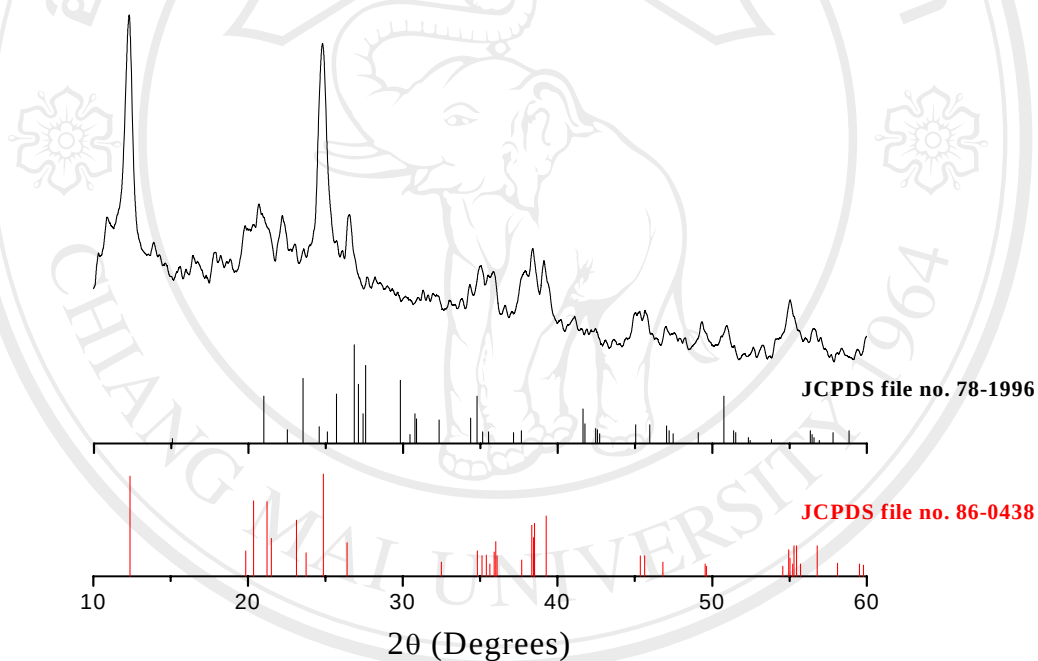


บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของวัตถุดิบ

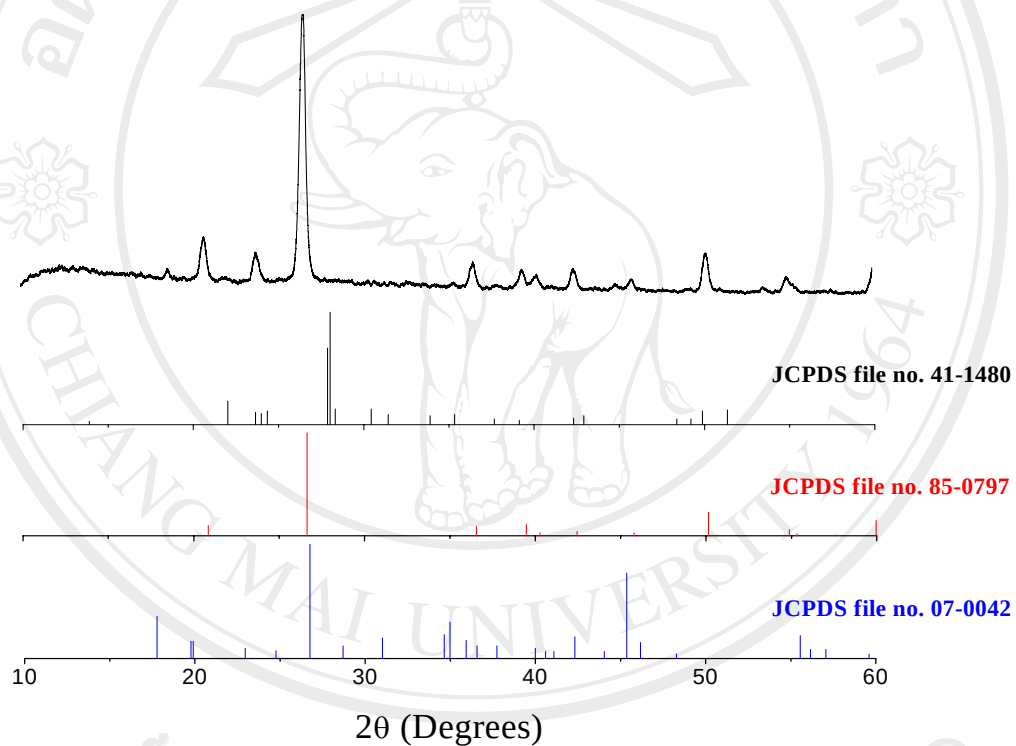
4.1.1 ดินขาวนราธิวาส หินฟ้าน้ำชนิดโซเดียม และควอตซ์



รูปที่ 4.1 องค์ประกอบทางแร่ของดินเกลีนนราธิวาส (เทียบกับ XRD Pattern จากข้อมูล JCPDS หมายเลข 78-1996 และ 86-0438 ตามลำดับ)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินขาวนราธิวาส (รูปที่ 4.1) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า มีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับข้อมูลของแร่เคโอลิไนท์ หรือสาร Aluminum Hydroxide Silicate มีสูตรเป็น $\text{Al}(\text{Si}_2\text{O}_5)\text{OH}_4$ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 78-1996 ซึ่งมีโครงสร้างเฟสแบบ Anorthic ผสมอยู่กับ Potassium Aluminum Silicate มีสูตรเป็น $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 86-0438 และมีโครงสร้างเฟสแบบ Monoclinic

ส่วนองค์ประกอบทางแร่ของหินฟีนมาชนิดโซเดียม (รูปที่ 4.2) พบว่า มีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับข้อมูลของสาร Sodium Calcium Aluminum Silicate หรือ Albite, Ca-rich, ordered ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 41-1480 มีสูตรเป็น $(\text{Na,Ca}) \text{Al} (\text{Si,Al})_3 \text{O}_8$ ซึ่งมีโครงสร้างเฟสแบบ Anorthic ผสมอยู่กับ SiO_2 ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 85-0797 ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล และสาร Potassium Aluminum Silicate Hydroxide ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 07-0042 หรือแร่ Muscovite-3T ซึ่งมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล มีสูตรเป็น $(\text{K,Na})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si}_{3.1}\text{Al}_{0.9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$



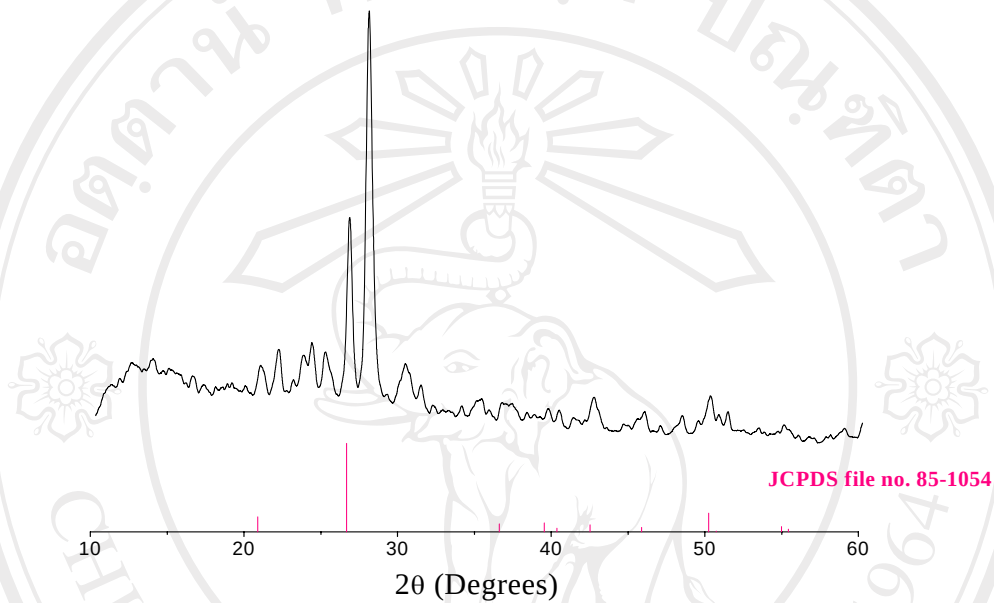
รูปที่ 4.2 องค์ประกอบทางแร่ของหินฟีนมาชนิดโซเดียม (เทียบกับ XRD Pattern จากข้อมูล JCPDS หมายเลข 41-1480, 85-0797 และ 07-0042 ตามลำดับ)

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าเส้นกราฟมาตรฐานนั้นเกิดการเลื่อนไป ซึ่งแสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของผลึก Albite ที่อยู่ในวัตถุดิบ ทำให้เกิดพีคที่มุมต่ำกว่าค่าจริง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินเภาลินและหินฟีนมาชนิดโซเดียม จะพบว่าวัตถุดิบทั้งสองชนิดนั้นมีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับข้อมูลของสาร Aluminum Silicate และ Potassium Aluminum Silicate เนื่องจากโครงสร้างพื้นฐานของวัตถุดิบทั้งสอง ประกอบไป

ด้วยโครงสร้างของ SiO_2 ในรูปเตตระไฮดรอล และออกเตไฮดรอลของ $\text{Al}(\text{O},\text{OH})_3$ ที่เชื่อมต่อกันเป็นชั้นๆ นอกจากนั้นยังพบว่า มีปริมาณของ SiO_2 สูงกว่าองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย

องค์ประกอบหลักของควอตซ์ (รูปที่ 4.3) จะพบว่ามีรูปแบบการเลี้ยวที่เบนสอดคล้องกับ SiO_2 ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล จากแฟ้มข้อมูล JCPDS ของ Quartz, α หมายเลข 85-1054

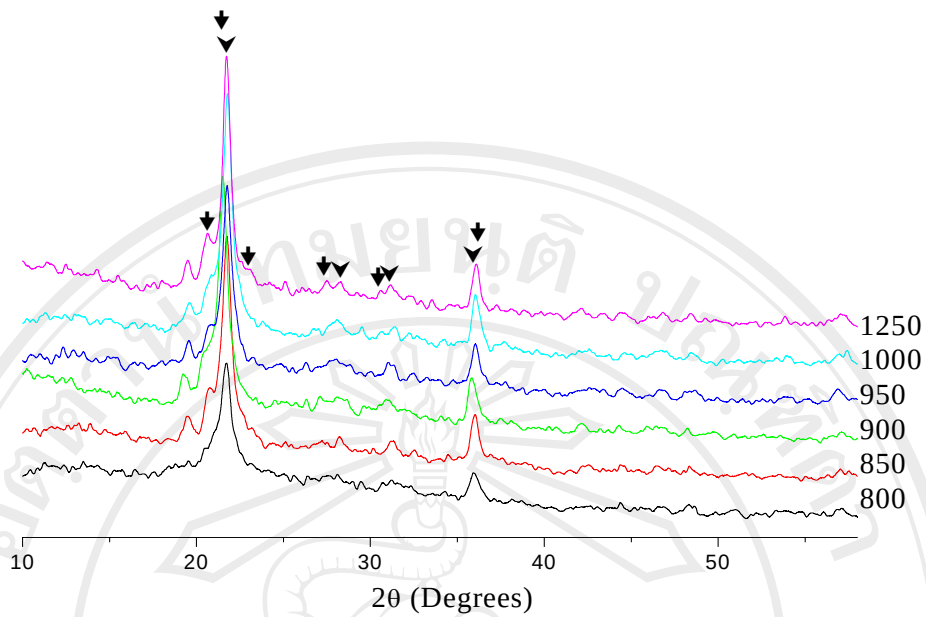


รูปที่ 4.3 องค์ประกอบทางแร่ของควอตซ์ (เทียบกับ XRD Pattern จากข้อมูล JCPDS หมายเลข 85-1054)

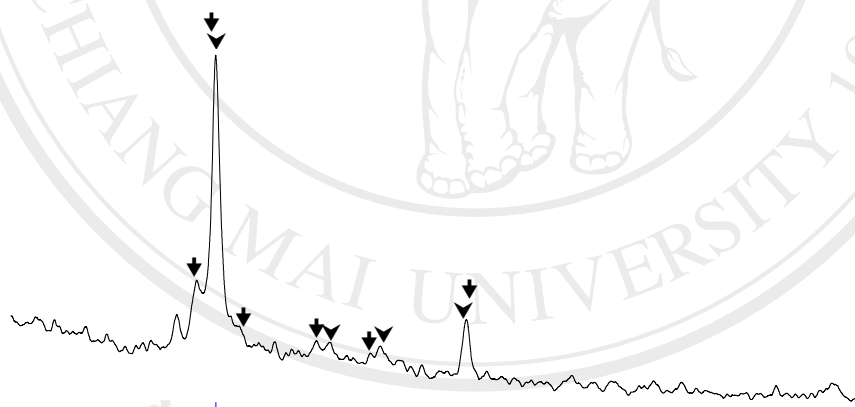
4.1.2 การเตรียมซีกาจากเถ้าแกลบ



รูปที่ 4.4 เถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

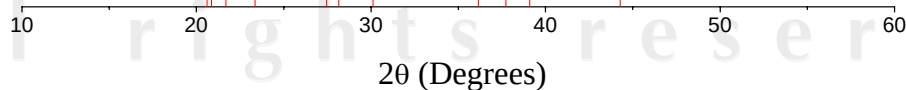


รูปที่ 4.5 องค์ประกอบทางแร่ของแก้วเคลือบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อ ▼ = Cristobalite และ ▲ = Tridymite^[5]



JCPDS file no. 82-0512

JCPDS file no. 16-0152



รูปที่ 4.6 องค์ประกอบทางแร่ของแก้วเคลือบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C เมื่อ ▼ = Cristobalite และ ▲ = Tridymite^[5] (เทียบกับ XRD Pattern จากข้อมูล JCPDS หมายเลข 82-0512 และ 16-0152 ตามลำดับ)

หลังจากทำการเผาแล้วเคลือบซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ กัน พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสูงขึ้น แก้วเคลือบที่ได้จะมีความขาวและมีปริมาณของซิลิกามากขึ้น (รูปที่ 4.4 และ 4.5) เมื่อทำการศึกษาร่องรอยประกอบทางแร่ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (รูปที่ 4.6) พบองค์ประกอบหลักคือผลึกของซิลิกา (SiO_2) ซึ่งมีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับข้อมูลของคริสโตบาไลต์ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 82-0512 มีโครงสร้างเฟสแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ผสมอยู่กับทริไคไมท์ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 16-0152 มีโครงสร้างเฟสแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) แต่ไม่พบโครงสร้างของควอตซ์ เนื่องจากการเผาเคลือบที่อุณหภูมิสูงนั้น จะทำให้ผลึกซิลิกาที่เกิดขึ้นเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของคริสโตบาไลต์และทริไคไมท์แทน^[7] และจากการศึกษาร่องรอยประกอบทางแร่ของแก้วเคลือบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C (รูปที่ 4.6) พบว่ามีปริมาณของซิลิกาสูงกว่าแก้วเคลือบที่เผาในทุกอุณหภูมิ จึงทำการเลือกแก้วเคลือบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C สำหรับใช้ในการทดลองต่อไป

4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวราธิวาส หินฟันม้าชนิดโซเดียม ควอตซ์ แก้วเคลือบ ล้างด้วยน้ำสะอาด และแก้วเคลือบที่ผ่านการเผาที่ 1250 °C

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ดินขาวราธิวาส	หินฟันม้าชนิดโซดา	ควอตซ์	แก้วเคลือบ	
				ล้างด้วยน้ำสะอาด	ผ่านการเผาที่ 1250 °C
Al_2O_3	36.18	15.60	0.00	0.26	0.00
SiO_2	44.76	71.08	98.73	92.57	96.43
Fe_2O_3	0.82	0.90	0.31	0.18	0.43
TiO_2	0.84	0.11	0.01	0.00	0.05
Na_2O	3.12	6.44	0.48	0.00	0.00
K_2O	1.15	2.44	0.03	1.85	1.76
CaO	0.13	1.10	0.08	0.90	0.96
MgO	0.11	0.47	0.09	0.00	0.00
MnO	0.01	0.07	0.00	0.24	0.00

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวราชีวาส หินฟันม้าชนิดโซเดียม ควอตซ์ เถ้าแกลบ
ล้างด้วยน้ำสะอาด และเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่ 1250 °C (ต่อ)

องค์ประกอบ ทางเคมี (%)	ดินขาว ราชีวาส	หินฟันม้า ชนิดโซดา	ควอตซ์	เถ้าแกลบ	
				ล้างด้วยน้ำ สะอาด	ผ่านการเผาที่ 1250 °C
Mn ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32
P ₂ O ₅	0.06	0.10	0.01	1.33	0.00
ZrO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
LOI	12.82	1.69	0.26	2.68	0.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

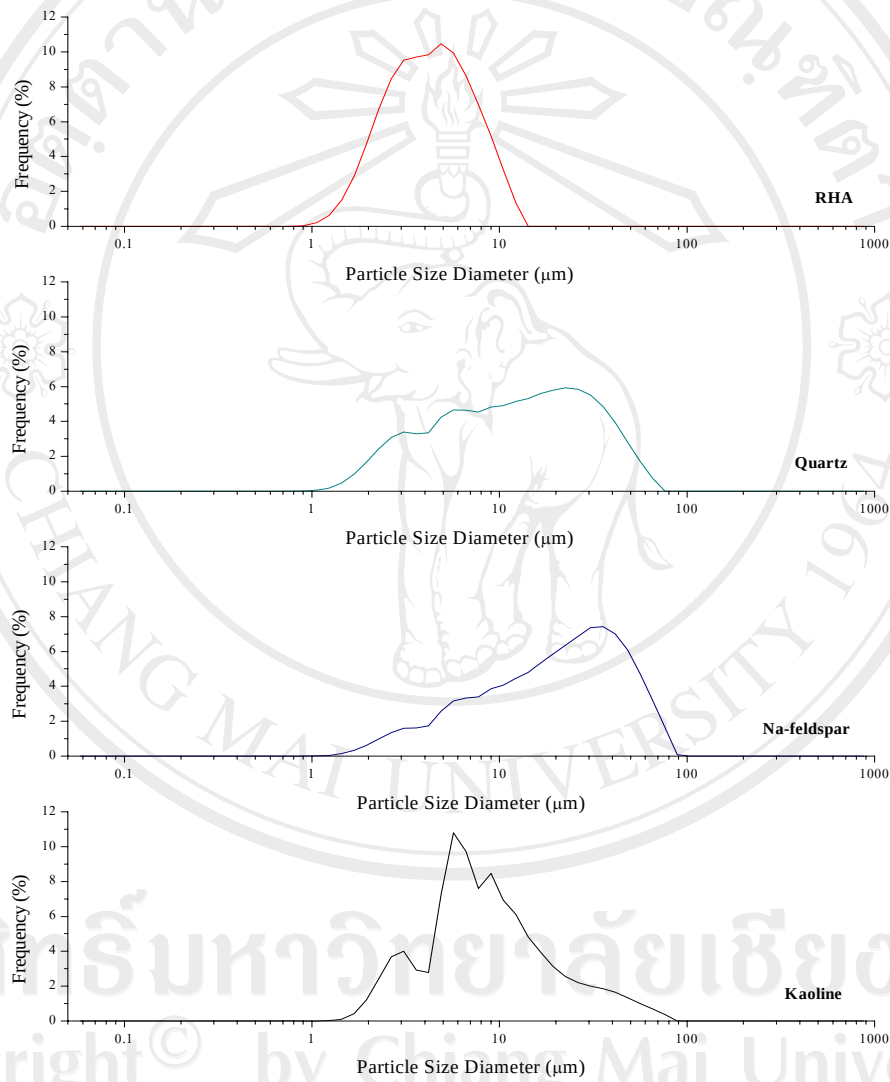
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวราชีวาส หินฟันม้าชนิดโซดา ควอตซ์ เถ้าแกลบที่ล้างด้วยน้ำสะอาด และเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่ 1250 °C ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ดินขาวราชีวาส มี SiO₂ และ Al₂O₃ เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมี SiO₂ ปริมาณมากที่สุด รองลงมาได้แก่ Al₂O₃ และมี Fe₂O₃, TiO₂, Na₂O, K₂O, CaO, MgO, MnO และ P₂O₅ ในปริมาณน้อย ส่วนหินฟันม้าชนิดโซดา มี SiO₂, Al₂O₃ และ Na₂O เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมี SiO₂ ปริมาณมากที่สุด รองลงมาได้แก่ Al₂O₃ และ Na₂O โดยมี Fe₂O₃, TiO₂, K₂O, CaO, MgO, MnO และ P₂O₅ ในปริมาณน้อย สำหรับควอตซ์และเถ้าแกลบนั้น จะพบว่า มี SiO₂ เป็นองค์ประกอบหลัก และจะพบว่าในควอตซ์ มี Fe₂O₃, TiO₂, Na₂O, K₂O, CaO, MgO, MnO และ P₂O₅ ในปริมาณน้อย ส่วนในเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่ 1250 °C พบว่า ไม่มี MgO, MnO, Al₂O₃ และ P₂O₅ แต่มี Mn₂O₃ และ ZrO₂ รวมอยู่ด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากการเผานั้นเอง เนื่องจากเตาเผาที่ใช้ นั้น มีการใช้งานในหลายลักษณะ รวมทั้งการเผาเคลือบด้วย ซึ่งทำให้เกิดการปนเปื้อนจากไอขององค์ประกอบเหล่านั้นในเถ้าแกลบด้วย ส่วนองค์ประกอบบางอย่างที่หายไปหลังจากการเผานั้น เกิดมาจากการถูกเผาไหม้ออกไป

4.3 การศึกษาผลของปริมาณเถ้าแกลบ

4.3.1 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค

เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุดิบเริ่มต้น จากรูปที่ 4.7 จะพบว่า การกระจายตัวของวัตถุดิบแต่ละชนิดนั้นมีการเกาะกลุ่มของอนุภาค ซึ่งดูได้จากตำแหน่งสูงสุดของ

กราฟที่มีหลายจุด และจากตารางที่ 4.2 จะพบว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าแกลบมีค่าน้อยที่สุด ในขณะที่หินปูนมีขนาดไซโตเดียมมีขนาดใหญ่ที่สุด และขนาดอนุภาคของวัตถุดิบมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งจะทำให้การรวมตัวหรือการจัดเรียงอนุภาคในเนื้อดินผสมเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากการมีช่องว่างเกิดขึ้นระหว่างอนุภาค



รูปที่ 4.7 การกระจายขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) ของวัตถุดิบแต่ละชนิด

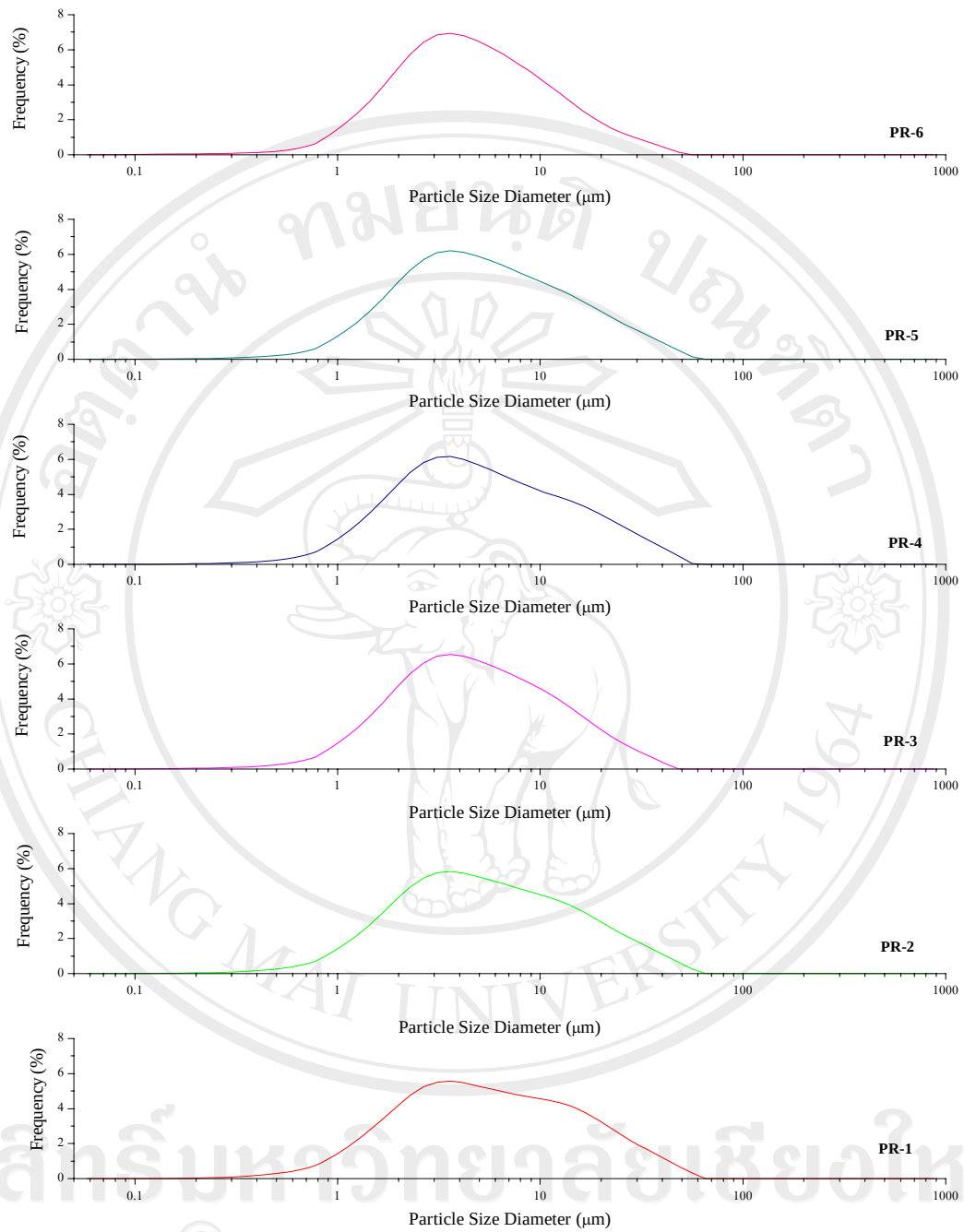
ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคเริ่มต้นของวัสดุบดแต่ละชนิดในส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน

วัสดุบด	การกระจายขนาดอนุภาค			ขนาดอนุภาค	
	10 %	50 %	90 %	เฉลี่ย	ใหญ่ที่สุด
ดินขาวราชีวาส	2.87	7.28	24.25	11.08	~76.32
หินฟันม้าชนิดโซเดียม	4.62	19.64	47.76	23.22	~88.91
ควอตซ์	2.79	11.54	34.6	15.55	~65.51
เถ้าแกลบ (บด 30 นาที)	1.95	3.93	7.68	4.41	~12.21

หลังจากการผสมแล้ว จะพบว่า ขนาดอนุภาคของแต่ละส่วนผสม มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลง และมีค่าใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4.3) และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.8 จะพบว่าการกระจายขนาดอนุภาคของแต่ละส่วนผสมมีการกระจายตัวที่ดี ไม่มีการเกาะกลุ่มของอนุภาค (มีตำแหน่งสูงสุดในกราฟเพียงตำแหน่งเดียว) ซึ่งทำให้การจัดเรียงตัวในเนื้อดินเกิดได้ดีขึ้น และลดปัญหาในการเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาค เนื่องจากความแตกต่างของขนาดอนุภาคได้

ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคของแต่ละส่วนผสมหลังจากทำการผสมแล้ว

ส่วนผสม (Mix no.)	การกระจายขนาดอนุภาค			ขนาดอนุภาค	
	10 %	50 %	90 %	เฉลี่ย	ใหญ่ที่สุด
PR-1	1.42	4.97	20.06	8.32	~56.23
PR-2	1.43	4.74	19.18	7.89	~56.23
PR-3	1.41	4.21	14.56	6.43	~41.43
PR-4	1.41	4.43	18.28	7.52	~56.23
PR-5	1.47	4.58	18.04	7.59	~56.23
PR-6	1.41	4.02	13.56	6.16	~48.27

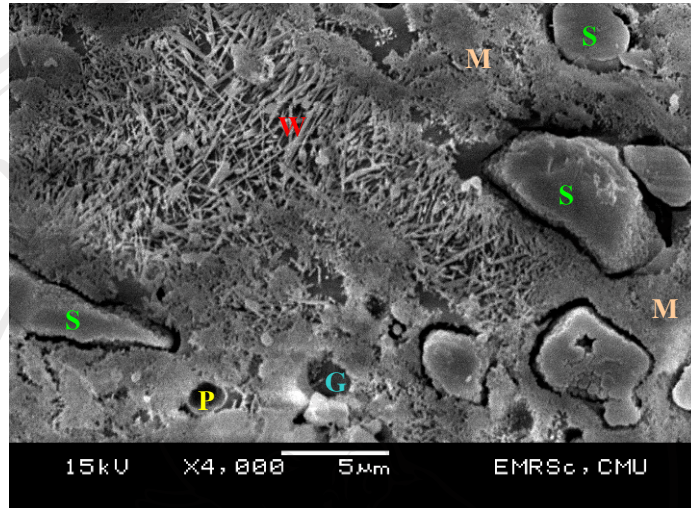


รูปที่ 4.8 การกระจายขนาดของอนุภาค (Particle Size Distribution) หลังการผสมแล้ว

4.3.2 โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของพอร์ซเลน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบโครงสร้างหลัก คือ ผลึกของมัลไลต์ (Mullite) ผลึกของซิลิกาที่ไม่

เกิดปฏิกิริยา (Free Silica) และรูพรุนปิด (Closed Pore) ที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อแก้ว (Glassy Phase) ดังรูปที่ 4.9

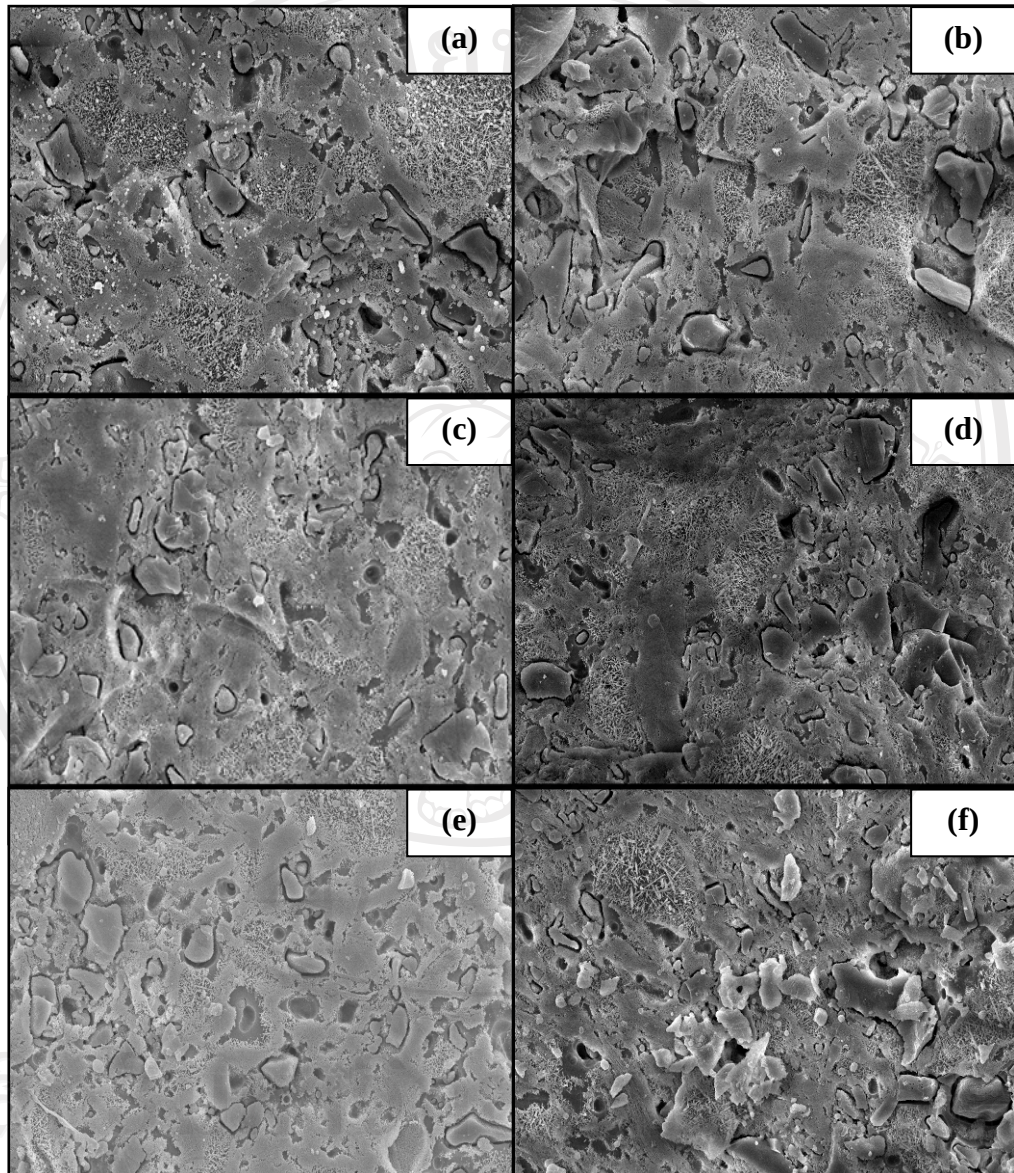


รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางจุลภาคพื้นฐานของพอร์ซเลนหลังเผา (กำลังขยาย 4000 เท่า)
(W=Whisker Structure, M=Primary Mullite, S=Free Silica, G=Glassy Phase, P=Closed Pore)^[74]

ผลิตภัณฑ์ของมัลไลต์ที่เกิดขึ้นในพอร์ซเลนมี 2 ลักษณะ คือ Primary Mullite มีลักษณะรูปแบบเข็ม เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวของดินเผาและกลายมาเป็นผลิตภัณฑ์ ส่วน Secondary Mullite ที่เกิดขึ้น จะมีลักษณะรูปแบบแท่งที่สานกันคล้ายดาบ (Whisker) ซึ่งเกิดจากการละลายของหินฟันม้าแล้วเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาที่หลุดออกมาจากดินเผาหรือซิลิกาจากเถ้าเคลือบ^[74]

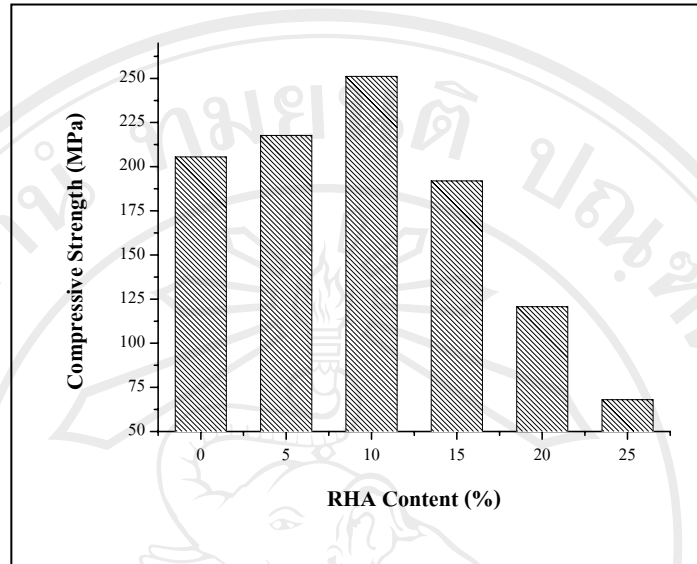
การใช้เถ้าเคลือบร้อยละ 10 (PR-3) (รูปที่ 4.10) จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบวิสเคอร์ (Whiskers) ของผลิตภัณฑ์ของมัลไลต์มากกว่าส่วนผสมอื่น นอกจากนั้นยังมีปริมาณของซิลิกาที่ไม่เกิดปฏิกิริยาและรูพรุนปิดน้อย ส่วนการใช้เถ้าเคลือบมากขึ้น (PR-4 - PR-6) จะพบว่ามีโครงสร้างของมัลไลต์ทั้งในรูปแบบเข็มและรูปแบบแท่งลดลง แต่กลับมีปริมาณของซิลิกาที่ไม่เกิดปฏิกิริยา เนื้อแก้วและรูพรุนปิดมากขึ้น เนื่องจากซิลิกาที่ได้จากเถ้าเคลือบมีขนาดเล็กและเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Active Silica)^[70] เมื่อมีปริมาณเถ้าเคลือบมาก จะทำให้ซิลิกาเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นได้ดี มีปริมาณของ Liquid Phase ระหว่างกระบวนการแน่นตัว (Densification) เกิดเป็นเนื้อแก้วได้เร็วและมากขึ้น ส่งผลให้กระบวนการสุกตัว (Vitrification) และกระบวนการแน่นตัวเกิดได้เร็วขึ้น แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงจนเลยจุดสุกตัว จะทำให้เกิดการเดือดของเนื้อแก้ว^[75] ส่งผลให้เกิดรูพรุนขึ้น

ในโครงสร้าง และเมื่อซิลิกาทำปฏิกิริยาจนกระทั่งหินฟินน้ำหมดแล้ว จะมีซิลิกาที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเหลืออยู่หรือตกผลึกช้า และเข้าไปฝังตัวอยู่ในเนื้อแก้วมากขึ้น (รูปที่ 4.10)

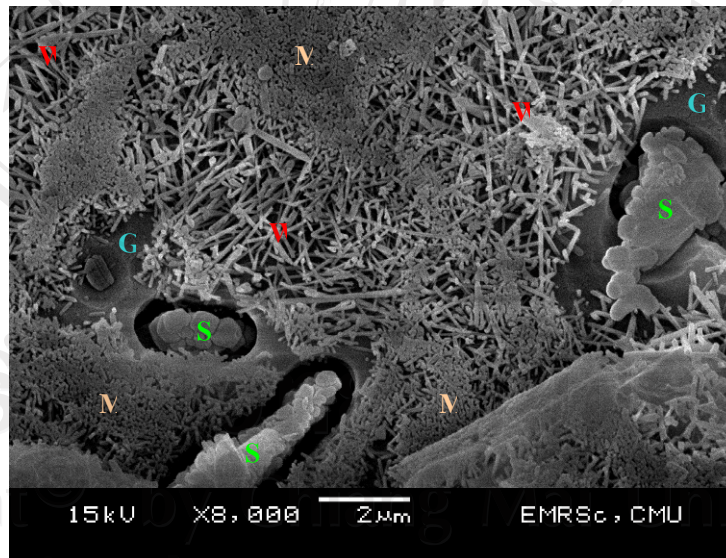


รูปที่ 4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของพอร์ซเลนที่ใช้เถ้าเคลบในปริมาณที่แตกต่างกัน (กำลังขยาย 1500 เท่า) (a) PR-1, (b) PR-1, (c) PR-3, (d) PR-4, (e) PR-5, (f) PR-6

4.3.3 ความทนแรงอัด (Compressive Strength)



รูปที่ 4.11 ความทนแรงอัด (Compressive Strength) ของพอร์ซเลนหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C

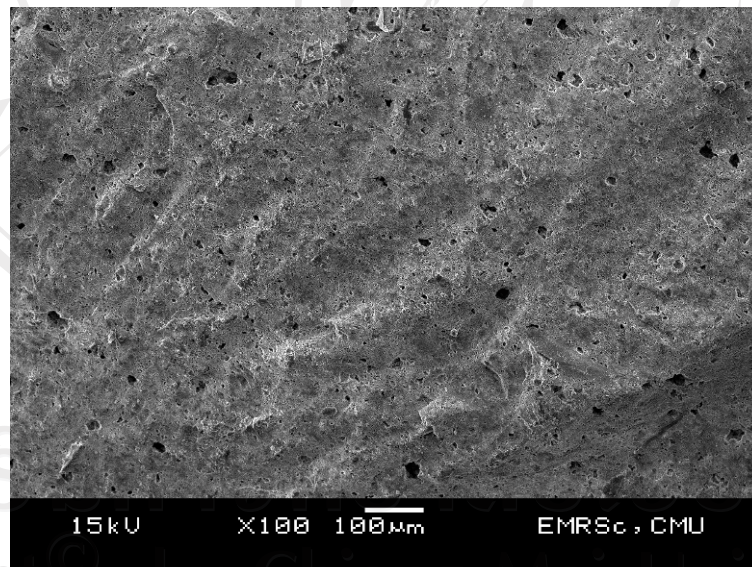


รูปที่ 4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของพอร์ซเลนที่ใช้เถ้าเคลบร้อยละ 10 (กำลังขยาย 8000 เท่า)

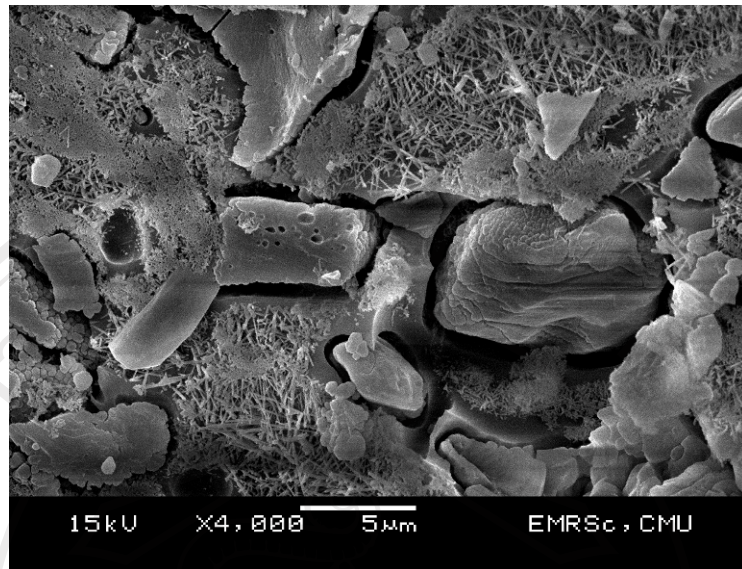
จากผลการทดลอง พบว่า ความทนแรงอัดของพอร์ซเลนที่มีการใช้เถ้าเคลบ มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณเถ้าเคลบมากขึ้น ดังรูปที่ 4.11 การใช้เถ้าเคลบร้อยละ 10 (PR-3) จะทำให้

พอร์ซเลนมีความทนแรงอัดสูงสุด คือ 251.06 MPa เพิ่มขึ้นร้อยละ 22.14 จากการไม่ใช้เถ้าแกลบเลย (PR-1) เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างทางจุลภาค (รูปที่ 4.12) จะพบว่าการมีโครงสร้างแบบวิสเคอร์ของผลึกรูปแบบแท่งของมัลไลต์ ที่มีลักษณะสานกันคล้ายโครงสร้างตาข่าย จะทำหน้าที่เป็นตัวเสริมแรงในโครงสร้างของพอร์ซเลน ทำให้มีความเหนียวมากขึ้น^[76] จึงสามารถรับและกระจายแรงได้ดีเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก

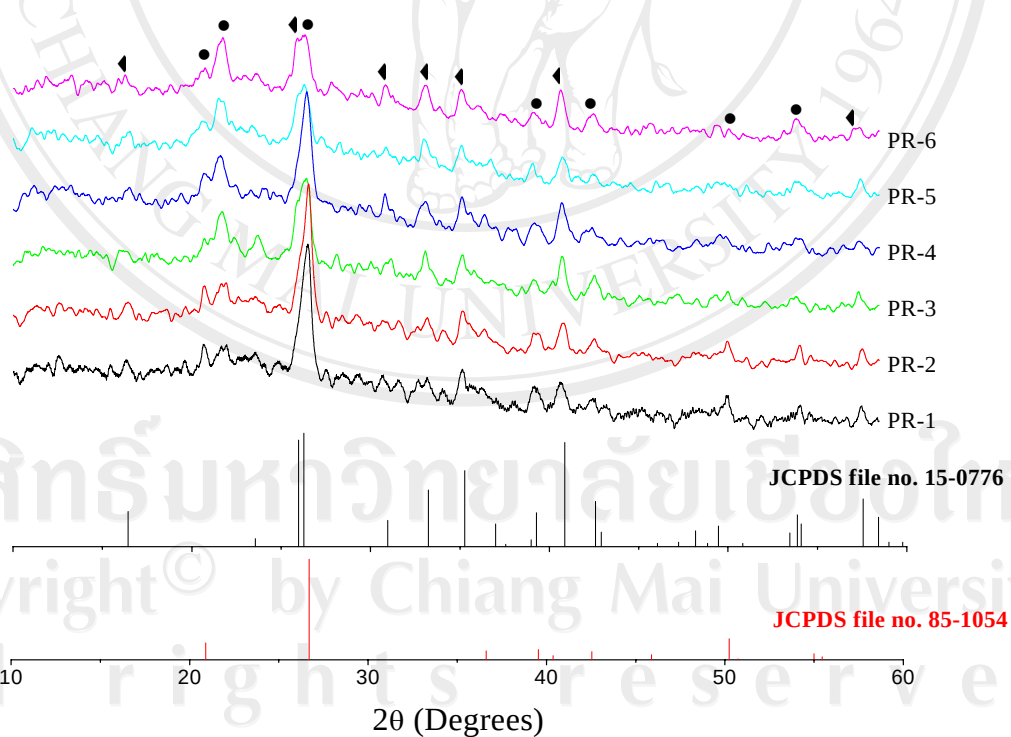
ส่วนการใช้เถ้าแกลบมากขึ้น จนกระทั่งแทนที่ควอตซ์ทั้งหมด คือ ร้อยละ 25 (PR-6) จะทำให้พอร์ซเลนมีความทนแรงอัดต่ำที่สุด คือ 68.06 MPa เนื่องจากการมีเนื้อแก้วมากในโครงสร้าง และเกิดการเดือดจนทำให้เกิดรูพรุน ทำให้ทนต่อแรงกระทำจากภายนอกได้น้อย มีความแข็งแรงต่ำ และการฝังตัวอยู่ในเนื้อแก้วของ Free Silica จะทำให้เกิดความเครียดขึ้นในโครงสร้าง นั่นคือขณะที่พอร์ซเลนกำลังเย็นตัวหลังจากการเผา จะเกิดการหดตัวของแต่ละโครงสร้าง (Phase) ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดรอยแตกรอบๆ อนุภาคของซิลิกา เนื่องจากการหดตัวไม่เท่ากันของผลึกซิลิกาและเนื้อแก้ว จึงทำให้เกิดการแตกหักได้ง่าย เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก^[77] (รูปที่ 4.13-4.14)



รูปที่ 4.13 โครงสร้างทางจุลภาคของพอร์ซเลนที่ใช้เถ้าแกลบร้อยละ 25 (กำลังขยาย 100 เท่า)



รูปที่ 4.14 โครงสร้างทางจุลภาคของพอร์ซเลนที่ใช้เถ้าเคลือบร้อยละ 25 (กำลังขยาย 4000 เท่า)



รูปที่ 4.15 องค์ประกอบทางแร่ของพอร์ซเลนที่ใช้เถ้าเคลือบในปริมาณที่ต่างกันไป หลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C เมื่อ • = Free Silica และ ♦ = Mullite^[70, 78] (เทียบกับ XRD Pattern จากข้อมูล JCPDS หมายเลข 85-1054 และ 15-0776 ตามลำดับ)

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ (รูปที่ 4.15) จะพบองค์ประกอบทางแร่ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างหลังเผา ได้แก่ มัลไลต์และซิลิกา^[70, 78] ซึ่งมีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับข้อมูลของมัลไลต์ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 15-0776 และซิลิกาที่ไม่เกิดปฏิกิริยาจะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับข้อมูลของแอลฟาควอตซ์ (α -Quartz) ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 85-1054 และพบว่า PR-3 จะมีปริมาณของมัลไลต์เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณของซิลิกาที่ไม่เกิดปฏิกิริยาลดลง เมื่อเทียบกับ PR-1 ในขณะที่ PR-4 มีปริมาณของซิลิกาที่ไม่เกิดปฏิกิริยามากกว่า ทำให้มีความทนแรงอัดน้อยกว่า ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น ส่วน PR-5 และ PR-6 นั้น จะมีปริมาณของผลึกลดลง เนื่องจากการเกิดเป็นเนื้อแก้วมากขึ้น และนอกจากนั้นยังมีปริมาณของรูพรุนปิดที่เกิดขึ้นจากการเดือดของเนื้อแก้วมากขึ้นด้วย

การลดลงของซิลิกาที่ไม่เกิดปฏิกิริยาใน PR-3 เนื่องมาจากซิลิกาจะทำปฏิกิริยากับหินฟินม้าแล้วกลายมาเป็นผลึกมัลไลต์ เมื่อปริมาณของมัลไลต์ในโครงสร้างมากขึ้น จะทำให้ซิลิกาที่ไม่เกิดปฏิกิริยาลดลง ส่วน PR-6 จะมีปริมาณของซิลิกาที่ไม่เกิดปฏิกิริยาลดลงเช่นกัน แต่ปริมาณของมัลไลต์ก่อนข้างคองที่ ซึ่งเกิดจากการเกิดไปเป็นเนื้อแก้วมากกว่าเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของมัลไลต์

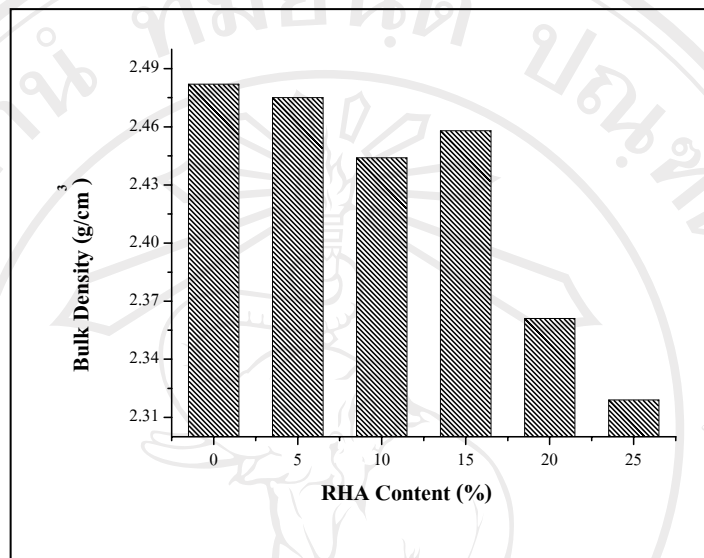
4.3.4 สมบัติทั่วไปของพอร์ซเลน

สมบัติของพอร์ซเลนและโครงสร้างทางจุลภาคของพอร์ซเลนนั้น มีความสัมพันธ์กันอย่างมาก เมื่อโครงสร้างทางจุลภาคเปลี่ยนไป สมบัติต่างๆ ก็จะเปลี่ยนตามไปด้วย ซึ่งทำให้สามารถอธิบายสมบัติต่างๆ เหล่านั้นได้ด้วยโครงสร้างทางจุลภาคของพอร์ซเลน ดังนี้

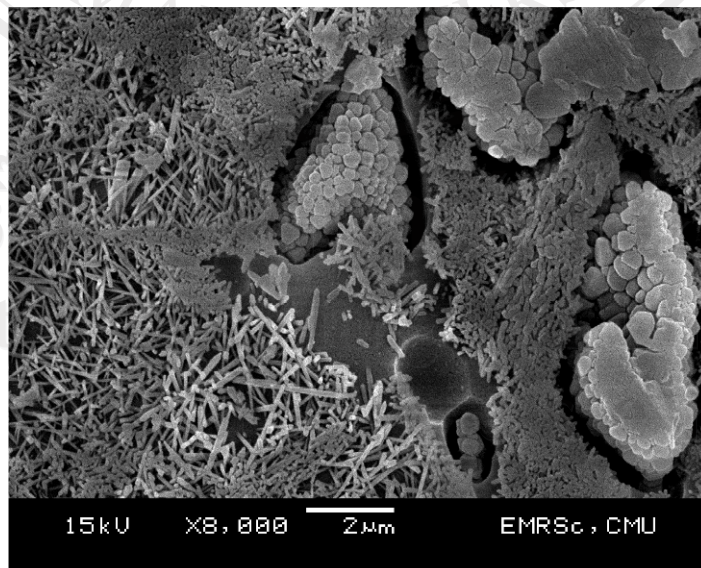
1. ความหนาแน่นของพอร์ซเลน (รูปที่ 4.16) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการใช้เถ้าเคลบมากขึ้น (PR-6) เนื่องจากการเกิดเนื้อแก้วมากขึ้น เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการเดือดของเนื้อแก้ว ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง ส่วนการใช้เถ้าเคลบร้อยละ 10 (PR-3) จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าการใช้เถ้าเคลบร้อยละ 15 (PR-4) ซึ่งเกิดจากการมีโครงสร้างแบบ Whisker และโครงสร้างของผลึกมัลไลต์ในรูปแบบแทงมากกว่า PR-4 (รูปที่ 4.18) ทำให้มีความหนาแน่นต่ำกว่า^[76] และส่งผลให้เกิดการหดตัวมากกว่า (รูปที่ 4.19) แต่จะพบว่า การหดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าเคลบที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการยุบตัวตามธรรมชาติของเถ้าเคลบ ซึ่งไม่เอื้อต่อการเตรียมชิ้นทดสอบและยังเพิ่มการสูญเสียชิ้นทดสอบเนื่องจากการแตกร้าวและเสียรูปร่างของชิ้นทดสอบอีกด้วย^[70]

จากผลการทดลองจะพบว่า ค่าความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นปรากฏมีค่าเท่ากัน แสดงว่าพอร์ซเลนที่เตรียมได้ไม่มีรูพรุนเปิด และไม่มีการดูดซึมน้ำเลย (ตารางที่ 4.4) ซึ่งเกิดจากการหลอมตัวของหินฟินม้าร่วมกับซิลิกา กลายเป็นเนื้อแก้วและแทรกเข้าไปปิดรูพรุนจนหมด เมื่อเกิด

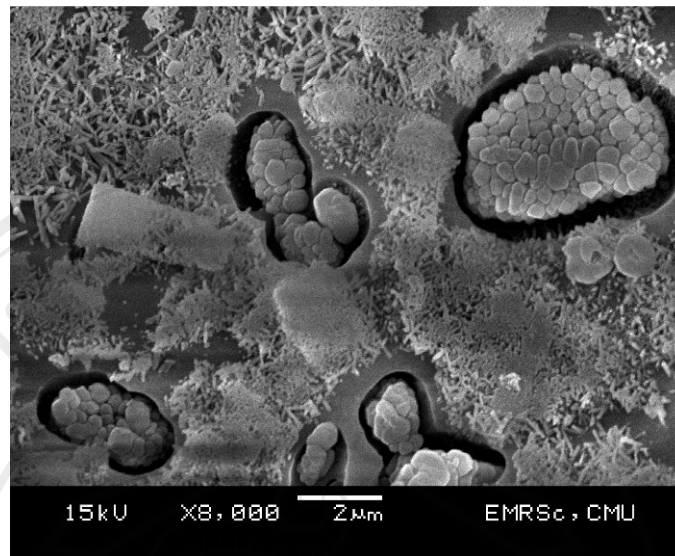
การเย็นตัวลง ผิวด้านนอกจะเย็นตัวเร็วกว่า ทำให้ไม่มีรูพรุนที่บริเวณผิวด้านนอก ในขณะที่เนื้อแก้วด้านในเกิดการเดือด เมื่อเย็นตัวลง จะมีฟองอากาศอยู่ภายในและไม่สามารถดันผิวด้านนอกออกมาได้ จึงทำให้เกิดรูพรุนปิดอยู่ในโครงสร้าง



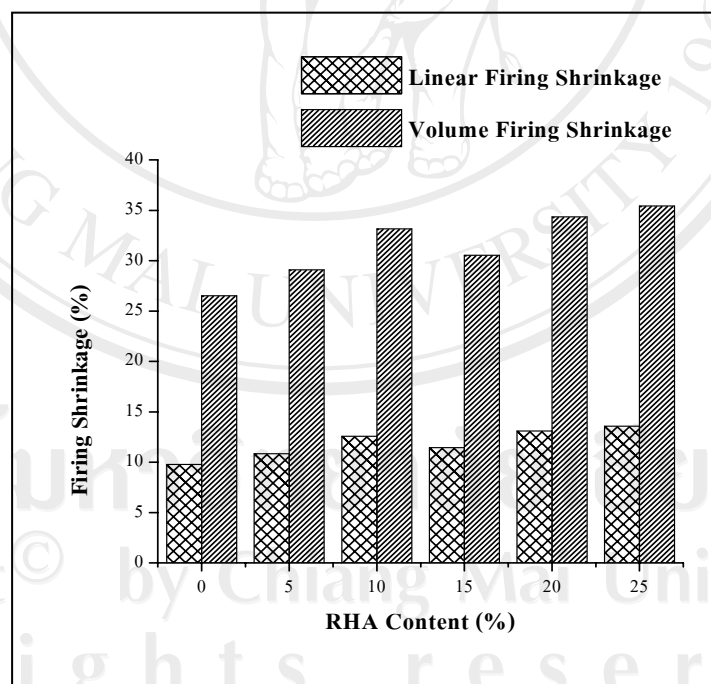
รูปที่ 4.16 ความหนาแน่นของพอร์ซเลนที่ใช้เถ้าแกลบในปริมาณที่แตกต่างกัน หลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C



รูปที่ 4.17 โครงสร้างทางจุลภาคของพอร์ซเลนที่ใช้เถ้าแกลบร้อยละ 10 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C



รูปที่ 4.18 โครงสร้างทางจุลภาคของพอร์ซเลนที่ใช้เถ้าแกลบร้อยละ 15
หลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C



รูปที่ 4.19 การหดตัวของพอร์ซเลนที่ใช้เถ้าแกลบในปริมาณที่แตกต่างกัน
หลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C

ตารางที่ 4.4 การหดตัวหลังเผา ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำของชั้นทดสอบหลังเผา

ส่วนผสม (Mix no.)	การหดตัวหลังเผา (%)		ความหนาแน่น (g/cm ³)		การดูด ซึมน้ำ (%)
	Linear Shrinkage	Volume Shrinkage	Bulk Density	Apparent Density	
PR-1	9.7 ± 0.26	26.5 ± 0.78	2.482 ± 0.005	2.482 ± 0.005	0.000
PR-2	10.8 ± 0.34	29.0 ± 1.04	2.475 ± 0.006	2.475 ± 0.006	0.000
PR-3	12.5 ± 0.49	33.1 ± 1.49	2.444 ± 0.002	2.444 ± 0.002	0.000
PR-4	11.4 ± 0.19	30.5 ± 1.49	2.458 ± 0.003	2.458 ± 0.003	0.000
PR-5	13.0 ± 0.08	34.3 ± 0.25	2.361 ± 0.002	2.361 ± 0.002	0.000
PR-6	13.5 ± 0.28	35.4 ± 0.84	2.319 ± 0.008	2.319 ± 0.008	0.000

ตารางที่ 4.5 ความขาวสว่าง ความโปร่งแสง ความทนแรงอัดและสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วย
ความร้อน (COE) ของชั้นทดสอบหลังเผา

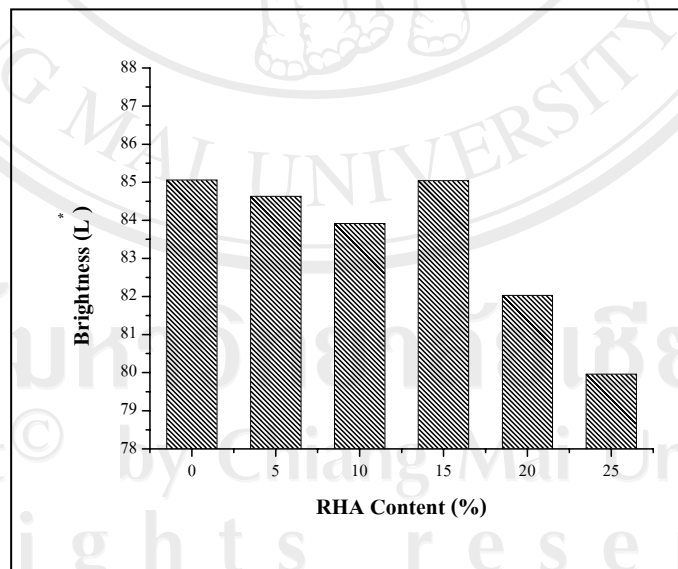
ส่วนผสม (Mix no.)	ความขาวสว่าง (L*)	ความโปร่งแสง	ความทนแรงอัด (MPa)	COE (25-500 °C) (x 10 ⁻⁶)
PR-1	85.060	0.988	205.56 ± 5.675	6.297
PR-2	84.626	0.996	217.67 ± 26.690	6.442
PR-3	83.912	0.977	251.06 ± 45.730	6.184
PR-4	85.038	0.996	192.04 ± 9.230	6.568
PR-5	82.030	0.991	120.77 ± 6.760	5.952
PR-6	79.964	0.990	68.06 ± 6.360	5.862

2. เมื่อพิจารณาความขาวสว่างของพอร์ซเลน (รูปที่ 4.20) พบว่าพอร์ซเลนทุกส่วนผสมมีค่าความขาวสว่างอยู่ในช่วงค่าความขาวสว่างของพอร์ซเลนทางการค้า^[59] แม้ว่าพอร์ซเลนที่ใช้เถ้าแกลบ จะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ยังใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช้เถ้าแกลบ เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ ยังมีสิ่งปนเปื้อนอยู่ด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะพบว่าเถ้าแกลบที่เตรียมได้นั้นมีไอออนของเหล็ก (Fe) ปนเปื้อนอยู่ด้วยเช่น เมื่อเผาในบรรยากาศออกซิเดชัน เหล็กจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบเฟอร์ริก (Fe₂O₃) ทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีครีม เมื่อใช้เถ้าแกลบมากขึ้นจึง

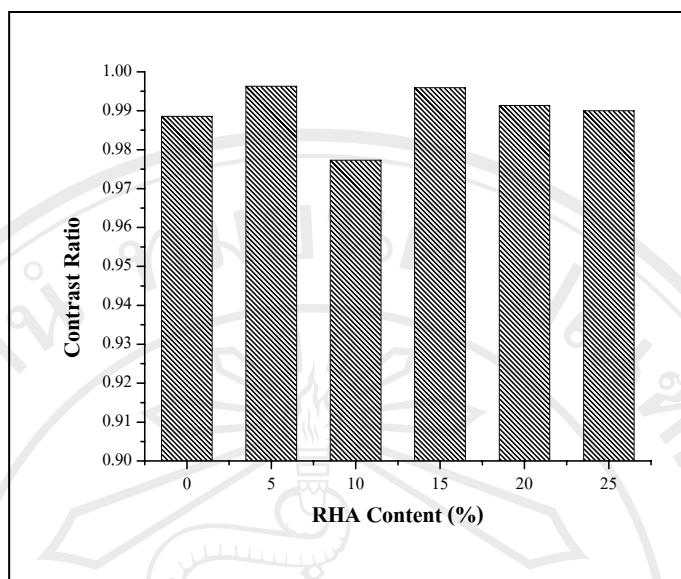
ทำให้ความขาวสว่างของฟอร์ชเลนลดลง นอกจากนั้นยังมี องค์ประกอบของสารที่ทำให้สีอยู่ด้วย ได้แก่ TiO_2 , Mn_2O_3 และ ZrO_2 ซึ่งส่งผลทำให้ฟอร์ชเลนที่ใช้เถ้าเกลบนั้น มีความขาวสว่างลดลงจากการไม่ใช่เถ้าเกลบ

นอกจากการปนเปื้อนในวัตถุดิบแล้ว ความขาวสว่างของฟอร์ชเลนยังขึ้นอยู่กับความเรียบของผิวที่แสงตกกระทบบ นั่นคือ เมื่อแสงตกกระทบบนผิวเรียบ จะเกิดการสะท้อนของแสงในทิศทางเดียวกัน ความเข้มแสงที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับความเข้มแสงที่ตกกระทบบ ทำให้ค่าความขาวสว่างมาก ในขณะที่แสงตกกระทบบนผิวที่ขรุขระ แสงที่สะท้อนออกมาจะกระจายไปในหลายทิศทาง เมื่อวัดความเข้มแสงที่สะท้อนออกมา จะมีค่าต่ำ ทำให้ค่าความขาวสว่างน้อย และความโปร่งแสงต่ำ นอกจากนั้นแล้ว เมื่อแสงตกกระทบบนขอบเกรนหรือรูพรุนจะทำให้เกิดการกระเจิงของแสงมากและมีการทะลุผ่านได้น้อย ทำให้มีค่าความโปร่งแสงต่ำด้วยเช่นกัน

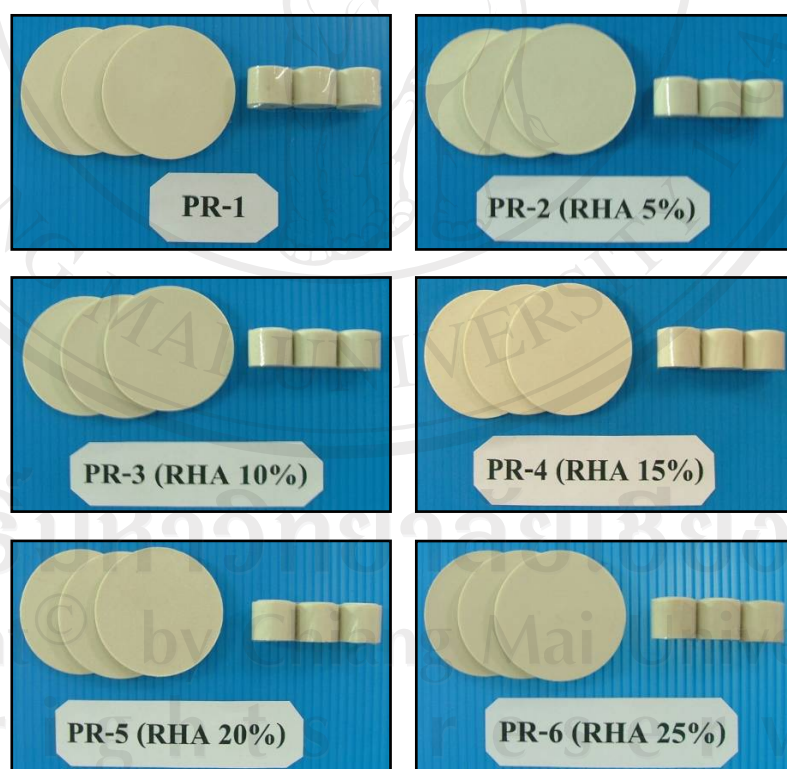
จากรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 การใช้เถ้าเกลบร้อยละ 10 (PR-3) มีความขาวสว่างและความโปร่งแสงต่ำกว่าการใช้เถ้าเกลบร้อยละ 15 (PR-4) เนื่องจากการมีผลลึกรูปแบบแท่งของมัลไลต์มากกว่า ซึ่งทำให้มีจำนวนของขอบเกรนมาก แม้จะมีจำนวนของรูพรุนน้อยกว่า (รูปที่ 4.17 และ 4.18) ส่วนการใช้เถ้าเกลบร้อยละ 20-25 (PR-5, PR-6) นั้น พบว่ามีความขาวสว่างและความโปร่งแสงลดลง แม้จะมีปริมาณเนื้อแก้วมาก เนื่องจากการมีรูพรุนในโครงสร้างมากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4.20 ความขาวสว่าง (Brightness) ของฟอร์ชเลนที่ใช้เถ้าเกลบในปริมาณที่แตกต่างกัน

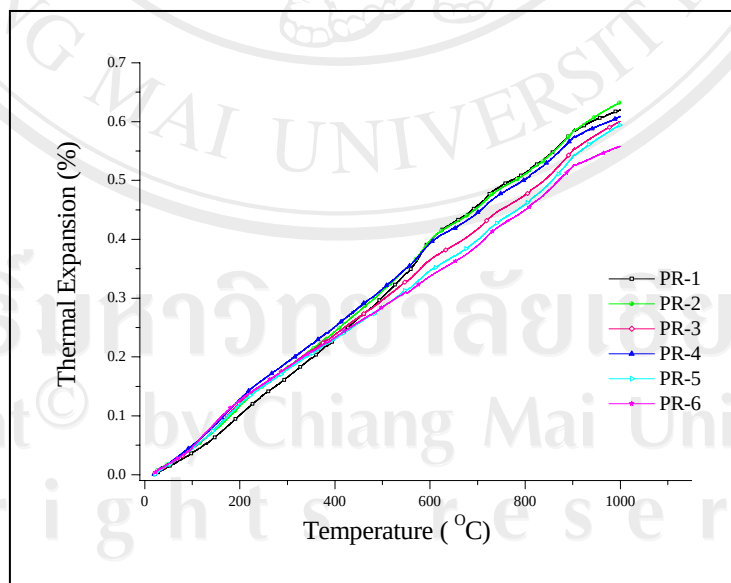


รูปที่ 4.21 ความโปร่งแสง (Contrast Ratio) ของพอร์ซเลนใช้เถ้าเคลือบในปริมาณที่ต่างกัน

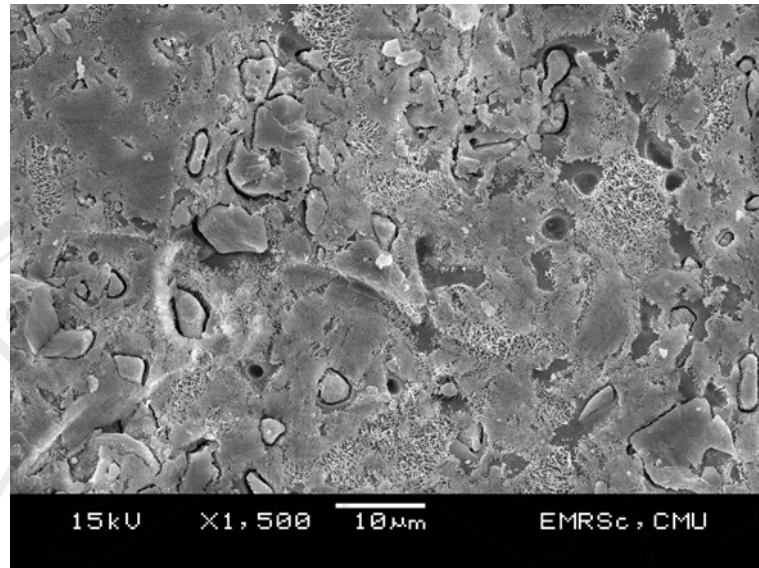


รูปที่ 4.22 ขั้นตอนทดสอบแบบแห้งและแผ่นกลมที่ใช้ปริมาณเถ้าเคลือบแตกต่างกันหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C (PR-1 ไม่มีการใช้เถ้าเคลือบแทนควอตซ์ PR-2, PR-3, PR-4, PR-5 และ PR-6 มีการใช้เถ้าเคลือบแทนควอตซ์ร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 ตามลำดับ)

3. การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของหินทดสอบหลังเผา (รูปที่ 4.23) พบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C การขยายตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเถ้าแกลบมากขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของทรีไคไมท์ในเถ้าแกลบ (รูปที่ 2.4) และการขยายตัวจะค่อยๆ ลดลง เนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปผลึกของคริสโตบาไลต์ ทำให้มีการหดตัว จนกระทั่งมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้ 400 °C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การขยายตัวจะค่อยๆ ลดลงเมื่อมีปริมาณเถ้าแกลบมากขึ้น (PR-6) และลดลงมากที่สุดถึงร้อยละ 15.87 ที่อุณหภูมิ 800 °C เนื่องจากการใช้เถ้าแกลบมากขึ้น จะทำให้ปริมาณซิลิกาที่เหลือในหินทดสอบหลังเผาลดลง เนื่องจากเกิดเป็นเนื้อแก้วมากขึ้น ขณะที่ปริมาณของมัลไลต์ส่วนใหญ่ มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย^[70] (รูปที่ 4.15) และเนื่องจากซิลิกาที่ได้จากเถ้าแกลบ ซึ่งอยู่ในรูปของคริสโตบาไลต์และทรีไคไมท์จะไม่เกิดการเปลี่ยนรูปผลึกในช่วงอุณหภูมิสูง^[23] (ดังแสดงในรูปที่ 2.20) ส่วนหินทดสอบที่มีการใช้ควอตซ์ในปริมาณมาก (PR-1) จะทำให้เกิดการขยายตัวมากที่อุณหภูมิสูง จากการเปลี่ยนจากควอตซ์ที่อุณหภูมิปกติ (α -Quartz) ไปเป็นควอตซ์ที่อุณหภูมิสูง (β -Quartz) ที่อุณหภูมิ 573 °C^[19] จึงทำให้เกิดการขยายตัวมากขึ้น และจะพบว่าในทุกส่วนผสมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงการขยายตัวที่อุณหภูมิต่ำและสูงแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ยกเว้นการใช้เถ้าแกลบร้อยละ 10 (PR-3) ที่มีอัตราการขยายตัวคงที่ในทุกช่วงอุณหภูมิ ซึ่งเกิดจากโครงสร้างหลังเผาที่เกิดขึ้น (Phase) มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (รูปที่ 4.24) ทำให้เกิดการขยายตัวใกล้เคียงกันและขยายตัวไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.23 การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (Thermal Expansion) ของพอร์ซเลนที่ใช้เถ้าแกลบในปริมาณที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.24 โครงสร้างทางจุลภาคของฟอรัชเลนที่ใช้เส้นใยกลบร้อยละ 10 (กำลังขยาย 1500 เท่า)

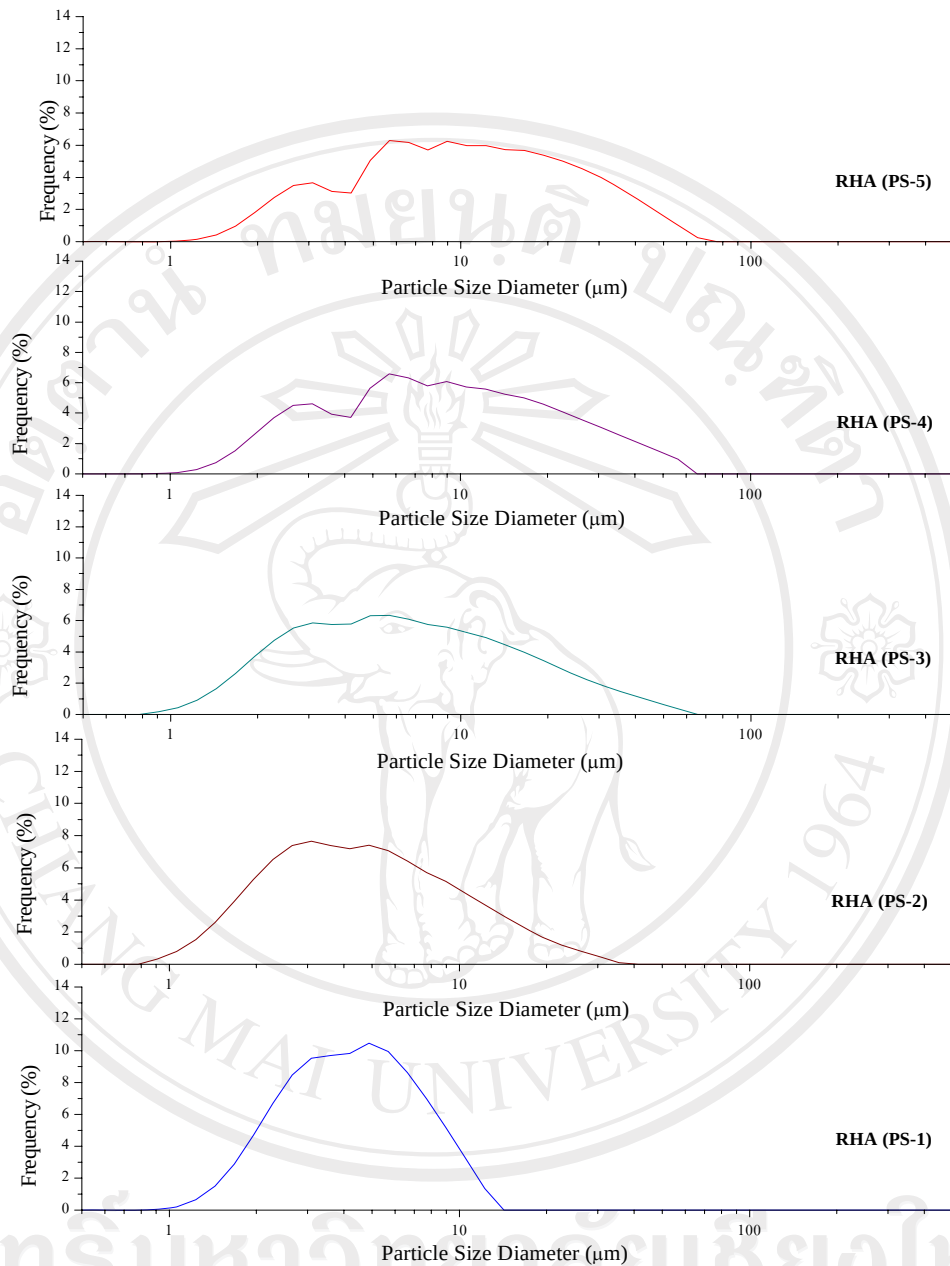
4.4 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคของเส้นใยกลบ

4.4.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาค

ดินเหนียวและหินปูนมีขนาดไซโตเลียมมีขนาด ดังตารางที่ 4.6 และมีการกระจายขนาดของอนุภาค (รูปที่ 4.7) ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 4.2.1 ส่วนการกระจายขนาดอนุภาคของเส้นใยกลบที่บดเป็นเวลาต่างๆ กันนั้น พิจารณาได้จากรูปที่ 4.25 ซึ่งจะพบว่าเส้นใยกลบในทุกส่วนผสมมีการกระจายขนาดอนุภาคที่ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากการเกาะกลุ่มของอนุภาคขนาดต่างๆ ซึ่งสังเกตได้จากการมีตำแหน่งสูงสุดของกราฟหลายตำแหน่ง

ตารางที่ 4.6 ขนาดอนุภาคเริ่มต้นของวัตถุดิบแต่ละชนิดในส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ฟอรัชเลน

วัตถุดิบ	การกระจายขนาดอนุภาค			ขนาดอนุภาค	
	10 %	50 %	90 %	เฉลี่ย	ใหญ่ที่สุด
ดินขาวนาวิวาส	2.87	7.28	24.25	11.08	~76.32
หินปูนมีขนาดไซโตเลียม	4.62	19.64	47.76	23.22	~88.91



รูปที่ 4.25 การกระจายขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) เริ่มต้นของเถ้าแกลบในส่วนผสม PS-1 ถึง PS-5

จากตารางที่ 4.7 จะพบว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าแกลบเริ่มต้นนั้นมีขนาดอยู่ระหว่าง 4-13 ไมครอน ซึ่งมีความแตกต่างจากดินขาวและหินฟืนม้าชนิดโซเดียม ซึ่งความแตกต่างของขนาดอนุภาคนี้อาจส่งผลต่อการจัดเรียงอนุภาคในเนื้อดิน และมีผลต่อปฏิกิริยาในขณะทำการเผา ทำให้เกิดโครงสร้างหลังเผาที่แตกต่างกัน

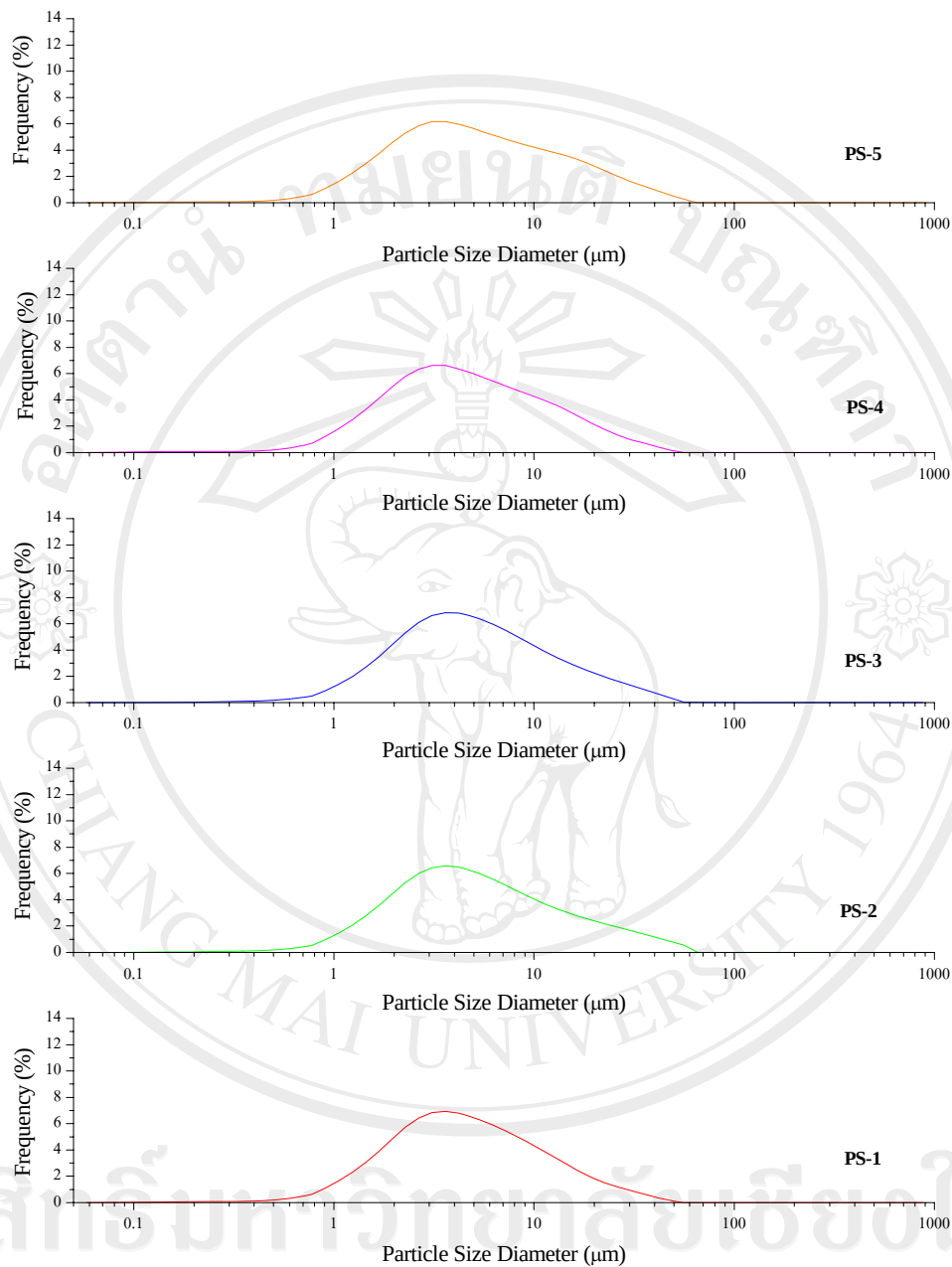
ตารางที่ 4.7 ขนาดอนุภาคของเถ้าเคลือบในส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน

ส่วนผสม (Mix no.)	เวลาในการบด (นาที)	การกระจายขนาดอนุภาค			ขนาดอนุภาค	
		10 %	50 %	90 %	เฉลี่ย	ใหญ่ที่สุด
PS-1	30	1.95	3.93	7.68	4.41	~12.21
PS-2	20	1.72	4.14	11.97	5.73	~35.56
PS-3	15	1.99	5.71	20.03	8.82	~56.23
PS-4	10	2.36	7.71	26.29	11.43	~56.23
PS-5	5	2.70	9.25	29.16	13.03	~65.51

หลังจากทำการผสมส่วนผสมเข้าด้วยกันแล้ว จะพบว่า ขนาดอนุภาคของทุกส่วนผสม (PS-1 ถึง PS-5) มีการกระจายขนาดของอนุภาคที่คล้ายคลึงกัน (รูปที่ 4.26) และไม่มีการเกาะกลุ่มของอนุภาค นั่นคือ กราฟการกระจายขนาดจะมีลักษณะรูประฆังคว่ำที่แสดงถึงการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แต่ยังมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.8) คือ ตั้งแต่ 6.16-7.73 ไมครอน ซึ่งผลของการกระจายตัวที่ดี จะทำให้การจัดเรียงตัวของอนุภาคในเนื้อดินเกิดได้ดี อนุภาคจัดเรียงได้ชิดกันมากขึ้น มีช่องว่างเหลือน้อย มีความแน่นตัวมากขึ้น ขณะที่เผาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็ว

ตารางที่ 4.8 การกระจายขนาดอนุภาคของแต่ละส่วนผสมหลังจากทำการผสมแล้ว

ส่วนผสม (Mix no.)	เวลาในการบด (นาที)	การกระจายขนาดอนุภาค			ขนาดอนุภาค	
		10 %	50 %	90 %	เฉลี่ย	ใหญ่ที่สุด
PS-1	30	1.41	4.02	13.56	6.16	~ 48.27
PS-2	20	1.49	4.39	18.78	7.73	~ 48.27
PS-3	15	1.52	4.43	15.92	6.93	~ 56.23
PS-4	10	1.36	3.97	14.43	6.31	~ 48.27
PS-5	5	1.40	4.26	17.81	7.32	~ 48.27

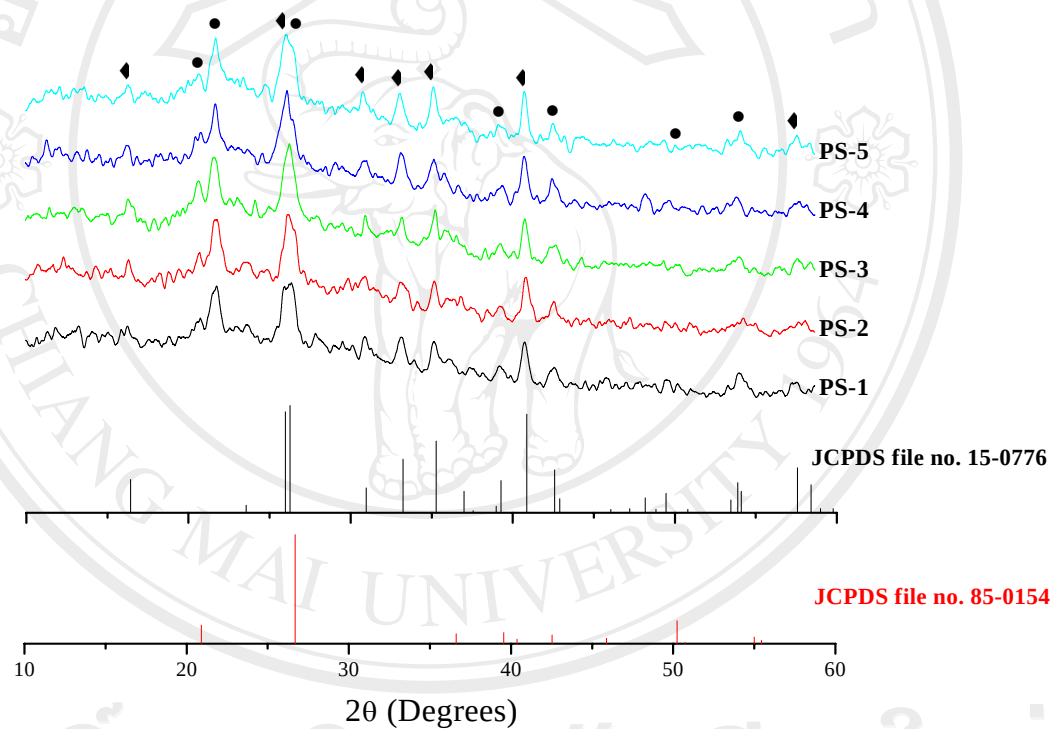


รูปที่ 4.26 การกระจายขนาดอนุภาคหลังการผสม (Particle Size Distribution) ของส่วนผสม

PS-1 ถึง PS-5

ในเนื้อดินที่มีปริมาณของเถ้าเคลือบเท่ากัน เมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างการเผา ขนาดอนุภาคของเถ้าเคลือบที่แตกต่างกันจะมีผลต่อโครงสร้างหลังเผาในส่วนของซิลิกาที่ไม่เกิดปฏิกิริยา รูพรุน และการกระจายตัวของเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้นเท่านั้น ซึ่งจะพบว่ามียผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ได้อย่าง

ไม่มีนัยสำคัญ^[66] (รูปที่ 4.27) อนุภาคที่มีขนาดเล็ก จะมีพื้นที่ผิวมากและมีพลังงานศักย์สูง เกิดการเคลื่อนที่และเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้เกิดการละลายได้ง่าย ทำให้โครงสร้างหลังจากการเผาแล้ว มีปริมาณของซิลิกาที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเหลืออยู่น้อย^[75] นอกจากนั้นแล้ว ยังทำให้ปริมาณรูพรุนลดลงด้วย^[66, 72, 75] แต่เมื่ออนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น จะทำอัตราการเผาผนึก (Sintering) ช้าลง มีปริมาณของซิลิกาที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเหลืออยู่มาก ทำให้เกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างหลังเผา^[72] มีการกระจายตัวของผลึกหรือเฟสที่กระจายตัวในเนื้อแก้วลดลง^[75] ซึ่งทำให้ตำหนิต่างๆ ลดลงด้วย^[75]



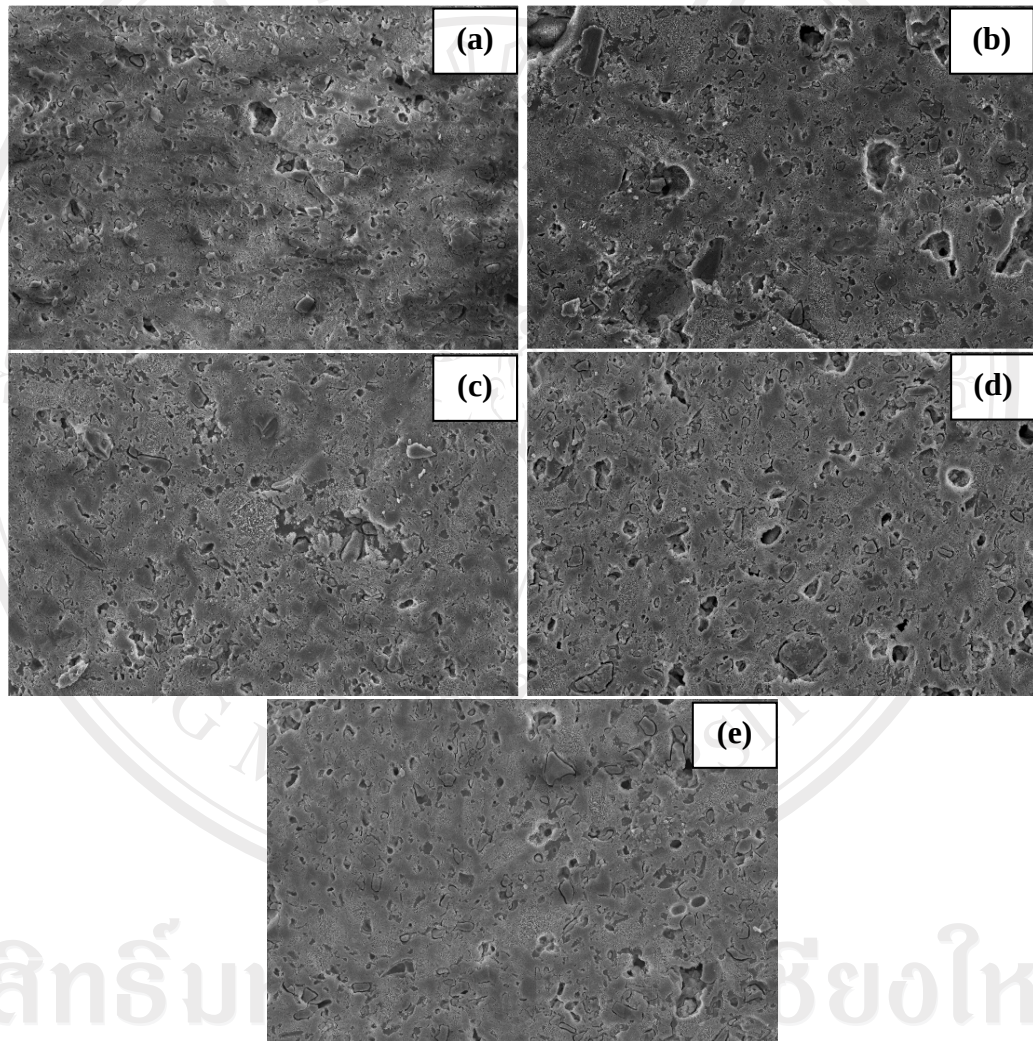
รูปที่ 4.27 องค์ประกอบทางแร่ของพอร์ซเลนทุกส่วนผสมหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C

เมื่อ ● = Free Silica และ ◆ = Mullite^[70, 78] (เทียบกับ XRD Pattern จากข้อมูล JCPDS หมายเลข 85-1054 และ 15-0776 ตามลำดับ)

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางแร่ของพอร์ซเลนหลังเผา (รูปที่ 4.27) จะพบว่า ปริมาณของมัลไลต์มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย อย่างไม่มีนัยสำคัญ และไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดอนุภาคแก้วเคลือบหรือการกระจายตัวของวัตถุดิบหลังจากการผสมเลย^[75]

4.4.2 โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของพอร์ซเลน พบว่า มีลักษณะของโครงสร้างพื้นฐาน เช่นเดียวกับการศึกษาในหัวข้อ 4.3 แต่พบว่าการใช้ขนาดอนุภาคเริ่มต้นของเถ้าเคลบและการกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุดิบแตกต่างกัน มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคแตกต่างกัน (รูปที่ 4.28)



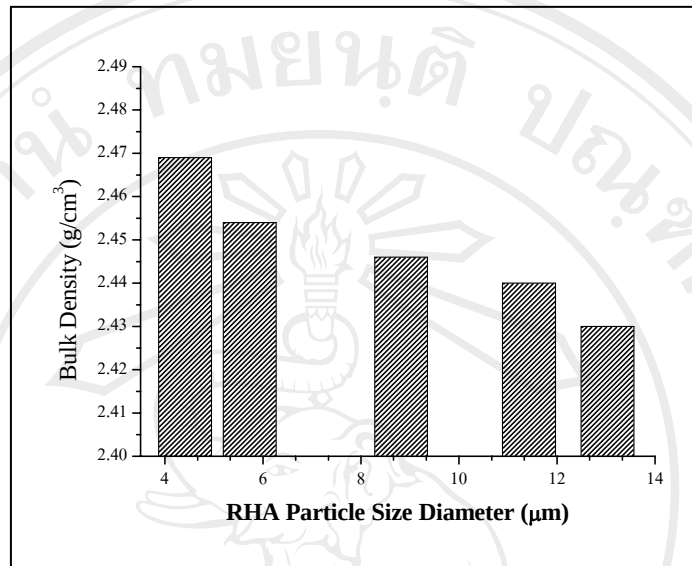
รูปที่ 4.28 โครงสร้างทางจุลภาคของพอร์ซเลนที่ใช้อนุภาคเถ้าเคลบเริ่มต้นแตกต่างกัน

(กำลังขยาย 500 เท่า) (a) PS-1, (b) PS-2, (c) PS-3, (d) PS-4, (e) PS-5

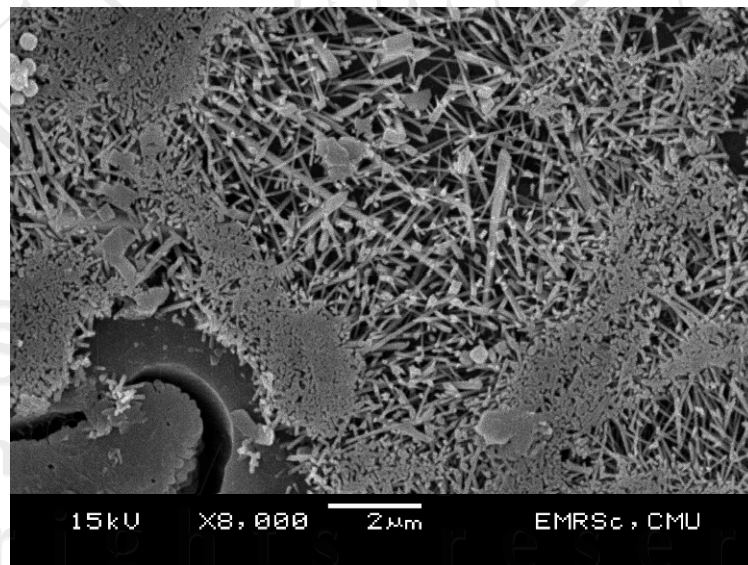
4.4.3 ความทนแรงอัด (Compressive Strength)

จากการทดสอบความทนแรงอัดของพอร์ซเลนที่มีการเติมเถ้าเคลบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยแตกต่างกัน (รูปที่ 4.29) พบว่า การใช้เถ้าเคลบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 11.43 ไมครอน มีความทน

แรงอัดสูงที่สุด คือ 134.00 MPa ซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้างหลังเผามีการกระจายตัวของโครงสร้างต่างๆ สม่ำเสมอ ทำให้สามารถรับและกระจายแรงได้ดี นอกจากนั้นแล้ว ภายในโครงสร้างยังมี

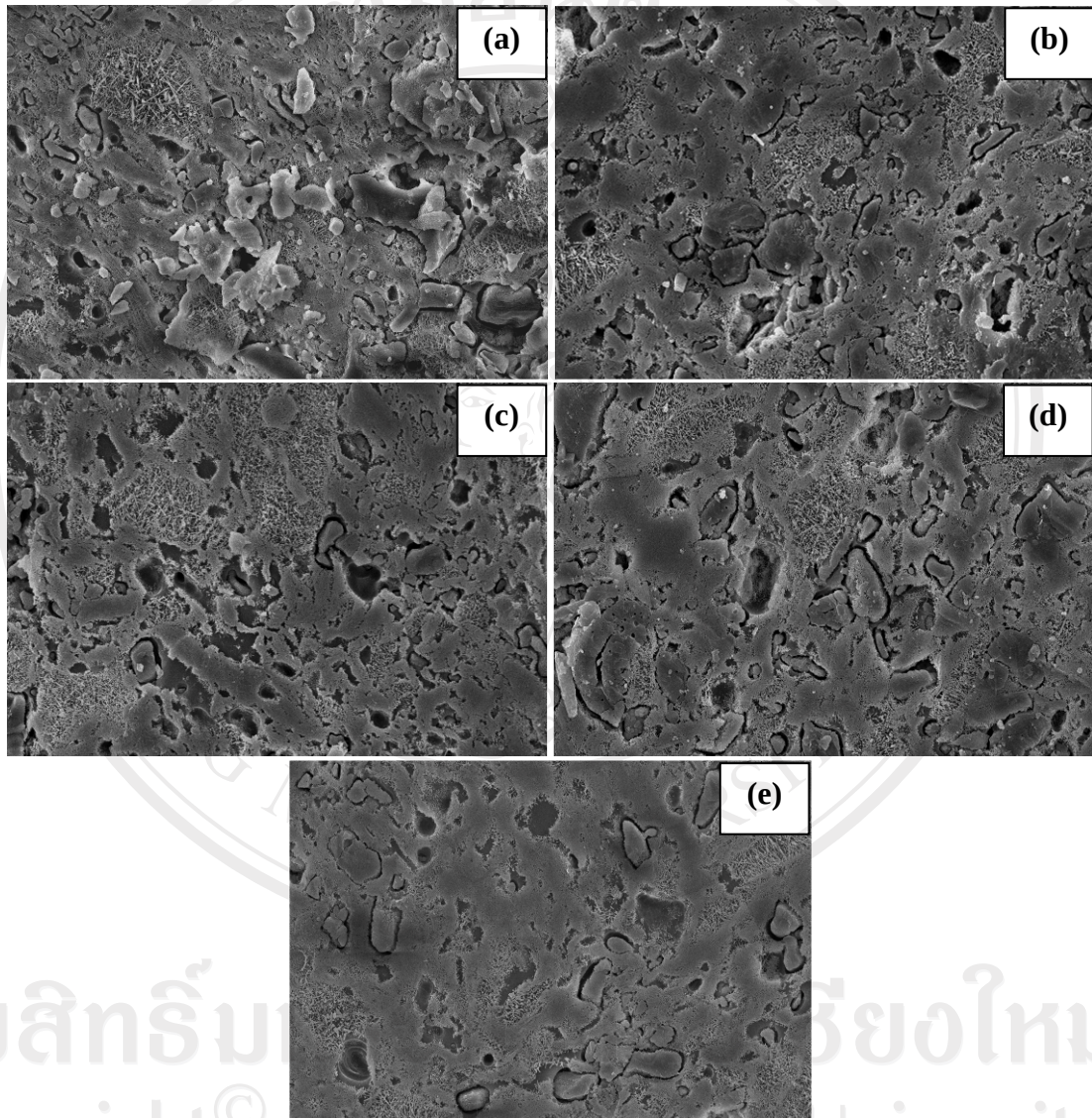


รูปที่ 4.29 ความทนแรงอัด (Compressive Strength) ของพอร์ซเลนที่ใช้เถ้าเคลบขนาดต่างๆ



รูปที่ 4.30 โครงสร้างทางจุลภาคของพอร์ซเลน PS-4 (กำลังขยาย 8000 เท่า)

ปริมาณของซิลิกาที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเหลืออยู่น้อยกว่าส่วนผสมอื่นๆ ทำให้เกิดความเครียดภายในโครงสร้างต่ำ และมวลโพลีที่ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะสานกันคล้ายเนื้อผ้า (Felt-like Interlocking) ของผลึกรูปเข็ม ซึ่งช่วยเสริมแรงให้กับพอร์ซเลนด้วย^[66] (รูปที่ 4.30)



รูปที่ 4.31 โครงสร้างทางจุลภาคของพอร์ซเลนที่ใช้เถ้าแก้วที่มีขนาดอนุภาคเริ่มต้นแตกต่างกัน (กำลังขยาย 1500 เท่า) (a) PS-1, (b) PS-2, (c) PS-3, (d) PS-4, (e) PS-5

เมื่อพิจารณาความทนแรงอัดจากรูปที่ 4.29 และรูปที่ 4.31 จะพบว่า PS-1 มีความทนแรงอัดต่ำที่สุด ซึ่งเกิดจากโครงสร้างหลังเผามีการกระจายตัวของเฟสต่างๆ ไม่สม่ำเสมอ มีซิลิกาที่ไม่

เกิดปฏิกิริยาอยู่มาก ทำให้เกิดความเครียดขึ้นภายในโครงสร้าง เกิดรอยแตกรอบๆ อนุภาคซิลิกา สำหรับ PS-2 จะมีความทนแรงอัดมากขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เหมาะสมกว่า ทำให้เกิดการแน่นตัวที่ดีกว่า มีปริมาณของซิลิกาที่ไม่เกิดปฏิกิริยาและและรูพรุนน้อยกว่า แต่จะพบว่า PS-3 มีความทนแรงอัดลดต่ำลง เนื่องจากการมีรูพรุนในโครงสร้างมากขึ้นและมีกระจายตัวของเฟสไม่สม่ำเสมอ ส่วน PS-5 ที่มีความทนแรงอัดต่ำกว่า PS-4 เกิดจากการมีรูพรุนมากกว่า

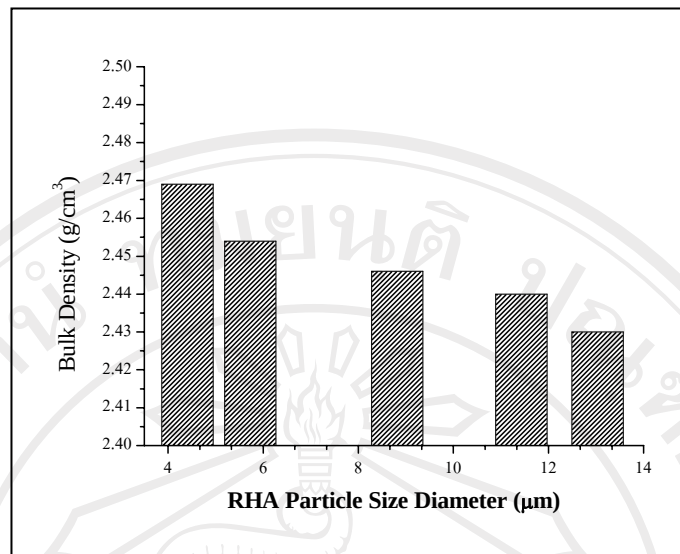
โครงสร้างทางจุลภาคที่แตกต่างกัน เกิดจากการกระจายขนาดของวัสดุดิบที่แตกต่างกัน (รูปที่ 4.26) ซึ่งจะพบว่า PS-4 ซึ่งใช้เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเริ่มต้นเฉลี่ย 11.43 ไมครอน มีการกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุดิบหลังจากการผสมที่เหมาะสม ทำให้เกิดโครงสร้างหลังเผาที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด ส่วนการใช้เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเริ่มต้นเฉลี่ยมากขึ้น นั่นคือ 13.03 ไมครอน (PS-5) จะมีความแข็งแรงต่ำลง เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวที่ไม่ดี ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก ส่งผลทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในโครงสร้างหลังเผามากขึ้นด้วย ส่วนการใช้เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเริ่มต้นเฉลี่ยเล็กน้อย คือ PS-(1-3) จะทำให้ความแข็งแรงลดลงเช่นกัน ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ Pre-stressing Effect^[66] ที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของอนุภาคต่างๆ หลังเผา ทำให้เกิดความเครียดขึ้นในโครงสร้าง

4.4.4 สมบัติทั่วไปของพอร์ซเลน

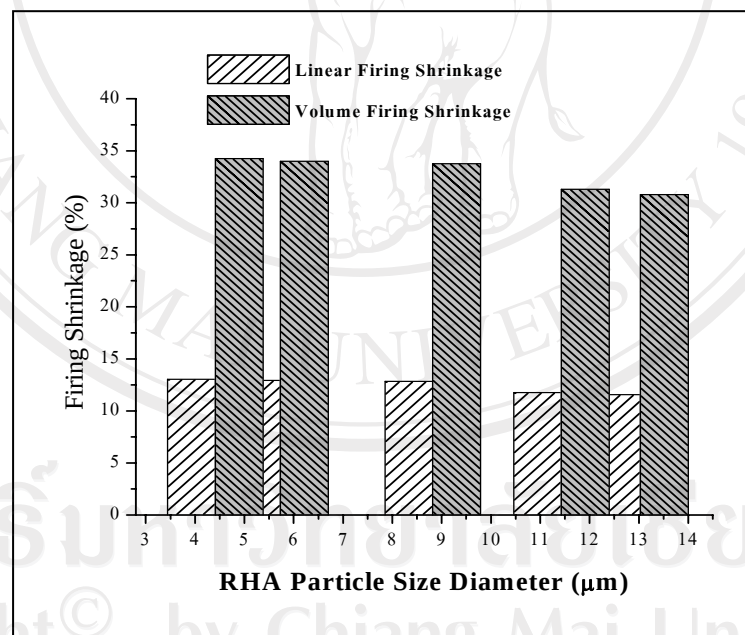
ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาควัสดุดิบเริ่มต้น มีผลต่อสมบัติของพอร์ซเลน ดังนี้

ตารางที่ 4.9 การหดตัวหลังเผา ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบหลังเผา

ส่วนผสม (Mix no.)	การหดตัวหลังเผา (%)		ความหนาแน่น (g/cm ³)		การดูดซึมน้ำ (%)
	Linear Shrinkage	Volume Shrinkage	Bulk Density	Apparent Density	
PS-1	13.0 ± 0.04	34.2 ± 0.13	2.469 ± 0.009	2.469 ± 0.009	0.000
PS-2	12.9 ± 0.02	34.0 ± .007	2.454 ± 0.005	2.454 ± 0.005	0.000
PS-3	12.8 ± 0.10	33.7 ± 0.03	2.446 ± 0.003	2.446 ± 0.003	0.000
PS-4	11.7 ± 0.11	31.3 ± 0.34	2.440 ± 0.008	2.440 ± 0.008	0.000
PS-5	11.5 ± 0.08	30.7 ± 0.02	2.430 ± 0.008	2.430 ± 0.008	0.000



รูปที่ 4.32 ความหนาแน่นของพอร์ชเลนที่ใช้เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเริ่มต้นแตกต่างกัน



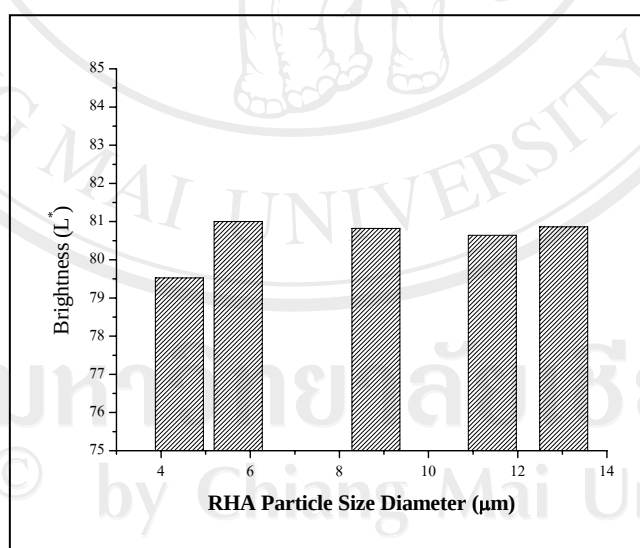
รูปที่ 4.33 การหดตัวของพอร์ชเลนที่ใช้เถ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเริ่มต้นแตกต่างกัน

1. ความหนาแน่นและการหดตัว จากตารางที่ 4.9 พบว่า พอร์ชเลนจะมีความหนาแน่นมากขึ้น เมื่อขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบที่ใช้เล็กลง และเมื่อพิจารณาจากการกระจายขนาดของอนุภาควัดดูดิบ จะพบว่า PS-1 มีการกระจายขนาดที่แคบกว่า ทำให้เกิดการจัดเรียงของอนุภาคใน

เนื้อดินได้ชิดกันมากกว่า ทำให้มีช่องว่างเหลือน้อย หลังจากการเผาจะมีความหนาแน่นสูงกว่า ดังรูปที่ 4.32 และมีการหดตัวมากขึ้นเพียงเล็กน้อย (รูปที่ 4.33) และนอกจากนั้น ยังพบว่า พอร์ซเลนที่ได้จะไม่รุกรุนเปิดและไม่มีการดูดซึมน้ำ เช่นเดียวกับการทดลองในข้อ 4.3.3

ตารางที่ 4.10 ความขาวสว่าง ความโปร่งแสง ความทนแรงอัดและสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อน (COE) ของชั้นทดสอบหลังเผา

ส่วนผสม (Mix no.)	ความขาวสว่าง (L^*)	ความโปร่งแสง	ความทนแรงอัด (MPa)	COE (25-500 °C) ($\times 10^{-6}$)
PS-1	79.526	0.990	68.06 ± 6.360	5.862
PS-2	81.000	0.989	113.24 ± 6.557	5.755
PS-3	80.822	0.986	99.27 ± 2.596	5.879
PS-4	80.642	0.984	134.00 ± 2.714	5.493
PS-5	80.864	0.983	121.52 ± 1.628	5.698

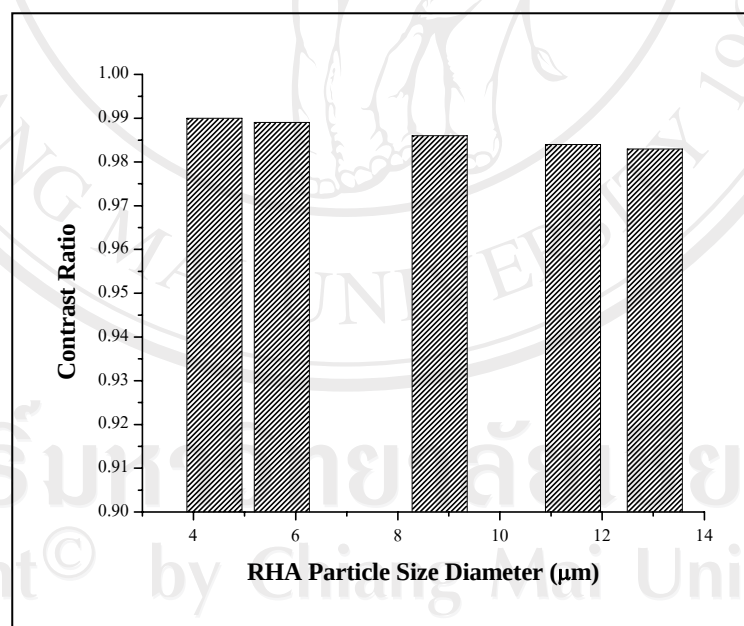


รูปที่ 4.34 ความขาวสว่างของพอร์ซเลนที่ใช้แก้วเคลือบที่มีขนาดอนุภาคเริ่มต้นแตกต่างกัน

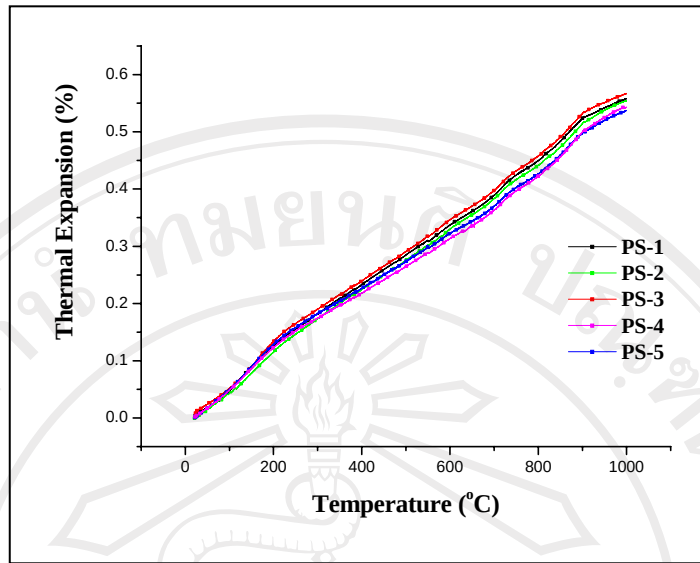
2. ความขาวสว่างและความโปร่งแสง (ตารางที่ 4.10) หลังทำการทดสอบความขาวสว่างและความโปร่งแสง พบว่า ความขาวสว่างของพอร์ซเลน (รูปที่ 4.34) จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ

เดิมเจ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น แต่กลับพบว่ามีความโปร่งแสงลดลง (รูปที่ 4.35) เนื่องจากการมีรูพรุนมาก ทำให้มีขอบเกรนมาก แสงที่ตกกระทบไม่สามารถส่งผ่านไปได้อีก (รูปที่ 4.31) และพบว่าความขาวสว่างและความโปร่งแสงของพอร์ซเลนที่ใช้เจ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเริ่มต้นแตกต่างกันนั้น มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ และเป็นที่ยอมรับได้ เนื่องจากค่าความขาวสว่างที่ได้ยังอยู่ช่วงของความขาวสว่างของพอร์ซเลนทางการค้า

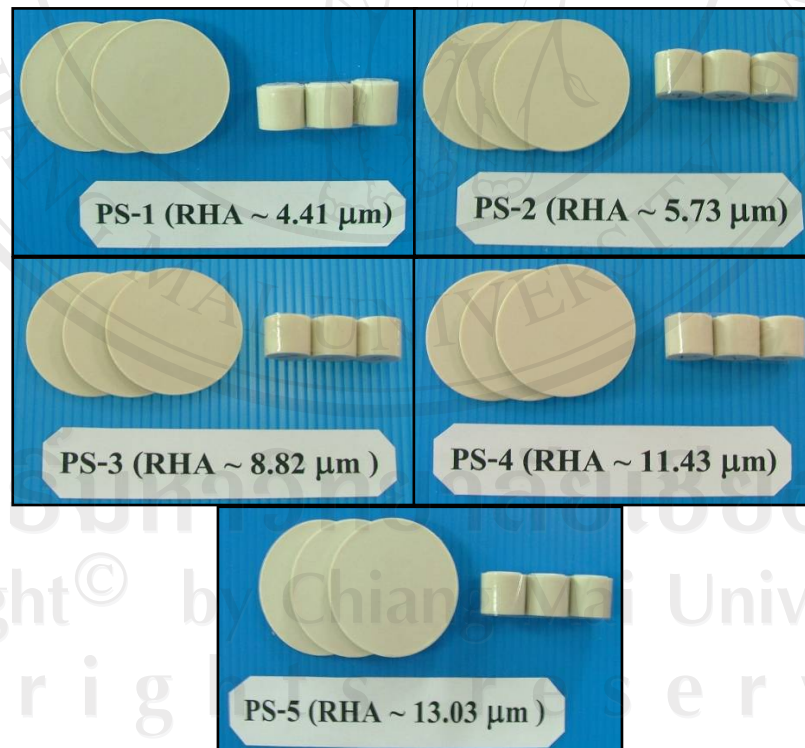
3. การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของพอร์ซเลน (รูปที่ 4.36) จะมีค่าการขยายตัวขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางจุลภาคที่เกิดขึ้น พบว่า PS-4 มีการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำที่สุด เนื่องจากการกระจายตัวของโครงสร้างหลังเผา ทำให้เมื่อเกิดการหด หรือขยายตัวเกิดไปในทิศทางเดียวกัน จึงไม่เกิดความแตกต่างระหว่างเฟสมากนัก ทำให้มีค่าการขยายตัวต่ำ และมีค่าการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนร้อยละ 0.291 ที่อุณหภูมิ 500 °C และต่ำกว่า PS-3 ซึ่งมีค่าการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนสูงที่สุดที่อุณหภูมิเดียวกันถึงร้อยละ 8.97 และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของพอร์ซเลนที่มีการใช้เจ้าแกลบ (ตารางที่ 4.10) มีค่าต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของพอร์ซเลนทางการค้า (ตารางที่ 2.1-2.2)



รูปที่ 4.35 ความโปร่งแสง (Contrast Ratio) ของพอร์ซเลนที่ใช้เจ้าแกลบที่มีขนาดอนุภาคเริ่มต้นแตกต่างกัน



รูปที่ 4.36 การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของพอร์ซเลนที่ใช้เถ้าเคลือบที่มีขนาดอนุภาคเริ่มต้นแตกต่างกัน



รูปที่ 4.37 ชั้นทดสอบแบบแท่งและแผ่นกลมที่ใช้เถ้าเคลือบที่มีขนาดอนุภาคเริ่มต้นแตกต่างกัน หลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C (PS-1 ถึง PS-5 ใช้เถ้าเคลือบที่มีขนาดอนุภาคเริ่มต้น 4.41, 5.73, 8.82, 11.43 และ 13.03 ไมครอน ตามลำดับ)

4.5 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน

หลังจากทดสอบขึ้นทดสอบของส่วนผสมพอร์ซเลนแล้ว ได้ทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จริง โดยวิธีการหล่อแบบ พบว่า ส่วนผสมของพอร์ซเลนที่ใช้เถ้าแกลบแทนควอตซ์นั้นสามารถขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ มีสีใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช้เถ้าแกลบ และมีความโปร่งแสงใกล้เคียงกัน (ดังแสดงในการทดลอง) แต่จะพบว่า ผลิตภัณฑ์บางชนิดจะเกิดการบิดเบี้ยวไปบ้างเล็กน้อย และยังไม่สามารถหล่อแบบผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ เนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้ เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นในการปรับปรุงสมบัติของพอร์ซเลนโดยใช้เถ้าแกลบ และยังต้องมีการศึกษาและปรับปรุงสมบัติของน้ำดินต่อไป เพื่อให้สามารถหล่อแบบผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงและสมบัติตามที่ต้องการได้



รูปที่ 4.38 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบ (ส่วนผสม PR-1 คือ ดินขาวราธิวาส ร้อยละ 50 หินฟันม้าชนิดโซเดียมร้อยละ 25 และควอตซ์ร้อยละ 25)



รูปที่ 4.39 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบ (ส่วนผสม PR-3 คือ ดินขาวราธิวาส ร้อยละ 50 หินฟันม้าชนิดโซเดียมร้อยละ 25 ควอตซ์ร้อยละ 15 และเถ้าแกลบร้อยละ 10)

4.6 การคำนวณต้นทุนในการผลิต

ตารางที่ 4.11 ราคาดินขาวนราธิวาส หินฟืนม้าชนิดโซเดียม และควอตซ์

วัตถุดิบ	ราคาต่อหน่วย (บาท)	หน่วย
ดินขาวนราธิวาส	15	1 kg
หินฟืนม้าชนิดโซเดียม	15	1 kg
ควอตซ์	15	1 kg
เถ้าแกลบจากโรงงานเผาอิฐ	0.50	1 kg
เถ้าแกลบที่ทำการเผาซ้ำ	148.30	1 kg

การคำนวณราคาเถ้าแกลบที่ทำการเผาซ้ำ จะคำนวณจากราคาแก๊ส LPG ที่ใช้ในการเผาในแต่ละครั้ง ซึ่งแก๊ส LPG 1 ถัง ราคา 786 บาท สามารถเผาซ้ำเถ้าแกลบได้ 5.30 kg ซึ่งคิดเป็นราคากิโลกรัมละ 148.30 บาท

จะพบว่า การใช้เถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานเผาอิฐจะทำให้ลดต้นทุนในการผลิตลงถึงร้อยละ 32.22 แต่เมื่อนำเถ้าแกลบมาทำการเผาซ้ำ จะทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้นสูงมาก แต่อย่างไรก็ตาม ในวิจัยนี้เป็นการทดลองเบื้องต้น เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเถ้าแกลบกลับมาใช้ประโยชน์ และศึกษาถึงการเตรียมซิลิกาจากเถ้าแกลบด้วย จึงจะเห็นว่า ถ้าใช้เถ้าแกลบที่ผ่านการเผาซ้ำแม้จะทำให้ต้นทุนในการผลิตสูง แต่ก็ทำให้ได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าการไม่เผาซ้ำ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของพอร์ซเลนด้วย แต่ถ้าใช้เถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมาใช้งาน โดยไม่ต้องผ่านการเผาซ้ำเลย ก็จะทำให้ลดต้นทุนการผลิตได้เช่นกัน