

การศึกษาผลกระทบของเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์ม  
ในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงผงสำหรับหม้อไอน้ำในภาคอุตสาหกรรม

EFFECT OF BLENDED COAL-PALM KERNEL ON PULVERIZED COMBUSTION  
FOR INDUSTRIAL BOILER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อปีการศึกษา 2563 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การศึกษาผลกระทบของเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์ม  
ในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงผงสำหรับหม้อไอน้ำในภาคอุตสาหกรรม

EFFECT OF BLENDED COAL-PALM KERNEL ON PULVERIZED COMBUSTION  
FOR INDUSTRIAL BOILER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อปีการศึกษา 2563 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

EFFECT OF BLENDED COAL-PALM KERNEL ON PULVERIZED COMBUSTION  
FOR INDUSTRIAL BOILER



KHANISORN SONGSEANGTHAM

NATAPON CHAICHANA

PADCHA ROEKSAKSRI

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

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
2020  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาผลกระทบของเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์มในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิง  
ผงสำหรับหม้อไอน้ำในภาคอุตสาหกรรม

EFFECT OF BLENDED COAL-PALM KERNEL ON PULVERIZED COMBUSTION FOR  
INDUSTRIAL BOILER

ผู้จัดทำ

1. นายคณิศร ทรงแสงธรรม รหัสประจำตัว 60010112
2. นายณัฐพล ชัยชนะ รหัสประจำตัว 60010320
3. นางสาวพัชชา ฤกษ์ศักดิ์ศรี รหัสประจำตัว 60010688

ภรณเพ็ญ สิริรัตนากุล

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.ภรณเพ็ญ สิริรัตนากุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การศึกษาผลกระทบของเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์มในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงผง สำหรับหม้อไอน้ำในภาคอุตสาหกรรม

คณิตศร	ทรงแสงธรรม	60010112
ณัฐพล	ชัยชนะ	60010320
พัชชา	ฤกษ์ศักดิ์ศรี	60010688
ผศ.ดร.ภรณ์เพ็ญ	ลภีรัตนากุล	อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2563

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อทำการทดลองศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมทางความร้อน ปริมาณความเข้มข้นของไอเสีย และแนวโน้มการก่อตัวของสแลกกิ้งและฟาวลิง โดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินซับบิทูมินัสกับกะลาปาล์มในอัตราส่วน 100:0 และ 90:10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งเป็นสัดส่วนที่อ้างอิงจากการศึกษาวารสารวิชาการที่ใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเครื่องมือศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนและการเกิดก๊าซไอเสียจากการใช้กะลาปาล์มผสมกับถ่านหินคุณภาพต่ำ เป็นเชื้อเพลิงเพื่อนำมาเปรียบเทียบ ขอบเขตงานวิจัยนี้คือทำการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง บดละเอียดที่อัตรา 300 kW ใช้อากาศส่วนเกิน 45% โดยแบ่งออกเป็นสามส่วนในอัตราส่วน 25:65:10 ที่ถูกป้อนสู่ห้องเผาไหม้ ในการทดลองจัดให้มีการบันทึกการกระจายตัวอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และวัดความเข้มข้นของก๊าซไอเสียเพื่อประเมินสมรรถนะในการเผาไหม้ จากการทดลองพบว่าการกระจายตัวในห้องเผาไหม้ของการทดลองเชื้อเพลิงผสมมีอุณหภูมิลดลง ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนนอกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์จากไอเสียเพิ่มขึ้นมา 656% และ 33% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแนวโน้มของการเกิดปัญหาสแลกกิ้งและฟาวลิงโดยการนำข้อมูลคุณสมบัติจากการศึกษาอื่นมาคำนวณค่าดัชนีต่าง ๆ พบว่าถ้าใช้ถ่านหินที่มีระดับแนวโน้มการเกิดปัญหาด้านสแลกกิ้งสูง เมื่อนำมาผสมกับกะลาปาล์มแล้ว ค่าดัชนีมีแนวโน้มที่จะลดระดับลงมาอยู่ในระดับกลาง ในขณะที่ถ่านหินมีค่าดัชนี fouling index สูง เมื่อผสมกับกะลาปาล์มแล้วค่าดัชนีมีแนวโน้มที่จะลดระดับลงมาที่ระดับกลางได้ แต่ไม่สามารถลดระดับลงมากกว่านี้ได้เนื่องจากตัวกะลาปาล์มมีค่าดัชนีแนวโน้มการเกิดฟาวลิงอยู่ในระดับกลางอยู่แล้ว การเพิ่มสัดส่วนของกะลาปาล์มในเชื้อเพลิงผสมจึงมีโอกาที่จะช่วยลดแนวโน้มการเกิดปัญหาด้านสแลกกิ้งและฟาวลิงได้ขึ้นกับคุณสมบัติของถ่านหินและกะลาปาล์มที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# EFFECT OF BLENDED COAL-PALM KERNEL ON PULVERIZED COMBUSTION FOR INDUSTRIAL BOILER

Khanisorn	Songseangtham	60010112
Natapon	Chaichana	60010320
Padcha	Roeksaksri	60010688
Asst.Prof.Ponepen	Laphirattanakul	Advisor
Year 2563		

## Abstract

The propose of this research was to experiment and study the combustion performance in pre-chamber, slagging and fouling propensity from using blended fuel between Subbituminous and Palm kernel shell. The ratios were chosen at 100:0 and 90:10 by weight according to the publication on CFD. The scope of this research is to study on combustion in pulverized coal-fired boiler, at 300 kW thermal throughput with 45% excess air. The combustion air was separated fed into the chamber with ratio 25:65:10 for primary, secondary, and tertiary. In experiment, temperature distribution in pre-chamber and flue gas concentration were observed to compare the combustion performance. Ash composition and ash fusion temperature results from several studies were used to evaluated slagging and fouling propensity through indices. The results showed temperature distribution of blended fuel firing has less temperature than pure sub-bituminous coal firing, CO and NO<sub>x</sub> concentration from blended fuel flue gas were higher than pure sub-bituminous coal by 656% and 33%, respectively. According to the ash properties from several studies, the slagging index values of high calcium coal ash samples, which had high slagging propensity, tended to approach lower level. Palm kernel shell ash fouling index was originally at medium level, blending high fouling tendency coal with palm kernel shell can reduce the fouling propensity to medium level but cannot go lower than that.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

II

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำ คำสั่งสอน ความกรุณา ให้คำปรึกษา ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ต่าง ๆ จาก ผศ.ดร.ภรณ์เพ็ญ ฤทธิटनाกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ทางคณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูง รวมทั้งขอขอบพระคุณคณาจารย์และพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาครั้งนี้ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ ให้ความร่วมมือต่อการศึกษานี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณทางครอบครัวและเพื่อน ๆ ของคณะผู้วิจัยที่คอยสนับสนุน ให้กำลังใจจนทาง คณะผู้วิจัยสามารถดำเนินการศึกษาได้มาจนถึงวันนี้

ขอขอบพระคุณทางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่คอยสนับสนุนทุน เพื่อทำการศึกษา และบริษัท พรีเมี่ยม เอ็นเนอร์ยี คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่คอยสนับสนุนด้านเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการศึกษานี้

คณิศร ทรงแสงธรรม  
ณัฐพล ชัยชนะ  
พัชชา ฤกษ์ศักดิ์ศรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

III

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
3.1 เชื้อเพลิงแข็ง.....	11
3.1.1 ประเภทและลักษณะของเชื้อเพลิงแข็ง.....	12
3.1.2 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง.....	17
3.1.3 การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็ง.....	17
3.2 การเผาไหม้ (Combustion).....	18
3.2.1 การเผาไหม้ตามปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric Combustion).....	18
3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuel Combustion).....	19
3.3.1 ระบบเผาไหม้แบบเบดนิ่ง.....	20
3.3.2 ระบบเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3 ระบบเผาไหม้แบบเบดเคลื่อนที่หรือเบดลอย.....	21
3.4 มลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ (Emissions).....	22
3.4.1 การปลดปล่อย CO.....	22
3.4.2 การปลดปล่อย NO <sub>x</sub> .....	22
3.4.3 ฝุ่นและเขม่า.....	24
3.5 การสะสมของสแลกกิ้งและฟาวลิ่งในหม้อไอน้ำประเภทเชื้อเพลิงบดละเอียด.....	25
3.6 องค์ประกอบของเถ้าของเชื้อเพลิงแข็ง.....	29
3.7 การวิเคราะห์แนวโน้มของปัญหาที่เกิดจากการสะสมของเถ้า.....	31
บทที่ 4 การคำนวณและการออกแบบการทดลอง.....	34
4.1 สมการการเผาไหม้.....	34
4.1.1 องค์ประกอบของธาตุเคมีของเชื้อเพลิง.....	34
4.1.2 สมการการเผาไหม้ถ่านหิน.....	36
บทที่ 5 อุปกรณ์ เจริญไซ และวิธีการทดลอง.....	39
5.1 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	39
5.1.1 หัวเผาเชื้อเพลิงแข็งชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber).....	40
5.1.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิงแข็ง.....	40
5.1.3 ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	42
5.1.4 ระบบบำบัดน้ำเสีย.....	43
5.2 อุปกรณ์วัด ควบคุม และบันทึกผล.....	45
5.2.1 ระบบป้อนอากาศ.....	45
5.2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ.....	46
5.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สไอเสีย.....	47
5.2.4 อุปกรณ์วัด ละควบคุมอื่น ๆ.....	48
5.3 เจริญไซ และวิธีการทดลอง.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าเข้าสู่มอเตอร์.....	50
5.3.2 การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	52
บทที่ 6 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง.....	54
6.1 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz) กับอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (kg/min).....	54
6.2 ผลการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินซับบิทูมินัสผสมกับกะลาปาล์ม	56
6.2.1 อิทธิพลของการเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของกะลาปาล์มต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้.....	56
6.2.2 อิทธิพลของการเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของกะลาปาล์มต่อการปลดปล่อยก๊าซมลพิษ.....	58
6.3 การวิเคราะห์ต่อแนวโน้มการเกิดสแลกกิ้งและฟาวลิง.....	60
บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	66
7.1 บทสรุป.....	66
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
เอกสารอ้างอิง.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงอุณหภูมิหุลอมเหลวของเก้าตัวอย่างถ่านหิน Q2 Q4 และ K3.....	5
2.2 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ตัวอย่างถ่านหิน.....	6
2.3 แสดง Slagging factors ของเชื้อเพลิงชีวมวลต่าง ๆ .....	8
3.1 ตัวอย่างองค์ประกอบออกซิเจน ความชื้น และเถ้าในเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่าง ๆ .....	11
3.2 แสดงลักษณะของถ่านหิน.....	13
3.3 ตัวอย่างเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีระหว่างไม้สนกับถ่านหินบิทูมินัส.....	14
3.4 การแบ่งชนิดของถ่านหินตามศักดิ์ของถ่านหิน (หลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า).....	14
3.5 องค์ประกอบของเถ้าในรูปออกไซด์ คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของเถ้า.....	29
3.6 องค์ประกอบของเถ้าในรูปธาตุเดี่ยว คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของเถ้า.....	30
3.7 ช่วงแนวโน้มของปัญหาสแลกกิ้ง.....	33
4.1 แสดงส่วนประกอบของถ่านหิน Sub-bituminous.....	34
4.2 แสดงส่วนประกอบของกะลาปาล์ม.....	35
4.3 แสดงส่วนประกอบของถ่านหินซบิทูมินัสกับกะลาปาล์มในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยมวล	36
4.4 แสดงอัตราการไหลของอากาศสามส่วนสำหรับเชื้อเพลิงถ่านหินซบิทูมินัส.....	37
4.5 แสดงอัตราการไหลของอากาศสามส่วนสำหรับเชื้อเพลิงผสมที่อัตราส่วน 90:10 โดยมวล...	38
5.1 แสดงย่านการทำงาน ความแม่นยำ และความละเอียดของเครื่องมือวัด.....	49
5.2 เงื่อนไขการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในแต่ละสัดส่วนที่ 300 Kw.....	52
6.1 แสดงอัตราการไหลของอากาศสามส่วนสำหรับเชื้อเพลิงถ่านหิน sub-bituminous.....	56
6.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ Q2 Q4 และ K3.....	61
6.3 แสดงอุณหภูมิหุลอมเหลวของเก้าตัวอย่างของถ่านหิน Q2 Q4 และ K3.....	61
6.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างถ่านหิน B D และ S.....	62
6.5 แสดงอุณหภูมิหุลอมเหลวของเก้าตัวอย่างของถ่านหิน B D และ S.....	62
6.6 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างกะลาปาล์มที่ถุ่กนำมาทดสอบ.....	62
6.7 ค่าดัชนีชี้วัดแนวโน้มปัญหาด้านสแลกกิ้งและฟาวลิ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินและกะลาปาล์มที่ถูกยกมาจากการศึกษาอื่น.....	63
6.8 ช่วงแนวโน้มของปัญหาสแลกกิ้งและฟาวลิ่ง.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ตระกรันที่เกาะอยู่บริเวณผนังหม้อไอน้ำในโรงไฟฟ้า..... 5
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Ash fusion temperatures กับ B/A ratio..... 7
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง Ash fusion temperatures กับ ปริมาณ CaO..... 7
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง Ash fusion temperatures กับ slagging index..... 7
2.5	แสดงภาพตัดขวางการกระจายตัวของอนุกรมุมิในห้องเผาไหม้ที่เชื้อเพลิงสัดส่วนต่าง ๆ ..... 9
2.6	แสดงการกระจายตัวของอนุกรมุมิในห้องเผาไหม้ที่เชื้อเพลิงสัดส่วนต่าง ๆ ..... 9
2.7	แสดงปริมาณสัดส่วนของ NO <sub>x</sub> ในห้องเผาไหม้ที่เชื้อเพลิงสัดส่วนต่าง ๆ ..... 10
3.1	ลักษณะรูปร่างของฟีดที่เกิดจากซากพืช..... 12
3.2	ถ่านหินลิกไนต์ที่เกิดจากการทับถมกันของฟีดเป็นเวลานาน..... 13
3.3	เชื้อเพลิงไม้อัดแท่ง (pallet)..... 15
3.4	ลำต้นปาล์ม..... 16
3.5	กะลาปาล์ม..... 17
3.6	ขั้นตอนการเผาไหม้อุณหภูมิเชื้อเพลิงขนาดเล็ก..... 20
3.7	ระบบ Underfeed firing..... 20
3.8	ระบบ Fluidized bed combustion..... 21
3.9	ระบบเผาไหม้แบบ Pulverized combustion..... 21
3.10	ความเข้มข้นของ NO <sub>x</sub> แต่ละประเภท..... 23
3.11	แสดงการฟอร์มตัวของเถ้าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง..... 27
3.12	การสะสมของเถ้าบนพื้นผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน..... 28
3.13	อนุกรมุมิการหลอมของเถ้า..... 31
5.1	องค์ประกอบของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง..... 39
5.2	ห้องเผาไหม้ช่วย..... 40
5.3	แผนผังแสดงเครื่องมือของระบบป้อนเชื้อเพลิง..... 40
5.4	ถังพักเชื้อเพลิง..... 41
5.5	ระบบสกรูขนส่ง..... 41
5.6	ท่อขนส่งเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย..... 42
5.7	ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง..... 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูเขงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8	ชุดสกรูระบายน้ำ.....	42
5.9	ถังพักน้ำ.....	43
5.10	Wet scrubber.....	43
5.11	ทางออกของระบบบำบัดไอเสียและพัดลมดูดไอเสีย.....	44
5.12	บ่อพักน้ำ.....	44
5.13	ทางออกของไอเสีย.....	44
5.14	ระบบป้อนอากาศ.....	45
5.15	โบลเวอร์ที่ใช้ในการป้อนอากาศสู่ห้องเผาไหม้.....	46
5.16	Pressure transmitter.....	46
5.17	ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิของชุดการทดลอง.....	46
5.18	Thermocouple Type-K.....	47
5.19	Testo 330 LL.....	47
5.20	ท่อขดลดอุณหภูมิ.....	48
5.21	ถังพักแก๊สไอเสียและปั๊มดูดแก๊สไอเสีย.....	48
5.22	อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ.....	49
5.23	ขั้นตอนการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงกับความถี่ที่ถูกป้อนเข้าสู่ มอเตอร์ขนถ่าย.....	51
5.24	ขั้นตอนการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	53
6.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz) - อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/min) ของ เชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัส.....	54
6.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz) - อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/min) ของ เชื้อเพลิงผสมถ่านหินซับบิทูมินัสกับกะลาปาล์มในอัตราส่วน 90:10 โดยมวล.....	55
6.3	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัส.....	57
6.4	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยที่สัดส่วนกะลาปาล์ม 10% โดยมวล...	57
6.5	แสดงปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO <sub>x</sub> ) (ppm).....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

G	Slag viscosity index
$MW_{air}$	น้ำหนักโมเลกุลของอากาศ
$MW_{fuel}$	น้ำหนักโมเลกุลของเชื้อเพลิง
$m_{air}$	มวลของอากาศ
$m_{fuel}$	มวลของเชื้อเพลิง
$R_s$	Slagging index
$T_{AFI}$	Ash fusibility index
$\phi$	อัตราส่วนสมมูล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องมาจากจำนวนประชากรโลกที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วรวมทั้งภาคอุตสาหกรรมภาคเศรษฐกิจ และการพัฒนาความเป็นอยู่ที่ดีขึ้นของประชาชน ส่งผลต่อความต้องการเชื้อเพลิงฟอสซิลที่สูงขึ้นตามลำดับ เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน ซึ่งจากเผาไหม้เชื้อเพลิงจากพลังงานประเภทนี้เป็นสาเหตุหลักของการทำลายสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการปล่อยก๊าซที่เป็นมลพิษต่าง ๆ ทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>), ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>), ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) รวมถึงฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็ก เมื่อมีการปล่อยก๊าซดังกล่าวในปริมาณที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ทำให้อากาศบนโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น ก่อให้เกิดภาวะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม สังคมและเศรษฐกิจตามมา เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ทั้งภาครัฐและเอกชนจากหลาย ๆ ประเทศ ได้พยายามศึกษาวิจัยเพื่อหาพลังงานทดแทนที่ไม่กระทบกับสิ่งแวดล้อม ประหยัดพลังงานและสามารถใช้พลังงานทดแทนที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าพลังงานเชื้อเพลิงที่ใช้ในปัจจุบันซึ่งมีแนวโน้มจะหมดไปในอนาคตอันใกล้

ประเทศไทยได้มีการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเป็นหลัก โดยมีสาเหตุจากความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณพลังงานที่ผลิตในประเทศมีไม่เพียงพอต่อความต้องการ และคาดว่าจะมีแนวโน้มจะสูงขึ้นอีกเพราะไม่สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตพลังงานในประเทศได้ทันกับความต้องการใช้ งาน การพัฒนาพลังงานทดแทนอย่างจริงจังจะช่วยลดการพึ่งพาและการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงและพลังงานชนิดอื่น และยังช่วยกระจายความเสี่ยงในการจัดหาเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตไฟฟ้าของประเทศ เพื่อส่งเสริมให้ชุมชนมีส่วนร่วมในการผลิตและการใช้พลังงานทดแทน รัฐบาลจึงได้กำหนดยุทธศาสตร์เพื่อส่งเสริมการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก แก้ไขกฎหมายและกฎระเบียบที่ยังไม่เอื้อต่อการพัฒนาพลังงานทดแทน ปรับปรุงระบบโครงสร้างพื้นฐาน รวมถึงการประชาสัมพันธ์และสนับสนุนงานวิจัยด้านการพัฒนาอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน โดยมีเป้าหมายเพื่อการขับเคลื่อนเทคโนโลยีพลังงานทดแทนเพื่อการผลิตไฟฟ้า และการผลิตความร้อน เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม และมีผลผลิตทางเกษตรกรรมรวมถึงผลผลิตเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีศักยภาพสูงสามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ การเลือกใช้ชีวมวลเหล่านี้มาเป็นพลังงานทดแทน จึงช่วยลดการนำเข้าพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนและสร้างไว้เพื่อใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่พิมพ์โดยมติที่ประชุมของสภา และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารทุกครั้งที่มาใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหมุนเวียนและไม่มีการปลดปล่อย อย่างไรก็ตามข้อกำหนดในการใช้ชีวมวลยังมีอยู่มาก ทั้งต้นทุนค่าขนส่งสูง ชีวมวลมีค่าความร้อนและความหนาแน่นต่ำ มีส่วนประกอบของอัลคาไลน์และคลอรีนสูงทำให้เกิดขี้เถ้าหลอม (slagging and fouling) เกาะตามอุปกรณ์ ข้อจำกัดดังกล่าวสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงร่วม ระหว่างชีวมวลกับถ่านหิน งานวิจัยนี้จึงจัดทำเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถ่านหินผสมเข้ากับชีวมวลที่เป็นกะลาปาล์มบดละเอียดในปริมาณที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการเผาไหม้และองค์ประกอบของเถ้าหนักและเถ้าลอย ในห้องเผาไหม้ชนิดที่ใช้ร่วมกับหัวเผาเชื้อเพลิงบดละเอียด นอกจากนี้ยังถือว่าเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีการเผาไหม้ร่วม (co-firing) ของประเทศไทย ช่วยลดการปล่อยมลภาวะ และสามารถใช้อย่างมีประสิทธิภาพได้

## 1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อสมรรถนะในด้านต่าง ๆ ของการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์ม ในอัตราส่วน 100:10 และ 90:10 โดยมวล ตามลำดับ
2. เพื่อศึกษาแนวโน้มการเกิดสแลกกิ้งและฟาวลิงจากการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์ม ในอัตราส่วน 100:10 และ 90:10 โดยมวล ตามลำดับ

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. การใช้เชื้อเพลิงผสมจะทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิการเผาไหม้ลดลงเมื่อมีสัดส่วนของเชื้อเพลิงชีวมวลเพิ่มขึ้น หากแต่มีปริมาณมลพิษจากการเผาไหม้ลดลง
2. สัดส่วนเชื้อเพลิงชีวมวลที่เพิ่มขึ้นทำให้มีแนวโน้มการเกิดสแลกกิ้งและฟาวลิงเพิ่มขึ้น

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ใช้เตาเผาประเภทเชื้อเพลิงบดละเอียดขนาด 300 kW เผาไหม้อากาศส่วนเกิน 45% โดยแบ่งอากาศเป็นสามส่วน คือ อากาศปฐมภูมิ 25% อากาศทุติยภูมิ 65% และอากาศตติยภูมิ 10%
2. เชื้อเพลิงบดละเอียดที่ใช้ในการเผาไหม้ คือ ถ่านหินซับบิทูมินัสผสมร่วมกับกะลาปาล์มโดยแบ่งสัดส่วนของกะลาปาล์มที่ใช้ผสมกับถ่านหินเป็น 0% และ 10% โดยมวลของเชื้อเพลิงผสม
3. วัดการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้รวมไปถึงอุณหภูมิของไอเสียทั้งหมด 8 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 4. วัดปริมาณ CO และ NO<sub>x</sub> ที่อยู่ในไอเสียด้วยเครื่อง flue gas analyzer Testo 330 LL

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. แนวโน้มการเกิดสแลกกิ่งและฟาวลิ่งจะถูกชี้วัดด้วยค่าดัชนีที่คำนวณจากคุณสมบัติของเก้าจากเชื้อเพลิง โดยมีการแบ่งระดับแนวโน้มการเกิดสามระดับคือ ต่ำ ปานกลาง และสูง

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. กำหนดหัวข้อ วัตถุประสงค์ และขอบเขตของการศึกษา
2. สำรวจ และศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบเชื้อเพลิงร่วม ระหว่างชีวมวลและถ่านหิน สำหรับอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าและความร้อน
3. ศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้ หลักการทำงาน องค์ประกอบเช่น ความชื้น ความหนาแน่น ของเชื้อเพลิงที่นำมาศึกษาซึ่งได้แก่ ถ่านหินบิทูมินัสกับกะลาปาล์ม และข้อจำกัดของชีวมวลที่นำมาใช้
4. ออกแบบวิธีการและสภาวะของการทดลอง ซึ่งใช้การทดลองและการศึกษาที่เป็นแบบจำลองการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์มเป็นการศึกษาอ้างอิง
5. ทดสอบชุดทดลองและดำเนินการทดลอง
6. วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้และสรุปผลการทดลอง

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการนำของเสียจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานทางเลือกทดแทนเชื้อเพลิงหลักเดิมที่ใช้อยู่
2. เป็นการลดมลพิษที่ได้มาจากการใช้เชื้อเพลิงหลักเดิมลง โดยยังคงประสิทธิภาพของการเผาไหม้ไว้
3. เป็นองค์ความรู้ให้กับผู้ที่มีความสนใจทางด้านพลังงานทดแทน และผู้ที่ต้องการนำไปต่อยอดให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ ๆ ที่ก่อให้เกิดประโยชน์แก่ส่วนรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทรรศน์

ในปัจจุบันประเทศไทยกำลังพัฒนาไปสู่การเป็นประเทศทางด้านอุตสาหกรรม การดำเนินการต่าง ๆ ในภาคอุตสาหกรรมจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานมาใช้จำนวนมาก ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำพลังงานมาใช้ในหลายรูปแบบเช่น พลังงานฟอสซิล ได้แก่แก๊สธรรมชาติ น้ำมันดิบ และถ่านหิน เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้พลังงานทดแทนเช่น พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล พลังงานน้ำ ตลอดจนพลังงานจากแสงอาทิตย์ แต่การใช้พลังงานทดแทนนี้ยังมีไม่มากเท่าใดนัก การใช้พลังงานฟอสซิลที่เพิ่มขึ้นก่อให้เกิดปัญหาการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ การนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้เพื่อจะช่วยลดความต้องการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้ รวมถึงยังเป็นการรักษาสภาพแวดล้อมอีกด้วย แต่เนื่องจากการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนนั้นมีผลกระทบที่ต้องคำนึงถึงด้วย จึงจำเป็นต้องศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่มีผู้วิจัยมาก่อน เพื่อทราบถึง แนวคิด วิธีการ ปัญหา ขั้นตอน และผลกระทบจากการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้

อุกฤษฏ์ สหพัฒน์สมบัติ และคณะ [1] ได้นำเศษไม้ยางพารา ทางปาล์ม ลำต้นปาล์ม และทะลายปาล์มมาศึกษาคุณภาพพบว่า ตัวอย่างวัตถุดิบที่นำมาศึกษาทั้งหมดนั้น มีโพแทสเซียมและซิลเฟอร์ อยู่ในปริมาณที่สูงเกินกว่าค่ามาตรฐาน ซึ่งมีผลต่อมลพิษทางอากาศ เถ้า และการกัดกร่อนต่อชิ้นส่วนอุปกรณ์ สำหรับวัตถุดิบจากปาล์มมีองค์ประกอบของเถ้าในปริมาณที่สูงมาก น้ำยาเคมีที่ใช้อบไม้ยางพารา มีองค์ประกอบของโลหะหนักอยู่สูง มีผลต่อการเกิดเถ้าและมลพิษทางอากาศมากขึ้น

Theis M. และคณะ [2-4] ได้ทำการศึกษาอัตราการสะสมของเถ้าในการเผาไหม้ร่วมระหว่างถ่านหินพีทกับฟางพบว่า เมื่อเผาเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนเชื้อเพลิงที่ฟางน้อยกว่า 70% ของน้ำหนักเชื้อเพลิง อัตราการสะสมของเถ้าแทบไม่ต่างอะไรกับการเผาถ่านหินอย่างเดียวเลย แต่เมื่อเผาเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของฟางที่มากกว่า 70% ของน้ำหนักเชื้อเพลิง พบว่าอัตราการสะสมตัวของเถ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

Easterly JL. และ Burnham M. [5] ได้กล่าวไว้ว่า ปัญหาฟาวลิง (fouling) เป็นปัญหาที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ทำให้ต้องคำนึงถึงการออกแบบอุปกรณ์และการทำงานของเครื่องเผาไหม้ ซึ่งปัญหาฟาวลิงนั้นหลัก ๆ แล้วเกิดจากสารอนินทรีย์ในเชื้อเพลิง ในเชื้อเพลิงชีวมวลต่าง ๆ มีสารอนินทรีย์เป็นส่วนประกอบหลากหลายชนิดต่างกับเชื้อเพลิงถ่านหิน โดยเฉพาะเชื้อเพลิงชีวมวลที่มาจากอุตสาหกรรม

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การเกษตรซึ่งมีส่วนประกอบของโลหะแอลคาไลสูงโดยเฉพาะ โซเดียมกับโพแทสเซียม ซึ่งโซเดียมและโพแทสเซียมในเถ้ามีผลทำให้อุณหภูมิการหลอมตัวของเถ้าลดลง นำไปสู่การเกิดการสะสมของเถ้าและฟาวลิ่งมากขึ้น

พิธา ศรีบุษย์ดี และภิญโญ มีชำนะ [6] ได้ทำการศึกษาปัญหาสแลก (slag) ที่เกิดขึ้นบนผนังหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างห้องเผาไหม้ไปยังท่อลำเลียงน้ำลดลง โดยทำการศึกษาจากถ่านหินตัวอย่างที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าแม่เมาะสามตัวอย่าง โดยให้ชื่อตัวอย่างว่า Q2 Q4 และ K3 ที่มีปริมาณร้อยละ CaO อยู่ในช่วง 23-35% โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์หาอุณหภูมิ Initial deforming temperature ดังที่แสดงในตารางที่ 2.1 และหาชนิดแร่ของแต่ละตัวอย่างที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ถ่านหินตัวอย่างที่ยังมีค่าปริมาณร้อยละของ CaO สูง ยิ่งทำให้อุณหภูมิ Initial deforming temperature ลดลง แต่เมื่อมีปริมาณร้อยละของ CaO มากกว่า 30% อุณหภูมิ Initial deforming temperature จะเริ่มสูงขึ้นแต่สูงน้อยกว่ากับถ่านหินที่มีปริมาณร้อยละของ CaO น้อย สาเหตุที่อุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าสูงขึ้นเนื่องจากปริมาณ CaO ที่สูงจะมีส่วนที่เหลื่ออยู่จับกันเป็น Eutectic mixture ซึ่งอยู่ในรูปของ Lime (CaO) ส่งผลทำให้เถ้ามีอุณหภูมิหลอมเหลวเริ่มสูงขึ้น



รูปที่ 2.1 ตะกรันที่เกาะอยู่บริเวณผนังหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้า [6]

ตารางที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าตัวอย่างของถ่านหิน Q2, ถ่านหิน Q4 และถ่านหิน K3 [6]

SAMPLE NAME	Q2	Q4	K3
ASH FUSION TEMPERATURE (°C)	RESULT		
INITIAL DEFORMATION TEMPERATURE (IT)	>1500	1197	1301
SOFTENING TEMPERATURE (ST)	>1500	1305	1314
HEMISPHERICAL TEMPERATURE (HT)	>1500	1307	1328
FLUID TEMPERATURE (FT)	>1500	1329	1369

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.2 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าของตัวอย่างถ่านหิน [6]

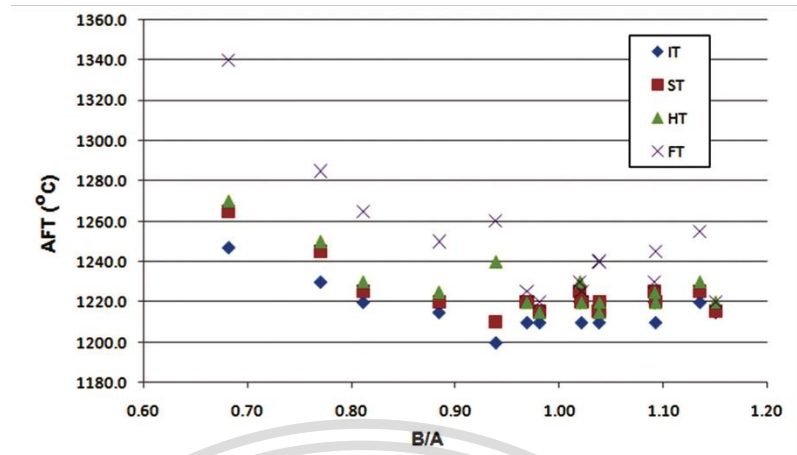
SAMPLE NAME	Q2	Q4	K3
ASH COMPOSITION (% wt)	RESULT		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.31	18.20	12.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.01	9.88	9.49
MgO	1.44	3.81	6.71
SiO <sub>2</sub>	48.21	19.58	19.33
CaO	2.24	27.42	31.81
K <sub>2</sub> O	4.03	0.69	0.69
Na <sub>2</sub> O	1.02	2.27	3.17
TiO <sub>2</sub>	0.44	0.13	0.11
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0.01	0.12	0.16
SO <sub>3</sub>	0.42	17.00	13.50
TOTAL	98.13	99.10	97.30

ภคมน ปินตานา และคณะ [7] ทำการเก็บตัวอย่างเถ้าหลอมจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ที่มีปริมาณของ CaO ในเถ้าสูงของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เพื่อศึกษาวิเคราะห์ลักษณะและคุณสมบัติของเถ้าหลอมเนื่องจากถ่านหินลิกไนต์ที่มีปริมาณของ CaO ในขี้เถ้าสูงอาจเป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิหลอมของเถ้าลดลงนำไปสู่ปัญหาที่เกิดจากเถ้าได้ซึ่งส่งผลเสียไปยังอุปกรณ์ ประสิทธิภาพของระบบลดลง รวมถึงค่าใช้จ่ายและเวลาเพื่อบำรุงรักษา โดยในการศึกษานี้ใช้ดัชนีต่าง ๆ (B/A ratio, slagging index, ash flow temperatures analysis, ash fusibility analysis) ในการวิเคราะห์แนวโน้มและคุณสมบัติของเถ้ากับสแลก โดยผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า ในสแลกประกอบไปด้วยธาตุออกซิเจน อลูมิเนียม ซิลิกา และแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ องค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของสแลกประกอบไปด้วย CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ MgO ค่า Base-to-acid ratio อยู่ในช่วง 0.68 ถึง 1.14 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการเกิดสแลกมากเมื่ออุณหภูมิหลอมของเถ้าลดลงทำให้ค่า slagging index เพิ่มขึ้น และพบว่า CaO และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเถ้าของถ่านหินลิกไนต์มีส่วนกระทบกับการเกิดสแลกอย่างมีนัยสำคัญ

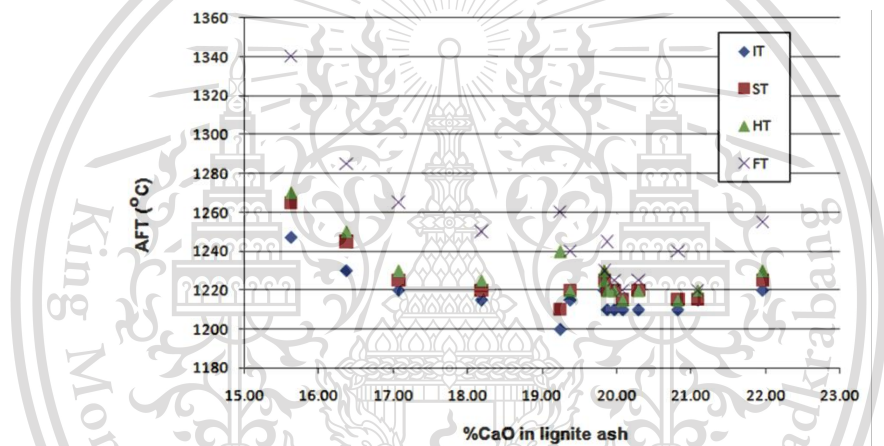
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

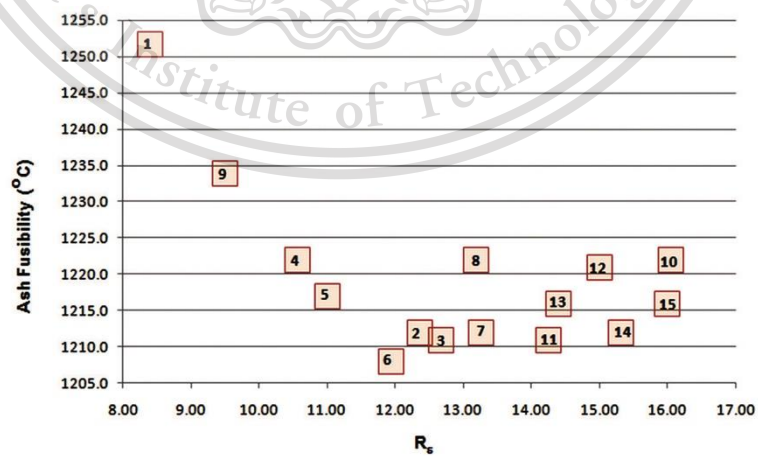
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ash fusion temperatures กับ B/A ratio [7]



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ash fusion temperatures กับ ปริมาณ CaO [7]



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ash fusion temperatures กับ slagging index [7]

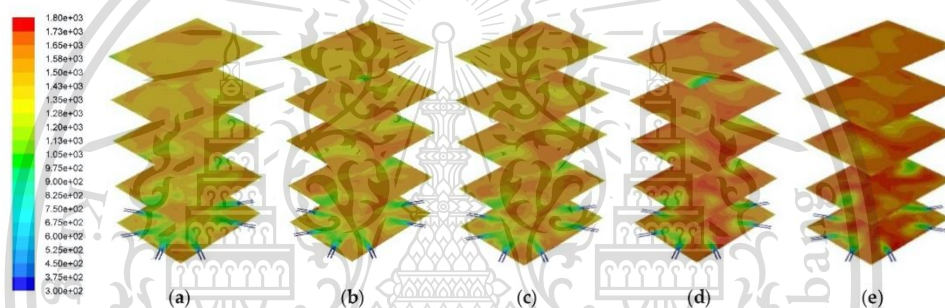
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

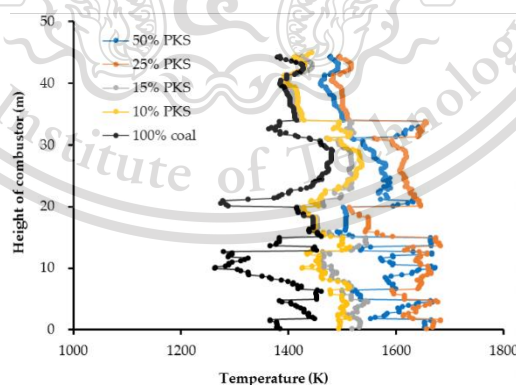
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



Muhammad Aziz และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาโดยใช้ Computational fluid dynamic (CFD) เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนและการเกิด  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_x$  และ  $\text{SO}_x$  ของการใช้กะลาปาล์มผสมกับถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงให้กับโรงไฟฟ้าขนาด 300 MWe โดยมีอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงของกะลาปาล์มเป็น 0%, 10%, 15%, 25%, และ 50% ของน้ำหนักเชื้อเพลิง 5 ตัวอย่าง ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเนื่องจากถ่านที่ใช้เป็นถ่านเกรดต่ำ (low rank coal) ซึ่งมีปริมาณความชื้นสูงกว่ากะลาปาล์ม สัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของกะลาปาล์มทำให้สารระเหยมีมากขึ้น อุณหภูมิของเปลวไฟและอุณหภูมิของไอเสียเพิ่มขึ้น เปลวไฟเสถียรมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม สัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของกะลาปาล์มทำให้มีปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิงน้อยลง ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ลดลง ทางคณะกล่าวว่าจากการกระจายตัวของอุณหภูมิที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.5 นั้น สัดส่วนของกะลาปาล์มที่ 25% ให้อุณหภูมิสูงสุด



รูปที่ 2.5 แสดงภาพตัดขวางการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่เชื้อเพลิงสัดส่วนต่าง ๆ (a) 0% PKS; (b) 10% PKS; (c) 15% PKS; (c) 25% PKS; (a) 50% PKS [9]

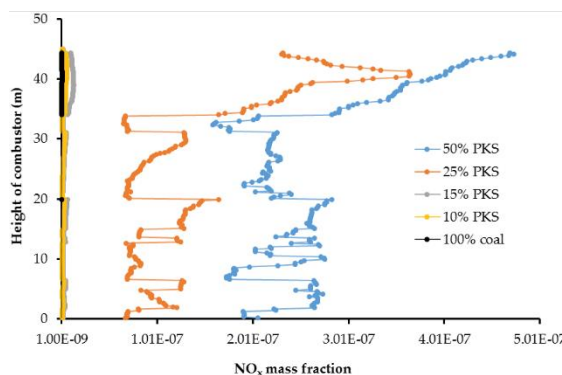


รูปที่ 2.6 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ที่เชื้อเพลิงสัดส่วนต่าง ๆ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.7 แสดงปริมาณสัดส่วนของ  $\text{NO}_x$  ในห้องเผาไหม้ที่เชื้อเพลิงสัดส่วนต่าง ๆ [9]

ในทางด้านไอเสียนั้น จากการศึกษพบว่า สัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของกะลาปาล์มส่งผลให้ปริมาณ  $\text{CO}_2$  และ  $\text{CO}$  ลดลง เนื่องจากถ่านมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่ากะลาปาล์ม คาร์บอนจึงถูกเปลี่ยนไปเป็น  $\text{CO}_2$  และ  $\text{CO}$  มากกว่า และ เนื่องจาก  $\text{CO}_2$  มีความหนาแน่นมากกว่าแก๊สอื่น ๆ พบว่า  $\text{CO}_2$  นั้นสะสมอยู่ที่ช่วงล่างของเตาเผา สัดส่วนที่มากขึ้นของกะลาปาล์มจึงมีความปั่นป่วนน้อยลง และความเร็วของไอเสียเพิ่มขึ้น ในส่วนของ  $\text{O}_2$  นั้น พบว่า สัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของกะลาปาล์มทำให้มีปริมาณแก๊ส  $\text{O}_2$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากกะลาปาล์มมีปริมาณของออกซิเจนสูง เช่นเดียวกับ  $\text{NO}_x$  ที่มีปริมาณสูงขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญเมื่อสัดส่วนของกะลาปาล์มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ 25% และ 50% เนื่องจากสัดส่วนของกะลาปาล์มดังกล่าว มีอุณหภูมิสูงกว่า 1600 K ซึ่งก่อให้เกิด thermal  $\text{NO}_x$  ในทางกลับกัน สัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของกะลาปาล์มมีผลทำให้ปริมาณ  $\text{SO}_2$  ลดลง เนื่องจากกะลาปาล์มมีปริมาณของซัลเฟอร์น้อยมาก

จากข้อมูลงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาและค้นคว้ามานั้น ทำให้ทราบว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล ก่อให้เกิดผลกระทบที่เกี่ยวกับมลพิษ และฟาวลิ่งสูง ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญต่ออุปกรณ์ นำไปสู่การเสียหาย ค่าใช้จ่ายและเสียเวลาเพื่อการบำรุงรักษาด้วย ในการศึกษาของ Muhammad Aziz และคณะ [9] นั้น ได้ใช้กะลาปาล์มผสมกับถ่านหินเกรดต่ำในสัดส่วนต่าง ๆ เป็นเชื้อเพลิง เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางความร้อน และพฤติกรรมของไอเสียที่เกิดขึ้น ดังนั้นการศึกษานี้จะใช้ถ่านหินซับบิฮูมินัสเป็นเชื้อเพลิงผสมกับกะลาปาล์มที่สัดส่วนน้ำหนัก 0% และ 10% โดยมวลเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้และวิเคราะห์แนวโน้มการเกิดสแลกกิ้งและฟาวลิ่งจากการใช้เชื้อเพลิงผสมสัดส่วนดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลกระทบของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความรู้ความเข้าใจในคุณสมบัติของเชื้อเพลิง กระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงตลอดจนการเดโพลีทของถ่าน บทที่สามนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่นำมาใช้เพื่อออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผลกระทบของการศึกษานี้

### 3.1 เชื้อเพลิงแข็ง [10, 11]

เชื้อเพลิง คือ สารที่ให้พลังงานความร้อนออกมาเมื่อเกิดการเผาไหม้จากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เชื้อเพลิงแบ่งออกได้เป็น เชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแก๊ส

เชื้อเพลิงแข็งนั้นได้แก่ ถ่านหิน พีต ไม้ ซี้วมวล ขยะ และของเหลือจากอุตสาหกรรมบางประเภทก็ถูกจัดเป็นเชื้อเพลิงเช่นเดียวกัน องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเชื้อเพลิงแข็งหลัก ๆ คือ คาร์บอนและไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังมี ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน น้ำ และเถ้าเป็นองค์ประกอบเช่นกัน ตัวอย่างเช่นใยผลปาล์ม ซึ่งมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบถึง 36.8% (วิเคราะห์โดยปลดถ่านและความชื้น) ในขณะที่ถ่านหินบิทูมินัสมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเพียง 18.4% ดังแสดงที่ตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างองค์ประกอบออกซิเจน ความชื้น และเถ้าในเชื้อเพลิงแข็งชนิดต่าง ๆ [10]

ชนิดของเชื้อเพลิง	ออกซิเจน, % (ปลดถ่านและความชื้น)	ความชื้น, % (แบบสด)	เถ้า, % (แบบสด)
แกลบ	42.80	10.3	14.0
ใยผลปาล์ม	36.8	35.0	4.5
ทะลายปาล์มเปล่า 1	49.74	38.4	3.39
ทะลายปาล์มเปล่า 2	40.6	44.5	2.10
กะลามะพร้าว (อินเดีย)	39.25	6.50	6.50
ไม้ซี้บ (อินเดีย)	44.59	7.00	0.37
ถ่านหินบิทูมินัส	18.40	24.69	4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์ในการค้าแบบที่ได้รับความนิยม (as-received basis) ลักษณะหลักอ้างอิงแห้งหรือไม่คิดความชื้น (dry basis) และไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ลักษณะหลักอ้างอิงแห้ง และไม่คิดเถ้า (dry, ash-free basis) การระบุงค์ประกอบนั้นจะต้องระบุให้ถูกต้องตามประเภท เนื่องจากองค์ประกอบต่าง ๆ ของเชื้อเพลิงนั้นจะถูกนำไปใช้คำนวณค่าความร้อนทางสูง และความร้อนทางต่ำของเชื้อเพลิง

ความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งนั้นมีผลกระทบโดยตรงต่อการเผาไหม้ ความชื้นในเชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วยสองรูปแบบ รูปแบบที่หนึ่งคือน้ำอิสระที่แทรกตัวอยู่ระหว่างผนังเซลล์หรือในรูพรุนเล็ก ๆ ของเชื้อเพลิง รูปแบบที่สองคือน้ำที่ถูกดูดกลืนเชิงกายภาพ (physical absorption หรือ bound water)

เถ้าที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งก็คือสารอนินทรีย์ที่หลงเหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้สิ้นสุดลงแล้ว ซึ่งการที่เชื้อเพลิงแข็งมีเถ้าเป็นองค์ประกอบสูงนั้นส่งผลให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ และการถ่ายโอนความร้อนได้ การเลือกใช้เชื้อเพลิงจึงเป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญอย่างมาก

ในการศึกษานี้ เชื้อเพลิงแข็งที่ถูกนำมาศึกษาคือ ถ่านหินบิทูมินัส และกะลาปาล์ม ซึ่งเชื้อเพลิงทั้งสองผ่านการบดมาแล้ว ในการหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้นั้นได้จากบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

### 3.1.1 ประเภทและลักษณะของเชื้อเพลิงแข็ง

ประเภทและลักษณะของเชื้อเพลิงแข็งที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้ มี 3 ประเภท ดังนี้

#### 3.1.1.1 พีต (Peat)

พีต คือเชื้อเพลิงที่เกิดจากเซลลูโลสในซากพืชที่ถูกหมักหมดในบริเวณอับอากาศจนเกิดการเน่าสลายโดยมีแบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพีตนั้นมีรูพรุนและความชื้นสูงมาก การนำมาใช้จึงจำเป็นต้องทำให้แห้งด้วยกระบวนการต่าง ๆ ก่อน



รูปที่ 3.1 ลักษณะรูปร่างของพีตที่เกิดจากซากพืช [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.1.1.2 ถ่านหิน (Coal)

ถ่านหิน เกิดจากซากพืชซากสัตว์ที่ถูกทับถมอัดรวมกันเป็นเวลานานจนกลายเป็นหิน โดยเริ่มจากพืชที่เกิดการสลายตัวทางเคมีชีวภาพ (biochemical decomposition) พร้อมกับถูกทับถมเพิ่มเรื่อย ๆ จนทำให้ความชื้น รูพรุน ปริมาณสารระเหย ปริมาณออกซิเจน และปริมาณของไฮโดรเจนมีปริมาณลดลง ในขณะที่มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ทำให้พืชนั้นกลายเป็นถ่านหินที่มีศักดิ์สูงขึ้นตามลำดับคือ ลิกไนต์ บิทูมินัส และแอนทราไซต์ กระบวนการนี้ถูกเรียกว่าการเกิดถ่านหิน (coalification)



รูปที่ 3.2 ถ่านหินลิกไนต์ที่เกิดจากการทับถมกันของพืชเป็นเวลานาน [12]

คุณภาพของถ่านหินนั้นถูกแบ่งเป็นสองประเภทคือ แบ่งตามศักดิ์ของถ่านหิน (rank of coal) และแบ่งตามเกรดของถ่านหิน (grade of coal) ซึ่งการแบ่งตามศักดิ์ของถ่านหินนั้นจะพิจารณาจากค่าความร้อนของถ่านหิน และปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอนคงตัวภายใต้เงื่อนไขหลักอ้างอิงแห้ง และไม่คิดเถ้า ดังแสดงในตารางที่ 3.4 ในขณะที่การแบ่งตามเกรดของถ่านหินนั้น จะพิจารณาจากปริมาณเถ้า จุดหลอมของเถ้า ปริมาณกำมะถัน และสารประกอบคุณภาพต่ำต่าง ๆ เกรดของถ่านหินนั้น สามารถเพิ่มเกรดได้หลายวิธี เช่น การบดถ่านหินให้ละเอียดจนเหลือขนาด 10 mm แล้วนำไปล้างด้วยน้ำเพื่อลดปริมาณเถ้าลงจนเหลือน้อยกว่า 1% ได้

ตารางที่ 3.2 แสดงลักษณะของถ่านหิน [10]

ประเภท	ความหนาแน่น [g/cm <sup>3</sup> ]	ความร้อนจำเพาะ	อุณหภูมิติดไฟ [°C]	ค่าความร้อน [kJ/kg]
ลิกไนต์	0.8-1.5	0.26-0.28	250-300	23020-31400
บิทูมินัส	1.2-1.7	0.24-0.28	300-400	31400-36840
แอนทราไซต์	1.5-1.8	0.22-0.24	400-450	34330-35580

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีระหว่างไม้สนกับถ่านหินบิทูมินัส [10]

ธาตุ	ไม้สน [ppm]	ถ่านหินบิทูมินัส [ppm]
Ca	760	>5000
Na	28	200-5000
K	39	200-5000
Mg	110	200-5000
Mn	97	6-210
Fe	10	>50000
P	40	10-340
Si	-	>50000
Al	6	>50000
Cl	48	200-1000

ตารางที่ 3.4 การแบ่งชนิดของถ่านหินตามคักดิ์ของถ่านหิน (หลักอ้างอิงแห้งและไม่คิดเถ้า) [10]

คักดิ์ของถ่านหิน	คาร์บอนคงตัว [%]	ค่าความร้อนทางสูง [MJ/kg]
เมตา-แอนทราไซต์	>98	
แอนทราไซต์	92-98	
เซมิแอนทราไซต์	86-92	
บิทูมินัสสารระเหยต่ำ	78-86	
บิทูมินัสสารระเหยปานกลาง	69-78	
บิทูมินัสสารระเหยสูง A		>32
บิทูมินัสสารระเหยสูง B		30-32
บิทูมินัสสารระเหยสูง C		27-30
ซับบิทูมินัส A		24-27
ซับบิทูมินัส B		22-24
ซับบิทูมินัส C		19-22
ลิกไนต์ A		15-19
ลิกไนต์ B		<15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.1.1.3 เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือวัสดุชีวภาพที่ได้จากสิ่งมีชีวิต แต่ในบริบทของการนำชีวมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงาน ชีวมวลหมายถึงสิ่งที่ได้จากการเพาะปลูกพืชเป็นหลัก ซึ่งอาจจะรวมไปถึงมูลสัตว์ด้วย เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถจำแนกออกได้เป็นสองประเภทตามต้นกำเนิดและประเภทตามสมบัติของชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลที่ถูกจำแนกตามต้นกำเนิดสามารถแบ่งออกได้เป็นสี่ประเภท

1. วัสดุเหลือใช้ปฐมภูมิ คือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากพืชอาหารและป่าไม้
2. วัสดุเหลือใช้หัตถภูมิ คือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการผลิตในอุตสาหกรรม
3. วัสดุเหลือใช้ตติภูมิ คือผลิตภัณฑ์พลอยได้จากของใช้ของเสีย
4. พืชพลังงาน เช่น ยูคาลิปตัส กระจินยักษ์ หญ้าเนเปียร์ เป็นต้น

เชื้อเพลิงชีวมวลที่ถูกจำแนกตามคุณสมบัติสามารถแบ่งได้เป็นหกประเภท

1. เชื้อเพลิงไม้และไม้ยืนต้น เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน ไม้จากการรื้อถอน
2. พืชล้มลุก เช่น ฟางข้าว หญ้า และลำต้นข้าวโพด
3. ของเสีย เช่น กากตะกอนจากน้ำเสีย เชื้อเพลิงขยะ
4. ของเสียจากอุตสาหกรรม
5. พืชน้ำ
6. พืชพลังงาน

โดยทั่วไป เชื้อเพลิงชีวมวลอาจแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่คือ ผลิตภัณฑ์ของเสีย ผลิตภัณฑ์ของเสียนั้นรวมถึงไม้ (เช่น ไม้เลื้อย ไม้ยืนต้น ไม้ท่อน และเปลือกไม้) วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (เช่น ฟางข้าว ลำต้นและใบข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง) ของเสียจากเทศบาลและโรงงานอุตสาหกรรม เชื้อเพลิงขยะ เชื้อเพลิงชีวมวลอีกกลุ่มคือ พืชพลังงาน ซึ่งหมายถึงพืชที่เพาะปลูกขึ้นมาเพื่อผลิตเป็นพลังงานโดยเฉพาะ ไม้ยืนต้นเร็ว (กระจินยักษ์ เป็นต้น) และพืชล้มลุกจำพวกหญ้า พืชเหล่านี้เจริญเติบโตได้รวดเร็วมาก ดังนั้นจึงสามารถป้อนเป็นเชื้อเพลิงให้กับโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงชีวมวลได้อย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 3.3 เชื้อเพลิงไม้อัดแท่ง (pallet) [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### ชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน

จากข้อมูลกล่าวว่ามีปริมาณการผลิตปาล์มน้ำมันในประเทศกว่า 8.75 ล้านตัน ทางใบและก้านคิดเป็นปริมาณเท่ากับ 2.36 ล้านตัน เมื่อคิดประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวม (65%) และการนำไปใช้ประโยชน์ จะมีปริมาณชีวมวลคงเหลือสุทธิ 1.54 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเทียบเท่า 481 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า 183 MW



รูปที่ 3.4 ลำต้นปาล์ม [1]

กากใบปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตของกรมส่งเสริมการเกษตร ปาล์มน้ำมันมีปริมาณของกากใบปาล์ม น้ำมันที่ได้เท่ากับ 1.31 ล้านตัน โดยชีวมวลประเภทนี้จะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมสกัด น้ำมันปาล์ม เมื่อหักปริมาณที่ถูกใช้งานออกจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 0.23 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อน 81.3 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 31 MW

ทะลายปาล์ม จากข้อมูลผลผลิตปาล์มน้ำมันของกรมส่งเสริมการเกษตร สามารถประเมินปริมาณของทะลายปาล์มได้เท่ากับ 2.01 ล้านตัน โดยมีการนำชีวมวลประเภทนี้ถูกนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าคิดเป็นปริมาณรวม 80,000 ตัน และใช้ในประเภทอื่น ๆ อีก เช่น ทำเป็นปุ๋ย และนำไปเพาะเห็ด คิดเป็นปริมาณ 160,000 ตัน ดังนั้นจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิเท่ากับ 1.13 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานทางความร้อนเท่ากับ 385 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 146 MW

กะลาปาล์ม จากข้อมูลสามารถประเมินปริมาณกะลาปาล์มได้เท่ากับ 0.53 ล้านตัน โดยมีการใช้ชีวมวลประเภทนี้ในภาคอุตสาหกรรมเพื่อเป็นเชื้อเพลิงคิดเป็นปริมาณรวม 18,000 ตัน และใช้ในประเภทอื่น ๆ 147,000 ตัน ดังนั้นจะมีชีวมวลคงเหลือสุทธิ 0.31 ล้านตัน คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 114 ktoe และคิดเป็นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 43 MW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.5 กะลาปาล์ม

### 3.1.2 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (heating value) คือค่าปริมาณความร้อนต่อหน่วยมวลของเชื้อเพลิงที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ในสภาวะเริ่มต้นที่ 25 °C ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับออกซิเจนได้สารผลิตภัณฑ์ที่เย็นตัวลงมาที่ 25 °C ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีสองค่าคือ ค่าความร้อนทางสูง (higher heating value, HHV) หรือ gross calorific value (gross C.V.) ซึ่งเกิดขึ้นกรณีที่ไอน้ำในสารผลิตภัณฑ์การเผาไหม้กลั่นตัวเป็นน้ำ และ ค่าความร้อนทางต่ำ (lower heating value, LHV) หรือ net calorific value (net C.V.) เกิดในกรณีที่ไอน้ำไม่กลั่นตัว

### 3.1.3 การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็ง

การวิเคราะห์เชื้อเพลิงแข็งโดยประมาณ (proximate analysis) นั้น สามารถทำได้โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3172 ซึ่งจะได้ปริมาณของความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงตัวอย่างที่ทดสอบออกมา

การวิเคราะห์เชื้อเพลิงแข็งแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) นั้นสามารถทำได้โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3176 ซึ่งจะได้ปริมาณองค์ประกอบธาตุต่าง ๆ ของเชื้อเพลิงตัวอย่างที่ถูกทดสอบ

ในการหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งนั้น สามารถทำได้โดยการใช้เครื่องมือวัดมาตรฐานที่ใช้หาค่าความร้อนคือ adiabatic bomb calorimeter ภายใต้สภาวะที่เกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ตามมาตรฐาน ASTM D2015 ซึ่งค่าความร้อนที่ได้จากการทดสอบจะเป็นค่าความร้อนรวม (gross heating value) หรือก็คือ ค่าความร้อนทางสูง (higher heating value)

การวิเคราะห์และทดสอบเชื้อเพลิงแข็งในการศึกษานี้ทั้งหมดนั้นถูกวิเคราะห์โดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

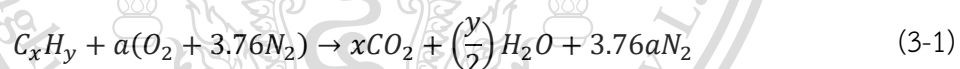
## 3.2 การเผาไหม้ (Combustion) [10]

ในระหว่างปฏิกิริยาการเผาไหม้ ส่วนประกอบที่มีอยู่ก่อนการเผาไหม้เรียกว่า สารตั้งต้น (reactants) ได้แก่ เชื้อเพลิงและอากาศ และส่วนประกอบที่เกิดขึ้นหลังจากเผาไหม้เรียกว่า ผลิตภัณฑ์ (products)

### 3.2.1 การเผาไหม้ตามปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometric Combustion)

การเผาไหม้ตามปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometric combustion) หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการไหม้ทางทฤษฎี (theoretical combustion) คือ กระบวนการเผาไหม้ที่ต้องการออกซิเจนในปริมาณที่พอดีทำให้เกิดการเผาไหม้โดยสมบูรณ์ เรียกปริมาณออกซิเจนนี้ว่า ปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) หรือ ปริมาณอากาศทางทฤษฎี (theoretical air) อากาศที่เข้าสู่กระบวนการเผาไหม้มีปริมาณมากกว่าปริมาณสารสัมพันธ์ จะถูกเรียกว่า อากาศส่วนเกิน (excess air) ซึ่งมีผลทำให้ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเป็น ส่วนผสมบาง (lean mixture หรือ fuel lean) แต่หากปริมาณอากาศที่ใช้ในกระบวนการเผาไหม้มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณสารสัมพันธ์ เรียกว่า ส่วนผสมหนา (rich mixture หรือ fuel rich) สมการการเผาไหม้ตามปริมาณสารสัมพันธ์ หรือตามทฤษฎี ได้จากการสมดุลอะตอมหรือสมดุลมวล ระหว่างสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ โดยสมมติว่าการเผาไหม้นั้นเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์

สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่มีสูตร  $C_xH_y$  จะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ตามทฤษฎีได้ดังนี้



เมื่อ 
$$a = x + \left(\frac{y}{4}\right) \quad (3-2)$$

สมมติให้ในอากาศแห้งมี  $O_2$  อยู่ 21% และ  $N_2$  79% โดยปริมาตร (หรือโดยโมล) เพื่อความสะดวกในการคำนวณ ดังนั้น อากาศที่มี  $O_2$  อยู่ 1 โมล จะมี  $N_2$  อยู่ 3.76 โมล

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามปริมาณสารสัมพันธ์ หรือ ตามทฤษฎี (stoichiometric หรือ theoretical air-fuel ratio) ถูกนิยามไว้ดังนี้

$$(A/F)_{stoic} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}}\right)_{stoic} = \frac{4.76a}{1} \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}} \quad (3-3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $MW_{air}$  และ  $MW_{fuel}$  คือน้ำหนักโมเลกุลของอากาศและเชื้อเพลิงตามลำดับ

อัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio,  $\phi$ ) เป็นค่าที่บ่งบอกว่าส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นส่วนผสมแบบหนาหรือส่วนผสมแบบบาง หรือตามปริมาณสารสัมพันธ์ มีนิยามว่าดังนี้

$$\phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{(A/F)} = \frac{(F/A)}{(F/A)_{stoic}} \quad (3-4)$$

จากนิยาม จะเห็นได้ว่า เมื่อค่าอัตราส่วนสมมูลมากกว่า 1 หมายถึง ส่วนผสมเชื้อเพลิงหนา ถ้าค่าอัตราส่วนสมมูลมีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ส่วนผสมเชื้อเพลิงเป็นไปตามปริมาณสารสัมพันธ์ และเมื่อค่าอัตราส่วนสมมูลน้อยกว่า 1 แสดงถึงส่วนผสมเชื้อเพลิงบาง ค่าอัตราส่วนสมมูลนั้น เป็นตัวแปรในการประเมินสมรรถนะของระบบ นอกจากนี้ ยังมีตัวแปรอื่น ๆ อีกที่มักถูกนำมาใช้ ได้แก่ เปอร์เซ็นต์อากาศตามปริมาณสารสัมพันธ์ หรือเปอร์เซ็นต์อากาศทางทฤษฎี (percent stoichiometric หรือ theoretical air) ซึ่งนิยามว่า คือร้อยละของอากาศที่ใช้จริงเทียบกับปริมาณอากาศทางทฤษฎี และมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนสมมูลดังนี้

$$\%stoichiometry\ air = \frac{m_a}{(m_a)_{stoic}} \times 100\% = \frac{100\%}{\phi} \quad (3-5)$$

และอีกตัวแปรหนึ่งที่เป็นมักถูกนำมาใช้คือ % อากาศส่วนเกิน (percent excess air) มีนิยามดังนี้

$$\%excess\ air = \frac{(1 - \phi)}{\phi} \times 100\% \quad (3-6)$$

ตัวอย่างเช่น excess air = 25% หมายความว่า % อากาศที่ใช้จริงเท่ากับ 125% ของอากาศตามปริมาณสารสัมพันธ์ เป็นต้น

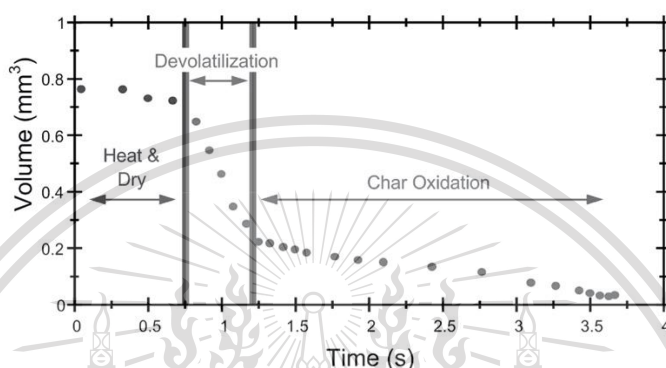
### 3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuel Combustion) [11]

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงกลไกการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านหินและเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเมื่ออนุภาคของเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจากการไหลของอากาศร้อน มวลของเชื้อเพลิงจะมีปริมาณลดลงตามช่วงสาม

ช่วง ได้แก่ (i) การอบแห้ง (drying) ความชื้นในอนุภาคถูกขับออก เมื่อถึงอุณหภูมิที่พอเหมาะ อนุภาคเชื้อเพลิงเกิดการแยกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงการกับระเหย ต่างกันที่การ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แยกสลายด้วยความร้อนเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เทียบกับการระเหย (ii) ช่วงถัดมาคือ การปล่อยสารระเหย (devolatilization) ได้สารอินทรีย์ที่เผาไหม้ได้ และถ่านคาร์บอน (iii) ช่วงสุดท้ายคือการเผาไหม้ถ่านคาร์บอน (char combustion) เกิดขึ้นหลังจากการแยกสลายด้วยความร้อนสิ้นสุดลง โดยที่สารระเหยกับถ่านคาร์บอนถูกเผาไหม้ไปพร้อม ๆ กัน

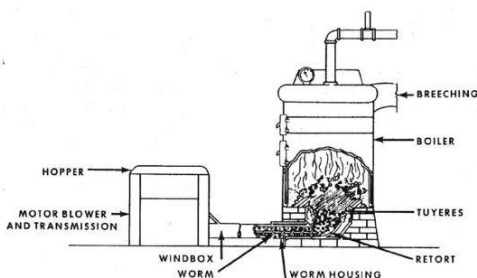


รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขนาดเล็ก [11]

ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ตามลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดังนี้ [13]

### 3.3.1 ระบบเผาไหม้แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed combustion)

ระบบเผาไหม้แบบเบดนิ่ง คือ ระบบที่ใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมภายในประเทศไทย ระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้อยู่บนตะแกรง แบ่งเป็น 2 ลักษณะใหญ่ ๆ ตามทิศทางการป้อนเชื้อเพลิงเทียบกับทิศทางของอากาศคือ ระบบ underfeed firing ซึ่งเชื้อเพลิงถูกป้อนขึ้นในทิศทางเดียวกันกับการไหลของอากาศ และ ระบบ overfeed firing ที่เชื้อเพลิงถูกป้อนลงในทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลของอากาศ



รูปที่ 3.7 ระบบ Underfeed firing [13]

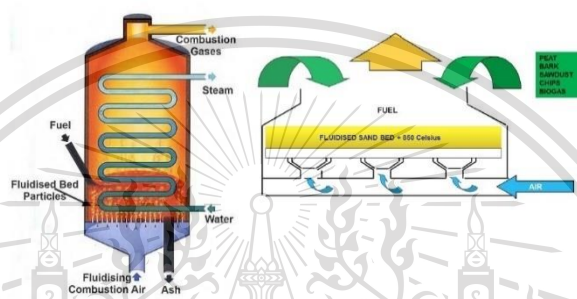
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.3.2 ระบบเผาไหม้แบบฟลูอิดไชน์เบด (Fluidized-bed combustion)

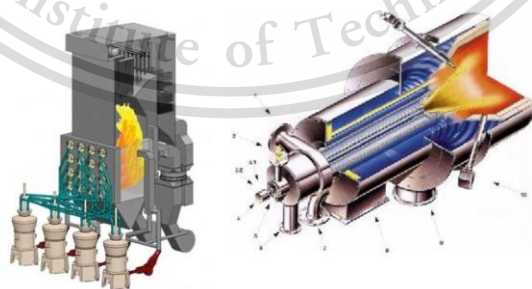
ระบบเผาไหม้แบบฟลูอิดไชน์เบดเป็นระบบที่เชื้อเพลิงเคลื่อนที่กระจายลอยตัวคล้ายน้ำเดือด หรือเรียกว่าสภาพฟลูอิดไชน์เซชัน ภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งอนุภาคเชื้อเพลิงจะถูกพุงให้ลอยตัวอยู่ในแก๊สโดยกระแสลม ทำให้อนุภาคเชื้อเพลิงเกิดการกระจายตัวและผสมผสานกับอากาศอย่างสม่ำเสมอทำให้ได้การเผาไหม้ที่ดี เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ได้สูงถึงร้อยละ 97-99



รูปที่ 3.8 ระบบ Fluidized bed combustion [13]

### 3.3.3 การเผาไหม้แบบเบดเคลื่อนที่หรือเบดลอย (Transportation bed หรือ Moving bed combustion)

ในระบบนี้เชื้อเพลิงที่ถูกใช้จะมีลักษณะเป็นผงเคลื่อนที่ขณะลุกไฟได้แก่ ระบบ pulverized combustion ซึ่งเชื้อเพลิงจะถูกบดเป็นผงและถูกพ่นเข้าสู่ห้องเผาไหม้พร้อมกับอากาศชั้นต้น (primary air) นอกจากนี้ยังมีอากาศส่วนที่สองที่ถูกบดเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อช่วยในการเผาไหม้ด้วย ทำให้ระบบนี้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงได้ถึงร้อยละ 90



รูปที่ 3.9 ระบบเผาไหม้แบบ Pulverized combustion [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.4 มลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ (Emissions) [10]

การเผาไหม้นั้น ก่อให้เกิดมลพิษหลัก ๆ ได้แก่  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ , Tar,  $\text{HCl/Cl}_2$ , PAH (polyaromatic hydrocarbon), PCDD (polychlorinated dibenzo - dioxins), PCDF (polychlorinated dibenzofurans), โลหะหนัก ฝุ่น (particulate matter) เขม่า (soot) และอนุภาคถ่านที่เผาไหม้ไม่หมด ซึ่งในการศึกษานี้ จะศึกษาปริมาณมลพิษของ  $\text{CO}$  และ  $\text{NO}_x$  ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เท่านั้น

#### 3.4.1 การปลดปล่อย CO

การที่คาร์บอนในเชื้อเพลิงถูกเปลี่ยนไปเป็น  $\text{CO}_2$  ต้องผ่านปฏิกิริยาขั้นพื้นฐานจำนวนมากและหลายเส้นทาง  $\text{CO}$  เป็นสารชั้นกลางที่สำคัญที่สุด เมื่อมีออกซิเจนเพียงพอ  $\text{CO}$  ก็จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็น  $\text{CO}_2$  ดังสมการ อัตราการออกซิเดชันของ  $\text{CO}$  นั้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นหลัก อากาศส่วนเกินน้อยเกินไป ระยะเวลาการเผาไหม้ไม่เพียงพอ อุณหภูมิเผาไหม้ต่ำ ล้วนเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด  $\text{CO}$



การจ่ายอากาศทุติยภูมิเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของกระแสแก๊สและอนุภาคนั้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และยังช่วยลดการปลดปล่อย  $\text{CO}$  เช่นเดียวกัน เนื่องจากการออกซิเดชันของอากาศปฐมภูมิได้รับ  $\text{O}_2$  เพิ่มขึ้นจากอากาศทุติยภูมิ และเนื่องจากการความปั่นป่วนทำให้เกิดการผสมระหว่างแก๊สเผาไหม้กับอากาศทุติยภูมิที่ดีขึ้น

#### 3.4.2 การปลดปล่อย $\text{NO}_x$

ออกไซด์ของไนโตรเจนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนนั้น ถูกพิจารณาว่าเป็นสาเหตุของการเกิดหมอกทางโฟโตเคมี หรือแก๊สโอโซนในระดับต่ำซึ่งเป็นพิษต่อทางเดินหายใจ นอกจากนี้แล้วยังเป็นตัวทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ stratosphere ของโลกดังสมการข้างล่างอีกด้วย

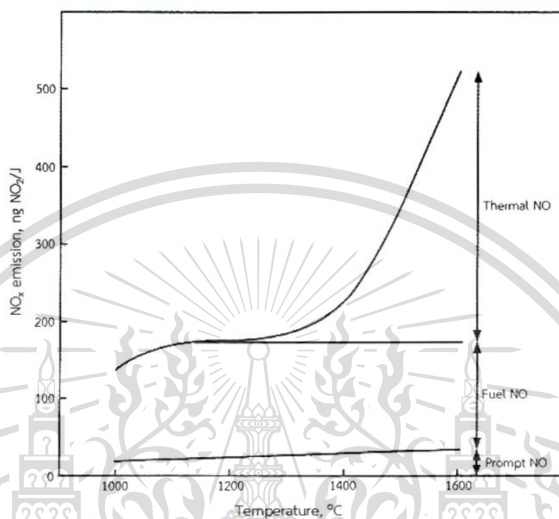


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

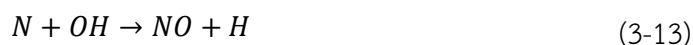
$\text{NO}_x$  นั้นมีองค์ประกอบหลัก คือ NO มาจากเส้นทางหลัก ๆ ทางเคมีสามเส้นทางได้แก่ Thermal - $\text{NO}_x$ , Prompt -  $\text{NO}_x$  หรือ Fenimore -  $\text{NO}_x$ , และ Fuel -  $\text{NO}_x$



รูปที่ 3.10 ความเข้มข้นของ  $\text{NO}_x$  แต่ละประเภท [10]

#### 3.4.2.1 Thermal - $\text{NO}_x$

เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง (>1300 °C) จากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่าง  $\text{O}_2$  และ  $\text{N}_2$  ในอากาศเผาไหม้ ส่วนใหญ่จะพบบ่อยในการเผาไหม้แบบแฉวนลอย เนื่องจากเป็นการเผาไหม้ภายใต้สภาวะเชื้อเพลิงหนาและอุณหภูมิการเผาไหม้สูง สมการพื้นฐานมีดังนี้



การลดปริมาณ thermal -  $\text{NO}_x$  นั้นสามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิในการเผาไหม้

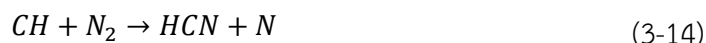
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.4.2.2 Prompt – NO<sub>x</sub>

เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วบริเวณส่วนหน้าของเปลวไฟระหว่าง N<sub>2</sub> ในอากาศกับอนุมูลอิสระไฮโดรคาร์บอนจากเชื้อเพลิง ได้ HCN เป็นสารผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นสารชั้นกลางที่สำคัญของการเกิด NO ดังสมการ



### 3.4.2.3 Fuel – NO<sub>x</sub>

หรือ NO<sub>x</sub> ที่เกิดจากการออกซิเดชันไนโตรเจนในเชื้อเพลิง เป็นสาเหตุหลักของการเกิด NO<sub>x</sub> จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและของเสีย การลดการเกิด Fuel – NO<sub>x</sub> สามารถทำได้โดยการรักษาสัดส่วนของออกซิเจนในแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงในเปลวไฟให้ต่ำไว้ ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงก็จะเปลี่ยนไปเป็น NO น้อยลงตาม

### 3.4.3 ฝุ่นและเขม่า (Particulates ad Soot)

ฝุ่น (particulate matter) เกิดจากการที่มีสารอนินทรีย์ปะปนอยู่ในเชื้อเพลิง ซึ่งถูกเผาไหม้แล้วกลายเป็นฝุ่นออกมาพร้อมกับแก๊สไอเสีย ฝุ่นนั้นมีหลายขนาด และมีน้ำหนักมากจึงถูกแยกออกมาจากแก๊สไอเสียได้ง่าย เช่น เถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา (bottom ash) ในขณะที่ฝุ่นบางชนิดที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอนจะลอยปนอยู่ในแก๊สไอเสียอย่างถาวร ฝุ่นเหล่านี้เรียกว่า เถ้าลอย (fly ash) จึงต้องใช้วิธีการพิเศษเพื่อกำจัดเถ้าลอยออก เช่น ใช้ถุงกรอง (bag filter), ใช้เครื่องแยกอนุภาคด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) และใช้ไซโคลน (cyclone) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เขม่า (soot) คืออนุภาคคาร์บอนที่มีส่วนของไฮโดรเจนรวมอยู่เป็นอย่างน้อย 1% โดยมวล มีสูตรทางเคมีอย่างง่ายคือ  $C_8H$  มักเกิดในบริเวณที่มีเชื้อเพลิงหนา (fuel-rich regions) ขั้นตอนการเกิดเขม่า มีดังนี้

1. การเกิดขึ้นเป็นอนุภาค (particle inception) ระหว่างปฏิกิริยาการเผาไหม้ เริ่มต้นที่โมเลกุลอนุภาคก่อตัวเป็นนิวเคลียส (nucleation) หรือเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากระดับโมเลกุล โดยนิวเคลียสดังกล่าวมักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นแบบวงแหวน เช่น polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) ซึ่งถือเป็นสารขั้นกลางก่อนเกิดเขม่า ทำปฏิกิริยากับ  $C_2H_2$  รวมตัวกันเป็นก้อนโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น
2. การเติบโตของผิวรอบนอก (surface growth) แต่ละอนุภาคเขม่าจะเกิดการขยายตัวใหญ่ขึ้นจากการเกาะตัวของสารตัวกลางต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่คือ  $C_2H_2$  ที่มีมากถึง 85% ของมวลรวม
3. การเกาะรวมตัวกัน (coagulation) อนุภาคเขม่าเกิดการรวมตัวกันจากการเคลื่อนที่ชนกัน เกิดเป็นอนุภาคจุลสาร รูปร่างลักษณะคล้ายห่วงโซ่
4. การออกซิไดซ์เขม่า (soot oxidation) หลังจากที่เขม่าเกิดขึ้นแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มักเกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของ reaction zone ที่อยู่ตรงปลายของเปลวไฟ เขม่าจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นกระแสผ่านเข้าไปในบริเวณการเผาไหม้ที่ปลายของเปลวไฟนั้น ถ้าเขม่าถูกเผาไหม้จนหมดจะเรียกเปลวไฟนั้นว่า เปลวไฟไร้เขม่า ในขณะที่ถ้าเขม่าเผาไหม้ไม่หมดจะเกิดเปลวไฟมีเขม่า

### 3.5 การสะสมของสแลกกิ่งและฟาวลิ่งในหม้อไอน้ำประเภทเชื้อเพลิงบดละเอียด [14]

ในหัวข้อนี้จากกล่าวถึงกลไกการเกิดและปัญหาการก่อตัวสะสมของเถ้าที่พบในหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงบดละเอียดเป็นเชื้อเพลิงและพูดถึงปัจจัยที่มีผลกับการเกิดปัญหาดังกล่าว

การสะสมของสแลกกิ่ง เกิดขึ้นบริเวณผนังของเตาเผา และบริเวณพื้นผิวของห้องเผาไหม้หลัก รวมไปถึงบริเวณหัวเผา การสะสมนี้มักจะประกอบด้วยชั้นเลเยอร์ชั้นในเป็นแบบผง และถูกปกคลุมด้วยเถ้าหลอมเป็นชั้น ๆ ซึ่งเถ้าสะสมบนบริเวณผิวผนังของเตาเผามักจะเป็นพวก ซิลิเกต เหล็ก และสารจำพวก แอลคาไล สแลกกิ่งนั้นส่งผลต่อการดูดซับความร้อนของเตาเผาน้อยลง ทำให้ไอเสียมีอุณหภูมิสูงขึ้น เกิดการโอเวอร์ฮีตของแผงซูเปอร์ฮีเตอร์ซึ่งก่อให้เกิดการฟอร์มตัวสะสมของเถ้าบริเวณผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

การสะสมของฟาวลิ่ง เกิดขึ้นบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเช่น ซูเปอร์ฮีเตอร์ และรีฮีเตอร์ที่ทางออกของเตาเผา ฟาวลิ่งอุณหภูมิสูงมีนิยามคือ การรวมตัวกันของเถ้าที่หลอมที่อุณหภูมิที่ 900-1300 °C ในขณะที่ฟาวลิ่งอุณหภูมิต่ำคือการสะสมของเถ้าที่หลอมกันเล็กน้อยในไอเสีย มีช่วงอุณหภูมิที่ 300-900 °C ซึ่งกลไกการเกิดฟาวลิ่งนั้นเกี่ยวข้องกับการควบแน่นของสารระเหยใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษายาทางน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลวไฟ โดยเกิดในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและความเข้มข้นของแก๊ส สารอนินทรีย์ในไอเสีย ส่งผลให้เเลเยอร์ชั้นในของกองเถ้าบนผิวท่อหมักจะเป็นเกลือแอลคาไล ซึ่งมีลักษณะที่เหนียวเกิดการดักจับอนุภาคอื่น ๆ

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการสะสมของเถ้าในนี้ได้แก่

คุณภาพลักษณะของเชื้อเพลิง เช่น อุณหภูมิหลอมของเถ้า ความหนืดของสแลก ขนาดของอนุภาค และองค์ประกอบของเถ้า เป็นต้น

การออกแบบหม้อไอน้ำ เช่น อุณหภูมิทางออกของเตาเผา ความสามารถในการดูดซับความร้อนของเตาเผา ขนาดและการจัดเรียงหัวเผา ขนาดและการจัดเรียงท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น

การทำงานของระบบหม้อไอน้ำ เช่น ขนาดของเชื้อเพลิง การกระจายของอากาศระหว่างหัวเผา การทำงานของหัวเผา ระดับอากาศส่วนเกิน ภาวะของหม้อไอน้ำ ระบบ soot blower เป็นต้น

กระบวนการเกิดการสะสมของกองเถ้าในหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงบดละเอียดเป็นเชื้อเพลิงนั้น มีขั้นตอนดังนี้

1. การปลดปล่อยของธาตุที่ก่อให้เกิดการฟอร์มตัวของเถ้า

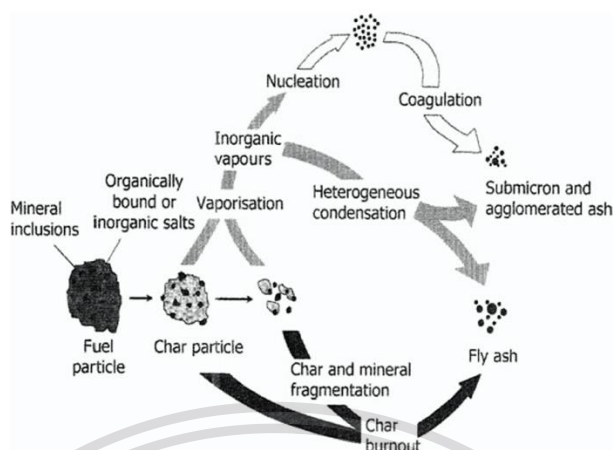
หลังจากที่อนุภาคเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจากรังสีความร้อนและจากไอร้อนแล้ว เกิดการปลดปล่อยสารระเหยประเภทอินทรีย์ออกมาให้เกิดการเผาไหม้ และตามด้วยการเผาไหม้คาร์บอน ในช่วงการปลดปล่อยสารระเหยและการเผาไหม้คาร์บอนของเชื้อเพลิงนั้น สารประเภทอินทรีย์ที่มีพันธะแบบสารอินทรีย์ เช่น K, Ca, P, S และ Cl ถูกปลดปล่อยออกมา เกิดเป็นไอสารอนินทรีย์ขึ้น ใบบางส่วนจะถูกจับรวมกับแร่ ส่วนที่เหลือจะผ่านกระบวนการทางกายภาพและทางเคมีเช่น การเปลี่ยนเฟส การแตกแยกออก การหลอมละลาย และการรวมตัวกันของแร่

การการเถ้าลอยจากการเผาไหม้ของอนุภาคเถ้าในนั้นเกิดขึ้นภายในเวลาน้อยกว่า 2-3 วิ การฟอร์มตัวของอนุภาคขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1 ไมครอน) นั้นเกี่ยวข้องกับการแยกส่วนและการรวมตัวกันของสารแร่เป็นหลัก ในขณะที่การระเหยและการควบแน่นของไอสารอนินทรีย์จะก่อให้เกิดอนุภาคขนาดซิปไมครอนขึ้น ในกรณีของการเผาไหม้ของถ่านหินนั้น เปอร์เซ็นต์การเกิดเถ้าขนาดซิปไมครอนขึ้นนั้นต่ำมาก (ประมาณ 1.0 wt%) เมื่อเทียบกับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.11 แสดงการฟอร์มตัวของเถ้าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง [14]

## 2. การฟอร์มตัวของเกลือและการเปลี่ยนแปลงของแร่

สารอนินทรีย์ที่สำคัญต่อการเกิดสแลกคือแร่ที่มี ไอร์ออน แคลเซียม โพแทสเซียม เป็นเบส รวมไปถึงอลูมิเนียมซิลิเกต ในขณะที่การปลดปล่อยแอลคาไลน์เอิร์ธ (Ca, Mg) และโลหะแอลคาไล (Na, K) อาจส่งผลต่อการเกิดฟาวลิ่งที่เพิ่มขึ้น

เหล็ก หรือ ไอร์ออน สามารถปรากฏอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ ภายในถ่านหิน (ซัลไฟด์, คาร์บอเนต และออกไซด์) อย่างไรก็ตาม รูปแบบที่ปรากฏเป็นส่วนใหญ่คือ ไพไรต์ ( $\text{FeS}_2$ ) ซึ่งเป็นคีย์แพคเตอร์ที่สำคัญต่อการพิจารณาแนวโน้มการเกิดสแลกของถ่านหิน

การเปลี่ยนแปลงของแร่ที่มีแคลเซียมเป็นเบส ซึ่งพบได้ในถ่านหินลิกไนต์ แร่ประเภทนี้มักจะทำปฏิกิริยากับอลูมิเนียมซิลิเกตซึ่งส่งผลต่อการเกิดสแลกก็งเพิ่มขึ้น

โพแทสเซียมมักจะปรากฏอยู่ในถ่านหินในรูปของแร่ดินเหนียว ในขณะที่โซเดียมมักจะอยู่ในรูปของโซเดียมคลอไรด์ซึ่งถูกขับออกจากเชื้อเพลิงได้อย่างง่าย มีการศึกษาหลายการศึกษาที่สนับสนุนว่าปริมาณที่เพิ่มขึ้นของโซเดียมคลอไรด์ หรือคลอไรด์ที่มีพันธะสารอินทรีย์ในถ่านหิน ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยโพแทสเซียมจากซิลิเกตเป็นแก๊สเฟสเพิ่มขึ้น ในขณะที่โซเดียมที่ระเหยถูกจับรวมกับอนุภาคเถ้าหลอมเกิดเป็นสแลกมากขึ้น โลหะแอลคาไลในเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นมักจะอยู่ในรูปของสารละลายที่แอกทีฟสูง เมื่อถูกขับออกเป็นแก๊สเฟส โลหะแอลคาไลที่อยู่ในรูปของซัลเฟอร์ออกไซด์จะฟอร์มเป็น โซเดียม โพแทสเซียม ซัลเฟต ซึ่งเร่งการเกิดฟาวลิ่งมากขึ้นจากชั้นเหนียวบนท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและดักจับอนุภาคเถ้าอื่น ๆ

## 3. การเคลื่อนที่ของเถ้าและการฟอร์มตัวของกองเถ้า

กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคเถ้าสู่พื้นผิวนั้นประกอบไปด้วย การกระทบด้วยแรงเฉื่อย (inertial impaction) การแพร่ (diffusion) และการเคลื่อนที่จากแรงเกรเดียนต์ความร้อน (thermophoresis)

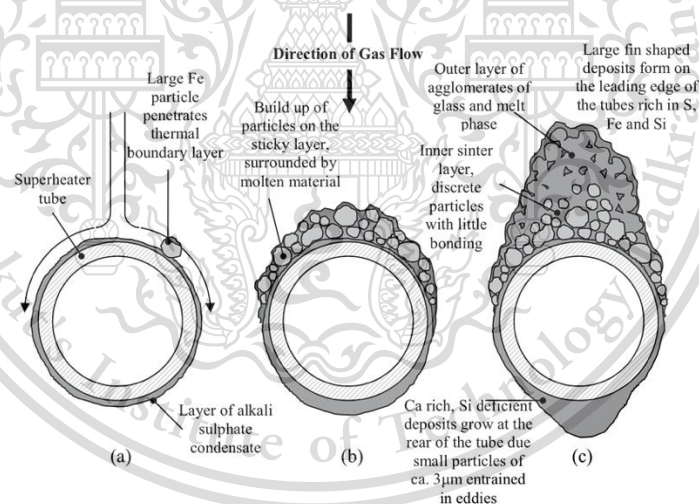
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การเคลื่อนที่ของแก๊สอยู่พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นเกิดขึ้นจากการกระทบด้วยแรงเฉื่อยเป็นขั้นแรกสำหรับอนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 10 ไมครอน และจากการแพร่และเคลื่อนที่จากแรงความร้อนสำหรับอนุภาคขนาด 10 ไมครอนหรือเล็กกว่า อัตราการเกิดการกระทบด้วยแรงเฉื่อยนั้นขึ้นกับรูปร่างของเป้าหมาย ขนาดของอนุภาค และคุณสมบัติของแก๊ส การแพร่นั้นแบ่งออกเป็นสามประเภทคือ Fick diffusion ที่เกิดจากเกรเดียนต์ความเข้มข้น Brownian diffusion จากการเคลื่อนที่แบบสุ่มของอนุภาคขนาดเล็ก และ Eddy diffusion จากผลของการไหลแบบปั่นป่วน การไหลของแก๊ส จุดตกกระทบบนผิวท่อ ลักษณะของพื้นผิวผนังนั้น มีอิทธิพลต่อกระบวนการการเคลื่อนที่เหล่านี้อย่างมาก

กระบวนการก่อตัวของชั้นเลเยอร์ของกองเถ้าบนผิวท่อนั้นแสดงให้เห็นได้ดังรูปด้านล่าง เมื่ออนุภาคเถ้าปะทะกับพื้นผิวท่อ อนุภาคเถ้าเหล่านั้นอาจจะเกาะติดหรือสะท้อนออกได้ การเกาะของอนุภาคนั้นเกิดได้จากทั้งแรง van der Waals หรือเกิดได้จากความเหนียวของอนุภาคหลอมเกาะติดกับผนัง สารประกอบอนินทรีย์ที่เป็นแก๊สอย่างเช่น เกลือแอลคาไล สามารถแพร่สู่ผิวและควบแน่นไปบนพื้นผิวที่มีความเย็นกว่า ซึ่งอย่างที่เคยกล่าวไว้ว่ามันก่อให้เกิดชั้นเลเยอร์ที่มีความเหนียวขึ้น ส่งผลให้เป็นการเร่งการเกิดการเกาะสะสมของอนุภาคอื่น ๆ บนพื้นผิวท่อมากขึ้น



รูปที่ 3.12 การสะสมของเถ้าบนพื้นผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน [14]

จากการสะสมของเถ้าบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ เมื่อเวลาผ่านไป ชั้นนอกของเถ้าสะสมอาจจะมีอุณหภูมิสูงถึงจุดหลอมของมันส่งผลให้เกิดการเกาะตัวสะสมของกองเถ้ามากขึ้น การก่อตัวนี้จะก่อตัวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่อุณหภูมิสูงจนเถ้าหลอมหลุดออกจากพื้นผิว หรือเกิดจากระบบ soot blowing ทำงานทำให้กองเถ้าสะสมเหล่านี้หลุดออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.6 องค์ประกอบของเถ้าของเชื้อเพลิงแข็ง [10]

องค์ประกอบของสารอนินทรีย์ในเชื้อเพลิงหาได้จากการนำเชื้อเพลิงมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี สารอนินทรีย์ในเถ้าจะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ดังนั้นจึงนิยามรายงานองค์ประกอบเถ้าในรูปของออกไซด์ โดยรายงานเป็นร้อยละของน้ำหนักเถ้า และร้อยละของน้ำหนักเชื้อเพลิงแห้ง

ตารางที่ 3.5 องค์ประกอบของเถ้าในรูปออกไซด์ คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของเถ้า [10]

% โดยน้ำหนักเถ้า	แคลส	ไม้มูลิปตัส	เปลือกไม้	ทะเลสาบปาล์มเปล่า	ใยผลปาล์ม
SiO <sub>2</sub>	90.3	22.01	8.1	12.12	33.64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.17	19.05	2.5	0.26	0.82
TiO <sub>2</sub>	0.01	3.01	0.1	N/A	0.14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22	2.22	0.9	N/A	2.02
CaO	0.49	21.12	46.6	9.65	18.74
MgO	0.34	5.98	8.8	1.9	5.58
K <sub>2</sub> O	2.68	10.71	7.5	55.48	20.58
Na <sub>2</sub> O	0.03	12.95	1.5	0.09	0.28
SO <sub>3</sub>	0.34	1.55	N/A	1.66	5.23
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.54	N/A	1.9	N/A	12.32
ส่วนที่ขาดหาย	4.88	1.40	22.1	18.84	0.65
รวม	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.6 องค์ประกอบของเถ้าในรูปธาตุเดี่ยว คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของเถ้า [10]

% โดยน้ำหนักเถ้า	แคลบ	ไม้ยูคาลิปตัส	เปลือกไม้	ทะเลสาบปาล์มเปล่า	ใยผลปาล์ม
Si	92.50	16.72	7.20	9.34	2.57
Al	0.20	16.38	2.52	0.23	0.73
Ti	0.01	2.39	0.11	N/A	0.14
Fe	0.34	2.52	1.20	N/A	2.39
Ca	0.77	24.53	63.34	11.37	22.63
Mg	0.45	5.86	10.09	1.89	5.69
K	4.88	14.45	11.84	75.96	28.87
Na	0.05	15.61	2.12	0.11	0.35
S	0.30	1.01	N/A	1.10	3.54
P	0.52	N/A	1.58	N/A	9.09
รวม	100	100	100	100	100

โลหะแอลคาไล (K, Na) ในเถ้าชีวมวลนั้น มีบทบาทสำคัญสำคัญในการก่อให้เกิดปัญหาการเกาะพอกพูนของอนุภาคบนผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน นอกจากโพแทสเซียมแล้ว ซิลิกอน แคลเซียม คลอรีน และซัลเฟอร์เองก็มีส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาฟาวลิงบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน นอกจากนี้ ยังพบว่าฟอสฟอรัสเองก็มีส่วนอยู่บ้างต่อปัญหาฟาวลิง

ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เมื่อรวมตัวกับโลหะแอลคาไลและแอลคาไลเอิร์ธ โดยเฉพาะโพแทสเซียมที่อยู่ในโหมดระเหยได้โดยง่าย จะเกิดเป็นสารประกอบตัวใหม่ ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำ เกิดการหลอมละลายจากอุณหภูมิภายในเตาเผาได้

การนำเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของเถ้าที่ก่อให้เกิดปัญหา ฟาวลิง สแลกกิ้ง และการรวมกลุ่มอนุภาคมาใช้นั้น ต้องพิจารณาเชื้อเพลิงนั้นให้ดีก่อนนำมาใช้ เพื่อป้องกันและลดแนวโน้มของปัญหาดังกล่าวลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.7 การวิเคราะห์แนวโน้มของปัญหาที่เกิดจากการสะสมของเถ้า [7, 8, 15-22]

ในการวิเคราะห์ผลกระทบเกี่ยวกับการสะสมของเถ้าที่เกิดขึ้นจากการเผาเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินซับบิทูมินัสผสมกับกะลาปาล์ม จะใช้วิธีเก็บตัวอย่างเถ้าที่ได้หลังจากการเผาเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้วนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวอย่างเถ้าได้แก่

1. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าโดยเครื่อง X-Ray fluorescence spectrometry ตามมาตรฐาน ASTM D4326 หาเพื่อสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าแต่ละตัวอย่าง

2. อุณหภูมิหลอมของเถ้า (Ash fusion temperatures)

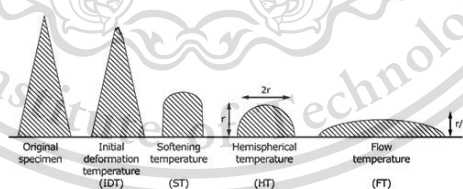
อุณหภูมิหลอมของเถ้า (Ash fusion temperatures) สามารถวิเคราะห์ได้ตามมาตรฐาน ASTM D1857 เพื่อดูพฤติกรรมอุณหภูมิของเถ้าภายใต้สภาวะ Oxidizing หรือ Reducing atmosphere โดยนำเถ้าตัวอย่างไปขึ้นรูปเป็นโคนปลายแหลม และเริ่มให้ความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 900 °C–1,600 °C ซึ่งอุณหภูมิการหลอมของเถ้าประกอบไปด้วย 4 ระดับดังนี้

Initial deformation temperature (IT) คืออุณหภูมิที่เถ้าเริ่มหลอมตัวจากปลายยอดโคน

Softening temperature (ST) คืออุณหภูมิที่เถ้าหลอมตัวจนความสูงของโคนเถ้าเท่ากับความกว้างของฐานโคนเถ้า

Hemispherical temperature (HT) คืออุณหภูมิที่เถ้าหลอมตัวจนความสูงของโคนเถ้าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความกว้างของฐานโคนเถ้า และ

Fluid temperature (FT) คืออุณหภูมิที่เถ้าหลอมละลายจนไหล มีความสูงของโคนเถ้าเป็นหนึ่งในสามของความกว้างของฐานโคนเถ้าดังรูป



รูปที่ 3.13 อุณหภูมิการหลอมของเถ้า [15]

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการส่งตัวอย่างเถ้าที่ผ่านการเผาไหม้จากการทดลองไปวิเคราะห์ข้างต้นนั้น จะถูกนำมาวิเคราะห์แนวโน้มการเกิดผลกระทบที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์มผ่านดัชนีชี้วัดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### Base-to-acid ratio (B/A ratio)

B/A ratio คือหนึ่งในดัชนีในการทำนายแนวโน้มการเกิดของสแลกจากเถ้า ซึ่งระบุแนวโน้มไว้เป็นช่วงดังนี้ แนวโน้มที่จะเกิดสแลกมีน้อย เมื่อค่า B/A ratio น้อยกว่า 0.2 ในช่วงตั้งแต่ 0.2 ถึง 1.0 แสดงถึงแนวโน้มในการเกิดสแลกปานกลาง และ เมื่อค่า B/A ratio มีค่ามากกว่า 1.0 กล่าวได้ว่า แนวโน้มในการเกิดสแลกมีแนวโน้มที่สูง โดยส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้ามีดังนี้  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{MnO}_2$  ซึ่งจะถูกใช้ในการคำนวณ B/A ratio จากสมการที่ (3-19) [16]

$$\frac{B}{A} = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2} \quad (3-19)$$

### Slagging index ( $R_s$ )

ดัชนีสแลกกิ่ง (slagging index) ถูกนำมาใช้แนวโน้มของการเกิดสแลกจากเถ้าเช่นเดียวกับ B/A ratio โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-20) ยิ่งค่า  $R_s$  มีค่าสูง ยิ่งแสดงถึงแนวโน้มที่จะเกิดสแลกมากขึ้น [17]

$$R_s = \left(\frac{B}{A}\right) \times \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad (3-20)$$

### Ash fusibility index ( $T_{AFI}$ )

การวิเคราะห์อุณหภูมิหลอมของเถ้าเพื่อดูแนวโน้มการเกิดสแลก คำนวณได้จากสมการที่ (3-21) โดยเมื่อค่า  $T_{AFI}$  อยู่ในช่วง 1052 – 1232 °C แสดงถึงแนวโน้มในการเกิดสแลกที่สูง และเมื่อค่า  $T_{AFI}$  มีค่าต่ำกว่า 1052 °C แสดงถึงแนวโน้มของการเกิดสแลกที่สูงมาก [18-20]

$$T_{AFI} = \frac{(4IT + HT)}{5} \quad (3-21)$$

### Slag viscosity index (G)

Slag viscosity เป็นหนึ่งในดัชนีที่ทำนายแนวโน้มการเกิดสแลก คำนวณได้จากสมการที่ (3-22) โดยแบ่งช่วงแนวโน้มไว้ที่มากกว่า 72 แนวโน้มการเกิดสแลกต่ำ ช่วง 65 – 72 มีแนวโน้มการเกิด

สแลกปานกลาง และเมื่อค่า Slag viscosity ต่ำกว่า 65 มีแนวโน้มการเกิดสแลกที่สูง [21] ระเบียบข้อดำเนินการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G = \left( \frac{SiO_2}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO} \right) \times 100 \quad (3-22)$$

Fouling index ( $R_f$ )

ดัชนีฟาวลิงเองก็ถูกนำมาใช้ในการทำนายแนวโน้มของการเกิดฟาวลิง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-23) โดยเมื่อค่าดัชนีฟาวลิงมีค่าสูง แสดงถึงแนวโน้มที่จะเกิดฟาวลิงสูง [8]

$$R_f = \left( \frac{B}{A} \right) \times (Na_2O + K_2O) \quad (3-23)$$

**ตารางที่ 3.7** ช่วงแนวโน้มของปัญหาสแลกกิ้งและฟาวลิง [ 7, 8, 15-22]

Evaluation Index	Slagging or Fouling Propensity		
	Slight	Medium	Serious
Base-to-acid ratio	<0.2	0.2 - 1.0	>1.0
Softening temperature	>1390	1260 - 1390	<1260
Ash fusibility index			<1052 °C
Slag viscosity index	>72	65 - 72	<65
Fouling index	<0.6	0.6 - 40	>40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4

### การคำนวณและการออกแบบการทดลอง

ในส่วนของบทที่ 4 จะนำเสนอถึงรายละเอียดการคำนวณโดยอ้างอิงจากทฤษฎีต่าง ๆ ได้แก่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง สมการการเผาไหม้ อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง อัตราการไหลของเชื้อเพลิง และอัตราการไหลของอากาศเป็นต้น ซึ่งที่วิจัยจะใช้ค่าที่ได้ จากการคำนวณเหล่านี้มาใช้ในการทดลองจริง

#### 4.1 สมการการเผาไหม้

ในการทดลองผู้วิจัยต้องทราบถึงลักษณะ และคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ เพื่อนำมาวิเคราะห์สมการการเผาไหม้ และได้มาซึ่งค่าของอัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ

##### 4.1.1 องค์ประกอบธาตุทางเคมีของเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงถ่านหินที่ใช้เป็นถ่านหิน Sub-bituminous ซึ่งนำส่งตรวจองค์ประกอบธาตุได้ดังตารางที่

4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบของถ่านหิน Sub-bituminous

คุณสมบัติ	สภาพนำส่ง	สภาพน้ำหนักแห้ง
ความชื้น, %	17.32	-
เถ้า, %	3.65	4.41
ไฮโดรเจน, %	4.00	4.84
คาร์บอน, %	57.10	69.06
ไนโตรเจน, %	1.18	1.43
ออกซิเจน, %	16.32	19.74
ซัลเฟอร์, %	0.43	0.52
ค่าความร้อนสูง, กิโลแคลอรี/กก.	5480	6630
ค่าความร้อนต่ำ, กิโลแคลอรี/กก.	5180	6270

ที่มา : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเผยแพร่ในนามของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) โดยอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้เป็นกะลาปาล์ม ซึ่งนำส่งตรวจองค์ประกอบธาตุได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงส่วนประกอบของกะลาปาล์ม

คุณสมบัติ	สภาพนำส่ง	สภาพน้ำหนักแห้ง
ความชื้น, %	7.14	-
เถ้า, %	5.86	6.31
ไฮโดรเจน, %	4.95	5.33
คาร์บอน, %	46.89	50.50
ไนโตรเจน, %	0.24	0.26
ออกซิเจน, %	34.85	37.53
ซัลเฟอร์, %	0.06	0.07
ค่าความร้อนสูง, กิโลแคลอรี/กก.	4380	4720
ค่าความร้อนต่ำ, กิโลแคลอรี/กก.	4090	4400

ที่มา : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

องค์ประกอบธาตุทางเคมีเมื่อนำถ่านหินมาผสมกับกะลาปาล์มในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยมวลตามลำดับ องค์ประกอบธาตุทางเคมีหาได้โดยการคำนวณแบ่งตามสัดส่วนเชื้อเพลิงที่ใช้ของแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.3 แสดงส่วนประกอบของถ่านหิน Sub-bituminous กับ กะลาปาล์ม ในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยมวล ตามลำดับ

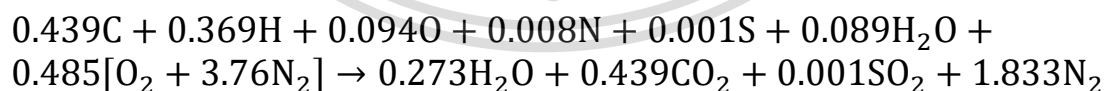
คุณสมบัติ	สภาพนำส่ง	สภาพน้ำหนักแห้ง
ความชื้น, %	16.30	-
เถ้า, %	3.85	4.6
ไฮโดรเจน, %	4.09	4.89
คาร์บอน, %	56.25	67.20
ไนโตรเจน, %	1.10	1.31
ออกซิเจน, %	18.01	21.52
ซัลเฟอร์, %	0.40	0.48
ค่าความร้อนสูง, กิโลแคลอรี/กก.	5370	6439
ค่าความร้อนต่ำ, กิโลแคลอรี/กก.	5071	6083

#### 4.1.2 สมการการเผาไหม้ถ่านหิน

เชื้อเพลิงถ่านหินที่ใช้เป็นถ่านหิน Sub-bituminous ซึ่งตาราง 4.1 จะแสดงถึงส่วนประกอบของธาตุทางเคมีของถ่านหิน Sub-bituminous ซึ่งในกรณีศึกษาจะศึกษากระบวนการเผาไหม้ที่สภาวะ stoichiometry โดยคิดสภาพเชื้อเพลิงแบบ dry basis

##### 4.1.2.1 พิจารณาถ่านหิน Sub-bituminous ที่สภาพน้ำหนักแห้ง ที่สภาวะ stoichiometry

เมื่อวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพน้ำหนักแห้งตามตารางที่ 4.1 จะสามารถเขียนเขียนสมการเผาไหม้เชื้อเพลิงพร้อมดุลสมการทางเคมี ได้ดังนี้



จากการวิเคราะห์สมการการเผาไหม้ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (AF ratio) ที่สภาวะ stoichiometry ประมาณ  $7.224 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.1.2.2 คำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

จากค่า AF ratio ที่ได้นำมาหาค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ สร้างตารางการทำงานที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ และแบ่งค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเป็น 3 ทาง โดยแบ่งเป็นสัดส่วน 25 ,65 และ 10 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ค่าความหนาแน่นจำเพาะของอากาศคงที่ที่ค่า 1 บรรยากาศ มีค่าเท่ากับ  $1.2 \text{ kg/m}^3$  ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราการไหลของอากาศสามส่วนสำหรับเชื้อเพลิงถ่านหิน sub-bituminous

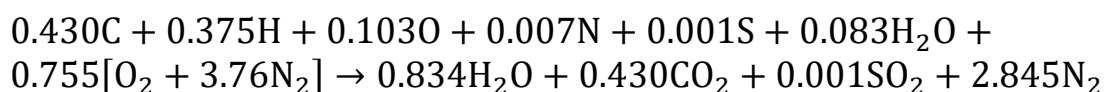
สภาวะการทำงาน (kW)	prim air ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	sec air ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	tert air ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
100	0.010	0.026	0.004
200	0.020	0.052	0.008
300	0.030	0.078	0.012
400	0.040	0.105	0.016
500	0.050	0.131	0.020

#### 4.1.3 สมการการเผาไหม้ถ่านหินผสมกับกะลาปาล์ม ในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยมวล

เชื้อเพลิงถ่านหินที่ใช้เป็นถ่านหิน Sub-bituminous ผสมกับกะลาปาล์มในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยมวล ตามลำดับ ซึ่งตาราง 4.3 จะแสดงถึงส่วนประกอบของธาตุทางเคมีของถ่านหิน Sub-bituminous ผสมกับกะลาปาล์ม ในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยมวล ตามลำดับ ซึ่งในกรณีศึกษาจะศึกษากระบวนการเผาไหม้ที่สภาวะ stoichiometry โดยคิดสภาพเชื้อเพลิงแบบ dry basis

##### 4.1.3.1 พิจารณาถ่านหิน Sub-bituminous ผสมกับกะลาปาล์ม ในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยมวล ตามลำดับ ที่สภาพน้ำหนักแห้ง ที่สภาวะ stoichiometry

เมื่อวิเคราะห์เชื้อเพลิง ณ สภาพน้ำหนักแห้งตามตารางที่ 4.3 จะสามารถเขียนเขียนสมการเผาไหม้เชื้อเพลิงพร้อมดุลสมการทางเคมี ได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากการวิเคราะห์สมการการเผาไหม้ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (AF ratio) ที่สภาวะ stoichiometry ประมาณ  $11.297 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$

#### 4.1.3.2 คำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

จากค่า AF ratio ที่ได้นำมาหาค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ สร้างตารางการทำงานที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ และแบ่งค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเป็น 3 ทาง โดยแบ่งเป็นสัดส่วน 25 ,65 และ 10 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ค่าความหนาแน่นจำเพาะของอากาศคงที่ที่ค่า 1 บรรยากาศ มีค่าเท่ากับ  $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$  ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราการไหลของอากาศสามส่วนสำหรับเชื้อเพลิงผสมที่อัตราส่วน 90:10 โดยมวล

สภาวะการทำงาน (kW)	prim air ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	sec air ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	tert air ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
100	0.016	0.042	0.006
200	0.032	0.084	0.013
300	0.048	0.125	0.019
400	0.064	0.167	0.026
500	0.080	0.209	0.032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

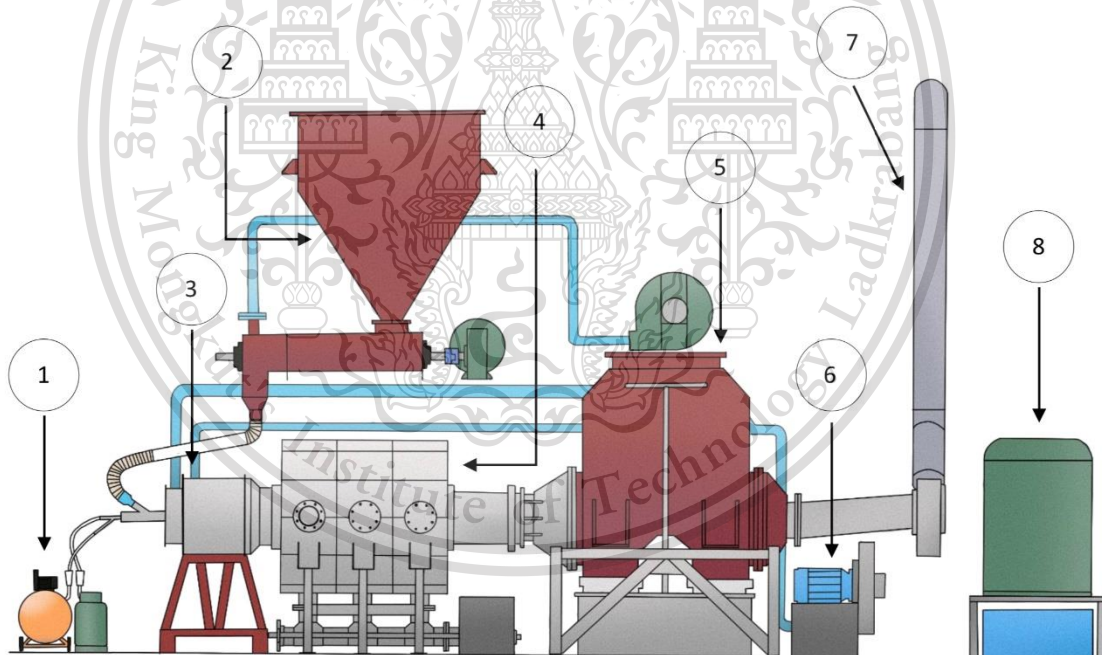
## บทที่ 5

# อุปกรณ์ เจียนไซ และวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงถึงชุดอุปกรณ์การทดลองในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในห้องที่ใช้ทำการทดลอง ทั้งรายละเอียดเครื่องมือบันทึกผลการทดลอง เครื่องมือวัดต่าง ๆ รวมทั้งเจียนไซ และขั้นตอนวิธีการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งทั้งหมด

### 5.1 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง เช่น หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวล ถึงพักเชื้อเพลิง ระบบสกรูขนส่ง และห้องเผาไหม้ เป็นต้น



รูปที่ 5.1 องค์ประกอบของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (1) ระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส, (2) ระบบจัดเก็บและลำเลียงเชื้อเพลิง, (3) ห้องเผาไหม้ช่วย, (4) ห้องเผาไหม้, (5) ระบบบำบัดไอเสีย wet scrubber, (6) ระบบป้อนอากาศ, (7) ระบบดูดไอเสีย, (8) บ่อตกตะกอนและระบบหมุนเวียนน้ำ

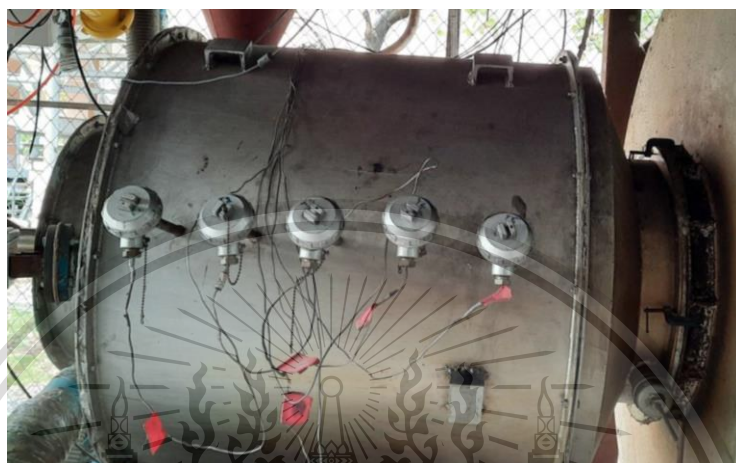
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 5.1.1 หัวเผาเชื้อเพลิงแข็งชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber)

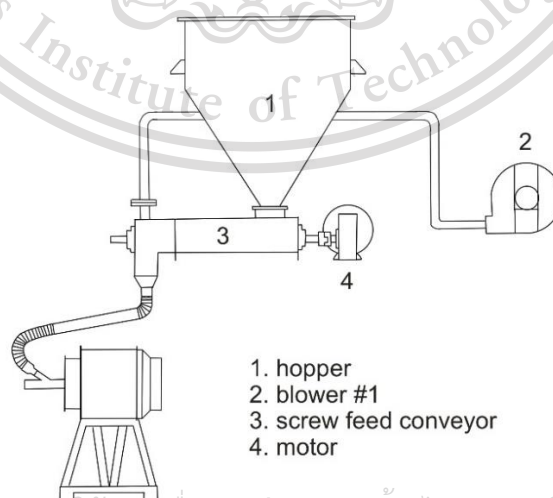
ห้องเผาไหม้ช่วยจะเป็นห้องที่ใช้สำหรับช่วยในการรักษาเสถียรภาพของเปลวไฟที่จะใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง



รูปที่ 5.2 ห้องเผาไหม้ช่วย

### 5.1.2 ระบบป้อนเชื้อเพลิงแข็ง

สำหรับการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ระบบป้อนเชื้อเพลิงนั้นถือว่าเป็นระบบที่มีความสำคัญระบบหนึ่ง แล้วยังเป็นระบบที่ต้องใช้อุปกรณ์ย่อยหลายชนิดมาทำงานร่วมกัน ซึ่งจะแสดงเป็นแผนผังรวมอุปกรณ์ย่อยดังแสดงในรูปที่ 5.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 5.3 แผนผังแสดงเครื่องมือของระบบป้อนเชื้อเพลิง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.4 ถังพักเชื้อเพลิง



รูปที่ 5.5 ระบบสกรูขนส่ง

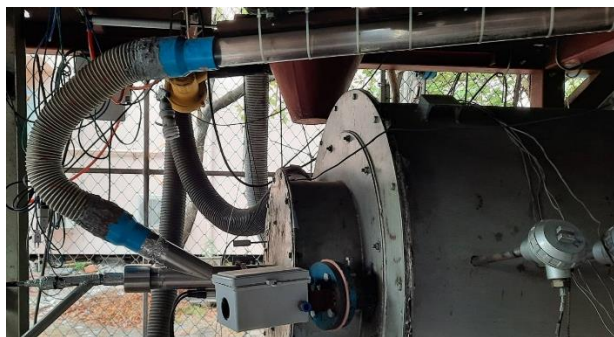
สำหรับรูปที่ 5.4 เป็นรูปของถังพักเชื้อเพลิง (Hopper) ไว้สำหรับบรรจุสำรองเชื้อเพลิงแข็งเพื่อเตรียมทำการส่งถ่ายเชื้อเพลิงแข็งเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยผ่านระบบสกรูขนส่งในรูปที่ 5.5 นอกจากนี้ ที่บริเวณผนังของถังพักเชื้อเพลิงมีการติดตั้งอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนเพื่อช่วยให้การขนส่งเชื้อเพลิงมีความต่อเนื่อง

ความเร็วในการหมุนของสกรูขนส่งจะเป็นตัวควบคุมอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงแข็ง เมื่อเชื้อเพลิงถูกส่งมาถึงปลายของท่อสกรู เชื้อเพลิงจะเข้าสู่ท่อขนส่งเชื้อเพลิงพร้อมกับอากาศส่วนที่หนึ่งเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



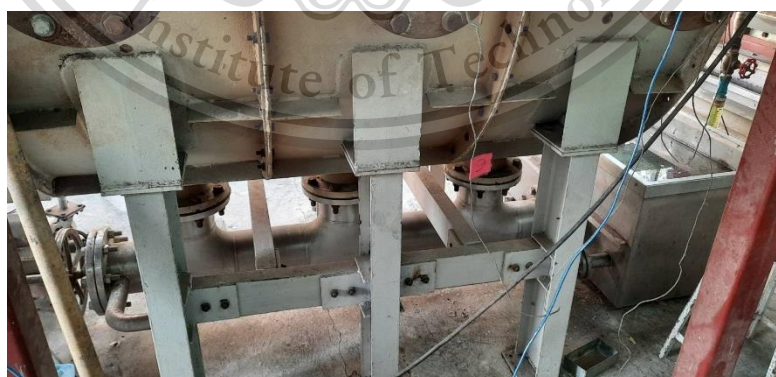
รูปที่ 5.6 ท่อขนส่งเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย

### 5.1.3 ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ห้องเผาไหม้ ชุดสกรูระบายเถ้าหนัก และ ถังพักเถ้าหนักดังแสดงในรูป



รูปที่ 5.7 ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง



รูปที่ 5.8 ชุดสกรูระบายเถ้าหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.9 ถังพักใ้หนัก

#### 5.1.4 ระบบบำบัดน้ำเสีย

ระบบบำบัดน้ำเสียในท้องทดลองจะเป็นการนำระบบลดอุณหภูมิไอเสีย (Evaporative cooling) กับระบบกำจัดฝุ่นเปียก (Wet scrubber) รวมไว้ด้วยกันดังรูป ระบบบำบัดน้ำเสียในท้องทดลองมีการต่อระบบหมุนเวียนน้ำออกไปด้านนอกท้องทดลองซึ่งมีบ่อกักน้ำดังแสดงในรูป และมีการติดตั้งพัดลมดูดไอเสียดังแสดงในรูป



รูปที่ 5.10 Wet scrubber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.11 ทางออกของระบบบำบัดไอเสีย (ซ้าย) พัดลมดูดไอเสีย (ขวา)



รูปที่ 5.12 บ่อพักน้ำ



รูปที่ 5.13 ทางออกของไอเสีย

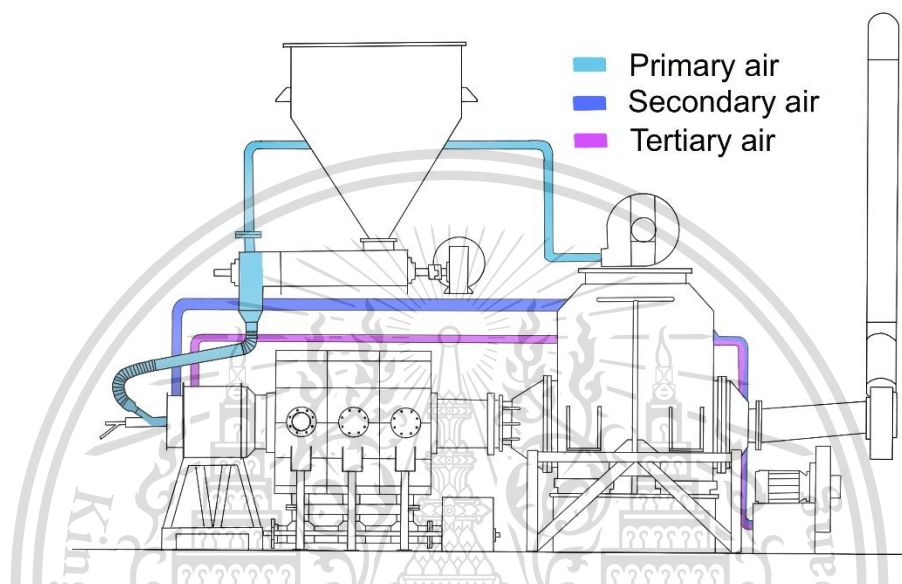
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 5.2 อุปกรณ์วัด ควบคุม และบันทึกผล

### 5.2.1 ระบบป้อนอากาศ



รูปที่ 5.14 ระบบป้อนอากาศ

ระบบป้อนอากาศสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงแข็งนั้นถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1. อากาศส่วนที่หนึ่ง (Primary air) ใช้สำหรับจุดติดไฟที่หัวเผา และเป็นอากาศที่พาเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้
2. อากาศส่วนที่สอง (Secondary air) เป็นอากาศส่วนหลักที่ใช้ในการเผาไหม้ ถูกป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ผ่านใบบิด (Swirl blades) ทำให้เกิดลักษณะการหมุนควงของอากาศ
3. อากาศส่วนที่สาม (Tertiary air) เป็นอากาศส่วนที่ใช้ในการหล่อเย็นห้องเผาไหม้ช่วย และช่วยเผาไหม้เชื้อเพลิงในส่วนที่เหลือ

อุปกรณ์ควบคุมระบบป้อนอากาศประกอบไปด้วย โบลเวอร์ (Blower) จำนวน 2 เครื่องสำหรับควบคุมอากาศทั้ง 3 ส่วน วาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly valve) แผ่นออริฟิส (Orifice plate) และ Pressure transmitter ดังแสดงในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



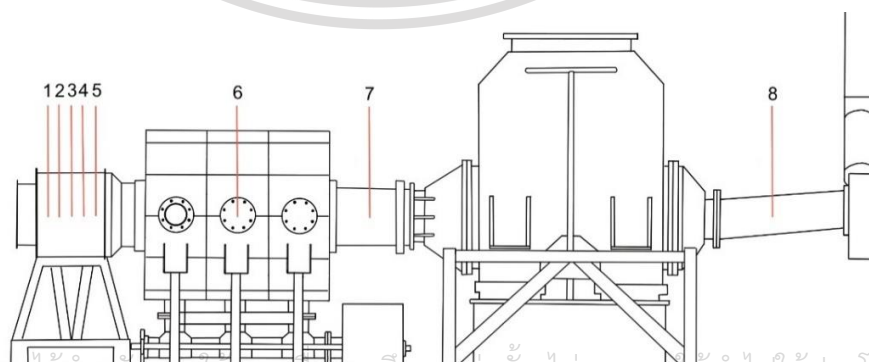
รูปที่ 5.15 โบลเวอร์ที่ใช้ในการป้อนอากาศสู่ห้องเผาไหม้



รูปที่ 5.16 Pressure transmitter

### 5.2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

ในการทดลองการบันทึกค่าอุณหภูมิความร้อนจะบันทึกทั้งหมด 8 จุดดังแสดงในรูป โดยแบ่งติดตั้งไว้ภายในห้องเผาไหม้ช่วย 5 จุด ที่ห้องเผาไหม้ 1 จุด ทางออกของแก๊สไอเสีย 1 จุด และบริเวณปล่องไอเสีย 1 จุด โดยใช้ Thermocouple Type-K ในการตรวจจับวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 5.17 ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิของชุดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.18 Thermocouple Type-K

### 5.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สไอเสีย

อุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สไอเสียจะถูกติดตั้งไว้ที่บริเวณทางออกของห้องเผาไหม้ที่ตำแหน่ง  $T_7$  โดยจะทำการตรวจวัดความเข้มข้นของออกซิเจน ( $O_2$ ) ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) และความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ ( $NO_x$ ) ด้วยเครื่อง Testo 330 LL ดังแสดงในรูป โดยการใช้ปั๊มสุญญากาศดูดแก๊สไอเสียออกมาวัดภายนอกผ่านหลอดลดอุณหภูมิไอเสียเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ตรวจวัดจากอุณหภูมิที่สูงของแก๊สไอเสีย



รูปที่ 5.19 Testo 330 LL

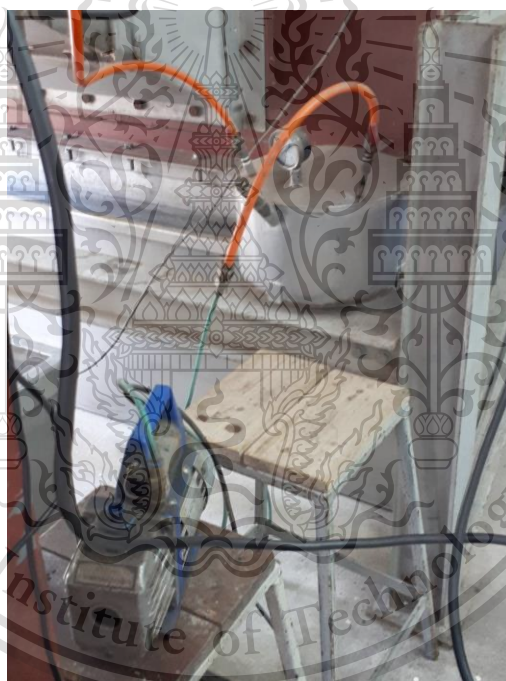
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.20 ท่อขดลดอุณหภูมิ



รูปที่ 5.21 ถังพักแก๊สไอเสียและปั๊มดูดแก๊สไอเสีย

#### 5.2.4 อุปกรณ์วัด และควบคุมอื่น ๆ

##### 5.2.4.1 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

สำหรับชุดทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งนั้น การไหลของเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบในการหมุนของสกรูชนถ่ายเชื้อเพลิงแข็ง รวมถึงโบลเวอร์ที่ใช้ป้อนอากาศในการเผาไหม้ ซึ่งทั้งสองอย่างนั้น เอกสารนี้เป็นถูกควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูป เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.22 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ

ตารางที่ 5.1 แสดงงานการทำงาน ความแม่นยำ และความละเอียดของเครื่องมือวัด

รายการ	ย่านการทำงาน	ความแม่นยำ	ความละเอียด
Pressure gauge ยี่ห้อ Nuova fima	0-4 bar	$\pm 1.6 \%$	0.1 bar
Rota meter ยี่ห้อ Nitto รุ่น K200	0-10 L/min	$\pm 5.6 \%$	0.2 L/min
Data logger YOKOGAWA รุ่น XL100 + Thermocouple Type K		$\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$
Difference pressure transmitter ยี่ห้อ KIMO รุ่น CP 112	0-10 mbar	$\pm 1.5 \%$	0.01 mbar
Difference pressure transmitter ยี่ห้อ KIMO รุ่น CP 115	0-2000 mbar	$\pm 1.5 \%$	1 mbar
Gas analyzer Testo 330 LL	O <sub>2</sub> : 0-25 Vol.%	$\pm 0.8 \%$	0.1 Vol.%
	CO : 0-10,000 ppm	$\pm 0.5 \%$	1 ppm
	NO <sub>x</sub> : 0-3000 ppm	$\pm 0.5 \%$	1 ppm
Inverter ยี่ห้อ Scheinder รุ่น ATV312	0-50 Hz	$\pm 0.2 \%$	0.1 Hz
Inverter ยี่ห้อ Winner รุ่น WIN-V63	0-50 Hz	$\pm 5.0 \%$	0.01 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 5.3 เงื่อนไข และวิธีการทดลอง

สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเงื่อนไข และขั้นตอนการทดลองการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์สกรูพืด การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิง และการวัดความเข้มข้นของ  $O_2$   $CO$  และ  $NO_x$  ในแก๊สไอเสียของการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิง

#### 5.3.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าเข้าสู่มอเตอร์

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิง (kg/s) กับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ของสกรูขนถ่าย (Hz) เพื่อกำหนดอัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิงซึ่งตามที่ต้องการได้ ทั้งนี้เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองแต่ละสัดส่วนมีความหนาแน่นของเชื้อเพลิงต่างกัน จึงจำเป็นต้องทำการทดลองซ้ำในแต่ละสัดส่วนเชื้อเพลิง

##### เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz)

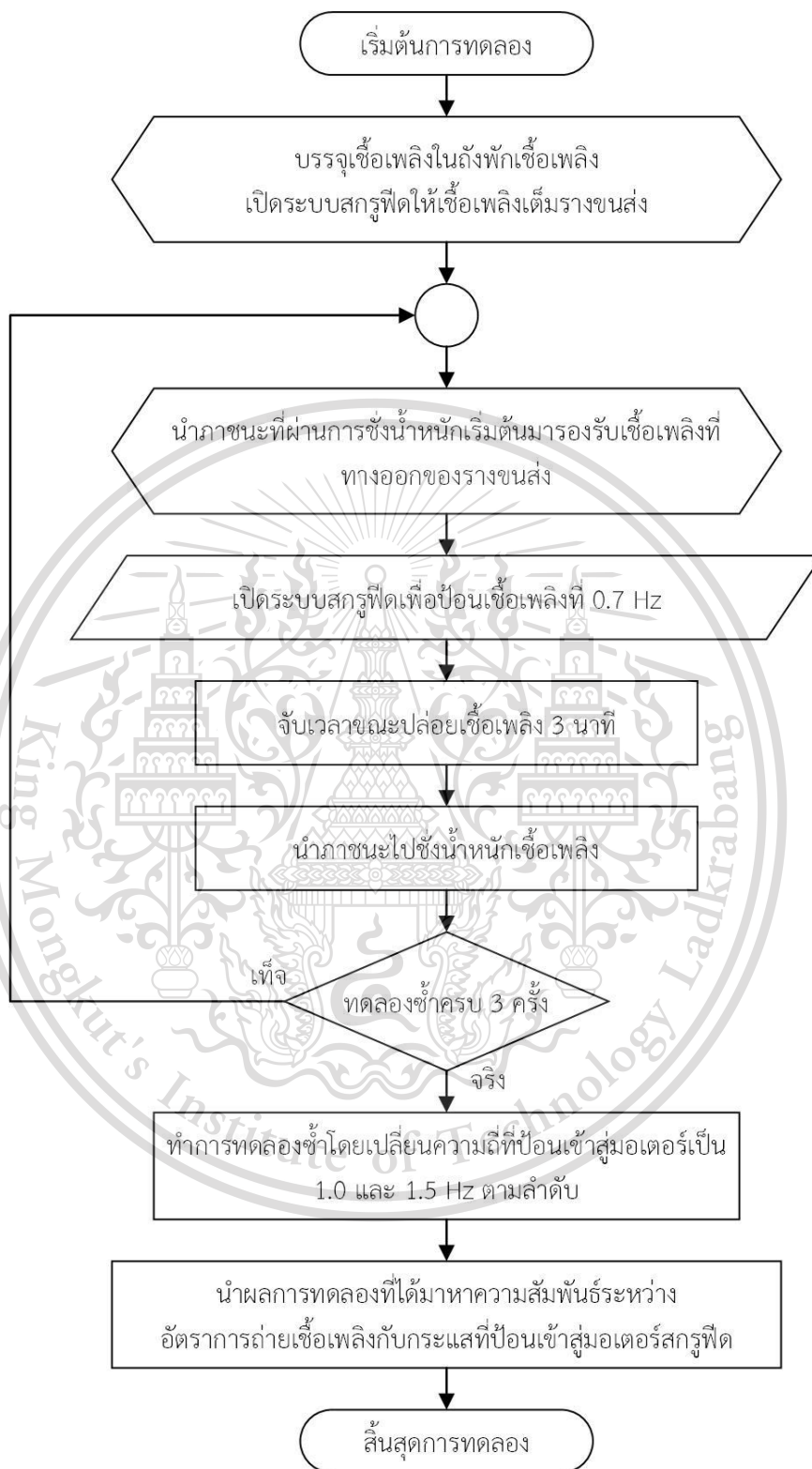
ตัวแปรตาม : น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ถูกป้อนสู่ภาชนะบรรจุ (kg)

ตัวแปรควบคุม : เวลาที่ใช้ในการขนถ่ายเชื้อเพลิงที่ 3 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 5.23 ขั้นตอนการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายเชือกเพลิงกับความถี่ที่ป้อนเข้าสู่  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
มอเตอร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2 การทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิง

ในการทดลองเพื่อศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์มในแต่ละสัดส่วนนั้นมีเงื่อนไขการทดลองที่ต่างกัน การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ความเข้มข้นของแก๊สไอเสีย และเพื่อให้ได้มาถึงค่าที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งที่จะถูกนำไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติของถ่านหิน ซึ่งก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง จะต้องมีการอุ่นเตาเผาให้ร้อนด้วยเชื้อเพลิง LPG เสียก่อนโดยการป้อนอากาศด้วยอัตราการไหลที่ 150 L/m และ LPG ที่ 12.5 L/m ผ่านหัวเผาเข้าสู่ห้องเผาไหม้ซึ่งจะถูกจุดไฟด้วยเขี้ยวหัวเทียนที่อยู่ภายในท่อหัวเผา โดยจะทำการอุ่นเตาเผาจนภายในห้องเผาไหม้ช่วยมีอุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส จึงสามารถเข้าสู่ขั้นตอนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งได้

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในแต่ละสัดส่วนที่ 300 kW

ตัวแปรควบคุม	Coal 100 : PKS 0	Coal 90 : PKS 10
Fuel, kg/s	0.013789	0.014085
(Hz)	(1.09)	(1.199)
Primary air, m <sup>3</sup> /s	0.030195	0.048236
Secondary air, m <sup>3</sup> /s	0.078509	0.125414
Tertiary air, m <sup>3</sup> /s	0.012078	0.019294

Operate at 30 Hz ID Fan, 45% Excess air

#### เงื่อนไขการทดลอง

ตัวแปรต้น : สัดส่วนเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์มที่ 100 : 0 และ 90 : 10 โดยมวลตามลำดับ

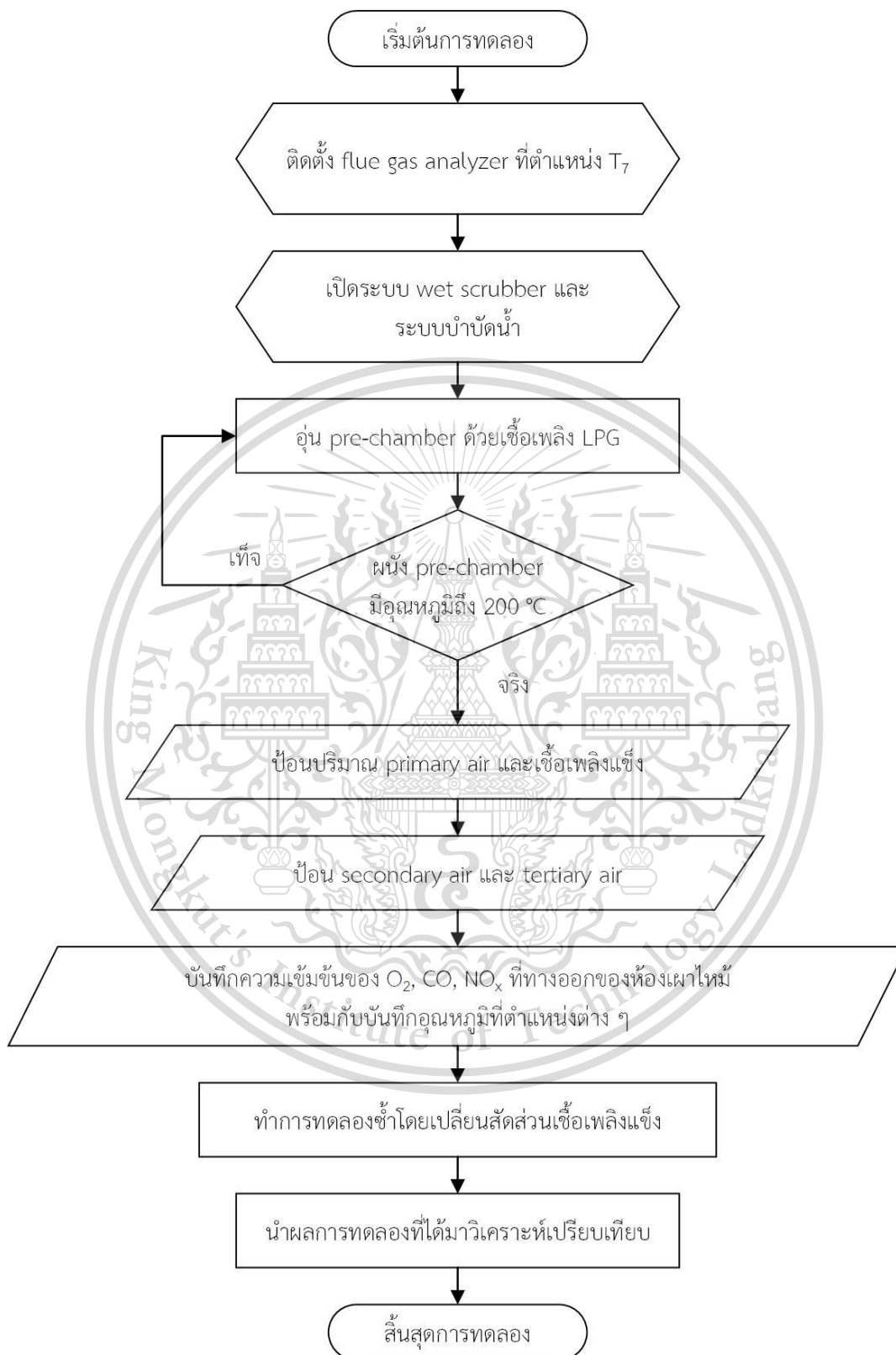
ตัวแปรตาม : การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้และความเข้มข้นของแก๊สไอเสีย

ตัวแปรควบคุม : ดังที่แสดงในตาราง 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 5.24 ขั้นตอนการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง**  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

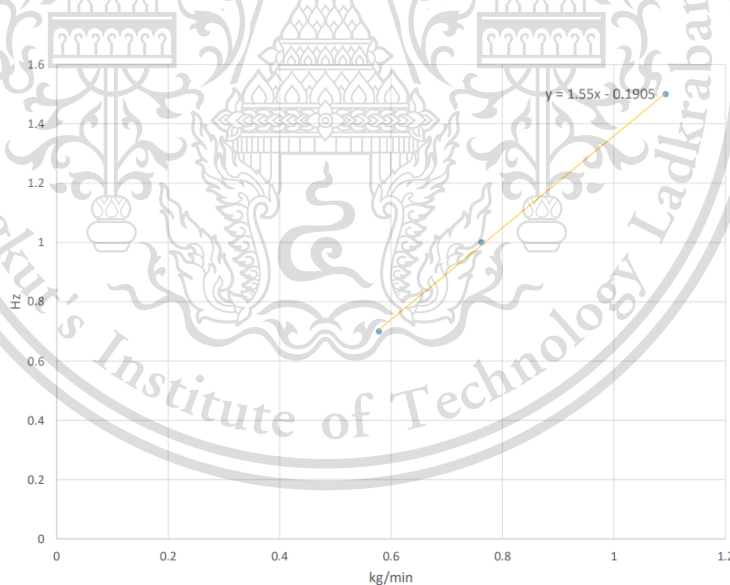
## บทที่ 6

### ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง

จากบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงบดละเอียด รวมถึงวิธีการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิง และเงื่อนไขการทดลองการเผาไหม้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว สำหรับบทนี้จึงเป็นการนำเสนอผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง ซึ่งจะนำไปสู่ข้อสรุปทางด้านสมรรถนะในด้านต่าง ๆ ของการเผาไหม้รวม และแนวโน้มการก่อตัวของสแลกกิ้ง

#### 6.1 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz) กับอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง (kg/min)

ในการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งนั้น อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเป็นตัวควบคุมที่สำคัญของการเผาไหม้ที่ขนาดต่าง ๆ ก่อนการทดลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในแต่ละสัดส่วนจึงจำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบเทียบค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิงซึ่งได้ผลออกมาดังนี้

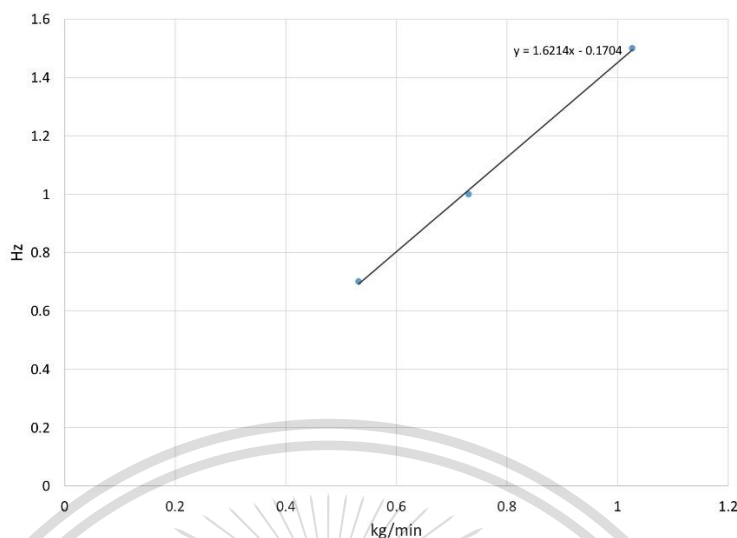


รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz) – อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/min) ของเชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Hz) – อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/min) ของเชื้อเพลิงผสมถ่านหินซับบิทูมินัสกับกะลาปาล์มในอัตราส่วน 90:10 โดยมวล

จากการทดลอง ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์กับ อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงดังนี้ สำหรับเชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัสล้วนได้สมการแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 6-1

$$y = 1.55x - 0.1905 \quad (6-1)$$

สำหรับเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินซับบิทูมินัสกับกะลาปาล์มที่อัตราส่วน 90:10 โดยมวล ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 6-2

$$y = 1.6214x - 0.1704 \quad (6-2)$$

จากสมการที่ได้จากการคาลิเบรทพบว่า ที่ค่าความถี่ (Hz) เดียวกัน อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงผสมมีค่าน้อยกว่าเชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัส ซึ่งจากการวัดค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัสและกะลาปาล์มพบว่า ถ่านหินซับบิทูมินัสบดที่นำมาใช้มีความหนาแน่นอยู่ที่ 905.88 kg/m<sup>3</sup> ในขณะที่ กะลาปาล์มบดมีค่าความหนาแน่นที่ 1000 kg/m<sup>3</sup> จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงผสมมีค่าความหนาแน่นมากกว่าเชื้อเพลิงถ่านหิน ดังนั้นการคาลิเบรทจึงมีความผิดพลาดที่เชื้อเพลิงผสมได้อัตราไหลเชิงมวลต่ำกว่าเชื้อเพลิงถ่านหินที่ความถี่เดียวกัน ซึ่งอาจจะมาจากสาเหตุที่ผู้ทำการทดลองวัดน้ำหนักการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิดพลาด หรือก่อนการปล่อยเชื้อเพลิงสู่ภาชนะยังมีช่องว่างบางส่วนภายในรางขนถ่ายเชื้อเพลิงทำให้ค่าน้ำหนักที่วัดได้ถูกเฉลี่ยตกลงมาจากค่าที่ควรจะวัดได้

เมื่อได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์กับอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงแล้ว สามารถนำไปหาความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จะถูกป้อนเข้าสู่มอเตอร์ที่สภาวะการเผาไหม้ต่าง ๆ ได้ดังแสดงในตาราง 6.1

**ตารางที่ 6.1** แสดงอัตราการไหลของอากาศสามส่วนสำหรับเชื้อเพลิงถ่านหิน sub-bituminous

สภาวะการทำงาน (kW)	ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าสู่มอเตอร์ในเชื้อเพลิงแต่ละสัดส่วน (Hz)	
	100:0 โดยมวล	90:10 โดยมวล
100	0.24	0.29
200	0.66	0.74
300	1.09	1.20
400	1.52	1.66
500	1.95	2.11

## 6.2 ผลการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินซับบิทูมินัสผสมกับกะลาปาล์ม

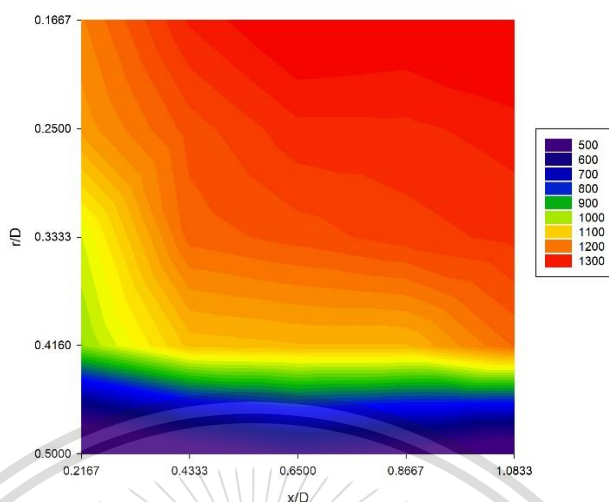
### 6.2.1 อิทธิพลของการเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของกะลาปาล์มต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้

ผลการทดลองจากการเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของกะลาปาล์มในการเผาไหม้ร่วมกับ 0 และ 10% ต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิแสดงดังในรูปที่ 6.3 - 6.4

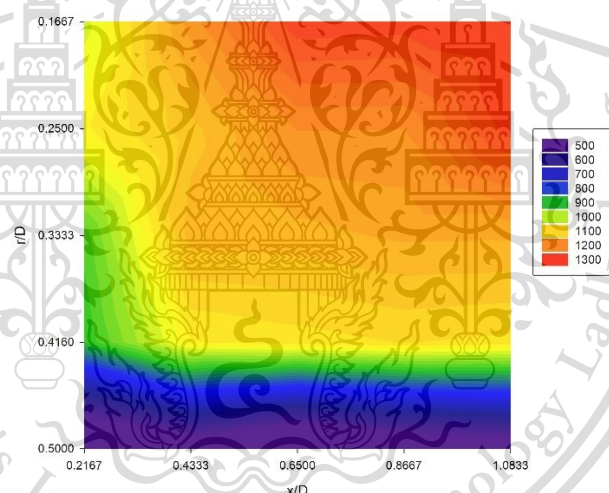
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 6.3 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยของเชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัส



รูปที่ 6.4 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยที่สัดส่วนกะลาปาล์ม 10% โดยมวล

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกะลาปาล์ม การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งแต่ละสัดส่วนมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด และอุณหภูมิสูงส่วนใหญ่อยู่บริเวณแกนกลางของห้องเผาไหม้ช่วยเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคเชื้อเพลิงสูง ในกรณีของการเผาเชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัส อุณหภูมิสูงที่สุดที่วัดได้อยู่ที่ 1345.8 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิสูงที่สุดที่วัดได้ของกรณีการเผาเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินซับบิทูมินัสกับกะลาปาล์มในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยมวล มีอุณหภูมิที่ 1278.5 องศาเซลเซียส จะสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

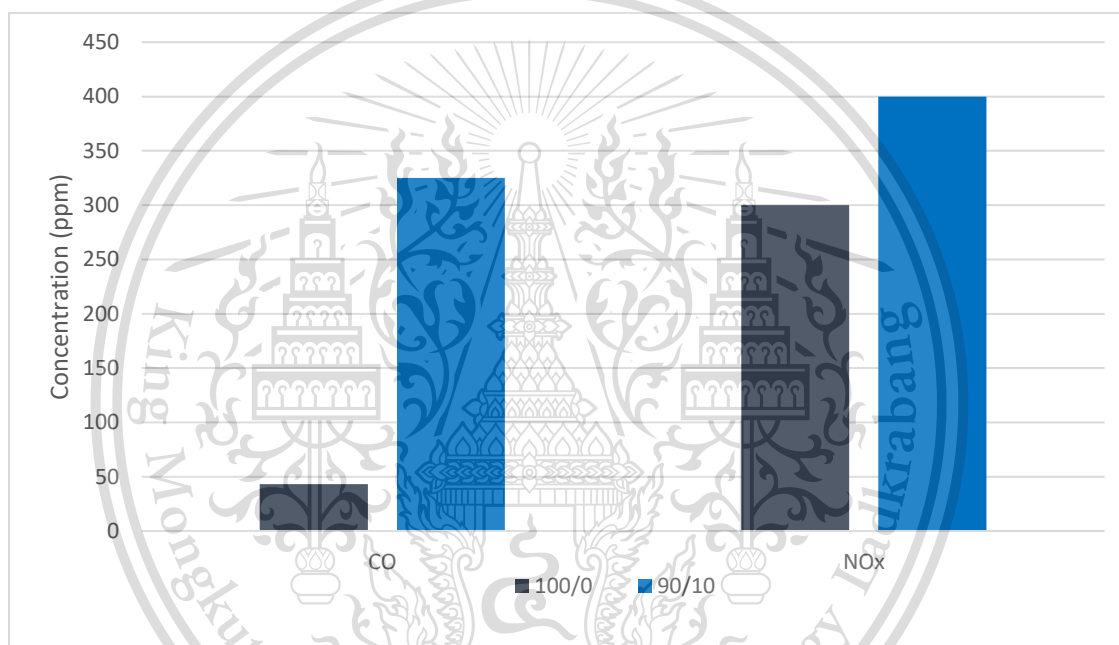
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สัดส่วนของกะลาปาล์มขึ้น การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วยลดลงเนื่องจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัสที่นำมาใช้นั้นมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงกะลาปาล์ม

## 6.2.2 อิทธิพลของการเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของกะลาปาล์มต่อการปลดปล่อยก๊าซมลพิษ

ผลการทดลองจากการเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลของกะลาปาล์มในการเผาไหม้ร่วมกับ 0% และ 10% ต่อการปลดปล่อยก๊าซมลพิษ ถูกแสดงดังในรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 แสดงปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) (ppm)

จากการเปรียบเทียบปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ของการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่ละสัดส่วน พบว่าในการทดลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินซับบิทูมินัสกับกะลาปาล์มที่สัดส่วน 90 ต่อ 10 โดยมวล มีปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัส สาเหตุที่คาร์บอนมอนอกไซด์หลงเหลือหลังจากการเผาไหม้นั้นเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์มีดังนี้

1) ปริมาณอากาศที่ไม่สัมพันธ์กับปริมาณของเชื้อเพลิง - ในกรณีที่มีการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์นั้น แสดงว่าปริมาณอากาศน้อยกว่าที่เชื้อเพลิงต้องการในการเผาไหม้ การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนมอนอกไซด์

เอกสารนี้เป็นไซต์ในการทดลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินซับบิทูมินัสกับกะลาปาล์มที่สัดส่วน 90 ร้อยต่อ 10 ร้อย โดยมวล ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อ 10 โดยมวล มีความเป็นไปได้ต่ำที่จะเกิดจากปัจจัยนี้ เนื่องจากในการทดลองได้คำนวณอากาศส่วนเกินไว้ถึง 45%

2) ความคลุกเคล้ากันของอากาศกับเชื้อเพลิง - ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงบดละเอียดนั้น แต่ละอนุภาคของเชื้อเพลิงควรจะสัมผัสกับอากาศเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ในบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคเชื้อเพลิงสูงนั้นเป็นสาเหตุของการเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ขึ้นได้ เนื่องจากอนุภาคเชื้อเพลิงบางส่วนไม่สัมผัสกับอากาศอย่างทั่วถึง ซึ่งเชื้อเพลิงกะลาปาล์มที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นมีความหนาแน่นที่  $1000 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งมีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัสที่มีความหนาแน่นเท่ากับ  $905.88 \text{ kg/m}^3$  การนำเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมาผสมกันระหว่างถ่านหินซับบิทูมินัสกับกะลาปาล์มที่สัดส่วน 90 ต่อ 10 โดยมวล จึงเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเมื่อเทียบกับการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัสล้วน ซึ่งเป็นปัจจัยทำให้มีอนุภาคบางส่วนสัมผัสกับอากาศน้อยลงนำไปสู่การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์มากขึ้น

นอกจากนี้ปัจจัยที่ก่อให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อผสมเชื้อเพลิงกะลาปาล์มเข้ากับถ่านหิน คือความสามารถในการเผาไหม้ของกะลาปาล์ม เนื่องจากกะลาปาล์มมีสัดส่วนของสารระเหย (volatile matter) สูงกว่าถ่านหิน ระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกะลาปาล์มจึงใช้เวลามากกว่านำไปสู่การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากยังมีอนุภาคเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดหลงเหลืออยู่

จากการเปรียบเทียบปริมาณของไนโตรเจนออกไซด์ของการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่ละสัดส่วนพบว่าในกรณีการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินซับบิทูมินัสกับกะลาปาล์มที่สัดส่วน 90 ต่อ 10 โดยมวล มีความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ในไอเสียอยู่ที่ 400 ppm ในขณะที่การเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัสมีความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ในไอเสียอยู่ที่ 300 ppm ทั้งนี้ สาเหตุของการเกิดไนโตรเจนออกไซด์มีดังนี้

1) thermal  $\text{NO}_x$  - เกิดจากการแตกตัวของไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ในอากาศทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) และไฮดรอกไซด์ (OH) ที่อุณหภูมิสูง อัตราการเกิดของ thermal  $\text{NO}_x$  นั้นยังขึ้นกับความดันและระยะเวลาในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (residence time) ด้วย ยิ่งตัวแปรเหล่านี้ยิ่งส่งผลให้อัตราการเกิด thermal  $\text{NO}_x$  น้อยลง ในการทดลองนี้นั้นอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยของการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัสมีค่าสูงกว่าการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสม แต่ผลการทดลองที่ได้ออกมาค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนออกไซด์ของการทดลองเชื้อเพลิงผสมกลับมีค่าสูงกว่าการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัส แสดงว่าความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของไนโตรเจนออกไซด์ในกรณีการทดลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมไม่ได้เกิดขึ้นจาก thermal  $\text{NO}_x$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2) fuel NO<sub>x</sub> - เกิดจากไนโตรเจนในเชื้อเพลิงซึ่งจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนโตรเจนออกไซด์ทั้งหมด ในกรณีการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัส ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงถ่านหินมีอยู่เพียง 1.18 % โดยมวลในสภาพนำส่ง ซึ่งมีค่ามากกว่าปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิงกะลาปาล์ม แสดงว่าความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของไนโตรเจนออกไซด์ในกรณีการทดลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมไม่ได้เกิดขึ้นจาก fuel NO<sub>x</sub>

3) prompt NO<sub>x</sub> - เกิดขึ้นที่บริเวณที่มีเชื้อเพลิงหนาซึ่งเป็นบริเวณส่วนหน้าของเปลวไฟ ในกรณีการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินซับบิทูมินัสกับกะลาปาล์มที่สัดส่วน 90 ต่อ 10 โดยมวล มีความเป็นไปได้ที่จะมีบริเวณที่มีเชื้อเพลิงหนามากกว่าการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัส เนื่องจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมมีมากกว่าเชื้อเพลิงถ่านหิน จึงมีโอกาที่จะมีบริเวณที่อากาศไม่ได้สัมผัสกับเชื้อเพลิงมากกว่า ก่อให้เกิด prompt NO<sub>x</sub> ขึ้น

นอกจากนี้ ความผิดพลาดในการคาลิเบรทราการขนถ่ายเชื้อเพลิงก็ส่งผลต่อการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ fuel NO<sub>x</sub> และ prompt NO<sub>x</sub> ขึ้น เนื่องจากในกรณีที่เชื้อเพลิงที่ถูกขนถ่ายมากกว่าที่คำนวณไว้ส่งผลให้มีปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และยังก่อให้เกิดบริเวณที่มีเชื้อเพลิงหนาแน่นมากขึ้น และในกรณีที่ไอเสียชนิดอื่นมีความเข้มข้นลดลง ก็ส่งผลให้เกิดการวัดความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ได้เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน

### 6.3 การวิเคราะห์แนวโน้มการก่อตัวของสแลกกิ้งและฟาวลิง

เนื่องจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-19 ในประเทศไทย ส่งผลให้การดำเนินการศึกษาเป็นไปอย่างยากลำบากจากข้อจำกัดในการเข้าสถานศึกษา ในการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้จึงเป็นการนำข้อมูลจากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของถ่านหินและกะลาปาล์มมาวิเคราะห์ถึงแนวโน้มการก่อตัวของสแลกกิ้งและฟาวลิง

ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างถ่านหินที่จะนำมาใช้วิเคราะห์นั้นถูกยกมาจากการศึกษาของพิธา ศรีบุษย์ดี และภิญญา มีชานะ [6] เนื่องจากใช้ถ่านหินลิกไนต์ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหินซับบิทูมินัสและเป็นชนิดที่มีการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและอุณหภูมิหลอมเหลวของถ่านหินเรียบร้อยแล้วดังตารางที่ 6.2 และตารางที่ 6.3 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 6.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ Q2 Q4 และ K3 [6]

SAMPLE NAME	Q2	Q4	K3
ASH COMPOSITION (% wt)	RESULT		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.31	18.20	12.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.01	9.88	9.49
MgO	1.44	3.81	6.71
SiO <sub>2</sub>	48.21	19.58	19.33
CaO	2.24	27.42	31.81
K <sub>2</sub> O	4.03	0.69	0.69
Na <sub>2</sub> O	1.02	2.27	3.17
TiO <sub>2</sub>	0.44	0.13	0.11
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0.01	0.12	0.16
SO <sub>3</sub>	0.42	17.00	13.50
TOTAL	98.13	99.10	97.30

ตารางที่ 6.3 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวของถ่านตัวอย่างของถ่านหิน Q2 Q4 และ K3 [6]

SAMPLE NAME	Q2	Q4	K3
ASH FUSION TEMPERATURE (°C)	RESULT		
INITIAL DEFORMATION TEMPERATURE (IT)	>1500	1197	1301
SOFTENING TEMPERATURE (ST)	>1500	1305	1314
HEMISPHERICAL TEMPERATURE (HT)	>1500	1307	1328
FLUID TEMPERATURE (FT)	>1500	1329	1369

นอกจากการศึกษาของพิธา ศรีบุษย์ดี และภิญโญ มีชำนะแล้ว ยังมีการศึกษาของ Yanjiang Li และคณะ [23] ที่นำถ่านหินบิทูมินัสที่มีแคลเซียมสูงมาศึกษาในหัวข้อ Effect of coal blending on ash fusion behavior for blast furnace injection of high calcium bituminous coal โดยจะนำข้อมูลคุณสมบัติของถ่านถ่านหิน 3 ตัวอย่างในการศึกษานี้มารวมไว้วิเคราะห์เปรียบเทียบกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 6.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างถ่านหิน B D และ S [23]

Samples	SO <sub>3</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
B	10.77	0.59	25.7	37.7	0.61	15.10	1.49	7.50	0.16
D	7.18	0.69	21.27	49.48	1.78	11.74	1.01	6.52	0.10
S	11.48	1.11	16.19	34.46	0.82	26.21	0.62	8.52	0.22

ตารางที่ 6.5 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวของถ่านตัวอย่างของถ่านหิน B D และ S [23]

SAMPLE NAME	B	D	S
ASH FUSION TEMPERATURE (°C)	RESULT		
INITIAL DEFORMATION TEMPERATURE (IT)	1254	1230	1124
SOFTENING TEMPERATURE (ST)	1316	1242	1149
HEMISPHERICAL TEMPERATURE (HT)	1364	1249	1170
FLUID TEMPERATURE (FT)	1385	1316	1202

ในการศึกษา Influence of temperature on the chemical compositions and microstructural change of ash formed from palm kernel shell ของ P.P. Ikubanni และคณะ [24] ได้นำตัวอย่างกะลาปาล์มไปผ่านการให้ความร้อนด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 900 1000 และ 1100 °C ตามลำดับเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้ได้มาซึ่งเถ้าจากกะลาปาล์ม จากนั้นนำไปหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีการวิเคราะห์ X-ray fluorescence (XRF) ได้ผลออกมาดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างกะลาปาล์มที่ถูกนำมาทดสอบ [24]

Samples	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	LOI
Raw	1.00	3.70	2.30	46.20	6.00	21.0	15.10	0.43	3.20	0.60	0.27
900 °C	0.17	3.14	6.46	66.90	3.78	5.20	5.52	0.53	5.72	0.08	2.50
1000 °C	0.16	3.12	6.48	66.91	3.74	5.22	5.54	0.52	5.74	0.07	2.50
1100 °C	0.15	3.10	6.50	66.92	3.70	5.24	5.56	0.50	5.75	0.06	2.52

\*LOI-Loss on ignition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาทั้งสามการศึกษา มาคำนวณสัดส่วนถ่านหินผสมกับกะลาปาล์มที่สัดส่วน 100 ต่อ 0 และ 90 ต่อ 10 โดยมวล โดยเลือกข้อมูลจากถ่านหินลิกไนต์ Q2 Q4 และ K3 จากการศึกษาของพิธา ศรีบุษย์ดี และภิญโญ มีขำนะ ร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสแคลเซียมสูงจากการศึกษาของ Yanjiang Li และคณะ ผสมกับกะลาปาล์มที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 1000 °C ในการศึกษาของ P.P. Ikubanni และคณะ มาใช้ในการคำนวณวิเคราะห์แนวโน้มปัญหาดานสแลกกิ้งและฟาวลิ่งได้ดังตารางที่ 6.5

**ตารางที่ 6.7** ค่าดัชนีชี้วัดแนวโน้มปัญหาด้านสแลกกิ้งและฟาวลิ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินและกะลาปาล์มที่ถูกยกมาจากการศึกษา [6] [23] และ [24]

Samples	Index				
	B/A ratio	Slagging index	Ash fusibility index	Slag viscosity index	Fouling index
Q2	0.226	2.108	> 1500 °C	78.774	1.144
Q4	1.770	32.224	1219 °C	28.373	5.241
K3	1.891	23.317	1306 °C	27.543	7.300
B	0.367	2.751	1276 °C	61.914	0.224
D	0.289	1.883	1233 °C	72.307	0.514
S	0.715	6.092	1133 °C	49.018	0.586
Q2:PKS 90:10	0.230	2.062	-	79.226	1.171
Q4:PKS 90:10	1.444	24.484	-	34.615	4.625
K3:PKS 90:10	1.532	17.884	-	33.788	6.149
B:PKS 90:10	0.356	2.605	-	64.547	0.387
D:PKS 90:10	0.287	1.847	-	73.471	0.614
S:PKS	0.653	5.385	-	52.807	0.834

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

90:10					
-------	--	--	--	--	--

\*ตัวเลขสีด้าหมายถึงค่าดัชนีอยู่ในแนวโน้มนระดับต่ำ สีฟ้าหมายถึงค่าดัชนีอยู่ในแนวโน้มนระดับปานกลาง และสีแดงหมายถึงค่าดัชนีอยู่ในแนวโน้มนระดับสูง

ตารางที่ 6.8 ช่วงแนวโน้มนของปัญหาสแลกกิ้งและฟาวลิ่ง [ 7, 8, 15-22]

Evaluation Index	Slagging or Fouling Propensity		
	Slight	Medium	Serious
Base-to-acid ratio	<0.2	0.2 - 1.0	>1.0
Ash fusibility index			<1052 °C
Slag viscosity index	>72	65 - 72	<65
Fouling index	<0.6	0.6 - 40	>40

จากการเปรียบเทียบดัชนีวัดแนวโน้มนปัญหาด้านสแลกกิ้งและฟาวลิ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินลิกไนต์และกะลาปาล์มที่ถูกยกมาจากการศึกษา [6] [23] และ [24] กับตารางที่ 6.6 จะเห็นได้ว่าถ่านหินลิกไนต์ Q4 และ K3 มีค่าดัชนี B/A ratio มากกว่า 1.0 มีค่าดัชนี Slagging viscosity น้อยกว่า 65 และมีค่าดัชนี Slagging index ที่สูงเมื่อเทียบกับถ่านหินตัวอย่างอื่น ๆ บ่งบอกได้ถึงแนวโน้มนที่จะก่อให้เกิดปัญหาด้านสแลกกิ้งในระดับสูง และถ่านหิน Q4 และ K3 ยังมีค่าดัชนี Fouling index ที่อยู่ระหว่าง 0.6 - 40 แสดงถึงแนวโน้มนที่จะเกิดปัญหาด้านสแลกกิ้งปานกลาง แต่เมื่อนำถ่านหินทั้งสองตัวอย่างมาวิเคราะห์ผสมเข้ากับถ่านหินของกะลาปาล์มที่อัตราส่วน 90:10 โดยมวล พบว่าค่าดัชนีทั้งหมดมีแนวโน้มนเข้าสู่ระดับการเกิดปัญหาทั้งสองที่ลดลง ในขณะที่ถ่านหินลิกไนต์ Q2 มีค่าดัชนี B/A ratio อยู่ระหว่าง 0.2 - 1.0 บ่งบอกถึงแนวโน้มนที่จะเกิดสแลกกิ้งในระดับสูงเพียงดัชนีเดียว และยังมีค่าดัชนีแนวโน้มนการเกิดปัญหาด้านฟาวลิ่งที่อยู่ระหว่าง 0.6 - 40 บ่งบอกถึงแนวโน้มนการเกิดปัญหาด้านฟาวลิ่งในระดับปานกลาง เมื่อนำมาวิเคราะห์ผสมร่วมกับถ่านหินจากกะลาปาล์มพบว่า ค่าดัชนีทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

ในกรณีข้อมูลตัวอย่างถ่านหินบิทูมินัสจากการศึกษาของ Yanjiang Li และคณะ มีค่าดัชนี base-to-acid ratio อยู่ระหว่าง 0.2 - 1.0 แสดงถึงแนวโน้มนปัญหาด้านสแลกกิ้งในระดับปานกลาง ถ่านหินตัวอย่างถ่านหิน B และ S มีดัชนี slagging viscosity น้อยกว่า 65 ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มนปัญหาด้านสแลกกิ้งสูง แต่เมื่อนำคุณสมบัติของตัวอย่างถ่านหินทั้งสามมาวิเคราะห์ผสมร่วมกับถ่านหินจากกะลาปาล์มที่อัตราส่วน 90:10 โดยมวล พบว่าค่าดัชนีทั้งหมดมีแนวโน้มนเข้าสู่ระดับการเกิดปัญหาด้านสแลกกิ้งลดลง แต่ในส่วนค่าดัชนี Fouling index จากการผสมถ่านหิน B D และ S เข้ากับกะลาปาล์มในอัตราส่วน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

90:10 นั้นมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยเฉพาะการผสมเก้าจากถ่านหิน D และ S เข้ากับเก้าจากกะลาปาล์มมีค่าดัชนีอยู่ระหว่าง 0.6 – 40 ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มการเกิดฟาวลิงในระดับปานกลาง

สรุปได้ว่า จากการนำข้อมูลคุณสมบัติของเก้าจากการศึกษา [6] [23] และ [24] มาวิเคราะห์ถึงแนวโน้มปัญหาด้านสแลกกิ้งและฟาวลิงด้วยดัชนีต่าง ๆ พบว่าคุณสมบัติตัวอย่างเก้าถ่านหิน Q4 และ K3 จากการศึกษาของพิธา ศรีบุษย์ดี และภิญโญ มีชำนะ เดิมทีแล้วมีแนวโน้มปัญหาด้านสแลกกิ้งที่สูงและแนวโน้มปัญหาด้านฟาวลิงในระดับปานกลาง แต่เมื่อนำมาผสมกับคุณสมบัติของเก้าจากกะลาปาล์มในอัตราส่วน 90:10 โดยมวลแล้ว ค่าดัชนีต่าง ๆ มีค่าเข้าสู่ระดับแนวโน้มปัญหาดังกล่าวลดลง ในขณะที่เก้าจากถ่านหิน Q2 เดิมทีมีค่าดัชนี B/A ratio และ Fouling index ที่บ่งบอกถึงปัญหาด้านสแลกกิ้งและฟาวลิงในระดับปานกลาง เมื่อผสมเข้ากับเก้าจากกะลาปาล์มในอัตราส่วน 90:10 โดยมวลแล้ว พบว่าค่าดัชนีต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แนวโน้มปัญหาด้านสแลกกิ้งและฟาวลิงยังคงอยู่ในระดับปานกลาง ในขณะเดียวกันเก้าจากถ่านหิน B D และ S จากการศึกษาของ Yanjiang Li และคณะ เดิมทีมีค่าดัชนี B/A ratio ที่บ่งบอกถึงแนวโน้มปัญหาด้านสแลกกิ้งในระดับปานกลาง และมีค่าดัชนี Fouling index ที่แสดงถึงแนวโน้มปัญหาด้านฟาวลิงในระดับต่ำ แต่เมื่อนำคุณสมบัติจากเก้าถ่านหินทั้งสามมาผสมเข้ากับคุณสมบัติเก้าจากกะลาปาล์มในอัตราส่วน 90:10 โดยมวลแล้ว พบว่าค่าดัชนีที่แสดงถึงแนวโน้มปัญหาด้านสแลกกิ้งมีค่าเข้าสู่ระดับที่ลดลง แต่ค่าดัชนี Fouling index มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเก้าจากถ่านหิน D และ S ที่ผสมเข้ากับกะลาปาล์มมีค่าดัชนี Fouling index เพิ่มขึ้นจากระดับต่ำเป็นระดับปานกลาง

จากการวิเคราะห์แนวโน้มการเกิดปัญหาด้านสแลกกิ้งและฟาวลิงด้วยข้อมูลจากการศึกษาทั้งสามโดยใช้ค่าดัชนีเป็นตัวชี้วัดระดับแนวโน้มสามระดับคือ ต่ำ ปานกลาง และสูง สามารถอนุมานได้ว่าเมื่อนำถ่านหินมาผสมกับกะลาปาล์มในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยมวลแล้ว ค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงระดับปัญหาสแลกกิ้งมีค่าเข้าสู่ในระดับที่ลดลง เมื่อเพิ่มสัดส่วนของกะลาปาล์มในเชื้อเพลิงขึ้น ค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงระดับปัญหาด้านสแลกกิ้งมีแนวโน้มที่จะลดระดับลงมา แต่ในส่วนของแนวโน้มด้านฟาวลิงนั้นเนื่องจากกะลาปาล์มมีแนวโน้มอยู่ในระดับปานกลางอยู่แล้ว ในกรณีที่เก้าจากถ่านหินมีค่าดัชนี Fouling index อยู่ในระดับสูง การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงสองชนิดอาจส่งผลให้แนวโน้มจากระดับสูงลดลงมาเป็นระดับปานกลางได้ ในขณะเดียวกัน ในกรณีที่เก้าจากถ่านหินมีค่าดัชนี Fouling index อยู่ในระดับต่ำ เมื่อผสมกับกะลาปาล์มก็อาจจะส่งผลให้ค่าดัชนีถูกยกระดับแนวโน้มขึ้นเป็นระดับปานกลางได้เช่นกัน ดังนั้นเพื่อที่จะระบุระดับแนวโน้มการเกิดปัญหาของสแลกกิ้งและฟาวลิงของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองของการศึกษานี้ ควรจะได้นำตัวอย่างเก้าจากเชื้อเพลิงถ่านหินซับบิทูมินัสและเก้าจากเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินซับบิทูมินัสกับกะลาปาล์มมาวิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบทางเคมีและอุณหภูมิหลอมเหลวของเก้าในแต่ละตัวอย่างเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 7

# สรุปและข้อเสนอแนะ

### 7.1 บทสรุป

การศึกษาผลกระทบของเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์มในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงผงสำหรับหม้อไอน้ำในภาคอุตสาหกรรม ได้ทำการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินซัลฟิวรีนส์ล้วน และการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินซัลฟิวรีนส์กับกะลาปาล์มในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยมวล เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ช่วย (pre-chamber) ความเข้มข้นของไอเสียจากการเผาไหม้ และแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดปัญหาด้านสแลกกิ้งและฟาวลิง พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ช่วยมีอุณหภูมิตดลงเนื่องจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงถ่านหินซัลฟิวรีนส์มีค่ามากกว่าของกะลาปาล์ม การผสมเชื้อเพลิงกะลาปาล์มเข้าไปจึงเป็นการทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงผสมน้อยกว่าค่าความร้อนเดิมของเชื้อเพลิงถ่านหินซัลฟิวรีนส์ ในด้านของความเข้มข้นของคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ที่วัดได้จากไอเสียของการทดลองนั้นพบว่า ไอเสียของเชื้อเพลิงผสมมีความเข้มข้น CO และ NO<sub>x</sub> มากกว่าไอเสียของเชื้อเพลิงถ่านหินซัลฟิวรีนส์ ทั้งนี้สาเหตุเป็นไปได้จากการที่เชื้อเพลิงกะลาปาล์มมีระยะเวลาในการเผาไหม้หมดที่นานกว่าเชื้อเพลิงถ่านหินซัลฟิวรีนส์ ทำให้อุณหภูมิบางส่วนยังเผาไหม้ไม่หมด ก่อให้เกิดคาร์บอนมอนนอกไซด์เพิ่มขึ้น และยังเป็นไปได้จากความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมมีมากกว่าทำให้อุณหภูมิบางส่วนไม่สัมผัสกับอากาศก่อให้เกิดคาร์บอนมอนนอกไซด์และ prompt NO<sub>x</sub> ที่เพิ่มขึ้น

ในส่วนของการวิเคราะห์แนวโน้มปัญหาของสแลกกิ้งและฟาวลิงนั้น ในการศึกษานี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลคุณสมบัติของถ่านหิน 6 ตัวอย่าง และคุณสมบัติของถ่านหินจากกะลาปาล์มที่มาจากการให้ความร้อนกะลาปาล์มที่ 1000 °C มาใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์แนวโน้มการเกิดปัญหาด้านสแลกกิ้งและฟาวลิงด้วยดัชนีชี้วัดระดับแนวโน้มการเกิดปัญหาดังกล่าวที่มีทั้งหมด 3 ระดับคือระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง พบว่าเมื่อใช้ข้อมูลจากการศึกษาดังกล่าวมาวิเคราะห์แล้ว ถ่านหินที่มีแคลเซียมสูงซึ่งมีแนวโน้มของสแลกกิ้งที่ระดับสูงเดิมอยู่แล้ว ผสมเข้ากับกะลาปาล์มที่สัดส่วน 90 ต่อ 10 โดยมวลแล้ว ค่าดัชนีมีแนวโน้มเข้าสู่ระดับที่ต่ำลง แต่ในส่วนของดัชนีที่บ่งบอกระดับแนวโน้มการเกิดฟาวลิงนั้น เนื่องจากเดิมที่ค่าดัชนี Fouling index ของถ่านหินปาล์มอยู่ในระดับปานกลางอยู่แล้ว การผสมเข้ากับถ่านหินที่มีระดับแนวโน้มของฟาวลิงต่ำมีโอกาสทำให้ค่าดัชนีถูกยกระดับขึ้นเป็นระดับกลางได้ ในขณะที่ถ่านหินที่มีแนวโน้มของฟาวลิงอยู่ในระดับสูง การผสมกับกะลาปาล์มอาจจะช่วยลดระดับแนวโน้มลงมาเป็นระดับกลางได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

7.2.1 ควรทำการคาลิเบรท้อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงด้วยจำนวนความถี่ที่มากขึ้นเพื่อให้ได้ค่าความถี่ของมอเตอร์ที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ขนำยที่แม่นยำมากขึ้น และควรทำการตรวจสอบความแม่นยำของความถี่ที่ถูกป้อนเข้าสู่มอเตอร์ขนำยที่อัตราการขนำยเชื้อเพลิงที่ต้องการ

7.2.2 ควรทำการเปลี่ยนแปลงขนาดเทอร์โมคัปเปิลให้มีขนาดสอดคล้องกับขนาดของห้องเผาไหม้ช่วย เพื่อที่จะวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ได้อย่างทั่วถึง

7.2.3 ในขั้นตอนการผสมเชื้อเพลิงระหว่างถ่านหินกับกะลาปาล์ม ควรผสมกันให้คลุกเคล้ากันอย่างทั่วถึง เพื่อให้เชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ด้วยความเสถียรมากที่สุด

7.2.4 สัดส่วนเชื้อเพลิงของกะลาปาล์มในเชื้อเพลิงผสมควรมีจำนวนสัดส่วนที่มากกว่านี้ เพื่อหาแนวโน้มของผลการศีกษาที่แม่นยำยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนเชื้อเพลิงของกะลาปาล์มในเชื้อเพลิง

7.2.5 ควรทำการเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิงแต่ละสัดส่วนนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติองค์ประกอบทางเคมีของถ่านจากเชื้อเพลิงที่สัดส่วนต่าง ๆ รวมถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของถ่านเพื่อนำมาคำนวณค่าดัชนีแนวโน้มที่ใช้บ่งบอกระดับความเสี่ยงการเกิดปัญหาด้านสแลกกิ้งและฟาวลิงของเชื้อเพลิงผสมแต่ละสัดส่วน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## เอกสารอ้างอิง

- [1] อุกฤษฏ์ สหพัฒนสมบัติ, ปานชีวา อุดมทรัพย์, เอกรัตน์ ไวยนิตย์, ธนกรตันธนวัฒน์. “การศึกษาเบื้องต้นถึงคุณภาพของชีวมวลสำหรับเชื้อเพลิงไม้อัดแท่ง” **บทความทางวิชาการ เล่มที่ 1 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22**, 2551. หน้า 36-40.
- [2] Theis M., Skrifvars BJ., Hupa M., Tran H. “Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 1: deposition rates” **Fuel**, vol. 85, 2006. pp. 1125-1130.
- [3] Theis M., Skrifvars BJ., Hupa M., Tran H. “Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 2: deposit chemistry” **Fuel**, vol. 85, 2006. pp. 1992-2001.
- [4] Theis M., Skrifvars BJ., Hupa M., Tran H. “Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 3: Influence of probe surface temperature” **Fuel**, vol. 85, 2006. pp. 2002-2011.
- [5] Easterly JL., Burnham M. “Overview of biomass and waste fuel resources for power production” **Biomass Bioenergy**, vol. 10(2-3), 1996. pp. 79-92.
- [6] พิธา ศรีบุษย์ดี, ฤทธิไญ มีขำนะ. “การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ” **วารสารวิจัยพลังงาน**, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, 2554. หน้า 79-86
- [14] P. Pintana, N. Tippayawong, A. Nuntaphun and P. Thongciew. “Characterization of slag from combustion of pulverized lignite with high calcium content in utility boiler”. **Energy Exploration and Exploitation**, vol. 32, no. 3, 2014. Pp. 471-482.
- [8] Pakamon Pintana, Nakorn Tippayawong. “Predicting Ash Deposit Tendency in Thermal Utilization of Biomass” **ENGINEERING JOURNAL**, vol. 20, issue 5, 2016. pp. 15-24.
- [9] Muhammad Aziz, Dwika Budianto, Takuya Oda. “Computational Fluid Dynamic Analysis of Co-Firing of Palm Kernel Shell and Coal” **Energies**, vol. 9, issue 3, 137, 2016. pp. 1-15.

- [10] ฐานิตย์ เมธิยานนท์. **ทฤษฎีและเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและชีวมวล**. พิมพ์ครั้งที่ 2. เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
กรุงเทพฯมหานคร : มินเซอร์วิศซัพพลาย. 2559.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [11] ชินภัทร ชูการ. “การพัฒนาหั่วเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558.
- [12] Hobart M. King. “Coal.” [Online]. Available : <https://www.geology.com/rocks/coal.shtml>. 2020.
- [13] บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี. “เทคโนโลยีการเผาไหม้.” [Online]. Available. : <http://thermalnet.org/technology2.php?lang=th>. 2560.
- [14] Piotr Patryk Plaza. “The Development of a Slagging and Fouling Predictive Methodology for Large Scale Pulverised Boilers Fired with Coal/Biomass Blends” PhD Thesis. Mechanical Engineering. Cardiff University. 2013.
- [15] Harleigh Hobbs. “The future of ash fusion analysis.” [Online]. Available : <http://www.wordcoal.com>. 2016.
- [16] Agraniotis M., Grammelis P., Papapavlou C. and Kakaras E. “Experimental investigation on the combustion behaviour of pre-dried Greek lignite.” **Fuel Processing Technology**, vol. 90(9), 2009. pp. 1071-1079.
- [17] Russell N. V., Wigley F. and Williamson J. “The roles of lime and iron oxide on the formation of ash and deposits in PF combustion.” **Fuel**, vol. 81(5), 2002. pp. 673-681.
- [18] McLennan A.R., Bryant G.W., Bailey C.W., Stanmore G.R., and Wall T. F. “Index for iron-based slagging for pulverized coal firing in oxidizing and reducing conditions.” **Energy & Fuel**, vol. 14(1), 2000. pp. 150-159.
- [19] McLennan A.R., Bryant G.W., Bailey C.W., Stanmore G.R., and Wall T. F. “Index for iron-based slagging for pulverized coal firing in oxidizing and reducing conditions.” **Energy & Fuel**, vol. 14(2), 2000. pp. 349-354.
- [20] Dunnu G., Maier J., and Scheffknecht G. “Ash fusibility and compositional data of solid recovered fuels.” **Fuel**, vol. 89(7), 2010. pp. 1534-1540.
- [21] Y. Zhu, Y. Niu, H. Tan, and X. Wang. “Short review on the origin and countermeasure of biomass slagging in grate furnace.” **Frontiers in Energy Research**, vol. 2, 2014. pp. 1-10.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [22] Qian Wang, Kuihua Han, Jie Gao, Jiamin Wang, and Chunmei Lu. “Investigation of Maize Straw Char Briquette Ash Fusion Characteristics and the Influence of Phosphorus Additives.” **Energy & Fuel**, vol. 31, 2017. pp. 2822-2830.
- [23] Yanjiang Li, Jianliang Zhang, Guangwei Wang, Junqiang Qiao, Peng Wang, and Wang Liang. “Effect of coal blending on ash fusion behavior for blast furnace injection of high calcium bituminous coal.” **Energy Science & Engineering**, vol. 7, 2019. pp. 3332-3343.
- [24] P.P. Ikubanni, M. Oki, A.A. Adeleke, A.A. Adediran, and O.S. Adesina. “Influence of temperature on the chemical compositions and microstructural changes of ash formed from palm kernel shell.” **Results in Engineering**, vol. 8, 2020. pp. 1-9.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.