

การทำตัวไดอิเล็กทริกชนิดเซรามิกส์

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงวิธีการทำตัวไดอิเล็กทริกเซรามิกส์ ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการเตรียมเนื้อสาร การทำแคลไซน์ การขึ้นรูปและการเผามาแล้ว ต่อไปนี้จะได้กล่าวถึงการทำสเปกซิเมนของตัวไดอิเล็กทริกเซรามิกส์ ที่จะใช้เป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์หาเฟสโคอะแกรม (phase diagram) เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างจากต่างประเทศ การตรวจจุลโครงสร้าง (microstructure) และใช้เป็นตัวอย่างในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางกายภาพ การทำตัวไดอิเล็กทริกจะใช้อุณหภูมิในการเผาที่ค่าต่าง ๆ กัน เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ไดอิเล็กทริกมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้ทำตัวไดอิเล็กทริก

3.1 การวิเคราะห์ตัวอย่างไดอิเล็กทริกจากต่างประเทศ

ตัวอย่างไดอิเล็กทริกชนิดเซรามิกส์ที่นำมาทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกจากตัวอย่างตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่หาได้ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากประเทศอุตสาหกรรมที่พัฒนาและมีชื่อเสียง คือตัวอย่างจากประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศฝรั่งเศส และประเทศญี่ปุ่น เพื่อให้เชื่อมั่นได้ว่าจะได้ตัวอย่างไดอิเล็กทริกที่มีคุณภาพดี เงื่อนไขในการเลือกตัวอย่างได้คำนึงถึงค่าความจุไฟฟ้า และค่าแรงดันใช้งาน ในที่นี้ได้เลือกตัวไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด 1,000 pF 20 kv \pm 20 % (ประเทศญี่ปุ่น) 1,000 pF 15 kv \pm 10 % (ประเทศฝรั่งเศส) และ 1,000 pF 3 kv (ประเทศสหรัฐอเมริกา)

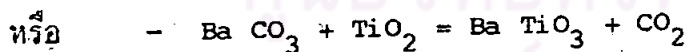
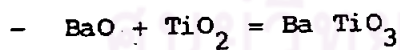
การวิเคราะห์หาชนิดของเนื้อสารตัวไดอิเล็กทริก ทำได้โดยการนำเอาตัวไดอิเล็กทริกตัวอย่างจากต่างประเทศดังกล่าวแล้วในตอนต้น มาบดให้มีความละเอียดเป็นผงขนาดโต 45 ไมครอน แล้วนำผงตัวอย่างไปตรวจหาด้วยกัน 2 วิธี วิธีแรกตรวจหาด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ วิธีที่สองตรวจหาด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ นำผลที่ได้จากการตรวจทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกัน

การตรวจสอบหาสารประกอบของตัวโคอิเล็กทริกด้วยการเอกซ์เรย์ทั้งสองวิธี ออกมาในรูปของเฟสโคอะแกรม ซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 5 ผลที่ได้จากการตรวจสอบทั้งสองวิธี ให้คำตอบเหมือนกัน คือ สารประกอบของตัวโคอิเล็กทริกตัวอย่างจากประเทศสหรัฐอเมริกา และประเทศญี่ปุ่นเป็นสาร TiO_2 (Rutile) ส่วนตัวอย่างจากประเทศฝรั่งเศสเป็นสาร $\text{Sr}(\text{Fe})\text{TiO}_3$ ซึ่งสารประกอบเหล่านี้จัดเป็นสารประกอบประเภทเฟอร์โรอิเล็กทริก ที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีสูง

3.2 การเลือกส่วนผสมของโคอิเล็กทริกเซรามิกส์

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าวัสดุที่เหมาะสมแก่การนำมาทำเป็นตัวโคอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุนั้น ควรจะเป็นสารประเภทเฟอร์โรอิเล็กทริก ที่ให้ค่าเปอร์มิตติวิตีสูง สารดังกล่าวนี้ได้แก่สารจำพวกทิตาเนตเซรามิกส์ เช่น สตรอนเทียมทิตาเนต (Sr TiO_3) แมกนีเซียมทิตาเนต (Mg TiO_3) แคลเซียมทิตาเนต (Ca TiO_3) แบเรียมทิตาเนต (Ba TiO_3) ทิตาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นต้น สารดังกล่าวข้างต้นนี้จะให้คุณสมบัติในการเป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริกอย่างสมบูรณ์

จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างโคอิเล็กทริกชนิดเซรามิกส์ของตัวเก็บประจุที่ได้ในข้อ 3.1 งานวิจัยนี้จึงได้เลือกสารแบเรียมทิตาเนต (Ba TiO_3) และทิตาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ทำตัวโคอิเล็กทริกสเปคซิเมน สารแบเรียมทิตาเนต (Ba TiO_3) ได้จากสารประกอบ



ส่วนสารประกอบทิตาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารที่มีจำหน่ายอยู่แล้ว

ในการหาส่วนผสมนี้ กำหนดให้อัตราส่วนผสมของสารประกอบแต่ละชนิดคิดเป็นหนึ่งโมเลกุล โดยกำหนดส่วนผสมรวมเท่ากับ 1 Mol % หรือเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 100 %

ส่วนผสมของติตาเนตไดออกไซด์เล็กริกเซรามิกส์ ที่เลือกผสมสำหรับงานวิจัยนี้

2 สูตร คือ

1) สูตรแบเรียมติตาเนต ($Ba TiO_3$) คาดว่าจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตร (ε) มากกว่า 1,000 (ค่าปกติสูงถึง 10,000)⁵⁾

2) สูตรติตาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) คาดว่าจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตร (ε) มากกว่า 60 (ค่าปกติสูงถึง 100)⁵⁾

3.2.1 การคำนวณหาปริมาณส่วนผสมของสารประกอบแต่ละชนิด เมื่อรวมแล้ว
ได้เท่ากับ 1 Mol % (100%)

การคำนวณเกี่ยวกับสูตรผสมแบเรียมติตาเนตไดออกไซด์เล็กริกเซรามิกส์ โดยการหาน้ำหนักอะตอมของธาตุต่าง ๆ ที่ใช้ เช่น

ธาตุ	Ba	มีน้ำหนักอะตอม	137
"	Ti	" "	48
"	O ₂	" "	16

สารประกอบอันเป็นวัตถุดิบที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมสารประกอบแบเรียมไดออกไซด์ (BaO) ปริมาณความบริสุทธิ์ 99.8 % และสารประกอบติตาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ปริมาณความบริสุทธิ์ 99.5 % (กำหนดโดยผู้ผลิต)

สูตร การหาน้ำหนักอะตอมของสารประกอบ = น้ำหนักอะตอมของธาตุ A + น้ำหนักอะตอมของธาตุ B

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักอะตอมรวมของสารประกอบ A คือ } BaO &= 137.34 + 16 \\ &= 153.34 \\ &= W_A \end{aligned}$$

$$\text{น้ำหนักอะตอมรวมของสารประกอบ B คือ } TiO_2 = 48 + (2 \times 16) = 80 = W_B$$

สูตร การหาน้ำหนักอะตอมรวมของของผสม = น้ำหนักอะตอมของสารประกอบ $W_A + W_B$

1) การคำนวณหาปริมาณของแบเรียมทิตาเนต

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักอะตอมรวมของของสารผสม Ba TiO}_3 &= 153.34 + 80 \\ &= 233.34 \\ &= 1.001 \quad \% \quad (100 \%) \end{aligned}$$

การคำนวณหาจำนวนเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสารประกอบแต่ละชนิด

$$\text{สูตรหา \% น้ำหนักของสารประกอบใด ๆ} = \frac{\text{น้ำหนักอะตอมรวมของสารประกอบ } W_A \text{ หรือ } W_B \times 100}{\text{น้ำหนักอะตอมรวมของของผสม } W_A + W_B}$$

$$\% \text{ น้ำหนักของสารประกอบ BaO} = \frac{153.34 \times 100}{233.34} = 65.7152 \%$$

$$\% \text{ น้ำหนักของสารประกอบ TiO}_2 = \frac{80 \times 100}{233.34} = 34.2847 \%$$

2) การคำนวณหาปริมาณของทิตาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂)

สารประกอบทิตาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ปริมาณความบริสุทธิ์เท่ากับ 99.8 %

(กำหนดโดยผู้ผลิต)

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักอะตอมของสารประกอบ TiO}_2 &= 48 + (2 \times 16) \\ &= 80 \end{aligned}$$

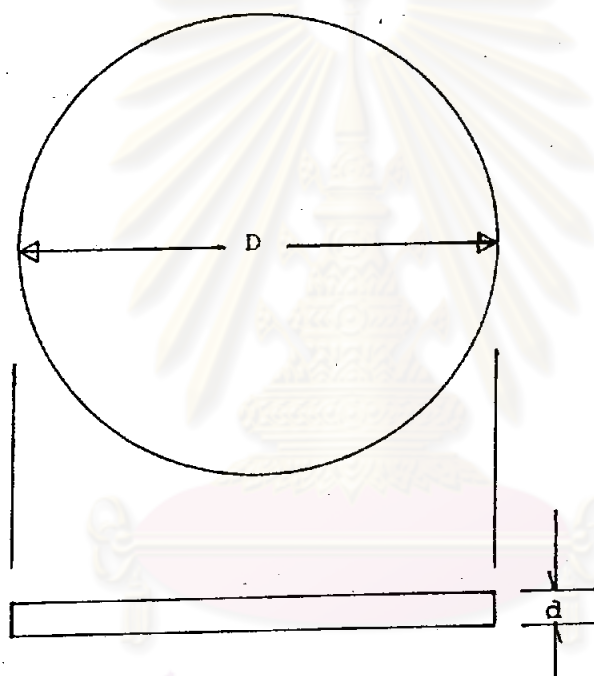
$$\text{น้ำหนักรวมของสารประกอบ TiO}_2 = 80 \text{ และ}$$

$$\% \text{ น้ำหนักของสารประกอบ TiO}_2 = 100 \%$$

การหาปริมาณของน้ำหนักวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ผสมทั้งหมดหาได้จาก ปริมาตรรวมของสเปคซิเมน
คูณกับความหนาแน่นของของผสม นั่นคือ

$$\text{น้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้} = \text{ปริมาตรที่ใช้ทั้งหมด} \times \text{ความหนาแน่นของของผสมสูตรนั้น ๆ}$$

สเปคซิเมนที่สร้างขึ้นเพื่อใช้งานวิจัย มีลักษณะเป็นแผ่นกลมแบน ดังรูป 3.1 มีความหนา 2.5 และ 4 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 ขนาด คือ 10, 60 และ 80 มิลลิเมตร ซึ่งมีปริมาตรและน้ำหนักดังแสดงในตาราง 3.1



รูปที่ 3.1 แผ่นสเปคซิเมนโคอีเล็กทริกสำหรับทดสอบหาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ตารางที่ 3.1 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างโคอิเล็กตริกเซรามิกส์แบบแผ่นแบนกลม

ชนิดโคอิเล็กตริก	การทดสอบ	ลักษณะของสเปคซิเมน		จำนวนชิ้น	ความหนาแน่น ขณะเป็นผง /cm ³	ปริมาตร cm ³	น้ำหนักก้อน gram
		เส้นผ่าศูนย์กลาง D mm.	ความหนา d mm.				
แมเรียมิตาเนต (Ba TiO ₃)	การหาคัว	10	4.	5	3.75	0.314	1.1775
	ความหนาแน่น	10	4.	5		0.314	1.1775
	ความพรุน	10	4.	5		0.314	1.1775
	การดูดซึมน้ำ	10	4.	5		0.314	1.1775
	เปอร์มิตทิวิตี	80	4.	5		20.1061	75.
	ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า	80	2.5	5		12.601	45.25
ตทานิยมโค- อ็อกไซด์ (TiO ₂)	การหาคัว	10	4.	5	3.50	0.314	1.099
	ความหนาแน่น	10	4.	5		0.314	1.099
	ความพรุน	10	4.	5		0.314	1.099
	การดูดซึมน้ำ	10	4.	5		0.314	1.099
	เปอร์มิตทิวิตี	80	4.	5		20.106	70.
	ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า	80	2.5	5		12.601	44.

ในการทำวิจัยครั้งนี้ใช้สูตรส่วนผสม 3 สูตรด้วยกัน คือ

- 1) สูตร $\text{BaO} + \text{TiO}_2 \Rightarrow \text{Ba TiO}_3 = 3 \text{ kg}$
- 2) สูตร $\text{Ba CO}_3 + \text{TiO}_2 \Rightarrow \text{Ba TiO}_3 + \text{CO}_2 \uparrow = 3 \text{ kg}$
- 3) สูตร $\text{TiO}_2 = 3 \text{ kg}$

ตารางที่ 3.2 ปริมาณวัตถุดิบทำเนื้อไดอิเล็กทริก

No	Composition	Material	Weight %	Weight in grams	Total weight
1	Ba TiO ₃	BaO	65.74	1972.20	3,000 grams
		TiO ₂	34.26	1027.8-	
2	Ba TiO ₃	Ba ₃ CO ₃	84.6081	2538.243	3,000 grams
		TiO ₂	34.2994	1028.982	
3	TiO ₂	TiO ₂ only	100 %	3,000	3,000 grams

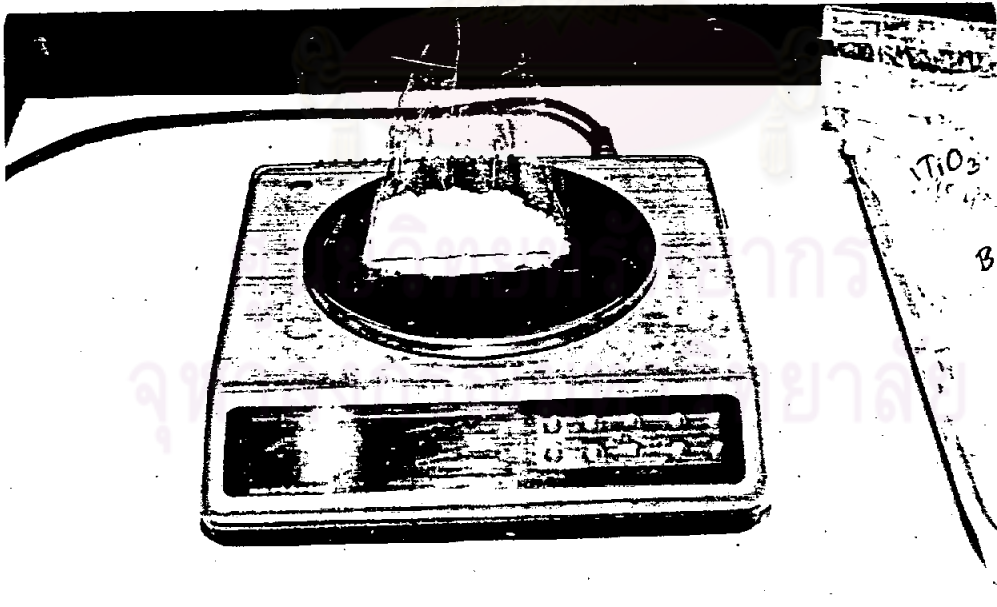
3.3 การเตรียมเนื้อสารโคอิเล็กทริกเซรามิกส์

การเตรียมเนื้อสารโคอิเล็กทริกเซรามิกส์ ประกอบด้วยขั้นตอนที่กล่าวไว้ใน
ข้อ 2.4

3.3.1 การชั่งวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ สารแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) หรือ สารแบเรียมออกไซด์ (BaO) และสารประกอบติตานิยมไดออกไซด์ (TiO_2) ความบริสุทธิ์ของสารดังกล่าวข้างต้นใช้เกรด Labortary หรือเกรดบริสุทธิ์ 99.8 % (AR) ซึ่งบรรจุอยู่ในขวดพลาสติกมีฝาปิดมิดชิด ขนาดขวดละ 0.5 - 1 กิโลกรัม

ดังรูป 3.3 เครื่องชั่งที่ใช้ชั่งน้ำหนักสารใช้เครื่องชั่งที่มีความแม่นยำสูง ในที่นี้ใช้เครื่องชั่งไฟฟ้า สามารถชั่งได้ถูกต้องถึง 0.1 มิลลิกรัม ดังรูป 3.2 การชั่งสารประกอบแต่ละชนิด แบ่งชั่งเป็นส่วน ๆ โดยคำนึงถึงปริมาณน้ำหนักรวมที่หม้อบดแต่ละลูก จะสามารถบรรจุได้ในการผสมตามอัตราส่วนที่กำหนด หมายเหตุได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.2 แสดงการชั่งน้ำหนักสารวัตถุดิบ



a) วัตถุดิบแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$)



b) วัตถุดิบิตาเนียมไดออกไซด์ และแบเรียมออกไซด์

รูปที่ 3.3 วัตถุดิบที่ใช้ทำสเบกซิเมนไดอิเล็กตริก

3.3.2 การผสมและการบดโดยวิธีการบดเปียก

ในการเตรียมตัวอย่างต่าง ๆ ในงานเซรามิกส์ ความสำคัญอยู่ที่ว่าส่วนผสมจะต้องเป็นเนื้อเดียวกันตลอด ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการและอุปกรณ์ในการผสมและบด

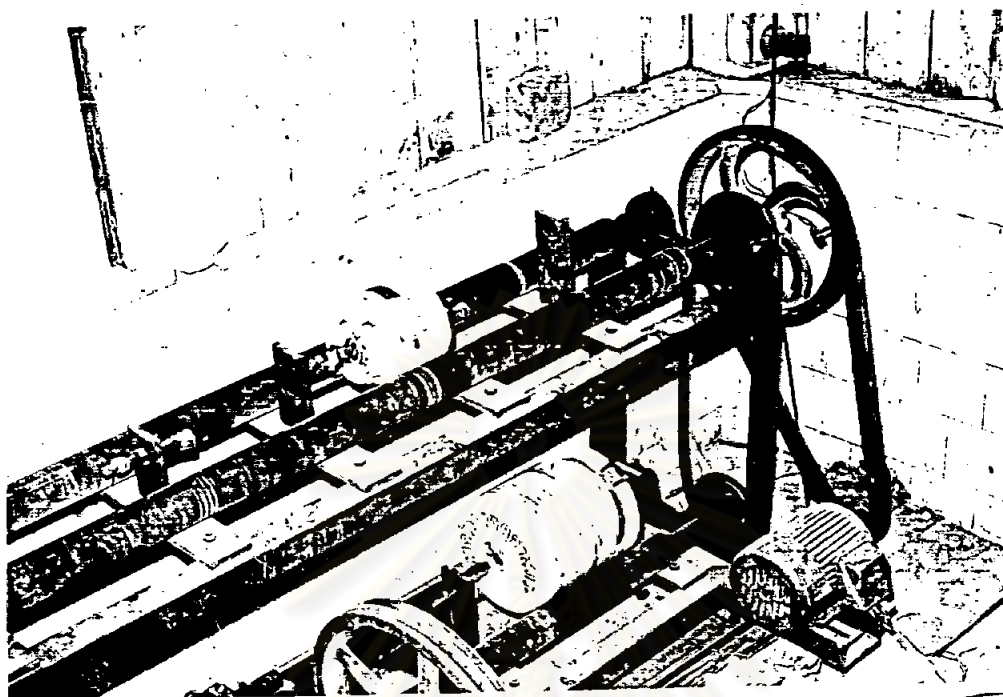
วิธีการผสมหรือบดมีอยู่ 2 แบบ คือ

- การผสมและการบดแบบแห้ง แบบนี้ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบเปียก
- การผสมและการบดแบบเปียก

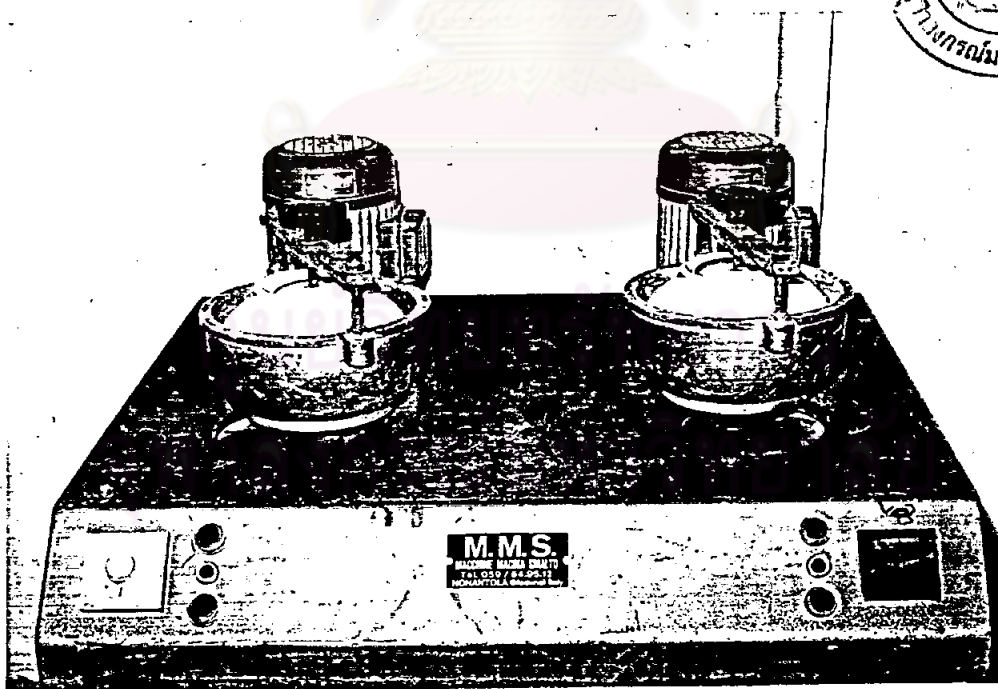
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมและการบดแบบเปียก สำหรับงานเซรามิกส์ขนาดเล็ก หรืองานวิจัยนิยมใช้เครื่องบด 2 ชนิด คือ

- หม้อบดแบบความเร็วรอบต่ำ ดังรูป 3.4 a
- หม้อบดแบบความเร็วรอบสูง ดังรูป 3.4 b

โครงสร้าง อุปกรณ์และหลักการทำงานของหม้อบด ทั้งสองแบบที่กล่าวข้างต้น มีลักษณะการทำงานคล้ายกัน คือ ในการบดสารจะใส่เนื้อสาร ลูกบด (ดูรูป 3.5) และน้ำในอัตราส่วนปริมาณที่เหมาะสม หรือสอคคล้องกัน และปิดฝาให้สนิท แล้วประกอบเข้ากับตัวเครื่องหมุน ที่มีความเร็วที่เหมาะสมของเครื่องบดแต่ละแบบ ทั้งเนื้อสาร และลูกบดจะถูกเหวี่ยงออกโดยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ทำให้เนื้อสารที่อยู่ระหว่างผิวในของหม้อบดและลูกบด หรืออยู่ระหว่างช่องของลูกบดถูกบดไปด้วยกัน



a) เครื่องบดความเร็วรอบต่ำ



b) หม้อบดความเร็วรอบสูง

รูปที่ 3.4 เครื่องบดแบบบดเปียก



รูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นถึงลูกบดที่ใช้กับหม้อบด

ความสามารถในการบดของหม้อบดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ คือ

- ขนาดของหม้อบด
- ขนาดและจำนวนของลูกหินบด
- น้ำหนักและปริมาตรของลูกบด
- ขนาดของเมล็ดสารที่ต้องการบด
- ปริมาณของน้ำที่ใช้ประกอบในการบด
- อุณหภูมิขณะทำการบด
- ความเร็วรอบของการหมุนหม้อบด
- ระยะเวลาในการบด

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้ออบ แต่ละแบบที่กล่าวข้างต้นพบว่า การผสม และการอบโดยวิธีการอบเปียก แบบใช้เครื่องอบความเร็วรอบสูง จะมีประสิทธิภาพดีกว่า แบบแรก ระยะเวลาที่ใช้ในการอบสั้นกว่า

อัตราส่วนการบรรจุของวัสดุที่จะทำการผสมหรือการอบ

ปริมาณของลูกหินประมาณ 50 - 60 % ของปริมาณรวม

ปริมาณน้ำเพื่อเป็นตัวทำละลาย = 20 % ของปริมาณรวม

ปริมาณของวัตถุดิบที่จะอบ = 20 % ของปริมาณรวม



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- เลือกวิธีการผสมและบดโดยเครื่องบดความเร็วรอบสูง โดยสามารถบดได้ครั้งละ 2 หม้อบด ๆ ละ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีส่วนผสมตามอัตราส่วนของสารแต่ละชนิดดังแสดงในตาราง 3.3

- กำหนดจำนวนครั้งการบด 7 ครั้ง (14 หม้อบด)

$$\text{ปริมาณน้ำหนักต่อหม้อบด} = \frac{3,000}{14} = 214.2857 \text{ กรัม}$$

ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณวัตถุดิบที่บรรจุต่อหม้อบด

No	Composition	Wright in gram Mixing	BaO %	Ba CO ₃ %	% TiO ₂			H ₂ O c.c.	Time in Minutes
			65.74 %	84.6081	34.26 %	34.2994	100 %		
1	Ba TiO ₃	214.2857	140.8714	-	73.4142	-	-	500	30 min -
2	Ba TiO ₃	214.2857	-	181.3030	-	73.4982	-	500	30 min -
3	TiO ₂	214.2857	-	-	-	-	214.2857	500	30 min -

ในการบดแต่ละครั้งจะได้น้ำสลิปชั้น ๆ มีความหนืดสูงพอประมาณ บรรจุในถังอลูมิเนียม (พลาสติก) เพื่อป้องกันน้ำสลิปทำปฏิกิริยากับโลหะทุกชนิด ปิดฝาให้มิดชิดเพื่อเตรียมไปยังกระบวนการกรองต่อไป

3.3.3 การกรองน้ำสลิป

เมื่อได้น้ำสลิปจากการผสมและการบด โดยวิธีการบดเปียกแล้ว นำมากรองผ่านตะแกรงกรองเบอร์ 400 เมช ก่อนที่จะทำการกรอง จะต้องนำน้ำกลั่นมาผสมกับน้ำสลิปก่อน เพื่อที่จะให้ปริมาณความขอลดลงมาก ๆ จนใส สามารถกรองผ่านตะแกรงเบอร์ 400 เมช การกรองหรือร่อนนี้ก็เพื่อที่จะให้ได้ขนาดของเกรน ของเนื้อสารไดอิเล็กทริกสม่ำเสมอ ตามความสัมพันธ์ของคุณสมบัติของชิ้นงานที่ต้องการ นอกจากนี้ยังเป็นการกรองเอาเศษวัสดุเจือปนออกในขั้นตอนแรก



รูปที่ 3.6 แสดงการกรองน้ำสลิปโดยตะแกรงกรอง

3.3.4 การกรองสารเหล็ก

การกรองสารโลหะประเภทเหล็กที่อาจจะปะปนมากับวัตถุดิบออก ซึ่งสารโลหะประเภทเหล็กดังกล่าวนี้ จะส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทาน ค่าความคงทนทางไฟฟ้า และอาจทำให้สีของผลิตภัณฑ์ผิดเพี้ยนไป เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกรองสารโลหะออกนี้ มีชื่อเรียกว่า "เฟอร์โรฟิลเตอร์ หรือ แม็กเนติกเซ็ปเรเตอร์" (ferro filter or magnetic separator) โดยมีหลักการทำงาน คือ เมื่อเราปล่อยน้ำสลิบที่ผ่านกระบวนการบดย่อยขนาด โดยเครื่องบดความเร็วรอบสูงดังได้กล่าวแล้วในตอนต้น ในน้ำสลิบนี้อาจจะมีส่วนประสมของสารเหล็กปะปนมา และเมื่อนำมาเทผ่านช่องตะแกรงเหล็กที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็ก ที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กสูง สารเหล็กที่ผ่านมากับน้ำสลิบจะถูกดูดเอาไว้หมด สารอะโลหะอื่น ๆ ก็จะรอดผ่านไปได้ กรรมวิธีการทำการกรองสารเหล็กออกจากสารประกอบหลัก ที่เราต้องการจะกระทำประมาณสามครั้ง เพื่อให้มีความแน่ใจในการกำจัดสารเหล็กออกจากน้ำสลิบหมด เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะนำเอาน้ำสลิบ ที่ผ่านขั้นตอนการกรองสารเหล็กแล้ว ไปยังขั้นตอนการตกตะกอนน้ำสลิบต่อไป



รูปที่ 3.7 แสดงการกรองสารโลหะหนักออกจากน้ำสลิป

3.3.5 การตกตะกอนน้ำสลิป

จากในขั้นตอนที่แล้ว ๆ มา ได้เพิ่มปริมาณน้ำ ทำให้เนื้อสารที่ผ่านการบดแตกตัวเพื่อประโยชน์ในการกรองขนาด และการกรองสารหนักออกจากเนื้อสารโคอิเล็ก-ตริกที่ต้องการ ดังนั้นเมื่อผ่านขบวนการดังกล่าวเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็จะต้องกำจัดปริมาณน้ำที่ไม่ต้องการออก โดยในขั้นต้นจะใช้วิธีการตกตะกอนของเนื้อสาร ทำได้โดยการบรรจุในภาชนะอโลหะที่มีก้นกว้าง ๆ เช่น ถังพลาสติก กะละมังพลาสติก โดยปล่อยทิ้งไว้หนึ่ง านานประมาณ 12 - 24 ชั่วโมง จากนั้นจะพบว่าน้ำที่เบาจะลอยตัวขึ้น และเนื้อสารที่หนักจะตกเป็นตะกอนลงสู่พื้นล่าง ซึ่งอาจใช้วิธีการลั่นน้ำ โดยใช้สายยางดูดออก หรือใช้กระดาษเยื่อซับออก ดังรูป 3.8 และ 3.9



รูปที่ 3.8 แสดงการตักตะกอนน้ำสลิบ

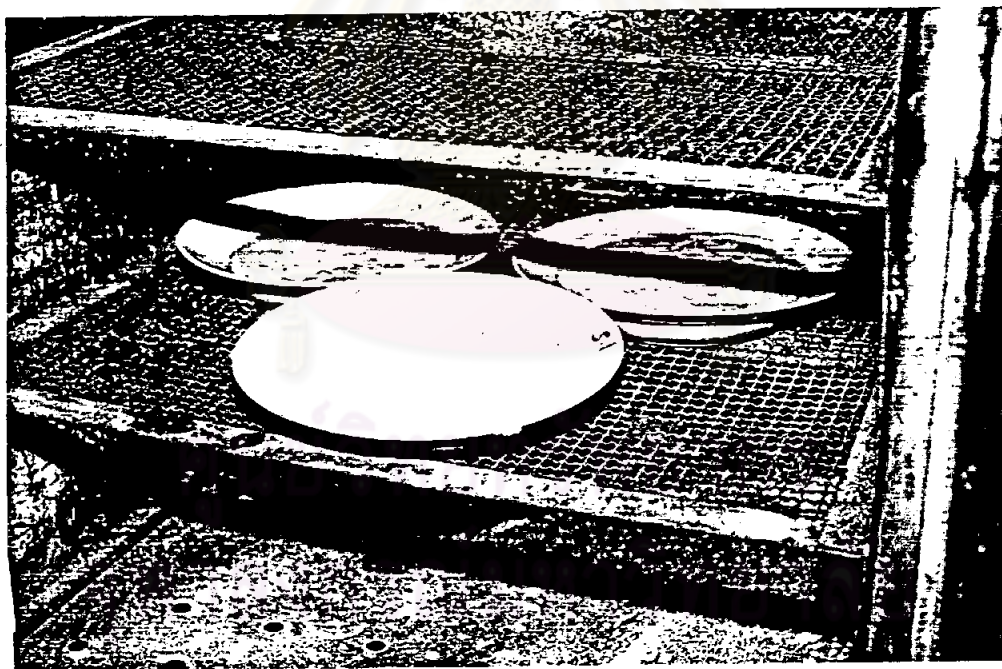


รูปที่ 3.9 แสดงกรรมวิธีการกำจัดน้ำออกจากเนื้อวัคดูคิมที่บดแล้ว

หลังจากนั้นจะได้เนื้อสลิบที่มีความหนืดหรือความเข้มข้นสูง จากนั้นก็บรรจุลงในภาชนะอะโลหะทนความร้อน เช่น จานกระเบื้อง เพื่อนำไปสู่ขั้นตอนการอบไล่น้ำทิ้งต่อไป

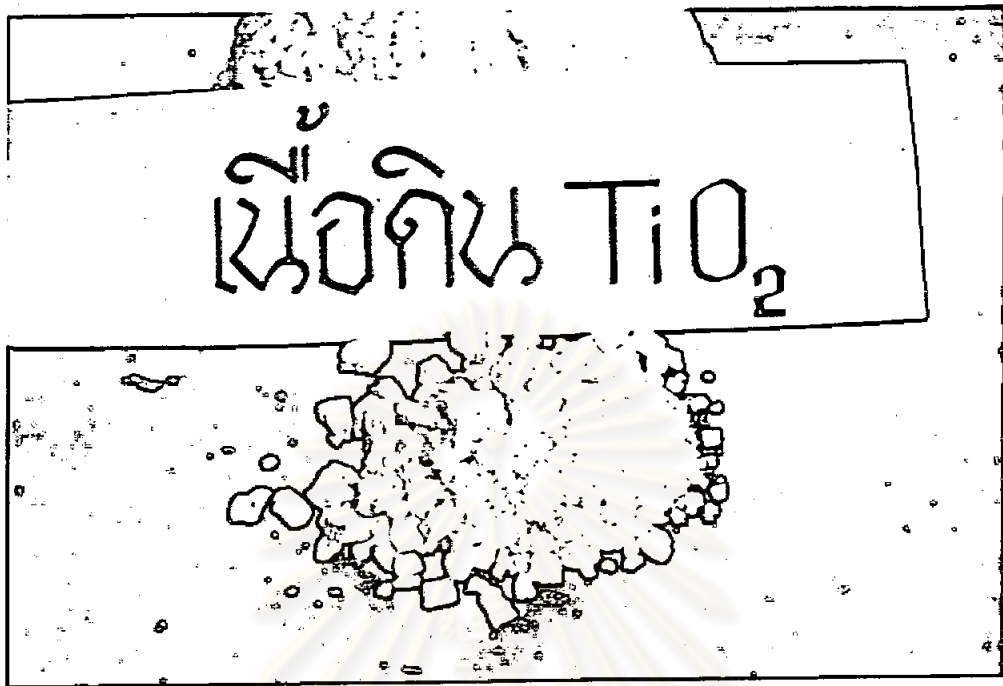
3.3.6 การอบแห้งน้ำสลิบ

เนื่องจากความต้องการเนื้อสารโคอิเล็กทริกที่เป็นผงแห้ง จึงต้องใช้ขบวนการทางความร้อนในการไล่น้ำ หรือความชื้นออกจากน้ำสลิบ กรรมวิธีที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ คือ การอบแห้งโดยเตาอบไฟฟ้า ดังรูป 3.10 ทั้งนี้เพราะต้องควบคุมความบริสุทธิ์ของเนื้อสารจากสิ่งเจือปนทุกรูปแบบ เช่น การทำปฏิกิริยากับโลหะต่าง ๆ หรือฝุ่นละอองต่าง ๆ ในการอบแห้งน้ำสลิบ จะบรรจุด้วยภาชนะกระเบื้องหรือภาชนะแก้วทนความร้อน อุณหภูมิที่ทำการอบ $100^{\circ} - 150^{\circ}\text{C}$ อบนาน 10 - 12 ชั่วโมง

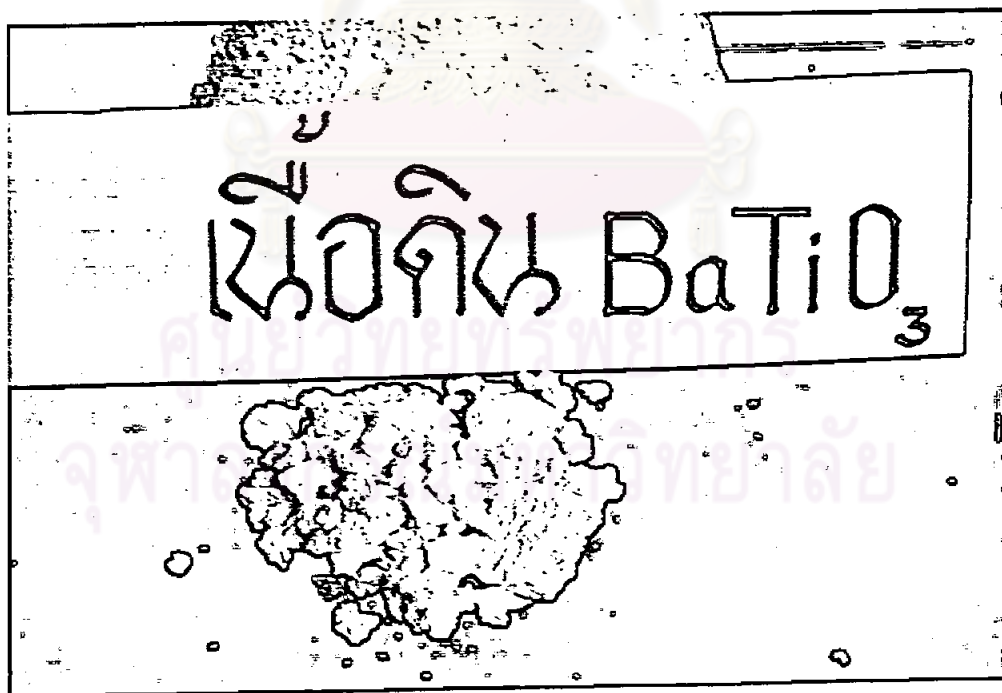


รูปที่ 3.10 แสดงการอบน้ำสลิบในเตาอบไฟฟ้า

หลังจากอบน้ำสลิบจนแห้งแล้ว ก็จะได้ผลึกแห้ง ๆ ของเนื้อโคอิเล็กทริก ดังรูป 3.11 ซึ่งจะต้องไปผ่านขั้นตอนการบดละเอียดต่อไป



a) เนื้อโคอิเล็กทริก TiO₂



b) เนื้อโคอิเล็กทริก Ba TiO₃

รูปที่ 3.11 เนื้อโคอิเล็กทริกหลังอบแห้ง

3.3.7 การบดแห้งเนื้อสารโคอิเล็กทริกโดยโกร่ง

กรรมวิธีการนี้เป็นการนำผลึกเนื้อสารโคอิเล็กทริกมาบดละเอียดให้เป็นผง โดยใช้โกร่งบด ดังรูป 3.12 เพื่อให้ได้ผงเนื้อสาร โดยคงสภาพทางเคมีเหมือนเดิม ความละเอียดของการบดในขั้นตอนนี้ จะผ่านตะแกรงเบอร์ 50. เมช เนื้อสารโคอิเล็กทริกที่ได้นี้ ยังมีคุณสมบัติไม่ดีพอ ต้องไปผ่านกระบวนการแคลไซน์ต่อไป เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสม



รูปที่ 3.12 แสดงการบดเนื้อสารโคอิเล็กทริกหลังจากการอบแห้ง

3.4 กรรมวิธีการทำปรีซีหรือแคลไซน์นิ่ง

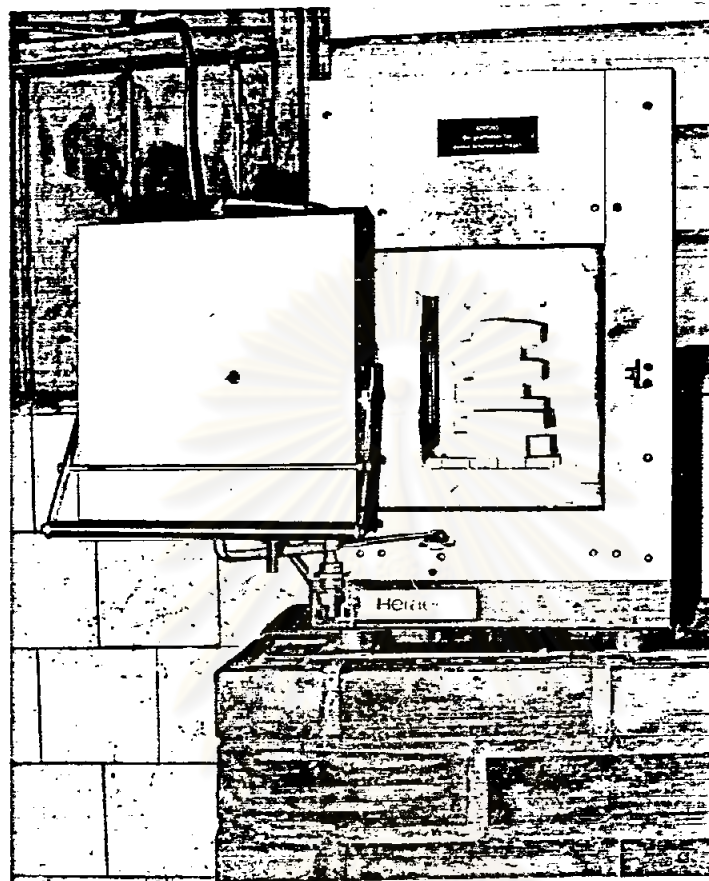
กระบวนการทำปรีซีหรือแคลไซน์นิ่ง เป็นกรรมวิธีการใช้ความร้อนค่อนข้างสูง (ประมาณ $1,000^{\circ}\text{C}$) ในการทำให้ผงเนื้อสารโคอิเล็กทริก ซึ่งผ่านการผสมและบดละเอียดโดยวิธีเปียก ซึ่งเป็นกรรมวิธีการในเชิงปฏิกิริยาในชั้นคั่นของสารประกอบแต่ละชนิด เพื่อรวมตัวกันเป็นของผสม แต่ยังไม่ได้ผลสมบูรณ์นัก หากนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อน จะช่วยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งปฏิกิริยาทางเคมีและกายภาพ

ผลที่ได้รับคือ อะตอมของสารประกอบแต่ละชนิด จะเกิดการรวมตัวกันเป็นของผสมอย่างสมบูรณ์ตามที่ต้องการ นอกจากนั้นยังจะเป็นการใช้ความร้อนในการขับไล่สารประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการออกจากของผสมหลักด้วย

กรรมวิธีการทำปรีฮีท หรือแคลไซน์นิ่ง ทำได้โดยการนำผงเนื้อสารไปอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 80 มม. หนา 20 มม. โดยความกดกัน 10,000 Psi น้ำหนักประมาณ 200 กรัม จากนั้นก็นำแผ่นขึ้นงานหนา ๆ วางลงบนแผ่นอลูมินาแข็งเพื่อนำเข้าเตาอบ การวางให้วางเหลื่อมล้ำกัน ดังรูป 3.13 เพื่อที่แผ่นขึ้นงานจะได้รับความร้อนอย่างทั่ว ๆ กัน เงื่อนไขการทำแคลไซน์นิ่งคือ

- อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิการอบ = 150°C/hr.
- อุณหภูมิที่ใช้อบ = $1,000^{\circ}\text{C}$
- อบอุ่นแบบคงที่อุณหภูมิ = $1,000^{\circ}\text{C/3hrz.}$
- การเย็นตัวลง = $1,000^{\circ}\text{C/10 min.}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.13 แสดงการทำแคลไซน์นิ่งเนื้อไดอิเล็กตริกเซรามิกส์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

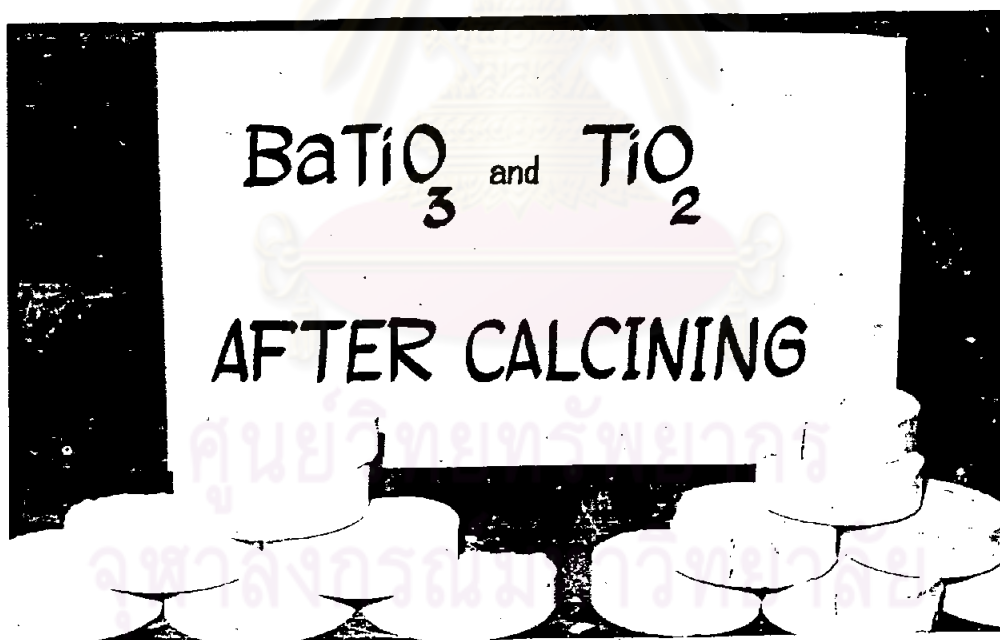
3.5 กรรมวิธีการอัดขึ้นรูปสเปคซิเมน

ในการทำวิจัยเพื่อหาคุณสมบัติทั้งทางกายภาพ และทางไฟฟ้า จำเป็นที่จะต้องใช้ชิ้นตัวอย่างรูปร่างแบบต่าง ๆ โดยสอดคล้องกับคุณสมบัติแต่ละแบบที่จะทำการทดสอบ

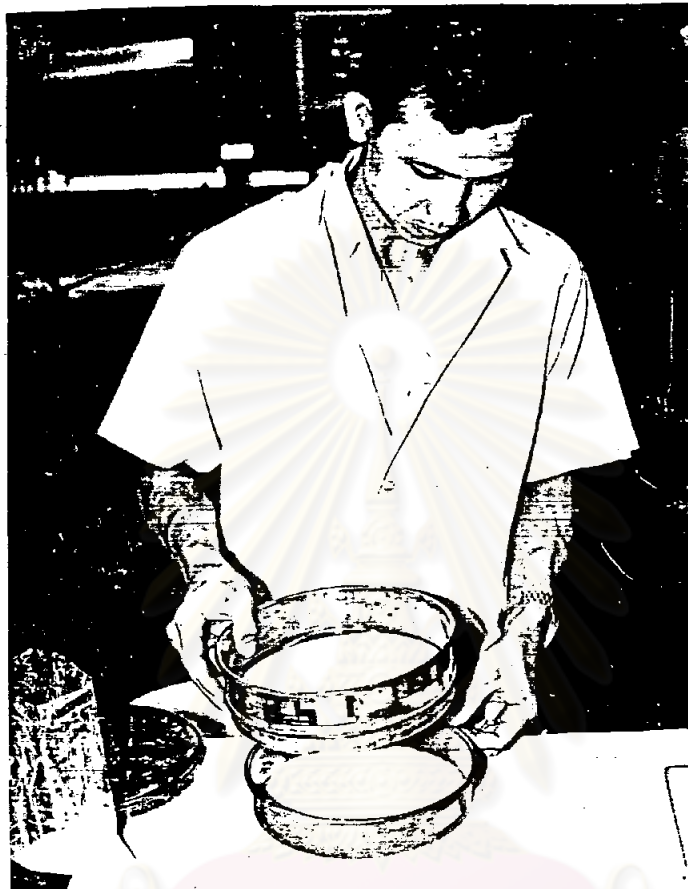
กระบวนการขึ้นรูปตัวอย่าง จะประกอบด้วยกรรมวิธีการต่าง ๆ ที่กล่าวแล้ว ในข้อ 2.4.2 ซึ่งจะได้อีกกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

3.5.1 การบดเนื้อสารไตอิเล็กทริกหลังการทำแคลไซน์

นำแผ่นเนื้อสารไตอิเล็กทริกที่ผ่านการทำแคลไซน์ ดังรูป 3.18 มาทำการบดย่อยโดยโกร่ง ให้มีขนาดความละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 80 - 100 เมช ดังรูป 3.15 ซึ่งจะได้อผงเนื้อสารไตอิเล็กทริกที่มีขนาดของเกรนเป็นผงโคสม่าเสมอ



รูปที่ 3.14 แสดงแผ่นเนื้อไตอิเล็กทริกหลังจากการทำแคลไซน์

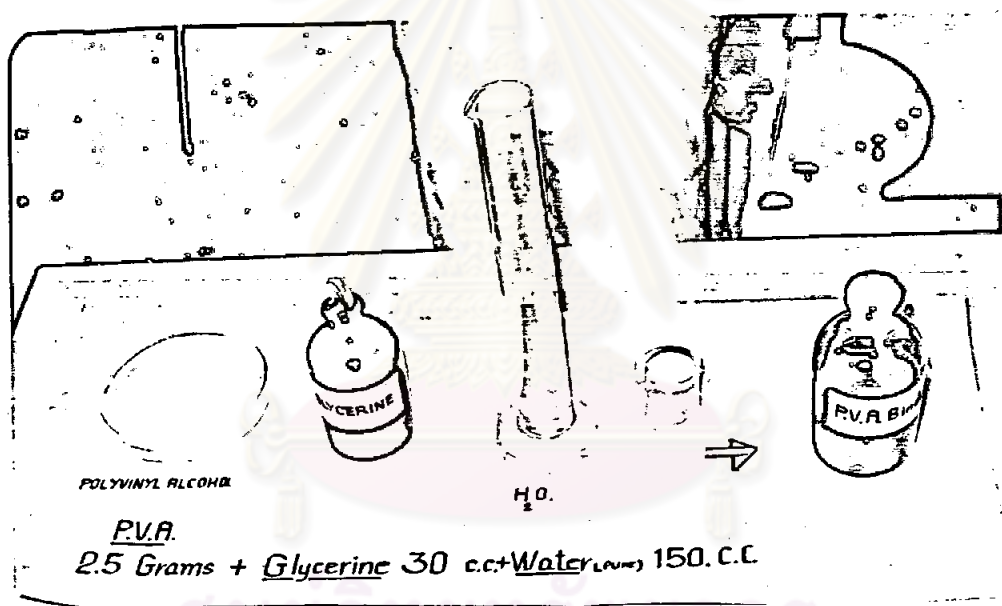


รูปที่ 3.15 แสดงการกรองขนาดผงเนื้อสารผ่าน 100 เมช

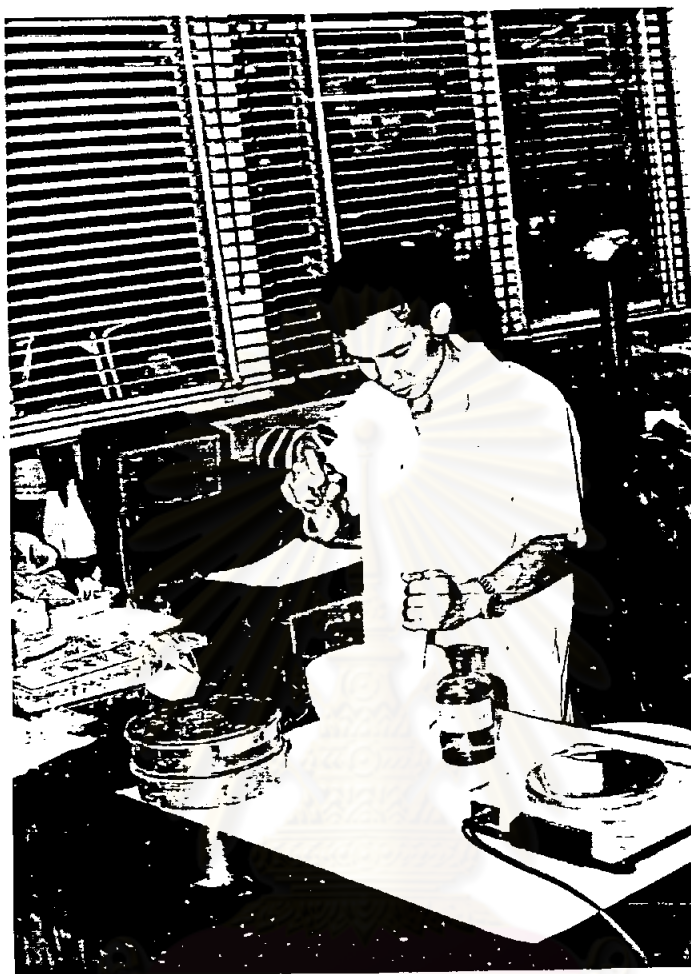
3.5.2 การผสมสารโบนีเคอร์หรือสารพลาสติกไซเซออร์

หลังจากบดละเอียดและร่อนผงเนื้อสารไดอิเล็กทริกแล้ว ผงเนื้อสารนั้นยังไม่พร้อมที่จะนำไปขึ้นรูปตัวอย่าง เพราะว่าผงเนื้อสารนั้นแห้งและละเอียดมาก ไม่มีคุณสมบัติในการเกาะยึดกันระหว่างมวล ยังจำเป็นต้องใช้สารละลายโบนีเคอร์ ที่มีคุณสมบัติเหนียวหนืด ช่วยเสริมในการเกาะยึดเกรนเข้าด้วยกัน การขึ้นรูปตัวอย่างก็เพื่อสะดวกในการนำพา หรือขนส่งเพื่อการนำไปเผา

ตัวไบเคอร์ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คิตาเนตเซรามิกส์ นิยมใช้สารไบเคอร์
 ดังรูป 3.16 ปริมาณที่ใช้ประมาณ 8 - 10 % ของปริมาณเนื้อสารที่ใช้ในการขึ้นรูป
 การผสมจะผสมโดยการปั่นเป็นผอย ๆ ลงบนเนื้อสารจนทั่วแล้วบดให้เข้ากันโดยโกร้งบด
 ดังรูป 3.17 ใช้เวลาในการบดนานประมาณ 30 นาที ต่อน้ำหนักสาร 200 กรัม
 หลังจากเห็นวงส่วนผสมระหว่างผงเนื้อสาร กับตัวไบเคอร์เข้ากันดีแล้ว ก็บรรจุเก็บไว้ใน
 ถุงพลาสติก เก็บรวม ๆ ไว้โดยรัดปากถุงให้แน่นป้องกันการระเหยของสารไบเคอร์
 ต่อจากนั้นจะนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50. เมช เพื่อให้ได้ผงเนื้อสารที่มีขนาดโตของ
 มวลเท่า ๆ กัน อันจะทำให้เนื้อของสเปคซิเมนหรือตัวขึ้นงานจริง มีคุณสมบัติของการเป็น
 ตัวไดอิเล็กทริกเซรามิกส์อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.16 แสดงส่วนผสมสารไบเคอร์



รูปที่ 3.17 แสดงการผสมสารไบเคอร์โดยการฉีดน้ำเป็นฝอย

ศูนย์วิทยพัทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.3 ปริมาณเนื้อสารในการขึ้นรูปจริง

ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หรือสเปคซิเมน แต่ละแบบจะใช้ปริมาณเนื้อสารไม่เท่ากัน จำเป็นที่จะต้องใช่วิธีการคำนวณหาปริมาณ น้ำหนักต่อชิ้นตัวอย่างนำไปทำการอัดขึ้นรูป เพื่อทดสอบขั้นต้น และตรวจปรับปริมาณจนได้ค่าปริมาณน้ำหนักที่แท้จริง จึงมากำหนดน้ำหนักจริงในการชั่งแบ่งผงเนื้อสาร เพื่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หรือชิ้นตัวอย่าง

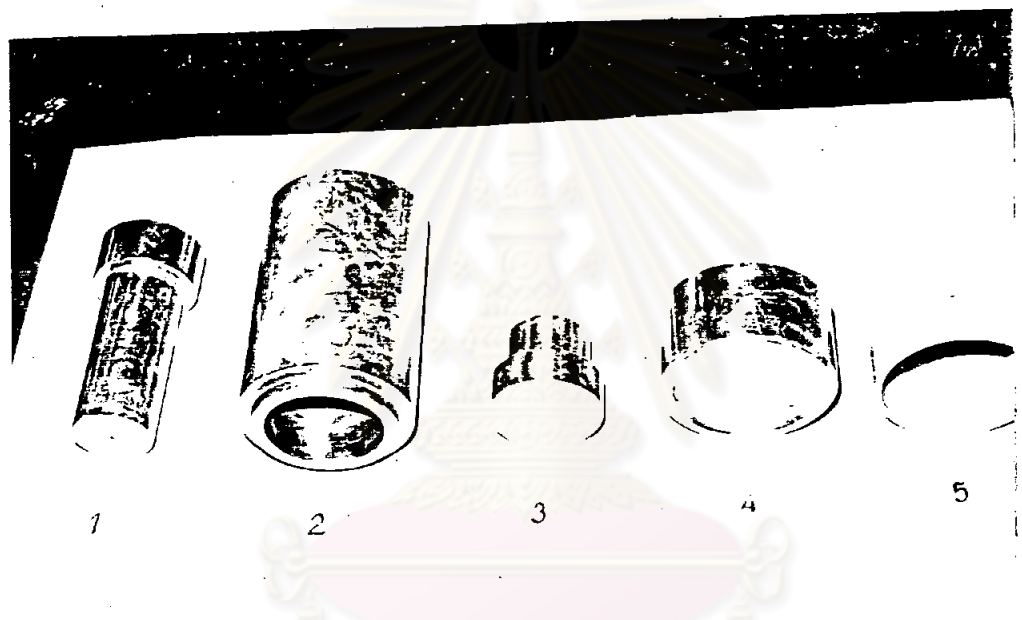
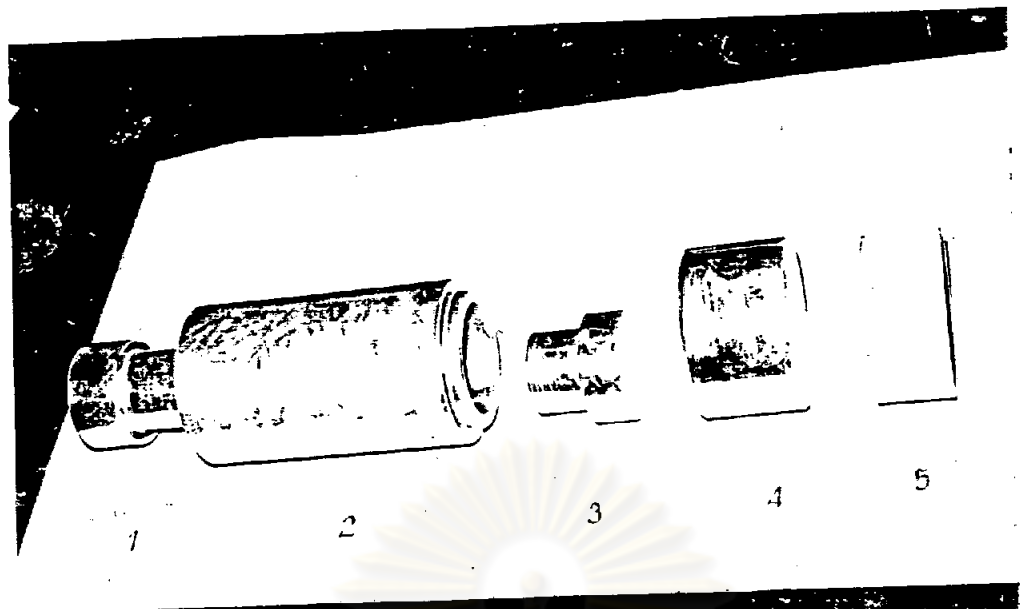
3.5.4 การอัดขึ้นรูปตัวโคอิเล็กทริกโดยวิธีไฮโครสแตติกส์เพรส

การขึ้นรูปตัวโคอิเล็กทริกอาจทำได้หลายวิธี ดังที่กล่าวแล้วในบทที่ 2 ในที่นี้ เลือกใช้วิธีอัดขึ้นรูปด้วยวิธีไฮโครสแตติกส์เพรส เพราะเป็นวิธีที่มีอุปกรณ์อยู่พร้อม รูปแบบของสเปคซิเมนที่ทำขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในการทดสอบคุณสมบัติ ฉะนั้นแบบอัดจะต้องออกแบบให้สอดคล้องกับลักษณะตัวอย่างสเปคซิเมน ในงานวิจัยนี้ลักษณะตัวอย่างสเปคซิเมนจะเป็นแผ่นแบนกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10, 60 และ 80 มิลลิเมตร และมีความหนา 2.5 และ 4 มิลลิเมตร ในรูป 3.18 เป็นตัวอย่างแบบอัดสเปคซิเมนโคอิเล็กทริกแบบไฮโครสแตติกส์เพรส ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร

แรงอัดที่ใช้ในการขึ้นรูปตัวอย่างโคอิเล็กทริก มีค่าสูงถึง 14,500 Psi คิดเป็นแรงอัดต่อพื้นที่ได้เท่ากับ 1 คันต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้เครื่องอัดระบบไฮดรอลิกที่มีขีดความสามารถในการอัดได้ถึง 100 ตัน ดังรูป 3.19

วิธีการอัดสารโคอิเล็กทริกเพื่อขึ้นรูปตัวอย่างสเปคซิเมน ทำได้โดยใช้สารประกอบโคอิเล็กทริก ที่ผสมสารไบเคอร์แล้วลงในแบบอัด ดังรูป 3.20 แล้วนำไปเข้าเครื่องอัด ดังรูป 3.21

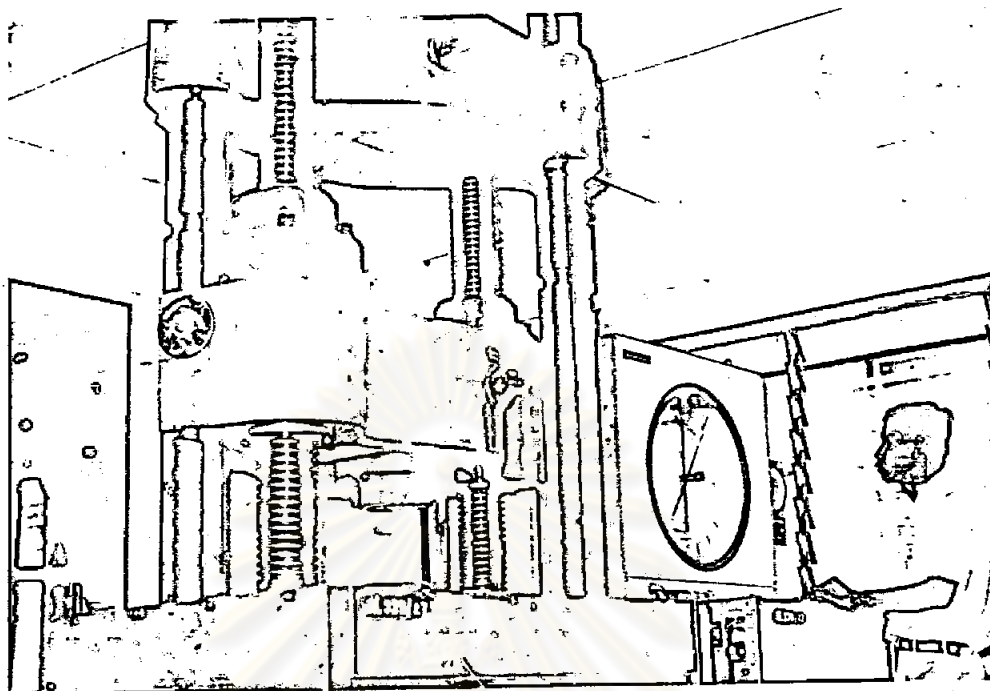
งานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบไฮโครสแตติกส์ ยังมีความแข็งแรงในการอยู่ตัวยังไม่ดีพอ จะต้องระมัดระวังการแตกสลายของตัวอย่าง ดังนั้นจึงต้องใส่ในภาชนะบรรจุเรียบร้อยแล้ว เพื่อนำไปทำการเผาต่อไป ดังรูป 3.22



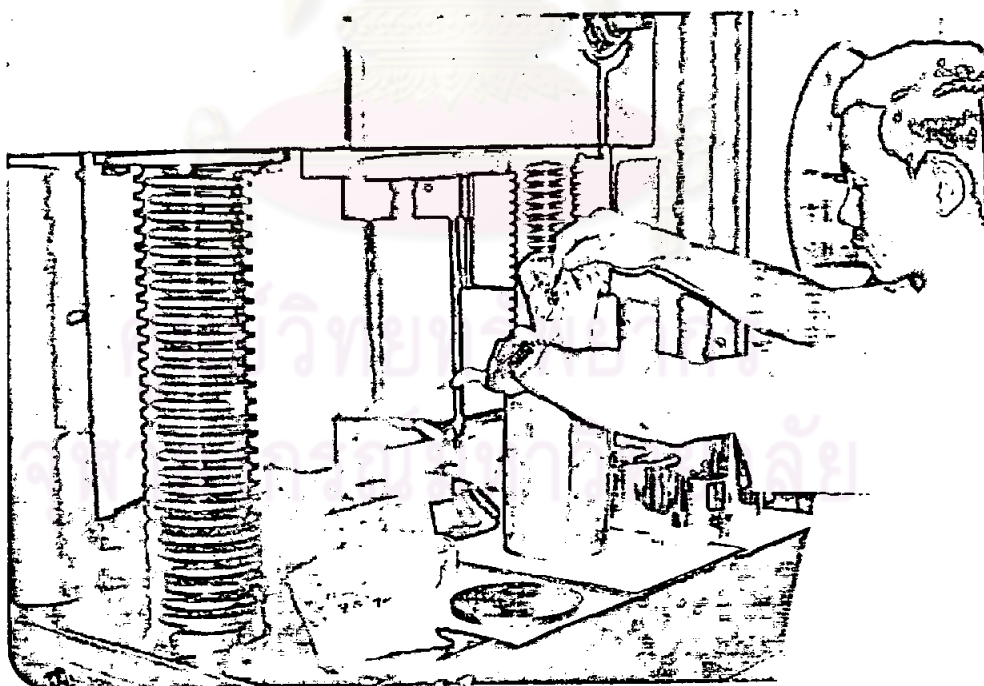
รูปที่ 3.18 แสดงแบบอักษสเปคซิเมน

ส่วนประกอบของแบบอักษสเปคซิเมน

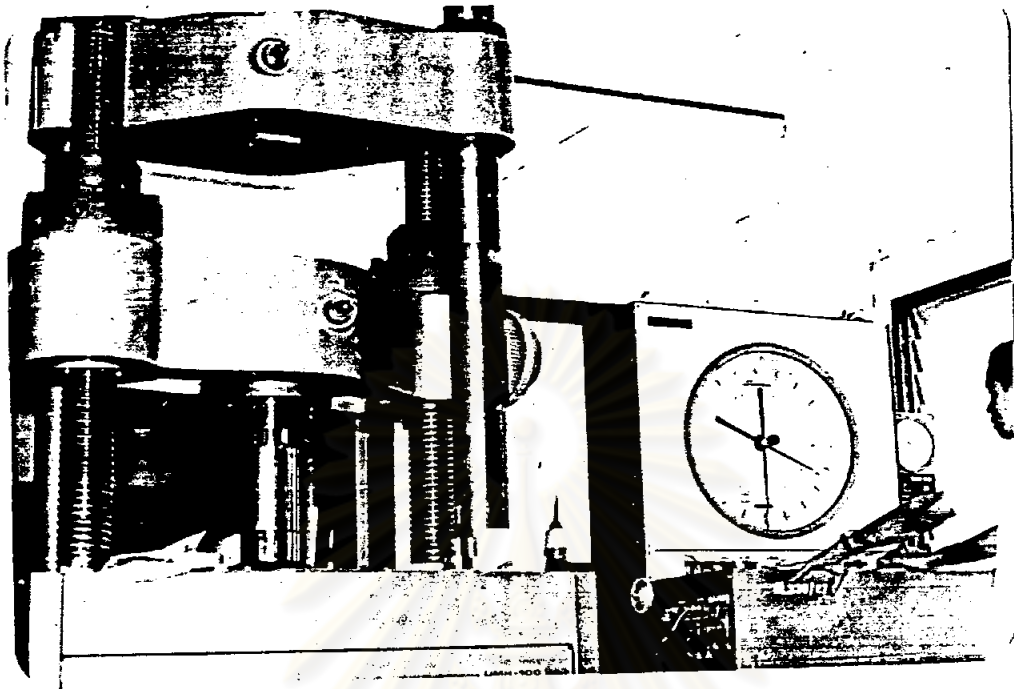
1. แกนส่งแรงกดคัน
2. ครอบงอกอักษ
3. หัวอักษ
4. ฝาครอบครอบงอกอักษ
5. ปลอกส่งแรงในการนำสเปคซิเมนออกจากครอบงอกอักษ



รูปที่ 3.19 แสดงเครื่องอัดแบบไฮดรอสแตติกส์ 100 ตัน



รูปที่ 3.20 แสดงการบรรจุผงเนื้อสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ลงในแบบอัด



รูปที่ 3.21 แสดงการอัดขึ้นรูปตัวโคอิเล็กทรอนิกส์ด้วยแรงอัด 50 ตัน



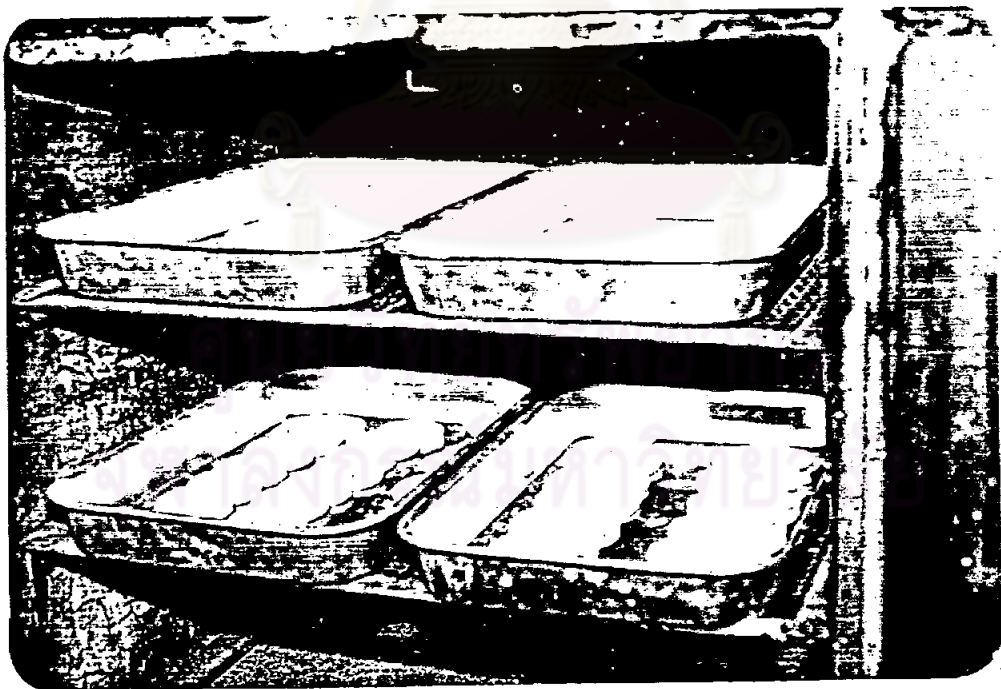
รูปที่ 3.22 แสดงการจัดวางตัวอย่างก่อนเข้าเตาอบ เพื่ออบแห้งก่อนการเผาจริง

3.6 การเผาโคอิเล็กทริกเซรามิกส์

การเผาชิ้นงานเป็นขั้นตอนการสุดท้าย ที่จะสร้างตัวโคอิเล็กทริกเซรามิกส์ ซึ่งกรรมวิธีนั้นจะเป็นการใช้ความร้อนในการทำให้เกรนต่าง ๆ ของเนื้อสารหลอมตัวเข้าด้วยกัน เป็นเนื้อเดียวกันตามรายละเอียดได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

3.6.1 การอบชิ้นงานก่อนการเผา

ก่อนการเผาชิ้นงานจริง จะต้องนำชิ้นงานที่มีรูปแบบต่าง ๆ ไปทำการอบไล่ความชื้นออก ให้เหลือในปริมาณที่เหมาะสม คือถ้าปริมาณความชื้นมากเกินไปในการเผา อาจมีการแตกร้าวได้ และในทางตรงกันข้าม หากปริมาณความชื้นในชิ้นหรือแผ่นตัวอย่างมีน้อยไปในการเตรียมหรือบรรจุชิ้นตัวอย่าง เพื่อการนำไปเผาอาจแตกร้าวก่อนการเผาจริง อุณหภูมิที่ทำการอบประมาณ $100 - 150^{\circ}\text{C}$ โดยอบนานประมาณ 3 - 5 ชั่วโมงในเตาอบ ดังรูป 3.23



รูปที่ 3.23 แสดงการบรรจุตัวอย่างเข้าไปภายในเตาอบ

3.6.2 การจัดเรียงชิ้นงานก่อนการเผา

ในการเผาชิ้นตัวอย่างให้ได้รับความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องจัดวางชิ้นงานในห้องเผาให้ถูกต้อง ทั้งนี้เพื่อเป็นการ

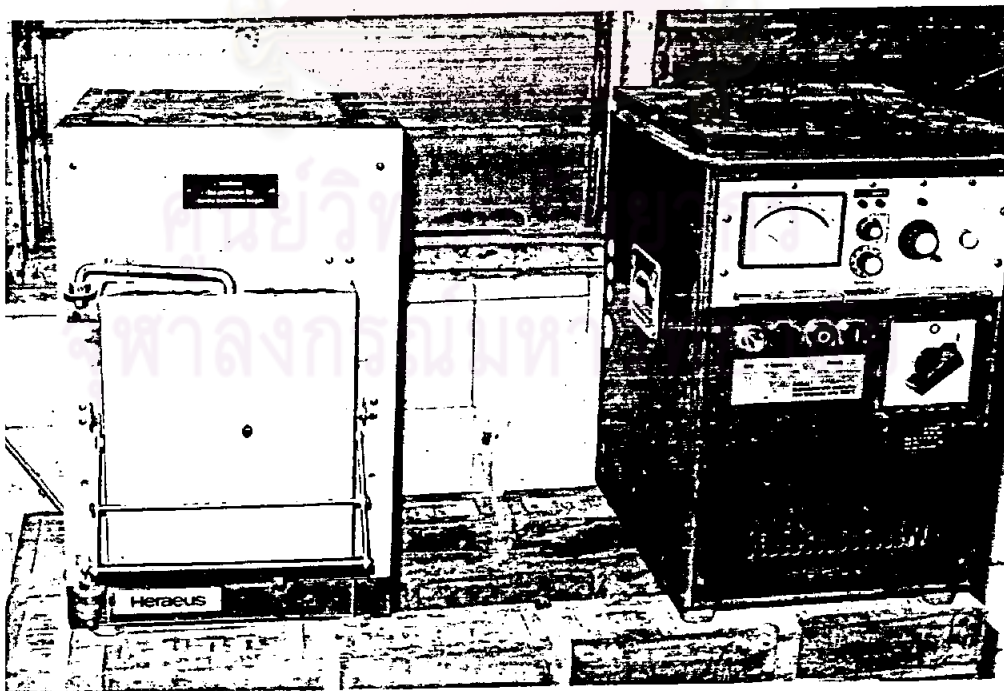
- ป้องกันการเสียสภาพรูปร่างไปจากเดิม เนื่องจากความร้อนจากการเผา
- ให้ชิ้นงานได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึง
- ป้องกันชิ้นงานทำอันตรายต่อชกลดความร้อน เนื่องจากการระเบิดหรือ

แตกกระจายไปของชิ้นงาน

การจัดเรียงชิ้นงานได้กำหนดการวางเรียงเป็นแถวเป็นแนว และกำหนดระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับชกลดความร้อน

3.6.3 การเผาชิ้นงาน

การเผาชิ้นงานในงานวิจัยนี้ใช้เตาเผาไฟฟ้า ซึ่งมีขีดความสามารถในการให้ความร้อน $1,600^{\circ}\text{C}$ สามารถทำการเผาได้ทั้งแบบธรรมดาทั่วไป หรือแบบเผาเร็วโดยใช้เตาเผาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิเผาโดยคน ดังรูป 3.24

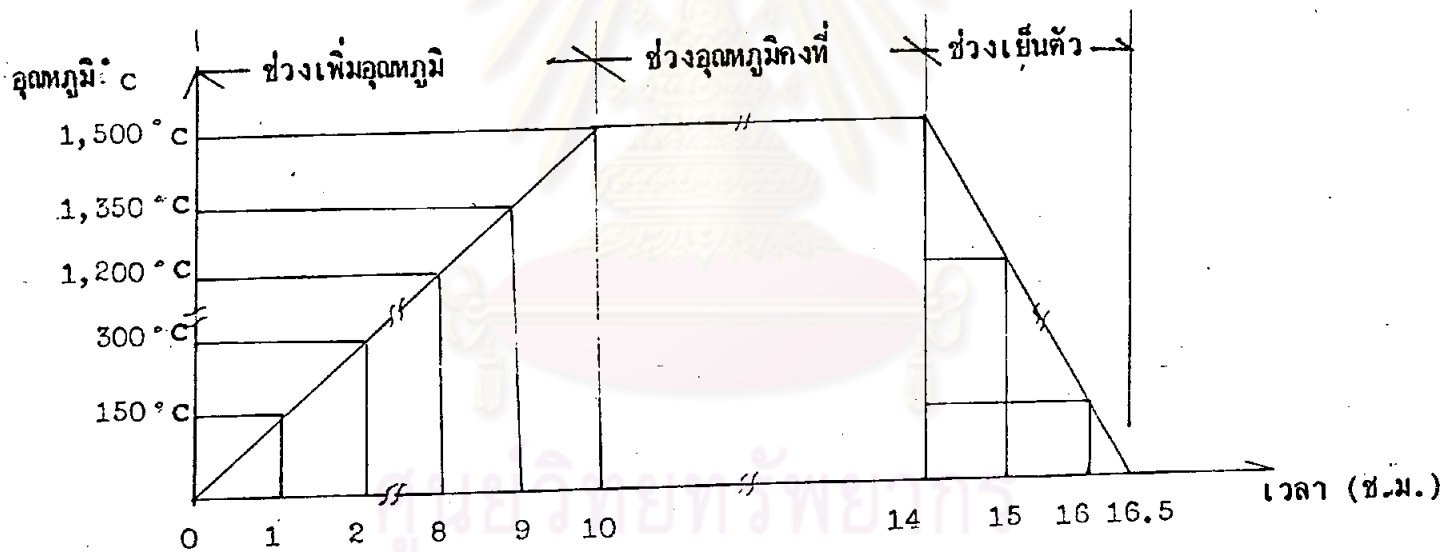


รูปที่ 3.24 แสดงให้เห็นถึงเตาเผาและตู้ควบคุมอุณหภูมิการเผา

การควบคุมอุณหภูมิในการเผาชิ้นงาน สำหรับงานวิจัยนี้ดังนี้

- อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ = $150^{\circ}\text{C} / \text{ชั่วโมง}$
- อุณหภูมิการเผาสูงสุด = $1,500^{\circ}\text{C}$
- ระยะเวลาการคงที่อุณหภูมิ = 3 - 4 ชั่วโมง
- อัตราการเย็นตัวลง = $-100^{\circ}\text{C} / 10 \text{ min}$

การควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเผา และช่วงเวลาการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ อาจแสดงเป็นไคอะแกรมของอุณหภูมิในเทอมของเวลาได้ ดังรูป 3.25



รูปที่ 3.25 ไคอะแกรมการควบคุมอุณหภูมิเผาโคอิเล็กทริกเซรามิกส์

- อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ = 150°C
- อุณหภูมิเผาสูงสุด = $1,500^{\circ}\text{C}$
- การคงที่อุณหภูมิ = $1,500^{\circ}\text{C}$

เพื่อศึกษาหาอุณหภูมิเผาที่เหมาะสมในการเผาตัวอย่างสเปกซิเมนโคอิเล็กตริก
ทั้งสองชนิด คือ แบริยมคิตาเนท และคิตาเนียมโคอิออกไซด์ จึงทำการเผาสารประกอบ
โคอิเล็กตริกที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 1,000, 1,200, 1,300, 1,350, 1,400 และ 1,500 °C
(เตาเผาสามารถเผาได้สูงสุด 1,500 °C) ซึ่งแต่ละอุณหภูมิจะมีช่วงอุณหภูมิตั้งที่เป็นเวลา
4 ชั่วโมงเท่ากัน โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเผาและอัตราการเป็นตัวแทนไปตามโคอะแกรม
ควบคุมอุณหภูมิในรูป 3.25



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย