

การศึกษากลไกการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

นายเอกณัฐ พัฒราช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

THE STUDY OF SLAG FORMATION MECHANISM IN
MAE MOH POWER PLANT BOILER

Mr. Ekkanat Pattarach

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Georesources Engineering
Department of Mining and Petroleum Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2012
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษากลไกการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำของ
โดย	โรงไฟฟ้าแม่เมาะ
สาขาวิชา	วิศวกรรมทรัพยากรธรณี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ มีชำนะ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ภู่วิจิตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วิวรรณะเดช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ มีชำนะ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ภู่วิจิตร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เทียนไชย ต้นไทย)

เอกณัฐ พัฒราช : การศึกษากลไกการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ
(THE STUDY OF SLAG FORMATION MECHANISM IN MAE MOH POWER
PLANT BOILER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ภิญโญ มีชำนะ, อ.ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร.สุรพล ภูวิจิตร, 128 หน้า.

การวิจัยนี้เป็นการศึกษากลไกการเกิดตะกรันในเตาเผาของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าถ่านหินที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แม่เมาะ โดยการศึกษาด้านองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินลิกไนต์ ร่วมกับการศึกษาด้านแร่วิทยาเมื่อมีการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ที่อุณหภูมิสูง จากการศึกษา พบว่า ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ K1 ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีของถ่านหิน 12.72 %CaO และ K2 ซึ่งมี ส่วนประกอบทางเคมีของถ่านหิน 15.24 %CaO แม้ว่าจะมีส่วนประกอบทางเคมีของถ่านหินอยู่ระหว่าง 23 - 35 %CaO ซึ่งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แม่เมาะ คาดว่าไม่น่าจะเกิดตะกรัน แต่กลับเกิด ตะกรันได้ การวิจัยนี้ได้พบว่า การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยปริมาณ CaO แต่เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถอธิบายกลไกการเกิดตะกรันได้ การศึกษานี้จึงใช้ Ternary Phase Diagram เพื่อช่วยศึกษา องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินร่วมกับการศึกษาด้านแร่วิทยา และพบว่า หากองค์ประกอบทางเคมี CaO-Al₂O₃-SiO₂ ของถ่านหิน Diagram ดังกล่าวอยู่บริเวณใกล้เคียงกับบริเวณอุณหภูมิการหลอมต่ำ (Low-Temperature Eutectic Region) ถ่านหินลิกไนต์ดังกล่าวจะให้ถ่านหินที่เกิดตะกรันเมื่อนำไปเผาไหม้ในเตาเผาของโรงไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการเปลี่ยนสถานะด้านแร่วิทยาของถ่านหินลิกไนต์ได้ เปลี่ยนไป โดยถ่านหินลิกไนต์ K1 และ K2 ซึ่งก่อนการเผาไหม้ประกอบด้วยแร่เคโอลินไนต์ แร่ยิปซัม และแร่ควอตซ์ในปริมาณต่างๆ กัน แต่หลังจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินจะกลายเป็นแร่อะนอร์ไทต์ ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับบริเวณอุณหภูมิการหลอมต่ำ และทำให้เกิดตะกรันได้ ในขณะที่ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ K3 ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีของถ่านหิน 22.88 %CaO กลับไม่เกิดตะกรัน ทั้งที่ก่อนการเผาไหม้จะมีองค์ประกอบทางแร่ของถ่านหินเช่นเดียวกับถ่านหิน K1 และ K2 แต่หลังจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง องค์ประกอบทางแร่ของถ่านหิน K3 จะกลายเป็นแร่แคลเซียมซิลิเกต ซึ่งอยู่ห่างจากบริเวณอุณหภูมิการหลอมต่ำ จึงไม่เกิดตะกรัน การศึกษาวิจัยนี้ ได้เสนอแนะให้มีการผสมดินหรือวัสดุต่างๆ ที่ได้จากการทำเหมืองถ่านหิน แม่เมาะ กับถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ เพื่อควบคุมให้องค์ประกอบทางเคมีของ CaO-Al₂O₃-SiO₂ ของถ่านหินให้ห่างจากบริเวณอุณหภูมิการหลอมต่ำ (Low-Temperature Eutectic Region) ใน Ternary Phase Diagram เพื่อมิให้เกิดตะกรันหลังจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ที่ผสมแล้ว

ภาควิชา วิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา วิศวกรรมทรัพยากรธรณี ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา 2555 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5270527121 : MAJOR GEORESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS : SLAG FORMATION / ANORTHITE

EKKANAT PATTARACH : THE STUDY OF SLAG FORMATION MECHANISM IN MAE MOH POWER PLANT BOILER. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. PINYO MEECHUMNA, PhD., THESIS CO-ADVISOR: ASST.PROF SURAPOL POOVICHIT, PhD., 128 pp.

This research is the study of slag formation mechanism of coal-fired boiler at Mae Moh EGAT power plant of Thailand. The combination of chemical and mineralogical studies of ashes derived from the combustion of lignite at high temperature have been done. The study reveals that lignite ash of sample K1 with ash containing 12.72 %CaO and of sample K2 containing 15.24 %CaO which are outside the range of 23 - 25 %CaO, the range not expected by EGAT to cause any slag in the boiler, still creates slagging problem. This study finds that only chemical composition of CaO in lignite ashes cannot explain the slag formation mechanism in the boiler. This study applies ternary phase diagram with chemical and mineral analysis of lignite ashes to explain the mechanism and it has been found that if chemical compositions of CaO-Al₂O₃-SiO₂ of lignite ashes are within or near the low-temperature eutectic region in the diagram, slagging of the ashes may occur. It has been identified that before combustion of K1 and K2 lignite samples the ashes contains kaolinite, gypsum and quartz with varied ratio of these minerals. However, after combustion at high temperature, the ashes turn to be anorthite mineral which is located near the low-temperature eutectic region of the diagram hence creates slagging. Whereas, lignite sample K3 with ash containing 22.88 %CaO creates no slagging problem at all. Before combustion at high temperature, the ash in sample K3 containing the same mineral types with varied ratio as in K1 and K2 but after combustion these minerals turn to be calcium silicate which is far away from the low-temperature eutectic region hence no slagging of ash occurs. It is recommended that blending mine waste of Mae Moh mine with lignite at suitable ratio before combustion may avoid slagging by controlling of CaO-Al₂O₃-SiO₂ in ashes of the blended lignite to be away from this low-temperature eutectic region.

Department: Mining and Petroleum Engineering Student's Signature

Field of Study: Georesources Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2012 Co-advisor's signature:

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์จากองค์กรและบุคคลหลายฝ่าย ได้แก่ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีชำนะ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก วิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพล ภู่วิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขและคอยกระตุ้นให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วิวรรณเดชะ ประธานกรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทียนไชย ต้นไทย กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย สำหรับข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณอุทิศ ทองกลิ้ง และคุณพงศธร รุ่งเจริญ นักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียมทุกท่าน ที่ให้คำที่ปรึกษาด้านเครื่องมือ ที่ใช้ในการทดลองวิเคราะห์ และคำแนะนำเกี่ยวกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง และขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียมทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวก ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จได้ตามเป้าหมาย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยเฉพาะคุณอำพล กิตติโชติกุล คุณกนิษฐา วงศ์ใหญ่ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้สนับสนุนด้านข้อมูลและคำปรึกษาที่เกี่ยวข้องวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ เพื่อน พี่ น้อง และบุคคลที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือผู้วิจัยให้สามารถทำงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จ

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาที่สนับสนุนด้านการเงิน และให้ความเอาใจใส่และกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของการศึกษาและการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ถ่านหิน	6
2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของถ่านหิน	7
2.1.2 การจำแนกถ่านหิน	10
2.1.3 การจำแนกลำดับของถ่านหินตามระบบมาตรฐาน	11
2.1.4 การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหินแบบประมาณ	13
2.1.5 การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหินแบบแยกธาตุ	15
2.1.6 ตะกรัน	15
2.1.7 การใช้ประโยชน์ถ่านหิน	16
2.1.8 แหล่งถ่านหินในประเทศไทย	17
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	37
3.1 แผนการศึกษาวิจัย	37
3.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย	37
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย	38
3.3.1 เครื่องมือหลักในการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน	38
3.3.2 เครื่องมือประกอบในการเตรียมถ่านหิน	40
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	40

บทที่ 3	3.5	การวิเคราะห์การหลอมเหลวและการวิเคราะห์องค์ประกอบของ ถ้ำถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้	42
	3.6	การศึกษาด้านแร่วิทยาของถ้ำถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้	44
	3.7	การศึกษาคุณลักษณะ องค์ประกอบทางแร่วิทยา และองค์ประกอบทาง เคมีของพื้นผิวของถ้ำถ่านหินลิกไนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	44
	3.8	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และแร่วิทยาของตะกอนถ้ำถ่านหินที่ เกิดขึ้นในเตาเผาของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ	45
บทที่ 4		ผลการทดลองและการวิจารณ์	46
	4.1	การวิจารณ์ผลการวิเคราะห์หาอุณหภูมิการหลอมของถ้ำถ่านหินลิกไนต์ (Ash Fusion Temperature Analysis) และองค์ประกอบทางเคมีของ ถ้ำถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้	46
	4.1.1	การวิจารณ์ผลการทดสอบการหาอุณหภูมิการหลอมของถ้ำ ถ้ำถ่านหินลิกไนต์	46
	4.1.2	การวิจารณ์ผลการหาร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของ ถ้ำถ่านหินลิกไนต์	47
	4.2	การวิจารณ์ผลการศึกษาด้านแร่วิทยาของถ้ำถ่านหินลิกไนต์ก่อนการ เผาไหม้.....	48
	4.2.1	การวิจารณ์ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของถ้ำถ่านหินโดยใช้ เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD)	48
	4.2.2	การวิจารณ์ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของตัวอย่าง ถ้ำถ่านหินลิกไนต์	54
	4.2.3	การวิจารณ์ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและหมู่ฟังก์ชันของ ตัวอย่างถ้ำถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR))	54
	4.2.4	สรุปผลการศึกษาด้านแร่วิทยาของถ้ำถ่านหินลิกไนต์ K1, K2 และ K3 ก่อนการเผาไหม้	56
	4.3	การวิจารณ์ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางแร่วิทยาและ องค์ประกอบทางเคมีพื้นผิวของถ้ำถ่านหินลิกไนต์หลังการเผาที่ อุณหภูมิต่างๆ	57

	หน้า
4.3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของถ้ำถ่านหินโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD)	57
4.3.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและแผนภาพองค์ประกอบทางเคมีพื้นผิวเพื่อหาโครงสร้างของถ้ำถ่านหินโดยใช้เทคนิค Electron Probe Micro Analysis (EPMA)	65
4.4 อธิบายสาเหตุการเกิดถ้ำหนัก (Bottom Ash) และตะกรันผนัง (Wall Slag) ของเตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดย Ternary Phase Diagram	67
4.4.1 วิเคราะห์ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและแร่วิทยาของถ้ำหนักและตะกรันผนังที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ K1 โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD).....	67
4.4.2 การใช้ Ternary Phase Diagram อธิบายการเกิดถ้ำหนัก (Bottom Ash) และตะกรันผนัง (Wall Slag)	72
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	75
5.1 สรุปผลการทดลอง	75
5.1.1 การวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมและองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำถ่านหินลิกไนต์	75
5.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบของแร่ของถ้ำถ่านหินก่อนการเผาไหม้	76
5.1.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบของแร่ของถ้ำถ่านหินหลังการเผาไหม้	77
5.1.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและแร่วิทยาของถ้ำหนัก (Bottom Ash) และตะกรันผนัง (Wall Slag) ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์	78
5.2 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	79
รายการอ้างอิง	81
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก	86
ภาคผนวก ข	101
ภาคผนวก ค	123
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	128

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงการจำแนกการเกิดถ่านหินโดยพื้นฐานต่างๆ	10
2.2	แสดงอิทธิพลของการเติม CaO ที่ทำให้อุณหภูมิของการหลอมของถ่านหินเปลี่ยนไป	19
2.3	แสดงลักษณะเฉพาะ FT-IR bands ของหมู่ฟังก์ชันของถ่านหินลิกไนต์	20
2.4	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของแร่ของถ่านหินตัวอย่างถ่านหิน I, J และ K	26
2.5	แสดงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของแร่ในถ่านหิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก).....	29
2.6	แสดงองค์ประกอบทางเคมีและอุณหภูมิในการหลอมตัวของถ่านหิน	30
2.7	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินในช่วงอุณหภูมิ 900 - 1,000 °C (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	32
2.8	แสดงสมการกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบแร่ที่อุณหภูมิต่างๆ	34
4.1	แสดงอุณหภูมิของการหลอมของถ่านหินตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3	47
4.2	แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินตัวอย่างถ่านหินด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICPS)	48
4.3	แสดงช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของถ่านหินตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3	52
4.4	แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินตัวอย่างถ่านหินและตัวอย่างตะกอนของถ่านหินลิกไนต์ที่เกิดขึ้นจริงในเตาเผาหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะเปรียบเทียบกับองค์ประกอบเคมีของถ่านหิน K1	68

สารบัญญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แสดงตะกรันจากเตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่เกิดขึ้น.....	2
1.2	แสดงคุณภาพถ่านหิน (%CaO) ซึ่งจะเริ่มเกิดปัญหาตะกรันมากขึ้นในปี พ.ศ. 2563	2
1.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพถ่านหิน (%CaO) กับอุณหภูมิเมื่อเริ่มหลอมละลาย (Initial Deformation Temperature; IT)	2
2.1	ถ่านหิน	6
2.2	โครงสร้างของถ่านหิน	7
2.3	โครงสร้างของถ่านหินบิทูมินัสที่มีสารระเหยได้อยู่สูง	9
2.4	แสดงการเปลี่ยนแปลงการเกิดถ่านหินในศักดิ์(Rank) ต่างๆ	12
2.5	แสดงอุณหภูมิการหลอมของถ่านตัวอย่างเมื่อเติม CaO ในปริมาณต่างๆ	19
2.6	แสดงผลการวิเคราะห์ DTA ของตัวอย่างถ่านลอย (Fly Ash, FA) และตะกรัน (Slag, SL)	20
2.7	แสดง TG diagrams ของตัวอย่างถ่านหินที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)	22
2.8	แสดง Electron Micrograph ของถ่านหินขนาด 63 - 90 ไมครอน : (a) Matrix, (b) Hematite, (c) Anorthite และ (d) Silica	23
2.9	แสดง FTIR Spectra ของตะกรัน (a) Fire Side และ (b) Wall Side	23
2.10	แสดง XRD Pattern ของตัวอย่างถ่านที่อุณหภูมิ 1,300 °C	25
2.11	แสดง XRD Pattern ของตัวอย่างถ่านที่อุณหภูมิ 1,400 °C	25
2.12	แสดง XRD Pattern จากการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน I, J และ K	27
2.13	แสดง XRD Pattern ของตัวอย่างถ่านหิน (Ash) และตะกรัน (Slag)	28
2.14	แสดง SEM Micrograph ของตัวอย่าง (a) ถ่านหิน (Ash) และ (b) ตะกรัน (Slag)	28
2.15	แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของถ่านหินที่หลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ (a) 800 °C (b) 900 °C และ (c) 1,000 °C	31
2.16	แสดง XRD Pattern ของถ่านหินที่อุณหภูมิต่างๆ	33
2.17	แสดง Ternary Phase Diagram ของตัวอย่าง Q2, Q4 และ K3	36
3.1	ตัวอย่างถ่านหินที่ถ่านมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำ K1 (12.72 %CaO)	39
3.2	ตัวอย่างถ่านหินที่ถ่านมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ปานกลาง K2 (15.24 %CaO)	39

รูปที่	หน้า
3.3 ตัวอย่างถ่านหินที่ถ้ำมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง K3 (22.88 %CaO)	39
3.4 ชุดเตาเผาควบคุมอุณหภูมิ	40
3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิจัย	41
3.6 รูปร่างของพีรามิดในแต่ละค่าของอุณหภูมิการหลอมของถ้ำถ่านหิน	43
4.1 แสดง XRD Pattern ในถ้ำตัวอย่างและชนิดแร่ในตัวอย่าง K1, K2 และ K3 ก่อนการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	49
4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน K1 (%CaO = 12.72) ด้วยเทคนิค TGA	51
4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน K2 (%CaO = 15.24) ด้วยเทคนิค TGA	51
4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน K3 (%CaO = 22.88) ด้วยเทคนิค TGA	52
4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน K1 (%CaO = 12.72) ด้วยเทคนิค FT-IR	55
4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน K2 (%CaO = 15.24) ด้วยเทคนิค FT-IR	55
4.7 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน K3 (%CaO = 22.88) ด้วยเทคนิค FT-IR	56
4.8 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ของถ้ำในตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่ อุณหภูมิ 600 - 1,100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ	58
4.9 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ของถ้ำในตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่ อุณหภูมิ 700 - 1,100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ	62
4.10 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ของถ้ำในตัวอย่าง K3 หลังการเผาที่ อุณหภูมิ 700 - 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ	63
4.11 แสดง Ternary Phase Diagram เปรียบเทียบชนิดของแร่ของตัวอย่าง ถ้ำถ่านหิน ระหว่างงานวิจัยของ พิธา ศรีบุศย์ดี, (2552) และการวิจัยนี้	64
4.12 รูปแสดงเฟสของแร่ชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นของตัวอย่างถ้ำ K1 ที่ผ่านการเผา ที่อุณหภูมิเผา 600 - 1,100 องศาเซลเซียส	66
4.13 แสดง Ternary Phase Diagram ของตัวอย่างถ้ำหนัก K1(a) (16.33 %CaO) และตัวอย่างตะกรัน K1(b) (13.73 %CaO)	69
4.14 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ของตัวอย่างถ้ำหนัก (Bottom Ash) ชนิด K1(a)	70
4.15 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ของตะกรันชนิด K1(b) (Wall Slag)	70

4.16	แสดง Ternary Phase Diagram เปรียบเทียบชนิดของแร่ของตัวอย่าง เก้าถ่านหิน K3, Q2 และ Q4 (พิธา ศรีบุญศรีดี, 2552) และตัวอย่างเก้าถ่านหิน K1, K2 และ K3 และถ่านหิน Slag K1(a) และตะกรันผนัง K1(b)	73
------	---	----

บทที่ 1

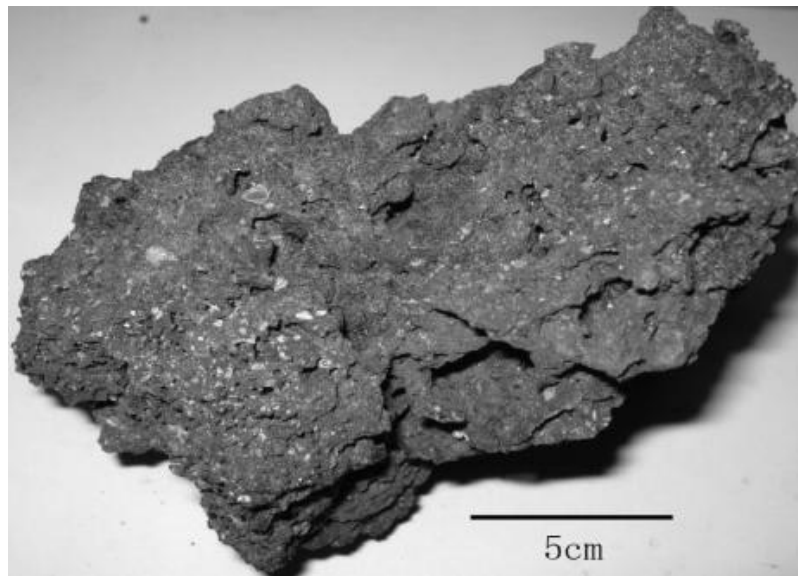
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตะกรัน (Slag) ที่เกิดขึ้นในเตาของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้านั้นสร้างปัญหาให้กับการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นอย่างมาก โรงไฟฟ้าแม่เมาะของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้ประสบกับปัญหาดังกล่าว ทำให้ต้องมีการปิดโรงไฟฟ้าในบางยูนิตที่เกิดปัญหา จากข้อมูลสถิติการสูญเสียกำลังการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ยูนิตที่ 8 - 13 ระหว่าง พ.ศ. 2544 - 2548 (JGSEE, 2006 อ้างถึงใน พิธา ศรีบุญยดี, 2552 : 3) และในยูนิตที่ 6 พ.ศ. 2553 ซึ่งในครั้งหลังนี้ ต้องใช้เวลาในการปิดและแก้ปัญหายูนิตดังกล่าว เป็นเวลามากกว่า 40 วัน ทั้งนี้พบสาเหตุว่า เกิดจากตะกรันไปเกาะตัวที่ผนังเตาของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้า ทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างห้องเผาไหม้ไปยัง Water Tube ของหม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพลดลง ส่งผลให้เกิดการสูญเสียกำลังการผลิตไฟฟ้า ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นบ่อยครั้ง ทั้งนี้ มีสาเหตุจากคุณภาพของถ่านที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านลิกไนต์ที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงขึ้น โดยเมื่อทำการขุดถ่านลิกไนต์ในบางชั้น (Seam) จะพบว่า ถ่านลิกไนต์ที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในถ่านที่อยู่ในช่วง 23 - 35% ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดตะกรันขึ้น (รูปที่ 1.1)

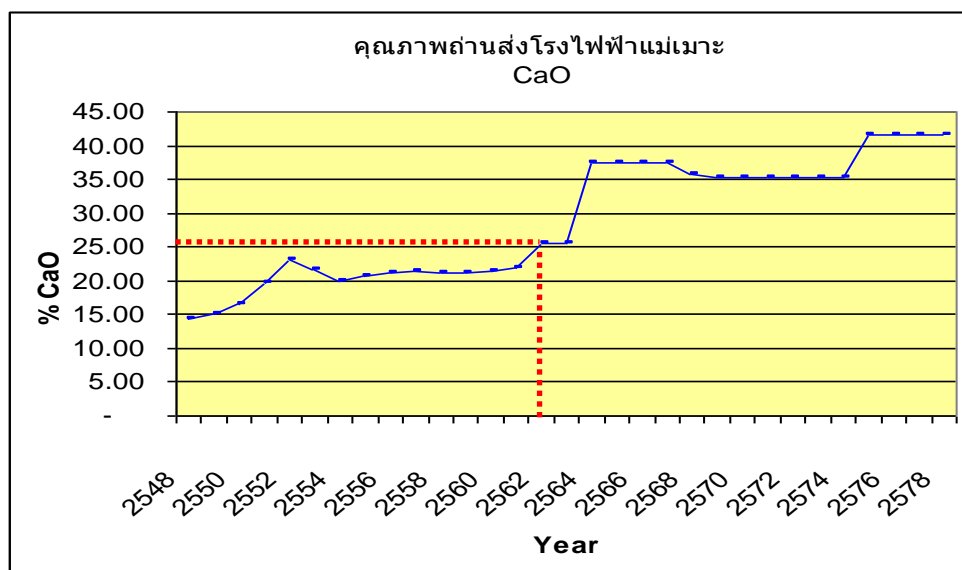
ปัจจุบัน โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ได้ใช้วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการผสมถ่านลิกไนต์ในการทำเหมืองในบริเวณต่างๆ โดยจำแนกถ่านลิกไนต์ในการผสมออกเป็น 3 ชนิด คือ ถ่านลิกไนต์ที่มีถ่านประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยกว่า 15%, CaO 15 - 23% และ CaO มากกว่า 23% โดยการผสมถ่านลิกไนต์จะควบคุมให้คุณภาพของถ่านมีส่วนประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยกว่า 23% แต่การผสมถ่านลิกไนต์ดังกล่าว ทำให้มีการเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจากปกติประมาณ 10 - 20 ล้านบาทต่อปี การผสมถ่านลิกไนต์ในปัจจุบันจะทำได้โดยวิธีการผสมถ่านหินข้ามบ่อ ส่วนการผสมถ่านลิกไนต์ในอนาคต (ประมาณปี พ.ศ.2563) คาดว่า เมื่อขุดลึกลงไปๆ คุณภาพถ่านหินจะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงขึ้น (มากกว่า 23%) ดังรูปที่ 1.2 ซึ่งทำให้การผสมถ่านหินเป็นไปได้ยาก

บริษัท Marubeni (Thailand) Co.,Ltd. และบริษัท Taiho Industries Co.,Ltd ได้เคยนำตัวอย่างถ่านลิกไนต์ชนิดที่มีถ่านของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงไปวิเคราะห์และศึกษาที่ประเทศญี่ปุ่น (ผลการศึกษา ณ Central Laboratory ของ Taiho Industries Co., Ltd., 2006



ที่มา : ข้อเสนอโครงการการศึกษาแนวทางการลดแผลงจากหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ, กฟผ.

รูปที่ 1.1 แสดงตะกรันจากเตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่เกิดขึ้น



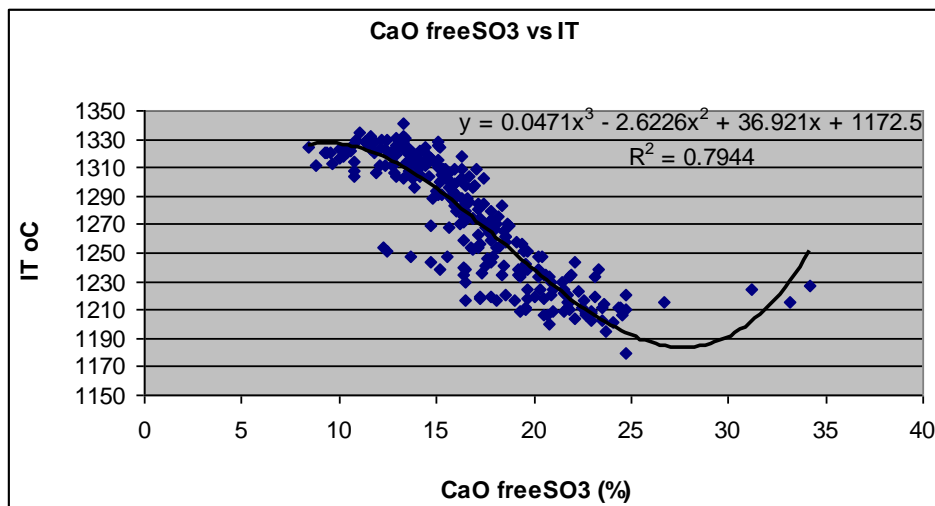
ที่มา : ข้อเสนอโครงการการศึกษาแนวทางการลดแผลงจากหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ, กฟผ.

รูปที่ 1.2 แสดงคุณภาพถ่านหิน (%CaO) ซึ่งจะเริ่มเกิดปัญหาตะกรันมากขึ้นในปี พ.ศ. 2563

อ้างถึงใน พิศา ศรีบุญศรี, 2552 :4) และได้สรุปว่า จุดวิกฤตที่เกิดทำให้ตะกรันน่าจะเป็นถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในถ่านอยู่ในช่วงระหว่าง 25 - 35% หากปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากกว่านี้ ปัญหาการเกิดตะกรันจะลดลง ดังรูปที่ 1.3

จากรูปที่ 1.3 อธิบายได้ว่าตัวอย่างถ่านลิกไนต์ที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ของถ่านในช่วง 25 - 35 % เกิดจากการรวมตัวระหว่าง Ca และ S ในรูปสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต (Anhydrite; CaSO_4) และเมื่อรวมตัวกับเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) จะทำให้มีจุดหลอมตัว (Melting Point) ต่ำลง และได้อธิบายเพิ่มเติมว่า หากถ่านลิกไนต์ที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในถ่านสูงมากขึ้น จะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เหลือเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้จุดหลอมตัวของถ่านทำให้ออกาสในการเกิดตะกรันลดลง

จากการศึกษางานวิจัยของ พิศา ศรีบุญศรี (2552) ซึ่งได้ทำการศึกษาอิทธิพลของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในตัวอย่างถ่านลิกไนต์และตะกรันที่เกิดขึ้นของเตาเผาของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จำนวน 3 ตัวอย่าง (Q2, Q4 และ K3) ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ที่อุณหภูมิ 800 °C, 900 °C, 1,000 °C, 1,100 °C และ 1,200 °C พบว่า ชนิดแร่ของตัวอย่างถ่าน Q2 (%CaO = 2.24) คือ แร่มุลไลต์ (Mullite), แร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite), แร่ควอตซ์ (Quartz) และแร่แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ (Calcium Aluminum Oxide) ตัวอย่างถ่าน Q4 (%CaO =



ที่มา : ข้อเสนอโครงการการศึกษาแนวทางการลดแผลกจากหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ, กฟผ.

รูปที่ 1.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพถ่านหิน (%CaO) กับอุณหภูมิเมื่อเริ่มหลอมละลาย (Initial Deformation Temperature; IT)

27.42) มีชนิดแร่คือ แร่เกห์เลไนต์ (Gehlenite), แร่ควอตซ์ (Quartz) และแร่แคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate) และตัวอย่างแก้ว K3 (%CaO = 31.81) มีชนิดแร่ คือ แร่ควอตซ์ (Quartz) และแร่แคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate) และได้สรุปว่า การควบคุมไม่ให้ปริมาณ SiO_2 , CaO และ Al_2O_3 ในแก้วถ่านหินอยู่ในบริเวณของการหลอมตัวต่ำ (Low-Temperature Eutectic Region) จะป้องกันการเกิดตะกั่วได้

จากความเป็นมา ปัญหาและงานวิจัยดังกล่าว จึงนำมาซึ่งการศึกษาถึงองค์ประกอบของถ่านหินที่ทำให้เกิดตะกั่ว โดยงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาถึงองค์ประกอบของถ่านหิน โดยนำไปผ่านกระบวนการสลายตัวของสารระเหย (Devolatilization) เพื่อระเหยแร่และสารที่เป็นอินทรีย์ (Organic) ออก หลังจากนั้น จะทำการศึกษาถึงอุณหภูมิในการหลอมเหลว และองค์ประกอบของแร่ที่เหลือหลังจากผ่านกระบวนการสลายตัวของสารระเหย (Devolatilization) ซึ่งผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ปัจจัยที่ทำให้เกิดตะกั่วของถ่านหิน และเพื่อหาแนวทางในการป้องกันและแก้ไขปัญหาคือการเกิดตะกั่วในขั้นต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยในครั้งนี้ มีดังต่อไปนี้

- 1) เพื่อศึกษาลักษณะทางแร่วิทยา (Mineralogy) ของถ่านหินลิกไนต์ และหาแนวทางในการอธิบายสาเหตุและกลไกของการเกิดตะกั่วจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์แม่เกาะ
- 2) เพื่อศึกษากลไกการเกิดตะกั่ว ซึ่งจะใช้ในการคาดการณ์ล่วงหน้าถึงคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ที่มีโอกาสเกิดตะกั่วหลังการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน
- 3) เพื่อหาแนวทางในการป้องกันและแก้ไขปัญหาตะกั่วของโรงไฟฟ้าแม่เกาะ

1.3 ขอบเขตของการศึกษาและการวิจัย

ขอบเขตของการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้เป็นไปตามลำดับ ดังนี้

- 1) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ และอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอม (Initial Deformation Temperature; IT) โดยใช้เครื่องมือ Ash Fusion Determinator (AFT) และเครื่องมือ Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICPS)

2) ศึกษาด้านแร่วิทยาของแร่ในตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ โดยใช้เครื่องมือ X-Ray Diffractometer (XRD), เทคนิค Thermo Gravimetric Analysis (TGA) และเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

3) ศึกษาองค์ประกอบทางแร่วิทยาถ่านหินที่เกิดขึ้นในเตาเผาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้เครื่องมือ X-Ray Diffractometer (XRD) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของแร่ที่อุณหภูมิต่างๆ ของตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ และองค์ประกอบของตัวอย่างถ่านหินหลังการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่างๆ

4) ศึกษาองค์ประกอบทางแร่วิทยาและองค์ประกอบในถ่านหินหลังการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเทคนิค Electron Probe Microanalysis (EPMA) เพื่อหาความสัมพันธ์ของชนิดแร่ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) สามารถทราบถึงสาเหตุของการเกิดตะกั่วจากการทดลองในห้องปฏิบัติการว่าก่อนการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์มีสารประกอบหรือแร่ในถ่านหินลิกไนต์ชนิดใดบ้าง

2) ทราบกลไกของการเกิดตะกั่วในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ องค์ประกอบของการเกิดตะกั่วในระหว่างการเผาไหม้ โดยถ่านหินลิกไนต์ที่มาจากรุ่นต่างๆ กัน จะมีคุณสมบัติทางแร่วิทยาต่างๆ กัน เมื่อผ่านการเผาไหม้และเกิดถ่านลิกไนต์ที่มาจากรุ่นลิกไนต์ที่มีคุณภาพต่างๆ กัน คุณสมบัติของถ่านลิกไนต์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง การเกิดตะกั่ว (Slag) จะเกิดขึ้นในสภาวะใด

3) เป็นแนวทางในการป้องกันและแก้ปัญหาการเกิดตะกั่วในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผสมถ่านหินและลดการสูญเสียกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านหิน (Meyers, 1981)

ถ่านหิน (รูปที่ 2.1) เป็นเชื้อเพลิงแข็งชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ จากการทับถมของอินทรีย์วัตถุ (Solid Organic Materials) เช่น ซากพืชที่ตาย สิ่งมีชีวิต ชั้นส่วนของพืช ตลอดจนดินโคลนที่มีอินทรีย์วัตถุที่ทับถมกันแล้วสะสมตัวภายใต้พื้นผิวโลก จนเมื่อเวลาผ่านไปเป็นร้อยล้านปี ทำให้อินทรีย์วัตถุเหล่านี้ผุพัง จากความร้อน ความกดดัน และการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาของผิวโลก ทำให้อินทรีย์วัตถุที่ทับถมกันเหล่านี้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ฟิสิกส์ ชีววิทยา รวมทั้งธรณีวิทยา จนแปรสภาพเป็นถ่านหินซึ่งถูกอัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ภายใต้พื้นผิวโลก ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณสำรองมากมาย โดยแหล่งถ่านหินกระจายอยู่ในประเทศต่างๆ มากกว่า 100 ประเทศทั่วโลก ทำให้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีความมั่นคงสูงและราคามีการแข่งขันกันสูง (ภิญโญ มีชำนะ, 2549)



(ที่มา : <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%84%E0%B8%9F%E0%B8%A5%E0%B9%8C> : Coal.jpg)

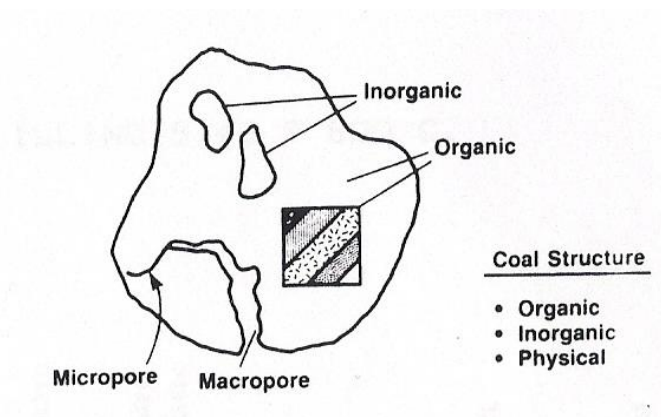
รูปที่ 2.1 ถ่านหิน

2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของถ่านหิน (Meyers, 1981; Kabe, 2004)

ถ่านหินเกิดจากการทับถมของซากอินทรีย์วัตถุ โดยทั่วไปองค์ประกอบหลักของถ่านหิน คือ คาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบมากที่สุดและเป็นโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินที่เป็นส่วนอินทรีย์ (Organic Coal Matrix) ซึ่งเป็นส่วนของถ่านหินที่ให้พลังงาน และยังมีธาตุอื่นๆ เป็นองค์ประกอบอยู่เล็กน้อย เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถันเรียกรวมส่วนนี้ว่า Maceral Matter นอกจากนี้ โครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินที่เป็นธาตุอื่นๆ ที่รวมเป็นสารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic Coal Matrix) แทรกอยู่ในเนื้อถ่านหินที่รวมตัวเป็นก้อนอย่างเห็นได้ชัด เรียกรวมส่วนนี้ว่า Mineral Matter (Crystalline Inorganic Compound) โดยมีกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อถ่านหิน

เมื่อนำถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสารประกอบอินทรีย์จะเกิดการเผาไหม้ และให้ความร้อนเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส และส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้คือ เถ้า (Ash) ซึ่งเป็นส่วนของสารประกอบแร่ธาตุ แต่มีส่วนประกอบของแร่ธาตุบางส่วน ซึ่งเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วจะไม่เกิดเป็นเถ้า เช่น ที่อุณหภูมิสูงๆ แร่ไพไรต์ (Pyrite) ถูกออกซิไดซ์ กำมะถันจะสลายตัวให้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คาร์บอนจะสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนเหล็กจะถูกเปลี่ยนสภาพให้อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก ซึ่งเป็นส่วนประกอบในเถ้า

โครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ตามสมบัติทางเคมี คือ ส่วนโครงสร้างอินทรีย์ (Organic Structure) และส่วนที่เป็นองค์ประกอบแร่ธาตุ (อนินทรีย์) ดังรูปที่ 2.2



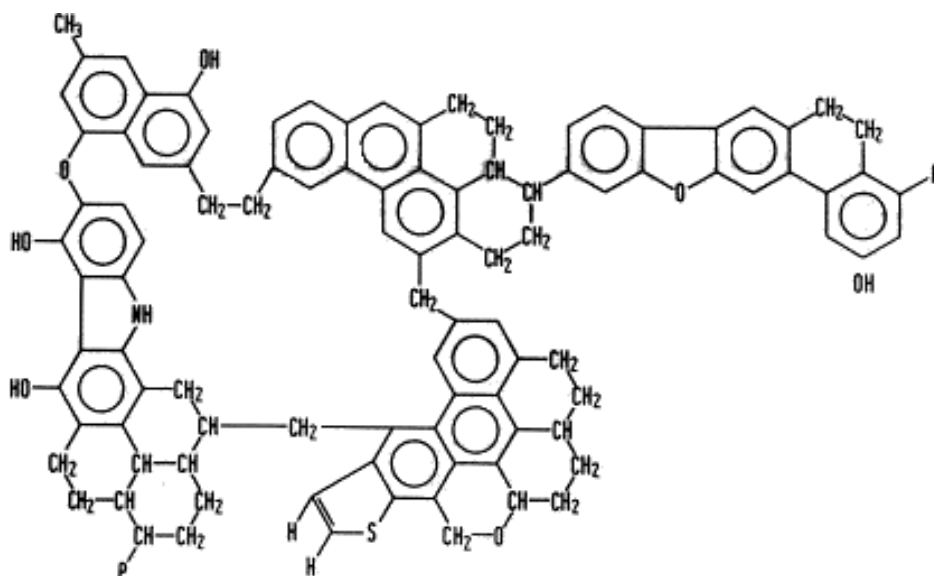
ที่มา : Meyers. 1981

รูปที่ 2.2 โครงสร้างของถ่านหิน

(1) โครงสร้างอินทรีย์

ในทางธรณีวิทยาถือว่า ถ่านหินเป็นหินตะกอน (Sedimentary Rocks) ชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ และมีสารอนินทรีย์ปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย โครงสร้างทางเคมีของถ่านหินประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และมีปริมาณของกำมะถันและไนโตรเจนเป็นส่วนน้อย เมื่อคิดจากพื้นฐานของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมธาตุ (Atomic Ratio) พบว่า ไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในโครงสร้างถ่านหิน ซึ่งเมื่อสกัดของถ่านหินสูงขึ้น อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนและออกซิเจนต่อคาร์บอนลดลง ส่วนกำมะถันและไนโตรเจนมีน้อยมากจนคิดว่าไม่มีส่วนสำคัญ

จากการศึกษาสารประกอบอินทรีย์ในโครงสร้างของถ่านหินโดยใช้ Spectro - Chromatography เพื่อศึกษาโครงสร้างทางเคมีของถ่านหินหรือสูตรโมเลกุลของถ่านหินนั้น ยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอน ทั้งๆ ที่มนุษยรู้จักนำถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ มาเป็นเวลานาน แต่จะทราบเพียงว่าโครงสร้างทางเคมีของถ่านหินประกอบด้วยกลุ่มโมเลกุลวงแหวนอะโรมาติก (Aromatics) และไฮโดรอะโรมาติก (Hydroaromatics) เกาะอยู่ด้วยเป็นกลุ่มๆ แต่ละกลุ่มเชื่อมกันอยู่ด้วยแขนของโมเลกุลอะลิฟาติก (Aliphatic) ที่อ่อนแอ ภายในกลุ่มแต่ละกลุ่มยังมีวงแหวนที่มีอะตอมของธาตุดอกซิเจนหรือกำมะถันหรือไนโตรเจนประกอบอยู่กับคาร์บอน รวมทั้งกลุ่มที่ทำหน้าที่ความเป็นกรด - เบส อีเทอร์และอื่นๆ หมู่ฟังก์ชันซึ่งแทนที่ไฮโดรเจนในวงแหวน เช่น ไฮดรอกซี คาร์บอกซี อะมิโน และไทออล ดังแสดงเป็นโมเลกุลสมบัติ รูปที่ 2.3 ซึ่งโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ จะเชื่อมโยงด้วยพันธะเคมีเป็นพอลิเมอร์เชื่อมขวาง (Crosslinked Polymer) และมีบางส่วนที่ไม่เป็นโครงสร้างพอลิเมอร์ จากการวัดความสามารถของการเป็นผลึก (Crystallinity) ของถ่านหินโดยใช้ X-Ray Scattering Technique พบว่า เมื่อสกัดของถ่านหินสูงขึ้น วงแหวนอะโรมาติก (Aromatics) จะเชื่อมกันมากขึ้นและผลึกมีลักษณะคล้ายแร่แกรไฟต์ (Graphite) เมื่อโมเลกุลของถ่านหินได้รับความร้อน จะเกิดการสลายตัว ซึ่งปัจจัยที่สำคัญ คือ จำนวนไฮโดรเจนที่มีอยู่ในโมเลกุลวงแหวนไฮโดรอะโรมาติก (Hydroaromatics) และแขนของโมเลกุลอะลิฟาติก (Aliphatic) จะแตกตัวออกง่ายที่สุด ทำให้กลุ่มโมเลกุลวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆ จำนวนมาก



ที่มา : Wender et al., 1981

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของถ่านหินปิทุมินัสที่มีสารระเหยได้อยู่สูง

(2) ส่วนประกอบที่เป็นแร่ธาตุ

สารประกอบแร่ธาตุที่พบมากที่สุดที่ถ่านหินคือ ซิลิกอน นอกจากนี้ ยังประกอบด้วยอะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโพแทสเซียม รวมตัวกันเป็นสารประกอบหรือรวมตัวกับอะตอมของธาตุอื่นๆ เกิดเป็นสารประกอบต่างๆ โดยสามารถแบ่งกลุ่มของสารประกอบแร่ได้ คือ

1. กลุ่มคาร์บอเนต (Carbonate) เช่น แร่แคลไซต์ (Calcite), แร่โดโลไมต์ (Dolomite) และแร่แองเกอร์ไรต์ (Ankerite) เป็นต้น
2. กลุ่มซัลไฟด์ (Sulfide) ที่พบมากคือ แร่มาร์เคไซต์ (Marcacite) และแร่ไพไรต์ (Pyrite)
3. กลุ่มซัลเฟต (Sulphate) เป็นแร่ที่พบหลังจากการเกิดออกซิเดชันของแร่ไพไรต์ (Pyrite) ได้แก่ แร่ยิปซัม (Gypsum), แร่แอนไฮไดรต์ (Anhydrite) เป็นต้น
4. กลุ่มซิลิเกต (Silicate) หรือ กลุ่มอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) หรือ ดินเหนียว (Clay) ซึ่งเป็นหมู่แร่ที่มีมากที่สุดในถ่านหิน เช่น แร่อีไลต์ (Illite) และแร่เคโอลินไนต์ (Kaolinite) เป็นต้น
5. แร่อื่นๆ เช่น แร่ควอตซ์ (Quartz) และแร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar) เป็นต้น

2.1.2 การจำแนกถ่านหิน (Probstein and Hicks, 1982, The Kentucky Geological Survey, 2012)

การจำแนกถ่านหินกระทำได้สองลักษณะคือ จำแนกตามชนิด (Type) และจำแนกตามศักดิ์ (Rank) ดังรายละเอียด

(1) การจำแนกถ่านหินตามชนิด (Type)

การศึกษาถ่านหินทางด้านธรณีวิทยาจำแนกถ่านหินตามชนิด โดยแบ่งกลุ่มถ่านหินไปตามองค์ประกอบทางด้านศิลาพรรณ (Petrography) เรียกว่า กลุ่มมาเซอร์ล (Maceral Groups) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ วิทรีไนต์ (Vitrinite), เอกซีนไนต์ (Exinite) และ อินเอร์ทีไนต์ (Inertinite) สองกลุ่มแรกเป็นเนื้อถ่านหินที่ว่องไว กลุ่มหลังถือว่าเป็นส่วนที่ไม่ว่องไว แต่ละกลุ่มมีต้นกำเนิดจากพืชและสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กต่างกัน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการจำแนกการเกิดถ่านหินโดยพื้นฐานต่างๆ

Maceral Group	Maceral	Composed of or Derived from
Vitrinite	Collinite	Humic gels
	Tellinite	Wood, bark, and cortical tissue
Exinite	Sporinite	Fungal and other spores
	Cutinite	Leaf cuticles
	Resinite	Resin bodies and Waxes
	Alginite	Algal remains
Inertinite	Micrinite	Unspecified detrital matter, 10 μ m
	Macrinite	Similar, but 10-100 μ m grains
	Semifusinite Fusinite	"Carbonized" woody tissue
	Seierotinite	Fungal sclerotia and mecelia

(2) การจำแนกถ่านหินตามศักดิ์ (Rank)

จากการศึกษาถ่านหินด้านอื่นๆ และการนำไปใช้งานนิยมใช้การจำแนกตามศักดิ์มากกว่าการจำแนกตามชนิด ซึ่งบ่งบอกถึงความเป็นถ่านหินของถ่านหินนั้นๆ ความเป็นถ่านหินหรือลำดับการเปลี่ยนเป็นถ่านหิน (Coalification) ขึ้นอยู่กับทั้งอายุและอัตราการเปลี่ยนแปลง จึงไม่ได้หมายความว่าเพียงอายุหรือคุณภาพของถ่านหินเท่านั้น

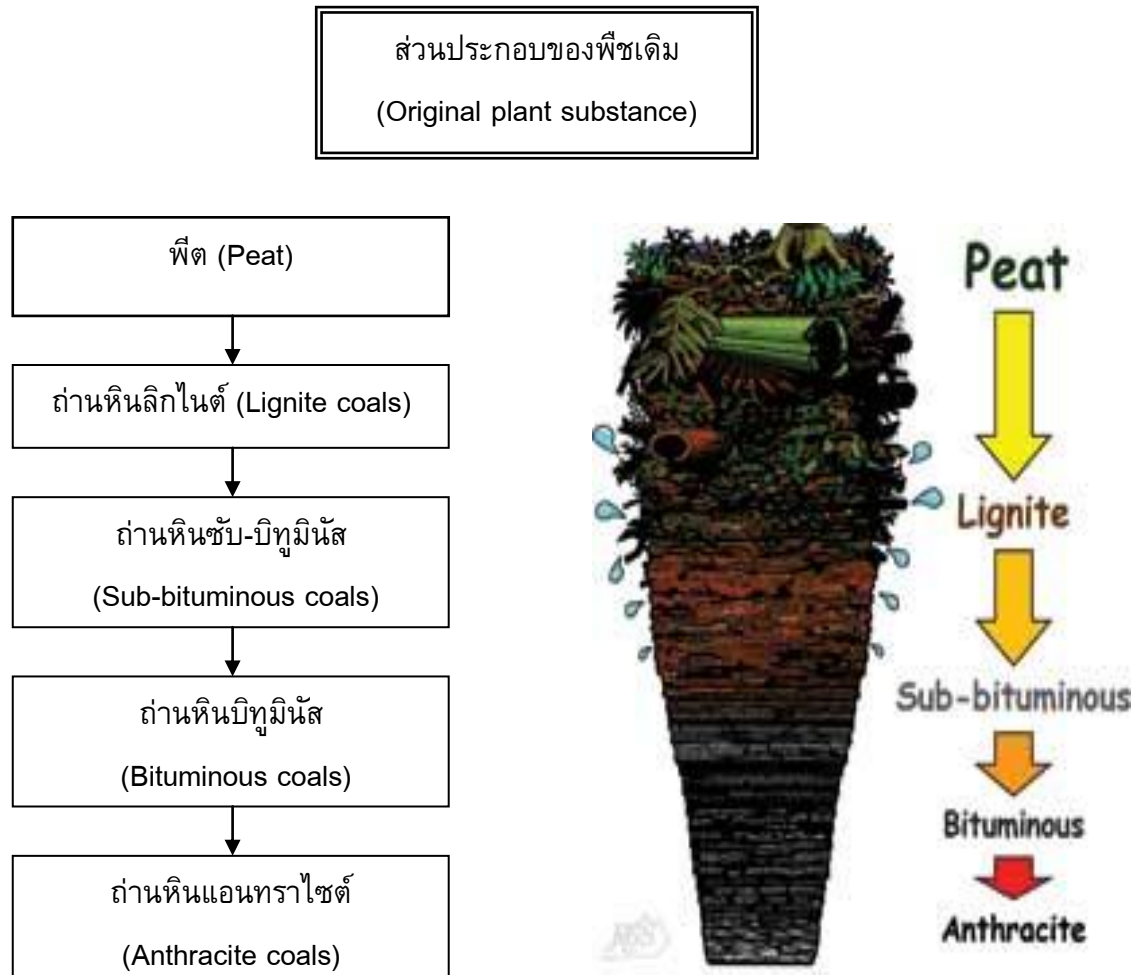
จากต้นกำเนิดของถ่านหินที่เริ่มต้นมาจากการเน่าเปื่อยผุพังเกิดการทับถมซึ่งกันและกันของพืชยืนต้นรวมถึงซากสิ่งมีชีวิตในบริเวณน้ำนิ่ง เมื่อเวลาผ่านไปจึงเริ่มกลายเป็นพีต (Peat) ก่อน แล้วจึงเปลี่ยนแปลงต่อไปภายใต้ภาวะความดัน อุณหภูมิ และการทับถมด้วยโคลนและตะกอน ตลอดจนการเคลื่อนทับของชั้นหินทำให้เนื้อถ่านหินแน่นแข็งขึ้น สูญเสียน้ำ ออกซิเจน และไฮโดรเจน มากขึ้น มีความเป็นถ่านหินสูงขึ้นตามลำดับ ตั้งแต่ลิกไนต์ (Lignite), ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous), บิทูมินัส (Bituminous), เซมิแอนทราไซต์ (Semi-Anthracite) ไปจนถึงแอนทราไซต์ (Anthracite) ดังนั้น ถ่านหินจึงเปรียบเทียบกับเนื้อไม้ที่มีปริมาณน้ำสูง คาร์บอนต่ำ แต่ปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนสูง เมื่อเนื้อไม้เปลี่ยนไปเป็นพีต (Peat) ในระยะเริ่มต้นและเปลี่ยนเป็นถ่านหินศักดิ์สูงขึ้น จะมีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้น ขณะเดียวกันออกซิเจน และความชื้นจะลดลงตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการกำหนดศักดิ์ของถ่านหินมีความจำเป็นและมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะในแง่ของการซื้อขายและการอ้างอิง ดังนั้น ระบบมาตรฐานการกำหนดศักดิ์ของถ่านหินซึ่งประเทศต่างๆ กำหนดขึ้นจึงแตกต่างกันออกไป

การจำแนกศักดิ์ของถ่านหินและการระบุคุณภาพของถ่านหิน ที่เกี่ยวกับการเผาไหม้และการให้ความร้อน อาศัยผลการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานต่างๆ ของถ่านหิน ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) และค่าความร้อน ระบบมาตรฐานอเมริกา (American Societies for Testing and Materials : ASTM) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้จัดลำดับของถ่านหินในปัจจุบัน โดยจัดให้ถ่านหินมี 4 ลำดับ คือ ลิกไนต์ (Lignite), ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous), บิทูมินัส (Bituminous), เซมิแอนทราไซต์ (Semi-Anthracite) และแอนทราไซต์ (Anthracite)

2.1.3 การจำแนกลำดับของถ่านหินตามระบบมาตรฐาน (Meyers, 1981; ASTM D388, 1994)

ถ่านหินทั่วโลกมีลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของแหล่งที่มาแตกต่างกัน ทั้งจากชนิดของพืชในถ่านหิน ภูมิศาสตร์ธรณีวิทยาและระยะเวลาในการสะสมตัวของถ่านหิน ซึ่งระบบมาตรฐานอเมริกา (American Societies for Testing and Materials, ASTM) เป็นระบบมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับในการจำแนกถ่านหินในปัจจุบัน โดยจำแนกถ่านหินตามค่าคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนของถ่านหิน ซึ่งโดยค่าคาร์บอนคงตัว (% ของคาร์บอน) จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการสะสมตัวของถ่านหินที่มากขึ้น

ดังนั้น จึงสามารถจำแนกจัดลำดับของถ่านหินได้ 4 ลำดับ คือ ลิกไนต์ (Lignite), ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous), บิทูมินัส (Bituminous), เซมิแอนทราไซต์ (Semi-Anthracite) และแอนทราไซต์ (Anthracite) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



ที่มา : http://www.uky.edu/KGS/coal/coal_information.htm

รูปที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงการเกิดถ่านหินในศักดิ์ (Rank) ต่างๆ

(1) ลิกไนต์ (Lignite)

มีรากศัพท์มาจากภาษาละตินว่า Lignum ซึ่งหมายถึงไม้ เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำที่สุด มีสีน้ำตาล เกิดจากถ่านพีต โดยยังคงปรากฏร่องรอยของเนื้อไม้อยู่บ้าง โครงสร้างเป็นแผ่น มีความแข็งพอประมาณ มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูง มีสารระเหยและความชื้นสูง ให้ค่าความร้อนต่ำ

(2) ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous)

เป็นถ่านหินศักดิ์สูงถัดจากลิกไนต์ บางทีเรียกว่า ลิกไนต์ดำ (Black Lignite) เป็นถ่านหินลักษณะผิวหน้าเรียบ ไม่เห็นเป็นชั้น มีสีน้ำตาลคล้ายขี้ผึ้งมีความชื้นประมาณ 15 - 30% และมีปริมาณเถ้าสูง ให้ค่าความร้อนสูงกว่าลิกไนต์ แต่เนื่องจากมีคุณสมบัติจุดไฟได้ง่าย และไม่เฝิ้ม เกาะเป็นก้อน จึงสามารถที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวหรือแก๊ส และเป็นเชื้อเพลิงในระบบเผาไหม้ขนาดใหญ่

(3) บิทูมินัส (Bituminous)

จัดว่าเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพสูง มีเนื้อแน่น แข็ง ไม่ปรากฏเป็นชั้นของเนื้อไม้และมีสีดำเป็นมันวาว ใช้เวลาในการแปรสภาพค่อนข้างยาวนาน มีสารระเหยมาก จะเฝิ้มและเกาะตัวเป็นก้อนเมื่อถูกความร้อน ให้ค่าความร้อนสูง ติดไฟง่าย ให้ควันน้อยและมีเถ้าต่ำเหมาะสำหรับนำไปผลิตเป็นถ่านโค้กและใช้ในอุตสาหกรรมถลุงโลหะ

(4) แอนทราไซต์ (Anthracite)

เป็นถ่านหินที่จัดว่ามีคุณภาพดีเลิศที่สุด มีลักษณะแข็ง เปราะ มีสีดำเป็นมันวาวและเป็นเนื้อเดียวกัน ปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงมาก ความชื้นและสารระเหยต่ำ ทำให้ติดไฟได้ยาก แต่เมื่อติดไฟแล้ว จะให้ค่าความร้อนสูงมากและใช้เวลาในการเผาไหม้ที่ยาวนาน

2.1.4 การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหินแบบประมาณ (Proximate Analysis) (Moore, 1940; สุณี ลาวัณยากุล และศิริวรรณ ศิลป์สกุลสุข, 2011)

เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบในถ่านหินโดยจำแนกเป็น ความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว โดยที่ความชื้นและเถ้า เป็นส่วนของสารประกอบอินทรีย์ที่เจือปนมากับเนื้อถ่านหิน ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วย สารระเหยและคาร์บอนคงตัว มักนิยมเรียกลักษณะนี้รวมกันว่า ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustibles)

(1) องค์ประกอบความชื้น (Moisture Content)

เป็นน้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการนำถ่านหินบดละเอียด (ผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร) ไปอบภายใต้ภาวะที่กำหนดที่อุณหภูมิ 105 - 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง น้ำส่วนที่เป็นความชื้น (Inherent Moisture) จะระเหยออกมา ขณะที่น้ำส่วนที่ไม่ใช่ความชื้น (Coherent Moisture) ยังคงอยู่ในถ่านหิน โดยถ่านหินที่มีอายุน้อยจะมีความชื้นสูงเมื่ออายุมากขึ้น แร่ดินต่าง ๆ บนผิวโลกที่กดทับลงบนแนวถ่านหิน จะทำให้ความชื้นลดลง ความชื้นในถ่านหินมี 2 รูปแบบ คือ

1. ความชื้นที่ติดแน่นอยู่ในเนื้อถ่านหิน (Inherent Moisture) เกิดจากสมบัติของถ่านหินการดูดความชื้นเข้าไปในเนื้อถ่านหินเป็นปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอายุของถ่านหิน อุณหภูมิ และความชื้น ณ แหล่งกำเนิด

2. ความชื้นอิสระ (Free or Occidental Moisture) เป็นความชื้นที่ถ่านหินดูดไว้ที่ผิว ซึ่งจะสูญเสียไปเมื่อกิ่งไว้ในอากาศ

(2) เถ้า (Ash)

เป็นน้ำหนักที่คงเหลืออยู่หลังจากนำถ่านหินบดละเอียดไปเผาภายใต้ภาวะออกซิไดซ์ที่กำหนดที่อุณหภูมิ 700 - 750 องศาเซลเซียส โดยเถ้า คือ ส่วนประกอบอนินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในถ่านหินที่ถูกออกซิไดซ์จนสมบูรณ์ ดังนั้น น้ำหนักของเถ้าจึงน้อยกว่าน้ำหนักของส่วนประกอบอนินทรีย์ (แร่) ที่มีอยู่ในถ่านหินเดิม เพราะสารประกอบประเภทคาร์บอนเนต ซัลไฟด์และอื่นๆ ถูกออกซิไดซ์ไปเป็นสารประกอบออกไซด์ทั้งหมด สารประกอบในถ่านหินแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. สารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตกลายเป็นถ่านหิน ได้แก่ ธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชถูกทับถมพร้อมกับซากอินทรีย์ และปรากฏเป็นองค์ประกอบในถ่านหินด้วย เช่น ออกไซด์ของโพแทสเซียม โซเดียม แมกนีเซียม แคลเซียม และซิลิกอน เป็นต้น

2. สารอนินทรีย์ที่ถูกทับถมลงบนแนวของถ่านหินขณะที่กำลังเกิดการสะสมตัว ได้แก่ แร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), แร่ไพไรต์ (FeS_2), หินปูนแอนคิไรต์ (Alkerites), หินเชลล์ และดิน เป็นต้น

โดยทั่วไป พบว่า สารอนินทรีย์มากกว่า 95% ประกอบด้วยแร่ 3 ชนิด คือ แร่เคโอลินไนต์ (Kaolinite), แร่แคลไซต์ (Calcite) และแร่ไพไรต์ (Pyrite) ในถ่านหินมากกว่า 95% ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO ที่เหลืออีก 5% เป็น MgO , Na_2O , K_2O และ TiO_2

สารประกอบอนินทรีย์จะเริ่มเปลี่ยนแปลงเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิต่างๆ และเกิดปฏิกิริยาเคมีได้สารประกอบเชิงซ้อนใหม่ ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนน้อยกว่าสารเริ่มต้น เพราะถูกใช้ไปโดยรีดิวซิ่งแก๊ส (Reducing Gas) Fe_3O_4 และ FeS_2 ที่พบในถ่านหินมักถูกรีดิวซ์เป็น Fe_2O_3 หรือ FeS ซึ่งทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวต่ำลง เช่นเดียวกับ Na_2O , K_2O และ MgO สำหรับ SiO_2 และ Al_2O_3 ทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงขึ้น นอกจากนี้ เหล็กที่อยู่ในรูปของ

แร่ไพไรต์ (FeS_2) เมื่อได้รับความร้อนจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นเหล็กออกไซด์ และ SO_2 หรือ SO_3

(3) สารระเหย (Volatile Matter)

เป็นน้ำหนักที่สูญหายไป (เมื่อหักน้ำหนักความชื้นออกแล้ว) หลังจากการนำถ่านหินบดละเอียด ไปเผาภายใต้ภาวะที่กำหนดที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที โดยไม่ให้สัมผัสกับอากาศ เพื่อแยกสลายสารที่ระเหยได้ในเนื้อถ่านออกมา สารระเหยได้ประกอบด้วยน้ำมันหาร์ท น้ำมันเบา (Lighter Oils) ไฮโดรคาร์บอน แก๊สไฮโดรเจน ออกไซด์ของคาร์บอน และน้ำจากการแตกตัวของโมเลกุลที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Hydrates) ซึ่งไม่ใช่ความชื้นอิสระ

สารระเหยนี้มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์ถ่านหินเพราะส่วนประกอบของสารระเหยได้จะแตกต่างกันตามศักดิ์ของถ่านหิน โดยลดลงเมื่อถ่านหินมีศักดิ์สูงขึ้น

(4) คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

เป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหิน ซึ่งจะเป็นของแข็งที่มีคาร์บอนส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบ โดยสามารถประมาณได้จากร้อยละที่เหลือจากการวิเคราะห์แบบประมาณ เมื่อหักค่าความชื้น สารระเหยและถ่านหินที่มีศักดิ์สูงจะคาร์บอนคงตัวสูงด้วยเนื่องจากปริมาณความชื้นและสารระเหยต่ำ

2.1.5 การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหินแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) (ทัศนีย์ สุวพันธ์, 2538 : 54 – 59; การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2552 : ออนไลน์)

เป็นการวิเคราะห์ธาตุที่สำคัญต่างๆ ที่มีอยู่ในถ่านหิน คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถันและไนโตรเจน บางครั้งมีการวิเคราะห์ฟอสฟอรัสและคลอรีนด้วย ส่วนออกซิเจนเป็นผลต่างระหว่างผลรวมของธาตุองค์ประกอบทั้งหมดกับความชื้นและถ่าน การวิเคราะห์ธาตุจะกระทำโดยการกลั่นสลายถ่านหินในภาวะออกซิไดซ์อย่างรุนแรง จนกระทั่งกลายเป็นสารประกอบออกไซด์ และหาปริมาณออกไซด์ที่เกิดด้วยวิธีทางเคมีหรือทางกายภาพ

2.1.6 ตะกรัน (Slag) (Hatt, 2001)

ถ้ำที่เกิดการสะสมตัวจะมีอยู่สองแบบคือ ถ้ำหลอม (Molten Ash) และเกลืออัลคาไลน์ (Alkali Salt) ถ้ำหลอมที่เกิดการสะสมตัว เรียกว่า “ตะกรัน (Slag)” ซึ่งเกิดขึ้นในบริเวณเตาเผา

ของหม้อไอน้ำ ส่วนเกลืออัลคาไลน์ (Alkali Salt) จะเกิดในบริเวณระบบหมุนเวียนหรือระบบหล่อเย็นของหม้อไอน้ำ โดยอธิบายถึงส่วนต่างๆ ของเตาที่สะสมตัวในบริเวณต่างๆ ดังนี้

(1) ตะกรันผนัง (Wall Slag)

หมายถึง ตะกรันที่ถูกหลอมตัวและก่อตัวขึ้นบริเวณผนังเตา โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจากตะกรันชนิดนี้ คือ

1. ตะกรันที่เกิดขึ้นอาจไหลลงอยู่ด้านล่างของเตาเผา และก่อตัวเป็นแนวโค้งอุดทางที่ถ้าจมนจะตกสู่เบื้องล่าง ทำให้เกิดการสะสมของถ้าจมนในเตา
2. ตะกรันที่เกาะผนังจะทำตัวเป็นฉนวนกีดขวางการส่งผ่านความร้อนไปยังผนังเตาเพื่อผลิตไอน้ำ ซึ่งทำให้เกิดอุณหภูมิของแก๊สที่ปากทางออกมากขึ้น ทำให้เกิดตะกรันขึ้นบริเวณห้องเผา
3. ตะกรันจะก่อตัวบริเวณหัวเผา (Burner) ที่เรียกว่า Eyebrows ซึ่งจะไปขัดขวางการไหลของมวลอากาศและถ่านหิน ซึ่งสร้างความเสียหายให้กับหัวเผาได้

(2) ตะกรัน Superheater (Superheater Slag)

เป็นตะกรันที่ก่อตัวขึ้นบริเวณ Superheater และบริเวณที่มีการหมุนเวียนอื่นๆ ในหม้อไอน้ำ

(3) ตะกรันบริเวณหมุนเวียนไปยังบริเวณการเกิด Fouling (Convection Pass Fouling)

ตะกรันชนิดนี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดอัลคาไลน์ซัลเฟต เช่น CaSO_4 และ Na_2SO_4 ซึ่งเกี่ยวข้องเนื่องกับการเกิดถ้าลอย ตะกรันชนิดนี้มักเกิดขึ้นกับถ่านหินในแถบตะวันตกของสหรัฐอเมริกา

(4) ตะกรันที่สะสมตัวในบริเวณที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Deposit)

ตะกรันชนิดนี้เกิดขึ้น เช่น บริเวณที่เกิดลมร้อนและสะสมตัวเป็นชั้นๆ เนื่องจากการควบแน่นกันระหว่างกรดซัลฟิวริกผสมกับถ้าลอยในบริเวณนี้

2.1.7 การใช้ประโยชน์ถ่านหิน (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2552 : ออนไลน์ ; สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, กระทรวงพลังงาน, 2552 : ออนไลน์)

ถ่านหินถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีแหล่งสำรองกระจายอยู่ทั่วโลกและปริมาณค่อนข้างมาก การขุดถ่านหินขึ้นมาใช้ประโยชน์ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจาก

ถ่านหินราคาถูกกว่าน้ำมัน ถ่านหินส่วนใหญ่จึงถูกนำมาเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ใช้หม้อน้ำร้อนในกระบวนการผลิต เช่น การผลิตไฟฟ้า การถลุงโลหะ การผลิตปูนซีเมนต์ การปรมไบยาสูบ และการผลิตอาหาร เป็นต้น นอกจากนั้น ยังมีการใช้ประโยชน์ในด้านอื่น เช่น การทำถ่านสังเคราะห์ (Activated Carbon) เพื่อดูดซับกลิ่น การทำคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber) ที่เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง แต่มีน้ำหนักเบา และการแปรสภาพถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเหลว (Coal Liquefaction) หรือแปรสภาพเป็นก๊าซ (Coal Gasification) ซึ่งเป็นการใช้ถ่านหินแบบเชื้อเพลิงสะอาด เพื่อช่วยลดมลภาวะจากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงได้อีกทางหนึ่ง ภายใต้กระบวนการแปรสภาพถ่านหินจะสามารถแยกเอาก๊าซที่มีฤทธิ์เป็นกรดหรือเป็นพิษ และสารพลอยได้ต่างๆ ที่มีอยู่ในถ่านหินนำไปใช้ประโยชน์ได้อีก เช่น กำมะถันใช้ทำกรดกำมะถัน และแร่ยิปซัม แอมโมเนียใช้ทำปุ๋ยเพื่อเกษตรกรรม ถ้าถ่านหินใช้ทำวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น

2.1.8 แหล่งถ่านหินในประเทศไทย (SOMWANNAPORN, 2552 : ออนไลน์; กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, กระทรวงพลังงาน, 2552 : ออนไลน์ ; การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2552 : ออนไลน์)

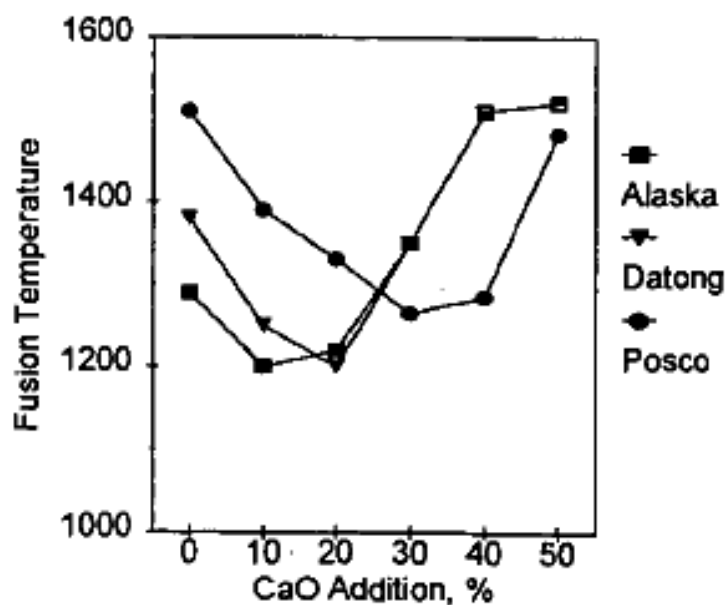
ประเทศไทยมีแหล่งถ่านหินกระจายอยู่ทั่วทุกภาค มีปริมาณสำรองทั้งสิ้นประมาณ 2,197 ล้านตัน แหล่งสำคัญอยู่ในภาคเหนือประมาณ 1,803 ล้านตัน หรือร้อยละ 82 ของปริมาณสำรองทั่วประเทศ ส่วนอีก 394 ล้านตันหรือร้อยละ 18 อยู่ภาคใต้ ถ่านหินส่วนใหญ่มีคุณภาพต่ำอยู่ในชั้นลิกไนต์และซับบิทูมินัส มีค่าความร้อนระหว่าง 2,800 - 5,200 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม หรือถ่านลิกไนต์ 2.0 - 3.7 ตัน ให้ค่าความร้อนเท่ากับน้ำมันเตา 1 ตัน ลิกไนต์เป็นถ่านหินที่พบมากที่สุดในประเทศไทยที่ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และจังหวัดกระบี่ จัดว่าเป็นลิกไนต์ที่คุณภาพแย่มากที่สุด พบว่า ส่วนใหญ่มีถ้ำปนอยู่มาก แต่มีกำมะถันเพียงเล็กน้อย คาร์บอนคงที่อยู่ระหว่างร้อยละ 41 - 74 ปริมาณความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 7 - 30 และถ้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 2 - 45 โดยน้ำหนัก ในช่วงเวลาที่ราคาน้ำมันยังไม่แพงประเทศไทยไม่นิยมใช้ลิกไนต์มากนัก แต่ภายหลังที่เกิดวิกฤตน้ำมันจึงได้มีการนำลิกไนต์มาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิงมากขึ้น ทั้งในด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าและอุตสาหกรรม แหล่งถ่านหินที่มีการสำรวจพบบางแหล่งได้ทำเหมืองผลิตถ่านหินขึ้นมาใช้ประโยชน์แล้ว แต่บางแหล่งยังรอการพัฒนาขึ้นมาใช้ประโยชน์ต่อไป

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kim, Bae, and Lee (1995 : 1107 - 1112) ได้ทดลองนำตัวอย่างถ่านหินจำนวน 3 ตัวอย่าง (Alaska, Datong และ Posco) มาวิเคราะห์หาอุณหภูมิในการหลอมตัวของเถ้า (Ash Fusion Temperature) โดยเริ่มต้นเผาที่อุณหภูมิ 538 องศาเซลเซียส จนถึง 1,600 องศาเซลเซียส และได้ใส่แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณต่างๆ เพื่อทดสอบว่าจะมีผลต่ออุณหภูมิของการหลอมมีค่าต่ำลงหรือไม่ ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิของการหลอมมีค่าต่ำลงเมื่อเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ลงไป จนกระทั่งถึงปริมาณหนึ่งที่เริ่มมากเกินไป ค่าอุณหภูมิของการหลอมเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งได้ข้อมูลสรุปมาจากตารางที่ 2.2

Aineto, Acosta, Rincon, and Romero (2006 : 2352 - 2358) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal Expansion) ของตะกรันถ่านหินจากโรงไฟฟ้า Elcogas IGCC ของประเทศสเปน ด้วยเทคนิค Differential Thermal Analysis (DTA) และเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของตะกรันถ่านหิน พบว่า การเปลี่ยนแปลงของกราฟเกิดที่ช่วงอุณหภูมิ 540 และ 720 องศาเซลเซียส เนื่องจากปฏิกิริยา Sulfide Oxidation และ Ferrous Oxidation (แร่ฮีมาไทต์; Fe_2O_3) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส จะเกิดแร่มุลไลต์ ($3Al_2O_3 \cdot SiO_2$) และแร่อะนอร์ไทต์ ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$) โดยเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าลอย (Fly Ash) และตะกรัน (Slag) และนำไปใน $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ Equilibrium Diagram พบว่า แร่มุลไลต์ (Mullite) จะอยู่ใกล้บริเวณ Eutectic Region ของการเกิดผลึกแร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite)

Oikonomopoulos, Perraki, and Tougiannidis (2010 : 2284 - 2293) ได้ทำการศึกษาถ่านหินลิกไนต์บริเวณของเหมืองโดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบของแร่และอินทรีย์ที่ปรากฏในตัวอย่างถ่านหิน ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะเป็นดังตารางที่ 2.3 โดยที่ 3400 cm^{-1} O-H stretching vibrations จะเป็นตำแหน่งของการดูดซับน้ำของกลุ่ม Clay Minerals หรือสารอินทรีย์ (Organic Matter) ในถ่านหินเช่นเดียวกับที่ 1610 cm^{-1} Aromatic ring (C=C in plane) stretching symmetric และที่ $1031, 534$ และ 468 cm^{-1} จะเป็นตำแหน่งของแร่เคโอ - ลิไนต์ (Kaolinite)



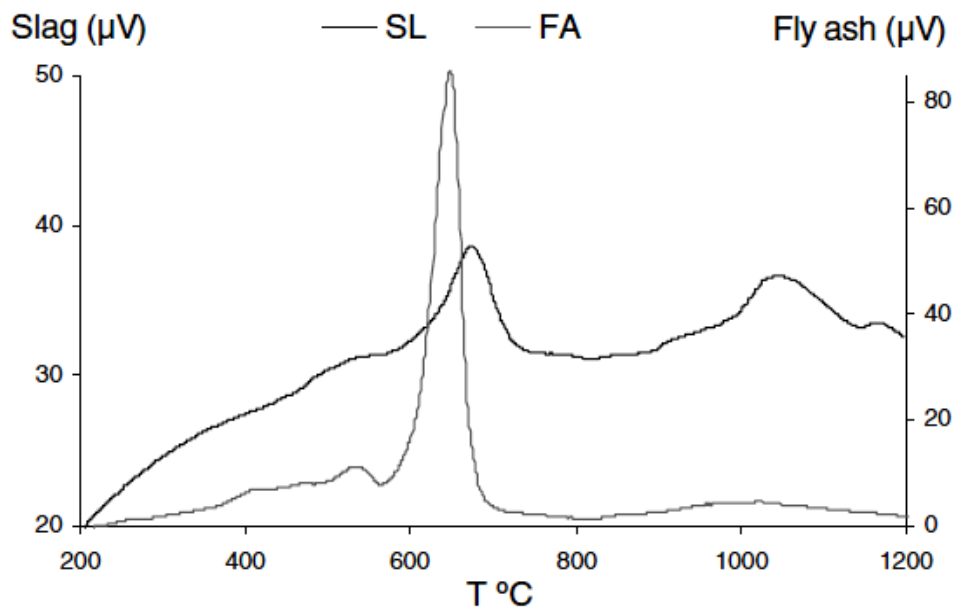
ที่มา : Kim et al., 1995

รูปที่ 2.5 แสดงอุณหภูมิการหลอมของถ้ำตัวอย่างเมื่อเติม CaO ในปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 2.2 แสดงอิทธิพลของการเติม CaO ที่ทำให้อุณหภูมิของการหลอมของถ้ำถ่านหินเปลี่ยนไป

Coal	AFT (°C)	%CaO (reducing condition)					
		Raw	10%	20%	30%	40%	50%
Alaska	IDT	1165	1143	1187	1256	1406	1413
	ST	1176	1163	1200	1275	1471	1525
	HT	1212	1183	1211	1289	1527	1535
	FT	1287	1208	1218	1344	1529	1537
ΔT (FT-IDT)		123	65	31	88	123	124
Dalong	IDT	1178	1139	1166	1256	1406	1413
	ST	1230	1182	1181	1275	1471	1525
	HT	1268	1222	1188	1289	1520	1535
	FT	1362	1282	1201	1344	1527	1537
ΔT (FT-IDT)		184	143	35	88	121	124
Posco	IDT	1369	1245	1193	1219	1257	1380
	ST	1420	1278	1215	1234	1268	1440
	HT	1460	1308	1243	1245	1275	1467
	FT	1519	1379	1317	1260	1286	1486
ΔT (FT-IDT)		150	134	124	41	29	106

ที่มา : Kim et al., 1995



ที่มา : Aineto et al., 2006

รูปที่ 2.6 แสดงผลการวิเคราะห์ DTA ของตัวอย่างเถ้าลอย (Fly Ash, FA) และ ตะกรัน (Slag, SL)

ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะเฉพาะ FT-IR bands ของหมู่ฟังก์ชันของถ่านหินลิกไนต์

Wavenumber (cm ⁻¹)	Assignment
3400	O-H stretching vibrations of hydrogen-bonded hydroxyl groups in polymeric association
2930	Asymmetric aliphatic C-H stretch vibrations-methylene (CH ₂)
2850	Symmetric aliphatic C-H stretch vibrations-methylene (CH ₂)
1610	Aromatic ring (C=C in plane) stretching symmetric
1510	C=O stretching vibrations
1458	Asymmetric aliphatic C-H deformation of methylene and methoxyl
1430 - 1420	Aromatic C=C stretching vibrations
1370	Symmetric aliphatic C-H bending of methyl groups CH ₃
1266	C-O stretch vibration (in lignin-gualacyl ring with C-O stretch)
1224	C-O stretch vibration (in lignin-gualacyl ring and C-O stretch)

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) แสดงลักษณะเฉพาะ FT-IR bands ของหมู่ฟังก์ชันของถ่านหินลิกไนต์

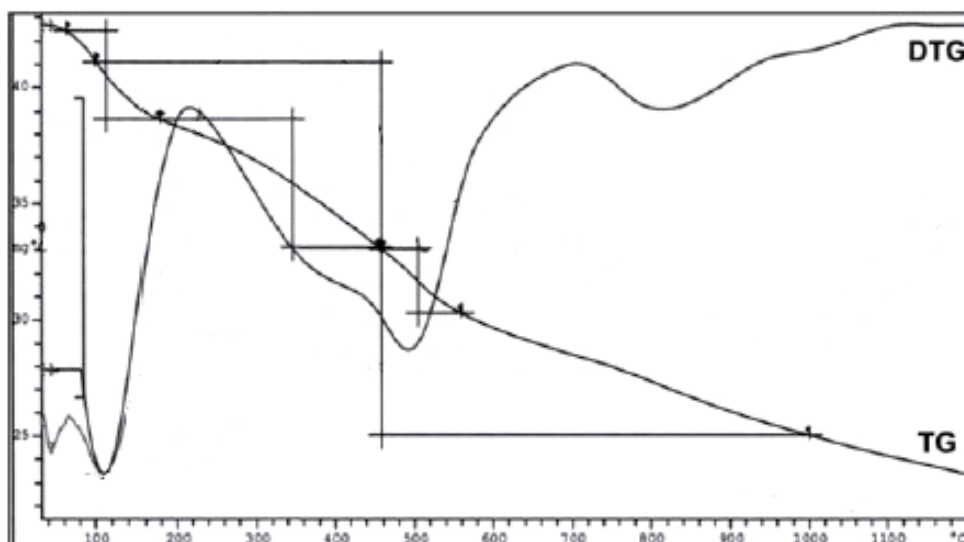
Wavenumber (cm ⁻¹)	Assignment
1031	C-O-H deformation in cellulose
822	Aromatic out-of-plane-rings with 2 neighboring C-H groups
~534	Si-O-AlVI vibrations (Al in octahedral co-ordination) of clay minerals
~468	Si-O-Si bending vibrations of clay minerals

ที่มา : Oikonomopoulos et al., 2010

นอกจากนี้ Oikonomopoulos et al. (2010) ได้ทำการศึกษาถ่านหินด้วยเทคนิค Thermo-Gravimetric Analysis (TGA/DTGA) โดยทำการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลการวิเคราะห์ TG Curve ที่ได้พบว่า น้ำหนักของตัวอย่างจะหายไปในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส โดยจะเกิดกระบวนการสลายตัวของสารระเหย (Devolatilization) และในช่วงอุณหภูมิ 500 - 600 องศาเซลเซียส จะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก เนื่องจากเกิดกระบวนการสูญเสียน้ำ (Dehydroxylation) ของแร่เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โดยเกิดการหายไปของ -OH groups โดยรอบอะตอมของ Al^{VI} และเปลี่ยนไปเป็นแร่เมตาเคโอลิน ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) แสดงในรูปที่ 2.7

Pang, Vassallo, Phong-anant, and Wilson (1992 : 13 - 32) ได้ทำการศึกษากลไกการเกิดตะกั่ว (Slag Formation Mechanism) ของถ่านหินจากโรงไฟฟ้า Gladstone ประเทศออสเตรเลีย ภายใต้ระยะเวลาและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่า ผลของเวลาและอุณหภูมิจะส่งผลต่อการเกิดแร่จำพวกอะลูมิโนซิลิเกต (Alumino Silicate) เช่น แร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite) นอกจากนี้ ยังเกิดการเปลี่ยนแปลงของแร่ จากแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) ไปเป็นแร่ควอตซ์ (Quartz) และจากแร่ควอตซ์ (Quartz) ไปเป็นแร่คริสโตบาไลต์ (Cristobalite)

ผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค Electron Probe Microanalysis (EPMA) ของถ่านหินที่มีขนาดระหว่าง 63 - 90 ไมครอน (รูปที่ 2.8) พบว่าการเกิดแร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite) ในตะกั่ว จะเกิดที่อุณหภูมิ 1,400 - 1,500 องศาเซลเซียส ที่ช่วงระยะเวลา 2 - 8 ชั่วโมง และ



ที่มา : Oikonomopoulos et al., 2010

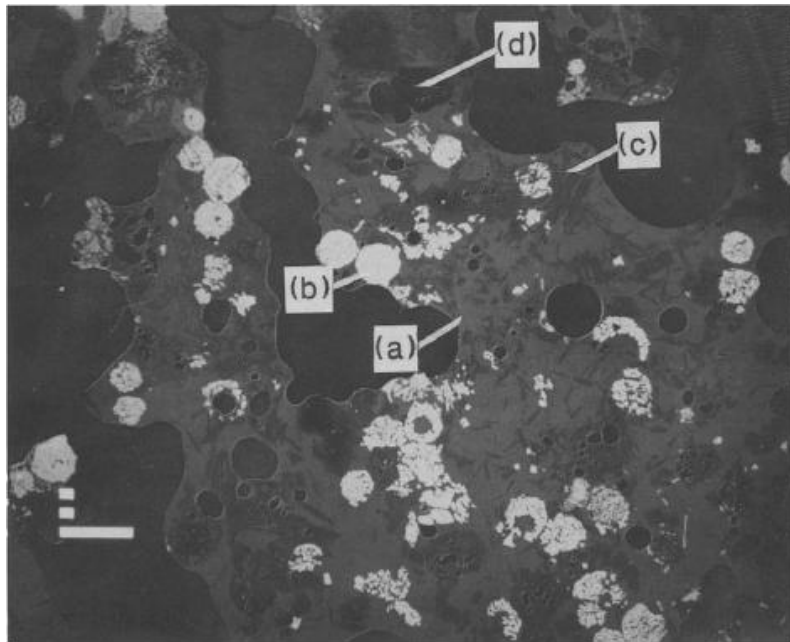
รูปที่ 2.7 แสดง TG diagrams ของตัวอย่างแก้วถ่านหิน ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

ยังพบแร่มุลไลต์ (Mullite) และแร่เหล็กออกไซด์ (Iron Oxide) บริเวณผนังของส่วนที่เป็นผลึกอสัณฐาน (Amorphous Matrix)

นอกจากนี้ Pang et al. (1992) ได้ศึกษาตะกอนที่เกิดขึ้นบริเวณผนังของเตาเผา (Wall Side) และตะกอนที่เกิดขึ้นบริเวณที่ติดเปลวไฟ (Fire Side) ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ผลการวิเคราะห์ที่ได้พบว่า ตะกอนบริเวณที่ติดเปลวไฟจะมีปริมาณของแร่แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกต (Calcium Alumino Silicate) สูงกว่าด้านที่ติดผนังของเตาเผา ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9

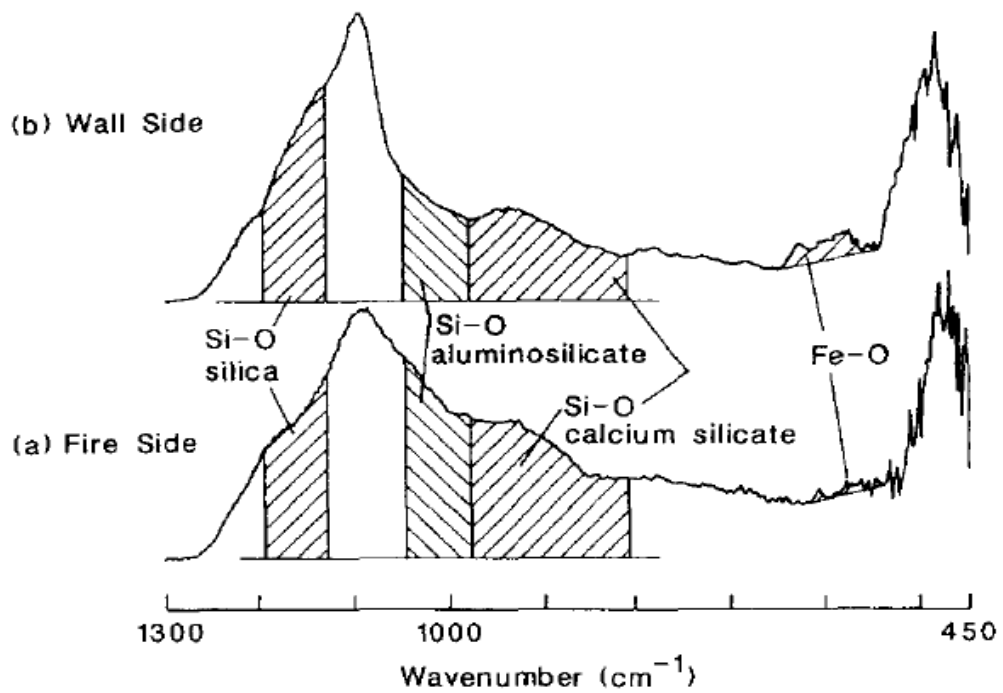
โดยที่ช่วงบริเวณ $1193 - 1133 \text{ cm}^{-1}$ จะเป็นของหมู่ฟังก์ชัน Si-O ของแร่ซิลิกา (Silica) ช่วงบริเวณ $1044 - 974 \text{ cm}^{-1}$ จะเป็นของหมู่ฟังก์ชัน Si-O ของแร่กลุ่มอะลูมิโนซิลิเกต (Alumino Silicate) ช่วงบริเวณ $974 - 808 \text{ cm}^{-1}$ จะเป็นของหมู่ฟังก์ชัน Si-O ของแร่แคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate) และช่วงบริเวณ $636 - 552 \text{ cm}^{-1}$ จะเป็นของหมู่ฟังก์ชัน Fe-O ของแร่เหล็กออกไซด์ (Iron Oxide)

Bai, Li W., and Li B (2008 : 583 - 591) ได้ศึกษาแก้วถ่านหินที่ถูกเตรียมไว้ที่อุณหภูมิ 815 องศาเซลเซียส ที่ผ่านการออกซิไดซ์กับอากาศ และเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 1,300



ที่มา : Pang et al., 1992

รูปที่ 2.8 แสดง Electron Micrograph ของแก้วถ่านหินขนาด 63 - 90 ไมครอน
: (a) Matrix, (b) Hematite, (c) Anorthite และ (d) Silica



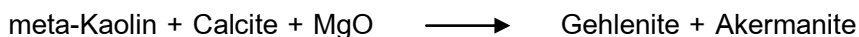
ที่มา : Pang et al., 1992

รูปที่ 2.9 แสดง FTIR Spectra ของตะกอน (a) Fire Side และ (b) Wall Side

องศาเซลเซียส และ 1,400 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน องค์ประกอบหลักของ ถ่านหินและเถ้า คือ แร่ควอตซ์ (SiO_2)

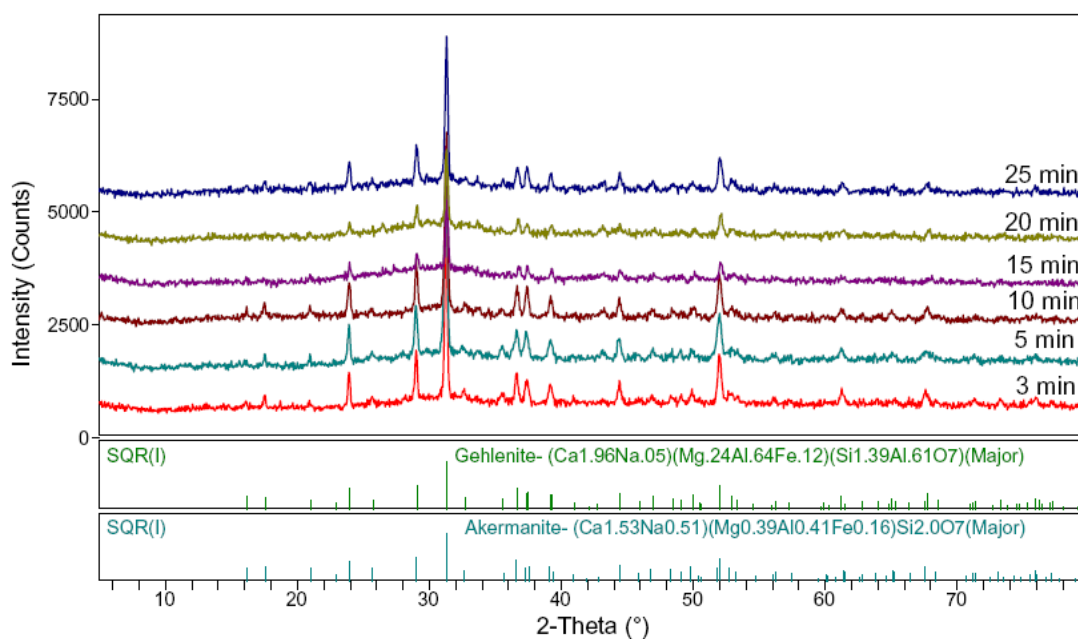
ส่วนองค์ประกอบหลักของเถ้าลอยคือ แร่อะลูมิโนซิลิเกต (Alumino Silicate) เถ้าที่เกิดจากถ่านหินถูกผสมด้วยอัตราส่วนต่างๆ กัน เพื่อทำนายพฤติกรรมการเกิดเถ้าจากถ่านหินที่ถูกผสม และการเปลี่ยนรูปของแร่และการเปลี่ยนแปลงเฟสภายใต้อุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอม หรือ IT (Initial Deforming Temperature) อุณหภูมิเมื่อเริ่มอ่อนตัวหรือ ST (Softening Temperature) และอุณหภูมิเมื่อเริ่มเป็นของไหลหรือ FT (Fluid Temperature) ซึ่งสอดคล้องกับ Phase Diagram ของ $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าจะถูกควบคุมโดยองค์ประกอบของถ่านหิน เตาที่ใช้ในการเผา และสภาพ ณ ขณะเผา ซึ่งผลการทดลองแสดงถึง Residence Time ของ ถ่านหินที่อุณหภูมิสูงว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเถ้าถ่านหิน และมีผลเล็กน้อยต่อปริมาณของคาร์บอนที่ไม่ได้ถูกเผา ระยะของการเกิดผลึกอสัณฐานเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น โดยผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD (รูปที่ 2.10) พบว่า ณ อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส จะพบองค์ประกอบทางเคมีของแร่อะเคอร์มานาइट (Akermanite) และ แร่เกห์เลไนต์ (Gehlenite) ซึ่งเกิดขึ้นตามลำดับปฏิกิริยา คือ



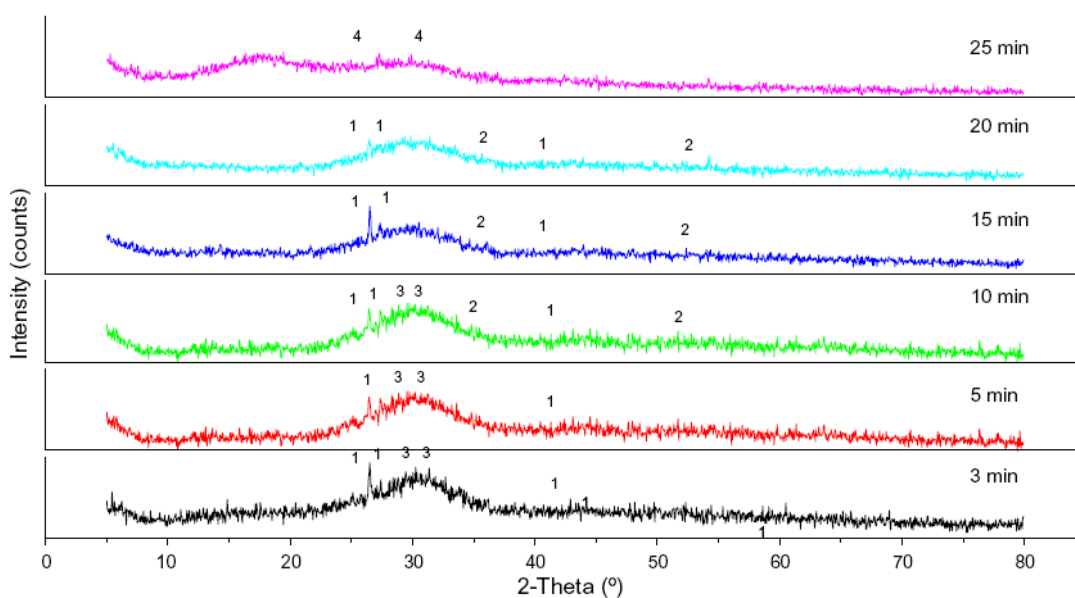
จากรูปที่ 2.10 พบว่า ระยะเวลาของการเผาที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่มีผลที่ชัดเจนต่อ องค์ประกอบที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม อาจมีผลต่อปริมาณที่เปลี่ยนไป แร่อะเคอร์มานาइट (Akermanite) และแร่เกห์เลไนต์ (Gehlenite) เมื่ออยู่ในสภาพสารละลายของแข็ง รูปแบบของ กราฟ XRD จะคล้ายกัน ดังรูปที่ 2.11 เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของแร่อะเคอร์มานาइट (Akermanite) และแร่เกห์เลไนต์ (Gehlenite) มีปริมาณเพิ่มขึ้น (ณ อุณหภูมิ 1,300 °C) และเมื่อถึงอุณหภูมิ 1,400 °C เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นผลึกอสัณฐาน จึงไม่สามารถอธิบายการเกิด แร่ โดยใช้ Phase Diagram ของ $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

ที่อุณหภูมิ 1,400 °C จากข้อมูล XRD ดังรูปที่ 2.11 พบว่า ส่วนใหญ่ได้เปลี่ยนรูปไป เป็นผลึกอสัณฐานแล้ว โดยยังพอวิเคราะห์ได้ว่าเป็นแร่ซิลลิมาไนต์ (Sillimanite), แร่ฟายาลิต (Fayalite), แร่เฟอร์โรซิลไลต์ (Ferrosillite) และแร่ไมโครไคลน์ (Microcline) เป็นแร่หลัก และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณของแร่ซิลลิมาไนต์ (Sillimanite) จะลดลง



ที่มา : Bai et al., 2007

รูปที่ 2.10 แสดงข้อมูลจาก XRD ของตัวอย่างแก้วที่อุณหภูมิ 1,300 °C



1.Sillimanite (Al₂(SiO₄)O) 2.Ferrosilite (FeSiO₃) 3.Fayalite (FeMgSiO₃) 4.Microcline (K_{0.92}Na_{0.08}Al_{0.99}Si_{3.01}O₈)

ที่มา : Bai et al., 2007

รูปที่ 2.11 แสดงข้อมูลจาก XRD ของตัวอย่างแก้วที่อุณหภูมิ 1,400 °C

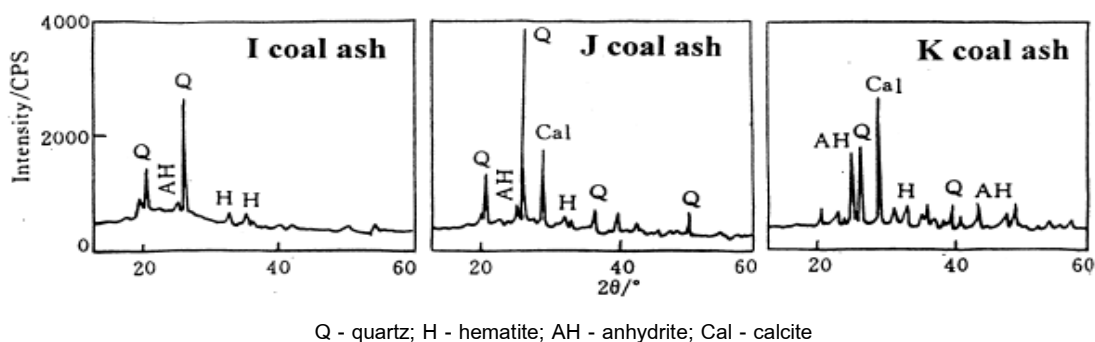
Qiu, Li, Zheng Y, Zheng C.-G, and Zhou (1999 : 963 - 969) ได้ศึกษาพฤติกรรมของแร่ในการหลอมของถ้ำถ่านหินและการเปลี่ยนรูปของแร่ที่เกิดขึ้น โดยทำการศึกษาถ่านหินและการผสมถ่านหินที่มีองค์ประกอบเคมีของถ้ำถ่านหินที่แตกต่างกัน (ถ่านหิน I, J และ K) แล้วนำมาวิเคราะห์หาอุณหภูมิจุดหลอมตัว (Ash Fusion Temperature, AFT)

โดยตัวอย่างจะถูกเผาเริ่มจากที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส นั้น ยังไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างแร่ในถ้ำถ่านหินที่ชัดเจน) ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของแร่จะแสดง ดังตารางที่ 2.4 นอกจากนี้ Qiu J.R., et. al., (1998) ได้ศึกษาองค์ประกอบของแร่ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวอย่าง I และตัวอย่าง J จะมีแร่ควอตซ์ (Quartz, SiO₂) เป็นองค์ประกอบหลัก ขณะที่ตัวอย่าง K จะพบแร่แคลไซต์ (Calcite, CaCO₃) เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องมาจาก การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแร่ ดังรูปที่ 2.12 ตัวอย่าง K จะมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงที่สุด

ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของแร่ของถ้ำในตัวอย่างถ่านหิน I, J และ K

Samples	I	J	K
Proximate (wt%)			
Moisture	3.8	2.7	1.8
Ash	26.5	16.2	4.2
VM	11.8	27.6	21.4
Ultimate (wt%)			
C	62.5	63.8	56.5
H	2.1	3.7	3.3
N	6.3	1.4	1.0
S	2.1	0.6	0.3
Ash Chemical composition (wt%)			
SiO ₂	49.2	48.4	38.2
Al ₂ O ₃	37.7	25.5	25.7
Fe ₂ O ₃	4.2	3.5	10.8
CaO	1.04	2.41	13.50
MgO	1.27	5.54	6.43
Na ₂ O	0.93	0.45	0.96
K ₂ O	0.99	2.00	1.35
TiO ₂	1.21	0.71	0.68

ที่มา : Qiu et al., 1998



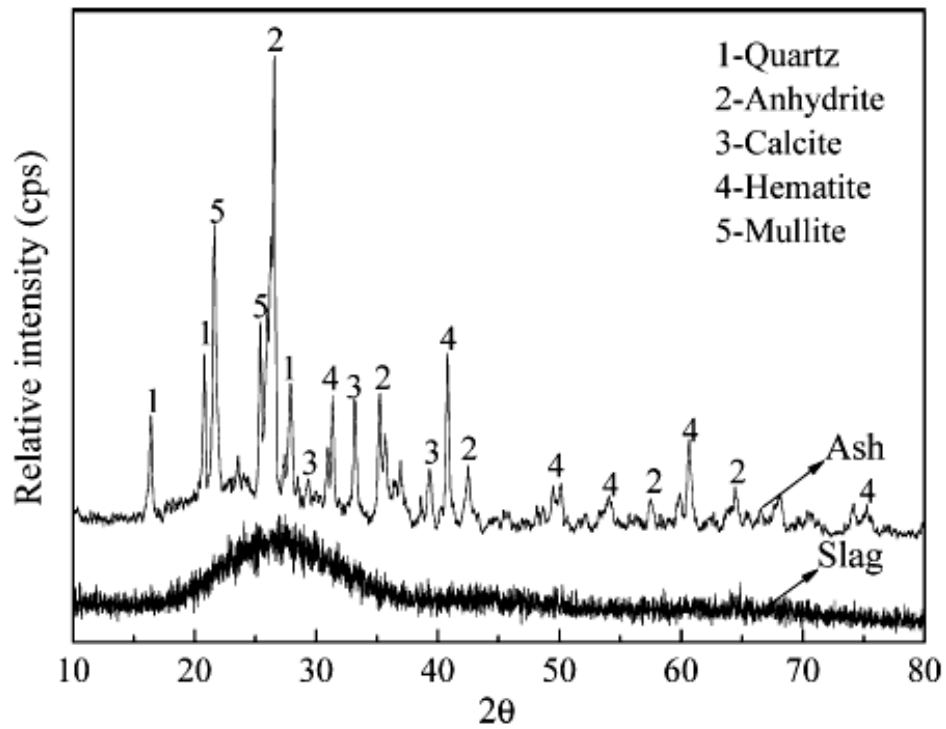
ที่มา: Qiu et al., 1998

รูปที่ 2.12 แสดง XRD Pattern จากการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน I, J และ K

Song, Tang, Zhu X., Wua Rong, Zhu Z., and Koyama (2009 : 297 - 304) ได้ศึกษาถ่านหินและตะกั่วที่เกิดขึ้นจริงจากถ่านหินดังกล่าว โดยการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพด้วยเครื่องมือ X-Ray Diffractometer (XRD) และเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) โดยทำการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 2.13 โดยจะพบแร่ควอตซ์ (Quartz), แร่แอนไฮไดรต์ (CaSO_4), แร่แคลไซต์ (CaCO_3), แร่ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) และแร่มุลไลต์ ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)

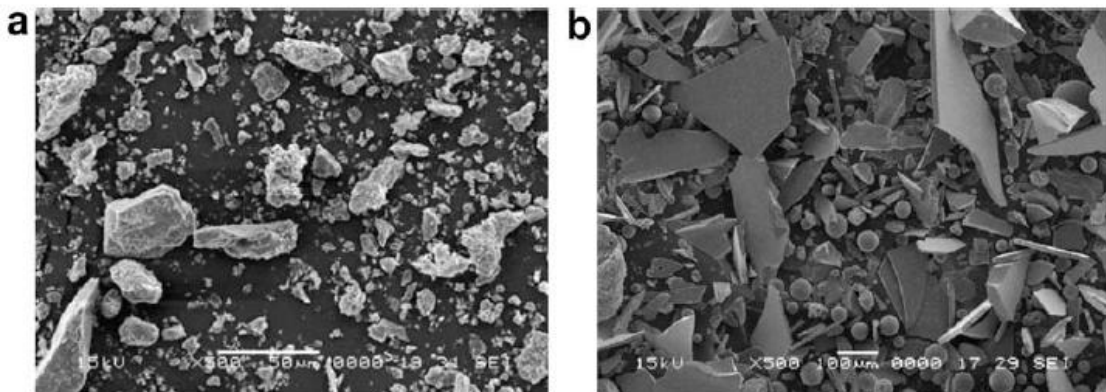
นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) พบว่าภาพผลการทดลองที่ได้ ตะกั่วจะไม่เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomeration) แต่จะพบอนุภาคทรงกลมปรากฏโดยทั่วไป ซึ่งต่างจากภาพผลการทดลองของถ่านหินที่มีลักษณะกระจายตัวอย่างกว้างๆ และมีการรวมตัวของอนุภาคที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.14

Van Dyk, Benson, Laumb, and Waanders (2009 : 1057 - 1063) ได้ทำการศึกษาชนิดของแร่ในถ่านหินและถ่านหินของโรงไฟฟ้าในประเทศแอฟริกาใต้ เพื่ออธิบายการเกิดตะกั่ว (Slag Formation) และกระบวนการเปลี่ยนแปลงของแร่ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค Ash Fusion Temperature (AFT) และ Scanning Electron Microscopy Point Count (SEMPC) จะพบว่า แร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite; $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) จะเป็นผลึกองค์ประกอบ - หลักที่ปรากฏอยู่ในอนุภาคของตะกั่ว (Slag) โดยแร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite) จะเริ่มเกิดการก่อตัวขึ้นที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองจะเป็นดังตารางที่ 2.5



ที่มา : Song et al., 2009

รูปที่ 2.13 กราฟ XRD Pattern ของตัวอย่างเถ้าถ่านหิน (Ash) และตะกรัน (Slag)



ที่มา : Song et al., 2009

รูปที่ 2.14 แสดง SEM Micrograph ของตัวอย่าง (a) เถ้าถ่านหิน (Ash) และ (b) ตะกรัน (Slag)

ตารางที่ 2.5 แสดงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของแร่ในถ้ำถ่านหิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Mineral Type	Mineral formula	Slag (selected dark region on clinker)	Slag (transition area on clinker between dark and grey)
Akermatite	$(Ca,Na,K)_2(Mg,Fe,Fe^{+3},Al,Si)_3O_7$	0.0	0.0
Gehlenite	$Ca_2Al_2SiO_7$	0.0	0.0
Anorthite	$CaAl_2Si_2O_8$	0.0	0.0
Albite	$NaAlSi_3O_8$	0.0	0.0
Mullite	$Al_6Si_2O_{13}$	0.0	2.7
Spinel	$(Fe,Al,Mg)O_4$	0.0	0.0
Quartz	SiO_2	14.8	8.7
Calcium Oxide	CaO	0.0	0.0
Unclassified	Mixed	51.0	36.2
Kaolinite amorphous	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	10.7	40.3
Montmorillonite amorphous	$(0.5Ca,Na)_{0.7}(Al,Mg,Fe)_4(Si,Al)_3O_{20}OH_4$	20.8	7.4
Kaolinite derived	Mixed	2.7	4.7

ที่มา : Van Dyk et al., 2009

Li, Huang, Fang, and Wang (2011 : 273 - 280) ได้ศึกษากระบวนการการเกิดตะกรัน (Slag) และวิธีป้องกันในกระบวนการ Gasification ซึ่งตัวอย่างถ้ำถ่านหินจะถูกเตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นจะนำไปเผาด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่อุณหภูมิ 450, 700, 800, 850, 900, 950, 1,000 และ 1,050 องศาเซลเซียสตามลำดับ ตัวอย่างถ้ำถ่านหินและตะกรัน (Slag) ที่เกิดขึ้นจากการทดลอง จะนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำถ่านหิน และอุณหภูมิในการหลอมด้วยเครื่อง Ash Fusion Determinator (AFT) ดังแสดงในตารางที่ 2.6

นอกจากนี้ Li et al., (2011) ได้ศึกษาถ้ำถ่านหินที่เกิดขึ้นแต่ละอุณหภูมิในการเผาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive X-Ray Detector (SEM-EDX) จากภาพผลการทดลอง SEM-EDX ที่ได้รับที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (รูปที่ 2.15 a) จะปรากฏภาพของอนุภาครูปแบบต่างๆ ทับซ้อนกันอยู่จำนวนมาก และมีอนุภาคเล็กๆ จำนวนเล็กน้อยที่เกิดการยึดติดเข้าด้วยกัน ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส (รูปที่ 2.15 b) จะเกิดการหลอมรวมกันของอนุภาคต่างๆ และมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส (รูปที่ 2.15 c) อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ที่ช่วงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.6 แสดงองค์ประกอบทางเคมีและอุณหภูมิในการหลอมตัวของแก้วถ่านหิน

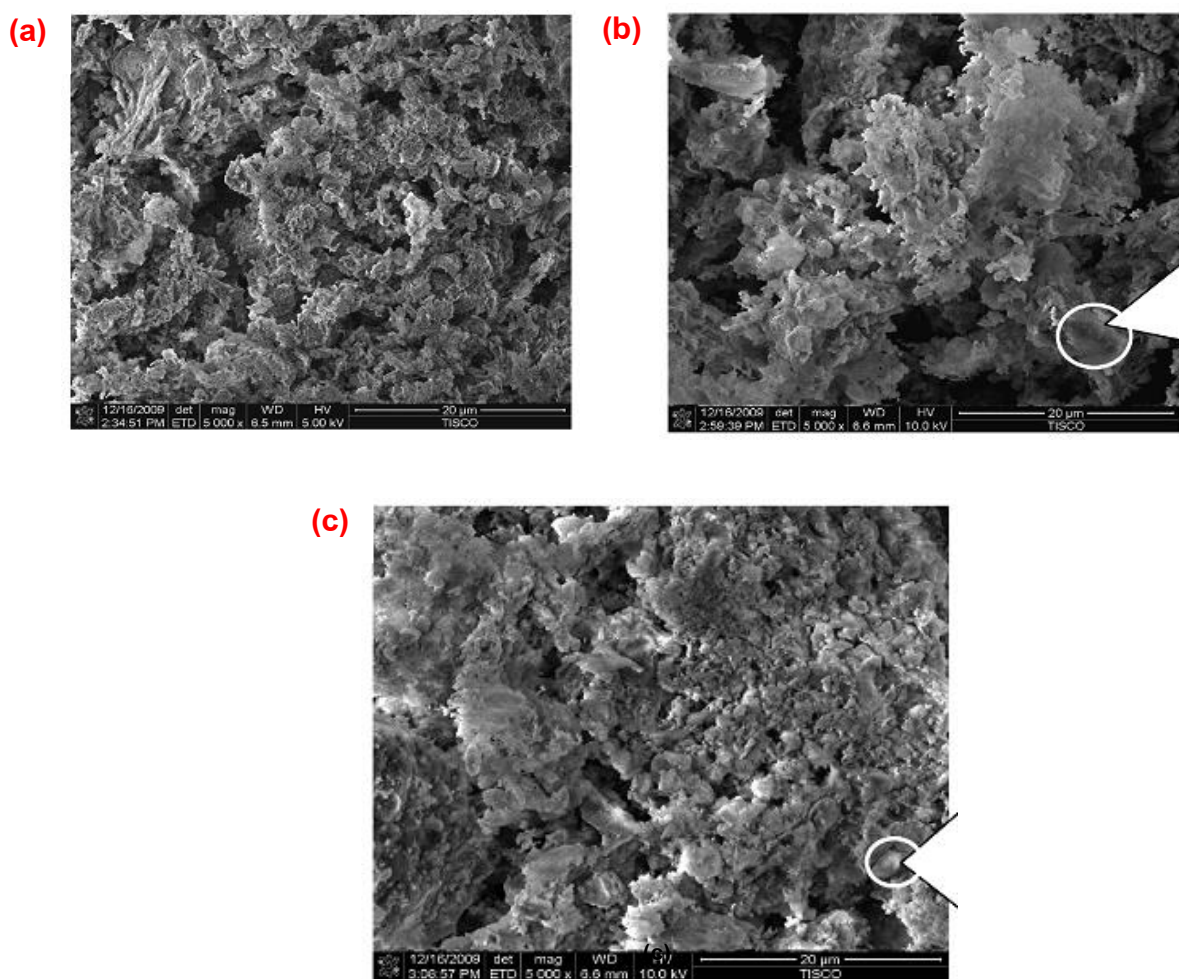
Constituent	Composition (wt %)
SiO ₂	33.14
Al ₂ O ₃	17.56
Fe ₂ O ₃	8.95
CaO	21.64
MgO	1.79
SO ₃	13.16
K ₂ O	0.99
Na ₂ O	0.94
TiO ₂	1.44
P ₂ O ₅	0.28
Temperature ^α	AFT/°C
DT	1096
ST	1158
HT	1169
FT	1189

^α DT: deformation temperature; ST: soften temperature; HT: hemi-spherical temperature; FT: flow temperature.

ที่มา : Li et al., 2011

จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) และเกิดเป็นตะกรัน (Slag) บริเวณผิวหน้าของแก้วถ่านหินที่หลอมเหลว

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Energy Dispersive X-Ray Detector (EDX) จากตารางที่ 2.7 จะสังเกตเห็นได้ว่าปริมาณของธาตุซิลิกอน (Silicon), ธาตุเหล็ก (Iron) และธาตุแคลเซียม (Calcium) มีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นโดยอนุภาคของตะกรันที่หลอมเหลวจะเกิดการก่อตัวขึ้น จากธาตุต่างๆ เช่น Ca, Fe และ Mg ในถ่านหินที่ทำให้เกิดการลดลงของอุณหภูมิในการหลอมตัว (Fusion Temperature) ของแร่อะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminum Silicate) ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 900 - 1,000 องศาเซลเซียส ดังนั้น แร่ออกไซด์ในแก้วถ่านหิน



ที่มา : Li et al., 2011

รูปที่ 2.15 แสดงภาพผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของเก้าถ่านหินที่หลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ (a) 800 °C (b) 900 °C และ (c) 1,000 °C

ที่เป็นองค์ประกอบหลัก (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO และ Fe_2O_3) จะเป็นแนวทางที่บ่งบอกถึงสมบัติของเก้าถ่านหินในการศึกษาได้ จากตารางที่ 2.7 จะสังเกตได้ว่า ธาตุซิลิกอน (Silicon), ธาตุอะลูมิเนียม (Aluminum), ธาตุแคลเซียม (Calcium) และธาตุเหล็ก (Iron) ในเก้าถ่านหิน จะปรากฏอย่างเด่นชัดในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 900 - 1,000 องศาเซลเซียส

Li et. al., (2011) ได้ทำการศึกษากระบวนการการเกิดตะกรัน โดยศึกษาเก้าถ่านหินหลังการเผาไหม้ในช่วงอุณหภูมิ 450 - 1,050 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะ Reducing Atmosphere

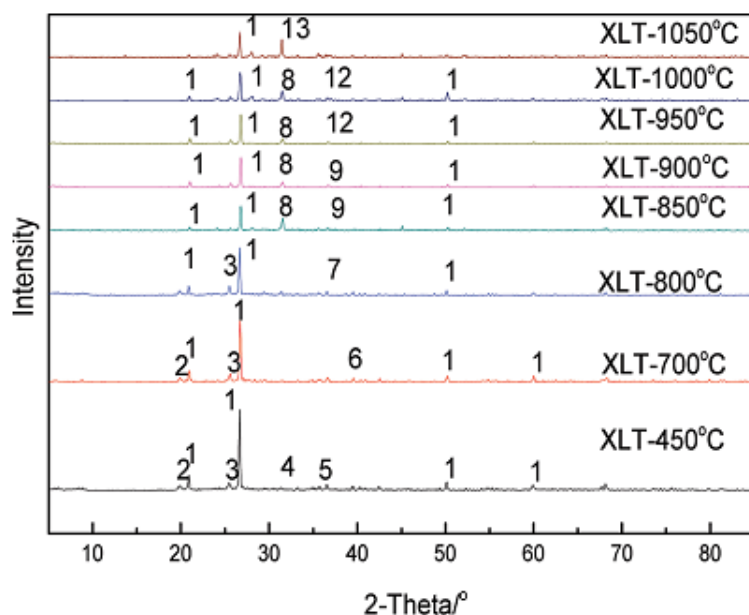
ตารางที่ 2.7 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำถ่านหินในช่วงอุณหภูมิ 900 - 1,000 °C (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

at 900 °C							
element	1	2	3	4	5	6	Mean value
O	38.47	38.44	39.07	38.31	38.80	38.39	38.54
Mg	1.26	1.32	1.28	1.36	1.27	1.31	1.30
Al	11.23	10.52	10.73	10.75	10.86	10.23	10.72
Si	18.53	18.62	18.59	18.63	18.34	18.89	18.60
S	5.87	5.83	5.73	5.81	5.95	5.91	5.85
K	0.68	0.65	0.71	0.69	0.64	0.59	0.66
Ca	14.48	14.53	14.23	14.67	14.67	14.82	14.50
Ti	0.96	1.06	1.07	1.08	1.08	0.96	1.03
Fe	8.53	9.03	8.59	8.39	8.39	9.18	8.81

at 1000 °C							
element	1	2	3	4	5	6	Mean value
O	35.53	35.68	35.42	35.25	35.61	35.91	35.57
Mg	1.31	1.24	1.34	1.28	1.25	1.20	1.27
Al	10.24	10.16	10.22	10.26	10.23	10.09	10.20
Si	19.50	19.56	19.63	19.81	19.62	19.48	19.60
S	2.70	2.81	2.79	2.77	2.75	2.70	2.74
K	1.45	1.52	1.47	1.45	1.50	1.46	1.48
Ca	17.36	17.09	17.16	17.10	17.19	16.94	17.14
Ti	1.37	1.32	1.36	1.35	1.30	1.28	1.33
Fe	10.74	10.62	10.61	10.70	10.55	10.84	10.67

ที่มา : Li et al., 2011

ซึ่งผลการทดลองที่ได้ (รูปที่ 2.16) พบว่า ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแร่ควอตซ์ (Quartz) และแร่แอนไฮไดรต์ (Anhydrite) ปริมาณจะค่อยๆ ลดลง ภายใต้สภาวะ Reducing Atmosphere ไอออนของ Fe^{3+} จะค่อยๆ เปลี่ยนไปเป็น Fe^{2+} ซึ่งทำให้เกิดแร่แมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ออกไซด์ (Magnesium Ferrous Oxide) (ที่ 700 °C) และเมื่อทำปฏิกิริยากับแร่ซิลิกา (SiO_2) จะเกิดเป็นแร่เฟอร์ไรต์แมกนีเซียมซิลิเกต (Ferrous Magnesium Silicate) (ที่ 800 °C) จากผลการทดลองที่ได้ในการศึกษากระบวนการการเกิดตะกอน จะสามารถเขียนสมการกระบวนการการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบแร่ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ ดังแสดงในสมการที่ (1) - (11) (Li, et al., 2011) ตามตารางที่ 2.8



- 1, Quartz (SiO_2); 2, Illite ($\text{KAl}_2[\text{OH}] \cdot 2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}$); 3, Anhydrite (CaSO_4); 4, Pyrite (FeS_2);
 5, Goethite ($\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$); 6, Magnesium Ferrous Oxide ($(\text{MgO})_{0.77}(\text{FeO})_{0.23}$);
 7, Ferrous Magnesium Silicate ($\text{Fe}_{0.24}\text{Mg}_{0.76}\text{SiO}_3$); 8, Oldhamite (CaS);
 9, Fayalite (Fe_2SiO_4); 12, Hercynite (FeAl_2O_4); 13, Gehlenite ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$)

ที่มา : Li et al., 2011

รูปที่ 2.16 แสดง XRD Pattern ของแก้วถ่านหินที่อุณหภูมิต่างๆ

พิธา ศรีบุศย์ดี (2552) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของแคลเซียมออกไซด์ในตัวอย่างแก้วถ่านหินและตะกอนที่เกิดขึ้นของเตาเผาของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จำนวน 3 ตัวอย่าง (Q2, Q4 และ K3) ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ที่อุณหภูมิ 800 °C, 900 °C, 1,000 °C, 1,100 °C และ 1,200 °C เพื่อหาชนิดของแร่ พบว่า ชนิดแร่ของตัวอย่างแก้ว Q2 คือ แร่มุลไลต์ (Mullite), แร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite), แร่ควอตซ์ (Quartz) และแร่แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ (Calcium Aluminum Silicate) ตัวอย่างแก้ว Q4 มีชนิดแร่คือ แร่เกห์เลไนต์ (Gehlenite), แร่ควอตซ์ (Quartz) และแร่แคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate) ตัวอย่างแก้ว K3 มีชนิดแร่ คือ แร่ควอตซ์ (Quartz) และแร่แคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate)

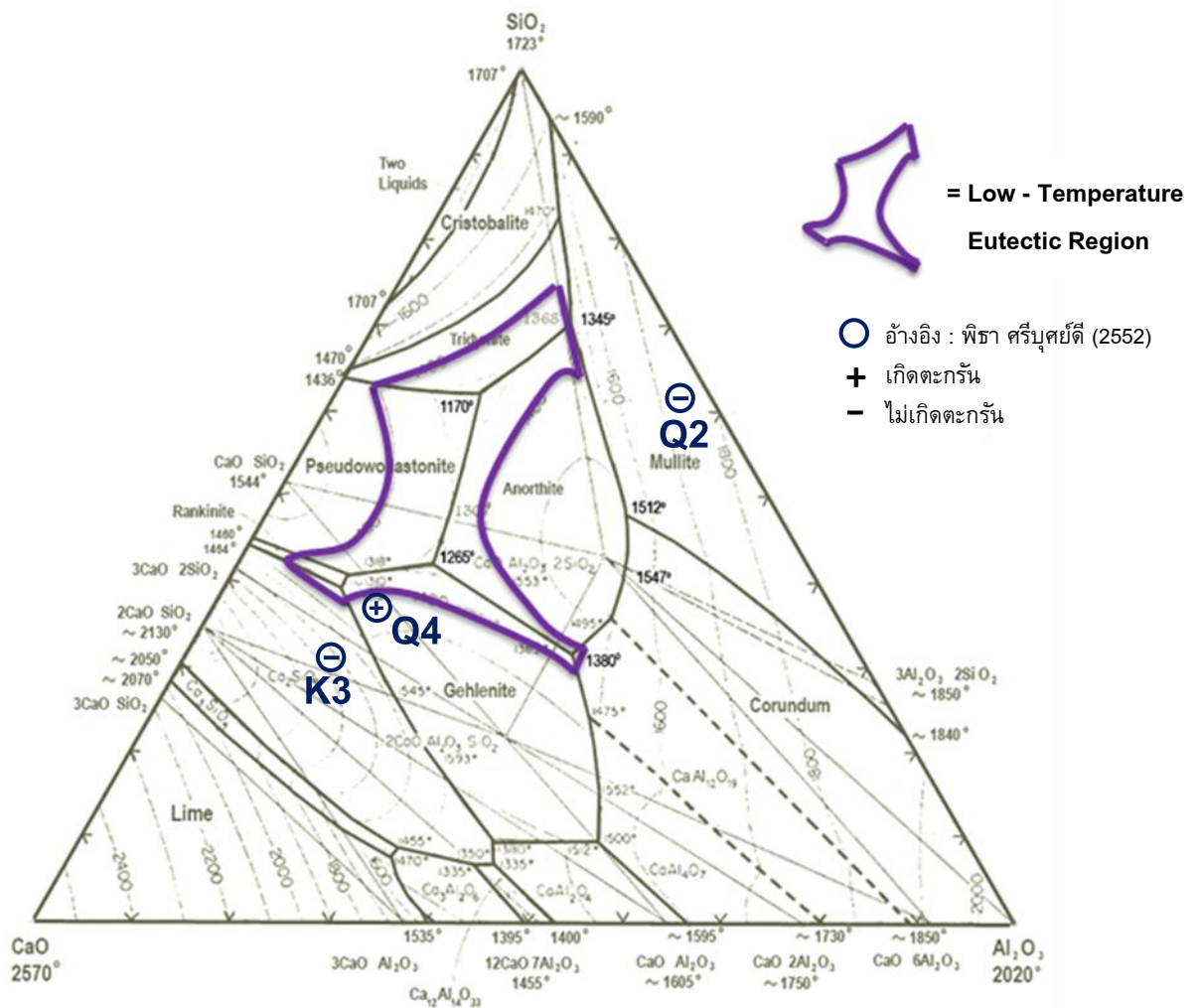
เมื่อนำตัวอย่างแก้วถ่านหินไปวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ในรูปของออกไซด์ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICPS) ผลวิเคราะห์พบว่า ตัวอย่างแก้ว Q2 มีปริมาณร้อยละของ CaO เท่ากับ 2.24% (CaO ต่ำ) ตัวอย่างแก้ว Q4 มีปริมาณร้อยละของ CaO เท่ากับ 27.42% (CaO ปานกลาง) และ

ตารางที่ 2.8 แสดงสมการกระบวนการการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบแร่ที่อุณหภูมิต่างๆ

Pyrite (FeS_2)	\longrightarrow	Pyrrhotite (FeS) + Other Sulfides	(1)
Anhydrite (CaSO_4)	\longrightarrow	Calcium oxide (CaO) + Sulfur dioxide (SO_2)	(2)
Anhydrite (CaSO_4) + Hydrogen (H_2)	\longrightarrow	Oldhamite (CaS)	(3)
Magnesium Ferrous Oxide($(\text{MgO})_{0.77}(\text{FeO})_{0.23}$) + Silicon dioxide (SiO_2)	\longrightarrow	Ferrous Magnesium Silicate ($\text{Fe}_{0.24}\text{Mg}_{0.76}\text{SiO}_3$)	(4)
meta-Kaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)	$\xrightarrow{900^\circ\text{C}}$	Mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)	(5)
Mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) + Calcium Oxide (CaO)	$\xrightarrow{950^\circ\text{C}}$	Anorthite ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)	(6)
Anorthite ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) + Calcium oxide (CaO)	\longrightarrow	Gehlenite ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)	(7)
Goethite ($\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$)	\longrightarrow	Wustite (FeO)	(8)
Illite ($\text{KAl}_2[\text{OH}]_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}$) + Wustite (FeO)	\longrightarrow	Almandite ($3\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$) + Hercynite ($\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) + Leucite (KAlSi_2O_3)	(9)
Mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) + Wustite (FeO)	\longrightarrow	Fayalite ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) + Hercynite ($\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)	(10)
Fayalite ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) + Calcium Oxide (CaO) + Silicon Dioxide (SiO_2)	\longrightarrow	Hedenbergite ($\text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$)	(11)

ตัวอย่างแก้ว K3 มีปริมาณร้อยละของ CaO เท่ากับ 31.81% (CaO สูง) และเมื่อนำค่าปริมาณร้อยละของ SiO_2 , Al_2O_3 และ CaO มาเทียบร้อยละน้ำหนักของตัวอย่างเท่ากับ 100% แล้วจึงนำมากำหนดตำแหน่งของแต่ละตัวอย่างลงใน Ternary Phase Diagram (รูปที่ 2.17) จะพบว่า ชนิดแร่หลักของตัวอย่างแก้วถ่านหิน Q2 จะเกิดอยู่ในบริเวณของแร่มุลไลต์ (Mullite) ตัวอย่างแก้วถ่านหิน Q4 จะมีแร่องค์ประกอบหลักเกิดอยู่ในบริเวณของแร่เกห์เลไนต์ (Gehlenite) และตัวอย่างแก้วถ่านหิน K3 จะมีแร่องค์ประกอบหลักเกิดอยู่ในบริเวณของแร่แคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate)

และเมื่อทำการศึกษาตัวอย่างตะกั่ว Q4 ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) พบว่า ชนิดแร่ที่เป็นองค์ประกอบหลักของตะกั่ว คือ แร่เกห์เลไนต์ (Gehlenite) และพบแร่อะเคอร์มานไนต์ (Akermanite) เป็นบางส่วน ดังนั้น แร่เกห์เลไนต์ (Gehlenite) น่าจะเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้แก้วถ่านหินเกิดการหลอมตัวในอุณหภูมิที่ต่ำจนเกิดตะกั่วขึ้นมา



หมายเหตุ : ตัวอย่าง Q2 (2.24 %CaO), Q4 (27.42 %CaO) และ K3 (31.81 %CaO)
ที่มา : พิธา ศรีบุญยต์, 2552

รูปที่ 2.17 แสดง Ternary Phase Diagram ของตัวอย่างเก้าถ่านหิน Q2, Q4 และ K3

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการศึกษาวิจัย

ในการผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจำเป็นต้องใช้ถ่านหินบดที่มีขนาดละเอียดเล็กกว่า 75 ไมครอน และมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (%CaO) ที่ไม่อยู่ในช่วงจุดวิกฤตที่ทำให้เกิดตะกรัน ซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในถ่านหินระหว่าง 23 - 35 %CaO จากผลการวิจัยของ พิธา ศรีบุญยดี (2552) ที่ศึกษาสาเหตุของถ่านหินที่ทำให้เกิดตะกรัน เมื่อทำการเผาไหม้ที่อุณหภูมิภายในเตาเผาสูงถึง 1,300 องศาเซลเซียส จะเกิดแร่ที่เป็นสาเหตุของการเกิดตะกรันในถ่านหิน ได้แก่ แร่เกห์เลไนต์ (Gehlenite) แร่อะเคอร์-มาไนต์ (Akermanite) และแร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite)

ดังนั้น ในการศึกษาวิจัยนี้ จะทำการตรวจสอบยืนยันกระบวนการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะว่ามีสาเหตุจากการก่อตัวของแร่ดังกล่าวในถ่านหิน โดยทำการศึกษาตัวอย่างถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในถ่านหินแตกต่างกัน และศึกษาองค์ประกอบและปริมาณของแร่ในถ่านหินตั้งแต่ก่อนทำการบด และหลังจากการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อศึกษากระบวนการการเกิดแร่ในถ่านหินภายในเตาเผาของโรงไฟฟ้าที่เป็นสาเหตุ ทำให้เกิดตะกรัน

3.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

จากการที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้ศึกษาและวิจัยร่วมกับบริษัท Marubeni (Thailand) จำกัด และบริษัท Taiho Industries จำกัด ได้สรุปว่า จุดวิกฤตที่ทำให้เกิดตะกรันน่าจะเป็นถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในถ่านหินในช่วงระหว่าง 23 - 35% อย่างไรก็ตาม การศึกษาของบริษัท Taiho ประเทศญี่ปุ่น (Taiho Industries Co., Ltd., 2006) ยังมีข้อจำกัดของการศึกษา ทั้งนี้เพราะเป็นการศึกษาการเกิดตะกรันเบื้องต้นโดยการเผาไหม้ถ่านหินในเตาบางอุณหภูมิ และยังไม่สามารถสรุปสาเหตุที่แท้จริงของการเกิดตะกรันได้

ในการวิจัยนี้ จึงเป็นการศึกษาถ่านหินชนิดที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดตะก้น โดยการนำตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ที่มีค่าปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในถ่านที่ใกล้เคียงกับช่วง 23 - 35% ซึ่งได้แก่ ตัวอย่างถ่านหินที่ถ่านมีคาร์บอน CaO ต่ำ และตัวอย่างถ่านหินที่ถ่านมีคาร์บอน CaO สูงมาหาค่าประกอบทางเคมีของแร่ที่เปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิในเตาเผา (อุณหภูมิในเตาเผาประมาณ 1,250 - 1,300 องศาเซลเซียส) ซึ่งได้แก่ ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ K1, K2 และ K3 โดยได้รับแจ้งจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ว่าตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ K1 และ K2 เป็นตัวอย่างถ่านหินที่เมื่อเผาไหม้แล้วได้เกิดตะก้นบริเวณผนังเตา ส่วนตัวอย่าง K3 ไม่เกิดตะก้นที่บริเวณผนังเตา

ตัวอย่างถ่านหินที่นำมาศึกษาวิจัยได้มาจากเหมืองถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จำนวน 3 แหล่ง คือ ตัวอย่างถ่านหิน K1 (12.72 %CaO) ตัวอย่างถ่านหิน K2 (15.24 %CaO) และตัวอย่างถ่านหิน K3 (22.88 %CaO) ดังรูปที่ 3.1 - 3.3 โดยตัวอย่างที่ได้มาจากชั้นของถ่านหินบริเวณที่นำมาผสมกันแล้ว ซึ่งตัวอย่าง K1 และ K2 เป็นตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ที่เมื่อเผาไหม้แล้วได้เกิดตะก้นบริเวณผนังเตา ส่วนตัวอย่าง K3 เมื่อเผาไหม้แล้วไม่เกิดตะก้นบริเวณผนังเตา

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

3.3.1 เครื่องมือหลักในการวิเคราะห์ถ่านหิน

1. เครื่องวิเคราะห์หาอุณหภูมิการหลอมของถ่าน (Ash Fusion Determinator) รุ่น AF700 Ash Fusion ของ LECO
2. เครื่องมือวิเคราะห์ Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICPS)
3. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD)
4. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis: TGA) รุ่น TGA/SDTA 851° ของบริษัท Mettler Toledo
5. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer: FT-IR) รุ่น Spectrum One ของบริษัท Perkin Elmer
6. เครื่องมือวิเคราะห์ความละเอียดสูง (Electron Probe Micro Analyzer: EPMA) รุ่น JXA-8100 ของบริษัท JEOL



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างถ่านหินที่ถ้ำมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำ K1 (12.72 %CaO)



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างถ่านหินที่ถ้ำมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ปานกลาง K2 (15.24 %CaO)



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างถ่านหินที่ถ้ำมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง K3 (22.88 %CaO)

3.3.2 เครื่องมือประกอบในการเตรียมถ่านหิน

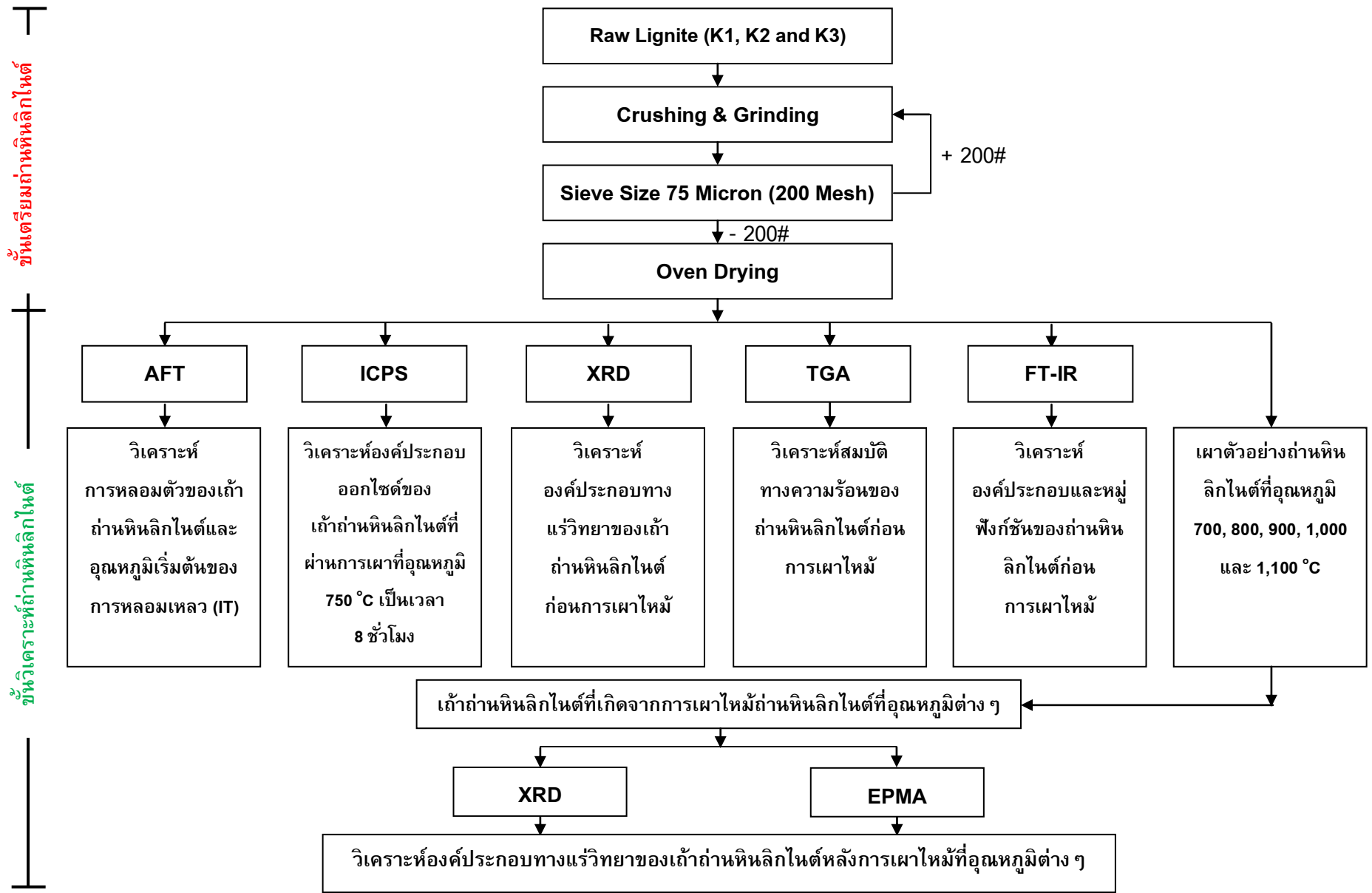
1. เครื่องย่อยแบบจอร์ (Jaw Crusher)
2. เครื่องบดแบบวงแหวน (Ring Mill)
3. ชุดตะแกรงร่อนมาตรฐาน (Sieve) ASTM Standard sieves เบอร์ 60, 100 และ 200 เมช
4. เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Mechanical Sieve Shaker)
5. ตู้อบตัวอย่างแบบถาด (Tray Dryer)
6. เครื่องชั่งสาร
7. เตาเผาควบคุมอุณหภูมิ (ดูรูปที่ 3.4)

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนทำการวิจัยในภาพรวมแสดงได้ตามแผนผังรูปที่ 3.5 ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนต่างๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.4 ชุดเตาเผาควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ มีดังนี้

(1) การบดถ่านหิน

เพื่อให้ถ่านหินลิกไนต์เล็กลงมีขนาดตามต้องการ ทำโดยนำถ่านหินลิกไนต์ขนาดใหญ่มาบดให้มีขนาดเล็กลงก่อนด้วยเครื่องย่อยแบบจอร์ (Jaw Crusher) จากนั้นนำถ่านหินลิกไนต์ที่ผ่านการย่อยนี้มาทำการบด (Grinding) ด้วย เครื่องบดแบบวงแหวน (Ring Mill) และนำมาทำการคัดขนาดของถ่านหินให้มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน โดยใช้ชุดตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช

(2) การอบถ่านหิน

นำถ่านหินลิกไนต์ที่ผ่านการคัดขนาดให้เล็กกว่า 75 ไมครอน มาทำการอบไล่ความชื้นในถ่านหิน ด้วยตู้อบแบบถาด (Tray Dryer) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

จากขั้นตอน (1) และ (2) เป็นขั้นตอนของการเตรียมตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ ก่อนทำการวิเคราะห์หาอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอมเหลวในถ้ำ และองค์ประกอบทางแร่วิธยาสมบัติทางความร้อน รวมทั้งองค์ประกอบและหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.5 การวิเคราะห์การหลอมเหลวและการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ้ำถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้

การวิเคราะห์การหลอมเหลวของถ้ำถ่านหินลิกไนต์ และการหาองค์ประกอบทางเคมีในถ้ำของตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ จะทำดังนี้

(1) การวิเคราะห์หาอุณหภูมิการหลอมของถ้ำถ่านหินลิกไนต์ (Ash Fusion Temperature) (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2552 : ออนไลน์)

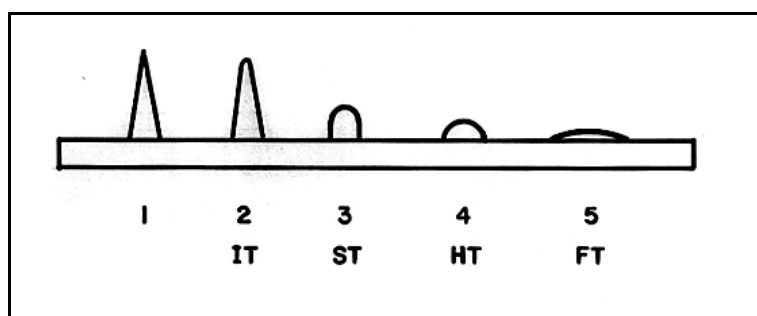
เป็นการศึกษาพฤติกรรมของการหลอมของถ้ำถ่านหินที่อุณหภูมิสูง โดยการวิเคราะห์เพื่อดูอุณหภูมิที่ถ้ำถ่านหินเริ่มจะละลาย ซึ่งถ้ำถ่านหินจะถูกทำให้มีรูปร่างคล้ายกับรูปทรงพีระมิด และใส่เข้าไปในเตาเผาที่ออกแบบโดยเฉพาะภายใต้บรรยากาศที่มีหรือไม่มีออกซิเจน พร้อมทั้งสังเกตและบันทึกการเปลี่ยนแปลงผ่านกระจกเตาเผา โดยจะเริ่มเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 1,600 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่บันทึกมี 4 ค่า คือ

1. Initial Deformation Temperature (IT) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างเริ่มหลอมตัว โดยเริ่มจากปลายยอด

2. Softening Temperature (ST) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างหลอมละลายจนความสูงของแท่งตัวอย่างลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความสูงของตัวอย่างเริ่มต้น

3. Hemispherical Temperature (HT) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างหลอมละลายจนความกว้างของฐานมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของความสูง

4. Flow Temperature (FT) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างหลอมละลายจนไหล ซึ่ง ณ จุดนี้ ความสูงของตัวอย่างจะมีค่าเท่ากับ 1 ใน 3 ของความกว้างของฐาน ซึ่งลักษณะของรูปพีรามิดในแต่ละค่า นั้น จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.6



ที่มา : http://maemohmine.egat.co.th/mining_technology/coal_analysis3.html

รูปที่ 3.6 รูปร่างของพีรามิดในแต่ละค่าของอุณหภูมิการหลอมของถ้ำถ่านหิน

โดยพีรามิดหมายเลข 1 แทนลักษณะตัวอย่างก่อนเข้าเครื่องวิเคราะห์ หมายเลข 2 แทนค่า IT หมายเลข 3 แทนค่า ST หมายเลข 4 แทนค่า HT และหมายเลข 5 แทนค่า FT และหลังจากที่ได้เผาตัวอย่าง เพื่อดูลักษณะของพีรามิดของถ้ำถ่านหินและวิเคราะห์ผลออกมา ซึ่งจะเป็นไปตามผลการทดลองในบทที่ 4 ตารางที่ 4.1

(2) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ (Ash Chemical Analysis)

เป็นการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของแร่อนินทรีย์ในถ้ำโดยนำตัวอย่างถ้ำถ่านหินไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ขึ้นไป เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ถ้ำถ่านหินแล้วนำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICPS) ในรูปของ Oxides ซึ่งจะอยู่ในรูป SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , K_2O , Mn_3O_4 , SO_3 และ Na_2O

3.6 การศึกษาด้านแร่วิทยาของถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้

ก่อนนำตัวอย่างถ่านหินไปทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ จะทำการหาล่องค์ประกอบทางแร่วิทยาของถ่านหินลิกไนต์ทั้ง 3 ตัวอย่าง (K1, K2 และ K3) โดยนำตัวอย่างถ่านหินทั้ง 3 ตัวอย่าง มาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออก จากนั้นนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (Vacuum Decicator) ก่อนนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

(1) วิเคราะห์หาล่องค์ประกอบทางแร่วิทยาของถ่านหินตัวอย่างถ่านหิน

ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) เพื่อทราบองค์ประกอบและชนิดของแร่ในถ่านหินก่อนการเผาไหม้

(2) วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของถ่านหินตัวอย่างถ่านหิน

ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) เพื่อทราบช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างถ่านหินก่อนการเผาไหม้

(3) วิเคราะห์องค์ประกอบและหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างถ่านหิน

ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) เพื่อบ่งบอกลักษณะสเปกตรัมเฉพาะของถ่านหิน ที่แสดงลักษณะเฉพาะขององค์ประกอบในตัวอย่างถ่านหินก่อนการเผาไหม้

3.7 การศึกษาคุณลักษณะ องค์ประกอบทางแร่วิทยาและองค์ประกอบทางเคมีพื้นผิวของถ่านหินลิกไนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

หลังจากนำตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3 ที่ผ่านการอบจนแห้ง ไปเผาที่อุณหภูมิ 700, 800, 900, 1,000 และ 1,100 องศาเซลเซียส และจึงนำถ่านหินไปวิเคราะห์หาล่องค์ประกอบทางแร่วิทยา และองค์ประกอบทางเคมีพื้นผิว โดยดำเนินการ ดังนี้

(1) การนำตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3 มาเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

เป็นการนำตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3 มาเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กัน แล้ววิเคราะห์ถ่านหินด้วยวิธีรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบน (X-Ray Diffractometer - XRD) โดยนำตัวอย่างทั้งสามที่ผ่านการบดแล้ว มาชั่งตัวอย่างด้วยวิธี Cone and Quartering แล้วนำมาเผาในเตาเผา โดยใส่ตัวอย่างในถ้วยทนไฟประมาณ 15 กรัม ก่อนนำเข้าเตาเผา เพื่อดูองค์ประกอบทางเคมีของแร่ในถ่านหินที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยเริ่มเผาจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อีกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำออกจากเตาเผา ทั้งให้เย็นสักครู่ แล้วนำไป

ไว้ในโถดูดความชื้น (Vacuum Decicator) เพื่อไม่ให้ทำปฏิกิริยากับอากาศจนเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์มากเกินไป ทำเช่นนี้เรื่อยไปโดยจะเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 100 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส และจึงนำตัวอย่างในแต่ละอุณหภูมิมาวิเคราะห์หาลองค์ประกอบทางแร่วิทยาด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer : XRD)

(2) วิเคราะห์หาลองค์ประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าถ่านหินลิกไนต์

หลังจากนำตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K1, K2 และ K3 ที่ผ่านการเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 700, 800, 900, 1,000 และ 1,100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มาทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) และทำการเปรียบเทียบ XRD Pattern ของการเผาไหม้แต่ละอุณหภูมิเพื่อทราบองค์ประกอบและชนิดของแร่ที่เปลี่ยนแปลงไปแต่ละอุณหภูมิ

(3) วิเคราะห์หาลองค์ประกอบและแผนภาพองค์ประกอบการกระจายตัวของแร่ในเถ้าถ่านหิน

โดยใช้เทคนิค Electron Probe Microanalysis (EPMA) เพื่อทราบรูปแบบของกระบวนการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีพื้นผิวในตัวอย่างเถ้าถ่านหิน โดยหาชนิดและปริมาณออกไซด์ขององค์ประกอบต่างๆ ในเถ้าถ่านหินลิกไนต์ที่ผ่านการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อทราบลักษณะการกระจายตัวทางเคมีของแร่ต่างๆ ที่เกิดขึ้น

3.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และแร่วิทยาของเถ้าหนักและตะกักรันถ่านหินลิกไนต์ที่เกิดขึ้นในเตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

นำตัวอย่างเถ้าหนัก (Bottom Ash) และตะกักรันผนัง (Wall Slag) ที่เกิดขึ้นจริงจากเตาเผาของหม้อไอน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ K1 ได้แก่ K1 (a) (Bottom Ash) และ K1 (b) (Wall Slag) มาศึกษาวิเคราะห์หาลองค์ประกอบทางแร่วิทยาโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) เพื่อทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีและชนิดของแร่ในตัวอย่างเถ้าหนัก (Bottom Ash) และตะกักรันผนัง (Wall Slag) เพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางแร่วิทยาที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างตัวอย่างเถ้าถ่านหินเถ้าหนัก (Bottom Ash) และตะกักรันผนัง (Wall Slag) ที่เกิดขึ้น

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์

ผลการดำเนินการวิจัยดังแสดงรายละเอียดในบทที่ 3 ซึ่งทำโดยการนำตัวอย่าง ถ่านหินลิกไนต์ 3 ตัวอย่าง (K1, K2 และ K3) และตัวอย่างเถ้าหนัก K1(a) (Bottom Ash) และ ตะกรันผนัง K1(b) (Wall Slag) ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ K1 ที่เกิดขึ้นจริงบริเวณ ผนังเตาเผา (Wall Slag) ของหม้อไอน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) มาทำการทดลอง และสามารถวิจารณ์ผลการทดลองได้ตามลำดับ ดังนี้

4.1 การวิจารณ์ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมของเถ้าถ่านหินลิกไนต์ (Ash Fusion Temperature Analysis) และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้

4.1.1 การวิจารณ์ผลการทดสอบการหาอุณหภูมิการหลอมของเถ้าถ่านหินลิกไนต์

จากการนำตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3 มาบดและคัดขนาดให้มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน โดยใช้แร้ง (Sieve) ขนาด 200 เมช แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิการหลอมของเถ้าด้วยเครื่อง Ash Fusibility Determinator รุ่น AF700 ในสภาพบรรยากาศออกซิเจน โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ต่อจากนั้น นำไปเข้าเครื่อง Ash Fusibility Determinator โดยเริ่มเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ถึง 1,600 องศาเซลเซียส ได้ผลวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.1

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ตัวอย่าง K1 จะมีค่า IT ของเถ้าต่ำที่สุด (1,155 องศาเซลเซียส) รองลงมาคือ ตัวอย่าง K2 (1,210 องศาเซลเซียส) ซึ่งตัวอย่าง K1 และ K2 จะมีค่า IT ของเถ้าต่ำกว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาของหม้อไอน้ำในโรงไฟฟ้า (ประมาณ 1,250 - 1,300 องศาเซลเซียส) ดังนั้น จึงมีโอกาที่ตัวอย่างเถ้าทั้งสองตัว จะหลอมตัวติดที่ผนังเตาได้ง่าย ขณะที่ตัวอย่าง K3 จะมีอุณหภูมิ IT (1,372 องศาเซลเซียส) ของเถ้าสูงกว่า ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาเผาของหม้อไอน้ำ (ประมาณ 1,250 - 1,300 องศาเซลเซียส) จะมีโอกาสหลอมตัวติดที่ผนังเตาได้ยากกว่า เพราะฉะนั้น การนำตัวอย่าง K1 และ K2 ไปเผา จึงอาจเกิดตะกรัน

ตารางที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิของการหลอมของเถ้าในตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3

ASH FUSION TEMPERATURE (°C)	RESULT		
SAMPLE NAME	K1	K2	K3
INITIAL DEFORMATION TEMPERATURE (IT)	1,155 *	1,210 *	1,372 **
SOFTIENING TEMPERATURE (ST)	1,172	1,291	1,409
HEMISPHERICAL TEMPERATURE (HM)	1,201	1,324	1,417
FLUID TEMPERATURE (FT)	1,239	1,346	1,449

หมายเหตุ : * = หลอมเหลว ** = ไม่หลอมเหลว

ในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าได้ ส่วนตัวอย่าง K3 จะเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าได้ยากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ซึ่งได้รับแจ้งว่าเมื่อทำการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ K1 และ K2 ได้ทำให้เกิดตะกรันบริเวณผนัง (Wall Slag) ขึ้นที่เตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ส่วนตัวอย่าง K3 ไม่ทำให้เกิดตะกรันแต่อย่างใด

4.1.2 การวิจารณ์ผลการหาร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินลิกไนต์

เมื่อนำตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3 มาหาร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของแร่ (Ash Chemical Analysis) ด้วยเครื่องมือ Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICPS) โดยนำตัวอย่างถ่านหินไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ประมาณ 8 ชั่วโมง ผลที่ได้ในรูปของออกไซด์ (Oxides) แสดงดังในตารางที่ 4.2 โดยผลการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ของเถ้าที่ได้จากตัวอย่าง K1 (12.72 %CaO), K2 (15.24 %CaO) และ K3 (22.88 %CaO) พบว่า ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ของตัวอย่างทั้งสามตัวอย่าง จะอยู่นอกบริเวณช่วงบริเวณ 23 - 35 %CaO ที่เป็นช่วงที่จะทำให้เกิดตะกรันในหม้อไอน้ำ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าตัวอย่าง K1 (12.72 %CaO) และ K2 (15.24 %CaO) แม้ผลวิเคราะห์เถ้าจะไม่ได้อยู่ในช่วง 23 - 35 %CaO ซึ่งเป็นช่วงที่ควรจะเกิดตะกรัน (ตามข้อสังเกตของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)) แต่ก็ยังสามารถเกิดตะกรันได้ ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จะพยายามหาสาเหตุและข้อสรุปมาอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าของตัวอย่างถ่านหินด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICPS)

ASH COMPOSITION (% wt)	RESULT		
SAMPLE NAME	K1	K2	K3
Fe ₂ O ₃	23.66	20.07	15.87
Al ₂ O ₃	11.41	13.28	5.77
MgO	5.46	2.80	4.84
SiO ₂	21.83	23.72	10.79
CaO	12.72 *	15.24 *	22.88 **
K ₂ O	1.12	1.37	0.74
Na ₂ O	1.17	0.68	1.26
TiO ₂	0.29	0.28	0.14
Mn ₃ O ₄	0.07	0.10	0.09
SO ₃	18.38	18.50	35.25
TOTAL	96.11	96.04	97.63

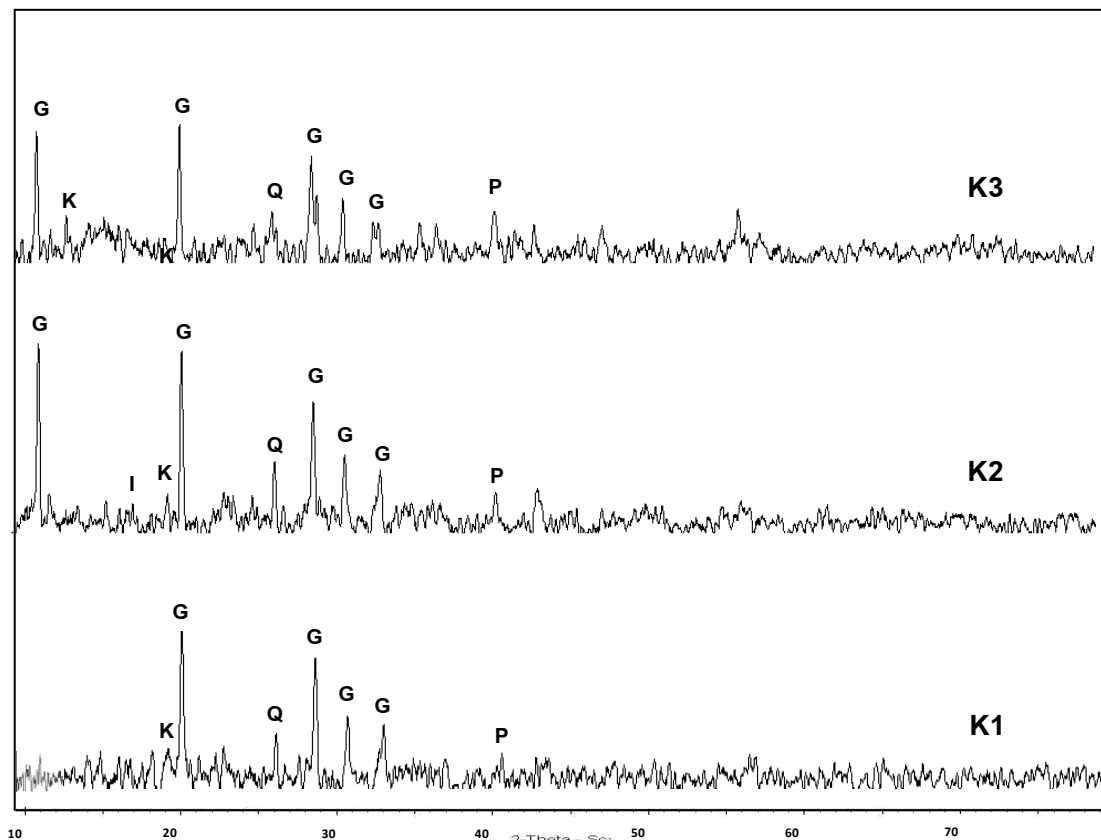
หมายเหตุ : * = หลอมเหลว ** = ไม่หลอมเหลว

4.2 การวิจารณ์ผลการศึกษาด้านแร่วิทยาของเถ้าถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลของการศึกษาด้านแร่วิทยาของเถ้าถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ตามลำดับการวิเคราะห์ ดังนี้

4.2.1 การวิจารณ์ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเถ้าถ่านหินโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD)

จากการวิเคราะห์ XRD Pattern ของถ่านหิน พบว่า แร่ที่เป็นองค์ประกอบหลักของเถ้าในตัวอย่างถ่านหินทั้งสามตัวอย่าง (รูปที่ 4.1) พบว่าตัวอย่าง K1, K2 และ K3 ประกอบด้วยแร่เคโอลิไนต์ (Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O), แร่ยิปซัม (CaSO₄·2H₂O), แร่ไพไรต์ (FeS₂), แร่ควอตซ์ (SiO₂) และแร่ฮิลไลต์ (K(Al,Fe)₂AlSi₃O₁₀(OH)₂·H₂O)



(Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); Illite ($\text{K}(\text{Al},\text{Fe})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$);

K, Kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); Pyrite (FeS_2); Q, quartz (SiO_2))

รูปที่ 4.1 แสดง XRD Pattern ในถ้ำตัวอย่างและชนิดแร่ในตัวอย่าง K1, K2 และ K3 ก่อนการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของแร่ที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างถ้ำถ่านหินลิกไนต์ 3 ตัวอย่าง โดยพิจารณาจากความสูงพีคของแร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), แร่ควอตซ์ (SiO_2) และแร่ไพไรต์ (FeS_2) โดยที่ตำแหน่งพีคของแร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ที่มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบ พบว่า ตัวอย่าง K3 ซึ่งมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ของถ้ำที่อยู่ในรูปของแร่ยิปซัม ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) มากกว่าตัวอย่าง K1 และ K2 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2) จะมีความสูงพีคของแร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ของตัวอย่าง K3 สูงกว่าตัวอย่าง K1 และ K2 ตามลำดับ (รูปที่ 4.1) ขณะที่ตำแหน่งพีคของแร่เคโอลินไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) พบว่า ตัวอย่าง K3 มีความสูงพีคของแร่เคโอลินไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) น้อยกว่าตัวอย่าง K2 และ K1 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ใน

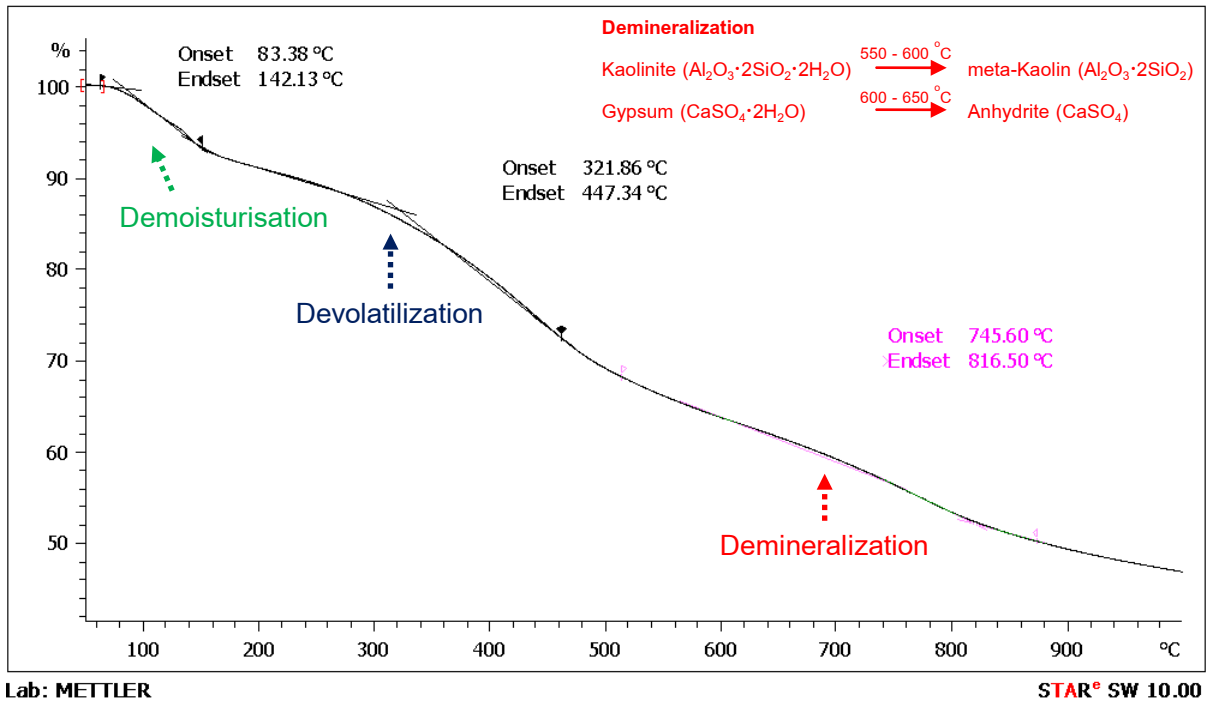
รูปของแร่เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ของตัวอย่าง K3 มีค่าน้อยกว่าตัวอย่าง K2 และ K1 ตามลำดับ เช่นเดียวกับที่ตำแหน่งพีคของแร่ควอตซ์ (SiO_2) ความสูงพีคของตัวอย่าง K2 จะมากกว่า K1 และ K3 ตามลำดับ เนื่องมาจากปริมาณของซิลิกา (SiO_2) ในรูปของแร่ควอตซ์ (SiO_2) ของตัวอย่าง K2 มีมากกว่าตัวอย่าง K1 และ K3 ตามลำดับ

แต่เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือวิเคราะห์ X-Ray Diffractometer (XRD) ในการวิเคราะห์ เพื่อหาปริมาณหรือองค์ประกอบของแร่ในตัวอย่าง จะไม่สามารถทำการวิเคราะห์องค์ประกอบที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ได้ ซึ่งตัวอย่างถ่านหินที่ยังไม่ได้ผ่านการเผาไหม้ที่อุณหภูมิมากกว่า 350 องศาเซลเซียส จะประกอบด้วยสารอินทรีย์ (Organic) และสารอนินทรีย์ (Inorganic) โดยสารอินทรีย์จะเป็นผลึกอสัณฐานที่ไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ X-Ray Diffractometer (XRD) ในตัวอย่างถ่านหินที่ยังไม่ได้ผ่านการเผาไหม้ อาจได้ผลที่ไม่แน่ชัดเท่าที่ควร จึงทำการวิเคราะห์องค์ประกอบและหมู่ฟังก์ชันของแร่ที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างถ่านหิน โดยใช้การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของตัวอย่างถ่านหินด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) ร่วมกับเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) เพื่อเป็นการสนับสนุนผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือ X-Ray Diffractometer (XRD) ซึ่งจะได้อธิบายตามหัวข้อ 4.2.2 และ 4.2.3 ตามลำดับต่อไป

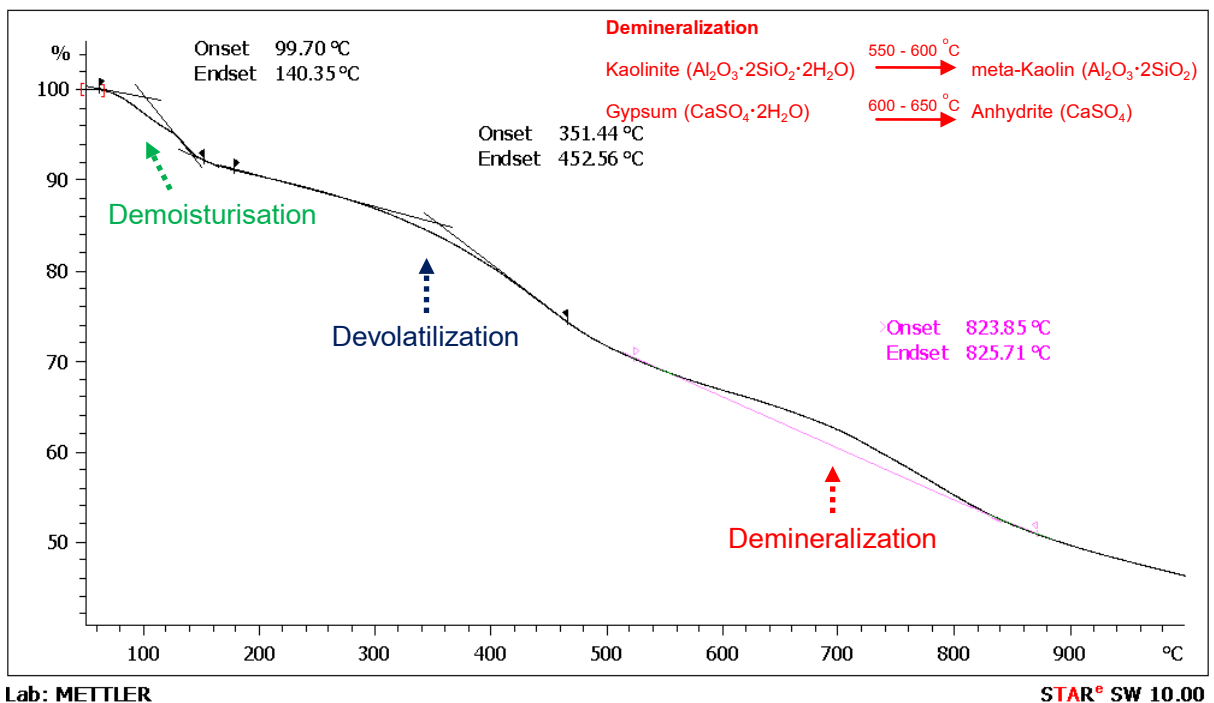
4.2.2 การวิจารณ์ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3 ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis ผลการวิเคราะห์จะแสดงในรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ ซึ่งกราฟที่ได้จะแสดงผลของน้ำหนักที่หายไปเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และพบว่า ตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3 ทั้งสามตัวอย่างมีช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

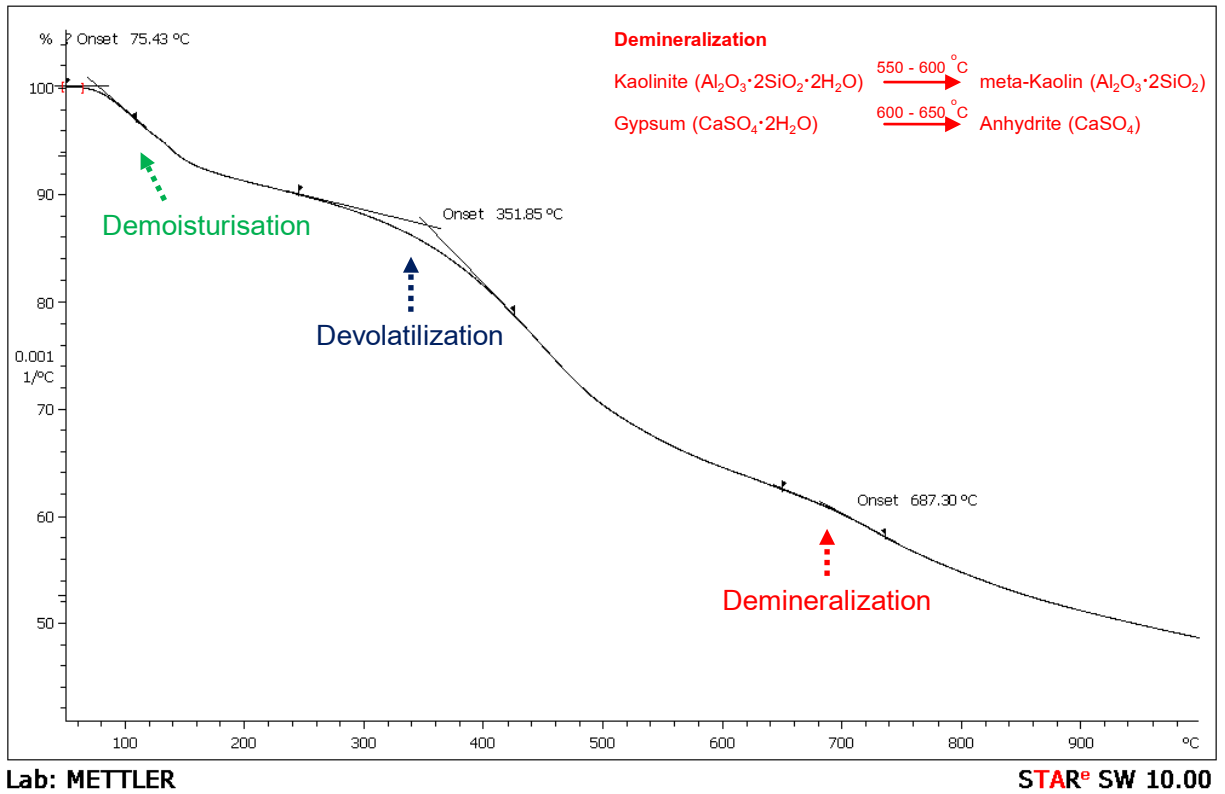
จากการทดลองด้วยเทคนิค TGA สามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างจะเกิดอยู่ 2 ช่วง โดยช่วงแรกที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 350 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน K1 (%CaO = 12.72) ด้วยเทคนิค TGA



รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน K2 (%CaO = 15.24) ด้วยเทคนิค TGA



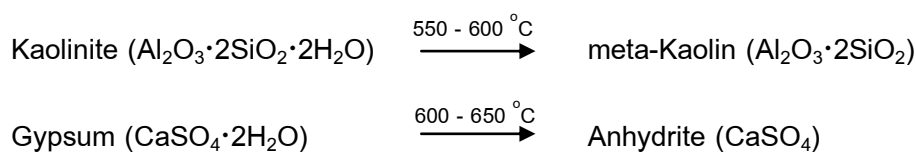
รูปที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน K3 (%CaO = 22.88) ด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.3 แสดงช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3

ตัวอย่างถ่านหิน	อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัวอย่างถ่านหิน	
	ช่วงอุณหภูมิที่ 1 (Onset-Endset, °C)	ช่วงอุณหภูมิที่ 2 (Onset-Endset, °C)
K1	321 - 447	745 - 816
K2	351 - 452	823 - 825
K3	351	687

ซึ่งจะเกิดเนื่องจากการหายไปของสารระเหย (Volatile Matter) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และช่วงที่สองที่อุณหภูมิประมาณ 700 - 820 องศาเซลเซียส จะเกิดกระบวนการการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุ (Demineralization) ของตัวอย่างถ่านหิน โดยที่อุณหภูมิช่วงแรกที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง จะเกิดจากกระบวนการการสลายตัวของสารระเหย (Devolatilization) ของตัวอย่างถ่านหิน ตัวอย่างถ่านหิน K3 จะมีช่วงอุณหภูมิในช่วงการเกิดการสลายตัวของสารระเหย (Devolatilization) ต่ำกว่าตัวอย่างถ่านหิน K1 และ K2 เนื่องมาจาก ที่อุณหภูมิดังกล่าว ตัวอย่างถ่านหิน K3 ยังมีปริมาณของสารระเหย (Volatile Matter) มากกว่าตัวอย่างถ่านหิน K1 และ K2 และเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 และ 1,100 องศาเซลเซียส ตัวอย่างถ่านหิน K3 จะเกิดการลุกไหม้ติดไฟอย่างรวดเร็ว

เมื่อพิจารณาที่ช่วงอุณหภูมิช่วงที่สอง ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง จะเกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุ (Demineralization) ในตัวอย่างถ่านหิน โดยแร่เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นแร่เมตาเคโอลิน ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ที่อุณหภูมิ 550 - 600 องศาเซลเซียส โมเลกุลของน้ำที่อยู่ในแร่เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะระเหยออกไปที่อุณหภูมิดังกล่าว ในขณะที่แร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะเกิดการสูญเสียโมเลกุลของน้ำเช่นเดียวกัน โดยแร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนเป็นแร่แอนไฮไดรต์ (CaSO_4) ที่อุณหภูมิ 600 - 650 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการหายไปของโมเลกุลน้ำในแร่เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และแร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ทำให้น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหินเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ช่วงอุณหภูมิดังกล่าว



ดังนั้น อุณหภูมิที่เริ่มทำให้น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหินคงที่ คือ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้น (น้ำหนักที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ) มาก จึงเป็นเหตุผล ในการเริ่มการทดลองเผาตัวอย่างในการศึกษาวิจัยนี้ที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 700 องศาเซลเซียส ถึง 1,100 องศาเซลเซียส

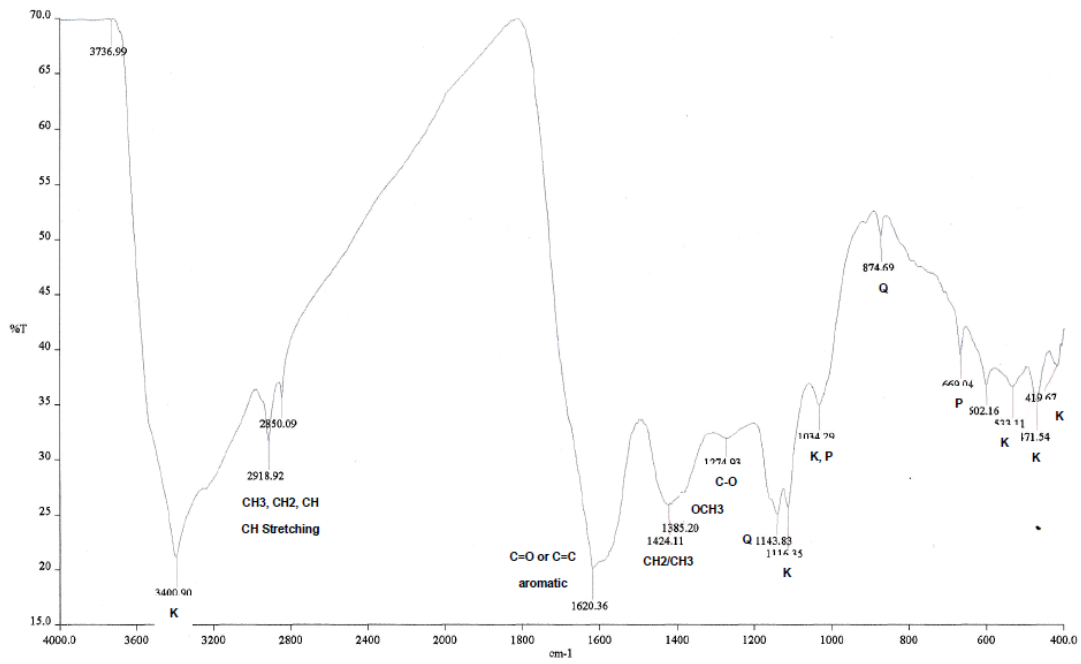
4.2.3 การวิจารณ์ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่าง ถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานซฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR))

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพในการหาหมู่ฟังก์ชัน เพื่อบ่งบอกลักษณะสเปกตรัมเฉพาะของถ่านหิน ที่แสดงลักษณะเฉพาะขององค์ประกอบใน ตัวอย่างถ่านหิน และบอกถึงชนิดของแร่ในตัวอย่างถ่านหิน เนื่องจากถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการเผาไหม้จะมีสารอินทรีย์ (Organic Compound) เป็นองค์ประกอบจำนวนมาก การวิเคราะห์ด้วย เครื่องมือ X-Ray Diffractometer (XRD) อาจได้ผลการวิเคราะห์ไม่ชัดเจนเท่าที่ควร ดังนั้นเพื่อเป็นการสนับสนุนผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ X-Ray Diffractometer (XRD) จึงทำการศึกษาด้วย เทคนิค FT-IR โดยผลของ FT-IR สเปกตรัมของตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3 แสดงดังใน รูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

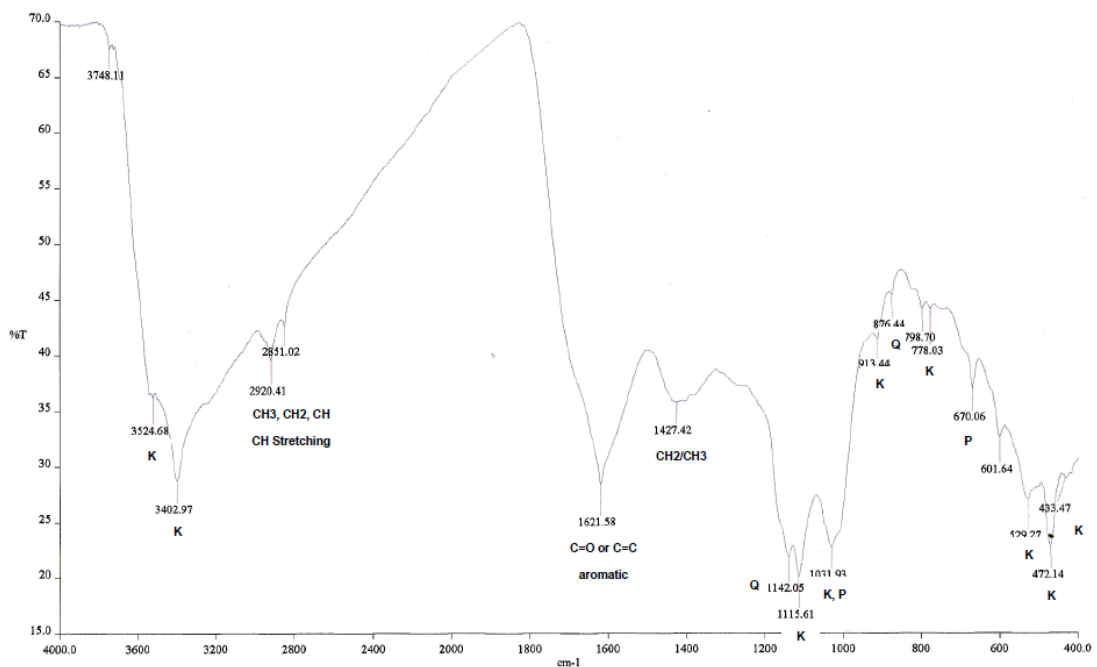
ผลการวิเคราะห์การทดลองด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ในการศึกษาองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในถ่านหิน จะปรากฏพีคของหมู่ C-H stretching bands ที่ 2919 และ 2850 cm^{-1} , หมู่ aromatic C=C band ที่ 1620 cm^{-1} และหมู่ hydroxyl band ที่ 3400 cm^{-1} ขณะที่พีค 1274, 1142, 1116 และ 1032 cm^{-1} จะเป็นพีคของหมู่ C-O stretching และหมู่ O-H deformation vibration ในกลุ่มแอลกอฮอล์, ฟีนอลและอีเทอร์

ซึ่งจากพีคที่ปรากฏที่ 2919 และ 2850 cm^{-1} โดยเป็นพีคของหมู่ C-H stretching bands จะเกิดจากการสลายตัวทางธรรมชาติของพืช เช่น ลิกนิน (หรืออาจเป็นพีคที่เลื่อนมาจากพีคของหมู่ Decarboxylation ที่ 2936 และ 2926 cm^{-1} ขณะที่พีคที่ปรากฏที่ 3400 cm^{-1} ของ -OH stretching vibrations ของ hydroxyl group ที่ดูดซับน้ำไว้ของแร่จำพวกดินเหนียว (Clay minerals) ซึ่งได้แก่ แร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), แร่เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และ จากพีคที่ปรากฏที่ 1620 cm^{-1} ซึ่งจะเป็นพีคของหมู่ C=O หรือ C=C aromatic ring ที่สอดคล้องกับพีคของกับหมู่ -OH stretching vibrations ของ hydroxyl group ที่ดูดซับน้ำไว้

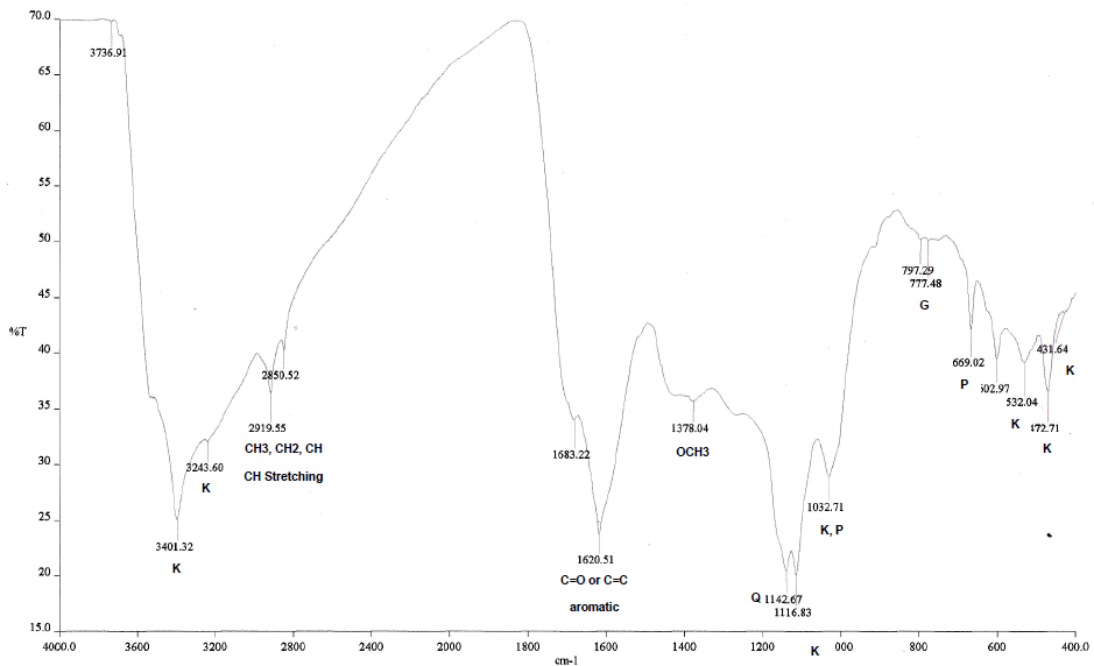
จากพีคที่ปรากฏที่ 1032 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ Si-O-Si และ Si-O-Al vibrations ซึ่งสอดคล้องกับแร่เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ที่มีองค์ประกอบคือ แร่อะลูมินา (Al_2O_3) และแร่ซิลิกา (SiO_2)



รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน K1 (%CaO = 12.72) ด้วยเทคนิค FT-IR



รูปที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน K2 (%CaO = 15.24) ด้วยเทคนิค FT-IR



รูปที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน K3 (%CaO = 22.88) ด้วยเทคนิค FT-IR

ดังนั้น จากการศึกษาองค์ประกอบของถ่านหินโดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เพื่อศึกษาสเปกตรัมที่ปรากฏ พบว่า ตัวอย่างถ่านหินที่ทำการศึกษาก่อนการเผาไหม้ประกอบด้วยแร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), แร่ควอตซ์ (SiO_2), แร่เคลอไลต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เป็นองค์ประกอบหลักในถ่านหิน

4.2.4 สรุปผลการศึกษาด้านแร่วิทยาของถ่านหินลิกไนต์ K1, K2 และ K3 ก่อนการเผาไหม้

จากการนำตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3 มาวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมเหลวและองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ พบว่า ตัวอย่าง K1, K2 และ K3 มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์เท่ากับ 12.72 %CaO, 15.24 %CaO และ 22.88 %CaO ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่าง K1 จะมีค่า IT ของถ่านหินที่ต่ำที่สุด (1,155 องศาเซลเซียส) รองลงมาคือตัวอย่าง K2 (1,210 องศาเซลเซียส) ซึ่งตัวอย่าง K1 และ K2 จะมีค่า IT ของถ่านหินต่ำกว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาของหม้อไอน้ำในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (ประมาณ 1,250 - 1,300 องศาเซลเซียส) เมื่อนำไปเผา อาจเกิดตะกั่วในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าได้ ขณะที่ตัวอย่าง K3 มีอุณหภูมิ IT

(1,372 องศาเซลเซียส) สูงกว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาของหม้อไอน้ำ จึงมีโอกาสเกิดตะกั้นในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าได้ยากกว่า

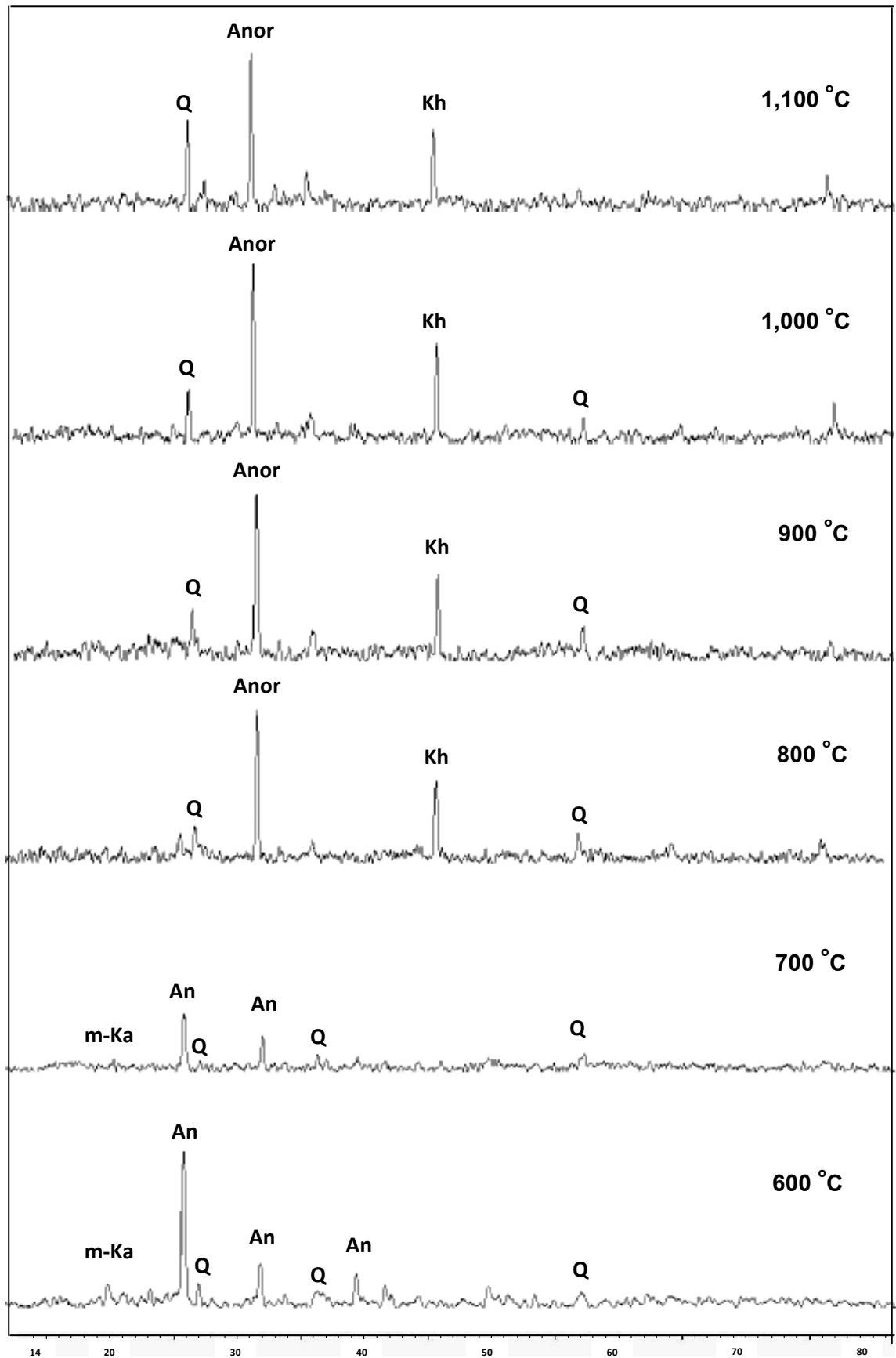
เมื่อศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบของถ้ำในตัวอย่างถ้ำหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ ด้วยเครื่องมือ X-Ray Diffractometer (XRD) ร่วมกับเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) และเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) พบว่า แร่ที่เป็นองค์ประกอบของถ้ำถ้ำหินก่อนการเผาไหม้ประกอบไปด้วยแร่เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), แร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), แร่ไพไรต์ (FeS_2) และแร่ควอตซ์ (SiO_2)

4.3 การวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางแร่วิทยาและองค์ประกอบทางเคมีพื้นผิวของของถ้ำถ้ำหินลิกไนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของถ้ำถ้ำหินโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD)

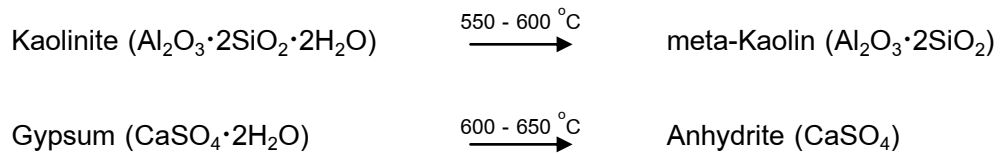
ผลการทดลองวิเคราะห์กระบวนการการเกิดแร่ของถ้ำในตัวอย่างถ้ำหิน จากกราฟ XRD Pattern เปรียบเทียบอุณหภูมิของถ้ำถ้ำหินหลังจากการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยเริ่มทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากในการวิเคราะห์ตัวอย่างถ้ำหินด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างถ้ำถ้ำหินเนื่องจากแร่เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะเปลี่ยนเป็นแร่เมตาเคโอลิน ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ที่อุณหภูมิ 550 - 600 องศาเซลเซียส และแร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนเป็นแร่แอนไฮไดรต์ (CaSO_4) ที่อุณหภูมิ 600 - 650 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการเผาตัวอย่าง K1 ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวอย่างถ้ำ K1 จะเกิดการลดลงของแร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และแร่เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โดยแร่ทั้งสองชนิดจะเกิดการสูญเสียโมเลกุลของน้ำออกไปเมื่อถึงอุณหภูมิดังกล่าว ซึ่งแร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นแร่แอนไฮไดรต์ (CaSO_4) (รูปที่ 4.8) ที่อุณหภูมิ 600 - 650 องศาเซลเซียส และแร่เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นแร่เมตาเคโอลิน ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ที่อุณหภูมิ 550 - 600 องศาเซลเซียส ดังสมการ



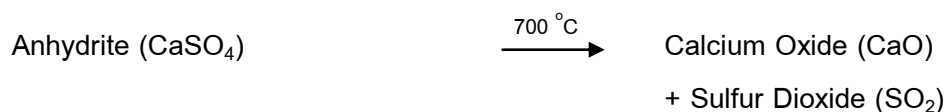
(An, Anhydrite (CaSO_4) / Anor, Anorthite ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) / m-Ka, meta-Kaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) /
 Kh, Khmaralite ($\text{Fe}_{0.24}\text{Mg}_{0.76}\text{SiO}_3$ or $\text{Mg}_{5.5}\text{Fe}_2\text{Al}_{14}\text{Be}_{1.5}\text{Si}_5\text{O}_{40}$) / Q, Quartz (SiO_2))

รูปที่ 4.8 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ของแก้วในตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 - 1,100



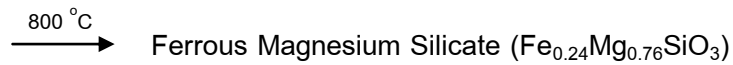
หลังจากนั้น ทำการเผาตัวอย่าง K1 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์ (CaSO₄) และแร่เมตาเคโอลิน (Al₂O₃·2SiO₂) ในถ้ำจะลดน้อยลง โดยจะปรากฏฟีดของกลุ่มแร่คามาราลด์ (Fe_{0.24}Mg_{0.76}SiO₃ หรือ Mg_{5.5}Fe₂Al₁₄Be_{1.5}Si₅O₄₀)

เมื่อทำการเผาตัวอย่าง K1 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แร่แอนไฮไดรต์ (CaSO₄) จะเกิดปฏิกิริยาสองแบบ ได้แก่ การสลายตัวเกิดแคลเซียม ออกไซด์ (CaO) และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) กับปฏิกิริยาการรวมตัวกับแก๊สไฮโดรเจน (H₂) เกิดเป็นแร่อัลด์ฮายไมต์ (CaS) แต่เนื่องจากการทดลองไม่ได้เป็นการเผาในสภาวะ Reducing Atmosphere ดังเช่นงานวิจัยของ Li et. al., (2011) เพราะฉะนั้น โอกาสที่แร่แอนไฮไดรต์ (CaSO₄) จะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นแร่อัลด์ฮายไมต์ (CaS) จึงเป็นไปได้ยาก ดังนั้น สังเกตได้ว่าฟีดของแร่แอนไฮไดรต์ (CaSO₄) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จะลดลง และที่ตำแหน่งฟีดดังกล่าวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ฟีดที่ตำแหน่งของแร่แอนไฮไดรต์ (CaSO₄) จะสูงขึ้น เนื่องมาจากแร่แอนไฮไดรต์ (CaSO₄) จะเปลี่ยนเป็นแร่อะนอร์ไทต์ (CaO·Al₂O₃·2SiO₂) โดยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และซิลิกอนออกไซด์ (SiO₂) ในแร่เมตาเคโอลิน (Al₂O₃·2SiO₂) กลายเป็นแร่อะนอร์ไทต์ (CaO·Al₂O₃·2SiO₂)

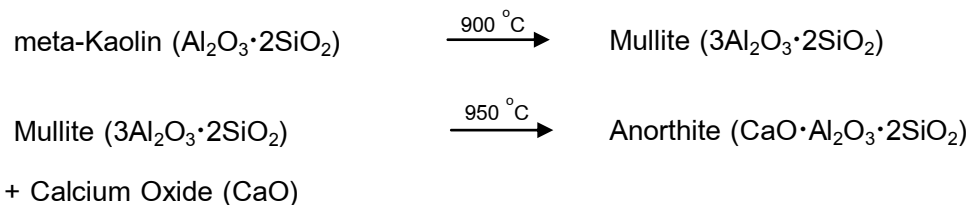


เมื่อทำการเผาตัวอย่าง K1 ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณของแร่ควอตซ์ (SiO₂) ในถ้ำค่อนข้างจะคงที่ เช่นเดียวกับกลุ่มแร่คามาราลด์ เนื่องมาจาก ที่อุณหภูมิดังกล่าว ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในแร่กลุ่มแร่คามาราลด์ (สูตรเคมี Fe_{0.24}Mg_{0.76}SiO₃ หรือ Mg_{5.5}Fe₂Al₁₄Be_{1.5}Si₅O₄₀) จะยังไม่เกิดการสูญหายไปหรือเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแร่ชนิดอื่น ๆ เช่น ธาตุแมกนีเซียม ธาตุอะลูมิเนียม และธาตุเหล็กที่เป็นองค์ประกอบในแร่คามาราลด์ โดยธาตุแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่สูงมากกว่า 1,400 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในเตาเผาของโรงไฟฟ้า (1,250 - 1,300 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิที่ใช้ในการวิจัยนี้

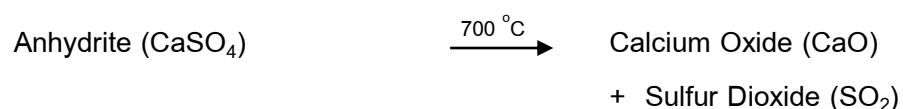
Magnesium Ferrous Oxide ((MgO)_{0.77}(FeO)_{0.23}) + Silicon Dioxide (SiO₂)



เมื่อทำการเผาตัวอย่าง K1 ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ผลการวิจัยพบว่า พีคของแต่ละแร่ในแก้วจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงแรงค้ำประคองภายในแก้วถ่านหิน โดยที่ตำแหน่งของแร่ควอตซ์ (SiO₂) จะพบว่า พีคมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่ตำแหน่งดังกล่าว แร่เมตาเคโอลิน (Al₂O₃·2SiO₂) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นแร่มุลไลต์ (3Al₂O₃·2SiO₂) ที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส แต่จากการหา XRD Pattern ไม่ปรากฏพีคของแร่มุลไลต์ (3Al₂O₃·2SiO₂) ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากแร่มุลไลต์ (3Al₂O₃·2SiO₂) มีองค์ประกอบคือ แร่อะลูมินา (Al₂O₃) และแร่ซิลิกา (SiO₂) ซึ่งเป็นตำแหน่งของพีคเดียวกับแร่ควอตซ์ (SiO₂) ดังนั้น ที่ตำแหน่งพีคของแร่ควอตซ์ (SiO₂) จึงมีความสูงของพีคที่เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จะพบว่า ที่ตำแหน่งพีคของแร่อะนอร์ไทต์ (CaO·Al₂O₃·2SiO₂) จะมีความสูงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ พิธา ศรีบุศย์ดี (2552) ที่พบว่า แร่อะนอร์ไทต์ (CaO·Al₂O₃·2SiO₂) เป็นสาเหตุทำให้เกิดตะกรันในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

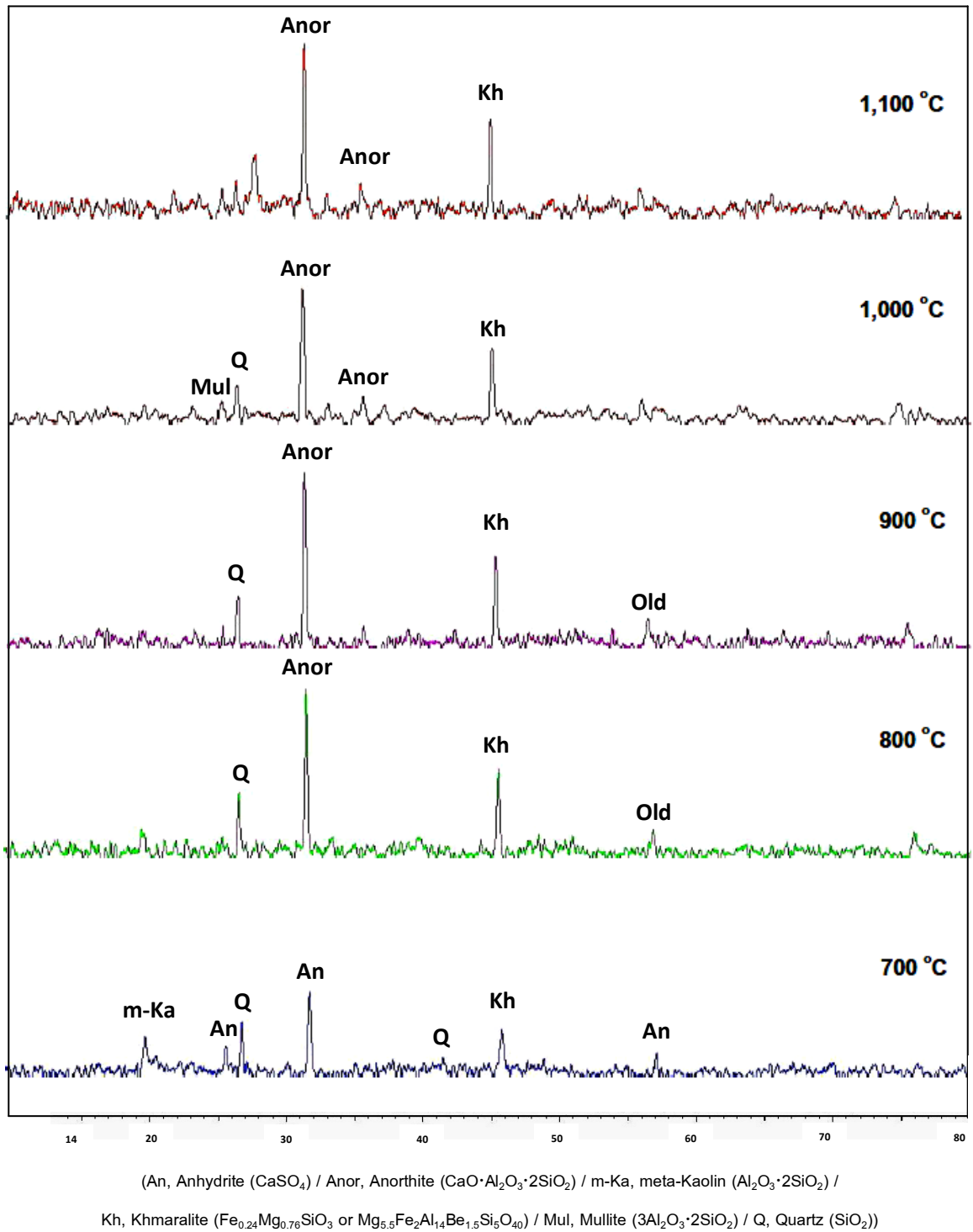


เมื่อทำการเผาตัวอย่าง K1 ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส พีคของแร่อะนอร์ไทต์ (CaO·Al₂O₃·2SiO₂) ในแก้วจะมีความสูงของพีคเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากเกิดแร่อะนอร์ไทต์ (CaO·Al₂O₃·2SiO₂) มากขึ้น เนื่องจากแร่เมตาเคโอลิน (Al₂O₃·2SiO₂) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของแร่แอนไฮไดรต์ (CaSO₄) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส นั่นเอง

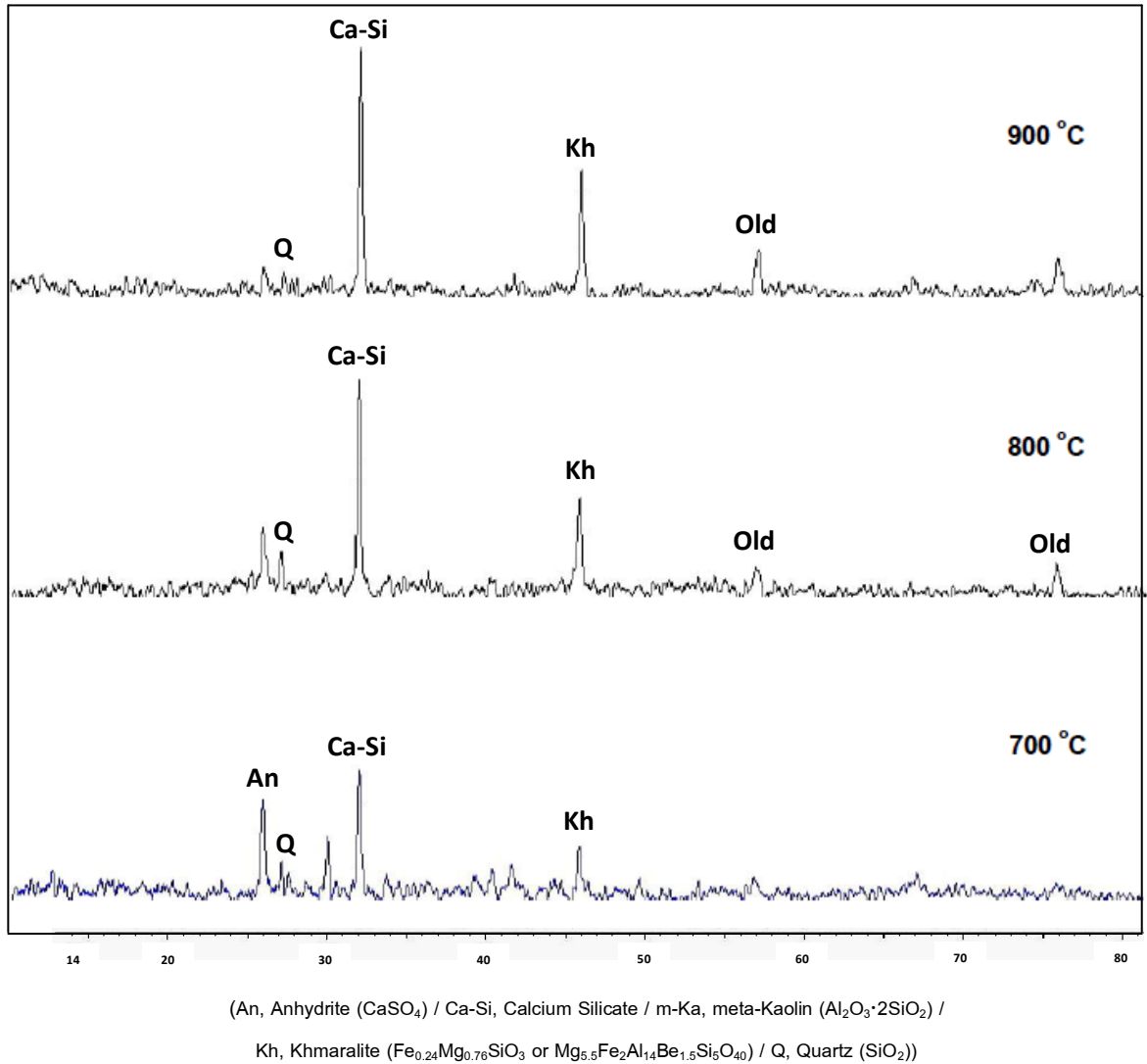


รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดง XRD pattern ของตัวอย่างแก้ว K2 และ K3 ตามลำดับ ซึ่งการทดลองเผาไหม้ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ K2 และ K3 พบว่า ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ไม่เกิดการเผาไหม้ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ทั้งสองตัวอย่าง ดังนั้น ในการศึกษาประกอบทางแร่วิทยาของแก้วถ่านหิน จึงเริ่มการศึกษาที่อุณหภูมิเผาไหม้ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีปฏิกิริยาการเกิดแร่ที่อุณหภูมิต่างๆ สอดคล้องกับตัวอย่างแก้ว K1 แต่ความสูงของแต่ละพีคของตัวอย่างแก้ว K2 ที่ปรากฏที่ตำแหน่งของแร่อะนอร์ไทต์ ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) จะมีความสูงของพีคน้อยกว่าตัวอย่างแก้ว K1 และจะมีความสูงของพีคที่ปรากฏที่ตำแหน่งของกลุ่มแร่คามาราลไซต์ (สูตรเคมี $\text{Fe}_{0.24}\text{Mg}_{0.76}\text{SiO}_3$ หรือ $\text{Mg}_{5.5}\text{Fe}_2\text{Al}_{14}\text{Be}_{1.5}\text{Si}_5\text{O}_{40}$) มากกว่าตัวอย่างแก้ว K1 จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ของตัวอย่าง K1 จะมีมากกว่าของตัวอย่าง K2 ดังนั้น แร่อะนอร์ไทต์ ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) ซึ่งมีองค์ประกอบคือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จึงมีความสูงของพีคที่มากกว่า ส่วนปริมาณของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ของตัวอย่างแก้ว K1 จะมีน้อยกว่าตัวอย่างแก้ว K2 จึงทำให้เกิดกลุ่มแร่คามาราลไซต์ น้อยกว่าของตัวอย่างแก้ว K2 สำหรับตัวอย่างแก้ว K3 เนื่องจากในการทดลองที่อุณหภูมิ 1,000 และ 1,100 องศาเซลเซียส ตัวอย่างดังกล่าวเกิดการลุกติดไฟอย่างรวดเร็ว อาจเกิดอันตรายได้เมื่อนำเข้าสู่เตาเผา จึงทำการทดลองที่อุณหภูมิระหว่าง 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เท่านั้น

รูปที่ 4.8, 4.9 และรูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบ XRD Pattern ที่ได้ของตัวอย่างแก้วถ่านหินลิกไนต์ K1, K2 และ K3 นี้ ตามลำดับ สามารถอธิบายการเกิดของแร่ โดยใช้ Ternary Phase Diagram (ดังรูปที่ 4.11) โดยการนำค่าปริมาณร้อยละของ CaO, Al_2O_3 และ SiO_2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICPS) (จากตารางที่ 4.2) มาเทียบให้เป็น 100 %wt แล้วจึงนำมากำหนดตำแหน่งของแต่ละตัวอย่างลงใน Ternary Phase Diagram (รูปที่ 4.11) จากองค์ประกอบร้อยละของตัวอย่าง K1 และ K2 เมื่อนำมาพล็อตลงใน Ternary Phase Diagram จะพบว่า แร่ที่เป็นองค์ประกอบหลักของตัวอย่างแก้ว K1 และ K2 เกิดอยู่ในบริเวณของแร่อะนอร์ไทต์ ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) ขณะที่เมื่อนำองค์ประกอบร้อยละของตัวอย่าง K3 มาพล็อตใน Ternary Phase Diagram จะพบว่า แร่องค์ประกอบหลักของตัวอย่างนี้ จะเกิดอยู่ในบริเวณของแร่แคลเซียมซิลิเกต (Ca_2SiO_4) ซึ่ง



รูปที่ 4.9 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ของแก้วในตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่ อุณหภูมิ 700 - 1,100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

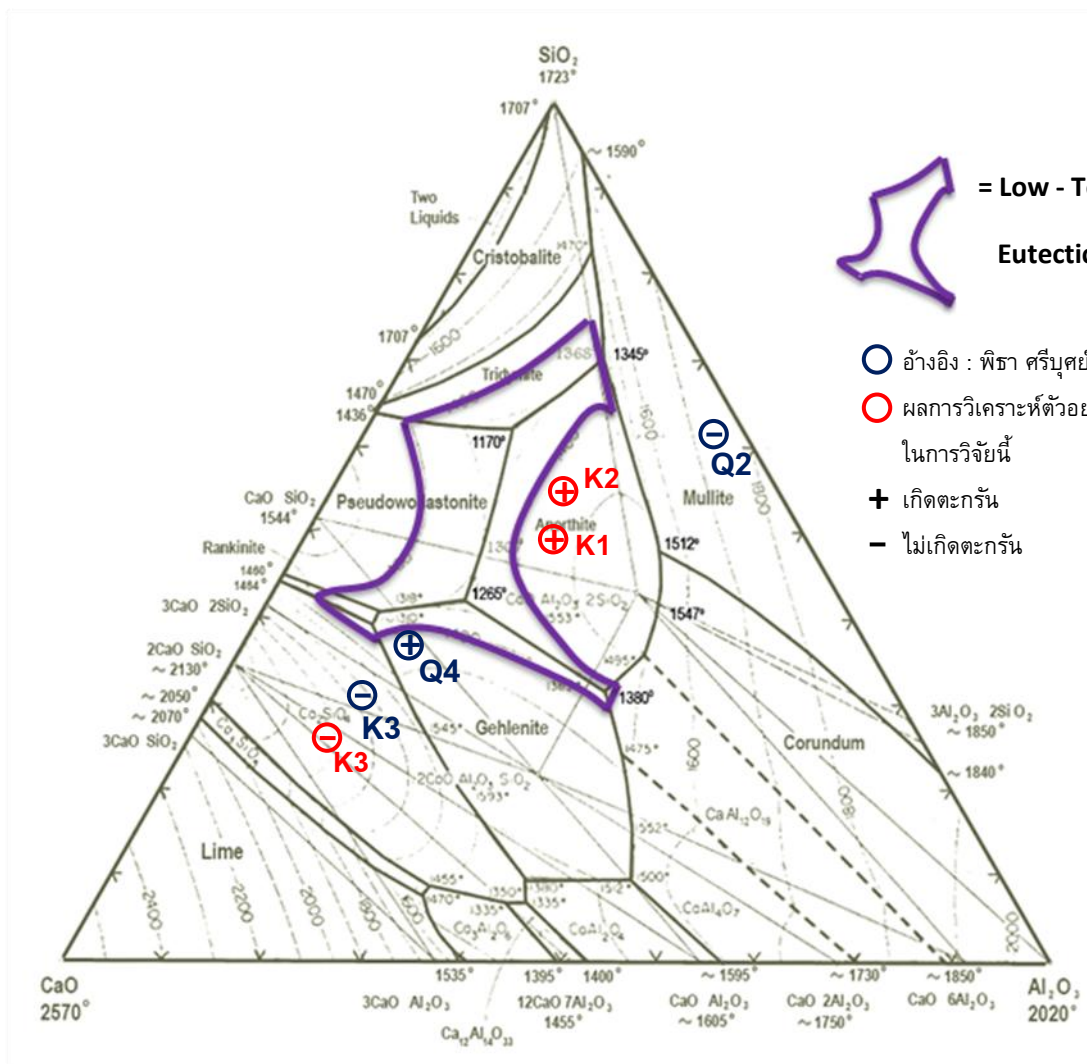


รูปที่ 4.10 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ของแก้วในตัวอย่าง K3 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 700 - 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

องค์ประกอบของตัวอย่างแก้ว K1 และตัวอย่างแก้ว K2 ที่อยู่ในบริเวณของแร่อะนอร์ไทต์ ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) นั้น มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสใกล้เคียงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำ (Low - Temperature Eutectic Region)

เมื่อนำเอาองค์ประกอบร้อยละของตัวอย่างแก้ว Q2, Q4 และ K3 ในงานวิจัยของ พิธา ศรีบุศย์ดี (2552) มาพล็อตลงใน Ternary Phase Diagram พบว่า องค์ประกอบของตัวอย่างแก้วถ่านหิน Q2 จะเกิดอยู่ในบริเวณของแร่มุลไลต์ (Mullite) ตัวอย่างแก้วถ่านหิน Q4 จะมีองค์ประกอบหลักเกิดอยู่ในบริเวณของแร่เกห์เลไนต์ (Gehlenite) และตัวอย่างแก้วถ่านหิน K3

จะมีแร่องค์ประกอบหลักเกิดอยู่ในบริเวณของแร่แคลเซียมซิลิเกต (Ca_2SiO_4) ดังนั้น จาก Ternary Phase Diagram จึงอาจสรุปได้ว่า องค์ประกอบทางแร่ของตัวอย่างเก่า K1 และ K2 ซึ่งมีองค์ประกอบใกล้เคียงกับบริเวณอุณหภูมิการหลอมต่ำ (Low-Temperature Eutectic Region) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดตะกรันในเตาเผาของหม้อไอน้ำได้ (ดูรูปที่ 4.11 ประกอบ)



หมายเหตุ : ตัวอย่างเก่า K1 (12.72 %CaO), K2 (15.24 %CaO) และ K3 (22.88 %CaO)
 (พิธา ศรีบุญศรี, 2552) และตัวอย่างเก่า K3 (31.81 %CaO)
 ในการวิจัยนี้

รูปที่ 4.11 แสดง Ternary Phase Diagram เปรียบเทียบชนิดของแร่ของตัวอย่างเก่า K1 และ K2 ระหว่างงานวิจัยของ พิตา ศรีบุญศรี, (2552) และการวิจัยนี้

4.3.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและแผนภาพองค์ประกอบทางเคมีพื้นผิว เพื่อหาโครงสร้างของเก้าถ่านหินโดยใช้เทคนิค Electron Probe Micro Analysis (EPMA)

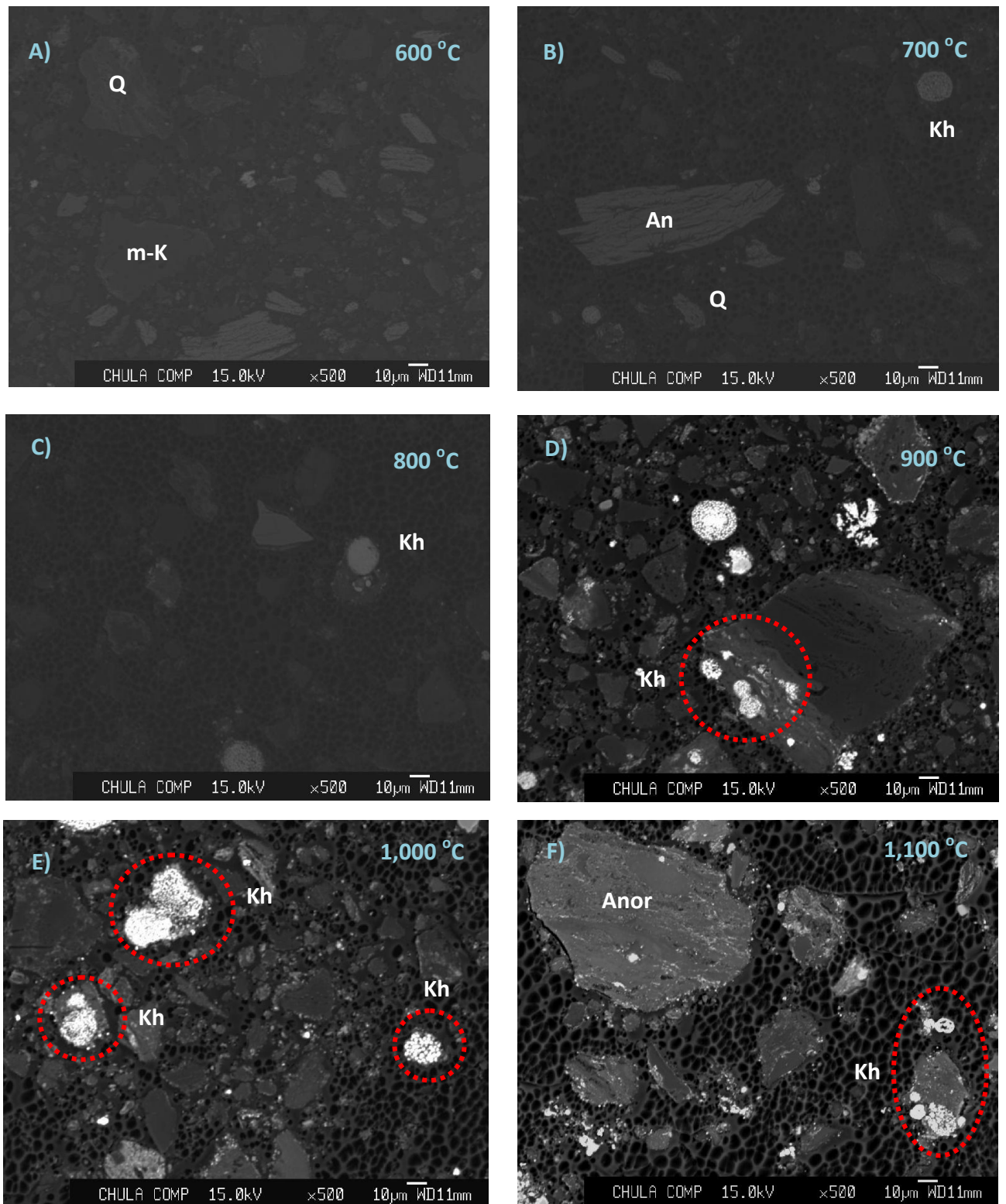
จากการศึกษาภายใต้เทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ Electron Probe Micro Analysis (EPMA) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน ของเก้าถ่านหินตัวอย่าง K1 เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน โดยทำการทดลองเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 100 องศาเซลเซียส

จากผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีพื้นผิว (รูปที่ 4.12) พบว่าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะปรากฏแร่เมตาเคโอลิน ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) และแร่ควอตซ์ (SiO_2) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 700 - 800 องศาเซลเซียส จะพบแร่ควอตซ์ (SiO_2), แร่แอนไฮไดรต์ (CaSO_4) และกลุ่มแร่คามาราลด์ (สูตรเคมี $\text{Fe}_{0.24}\text{Mg}_{0.76}\text{SiO}_3$ หรือ $\text{Mg}_{5.5}\text{Fe}_2\text{Al}_{14}\text{Be}_{1.5}\text{Si}_5\text{O}_{40}$) เพิ่มขึ้นมา

ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.12 D) สังเกตเห็นได้ว่า เริ่มปรากฏการณ์รวมกันของผลึกของกลุ่มแร่คามาราลด์กับแร่มุลไลต์ ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค1) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จะมีเปอร์เซ็นต์สัดส่วนออกไซด์ของธาตุใกล้เคียงกับกลุ่มแร่คามาราลด์

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 1,000 องศาเซลเซียส จะพบว่า กลุ่มแร่คามาราลด์จะปรากฏเห็นเด่นชัดและมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเก้าถ่านหินโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ที่พบว่า กลุ่มแร่คามาราลด์จะเพิ่มมากขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 900 - 1,000 องศาเซลเซียส

ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส จะปรากฏแร่อะนอร์ไทต์ ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ขึ้น (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค1) โดยที่กลุ่มแร่คามาราลด์จะยังคงสังเกตเห็นได้อยู่ เนื่องจากธาตุที่เป็นองค์ประกอบของกลุ่มแร่คามาราลด์ (สูตรเคมี $\text{Fe}_{0.24}\text{Mg}_{0.76}\text{SiO}_3$ หรือ $\text{Mg}_{5.5}\text{Fe}_2\text{Al}_{14}\text{Be}_{1.5}\text{Si}_5\text{O}_{40}$) ได้แก่ ธาตุเหล็ก (Fe), ธาตุแมกนีเซียม (Mg) และธาตุอะลูมิเนียม (Al) ต่างมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงกว่า 1,100 องศาเซลเซียส ที่ทำการศึกษาทดลอง



Anor, Anorthite ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$); m-Ka, meta-Kaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$); Kh, Khmaralite ($\text{Fe}_{0.24}\text{Mg}_{0.76}\text{SiO}_3$ or $\text{Mg}_{5.5}\text{Fe}_2\text{Al}_4\text{Be}_{1.5}\text{Si}_5\text{O}_{40}$); Q, Quartz (SiO_2)

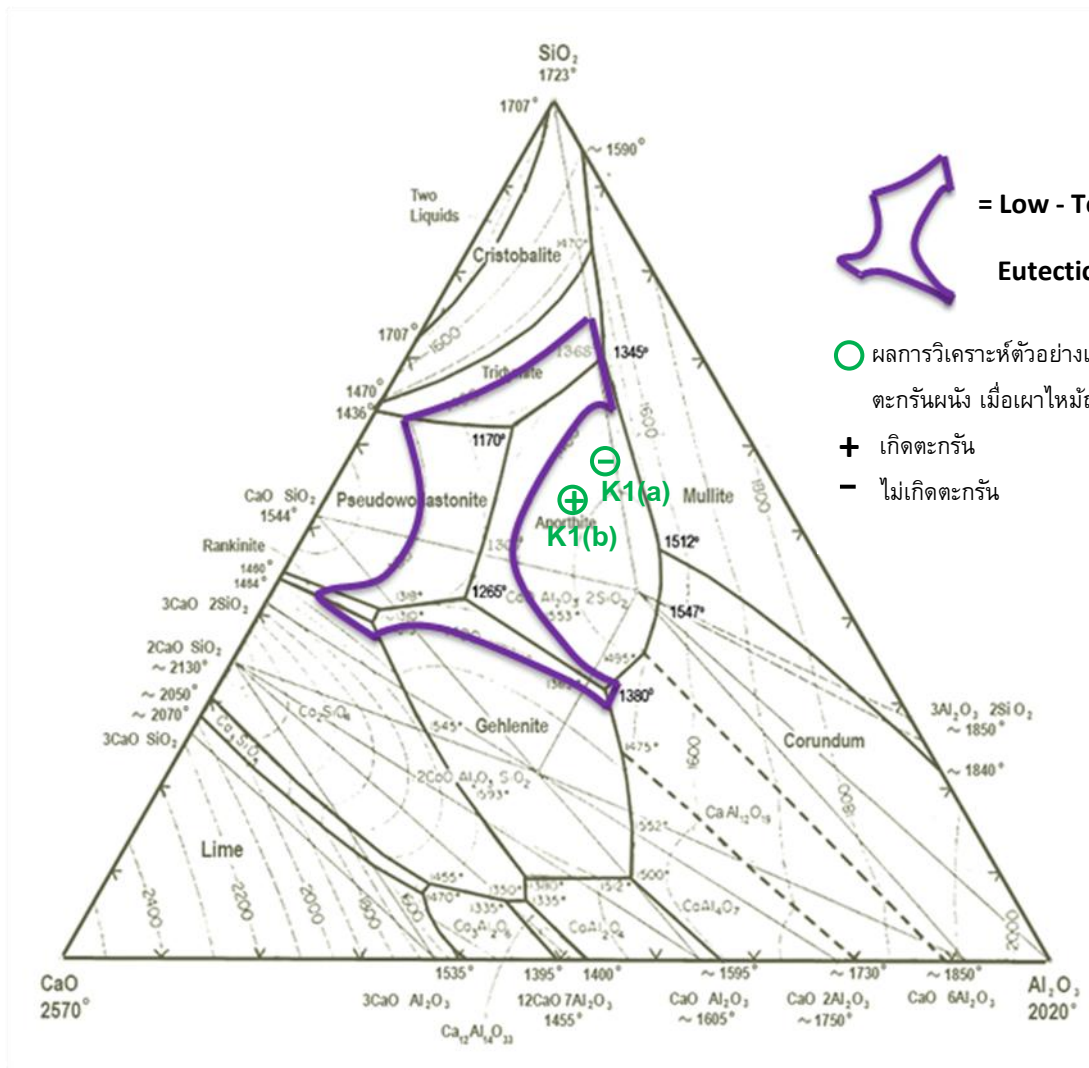
รูปที่ 4.12 รูปแสดงเฟสของแร่ชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นของตัวอย่างแก้ว K1 ที่ผ่านการเผา ที่อุณหภูมิ 600 - 1,100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีของตัวอย่างเถ้าหนักและตัวอย่างตะกั่ว
ของถ่านหินลิกไนต์ที่เกิดขึ้นจริงในเตาเผาหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ
เปรียบเทียบกับองค์ประกอบเคมีของถ่านหิน K1

ASH COMPOSITION (% wt)	RESULT		
SAMPLE NAME	K1	Slag K1 (a) (Bottom Ash)	Slag K1 (b) (Wall Slag)
Fe ₂ O ₃	23.66	12.45	12.87
Al ₂ O ₃	11.41	17.82	18.04
MgO	5.46	4.91	5.09
SiO ₂	21.83	37.84	39.76
CaO	12.72	16.33	13.73
K ₂ O	1.12	6.33	7.28
Na ₂ O	1.17	2.34	2.57
TiO ₂	0.29	0.39	0.43
Mn ₃ O ₄	0.07	0.12	0.10
SO ₃	18.38	0.27	0.12
TOTAL	96.11	98.80	99.99

·2SiO₂) และสารประกอบที่น่าจะเป็นแร่เพอริเอไรต์ (Perrierite; (Ce,Ca)Fe(AlTi)TiSiO))
ขณะที่ตัวอย่างตะกั่วผนัง K1(b) (Wall Slag) จะพบแร่อะนอร์ไทต์ (CaO·Al₂O₃·2SiO₂) เป็น
องค์ประกอบหลักแต่เพียงอย่างเดียว ซึ่งผลการวิเคราะห์ XRD Pattern ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.14
และ รูปที่ 4.15 ตามลำดับ

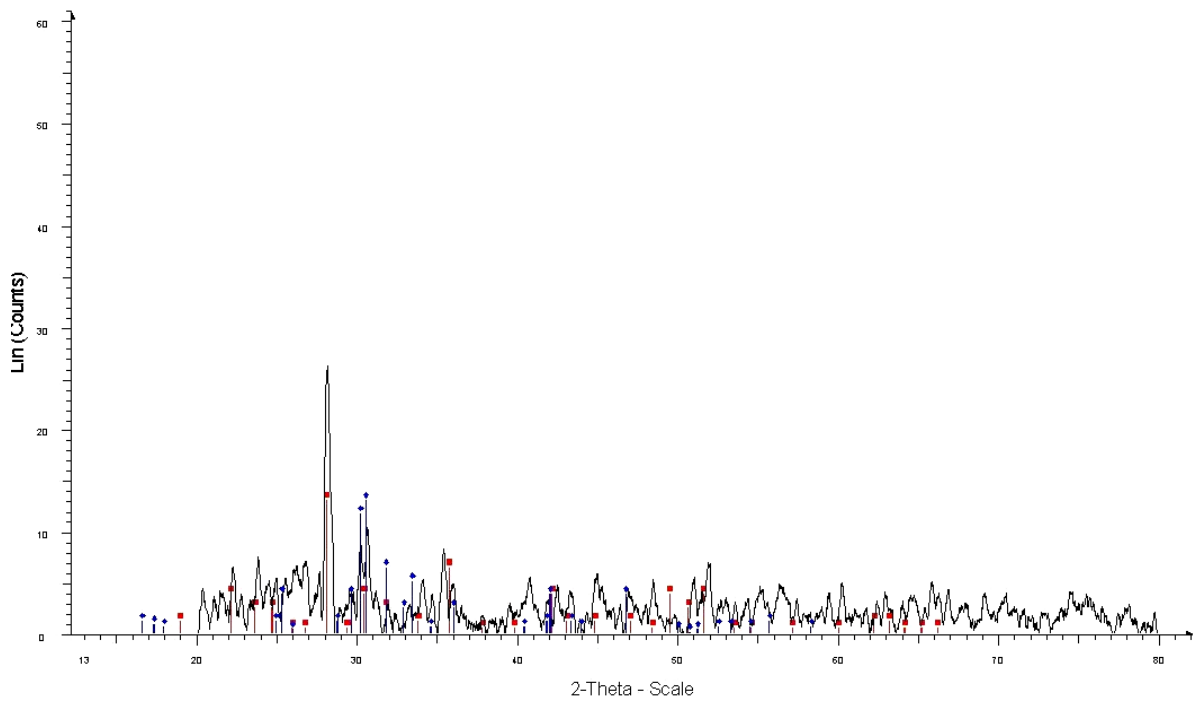
ดังนั้น จากการศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและแร่วิทยาของตะกั่วถ่านหิน
ลิกไนต์ (Slag) จากเตาเผาหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ สามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่างเถ้าหนัก
K1(a) (Bottom Ash) และตัวอย่างตะกั่วผนัง K1(b) (Wall Slag) มีแร่อะนอร์ไทต์ (CaO·Al₂O₃
·2SiO₂) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ถ่านหินลิกไนต์เกิดการหลอมตัวที่



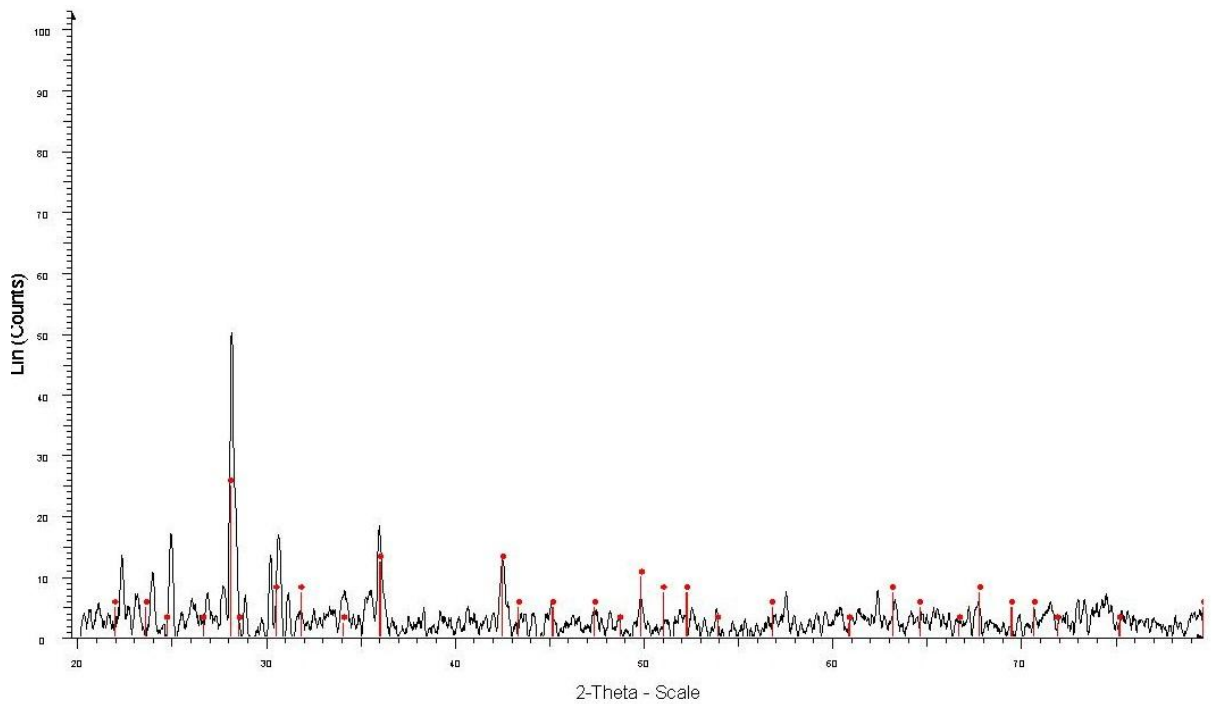
หมายเหตุ : ตัวอย่าง K1(a) (16.33 %CaO) เกิดแก่หนัก (Bottom Ash) และตัวอย่าง K1(b) (13.73 %CaO) เกิดตะกรันผนัง (Wall Slag)

รูปที่ 4.13 แสดง Ternary Phase Diagram ของตัวอย่างแก่หนัก K1(a) (16.33 %CaO) และตัวอย่างตะกรัน K1(b) (13.73 %CaO)

อุณหภูมิต่ำ และเกิดตะกรันขึ้นในเตาเผาของหม้อไอน้ำ โดยจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของ แก้วถ่านหิน K1 (12.72 %CaO) และ K2 (15.24 %CaO) ในการศึกษาองค์ประกอบของแก้ว - ถ่านหิน (ตารางที่ 4.2) แล้วนำมากำหนดตำแหน่งของแต่ละตัวอย่างลงใน Ternary Phase Diagram (ดูรูปที่ 4.13 ประกอบ) จะสอดคล้องกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่าง แก้วถ่านหิน K1(a) (Bottom Ash) และตัวอย่างตะกรันผนัง K1(b) (Wall Slag) คือ อยู่ในบริเวณ ของแร่อะนอร์ไทต์ ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.14 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ของตัวอย่างถ่านหิน (Bottom Ash) ชนิด K1(a) (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่อะโนไรต์ ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ส่วนเส้นสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งของแร่เพอริเอไรต์ (Perrierite : $(\text{Ce,Ca})\text{Fe}(\text{AlTi})\text{TiSiO}$))



รูปที่ 4.15 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ของตะกอนชนิด K1(b) (Wall Slag) (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่อะโนไรต์ ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$))

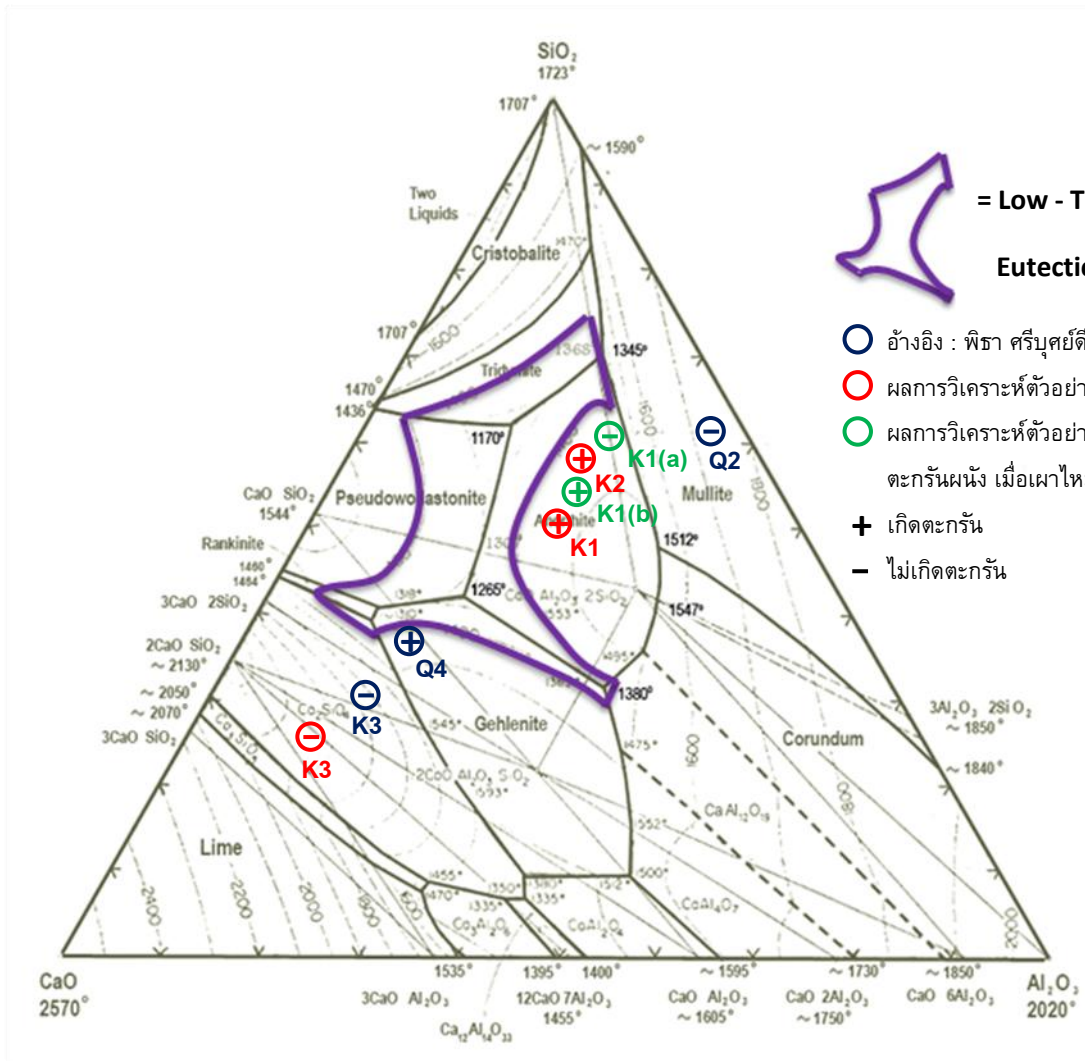
ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K1 (12.72 %CaO), K2 (15.24 %CaO) และ K3 (22.88 %CaO) เมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ พิธา ศรีบุศย์ดี (2552) (รูปที่ 4.16) ซึ่งทำการศึกษาตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K3 (31.81 %CaO), Q2 (2.24 %CaO) และ Q4 (27.42 %CaO) พบว่า ตัวอย่างเถ้าถ่านหินของ พิธา ศรีบุศย์ดี (2552) เมื่อเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะมีองค์ประกอบหลักของตัวอย่างเถ้าถ่านหิน Q4 คือ แร่เกท์เลไนต์ ($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) โดยอยู่บริเวณใกล้เคียงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำ (Low - Temperature Eutectic Region) ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดตะกรันผนัง (Wall Slag) (ดูรูปที่ 4.16 ประกอบ) ส่วนตัวอย่างเถ้าถ่านหิน Q2 (2.24 %CaO) จะเกิดเป็นแร่มุลไลต์ ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) ซึ่งไม่เกิดตะกรัน และตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K3 (31.81 %CaO) จะเกิดเป็นแร่แคลเซียมซิลิเกต (Ca_2SiO_4) ซึ่งจะไม่เกิดตะกรันเช่นกัน แต่จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K1, K2, ตัวอย่างเถ้าหนัก K1(a) (Bottom Ash) และตัวอย่างตะกรันผนัง K1(b) (Wall Slag) ในการศึกษาวิจัยนี้ พบว่า องค์ประกอบหลักของตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K1, K2 และตัวอย่างเถ้าหนัก K1(a) (Bottom Ash) และตัวอย่างตะกรันผนัง K1(b) (Wall Slag) จะอยู่ในบริเวณของแร่อะนอร์ไทต์ ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) ซึ่งตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K1 และ K2 จะทำให้เกิดตะกรันผนัง (Wall Slag) ในเตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์จริง (จากข้อมูลการแจ้งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)) แม้จะมีองค์ประกอบหลักของเถ้าถ่านหินคือ แร่อะนอร์ไทต์ ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) ที่แตกต่างกับงานวิจัยของ พิธา ศรีบุศย์ดี (2552) ซึ่งองค์ประกอบหลักของตะกรันคือ แร่เกท์เลไนต์ ($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) ที่มีส่วนประกอบทางเคมีอยู่ใกล้เคียงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำ (Low - Temperature Eutectic Region) โดยตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K1 (12.72 %CaO) และ K2 (15.24 %CaO) แม้ไม่ได้อยู่ในช่วง 23 - 35 %CaO ซึ่งเป็นช่วงที่ควรเกิดตะกรัน (ตามข้อสังเกตของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)) แต่ก็เกิดตะกรันขึ้นมาได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากองค์ประกอบทางเคมีจะอยู่ใกล้เคียงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำ (Low - Temperature Eutectic Region) นั่นเอง

4.4.2 การใช้ Ternary Phase Diagram อธิบายการเกิดเถ้าหนัก (Bottom Ash) และตะกรันผนัง (Wall Slag)

เมื่อนำข้อมูลตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K1 (12.72 %CaO), K2 (15.24 %CaO), K3 (22.88 %CaO), ตัวอย่างตะกรันหนัก K1(a) (Bottom Ash) และตัวอย่างตะกรันผนัง K1(b) (Wall Slag) จากงานวิจัยนี้ และข้อมูลตัวอย่างเถ้าถ่านหินจากงานวิจัยของ พิธา ศรีบุญยดี (2552) ซึ่งทำการศึกษาตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K3 (31.81 %CaO), Q2 (2.24 %CaO) และ Q4 (27.42 %CaO) มาพล็อตจะได้ Ternary Phase Diagram แสดงดังรูปที่ 4.16

จากเส้นบอกอุณหภูมิ (Contour Line) (ตามรูปที่ 4.16) จะสังเกตได้ว่า ตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K1, K2 และตัวอย่างเถ้าหนัก K1(a) (Bottom Ash) และตัวอย่างตะกรันผนัง K1(b) (Wall Slag) อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำ (Low - Temperature Eutectic Region) เช่นกัน ดังนั้นจากการศึกษาวิจัยนี้คาดว่าหากทำการเผาตัวอย่างถ่านหิน K1 และ K2 จะมีโอกาสที่ตัวอย่างถ่านหิน K1 (12.72 %CaO) และตัวอย่างถ่านหิน K2 (15.24 %CaO) จะหลอมเหลวกลายเป็นตะกรันผนัง (Wall Slag) เนื่องจากจะเกิดแร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite) เป็นองค์ประกอบหลัก อันเป็นสาเหตุทำให้เกิดตะกรันในเตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะได้

จากข้อสังเกตของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่กำหนดว่า ช่วง 23 - 35 %CaO เป็นช่วงที่จะเกิดตะกรัน แต่จากการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยพบว่า ตัวอย่างตะกรันผนัง K1(b) (Wall Slag) ที่เกิดขึ้นจริงในเตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) อยู่นอกช่วง 23 - 35 %CaO แต่ก็ยังเกิดตะกรันผนังได้ ซึ่งเป็นข้อสังเกตใหม่ที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ และจากการศึกษาองค์ประกอบทางแร่วิทยาของตัวอย่างเถ้าหนัก K1(a) (Bottom Ash) ประกอบด้วย แร่อะนอร์ไทต์ ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) และสารประกอบที่น่าจะเป็นแร่เพอริเอไรต์ (Perrierite; $(\text{Ce,Ca})\text{Fe}(\text{AlTi})\text{TiSiO}$) ขณะที่ตัวอย่างตะกรันผนัง K1(b) (Wall Slag) จะพบแร่อะนอร์ไทต์ ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) เป็นองค์ประกอบหลักแต่เพียงอย่างเดียว ซึ่งเถ้าหนัก (Bottom Ash) ที่เกิดขึ้น น่าจะเป็นตะกรันเช่นกัน แต่ไม่เกาะผนังเตาเผาของหม้อไอน้ำ แต่จะร่วงลงมาบริเวณข้างล่างเตาเผากลายเป็นเถ้าหนัก (Bottom Ash) ซึ่งจะสังเกตว่าองค์ประกอบทางแร่วิทยา คือประกอบด้วยแร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite) เหมือนกัน แต่ที่ต่างกันคือ เถ้าหนัก (Bottom Ash) ยังประกอบไปด้วยสารประกอบ



หมายเหตุ : ตัวอย่าง K1 (12.72 %CaO), K2 (15.24 %CaO), Q4 (27.42 %CaO) และตัวอย่าง K1(b) (13.73 %CaO) เกิดตะกรันผนัง
 ตัวอย่าง K3 (31.81 %CaO), K3 (22.88 %CaO) และ Q2 (2.24 %CaO) ไม่เกิดตะกรันผนัง
 ตัวอย่าง K1(a) (16.33 %CaO) เกิดเถ้าหนัก

รูปที่ 4.16 แสดง Ternary Phase Diagram เปรียบเทียบชนิดของแร่ของตัวอย่าง
 เถ้าถ่านหิน K3, Q2 และ Q4 (พิธา ศรีบุศย์ดี, 2552) และตัวอย่าง
 เถ้าถ่านหิน K1, K2, K3 และเถ้าหนัก Slag K1(a) และตะกรันผนัง K1(b)

ที่น่าจะเป็นแร่เพอริเอไรต์ (Perrierite; (Ce,Ca)Fe(AlTi)TiSiO)) เพราะฉะนั้น ในการศึกษาวิจัยองค์ประกอบชนิดของแร่ที่ทำให้เถ้าหนัก (Bottom Ash) ไม่เกาะติดบริเวณผนังของเตาเผาหม้อไอน้ำ และร่วงลงมาบริเวณข้างล่างของเตาเผา จึงเป็นเรื่องสำคัญที่ควรจะศึกษาวิจัยเพิ่มเติมต่อไปในภายภาคหน้า

นอกจากนี้ การอธิบายการเกิดตะกรันจากการนำถ่านหินมาวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมเริ่มต้น (IT; Initial Deformation Temperature) ก่อนการเผาไหม้ และการวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ของ CaO , Al_2O_3 และ SiO_2 และนำมาพล็อตลงใน Ternary Phase Diagram เป็นสิ่งที่บ่งบอกได้ถึงสมบัติของถ่านหินที่จะเกิดตะกรันผนัง (Wall Slag) หรือไม่ ซึ่งถ้าหากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ทำการวิเคราะห์ถ่านหินล่วงหน้า ก็จะสามารถกำหนดบริเวณที่ทำให้เกิดตะกรันผนัง (Wall Slag) ใน Ternary Phase Diagram ได้ ซึ่งมีประโยชน์ต่อการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ในการคาดการณ์ล่วงหน้า และหาวิธีป้องกันการเกิดตะกรันผนัง (Wall Slag) เช่น การนำดินหรือวัสดุต่างๆ ที่เป็นผลพลอยได้จากการทำเหมืองถ่านหินมาผสมกับถ่านหินลิกไนต์ เพื่อป้อนเข้าสู่เตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแล้วทำให้ถ่านหินไม่เกิดตะกรันผนัง (Wall Slag) ซึ่งเมื่อนำดินที่ผสมเข้ากับถ่านหินลิกไนต์มาวิเคราะห์หาปริมาณออกไซด์ของ CaO , Al_2O_3 และ SiO_2 แล้ว นำไปพล็อตลงใน Ternary Phase Diagram ก็น่าจะสามารถกำหนดอัตราส่วนระหว่างดินหรือวัสดุต่างๆ เหล่านั้นกับถ่านหินลิกไนต์ใน Ternary Phase Diagram ซึ่งจะทำให้เมื่อผสมดินหรือวัสดุดังกล่าวกับถ่านหินลิกไนต์แล้ว จะไม่เกิดตะกรันผนัง (Wall Slag)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษากลไกการเกิดตะกัณในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน ที่มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์แตกต่างกัน ถ่านหินที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ และตะกัณจากเตาเผาของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้า สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมและองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน ลิกไนต์

ในการวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอม พบว่า ตัวอย่าง K1 และ K2 จะมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอม (Initial Deformation Temperature; IT) เท่ากับ 1,155 และ 1,210 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาของหม้อไอน้ำ (1,250 - 1,300 องศาเซลเซียส) และตัวอย่าง K3 จะมีอุณหภูมิ IT (1,372 องศาเซลเซียส) สูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาเผาของหม้อไอน้ำ (1,250 - 1,300 องศาเซลเซียส) ดังนั้นตัวอย่าง K1 และ K2 ซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอมต่ำเมื่อนำไปเผา อาจเกิดตะกัณในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าได้ ซึ่งก็สอดคล้องกับรายงานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) แม่เมาะว่าเมื่อนำถ่านหิน K1 และ K2 ไปใช้เผาไหม้ในเตาเผาของหม้อไอน้ำจริง ได้เกิดตะกัณผนัง (Wall Slag) ขึ้น

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินของตัวอย่างถ่านหินทั้งสามตัวอย่าง คือ K1, K2 และ K3 โดยหาองค์ประกอบของแร่ออกไซด์ พบว่า ตัวอย่าง K1 (12.72 %CaO), K2 (15.24 %CaO) และ K3 (22.88 %CaO) ซึ่งอยู่นอกช่วงบริเวณ 23 - 35 %CaO ที่เป็นช่วงที่จะทำให้เกิดตะกัณ (ตามข้อสังเกตของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)) แต่ตัวอย่าง K1 (12.72 %CaO) และ K2 (15.24 %CaO) ซึ่งมีปริมาณ CaO ต่ำกว่า 23 %CaO จะสามารถเกิดตะกัณได้ ส่วนตัวอย่าง K3 (22.88 %CaO) ไม่เกิดตะกัณ

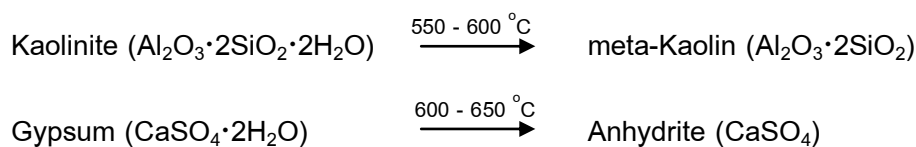
เพราะฉะนั้น ตัวอย่าง K1 (12.72 %CaO) และ K2 (15.24 %CaO) แม้จะไม่ได้อยู่ในช่วง 23 - 35 %CaO ซึ่งเป็นช่วงที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) แม่เมาะ

คาดว่าควรจะเกิดตะกอน แต่ก็ยังเกิดตะกอนขึ้นมาได้ ซึ่งเป็นข้อสังเกตใหม่ที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้

5.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบแร่ของถ่านหินก่อนการเผาไหม้

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่า แร่ที่เป็นองค์ประกอบหลักของถ่านหิน ประกอบไปด้วยแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite), แร่ยิปซัม (Gypsum), แร่ควอตซ์ (Quartz), แร่ไพไรต์ (Pyrite), แร่อีลไลต์ (Illite) และแร่แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ (Calcium Aluminum Oxide) โดยในการเปรียบเทียบปริมาณของแร่ที่เป็นองค์ประกอบ พบว่า ตัวอย่างถ่านหิน K3 มีปริมาณของแร่ยิปซัม (CaSO_4) สูงกว่าตัวอย่างถ่านหิน K1 และ K2 ตามลำดับ ตัวอย่างถ่านหิน K3 มีปริมาณแร่เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) น้อยกว่าตัวอย่าง K2 และ K1 ตามลำดับ นอกจากนี้ ตัวอย่างถ่านหิน K3 มีปริมาณแร่ควอตซ์ (SiO_2) น้อยกว่าตัวอย่างถ่านหิน K1 และ K3 ตามลำดับ

ในการวิเคราะห์อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงสูงขึ้น จะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างถ่านหิน พบว่า ตัวอย่างถ่านหินทั้งสามตัวอย่าง มีช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอยู่ 2 ช่วง โดยช่วงแรกที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 350 องศาเซลเซียส จะเกิดเนื่องจากการหายไปของสารระเหย (Volatile Matter) และช่วงที่สอง ที่อุณหภูมิประมาณ 700 - 820 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 700 - 820 องศาเซลเซียส จะเกิดกระบวนการการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุ (Demineralization) ของตัวอย่างถ่านหิน ซึ่งเกิดจากแร่เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เปลี่ยนแปลงไปเป็นแร่เมตาเคโอลิน ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ที่อุณหภูมิ 550 - 600 องศาเซลเซียส และแร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนเป็นแร่แอนไฮไดรต์ (CaSO_4) ที่อุณหภูมิ 600 - 650 องศาเซลเซียส ดังสมการ



ในการศึกษาหมู่ฟังก์ชันองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในถ่านหิน จะพบพีคที่ปรากฏที่ 3400 cm^{-1} ของ -OH stretching vibrations ของ hydroxyl group ที่ดูดซับน้ำไว้ของแร่จำพวกดินเหนียว (Clay Minerals) ได้แก่ แร่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), แร่เคโอลิไนต์ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$

·2H₂O) และจากพีคที่ปรากฏที่ 1620 cm⁻¹ ซึ่งจะเป็นพีคของหมู่ C=O หรือ C=C aromatic ring ที่สอดคล้องกับพีคของกับหมู่ -OH stretching vibrations ของ hydroxyl group ที่ดูดซับน้ำไว้ จากพีคที่ปรากฏที่ 1032 cm⁻¹ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ Si-O-Si และ Si-O-Al vibrations ที่สอดคล้องกับแร่เคโอลินไนต์ (Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O) ที่มีองค์ประกอบคือ แร่อะลูมินา (Al₂O₃) และแร่ซิลิกา (SiO₂) ดังนั้น การศึกษาดังกล่าวข้างต้น จะยืนยันได้ว่าถ่านหินที่ทำการศึกษา K1, K2 และ K3 ประกอบด้วยแร่ยิปซัม (CaSO₄·2H₂O), แร่ควอตซ์ (SiO₂) และแร่เคโอลินไนต์ (Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O) เป็นองค์ประกอบหลักของถ่านหินลิกไนต์

5.1.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบของถ่านหินหลังการเผาไหม้

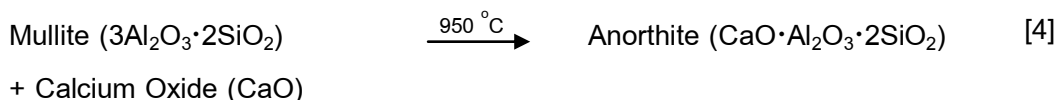
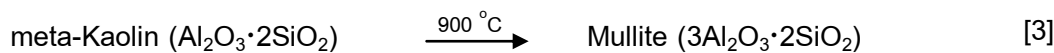
ในการวิเคราะห์กระบวนการการเกิดแร่ของตัวอย่างถ่านหิน พบว่า ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ตัวอย่างถ่านหิน K1 จะเกิดการลดลงของแร่ยิปซัม (Gypsum) และแร่เคโอลินไนต์ (Kaolinite) ซึ่งแร่ยิปซัม (Gypsum) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่แอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิ (Anhydrite) 600 - 650 องศาเซลเซียส และแร่เคโอลินไนต์ (Kaolinite) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นแร่เมตาเคโอลิน (meta-Kaolin) ที่อุณหภูมิ 500 - 550 องศาเซลเซียส (สมการที่ [1] และ [2])



ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์ (Anhydrite) และแร่เมตาเคโอลิน (meta-Kaolin) จะลดน้อยลง โดยจะปรากฏพีคของของของกลุ่มแร่คามาราไลต์ (สูตรเคมี Fe_{0.24}Mg_{0.76}SiO₃ หรือ Mg_{5.5}Fe₂Al₁₄Be_{1.5}Si₅O₄₀) ดังนั้น สังเกตได้ว่าพีคของแร่แอนไฮไดรต์ (CaSO₄) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จะลดลง และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พีคที่ตำแหน่งของแร่อะนอร์ไทต์ (CaO·Al₂O₃·2SiO₂) จะสูงขึ้น เนื่องมาจากแร่แอนไฮไดรต์ (CaSO₄) จะเปลี่ยนเป็นแร่อะนอร์ไทต์ (CaO·Al₂O₃·2SiO₂)

ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณของแร่ควอตซ์ (Quartz) จะค่อนข้างคงที่ เช่นเดียวกับแร่กลุ่มแมกนีเซียมเฟอร์รัสอะลูมินัมซิลิเกต (Magnesium Ferrous Aluminum Silicate) จะพบว่า แร่เมตาเคโอลิน (meta-Kaolin) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นแร่มุลไลต์

(Mullite) และที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส จะเกิดแร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งแร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite) จะเป็นผลทำให้เกิดตะกั่วในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส จะปรากฏพีคของแร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite) เพิ่มสูงขึ้น (สมการที่ [3] และ [4])



และเมื่อนำถ้ำถ่านหินทั้งสามตัวอย่างมากำหนดตำแหน่งของแต่ละตัวอย่าง ลงใน Ternary Phase Diagram พบว่า ตัวอย่าง K1 และ K2 เกิดอยู่ในบริเวณของแร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite) ขณะที่ตัวอย่าง K3 จะพบว่า แร่หลักของตัวอย่างนี้จะเป็นแร่แคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate)

ในการวิเคราะห์ภาพลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างถ้ำถ่านหินที่ผ่านการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเทคนิค Electron Probe Micro-Analysis (EPMA) จะพบว่า ตัวอย่างถ้ำถ่านหินจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างเห็นได้ชัดในช่วงอุณหภูมิ 900 - 1,100 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการศึกษาวินิจฉัยที่ได้สนับสนุนผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของถ้ำถ่านหินด้วยเครื่องมือ X-Ray Diffractometer (XRD) โดยมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของแร่เป็นไปตามสมการข้างต้น

5.1.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและแร่วิทยาของถ้ำถ่านหิน (Bottom Ash) และตะกั่วผนัง (Wall Slag) ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ้ำถ่านหินลิกไนต์ K1

การวิเคราะห์ตัวอย่างถ้ำถ่านหิน K1(a) (Bottom Ash) และตัวอย่างตะกั่วผนัง K1(b) (Wall Slag) พบว่า ตัวอย่างถ้ำถ่านหิน K1(a) (Bottom Ash) และตัวอย่างตะกั่วผนัง K1(b) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์เท่ากับ 16.33 %CaO และ 13.73 %CaO ซึ่งอยู่นอกช่วงบริเวณ 23 - 35 %CaO ที่เป็นช่วงที่จะทำให้เกิดตะกั่ว (ตามข้อสังเกตของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)) โดยตัวอย่างถ้ำถ่านหิน K1(a) (Bottom Ash) มีองค์ประกอบแร่ คือ แร่อะนอร์ไทต์ (CaO·Al₂O₃·2SiO₂) และสารประกอบที่คาดว่าจะน่าจะเป็นแร่เพอริเอไรต์

(Perrierite; $(\text{Ce,Ca})\text{Fe}(\text{AlTi})\text{TiSiO}$) ในขณะที่ตัวอย่างตะกรันผนัง K1(b) (Wall Slag) จะพบแร่แอนอร์ไทต์ (Anorthite) เป็นองค์ประกอบหลักแต่เพียงอย่างเดียว และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำถ่านหิน K1 และ K2 แล้วนำมาพล็อตใน Ternary Phase Diagram จะสอดคล้องกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของตะกรันทั้งสองตัวอย่าง คือเป็นแร่แอนอร์ไทต์ (Anorthite) เช่นเดียวกัน โดยคาดว่าถ้ำถ่าน (Bottom Ash) ที่เกิดขึ้น น่าจะเป็นตะกรันเช่นกัน แต่ไม่เกาะผนังเตาเผาของหม้อไอน้ำ แต่จะร่วงลงมาบริเวณข้างล่างเตาเผากลายเป็นถ้ำถ่าน (Bottom Ash) ซึ่งจะสังเกตว่าองค์ประกอบทางแร่วิทยา คือประกอบด้วยแร่แอนอร์ไทต์ (Anorthite) เหมือนกัน แต่ที่ต่างกันคือ ถ้ำถ่าน (Bottom Ash) ยังประกอบไปด้วยสารประกอบที่น่าจะเป็นแร่เพอริเอไรต์ (Perrierite; $(\text{Ce,Ca})\text{Fe}(\text{AlTi})\text{TiSiO}$)

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าตัวอย่างถ้ำถ่าน K1(a) (Bottom Ash) (16.33 %CaO) และตัวอย่างตะกรันผนัง K1(b) (Wall Slag) (13.73 %CaO) ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่นอกช่วงบริเวณ 23 - 35 %CaO ก็สามารถเกิดตะกรันได้ โดยมีแร่แอนอร์ไทต์ (Anorthite) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ถ้ำถ่านหินลิกไนต์เกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ และเกิดตะกรันขึ้นในเตาเผาของหม้อไอน้ำ

5.2 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยนี้อาจสรุปได้ว่า ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ แม้จะไม่ได้อยู่ในช่วง 23 - 35 %CaO ซึ่งเป็นช่วงที่ควรที่จะเกิดตะกรัน แต่ก็สามารถเกิดตะกรันได้ โดยการอธิบายการเกิดตะกรันจากการนำถ้ำถ่านหินมาวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมเริ่มต้น (IT; Initial Deformation Temperature) ก่อนการเผาไหม้ และการวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ของ CaO , Al_2O_3 และ SiO_2 ในถ้ำถ่านหิน และนำมาพล็อตลงใน Ternary Phase Diagram เป็นสิ่งที่บ่งบอกได้ถึงสมบัติของถ้ำถ่านหินที่จะเกิดตะกรันผนัง (Wall Slag) หรือไม่ ซึ่งถ้าการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ทำการวิเคราะห์ถ้ำถ่านหิน เพื่อหาปริมาณออกไซด์ดังกล่าวร่วมกับอุณหภูมิการหลอมเริ่มต้น (IT; Initial Deformation Temperature) ล่วงหน้า ก็จะสามารถกำหนดบริเวณที่ทำให้เกิดตะกรันผนัง (Wall Slag) ซึ่งเป็นบริเวณใกล้เคียงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำ (Low - Temperature Eutectic Region) ใน Ternary Phase Diagram ดังกล่าวได้ ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ในการคาดการณ์ล่วงหน้า และหาวิธีป้องกันการเกิดตะกรันผนัง (Wall Slag) ที่เกิดขึ้นได้ เช่น การนำดินหรือวัสดุต่างๆ จากบริเวณ

เมื่อถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มาทำการผสมกับถ่านหินลิกไนต์ก่อนนำเข้าสู่เตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เพื่อให้องค์ประกอบทางเคมีของ $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ของถ่านหินลิกไนต์ออกห่างจากบริเวณที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำ (Low - Temperature Eutectic Region) ใน Ternary Phase Diagram ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดตะกรันในเตาเผาของหม้อไอน้ำ โดยเมื่อนำดินหรือวัสดุต่างๆ ที่ผสมเข้ากับถ่านหินลิกไนต์มาวิเคราะห์หาปริมาณออกไซด์ของ CaO , Al_2O_3 และ SiO_2 แล้ว นำไปพล็อตลงใน Ternary Phase Diagram ก็จะสามารถกำหนดอัตราส่วนการผสมกันระหว่างดินหรือวัสดุต่างๆ กับถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดตะกรันผนัง (Wall Slag) เมื่อนำถ่านหินลิกไนต์ที่ผ่านการผสมดินหรือวัสดุต่างๆ ดังกล่าวไป เผาไหม้ในเตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

ในการศึกษาวิจัยนี้ ทำให้ทราบถึงกระบวนการการเกิดแร่ต่างๆ ที่แต่ละอุณหภูมิภายในเตาเผาของการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งองค์ประกอบของแร่ต่างๆ ที่เปลี่ยนไป และแร่ที่เกิดขึ้นอาจจะส่งผลให้ถ่านหินลิกไนต์เกิดตะกรัน (Slag) ในรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งจากข้อจำกัดของอุณหภูมิของเตาเผาในการศึกษาวิจัยนี้ การเพิ่มอุณหภูมิในการเผาถ่านหินจนถึงอุณหภูมิในเตาเผาที่สอดคล้องกับการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (ประมาณ 1,250 - 1,300 องศาเซลเซียส) จะสามารถศึกษากลไกการเกิดตะกรันในเตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะได้ชัดเจนมากขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, องค์การ. การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหิน. [ออนไลน์]. 2552.
แหล่งที่มา: <http://maemohmine.egat.co.th> [15 ธันวาคม 2554]

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, องค์การ. การวิเคราะห์เพื่อหาอุณหภูมิการหลอมของถ่านหิน (Ash Fusion Temperature). [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: <http://maemohmine.egat.co.th> [21 ธันวาคม 2554]

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, องค์การ. กรมสารสนเทศ. การใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : องค์การการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, มปป. (อัสสาเนา)

ทัศนีย์ สุวพันธ์. การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหิน. วารสาร กฟผ. 4,1 (มกราคม - มีนาคม 2538) : 54-59.

นโยบายและแผนพลังงาน, สำนักงาน. ถ่านหิน. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา : www.eppo.go.th/coal/data.html [1 กันยายน 2555]

พลังงาน, กระทรวง. กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ. แหล่งถ่านหินในประเทศไทย. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: www.dmf.go.th [27 ตุลาคม 2554]

พลังงาน, กระทรวง. กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ. ความรู้เรื่องถ่านหิน. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: www.dmf.go.th [27 ตุลาคม 2554]

พลังงาน, กระทรวง. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. ถ่านหินเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า. เอกสารเผยแพร่เพื่อพลังงานทดแทน [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา : www.eppo.go.th/coal/data.html [22 พฤศจิกายน 2554]

พิธา ศรีบุญยดี. การศึกษาปัจจัยที่ควบคุมการเกิดตะกอนในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2552.

- ภิญโญ มีชำนะ. การผลิตไฟฟ้าของไทยควรใช้เชื้อเพลิงชนิดใด. [บรรยาย ณ โรงแรมสยามซิตี กรุงเทพมหานคร]. 22 ธันวาคม 2549. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)
- ภิญโญ มีชำนะ. เอกสารประกอบการเรียน รายวิชา Mineral and Processing Engineering. กรุงเทพมหานคร :คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.(อัดสำเนา)
- ภิญโญ มีชำนะ. การศึกษาแนวทางการลดสแลกจากหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ. [บรรยาย ณ ฝ่ายบริหารงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย].มิถุนายน 2551. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)
- ภิญโญ มีชำนะ. วิศวกรรมแต่งแร่ (Mineral Process Engineering). กรุงเทพมหานคร :ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- แมน อมรสิทธิ์. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพมหานคร : ชวนพิมพ์, 2535.
- สุนี ลาวัญยากุล และ ศิริวรรณ ศิลป์สกุลสุข. ถ่านหินและการทดสอบคุณภาพ. สารความรู้: บทความวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีโดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ. [ออนไลน์]. 2011. แหล่งที่มา : <http://www.dss.go.th> [23 พฤศจิกายน 2555]

ภาษาอังกฤษ

- Aineto, M., and others. Thermal expansion of slag and fly ash from coal gasification in IGCC power plant. Fuel Volume 85(June 2006) : 2352 -2358.
- Bai, J., and others. Characterization of low-temperature coal ash behaviors at high temperatures under reducing atmosphere. Fuel Volume 87 (4-5) (2008) : 583-591.
- Hatt, R.M.. Influence of Coal Quality and Boiler Operating Conditions on Slagging of Utility Boilers ;Power Production in the 21st Century : Impacts of Fuel Quality and Operations. UTHA : Snowbird (Oct. 28 - Nov. 2, 2001).
- <http://www.astm.org>, 1994.
- Kabe, T., and others. Coal and Coal-Related Compounds, Volume 150 : Structures, Reactivity and Catalytic Reactions (Studies in Surface Science and Catalysis). Tokyo : Kodansha Ltd., Elsevier Science, 2004.

- Kim, H.-T., and others. A Prediction of Coal Ash Slagging under the Gascification Condition of Preprints of the American Society Division of Fuel Chemistry. Korea : Energy Department of Ajou University, 1995.
- Li, F., and others. Formation Mechanism of Slag during Fluid-bed Gasification of Lignite. Energy Fuels 25 (1) (2011) : 273-280.
- Meyers, R. A.. Coal handbook. New York : M. Dekker, 1981.
- Moore, E.S. Coal. 2nd ed.. pp. 28 -91. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1940.
- Oikonomopoulos, I., and others. FTIR study of two different lignite lithotypes from Neocene Achlada lignite deposits in NW Greece. Abstract Bulletin of the Geological Society of Greece, 2010 Proceedings of the 12th International Congress 2010 XLIII, No 5 (2010) : 2284-2293.
- Pang L.S.K., and others. A study of slag in laboratory, pilot and commercial scale furnaces using FTIR microscopy, electron microscopy and NMR spectroscopy. Fuel Processing Technology Volume 33 Issue 1(1993) :13-32.
- Probstein, R.F., and Hicks, E.. Synthetic Fuels. New York : McGraw-Hill, 1982.
- Qiu, J-R., and others. The influences of mineral behaviour on blended coal ash fusion characteristics. Fuel Volume 78 (1999) : 963-969.
- SOMWANNAPORN. แหล่งถ่านหินในประเทศไทย. [ออนไลน์]. 2009. แหล่งที่มา : somwanaporn.wordpress.com [26 มิถุนายน 2555]
- Song, W., and others. Fusibility and flow properties of coal ash and slag. Fuel Volume 88(2009) : 297-304.
- The Joint Graduate School of Energy and Environment. Advanced Fuel Processing Laboratory (AFPL). [Online]. 2010. Available from : <http://www.jgsee.kmutt.ac.th> [2012, August 13]
- The Kentucky Geological Survey. Coal Information 1997-2014. Kentucky : University of Kentucky. [Online]. 2012.
- Van Dyk, J.C., and others. Coal and coal ash characteristics to understand mineral transformations and slag formation. Fuel. Volume 88 (6) (2009) : 1057-1063.
- Wender, and others, 1981, Cited in Saxena, S.C.. Devolatilization and Combustion Characteristics of Coal Particles. Progress in Energy Combustion Science. Volume 16 Issue 1(1990) : 55 - 94.

Wikimedia Thailand. [Coal.jpg](#). [Online]. 2012. Available from : <http://th.wikipedia.org>
[2012, June 11]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
หลักการของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ก

หลักการของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) (Buhrke, 2536)

เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffraction) เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุในรูปของสารประกอบ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (XRD) ถูกนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ ในการค้นคว้าวิจัยสำหรับวิทยาศาสตร์พื้นฐาน รวมทั้งในด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยทั่วไปสามารถประยุกต์ใช้ในด้านของธรณีวิทยา ในด้านของเคมีเกี่ยวกับบอโนนทรียสาร ในด้านของฟิสิกส์ ในด้านของการค้นคว้าวิจัยอุปกรณ์เครื่องมือ และในด้านของอุตสาหกรรมแร่ธาตุต่าง ๆ เป็นต้น หลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (XRD) สามารถอธิบายได้ คือ ในอะตอมหนึ่ง ๆ ของธาตุใด ๆ จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ นิวเคลียสและอิเล็กตรอน เมื่อลำอิเล็กตรอนซึ่งเป็น Primary Electron ถูกยิงเข้าสู่ วัสดุก็จะเคลื่อนที่ไปชนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่รอบนิวเคลียสของอนุภาค แล้วสะท้อนกลับออกมา อิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับออกมาเรียกว่า Backscatter Electron ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกชนได้รับการถ่ายเทพลังงาน Backscatter Electron ทำให้มีพลังงานสูงกว่าแรงดึงดูดจากนิวเคลียส จึงเคลื่อนที่หลุดออกจากวงโคจร อิเล็กตรอนตัวนี้เรียกว่า Secondary Electron หาก Secondary Electron เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรชั้นในแล้ว อิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้นนอกที่มีพลังงานจลน์สูงกว่า ก็จะกระโดดเข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดการคายพลังงานออกมา ซึ่งจะถูกตรวจจับโดยเครื่องตรวจจับสัญญาณ และเนื่องจากว่าค่าพลังงานในแต่ละชั้นวงโคจรของในแต่ละธาตุ จะมีค่าเฉพาะตัวขึ้นอยู่กับขนาดและรัศมีของวงโคจร จึงสามารถทราบได้ว่าเป็นธาตุใด ในขณะที่เดียวกันก็มี Primary Electron บางส่วน ที่ไม่ชนแนวการเคลื่อนที่ให้อิเล็กตรอนกลับขึ้นมา อิเล็กตรอนส่วนนี้เรียกว่า Auger Electron

จากสูตร $n\lambda = 2d \cdot \sin d\theta$ (มุมที่กวาดตอนทำ XRD)

ค่าที่สนใจคือค่า d ซึ่งคือ ระยะห่างระหว่างอะตอมในผลึก อันเกิดจากการเชื่อมพันธะ ค่า d เป็นค่าเฉพาะในแต่ละธาตุ หากทราบค่านี้ก็จะทราบโครงสร้างของธาตุ ทำให้ทราบว่าธาตุที่วิเคราะห์เป็น ธาตุใด และจากค่า d ก็จะสามารถบอกชนิดโครงสร้างของสารประกอบได้ในการ

ทำ XRD ดังนั้น เมื่อรังสีกระทบตัวอย่าง รังสีจะเกิดการกระจาย จึงต้องใช้ Collimator และ คริสตัลมาจับให้รวมกัน เครื่องตรวจจับจึงสามารถตรวจจับและแปลข้อมูลออกเป็นกราฟได้

เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) (แมน อมรสิทธิ์, 2535)

เทคนิค FT-IR Spectroscopy เป็นเทคนิคที่นิยมใช้วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์โดยทั่วไป โดยอาศัยการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation, IR) ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ระหว่างช่วงของรังสีไมโครเวฟ และแสงที่ตามองเห็นได้ การอ้างอิงถึงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงนี้ นิยมใช้เลขคลื่นหรือเวฟนัมเบอร์ (Wave number) มีหน่วยเป็น cm^{-1} (Reciprocal Centimeter) ซึ่งหมายถึง จำนวนเลขคลื่นต่อหน่วยเซนติเมตร เนื่องจากพลังงานของรังสีอินฟราเรดจะอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับการสั่น (Vibration) ของพันธะภายในโมเลกุล หากการสั่นของพันธะใดเกิดที่ความถี่ที่ตรงกับความถี่ของรังสีอินฟราเรดก็จะเกิดการดูดกลืนขึ้น การสั่นของโมเลกุลของสารแบ่งออกได้เป็นสองประเภทหลักๆ ได้แก่ การยืด และหด (Stretching) ของพันธะ และการงอ (Bending) ของพันธะ ผลการทดลองที่ได้จะเรียกว่า อินฟราเรดสเปกตรัม ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานสมิตแตนซ์ (%T) หรือแอบซอเบแนนซ์ (A) กับค่าเลขคลื่น ซึ่งแต่ละแถบการดูดกลืนสามารถบ่งบอกลักษณะเฉพาะลงไปได้อีก เช่น หากตัวเลขทรานสมิตแตนซ์มีค่ามาก หรือแอบซอเบแนนซ์มีค่าน้อย เรียกว่า สัญญาณนั้นอ่อน ในทางกลับกัน หากตัวเลขทรานสมิตแตนซ์มีค่าน้อยหรือแอบซอเบแนนซ์มีค่ามาก เรียกว่า สัญญาณนั้นเข้ม นอกจากนี้ แถบการดูดกลืนยังอาจมีลักษณะกว้างหรือแคบ โดยการสั่นของพันธะแต่ละแบบ จะมีลักษณะเฉพาะของพีคที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งนำไปใช้ประกอบการพิจารณาโครงสร้างของโมเลกุลได้ด้วย นอกเหนือจากการพิจารณาจากค่าเลขคลื่นที่เกิดจากการดูดกลืนเพียงอย่างเดียว

โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ซึ่งมีค่าเลขคลื่น (Wave number) อยู่ในช่วงประมาณ 12800 ถึง 10 cm^{-1} แบ่งย่อยได้เป็น 3 ช่วงคือ ช่วง Far IR ($200-10 \text{ cm}^{-1}$) Mid IR ($4000-200 \text{ cm}^{-1}$) และ Near IR ($12800-4000 \text{ cm}^{-1}$) นิยมใช้เป็นเทคนิคสำหรับหาโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น หา Functional Group ต่างๆ การทำปริมาณวิเคราะห์ นิยมใช้เทียบกับสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว ยกตัวอย่างเช่น ช่วง wave numbers 4000 - 1500 จะเป็นช่วงที่บ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันอล ของโมเลกุล เช่น -OH, C=O, N-

H, CH₃ เป็นต้น และในช่วง wave numbers 1500 - 400 เป็นช่วง the fingerprint region ซึ่งจะมีลักษณะของสเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละตัว แต่เนื่องจากจะมีพีคเกิดค่อนข้างเยอะ ดังนั้น การวิเคราะห์สเปกตรัมช่วงนี้ จะทำการวิเคราะห์ได้ค่อนข้างยาก

ส่วนประกอบ

ในระบบ FTIR มีส่วนประกอบหลักด้วยกัน 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดรังสี, Interferometer และเครื่องตรวจจับ โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีที่มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ซึ่งจะให้กำลังและความเสถียรมากกว่าแหล่งกำเนิดทั่วไป สำหรับตัวแยกรังสีของ FTIR จะเป็น Interferometer โดยจะแยกลำรังสีออก ทำให้เกิด Path difference ระหว่างลำแสง แล้วทำการรวมสัญญาณการแทรกสอดซึ่งเป็นฟังก์ชันกับ Path difference โดยเครื่องตรวจจับ เครื่องตรวจจับที่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับ FTIR คือ Deuterated Triglycine Sulfate (DTGS) และ Mercury Cadmium Telluride (MCT) โดย DTGS เป็นเครื่องตรวจจับประเภท Pyroelectric ที่สามารถส่งสัญญาณการตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว เพราะอุปกรณ์ตัวนี้ทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ สำหรับ MCT เป็นเครื่องตรวจจับโฟตอนซึ่งขึ้นกับ Quantum nature ของรังสี และให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็วมาก ขณะที่ DTGS ทำงานที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (77 เคลวิน) MCT จะทำงานได้ดี โดยทั่วไป MCT จะเร็วกว่าและมีความไวมากกว่า DTGS

การทำงาน

ลักษณะการทำงานของเครื่องรังสีอินฟราเรด จากแหล่งกำเนิดจะถูกฉายไปยัง Interferometer ซึ่งตัวที่นิยมใช้ คือ Michelson Interferometer ซึ่งประกอบด้วยกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ กระจกที่ตรึงอยู่กับที่ โดยทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตัวแยกแสงซึ่งเป็นอุปกรณ์กึ่งสะท้อนแสง โดยส่วนใหญ่ทำมาจากการนำฟิล์มบางของ เจอร์มาเนียมวางลงบน KBr ที่ตัวแยกแสง ลำรังสีครึ่งหนึ่งจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ และอีกครึ่งหนึ่งจะสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นลำรังสีจะสะท้อนจากกระจกกลับมารวมกันที่ตัวแยกแสง เกิดการแทรกสอดขึ้น และลำรังสีจะผ่านไปยังตัวอย่าง และในที่สุดก็จะตกลงบนเครื่องตรวจจับ Path difference ระหว่างลำรังสีที่ถูกแยกออกเกิดขึ้นจากระยะทางสัมพัทธ์ระหว่างกระจกทั้งสอง ถ้าแขนยึดกระจกทั้งสองข้างของ Interferometer ยาวเท่ากัน ลำรังสีทั้งสองก็จะเดินทางด้วยระยะทางที่เท่ากัน มีเฟสตรงกัน ทำให้สัญญาณที่ไปถึงเครื่องตรวจจับมีค่ามากที่สุด เมื่อกระจกเคลื่อนที่เป็นระยะทาง $\lambda/4$ ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น $\lambda/2$ รังสีทั้งสองมีเฟส

ต่างกัน 180 องศา การแทรกสอดจะอยู่ในตำแหน่งหักล้าง เมื่อเคลื่อนกระจกเป็นระยะทางอีก $\lambda/4$ ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น λ รังสีทั้งสองลำจะกลับมามีเฟสตรงกัน เมื่อกระจกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ความเข้มของสัญญาณที่เครื่องตรวจจับวัดได้จะมีลักษณะของ Interferogram เป็นรูปคลื่น Sine โดยกราฟจะพล็อตระหว่างการตอบสนองที่เครื่องตรวจจับบันทึกได้ และเวลาที่กระจกมีการเคลื่อนที่ ถ้าตัวอย่างเกิดการดูดกลืนรังสีที่ค่าความถี่นี้ ขนาดของแอมพลิจูดจะลดลงโดยสัมพันธ์กับปริมาณของตัวอย่าง หลังจากนั้นใช้ Fourier Transform ซึ่งเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการแปลงผลที่ได้ (ขึ้นกับเวลา) ให้กลายเป็นค่าความเข้มกับความถี่

การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR จะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซ โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแข็ง มีวิธีการเตรียมดังนี้

- 1.1 บดตัวอย่างให้มีความละเอียด
- 1.2 ผสมตัวอย่างเข้ากับ KBr ในโถรงบดสาร โดยให้ตัวอย่างมีความเข้มข้นประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์ และบดสารให้ละเอียดโดยให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
- 1.3 ใส่ตัวอย่างที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์ และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ให้มีความดันประมาณ 15,000 ทิ้งไว้ 1 - 2 นาที
- 1.4 ถอดตัวประกบแม่พิมพ์ออก ตัวอย่างจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์ มีลักษณะเป็นวงกลมใส และตัวอย่างจะกระจายอยู่บน KBr แล้วนำตัวอย่างเข้าเครื่อง FT-IR ได้เลย
- 1.5 การทำความสะอาดแม่พิมพ์ ใช้ช้อนตักสารสแตนเลส ขูดตัวอย่างออกมา เช็ดด้วยกระดาษทิชชูและล้างด้วยอะซิโตนแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง

ข้อดี-ข้อจำกัด

FTIR ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วและมีความไวสูง (โดยส่วนใหญ่จะใช้เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 1 - 5 นาที) โดยมีอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise; S/N) ต่ำ อัตรา S/N จะแปรผันกับรากที่สองของปริมาณสัญญาณที่ตรวจจับได้ทั้งหมด ความไวของเครื่องตรวจจับสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการเพิ่ม S/N ร่วมกับการเพิ่มจำนวนรอบของสแกน มีการใช้ Circular optical aperture แทนที่ entrance slit ทำให้ลำรังสีมีขนาดมากกว่าแบบ Dispersive ถึง 75 - 100 เท่า มีกำลังแสงสูงขึ้น เหมาะสำหรับตัวอย่างหรือเทคนิคบางเทคนิคที่มีข้อจำกัดของกำลังแสง นอกจากนี้ FTIR ยังให้ประสิทธิภาพในการแยกสูงรวมทั้งมี

ความถูกต้องไม่ต่ำกว่า 0.01 cm^{-1} มีกลไกการทำงานที่ง่าย แต่ FTIR มีข้อจำกัดในการเตรียมตัวอย่างบางเทคนิคที่ต้องใช้สารละลายที่ยินยอมให้รังสีทะลุผ่านและตัวอย่างจะต้อง Active ในช่วงอินฟราเรด นอกจากนี้ เครื่องมือที่ใช้มีราคาค่อนข้างสูงและมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง

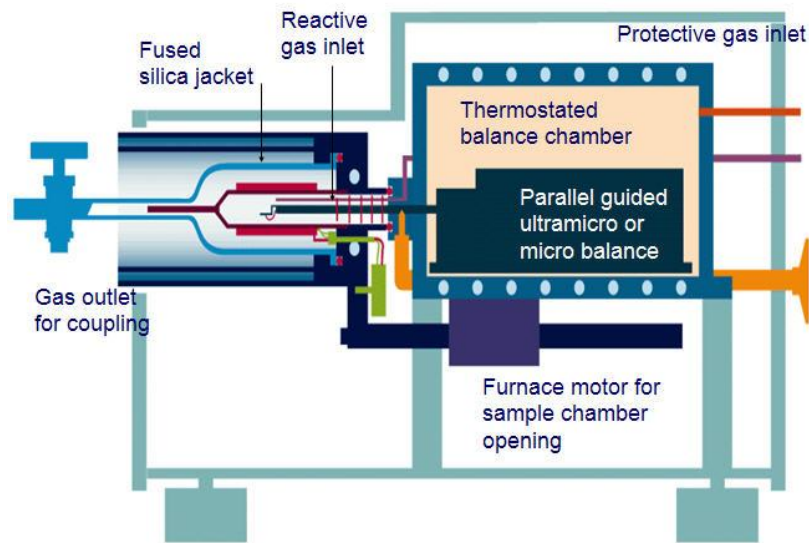
การประยุกต์ใช้งาน

โดยทั่วไป IR/FTIR นั้น จะใช้ในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ทุกประเภทและสารประกอบอนินทรีย์บางประเภท รวมถึงหมู่ฟังก์ชันในสารตัวอย่าง เช่น อินทรีย์วัตถุ ซีโลหะพอลิ-เมอร์ พลาสติก เรซิน สารเคลือบ ยา ยาฆ่าแมลง หรือสารปนเปื้อน เป็นต้น โดยทำการจับคู่สเปกตรัมของสารประกอบที่ต้องการเข้ากับสเปกตรัมอ้างอิง IR/FTIR ยังใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างและสัญญาณของไอโซเมอร์ ใช้ในการบ่งบอกองค์ประกอบของสารที่เป็นตัวเกิดปฏิกิริยาหรือใช้ในการศึกษาการเคลื่อนไหวของปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังใช้ในการตรวจสอบปริมาณของสารผสม สารที่ไม่บริสุทธิ์หรือสารที่เติมเข้าไปประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ และในบางกรณีนั้นสามารถตรวจสอบได้ต่ำถึง 0.01 เปอร์เซ็นต์

เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนหรือ Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของวัตถุต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้การวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวและความละเอียดสูง ในสภาวะแวดล้อมที่กำหนด สามารถใช้ในการศึกษาสมบัติของตัวอย่างได้หลากหลายชนิด ทั้งตัวอย่างในกลุ่มเซรามิก, พอลิเมอร์ หรือสารอนินทรีย์ต่างๆ ได้ สามารถวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลว, การสูญเสียน้ำหนัก, หาสารเจือปนในตัวอย่าง รวมไปถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อนได้อีกด้วย

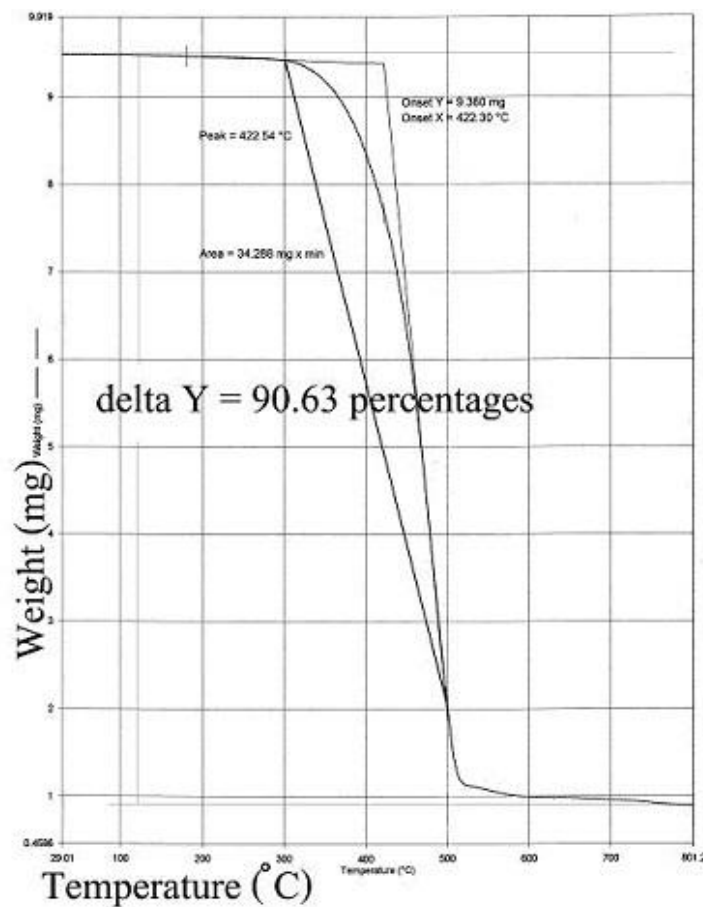
เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (Crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) เป็นต้น



รูปที่ ก1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่อง TGA

ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย ได้แก่ ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือ ออกซิเจน น้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ

ซึ่งผลการทดลองที่ได้ นอกจากจะสามารถแสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ (TG curve) แล้วยังสามารถแสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (DTA) โดยใช้การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างเทียบกับอุณหภูมิของห้องเผา นอกจากนี้ยังสามารถทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารที่สลายตัวได้ทั้งแบบความสัมพันธ์ หรือน้ำหนักจริง และสามารถบอกถึงอุณหภูมิเริ่มต้นของการเผาไหม้ได้ สามารถเปลี่ยนชนิดแก๊สอัตโนมัติเมื่อถึงอุณหภูมิตามที่ได้ตั้งไว้สามารถตั้งโปรแกรมอุณหภูมิที่แตกต่างกันได้ใน 1 ขั้นตอนการทดลอง โดยสามารถตั้งได้ทั้งแบบไดนามิก (Dynamic) และ ไอโซเทอร์มอล (Isothermal)



รูปที่ ก2 เทอร์โมแกรมของเศษพลาสติกตัวอย่างกรอบทะเบียนรถ A ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA

ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ผลการวิเคราะห์ที่ได้ จะอยู่ในรูปเทอร์โมแกรมของการเปลี่ยนแปลงมวลที่พล็อตระหว่างน้ำหนัก (mg) และอุณหภูมิ (°C) ในการศึกษานี้ได้ทำการวัดอุณหภูมิ Onset temperature (°C) จากการเกิดขึ้นตอนการเปลี่ยนแปลงมวล และหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวอย่างที่หายไป ดังเทอร์โมแกรมในรูปที่ ก2 ที่แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ของกรอบทะเบียนรถ A

เทคนิค Electron Probe Micro-Analysis (EPMA)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA เป็นการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและคุณภาพ เป็นการวิเคราะห์ที่มีความละเอียดและความแม่นยำสูง สามารถตรวจวิเคราะห์พื้นผิวด้วยภาพขยายได้ถึง 50 - 40,000 เท่า การได้มาซึ่งข้อมูลหรือผลการวิเคราะห์จะอาศัยหลักการของ

Secondary Electrons, Back Scattered Electrons, Electrons Absorption, Electron Transmission, X-Ray, UV-Ray, Visible Light Rays และ Infrared Rays เพื่อหาทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของธาตุ และองค์ประกอบชนิดต่างๆ

โดย Electron Probe Micro-Analyzer เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (In-situ non-destructive chemical analysis) เครื่องมือ EPMA ซึ่งทั่วไปอาจเรียกว่า Electron microprobe หรือ Probe โดยหลักการของการวิเคราะห์จะคล้ายคลึงกับเครื่องมือ SEM (Scanning Electron Microscopy) แต่จะมีความสามารถเพิ่มขึ้น ในการวิเคราะห์ทางเคมี หลักสำคัญของเครื่อง EPMA คือ ความสามารถในการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุที่มีจุดวิเคราะห์หรือขนาดที่เล็กมากๆ (อย่างน้อย 1 - 2 ไมครอน)

เทคนิค Electron Probe Micro-Analysis (EPMA)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA เป็นการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและคุณภาพ เป็นการวิเคราะห์ที่มีความละเอียดและความแม่นยำสูง สามารถตรวจวิเคราะห์พื้นผิวด้วยภาพขยายได้ถึง 50 - 40,000 เท่า การได้มาซึ่งข้อมูลหรือผลการวิเคราะห์จะอาศัยหลักการของ Secondary Electrons, Back Scattered Electrons, Electrons Absorption, Electron Transmission, X-Ray, UV-Ray, Visible Light Rays และ Infrared Rays เพื่อหาทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของธาตุ และองค์ประกอบชนิดต่างๆ

โดย Electron Probe Micro-Analyzer เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (In-situ Non-destructive Chemical Analysis) เครื่องมือ EPMA ซึ่งทั่วไปอาจเรียกว่า Electron microprobe หรือ Probe โดยหลักการของการวิเคราะห์จะคล้ายคลึงกับเครื่องมือ SEM (Scanning Electron Microscopy) แต่จะมีความสามารถเพิ่มขึ้น ในการวิเคราะห์ทางเคมี หลักสำคัญของเครื่อง EPMA คือ ความสามารถในการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุที่มีจุดวิเคราะห์หรือขนาดที่เล็กมากๆ (อย่างน้อย 1 - 2 ไมครอน)

หลักการของเครื่องมือ EPMA ในกรณีที่วัสดุเป็นของแข็งจะถูกยิงด้วยลำแสงของอิเล็กตรอน ซึ่งการชนของลำแสงอิเล็กตรอนที่มีพลังงานเพียงพอ จะทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานและสสารออกจากตัวอย่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะปล่อยออกมาในรูปของพลังงานความร้อนที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนและรังสีเอ็กซ์ ในทางธรณีวิทยา จะสนใจวิเคราะห์ Secondary

Electrons และ Back-Scattered Electrons ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการถ่ายภาพพื้นผิวหรือผลของค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบในวัสดุดังกล่าว

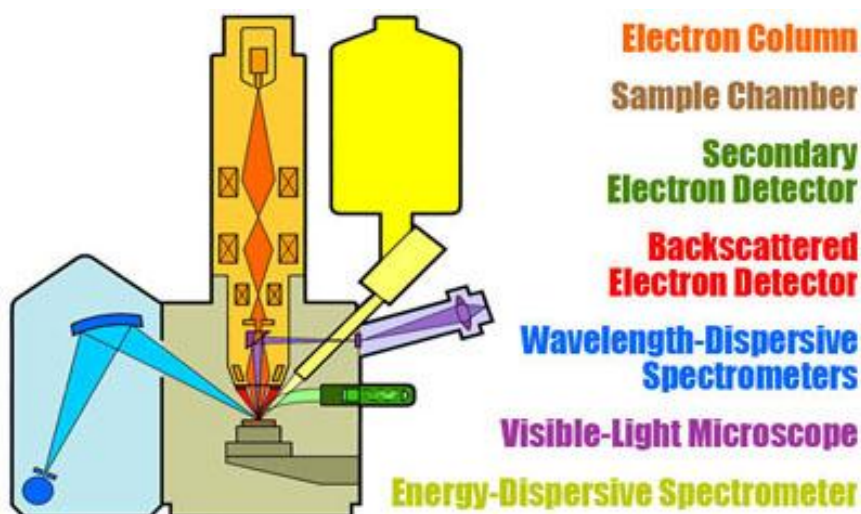
รังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้น จะเกิดจากการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Collisions) ของอิเล็กตรอน ของลำแสงที่ยิงเข้าไปกับอะตอมที่อยู่ภายในชั้นวงแหวนของตัวอย่าง เมื่ออิเล็กตรอนภายในวงแหวนถูกปล่อยออกมาไปยังชั้นของวงแหวนที่ว่าง อิเล็กตรอนของชั้นที่สูงกว่าจะตกลงไปยังชั้นของวงแหวนที่ว่าง รวมทั้งมีการปล่อยพลังงานบางส่วนออกมา (X-Ray) ปริมาณของรังสีเอ็กซ์ที่ปล่อยออกมาดังกล่าวจะเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPMA จะเป็นการวิเคราะห์ที่เป็นแบบ Non-destructive ซึ่งรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นจะไม่ทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณของตัวอย่าง ดังนั้นจึงเป็นข้อดีของเทคนิค EPMA นี้ ที่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเดียวกันได้มากกว่า 1 ครั้ง

ส่วนประกอบหลักของเครื่องมือวิเคราะห์ Electron Probe Micro-Analyzer (รูปที่ ก3) ได้แก่

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคือ ขั้วแคโทด W-Filament
2. ชุดของเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งติดตั้งในคอลัมน์ของเครื่องมือ จะทำหน้าที่รวมและกำหนดหรือกรองลำอิเล็กตรอนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด โดยชุดของเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยเลนส์อิเล็กตรอน (Electron Optics) และเลนส์ที่ทำหน้าที่คล้ายแหล่งกำเนิดแสง (Light Optics)
3. ห้องวางชิ้นงานตัวอย่าง (Sample Chamber) ประกอบด้วยแท่นวางตัวอย่างที่สามารถเคลื่อนที่ในแนว X-Y-Z ที่อยู่ภายใต้สุญญากาศ เพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซและโมเลกุลของไอน้ำ รบกวนลำแสงของอิเล็กตรอนที่ยิงไปยังตัวอย่าง กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง จะช่วยให้การสังเกตลำแสงจากตัวอย่างทำได้ง่ายขึ้น
4. เครื่องมือตรวจจับรอบๆ ห้องวางชิ้นงานตัวอย่าง (Sample Chamber) จะเก็บรวบรวมรังสีเอ็กซ์และอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมาจากตัวอย่าง

การประยุกต์ใช้งานเครื่องมือ Electron Probe Micro Analysis (EPMA)

- การวิเคราะห์เชิงปริมาณ เทคนิค EPMA เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก สำหรับการวิเคราะห์ทางเคมีของวัสดุทางธรณีวิทยาที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ ก3 แสดงส่วนประกอบหลักของเครื่องมือ EPMA

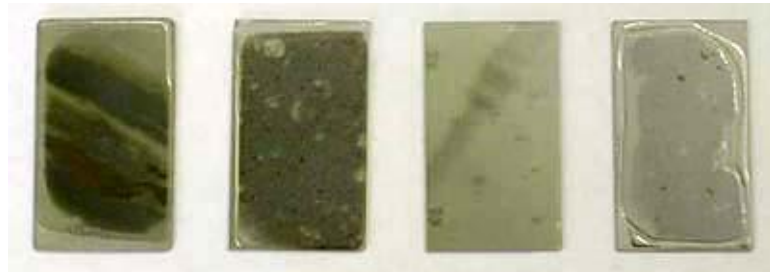
- เทคนิค EPMA มักถูกใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่ต้องมีการวิเคราะห์ในแต่ละเฟส เช่น แร่หินอัคนีและหินแปร หรือวัสดุที่มีขนาดเล็กที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ (เช่น ตะกอนของปูนซีเมนต์, แก้วภูเขาไฟ, วัตถุโบราณคดี เช่น เซรามิก หรือการเคลือบเครื่องมือ)
- ในบางกรณี อาจสามารถใช้ในการหาอายุของ U-Th ของแร่ เช่น แร่โมนาไซต์ (Monazite) โดยไม่ต้องทำการวัดอัตราส่วนของไอโซโทป
- เทคนิค EPMA ถูกใช้อย่างแพร่หลาย สำหรับการวิเคราะห์วัสดุสังเคราะห์ เช่น แผ่นไมโครชิพ (Optical Wafers), แผ่นฟิล์มบาง, แผงวงจรมิโคร (Microcircuits), วัสดุกึ่งตัวนำและตัวนำยิ่งยวด (Semi-Conductors and Superconductors) และเซรามิก

ข้อดีและข้อจำกัดของเครื่องมือ Electron Probe Micro Analysis (EPMA)

ข้อดี

- เทคนิค EPMA มีหลักในการวิเคราะห์เช่นเดียวกับเทคนิค SEM แต่เทคนิค EPMA จะมีอุปกรณ์ที่มีช่วงของ Crystal Spectrometer ที่สามารถวิเคราะห์ทางเคมีเชิงปริมาณ (WDS) ที่มีความไวสูงได้
- เทคนิค EPMA เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ทางเคมีของวัสดุของแข็งที่มีขนาดเล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 - 2 ไมครอน) เพราะฉะนั้นผู้วิเคราะห์สามารถวิเคราะห์ได้หลากหลายรูปแบบในขั้นตอนเดียว เช่น การวิเคราะห์แร่ในวัสดุ (เช่น หิน) ด้วยการวิเคราะห์แบบจุด

- การวิเคราะห์ทางเคมีแบบจุด สามารถตรวจสอบองค์ประกอบขนาดเล็กภายในเนื้อหรือแม่แต่ผิวของวัสดุ



ข้อจำกัด

- แม้ว่าเทคนิค EPMA มีความสามารถในการวิเคราะห์องค์ประกอบได้เกือบทั้งหมด แต่เทคนิคดังกล่าวจะไม่สามารถตรวจสอบองค์ประกอบที่มีน้ำหนักเบาได้ เช่น ไฮโดรเจน (H), ฮีเลียม (He) และ ลิเทียม (Li) ยกตัวอย่างเช่น โมเลกุลของน้ำในแร่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Hydrous Minerals) จะไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้
- องค์ประกอบที่ทำการวิเคราะห์บางชนิด สามารถสร้างรังสีเอ็กซ์ที่เกิดการ Overlapping กับตำแหน่งของพีคที่ปรากฏ (โดยทั้งพลังงานและความยาวคลื่น) ซึ่งต้องทำการแยกออกจากกันในการวิเคราะห์
 - การวิเคราะห์ Microprobe จะแสดงผลเป็นออกไซด์ขององค์ประกอบ ไม่ได้แสดงเป็นแคทไอออน (Cations) ดังนั้น สัดส่วนของแคทไอออนและสูตรโครงสร้างของแร่ (Mineral Formula) จะต้องคำนวณใหม่ตามกฎของ Stoichiometric Ratio

- การวิเคราะห์ Probe analysis ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างชั้น valence electron ของ Fe ได้ ดังนั้นสัดส่วนของ Ferric/Ferrous (Fe^{3+}/Fe^{2+}) จะไม่สามารถกำหนดได้ และต้องทำการหาด้วยเทคนิคอื่นๆ

ตะแกรงมาตรฐาน (SIEVE) (ภิญโญ มีชำนะ, 2554)

การวิเคราะห์ขนาดโดยใช้ตะแกรงมาตรฐานเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก ในการแต่งแร่ เพราะแร่ที่เกิดโดยธรรมชาติทั่วไป มักมีขนาดพอเหมาะที่จะใช้วิธีการนี้ได้ การใช้ตะแกรงจะมีปัญหาสำหรับแร่ที่มีขนาดเล็กมากๆ เนื่องจากจะเกิดการอุดตันของเม็ดแร่บนรูตะแกรง โดยเฉพาะเม็ดแร่ที่มีขนาดใกล้เคียงกับรูแร่ การใช้แร่มาตรฐานคัดขนาดอาจใช้วิธีแห้งหรือวิธีเปียก ก็ได้ตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยเส้นลวดนำมาสานกัน ทำให้เกิดเป็นช่องสี่เหลี่ยม และมีขอบขนาดเป็นเมช (Mesh) แร่ขนาด 10 เมช ซึ่งหมายถึงระยะความยาว 1 นิ้ว จะมีช่องรูตะแกรงจำนวน 10 ช่อง และช่องหนึ่งจะมีความกว้าง 0.1 นิ้ว หักออกเสียด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวด ดังนั้นคำว่า เมช จึงยังไม่ได้บอกขนาดที่แท้จริงของสารที่ผ่านลวดรูตะแกรง จนกว่าจะทราบขนาดของเส้นลวดที่โรงงานต่างๆ นำมาใช้สานทำตะแกรง

วิธีง่ายๆ วิธีหนึ่งที่จะทราบขนาดของช่องตะแกรงเป็นเมช ก็คือ เมื่อบีบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดและช่องว่าง (หน่วยเป็นนิ้ว) แล้วนำตัวเลขทั้งสองมารวมกันแล้วนำไปหาร 1 ผลลัพธ์ที่ออกมาจะเป็นเมช เช่น แร่มีช่องว่าง 0.0015 นิ้ว และมีเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดเท่ากับ 0.0010 นิ้ว เมื่อนำมารวมกันจะได้ 0.0025 นิ้ว เมื่อนำไปหาร 1 จะได้ 400 คือ ขนาดของตะแกรงนั้นเป็น 400 เมช ตะแกรงชุดหนึ่งๆ มักจะมีกฎเกณฑ์ขนาดของรูลดหลั่นกันลงไป สมมติว่า ถ้าจะใช้หลักการก้าวหน้าทางเลขคณิต (Arithmetic Series) ง่ายๆ คือ มีขนาด 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2 และ 1 นิ้ว ตามลำดับ จะเห็นว่าหลักนี้ไม่เหมาะสม เพราะที่ 1 นิ้ว และ 2 นิ้ว มีขนาดแตกต่างกันมาก ซึ่งตรงกันข้ามกับแร่ขนาด 9 และ 10 นิ้ว ซึ่งดูแล้วเกือบจะไม่เห็นความแตกต่าง ดังนั้น จึงมีผู้คิดค้นใหม่ โดยหาตัวคงที่มาคูณ เช่น ใช้ 2 เป็นตัวคูณ ตัวเลขจะออกมาเป็น 8, 4, 2, 1, $\frac{1}{2}$ นิ้ว เป็นต้น ซึ่งอยู่ในระบบความก้าวหน้าทางเรขาคณิต (Geometric Series) แต่ต่อมาได้มีการแก้ไข $\sqrt{2}$ เป็นตัวคูณ และได้กลายเป็นมาตรฐานของตะแกรง ที่ใช้กันในประเทศสหรัฐอเมริกาในปัจจุบัน ในงานค้นคว้า บางงานจะใช้

$\sqrt{2}$ เป็นตัวคูณ และทางบริษัทผู้ผลิตได้ยึดเอาแรงขนาด 200 เมช เป็นมาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 75 ไมครอน หรือ 0.075 มม.

ตะแกรงมาตรฐานที่ใช้ในการคัดขนาดสำหรับงานแต่งแร่จะอยู่ระหว่าง 3 เมช ถึง 400 เมช เป็นส่วนใหญ่ โดยขนาด 400 เมช เท่ากับขนาดของรูตะแกรง 38 ไมครอน (1 ไมครอน = 1/1,000 มิลลิเมตร = 1/1,000,000 เมตร) สำหรับการคัดขนาดด้วยตะแกรงที่มีรูขนาดเล็กกว่านี้ จะใช้แรง Micromesh ซึ่งสามารถคัดขนาดได้เล็กถึง 5 - 10 ไมครอน

การคัดขนาดด้วยแรงมาตรฐานนี้ ทำได้โดยการนำแร่ไปผ่านแรง (Sieve) ที่มีขนาดต่างๆ กัน การคัดขนาดโดยใช้มืออาจใช้คัดขนาดแร่ซึ่งต้องการคัดขนาดเพียงขนาดเดียว หรือ 2 - 3 ขนาด แต่ถ้าหากต้องการคัดออกมาหลายๆ ขนาดก็ต้องวางชุดตะแกรง (Stack of Sieves) เป็นหลายๆ ชั้น (รูปที่ ก4) ซึ่งการคัดขนาดแบบนี้โดยไม่ใช่เครื่องมือช่วยเลยนั้นจะต้องใช้เวลาานาน และผิดพลาดได้ง่าย

ตะแกรงที่ใช้คัดขนาดจะติดอยู่กับส่วนล่างของโลหะทองเหลืองรูปกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างๆ ไปที่ใช้ประมาณ 8 นิ้ว สูงประมาณ 2 นิ้ว แรงชุดที่จะประกอบไปด้วยตะแกรงขนาดต่างๆ มีฝาปิดครอบแรงชั้นบนสุด และชั้นล่างสุดจะมี Pan รองรับ Pan มีรูปร่างลักษณะคล้ายกับแรงต่างๆ ไป แต่ข้างล่างแทนที่จะมีลวดเป็นแรง กลับเป็นโลหะที่บสำหรับรองรับที่ผ่านแรงชั้นเหนือกว่าไว้ หลังจากการคัดขนาดจะมีแร่ค้างอยู่บนแรง เรียกว่า แร่โตเกินขนาด (Oversize)

สิ่งที่ควรระวังในการคัดขนาดก็คือ อย่าใช้ตัวอย่างมากเกินไปในการทดลองครั้งหนึ่งๆ เพราะเม็ดแร่จะเกิดการอุดตันในรูแรงมาก และอาจจะทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะทำให้แร่เม็ดเล็กๆ เกิดรวมตัวกันเป็นก้อน ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ผิดไป นอกจากนี้ความชื้นจะต้องมีน้อยที่สุด



รูปที่ ก4 แสดงวิธีการคัดขนาด ด้วยชั้นของชุดตะแกรงขนาดต่างๆ

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

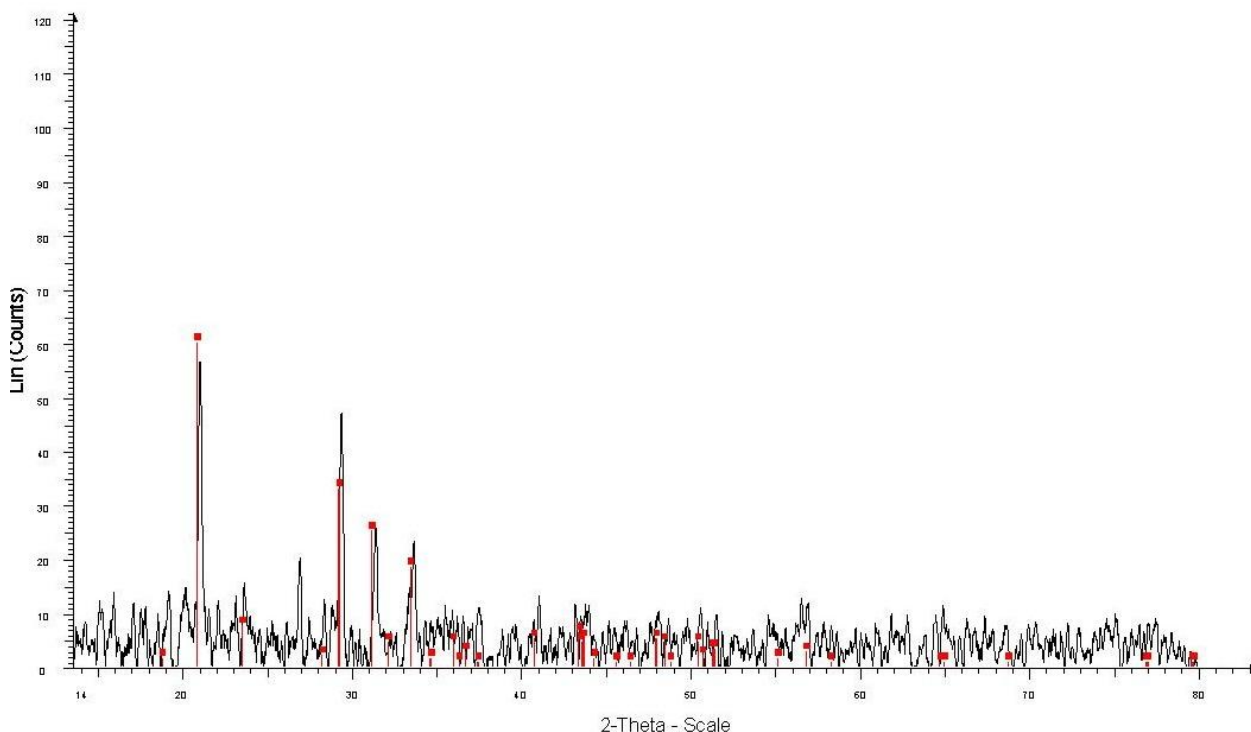
ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์การทดลอง

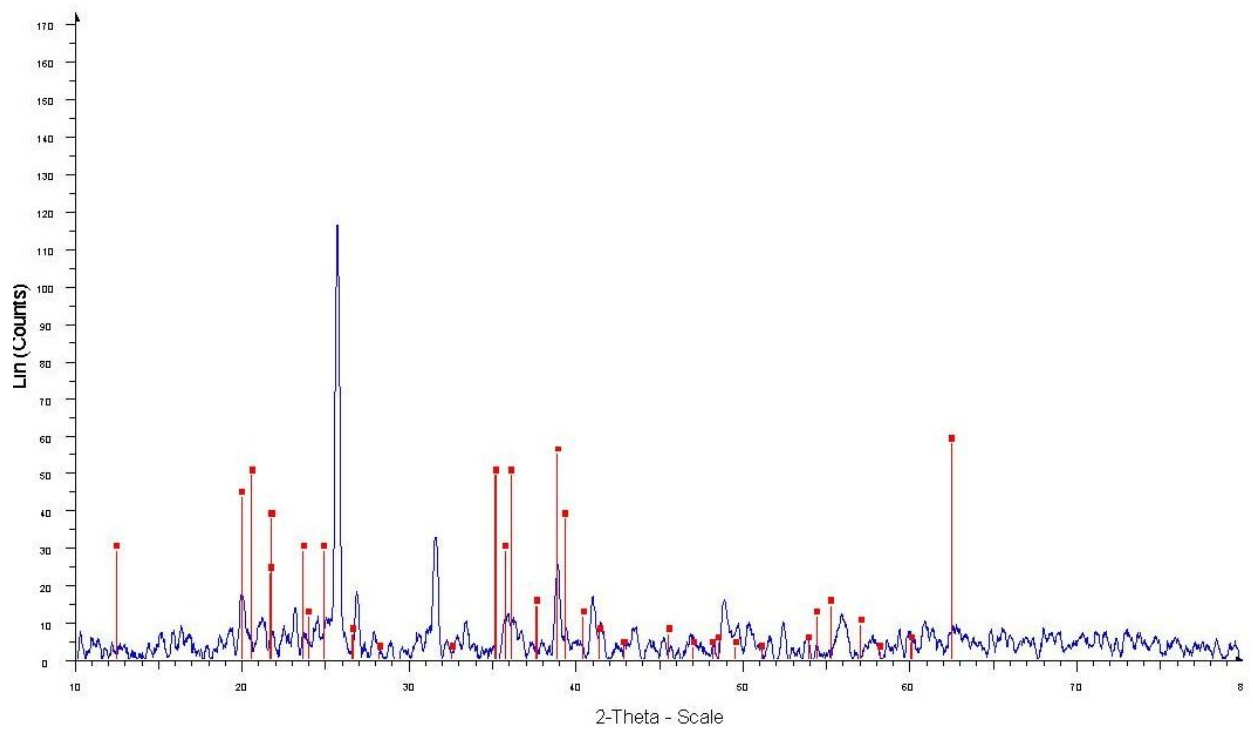
ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

การวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ XRD โดยเริ่มการวิเคราะห์จากตัวอย่างถ่านหินก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ผลการวิเคราะห์ ดังนี้

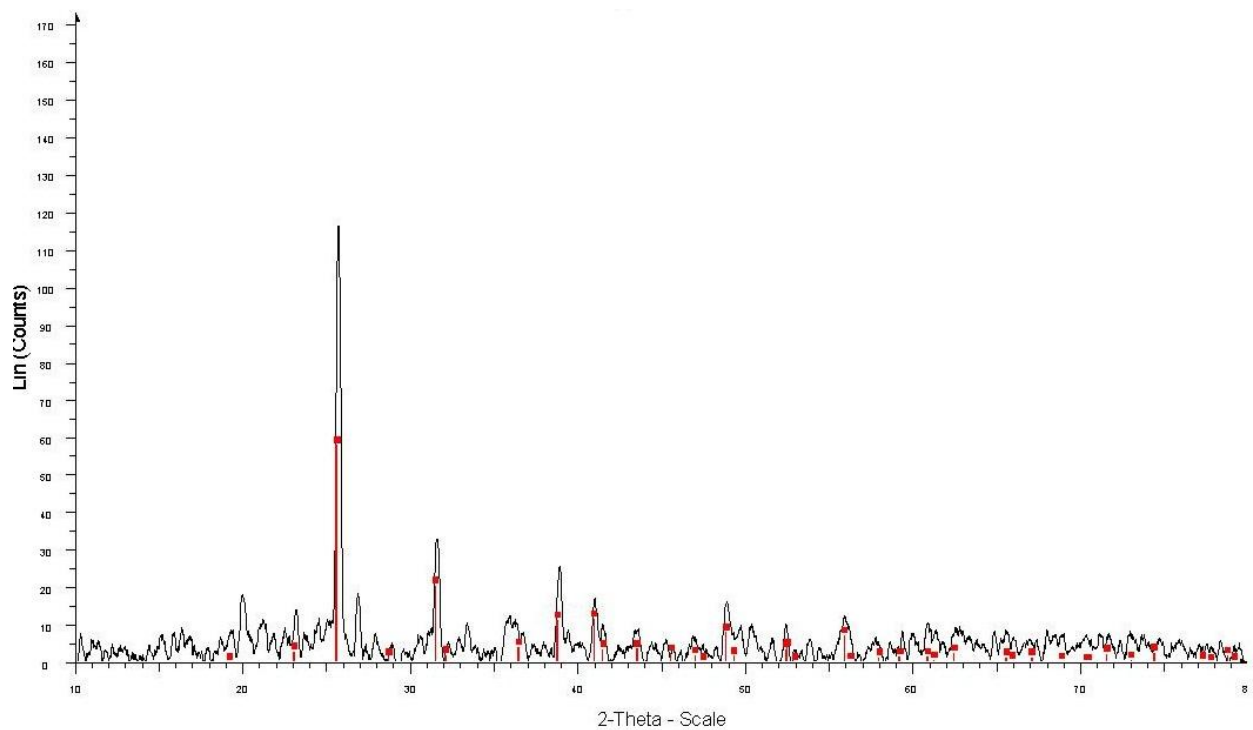
1.1 ตัวอย่างถ่านหิน K1 (ค่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 12.72)



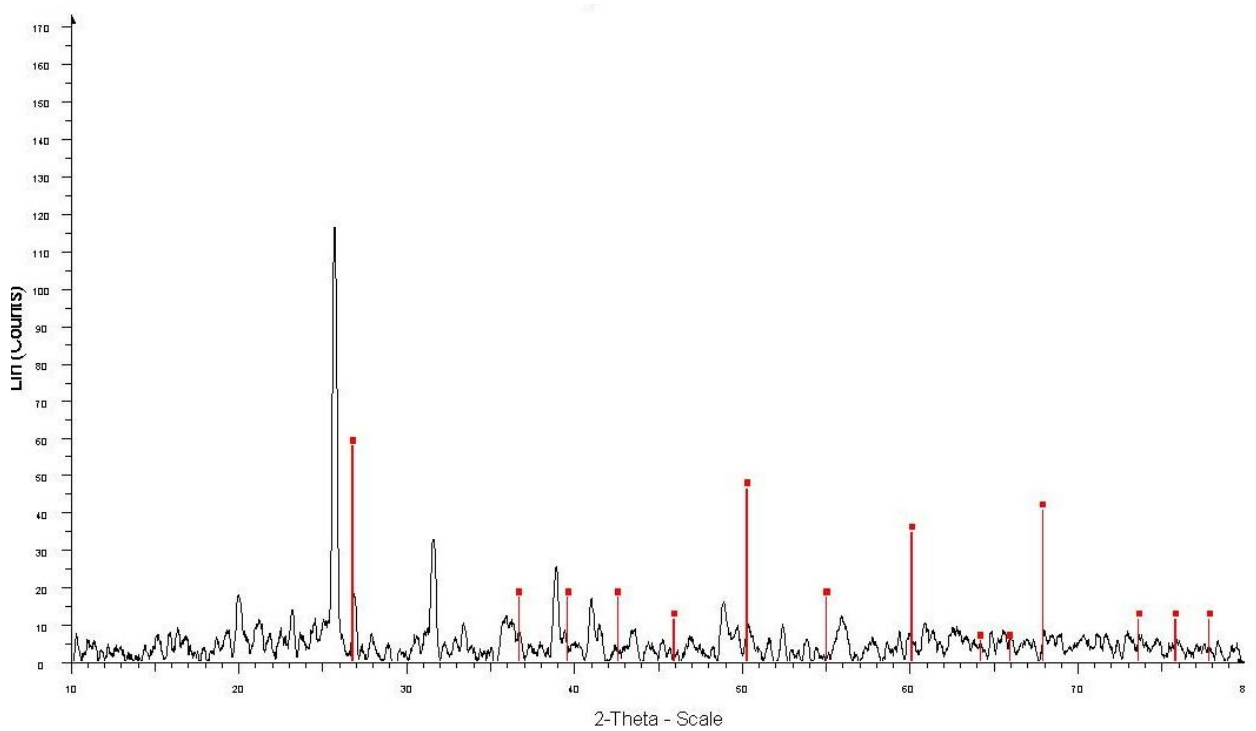
รูปที่ ข1 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 ก่อนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ยิปซัม)



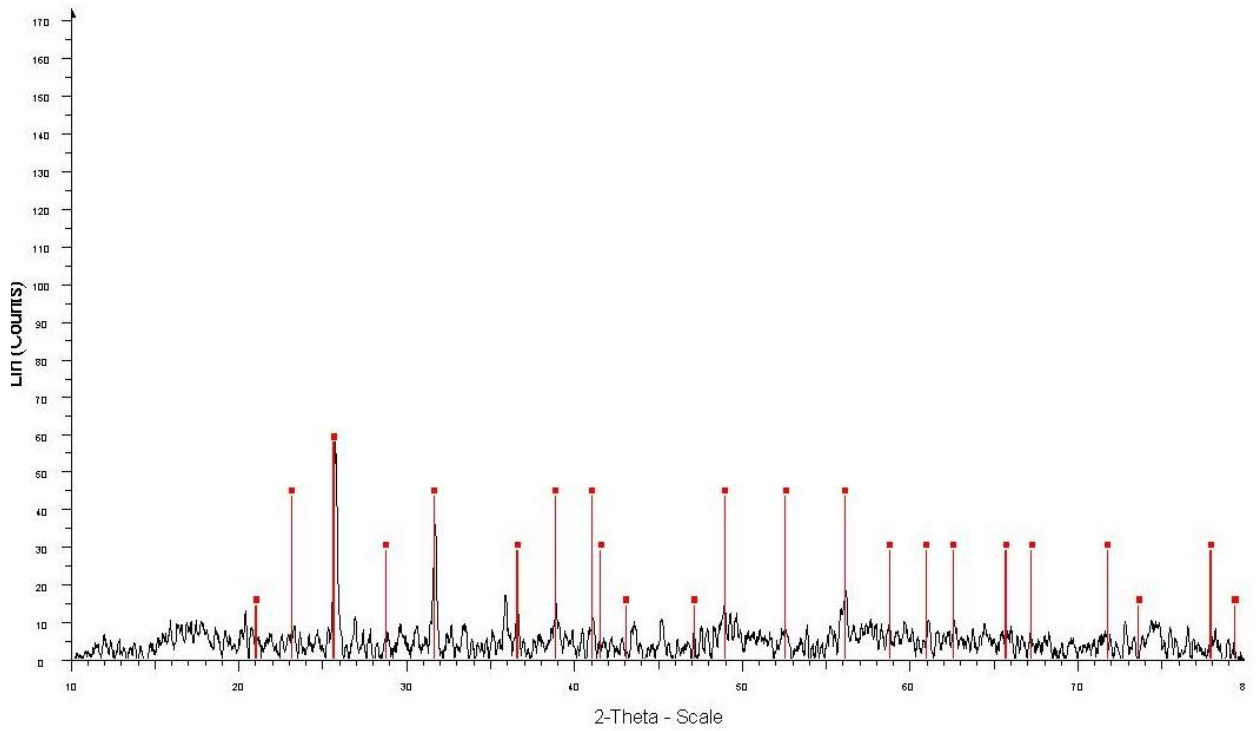
รูปที่ ข2 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 ก่อนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่แคลิไนต์)



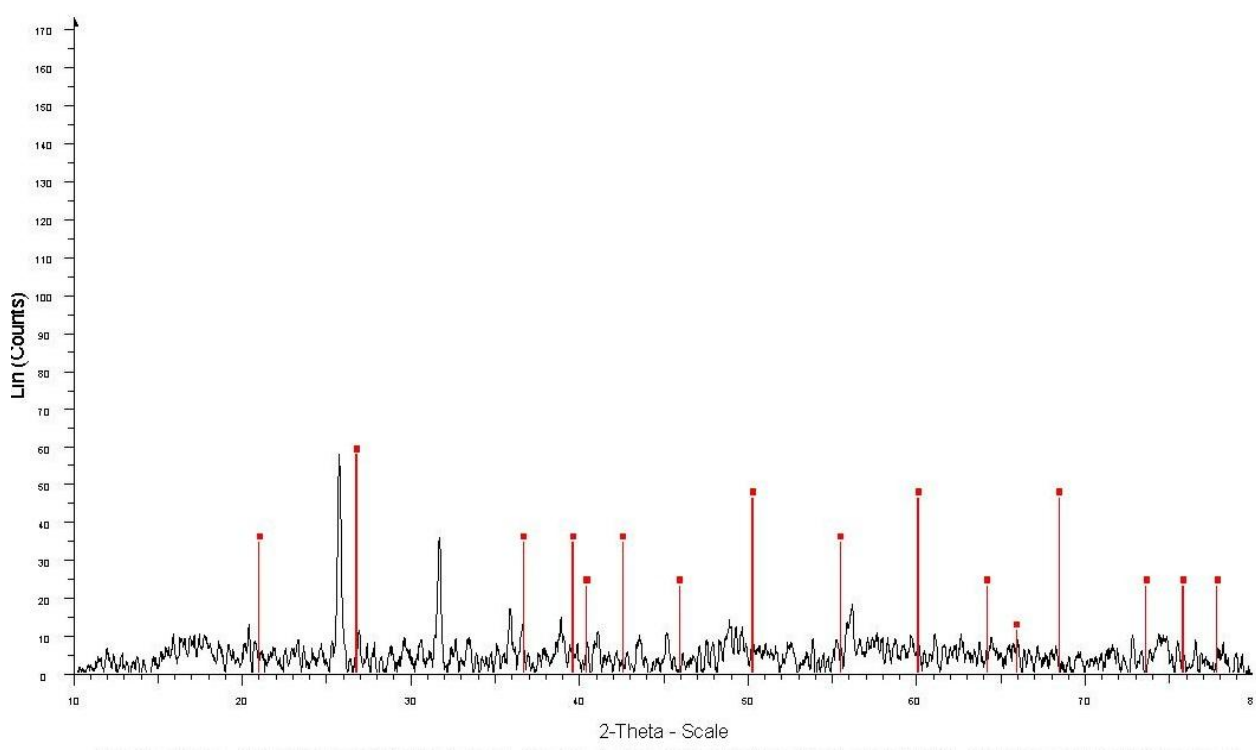
รูปที่ ข3 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่แอนไฮไดรต์)



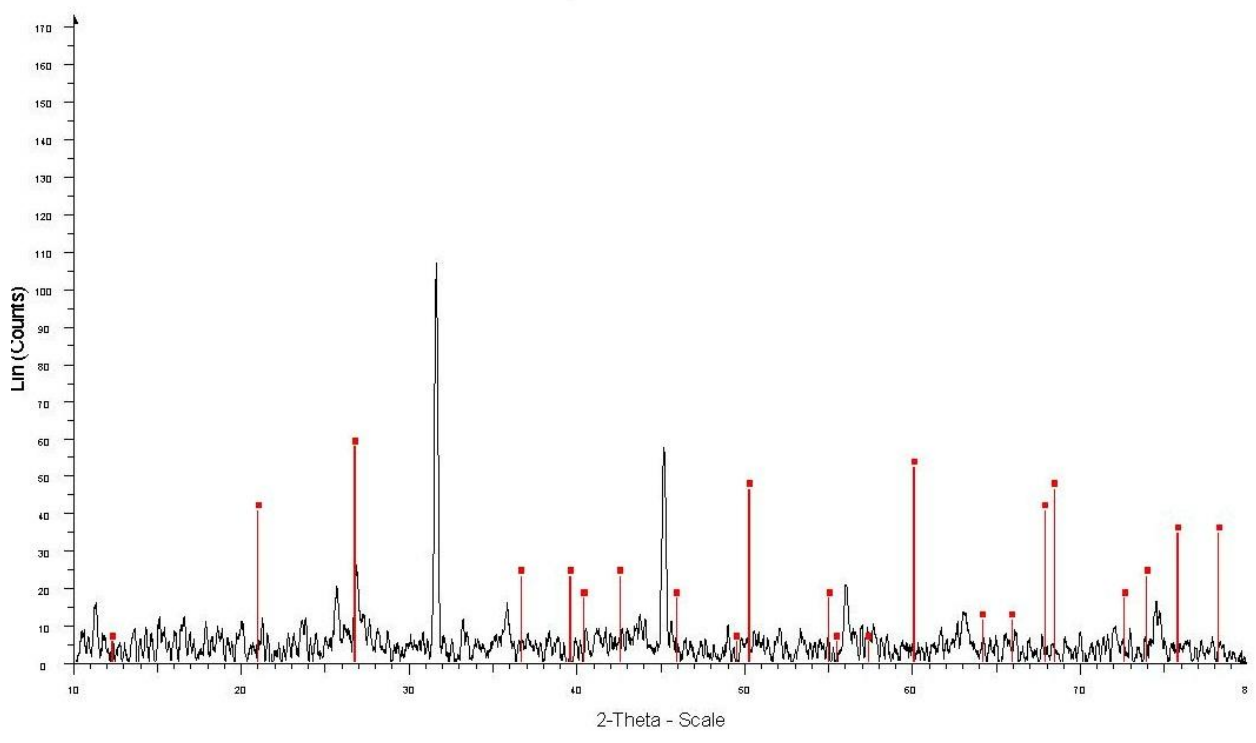
รูปที่ ข4 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอร์ตซ์)



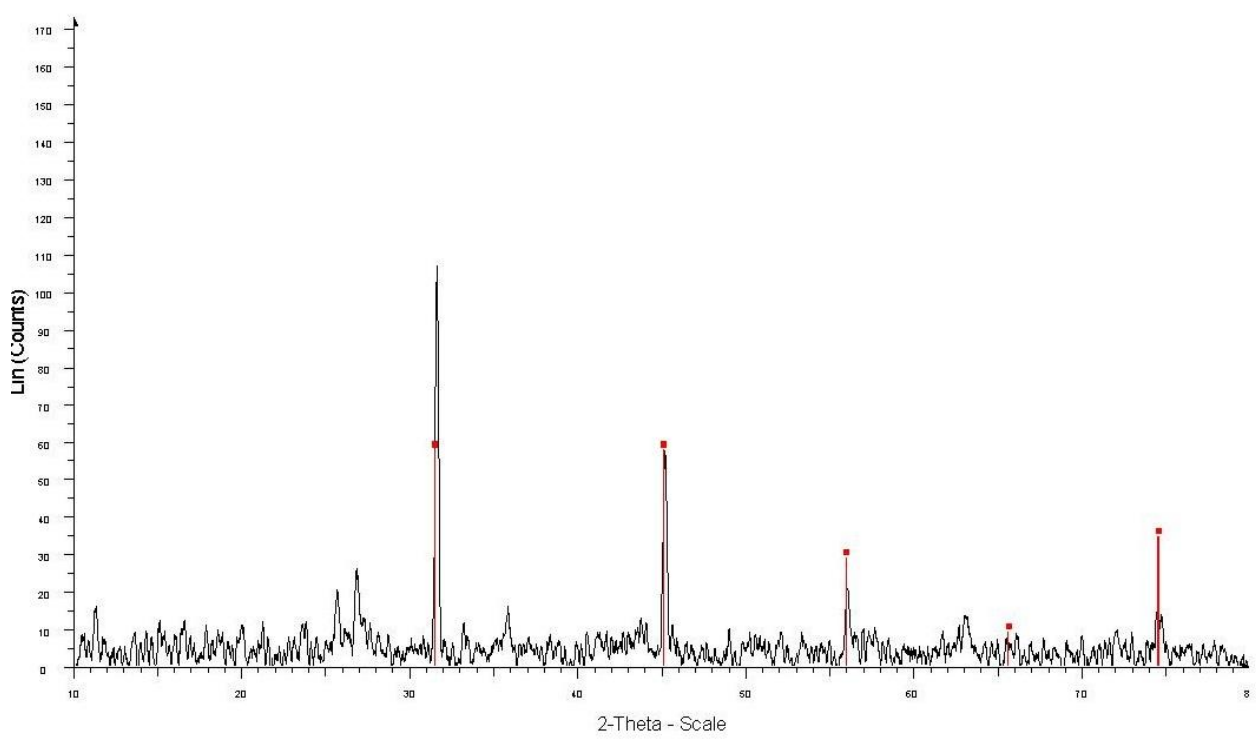
รูปที่ ข5 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่แอนไฮไดรต์)



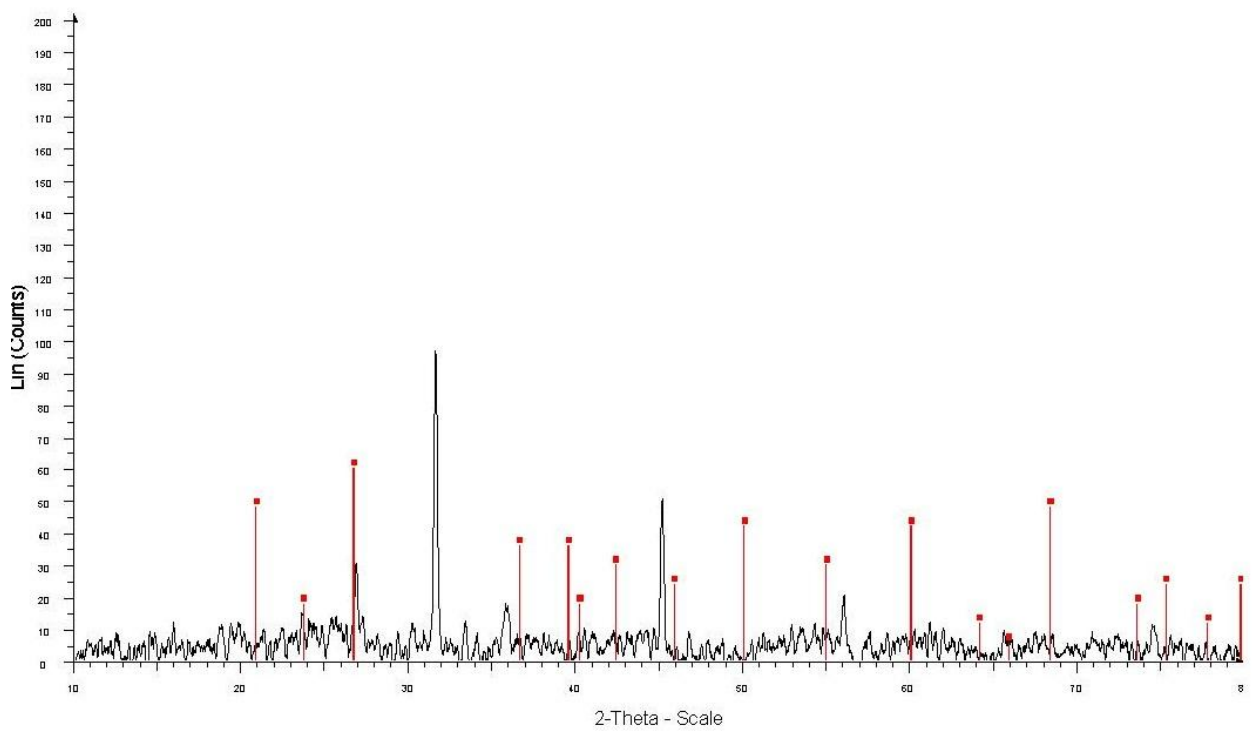
รูปที่ ข6 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอร์ตซ์)



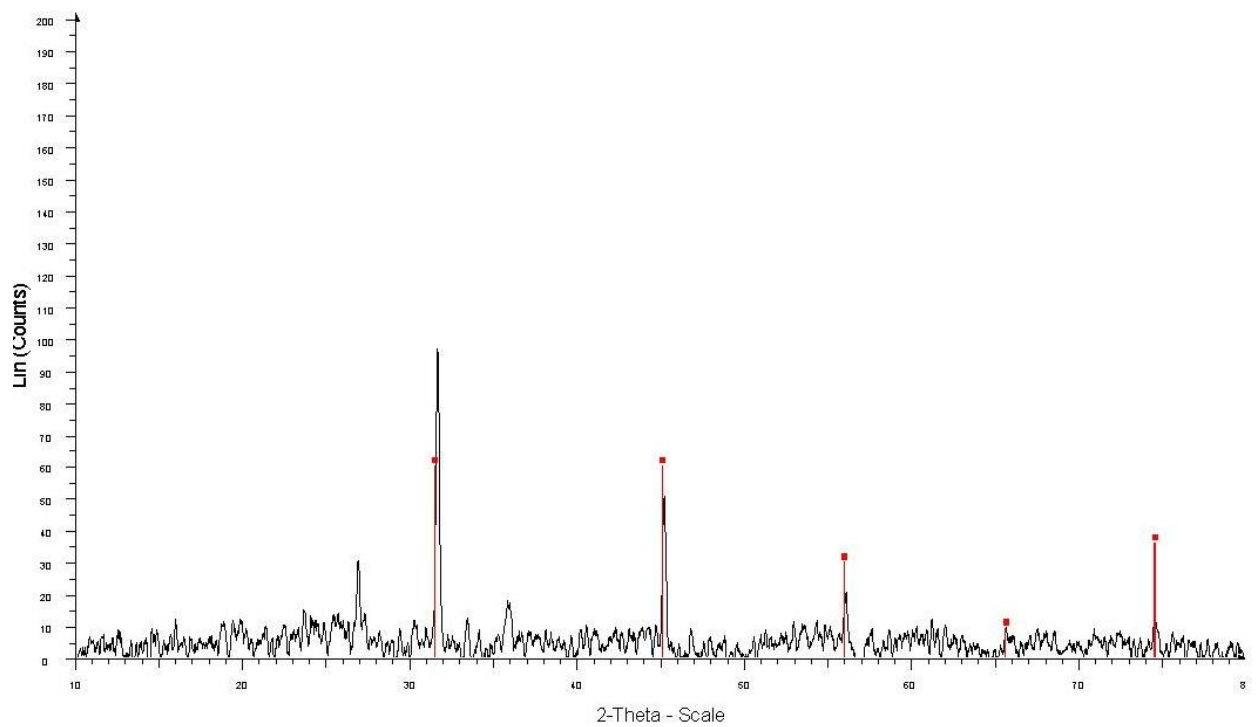
รูปที่ ข7 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอร์ตซ์)



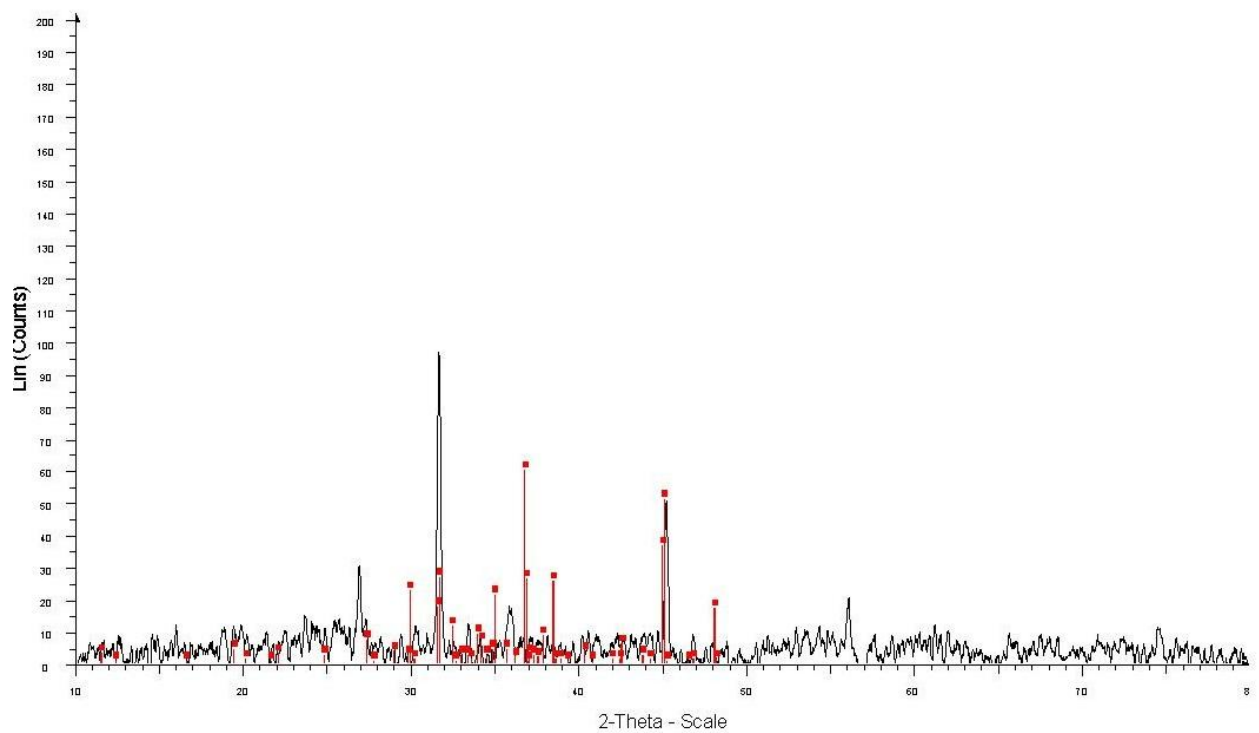
รูปที่ ข8 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Oldhamite)



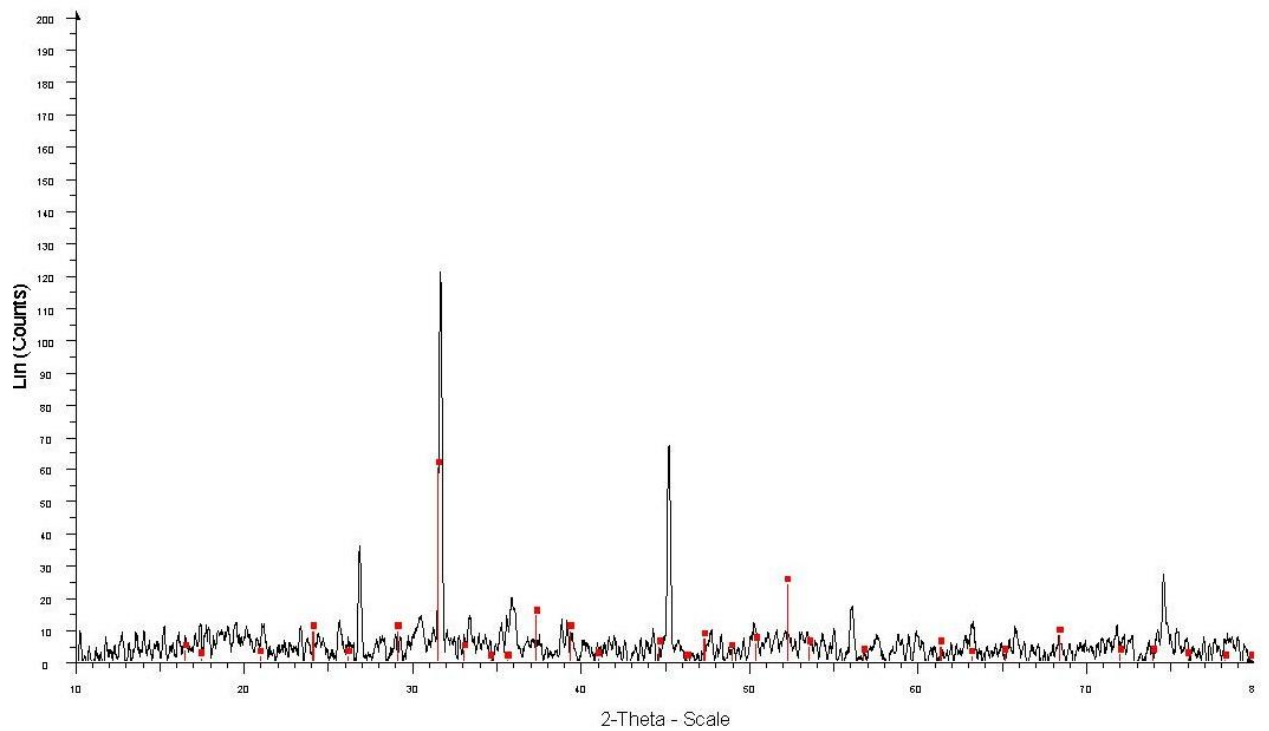
รูปที่ ข9 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอร์ตซ์)



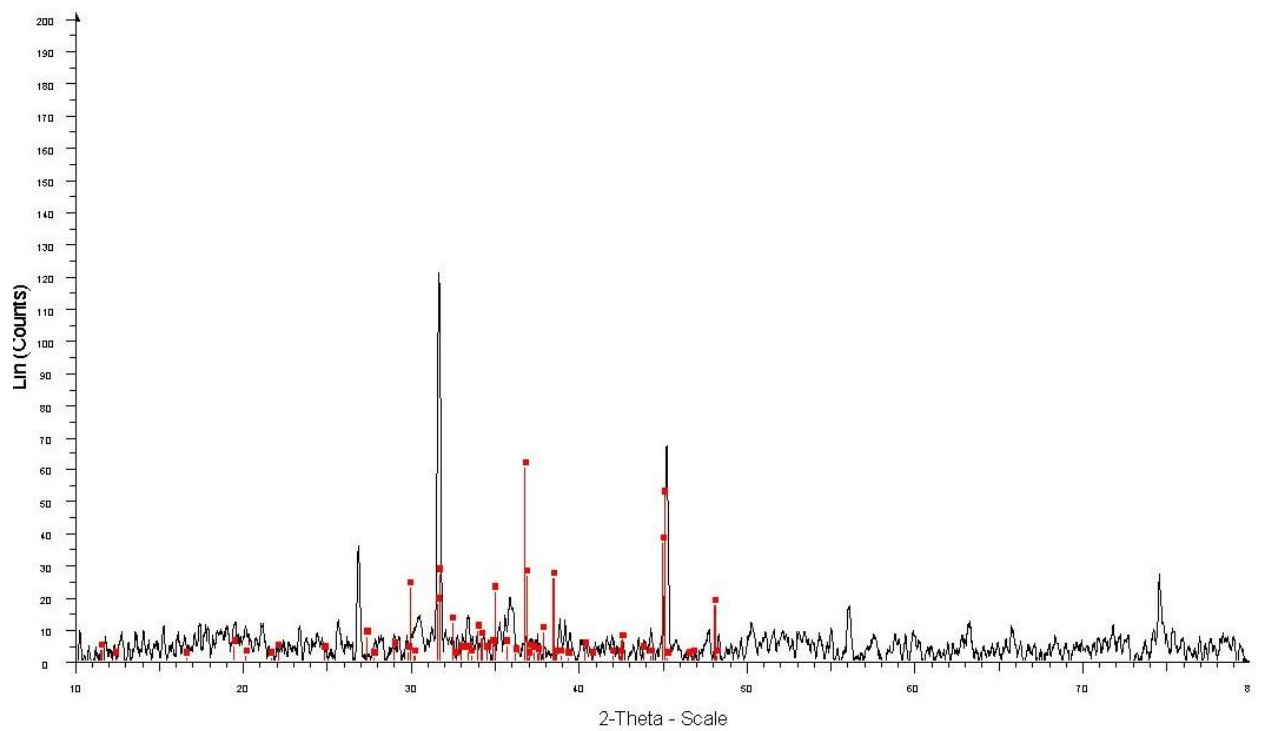
รูปที่ ข10 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Oldhamite)



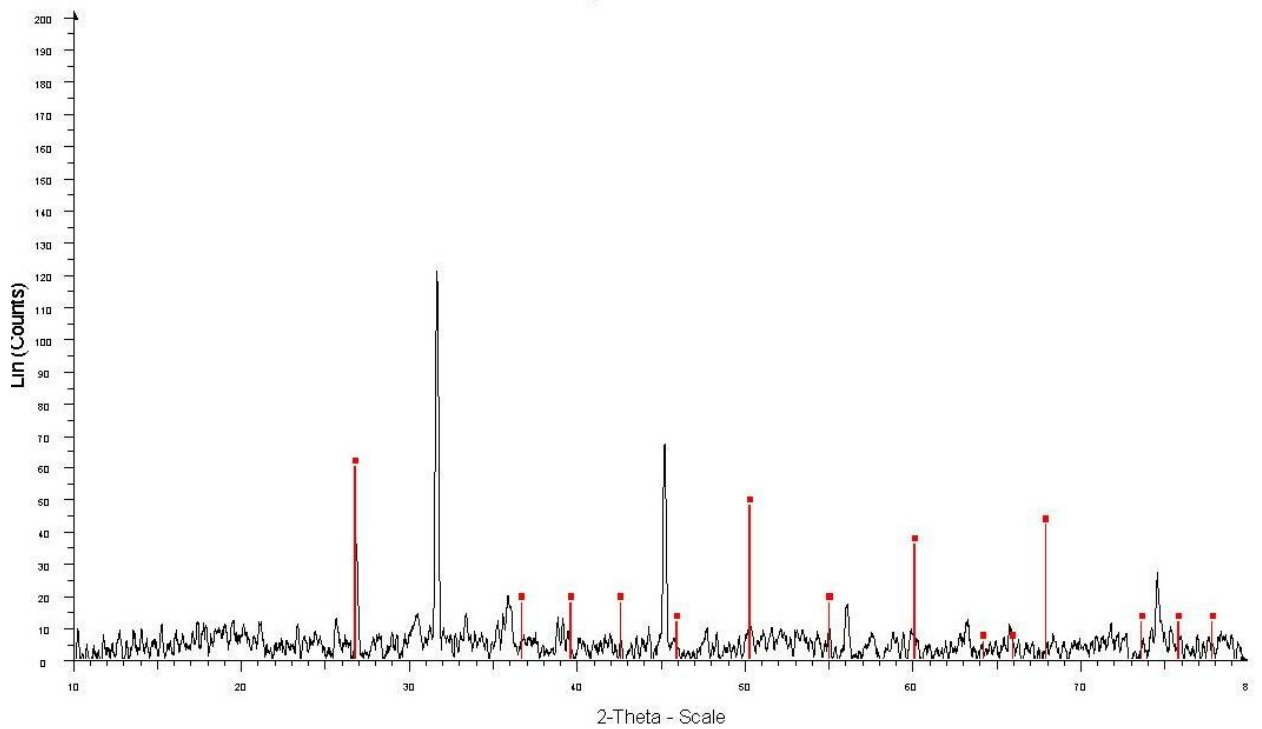
รูปที่ ข11 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Khmaralite)



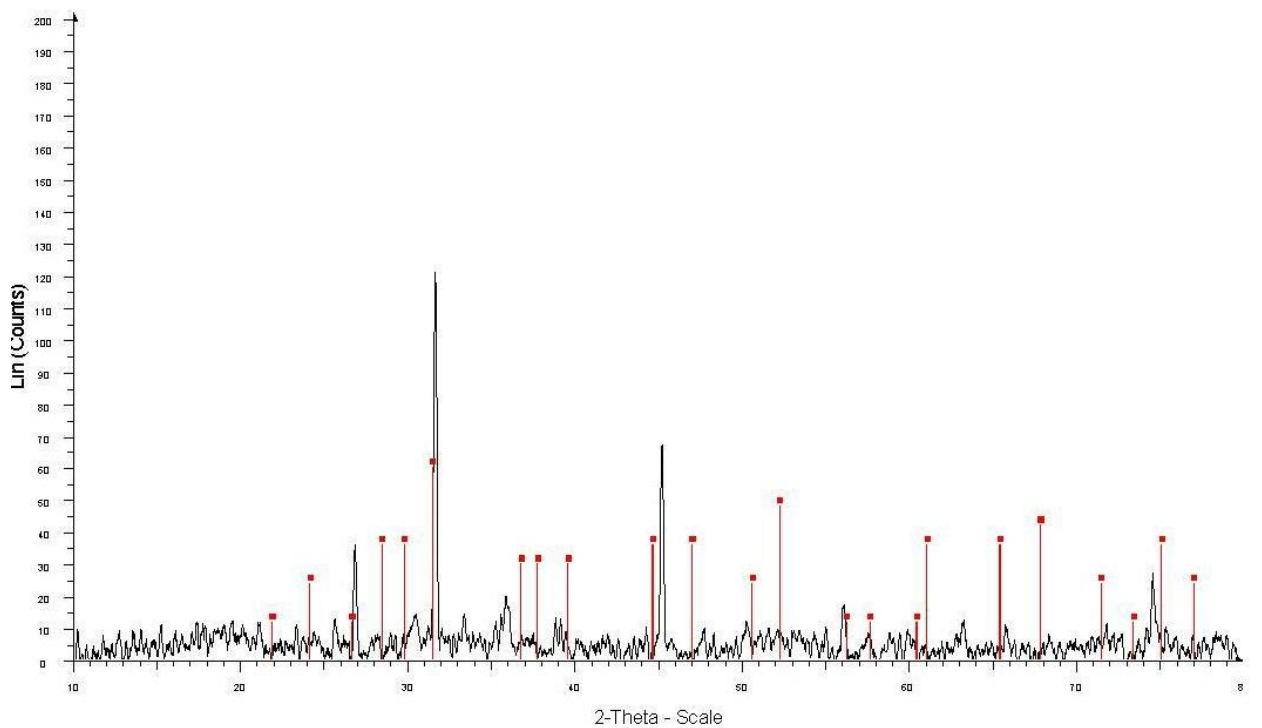
รูปที่ ข12 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Gehlenite)



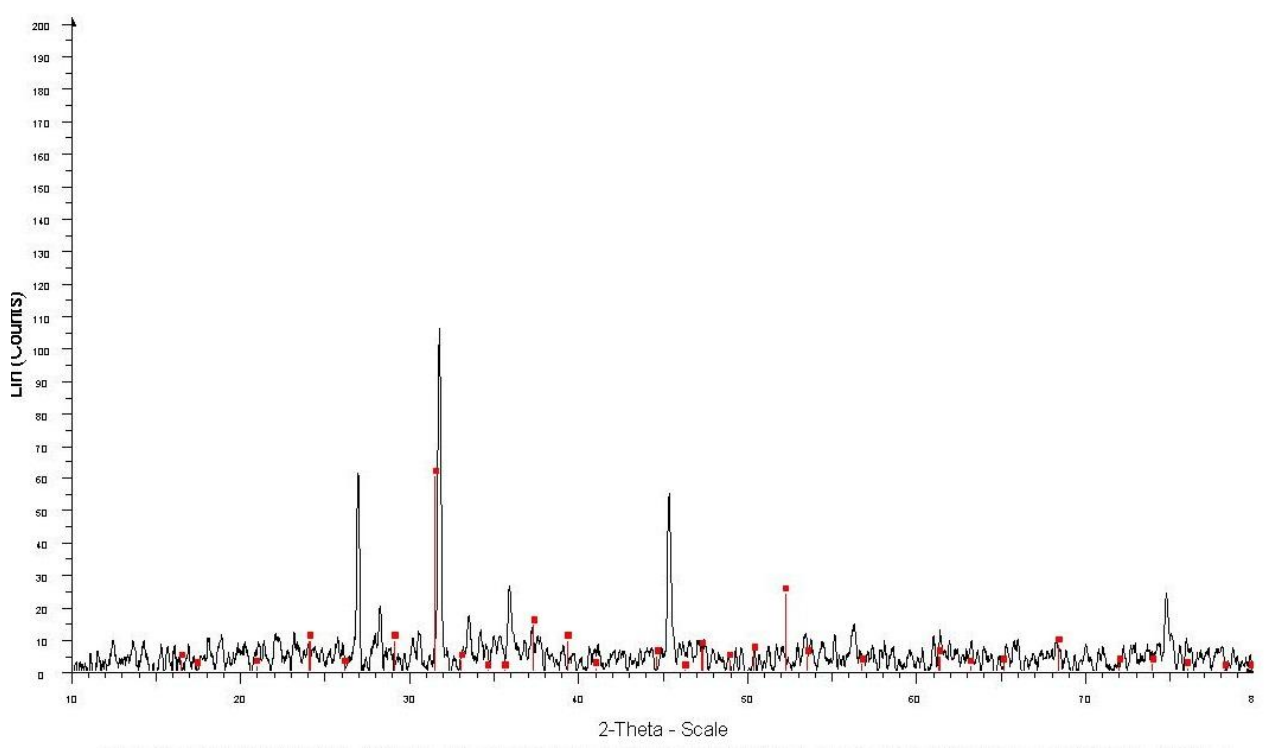
รูปที่ ข13 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Khmaralite)



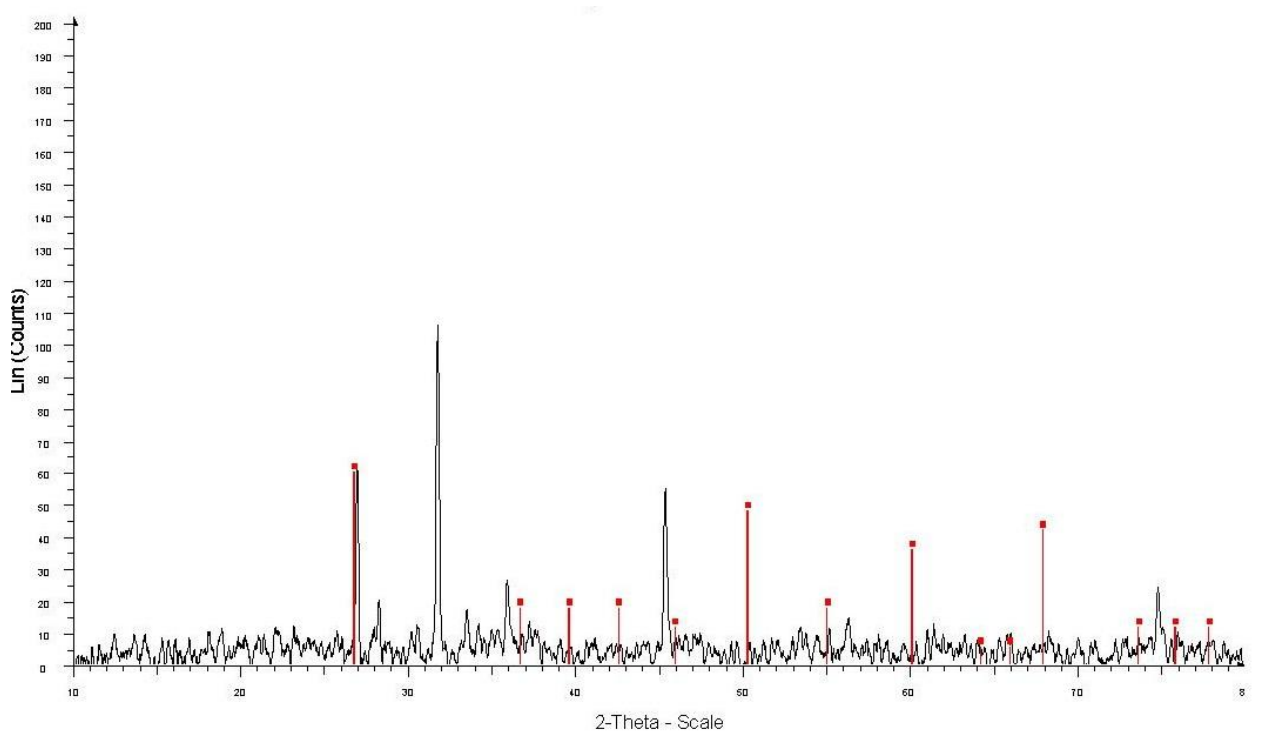
รูปที่ ข14 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอร์ตซ์)



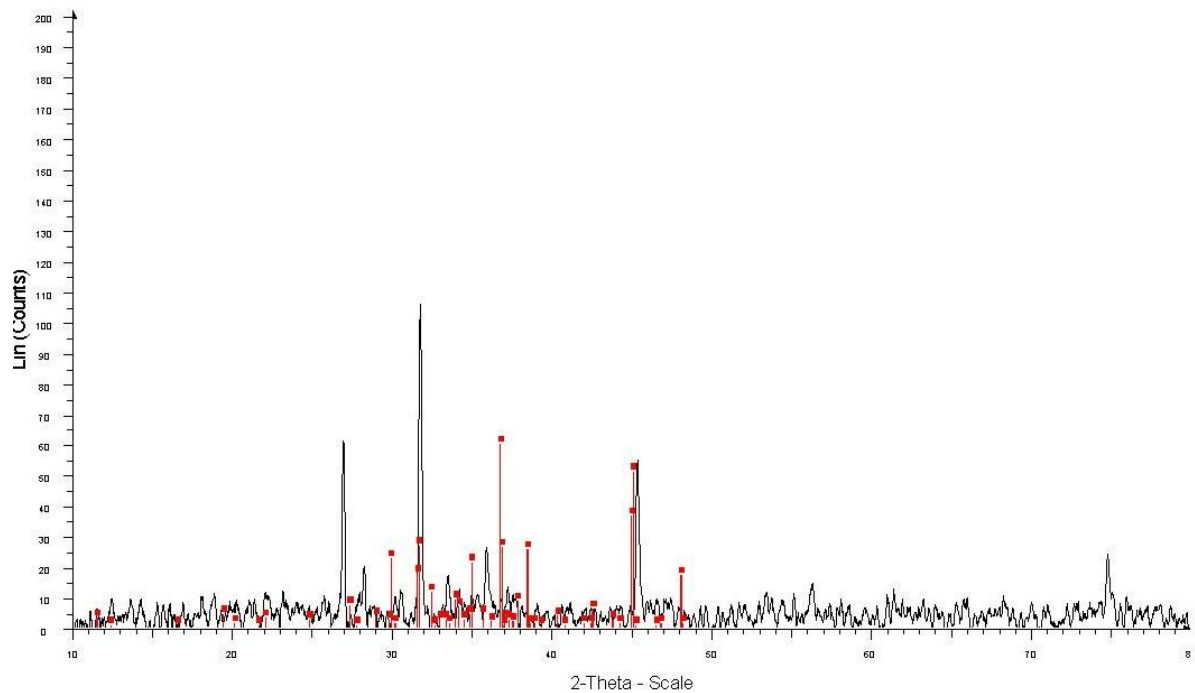
รูปที่ ข15 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่อะเคอร์มาไนต์)



รูปที่ ข16 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่เกห์เลไนต์)

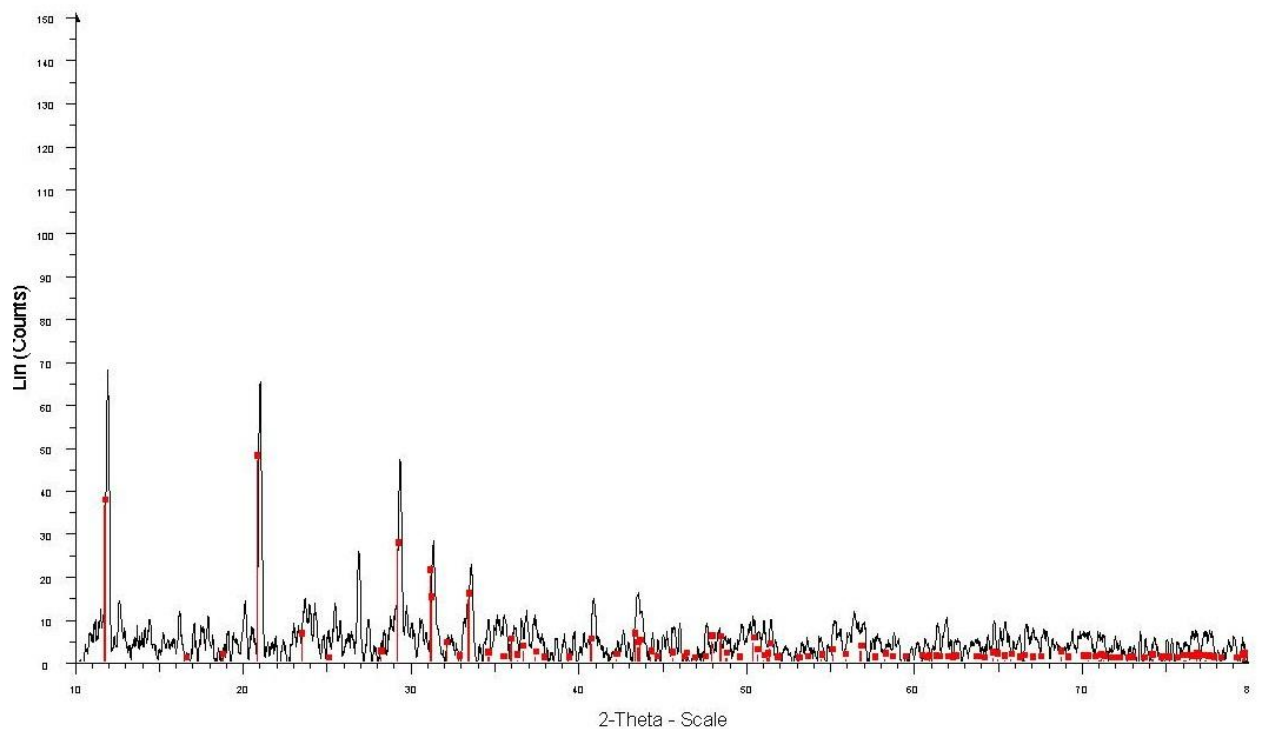


รูปที่ ข17 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอร์ตซ์)

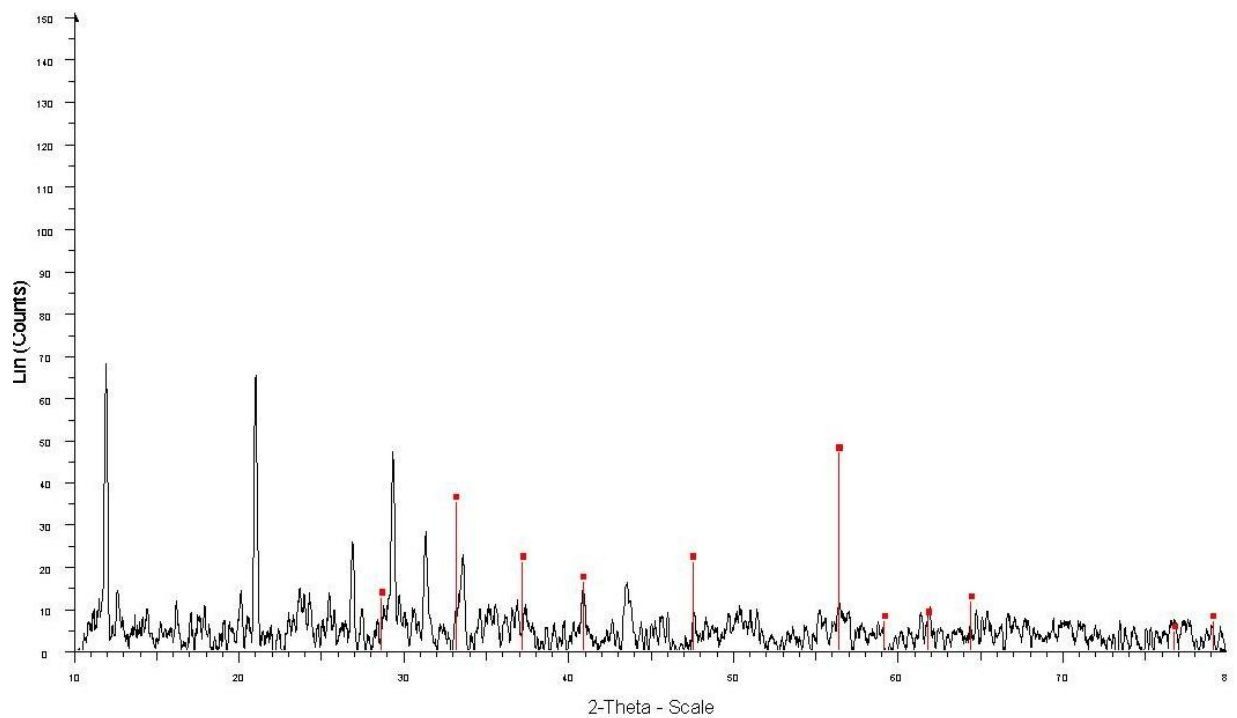


รูปที่ ข18 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Khmaralite)

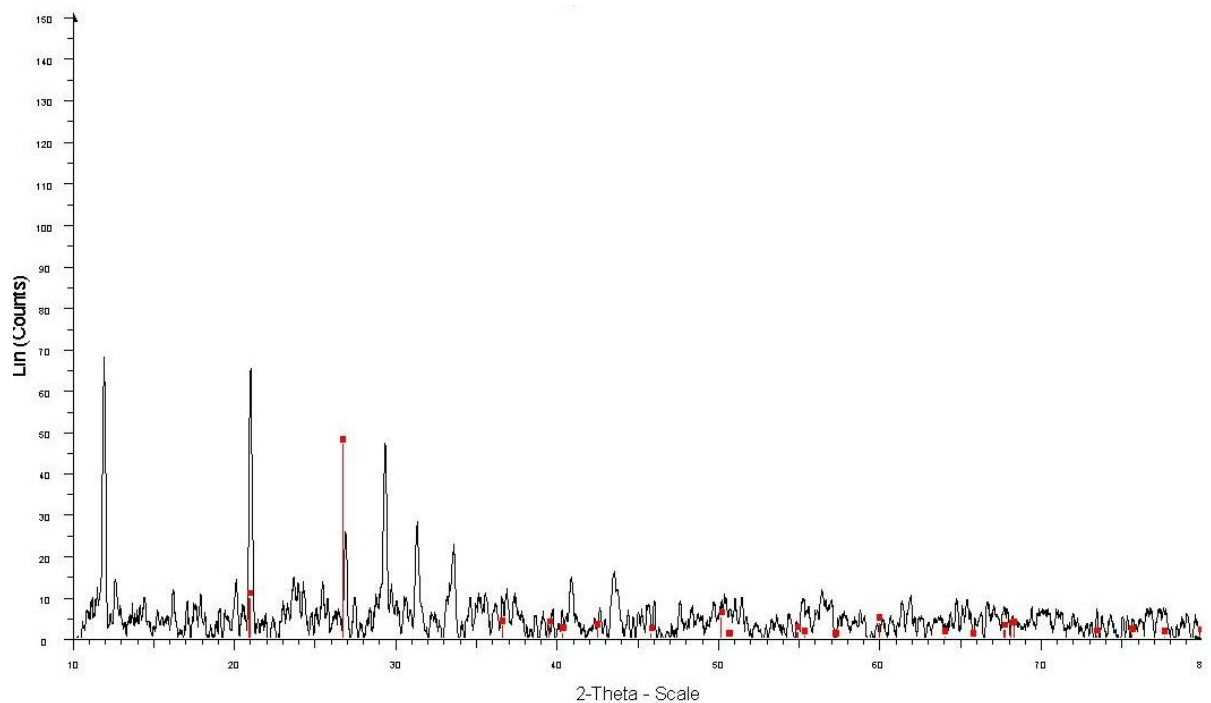
1.2 ตัวอย่างถ่านหิน K2 (ค่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 15.24)



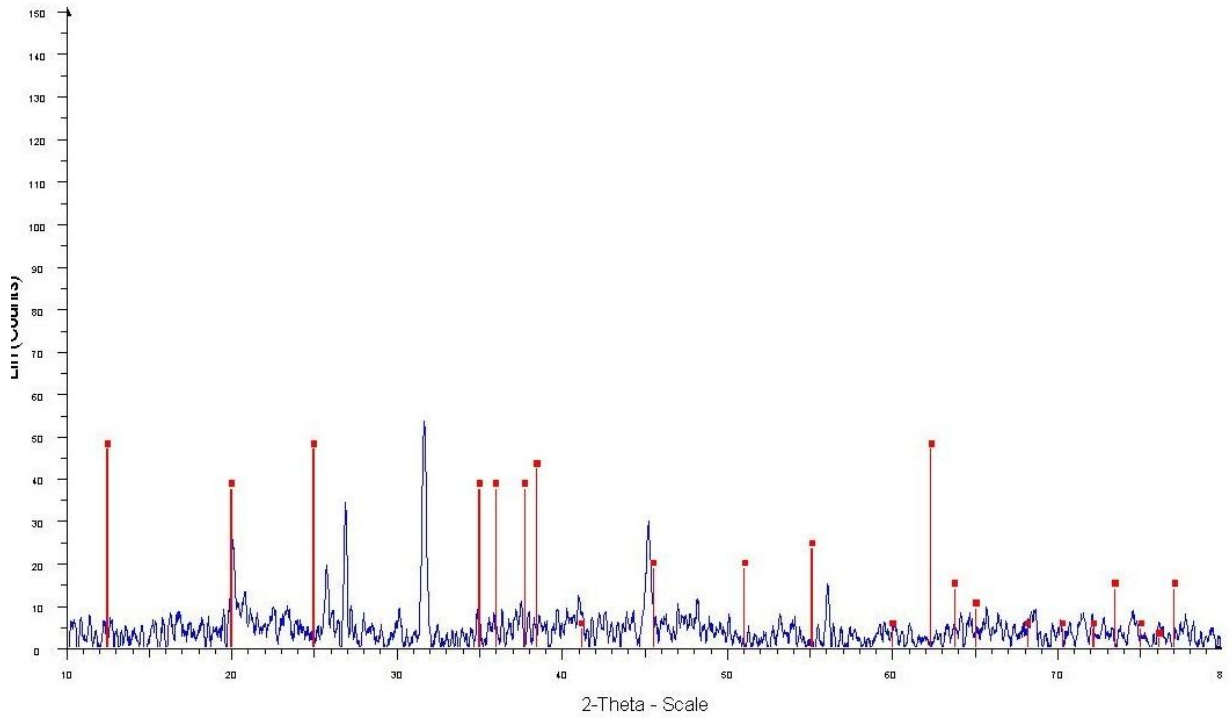
รูปที่ ข19 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 ก่อนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ไพไรต์)



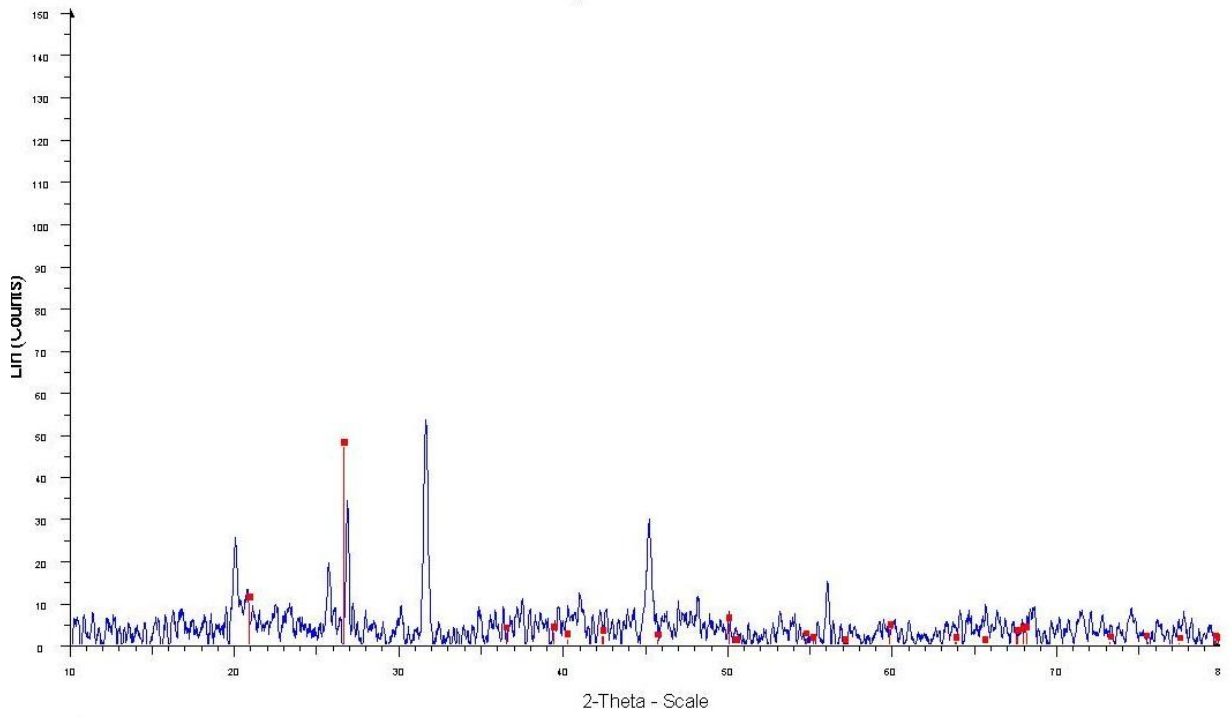
รูปที่ ข20 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 ก่อนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่แคลิไนต์)



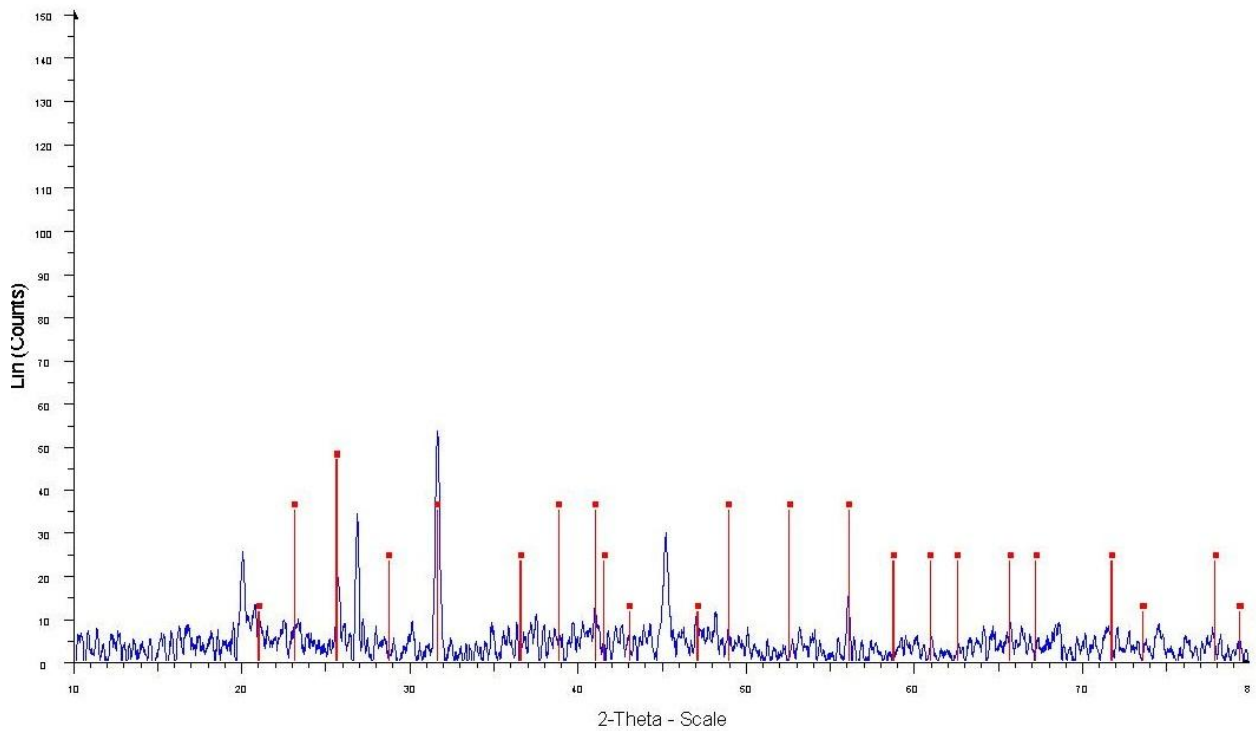
รูปที่ ข21 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 ก่อนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอร์ตซ์)



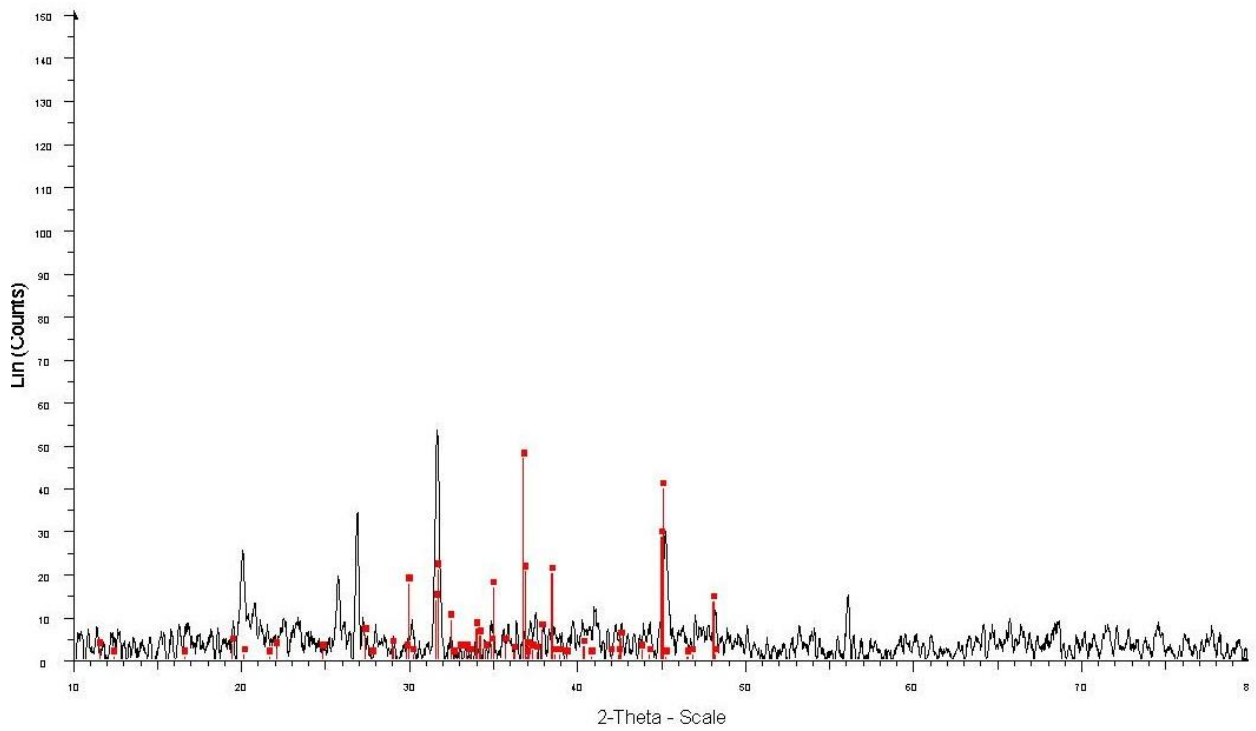
รูปที่ ข22 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่แคลิไนต์)



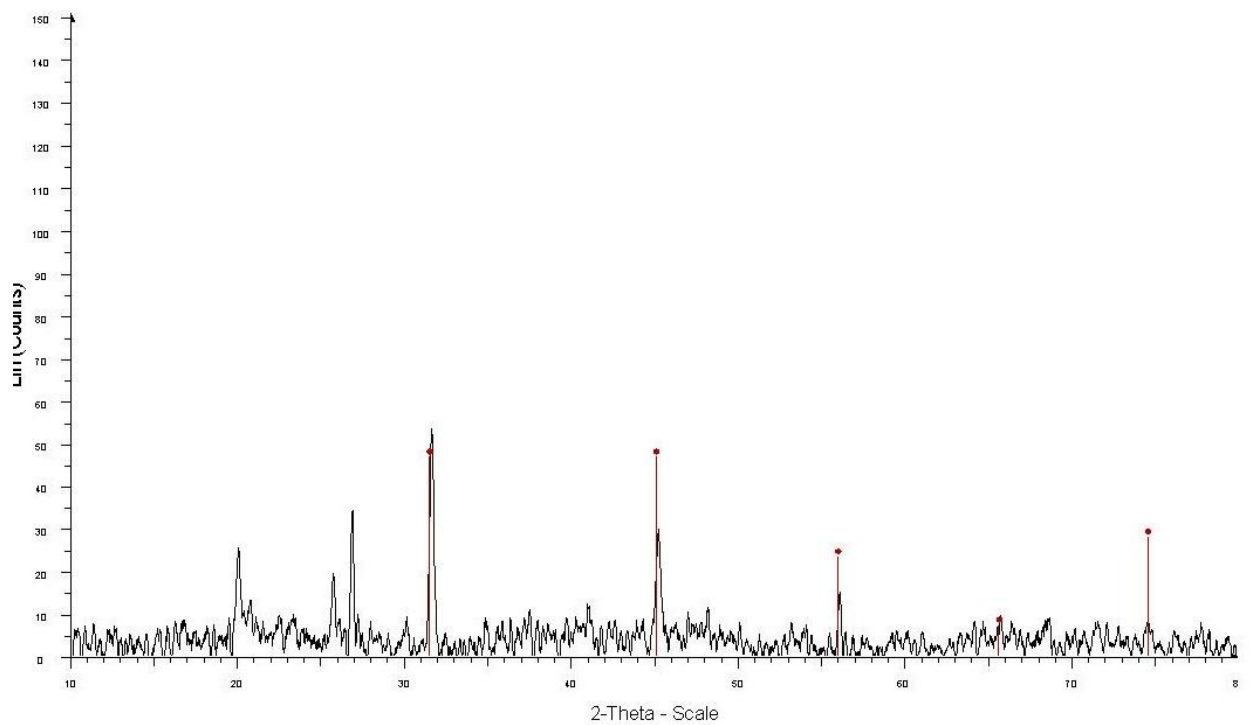
รูปที่ ข23 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอร์ตซ์)



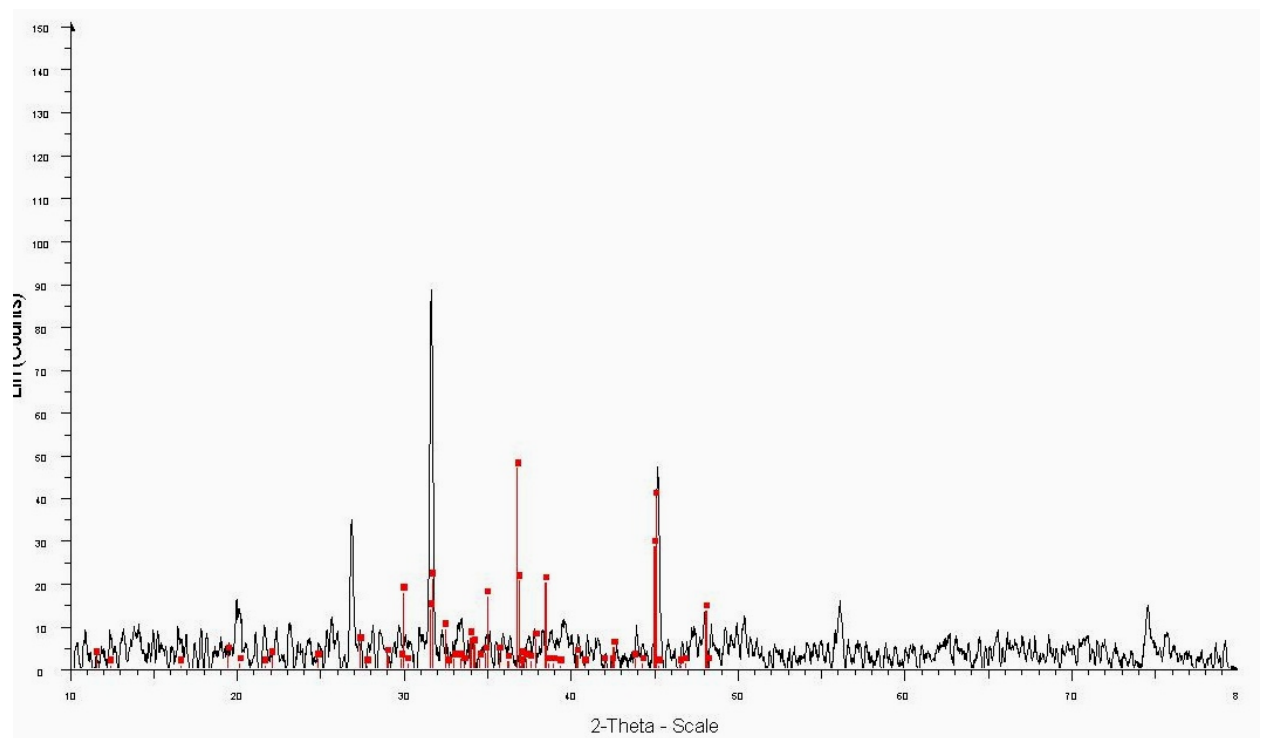
รูปที่ ข24 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่แอนไฮไดรต์)



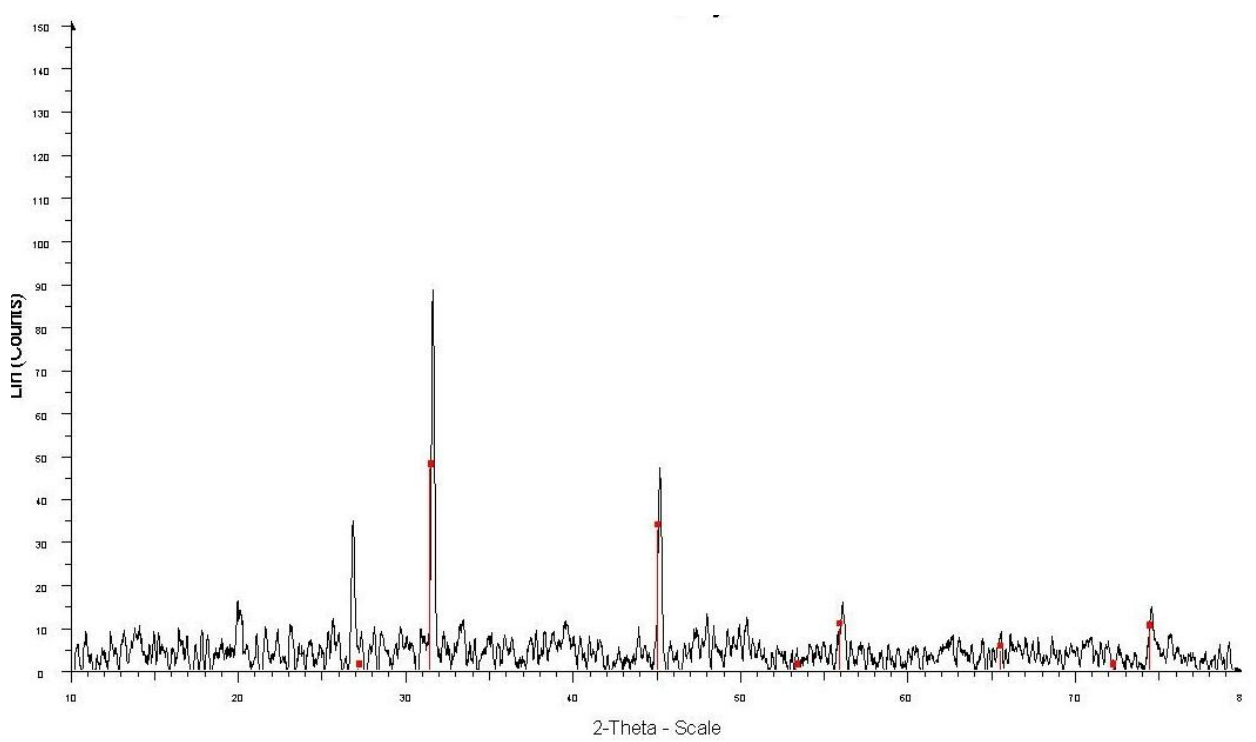
รูปที่ ข25 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Khmaralite)



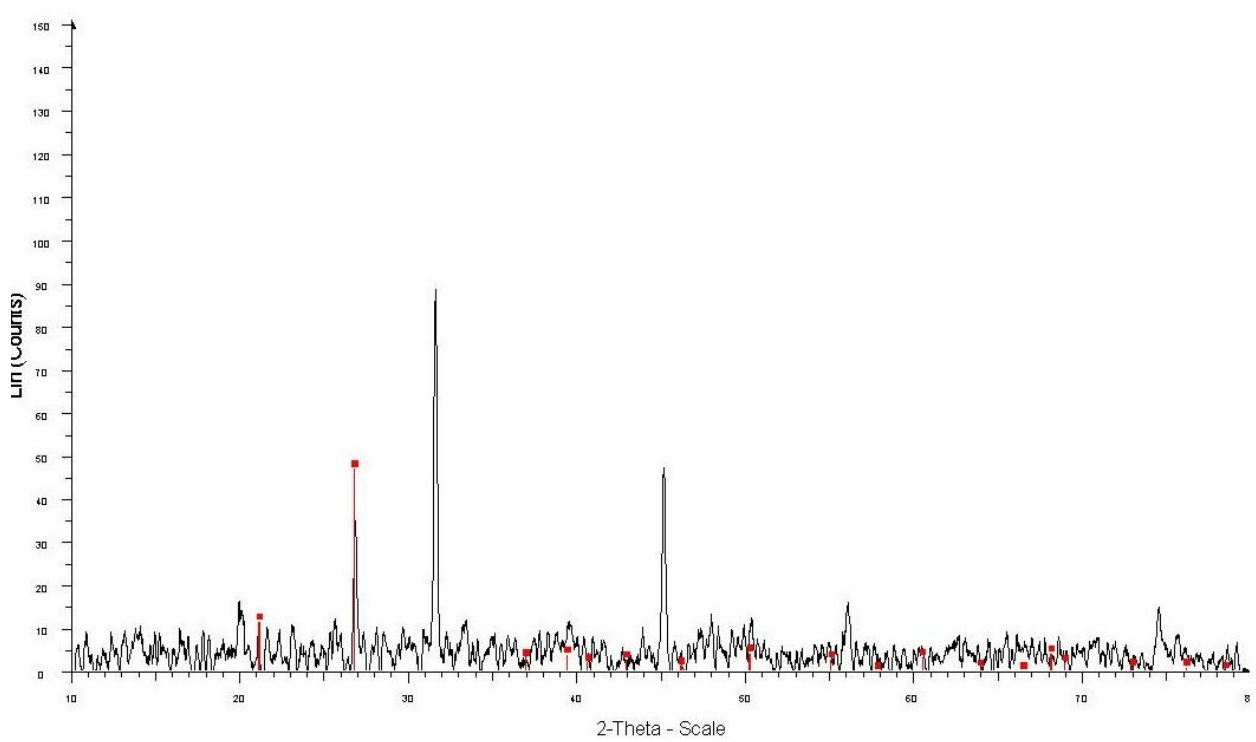
รูปที่ ข26 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Oldhamite)



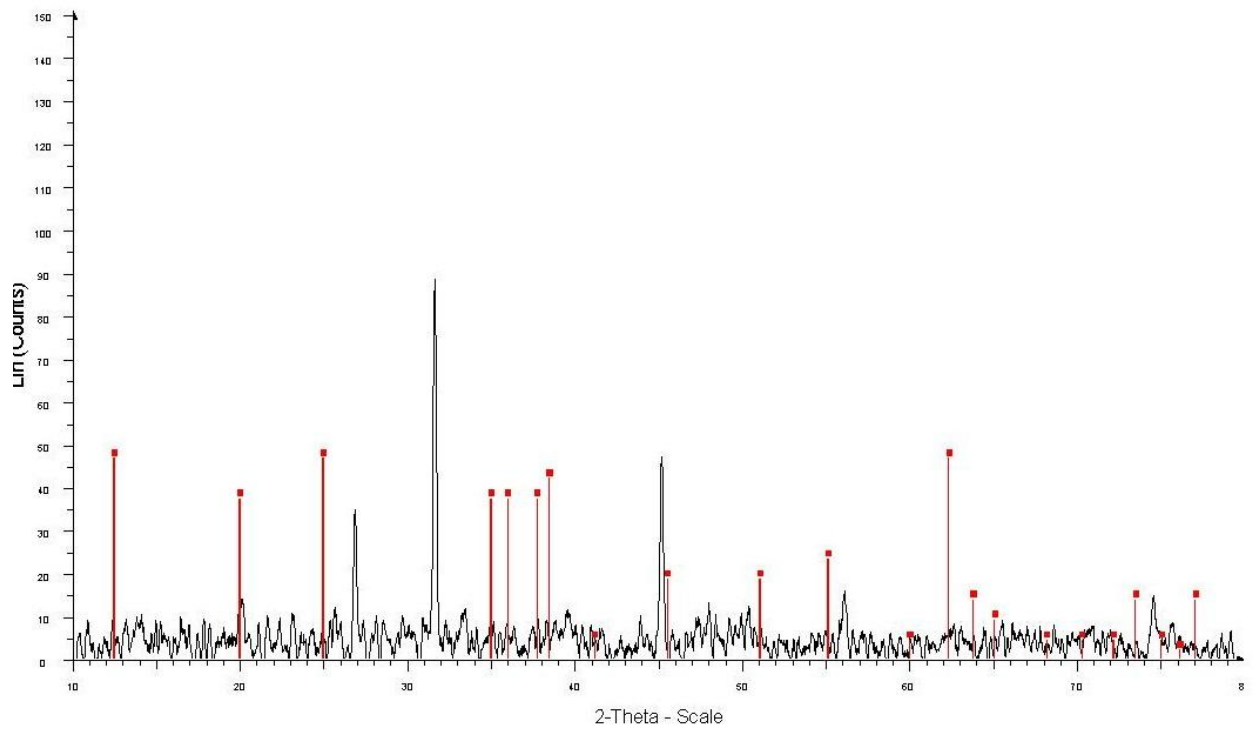
รูปที่ ข27 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Khmaralite)



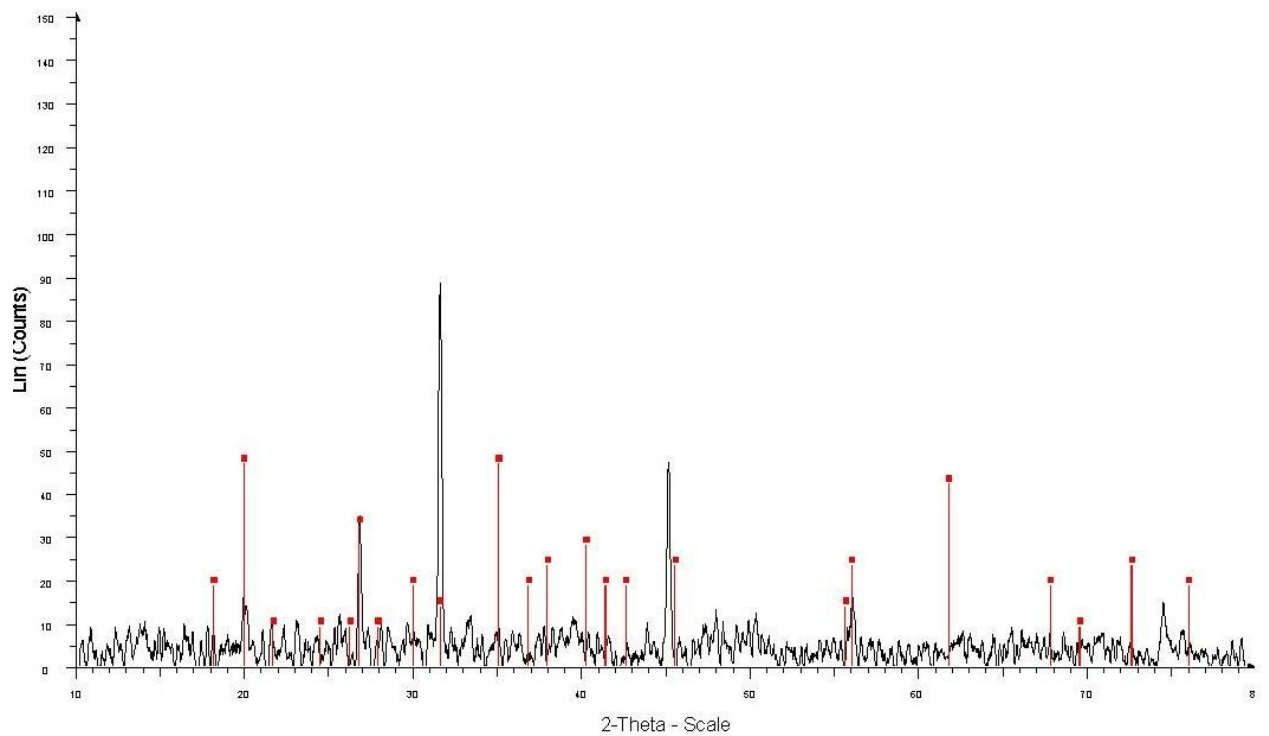
รูปที่ ข28 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Oldhamite)



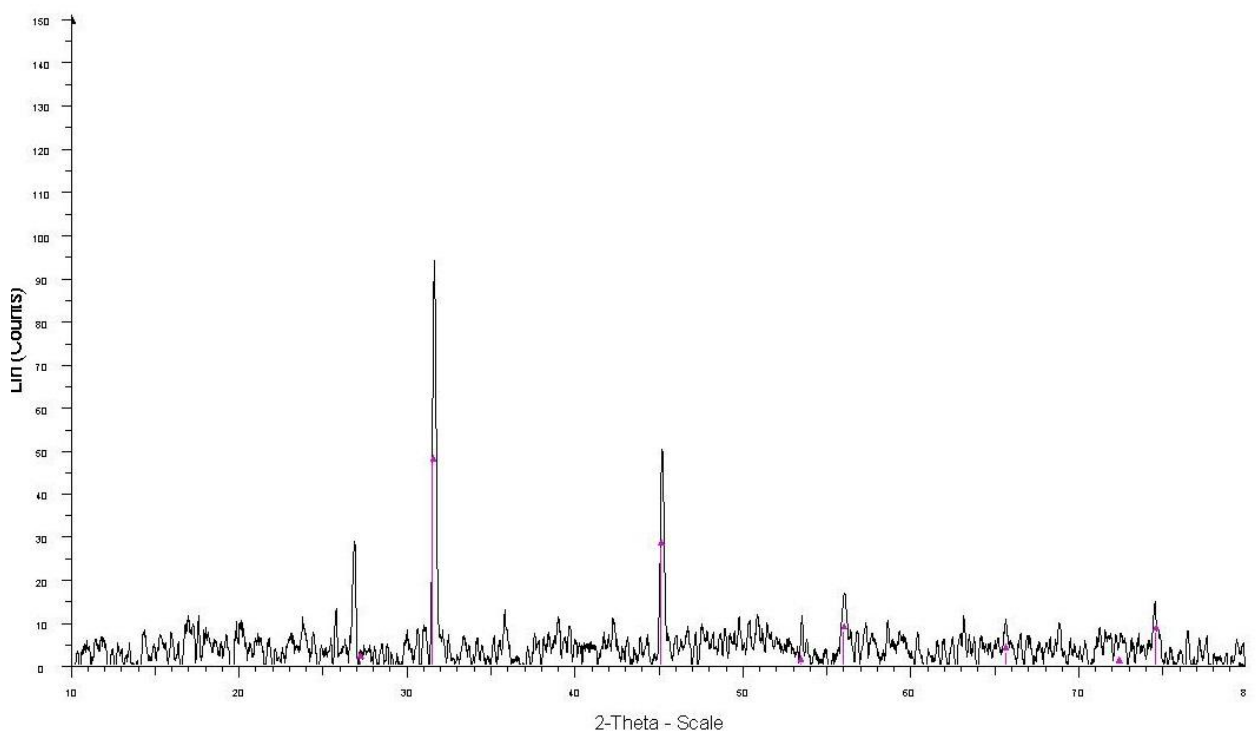
รูปที่ ข29 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Quartz)



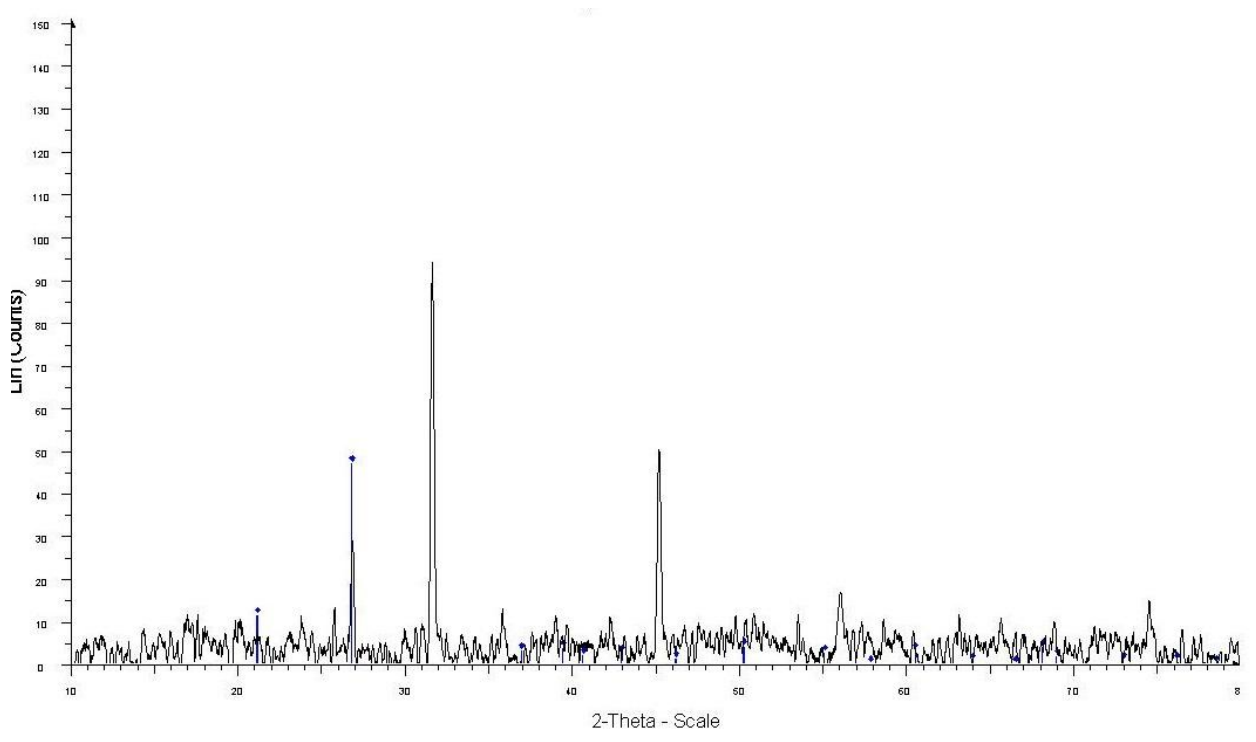
รูปที่ 30 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Kaolinite)



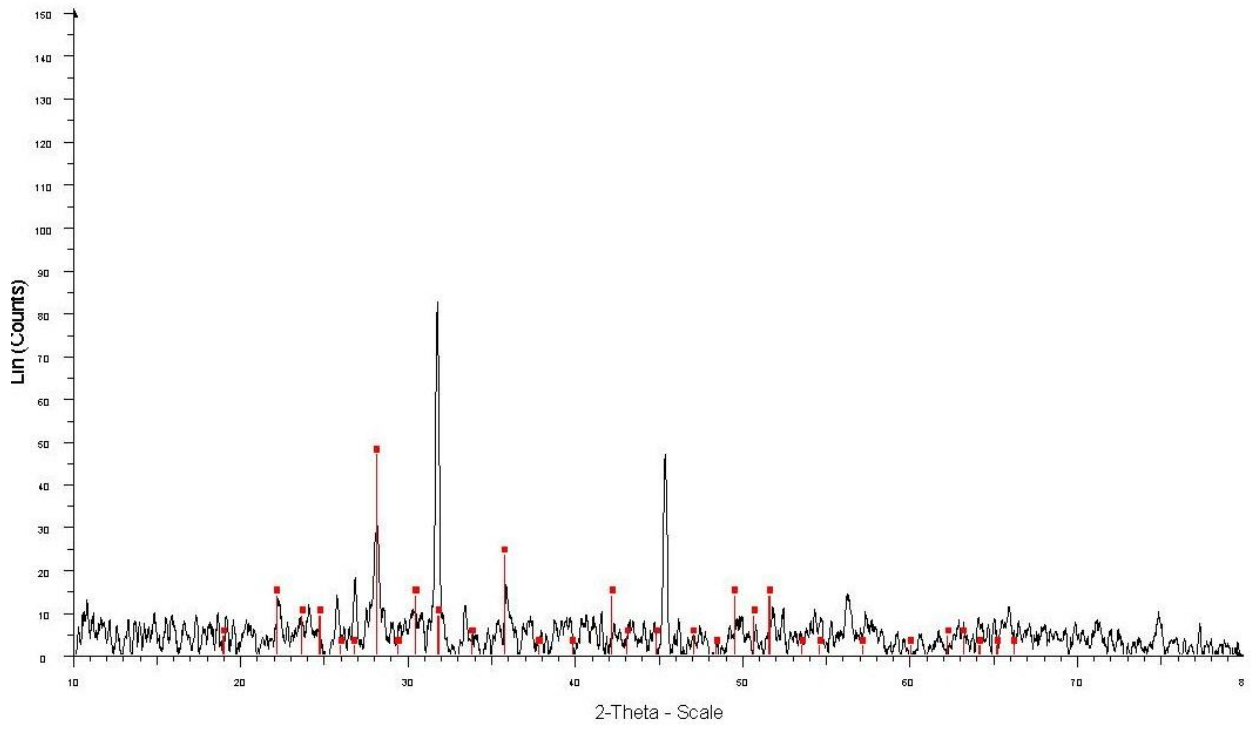
รูปที่ 31 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Illite)



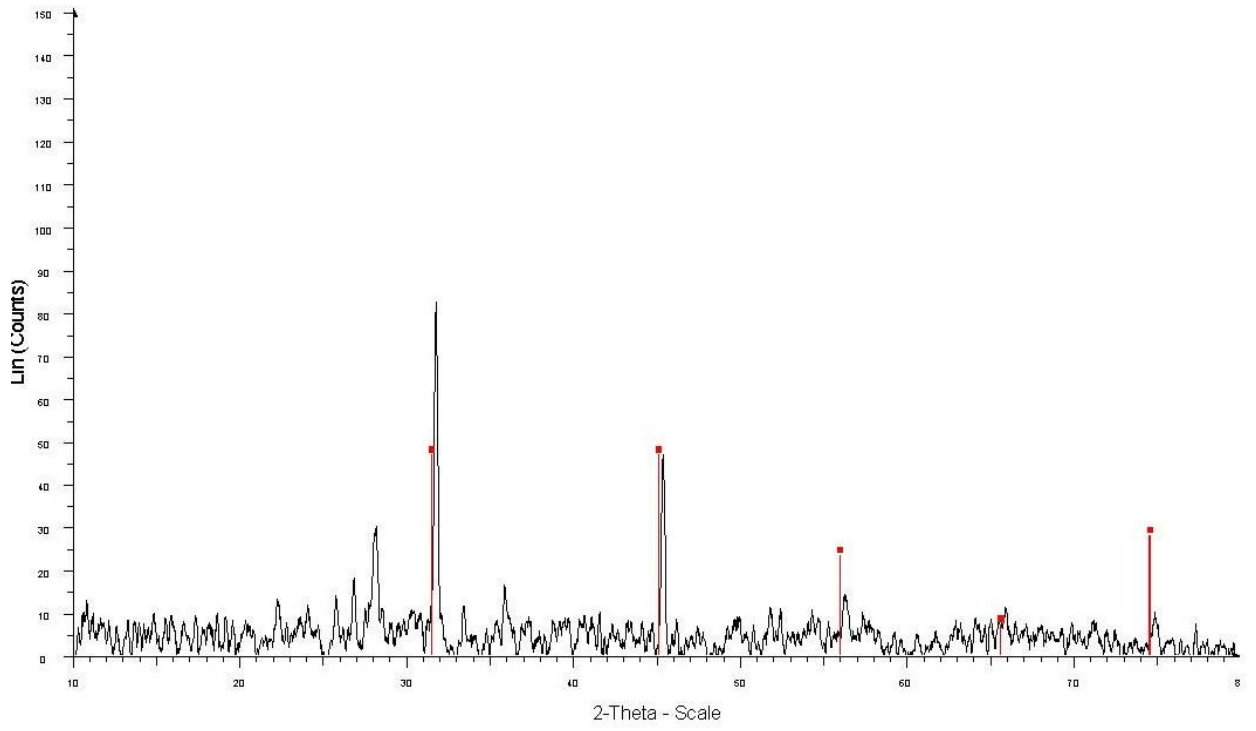
รูปที่ ข32 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Oldhamite)



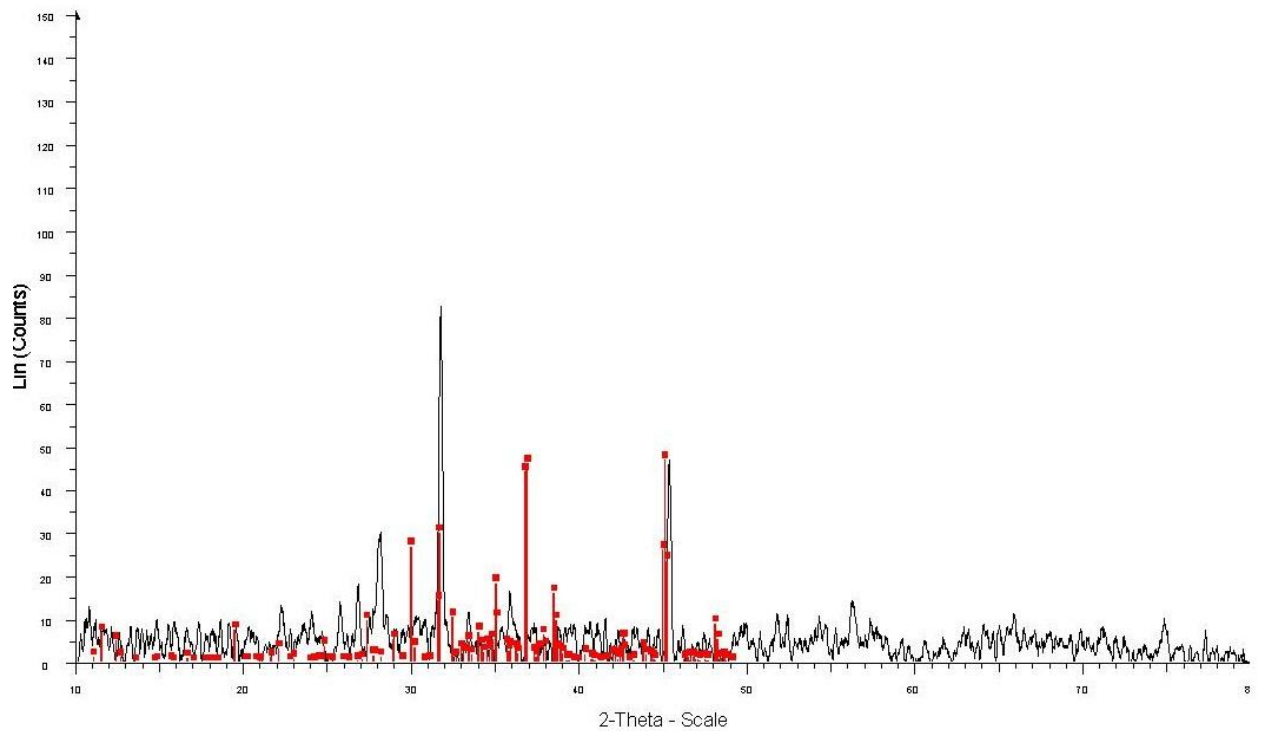
รูปที่ ข33 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Quartz)



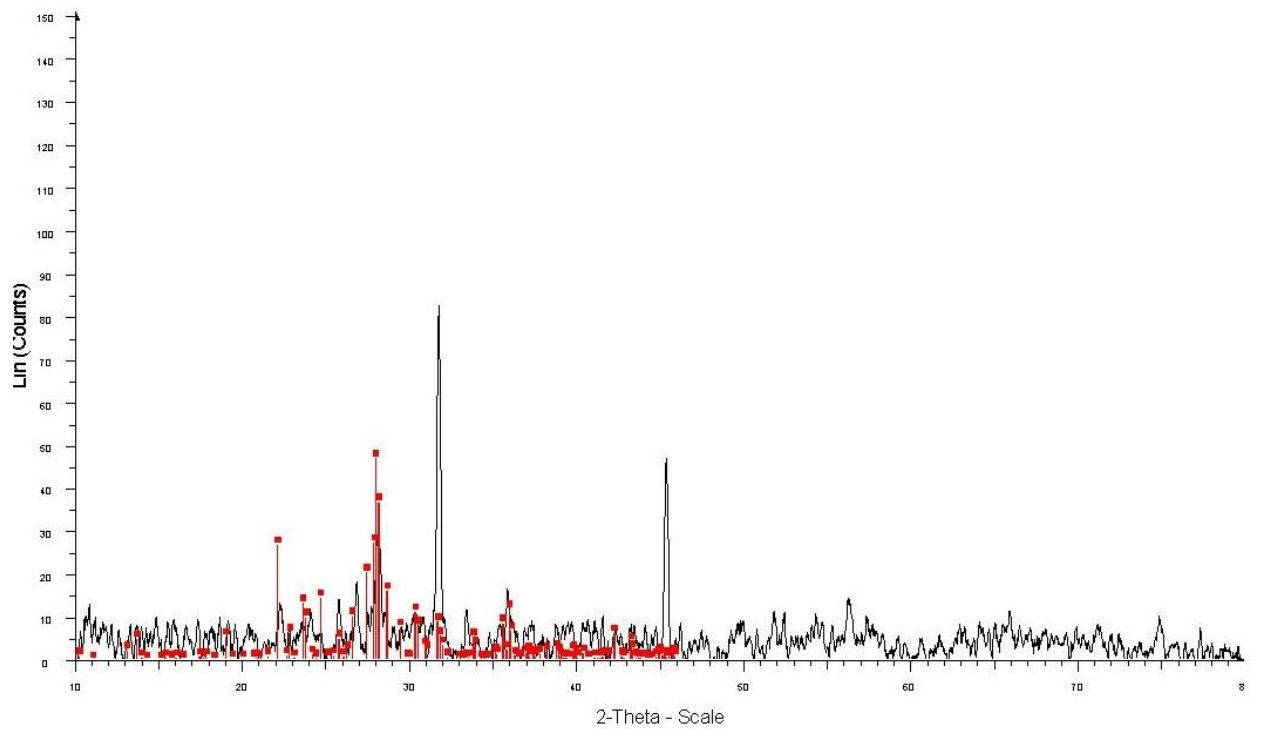
รูปที่ ข34 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Anorthite)



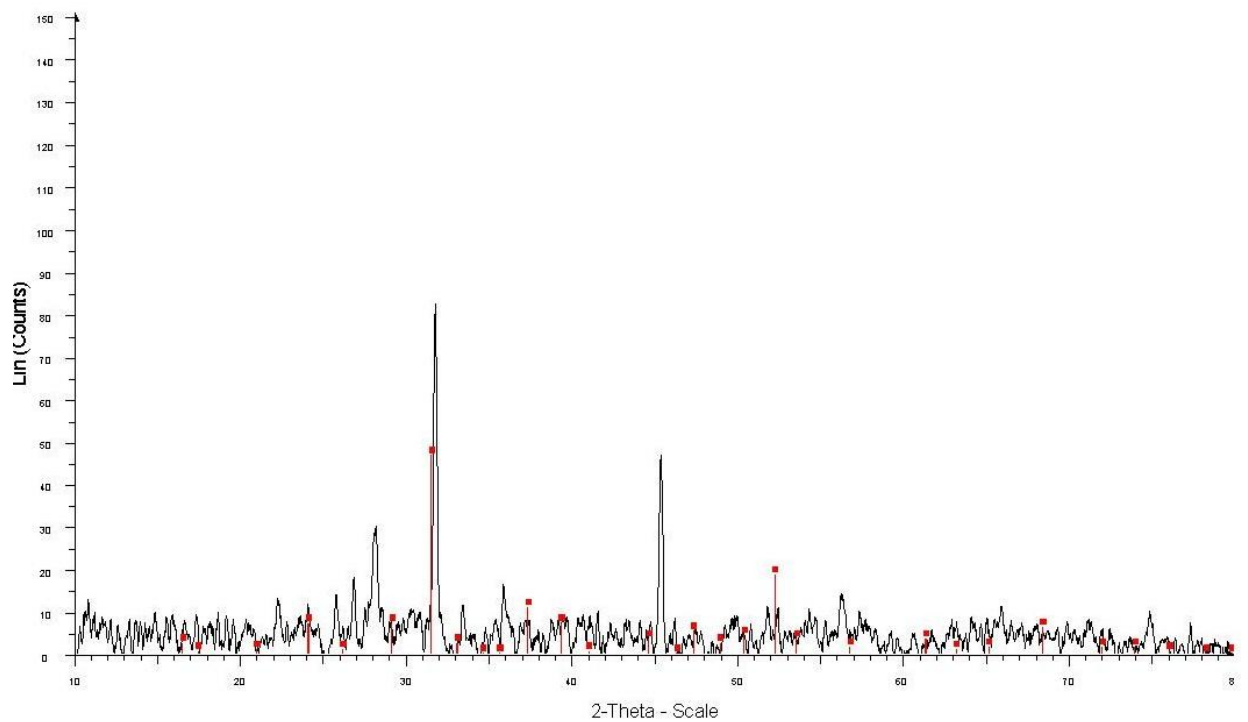
รูปที่ ข35 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Oldhamite)



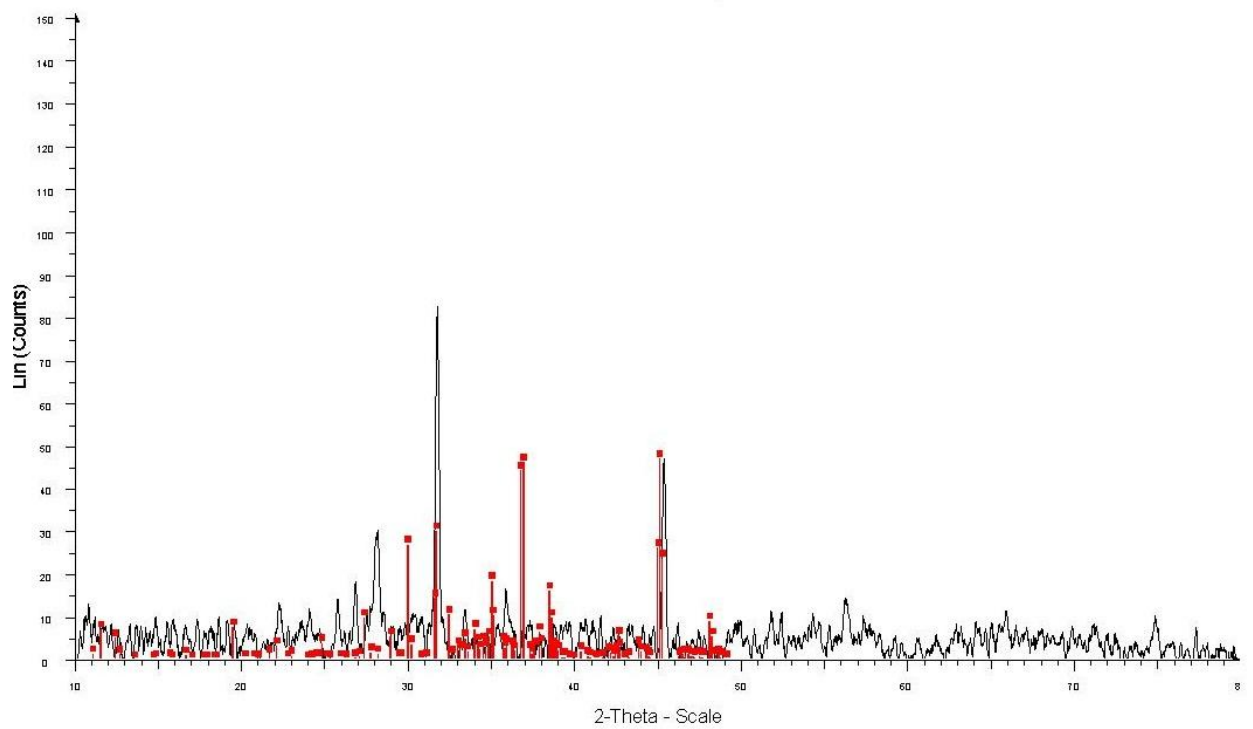
รูปที่ ข36 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Khmaralite)



รูปที่ ข37 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Anorthite)

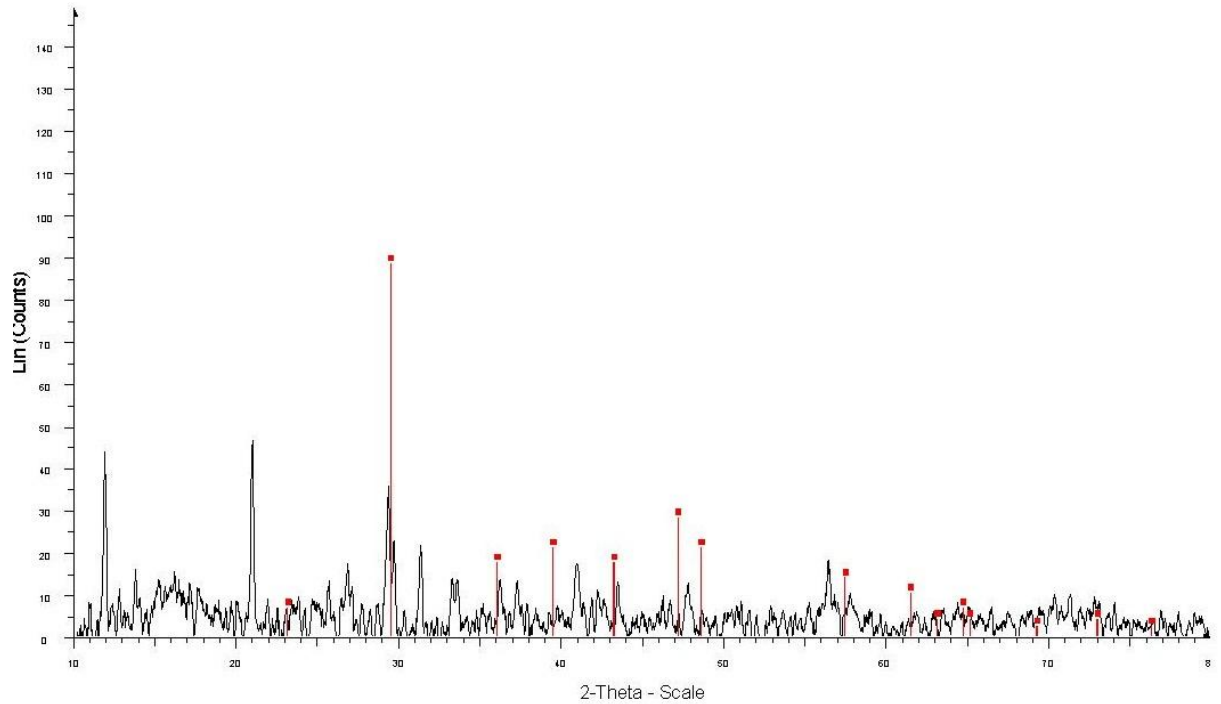


รูปที่ ข38 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Gehlenite)

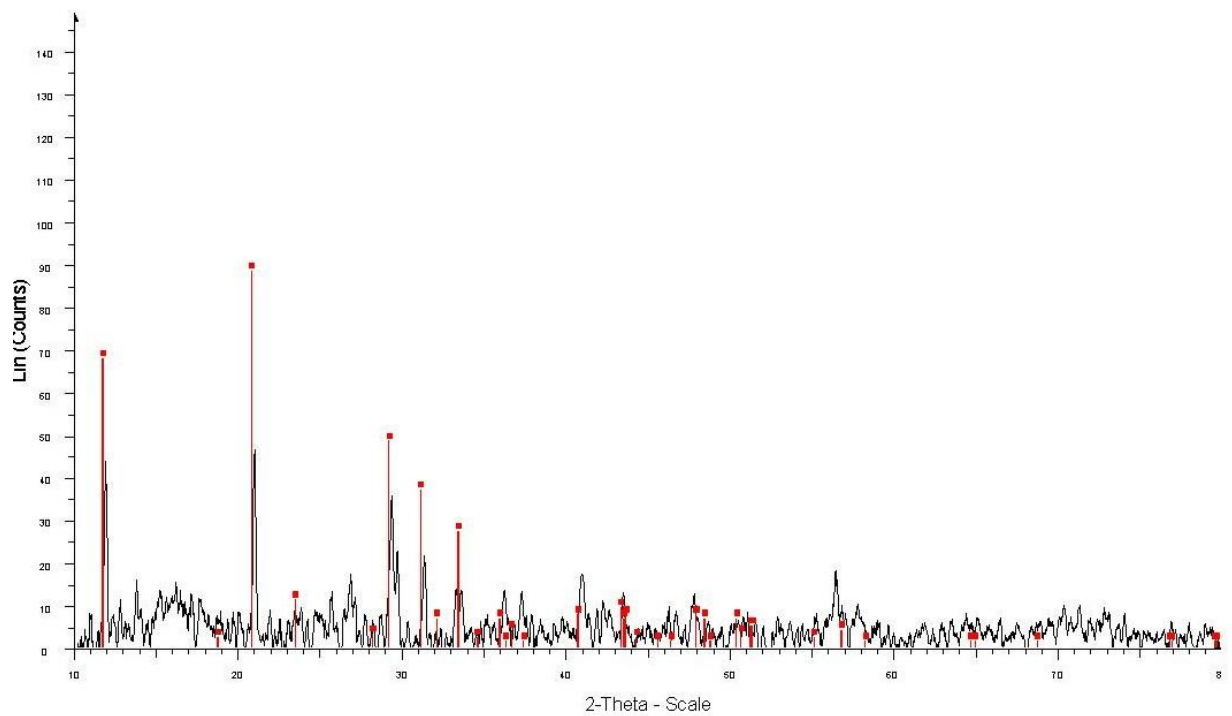


รูปที่ ข39 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ Khmaralite)

1.3 ตัวอย่างถ่านหิน K3 (ค่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 22.88)



รูปที่ ข40 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K3 ก่อนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่แคลไซต์)



รูปที่ ข41 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง K3 ก่อนเผาที่อุณหภูมิต่างๆ
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ยิปซัม)

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินด้วยเทคนิค

Electron Probe Micro Analysis (EPMA)

ตารางที่ ค1 แสดงองค์ประกอบของแก้วถ่านหิน K1 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในรูปของแร่ออกไซด์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	Na ₂ O	MgO	Total	ความน่าจะเป็น ของชนิดแร่
600	32.993	51.673	0.539	8.884	1.513	4.398	100	meta-Kaolinite
	23.45	36.881	12.184	20.351	1.673	5.461	100	meta-Kaolinite
	23.33	34.251	19.448	6.81	0.505	15.657	100	meta-Kaolinite
	20.61	38.138	16.018	15.971	1.463	7.799	100	Magnesium Ferrous Aluminum
	14.754	59.736	4.382	8.714	1.648	10.764	100	Quartz
700	32.661	11.06	5.041	20.318	5.408	25.512	100	Magnesium Ferrous Aluminum
	16.214	2.717	1.078	49.989	2.133	27.869	100	Magnesium Ferrous Aluminum
	13.772	9.015	0.782	55.639	1.631	19.162	100	Magnesium Ferrous Aluminum
	14.198	0	1.999	46.705	0.5	36.598	100	Magnesium Ferrous Aluminum

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	Na ₂ O	MgO	Total	ความน่าจะเป็น ของชนิดแร่
700	4.298	5.402	58.66	3.35	0.201	1.092	100	Anhydrite
	0.381	0.364	98.553	0.602	0.034	0.065	100	Anhydrite
	0.571	0.365	98.271	0.642	0.029	0.123	100	Anhydrite
	0.026	99.745	0.035	0.193	0	0.001	100	Quartz
	4.295	5.402	85.66	3.35	0.201	1.092	100	Calcium Oxide
	0.381	0.364	98.553	0.602	0.034	0.065	100	Calcium Oxide
800	21.798	14.694	2.219	30.07	1.285	29.934	100	Magnesium Ferrous Aluminum
	19.99	0.071	3.233	39.149	1.45	36.106	100	Magnesium Ferrous Aluminum
	5.007	6.968	84.513	2.528	0.04	0.943	100	Anhydrite
900	26.388	36.507	2.433	29.678	1.509	3.486	100	Magnesium Ferrous Aluminum

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	Na ₂ O	MgO	Total	ความน่าจะเป็น ของชนิดแร่
900	22.734	34.588	25.718	7.231	0.903	8.825	100	Anorthite
	15.849	18.191	0.614	48.503	1.410	15.432	100	Magnesium Ferrous Aluminum
	23.468	36.574	0.747	28.524	1.724	8.963	100	Mullite
1,000	27.541	28.735	16.298	12.731	0.687	14.008	100	Anorthite
	19.234	17.297	2.65	35.572	3.394	21.853	100	Magnesium Ferrous Aluminum
	21.695	29.403	1.006	35.881	2.21	9.805	100	Magnesium Ferrous Aluminum
1,100	23.157	33.752	21.899	9.286	0.501	11.405	100	Anorthite
	20.085	29.465	20.986	10.148	0.721	18.596	100	Anorthite
	1.871	2.88	89362	4.35	0.06	1.218	100	Gehlenite
	24.362	19.394	14.963	14.406	0.556	26.319	100	Magnesium Ferrous Aluminum

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	Na ₂ O	MgO	Total	ความน่าจะเป็น ของชนิดแร่
1,100	21.275	16.706	3.279	44.646	0.548	13.545	100	Magnesium Ferrous Aluminum

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกณัฐ พัฒราช เกิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนวัดอมรินทราราม และระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสวนกุหลาบ - วิทยาลัย ระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปัจจุบันศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ - มหาวิทยาลัย