

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง วิเคราะห์และทดสอบสมบัติทั้งหมด มีรายการดังต่อไปนี้ (ภาพอุปกรณ์บางรายการ แสดงไว้ในภาคผนวก ข.)

1. เครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) และฮอตเพลท (Hot plate)^{1,2}
2. เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield)^{1,2}
3. อุปกรณ์คั่วอย่าง ใต้แก้ว หน้อบคพลาสติกโพลีพรพิลีน (Polypropylene bottle) และลูกบดอลูมินา (Alumina grinding media)
4. รางบดสารตัวอย่าง¹
5. ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 70 เมช (Mesh)¹
6. เตาอบแห้ง (Oven)^{1,2}
7. ชวัดพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer)¹
8. เครื่องชั่งน้ำหนักที่สามารถวัดได้ละเอียดถึง 0.0001 กรัม^{1,2}
9. เครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค รุ่น Sedigraph 5100²
10. เครื่องวัดขนาดพื้นที่ผิวตัวอย่าง รุ่น Flowsorb 2300²
11. เครื่องวัดอัตราการไหลของอนุภาคแบบฮอลล์ (Hall flowmeter)¹
12. เครื่องหาความหนาแน่นหลังการเคาะของอนุภาคแบบประทับ (Stampfvolumeter)¹
13. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD)²

- 14 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุด้วยวิธี DTA (Differential thermal analysis) และ TGA (Thermogravimetric analysis)³
- 15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน (X-ray fluorescent-Energy dispersion system, EDS)^{3,4,5}
- 16 เครื่องขึ้นรูปชนิกให้ความดันเท่ากันทุกทิศทางแบบไม่เผาหรือโคลด์ไอโซสแตติกเพรสซิ่ง (Cold isostatic pressing, CIP) แบบเปียก²
- 17 เตาเผาไฟฟ้าซึ่งสามารถเผาได้ถึงอุณหภูมิ 1800 องศาเซลเซียส⁶
- 18 เครื่องทดสอบแรงดึงและแรงกดของวัสดุ (Universal testing machine)²
- 19 เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างความเร็วรอบสูง รุ่น Isomet 2000²
- 20 เครื่องวัดความต้านทานทางไฟฟ้า รุ่น Megger BM11⁷
21. เครื่องออยล์เทสเตอร์ (Oil tester) สำหรับวัดความแข็งแรงทางเคมี เลกคริก⁷

- หมายเหตุ :
- 1 ทดสอบที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 - 2 ทดสอบที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 - 3 ทดสอบที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 - 4 ทดสอบที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
 - 5 ทดสอบที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 - 6 ทดสอบที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาเครื่องปั้นดินเผา กรมวิทยาศาสตร์บริการ
 - 7 ทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 วัตถุดิบ

3.2.1 อลูมินา

ผงอลูมินาที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ได้แก่อลูมินาแคลไซน์ (Calcined alumina) เกรดเอ 14 (A-14) ซึ่งเป็นอลูมินาที่มีปริมาณธาตุเรเดียมต่ำอย่างหนึ่ง จึงมีสมบัติโคอีเลกทริกที่ีเหมาะสมกับการใช้ทำฉนวนไฟฟ้า ลักษณะโดยทั่วไปของอลูมินาเกรดนี้แสดงเอาไว้ในตารางที่ 3.1

3.2.2 ดินขาวปราจีน

ดินขาวปราจีนเป็นดินขาวเหนียว (Ball clay) แหล่งหนึ่งที่มีความสำคัญในทางอุตสาหกรรมเซรามิกภายในประเทศ เป็นดินขาวหนาไฟเนื้อละเอียดสีเหลืองนวลและเมื่ออบจะมีสีคากาล้าง มีความเหนียวดี ลักษณะทั่วไปของดินชนิดนี้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

3.2.3 แมกนีเซียมออกไซด์

แมกนีเซียมออกไซด์ มีสูตรเคมีคือ MgO โมลัมเลข 40.31 มีหน้าที่เป็นตัวยับยั้งการรูดของเกรน สำหรับที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นแมกนีเซียมออกไซด์ชนิดเบา มีลักษณะเป็นผงสีขาวละลายน้ำได้ดี มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์มากกว่าร้อยละ 98 โดยน้ำหนักและมีสิ่งเจือปนอื่น ๆ เช่น Cd , Cu , Fe , Pb , Zn , Cl^- และ SO_4^{2-} อีกเล็กน้อย

3.2.4 สารเพิ่มการยึดเกาะ (Binder)

สารเพิ่มการยึดเกาะที่ใช้ในการทดลอง คือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohols, PVA) ประเภทผ่านการไฮโดรไลซิสบางส่วน โดยมีอัตราของการไฮโดรไลซิสต่ำสุดร้อยละ 87 น้ำหนักโมลกุลโดยประมาณเท่ากับ 115,000 ลักษณะเป็นผงสีขาว ละลายน้ำได้เล็กน้อยที่อุณหภูมิห้อง แต่จะละลายได้ดีขึ้นในน้ำร้อนน้ำได้เป็นสารละลายเหนียวข้น

ตารางที่ 3.1 ลักษณะทั่วไปของอลูมินาแคลเซียมเกรด เอ 14

สมบัติ	ค่าที่วัดได้
<u>ผลวิเคราะห์เคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)</u>	
Al ₂ O ₃	99.6
Na ₂ O	0.03
SiO ₂	0.08
Fe ₂ O ₃	0.04
B ₂ O ₃	0.03
<u>สมบัติทางกายภาพ</u>	
ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด (ไมครอน)	2 - 5
พื้นที่ผิวรวม (ตาราง เมตรต่อกรัม)	0.5
ปริมาณสารละลายตัว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.1 - 0.2
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	
ขณะยังไม่อัดตัว	1.01
ขณะอัดตัวแล้ว	1.33
ความว่างจาเพาะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	3.8 - 3.9
ปริมาณอนุภาคสะสมที่ค้ำตะแกรง (ร้อยละ)	
100 เมช	0 - 6
200 เมช	30 - 70
325 เมช	80 - 90
ผ่านตะแกรง 325 เมช	4 - 20

ที่มา : ข้อมูลผลิตภัณฑ์ alcoa

ตารางที่ 3.2 ลักษณะทั่วไปของดินชาวบราซิล

สมบัติ	ค่าที่วัดได้
ผลวิเคราะห์เคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
SiO ₂	74.5
Al ₂ O ₃	16.1
Fe ₂ O ₃	0.79
MgO	0.04
CaO	< 0.01
Na ₂ O	0.07
K ₂ O	0.25
TiO ₂	0.60
P ₂ O ₅	0.02
MnO	< 0.01
Cr ₂ O ₃	0.01
สารละลายตัวเมื่อได้รับความร้อน (Loss of ignition, LOI)	7.40
พื้นที่ผิวรวม (ตารางเมตรต่อกรัม)	22.9 + 0.37
ขนาดอนุภาคปานกลาง (ไมครอน)	5 - 6

ที่มา : สิริวรรณ วิญญูนันท์กุล และ ธนาพร นาถวิรัชกุล, 2537

3.4.3 การขึ้นรูปและสมบัติก่อนเผาของตัวอย่าง

3.4.3.1 การขึ้นรูป

นำผงตัวอย่างที่เตรียมจากข้อ 3.4.2.1 มาอัดใส่ในแบบยางที่ทำจากโพลียูรีเทนให้เต็มและ เคาะให้อัดตัวกันแน่นและสม่ำเสมอก่อนจะปิดด้านบนด้วยจุกยางและผนึกให้แน่นด้วยเทปขาว นำไปอัดในเครื่องขึ้นรูปชนิดให้ความดันเท่ากันทุกทิศทางแบบเบี่ยง (อุปกรณ์รายการที่ 16) uly ใช้ความดันต่างๆ กัน ได้แก่ 100, 150, 200 และ 250 เมกะปาสกาล เข้าไว้ที่ความดันที่ต้องการนาน 3 นาทีก่อนจะผ่อนความดันลง รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วซึ่ง เป็นแท่งทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5 ถึง 1.8 เซนติเมตร และยาวประมาณ 12-15 เซนติเมตร



รูปที่ 3.2 ลักษณะของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้ว

3.2.5 สารช่วยในการกระจายลอยตัว (Deflocculant)

สารช่วยการกระจายลอยตัวที่ใช้ในการทดลอง มีชื่อทางการค้าคือ คิสเบ็กซ์ เอ 40 (Dispex A-40) เป็นเกลือแอมโมเนียมของโพลีอะคริเลต (Ammonium salt of polyacrylate) มีปริมาณเนื้อสารร้อยละ 40 ± 1 โดยน้ำหนัก ลักษณะเป็นของเหลวข้นสีเหลืองอ่อนมีความหนืดสูง ละลายน้ำได้ดีและทำให้เกิดฟอง ความว่างจำเพาะ 1.16 การใช้สารชนิดนี้เป็นตัวช่วยในการกระจายลอยตัวก็เพื่อจำกัดปริมาณธาตุรีดิวซ์ในตัวอย่างให้ค่าที่สุกนั้เอง

3.3 เนื้อตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้

3.3.1 การคำนวณสูตรเนื้อตัวอย่าง

ในการทดลองนี้ต้องการเนื้อวัสดุที่มีปริมาณอลูมินาร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงจะต้องผสมวัตถุดิบที่มีอลูมินาเป็นส่วนประกอบ ได้แก่ อลูมินา เอ 14 และคินชาวปราจันในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้เนื้อดินปั้นที่ต้องการ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

อลูมินา เอ 14 มีปริมาณอลูมินาร้อยละ 99.6 โดยน้ำหนัก

คินชาวปราจันมีปริมาณอลูมินาร้อยละ 16.1 โดยน้ำหนัก

สมมติให้เนื้อตัวอย่างมีอลูมินา เอ 14 ผสมอยู่ร้อยละ A

คินชาวปราจัน ผสมอยู่ร้อยละ P

$$\text{ดังนั้น} \quad A + P = 100$$

$$99.6/100 A + 16.1/100 P = 95$$

$$\text{แก้สมการทั้งสองจะได้} \quad A = 94.49 \%$$

$$P = 5.51 \%$$

3.3.2 ความหนาแน่นทางทฤษฎีของ เนื้อตัวอย่างในการทดลองครั้งนี้

ความหนาแน่นทางทฤษฎีของอลูมินาเป็น 3.99 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ ความหนาแน่นทางทฤษฎีของคินชาวเป็น 2.61 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (O'Bannon, 1984)

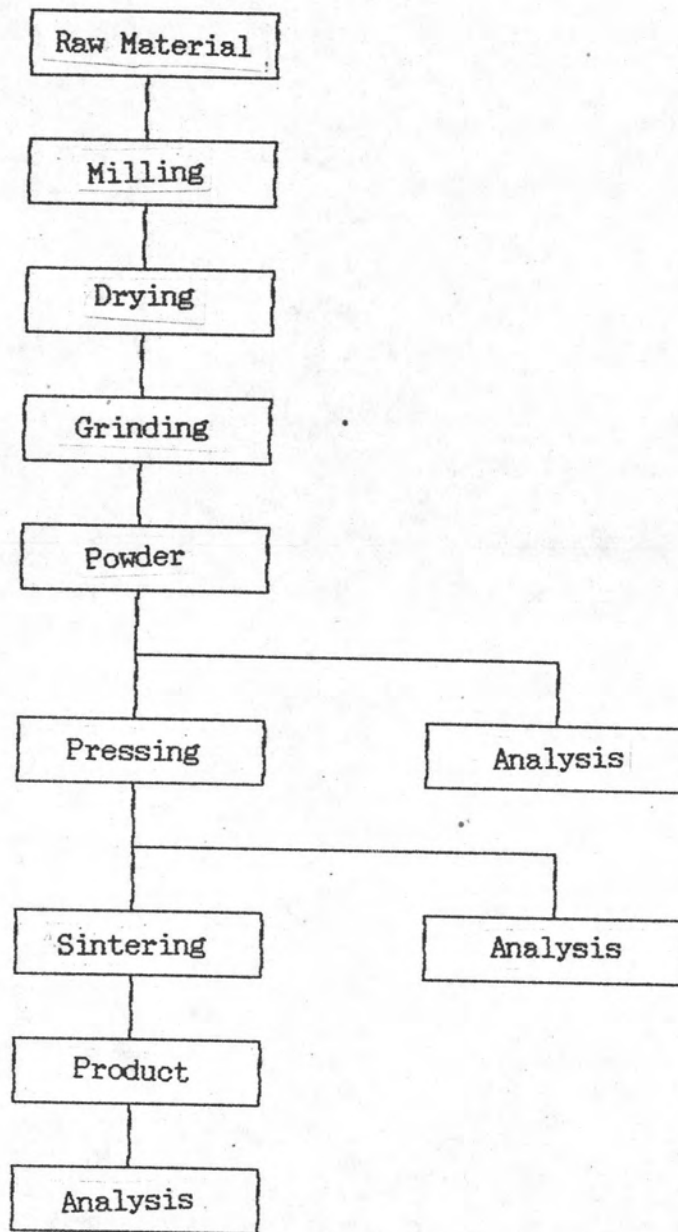
$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ความหนาแน่นของเนื้อตัวอย่าง} &= \frac{3.99 \times 94.49 + 2.61 \times 5.51}{100} \\ &= 3.914 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารช่วยการกระจายลอยตัวต่อสมบัติการไหลตัวของ เนื้อตัวอย่างในน้ำ

เตรียมอลูมินากับคินชาวปราจีนในอัตราส่วน 94.49 ต่อ 5.51 (ได้จากการคำนวณตามข้อ 3.3.1) จากนั้นจึงเติมน้ำกลั่นลงไปให้มีปริมาณของสเลอรี่รวม 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีปริมาตรเนื้อสารตัวอย่างเป็นร้อยละ 30 โดยมีปริมาตร กวนผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก (อุปกรณ์รายการที่ 1) นาน 20 นาที และนำไปวัดค่าความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบรูคพิลด์ (อุปกรณ์รายการที่ 2) จากนั้นจึงเติมคิสเบซ เอ 40 เพิ่มขึ้นครึ่งละร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักของเนื้อสารตัวอย่างและวัดความหนืดทุกครั้งจนกระทั่งค่าที่อ่านได้คงที่ บันทึกผลและเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคิสเบซที่ใช้กับค่าความหนืด เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารช่วยการกระจายลอยตัวที่เหมาะสมต่อการเตรียมตัวอย่างทดลองต่อไป

สำหรับการเตรียมผงตัวอย่างและการขึ้นรูปตัวอย่างสำหรับการทดลองในครั้งนี้ แสดงไว้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการทดลองครั้งนี้

3.4.2 การเตรียมผงตัวอย่างและสมบัติของผงตัวอย่าง

3.4.2.1 การเตรียมผงตัวอย่าง

1. ชั่งน้ำหนักอนุภาคน้ำ เอน 14 และดินขาวปราศจากอินทรีย์ในอัตราส่วน 94.49 ต่อ 5.51 (จากการคำนวณตามข้อ 3.3.1) โดยให้น้ำหนักรวมของวัสดุทั้งสองเป็น 1,900 กรัม ผสมแม่เนื้อเชื่อมออกไซด์ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของเนื้อดินปั้นทั้งหมด

2. บดวัสดุจากข้อ 1 โดยผสมน้ำกลั่น 1,114 ลูกบาศก์เซนติเมตร เคมีคิสเปทซ์ เอ 40 โดยใช้เวลาเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักของเนื้อตัวอย่าง (จากการทดลองตามข้อ 3.4.1) และสารที่ช่วยในการยัดเกาะที่ละลายน้ำแล้ว โดยให้มีปริมาณสารที่ช่วยในการยัดเกาะร้อยละ 2 ของน้ำหนักเนื้อตัวอย่าง ส่วนผสมทั้งหมดบรรจุลงในหม้อบดโพลีโพรพิลีน ความจุ 4,200 ลูกบาศก์เซนติเมตร และใช้ลูกบดอนุภาคน้ำหนักรวมประมาณ 4,500 กรัม (อุปกรณ์รายการที่ 3) บดด้วยเครื่องบดแบบความเร็วต่ำ (อุปกรณ์รายการที่ 4) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. อบสเลอร์ที่ได้ในเตาอบแห้ง (อุปกรณ์รายการที่ 5) ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือนานกว่าเล็กน้อยจนกระทั่งตัวอย่างแห้งสนิท มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก (ก่อนอบ ควรจะนำสเลอร์ที่ได้มาเคี้ยวบนเตาไฟฟ้าให้น้ำระเหยออกเกือบหมดเสียก่อนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการแยกตัวของสารที่ใช้ช่วยในการยัดเกาะบนผิวของสเลอร์ ซึ่งจะหาให้ส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน)

4. นำตัวอย่างแบบแห้งในหม้อบดโพลีโพรพิลีนและลูกบดอนุภาคน้ำ โดยใช้เวลาในการบดนาน 24 ชั่วโมง

5. ร่อนผงตัวอย่างที่บดได้จากข้อ 4 ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 70 เมช (อุปกรณ์รายการที่ 6) เก็บไว้ขึ้นรูปต่อไป

3.4.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะของผงตัวอย่าง

1. ทดความถ่วงจำเพาะตาม ASTM C135-86 โดยใช้ขวดพิคโนมิเตอร์ (อุปกรณ์รายการที่ 7)

2. ทาร้อยละความชื้นของตัวอย่าง (Moisture content) ตาม ASTM C324-82 โดยชั่งตัวอย่างน้ำหนัก 10 กรัมด้วยเครื่องชั่งอย่างละเอียด (อุปกรณ์รายการที่ 8) นำบ่อนแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เพื่อหาปริมาณความชื้น ดังสูตร

$$\% \text{ ความชื้นของตัวอย่าง} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}}{\text{น้ำหนักก่อนอบ}} \times 100$$

3. หาขนาดการกระจายอนุภาคของผงตัวอย่าง (Particle size distribution, PSD) ตาม ASTM C958-92 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค (อุปกรณ์รายการที่ 9)

4. หาพื้นที่ผิวรวมต่อน้ำหนักผงตัวอย่าง (Specific surface area) โดยวิธีของบรูน่าวอร์ เอ็มเมทและเทลเลอร์ (Brunauer, Emmett and Teller, BET) ตาม ASTM C1089-86 ด้วยเครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว (อุปกรณ์รายการที่ 10)

5. หาอัตราการไหล (Flow rate) ตาม ASTM B213-83 ด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลของอนุภาคแบบฮอล (อุปกรณ์รายการที่ 11)

6. ทาค่าความหนาแน่นหลังการเคาะ (Tap density) ตาม ASTM B527-70 ด้วยเครื่องทาคความหนาแน่นหลังการเคาะของอนุภาคแบบกระแทก (อุปกรณ์รายการที่ 12) และคำนวณอัตราส่วนการบรรจุ (Fill หรือ Hausner ratio) จากสูตร

$$\text{อัตราส่วนการบรรจุ} = \frac{\text{ความหนาแน่นหลังการเคาะ}}{\text{ความหนาแน่นปรากฏ}}$$

7. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส (Phase analysis) โดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กชันมิเตอร์ (อุปกรณ์รายการที่ 13)

8. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของผงตัวอย่างแบบ DTA และ TGA ด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ (อุปกรณ์รายการที่ 14) โดยให้ความร้อนในอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส นำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาตารางการเผาที่เหมาะสมต่อไป

9. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของผงตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง แล้วจึงส่งวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน (อุปกรณ์รายการที่ 15)

10. ศึกษาลักษณะ รูปร่างและการกระจายของขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (อุปกรณ์รายการที่ 15)

3.4.3.2 การทดสอบสมบัติก่อนเผาของตัวอย่าง

1. ทดสอบความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่างก่อนเผาด้วยวิธีแทนที่น้ำ ตาม ASTM C693-93

2. ตรวจสอบลักษณะภายนอกของชิ้นตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยความดันต่าง ๆ ภายใต้น้ำขึ้นตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้อาคารการเผาที่วิเคราะห์ได้จาก ข้อ 3.4.2.2 หัวข้อ 8 พบเห็นแตกและน้ำเบสีกษาศิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.4.4 การเผาผนึก (sintering)

นำชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วมาเผาผนึกในเตาไฟฟ้า (อุปกรณ์รายการที่ 17) ภายใต้อุณหภูมิสูงสุดในการเผาเป็น 1,500, 1,550, 1,600 และ 1,650 องศาเซลเซียสตามลำดับ ภายใต้อาคารการเผาที่วิเคราะห์ได้จากข้อ 3.4.2.2 หัวข้อ 8

3.4.5 การตรวจสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์

3.4.5.1 การตรวจสอบลักษณะทั่วไปของผลิตภัณฑ์

1. ทดสอบความหนาแน่น, ร้อยละของการดูดซึมน้ำ และปริมาณรูพรุน ตาม ASTM C373-88 และค่าการหดตัวหลังเผา ตาม ASTM C326-82 ด้วยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งก่อนเผาและหลังเผา แล้วนำมาคำนวณจากสูตร

$$\% \text{ การหดตัว} = \frac{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางก่อนเผา} - \text{เส้นผ่านศูนย์กลางหลังเผา}}{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางก่อนเผา}} \times 100$$

2. ตรวจสอบของตัวอย่างที่ผ่านการเผา โดยการตัดชิ้นตัวอย่างที่เผาแล้วให้เป็นแผ่นบางๆ ที่มีผิวหน้าเรียบดี ชัดผิวเรียบให้สะอาดแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์

3. ศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของตัวอย่าง โดยการทุบให้แตกแล้วนำไปถ่ายภาพผิวแตกที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.4.5.2 การตรวจสอบสมบัติการใช้งาน

1. ทดสอบค่าโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of rupture, MOR) ตาม ASTM C674-88 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงและแรงกดของวัสดุ (อุปกรณ์รายการที่ 18) คำนวณหาค่าโมดูลัสของการแตกหักจากแรงกด ณ จุดที่แตกหักที่วัดได้ ดังสมการ

$$\text{MOR} = (8 \times P \times L) / (\pi \times d^3)$$

เมื่อ P คือแรงกด (นิวตัน)

L คือความยาวของ Span (เมตร)

และ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นตัวอย่าง (เมตร)

2. ทดสอบความต้านทานไฟฟ้า และความแข็งแรงทางโคอีเลกตริก โดยนำชิ้นงานที่ทดสอบค่าโมดูลัสของการแตกหักแล้วมาตัดตามขวางให้เป็นชิ้นบางๆ ความหนา 1 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดชิ้นตัวอย่างความเร็วรอบสูง (อุปกรณ์รายการที่ 19) นำชิ้นงานไปแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจางเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อละลายคราบโลหะที่ติดมาจากผิวบ่มที่ออก แล้วจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเพื่อไล่ความชื้นและสิ่งสกปรกที่ผิวออก จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์หาความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้า (อุปกรณ์รายการที่ 20) โดยให้กระแสไฟฟ้าตรง แรงเคลื่อนไฟฟ้า 500 โวลต์ หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งแรงทางโคอีเลกตริกด้วยเครื่องออยล์เทสเตอร์ (อุปกรณ์รายการที่ 21)