

การศึกษากลไกการเกิดตะกั่วในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

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

เอกฉัตร พัทธราช

นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินลิกไนต์ร่วมกับการศึกษาวิทยาแร่เมื่อมีการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ที่อุณหภูมิสูง จากการศึกษาพบว่า ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ K1 และ K2 มีส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน 12.72 %CaO และ 15.24 %CaO ตามลำดับ แม้ว่าส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าอยู่นอกช่วง 23 - 35 %CaO ซึ่งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แม่เมาะคาดว่าไม่น่าจะเกิดตะกั่ว แต่กลับเกิดตะกั่วได้ ดังนั้นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยปริมาณ CaO แต่เพียงอย่างเดียวไม่สามารถอธิบายกลไกการเกิดตะกั่วได้ จึงใช้ Ternary Phase Diagram เพื่อช่วยศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินร่วมกับการศึกษาด้านวิทยาแร่ และพบว่า หากองค์ประกอบทางเคมี $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ของเถ้าใน Diagram อยู่ใกล้เคียงกับบริเวณอุณหภูมิการหลอมต่ำ ถ่านหินลิกไนต์จะให้เถ้าที่เกิดตะกั่ว ซึ่งเมื่อนำไปเผาไหม้ในเตาเผาที่อุณหภูมิสูงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจะอยู่บริเวณของแร่อะนอร์ไทต์ และอยู่ใกล้เคียงกับบริเวณอุณหภูมิการหลอมต่ำจึงทำให้เกิดตะกั่ว การวิจัยนี้ ได้เสนอแนะให้มีการผสมดินหรือวัสดุต่างๆ ที่ได้จากการทำเหมืองถ่านหินเข้ากับถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ เพื่อควบคุมให้องค์ประกอบทางเคมีของ $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ของเถ้าถ่านหินห่างจากบริเวณอุณหภูมิการหลอมต่ำใน Ternary Phase Diagram

คำสำคัญ: กลไกการเกิดตะกั่ว, แร่อะนอร์ไทต์

ABSTRACT

This research is to study of slag formation mechanism of coal-fired boiler at Mae Moh EGAT power plant of Thailand. Both chemical and mineralogical studies of ashes derived from the lignite combustion at high temperature have been done. The study reveals that lignite ash of sample K1, containing 12.72 %CaO and of sample K2, containing 15.24 %CaO being outside the range of 23 - 25 %CaO, the range not expected by EGAT to cause any slag in

the boiler, still creates slagging problem. Only chemical composition of CaO in lignite ashes cannot explain the slag formation mechanism in the boiler. Therefore, ternary phase diagram with chemical and mineral analysis of lignite ashes is applied to explain the mechanism. If chemical compositions of $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ of lignite ashes are within or near the low-temperature eutectic region in the diagram, slagging of the ashes may occur. After combustion at high temperature, the ashes turn to be anorthite mineral, located near the low-temperature eutectic region of the diagram hence creates slagging. It is recommended that blending mine waste of Mae Moh mine with lignite at suitable ratio before combustion may avoid slagging by controlling of $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ in ashes of the blended lignite to be away from this low-temperature eutectic region.

KEYWORDS: Slag Formation, Anorthite

1. บทนำ

ตะกรัน (Slag) ที่เกิดขึ้นที่ผนังเตาในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้า ทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างห้องเผาไหม้ไปยัง Water Tube ของหม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพลดลง สร้างปัญหาให้กับการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นอย่างมากจนทำให้ต้องปิดโรงไฟฟ้าบางยูนิต ปัญหาดังกล่าวมีสาเหตุจากคุณภาพของถ่านที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านลิกไนต์ที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงขึ้นโดยจุดวิกฤตที่ทำให้ตะกรันจะเป็นถ่านหินที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในถ่านระหว่าง 23 - 35% ซึ่งหากมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากขึ้น ปัญหาการเกิดตะกรันจะลดลง โรงไฟฟ้าแม่เมาะได้พยายามใช้วิธีการผสมถ่านลิกไนต์ในการทำเหมืองบริเวณต่างๆ เพื่อควบคุมให้คุณภาพของถ่านมีส่วนประกอบของแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่า 23% แต่ทำให้เสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากและพบว่าเมื่อขุดลึกลงไป คุณภาพถ่านหินจะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงมากกว่า 23% ซึ่งทำให้การผสมถ่านหินยิ่งเป็นไปได้ยาก พิศา ศรีบุญยดี [7] ได้ศึกษาถึงชนิดแร่ของตัวอย่างถ่านลิกไนต์ 3 ตัวอย่าง พบว่า การควบคุมไม่ให้ปริมาณ SiO_2 , CaO และ Al_2O_3 ในถ่านลิกไนต์อยู่ในบริเวณของการหลอมตัวต่ำจะป้องกันการเกิดตะกรันได้

งานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาลักษณะทางวิทยาแร่ของถ่านหินและถ่านลิกไนต์ที่อุณหภูมิต่างๆ รวมทั้งการศึกษาลักษณะและกลไกของการเกิดตะกรัน ซึ่งจะช่วยในการคาดการณ์ล่วงหน้าถึงคุณภาพของถ่านลิกไนต์ที่มีโอกาสเกิดตะกรัน หลังการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน อีกทั้งศึกษาชนิดแร่ของถ่านลิกไนต์ที่เกิดขึ้นในเตาเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบเคมีของแร่ที่อุณหภูมิต่างๆ ของตัวอย่างถ่านลิกไนต์และตัวอย่างถ่านลิกไนต์

ผลการวิจัยจะเป็นประโยชน์ในการหาแนวทางการป้องกันและแก้ไขปัญหาตะก้น เพื่อป้องกันการสูญเสียกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านหินและตะก้น

2.1.1 ถ่านหิน

เป็นเชื้อเพลิงแข็งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ จากการทับถมของอินทรีย์วัตถุที่สะสมตัวภายใต้พื้นผิวโลก จากความร้อน ความกดดัน และการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาของโลก ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ฟิสิกส์ ชีววิทยา รวมทั้งธรณีวิทยา จนแปรสภาพเป็นถ่านหินอัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ องค์ประกอบหลักของถ่านหิน คือ ธาตุคาร์บอน ซึ่งเป็นส่วนที่ให้พลังงาน ส่วนแร่ธาตุที่พบมากที่สุดในถ่านหินคือ ซิลิกอน และแร่ธาตุอื่นๆ

แหล่งถ่านหินในประเทศไทย [3,5,18] มีกระจายอยู่ทั่วทุกภาค ประมาณ 2,197 ล้านตัน โดยแหล่งสำคัญพบในภาคเหนือร้อยละ 82 ของปริมาณสำรองทั่วประเทศ ส่วนร้อยละ 18 พบในภาคใต้ ถ่านหินส่วนใหญ่มีคุณภาพต่ำอยู่ในชั้นลิกไนต์และซับบิทูมินัส มีค่าความร้อนระหว่าง 2,800 - 5,200 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งลิกไนต์เป็นถ่านหินที่พบมากที่สุดในประเทศไทยที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และเนื่องจากถ่านหินมีราคาถูกกว่าน้ำมัน จึงถูกนำมาเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ใช้หม้อน้ำร้อนในกระบวนการผลิต [2,6] เช่น การผลิตไฟฟ้า การถลุงโลหะ การผลิตปูนซีเมนต์ ฯลฯ

การจำแนกถ่านหิน [16,20] ขึ้นอยู่กับอายุและอัตราการเปลี่ยนแปลงของถ่านหิน ในปัจจุบัน ระบบมาตรฐานอเมริกา (American Societies for Testing and Materials, ASTM) เป็นระบบในการจำแนกถ่านหินตามค่าคาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนของถ่านหิน โดยค่าคาร์บอนคงตัว (% ของคาร์บอน) จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการสะสมตัวของถ่านหินที่มากขึ้น จำแนกได้ 4 ลำดับ คือ ลิกไนต์ (Lignite), ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous), บิทูมินัส (Bituminous) และแอน - ทราไซต์ (Anthracite)

2.1.2 การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหิน

2.1.2.1 การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหินแบบประมาณ (Proximate Analysis) [8,13] เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบในถ่านหินโดยจำแนกเป็นความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว โดยที่ความชื้นและเถ้า เป็นส่วนของสารประกอบอินทรีย์ที่เจือปนมากับเนื้อถ่านหิน ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยสารระเหยและคาร์บอนคงตัว สองส่วนนี้รวมกันเรียกว่า ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustibles)

(1) องค์กรประกอบความชื้น (Moisture content) เป็นน้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการนำถ่านหินบดละเอียด (ผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตร) ไปอบภายใต้ภาวะที่กำหนดที่อุณหภูมิ 105 - 110 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง น้ำจะระเหยออกมา ส่วนประกอบทั้งอินทรีย์และอินทรีย์ยังคงอยู่ในถ่านหิน ความชื้นในถ่านหินมี 2 รูปแบบ คือความชื้นที่ติดแน่นอยู่ในเนื้อถ่านหิน (Inherent Moisture) และความชื้นอิสระ (Free or Occidental Moisture) ซึ่งเป็นความชื้นที่ถ่านหินดูดไว้ที่ผิวซึ่งจะสูญเสียไปเมื่อทิ้งไว้ในอากาศ

(2) เถ้า (Ash) เป็นน้ำหนักที่คงเหลืออยู่หลังจากนำถ่านหินบดละเอียดไปเผาภายใต้ภาวะออกซิไดซ์ที่กำหนดที่อุณหภูมิ 700 - 750 °C โดยเถ้า คือส่วนประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในถ่านหินที่ถูกออกซิไดซ์จนสมบูรณ์ เถ้าถ่านหินมากกว่า 95% ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO ที่เหลืออีก 5% เป็น MgO , Na_2O , K_2O และ TiO_2

(3) สารระเหย (Volatile Matter) เป็นน้ำหนักที่สูญเสียไป (เมื่อหักน้ำหนักความชื้นออกแล้ว) หลังจากการนำถ่านหินบดละเอียด ไปเผาภายใต้ภาวะที่กำหนดที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 นาที โดยไม่ให้สัมผัสกับอากาศ เพื่อแยกสลายสารที่ระเหยได้ในเนื้อถ่านหินออกมา

(4) คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) เป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหิน ซึ่งจะเป็นของแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ โดยสามารถประมาณได้จากร้อยละที่เหลือจากการวิเคราะห์แบบประมาณ เมื่อหักค่าความชื้นสารระเหย และเถ้าถ่านหินที่มีศักดิ์สูงจะคาร์บอนคงตัวสูงด้วย เนื่องจากปริมาณความชื้นและสารระเหยต่ำ

2.1.2.2 การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหินแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) [1,4] เป็นการวิเคราะห์ธาตุที่สำคัญต่างๆ ที่มีอยู่ในถ่านหิน คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถันและไนโตรเจน บางครั้งมีการวิเคราะห์ฟอสฟอรัสและคลอรีนด้วย ส่วนออกซิเจนเป็นผลต่างระหว่างผลรวมของธาตุองค์ประกอบทั้งหมดกับความชื้นและเถ้า

2.1.3 ตะกรัน (Slag) [10]

เถ้าที่เกิดการสะสมตัวจะมีอยู่สองแบบคือ เถ้าหลอม (Molten Ash) และเกลือแอลคาไล (Alkali Salt) เถ้าหลอมที่เกิดการสะสมตัว เรียกว่า “ตะกรัน” (Slag) ซึ่งเกิดขึ้นในบริเวณเตาเผาของหม้อไอน้ำ ส่วนเกลือแอลคาไลจะเกิดในบริเวณระบบหมุนเวียนหรือระบบหล่อเย็นของหม้อไอน้ำ เถ้าที่สะสมตัวในบริเวณต่างๆ ได้แก่

2.1.3.1 ตะกรันผนัง (Wall Slag) หมายถึง ตะกรันที่ถูกหลอมตัวและก่อตัวขึ้นบริเวณผนังเตา โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจากตะกรันชนิดนี้ คือ (1) ตะกรันที่เกิดขึ้นอาจไหลลงอยู่ด้านล่างของเตาเผา และก่อตัวเป็นแนวโค้งอุดทางที่เถ้าจมนจะตกสู่เบื้องล่าง ทำให้เกิดการสะสมของเถ้าจมนในเตา (2) ตะกรันที่เกาะผนังจะทำให้ตัวเป็นฉนวนกีดขวางการส่งผ่านความร้อนไปยังผนังเตาเพื่อผลิตไอน้ำ ทำให้เกิดอุณหภูมิของแก๊สที่ปากทางออกมากขึ้น เกิดตะกรันขึ้นบริเวณห้องเผา และ (3) ตะกรันจะ

ก่อตัวบริเวณหัวเผา (Burner) ที่เรียกว่า Eyebrows ซึ่งจะไปขัดขวางการไหลของมวลอากาศและถ่านหิน ซึ่งสร้างความเสียหายให้กับหัวเผาได้

2.1.3.2 ตะกรัน Superheater (Superheater Slag) ก่อตัวขึ้นบริเวณ Superheater และบริเวณที่มีการหมุนเวียนอื่นๆ ในหม้อไอน้ำ

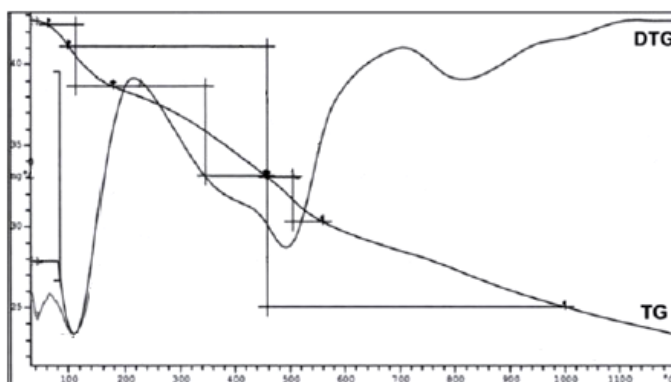
2.1.3.3 ตะกรันบริเวณหมุนเวียนไปยังบริเวณการเกิด Fouling (Convection Pass Fouling) เป็นสาเหตุทำให้เกิดแอลคาไลซัลเฟต เช่น CaSO_4 และ Na_2SO_4

2.1.2.4 ตะกรันที่สะสมตัวในบริเวณที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Deposit) เกิดขึ้นบริเวณที่เกิดลมร้อนและสะสมตัวเป็นชั้นๆ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

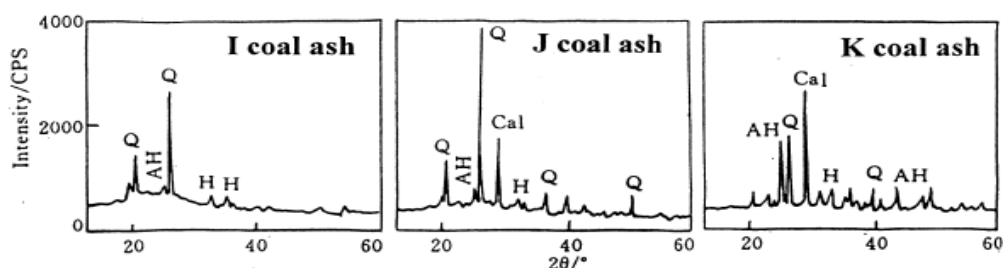
Oikonomopoulos, and others [14] ศึกษาถ่านหินลิกไนต์โดยใช้เทคนิค FT-IR เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบของแร่และอินทรีย์ที่ปรากฏในตัวอย่างถ่านหิน พบว่า ที่ 3400 cm^{-1} O-H stretching vibrations เป็นตำแหน่งของการดูดซับน้ำของสารอินทรีย์ (Organic Matter) ในถ่านหิน เช่นเดียวกับที่ 1610 cm^{-1} Aromatic ring (C=C in plane) stretching symmetric และที่ 1031 , 534 และ 468 cm^{-1} จะเป็นตำแหน่งของแร่แคลไซต์ และจากการวิเคราะห์ถ่านหินด้วยเทคนิค TGA/DTGA ดังรูปที่ 1 พบว่า ที่อุณหภูมิ $1,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที น้ำหนักของตัวอย่างจะหายไปในช่วงอุณหภูมิระหว่าง $200 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยจะเกิดกระบวนการสลายตัวของสารระเหย (Devolatilization) และในช่วงอุณหภูมิ $500 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก เนื่องจากเกิดกระบวนการ Dehydroxylation ของแร่แคลไซต์ เกิดการหายไปของ OH groups โดยรอบอะตอมของ Al^{VI} และเปลี่ยนไปเป็นแร่เมทาแคลิติน ส่วน Kim, and others [11] ได้วิเคราะห์หาอุณหภูมิในการหลอมตัวของถ่านหินที่อุณหภูมิ $538 - 1,600\text{ }^{\circ}\text{C}$ และได้ใส่แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณต่างๆ พบว่า อุณหภูมิของการหลอมมีค่าต่ำลง เมื่อเติม CaO ลงไป ขณะที่ Bai, and others [9] ได้ศึกษาถ่านหินที่ผ่านการออกซิไดซ์กับอากาศ และเพิ่มอุณหภูมิจาก $815\text{ }^{\circ}\text{C}$ ไปจนถึง $1,300\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $1,400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน องค์ประกอบหลักของถ่านหินและถ่านคือแร่ควอตซ์ ส่วนองค์ประกอบหลักของถ่านลอยคือแร่อะลูมิเนียมซิลิเกต ถ่านที่เกิดจากถ่านหินถูกผสมด้วยอัตราส่วนต่างๆ กัน เพื่อทำนายพฤติกรรมการเกิดถ่านจากถ่านหินที่ถูกผสมการเปลี่ยนรูปของแร่ และการเปลี่ยนเฟสภายใต้อุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอมหรือ IT (Initial Deforming Temperature) อุณหภูมิเมื่อเริ่มอ่อนตัวหรือ ST (Softening Temperature) และอุณหภูมิเมื่อเริ่มเป็นของไหลหรือ FT (Fluid Temperature) ซึ่งสอดคล้องกับ Phase Diagram ของ $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ โดยผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่า ที่อุณหภูมิ $1,400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถ่านส่วนใหญ่ได้เปลี่ยนรูปไปเป็นผลึกอสัณฐานเป็นแร่ซิลลิมาไนต์ แร่ฟายาไลต์ แร่

เฟอร์โรซิลไลต์ และแร่ไมโครไคลน์ เป็นแร่หลัก และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณของแร่ซิลลิมาไนต์ จะลดลง นอกจากนี้ Qiu, and others [17] ได้ศึกษาการเปลี่ยนรูปของแร่ที่เกิดขึ้นจากการหลอม ของถ้ำถ่านหินที่มีองค์ประกอบเคมีแตกต่างกัน วิเคราะห์หาอุณหภูมิจุดหลอมตัวพบว่า องค์ประกอบของแร่ที่อุณหภูมิ 800 °C ตัวอย่าง I และตัวอย่าง J จะมีแร่ควอตซ์ เป็นองค์ประกอบ หลัก ขณะที่ตัวอย่าง K จะพบแร่แคลไซต์ เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องมาจากการวิเคราะห์ องค์ประกอบทางเคมีของแร่ ดังรูปที่ 2 ตัวอย่าง K จะมีปริมาณของ CaO สูงที่สุด



ที่มา : Oikonomopoulos et al., 2010

รูปที่ 1 TG diagrams ของตัวอย่างถ้ำถ่านหิน ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA



Q - quartz; H - hematite; AH - anhydrite; Cal - calcite

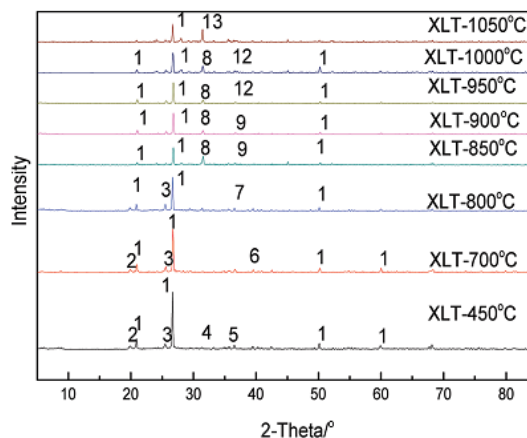
ที่มา : Qiu et al., 1998

รูปที่ 2 XRD Pattern จากการวิเคราะห์ตัวอย่างถ้ำถ่านหิน I, J และ K

Van D., and others [21] ได้ศึกษานิตของแร่ในถ้ำถ่านหินและถ้ำถ่านหิน เพื่ออธิบายการเกิด ตะกรัน (Slag Formation) และกระบวนการเปลี่ยนแปลงของแร่ที่เกิดขึ้นด้วย AFT และ Scanning Electron Microscopy Point Count (SEMPC) พบว่า แร่อะนอร์ไทต์เป็นผลึกองค์ประกอบหลักที่ ปรากฏอยู่ในอนุภาคของตะกรัน โดยแร่อะนอร์ไทต์จะเริ่มเกิดการก่อตัวขึ้นที่อุณหภูมิ 1,000 °C ขณะเดียวกัน Pang, and others [15] ได้ศึกษากระบวนการการเกิดตะกรันของถ้ำถ่านหินพบว่า ผล

ของเวลาและอุณหภูมิที่แตกต่างกันจะส่งผลให้เกิดแร่จำพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต เช่น แร่อะนอร์ไทต์ นอกจากนี้ยังเกิดการเปลี่ยนแปลงของแร่จากแร่แคลไซต์ไปเป็นแร่ควอตซ์ และจากแร่ควอตซ์ไปเป็นแร่คริสโตบาไลต์ ผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค EPMA ของเถ้านหินที่มีขนาดระหว่าง 63 - 90 ไมครอน พบว่าการเกิดแร่อะนอร์ไทต์ในตะกอน จะเกิดที่อุณหภูมิ 1,400 - 1,500 °C ที่ช่วงระยะเวลา 2 - 8 ชั่วโมง และยังพบแร่มุลไลต์และแร่เหล็กออกไซด์บริเวณผนังของส่วนที่เป็นผลึกอสัณฐาน

Li, and others [12] ได้ศึกษากระบวนการการเกิดตะกอนโดยการเผาเถ้านหินที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450, 700, 800, 850, 900, 950, 1,000 และ 1,050 °C ตามลำดับ ตัวอย่างเถ้านหินและตะกอนที่เกิดขึ้นนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี จากการศึกษาเถ้านหินหลังการเผาไหม้ที่ช่วงอุณหภูมิ 450 - 1,050 °C ภายใต้สภาวะ Reducing Atmosphere ซึ่งผลที่ได้ดังรูปที่ 3 พบว่า ที่อุณหภูมิ 450 °C เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แร่ควอตซ์และแร่แอนไฮไดรต์ปริมาณจะค่อยๆ ลดลง ไอออนของ Fe^{3+} จะค่อยๆ เปลี่ยนไปเป็น Fe^{2+} ซึ่งทำให้เกิดแร่แมกนีเซียมเฟรริสออกไซด์ ที่ 700 °C และเมื่อทำปฏิกิริยากับแร่ซิลิกาจะเกิดเป็นแร่เฟรริสแมกนีเซียมซิลิเกตที่ 800 °C



- 1, Quartz (SiO_2); 2, Illite ($KAl_2(OH)_2AlSi_3O_{10}$); 3, Anhydrite ($CaSO_4$); 4, Pyrite (FeS_2); 5, Goethite ($\alpha-FeO(OH)$);
6, Magnesium Ferrous Oxide ($(MgO)_{0.77}(FeO)_{0.23}$); 7, Ferrous Magnesium Silicate ($Fe_{0.24}Mg_{0.76}SiO_3$);
8, Oldhamite (CaS); 9, Fayalite (Fe_2SiO_4); 12, Hercynite ($FeAl_2O_4$); 13, Gehlenite ($2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$)

ที่มา: Li et al., 2011

รูปที่ 3 XRD Pattern ของเถ้านหินที่อุณหภูมิต่าง ๆ

พิธา ศรีบุญยดี [7] ศึกษาอิทธิพลของ CaO ในตัวอย่างเถ้านหินและตะกอนที่เกิดขึ้นของเตาเผาโรงไฟฟ้าแม่เมาะด้วยเครื่อง XRD ที่อุณหภูมิ 800 °C, 900 °C, 1,000 °C, 1,100 °C และ 1,200 °C เพื่อหาชนิดของแร่ พบว่าตัวอย่างเถ้า Q2 มีชนิดแร่ คือ แร่มุลไลต์ แร่อะนอร์ไทต์ แร่ควอตซ์ และแร่แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ ตัวอย่างเถ้า Q4 มีชนิดแร่ คือ แร่แคลไซต์ แร่ควอตซ์

และแร่แคลเซียมซิลิเกต ตัวอย่างเก่า K3 มีชนิดแร่คือแร่ควอตซ์ และแร่แคลเซียมซิลิเกต เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ในรูปของออกไซด์ที่อุณหภูมิ 750 °C โดยใช้เครื่อง ICPS พบว่าตัวอย่างเก่า Q2 มีปริมาณร้อยละของ CaO เท่ากับ 2.24% (ต่ำ) ตัวอย่างเก่า Q4 มีปริมาณร้อยละของ CaO เท่ากับ 27.42% (ปานกลาง) และตัวอย่างเก่า K3 มีปริมาณร้อยละของ CaO เท่ากับ 31.81% (สูง) และเมื่อนำค่าปริมาณร้อยละของ SiO_2 , Al_2O_3 และ CaO มาเทียบร้อยละน้ำหนักของตัวอย่างเท่ากับ 100% นำมากำหนดตำแหน่งของแต่ละตัวอย่างลงใน Ternary Phase Diagram พบว่า ชนิดแร่หลักของตัวอย่างเก่า Q2 จะเกิดอยู่ในบริเวณของแร่มุลไลต์ ตัวอย่างเก่า Q4 จะอยู่ในบริเวณของแร่เกลินต์ และตัวอย่างเก่า K3 จะอยู่ในบริเวณของแร่แคลเซียมซิลิเกต และเมื่อศึกษาตัวอย่างตะกั้น Q4 ด้วยเครื่อง XRD พบว่า ชนิดแร่ที่เป็นองค์ประกอบหลักของตะกั้น คือ แร่เกลินต์ และแร่อะเคอร์มาไนต์เป็นบางส่วน จึงสรุปว่าแร่เกลินต์ น่าจะเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดถ่านหินเกิดการหลอมตัวในอุณหภูมิที่ต่ำจนเกิดตะกั้นขึ้นมา

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาการเกิดตะกั้นเบื้องต้นโดยการเผาไหม้ถ่านลิกไนต์บางอุณหภูมิยังไม่สามารถสรุปสาเหตุที่แท้จริงได้ การวิจัยนี้จึงตรวจสอบยืนยันกระบวนการเกิดตะกั้นในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยศึกษาตัวอย่างถ่านหินที่มีปริมาณ CaO ในถ่านแตกต่างกัน และศึกษาองค์ประกอบของแร่ในถ่านหินตั้งแต่ก่อนการบด และหลังจากการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่างถ่านหินที่นำมาศึกษาได้จากเหมืองถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จำนวน 3 แหล่ง คือ ตัวอย่างถ่านหิน K1 (12.72 %CaO), K2 (15.24 %CaO) และ K3 (22.88 %CaO) โดยตัวอย่างที่ได้มาจากชั้นของถ่านหินบริเวณที่นำมาผสมกันแล้ว ซึ่งตัวอย่าง K1 และ K2 เป็นตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ที่เมื่อเผาไหม้แล้วได้เกิดตะกั้นบริเวณผนังเตา ส่วนตัวอย่าง K3 เมื่อเผาไหม้แล้วไม่เกิดตะกั้นบริเวณผนังเตา

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

เครื่องมือหลักเพื่อใช้วิเคราะห์ถ่านหิน ได้แก่ เครื่องวิเคราะห์ Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICPS) เครื่องวิเคราะห์หาอุณหภูมิการหลอมของถ่าน (Ash Fusion Determinator) เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermo - Gravimetric Analysis) (TGA) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer) (XRD) เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer)

(FT-IR) และเครื่องมือวิเคราะห์ความละเอียดสูง (Electron Probe Micro Analyzer; EPMA) ส่วนเครื่องมือที่ใช้เตรียมถ่านหิน ได้แก่ เครื่องย่อยแบบจอร์ (Jaw Crusher) เครื่องบดแบบวงแหวน (Ring Mill) ชุดตะแกรงร่อนมาตรฐาน (Sieve) ASTM Standard sieves เบอร์ 60, 100 และ 200 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Mechanical Sieve Shaker) ตู้อบตัวอย่างแบบถาด (Tray Dryer) เครื่องซังสาร และเตาเผาควบคุมอุณหภูมิ

3.3 ขั้นตอนการทําวิจัย

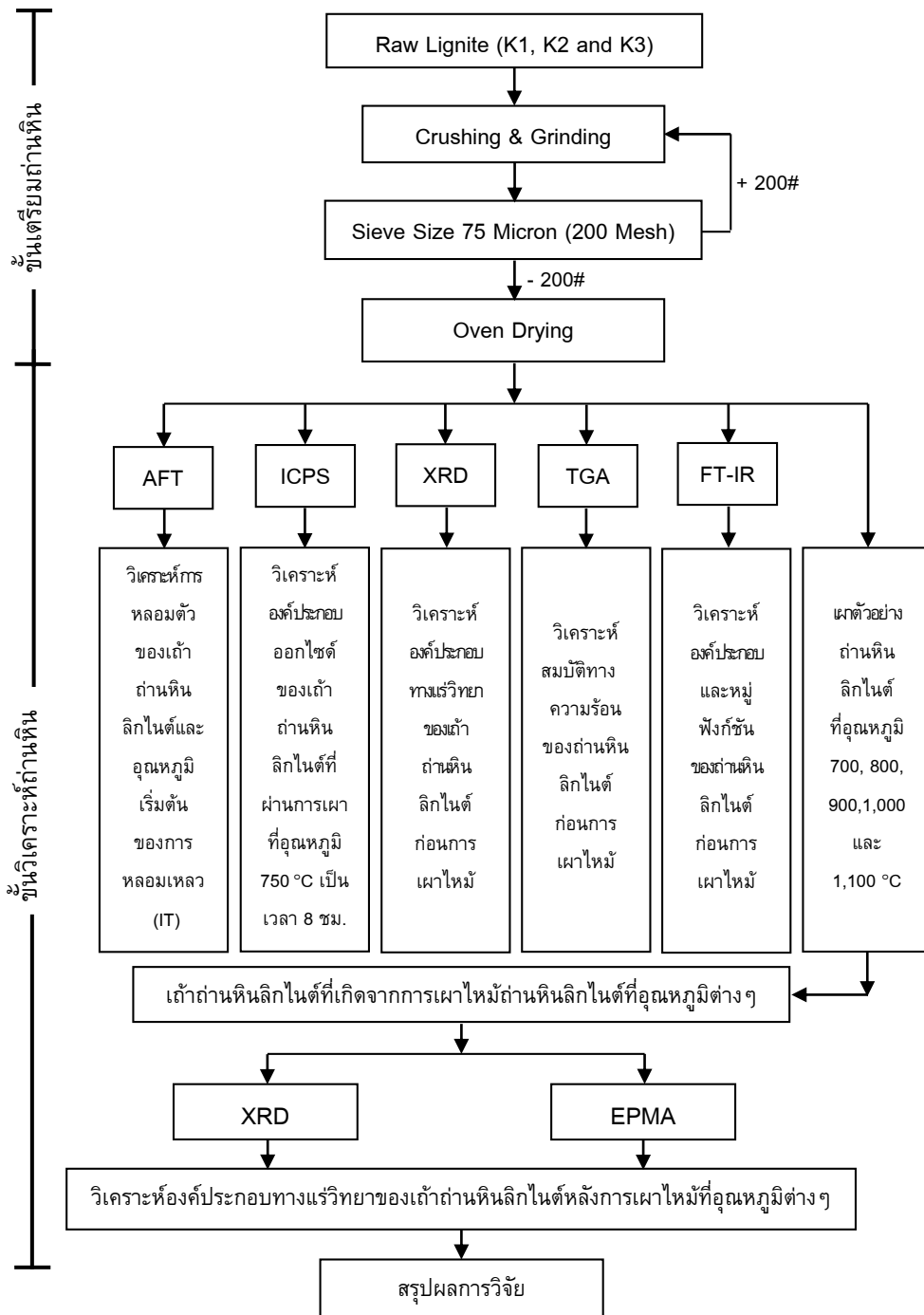
สามารถอธิบายได้ตามแผนผังในรูปที่ 4 และมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้

ได้แก่ การบดถ่านหิน เพื่อให้ถ่านหินลิกไนต์มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน โดยใช้เครื่องย่อยแบบจอร์ (Jaw Crusher) บด (Grinding) ด้วยเครื่องบดแบบวงแหวน (Ring Mill) และคัดขนาดของถ่านหินให้มีขนาดตามต้องการ โดยใช้ชุดตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช และอบถ่านหิน โดยนำถ่านหินลิกไนต์ที่ผ่านการคัดขนาดแล้วมาอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบแบบถาด (Tray Dryer) ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

3.3.2 การวิเคราะห์การหลอมเหลวและการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้

3.3.2.1 การวิเคราะห์หาอุณหภูมิการหลอมของถ่านหินลิกไนต์ (Ash Fusion Temperature) โดยการวิเคราะห์อุณหภูมิที่ถ่านหินเริ่มหลอมตัว ซึ่งถ่านหินจะมีรูปร่างคล้ายกับรูปทรงพีรามิด และใส่เข้าไปในเตาเผาที่ออกแบบโดยเฉพาะภายใต้บรรยากาศที่มีหรือไม่มีออกซิเจน พร้อมทั้งสังเกตและบันทึกการเปลี่ยนแปลงผ่านกระจกเตาเผาโดยจะเริ่มเผาที่อุณหภูมิ 900 °C จนถึงอุณหภูมิ 1,600 °C อุณหภูมิที่บันทึกมี 4 ค่า คือ (1) Initial Deformation Temperature (IT) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างเริ่มหลอมตัวโดยเริ่มจากปลายยอด (2) Softening Temperature (ST) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างหลอมจนความสูงของแท่งตัวอย่างลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความสูงของตัวอย่างเริ่มต้น (3) Hemispherical Temperature (HT) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างหลอมละลายจนความกว้างของฐานมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของความสูง และ (4) Flow Temperature (FT) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างหลอมละลายจนไหล ซึ่ง ณ จุดนี้ ความสูงของตัวอย่างจะมีค่าเท่ากับ 1 ใน 3 ของความกว้างของฐาน ซึ่งลักษณะของรูปพีรามิดในแต่ละค่านั้น



รูปที่ 4 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิจัย

3.3.2.2 การหาร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้า (Ash Chemical Analysis) เป็นการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของแร่อนินทรีย์ในเถ้า โดยนำตัวอย่างถ่านหินไปเผาที่อุณหภูมิ 750 °C ขึ้นไป เพื่อให้ได้เถ้าแล้วนำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ ICPS ในรูปของ Oxides ซึ่งจะอยู่ในรูป SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , K_2O , Mn_3O_4 , SO_3 และ Na_2O

3.3.3 การศึกษาด้านวิทยาแร่ของถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้

ก่อนนำตัวอย่างถ่านหินไปเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะทำการหาองค์ประกอบทางวิทยาแร่ของถ่านหินลิกไนต์ทั้ง 3 ตัวอย่าง (K1, K2 และ K3) โดยนำตัวอย่างถ่านหินทั้ง 3 มาอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออก จากนั้นนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (Vacuum Decicator) ก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้ (1) วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางวิทยาแร่ของตัวอย่างถ่านหินด้วยเครื่อง XRD เพื่อทราบองค์ประกอบและชนิดของแร่ในตัวอย่างถ่านหิน ก่อนการเผาไหม้ (2) วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของตัวอย่างถ่านหิน ด้วยเทคนิค TGA เพื่อทราบช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างถ่านหินก่อนการเผาไหม้ และ (3) วิเคราะห์องค์ประกอบและหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างถ่านหินด้วยเครื่อง FT-IR เพื่อบ่งบอกลักษณะสเปกตรัมเฉพาะของถ่านหินที่แสดงลักษณะเฉพาะขององค์ประกอบในตัวอย่างถ่านหินก่อนการเผาไหม้

3.3.4 การศึกษาคุณลักษณะ องค์ประกอบทางวิทยาแร่และองค์ประกอบทางเคมีพื้นผิวของถ่านหินลิกไนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

หลังจากนำตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3 ที่ผ่านการอบจนแห้ง ไปเผาที่อุณหภูมิ 700, 800, 900, 1,000 และ 1,100 °C และจึงนำถ่านหินไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางวิทยาแร่และองค์ประกอบทางเคมีพื้นผิว โดยดำเนินการดังนี้ (1) การวิเคราะห์ด้วย XRD โดยนำตัวอย่างที่ผ่านการบดแล้ว มาชักตัวอย่างด้วยวิธี Cone and Quartering แล้วนำมาเผาในเตาเผาเพื่อดูองค์ประกอบทางเคมีของแร่ที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยเริ่มเผาจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นแล้วนำไปไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อไม่ให้ทำปฏิกิริยากับอากาศจนเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์มากเกินไป ทำเช่นนี้เรื่อยไปโดยเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 100 °C จนถึงอุณหภูมิ 1,100 °C และจึงนำตัวอย่างที่แต่ละอุณหภูมิมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบแร่ด้วยเครื่อง XRD (2) การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางวิทยาแร่ของถ่านหินลิกไนต์ หลังจากขั้นตอนที่ (1) จึงทำการเปรียบเทียบ XRD Pattern ของการเผาไหม้แต่ละอุณหภูมิ เพื่อทราบองค์ประกอบและชนิดของแร่ที่เปลี่ยนแปลงไปแต่ละอุณหภูมิ (3) การวิเคราะห์หาองค์ประกอบและแผนภาพองค์ประกอบการกระจายตัวของแร่ โดยใช้เทคนิค EPMA เพื่อทราบรูปแบบกระบวนการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีพื้นผิวในตัวอย่างถ่านหิน และการกระจายตัวของแร่

ต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยหาปริมาณออกไซด์ขององค์ประกอบต่างๆ ในถ้ำถ่านหินที่ผ่านการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่างๆ

3.3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และวิทยาแร่ของตะกอนถ่านหินที่เกิดขึ้นในเตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

เป็นการนำตัวอย่างถ้ำถ่าน (Bottom Ash) และตะกอนผนัง (Wall Slag) ที่เกิดขึ้นจริงจากเตาเผาหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ K1 ได้แก่ K1 (a) (Bottom Ash) และ K1 (b) (Wall Slag) มาศึกษาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางวิทยาแร่โดยใช้เครื่อง XRD เพื่อทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีและชนิดของแร่ในตัวอย่างถ้ำถ่านและตะกอนผนัง และเปรียบเทียบองค์ประกอบทางวิทยาแร่ที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างตัวอย่างถ้ำถ่านหิน ถ้ำถ่านและตะกอนผนังที่เกิดขึ้น

4. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมของถ้ำถ่านหินลิกไนต์ (Ash Fusion Temperature Analysis) และองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้

4.1.1 การวิจารณ์ผลการทดสอบการหาอุณหภูมิการหลอมของถ้ำถ่านหินลิกไนต์

พบว่าตัวอย่าง K1 จะมีค่า IT ของถ้ำต่ำที่สุด ($1,155^{\circ}\text{C}$) รองลงมาคือ ตัวอย่าง K2 ($1,210^{\circ}\text{C}$) ซึ่งเป็นค่า IT ของถ้ำที่ต่ำกว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาของหม้อไอน้ำในโรงไฟฟ้า ($1,250 - 1,300^{\circ}\text{C}$) ดังนั้น จึงมีโอกาสดังกล่าวจะหลอมตัวติดที่ผนังเตาได้ง่าย ขณะที่ตัวอย่าง K3 จะมีอุณหภูมิ IT ($1,372^{\circ}\text{C}$) ของถ้ำสูงกว่าอุณหภูมิสูงสุดภายในเตาเผาของหม้อไอน้ำจะมีโอกาสหลอมตัวติดที่ผนังเตาได้ยากกว่า เพราะฉะนั้น การนำตัวอย่าง K1 และ K2 ไปเผา จึงอาจเกิดตะกอน ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ซึ่งได้รับแจ้งว่าตัวอย่างถ้ำถ่านหินลิกไนต์ K1 และ K2 ได้ทำให้เกิดตะกอนขึ้นที่เตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ส่วนตัวอย่าง K3 ไม่เกิดตะกอนแต่อย่างใด

4.1.2 การวิจารณ์ผลการหาร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำถ่านหินลิกไนต์

พบว่า ตัวอย่างถ้ำ K1 ($12.72\% \text{CaO}$), K2 ($15.24\% \text{CaO}$) และ K3 ($22.88\% \text{CaO}$) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์จะอยู่นอกบริเวณช่วง $23 - 35\% \text{CaO}$ ที่เป็นช่วงทำให้เกิดตะกอนในหม้อไอน้ำ และสังเกตได้ว่าตัวอย่าง K1 ($12.72\% \text{CaO}$) และ K2 ($15.24\% \text{CaO}$) แม้จะไม่ได้อยู่ในช่วง $23 - 35\% \text{CaO}$ ซึ่งเป็นช่วงที่ควรเกิดตะกอน (ตามข้อสังเกตของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่ง

ประเทศไทย (กฟผ.) ก็จะสามารถเกิดตะกั่วได้ ซึ่งการวิจัยครั้งนี้จึงพยายามหาสาเหตุและข้อสรุปมาอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าว

4.2 ผลการศึกษาด้านวิทยาแร่ของถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้

4.2.1 การวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของถ่านหินโดยใช้เครื่อง XRD

จากการวิเคราะห์ XRD pattern ของถ่านหิน พบว่า แร่ที่เป็นองค์ประกอบหลักของถ่านหินประกอบไปด้วยแร่แคลไซต์ แร่ไพไรต์ แร่ควอตซ์ และแร่โอลิไนด์

4.2.2 การวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์

จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบและหมู่ฟังก์ชันของแร่ที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างถ่านหิน ด้วยเทคนิค TGA ร่วมกับเทคนิค FT-IR เพื่อสนับสนุนผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือ XRD ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3 พบว่า ตัวอย่างถ่านหินมีช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างที่ใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 1 สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างจะเกิดอยู่ 2 ช่วง โดยช่วงแรกที่อุณหภูมิประมาณ 350 °C เนื่องจากการหายไปของสารระเหย (Volatile Matter) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และช่วงที่สองที่อุณหภูมิ 700 - 820 °C โดยที่อุณหภูมินี้จะเกิดกระบวนการการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุของตัวอย่างถ่านหิน อุณหภูมิช่วงแรกที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง จะเกิดจากกระบวนการการสลายตัวของสารระเหยของตัวอย่างถ่านหิน ซึ่งตัวอย่าง K3 จะมีช่วงอุณหภูมิการเกิดการสลายตัวของสารระเหยต่ำกว่าตัวอย่าง K1 และ K2 เนื่องมาจาก ที่อุณหภูมิดังกล่าวตัวอย่าง K3 ยังมีปริมาณของสารระเหยมากกว่าตัวอย่าง K1 และ K2 และเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 และ 1,100 °C ตัวอย่าง K3 จะเกิดการลุกไหม้ติดไฟอย่างรวดเร็ว ณ ช่วงอุณหภูมิช่วงที่สองที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง จะเกิดกระบวนการการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุ โดยแร่แคลไซต์ เปลี่ยนเป็นแร่เมทาแคลไซต์ ที่อุณหภูมิ 550 - 600 °C ในขณะที่ แร่ไพไรต์จะเปลี่ยนเป็นแร่แอนไฮไดรต์ ที่อุณหภูมิ 600 - 650 °C ซึ่งการหายไปของโมเลกุลน้ำในแร่แคลไซต์และแร่ไพไรต์จึงทำให้น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหินเปลี่ยนแปลง ดังนั้น อุณหภูมิที่เริ่มทำให้น้ำหนักของตัวอย่างถ่านหินคงที่ คือ ที่อุณหภูมิ 700 °C เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นมาก จึงเป็นเหตุผลที่ผู้วิจัยเริ่มการทดลองเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิตั้งแต่ 700 °C ถึง 1,100 °C

ตารางที่ 1 ช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3

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

4.2.3 การวิจารณ์ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้โดยใช้เทคนิค FT-IR

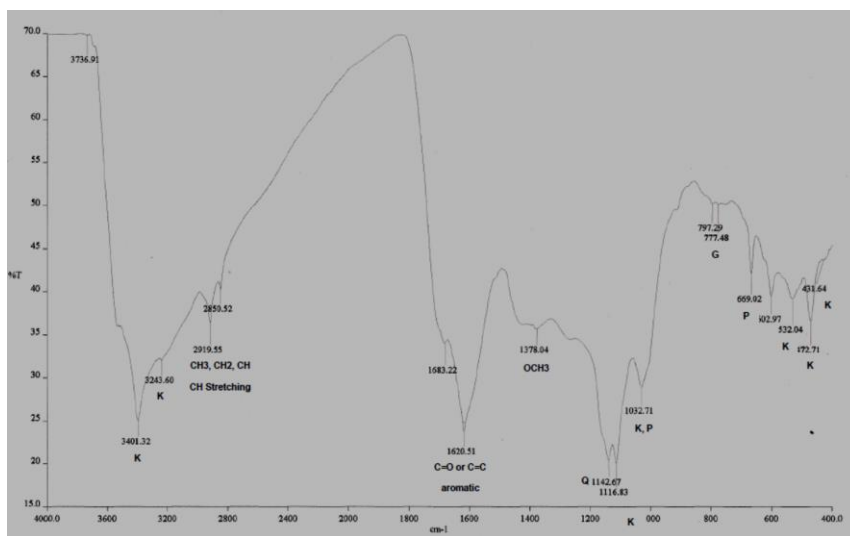
เพื่อบ่งบอกลักษณะสเปกตรัมเฉพาะของถ่านหิน ที่แสดงลักษณะเฉพาะขององค์ประกอบของสารอินทรีย์ในตัวอย่างถ่านหิน พบว่า ตัวอย่างถ่านหิน K1, K2 และ K3 ปรากฏพีดของหมู่ C-H stretching bands ที่ 2,919 และ 2,850 cm^{-1} , หมู่ aromatic C=C band ที่ 1,620 cm^{-1} และหมู่ hydroxyl band ที่ 3,400 cm^{-1} ขณะที่พีด 1,274, 1,142, 1,116 และ 1,032 cm^{-1} จะเป็นพีดของหมู่ C-O stretching และหมู่ O-H deformation vibration ในกลุ่มแอลกอฮอล์, ฟีนอลและอีเทอร์ ซึ่งจากพีดที่ปรากฏที่ 2,919 และ 2,850 cm^{-1} โดยเป็นพีดของหมู่ C-H stretching bands จะเกิดจากการสลายตัวทางธรรมชาติของพืช เช่น ลิกนิน (หรืออาจเป็นพีดที่เลื่อนมาจากพีดของหมู่ Decarboxylation ที่ 2,936 และ 2,926 cm^{-1} ขณะที่พีดที่ปรากฏที่ 3,400 cm^{-1} ของ -OH stretching vibrations ของ hydroxyl group ที่ดูดซับน้ำไว้ของแร่จำพวกดินเหนียว ซึ่งได้แก่ แร่ยิปซัม แร่แคลไซต์ และจากพีดที่ปรากฏที่ 1,620 cm^{-1} ซึ่งจะเป็นพีดของหมู่ C=O หรือ C=C aromatic ring ที่สอดคล้องกับพีดของหมู่ -OH stretching vibrations ของ hydroxyl group ที่ดูดซับน้ำไว้ จากพีดที่ปรากฏที่ 1,032 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ Si-O-Si และ Si-O-Al vibrations ซึ่งสอดคล้องกับแร่แคลไซต์ ที่มีองค์ประกอบคือ แร่อะลูมินาและแร่ซิลิกา ดังนั้นจากการศึกษาองค์ประกอบของถ่านหินโดยใช้เทคนิค FT-IR ดังรูปตัวอย่างที่ 5 พบว่าถ่านหินที่ทำการศึกษาประกอบด้วยแร่ยิปซัม แร่ควอตซ์ แร่แคลไซต์เป็นองค์ประกอบหลักในถ่านหิน

4.2.4 สรุปผลการศึกษาด้านวิทยาแร่ของถ่านหินลิกไนต์ K1, K2 และ K3 ก่อนการเผาไหม้

จากการนำตัวอย่างถ่านหินมาวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมเหลวและองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ พบว่า ตัวอย่าง K1, K2 และ K3 มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์เท่ากับ 12.72 %CaO, 15.24 %CaO และ 22.88 %CaO ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่าง K1 จะมีค่า IT ของถ่านหินต่ำที่สุด (1,155 °C) รองลงมาคือ ตัวอย่าง K2 (1,210 °C) และตัวอย่าง K1 และ K2

มีค่า IT ของต่ำกว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาของหม้อไอน้ำในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (ประมาณ 1,250 - 1,300 °C) เมื่อนำไปเผาอาจเกิดตะกั่วในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าได้ ขณะที่ตัวอย่าง K3 มีอุณหภูมิ IT (1,372 °C) สูงกว่าอุณหภูมิภายในเตาเผาของหม้อไอน้ำ จึงมีโอกาสเกิดตะกั่วในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าได้ยากกว่า

เมื่อศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบของแร่ในตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ก่อนการเผาไหม้ ด้วยเครื่องมือ XRD ร่วมกับเทคนิค TGA และเทคนิค FT-IR พบว่าแร่ที่เป็นองค์ประกอบของแร่ถ่านหินก่อนการเผาไหม้ประกอบไปด้วยแร่แคลไซต์ แร่ยิปซัม แร่ไพไรต์ และแร่ควอตซ์



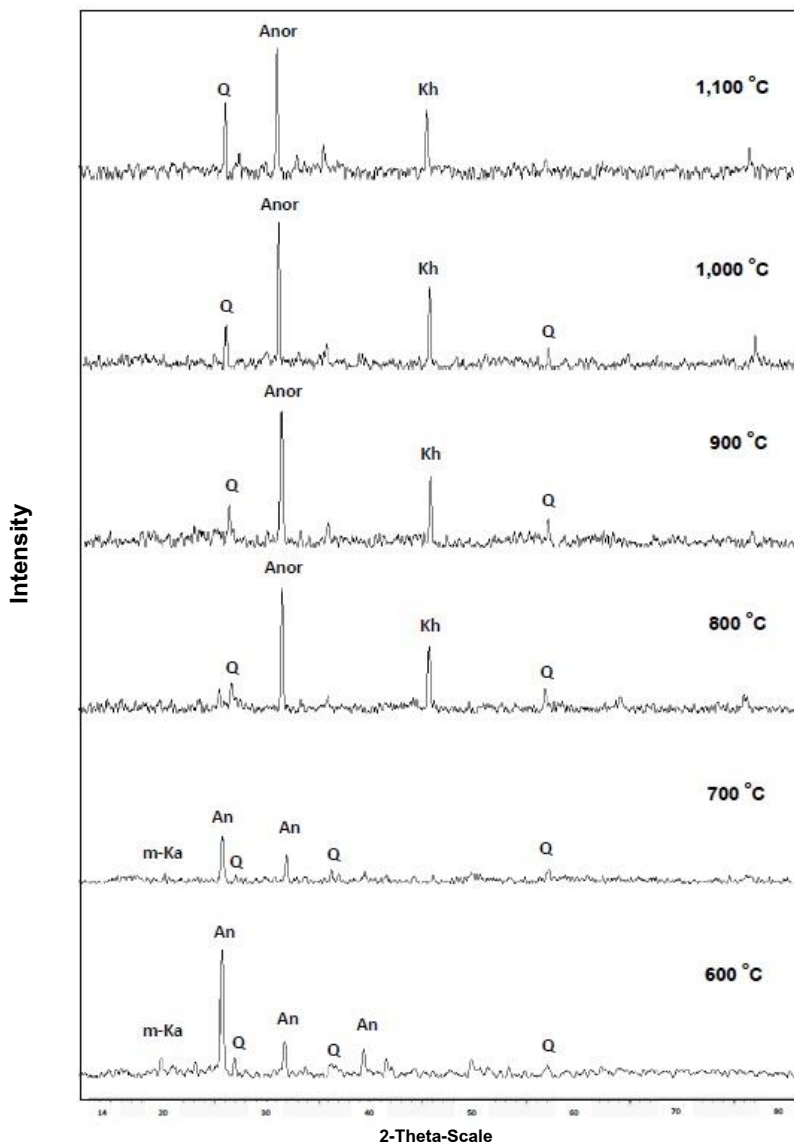
รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหิน K3 (%CaO = 22.88) ด้วยเทคนิค FT-IR

4.3 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางวิทยาแร่และองค์ประกอบทางเคมีพื้นผิวของของถ่านหินลิกไนต์หลังการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของถ่านหินโดยใช้เครื่อง XRD

จากกราฟ XRD Pattern เปรียบเทียบอุณหภูมิของถ่านหินหลังจากการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังรูปที่ 6 พบว่า ที่อุณหภูมิ 600 °C ตัวอย่างถ่าน K2 จะเกิดการลดลงของแร่ยิปซัมและแร่แคลไซต์ โดยแร่ทั้งสองจะสูญเสียโมเลกุลของน้ำออกไปเมื่อถึงอุณหภูมิดังกล่าว ซึ่งแร่แคลไซต์จะเปลี่ยนเป็นแร่เมทาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 550 - 600 °C และแร่ยิปซัมจะเปลี่ยนเป็นแร่แอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิ 600 - 650 °C หลังจากนั้นทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C พบว่า ปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์และแร่เมทาแคลไซต์จะลดน้อยลง โดยจะปรากฏพีกของกลุ่มแร่คาร์มาราไลต์ที่อุณหภูมิ 800 °C แร่แอนไฮไดรต์จะเกิดปฏิกิริยาสองแบบได้แก่ การสลายตัวเกิดแคลเซียมออกไซด์และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับปฏิกิริยาการรวมตัวกับแก๊สไฮโดรเจนเกิดเป็นแร่ออลด์ฮาไมต์ แต่เนื่องจากการ

ทดลองไม่ได้เป็นการเผาในสภาวะ Reducing Atmosphere ดังเช่นงานวิจัยของ Li and others ดังนั้น สังเกตได้ว่าพีคของแร่แอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิ 700 °C จะลดลง ขณะที่ตำแหน่งพีคดังกล่าวที่อุณหภูมิ 800 °C พีคที่ตำแหน่งของแร่แอนไฮไดรต์จะสูงขึ้น เนื่องมาจากธาตุ Ca ที่สลายตัวจากแร่แอนไฮไดรต์จะจับตัวกับธาตุ Si และ Al จากแร่เมทาเกลิน และเกิดเป็นแร่เอนอร์ไทต์



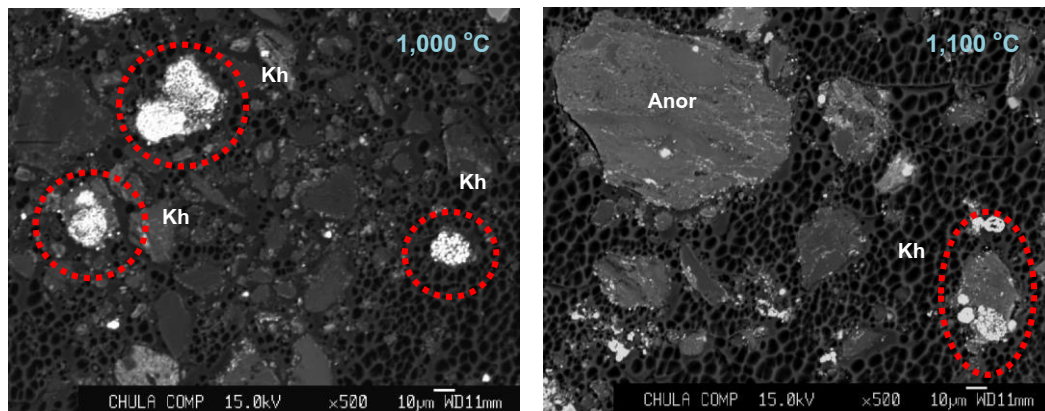
(An, Anhydrite (CaSO_4) / Anor, Anorthite ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) / m-Ka, meta-Kaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) /
Kh, Khmaralite ($\text{Fe}_{0.24}\text{Mg}_{0.76}\text{SiO}_3$ or $\text{Mg}_{5.5}\text{Fe}_{14}\text{Be}_{1.5}\text{Si}_5\text{O}_{40}$)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

รูปที่ 6 XRD Pattern ตัวอย่างและชนิดแร่ของแก้วในตัวอย่าง K1 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 - 1,100 °C

ที่อุณหภูมิ 950 °C ที่ตำแหน่งพีคของแร่อนอร์ไทต์ จะมีความสูงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พิธา ศรีบุญยดี ที่พบว่า แร่อนอร์ไทต์เป็นสาเหตุทำให้เกิดตะกอนในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ที่อุณหภูมิ 1,100 °C พีคของแร่อนอร์ไทต์จะมีความสูงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแร่เมทาเกลินทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ ที่เกิดจากการสลายตัวของความร้อนของแร่แอนไฮไดรต์ที่อุณหภูมิ 700 °C ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเถาถ่านหินโดยใช้เครื่อง XRD ของตัวอย่างเก่า K2 และ K3 ตามลำดับ พบว่า การทดลองมีปฏิกิริยาการเกิดแร่ที่อุณหภูมิต่างๆ สอดคล้องกับตัวอย่างเก่า K1 แต่ความเข้มของพีคของตัวอย่างเก่า K2 ที่ปรากฏที่ตำแหน่งของแร่อนอร์ไทต์มีความเข้มของพีคน้อยกว่าตัวอย่างเก่า K1 และมีความเข้มพีคที่ปรากฏที่ตำแหน่งของแร่คามาราไลต์มากกว่าตัวอย่างเก่า K1 เนื่องจากปริมาณแคลเซียมออกไซด์ของตัวอย่าง K1 มีมากกว่าของตัวอย่าง K2 ดังนั้น แร่อนอร์ไทต์ซึ่งมีองค์ประกอบคือ แคลเซียม จึงมีความเข้มของพีคที่มากกว่าตัวอย่าง K2 สำหรับตัวอย่างเก่า K3 เนื่องจากในการทดลองที่อุณหภูมิ 1,000 และ 1,100 °C ตัวอย่างดังกล่าวเกิดการลุกติดไฟอย่างรวดเร็ว อาจเกิดอันตรายได้เมื่อนำเข้าสู่เตาเผาจึงทำการทดลองที่อุณหภูมิระหว่าง 700, 800 และ 900 °C เท่านั้น

4.3.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและแผนภาพองค์ประกอบทางเคมีพื้นผิวเพื่อหาโครงสร้างของเถาถ่านหินโดยใช้เทคนิค EPMA

จากการศึกษาการกระจายตัวของธาตุที่ตำแหน่งต่างๆ ของเถาถ่านหินตัวอย่าง K1 เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กัน โดยทำการทดลองเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 100 °C พบว่าที่อุณหภูมิ 600 °C จะปรากฏแร่เมทาเกลินและแร่ควอตซ์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 700 - 800 °C จะพบแร่ควอตซ์ แร่แอนไฮไดรต์ และกลุ่มแร่คามาราไลต์เพิ่มขึ้นมา ที่อุณหภูมิ 900 °C สังเกตเห็นว่า เริ่มปรากฏการณ์รวมกันของผลึกของกลุ่มแร่คามาราไลต์กับแร่มุลไลต์ ที่อุณหภูมิ 900 °C จะมีเปอร์เซ็นต์สัดส่วนออกไซด์ของธาตุใกล้เคียงกับกลุ่มแร่คามาราไลต์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 1,000 °C จะพบกลุ่มแร่คามาราไลต์ปรากฏเห็นเด่นชัดและมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเถาถ่านหินโดยใช้เทคนิค XRD ที่พบว่า กลุ่มแร่คามาราไลต์จะเพิ่มมากขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 900 - 1,000 °C ที่อุณหภูมิ 1,100 °C จะปรากฏแร่อนอร์ไทต์ขึ้นดังรูปที่ 7 โดยที่กลุ่มแร่คามาราไลต์จะยังคงสังเกตเห็นได้อยู่ เนื่องจากธาตุที่เป็นองค์ประกอบของกลุ่มแร่คามาราไลต์ ($\text{Fe}_{0.24}\text{Mg}_{0.76}\text{SiO}_3$ หรือ $\text{Mg}_{5.5}\text{Fe}_2\text{Al}_{14}\text{Be}_{1.5}\text{Si}_5\text{O}_{40}$) ได้แก่ ธาตุเหล็ก ธาตุแมกนีเซียม และธาตุอะลูมิเนียม ต่างมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงมากกว่า 1,100 °C ที่ทำการศึกษาทดลอง



Anor, Anorthite ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$); Kh, Khmaralite ($\text{Fe}_{0.24}\text{Mg}_{0.76}\text{SiO}_3$ or $\text{Mg}_{5.5}\text{Fe}_2\text{Al}_{14}\text{Be}_{1.5}\text{Si}_5\text{O}_{40}$)

รูปที่ 7 เฟสของแร่ที่เกิดขึ้นของตัวอย่างแก้ว K1 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 - 1,100 °C

4.4 อธิบายสาเหตุการเกิดเถ้าหนัก (Bottom Ash) และตะกรันผนัง (Wall Slag) ของเตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดย Ternary Phase Diagram

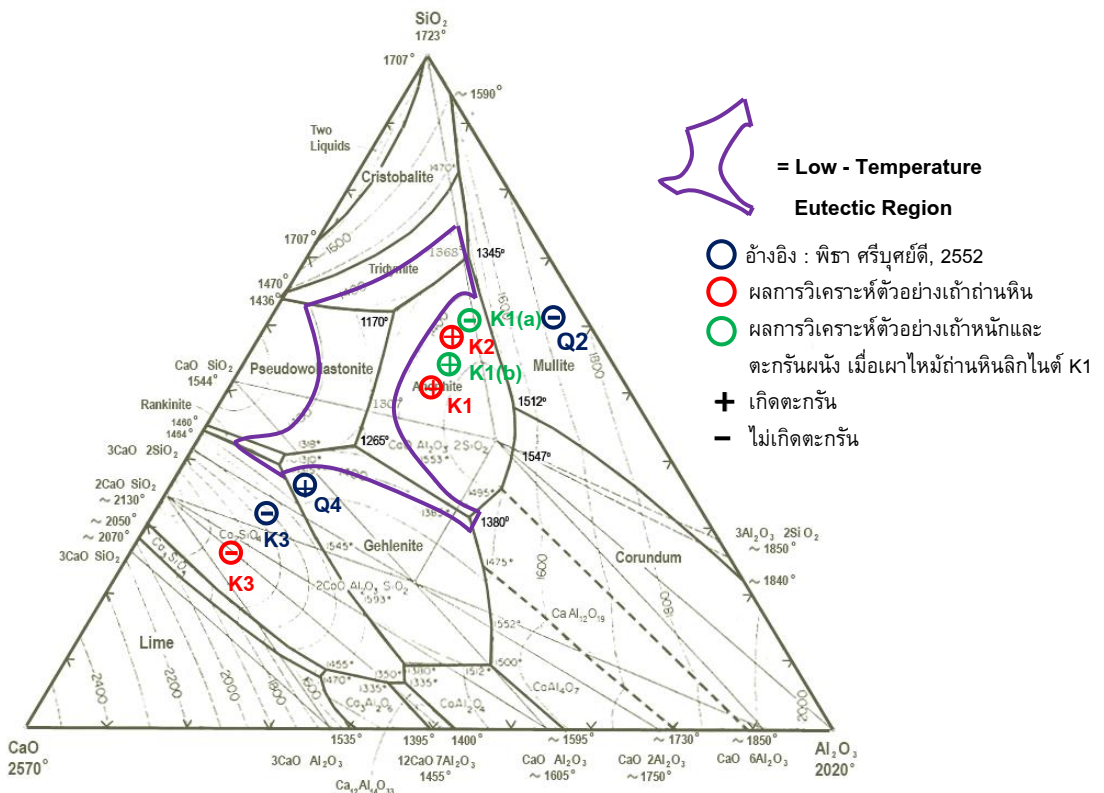
4.4.1 วิจารณ์ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและวิทยาแร่ของเถ้าหนักและตะกรันผนังที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ K1 โดยใช้เครื่อง XRD

ในการศึกษาองค์ประกอบทางวิทยาแร่ด้วยเครื่อง XRD พบว่า ตัวอย่างเถ้าหนัก K1(a) ประกอบด้วยแร่อะนอร์ไทต์และสารประกอบที่น่าจะเป็นแร่เพอริเอไรต์ (Perrierite) ขณะที่ตัวอย่างตะกรันผนัง K1(b) พบแร่อะนอร์ไทต์เป็นองค์ประกอบหลักแต่เพียงอย่างเดียว ซึ่งสรุปได้ว่าตัวอย่างเถ้าหนัก K1(a) และตัวอย่างตะกรันผนัง K1(b) มีแร่อะนอร์ไทต์เป็นองค์ประกอบหลัก และน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เถ้าถ่านหินลิกไนต์เกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ และเกิดตะกรันขึ้นในเตาเผาของหม้อไอน้ำ

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

เมื่อนำข้อมูลตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K1 (12.72 %CaO), K2 (15.24 %CaO), K3 (22.88 %CaO), ตัวอย่างเถ้าหนัก K1(a) และตัวอย่างตะกรันผนัง K1(b) จากงานวิจัยนี้ และข้อมูลตัวอย่างเถ้าถ่านหินจากงานวิจัยของ พิศา ศรีบุญยดี [7] ซึ่งทำการศึกษาตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K3 (31.81 %CaO), Q2 (2.24 %CaO) และ Q4 (27.42 %CaO) มาพล็อตลงใน Ternary Phase Diagram ดังรูปที่ 8 ซึ่งจากเส้นบอกอุณหภูมิ (Contour Line) สังเกตได้ว่า ตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K1, K2 ตัวอย่างเถ้าหนัก K1(a) และตัวอย่างตะกรันผนัง K1(b) อยู่ในบริเวณของแร่อะนอร์ไทต์ ซึ่งใกล้เคียงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำ (Low Temperature Eutectic Region) เช่นเดียวกัน และตัวอย่างเถ้าถ่านหิน

K3 จะมีแร่องค์ประกอบหลักเกิดอยู่ในบริเวณของแร่แคลเซียมซิลิเกต (Ca_2SiO_4) ซึ่งแตกต่างกับงานวิจัยของ พิธา ศรีบุญยดี [7] ที่พบว่าองค์ประกอบหลักของตะกรันคือ แร่เกลินต์ ดังนั้นตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K1 (12.72 %CaO) และ K2 (15.24 %CaO) แม้ไม่ได้อยู่ในช่วง 23 - 35 %CaO ซึ่งเป็นช่วงที่ควรเกิดตะกรัน (ตามข้อสังเกตของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)) แต่ก็เกิดตะกรันขึ้นมาได้ ทั้งนี้เนื่องจากจะเกิดแร่เอนอร์ไทต์เป็นองค์ประกอบหลัก อันเป็นสาเหตุทำให้เกิดตะกรันในเตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะได้



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

รูปที่ 8 Ternary Phase Diagram เปรียบเทียบชนิดแร่ของตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K3, Q2 และ Q4 พิธา ศรีบุญยดี [7] และตัวอย่างเถ้าถ่านหิน K1, K2, K3 และเถ้าถ่าน Slag K1(a) และตะกรันผนัง K1(b)

ดังนั้น จากการวิจัยนี้คาดว่า หากทำการเผาตัวอย่างถ่านหิน K1 และ K2 จะมีโอกาสที่ตัวอย่างถ่านหิน K1 (12.72 %CaO) และ K2 (15.24 %CaO) จะหลอมเหลวกลายเป็นตะกรันผนัง

เนื่องจากจะเกิดแร่เอนอร์ไทต์เป็นองค์ประกอบหลัก อันเป็นสาเหตุทำให้เกิดตะกรันในเตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เมาะได้ นอกจากนี้ จากข้อสังเกตของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่กำหนดว่าช่วง 23 - 35 %CaO เป็นช่วงที่จะเกิดตะกรัน ผู้วิจัยพบว่า ตัวอย่างตะกรันผนัง K1(b) ที่เกิดขึ้นจริงมีปริมาณของ CaO อยู่นอกช่วง 23 - 35 %CaO แต่ก็ยังเกิดตะกรันผนังได้ ซึ่งเป็นข้อสังเกตใหม่ที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ และจากการศึกษาองค์ประกอบทางวิทยาแร่ของตัวอย่างแท่ง K1(a) ประกอบด้วยแร่เอนอร์ไทต์และสารประกอบที่น่าจะเป็นแร่เพอร์เฮอร์ไรต์ ขณะที่ตัวอย่างตะกรันผนัง K1(b) จะพบแร่เอนอร์ไทต์เป็นองค์ประกอบหลักแต่เพียงอย่างเดียว ซึ่งแท่งหนักที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นตะกรันที่ไม่เกาะผนังเตาเผาของหม้อไอน้ำ แต่ร่วงลงมาบริเวณข้างล่างเตาเผากลายเป็นแท่งหนัก ซึ่งจะสังเกตได้ว่าองค์ประกอบทางวิทยาแร่คือแร่เอนอร์ไทต์เช่นเดียวกัน แต่ที่แตกต่างคือ แท่งหนักยังประกอบไปด้วยสารประกอบอื่นที่น่าจะเป็นแร่เพอร์เฮอร์ไรต์ เพราะฉะนั้นในการศึกษาวิจัยองค์ประกอบชนิดของแร่ที่ทำให้แท่งหนักไม่เกาะติดบริเวณผนังของเตาเผาหม้อไอน้ำและร่วงลงมาบริเวณข้างล่างของเตาเผา จึงเป็นเรื่องสำคัญที่ควรจะศึกษาวิจัยเพิ่มเติมต่อไปในภายภาคหน้า

นอกจากนี้ การอธิบายการเกิดตะกรันจากการนำแท่งหนักมาวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมเริ่มต้น (IT; Initial Deformation Temperature) ก่อนการเผาไหม้ และการวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ของ CaO, Al_2O_3 และ SiO_2 และนำมาพล็อตลงใน Ternary Phase Diagram เป็นสิ่งที่บ่งบอกได้ถึงสมบัติของถ่านหินที่จะเกิดตะกรันผนังหรือไม่ ซึ่งถ้าหากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ทำการวิเคราะห์แท่งหนักล่วงหน้าก็จะสามารถกำหนดบริเวณที่ทำให้เกิดตะกรันผนังใน Ternary Phase Diagram ได้ ซึ่งมีประโยชน์ต่อการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ในการคาดการณ์ล่วงหน้า และหาวิธีป้องกันการเกิดตะกรันผนัง เช่น การนำดินหรือวัสดุต่างๆ ที่เป็นผลพลอยได้จากการทำเหมืองถ่านหินมาผสมกับถ่านหินลิกไนต์ เพื่อป้อนเข้าสู่เตาเผาของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้า แล้วทำให้แท่งหนักไม่เกิดตะกรันผนัง

5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การวิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมและองค์ประกอบทางเคมีของแท่งถ่านหินลิกไนต์

พบว่า ตัวอย่าง K1 และ K2 ซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการหลอมต่ำเมื่อนำไปเผาอาจเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าได้ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) แม่เมาะ ที่ว่าเมื่อนำถ่านหิน K1 และ K2 ไปใช้เผาไหม้ในเตาเผาของหม้อไอน้ำจริงได้เกิดตะกรันผนังขึ้น จากการวิเคราะห์ตัวอย่างแท่งถ่านหิน คือ K1, K2 และ K3 โดยหาองค์ประกอบของแร่ออกไซด์ พบว่าตัวอย่าง K1 (12.72 %CaO) และ K2 (15.24 %CaO) ซึ่งมีปริมาณ CaO ต่ำ

กว่า 23 %CaO จะสามารถเกิดตะกรันได้ ส่วนตัวอย่าง K3 (22.88 %CaO) ไม่เกิดตะกรัน เพราะฉะนั้นตัวอย่าง K1 และ K2 แม้จะไม่ได้อยู่ในช่วง 23 - 35 %CaO ซึ่งเป็นช่วงที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) แม่เมาะคาดว่าจะควรเกิดตะกรัน แต่ก็ยังเกิดตะกรันขึ้นมาได้ ซึ่งเป็นข้อสังเกตใหม่ที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้

5.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบแร่ของถ่านหินก่อนการเผาไหม้ ด้วยเครื่อง XRD

พบว่า องค์ประกอบหลักของถ่านหินประกอบด้วยแร่แคลไซต์ (Kaolinite) แร่ยิปซัม (Gypsum) แร่ควอตซ์ (Quartz) แร่ไพไรต์ (Pyrite) และแร่แคลเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ (Calcium Aluminum Oxide) ในการวิเคราะห์อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงสูงขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างถ่านหิน พบว่า มีช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอยู่ 2 ช่วง โดยช่วงแรกในช่วงอุณหภูมิประมาณ 350 °C จะเกิดเนื่องจากการหายไปของสารระเหย และช่วงที่สอง ที่อุณหภูมิประมาณ 700 - 820 °C โดยที่อุณหภูมิ 700 - 820 °C จะเกิดกระบวนการการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุของตัวอย่างถ่านหิน ซึ่งเกิดจากแร่แคลไซต์เปลี่ยนแปลงไปเป็นแร่เมทาเกลิน ที่อุณหภูมิ 550 - 600 °C และแร่ยิปซัมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่แอนไฮไดรต์ ที่อุณหภูมิ 600 - 650 °C ในการศึกษาหุ้มน้ำหนักขององค์ประกอบของสารอินทรีย์ในถ่านหิน จะพบฟีดที่ปรากฏและยืนยันได้ว่า ถ่านหินที่ทำการศึกษา K1, K2 และ K3 ประกอบด้วยแร่ยิปซัม แร่ควอตซ์ และแร่แคลไซต์เป็นองค์ประกอบหลักของถ่านหินลิไกไนต์

5.1.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบของถ่านหินหลังการเผาไหม้

พบว่า ที่อุณหภูมิ 600 °C ตัวอย่างถ่าน K1 จะเกิดการลดลงของแร่ยิปซัมและแร่แคลไซต์ ที่อุณหภูมิ 700 °C พบว่า ปริมาณของแร่แอนไฮไดรต์และแร่เมทาเกลินลดลง ที่อุณหภูมิ 800 °C ฟีดที่ตำแหน่งของแร่อะนอร์ไทต์สูงขึ้น เนื่องมาจากธาตุ Ca ที่สลายตัวจากแร่แอนไฮไดรต์จะจับตัวกับธาตุ Si และ Al จากแร่เมทาเกลินและเกิดเป็นแร่อะนอร์ไทต์ ที่อุณหภูมิ 900 °C พบว่า แร่เมทาเกลินจะเปลี่ยนแปลงเป็นแร่มุลไลต์ (Mullite) และที่อุณหภูมิ 1,000 °C จะเกิดแร่อะนอร์ไทต์เพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้เกิดตะกรันในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และที่อุณหภูมิ 1,100 °C จะปรากฏฟีดของแร่อะนอร์ไทต์เพิ่มสูงขึ้น จากการพล็อต Ternary Phase Diagram พบว่า ตัวอย่าง K1 และ K2 เกิดอยู่ในบริเวณของแร่อะนอร์ไทต์ ขณะที่ตัวอย่าง K3 จะเป็นแร่แคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate)

จากการวิเคราะห์ภาพลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างถ่านหินที่ผ่านการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเทคนิค EPMA พบว่า ตัวอย่างถ่านหินเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่าง

ชัดเจนที่ช่วงอุณหภูมิ 900 - 1,100 °C ซึ่งผลการศึกษาวิเคราะห์ที่ได้สนับสนุนผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าถ่านหินด้วยเครื่องมือ XRD

5.1.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและวิทยาแร่ของเถ้าหนัก K1(a) (Bottom Ash) และตะกัณผนัง K1(b) (Wall Slag) ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ K1

พบว่า ตัวอย่างเถ้าหนัก K1(a) และตัวอย่างตะกัณผนัง K1(b) มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่นอกช่วงบริเวณ 23 - 35 %CaO ที่เป็นช่วงที่จะทำให้เกิดตะกัณ โดยตัวอย่างเถ้าหนัก K1(a) มีองค์ประกอบแร่คือ แร่อะนอร์ไทต์และสารประกอบที่คาดว่าจะเป็แร่เพอร์ไธต์ ในขณะที่ตัวอย่างตะกัณผนัง K1(b) จะพบแร่อะนอร์ไทต์เป็นองค์ประกอบหลักแต่เพียงอย่างเดียว และเมื่อนำมาพล็อตใน Ternary Phase Diagram จะสอดคล้องกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของตะกัณทั้งสองตัวอย่างคือเป็นแร่อะนอร์ไทต์เช่นเดียวกัน โดยคาดว่าเถ้าหนักที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นตะกัณเช่นกัน แต่ไม่เกาะผนังเตาเผาของหม้อไอน้ำ โดยจะร่วงลงมาบริเวณข้างล่างเตาเผากลายเป็นเถ้าหนัก ซึ่งจะสังเกตว่าองค์ประกอบทางวิทยาแร่คือประกอบด้วยแร่อะนอร์ไทต์เช่นเดียวกัน แต่ที่แตกต่างกันคือเถ้าหนักประกอบด้วยสารประกอบที่น่าจะเป็นแร่เพอร์ไธต์ ซึ่งควรมีการศึกษาต่อไปในภายภาคหน้า

สรุปได้ว่าตัวอย่างเถ้าหนัก K1(a) และตัวอย่างตะกัณผนัง K1(b) ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่นอกช่วงบริเวณ 23 - 35 %CaO ก็สามารถเกิดตะกัณได้ โดยมีแร่อะนอร์ไทต์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เถ้าถ่านหินลิกไนต์เกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ และเกิดตะกัณขึ้นในเตาเผาของหม้อไอน้ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยที่สรุปข้างต้นและนำมาพล็อตลงใน Ternary Phase Diagram เป็นสิ่งที่บ่งบอกได้ถึงสมบัติของถ่านหินที่จะเกิดตะกัณผนังหรือไม่ ซึ่งถ้าการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ทำการวิเคราะห์เถ้าถ่านหินเพื่อหาปริมาณออกไซด์ ร่วมกับอุณหภูมิการหลอมเริ่มต้นล่วงหน้า ก็จะสามารถกำหนดบริเวณที่ทำให้เกิดตะกัณผนัง ซึ่งเป็นบริเวณใกล้เคียงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำใน Ternary Phase Diagram ดังกล่าวได้ ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการคาดการณ์ล่วงหน้าและหาวิธีป้องกันการเกิดตะกัณผนังที่จะเกิดขึ้น นอกจากนี้ สำหรับการศึกษาในครั้งต่อไป ควรมีการศึกษาเชิงลึกในด้านปริมาณของแร่อะนอร์ไทต์ ณ จุดที่ทำให้เกิดตะกัณในเตาเผาของหม้อไอน้ำ เพื่อหาวิธีบำบัด ป้องกัน และลดปัญหาการเกิดตะกัณในเตาเผาของหม้อไอน้ำ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปิญโญ มีชานะ ที่อบรมสั่งสอนขัดเกลาความคิดสร้างสรรค์แนวทางในการทำวิจัย และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ดาวลัย วิวรรณเดช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพล ภู่วิจิตร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทียนไชย ดันไทย ที่ให้ข้อเสนอแนะต่างๆ ในการวิจัย ขอขอบพระคุณผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่าง การให้ข้อมูลและการอำนวยความสะดวกต่างๆ ทุกท่าน ทุกองค์กร ทำสุดขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่สนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. [ออนไลน์]. (2552). การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหิน. เข้าถึงได้จาก: <http://maemohmine.egat.co.th> [15 ธันวาคม 2554]
- [2] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. [ออนไลน์]. (2552). การวิเคราะห์เพื่อหาอุณหภูมิการหลอมของเถ้า (Ash Fusion Temperature). เข้าถึงได้จาก: <http://maemohmine.egat.co.th> [21 ธันวาคม 2554]
- [3] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, กรมสารสนเทศ. การใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : องค์การการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, มปป. (อัดสำเนา)
- [4] ทศนีย์ สุวพันธ์. (2538). “การวิเคราะห์คุณภาพถ่านหิน”. วารสาร กฟผ. 4,1 (มกราคม - มีนาคม 2538) : 54-59.
- [5] กระทรวงพลังงาน, กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ. [ออนไลน์]. (2552). แหล่งถ่านหินในประเทศไทย. เข้าถึงได้จาก: www.dmf.go.th [27 ตุลาคม 2554]
- [6] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. กระทรวงพลังงาน. [ออนไลน์]. (2552). ถ่านหินเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า. เข้าถึงได้จาก: www.eppo.go.th/coal/data.html [22 พฤศจิกายน 2554]
- [7] พิธา ศรีบุญยดี. (2552). การศึกษาปัจจัยที่ควบคุมการเกิดตะกันในหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [8] สุนี ลาวัณยากุล และ ศิริวรรณ ศิลป์สกุลสุข. [ออนไลน์]. (2011). “ถ่านหินและการทดสอบคุณภาพ”. สารานุกรม: บทความวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีโดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ. เข้าถึงได้จาก: <http://www.dss.go.th> [23 พฤศจิกายน 2555]
- [9] Bai, J., Li W., and Li. (2008). “Characterization of low-temperature coal ash behaviors at high temperatures under reducing atmosphere,” **Fuel**. Volume 87 (4-5): 583-591.

- [10] Hatt, R.M. (2001). **Influence of Coal Quality and Boiler Operating Conditions on Slagging of Utility Boilers; Power Production in the 21st Century: Impacts of Fuel Quality and Operations.** UTHA: Snowbird.
- [11] Kim, H.-T., Bae, and Lee. (1995). **A Prediction of Coal Ash Slagging under the Gascification Condition of Preprints of the American Society Devision of Fuel Chemistry.** Korea: Energy Department of Ajou University.
- [12] Li, F., Li, Huang, Fang, and Wang. (2011). "Formation Mechanism of Slag during Fluid-bed Gasification of Lignite," **Energy Fuels.** 25 (1): 273-280.
- [13] Moore, E.S. (1940). **Coal.** 2nd edition. New York: John Wiley & Sons, Inc. pp. 28 -91.
- [14] Oikonomopoulos, I., Perraki, Th., and Tougiannidis, N. (2010). "FTIR study of two different lignite lithotypes from Neocene Achlada lignite deposits in NW Greece," **Abstract Bulletin of the Geological Society of Greece, 2010 Proceedings of the 12th International Congress 2010.** XLIII. No 5: 2284-2293.
- [15] Pang L.S.K., Vassallo, Phong-anant, and Wilson. (1993). "A study of slag in laboratory, pilot and commercial scale furnaces using FTIR microscopy, electron microscopy and NMR spectroscopy," **Fuel Processing Technology.** Volume 33 (Issue 1):13-32.
- [16] Probststein, R.F. and Hicks, E. (1982). **Synthetic Fuels.** New York: McGraw-Hill.
- [17] Qiu, J-R., Li, Zheng Y, Zheng C.-G, and Zhou. (1999). "The influences of mineral behaviour on blended coal ash fusion characteristics," **Fuel.** Volume 78: 963-969.
- [18] Somwannaporn. [ออนไลน์]. (2009). แหล่งถ่านหินในประเทศไทย.เข้าถึงได้จาก: somwannaporn.wordpress.com [26 มิถุนายน 2555]
- [19] Song, W., Tang, L., Zhu, X., Wu, Y., Rong, Y., Zhu, Z. and Koyama, S. (2009). "Fusibility and flow properties of coal ash and slag," **Fuel.** Volume 88: 297-304.
- [20] The Kentucky Geological Survey. [Online]. (2012). **Coal Information 1997 - 2014.** Kentucky: University of Kentucky.
- [21] Van Dyk, J.C., Benson, Laumb, and Waanders. (2009). "Coal and coal ash characteristics to understand mineral transformations and slag formation," **Fuel.** Volume 88 (6): 1057-1063.

ประวัติผู้เขียน



นายเอกฉัตร พัฒราช สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนวัดอมรินทร์าราม ระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย และระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2552 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนถึงปัจจุบัน