6.50	48.15	38.85	23.80	53.21	6.20	39.25	1.28	0.05
MSW (อังกฤษ)	36.00	32.00	8.20	11.05	50.20	5.80	42.30	0.97	0.73
RDF (อังกฤษ)	20.00	60.77	8.18	18.70	52.28	5.07	33.04	1.42	0.88
RDF (อิตาลี)	1.90	69.90	9.80	7.04	55.79	7.93	36.37	N/A	N/A
ฟางข้าว (เดนมาร์ก)	7.40	N/A	N/A	N/A	47.46	6.36	45.31	0.68	0.18
ฟางข้าว (อังกฤษ)	7.88	80.08	6.76	5.28	50.18	6.31	42.38	0.69	0.44
ใบและยอดอ้อย (อินเดีย)	4.00	55.98	38.27	1.75	49.87	5.99	44.13	N/A	N/A
หญ้าพันธุ์ Switch (อังกฤษ)	6.43	82.84	7.24	3.49	48.33	6.07	44.55	0.48	0.57
ฟางข้าวสาลี (เดนมาร์ก)	12.00	69.52	14.39	4.09	49.24	6.40	43.90	0.46	N/A
ไม้ซุง (อินเดีย)	7.00	54.52	38.11	0.37	49.01	6.40	44.59	N/A	N/A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อนของชีวมวล

ค่าความร้อนของชีวมวลสามารถวิเคราะห์ได้ 2 แบบ คือ วิเคราะห์โดยหาค่าความร้อนสูง (High Heating Value, HHV) และวิเคราะห์โดยหาค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value, LHV) โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.2

$$\text{HHV}=\text{LHV}+n h_{f_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (3.2)$$

เมื่อ n คือ จำนวนโมลของไอน้ำ
 $h_{f_{\text{H}_2\text{O}}}$ คือ เอนทาลปีที่ใช้ในการเปลี่ยนไอน้ำให้เป็นของเหลวซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,260 กิโลจูลต่อกรัม

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ สามารถเขียนได้อีกในรูปแบบหนึ่งดังสมการที่ 3.3

$$\text{HHV}=\text{LHV}+22.6(9\text{H}+\text{M}) \text{ (MJ/kg)} \quad (3.3)$$

เมื่อ H คือ ร้อยละของไฮโดรเจนในชีวมวล
 M คือ ร้อยละของความชื้นในมวล

การหาค่าความร้อนของชีวมวล ยังสามารถหาได้จากการคำนวณด้วยปริมาณองค์ประกอบของชีวมวล โดยกรณีทีวิเคราะห์องค์ประกอบโดยปริมาณ ค่าความร้อนสูงสามารถหาได้จากสมการที่ 3.4

$$\text{HHV}=0.3536\text{FC}+0.1559\text{VM}-0.0078\text{Ash} \text{ (MJ/kg)} \quad (3.4)$$

เมื่อ FC คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
 VM คือ ปริมาณสารระเหยในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
 Ash คือ ปริมาณขี้เถ้าในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

และกรณีทีวิเคราะห์องค์ประกอบโดยละเอียด ค่าความร้อนสูงหาได้จากสมการที่ 3.5

$$\text{HHV}=0.3491\text{C}+1.1783\text{H}+0.1005\text{S}-0.1034\text{O}-0.015\text{N}-0.0211\text{A} \text{ (MJ/kg)} \quad (3.5)$$

เมื่อ C คือ ปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- S คือ ปริมาณซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
 O คือ ปริมาณออกซิเจนในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
 N คือ ปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
 A คือ ปริมาณซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

อย่างไรก็ตาม ค่าความร้อนของชีวมวลจากสูตรเป็นค่าทางทฤษฎี ในทางปฏิบัติแล้วมีหลายปัจจัยที่ทำให้คุณสมบัติของชีวมวลเกิดความแตกต่างกัน การหาค่าความร้อนของชีวมวลที่แม่นยำกว่าคือการนำชีวมวลชุดดังกล่าวไปวัดค่าความร้อนในห้องปฏิบัติการ

3.1.2 ขนาดของชีวมวล

ขนาดของชีวมวลมีผลอย่างมากต่อการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ ชีวมวลที่นำมาเป็นเชื้อเพลิงควรมีขนาดที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ หากมีขนาดเล็กมากจะทำให้อากาศแทรกเข้าไประหว่างชีวมวลได้น้อย ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอ

3.1.3 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ เช่น อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงระยะเวลาที่ใช้ในการจุดเตา ดังนั้น ความหนาแน่นจึงส่งผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง โดยหากชีวมวลมีความหนาแน่นสูงกว่าจะมีอัตราการสิ้นเปลืองน้อยกว่าชีวมวลมีความหนาแน่นต่ำกว่า ชีวมวลอยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแข็ง สามารถพิจารณาความหนาแน่นได้ 3 ลักษณะ ดังนี้

ความหนาแน่นจริง (True density) คือความหนาแน่นที่คิดจากมวลทั้งก้อนของชีวมวลเทียบกับปริมาตรของชีวมวล ดังที่แสดงในสมการที่ 3.6

$$\rho_{\text{true}} = \frac{\text{Total mass of biomass}}{\text{Solid volume in biomass}} \quad (3.6)$$

ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) คือความหนาแน่นที่คิดจากมวลของเนื้อชีวมวลเทียบกับปริมาตรทั้งหมดของชีวมวลซึ่งรวมถึงปริมาตรของรูพรุนด้วย ดังที่แสดงในสมการที่ 3.7

$$\rho_{\text{apparent}} = \frac{\text{Total mass of biomass}}{\text{Apparent volume of biomass including solids and internal pores}} \quad (3.7)$$

ความหนาแน่นรวม (Bulk density) คือความหนาแน่นที่คิดจากมวลของเนื้อชีวมวลเทียบกับปริมาตรของภาชนะที่บรรจุชีวมวลนั้น ดังที่แสดงในสมการที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\rho_{\text{bulk}} = \frac{\text{Total mass of biomass}}{\text{Bulk volume occupied by biomass particles or stack}} \quad (3.8)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลใดๆ ที่ปรากฏในเอกสารนี้

3.1.4 ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล

ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลส่งผลอย่างมากต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากชีวมวลที่มีความชื้นสูงจะทำให้ช่วงของการระเหยของน้ำ (Drying) ในการเผาไหม้มีระยะเวลายาวนานขึ้น ชีวมวลส่วนใหญ่จึงถูกนำไปผ่านกระบวนการลดความชื้นมาก่อน ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลจะพิจารณาจากปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่อยู่ในชีวมวลต่อน้ำหนักของชีวมวลทั้งก้อน โดยสามารถหาความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลได้ 2 วิธี

การหาค่าความชื้นตามมาตรฐานเปียก (Wet basis) เป็นการหาค่าความชื้นของชีวมวลโดยเทียบกับชีวมวลเปียก ดังที่แสดงในสมการที่ 3.9

$$MC_W = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{wet}} \quad (3.9)$$

การหาค่าความชื้นตามมาตรฐานแห้ง (Dry basis) เป็นการหาค่าความชื้นของชีวมวลโดยเทียบกับชีวมวลแห้ง ดังที่แสดงในสมการที่ 3.10

$$MC_D = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}} \quad (3.10)$$

เมื่อ MC_W คือ ความชื้นของชีวมวลมาตรฐานเปียก

MC_D คือ ความชื้นของชีวมวลมาตรฐานแห้ง

W_{wet} คือ น้ำหนักของชีวมวลเปียก

W_{dry} คือ น้ำหนักของชีวมวลแห้ง

3.1.5 ทอรรีแฟคชัน [8,9]

ทอรรีแฟคชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิสแบบอ่อน (mild pyrolysis) ที่อุณหภูมิ 200-315 องศาเซลเซียส ที่สภาวะบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน การทอรรีแฟคชันจะให้น้ำถูกนำออกจากชีวมวล เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ลิกนินและเซลลูโลสบางส่วน ส่งผลให้ชีวมวลที่เป็นของแข็ง มีค่าความร้อนสูง การดูดความชื้นต่ำ มีความเปราะ ง่ายต่อการบดละเอียด

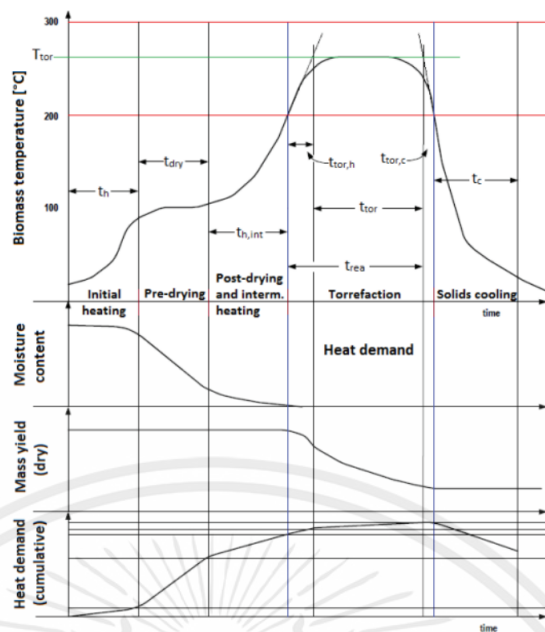
การทอรรีแฟคชันชีวมวล ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ทำให้ได้ชีวมวลทอรรีไฟต์และสารระเหย สามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนย่อย ขั้นตอนแรกจะได้สารระเหยเบา (light volatile) เช่น โมโนแซกคาไลน์ พอลิแซกคาไลน์ และดีไฮโดรซูก้า และขั้นตอนที่ 2 จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ การใช้ความร้อนเพื่อแตกสลายพันธะคาร์บอน กลุ่มคาร์บอกซิลิกทำให้เกิดการก่อตัวของกรด ซึ่งการเกิดกรดจะช่วยเร่งปฏิกิริยาการคายน้ำ และปฏิกิริยาการแตกสลายพันธะด้วยความร้อนจะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนิล ได้แก่ ไฮดรอกซีลอะซิโตน เมทานอล โพรพานอล กรดอะซิติก ฟูเพอร์รอล น้ำกรดแล็กติก และกรดฟอรอมิก ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ด้วยการสลายตัวดังกล่าวทำให้ชีวมวลมี

ความเปราะ มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำเนื่องจาก โอเอชกรุปถูกทำลาย มีค่าความร้อนสูง เนื่องจากมีการสูญเสียสารระเหยและการแตกสลายพันธะคาร์บอนในกลุ่มคาร์บอกซิลิกทำให้มีจำนวนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น

3.1.5.1 กระบวนการทอรรีแฟคชัน

กระบวนการทอรรีแฟคชันเป็นเพียงขั้นตอนหนึ่งใน 5 ขั้นตอน ดังนี้

- 1.) ระยะเวลาให้ความร้อนเริ่มต้น (Initial Heating) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิของชีวมวลจะเพิ่มขึ้น และเริ่มต้นการระเหยแห้งของน้ำทำให้ความชื้นของชีวมวลลดลงเล็กน้อย
- 2.) ระยะเวลาอบแห้ง (Pre-Drying) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 100-105 องศาเซลเซียส น้ำในชีวมวลจะระเหยแห้งด้วยอัตราคงที่ อุณหภูมิของชีวมวลจะคงที่และความชื้นในชีวมวลเริ่มลดลง
- 3.) ระยะเวลาหลังอบแห้ง (Post Drying and Intermediate heating) อุณหภูมิของชีวมวลถูกเพิ่มไปที่ 200 องศาเซลเซียส ความชื้นภายในผนังเซลล์ของชีวมวลถูกระเหยจนหมด และมีสารระเหยเบาบางส่วนระเหยออกมา พลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากระยะก่อนหน้า
- 4.) ระยะเวลาทอรรีแฟคชัน (Torrefaction) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนย่อยคือ การทำความร้อน (Heating), การรักษาอุณหภูมิคงที่ (Constant temperature) และการระบายความร้อน (Cooling) อุณหภูมิที่ใช้สำหรับขั้นตอนนี้แตกต่างกันตามชนิดของชีวมวล โดยทั่วไปมีอุณหภูมิประมาณ 230-300 องศาเซลเซียส
- 5.) ระยะเวลาลดอุณหภูมิ เป็นการลดอุณหภูมิของชีวมวลซึ่งผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม พลังงานความร้อนสะสมลดลงในขณะที่มวลค่อนข้างคงที่



ภาพที่ 3.1 กระบวนการทอรรีแฟคชัน

3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการเผาไหม้ [6,10,11]

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีซึ่งวัตถุดิบที่เผาไหม้ได้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจน พร้อมกับปลดปล่อยความร้อนออกมา ในขณะเดียวกันก็จะแปรสภาพไปเป็นสารประกอบออกไซด์ หรือผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ก่อให้เกิดการสันเปลืองเชื้อเพลิงไปโดยเปล่าประโยชน์และก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ

3.2.1 กระบวนการเผาไหม้

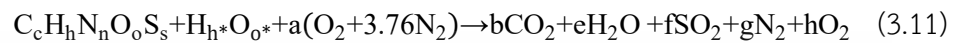
กระบวนการเผาไหม้ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

- 1.) การอบแห้ง (Drying) ห้องเผาไหม้พาความร้อนหรือแผ่รังสีความร้อนไปยังเชื้อเพลิง จะทำให้ความชื้นในเชื้อเพลิงระเหยออกมาภายนอก ดังนั้นหากเชื้อเพลิงมีความชื้นสูงจะทำให้กระบวนการเผาไหม้มีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากมีพลังงานบางส่วนถูกใช้เพื่อระเหยน้ำออก
- 2.) การปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization) หรือไพโรไลซิส (Pyrolysis) เกิดขึ้นเมื่อระเหยน้ำในเชื้อเพลิงจนถึงอุณหภูมิหนึ่ง สารระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิง ได้แก่ น้ำมันดิน (Tar) คาร์บอน (Char coal) จะทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับอากาศรอบ ๆ เมื่ออุณหภูมิถึงจุดติดไฟจึงเกิดเป็นเปลวไฟรอบอนุภาคเชื้อเพลิง
- 3.) การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Char oxidation) เกิดขึ้นหลังสารระเหยเผาไหม้เหลือถ่านชาร์ที่มีความพรุน ทำให้ออกซิเจนรอบ ๆ แพร่เข้าไปเกิดการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 สตอยคิโอเมตรีของการเผาไหม้

สตอยคิโอเมตรีของการเผาไหม้ (Combustion stoichiometry) คือสภาวะการเผาไหม้ที่มีปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงพอดีสำหรับการที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมี หาได้จากการดุลสมการเคมีการเผาไหม้ โดยสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่สภาวะอากาศแห้งมีออกซิเจน 21% และไนโตรเจน 79% และมีความชื้น ได้ดังสมการที่ 3.11



เมื่อ เทอมของ $H_{h^*}O_{o^*}$ เกิดจากความชื้นของเชื้อเพลิง

$$a = \frac{2b + e + 2f - o - o^*}{2} \quad (3.12)$$

จากการดุลสมการเคมีข้างต้นจะทำให้สามารถคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงหรือ $(A/F)_{\text{stoi}}$ ที่ทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ ดังสมการที่ 3.13

$$(A/F)_{\text{stoi}} = \frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}} \quad (3.13)$$

3.2.3 อัตราส่วนสมมูล

อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, Φ) เป็นปริมาณไร้มิติที่ทำให้ทราบว่า อัตราส่วนผสมของอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงมีค่าต่างจากทฤษฎีมากแค่ไหน เนื่องจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริงโดยส่วนใหญ่ไม่ได้เป็นไปตามอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี อัตราส่วนสมมูลแสดงดังสมการที่ 3.14

$$\Phi = \frac{(A/F)_{\text{stoi}}}{(A/F)_{\text{act}}} = \frac{(m_{\text{air}}/m_{\text{fuel}})_{\text{stoi}}}{(m_{\text{air}}/m_{\text{fuel}})_{\text{act}}} \quad (3.14)$$

เมื่อ $(A/F)_{\text{stoi}}$ คือ อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี

$(A/F)_{\text{act}}$ คือ อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง

โดยมีความหมายดังนี้

$\Phi < 1$ หมายถึง ส่วนผสมบาง (Fuel-lean mixture) กรณีนี้อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้จริงมีค่าน้อยกว่าค่าทฤษฎี

$\Phi = 1$ หมายถึง อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้จริงเป็นไปตามทฤษฎี (Stoichiometry)

$\Phi > 1$ หมายถึง ส่วนผสมหนา (Fuel-rich mixture) กรณีนี้อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้

จริงมีค่ามากกว่าค่าทฤษฎี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่โรงเรียนฯ ให้บริการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ประสิทธิภาพการเผาไหม้

โดยปกติการเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์เพราะมีองค์ประกอบที่เผาไหม้ไม่หมด ประสิทธิภาพการเผาไหม้จึงคำนวณจากความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากองค์ประกอบบางส่วนที่ยังไม่ถูกเผาไหม้ ดังสมการที่ 3.15

$$\eta = 1 - \frac{\sum_j \dot{E}_j \cdot \dot{m}_F}{NCV \cdot \dot{m}_F} = \frac{\sum_j \dot{E}_j}{NCV} \quad (3.15)$$

เมื่อ \dot{E}_j คือ พลังงานที่สูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (MW)

ในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้เชิงเปรียบเทียบ สามารถวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ที่ปลดปล่อยออกมาเทียบกับแก๊สร้อนจากการเผาไหม้ได้เช่นกัน

3.3 การปลดปล่อยมลพิษ [12,13]

ในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ย่อมมีการปลดปล่อยมลพิษออกมาจากการทำปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งส่งผลกระทบต่อบรรยากาศและสิ่งแวดล้อม การปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้เกิดจากทั้งการเผาไหม้สมบูรณ์และการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ มีทั้งหมดดังนี้

3.3.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

คาร์บอนในเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อผ่านกระบวนการเผาไหม้แล้ว ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิโลกสูงขึ้นจากภาวะเรือนกระจก

3.3.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)

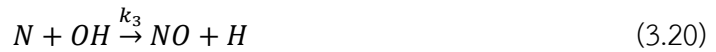
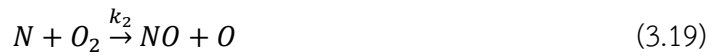
เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง มลพิษที่เกิดขึ้นมาจากไนตริกออกไซด์ (NO) ทำปฏิกิริยากลายเป็นไนโตรเจนออกไซด์ (NO₂) โดยออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดหมอกทางโฟโตเคมี คือ ทำให้เกิดแก๊สโอโซนในระดับต่ำ และทำลายแก๊สโอโซนในระดับสูง ดังสมการ



จากสมการกล่าวได้ว่า ไนตริกออกไซด์ (NO) หนึ่งโมเลกุลสามารถทำลายแก๊สโอโซน (O₃) ได้ต่อเนื่อง โดย NO₂ ที่เกิดจากสมการที่ 3.16 จะถูกรีดิวซ์กลับมาเป็น NO ดังสมการที่ 3.17 และย้อนกลับไปทำลาย O₃ ในสมการที่ 3.16 อีกครั้งเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ กลไกการเกิด NO_x ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลมีรูปแบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการวิจัยและพัฒนา โดยผู้เขียนขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และไม่รับผิดชอบต่อข้อผิดพลาดใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ

1.) NO_x ที่เกิดจาก Thermal NO_x หรือ Zeldovich NO_x มีสมการพื้นฐานดังต่อไปนี้



เมื่อ $k_1 = 1.8 \times 10^{14} \exp(-318 \text{ kJ.mol}^{-1}/(\text{RT}))$

เมื่อ $k_2 = 9.0 \times 10^9 \exp(-27 \text{ kJ.mol}^{-1}/(\text{RT}))$

เมื่อ $k_3 = 2.8 \times 10^{13}$

และจากสมการเคมีกลไกของ Zeldovich สามารถหาอัตราการเกิด NO_x ได้คือ

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = k_1[\text{O}][\text{N}_2] + k_2[\text{N}][\text{O}_2] + k_3[\text{N}][\text{OH}] \quad (3.21)$$

เนื่องจากอัตราการเกิดอะตอมของไนโตรเจนขณะเกิดปฏิกิริยาในสภาวะเสถียรคือ

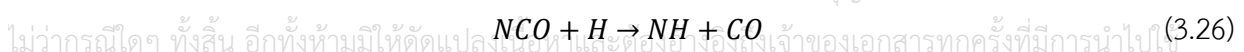
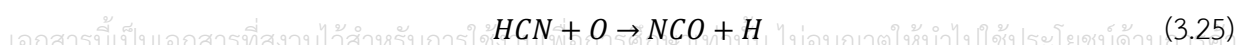
$$\frac{d[\text{N}]}{dt} = k_1[\text{O}][\text{N}_2] + k_2[\text{N}][\text{O}_2] + k_3[\text{N}][\text{OH}] \approx 0 \quad (3.22)$$

จะได้อัตราการเกิด NO คือ

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_1[\text{O}][\text{N}_2] \quad (3.23)$$

ดังนั้น การลดปริมาณ NO สามารถทำได้สองวิธี ได้แก่ การลด [O] และ $[\text{N}_2]$ หรือการลดอุณหภูมิ k_1 ซึ่งหมายถึงการลดอุณหภูมิการเผาไหม้

2.) NO_x ที่เกิดจาก Prompt NO_x เกิดขึ้นในกรณีที่มีการเผาไหม้แบบส่วนผสม การหาปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ของเปลวไฟแบบราบเรียบจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนไม่ได้มีค่าลดลงใกล้เคียงศูนย์เหมือนที่คาดการณ์จากกลไกของ Zeldovich แต่พบว่ามีไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีปฏิกิริยาที่ซับซ้อนกว่า Thermal NO_2 โดยมีปฏิกิริยาการเกิด NO ดังนี้





โดยจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า Thermal NO_x เพราะปฏิกิริยาใช้พลังงานกระตุ้นที่น้อยกว่าอุณหภูมิประมาณ 1000 K โดยในกรณีของเชื้อเพลิงชีวมวล Prompt NO_x จะมีความสำคัญน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในเชื้อเพลิงฟอสซิล

- 3.) NO_x ที่เกิดจาก Fuel NO_x สำหรับเชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบ ได้แก่ เชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งถ่านหินอาจมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบได้ถึงร้อยละ 2 โดยไนโตรเจนส่วนใหญ่จะเปลี่ยนไปเป็น HCN ในเปลวไฟ ก่อนที่จะเปลี่ยนต่อไปเป็น NH หรือ NH₂ แล้วทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิด NO+H₂O ดังนั้น สัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่หลุดออกมาจากเปลวไฟกลายเป็น NO นั้นจะเป็นอิสระต่ออัตราส่วนระหว่าง NO/O₂ ในเปลวไฟ หากรักษาให้สัดส่วนของออกซิเจนในแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงในเปลวไฟให้ต่ำ จะทำให้ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเปลี่ยนไปเป็น NO น้อยลงตามไปด้วย

3.3.3 ไนตรัสออกไซด์ (N₂O)

ไนตรัสออกไซด์ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการสันดาปของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลวัดปริมาณไนตรัสออกไซด์มีค่าน้อยมาก โดยไนตรัสออกไซด์สามารถก่อให้เกิด NO ได้ตั้งสมการ



ที่อุณหภูมิสูงและความดันต่ำจะทำให้เกิด NO มากขึ้น มักพบในการเผาไหม้ที่ใช้ส่วนผสมบาง

3.3.4 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

คาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นได้จากปัจจัยหลายประการ เช่น การเผาไหม้ที่ส่วนผสมหนาเกินไป การที่เชื้อเพลิงคลุกเคล้ากันไม่ดีพอ ปริมาณอากาศน้อยเกินไปไม่เพียงพอ และยังมีผลจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงเกินไปจนเกิดการแตกสลายคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ดังสมการ



ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างคือ เวลาในการเผาไหม้น้อยเกินไป เกิดจากการระบายไอเสียออกทันที ทำ

ให้อุณหภูมิและความดันเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก CO เป็น CO₂ ไม่เต็มที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันทางไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากระยะเวลาที่ถูกจำกัด อย่างไรก็ตาม ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถควบคุมได้จากอัตราส่วน สมมูล หรือปริมาณออกซิเจนในปฏิกิริยาการเผาไหม้

3.3.5 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x)

ออกไซด์ของซัลเฟอร์เป็นแก๊สที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถทำลายอุปกรณ์การเผาไหม้ รวมถึงอุปกรณ์อื่น ๆ ให้เสียหายได้ โดยออกไซด์ของซัลเฟอร์ประกอบด้วยซัลเฟอร์ซึ่งเป็นองค์ประกอบ อยู่ในเชื้อเพลิง ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ได้เป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) เป็นหลัก และมีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ปนอยู่บ้างเล็กน้อย รวมถึงแก๊สอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) คาร์บอนิลซัลไฟด์ (COS) ซึ่งเรียกรวม ๆ ได้ว่า SO_x ซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงอาจมีปริมาณน้อยและทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ดังสมการ



ออกไซด์ของซัลเฟอร์ที่เกิดจากการเผาไหม้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วกลายเป็นกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ดังสมการ



3.4 การชดเชยอุณหภูมิที่ได้รับผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อน [14]

สำหรับ Thermocouple ที่ใช้วัดอุณหภูมิ ค่าที่อ่านได้หมายถึงอุณหภูมิของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ แต่ไม่ใช่อุณหภูมิของตัวกลาง ในที่นี้คือแก๊สที่อยู่ล้อมรอบ Thermocouple เนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สร้อนกับเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ โดยมีการพาความร้อนจากแก๊สร้อนไปยังเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และมีการแผ่รังสีความร้อนจากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิไปยังพื้นผิวโดยรอบ จนกระทั่งเกิดความสมดุลทางอุณหภูมิ สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{q}_{conv,to\ sensor} = \dot{q}_{rad,from\ sensor} \quad (3.35)$$

$$h(T_f - T_{th}) = \epsilon_{th}\sigma(T_f^4 - T_w^4) \quad (3.36)$$

จึงได้ว่าอุณหภูมิที่แท้จริงของเชื้อเพลิงคือ

$$T_f = T_{th} + \frac{\epsilon_{th}\sigma(T_{th}^4 - T_w^4)}{h} \quad (3.37)$$

เมื่อ T_f = อุณหภูมิที่แท้จริงของเชื้อเพลิง (K)

T_{th} = อุณหภูมิที่เซ็นเซอร์วัดได้ที่ศูนย์กลางห้องเผาไหม้ช่วย (K)

T_w = อุณหภูมิที่เซ็นเซอร์วัดได้ที่ผนังห้องเผาไหม้ช่วย (K)

เอกสารนี้เป็น ϵ_{th} = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

σ = ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ประมาณ $5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน หาได้จากสมการ


$$h = Nu_{cyl} \frac{k}{D} \quad (3.38)$$

เมื่อ Nu_{cyl} = ค่าจำนวน Nusselt สำหรับทรงกระบอก

k = ค่าการนำความร้อน ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ (m)

ค่าจำนวน Nusselt สามารถคำนวณได้จากภาพที่ 3.2

Cross-section of the cylinder	Fluid	Range of Re	Nusselt number
	Gas or liquid	0.4 - 4	$Nu = 0.989 Re^{0.330} Pr^{1/3}$
		4 - 40	$Nu = 0.911 Re^{0.385} Pr^{1/3}$
		40 - 4000	$Nu = 0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3}$
		4000 - 40,000	$Nu = 0.193 Re^{0.618} Pr^{1/3}$
		40,000 - 400,000	$Nu = 0.027 Re^{0.805} Pr^{1/3}$

ภาพที่ 3.2 สมการสหสัมพันธ์หาค่าจำนวน Nusselt สำหรับทรงกระบอก

โดยที่ Re คือค่าจำนวน Reynold หาได้จากสมการ

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (3.39)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของแก๊สร้อน (kg/m^3)

u = อัตราเร็วของแก๊ส (m/s)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของห้องเผาไหม้ช่วย (m)

μ = ความหนืดสัมบูรณ์ของแก๊ส ($\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$)

และ Pr คือค่าจำนวน Prandtl หาได้จากสมการ

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (3.40)$$

เมื่อ c_p = ความร้อนจำเพาะของแก๊ส ($\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$)

k = ค่าการนำความร้อน ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [10,15]

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) หรือ CFD คือการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหล พื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณคือการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ซึ่งเป็นสมการควบคุมการไหล โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการหาผลเฉลยด้วยวิธีเชิงตัวเลข ปัจจุบันถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมแขนงต่าง ๆ เช่น การจำลองการไหลของอากาศโดยรอบยานพาหนะ การจำลองระบบทำความเย็นภายในอาคาร การประเมินประสิทธิภาพของปั๊ม เป็นต้น

3.5.1 ข้อได้เปรียบของ CFD เมื่อเทียบกับการทดลอง

1. ลดเวลาและต้นทุนของการออกแบบใหม่
2. สามารถศึกษาระบบที่ควบคุมการทดลองได้ยากหรือเป็นไปไม่ได้ เช่น ระบบที่มีขนาดใหญ่
3. สามารถศึกษาระบบในด้านความปลอดภัย อุบัติเหตุ และการทำงานเกินข้อจำกัดของระบบ
4. ค่าพารามิเตอร์บางตัวไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยวิธีการทดลอง แต่สามารถแสดงให้เห็นได้ด้วยผลของการจำลองจากวิธี CFD

3.5.2 ปัญหาที่เกิดจากการใช้ CFD

1. การกำหนดขอบเขตของปัญหาและข้อมูลเพื่อการคำนวณที่ไม่เหมาะสม จะส่งผลให้ผลเฉลยจากการคำนวณไม่สามารถสะท้อนปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงได้
2. การไม่เข้าใจในเทคนิคการหาผลเฉลยด้วยวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ เช่น ค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อกรูเข้าหาคำตอบ และเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เป็นข้อจำกัดของเทคนิคนั้น ๆ
3. ทักษะในการใช้โปรแกรมทาง CFD เช่น การสร้างกริดที่มีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมกับปัญหาการไหล
4. ความถูกต้องของแบบจำลองที่เลือกใช้

3.5.3 ขั้นตอนการคำนวณด้วยโปรแกรมทางด้าน CFD

1. การเตรียมการก่อนการคำนวณ (Pre-processor) เป็นขั้นตอนที่ผู้ใช้จะป้อนข้อมูลปัญหาการไหล และโปรแกรมจะเปลี่ยนข้อมูลนี้ให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการคำนวณ ขั้นตอนนี้ผู้ใช้จะต้องทำการ นิยามรูปร่างขอบเขตที่สนใจ กำหนดกริด เลือกปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกี่ยวข้อง นิยามคุณสมบัติของของไหล และกำหนดขอบเขตที่เซลล์ซึ่งเหมาะสมกับขอบเขตของปัญหา

2. การคำนวณเพื่อหาผลเฉลย (Solver) ประกอบไปด้วย การประมาณค่าพารามิเตอร์ของการไหลที่ต้องการหาคำตอบด้วยฟังก์ชันอย่างง่าย การแทนค่าตัวแปรที่ประมาณไว้ในสมการควบคุมการไหล การจัดรูปสมการให้เป็นฟังก์ชันของโหนด และการหาคำตอบของสมการพีชคณิต

ซึ่งเทคนิคการหาคำตอบเชิงตัวเลข มีทั้งหมด 4 แบบ ได้แก่ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) วิธีสเปกตรัล (Spectral Method) และวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) โดยเทคนิคที่ใช้จะขึ้นอยู่กับโปรแกรมทาง CFD

3. การแสดงผล (Post-processor) เป็นขั้นตอนแสดงผลเฉลยจากการคำนวณ โดยนิยมแสดงในรูปแบบของ รูปร่างของขอบเขตของปัญหา แสดงกริด เวกเตอร์ ภาพคอนทัวร์ (Contour) และเส้นสายธาร (Streamline) พื้นผิว 2D และ 3D โดยโปรแกรมทาง CFD จะมีเครื่องมือในการจัดภาพให้เหมาะสม เช่น การหมุน การเคลื่อนที่ การย่อหรือขยาย รวมทั้งสามารถสร้างไฟล์ภาพเพื่อบันทึกผลในรูปแบบของ jpeg หรือไฟล์ภาพชนิดอื่น ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

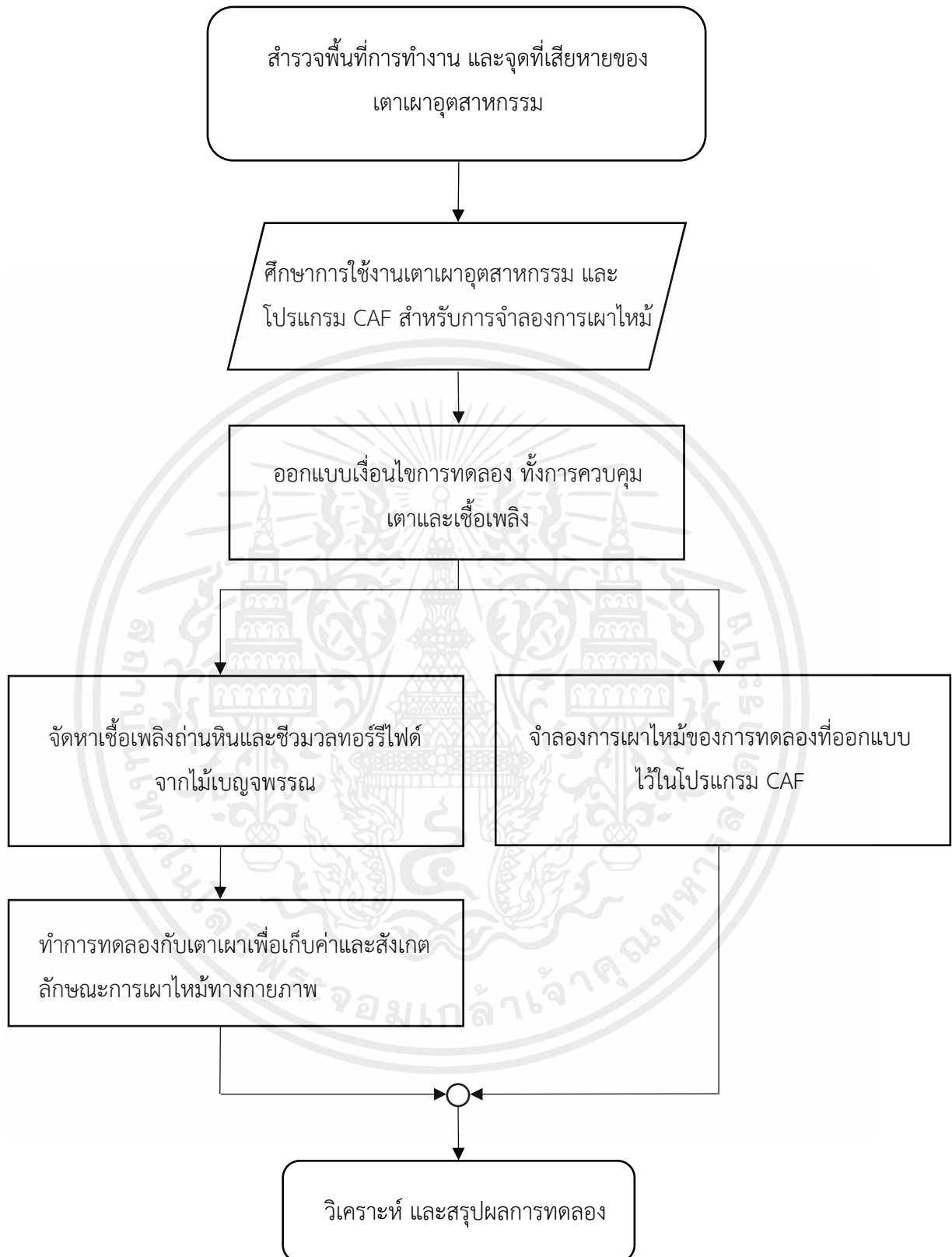
วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลองในเตาเผาอุตสาหกรรม การเตรียมเชื้อเพลิง การคำนวณอัตรา
การไหลของอากาศ และวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 4.1 แผนการดำเนินงาน

ที่	รายละเอียด	ระยะเวลาดำเนินงาน								
		2566						2567		
		ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1	ศึกษาการทำงานของเตาเผา อุตสาหกรรมและคุณสมบัติของ เชื้อเพลิง	/	/							
2	ศึกษาการใช้งานโปรแกรม CFD เพื่อใช้ในการจำลองการเผาไหม้		/	/	/	/				
3	ออกแบบการทดลองสำหรับการ ผสมเชื้อเพลิงระหว่างถ่านหินและ ชีวมวลทอร์รีไฟต์ในเตาเผา อุตสาหกรรม			/	/	/				
4	จัดหาเชื้อเพลิงและอุปกรณ์ที่ จำเป็นสำหรับการทดลอง				/	/	/			
5	ทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล					/	/	/		
6	จำลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ผสมในโปรแกรม CFD ภายใต้ เงื่อนไขเดียวกันกับการทดลองที่ ทำจริง					/	/	/		
7	อภิปรายและวิเคราะห์ผล การทดลอง								/	/
8	สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง								/	/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 เตาเผาอุตสาหกรรมชนิดหัวเผาแบบฝุ่น (Pulverized burner)

4.1.1 อุปกรณ์ในเตาเผาอุตสาหกรรมชนิดหัวเผาแบบฝุ่น [16]



ภาพที่ 4.1 ไซโลเก็บเชื้อเพลิงก่อนเข้าเครื่องบด

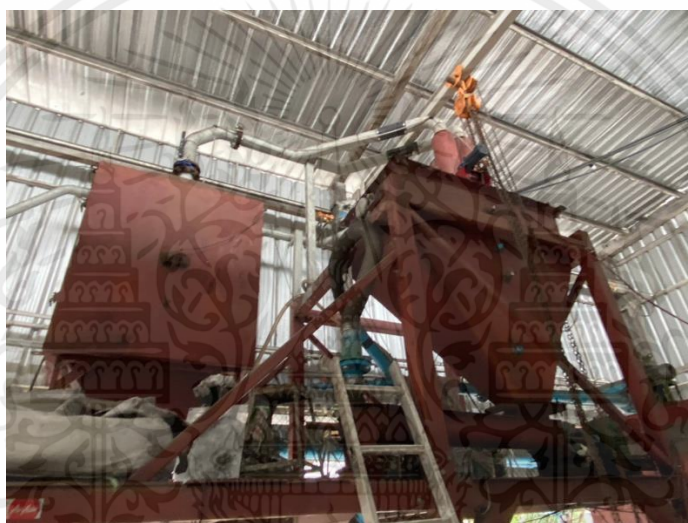


ภาพที่ 4.2 เครื่องบดเชื้อเพลิงชนิด Hammer mill

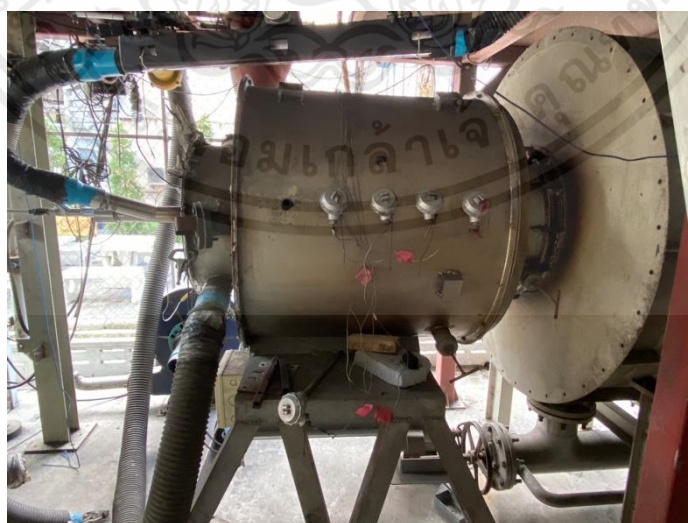
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 พัดลมลำเลียงเชื้อเพลิงที่ผ่านการบดแล้ว



ภาพที่ 4.4 ถังต้กฝุ่นจากการลำเลียงเชื้อเพลิง และ ไซโลเก็บเชื้อเพลิงที่ผ่านการบดแล้ว



ภาพที่ 4.5 ห้องเผาไหม้ช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 ห้องเผาไหม้หลัก



ภาพที่ 4.7 ท่อลำเลียงซีเมนต์



ภาพที่ 4.8 หอบำบัดอากาศแบบเปียก (Wet scrubber)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 ท่อไอเสีย



ภาพที่ 4.10 ระบบบำบัดน้ำเสีย

4.2 วิธีการทดลอง

4.2.1 วิธีการทดลองในเตาเผาอุตสาหกรรมชนิดหัวเผาแบบฝุ่น

ในการวิจัยนี้สนใจลักษณะการเผาไหม้ของการผสมกันของเชื้อเพลิง 2 แบบได้แก่เชื้อเพลิงจากถ่านหิน และ เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ ในอัตราส่วนโดยมวล 2 กรณีศึกษาได้แก่ สัดส่วนผสมเชื้อเพลิงถ่านหิน 90% ต่อเบญจพรรณทอร์รีไฟต์ 10% และ เชื้อเพลิงถ่านหิน 80% ต่อเบญจพรรณทอร์รีไฟต์ 20% โดยมีขั้นตอนหลักในการทดลองดังนี้

1. การเตรียมเชื้อเพลิง

การเตรียมเชื้อเพลิงผสมที่ใช้ในการทดลอง นำเชื้อเพลิงมาเข้าเครื่องบดชนิด Hammer mill จากนั้นเชื้อเพลิงที่ถูกบดเป็นผงแล้วจะถูกลำเลียงผ่านท่อลมไปยังไซโลสำหรับเก็บเชื้อเพลิง โดยก่อนที่จะบดเชื้อเพลิงอีกชนิดให้ทำความสะอาดระบบบดเชื้อเพลิงนำเชื้อเพลิงที่บดก่อนมาบดบรรจุกระสอบแล้วจึงทำซ้ำขั้นตอนการบดแล้วหลังจากเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดถูกบดเสร็จก็นำมาบรรจุกระสอบแล้ว จึงเริ่มการผสมเชื้อเพลิงถ่านหินต่อเบญจพรรณทอร์รีไฟต์ที่สัดส่วน 90:10 และ 80:20 โดยมวลตามลำดับ อัตราส่วนโดยมวลดังกล่าวมาจากการชั่งน้ำหนักตามสัดส่วนการผสม หลังจากนั้นนำเชื้อเพลิงที่ผสมใส่กลับไปยังไซโลพร้อมสำหรับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 การผสมเชื้อเพลิงสำหรับการทดลอง

2. การเตรียมระบบ

ก่อนการนำเชื้อเพลิงไปเผาไหม้ จำเป็นจะต้องเตรียมระบบและเครื่องมือวัดซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ป้องกันไม่ให้เกิดการข้อผิดพลาดในการทดลอง โดยระบบที่จำเป็นต้องเตรียมพร้อมก่อนการเผาไหม้ได้แก่ ระบบลำเลียงอากาศซึ่งประกอบด้วยปฐุมภูมิ ระบบลำเลียงอากาศทุติยภูมิ และ ระบบลำเลียงอากาศตติยภูมิ ต่อมาเป็นระบบควบคุมแก๊ส และพัดลม ID fan ที่จำเป็นในการสร้างแรงดันลมให้ระบบก่อนเริ่มการทดลอง

4.2.1.1 การเตรียมระบบควบคุมแก๊ส

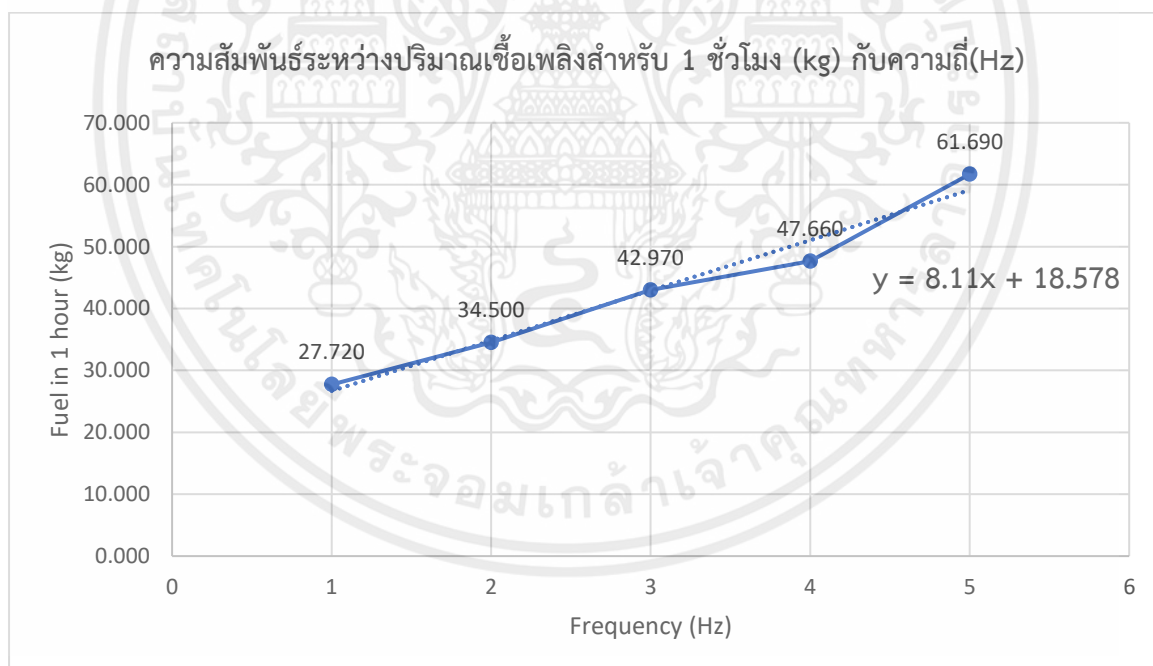
1. การอุ่นห้องไหม้ด้วยแก๊ส LPG การทดลองการเผาไหม้จะควบคุมการปล่อยแก๊สที่ 10 L/min สำหรับการอุ่น โดยเมื่อสั่งเปิดระบบจุดไฟอุปกรณ์จ่ายไฟจะจุดหัวเทียน แล้ว Solenoid valve จึงเปิดตามมา แก๊สที่ผ่านประกายไฟจากหัวเทียนจะทำให้เกิดการลุกติดของไฟในห้องเผาไหม้ โดยระยะเวลาการอุ่นห้องเผาไหม้ในแต่ละครั้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ หรืออุณหภูมิผนังของห้องเผาไหม้
2. การอุ่นห้องเผาไหม้ด้วยแก๊ส LPG ร่วมกับเชื้อเพลิงฝุ่น เพื่อความคุ้มค่าของการใช้แก๊ส LPG ระบบจึงถูกออกแบบให้สามารถใช้เชื้อเพลิงชีวมวลแบบฝุ่นในการช่วยอุ่นห้องเผาไหม้ที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่น 150 kW เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวล และอากาศจากระบบอากาศปฐุมภูมิ ไหลผ่านเปลวไฟที่มาจากแก๊ส เชื้อเพลิงชีวมวลดังกล่าวจะติดเป็นสะเก็ดไฟ
3. การหยุดแก๊ส LPG เพื่อใช้เชื้อเพลิงฝุ่นในการเผาไหม้อย่างเดียว เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิง จะมีค่าเทียบเท่า 300 kW จึงหยุดระบบแก๊สเพื่อใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินและชีวมวลทอร์รีไฟด์แบบฝุ่นที่ผ่านการคำนวณสัดส่วนผสมแล้วเข้าไปยังห้องเผาไหม้ หลังจากแก๊สดับจนอุณหภูมิในระบบคงที่ ถ้าเปลวไฟเสถียรแล้วเชื้อเพลิงสามารถเผาได้อย่างต่อเนื่อง จึงทำการเก็บวัดผลของอุณหภูมิ และแก๊สไอเสียที่ทางออกได้
4. บันทึกภาพ เก็บผลของอุณหภูมิ และแก๊สไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

4.2.2.1 อัตราการไหลของเชื้อเพลิง

วิทยานิพนธ์นี้ใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินกับเบญจพรรณทอรัไฟด์ที่อัตราส่วน C90:T10 และ C80:T20 ตามลำดับ ที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดชนิด Hammer mill ผ่านตะแกรงที่มีรูขนาด 0.5 มิลลิเมตร และวิเคราะห์องค์ประกอบโดยละเอียดของเชื้อเพลิงเดี่ยวและเชื้อเพลิงผสม ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ ตารางที่ 4.3 แล้วจึงคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเมื่อผสมเชื้อเพลิง ดังแสดงใน ตารางที่ 4.4 ดังนั้นอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ใช้ในการทดลองในเตาเผาอุตสาหกรรมชนิดหัวเผาแบบฝุ่น หากจาก ค่าทดสอบจริง โดยกำหนดความถี่กระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับสกรูลำเลียงเชื้อเพลิง ที่ช่วง 1 เฮิรตซ์ ถึง 5 เฮิรตซ์ จากนั้นจับเวลาทุก 1 นาที และ 2 นาที และบันทึกค่ามวลที่ได้ แล้วหาค่าเฉลี่ย และสร้างกราฟ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลของเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ 1 ชั่วโมง และความถี่กระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการขับสกรูลำเลียงเชื้อเพลิง ดังภาพที่ 4.12 จากนั้นนำสมการที่ได้จากกราฟมาคำนวณหามวลของเชื้อเพลิงและความถี่กระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองในเตาเผาอุตสาหกรรมชนิดหัวเผาแบบฝุ่น ที่กำลังความร้อน 150 kW และ 300 kW ของแต่ละอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 4.8



ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลของเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ 1 ชั่วโมง และความถี่กระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์

4.2.2.2 เชื้อเพลิงสำหรับการทดลอง

เชื้อเพลิงที่ใช้ทำการทดลองคือเชื้อเพลิงถ่านหิน และเชื้อเพลิงชีวมวลทอรรีไฟต์ โดยใช้เป็นชีวมวลจากไม้เบญจพรรณ (ชีวมวลทอรรีไฟต์) ที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชัน ในการทดลองจำเป็นต้องใช้ผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิด เพื่อนำมาคำนวณคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงหรือ $(A/F)_{stoi}$ และวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสมตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ ในที่นี้จะใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยละเอียด (Ultimate analysis) หรือการแยกธาตุ ชนิดปลอดภัย

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยละเอียดของเชื้อเพลิงเดี่ยวแบบ Dry Basis

ชนิดเชื้อเพลิงผง	ชีวมวลทอรรีไฟต์	ถ่านหิน
% คาร์บอน	63.31	69.06
% ไฮโดรเจน	4.16	4.84
% ไนโตรเจน	0.67	1.43
% ออกซิเจน	20.45	19.74
% กำมะถัน (ซัลเฟอร์)	0.35	0.52
% เถ้า	11.07	4.41
$(A/F)_{stoi}$	5.72	7.42

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยละเอียดของเชื้อเพลิงผสมแบบ Dry Basis

ชนิดเชื้อเพลิงผสม	ถ่านหิน 90% ชีวมวลทอรรีไฟต์ 10%	ถ่านหิน 80% ชีวมวลทอรรีไฟต์ 20%
% คาร์บอน	68.48	67.91
% ไฮโดรเจน	4.77	4.70
% ไนโตรเจน	1.35	1.28
% ออกซิเจน	19.81	19.88
% กำมะถัน (ซัลเฟอร์)	0.50	0.49
% เถ้า	5.08	5.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองจะใช้การผสมเชื้อเพลิงระหว่างถ่านหินและชีวมวลจากไม้เบญจพรรณ โดยกำหนดให้อากาศส่วนเกิน 15% แลการทดลองนี้จึงได้เลือกให้หัวเผาทำงานที่ 300 kW จากนั้นนำไปคำนวณเพื่อหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง และอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งจำแนกตามอัตราส่วนผสมดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเมื่อผสมเชื้อเพลิง

อัตราส่วนผสมเชื้อเพลิง	ถ่านหิน 90% ชีวมวลทอร์รีไฟต์ 10%	ถ่านหิน 80% ชีวมวลทอร์รีไฟต์ 20%
อัตราการไหลเชื้อเพลิงเทียบเท่ากำลัง 300 kW (kg/s)	0.014	0.015
$(A/F)_{stoi}$	7.32	7.24
อัตราการไหลอากาศรวม (kg/s)	0.104	0.105
(A/F) ที่อากาศส่วนเกิน 15%	8.42	8.33
อัตราการไหลอากาศรวม (kg/s) ที่อากาศส่วนเกิน 15%	0.119	0.120

อัตราการไหลของอากาศสามารถแบ่งออกเป็นอากาศปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และตติยภูมิ โดยแบ่งอัตราส่วนเป็น 25 : 65 : 10 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้ง 2 ส่วน

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ทั้ง 2 ส่วน	อากาศปฐมภูมิ 25%	อากาศทุติยภูมิ 65%	อากาศตติยภูมิ 10%
ถ่านหิน 90% ชีวมวลทอร์รีไฟต์ 10%	0.02599	0.06757	0.01040
ถ่านหิน 80% ชีวมวลทอร์รีไฟต์ 20%	0.02629	0.06836	0.01052

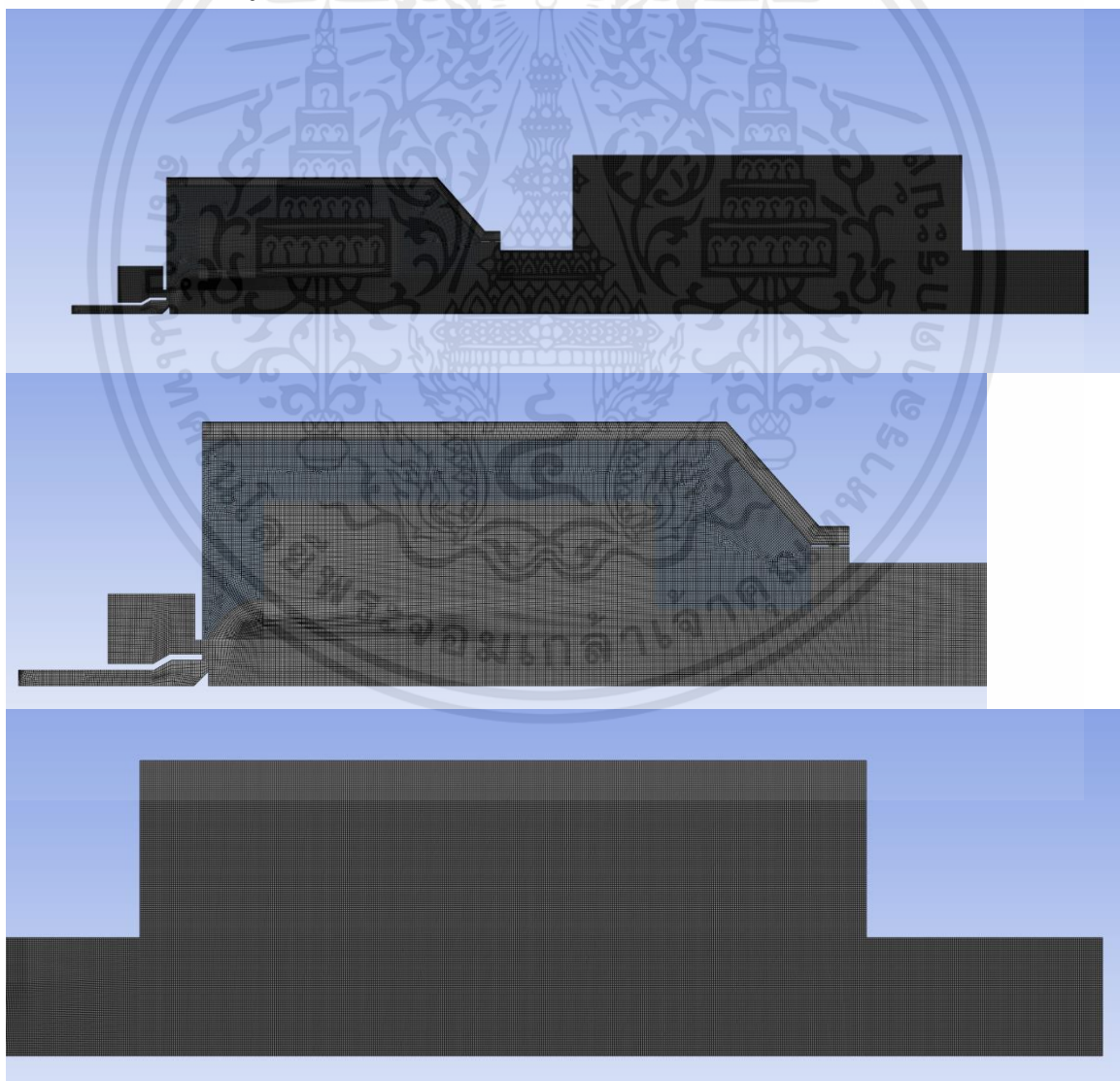
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 เงื่อนไขเริ่มต้นของการจำลองทางคณิตศาสตร์

โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองคือ ANSYS Fluent 2024 R1 Student version ด้วยการจำลอง 2 มิติจำลอง การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมสองกรณีได้แก่ การจำลองเชื้อเพลิงผสมของถ่านหิน 90% ทอรีไฟต์ 10% และการจำลองเชื้อเพลิงผสมของถ่านหิน 80% ทอรีไฟต์ 20% ที่อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงที่อากาศ ส่วนเกิน 15% โดยอากาศที่ป้อนเข้าไปยังห้องเผาไหม้ถูกแบ่งออกเป็นสัดส่วน อากาศปฐมภูมิ อากาศทุติย ภูมิ และ อากาศตติยภูมิเท่ากับ อัตราส่วน 25 65 และ 10 ตามลำดับเพื่อให้ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ เสมือนทดลองที่ใช้ในเตาเผาไหม้จริง

4.2.3.1 โครงสร้าง และจำนวนกริด (Geometry and mesh structure)

โครงสร้างของระบบที่นำมาใช้ในการจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นประกอบด้วย ห้องเผา ไหม้ช่วย ทางเข้าของอากาศทั้งสามส่วน ห้องเผาไหม้หลัก และท่อทางออก โดยการจำลองอ้างอิงขนาด จากอุปกรณ์จริงโดยการจำลองแบบ 2 มิติซึ่งเป็นโครงสร้างของของไหลที่อยู่ภายใน (fluid domain) โดย โครงสร้างกริดที่ใช้เป็นรูป Polyhydral มีจำนวน 137,238 กริด



ภาพที่ 4.13 โครงสร้างกริดของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ขอบเขตของการจำลอง (boundary condition)

	เชื้อเพลิงผสม C90:T10	เชื้อเพลิงผสม C80:T20
อัตราการไหลของเชื้อเพลิง เทียบกับกำลัง 300 kW (kg/s)	0.011	0.011
อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (kg/s)	0.03	0.03
อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (kg/s)	0.070	0.077
อัตราการไหลของอากาศตติยภูมิ (kg/s)	0.012	0.012
ความดันที่ทางออก (Pa)	-150	-150

ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติและการแยกธาตุของเชื้อเพลิงผสมที่ใช้ในการจำลอง (species) แบบ Dry Ash Free Basis

ชนิดเชื้อเพลิงผง	ถ่านหิน 90%	ชนิดเชื้อเพลิงผง
วิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงโดยการประมาณค่า (Proximate analysis)		
1. % ความชื้น	18.46	19.60
2. % สารระเหย	40.02	38.67
3. % ถ่านคงตัว	37.68	37.44
4. % เถ้า	3.84	4.29
วิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยละเอียดหรือแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)		
5. % คาร์บอน	72.15	72.05
6. % ไฮโดรเจน	5.03	4.99
7. % ไนโตรเจน	1.42	1.36
8. % ซัลเฟอร์	0.53	0.51
9. % ออกซิเจน	20.87	21.09

4.2.3.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองห้องเผาไหม้ของหัวเผาเชื้อเพลิงฝุ่น ทำการจำลองที่สภาวะคงตัว (Steady state) โดยค่าคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ดูได้ดังตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 มวลของเชื้อเพลิงและความถี่กระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อเพลิงผสม	กำลังความร้อน (kW)	มวลเชื้อเพลิง (kg)	ความถี่ (Hz)
ถ่านหิน 90%	150	25.469	0.850
ชีวมวลทอร์รีไฟต์ 10%	300	50.938	3.990
ถ่านหิน 80%	150	26.048	0.921
ชีวมวลทอร์รีไฟต์ 20%	300	52.095	4.133



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การชดเชยอุณหภูมิที่ได้รับผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อน

จากสมการความสมดุลทางอุณหภูมิของ Thermocouple ซึ่งสามารถจัดรูปเขียนได้ดังสมการที่ 3.35 ต่อไปนี้

$$\text{จากสมการที่ (3.35)} \quad T_f = T_{th} + \frac{\epsilon_{th}\sigma(T_{th}^4 - T_w^4)}{h} \quad (4.1)$$

เมื่อ T_f = อุณหภูมิที่แท้จริงของเชื้อเพลิง (K)

T_{th} = อุณหภูมิที่เซ็นเซอร์วัดได้ที่ศูนย์กลางห้องเผาไหม้ช่วย (K)

T_w = อุณหภูมิที่เซ็นเซอร์วัดได้ที่ผนังห้องเผาไหม้ช่วย (K)

ϵ_{th} = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ สำหรับการทดลองนี้มีค่า

เท่ากับ 0.55

σ = ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ประมาณ $5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน หาได้จากสมการ

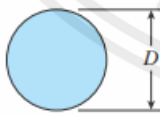
$$h = Nu_{cyl} \frac{k}{D} \quad (4.2)$$

เมื่อ Nu_{cyl} = ค่าจำนวน Nusselt สำหรับทรงกระบอก

k = ค่าการนำความร้อน ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ มีค่าเท่ากับ 0.1 m

ค่าจำนวน Nusselt สามารถคำนวณได้จากภาพที่ 4.14

Cross-section of the cylinder	Fluid	Range of Re	Nusselt number
	Gas or liquid	0.4–4	$Nu = 0.989Re^{0.330} Pr^{1/3}$
		4–40	$Nu = 0.911Re^{0.385} Pr^{1/3}$
		40–4000	$Nu = 0.683Re^{0.466} Pr^{1/3}$
		4000–40,000	$Nu = 0.193Re^{0.618} Pr^{1/3}$
		40,000–400,000	$Nu = 0.027Re^{0.805} Pr^{1/3}$

ภาพที่ 4.14 สมการสหสัมพันธ์หาค่าจำนวน Nusselt สำหรับทรงกระบอก

โดยที่ Re คือค่าจำนวน Reynold หาได้จากสมการ

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (4.3)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของแก๊สร้อน (kg/m^3)

u = อัตราเร็วของแก๊ส (m/s)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของห้องเผาไหม้ช่วย มีค่าเท่ากับ 0.6 m

μ = ความหนืดสัมบูรณ์ของแก๊ส ($\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ Pr คือค่าจำนวน Prandtl หาได้จากสมการ

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (4.4)$$

เมื่อ c_p = ความร้อนจำเพาะของแก๊ส (J/(kg·K))

k = ค่าการนำความร้อน (W/m·K)

จึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิของแก๊สคือ

- 1.) กรณีค่าจำนวน Reynold อยู่ในช่วง 40-4000

$$T_f = T_{th} + \frac{0.55 \times 5.67 \times 10^{-8} (T_{th}^4 - T_w^4)}{0.683 \times \left(\frac{0.6\rho u}{\mu}\right)^{0.466} \times \left(\frac{c_p \mu}{k}\right)^{1/3} \times \frac{k}{0.1}} \quad (4.5)$$

- 2.) กรณีค่าจำนวน Reynold อยู่ในช่วง 40000-400000

$$T_f = T_{th} + \frac{0.55 \times 5.67 \times 10^{-8} (T_{th}^4 - T_w^4)}{0.193 \times \left(\frac{0.6\rho u}{\mu}\right)^{0.618} \times \left(\frac{c_p \mu}{k}\right)^{1/3} \times \frac{k}{0.1}} \quad (4.6)$$

ทั้งนี้ค่าของ ρ , u , μ , c_p และ k จะแตกต่างกันออกไปในแต่ละกรณี ขึ้นอยู่กับ T_{th} และ T_w

บทที่ 5

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

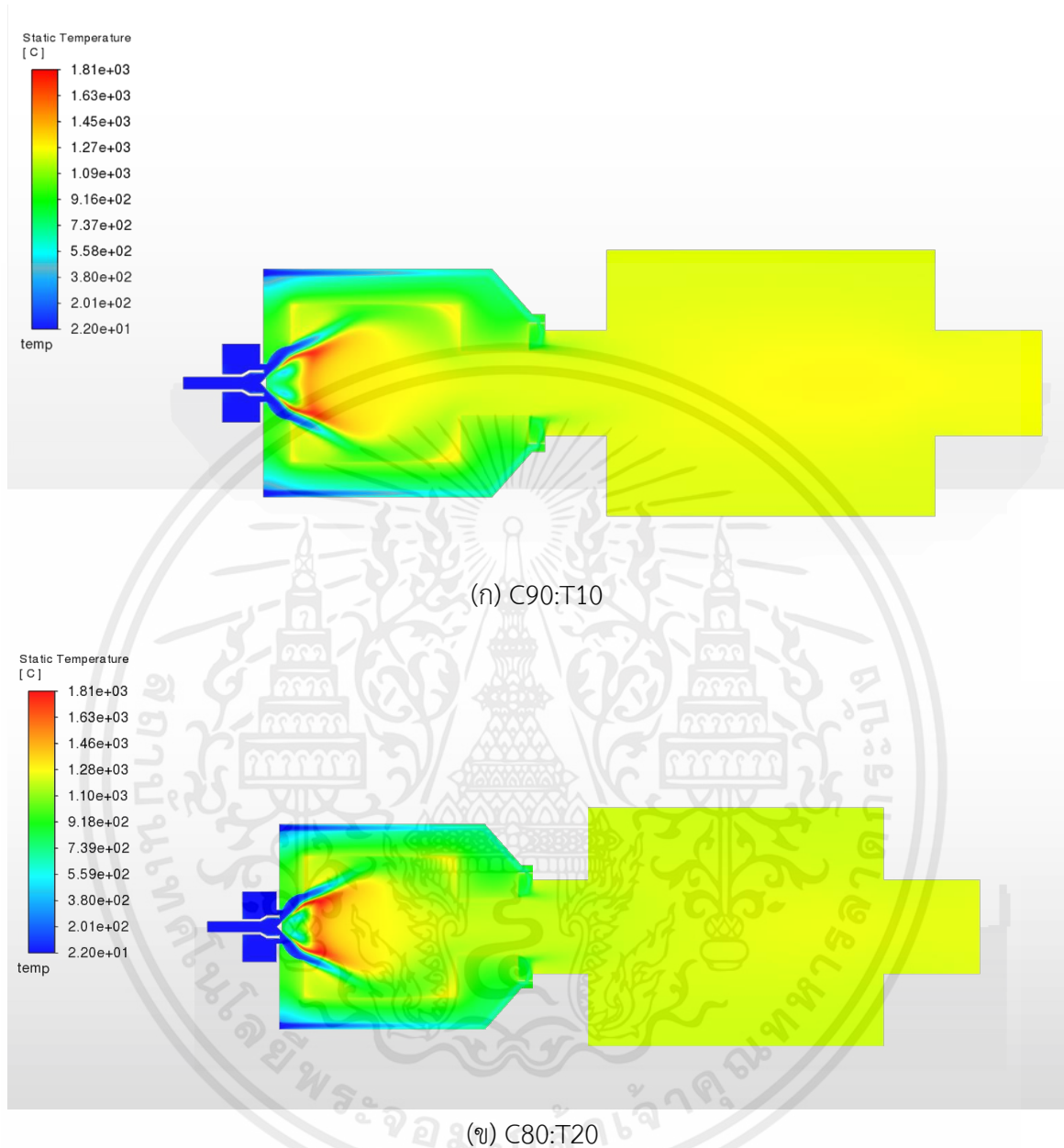
5.1 ผลการจำลองการเผาไหม้ทางคณิตศาสตร์ของเชื้อเพลิงชีวมวลทอรีไฟต์

การจำลองจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีเชื้อเพลิงผสมระหว่างเชื้อเพลิงชีวมวลทอรีไฟต์ และ ถ่านหินที่สองอัตราส่วนผสมได้แก่ C90:T10 และ C80:T20 ตามลำดับ โดยผลการจำลองที่เรานำมา ทำการศึกษา และเปรียบเทียบมีดังนี้

1. อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเตาเผาอุตสาหกรรม
2. สัดส่วนเชิงมวลของสารระเหย (Volatile)
3. สัดส่วนเชิงมวลของออกซิเจน (O_2)
4. สนามการไหล

โดยพฤติกรรมของของไหลจากแบบจำลองสามารถอธิบายด้วยสมการ 3 สมการ คือ สมการความ ต่อเนื่อง (Continuity Equation) สมการโมเมนตัม (Momentum Equation) และสมการพลังงาน (Energy Equation) โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีถูกควบคุมโดย large-eddy mixing time scale

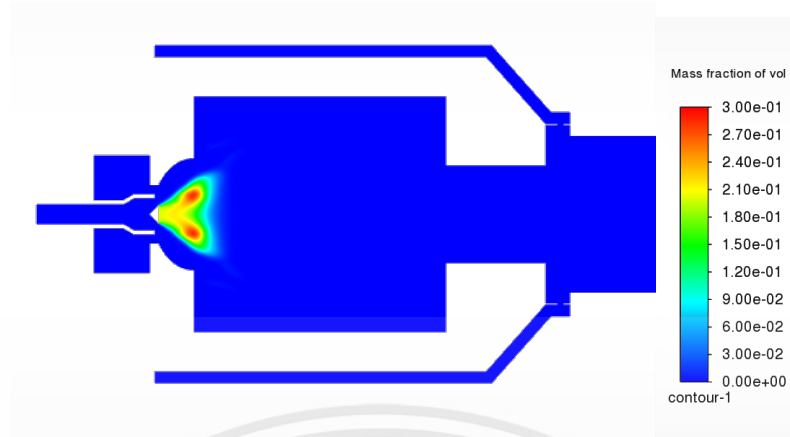
5.1.1 ผลการจำลองของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเตาเผาอุตสาหกรรม



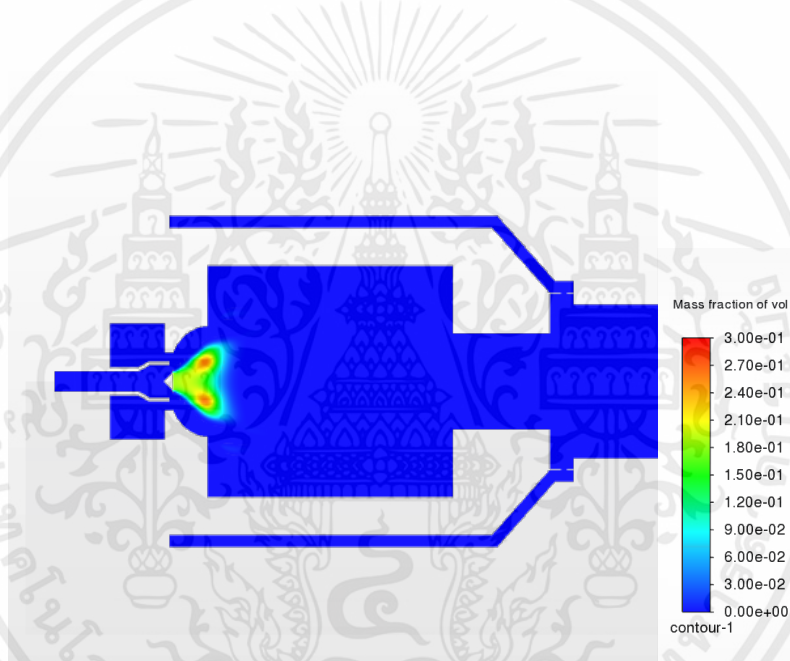
ภาพที่ 5.1 แสดงการอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเตาเผาอุตสาหกรรม

จากภาพที่ 5.1 ผลของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเตาเผาอุตสาหกรรมสามารถแสดงให้เห็นลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นทั้งห้องเผาไหม้ช่วย และ ห้องเผาไหม้หลักโดยสอดคล้องกับสนามการไหล โดยการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดจากการพาอนุภาคเชื้อเพลิงโดยอากาศภายใน ดังนั้นอุณหภูมิที่แสดงจะบ่งชี้ถึงบริเวณที่มีการเผาไหม้เกิดขึ้น โดยเมื่อเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย อนุภาคเชื้อเพลิงจะรับรังสีความร้อนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงและดูดซับความร้อนเข้าสู่อนุภาค แล้วจึงเริ่มการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังภาพที่ 5.1 โดยเริ่มต้นจากการระเหยความชื้นในเชื้อเพลิงผสม การปลดปล่อยสารระเหย การจุดติดไฟ และการเผาไหม้ของสารระเหยและถ่านชาร์ จนกระทั่งเผาไหม้เหลือแต่ขี้เถ้า โดยแนวโน้มของอุณหภูมิในสองกรณีเอกสค่อนข้างใกล้เคียงกันเนื่องจกอัตราส่วนของเชื้อเพลิงผสมไม่ต่างกันมากญาติให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ผลการจำลองของสัดส่วนเชิงมวลของปริมาณสารระเหย



(ก) C90:T10



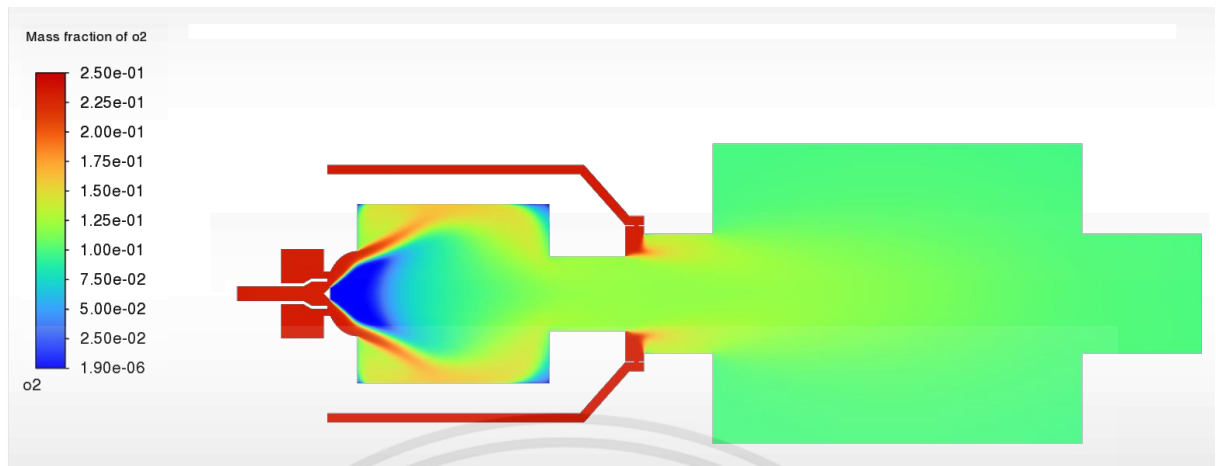
(ข) C80:T20

ภาพที่ 5.2 ปริมาณของสารระเหยที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ช่วย

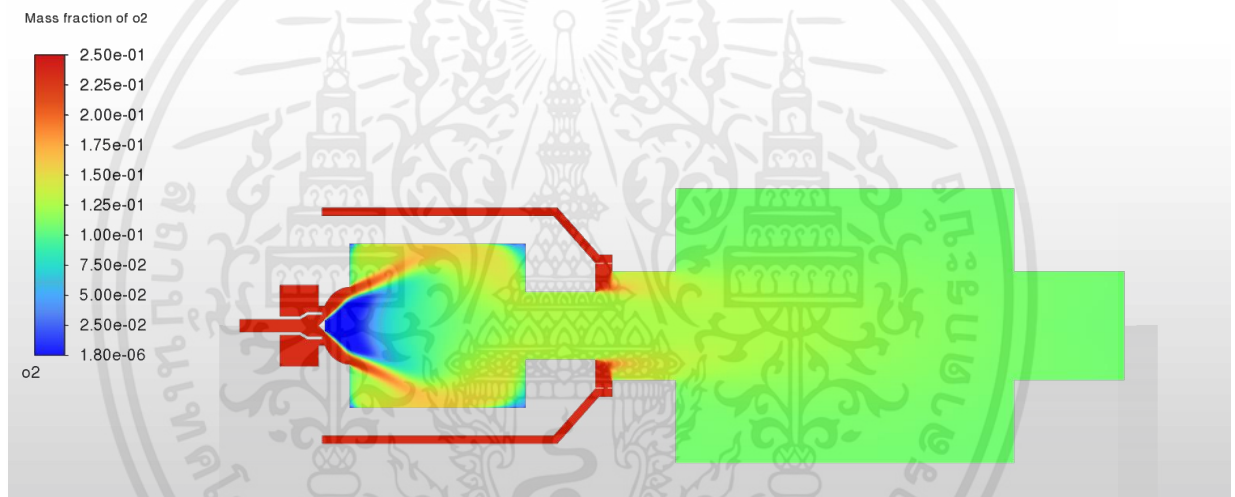
จากภาพที่ 5.2 แสดงปริมาณความเข้มข้นของสารระเหยที่ถูกปล่อยออกมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิง พบว่าปริมาณสารระเหยบริเวณห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงผสม C90:T10 มากกว่า C80:T20 เนื่องจากสารระเหยในองค์ประกอบของ C90:T10 มีมากกว่า โดยปริมาณของสารระเหยดังกล่าวเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเผาไหม้เร็วมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ผลการจำลองปริมาณสัดส่วนเชิงมวลของออกซิเจน



(ก) C90:T10



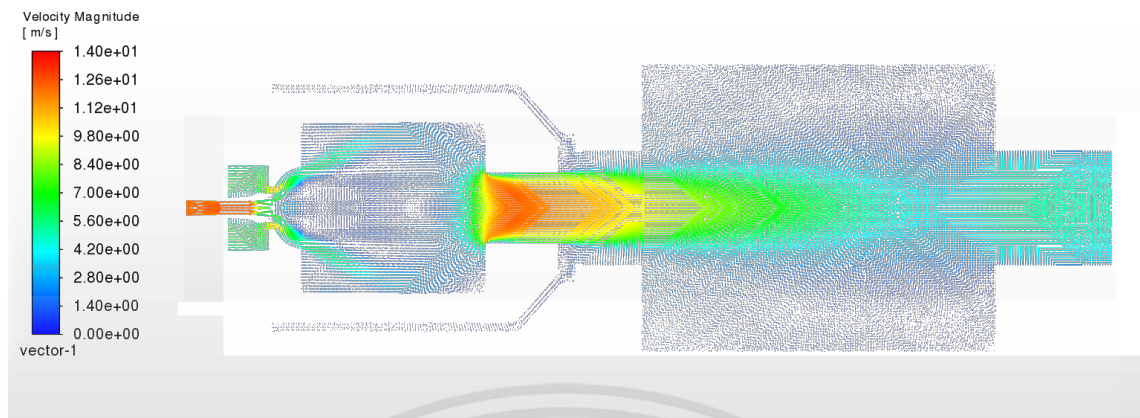
(ข) C80:T20

ภาพที่ 5.3 แสดงปริมาณออกซิเจนในห้องเผาไหม้ของเตาเผาอุตสาหกรรม

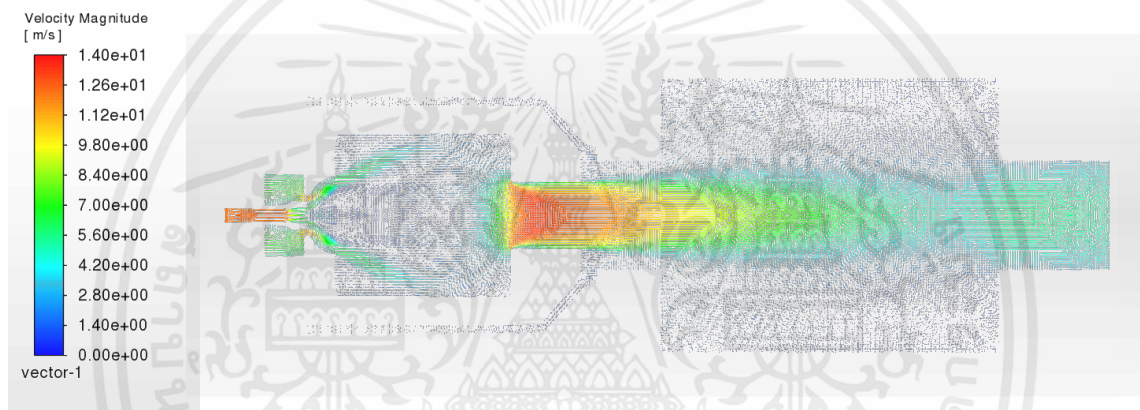
จากผลการจำลองของปริมาณสัดส่วนออกซิเจนพบว่าบริเวณห้องเผาไหม้ช่วยด้านหลังของวัตถุ ขวางการไหลมีบริเวณที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำมากเนื่องจากอัตราส่วนเชื้อเพลิงเกิน และเป็น บริเวณแสดงถึงอัตราการเผาไหม้ที่สูง เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยต้องมีเชื้อเพลิง และอากาศจึง สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ ดังนั้นบริเวณที่ออกซิเจนต่ำลงแสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง ซึ่ง สอดคล้องกับผลการจำลองของอุณหภูมิโดยบริเวณที่มีออกซิเจนต่ำเป็นบริเวณเดียวกันกับจุดที่มีอุณหภูมิ สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 ผลการจำลองสนามการไหล



(ก) C90:T10

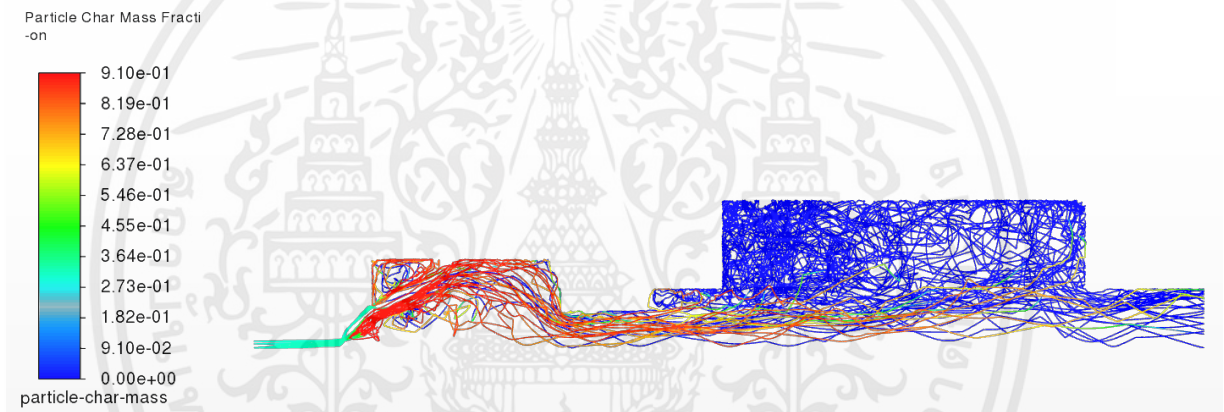
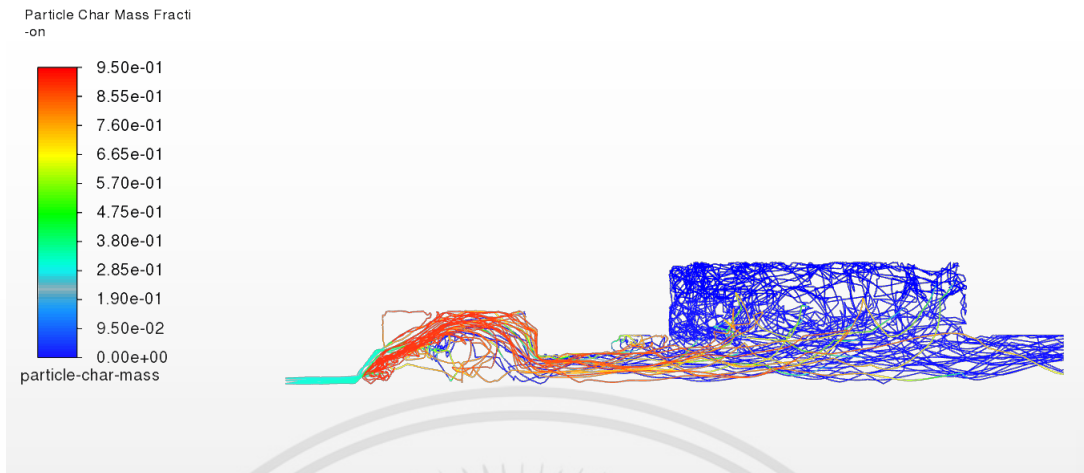


(ข) C80:T20

ภาพที่ 5.4 แสดงสนามการไหลภายในเตาเผาอุตสาหกรรม

จากภาพที่ 5.4 แสดงสนามการไหลของอากาศภายในห้องเผาไหม้พบว่าเวกเตอร์การไหลของอากาศปฐมภูมิที่เข้ามามีความเร็วประมาณ 12 เมตรต่อวินาทีโดยที่ปลายของอากาศปฐมภูมิมียัตถุขวางการไหลจึงทำให้ความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น และมีความเร็วของอากาศทุติยภูมิเข้ามารวมทำให้มีความเร็วประมาณ 11 เมตรต่อวินาที เมื่อเข้าห้องเผาไหม้ช่วยโดยอากาศทุติยภูมิเป็นอากาศที่ผ่านแผ่นบิดโค้ง (Swirl) ทำให้เกิดการหมุนควงภายในห้องเผาไหม้ช่วยทำให้อากาศที่ไหลเข้าไปยังห้องเผาไหม้ช่วยฉีกไปยังผนังของเตาเพราะการหมุนควงซึ่งทำให้เกิดการไหลปั่นป่วน และเกิดการไหลย้อนกลับ ความเร็วการไหลจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อเข้าสู่ห้องเผาไหม้หลักเนื่องจากระหว่างห้องเผาไหม้ช่วย และห้องเผาไหม้หลักมีบริเวณที่พื้นที่เล็กเพื่อเข้าสู่ห้องเผาไหม้หลัก

5.1.5 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคชาร์



ภาพที่ 5.5 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคของชาร์ในเตาเผาอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการทดลองจากหัวเผา

5.2.1 ผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

การทดลองนี้ได้ทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 และ 80:20 โดยทำการวัดอุณหภูมิที่ Pre-chamber (ตำแหน่ง T1-T5) ทั้งตามแนวแกนและตามแนวรัศมีได้ผลดังนี้

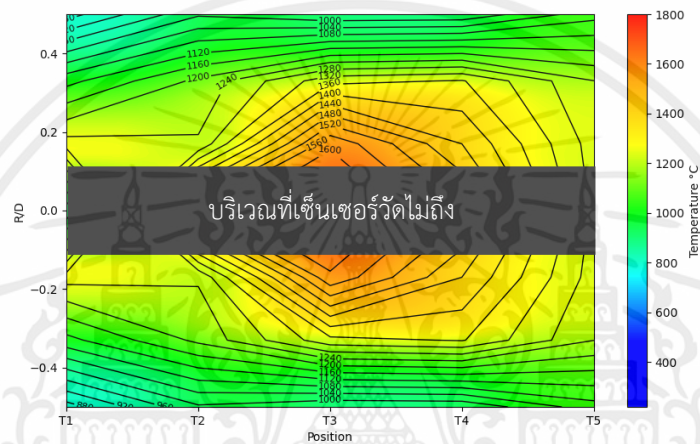
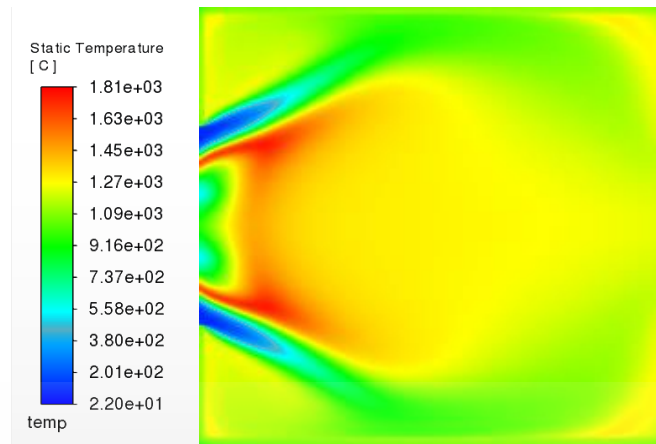
ตารางที่ 5.1 อุณหภูมิที่เซ็นเซอร์วัดได้ตามแนวแกนของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

R/D	0.2	0.3	0.4	0.5
T1	948.20	1050.50	979.80	861.70
T2	1135.30	1132.20	1101.50	993.60
T3	1175.90	1186.70	1156.20	962.20
T4	1165.10	1163.80	1151.90	966.30
T5	1152.50	1151.90	1146.40	1063.70

ตารางที่ 5.2 อุณหภูมิที่เซ็นเซอร์วัดได้ตามแนวรัศมีของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

R/D	0.2	0.3	0.4	0.5
T1	860.60	937.10	900.90	861.70
T2	1063.70	1086.10	1075.70	993.60
T3	1151.90	1156.80	1148.80	962.20
T4	1136.50	1152.50	1121.80	966.30
T5	1153.70	1135.50	1125.50	1063.70

อุณหภูมิตามแนวแกนจากบริเวณหัวฉีดเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นจนถึงตำแหน่ง (T3) และ R/D = 0.2 แล้วลดลงเล็กน้อยก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้หลัก ส่วนอุณหภูมิตามแนวรัศมีจะเพิ่มขึ้นจากจุดศูนย์กลางห้องเผาไหม้ช่วยจนถึงที่ระยะ R/D = 0.3 แล้วอุณหภูมิลดลงจนถึงผนังห้องเผาไหม้ช่วย



ภาพที่ 5.6 อุณหภูมิจากการจำลองเทียบกับที่เซ็นเซอร์วัดได้ของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสม ถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 เปอร์เซนต์โดยมวล

จากภาพแสดงให้เห็นฐานของเปลวไฟอยู่ที่บริเวณตำแหน่ง (T2) แสดงให้เห็นถึงความล่าช้าของการจุดติดไฟเล็กน้อย (Ignition Delay) ก่อนที่จะกระจายอุณหภูมิไปยังผนังเตาด้วยอิทธิพลของลมทุติยภูมิ ซึ่งเป็นลมที่ไหลผ่านใบพัดบิด (Swirl) ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน คลุกเคล้ากันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศในห้องเผาไหม้ได้เป็นอย่างดี อุณหภูมิในห้องเผาไหม้เฉลี่ย 1050-1150 °C

5.2.2 ผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 80:20 เปอร์เซ็นต์ โดยมวล

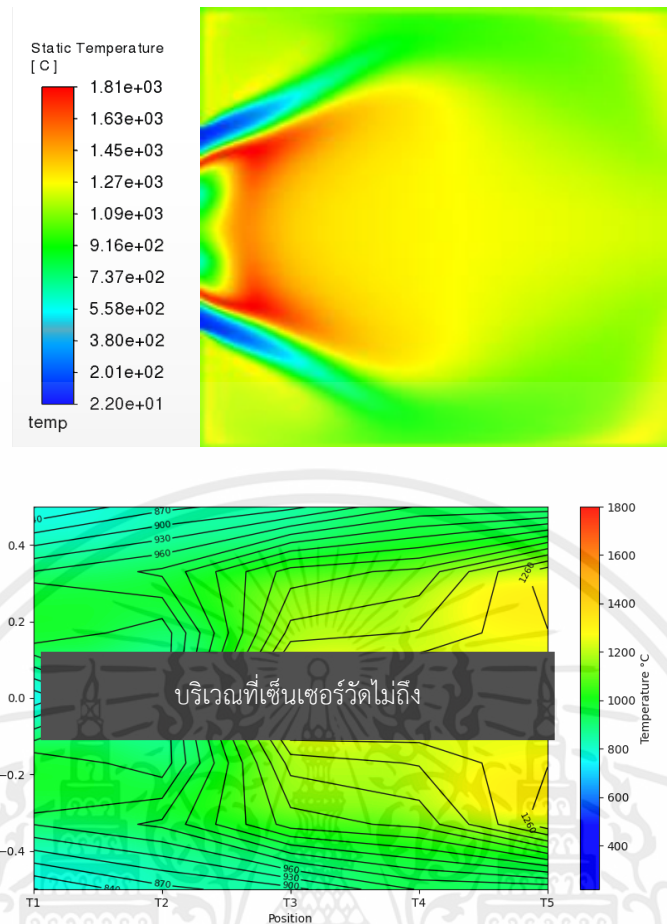
ตารางที่ 5.3 อุณหภูมิที่เซ็นเซอร์วัดได้ตามแนวแกนของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

R/D	0.2	0.3	0.4	0.5
T1	796.20	892.80	891.60	808.20
T2	876.60	893.90	943.00	860.60
T3	1050.50	1015.80	1024.80	889.80
T4	1088.60	1071.50	1064.90	962.80
T5	1092.30	1111.30	1107.70	966.90

ตารางที่ 5.4 อุณหภูมิที่เซ็นเซอร์วัดได้ตามแนวรัศมีของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

R/D	0.2	0.3	0.4	0.5
T1	820.20	866.30	819.00	861.70
T2	934.80	912.00	921.40	993.60
T3	1078.80	1052.30	1007.40	962.20
T4	1135.30	1094.70	1061.30	966.30
T5	1145.10	1133.50	1100.90	1063.70

อุณหภูมิตามแนวแกนจากบริเวณหัวฉีดเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสูงสุดที่ก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้หลัก (T5) ส่วนอุณหภูมิตามแนวรัศมีจะเพิ่มขึ้นจากระยะ R/D = 0.2 เผาไหม้ช่วยจนถึงที่ระยะ R/D = 0.3 แล้วอุณหภูมิลดลงจนถึงผนังห้องเผาไหม้ช่วย R/D = 0.5



ภาพที่ 5.7 อุณหภูมิจากการจำลองเทียบกับที่เซ็นเซอร์วัดได้ของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสม ถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

จากภาพแสดงให้เห็นอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่บริเวณตำแหน่ง (T3) ซึ่งอยู่บริเวณกลางเตา แสดงให้เห็นถึงความล่าช้าของการจุดติดไฟ (Ignition Delay) ก่อนที่จะกระจายอุณหภูมิไปยังผนังเตาด้วยอิทธิพลของลมทุติยภูมิซึ่งเป็นลมที่ไหลผ่านใบพัดบิต (Swirl) ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน คลุกเคล้ากันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศในห้องเผาไหม้ได้เป็นอย่างดี อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยเฉลี่ย 950-1050 °C

5.2.3 ผลการชดเชยผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อน

ในการใช้ Thermocouple วัดอุณหภูมิ ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จะไม่ใช้ค่าอุณหภูมิของเชื้อเพลิงผสม แต่จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากมีการแผ่รังสีความร้อนจากบริเวณจุดกลางเตาไปยังผนังเตา จึงต้องมีการชดเชยผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อน ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.5 การชดเชยผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อนของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

อุณหภูมิ	Tth	Tw	Tf
T1	948.20	861.70	1007.29
T2	1135.30	993.60	1576.03
T3	1175.90	962.20	1676.01
T4	1165.10	966.30	1534.66
T5	1152.50	1063.70	1270.98

ตารางที่ 5.6 การชดเชยผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อนของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

อุณหภูมิ	Tth	Tw	Tf
T1	796.20	808.20	790.30
T2	876.60	860.60	906.63
T3	1050.50	889.80	1319.49
T4	1088.60	962.80	1289.46
T5	1092.30	966.90	1227.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

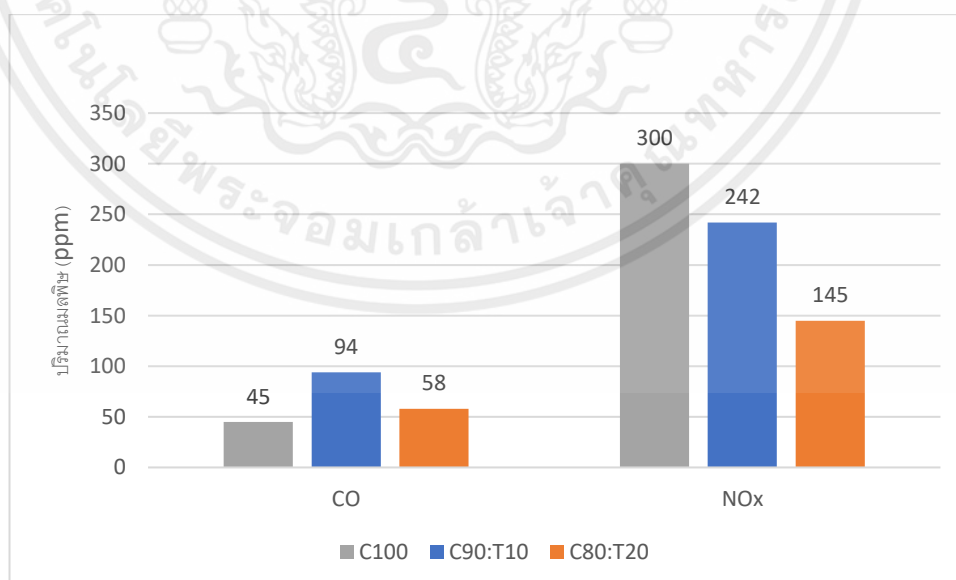
5.2.4 การเปรียบเทียบผลการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลทอร์รีไฟต์ที่สัดส่วนต่างกัน

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบอุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 และ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

อุณหภูมิ	90:10	80:20
T1	1007.29	790.30
T2	1576.03	906.63
T3	1676.01	1319.49
T4	1534.66	1289.46
T5	1270.98	1227.60

ตารางที่ 5.8 ตารางแสดงค่าแก๊สไอเสียที่วัดได้จากการทดลอง

เชื้อเพลิง	CO เฉลี่ย (ppm)	CO มากสุด (ppm)	CO น้อยสุด (ppm)	NO _x เฉลี่ย (ppm)	NO _x มากสุด (ppm)	NO _x น้อยสุด (ppm)	%O
C100	45	-	-	300	-	-	7
C90:T10	94	447	57	242	308	197	10
C80:T20	58	194	22	145	237	81	14



ภาพที่ 5.8 แสดงการปล่อยแก๊สไอเสียของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 และ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

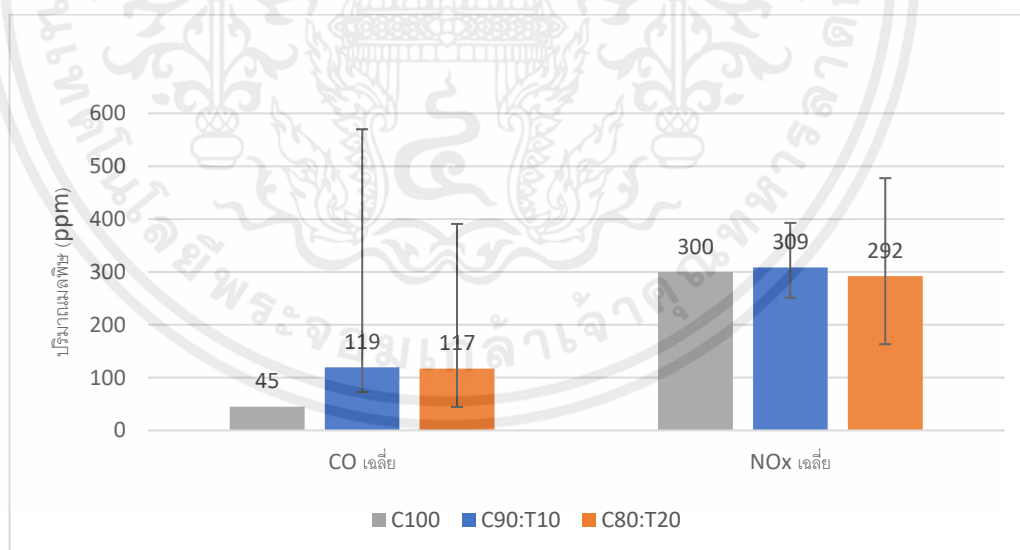
ในการวัดแก๊สไอเสีย เนื่องจากปริมาณ % จึงต้องมีการปรับค่าแก๊สไอเสีย (Emission conversion factors) โดยใช้ออกซิเจน 7% เป็นค่าอ้างอิง และใช้สมการต่อไปนี้

$$F_o = \frac{(20.9 - \%O_{2,reference})}{(20.9 - \%O_{2,measured})} \quad (5.1)$$

จะได้แฟกเตอร์การปรับค่าไอเสียของเชื้อเพลิง C90:T10 เป็น 1.28 และแฟกเตอร์การปรับค่าไอเสียของเชื้อเพลิง C80:T20 เป็น 2.01 จึงสามารถคำนวณปริมาณแก๊สไอเสียได้ใหม่ดังนี้

ตารางที่ 5.9 ตารางแสดงผลแก๊สไอเสีย โดยผ่านการปรับค่าซึ่งอ้างอิงที่ปริมาณออกซิเจน 7%

	CO เฉลี่ย (ppm)	CO มากสุด (ppm)	CO น้อยสุด (ppm)	NO _x เฉลี่ย (ppm)	NO _x มากสุด (ppm)	NO _x น้อยสุด (ppm)
C100	45	-	-	300	-	-
C90:T10	119	570	73	309	393	251
C80:T20	117	391	44	292	477	163

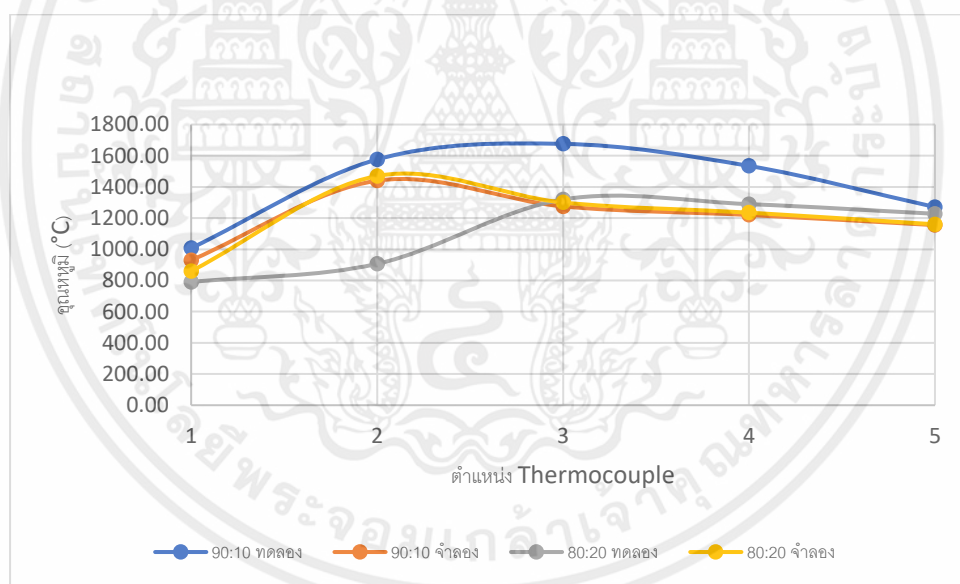


ภาพที่ 5.9 แสดงการปล่อยแก๊สไอเสียของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 และ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล เมื่อผ่านการปรับค่าซึ่งอ้างอิงที่ปริมาณออกซิเจน 7%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวัดแก๊สไอเสียของเชื้อเพลิงผสมพบว่า เชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 และ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล จะมีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นเฉลี่ย 119 และ 117 ppm และปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) เฉลี่ย 309 และ 300 ppm ตามลำดับ เมื่อนำผลการทดลองถ่านหิน 100% จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ซึ่งวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นเฉลี่ย 45 ppm และปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) เฉลี่ย 300 ppm โดยกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดมาตรฐานให้อุตสาหกรรมสามารถปล่อย CO และ NO_x ได้ไม่เกิน 690 และ 200 ตามลำดับ [K23] สำหรับการเกิด CO สามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ระหว่างสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกับอากาศหรือการแตกสลายของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งวัดได้ค่าปริมาณต่ำกว่ามาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ ส่วนการเกิด NO_x อาจเกิดจากกลไกของ Thermal NO_x เนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ประมาณ 1,100-1,400 °C ทำให้เกิดปริมาณ NO_x สูงสุด 309 ppm ซึ่งเกินมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ

5.3 เปรียบเทียบการเผาไหม้ระหว่างผลการทดลองและผลการจำลอง



ภาพที่ 5.10 อุณหภูมิจากการจำลองและการทดลองของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 และ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

ผลการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมถ่านหินกับทอร์รีไฟต์ 90:10 และ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยมวลจากการทดลองและการจำลองให้ผลลัพธ์ที่ต่างกัน โดยหลังจากที่ได้นำผลอุณหภูมิจาก Thermocouple มาชดเชยผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อน พบว่าอุณหภูมิจะเพิ่มมากขึ้นสูงสุดที่ T3 ในขณะที่ผลจากการจำลองพบว่าอุณหภูมิจะเพิ่มมากขึ้นสูงสุดที่ T2 อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของอุณหภูมียังคงเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ อุณหภูมิจะต่ำที่สุดบริเวณหัวฉีดเชื้อเพลิง (T1) ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นจนสูงสุดที่บริเวณกลางห้องเผาไหม้ช่วย (T2) หรือ (T3) และลดลงเล็กน้อยเข้าสู่ห้องเผาไหม้หลัก (T5)

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ (CFD) แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหิน และทอริไฟต์โดย

1.) อุณหภูมิในห้องเผาไหม้พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นของเชื้อเพลิงผสม C90:T10 และ C80:20 เท่ากับ $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $1810\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ และผลการจำลองเชิงตัวเลขทำให้เห็นพฤติกรรมการเผาไหม้โดยผลของอุณหภูมิจะบ่งบอกตำแหน่งการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เมื่ออากาศไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย เชื้อเพลิงที่อยู่ใต้กระแสการไหลของแก๊สร้อนทำให้การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา และแผ่รังสีไปยังผิวของเชื้อเพลิงส่งผลให้อุณหภูมิถึงจุดเดือดของน้ำทำให้มีการระเหยของน้ำ จากนั้นอุณหภูมิจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เชื้อเพลิงจะค่อยๆ ถูกสลายด้วยความร้อน และปล่อยสารระเหยออกมาสู่อากาศรอบ ๆ แสดงถึงผลของสัดส่วนโดยมวลของสารระเหย เมื่ออุณหภูมิถึงจุดติดไฟจะเกิดเปลวรอบ ๆ เชื้อเพลิง เปลวไฟที่เกิดขึ้นให้ความร้อนแก่เชื้อเพลิงส่งเสริมให้การปล่อยสารระเหยและเกิดการเผาไหม้ดีขึ้น โดยการกระจายตัวของอุณหภูมิการเผาไหม้จะเกิดขึ้นเป็นไปตามความเร็วของอากาศตามผลจำลองสนามเวกเตอร์การไหลในรูปที่ 5.4

2.) ปริมาณสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนแสดงให้เห็นถึงการสนับสนุนกันของเชื้อเพลิงผสม และอากาศที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในบริเวณกลางห้องเผาไหม้ที่สอดคล้องกับบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง

3.) ปริมาณสัดส่วนโดยมวลของสารระเหยโดยกรณีเชื้อเพลิงผสม C90:T10 มีความเข้มข้นมากกว่า C80:T20 เนื่องจากในเชื้อเพลิงผสมประกอบด้วยถ่านหินซึ่งมีสารระเหยมากกว่า และจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent ทำให้เห็นตำแหน่งการระเหยของสารระเหยในเชื้อเพลิงผสมทำให้เห็นรายละเอียดของการเผาไหม้ในช่วงการปลดปล่อยสารระเหยได้ดีขึ้น และสอดคล้องกับผลของอุณหภูมิ

6.2 สรุปผลการเผาไหม้จริงจากชุดทดลอง

การศึกษาอุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินและทอริไฟต์ที่อัตราส่วนผสม 90:10 และ 80:20 โดยมวล ได้ข้อสรุปดังนี้

1.) การกระจายตัวของอุณหภูมิตามแนวแกนสำหรับเชื้อเพลิงผสม C90:10 และ C80:20 พบว่าอุณหภูมิมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันโดยเริ่มสูงขึ้นที่ตำแหน่งของ T3 โดยที่เชื้อเพลิงผสม C90:T10 จะมีอุณหภูมิสูงกว่า C80:T20 ณ ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งหมายถึงเชื้อเพลิงผสม C90:T10 จะมีฐานของเปลวไฟอยู่ใกล้กับต้นทางของห้องเผาไหม้ช่วยมากกว่า C80:T20 หรือเชื้อเพลิงผสม C80:T20 มีความล่าช้าของการจุดติดไฟ (Ignition delay)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) การกระจายตัวของอนุภาคนิวตามแนวรัศมีสำหรับเชื้อเพลิงผสม C90:10 และ C80:20 พบว่าอนุภาคนิวมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันโดยสูงที่สุดที่ตำแหน่งของ $R/D = 0.17$ โดยที่เชื้อเพลิงผสม C90:T10 จะมีอนุภาคนิวสูงกว่า C80:T20 ณ ตำแหน่ง R/D เดียวกัน

3.) มลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม C90:10 และ C80:20 เนื่องจากปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ซึ่งมาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้ คือ 200 ppm พบว่าเชื้อเพลิงผสม C90:T10 มีปริมาณ 309 ppm เกินมาตรฐาน ในขณะที่เชื้อเพลิงผสม C80:T20 มีปริมาณ 292 ppm เกินมาตรฐานเช่นเดียวกัน สาเหตุเกิดจาก Thermal NO_x ทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม C90:T10 ซึ่งมีอนุภาคนิวในห้องเผาไหม้สูงกว่าจึงเกิด NO_x มากกว่า C80:T20 ส่วนปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) พบว่าเชื้อเพลิงผสม C90:T10 มีปริมาณ 119 ppm และเชื้อเพลิงผสม C80:T20 มีปริมาณ 117 ppm ผ่านมาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด คือ 690 ppm โดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากการคลุกเคล้าไม่ดีของเชื้อเพลิงผสม สภาวะการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป และปริมาณอากาศไม่เพียงพอ

4.) จากการเปรียบเทียบมลพิษกับกรณีถ่านหิน 100% (C100) ยังไม่สามารถบอกแนวโน้มได้ว่าการเพิ่มสัดส่วนของชีวมวลทอร์รีไฟด์จะส่งผลให้ปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างไร โดยเมื่อพิจารณาแถบความผิดพลาด (Error bar) แสดงให้เห็นถึงค่าจากการทดลองมีความแปรปรวนมาก ซึ่งสามารถเกิดได้จากการที่มลพิษถูกเจือจางด้วยปริมาณไอเสียขณะทำการวัดผลการทดลอง

5.) การชดเชยอนุภาคนิวที่ได้รับผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อน มีความจำเป็นต้องใช้ความเร็วของเชื้อเพลิงจากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าความเร็วของอนุภาคเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ได้ ความแตกต่างกันของเส้นทางเดินอนุภาคจากการจำลองและการทดลองจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่อการชดเชยอนุภาคนิว

6.3 ข้อเสนอแนะ

1.) ในการจำลองทางคณิตศาสตร์การกำหนดค่าขนาดของอนุภาคในการจำลองค่อนข้างมีผลต่อผลลัพธ์การจำลองเพื่อความแม่นยำของผลการจำลองควรนำเชื้อเพลิงไปวัดการกระจายของขนาดเชื้อเพลิง (Size distribution) เพิ่มเติม

2.) ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลของอนุภาคของถ่านชาร์ที่ยังคงหลงเหลือบริเวณทางออกของเตาเผา ดังนั้นในการปรับปรุงผลการจำลองควรปรับค่าของ Char reaction เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ของชาร์จนหมด และใกล้เคียงกับการเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

3.) การเตรียมเชื้อเพลิงผสม ควรมีเครื่องผสมที่ใช้แรงเครื่องจักรกลเพื่อควบคุมส่วนผสมและความเร็วของใบกวน ให้เกิดการผสมอย่างสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี

4.) การเก็บค่าอนุภูมิภาคของการทดลองตามแนวรัศมี เป็นการเก็บค่าเพียงด้านเดียวภายใต้การสมมติว่าอนุภูมิภาคที่แนวรัศมีที่เท่ากัน จะมีค่าอนุภูมิภาคเท่ากัน แต่เนื่องจากห้องเผาไหม้มีลักษณะเหมือนทรงกระบอกวงแหวนอน เชื่อเพลิงในห้องเผาไหม้จึงตกลงสู่ด้านล่างตามแรงโน้มถ่วงของโลก จึงควรเพิ่มตำแหน่งการเก็บค่าอนุภูมิภาคเพื่อความแม่นยำมากขึ้นในการบันทึกและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.) การทดลองในหนึ่งครั้ง ใช้เวลาเตรียมการค่อนข้างนานและสิ้นเปลืองทรัพยากรเชื้อเพลิงมาก จึงเป็นไปได้ยากในการทดลองซ้ำทันที หากมีการทำวิจัยในครั้งถัดไปและนำผลครั้งนี้มาวิเคราะห์ร่วมด้วย จะทำให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนและแม่นยำมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] รายงานสถานการณ์พลังงานของประเทศไทยเดือนมกราคมถึงพฤษภาคม 2566 เบื้องต้น. กระทรวงพลังงาน.
- [2] คณิศร ทรงแสงธรรม, ณัฐพล ชัยชนะ, พัดชา ฤกษ์ศักดิ์ศรี. การศึกษาผลกระทบของเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์มในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงผงสำหรับหม้อไอน้ำในภาคอุตสาหกรรม. (วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2563).
- [3] รังสินันท์ ณ รังสี. การปรับปรุงสมรรถนะหัวพ่นเชื้อเพลิงผงโดยการเพิ่มพื้นที่ช่องการไหลของอากาศปฐมภูมิ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2563).
- [4] คีต สร้อยทอง. พฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผสมในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดผง. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2563).
- [5] Jun Li, Artur Brzdekiewicz, Weihong Yang, Włodzimierz Blasiak. Co-firing based on biomass torrefaction in pulverized coal boiler with aim of 100% fuel switching. (Applied Energy 99, 2012).
- [6] ฐานิตย์ เมธิยานนท์. ทฤษฎีและเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและชีวมวล. (มีนเซอร์วิส ซัพพลาย, 2559).
- [7] Prabir Basu, Biomass Gasification and pyrolysis practical design and theory.
- [8] ภูมินทร์ คงโต, อาคม ปะหลามานิต, สุเมธ ไชยประพัทธ์, นคร ทิพย์าวงศ์. เทคโนโลยีเทอร์รีแฟคชันชีวมวลเพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพแข็งคุณภาพสูง. (วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2563).
- [9] Anna-Maria Eriksson. The potential of torrefaction combined with entrained-flow gasification for production of synthesis-gas. (MSc. Thesis, Chemical Technology, KTH Royal Institute of Technology. 2012).
- [10] จารุวัตร เจริญสุข. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการประยุกต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1, (กรุงเทพมหานคร : หจก.มีน เซอร์วิส ซัพพลาย, 2561).
- [11] S. Loo and J Koppe. “The handbook of biomass combustion & cofiring”. (Earthscan, 2008).
- [12] Turns, S.R. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications Second Edition. (McGraw-Hill, New York, NY, 1998).
- [13] TSI. Combustion Analysis Basics – An Overview of Measurements, Methods and Calculations Used in Combustion Analysis. (Combust. Anal., 2004).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปยังสื่ออื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar. **Heat and Mass Transfer – Fundamentals & Applications fifth edition.** (McGraw-Hill, New York, NY, 2015).
- [15] ANSYS FLUENT ver.12.0. Theory Guide.
- [16] จารุวัตร เจริญสุข. **หัวฟันไฟอุตสาหกรรมสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่น.** (รายงานการวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้