

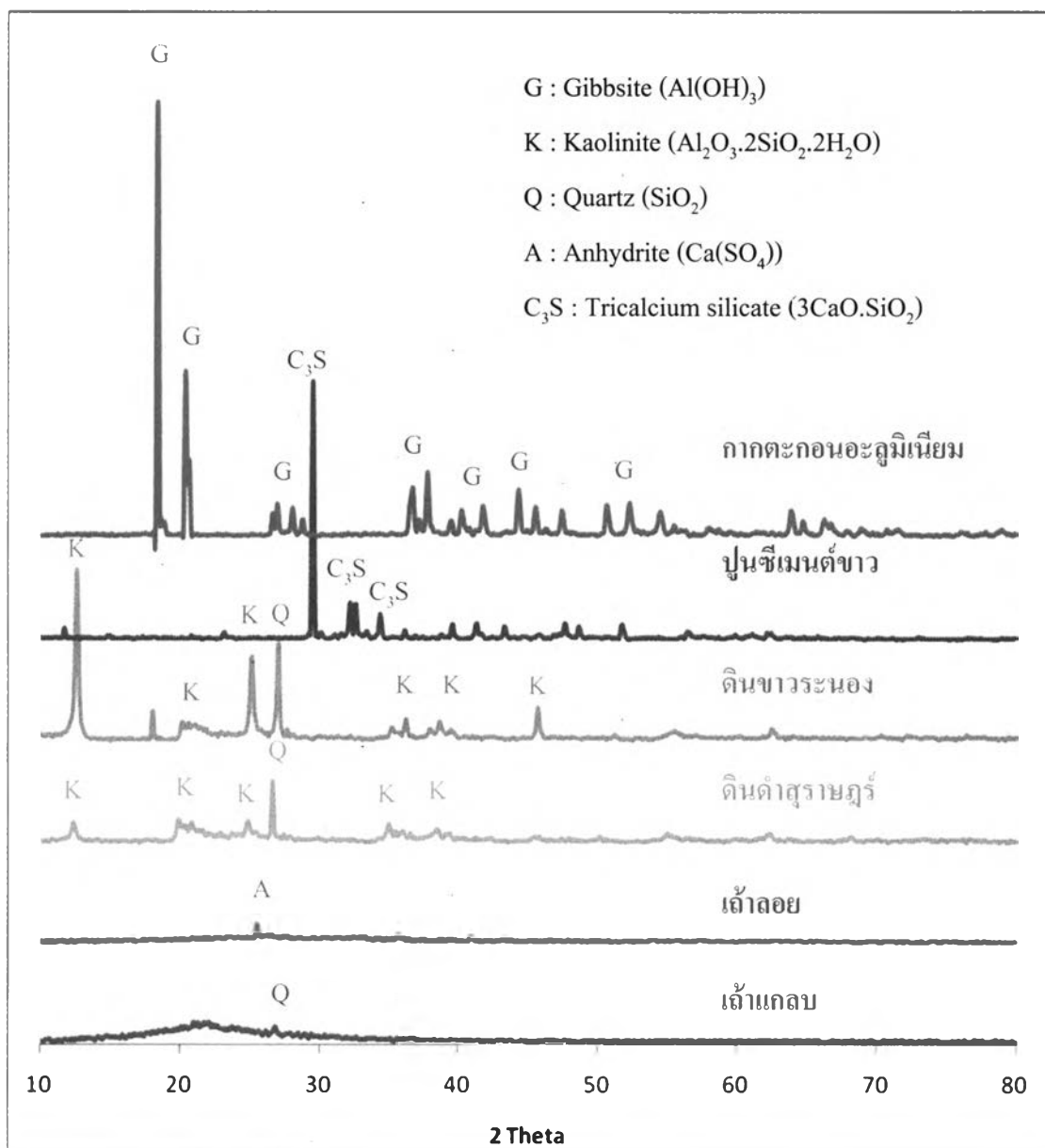
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของวัสดุคิบ

4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของวัสดุคิบ

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของวัสดุคิบด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) พบเฟสที่แตกต่างกันของวัสดุคิบแต่ละชนิด ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 XRD องค์ประกอบทางเฟสของวัสดุคิบ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสดังรูปที่ 4.1 พบว่า กากตะกอนหุบผิวอะลูมิเนียมประกอบด้วยแร่จิบbsite ซึ่งเป็นแหล่งของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จึงมีอะลูมินาเป็นองค์ประกอบสูง สำหรับแร่แคลซียมเฟสของควอตซ์และซิลิกาออสฐานบริเวณ 2 Theta ที่ 20-24 $^{\circ}$ จึงเป็นแหล่งของซิลิกาที่สูง นอกจากนี้แร่ลอมบเฟสของแอนไฮไดรต์เป็นหลักจึงเป็นแหล่งให้แคลเซียมในองค์ประกอบสูง แต่อย่างไรก็ตามวัตถุดิบข้างต้นเป็นวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว (7, 31, 32) จึงต้องการตัวเชื่อมประสานเพื่อช่วยในการผสมและขึ้นรูป ซึ่งดินคำสุราษฎร์ธานีมีความเหมาะสมเนื่องจากให้เฟสเคโอลิไนต์และควอตซ์ซึ่งพบในวัตถุดิบกลุ่มแร่ดิน เช่นเดียวกับดินขาวระนองที่พบเฟสทั้งสองนี้ด้วย

4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบด้วยเครื่อง X-ray fluorescence พบองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันในแต่ละวัตถุดิบดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแต่ละวัตถุดิบ

องค์ประกอบ (wt%)	กากตะกอนอะลูมิเนียม	แร่แคลซียม	แคลซียม	แร่ลอมบ	ดินขาวระนอง	ดินคำสุราษฎร์ธานี	ปูนซีเมนต์ขาว
SiO ₂	0.00	82.19	16.81	41.62	46.50	52.90	20.05
Al ₂ O ₃	53.16	0.55	0.00	23.95	38.50	30.27	4.00
Fe ₂ O ₃	0.02	0.48	0.04	11.94	0.60	1.54	0.35
TiO ₂	0.01	0.05	0.01	0.40	0.23	0.34	0.05
CaO	0.01	0.75	0.07	13.95	0.30	0.28	63.30
MgO	0.00	0.43	0.02	2.46	0.11	0.32	1.30
Na ₂ O	0.69	0.43	0.01	1.25	0.75	0.39	0.00
K ₂ O	0.00	0.92	0.14	2.39	2.40	2.06	0.10
MnO ₂	0.01	0.16	0.02	0.07	0.00	0.03	0.00
P ₂ O ₅	0.00	0.85	0.07	0.16	0.05	0.02	0.00
L.O.I	46.10	12.50	82.82	1.47	10.49	11.86	10.60
รวม	100.00	99.31	100.01	99.66	99.93	100.01	99.75

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 4.1 ยืนยันผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสในรูปที่ 4.1 ได้ว่ากากตะกอนหุบผิวอะลูมิเนียมเป็นแหล่งของอะลูมินาสูงจาก

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกและวัสดุทนไฟ^(7, 31, 32) นอกจากนี้ยังพบการสลายตัวของสารประกอบไฮดรอกไซด์ที่สูงด้วย จึงทำให้มีค่าการสลายตัวหลังเผา (L.O.I) สูงตามไปด้วยดังแสดงในตารางที่ 4.1 สำหรับถ้ำแกลบพบเฟสของควอตซ์ในรูปของซิลิกาอสัญฐานซึ่งผลการวิเคราะห์ทางเคมียืนยันได้ว่าพบซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักและมีปริมาณคาร์บอนที่เหลือไม่สูงนักซึ่งเหมาะสมเป็นวัตถุดิบของเซรามิกและวัสดุทนไฟ^(6, 46, 47) นอกจากนี้ถ้ำลอยที่ได้พบเฟสแอนไฮไดรต์เป็นหลักจึงมีปริมาณแคลเซียมในองค์ประกอบสูงจากผลการวิเคราะห์ทางเคมีและแร่ แต่ถ้ำลอยก็มีองค์ประกอบเป็นซิลิกาและอะลูมินาสูงเช่นกันจึงเหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก อย่างไรก็ตามถ้ำลอยยังพบสารกลุ่มแอลคาไลน์ออกไซด์และเหล็กออกไซด์สูง ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอมในเนื้อวัตถุดิบและส่งเสริมการเกิดเฟสแก้วในเนื้อผลิตภัณฑ์หลังเผา^(36, 37) ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังเผาไม่แข็งแรง

สำหรับวัตถุดิบในกลุ่มแร่ดินคือดินคำสุราษฎร์ธานีและดินขาวระนองต่างก็พบเฟสเคโอลิไนต์และควอตซ์ซึ่งมีปริมาณองค์ประกอบเคมีกลุ่มอะลูมิโนซิลิเกตสูงเข้ากับวัตถุดิบหลักที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมและการเกษตรข้างต้นที่เป็นสารกลุ่มอะลูมิโนซิลิเกตเช่นกัน นอกจากนี้การสลายสารอินทรีย์ (L.O.I) มีค่าสูงแสดงให้เห็นว่าดินคำมีปริมาณของสารประกอบคาร์บอนจะทำให้มีความเหนียวสูงตามไปด้วย⁽¹⁵⁾ อย่างไรก็ตามวัตถุประสงค์หลักของการวิจัยในครั้งนี้มุ่งเน้นการใช้ประโยชน์จากของเสียทางอุตสาหกรรมและการเกษตรเป็นหลัก จึงจำกัดการใช้ดินคำไว้ที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพื่อใช้เป็นตัวเชื่อมประสานเท่านั้น

สำหรับแกลบจัดเป็นตัวสร้างรูพรุนชนิดเซลลูลาร์ที่เติมลงไปในส่วนผสมแล้วจะสลายตัวไปหลังเผาเกิดรูพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์⁽⁴⁵⁾ ดังจะเห็นได้จากการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่มีค่าสูงถึง 80 เปอร์เซ็นต์จากการที่แกลบมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก อย่างไรก็ตามองค์ประกอบเคมีที่ยังคงพบในแกลบหลังเผากลายเป็นถ้ำก็คือ ซิลิกา เป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกับที่พบในถ้ำแกลบที่ใช้ในการทดลองนี้

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสดังรูปที่ 4.1 และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 4.1 ของวัตถุดิบยืนยันได้ว่า แม้ว่าวัตถุดิบที่เลือกใช้จะเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมและการเกษตร แต่หากตะกอนซุบผิวอะลูมิเนียม เถ้าแกลบและถ้ำลอย ก็เหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นส่วนผสมทำหน้าที่วัตถุดิบหลักในการผลิตอิฐฉนวนทนไฟโดยเปรียบเทียบกับดินขาวระนองซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกและวัสดุทนไฟ

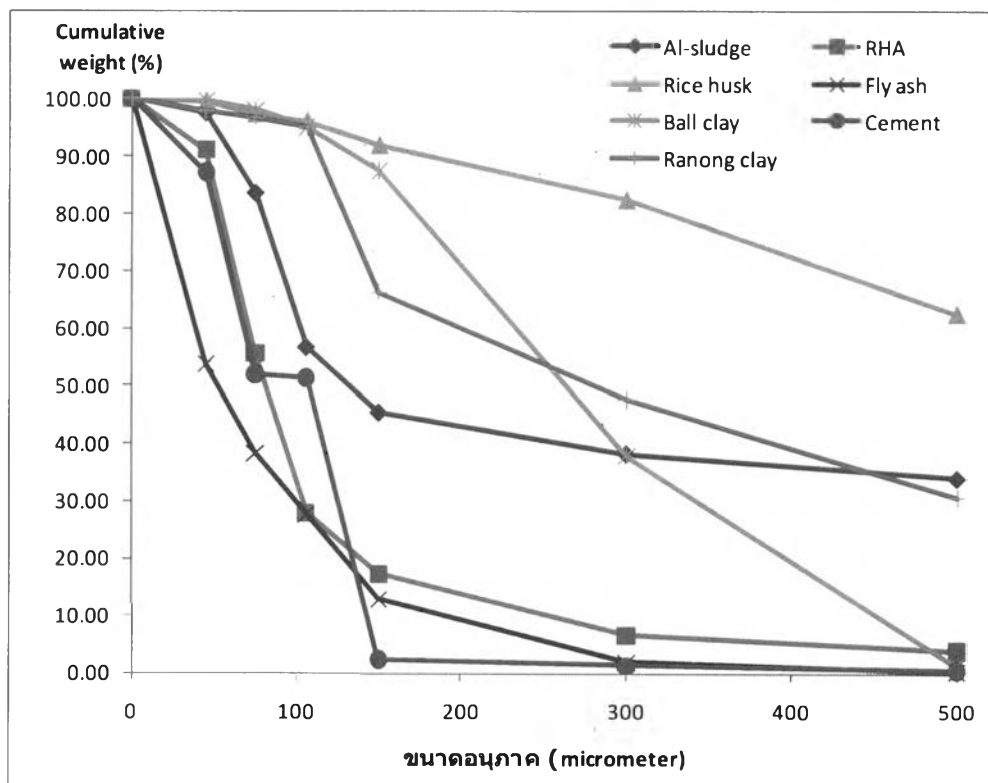
4.1.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาค

การวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุดิบแต่ละชนิดด้วยตะแกรงร่อนขนาดต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.2 และนำข้อมูลมาแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์แบบสะสม (Cumulative) ได้ดัง

กราฟรูปที่ 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุดิบ (เปอร์เซ็นต์สะสม)

ขนาด (μm)	กากตะกอน อะลูมิเนียม	เถ้าแกลบ	แกลบคิบ	เถ้าลอย	ดินขาว ระนอง	ดินคำ สุราษฎร์	ปูนซีเมนต์ ขาว
>500	33.99	3.98	62.55	0.27	30.70	1.22	0.44
>300	38.27	6.69	82.41	1.92	47.61	37.98	1.28
>150	45.38	17.36	91.89	12.99	66.32	87.49	2.41
>106	56.71	28.05	96.16	27.72	95.19	95.04	51.45
>75	83.70	55.63	97.36	38.42	96.78	98.15	52.03
>45	97.64	91.14	99.53	53.78	97.87	99.73	87.18
<45	99.99	100.00	100.01	100.00	100.00	100.00	99.98



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบเปอร์เซ็นต์สะสม

จากผลการกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุดิบแต่ละชนิดดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 พบว่า กากตะกอนซุบฟิวอะลูมิเนียมและดินขาวระนองมีขนาดมากกว่า 500 ไมโครเมตร

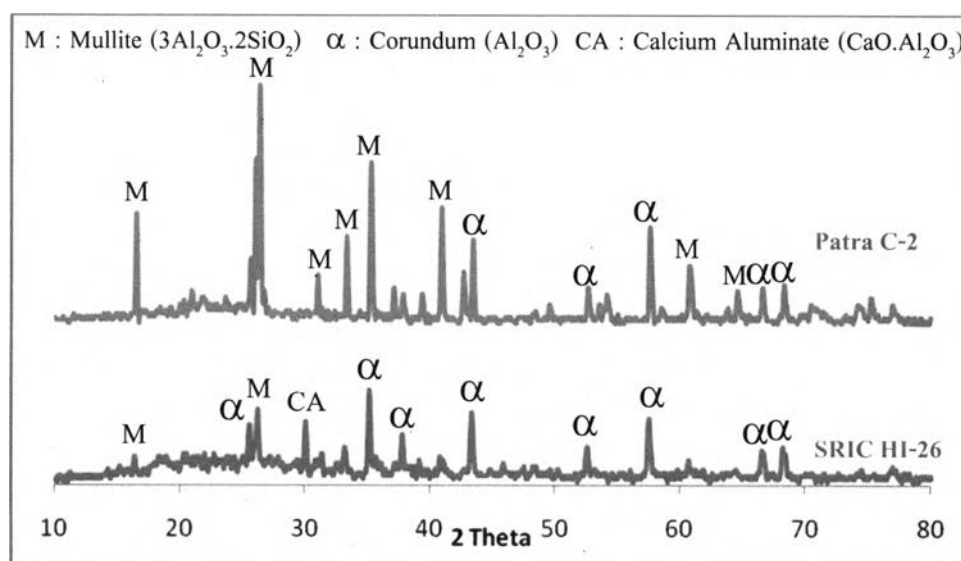
ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากภาคตะกอนซุบผิวอะลูมิเนียมแต่เดิมเป็นสารที่มีความชื้นสูง เป็นสารผสมของของเสียที่มีลักษณะคล้ายเจล⁽⁷⁾ จะนำมาอบให้แห้งก่อนทำการจัดเก็บจึงทำให้วัตถุคิเบเกาะรวมตัวกัน (Agglomerate) สำหรับดินขาวระนองมีลักษณะเกาะรวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่อันเป็นผลมาจากความชื้นจากการจัดเก็บ ดังนั้นการนำภาคตะกอนซุบผิวอะลูมิเนียมไปใช้ในส่วนผสมจึงต้องนำมาบดร่อนคัดขนาดผ่านตะแกรง 100 เมชให้มีขนาดใกล้เคียงกับวัตถุคิเบอื่นๆ เสียก่อน สำหรับเกลบคิเบมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยมากกว่า 500 ไมโครเมตร ซึ่งเกลบคิเบใช้เป็นตัวสร้างรูพรุนที่จะสลายตัวหลังเผา ขนาดของเกลบคิเบจึงมีผลต่อขนาดของรูพรุน การกระจายขนาดของรูพรุนภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ และความพรุนตัวของผลิตภัณฑ์ด้วยซึ่งจะดำเนินการทดสอบเพื่อหาอิทธิพลของขนาดของเกลบคิเบที่มีต่อลักษณะและสมบัติของอิฐฉนวนทนไฟดังจะกล่าวในลำดับต่อไป

4.2 การวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า

ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกเปรียบเทียบอิฐฉนวนทนไฟที่ทำการทดลองกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า 2 ชนิดคือ SRIC HI-26 และ Patra C-2 ซึ่งมีข้อมูลลักษณะและสมบัติของอิฐฉนวนไฟจากบริษัทผู้ผลิตตามภาคผนวก ค ซึ่งจำแนกสมบัติตามมาตรฐาน ASTM และภาคผนวก ง ซึ่งจำแนกสมบัติตามมาตรฐาน JIS ตามลำดับ โดยผลิตภัณฑ์ทั้งสองมีอุณหภูมิใช้งานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ไม่เกิน 1400 องศาเซลเซียส

4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) พบเฟสที่แตกต่างกันของแต่ละผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 องค์ประกอบทางเฟสของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า

4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-ray fluorescence ของอิฐฉนวนทนไฟ SRIC HI-26 และ Patra C-2 พบข้อมูลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์อิฐฉนวนทนไฟทางการค้า

องค์ประกอบ (wt%)	SRIC HI-26	Patra C-2
SiO ₂	32.45	40.74
Al ₂ O ₃	45.91	54.99
Fe ₂ O ₃	0.45	1.39
TiO ₂	0.32	0.32
CaO	8.46	0.26
MgO	0.15	0.27
Na ₂ O	0.93	0.11
K ₂ O	0.85	0.62
MnO ₂	0.03	0.03
P ₂ O ₅	0.02	0.12
L.O.I	9.76	0.10
รวม	99.33	98.95

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสดังรูปที่ 4.3 และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 4.3 พบว่าอิฐฉนวนทนไฟผลิตภัณฑ์ Patra C-2 จะพบเฟสของมัลไลต์และคอร์ันดัมเป็นหลัก แสดงว่าวัตถุดิบหลักที่ใช้ผลิตเนื้ออิฐฉนวนทนไฟชนิดนี้ควรเป็นชนิดอะลูมินอซิลิเกตที่มีทั้งอะลูมินาและซิลิกาเป็นองค์ประกอบตามผลวิเคราะห์ทางเคมี⁽⁹⁾ โดยที่มีปริมาณอะลูมินามากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ จึงอาจจัดอิฐฉนวนทนไฟนี้เป็นอิฐฉนวนทนไฟอะลูมินาสูงตามมาตรฐาน ASTM C 27-98 (Reapproved 2002) สำหรับผลิตภัณฑ์ SRIC HI26 จะพบเฟสของคอร์ันดัมเป็นส่วนใหญ่ นั่นแสดงว่าเป็นอิฐฉนวนทนไฟอะลูมินาหรือคอร์ันดัมซึ่งมีวัตถุดิบที่เป็นอะลูมินาอยู่สูง⁽⁹⁾ นอกจากนั้นยังพบเฟสของแคลเซียมอะลูมินेटด้วย ซึ่งเป็นไปได้ว่าอาจมีการเติมตัวเชื่อมประสานที่เป็นแคลเซียมอะลูมินेटซีเมนต์ซึ่งนิยมใช้ผสมในวัสดุทนไฟ⁽¹¹⁾ จึงมีองค์ประกอบของแคลเซียมอยู่ซึ่งงานจึงเกิดการเซ็ตตัวแข็งจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน⁽¹⁶⁾

4.2.3 การวิเคราะห์ความหนาแน่น ความพรุนตัวปรากฏ และการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์
ทำการตัดชิ้นงานจากอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าให้มีขนาด 25.4x25.4x25.4
มิลลิเมตร เป็นจำนวนผลิตภัณฑ์ละ 5 ชิ้น เพื่อนำมาทดสอบ

ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่น ความพรุนตัวปรากฏและการดูดซึมน้ำของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า

ผลิตภัณฑ์	ลักษณะภายนอก	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความพรุนตัว ปรากฏ (%)	การดูดซึมน้ำ (%)
SRIC HI-26		0.86±0.01	47.71±0.87	57.35±3.54
Patra C-2		0.78±0.02	71.59±0.24	88.71±0.75

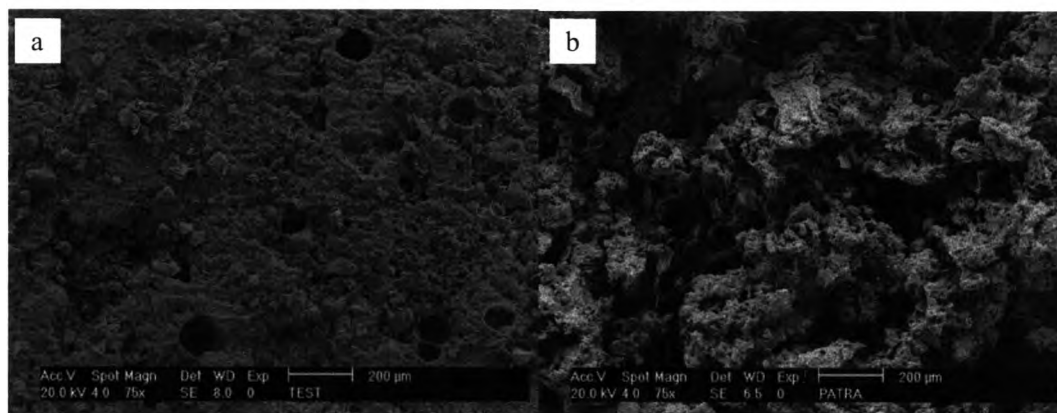
4.2.4 การวิเคราะห์การต้านทานแรงกดและสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน
ทำการตัดชิ้นงานจากอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าให้มีขนาด 25.4x25.4x25.4
มิลลิเมตร เป็นจำนวนผลิตภัณฑ์ละ 5 ชิ้นสำหรับวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงกดแตก และขนาด
5x5x25 มิลลิเมตร สำหรับวิเคราะห์ค่าการขยายตัวทางความร้อน

ตารางที่ 4.5 ความต้านทานแรงกดแตกและสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า

ผลิตภัณฑ์	ความต้านทานแรงกดแตก (MPa)	สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ($\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)				
		50-300 $^{\circ}\text{C}$	50-500 $^{\circ}\text{C}$	50-800 $^{\circ}\text{C}$	50-1000 $^{\circ}\text{C}$	50-1200 $^{\circ}\text{C}$
SRIC HI-26	2.48 \pm 0.53	5.46	5.50	5.74	6.15	6.12
Patra C-2	2.50 \pm 0.60	4.51	4.60	4.77	4.84	4.60

4.2.5 โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์

นำชิ้นงานที่แตกหักหลังผ่านการวัดค่าความต้านทานแรงกดแตกของผลิตภัณฑ์นำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์อิฐฉนวนทนไฟ รูป a) SRIC HI-26 และ b) Patra C-2

ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น ความพรุนตัว การดูดซึมน้ำตามตารางที่ 4.4 พบว่าผลิตภัณฑ์ SRIC HI-26 มีความหนาแน่นสูง จึงส่งผลทำให้ความพรุนตัวและค่าการดูดซึมน้ำต่ำ ซึ่งยืนยันได้จากภาพโครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ 4.4 พบว่า SRIC HI-26 มีเนื้อที่ค่อนข้างแน่นและมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไป และรูพรุนที่เห็นมีลักษณะเป็นรูพรุนปิด แต่จากความต้านทานแรงกดแตกตามตารางที่ 4.5 พบว่าผลิตภัณฑ์ SRIC HI-26 ให้ค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ Patra C-2 ที่มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่า ส่งผลให้ค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำสูงกว่ามาก ยืนยันได้จากภาพโครงสร้างจุลภาครูปที่ 4.4 พบรูพรุนเปิดและเชื่อมกันเป็นจำนวนมาก ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวจะส่งผลทำให้ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ไม่สูงมากนัก คาดว่าผลิตภัณฑ์ SRIC HI-26 เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการเผาที่อุณหภูมิต่ำ สังเกตได้จากเมื่อวัดค่าการขยายตัวทางความร้อนดังแสดงใน

ตารางที่ 4.5 ช่วง 40-1200 องศาเซลเซียส พบการขยายตัวที่สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นั้นแสดงว่าผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ Patra C-2 ที่ค่าการขยายตัวทางความร้อนค่อนข้างต่ำและคงที่ นั้นแสดงว่าชิ้นงาน Patra C-2 มีการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ทำการทดสอบและสุกตัวแล้ว อย่างไรก็ตามค่าการขยายตัวทางความร้อนทั้งสองก็อยู่ในช่วงของการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เซรามิกมัลติไลต์ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนประมาณ 5.0×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส⁽³³⁾ และแม้ว่าชิ้นงาน SRIC HI26 จะเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิใช้จริงแต่แสดงให้เห็นว่า ลักษณะและสมบัติของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าสำหรับอุณหภูมิการใช้งานต่ำกว่า 1400 องศาเซลเซียสมีค่าที่ยอมรับได้อยู่ในช่วงของอิฐฉนวนทนไฟทั้งสองไม่ว่าจะแบ่งด้วยมาตรฐานใดก็ตาม

4.3 การเลือกวิธีการขึ้นรูปที่เหมาะสม

ในการทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อิฐฉนวนทนไฟนั้น ได้มีการพิจารณาคัดเลือกวิธีการขึ้นรูปวัสดุทนไฟที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความยุ่งยากซับซ้อนของรูปแบบผลิตภัณฑ์ วัสดุทนไฟ ความเหมาะสมของวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป ปริมาณและกำลังการผลิตในแต่ละครั้ง รวมถึงมูลค่าและราคาของแบบพิมพ์ อุปกรณ์และเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป เป็นเกณฑ์ในการเลือกวิธีการขึ้นรูปที่เหมาะสม โดยเล็งเห็นถึงความคุ้มค่าในการลงทุน ซึ่งวิธีการขึ้นรูปที่แตกต่างกันจะส่งผลถึงลักษณะและสมบัติของอิฐฉนวนทนไฟที่แตกต่างกันด้วย⁽³²⁾ ในที่นี้ผู้ทำการวิจัยจึงทำการศึกษาวิธีการขึ้นรูปที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากการใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตวัสดุทนไฟและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำการพิจารณาข้อดีข้อเสียของการขึ้นรูปแต่ละวิธีเพื่อนำไปสู่การเตรียมการทดสอบ ดังนี้

4.3.1 การขึ้นรูปแบบหล่อ

เป็นการเตรียมส่วนผสมให้อยู่ในรูปแบบเพสต์คล้ายยาสีฟันหรือปูนซีเมนต์ ซึ่งใช้ปริมาณของน้ำให้เหมาะสมแก่การไหลตัวและเทแบบ โดยใช้โต๊ะสั่นเพื่อช่วยในการไหลตัวของส่วนผสมเข้าสู่แบบได้ดีขึ้น ข้อดีของวิธีการนี้คืออุปกรณ์และแบบพิมพ์มีราคาถูก เปลี่ยนรูปแบบได้ง่าย แต่มีข้อเสียที่การขึ้นรูปจะใช้เวลาานต่อ 1 แบบพิมพ์เนื่องจากต้องรอให้ชิ้นงานอยู่ตัวหรือแห้งจึงจะทำการถอดแบบได้ จึงใช้งานได้ปริมาณน้อยต่อ 1 แบบพิมพ์⁽⁴⁸⁾

4.3.2 การขึ้นรูปแบบอัดแห้ง

เป็นการเตรียมส่วนผสมให้อยู่ในรูปผงแห้ง โดยใช้ปริมาณน้ำน้อยมากจึงเป็นวิธีการขึ้นรูปที่เตรียมส่วนผสมได้ง่ายและรวดเร็ว เมื่ออัดขึ้นรูปแล้วชิ้นงานจะอยู่ตัวสามารถถอดแบบได้ทันที ทำให้กำลังการผลิตสูงทำได้อย่างรวดเร็วไม่ต้องรอให้ผลิตภัณฑ์แห้งแล้วจึงถอดแบบ แต่มีข้อเสียที่รูปร่างและรูปทรงของผลิตภัณฑ์ขึ้นกับแบบพิมพ์ ซึ่งการทำแบบพิมพ์มีความยุ่งยาก

และมีราคาสูงเนื่องจากต้องใช้โลหะที่มีความแข็งแรงและทนแรงกดได้สูง หากรูปร่างของผลิตภัณฑ์ซับซ้อนก็จะต้องใช้ฝีมือและความละเอียดในการกลึงแบบพิมพ์สูงเช่นกัน⁽⁴⁹⁾

4.3.3 การขึ้นรูปแบบอัดรีด

การขึ้นรูปแบบอัดรีด (Extrusion) เป็นการเตรียมส่วนผสมให้อยู่ในรูปแท่งดินเหนียวจึงต้องใช้ปริมาณของน้ำให้เหมาะสม ข้อดีของวิธีการนี้คือไม่ต้องเตรียมแบบพิมพ์ เนื่องจากเครื่องรีดจะทำการรีดส่วนผสมออกมาให้เป็นก้อนแท่งดินที่มีความเหนียว แล้วจึงนำมาตัดตกแต่งให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ จึงสามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ง่าย การขึ้นรูปทำได้อย่างรวดเร็วเพราะจะนำมตัดตกแต่งภายหลัง แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือการลงทุนด้านเครื่องจักรในการอัดรีดค่อนข้างสูง และวัตถุดิบที่ใช้ในส่วนผสมต้องมีความเหนียวสูงจึงจะนำมาอัดรีดได้⁽⁴⁹⁾

ในการวิจัยครั้งนี้ต้องการเตรียมอิฐฉนวนทนไฟโดยใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมและการเกษตรเป็นวัตถุดิบ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีแล้วพบว่าปริมาณของสารอินทรีย์ซึ่งเป็นตัวให้ความเหนียวอยู่น้อย จึงไม่ได้พิจารณาการขึ้นรูปแบบรีดในการวิจัยครั้งนี้

4.4 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบหล่อ

4.4.1 สูตรผสม C1-1, C1-2, C1-3 และ C1-4

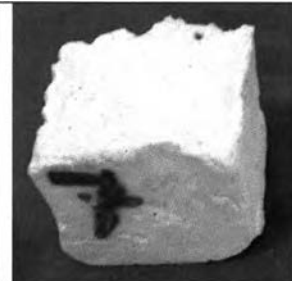



4.4.1.1 ออกแบบส่วนผสม

การออกแบบส่วนผสมโดยทดลองแทนที่ดินขาวระนองซึ่งเป็นวัตถุดิบตามธรรมชาติด้วยเถ้าแกลบซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมดังนี้

ตารางที่ 4.6 ส่วนผสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปรหัส C1

วัตถุดิบ (wt%)	ดินขาว ระนอง	กาก ตะกอน อะลูมิเนียม	เถ้าแกลบ	เถ้าลอย	ดินดำ	รวม	ปริมาณ น้ำที่ใช้
C1-1	60	0	30	0	10	100	62.5
C1-2	50	0	40	0	10	100	65
C1-3	40	0	50	0	10	100	75
C1-4	30	0	60	0	10	100	82.5

4.4.1.2 ตัวอย่างชิ้นงานหลังเผา

	C1-1 การหดตัวหลังเผา 32.77%		C1-2 การหดตัวหลังเผา 33.54%
	C1-3 การหดตัวหลังเผา 35.44%		C1-4 การหดตัวหลังเผา 39.36%

รูปที่ 4.5 ชิ้นงานหลังเผาสูตร C1-1, C1-2, C1-3, C1-4

จากลักษณะภายนอกของชิ้นงานหลังเผาดังรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบลงไปในส่วนผสมจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าการหดตัวหลังเผาเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของเถ้าแกลบมีลักษณะที่นิ่ม ไม่เหนียวและไม่แข็งแรง จึงต้องใช้น้ำในส่วนผสมปริมาณมาก ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกและเสียรูปร่างได้ง่ายหลังเผา อีกทั้งองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบยังพบซิลิกาอสัณฐานสูง จึงสนับสนุนการเกิดเฟสแก้วขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์ เร่งการเกิดการแน่นตัวนำไปสู่การหดตัวหลังเผาสูง⁽⁴⁷⁾ จึงควรออกแบบส่วนผสมใหม่โดยลดปริมาณเถ้าแกลบลง

4.4.2 สูตรผสม C2-1, C2-2, C2-3 และ C2-4

4.4.2.1 ออกแบบส่วนผสม

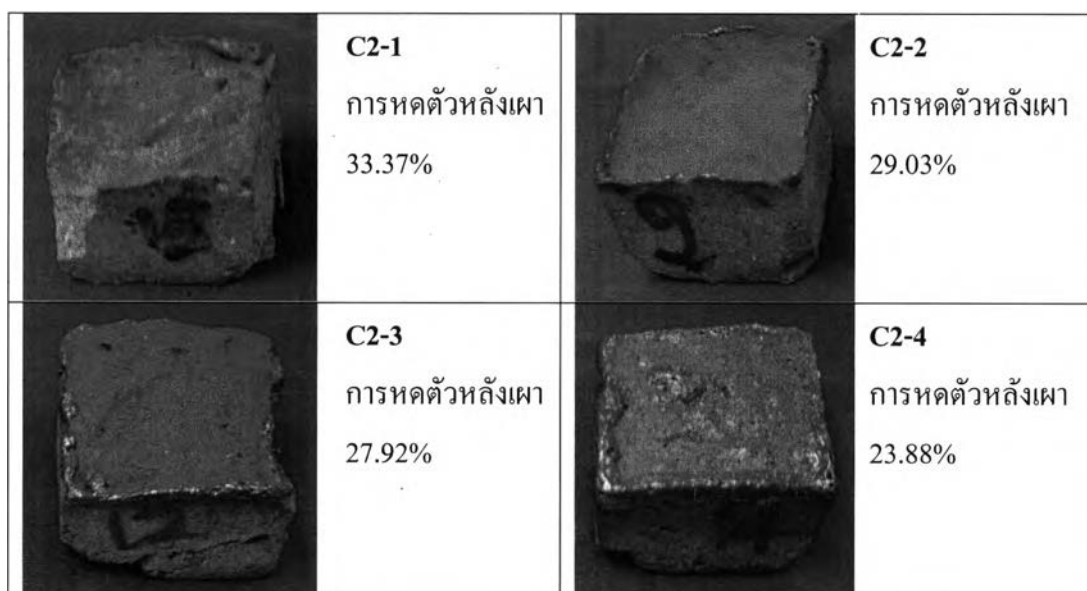
การออกแบบส่วนผสมโดยทดลองลดปริมาณเถ้าแกลบลง และแทนที่ส่วนผสมของเถ้าแกลบด้วยเถ้าลอยซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมดังนี้

เลขหมู่..... ๖พ. 2593
เลขทะเบียน..... 6996
วันเดือนปี..... 10 มี.ค. 2560

ตารางที่ 4.7 ส่วนผสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปรหัส C2

วัตถุดิบ (wt%)	ดินขาว ระนอง	กาก ตะกอน อะลูมิเนียม	เถ้าแกลบ	เถ้าลอย	ดินดำ	รวม	ปริมาณ น้ำที่ใช้
C2-1	60	0	0	30	10	100	47.5
C2-2	50	0	10	30	10	100	47.5
C2-3	40	0	20	30	10	100	55
C2-4	30	0	30	30	10	100	62.5

4.4.2.2 ตัวอย่างชิ้นงานหลังเผา



รูปที่ 4.6 ชิ้นงานหลังเผาสูตร C2-1, C2-2, C2-3, C2-4

จากลักษณะภายนอกของชิ้นงานหลังเผาดังรูปที่ 4.6 พบว่า เถ้าลอยมีผลต่อสีหลังเผาของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะให้สีที่เข้มขึ้นเนื่องจากในเถ้าลอยพบปริมาณเหล็กออกไซด์ที่สูง แต่ปริมาณการใช้น้ำของส่วนผสม C2 น้อยกว่า C1 เนื่องจากเถ้าลอยมีความละเอียดกว่าจึงทำให้อนุภาคเกาะรวมตัวกันได้ดี นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตามตารางที่ 4.1 พบว่าเถ้าลอยมีปริมาณของสารประกอบกลุ่มแอลคาไลน์ออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอมเช่นเดียวกับดินขาวระนองจึงทำให้ส่วนผสม C2-1 มีค่าการหดตัวที่สูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าแกลบตาม

ตารางที่ 4.7 พบว่ามีการหดตัวลดลง เนื่องจากแคลเซียม (CaO) ที่พบปริมาณมากในเถ้าลอยรวมตัวกับซิลิกาที่พบมากในเถ้าแกลบและอะลูมินา-ซิลิกาในดินขาวระนองเกิดเป็นอะนอร์ไทต์ ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) จึงเกิดเฟสที่เป็นผลึกเพิ่มขึ้นทำให้เฟสแก้วลดลง^(5, 50) ซึ่งงานไม่แน่นตัวและไม่หลอมส่งผลทำให้การหดตัวหลังเผาลดลงด้วย

นอกจากนี้จากรูปที่ 4.6 พบว่า บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานไม่เรียบและมีแก้วบางๆ เคลือบที่ผิว เป็นผลมาจากการขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้น้ำในส่วนผสมมากขึ้น การหล่อแบบบนโต๊ะสั่นจะทำให้ส่วนผสมเกิดการกระจายตัวเต็มแบบพิมพ์และทำให้น้ำเกิดการแยกชั้นกับส่วนผสมอื่นๆอยู่บริเวณผิวหน้าชิ้นงานมากขึ้น ซึ่งเกลือของแอลคาไลน์ที่พบในเถ้าลอยละลายน้ำปนอยู่กับน้ำที่ผิวหน้าซึ่งเป็นตัวช่วยหลอมทำให้หลังเผาชิ้นงานเกิดเฟสแก้วบางๆขึ้นที่ผิว⁽⁵⁾ อีกทั้งการใช้ดินขาวระนองเป็นวัตถุดิบหลักนั้นจัดเป็นแหล่งของแอลคาไลน์ปริมาณสูงจากองค์ประกอบทางเคมีซึ่งเป็นตัวช่วยหลอมที่รุนแรง เพื่อลดปัญหาเรื่องการแน่นตัวและหดตัวสูงรวมถึงการละลายของแอลคาไลน์ที่ผิวจึงควรเปลี่ยนไปใช้วัตถุดิบตัวอื่นที่มีปริมาณสารแอลคาไลน์ต่ำ

4.4.3 สูตรผสม C3-1, C3-2, C3-3 และ C3-4

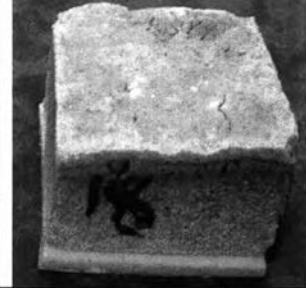
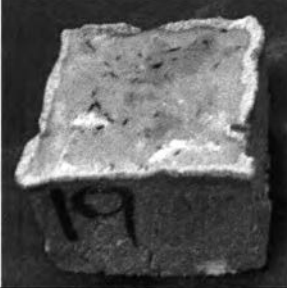
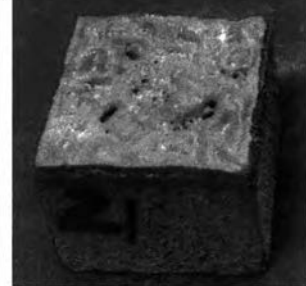

4.4.3.1 ออกแบบส่วนผสม

การออกแบบส่วนผสมโดยทดลองแทนที่ดินขาวระนองด้วยกากตะกอนขุบิวอะลูมิเนียม แล้วทำการเติมเถ้าแกลบ และเถ้าลอยหลายอัตราส่วน

ตารางที่ 4.8 ส่วนผสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปรหัส C3

วัตถุดิบ (wt%)	ดินขาวระนอง	กากตะกอนอะลูมิเนียม	เถ้าแกลบ	เถ้าลอย	ดินดำ	รวม	ปริมาณน้ำที่ใช้
C3-1	0	60	0	30	10	100	37.5
C3-2	0	50	10	30	10	100	47.5
C3-3	0	40	20	30	10	100	52.5
C3-4	0	30	30	30	10	100	58.5

4.4.3.2 ตัวอย่างชิ้นงานหลังเผา

	C3-1 การหดตัวหลังเผา 8.77%		C3-2 การหดตัวหลังเผา 21.65%
	C3-3 การหดตัวหลังเผา 23.98%		C3-4 การหดตัวหลังเผา 38.34%

รูปที่ 4.7 ชิ้นงานหลังเผาสูตร C3-1, C3-2, C3-3, C3-4

จากผลการทดลองและลักษณะของชิ้นงานหลังเผาดังรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อแทนที่ดินขาวระนองด้วยกากตะกอนขุบิวอะลูมิเนียมแล้ว ให้ผลที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนกับส่วนผสม C2 โดยเฉพาะเรื่องสีหลังเผา การหดตัว และลักษณะของชิ้นงาน ซึ่งส่วนผสม C3-1 พบการหดตัวค่อนข้างต่ำ เนื่องจากมีปริมาณของกากตะกอนขุบิวอะลูมิเนียมซึ่งมีอะลูมินาเป็นส่วนประกอบหลัก หลังเผาแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ที่แข็งแรงของมัลไลต์และแอลฟาอะลูมินา ลดปริมาณเฟสแก้วลง⁽³²⁾ นอกจากนี้การที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจึงส่งผลต่อสีหลังเผาและพบเฟสที่หลอมละลายของเกลือแอลคาไลน์ในเถ้าลอยบนผิวของชิ้นงานด้วย ส่วนผสม C3-2 และ C3-3 มีการหดตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีปริมาณของเถ้าเคลบเพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดเฟสแก้วเพิ่มขึ้นด้วย แต่การหดตัวก็อยู่ในระดับไม่สูงนักเนื่องจากซิลิกาในเถ้าเคลบรวมตัวกับอะลูมินาในกากตะกอนขุบิวอะลูมิเนียมทำให้เกิดเฟสที่เป็นผลึกของมัลไลต์และแอลฟาอะลูมินาขึ้น โดยมีเฟสของแก้วร่วมอยู่ด้วย⁽⁷⁾

แต่ส่วนผสม C3-4 มีการหดตัวสูงที่สุดและบริเวณผิวของชิ้นงานเกิดการพองตัวจากฟองอากาศ (Bloating) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ผิวมีน้ำที่ซึมออกมาจากส่วนผสมซึ่งประกอบไปด้วยเกลือแอลคาไลน์ที่เป็นตัวช่วยหลอมละลายอยู่มาก ลักษณะดังกล่าวเกิดส่วนผสมทุกตัวทำปฏิกิริยาพอดีกันและมีเฟสที่หลอมเหลวปรากฏ โดยเฟสแก้วนี้ถึงจุดอ่อนตัว (Softening) เกิดการหลอมละลายของผิวชิ้นงานเรียกปฏิกิริยาไพโรพลาสติก (Pyroplastic) ประกอบกับสารประกอบ

ของเกลือแอลคาไลน์ในเถ้าลอยเกิดการสลายตัวจึงเกิดแก๊สดันเฟสที่หลอมเหลวขึ้นจึงเห็นการพองตัวของบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์^(5, 51)

จึงเป็นไปได้ว่าเถ้าลอยในอัตราส่วน 30 เปอร์เซนต์นั้นมีปริมาณมากเกินไป เพราะต่างให้ค่าการหดตัวและปริมาณของเกลือแอลคาไลน์ที่สูง โอกาสที่จะเกิดปรากฏการณ์ที่ชิ้นงานจะพองตัวเป็นไปได้สูงตามไปด้วย จึงควรลดปริมาณเถ้าลอยลงเพื่อลดปัญหาดังกล่าว

4.4.4 สูตรผสม C4-1 ถึง C4-9

จากผลการศึกษาสูตรผสม C1 และ C2 ข้างต้นที่ให้การหดตัวที่สูง เมื่อออกแบบส่วนผสมตามสูตรผสม C3 โดยใช้กากตะกอนซุบผิวอะลูมิเนียมจะพบการหดตัวลดลง แต่เนื่องจากปัญหาของปริมาณเถ้าลอยที่สูงเกินไป จึงปรับลดปริมาณเถ้าลอยลงเพื่อป้องกันปัญหาการสลายตัวของเกลือแอลคาไลน์ที่อุณหภูมิสูง






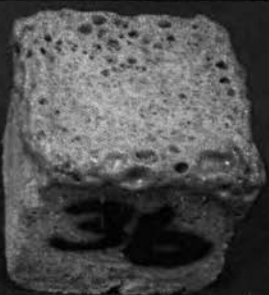



4.4.4.1 ออกแบบส่วนผสม

การออกแบบส่วนผสมโดยลดปริมาณเถ้าลอยลงจาก 30 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เหลือเพียง 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.9 ส่วนผสมสำหรับการหล่อขึ้นรูปรหัส C4

วัตถุดิบ (wt%)	ดินขาว ระนอง	กาก ตะกอน อะลูมิเนียม	เถ้าแกลบ	เถ้าลอย	ดินดำ	รวม	ปริมาณ น้ำที่ใช้
C4-1	0	80	0	10	10	100	47.5
C4-2	0	70	10	10	10	100	53
C4-3	0	60	20	10	10	100	57.5
C4-4	0	50	30	10	10	100	62.5
C4-5	0	40	40	10	10	100	67.5
C4-6	0	30	50	10	10	100	77.5
C4-7	0	20	60	10	10	100	87.5
C4-8	0	10	70	10	10	100	96.5
C4-9	0	0	80	10	10	100	105

4.4.4.2 ตัวอย่างชิ้นงานหลังเผา

	C4-1 การหดตัวหลัง เผา 7.48%		C4-2 การหดตัวหลัง เผา 13.70%
	C4-3 การหดตัวหลัง เผา 14.35%		C4-4 การหดตัวหลัง เผา 21.33%
	C4-5 การหดตัวหลัง เผา 33.46%		C4-6 การหดตัวหลัง เผา 39.64%
	C4-7 การหดตัวหลัง เผา 40.12%		C4-8 การหดตัวหลัง เผา 36.92%
	C4-9 การหดตัวหลัง เผา 35.84%		

รูปที่ 4.8 ชิ้นงานหลังเผาสูตร C4-1 ถึง C4-9

จากผลการทดลองและลักษณะของชิ้นงานหลังเผา ดังรูปที่ 4.8 พบว่า ชิ้นงานหลังเผาทุกส่วนผสมให้สีที่อ่อนกว่าชิ้นงาน C2 และ C3 เนื่องจากมีปริมาณเถ้าลอยลดลง แต่ชิ้นงาน C4-1 C4-2 และ C4-3 จะไม่พบผิวที่หกลมบริเวณขอบและผิวหน้าของชิ้นงาน

การเพิ่มปริมาณเถ้าเคลือบให้สูงขึ้นจนกระทั่งแทนที่กากตะกอนซุบผิวอะลูมิเนียมจนหมดตามการออกแบบส่วนผสมในตารางที่ 4.9 พบว่ามีการใช้ปริมาณน้ำเพื่อผสมให้ส่วนผสมให้กลายเป็นพেষท์ในปริมาณมากตามไปด้วย การที่มีปริมาณเถ้าเคลือบสูงทำให้เกิดเฟสของแก้วได้มากและการใช้น้ำในส่วนผสมมากนำไปสู่การละลายของเกลือแอลคาไลน์ที่ละลายปนมากับน้ำและแยกชั้นอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงานขณะทำการขึ้นรูปบนโต๊ะสั่นและค่าการหดตัวของชิ้นงานที่สูงตามไปด้วย จึงเห็นสมควรว่าสูตรผสมที่ C4-4 ถึง C4-7 ไม่เหมาะสมจะนำมาผลิตเป็นอิฐฉนวนทนไฟ

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของสูตรผสม C4-1 และ C4-2 ดังรูปที่ 4.8 พบว่าส่วนผสมทั้งสองใช้ปริมาณน้ำน้อยให้ค่าการหดตัวไม่สูงนัก แต่ชิ้นงานเห็นการแยกชั้นของส่วนผสมอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นไปได้ว่าวัตถุดิบที่มีความถ่วงจำเพาะสูงจะตกตะกอน ส่วนวัตถุดิบที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำจะลอยมาขังผิวหน้าจากระบวนการขึ้นรูปบนโต๊ะสั่น และเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงาน C4-3 ในรูปที่ 4.8 แล้วพบว่าชิ้นงานมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งผลิตภัณฑ์ มีการหดตัวต่ำกว่าสูตร C4-4 ถึง C4-9 แต่การหดตัวของ C4-3 สูงกว่า C4-1 และ C4-2 เล็กน้อย แต่ส่วนผสม C4-3 ไม่เกิดการแยกชั้นจึงนำสูตรผสมนี้มาทำการขยายผล

4.4.5 เปรียบเทียบการกรองส่วนผสมก่อนการขึ้นรูป

จากการทดลองที่ผ่านมา พบว่าในส่วนผสมของเถ้าลอยจะพบเกลือแอลคาไลน์ที่ละลายน้ำได้และเป็นตัวช่วยหลอมที่รุนแรงด้วย จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัวสูงและปฏิกิริยาไพโรพลาสติกให้เกิดการหลอมละลายที่ผิวและการระเหยของแก๊สเกิดการพองตัว จึงทดลองล้างส่วนผสมด้วยน้ำกลั่นเพื่อชะเกลือแอลคาไลน์ออกจากส่วนผสม ด้วยการกรองผ่านเครื่องกรองสุญญากาศและกระดาษกรองหมายเลข 40 ตามวิธีการในข้อ 3.4.4

4.4.5.1 ส่วนผสมที่เลือก

จากผลการทดลองผสมส่วนผสมสูตร C4-1 ถึง C4-9 ดังตารางที่ 4.9 พบว่าส่วนผสม C4-3 เป็นส่วนผสมที่ไม่เกิดการแยกชั้นและเนื้อส่วนผสมค่อนข้างสม่ำเสมอที่สุด จึงสนใจนำมาขยายผลเพื่อศึกษาต่อ

ตารางที่ 4.10 ส่วนผสมที่ทำการเลือก

วัสดุดิบ (wt%)	ดินขาว ระนอง	กากตะกอน อะลูมิเนียม	เถ้าแกลบ	เถ้าลอย	ดินดำ	รวม
C4-3	0	60	20	10	10	100

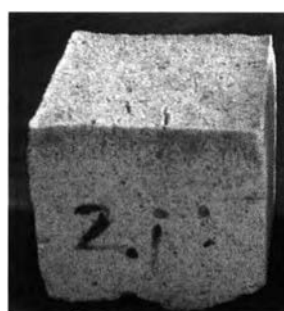
ทดสอบอิทธิพลของแอลคาไลน์ที่ละลายปนมากับน้ำที่แยกชั้นจากการขึ้นรูปแบบหล่อบนโต๊ะสั่นของส่วนผสมที่ทำการเลือก โดยเปรียบเทียบการล้างส่วนผสมด้วยการกรองเอาน้ำซึ่งละลายแอลคาไลน์ที่ละลายน้ำได้ออกมาด้วยตามวิธีในข้อ 3.4.4 กับการไม่ล้างส่วนผสมได้ผลดังนี้

4.4.5.2 ตัวอย่างชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบการล้างและไม่ล้างส่วนผสม

ทดสอบอิทธิพลของแอลคาไลน์ที่ละลายปนมากับน้ำโดยเปรียบเทียบการล้างและไม่ล้างส่วนผสมด้วยเครื่องกรอง



C4-3 ไม่ล้าง
การหดตัวหลังเผา
14.35%
ใช้น้ำ 57.5 wt%

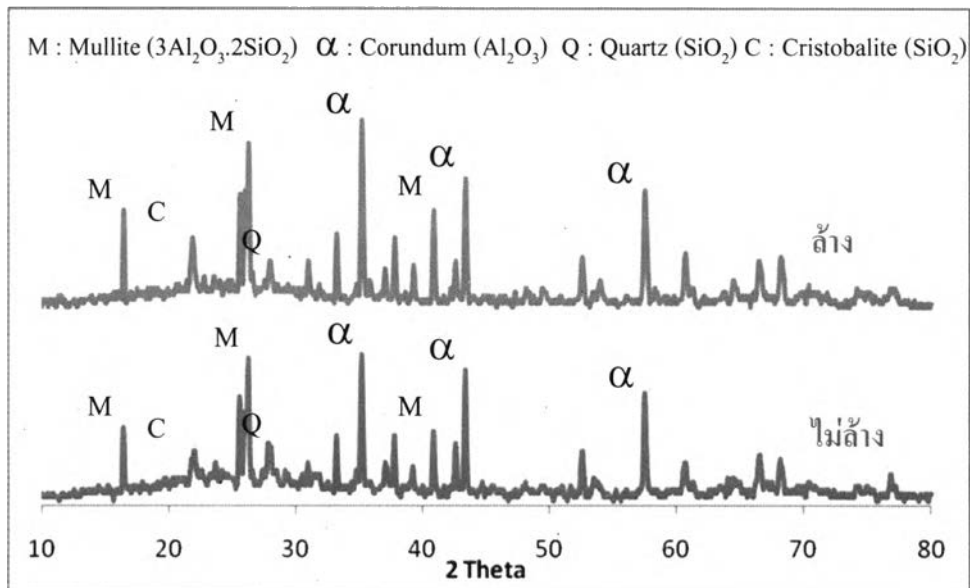


C4-3 ล้าง
การหดตัวหลังเผา
11.73%
ใช้น้ำ 41 wt%

รูปที่ 4.9 ชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบการล้างและไม่ล้างส่วนผสมก่อนการขึ้นรูป

จากผลการเปรียบเทียบการล้างและไม่ล้างส่วนผสมดังรูปที่ 4.9 พบว่า จากลักษณะภายนอกของชิ้นงานที่ผ่านการล้างยังคงเห็นการแยกชั้นบริเวณใกล้ผิวหน้า แต่ให้สีหลังเผาอ่อนกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ล้างส่วนผสม และพบรอยแตกของชิ้นงานน้อยกว่าเนื่องจากใช้น้ำน้อย ทำให้กระบวนการระเหยน้ำออกจากชิ้นงานเกิดน้อย นอกจากนี้ชิ้นงานมีการหดตัวลดลงจาก 14.35 เปอร์เซ็นต์ เป็น 11.73 เปอร์เซ็นต์ จึงศึกษาองค์ประกอบทางเฟสของส่วนผสมทั้งสองเพิ่มเติมให้ผลดังนี้

4.4.5.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานล้างและไม่ล้างหลังเผา



รูปที่ 4.10 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานล้างและไม่ล้างส่วนผสม

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบดังเฟสได้ผลดังรูปที่ 4.10 พบว่า ไม่พบเฟสใหม่จากการล้างส่วนผสม แต่การที่ชิ้นงานที่ผ่านการล้างมีการหดตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณของเฟสแก้วลดลงจากการพบเฟสที่เป็นผลึกคือคริสโตบาไลต์ มัลไลต์และแอลฟาออร์ธอมิกความสูงของพีคเพิ่มขึ้น จึงทำให้การแน่นตัวของผลิตภัณฑ์ลดลงและการหดตัวก็ลดลงตามไปด้วย

แต่อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานส่วนผสมสูตร C4-3 ดังรูปที่ 4.9 ที่ผ่านการขึ้นรูปแบบหล่อยังคงมีการใช้น้ำในปริมาณที่มากเพื่อเตรียมส่วนผสมซึ่งไม่มีความเหนียวของวัตถุดิบได้แก่กากตะกอนซุบพิวอะลูมิเนียม เถ้าแคลบ และเถ้าลอย ส่งผลต่อค่าการหดตัวสูงและชิ้นงานเห็นการแยกชั้นอย่างชัดเจนจากการตกตะกอนในขณะขึ้นรูปบนโต๊ะสั่น จึงสรุปได้ว่าการขึ้นรูปแบบหล่อไม่เหมาะสมสำหรับการเตรียมอิฐฉนวนทนไฟที่มีวัตถุดิบเป็นของเสียดังกล่าวเนื่องจากเกิดการละลายของเกลือแอลคาไลน์และการกระจายขนาดอนุภาคของของเสียดังกล่าวแต่ละชนิดมีลักษณะที่แตกต่างกันมาก จึงส่งผลต่อการแยกชั้นของชิ้นงานได้ง่าย

จึงทำการทดลองเปลี่ยนวิธีการขึ้นรูปให้มีความเหมาะสมกับส่วนผสมที่ใช้ของเสียดังที่กล่าวมาแล้วเป็นวัตถุดิบหลัก โดยเปลี่ยนวิธีการขึ้นรูปเป็นการขึ้นรูปแบบอัดด้วยเครื่องไฮดรอลิกเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปแบบหล่อได้ผลดังต่อไปนี้

4.5 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบอัด

4.5.1 เปรียบเทียบลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแบบอัดและแบบหล่อ

4.5.1.1 ลักษณะการขึ้นรูป

เปรียบเทียบการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ระหว่างการขึ้นรูปแบบอัดด้วยแบบพิมพ์โลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตรแรงอัด 10 เมกะพาสคัล และการขึ้นรูปแบบหล่อด้วยแบบพิมพ์โลหะขนาดพื้นที่หน้าตัด 50x50 มิลลิเมตร อัตราการสั่นแอมป์ลิจูด 60 บนโต๊ะสั่น และใช้ส่วนผสม C4-3

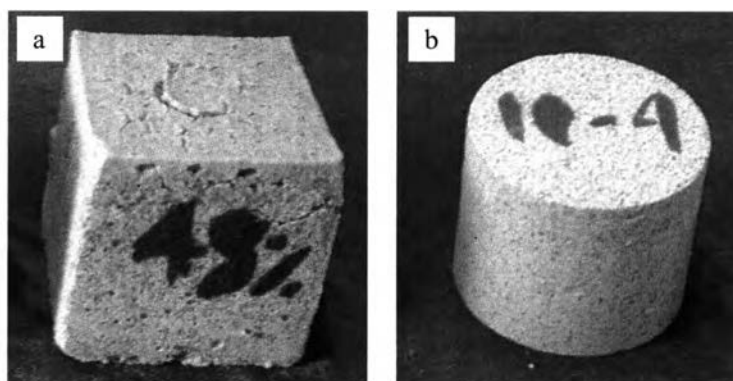
4.5.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานเฉลี่ยหลังเผา 1250 องศาเซลเซียส

แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานหลังขึ้นรูปแบบหล่อและแบบอัดได้ดังนี้

ตารางที่ 4.11 ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานเปรียบเทียบรูปแบบการขึ้นรูป

ชิ้นงาน	ปริมาณน้ำ (wt%)	แรงอัด (MPa)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	การหดตัวหลังเผา (%)
หล่อ	47.5	-	0.99±0.03	15.09±1.94
อัด	2	10	1.25±0.04	7.17±0.11

4.4.1.3 ตัวอย่างชิ้นงานหลังเผา



รูปที่ 4.11 ชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบการขึ้นรูป a) แบบหล่อและ b) แบบอัด

ผลการทดลองตามตารางที่ 4.11 และลักษณะของชิ้นงานหลังเผาดังรูปที่ 4.11 พบว่า ชิ้นงานที่ทำการหล่อขึ้นรูปจะให้ค่าความหนาแน่นต่ำแต่มีการหดตัวสูงหลังเผาประมาณ

15.09 เปอร์เซ็นต์ ชี้นงานแตกต่างการระเหยของน้ำปริมาณมากในส่วนผสมเปรียบเทียบกับชี้นงานที่ทำการอัดขึ้นรูปจะให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่า แต่การหดตัวต่ำกว่าแบบหล่อคือหดตัวประมาณ 7.17 เปอร์เซ็นต์ ไม่พบรอยแตกบนชี้นงานเนื่องจากการใช้น้ำในเป็นส่วนผสมน้อย ทำให้เกลือแอลคาไลน์ไม่เกิดการละลายมายังผิวชี้นงานแต่มีการกระจายอยู่ทั่วผลิตภัณฑ์ ซึ่งจัดเป็นข้อดีของการขึ้นรูปแบบอัดที่สามารถขึ้นรูปผงที่มีความแห้ง หรือใช้น้ำน้อย หรือใช้ตัวเชื่อมประสานอินทรีย์ปริมาณน้อยได้ มีกำลังการผลิตที่สูงไม่ใช้เวลานาน และยังเป็นวิธีที่โรงงานอุตสาหกรรมผลิตอิฐทนไฟนิยมใช้ในการผลิตด้วย⁽⁴⁹⁾

ชี้นงานหลังขึ้นรูปแบบหล่อให้ผลความหนาแน่นค่อนข้างต่ำประมาณ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรดังตารางที่ 4.11 เนื่องจากวัตถุดิบหลักที่ใช้ในส่วนผสมคือกากตะกอนซูปไฟวอะลูมิเนียมซึ่งประกอบด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) เป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งสารประกอบนี้เมื่อทำการเผาถึงอุณหภูมิประมาณ 1100 องศาเซลเซียสจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮดรอกซิเลชัน (Dehydroxylation) เป็นการกำจัดสารกลุ่มไฮดรอกไซด์ออกจากสารประกอบเกิดรูพรุนของแก๊สขึ้น ทำให้ชี้นงานมีความหนาแน่นต่ำและการหดตัวสูง⁽⁵²⁾ แต่อย่างไรก็ตามชี้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้วยังคงให้ค่าความหนาแน่นตามตารางที่ 4.11 ซึ่งสูงกว่าแบบหล่อขึ้นรูป เนื่องจากการอัดขึ้นรูปจะทำให้อนุภาคของวัตถุดิบที่เกาะกันด้วยแรงระหว่างพันธะที่ไม่แข็งแรงเกิดการแตกตัวไปปิดรูพรุนและช่องว่างระหว่างอนุภาค⁽⁴⁶⁾ และชี้นงานยังให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่าอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.78-0.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อีกทั้งการหดตัวหลังเผาที่สูงซึ่งเป็นไปได้ว่าส่วนผสมมีแอลคาไลน์ที่เป็นตัวช่วยหลอมทั้งจากเถ้าลอยและดินคำอยู่ในปริมาณมากจึงเกิดเฟสที่หลอมเหลวขึ้นในส่วนผสมทำให้อนุภาคเกาะเชื่อมกันได้แน่นขึ้นและเฟสที่หลอมเหลวไปปิดรูพรุนของชี้นงานจึงมีความหนาแน่นมากขึ้น หากสามารถลดปริมาณแอลคาไลน์ลงได้ก็จะช่วยลดปริมาณเฟสที่หลอมเหลวลงอีกทางหนึ่งด้วย

4.5.2 เปรียบเทียบการล้างและไม่ล้างส่วนผสมก่อนขึ้นรูปแบบอัด

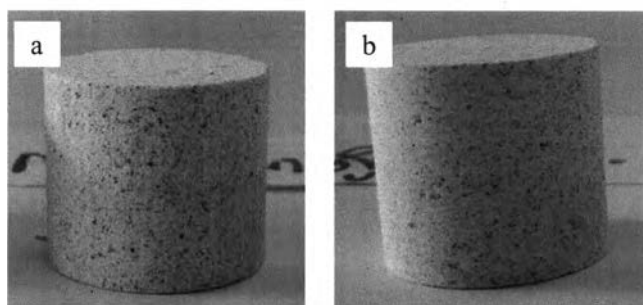
ทดลองลดปริมาณแอลคาไลน์โดยเปรียบเทียบผลการล้างและไม่ล้างส่วนผสมก่อนการขึ้นรูปและใช้แรงอัดที่น้อยลงจาก 10 เมกะพาสคัลเป็น 2.5 เมกะพาสคัล และเพิ่มปริมาณน้ำเป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยใช้ส่วนผสม C4-3

4.5.2.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของชี้นงานเฉลี่ยหลังเผา 1250 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.12 ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานเปรียบเทียบการล้างและไม่ล้างส่วนผสม

ชิ้นงาน	ปริมาณน้ำ (wt%)	แรงอัด (MPa)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	การหดตัวหลังเผา (%)
ไม่ล้าง	5	2.5	1.03±0.02	6.17±0.16
ล้าง	5	2.5	1.07±0.03	6.09±0.17

4.5.2.2 ตัวอย่างชิ้นงานหลังเผา



รูปที่ 4.12 ชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบ a) ไม่ล้างและ b) ล้างส่วนผสม

จากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการล้างส่วนผสมดังรูปที่ 4.12 (b) มีลักษณะและสมบัติไม่แตกต่างจากชิ้นงานที่ไม่ผ่านการล้างส่วนผสมดังรูป 4.12 (a) ซึ่งมีค่าความหนาแน่นและการหดตัวที่ใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4.12 แสดงว่าการล้างส่วนผสมเพื่อกำจัดเกลือแอสคาไลน์ที่ละลายน้ำ ไม่มีผลต่อชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปแบบอัด

แต่ปัจจัยเรื่องแรงดันที่ใช้ในการอัดกลับมีผลต่อความหนาแน่นและการหดตัวของชิ้นงานเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ 4.5.1 ที่ทำการอัดขึ้นรูปด้วยแรงดัน 10 เมกะพาสคัลให้ความหนาแน่นสูงกว่าที่อัดขึ้นรูปด้วยแรงดัน 5 เมกะพาสคัลในการทดลองที่ 4.5.2 แต่การหดตัวลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากแรงดันมีผลต่อการเกาะตัวกันแน่นของอนุภาคในส่วนผสม หากอัดด้วยแรงดันสูงอนุภาคจะเรียงตัวชิดกัน บางอนุภาคที่เกาะกันด้วยพันธะอ่อนๆ จะเกิดการแตกตัวและปิดช่องว่างและรูพรุน หากอัดด้วยแรงดันต่ำการเรียงตัวชิดกันของอนุภาคก็จะน้อยตามไปด้วย⁽⁴⁶⁾ สำหรับการหดตัวนั้นเป็นผลมาจากพฤติกรรมการเผาของวัตถุดิบและปริมาณน้ำในส่วนผสมเป็นหลัก ซึ่งการทดลองทั้งสองใช้วัตถุดิบในอัตราส่วนผสมที่เท่ากันจึงไม่ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงาน จึงผสมส่วนผสม C4-3 โดยไม่ล้างส่วนผสมและขึ้นรูปส่วนผสมแบบอัดด้วยแรงดัน 2.5 เมกะพาสคัลใช้ปริมาณน้ำ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบหาอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสม

4.6 การเลือกอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสม

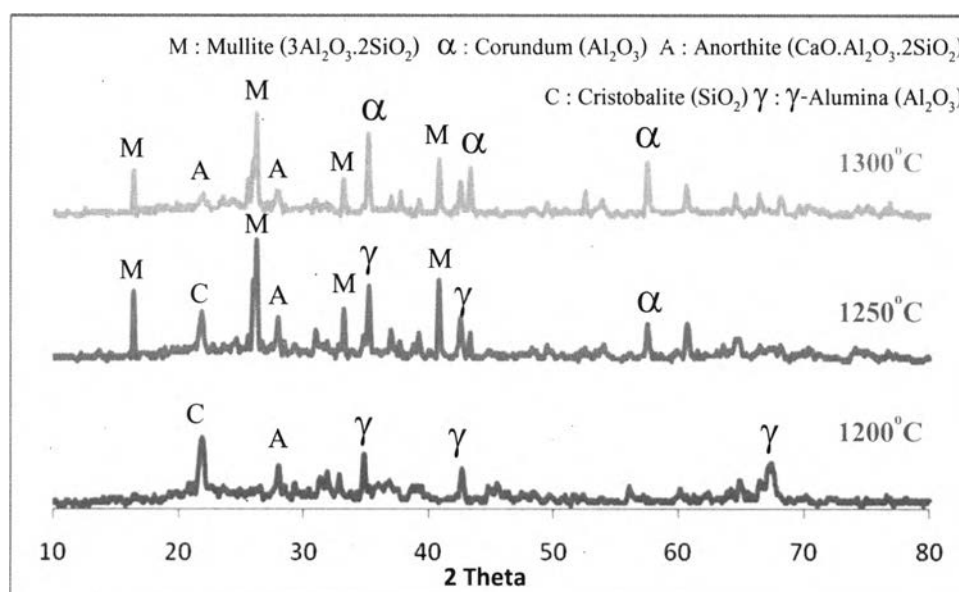
เนื่องจากในการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมอิฐฉนวนทนไฟสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 1200-1300 องศาเซลเซียส จึงทดลองหาอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมและหาลักษณะสมบัติของชิ้นงานที่ได้หลังเผาโดยใช้ส่วนผสมที่เลือกคือ C4-3 เป็นเกณฑ์

4.6.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานเฉลี่ยหลังเผาของส่วนผสมที่เลือก

ตารางที่ 4.13 ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผา

อุณหภูมิการเผา (°C)	ปริมาณน้ำ (wt%)	แรงอัด (MPa)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	การหดตัวหลังเผา (%)
1200	5	2.5	0.93±0.04	4.12±0.37
1250	5	2.5	1.03±0.02	6.17±0.16
1300	5	2.5	1.02±0.04	6.40±0.57

4.6.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานแต่ละอุณหภูมิ



รูปที่ 4.13 องค์ประกอบทางเฟสแต่ละอุณหภูมิการเผา

ผลการทดลองดังตารางที่ 4.13 พบว่าอุณหภูมิการเผามีผลต่อความหนาแน่นและการหดตัวของชิ้นงาน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาจะทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้นและการหดตัวของชิ้นงานก็เพิ่มขึ้นด้วย อธิบายได้จากองค์ประกอบทางเฟสที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิ

เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าที่ 1200 องศาเซลเซียส พบเฟสของผลึกซิลิกาคือคริสโตบาไลต์มีพีคสูงขึ้นเนื่องจากมีปริมาณเถ้าแกลบในส่วนผสมถึง 20 เปอร์เซ็นต์ จึงมีซิลิกาออสฐานเป็นส่วนประกอบหลักเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นซิลิกาที่มีรูปผลึกเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น เมื่อเผาถึง 1300 องศาเซลเซียสจะไม่พบเฟส คริสโตบาไลต์อีกเนื่องจากตัวช่วยหลอมกลุ่มแอลคาไลน์เกิดการหลอมอย่างรุนแรงทำให้ซิลิกาที่เป็นผลึกเกิดการหลอมกลายเป็นซิลิกาออสฐานมากขึ้นและได้เฟสแก้ว ตัวช่วยหลอมจะกลายเป็นของเหลวหลอมแพร่อยู่รอบๆ อนุภาควัตถุดิบ ทำให้ผลึกของส่วนผสมอื่นเกิดการหลอมละลายเข้าด้วยกันยึดเกาะกันแน่นขึ้นรูพรุนก็จะลดลงตามไปด้วย จึงทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวและมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วย⁽⁵³⁾ ซึ่งที่ตั้งแต่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียสจัดเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาอิฐฉนวนทนไฟที่ทำการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียสแม้ว่าจะให้องค์ประกอบทางเฟสที่เหมาะสม แต่ความหนาแน่นของชิ้นงานยังคงสูงกว่าช่วงความหนาแน่นของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าอยู่

4.7 การปรับปรุงความหนาแน่นของชิ้นงาน

จากการศึกษาพบว่าแม้จะลดแรงอัดของชิ้นงานลงจาก 10 เมกะพาสคัลเป็น 2.5 เมกะพาสคัล ก็ไม่ทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลงใกล้เคียงกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.78-0.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรได้ จึงเลือกปรับปรุงความหนาแน่นของชิ้นงานโดยอาศัยตัวสร้างรูพรุน ในที่นี้เลือกเถ้าแกลบดิบเป็นตัวสร้างรูพรุนเพื่อให้องค์ประกอบทางเคมีและเฟสที่ได้หลังเผาใกล้เคียงกับเถ้าแกลบที่ใช้เป็นส่วนผสมหลัก โดยเติมในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเถ้าแกลบดิบหลังเผา (%Residue)

4.7.1 การออกแบบส่วนผสมโดยการเติมเถ้าแกลบดิบเป็นตัวสร้างรูพรุน

เติมเถ้าแกลบดิบหยาบเป็นตัวสร้างรูพรุนเสริมในเนื้อผลิตภัณฑ์ โดยคิดจากปริมาณเถ้าแกลบที่เหลือหลังเผา ซึ่งเถ้าแกลบดิบ 100 กรัมจะเหลือเป็นเถ้าหลังเผา 20 กรัม (1 ใน 5 ของน้ำหนักเริ่มต้น)⁽⁴¹⁾ โดยทำการแทนที่ลงในเถ้าแกลบ

ตารางที่ 4.14 ส่วนผสมเมื่อทำการเติมเถ้าแกลบดิบ

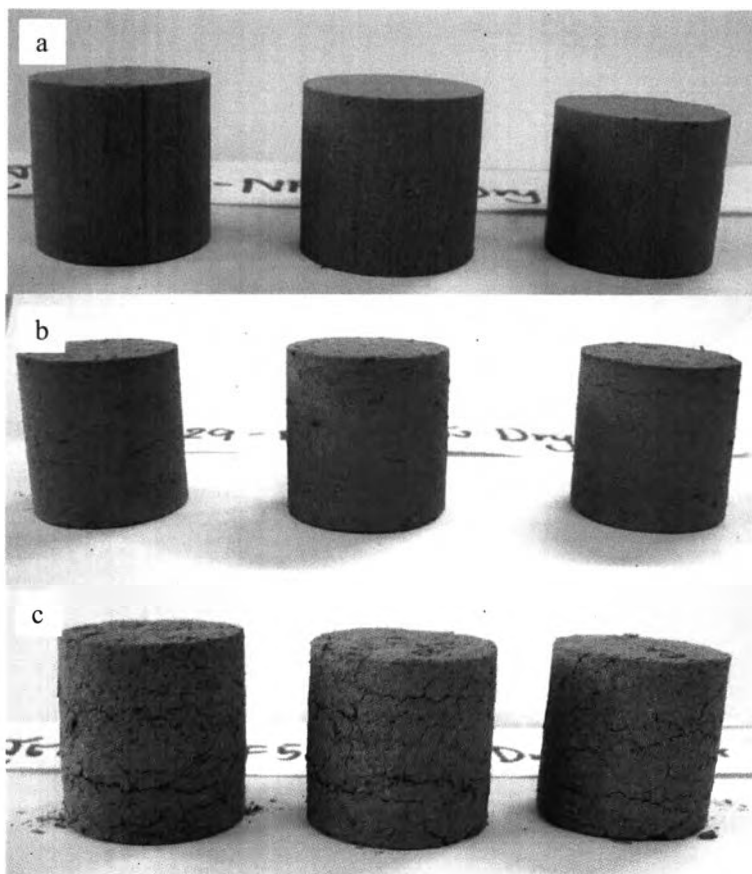
วัตถุดิบ (wt%)	กากตะกอน อะลูมิเนียม	เถ้าแกลบ	เถ้าลอย	ดินดำ	เถ้าแกลบดิบ	รวม
P1-RH0	60	20	10	10	0	100
P1-RH12.5	60	17.5	10	10	12.5	100
P1-RH25	60	15	10	10	25	100

4.7.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานเฉลี่ยหลังเผา 1300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติหลังเผา

ชิ้นงาน	ปริมาณน้ำ (wt%)	แรงอัด (MPa)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	การหดตัวหลังเผา (%)
P1-RH0	5	2.5	1.09 ± 0.02	7.15 ± 0.43
P1-RH12.5	40	2.5	0.74 ± 0.04	ขยายตัว
P1-RH25	50	2.5	-	-

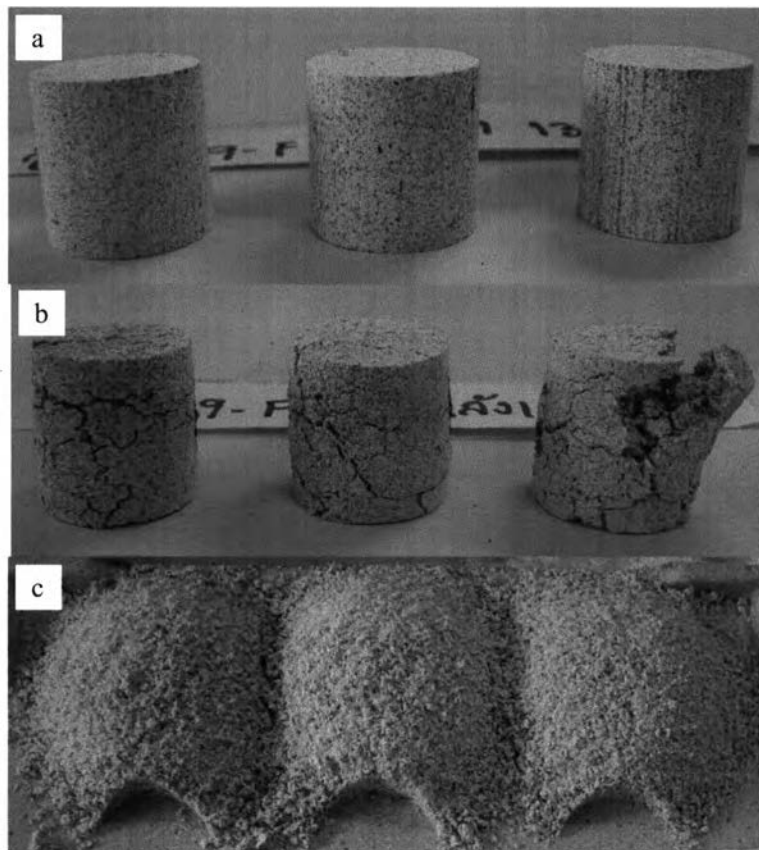
4.7.1.2 ตัวอย่างชิ้นงานก่อนเผา



รูปที่ 4.14 ชิ้นงานก่อนเผาเปรียบเทียบการเติมแคลบคิบตามที่ได้รับ รูป a) ไม่เติม b) เติม 12.5% และ c) เติม 25%

จากการผลทดลองพบว่า ชีงงานที่เติมแกลบดิบลงไปจะเกิดการแตกตัว หากเติมลงไปปริมาณที่มากจะทำให้ไม่อยู่ตัวหลังการขึ้นรูปเลยดังแสดงในรูปที่ 4.14 (b) และ (c) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก แกลบดิบที่เติมลงไปเป็นแกลบที่ยังไม่ได้ผ่านการบด การกระจายขนาดอนุภาคของแกลบดิบพบว่ามากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ของแกลบดิบจะมีขนาดใหญ่กว่า 500 ไมโครเมตร ซึ่งใหญ่กว่าอนุภาคของวัตถุดิบอื่นๆมากส่งผลถึงการเกาะตัวกันแน่นหลังการขึ้นรูป อีกทั้งแกลบดิบเป็นวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว เมื่อเพิ่มปริมาณแกลบดิบลงไปจึงต้องใส่น้ำลงไปช่วยให้เกิดการเกาะกันของวัตถุดิบมากขึ้น แต่ผลิตภัณฑ์หลังการขึ้นรูปมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non-uniform texture)⁽⁴¹⁾ พบรอยแตกและการแยกตัวหลังจากการอบแห้งซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากันและไม่เกาะกันกับส่วนผสมอื่นๆ เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ไม่เติมแกลบดิบดังรูปที่ 4.14 (a) โดยยิ่งเติมแกลบดิบมากขึ้นความไม่เป็นเนื้อเดียวกันจะเห็นได้อย่างชัดเจน หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ชีงงานที่ได้หลังเผาจะให้ผลดังตารางที่ 4.15 และมีลักษณะดังนี้

4.7.1.3 ตัวอย่างชีงงานหลังเผา



รูปที่ 4.15 ชีงงานหลังเผาเปรียบเทียบการเติมแกลบดิบตามที่ได้รับรูป a) ไม่เติม b) เติม 12.5% และ c) เติม 25%

จากผลการทดลองหลังจากทำการเผาชิ้นงานที่เติมเกลบคิบดังตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.15 จะพบว่าการเติมเกลบคิบช่วยลดความหนาแน่นของชิ้นงานได้ แต่ชิ้นงานจะขยายตัวพบรอยแตกขนาดใหญ่และหากเพิ่มปริมาณเกลบคิบจะทำให้ชิ้นงานไม่อยู่ตัวดังรูปที่ 4.15 เนื่องจากเกลบคิบมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ ทำให้การสลายตัวของสารอินทรีย์ในเกลบคิบหลังเผาเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ตามไปด้วย ในกระบวนการเผาจะเกิดปรากฏการณ์ที่รูพรุนมาเชื่อมกันและแก๊สพยายามจะระเหยออกจากชิ้นงานผ่านรอยแตก⁽⁵³⁾ ซึ่งส่วนผสม P1-RH2.5 ดังรูปที่ 4.15 (c) ชิ้นงานไม่อยู่ตัวเลยเพราะมีส่วนผสมของเกลบคิบที่มีขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่ว วัสดุคิบอื่นๆ ไม่สามารถหลอมตัวมาเชื่อมกันได้เมื่อเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์แต่ส่วนผสม P1-RH25 มีปริมาณเกลบคิบสูงที่สุด การระเหยของสารอินทรีย์จะเกิดรุนแรงที่สุด ทำให้ส่วนผสมไม่เกาะตัวกัน แต่สลายตัวกลายเป็นผงเกาะรวมกันแน่นที่ฐานรองดังรูปที่ 4.15 (c) ซึ่งเกิดจากการหนีกันแน่นภายหลังจากการแตกตัวแล้ว

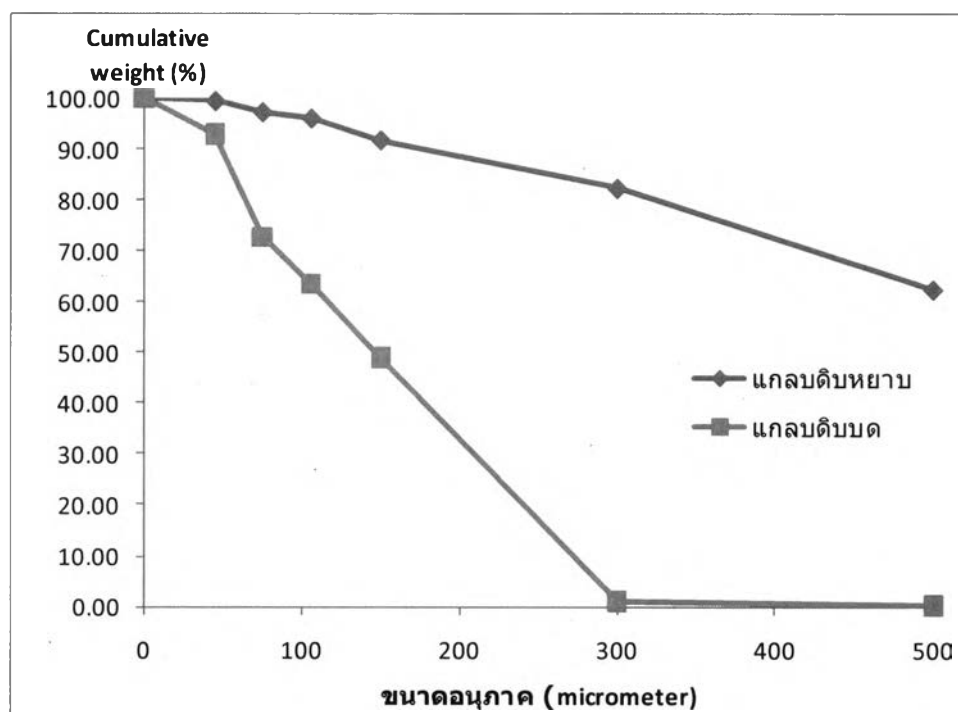
เพื่อให้เกิดการผสมกันของวัสดุคิบให้ดียิ่งขึ้นจึงควรทำการบดอนุภาคของเกลบคิบให้มีการกระจายขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับวัสดุคิบตัวอื่นๆ ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 300 ไมโครเมตรเป็นจำนวนมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ยิ่งขนาดอนุภาคละเอียดมากขึ้นชิ้นงานก็จะเกาะตัวกันได้แน่นขึ้น⁽⁵²⁾ นอกจากนี้อีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการสลายตัวของสารอินทรีย์อย่างรุนแรงขณะเผา คือ สภาวะการเผาและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ โดยปกติจะทำการตั้งสภาวะการเผาให้เผาจากอุณหภูมิห้องถึง 1300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งส่งผลต่อการสลายตัวของน้ำในพอลิเมอร์และอินทรีย์สารในเนื้อผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะเกลบคิบซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์กลุ่มไฮโดรคาร์บอนที่สลายตัวหลังจากเผาและให้ความร้อนสูงได้แก่ เซลลูโลสและลิกนินประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเกลบ⁽⁴¹⁾ เมื่อเกลบคิบมีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนเปิดขนาดใหญ่และการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่รุนแรง ในกระบวนการเผาพนักูพรุนเหล่านี้จะรวมตัวกัน (Pore coalescence)⁽⁵⁴⁾ แก๊สจากการเผาไหม้สารอินทรีย์จะเกิดการรวมตัวทำให้ชิ้นงานขยายตัว บางส่วนหนีออกจากชิ้นงานตามรอยแตก หากให้ความร้อนอย่างรวดเร็วแก๊สจากการเผาไหม้ของสารอินทรีย์ก็จะรวมกันอย่างรวดเร็วและเกิดการระเบิดขึ้น

4.7.2 การลดขนาดของเกลบคิบ

ทำการลดขนาดของเกลบคิบเปรียบเทียบกับเกลบคิบหยาบ โดยนำเกลบคิบไปบดให้มีขนาดน้อยกว่า 150 ไมโครเมตรผ่านตะแกรง 100 เมช แสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบเปอร์เซ็นต์สะสมตามตารางและรูปดังนี้

ตารางที่ 4.16 การกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุคิบบแบบเปอร์เซ็นต์สะสม

ขนาด (μm)	แกลบคิบบหยาบ (wt%)	แกลบคิบบด (wt%)
>500	62.55	0.17
>300	82.41	1.00
>150	91.89	49.00
>106	96.16	63.53
>75	97.36	72.80
>45	99.53	92.93
<45	100.01	99.99



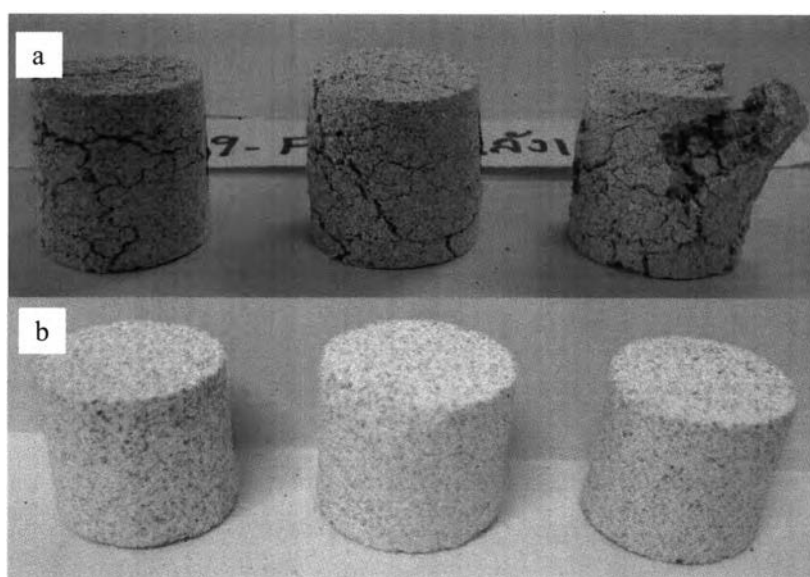
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคแบบเปอร์เซ็นต์สะสม

4.7.2.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานส่วนผสม P1-RH12.5 โดยเปรียบเทียบการใช้แกลบคิบบหยาบและแกลบคิบบด ทำการเผา ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.17 ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานก่อนและหลังบดเกลบดิบ

ชิ้นงาน	ปริมาณน้ำ (wt%)	แรงอัด (MPa)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	การหดตัวหลังเผา (%)
P1-RH12.5- เกลบดิบหยาบ	40	2.5	0.74 ± 0.04	ขยายตัว
P1-RH12.5- เกลบดิบบด	30	2.5	0.87 ± 0.03	9.42 ± 0.93

4.7.2.2 ตัวอย่างชิ้นงานหลังเผา



รูปที่ 4.17 ชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบการเติมเกลบดิบ รูป a) เกลบดิบตามที่ได้รับและ b) เกลบดิบบด

ผลการลดขนาดเกลบดิบดังตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.17 พบว่า ชิ้นงานที่เติมเกลบดิบบดไม่พบรอยแตกขนาดใหญ่หลังเผาดังรูปที่ 4.17 (b) เนื่องจากใช้น้ำในส่วนผสมน้อยลง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ความหนาแน่นสูงกว่าชิ้นงานที่เติมเกลบดิบหยาบและหดตัวสูงกว่าดังตารางที่ 4.17 เนื่องมาจากอนุภาคของวัตถุดิบเกาะรวมตัวกันได้ดีขึ้นจากการบดเกลบดิบให้มีความละเอียดมากขึ้นจะทำให้อนุภาคของเกลบดิบบดมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นขณะทำการขึ้นรูปอนุภาคของเกลบจะกระจายตัวไปตามช่องว่างภายในส่วนผสม ทำให้เกิดการเกาะตัวกันแน่น⁽⁵⁾

เมื่อเผาผลิตภัณฑ์จะทำให้ชิ้นงานเกิดการเผาผืนิก แกลบดิบจะสลายตัวไปเมื่อได้รับความร้อนและเกิดรูพรุนที่มีขนาดเล็กตามขนาดอนุภาคของแกลบดิบกระจายตัวทั่วชิ้นงาน อนุภาคเกิดการเกาะกัน ได้แน่นขึ้นความหนาแน่นจึงเพิ่มขึ้น รูพรุนที่เกิดจากการเผามีขนาดเล็กจึงทำให้การเชื่อมกันของรูพรุนเพื่อการสลายตัวของน้ำและสารอินทรีย์เกิดขึ้นไม่รุนแรง

จึงขยายผลเพื่อหาปริมาณแกลบดิบบดที่เหมาะสมให้ชิ้นงานมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าและหลีกเลี่ยงการเกิดการแตกและแยกตัวของชิ้นงาน (Laminate) ขณะขึ้นรูปและหลังเผา⁽⁴⁶⁾ โดยยึดระยะเวลาการเผาเพื่อช่วยในการเผาไหม้แกลบดิบโดยการให้ความร้อนในอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มีการสลายตัวของน้ำในโครงสร้าง⁽⁵⁵⁾ สารอินทรีย์⁽⁵³⁾ และสารประกอบไฮดรอกไซด์⁽⁵²⁾ ของวัตถุดิบ ขึ้นไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิสูงสุดแล้วขึ้นไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อทำการเผาผืนิกให้ระบบมีเวลามากพอจนถึงสภาวะคงที่ (Steady state)⁽⁵⁶⁾ อีกทั้งทดสอบหาค่าแรงกดที่เหมาะสมในการเตรียมอิฐฉนวนทนไฟให้ได้ความหนาแน่นที่ต้องการ เนื่องจากปริมาณแกลบดิบมีผลต่อการเกาะรวมตัวกันของวัตถุดิบด้วยได้ผลดังนี้

4.7.3 การออกแบบส่วนผสมโดยการเติมแกลบดิบบดเป็นตัวสร้างรูพรุน

เติมแกลบดิบเป็นตัวสร้างรูพรุนเสริมในเนื้อผลิตภัณฑ์ โดยคิดจากปริมาณแกลบที่เหลือหลังเผา ซึ่งแกลบดิบ 100 กรัมจะเหลือเป็นเถ้าแกลบหลังเผา 20 กรัม (1 ใน 5) โดยแทนที่ลงในปริมาณเถ้าแกลบ

ตารางที่ 4.18 ส่วนผสมเมื่อทำการเติมแกลบดิบบด

วัตถุดิบ (wt%)	กากตะกอน อะลูมิเนียม	เถ้าแกลบ	เถ้าลอย	ดินคำ	แกลบดิบ บด	รวม
P2-RH0	60	20	10	10	0	100
P2-RH5	60	19	10	10	5	104
P2-RH12.5	60	17.5	10	10	12.5	110
P2-RH15	60	17	10	10	15	112
P2-RH17.5	60	16.5	10	10	17.5	114
P2-RH20	60	16	10	10	20	116
P2-RH22.5	60	15.5	10	10	22.5	118

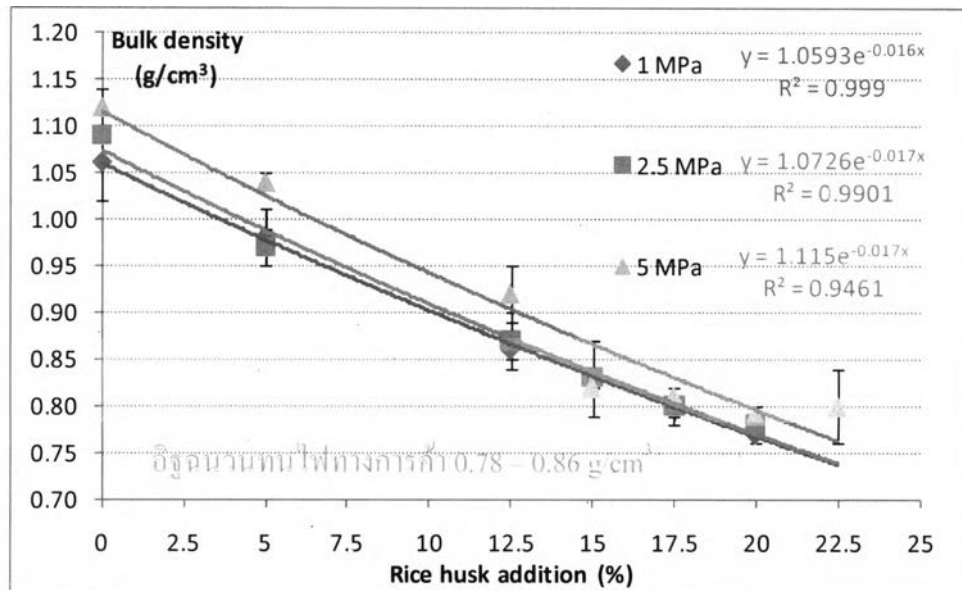
4.7.3.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานเฉลี่ยหลังเผา 1300 องศาเซลเซียส

ทำการเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าทั้ง 2 ผลิตภัณฑ์ร่วมกับชิ้นงานทดสอบซึ่งมีปริมาณแคลเซียมและแรงดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่างกัน ได้ผลดังนี้

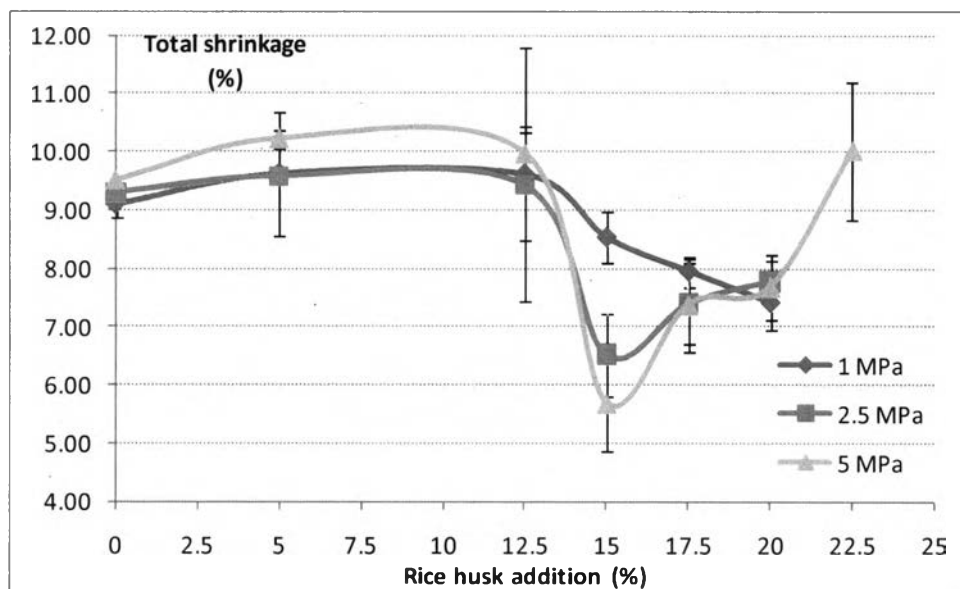
ตารางที่ 4.19 ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานหลังเผา

ชิ้นงาน	ปริมาณน้ำ (wt%)	แรงอัด (MPa)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	การหดตัวหลังเผา (%)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความต้านทานแรงกดแตก (MPa)
SRIC HI-26	-	-	0.86±0.01	-	47.71±0.87	57.35±3.54	2.48±0.53
Patra C-2	-	-	0.78±0.02	-	71.59±0.24	88.71±0.75	2.50±0.60
P2-RH0	5	1	1.06±0.04	9.10±0.22	60.36±2.57	57.14±3.54	2.96±0.82
		2.5	1.09±0.01	9.30±0.11	60.20±0.20	53.69±0.58	3.71±0.61
		5	1.12±0.02	9.51±0.07	59.07±0.51	51.57±1.01	4.75±0.70
P2-RH5	10	1	0.98±0.03	9.63±1.06	67.66±3.59	74.66±1.30	1.07±0.14
		2.5	0.97±0.02	9.58±0.10	64.92±0.99	65.18±2.84	1.08±0.17
		5	1.04±0.01	10.22±0.15	63.45±2.70	58.63±0.64	1.74±0.06
P2-RH12.5	30	1	0.86±0.01	9.62±2.16	68.06±0.53	75.70±1.69	0.44±0.06
		2.5	0.87±0.03	9.42±0.93	67.46±1.86	74.12±6.23	0.47±0.19
		5	0.92±0.03	9.97±0.48	65.94±1.22	68.58±3.76	0.72±0.15
P2-RH15	30	1	0.83±0.04	8.54±0.43	69.65±1.09	84.02±1.91	0.34±0.08
		2.5	0.83±0.01	6.52±0.72	69.94±0.32	81.29±0.64	0.53±0.06
		5	0.82±0.01	5.69±0.82	71.19±0.51	81.86±0.44	0.68±0.02
P2-RH17.5	30	1	0.80±0.01	7.96±0.26	70.50±0.31	86.12±1.11	0.28±0.04
		2.5	0.80±0.02	7.40±0.70	69.74±0.66	83.56±2.87	0.26±0.03
		5	0.81±0.01	7.38±0.79	69.31±0.99	82.22±2.40	0.30±0.02
P2-RH20	35	1	0.77±0.01	7.42±0.46	70.50±0.22	86.56±0.39	0.23±0.02
		2.5	0.78±0.02	7.78±0.37	69.60±1.12	86.02±3.25	0.25±0.04
		5	0.79±0.01	7.68±0.55	70.36±0.32	85.98±0.61	0.27±0.00
P2-RH22.5	50	5	0.80±0.04	10.02±1.17	70.85±0.89	85.98±3.72	0.54±0.10

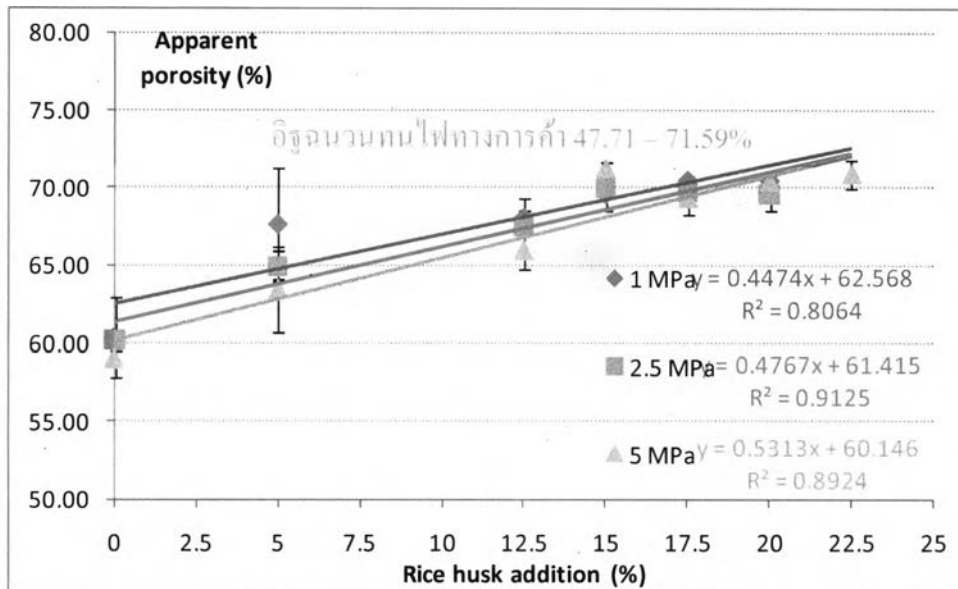
4.7.3.2 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติต่างๆ



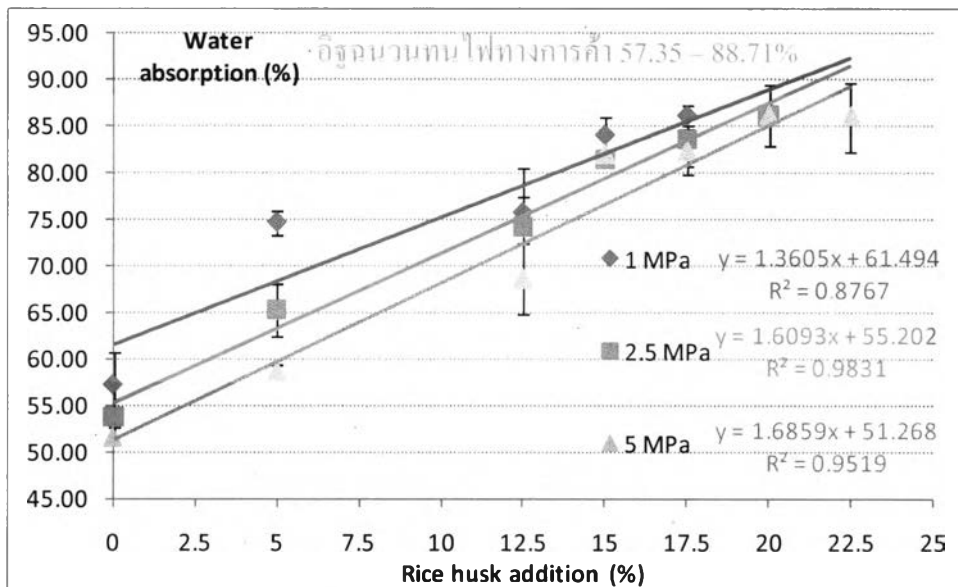
รูปที่ 4.18 แนวโน้มความหนาแน่นรวมเปรียบเทียบกับปริมาณแกลบดิบและแรงอัดขึ้นรูป



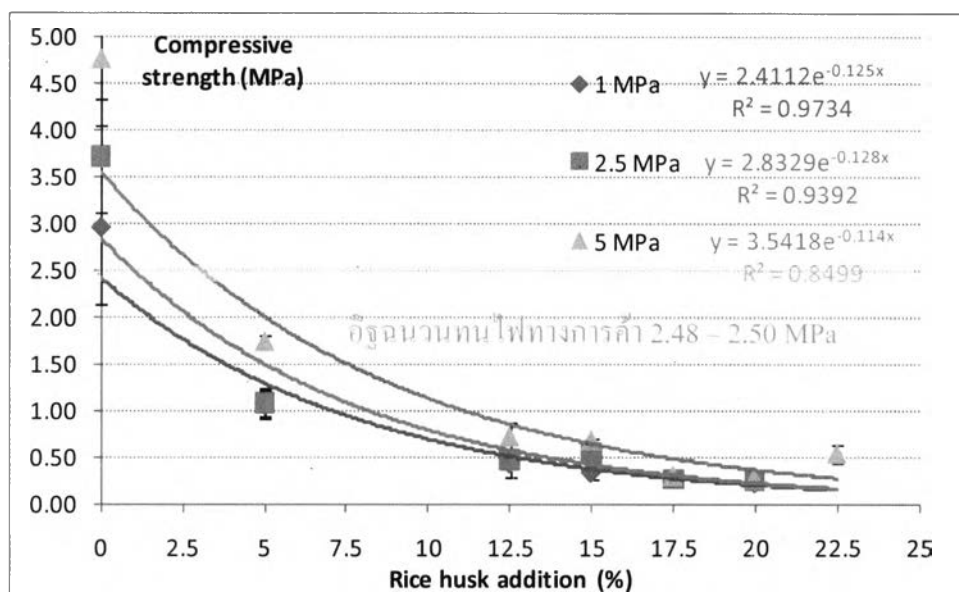
รูปที่ 4.19 แนวโน้มการหดตัวรวมเปรียบเทียบกับปริมาณแกลบดิบและแรงอัดขึ้นรูป



รูปที่ 4.20 แนวโน้มความพรุนตัวปรากฏเปรียบเทียบกับ การเพิ่มปริมาณแกลบดิบและแรงอัดขึ้นรูป



รูปที่ 4.21 แนวโน้มการดูดซึมน้ำเปรียบเทียบกับ การเพิ่มปริมาณแกลบดิบและแรงอัดขึ้นรูป



รูปที่ 4.22 แนวโน้มความต้านทานแรงกดแตกเปรียบเทียบการเพิ่มเกลบคิบและแรงอัดขึ้นรูป

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.19 พบว่าการเพิ่มปริมาณเกลบคิบบดทำให้ต้องใช้ น้ำในส่วนผสมมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เกลบคิบบดเป็นวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียวจึงทำให้ เเกะรวมตัวกันได้ยาก⁽⁵⁾ ปริมาณน้ำและเกลบคิบบดที่เพิ่มขึ้นนี้เองทำให้ผลิตภัณฑ์มีรูพรุนจากการ ระเหยของน้ำและสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อแนวโน้มของความหนาแน่นรวมที่ลดลงเมื่อปริมาณ เกลบคิบบดเพิ่มขึ้นดังแนวโน้มของกราฟในรูปที่ 4.18 ทำให้ความพรุนตัวปรากฏและการดูดซึมน้ำ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ โดยแรงอัดที่ใช้ในการอัดขึ้นงานก็มีผลต่อ ปัจจัยทั้งสามนี้เช่นกัน โดยการใช้แรงอัดสูงคือ 5 เมกะพาสคัลจะทำให้วัตถุดิบเกาะกันได้แน่นขึ้น จากการที่อนุภาคของวัตถุดิบเกาะรวมตัวกันด้วยพันธะที่ไม่แข็งแรง (Soft agglomerate) เมื่อได้รับ แรงอัดสูงก็จะเกิดการแตกตัวของอนุภาคให้มีขนาดเล็กกลง โดยเฉพาะวัตถุดิบที่ใช้ต่างก็ไม่มี ความเหนียวจะทำให้อนุภาคที่แตกตัวไปปิดช่องว่างได้ดีและง่ายยิ่งขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นสูงดัง กราฟสีเขียวที่ปรากฏในรูปที่ 4.18 ทำให้รูพรุนและการดูดซึมน้ำต่ำไปด้วยดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ ตรงข้ามกับการใช้แรงอัดต่ำคือ 1 เมกะพาสคัลจะให้ผลการทดลองตรงกันข้าม ซึ่งแรงอัด 2.5 เมกะพาสคัลจะให้ผลอยู่ในระดับปานกลาง

อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของค่าความหนาแน่นรวมที่อยู่ในช่วงของอิฐฉนวนไฟ ทางการค้าจะพบในชิ้นงานที่เติมเกลบคิบบดตั้งแต่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นต้นไปดังรูปที่ 4.18 นอกจากนี้ค่าของความพรุนตัวที่ปรากฏและการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เติมเกลบคิบบดต่างอยู่ ในช่วงของอิฐฉนวนไฟทางการค้าทั้งสิ้นดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 จะเห็นว่าปริมาณของ ความหนาแน่นที่ลดลงจากการที่มีค่าความพรุนตัวสูงและการดูดซึมน้ำมาก แสดงให้เห็นถึงปริมาณ

ของรูปพรุนที่มากจากการเติมเกลบคิบบด ทำให้เกิดแก๊สจากการเผาไหม้สารอินทรีย์และการสลายตัวของน้ำภายในอนุภาคของแต่ละวัสดุคิบ เมื่อให้ความร้อนจะทำให้รูปพรุนเกิดการรวมตัวกันเกิดรูปพรุนเปิด⁽⁵⁴⁾ ให้ความพรุนตัวปรากฏเพิ่มขึ้น ยังมีเกลบคิบบดมากก็จะทำให้รูปพรุนปรากฏมากขึ้นด้วย

ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลถึงความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผา เมื่อความพรุนตัวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง⁽⁴⁵⁾ จากผลการวัดความต้านทานแรงกดแตกดังตารางที่ 4.19 และแนวโน้มน้ำดังแสดงในรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่า ไม่มีชิ้นงานใดเลยที่เติมเกลบคิบบดแล้วให้ค่าความต้านทานแรงกดแตกมากกว่าหรือเท่ากับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า การเพิ่มแรงดันในการอัดดังแสดงด้วยกราฟสีเขียวในรูปที่ 4.22 ช่วยสนับสนุนให้มีค่าความต้านทานแรงกดแตกเพิ่มขึ้นแต่ความหนาแน่นก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยแต่ถึงอย่างไรความแข็งแรงยังคงน้อยกว่าอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าอยู่ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเกิดรูปพรุนเปิดที่รวมตัวกันทำให้ความพรุนตัวปรากฏเพิ่มสูงขึ้นทำให้โครงสร้างที่ได้เป็น โครงสร้างที่ไม่แข็งแรงเนื่องจากมีเฟสของรูปพรุนเป็นหลัก^(38, 47)

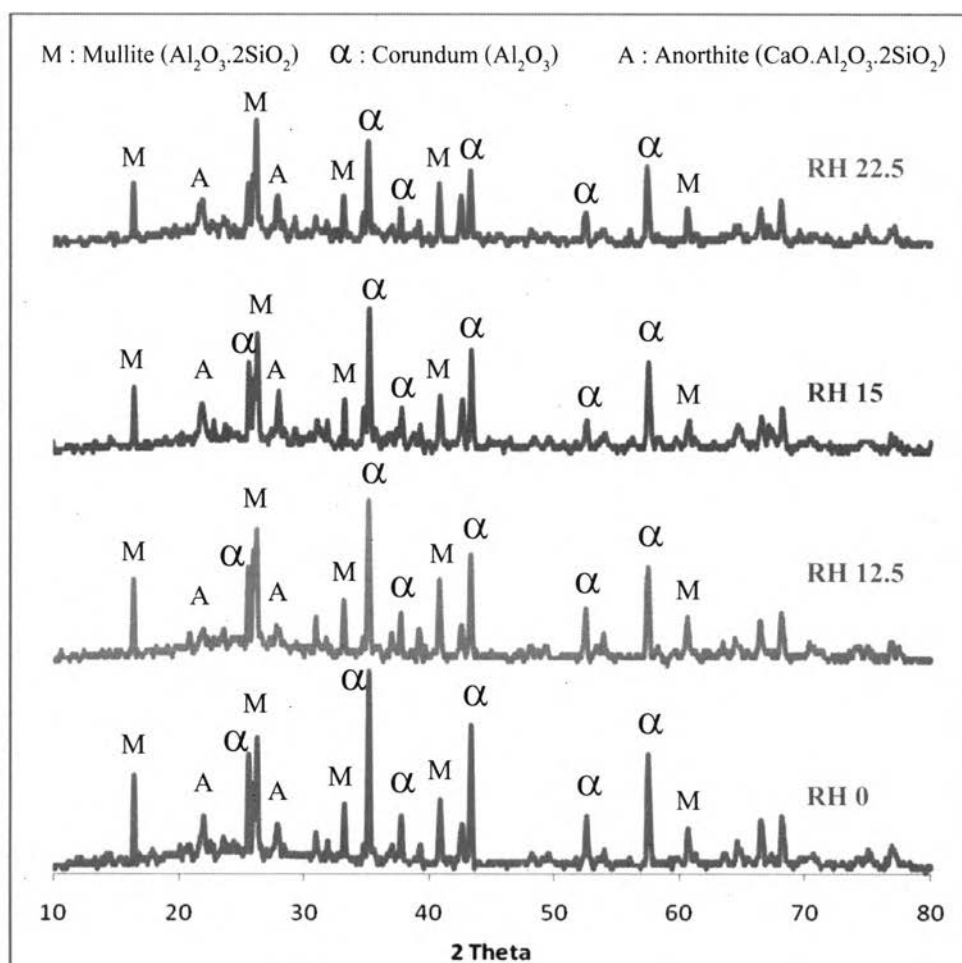
สำหรับผลการหาคัดตัวดังแสดงในรูปที่ 4.19 นั้นมีความเกี่ยวข้องกับการเกิดเฟสของเหลวและเฟสแก้วในเนื้อผลิตภัณฑ์ขณะทำการเผา⁽³¹⁾ ซึ่งจะทำให้เกิดการหลอมของผิวอนุภาคมาเชื่อมติดกัน เกิดการไล่แก๊สซึ่งอยู่ในรูปพรุนออกทำให้รูปพรุนรวมตัวกันชิ้นงานจึงเกิดการหดตัว ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเฟสของเหลวคือปริมาณของตัวช่วยหลอมในวัสดุคิบซึ่งเป็นสารประกอบกลุ่มแอลคาไลน์⁽³³⁾ ซึ่งการเติมเกลบคิบบดจะช่วยเพิ่มเฟสแก้วในเนื้อผลิตภัณฑ์ และเอื้อต่อการเกิดเฟสของเหลวในเนื้อส่วนผสมด้วย จากกราฟในรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าการเติมเกลบคิบบดลงไปไม่เกิน 12.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะส่งผลให้มีการหดตัวในชิ้นงานสูงประมาณ 9-10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเกิดเฟสแก้วขึ้นร่วมกับตัวช่วยหลอมจึงเกาะรวมตัวกันได้ดี ชิ้นงานจึงหลอมตัวจับกันได้ง่ายและเกิดการหดตัวสูงตามไปด้วย โดยเฉพาะชิ้นงานที่ทำการอัดด้วยแรงดัน 5 เมกะพาสคัลดังกราฟสีเขียวในรูปที่ 4.19 มีการหดตัวของชิ้นงานที่สูงกว่าแรงดันอื่นๆ เนื่องจากแรงอัดทำให้อนุภาคเกาะรวมตัวกันแน่นกว่าและอนุภาควัสดุคิบจึงเกิดการหลอมและแพร่ไปเชื่อมกันได้เร็วกว่า

แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเกลบคิบบดถึง 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะพบว่าชิ้นงานเกิดการหดตัวน้อยมาก สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะการสลายตัวของน้ำและสารอินทรีย์มีอิทธิพลเหนือการหลอมละลายของอนุภาคจากการเผาผนึก อนุภาคจึงไม่ชิดกันดังจะเห็นจากความหนาแน่นของชิ้นงานมีแนวโน้มน้ำลดลงในอัตราที่ต่ำ⁽⁵⁾ โดยเฉพาะปริมาณน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเกลบคิบบดเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการขยายตัวจากการระเหยของน้ำหลังอบแห้งส่งผลต่อการหดตัวรวมที่ลดลง แต่หลังจากเพิ่มเกลบคิบบดมากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์พบว่า ชิ้นงานมีการหดตัวสูงขึ้นเนื่องจากพบเฟสแก้วจากการหลอมของซิลิกาในเกลบคิบมากขึ้น อนุภาคเกิดการชิดกันมากขึ้น เฟสแก้วรวมตัวกับ

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุดิบอื่นๆ เช่น อะลูมินาในภาคตะกอนหุบผิวอะลูมิเนียมทำให้เฟสคอร์นดัมลดลง หรือรวมตัวกับแคลเซียมในถ้ำลอยเกิดเฟส อะนอร์ไทต์เพิ่มขึ้น ซึ่งยืนยันได้จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสที่มีความเข้มเฟสคอร์นดัมลดลงเมื่อเติมแคลบดิบลดลงไปมากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์

อย่างไรก็ตามแนวโน้มของการหดตัวลดลงอย่างต่อเนื่องพบเฉพาะการอัดด้วยแรงดัน 1 เมกะพาสคัลดังกราฟสีน้ำเงินในรูปที่ 4.19 เท่านั้น ซึ่งเป็นผลมาจากแคลบดิบบดปริมาณมากเกาะตัวกับวัตถุดิบอื่นได้น้อยลง และไม่มีแรงดันช่วยสนับสนุนดังเช่น 2.5 และ 5 เมกะพาสคัลทำให้เกิดการเกาะรวมตัวกันให้แน่นขึ้น ซึ่งงานที่อัดด้วยแรงดันต่ำจึงเกิดการขยายตัวจากการสลายตัวของน้ำและสารอินทรีย์มากกว่า

4.7.3.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานหลังเผา 1300 องศาเซลเซียส แรงดัน 2.5 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.23 องค์ประกอบทางเฟสชิ้นงานตามปริมาณแคลบดิบบดที่เติม

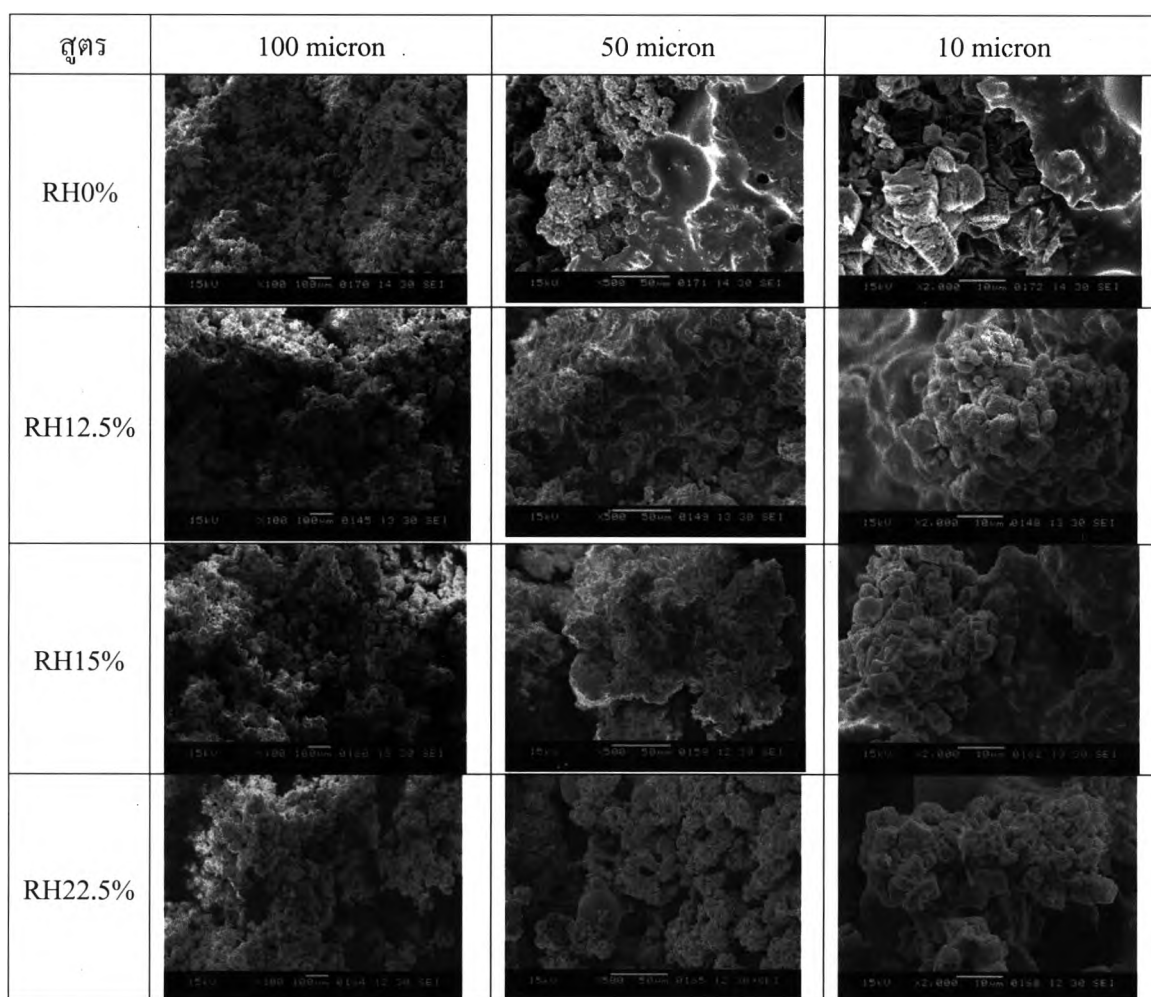
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานดังรูปที่ 4.23 ยืนยันการวิเคราะห์ผลตามข้อ 4.7.3.2 ได้ว่า เมื่อเติมแกลบคิบบดเข้าไปถึง 12.5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเฟสผลึกของอะนอร์ไทต์และคอร์นคัมลตลงนั้นแสดงว่าเกิดการหลอมของผลึกทั้งสองทำให้มีปริมาณของเฟสแก้วเพิ่มขึ้น ร่วมกับเฟสของตัวช่วยหลอมที่เป็นแอลคาไลน์ในเถ้าลอยหลอมเหลวรวมกันเกิดการเผาผนึกชิ้นงานจึงมีการหดตัวสูงขึ้น

แต่การเติมแกลบคิบบดถึง 15 เปอร์เซ็นต์จะทำให้ปริมาณเฟสที่เป็นผลึกเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะเฟสของอะนอร์ไทต์แต่เฟสของคอร์นคัมลตลง เนื่องจากแกลบคิบบดกลายเป็นเฟสซิติกา อสังฐานทำให้มีปริมาณซิติกาสูงที่เกินในเนื้อผลิตภัณฑ์รวมตัวกับอะลูมินาในภาคตะกอนหุบผิวอะลูมิเนียมได้อะนอร์ไทต์เพิ่มขึ้น แต่อะลูมินาลดลงทำให้คอร์นคัมลตลงตามความเข้มของเฟสที่ปรากฏ ส่งผลให้ชิ้นงานมีเฟสที่หลอมเหลวลดลงจึงมีทำให้การหดตัวลดลงด้วย

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสดังรูป 4.23 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มแกลบคิบบดแล้วจะทำให้เฟสคอร์นคัมลตลง เนื่องจากแกลบคิบบดมีองค์ประกอบของซิติกาอสังฐานเป็นหลัก ซึ่งภายในส่วนผสมเกิดเฟสหลอมเหลวของแอลคาไลน์จากเถ้าลอยและดินดำแล้วยังปรากฏเฟสของซิติกาจากเถ้าแกลบอีกด้วย จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเฟสแก้วและซิติกาเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ซิติกาที่เกินและเฟสแก้วจึงทำปฏิกิริยากับอะลูมินาในคอร์นคัม ได้เฟสของมัลไลต์⁽⁵⁴⁾ และกับแคลเซียมในเถ้าลอยโคเฟสของอะนอร์ไทต์จึงทำให้ปริมาณอะลูมินาอิสระในส่วนผสมลดลงเป็นผลให้เฟสของคอร์นคัมลตลงไปด้วย แต่เฟสมัลไลต์ที่มีก็ยังไม่เพียงพอที่จะช่วยทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

4.7.3.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผา 1300 องศาเซลเซียส

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภากดังรูปที่ 4.24 พบว่า เมื่อปริมาณแกลบคิบบดเพิ่มขึ้นจะทำให้รูพรุนในชิ้นงานเพิ่มขึ้นและขนาดใหญ่ขึ้น โดยเฉพาะการเติมแกลบคิบบด 15 เปอร์เซ็นต์จะพบรูพรุนที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงล้อมรอบด้วยอนุภาคที่หลอมเหลว และเมื่อเติมแกลบคิบ 22.5 เปอร์เซ็นต์จะพบโครงลึกลงและใหญ่มาก นอกจากนี้ยังพบเฟสที่หลอมเหลวล้อมรอบโครงสร้างผลึกในลักษณะเชื่อมยึดและปกคลุมแต่ละผลึกเข้าด้วยกัน ซึ่งยืนยันการเกิดเฟสที่หลอมเหลวของสารประกอบแอลคาไลน์ควบคู่กับการเกิดเฟสแก้วซิติกาอสังฐานเพิ่มขึ้นจากทั้งเถ้าแกลบและแกลบคิบบดทำให้เฟสของคอร์นคัมลตลง โครงสร้างที่มีความพรุนตัวนี้เองเป็นตัวการที่ทำให้ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ลดลง แม้ว่าในโครงสร้างจุลภาคพบผลึกทรงเหลี่ยมปริซึมซึ่งเป็นอนุภาคของมัลไลต์ แต่ก็พบเฟสแก้วและเฟสที่หลอมเหลวปกคลุมและยึดเชื่อมแต่ละผลึก



รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาที่เติมแคลบดิบบด

ผลการปรับปรุงความหนาแน่นของชิ้นงานดังตารางที่ 4.19 พบว่า การเติมแคลบดิบบดลงในส่วนผสม โดยแทนที่เถ้าแคลบจะส่งเสริมทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นลดลงได้ดังแนวโน้มที่แสดงในรูปที่ 4.18 โดยหากเติมแคลบดิบบดลงไปในปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์เหลือเป็นเถ้าแคลบหลังเผา 3 เปอร์เซ็นต์จะให้ค่าความหนาแน่นอยู่ในค่าเฉลี่ยระหว่างอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าทั้ง 2 ชนิดพอดีคือ 0.82-0.83 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ยังทำให้การหดตัวของชิ้นงานมีค่าต่ำดังกราฟที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์ความพยุบตัวปรากฏและการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าพอดีตามรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ พบเฟสหลังเผาได้แก่ มัลไลต์ คอร์นดัม และอะนอร์ไทต์ดังรูปที่ 4.23 ซึ่งจากโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4.24 พบเฟสแก้วและเฟสที่หลอมเหลวล้อมรอบรูพรุน ปกคลุมและเชื่อมผลึกของมัลไลต์เอาไว้ จึงเลือกส่วนผสม P2-RH15 เพื่อทำการพัฒนาต่อแม้ว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ได้ตามแนวโน้มรูปที่ 4.22 จะต่ำกว่าอิฐฉนวนทนไฟทางการค้ามากที่สุดตาม

4.8 การปรับปรุงความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

4.8.1 การออกแบบส่วนผสมโดยการเติมตัวเชื่อมประสาน

ชิ้นงานหลังการอบแห้งมีความแข็งแรงต่ำทำให้การหีบจับชิ้นงานต้องใช้ความระมัดระวังสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อลักษณะของชิ้นงานหลังเผาด้วย จึงควรปรับปรุงโดยการเพิ่มตัวเชื่อมประสานเพื่อให้ชิ้นงานคงรูปได้ดีก่อนเผา

ตารางที่ 4.20 ส่วนผสมเมื่อทำการเติมตัวเชื่อมประสาน

วัตถุดิบ (wt%)	กากตะกอนอะลูมิเนียม	เถ้าแก้ว	เถ้าลอย	ดินดำ	แคลเซียมไดโบรไมด์	CMC	ปูนซีเมนต์ขาว	รวม
P3	60	17	10	10	15	-	-	112.0
P3-CMC1	60	17	10	10	15	0.3	-	112.3
P3-CMC2	60	17	10	10	15	0.6	-	112.6
P3-CMC3	60	17	10	10	15	0.9	-	112.9
P3-Cement5	60	17	10	10	15	-	5.6	117.6
P3-Cement10	60	17	10	10	15	-	11.2	123.2

หมายเหตุ : ใช้น้ำปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ทุกส่วนผสม

ตัวเชื่อมประสานชนิด CMC เติมโดยทำการละลายน้ำ ในอัตราส่วนดังนี้ CMC 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คิดเป็น CMC 1 กรัม ละลายในน้ำ 99 กรัม เมื่อใช้น้ำ 30 เปอร์เซ็นต์จึงมี CMC 0.3 กรัม สำหรับ CMC 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คิดเป็น CMC 2 กรัม ละลายในน้ำ 98 กรัม เมื่อใช้น้ำ 30 เปอร์เซ็นต์จึงมี CMC 0.6 กรัม สำหรับ CMC 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คิดเป็น CMC 3 กรัม ละลายในน้ำ 97 กรัม เมื่อใช้น้ำ 30 เปอร์เซ็นต์จึงมี CMC 0.9 กรัม

ตัวเชื่อมประสานชนิดปูนซีเมนต์ขาวเติมลงในส่วนผสมคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เกินจากน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมดดังนี้ ปูนซีเมนต์ขาว 5 เปอร์เซ็นต์คือ 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักส่วนผสม 112 กรัมคิดเป็นปูนซีเมนต์ขาว 5.6 กรัม และปูนซีเมนต์ขาว 10 เปอร์เซ็นต์คือ 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักส่วนผสม 112 กรัมคิดเป็นปูนซีเมนต์ขาว 11.2 กรัม

ได้ผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานที่เติมตัวเชื่อมประสานหลังเผาเปรียบเทียบกับไม่เติมดังนี้

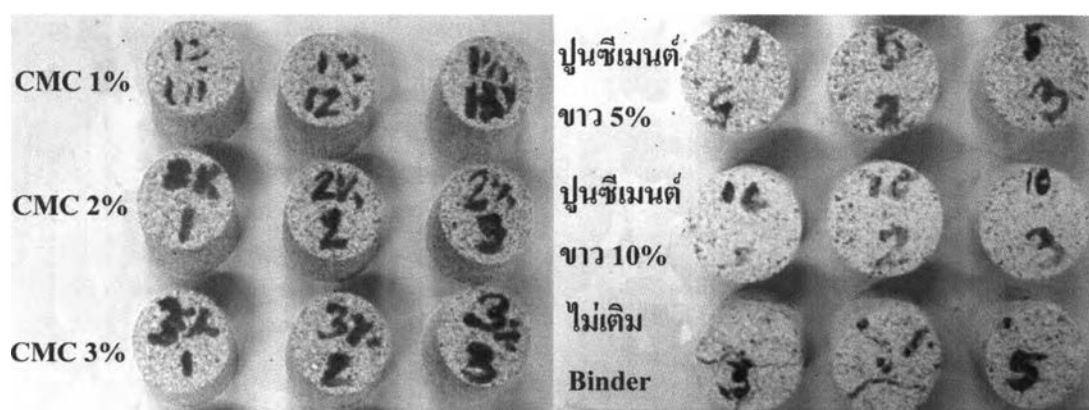
4.8.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของชิ้นงานหลังเผา 1300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.21 ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานเฉลี่ยหลังเผา

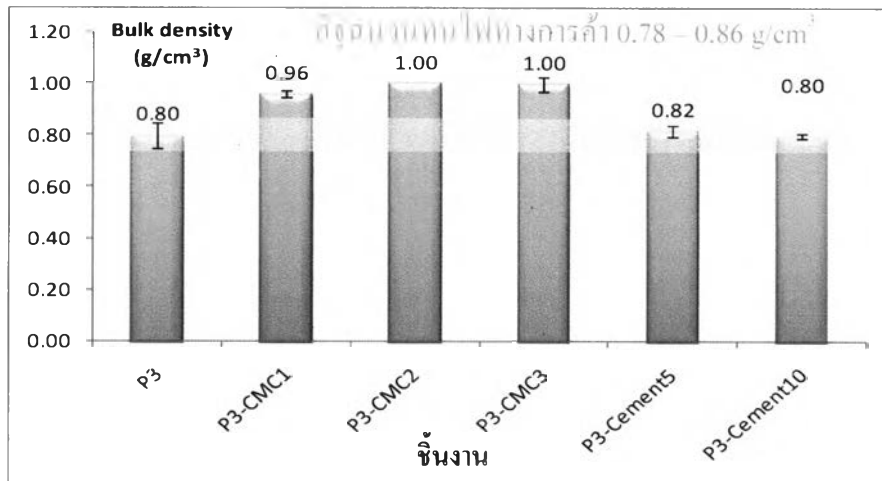
ชิ้นงาน	ปริมาณน้ำ (wt%)	แรงอัด (MPa)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	การหดตัวหลังเผา (%)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความต้านทานแรงกดแตก (MPa)
P3	30	2.5	0.80±0.05	5.90±2.39	68.73±1.53	78.81±4.78	0.32±0.07
P3-CMC1	30	2.5	0.96±0.01	11.54±0.41	65.48±0.62	66.05±1.72	1.10±0.07
P3-CMC2	30	2.5	1.00±0.00	13.10±0.08	63.19±0.47	60.54±0.75	1.72±0.08
P3-CMC3	30	2.5	1.00±0.03	12.84±0.79	63.59±0.87	61.83±2.32	1.71±0.42
P3-Cement5	30	2.5	0.82±0.02	5.39±0.55	69.60±1.02	82.93±3.18	0.29±0.06
P3-Cement10	30	2.5	0.80±0.01	3.61±0.10	70.68±0.77	86.52±2.36	0.34±0.04

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติหลังเผาดังตารางที่ 4.21 พบว่า ส่วนผสมที่เติม CMC เป็นตัวเชื่อมประสานจะทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นและการหดตัวที่สูงกว่า ส่วนผสมที่ไม่เติมตัวเชื่อมประสานและที่เติมปูนซีเมนต์ขาว โดยเห็นได้ชัดจากลักษณะภายนอกของชิ้นงานดังรูปที่ 4.25 และความหนาแน่นที่ได้ก็สูงกว่าอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า ส่งผลทำให้ค่าความพรุนตัวปรากฏและการดูดซึมน้ำต่ำกว่าส่วนผสมที่ไม่ทำการเติมตัวเชื่อมประสานด้วย ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนจากการเปรียบเทียบผลการเติมตัวเชื่อมประสานและไม่เติมตัวเชื่อมประสาน

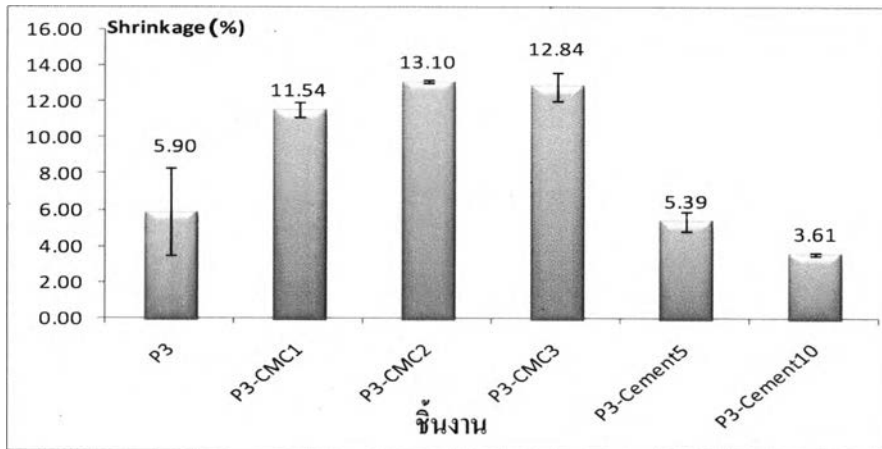
4.8.1.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติต่างๆ



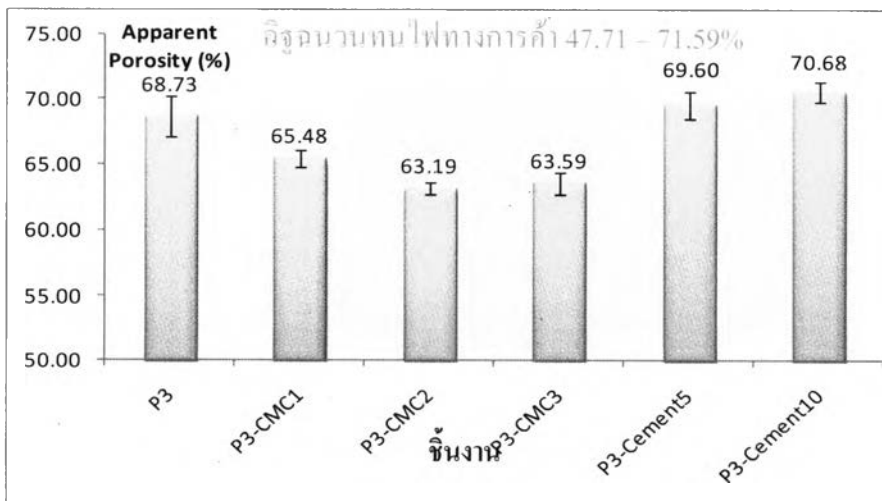
รูปที่ 4.25 ลักษณะของชิ้นงานหลังเผา 1300 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบชิ้นงานที่ไม่เติมและชิ้นงานที่เติมตัวเชื่อมประสานแต่ละชนิด



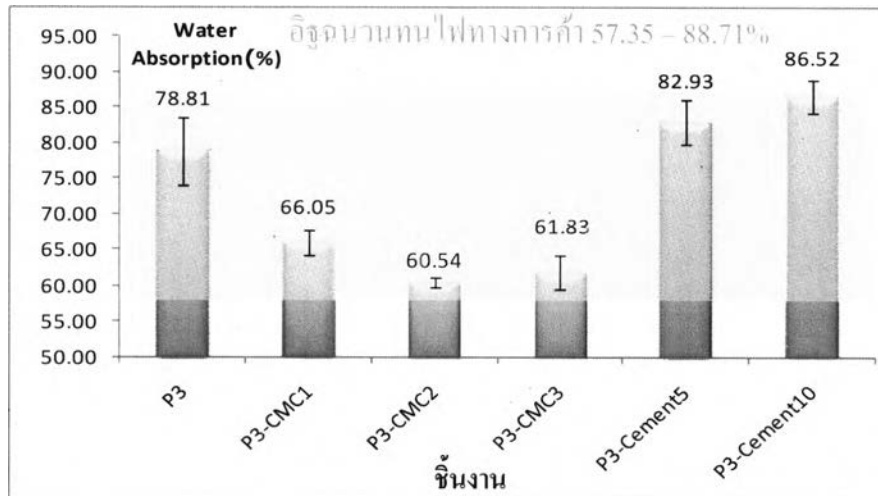
รูปที่ 4.26 ความหนาแน่นรวมเปรียบเทียบการเติมและไม่เติมตัวเชื่อมประสาน



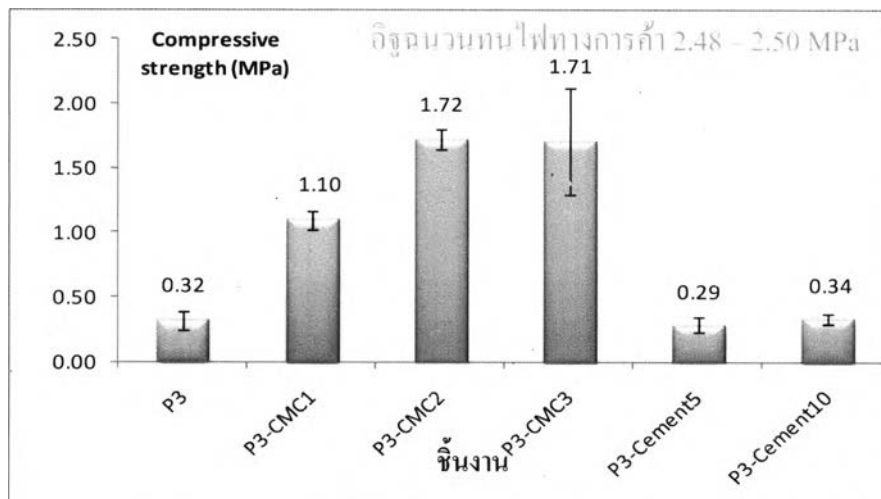
รูปที่ 4.27 การหดตัวรวมเปรียบเทียบการเติมและไม่เติมตัวเชื่อมประสาน



รูปที่ 4.28 ความพรุนตัวปรากฏเปรียบเทียบการเติมและไม่เติมตัวเชื่อมประสาน

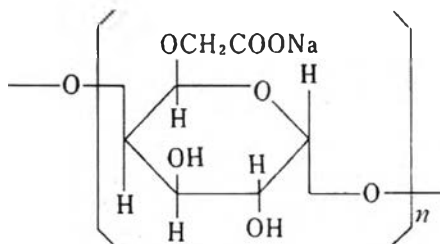


รูปที่ 4.29 การดูดซึมน้ำเปรียบเทียบกับคาร์เดิมและไม่เติมตัวเชื่อมประสาน



รูปที่ 4.30 ความต้านทานแรงกดแตกเปรียบเทียบคาร์เดิมและไม่เติมตัวเชื่อมประสาน

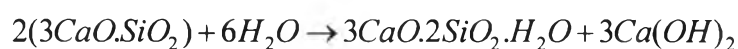
เนื่องจาก CMC หรือ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เป็นกาวอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกเพื่อช่วยในการยึดเกาะอนุภาคของวัตถุดิบเข้าด้วยกันขณะขึ้นรูป โดยเฉพาะวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว ซึ่งมีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ที่มีเกลือโซเดียมเป็นองค์ประกอบดังรูปที่ 4.31⁽¹⁶⁾



รูปที่ 4.31 โครงสร้างของกาวอินทรีย์โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC)

จากลักษณะดังกล่าวนี้เองจึงทำให้อนุภาควัตถุคิบทั้งหมดที่มีตัวเชื่อมประสานเป็น CMC เกิดการเกาะตัวกันแน่นขณะทำการขึ้นรูป ทำให้ชิ้นงานสามารถหยิบจับได้ง่าย หลังทำการอบแห้งไม่หลุดร่อนเป็นผง โดยชิ้นงานที่เติม CMC ในปริมาณน้อยจะเป็นตัวช่วยกระจายตัว (Plasticizer) พบว่าส่วนผสมมีการกระจายตัวได้ดีเนื่องจากพอลิเมอร์ใน CMC คลุมอนุภาควัตถุคิบไว้และช่วยในการกระจายตัวของวัตถุคิบให้สามารถเคลื่อนไปเกาะรวมตัวกันได้ง่าย ชิ้นงานจึงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่สำหรับชิ้นงานที่เติม CMC ในปริมาณมากพบว่าพอลิเมอร์จะทำหน้าที่เป็นกาวเชื่อมประสานอนุภาคไว้ด้วยกันแน่นทำให้ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำลดลง ดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ ส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นดังกราฟรูปที่ 4.26 จึงมีผลต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน จากการทดสอบความต้านทานแรงกดแตกดังรูปที่ 4.30 ให้ค่าที่สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมตัวเชื่อมประสานมาก ชิ้นงานจึงเกิดการหดตัวมากกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมตัวเชื่อมประสานที่ยังคงพบรอยแตกจากการสลายตัวของแก๊สที่เกิดจากสารอินทรีย์และสารประกอบอื่นๆ ในส่วนผสมดังภาพลักษณะภายนอกของชิ้นงานในรูปที่ 4.25

การเติมปูนซีเมนต์ขาวเป็นตัวเชื่อมประสานมีส่วนช่วยทำให้ส่วนผสมเกาะตัวกันแน่นหลังทำการขึ้นรูป และหลังทำการอบแห้งชิ้นงานพบว่าชิ้นงานที่ได้เกิดการเซ็ดตัวแข็งทำให้หยิบจับชิ้นงานได้ง่ายไม่หลุดร่อน ที่เป็นเช่นนี้เพราะปูนซีเมนต์ขาวมีส่วนประกอบหลักคือแคลเซียม (CaO) และมีเฟสหลักเป็นสารกลุ่มไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$: C_3S) จัดเป็นปูนซีเมนต์ที่มีส่วนประกอบของเหล็กออกไซด์ต่ำจึงทำให้มีสีขาวและไม่พบเฟสของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$: C_4AF) ซึ่งเฟสไตรแคลเซียมซิลิเกตเมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและคายความร้อนออกมา ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrated : CSH) ทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานให้อนุภาคของส่วนผสมเกิดการเกาะกันเซ็ดตัวแข็งอย่างรวดเร็ว ดังสมการ⁽⁴⁸⁾



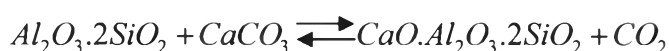
นอกจากนี้ การที่ชิ้นงานมีความแข็งแรงหลังการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นจากไม่เดิม ก็เป็นผลมาจากการที่มีการจัดเรียงอนุภาคที่ดีจากการที่ปูนซีเมนต์ขาวมีการกระจายขนาดอนุภาคที่ กว้างจึงไปแทรกอยู่ในรูพรุนและช่องว่างระหว่างอนุภาคขณะทำการขึ้นรูป⁽³⁶⁾ แต่ชิ้นงานที่ได้หลัง เผาให้ผลแตกต่างจากการเดิม CMC ดังแสดงในตารางที่ 4.21 คือชิ้นงานที่ได้มีค่าความหนาแน่นต่ำ ใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ไม่เติมตัวเชื่อมประสานและอยู่ในช่วงของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า ดังแสดงในรูปที่ 4.26 การหดตัวค่อนข้างต่ำจากรูปที่ 4.27 ซึ่งความพรุนตัวปรากฏและการดูดซึมน้ำสูง กว่าส่วนผสมที่ไม่เติมตัวเชื่อมประสานเล็กน้อยแต่ยังคงอยู่ในช่วงของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า ดังแสดงในรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ และความต้านทานแรงกดแตกก็ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ไม่ ทำการเติมตัวเชื่อมประสานด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.30 เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจาก ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนเหลือเพียงสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์และรูพรุนใน ชิ้นงาน ในส่วนความแข็งแรงของชิ้นงานนั้นเกิดจากมีเฟสที่แข็งแรงในชิ้นงานลดลง ยืนยันได้จาก ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานหลังเผาตามรูปที่ 4.32 พบเฟสของอะนอร์ไทต์เพิ่มขึ้น เมื่อเติมปูนซีเมนต์ขาว เฟสคอร์รันดัมลดลงและไม่พบเฟสของมัลไลต์ซึ่งเป็นเฟสที่แข็งแรงใน ส่วนผสมจึงทำให้ความต้านทานแรงกดแตกที่ได้ต่ำด้วย

4.8.1.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงาน

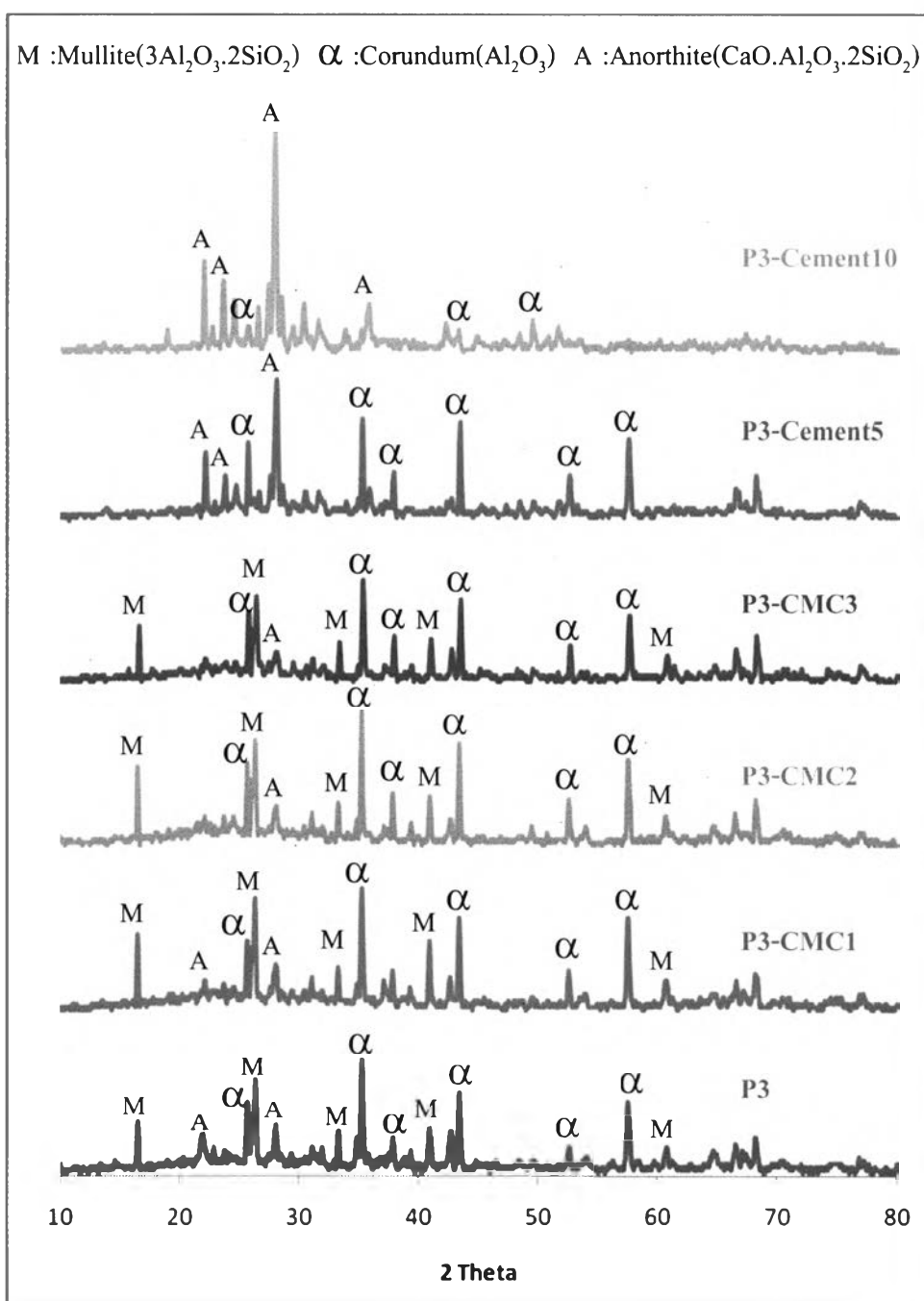
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานตามรูปที่ 4.32 พบว่า ชิ้นงานที่ไม่ทำการเติมตัวเชื่อมประสานจะพบเฟสของคอร์รันดัมจากอะลูมินาที่เกิดจากกากตะกอน ชุบผิวอะลูมิเนียม มัลไลต์จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะลูมินาอิสระกับเฟสของแก้วและเฟสที่ หลอมเหลว หรือซิลิกาอิสระจากเถ้าแกลบหรือแกลบดิบ และอะนอร์ไทต์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณ แคลเซียมสูงเกิดปฏิกิริยากับอะลูมินาและซิลิกา ซึ่งแม้ว่าชิ้นงานจะพบเฟสมัลไลต์แต่โครงสร้างที่ พรุนตัวสูงของชิ้นงานมีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานมากกว่า

การเติมตัวเชื่อมประสานส่งผลต่อความเปลี่ยนแปลงของเฟสหลังเผา โดยการเติม CMC เป็นตัวเชื่อมจะทำให้เฟสของแก้วเพิ่มขึ้น สืบเนื่องจากการลดลงของฟิคเฟสอะ นอร์ไทต์ คอร์รันดัมและมัลไลต์เมื่อปริมาณ CMC เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.32 เนื่องจากเกิดเฟสของแก้ว และเฟสหลอมเหลวปกคลุมชิ้นงานซึ่งยืนยันได้จากโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4.33 ซึ่งตรงข้ามกับ การเติมปูนซีเมนต์ขาวที่พบเฟสของอะนอร์ไทต์เพิ่มขึ้นจากองค์ประกอบทางเฟสในรูปที่ 4.32 แต่ เฟสของคอร์รันดัมลดลงและไม่พบเฟสของมัลไลต์อีก ทั้งนี้เนื่องจาก 2 สาเหตุ ดังนี้⁽³⁶⁾

1) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเมตาเคโอลินในดินหรือเถ้าลอย กับแคลเซียม คาร์บอเนตซึ่งเป็นเฟสหลักของปูนซีเมนต์ขาว จะไปขัดขวางและลดการเกิดเฟสมัลไลต์ดังสมการ



2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างมัลไลต์ที่พบในส่วนผสมหลักก่อนเติมตัวเชื่อมประสาน แคลเซียมจากปูนซีเมนต์ขาวและเถ้าลอย กับซิลิกาที่พบในเฟสของแก้วและเฟสหลอมเหลวจากเถ้าแกลบและแกลบดิบดังสมการ



รูปที่ 4.32 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานตามชนิดของตัวเชื่อมประสาน

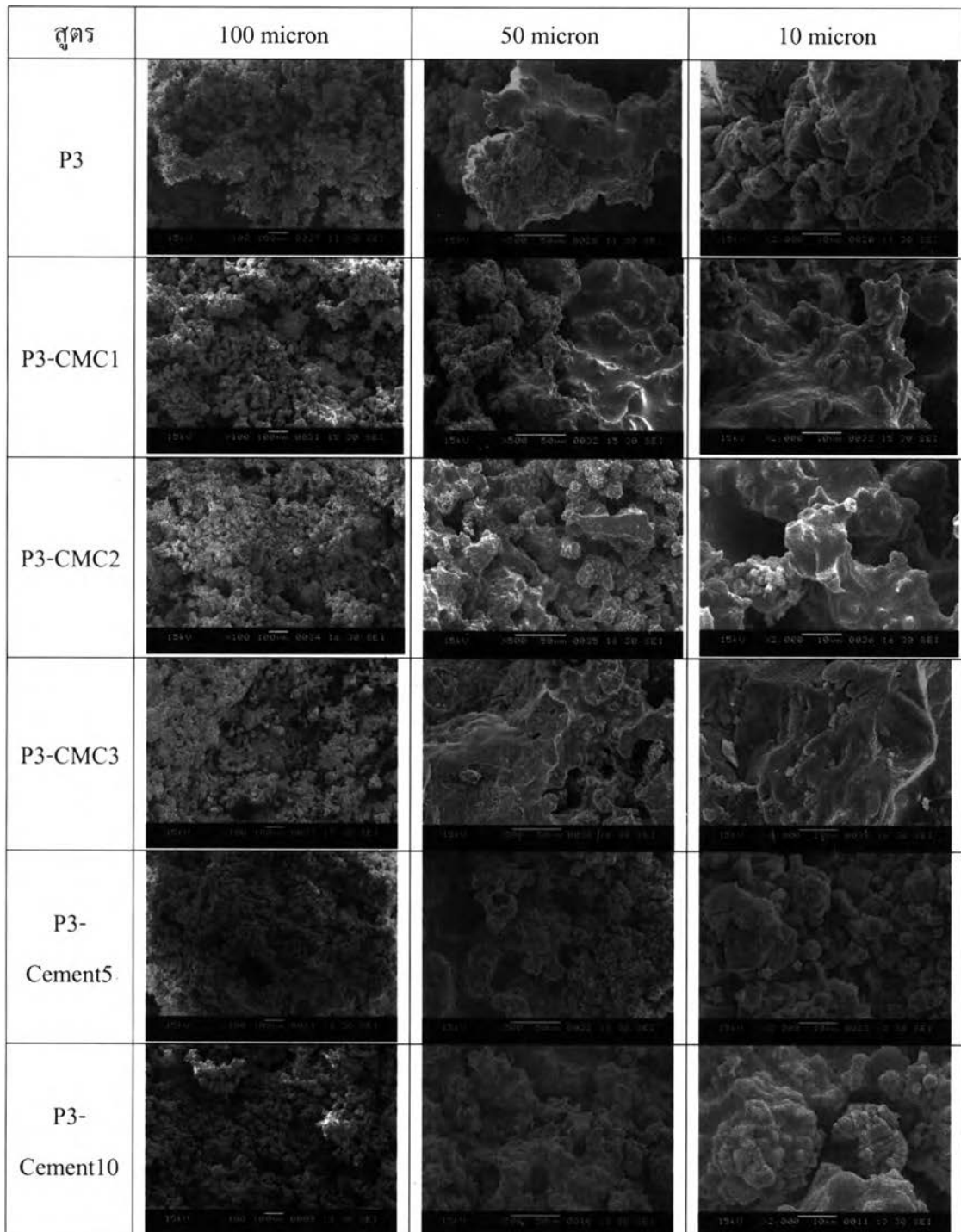
จึงเป็นสาเหตุทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงต่ำจากการที่มีรูพรุนสูง และเฟสของมัลไลต์ที่แข็งแรงหายไป แต่กลับมีเฟสของแก้วมาแทนที่ ซึ่งยืนยันได้จากผลวิเคราะห์ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมและเติมตัวเชื่อมประสานดังนี้

4.8.1.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบการเติมและไม่เติมตัวเชื่อมประสาน

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ไม่เติมตัวเชื่อมประสาน P3 ดังรูปที่ 4.33 จะพบโครงสร้างผลึกเกาะกันเป็นกลุ่มๆ แต่ยังคงเห็นผลึกอย่างชัดเจนอยู่ พบเฟสที่หล้อมแก้วรอบผลึกชิ้นงานและพบรูพรุนกระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน แต่สำหรับชิ้นงานที่เติมตัวเชื่อมประสานชนิด CMC ดังรูปที่ 4.33 พบเฟสที่หล้อมเหลวเป็นจำนวนมากและเฟสเหลวนั้นปกคลุมผลึกอนุภาค โดยเมื่อเติมตัวเชื่อมประสานชนิด CMC มากขึ้นจะพบเฟสที่หล้อมเพิ่มมากขึ้น อนุภาคที่เป็นผลึกจะเกิดการเชื่อมประสานกันมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเติมตัวเชื่อมประสานชนิด CMC ถึง 3 เปอร์เซ็นต์จะทำให้ชิ้นงานมีลักษณะหล้อมตัวมากที่สุด แม้ว่าจะพบรูพรุนในชิ้นงานแต่ก็พบเฟสที่หล้อมเหลวรอบๆ รูพรุนด้วย ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นจากการที่มีเฟสที่หล้อมเหลวเกิดขึ้น ชิ้นงานมีการหดตัวสูง ส่งผลทำให้ชิ้นงานมีความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำต่ำลง สนับสนุนทำให้ความแข็งแรงจากการแน่นตัวของชิ้นงานเพิ่มขึ้นด้วย

แต่ชิ้นงานที่เติมตัวเชื่อมประสานชนิดปูนซีเมนต์ขาว โครงสร้างจุลภาคจะมีลักษณะคล้ายๆ กับชิ้นงานที่ไม่เติมตัวเชื่อมประสานดังจะเห็นจากรูปที่ 4.33 คือพบเฟสที่เป็นผลึกเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน พร้อมกับเฟสที่หล้อมเหลวล้อมรอบชิ้นงานอยู่ ชิ้นงานมีการเชื่อมกันบางส่วนแต่ยังคงพบรูพรุนที่กระจายตัวเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ไม่เติมตัวเชื่อมประสาน แต่การที่ความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานลดลงเป็นเพราะการเกิดรูพรุนจำนวนมากและไม่พบเฟสมัลไลต์ที่เสริมความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน

อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่เติมตัวเชื่อมประสานชนิดปูนซีเมนต์ขาวก็มีส่วนช่วยทำให้ชิ้นงานหลังขึ้นรูปคงรูปได้ดีไม่หลุ่คร่อนได้ง่าย ความหนาแน่นและการหดตัวก็อยู่ในระดับต่ำ จึงเลือกส่วนผสม P3-Cement10 ทำการพัฒนาต่อโดยทดลองเพิ่มอุณหภูมิการเผาเพื่อหาอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมที่ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นแต่ไม่ทำให้ลักษณะและสมบัติอื่นๆ เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.33 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบการเติมและไม่เติมตัวเชื่อมประสาน

4.8.2 การเพิ่มอุณหภูมิการเผาชิ้นงาน

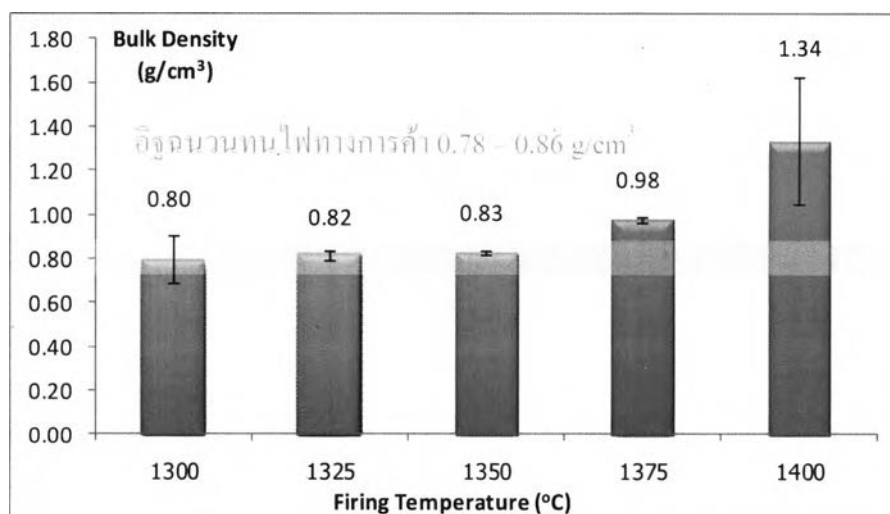
4.8.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานเคลือบหลังเผา

นำส่วนผสม P3 เติมนีเมนต์ขาวลงไป 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักส่วนผสม ทำการผสมน้ำจำนวน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปและเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผาระหว่าง 1300-1400 องศาเซลเซียส

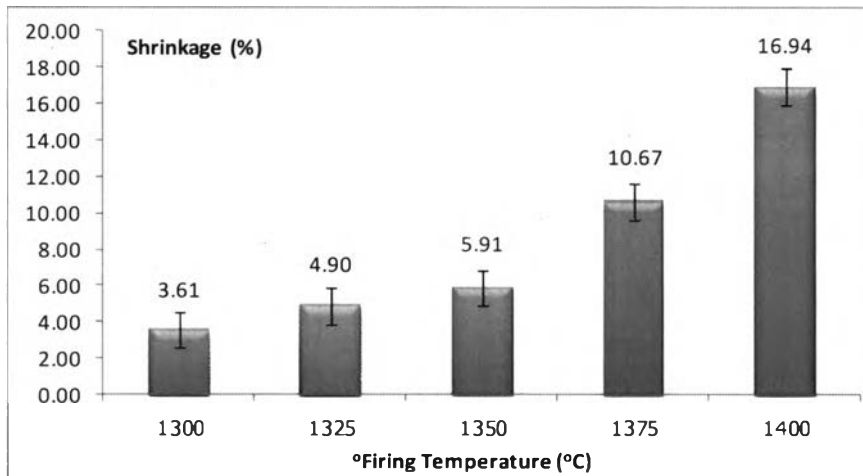
ตารางที่ 4.22 ลักษณะและสมบัติของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

ชิ้นงาน	ปริมาณน้ำ (wt%)	อุณหภูมิ การเผา (°C)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	การหดตัว หลังเผา (%)	ความพรุน ตัวปรากฏ (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	ความ ต้านทาน แรงกดแตก (MPa)
P3-Cement 10%	30	1300	0.80±0.11	3.61±0.10	70.68±0.77	86.52±2.36	0.34±0.04
		1325	0.82±0.02	4.90±0.48	70.44±0.45	84.37±2.85	0.50±0.04
		1350	0.83±0.01	5.91±0.27	69.69±0.30	80.40±1.17	0.54±0.05
		1375	0.98±0.01	10.67±0.73	60.24±1.29	57.19±2.39	1.57±0.28
		1400	1.34±0.29	16.94±2.41	51.33±3.39	39.54±5.45	4.49±2.04

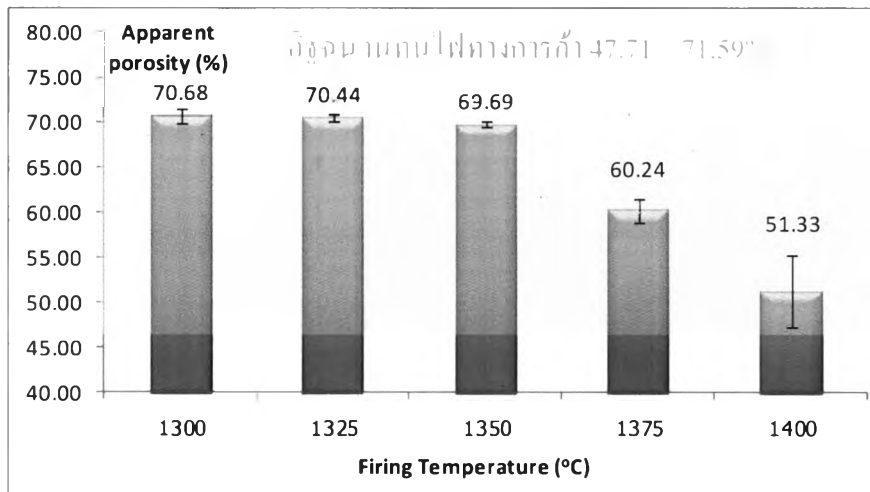
4.8.2.2 แสดงการเปรียบเทียบแนวโน้มผลการวิเคราะห์ด้วยกราฟแท่ง



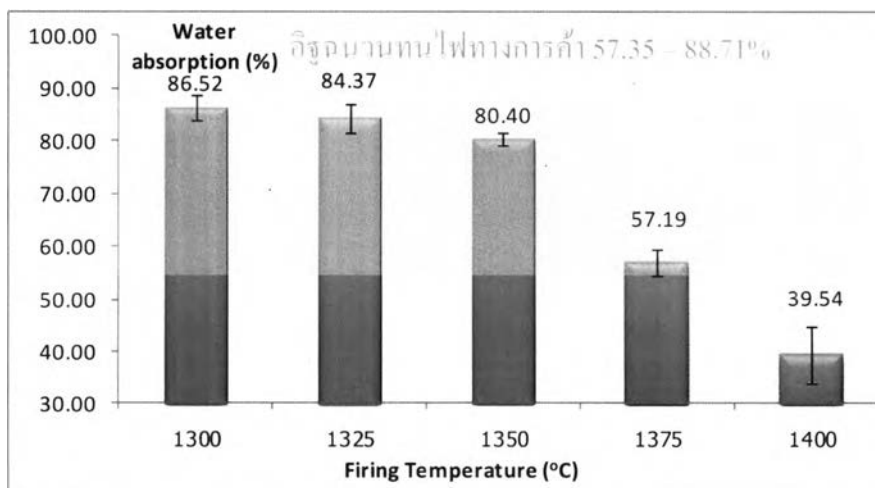
รูปที่ 4.34 แนวโน้มความหนาแน่นรวมเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผา



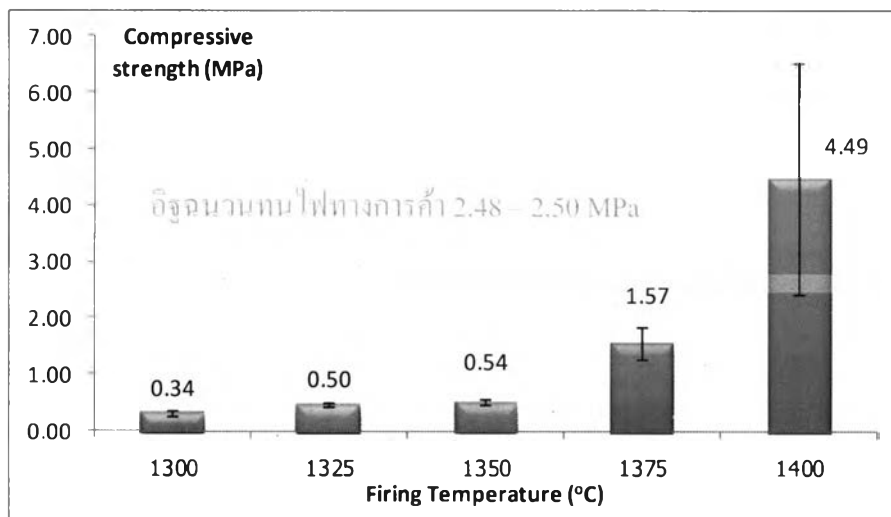
รูปที่ 4.35 แนวโน้มการหดตัวเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผา



รูปที่ 4.36 แนวโน้มความพรุนตัวปรากฏเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผา



รูปที่ 4.37 แนวโน้มการดูดซึมน้ำเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผา

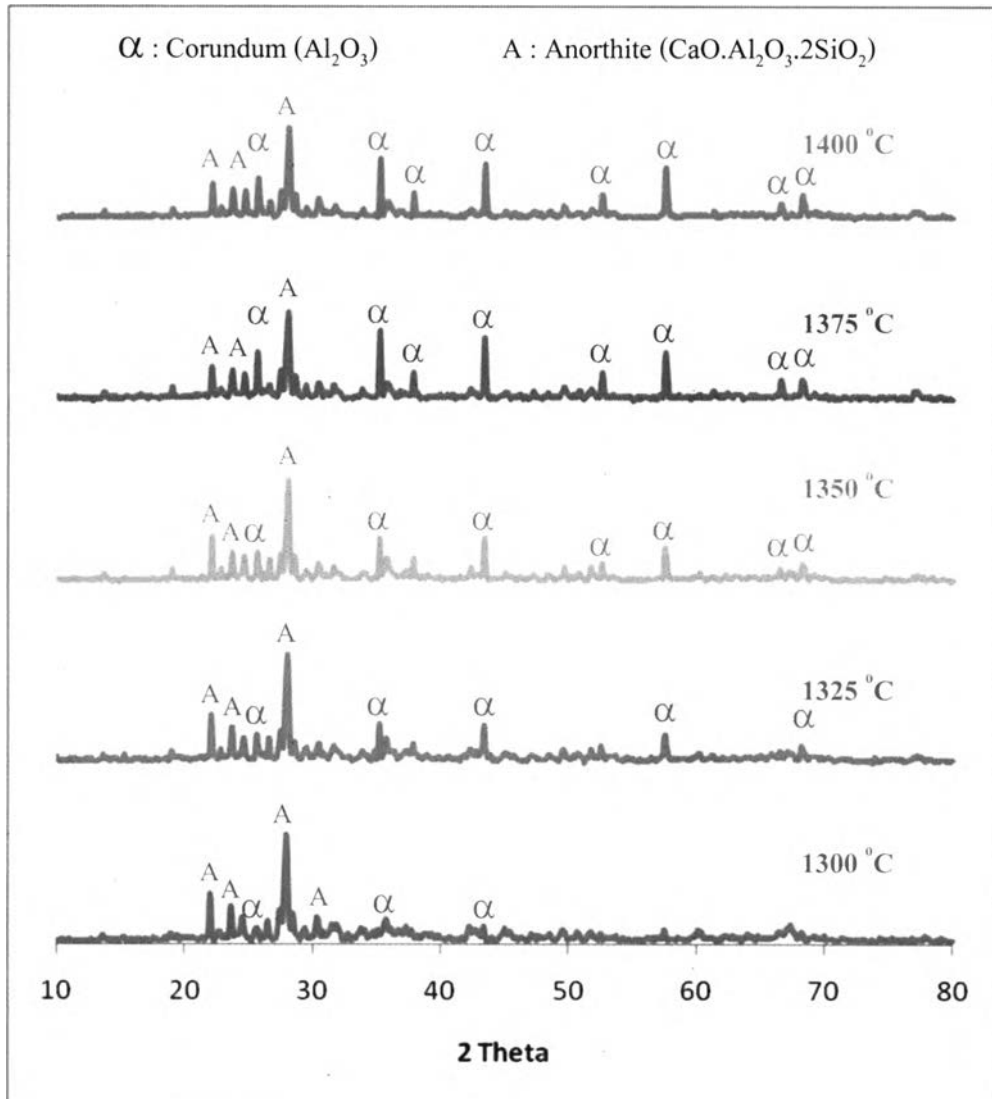


รูปที่ 4.38 แนวโน้มความต้านทานแรงกดแตกเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผา

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.22 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาจาก 1300-1350 องศาเซลเซียส ซึ่งงานที่ได้มีค่าความหนาแน่น การหดตัว ความพรุนตัวปรากฏ การดูดซึมน้ำและความต้านทานแรงกดแตกใกล้เคียงกัน โดยค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าซึ่งมีค่าต่ำดังรูปที่ 4.34 จึงส่งผลทำให้ความพรุนตัวปรากฏและการดูดซึมน้ำสูงแต่ยังคงอยู่ในช่วงของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าดังรูปที่ 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ และจากการเติมปูนซีเมนต์ขาวเป็นตัวเชื่อมประสานจะทำให้ชิ้นงานที่ได้ค่อนข้างอยู่ตัวจากการเซ็ดตัวของปูนซีเมนต์ขาว การหดตัวของชิ้นงานจึงไม่สูงนักดังรูปที่ 4.35 แต่ความต้านทานแรงกดแตกมีค่าต่ำกว่าอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าอยู่มากตามแนวโน้มดังรูปที่ 4.38

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเป็น 1375-1400 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีแนวโน้มที่ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นและสูงกว่าความหนาแน่นของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าตามรูปที่ 4.34 และจากแนวโน้มนการหดตัวดังรูปที่ 4.35 พบการหดตัวสูงขึ้นอย่างชัดเจน จึงทำให้ความพรุนตัวปรากฏและการดูดซึมน้ำลดลงมากตามรูปที่ 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ โดยเฉพาะเมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียสชิ้นงานที่ได้จะมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า แต่ค่าความต้านทานแรงกดแตกของชิ้นงานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและสูงกว่าอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าดังรูปที่ 4.38 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากช่วงอุณหภูมิระหว่าง 1350-1375 องศาเซลเซียสชิ้นงานจะเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว แสดงว่าช่วงระหว่าง 1350-1375 องศาเซลเซียสชิ้นงานเริ่มเกิดการแน่นตัวและเกิดการเผาผนึกแบบเฟสของเหลวจากการหลอมของตัวช่วยหลอมและเฟสแก้ว ทำให้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาชิ้นงานจะเกิดการแน่นตัวขึ้นชิ้นงานเกิดการหลอมของอนุภาคเข้าด้วยกันซึ่งช่วยให้เกิดการเชื่อมประสานอนุภาคทุกส่วนและปิดรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของสารประกอบในส่วนผสมนี้

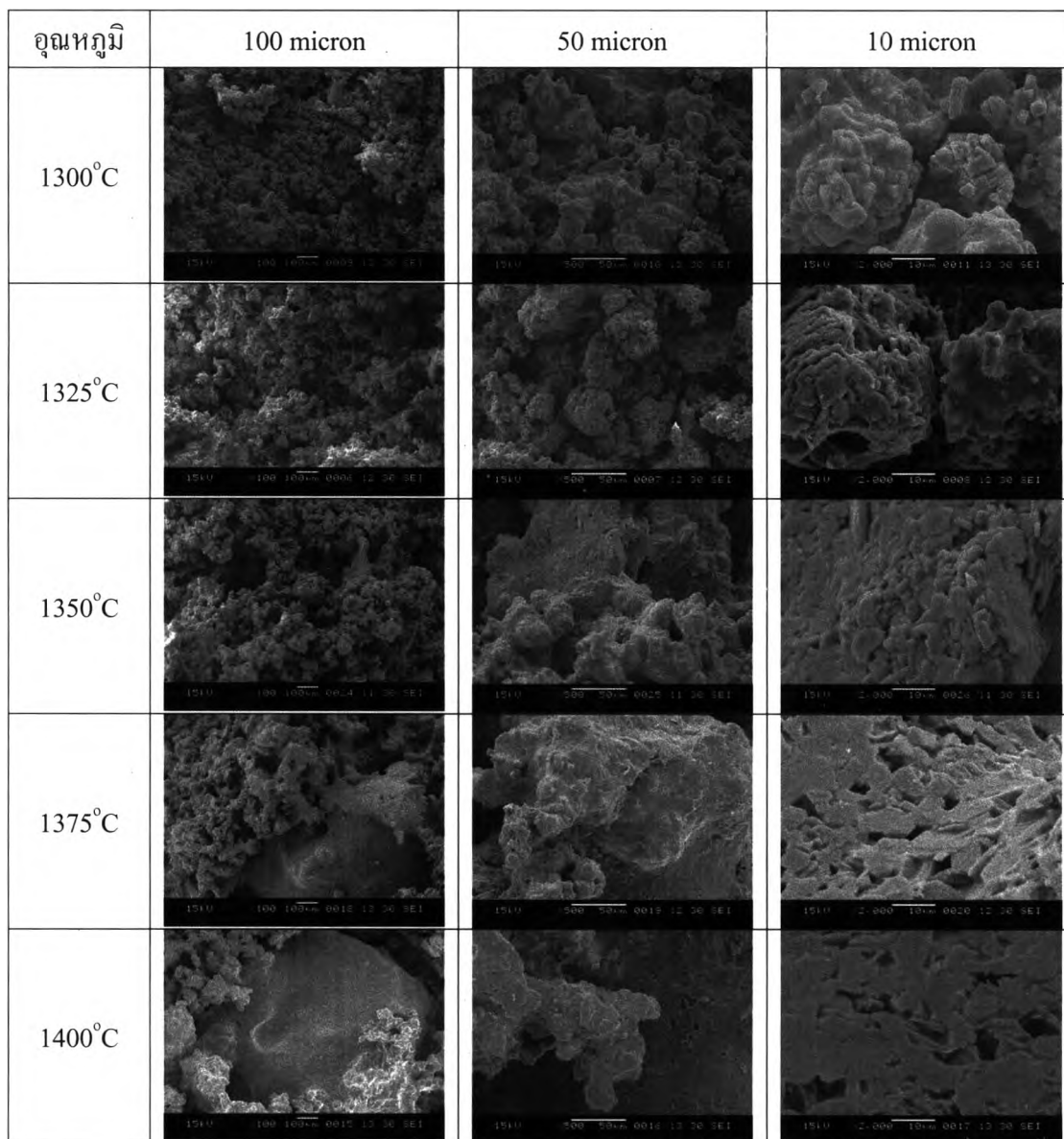
4.8.2.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.39 แนวโน้มความต้านทานแรงกดแตกเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผา

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสดังรูปที่ 4.39 พบว่าไม่พบเฟสของมัลไลต์ในส่วนประกอบและเฟสของอะนอร์ไทต์มีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่เฟสของคอร์ันดัมมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้น แสดงว่ามีเฟสแก้วมากขึ้นจากการหลอมของส่วนประกอบในชิ้นงานจึงทำให้อะนอร์ไทต์ซึ่งมีแคลเซียมที่มีสารแอลคาไลน์เป็นองค์ประกอบจะกลายเป็นเฟสที่หลอมเหลว และส่งเสริมทำให้เฟสของอะลูมินาซึ่งเป็นเฟสที่ทนไฟเด่นชัดขึ้น จากการพบเฟสของคอร์ันดัมที่เข้มในช่วง 1350-1400 องศาเซลเซียสจึงเป็นผลสนับสนุนทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นสูงอีกทางหนึ่งดังแนวโน้มในรูปที่ 4.38 แต่ช่วง 1325-1350 องศาเซลเซียส เฟสของคอร์ันดัมยังไม่เข้มนักจึงทำให้ความแข็งแรงต่ำ

4.8.2.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 1300-1400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.40 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบการเติมและไม่เติมตัวเชื่อมประสาน

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคดังรูปที่ 4.40 พบว่าในการเผาชิ้นงานจะพบทั้งเฟสที่เป็นผลึก เฟสหลอมเหลว และรูพรุนกระจายอยู่ภายในชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานที่ทำการเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 1300-1350 องศาเซลเซียส จะพบเฟสที่เป็นผลึกเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและมีเฟสหลอมเหลวล้อมรอบเกาะยึดอนุภาคผนึกไว้เป็นจำนวนมาก แต่ยังคงเห็นผลึกลอยอยู่ในเฟสหลอมเหลว แต่ชิ้นงานที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 1375-1400 องศาเซลเซียส พบเฟสหลอมเหลว

เป็นจำนวนมากปกคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่และหลอมรวมผลึกเอาไว้ด้วยกัน สันนิษฐานผลความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.34 และความพรุนตัวปรากฏและการดูดซึมน้ำที่ลดลงเป็นอย่างมากตามรูปที่ 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากมีเฟสที่หลอมเหลวเพิ่มขึ้นจึงสันนิษฐานทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.38 เนื่องจากเกาะตัวกันแน่นของชิ้นงาน จะทำให้ความหนาแน่นสูงและการหดตัวสูงดังรูปที่ 4.35 ประกอบกับการมีเฟสของคอร์รันคัมที่ส่งเสริมความแข็งแรงในเนื้อผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วยจากองค์ประกอบทางเฟสในรูปที่ 4.39

4.9 การเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของส่วนผสมที่เลือกกับผลิตภัณฑ์อิฐฉนวนทนไฟทางการค้า

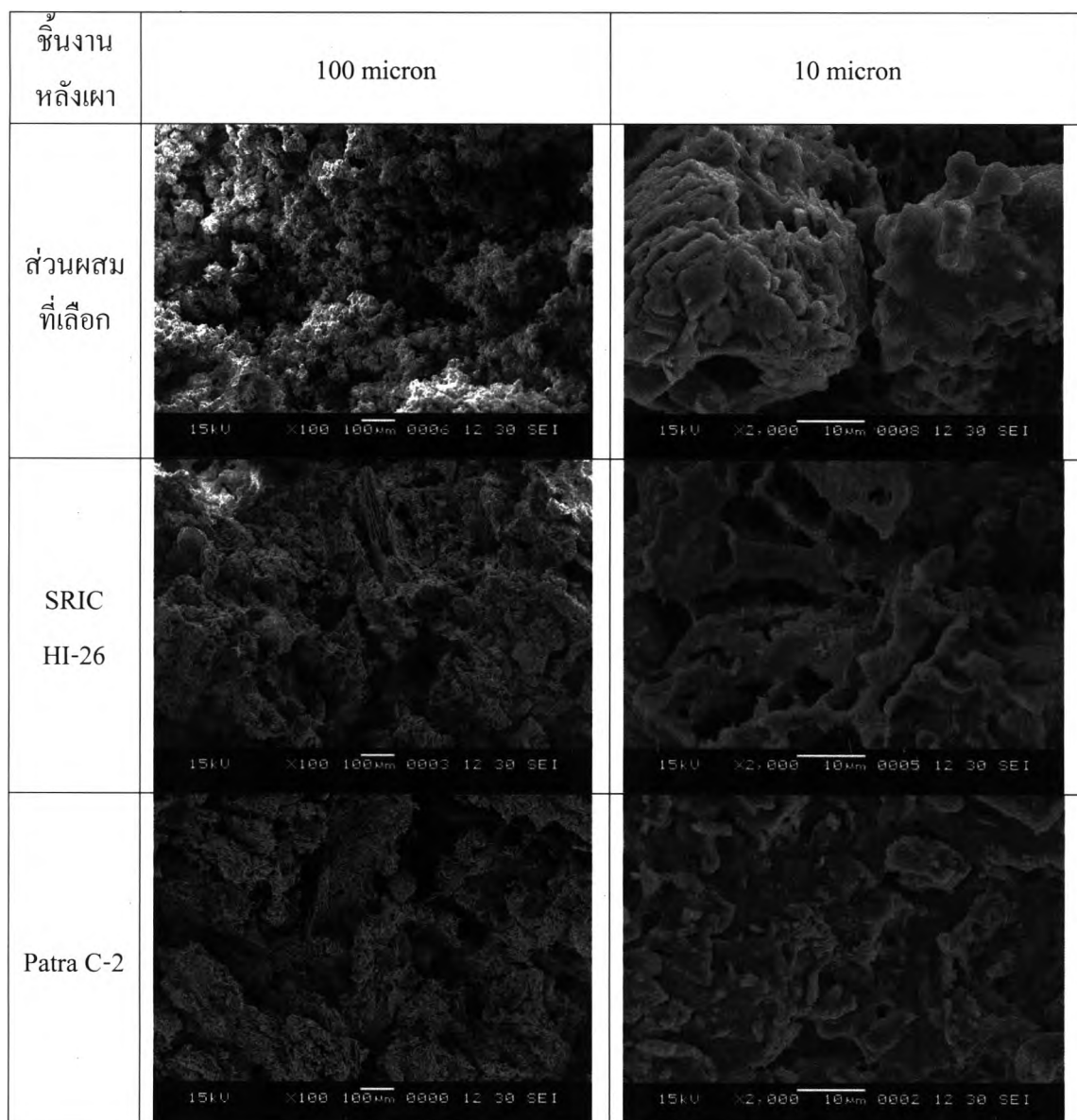
ส่วนผสมที่เลือกคือส่วนผสมระหว่าง กากตะกอนซุบผิวอะลูมิเนียม : ulla : เถ้าลอย : ดินดำ : แกลบดิบ : ปูนซีเมนต์ขาว คิดเป็น 60 : 17 : 10 : 10 : 15 : 11.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และทำการเผาที่อุณหภูมิ 1325 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า 2 ชนิด คือ SRIC HI-26 และ Patra C-2 ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.23 การเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของส่วนผสมที่เลือกกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า

ลักษณะและสมบัติ	ส่วนผสมที่เลือก	SRIC HI-26	Patra C-2
1. ความหนาแน่นโดยรวม (g/cm ³)	0.81±0.00	0.86±0.01	0.78±0.02
2. ความพรุนตัวปรากฏ (%)	70.65±0.37	47.71±0.87	71.59±0.24
3. การดูดซึมน้ำ (%)	86.16±0.35	57.35±3.54	88.71±0.75
4. ความต้านทานแรงกดแตก (MPa)	0.55±0.01	2.48±0.53	2.50±0.60
5. องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงาน	คอร์รันคัม และอะนอร์ไทต์	คอร์รันคัม มัลไลต์ และแคลเซียม อะลูมิเนต	มัลไลต์ และคอร์รันคัม
6. สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (x10 ⁻⁶ °C ⁻¹)			
ช่วง 50-300°C	6.16	5.46	4.51
ช่วง 50-500°C	6.38	5.50	4.60
ช่วง 50-800°C	6.76	5.74	4.77
ช่วง 50-1000°C	6.92	6.15	4.84
ช่วง 50-1200°C	-	6.12	4.60

ตารางที่ 4.23 การเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของส่วนผสมที่เลือกกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า

7. การต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลัน ที่ 1200°C 5 รอบ (%)			
ความต้านทานแรงกดแตกก่อนทดสอบ (MPa)	0.76+0.13	3.90+0.55	1.02+0.19
ความต้านทานแรงกดแตกหลังทดสอบ (MPa)	0.53+0.17	2.95+0.30	1.08+0.38
ผลการเปรียบเทียบ	ความแข็งแรงลดลง 30.26%	ความแข็งแรงลดลง 24.40%	ความแข็งแรง เพิ่มขึ้น 5.86%



รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมที่เลือกกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า

จากผลการเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของชิ้นงานหลังเผา 1325 องศาเซลเซียสกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า SRIC HI-26 และ Patra C-2 ดังตารางที่ 4.23 พบว่าลักษณะและสมบัติของชิ้นงานอยู่ในช่วงของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า โดยค่าความหนาแน่นจะอยู่ระหว่างอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าทั้งสองชนิด ความพรุนตัวปรากฏและการดูดซึมน้ำจะใกล้เคียงกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้า Patra C-2 แต่ความต้านทานแรงกดแตกของชิ้นงานมีค่าต่ำกว่าอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าประมาณ 5 เท่า องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานและอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าจะพบเฟสคอร์นคัมแต่ชิ้นงานทดสอบจะพบเฟสอะนอร์ไทต์ร่วมด้วย แต่อิฐฉนวนทนไฟทางการค้าจะพบเฟสของมัลไลต์โดย SRIC HI-26 จะพบเฟสของแคลเซียมอะลูมิเนตเพิ่มเข้ามา และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนพบว่า อิฐฉนวนทนไฟทางการค้ามีค่าการขยายตัวต่ำกว่าชิ้นงานเล็กน้อย ซึ่งอิฐฉนวนทนไฟทางการค้ามีค่าการขยายตัวใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การขยายตัวของมัลไลต์ซึ่งมีค่าประมาณ 5.0×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20-800 องศาเซลเซียส⁽³³⁾ แต่ชิ้นงานทดสอบให้ค่าการขยายตัวสูงกว่าของมัลไลต์เนื่องจากไม่พบเฟสของมัลไลต์ในชิ้นงาน ดังนั้นจึงมีค่าการขยายตัวใกล้เคียงระหว่างอะลูมินาซึ่งมีค่าประมาณ 8.0×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส⁽⁷⁾ และอะนอร์ไทต์ซึ่งมีค่าประมาณ 4.8×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส⁽¹⁸⁾ หลังจากทดสอบค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบเฉียบพลันที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสเป็นจำนวน 5 รอบ พบว่าชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์จากผลการวัดความต้านทานแรงกดแตก และมีค่าด้อยกว่าอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของอิฐฉนวนทนไฟที่ทดลองมีค่าสูงกว่าอิฐฉนวนทนไฟทางการค้านั่นเอง สำหรับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเปรียบเทียบกับอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าดังแสดงในรูปที่ 4.41 พบการกระจายของผลึกและรูพรุนทั่วทั้งชิ้นงาน แต่ชิ้นงานทดสอบจะมีการเกาะรวมตัวกันของผลึกเป็นกลุ่มก้อน เชื่อมกันด้วยเฟสที่หลอมเหลว แต่อิฐฉนวนทนไฟทางการค้าจะมีลักษณะเป็นเกล็ดและเป็นแผ่นเกาะกันมากกว่าเป็นกลุ่มก้อนที่เชื่อมยึดกันอย่างแน่นหนามากกว่าและยังพบแท่งผลึกของมัลไลต์ในโครงสร้างจุลภาคด้วยจึงสนับสนุนความแข็งแรงของอิฐฉนวนทนไฟทางการค้าทั้งสอง