

บทที่ 3

ผลการทดลอง

3.1 ผลการเตรียมวัตถุดิบ

จากการนำวัตถุดิบมัลไลต์ทางการค้าไปทำการบดด้วยเครื่องบด Ball Mill พบว่า การบดมัลไลต์ค่อนข้างยาก เนื่องจากมัลไลต์มีความแข็งมาก จึงต้องทำการบดเป็นเวลานานถึง 8 ชั่วโมง จึงจะได้ตามขนาดที่ต้องการ คือร่อนผ่านตะแกรง 150 เมช ส่วนสีที่ได้หลังบดนั้นค่อนข้างออกสีเหลืองแดง อันเนื่องมาจากระหว่างการบดวัตถุดิบมัลไลต์ไปขัดสีกับผนังของหม้อบด ทำให้สีของมัลไลต์ที่ได้มีสีของสนิมเหล็ก ส่วนคอร์เดียไรต์เมื่อผ่านการบดเป็นเวลา 8 ชม. จะมีความละเอียดและเนื้อเนียนมากขึ้น สีของคอร์เดียไรต์ซึ่งมีสีน้ำตาลเมื่อบดแล้วไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

3.2 ผลการผสมอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ

หลังจากนำวัตถุดิบคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ไปผสมตามอัตราส่วนต่างๆ ระหว่างคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในทุกๆ ส่วนผสม พบว่าสามารถผสมกันได้ดีภายในหม้อบดความเร็วสูง ส่วนคอร์เดียไรต์เดี่ยวๆ จะมีสีเข้มมากที่สุดและมีความเข้มของสีในส่วนผสมลดลงเมื่อใช้คอร์เดียไรต์ในอัตราส่วนที่น้อยลงตามลำดับ

การเติมโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ 0.6 wt% ของส่วนผสมจะทำให้ส่วนผสมวัตถุดิบที่เตรียมในอัตราส่วนต่างๆ มีความเหนียวขึ้น และสามารถนำไปขึ้นรูปขึ้นทดสอบได้

3.3 ผลการขึ้นรูปของชิ้นงานทดสอบ

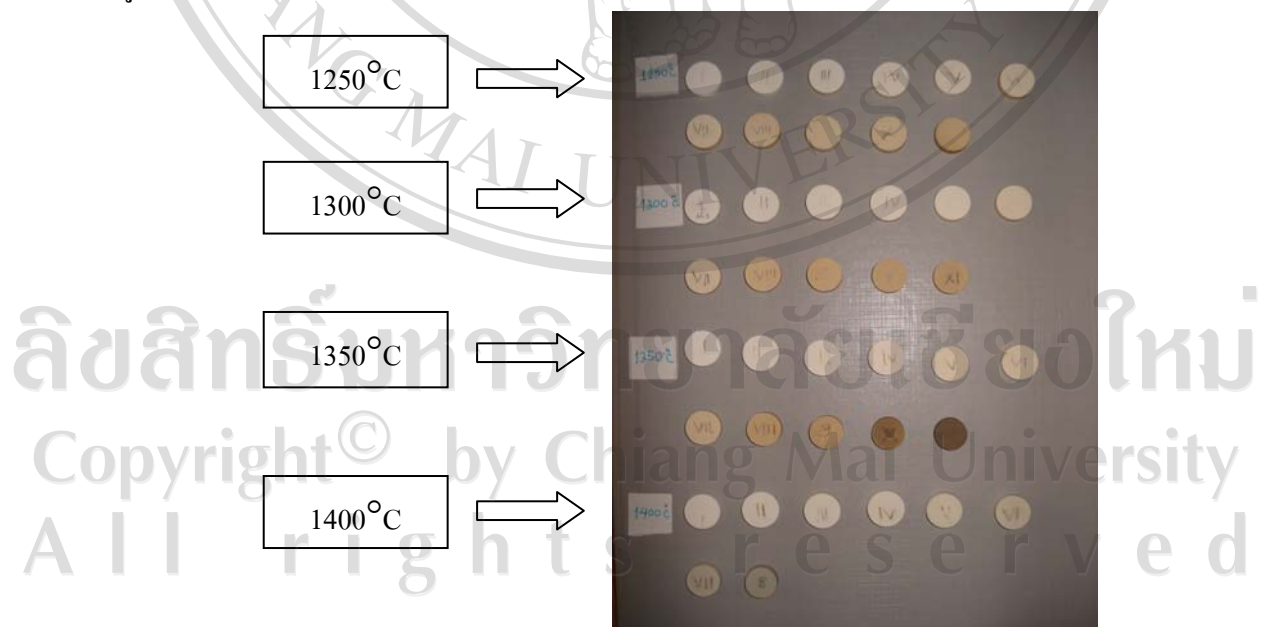
จากการนำส่วนผสมมัลไลต์และคอร์เดียไรต์ในอัตราส่วนต่างๆ ไปขึ้นรูปโดยน้ำหนักรีด สามารถนำชิ้นทดสอบออกจากแบบพิมพ์เหล็กกล้าได้ง่าย และชิ้นทดสอบที่ได้จะมีลักษณะมีคราบสีดำติดอยู่ที่ผิวด้านข้าง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากคราบสนิมเหล็กของแบบพิมพ์ซึ่งคราบสีดำดังกล่าวจะหายไปภายหลังจากการเผา ลักษณะชิ้นทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.1

3.4 ผลการตากแห้งขึ้นทดสอบ

ขึ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยน้ำหนักรีด ทั้งแบบแท่งและแบบทรงกระบอก ลักษณะก่อนการตากแห้งจะค่อนข้างเปราะ ภายหลังจากการนำขึ้นทดสอบรูปแบบต่างๆ ไปตากแห้งที่อุณหภูมิห้องแล้ว พบว่าขึ้นทดสอบจะมีความแข็งแรงมากขึ้นและสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก คาดว่าผลน่าจะเกิดมาจากโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่เป็นตัวยึดเกาะอยู่ในขึ้นทดสอบ

3.5 ผลการเผาขึ้นทดสอบ

ขึ้นทดสอบรูปทรงกระบอกที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1250-1400°C พบว่า ขึ้นทดสอบที่มีปริมาณของคอร์เดียไรต์สูง เมื่อเผาออกมาจะมีสีเข้ม ไม่ขาวเท่ากับขึ้นทดสอบที่มีปริมาณคอร์เดียไรต์น้อย โดยขึ้นทดสอบทุกชิ้นสามารถคงรูปอยู่ได้ ส่วนขึ้นทดสอบที่เป็นคอร์เดียไรต์เดี่ยวๆ จะเกิดการหลอมติดติดกับแผ่นรองผลิตภัณฑ์ในเตา เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1400°C ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานมัลไลต์เดี่ยวๆ จะไม่เกิดการหลอมตัว อีกทั้งสีของชิ้นงานที่ได้ยังมีความขาวอีกด้วย นอกจากนี้ ขึ้นทดสอบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1400°C ในอัตราส่วนคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ที่ 80:20 และ 90:10 เกิดการหลอมติดแผ่นรองผลิตภัณฑ์ในเตา ไม่สามารถนำมาวัดค่าต่างๆ ได้ ซึ่งได้แสดงภาพของผลการเผาขึ้นทดสอบในอัตราส่วนผสมต่างๆ ณ อุณหภูมิ 1250-1400°C ดังในรูป 3.1



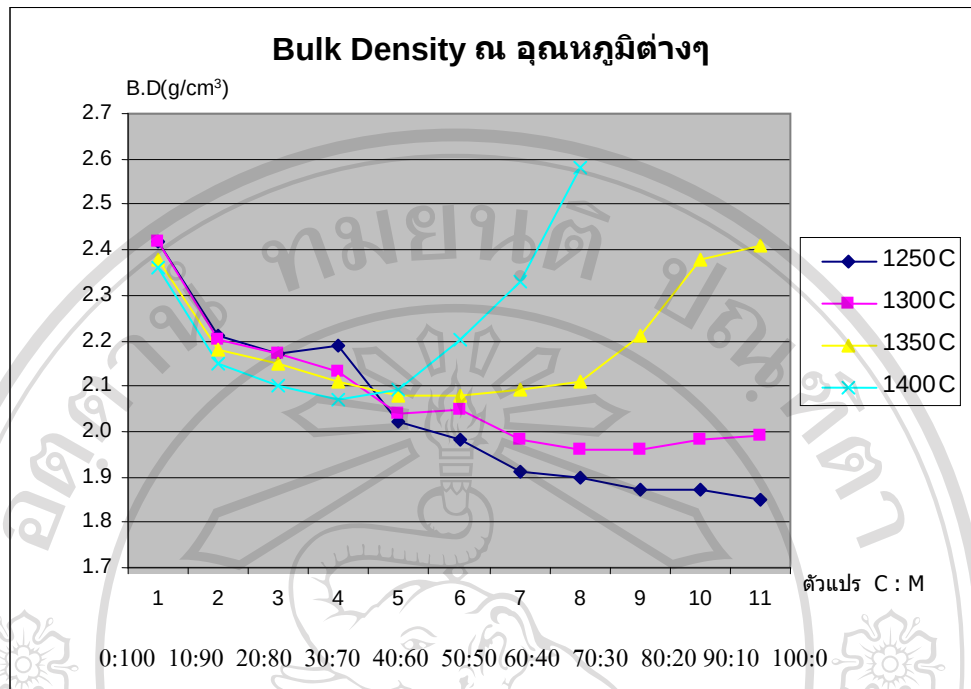
รูปที่ 3.1 ขึ้นทดสอบที่มีคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ผสมอัตราส่วนต่างๆ เมื่อผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1250 - 1400°C

3.6 ผลของความหนาแน่นของชั้นทดสอบหลังเผา

เมื่อชั้นทดสอบขึ้นรูปด้วยแรงอัด $1,500 \text{ kg/cm}^2$ เฝ้า ณ อุณหภูมิต่างๆกัน ให้ผลคือ ค่าความหนาแน่น (Bulk Density) แสดงได้ดังตารางที่ 3.1 ดังนี้ คือ ค่าความหนาแน่นของชั้นทดสอบที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกันจะให้ค่าความหนาแน่นที่แตกต่างกัน คือ ชั้นทดสอบที่เผาที่อุณหภูมิต่ำ คือ เผาที่อุณหภูมิ 1250°C จะให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่า เผาที่อุณหภูมิสูง คือ 1300 , 1350 และ 1400°C ตามลำดับ โดยค่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น เป็นไปตามนัยสำคัญ โดยที่ชั้นทดสอบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1250°C และ 1300°C พบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่ออัตราส่วนผสมมีปริมาณของคอร์เดียไรต์เพิ่มมากขึ้น โดยชั้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 1250°C จะให้ค่าความหนาแน่นน้อยกว่าชั้นทดสอบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1300°C ส่วนชั้นทดสอบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350°C และ 1400°C มีแนวโน้มของค่าความหนาแน่นไปในทิศทางเดียวกัน คือจะลดลงจนถึงจุดหนึ่ง คือ มีปริมาณของมวลไลต์มากกว่า 50% แล้วเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของคอร์เดียไรต์มีมากกว่า 60% โดยค่าความหนาแน่นมีค่าอยู่ระหว่าง $1.85\text{-}2.6 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ค่าความหนาแน่นของชั้นทดสอบ คอร์เดียไรต์ต่อมวลไลต์ในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อชั้นทดสอบขึ้นรูปด้วยแรงอัด $1,500 \text{ kg/cm}^2$ เฝ้า ณ อุณหภูมิต่างๆกัน

อุณหภูมิ	ตัวแปร 1 (g/cm^3)	ตัวแปร 2 (g/cm^3)	ตัวแปร 3 (g/cm^3)	ตัวแปร 4 (g/cm^3)	ตัวแปร 5 (g/cm^3)	ตัวแปร 6 (g/cm^3)	ตัวแปร 7 (g/cm^3)	ตัวแปร 8 (g/cm^3)	ตัวแปร 9 (g/cm^3)	ตัวแปร 10 (g/cm^3)	ตัวแปร 11 (g/cm^3)
1250°C	2.42	2.21	2.17	2.19	2.02	1.98	1.91	1.90	1.87	1.87	1.85
1300°C	2.42	2.20	2.17	2.13	2.04	2.05	1.98	1.96	1.96	1.98	1.99
1350°C	2.38	2.18	2.15	2.11	2.08	2.08	2.09	2.11	2.21	2.38	2.41
1400°C	2.36	2.15	2.10	2.07	2.09	2.20	2.33	2.58	-	-	-



รูปที่ 3.2 ค่าความหนาแน่น (Bulk Density) ของชิ้นทดสอบในอัตราส่วนต่างๆ กันที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ กัน

3.7 ผลของการเผาและส่วนผสมที่มีต่อความพรุนตัวและค่าการซึมน้ำของชิ้นทดสอบหลังเผา

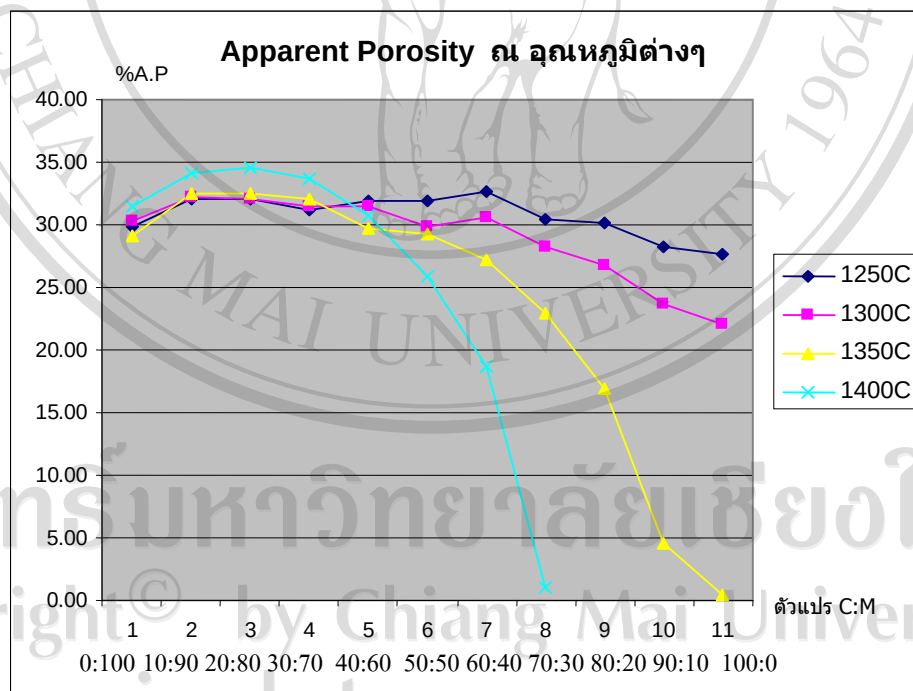
เมื่อชิ้นทดสอบขึ้นรูปด้วยแรงอัด $1,500 \text{ kg/cm}^2$ เผา ณ อุณหภูมิต่างๆ กัน ให้ผลดังนี้

3.7.1 ค่าความพรุนตัวของชิ้นทดสอบหลังเผา

ลักษณะชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความพรุนตัว จะมีลักษณะและสีไม่แตกต่างกัน ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวแสดงได้ดังตาราง 3.2 ก็คือชิ้นทดสอบที่มีมัลไลต์เป็นส่วนผสมในอัตราส่วนที่สูงจะมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวสูงเมื่อเทียบกับชิ้นทดสอบที่มีมัลไลต์เป็นส่วนผสมในอัตราส่วนต่ำ และตรงกันข้ามชิ้นทดสอบที่มีคอร์เดียไรต์สูงจะมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวต่ำเมื่อเทียบกับชิ้นทดสอบที่มีส่วนผสมของคอร์เดียไรต์ต่ำ ค่าความพรุนตัวที่กล่าวมานี้เป็นค่าความพรุนตัวปรากฏ (Apparent Porosity) โดยค่าความพรุนตัวนี้เป็นค่าความพรุนตัวของรูพรุนเปิดตรงบริเวณผิวภายนอกของชิ้นทดสอบ ซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังรูป 3.3

ตารางที่ 3.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวปรากฏของชิ้นทดสอบมัลไลต์ต่อคอร์เดียไรต์ในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อเผาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน น้ำหนักอัดขึ้นทดสอบ $1,500 \text{ kg/cm}^2$

	ตัวแปร 1	ตัวแปร 2	ตัวแปร 3	ตัวแปร 4	ตัวแปร 5	ตัวแปร 6	ตัวแปร 7	ตัวแปร 8	ตัวแปร 9	ตัวแปร 10	ตัวแปร 11
อุณหภูมิ (%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1250°C	29.90	32.11	32.11	31.15	31.91	31.96	32.60	30.50	30.17	28.18	27.58
1300°C	30.26	32.19	32.07	31.50	31.43	29.90	30.61	28.30	26.71	23.69	22.08
1350°C	29.12	32.53	32.49	32.12	29.64	29.27	27.14	22.94	16.95	4.56	0.47
1400°C	31.54	34.10	34.62	33.75	30.75	25.93	18.75	1.00	-	-	-



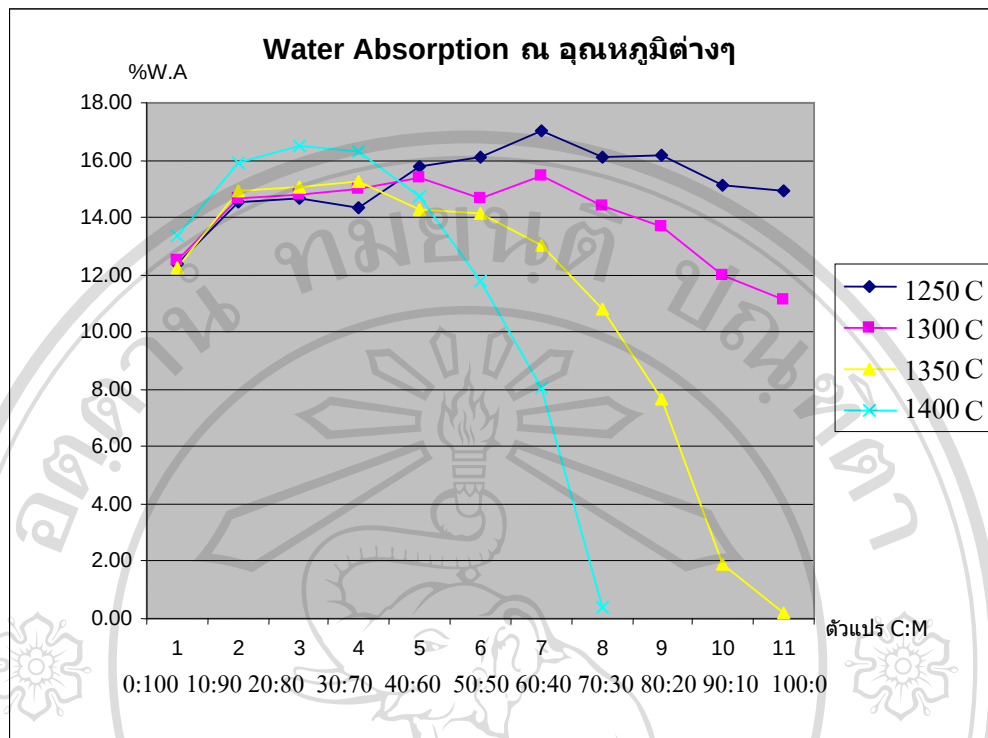
รูปที่ 3.3 ค่าความพรุนตัวปรากฏ (Apparent Porosity) ของชิ้นทดสอบในอัตราส่วนต่างๆ กันที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ กัน

3.7.2 ค่าการซึมน้ำของหินทดสอบหลังเผา

ค่าเปอร์เซ็นต์การซึมน้ำแสดงได้ดังตาราง 3.3 คือหินทดสอบที่มีมวลโล้เป็นส่วนผสมในอัตราส่วนที่สูงจะมีเปอร์เซ็นต์การซึมน้ำสูงเมื่อเทียบกับหินทดสอบที่มีมวลโล้เป็นส่วนผสมในอัตราส่วนต่ำ และตรงกันข้ามหินทดสอบที่มีคอร์เดียไรต์สูงจะมีเปอร์เซ็นต์การซึมน้ำต่ำเมื่อเทียบกับหินทดสอบที่มีส่วนผสมของคอร์เดียไรต์ต่ำ ซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังรูป 3.4

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าการซึมน้ำของหินทดสอบมวลโล้ต่อคอร์เดียไรต์ในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อเผาอุณหภูมิแตกต่างกัน น้ำหนักอัดหินทดสอบ $1,500 \text{ kg/cm}^2$

อุณหภูมิ	ตัวแปร 1 (%)	ตัวแปร 2 (%)	ตัวแปร 3 (%)	ตัวแปร 4 (%)	ตัวแปร 5 (%)	ตัวแปร 6 (%)	ตัวแปร 7 (%)	ตัวแปร 8 (%)	ตัวแปร 9 (%)	ตัวแปร 10 (%)	ตัวแปร 11 (%)
1250°C	12.35	14.55	14.67	14.33	15.77	16.12	17.05	16.09	16.18	15.09	14.90
1300°C	12.50	14.64	14.79	14.96	15.41	14.67	15.47	14.41	13.66	11.96	11.10
1350°C	12.26	14.90	15.08	15.26	14.27	14.11	13.00	10.80	7.66	1.93	0.20
1400°C	13.36	15.89	16.50	16.27	14.71	11.81	8.04	0.39	-	-	-



รูปที่ 3.4 ค่าการซึมน้ำ (Water Absorption) ของชิ้นทดสอบในอัตราส่วนต่างๆ กันที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ กัน

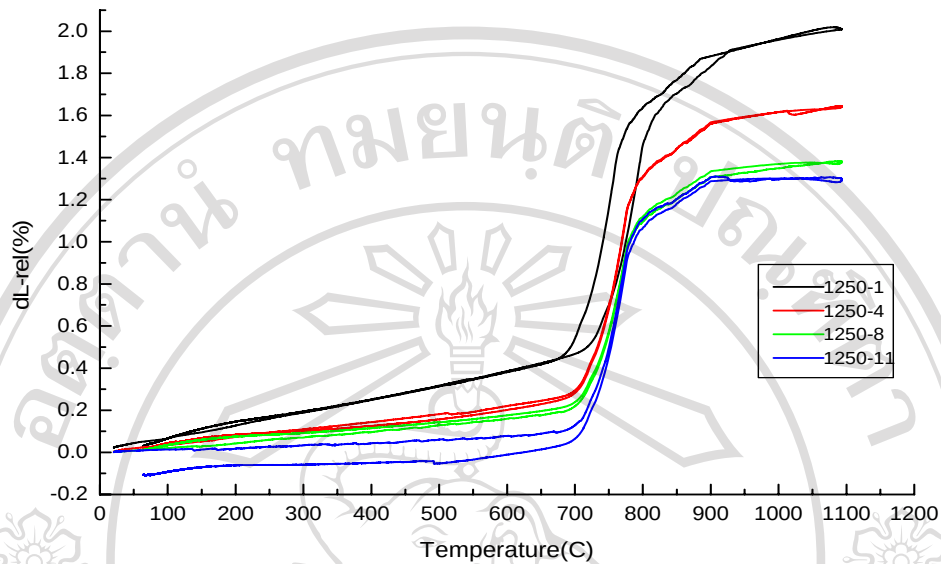
3.8 ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (ASTM, E228-85)

จากการนำชิ้นทดสอบรูปแท่งกลมยาวซึ่งได้จากการนำชิ้นงานรูปทรงกระบอกมาตัดตามยาวแล้วเหลาให้เป็นแท่งกลม โดยได้คัดเลือกเฉพาะอัตราส่วนผสมของมัลไลต์ต่อคอร์เดียไรต์ 70:30, 30:70 มัลไลต์เดี่ยวๆ และคอร์เดียไรต์เดี่ยวๆ มาทำการวัดหาค่าสัมประสิทธิ์เนื่องด้วยความร้อน โดยใช้ข้อมูลจากค่าความหนาแน่น ค่าความพรุนตัวปรากฏและการซึมน้ำมาเป็นส่วนหนึ่งในการพิจารณา โดยผลของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนดังตารางที่ 3.4 ค่าสัมประสิทธิ์เนื่องด้วยความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อชิ้นทดสอบมีอัตราส่วนคอร์เดียไรต์ในอัตราส่วนที่ต่ำ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ยิ่งปริมาณมัลไลต์สูงขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนมากขึ้น ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.5, 3.6, 3.7 และ 3.8 เมื่อนำอัตราส่วนผสมของมัลไลต์ต่อคอร์เดียไรต์ 70:30, 30:70 มัลไลต์เดี่ยวๆ และคอร์เดียไรต์เดี่ยวๆ มาทำการเผาที่อุณหภูมิ 1250°C, 1300°C, 1350°C และ 1400°C ตามลำดับ

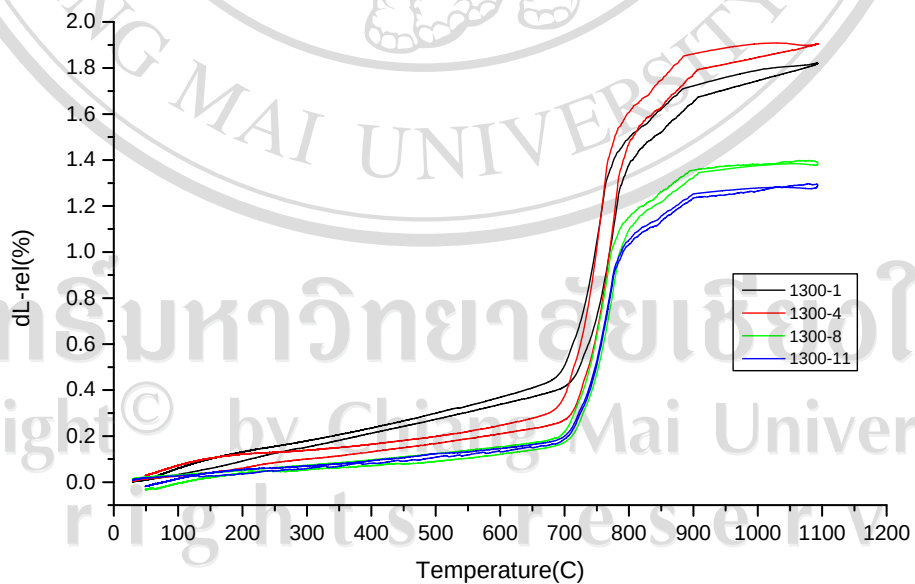
เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (α) ของมัลไลต์เพียงอย่างเดียว จะให้ค่าสูงทุกสภาวะที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ กัน และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์เนื่องด้วยความร้อน (α) ของคอร์เดียไรต์ เพียงอย่างเดียวจะให้ค่าต่ำในทุกๆ สภาวะที่เผาที่อุณหภูมิต่างกัน แสดงดังตารางที่ 3.4 แสดงว่าคอร์เดียไรต์เป็นตัวที่ทำให้วัสดุผสมมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำลง ยังมีคอร์เดียไรต์ในส่วนผสมมากเท่าไร ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของวัสดุผสมจะมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามความเหมาะสมของปริมาณคอร์เดียไรต์ สภาวะของการเผา และความเหมาะสมของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน พบว่ามีความเหมาะสมที่อัตราส่วนผสมระหว่างคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 เผาที่อุณหภูมิ 1400°C มีค่า $\alpha = 2.98 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

ตารางที่ 3.4 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของชิ้นทดสอบระหว่างคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนต่างๆ (ดูวิธีการคำนวณ ในผนวก (ก-1)-(ก-4), หน้า 88-91)

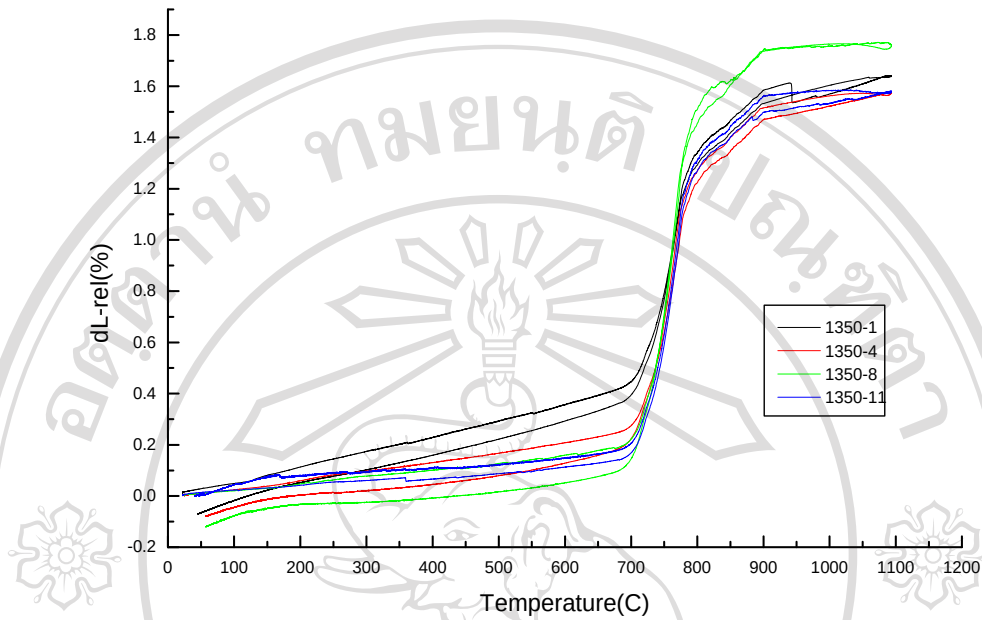
อุณหภูมิเผา ($^{\circ}\text{C}$)	ชิ้นทดสอบ คอร์เดียไรต์ : มัลไลต์	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน ($\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
1250	0:100	7.88
	30:70	5.74
	70:30	3.10
	100:0	3.03
1300	0:100	7.29
	30:70	5.50
	70:30	3.16
	100:0	3.04
1350	0:100	6.74
	30:70	4.97
	70:30	4.52
	100:0	3.26
1400	0:100	5.53
	30:70	4.55
	70:30	2.98



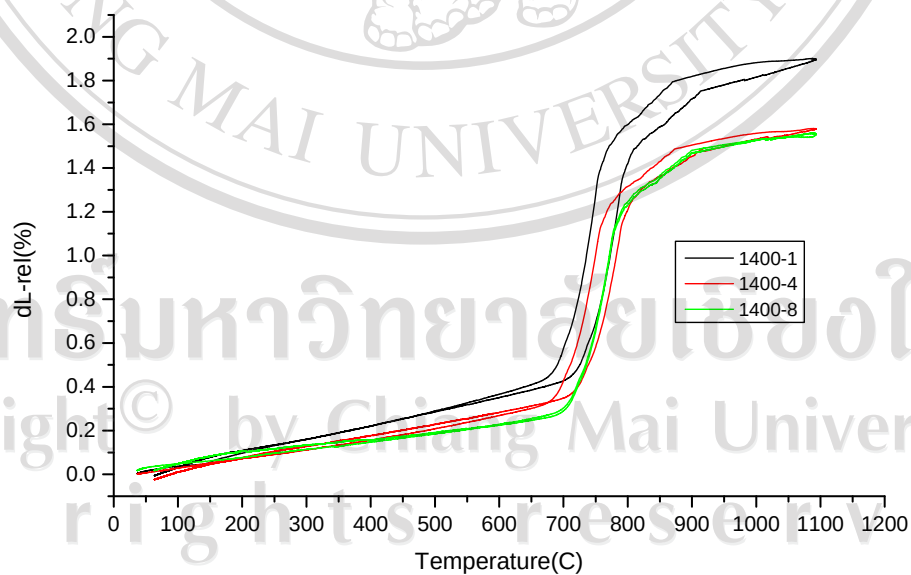
รูปที่ 3.5 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของอัตราส่วนผสมต่างๆ เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C



รูปที่ 3.6 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของอัตราส่วนผสมต่างๆ เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1300 °C

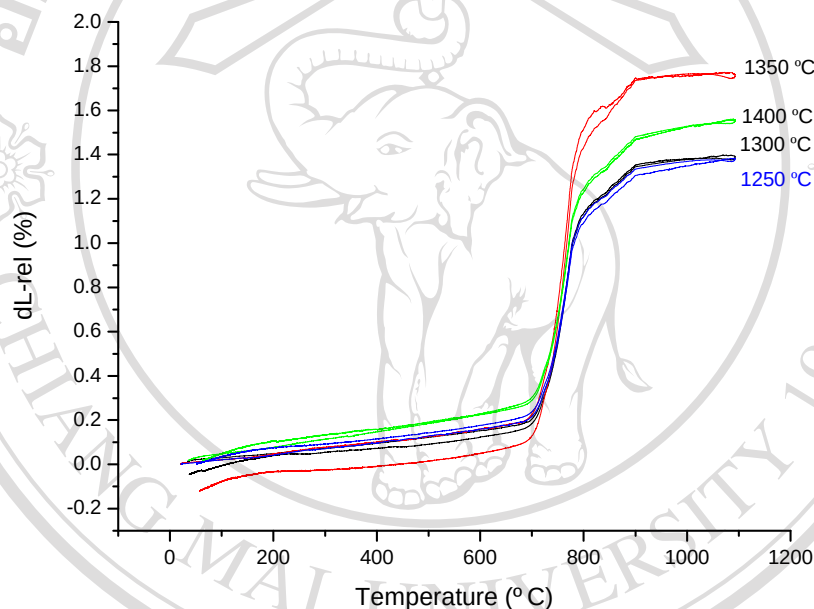


รูปที่ 3.7 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของอัตราส่วนผสมต่างๆ เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1350 °C



รูปที่ 3.8 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของอัตราส่วนผสมต่างๆ เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C

จากข้อมูลรูปที่ 3.5, 3.6, 3.7 และ 3.8 ทำให้สามารถเลือกสถานะและอัตราส่วนของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ที่เหมาะสมได้ โดยพิจารณาจากความกว้างของช่อง (Loop) โดยพิจารณาว่ายิ่งความกว้างของช่อง (Loop) มีน้อยเพียงไร วัสดุจะสามารถทนทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้มากเพียงนั้น ซึ่งจะเป็นแนวทางในการนำไปทดสอบสมบัติการทนทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนผสมของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 wt% เป็นอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุด แล้วจึงนำอัตราส่วนผสมของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 wt% นี้ มาทำการพล็อตกราฟดูพฤติกรรม ณ อุณหภูมิต่างๆว่ามีผลอย่างไร สามารถแสดงดังรูปที่ 3.9



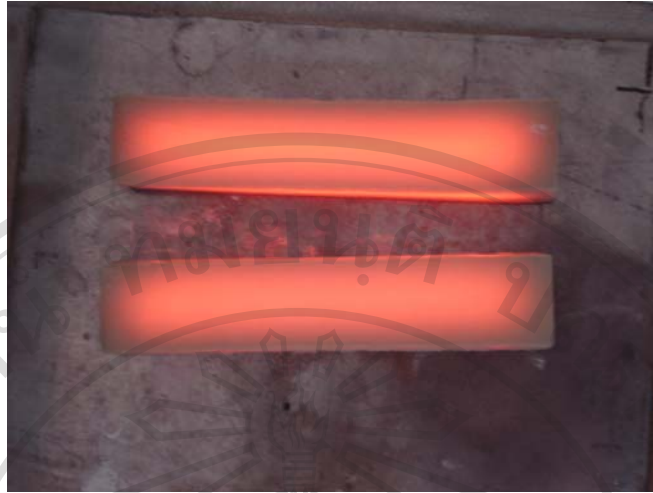
รูปที่ 3.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของอัตราส่วนผสมคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 wt% เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

3.9 การทดสอบค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันโดยวิธี ASTM ของชิ้นทดสอบคอร์เดียไรต์-มัลไลต์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม 70:30 และผ่านการเผา ณ อุณหภูมิ 1400 °C (ASTM, C1171-91, 1993) คูณวณ ฐ หน้า 92

จากการทดสอบค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันของชิ้นทดสอบคอร์เดียไรต์-มัลไลต์ในอัตราส่วน 70:30 ซึ่งเป็นอัตราส่วนและสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองครั้งนี้ ได้ผลดังนี้ คือ ชิ้นทดสอบสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน โดยนับเป็นจำนวนรอบ ได้ถึง 8 ครั้ง โดยประเมินค่าความเสียหายด้วยตา ส่วนในครั้งที่ 9 ชิ้นทดสอบเริ่มเกิดรอยร้าวขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตา แสดงได้ดังรูปที่ 3.10, 3.11, 3.12 และ 3.13 เมื่อนำชิ้นทดสอบดังกล่าวไปทำการเปรียบเทียบกับค่าการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันของสารผสมอะลูมินา - คอร์เดียไรต์ ในงานวิจัยของ นายสัมพันธ์ สร้อยกล่อม ซึ่งใช้สารผสมอะลูมินา-คอร์เดียไรต์ 90:10 เผาที่ 1650 °C ซึ่งเป็นสภาวะที่ดีที่สุดของงานวิจัยนี้ ได้รายงานผลของค่าการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันว่า สามารถทนได้ 6 รอบ



รูปที่ 3.10 ชิ้นทดสอบคอร์เดียไรต์-มัลไลต์ อัตราส่วน 70:30 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C ก่อนนำไปทดสอบค่าการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน



รูปที่ 3.11 ชิ้นทดสอบคอร์เดียไรต์-มัลไลต์อัตราส่วน 70:30 ที่นำออกจากเตาเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C



รูปที่ 3.12 ชิ้นทดสอบคอร์เดียไรต์-มัลไลต์อัตราส่วน 70:30 ที่ผ่านการทดสอบค่าการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน รอบที่ 2

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright © by Chiang Mai University

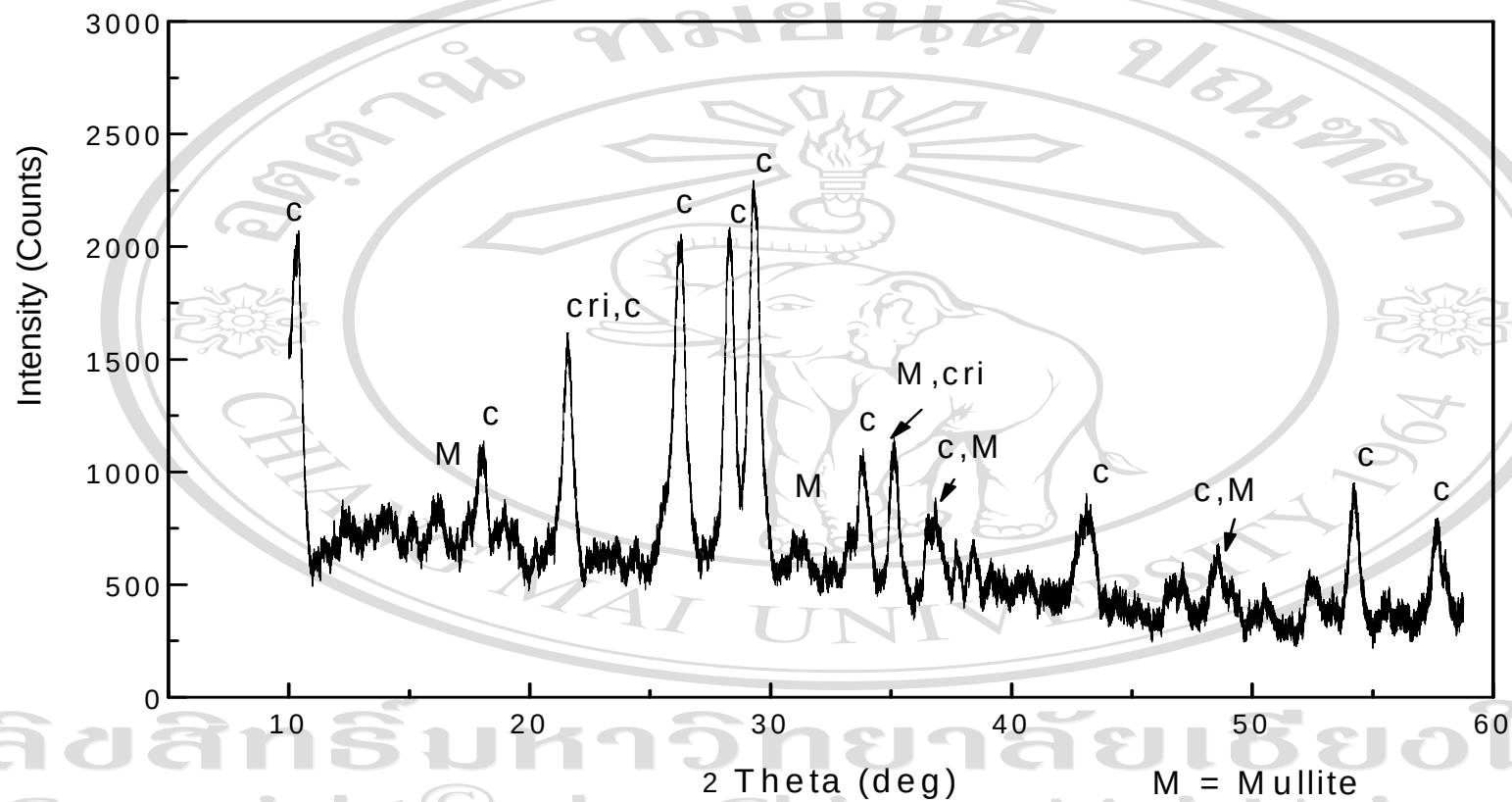
All rights reserved



รูปที่ 3.13 ชิ้นทดสอบคอร์เดียไรต์-มัลไลต์อัตราส่วน 70:30 ที่ผ่านการทดสอบค่าการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน รอบที่ 9

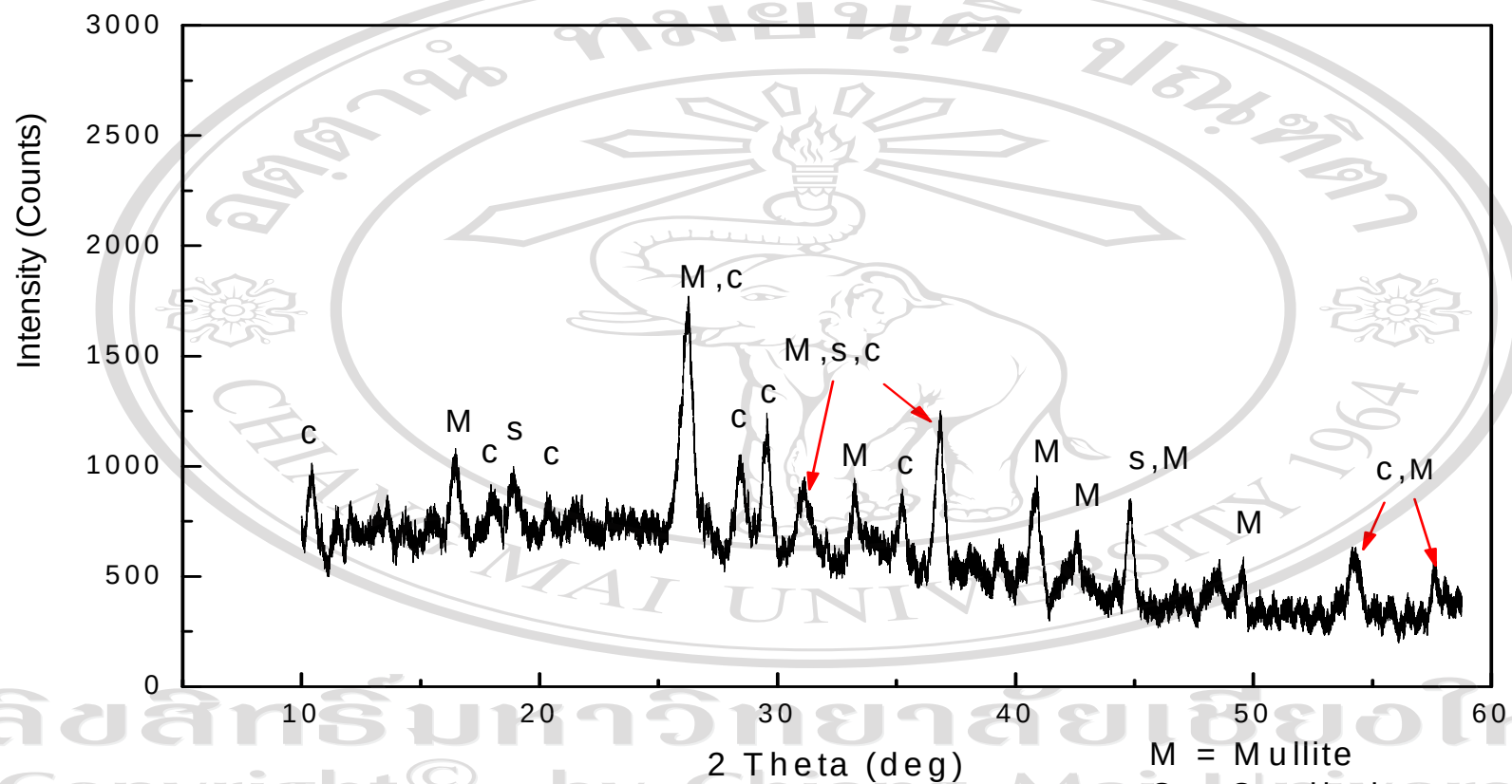
3.10 ผลการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อประกอบการวินิจฉัยผลของสารคอร์เดียไรต์-มัลไลต์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม 70:30 ที่อุณหภูมิ 1400 °C ที่มีความสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันด้วย XRD และ SEM (ดูผนวก ค และผนวก ด)

จากการศึกษาโครงสร้างทางแร่ของสารคอร์เดียไรต์-มัลไลต์ ในอัตราส่วน 70:30 ณ อุณหภูมิ 1400°C เพื่อยืนยันองค์ประกอบทางแร่ที่เกิดขึ้นทั้งก่อนเผาและหลังเผา ณ อุณหภูมิ 1400°C ว่าเกิดขึ้นอย่างไร สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 3.14 และ 3.15



M = Mullite
C = Cordierite
cri = Cristobalite

รูปที่ 3.14 กราฟเอกซเรย์ก่อนการเผาของอัตราส่วนผสมระหว่างคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30



รูปที่ 3.15 กราฟเอกซเรย์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C ของอัตราส่วนผสมระหว่างคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30

ผลการวิเคราะห์ขั้นตอนทดสอบสารผสมคอร์เดียไรต์-มัลไลต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope – SEM)

ภาพโครงสร้างทางจุลภาคจาก SEM ในรูปที่ 3.16 ประกอบด้วย

ภาพที่ 1 : คอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 เเผที่ 1250°C ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ภาพที่ 2 : คอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 เเผที่ 1250°C ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

ภาพที่ 3 : คอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 เเผที่ 1300°C ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ภาพที่ 4 : คอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 เเผที่ 1300°C ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

ภาพที่ 5 : คอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 เเผที่ 1350°C ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ภาพที่ 6 : คอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 เเผที่ 1350°C ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

ภาพที่ 7 : คอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 เเผที่ 1400°C ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ภาพที่ 8 : คอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 เเผที่ 1400°C ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

ภาพที่ 9 : คอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 เเผที่ 1400°C ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

ภาพที่ 10 : คอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 เเผที่ 1400°C ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า และผ่านการกัดด้วยกรดกัดแก้ว (HF)

ภาพที่ 11-14 : คอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 เเผที่ 1400°C ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า และผ่านการกัดด้วยกรดกัดแก้ว (HF)

ภาพที่ 15 : คอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ 70:30 เเผที่ 1400°C ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า และผ่านการกัดด้วยกรดกัดแก้ว (HF)

ผู้วิจัยไม่สามารถทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคได้ทุกขั้นตอนของการทดลอง เพียงแต่ได้นำจุดสำคัญบางจุดมาศึกษาด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคจาก SEM ที่มีความประสงค์จะเห็นโครงสร้างผลึกของมัลไลต์ คอร์เดียไรต์ และสภาพความเป็นอยู่และการเปลี่ยนแปลงของมัลไลต์และคอร์เดียไรต์เมื่อขึ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยแรงอัด 1500 kg/cm² และผ่านการเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ ด้วยคาดการณ์ถึงการอยู่ร่วมกันระหว่างคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อคอร์เดียไรต์อยู่ในสถานะที่เป็นแก้ว จะส่งผลทำให้เนื้อของวัสดุเกิดการแน่นตัว ดังนั้นโครงสร้างทางจุลภาคอาจแสดงให้เห็นถึงสภาพความเป็นเนื้อแน่น หรือการปรากฏรูพรุนที่เป็นโพรงจากภาพ SEM ต่างๆ จำนวน 9 รูป โดยขอแสดงความคิดเห็นต่างๆที่จะนำไปสู่งานวิจัยดังต่อไปนี้

ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C โดยอนุภาคของคอร์เดียไรต์มีการเชื่อมติดกันเป็นบางส่วน ซึ่งอนุภาคมีรูปร่างแตกต่างกัน วางเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิ 1250 °C ยังไม่ช่วยให้ผิวสัมผัสของเม็ดอนุภาคเหล่านั้นเกาะติดกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการมีช่องว่างหรือสภาพความพรุนตัวปรากฏชัดเจน

ภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C พบว่าการจัดเรียงตัวของผลึกมัลไลต์เริ่มเกิดการเรียงตัวซ้อนกัน และการจัดเรียงตัวนี้เกิดขึ้นจากผลึกมัลไลต์เล็กๆ หลายๆ ผลึกเริ่มมีการเรียงตัวประสานกัน สังเกตจากรูปมีลักษณะเหมือนร่างแห โดยมีการเรียงตัวเกิดขึ้นทุกทิศทาง การจัดเรียงตัวมีทิศทางที่ไม่แน่นอน

ภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1300 °C พบว่าอนุภาคของมัลไลต์มีการเชื่อมติดกันเป็นแผ่นมากขึ้น อาจเนื่องมาจากการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น คือที่อุณหภูมิ 1300 °C อนุภาคของคอร์เดียไรต์อาจหลอมตัวกลายเป็นแก้วได้มากขึ้น ทำให้เมื่อสังเกตจากรูปจะเห็นว่าช่องว่างหรือความพรุนตัวที่ปรากฏมีน้อยลง

ภาพที่ 4 แสดงผลึกของมัลไลต์ที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1300 °C พบว่าผลึกของมัลไลต์มีขนาดใหญ่ขึ้น ผลึกเกิดการแตกหักและมีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ที่ช่วงอุณหภูมินี้ เริ่มเกิดการแพร่ของแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+} Ions) จากเกรนของคอร์เดียไรต์ หรือแมทริกซ์ (Matrix) เข้าไปแทรกในมัลไลต์และแลตทิซ (Mullite Lattice) ทำให้เกรนของมัลไลต์เกิดการแตกหัก

ภาพที่ 5 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 °C สังเกตได้ว่าเกิดผลึกของคอร์เดียไรต์เกิดขึ้นทั่วทั้งชิ้นงาน พร้อมทั้งเนื้อของชิ้นงานยังคงปรากฏรูพรุน หรือช่องว่างเกิดขึ้นด้วย

ภาพที่ 6 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของผลึกคอร์เดียไรต์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 °C สังเกตได้ว่ามีรูปร่างคล้ายดอกไม้ ซึ่งผลึกจะเกิดจากจุดเล็กๆ ตรงกลางแล้วเกิดการเติบโตขึ้น (Grain Growth) ซึ่งสามารถยืนยันการเกิดและแสดงผลได้จากภาพถ่าย EDS

ภาพที่ 7 และ 8 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C สังเกตได้ว่าอนุภาคของคอร์เดียไรต์เกิดการหลอมกลายเป็นแก้ว ทำหน้าที่ไปปิดรูพรุนของชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานเกิดเนื้อแน่น เมื่อสังเกตจากรูปจะเห็นว่า ช่องว่างหรือความพรุนตัวที่ปรากฏจะเกิดน้อยมาก ซึ่งจากการสังเกตด้วยตาจะเห็นว่ามีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น แต่ก็ยังพบว่ามัลไลต์เกิดขึ้นในชิ้นงานอยู่จำนวนหนึ่ง ซึ่งเมื่อพิจารณาเข้าไปในรูพรุน พบว่า ภายในรูพรุนเกิดผลึกของมัลไลต์เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 8

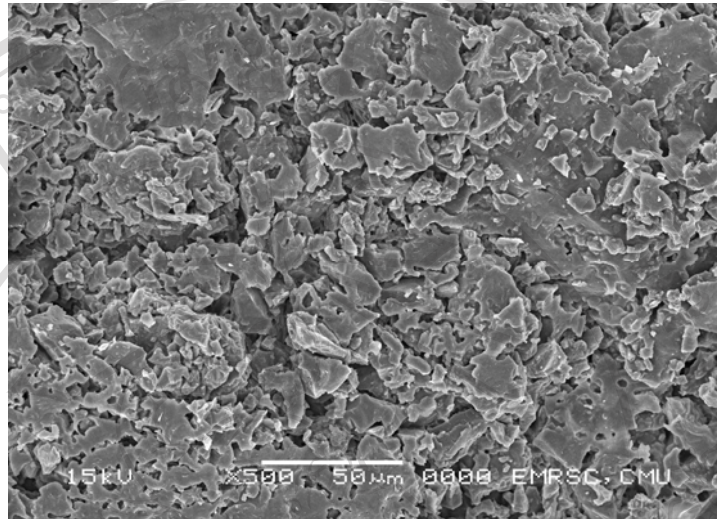
ภาพที่ 10-12 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C แล้วนำไปทำการกัดด้วย กรดกัดแก้ว (HF) สังเกตได้ว่าเนื้อของชิ้นทดสอบ เกิดรูพรุนจำนวนเล็กน้อยทั่วทั้งชิ้นทดสอบ โดยคาดว่าจะเนื้อแก้วและถูกกรดกัดลงไป พร้อมทั้งยังพบว่า อนุภาคของคอร์เดียไรต์แทรกตัวอยู่ระหว่างโครงสร้างของมัลไลต์

ภาพที่ 13 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C แล้วนำไปทำการกัดด้วย กรดกัดแก้ว (HF) พบว่า โครงสร้างของผลึกมัลไลต์ที่เกิดขึ้นเป็นมัลไลต์ปฐมภูมิ (Primary Mullite) สังเกตได้จากรูปผลึกที่มีขนาดใหญ่ อันเกิดจากการเผาผนึกแบบของแข็ง (Solid-Solid Sintering)

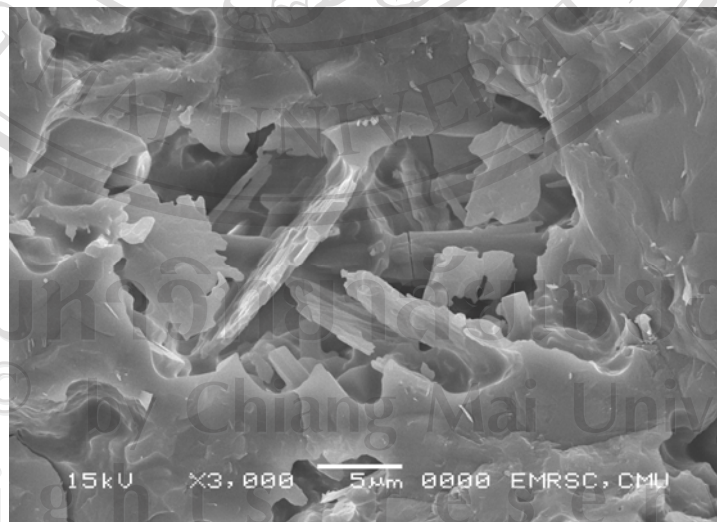
ภาพที่ 14 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C แล้วนำไปทำการกัดด้วย กรดกัดแก้ว (HF) พบว่า โครงสร้างผลึกของมัลไลต์แสดงลักษณะรูปเข็ม ซึ่งเป็นมัลไลต์ปฐมภูมิ (Primary Mullite) และมีคอร์เดียไรต์แทรกอยู่ระหว่างโครงสร้างของมัลไลต์

ภาพที่ 15 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคภายในรูพรุนของคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C แล้วนำไปทำการกัดด้วย กรดกัดแก้ว (HF) พบว่า โครงสร้างของมัลไลต์มีการจัดเรียงตัวเป็นร่างแห และภายในร่างแหของมัลไลต์นั้นมีผลึกของคอร์เดียไรต์แทรกอยู่ภายในโครงสร้างนั้น

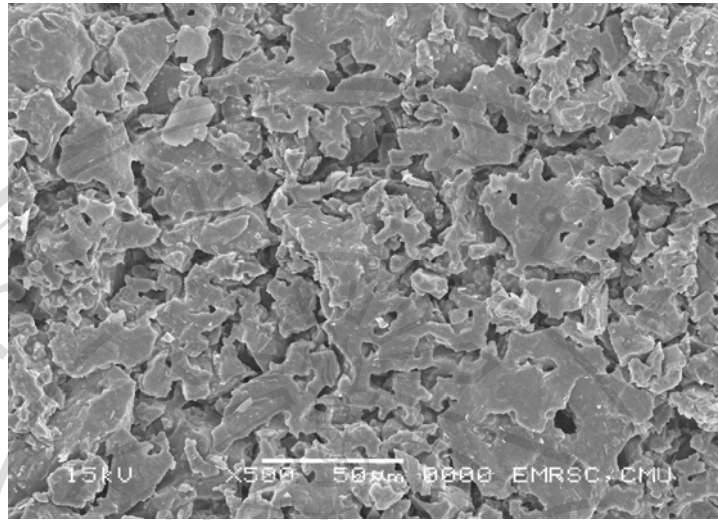
จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นทดสอบเพื่อดูโครงสร้าง
จุลภาคของชิ้นทดสอบแสดงผลดังรูปที่ 3.16



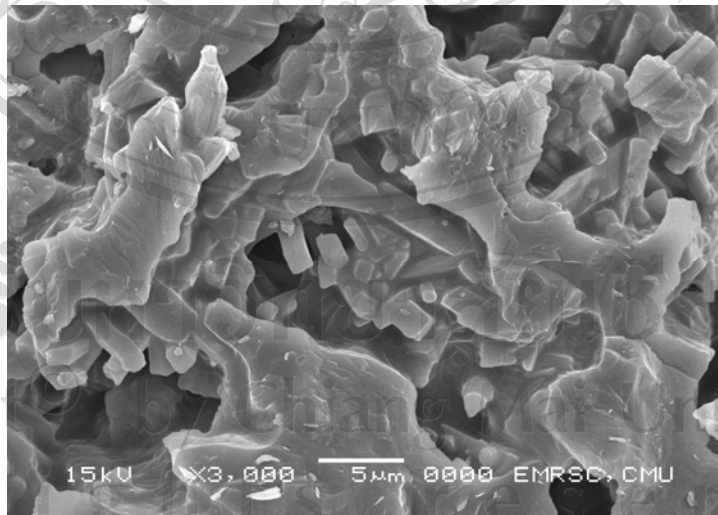
รูปที่ 1 ภาพโดยรวมของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนผสม 70:30 เผาพูนที่ 1250°C ที่กำลังขยาย 500 เท่า



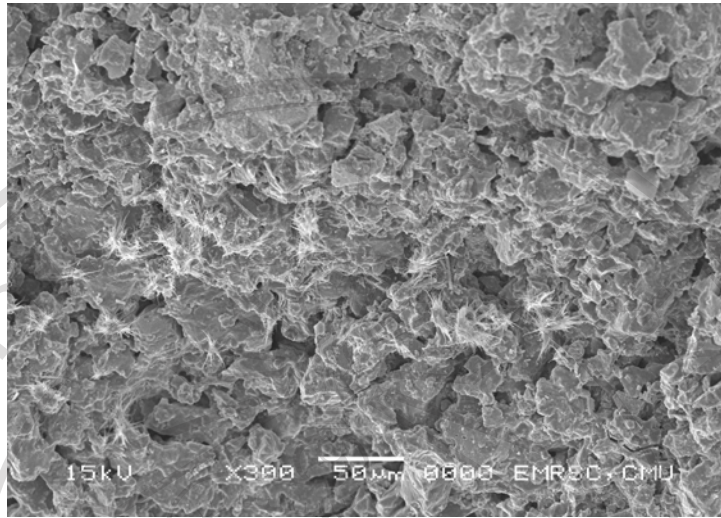
รูปที่ 2 ภาพขยายของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนผสม 70:30 เผาพูนที่ 1250°C ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



รูปที่ 3 ภาพโดยรวมของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนผสม 70:30 เเผผนิกที่ 1300°C ที่กำลังขยาย 500 เท่า



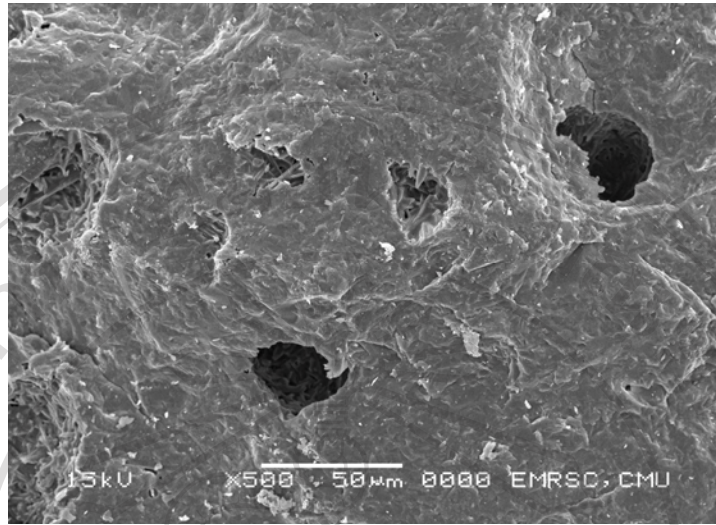
รูปที่ 4 ภาพขยายของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนผสม 70:30 เเผผนิกที่ 1250°C ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



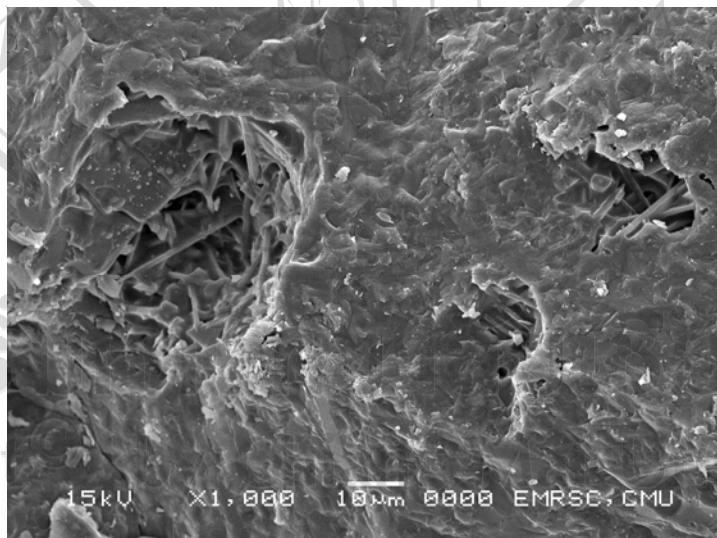
รูปที่ 5 ภาพโดยรวมของคาร์บอนไฟเบอร์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนผสม 70:30 เพาพนิกที่ 1350°C ที่กำลังขยาย 500 เท่า



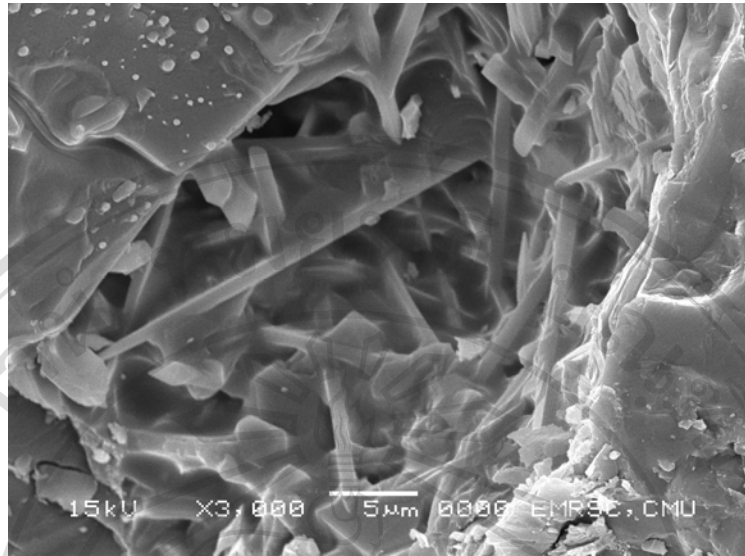
รูปที่ 6 ภาพขยายของคาร์บอนไฟเบอร์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนผสม 70:30 เพาพนิกที่ 1350°C ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า พบว่าเกิดเป็นผลึกของคาร์บอนไฟเบอร์ขึ้น ยืนยันจากข้อมูล EDS (ดูในผนวก ค หน้า 104 -112)



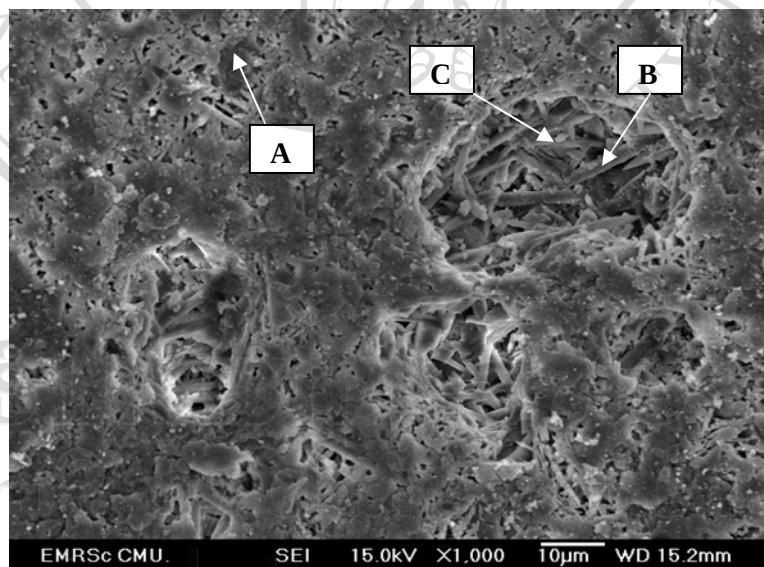
รูปที่ 7 ภาพโดยรวมของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนผสม 70:30 เผาพูนที่ 1400°C ที่กำลังขยาย 500 เท่า



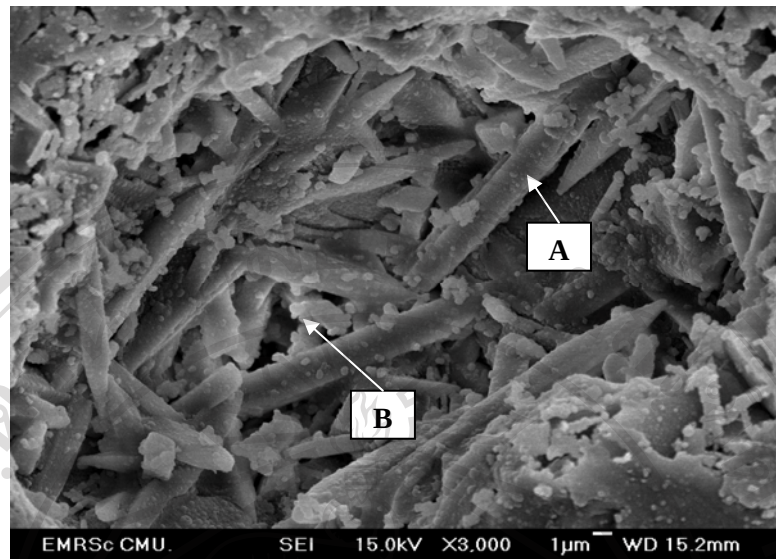
รูปที่ 8 ภาพขยายของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนผสม 70:30 เผาพูนที่ 1400°C ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



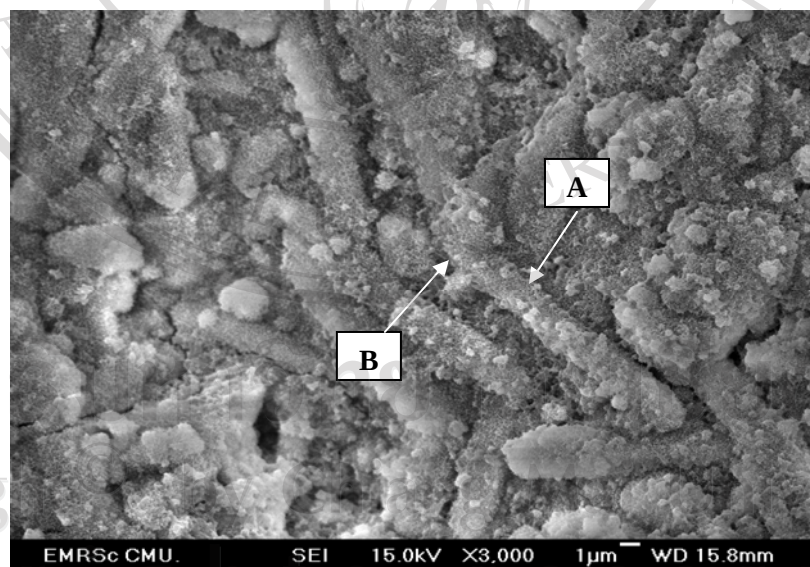
รูปที่ 9 ภาพขยายของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนผสม 70:30 เผาพูนที่ 1400°C ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



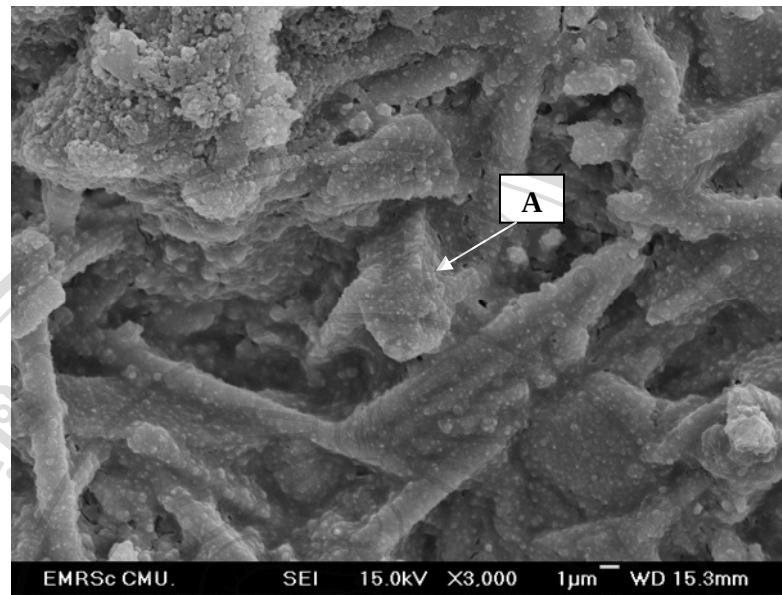
รูปที่ 10 ภาพขยายของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนผสม 70:30 เผาพูนที่ 1400°C เมื่อทำการกัดด้วย กรดกัดแก้ว (HF) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า : เมื่อ A = รูพรุน (Pore), B = มัลไลต์ปฐมภูมิ (Primary Mullite), C = คอร์เดียไรต์ (Cordierite)



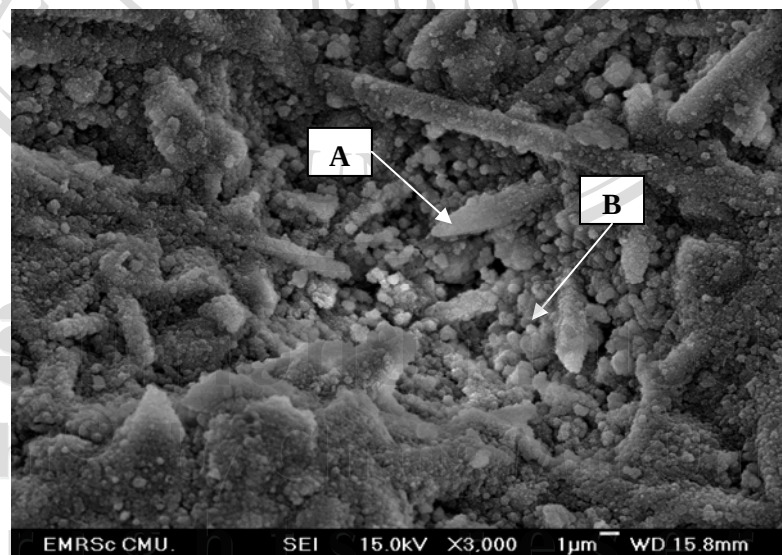
รูปที่ 11 ภาพขยายของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนผสม 70:30 เภาพนิกที่ 1400°C เมื่อทำการกัดด้วย กรดกัดแก้ว (HF) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า : เมื่อ A = มัลไลต์ปฐมภูมิ (Primary Mullite), B = คอร์เดียไรต์ (Cordierite)



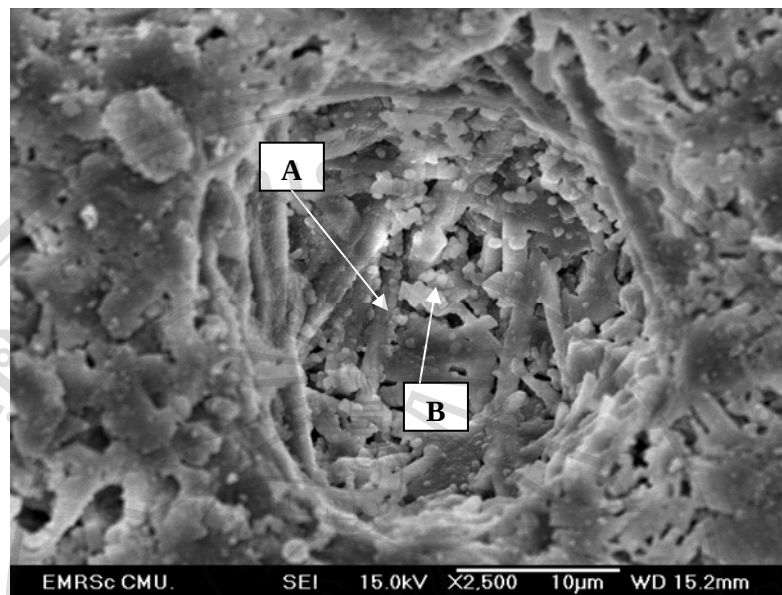
รูปที่ 12 ภาพขยายของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนผสม 70:30 เภาพนิกที่ 1400°C เมื่อทำการกัดด้วย กรดกัดแก้ว (HF) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า : เมื่อ A = มัลไลต์ปฐมภูมิ (Primary Mullite), B = คอร์เดียไรต์ (Cordierite)



รูปที่ 13 ภาพขยายของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนผสม 70:30 เภาพณีที่ 1400°C เมื่อทำการกัดด้วย กรดกัดแก้ว (HF) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ได้แสดงรูปผลึกของมัลไลต์ที่เป็นรูปเข็ม : เมื่อ A = มัลไลต์ปฐมภูมิ (Primary Mullite)



รูปที่ 14 ภาพขยายของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนผสม 70:30 เภาพณีที่ 1400°C เมื่อทำการกัดด้วย กรดกัดแก้ว (HF) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ได้แสดงรูปผลึกของมัลไลต์ที่เป็นรูปเข็ม และคอร์เดียไรต์ เมื่อ A = มัลไลต์ปฐมภูมิ (Primary Mullite), B = คอร์เดียไรต์ (Cordierite)



รูปที่ 15 ภาพขยายของคอร์เดียไรต์ต่อมัลไลต์ในอัตราส่วนผสม 70:30 เภาพนิกที่ 1400°C เมื่อทำการกัดด้วย กรดกัดแก้ว (HF) ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า ได้แสดงรูปผลึกของมัลไลต์ที่สานตัวเป็นร่างแห และผลึกของคอร์เดียไรต์ที่แทรกอยู่ระหว่างมัลไลต์ : เมื่อ A = มัลไลต์ปฐมภูมิ (Primary Mullite), B = คอร์เดียไรต์ (Cordierite)

จากผลการทดลองที่แสดงคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางความร้อน ดังกล่าว ได้ทำการนำสมบัติดังกล่าวไปทำการเปรียบเทียบกับวัสดุทนไฟที่ขายในท้องตลาด สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.5 โดยแสดงให้เห็นว่าชิ้นทดสอบในการศึกษานี้ มีคุณสมบัติที่ดีเทียบเท่ากับวัสดุทนไฟที่ขายในตลาด ซึ่งสังเกตได้จากค่า Bulk Density, Apparent Porosity ซึ่งจะให้ค่าที่ดีกว่า แต่ค่าความทนไฟ และอุณหภูมิที่ใช้งานได้สูงสุด ยังมีส่วนที่ด้อยกว่าบ้าง ซึ่งควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นต่อไป

ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของหินทดสอบกับวัสดุทนไฟของบริษัท ภัทรา รีแฟรกทอรี จำกัด [1, 30]

Products	K -43	PATRA COR-30	ชิ้นงานในการ ทดลองนี้
Properties			
1. Bulk Density, gm/cc	2.21-2.28	2.20	2.58
2. Apparent Porosity, %	15-19	20	1.00
3. Refractoriness, SK (Seeger Cone)	34	-	-
4. Thermal Expansion Coefficient °C ⁻¹	-	-	2.98×10^{-6}
5. Maximum Service Temperatures :°C	1745	1370	1400