

พฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผสมในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดผง

COMBUSTION BEHAVIORS OF CO-FIRING BIOMASS IN PULVERIZED
BURNER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2563

KMITL-2020-EN-M-030-004

พฤติกรรมกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผสมในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดผง

COMBUSTION BEHAVIORS OF CO-FIRING BIOMASS IN PULVERIZED
BURNER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMITL-2020-EN-M-030-004 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMBUSTION BEHAVIORS OF CO-FIRING BIOMASS IN PULVERIZED
BURNER



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

2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของห้องเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KMUTL-2020-EN-M-030-004



COPYRIGHT 2020

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้ผู้อื่นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผสมในหัวเผา เชื้อเพลิงชนิดผง
นักศึกษา	นายคิษฐ์ สร้อยทอง
รหัสประจำตัว	60601202
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2563
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จรรูวัตร เจริญสุข

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับผลการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอรีไฟด์กับไม้ยางพาราในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น โดยเริ่มศึกษาจากเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (TGA) เพื่อหาอุณหภูมิติดไฟ อุณหภูมิที่เกิดการเผาไหม้สูงสุด (อุณหภูมิที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักมากที่สุด) รวมถึงอุณหภูมิที่สิ้นสุดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์ (Torrefied Bamboo:TB) ไม้ยางพารา (Rubber Wood: RW) และเชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอรีไฟด์กับไม้ยางพาราที่อัตราส่วน TB90:RW10 TB80:RW20 และ TB70:RW30 ตามลำดับ พบว่าเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์ ไม้ยางพารา และเชื้อเพลิงผสมที่อัตราส่วน TB90:RW10 TB80:RW20 และ TB70:RW30 มีอุณหภูมิติดไฟอยู่ที่ 262.4 270.6 267.2 265.2 และ 263.5 องศาเซลเซียสตามลำดับ ต่อมาได้ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอรีไฟด์กับไม้ยางพาราที่สัดส่วนผสม TB70:RW30 และ TB50:RW50 เพื่อดูผลของสนามการไหล การกระจายอุณหภูมิ สัดส่วนโดยมวลของสารระเหย สัดส่วนโดยมวลของออกไซด์ซัลเฟอร์ และสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน ที่แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งที่เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ ขึ้นในห้องเผาไหม้ ซึ่งประกอบไปด้วยการปลดปล่อยสารระเหย การเผาไหม้ การก่อเกิดมลพิษ ต่อมาได้ทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 และ TB50:RW50 ในเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดฝุ่น โดยสามารถเก็บผลของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วย ห้องเผาไหม้หลัก และปริมาณมลพิษจากแก๊สไอเสีย พบว่าเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 สามารถลดระยะห่างของฐานเปลวไฟกับหัวพ่นเชื้อเพลิงผง ซึ่งส่งผลให้ห้องเผาไหม้ช่วยมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 โดยอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิง TB70:RW30 และ TB50: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 กรณีเชื้อเพลิงผสมวัดค่าได้ใกล้เคียงกัน อยู่ที่ประมาณ 300 PPM ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Combustion behaviors of co-firing biomass in pulverized burner
Student	Mr. Key Soytong
Student ID.	60601202
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2020
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk

ABSTRACT

This thesis concerns with a study on co-firing behavior in pulverized burner of torrefied bamboo, rubber wood and their blends. Firstly, work was carried out on weightloss behavior with temperature under Thermogravimetric analysis (TGA) for torrefied bamboo (TB), rubber wood (RW) and their blends with ratios TB90:RW10, TB80:RW20 and TB70:RW30. The propose was to determine the ignition temperature, peak temperature, and burnout temperature. It was found that the ignition temperature of rubber wood, torrefied bamboo and their blends with ratio TB90:RW10 TB80:RW20 and TB70:RW30 were 262.4, 270.6 267.2, 265.2 and 263.5 degree Celsius respectively. Secondly, work was done on on co-firing behavior in pulverized burner with the aid of Computation fluid dynamics (CFD). The fuel used in this case was a blend of torrefied bamboo and rubber wood with ratios of TB70:RW30 and TB50:RW50. The results showed the vector of velocity, temperature distribution and mass faction of volatile and oxide of surfur. From the result of devolatilization and it's Combustion with air in the pre-chamber. Thirdly, Work was concerned with co-firing behavior in pulverized burner in which temperature in pre-chamber and main chamber and Emission from the exhaust gas can be measured from the semi-industrial scale unit. The results showed that the flame front of co-firing of TB50:RW50 was nearless to burner than TB70:RW30. The temperature in a pre-chamber of TB70:RW30 and TB50:RW50 was 950 and 1050 degree Celsius respectively. The emissions of CO from exhaust in case of TB50:RW50 is 175 PPM more than the case of TB70:RW30 that can be collected at 80 PPM. The emissions of NO_x from exhaust gas of the both case of ratio blend (TB70:RW30 and TB50:RW50) was similar at 300 PPM and that was lower than the limit of Pollution Management of Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำ คำปรึกษาและความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.จรรูวัตร เจริญสุข อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความ อนุเคราะห์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ จักรใจ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฏวิภา เจียรระโนวชิระ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง และ รองศาสตราจารย์ ดร.จรรูวัตร เจริญสุข ประธานและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เฝ้าเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และให้ทุนทรัพย์ใน การศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตั้งแต่เริ่มต้นจนประสบความสำเร็จรวมทั้งเป็นกำลังใจในการฟัน ฝ่าปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ เสมอมา และขอขอบคุณผู้ที่ให้การสนับสนุนทุกท่านที่มีได้เอื้อนามมา ณ ที่นี้ด้วย

ถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลงได้ด้วยดี คุณค่าและ ประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรี รัตนตรัยอำนวยการอำนวยพรความสุขสวัสดิ์จงมีแต่ทุกท่าน

คีต์ สร้อยทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4.1 เชื้อเพลิงชีวมวล	3
1.4.2 การศึกษาด้วยเครื่องวิเคราะห์การลดลงของน้ำหนัก.....	3
1.4.3 การเผาไหม้ในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 องค์ประกอบของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวิเคราะห์การลดลงของน้ำหนัก.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ในหัวเผาชนิดฝุ่น (Pulverized).....	6
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (TGA).....	10
3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับชีวมวล	11
3.2.1 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง	12
3.2.2 ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	13
3.2.3 ขนาดและลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	13
3.2.4 สมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวล	13
3.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.1 กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล	20
3.3.2 สตอยซิโอเมตรีของการเผาไหม้	20
3.3.3 อัตราส่วนสมมูล	21
3.3.4 เปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎี	21
3.3.5 การคำนวณประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้	22
3.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยมลพิษ	23
3.4.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	23
3.4.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (Nitrogen oxide, NO _x)	23
3.4.3 ไนตรัสออกไซด์ (N ₂ O)	26
3.4.4 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO _x)	26
3.4.5 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	28
3.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองคณิตศาสตร์	28
3.5.1 สมการอนุกรมมวล	28
3.5.2 สมการอนุกรมโมเมนตัม	29
3.5.3 สมการอนุกรมพลังงาน	29
3.5.4 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน k-ε	29
3.5.5 สมการถ่ายโอนสปีชีส์	32
3.5.6 แบบจำลองของการก่อเกิดมลพิษ	33
บทที่ 4 ชุดอุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง	34
4.1 อุปกรณ์การทดลอง	34
4.1.1 ชุดทดลองเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร	34
4.1.2 ชุดอุปกรณ์ทดลองหัวเผาชนิดฝุ่น (Pulverized Burner)	35
4.2 วิธีการทดลอง	41
4.2.1 วิธีการทดลองในหัวเผาชนิดฝุ่น	41
4.2.2 การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	44
4.2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	49
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	52
5.1 ผลการทดลองจากเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (TGA)	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1.1 ผลของเชื้อเพลิงเดี่ยว	52
5.1.2 ผลของเชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ยางพารากับไม้ไผ่ทอรีไฟด์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ	53
5.2 ผลการจำลองการเผาไหม้ทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาชนิดฝุ่น.....	56
5.2.1 ผลการจำลองของสนามการไหล	56
5.2.2 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้	61
5.2.3 ผลการจำลองของปริมาณของสารระเหย	63
5.2.4 ผลการจำลองของปริมาณออกซิเจน O ₂	64
5.2.5 ผลการจำลองของออกไซด์ซัลเฟอร์ (SO _x).....	65
5.3 ผลการทดลองจากหัวเผาชนิดฝุ่น	67
5.3.1 ผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมไม้ไผ่ทอรีไฟด์ กับไม้ยางพารา 70:30 เปร้เซ็นโดยมวล	67
5.3.2 ผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมไม้ไผ่ทอรีไฟด์ กับไม้ยางพารา 50:50 เปร้เซ็นโดยมวล	73
5.3.3 เปรียบเทียบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมไม้ไผ่ทอรีไฟด์ กับไม้ยางพารา 70:30 50:50 เปร้เซ็นโดยมวล ที่สัดส่วนอากาศ ปฐมภูมิ:ทุติยภูมิ:ตติยภูมิ 25:70:5 ตามลำดับ	79
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	86
6.1 สรุปผลการทดลองจากเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (TGA)	86
6.2 สรุปผลการทดลองจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น	86
6.3 สรุปผลการทดลองจากหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น.....	87
6.4 ข้อเสนอแนะ	89
เอกสารอ้างอิง	90
ภาคผนวก.....	92
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์	92
ประวัติผู้เขียน	113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate analysis) และ แบบการประมาณค่า (Proximate analysis) องค์ประกอบในเชื้อเพลิงชีวมวล	17
4.1 การกระจายของขนาดเชื้อเพลิง (Size distribution).....	45
4.2 การวิเคราะห์แบบประมาณค่าและการแยกธาตุของเชื้อเพลิงไม้อย่างพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟด์...	46
4.3 การแยกธาตุของเชื้อเพลิงผสม.....	46
4.4 อัตราการไหลเชิงมวลของแต่ละขนาดของอนุภาค	47
4.5 อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงตามทฤษฎี ($\phi_{stoic} = 1$).....	48
4.6 อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงที่อากาศส่วนเกิน 15% ($\phi = 0.87$).....	48
4.7 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้ง 3 ส่วน.....	49
4.8 ขอบเขตของการจำลอง (Boundary condition).....	51
5.1 ตารางแสดงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของพฤติกรรมเผาไหม้.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 กราฟการลดลงของน้ำหนัก (TG) และอัตราการลดลงของน้ำหนัก (DTG).....	10
3.2 การหาอุณหภูมิติดไฟจากกราฟการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร(TGA)	11
3.3 ปริมาณที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง	
โดยการประมาณค่าตามเกณฑ์ต่าง ๆ	16
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงแข็ง.....	18
3.5 กลไกการเกิด NO	26
4.1 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis :TGA).....	34
4.2 แสดงแผนผังด้านหน้าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเตาเผาไหม้.....	35
4.3 ไซโลเก็บเชื้อเพลิงเม็ดและสกรูลำเลียงเชื้อเพลิง	37
4.4 เครื่องบดเชื้อเพลิงชนิด Hammer mill	37
4.5 พัดลมลำเลียงเชื้อเพลิงผง	37
4.6 Baghouse และไซโลเก็บเชื้อเพลิงผง	38
4.7 ห้องเผาไหม้ช่วย.....	38
4.8 ห้องเผาไหม้หลัก.....	38
4.9 อ่างเก็บขี้เถ้า.....	39
4.10 หอบำบัดอากาศแบบเปียก (Wet scrubber).....	39
4.11 ท่อไอเสีย	39
4.12 ระบบบำบัดน้ำเสีย	40
4.13 รายละเอียดของห้องเผาไหม้ช่วย.....	40
4.14 ห้องเผาไหม้หลัก.....	41
4.15 เชื้อเพลิงอัดเม็ด	42
4.16 เชื้อเพลิงผง.....	42
4.17 เชื้อเพลิงผสมไม้ไผ่ทอรีไฟต์(TB): ไม้ยางพารา(RW).....	42
4.18 ระบบควบคุมแก๊ส.....	43
4.19 รายละเอียดของระยะที่ทำการวัดอุณหภูมิของห้องเผาไหม้.....	44
4.20 โครงสร้าง และขนาดของแบบจำลองของเตา.....	50
4.21 โครงสร้างกริดของแบบจำลอง.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 กราฟ TG และ DTG ของเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์ และไม้ยางพารา	52
5.2 กราฟTG และDTGของเชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอรีไฟด์ และไม้ยางพาราที่สัดส่วนต่าง ๆ ..	53
5.3 กราฟ TG ของเชื้อเพลิงผสมในช่วงที่เกิดการระเหยน้ำ.....	54
5.4 กราฟอัตราการลดลงของน้ำหนัก DTG ของเชื้อเพลิงผสม	54
5.5 สนามการไหลภายในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสม TB70:RB30.....	56
5.6 สนามการไหลภายในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสม TB50:RB50	57
5.7 สนามการไหลภายในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสม	58
5.8 ทิศทางการไหลในระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x/D ของห้องเผาไหม้ช่วย ของเชื้อเพลิงผสม TB70:RB30	60
5.9 ทิศทางการไหลในระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง x/D ของห้องเผาไหม้ช่วย ของเชื้อเพลิงผสม TB50:RB50	61
5.10 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงผสม	62
5.11 ปริมาณของสารระเหยที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ช่วย	64
5.12 ความเข้มข้นของออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้และห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงผสม	65
5.13 ความเข้มข้นของออกไซด์ซัลเฟอร์ในห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงผสม	66
5.14 กราฟการกระจายของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 ที่อัตราส่วนอากาศปฐุมภูมิ:ทุติยภูมิ:ตติยภูมิ	68
5.15 ผลอุณหภูมิของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 สัดส่วนอากาศที่ระยะ x/D ต่าง ๆ	70
5.16 ปริมาณมลพิษที่วัดจากไอเสียในกรณี เชื้อเพลิงผสม TB70:RW30.....	73
5.17 กราฟการกระจายของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 ที่อัตราส่วนอากาศปฐุมภูมิ:ทุติยภูมิ:ตติยภูมิ	74
5.18 ผลอุณหภูมิของเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 สัดส่วนอากาศที่ระยะ x/D ต่าง ๆ.....	76
5.19 ปริมาณมลพิษที่วัดจากไอเสียในกรณี เชื้อเพลิงผสมTB50:RW50	79
5.20 ผลของอุณหภูมิในแต่ละสัดส่วนของการผสมเชื้อเพลิงที่ระยะ x/D	80
5.21 เปรียบเทียบปริมาณมลพิษที่วัดจากไอเสียของเชื้อเพลิงผสมทั้ง 2 กรณี	83
5.22 เชื้อเพลิงที่กองอยู่ในห้องเผาไหม้ช่วยในกรณีของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30.....	84
5.23 ผลเฉลี่ยของการเผาไหม้อนุภาคคาร์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ [1]

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการในการใช้พลังงานทุกรูปแบบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุก ๆ ปี โดยในปี 2562 พบว่าประเทศไทยมีการใช้พลังงานรวมขั้นสุดท้ายรวม 36,640 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากปี 2561 ร้อยละ 1.4% คิดเป็นมูลค่าการใช้พลังงานรวม 567,521 ล้านบาท โดยน้ำมันสำเร็จรูปยังคงเป็นพลังงานที่ใช้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 48.10% ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด รองลงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า 20.00%, พลังงานหมุนเวียน 9.50 %, ถ่านลิกไนต์ 8.30%, ก๊าซธรรมชาติ 7.10% และ พลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม 6.4% ซึ่งพลังงานเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตประจำวันและพัฒนาขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ จากความต้องการพลังงานพลังงานที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่ในทางตรงกันข้ามแหล่งพลังงานของประเทศมีค่อนข้างจำกัดจึงต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ปี 2562 ประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงานสุทธิ 7,770 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากปี 2561 ร้อยละ 3.5 โดยน้ำมันดิบยังคงเป็นการนำเข้าที่มากที่สุด นอกจากนี้ราคาพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงอย่างต่อเนื่องทำให้เป็นภาระต่อผู้ใช้พลังงาน ด้วยเหตุนี้ทำให้รัฐบาลจึงหันมาตระหนักถึงการไหลพลังงานทดแทนและพลังงานหมุนเวียนมากขึ้น อาทิเช่น พลังงานชีวมวล พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานน้ำ เป็นต้น

ประเทศไทยนับเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ประชาชนมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ผลพลอยได้ที่สำคัญนอกเหนือจากผลผลิตทางการเกษตรก็คือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ กากอ้อย กาก ใย และทะลายปาล์ม เป็นต้น เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าชีวมวล (Biomass) มีปริมาณกว่า 60 ล้านตันต่อปี หรือหากคิดเป็นพลังงานเทียบเท่า 11,938 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ซึ่งชีวมวลเหล่านี้หากไม่นำไปใช้ประโยชน์มักจะถูกทิ้งให้กลายเป็นปุ๋ยอินทรีย์หรือไม่ก็กำจัดโดยการเผาทิ้ง จากปริมาณซากชีวมวลที่เหลือทิ้งจำนวนมากทำให้หลายหน่วยงานได้เล็งเห็นถึงศักยภาพของชีวมวลและได้มีการนำชีวมวลไปใช้ในการผลิตพลังงาน ซึ่งในปี 2562 พบว่ามีการนำชีวมวลมาแปรรูปเป็นพลังงานทดแทนสามารถช่วยผลิตพลังงานความร้อนได้มากกว่า 6,907 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ และผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 3,372 เมกะวัตต์ จะเห็นได้ว่าชีวมวลมีศักยภาพในการเป็นพลังงานทดแทนได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการนำชีวมวลมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทางความร้อนจึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีราคาต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลและมีหาได้ง่ายในประเทศไทย อีกทั้งในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่สามารถเพิ่มค่าความร้อนให้แก่เชื้อเพลิง จึงเริ่มเป็นที่สนใจสำหรับอุตสาหกรรม

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เชื้อเพลิงไม้ยางพารา และไม้ไผ่ที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น (ไม้ไผ่ทอรีไฟต์) ซึ่งกระบวนการทอรีแฟคชั่นเป็นกระบวนการเพิ่มค่าความร้อนของเชื้อเพลิง(Heating Value) โดยเชื้อเพลิงข้างต้นถูกนำมาศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ และศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของการผสมไม้ไผ่ทอรีไฟต์กับไม้ยางพาราที่อัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้ให้สูงขึ้น และสามารถลดปริมาณมลพิษอันเนื่องมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งเป็นที่ถูกจับตามอง เนื่องจากสถานะโลกร้อนที่กำลังร้ายแรงขึ้นทุกวัน โดยการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟต์ ไม้ยางพารา และเชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอรีไฟต์กับไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 90:10, 80:20 และ 70:30 ตามลำดับ ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักสาร (Thermogravimetric analysis) เพื่อศึกษาที่พฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสม ต่อมาได้นำเชื้อเพลิงผสมไม้ไผ่ทอรีไฟต์และไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 70:30 และ 50:50 ทำการเผาจริงในเตาเผาด้วยหัวเผาชนิดฝุ่น (Pulverized burner) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในเตารวมถึงการไหลของอากาศ การคลุกเคล้า และสัดส่วนอากาศที่เหมาะสมในการป้อน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในห้องเผาไหม้ รวมถึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Computation Fluid Dynamics) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในเตา

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของการผสมระหว่างเชื้อเพลิงผสมไม้ไผ่ทอรีไฟต์กับไม้ยางพาราที่มีต่อพฤติกรรมการเผาไหม้ด้วยเครื่องวิเคราะห์การลดลงของน้ำหนัก (Thermogravimetric analysis)
- 1.2.2 ศึกษาการเผาไหม้ภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น (Pulverized Burner) โดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอรีไฟต์กับไม้ยางพาราที่ส่งผลต่ออุณหภูมิ และการเกิดมลพิษจากการเผาไหม้
- 1.2.3 ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอรีไฟต์กับไม้ยางพาราภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น (Pulverized Burner) ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (CFD) เพื่อสังเกตพฤติกรรมการเผาไหม้ สนามการไหลที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ และการเกิดมลพิษจากการเผาไหม้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 การไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ มีการไหลสม่ำเสมอเท่ากันตลอดเวลา
- 1.3.2 เชื้อเพลิงผสม ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
- 1.3.3 อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มีความชื้นเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 เชื้อเพลิงชีวมวล

1. ใช้เชื้อเพลิงไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟด์ (ที่ดัชนีทอรีแฟคชัน 30%)
2. เชื้อเพลิงฝุ่นที่ใช้ถูกบดด้วย Hummer mill ผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร

1.4.2 การศึกษาด้วยเครื่องวิเคราะห์การลดลงของน้ำหนัก (Thermogravimetric analysis)

1. ใช้เชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์ (Torrefied Bamboo :TB) ไม้ยางพารา (Rubber Wood :RW) และใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอรีไฟด์กับไม้ยางพาราในสัดส่วน TB90:RW10 TB80:RW20 และ TB70:RW30
2. อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 60 mL/min
3. อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heat rate) ของเครื่อง TGA เท่ากับ 20 °C/min

1.4.3 การเผาไหม้ในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1. เชื้อเพลิงผสมไม้ไผ่ทอรีไฟด์ และไม้ยางพาราที่สัดส่วน TB70:RW30 และ TB50:RW50
2. อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงที่อากาศเกิน 15%
3. ทำการทดลองที่กำลังความร้อน 300kW
4. ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กำลังความร้อน 300kW

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.5.1 มีความเข้าใจถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสม
- 1.5.2 เป็นแนวทางการปรับปรุง และพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่นในกรณีของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม
- 1.5.3 เป็นแนวทางในการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาพัฒนาให้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.6 องค์ประกอบของวิทยานิพนธ์

ในบทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์ที่เกี่ยวข้องพฤติกรรมการเผาไหม้ทั้งในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การลดลงของน้ำหนัก (Thermogravimetric analysis) การเผาไหม้จริงภายในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น และการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงทฤษฎีของเชื้อเพลิงชีวมวล ทฤษฎีของเครื่องวิเคราะห์การลดลงของน้ำหนักสาร (Thermogravimetric analysis ,TGA)

ทฤษฎีของการเผาไหม้ และทฤษฎีของแบบจำลองการเผาไหม้ บทที่ 4 กล่าวถึงชุดทดลอง อุปกรณ์ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลอง รวมถึงการคำนวณที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ บทที่ 5 ผลการทดลองของ TGA ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของเผาไหม้ในหัวเผาชนิดฝุ่น และผลของการเผาไหม้จริง บทที่ 6 จะเป็นสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (Thermogravimetric analysis) ที่นำมาสังเกตพฤติกรรมเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และกระบวนการเผาไหม้ในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น (Pulverized Burner) รวมถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดฝุ่น (CFD)

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวิเคราะห์การลดลงของน้ำหนัก (TGA)

Li Xiang-guo และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาการเผาไหม้ร่วมของเชื้อเพลิงผสม ระหว่างเชื้อเพลิงถ่านหินที่มีค่าสูงกับยางเสีย โดยเขาทำการทดสอบการเผาไหม้ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเชื้อเพลิง (Thermogravimetric analysis หรือ TGA) ที่สามารถดูน้ำหนักของตัวอย่างเชื้อเพลิงที่หายไป (TG) หรืออัตราการหายไปของน้ำหนักตัวอย่าง (DTG) เทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา ภายใต้เงื่อนไขของอัตราการป้อนอากาศและอัตราการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลและอุณหภูมิ โดยเขาหาได้ว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมของเชื้อเพลิงถ่านหิน มีจุดติดไฟที่อุณหภูมิสูงกว่ายางเสีย ดังนั้นจึงใช้เชื้อเพลิงถ่านหินเป็นหลักแล้วผสมยางเสียเขาไปตามอัตราส่วน 10 30 50 ตามลำดับ ซึ่งผลที่เขาได้พบว่าอุณหภูมิของการติดไฟต่ำลงและใช้เวลาในการเผาไหม้ลดลงอีกด้วย

D.Vamvuka และคณะ [3] ได้สังเกตจุดติดไฟและพฤติกรรมเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผสมกับลิกไนต์ โดยมีการหาตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้มาเปรียบเทียบกัน และยังอธิบายพฤติกรรมเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดรวมถึงเชื้อเพลิงผสมด้วยกราฟ TG และDTG เทียบอยู่กับอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์ TGA โดยจากการทดลองของเขาสรุปได้ว่า อุณหภูมิของการติดไฟและการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นหากอนุภาคของเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่ขึ้นและปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงมากขึ้น อีกทั้งยังสรุปว่าเชื้อเพลิงลิกไนต์เมื่อผสมกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่น ๆ จะสามารถเร่งกระบวนการทางเคมีความร้อนโดยพิสูจน์จากดัชนีการจุดติด จุดที่น้ำหนักลดลงมากที่สุด (จุดที่มีการเผาไหม้มากที่สุด) และเวลาที่สั้นที่สุดที่ใช้ในการเผาไหม้ โดยจะสามารถหาอุณหภูมิของจุดที่เกิดการติดไฟได้ เมื่อทราบอุณหภูมิของการติดไฟ ได้มีการเปรียบเทียบการจุดติดไฟในเชิงตัวเลขด้วยดัชนีของการติดไฟซึ่งหาได้จาก อัตราการเผาไหม้ที่มากที่สุด เทียบกับเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มกระบวนการจนถึงจุดติดไฟและเวลาที่ใช้นจนถึงจุดที่มีการเผาไหม้มากที่สุด

Marisamy Muthuraman [4] ศึกษาประสิทธิภาพของการเผาไหม้ถ่านจากประเทศอินโดนีเซีย และถ่านที่มีสัดส่วนถ่านสูงจากประเทศอินเดียผสมกับขยะมูลฝอยด้วยการวิเคราะห์ TGA เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า การบำบัดขยะมูลฝอยด้วยความร้อนทำให้ขยะมูลฝอยเป็นผงเหมือนเชื้อเพลิงแข็งทั่วไป ซึ่งทำให้
 ง่ายต่อการผสมและเผาไหม้กับถ่าน โดยอุณหภูมิติดไฟของเชื้อเพลิงถ่านผสมขยะมูลฝอยจะขึ้นอยู่กับ
 พลังงานที่สารระเหยปล่อยออกมา ซึ่งเขาได้ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิของการปลดปล่อยสารระเหย
 และอุณหภูมิติดไฟ พบว่าขยะมูลฝอยมีการปล่อยสารระเหยที่อุณหภูมิต่ำกว่าทำให้อุณหภูมิติดไฟมีค่าต่ำ
 กว่าถ่านจากประเทศอินโดนีเซียและประเทศอินเดีย ซึ่งทำให้เขาสรุปได้ว่าอุณหภูมิติดไฟนั้นจะแปรผัน
 ตามอุณหภูมิของการปลดปล่อยสารระเหย เนื่องจากปริมาณออกซิเจนของขยะมูลฝอยมีมากกว่าถ่าน
 หินที่เป็นส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเร็วขึ้น เป็นการสนับสนุนการให้ถ่านหินมีอุณหภูมิติดไฟ
 ต่ำลงเมื่อนำเชื้อเพลิงขยะมูลฝอยมาเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงถ่าน ดังนั้นการผสมขยะมูลฝอยกับถ่าน
 หินอาจช่วยลดระยะเวลาและปริมาณเชื้อเพลิงในการอุ่นเตาของโรงงาน

Zhijia Liu และคณะ [5] ค้นคว้าพฤติกรรมการเผาไหม้ของไม้ไผ่ ไม้ไผ่ทอรีไฟต์ ถ่าน และการ
 ผสมของเชื้อเพลิงข้างต้นด้วยการวิเคราะห์ TGA รวมถึงหาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้
 ในการเผาไหม้ของเครื่องวิเคราะห์ TGA พบว่าอัตราการไหลของอากาศเป็นตัวเพิ่มปฏิกิริยาการเผา
 ไหม้และสนับสนุนการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังกล่าวว่าการทอรีไฟต์ชั้น
 ทำให้ไม้ไผ่ทอรีไฟต์มีสารระเขยน้อยลงแต่มีค่าความร้อน สัดส่วนของเถ้า และสัดส่วนคาร์บอนที่สูงขึ้น
 จึงทำให้อุณหภูมิจุดติดไฟ และการเผาไหม้สูงขึ้น ซึ่งทำให้พฤติกรรมการเผาไหม้ของไม้ไผ่ทอรีไฟต์
 ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของถ่าน ดังนั้นพฤติกรรมการเผาไหม้ของถ่าน และไม้ไผ่ทอรีไฟต์จึงแสดงที่
 พฤติกรรมที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นการยืนยันว่าในภาคอุตสาหกรรมสามารถใช้ไม้ไผ่ทอรีไฟต์ผสมกับ
 ถ่านเป็นเชื้อเพลิงได้ โดยไม่ต้องมีการปรับปรุงห้องเผาไหม้เพิ่ม

Zhijia Liu และคณะ [6] ได้ทำการค้นหาลักษณะเฉพาะของการไพโรไลซิสและการเผาไหม้
 ของไม้ไผ่ทอรีไฟต์และไม้สนทอรีไฟต์ ซึ่งเขาพบว่าหลังจากเชื้อเพลิงผ่านกระบวนการทอรีไฟต์ชั้นจะ
 ทำให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส (การปลดปล่อยสารระเหย) ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความร้อนสูงขึ้น
 เปอร์เซ็นต์เถ้าสูงขึ้นและอัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนส่วนด้วยออกซิเจนสูงขึ้นอีกด้วย รวมถึง
 เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่น้อยลงของเชื้อเพลิงทอรีไฟต์ทำให้กระบวนการเผาไหม้เกิดได้ดีมากขึ้น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ในหัวเผาชนิดฝุ่น (Pulverized Burner)

Hipeng Jing และคณะ [7] ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในหัวเผาเชื้อเพลิง
 ชนิดฝุ่น โดยจะศึกษาที่ 2 ขนาดอนุภาคคือ 50 ถึง 70 ไมโครเมตร และ 100 ถึง 200 ไมโครเมตร
 ตามลำดับ พบว่าลักษณะฐานของเปลวไฟของเชื้อเพลิง 50-70 ไมโครเมตร มีลักษณะกลมและ
 ราบเรียบ มีเปลวไฟเหลืองหรือแดง ในขณะที่กรณี 100-200 ไมโครเมตรเปลวไฟมีความผิดปกติและ
 เกิดการแยกชั้นกัน โดยความเร็วของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาแน่นของอนุภาค

เชื้อเพลิง สรุปได้ว่าเชื้อเพลิงชีวมวลที่ดีที่สุดที่สามารถใช้แทนถ่านหินในอุตสาหกรรมได้คือ ฟางข้าวที่มีขนาด 100-200 ไมโครเมตร

Jun Li และคณะ [8] ศึกษาการเผาไหม้ร่วมกันของเชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟด์และถ่านหิน โดยเชื้อเพลิงชีวมวลทอริไฟด์มีพลังงานต่อความหนาแน่นสูง มีความสามารถในการไหลที่ดีกว่าถ่าน และไหลไม่เป็นรูปแบบ กระบวนการทอริแฟคชันทำให้องค์ประกอบทางเคมีและฟิสิกส์ของชีวมวลคล้ายคลึงกับถ่านหินบิทูมินัส โดยในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเผาไหม้ร่วมกันระหว่างถ่านหินบิทูมินัสและชีวมวลทอริไฟด์ที่ 5 อัตราส่วน ชีวมวล 25% ชีวมวล 50% ชีวมวล 75% และชีวมวล 100% พบว่าผลของเชื้อเพลิงชีวมวลทำให้ประสิทธิภาพและความผันผวนของเครื่องกำเนิดไอน้ำลดลง และปริมาณพิษ (NO_x CO) ลดลงในอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงชีวมวลที่เพิ่มมากขึ้น

Xinzhuo Li และคณะ [9] ศึกษาอิทธิพลของขนาดเชื้อเพลิงผงที่มีผลต่อลักษณะของเปลวไฟ โดยให้ความสนใจในบริเวณที่เกิดการไหลย้อนกลับภายในและการหมุนควงของแก๊สไอเสีย เพื่อลดมลพิษ NO_x ด้วยการไหลหมุนควงของเชื้อเพลิงผง เพื่อหาอิทธิพลของขนาดอนุภาค จะแบ่งขนาดของอนุภาคออกเป็น 3 กรณีคือ เล็กกว่า 90 ไมโครเมตร ใหญ่กว่า 150 ไมโครเมตร และระหว่าง 90 ถึง 150 ไมโครเมตร พบว่าความเข้มข้นของ OH และอุณหภูมิลดลงเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น การไหลย้อนกลับและการหมุนวนของแก๊สร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลง และอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่ทำให้ใช้เวลาอยู่ในสนามการไหลนาน ทำให้อัตราส่วนเชื้อเพลิงเกิน (Fuel-rich) ซึ่งทำให้เกิดมลพิษ (NO_x) น้อยลง

Igor Bonafacic และคณะ [10] ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างชีวมวลกับถ่านหินในเตาเผาทรงกระบอก โดยใช้อัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงถ่านหิน 80 และชีวมวล 20 โดยมวลในทุกกรณีศึกษา โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะถูกคำนวณด้วยสมการ การไหลปั่นป่วน การแลกเปลี่ยนมวล การแลกเปลี่ยนความร้อน และการเผาไหม้ โดยจะทำการทดลองเทียบเท่ากับกำลังทางความร้อนที่ 20 กิโลวัตต์และมีการควบคุมอุณหภูมิผนังของเตาเผาให้อยู่ในช่วง 1233K ถึง 1823K ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแต่ละกรณี อีกทั้งยังคำนวณอัตราส่วนอากาศเกินที่ 10% และ 20% ขึ้นอยู่กับแต่ละกรณี พบว่าอิทธิพลของอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีต่อการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค และลักษณะรูปร่างของอนุภาคมีผลต่อความเข้มข้นของการปลดปล่อยสารระเหยและการเผาไหม้

Xiaohan Ren และคณะ [11] ศึกษามลพิษจากแก๊สไอเสีย CO NO_x และ SO_x ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดที่มีขนาดอนุภาค 75-150 ไมโครเมตร โดยใช้เชื้อเพลิง 2 ชนิดคือ ชีวมวลและชีวมวลทอริไฟด์ ทำการทดลองให้ความร้อนจากไฟฟ้าที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10^4 - 10^5 K/s จนถึงอุณหภูมิ 1400K และเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศเกิน โดยชีวมวลทอริไฟด์มี เปอร์เซ็นต์สารระเหยต่ำ เปอร์เซ็นต์ถ่านคงตัวสูง และค่าความร้อนสูง พบว่า (ก) มลพิษ CO จากการเผาไหม้ชีวมวลทอริไฟด์วัดได้สูงกว่าการเผาไหม้ชีวมวล ที่ทำให้เห็นถึง เปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่มากกว่าในชีวมวลทอริไฟด์ (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SO₂ ของการเผาไหม้ชีวมวลทอรีไฟต์วัดได้น้อยกว่าชีวมวลอื่น ๆ ถึงแม้ว่าชีวมวลทอรีไฟต์จะมีเปอร์เซ็นต์ซัลเฟอร์ มากกว่าก็ตาม (ค) NO_x ถึงแม้ชีวมวลทอรีไฟต์มี เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในองค์ประกอบมากกว่าชีวมวลอื่น แต่ก็ยังสรุปไม่ได้ว่าเกิด NO_x ของชีวมวลทอรีไฟต์จะมากกว่าชีวมวล แต่ถ้าหากเปรียบเทียบมลพิษที่เกิดขึ้นในการเผาไหม้ชีวมวลทอรีไฟต์ กับถ่านหิน พบว่าชีวมวลทอรีไฟต์จะเกิดมลพิษ SO₂ และNO_x น้อยกว่าการเผาไหม้ถ่านหินซับบิทูมินัส

Jun Li และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาลักษณะเปลวไฟของการเผาไหม้ชีวมวลทอรีไฟต์ที่มีดัชนีทอรีแฟคชัน (Torrefaction degree) 10% 20% และ30% ตามลำดับ ทำการทดลองที่มาตรฐานเดียวกันเพื่อสังเกตอิทธิพลของดัชนีทอรีแฟคชัน ความเข้มข้นของออกซิเจน ความเร็วของการไหล และขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีผลต่อตำแหน่งของเปลวไฟ ลักษณะของเปลวไฟ และอุณหภูมิสูงสุด โดยทำการทดลองในห้องแล็บและทำการแบบทดลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าอนุภาคเชื้อเพลิงทอรีไฟต์มีการปลดปล่อยสารระเหยช้า ทำให้เกิดการล่าช้าของการจุดติดไฟ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเปลวไฟจะขึ้นกับปริมาณสารระเหยในเชื้อเพลิงนั้น นอกจากนี้ผลจากการเผาไหม้ที่ความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำพบว่าเปลวไฟมีขนาดใหญ่ขึ้น อุณหภูมิสูงสุดลดลง และเกิดมลพิษ NO_x น้อยลง สุดท้ายนี้ความยาวของเปลวไฟจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหลของอากาศ และฐานของเปลวไฟจะขึ้นอยู่กับการไหลของอนุภาค

J.Ballester และคณะ [13] ศึกษาลักษณะเปลวไฟในห้องเผาไหม้จำลองด้วยเชื้อเพลิง 3 ชนิด คือ ถ่านบิทูมินัส ถ่านลิกไนต์ และชีวมวล (ฟางข้าวโอ๊ต) ทำการทดลองที่สภาวะเดียวกันในกรณีของถ่านหินทั้ง 2 ชนิดและที่สภาวะใกล้เคียงกันในชีวมวล เพื่อศึกษาอิทธิพลของความแตกต่างกันขององค์ประกอบเชื้อเพลิงที่มีผลต่อลักษณะของเปลวไฟ อุณหภูมิความเข้มข้นของ O₂, CO, NO_x, N₂O และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ พบว่าเปอร์เซ็นต์สารระเหยในองค์ประกอบของถ่านหินลิกไนต์ที่มากกว่าถ่านหินบิทูมินัส ทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าและเกิดการเผาไหม้ที่มากกว่า เมื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลพบว่า เปอร์เซ็นต์สารระเหยของชีวมวลที่มีมากกว่าทำให้ฐานของเปลวอยู่ชิดกับหัวเผามากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ของถ่านหิน

Melissa L. Holtmeyer และคณะ [14] ศึกษามลพิษที่มาจากการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงผสม ในรูปของ NO SO_x ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการเผาไหม้ร่วมกันของถ่านหิน และขี้เลื่อยในเตาเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น เพื่อดูผลความยาวของเปลวไฟ และไนตริกออกไซด์ (NO) โดยความยาวที่แตกต่างกันของเปลวไฟมีผลจากการไหลปั่นป่วน non-premixed และการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะทำให้ฐานของเปลวไฟอยู่ห่างจากทางออกของหัวพ่น และมีปริมาณ NO เกิดขึ้นมากกว่าเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็ก

Hesameddin Fatehi และคณะ [15] ศึกษาการจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองการเผาไหม้เพื่อสังเกตการจุดติดไฟ และการล่าช้าของการจุดติดของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นในแก๊สร้อน จากผลการทดลองพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลทั้งหมดจุดติดไฟบริเวณรอบของแก๊สร้อนที่ผิวของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิง(ชาร์) โดยในการศึกษานี้จะใช้ค่าเฉลี่ยของผลที่ได้จากการทำแบบจำลองของอนุภาคชีวมวลในแก๊สร้อน เพื่ออธิบายถึงกลไกทางเคมี การติดไฟ และการล่าช้าของการจุดติด โดยจุดติดไฟจะทำการศึกษาจากผลของฟิสิกส์ของการเผาไหม้ฟางข้าวสาลี ส่วนของการล่าช้าของการจุดติดจะอธิบายจากการเผาไหม้ชีวมวลหลากหลายชนิดที่ใช้เวลาในการจุดติดที่แตกต่างกัน จากแบบจำลองที่กำหนดการไหลและสมการการเผาไหม้เหมือนกัน (อุณหภูมิของสภาพแวดล้อม, ความเข้มข้นของออกซิเจน, ความเร็วของแก๊สร้อนและอนุภาคเชื้อเพลิง) ซึ่งผลการทดลองจะแสดงถึงแนวโน้มของเวลาที่ใช้ในการปลดปล่อยสารระเหยออกจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

Aidin Panahi และคณะ [16] งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลทอรีไฟต์ในการเครื่องผลิตไอน้ำทดแทนเชื้อเพลิงถ่านหินหรือการเผาไหม้ผสมกัน โดยชีวมวลที่ใช้จะผ่านกระบวนการทอรีไฟต์ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีในไนโตรเจน ในการทดลองเชื้อเพลิงชีวมวลทอรีไฟต์จะถูกเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ภายใต้สภาวะควบคุมที่อุณหภูมิสูงและ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Heating rate) สูง โดยใช้กรณีพื้นฐานของการเผาไหม้ถ่านหินที่มีขนาด 75-90 ไมโครเมตร โดยพบว่าถ้าหากต้องการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลทอรีไฟต์เผาไหม้หมดพร้อมกับถ่านหินต้องใช้เชื้อเพลิงชีวมวลทอรีไฟต์ที่มีขนาด 212-300 ไมโครเมตร จึงสรุปได้ว่าอาจจะไม่จำเป็นต้องบดเชื้อเพลิงชีวมวลทอรีไฟต์ให้ละเอียดมากเพื่อนำไปใช้ในหัวเผาชนิดฝุ่นแทนเชื้อเพลิงถ่านหิน

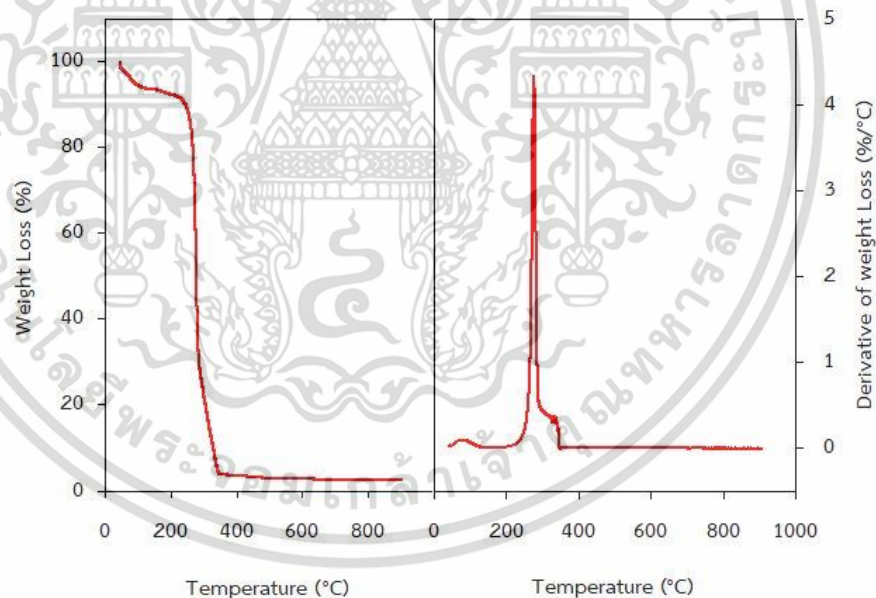
บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของกับงานวิจัย ซึ่งจะประกอบไปด้วยทฤษฎีของเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (Thermogravimetric analysis:TGA) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับชีวมวล ทฤษฎีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง และส่วนสุดท้ายจะเป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Computation Fluid Dynamics) ของการเผาไหม้

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (TGA)

การทดสอบการเผาไหม้ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเชื้อเพลิง (Thermogravimetric analysis หรือ TGA) ที่สามารถดูน้ำหนักของตัวอย่างเชื้อเพลิงที่หายไป(TG) หรืออัตราการหายไปของน้ำหนักตัวอย่าง (DTG) เทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา ภายใต้เงื่อนไขของอัตราการป้อนอากาศและอัตราการให้ความร้อน



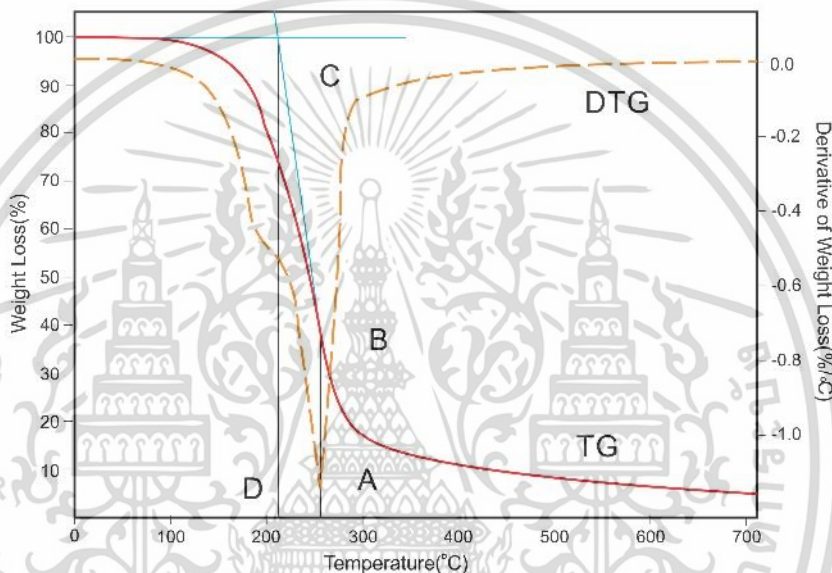
รูปที่ 3.1 กราฟการลดลงของน้ำหนัก (TG) และอัตราการลดลงของน้ำหนัก (DTG)

โดยเส้นกราฟ TG และ DTG ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของกระบวนการเผาไหม้ที่จุดวิกฤติต่าง ๆ ของกราฟทั้ง 2 โดยเริ่มจากการลดลงของน้ำหนักของกราฟ TG ในช่วงเริ่มต้นเป็นการระเหยความชื้น ต่อมาการลดลงของน้ำหนักจะลดลงเพียงเล็กน้อยแสดงถึงการเริ่มปลดปล่อยสารระเหย (Devolatile) ก่อนที่สารระเหยจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศโดยรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการติดไฟของสารระเหยแล้วเกิดการเผาไหม้ของชาร์ทำให้เกิดการลดลงของน้ำหนักอย่างรวดเร็ว ในท้ายที่สุดเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เหลืออยู่จะแสดงให้เห็นถึง%ของถ่านในองค์ประกอบของเชื้อเพลิง

โดยจากเอกสารอ้างอิง [3] สามารถหาอุณหภูมิของจุดที่เกิดการติดไฟได้จากการใช้จุดที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักสารมากที่สุดจากกราฟ (DTG จุด A) แล้วจึงลากตามแนวแกนตั้งไปตัดกับกราฟ TG (จุด B) จากนั้นลากตามความชันของกราฟ TG เพื่อหาจุดตัดกับเส้นแกนนอนของจุดที่มีการเริ่มปลดปล่อยสารระเหย (จุด C) แล้วจึงลากเส้นตามแนวแกนตั้งอีกครั้งเพื่อดูจุดตัดแกนนอน (จุดD) ทำให้สามารถหาอุณหภูมิของการติดไฟได้จากกราฟ TG และ DTG จากการวิเคราะห์ TGA ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การหาอุณหภูมิติดไฟจากการกราฟวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (TGA) [3]

3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับชีวมวล (Biomass) [17,18]

สมบัติและลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาประกอบในการนำชีวมวลชนิดนั้นมาใช้ในการผลิตพลังงานโดยเฉพาะการเปลี่ยนรูปชีวมวล โดยใช้กระบวนการทางเคมีความร้อน สมบัติ และลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลได้แก่ ความหนาแน่น ความชื้น และขนาดของชีวมวล เป็นต้นสมบัติทางกายภาพเป็นข้อพิจารณาเบื้องต้นที่จะต้องนำมาใช้ในการคัดเลือกชีวมวล เนื่องจากจะมีผลต่อขั้นตอนและกระบวนการในการนำชีวมวลนั้นไปใช้งาน เช่น การขนส่งชีวมวล การเตรียมชีวมวล เช่นกรณีที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีความหนาแน่นต่ำจะทำให้สิ้นเปลืองในการขนส่ง ซึ่งอาจต้องมีการเตรียมชีวมวลก่อนที่จะขนส่งเพื่อนำไปใช้งานโดยการทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง หรือตัดให้มีขนาดเล็ก เป็นต้นสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นสูงจะไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ ดังนั้นจะต้องนำชีวมวลนั้นมาผ่านกระบวนการลดความชื้นก่อนที่จะนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานเป็นต้น สมบัติ และลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ส่งผลต่อกระบวนการและปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิง ได้แก่ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง และขนาดของชีวมวล เป็นต้น

3.2.1 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

ชีวมวลเป็นสมบัติที่ส่งผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ในด้านต่าง ๆ เช่น อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และระยะเวลาที่ใช้ในการจุดเตา เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงจะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่าเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งพิจารณาได้เป็น 3 ลักษณะ คือความหนาแน่นที่แท้จริง (True density) ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) และความหนาแน่นรวม (Bulk density)

ความหนาแน่นที่แท้จริง (True density) คือความหนาแน่นที่คิดจากมวลทั้งก้อนของชีวมวลเทียบกับปริมาตรของชีวมวลสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรของชีวมวลทั้งก้อน ความหนาแน่นที่แท้จริงสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$\rho_{\text{true}} = \frac{\text{Total mass of biomass}}{\text{Solid volume in biomass}} \quad (3.1)$$

ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) คือความหนาแน่นที่คิดจากมวลของเนื้อชีวมวลเทียบกับปริมาตรทั้งหมดของชีวมวลรวมทั้งปริมาตรของรูพรุนด้วย สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรภายนอกของเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งรวมทั้งปริมาตรของรูพรุน ความหนาแน่นปรากฏสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 3.2

$$\rho_{\text{apparent}} = \frac{\text{Total mass of biomass}}{\text{Apparent volume of biomass including solids and internal pores}} \quad (3.2)$$

ความหนาแน่นรวม (Bulk density) คือ ความหนาแน่นที่คิดจากมวลของเนื้อชีวมวลต่อปริมาตรของภาชนะที่บรรจุชีวมวลนั้นค่าความหนาแน่นรวมสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$\rho_{\text{bulk}} = \frac{\text{Total mass of biomass}}{\text{Bulk volume occupied by biomass particles or stack}} \quad (3.3)$$

ความหนาแน่นรวมมีค่าขึ้นกับประเภทของชีวมวล เช่น ไม้ยางพาราจะมีค่าความหนาแน่นรวม 407 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไม้ไผ่ทอรีไฟด์ความหนาแน่นรวมจะมีค่า 648 กิโลกรัม

ต่อลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล

ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลส่งผลต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นอย่างมากชีวมวลที่นำมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง ความชื้นในเชื้อเพลิงอาจพิจารณาจากชีวมวลตามที่ได้จากแหล่ง (As received) หรือชีวมวลที่ได้ผ่านกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงเพื่อลดความชื้นมาแล้ว ความชื้นที่อยู่ในเชื้อเพลิงมี 3 ลักษณะ คือ ความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อชีวมวล (Inherent moisture) ความชื้นที่อยู่ที่ชั้นผิวของชีวมวล (Surface moisture) และความชื้นที่เกิดจากการแตกตัวของอินทรีย์สาร (Decomposition moisture)

ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลพิจารณาจากปริมาณน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่อยู่ในชีวมวลต่อน้ำหนักของชีวมวลทั้งก้อน การหาความชื้นของชีวมวลสามารถหาได้ 2 วิธี ได้แก่ (1) การหาค่าความชื้นของชีวมวลโดยเปรียบเทียบกับชีวมวลเปียกเรียกว่าการหาค่าความชื้นตามมาตรฐานเปียก (Wet basis) และ (2) การหาค่าความชื้นของชีวมวลโดยเปรียบเทียบกับชีวมวลแห้งเรียกว่าการหาค่าความชื้นตามมาตรฐานแห้ง (Dry basis)

การหาค่าความชื้นตามมาตรฐานเปียก (Wet basis) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.4

$$MC_w = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{wet}} \quad (3.4)$$

การหาค่าความชื้นตามมาตรฐานแห้ง (Dry basis) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.5

$$MC_d = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}} \quad (3.5)$$

เมื่อ MC_w คือ ความชื้นของชีวมวลมาตรฐานเปียก W_{wet} คือ น้ำหนักของชีวมวลเปียก
 MC_d คือ ความชื้นของชีวมวลมาตรฐานแห้ง W_{dry} คือ น้ำหนักของชีวมวลแห้ง

3.2.3 ขนาดและลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้ในหัวเผาชนิดเชื้อเพลิงฝุ่น (Pulverized) จะต้องมีความเหมาะสมและสม่ำเสมอ ขนาดของเชื้อเพลิงชีวมวลมีอิทธิพลอย่างมากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาไหม้ โดยเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขนาดเล็กมากจะทำให้อากาศแทรกเข้าไปในระหว่างชีวมวลได้น้อยซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ

3.2.4 สมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวล

คุณสมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญมากในการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่จำเป็นต้องทราบเพื่อนำข้อมูลใช้ในการออกแบบและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ วิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งโดยทั่วไปทำการวิเคราะห์ 3 แบบ ซึ่งการวิเคราะห์แต่ละแบบมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ (1) การหาองค์ประกอบในเชื้อเพลิงชีวมวลโดยการประมาณค่า (Proximate analysis) (2) การหาองค์ประกอบในเชื้อเพลิงชีวมวลโดยละเอียดหรือแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และ (3) การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล (Heating value analysis)

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยการประมาณค่า

การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยการประมาณค่า (Proximate analysis) จะวิเคราะห์โดยอ้างอิงหลักวิธีการวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยประมาณของถ่านหินและถ่านโค้กที่กำหนดตามมาตรฐานการทดสอบ และวัสดุของสมาคม ASTM สำหรับถ่านหิน ASTM D3172 - 07 ซึ่งได้กำหนดมาตรฐานวิธีการวิเคราะห์และมาตรฐานปริมาณที่ต้องการทำการวิเคราะห์ไว้

การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งโดยการประมาณค่าปริมาณที่ทำการวิเคราะห์มี 4 ปริมาณได้แก่

- (1) ความชื้น (Moisture Content)
- (2) สารระเหย (Volatile Matter)
- (3) เถ้า (Ash)
- (4) คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

ความชื้นที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลจะใช้วิธีวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของสมาคม ASTM โดยเชื้อเพลิงไม้ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของสมาคม ASTM D-871-1762-84 (ASTM D-1762-84) และสำหรับเชื้อเพลิงขยะ (Refuse derived fuel : RDF) ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของสมาคม ASTM E - 949- 88 (ASTM E- 949- 88) ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐานต่าง ๆ จะแตกต่างกันไป เช่นการวิเคราะห์ค่าความชื้นของไม้ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของสมาคม ASTM D-1762-84 (ASTM D-1762 - 84) จะใช้ไม้ตัวอย่างในการวิเคราะห์น้ำหนัก 50 กรัม อบในเตาอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที และหลังจากนั้นทิ้งไม้ไว้ในเตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 103 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมง และหลังจากนั้นนำไม้ออกมาชั่งน้ำหนักน้ำหนักที่หายไปคือค่าความชื้นที่อยู่ในไม้

สารระเหยที่อยู่ในชีวมวลหมายถึง ไอที่สามารถควบแน่นได้ และไอที่ไม่สามารถควบแน่นได้ที่ปล่อยออกมาเมื่อชีวมวลได้รับความร้อนปริมาณสารระเหยที่ปล่อยออกมาจะขึ้นกับอัตราการให้ความร้อนเชื้อเพลิงและอุณหภูมิในการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยจะใช้วิธีวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของสมาคม ASTM สำหรับเชื้อเพลิงไม้ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของสมาคม ASTM E-872 (ASTM E-872) การวิเคราะห์ทำโดยใช้เชื้อเพลิงไม้ตัวอย่าง 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรัม ที่สุ่มมาจากเชื้อเพลิงไม้ 10 กิโลกรัมโดยการสุ่มตัวอย่างใช้วิธีตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของสมาคม ASTM D-346 (ASTM D-346) และนำตัวอย่างมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร และนำเชื้อเพลิงแห้งที่บดแล้วน้ำหนัก 1 กรัมมาใช้ในการวิเคราะห์โดยวางตัวอย่างในบ้ำหโลมที่มีฝาปิดและใส่ลงไปในเตาอบที่มีอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียสโดนให้ความร้อนเป็นเวลา 7 นาที่สารระเหยจะปล่อยออกมาซึ่งสามารถสังเกตได้จากเปลวไฟหลังจากนั้นนำตัวอย่างออกมาและทำให้เย็นและชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิงไม้ น้ำหนักส่วนที่หายไปคือสารระเหย

เถ้า คือ สารอนินทรีย์ที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากที่คาร์บอนในชีวมวลถูกเผาไหม้หมดแล้วสารอนินทรีย์ที่อยู่ในเถ้าได้แก่ ซิลิกา อลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกเนเซียม และโปรแตสเซียม เป็นต้น การวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าสำหรับเชื้อเพลิงไม้ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของสมาคม ASTM D-1102 (ASTM D-1102) การวิเคราะห์เถ้าทำโดยใช้เชื้อเพลิงไม้ตัวอย่าง 2 กรัม ที่มีขนาดเล็กกว่า 475 ไมครอนอบแห้งตามวิธีมาตรฐาน และนำมาวางบนบ้ำหโลมที่ไม่ต้องปิดฝา และใส่ไว้ในเตาเผาอุณหภูมิสูงโดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเมื่อคาร์บอนในชีวมวลถูกเผาไหม้หมดแล้ว ทิ้งไว้ให้เย็น และนำมาชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ได้เป็นน้ำหนักของเถ้าที่อยู่ในเชื้อเพลิง

คาร์บอนคงตัว หมายถึง ปริมาณคาร์บอนในชีวมวลที่ยังคงเหลืออยู่ในถ่านชาร์หลังจากที่สารระเหยถูกปล่อยออกมาในกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน การหาค่าปริมาณคาร์บอนคงตัวสามารถหาได้เมื่อทราบปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย และเถ้า โดยใช้ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 3.6

$$FC = 1 - MC - VM - Ash \quad (3.6)$$

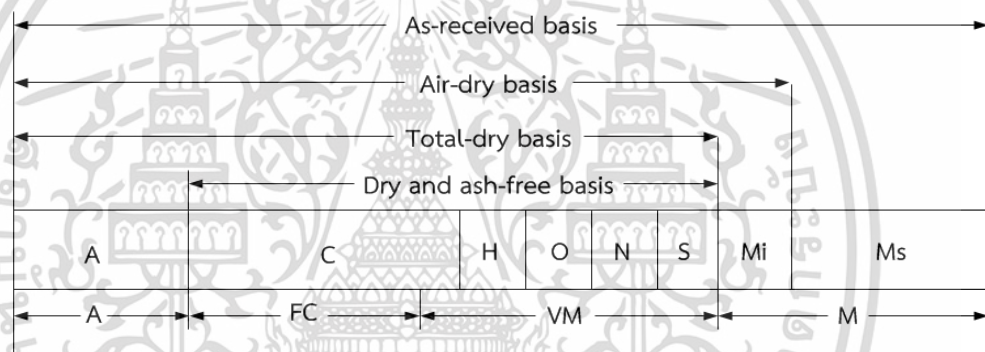
เมื่อ FC คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัว MC คือ ปริมาณความชื้น
VM คือ ปริมาณสารระเหย Ash คือ ปริมาณเถ้า

ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่ได้จากการวิเคราะห์โดยการประมาณค่าและจากการวิเคราะห์โดยละเอียดจะมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากการวิเคราะห์โดยวิธีการประมาณค่าไม่ได้รวมคาร์บอนที่อยู่ในสารระเหยซึ่งโดยปกติจะหมายถึงวิเคราะห์โดยละเอียดจะมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากการวิเคราะห์โดยวิธีการประมาณค่าไม่ได้รวมคาร์บอนที่อยู่ในสารระเหยซึ่งโดยปกติจะหมายถึงถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการสลายด้วยความร้อน

การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลโดยการประมาณค่าอาจทำการวิเคราะห์ตามลักษณะของชีวมวลที่ใช้ในการพิจารณาที่มีลักษณะที่ต่างกันเป็น 4 แบบ คือ (1) วิเคราะห์เชื้อเพลิงตามสมบัติของเชื้อเพลิงตามที่ได้รับมา (As received basis) (2) วิเคราะห์เชื้อเพลิงภายใต้เกณฑ์การพิจารณาว่าเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงแห้ง (Total dry basis) เป็นการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื้อเพลิงที่ไม่พิจารณาความชื้นทั้งหมดที่อยู่ในเชื้อเพลิง (3) วิเคราะห์เชื้อเพลิงภายใต้เกณฑ์การพิจารณาที่ไม่รวมความชื้นที่ผิว (Air dry basis) เป็นการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแห้งที่ไม่พิจารณาความชื้นที่อยู่ผิวของเชื้อเพลิงเป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิง และ (4) วิเคราะห์เชื้อเพลิงภายใต้เกณฑ์การพิจารณาว่าเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงแห้งและไม่มีเถ้า (Dry ash free basis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแห้งที่ไม่พิจารณาความชื้นและเถ้าเป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิงการวิเคราะห์ภายใต้เกณฑ์ต่าง ๆ ปริมาณที่ทำการวิเคราะห์และปริมาณองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้จะมีค่าแตกต่างกันการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณตามเกณฑ์ที่พิจารณาต่าง ๆ กันจะได้ข้อมูลที่แตกต่างกันเช่น การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแห้งตามลักษณะของเชื้อเพลิงตามที่ได้รับมาข้อมูลที่ได้รับประกอบด้วยเถ้าคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ คาร์บอนคงตัว สารระเหย ความชื้นที่อยู่ในเนื้อของชีวมวลและความชื้นที่อยู่ในผิวของชีวมวลปริมาณที่ได้จากการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแห้งตามเกณฑ์ต่าง ๆ ทั้ง 4 แบบแสดงรายละเอียดดัง รูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ปริมาณที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแห้งโดยการประมาณค่าตามเกณฑ์ต่าง ๆ

A	คือ เถ้า	FC	คือ คาร์บอนคงตัว	H	คือ ไฮโดรเจน
VM	คือ สารระเหย	N	คือ ไนโตรเจน	Ms	คือ ความชื้นที่อยู่ในเนื้อของชีวมวล
C	คือ คาร์บอน	O	คือ ออกซิเจน	Mi	คือ ความชื้นที่อยู่ในผิวของชีวมวล
S	คือ ซัลเฟอร์	M	คือ ความชื้นทั้งหมดของชีวมวล		

2. การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยละเอียด

การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยละเอียดหรือแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) โดยทั่วไปจะใช้วิธีอ้างอิงตามวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของถ่านหินและถ่านโค้กที่กำหนดตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของสมาคม ASTM สำหรับถ่านหิน ASTM D 3176-09 ตามมาตรฐานนี้ได้กำหนดวิธีวิเคราะห์และปริมาณที่ต้องการวิเคราะห์และปริมาณที่ต้องทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ที่ได้แก่ปริมาณของคาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ไนโตรเจน และเถ้าโดยปริมาณของออกซิเจนใช้วิธีคำนวณโดยคิดว่าปริมาณสารทั้งหมดในเชื้อเพลิงมีค่าเป็น 100 ส่วน สำหรับการวิเคราะห์แบบแยกธาตุจะวิเคราะห์โดยพิจารณาตามพื้นฐานที่เชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงแห้งโดยไม่พิจารณาความชื้นเป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิงการวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate analysis) โดยรายงานแบบปลอดความชื้นและเถ้า (Dry and ash free basis) ของเชื้อเพลิงชีวมวลบางชนิดทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศแสดงดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate analysis) และ แบบการประมาณค่า (Proximate analysis) องค์ประกอบในเชื้อเพลิงชีวมวล [17]

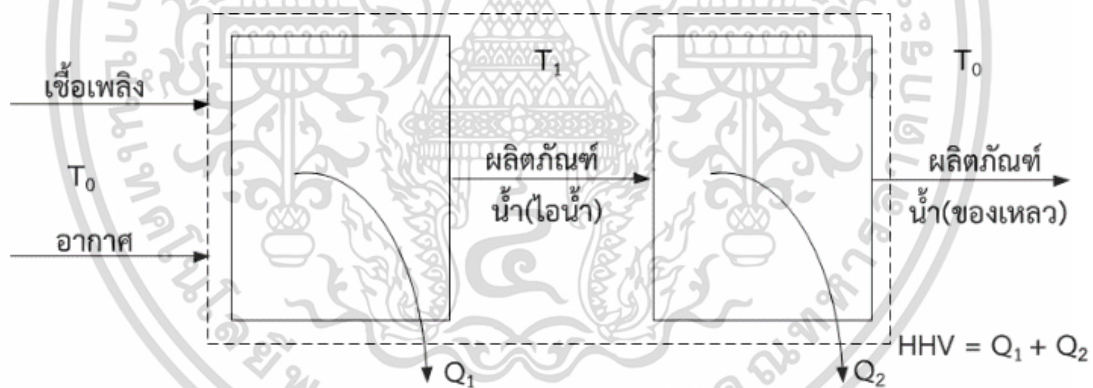
ชีวมวล(ประเทศ)	วิเคราะห์โดยประมาณ (% นน.แบบสด)				วิเคราะห์โดยละเอียด (% นน.ปลอดเถ้าและความชื้น)				
	ความชื้น	VM	FC	เถ้า	C	H	O	N	S
แกลบ (ไทย)	10.30	55.60	20.10	14.00	50.20	6.01	42.80	0.91	0.08
ทะลายปาล์ม (ไทย)	38.40	40.71	17.50	3.39	43.07	5.71	49.74	0.32	1.16
ใยผลปาล์ม(ไทย)	35.00	48.40	12.10	4.50	54.90	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	NA.	NA.	6.50	51.88	6.10	41.71	0.31	NA.
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	NA.	NA.
ฟางข้าว (เดนมาร์ก)	7.40	NA.	NA.	NA.	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	NA.	NA.
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	NA.
ไม้ซี้บ (อินเดีย)	7.00	54.52	38.11	0.37	49.01	6.40	44.59	NA.	NA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การวิเคราะห์ค่าความร้อนของชีวมวล

ค่าความร้อนของชีวมวลสามารถหาได้โดยวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือวัดที่เรียกว่า บอมบ์แคลอริมิเตอร์และโดยวิธีการคำนวณโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยละเอียดการวิเคราะห์หาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลที่นิยมใช้โดยทั่วไปใช้วิธีอ้างอิงตามค่ากำหนดมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของสมาคม ASTM สำหรับถ่านหินที่ใช้มาตรฐาน ASTM D-5868

การหาค่าความร้อนของชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งมี 2 วิธี คือ วิเคราะห์โดยหาค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง (Higher Heating Value: HHV) และวิเคราะห์โดยหาค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (Lower Heating Value; LHV) ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงชีวมวลหรืออาจเรียกว่า ค่าความร้อนสุทธิ (Net Calorific Value; NCV) เป็นการหาค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส โดยพิจารณาว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ทั้งหมดรวมทั้งน้ำมีสถานะเป็นไอค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวลหรืออาจเรียกว่าค่าความร้อนรวม (Gross Calorific Value: GCV) เป็นการหาค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส ในกรณีนี้ไอน้ำจากการเผาไหม้จะควบแน่นกลับมาเป็นของเหลว ทำให้คายความร้อนออกมาซึ่งจะทำให้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งความร้อนที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของไอน้ำ



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงแข็ง

จากการพิจารณาแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 3.4 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวล แสดงในสมการที่ 3.7

$$HHV = LHV + nh_{fg_{H_2O}} \quad (3.7)$$

เมื่อ $h_{fg_{H_2O}}$ คือ เอนทาลปีที่ใช้ในการเปลี่ยนไอน้ำให้เป็นของเหลวซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,260 กิโลจูลต่อกรัม

n คือ จำนวนโมลของไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าความร้อนแฝงในการเป็นไอของน้ำมีค่า 2,260 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และโมเลกุลของน้ำประกอบด้วยไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม คิดเป็นอัตราส่วนมวลโมเลกุลของไฮโดรเจนต่อมวลโมเลกุลของน้ำมีค่าเท่ากับ 1 : 9 ดังนั้นจากสมการที่ 3.7 จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวลได้ดังสมการที่ 3.8

$$HHV = LHV + 22.6(9H + M) \quad (3.8)$$

เมื่อ H คือ ร้อยละของไฮโดรเจนในชีวมวล M คือ ร้อยละของความชื้นในชีวมวล

การหาค่าความร้อนของชีวมวลสามารถคำนวณได้ถ้าทราบปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ ของเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์โดยการประมาณค่าและการวิเคราะห์โดยละเอียดได้มีผู้เสนอความสัมพันธ์เพื่อหาค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงโดยการคำนวณจากปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่มีในเชื้อเพลิงที่ได้จากการวิเคราะห์โดยละเอียดซึ่งปรากฏในรูปของสมการอย่างง่ายหลายสมการโดยแต่ละสมการจะมีสูตรและเงื่อนไขในการใช้สมการที่แตกต่างกันไปการจะเลือกนำสมการใดไปใช้งานจะขึ้นกับข้อมูลองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่มีในเชื้อเพลิง

$$HHV = 0.3491C + 1.1783H + 0.1005S - 0.1034O - 0.015N - 0.0211A \quad (MJ/kg) \quad (3.9)$$

เมื่อ C คือ ปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก) H ปริมาณไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
S คือ ปริมาณซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก) O คือ ปริมาณออกซิเจนในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
N คือ ปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก) A ปริมาณเถ้าในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอาจทำการคำนวณได้ถ้าทราบผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงโดยประมาณเนื่องจากการวิเคราะห์โดยประมาณนั้นทำได้ง่ายกว่าการวิเคราะห์โดยละเอียดจากการศึกษาของเชื้อเพลิงโดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์โดยประมาณแสดงดังสมการที่ 3.10

$$HHV = 0.3536FC + 0.1559VM - 0.0078Ash \quad (MJ/kg) \quad (3.10)$$

เมื่อ FC คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

VM คือ ปริมาณสารระเหยในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Ash คือ ปริมาณเถ้าในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ [17,20]

การเผาไหม้ (Combustion) หมายถึง ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเปลี่ยนพลังงานในพันธะเคมีเป็นพลังงานความร้อนสูงและมีการแผ่รังสี แต่ถ้าหากปฏิกิริยาเป็นไปอย่างช้าๆก็จะมีผลให้ความร้อนออกมาเพียงเล็กน้อย ปฏิกิริยานี้อาจจะเป็นการออกซิเดชันกับเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว หรือเชื้อเพลิงแก๊ส ซึ่งตัวออกซิไดซ์กับเชื้อเพลิงดังกล่าวคือออกซิเจน แต่ในทางปฏิบัติเราอาจไม่สามารถใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากออกซิเจนบริสุทธิ์ส่วนใหญ่ใช้ในห้องปฏิบัติการเท่านั้นเพราะราคาแพง การใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง แต่เนื่องจากในอากาศมีองค์ประกอบหลักคือ ออกซิเจน 21% ไนโตรเจน 79% (โดยปริมาตร) ส่งผลให้เปลวไฟอุณหภูมิเปลวไฟของการเผาไหม้ลดลง เนื่องจากต้องใช้ความร้อนส่วนหนึ่งทำให้นโตรเจนร้อนขึ้น

3.3.1 กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลมีลำดับขั้นตอนดังนี้

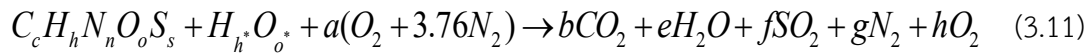
1. การอบแห้ง (Drying) เมื่อเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีหรือการพา ในห้องเผาไหม้ ความชื้นที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงจะระเหยออกมาภายนอก ความชื้นที่สะสมในเชื้อเพลิงมากจะทำให้ กระบวนการเผาไหม้มีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากมีพลังงานบางส่วนถูกใช้เพื่อการระเหยน้ำ ทำให้ การเผาไหม้มีอุณหภูมิต่ำถ้าเชื้อเพลิงมีความชื้นสูง

2. การปลดปล่อยสารระเหย (Devolatilization) หรือ ไพโรไลซิส (Pyrolysis) เมื่อเชื้อเพลิงระเหยน้ำ จนถึงอุณหภูมิสูงจุดหนึ่งแล้ว สารระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิง ได้แก่ น้ำมันดิน (Tar) คาร์บอน (Char coal) จะทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับอากาศรอบๆ เมื่ออุณหภูมิถึงจุดติดไฟจึงเกิดเป็นเปลวไฟรอบอนุภาค เชื้อเพลิง

3. การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Char oxidation) หลังจากสารระเหยเผาไหม้ ส่วนที่เหลือคือถ่านชาร์ ออกซิเจนรอบ ๆ จะแพร่เข้าไปในถ่านชาร์ซึ่งมีช่องว่างเนื่องจากความพรุน ทำให้เกิดการเผาไหม้ การเผาไหม้เป็นกระบวนการที่มีการทำปฏิกิริยาต่อกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ดังนั้น กระบวนการเผาไหม้จึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเชื้อเพลิง (รูปร่าง ความหนาแน่น ความชื้น ปริมาณ คาร์บอนคงตัว สารระเหย) ปริมาณของเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศ ที่ใช้ในการเผาไหม้ และเงื่อนไขต่างๆ ของสิ่งแวดล้อมภายนอก (ความชื้น อุณหภูมิ)

3.3.2 สตอยชิโอเมตรีของการเผาไหม้ (Combustion stoichiometry)

เมื่อทราบองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุแล้ว จะสามารถคำนวณหาอากาศที่ทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์ทางทฤษฎี หรือเรียกว่า สตอยชิโอเมตรีของการเผาไหม้ โดยเขียนสมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่สภาวะอากาศแห้งมีออกซิเจน 21% และ ไนโตรเจน 79% และมีความชื้นได้ดังนี้



เทอมของ $H_h^* O_o^*$ เกิดจากความชื้นของเชื้อเพลิง

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

สามารถหาอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎีได้ดังนี้

$$(A/F)_{stoic} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = 4.76a \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}} \quad (3.13)$$

3.3.3 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, Φ)

เมื่อทราบอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎีก็สามารถหาอัตราส่วนสมมูล ซึ่งเป็นตัวแปรที่ทำให้ทราบว่าอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้ห่างจากค่าทฤษฎีแค่ไหน โดยอัตราส่วนสมมูลมีสองชนิดคือ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง (Fuel equivalence ratio, Φ_{fuel}) และอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงออกซิไดเซอร์ (Oxidizer equivalence ratio, Φ_{oxi}) คำนวณได้จาก

$$\Phi_{fuel} = \frac{m_{fuel}/m_{air}}{(m_{fuel}/m_{air})_{stoic}} \quad (3.14)$$

โดย $\Phi_{fuel} < 1$ หรือ $\Phi_{oxi} > 1$ หมายความว่าส่วนผสมบาง (Fuel-lean mixture) กรณีนี้อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้จริงน้อยกว่าค่าทฤษฎี

$\Phi_{fuel} > 1$ หรือ $\Phi_{oxi} < 1$ หมายความว่าส่วนผสมหนา (Fuel-rich mixture) กรณีนี้ส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้จริงมากกว่าค่าทฤษฎี

$\Phi_{fuel} = \Phi_{oxi} = 1$ หมายความว่าส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้จริงเป็นไปตามทฤษฎีส่วนใหญ่นิยมใช้อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง Φ_{fuel}

3.3.4 เปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎี (Percent theoretical air) และเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (Percent excess air)

เปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎีเรียกอีกชื่อว่าอัตราส่วนอากาศ (air ratio) เป็นปริมาณที่บอกให้ทราบว่าอากาศที่ใช้จริงในการเผาไหม้คิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศทางทฤษฎี คำนวณได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎี} = \frac{100}{\Phi_{fuel}} = 100\Phi_{oxi} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น $\Phi_{fuel} = 0.8$ หรือ $\Phi_{oxi} = 1.25$ ดังนั้นเปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 125 จากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100

เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าอากาศที่ใช้จริงเกินจากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ คำนวณได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน} = \frac{100}{\Phi_{fuel}} - 100 = \Phi_{oxi} - 100 \quad (3.16)$$

3.3.5 การคำนวณประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้

1. ประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal efficiency)

ประสิทธิภาพทางความร้อนคืออัตราส่วนระหว่าง ความร้อน หรือ งานที่ผลิต กับพลังงานที่ให้กับระบบ เช่น ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับหม้อไอน้ำ (Boiler) งานที่ได้จากการผลิตไฟฟ้า หรือ ขับเคลื่อนกลไกต่าง ๆ ในอุปกรณ์ทางกล เป็นต้น การคำนวณประสิทธิภาพทางความร้อนในเชิง การทดลองอาจพิจารณาการถ่ายเทความร้อนสู่ห้อง (Room heating application) เมื่อทราบอุณหภูมิทางเข้าปล่องไฟ (Chimney inlet, T_{Ch}) ซึ่งในการทดลองคือท่อทางออกของห้องเผาไหม้ และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้จากการวัด ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส (Flue gas analyzer) ความร้อนที่สูญเสียที่ปล่องไฟ (Chimney heat loss) คำนวณได้จากสูตร

$$Q_{Ch} = [h_{FG}(T_{Ch}) - h_{FG}(T_{Amb})] \dot{m}_{FG} \quad (3.17)$$

กรณีที่ไม่มี การอุ่นเชื้อเพลิงหรืออากาศ และสมมติว่ามีความร้อนสูญเสียที่ปล่องไฟเท่านั้น ประสิทธิภาพทางความร้อนคำนวณได้จากสูตร

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{Ch}}{NCV \cdot \dot{m}_F} \quad (3.18)$$

2. ประสิทธิภาพการเผาไหม้ (Combustion efficiency)

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ โดยปกติการเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์ร้อยเปอร์เซ็นต์เพราะ จะมีองค์ประกอบที่เผาไหม้ไม่หมด ดังนั้นประสิทธิภาพการเผาไหม้จะพิจารณาความร้อนที่สูญเสีย เนื่องจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงบางส่วนที่ไม่ถูกเผาไหม้ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\eta_{comb} = 1 - \frac{\sum_j \bar{E}_j \cdot \dot{m}_F}{NCV \cdot \dot{m}_F} = 1 - \frac{\sum_j \bar{E}_j}{NCV} \quad (3.19)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency)

ประสิทธิภาพรวมจะพิจารณาทั้งความร้อนที่สูญเสียที่ปล่องไฟ ความร้อนที่สูญเสียจากการถ่ายเทเนื่องจากการพา การนำ และการแผ่รังสีความร้อน และความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงบางส่วนไม่ถูกเผาไหม้ กรณีที่ไม่มีการอุ่นอากาศหรือเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพรวมสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\eta_{tot} = 1 - \frac{Q_{Ch} + \sum_i Q_i + \sum_j \bar{E}_j \cdot \dot{m}_F}{NCV \cdot \dot{m}_F} \quad (3.20)$$

3.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยมลพิษ[17,19]

การปลดปล่อยมลพิษในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล อาจแบ่งเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ มลพิษจากการเผาไหม้สมบูรณ์ และมลพิษจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สำหรับการปลดปล่อยอนุภาคที่เป็นมลพิษจะเกิดขึ้นได้ทั้งสองแบบ สำหรับมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล มีทั้งหมดดังนี้

3.4.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

เป็นผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล มีต้นกำเนิดมาจากคาร์บอนที่อยู่ในเชื้อเพลิง คาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น

3.4.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (Nitrogen oxide, NO_x)

NO_x เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของไนโตรเจนที่อยู่ในเชื้อเพลิง มลพิษที่เกิดจากออกไซด์ของไนโตรเจน สาเหตุหลักมาจาก ไนตริกออกไซด์ (NO) ทำปฏิกิริยากลายเป็น ไนโตรเจนออกไซด์ (NO₂) ในชั้นบรรยากาศ NO_x เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดหมอกทางโฟโตเคมี นั่นคือ แก๊สโอโซนในระดับต่ำ (Ground-level ozone) และทำลายโอโซนในระดับสูงที่ช่วยลดรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์สู่ผิวโลก ดังสมการ



จะเห็นว่า NO เพียงโมเลกุลเดียวสามารถทำลาย O₃ อย่างต่อเนื่องโดยปฏิกิริยารีดอกซ์ ตามสมการที่ (3.21) จะเห็นว่า NO₂ จะถูกรีดิวซ์กลับมาเป็น NO ย้อนกลับไปทำลาย O₃ ดังสมการที่ (3.22) เป็น ปฏิกิริยาลูกโซ่ กลไกการเกิด NO_x ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล มีรูปแบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Thermal NO_x

เป็น NO_x ที่เกิดในสภาวะอุณหภูมิสูง ประมาณ 1300 °C บางครั้งเรียกว่า Zeldovich-NO ซึ่ง Zeldovich เป็นคนแรกที่อธิบายการเกิด NO_x ชนิดนี้ มีสมการการเกิดดังนี้



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

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

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

สาเหตุที่ชื่อว่า thermal NO_x เพราะว่า NO ที่เกิดจากสมการที่ (3.23) นั้นต้องใช้พลังงานกระตุ้นสูง มากเมื่อเทียบกับสมการที่ (3.24) ทั้งนี้เพราะต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของ N₂ ซึ่งเป็น แบบไตรพันธะ (Triple bond) ขณะเดียวกันสมการที่ (3.25) จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้ ต่อเมื่ออุณหภูมิสูงเท่านั้น ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นตัวควบคุมการเกิด NO ตามสมการที่ (3.23) ผ่านค่าคงตัว ของการเกิดปฏิกิริยา k_1 ซึ่งแปรผกผันกับ $1/T$ ในการทำนายปริมาณการเกิด NO_x ในปฏิกิริยาการเผาไหม้ ไม่ควรใช้วิธีการทำสมดุลเคมีเหมือนการทำปริมาณ H₂O หรือ CO₂ เพราะจะเกิดความผิดพลาดอย่างมาก เนื่องจากสมดุลเคมีจะเกิดขึ้นได้นั้นต้องใช้เวลาที่ค่อนข้างนาน และนานกว่าเวลาที่อยู่ในเปลวไฟอุณหภูมิสูงเสียอีก จากสมการเคมีกลไกของ Zeldovich สามารถหาอัตราการเกิด NO_x ได้คือ

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] \quad (3.26)$$

เนื่องจากว่าอัตราการเกิดอะตอมของไนโตรเจนขณะเกิดปฏิกิริยา ในสภาวะเสมือนคงที่ คือ

$$\frac{d[N]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] \approx 0 \quad (3.27)$$

ดังนั้นได้อัตราการเกิด NO คือ

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[O][N_2] \quad (3.28)$$

จะเห็นว่า การลดปริมาณ thermal NO_x ได้นั้นมีเพียงสองวิธีคือ ลด [N₂] และ [O] หรือลด

k_1 ซึ่งมีความหมายคือต้องลดอุณหภูมิในการเผาไหม้นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Prompt NO_x

เมื่อทำการวัดหาปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ของเปลวไฟแบบ ราบเรียบจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน จากจุดที่ห่างจากปลายของเปลวไฟเข้าหาแนวของ เปลวไฟ พบว่าปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ไม่ได้มีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์แต่ประการใดเหมือนที่ ทำนายโดยกลไกของ Zeldovich แต่กลับพบว่าไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด (Promptly) ที่บริเวณใกล้แนวของเปลวไฟซึ่ง มีความซับซ้อนมากกว่า Thermal NO_x ทั้งนี้เพราะว่า Prompt NO_x เกิดจากอนุมูลอิสระ CH ที่เกิดขึ้นในลักษณะเป็นสารชั้นกลางที่บริเวณแนวของเปลวไฟ จากนั้น CH จะทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนในอากาศ ทำให้ได้กรดไฮโดรไซยานิค (HCN) ซึ่งจะทำ ปฏิกิริยาต่อไปจนเกิด NO ดังสมการต่อไปนี้

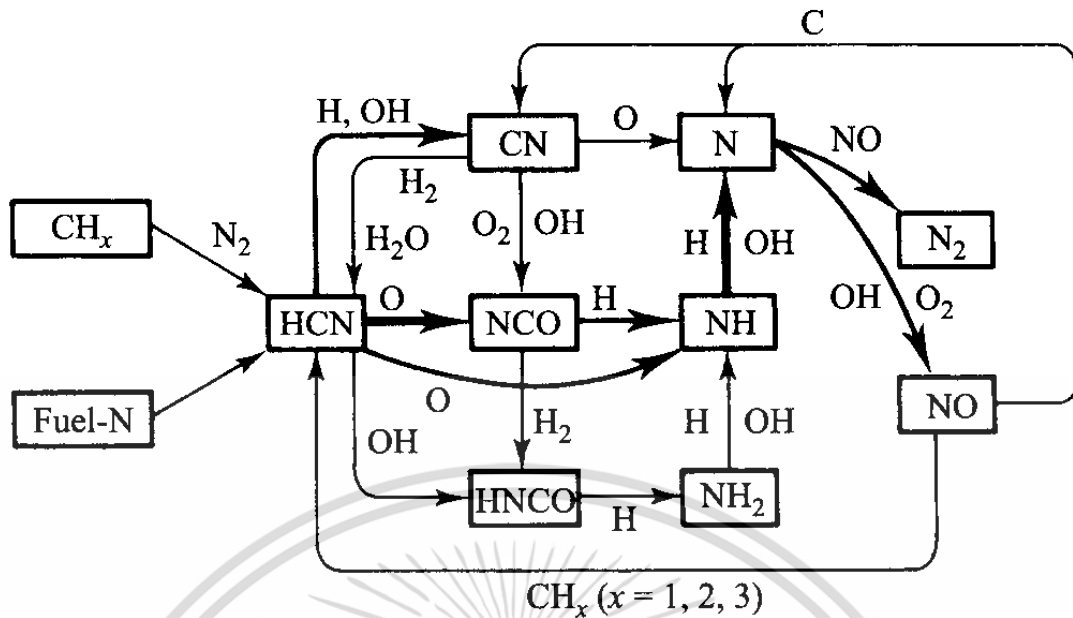


Prompt NO_x มักเกิดในกรณีส่วนผสมหนา Prompt NO_x จะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า Thermal NO_x เพราะปฏิกิริยาต้องใช้พลังงานกระตุ้นที่น้อยกว่า ที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำประมาณ 1000 K ในกรณีเชื้อเพลิงชีวมวล Prompt NO_x จะมีความสำคัญน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในเชื้อเพลิงฟอสซิล

3. Fuel NO_x

สำหรับเชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบได้แก่ เชื้อเพลิงชีวมวล และถ่าน หิน เป็นต้น ซึ่งถ่านหินอาจมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบได้ถึงร้อยละ 2 ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะเปลี่ยนไปเป็น HCN ในเปลวไฟซึ่งจะเปลี่ยนต่อไปเป็น NH หรือ NH₂ จากนั้นทั้งคู่ก็จะทำ ปฏิกิริยากับออกซิเจน และทำให้เกิด NO+H₂O หรืออาจทำปฏิกิริยากับ NO แล้วเปลี่ยนเป็น N₂ และ H₂O ดังนั้นสัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่หลุดออกมาจากเปลวไฟกลายเป็น NO นั้นจะเป็น อิสระต่ออัตราส่วนระหว่าง NO/O₂ ในเปลวไฟ นั่นคือหากรักษาให้สัดส่วนของออกซิเจนในแก๊สที่มี อุณหภูมิสูงในเปลวไฟให้ต่ำไว้ก็จะทำให้ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเปลี่ยนไปเป็น NO น้อยลงตามไปด้วย

สัดส่วนของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนเป็น NO_x ในแก๊สไอเสียนั้นประมาณ ได้ว่ามีสัดส่วนประมาณร้อยละ 20 ถึง 50 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะของเตาเผา และอาจขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางเคมีของไนโตรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงอีกด้วย จะเห็นได้ว่าแม้จะทำการวิเคราะห์และ ศึกษากลไกการเกิด NO แต่ละประเภทแยกออกจากกัน แต่ทั้ง Thermal NO_x, Prompt NO_x และ Fuel NO_x ต่างก็เกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน และมีกลไกการเกิดร่วมกัน



รูปที่ 3.5 กลไกการเกิด NO [19]

3.4.3 ไนตรัสออกไซด์ (N_2O)

การปลดปล่อยไนตรัสออกไซด์ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการสันดาปของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง จากการวัดไนตรัสออกไซด์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล พบว่ามีค่าน้อยมาก นอกจากนี้ไนตรัสออกไซด์ยังก่อให้เกิด NO ตามสมการด้านล่าง



NO ที่เกิดจากสมการทั้งสองด้านบนจะเกิดที่อุณหภูมิสูงและความดันต่ำ ซึ่งส่วนใหญ่พบเจอใน เครื่องยนต์กังหันแก๊ส หรือกรณีไอดีบางมาก ๆ

3.4.4 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x)

เป็นที่ทราบกันดีว่าออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) นอกจากจะมีผลต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังสามารถทำลายอุปกรณ์การเผาไหม้ และอุปกรณ์อื่น ๆ ให้ผุพังเสียหายได้ ออกไซด์ของซัลเฟอร์มีที่มาจากซัลเฟอร์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการเผาไหม้ โดยจะได้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เป็นสารประกอบหลัก มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อยู่เล็กน้อย และอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) คาร์บอนิลซัลไฟด์ (COS) ซึ่งเรียกรวมกันว่า SO_x ซึ่งเชื้อเพลิงเกือบทั้งหมดที่ใช้โดยมนุษย์ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ ไม้ และสารอินทรีย์อื่นๆ เป็นต้น ล้วนมีซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบ เชื้อเพลิงไม้อาจมีอยู่ในปริมาณน้อยเพียงร้อยละ 0.1 ในขณะที่ถ่านหิน

เกือบทุกชนิดอาจมีอยู่ตั้งแต่ร้อยละ 0.5 ถึง ร้อยละ 3 ในขณะที่น้ำมันโดยทั่วไปจะมีซัลเฟอร์มากกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม้แต่จะน้อยกว่าที่มีในถ่านหิน ถ้าทำการเผาไหม้ไม้ ซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในไม้เกือบทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ดังสมการต่อไปนี้



ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วกลายเป็นกรด ซัลฟิวริก (H₂SO₄) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดฝนกรด



ซึ่งน้ำที่ทำปฏิกิริยากับ SO₃ คือน้ำที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ และมีอยู่แล้วใน แก๊สไอเสียพร้อมกับ SO₃ นั้นเอง SO₂ ที่เกิดจากการเผาไหม้จะมีปริมาณมากกว่าแก๊ส SO₃ ดังนั้น SO₂ จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็น SO₃ โดยอนุมูลของ OH ก่อนทำปฏิกิริยากับ H₂O เป็นกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ต่อไป ซึ่งวิธีการทั่วไปที่ใช้กำจัด SO_x จากแก๊สไอเสียคือใช้หินปูน (limestone, CaCO₃) หรือใช้ปูนขาว (lime, CaO) ผสมน้ำจนเป็นโคลนเหลวแล้วพ่นเข้าไปในหอที่แก๊สไอเสียไหลผ่าน ซึ่ง SO_x จะถูก กำจัด ดังสมการต่อไปนี้

กรณีใช้โคลนเหลวของหินปูน (aqueous slurry of limestone)



กรณีใช้โคลนเหลวของหินขาว (aqueous slurry of lime)



นอกจากการใช้หินปูนหรือปูนขาวผสมน้ำ (แบบเปียก) กำจัด SO₂ ได้แล้ว ยัง สามารถกำจัด SO₂ ด้วยหินปูนหรือปูนขาวในรูปแบบผง (แบบแห้ง) ได้อีกด้วย ซึ่งกรณีแบบเปียกต้อง รอให้ calcium sulfate dehydrate (CaSO₃ · 2H₂O) ตกตะกอนในถังพักเสียก่อนแล้วค่อยแยกน้ำ ออกเพื่อขนย้ายออกไปกำจัดโดยการฝังต่อไป ส่วนในกรณีแบบแห้งนั้นใช้เครื่องแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้า สถิตเพื่อแยกผง CaSO₃ ออกไปเสียก่อนแล้วจึงนำไปกำจัดต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่เกิดจากการเผาไหม้มีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น สภาวะการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป การผสมคลุกเคล้ากันไม่ดีพอ ปริมาณอากาศไม่เพียงพอ นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงจนทำให้เกิดการแตกสลายของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มาเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ได้ดังสมการ



สาเหตุที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้เกิด CO คือการมีเวลาสั้นเกินไปในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากต้องระบายไอเสียออกทันที อุณหภูมิ และความดันเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ดังนั้น CO จะอยู่ในสภาวะสมดุลบางส่วนมากกว่าที่จะอยู่ในสภาวะสมดุลอย่างสมบูรณ์ ทำให้การเปลี่ยนแปลงจาก CO เป็น CO₂ เกิดขึ้นไม่เต็มที่ เพราะถูกจำกัดด้วยการแย่งเข้าทำปฏิกิริยาของ OH กับ H



ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถควบคุม ปริมาณออกซิเจนในปฏิกิริยาการเผาไหม้ แก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และเป็นพิษต่อร่างกายอย่างมาก เมื่อร่างกายได้รับ แก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์จะทำให้ร่างกาย สมอง และกล้ามเนื้อ ได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ ปฏิกิริยา การตอบสนองของร่างกายจะช้าลง และขาดการตัดสินใจที่ดี เมื่อได้รับแก๊สชนิดนี้เข้าไปในปริมาณ มาก ๆ สามารถทำให้เสียชีวิตได้

3.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ [20,21]

บทนี้จะนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการจำลองในงานวิจัยนี้ โดยสามารถศึกษาได้จาก help ของโปรแกรม ANSYS Fluent ver.12.0 และจากงานวิจัยที่โปรแกรมได้อ้างอิงถึง

3.5.1 สมการอนุรักษ์มวล

พิจารณาของไหลอัดตัวได้ และเป็นของไหลแบบ Newtonian

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = S_m \quad (3.44)$$

เมื่อ

$$\text{div}(\rho u) = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

พิจารณาของไหลอัดตัวได้ และเป็นของไหลแบบ Newtonian สมการโมเมนตัมพิกัดคาร์ทีเซียน x, y, z คือ

พิกัด x

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + S_{Mx} \quad (3.45)$$

พิกัด y

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + S_{My} \quad (3.46)$$

พิกัด z

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} w) + S_{Mz} \quad (3.47)$$

3.4.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{\text{eff}} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (3.48)$$

เทอมแรกฝั่งขวามือของสมการ คือการถ่ายโอนพลังงานจากการนำ การแพร่ของสปีชีส์ และการขยายตัวจากความหนืด ตามลำดับ

เมื่อ k_{eff} คือ Effective conductivity
 \vec{J}_j คือ แฟลักซ์การแพร่ของสปีชีส์
 S_h คือ ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี และแหล่งความร้อนอื่น ๆ ในระบบ
 $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$ โดย h คือ Sensible enthalpy ของแก๊สอุดมคติ

3.5.4 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน k- ϵ (k- ϵ turbulence flow model)

1. Standard k- ϵ turbulence model

แบบจำลองการไหลปั่นป่วน k- ϵ มาตรฐานเป็นแบบจำลองที่สมบูร์นอย่างง่ายที่สุดสำหรับการไหลปั่นป่วน คือแบบจำลองของสมการสองชุด ที่สามารถแก้ปัญหาสมการการถ่ายโอนแยกกันสองแบบ เพื่อให้สามารถกำหนดความปั่นป่วนของความเร็ว และ length scale อีกระยะจากกัน แบบจำลองประกอบด้วยสมการถ่ายโอนพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k) และสมการสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) โดยแบบจำลองการไหลปั่นป่วน k- ϵ จะอยู่บนสมมติฐานคือ เป็นการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลปั่นป่วนเต็มขั้น (Fully turbulent flow) และไม่มีผลจากความหนืดในระดับโมเลกุล สามารถคำนวณ k และ ϵ ได้จาก

สมการถ่ายโอนพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3.49)$$

สมการสูญเสียของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (3.50)$$

- เมื่อ G_k คือ การก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ความเร็ว
 G_b คือ การก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว
 Y_M คือ การขยายตัวของกาการสูญเสีย
 $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ คือ ค่าคงที่
 $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ คือ Prandtl numbers ของ k และ ϵ ตามลำดับ
 S_k, S_ϵ คือ เทอมของการก่อกำเนิด
 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ คือ ความหนืดปั่นป่วน (Turbulent (or eddy) viscosity) โดย C_μ = ค่าคงที่

จากการทดลองการไหลปั่นป่วนที่ใช้อากาศและน้ำเป็นของไหล พบว่าค่าคงที่ต่างๆมีค่าดังนี้

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

2. Realizable k - ϵ turbulence model

แบบจำลองการไหลปั่นป่วน k - ϵ realizable มีการพัฒนา และมีความแตกต่างกับของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน k - ϵ มาตรฐาน อยู่ 2 ข้อ คือ วิธีการคำนวณความหนืดปั่นป่วน (Turbulent (or eddy) viscosity) μ_t และเปลี่ยนแปลงสมการสูญเสียของพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ) สามารถคำนวณ k และ ϵ ได้จาก

สมการถ่ายโอนพลังงานจลน์ปั่นป่วน (k)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการสูญเสียพลังงานจลน์ปั่นป่วน (ϵ)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon})\frac{\partial\epsilon}{\partial x_j}] + \rho C_{1\epsilon} S_\epsilon - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v\epsilon}} \quad (3.52)$$

$$+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon$$

$$C_1 = \max[0.43, \frac{\eta}{\eta+5}], \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3.53)$$

เมื่อ G_k คือ การก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนท์ความเร็ว

G_b คือ การก่อกำเนิดพลังงานจลน์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว

Y_M คือ การขยายตัวของการสูญเสีย

$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ คือ ค่าคงที่

$\sigma_k, \sigma_\epsilon$ คือ Prandtl numbers ของ k และ ϵ ตามลำดับ

S_k, S_ϵ คือ เทอมของการก่อกำเนิด

$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ คือ ความหนืดปั่นป่วน (turbulent (or eddy) viscosity)

โดย C_μ ไม่คงที่

ซึ่ง C_μ หาได้จากสมการ

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\epsilon}} \quad (3.54)$$

เมื่อ $A_0 = 4.04, A_s = \sqrt{6} \cos\phi$, โดย $\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W)$, $W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2}(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j})$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.55)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\epsilon_{ijk}\omega_k \quad (3.56)$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \epsilon_{ijk}\omega_k \quad (3.57)$$

จากการทดลองการไหลปั่นป่วนที่ใช้อากาศและน้ำเป็นของไหล พบว่าค่าคงที่ต่าง ๆ มีค่าดังนี้

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.5 สมการถ่ายโอนสปีชีส์ (Species transport equations)

เป็นสมการอนุรักษ์พลังงานทางเคมี ที่หาสัดส่วนมวลของแต่ละสปีชีส์ Y_i ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีที่ ตำแหน่งต่าง ๆ ผ่านการแก้สมการการพาและการแพร่ สมการอนุรักษ์นี้มีรูปแบบทั่วไปคือ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (3.58)$$

เมื่อ R_i คือ อัตราการเกิดสุทธิของปฏิกิริยาเคมีใน i สปีชีส์

S_i คือ อัตราการกำเนิดของสารเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์

1. Mass diffusion in turbulent Flows

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (3.59)$$

เมื่อ Sc_t คือ Turbulent Schmidt number

$D_{i,m}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสำหรับสปีชีส์ i ในส่วนผสม

$D_{T,i}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่จากความร้อน

μ_t คือ ความหนืดปั่นป่วน

2. Treatment of species transport in the Energy Equation

สำหรับการไหลที่มีหลากหลายองค์ประกอบ การถ่ายโอนเอ็นทัลปีเนื่องจากการแพร่ของสปีชีส์เขียนสมการในรูปทั่วไปคือ

$$\nabla \cdot \left[\sum_{i=1}^n h_i \vec{J}_i \right] \quad (3.60)$$

โดยการแพร่ของสปีชีส์อาจมีผลต่อสนามเอ็นทัลปี ซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก Lewis number

$$Le_i = \frac{k}{\rho c_p D_{i,m}} \quad (3.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.6 แบบจำลองของการก่อเกิดมลพิษ (Pollutant Formation)

1. สมการการถ่ายเทออกไซด์ไนโตรเจน (Equations for NO_x Transport)

อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในกลไกเกิดของ NO_x อ้างอิงจากการเคลื่อนที่ของมวล และเทอมของการพา ที่สามารถเขียนสมการการก่อเกิดของ NO_x ในรูปแบบปริมาตรควบคุมหยุดนิ่งดังแสดงในสมการ 3.62

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\text{NO}_x}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{\text{NO}_x}) = \nabla \cdot (\rho D Y_{\text{NO}_x}) + S_{\text{NO}_x} \quad (3.62)$$

เมื่อ Y_{NO_x} คือ สัดส่วนโดยมวล
 S_{NO_x} คือ Source terms

2. สมการการถ่ายเทออกไซด์ซัลเฟอร์ (Equations for SO_x Transport)

สมการการเคลื่อนที่มวล SO_x จะรวมเทอมของการพา การแพร่ การเกิดและการบริโภคของ SO₂ SO₃ SO SO_{SH} และ H₂S ดังแสดงในสมการ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\text{SO}_x}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{\text{SO}_x}) = \nabla \cdot (\rho D Y_{\text{SO}_x}) + S_{\text{SO}_x} \quad (3.63)$$

เมื่อ Y_{NO_x} คือ สัดส่วนโดยมวล
 S_{NO_x} คือ Source terms

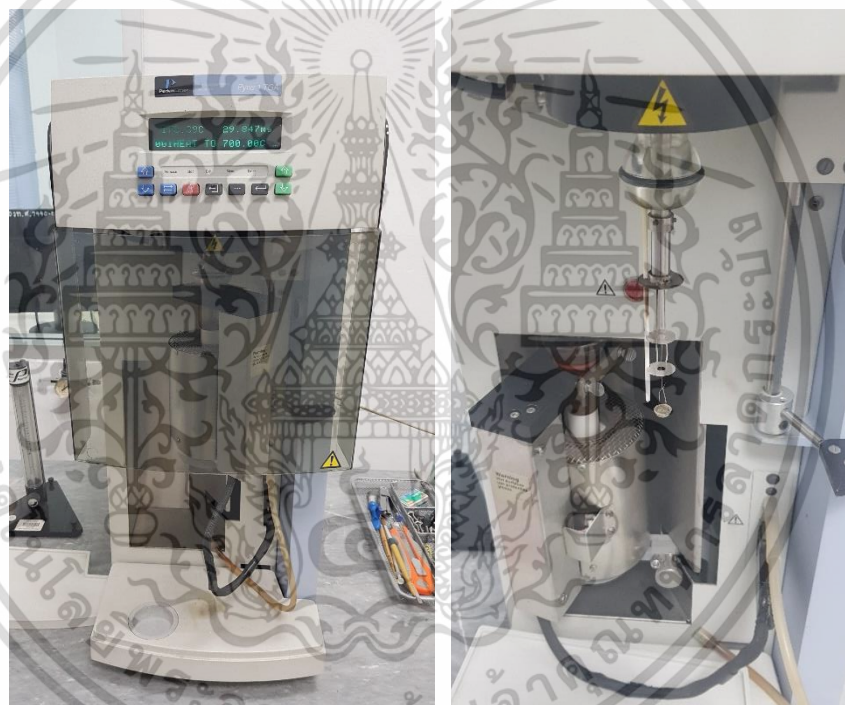
บทที่ 4

ชุดอุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงชุดอุปกรณ์การทดลอง วิธีการทดลองของหัวเผาชนิดฝุ่น เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร และรวมถึงวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.1 ชุดทดลอง

4.1.1 ชุดทดลองเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (Thermogravimetric analysis)



รูปที่ 4.1 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis :TGA)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนของยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 ซึ่งรายละเอียดของเครื่องแสดงในอ้างอิง [22] โดยเครื่อง TGA ได้มาตรฐาน ISO 9000

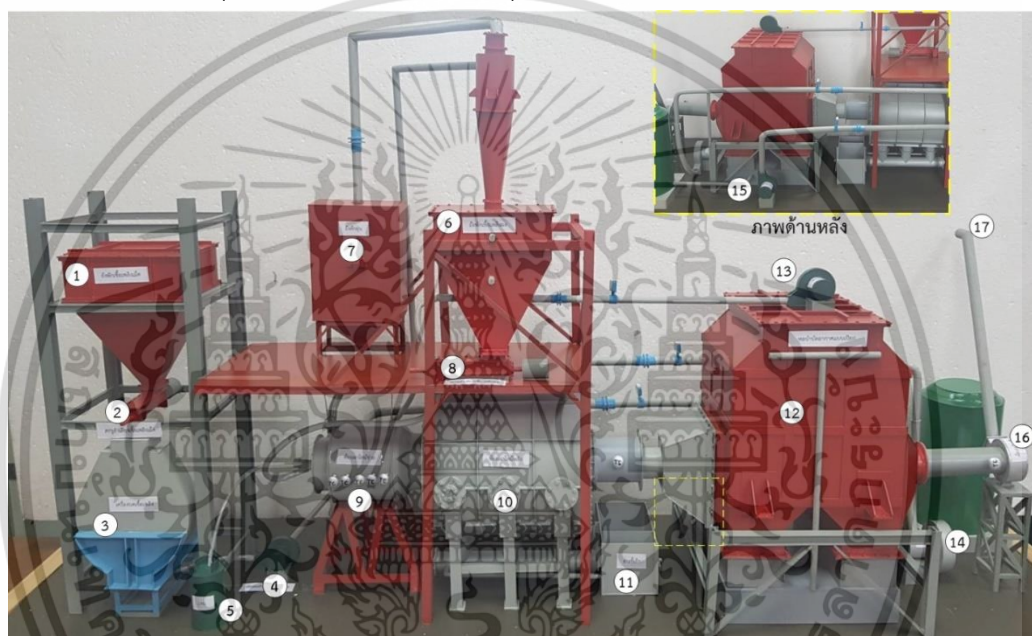
มีการควบคุมน้ำหนักเริ่มต้นของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ที่ 23.5 มิลลิกรัม ที่บิดผ่านตะแกรง 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 4.1 อีกทั้งยังมีการควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 60 มิลลิตรต่อนาที และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่ 20 องศาเซลเซียส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมาที่ โดยจะใช้ค่านี้เป็นค่าเริ่มต้นในทุก ๆ เชื้อเพลิงที่ทำการทดลองในงานวิจัยนี้ เพื่อที่จะสามารถนำผลของการวิเคราะห์ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกัน

โดยผลที่ได้จากเครื่อง TGA จะแสดงในรูปของการเปอร์เซ็นต์น้ำหนักมวลสาร (TG) และอัตราการลดลงของน้ำหนัก (DTG) ต่ออุณหภูมิ ซึ่งเราสามารถนำผลจากการลดลงของมวลสารมาวิเคราะห์จุดวิกฤตต่าง ๆ ที่เป็นตัวแปรของพฤติกรรมของการเผาไหม้ต่อไป

4.1.2 ชุดอุปกรณ์ทดลองหัวเผาชนิดฝุ่น (Pulverized Burner)

1. แผนผังของอุปกรณ์ทดลองหัวเผาชนิดฝุ่น



รูปที่ 4.2 แสดงแผนผังด้านหน้าของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเตาเผาไหม้

หมายเลขที่ 1 คือ ไซโลเก็บเชื้อเพลิงเม็ดก่อนบด ดังแสดงในรูปที่ 4.3

หมายเลขที่ 2 คือ สกรูลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าเครื่องบด ดังแสดงในรูปที่ 4.3

หมายเลขที่ 3 คือ เครื่องบดเชื้อเพลิงชนิด Hammer mill ที่เป็นตัวทำหน้าที่บดเชื้อเพลิงอัดเม็ดให้เป็นผงโดยเชื้อเพลิงจะถูกบดผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4

หมายเลขที่ 4 คือ พัดลมลำเลียงเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เป็นพัดลมที่ลำเลียงเชื้อเพลิงที่ผ่านการบดแล้วส่งต่อไปยังไซโลเก็บเชื้อเพลิงผง

หมายเลขที่ 5 คือ ถังแก๊ส LPG ที่ใช้ในการอุ่นเตาก่อนที่จะเริ่มป้อนเชื้อเพลิง

หมายเลขที่ 6 คือ ไซโลเก็บเชื้อเพลิงผงที่ส่งมาจากเครื่องบด และรอที่จะถูกส่งเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หมายเลขที่ 7 คือ Bag House ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ทำหน้าที่เก็บอนุภาคขนาดเล็ก ภายในบรรจุถุงกรอง (Bag Filter) อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะถูกถุงกรองดักไว้
- หมายเลขที่ 8 คือ สกรูลำเลียงเชื้อเพลิงผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (Screw feed) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยหลังจากเชื้อเพลิงผงผ่านสกรูลำเลียงจะลงสู่ท่อลำเลียง และถูกอากาศปฐมภูมิ ลำเลียงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย (Pre-chamber)
- หมายเลขที่ 9 คือ ห้องเผาไหม้ช่วย ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นส่วนที่วิทย์ยานพนธ์นี้ให้ความสนใจ พฤติกรรมการเผาไหม้
- หมายเลขที่ 10 คือ เตเผาไหม้หลักดังแสดงในรูปที่ 4.8 เป็นบริเวณที่รับความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้
- หมายเลขที่ 11 คือ ถังเก็บเถ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.9
- หมายเลขที่ 12 คือ ระบบบำบัดอากาศแบบเปียก (Wet scrubber) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จะอยู่ต่อจากเตเผาไหม้หลัก ซึ่งบริเวณทางเข้าจะมีหัวฉีดน้ำเป็นละอองดักจับอนุภาคที่เป็นเถ้าลอย (Fly ash) ให้ตกลงสู่อ่างด้านล่าง นอกจากนี้ยังเป็นการลดอุณหภูมิไอเสีย ก่อนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ
- หมายเลขที่ 13 คือ พัดลมอากาศปฐมภูมิ (Primary air fan) ทำหน้าที่ลำเลียงเชื้อเพลิงผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย
- หมายเลขที่ 14 คือ พัดลมอากาศทุติยภูมิ (Secondary air fan) ทำหน้าที่ลำเลียงอากาศที่เป็นอากาศหลักเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง อากาศทุติยภูมิจะไหลแบบหมุนควงเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยกลไกของตัวสร้างการหมุนควง (Swirl) ที่ติดตั้งในกล่องลม (Swirl box)
- หมายเลขที่ 15 คือ พัดลมอากาศตติยภูมิ (Tertiary air fan) ทำหน้าที่ลำเลียงอากาศส่วนสุดท้ายที่เข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงบริเวณก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้หลัก อากาศส่วนนี้จะแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังของปูนทนไฟชั้นนอกก่อน แล้วจึงพุ่งเข้ารูที่ส่วนปลายของห้องเผาไหม้ช่วย
- หมายเลขที่ 16 คือ พัดลมดูด หรือ ID fan ทำหน้าที่สร้างแรงดูดเพื่อให้ความดันในระบบเป็นลบตลอดเวลา และดูดอากาศที่ผ่านการบำบัดออกสู่ปล่องควันของท่อไอเสีย
- หมายเลขที่ 17 คือ ท่อไอเสีย ดังแสดงในรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ไซโลเก็บเชื้อเพลิงเม็ดและสกรูลำเลียงเชื้อเพลิง



รูปที่ 4.4 เครื่องบดเชื้อเพลิงชนิด Hammer mill



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 4.5 พัดลมลำเลียงเชื้อเพลิงผง
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 Baghouse และไซโลเก็บเชื้อเพลิงผง



รูปที่ 4.7 ห้องเผาไหม้ช่วย



รูปที่ 4.8 ห้องเผาไหม้หลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 อ่างเก็บน้ำไอน้ำ



รูปที่ 4.10 หอบำบัดอากาศแบบเปียก (Wet scrubber)



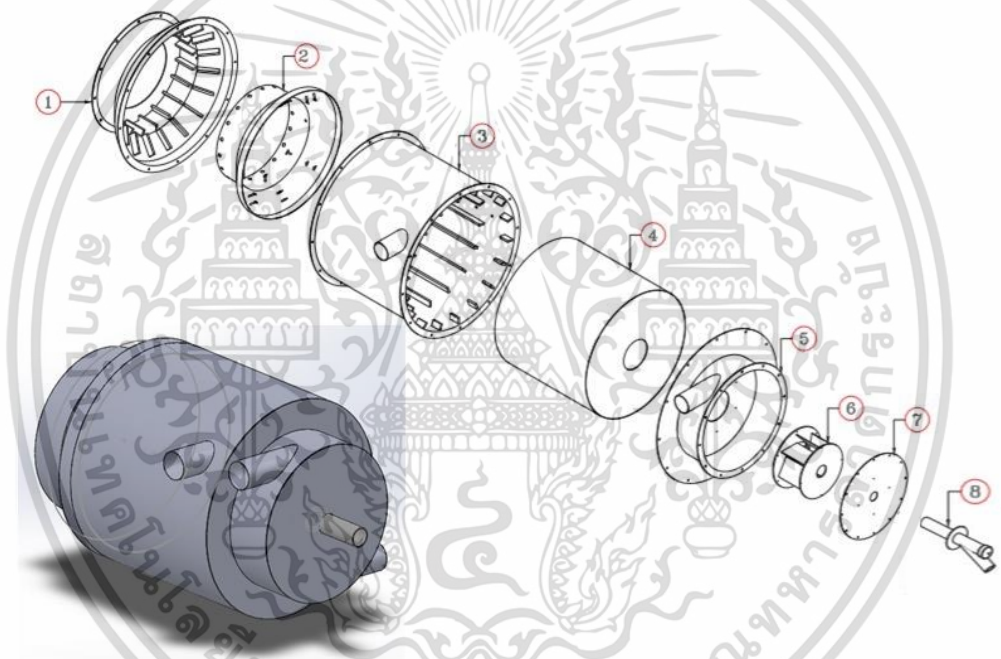
รูปที่ 4.11 ท่อไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ระบบบำบัดน้ำเสีย

2. รายละเอียดของหัวเผาและห้องเผาไหม้



รูปที่ 4.13 รายละเอียดของห้องเผาไหม้ช่วย

หมายเลขที่ 1 คือ ช่องการไหลที่ห่อหุ้มเตา ซึ่งเป็นช่องการไหลอากาศตติยภูมิ

หมายเลขที่ 2 คือ วงแหวนที่เป็นทางเข้าของอากาศตติยภูมิเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย

หมายเลขที่ 3 คือ ช่องการไหลที่ห่อหุ้มเตา และมีทางเข้าของอากาศตติยภูมิ

หมายเลขที่ 4 คือ ห้องเผาไหม้ช่วยที่ห่อหุ้มด้วยอิฐทนไฟ

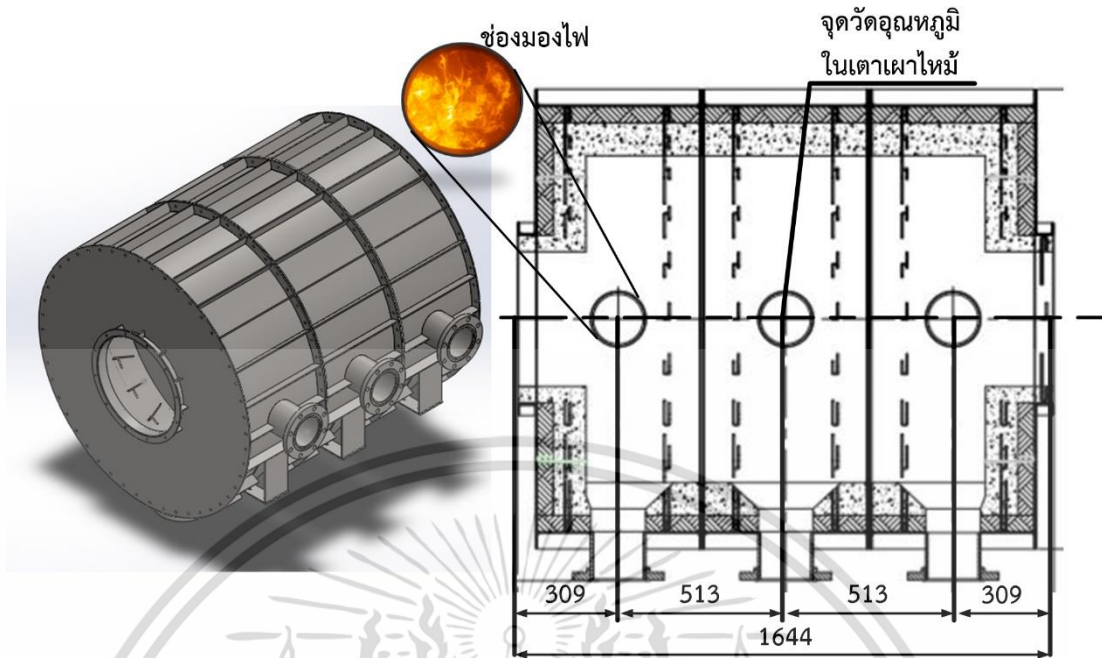
หมายเลขที่ 5 คือ swirl box และทางเข้าของอากาศตติยภูมิ

หมายเลขที่ 6 คือ swirl แบบใบโค้ง 85°

หมายเลขที่ 7 คือ แผ่นปิด Swirl box

หมายเลขที่ 8 คือ หัว Pilot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ห้องเผาไหม้หลัก

4.2 วิธีการทดลอง

4.2.1 วิธีการทดลองในหัวเผาชนิดฝุ่น

การทดลองจะเริ่มต้นจากกรณีของ นายรังสินันท์ ณ รังสี ที่ใช้เชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟต์ในการเผาไหม้ในเตาเผาที่มีการปรับปรุงห้องเผาไหม้ช่วยและหัว Pilot พบว่าฐานของเปลวไฟมีระยะห่างออกไปจากหัว Pilot มากขึ้นเมื่อเทียบกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม้ยางพาราที่มีการทำวิจัยมาก่อนหน้านี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจลักษณะของการเผาไหม้ของการผสมกันของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษาได้แก่ กรณีสัดส่วนผสมไม้ไผ่ทอรีไฟต์ 70% ไม้ยางพารา 30% และ ไม้ไผ่ทอรีไฟต์ 50% ไม้ยางพารา 50%

วิธีการทดลองมีขั้นตอนหลักดังนี้

1. การเตรียมเชื้อเพลิง

การเตรียมเชื้อเพลิงผสมที่ใช้ในการทดลองเริ่มจากการบดเชื้อเพลิงอัดเม็ดด้วยเครื่องบดชนิด Hammer mill (รูปที่ 4.4) จากนั้นเชื้อเพลิงผงจะถูกลำเลียงโดยพัดลมลำเลียง (รูปที่ 4.5) ไปเก็บไว้ในไซโลเก็บเชื้อเพลิงผง (รูปที่ 4.6) จากนั้นเราจะทำการนำเชื้อเพลิงฝุ่นออกจากไซโลแล้วบรรจุใส่กระสอบเพื่อรอผสมเชื้อเพลิง ต่อมาทำการทำความสะอาดระบบบดเชื้อเพลิงเพื่อเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิงอัดเม็ดเพื่อบดอีกครั้งหนึ่ง หลังจากนั้นนำเชื้อเพลิงผงทั้ง 2 ชนิดออกจากไซโลมาบรรจุในกระสอบแล้ว จึงเริ่มทำการผสมเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟต์ต่อไม้ยางพารา ที่สัดส่วน 70:30 และ 50:50% โดยมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ ด้วยการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลตามสัดส่วนของการผสมที่กำหนด และใส่เชื้อเพลิงผงที่ผสมแล้วกลับลงไปที่ไซโลบรรจุเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการทดลอง



รูปที่ 4.15 เชื้อเพลิงอัดเม็ด



รูปที่ 4.16 เชื้อเพลิงผง



(ก)TB90:RW10

(ข)TB80:RW20

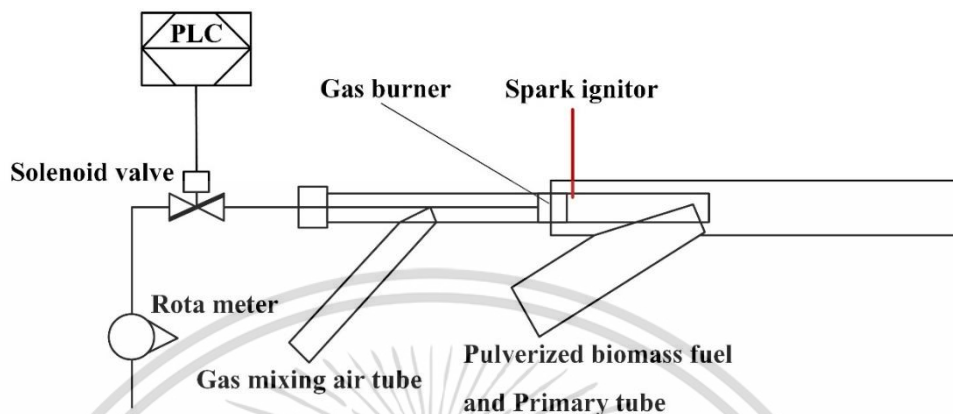
(ค)TB70:RW30

รูปที่ 4.17 เชื้อเพลิงผสมไม้ไผ่ทอรีไฟด์(TB): ไม้ยางพารา(RW)

2. การเตรียมระบบ

ก่อนการเผาไหม้ การเตรียมระบบและเครื่องมือวัดเป็นสิ่งสำคัญเพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดในการทดลอง โดยระบบที่ต้องเตรียมพร้อมก่อนการเผาไหม้ได้แก่ ระบบลำเลียงอากาศทั้ง 3 (อากาศเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฐุมภูมิ ทุดิยภูมิและตติยภูมิ) ระบบบ้ำบัต (รูปที่ 4.12) ระบบควบคุมแก๊ส(รูปที่ 4.17) และพัตลมID fan เพื่อสร้้างแรงดันลบให้กั้ระบบก่อนการทตลอง



รูปที่ 4.18 ระบบควบคุมแก๊ส

1. การอุ่นห้องเผาไหม้ด้วยแก๊ส LPG

ในการทดลองจะควบคุมการใช้แก๊สที่ 8 l/min ในการอุ่น จากรูปที่ 4.17 เมื่อสั่งเปิดระบบจุดไฟ อุปกรณ์จ่ายไฟจะทำงานเพื่อจุดหัวเทียน จากนั้น Solinoid valve จึงเปิดตามมา แก๊สที่ไหลผ่านประกายไฟจากหัวเทียนจะลุกติดในห้องเผาไหม้ ระยะเวลาการอุ่นแต่ละครั้งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ หรืออุณหภูมิที่ผนัง

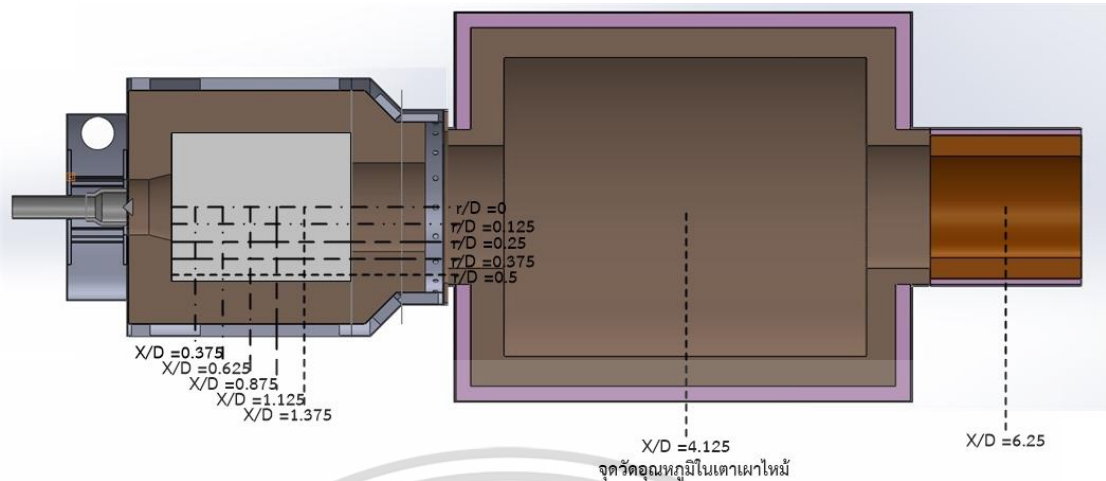
2. การอุ่นห้องเผาไหม้ด้วยแก๊ส LPG ร่วมกับเชื้อเพลิงฟูลิน

เพื่อให้ประหยัดแก๊ส LPG ระบบถูกออกแบบให้สามารถใช้เชื้อเพลิงชีวมวลฟูลิน ช่วยในการอุ่นที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิงชีวมวลฟูลิน 100 kW เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวล และ อากาศปฐุมภูมิไหลผ่านเปลวไฟที่มาจากแก๊ส เชื้อเพลิงจะเริ่มติดเป็นสะเก็ดไฟ เมื่ออุณหภูมิที่ผนังและห้องเผาไหม้สูงพอ สารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคมีความเข้มข้นสูงขึ้น เปลวไฟจึงลุกติดไฟ

3. การหยุดแก๊ส LPG เพื่อใช้เชื้อเพลิงฟูลินในการเผาไหม้เพียงอย่างเดียว

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของเชื้อเพลิง จนเทียบเท่า 300 kW จึงทำการหยุดระบบแก๊สเพื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลฟูลินเพียงอย่างเดียว หลังจากแก๊สดับจนอุณหภูมิของระบบคงที่ในแต่ละกรณีของการทดลอง ถ้าเปลวไฟเสถียรแล้วเชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง จึงทำการเก็บผลการวัดอุณหภูมิ และแก๊สไอเสีย (Flue gas) ที่ทางออกได้

4. การบันทึกภาพ เก็บผลของอุณหภูมิ และแก๊สไอเสีย ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 รายละเอียดของระยะที่ทำการวัดอุณหภูมิของห้องเผาไหม้

4.2.2 การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1. อัตราการไหลของเชื้อเพลิง

วิทยานิพนธ์นี้ใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอริไฟด์กับไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 70:30 และ 50:50 ตามลำดับ ที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดชนิด Hammer mill ผ่านตะแกรงที่มีรูขนาด 0.5 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องตรวจวัดขนาดอนุภาค (Sieve analysis) เพื่อหาการกระจายของขนาด (Size distribution) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และวิเคราะห์แบบประเมินและแยกธาตุดังแสดงในตารางที่ 4.2 แล้วจึงนำผลจากการแยกธาตุของเชื้อเพลิงเดี่ยวมาคำนวณสัดส่วนของเชื้อเพลิงผสม ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ดังนั้นอัตราการไหลเชิงมวลเทียบเท่ากำลังความร้อนจึงสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{Q}{HHV} \text{ (kg/s)} \quad (4.1)$$

อัตราการไหลเชิงมวลเทียบเท่ากำลังความร้อน 300kW ของเชื้อเพลิงผสมที่สัดส่วน 70:30 และ 50:50 อยู่ที่ 0.01454 และ 0.015199 กิโลกรัมต่อวินาทีตามลำดับ โดยอัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคจะถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราการขนส่งเชื้อเพลิงของสกูดังสมการ

$$\text{ความถี่กระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ (Hz)} = 72.272(\dot{m}_{fuel}) + 0.1413 \quad (4.2)$$

$$\text{ความถี่กระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ (Hz)} = 83.325(\dot{m}_{fuel}) + 0.0964 \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟต์ 70%โดยมวล ไม้ยางพารา 30%โดยมวล (TB70:RW30) จะใช้ความถี่กระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่หาได้จากสมการ (4.2) ส่วนอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟต์ 50%โดยมวล ไม้ยางพารา 50%โดยมวล (TB50:RW50) จะใช้ความถี่กระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่หาได้จากสมการ (4.3)

ในการจำลองจำเป็นต้องกำหนดขนาดของอนุภาค และอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงในแต่อนุภาค ดังนั้นจึงทำการเฉลี่ยขนาดของอนุภาคที่ค้างในตะแกรงของเครื่อง Sieve แล้วนำมาหาอัตราการไหลเชิงมวลของแต่ละขนาดของอนุภาคดังแสดงในตาราง 4.4

ตารางที่ 4.1 การกระจายของขนาดเชื้อเพลิง (Size distribution)

ขนาดของ ตะแกรง (มิลลิเมตร)	สัดส่วนผสมไม้ไผ่ทอรีไฟต์70 ไม้ ยางพารา30		สัดส่วนผสมไม้ไผ่ทอรีไฟต์50 ไม้ ยางพารา50	
	น้ำหนักของ อนุภาคที่ค้าง ตะแกรง(กรัม)	เปอร์เซ็นต์ของ อนุภาคที่ติดอยู่บน ตะแกรง	น้ำหนักของ อนุภาคที่ค้าง ตะแกรง(กรัม)	เปอร์เซ็นต์ของ อนุภาคที่ติดอยู่บน ตะแกรง
0.85	22.93	7.67	32.99	11.00
0.6	14.95	5.00	15.93	5.31
0.425	34.83	11.64	39.58	13.20
0.3	47.02	15.72	49.95	16.66
0.15	96.82	32.37	85.86	28.63
0.075	50.13	16.76	44.54	14.85
≤0.075	32.43	10.84	31.03	10.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์แบบประมาณและการแยกธาตุของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟด์

ชนิดเชื้อเพลิงผง	ไม้ยางพารา	ไม้ไผ่ทอรีไฟด์
วิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงโดยการประมาณค่า (Proximate analysis)		
1. % ความชื้น	5.81	5.09
2. % สารระเหย	76.68	49.5
3. % ถ่านคงตัว	15.23	40.22
4. % เถ้า	2.28	5.19
วิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยละเอียดหรือแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)		
5. % คาร์บอน	46.48	60.31
6. % ไฮโดรเจน	6.46	5.27
7. % ไนโตรเจน	0.46	0.33
8. % ซัลเฟอร์	0	0.04
9. % ออกซิเจน	46.6	34.05
10. ค่าความร้อนแบบกรอส (MJ/Kg)	17.5	21.98

ตารางที่ 4.3 การแยกธาตุของเชื้อเพลิงผสม

ชนิดเชื้อเพลิงผง	ไม้ไผ่ทอรีไฟด์ 70% ไม้ ยางพารา 30%	ไม้ไผ่ทอรีไฟด์ 50% ไม้ ยางพารา 50%
วิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงโดยการประมาณค่า (Proximate analysis)		
1. % ความชื้น	5.31	5.41
2. % สารระเหย	57.65	63.09
3. % ถ่านคงตัว	32.72	27.73
4. % เถ้า	4.32	3.74
วิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยละเอียดหรือแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)		
5. % คาร์บอน	56.67	53.47
6. % ไฮโดรเจน	5.63	5.86
7. % ไนโตรเจน	0.37	0.39
8. % ซัลเฟอร์	0.03	0.02
9. % ออกซิเจน	37.9	40.26
10. ค่าความร้อนแบบกรอส (MJ/Kg)	20.64	19.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

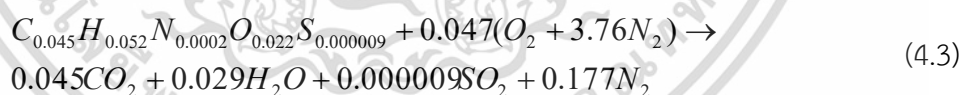
ตารางที่ 4.4 อัตราการไหลเชิงมวลของแต่ละขนาดของอนุภาค

ขนาดของอนุภาค (มิลลิเมตร)	สัดส่วนผสมไม้ไฟทอร์ไฟต์ 70 ไม้ ยางพารา 30		สัดส่วนผสมไม้ไฟทอร์ไฟต์ 50 ไม้ ยางพารา 50	
	จำนวน (%)	อัตราไหลเชิงมวล (kg/s)	จำนวน (%)	อัตราไหลเชิงมวล (kg/s)
0.85	7.67	0.0011	11.00	0.0017
0.6	5.00	0.0007	5.31	0.0008
0.425	11.64	0.0017	13.20	0.0020
0.3	15.72	0.0023	16.66	0.0025
0.15	32.37	0.0047	28.63	0.0044
0.075	16.76	0.0024	14.85	0.0023
≤0.075	10.84	0.0016	10.35	0.0016

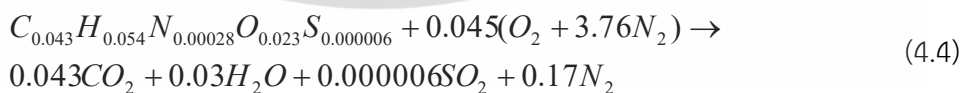
2. อัตราการไหลของอากาศ

การคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศ ต้องทำสมดุลการสโตยซิโอเมตรีของการเผาไหม้ เมื่อทราบองค์ประกอบของธาตุในเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากสมการที่ 3.11 สโตยซิโอเมตรีของการเผาไหม้คือ

(ก) เป็นสมดุลการสโตยซิโอเมตรีของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ไฟทอร์ไฟต์ 70 ไม้ยางพารา 30



(ข) เป็นสมดุลการสโตยซิโอเมตรีของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ไฟทอร์ไฟต์ 50 ไม้ยางพารา 50



ทำการคำนวณหาค่าอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงตามทฤษฎี จากสมการที่ 3.13 จะได้ $(A/F)_{stoic}$ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้อากาศส่วนเกิน 15% เมื่อทราบอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงตามทฤษฎี และอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงที่กำลังความร้อน 300kW แล้วนำไปคำนวณหาอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง (ϕ_{stoic}) ตามสมการที่ 3.14 จะสามารถหาอัตราการไหลเชิงมวล และอัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลเชิงปริมาตรของอากาศได้ ซึ่งอัตราการไหลเชิงมวล และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

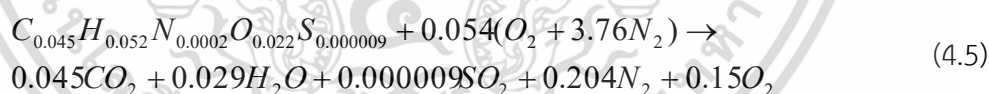
ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงตามทฤษฎี ($\phi_{stoic} = 1$)

	ไม่ไผ่ทอรีไฟด์70:ไม่ยางพารา30	ไม่ไผ่ทอรีไฟด์50:ไม่ยางพารา50
$(A/F)_{stoic}$	6.83	6.56
อัตราไหลเชิงมวล (kg/s)	0.0993	0.095
อัตราไหลเชิงปริมาตร (m ³ /s)	0.0882	0.0846

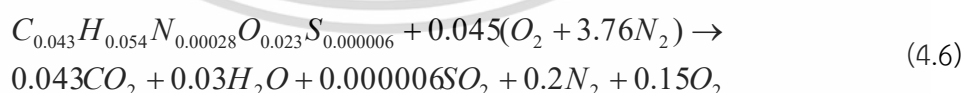
ตารางที่ 4.6 อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงที่อากาศส่วนเกิน 15% ($\phi = 0.87$)

	ไม่ไผ่ทอรีไฟด์70:ไม่ยางพารา30	ไม่ไผ่ทอรีไฟด์50:ไม่ยางพารา50
$(A/F)_{15\%excessair}$	7.86	7.54
อัตราไหลเชิงมวล (kg/s)	0.1142	0.11
อัตราไหลเชิงปริมาตร (m ³ /s)	0.1014	0.0973

เมื่อ สมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมไม่ไผ่ทอรีไฟด์70:ไม่ยางพารา30ที่อากาศส่วนเกิน 15% คือ



และ สมการการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่ไผ่ทอรีไฟด์50:ไม่ยางพารา50ที่อากาศส่วนเกิน 15% คือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทั้ง 3 ส่วน

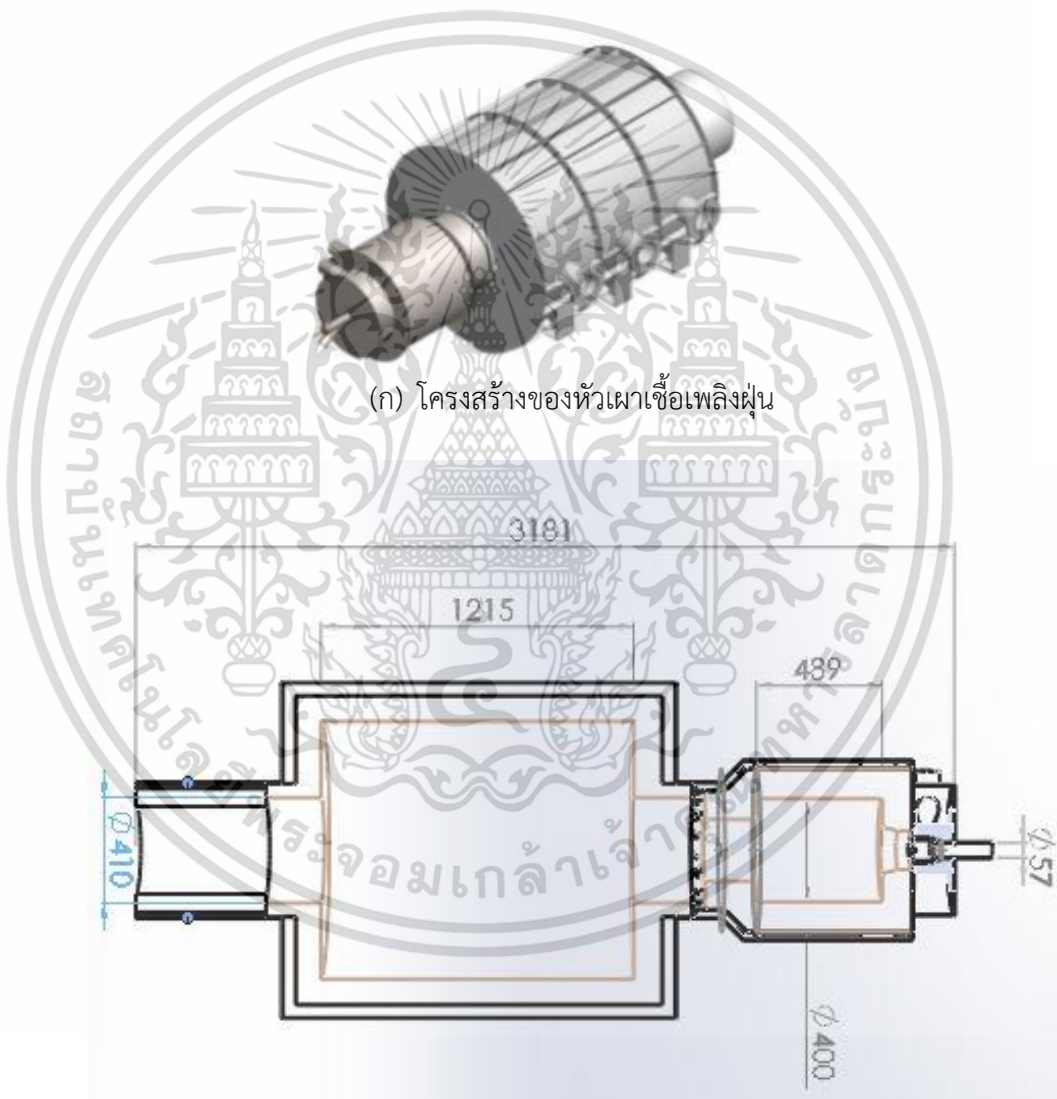
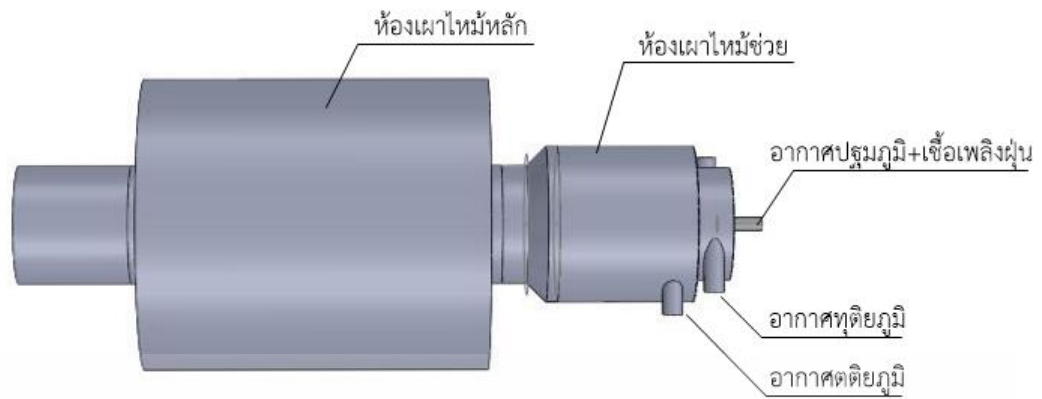
อัตราการไหลเชิง มวลของอากาศ ทั้ง 3 ส่วน	อากาศ ปฐมภูมิ (25%) (kg/s)	อากาศ ทุติยภูมิ (70%) (kg/s)	อากาศ ตติยภูมิ (5%) (kg/s)	อากาศ ปฐมภูมิ (25%) (kg/s)	อากาศ ทุติยภูมิ (65%) (kg/s)	อากาศ ตติยภูมิ (10%) (kg/s)
เชื้อเพลิงผสมไม้ ไม้ทอรีไฟต์70: ไม้ยางพารา30	0.0285	0.08	0.006	0.0285	0.069	0.011
เชื้อเพลิงผสมไม้ ไม้ทอรีไฟต์50: ไม้ยางพารา50	0.0274	0.077	0.005	0.0274	0.66	0.011

4.2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โปรแกรมที่ใช้จำลองคือ ANSYS Fluent ver.12.0.16 ด้วยการจำลอง 3 มิติ ในการจำลอง จะแบ่งเป็น 2 กรณี คือการจำลองกรณีเชื้อเพลิงผสมไม้ไม้ทอรีไฟต์ 70% ไม้ยางพารา 30% และการจำลองกรณีเชื้อเพลิงผสมไม้ไม้ทอรีไฟต์ 50% ไม้ยางพารา 50% ที่อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงที่อากาศส่วนเกิน 15% โดยอากาศที่ป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้จะถูกแบ่งออกเป็นสัดส่วน อากาศปฐมภูมิ อากาศทุติยภูมิ และ อากาศตติยภูมิเท่ากับ 25 70 และ 5 ตามลำดับ เพื่อให้เสมือนที่ใช้ในเตาเผาไหม้จริง

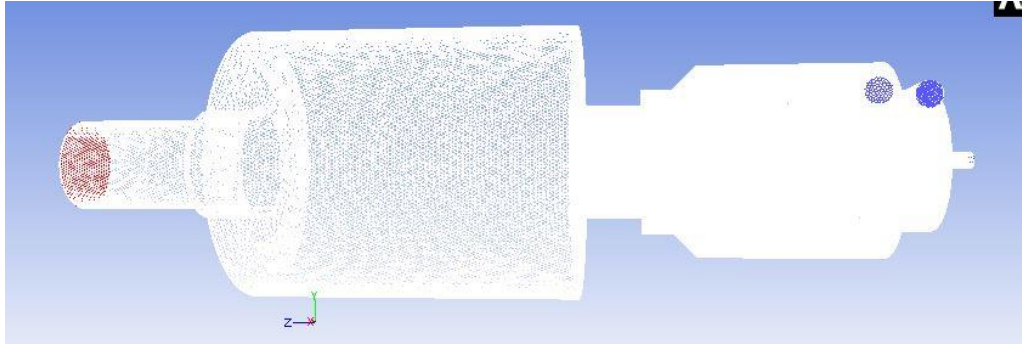
1. โครงสร้าง และจำนวนกริด (Geometry and mesh structure)

ระบบที่นำมาใช้จำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลฝุ่นที่ประกอบด้วย ห้องเผาไหม้ช่วย อากาศทั้งสามส่วน ห้องเผาไหม้หลัก และท่อทางออก การจำลองจะอ้างอิงจากขนาดของอุปกรณ์จริง โดยทำการจำลองแบบ 3 มิติ โครงสร้างของอุปกรณ์จริงแสดงดังรูปที่ 4.20(ก) โครงสร้าง และขนาดของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.20(ข) ซึ่งเป็นโครงสร้างของของไหล ที่อยู่ภายใน (fluid domain) โดยจะใช้อัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงไม้ทอรีไฟต์ และไม้ยางพาราที่สัดส่วนผสม 70:30 และ 50:50 ตามลำดับ โดยโครงสร้างกริดที่ใช้เป็นรูป Polyhydral ดังแสดงในรูป 4.21 มีจำนวนกริด 1,779,385 กริด



รูปที่ 4.20 โครงสร้าง และขนาดของแบบจำลองเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 โครงสร้างกริดของแบบจำลอง

ตารางที่ 4.8 ขอบเขตของการจำลอง (boundary condition)

	เชื้อเพลิงผสม TB70:RW30	เชื้อเพลิงผสม TB50:RW50
อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเทียบเท่ากำลัง 300 kW (kg/s)	0.01454	0.01454
อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (kg/s)	0.029	0.0274
อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (kg/s)	0.08	0.077
อัตราการไหลของอากาศตติยภูมิ (kg/s)	0.006	0.005
อุณหภูมิผนังเตา (Furnace wall) (K)	973	973
อุณหภูมิเริ่มต้นของเชื้อเพลิง (K)	303	303
ความดันที่ทางออก (Pa)	-1500	-1500

2. ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองห้องเผาไหม้ของหัวเผาเชื้อเพลิงฝุ่น จะทำการจำลองที่สภาวะคงตัว (Steady state) ภายใต้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง -9.81 m/s^2 และอุณหภูมิเริ่มต้นของเชื้อเพลิง 30°C (303) องศาเซลเซียส ค่าความร้อน และการกระจายขนาดอนุภาคได้ด้วยตารางที่ 4.1-4.4

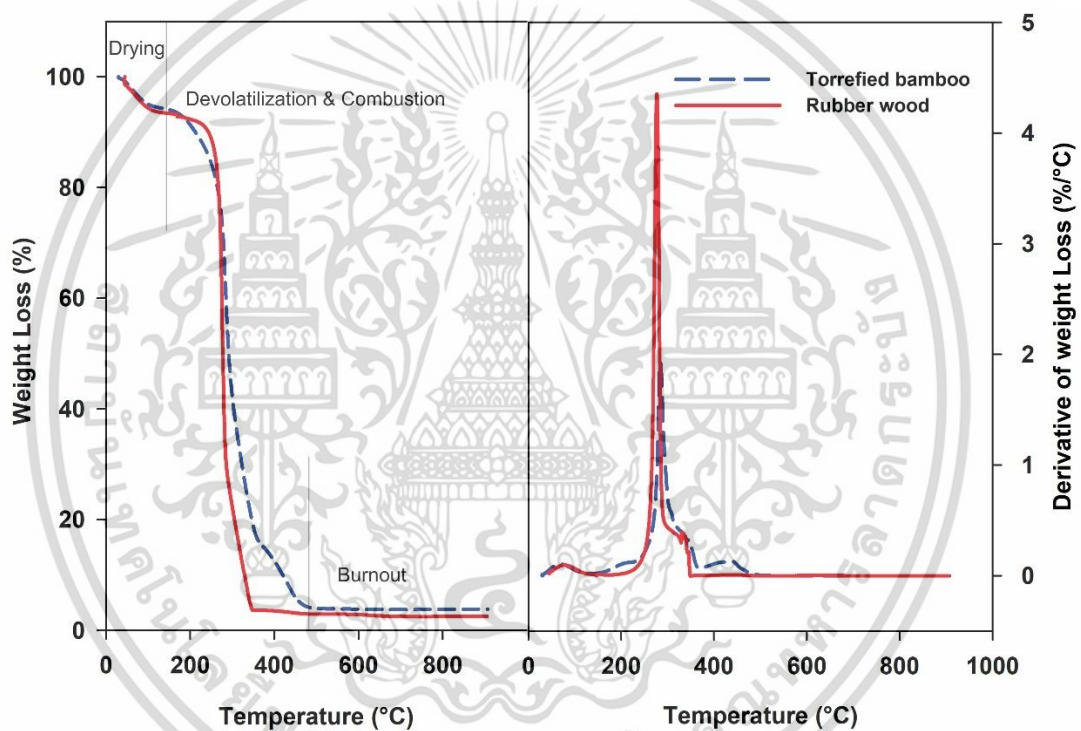
บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์บทนี้กล่าวถึง การวิเคราะห์ผลการทดลองของ Thermogravimetric Analysis (TGA) การเผาไหม้จริง และแบบจำลองของหัวเผาชนิดเชื้อเพลิงฝุ่น เพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ

5.1 ผลการทดลองจากเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (TGA)

5.1.1 ผลเชื้อเพลิงเดี่ยว

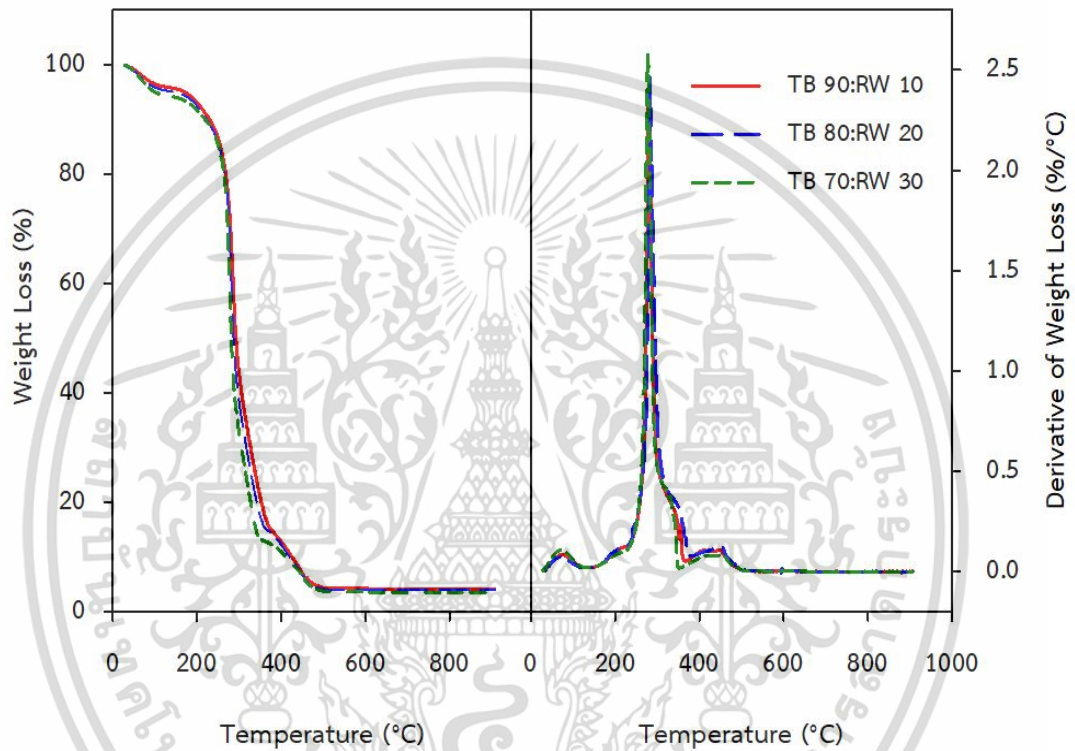


รูปที่ 5.1 กราฟ TG และ DTG ของเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟต์ และไม้ยางพารา

จากรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงการลดลงของน้ำหนัก (TG) และอัตราการลดลงของน้ำหนัก (DTG) ของเชื้อเพลิงเดี่ยวของไม้ไผ่ทอรีไฟต์ และไม้ยางพารา ซึ่งจากรูป TG ทำให้เห็นลักษณะต่างๆ ของกระบวนการเผาไหม้ในแต่ละช่วงของอุณหภูมิ โดยในช่วงแรกของการลดลงของน้ำหนักเป็นการลดลงอันเนื่องมาจากการระเหยของน้ำ ซึ่งจะเห็นว่าไม้ไผ่ทอรีไฟต์มีการลดลงของน้ำหนักน้อยกว่าไม้ยางพารา ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 4.2 ที่แสดงถึงคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ต่อมาจะเห็นได้ว่ากราฟ TG มีการลดลงเล็กน้อยก่อนที่จะมีการลดลงของน้ำหนักอย่างรุนแรง ที่แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการปลดปล่อยสารระเหยแล้วจุดติดไฟทำให้น้ำหนักของเชื้อเพลิงลดลงอย่างรุนแรงอันเนื่องมาจากการเผาไหม้ของสารระเหยและชาร์ โดยอุณหภูมิจุดติดไฟของเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟต์และไม้ยางพาราอยู่ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

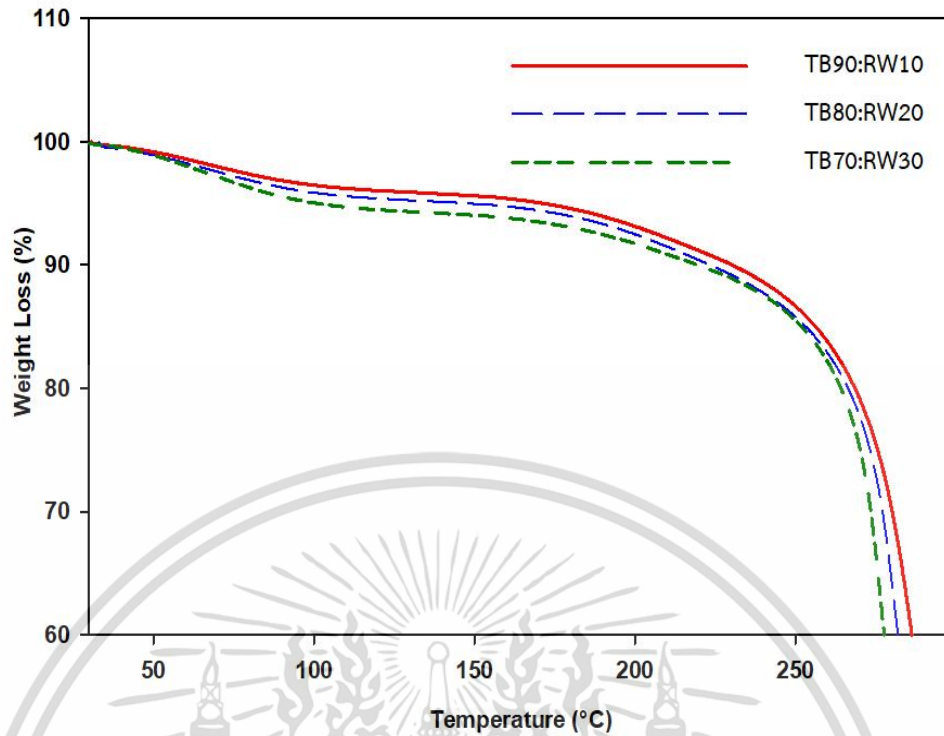
270.6 และ 262.4 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากกราฟจะเห็นว่าจุดสิ้นสุดการเผาไหม้ของอนุกรมของไม้ไผ่ทอรีไฟด์จะอยู่ที่อุณหภูมิ 524.4 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าไม้ยางพาราที่มีอุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้ อยู่ที่ 351.23 องศาเซลเซียส อีกทั้งในช่วงสุดท้ายของกราฟ TG จะเห็นว่าน้ำหนักที่หลงเหลืออยู่ ซึ่งเป็นน้ำหนักของขี้เถ้า โดยไม้ไผ่ทอรีไฟด์จะอยู่สูงกว่าไม้ยางพาราซึ่งเป็นไปตามตารางคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่กล่าวว่าเปอร์เซ็นต์เถ้าของไม้ไผ่ทอรีไฟด์มากกว่าไม้ยางพารา

5.1.2 ผลของเชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ยางพารากับไม้ไผ่ทอรีไฟด์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

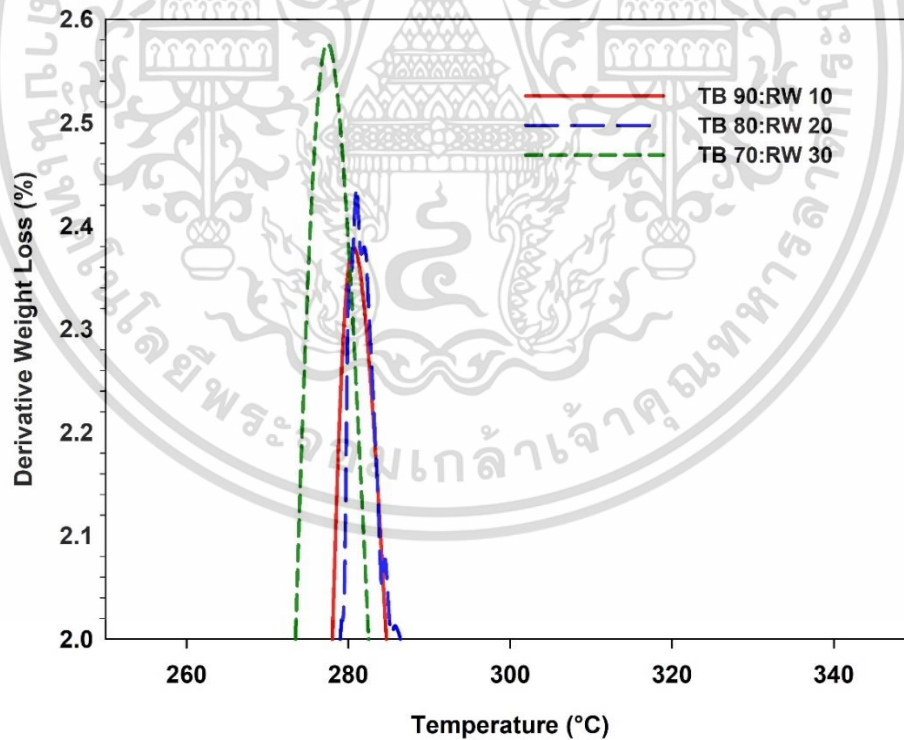


รูปที่ 5.2 กราฟ TG และDTG ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอรีไฟด์ และไม้ยางพาราที่อัตราส่วนต่าง ๆ

รูปที่ 5.2 แสดงการลดลงและอัตราการลดลงของน้ำหนักของเชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอรีไฟด์และไม้ยางพาราที่อัตราส่วนผสม 90:10 80:20 และ 70:30 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสม ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเผาไหม้นั้นมีลักษณะการเผาไหม้ที่คล้ายคลึงกับพฤติกรรมการเผาไหม้ของไม้ไผ่ทอรีไฟด์เนื่องมาจากเป็นเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ในการผสม



รูปที่ 5.3 กราฟ TG ของเชื้อเพลิงผสมในช่วงที่เกิดการระเหยน้ำ



รูปที่ 5.4 กราฟอัตราการลดลงของน้ำหนัก DTG ของเชื้อเพลิงผสม

รูปที่ 5.3 เป็นการลดลงของน้ำหนักเนื่องจากการระเหยน้ำ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นไปตามตาราง

4.3 ที่แสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงทั้ง 2 โดยเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอร์ไฟด์จะมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นน้อยกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ยางพารา ทำให้เส้นกราฟ TG ของเชื้อเพลิงผสมมีการลดลงของน้ำหนักอันเนื่องมาจากการปลดปล่อยความชื้นมากที่สุดส่วนผสมไม่ยางพาราที่มากขึ้น

รูปที่ 5.4 แสดงอัตราการลดลงที่มากที่สุด (การเผาไหม้สูงที่สุด) ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการลดลงของน้ำหนักจะมากขึ้นหากมีส่วนผสมไม่ยางพารามากขึ้น

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของพฤติกรรมเผาไหม้

ตัวอย่าง	T_i (°C)	t_i (min)	T_b (°C)	t_b (min)	R_m	T_m (°C)	t_m (min)
ไม้ไฟทอรีไฟด์	270.6	12.0	524.4	24.2	1.93	284.5	12.7
90%ทอรีไฟด์	267.2	11.9	524.2	24.0	2.35	283.1	12.7
80%ทอรีไฟด์	265.2	11.8	524.2	23.8	2.44	281.0	12.5
70%ทอรีไฟด์	263.5	11.7	524.1	23.2	2.58	277.8	12.4
ไม่ยางพารา	262.4	11.6	351.23	16.1	4.35	276.9	12.0

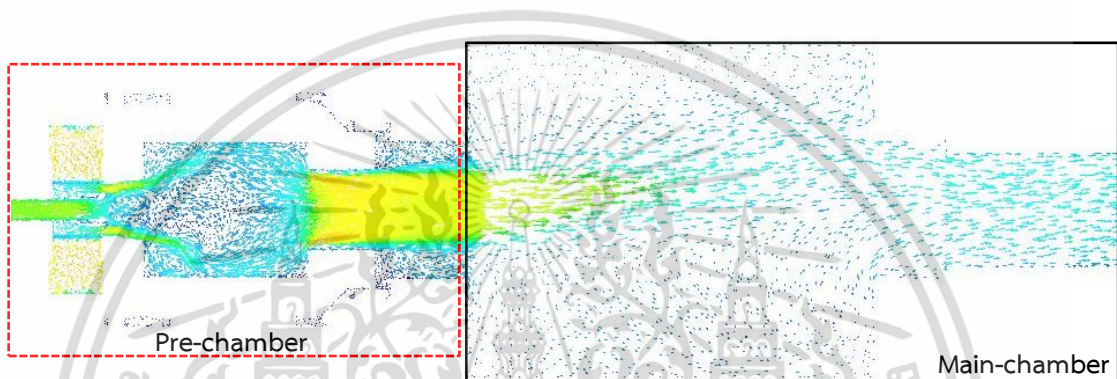
ตารางที่ 5.1 พบว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ไฟทอรีไฟด์กับเชื้อเพลิงไม่ยางพารามีอุณหภูมิติดไฟอยู่ที่ 270.6 และ 262.4 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งทำให้อุณหภูมิติดไฟของเชื้อเพลิงผสมที่สัดส่วนการผสม 90:10 80:20 และ 70:30 อยู่ที่ 267.2 265.2 และ 263.5 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยเชื้อเพลิงผสมมีอุณหภูมิติดไฟลดลง 3.4 5.4 และ 7.2 องศาเซลเซียสตามลำดับ อีกทั้งระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่ต้นถึงจุดติดไฟจะลดลงตามสัดส่วนผสมของไม้ยางพารามีเพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยอุณหภูมิสิ้นสุดของการเผาไหม้ของทั้งเชื้อเพลิงไม่ยางพารา ไม้ไฟทอรีไฟด์และเชื้อเพลิงผสมที่สัดส่วน 90:10 80:20 และ 70:30 มีค่า 351.23 529.72 524.2 524.16 และ 524.14 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงผสมมีค่าอุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้ที่คล้ายคลึงกับอุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้ของไม้ไฟทอรีไฟด์ แต่แตกต่างกันที่ระยะเวลาที่ใช้ โดยจะใช้ระยะเวลาน้อยลงที่สัดส่วนการผสมของไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้น

การที่องค์ประกอบของเชื้อเพลิงไม่ยางพาราที่มีสัดส่วนออกซิเจนที่มากกว่าไม้ไฟทอรีไฟด์จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างรวดเร็วที่เป็นส่วนช่วยในการปลดปล่อยพลังงานจากเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นการสนับสนุนให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ได้ดีมากขึ้น แต่เนื่องจากไม้ไฟทอรีไฟด์ที่เรานำมาการใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไม้ไฟทอรีไฟด์ที่ดัชนีทอรีแฟคชัน 30 [12] ทำให้ความชื้นและสารระเหยลดลงไม่มาก ซึ่งทำให้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมเป็นไปในทิศทางเดียวกันเนื่องจากมีพฤติกรรมเผาไหม้ที่คล้ายคลึงกัน โดยจะสังเกตได้จากอุณหภูมิการจุดติดไฟ อุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้และอุณหภูมิที่เกิดการเผาไหม้มากที่สุดจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

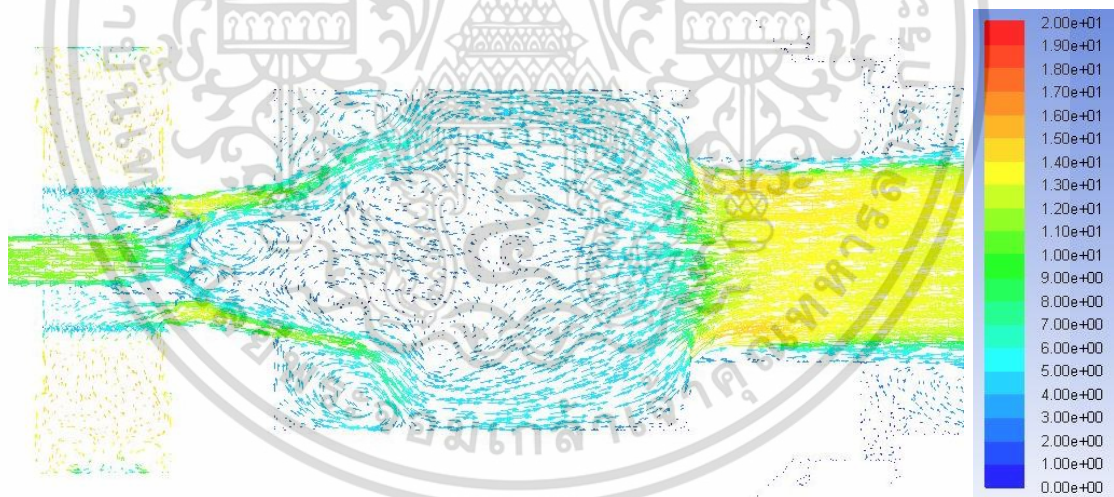
5.2 ผลการจำลองการเผาไหม้ทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาชนิดฝุ่น

การจำลองจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีเชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอริไฟด์ (Torrefied Bamboo) และไม้ยางพารา (Rubber Wood) ที่ 2 สัดส่วนการผสม TB70:RW30 และ TB50:RW50 ตามลำดับ โดยผลการจำลองที่เรานำมาทำการศึกษามีดังนี้ 1.สนามของการไหล 2. อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ 3.สัดส่วนเชิงมวลของสารระเหย (Volatile) 4.สัดส่วนเชิงมวลของออกซิเจน (O_2) และ 5.สัดส่วนเชิงมวลของออกไซด์ซัลเฟอร์ (SO_x)

5.2.1 ผลการจำลองของสนามการไหล



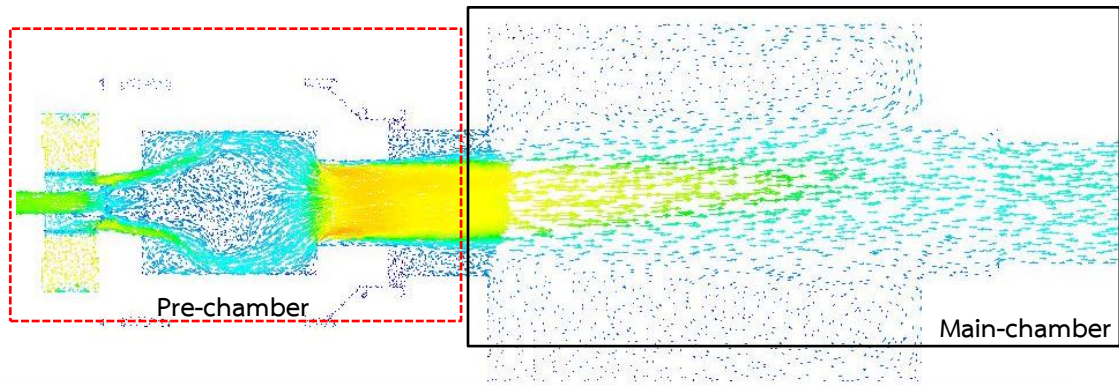
(ก) สนามการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วย (Pre-chamber) และห้องเผาไหม้หลัก (Main-chamber)



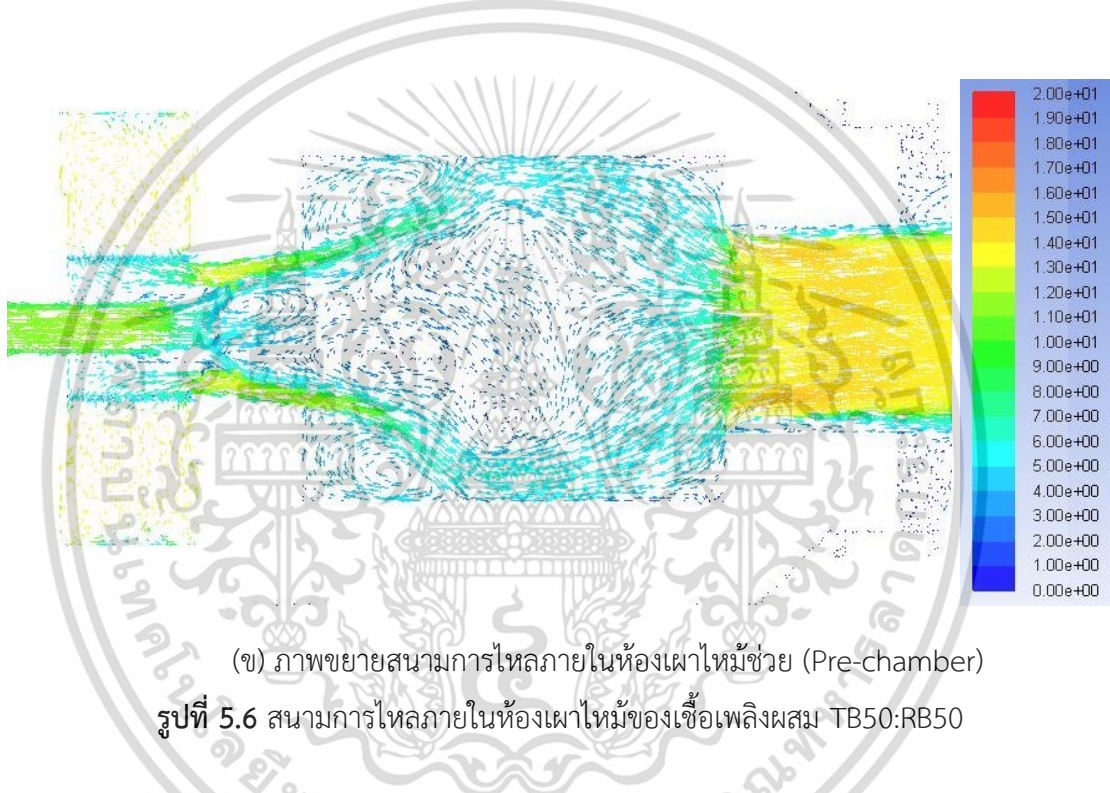
(ข) ภาพขยายสนามการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วย (Pre-chamber)

รูปที่ 5.5 สนามการไหลภายในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สนามการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วย (Pre-chamber) และห้องเผาไหม้หลัก (Main-chamber)

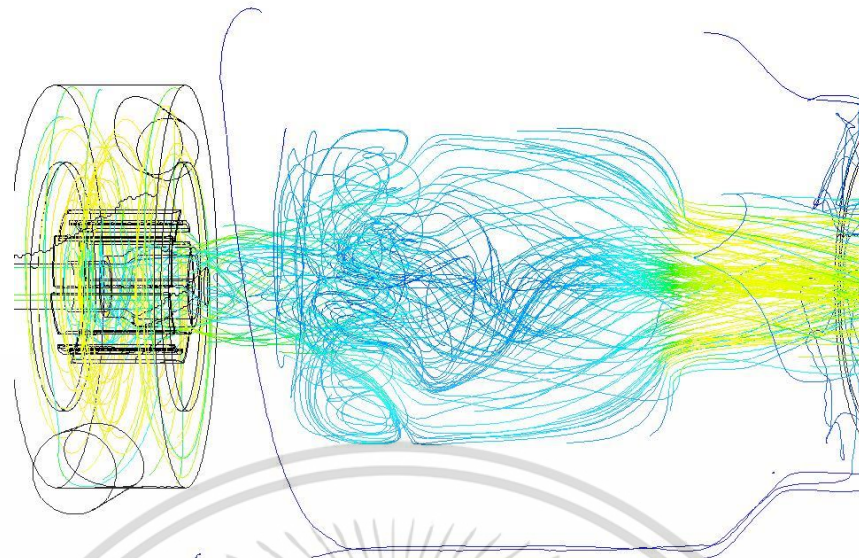


(ข) ภาพขยายสนามการไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วย (Pre-chamber)

รูปที่ 5.6 สนามการไหลภายในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสม TB50:RB50

รูปที่ 5.5,5.6 แสดงสนามการไหลของอากาศภายในห้องเผาไหม้ช่วยพบว่า เวกเตอร์การไหลของอากาศปฐมภูมิที่เข้ามามีความเร็วประมาณ 10 เมตรต่อวินาที โดยที่ปลายทางออกของอากาศปฐมภูมิมียัตถุขวางการไหลอยู่ (Bluff body) ทำให้การไหลถูกบีบให้มีความเร็วสูงขึ้น อีกทั้งเมื่อผ่านยัตถุขวางการไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย ยังมีการผสมเข้ากับอากาศทุติยภูมิที่มีความเร็วประมาณ 14 เมตรต่อวินาที ซึ่งอากาศทุติยภูมิที่เข้ามาเป็นอากาศที่ผ่านแผ่นบิดโค้ง (Swirl) ที่ทำให้เกิดการหมุนควงภายในห้องเผาไหม้ช่วย จะเห็นได้ว่าอากาศที่ผ่านเข้าสู่ห้องเผาไหม้มีความเร็วสูงและมีทิศทางฉีกออกไปทางผนังของเตาอันเนื่องมาจากการหมุนควงซึ่งทำให้เกิดการไหลปั่นป่วน และเกิดการไหลย้อนกลับภายในและภายนอก ก่อนที่ความเร็วการไหลจะลดลงเนื่องจากการการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมของของไหล ก่อนที่จะมีความเร็วเพิ่มขึ้นอีกครั้งเนื่องจากผ่านช่องการไหลที่มีพื้นที่เล็กลงเข้าสู่ห้องเผาไหม้หลักต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) TB70:RW30



(ข) TW50:RW50

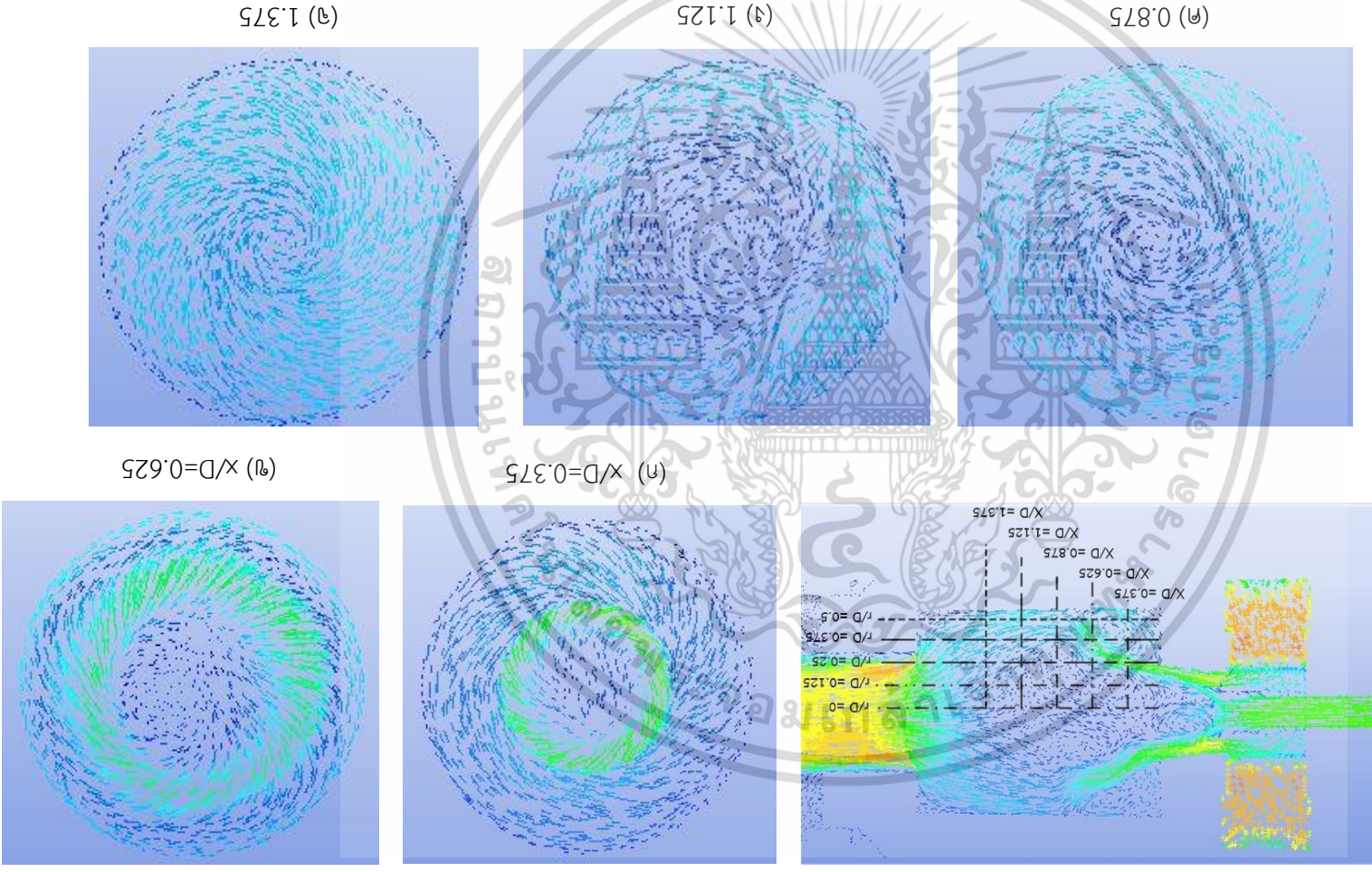
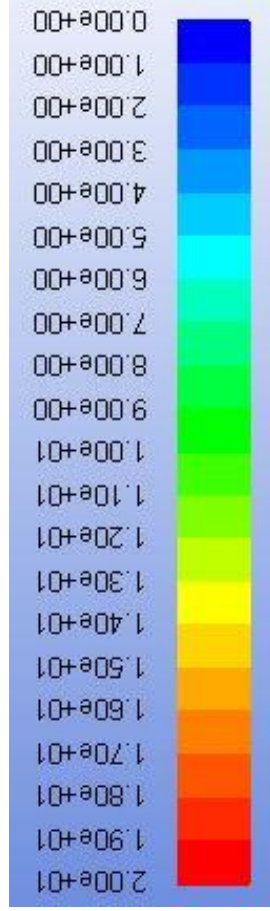
รูปที่ 5.7 สนามการไหลภายในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสม

จากรูปที่ 5.7 การไหลย้อนกลับจะมีอยู่ 2 ตำแหน่งคือ ย้อนกลับภายใน (Internal circulation) และย้อนกลับภายนอก (External circulation) สาเหตุมาจากการไหลปั่นป่วนที่กระจายออกสู่ผนังเตาทำให้เกิดการเหนียวทำให้เกิดการไหลย้อนกลับ (Reverse flow) และอีกส่วนคือ อากาศที่ไหลชนเข้ากับวัตถุขวางการไหลที่ทำให้ฟลักซ์ของการไหลมีทิศทางฉีกออกไปยังผนังเตา ทำให้ความดันด้านหลังวัตถุขวางการไหลมีความดันต่ำ ซึ่งเป็นส่วนช่วยที่ทำให้เกิดการไหลย้อนกลับเข้าสู่กลางเตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

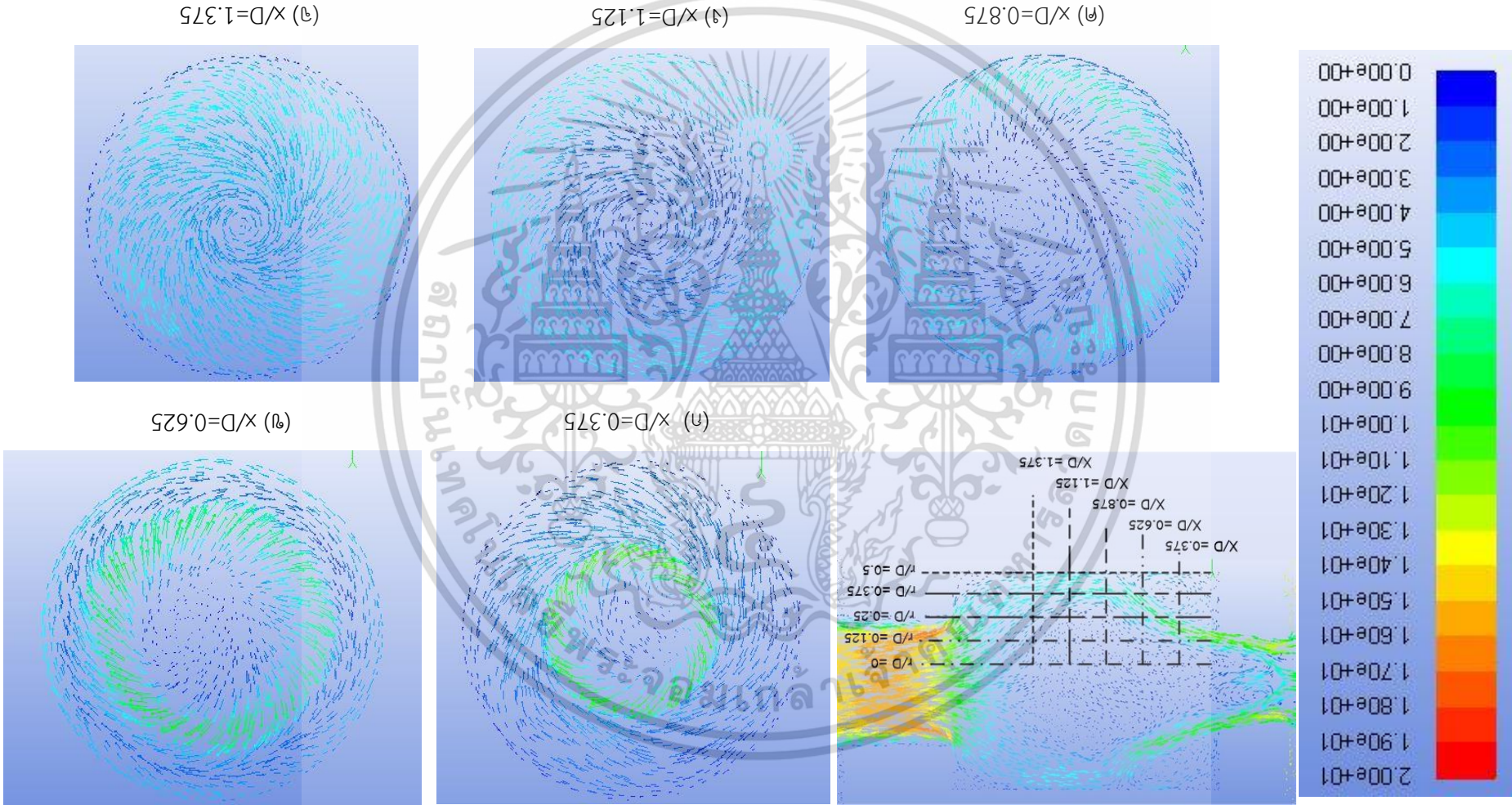
รูปที่ 5.8 แสดงพัฒนาการของการหมุนควงภายในเตา โดยจะสังเกตจากภาพตัดขวางภายในเตา เพื่อให้เห็นถึงการหมุนควง โดยจะมีภาพตัดที่ x/D จำนวน 5 ภาพเริ่มจาก 0.375 0.625 0.875 1.125 และ 1.375 ตามลำดับ โดยเริ่มจาก (ก) x/D ที่ 0.375 จะเห็นได้ว่าจุดที่มีความเร็วสูงยังมีการกระจายของความเร็วค่อนข้างน้อย เนื่องจากห่างจากทางออกของใบพัดเพียงเล็กน้อย (ข) x/D ที่ 0.625 จะเห็นพัฒนาการของการไหลที่ชัดเจนเนื่องจากการแลกเปลี่ยนโมเมนตัม ซึ่งทำให้การหมุนควงภายในห้องเผาไหม้มีบริเวณกว้างขึ้น อีกทั้งยังมีความเร็วในการหมุนควงที่รุนแรง (ค) x/D ที่ 0.875 และ (ง) x/D ที่ 1.125 การไหลหมุนควงจะมีลักษณะไม่ต่างกันมากนัก เนื่องการแลกเปลี่ยนกันของความเร็วในทิศทางของการหมุนของอากาศและแก๊สร้อนภายในห้องเผาไหม้ช่วย หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่ามีการแลกเปลี่ยนโมเมนตัม ของการไหลในทิศทางต่าง ๆ จนมีทิศทางและแรงในแนวการไหลที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากสุดขอบเขตของสนามการไหล(ผนังเตา) โดยจะเห็นได้ว่าทิศการหมุนควงจะหมุนไปในทางทิศเดียวกันและมีขนาดของการไหลประมาณ 2 ถึง 5 เมตรต่อวินาที (จ) x/d ที่ 1.375 จะเห็นได้ว่าฟลักซ์ของการไหลที่กลางเตามีความเร็วสูงขึ้นอีกครั้งเนื่องจากเป็นบริเวณที่ใกล้ทางออกของห้องเผาไหม้ช่วยที่จะผ่านช่องการไหลที่แคบลงก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้หลัก โดยช่องการไหลที่เป็นนี้มีพื้นที่หน้าตัดแคบลงส่งผลให้ความเร็วในการไหลสูงขึ้น

ผลการจำลองสนามของอากาศของทั้งเชื้อเพลิงผสมไม้ไผ่ทอรีไฟด์ 70:ไม้ยางพารา 30(TB70:RW30) และไม้ไผ่ทอรีไฟด์ 50:ไม้ยางพารา 50 (TB50:RW50) จะมีการไหลที่คล้ายคลึงกันเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีขอบเขตของการไหลและจุดเริ่มต้นเดียวกันคือ อากาศปฐมภูมิที่ 0.0274 กิโลกรัมต่อวินาที อากาศทุติยภูมิที่ 0.0767 กิโลกรัมต่อวินาที และอากาศตติยภูมิที่ 0.005 กิโลกรัมต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ (5.8,5.9)

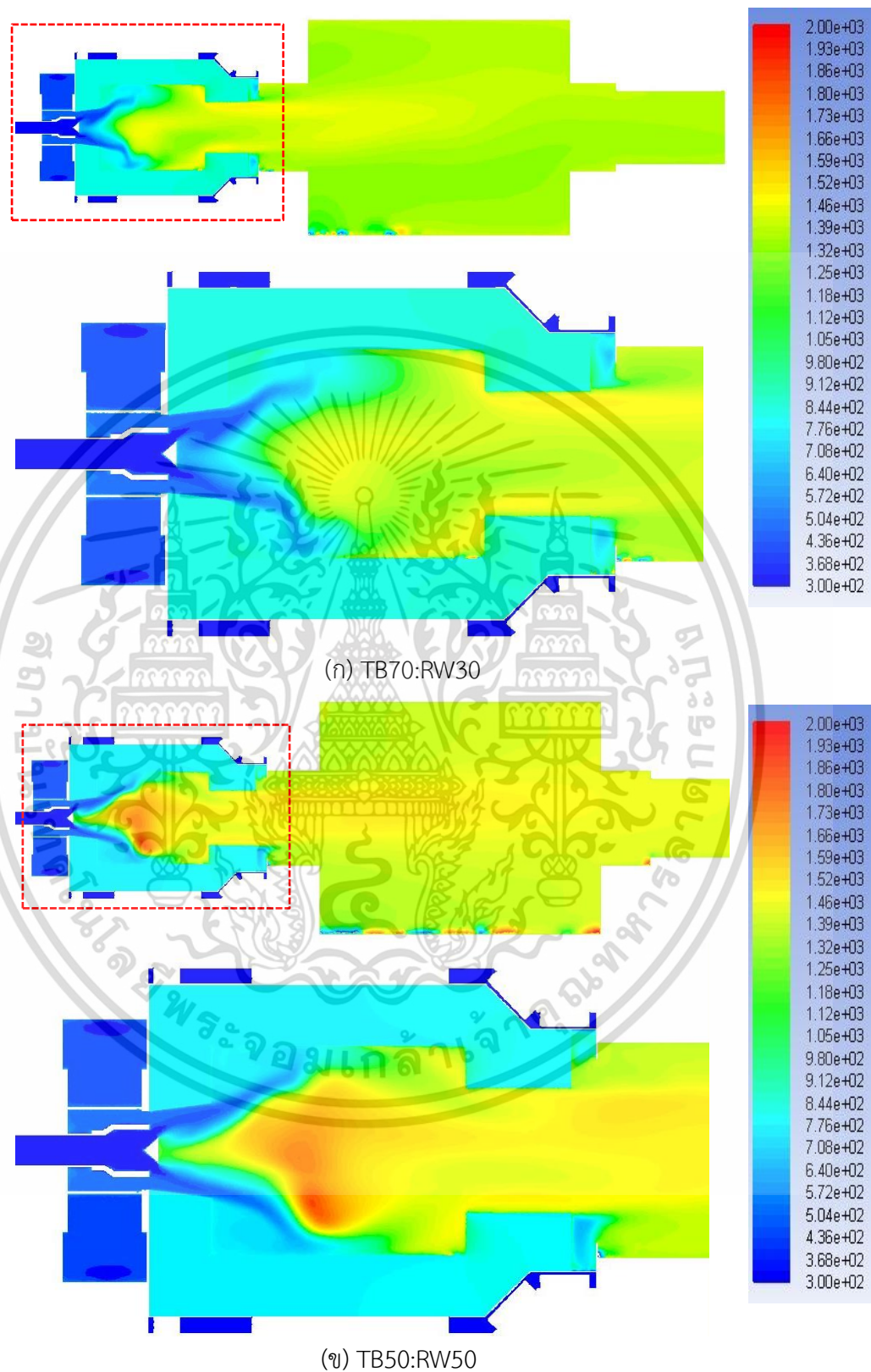


รูปที่ 5.8 ทิศทางการไหลในระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง X/D ของห้องเผาไหม้ขนาดใหญ่ของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30

รูปที่ 5.9 ทิศทางการไหลในระนาบตัดขวางที่ตำแหน่ง X/D ของห้องเผาไหม้ขนาดใหญ่ของเขื่อนพลังผสม TB50:RW50



5.2.2 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้

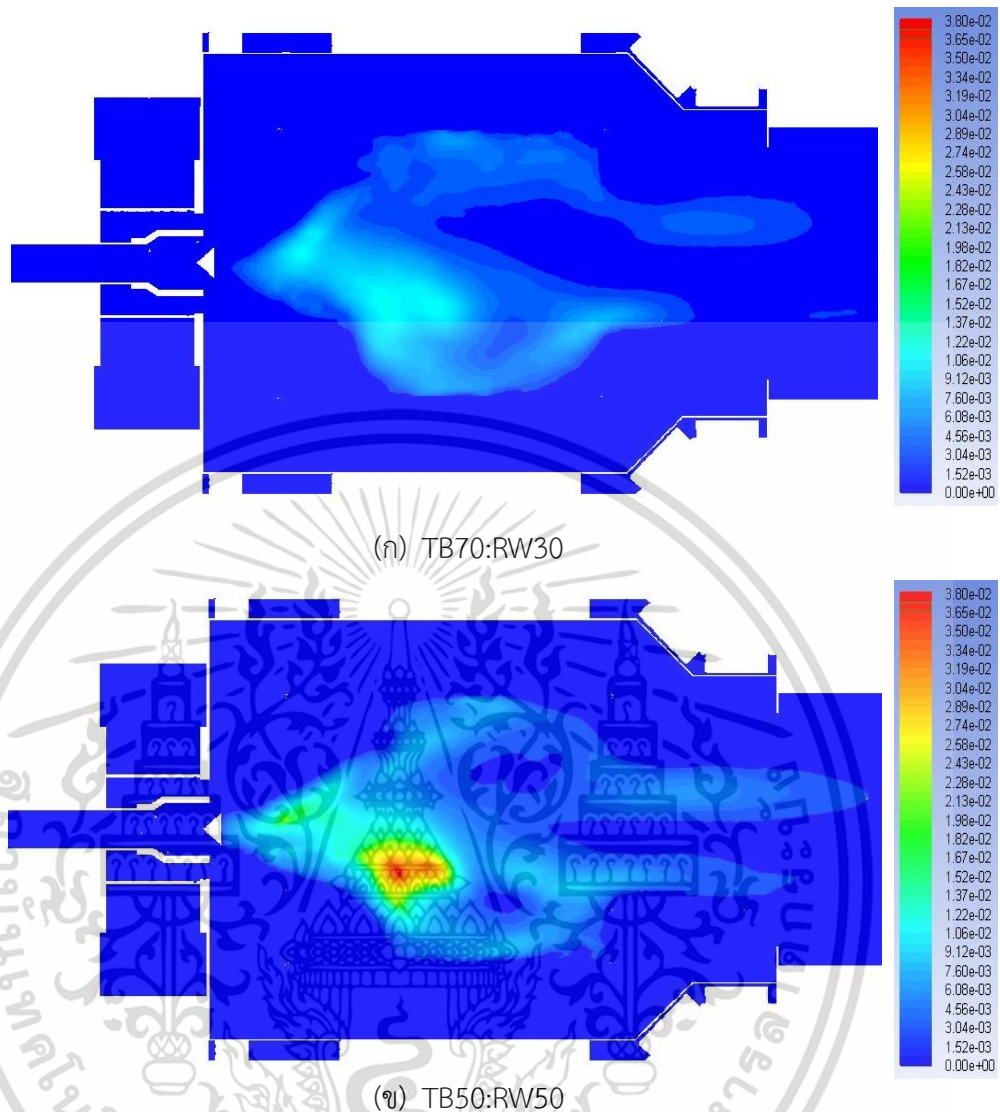


รูปที่ 5.10 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.10 ผลของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยที่แสดงให้เห็นการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก โดยผลของอุณหภูมิภายในห้องเผาช่วยจะสอดคล้องและเกี่ยวเนื่องกันกับสนามของการไหล เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นนั้นเกิดจากการเผาไหม้ของอนุภาคเชื้อเพลิง โดยที่เชื้อเพลิงจะถูกพาจากการไหลของอากาศภายใน ดังนั้นการกระจายของอุณหภูมิจึงแสดงถึงตำแหน่งที่มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ซึ่งจากรูปที่ 5.10 จะเห็นว่าที่ทางเข้าของห้องเผาไหม้ช่วยมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 303K ทั้ง 2 กรณีศึกษาเชื้อเพลิง เมื่อเชื้อเพลิงไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยจากการพาของอากาศปฐมภูมิ อนุภาคเชื้อเพลิงจะได้รับรังสีความร้อนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงและดูดซับความร้อนเข้าสู่อนุภาค แล้วจึงเริ่มกระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในผลของ TGA (รูปที่ 5.1) คือ เริ่มจากการระเหยความชื้น การปลดปล่อยสารระเหย การจุดติดไฟและการเผาไหม้ของสารระเหยและถ่านชาร์ จนกระทั่งเหลือแต่ขี้เถ้าตามลำดับ ซึ่งจากผลของอุณหภูมิมพบว่าที่กลางเตาเชื้อเพลิงผสมไม้ไผ่ทอรีไฟต์70:ไม้ยางพารา30 (TB70:RW30) มีอุณหภูมิอยู่ที่ 1500 K ซึ่งต่ำกว่าที่กรณีของเชื้อเพลิงผสมไม้ไผ่ทอรีไฟต์50:ไม้ยางพารา50 (TB50:RW50) ที่มีอุณหภูมิอยู่ที่ 1800 K อุณหภูมิต่ำกว่ากัน 300 K ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการสนับสนุนกันของการเผาไหม้ เนื่องจากเชื้อเพลิงผสมTB70:RW30 มีไม้ไผ่ทอรีไฟต์มากกว่าแต่กลับให้อุณหภูมิต่ำ แต่TB50:RW50 มีส่วนผสมไม้ไผ่ทอรีไฟต์น้อยลงแล้วให้อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้กล่าวได้ว่า ไม้ไผ่ทอรีไฟต์ที่มีค่าความร้อนสูงแต่ติดไฟยาก ได้รับพลังงานจากไม้ยางพาราเป็นตัวช่วยให้ไม้ไผ่ทอรีไฟต์จุดติดไฟได้เร็วขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เผาไหม้สารระเหยของไม้ยางพาราที่ปลดปล่อยออกมาก่อน เป็นตัวกระตุ้นให้เชื้อเพลิงทั้ง 2 ปลดปล่อยสารระเหยเร็วมากยิ่งขึ้น อีกทั้งการปลดปล่อยสารระเหยที่เร็วมากขึ้นทำให้การจุดติดไฟเร็วมากขึ้นไปด้วย ส่งผลให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงที่มีแก๊สร้อนอยู่ล้อมรอบ ดูดซับความร้อนกลับเข้าไปยังอนุภาคซึ่งทำให้เกิดการเผาไหม้ของถ่านชาร์ได้เร็วมากยิ่งขึ้น นอกจากอุณหภูมิของเชื้อเพลิง (TB50:RW50) จะมากกว่าแล้ว ฐานของเปลวไฟยังอยู่ชิดกับทางเข้ามากขึ้นอีกด้วย ซึ่งเป็นไปตามผลของ TGA ในตารางที่ 5.1 ที่แสดงถึงระยะเวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟและเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ โดยเชื้อเพลิงไม้ยางพาราให้เวลาเพียง 11.6 และ 16.1 นาทีตามลำดับ ในขณะที่ไม้ไผ่ทอรีไฟต์ใช้เวลาในการจุดติดไฟและเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ 12.0 และ 24.2 นาทีตามลำดับ

5.2.3 ผลการจำลองของปริมาณของสารระเหย

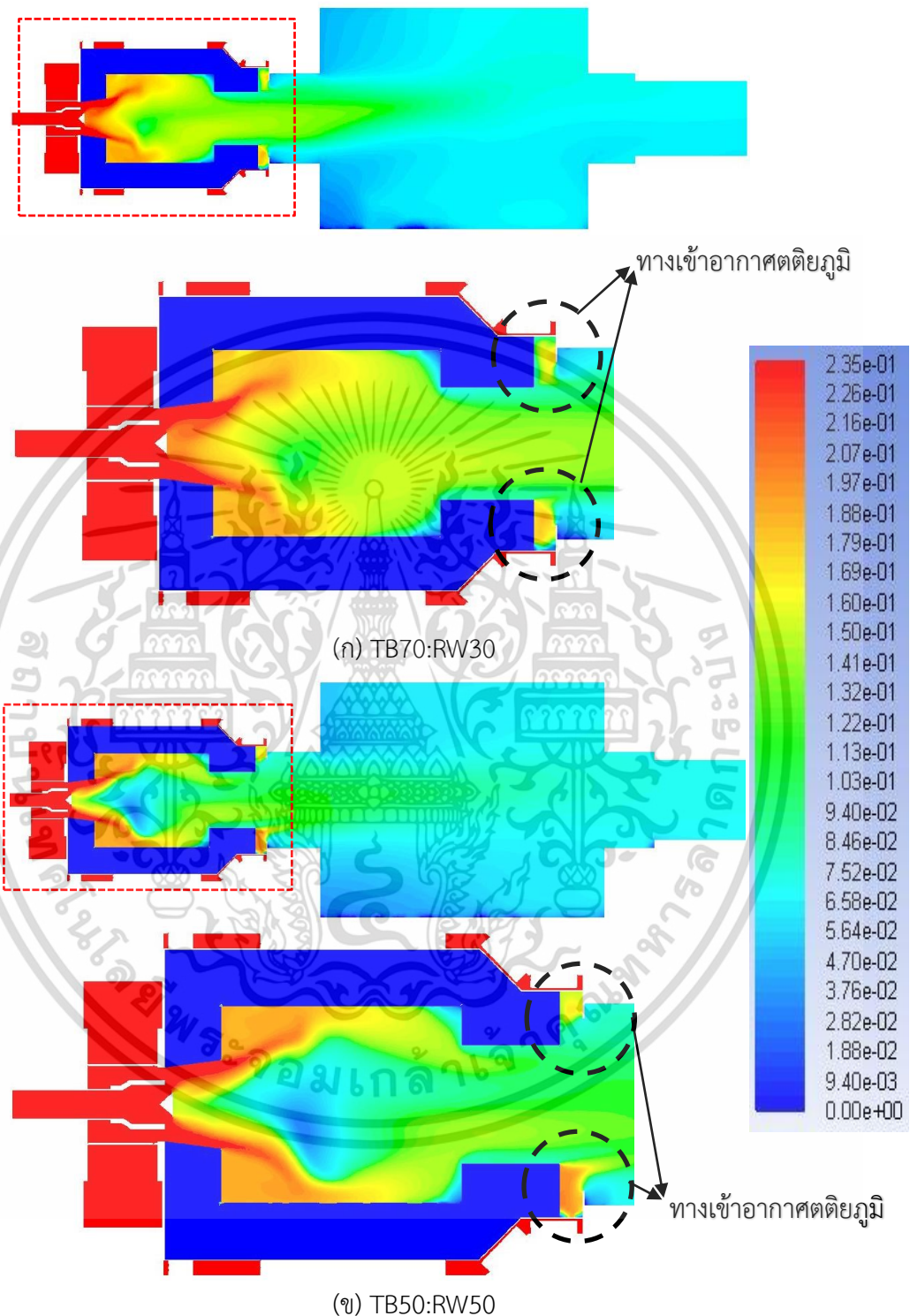


รูปที่ 5.11 ปริมาณของสารระเหยที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ช่วย

จากรูปที่ 5.11 แสดงความเข้มข้นของสารระเหยที่อนุภาคเชื้อเพลิงปลดปล่อยออกมา ซึ่งจุดที่มีเข้มข้นของสารระเหยสูงนั้นสอดคล้องกับผลของอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 5.10 ในกรณีของเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 ที่มีอุณหภูมิสูงในบริเวณที่สารระเหยมีความเข้มข้นสูง ซึ่งจะเห็นว่าความเข้มข้นของสารระเหยและอุณหภูมิจะอยู่ที่ตำแหน่งต่ำกว่ากึ่งกลางเตาเนื่องจากแรงโน้มถ่วงที่ทำให้เชื้อเพลิงตกลงสู่ด้านล่างของห้องเผาไหม้ช่วย โดยเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 จะมีสารระเหยในองค์ประกอบมากกว่าเนื่องจากมีส่วนผสมของไม้ยางพารามากกว่าเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 ซึ่งไม้ยางพารามี เปอร์เซ็นต์สารระเหยมากที่เป็นส่วนช่วยให้เกิดการเผาไหม้ได้เร็วมากยิ่งขึ้น สอดคล้องกับผลของ TGA (ตารางที่ 5.1) แต่อย่างไรก็ตามผลของปริมาณสารระเหยในกรณีของ TB70:RW30 ก็ยังเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากสารระเหยในองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแตกต่างกันไม่มาก โดยองค์ประกอบ

เชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 และ TB50:RW50 มีสารระเหยถึง 57.65 และ 63.09 % ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 ผลการจำลองความเข้มข้นของออกซิเจน O_2



รูปที่ 5.12 ความเข้มข้นของออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิง

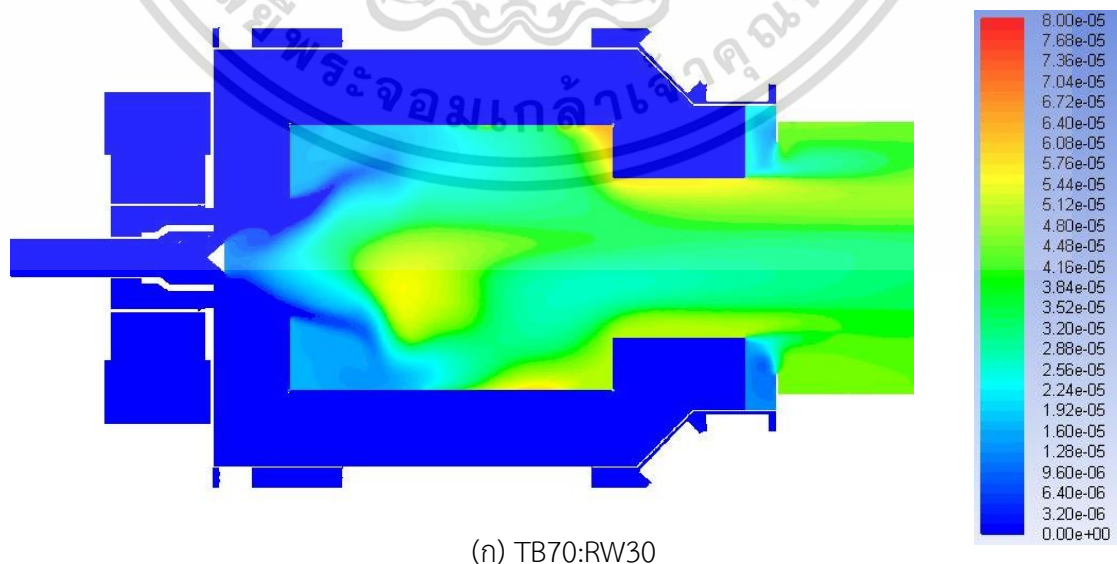
ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.12 จะเห็นว่าในกรณีของเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 ที่ตำแหน่งกลางเตา ($r/D=0$) ด้านหลังวัตถุวางการไหลมีความเข้มข้นของสัสด่วนโดยมวลของออกซิเจนต่ำ แสดงให้เห็นว่าอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในบริเวณดังกล่าวสูง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต้องมีเชื้อเพลิงและอากาศจึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมา ดังนั้นการที่ออกซิเจนที่มีสัสด่วนโดยมวลต่ำลงแสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกันกับผลของอุณหภูมิ (รูปที่ 5.10) พบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยในตำแหน่งที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำก็จะมีอุณหภูมิสูงหรือประมาณ 1900K แต่ในกรณีของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 พบว่าสัสด่วนโดยมวลของออกซิเจนลดลงเพียงครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับทางเข้า ซึ่งสอดคล้องกับผลของอุณหภูมิในรูปที่ 5.10 ที่มีอุณหภูมิกกลางเตาหลังวัตถุวางการไหลประมาณ 1500K

อีกหนึ่งจุดที่น่าสนใจ คือบริเวณที่อากาศตติยภูมิ เข้าสู่ด้านหลังห้องเผาไหม้ช่วย เสมือนว่าเป็นการเติมอากาศให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับอนุภาคเชื้อเพลิง โดยจะเห็นว่าทั้ง 2 กรณี มีความเข้มข้นของออกซิเจนในบริเวณที่อากาศตติยภูมิเข้าไปเหมือนกันคือ ที่ด้านล่างของเตามีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงและที่ด้านบนของเตามีความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำ อันเนื่องมาจากอนุภาคเชื้อเพลิงที่อยู่ในห้องเผาไหม้มีขนาดที่ไม่เท่ากัน (ตารางที่ 4.1) ทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถลอยตัวอยู่ ไหนสนามการไหลตกอยู่ด้านล่างเตา ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กสามารถลอยขึ้นไปบนผนังเตาได้ โดยขนาดของอนุภาคมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของการเผาไหม้ อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะเผาไหม้ได้เร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ [16] เป็นผลให้เราเห็นความเข้มข้นของออกซิเจนที่ด้านบนของเตาเหลือน้อยกว่าด้านล่าง เนื่องจากออกซิเจนกับเชื้อเพลิงขนาดเล็กเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่าเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ที่อยู่ด้านล่าง

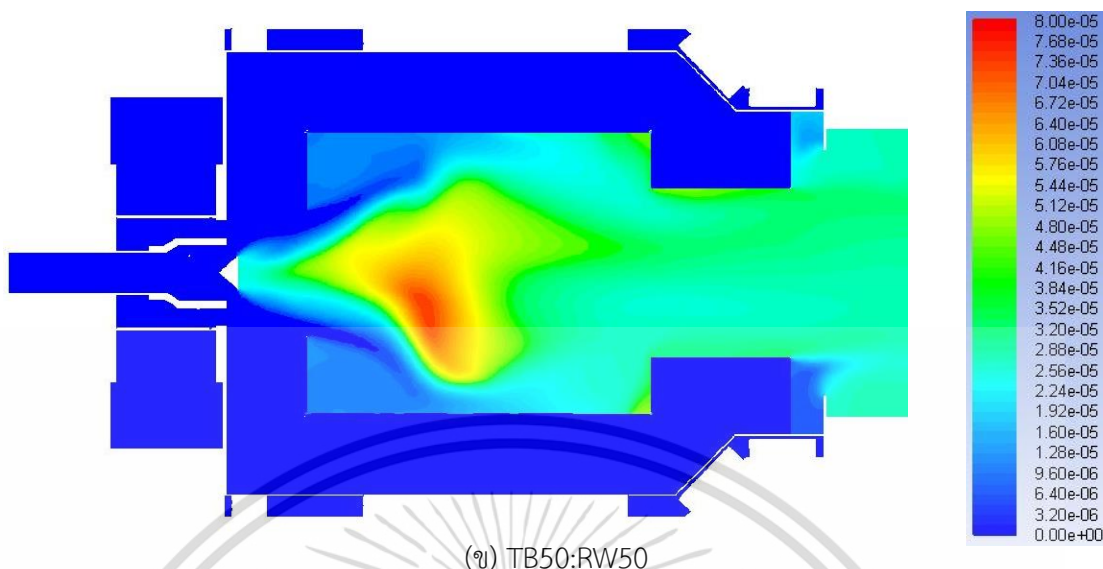
5.2.5 ผลการจำลองของออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x)



(ก) TB70:RW30

รูปที่ 5.13 ความเข้มข้นของออกไซด์ซัลเฟอร์ในห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยูเอชเห็นใบเซอร์เวอชันด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



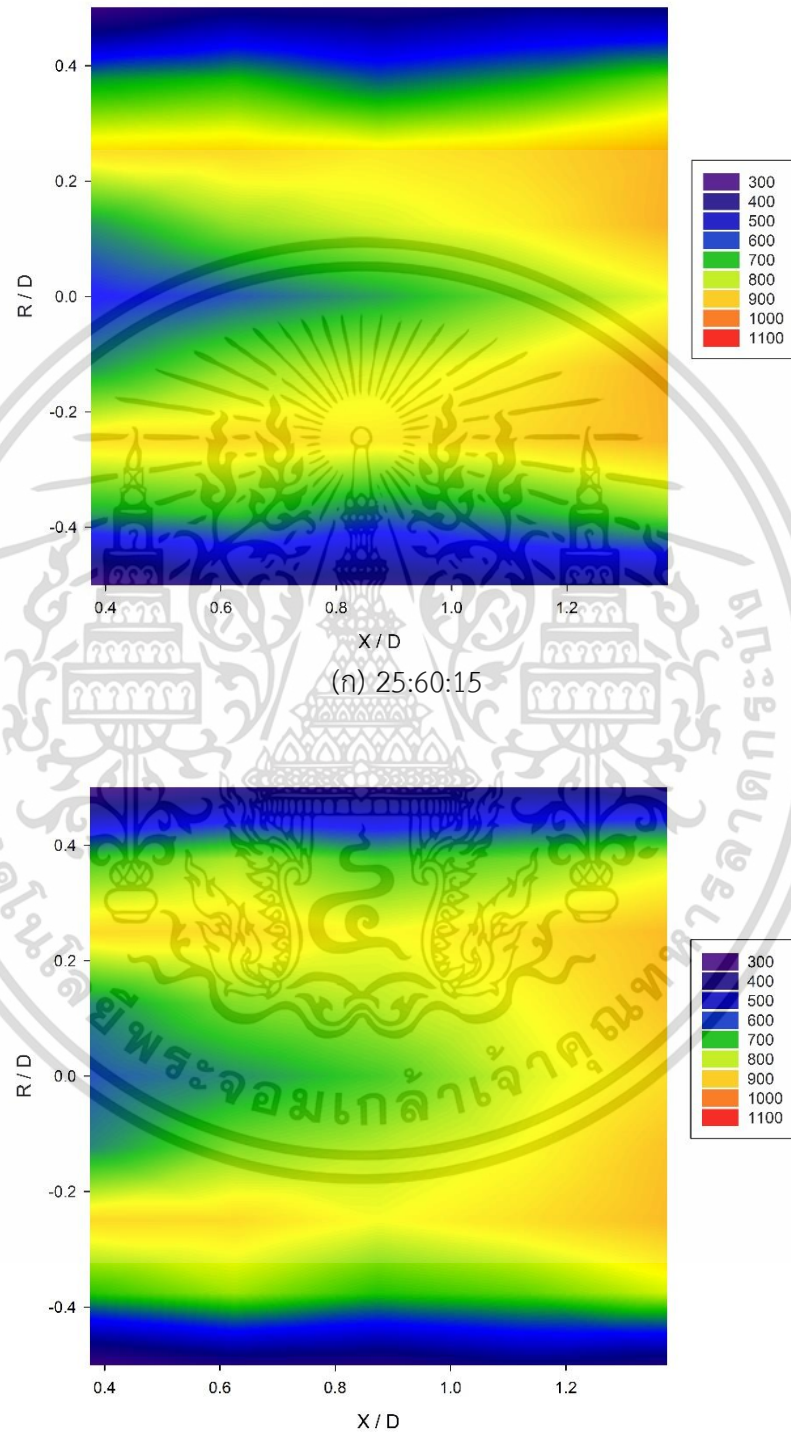
(ข) TB50:RW50

รูปที่ 5.13 ความเข้มข้นของออกไซด์ซัลเฟอร์ในห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงผสม (ต่อ)

เนื่องจากเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟต์ที่เป็นส่วนผสมหลัก มีปริมาณซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบอยู่ ทำให้มีการก่อเกิดของออกไซด์ของซัลเฟอร์ SO_x ดังแสดงในสมการ (3.35) จะเห็นได้ว่าซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการเผาไหม้จนกลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งจากรูปที่ 5.13 ปริมาณความเข้มข้นของออกไซด์ของซัลเฟอร์ สอดคล้องกับผลของอุณหภูมิและผลของออกซิเจนที่เป็นตัวทำปฏิกิริยาร่วมกันดังแสดงในรูปที่ 5.10, 5.12 โดยผลของความเข้มข้นของออกไซด์ของซัลเฟอร์เป็นอีกหนึ่งข้อยืนยันของการสนับสนุนกันของการเผาไหม้ เนื่องจากเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 มีส่วนผสมของเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟต์มากกว่าที่ทำให้องค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสมนี้มีปริมาณซัลเฟอร์มากกว่าส่วนผสม TB50:RW50 แต่ผลของความเข้มข้นของปริมาณออกไซด์ของซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 กลับมีความเข้มข้นที่สูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วย ที่เชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 มีอุณหภูมิในการเผาไหม้สูงกว่าเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 อีกทั้งเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 มีบริเวณเผาไหม้ที่กว้างกว่าทำให้เกิดของออกไซด์ของซัลเฟอร์ SO_x มากกว่าเนื่องจากออกไซด์ของซัลเฟอร์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นในบริเวณของการเผาไหม้

5.3 ผลการทดลองจากหัวเผาชนิดฝุ่น

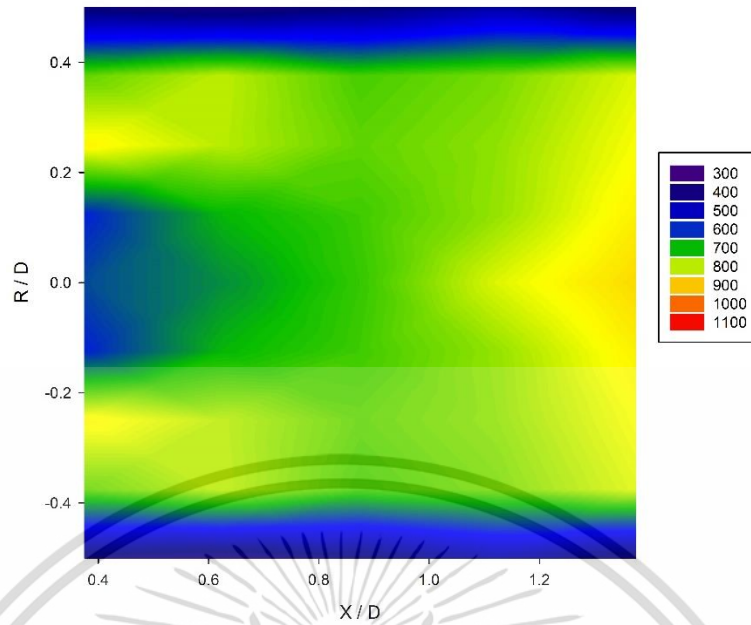
5.3.1 ผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมไม้ไผ่ทอริไฟต์กับไม้ยางพารา 70:30 เปอร์เซนต์โดยมวล



รูปที่ 5.14 กราฟการกระจายของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 ที่

อัตราส่วนอากาศปฐมภูมิ:ทุติยภูมิ:ตติยภูมิ

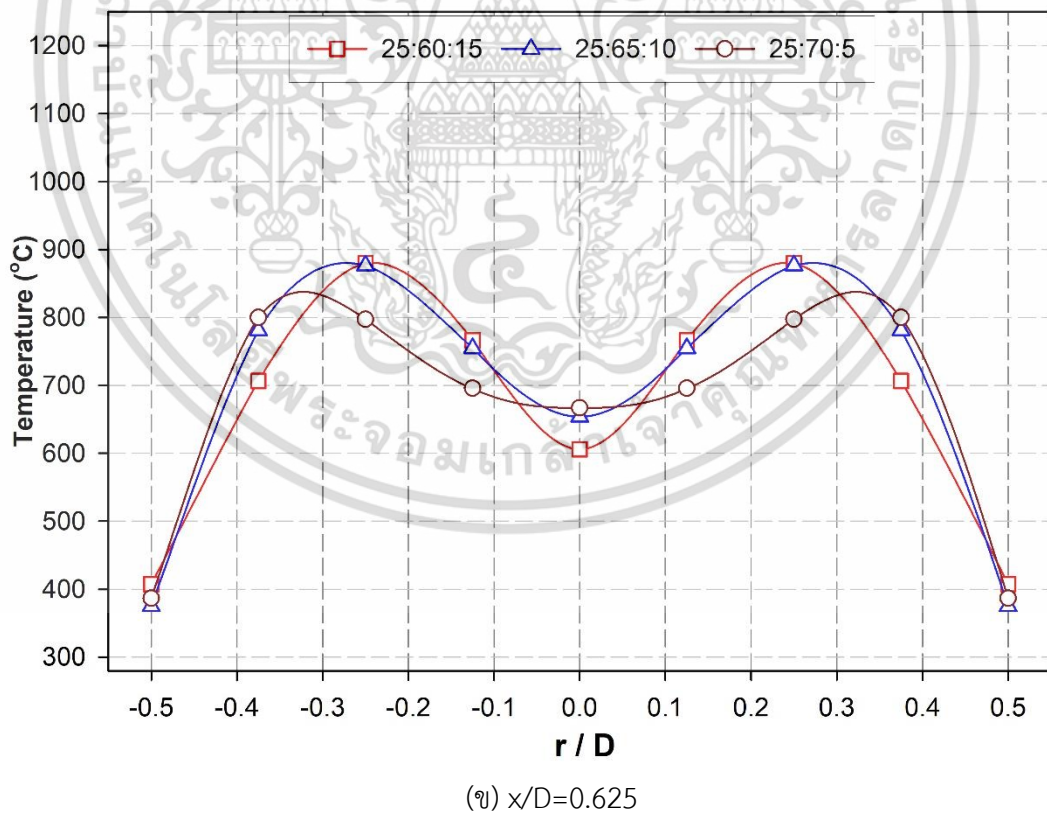
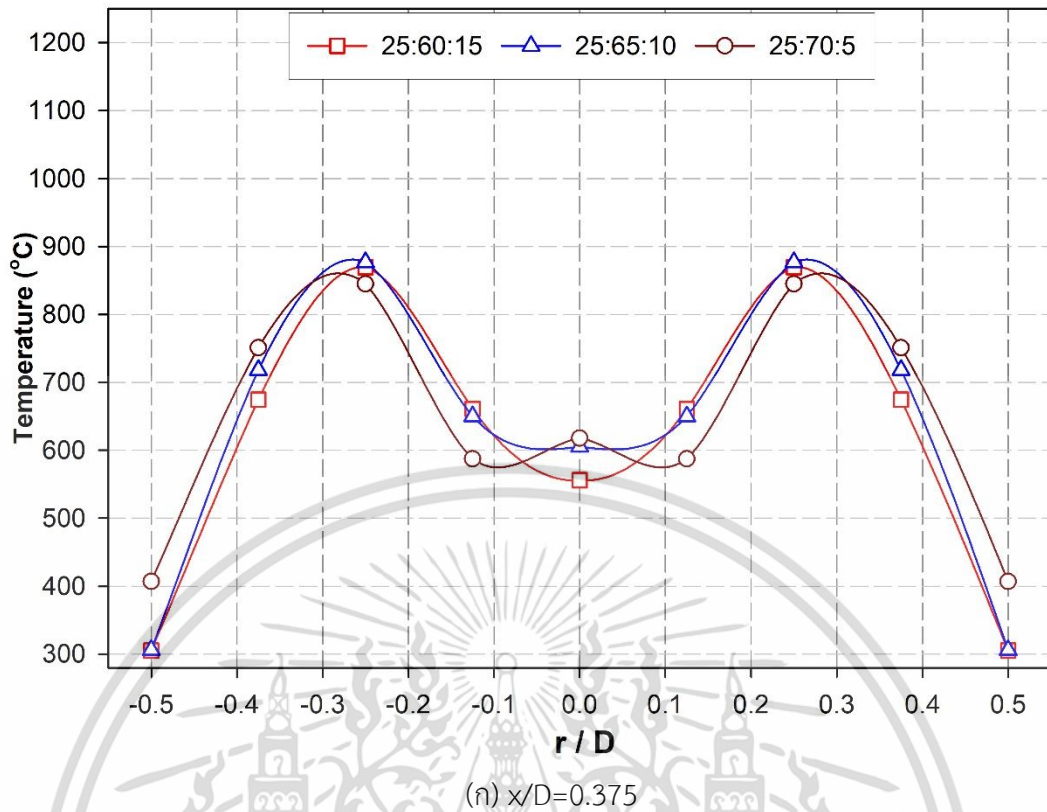
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) 25:70:5

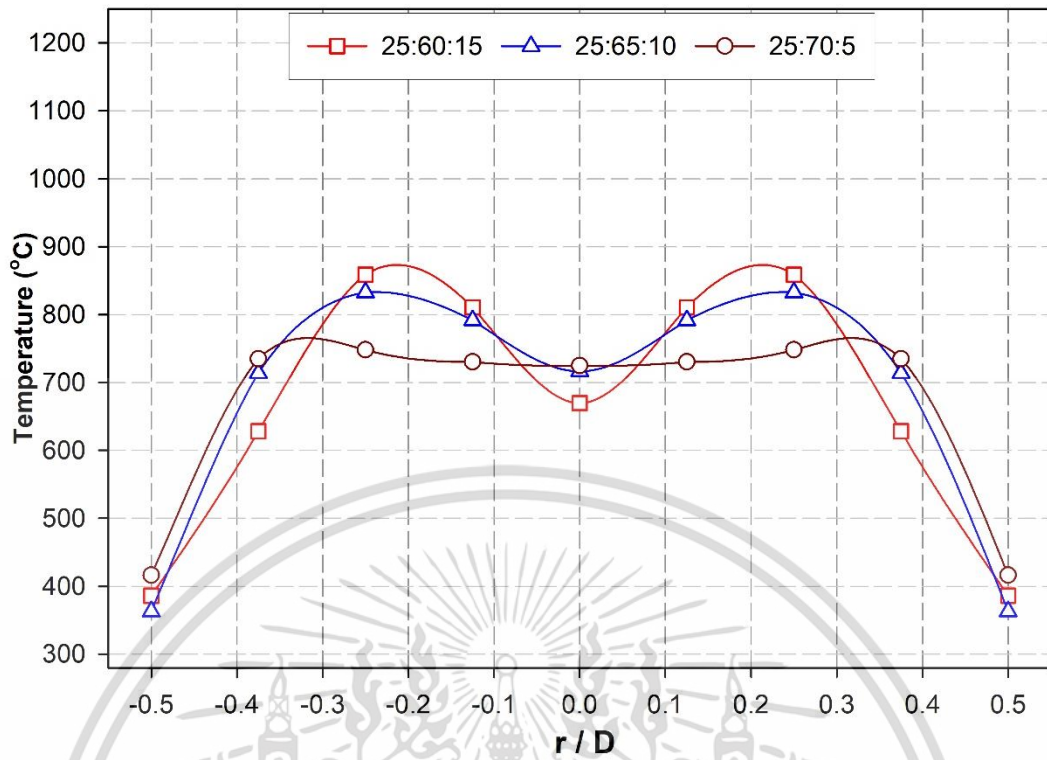
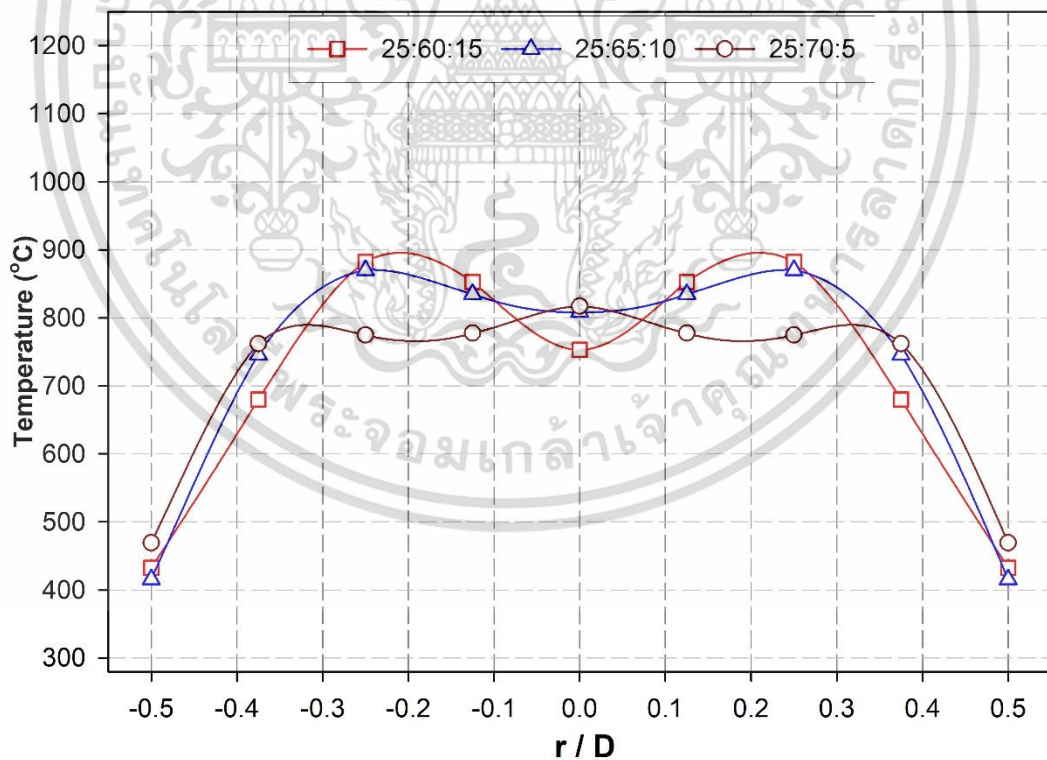
รูปที่ 5.14 กราฟการกระจายของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 ที่อัตราส่วนอากาศปฐุมภูมิ:ทุติยภูมิ:ตติยภูมิ(ต่อ)

รูปที่ 5.14 แสดงการกระจายอุณหภูมิของเชื้อเพลิงผสม TB:70RW30 ที่อัตราส่วนอากาศปฐุมภูมิ:ทุติยภูมิ:ตติยภูมิ 25:60:15 25:65:10 และ 25:70:5 ตามลำดับ ในกรณี (ก) 25:60:15 อุณหภูมิห้องเผาไหม้ช่วยประมาณ 900 °C และมีฐานของเปลวไฟอยู่ที่ระยะประมาณ $x/D=1$ แต่มีการกระจายอุณหภูมิไปที่ผนังเตาดำ (500-600 °C) (ข) 25:65:10 อุณหภูมิห้องเผาไหม้ลดลงจากกรณีแรกเหลือ 800-900 °C ส่วนฐานของไฟขยับมาอยู่ที่ $x/D=0.8$ และมีการกระจายอุณหภูมิไปที่ผนังเตามากขึ้น อยู่ที่ 600 °C (ค) 25:70:5 อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยอยู่ที่ 700-800 °C ซึ่งฐานของเปลวไฟขยับมาอยู่ที่ตำแหน่ง $x/D=0.7$ และมีการกระจายอุณหภูมิไปยังผนังเตาได้ดีมากขึ้น ที่ 600-700 °C โดยการกระจายของอุณหภูมิที่ยังผนังเตาจะมากยิ่งขึ้นที่ลมทุติยภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากลมทุติยภูมิเป็นลมที่ไหลผ่านใบพัด (Swirl) ที่เป็นส่วนช่วยให้เกิดการหมุนควง ทำให้เกิดการไหลปั่นป่วน ซึ่งทำให้มีการไหลย้อนกลับที่กลางเตา อีกทั้งการไหลปั่นป่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการคลุกเคล้ากันระหว่างอนุภาคเชื้อเพลิงและอากาศได้ดีมากยิ่งขึ้น แต่ลมทุติยภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นนอกจากจะทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีแล้วนั้น ยังทำให้เกิดการพัดพาในห้องเผาไหม้ช่วยอีกด้วย โดยการพัดพาที่มากเกินไปทำให้อุณหภูมิต่ำลงเมื่อเทียบกับอัตราส่วนลม ดังแสดงในรูปที่ 5.14 (ข) และ (ค) อีกทั้งยังทำให้เกิดก๊าซ CO ที่มากขึ้นเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 5.16 ซึ่งอาจเป็นการแสดงถึงอัตราส่วนลมทุติยภูมิที่มากเกินไปและอาจทำให้เกิดการเป่าดับ (Blowout)

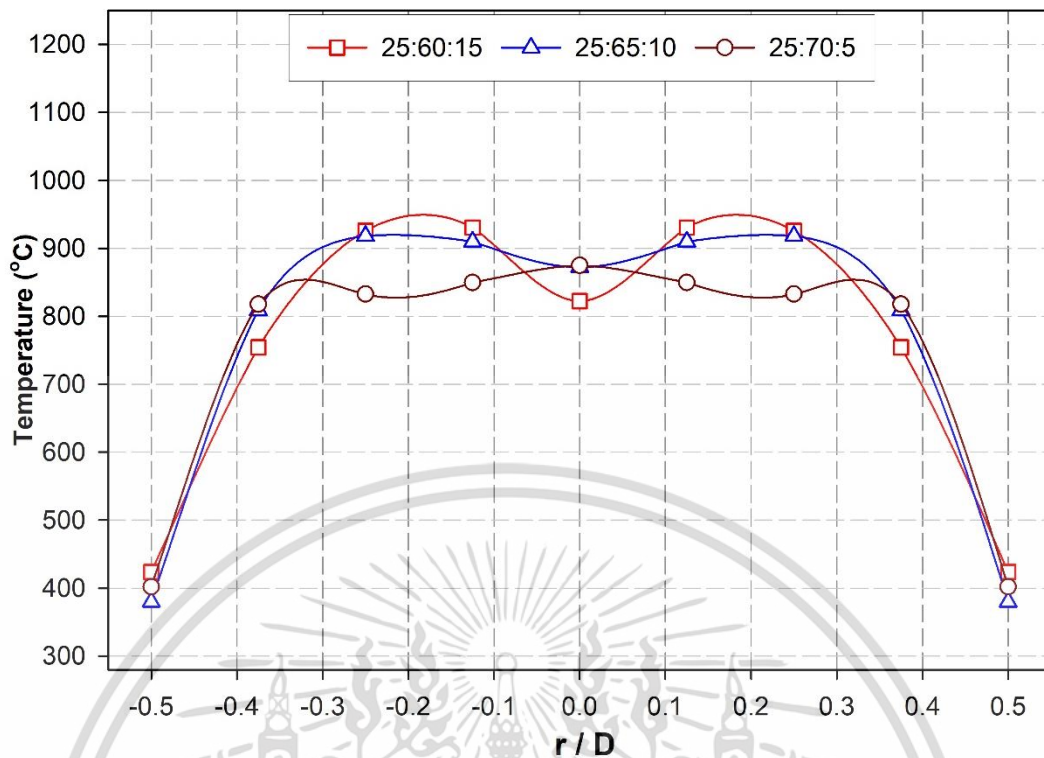


รูปที่ 5.15 ผลอุณหภูมิของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 สัดส่วนอากาศที่ระยะ x/D ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) $x/D=0.875$ (ง) $x/D=1.125$ รูปที่ 5.15 ผลอุณหภูมิของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 สัดส่วนอากาศที่ระยะ x/D ต่าง ๆ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) $x/D=1.375$

รูปที่ 5.15 ผลอุณหภูมิของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 สัดส่วนอากาศที่ระยะ x/D ต่าง ๆ (ต่อ)

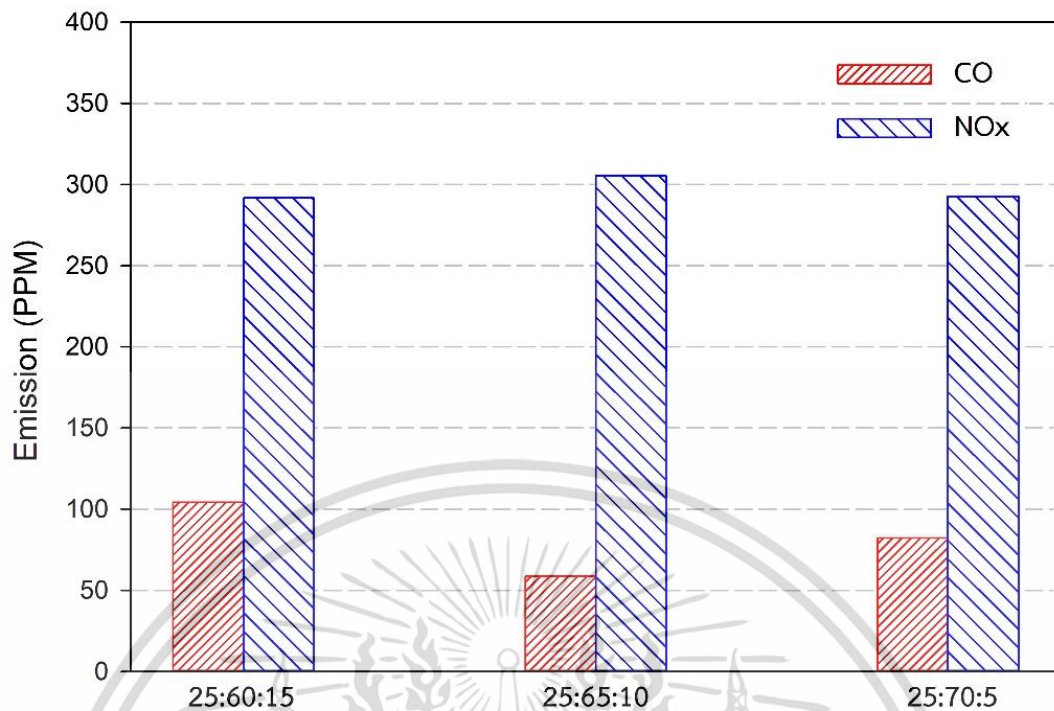
จากตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยดังแสดงในรูปที่ 4.18 ทำการพิจารณาที่ภาพตัดที่ระยะ x/D ต่าง ๆ แล้วเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวรัศมีของห้องเผาไหม้ช่วยพบว่า

ที่ต้นทางของห้องเผาไหม้ช่วย $x/D=0.375$ อุณหภูมิที่บริเวณกลางเตามีค่าสูงที่สุดที่สัดส่วนอากาศที่อุดมมากที่สุด ซึ่งอากาศที่เป็นตัวพาให้เชื้อเพลิงไหลนั้นมีการไหลย้อนกลับที่กลางเตา (Internal recirculation) เนื่องจากความเร็วของการไหลที่ออกจากใบพัดทำให้เกิดการหมุนควงของอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ด้วยความเร็วสูง อีกทั้งมีแผ่นขวางการไหล (Bluff body) ทำให้ความดันหลังแผ่นขวางการไหลมีความดันต่ำกว่าที่ทางเข้า ส่งผลให้เกิดการไหลย้อนกลับที่กลางเตา

ต่อมาที่ระยะ $x/D=0.625$ จะเห็นว่าอุณหภูมิที่กลางเตามีอุณหภูมิสูงขึ้นแต่ยังคงมีอุณหภูมิน้อยกว่าที่ผนังเตา ต่อมาที่ระยะ $x/D=0.875, 1.125$ การกระจายอุณหภูมิจะใกล้เคียงกันทุกบริเวณในระนาบตัด ในสัดส่วนอากาศ 25:70:5 แสดงให้เห็นถึงการคลุกเคล้าของอากาศกับอนุภาคเชื้อเพลิงที่ดีขึ้นอันเนื่องมาจากการไหลปั่นป่วนทำให้อากาศแพร่เข้าสู่อนุภาคเชื้อเพลิงและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีขึ้น

ที่ระยะ $x/D=1.375$ จะเห็นว่าอุณหภูมิที่กลางเตามีอุณหภูมิสูงกว่าผนังเตา เนื่องจากแก๊สร้อนภายในเตาที่ไหลออกจากห้องเผาไหม้ช่วยต้องไหลผ่าน nozzle ที่มีหน้าตัดเล็กลงก่อนที่จะเข้าสู่ห้องเผาไหม้หลังทำให้ฟลักซ์ของการไหลถูกบีบให้เข้าสู่ศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ช่วย ซึ่งสอดคล้องกับผลของการจำลองสนามของไหลภายในห้องเผาไหม้ช่วย

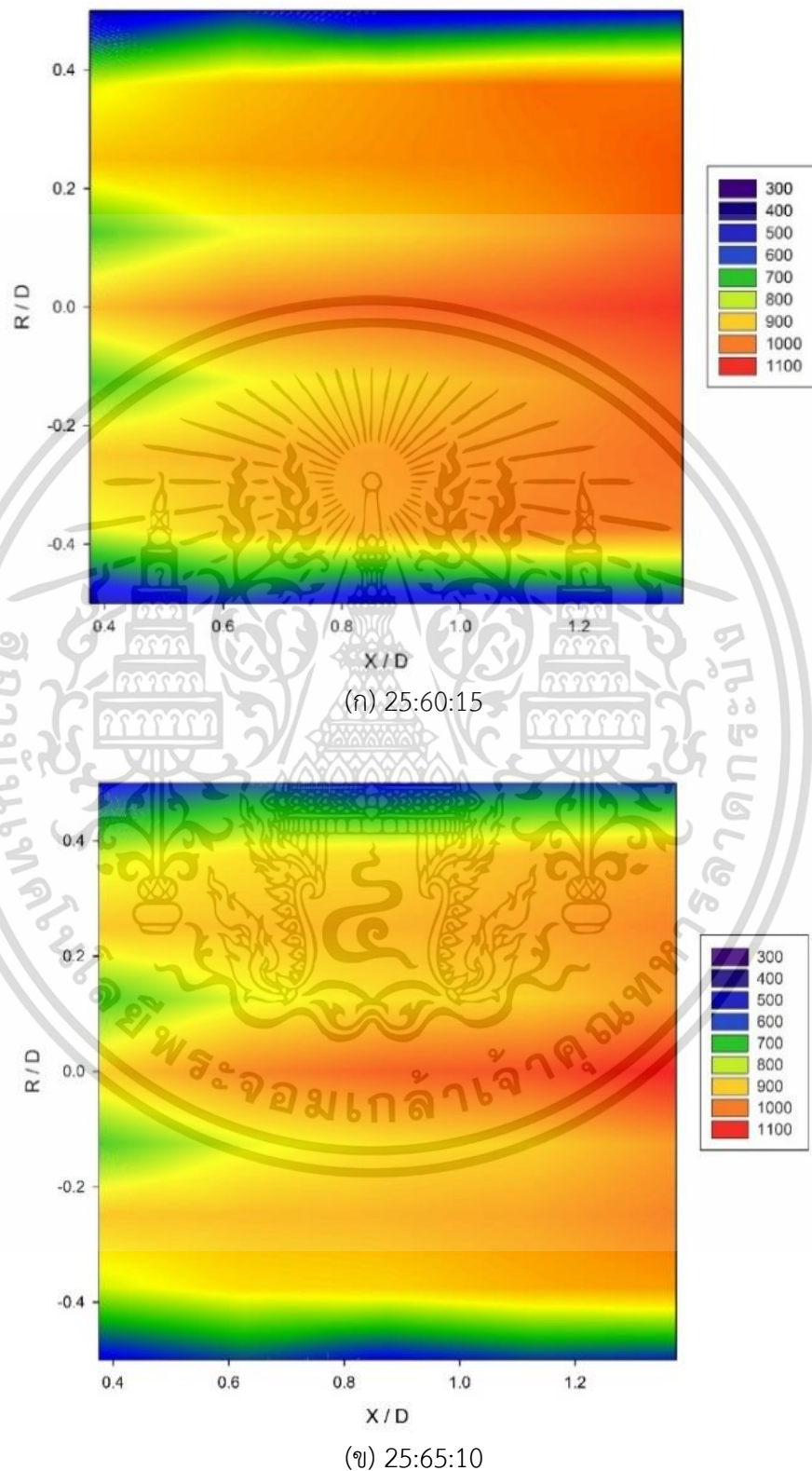
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 ปริมาณมลพิษที่วัดจากไอเสียในกรณี เชื้อเพลิงผสม TB70:RW30

ผลการวัดแก๊สไอเสียในกรณีเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 ที่อัตราส่วนอากาศต่าง ๆ โดยกรมควบคุมมลพิษกำหนดมาตรฐานให้อุตสาหกรรมปล่อย NO_x และ CO สู่อากาศได้ไม่เกิน 200 และ 690 PPM ตามลำดับ[23] ซึ่งปริมาณ NO_x ที่วัดได้จากเครื่องวัดแก๊สสามารถเกิดได้จาก 3 กลไกคือ Thermal NO_x , Prompt NO_x และ Fuel NO_x ซึ่งการเกิด NO_x ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 จะตัดประเด็นเรื่อง Fuel NO_x เนื่องจากเชื้อเพลิงมี N ในองค์ประกอบต่ำ ต่อมา Prompt NO_x ก็เป็นอีกส่วนที่เราตัดไปเนื่องจากทุกกรณีที่ทำการศึกษาจะใช้อากาศเกิน 15% อีกทั้งกรณีเชื้อเพลิงชีวมวล prompt NO_x จะมีความสำคัญน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในเชื้อเพลิงฟอสซิล เหลือแต่ในส่วนของ Thermal NO_x เนื่องจากเมื่อพิจารณาควบคู่กันกับผลของอุณหภูมิแล้วพบว่า อุณหภูมิที่เกิด Thermal NO_x จะเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 1300°C โดยในการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 อุณหภูมิในเตามีค่าสูงสุดในห้องเผาไหม้หลักที่ประมาณ 950°C จึงอาจทำให้เกิด Thermal NO_x ที่ปริมาณประมาณ 300PPM ซึ่งสูงกว่าค่าที่มาตรฐานที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 5.16 ในส่วน CO ที่สามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกับอากาศ หรือเกิดได้จากการแตกสลายของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจากการวัดจะเห็นได้ว่ามีปริมาณ CO ในไอเสียอยู่น้อยมาก โดยมีปริมาณต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด

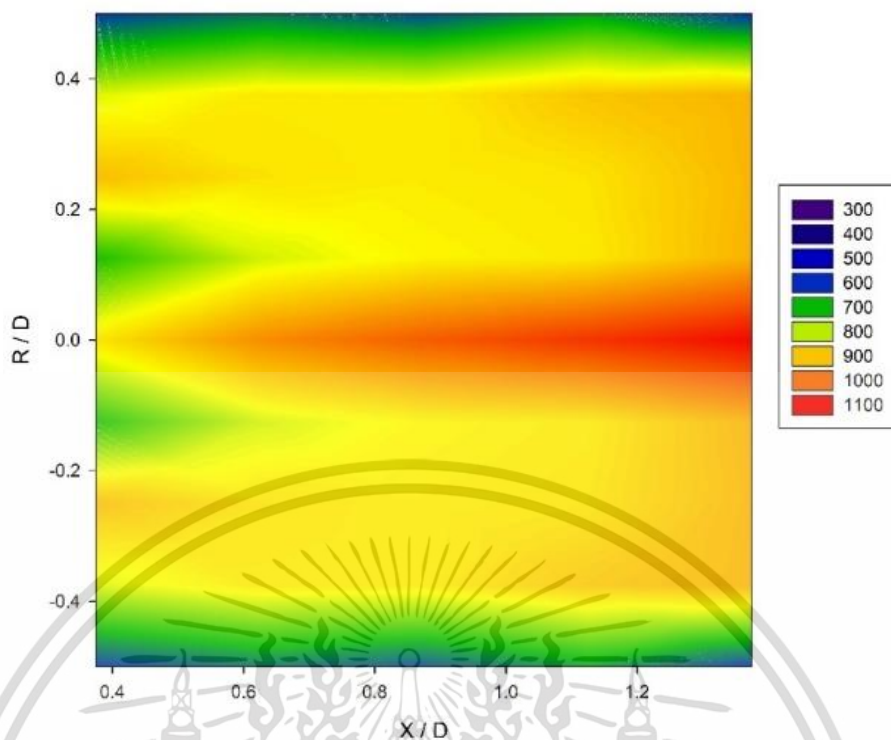
5.3.2 ผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมไม้ไฟทอรีไฟด์กับไม้ยางพารา 50:50
เปอร์เซ็นต์โดยมวล



รูปที่ 5.17 กราฟการกระจายของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 ที่

อัตราส่วนอากาศปฐุมภูมิ:ทุติยภูมิ:ตติยภูมิ

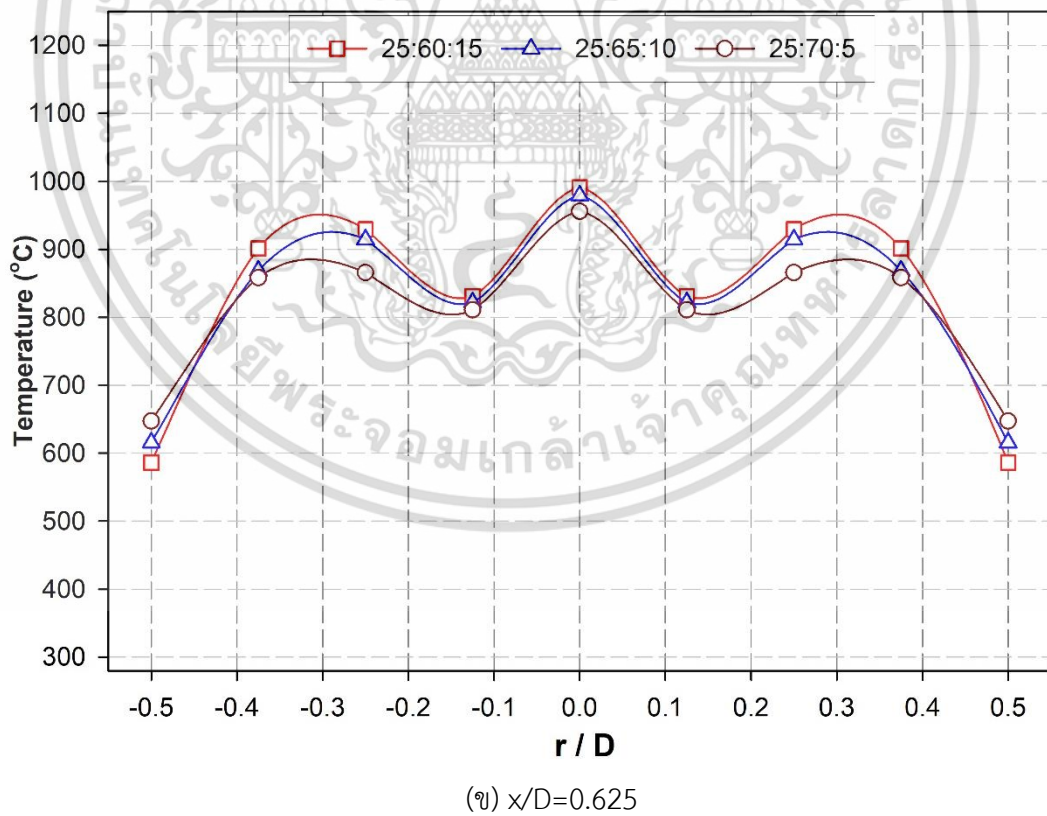
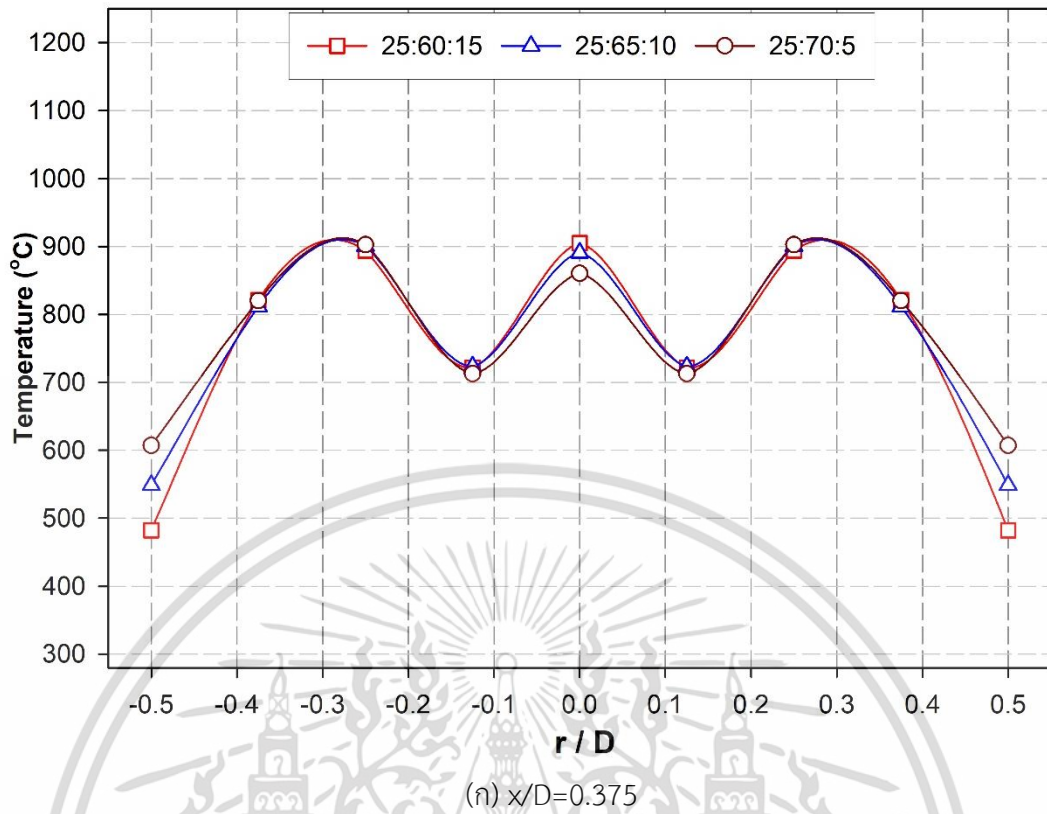
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) 25:70:5

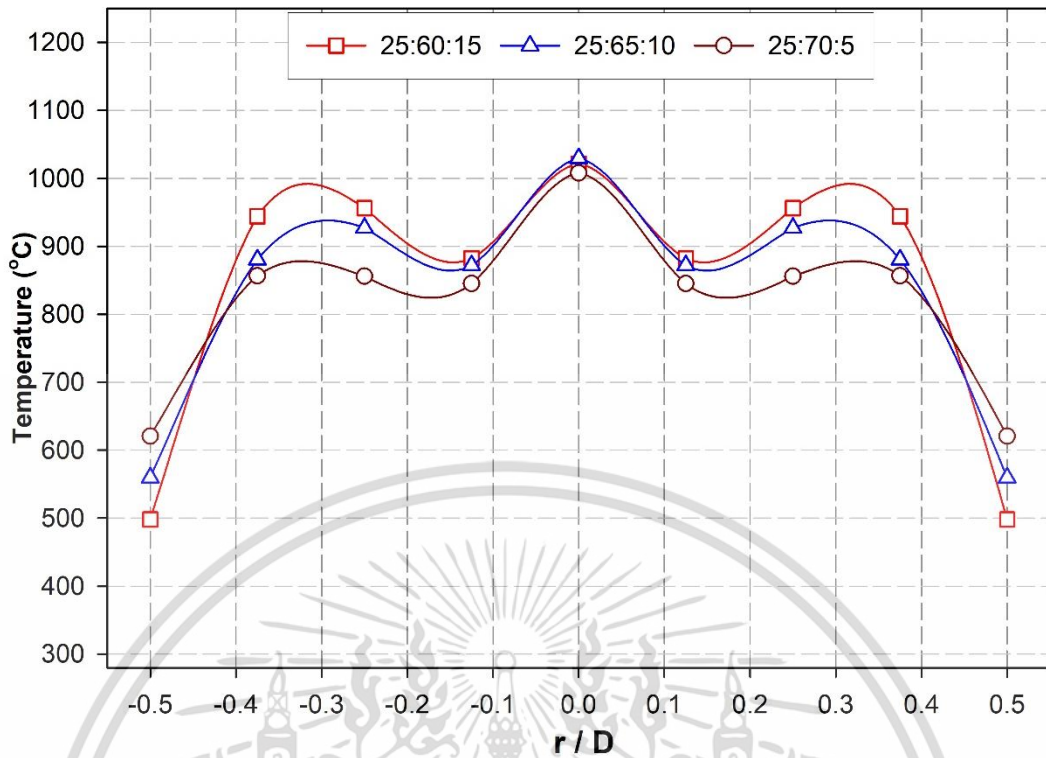
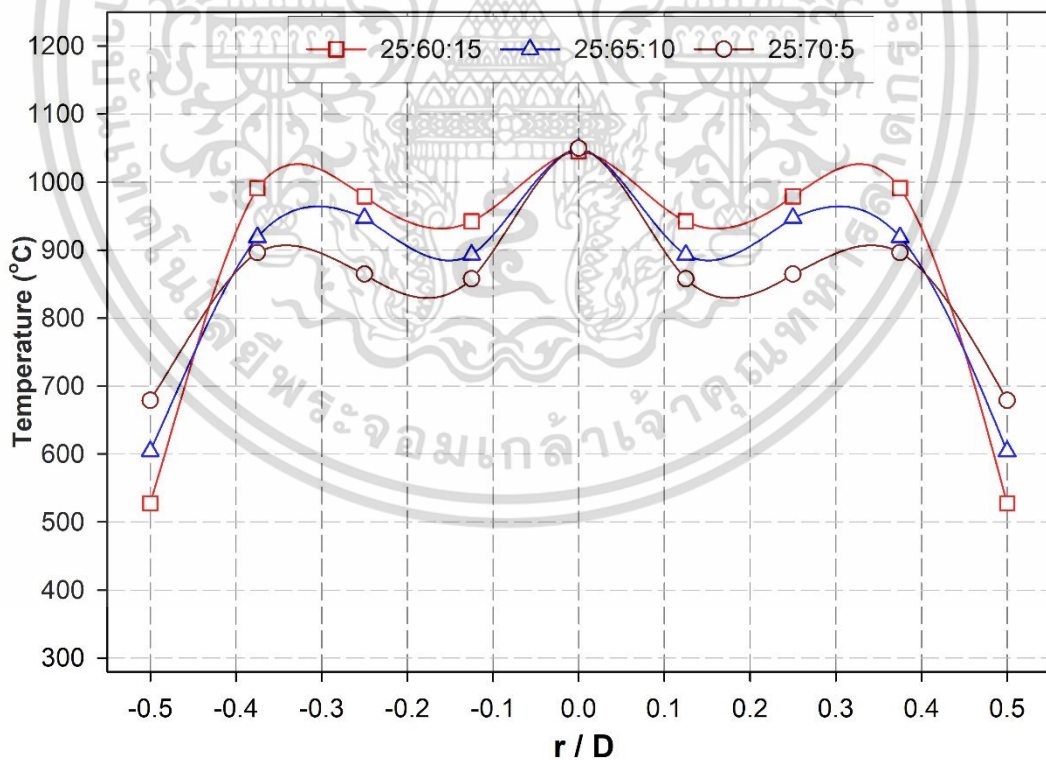
รูปที่ 5.17 กราฟการกระจายของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 ที่อัตราส่วนอากาศปฐุมภูมิ:ทุติยภูมิ:ตติยภูมิ(ต่อ)

จากรูปที่ 5.17 แสดงการกระจายของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 จะสังเกตเห็นว่าทั้ง 3 สัดส่วนของอากาศปฐุมภูมิ ทุติยภูมิและตติยภูมิ มีอุณหภูมิที่บริเวณกลางเตา($r/D=0$) ประมาณ 1000-1100 °C ตลอดแนวและมีฐานของเปลวไฟอยู่ชิดกับทางเข้า ($x/D=0.375$) จึงกล่าวได้ว่าเชื้อเพลิงไม้ยางพาราเป็นส่วนช่วยให้เกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟต์ได้ดีมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของTGA และผลของการจำลอง โดยที่อิทธิพลของการไหลภายในเตาก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ช่วยให้การเผาไหม้เกิดได้ดีขึ้นเช่นกัน เนื่องจากการไหลของอากาศทุติยภูมิทำให้เกิดการไหลย้อนกลับและการคลุกเคล้าเชื้อเพลิงกับอากาศที่ดีมากยิ่งขึ้นดังที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ นอกจากนี้การไหลปั่นป่วนจะยังช่วยให้เกิดการถ่ายเทพลังงานไปทั่วห้องเผาไหม้ช่วย แต่จากรูป 5.16 กลับพบว่าที่ผนังเตาของกรณีลมทุติยภูมิ 60% มีอุณหภูมิ 1100 °C ที่ลมทุติยภูมิ 65% ผนังเตามีอุณหภูมิ 1000 °C และที่ลมทุติยภูมิ 70% ผนังเตามีอุณหภูมิ 900 °C ซึ่งเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จึงทำเป็นกราฟเทียบอุณหภูมิที่ตำแหน่ง x/D ต่อไป



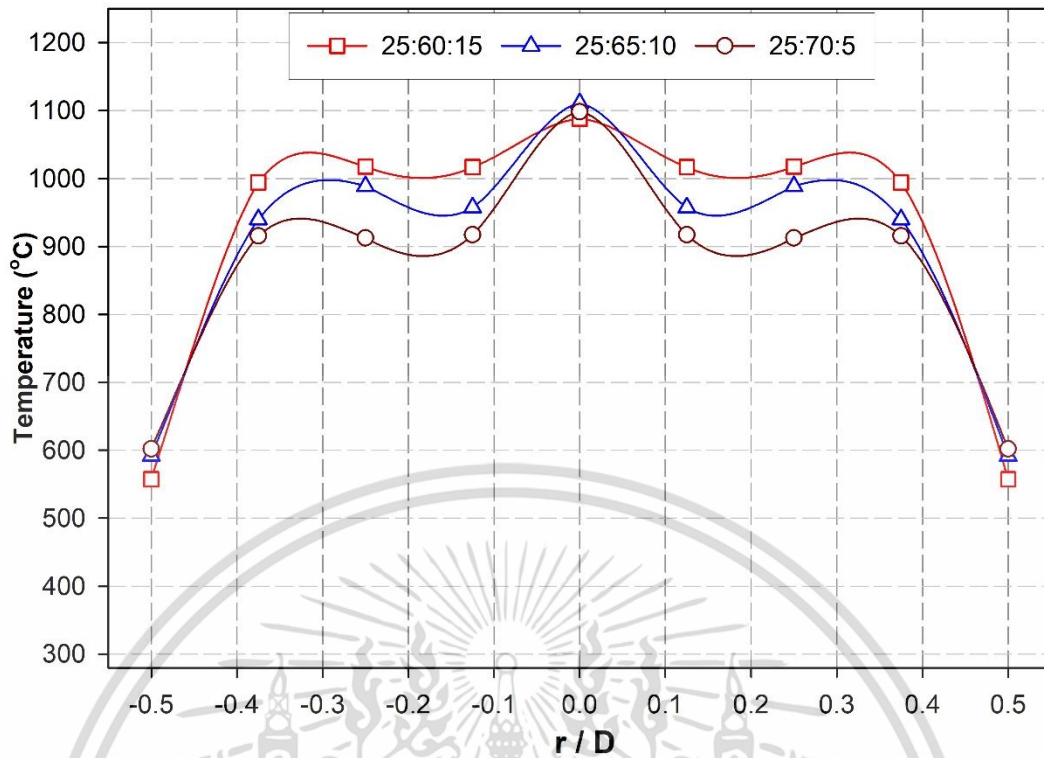
รูปที่ 5.18 ผลอุณหภูมิของเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 สัดส่วนอากาศที่ระยะ x/D ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) $x/D=0.875$ (ง) $x/D=1.125$

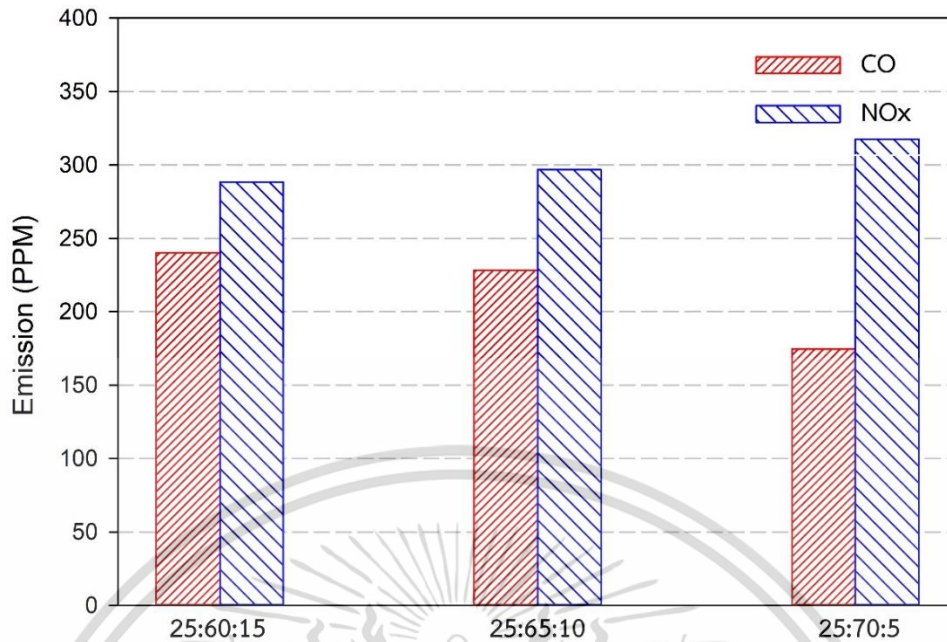
รูปที่ 5.18 ผลอุณหภูมิของเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 สัดส่วนอากาศที่ระยะ x/D ต่าง ๆ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(จ) $x/D = 1.375$

รูปที่ 5.18 ผลอุณหภูมิของเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 สัดส่วนอากาศที่ระยะ x/D ต่าง ๆ (ต่อ)

เพื่อให้เห็นการกระจายอุณหภูมิในระนาบตัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ จึงทำกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยในแต่ละระยะ x/D ดังแสดงในรูป 5.18 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่กลางเตาของทุกอัตราส่วนอากาศเริ่มต้นที่ 900°C ที่ $x/D = 0.375$ จนถึง 1100°C ที่ $x/D = 1.375$ โดยการกระจายอุณหภูมิไปยังผนังของห้องเผาไหม้ช่วย ($r/D = 0$) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของลมทุติยภูมิที่เพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันระหว่างกลางเตากับผนังเตา ($0 < r/D < 0.5$) พบว่าการกระจายของอุณหภูมิกับต่ำลงเมื่อมีการเพิ่มลมทุติยภูมิ แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F ratio) ที่มีผลต่ออุณหภูมิของการเผาไหม้ โดยที่อัตราส่วนอากาศ (25:60:15) พบว่าอากาศที่เข้าไปทำปฏิกิริยาในส่วนของห้องเผาไหม้ช่วยมีเพียง 85% ของอากาศทั้งหมดในห้องเผาไหม้ ทำให้มีอัตราส่วนอากาศเกินในห้องเผาไหม้ช่วยน้อยลง จึงเป็นการลดภาระในการเพิ่มอุณหภูมิ ในทางกลับกันที่สัดส่วนลม 25:70:5 พบว่าอากาศที่เข้าไปทำปฏิกิริยาในส่วนของห้องเผาไหม้ช่วยมีเพียง 95% ของอากาศทั้งหมดในห้องเผาไหม้ ทำให้มีอัตราส่วนอากาศเกินมากกว่ากรณีข้างต้น ซึ่งเป็นการเพิ่มภาระในการเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้อุณหภูมิที่ ระยะ $0 < r/D < 0.5$ มีค่าต่ำลงเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนอากาศทุติยภูมิ

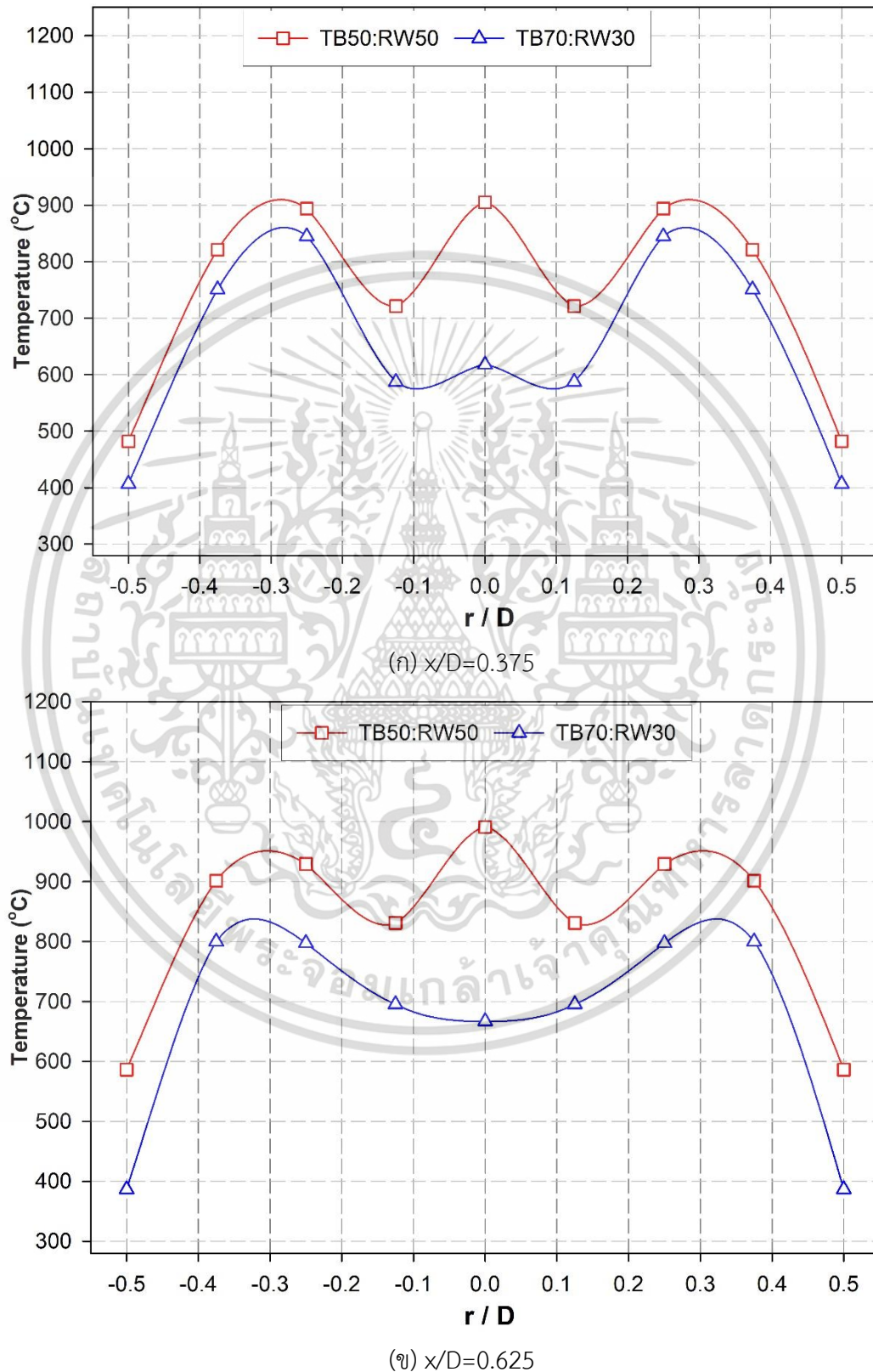


รูปที่ 5.19 ปริมาณมลพิษที่วัดจากไอเสียในกรณี เชื้อเพลิงผสมTB50:RW50

จากรูปที่ 5.19 ผลการวัดแก๊สไอเสียในกรณีเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 พบว่าผลของ NO_x ไม่แตกต่างจากผลของTB70:RW30 มากนัก เนื่องจากองค์ประกอบเชื้อเพลิงมี N ต่ำ อีกทั้งเผาไหม้ที่อัตราส่วนอากาศเกิน 15% จึงทำให้ NO_x อาจเกิดได้เนื่องจาก Thermal NO_x โดยอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาอยู่ที่ห้องเผาไหม้หลักที่ประมาณ 1060°C ซึ่งอุณหภูมิก็คงสูงไม่ถึงอุณหภูมิที่ทำให้เกิด Thermal NO_x อย่างมีนัยยะสำคัญนั่นเอง (1300°C) แต่ก็ยังคงเกินค่ามาตรฐานของอุตสาหกรรมที่มีการควบคุมไว้ที่ 200PPM ในส่วน CO จะมีปริมาณมากกว่าในกรณีของเชื้อเพลิงผสมTB70:RW30 แต่ก็ยังคงมีในปริมาณที่ต่ำกว่าที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้ไม่เกิน 690PPM ซึ่ง CO ที่เพิ่มมากขึ้นเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์รวมถึงอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการแตกตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้น ซึ่งจากกรณีของอากาศ 25:60:15 จะมีมลพิษ CO มากที่สุดที่ 245 PPM และมีค่าลดลงเป็น 220 PPM และ 175 PPM ในสัดส่วนอากาศ 25:65:10 25:70:5 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณอากาศส่วนเกินที่ไม่เท่ากันในห้องเผาไหม้ช่วย โดยจะมีอากาศส่วนเกินน้อยในกรณี 25:60:15 จึงเป็นสาเหตุให้มีปริมาณ CO ในแก๊สไอเสียมาก แต่ในทางตรงกันข้ามในกรณี 25:70:5 มีปริมาณอากาศเกินในห้องเผาไหม้ช่วยเยอะทำให้เกิด CO น้อยนั่นเอง

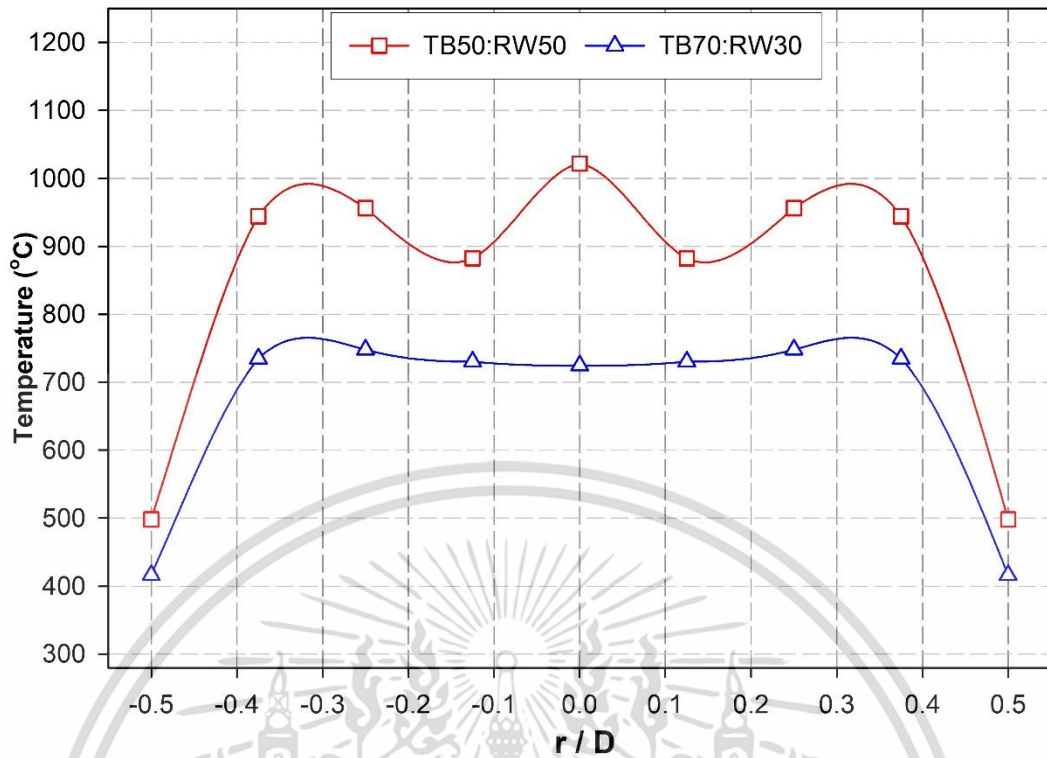
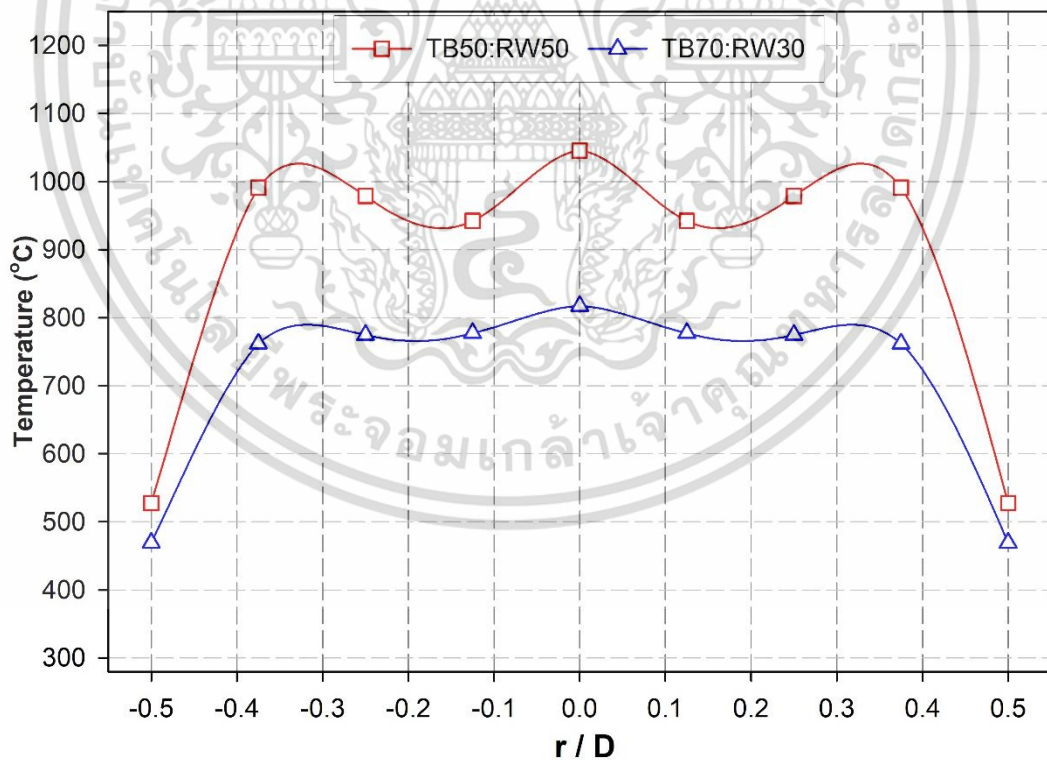
5.3.3 เปรียบเทียบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนผสมไม้ไผ่ทอรีไฟต์กับไม้ยางพารา 70:30 50:50 เปอร์เซนต์โดยมวล ที่สัดส่วนอากาศปฐมภูมิ:ทุติยภูมิ:ตติยภูมิ 25:70:5 ตามลำดับ

(1) ผลของอุณหภูมิ



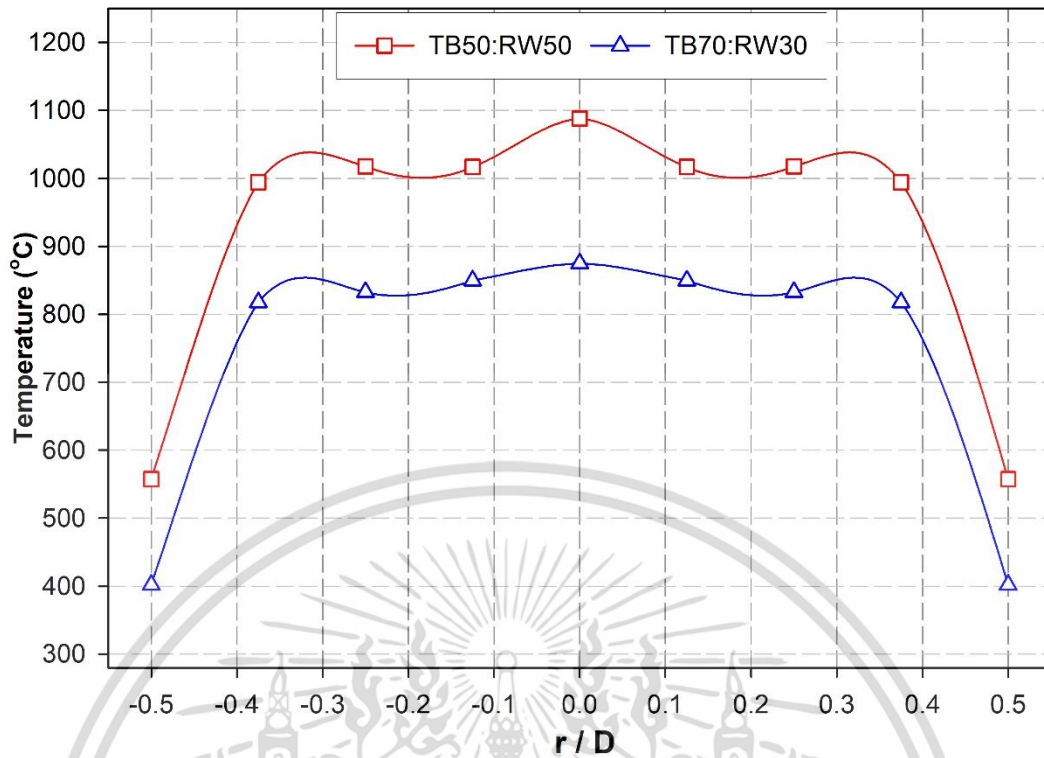
รูปที่ 5.20 ผลของอุณหภูมิที่ในแต่ละสัดส่วนของการผสมเชื้อเพลิงที่ระยะ x/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) $x/D=0.875$ (ง) $x/D=1.125$

รูปที่ 5.20 ผลของอุณหภูมิที่ในแต่ละสัดส่วนของการผสมเชื้อเพลิงที่ระยะ x/D (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

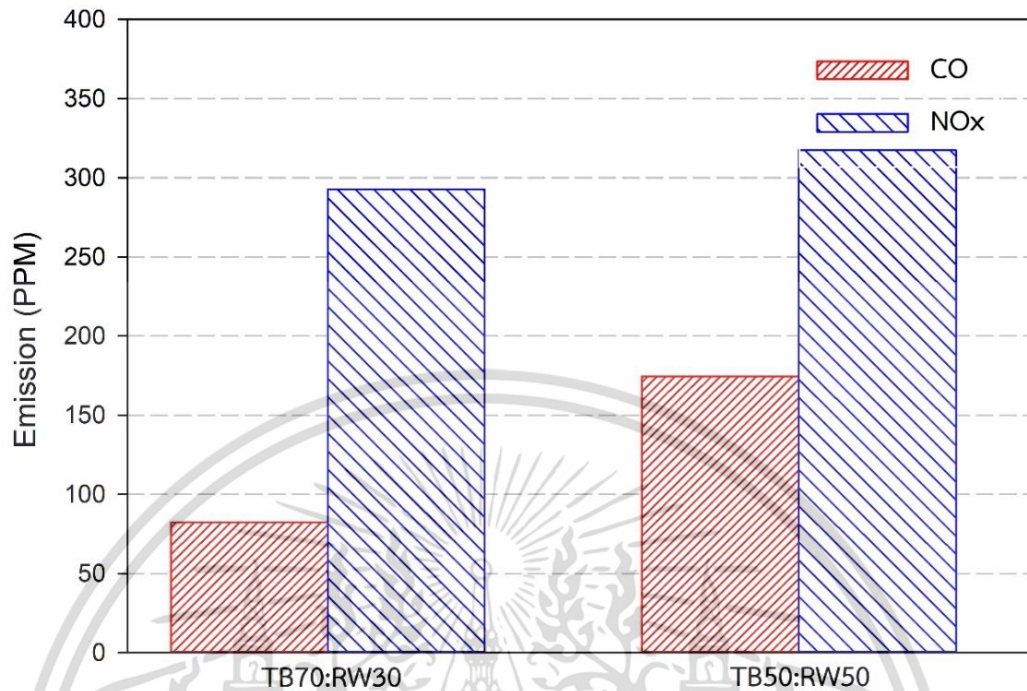


(จ) 1.375

รูปที่ 5.20 ผลของอุณหภูมิที่ในแต่ละสัดส่วนของการผสมเชื้อเพลิงที่ระยะ x/D (ต่อ)

จากผลเปรียบเทียบของการกระจายอุณหภูมิของเชื้อเพลิงผสมไม้ไผ่ทอรีไฟต์และไม้ยางพารา ที่อัตราส่วน 70:30 และ 50:50 ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก มีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อมีการผสมไม้ยางพาราเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการพิสูจน์ถึงการสนับสนุนกันของพฤติกรรม การเผาไหม้ที่ได้ทำการจากผลของ TGA โดยการผสมไม้ยางพาราทำให้สามารถลดการล่าช้าในการจุดติดของเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟต์ (Ignition delay) ดังแสดงในรูปที่ 5.20 อุณหภูมิที่กลางเตาที่ตำแหน่ง $x/D=0.375$ ซึ่งเป็นฐานของเปลวไฟ ของเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 มีอุณหภูมิตั้งอยู่ที่ประมาณ 900°C ในขณะที่เชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 มีอุณหภูมิตั้งอยู่ที่ประมาณ 400°C เท่านั้นซึ่งสอดคล้องกันกับผลของการจำลอง หรือกล่าวให้ได้อีกนัยหนึ่งว่าในสนามการไหลที่เดียวกัน สัดส่วนอากาศเกินเท่ากัน (Excess air) อุณหภูมิเริ่มต้นของเตาและอากาศเท่ากัน ดังนั้นอุณหภูมิที่สูงขึ้นในห้องเผาไหม้เกิดจากพลังงานความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาของการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งไม้ไผ่ทอรีไฟต์เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง แต่ที่ส่วนผสม TB70:RW30 กลับมีอุณหภูมิต่ำกว่าเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 แสดงถึงการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ โดยเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 มีความร้อนในห้องเผาไหม้หลักที่ 950°C ในขณะที่เชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 มีความร้อนในห้องเผาไหม้หลักที่ 1060°C

(2) ผลของมลพิษ



รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบปริมาณมลพิษที่วัดได้จากไอเสียของเชื้อเพลิงผสมทั้ง 2 กรณี

รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบมลพิษที่วัดได้จากไอเสียของเตาเผาที่อัตราส่วนอากาศปฐมภูมิ:ทุติยภูมิ:ตติยภูมิ 25:70:5 ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าปริมาณ NO_x ที่วัดได้ของเชื้อเพลิงผสมทั้ง 2 มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ที่เป็นส่วนผสม ทั้งไม่เฟอโรไฟต์และไม่ย่างพาราต่างก็มี N ในองค์ประกอบต่ำ ทำให้เราสามารถตัดประเด็นเรื่อง fuel NO_x ในส่วนของ Prompt NO_x ก็เป็นอีกส่วนที่เราตัดไปเนื่องจากทุกกรณีที่ทำการศึกษาคือใช้อากาศเกิน 15% อีกทั้งกรณีเชื้อเพลิงชีวมวล prompt NO_x จะมีความสำคัญน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยเหลือเพียงสาเหตุเดียวที่สามารถทำให้เกิด NO_x นั่นก็คือ Thermal NO_x ซึ่ง NO_x ที่วัดได้จากไอเสียของทั้ง 2 กรณีนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่กรณี TB50:RW50 จะมี NO_x สูงกว่า ที่สอดคล้องกับผลของอุณหภูมิสูงสุดที่วัดภายในห้องเผาไหม้หลักที่เชื้อเพลิง TB50:RW50 มีอุณหภูมิสูงกว่าเชื้อเพลิง TB50:RW50 110°C นั้นเอง จึงทำให้เกิด NO_x มากกว่าประมาณ 30 PPM

รูปที่ 5.21 แสดงความเข้มข้นของ CO ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 และ TB50:RW50 ที่คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์มีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น สภาพการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป การผสมคลุกเคล้ากันไม่ดีพอและปริมาณอากาศไม่เพียงพอ อีกทั้งสามารถเกิดได้จากการแตกสลายของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผลการตรวจวัด CO ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 และ TB50:RW50 วัดค่าได้ประมาณ 80 และ 175 PPM ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกันกับผลของการจำลองซึ่งจากรูปที่ 5.11 โดยในกรณีของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TB50:RW50 พบว่าปริมาณออกซิเจนที่ตำแหน่ง $x/D = 0.375$ และ $r/D=0$ (กลางเตา) มีปริมาณออกซิเจนต่ำ (เข้าใกล้ 0) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งที่มีอัตราส่วนเชื้อเพลิงมากกว่าอากาศส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์แล้วจึงเกิดเป็น CO ในขณะที่กรณีผลการจำลองของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 ไม่พบบริเวณที่ออกซิเจนต่ำ จึงไม่แสดงให้เห็นถึงจุดที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างรุนแรงและไม่มีการขาดอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ในทุกบริเวณ ที่เป็นการส่งผลให้เกิด CO น้อย แต่อย่างไรก็ตามผลของ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตรวจวัดได้เป็นคาร์บอนที่เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์อยู่ในรูปคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่ไม่สามารถยืนยันถึงประสิทธิภาพของการเผาไหม้เนื่องจากมีเชื้อเพลิงบางส่วนกองอยู่ในห้องเผาไหม้ช่วยในกรณีเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 ดังแสดงในรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 เชื้อเพลิงที่กองอยู่ในห้องเผาไหม้ช่วยในกรณีเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30

(*)- Combusting Particles -(*)

Fate	Volatile Content (kg/s)			Char Content (kg/s)		
	Initial	Final	onv	Initial	Final	onv
Incomplete	6.372e-06	0.000e+00	100.00	3.617e-06	2.533e-06	29.96
Escaped - Zone 23	7.559e-05	0.000e+00	100.00	4.290e-05	8.990e-06	79.05
Net	8.196e-05	0.000e+00	100.00	4.652e-05	1.152e-05	75.23

(ก) TB70:RW30

(*)- Combusting Particles -(*)

Fate	Volatile Content (kg/s)			Char Content (kg/s)		
	Initial	Final	onv	Initial	Final	onv
Incomplete	9.747e-06	0.000e+00	100.00	4.290e-06	1.993e-06	53.55
Escaped - Zone 23	8.629e-05	0.000e+00	100.00	3.799e-05	1.026e-05	73.00
Net	9.604e-05	0.000e+00	100.00	4.228e-05	1.225e-05	71.02

(ข) TB50:RW50

รูปที่ 5.23 ผลเฉลี่ยของการเผาไหม้อุณหภูมิด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โดยจากเปอร์เซ็นต์ของการเผาไหม้อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในรูปที่ 5.23 พบว่าอุณหภูมิของกรณีเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ 29.96%

และเมื่ออุณหภูมิที่หลุดออกไปจากทางออกห้องเผาไหม้ถึง 79.23% ส่วนในกรณีของ TB50:RW50 ไม่ว่กรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าอนุภาคที่การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ถึง 53.55% แต่มีอนุภาคซาร์ที่ออกจากห้องเผาไหม้คิดเป็น 73% ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดลองจริงที่สามารถวัด CO จากก๊าซไอเสียในกรณีของTB70:RW30 ได้น้อยกว่า TB50:RW50 เนื่องจาก TB50:RW50 เกิดการเผาไหม้ของอนุภาคซาร์ที่ไม่สมบูรณ์ในช่วงของเตาเผาไหม้ จึงทำให้ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมามากกว่านั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์บทนี้กล่าวถึงข้อสรุปจากผลที่ได้จากการทดลองของเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (TGA) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น และการเผาไหม้ในหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น

6.1 สรุปผลการทดลองจากเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (TGA)

งานวิจัยส่วนนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมไม้ไผ่ทอรีไฟด์และไม้ยางพารา ด้วยการใช้เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักสาร พบว่า

1. อุณหภูมิติดไฟของเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์ และไม้ยางพาราจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารระเหยในองค์ประกอบของเชื้อเพลิงและอุณหภูมิในการเริ่มต้นการปลดปล่อยสารระเหย ซึ่งการผสมกันของเชื้อเพลิงเป็นการช่วยให้ไม้ไผ่ทอรีไฟด์ที่มีสารระเหยน้อยกว่าสามารถจุดติดไฟได้เร็วยิ่งขึ้น เนื่องจากได้รับพลังงานจากการจุดติดไฟของสารระเหยของไม้ยางพาราที่มีสารระเหยมากกว่า ทำให้อุณหภูมิติดไฟของเชื้อเพลิงผสมต่ำลง

2. อัตราการลดลงของน้ำหนักที่มากที่สุด (R_m) ของเชื้อเพลิงผสมพิสูจน์ถึงการสนับสนุนกันของการเผาไหม้ โดยอัตราการเผาไหม้จะแปรผันตามสัดส่วนของผสมไม้ยางพาราที่มากขึ้น เพราะพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของไม้ยางพาราเป็นตัวเร่งให้ไม้ไผ่ทอรีไฟด์ที่ผสมอยู่เผาไหม้ได้เร็วมากขึ้นส่งผลให้อัตราการลดลงของน้ำหนักมากขึ้นด้วย

3. อุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมจะมีค่าใกล้เคียงกับไม้ไผ่ทอรีไฟด์ ซึ่งมีความเชื่อมโยงกับเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวของไม้ไผ่ทอรีไฟด์ที่มีสูงกว่าและค่าความร้อนสูงกว่า แต่จะใช้เวลาในการเผาไหม้น้อยลงตามสัดส่วนของการผสมไม้ยางพารา

6.2 สรุปผลการทดลองจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น

งานวิจัยส่วนนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมไม้ไผ่ทอรีไฟด์และไม้ยางพาราที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (CFD)

1. อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 มีอุณหภูมิอยู่ที่ 1500K ต่ำกว่าเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 ที่มีอุณหภูมิอยู่ที่ 1900K แสดงให้เห็นถึงการสนับสนุนกันของการเผาไหม้ที่สอดคล้องกันกับผลของเชื้อเพลิงผสมจาก TGA โดยจะเห็นว่าในกรณีของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 จุดที่มีอุณหภูมิสูงในห้องเผาไหม้ช่วยที่เป็นเสมือนฐานของเปลวไฟ (Flame Front) อยู่ห่างออกจากหัวพ่นเชื้อเพลิงฝุ่น (Pilot) มากกว่ากรณีของ TB50:RW50 ซึ่งแสดงให้เห็นความล่าช้าของการติดไฟ (Ignition delay)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปริมาณสัดส่วนโดยมวลของสารระเหยในกรณีเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 มีความเข้มข้นน้อยกว่า TB50:RW50 ซึ่งสอดคล้องกันกับองค์ประกอบของเชื้อเพลิง เนื่องจากไม้ยางพารา (Rubber wood) เป็นเชื้อเพลิงที่มีสารระเหยมากทำให้เชื้อเพลิงผสมที่มีสัดส่วนของไม้ยางพารามากกว่าจะมีความเข้มข้นสูงกว่า

3. ปริมาณสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน (O_2) แสดงให้เห็นถึงการสนับสนุนกันของเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 ที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำมากที่ตำแหน่งกลางห้องเผาไหม้ช่วย ที่สอดคล้องกันกับผลของอุณหภูมิที่สรุปไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งบริเวณที่ออกซิเจนต่ำเป็นแสดงถึงอัตราส่วนเชื้อเพลิงเกิน (Fuel rich)

4. การเกิดออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) สามารถทำลายอุปกรณ์ให้ฟูก่อนเสียหายได้ โดยซัลเฟอร์ที่เกิดขึ้นในทั้ง 2 กรณีมาจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 และ TB50:RW50 ที่มีซัลเฟอร์ในองค์ประกอบ 0.03 และ 0.02 % ตามลำดับ ซึ่งขัดแย้งกับผลจากแบบจำลองที่พบว่าสัดส่วนโดยมวลของ SO_x ต่ำที่กรณีเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 แต่กลับมีสัดส่วนโดยมวลสูงที่กรณีของ TB50:RW50 แสดงให้เห็นว่าในกรณีของ TB70:RW30 มีอนุภาคที่ไม่ได้ถูกเผาไหม้อยู่หลายส่วน เมื่ออนุภาคไม่เกิดการเผาไหม้ก็ไม่มีการแตกสลายของเชื้อเพลิง ทำให้ซัลเฟอร์ไม่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดสัดส่วน SO_x ในปริมาณน้อย โดยในกรณีของ TB50:RW50 พบว่ามีสัดส่วนโดยมวลของ SO_x เกิดขึ้นสูงที่ตำแหน่งฐานของเปลวไฟที่มีอุณหภูมิสูง อันเนื่องมาจากการแตกสลายของอนุภาคเชื้อเพลิง และให้พลังงานความร้อนออกมา ส่วนของซัลเฟอร์ก็ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนรอบข้างเกิดเป็น SO_2 จึงเป็นที่สังเกตให้ได้ว่า SO_x จะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความเข้มข้นของเปลวไฟสูงนั่นเอง

6.3 สรุปผลการทดลองจากหัวเผาเชื้อเพลิงชนิดฝุ่น

งานวิจัยส่วนนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมไม้ไผ่ทอไรไฟด์และไม้ยางพารา ด้วยผลของอุณหภูมิที่ทำการวัดและมลพิษที่วัดจากไอเสีย

1. ผลของการกระจายอุณหภูมิในกรณีของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 ที่อัตราส่วนอากาศปฐมภูมิ:ทุติยภูมิ:ตติยภูมิ ที่ 25:60:15 25:65:10 และ 25:70:5 ตามลำดับ พบว่าบริเวณอุณหภูมิสูงที่กลางห้องเผาไหม้ช่วยที่เป็นเสมือนฐานของเปลวไฟมีอยู่ที่ $x/D = 1, 0.8$ และ 0.8 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการล่าช้าของการจุดติดไฟ (Ignition delay) รวมถึงการไหลย้อนกลับที่กลางเตา โดยเมื่อเพิ่มอากาศทุติยภูมิจะทำให้มีการไหลย้อนกลับที่กลางเตามากขึ้นอันเนื่องมาจากการไหลปั่นป่วนดังแสดงในผลของสนามการไหลจากการจำลอง

2. ผลของการกระจายอุณหภูมิกรณี TB50:RW50 ที่อัตราส่วนอากาศปฐมภูมิ:ทุติยภูมิ:ตติยภูมิ ที่ 25:60:15 25:65:10 และ 25:70:5 ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิกลางเตามีค่าใกล้เคียงกันและเริ่มสูงขึ้นที่ตำแหน่ง x/D เดียวกันอยู่ที่ประมาณ 1000-1100 องศาเซลเซียส ซึ่งฐานของเปลวไฟอยู่ติดกับ

ต้นทางของห้องเผาไหม้ช่วย ที่ไม่แสดงถึงการล่าช้าของการจุดไฟ (Ignition delay) แสดงให้เห็นถึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสนับสนุนกันของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมที่ทำการศึกษามาจาก TGA พบว่าระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดติดไฟน้อยลงเมื่อสัดส่วนผสมไม้ยางพาราเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกันกับผลของการเผาไหม้จริงในหัวเผาชนิดเชื้อเพลิงผง

3. จากผลของการกระจายอนุกรมของเชื้อเพลิงผสมทั้ง 2 กรณีพบว่า ที่อัตราส่วนอากาศ 25:70:5 มีการกระจายของอนุกรมออกไปจากจุดศูนย์กลางเตา ทำให้ที่จุดกลางเตาอนุกรมต่ำลง ส่วนที่ผนังเตากลับมีอนุกรมมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอากาศ 25:65:10 และ 25:60:15 ตามลำดับ สรุปได้ว่าเนื่องจากลมทุติยภูมิเป็นลมที่ทำให้เกิดการหมุนวนทำให้เกิดการกระจายของอนุกรมได้ดีขึ้น จากการพาความร้อนไปยังพื้นที่ผนังมากขึ้นที่กลางเตาจึงสูญเสียความร้อน ทำให้อนุกรมต่ำลง หรือสามารถอธิบายได้อีกว่า การที่การกระจายของอนุกรมต่ำลงที่อัตราส่วนลมทุติยภูมิ 70% มาจากอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F ratio) ที่มีผลต่ออนุกรมของการเผาไหม้ โดยพบว่าอากาศที่เข้าไปทำปฏิกิริยาในส่วนของห้องเผาไหม้ช่วย 85% ของอากาศทั้งหมดในกรณีของสัดส่วนอากาศ 25:60:15 ทำให้มีอัตราส่วนอากาศเกินในห้องเผาไหม้ช่วยน้อยลงจึงเป็นการลดภาระในการเพิ่มอนุกรม ในทางกลับกันที่สัดส่วนลม 25:70:5 พบว่าอากาศที่เข้าไปทำปฏิกิริยาในส่วนของห้องเผาไหม้ช่วย 95% ของอากาศทั้งหมดในห้องเผาไหม้ทำให้มีอัตราส่วนอากาศเกินมากกว่ากรณีข้างต้นซึ่งเป็นการเพิ่มภาระในการเพิ่มอนุกรม ทำให้อนุกรมที่ ระยะ $0 < r/D < 0.5$ มีค่าต่ำลงเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนอากาศทุติยภูมิ

4. ผลของการวัดมลพิษ NO_x ที่วัดได้จากแก๊สไอเสียพบว่าในทุกกรณีที่สามารถวัดค่า NO_x ได้เกินมาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้ที่ 200 PPM ทั้งสิ้น โดยในกรณีของเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 วัด NO_x จากแก๊สไอเสียได้เฉลี่ย 296.58 PPM ส่วนในกรณีของเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50 วัด NO_x จากแก๊สไอเสียได้เฉลี่ย 300.85 PPM ซึ่งมีความแตกต่างกันน้อยเนื่องจากเชื้อเพลิงทั้ง 2 ที่ผสมกันต่างก็มี N ในองค์ประกอบต่ำจึงสามารถตัดประเด็นเรื่อง Fuel NO_x ในส่วนของ Prompt NO_x เป็นอีกส่วนที่ตัดไปเนื่องจากทุกกรณีที่ทำการศึกษาจะใช้อากาศเกิน 15% อีกทั้งกรณีเชื้อเพลิงชีวมวล prompt NO_x จะมีความสำคัญน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยเหลือเพียงสาเหตุเดียวที่สามารถทำให้เกิด NO_x นั่นก็คือ Thermal NO_x ซึ่งเกิดในสภาวะอุณหภูมิสูงประมาณ 1300°C บางครั้งเรียกว่า Zeldovich-NO ซึ่งพบว่าในกรณีของ TB50:RW50 มี NO_x ในไอเสียมากกว่ากรณีของ TB70:RW30 เล็กน้อย เนื่องจากมีอนุกรมในห้องเผาไหม้สูงกว่านั่นเอง

5. . ผลของการวัดมลพิษ CO ที่วัดได้จากแก๊สไอเสีย พบว่าในทั้ง 2 กรณีวัดค่า CO ได้ต่ำกว่ามาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษที่กำหนดไว้ 690 PPM ซึ่งการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์มีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น สภาวะการเผาไหม้แบบส่วนผสมหนาเกินไป การผสมคลุกเคล้ากันไม่ดีพอและปริมาณอากาศไม่เพียงพอ อีกทั้งสามารถเกิดได้จากการแตกสลายของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่ง CO ที่วัดได้จากแก๊สไอเสียของไหม้เชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 และ TB50:RW50 อยู่ที่ 80 และ 175 PPM ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกันกับผลการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงให้เห็นถึงจุดที่มีอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงหนาในห้องเผาไหม้ (สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนเหลือน้อย) ทำให้เกิด CO มากกว่าในกรณีของเชื้อเพลิงผสม TB50:RW50

อย่างไรก็ตามผลของ CO ที่บ่งบอกถึงมลพิษที่ออกมาจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ไม่ได้เป็นตัวชี้วัดว่าเชื้อเพลิงผสม TB70:RW30 การเผาไหม้ที่ตีมากกว่า TB50:RW50 จากที่มีปริมาณ CO ในไอเสียน้อยกว่า แต่เนื่องจาก CO ที่เก็บค่าได้จากไอเสียเป็นเพียงแก๊สร้อนที่หลงเหลือจากการเผาไหม้เท่านั้นแต่ถ้าหากพูดถึงประสิทธิภาพของการเผาไหม้ต้องมีการเก็บตัวอย่างซีเอ็นเอ เพื่อหาสัดส่วนคาร์บอนที่หลงเหลืออยู่ว่ามีปริมาณมากหรือน้อยเพียงใด

6.4 ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองควรมีการเป็น เล้า หรืออนุภาคที่หลงเหลืออยู่ในทั้งห้องเผาไหม้ช่วยและห้องเผาไหม้หลัก รวมถึงอนุภาคที่หลุดออกจากทางออกของห้องเผาไหม้หลักมาทำการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่หลงเหลืออยู่เพื่อนำมาศึกษาเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่ไม่เกิดการเผาไหม้ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

2. การเตรียมการทดลองของเชื้อเพลิงผสม ควรทำเครื่องผสมที่สามารถผสมเชื้อเพลิงได้ในปริมาณมากและผสมเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดให้เป็นเนื้อเดียวกันได้ดี หรือ เพิ่มไซโลเก็บเชื้อเพลิงผงบ จากนั้นทำการปรับค่าความเร็วของสกรูพิดที่ป้อนเชื้อเพลิงผงบเข้าสู่ห้องเผาไหม้ให้ได้ตามอัตราไหลของเชื้อเพลิงที่ต้องการในเชื้อเพลิงแต่ละชนิด

3. การเก็บค่าอุณหภูมิของการทดลองจริงในหัวเผา นั้น เป็นการเก็บค่าในด้านเดียวเท่านั้น และใช้วิธีชั่งตำแหน่งตามแนวแกนรัศมี ซึ่งผลของการทดลองเป็นการสมมุติว่ามีการกระจายอุณหภูมิที่สมมาตรกัน แต่หากต้องการความแม่นยำของการกระจายอุณหภูมิ ควรหาวิธีเก็บค่าที่แท้จริงในแต่ละตำแหน่งรอบ ๆ ทรงกระบอกของห้องเผาไหม้ เนื่องจากในความเป็นจริงมีแรงโน้มถ่วงทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงตกลงสู่ด้านล่างของห้องเผาไหม้ หากในอนาคตมีอุปกรณ์และเครื่องมือที่ทันสมัยมากยิ่งขึ้นที่สามารถเก็บผลอุณหภูมิได้แม่นยำในทุก ๆ ตำแหน่งของห้องเผาไหม้ที่แท้จริงได้ จะเป็นผลดีต่อการวิเคราะห์ผลการทดลองและการทำการทดลองต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] รายงานสถิติพลังงาน 2018 สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน หน้า 20-23
- [2] Li Xiang-guo, Ma Bao-guo, Xu Li, Hu Zhen-wu, Wang Xin-gang (2006), **Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blend with high ash coal and waste tyres**”, *Thermochemica Acta* 441,
- [3] D.Vamvuka, N.El Chatib, S.Sfakiotakis (2011), **Measurements of Ignition Point and Combustion Characteristics of Biomass Fuels and their Blends with Lignite**, Conference Paper
- [4] Marisamy Muthuraman, Tomoaki Namioka, Kunio Yoshikawa (2009) , **A comparative study on co-combustion performance of municipal solid waste and Indonesian coal with high ash coal with high ash Indian coal: A thermogravimetric analysis**, *Fuel Processing Technology* 91, December, 550-558
- [5] Zhijia Liu, Wanhe Hu, Zehui Jiang, Bingbing Mi and Benhua Fei (2015), **Investigating combustion behaviors of bamboo, torrefied bamboo, coal and their respective blends by thermogravimetric analysis**, *Renewable Energy* 87, 346-352
- [6] Bingbing Mi, Zhijia Liu, Wanhe Hu, Penglian Wei, Zehui Jiang, Benhua Fei (2016), **Investigating pyrolysis and combustion characteristics of torrefied bamboo, torrefied wood and their blends**, *Bioresour. Technol.* 209, 50-55
- [7] Haipeng Jiang, Mingshu Bi, Bei Li, Bo Gan, Wei Gao (2018), **Combustion behaviors and temperature characteristics in pulverized biomass dust explosions**, *Renewable Energy* 122, 45-54
- [8] Jun Li, Artur Brzdekiewicz, Weihong Yang, Wlogzimirz Blasiak (2012), **Co-firing based on biomass torrefaction in pulverized coal boiler with aim of 100% fuel switching**, *Renewable Energy* 99, 344-354
- [9] Xinzhuo Li, Minsung Choi, Kibeom Kim, Yeseul Park, Yonmo Sung, Masakazu Muramatsu (2019), **Effects of pulverized coal partical size on flame structure in a methane-assisted swirl burner**, *Fuel* 242, 68-76
- [10] Igor Bonefacic, Bernard Frankovic, Anes Kazagic (2015), **Cylindrical partical modelling in pulverized coal and biomass co-firing process**, *Applied Thermal Engineering* 78, 74-81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Xiaohan Ren, Rui San, Xiaoxiao Meng, Nikita Vorobive, Martin Schiemann, Yiannis A. Levendis (2017), **Carbon, sulfur and nitrogen oxide emission from combustion of pulverized raw and torrefied biomass**, Fuel 188, 310-323
- [12] Jun Li, Enrico Biagini, Weihong Yang, Leonardo Tognotti, Włodzimierz Blasiak (2013), **Flame characteristics of pulverized torrefied-biomass combusted with high-temperature air**, Combustion 160, 2585-2594
- [13] J. Ballester, J. Barroso, L.M. Cerecedo, R. Ichaso (2005), **Comparative study of semi-industrial-scale flames of pulverized coals and biomass**, Combustion and Flame 141, 204-215
- [14] Melissa L. Holtmeyer, Benjamin M. Kumfer, Richard L. Axelbaum (2012), **Effects of biomass particle size during cofiring under air-fired and oxyfuel conditions**, Applied Energy 93, 606-613
- [15] Hesameddin Fatehi, Wubin Weng, Mario Costa, Zhongshan Li, Miriam Rabacal, Marcus Alden, Xue-Song Bai (2019), **Numerical simulation of ignition mode and ignition delay time of pulverized biomass particles**, Combustion 206, 400-410
- [16] Aidin Panahi, Mahmut Tarakcioglu, Martin Schiemann, Michael Delichatsios, Yiannis A. Levendis (2018), **On the particle sizing of torrefied biomass for co-firing with pulverized coal**, Combustion and Flame 194, 72-84
- [17] ฐานิตย์ เมธิยานนท์ 2559 “ทฤษฎีและเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและชีวมวล” มินเซอรัลส์ซีพีพลาย
- [18] Prabir Basu, **Biomass Gasification and pyrolysis practical design and theory**,
- [19] Turns, S.R. 1988. **An Introduction to Combustion: Concepts and Applications Second Edition**, McGraw-Hill, New York, NY.
- [20] วัตร เจริญสุข, 2561, **พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการประยุกต์ในงานวิศวกรรม**, กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [21] **ANSYS FLUENT ver.12.0**. Theory guide.
- [22] **Pyris 1 TGA Thermogravimetric Product Note**, PerkinElmer Life and Analytical Sciences, 710 Bridgeport Avenue Shelton, CT 06484-4794 USA, Phone: (800) 762-4000 or (+1) 203-925-4602, www.perkinelmer.com
- [23] http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_airsnd03.html



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

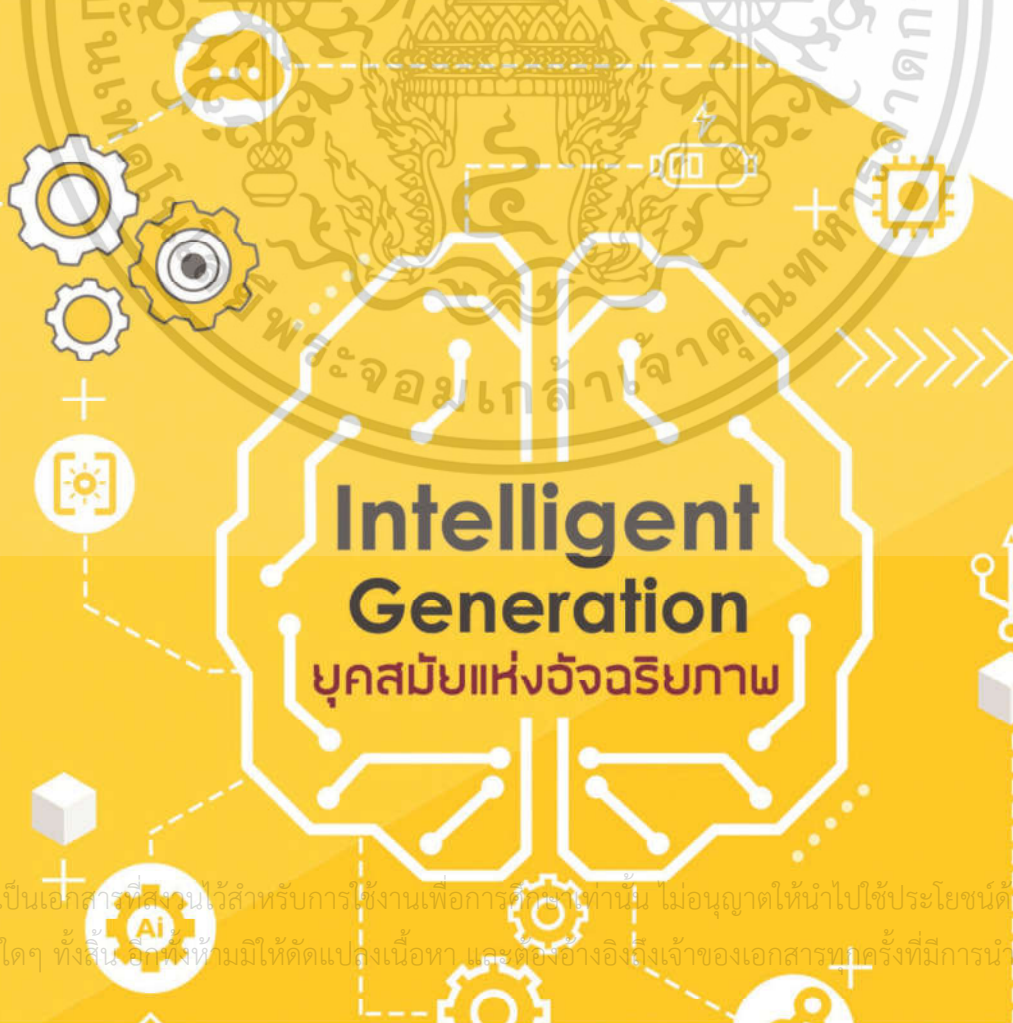


ME NETT 2019

Faculty of Engineering
MAHASARAKHAM UNIVERSITY
The 33rd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33

วันที่ 2-5 กรกฎาคม 2562
ณ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ อุดรธานี



Intelligent Generation บุคคลมัยแห่งจิวจเรียภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญบทความฉบับเต็ม (ต่อ)

บทความ	หน้า
AEC-011	79
AEC-012	86
AEC-013	94
AEC-014	100
AEC-015	108
AEC-016	116
AEC-017	125
AEC-019	135
AEC-020	142
AEC-021	152

ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การ
เปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร

Study on combustion behaviors of rubber wood and torrefied bamboo by
Thermogravimetric analysis

ศัตร์ สร้อยทอง, ฉัตรเฉลิม แก้วชมพู, รังสินันท์ ณ รังษี, จารุวัตร เจริญสุข*

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

*ติดต่อ: jaruwat_ch@kmitl.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 086-0803407, เบอร์โทรสาร 02 329 8352

บทคัดย่อ

บทความนี้เกี่ยวข้องกับผลการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผสมที่ผสมระหว่างไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟด์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเพื่อหาอุณหภูมิติดไฟ อุณหภูมิที่เกิดการเผาไหม้สูงที่สุด (อุณหภูมิที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักมากที่สุด) รวมถึงอุณหภูมิที่สิ้นสุดการเผาไหม้ของทั้งเชื้อเพลิงเดี่ยว และเชื้อเพลิงผสม ซึ่งจากผลการวิเคราะห์จาก TGA พบว่าอุณหภูมิติดไฟของไม้ยางพารา และไม้ไผ่ทอรีไฟด์คือ 262.4 และ 270.6 องศาเซลเซียสตามลำดับ ต่อมาจึงผสมเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์กับไม้ยางพาราที่อัตราส่วน 90:10 80:20 และ 70:30 โดยมีอุณหภูมิติดไฟ 267.2 265.2 และ 263.5 องศาเซลเซียสตามลำดับ การทดสอบนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์ร่วมกับลักษณะการเผาไหม้ของหัวเผาที่ใช้เชื้อเพลิงผง ต่อไป

คำหลัก: เชื้อเพลิงชีวมวล, เชื้อเพลิงผสม, เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร

Abstract

This paper concerns with a study on combustion behaviors of rubber wood, torrefied bamboo, and their blends, by the use of Thermogravimetric analysis (TGA). The propose is to determine the ignition temperature, peak temperature, and burnout temperature of the single fuel and blend fuel. It was found that the ignition temperature of rubber wood and torrefied bamboo were 262.4 and 270.6 degree Celsius respectively. Then the blend fuel of the torrefied bamboo with the rubber wood with the ratio of 90:10, 80:20 and 70:30 provided the ignition temperature of 267.2, 265.2 and 263.5 degree Celsius respectively. The obtained result was useful to improve burner operation with varying ratio of fuel blends.

Keywords: Single fuel, Blends fuel, thermogravimetric analysis

รายการสัญลักษณ์

T_i คืออุณหภูมิจุดติด (Ignition Temperature)	t_i คือระยะเวลาตั้งแต่เริ่มจนถึงจุดติด
T_b คืออุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้ (Burnout Temperature)	t_b คือระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดการเผาไหม้
T_m คืออุณหภูมิที่มีการเผาไหม้สูงสุด (อุณหภูมิที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักมากที่สุด)	
t_m คือระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเผาไหม้สูงสุด	D คือดัชนีของการจุดติด
R_m คืออัตราเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักต่ออุณหภูมิที่มากที่สุด	

1. บทนำ

พลังงานจากสารชีวมวล เป็นพลังงานทดแทนที่กำลังได้รับความสนใจจากอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ในตอนนี้ เนื่องจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังตระหนักถึงสภาวะโลกร้อนและปัญหาสิ่งแวดล้อม ทำให้ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมหันมาสนใจพลังงานหมุนเวียนกันมากขึ้น ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นตัวเลือกหนึ่งของพลังงานทดแทนที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรม อาทิเช่น ฟางข้าว แกลบ ชี้อ้อย และเปลือกไม้ชนิดต่าง ๆ แต่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการอัดแท่งเพื่อให้มีขนาดรูปร่างสม่ำเสมอและความหนาแน่นของพลังงานที่สูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลและชีวมวลผสมด้วยการวิเคราะห์การเผาไหม้ด้วยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเชื้อเพลิง

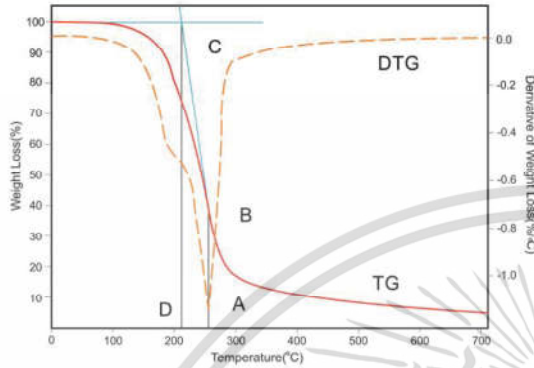
Li Xiang-guo และคณะ[1] ได้ทำการศึกษการเผาไหม้ร่วมของเชื้อเพลิงผสม ระหว่างเชื้อเพลิงถ่านหินที่มีเถ้าสูงกับยางเสีย โดยเขาทำการทดสอบการเผาไหม้ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเชื้อเพลิง (Thermogravimetric analysis หรือ TGA) ที่สามารถดูน้ำหนักของตัวอย่างเชื้อเพลิงที่หายไป(TG) หรืออัตราการหายไปของน้ำหนักตัวอย่าง(DTG) เทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา ภายใต้เงื่อนไขของอัตราการป้อนอากาศและอัตราการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลและอุณหภูมิ โดยเขาหาได้ว่าการ

เผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมของเชื้อเพลิงถ่านหิน มีจุดติดไฟที่อุณหภูมิสูงกว่ายางเสีย ดังนั้นเขาจึงใช้เชื้อเพลิงถ่านหินเป็นหลักแล้วผสมยางเสียเขาไปตามอัตราส่วน 10 30 50 ตามลำดับ ซึ่งผลที่เขาได้พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการติดไฟต่ำลงและใช้เวลาในการเผาไหม้ลดลงอีกด้วย ต่อมา D. Vamvuka ,N. El Chatib และ S. Sfakiotakis [2] ได้สังเกตจุดติดไฟและพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลผสมกับลิกไนต์ โดยมีการหาตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้มาเปรียบเทียบกัน และยังอธิบายพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดรวมถึงเชื้อเพลิงผสมด้วยกราฟ TG และDTG เทียบอยู่กับอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์TGA โดยจากการทดลองของเขาสรุปได้ว่าอุณหภูมิของการติดไฟและการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นหากอนุภาคของเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่ขึ้นและปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงมากขึ้น อีกทั้งยังสรุปว่าเชื้อเพลิงลิกไนต์เมื่อผสมกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่น ๆ จะสามารถเร่งกระบวนการทางเคมีความร้อนโดยพิสูจน์จากดัชนีการจุดติด จุดที่น้ำหนักลดลงมากที่สุด(จุดที่มีการเผาไหม้มากที่สุด) และเวลาที่สั้นที่สุดที่ใช้ในการเผาไหม้

โดยจะสามารถหาอุณหภูมิของจุดที่เกิดการติดไฟได้จากการใช้จุดที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักสารมากที่สุดจากกราฟ(DTG จุดA) แล้วจึงลากตามแนวแกนตั้งไปตัดกับกราฟTG (จุดB) จากนั้นลากตามความชันของกราฟTGเพื่อหาจุดตัดกับเส้นแนนอนของจุดที่มีการเริ่มปลดปล่อยสารระเหย(จุดC) แล้วจึงลากเส้นตามแนวแกนตั้งอีกครั้งเพื่อดูจุดตัดแนนอน(จุดD) ทำให้สามารถหา

AEC – 015

อุณหภูมิของการติดไฟได้จากกราฟ TG และ DTG จากการวิเคราะห์ TGA ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การหาอุณหภูมิติดไฟจากการกราฟวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (TGA) [2]

เมื่อทราบอุณหภูมิของการติดไฟ ได้มีการเปรียบเทียบการจุดติดไฟในเชิงตัวเลขด้วยดัชนีของการติดไฟซึ่งหาได้จาก อัตราการเผาไหม้ที่มากที่สุด เทียบกับเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มกระบวนการจนถึงจุดติดไฟและเวลาที่ใช้งานถึงจุดที่มีการเผาไหม้มากที่สุด

Marisamy Muthuraman [3] ศึกษาประสิทธิภาพของการเผาไหม้ถ่านจากประเทศอินโดนีเซียและถ่านที่มีสัดส่วนถ่านสูงจากประเทศอินเดียผสมกับขยะมูลฝอยด้วยการวิเคราะห์ TGA พบว่าการบำบัดขยะมูลฝอยด้วยความร้อนทำให้ขยะมูลฝอยเป็นผงเหมือนเชื้อเพลิงแข็งทั่วไป ซึ่งทำให้ง่ายต่อการผสมและเผาไหม้กับถ่าน โดยอุณหภูมิติดไฟของเชื้อเพลิงถ่านผสมขยะมูลฝอยจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่สารระเหยปล่อยออกมา ซึ่งเขาได้ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิของการปลดปล่อยสารระเหยและอุณหภูมิติดไฟ พบว่าขยะมูลฝอยมีการปล่อยสารระเหยที่อุณหภูมิต่ำทำให้อุณหภูมิติดไฟมีค่าต่ำกว่าถ่านจากประเทศอินโดนีเซียและประเทศอินเดีย ซึ่งทำให้เขาสรุปได้ว่าอุณหภูมิติดไฟนั้นจะแปรผันตามอุณหภูมิของการปลดปล่อยสารระเหย เนื่องจากปริมาณออกซิเจนของขยะมูลฝอยมีมากกว่าถ่านหินที่เป็นส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเร็วขึ้น เป็นการสนับสนุนการให้

ถ่านหินมีอุณหภูมิติดไฟต่ำลงเมื่อนำเชื้อเพลิงขยะมูลฝอยมาเผาไหม้ร่วมกับเชื้อเพลิงถ่าน ดังนั้นการผสมขยะมูลฝอยกับถ่านหินอาจช่วยลดระยะเวลาและปริมาณเชื้อเพลิงในการอุ่นเตาของโรงงาน

Zhijia Liu และคณะ [4] ค้นคว้าพฤติกรรมการเผาไหม้ของไม้ไผ่ ไม้ไผ่ทอไรไฟต์ ถ่าน และการผสมของเชื้อเพลิงข้างต้นด้วยการวิเคราะห์ TGA รวมถึงหาอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ของเครื่องวิเคราะห์ TGA พบว่าอัตราการไหลของอากาศเป็นตัวเพิ่มปฏิกิริยาการเผาไหม้และสนับสนุนการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังกล่าวว่าการระบายนการทอไรไฟต์ชั้นทำให้ไม้ไผ่ทอไรไฟต์มีสารระเหยน้อยลงแต่มีความร้อน สัดส่วนของเถ้า และสัดส่วนคาร์บอนที่สูงขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิการติดไฟและการเผาไหม้ขยับสูงขึ้น ซึ่งทำให้พฤติกรรมการเผาไหม้ของไม้ไผ่ทอไรไฟต์ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของถ่าน ดังนั้นพฤติกรรมการเผาไหม้ของถ่านและไม้ไผ่ทอไรไฟต์จึงแสดงที่พฤติกรรมที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นการยืนยันว่าในภาคอุตสาหกรรมสามารถใช้ไม้ไผ่ทอไรไฟต์ผสมกับถ่านเป็นเชื้อเพลิงได้ โดยไม่ต้องมีการปรับปรุงห้องเผาไหม้เพิ่ม [5] ต่อมาคณะของเขาได้ทำการค้นหาลักษณะเฉพาะของการไฟโรไลซิสและการเผาไหม้ของไม้ไผ่ทอไรไฟต์และไม้สนทอไรไฟต์ ซึ่งเขาพบว่าหลังจากเชื้อเพลิงผ่านกระบวนการทอไรไฟต์ชั้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟโรไลซิส (การปลดปล่อยสารระเหย) ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความร้อนสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์ถ่านสูงขึ้น และอัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนส่วนด้วยออกซิเจนสูงขึ้นอีกด้วย รวมถึงเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่น้อยลงของเชื้อเพลิงทอไรไฟต์ทำให้กระบวนการเผาไหม้เกิดได้ดีมากขึ้น

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของไม้ยางพารา ไม้ไผ่ทอไรไฟต์ และการผสมเชื้อเพลิงข้างต้น เพื่อดูลักษณะเฉพาะของกระบวนการเผาไหม้และการสนับสนุนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมด้วยเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเชื้อเพลิง(TGA) ซึ่งจะมีการปรับใช้เชื้อเพลิงผสมที่ได้ทำการสังเกตพฤติกรรมของกระบวนการเผาไหม้ในงานวิจัยนี้กับหัวเผาเชื้อเพลิงแบบฝุ่น(Pulverized combustion)ต่อไปในอนาคต

2. อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์และวิธีการเตรียมเชื้อเพลิง

บทนี้จะอธิบายถึงอุปกรณ์และวิธีการเตรียมเชื้อเพลิง รวมถึงการผสมเชื้อเพลิงไม้อย่างพาราและเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์ ที่อัตราส่วน 10:90 20:80 30:70 ตามลำดับ อีกทั้งยังบอกถึงองค์ประกอบธาตุของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้



รูปที่ 2 เชื้อเพลิงไม้อย่างพาราผง



รูปที่ 3 เชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์ผง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบธาตุของเชื้อเพลิงผง

ชนิดเชื้อเพลิงผง	ไม้อย่างพารา	ไม้ไผ่ทอรีไฟด์	ไม้ไผ่ [1]
1.ความชื้น (%)	5.81	5.09	6.23
2.สารระเหย (%)	76.68	49.5	80.84
3.เถ้า (%)	2.28	5.19	1.66
4.คาร์บอน (%)	45.42	57.2	49.59
5.ไฮโดรเจน (%)	6.31	5.0	5.56
6.ไนโตรเจน (%)	0.48	0.31	0.14
7.ซัลเฟอร์ (%)	0	0.04	0.02
8.ออกซิเจน (%)	45.54	32.3	44.71
9.ค่าความร้อนแบบกรอส (MJ/Kg)	17.5	21.98	18.52



รูปที่ 4 เครื่องบดเชื้อเพลิง



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 5 เชื้อเพลิงผสมระหว่างไม้ไผ่ทอรีไฟด์ผง/ไม้อย่างพารา (ก)90:10 (ข)80:20 และ(ค)70:30

ตารางที่ 1 เป็นการพิสูจน์จากที่อ้างอิงได้กล่าวไว้ว่าเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอรีแฟคชันจะมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นและสารระเหยต่ำ เปอร์เซ็นต์เถ้าสูง และอัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนต่อออกซิเจนสูงขึ้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมการเผาไหม้

จากรูปที่ 2 และ 3 จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเชื้อเพลิงผง ที่มาจากการบดผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร แล้วจึงนำมาผสมกันตามอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล

AEC – 015

ตารางที่ 2 ขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงที่ผ่านเครื่องวัดขนาดอนุภาค

เบอร์ตะแกรง	ขนาดรูตะแกรง (มิลลิเมตร)	ร้อยละน้ำหนักที่ ติดอยู่ในตะแกรง
10	2	0.0135
20	0.85	0.0631
30	0.6	0.0500
40	0.425	0.1164
50	0.3	0.1572
100	0.15	0.3237
200	0.075	0.1676
ต่ำกว่า 200	เล็กกว่า 0.075	0.1084



รูปที่ 6 เครื่อง Thermogravimetric analysis

2.2 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร (Thermogravimetric analysis :TGA)

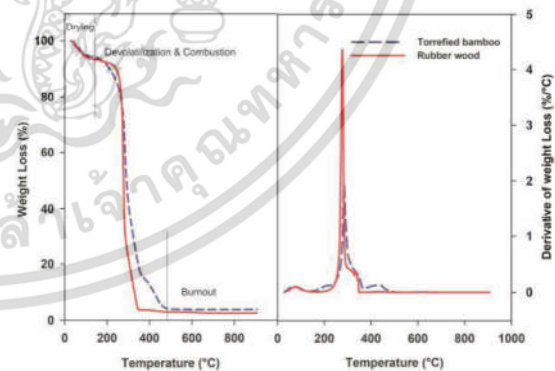
งานวิจัยนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร ซึ่งเครื่อง TGA ที่ใช้วิเคราะห์เป็นของยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 ซึ่งรายละเอียดของเครื่องแสดงในอ้างอิง[6] โดยเครื่อง TGA นี้ได้รับการรับรองจากมาตรฐาน ISO 9000

มีการควบคุมน้ำหนักเริ่มต้นของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ที่ 23.5 มิลลิกรัม และเป็นเชื้อเพลิงที่บิดผ่านตะแกรง 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 2 อีกทั้งยังมีการควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 60 มิลลิลิตรต่ออนาที และอัตราการให้ความร้อนของห้องเผาไหม้ที่ 20 องศาเซลเซียสต่ออนาที โดยจะใช้ค่านี้เป็นค่าเริ่มต้นในทุก ๆ เชื้อเพลิงที่ทำการทดลองในงานวิจัยนี้ เพื่อที่จะสามารถนำผลของการวิเคราะห์ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกัน

ผลที่ได้จากเครื่อง TGA จะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักมวลสาร(TG) และอัตราการลดลงของน้ำหนัก(DTG) ต่ออุณหภูมิ ซึ่งเราสามารถนำผลจากการลดลงของมวลสารมาวิเคราะห์จุดวิกฤตต่าง ๆ ที่เป็นตัวแปรของพฤติกรรมเผาไหม้ต่อไป

3. วิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 ผลของการเผาไหม้เชื้อเพลิงเดี่ยว



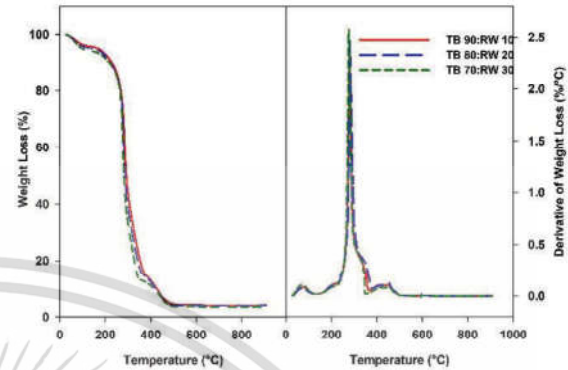
รูปที่ 7 กราฟน้ำหนัก(TG)และอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก(DTG)ของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอร์ไฟด์

รูปที่ 7 จะเห็นว่าในช่วงแรกของการลดลงของกราฟTG เป็นการระเหยของความชื้นที่อยู่ในอนุภาคซึ่งมวลของไม้ยางพาราตกลงมากกว่าไม้ไผ่ทอร์ไฟด์ซึ่งตรง

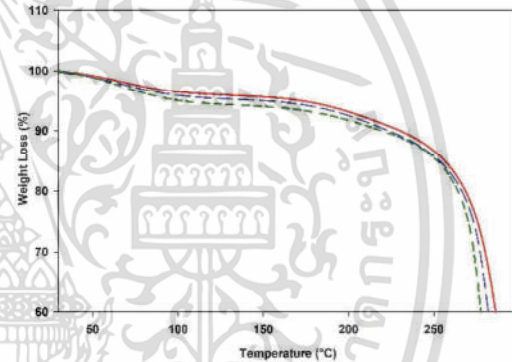
กับข้อมูลจากตารางที่ 1 ที่แสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราที่มีมากกว่าไม้ไผ่ทอรีไฟต์ ต่อมามวลจะลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาไพโรไลซิสหรือการปลดปล่อยสารระเหยจนกระทั่งเกิดการวាប់ไฟ โดยพลังงานความร้อนจากเปลวไฟนั้นจะเป็นส่วนช่วยให้กระบวนการเผาไหม้เร็วมากขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากจุดที่มีการลดลงของมวลมากที่สุดในกราฟTGหรือสังเกตจุดยอดของจากกราฟDTG ซึ่งเป็นจุดที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักมากที่สุดหรือเรียกได้ว่าเป็นจุดที่มีอัตราการเผาไหม้สูงที่สุด โดยจุดที่มีอัตราการเผาของไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟต์มากที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 276.9 และ 284.5 องศาเซลเซียส และมีอัตราการลดลงของน้ำหนักอยู่ที่ 4.35 และ 1.93 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อองศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งระหว่างกระบวนการปลดปล่อยสารระเหยและกระบวนการเผาไหม้นั้นสารระเหยของอนุภาคเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศทำให้เกิดเปลวไฟ โดยเราสามารถหาอุณหภูมิติดไฟได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งจุดติดไฟของไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟต์อยู่ที่ 262.47 และ 270.62 องศาเซลเซียสตามลำดับ ต่อมาอุณหภูมิที่สิ้นสุดกระบวนการเผาไหม้จะสังเกตได้จากเส้นของDTG จะไม่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงซึ่งมีค่าเท่ากับ 498.8 และ 529.72 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยจากตารางที่ 1 ที่แสดงองค์ประกอบของเชื้อเพลิงจะเห็นได้ว่าสัดส่วนเถ้าของเชื้อเพลิงยางพาราอยู่ที่ 2.28 ซึ่งน้อยกว่าสัดส่วนเถ้าของไม้ไผ่ทอรีไฟต์ที่มีค่าอยู่ที่ 5.19 ซึ่งสอดคล้องกันกับเส้นTGจากรูปที่ 7 ที่น้ำหนักของไม้ยางพาราอยู่ต่ำกว่าไม้ไผ่ทอรีไฟต์หลังจากสิ้นสุดกระบวนการเผาไหม้

3.2 ผลของการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม

จะเห็นได้ว่าการผสมกันของเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟต์และไม้ยางพาราที่สัดส่วนต่าง ๆ ส่งผลต่อพฤติกรรมของกระบวนการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟน้ำหนัก(TG)และอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก(DTG)ของเชื้อเพลิงผสม

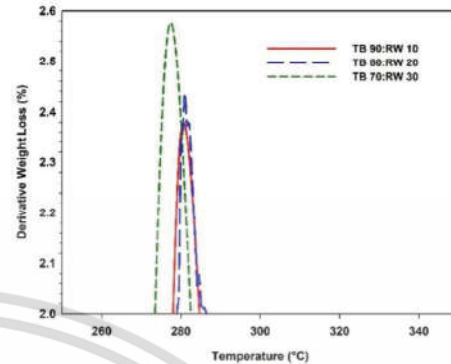


รูปที่ 9 กราฟน้ำหนัก(TG)ของเชื้อเพลิงผสมในช่วงแรกของกระบวนการเผาไหม้

กราฟน้ำหนัก(TG) ที่แสดงในรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าในช่วงของการระเหยของความชื้นนั้นเชื้อเพลิงผสมของไม้ไผ่ทอรีไฟต์และไม้ยางพารา สัดส่วน 90:10 น้ำหนักลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคเชื้อเพลิงของไม้ไผ่ทอรีไฟต์ที่เป็นส่วนหลักในการผสมมีปริมาณความชื้นอยู่น้อยซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 1 ที่แสดงถึงองค์ประกอบของเชื้อเพลิง โดยจะเห็นว่าสัดส่วนความชื้นของไม้ยางพาราสูงกว่าไม้ไผ่ทอรีไฟต์ ส่งผลให้การลดลงของน้ำหนักจากการสูญเสียความชื้นจะมากขึ้นที่สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงไม้ยางพาราที่มากขึ้น รวมถึงเปอร์เซ็นต์ของสารระเหยของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราที่มีมากกว่าไม้ไผ่ทอรีไฟต์ ซึ่งสอดคล้องกับเส้นDTGที่แสดงการลดลงของ

สัดส่วนน้ำหนักมากที่สุด ที่สัดส่วนการผสมไม้ยางพารา
มากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 10

โดยจากรูปที่ 7-10 ทำให้สามารถวิเคราะห์
พฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงด้วยจุดวิกฤตต่าง ๆ
ของกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 3 ต่อไป



รูปที่ 10 กราฟอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก(DTG)ของ
เชื้อเพลิงผสมในช่วงแรกของกระบวนการเผาไหม้

ตารางที่ 3 อุณหภูมิ เวลา และอัตราการลดลงของน้ำหนักที่จุดวิกฤตต่าง ๆ

ตัวอย่าง	T_i (°C)	t_i (min)	T_b (°C)	t_b (min)	R_m	T_m (°C)	t_m (min)	D
ไม้ไผ่ทอรีไฟต์	270.6	12.0	524.4	24.2	1.93	284.5	12.7	0.013
90%ทอรีไฟต์	267.2	11.9	524.2	24.0	2.35	283.1	12.7	0.016
80%ทอรีไฟต์	265.2	11.8	524.2	23.8	2.44	281.0	12.5	0.017
70%ทอรีไฟต์	263.5	11.7	524.1	23.2	2.58	277.8	12.4	0.018
ไม้ยางพารา	262.4	11.6	351.23	16.1	4.35	276.9	12.3	0.030

จากอ้างอิง[2] $D = R_m / t_m t_i$

จากตารางที่ 3 พบว่าการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง
ไม้ไผ่ทอรีไฟต์กับเชื้อเพลิงไม้ยางพารามีอุณหภูมิติดไฟอยู่
ที่ 270.6 และ 262.4 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งทำให้
อุณหภูมิติดไฟของเชื้อเพลิงผสมที่สัดส่วนการผสม 90:10
80:20 และ 70:30 อยู่ที่ 267.2 265.2 และ 263.5 องศา
เซลเซียสตามลำดับ โดยเชื้อเพลิงผสมมีอุณหภูมิติดไฟ
ลดลง 3.4 5.4 และ 7.2 องศาเซลเซียสตามลำดับ อีกทั้ง
ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่ต้นถึงจุดติดไฟจะลดลงตามสัดส่วน
ผสมของไม้ยางพาราที่มีเพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยสามารถหาดัชนี
การติดไฟจากสูตร[2] ซึ่งเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟต์ ไม้
ยางพารา และเชื้อเพลิงผสมที่สัดส่วน 90:10 80:20
70:30 มีค่าดัชนีการติดไฟเท่ากับ 0.013 0.03 0.016
0.017 และ 0.018 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าดัชนีของการ
จุดติดไฟเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสมของไม้ยางพาราที่
เพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิสิ้นสุดของการเผาไหม้ของทั้ง

เชื้อเพลิงไม้ยางพารา ไม้ไผ่ทอรีไฟต์และเชื้อเพลิงผสมที่
สัดส่วน 90:10 80:20 และ 70:30 มีค่า 498.8 529.72
524.2 524.16 และ 524.14 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่ง
จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงผสมมีค่าอุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้
ที่คล้ายคลึงกับอุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้ของไม้ไผ่ทอรี
ไฟต์ แต่แตกต่างกันที่ระยะเวลาที่ใช้ โดยจะใช้ระยะเวลา
น้อยลงที่สัดส่วนการผสมของไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้น

การที่องค์ประกอบของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราที่มี
สัดส่วนออกซิเจนที่มากกว่าไม้ไผ่ทอรีไฟต์จึงทำให้
เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างรวดเร็วที่เป็นส่วนช่วยใน
การปลดปล่อยพลังงานของเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นการสนับสนุน
ให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ได้ดีมากขึ้น แต่
เนื่องจากไม้ไผ่ทอรีไฟต์ที่เรานำมาการใช้ในงานวิจัยนี้เป็น
ไม้ไผ่ที่ผ่านกระบวนการทอรีไฟชั่นมาในระยะเวลาสั้น
ทำให้ความชื้นและสารระเหยลดลงไม่มากเท่าที่ควร ซึ่งทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AEC – 015

ให้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากมีพฤติกรรมการเผาไหม้ที่คล้ายคลึงกัน โดยจะสังเกตได้จากอุณหภูมิการสันดาป อุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้และอุณหภูมิที่เกิดการเผาไหม้มากที่สุดจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

4. สรุปผลการทดลอง

1. อุณหภูมิติดไฟของเชื้อเพลิงไม้ไผ่ทอรีไฟด์ และไม้ยางพาราจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารระเหยในองค์ประกอบของเชื้อเพลิงและอุณหภูมิในการเริ่มต้นการปลดปล่อยสารระเหย ซึ่งการผสมกันของเชื้อเพลิงเป็นการช่วยให้ไม้ไผ่ทอรีไฟด์ที่มีสารระเหยน้อยกว่าสามารถจุดติดไฟที่อุณหภูมิต่ำลงเนื่องจากได้รับพลังงานจากสารระเหยของไม้ยางพาราที่มีสารระเหยมากกว่า ทำให้อุณหภูมิติดไฟต่ำลง
2. อัตราการลดลงของน้ำหนักที่มากที่สุด (R_m) ของเชื้อเพลิงผสมพิสูจน์ถึงการสนับสนุนกันของการเผาไหม้ โดยอัตราการเผาไหม้จะแปรผันตามสัดส่วนของผสมไม้ยางพาราที่มากขึ้น เพราะพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของไม้ยางพาราเป็นตัวเร่งให้ไม้ไผ่ทอรีไฟด์ที่ผสมอยู่เผาไหม้ได้เร็วมากขึ้นส่งผลให้อัตราการลดลงของน้ำหนักมากขึ้นด้วย
3. อุณหภูมิสิ้นสุดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมจะมีค่าใกล้เคียงกับไม้ไผ่ทอรีไฟด์ ซึ่งจะมีความเชื่อมโยงกับเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวของไม้ไผ่ทอรีไฟด์ที่มีสูงกว่าและค่าความร้อนสูงกว่า แต่จะใช้เวลาในการเผาไหม้น้อยลงตามสัดส่วนของการผสมไม้ยางพารา

5 เอกสารอ้างอิง

5.1 บทความจากวารสาร (Journal)

- [1] Li Xiang-guo, Ma Bao-guo, Xu Li, Hu Zhen-wu and Wang Xin-gang “Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blend with high ash

coal and waste tyres”, *Thermochimica Acta* 441, January 2006, 79-83

- [2] D.Vamvuka, N.El Chatib and S.Sfakiotakis “Measurements of Ignition Point and Combustion Characteristics of Biomass Fuels and their Blends with Lignite”, *Conference Paper*, January 2011

- [3] Marisamy Muthuraman, Tomoaki Namioka and Kunio Yoshikawa “A comparative study on co-combustion performance of municipal solid waste and Indonesian coal with high ash coal with high ash Indian coal: A thermogravimetric analysis”, *Fuel Processing Technology* 91, December 2009, 550-558

- [4] Zhijia Liu, Wanhe Hu, Zehui Jiang, Bingbing Mi and Benhua Fei “Investigating combustion behaviors of bamboo, torrefied bamboo, coal and their respective blends by thermogravimetric analysis”, *Renewable Energy* 87, October 2015, 346-352

- [5] Bingbing Mi, Zhijia Liu, Wanhe Hu, Penglian Wei, Zehui Jiang and Benhua Fei “Investigating pyrolysis and combustion characteristics of torrefied bamboo, torrefied wood and their blends”, *Bioresour Tecnology* 209, March 2016, 50-55

5.2 เว็บไซต์

- [6] Pyris 1 TGA Thermogravimetric Product Note, PerkinElmer Life and Analytical Sciences, 710 Bridgeport Avenue Shelton, CT 06484-4794 USA, Phone: (800) 762-4000 or (+1) 203-925-4602,

www.perkinelmer.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายคีต์ สร้อยทอง
วัน เดือน ปีเกิดวันที่	14 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	2559 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้