บทที่ 4

ผลการทดลอง การวิเคราะห์และวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปฏิกิริยาของปูนขาวกับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้ของถ่านหิน งานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการขจัดกำมะถันในถ่านหิน โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อัตราส่วน CaO/S (โดยโมล) อุณหภูมิ และปริมาณกำมะถันในถ่านหิน ส่วนที่สองหาอัตราส่วน CaO/S (โดยโมล) และอุณหภูมิที่เหมาะสม ส่วนที่สามศึกษาลำดับและชนิดของปฏิกิริยา ตลอดจนสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาของปูนขาวกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

การศึกษาสมบัติเบื้องต้นของถ่านหินเหมืองแม่เมาะ 3 ตัวอย่าง ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าถ่านหินทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 3200 - 4600 แคลอรีต่อกรัม (air - dried basis) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงการแบ่งถ่านหินตามศักดิ์โดยวิธีมาตรฐาน ASTM D388 พบว่า ถ่านหินทั้ง 3 ตัวอย่างมีศักดิ์ ซับบิทูมินัส-ซี เมื่อวิเคราะห์สมบัติอย่างอื่น เช่น การวิเคราะห์แบบประมาณ กำมะถันรวม รูปแบบกำมะถัน จะมีสมบัติแตกต่างกันโดยกำมะถันรวมจะอยู่ในช่วง 2.2 - 4.4 % รูปแบบกำมะถันซึ่งมี 3 รูปแบบ คือ กำมะถันไพไรต์อยู่ในช่วง 8 - 21 % กำมะถันซัลเฟตอยู่ในช่วง 34 - 46 % และกำมะถันอินทรีย์อยู่ในช่วง 41 - 50 %

4.1 การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการขจัดกำมะถันเมื่อทำการเผาไหม้ถ่านหิน

ในการทดลองนี้ใช้ถ่านหินเหมืองแม่เมาะ 3 ตัวอย่างทดลองในหลอดแก้วควอร์ตซ์ เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ คือ อัตราส่วน CaO/S (โดยโมล) อุณหภูมิ และ ปริมาณกำมะถันในถ่านหิน

4.1.1 อัตราส่วน CaO/S (โดยโมล)

ผลการวิเคราะห์วัดปริมาณ กำมะถันในถ่านหินที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของถ่านหินแม่เมาะ 1 ที่อัตราส่วน CaO/S Ø - 3 และที่อุณหภูมิ 600 - 1000 °ซ แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเมื่อเทียบกับปริมาณกำมะถันทั้งหมดของถ่านหินแม่เมาะ 1 จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติของถ่านหินตัวอย่างต่าง ๆ

รายการที่ทำการวิเคราะห์	แม่เมาะ 1	แม่เมาะ 2	แม่เมาะ 3
การวิเคราะห์แบบประมาณ (%)			
ก. air-dried basis[1]			
- ความชื้น	19.8	10.3	13.2
- เถ้า	8.0	20.4	26.3
- สารระเหย	35.2	39.5	33.8
- คาร์บอนคงตัว	37.0	29.8	26.7
ข. dry basis[2]			
- เถ้า	10.0	22.8	30.3
- สารระเหย	43.9	44.0	39.0
- คาร์บอนคงตัว	46.1	33.2	30.7
กำมะถันรวม (%)	2.20	3.14	4.37
รูปแบบของกำมะถัน (%)[3]			
- กำมะถันไพไรต์	0.45 (20.5)	0.27 (8.6)	0.57 (13.0)
- กำมะถันซัลเฟต	0.76 (34.5)	1.32 (42.0)	1.99 (45.5)
- กำมะถันอินทรีย์	0.99 (45.0)	1.55 (49.4)	1.81 (41.5)
ค่าความร้อน (แคลอรี/กรัม)	4550	3571	3820
ศักดิ์ของถ่านหิน	ซับบิทูมินัส-ซี	ซับบิทูมินัส-ซี	ซับบิทูมินัส-ซี

หมายเหตุ 1. air-dried basis หมายถึง สภาวะที่ทิ้งตัวอย่างไว้ในบรรยากาศจนมีความชื้นอยู่ในสมดุล

2. dry basis หมายถึง สภาวะที่ไม่รวมความชื้น

3. ตัวเลขในวงเล็บ หมายถึงร้อยละของกำมะถันรูปแบบต่าง ๆ เทียบกับกำมะถันรวมในถ่านหิน

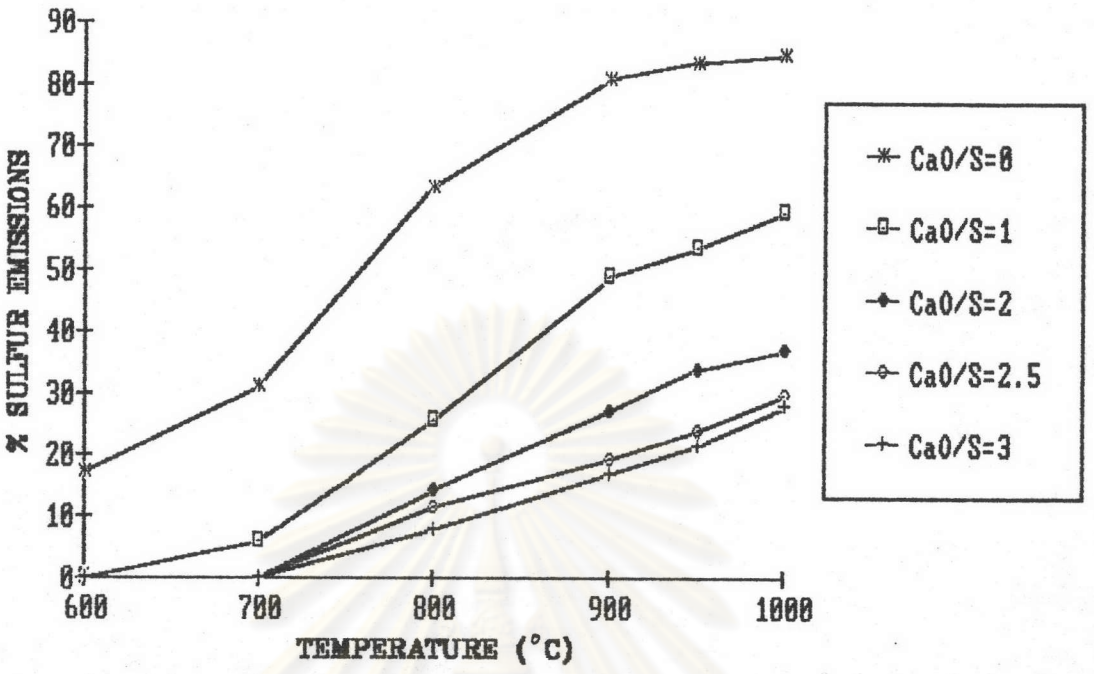
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 แสดงร้อยละของกำมะถันในถ่านหินที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ถ่านหินแม่เมาะ 1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และอัตราส่วน CaO/S Ø-3

CaO/S (โดยโมล)	% กำมะถัน					
	600 °ซ	700 °ซ	800 °ซ	900 °ซ	950 °ซ	1000 °ซ
Ø	Ø.38	Ø.68	1.39	1.77	1.83	1.86
1	Ø	Ø.13	Ø.56	1.07	1.17	1.30
2	Ø	Ø	Ø.31	Ø.59	Ø.74	Ø.81
2.5	Ø	Ø	Ø.25	Ø.42	Ø.52	Ø.65
3	Ø	Ø	Ø.17	Ø.37	Ø.47	Ø.61

ตารางที่ 4.3 แสดงร้อยละของกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ถ่านหินแม่เมาะ 1 เทียบกับกำมะถันทั้งหมด ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และอัตราส่วน CaO/S Ø-3

CaO/S (โดยโมล)	% กำมะถัน					
	600 °ซ	700 °ซ	800 °ซ	900 °ซ	950 °ซ	1000 °ซ
Ø	17.3	30.9	63.2	80.5	83.2	84.5
1	Ø	5.9	25.5	48.6	53.2	59.1
2	Ø	Ø	14.1	26.8	33.6	36.8
2.5	Ø	Ø	11.4	19.1	23.6	29.5
3	Ø	Ø	7.7	16.8	21.4	27.7



รูปที่ 4.1 แสดงผลของกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของถ่านหินแม่เมาะ 1 เทียบกับกำมะถันทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 600-1000 °ซ และอัตราส่วน CaO/S 0-3

จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิคงที่ เมื่อเพิ่มอัตราส่วน CaO/S กำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของถ่านหินลดลง เนื่องจากปูนขาวที่ใส่ไปในถ่านหินจะทำหน้าที่จับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่เกิดจากการออกซิไดซ์ของกำมะถัน ได้ผลิตภัณฑ์คือ $CaSO_4$ คงอยู่ในเถ้า จากตารางที่ 4.3 ที่อุณหภูมิ 600 °ซ เมื่อเพิ่มอัตราส่วน CaO/S = 1 สามารถขจัดกำมะถันที่ถูกปล่อยออกมาในรูปของ SO_2 ได้ทั้งหมด ส่วนที่อุณหภูมิ 700 °ซ ต้องใช้อัตราส่วน CaO/S = 2 จึงจะสามารถขจัด SO_2 ที่ปล่อยออกมาได้หมด เนื่องจาก อุณหภูมิสูงขึ้น กำมะถันที่ถูกปล่อยออกมา หรือ SO_2 ที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากขึ้น จึงต้องเพิ่มอัตราส่วนของ CaO/S

ตามทฤษฎี ที่อัตราส่วน CaO/S (โดยโมล) = 1 สามารถขจัดกำมะถันที่อยู่ในรูป SO_2 ได้หมด แต่ในความเป็นจริง CaO ไม่สามารถทำหน้าที่ดูดจับ SO_2 ได้เต็มประสิทธิภาพ ต้องใช้อัตราส่วน CaO/S มากกว่า 1 จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 800 °ซ ขึ้นไป พบว่าที่อัตราส่วน CaO/S = 3 ก็ยังไม่สามารถดูดจับ SO_2 ได้หมด เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ$CaSO_4$ เข้าไปอุดตันรูพรุนของ CaO ทำให้ความพรุน (porosity) และพื้นที่ผิวสัมผัส (surface area) ของ CaO ลดลงอย่างมาก CaO ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยามีโอกาสทำปฏิกิริยากับ SO_2 น้อยลง เป็นผลให้อัตราการดูดจับ SO_2 ในเวลาต่อมาลดลงอย่างรวดเร็ว CaO จึงถูกใช้อย่างไม่เต็มที่

สำหรับกำมะถันในถ่านหินที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของถ่านหินแม่เมาะ 2 ที่อัตราส่วน CaO/S Ø - 3 และที่อุณหภูมิ 600 - 1000 °ซ แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งเมื่อเทียบกับปริมาณกำมะถันทั้งหมดของถ่านหินแม่เมาะ 2 จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.2

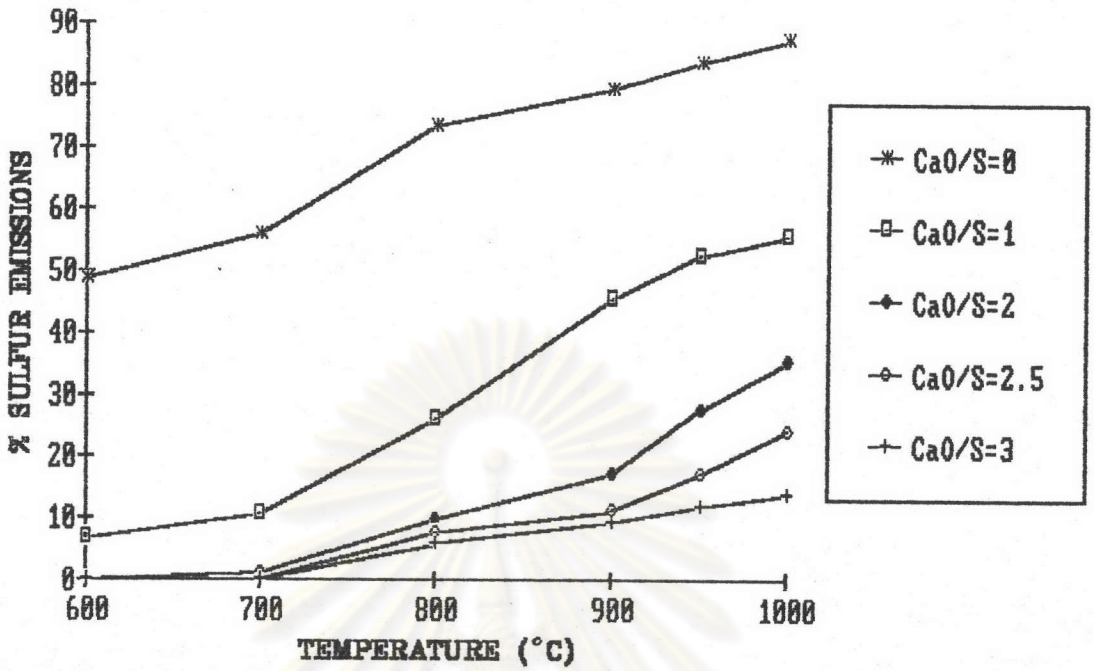
ตารางที่ 4.4 แสดงร้อยละของกำมะถันในถ่านหินที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ถ่านหินแม่เมาะ 2 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และอัตราส่วน CaO/S Ø-3

CaO/S (โดยโมล)	% กำมะถัน					
	600 °ซ	700 °ซ	800 °ซ	900 °ซ	950 °ซ	1000 °ซ
Ø	1.53	1.75	2.30	2.48	2.62	2.73
1	Ø.21	Ø.33	Ø.81	1.42	1.64	1.74
2	Ø	Ø.Ø3	Ø.3Ø	Ø.53	Ø.86	1.11
2.5	Ø	Ø	Ø.24	Ø.35	Ø.53	Ø.75
3	Ø	Ø	Ø.18	Ø.29	Ø.37	Ø.43

ตารางที่ 4.5 แสดงร้อยละของกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ถ่านหินแม่เมาะ 2 เทียบกับกำมะถันทั้งหมด ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และอัตราส่วน CaO/S Ø-3

CaO/S (โดยโมล)	% กำมะถัน					
	600 °ซ	700 °ซ	800 °ซ	900 °ซ	950 °ซ	1000 °ซ
Ø	48.7	55.7	73.2	79.Ø	83.4	86.9
1	6.7	1Ø.5	25.8	45.2	52.2	55.4
2	Ø	1.Ø	9.6	16.9	27.4	35.4
2.5	Ø	Ø	7.6	11.1	16.9	23.9
3	Ø	Ø	5.7	9.2	11.8	13.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 แสดงผลของกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของถ่านหินแม่เมาะ 2 เทียบกับกำมะถันทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 600-1000 °ซ และอัตราส่วน CaO/S Ø-3

จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิคงที่ เมื่อเพิ่มอัตราส่วน CaO/S กำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของถ่านหินลดลง และที่อุณหภูมิ 600 °ซ ใช้อัตราส่วน CaO/S = 2 ส่วนที่อุณหภูมิ 700 °ซ ใช้อัตราส่วน CaO/S = 2.5 จึงสามารถดูดจับ SO_2 ได้หมด เนื่องจากถ่านหินแม่เมาะ 2 มีปริมาณกำมะถันรวมมากกว่าถ่านหินแม่เมาะ 1 ทำให้ต้องใช้อัตราส่วน CaO/S เพิ่มขึ้น สำหรับที่อุณหภูมิ 800 °ซ ขึ้นไปมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับถ่านหินแม่เมาะ 1 กล่าวคือ แม้ว่าใช้อัตราส่วน CaO/S = 3 ก็ยังไม่สามารถดูดจับ SO_2 ที่เกิดขึ้นได้หมด

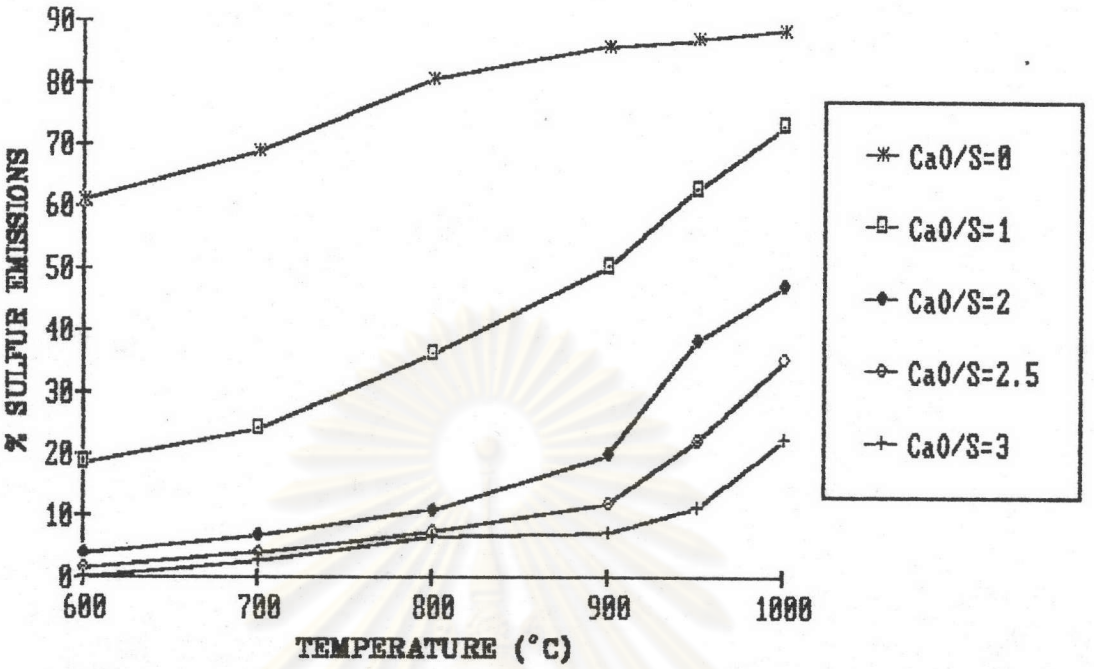
ปริมาณกำมะถันในถ่านหินที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของถ่านหินแม่เมาะ 3 ที่อัตราส่วน CaO/S Ø - 3 และที่อุณหภูมิ 600 - 1000 °ซ แสดงดังตารางที่ 4.6 ซึ่งเมื่อเทียบกับปริมาณกำมะถันทั้งหมดของถ่านหินแม่เมาะ 3 จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วน CaO/S ที่อุณหภูมิคงที่ กำมะถันที่ถูกปล่อยออกมาลดลง เช่นเดียวกับผลการทดลองของถ่านหินทั้ง 2 ตัวอย่างข้างต้น

ตารางที่ 4.6 แสดงร้อยละของกำมะถันในถ่านหินที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ถ่านหินแม่เมาะ 3 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และอัตราส่วน CaO/S Ø-3

CaO/S (โดยโมล)	% กำมะถัน					
	600 °ซ	700 °ซ	800 °ซ	900 °ซ	950 °ซ	1000 °ซ
Ø	2.66	3.00	3.51	3.74	3.79	3.85
1	Ø.81	1.04	1.57	2.18	2.73	3.18
2	Ø.17	Ø.29	Ø.47	Ø.86	1.66	2.05
2.5	Ø.06	Ø.17	Ø.32	Ø.52	Ø.96	1.53
3	Ø	Ø.11	Ø.28	Ø.31	Ø.49	Ø.97

ตารางที่ 4.7 แสดงร้อยละของกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ถ่านหินแหล่งแม่เมาะ 3 เทียบกับกำมะถันทั้งหมด ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และอัตราส่วน CaO/S Ø-3

CaO/S (โดยโมล)	% กำมะถัน					
	600 °ซ	700 °ซ	800 °ซ	900 °ซ	950 °ซ	1000 °ซ
Ø	60.9	68.6	80.3	85.6	86.7	88.1
1	18.5	23.8	35.9	49.9	62.5	72.8
2	3.9	6.6	10.8	19.7	38.0	46.9
2.5	1.4	3.9	7.3	11.9	22.0	35.0
3	Ø	2.5	6.4	7.1	11.2	22.2



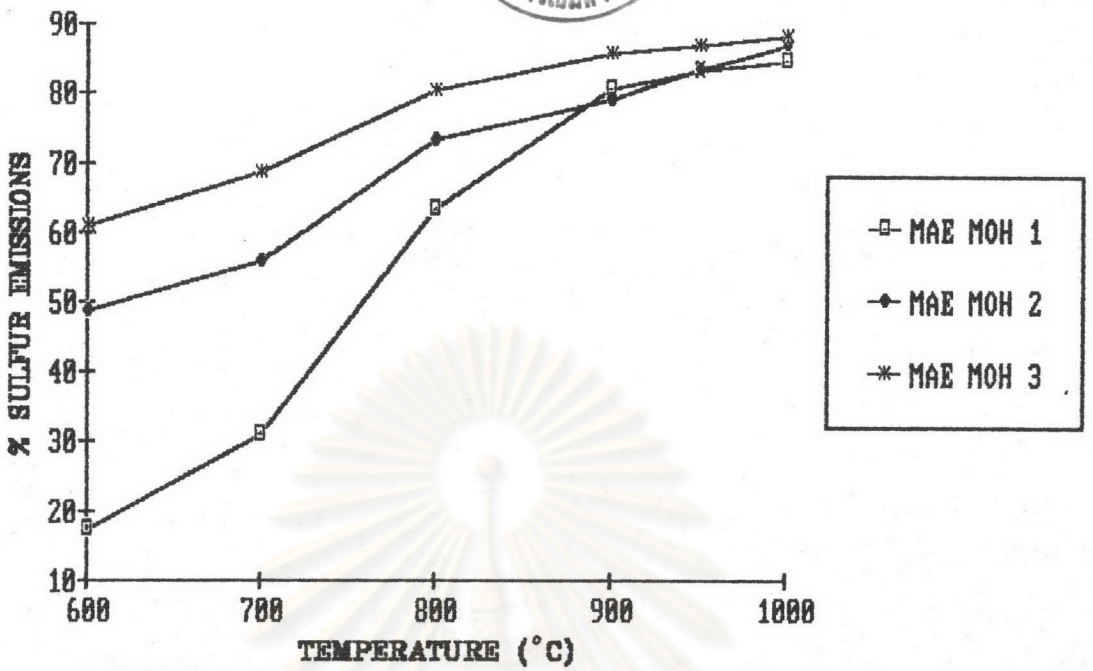
รูปที่ 4.3 แสดงผลของกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของถ่านหินแม่เมาะ 3 เทียบกับกำมะถันทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 600-1000 °ซ และอัตราส่วน CaO/S 0-3

จากตารางที่ 4.7 ที่อุณหภูมิ 600 °ซ อัตราส่วน CaO/S = 3 สามารถดูดจับ SO_2 ที่เกิดขึ้นได้หมด ส่วนที่อุณหภูมิ 700 - 1000 °ซ ที่อัตราส่วนเดียวกันไม่สามารถดูดจับ SO_2 ได้หมด เพียงแต่ทำให้ SO_2 ที่ปล่อยออกมาลดลงเท่านั้น

การวิเคราะห์ผลของถ่านหินแม่เมาะ 3 ตัวอย่างข้างต้น พบว่าปูนขาวที่ใส่ลงไปในถ่านหิน ทำให้กำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของถ่านหินลดลง ถ้าเพิ่มอัตราส่วน CaO/S (โดยโมล)มากขึ้น กำมะถันในก๊าซหรือ SO_2 จะมีปริมาณลดลง

4.1.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ในช่วง 600-1000 °ซ ปริมาณกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของถ่านหิน เทียบกับกำมะถันทั้งหมด เมื่อยังไม่ได้เติมปูนขาว ที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงร้อยละของกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของถ่านหิน เทียบกับกำมะถันทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 600-1000 °ซ

จากรูปจะเห็นว่า ถ่านหินแม่เมาะทั้ง 3 ตัวอย่าง มีแนวโน้มคล้ายกัน กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาจะเพิ่มขึ้น โดยที่ถ่านหินแม่เมาะ 3 ซึ่งมีปริมาณกำมะถันรวมเริ่มต้นมากกว่า จะปล่อยกำมะถันออกมาหรือ SO_2 มากขึ้นด้วย และสามารถแบ่งปริมาณการปล่อยกำมะถันออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรก (อุณหภูมิ 600-800 °ซ) มีปริมาณการปล่อยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนช่วงที่สอง (อุณหภูมิ 800-900 °ซ) มีปริมาณการปล่อยลดน้อยลงกว่าช่วงแรก และคงที่ที่ช่วงสุดท้าย (อุณหภูมิ 900-1000 °ซ)

4.2 <u>การศึกษาหาอัตราส่วน CaO/S (โดยโมล) และอุณหภูมิที่เหมาะสม</u>

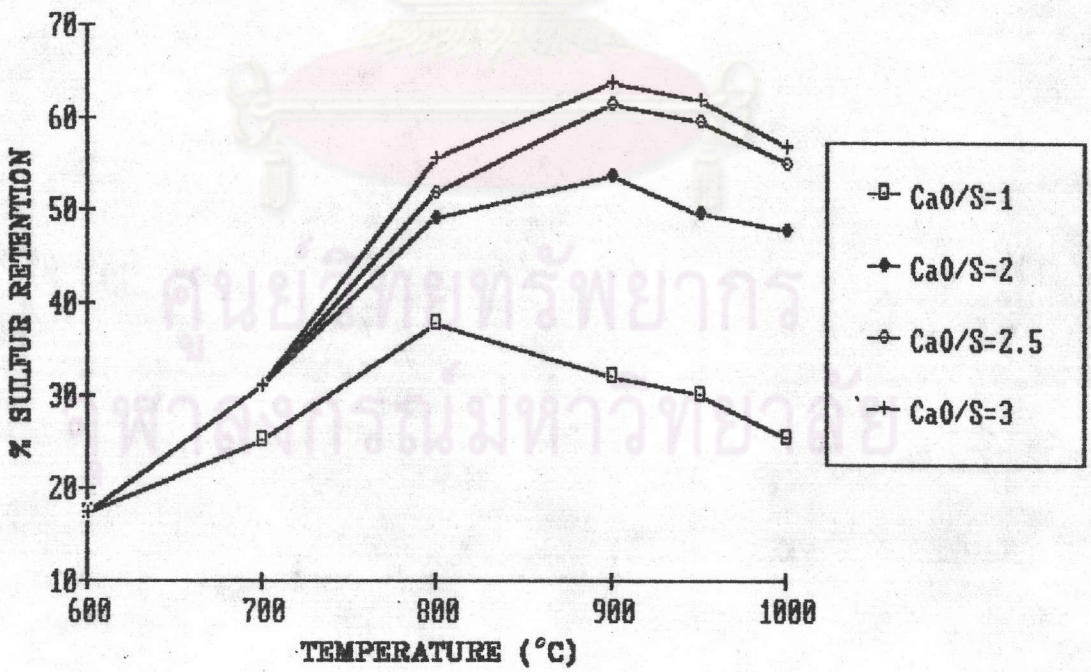
จากการเปรียบเทียบ ร้อยละกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมาของถ่านหินที่ไม่ได้เติมปูนขาว (CaO/S = 0) กับถ่านหินที่เติมปูนขาวในอัตราส่วนต่างๆกัน พบว่าเมื่อเติมปูนขาว กำมะถันถูกปล่อยออกมาน้อยลง ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ (ซึ่งถือได้ว่าเกิดขึ้น เนื่องจากปูนขาวทำหน้าที่ดูดจับกำมะถัน) แสดงเป็นค่าปริมาณกำมะถันในก๊าซที่ถูกดูดจับโดยปูนขาว รายละเอียดในการคำนวณแสดงในภาคผนวก ช

ปริมาณกำมะถันในก๊าซที่ถูกดูดจับโดยปูนขาวในถ่านหินแม่เมาะ 1 แสดงได้ดังตารางที่

4.8 และ รูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.8 แสดงร้อยละของกำมะถันในก๊าซที่ถูกดูดจับโดยปูนขาวในถ่านหินแม่เมาะ 1 เทียบกับกำมะถันทั้งหมด ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และอัตราส่วน CaO/S 1-3

CaO/S (โดยโมล)	% กำมะถัน					
	600 °ซ	700 °ซ	800 °ซ	900 °ซ	950 °ซ	1000 °ซ
1	17.3	25.0	37.7	31.9	30.0	25.4
2	17.3	30.9	49.1	53.7	49.6	47.7
2.5	17.3	30.9	51.8	61.4	59.5	55.0
3	17.3	30.9	55.5	63.7	61.8	56.8



รูปที่ 4.5 แสดงร้อยละของกำมะถันในก๊าซที่ถูกดูดจับโดยปูนขาวในถ่านหินแม่เมาะ 1 เทียบกับกำมะถันทั้งหมด ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

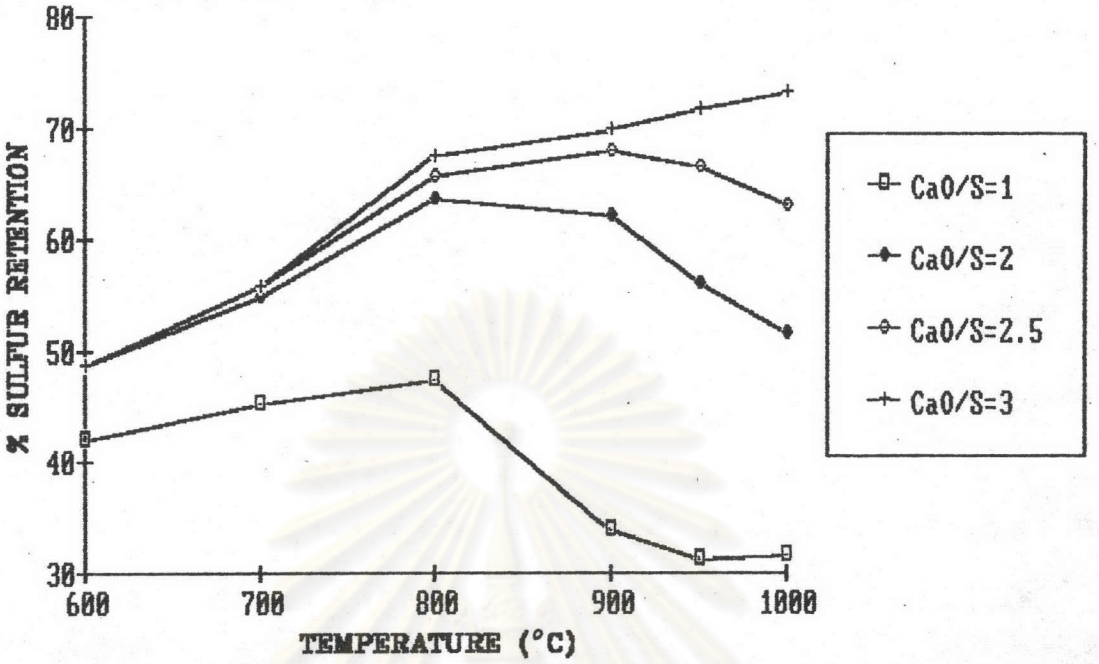
จากรูปจะเห็นว่า ที่อัตราส่วน 2 ,2.5 และ 3 มีอัตราการดูดจับกำมะถันที่ปล่อยออกมาหรือ SO_2 ใกล้เคียงกัน ในทางปฏิบัติไม่จำเป็นต้องเลือกใช้อัตราส่วน CaO/S ที่มีค่ามากที่สุด แต่ควรเลือกใช้อัตราส่วน CaO/S ที่พอเหมาะที่สามารถขจัดกำมะถันได้ เนื่องจากการเติมปูนขาวจะเพิ่มค่าใช้จ่ายและทำให้ค่าความร้อนของถ่านหินในการใช้งานต่ำลง ดังนั้นอัตราส่วน CaO/S ที่เหมาะสมคือ 2-2.5 และอุณหภูมิที่มีการดูดจับกำมะถันดีที่สุดคือ 900 °ซ

สำหรับถ่านหินแม่เมาะ 2 อัตราการดูดจับกำมะถันในก๊าซที่ปล่อยออกมาโดยปูนขาวสามารถแสดงดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.9 แสดงร้อยละของกำมะถันในก๊าซที่ถูกดูดจับโดยปูนขาวในถ่านหินแม่เมาะ 2 เทียบกับกำมะถันทั้งหมด ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และอัตราส่วน CaO/S 1-3

CaO/S	% กำมะถัน					
(โดยโมล)	600 °ซ	700 °ซ	800 °ซ	900 °ซ	950 °ซ	1000 °ซ
1	42.0	45.2	47.4	33.8	31.2	31.5
2	48.7	54.7	63.6	62.1	56.0	51.5
2.5	48.7	55.7	65.6	67.9	66.5	63.0
3	48.7	55.7	67.5	69.8	71.6	73.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 แสดงร้อยละของกำมะถันในก๊าซที่ถูกดูดจับโดยปูนขาวในถ่านหินแม่เมาะ 2 เทียบกับกำมะถันทั้งหมด ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปจะเห็นว่า ที่อัตราส่วน 2, 2.5 และ 3 กราฟที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปที่ 4.5 และจากเหตุผลข้างต้น อัตราส่วน CaO/S ที่เหมาะสมในการดูดจับกำมะถันในก๊าซได้ดี คือ 2-2.5 ที่อุณหภูมิช่วง 800-900 °ซ

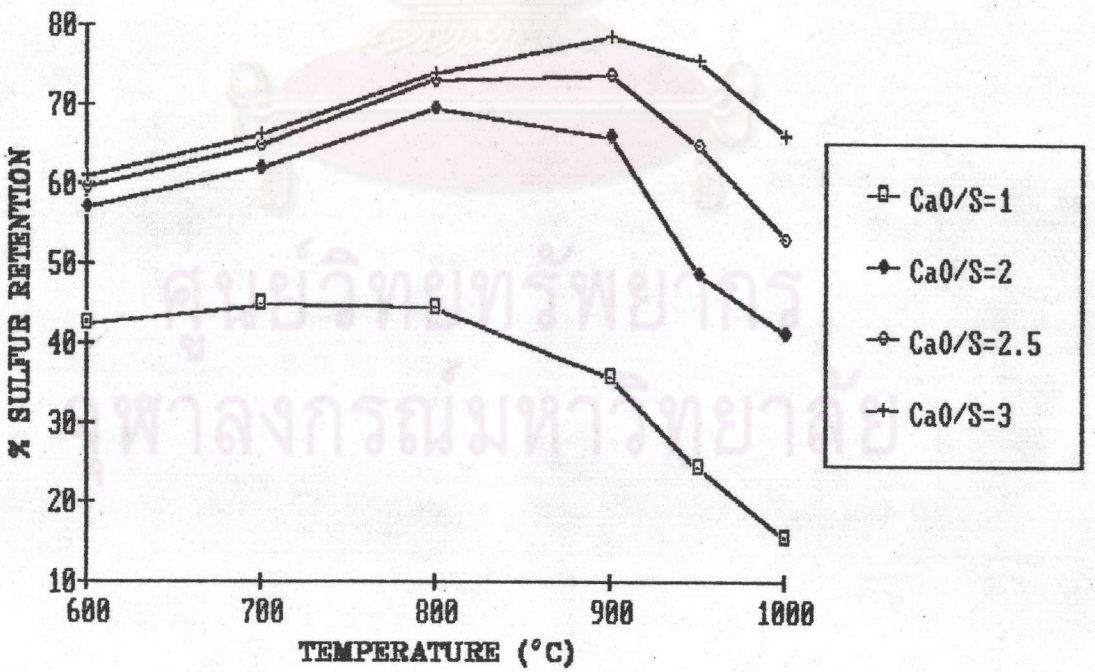
ส่วนถ่านหินแม่เมาะ 3 อัตราการดูดจับกำมะถันในก๊าซที่ปล่อยออกมาโดยปูนขาว แสดงดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I10308143

ตารางที่ 4.10 แสดงร้อยละของกำมะถันในก๊าซที่ถูกดูดจับโดยปูนขาวในถ่านหินแม่เมาะ 3 เทียบกับกำมะถันทั้งหมด ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และอัตราส่วน CaO/S 1-3

CaO/S (โดยโมล)	% กำมะถัน					
	600 °ซ	700 °ซ	800 °ซ	900 °ซ	950 °ซ	1000 °ซ
1	42.4	44.8	44.4	35.7	24.2	15.3
2	57.0	62.0	69.5	65.9	48.7	41.2
2.5	59.5	64.7	73.0	73.7	64.7	53.1
3	60.9	66.1	73.9	78.5	75.5	65.9



รูปที่ 4.7 แสดงร้อยละของกำมะถันในก๊าซที่ถูกดูดจับโดยปูนขาวของถ่านหินแม่เมาะ 3 เทียบกับกำมะถันทั้งหมด ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

พบว่าแนวโน้มของข้อมูลและกราฟจะคล้ายคลึงกับกับถ่านหิน 2 ตัวอย่างข้างต้น ดังนั้น อัตราส่วน CaO/S ที่เหมาะสมคือ 2-2.5 ที่อุณหภูมิ 800-900 °ซ

เมื่อเปรียบเทียบถ่านหินแหล่งแม่เมาะทั้ง 3 ตัวอย่างซึ่งมีปริมาณกำมะถันรวมในถ่านหินแตกต่างกัน การใช้ปูนขาวที่มีอัตราส่วน CaO/S (โดยโมล) ที่เหมาะสมทั้ง 3 ตัวอย่าง จะอยู่ในช่วง 2-2.5 ที่อุณหภูมิช่วง 800-900 °ซ

4.3 <u>การศึกษาลำดับและชนิดของปฏิกิริยาตลอดจนสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา ระหว่างปูนขาวกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์</u>

งานวิจัยในส่วนนี้ทำโดยเก็บรวบรวมถ่านหินแหล่งแม่เมาะ 3 ตัวอย่าง และเถ้าที่ได้จากการเผาถ่านหินในหลอดแก้วควอร์ตซ์ นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction spectrometer เพื่อหาองค์ประกอบของแร่ ใช้ในการทำนายขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ผลการวิเคราะห์ถ่านหินแหล่งแม่เมาะ ด้วยเทคนิคทาง X-ray diffraction แสดงดังตารางที่ 4.11

<u>ตารางที่ 4.11</u> แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุในถ่านหินแหล่งแม่เมาะ

ถ่านหินแม่เมาะ	Quartz SiO_2	Gypsum $CaSO_4.2H_2O$	Pyrite FeS_2	Illite *
1	+	+	+	
2	+	+	+	+
3	+	+		+

หมายเหตุ * คือ K-Na-Mg-Fe-Al-Si-O-H_2O

\+ คือ แร่ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาง X-ray diffraction

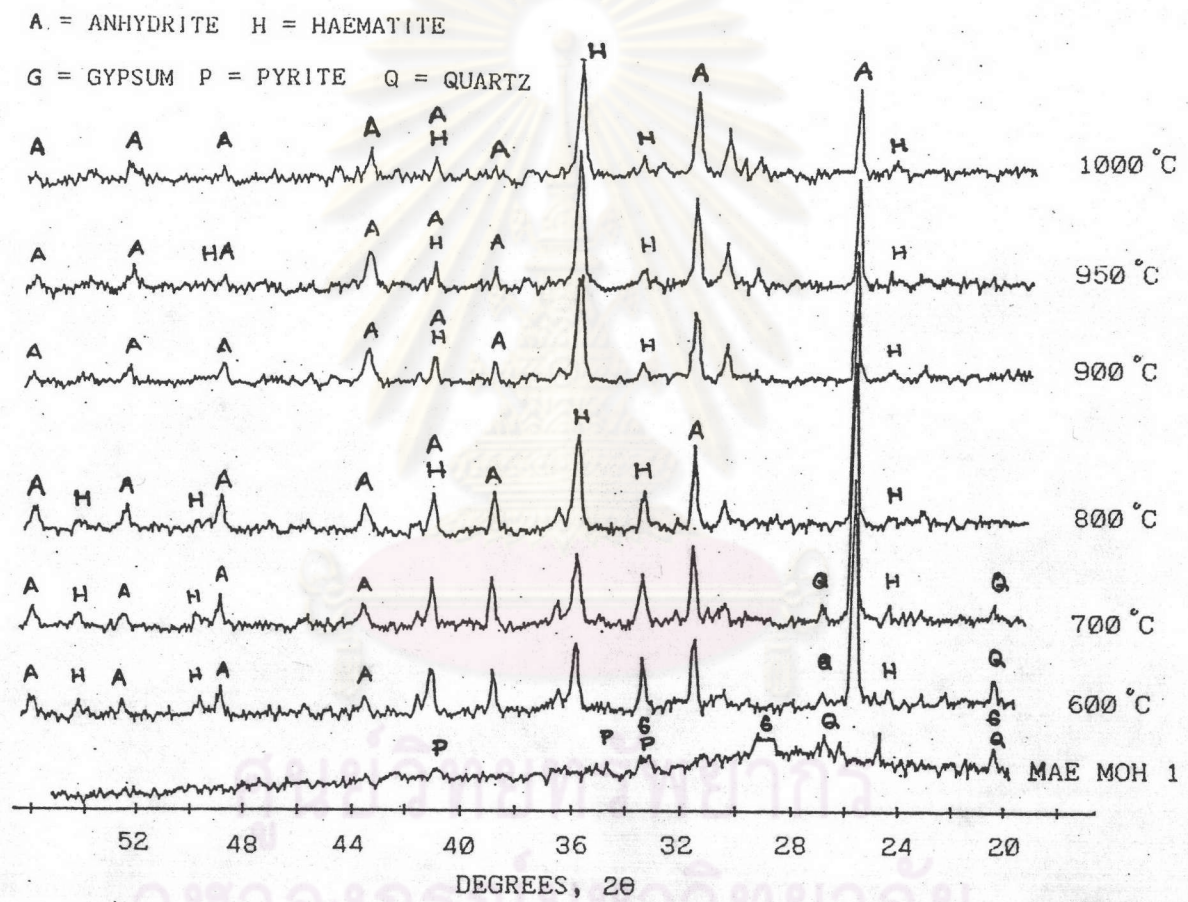
จากตารางจะเห็นว่า ถ่านหินทั้ง 3 ตัวอย่างมีองค์ประกอบที่เหมือนกันคือ ควอร์ตซ์และยิบซัม ไพไรต์มีในถ่านหินแม่เมาะ 1 และ 2 ส่วนอิลไลต์พบในถ่านหินแม่เมาะ 2 และ 3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

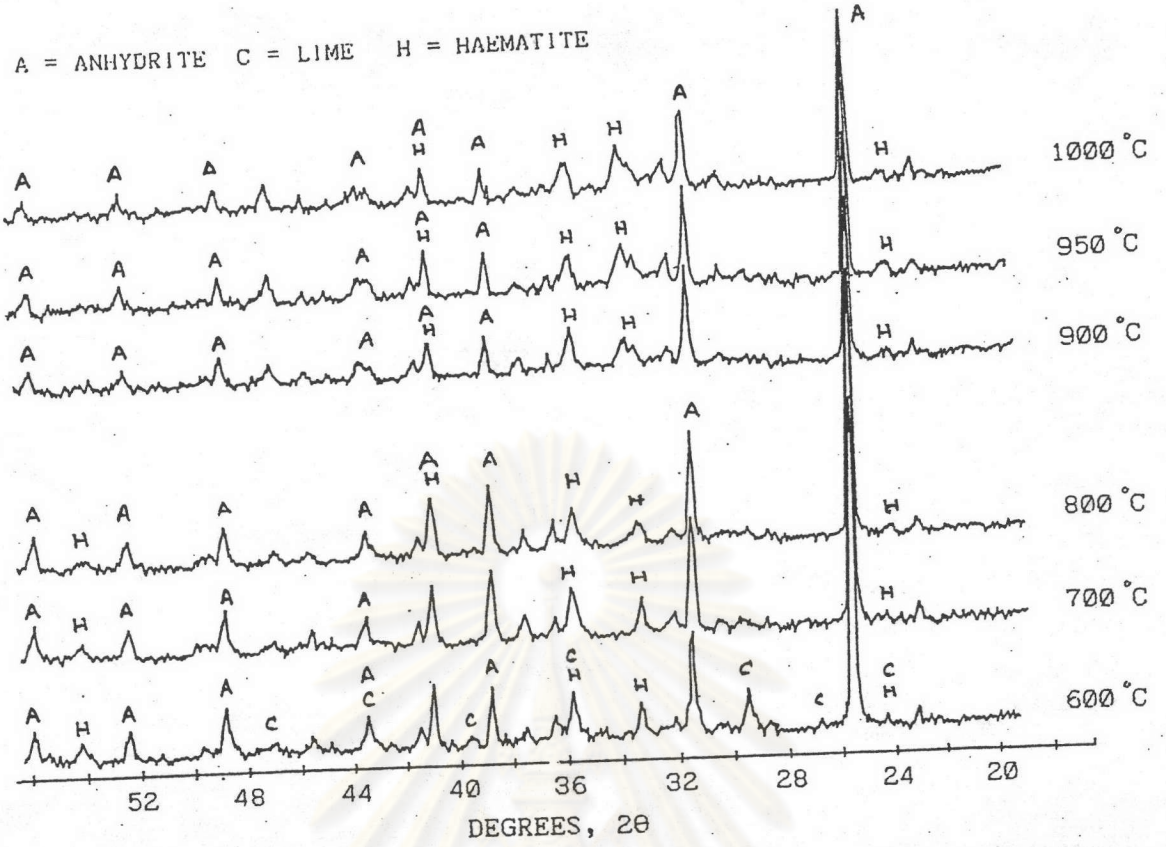
สำหรับผลการวิเคราะห์เถ้า มีรายละเอียดดังนี้คือ

4.3.1 เถ้าถ่านหินแม่เมาะ 1

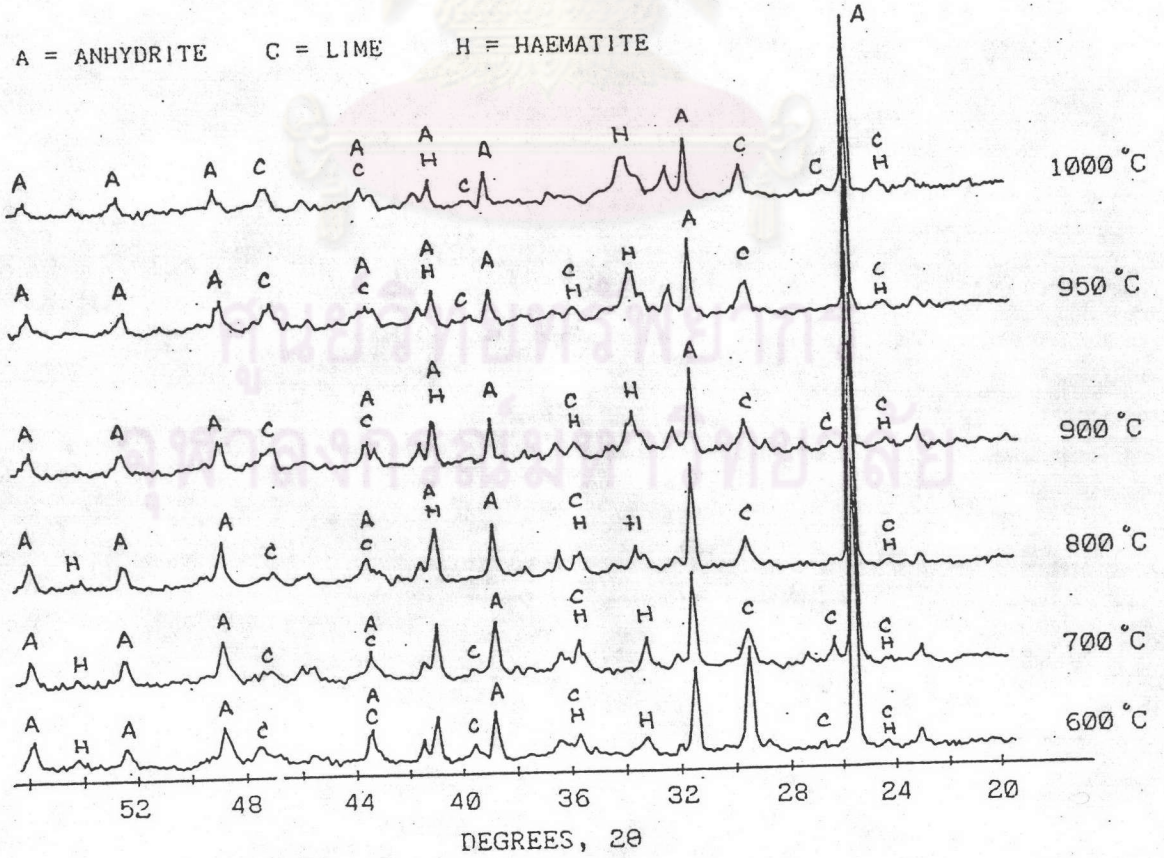
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุในเถ้าถ่านหิน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.8 โดยมีอัตราส่วน CaO/S = 0 ส่วนที่อัตราส่วน CaO/S = 1 แสดงดังรูปที่ 4.9 และที่อัตราส่วน CaO/S = 2 แสดงดังรูปที่ 4.10 เมื่อนำผลวิเคราะห์ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันจะได้ผลตามตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ในถ่านหินแหล่งแม่เมาะ 1 และเถ้าถ่านหินที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ในเถ้าถ่านหินแหล่งแม่เมาะ 1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีอัตราส่วน CaO/S = 1



รูปที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ในเถ้าถ่านหินแหล่งแม่เมาะ 1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีอัตราส่วน CaO/S = 2

ตารางที่ 4.12 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุในเถ้าถ่านหินแม่เมาะ 1

อุณหภูมิ (°ซ)	อัตราส่วน CaO/S (โดยโมล)	Anhydrite $CaSO_4$	Haematite Fe_2O_3	Quartz SiO_2	Lime CaO
600	0	+	+	+	
	1	+	+		+
	2	+	+		+
700	0	+	+	+	
	1	+	+		
	2	+	+		+
800	0	+	+		
	1	+	+		
	2	+	+		+
900	0	+	+		
	1	+	+		
	2	+	+		+
950	0	+	+		
	1	+	+		
	2	+	+		+
1000	0	+	+		
	1	+	+		
	2	+	+		+

หมายเหตุ + คือแร่ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาง X-ray diffraction

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.12 จะเห็นว่า พบแอนไฮไดรต์ ($CaSO_4$) และฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) ทุกช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาระหว่าง 600-1000 °ซ และทุกอัตราส่วน CaO/S ระหว่าง 0-2 แอนไฮไดรต์ที่พบเกิดมาจากสาเหตุ 2 ประการ คือ

1. การสลายตัวทางความร้อนของยิบซัม ($CaSO_4.2H_2O$) ที่มีอยู่ในถ่านหิน ได้บาสแซนไนต์ ($CaSO_4.1/2H_2O$) ตามสมการที่ (4.1)

$$CaSO_4.2H_2O \text{ ------> } CaSO_4.1/2H_2O + 3/2H_2O \quad ....(4.1)$$

เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 200 °ซ บาสแซไนต์สลายตัวได้แอนไฮไดรต์และน้ำ ตามสมการที่ (4.2)

$$CaSO_4.1/2H_2O \text{ ------> } CaSO_4 + 1/2H_2O \quad .....(4.2)$$

2. การรวมตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับแคลเซียมออกไซด์ (Lime, CaO) ได้แอนไฮไดรต์ตามสมการที่ (4.3)

$$CaO + SO_2 + 1/2O_2 \text{ ------> } CaSO_4 \quad .....(4.3)$$

แคลเซียมออกไซด์ดังกล่าวมาจาก 2 ทางคือ

2.1 ปูนขาวที่เติมในถ่านหินในอัตราส่วน(โดยโมล) CaO/S 1-2

เมื่อพิจารณาดูลักษณะของพีค (peak) ของแอนไฮไดรต์ในรูปที่ 4.9 (เติมปูนขาวในอัตราส่วน CaO/S =1) เทียบกับรูปที่ 4.8 (ไม่เติมปูนขาว) จะเห็นว่าพีคมีความสูงเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีส่วนหนึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง CaO กับ SO_2 ที่ได้จากการถูกออกซิไดซ์ของไพไรต์

2.2 การสลายตัวทางความร้อนของแคลไซต์ ($CaCO_3$) ในถ่านหินที่อุณหภูมิ 600-700 °ซ ตามสมการ (4.4)

$$CaCO_3 \text{ ------> } CaO + CO_2 \quad .....(4.4)$$

แต่จากการวิเคราะห์ถ่านหินด้วยเทคนิคทาง X-ray diffraction ไม่พบแคลไซต์ซึ่งแสดงว่าอาจมีแคลไซต์อยู่ในปริมาณที่น้อยกว่า 5 % เมื่อเทียบกับองค์ประกอบทั้งหมด จึงไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีดังกล่าว ด้วยเหตุเดียวกันนี้ จึงตรวจไม่พบ CaO ในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาด้วย

ฮีมาไทต์ที่พบในตารางที่ 4.12 เกิดจากการออกซิเดชันของไพไรต์ (ซึ่งพบในถ่านหิน) ที่อุณหภูมิประมาณ 500 °ซ ขึ้นไป ตามสมการ (4.5)

$$2FeS_2 + 11/2O_2 \text{ ------> } Fe_2O_3 + 4SO_2 \quad .....(4.5)$$

ควอร์ตซ์ซึ่งเป็นแร่ที่พบในถ่านหิน จะเห็นว่าพบในเถ้าถ่านหิน (ไม่เติมปูนขาว) ในช่วงอุณหภูมิ 600-700 °ซ เท่านั้น เนื่องจากอาจมีควอร์ตซ์อยู่ในปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับองค์

ประกอบทั้งหมด

เมื่อเติมปูนขาวในถ่านหินแม่เมาะ 1 ที่อัตราส่วน CaO/S 1-2 จากผลการวิเคราะห์สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

4.3.1.2 อัตราส่วน CaO/S = 1

จะเห็นว่ามี CaO ที่อุณหภูมิ 600 °ซ เท่านั้น เมื่อพิจารณาตามตารางที่ 4.3 พบว่ากำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมา ถูกดูดจับด้วยปูนขาวหมด ดังนั้น CaO ที่พบน่าจะเป็นส่วนที่ยังเหลืออยู่ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำ การปลดปล่อยก๊าซ SO_2 จากถ่านหินยังไม่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 700-1000 °ซ CaO ทำปฏิกิริยามากขึ้นจึงพบ CaO ในความเข้ม (intensity) ที่น้อยมากจนแทบไม่มีลักษณะของพีคปรากฏอยู่ แต่ก็ยังพบกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมา (ตารางที่4.3) ในกรณีเช่นนี้พิจารณาได้ 2 แบบ กล่าวคือ

1. CaO ที่เติม ทำปฏิกิริยากับ SO_2 หมด โดยไม่มีการอุดตันรูพรุนของ CaO ด้วย $CaSO_4$ ที่เกิดขึ้น

ถ้าเป็นไปตามข้อสันนิษฐานนี้ CaO ควรจะดูดจับ SO_2 ได้เต็มที่ด้วยตัวเลขที่คงที่ แต่เมื่อพิจารณาตามตารางที่ 4.8 ซึ่งแสดงร้อยละกำมะถันในก๊าซที่ถูกดูดจับโดยปูนขาว ที่อัตราส่วน CaO/S = 1 จะเห็นว่าไม่มีค่าตัวเลขที่คงที่เลย ดังนั้นข้อสันนิษฐานนี้ไม่เป็นจริง

2. CaO ยังหลงเหลืออยู่ในปริมาณน้อยและมีการอุดตันรูพรุนของ CaO ด้วย $CaSO_4$ ที่เกิดขึ้น

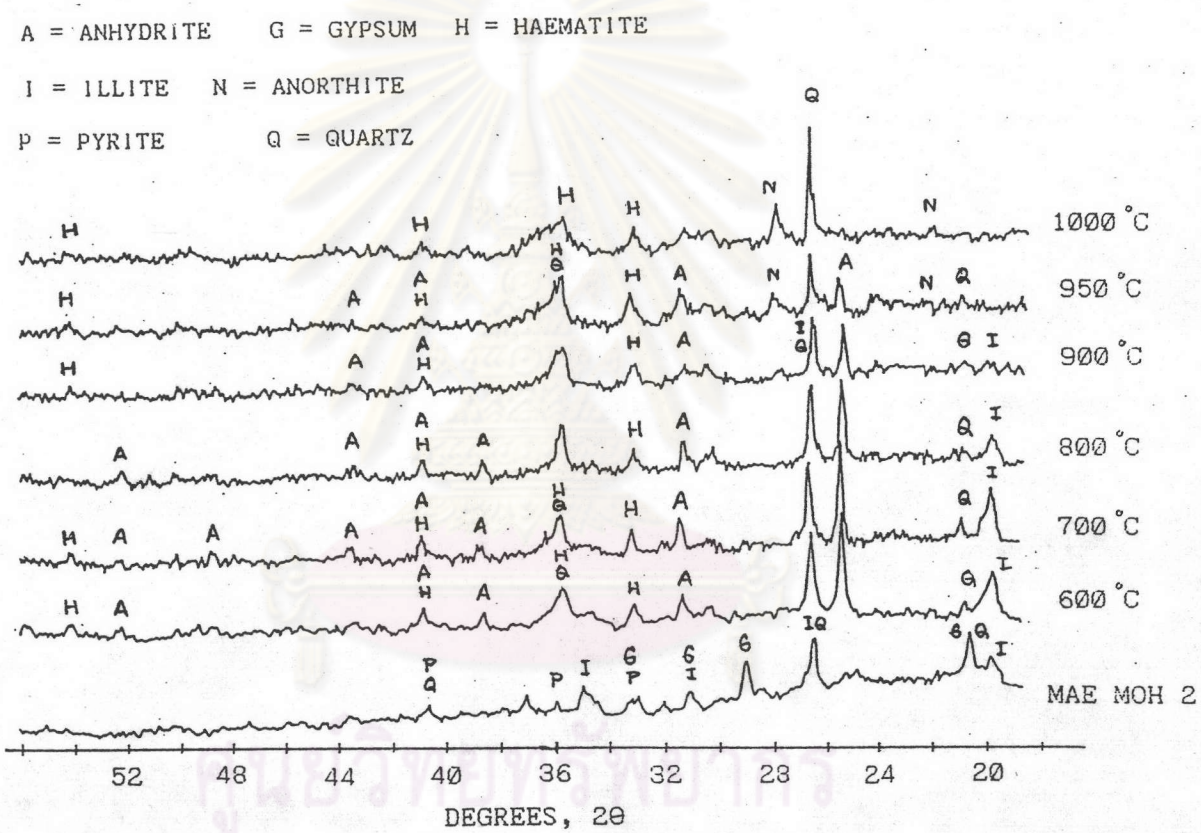
เครื่อง X-ray diffraction spectrometer จะไม่แสดงลักษณะของพีคปรากฏชัดเจน ถ้าหากว่ามีองค์ประกอบแร่ธาตุนั้นน้อยกว่า 5 % เทียบกับองค์ประกอบทั้งหมด ดังนั้นอาจเป็นไปได้ที่ยังมี CaO เหลืออยู่ ส่วนการที่สันนิษฐานว่ามีการอุดตันรูพรุนของ CaO เนื่องจากเมื่อพิจารณาตามตารางที่ 4.8 พบว่าการดูดจับกำมะถันในก๊าซด้วย CaO สูงสุดที่อุณหภูมิ 800 °ซ และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 800 °ซ

4.3.1.2 อัตราส่วน CaO/S = 2

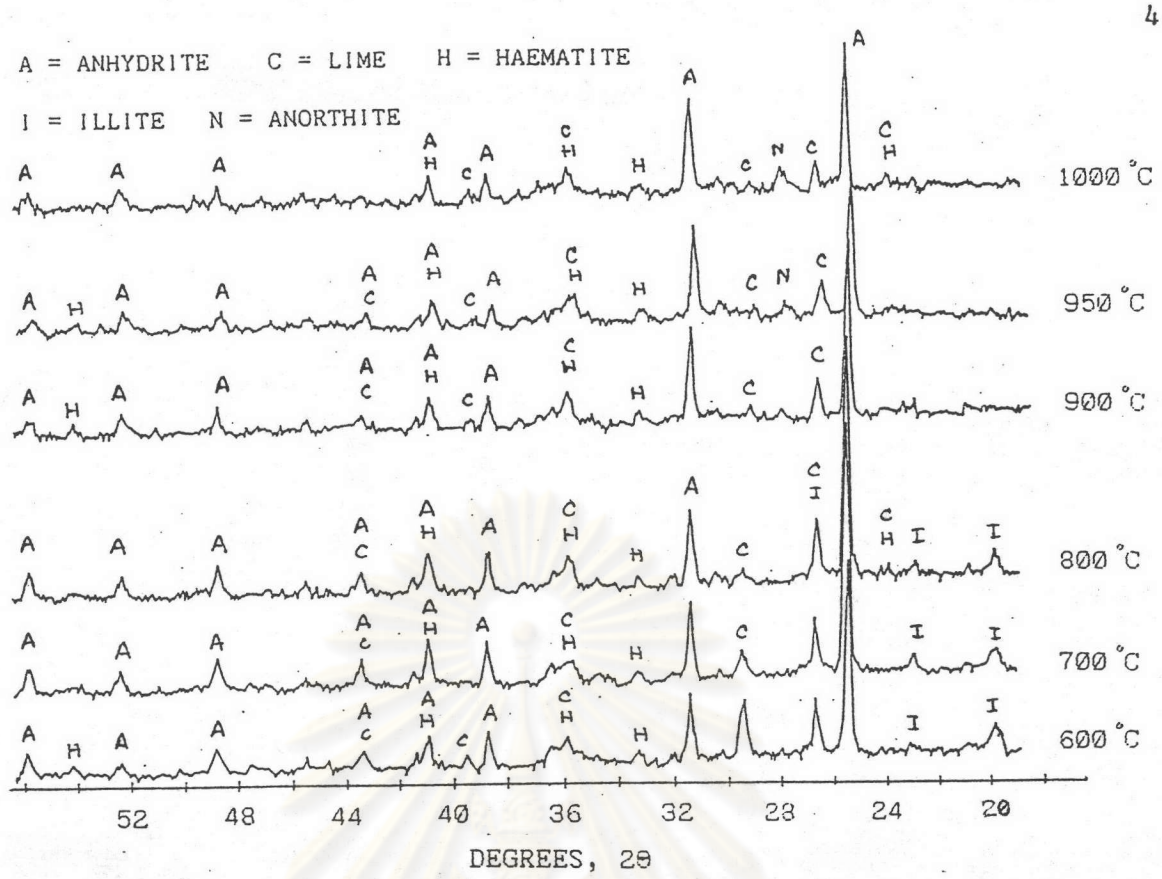
เมื่อพิจารณาตามตารางที่ 4.3 ที่อุณหภูมิ 600-700 °ซ พบว่ากำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมา ถูกดูดจับด้วยปูนขาวได้หมด ดังนั้น CaO ที่พบ เป็นส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับ SO_2 ส่วนที่อุณหภูมิ 800-1000 °ซ ยังมีกำมะถันในก๊าซที่ถูกปล่อยออกมา CaO ที่พบ เป็นส่วนที่อยู่ภายในอนุภาคที่ผิวภายนอกถูกอุดตันด้วย $CaSO_4$ หมดแล้ว

4.3.2 เถ้าถ่านหินแม่เมาะ 2

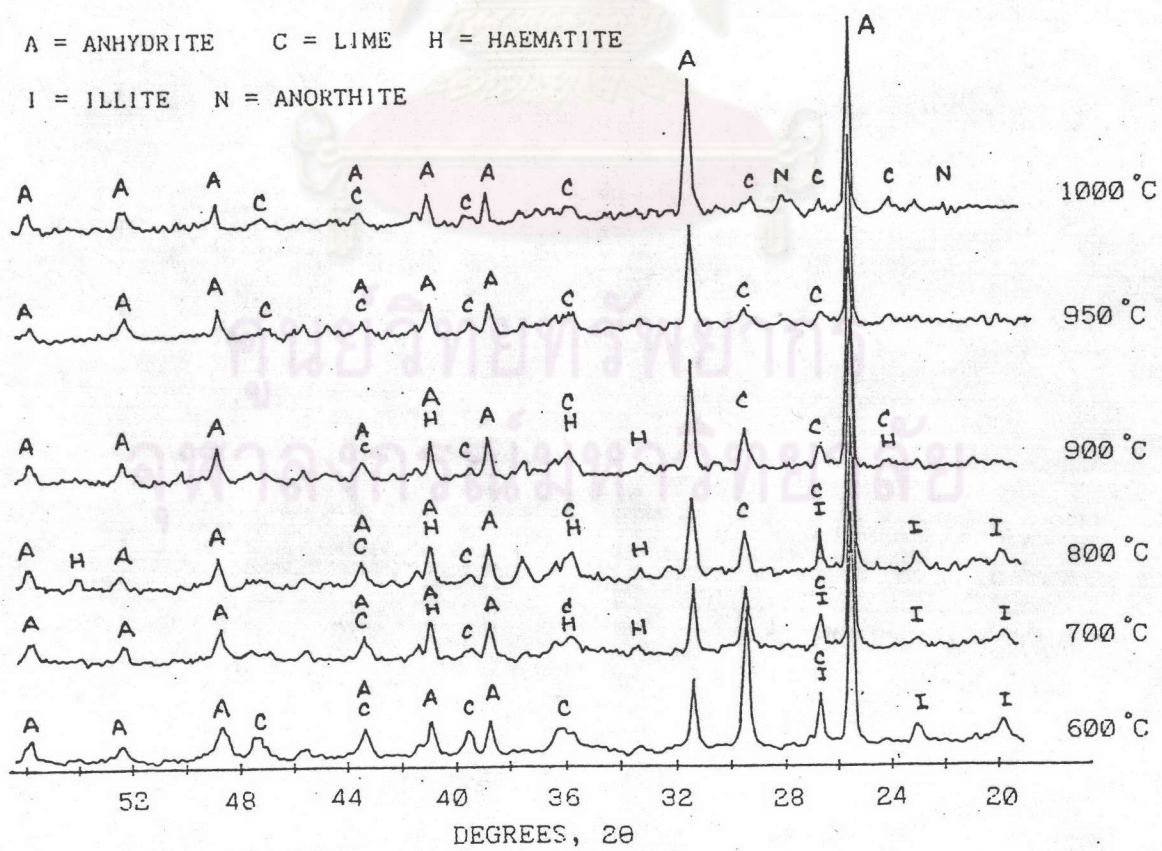
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุในเถ้าถ่านหิน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.11 โดยมีอัตราส่วน CaO/S = Ø ส่วนที่อัตราส่วน CaO/S = 1 แสดงดังรูปที่ 4.12 และที่อัตราส่วน CaO/S = 2 แสดงดังรูปที่ 4.13 เมื่อนำผลวิเคราะห์ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกัน จะได้ผลตามตารางที่ 4.13



รูปที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ในถ่านหินแหล่งแม่เมาะ 2 และเถ้าถ่านหินที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ในเถ้าถ่านหินแหล่งแม่เมาะ 2 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีอัตราส่วน CaO/S = 1



รูปที่ 4.13 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ในเถ้าถ่านหินแหล่งแม่เมาะ 2 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีอัตราส่วน CaO/S = 2

ตารางที่ 4.13 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุในเถ้าถ่านหินแม่เมาะ 2

อุณหภูมิ (°ซ)	อัตราส่วน CaO/S (โดยโมล)	Anhydrite $CaSO_4$	Haematite Fe_2O_3	Quartz SiO_2	Illite *	Lime CaO	Anorthite $CaAl_2Si_2O_8$
600	0	+	+	+	+		
	1	+	+		+	+	
	2	+			+	+	
700	0	+	+	+	+		
	1	+	+		+	+	
	2	+	+		+	+	
800	0	+	+	+	+		
	1	+	+		+	+	
	2	+	+		+	+	
900	0	+	+	+	+		
	1	+	+			+	
	2	+	+			+	
950	0	+	+	+			+
	1	+	+			+	+
	2	+				+	
1000	0		+	+			+
	1	+	+			+	+
	2	+				+	+

หมายเหตุ * คือ K-Na-Mg-Fe-Al-Si-O-H_2O

\+ คือ แร่ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาง X-ray diffraction

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.13 จะเห็นว่าแอนไฮไดรต์และฮีมาไทต์ยังคงพบเป็นส่วนใหญ่เช่นเดียวกับแม่เมาะ 1 ควอร์ตซ์ (เป็นแร่ที่พบในถ่านหิน) พบในเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้เติมปูนขาว ในช่วงอุณหภูมิ 600-1000 °ซ แร่ธาตุที่พบแตกต่างจากแม่เมาะ 1 คือ อิลไลต์ ($K-Na-Mg-Fe-Al-Si-O-H_2O$) และแอนนอไทต์ ($CaAl_2Si_2O_8$) อิลไลต์ซึ่งพบในถ่านหิน ยังคงมีอยู่ในเถ้าถ่านหินที่อุณหภูมิ 600-900 °ซ ส่วนแอนนอไทต์ที่พบในช่วงอุณหภูมิ 950-1000 °ซ น่าจะเกิดจากสาเหตุ 2 ประการ คือ

1. การจัดรูปผลึกใหม่ของอิลไลต์ที่อุณหภูมิสูง
2. เกเลไนต์($Ca_2Al_2SiO_7$) ที่อาจพบที่อุณหภูมิมากกว่า 900 °ซ ตามสมการ (4.6) มีการจัดรูปผลึกใหม่ได้เป็นแอนนอไทต์

$$2CaO + SiO_2 + Al_2O_3 \text{ ------> } Ca_2Al_2SiO_7 \quad ....(4.6)$$

เมื่อเติมปูนขาวในถ่านหินแม่เมาะ 2 ที่อัตราส่วน CaO/S 1-2 จากผลการวิเคราะห์สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

4.3.2.1 อัตราส่วน CaO/S = 1

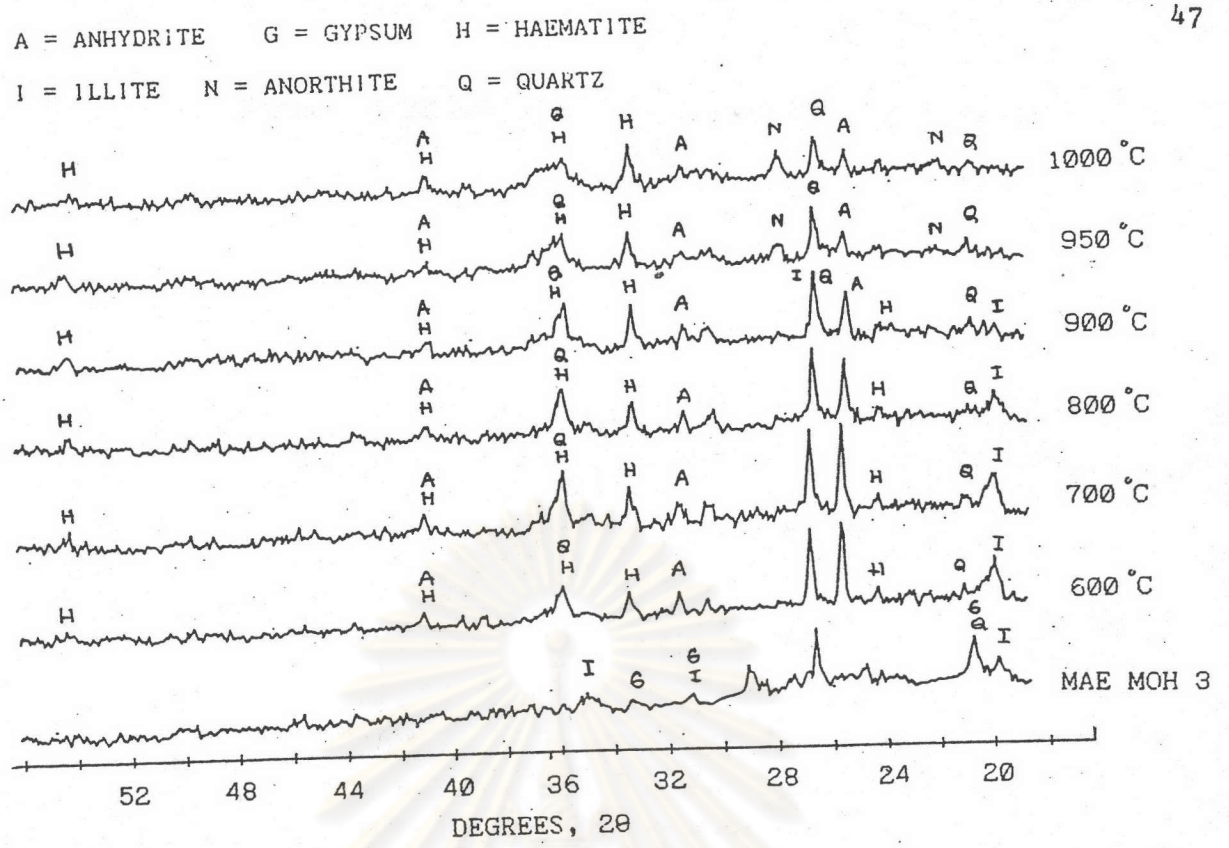
CaO ที่พบในช่วงอุณหภูมิ 600-1000 °ซ เป็นส่วนที่อุดตันด้วย $CaSO_4$ ซึ่งพิจารณาในทำนองเดียวกับ เถ้าถ่านหินแม่เมาะ 1

4.3.2.2 อัตราส่วน CaO/S = 2

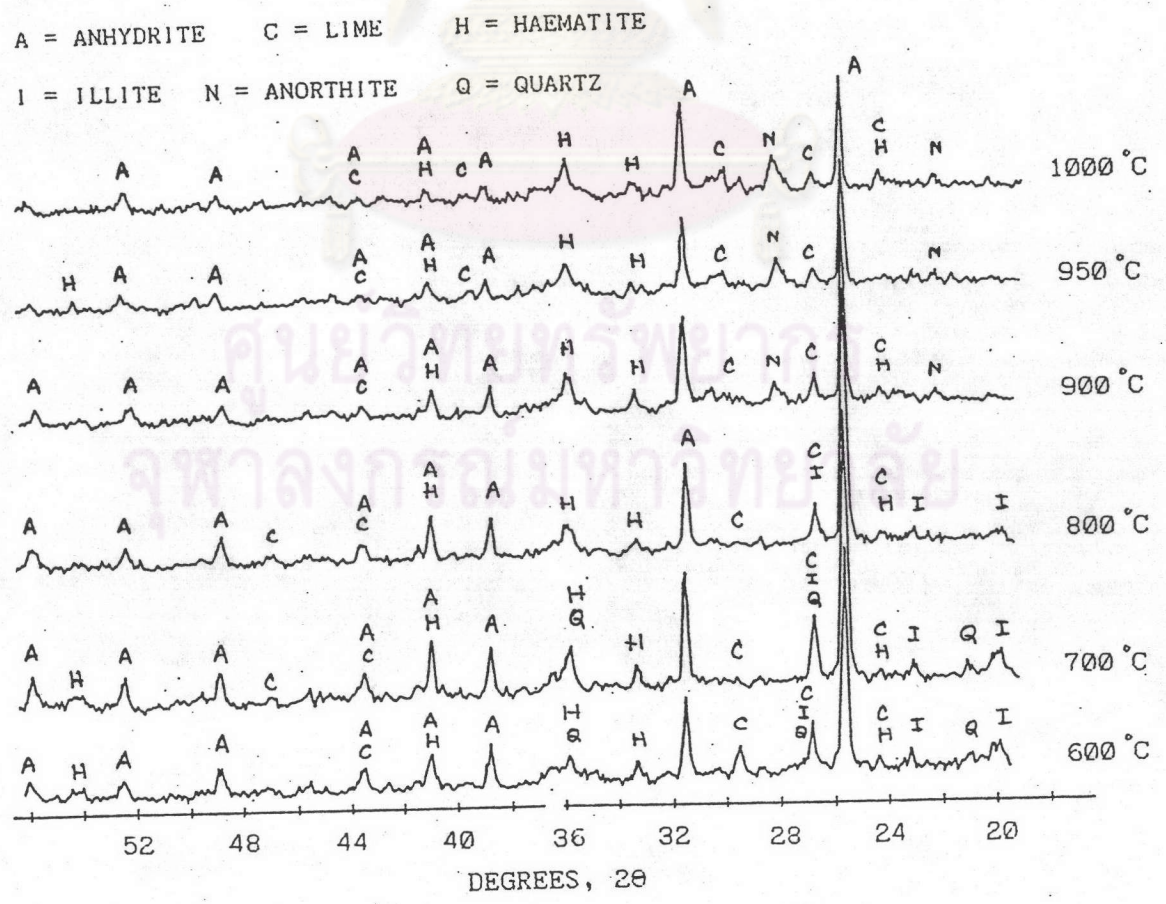
CaO ยังคงพบในช่วงอุณหภูมิเช่นเดียวกับข้างต้น แต่สำหรับอุณหภูมิ 600 °ซ เมื่อพิจารณาตามตารางที่ 4.5 ไม่มีกำมะถันในก๊าซที่ปล่อยออกมา ดังนั้น CaO ที่พบน่าจะเป็นส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับ SO_2

4.3.3 เถ้าถ่านหินแม่เมาะ 3

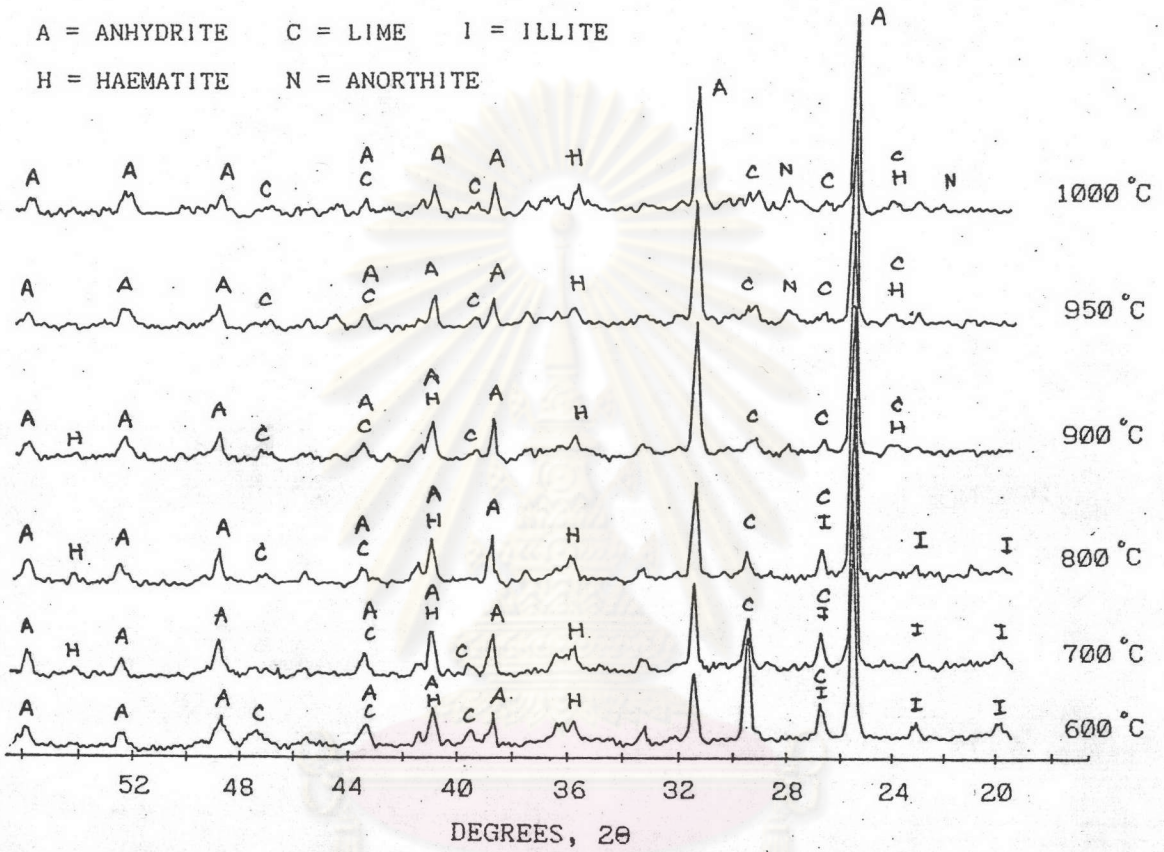
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ธาตุในเถ้าถ่านหิน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.14 โดยมีอัตราส่วน CaO/S = 0 ส่วนที่อัตราส่วน CaO/S = 1 แสดงดังรูปที่ 4.15 และที่อัตราส่วน CaO/S = 2 แสดงดังรูปที่ 4.16 เมื่อนำผลวิเคราะห์ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันจะได้ผลตามตาราง่างที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ในถ่านหินแหล่งแม่เมาะ 3 และเถ้าถ่านหินที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ในเถ้าถ่านหินแหล่งแม่เมาะ 3 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีอัตราส่วน CaO/S = 1



รูปที่ 4.16 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ในเถ้าถ่านหินแหล่งแม่เมาะ 3 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีอัตราส่วน CaO/S = 2

ตารางที่ 4.14 แสดงองค์ประกอบแร่ธาตุในเถ้าถ่านหินแม่เมาะ 3

อุณหภูมิ (°ซ)	อัตราส่วน CaO/S (โดยโมล)	Anhydrite $CaSO_4$	Haematite Fe_2O_3	Quartz SiO_2	Illite *	Lime CaO	Anorthite $CaAl_2Si_2O_8$
600	0	+	+	+	+		
	1	+	+	+	+	+	
	2	+	+		+	+	
700	0	+	+	+	+		
	1	+	+	+	+	+	
	2	+	+		+	+	
800	0	+	+		+		
	1	+	+		+	+	
	2	+	+		+	+	
900	0	+	+		+		
	1	+	+			+	+
	2	+	+			+	
950	0	+	+	+			+
	1	+	+			+	+
	2	+	+			+	+
1000	0	+	+	+			+
	1	+	+			+	+
	2	+	+			+	+

หมายเหตุ * คือ K-Na-Mg-Fe-Al-Si-O-H_2O

\+ คือ แร่ธาตุที่พบจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาง X-ray diffraction

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.14 จะเห็นว่าแร่ธาตุที่พบ ที่อุณหภูมิและอัตราส่วน CaO/S ต่างๆ คล้ายคลึงกับแม่เมาะ 2 เพราะว่าถ่านหินแม่เมาะ 3 มีส่วนผสมของแม่เมาะ 2 อยู่ 3 ใน 4 ส่วน สำหรับ CaO ที่พบที่อัตราส่วน CaO/S 1-2 ในช่วงอุณหภูมิ 600-1000 °ซ เมื่อพิจารณาตามตารางที่ 4.7 พบว่า กำมะถันในก๊าซยังคงถูกปลดปล่อยออกมาอยู่ แสดงว่า CaO ที่เติมไปนั้นถูกอุดตันด้วย $CaSO_4$ ที่เกิดขึ้น

จากผลการวิเคราะห์เถ้าถ่านหินแม่เมาะ 3 ตัวอย่าง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพบว่า

1. แร่บางตัวที่พบในถ่านหินยังคงพบอยู่ในเถ้าโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ ควอร์ตซ์ และอิลไลต์

2. แร่ในถ่านหินเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้แร่ชนิดใหม่ ได้แก่ ไพไรต์ (FeS_2) และยิบซัม ($CaSO_4.2H_2O$)

3. แร่ที่สลายตัวแล้วมีการจัดรูปผลึกใหม่ เช่น อิลไลต์

สำหรับ CaO ที่เติมลงไปในถ่านหิน ในอัตราส่วน CaO/S ต่างๆ เพื่อทำหน้าที่ดูดจับ SO_2 ที่เกิดขึ้นนั้น พบในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาคือ 600-1000 °ซ ได้ $CaSO_4$ เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา แต่ไม่พบผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น $CaSO_3$ และ CaS เป็นต้น ตามทฤษฎี $CaSO_3$ เกิดจาก CaO ทำปฏิกิริยากับ SO_2 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 650 °ซ และถ้ามีออกซิเจนอยู่ในวัฏภาคก๊าซ $CaSO_3$ จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็น $CaSO_4$ ซึ่งมีรูปแบบที่เสถียรมากกว่า (12,13) ส่วน CaS มักพบในเถ้าถ่านหินจากการศึกษาทางไพโรไลซิส (pyrolysis) (29)

ดังนั้นลำดับและชนิดของปฏิกิริยาที่สำคัญ ระหว่างปูนขาวกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเผาไหม้ของถ่านหิน ในเตาเผาที่ใช้หลอดแก้วควอร์ตซ์ โดยใช้อัตราส่วน CaO/S 0-2 ที่อุณหภูมิ 600-1000 °ซ ในบรรยากาศของอากาศและออกซิเจน จากผลวิเคราะห์ทาง X-ray diffraction ปฏิกิริยาที่น่าจะเป็นไปได้มีขั้นตอนย่อย ดังนี้คือ

(1) $2FeS_2 + 11/2O_2 \longrightarrow Fe_2O_3 + 4SO_2$ ..... (4.7)

ไพไรต์ถูกออกซิไดซ์ สลายตัวให้ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) และ SO_2 ที่อุณหภูมิประมาณ 500 °ซ ขึ้นไป

(2) กำมะถันอินทรีย์ + $O_2 \longrightarrow SO_2$ ..... (4.8)

(3) $SO_2 + 1/2O_2 \longleftrightarrow SO_3$ ..... (4.9)

ปฏิกิริยานี้ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) จากที่มีผู้วิจัยมา (9,10) ปฏิกิริยานี้สามารถถูกเร่งด้วยคะตะลิสต์ หรือสิ่งเจือปนในถ่านหิน เช่น Fe_2O_3,

V_2O_5, Cr_2O_3 เป็นต้น

(4) SO_3 ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ (3) จะถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) จากวัฏภาคก๊าซไปยังผิวอนุภาค CaO แล้วเกิดปฏิกิริยาตามขั้นตอนที่ (6)

(5) SO_3 ที่ยังเหลืออยู่ แพร่ผ่าน $CaSO_4$ ที่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์อยู่ในรูพรุนของ CaO เข้าไปยัง CaO ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา

(6) $CaO + SO_3 \longrightarrow CaSO_4$ ..... (4.10)

ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาระหว่าง วัฏภาคของแข็งและก๊าซ (solid-gas reaction)

ปฏิกิริยารวมจะถูกควบคุมด้วยปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ (3), (4) และ (5) เนื่องจากปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ (1) และ (6) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ขั้นตอนที่ (4) ควบคุมโดยอัตราการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer control) และ (5) เป็นขั้นตอนที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ (diffusion control) ถ้า $CaSO_4$ ที่เป็นผลิตภัณฑ์มีมากก็จะอุดตันรูพรุนของ CaO ทำให้ปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ (6) เกิดต่อไปไม่ได้ CaO ที่มีเหลือในผลิตภัณฑ์สามารถตรวจพบได้ด้วยเทคนิคทาง X-ray diffraction SO_3 ที่มีในระบบไม่สามารถแพร่ผ่าน $CaSO_4$ ได้ โดยปกติ SO_3 เป็นก๊าซที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูง จึงเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ดังขั้นตอนที่ (3) และถูกปลดปล่อยออกไปกับก๊าซจากการเผาไหม้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย