

การศึกษาปัจจัยที่ควบคุมการเกิดตะกอนในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ



นาย พิธา ศรีบุญศรีดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY OF FACTORS CONTROLLING SLAG FORMATION IN BOILER OF MAE MOH  
POWER PLANT



Mr.Pitha Sribuddee

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

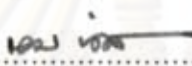
Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University


หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาปัจจัยที่ควบคุมการเกิดตะกอนในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ
โดย	นายพิธา ศรีบุญยดี
สาขาวิชา	วิศวกรรมทรัพยากรธรณี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ มีชำนะ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ภูวิจิตร

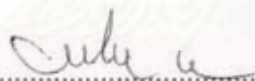
---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

  
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศhiratวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวิตย์ วิวรรณะเดช)

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

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ภูวิจิตร)

  
.....กรรมการนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เทียนไชย ต้นไทย)

ศูนย์วิทยาศาสตร์ทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พินิจ ศิริบุญยดี : การศึกษาปัจจัยที่ควบคุมการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่  
 เมาะ. (STUDY OF FACTORS CONTROLLING SLAG FORMATION IN BOILER  
 OF MAE MOH POWER PLANT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ภิญโญ มีชำนะ,  
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร.สุรพล ภูวิจิตร, 94 หน้า.

ตะกรัน (Slag) ที่เกิดขึ้นในโรงไฟฟ้าแม่เมาะสร้างปัญหาในการผลิตกระแสไฟฟ้าอย่าง  
 มากเนื่องจากการที่มีตะกรันไปติดอยู่ในผนังเตาของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้า ซึ่งสาเหตุหลักที่  
 ก่อให้เกิดตะกรันคือ ด้านหินที่มีปริมาณร้อยละของ CaO ที่อยู่ในช่วง 23-35% การทดลองนำเอา  
 ตัวอย่างด้านหินจำนวนสามตัวอย่าง ซึ่งมีค่าปริมาณร้อยละของ CaO แตกต่างกันคือ ตัวอย่างที่  
 มีค่า CaO ต่ำ (2.24%) ค่า CaO ปานกลาง (27.34%) และ ตัวอย่างที่มีค่า CaO สูง (31.81%)  
 นำไปหาค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอม (Initial Deforming Temperature: IT) ของแก้ว พบว่า  
 อุณหภูมิการหลอมของตัวอย่าง ที่มีค่า CaO ปานกลาง มีค่า IT = 1,197 °C (อุณหภูมิต่ำสุด)ซึ่ง  
 ต่ำกว่าอุณหภูมิในเตาเผาหม้อไอน้ำ (1,200°C) ตัวอย่างที่มีค่า CaO สูง มีค่า IT = 1,301°C และ  
 ตัวอย่างที่มีค่า CaO ต่ำ จะมีค่า IT มากกว่า 1,500°C หลังจากนั้นนำตัวอย่างด้านหินทั้งสามมา  
 เผาที่อุณหภูมิ 800°C, 900°C, 1,000°C, 1,100°C และ 1,200°C แล้วนำแก้วที่ได้มาวิเคราะห์ด้วย  
 วิธี X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อหาชนิดของแร่ในแต่ละอุณหภูมิของตัวอย่าง พบว่าเมื่อเผา  
 ตัวอย่างที่มีค่า CaO ปานกลางที่อุณหภูมิ 1,100°C เกิดแร่เกห์เลไนต์ (Gehlenite) ซึ่งเป็นแร่  
 ชนิดเดียวกันกับที่พบในตัวอย่างตะกรันที่ได้เก็บตัวอย่างมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจำนวน 3  
 ตัวอย่าง จากนั้นได้นำตัวอย่างด้านหินที่ผสมกันระหว่าง ตัวอย่างที่มีค่า CaO ต่ำ กับตัวอย่างที่มี  
 ค่า CaO ปานกลาง ในอัตราส่วนต่าง ๆ นำไปเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันพบว่า ตัวอย่างด้านหิน  
 ผสมระหว่าง ที่มีค่า CaO ต่ำ 20% กับ ที่มีค่า CaO ปานกลาง 80% (IT = 1,322°C) เกิดแร่  
 เลไนต์ที่อุณหภูมิระหว่าง 800°C - 1,100°C และเมื่อนำตัวอย่างแก้วมาหาองค์ประกอบออกไซด์  
 ได้แก่ปริมาณร้อยละของ SiO<sub>2</sub>, CaO และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มาพล็อตลงใน Ternary Phase Diagram  
 พบว่าตัวอย่างที่มีค่า CaO ปานกลางและตัวอย่างด้านหินผสมดังกล่าวข้างต้น อยู่ในบริเวณของ  
 แร่เกห์เลไนต์ที่มีอุณหภูมิของการหลอมตัวต่ำ อาจสรุปได้ว่าการควบคุมมีให้ปริมาณ SiO<sub>2</sub>, CaO  
 และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในแก้วด้านหินเพื่อมิให้อยู่ในบริเวณของการหลอมตัวต่ำ (Low-Temperature  
 Eutectic Region) จะป้องกันการเกิดตะกรันได้

ภาควิชา.....วิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม..ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมทรัพยากรธรณี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา..2552.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....



## 5070592021: MAJOR GEORESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS : SLAG / LIGNITE COAL / ASH COMPOSITION / ASH FUSION / GEHLENITE

PITHA SRIBUDDEE: STUDY OF FACTORS CONTROLLING SLAG FORMATION IN BOILER OF MAE MOH POWER PLANT. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. PINYO MEECHUMNA, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: ASST.PROF. SURAPOL POOVICHIT, Ph.D., 94 pp.

Boiler slagging has been recognized as one of the most troublesome operational problems associated with pulverized coal combustion of Mae Moh power plants. It has been noticed that CaO content in the range of 23-35% of coal ash creates boiler slagging problem. Study of minerals and ash fusion characteristics of three kinds of coal samples namely low CaO (2.24%), medium CaO (27.34%) and high (31.81%) have been conducted. It has been found that Initial Deforming Temperature (IT) of the ash of the three samples respectively are > 1,500°C, 1,197°C and 1,301°C. The IT analyses show 27.34% CaO has the lowest IT (1,197°C) which is lower than minimum temperature in boiler (1,200°C). These samples were put in furnaces to be combusted at 800°C - 1,200°C at 100°C intervals and ashes obtained were analyzed by XRD to identify mineral phases contained in the ashes. Gehlenite has been identified in coal ash (slag) when medium CaO coal was combusted. Boiler slags collected from Mae Moh power plants has also been found to contain gehlenite. Blending of low and medium CaO samples at different proportion has been done and gehlenite has been identified at the temperature between 800°C - 1,000°C in the blended coal samples (especially with 20% low CaO + 80% medium CaO sample). Three oxides namely SiO<sub>2</sub>, CaO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> analyzed in the coal ash plotted into the ternary phase diagram shows that medium CaO sample is in gehlenite area of the diagram which is closed to low – melting eutectic temperature region.

Department :.....Mining and Petroleum Engineering

Student's Signature.....*[Signature]*

Field of Study :....Georesources Engineering.....

Advisor's Signature .....*[Signature]*

Academic Year :.2009.....

Co-Advisor's Signature .*[Signature]*

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ภิญโญ มีชำนะ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพล ภูวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะแนวทางการวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนช่วยเหลือ และคอยกระตุ้นให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวัลย์ วิวรรณะเดช ประธานกรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทียนไชย ต้นไทย กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย และขอขอบพระคุณอ.อุทิศ ทองกลิ้ง และคุณพงศธร รุ่งเจริญ ที่เป็นที่ปรึกษาในด้านเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียมทุกท่านที่อำนวยความสะดวก ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จได้ตามเป้าหมาย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยคุณอำพล กิตติโชติกุล คุณกนิษฐา วงศ์ใหญ่ และเจ้าหน้าที่ท่านอื่นทุกท่านที่ได้สนับสนุนด้านข้อมูลและคำปรึกษาที่เกี่ยวข้องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา และทำที่สุดผู้วิจัยขอขอบคุณ พี่น้องๆ และบุคคลที่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้ ที่ได้สนับสนุนและช่วยเหลือผู้วิจัยตลอดมา

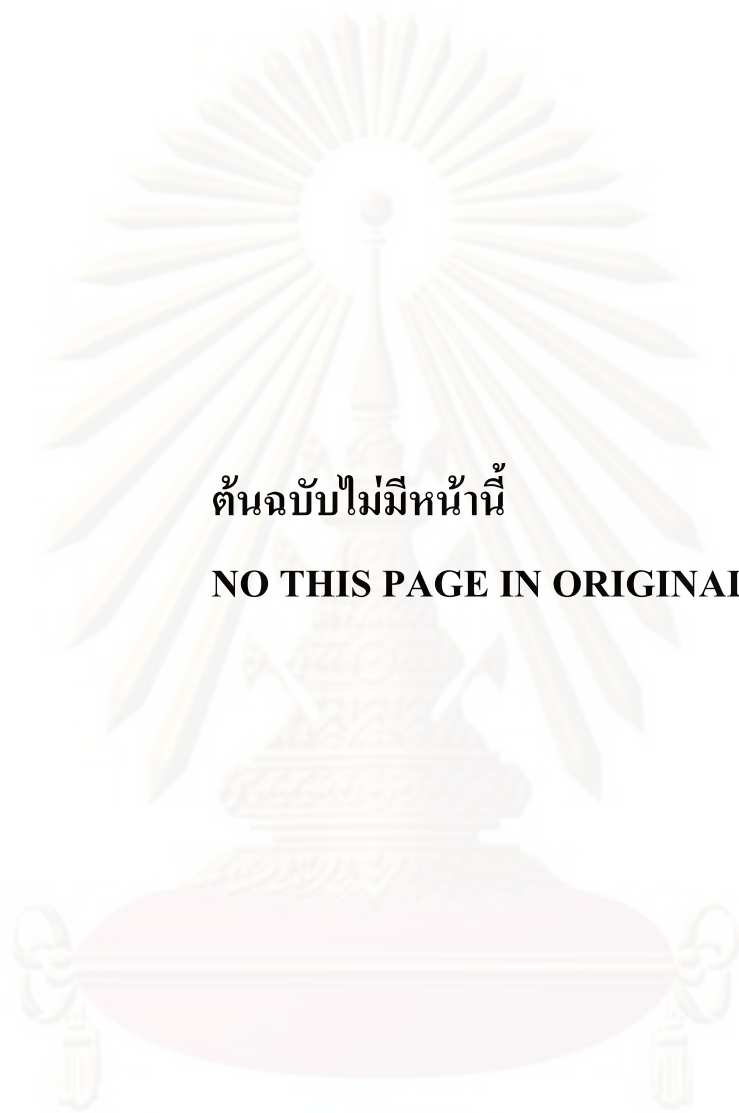
ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 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.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ถ่านหิน.....	4
2.1.1 การเกิดถ่านหิน.....	5
2.1.2 การจำแนกชนิดของถ่านหิน.....	7
2.2 ถ่านหินและลิกไนต์ในประเทศไทย.....	7
2.3 ลักษณะแหล่งถ่านหินแม่เมาะ.....	8
2.3.1 ลักษณะภูมิประเทศ.....	8
2.3.2 ลักษณะธรณีวิทยาทั่วไป.....	9
2.3.3 ลักษณะโครงสร้างธรณีวิทยาของแอ่งแม่เมาะ.....	10
2.3.4 ลำดับชั้นหิน.....	12
2.4 การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหิน.....	13
2.5 ตะกรัน.....	14
2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	28
3.1 แผนการศึกษาวิจัย.....	28
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย.....	28

บทที่	หน้า
3.3 ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
3.3.1 ตัวอย่างถ่านหิน.....	29
3.3.2 ตัวอย่างตะกั่ว.....	32
3.4 ขั้นตอนการทำวิจัย.....	34
3.4.1 การเตรียมและวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน.....	34
3.4.2 การเตรียมและวิเคราะห์ตัวอย่างตะกั่ว.....	36
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	37
4.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)....	37
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการหาอุณหภูมิการหลอมของถ่านหิน.....	37
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กันด้วย เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD).....	38
4.2 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการหาอุณหภูมิการหลอมของถ่านหิน และผล การวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินผสมระหว่าง Q2 และ Q4 ที่ผ่านการเผาที่ อุณหภูมิต่างๆ กันด้วยเครื่อง XRD.....	42
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการหาอุณหภูมิการหลอมของถ่านหิน.....	42
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินผสมระหว่าง Q2 และ Q4 ที่ผ่านการ เผาที่อุณหภูมิต่างๆ กันด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer.....	43
4.3 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างตะกั่วด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD).....	47
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	54
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
รายการอ้างอิง.....	57
ภาคผนวก.....	59
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	94





ต้นฉบับไม่มีหน้านี้

NO THIS PAGE IN ORIGINAL

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	สารประกอบ หรือแร่ ที่อาจเป็นองค์ประกอบอยู่ในถ่านหินลิกไนต์.....	6
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของแร่ของตัวอย่างถ่านหิน I, J และ K.....	19
2.2	ลักษณะของการหลอมตัว ณ อุณหภูมิหนึ่งของตัวอย่าง.....	20
2.3	แสดงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของแร่ (ร้อยละโดยน้ำหนัก), สารอินทรีย์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก), และค่าความร้อนที่สูญเสียไปของตัวอย่างเจ้าจม.....	24
2.4	แสดงอิทธิพลของการเติม CaO ที่ทำให้คุณสมบัติของการหลอมเปลี่ยนไป.....	27
3.1	แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีของซีเมนต์ของตัวอย่างถ่านหิน.....	34
4.1	แสดงคุณสมบัติของการหลอมตัวของถ้ำตัวอย่าง Q2, Q4 และ K3.....	37
4.2	คุณสมบัติของการหลอมตัวของถ้ำตัวอย่าง Q2 ที่ผสมกับ Q4 ในปริมาณต่าง ๆ....	42



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %CaO และค่า IT.....	1
1.2 แสดงคุณภาพถ่านหินโดยดูจากค่าปริมาณ %CaO ที่มากกว่า 23% ซึ่งเริ่มเกิดปัญหาตะกรันมากขึ้นในปี พ.ศ. 2563.....	2
1.3 ผลการศึกษาของ JGSEE.....	3
1.4 ผลการทดลองของ บริษัท Taiho Industries จำกัด.....	5
1.5 แสดงการพองตัวของ Silica-base Additive ในการแก้ปัญหาสแลก.....	5
2.1 แสดงบริเวณที่มีการทำเหมืองถ่านหิน.....	12
2.2 แสดงลักษณะทางธรณีวิทยาของเหมืองแม่เมาะ.....	14
2.3 แผนที่ทางธรณีวิทยาและลำดับชั้นหินของเหมืองแม่เมาะ.....	15
2.4 แผนที่ทางธรณีวิทยาและลำดับชั้นหินของเหมืองแม่เมาะ.....	16
2.5 กราฟของ XRD ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน I, J และ K.....	20
2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของ XRD กับคุณสมบัติของตัวอย่างถ่านหิน 20% I ผสมกับ ถ่านหิน 80% J.....	21
2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของ XRD กับคุณสมบัติของตัวอย่างถ่านหิน J 40% ผสมกับ ถ่านหิน K 60%.....	22
2.8 Ternary Phase Diagram ระหว่าง $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ .....	23
2.9 กราฟ XRD ของตัวอย่างวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,300°C.....	25
2.10 แสดงข้อมูลจาก XRD ของตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1,400°C .....	25
2.11 แสดงคุณสมบัติการหลอมของตัวอย่างเมื่อเติม CaO ในปริมาณต่าง ๆ.....	26
3.1 แสดงการเก็บตัวอย่างของ Q2.....	29
3.2 แสดงการเก็บตัวอย่างของ Q4.....	30
3.3 แสดงการเก็บตัวอย่างของ K3.....	30
3.4 ตัวอย่างถ่านหิน Q2.....	31
3.5 ตัวอย่างถ่านหิน Q4.....	31
3.6 ตัวอย่างถ่านหิน K3.....	32
3.7 ตัวอย่าง Slag A.....	32
3.8 ตัวอย่าง Slag B.....	33
3.9 ตัวอย่าง Slag C.....	33

ภาพที่	หน้า
3.10	รูปร่างของพีรามิดในแต่ละค่าของอุณหภูมิการหลอม..... 35
4.1	แสดงผลวิเคราะห์ XRD ซึ่งแสดงการเกิดของแร่ในถ้ำถ่านหิน Q2 ซึ่งผ่านการเผา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 38
4.2	แสดงผลวิเคราะห์ XRD ซึ่งแสดงการเกิดของแร่ในถ้ำถ่านหิน Q4 ซึ่งผ่านการเผา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 39
4.3	แสดงผลวิเคราะห์ XRD ซึ่งแสดงการเกิดของแร่ในถ้ำถ่านหิน K3 ซึ่งผ่านการเผา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 40
4.4	แสดง Ternary Phase Diagram ของตัวอย่าง Q2, Q4 และ K3..... 41
4.5	แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอมกับปริมาณถ่านหินผสมระหว่าง Q2 กับ Q4... 43
4.6	แสดงผลวิเคราะห์ XRD ซึ่งแสดงการเกิดของแร่ในถ้ำถ่านหิน 60% Q2 กับ 40% Q4 ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 45
4.7	แสดงกราฟ XRD ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิกับการเกิดแร่ของตัวอย่างถ่านหินผสมกัน ระหว่าง 40% Q2 กับ 60% Q4..... 45
4.8	แสดงกราฟ XRD ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิกับการเกิดแร่ของตัวอย่างถ่านหินผสมกัน ระหว่าง 20% Q2 กับ 80% Q4..... 46
4.9	แสดง Ternary Phase Diagram ความสัมพันธ์ของตัวอย่าง Q2 ที่ผสมกับ Q4.... 47
4.10	XRD Pattern ของตัวอย่าง Slag A (แร่เหล็กไนต์)..... 49
4.11	XRD Pattern ของตัวอย่าง Slag A (แร่อะเคอร์มาไนต์)..... 50
4.12	XRD Pattern ของตัวอย่าง Slag B (แร่เหล็กไนต์)..... 51
4.13	XRD Pattern ของตัวอย่าง Slag C (แร่เหล็กไนต์)..... 52
4.14	XRD Pattern ของตัวอย่าง Slag C (แร่อะนอไทต์)..... 53

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



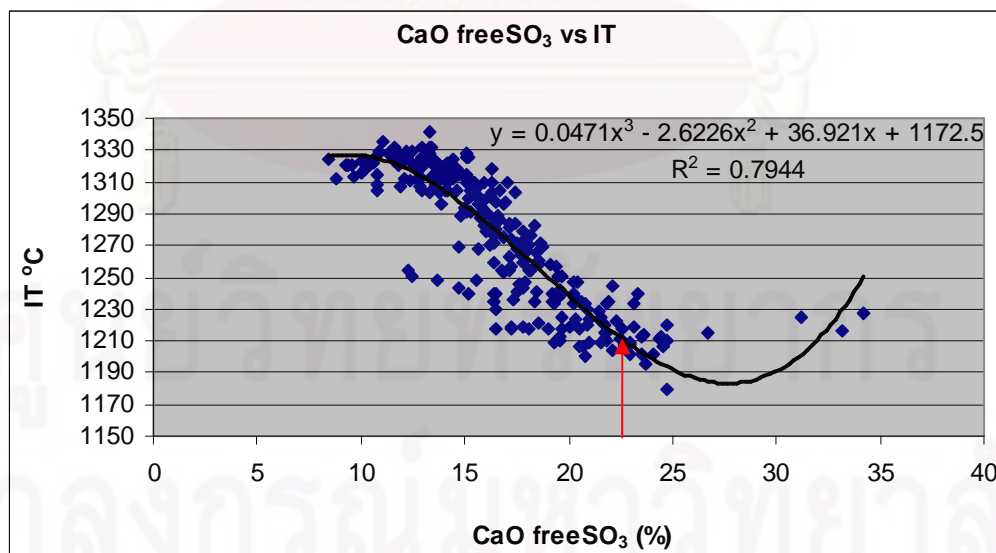
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและปัญหา (ภิญโญ., 2550)

โรงไฟฟ้าแม่เมาะของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) กำลังประสบปัญหาเกี่ยวกับตะกรัน (Slag) ที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้า โดยสร้างปัญหาให้กับการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นอย่างมาก ทำให้ต้องมีการปิดโรงไฟฟ้าในบางโรงที่เกิดปัญหา จากข้อมูลสถิติการสูญเสียกำลังการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะโรงที่ 8-13 ระหว่างปี 2544-2548 พบว่าเกิดจากตะกรันไปเกาะตัวผนังเตาของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างห้องเผาไหม้ไปยัง Water Tube ของหม้อไอน้ำประสิทธิภาพลดลงทำให้เกิดการสูญเสียกำลังการผลิตไฟฟ้า ปัญหาดังกล่าวพบว่ามีเกิดขึ้นบ่อยครั้งในรอบหลายปีที่ผ่านมา

ก่อนปี พ.ศ.2549 ทางทีมงานกฟผ.แม่เมาะได้มีการพัฒนาแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับแหล่งถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ เพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพลิกไนต์ที่ป้อนเข้าโรงไฟฟ้าโดยได้ลองวิเคราะห์ถ่านลิกไนต์เฉพาะค่าปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ (%CaO) เท่านั้น และเมื่อนำข้อมูลของตัวอย่างถ่านลิกไนต์จำนวน 900 ตัวอย่าง (ข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543-2548) มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิการหลอมเริ่มต้น (Initial Deforming Temperature: IT) พบว่าเมื่อปริมาณ %CaO เพิ่มขึ้น ค่า IT จะลดลงดังรูปที่ 1.1

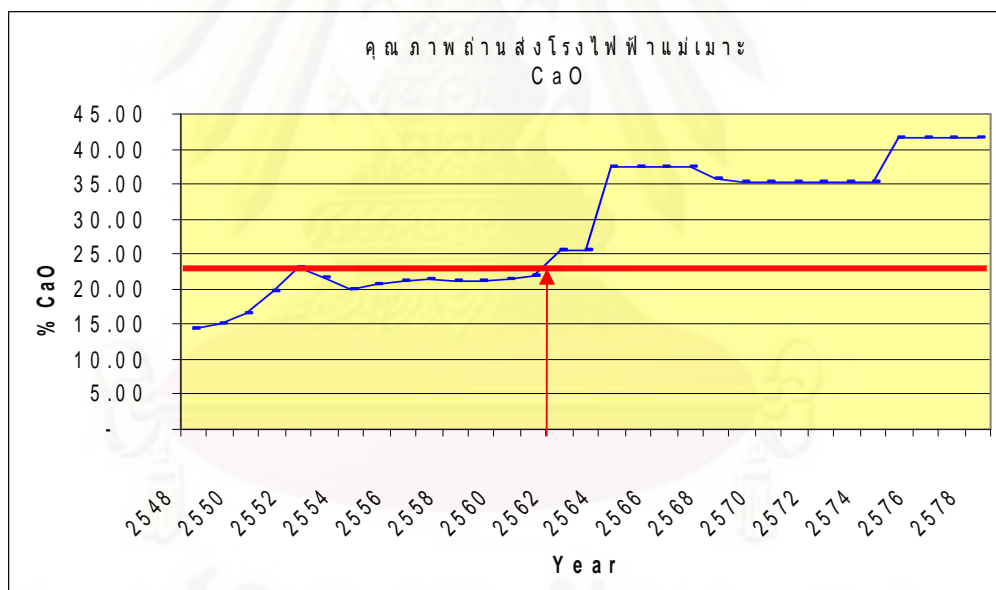


ที่มา: ข้อเสนอโครงการการศึกษาแนวทางการลดสแลกจากหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ, กฟผ.

รูปที่ 1.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %CaO และค่า IT

จากรูปที่ 1.1 พบว่าถ่านหินที่มีปริมาณ %CaO ที่อยู่ในช่วง 23-35% น่าจะทำให้เกิดปัญหาตะกรันขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติของเตาในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะอยู่ในช่วง 1,200-1,300 °C และคุณสมบัติเริ่มต้นการหลอมของตัวอย่างถ่านหินที่ทำให้เกิดปัญหานั้นมีค่าต่ำกว่าในเตาหม้อไอน้ำ ทำให้เกิดตะกรันหลอมติดกับผนังเตาที่อุณหภูมิของเตา

การแก้ปัญหาในปัจจุบันทำได้โดยการผสมถ่านในบริเวณต่าง ๆ ของเหมืองออกเป็น 3 แหล่ง คือ ถ่านหินลิกไนต์ที่มีเถ้าประกอบด้วย CaO น้อยกว่า 15% , CaO อยู่ในช่วง 15-23% และ CaO มากกว่า 23% การผสมถ่านหินลิกไนต์จะควบคุมให้คุณภาพของเถ้ามีส่วนประกอบ CaO น้อยกว่า 23% ซึ่งการผสมถ่านหินลิกไนต์ดังกล่าวทำให้มีการเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจากปกติประมาณ 10-20 ล้านบาทต่อปี การผสมถ่านหินลิกไนต์ปัจจุบันจะทำโดยวิธีการผสมถ่านหินข้ามบ่อ แต่การผสมถ่านหินลิกไนต์ในอนาคต (ประมาณปี พ.ศ. 2563) เมื่อขุดลึกลงไปเรื่อย ๆ พบว่าคุณภาพถ่านหินมีปริมาณ CaO สูงขึ้น (มากกว่า 23%) ดังรูปที่ 1.2 จึงทำให้การผสมถ่านได้ยากขึ้น



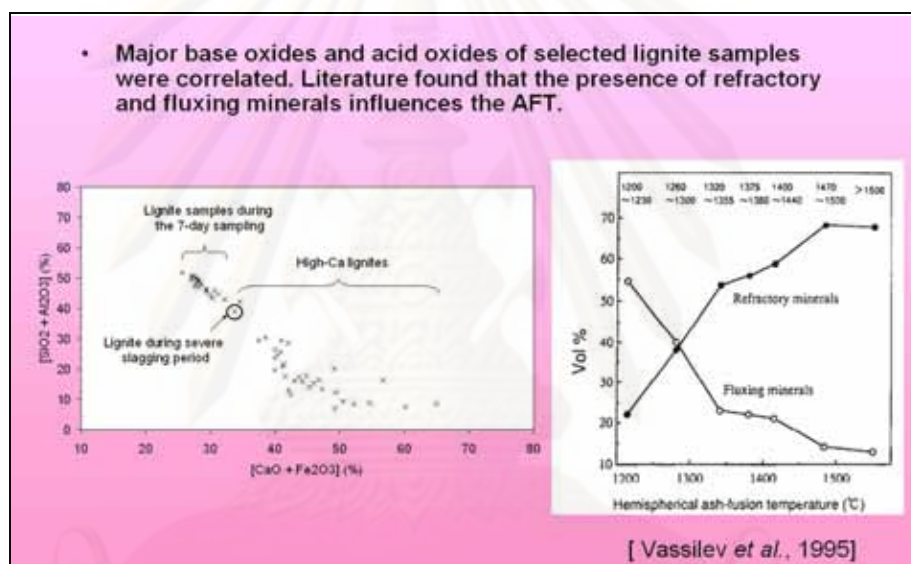
ที่มา: ข้อเสนอโครงการการศึกษาแนวทางการลดสแลกจากหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ, กฟผ.

รูปที่ 1.2 แสดงคุณภาพถ่านหินโดยดูจากค่าปริมาณ %CaO ที่มากกว่า 23% ซึ่งเริ่มเกิดปัญหาตะกรันมากขึ้นในปี พ.ศ. 2563

อย่างไรก็ตามการแก้ปัญหาตะกรันในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าจากนี้ไปจนถึงปี พ.ศ. 2563 จะสามารถทำได้โดยการผสมถ่านหินลิกไนต์คุณภาพต่าง ๆ กันดังกล่าวข้างต้นเพื่อให้ได้ถ่านหินลิกไนต์ที่ป้อนเข้าสู่โรงไฟฟ้ามีปริมาณ CaO ในเถ้าไม่เกิน 23% แต่หลังปี พ.ศ. 2563 ไปแล้ว (รูปที่ 1.2) การแก้ปัญหาโดยการผสมถ่านหินลิกไนต์ไม่สามารถทำได้เนื่องจากถ่าน

หินลิกไนต์ที่มีปริมาณ CaO ในถ่านไม่เกิน 23% จะหมดไปทำให้ต้องป้อนถ่านหินลิกไนต์ที่มีปริมาณ CaO ในถ่านมากกว่า 23% และคาดว่าจะก่อปัญหาตะกอนมากขึ้น

ในปี พ.ศ. 2549 กฟผ.แม่เมาะได้ว่าจ้างที่มงานจาก Joint Graduate School of Energy and Environment (JGSEE) พร้อมผู้เชี่ยวชาญต่างประเทศ (ผลการศึกษารายงานของ JGSEE, 2006) โดยได้ทำการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 7 วัน โดยเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบของโรงไฟฟ้ายูนิต 8, 9 และ 11 ซึ่งจากการศึกษาของ JGSEE ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %  $\text{SiO}_2$  กับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ CaO กับ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (รูปที่ 1.3) และให้ความเห็นว่า Fluxing Mineral ที่มีอยู่ในถ่านลิกไนต์น่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ Ash Fusion Temperature (AFT) ของถ่านลิกไนต์ลดลงอันเป็นเหตุให้เกิดตะกอนได้ง่าย



ที่มา: ผลการศึกษาของ Joint Graduate School of Energy and Environment, 2006.

รูปที่ 1.3 ผลการศึกษาของ JGSEE

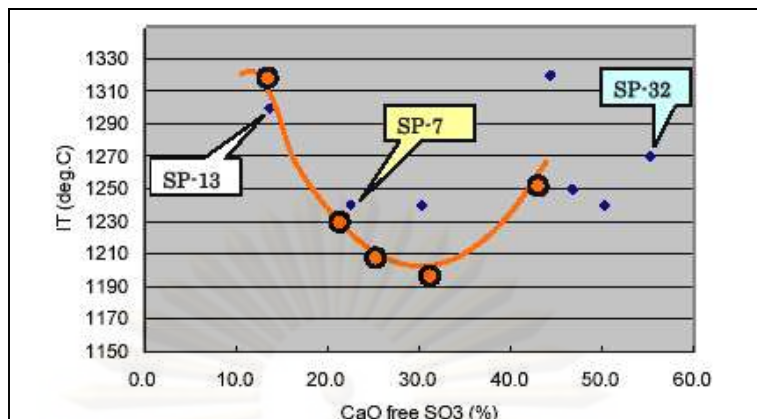
อย่างไรก็ตามจากการศึกษาไม่ได้ระบุว่า Fluxing Mineral นั้นประกอบด้วยแร่อะไรบ้าง แต่ได้สรุปว่า Ca ในถ่านลิกไนต์อยู่ในรูป Water Soluble Ca ที่ไม่มีปัญหา กับ Water Insoluble Ca ซึ่งเป็นฟอร์มที่ก่อให้เกิดปัญหาตะกอน และให้ข้อสังเกตว่าหากปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มากกว่า 15% จะทำให้เกิดตะกอนยาก ส่วน Fe จะอยู่ในรูปของเหล็กซัลไฟด์ซึ่งเป็นแร่ไพไรต์ (Pyrite:  $\text{Fe}_2\text{S}_2$ ) ซึ่งหากมีปริมาณ Fe สูงขึ้น จะทำให้การหลอมเหลวของถ่านมีโอกาสง่ายขึ้น นอกจากนั้นแล้วยังได้ให้ข้อแนะนำว่าการผสมถ่านหินลิกไนต์ในปัจจุบันควรควบคุมถ่านลิกไนต์ให้มีปริมาณ CaO น้อยกว่า 20%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ประมาณ 15% และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มากกว่า 15% เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาตะกอน และได้เสนอให้มีการศึกษาเพิ่มเติมว่าน่าจะมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของ Fe และ Al ที่มีต่อ AFT ว่าเป็นเช่นไร และควรศึกษาถ่านลิกไนต์ที่มีส่วนประกอบของ CaO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{SiO}_2$  ตลอดจนศึกษา

เก้าลิกันต์และเก้าสังเคราะห์ดังกล่าวด้วยเครื่องวิเคราะห์ Scanning Electron Microscope (SEM) และ X-Ray Diffractometer (XRD) เพื่อให้ทราบว่าเก้าลิกันต์หรือเก้าวิเคราะห์นั้นประกอบด้วยสารประกอบ (Compound) หรือแร่ (Mineral) อะไรบ้าง ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวจะช่วยให้สามารถสร้าง Phase Diagram ที่สามารถอธิบายการเกิดตะกอนในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำได้

ในปี พ.ศ. 2549 บริษัท Marubeni (Thailand) จำกัด และ บริษัท Taiho Industries จำกัด (Taiho Industries, 2549) ได้นำตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ชนิดที่มีเก้า CaO สูงไปวิเคราะห์และศึกษาที่ประเทศญี่ปุ่นและได้สรุปว่าจุดวิกฤตที่เกิดตะกอนน่าจะเป็นถ่านหินที่มีปริมาณ CaO ในเก้าอยู่ในช่วงระหว่าง 25-35% หากปริมาณ CaO มากกว่านี้ ปัญหาจะไม่รุนแรงเพิ่มขึ้น โดยได้อธิบายว่า ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ที่มีปริมาณ CaO ในช่วง 25-35% เกิดการรวมตัวระหว่าง Ca และ S ในรูปสารประกอบ  $\text{CaSO}_4$  (Anhydrite) และเมื่อรวมตัวกับ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และอื่นๆ จะทำให้มีจุดหลอมตัว (Melting Point) ต่ำลง และได้อธิบายเพิ่มเติมว่าหากถ่านหินลิกไนต์มีปริมาณ CaO ในเก้าสูงมากขึ้น ก็จะมี CaO เหลือเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้จุดหลอมตัวของเก้าทำให้เกิดตะกอนไม่น่าจะรุนแรงขึ้น อย่างไรก็ตามการศึกษาของ Taiho ณ ประเทศญี่ปุ่นยังมีข้อจำกัดของการศึกษาโดยการศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาการเกิดตะกอนเบื้องต้น โดยการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์บางคุณสมบัติ และยังไม่สามารถสรุปสาเหตุที่แท้จริงของการเกิดตะกอนได้

ในปี พ.ศ.2549 บริษัท Taiho Industries จำกัด (Taiho Industries, 2549) ได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ %CaO และ IT โดยการนำตัวอย่างไปทดสอบพบว่า ผลของปริมาณ CaO ที่มีต่อค่า IT เป็นไปในทำนองเดียวกับที่ทีมงาน กฟผ. แม่เมาะได้ทดสอบไปแล้ว และได้ให้ความเห็นสรุปว่า เมื่อ %CaO เพิ่มขึ้น ค่า IT จะลดลง แต่เมื่อ % CaO เพิ่มขึ้นจนมากกว่า 30 แล้ว ค่า IT จะเพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 1.4) นอกจากนั้นได้ทำการศึกษาดูตัวอย่างด้วย XRD เพื่อหาชนิดของแร่ (ดังตารางที่ 1.1) และ SEM-EDX Qualitative Analysis พบว่า Ca และ S มีการกระจายตัวในรูปแบบเดียวกัน และได้รายงานว่ Ca และ S น่าจะฟอร์มตัวกันอยู่ในรูปของแร่แอนไฮไดรต์ (Anhydrite:  $\text{CaSO}_4$ ) จึงแสดงความเห็นว่า Eutectic Mixture ของ  $\text{CaSO}_4$  กับ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , MgO และ  $\text{Na}_2\text{O}$  อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่า IT ของเก้าลิกันต์ลดลง อันเป็นเหตุสำคัญทำให้เกิดตะกอนและได้อธิบายว่าเมื่อปริมาณ CaO เพิ่มมากขึ้น (CaO มากกว่า 30%) จะมีปริมาณ CaO ที่เหลือจากการจับตัวกันเป็น Eutectic Mixture ซึ่งจะอยู่ในรูปของ Lime (CaO) ซึ่ง CaO ที่เหลือนี้จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เก้าลิกันต์มีค่า IT เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจาก Melting Point ของ CaO สูงถึง  $2,572^\circ\text{C}$

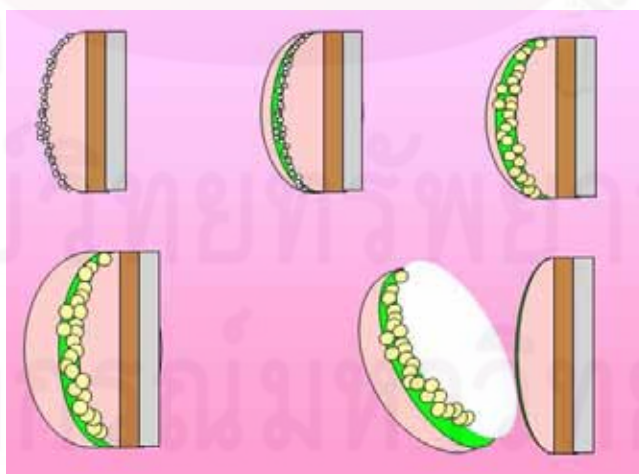




ที่มา : รายงานผลวิเคราะห์ของ Taiho Industries Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่นเมื่อปี พ.ศ. 2549

รูปที่ 1.4 ผลการทดลองของ บริษัท Taiho Industries จำกัด

จากการศึกษาดังกล่าว Taiho ได้แนะนำให้ใช้ CF8000 เป็น Additive ในการแก้ปัญหาแตกโดยอธิบายว่า CF8000 เป็น Silica-base Additive ซึ่งจะทำให้ค่า IT ของถ้ำลิกไนต์สูงขึ้น ซึ่งจะสามารถแก้ปัญหาแตกได้ และที่งานแก้ปัญหาของ กฟผ. แม่เมาะได้เคยทดลองใช้ CF8000 เป็น Additive ในรูปสารละลายผสมกับถ้ำลิกไนต์ก่อนป้อนเข้าไปในเตาเผา โดยใช้ปริมาณ 2,000 กก. ใน 60 นาทีต่อวัน ทำให้สแตกที่เกิดขึ้นหลังจากนั้นหลุดร่วงออกจากผนังเตาได้ง่าย สามารถลดปัญหาการเกิดสแตกไปได้เป็นอย่างดี โดยอธิบายหลักการทำงานของ CF8000 ซึ่งเป็น Silica-base Additive แสดงในรูปที่ 3 โดย Silica ที่อยู่ใน Additive จะพองและขยายตัวและทำให้สแตกไม่สามารถเกาะตัวกันได้จึงหลุดร่วงออกจากผนังเตาได้ง่าย อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายในการดำเนินการดังกล่าวสูงมาก



ที่มา : รายงานผลวิเคราะห์ของ Taiho Industries Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่นเมื่อปี พ.ศ. 2549

รูปที่ 1.5 แสดงการพองตัว ของ Silica-base Additive ในการแก้ปัญหาแตก

ตารางที่ 1.1 สารประกอบ หรือแร่ ที่อาจเป็นองค์ประกอบอยู่ในถ่านหินลิกไนต์

Chemical Formula and Eutectic	Molecular weight.	Color, Crystal system	Melting Point. deg.C	Solubility	Formation temperature. C
CaSO <sub>4</sub> Calcium Sulfate.	136.1	Anidius/orthorhombic	—	Difficult	750
CaO Calcium Oxide	56.1	Anidius/Cubic system	2,572	Solution(acid)	
SiO <sub>2</sub> Silicon Dioxide.	60.1	Anidius/Amorphous	1,726	Solution	
αFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Iron Oxide	159.7	Red brown/ Trigonal	400~700	Not solute	700
Na <sub>2</sub> O Sodium Oxide.	62	Anidius/ Cubic system	1,275	Alcohol	
Ca-Mg mellite. Akermanite.					
Na[AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ] Albite					
Ca[Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ] Anorthite					1,000
CaCO <sub>3</sub> Calcite					125
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 5(FeO,MgO) · 3.5SiO <sub>2</sub> · 7.5H <sub>2</sub> O					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Corundum					1,300
Ca mellite Gehlenite					1,000
Na <sub>2</sub> Ca(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Glauberite					
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Magnetite					700
(Ca,Na) <sub>2</sub> (Al,Mg)[(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ]					700
FeS <sub>2</sub> Pyrite					125
FeCO <sub>3</sub> Siderite					
Al <sub>4</sub> [(OH) <sub>8</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ] Kaolinite					125
CaSO <sub>4</sub> ·0.5 H <sub>2</sub> O Bassanite					125

ที่มา : รายงานผลวิเคราะห์ของ Taiho Industries Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่นเมื่อปี พ.ศ. 2549

## 1.2 วัตถุประสงค์สำหรับงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับลักษณะทางแร่วิทยา (Mineralogy) ของถ่านหินและตะกอนที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เพื่อหาแนวทางที่จะอธิบายสาเหตุและกลไกของการเกิดตะกอน
- 2) เพื่อศึกษากลไกการเกิดตะกอนซึ่งจะใช้ในการคาดการณ์ล่วงหน้าถึงคุณภาพของถ่านลิกไนต์ที่มีโอกาสเกิดตะกอนหลังการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่างๆกัน
- 3) เพื่อหาแนวทางในการป้องกันและแก้ไขปัญหาตะกอนเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิตกระแสไฟฟ้า

## 1.3 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย

- 1) ศึกษาชนิดของแร่ในส่วนหนึ่งของชนิดของแร่ของตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ที่ได้มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ด้วยวิธีรังสีเอ็กซ์แบบเลี้ยวเบน (X-Ray Diffraction: XRD)
- 2) ศึกษาชนิดแร่ของตัวอย่างตะกอนที่เกิดขึ้นในเตาเผา โดยใช้เครื่อง XRD เพื่อต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแร่ของตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์และชนิดของแร่ของตัวอย่างตะกอน

3) ศึกษาหาคุณสมบัติเริ่มต้นของการหลอม (IT) ของแต่ละตัวอย่างเพื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบหาตัวอย่างที่มีค่า IT ที่น่าจะทำให้เกิดปัญหาตะกรัน และตัวอย่างที่ไม่น่าจะก่อให้เกิดปัญหาแล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบที่เกิดขึ้น จากนั้นหาการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่เกิดขึ้น เพื่อหาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทางแร่ในถ่านหินเมื่อถูกเผา

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถทราบถึงปัจจัยที่ควบคุมการเกิดตะกรันในระดับห้องปฏิบัติการ
- 2) ทราบกลไกของการเกิดตะกรันในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ ตลอดจนองค์ประกอบของการเกิดตะกรันในระหว่างการเผาไหม้ เป็นแนวทางในการป้องกันและแก้ปัญหาการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผสมถ่านและลดการสูญเสียกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ถ่านหิน

ถ่านหินเป็นหินตะกอนชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในถ่านหินเช่น คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน อาจจะมีองค์ประกอบของซัลเฟอร์และไนโตรเจนบ้างเล็กน้อย ส่วนองค์ประกอบสารอนินทรีย์จะประกอบไปด้วยแร่กลุ่มซิลิเกต เช่น แร่ควอตซ์(Quartz) แร่ฟันม้า (Feldspar) กลุ่มแร่ดินเหนียว เช่นแร่ดินขาว(Kaolinite) อิลไลต์(Illite) เป็นต้น แร่กลุ่มคาร์บอเนต เช่น แร่แคลไซต์ (Calcite) แร่ซิเดไรต์ (Siderite) และแร่โดโลไมต์ (Dolomite) เป็นต้น กลุ่มแร่ซัลไฟด์ เช่น แร่ไพไรต์ (Pyrite) เป็นต้น และแร่อื่น ๆ (Ward, 2002) คุณสมบัติของถ่านหินก็คือสามารถติดไฟและให้พลังงานความร้อนได้ ถ่านหินเป็นแหล่งพลังงานซากดึกดำบรรพ์ (Fossil Fuel) ที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก ถ่านหินมีกำเนิดมาจากการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติของพืชพันธุ์ไม้ต่างๆ ที่ สลายตัวและสะสมอยู่ในหนองบึงนับเป็นสิบล้านปี เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของ ผิวโลกเช่น เกิดแผ่นดินไหว ภูเขาไฟระเบิด หรือมีการทับถมของตะกอนมากขึ้น ทำให้แหล่งสะสมตัวนั้นได้รับความกดดันและความร้อนที่มีอยู่ภายในโลกเพิ่มขึ้น ซากพืชเหล่านั้นก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นถ่าน ตามลำดับขั้นต่างๆ ในปัจจุบันถ่านหินได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้า การถลุงเหล็ก การผลิตปูนซีเมนต์ การผลิตอาหาร เป็นต้น แต่การผลิตกระแสไฟฟ้านั้นอาจทำให้เกิดมลภาวะขึ้นเนื่องจากองค์ประกอบของแร่ในถ่านหินจะเริ่มเปลี่ยนไปในขณะเผา การเผาไหม้ของถ่านหินที่มีซัลเฟอร์อยู่ จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นพิษและมีฤทธิ์กัดกร่อน ซึ่งก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายหลังจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) ซึ่งเมื่อรวมกับน้ำจะกลายเป็นกรดซัลฟิวริก ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างมาก เช่น การกัดกร่อนของผนังหม้อไอน้ำ ท่อส่งไต้ดิน เครื่องจักรต่าง ๆ ฝนกรด ฯลฯ (Mukherjee et. al, 2006)

นอกจากนั้นแล้ว ปัญหาที่เกิดขึ้นอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญก็คือ ปัญหาตะกั่ว (Slag) เกาะผนังหม้อไอน้ำ ซึ่งทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้นั้นต่ำลง สาเหตุเกิดจากเมื่อเผาถ่านหินที่อุณหภูมิสูงถึงจุด ๆ หนึ่ง องค์ประกอบของแร่ในถ่านหินจะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิในเตาเผา ทำให้เกิดเป็นของเหลวหนืดเกาะอยู่บริเวณผนังเตา เมื่อทิ้งไว้สักระยะหนึ่ง จะเกิดการสะสมของตะกั่วนี้มากขึ้นจนเป็นปัญหาทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่ำลงไปด้วย ปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่ง



บางครั้งเกิดจนอาจจะต้องปิดยูนิตของโรงไฟฟ้าที่มีปัญหาทำให้ต้องสูญเสียกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าไปอย่างมาก นับเป็นความเสียหายต่อประเทศอย่างใหญ่หลวง

ถ่านหินที่ใช้สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะได้มาจากการทำเหมืองถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้นำถ่านหินจากเหมืองในแต่ละจุดมาผสมกันให้ได้อัตราส่วนของถ่านหินที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ให้ไม่เกิน 23% เนื่องจากมีการศึกษาจากบริษัท Marubeni (ประเทศไทย) จำกัด และ บริษัท Taiho Industries จำกัด ของประเทศญี่ปุ่น (Taiho Industries, 2549) โดยทาง กฟผ. ได้ส่งตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ชนิดที่ทำให้เกิดตะกรันไปวิเคราะห์และได้ข้อสรุปในเบื้องต้นว่า ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ในช่วง 23-35% เกิดการรวมตัวระหว่าง Ca และ S ในรูปสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต หรือ แอนไฮไดรต์ ( $\text{CaSO}_4$  - Anhydrite) และเมื่อรวมตัวกับเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และอื่นๆ จะทำให้มีจุดหลอมตัว (Melting Point) ต่ำลง แต่หากถ่านหินลิกไนต์มีปริมาณ CaO ในถ่านหินมากขึ้น ก็จะมีปริมาณ CaO เหลือเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้จุดหลอมตัวให้สูงขึ้นแต่การศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาการเกิดตะกรันเบื้องต้น โดยการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์บางคุณสมบัติ และยังไม่สามารถสรุปสาเหตุที่แท้จริงของการเกิดตะกรันได้

### 2.1.1 การเกิดถ่านหิน (Miller B. G., 2005)

ถ่านหินวางตัวเป็นแนวชั้นถ่านหินที่เรียกว่า Seam เกิดจากการสะสมตัวของซากพืชที่ถูกย่อยสลายและสะสมอยู่ในลุ่มน้ำหรือแอ่งน้ำต่างๆ หรือถูกกระแสน้ำพัดพามาแล้วสะสมตัวอยู่ในบริเวณนั้นโดยกระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) นั่นคือเมื่อเวลาผ่านไปซากพืชเหล่านี้จะถูกปิดทับโดยตะกอนต่างๆ เป็นจำนวนมากขึ้นทำให้เกิดการอัดตัว (Compaction) โดยน้ำหนักของตะกอน และเปลี่ยนแปลงรูป (Transformation) จนกลายเป็นถ่านหินในที่สุด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบในการสะสมซากพืชแล้วทำให้เกิดเป็นถ่านหินนั้น มีด้วยกัน 2 รูปแบบคือ

- 1) เป็นการสะสมตัวของซากพืชที่เคยเจริญเติบโตและตายลงสะสมกันอยู่ในบริเวณนั้น (In Situ) เมื่อมีการร่วงโรยตายลงก็จะทับถมกันอยู่ภายในห้วยหรือแอ่งน้ำนิ่งแห่งนั้น กลายเป็นชั้นถ่านหินที่เรียกว่าแหล่งการสะสมตัวอยู่กับที่ (Autochthonous Coal Deposit) ซากพืชที่ตายลงนั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพีท (Peat) โดยจุลินทรีย์ เมื่อระยะเวลาผ่านไป แอ่งสะสมตัวนี้จะถูกทับถมและจมตัวลงจากชั้นหินอื่น ๆ ที่มาสะสมทับอยู่ด้านบนถ่านหินที่เกิดขึ้นจากการสะสมตัว จนกลายเป็นแหล่งสะสมตะกอน จากนั้นก็จะเริ่มเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นชั้นถ่านหินต่อไปในอนาคต และเมื่อเกิดเป็นวัฏจักรอย่างนี้ซ้ำ ๆ กันต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน มักพบว่าชั้นดินเหนียววางตัวอยู่ใต้ชั้นถ่านหิน โดยจะมีชั้นถ่านหินสม่ำเสมอเป็นบริเวณกว้างแม้ว่าจะมีชั้นหินดินดานแทรกสลับอยู่บ้างก็ตาม และไม่ค่อยมีสารอื่นปะปนในชั้นถ่านหิน เนื้อถ่านหินจะคงรูปซากพืชไว้อย่างเห็นได้ชัด

โดยเฉพาะในถ่านหินคุณภาพต่ำ (Low Rank Coal) และคุณภาพของเนื้อถ่านหินมักไม่คงที่ตลอดชั้นถ่านหินส่วนที่อยู่ข้างใต้จะมีลักษณะอ่อนหรือยุ่ย ส่วนกลางๆ จะเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีมีลักษณะเป็นมันวาว แต่ส่วนตอนบนจะมีคุณภาพของ ถ่านหินต่ำลงอีก โดยทั่วไปชั้นถ่านหินที่เกิดอยู่กับที่แบบนี้จะมีชั้นหินดินดานปิดอยู่ข้างบน แหล่งถ่านหินแบบนี้สามารถพบได้โดยทั่วไป โดยเฉพาะแหล่งขนาดใหญ่และสำคัญๆ ของโลก ที่อยู่ค่อนข้างไปทางขั้วโลกเหนือเป็นแหล่งที่มีการกำเนิดแบบนี้ทั้งสิ้น

2) เป็นการสะสมตัวของซากพืชที่เคยเจริญเติบโตในที่อื่น จึงเรียกแหล่งนี้ว่าว่า แหล่งการสะสมตัวจากพืชที่เกิดที่อื่น (Allochthonous Coal Deposit) เกิดจากพืชที่เกิดที่อื่นไม่ว่าจะเป็นในหรือนอกแอ่งแล้วถูกพัดพาด้วยอิทธิพลจากน้ำหรือลม และเมื่อถูกพัดพามาสะสมอยู่ในแอ่งหนึ่งก็จะเริ่มตก ตะกอนสะสมทับถมกันเป็นชั้นถ่านหินที่ห่างไกลจากแหล่งกำเนิดเดิม แหล่งถ่านหินแบบนี้ไม่ค่อยมีอยู่ทั่วไป แต่จะมีอยู่ในบางประเทศโดยเฉพาะในบริเวณขั้วโลกด้านใต้ แหล่งถ่านหินแบบนี้มีอาณาบริเวณไม่กว้างขวางมาก และความหนาของชั้นถ่านหินไม่แน่นอน เนื่องจากบางส่วนของซากพืชที่ถูกน้ำพัดพาไปจากแหล่งเดิม ชั้นถ่านหินจะมี สารอื่นๆ ปะปนอยู่มาก โดยเฉพาะสารที่เกิดจากพวกโคลนตมซึ่งทำให้มีปริมาณขี้เถ้า (Ash Content) มากกว่าแบบแรก ส่วนชั้นหินที่วางอยู่บนชั้นของถ่านหินชั้นอยู่กับชั้นหินต้นกำเนิดที่ถูกทำลายให้ผุกร่อนและพัดพาไปตามสายน้ำ โดยทั่วไปแล้วมักจะเกิดเป็นชั้นหินทรายและหินดินดาน ในกรณีที่เกิดได้ ชั้นหินทรายจะทำให้ถ่านหินที่ได้ไม่มีคุณสมบัติในการอบไล่ก๊าซหรือทำให้เป็นถ่านโค้กได้ เพราะก๊าซที่เกิดขึ้นในกระบวนการจะมีการเล็ดลอดผ่านทางช่องว่างของหินทรายได้ ส่วนในกรณีของชั้นถ่านหินที่มีหินดินดานปิดทับอยู่ข้างบนนั้น ก๊าซที่เกิดในระหว่างกระบวนการสลายตัวของซากพืช จะไม่สามารถผ่านออกไปได้ ถ่านหินที่ได้จึงสามารถทำเป็นถ่านหินชนิดที่อบไล่ก๊าซและทำถ่านโค้กได้

### 2.1.2 การจำแนกชนิดของถ่านหิน

การจำแนกถ่านหินมักจะใช้ระบบมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) (<http://www.astm.org>) เป็นระบบการจำแนกถ่านหินตามลำดับชั้น (Rank) ซึ่งมีความชัดเจนและง่ายแก่การใช้งาน จึงเป็นที่นิยมใช้กันมากในหลายประเทศ ระบบนี้ได้จำแนกถ่านหินเป็น 4 ลำดับชั้นคือ แอนทราไซต์ (Anthracite), บิทูมินัส (Bituminous), ซับบิทูมินัส (Subbituminous) และ ลิกไนต์ (Lignite) ส่วนพีท (Peat) ไม่จัดเป็นถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM

1) แอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินสีดำเข้มที่มีความมันวาวสูงแต่จุดไฟติดยากค่าความร้อนมากกว่า 14,000 บีทียูต่อปอนด์ (เมื่อทำตัวอย่างให้แห้งโดยหักค่าความชื้นและหักค่าแร่ประกอบอินทรีย์ออกแล้ว) และจะมีค่าคาร์บอนสูงประมาณ 86 เปอร์เซ็นต์ ค่าสารระเหยไม่เกิน 14 เปอร์เซ็นต์

2) บิทูมินัส (Bituminous)

เป็นถ่านหินที่มีสมบัติไม่ผูกพันและเมื่อเผาจะมีการจับตัวเป็นส่วนใหญ่ เมื่อทำตัวอย่างให้แห้งโดยหักค่าความชื้นและหักค่าแร่ประกอบอินทรีย์ออก มีค่าความร้อนตั้งแต่ 13,000 บีทียูต่อปอนด์ขึ้นไป มีค่าคาร์บอนคงที่ต่ำกว่า 86 เปอร์เซ็นต์ ค่าสารระเหยสูงกว่า 14 เปอร์เซ็นต์

3) ซับบิทูมินัส (Subbituminous)

ถ่านหินในชั้นซับบิทูมินัส จะเป็นถ่านหินที่เมื่อเผาแล้วจะไม่จับกัน และทิ้งไว้จะผูกพันเองได้ มีค่าคาร์บอนคงที่(เมื่อหักค่าความชื้นและแร่อินทรีย์ออกไป)ต่ำกว่า 69 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสารระเหยเกินกว่า 31 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 8,300-11,000 บีทียูต่อปอนด์

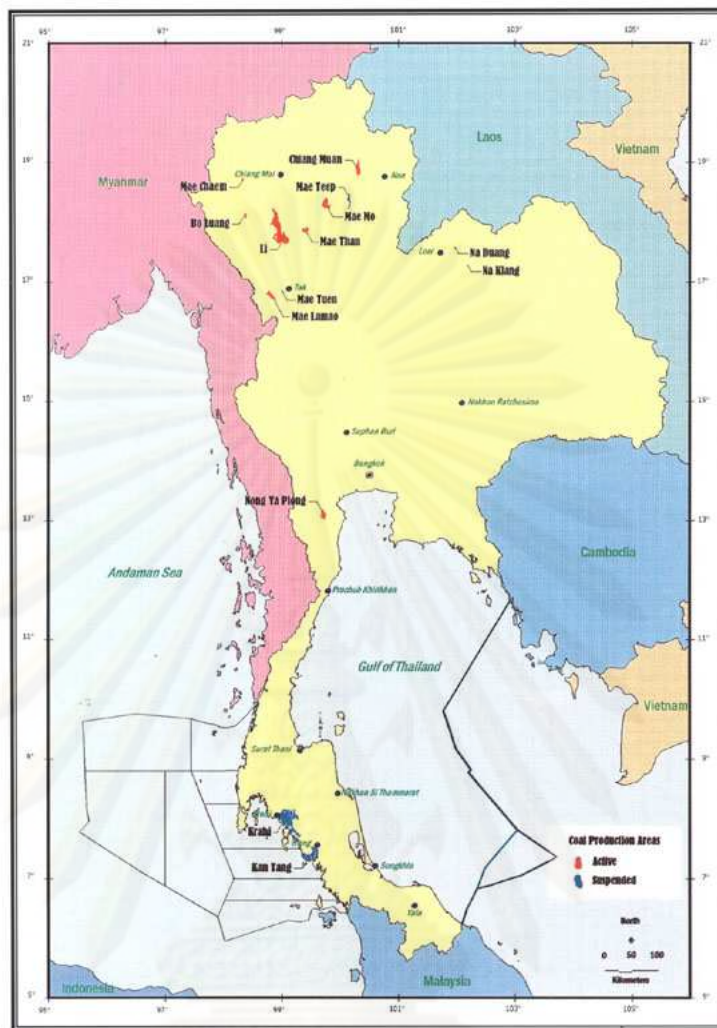
4) ลิกไนต์ (Lignite)

ถ่านหินลิกไนต์เป็นถ่านหินที่มีซากพืชเหลือปรากฏอยู่เล็กน้อย มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูง เมื่อหักค่าความชื้นและค่าแร่อินทรีย์ออกแล้วจะมีค่าคาร์บอนต่ำกว่า 69 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสารระเหยเกินกว่า 31 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความร้อนไม่เกิน 8,300 บีทียู/ปอนด์ ทิ้งไว้ในอากาศจะผูกพันเป็นชั้นเล็กชั้นน้อย และเมื่อเผาจะไม่จับตัวเป็นก้อน ซึ่งถ่านหินชนิดนี้มีอยู่ในเหมืองแม่เมาะเป็นส่วนมากและเป็นถ่านหินตัวอย่างสำหรับงานวิจัยนี้ด้วย

## 2.2 ถ่านหินและลิกไนต์ในประเทศไทย

ถ่านหินที่พบในประเทศไทยส่วนใหญ่พบในแอ่งเทอร์เชียรี ในบริเวณเทือกเขาสูงทางภาคเหนือและตามแนวขอบตะวันตกของประเทศลงไปจนถึงใต้สุดของแหลมไทย ถ่านหินในแอ่งเทอร์เชียรีส่วนใหญ่อยู่ในชั้นลิกไนต์ไปจนถึงบิทูมินัสที่มีสารระเหยสูง และพบถ่านหินที่มีอายุมากกว่ายุคเทอร์เชียรีอีกบ้างเล็กน้อยทางขอบด้านเหนือของบริเวณที่ราบสูงตะวันออกเฉียงเหนือในหินชุดโคราช หน่วยหินภูพานในยุคจูราสสิก ซึ่งถ่านหินเหล่านี้อยู่ในชั้นบิทูมินัส แต่ชั้นถ่านบางและน้อยมาก ไม่เป็นประโยชน์ทางเศรษฐกิจ และถ่านหินแอนทราไซต์ที่เกิดในยุคคาร์บอนิเฟอรัส บริเวณเขตต่ออำเภอนาดวง จังหวัดเลย และอำเภอนากลาง จังหวัดหนองบัวลำภู มีการผลิตถ่านหินแอนทราไซต์ที่อำเภอนาดวง โดยมีกำลังการผลิตในช่วงปี พ.ศ.2530-2537 ปีละ 20,000 - 40,000 ตัน ซึ่งปัจจุบันได้เลิกทำเหมืองแล้ว





ที่มา: [http://maemohmine.egat.co.th/mining\\_technology/coal.html](http://maemohmine.egat.co.th/mining_technology/coal.html)

รูปที่ 2.1 แสดงบริเวณที่มีการทำเหมืองถ่านหิน

## 2.3 ลักษณะแหล่งถ่านหินแม่เมาะ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2552)

### 2.3.1 ลักษณะภูมิประเทศ

แอ่งแม่เมาะเป็นแอ่งระหว่างหุบ มีลักษณะเป็นที่ราบลอนคลื่น อยู่สูงกว่าระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 330 เมตร ทิศทางของแอ่งและแนวเทือกเขาวางตัวในแนวเหนือ-ใต้ ทิศเหนือจรดกลุ่มแนวเขาหินปูนดอยผาก้าน ทิศตะวันออกจรดกลุ่มแนวเขาหินปูนดอยผาศูบซึ่งสูงที่สุดในบริเวณนี้ คือสูง 921 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง และเขาหินปูนดอยผาศูบ ทิศตะวันตกติดแนวเทือกเขา แม่ทะ-ผาลาด เป็นแนวเทือกเขาที่แยกแอ่งแม่เมาะออกจากแอ่งลำปาง ทิศใต้เป็นแนวร่องเขาแคบ ๆ เชื่อมต่อไปถึงที่ราบของแอ่งแม่ทะ มีปล่องภูเขาไฟ 2 ปล่องได้แก่



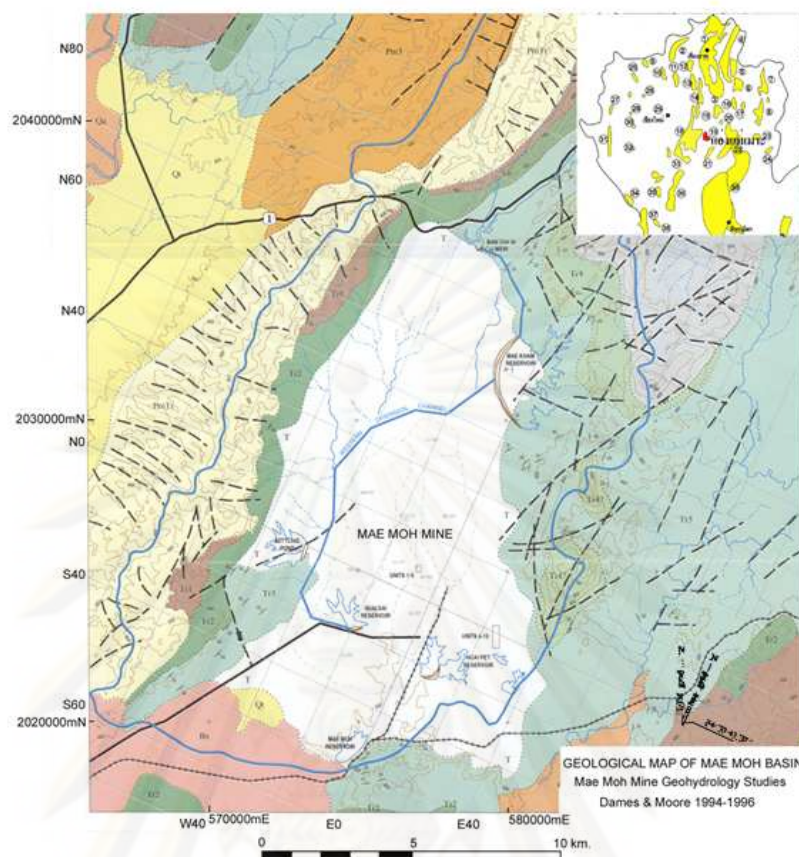
ปล่องภูเขาไฟผาคอกหินฟู และจำปาแดด แอ่งแม่เมาะมีลำห้วยแม่เมาะ และลำห้วยสาขาใหม่ ผ่านพื้นที่ไปทางทิศใต้ ฤดูฝนน้ำจะไหลระ ฤดูแล้งน้ำจะแห้งขอด และมีน้ำขังบ้างบางบริเวณ

สำหรับพื้นที่คำขอประทานบัตรที่ 10/2548 ถึง 23/2548 จำนวน 14 แปลง เป็นพื้นที่ที่อยู่บริเวณฯ ด้านตะวันออกของแอ่งแม่เมาะ ซึ่งได้เปิดดำเนินการทำเหมืองมาเป็นเวลานานแล้ว และยังคงดำเนินการต่อไปอย่างต่อเนื่อง โดยในปัจจุบันพื้นที่มีระดับความสูงโดยเฉลี่ยประมาณ 137 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง ต่ำกว่าระดับพื้นดินโดยรอบที่มีระดับความสูงเฉลี่ยโดยประมาณ 324 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง

### 2.3.2 ลักษณะธรณีวิทยาทั่วไป

แอ่งแม่เมาะ แอ่งสะสมตะกอนยุคเทอร์เชียรี เกิดจากอิทธิพลของแผ่นเปลือกโลกอินเดียเคลื่อนตัวชนกับแผ่นเปลือกโลกยูเรเชียเมื่อราว 45 ล้านปีก่อนในสมัยอีโอซีน ก่อให้เกิดแอ่งสะสมตะกอนแนวเหนือ-ใต้ในประเทศไทยขึ้นเป็นจำนวนมาก รวมทั้งแอ่งแม่เมาะ

แอ่งแม่เมาะเป็นแอ่งระหว่างหุบเขา มีทิศทางการวางตัวของแอ่งประมาณเหนือ-ใต้ กว้างประมาณ 7.5 กิโลเมตร ยาวประมาณ 15 กิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 110 ตารางกิโลเมตร การกระจายตัวของหินอายุต่าง ๆ บริเวณแอ่งแม่เมาะ (รูปที่ 2.2) จากเก่าไปอ่อนนั้นพบว่าด้านตะวันตกของพื้นที่ตามแนวเทือกเขาแม่ทะ-ผาลาด พบหินอัคนียุคเพอร์โม-ไทรแอสสิก (Permo-Triassic Volcanic Rocks) ประกอบด้วยหินแอนดีไซต์ (Andesite) ไรโอไลต์ (Rhyolite) ทัฟฟ์ (Tuff) และหินกรวดภูเขาไฟ ถูกปิดทับแบบชั้นไม่ต่อเนื่องด้วยหินตะกอนที่สะสมตัวในทะเลของกลุ่มหินลำปางยุคไทรแอสสิก (Marine Triassic Sediment) ซึ่งพบเป็นเนินเขาและภูเขาสูงล้อมรอบแอ่งแม่เมาะทั้งทางด้านเหนือ ด้านตะวันออก และด้านตะวันตก ประกอบด้วยหินทราย หินทรายแป้ง หินดินดาน และหินกรวดมน สีน้ำตาลถึงน้ำตาลแดงของหมวดหินพระธาตุ (Phra That Formation หรือ Tr1) ที่พบทางตะวันตกเฉียงเหนือและตะวันตกเฉียงใต้ของแอ่ง หินปูนมีสีเทาถึงเทาเข้มสลับด้วยหินดินดานสีเทาเขียวในหมวดหินผาก้าน (Pha Kan Formation หรือ Tr2) พบเป็นแนวอยู่ทางตะวันตกของแอ่ง หินทราย หินทรายแป้ง หินดินดาน และหินอาร์จิลไลต์ ของหมวดหินฮองฮอย (Hong Hoi Formation หรือ Tr3) ที่พบทั้งด้านเหนือ ตะวันออก และตะวันตกเฉียงใต้ของแอ่ง หินปูนเนื้อละเอียดสีเทาถึงเทาขาวของหมวดหินดอยลอง (Doi Long Formation หรือ Tr4) พบทางด้านเหนือและด้านตะวันออกของแอ่ง หินทราย หินทรายแป้ง หินดินดาน และหินกรวดมน สีแดงถึงสีม่วงแดงของหมวดหินผาแดง (Pha Daeng Formation หรือ Tr5) พบทางตะวันออกเฉียงเหนือของแอ่ง กลุ่มหินลำปางมีความหนาแน่นรวมประมาณ 3,000 เมตร วางตัวเป็นหินฐานรองรับแอ่งสะสมตะกอนแบบชั้นไม่ต่อเนื่องของกลุ่มหินแม่เมาะยุคเทอร์เชียรี ซึ่งประกอบด้วย หินโคลน หินทราย หินทรายแป้ง หินกรวดมน และชั้นถ่านหิน กลุ่มหินแม่เมาะจะมี



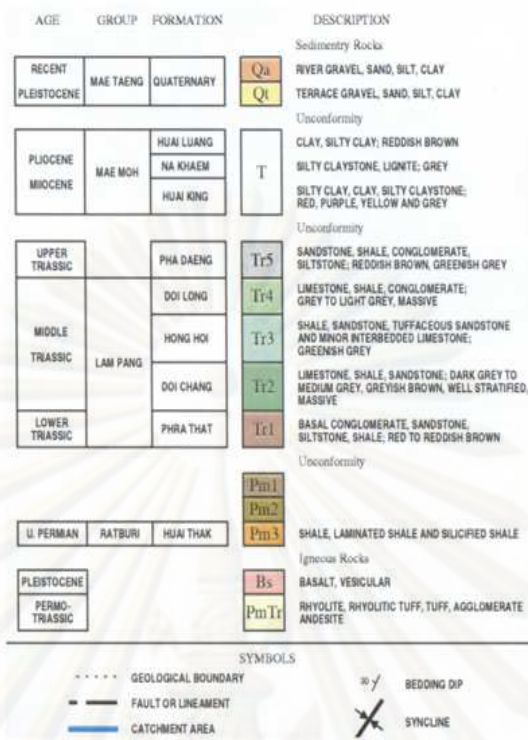
ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, การนำเสนอแนะนำกฟผ. แม่เมาะ, 2550

รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะทางธรณีวิทยาของเหมืองแม่เมาะ

ความหนาแน่นประมาณ 1,000 เมตร ด้านใต้ของแอ่งถูกปิดทับด้วยตะกอนตะพักลำน้ำ และตะกอนน้ำพา พวกกรวดทรายสมัยปัจจุบันหนา 1-10 เมตร

### 2.3.3 ลักษณะโครงสร้างธรณีวิทยาของแอ่งแม่เมาะ

แอ่งแม่เมาะเป็นแอ่งแบบกระเบน (Graben Basin) ที่มีรอยเลื่อนในแนวประมาณเหนือ-ใต้ขนานอยู่ทั้งสองด้าน ทั้งด้านตะวันตกและตะวันออก นอกจากนี้ยังมีรอยเลื่อนปกติ (Normal Fault) แนวเหนือ-ใต้หลายแนวตัดผ่านชั้นหินยุคเทอร์เชียรี มีผลทำให้ชั้นหินยุคเทอร์เชียรีบริเวณขอบแอ่งโผล่ที่ผิวดิน ในขณะที่เดียวกันบริเวณกลางแอ่งก็เกิดการทรุดตัวมากขึ้น ชั้นหินจึงมีการเอียงเทเข้าไปหากกลางแอ่งแบบโค้งรูปประทุนหงาย (Syncline)



ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, การนำเสนอแผนน้ำกฟผ. แม่เมาะ, 2550

รูปที่ 2.3 แผนที่ทางธรณีวิทยาและลำดับชั้นหินของเหมืองแม่เมาะ

### 2.3.4 ลำดับชั้นหิน

ชั้นหินยุคเทอร์เชียรีของแอ่งแม่เมาะจัดอยู่ในกลุ่มหินแม่เมาะ (Mae Moh Group) แบ่งออกเป็น 3 หมวดหิน เรียงลำดับจากอายุแก่ไปหาอ่อน คือล่างสุดได้แก่

**2.3.4.1 หมวดหินห้วยคิง (Huai King Formation)** หนาประมาณ 15-320 เมตร วางตัวแบบมีรอยชั้นไม่ต่อเนื่องกับหินดินดาน หินทราย หินปูน และหินอาร์จิลไลต์ของกลุ่มหินลำปาง หินหมวดห้วยคิงประกอบด้วย หินโคลน หินทราย หินทรายแป้ง และหินกรวดมน มีหลายสี ทั้งสีน้ำตาล สีแดง สีเทา และสีเทาอมเขียว มีลักษณะเด่นคือ ขนาดของตะกอนจะมีขนาดเล็กลงเมื่อไล่ขึ้นสู่ส่วนบน

**2.3.4.2 หมวดหินนาแวม (Na Kham Formation)** หนาประมาณ 300-420 เมตร ส่วนใหญ่เป็นหินโคลนสีเทาถึงสีน้ำตาลเทา เนื้อหินมีสารปูนปน มีชั้นถ่านหินชนิดลิกไนต์ถึงชั้นบิทูมินัสแทรกสลับอยู่ 5 โซน มีชื่อเรียกจากล่างขึ้นบน คือ ถ่านหินชั้น S,R,Q,K และ J ซึ่งถ่านหินที่คุ้มค่าต่อการทำเหมืองคือ

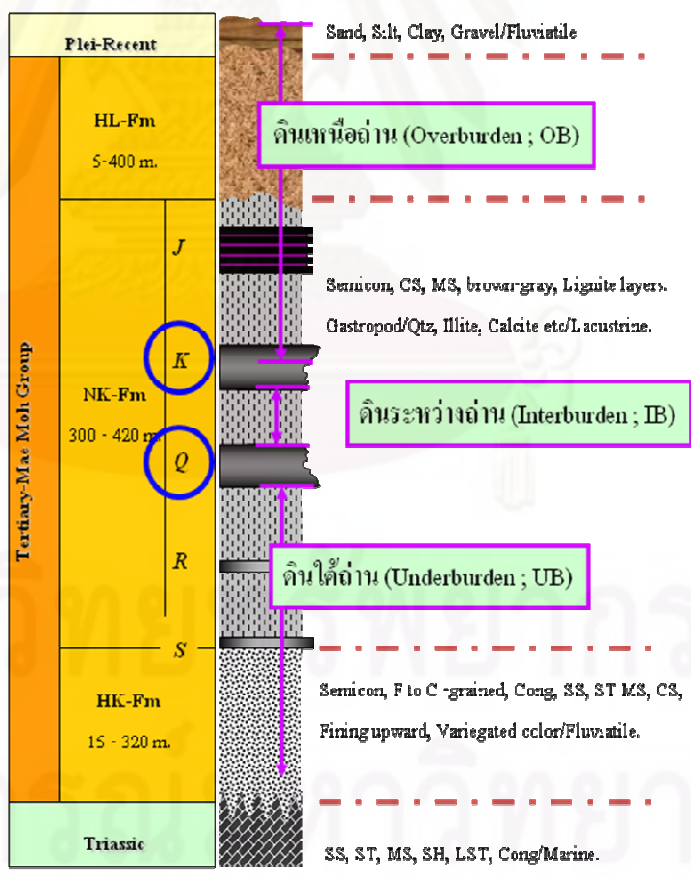
ก) ถ่านหินชั้น Q หนาประมาณ 25-30 เมตร ซึ่งเป็นถ่านหินชั้นหลักที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้ทำเหมืองทางด้านเหนือของพื้นที่ ลักษณะเป็นชั้นหนาชั้นเดียว



ต่อเนื่องกัน (Compact Seam) มีชั้นหินโคลนแทรกสลับบาง ๆ อยู่บ้าง จากนั้นชั้น Q จะค่อย ๆ แยกออกเป็นชั้นย่อย (Split Seam) คือ Q1, Q2, Q3 และ Q4 โดยมีชั้นหินโคลนแทรกสลับหนามากขึ้นเมื่อไปทางใต้ของพื้นที่

ข) ถ่านหินชั้น K หนาประมาณ 25-30 เมตร ซึ่งเป็นถ่านหินชั้นหลักอีกชั้นหนึ่งที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้ทำเหมือง พบถัดขึ้นมาจากถ่านหินชั้น Q โดยมีชั้นหินโคลนสีเทาถึงสีเทาเขียวหนาประมาณ 25-30 เมตร คั่นอยู่ตรงกลาง (Inter Burden) ถ่านหินชั้น K ทางด้านเหนือจะพบเป็นชั้นหนาชั้นเดียวต่อเนื่องกัน มีชั้นหินโคลนแทรกสลับบาง ๆ อยู่บ้าง จากนั้นถ่านหินชั้น K จะค่อย ๆ แยกออกเป็นชั้นย่อย คือ K1, K2, K3 และ K4 โดยมีชั้นหินโคลนแทรกสลับหนามากขึ้นเมื่อไปทางใต้ของพื้นที่เหมือนกับถ่านหินชั้น Q

ค) ถ่านหินชั้น J พบเห็นเป็นแนวทางด้านทางตะวันตกของพื้นที่ ถ่านหินชั้นนี้เป็นถ่านชั้นบาง ๆ หลายชั้นหนาประมาณ 0.15-1.0 เมตร และแทรกสลับด้วยหินโคลน ถ่านหิน J บริเวณนี้ไม่ได้ทำเหมืองเนื่องจากเป็นถ่านหินชั้นบางและมีคุณภาพต่ำ



ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, การนำเสนอแผนนำถ่านหินแม่เมาะ, 2550

รูปที่ 2.4 แสดงชั้นถ่านหินที่ได้จากข้อมูลหลุมเจาะ



ซากดึกดำบรรพ์จำพวกหอย พบได้ทั่วไปในหินหมวดนี้ และบางครั้งยังพบซากดึกดำบรรพ์จำพวกกระดูกของตะพาบน้ำ ก้างปลา ใบไม้ กรามช้าง และฟันของสัตว์กินเนื้อพวก *Siamogale thailandica* ซึ่งบอกอายุช่วงกลางยุคไมโอซีนจนถึงปลายยุคไมโอซีน ลักษณะของหินหมวดนี้คือมีสีเทา ในทางการทำเหมืองจึงนิยมเรียกหินหมวดนี้ว่า ชั้นดินสีเทา หรือ Grey Bed

### 2.3.4.3 หมวดหินห้วยหลวง (Huai Luang Formation) หนาประมาณ 5-400

เมตร โดยหนามากสุดบริเวณกลางแอ่ง หินส่วนใหญ่ประกอบด้วย หินโคลนและหินทรายแป้งสีน้ำตาลแดง มีหินทรายและหินกรวดมนบ้างบางแห่ง ด้านบนสุดถูกปิดทับด้วยตะกอนกรวดทรายอายุควอเทอร์นารี แบบมีรอยชั้นไม่ต่อเนื่อง ในหมวดหินนี้พบชั้นถ่านหินบาง ๆ 1 ชั้น เรียกว่าถ่านหินชั้น I ลักษณะเด่นของหินหมวดนี้คือมีสีน้ำตาลแดง เรียกว่า ชั้นดินแดง (Red Bed)

## 2.4 การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหิน

การวิเคราะห์ถ่านหินใช้ในการจำแนกชนิดของถ่านหินเป็นหลัก เนื่องจากถ่านหินในแต่ละแหล่งจะมีคุณสมบัติต่างกันทั้งด้านกายภาพและทางด้านเคมี ซึ่งจะบ่งบอกถึงคุณภาพและชนิดของถ่านหิน โดยทั่วไปการวิเคราะห์คุณภาพถ่านหิน มุ่งเน้นไปที่คุณสมบัติด้านเคมี การเผาไหม้ และคุณสมบัติด้านกายภาพเป็นหลัก แต่บางครั้งอาจมีการวิเคราะห์ด้านศิลาวรรณา (Petrography) ควบคู่ไปด้วย เพื่อประโยชน์ในการจัดลำดับชั้น และศึกษาด้านการกำเนิดถ่านหิน

วิธีวิเคราะห์ถ่านหินที่สำคัญ มีดังนี้

### 1. Proximate Analysis

เป็นวิธีการวิเคราะห์แบบง่าย ๆ โดยเผาถ่านหินภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน เพื่อหาความสัมพันธ์ของ ความชื้น สารระเหย ซี้เถ้า และปริมาณ คาร์บอนในถ่านหิน

### 2. Ultimate Analysis

เป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการหาค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ โดยจะรายงานเป็นปริมาณร้อยละของธาตุต่างๆ ที่ประกอบขึ้นเป็นถ่านหิน เช่น คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน

### 3. Ash Chemical Analysis

เป็นการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางแร่อนินทรีย์ในซี้เถ้าโดยนำตัวอย่างถ่านหินไปเผาที่อุณหภูมิ 750 °C เพื่อให้ได้ซี้เถ้าแล้วนำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ ICPS (Inductively Coupled Plasma Spectrometer) เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในถ่านหิน เช่น ปริมาณของแคลเซียมในรูปร้อยละของ CaO เป็นต้น

## 2.5 ตะกรัน (Hatt R., 2001)

เถ้าที่เกิดการสะสมตัวจะมีอยู่สองแบบ คือ เถ้าหลอม (Molten Ash) และ เกลืออัลคาไลด์ (Alkali Salt) เถ้าหลอมที่เกิดการสะสมตัวเราเรียกว่า “ตะกรัน” (Slag) ซึ่งเกิดขึ้นในบริเวณเตาเผาของหม้อไอน้ำ ส่วนเกลืออัลคาไลด์จะเกิดในบริเวณระบบหมุนเวียนหรือระบบหล่อเย็นของหม้อไอน้ำ โดยอธิบายถึงส่วนต่าง ๆ ของเถ้าที่สะสมตัวในบริเวณต่าง ๆ ดังนี้

### 2.5.1 ตะกรันผนัง (Wall Slag)

หมายถึง ตะกรันที่ถูกล้อมตัวและก่อตัวขึ้นบริเวณผนังเตา โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจากตะกรันชนิดนี้คือ

- 1) ตะกรันที่เกิดขึ้นอาจไหลลงอยู่ด้านล่างของเตาเผา และก่อตัวเป็นแนวโค้งอุดทางที่เถ้าจมนจะตกสู่เบื้องล่าง ทำให้เกิดการสะสมของเถ้าจมนในเตา
- 2) ตะกรันที่เกาะผนังจะทำตัวเป็นฉนวนกีดขวางการส่งผ่านความร้อนไปยังผนังเตาเพื่อผลิตไอน้ำ ซึ่งทำให้เกิดอุณหภูมิของแก๊สที่ปากทางออกมากขึ้น ทำให้เกิดตะกรันขึ้นบริเวณห้องเผา
- 3) ตะกรันจะก่อตัวบริเวณหัวเผา (Burner) ที่เรียกว่า Eyebrows ซึ่งจะไปขัดขวางการไหลของมวลอากาศและถ่านหินซึ่งสร้างความเสียหายให้กับหัวเผาได้

### 2.5.2 Superheater Slag

เป็นตะกรันที่ก่อตัวขึ้นบริเวณ Superheater และบริเวณที่มีการหมุนเวียนอื่น ๆ ในหม้อไอน้ำ

### 2.5.3 ตะกรันบริเวณหมุนเวียนไปยังบริเวณการเกิด Fouling (Convection Pass Fouling)

ตะกรันชนิดนี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดอัลคาไลด์ ซัลเฟต เช่น  $\text{CaSO}_4$  and  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการเกิดเถ้าลอย ตะกรันชนิดนี้มักเกิดขึ้นกับถ่านหินในแถบตะวันตกของสหรัฐฯ

### 2.5.4 ตะกรันที่สะสมตัวในบริเวณที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Deposit)

ตะกรันชนิดนี้เกิดขึ้นเช่นบริเวณที่เกิดลมร้อน และสะสมตัวเป็นชั้น ๆ เนื่องจากมีการควบแน่นกันระหว่างกรดซัลฟิวริกผสมกับเถ้าลอยในบริเวณนี้

## 2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Qiu J.R. และคณะ, (1998) ได้ศึกษาอิทธิพลของพฤติกรรมแร่ในการหลอมเถ้าถ่านหินที่ผสมกันแล้วและการเปลี่ยนแปลงของแร่ โดยทำการศึกษาถ่านหินจำนวน 3 ตัวอย่างที่มีองค์ประกอบเคมีของซีเถ้าที่ต่างกัน (ถ่านหิน I, J และ K) หลังจากนั้นนำมาผสมถ่านหินอัตราส่วนที่ต่างกัน แล้วนำมาวิเคราะห์หาอุณหภูมิจุดหลอมตัวเริ่มต้น หรือ Ash Fusion Temperature (AFT) โดยที่

ตัวอย่างจะถูกเผาเริ่มที่อุณหภูมิ 800°C (เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำกว่านั้นยังไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างแร่ในถ้ำที่ชัดเจนนอกจากเกิดการสลายตัว) จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ตัวอย่างเริ่มหลอมตัว โดยมีองค์ประกอบทางเคมีของแร่ดังตารางที่ 2.1 องค์ประกอบแร่ในแต่ละช่วงอุณหภูมิจะวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ X-Ray Diffractometer (XRD) ซึ่งผลวิเคราะห์ XRD ที่อุณหภูมิ 800°C พบว่าตัวอย่าง I และตัวอย่าง J จะมีแร่ควอตซ์เป็นแร่หลัก ส่วนตัวอย่าง K ซึ่งมีผลวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงที่สุดก็จะพบแร่แคลไซต์เป็นแร่หลัก และจะพบแร่แอนไฮไดรต์ (Anhydrite:  $\text{CaSO}_4$ ) และแร่ฮีมาไทต์ (Hematite:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) บ้างเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.5 หลังจากเผาและวิเคราะห์ตัวอย่างแล้วผลปรากฏว่าองค์ประกอบของถ่านหินที่ถูกเผาจะมีอัตราส่วนระหว่าง  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{SiO}_2$  ที่เปลี่ยนไป ตัวอย่างถ่านหินที่มีองค์ประกอบของ  $\text{CaO}$  ต่ำ (ถ่านหิน I ผสมกับถ่านหิน J) ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอม (Initial Temperature: IT) สูงกว่าตัวอย่างที่มีค่า  $\text{CaO}$  สูง (ถ่านหิน J ผสมกับถ่านหิน K) ดังแสดงในตารางที่ 2.2

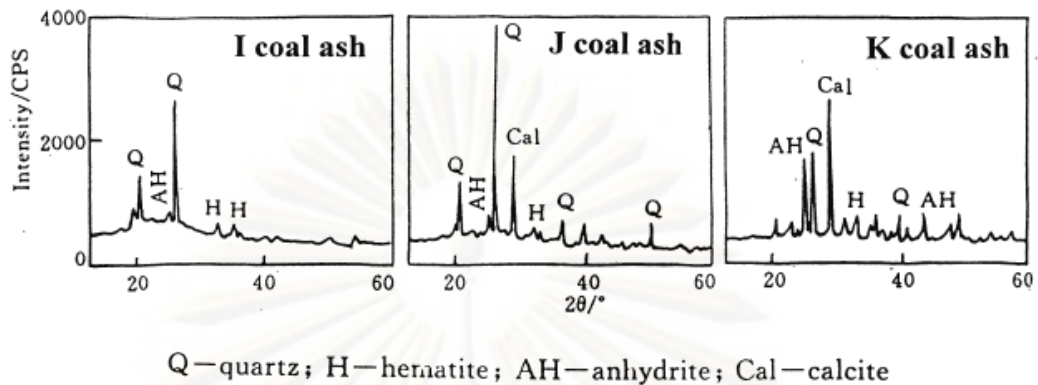
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแร่ของตัวอย่างถ่านหิน I, J และ K

Samples	I	J	K
<i>Proximate (wt.%)</i>			
Moisture	3.8	2.7	1.8
Ash	26.5	16.2	4.2
VM	11.8	27.6	21.4
<i>Ultimate (wt.%)</i>			
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
<i>Ash chemical composition (wt.%)</i>			
$\text{SiO}_2$	49.2	48.4	38.2
$\text{Al}_2\text{O}_3$	37.7	25.5	25.7
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4.2	3.5	10.8
$\text{CaO}$	1.04	2.41	13.50
$\text{MgO}$	1.27	5.54	6.43
$\text{Na}_2\text{O}$	0.93	0.45	0.96
$\text{K}_2\text{O}$	0.99	2.00	1.35
$\text{TiO}_2$	1.21	0.71	0.68

ที่มา: Qiu J.R. และคณะ, 1998.

การวิเคราะห์ XRD ซึ่งใช้เพื่อดูพฤติกรรมกรรมการหลอมของแร่ จะมีข้อจำกัดคือสามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะลักษณะแร่ที่มีรูปผลึกชัดเจนเท่านั้น ส่วนลักษณะที่เป็นผลึกอสัณฐานหรือไม่เป็นรูปผลึกจะไม่สามารถวิเคราะห์หาองค์ประกอบได้ ให้วิธีการหาความสัมพันธ์ของกราฟที่ได้จาก

การวิเคราะห์ XRD และ Ternary Phase Diagram ประกอบกันเพื่อทำนายลักษณะแร่ที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดหลอมตัว



ที่มา: Qiu J.R. และคณะ, 1998.

รูปที่ 2.5 กราฟของ XRD ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน I, J และ K

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของการหลอมตัว ณ อุณหภูมิหนึ่งของตัวอย่าง

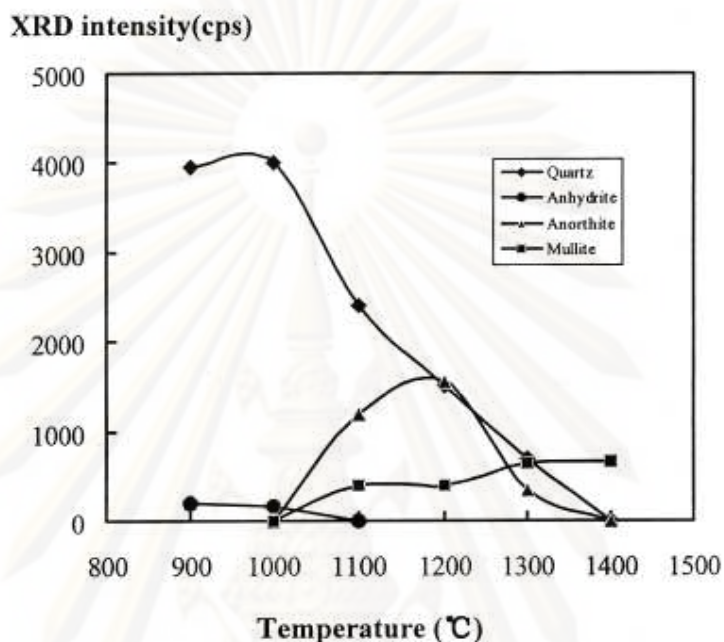
Samples	Initial deformation temperature (°C)	Softening temperature (°C)	Fusion temperature (°C)
I	> 1500		
J	1320	1350	1380
K	1200	1380	1400
20% I+80% J	1320	1380	1410
40% I+60% J	1430	1460	1510
60% I+40% J	> 1500		
80% I+20% J	> 1500		
20% K+80% J	1290	1330	1370
40% K+60% J	1230	1280	1330
60% K+40% J	1170	1200	1220
80% K+20% J	1170	1210	1230

ที่มา: Qiu J.R. และคณะ, 1998.

เมื่อนำตัวอย่างถ่าน I, J และ K มาผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ แล้วนำมาวิเคราะห์ XRD พบว่าในอัตราส่วนของถ่านตัวอย่าง 20% I ผสมกับ ถ่านตัวอย่าง 80% J โดยน้ำหนักนั้นจะมีเส้นกราฟที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น พบว่ามีการเริ่มเกิดแร่มุลไลต์ (Mullite) และแร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite) ขึ้นจากปฏิกิริยาร่วมกันระหว่าง  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่  $1,000^\circ\text{C}$  ขึ้นไป และ  $\text{SiO}_2$  จะ



หายไปเมื่ออุณหภูมิ 1,300 °C แร่แอนไฮไดรต์หายไปที่อุณหภูมิ 1,100 °C ส่วนแร่มุลไลต์กับแร่อะนอร์ไทต์จะเกิดร่วมกันเมื่ออุณหภูมิ 1,320 °C โดยที่แร่มุลไลต์จะพบในถ่านหิน I ที่อุณหภูมิ 1,500 °C ส่วนแร่อะนอร์ไทต์จะพบในถ่านหิน J เท่านั้นที่อุณหภูมิ 1,320 °C ดังรูปที่ 2.6

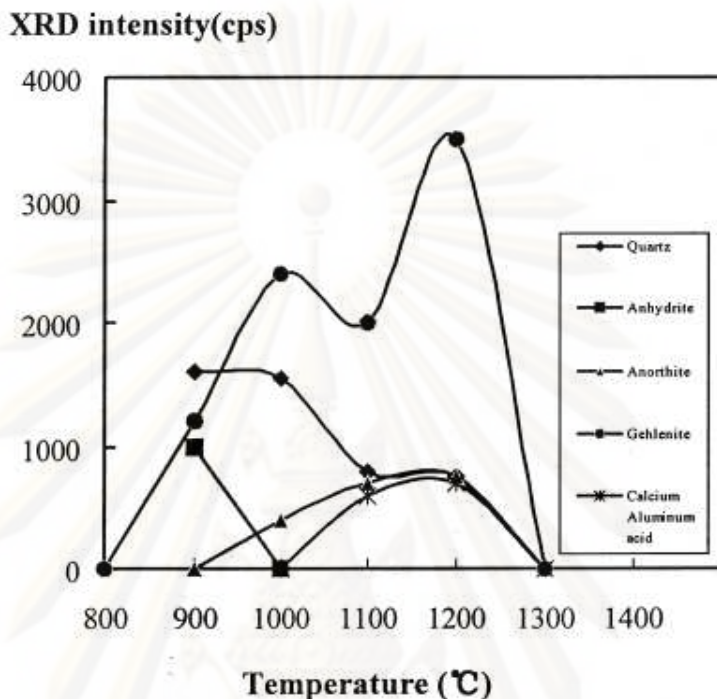


ที่มา: Qiu J.R. และคณะ, 1998.

รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มของ XRD กับอุณหภูมิของตัวอย่าง ถ่านหิน 20% I ผสมกับ ถ่านหิน 80% J

ส่วนการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินที่ผสมกันระหว่างตัวอย่าง 40% J กับ 60% K โดยนำหนักดังรูปที่ 2.7 พบว่า  $\text{SiO}_2$  ทำปฏิกิริยากับ  $\text{CaO}$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ได้เป็นแร่เกห์ไลไนต์ ( $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}$ ) แร่อะนอร์ไทต์ และกลุ่มแร่แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) ที่อุณหภูมิ 800 °C, 900 °C และ 1,000 °C ตามลำดับ จากนั้น  $\text{SiO}_2$  จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของผลึกอสัณฐานที่ 1,320 °C ส่วนแร่แอนไฮไดรต์หายไปเมื่ออุณหภูมิ 1,000 °C และแร่อะนอร์ไทต์เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิอ่อนตัว (Softening Temperature) 1,220 °C ส่วนแร่มุลไลต์เริ่มก่อตัวที่อุณหภูมิ 1,000 °C และเริ่มเปลี่ยนสภาพเป็นผลึกอสัณฐานที่อุณหภูมิ 1,400 °C ชนิดของแร่หลักในถ่านหินที่ผสมกันที่อุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอม (1,170 °C) ได้แก่ แร่เกห์ไลไนต์ แร่อะนอร์ไทต์ และกลุ่มแร่แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ ชนิดของแร่ของตัวอย่างถ่านหิน K ที่อุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอม (1,200 °C) คือแร่เกห์ไลไนต์ และในตัวอย่างถ่านหิน J อุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอม (1,320 °C)

คือแร่อะนอร์ไทต์ แร่ที่มีอยู่ในตัวอย่าง K 60% ผสมกับ ถ่านหิน J 40% ทั้งแร่เกิร์ตไลน์ต์ แร่ควอตซ์ แร่อะนอร์ไทต์ และกลุ่มแร่

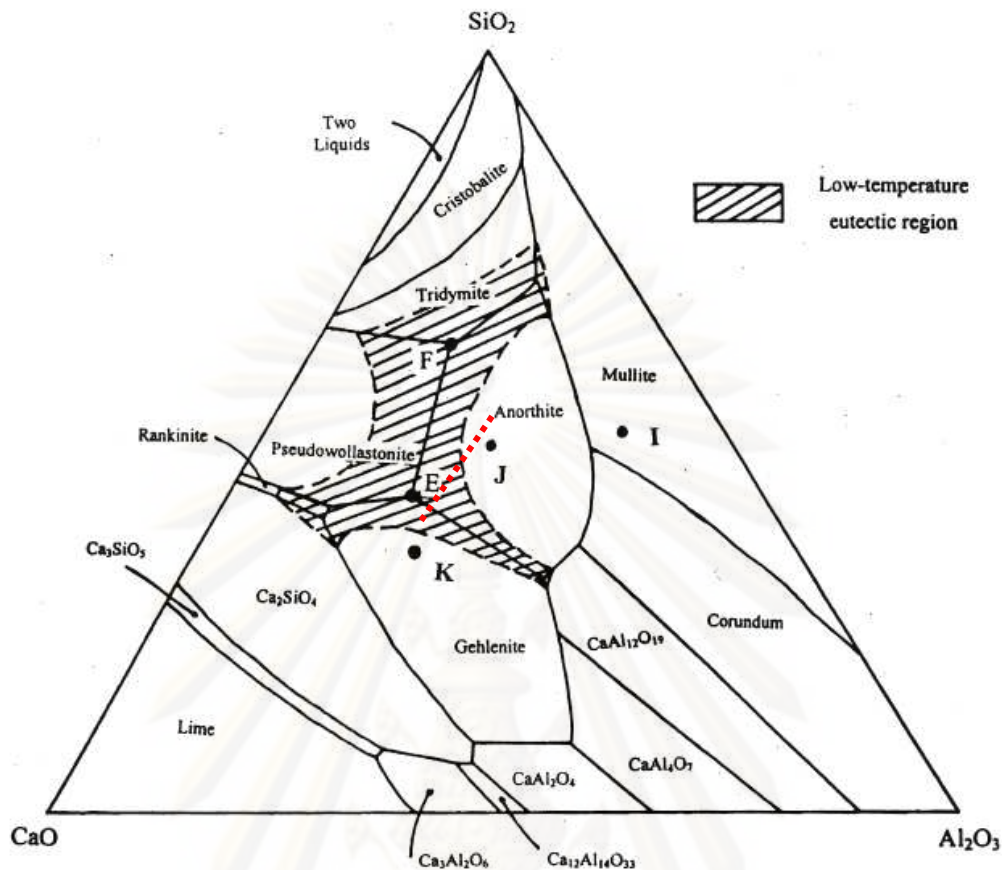


ที่มา: Qiu J.R. และคณะ, 1998.

รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นของ XRD กับอุณหภูมิของตัวอย่าง ถ่านหิน J 40% ผสมกับ ถ่านหิน K 60%

แคลเซียมอลูมิเนียมแอซิด ทำให้เกิดส่วนผสมที่หลอมในอุณหภูมิต่ำดังรูปที่ 2.8 จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการหลอมที่อุณหภูมิต่ำของถ่านหินที่ถูกผสม

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์หาปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักแล้วนำมาพล็อตลงใน Phase Diagram พบว่าตัวอย่าง I เป็นแร่มูลไลต์ ส่วนตัวอย่าง J คือแร่อะนอร์ไทต์ และตัวอย่าง K เป็นแร่เกิร์ตไลน์ต์ ซึ่งตรงกับผลวิเคราะห์ด้วย XRD ดังนั้น Ternary Phase Diagram สามารถอธิบายถึงการหลอมตัวของตัวอย่างถ่านหินได้ โดยบริเวณที่แรเงาคือ Low-Temperature Eutectic Region เป็นบริเวณที่ค่าอุณหภูมิจากการหลอมของแร่มีค่าต่ำกว่า 1,400°C ดังนั้นเมื่อตัวอย่าง J และ K มาผสมกัน จะมีโอกาสสูงที่ตัวอย่างจะเริ่มหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำได้ ดังรูปที่ 2.8



ที่มา: Qiu J.R. และคณะ, 1998.

รูปที่ 2.8 Ternary Phase Diagram ระหว่าง  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

Kantiranis N. et al., (2004) ได้ศึกษาองค์ประกอบของเถ้าจมน (Bottom Ash) ของโรงไฟฟ้า Agios Dimitrios ซึ่งใช้หลักการและการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง PXRD เพื่อหาองค์ประกอบเคมีของแร่และการหาองค์ประกอบของสารอินทรีย์จะใช้กระบวนการทางเคมีแบบเปียก รวมไปถึงการหาค่าการสูญเสียขณะเผาไหม้ (Loss On Ignition - LOI) ด้วย จากการวิเคราะห์พบว่าตัวอย่างเถ้าจมนมีองค์ประกอบเคมีของแร่ เป็นแร่แคลไซต์, แร่ควอตซ์, และแร่ฟีนมาหรือเฟลด์สปาร์ (Feldspar) เป็นหลัก และพบแร่ไมกา แร่ดินเหนียว แร่เกห์เลไนต์ และพอร์ตแลนด์ไดต์ (Portlandite) ในปริมาณไม่มาก และพบแร่ที่มีลักษณะผลึกสัณฐานประมาณร้อยละ 10-43 โดยน้ำหนัก ในขณะที่สารอินทรีย์มีองค์ประกอบอยู่ระหว่างร้อยละ 5-42 โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของแร่ (ร้อยละโดยน้ำหนัก), สารอินทรีย์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก), และค่าความร้อนที่สูญเสียไปของตัวอย่างเถ้าจมน

Unit	C	Q	M	Cl	F	G	P	A	Total	OM	I.A.M. (A-OM)	L.O.I.
I	32	20	-	2	3	-	-	43	100	42	1	49
II	29	23	2	-	6	5	-	35	100	33	2	39
IV	25	23	-	-	21	8	10	13	100	6	7	12
V	20	34	-	-	11	7	18	10	100	5	5	10

C: calcite, Q: quartz, M: micas, Cl: clays (kaolinite), F: feldspars, G: gehlenite, P: portlandite, A: total amorphous material (determined by PXRD, including organic matter), OM: organic matter (determined by net chemical method), IAM: inorganic amorphous material, L.O.I.: loss of ignition at 1050° C/2h.

ที่มา: Kantiranis N. et al., 2004

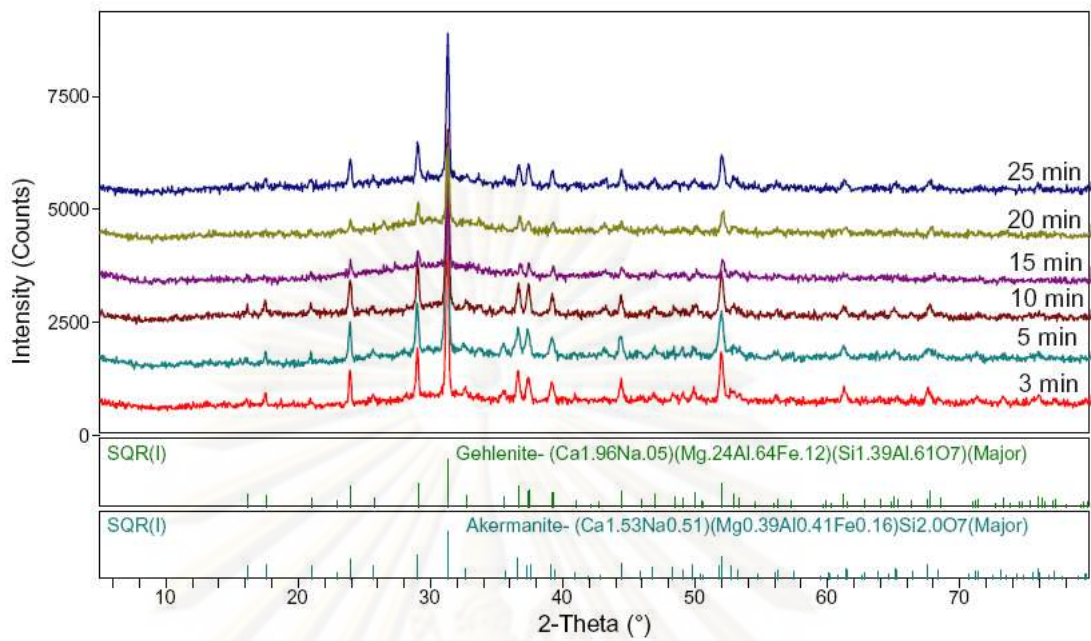
แร่บางตัวที่อยู่ในเถ้าจมน เช่น แร่แคลไซต์ แร่ควอตซ์ แร่ไมกา และแร่ดินเหนียว จะเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในถ่านหิน ในขณะที่แร่เกห์เลไนต์ และแร่พอร์ตแลนด์ไดต์เกิดขึ้นในระหว่างการเผาถ่านหินลิกไนต์ โดยที่แร่พอร์ตแลนด์ไดต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของควิกไลม์ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของความร้อนของแร่แคลไซต์

Bai J. et al. (2007) ได้ศึกษาถ่านหินที่ถูกเตรียมไว้ที่อุณหภูมิ 815°C ที่ผ่านการออกซิไดซ์กับอากาศและเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 1,300°C และ 1,400°C ในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน องค์ประกอบหลักของถ่านหินและขี้เถ้าคือควอตซ์ ส่วนองค์ประกอบหลักของขี้เถ้าลอยคือ อลูมิเนียมซิลิเกต ขี้เถ้าที่เกิดจากถ่านหินถูกผสมด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ กันเพื่อทำนายพฤติกรรม การเกิดขี้เถ้าจากถ่านหินที่ถูกผสม และการเปลี่ยนรูปของแร่และการเปลี่ยนเฟสภายใต้อุณหภูมิ เริ่มต้นของการหลอมหรือ IT (Initial Deforming Temperature), อุณหภูมิเมื่อเริ่มอ่อนตัวหรือ ST (Softening Temperature) และอุณหภูมิเมื่อเริ่มเป็นของไหลหรือ FT (Fluid Temperature) ซึ่งสอดคล้องกับ Phase Diagram ของ CaO- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>

ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของขี้เถ้าจะถูกควบคุมโดยองค์ประกอบของถ่านหิน, เตาที่ใช้ในการเผา และสภาพ ณ ขณะเผา ซึ่งผลการทดลองแสดงถึง Residence Time ของถ่านหินที่อุณหภูมิสูงว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของถ่านหินและมีผลเล็กน้อยต่อปริมาณของคาร์บอนที่ไม่ได้ถูกเผา ระยะของการเกิดผลึกอัสฐานเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น โดยผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่า ณ อุณหภูมิ 1,300°C จะพบองค์ประกอบทางเคมีของแร่เออร์มาไนต์ และแร่เกห์เลไนต์ ซึ่งเกิดขึ้นตามลำดับปฏิกิริยา คือ

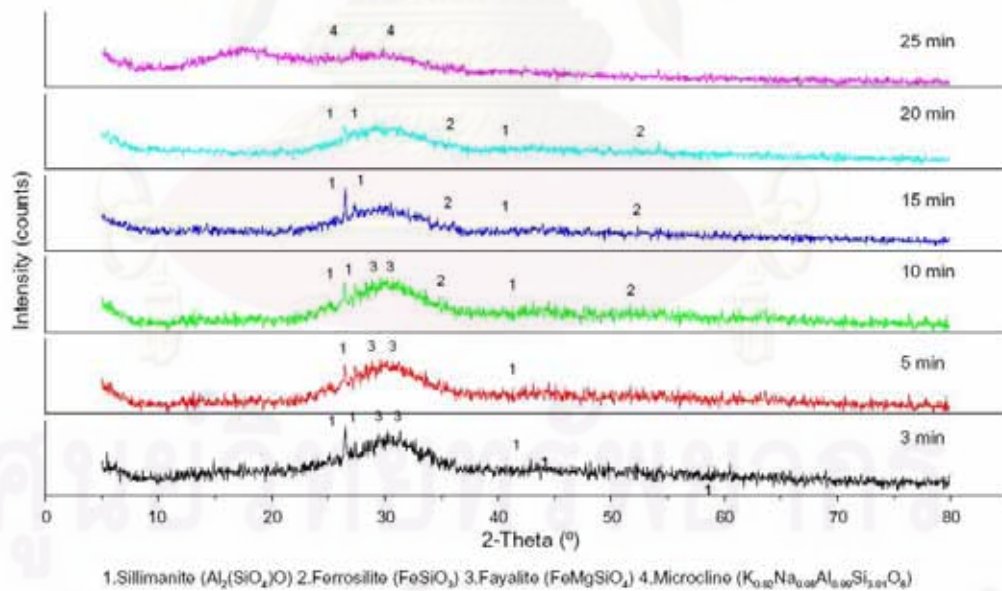






ที่มา: Bai J. et al. 2007.

รูปที่ 2.9 กราฟ XRD ของตัวอย่างวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,300°C



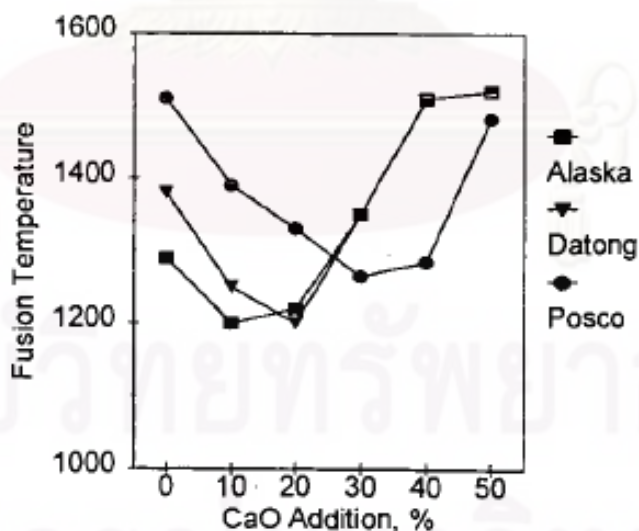
ที่มา: Bai J. et al. 2007.

รูปที่ 2.10 แสดงข้อมูลจาก XRD ของตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1,400°C

จากกราฟที่ 2.9 พบว่า ระยะเวลาของการเผาที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่มีผลที่ชัดเจนต่อองค์ประกอบที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอาจมีผลต่อปริมาณที่เปลี่ยนไป แร่เออร์มาไนต์ และแร่เกห์เลไนต์เมื่ออยู่ในสภาพสารละลายของแข็ง รูปแบบของกราฟ XRD จะคล้ายกัน ดังรูปที่ 2.9 เมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณของแร่เออร์มาไนต์ลดลงแต่แร่เกห์เลไนต์มีปริมาณเพิ่มขึ้น (ณ อุณหภูมิ 1,300°C) และเมื่อถึงอุณหภูมิ 1,400°C เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นผลึกออสซิลฐานซึ่งไม่สามารถอธิบายการเกิดแร่โดยใช้ Phase Diagram ของ CaO- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>

ที่อุณหภูมิ 1,400°C จากข้อมูล XRD ดังรูปที่ 2.10 พบว่าส่วนใหญ่ได้เปลี่ยนรูปไปเป็นผลึกออสซิลฐานแล้ว โดยยังพอวิเคราะห์ได้ว่าเป็นแร่ซิลลิมาไนต์ (Sillimanite) แร่ฟายาไลต์ (Fayalite) แร่เฟอร์โรซิลไลต์ (Ferrosillite) และแร่ไมโครไคลน์ (Microcline) เป็นแร่หลัก และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณของแร่ซิลลิมาไนต์ก็จะลดลงด้วย

Hyun-Taek Kim et al. (1995) ได้ทำการทดลองโดยนำตัวอย่างถ่านหินจำนวน 3 ตัวอย่าง (Alaska, Datong และ Posco) มาวิเคราะห์หา Ash Fusion Temperature โดยเริ่มต้นเผาที่อุณหภูมิ 538°C จนถึง 1,600°C และได้ใส่ CaO ในปริมาณต่าง ๆ เพื่อดูว่าจะมีผลต่ออุณหภูมิของการหลอมหรือไม่ พบว่าอุณหภูมิของการหลอมมีค่าต่ำลงเมื่อเติม CaO ลงไป จนกระทั่งถึงปริมาณหนึ่งที่เหมาะสม ค่าอุณหภูมิของการหลอมเพิ่มสูงขึ้นดังรูปที่ 2.11 ซึ่งได้ข้อมูลสรุปมาจากตารางที่ 2.4



ที่มา: Hyun-Taek Kim et al. 1995.

รูปที่ 2.11 แสดงอุณหภูมิการหลอมของตัวอย่างเมื่อเติม CaO ในปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 2.4 แสดงอิทธิพลของการเติม CaO ที่ทำให้อุณหภูมิของการหลอมเปลี่ยนไป

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
$\Delta T$ (FT-IDT)		123	65	31	88	123	124
Datong	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
$\Delta T$ (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
$\Delta T$ (FT-IDT)		150	134	124	41	29	106

ที่มา: Hyun-Taek Kim et al. 1995.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการศึกษาวิจัย

จากการที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้มีการศึกษาและวิจัยร่วมกับบริษัท Marubeni (Thailand) จำกัด และ บริษัท Taiho Industries จำกัด ได้สรุปว่าจุดวิกฤตที่ทำให้เกิดตะกั่วหน้าจะเป็นถ่านหินที่มีปริมาณ CaO ในถ่านอยู่ในช่วงระหว่าง 23-35% อย่างไรก็ตาม การศึกษาของบริษัท Taiho ประเทศญี่ปุ่นยังมีข้อจำกัดของการศึกษาโดยการศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาการเกิดตะกั่วเบื้องต้น โดยการเผาไหม้ถ่านลิกไนต์บางคุณสมบัติ และยังไม่สามารถสรุปสาเหตุที่แท้จริงของการเกิดตะกั่วได้

การศึกษากำหนดให้เป็นสาเหตุให้เกิดตะกั่ว นั้น จะศึกษาโดยนำตัวอย่างที่มีค่าปริมาณร้อยละของ CaO ที่ใกล้เคียงกับช่วง 23-35% กับตัวอย่างถ่านหินที่มีค่าร้อยละ CaO ต่ำ และตัวอย่างถ่านหินที่มีค่าร้อยละ CaO สูง มาหาองค์ประกอบทางเคมีของแร่ที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิในเตาเผา (ประมาณ 1,200°C) และนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของแร่ที่ได้จากการวิเคราะห์ตะกั่ว จากนั้นหาความสัมพันธ์ของปัจจัยการเกิดตะกั่วโดยนำมาเทียบกับ สามเหลี่ยมไดอะแกรม (Ternary Phase Diagram) ระหว่าง  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

1. เครื่องย่อยแบบลูกกลิ้ง (Roll Crusher)
2. เครื่องบดแบบแหวน (Ring Mill)
3. ตะแกรงมาตรฐาน (Sieve)
4. เตาอบตัวอย่าง
5. เตาเผา
6. เครื่องซังสาร
7. เครื่องรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (X-Ray Diffractometer : XRD)
8. เครื่องวิเคราะห์หาอุณหภูมิการหลอมของเถ้า (Ash Fusion Determinator)
9. Inductively Coupled Plasma Spectrometer – ICPS



### 3.3 ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.3.1 ตัวอย่างถ่านหิน

ตัวอย่างถ่านหินที่นำมาศึกษาวิจัยได้เก็บมาจากเหมืองถ่านหินแม่เมาะ จ. ลำปาง จำนวน 3 แหล่ง คือ ตัวอย่างที่ได้จากชั้นถ่านหิน Q2 (ปริมาณร้อยละของ CaO ต่ำ) ตัวอย่าง Q4 (ปริมาณร้อยละของ CaO ปานกลาง) และตัวอย่าง K3 (ปริมาณร้อยละของ CaO สูง) ดังรูปที่ 3.1-3.3 โดยวิธีการเลือกพื้นที่ตัวอย่างได้มาจากข้อมูลหลุมเจาะเพื่อหาตัวอย่างโดยดูจากค่าปริมาณร้อยละของ CaO ซึ่งวิธีการเก็บตัวอย่างจะกะเทาะชั้นหินในแนวขวางกับแนวชั้นหิน เพื่อให้ครอบคลุมองค์ประกอบของถ่านหินของชั้นนั้น



รูปที่ 3.1 แสดงการเก็บตัวอย่างของ Q2



รูปที่ 3.2 แสดงการเก็บตัวอย่างของ Q4



รูปที่ 3.3 แสดงการเก็บตัวอย่างของ K3



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างถ่านหิน Q2



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างถ่านหิน Q4

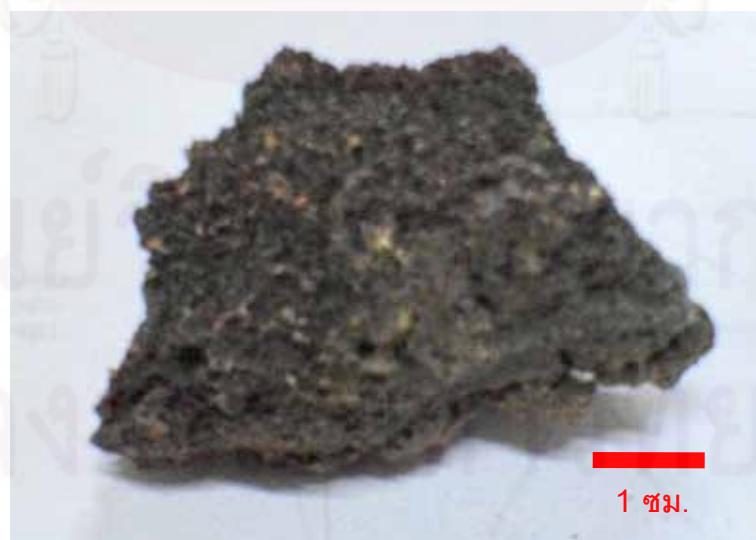




รูปที่ 3.6 ตัวอย่างถ่านหิน K3

### 3.3.2 ตัวอย่างตะกรัน

ตัวอย่างตะกรันได้มาจากผนังเตาในโรงไฟฟ้าชนิดที่ 9 จำนวน 4 ตัวอย่างโดยจะเรียกชื่อแต่ละตัวอย่างคือ Slag A, Slag B, Slag C และ Slag D โดยที่ Slag A เป็นตะกรันที่ได้จากถ่านหินที่มีค่าปริมาณร้อยละของ CaO สูง มีลักษณะเป็นรูพรุน มีสีดำสลับน้ำตาล Slag B ได้มาจากที่ติดผนังเตาโดยต้องปิดโรงไฟฟ้าเพื่อแกะตะกรันนี้ออกจากผนังเตา และ Slag C ได้จากส่วนที่ติดผนังก่อนและร่วงลงมาพร้อมเถ้าจม ดังรูปที่ 3.7 – 3.10



รูปที่ 3.7 ตัวอย่าง Slag A





รูปที่ 3.8 ตัวอย่าง Slag B



รูปที่ 3.9 ตัวอย่าง Slag C

### 3.4 ขั้นตอนการทำวิจัย

#### 3.4.1 การเตรียมและวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน

เมื่อได้ตัวอย่างมาแล้วจะทำการย่อยด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้ง (Roll Crusher) ให้ได้ขนาด 80 เมช (Mesh) แล้วนำไปซีกตัวอย่างออกไปบางส่วนก่อนนำไปบดโดยใช้เครื่องบดแบบเหวนจะได้ขนาดตัวอย่างประมาณ 325 เมช หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่บดแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังนี้

1) ทหาร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของแร่ (Ash Chemical Analysis) ซึ่งเป็นกรวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของแร่อนินทรีย์ในขี้เถ้าโดยนำตัวอย่างถ่านหินไปเผาที่อุณหภูมิ 750° C เพื่อให้ได้ขี้เถ้าแล้วนำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ ICPS ในรูปของ Oxides ซึ่งจะอยู่ในรูป  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ,  $\text{SO}_3$  และ  $\text{Na}_2\text{O}$  ดังตารางที่ 3.1 โดยใช้ค่าปริมาณร้อยละของ CaO เป็นเกณฑ์ในการกำหนดชนิดตัวอย่าง จากตารางพบว่า ตัวอย่างถ่านหิน Q2, K3 และ Q4 มีค่าปริมาณร้อยละของ CaO คือ 2.24, 27.42 และ 31.81 ตามลำดับ (ตัวหนาสีแดง) จะสังเกตว่า ตัวอย่างถ่านหิน K3 และ Q4 นี้มีค่าปริมาณร้อยละของ CaO อยู่ในช่วงของโอกาสที่ทำให้เกิดตะกรัน (คือ CaO อยู่ในช่วง 23 -35% ซึ่งเป็นช่วงที่จะเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้า)

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการทดสอบขององค์ประกอบเคมีของขี้เถ้าของตัวอย่างถ่านหิน

SAMPLE NAME	Q 2	Q 4	K 3
ASH COMPOSITION (% wt)	RESULT		
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	9.31	18.20	12.33
$\text{Al}_2\text{O}_3$	31.01	9.88	9.49
MgO	1.44	3.81	6.71
$\text{SiO}_2$	48.21	19.58	19.33
<b>CaO</b>	<b>2.24</b>	<b>27.42</b>	<b>31.81</b>
$\text{K}_2\text{O}$	4.03	0.69	0.69
$\text{Na}_2\text{O}$	1.02	2.27	3.17
$\text{TiO}_2$	0.44	0.13	0.11
$\text{Mn}_3\text{O}_4$	0.01	0.12	0.16
$\text{SO}_3$	0.42	17.00	13.50
TOTAL	98.13	99.10	97.30

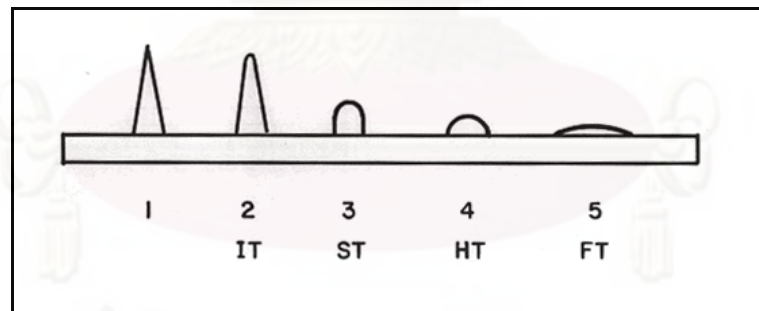
2) วิเคราะห์เพื่อหาอุณหภูมิการหลอมของเถ้า (Ash Fusion Temperature) ([http://maemohmine.egat.co.th/mining\\_technology/coal\\_analysis3.html](http://maemohmine.egat.co.th/mining_technology/coal_analysis3.html)) เป็นการศึกษาพฤติกรรมการหลอมของเถ้าถ่านหินที่อุณหภูมิสูง โดยจะวิเคราะห์เพื่อดูอุณหภูมิที่เถ้าเริ่มจะละลายโดยที่เถ้าจะถูกทำให้มีรูปร่างคล้ายกับรูปทรงพีระมิด และใส่เข้าไปในเตาเผาซึ่งออกแบบโดยเฉพาะภายใต้บรรยากาศที่มีหรือไม่มีออกซิเจน พร้อมทั้งสังเกตและบันทึกการเปลี่ยนแปลงผ่านกระจกเตาเผา โดยจะเริ่มที่อุณหภูมิ 900° C จนถึงอุณหภูมิ 1,600° C อุณหภูมิที่บันทึกมี 4 ค่า คือ

ก) Initial Deformation Temperature (IT) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างเริ่มหลอมตัว โดยเริ่มจากปลายยอด

ข) Softening Temperature (ST) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างหลอมละลายจนความสูงของแท่งตัวอย่างลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความสูง ของตัวอย่าง เริ่มต้น

ค) Hemispherical Temperature (HT) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างหลอมละลายจนความกว้างของฐานมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของความสูง

ง) Flow Temperature (FT) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างหลอมละลายจนไหล ซึ่ง ณ จุดนี้ ความสูงของตัวอย่างจะมีค่าเท่ากับ 1 ใน 3 ของความกว้าง ของฐาน ซึ่ง ลักษณะของรูปพีระมิดในแต่ละค่า นั้น จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.11



ที่มา: [http://maemohmine.egat.co.th/mining\\_technology/coal\\_analysis3.html](http://maemohmine.egat.co.th/mining_technology/coal_analysis3.html)

รูปที่ 3.10 รูปร่างของพีระมิดในแต่ละค่าของอุณหภูมิการหลอม

โดยพีระมิดหมายเลข 1 แทนลักษณะตัวอย่างก่อนเข้าเครื่องวิเคราะห์ หมายเลข 2 แทนค่า IT หมายเลข 3 แทนค่า ST หมายเลข 4 แทนค่า HT และหมายเลข 5 แทนค่า FT และหลังจากที่ได้เผาตัวอย่างเพื่อดูลักษณะพีระมิดแล้ววิเคราะห์ออกมา จะได้ผลตามในบทที่ 4 ตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่า ตัวอย่าง Q2 ที่มีค่าปริมาณร้อยละของ CaO ต่ำ จะมีค่า IT สูง ซึ่งต่างจากตัวอย่าง K3 และ Q4 โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตัวอย่าง Q4 ค่า IT ต่ำกว่าอุณหภูมิตั้งแต่เตาเผา

จริง ดังนั้นเมื่ออยู่ในบริเวณห้องเผา Q4 จะมีโอกาสหลอมตัวติดผนังเตาได้เร็ว ณ อุณหภูมิต่ำทำให้เกิดตะกรันได้ง่ายขึ้น

3) การนำตัวอย่างถ่านหินมาเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันแล้ววิเคราะห์ด้วยวิธีรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน (X-Ray Diffractometer – XRD) โดยนำตัวอย่างทั้งสามที่ผ่านการบดแล้ว มาชกตัวอย่างด้วยวิธี Cone and Quartering แล้วนำมาเผาในเตาเผาโดยใส่ตัวอย่างในถ้วยทนไฟประมาณ 15 กรัม ก่อนนำเข้าเตาเผาเพื่ออุณหภูมิประกอบทางเคมีของแร่ที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยเริ่มเผาจากอุณหภูมิ ห้องจนถึงอุณหภูมิ 800° C อีก 3 ชั่วโมง จากนั้น นำออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นสักพักแล้วนำไปไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยากับอากาศ จนเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์มากจนเกินไป ทำเช่นนี้เรื่อยไปโดยจะเพิ่มอุณหภูมิทีละ 100° C จนถึงอุณหภูมิ 1,200° C และนำตัวอย่างในแต่ละอุณหภูมิมาวิเคราะห์โดยวิธี XRD

4) นำตัวอย่าง Q2 และ Q4 มาผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ คือ 20% Q2 + 80% Q4, 40% Q2 + 60% Q4, 60% Q2 + 40% Q4, และ 80 %Q2 + 20% Q4 ทั้งหมด 4 ตัวอย่าง จากนั้นทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 2) และข้อ 3)

### 3.4.2 การเตรียมและวิเคราะห์ตัวอย่างตะกรัน

นำตัวอย่างตะกรันทั้ง 3 ตัวอย่าง (Slag A, B และ C) มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105° C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นทิ้งให้เย็น แล้วนำมาบดในเครื่องบดแบบแหวนจะได้นขนาดประมาณ 325 เมช จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี XRD แล้วนำผลวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ XRD ที่ได้จากตัวอย่างถ่านหินจากข้อ 2) และข้อ 3) ในหัวข้อที่

3.4.1



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการหาอุณหภูมิการหลอมของเถ้าถ่านหิน (Ash Fusion Temperature Analysis) และตัวอย่างถ่านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กันด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

#### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการหาอุณหภูมิการหลอมของเถ้า

นำตัวอย่างถ่านหิน Q2 (%CaO = 2.24), Q4 (%CaO = 27.42) และตัวอย่าง K3 (%CaO = 31.81) มาอบให้แห้งแล้วนำมาบดให้ผ่านรูละเอียดขนาด 200 เมช (ประมาณ 74 ไมครอน) ทั้งหมด จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจนกลายเป็นเถ้าถ่านหิน แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิการหลอมด้วยเครื่อง Ash Fusibility Determinator รุ่น AF 700 ในสภาพบรรยากาศออกซิเจน โดยเริ่มเผาที่อุณหภูมิ 900°C จนถึง 1,600°C ได้ผลวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิของการหลอมตัวของเถ้าตัวอย่าง Q2, Q4 และ K3

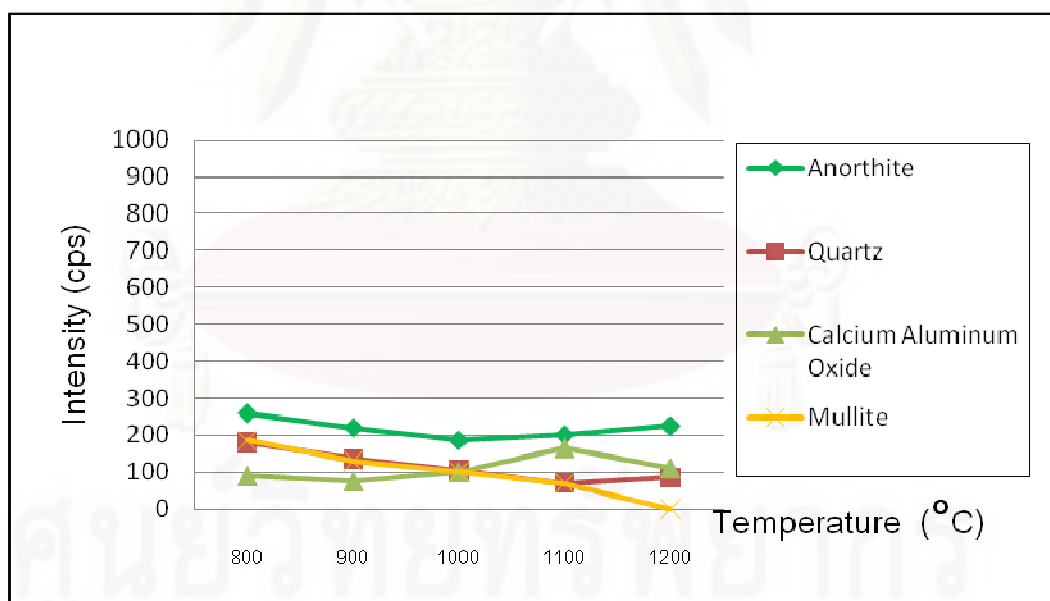
SAMPLE NAME	Q2	Q4	K3
ASH FUSION TEMPERATURE ( °C)	RESULT		
INITIAL DEFORMATION TEMPERATURE (IT)	>1,500	1,197	1,301
SOFTENING TEMPERATURE (ST)	>1,500	1,305	1,314
HEMISPHERICAL TEMPERATURE (HT)	>1,500	1,307	1,328
FLUID TEMPERATURE (FT)	>1,500	1,329	1,369

จากตารางที่ 4.1 พบว่าตัวอย่าง Q4 ซึ่งมีค่า %CaO ปานกลางจะมีค่า IT ต่ำที่สุด ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิในเตาเผาของหม้อไอน้ำ (อุณหภูมิประมาณ 1,300°C) ทำให้เกิดการหลอมตัว

ในผนังเตาได้ง่าย ส่วนตัวอย่าง Q2 ซึ่งมีค่า %CaO ต่ำ มีค่า IT สูง (มากกว่า  $1,500^{\circ}\text{C}$ ) และตัวอย่าง K3 ซึ่งมีค่า %CaO สูง มีค่า IT ประมาณ  $1,300^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดของหม้อไอน้ำที่หากนำถ่านหิน K3 ไปเผาอาจเกิดตะกั่วในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าได้

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

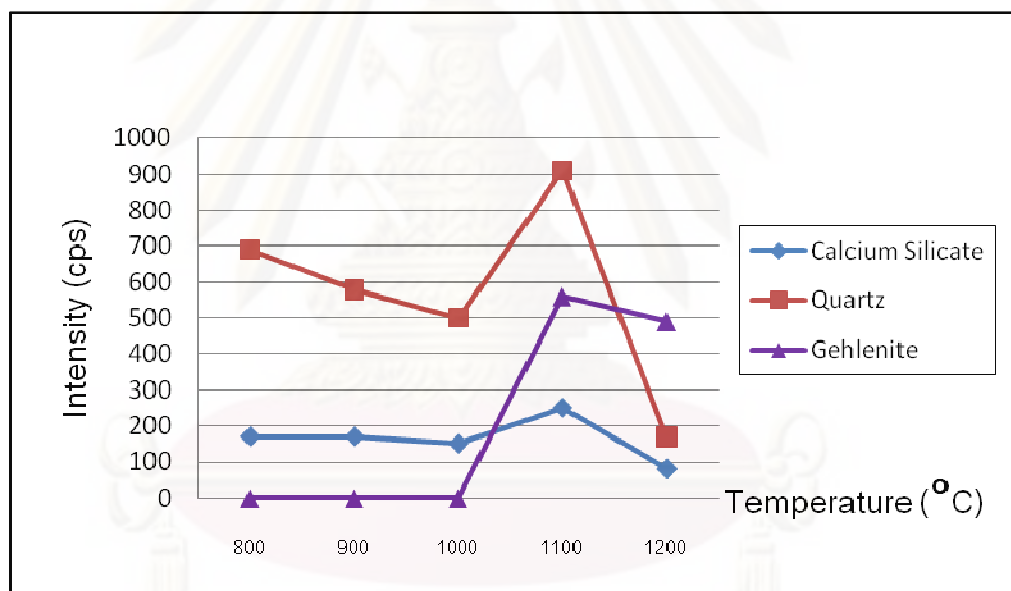
การวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน Q2, Q4 และตัวอย่าง K3 เพื่อหาชนิดของแร่ในแต่ละอุณหภูมิเริ่มด้วยการนำตัวอย่าง Q2, Q4 และ K3 ไปเผาที่อุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$ ,  $900^{\circ}\text{C}$ ,  $1,000^{\circ}\text{C}$ ,  $1,100^{\circ}\text{C}$  และ  $1,200^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมงในแต่ละอุณหภูมิ หลังจากนั้นนำถ่านหินที่เหลือจากการเผาไหม้มาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ XRD ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance แหล่งกำเนิดรังสีคือ ทองแดง (Cu Tube) กำลังไฟ 40 kV, 40 mA และ  $\text{CuK}\alpha = 1,544$  เพื่อหาชนิดของแร่ในถ่านหิน ได้ผลวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ซึ่งแสดงการเกิดของแร่ในถ่านหิน Q2 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.1 พบว่าที่อุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$  ตัวอย่าง Q2 เกิดเป็นแร่มุลไลต์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) แร่ควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) แร่อะนอร์ไทต์ ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) และแร่แคลเซียมอลูมินัมออกไซด์

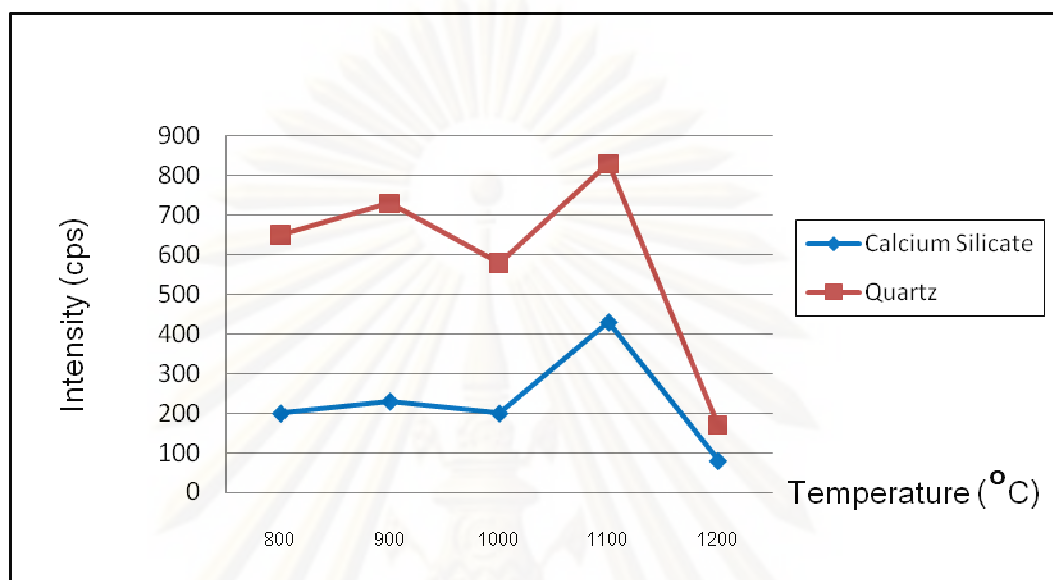
( $3\text{CaO}\cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ปริมาณของแร่ควอตซ์กับแร่มูลไลต์ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแต่แร่ควอตซ์กลับมีปริมาณเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ  $1,100^\circ\text{C}$  ในขณะที่แร่มูลไลต์หายไป ส่วนแร่แคลเซียมซิลิเกตมีปริมาณเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ  $1,100^\circ\text{C}$  แล้วกลับลดลงเมื่ออุณหภูมิ  $1,200^\circ\text{C}$  อาจเกิดจากการที่  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ของแร่มูลไลต์ทำปฏิกิริยากับ  $\text{CaO}$  ที่อุณหภูมิ  $1,200^\circ\text{C}$  นี้ จากนั้นปริมาณลดลง และอาจเกิดจากการที่  $\text{SiO}_2$  ของแร่มูลไลต์ทำปฏิกิริยากันกับแร่แคลเซียมซิลิเกตที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้แร่ควอตซ์กับแร่อะนโทไตต์มีปริมาณสูงขึ้น ส่วนแร่มูลไลต์ที่เหลือเริ่มเปลี่ยนสภาพเป็นผลึกอสัณฐานที่อุณหภูมิ  $1,200^\circ\text{C}$  และเมื่อนำมาเทียบกับผลวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมแล้วแสดงว่า เมื่อค่า  $\%\text{CaO}$  ต่ำจะทำให้อุณหภูมิของการเริ่มหลอมตัวสูง ( $IT > 1,500^\circ\text{C}$ ) เนื่องจากเกิดแร่มูลไลต์ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูง



รูปที่ 4.2 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ซึ่งแสดงการเกิดของแร่ในถ้ำถ่านหิน Q4 ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.2 ตัวอย่าง Q4 เกิดแร่แคลเซียมซิลิเกต ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) และแร่ควอตซ์ที่อุณหภูมิระหว่าง  $800 - 1,000^\circ\text{C}$  จากนั้นพบว่ามีเปลี่ยนแปลงชัดเจนที่อุณหภูมิ  $1,100^\circ\text{C}$  โดยมีปริมาณของแร่แคลเซียมซิลิเกตและแร่ควอตซ์เพิ่มสูงขึ้น รวมถึงเกิดแร่เกห์เลไนต์ ( $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ ) ขึ้น และปริมาณแร่ลดลงเมื่ออุณหภูมิ  $1,200^\circ\text{C}$  เนื่องจากแร่แคลเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับแร่

ควอตซ์เกิดเป็นแร่เกอร์ไลไนต์ซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าอุณหภูมิของการหลอมตัวต่ำลง ( $IT = 1,197^{\circ}\text{C}$ ) แสดงดังตารางที่ 4.1

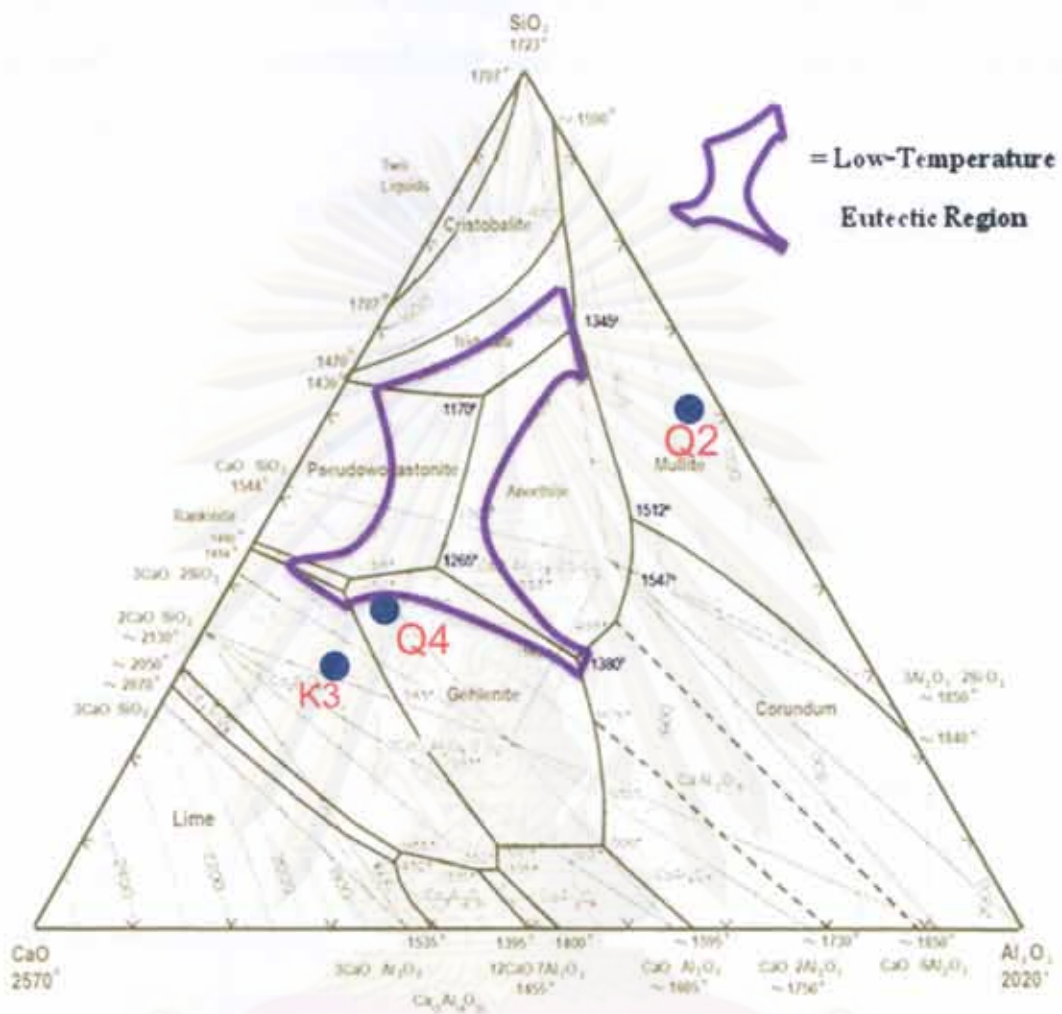


รูปที่ 4.3 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ซึ่งแสดงการเกิดของแร่ในเก้าถ่านหิน K3 ซึ่งผ่านการเผาที่ อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.3 ตัวอย่าง K3 เกิดเฉพาะแร่แคลเซียมซิลิเกตและแร่ควอตซ์ ลักษณะจะคล้ายกับตัวอย่าง Q4 เพียงแต่ไม่เกิดแร่เกอร์ไลไนต์ที่อุณหภูมิ  $1,100^{\circ}\text{C}$  จึงทำให้ค่า IT สูงกว่าเก้าถ่านหิน Q4 และเมื่ออุณหภูมิถึง  $1,200^{\circ}\text{C}$  ปริมาณของแร่ทั้งสองลดลง อาจเป็นเพราะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็นผลึกอสัณฐาน

จากกราฟ XRD ของทั้ง 3 ตัวอย่างนี้ (รูปที่ 4.1-4.3) สามารถอธิบายการเกิดของแร่โดยใช้ Ternary Phase Diagram (ดังรูปที่ 4.4) โดยนำค่าปริมาณร้อยละของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO}$  ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย ICPS (จากตารางที่ 3.1 ในบทที่ 3) มาเทียบให้เป็น 100% ก่อน แล้วจึงจะนำมากำหนดตำแหน่งของแต่ละตัวอย่างลงใน Phase Diagram โดยองค์ประกอบของตัวอย่าง Q2 เมื่อนำมาพล็อตลงใน Phase Diagram จะพบว่าแร่หลักของตัวอย่างนี้จะเกิดอยู่ในบริเวณของแร่มุลไลต์ ส่วนองค์ประกอบของตัวอย่าง Q4 จะพบว่าแร่หลักของตัวอย่างนี้จะเกิดอยู่ในบริเวณของแร่เกอร์ไลไนต์ และองค์ประกอบของตัวอย่าง K3 เมื่อนำมาพล็อตกราฟจะพบว่าแร่หลักของตัวอย่างนี้จะเกิดอยู่ในบริเวณของแร่แคลเซียมซิลิเกต





รูปที่ 4.4 แสดง Ternary Phase Diagram ของตัวอย่าง Q2, Q4 และ K3

จากรูปที่ 4.4 พบว่า องค์ประกอบของแร่ที่เกิดขึ้นในบริเวณของแร่เกห์เลินต์นั้น มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสใกล้เคียงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสต่ำ (Low-Temperature Eutectic Region) ด้วย จึงสรุปว่า องค์ประกอบของแร่ตัวอย่างที่มีปริมาณของ CaO ประมาณ 27% อุณหภูมิการหลอมต่ำอาจเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดตะกอนในหม้อไอน้ำได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4.2 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการหาอุณหภูมิการหลอมของแก้วถ่านหิน และผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินผสมระหว่าง Q2 และ Q4 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กันด้วยเครื่อง XRD

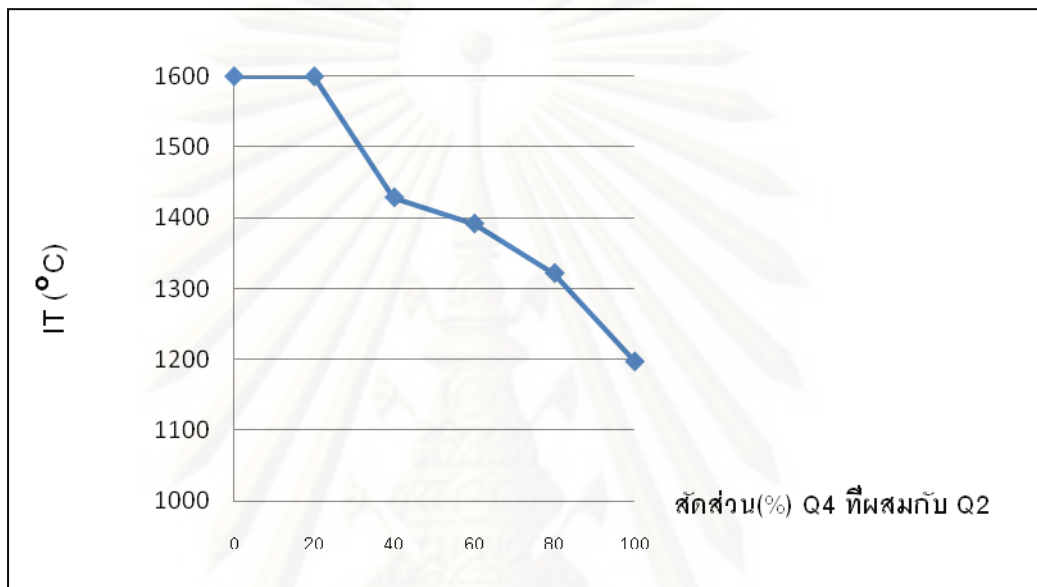
### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการหาอุณหภูมิการหลอมของแก้วถ่านหิน

นำตัวอย่าง Q2 และตัวอย่าง Q4 มาผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ คือ 20% Q2 + 80% Q4, 40% Q2 + 60% Q4, 60% Q2 + 40% Q4, และ 80% Q2 + 20% Q4 มาเตรียมตัวอย่างและวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 4.1.1 ผลวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิของการหลอมตัวของแก้วตัวอย่าง Q2 ที่ผสมกับ Q4 ในปริมาณต่าง ๆ

SAMPLE NAME	100% Q2	80% Q2 + 20% Q4	60% Q2 + 40% Q4	40% Q2 + 60% Q4	20% Q2 + 80% Q4	100% Q4
ASH FUSION TEMPERATURE (°C)	RESULT					
INITIAL DEFORMATION TEMPERATURE (IT)	>1,500	>1,500	1,429	1,392	1,322	1,197
SOFTENING TEMPERATURE (ST)	>1,500	>1,500	1,467	1,425	1,348	1,305
HEMISPHERICAL TEMPERATURE (HT)	>1,500	>1,500	> 1,500	1,443	1,362	1,307
FLUID TEMPERATURE (FT)	>1,500	>1,500	> 1,500	1,450	1,401	1,329

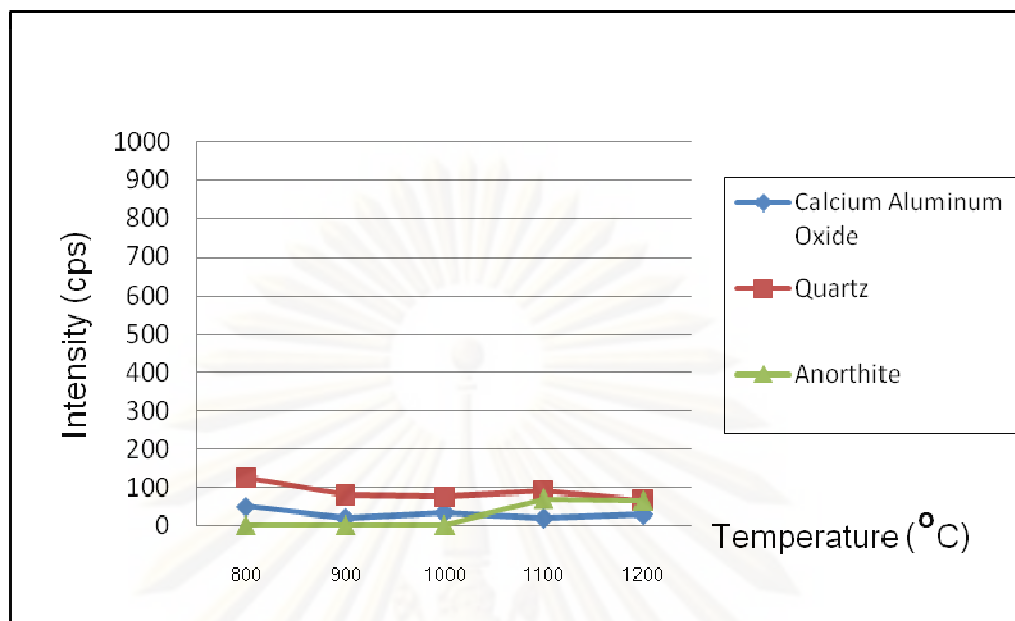
จากตารางที่ 4.2 พบว่า ตัวอย่างแก้วถ่านหินผสม 20% Q2 + 80% Q4 มีค่า IT ต่ำที่สุด (1,322°C) เนื่องจากมีส่วนผสมของตัวอย่าง Q4 มากที่สุดคือ 80% ซึ่งสามารถนำพล็อตลงไป ในกราฟระหว่างตัวอย่างถ่านหินผสมกันระหว่าง Q2 กับ Q4 กับอุณหภูมิการหลอมตัวเริ่มต้น (IT) ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอมกับปริมาณถ่านหินผสมระหว่าง Q2 กับ Q4

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินผสมระหว่าง Q2 และ Q4 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กันด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer

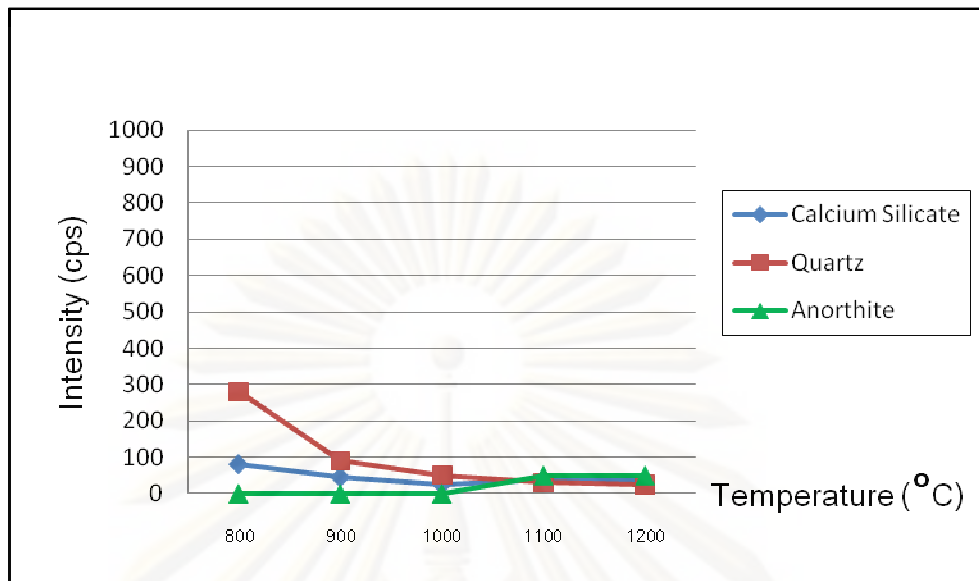
นำตัวอย่างแก้วถ่านหินที่ผสมกันระหว่าง ตัวอย่างถ่านหิน Q2 กับ Q4 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน ณ อุณหภูมิต่าง ๆ กัน (ตัวอย่างเดียวกันกับในหัวข้อที่ 4.1.2) มาวิเคราะห์หาชนิดของแร่ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง XRD และได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.5 – 4.8



รูปที่ 4.5 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ซึ่งแสดงการเกิดของแร่ในแก้วถ่านหิน 80% Q2 กับ 20% Q4 ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

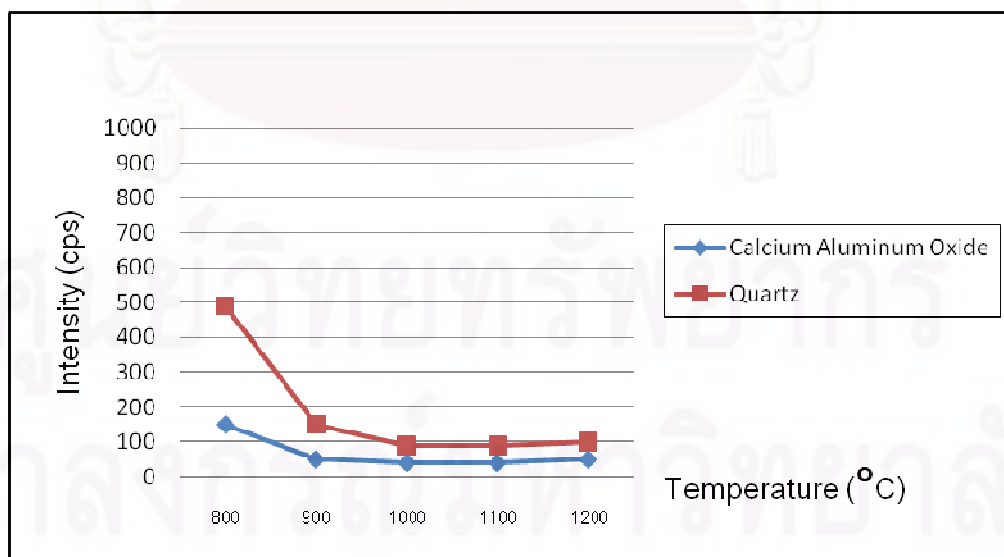
จากรูปที่ 4.5 พบว่าแร่แคลเซียมอลูมินัมออกไซด์กับแร่ควอตซ์เกิดขึ้นระหว่างอุณหภูมิ 800°C - 1,000°C และเมื่อถึงอุณหภูมิ 1,100°C ทั้งสองแร่ทำปฏิกิริยากันจนเกิดเป็นแร่อะนอไทต์ขึ้น จากนั้นปริมาณของแร่ควอตซ์ลดลงที่อุณหภูมิ 1,200°C และค่า IT ที่ได้จากการวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมพบว่า มีค่าสูงกว่า 1,500°C เนื่องจากมีส่วนของตัวอย่าง Q2 (ที่มี IT สูงกว่า 1,500°C) ปนอยู่ในสัดส่วนที่สูงถึง 80%





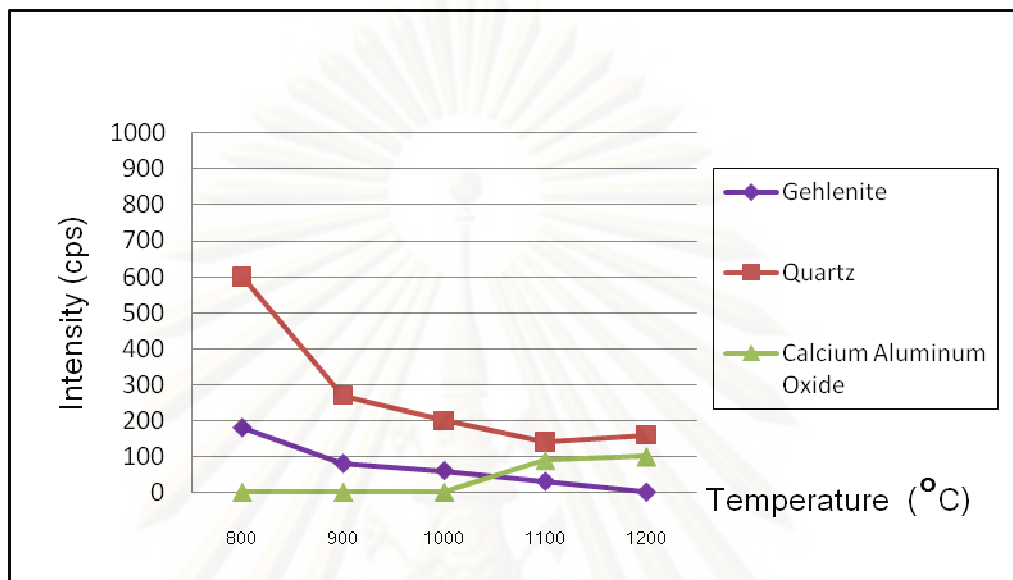
รูปที่ 4.6 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ซึ่งแสดงการเกิดของแร่ในถ้ำถ่านหิน 60% Q2 กับ 40% Q4 ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.6 ปริมาณแร่ควอตซ์ลดลงอย่างมากเมื่อถึงอุณหภูมิ 900°C เช่นเดียวกับแร่แคลเซียมซิลิเกต จนกระทั่งถึงอุณหภูมิประมาณ 1,100°C ทั้งแร่ควอตซ์และแร่แคลเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นแร่อะนอไทต์และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 1,200°C ในขณะที่แร่ควอตซ์และแร่แคลเซียมซิลิเกตมีปริมาณลดลง



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟ XRD ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิกับการเกิดแร่ของตัวอย่างถ่านหินผสมกันระหว่าง 40% Q2 กับ 60% Q4

จากรูปที่ 4.7 ที่อุณหภูมิ 800°C พบเฉพาะแร่แคลเซียมอลูมิเนียมออกไซด์กับแร่ควอตซ์ เท่านั้น จากนั้นปริมาณของแร่ทั้งสองชนิดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

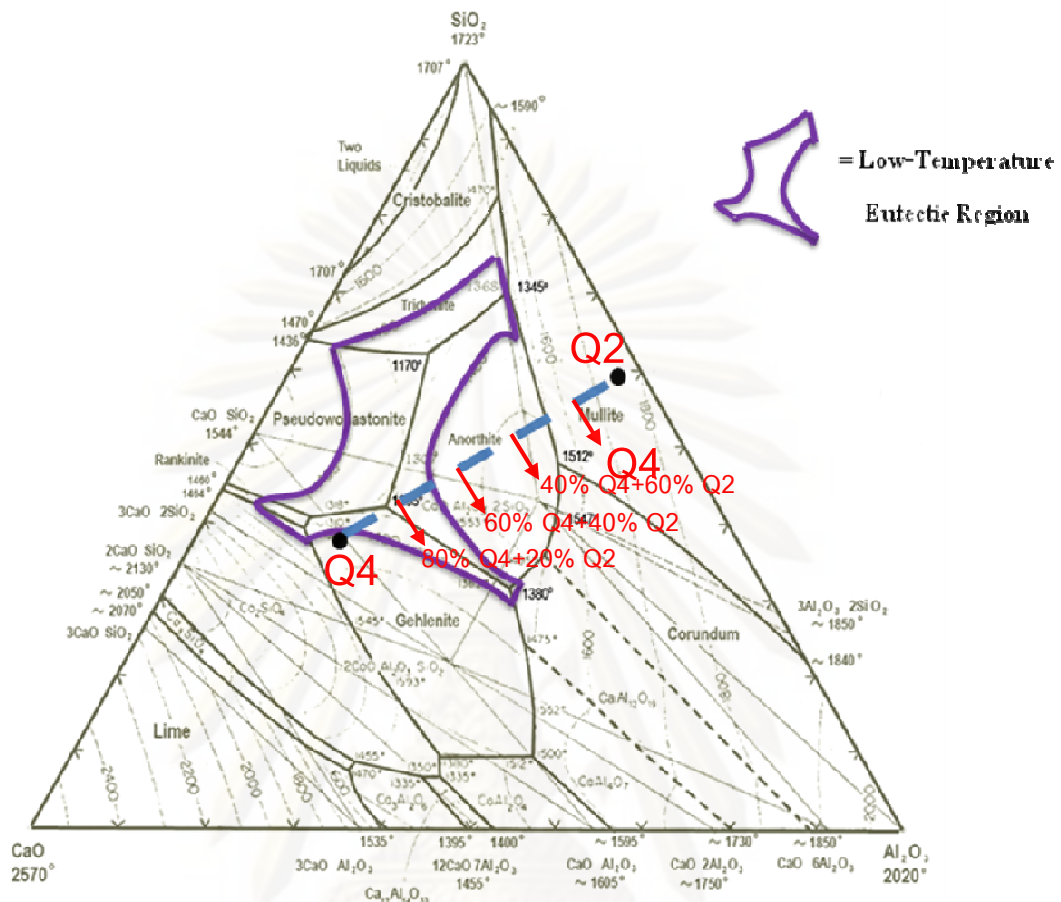


รูปที่ 4.8 แสดงกราฟ XRD ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิกับการเกิดแร่ของตัวอย่างถ่านหินผสมกันระหว่าง 20% Q2 กับ 80% Q4

ส่วนรูปที่ 4.8 พบแร่เกห์เลไนต์และแร่ควอตซ์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 800°C จากนั้นปริมาณของแร่ทั้งสองชนิดลดลงเรื่อย ๆ จนถึงอุณหภูมิ 1,100°C แร่เกห์เลไนต์เริ่มหายไปเนื่องจากทำปฏิกิริยากับควอตซ์ที่อุณหภูมินี้เกิดเป็นแร่แคลเซียมอลูมิเนียมออกไซด์

ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่างแร่ Q2 และ Q4 ได้ด้วย Ternary Phase Diagram ดังรูปที่ 4.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 แสดง Ternary Phase Diagram ความสัมพันธ์ของตัวอย่าง Q2 ที่ผสมกับ Q4

จากรูปที่ 4.9 การผสมตัวอย่างระหว่าง Q2 กับ Q4 เมื่อผสมกันถึงอัตราส่วนหนึ่ง มีแนวโน้มก่อให้เกิดตะกั่วขึ้นได้ เนื่องจาก อัตราส่วนของการผสมถ่านนั้น ได้พาดผ่านบริเวณที่มี อุณหภูมิของการหลอมต่ำ (Low – Temperature Eutectic Region) ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จาก XRD คือตัวอย่างถ่านที่ผสมระหว่าง 20% Q2 กับ 80% Q4 เกิดแร่เกห์เลไนต์ขึ้น (เครื่องหมายลูกศร แสดงอัตราส่วนร้อยละของ Q4 ที่เพิ่มขึ้น) จะตกอยู่ในบริเวณของการหลอมตัวต่ำพอดี

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างตะกั่วด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

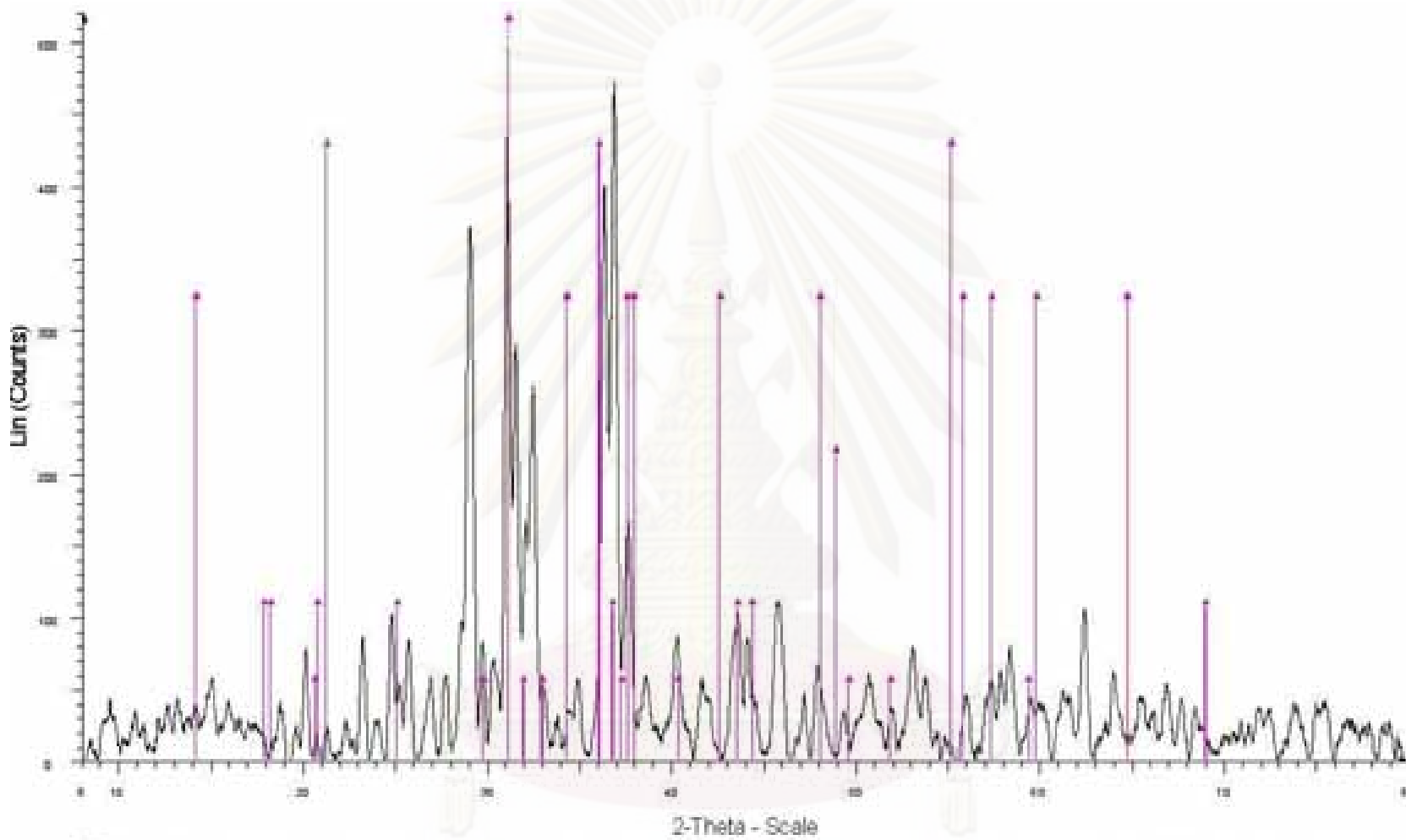
นำตัวอย่างตะกั่วทั้ง 4 ตัวอย่าง (Slag A, B, และ C) ที่ผ่านการอบและบดแล้วมา วิเคราะห์หาชนิดแร่ด้วยเครื่อง XRD พบว่า ตัวอย่าง Slag A คือแร่เกห์เลไนต์และแร่อะเคอร์มานไนต์ ( $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ ) ซึ่งมีองค์ประกอบคล้ายกับแร่เกห์เลไนต์ เพียงแต่มี Mg เข้าไปทำปฏิกิริยากับ

แคลเซียมซิลิเกตแทนที่  $Al_2O_3$  เกิดเป็นแร่อะเคอร์มาไนต์ขึ้น Slag B พบแร่เกห์เลไนต์ และ Slag C พบแร่เกห์เลไนต์และแร่อะนอร์ไทต์ ซึ่งผลวิเคราะห์แสดงไว้ดังรูปที่ 4.10 – 4.15 โดยสรุปว่า ตัวอย่างตะกรันทั้งสามตัวอย่างมีแร่เกห์เลไนต์ที่น่าจะเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เก้าถ่านหินเกิดการหลอมตัวในอุณหภูมิต่ำจนเกิดตะกรันขึ้นมา และแร่เกห์เลไนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตะกรัน ตรงกับชนิดของแร่ที่เกิดขึ้นของตัวอย่างถ่านหิน Q4 และตัวอย่างเก้าถ่านหินผสมระหว่าง 20% Q2 กับ 80% Q4 ซึ่งทำให้มีอุณหภูมิของการหลอมตัวต่ำและยังสอดคล้องกับตำแหน่งของแร่ ที่อยู่ใกล้บริเวณที่มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสต่ำอีกด้วย



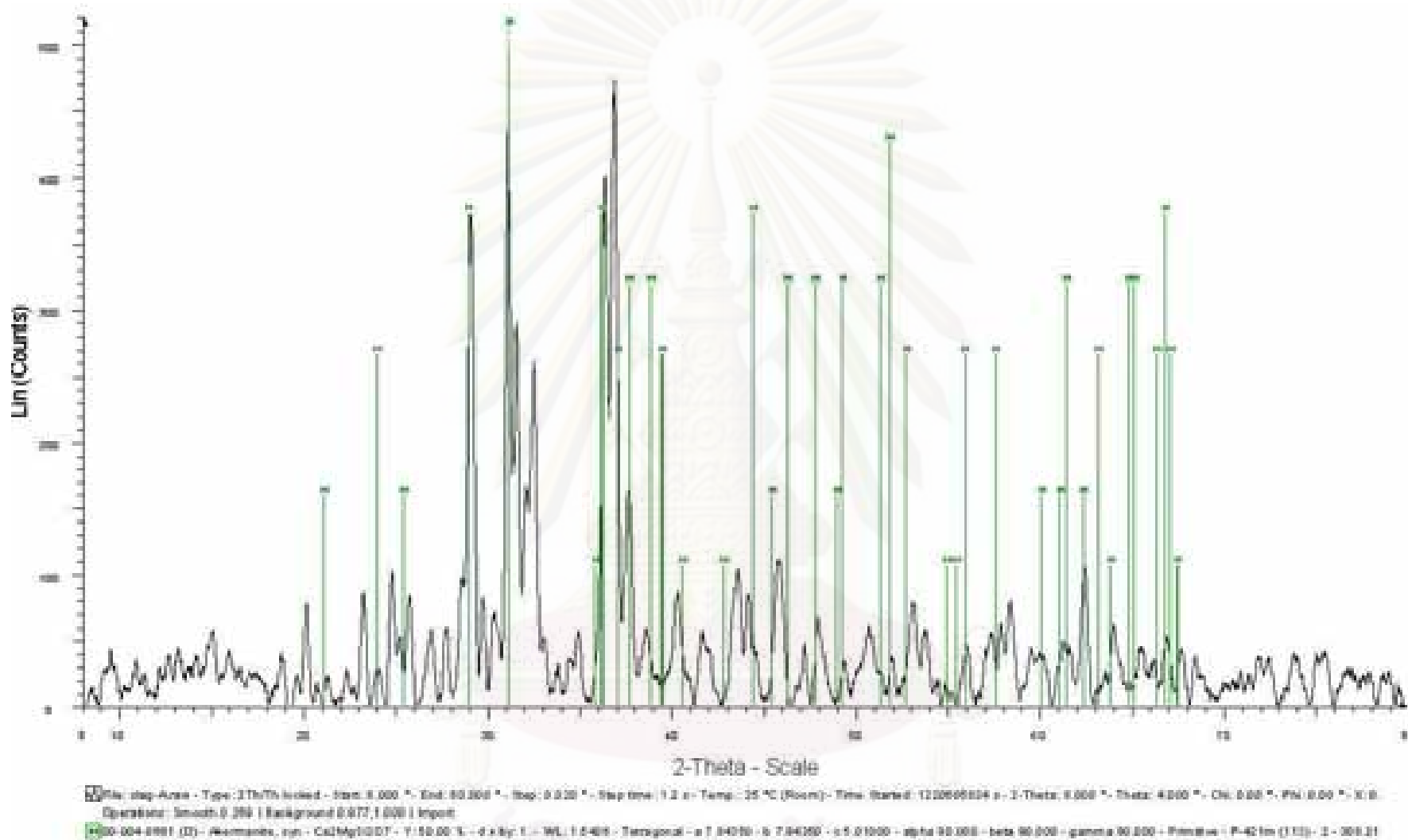
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



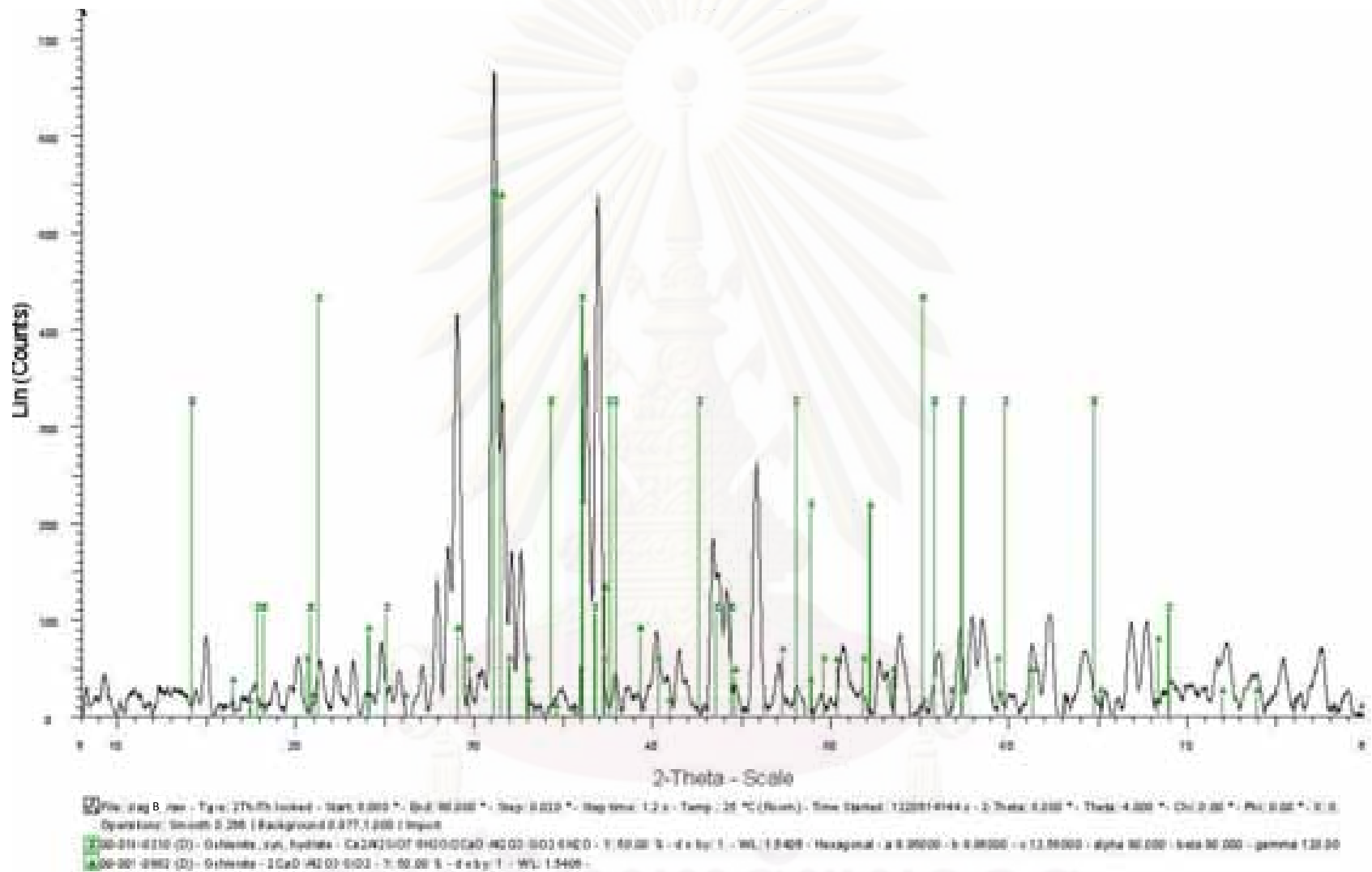


File: slag-A.zip - Type: 2Th/Th locked - Start: 8.000 ° - End: 90.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 1.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time started: 122855024 s - 2-Theta: 8.000 ° - Theta: 4.000 ° - Di: 0.02 ° - Phi: 0.00 ° - X: 0  
 Operator: Smooth 0.200 | Background 0.977 | Offset  
 00-019-0219 (2) - GdFeldsp, hydrate - Ca2Al2SiO7·nH2O/2CaO·nH2O | 503-916-0 - T: 50.00 ° - d x by: 1 - WL: 1.5406 - Hexagonal - a 0.99500 - b 0.99500 - c 12.95000 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000

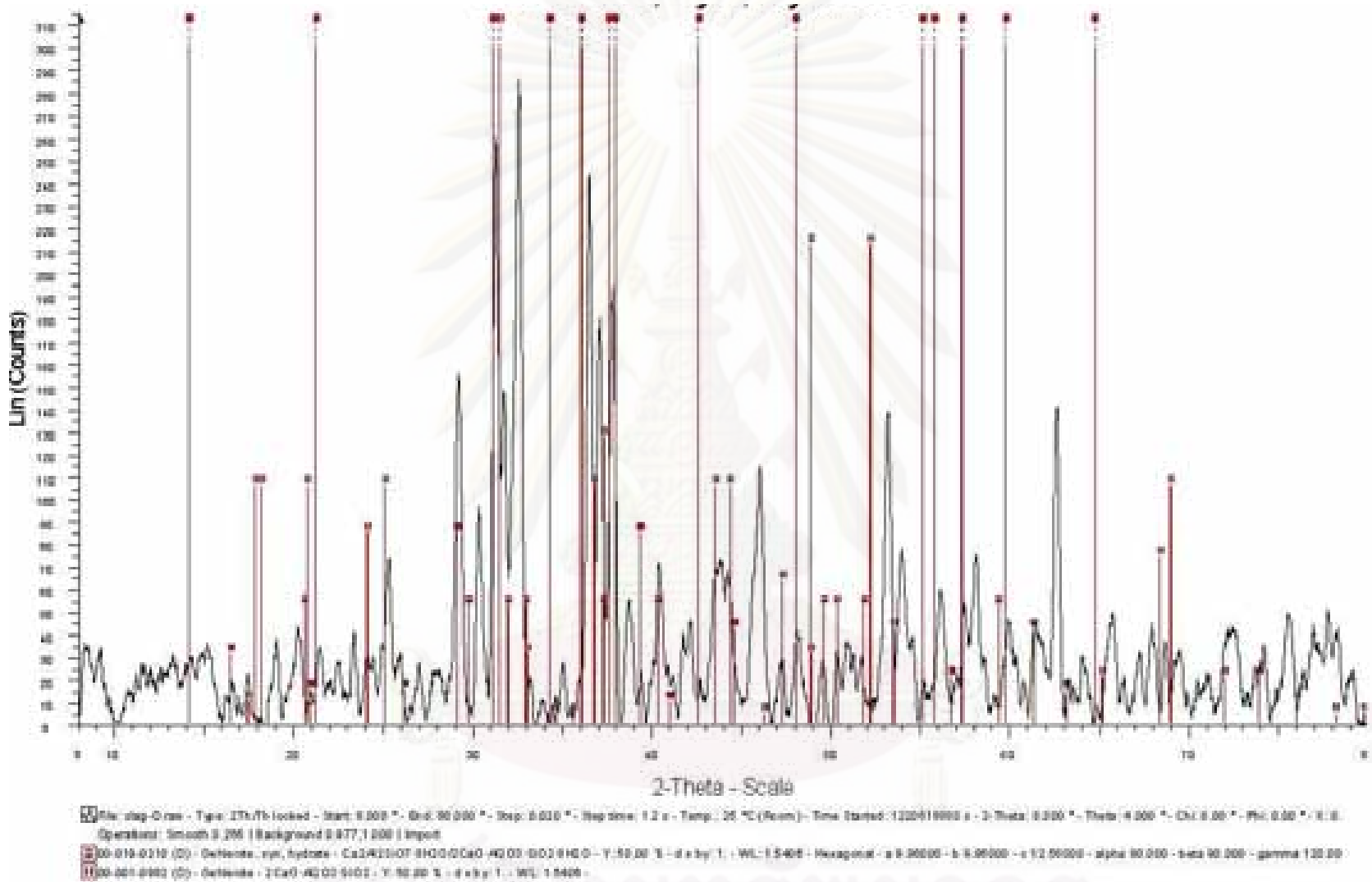
รูปที่ 4.10 XRD Pattern ของตัวอย่าง Slag A (แร่เกิร์ตไลน์ต์)



รูปที่ 4.11 XRD Pattern ของตัวอย่าง Slag A (แร่อะเคอร์ไมไนต์)

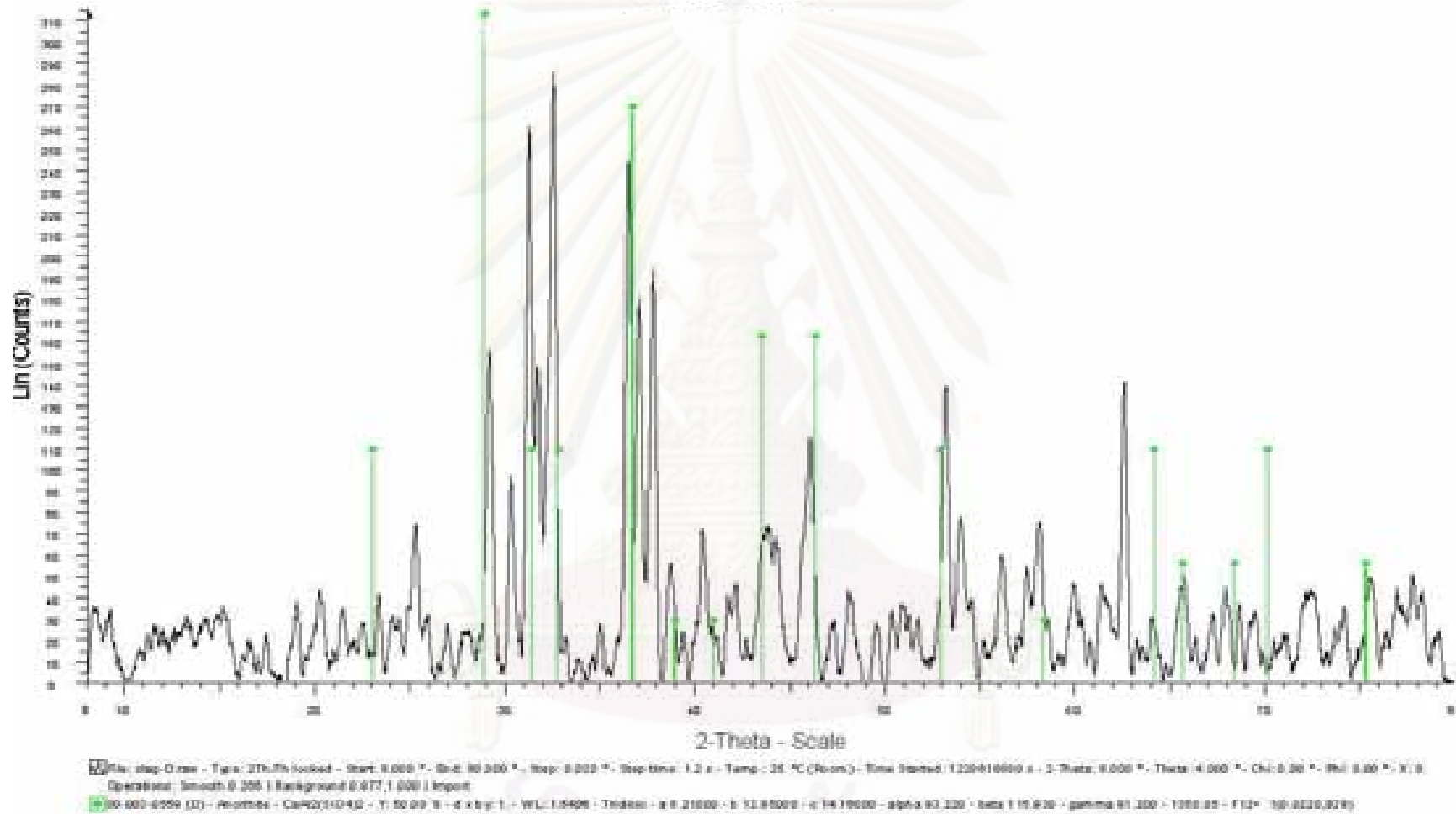


รูปที่ 4.12 XRD Pattern ของตัวอย่าง Slag B (แร่เกห์ไลไนต์)



รูปที่ 4.13 XRD Pattern ของตัวอย่าง Slag C (แร่เกิร์ตไลต์)





รูปที่ 4.14 XRD Pattern ของตัวอย่าง Slag C (แฉะนอโต้)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างแก้วถ่านหินจำนวน 3 ตัวอย่าง คือ Q2, Q4 และ K3 โดยหาค่าประกอบของแร่ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 750°C โดยใช้เครื่อง ICPS ผลวิเคราะห์พบว่าตัวอย่างแก้ว Q2 มีปริมาณร้อยละของ CaO เท่ากับ 2.24% (CaO ต่ำ) ตัวอย่างแก้ว Q4 มีปริมาณร้อยละของ CaO เท่ากับ 27.42% (CaO ปานกลาง) และตัวอย่างแก้ว K3 มีปริมาณร้อยละของ CaO เท่ากับ 31.81% (CaO สูง)

ส่วนผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่าอุณหภูมิการหลอมเริ่มต้นพบว่า ตัวอย่างแก้ว Q2 มีค่า IT สูง (มากกว่า 1,500°C) ตัวอย่างแก้ว Q4 มีค่า IT ต่ำ (1,197°C) ส่วนตัวอย่างแก้ว K3 มีค่า IT ปานกลาง (1,301°C) โดยที่ตัวอย่างแก้ว Q4 มีค่า IT ต่ำกว่าอุณหภูมิในหม้อไอน้ำ ซึ่งอุณหภูมิของหม้อไอน้ำประมาณ 1,200 - 1,300°C

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ที่อุณหภูมิ 800°C, 900°C, 1,000°C 1,100°C และ 1,200°C เพื่อหาชนิดของแร่พบว่าชนิดแร่ของตัวอย่างแก้ว Q2 คือ แร่มุลไลต์ แร่อะนอร์ไทต์ แร่ควอตซ์ และแร่แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ ตัวอย่างแก้ว Q4 มีชนิดแร่คือ แร่เกิร์ตเลไนต์ แร่ควอตซ์ และแร่แคลเซียมซิลิเกต ส่วนตัวอย่างแก้ว K3 มีชนิดแร่คือ แร่ควอตซ์ และแร่แคลเซียมซิลิเกต ส่วนตัวอย่างแก้วตะกั่วที่ได้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่าตะกั่วทั้ง 3 ตัวอย่างมีแร่เกิร์ตเลไนต์เป็นองค์ประกอบ ส่วนแร่อะนอร์ไทต์ที่มีอยู่ในตัวอย่าง Slag A อาจเนื่องมาจากถ่านหินที่ถูกป้อนเข้าไปในโรงไฟฟ้านั้นมีองค์ประกอบ % MgO สูง ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมกับซิลิเกตเกิดเป็นแร่อะนอร์ไทต์ขึ้น และแร่อะนอร์ไทต์ที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง Slag C ร่วมกับแร่เกิร์ตเลไนต์ซึ่งเป็นสาเหตุให้ตะกั่วที่เกิดขึ้นนั้นร่วงลงมาอยู่ส่วนล่างของเตาเนื่องจากว่าแร่อะนอร์ไทต์มีจุดหลอมเหลวสูง ดังนั้นเมื่ออยู่ในอุณหภูมิของเตาจึงยังไม่เกิดการหลอมตัว แต่แร่เกิร์ตเลไนต์เกิดการหลอมตัว จึงเกิดเป็นตะกั่วร่วงลงสู่ก้นเตา ส่วนตัวอย่างแก้วถ่านหินที่ผสมกันระหว่าง Q2 กับ Q4 ในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า อัตราส่วนระหว่าง 20% Q2 + 80% Q4 พบแร่เกิร์ตเลไนต์

เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วิเคราะห์กับความเข้มของ XRD พบว่า ตัวอย่างแก้ว Q2 พบว่าแร่มุลไลต์ แร่ควอตซ์ และแร่อะนอร์ไทต์มีปริมาณลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนแร่แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 1,100°C จากนั้นปริมาณลดลง แต่แร่ควอตซ์กับแร่อะนอร์ไทต์มีปริมาณสูงขึ้น ส่วนแร่มุลไลต์เริ่มเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิ 1,200°C ส่วนตัวอย่างแก้ว K3 พบว่า เมื่อถึงอุณหภูมิ 1,100°C แร่ควอตซ์ และ แร่แคลเซียมซิลิเกตจะเริ่ม

เปลี่ยนเฟสจนถึงอุณหภูมิ  $1,200^{\circ}\text{C}$  และตัวอย่างเก่า Q4 จะพบแร่เกห์เลไนต์ที่อุณหภูมิ  $1,100^{\circ}\text{C}$  ส่วนแร่ควอตซ์ ปริมาณลดลงอย่างมากที่อุณหภูมิ  $1,100^{\circ}\text{C}$  คาดว่าอาจเกิดจากแร่ควอตซ์ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกต ส่วนตัวอย่างเก่าถ่านหินที่ผสมกันระหว่าง  $20\% \text{ Q2} + 80\% \text{ Q4}$  พบแร่เกห์เลไนต์และแร่ควอตซ์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$  จากนั้นปริมาณของแร่ทั้งสองชนิดลดลงจนถึงอุณหภูมิ  $1,100^{\circ}\text{C}$  แร่เกห์เลไนต์เริ่มหายไปเนื่องจากทำปฏิกิริยากับควอตซ์ที่อุณหภูมินี้เกิดเป็นแร่แคลเซียมอลูมินัมออกไซด์

ผลการวิจัยได้ข้อสรุปว่า ค่าปริมาณร้อยละของ CaO ที่ 27 เปอร์เซ็นต์ (จากตัวอย่างเก่า Q4) และตัวอย่างเก่าถ่านหินที่ผสมกันระหว่าง  $20\% \text{ Q2} + 80\% \text{ Q4}$  มีชนิดของแร่เช่นเดียวกับตะกอนเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง ( $1,100^{\circ}\text{C}$ ) คือ แร่เกห์เลไนต์ และยังสามารถทำนายการเกิดตะกอนได้โดย Ternary Phase Diagram โดยพล็อตจากองค์ประกอบทางเคมีของแร่ที่มีอยู่ในตัวอย่าง โดยพบว่า ตัวอย่างเก่า Q4 มีองค์ประกอบทางแร่อยู่ใกล้เคียงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิของการหลอมต่ำ และเมื่อนำมาผสมกับตัวอย่างเก่า Q2 ก็พบว่า มีแนวโน้มที่จะเกิดองค์ประกอบของแร่ที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำเช่นเดียวกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การแก้ปัญหาการเกิดตะกอนในโรงไฟฟ้าแม่เมาะทำได้โดยผสมถ่านหินให้ องค์ประกอบทางเคมีของแร่ในถ่านหินไม่ให้มีองค์ประกอบอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำ ใน Ternary Phase Diagram โดยนำถ่านหินที่มีปริมาณร้อยละของ  $\text{SiO}_2$ , CaO หรือ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  อย่างใดอย่างหนึ่งมีค่าสูง หรืออาจใช้วัสดุที่มีค่าเหล่านี้สูงมีผสมกับถ่านหินก็ได้ เช่น ผสมถ่านหินกับดินที่มีปริมาณอลูมินา (Alumina:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) สูง หรืออาจผสมหินปูน (Limestone:  $\text{CaCO}_3$ ) ป้อนไปกับถ่านหินลงไปเพื่อเพิ่มปริมาณร้อยละของ CaO ให้สูงขึ้นเพื่อให้องค์ประกอบถ่านหินออกห่างจากบริเวณการหลอมต่ำในไดอะแกรม โดยในปัจจุบันทาง กฟผ. ได้ผสมถ่านโดยเน้นเพียงแค่ปริมาณร้อยละของ CaO ไม่ให้เกิน 23 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

งานวิจัยนี้สามารถนำมาวิจัยหรือศึกษาต่อได้อีกโดยการศึกษาหาอุณหภูมิการหลอมของตะกอนที่เกิดขึ้น โดยนำข้อมูลถ่านหินที่ทำให้เกิดตะกอนที่เกิดขึ้นจริงในหม้อไอน้ำมาหาองค์ประกอบออกไซด์ของแร่ในถ่าน แล้วนำข้อมูลมาพล็อตลงใน Phase Diagram เพื่อกำหนดบริเวณที่ทำให้เกิดปัญหาตะกอนขึ้น การศึกษาหาองค์ประกอบของซีเถ้าโดยนำไปเผาตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง  $1,500^{\circ}\text{C}$  แล้วนำถ่านในแต่ละช่วงอุณหภูมิมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของชนิดแร่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปได้ชัดเจนยิ่งขึ้น การศึกษาหาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบแร่ที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิสูงด้วยวิธี Differential Thermal Analysis (DTA) การ

น้ำหนักที่หายไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นด้วยวิธี Thermogravimetry Analysis ก็จะช่วยทำให้ทราบถึงกระบวนการของการเปลี่ยนแปลงของเถ้าในถ่านหินที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ละเอียดขึ้น



ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ภิญโญ มีชำนะ. การศึกษาแนวทางการลดสแลกจากหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ, หน้า 3-15. มิถุนายน 2551, ฝ่ายบริหารงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2551.

ผลการศึกษาของ Joint Graduate School of Energy and Environment (JGSEE), 2006.

ผลการศึกษา ณ Central Laboratory ของ Taiho Industries Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น, 2006.

ภาษาอังกฤษ

Hatt, Roderick M., Fireside Deposits in Coal-Fired Utility Boilers, Progress in Energy and Combustion Science, Vol 16, pp.235-241, 1990.

Hyun-Taek Kim และ Han-jin Bae. A Prediction of coal ash slagging under the gasification condition, The American Society Division of Fuel Chemistry, Energy Department, Ajou University, Korea, 1995.

Karfa Traore, Tibo Simeon Kabre และ Philippe Blanchart. Gehlenite and anorthite crystallisation from kaolinite and calcite mix. Ceramics International 29 (June 2003) 377–383.

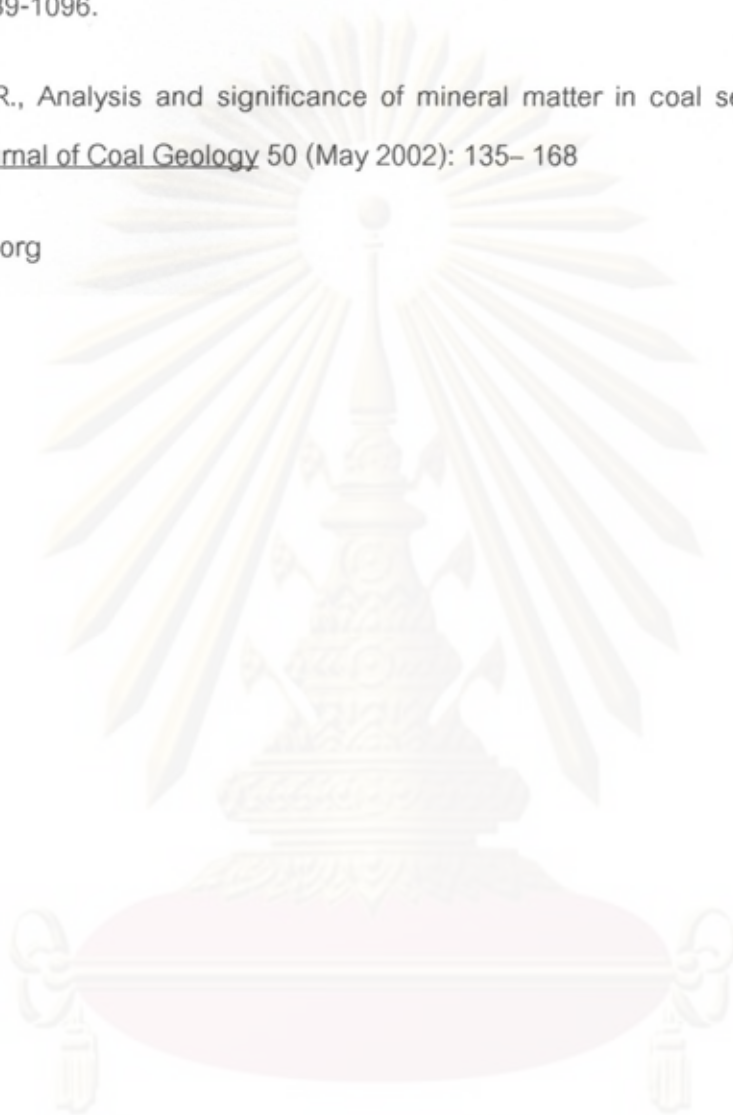
Miller, B. G, Coal Energy System, Elsevier Academic Press: Elsevier Inc., 2005.

Qiu J.R., F. Li, Y. Zheng, C.G. Zheng, และ H.C. Zhou. The influences of mineral behaviour on blended coal ash fusion characteristics. Fuel 78 (December 1999) 963–969.

Samit Mukherjee and Sunil Kumar Srivastava, Minerals Transformations in Northeastern Region Coals of India on Heat Treatment, Energy & Fuels 20 (February 2006): 1089-1096.

Ward, C. R., Analysis and significance of mineral matter in coal seams. International Journal of Coal Geology 50 (May 2002): 135– 168

[www.astm.org](http://www.astm.org)



ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

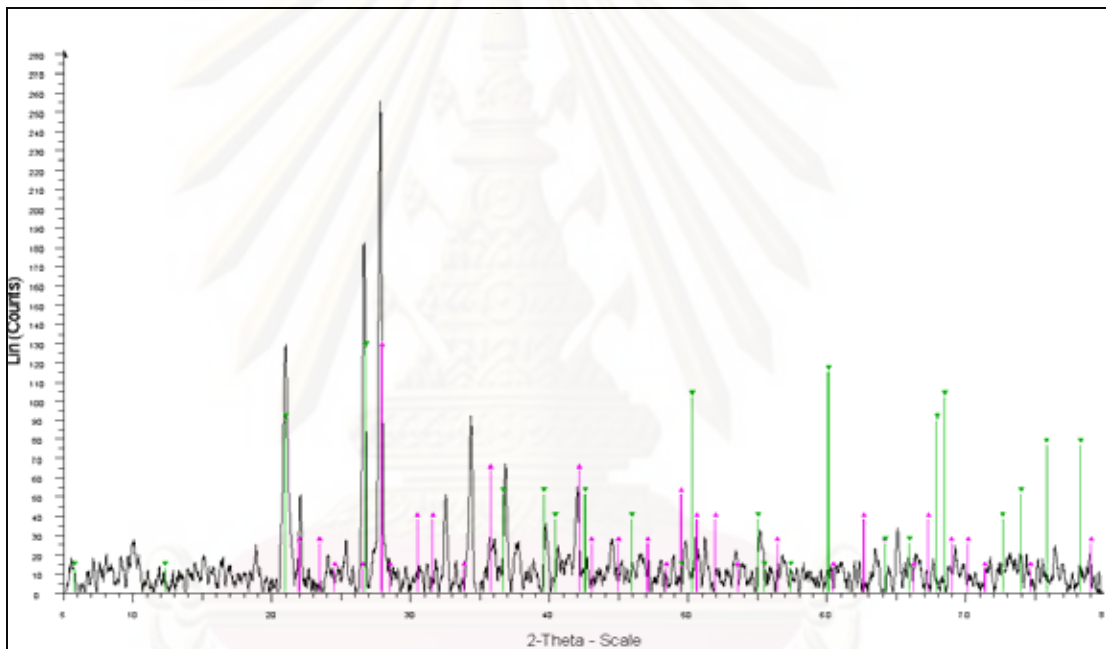


## ภาคผนวก ก

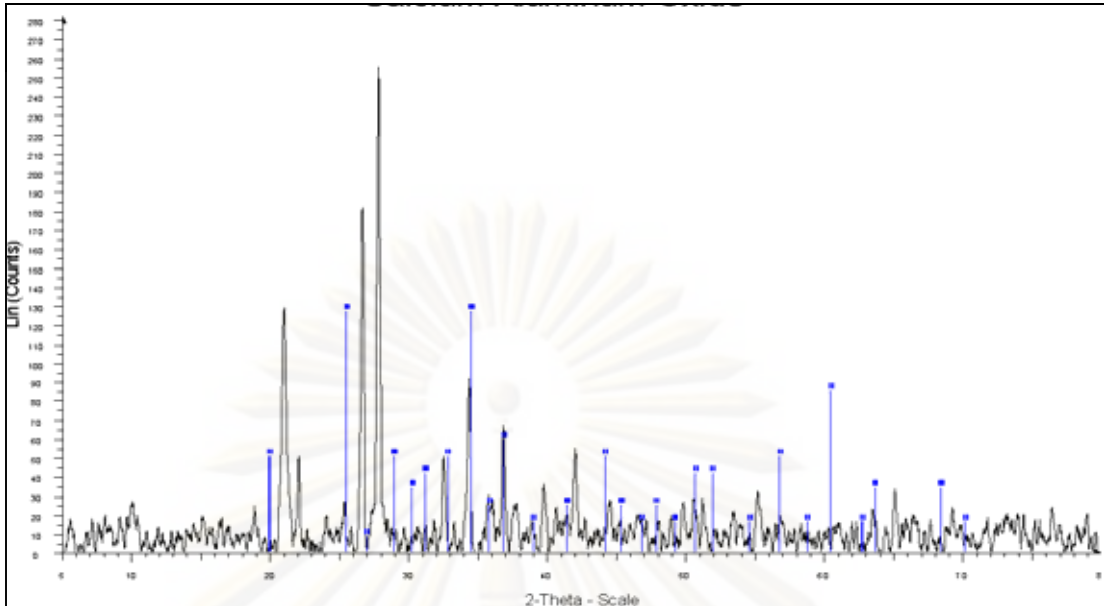
### ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

การวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน Q2, K3 และ Q4 กับตัวอย่างถ่านหินที่ผสมกันระหว่าง Q2 และ Q4 และตัวอย่างตะกรัน Slag A Slag B, Slag C และ Slag D ด้วยเครื่องวิเคราะห์ XRD เริ่มด้วยการนำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 800°C, 900°C, 1,000°C, 1,100°C และ 1,200°C เป็นเวลาช่วงละ 3 ชั่วโมงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ได้ผลวิเคราะห์ ดังนี้

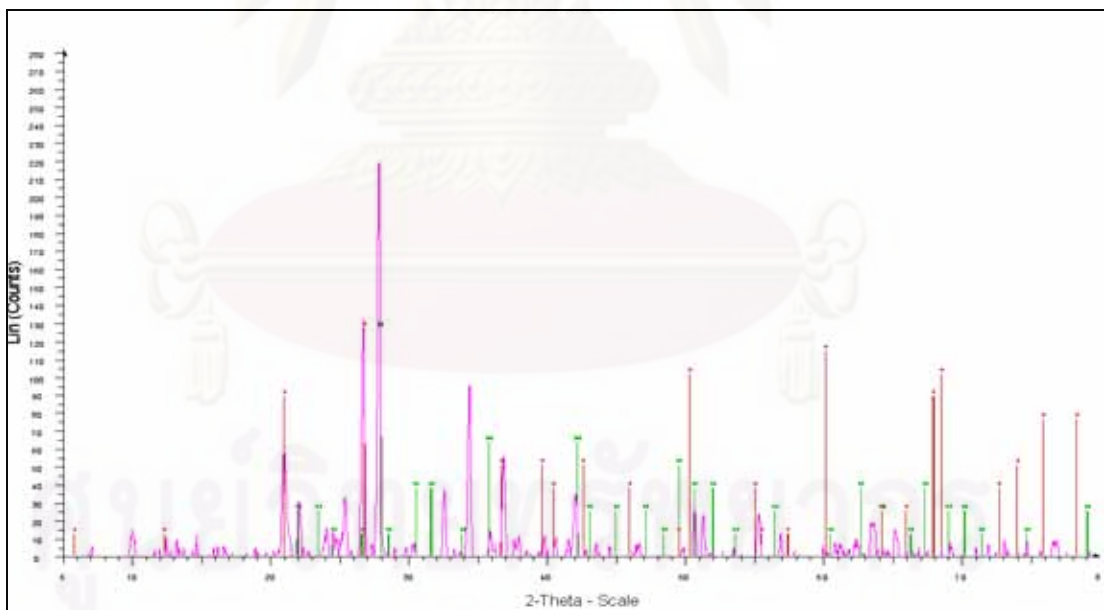
#### 1.1 ตัวอย่าง Q2 (ค่าปริมาณร้อยละของ CaO ต่ำ (2.24 %CaO))



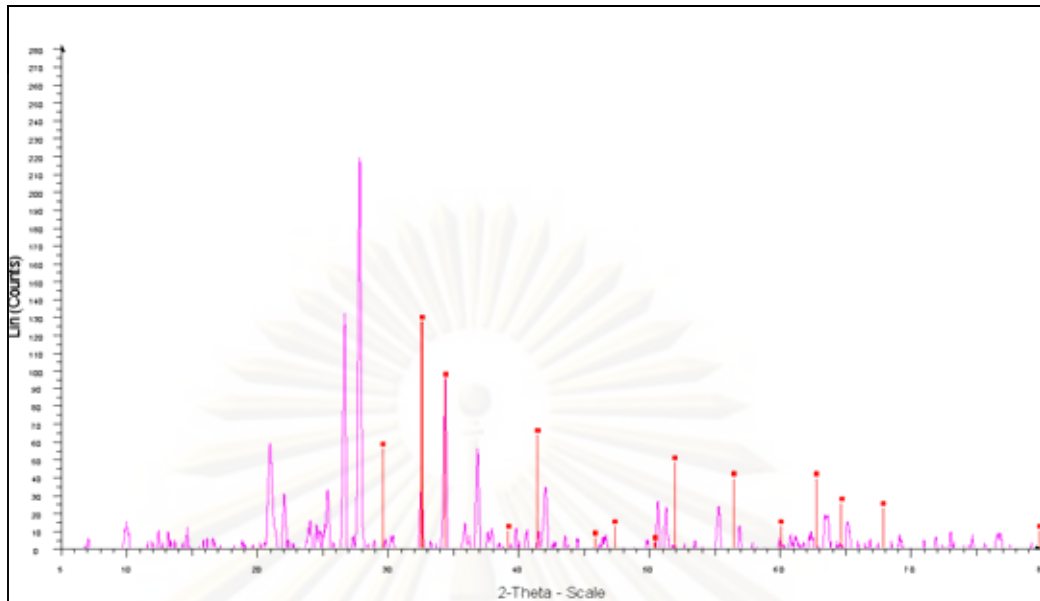
รูปที่ 1 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่ตัวอย่าง Q2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°C (เส้นสีเขียวแสดงตำแหน่งของแอมอร์ฟิทัส ส่วนเส้นสีชมพูแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์)



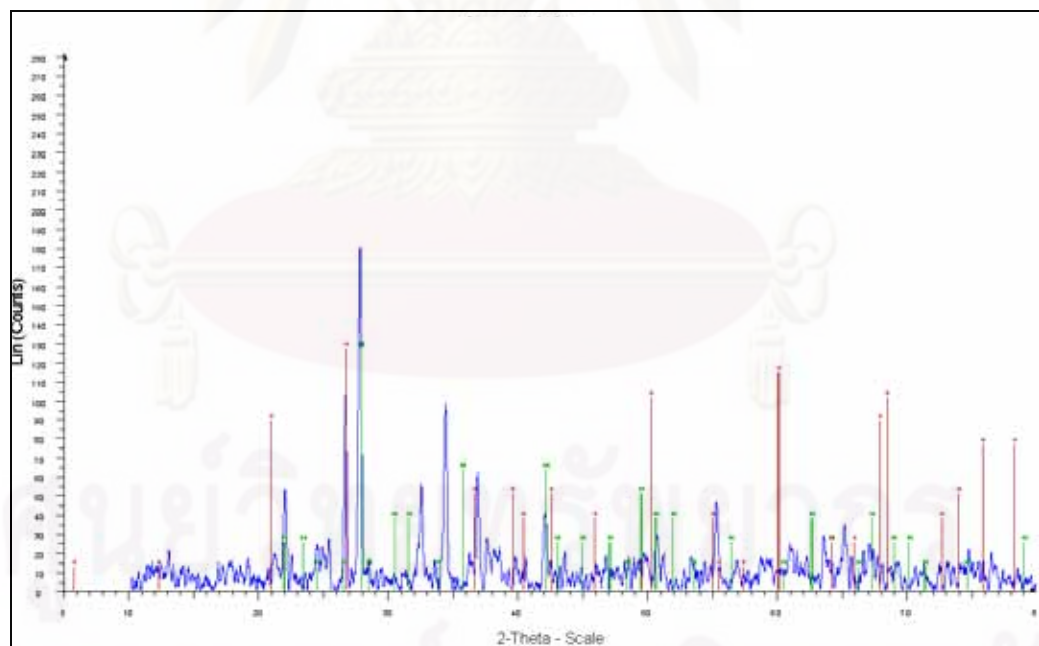
รูปที่ 2 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและและชนิดแร่ตัวอย่าง Q2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°C (เส้นสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์)



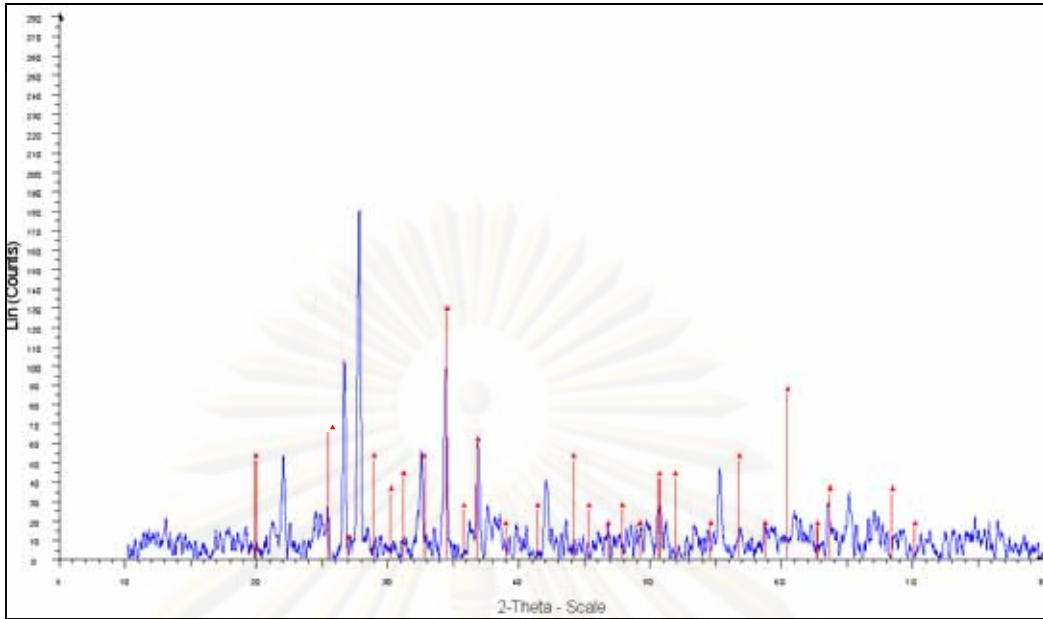
รูปที่ 3 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและและชนิดแร่ตัวอย่าง Q2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900°C (เส้นสีเขียวแสดงตำแหน่งของแร่อะนอร์ไทต์ ส่วนเส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์)



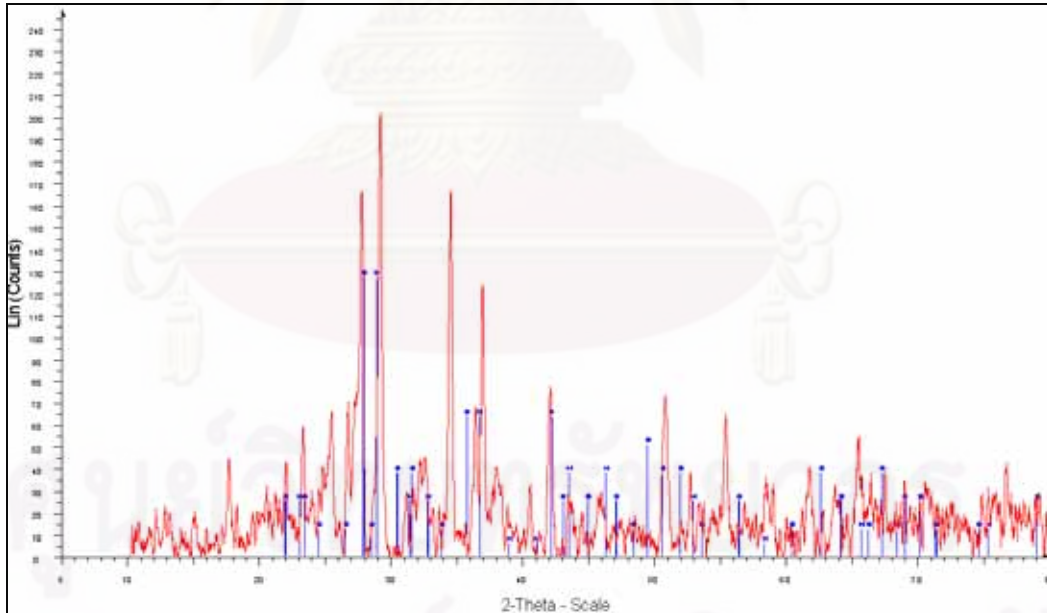
รูปที่ 4 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและและชนิดแร่ตัวอย่าง Q2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900°C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมอะลูมินัมออกไซด์)



รูปที่ 5 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและและชนิดแร่ตัวอย่าง Q2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,000°C (เส้นสีเขียวแสดงตำแหน่งของแร่เซอร์โคเนีย ส่วนเส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์)

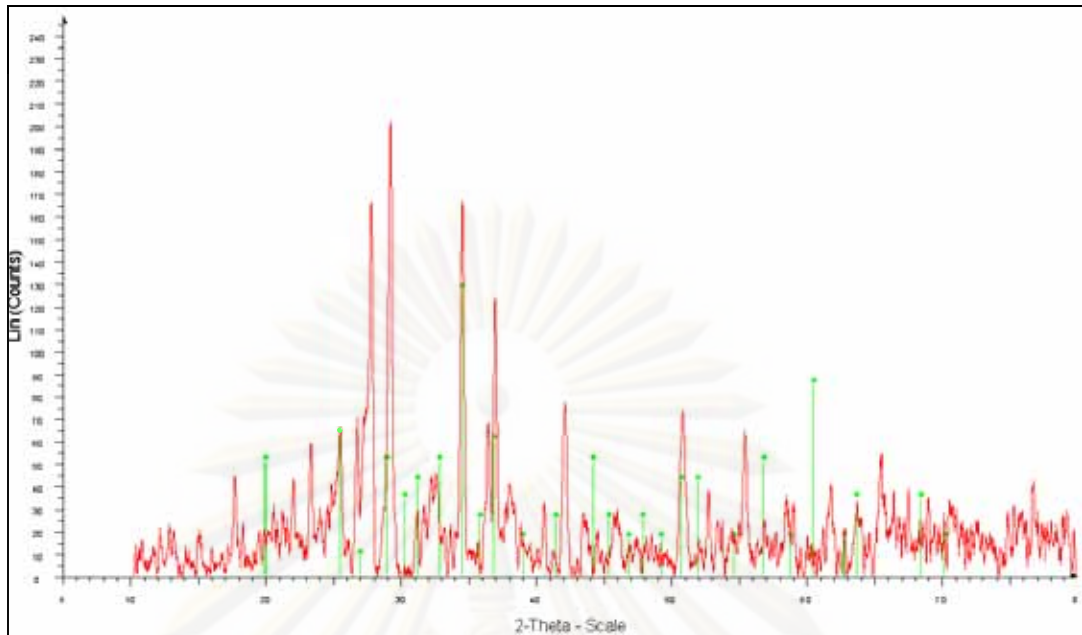


รูปที่ 6 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง Q2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,000°C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมอะลูมินัมออกไซด์)

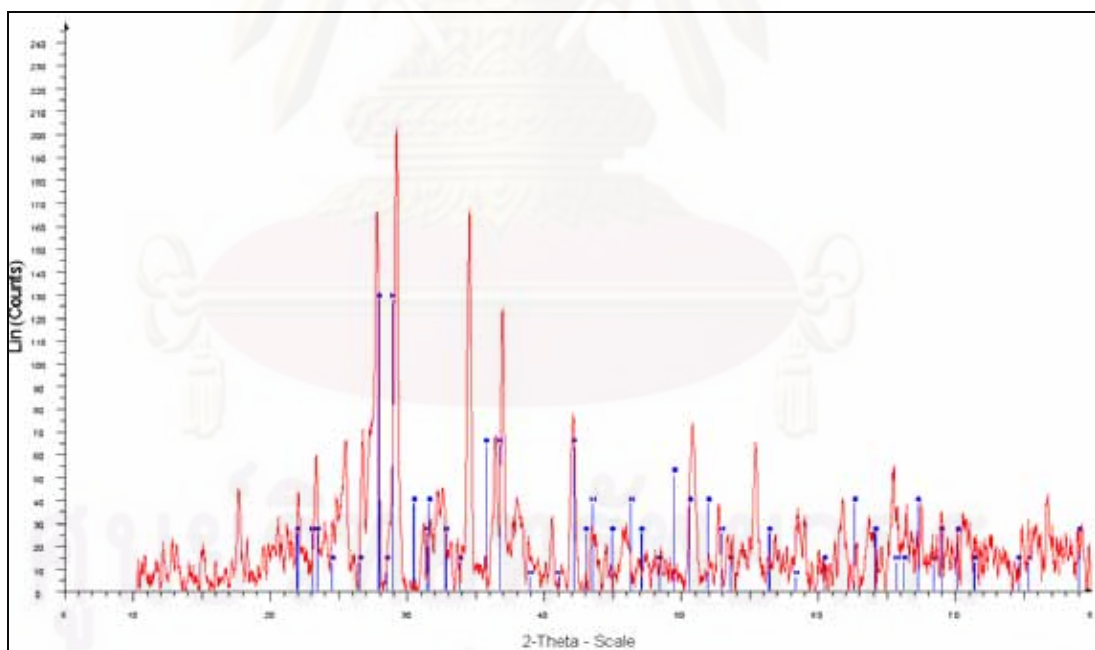


รูปที่ 7 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง Q2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100°C (เส้นน้ำเงินแสดงตำแหน่งของแร่อะนอร์ไทต์)

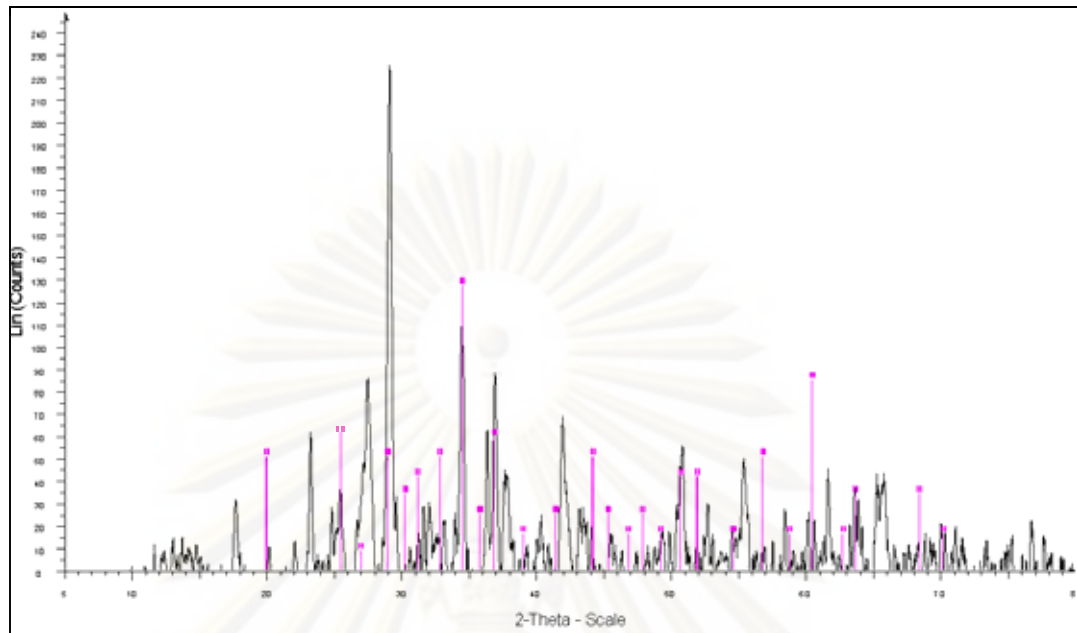




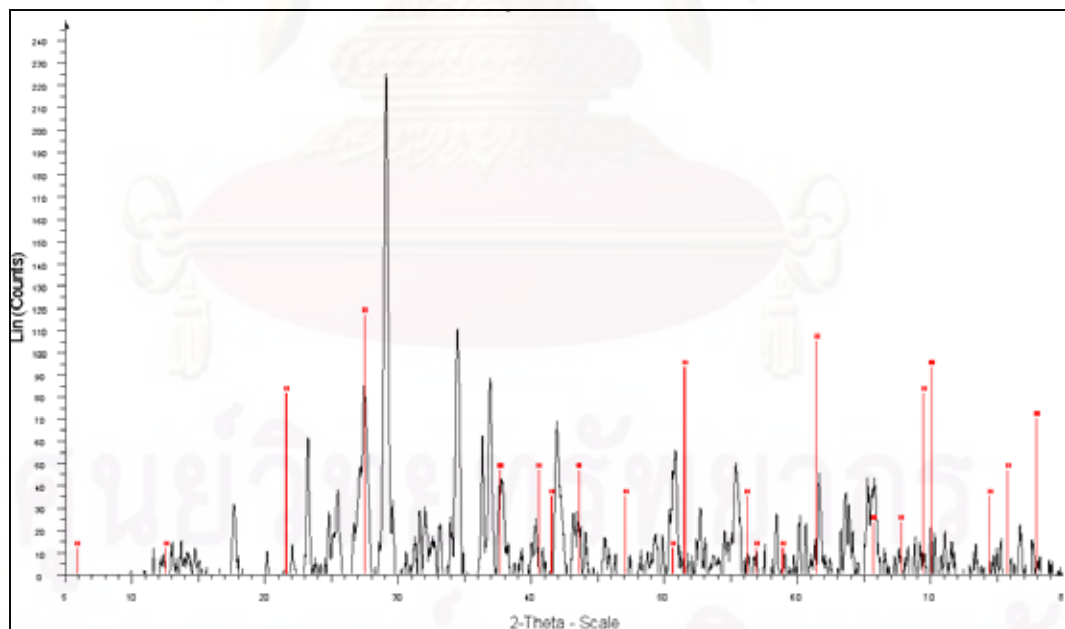
รูปที่ 8 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง Q2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100°C (เส้นสีเขียวอ่อนแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมอะลูมินัมออกไซด์)



รูปที่ 9 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง Q2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100°C (เส้นน้ำเงินแสดงตำแหน่งของแร่อะนอร์ไทต์)

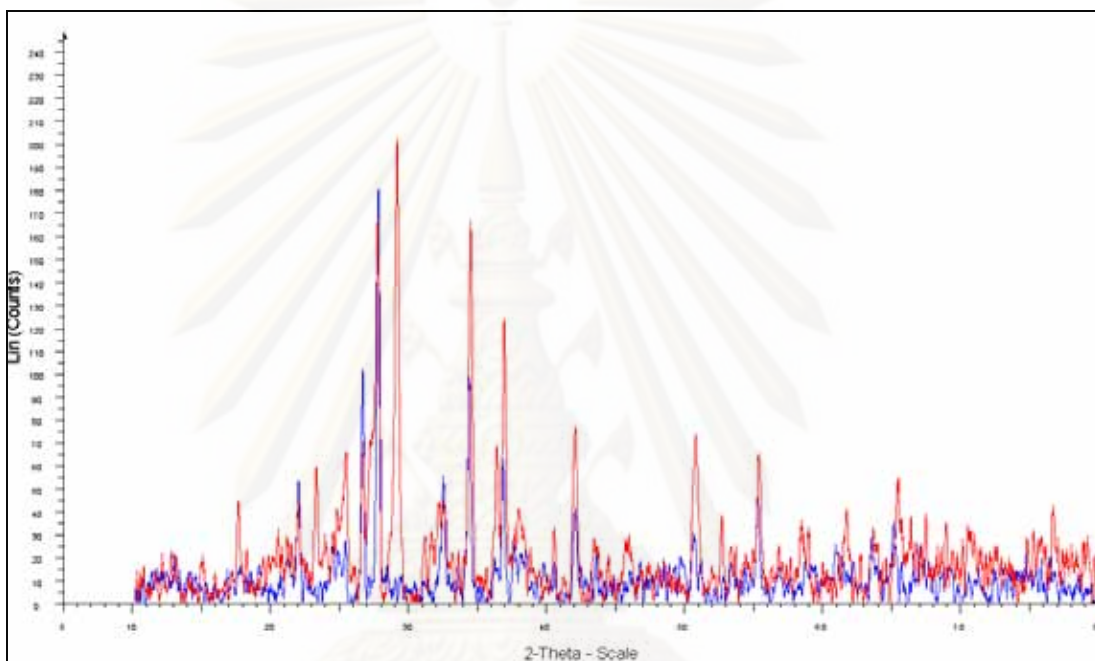


รูปที่ 10 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง Q2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°C (เส้นสีชมพูแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์)



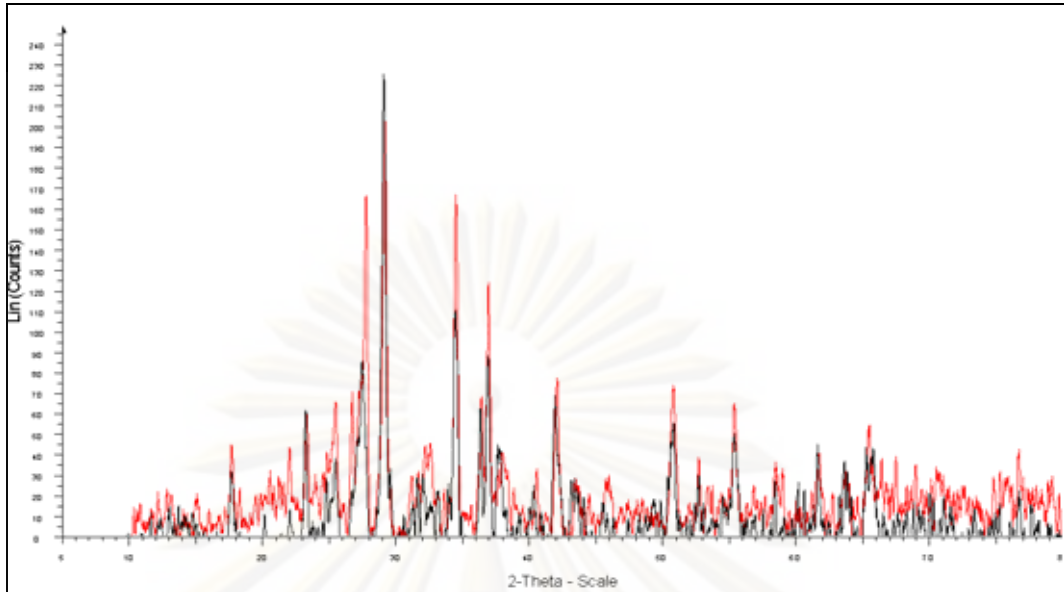
รูปที่ 11 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ตัวอย่าง Q2 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์)

จากรูปที่ 1-6 อุณหภูมิตั้งแต่ 800°C จนถึงอุณหภูมิ 1,000°C พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของ พีค (Peak) ไม่มากนัก จนถึงอุณหภูมิ 1,100°C โดยที่กลุ่มแร่แคลเซียม อะลูมิเนียมออกไซด์ แร่อะโนไทต์ และแร่ควอตซ์มีขนาดของพีคสูงขึ้น โดยเฉพาะแร่อะโนไทต์จะเพิ่มขึ้นมามากอย่างเห็นได้ชัดแต่เมื่อถึงอุณหภูมิ 1,200°C พีคของแร่ควอตซ์และกลุ่มแร่แคลเซียม อะลูมิเนียมออกไซด์ต่ำลง แต่พีคของแร่อะโนไทต์สูงขึ้น โดยจะเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ดังรูปที่ 12 และ รูปที่ 13



รูปที่ 12 เปรียบเทียบชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิที่เปลี่ยนไประหว่างตัวอย่าง Q2 ที่อุณหภูมิ 1,000°C (เส้นสีน้ำเงิน) กับตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1,100°C (เส้นสีแดง)

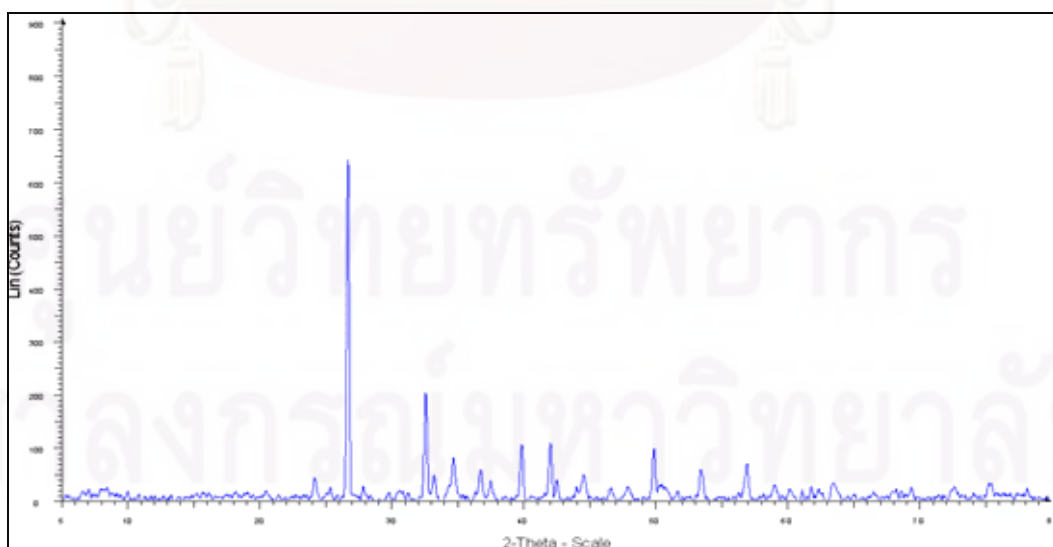
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 13 เปรียบเทียบชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิที่เปลี่ยนไประหว่างตัวอย่าง Q2 ที่อุณหภูมิ 1,100°C (เส้นสีแดง) กับตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1,200°C (เส้นสีดำ)

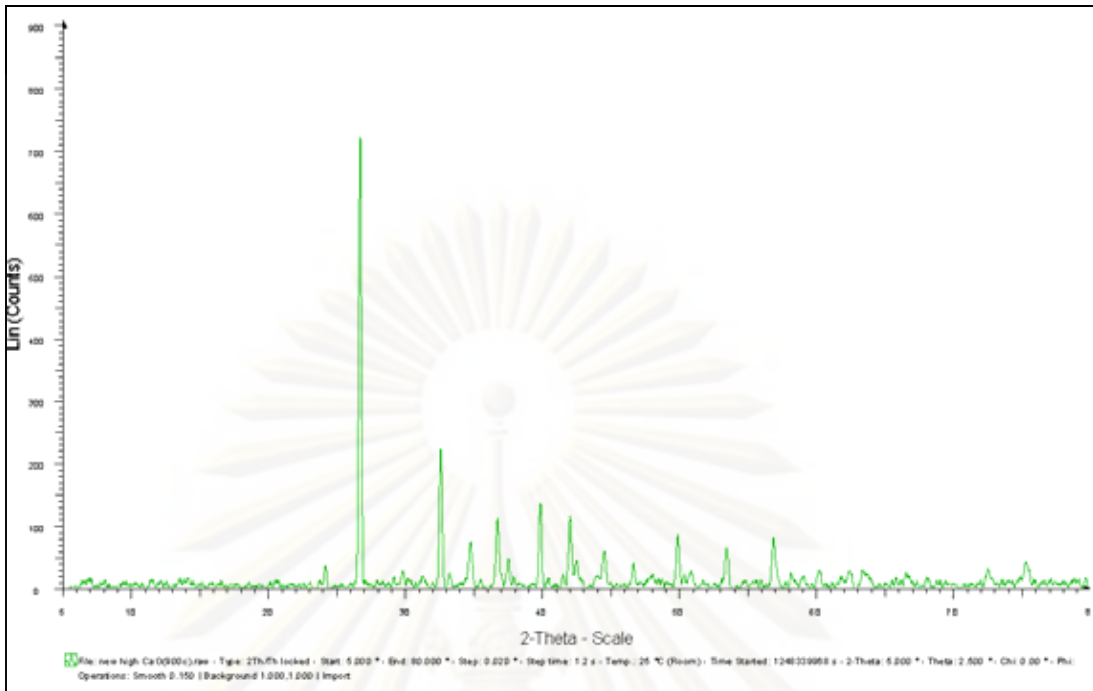
จากรูปที่ 12 – 13 จะพบการเปลี่ยนแปลงชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงอุณหภูมิ 1,000°C - 1,100°C และ 1,100°C - 1,200°C โดยที่ปริมาณของแร่ควอตซ์มีค่าลดลง แต่ปริมาณของแร่อะโนไทต์และกลุ่มแร่แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น

### 1.2 ตัวอย่าง K3 (ค่าปริมาณร้อยละของ CaO สูง (31.81% CaO))

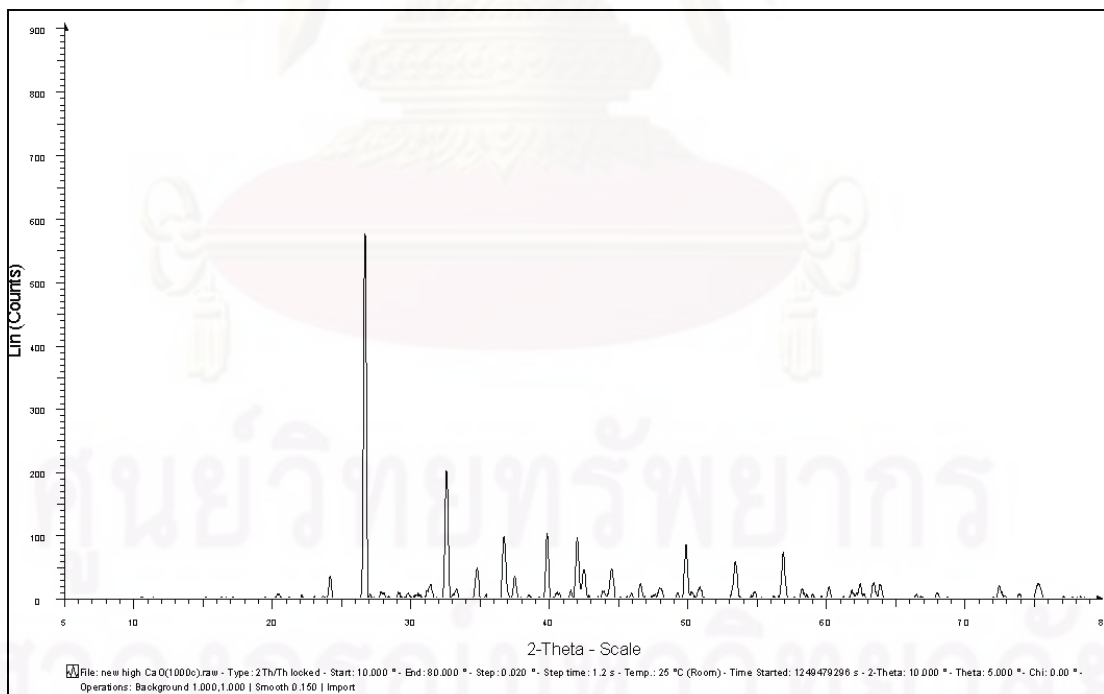


รูปที่ 14 XRD Pattern ของตัวอย่าง K3 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°C



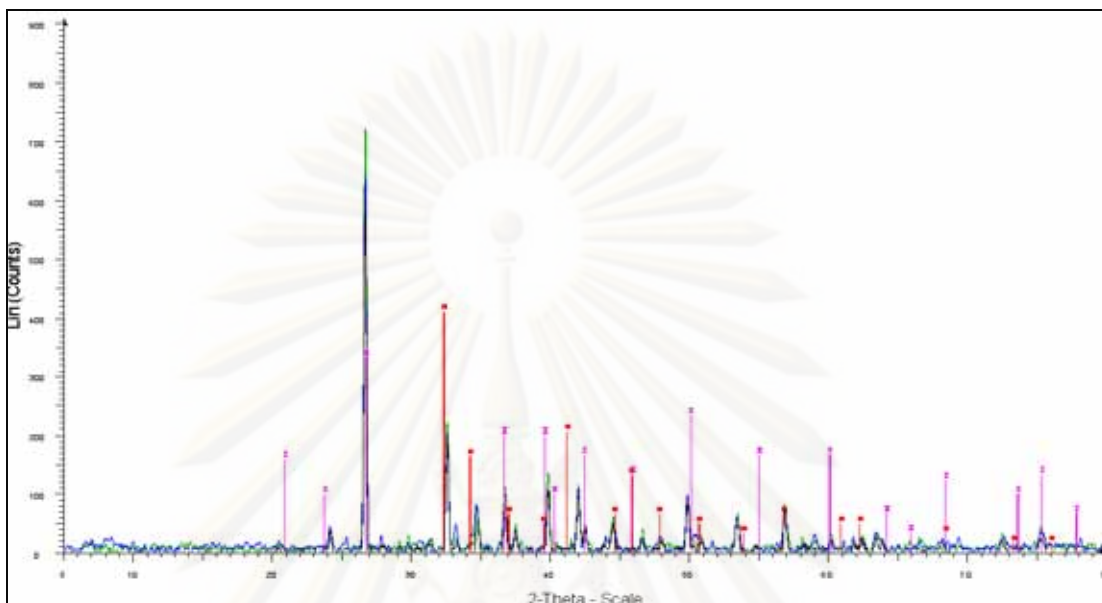


รูปที่ 15 XRD Pattern ของตัวอย่าง K3 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900°C



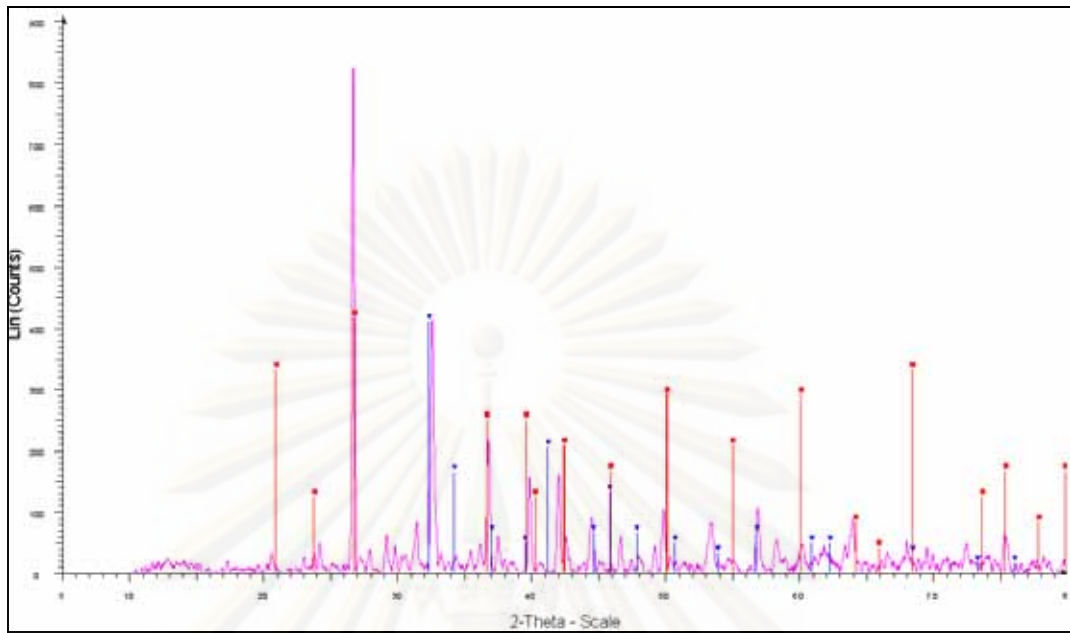
รูปที่ 16 XRD Pattern ของตัวอย่าง K3 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,000°C

จากรูปที่ 14 - 16 สามารถนำมาเปรียบเทียบ XRD Pattern และวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีได้ดังรูปที่ 17

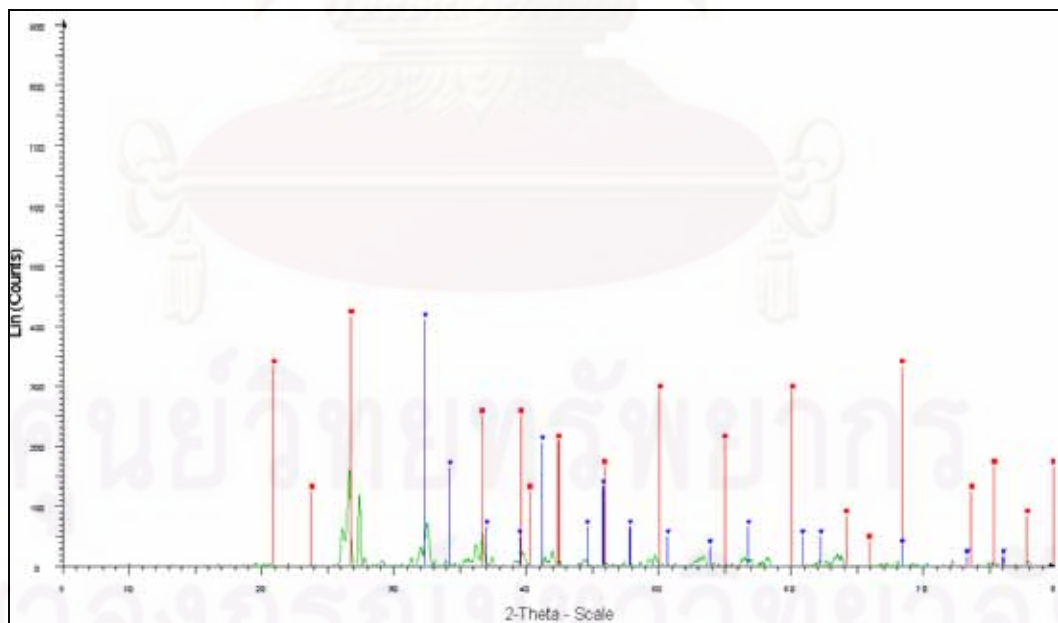


รูปที่ 17 XRD Pattern ของตัวอย่างของตัวอย่าง K3 ที่อุณหภูมิ 800°C, 900°C และ 1,000°C  
จากรูปที่ 16 พบว่าที่อุณหภูมิ 900°C (XRD Pattern สีเขียว) จะมียอดของพีคสูงที่สุด รองลงมาจะเป็น XRD Pattern ที่อุณหภูมิ 800°C (XRD Pattern สีน้ำเงิน) และ 1,000°C (XRD Pattern สีดำ) ตามลำดับ และชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิคือ แร่ควอตซ์ (เส้นสีเขียว) และกลุ่มแร่แคลเซียมซิลิเกต (เส้นสีแดง)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



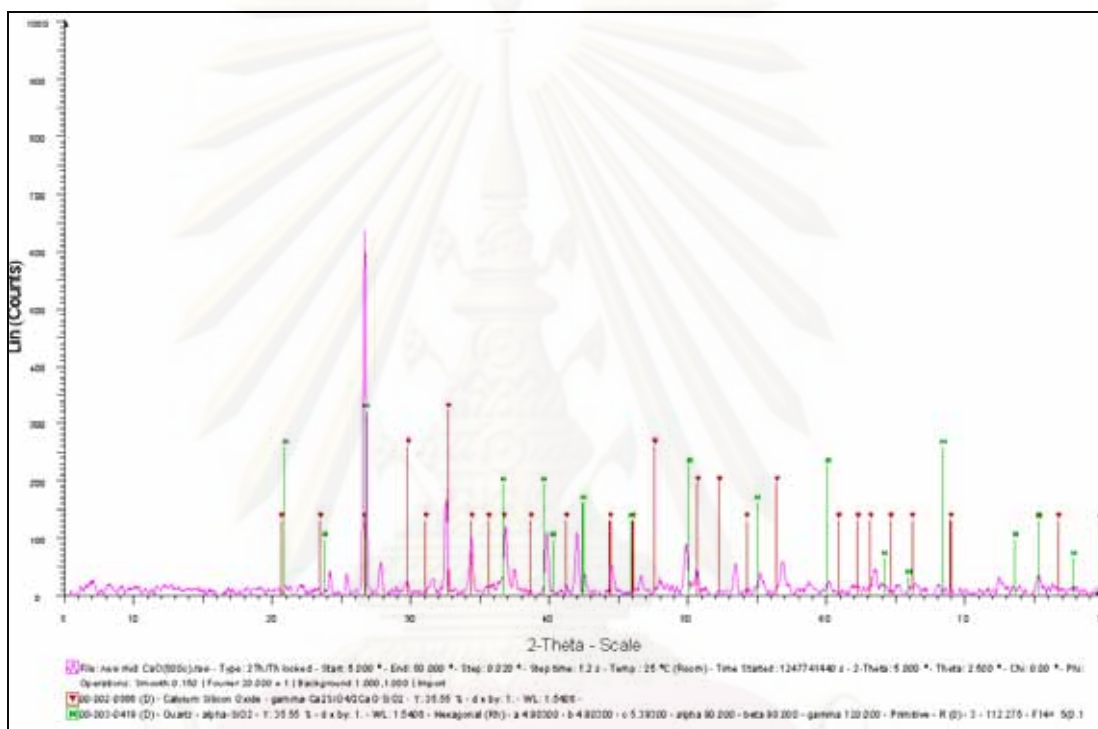
รูปที่ 18 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ของตัวอย่าง K3 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100°C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์ เส้นสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมซิลิเกต)



รูปที่ 19 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ของตัวอย่าง K3 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์ เส้นสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมซิลิเกต)

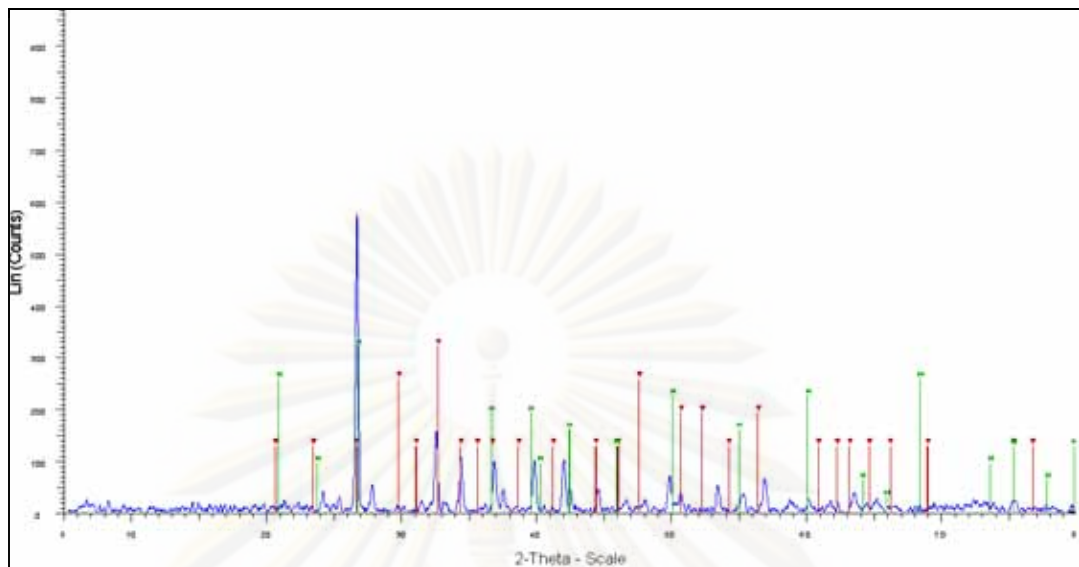
จากรูปที่ 18-19 พบว่า XRD Pattern ของตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1,200°C มีปริมาณน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 1,100°C มากและสามารถสรุปได้ว่าตัวอย่าง K3 (ค่าปริมาณร้อยละของ CO สูง) มีชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิแร่ควอตซ์ และกลุ่มแร่แคลเซียมซิลิเกตเป็นหลัก และมีความเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบอย่างเห็นได้ชัดอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 1,100°C ถึง 1,200°C

### 1.3 ตัวอย่าง Q4 (ค่าปริมาณร้อยละของ CaO เท่ากับ 27.42% (กลาง))

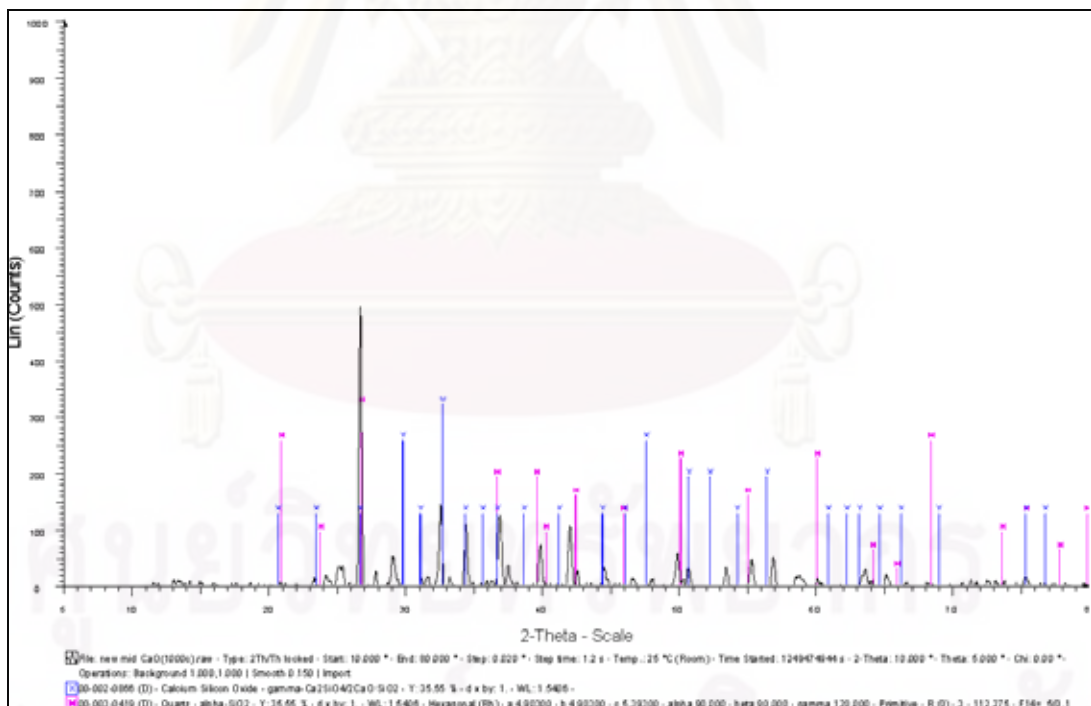


รูปที่ 20 แสดง XRD Pattern ตัวอย่าง Q4 และชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°C (เส้นสีเขียวแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์ เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมซิลิเกต)

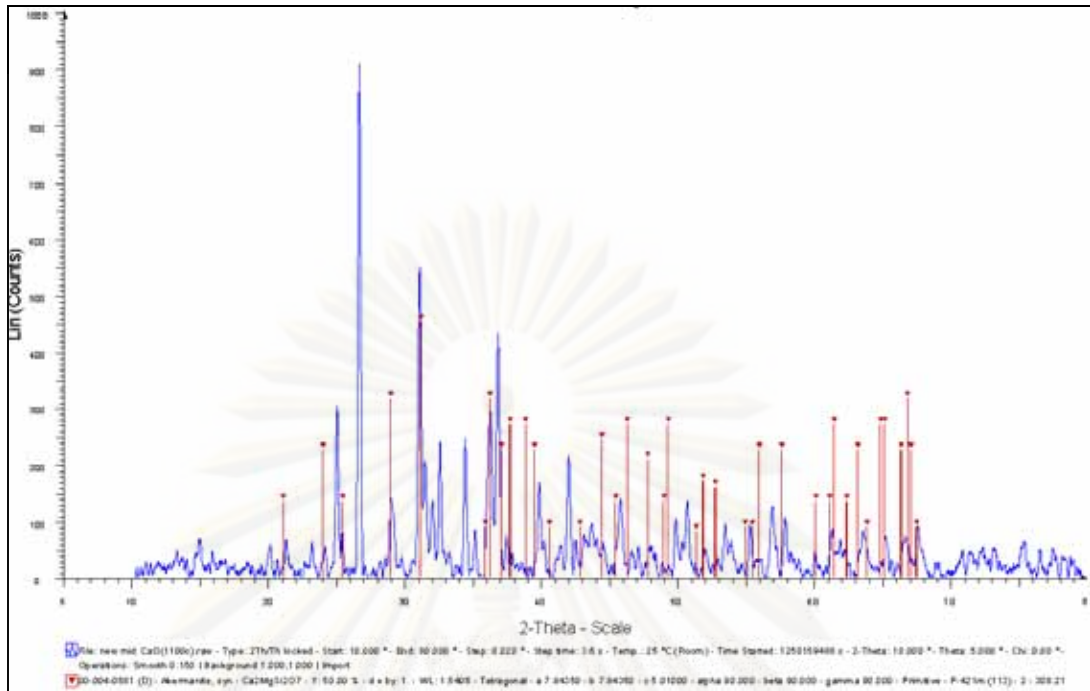




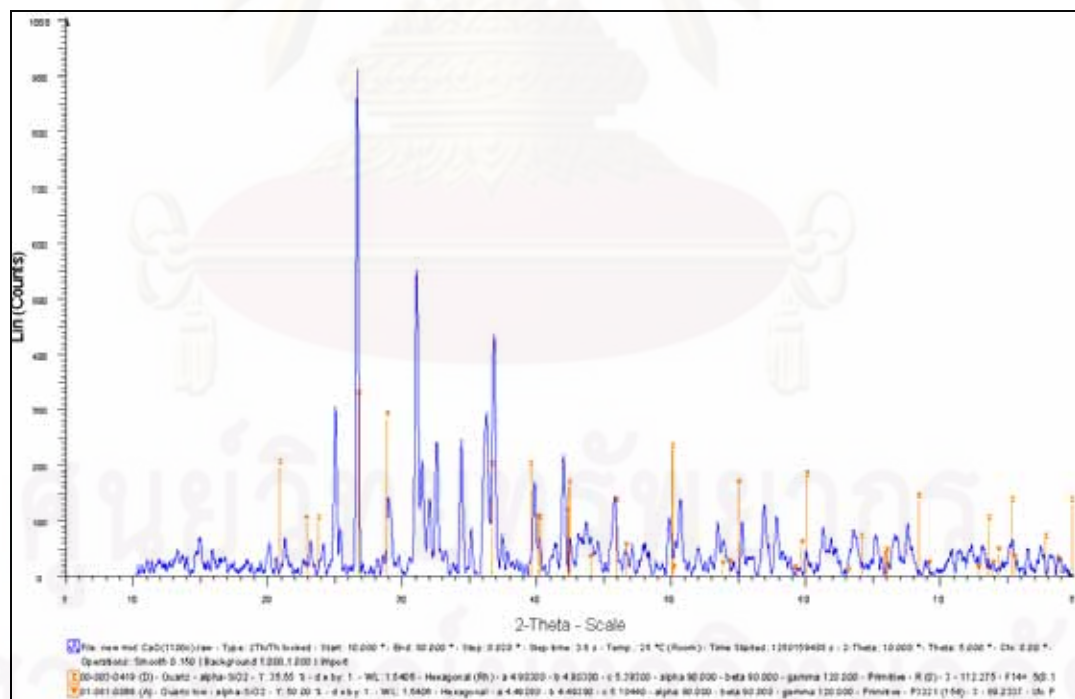
รูปที่ 21 แสดง XRD Pattern ตัวอย่าง Q4 และชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900°C (เส้นสีเขียวแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์ เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมซิลิเกต)



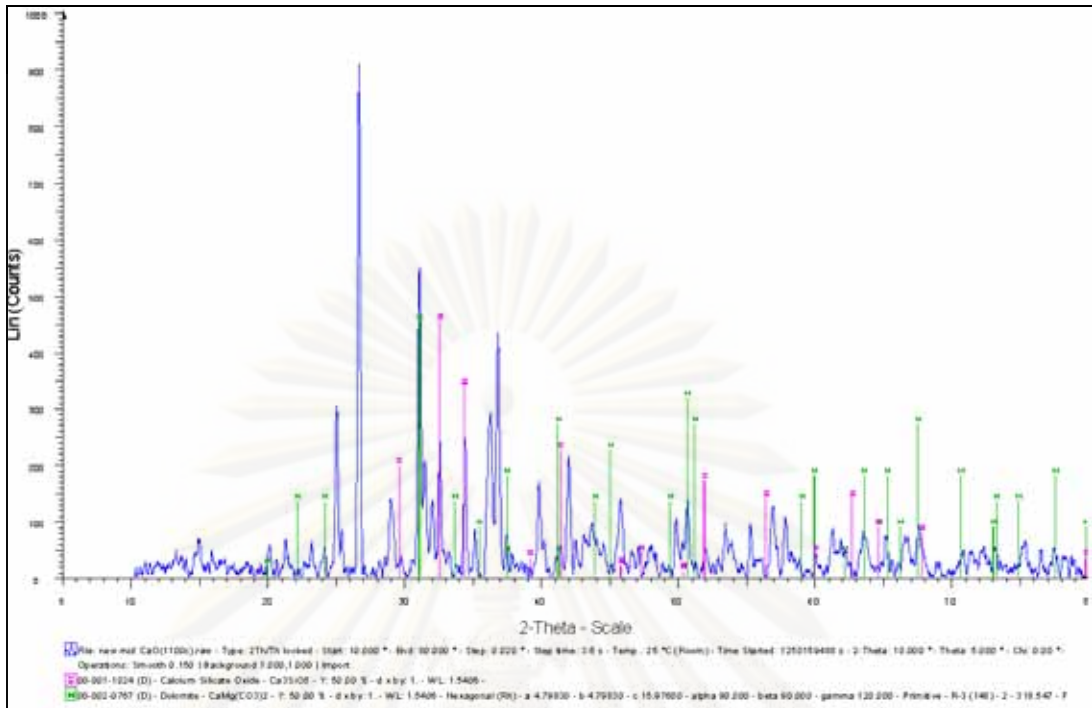
รูปที่ 22 แสดง XRD Pattern ตัวอย่าง Q4 และชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,000°C (เส้นสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์ เส้นสีเขียวแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมซิลิเกต)



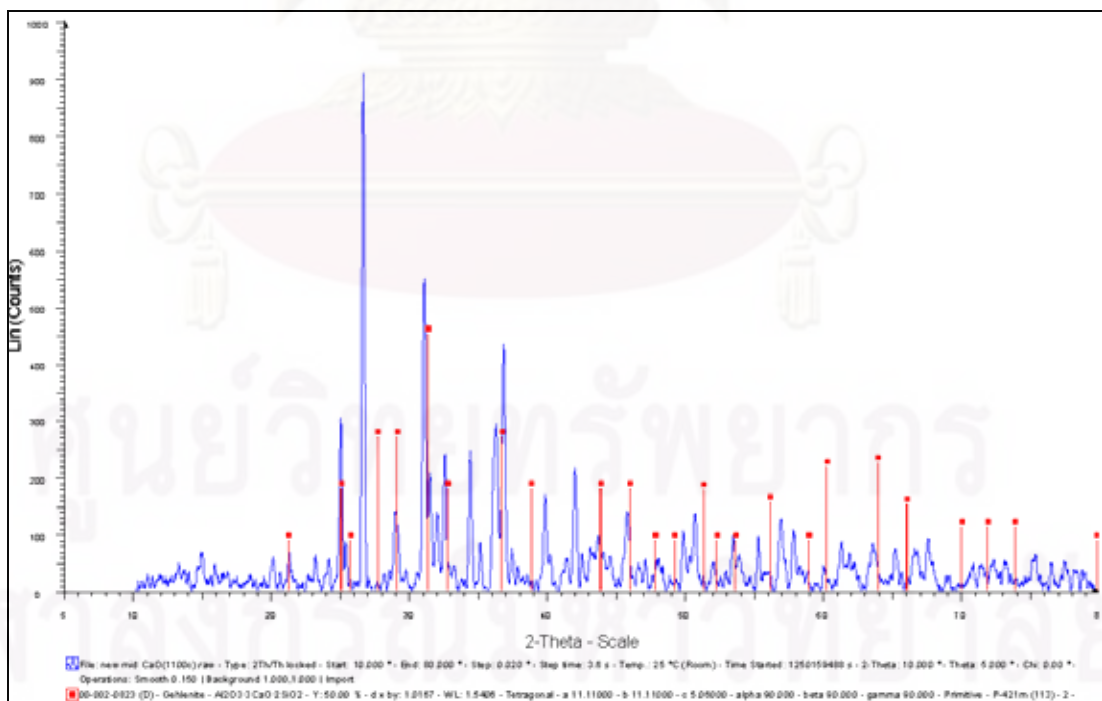
รูปที่ 23 แสดง XRD Pattern ตัวอย่าง Q4 และชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100°C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่อะเคอร์มาไนต์)



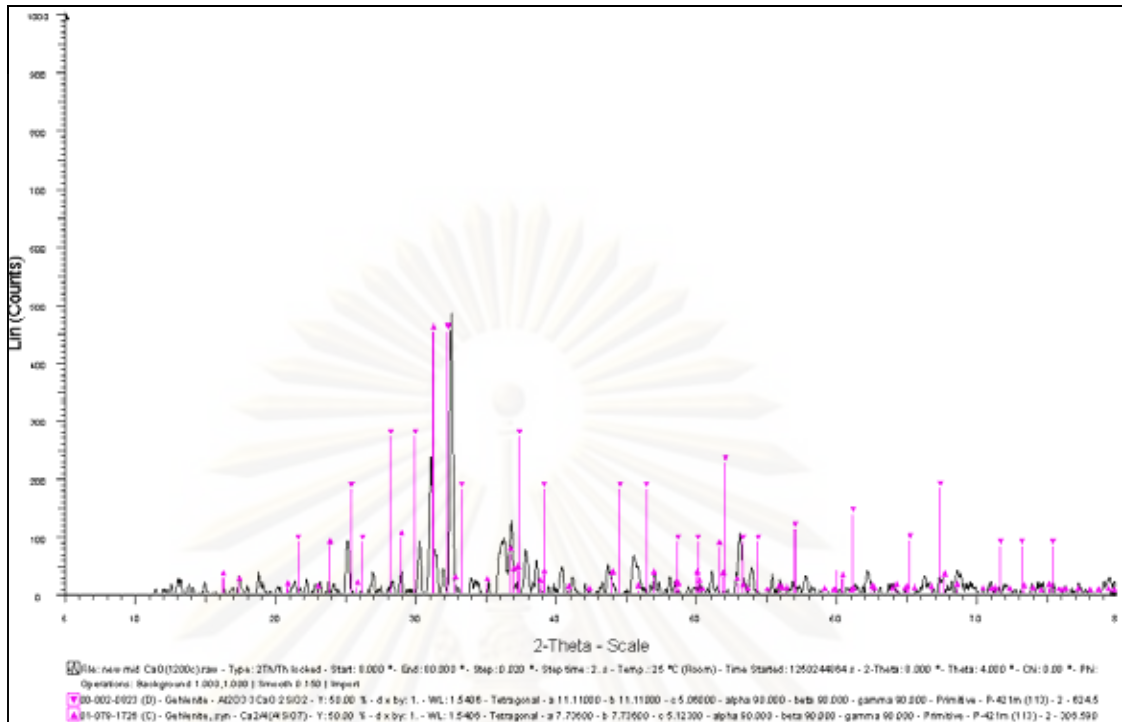
รูปที่ 24 แสดง XRD Pattern ตัวอย่าง Q4 และชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100°C (เส้นสีส้มแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์)



รูปที่ 25 แสดง XRD Pattern ตัวอย่าง Q4 และชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100°C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่โดโลไมต์ ส่วนเส้นสีชมพูแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมซิลิเกต)



รูปที่ 26 แสดง XRD Pattern ตัวอย่าง Q4 และชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100°C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่เกห์เลไนต์)



รูปที่ 27 แสดง XRD Pattern ตัวอย่าง Q4 และชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°C  
(เส้นสีชมพูแสดงตำแหน่งของแร่เกห์ไนด์)

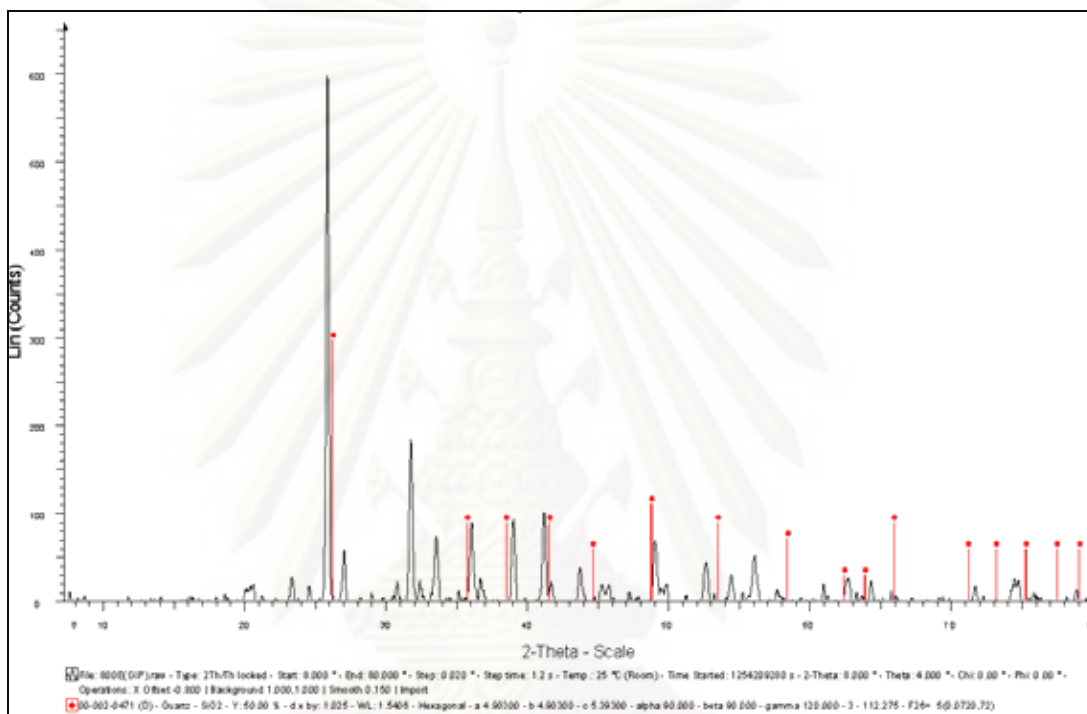
จากรูปที่ 20-22 จะเห็นว่า จากอุณหภูมิ 800°C - 1,000°C ยังมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แร่ส่วนใหญ่ยังเป็นแร่ควอตซ์และกลุ่มแร่แคลเซียมซิลิเกต แต่เมื่อถึงอุณหภูมิ 1,100°C ปริมาณควอตซ์เพิ่มขึ้นและมีแร่ใหม่ฟอร์มตัวขึ้นนั่นคือ แร่อะเคอร์มาไนต์ และแร่โคโลไมต์ ซึ่งทั้งสองแร่ต่างมีแมกนีเซียมอยู่เป็นองค์ประกอบทางเคมีด้วย ส่วนแร่เกห์ไนด์เกิดขึ้นคล้ายกับผลวิเคราะห์ของตัวอย่างตะกอนที่มีมาก่อนหน้านี้ และจะพบแร่ชนิดนี้ที่อุณหภูมิ 1,200°C ด้วย



## 2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินที่ผสมกันด้วยเครื่อง XRD

จากการวิเคราะห์ตัวอย่าง Q2 และ Q4 ที่ได้นำมาผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ คือ Q2 20% + Q4 80%, Q2 40% + Q4 60%, Q2 60% + Q4 40%, และ Q2 80% + Q4 20% ทั้งหมด 4 ตัวอย่าง โดยได้ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 1 ได้ผลวิเคราะห์ดังนี้

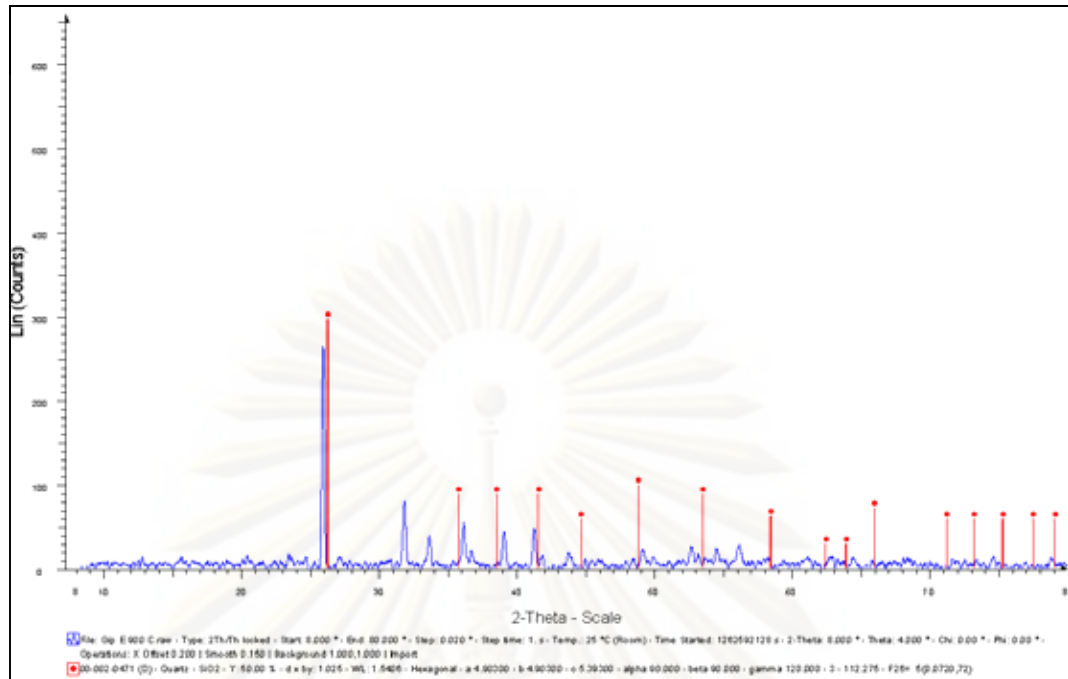
### 2.1 ตัวอย่าง Q2 20% + Q4 80%



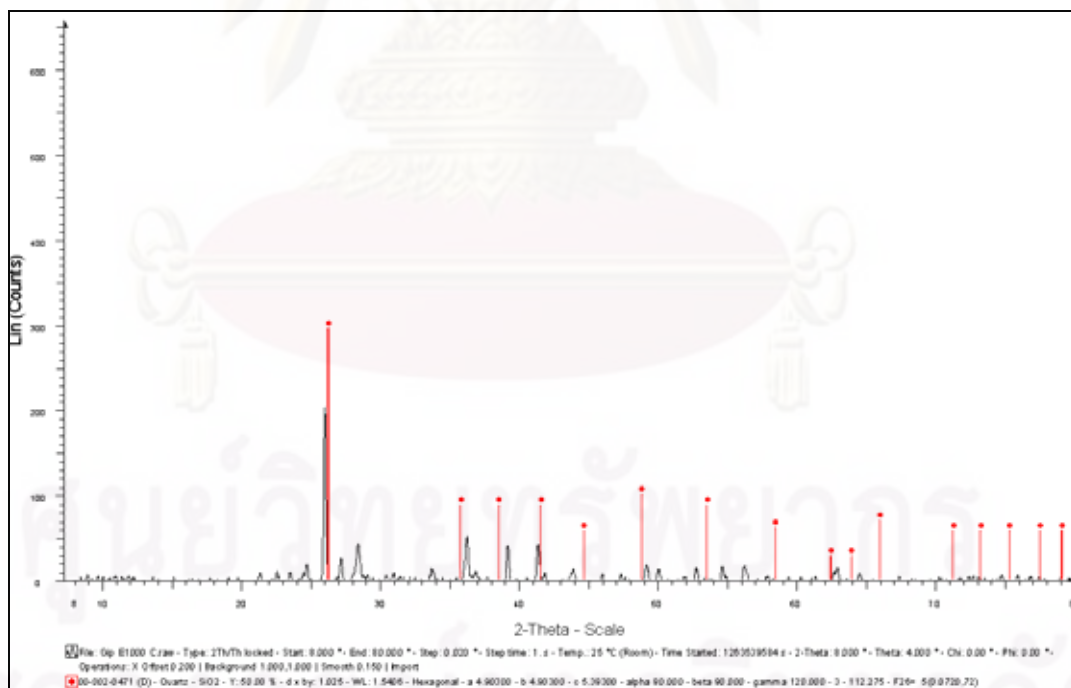
รูปที่ 28 แสดง Diffraction Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

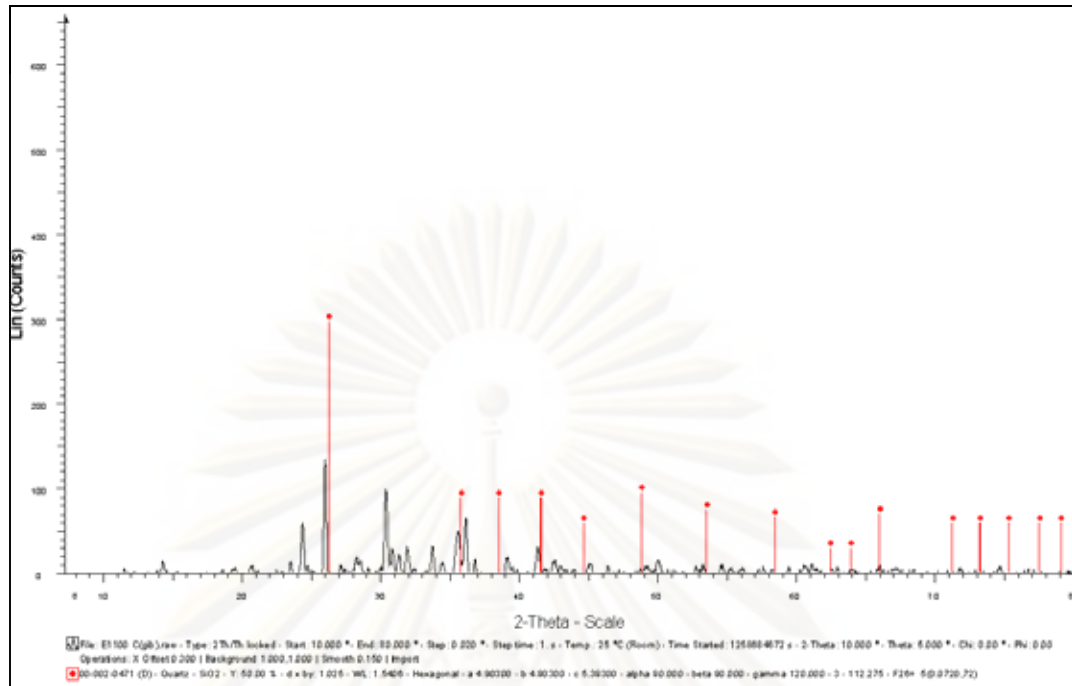
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



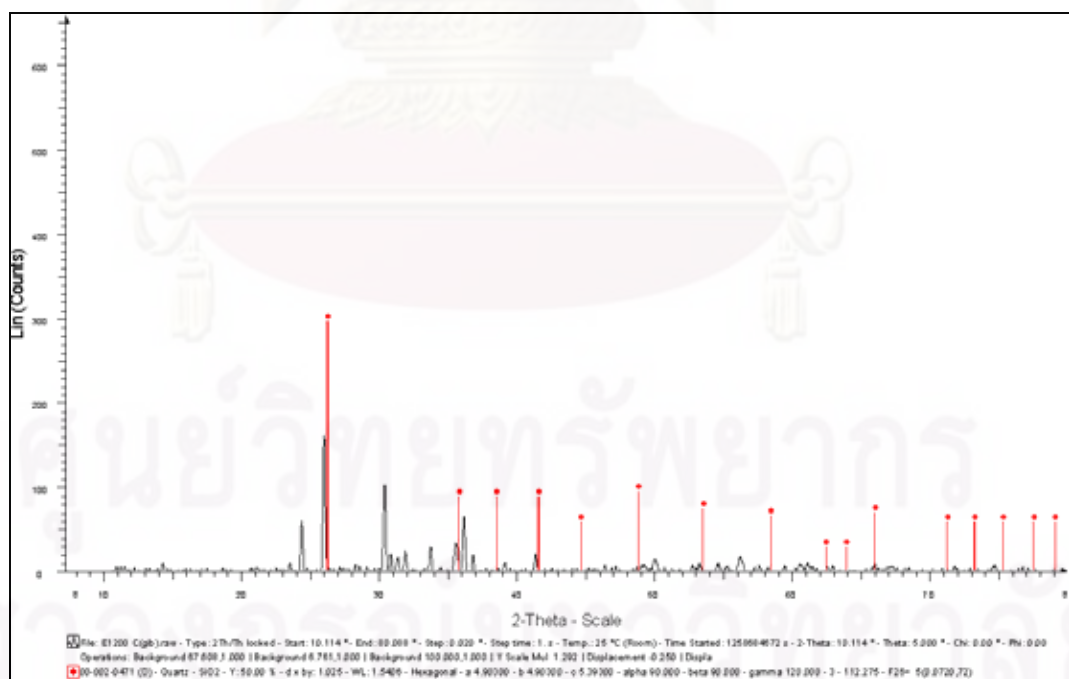
รูปที่ 29 แสดง Diffraction Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900°C  
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์)



รูปที่ 30 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,000°C  
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์)



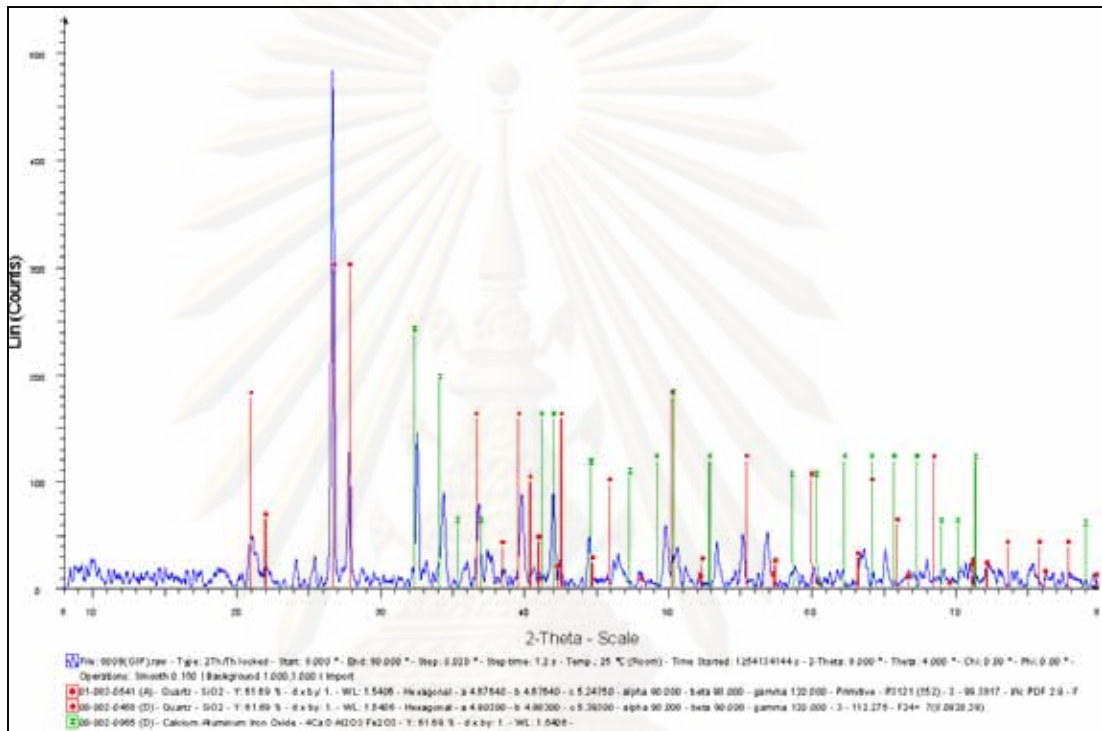
รูปที่ 31 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100°C  
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์)



รูปที่ 32 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°C  
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์)

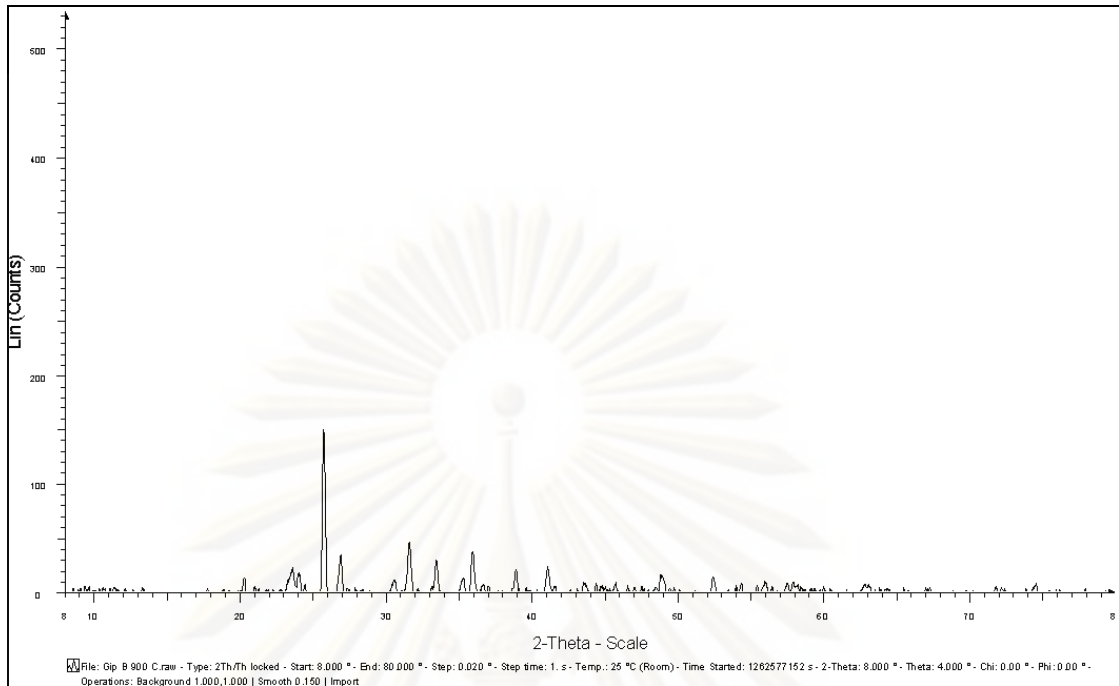
จากรูปที่ 28 - 32 พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของXRD Pattern ที่เด่นชัดที่สุดคือระหว่างอุณหภูมิ 800°C - 900°C หลังจากนั้น ขนาดของXRD Pattern มีขนาดเล็กลง แสดงว่าขนาดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิเปลี่ยนไปไม่มากนักเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

## 2.2 ตัวอย่าง Q2 40% + Q4 60%

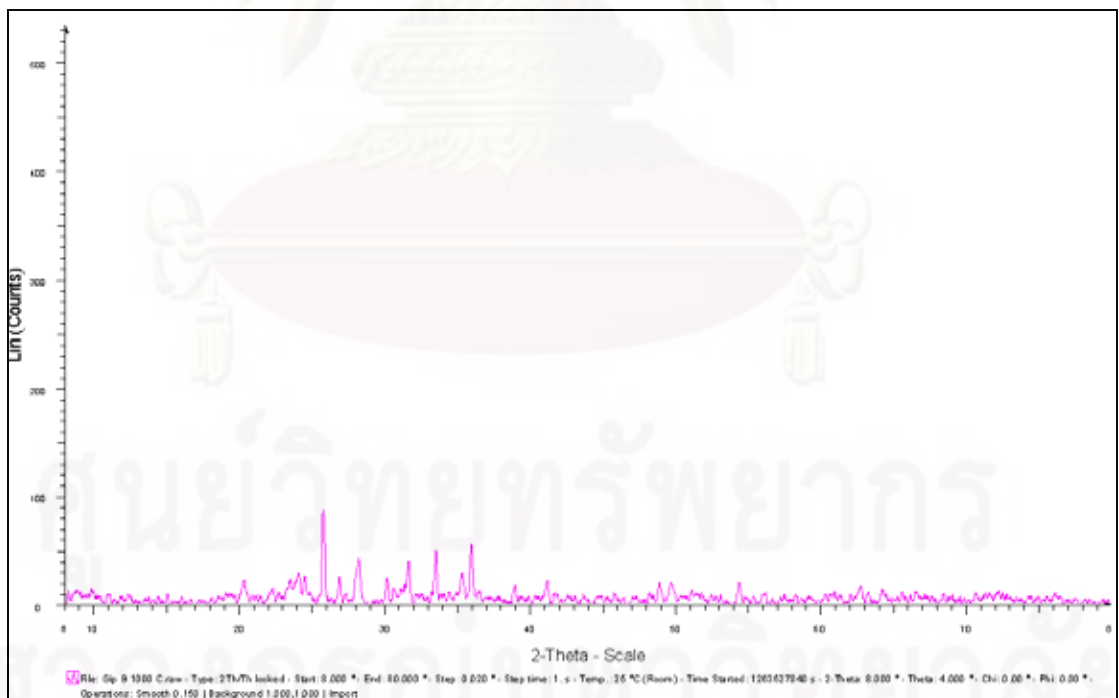


รูปที่ 33 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์, เส้นสีเขียวแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมอลูมินัมไอรอนออกไซด์)

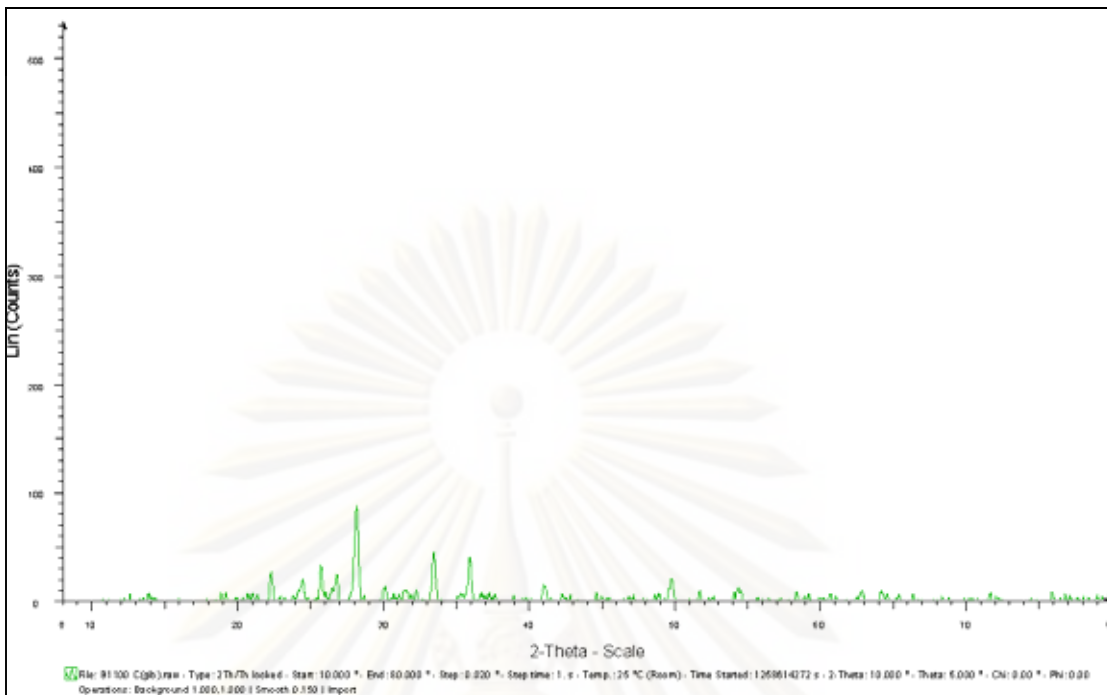




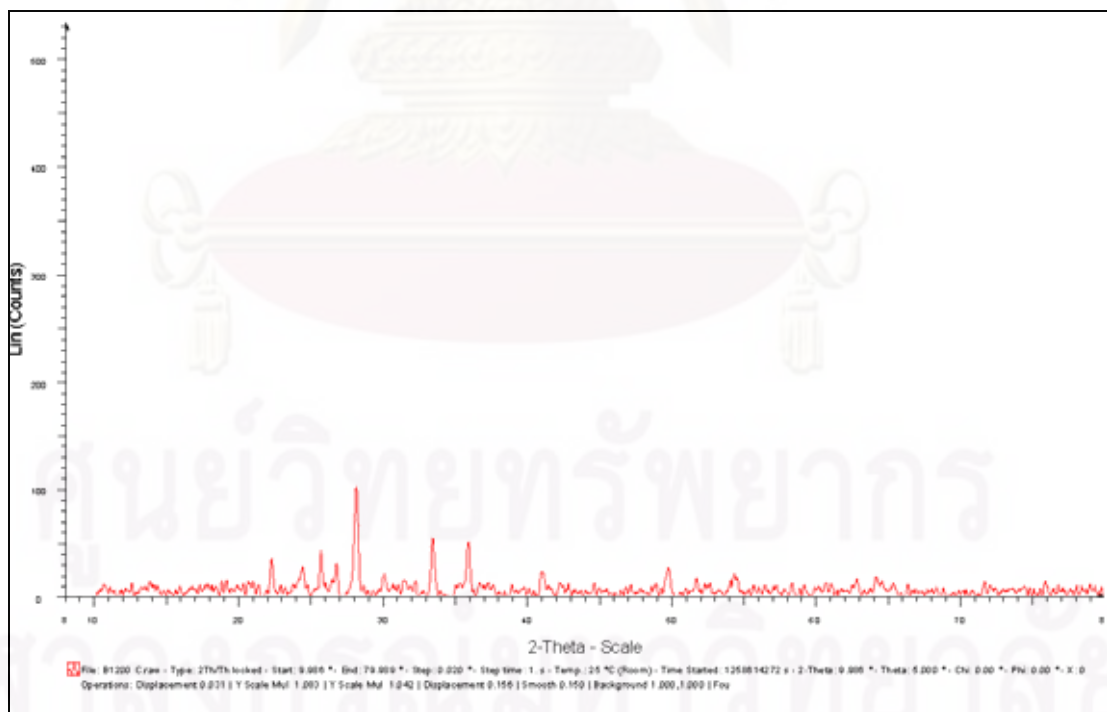
รูปที่ 34 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 900°C



รูปที่ 35 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1,000°C



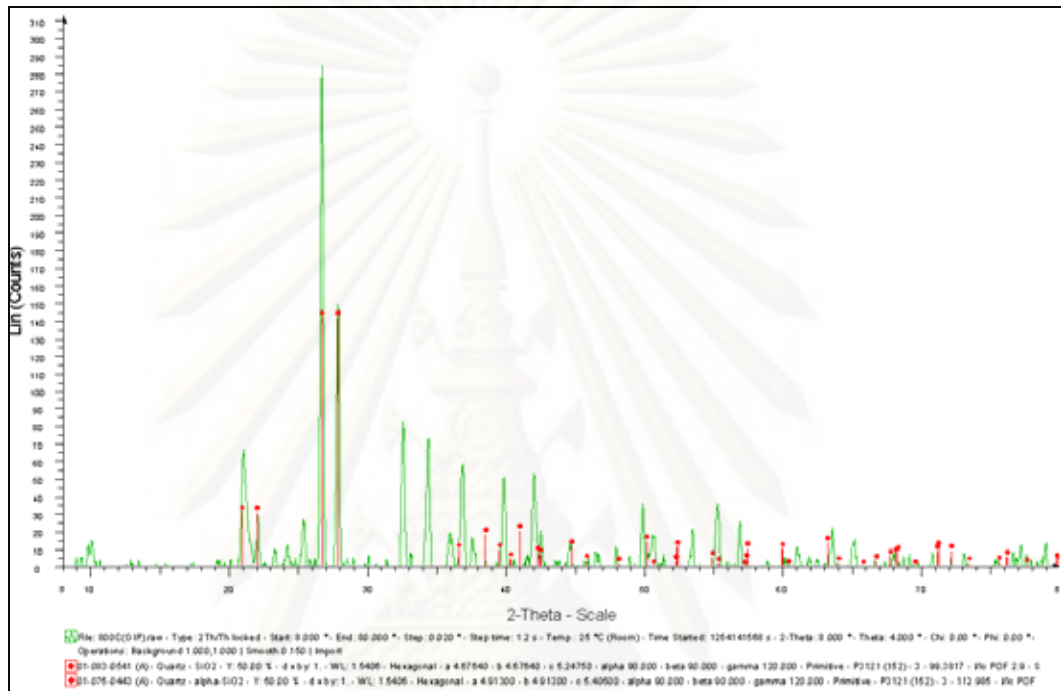
รูปที่ 36 แสดงDiffraction Patternตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1,100°C



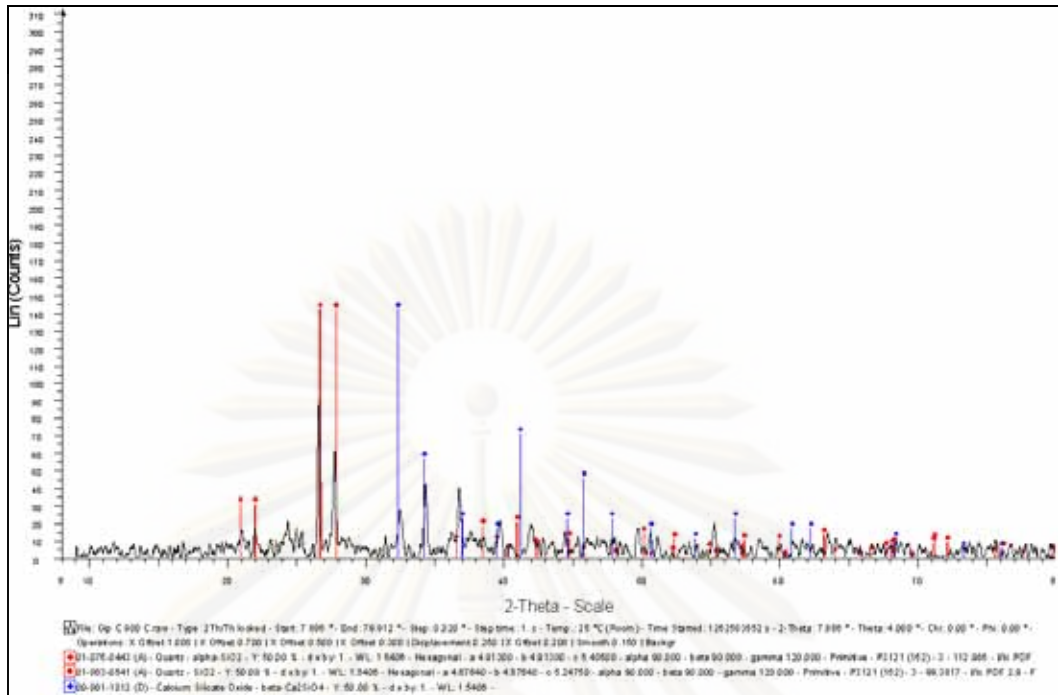
รูปที่ 37 แสดงDiffraction Patternตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1,200°C

จากรูปที่ 33 – 37 พบว่าที่อุณหภูมิ 800°C จะพบ XRD Pattern ของแร่ควอตซ์ และกลุ่มแร่แคลเซียมอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ชัดเจน แต่เมื่อถึงอุณหภูมิ 900°C จนถึงอุณหภูมิ 1,200°C พบว่า ขนาดของ XRD Pattern ลดลง

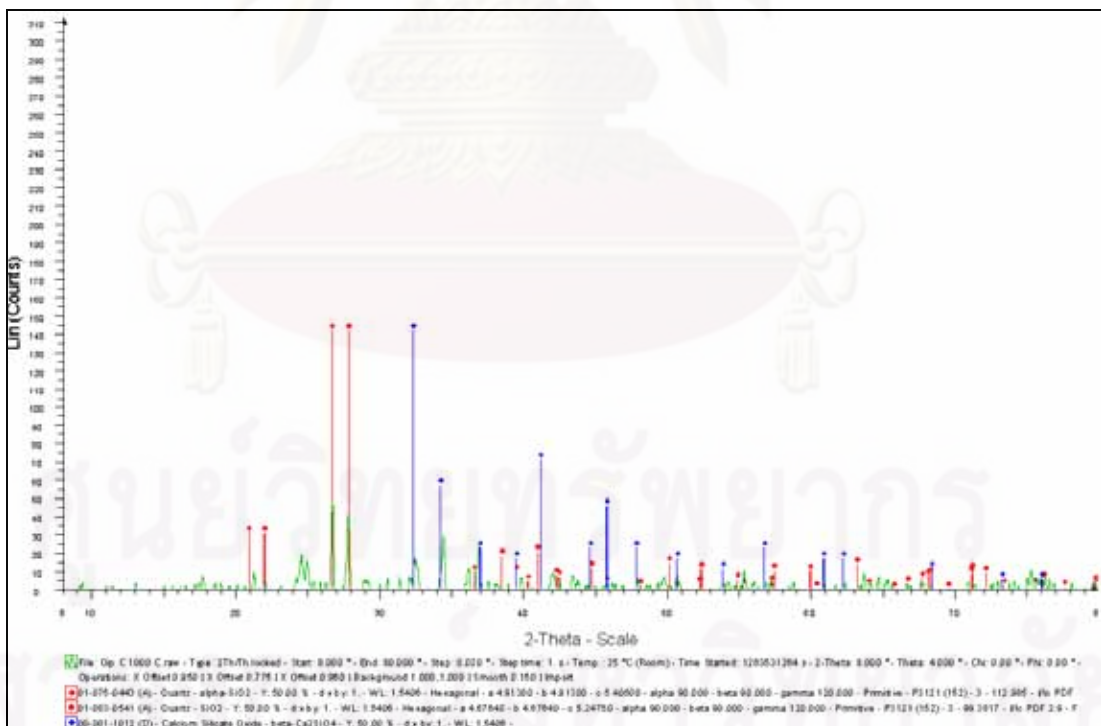
### 2.3 ตัวอย่าง Q2 60% + Q4 40%



รูปที่ 38 แสดง Diffraction Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์)

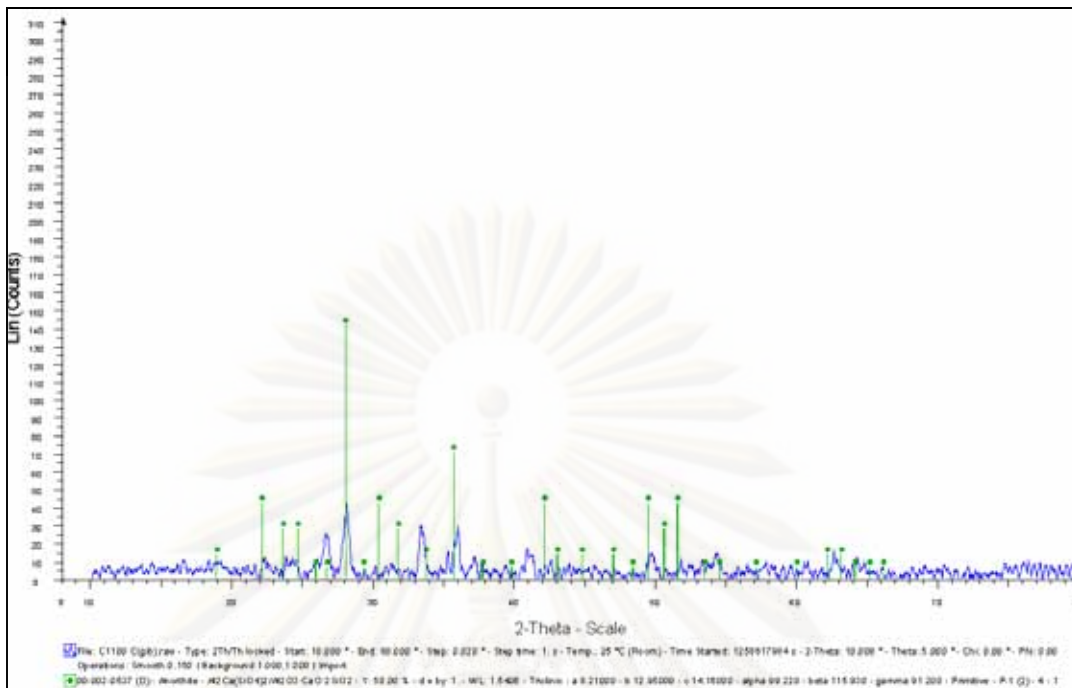


รูปที่ 39 แสดง Diffraction Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900°C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์, เส้นสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมซิลิเกต)

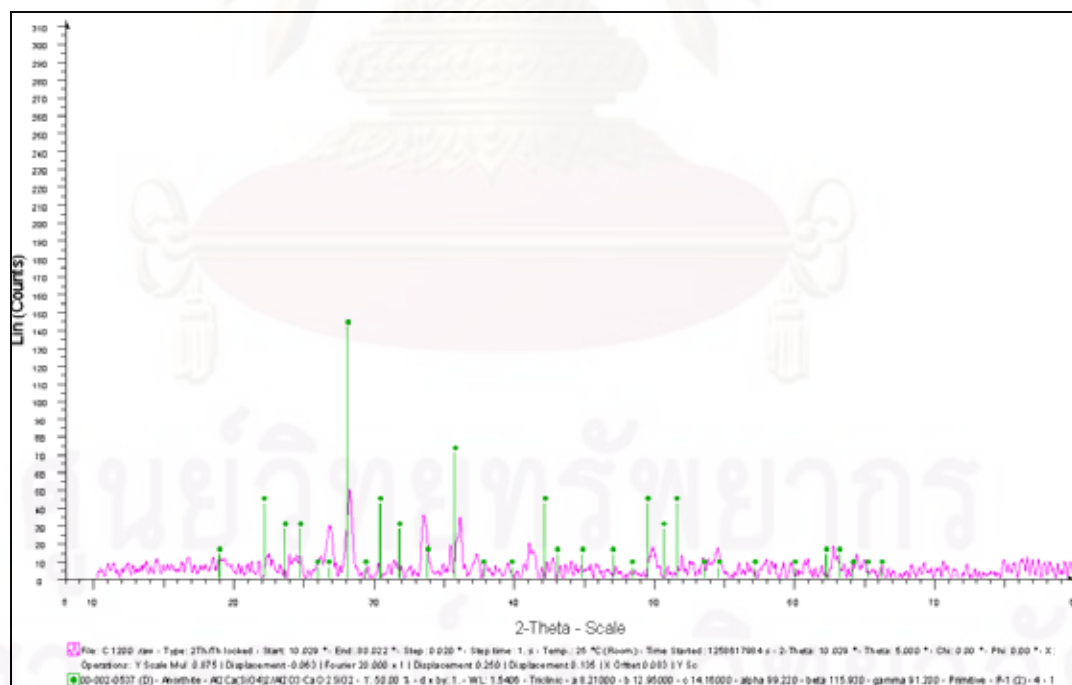


รูปที่ 40 แสดง XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,000°C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์, เส้นสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมซิลิเกต)





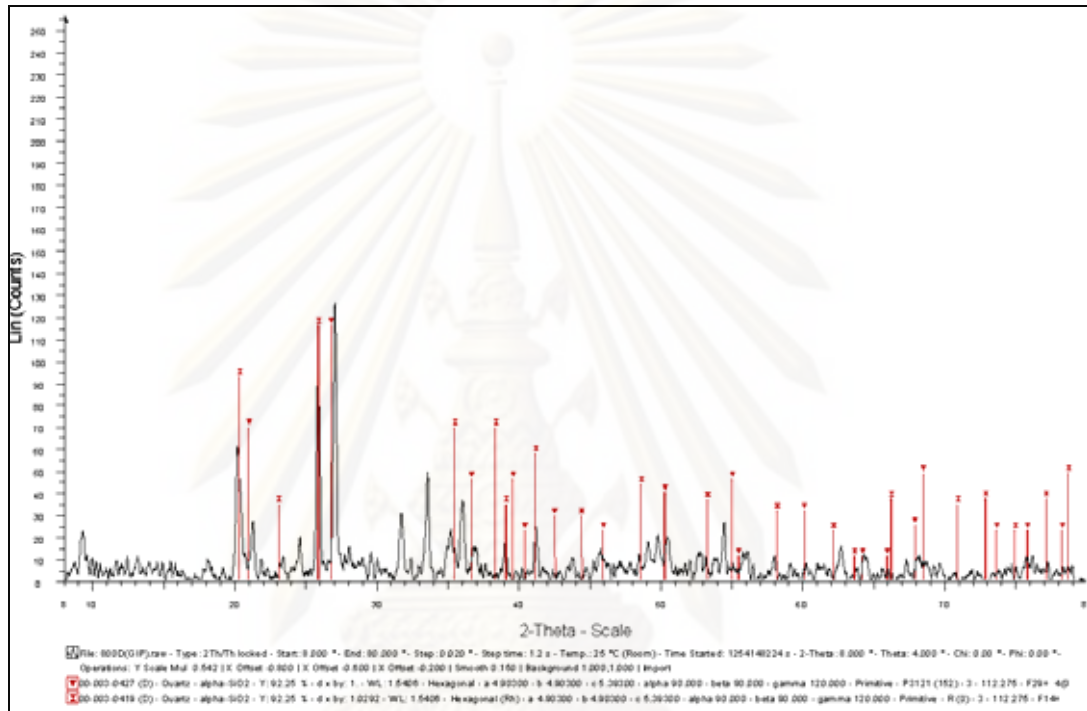
รูปที่ 41 แสดง Diffraction Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100°C (เส้นสีเขียวแสดงตำแหน่งของแร่อะนอร์ไทต์)



รูปที่ 42 แสดง Diffraction Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°C (เส้นสีเขียวแสดงตำแหน่งของแร่อะนอร์ไทต์)

จากรูปที่ 38 – 42 พบว่า แถบ XRD Pattern มีการเปลี่ยนแปลงขนาดระหว่าง อุณหภูมิ 800°C - 900°C และมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิจากแร่ควอตซ์ กับกลุ่มแร่แคลเซียมซิลิเกตเป็นแร่อะโนไทต์ที่อุณหภูมิ 1,100°C

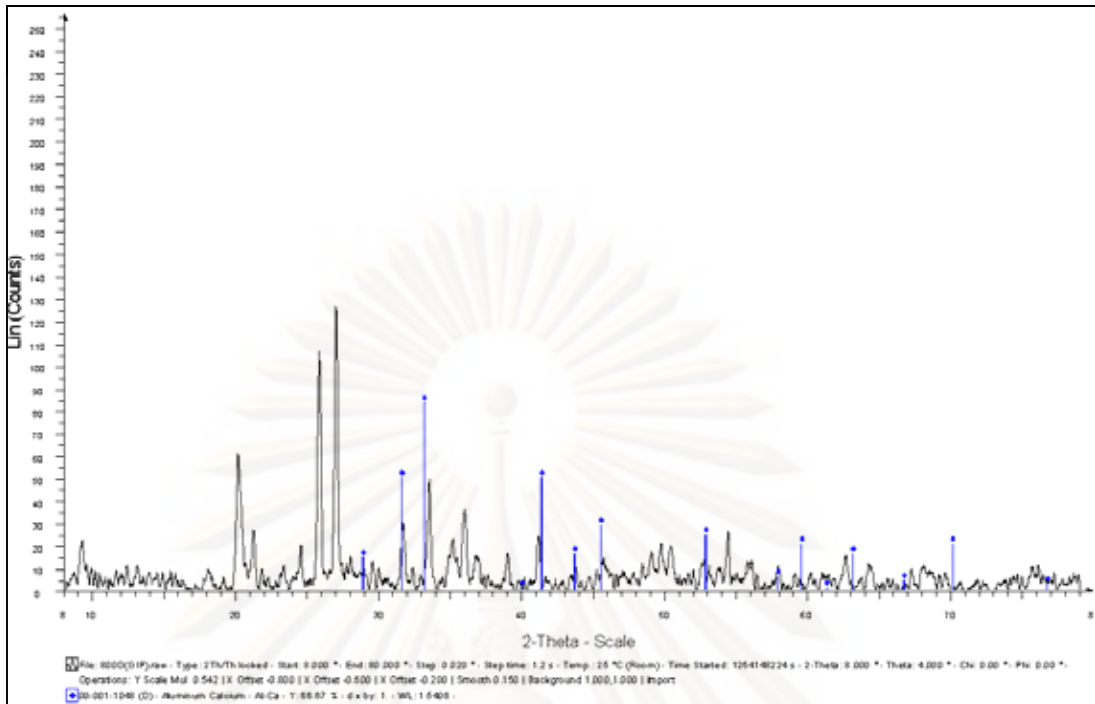
#### 2.4 ตัวอย่าง Q2 80% + Q4 20%



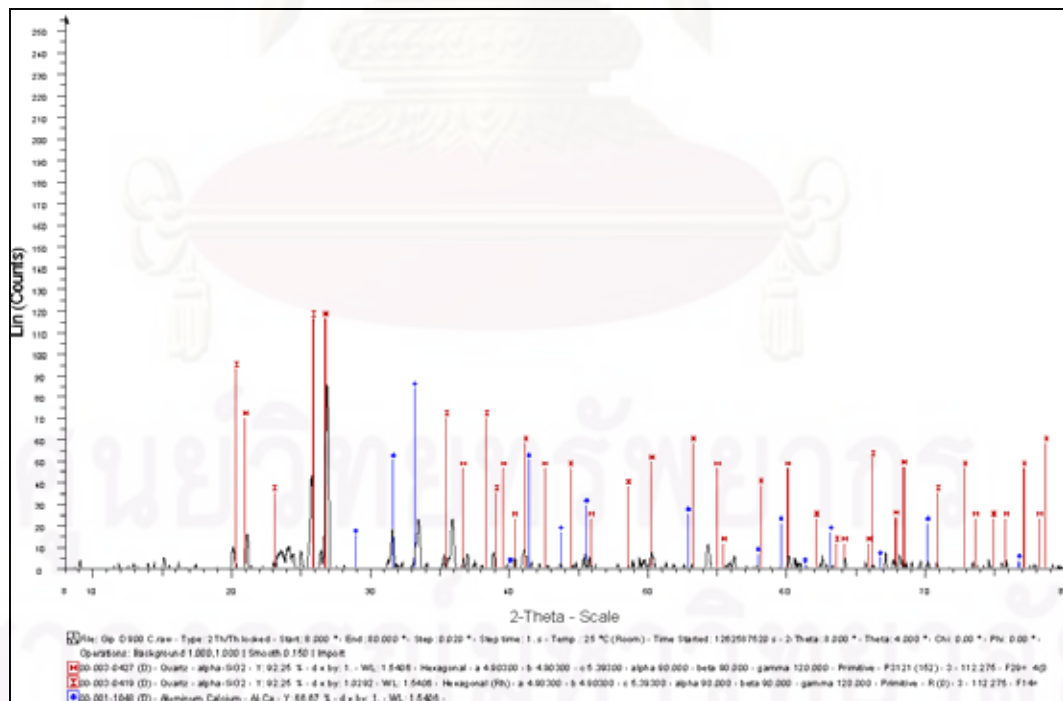
รูปที่ 43 แสดง Diffraction Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

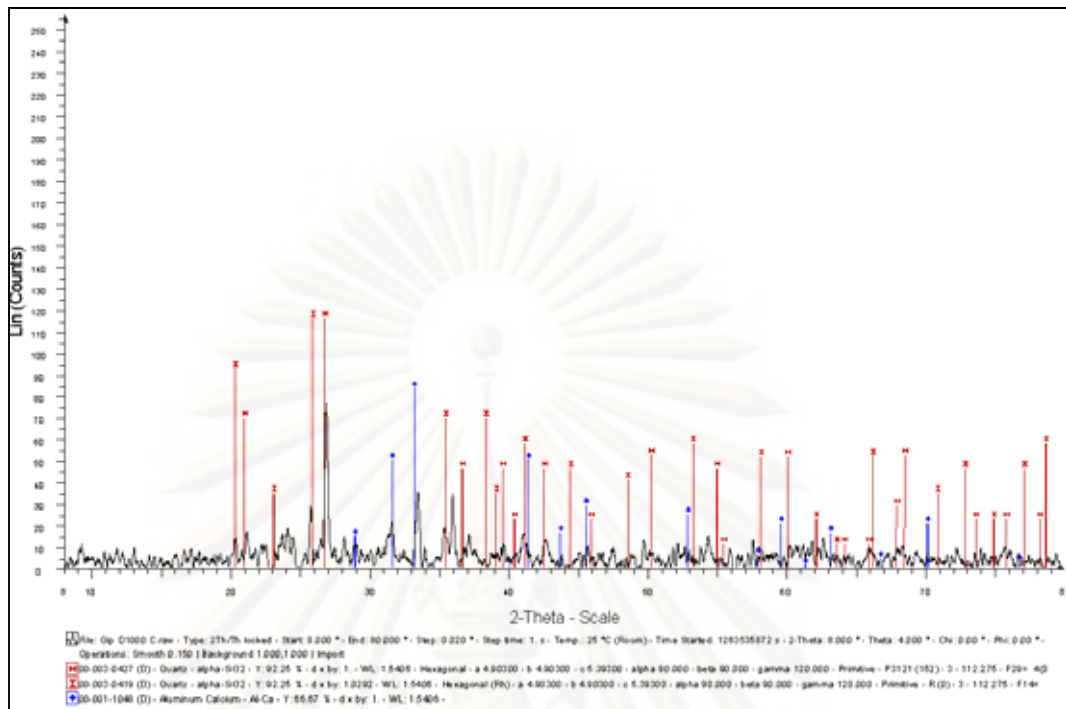
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



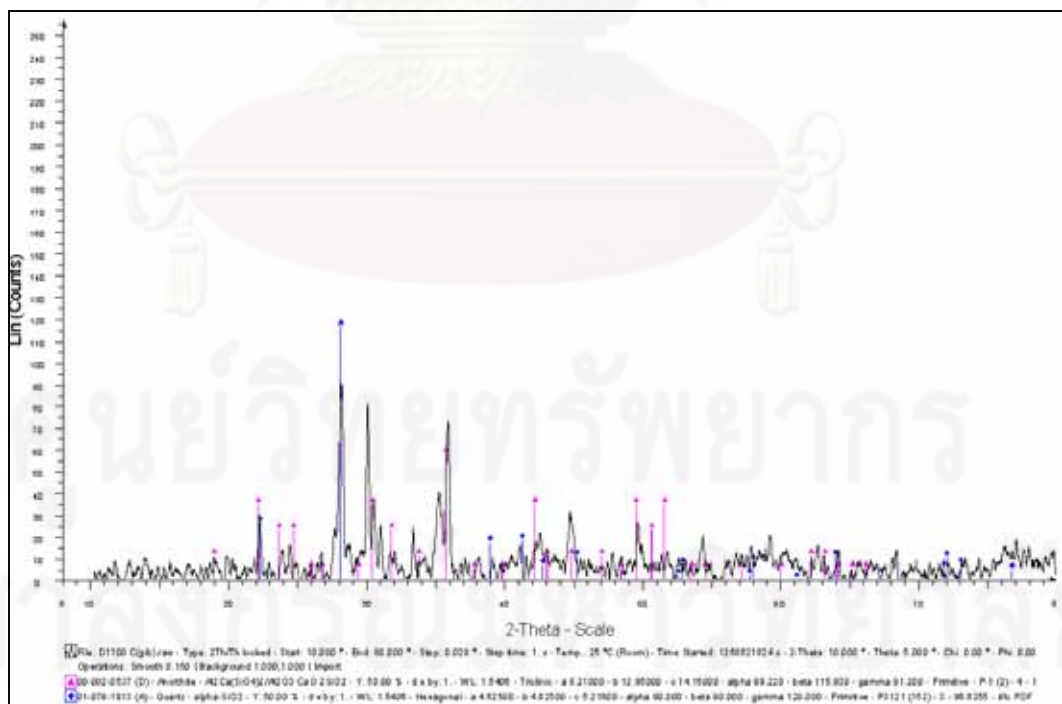
รูปที่ 44 แสดงDiffraction Patternตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 800°C  
(เส้นสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมอะลูมิเนียม)



รูปที่ 45 แสดงDiffraction Patternตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900°C  
(เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์, เส้นสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมอะลูมิเนียม)

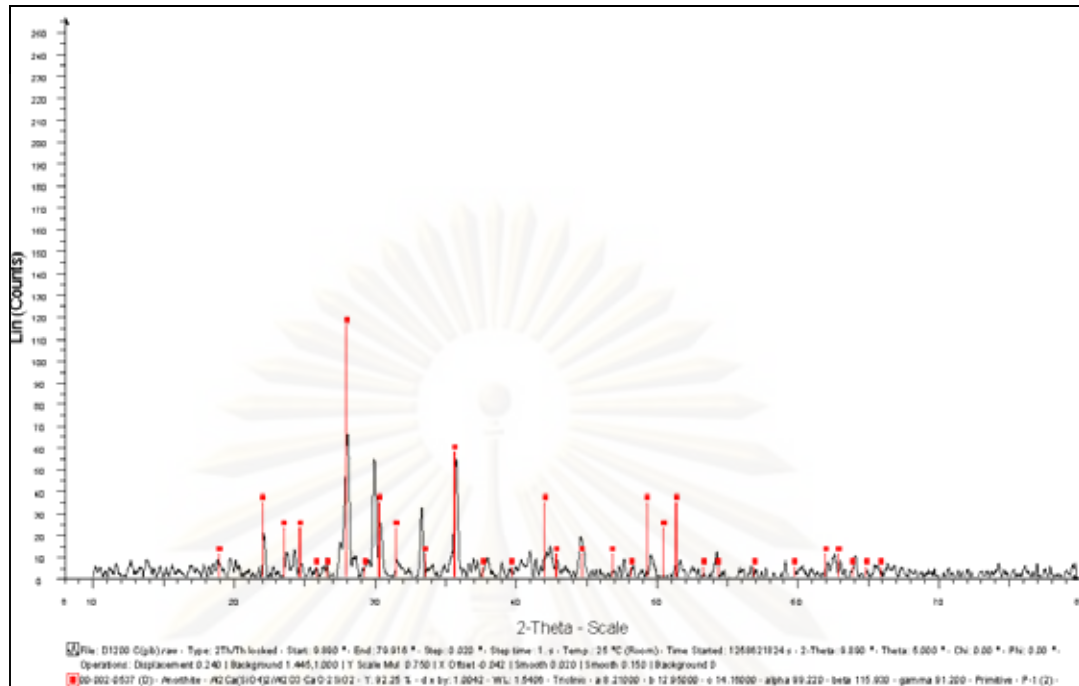


รูปที่ 46 แสดง Diffraction Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,000°C (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์, เส้นสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งของกลุ่มแร่แคลเซียมอะลูมิเนียม)



รูปที่ 47 แสดง Diffraction Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,100°C (เส้นสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งของแร่ควอตซ์, เส้นสีชมพูแสดงตำแหน่งของแร่อะโนไทต์)





รูปที่ 48 แสดง Diffraction Pattern ตัวอย่างและชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°C  
 (เส้นสีชมพูแสดงตำแหน่งของแร่อะโนไทต์)

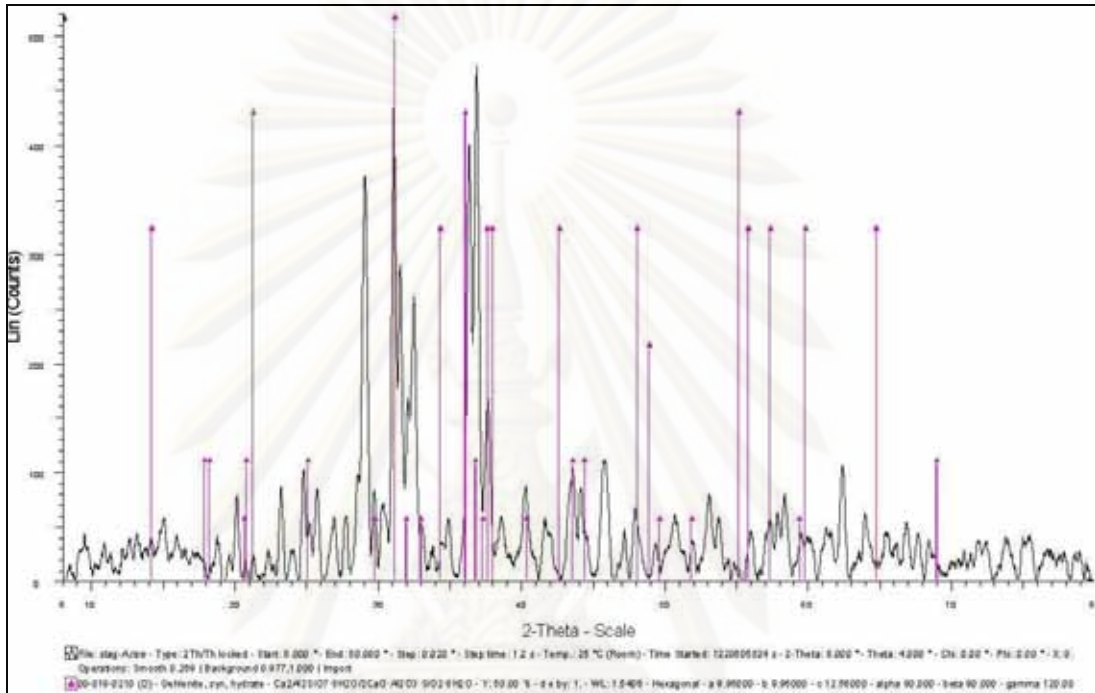
จากรูปที่ 43 – 48 มีการเปลี่ยนแปลงชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิจากกลุ่ม  
 แร่แคลเซียมอะลูมินัมเป็นแร่อะโนไทต์ที่อุณหภูมิ 1,100°C หลังจากนั้นไม่พบแร่ควอตซ์ที่อุณหภูมิ  
 1,200°C

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างตะกรันด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างตะกรัน Slag A, Slag B, Slag C และ Slag D ที่ได้จากแต่ละตำแหน่งของผนังหม้อไอน้ำด้วยเครื่อง XRD ได้ผลดังนี้

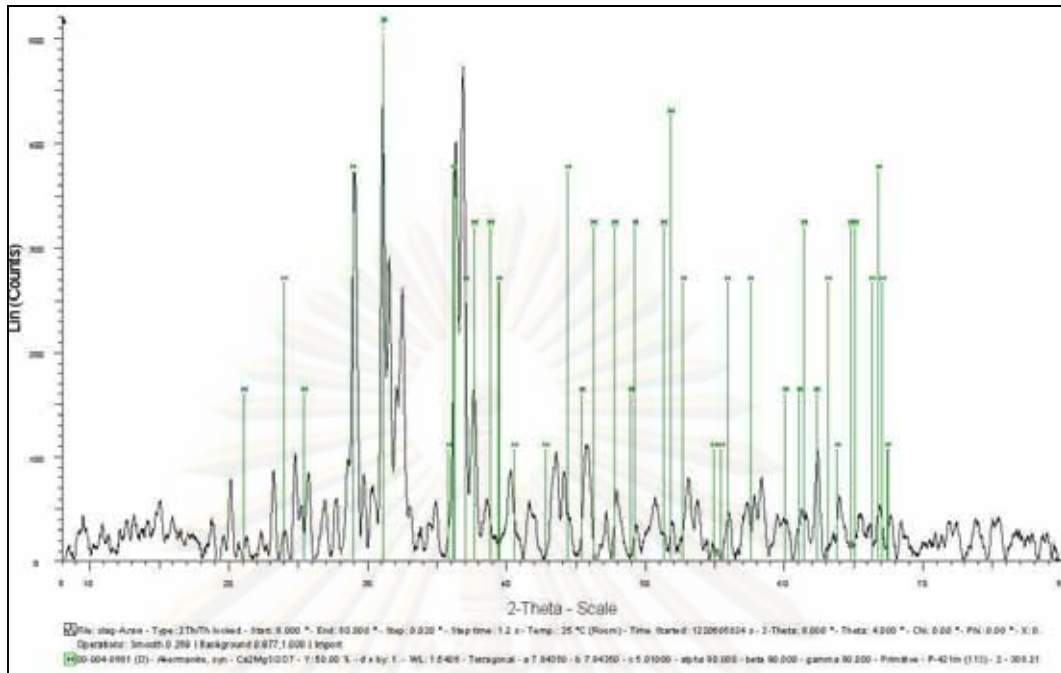
#### 3.1 ตัวอย่าง Slag A



รูปที่ 49 XRD Pattern XRD ของตัวอย่าง Slag A  
(เส้นสีชมพูแสดงตำแหน่งของแร่เกิร์ตไลน์ต์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

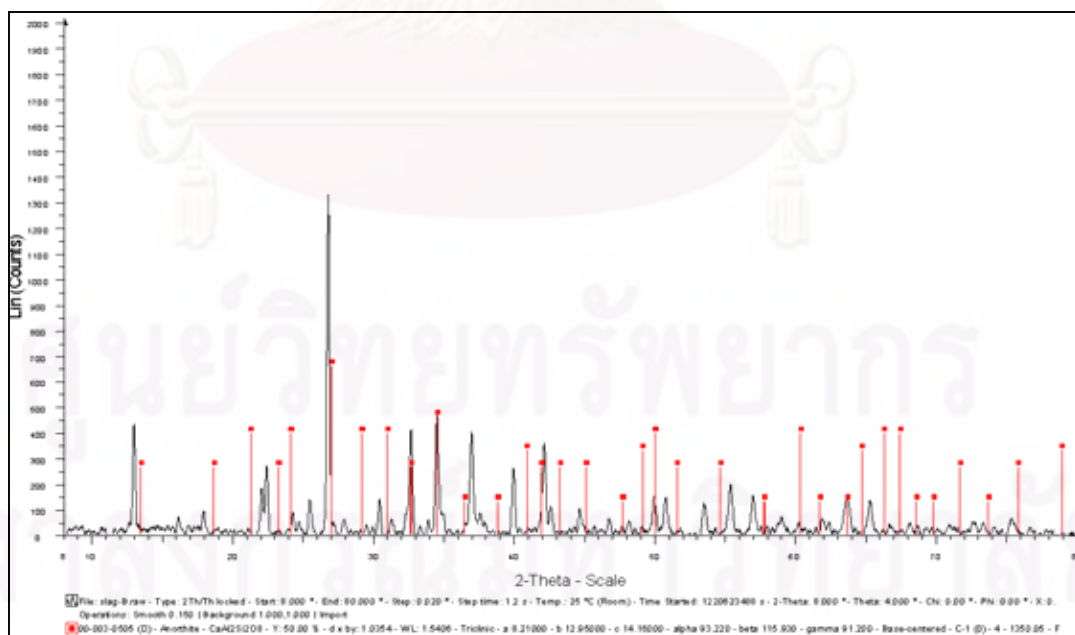
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 50 XRD Pattern XRD ของตัวอย่าง Slag A  
 (เส้นสีเขียวแสดง Peak ของแร่อะเคอร์มาไนต์)

จากรูปที่ 49-50 พบว่า ตัวอย่าง Slag A มีชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิคือ แร่เกห์เลไนต์ และแร่อะเคอร์มาไนต์

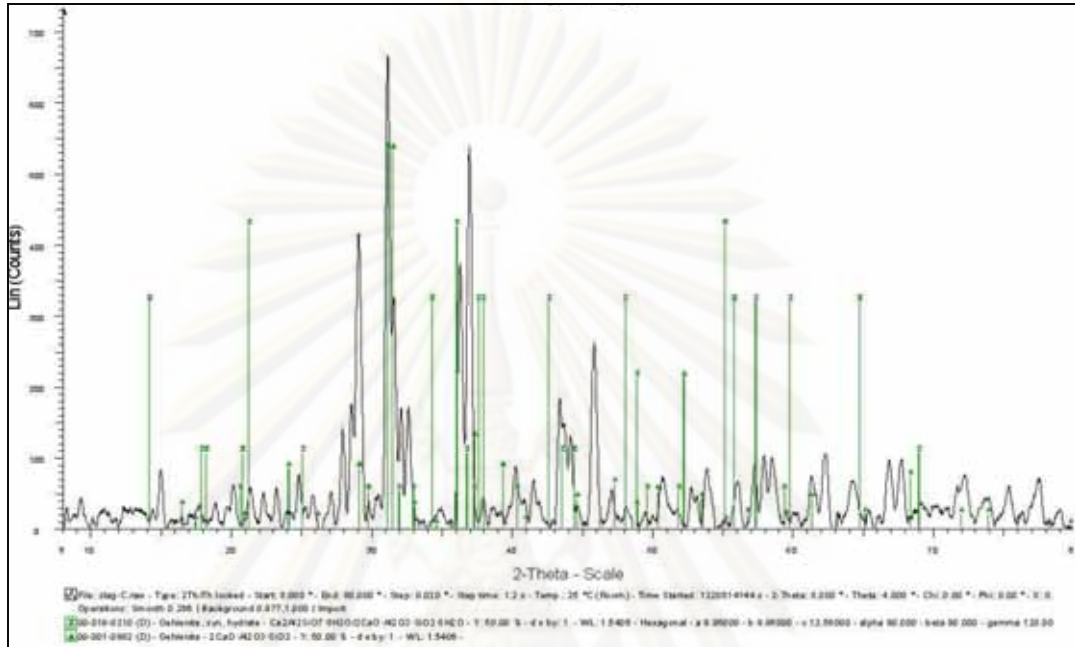
### 3.2 ตัวอย่าง Slag B



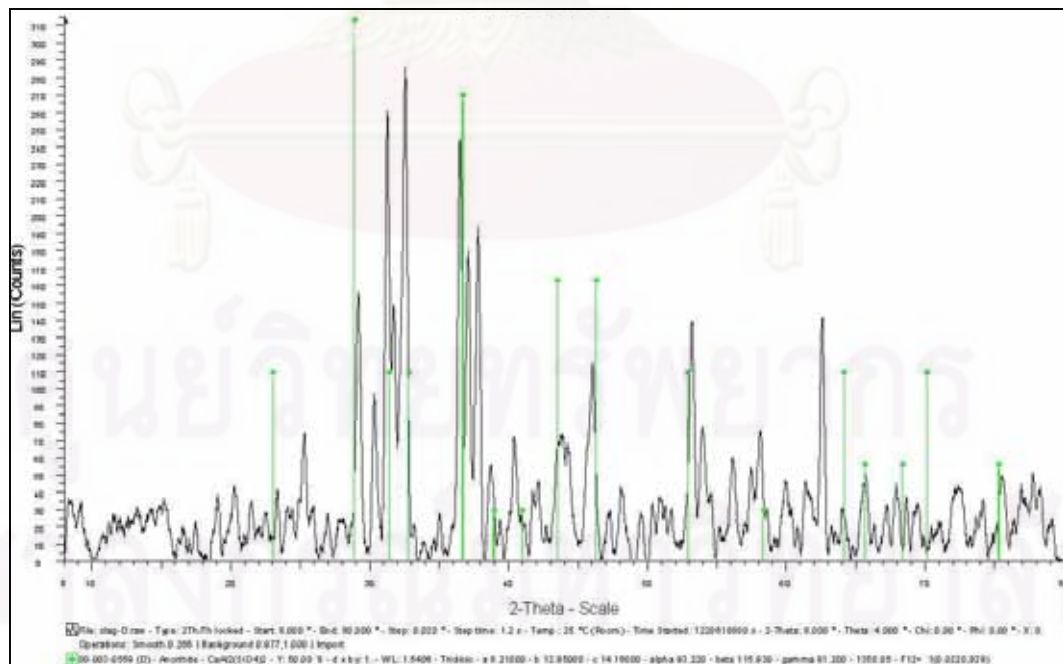
รูปที่ 51 XRD Pattern XRD ของตัวอย่าง Slag B  
 (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแร่อะนอไทต์)

จากรูปที่ 51 พบว่า ตัวอย่าง Slag B มีชนิดของแร่หลังการเผาที่อุณหภูมิคือ แร่ควอตซ์ และแร่อะโนไทต์

### 3.3 ตัวอย่าง Slag C

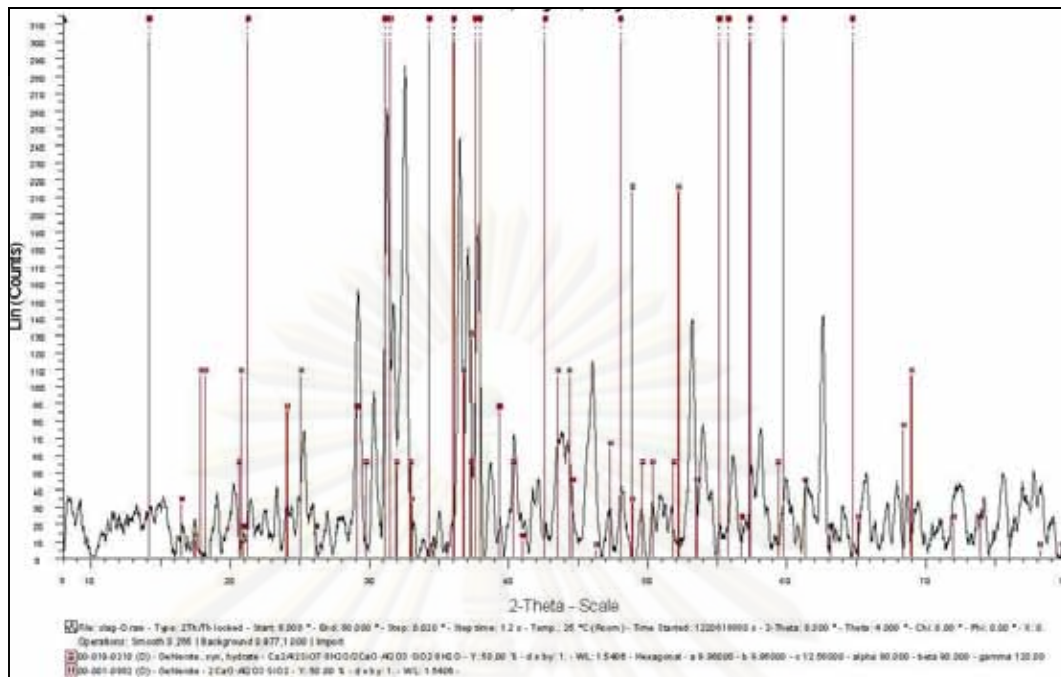


รูปที่ 52 XRD Pattern XRD ของตัวอย่าง Slag C  
(เส้นสีเขียวแสดงตำแหน่งของแร่เกห์ไลไนต์)



รูปที่ 53 XRD Pattern XRD ของตัวอย่าง Slag C  
(เส้นสีเขียวแสดงตำแหน่งของแร่อะโนไทต์)





รูปที่ 54 XRD Pattern XRD ของตัวอย่าง Slag C  
 (เส้นสีแดงแสดงตำแหน่งของแระกซ์ไลน์)

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพิธา ศรีบุญศรีดี จบการศึกษาจากภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป จากคณะ  
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี พ.ศ. 2546 ปัจจุบันได้เข้ารับการศึกษต่อในระดับ  
ปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2550 จนถึงปัจจุบัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย