

การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ Efficiency Improvement in Electricity Generation at Mae Moh Power Plant

พิชา ศรีบุศย์ศย์¹ และ ภิญญโณ มีชานะ²

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน การผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะกำลังประสบปัญหาการเกิดตะกรันขึ้นในผนังของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้า ทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างห้องเผาไหม้ไปยัง Water Tube ของหม้อไอน้ำประสิทธิภาพลดลงทำให้เกิดการสูญเสียกำลังการผลิตไฟฟ้า ซึ่งสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดตะกรันคือ ถ่านหินที่มีปริมาณร้อยละของ CaO อยู่ในช่วง 23-35% จึงได้ทำการทดลองโดยนำตัวอย่างถ่านหินจำนวน 3 ตัวอย่าง ที่มีค่า % CaO แตกต่างกันคือ ตัวอย่าง Q2 (2.24% CaO), ตัวอย่าง Q4 (27.34% CaO) และ ตัวอย่าง K3 (31.81% CaO) และตัวอย่างที่ผสมกันระหว่าง ตัวอย่าง Q2 กับ ตัวอย่าง Q4 โดยนำตัวอย่างทั้งสามมาหาค่าอุณหภูมิเริ่มต้นการหลอม (Initial Deforming Temperature: IT) พบว่าตัวอย่าง Q4 มีค่า IT ต่ำกว่าอุณหภูมิในเตาของหม้อไอน้ำ หลังจากนั้นนำตัวอย่างทั้งหมดมาเผาที่อุณหภูมิ 800 C - 1,200 C แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อหาชนิดของแร่ในแต่ละอุณหภูมิของตัวอย่างพบว่า แร่ในตัวอย่าง Q4 และแร่ในตัวอย่างถ่านหินผสมระหว่าง Q2 20% กับ Q4 80% ที่น่าจะเป็นสาเหตุให้มีค่า IT ต่ำคือ แร่เกิร์ตไลน์ต์

คำสำคัญ: Slag, Blended Coal Ash, Ash Fusion, Ternary Phase Diagram

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย E-mail: gipgarp@hotmail.com

² ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทนำ

โรงไฟฟ้าแม่เมาะของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) กำลังประสบปัญหาเกี่ยวกับตะกรัน (Slag) ที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้า โดยสร้างปัญหาให้กับการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นอย่างมาก ทำให้ต้องมีการปิดโรงไฟฟ้าที่เกิดปัญหา จากข้อมูลสถิติการสูญเสียกำลังการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะโรงที่ 8-13 ระหว่างปี 2544-2548 พบว่าเกิดจากตะกรันไปเกาะตัวผนังเตาของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (รูปที่ 1) ทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างห้องเผาไหม้ไปยัง Water Tube ของหม้อไอน้ำประสิทธิภาพลดลงทำให้เกิดการสูญเสียกำลังการผลิตไฟฟ้า ปัญหาดังกล่าวพบที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งในรอบหลายปีที่ผ่านมา [1]



รูปที่ 1 ตะกรันที่เกาะอยู่บริเวณผนังหม้อไอน้ำในโรงไฟฟ้า

ก่อนปี พ.ศ.2549 ทางทีมงานกฟผ.แม่เมาะได้มีการพัฒนาแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับแหล่งถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ เพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพลิกไนต์ที่ป้อนเข้าโรงไฟฟ้าโดยได้ลองวิเคราะห์ถ่านลิกไนต์เฉพาะค่าปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ (% CaO) เท่านั้น และเมื่อนำข้อมูลของตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์จำนวน 900 ตัวอย่าง มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิของการหลอมเริ่มต้น (Initial Deforming Temperature: IT) พบว่าเมื่อปริมาณร้อยละของ CaO เพิ่มขึ้น ค่า IT จะลดลง การแก้ปัญหาในปัจจุบันทำได้โดยการผสมถ่านในบริเวณต่าง ๆ ของเหมืองออกเป็น 3 แหล่ง คือ แหล่งถ่านหินลิกไนต์ที่มี

ต่ำประกอบด้วยปริมาณของ CaO น้อยกว่า 15% , ปริมาณของ CaO อยู่ในช่วง 15-23% และ ปริมาณของ CaO มากกว่า 23% การผสมถ่านหินลิกไนต์จะควบคุมให้คุณภาพของถ่านมีส่วนประกอบของ CaO น้อยกว่า 23% ซึ่งการผสมถ่านหินลิกไนต์ดังกล่าวทำให้มีการเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจากปกติประมาณ 10-20 ล้านบาทต่อปี การผสมถ่านหินลิกไนต์ปัจจุบันจะทำได้โดยวิธีการผสมถ่านหินข้ามบ่อ แต่การผสมถ่านหินลิกไนต์ในอนาคตก (ประมาณปี พ.ศ. 2563) เมื่อชุดลิกไนต์ไปเรื่อย ๆ พบว่าคุณภาพถ่านหินมีปริมาณ CaO สูงขึ้น (มากกว่า 23%) จึงทำให้การผสมถ่านได้ยากขึ้น

ในปี พ.ศ. 2549 กฟผ.แม่เมาะได้ว่าจ้างทีมงานจาก Joint Graduate School of Energy and Environment (JGSEE) พร้อมผู้เชี่ยวชาญต่างประเทศ [2] โดยได้ทำการทดลองเก็บข้อมูลจากโรงไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 7 วัน โดยเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบ ของโรงไฟฟ้ายูนิต 8, 9 และ 11 ซึ่งจากการศึกษาของ JGSEE ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % SiO₂ กับ Al₂O₃ และ CaO กับ Fe₂O₃ และให้ความเห็นว่า Fluxing Mineral ที่มีอยู่ในถ่านลิกไนต์น่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ Ash Fusion Temperature (AFT) ของถ่านลิกไนต์ลดลงอันเป็นเหตุให้เกิดตะกรันได้ง่าย

ในปี พ.ศ.2549 บริษัท Taiho Industries จำกัด [3] 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 นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาตัวอย่างด้วย XRD เพื่อหาชนิดของแร่ (ดังตารางที่ 1) และ SEM-EDX Qualitative Analysis พบว่า Ca และ S มีการกระจายตัวในรูปแบบเดียวกัน และได้รายงาน ว่า Ca และ S น่าจะฟอร์มตัวกันอยู่ในรูปของแร่แอนไฮไดรต์ (Anhydrite: CaSO₄) จึงแสดงความคิดเห็นว่า Eutectic Mixture ของ CaSO₄ กับ Fe₂O₃ MgO และ Na₂O อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่า IT ของถ่าน

ลิกไนต์ลดลง อันเป็นเหตุสำคัญทำให้เกิดตะกรันและได้อธิบายว่าเมื่อปริมาณ CaO เพิ่มมากขึ้น (CaO มากกว่า 30%) จะมีปริมาณ CaO ที่เหลือจากการจับตัวกันเป็น Eutectic Mixture ซึ่งจะอยู่ในรูปของ Lime (CaO) ซึ่ง CaO ที่เหลือนี้จะเป็นสาเหตุที่ทำให้ถ่านลิกไนต์มีค่า IT เพิ่มขึ้นเนื่องจากจุดหลอมเหลวของ CaO นั้นสูงถึง 2,572 °C

ตารางที่ 1 สารประกอบ หรือแร่ที่อาจจะเป็นองค์ประกอบอยู่ในถ่านลิกไนต์

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

ที่มา : รายงานผลวิเคราะห์ของ Taiho Industries ประเทศญี่ปุ่นเมื่อปี พ.ศ. 2549

Qiu J.R. และคณะ, (1998) [4] ได้ศึกษาอิทธิพลของพฤติกรรมแร่ในการหลอมถ่านลิกไนต์ผสมกันแล้วและการเปลี่ยนรูปของแร่ โดยทำการศึกษาถ่านลิกไนต์จำนวน 3 ตัวอย่างที่มีองค์ประกอบเคมีของซีเถ้าที่ต่างกันคือ ถ่านลิกไนต์ปริมาณร้อยละของ CaO ต่ำ (ตัวอย่าง I), ปริมาณร้อยละของ CaO กลาง (ตัวอย่าง J) และ ปริมาณร้อยละของ CaO สูง (ตัวอย่าง K) หลังจากนั้นนำมาผสมถ่านในอัตราส่วนที่ต่างกัน แล้วนำมาวิเคราะห์หาอุณหภูมิจุดหลอมตัวเริ่มต้น หรือ Ash Fusion Temperature (AFT) โดยที่ตัวอย่างจะถูกเผาเริ่มที่อุณหภูมิ 800 °C (เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำกว่านั้นยังไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างแร่ในถ่านที่ชัดเจน นอกจากเกิดการสลายตัว) จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ตัวอย่างเริ่มหลอมตัว โดยองค์ประกอบแร่ในแต่ละช่วงอุณหภูมิจะวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ X-Ray Diffractometer (XRD) ซึ่งผลวิเคราะห์ XRD ที่

อุณหภูมิ 800 °C พบว่าตัวอย่าง I และตัวอย่าง J จะมีแร่ควอตซ์เป็นแร่หลัก ส่วนตัวอย่าง K ซึ่งมีผลวิเคราะห์ปริมาณ CaO สูงที่สุดก็จะพบแร่แคลไซต์เป็นแร่หลัก และจะพบแร่แอนไฮไดรต์ (Anhydrite: CaSO₄) และแร่ฮีมาไทต์ (Hematite: Fe₂O₃) บ้างเล็กน้อย หลังจากเผาและวิเคราะห์ตัวอย่างแล้วผลปรากฏว่าองค์ประกอบของถ่านหินที่ถูกเผาจะมีอัตราส่วนระหว่าง CaO, Al₂O₃ และ SiO₂ ที่เปลี่ยนไป ตัวอย่างถ่านหินที่มีองค์ประกอบของ CaO ต่ำ (ถ่านหิน I ผสมกับถ่านหิน J) ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอม (Initial Temperature: IT) สูงกว่าตัวอย่างที่มีค่า CaO สูง (ถ่านหิน J ผสมกับถ่านหิน K)

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนั้นเพื่อศึกษาเกี่ยวกับลักษณะทางแร่วิทยา (Mineralogy) ของถ่านหินและตะกรันที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเตาของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เพื่อหาแนวทางที่จะอธิบายสาเหตุและกลไกของการเกิดตะกรันและหาแนวทางป้องกันการเกิดตะกรันเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิตกระแสไฟฟ้า

2. วัตถุประสงค์ และวิธีการวิจัย

การศึกษาถ่านหินที่เป็นสาเหตุให้เกิดตะกรันนั้น จะศึกษาโดยนำตัวอย่างที่มีค่าปริมาณร้อยละของ CaO ที่ใกล้เคียงกับช่วง 23-35% กับตัวอย่างถ่านหินที่มีค่าร้อยละ CaO ต่ำ และตัวอย่างถ่านหินที่มีค่าร้อยละ CaO สูง มาหาองค์ประกอบทางเคมีของแร่ที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิในเตาเผา (ประมาณ 1,200 C) และนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของแร่ที่ได้จากการวิเคราะห์ตะกรัน จากนั้นหาความสัมพันธ์ของปัจจัยการเกิดตะกรันโดยนำมาเทียบกับ สามเหลี่ยมไตอะแกรม (Ternary Phase Diagram) ระหว่าง CaO-Al₂O₃-SiO₂

ตัวอย่างถ่านหินที่นำมาศึกษาวิจัยได้เก็บมาจากเหมืองถ่านหินแม่เมาะ จ.ลำปาง จำนวน 3 แหล่ง คือ ตัวอย่างที่ได้จากชั้นถ่านหิน Q2 (ปริมาณร้อยละของ CaO ต่ำ) ตัวอย่าง Q4 (ปริมาณร้อยละของ CaO ปานกลาง) และตัวอย่าง K3 (ปริมาณร้อยละของ CaO สูง) โดยวิธีการเลือกพื้นที่ตัวอย่างได้มาจากข้อมูลหลุมเจาะเพื่อหาตัวอย่างโดยดูจากค่าปริมาณร้อยละของ

CaO ซึ่งวิธีการเก็บตัวอย่างจะกะเทาะชั้นหินในแนวขวางกับแนวชั้นหิน เพื่อให้ครอบคลุมองค์ประกอบของถ่านหินของชั้นนั้น ส่วนตัวอย่างตะกักรันที่นำมาวิเคราะห์เพื่อเทียบองค์ประกอบทางเคมีของแร่ที่ได้มาจากผนังเตาในโรงไฟฟ้า

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก็คือนำตัวอย่างถ่านหินและตัวอย่างตะกักรันมาย่อยด้วยเครื่องย่อยแบบลูกกลิ้ง (Roll Crusher) ให้ได้ขนาด 80 เมช (Mesh) แล้วนำไปชั่งตัวอย่างออกไปบางส่วนก่อนนำไปบดโดยใช้เครื่องบดแบบแหวนจะได้ขนาดตัวอย่างประมาณ 325 เมช หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่บดแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังนี้

2.1) วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของแร่อินทรีย์ในซีเถ้าโดยนำตัวอย่างถ่านหินไปเผาที่อุณหภูมิ 750 C เพื่อให้ได้ซีเถ้าแล้วนำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ ICPS ในรูปของ Oxides โดยใช้ค่าปริมาณร้อยละของ CaO เป็นเกณฑ์ในการกำหนดชนิดตัวอย่าง (ดังตารางที่ 2) จากตารางพบว่า ตัวอย่างถ่านหิน Q2, K3 และ Q4 มีค่าปริมาณร้อยละของ CaO คือ 2.24, 27.42 และ 31.81 ตามลำดับ จะสังเกตว่าตัวอย่างถ่านหิน K3 และ Q4 นี้มีค่าปริมาณร้อยละของ CaO อยู่ในช่วงของโอกาสที่ทำให้เกิดตะกักรัน (คือ CaO อยู่ในช่วง 23 -35% ซึ่งเป็นช่วงที่จะเกิดตะกักรันในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้า)

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีของซีเถ้าของตัวอย่างถ่านหิน

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

2.2) วิเคราะห์เพื่อหาอุณหภูมิการหลอมของเถ้า (Ash Fusion Temperature) เป็นการศึกษาพฤติกรรมการหลอมของเถ้าถ่านหินที่อุณหภูมิสูง โดยจะวิเคราะห์เพื่อดูอุณหภูมิที่ซีเถ้าเริ่มจะละลายโดยซีเถ้าจะถูกทำให้มีรูปร่างคล้ายกับรูปทรงพีรามิด และใส่เข้าไปในเตาเผา ซึ่งออกแบบโดยเฉพาะภายใต้บรรยากาศที่มีหรือไม่มีออกซิเจน พร้อมทั้งสังเกตและบันทึกการเปลี่ยนแปลงผ่านกระจกเตาเผา โดยจะเริ่มที่อุณหภูมิ 900 C จนถึงอุณหภูมิ 1,600°C

2.3) การนำตัวอย่างถ่านหินมาเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันแล้ววิเคราะห์ด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) โดยนำตัวอย่างทั้งสามที่ผ่านการบดแล้ว มาชั่งตัวอย่างด้วยวิธี Cone and Quartering แล้วนำมาเผาในเตาเผาโดยใส่ตัวอย่างในถ้วยทนไฟประมาณ 15 กรัม ก่อนนำเข้าเตาเผาเพื่อดูองค์ประกอบทางเคมีของแร่ที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยเริ่มเผาจากอุณหภูมิ ห้องจนถึงอุณหภูมิ 800 C อีก 3 ชั่วโมง จากนั้น นำออกจากเตาเผา ทิ้งให้เย็นสักพักแล้วนำไปไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อไม่ให้ทำปฏิกิริยากับอากาศจนเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์มากจนเกินไป ทำเช่นนี้เรื่อยไปโดยจะเพิ่มอุณหภูมิทีละ 100 C จนถึงอุณหภูมิ 1,200 C และนำตัวอย่างในแต่ละอุณหภูมิมาวิเคราะห์โดยวิธี XRD

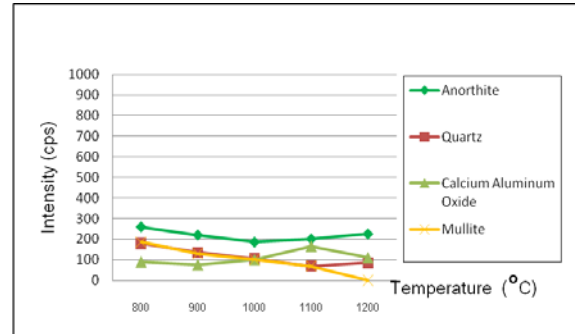
ผลการทดลอง (Results)

จากการทดลองในข้อที่ 2.2 หัวข้อที่ 2 นำตัวอย่างถ่านหิน Q2 (% CaO = 2.24), Q4 (% CaO = 27.42) และตัวอย่าง K3 (% CaO = 31.81) มาอบให้แห้งแล้วนำมาบดให้ผ่านรูตะแกรงขนาด 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 3

ตารางที่ 3 แสดงอุณหภูมิของการหลอมตัวของแก้ว ตัวอย่าง Q2, Q4 และ K3

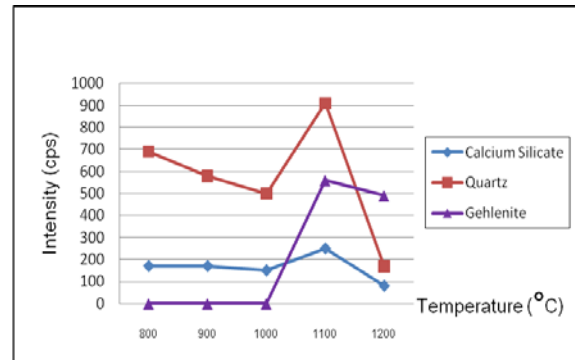
SAMPLE NAME	Q2	Q4	K3
ASH FUSION TEMPERATURE (°C)	RESULT		
INITIAL DEFORMATION TEMPERATURE (IT)	>1,500	1,197	1,301
SOFTENING TEMPERATURE (ST)	>1,500	1,305	1,314
HEMISPHERICAL TEMPERATURE (HT)	>1,500	1,307	1,328
FLUID TEMPERATURE (FT)	>1,500	1,329	1,369

จากผลการทดลองพบว่าตัวอย่าง Q4 ซึ่งมีค่า % CaO ปานกลางจะมีค่า IT ต่ำที่สุด ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิในเตาเผาของหม้อไอน้ำ (อุณหภูมิประมาณ 1,300°C) ทำให้เกิดการหลอมตัวในผนังเตาได้ง่าย ส่วนตัวอย่าง Q2 ซึ่งมีค่า % CaO ต่ำ และตัวอย่าง K3 ซึ่งมีค่า % CaO สูงจะมีค่า IT สูง ซึ่งหากนำถ่านหิน Q4 ไปเผาอาจเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าได้ การวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน Q2, Q4 และตัวอย่าง K3 เพื่อหาชนิดของแร่ในแต่ละอุณหภูมิเริ่มด้วยการนำตัวอย่าง Q2, Q4 และ K3 ไปเผาที่อุณหภูมิ 800°C, 900°C, 1,000°C, 1,100°C และ 1,200°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงในแต่ละอุณหภูมิ หลังจากนั้นนำแก้วที่เหลือจากการเผาไหม้มาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ XRD ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance แหล่งกำเนิดรังสีคือ ทองแดง (Cu Tube) กำลังไฟ 40 kV, 40 mA และ $CuK\alpha = 1,544$ เพื่อหาชนิดของแร่ในถ่านหิน ได้ผลวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 2, รูปที่ 3 และรูปที่ 4



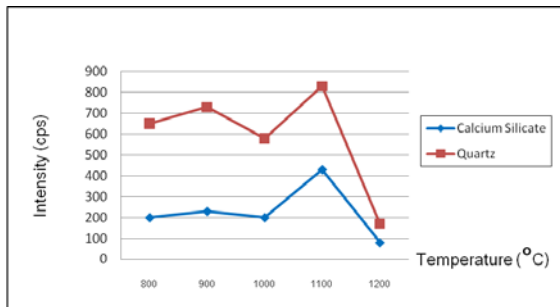
รูปที่ 2 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ซึ่งแสดงการเกิดของแร่ในถ่านหิน Q2 ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 2 พบว่าที่อุณหภูมิ 800°C ตัวอย่าง Q2 เกิดเป็นแร่มุลไลต์ ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) แร่ควอตซ์ (SiO_2) แร่อะนอไทต์ ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) และแร่แคลเซียมอลูมิเนียมออกไซด์ ($3CaO \cdot 5Al_2O_3$) ปริมาณของแร่ควอตซ์กับแร่มุลไลต์ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแต่แร่ควอตซ์กลับมีปริมาณเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 1,100°C ในขณะที่แร่มุลไลต์หายไป ส่วนแร่แคลเซียมอลูมิเนียมออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 1,100°C แล้วกลับลดลงเมื่ออุณหภูมิ 1,200°C อาจเกิดจากการที่ Al_2O_3 ของแร่มุลไลต์ทำปฏิกิริยากับ CaO ที่อุณหภูมิ 1,200°C นี้ จากนั้นปริมาณลดลง และอาจเกิดจากการที่ SiO_2 ของแร่มุลไลต์ทำปฏิกิริยากับแร่แคลเซียมอลูมิเนียมออกไซด์ทำให้แร่ควอตซ์กับแร่อะนอไทต์มีปริมาณสูงขึ้น ส่วนแร่มุลไลต์ที่เหลือเริ่มเปลี่ยนสภาพเป็นผลึกอสัณฐานที่อุณหภูมิ 1,200°C และเมื่อนำมาเทียบกับผลวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมแล้วแสดงว่าเมื่อค่า %CaO ต่ำจะทำให้อุณหภูมิของการเริ่มหลอมตัวสูง เนื่องจากเกิดแร่มุลไลต์ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูง



รูปที่ 3 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ซึ่งแสดงการเกิดของแร่ในถ่านหิน Q4 ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

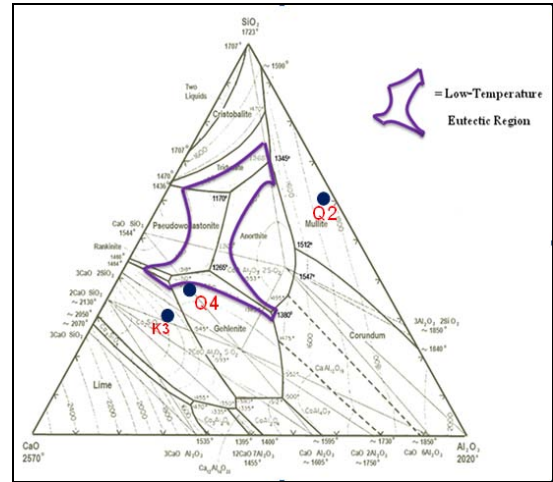
ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่าง Q4 (ดังรูปที่ 3) เกิดแร่แคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) และแร่ควอตซ์ที่อุณหภูมิระหว่าง 800°C - $1,000^\circ\text{C}$ จากนั้นพบว่าการเปลี่ยนแปลงชัดเจนที่อุณหภูมิ $1,100^\circ\text{C}$ โดยมีปริมาณของแร่แคลเซียมซิลิเกตและแร่ควอตซ์เพิ่มสูงขึ้น รวมไปถึงการเกิดแร่เกห์เลไนต์ ($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$) ขึ้น และปริมาณแร่ลดลงเมื่ออุณหภูมิ $1,200^\circ\text{C}$ เนื่องจากแร่แคลเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับแร่ควอตซ์เกิดเป็นแร่เกห์เลไนต์ซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าอุณหภูมิของการหลอมตัวต่ำลง



รูปที่ 4 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ซึ่งแสดงการเกิดของแร่ในถ้ำถ่านหิน K3 ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ส่วนผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่าง K3 (ดังรูปที่ 4) พบว่าเกิดเฉพาะแร่แคลเซียมซิลิเกตและแร่ควอตซ์ลักษณะจะคล้ายกับตัวอย่าง Q4 เพียงแต่ไม่เกิดแร่เกห์เลไนต์ที่อุณหภูมิ $1,100^\circ\text{C}$ จึงทำให้ค่า IT สูงกว่าถ้ำถ่านหิน Q4 และเมื่ออุณหภูมิถึง $1,200^\circ\text{C}$ ปริมาณของแร่ทั้งสองลดลง อาจเป็นเพราะเริ่มมีการเปลี่ยนเฟสเป็นผลึกอสัณฐาน

จากกราฟ XRD ของทั้ง 3 ตัวอย่างนี้ (รูปที่ 2, รูปที่ 3 และรูปที่ 4) สามารถอธิบายการเกิดของแร่โดยใช้ Ternary Phase Diagram (ดังรูปที่ 5) โดยนำค่าปริมาณร้อยละของ SiO_2 , Al_2O_3 และ CaO ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย ICPS (จากตารางที่ 2 ในหัวข้อที่ 2) มาเทียบให้เป็น 100% ก่อน แล้วจึงจะนำมากำหนดตำแหน่งของแต่ละตัวอย่างลงใน Phase Diagram โดยองค์ประกอบของตัวอย่าง Q2 เมื่อนำมาพล็อตลงใน Phase Diagram จะพบว่าแร่หลักของตัวอย่างนี้จะเกิดอยู่ในบริเวณของแร่มุลไลต์ ส่วนองค์ประกอบของตัวอย่าง Q4 จะพบว่าแร่หลักของตัวอย่างนี้จะเกิดอยู่ในบริเวณของแร่เกห์เลไนต์ และองค์ประกอบของ

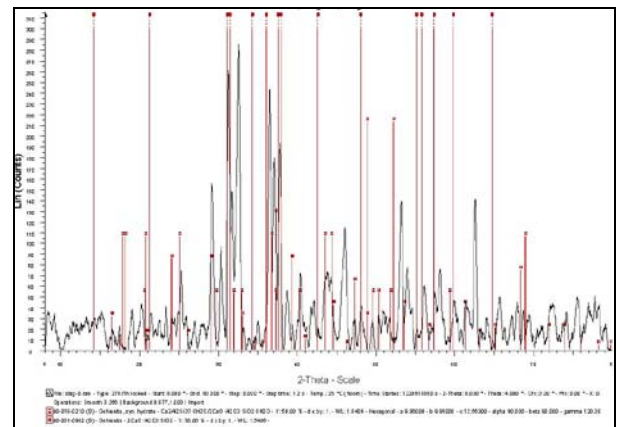
ตัวอย่าง K3 เมื่อนำมาพล็อตกราฟจะพบว่าแร่หลักของตัวอย่างนี้จะเกิดอยู่ในบริเวณของแร่แคลเซียมซิลิเกต ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จาก XRD



รูปที่ 5 แสดง Ternary Phase Diagram ของตัวอย่าง Q2, Q4 และ K3

จากรูปที่ 5 พบว่า องค์ประกอบของแร่ที่เกิดขึ้นในบริเวณของแร่เกห์เลไนต์นั้น มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสใกล้เคียงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสต่ำ (Low-Temperature Eutectic Region) ด้วย จึงสรุปว่า องค์ประกอบของแร่ตัวอย่างที่มีปริมาณของ CaO ประมาณ 27% อุณหภูมิการหลอมต่ำอาจเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดตะกรันในหม้อไอน้ำได้

ส่วนการวิเคราะห์ตัวอย่างตะกรันด้วยวิธี XRD พบว่าชนิดของแร่ในตัวอย่างคือ แร่เกห์เลไนต์ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 XRD Pattern ของตัวอย่างตะกรัน (แร่เกห์เลไนต์)

อภิปรายและสรุป (Discussion and Conclusion)

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างแก้ผ่านหินจำนวน 3 ตัวอย่าง คือ Q2, Q4 และ K3 โดยหาค่าองค์ประกอบของแร่ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 750°C โดยใช้เครื่อง ICPS ผลวิเคราะห์พบว่าตัวอย่างแก้ Q2 มีปริมาณร้อยละของ CaO เท่ากับ 2.24% (CaO ต่ำ) ตัวอย่างแก้ Q4 มีปริมาณร้อยละของ CaO เท่ากับ 27.42% (CaO ปานกลาง) และตัวอย่างแก้ K3 มีปริมาณร้อยละของ CaO เท่ากับ 31.81% (CaO สูง)

ส่วนผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่าอุณหภูมิการหลอมเริ่มต้นพบว่า ตัวอย่างแก้ Q2 มีค่า IT สูง (มากกว่า 1,500°C) ตัวอย่างแก้ Q4 มีค่า IT ต่ำ (1,197°C) ส่วนตัวอย่างแก้ K3 มีค่า IT ปานกลาง (1,301°C) โดยที่ตัวอย่างแก้ 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 เพื่อหาชนิดของแร่พบว่าชนิดแร่ของตัวอย่างแก้ Q2 คือ แร่มูลไลต์ แร่อะโนไทต์ แร่ควอตซ์ และแร่แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ ตัวอย่างแก้ Q4 มีชนิดแร่คือ แร่ควอตซ์ แร่เกท์ไลน์ต์ และแร่แคลเซียมซิลิเกต ส่วนตัวอย่างแก้ K3 มีชนิดแร่คือ แร่ควอตซ์ และแร่แคลเซียมซิลิเกต ส่วนตัวอย่างแก้ตะกรันที่ได้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่าตะกรันตัวอย่างมีแร่เกท์ไลน์ต์เป็นองค์ประกอบ

เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วิเคราะห์กับความเข้มของ XRD พบว่า ตัวอย่างแก้ Q2 พบว่าแร่มูลไลต์ แร่ควอตซ์ และแร่อะโนไทต์มีปริมาณความเข้มชั้นลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนแร่แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 1,100°C จากนั้นปริมาณลดลง แต่แร่ควอตซ์กับแร่อะโนไทต์มีปริมาณสูงขึ้น ส่วนแร่มูลไลต์เริ่มเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิ 1,200°C ส่วนตัวอย่างแก้ K3 พบว่า เมื่อถึงอุณหภูมิ 1,100°C แร่ควอตซ์ และ แร่แคลเซียมซิลิเกตจะเริ่มเปลี่ยนเฟสจนถึงอุณหภูมิ 1,200°C และตัวอย่างแก้ Q4 จะพบแร่เกท์ไลน์ต์ที่อุณหภูมิ 1,100°C ส่วนแร่ควอตซ์ ปริมาณลดลงอย่าง

มากที่อุณหภูมิ 1,100°C คาดว่าอาจเกิดจากแร่ควอตซ์ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกต

ผลการวิจัยได้ข้อสรุปว่า ค่าปริมาณร้อยละของ CaO ที่ 27 เปอร์เซ็นต์ (จากตัวอย่างแก้ Q4) มีชนิดของแร่เช่นเดียวกับตะกรันเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง (1,100°C) คือ แร่เกท์ไลน์ต์ และยังสามารถทำนายการเกิดตะกรันได้โดย Ternary Phase Diagram โดยพล็อตจากองค์ประกอบทางเคมีของแร่ที่มีอยู่ในตัวอย่าง โดยพบว่า ตัวอย่างแก้ Q4 มีองค์ประกอบทางแร่อยู่ใกล้เคียงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิของการหลอมต่ำ และเมื่อนำมาผสมกับตัวอย่างแก้ Q2 ก็พบว่า มีแนวโน้มที่จะเกิดองค์ประกอบของแร่ที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำเช่นเดียวกัน

จากการวิจัยนี้ ทำให้เราสามารถหาแนวทางเบื้องต้นในการลดตะกรันที่เกิดขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ เช่นการใส่หินปูน (CaCO₃) เพิ่มลงในถ่านก่อนเข้าหม้อไอน้ำเพื่อทำให้องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินเปลี่ยนไปเป็นแร่อื่นที่ไม่ใช่แร่เกท์ไลน์ต์ หรืออาจศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับแร่ฟลักซ์ (Fluxing Minerals) ในถ่านหินที่อาจเป็นสาเหตุให้ถ่านหินมีจุดหลอมตัวต่ำลงได้

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

งานวิจัยชิ้นนี้ ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและเอื้อเพื่อข้อมูลและตัวอย่างที่ใช้ในการทำวิจัยโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (แม่เมาะ)

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Qiu J.R., F. Li, Y. Zheng, C.G. Zheng, and H.C.Zhou. The influences of mineral behaviour on blended coal ash fusion characteristics. National Coal Combustion Laboratory, Huazhong University of Science and Technology Wuhan, Hubei, 1998.

- [2] ภิญโญ มีชำนะ, การศึกษาแนวทางการลดสแลกจากหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ, หน้า 3-15. มิถุนายน 2551, ฝ่ายบริหารงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2551.
- [3] ผลการศึกษาของ Joint Graduate School of Energy and Environment (JGSEE), 2006.
- [4] ผลการศึกษา ณ Central Laboratory ของ Taiho Industries Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น, 2006.