

บทที่ 8

วิธีการวิจัย

การวิจัยประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญต่อไปนี้

- 1) การเตรียมสารเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก
- 2) การเตรียมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกรูปแบบแท่ง
- 3) การเตรียมวัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3
- 4) การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ

รายละเอียดของวิธีการศึกษาแต่ละขั้นตอนจะได้กล่าวต่อไป

8.1 วัสดุและอุปกรณ์

สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.1 สารเคมี

สารเคมี	บริษัท	ข้อมูลเฉพาะ
สารตะกั่วออกไซด์ (PbO)	BDH Laboratories (Germany)	Purity > 99.0 %
สารเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO ₂)	Fluka Chemika	Purity > 99.0 %
สารไททานเนียมออกไซด์ (TiO ₂)	Fluka Chemika	Purity > 99.0 %
สารสตรอนเชียมคาร์บอเนต (SrCO ₃)	BDH Laboratories (Germany)	Purity > 98.5 %
สารบิสมัทออกไซด์ (Bi ₂ O ₃)	BDH Laboratories (Germany)	Ignition loss < 1.0 %
ผงอัลูมินา (Al ₂ O ₃)	Beuhler (USA)	Particle size ~ 1 micron
สารอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin)	Beuhler (USA)	No. 20-8130-032
สารช่วยการแข็งตัว (Epoxy hardener)	Beuhler (USA)	No. 20-8132-008
สารโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)	Riedel de Haen	No. 151283
สารไพริลแอลกอฮอล์	BDH (UK)	99.5% min assay
สารเอทิลแอลกอฮอล์	Merck (Germany)	99.8% min assay

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

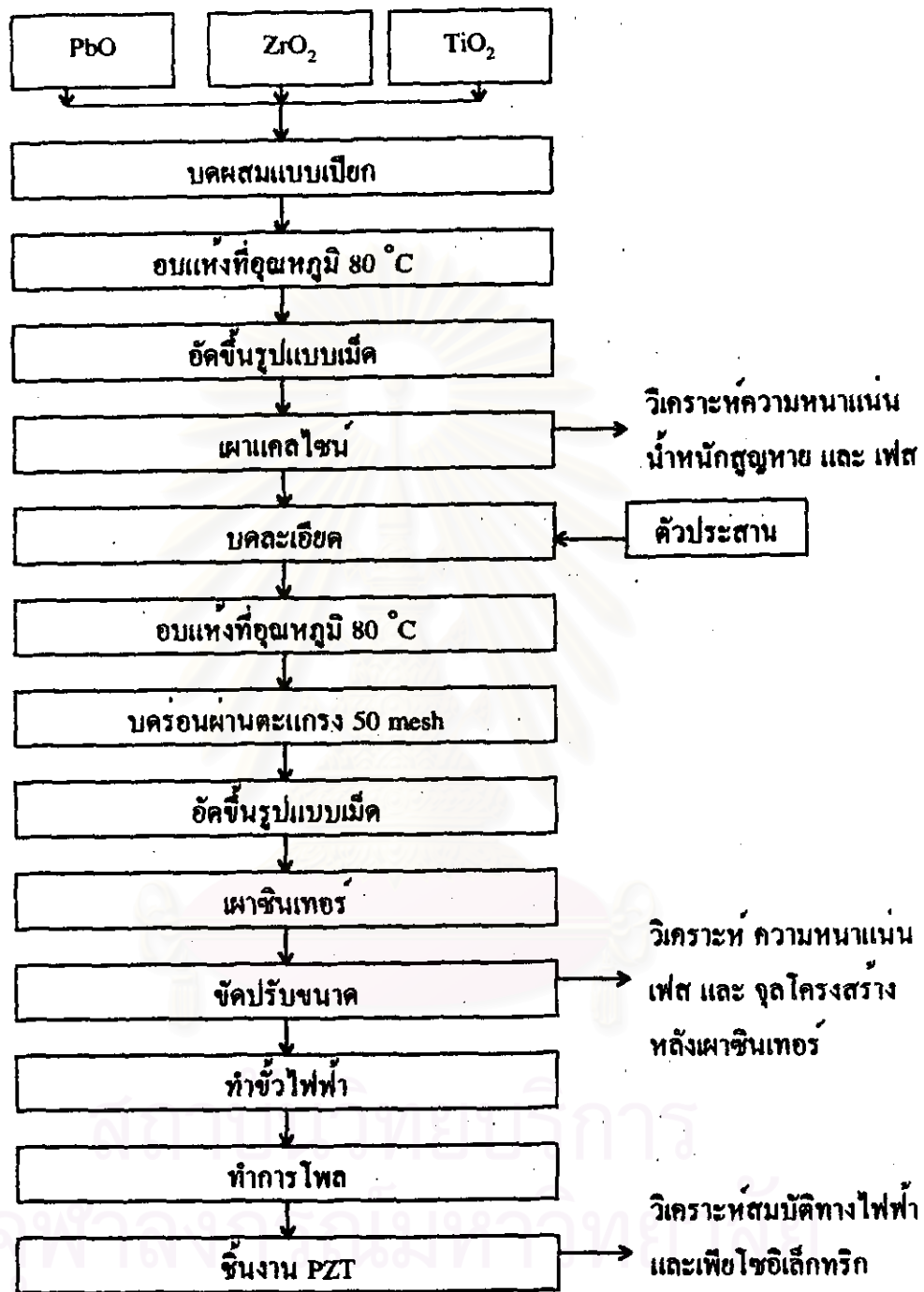
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

อุปกรณ์และเครื่องมือ	บริษัท	ข้อมูลเฉพาะ
เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง	Mettler instrument (Switzerland)	รุ่น Mettler AM100
เครื่องบดบอลมิล	Hitachi (Japan)	ความเร็ว 214 รอบต่อนาที
ตู้อบ	Tabai espec corperation	รุ่น Safety oven SPHH-100
เตาเผา	Naberterm	
เครื่องอัดไฮดรอลิก	T.M.C. Hydraulic press (Thailand)	แรงอัดสูงสุด 10 ตัน
เครื่องอัด CIP	Kobelco (Japan)	รุ่น Dr. CIP
เครื่องขัดหยาบ	Marumoto kocho kaisha (Japan)	
เครื่องขัดละเอียด	Marumoto kocho kaisha (Japan)	
แผ่นขัดซิลิกอนคาร์ไบด์ (ขัดหยาบ)	Struers	FEPa #300, #600, #800
แผ่นขัดซิลิกอนคาร์ไบด์ (ขัดละเอียด)	Buehler (USA)	P4000
เครื่องล้างอัลตราโซนิค	Decon ultasonics (England)	
เครื่องเคลือบทอง (Ion coater)	Eiko (Japan)	รุ่น Eiko IB-3
เครื่องดูดอากาศ (Vacuum discicator)	Buehler (USA)	
เครื่องตัดด้วยใบตัดเพชร	Berney (France)	รุ่น T39-NC
Centrifugal particle size analyzer	Shimadzu (Japan)	รุ่น SA-CP3
X-ray diffractometer (XRD)	Shimadzu (Japan)	รุ่น XD-610
Scanning electron microscope (SEM)	JEOL (Japan)	รุ่น JSM-T330A
อุปกรณ์การไหล	ชุดอุปกรณ์จัดทำโดยวท.	วางรแสดงในภาคผนวก ก.
d ₃₃ meter	Channel	รุ่น Berlincourt d ₃₃ meter
Impedance analyzer	Hewlett packard (USA)	รุ่น HP4192A

3.2 การเตรียมสารเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก

3.2.1 การเตรียมสารเลดเซอร์โคเนตไททานต (PZT)

สารเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ศึกษาวิจัยคือสารประกอบเลดเซอร์โคเนตไททานต (PZT) ที่มีสัดส่วนโมล Zr เท่ากับ 0.52 กระบวนการเตรียมแสดงดังรูปที่ 3.1 สาร PZT เตรียมจากสารตั้งต้นได้แก่ PbO จำนวน 69.2372 กรัม ZrO_2 จำนวน 19.8760 กรัม และ TiO_2 จำนวน 11.8969 กรัม ดังแสดงในตารางที่ 3.3 สารตั้งต้นที่ชั่งแล้วบรรจุลงในขวดบดโพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูง (HDPE) และเติม Propyl alcohol ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางการบดในสัดส่วน 100 มิลลิลิตรต่อสารที่บด 100 กรัม และบรรจุถูกบดเซอร์โคเนียประมาณ 2 ใน 3 ของปริมาตรของขวดบด นำขวดบดที่ปิดฝาให้สนิทไปวางบนเครื่องบดแบบบอลมิลล์ที่หมุนด้วยความเร็วประมาณ 214 รอบต่อนาที นาน 28 ชม. จนเป็นสารผสมเนื้อเดียว (Homogenous powder) จากนั้นกรองเอา Propyl alcohol ออก และนำเนื้อสารที่บดผสมเข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิ $80^{\circ}C$ จนน้ำหนักคงที่จึงบดกระจายด้วยโกรง (Pestle and mortar) อีกครั้งก่อนอัดขึ้นรูปแบบเม็ดโดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกอัดด้วยแรง $1/4$ ตัน เป็นเม็ดสารขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. น้ำหนักประมาณเม็ดละ 8 กรัม เม็ดสารถูกนำไปเผาเคลือบในเตาเผาอุณหภูมินำบริสุทธิ์สูงมากกว่า 99.9% ที่ปิดผนึกฝาด้วยเผาด้วย ZrO_2 paste เพื่อป้องกันการระเหยของตะกั่ว (Lead vapor) ออกสู่บรรยากาศ นำด้วยเผาที่บรรจุเม็ดสารเข้าเตาเผาและเผาเคลือบเม็ดสารดังแสดงรูปที่ 3.2 โดยเพิ่มอุณหภูมิเตาเผาจากอุณหภูมิห้องด้วยอัตราการให้ความร้อน $150^{\circ}C/ชม.$ ไปถึงอุณหภูมิเคลือบที่ 650, 700, 800 หรือ $900^{\circ}C$ และคงไว้ที่อุณหภูมิเคลือบนาน 2 ชม. เม็ดสารหลังเผาเคลือบถูกตรวจสอบเฟส (Phase analysis) และน้ำหนักสูญหายหลังการเผา (Weight loss) ด้วยวิธีการในหัวข้อที่ 3.5.3 และ 3.5.5



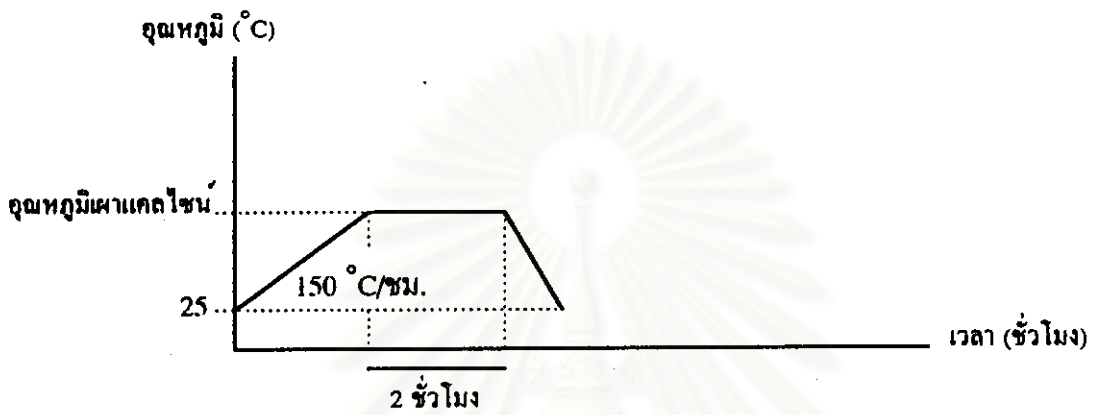
รูปที่ 8.1 การเตรียมสารประกอบ $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$

ตารางที่ 8.3 สูตรของสารประกอบเซรามิกและปริมาณสารตั้งต้นที่ต้องใช้ในการเตรียมสารประกอบ

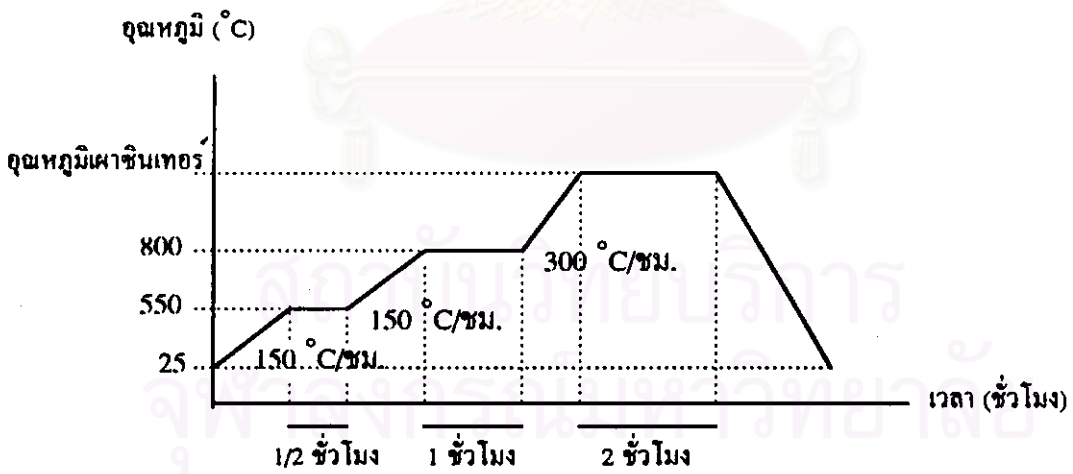
สูตรของสารประกอบ	น้ำหนักต่อ 1 โมล (กรัม)	จำนวนโมลที่เตรียม	PbO (กรัม)	SrCO ₃ (กรัม)	ZrO ₂ (กรัม)	TiO ₂ (กรัม)	น้ำหนักรวม (กรัม)
Pb(Zr _{0.52} , Ti _{0.48})O ₃ , PZT	325.9730	0.3071	69.2372	0.0000	19.8760	11.8969	101.0101
(Pb _{0.98} , Sr _{0.02})(Zr _{0.52} , Ti _{0.48})O ₃ , PSZT2	323.5814	0.3094	68.3545	0.9274	20.0231	11.9849	101.2898
(Pb _{0.96} , Sr _{0.04})(Zr _{0.52} , Ti _{0.48})O ₃ , PSZT4	321.1898	0.3117	67.4586	1.8686	20.1724	12.0742	101.5738
(Pb _{0.94} , Sr _{0.06})(Zr _{0.52} , Ti _{0.48})O ₃ , PSZT6	318.7982	0.3140	66.5493	2.8239	20.3238	12.1649	101.8619
(Pb _{0.92} , Sr _{0.08})(Zr _{0.52} , Ti _{0.48})O ₃ , PSZT8	316.4066	0.3164	65.6262	3.7937	20.4776	12.2570	102.1545
(Pb _{0.90} , Sr _{0.10})(Zr _{0.52} , Ti _{0.48})O ₃ , PSZT10	314.0150	0.3188	64.6890	4.7782	20.6338	12.3504	102.4515

สารประกอบ $Pb(Zr_{0.52}, Ti_{0.48})O_3$ (PZT) ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนได้สารประกอบเฟสเดี่ยวที่สมบูรณ์ (Single phase) ถูกบดด้วยโกร่งและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 (รูเปิดขนาด 297 ไมครอน) แบ่งสารส่วนหนึ่งสำหรับร่อนพื้นในขั้นตอนการเผาซินเทอร์ และอีกส่วนถูกนำไปบดละเอียดขนาด 28 ชม. โดยเติมสารละลายตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ลงขบคในชั่วโมงสุดท้ายของการบด สารละลายตัวประสานเตรียมจากการละลายสาร PVA ในอัตราส่วน 0.01 กรัมต่อน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร จำนวนตัวประสานที่ใช้คิดเป็นอัตราส่วนสาร PVA ต่อสาร PZT เท่ากับ 0.01 : 1 โดยน้ำหนัก สารที่ผ่านการบดผสมครบ 28 ชม.ถูกนำไปกรองของเหลวออกและอบในตู้อบจนมีน้ำหนักคงที่ บดกระจายสารด้วยโกร่งและร่อนสารผ่านตะแกรงเบอร์ 50 นำสารไปอัดขึ้นรูปเม็ดโดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกอัดด้วยแรง 1/4 ตัน เป็นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. น้ำหนักเม็ดละ 4 กรัม บรรจุเม็ดสารลงในถุงยางและนำไปอัดเพิ่มความหนาแน่นโดยใช้เครื่องอัด CIP (Cold Isostatic Pressing) ด้วยแรง 2000 kgf/cm^2 อบเม็ดสารในตู้อบที่อุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อลดความชื้น แล้วเผาซินเทอร์เม็ดสารในถ้วยเผาอุณหภูมิที่รองพื้นด้านล่างด้วยผงของสารประกอบ PZT ที่แยกไว้เพื่อควบคุมความคืบหน้าของตะกั่วและช่วยลดการสูญเสียของตะกั่ว (Lead loss) จากเม็ดสาร ปิดผนึกฝาถ้วยเผาด้วย ZrO_2 paste และทำการเผาค้างแสดงรูปที่ 3.3 โดยเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องด้วยอัตราการให้ความร้อน $150\text{ }^{\circ}\text{C/ชม.}$ ไปถึงอุณหภูมิ $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ และคงไว้นาน 1/2 ชม. เพื่อเผาไล่สารอินทรีย์ออกจากเม็ดสาร เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราเต็มไปถึงอุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ และคงไว้นาน 1 ชม. จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อน $300\text{ }^{\circ}\text{C/ชม.}$ ไปถึงอุณหภูมิสูงสุดของการเผาซินเทอร์ที่ 1120, 1200 หรือ $1280\text{ }^{\circ}\text{C}$ และคงไว้นาน 2 ชม. เม็ดสารที่ผ่านการเผาซินเทอร์ทุกเม็ด (อย่างน้อย 5 เม็ด) ถูกวัดขนาดและชั่งน้ำหนักเพื่อวิเคราะห์น้ำหนักสูญหายและการเปลี่ยนแปลงขนาดหลังเผาซินเทอร์ด้วยวิธีการในหัวข้อที่ 3.5.5

เม็ดสารถูกจัดปรับขนาดและผิวหน้าด้วยเครื่องขัดแบบกระดาษขัดเบอร์ 300, 600 และ 800 ตามลำดับ และขัดละเอียดโดยใช้ผงขัดอุณหภูมิขนาด 1.0 ไมครอน เม็ดสารหลังการขัดถูกนำไปวิเคราะห์เฟส ความหนาแน่น และตรวจสอบจุดโครงสร้าง ด้วยวิธีการในหัวข้อ 3.5.2, 3.5.3 และ 3.5.4 ตามลำดับ เม็ดสารสำหรับการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริกถูกจัดจนเหลือความหนาประมาณ 0.85 มม. (อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของเม็ดสารมากกว่า 10) และทำอิเล็กโทรด



รูปที่ 3.2 แผนภูมิอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ (Calcination profile)



รูปที่ 3.3 แผนภูมิอุณหภูมิการเผาซินเทอร์ (Sintering profile)

โดยการทาสีที่ทำจากโลหะเงิน (Silver paint) บนผิวหน้าของเม็คสารทั้งสองด้าน แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C นาน 2 ชม. เพื่อไล่สารอินทรีย์และเหลือชั้นเงินบางๆ เม็คสารที่ทำอิเล็กโทรดแล้วถูกนำมาทำการโพล ในงานวิจัยนี้จึงเลือกเงื่อนไขการโพลโดยใช้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1.5 kV/mm ไปยังชิ้นงานตัวอย่างที่แช่อยู่ในอ่างน้ำมันซิลิโคนที่อุณหภูมิ 120 °C นาน 10 นาที เนื่องจากท. ได้ศึกษาการโพลสาร PZT ที่สนามไฟฟ้าและเวลาต่างกันโดยรักษาอุณหภูมิการโพลคงที่ 120 °C พบว่าที่สนามไฟฟ้า 1.5 kV/mm นาน 10 นาที จะให้ผลสมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริกดีที่สุด⁽⁴⁰⁾ เม็คสารที่ผ่านการโพลถูกทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 1 วัน จึงทำการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริกด้วยวิธีการในหัวข้อที่ 3.5.6

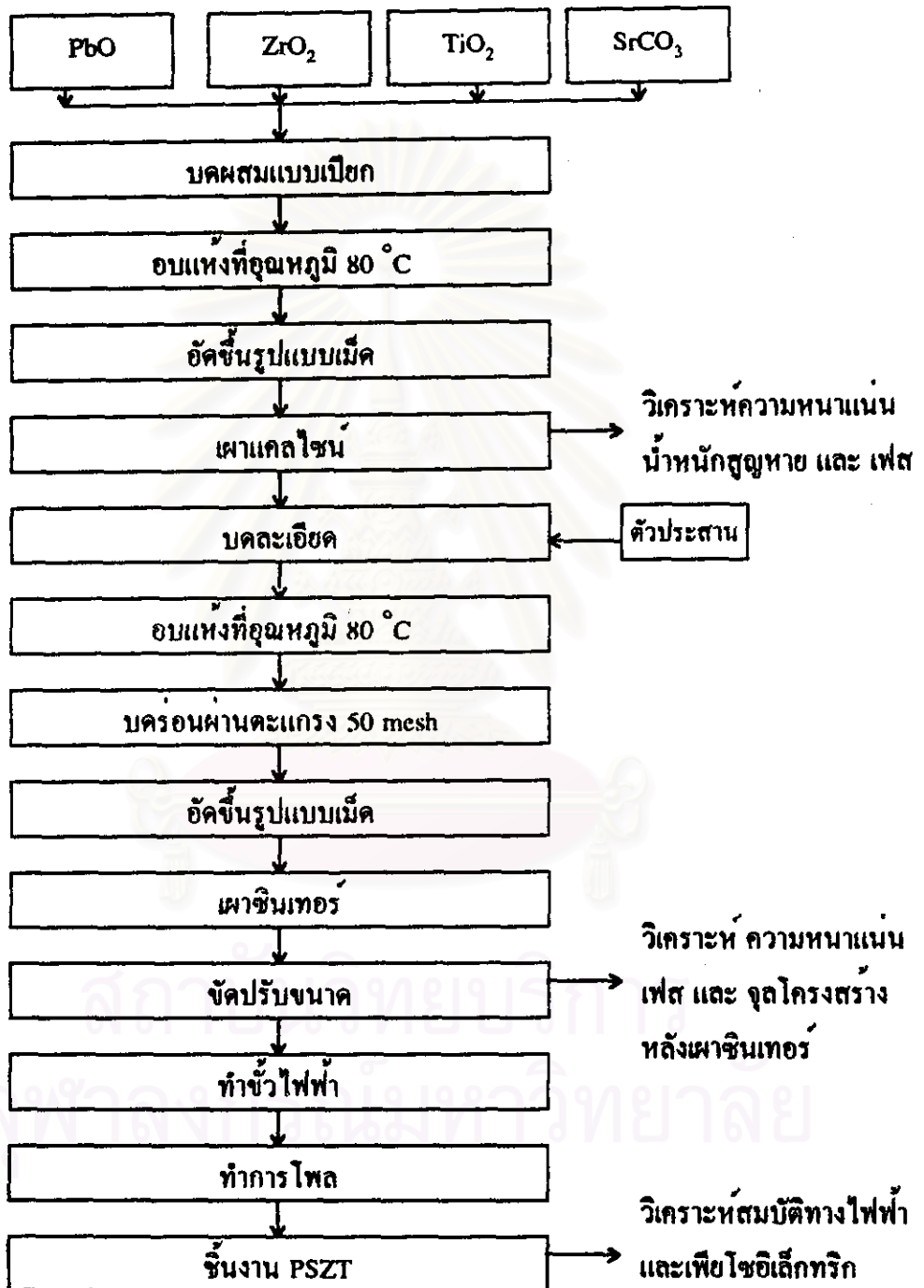


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.2 การเตรียมสาร PZT ที่มีตัวเติม Sr และ Bi

สารประกอบ PZT ที่มีตัวเติมสตรอนเชียมที่จัดอยู่ในกลุ่มสารประเภท isovalent substitution ถูกเตรียมด้วยวิธีการดังแสดงรูปที่ 3.4 สารประกอบ PZT ที่มีตัวเติม Sr เขียนในรูปสูตรเป็น $(\text{Pb}_{1-x}\text{Sr}_x)(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$, PSZT(X) ค่า x ห้อยท้ายอยู่ที่ Sr ในสูตรของสารประกอบคือ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 และ 0.10 แสดงปริมาณการเติมสตรอนเชียมคิดเป็นร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยอะตอม ตามลำดับ ตัวอย่างการเตรียมสารประกอบสูตร $(\text{Pb}_{0.98}\text{Sr}_{0.02})(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ สารตั้งต้นได้แก่ PbO จำนวน 68.3545 กรัม SrCO_3 จำนวน 0.9274 กรัม ZrO_2 จำนวน 20.0231 กรัม และ TiO_2 จำนวน 11.9849 กรัม ดังแสดงตารางที่ 3.3 ถูกชั่งและบรรจุลงในขวด HDPE แล้วบดผสมจนได้สารที่มีเนื้อเดียวกัน แยกของเหลวตัวกลางออกและนำสารไปอบแห้งก่อนเผาแคลไซน์เพื่อให้ได้เฟสเดี่ยวของสาร PSZT จากนั้นบดผสมสารกับตัวประสานและอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดแล้วเผาซินเทอร์ด้วยวิธีการเตรียมเหมือนกับการเตรียมสาร PZT ที่ได้กล่าวในตอนต้น การเผาแคลไซน์และการเผาซินเทอร์มีลักษณะเหมือนกับการเตรียมสาร PZT แต่อุณหภูมิเผาแคลไซน์และอุณหภูมิเผาซินเทอร์คือ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $1280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ จากนั้นจึงนำเม็ดสาร ไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก สำหรับสารประกอบ PSZT สูตรอื่นๆเตรียมโดยการชั่งสารตั้งต้นดังแสดงตารางที่ 3.3

บิสมีทออกไซด์ (Bi_2O_3) เป็นสารที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ $820\text{--}860\text{ }^{\circ}\text{C}$ การเติม Bi_2O_3 ในสารประกอบ $(\text{Pb}_{0.94}\text{Sr}_{0.06})(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่ผ่านการแคลไซน์ช่วยให้เกิด liquid phase ในขั้นการเผาซินเทอร์ การศึกษาที่สารประกอบ $(\text{Pb}_{0.94}\text{Sr}_{0.06})(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ หรือ PSZT(6) ถูกเตรียมด้วยวิธีการดังกล่าวไว้ในขั้นตอนการเตรียมสาร PSZT จนถึงขั้นตอนการเผาแคลไซน์ สาร PSZT(6) หลังเผาแคลไซน์ถูกนำมาบดละเอียดพร้อมกับสาร Bi_2O_3 ที่เติมในระดับ 1.5, 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเรียกว่าสูตร PSZT(6)/B1, PSZT(6)/B2 ตามลำดับ ดังแสดงตารางที่ 3.4 สารละลายตัวประสาน PVA ถูกเติมลงในขวดในชั่วโมงที่ 27 ของการบดและบดสารจนเวลาครบ 28 ชม. กรองเอาตัวกลางในการบดออกจากสารและนำสารเข้าอบในตูอบจนแห้ง บดกระจายสารด้วยโกร่งและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 นำสารไปขึ้นรูปแบบเม็ดโดยใช้เครื่องอัดไฮโดรลิกและอัดเพิ่มความหนาแน่นเม็ดสารด้วยเครื่อง CIP ด้วยแรง 2000 kgf/cm^2 จากนั้นเผาซินเทอร์เม็ดสารในถ้ำเผาด้วยลักษณะการเผาดังแสดงรูปที่ 3.3 โดยอุณหภูมิสูงสุดของการเผาซินเทอร์คือ $960, 1040, 1120$ หรือ $1280\text{ }^{\circ}\text{C}$ เม็ดสารที่ผ่านการเผาซินเทอร์ถูกวิเคราะห์น้ำหนักสูญหาย การเปลี่ยนแปลงขนาด และนำไปขัดเพื่อวิเคราะห์ความหนาแน่น เฟสจุลโครงสร้าง สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 8.4 การเตรียมสารประกอบ $(Pb_{1-x} Sr_x)(Zr_{0.52} Ti_{0.48})O_8$ หรือ PSZT(X)

ตารางที่ 3.4 สูตร $(\text{Pb}_{0.94}\text{Sr}_{0.06})(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่มีตัวเติมบิสมาทออกไซด์

สูตร	PSZT(6) (กรัม)	Bi_2O_3 (กรัม)	น้ำหนักรวม (กรัม)
$(\text{Pb}_{0.94}\text{Sr}_{0.06})(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$, PSZT(6)	65.0000	0.0000	65.0000
$(\text{Pb}_{0.94}\text{Sr}_{0.06})(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + 1.5\% \text{Bi}_2\text{O}_3$, PSZT(6)/B1	64.0250	0.9750	65.0000
$(\text{Pb}_{0.94}\text{Sr}_{0.06})(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3 + 3.0\% \text{Bi}_2\text{O}_3$, PSZT(6)/B2	63.0500	1.9500	65.0000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

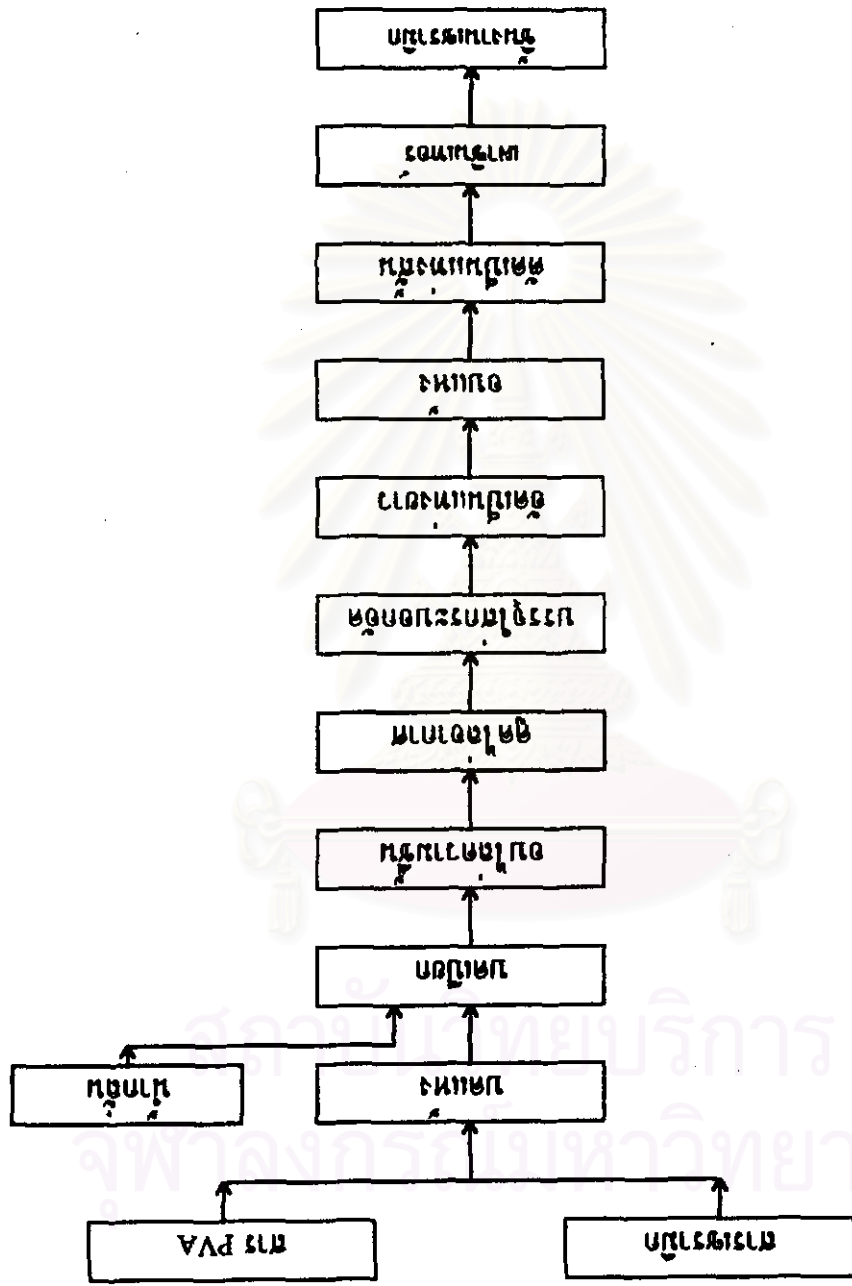
3.3 การเตรียมเซรามิกพีโซอิเล็กทริกประเภท

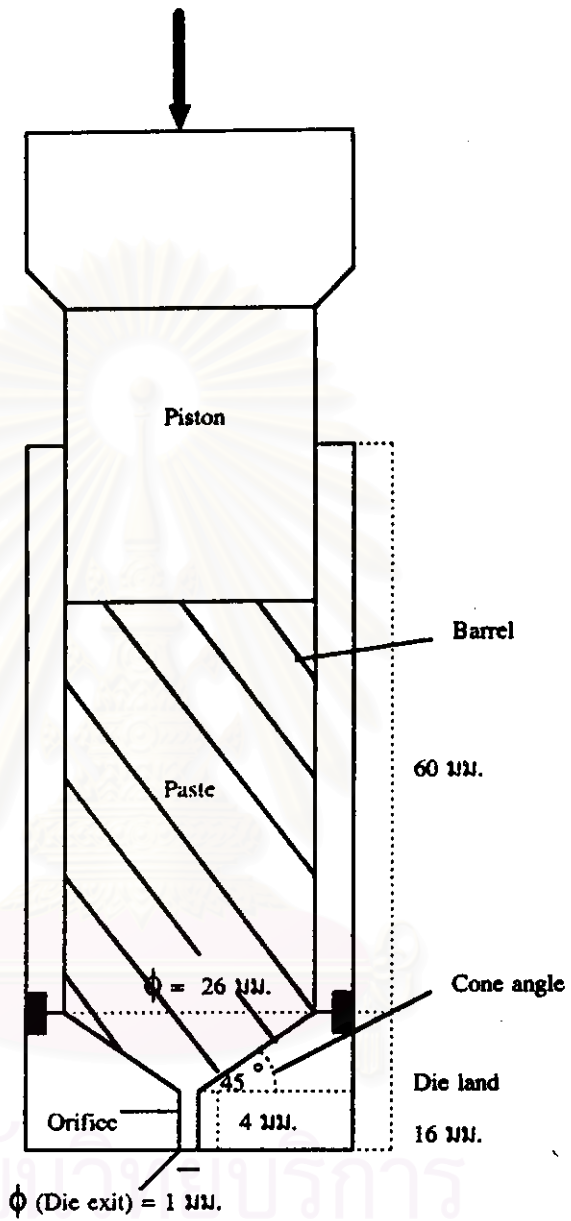
สารเซรามิกพีโซอิเล็กทริกสูตร $(\text{Pb}_{0.94}, \text{Sr}_{0.06})(\text{Zr}_{0.52}, \text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่เติม Bi_2O_3 ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก (หรือ PSZT(6)/B1) เป็นสารที่ใช้เตรียมเซรามิกประเภทนี้เพื่อใช้เป็น ส่วนประกอบของการเตรียมวัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 กระบวนการเตรียมแท่งเซรามิกแสดงดัง รูปที่ 3.5 เริ่มจากการบดผสมสาร PSZT(6)/B1 จำนวน 58.20 กรัม กับสาร PVA จำนวน 1.80 กรัม แบบแห้งนาน 1 ชม. ในขวด HDPE ที่มีลูกบดเซอร์โคเนียอยู่ 2 ใน 3 ของปริมาตร ของขวดบด เติมน้ำกลั่นจำนวน 60.00 กรัมลงไปในขวดและบดต่ออีก 2 ชม. ส่วนของสาร ผสมถูกแยกออกและนำมาซึ่งน้ำหนักก่อนอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70°C ทั้งนี้สารผสมถูกกวนเป็น ระยะเวลาเพื่อป้องกันการเกิดฟิล์มที่ผิวด้านบนของสารและเพื่อกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอ สาร ผสมถูกตรวจสอบความชื้นเป็นระยะ เมื่อความชื้นของสารผสมอยู่ในช่วงร้อยละ 12-16 (ซึ่งเป็น ช่วงความชื้นที่สามารถทำการอัดสารให้เป็นแท่งยาวได้) จึงนำสารผสมออกจากตู้อบและอัดขึ้นรูป แท่ง

การขึ้นรูปแท่งอาศัยการอัดสารผ่านหัวอัด (Extrusion process) อุปกรณ์การอัด เป็นแบบ piston extruder แสดงดังรูปที่ 3.6 ประกอบด้วย กระบอกอัด (Barrel) ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 26 มม. ความยาวของ die land เท่ากับ 16 มม. ความยาว ของ orifice เท่ากับ 4 มม. die exit เป็นรูเปิดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 มม. และมุม กรวย (Cone angle) เท่ากับ 45° การขึ้นรูปแท่งทำโดยบรรจุสารเซรามิกที่มีความชื้นในช่วงร้อยละ 12-16 เข้ากระบอกอัดและอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกดังแสดงรูปที่ 3.7 ค่อยๆเพิ่มแรงอัดให้สาร ผ่านรูเปิดออกมาในลักษณะแท่งยาวแล้วรองรับด้วยกระดาษ A4 (ความยาว 29.60 ซม.) ดังแสดง รูปที่ 3.8 อัตราการไหลของแท่งเซรามิกประมาณ 2 เซนติเมตรต่อ 1 วินาที จากนั้นแท่ง เซรามิกถูกอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C นาน 12 ชม. ในตู้อบ นำแท่งเซรามิกออกมาตัดเป็น แท่งยาวประมาณ 2.5 ซม. แท่งเซรามิกที่มีความโค้งหรือผิวภายนอกสามารถสังเกต เห็นรูปพูนเปิดขนาดใหญ่ถูกคัดออก แท่งเซรามิกที่เหลือถูกนำไปวางใน alumina boat ที่ รองพื้นด้วยสาร PSZT(6) และเผาขึ้นเตอรด้วยลักษณะการเผาดังแสดงรูปที่ 3.3 โดยคงไว้ที่ อุณหภูมิเผาขึ้นเตอรที่ 1040°C นาน 2 ชม.

แท่งเซรามิกที่ถูกเตรียมมีความแข็งแรงสามารถจับถือได้ง่าย (Easily handled) ส่วนหนึ่งของแท่งเซรามิกถูกนำไปวิเคราะห์ความหนาแน่น และ จุดโครงสร้าง ส่วนที่เหลือใช้ เตรียมวัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 ต่อไป

การดำเนินงานตามแผน ๑๖ ปี

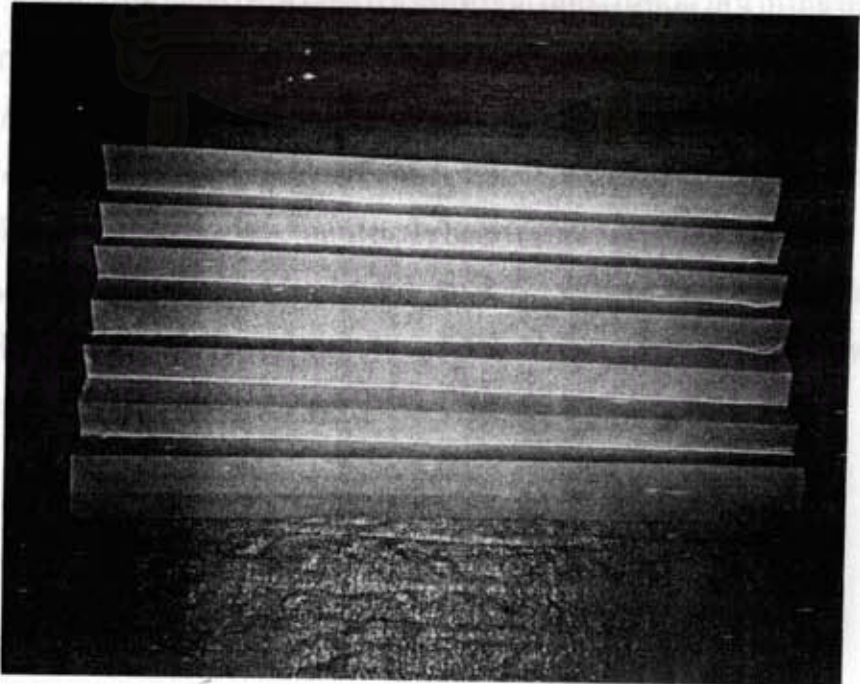




รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ piston extruder สำหรับอัดเซรามิกรูปแท่ง



รูปที่ 3.7 การอัดและการรองรับแท่งเซรามิก



รูปที่ 3.8 แท่งเซรามิกก่อนเผาขึ้นทอร์

8.4 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3

วัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 ประกอบด้วยแท่งเซรามิกวางตัวในแนวตั้งฝังอยู่ในพอลิเมอร์ พอลิเมอร์เตรียมจากการชั่งอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) และสารช่วยการแข็งตัว (Epoxy hardener) ในสัดส่วน 6 ต่อ 1 ตามน้ำหนัก แล้วคนในถ้วยกระดาษจนผสมเข้ากัน

เตรียมวัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 ให้มีสัดส่วนปริมาตรเซรามิกเท่ากับร้อยละ 10, 20, 40 และ 45 โดยจัดเรียงแท่งเซรามิกที่ได้จากการเตรียมในหัวข้อที่ 3.3 ตามจำนวนที่คำนวณไว้ในหลอดแก้วปลายเปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 11.8 มม. ปลายหลอดแก้วด้านหนึ่งวางบนก้นดินน้ำมัน จากนั้นนำหลอดแก้วที่เรียงแท่งเซรามิกและถ้วยกระดาษที่บรรจุพอลิเมอร์เข้าไปในเครื่องสุญญากาศ (Vacuum desiccator) ที่ความดันภายในเท่ากับ 26 psi จนไม่มีฟองอากาศ เทพอลิเมอร์ลงในขวดแก้วจนท่วมแท่งเซรามิกและเก็บไว้ใน vacuum desiccator ที่ความดันเคมิกานาน 12 ชม. จนพอลิเมอร์แข็งตัว ทำ curing ในตู้อบที่อุณหภูมิ 55 °C นาน 3 ชม. ตัดชิ้นงานด้วยใบตัดเพชรที่มีแนวตัดตั้งฉากกับแท่งเซรามิกให้ความหนาของแต่ละชิ้นประมาณ 1.2 มม. แกะเอาแก้วซึ่งติดอยู่ออก

วัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 ถูกขัดปรับขนาดและผิวหน้าจนเหลือความหนา 0.85 มม. หรืออัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนามากกว่า 10 วัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 ถูกนำไปทำอิเล็กโทรดโดยการทาสีที่ทำจากโลหะเงินบนผิวหน้าทั้งสองด้านก่อนนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 °C จากนั้นทำการโพลขึ้นงานโดยการจ่ายสนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1.0 kV/mm ต่อเม็คสาร (หากใช้สนามไฟฟ้าสูงกว่านี้พบว่าชิ้นงานจะเกิด breakdown ภายใน 1 นาทีหลังเริ่มให้สนามไฟฟ้า) ในน้ำมันซิลิโคนที่มีอุณหภูมิ 80 °C นาน 10 นาที เงื่อนไขการโพลที่อุณหภูมิ 80 °C ถูกนำมาใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 ของ Tontrakoon⁽²⁷⁾ ทั้งนี้เพราะว่าอุณหภูมิสูงกว่า 80 °C ทำให้พอลิเมอร์อ่อนและเกิด breakdown ได้ง่าย ชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการโพลทิ้งไว้ 1 วันก่อนการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก

8.5 การวิเคราะห์และการตรวจวัดสมบัติของวัสดุ

3.5.1 การกระจายขนาดอนุภาค

การกระจายขนาดอนุภาคของสารถูกวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Centrifugal particle size analyzer (SA-CP3) เริ่มจากการกระจายสารตัวอย่างประมาณ 0.3 กรัม ในสารละลาย sodium hexametaphosphate ทำหน้าที่เป็น deflocculant ที่ความเข้มข้น 2 % โดยน้ำหนัก ทั้งนี้กวนสารนานอย่างน้อย 10 นาทีจนสารกระจายตัวสม่ำเสมอ ใช้ pipette ดูดสุ่มสารตัวอย่างบรรจุเต็มเซลล์ แล้ววางเซลล์ในเครื่องวิเคราะห์ซึ่งอาศัยหลักการตกตะกอนทั้งโดยแรงโน้มถ่วงและแรงหนีศูนย์กลาง ความเข้มข้นของอนุภาคที่ตำแหน่งคงที่ในเวลาต่างๆถูกวัดด้วยวิธีดูดซับแสงที่มีความเข้มสูง เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ทำการประมวลผลการกระจายขนาดอนุภาค การคำนวณอาศัย Stoke's law ตามสมการ

1) Gravitational sedimentation :

$$\left(\frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_p} \right) g - \frac{18\eta}{\rho_p D^2} \cdot \frac{L}{\theta} = 0$$

2) Centrifugal sedimentation :

Constant speed rotation

$$\left(\frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_p} \right) R\omega^2 - \frac{18\eta}{\rho_p D^2} \cdot \frac{dR}{d\theta} = 0$$

Accelerated rotation

$$\frac{d^2 R}{d\theta^2} + \frac{18\eta}{\rho_p D^2} \cdot \frac{dR}{d\theta} - \left(\frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_p} \right) R\beta^2 \theta^2 = 0$$

โดยที่ ρ_p	คือ ความหนาแน่นของสาร (g/cm^3)
ρ_d	คือ ความหนาแน่นของ dispersant (g/cm^3)
D	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
L	คือ ระยะทางจากผิวสูงสุดของการตกตะกอนถึงรังสีตรวจสอบ
R	คือ ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของการหมุนถึงอนุภาค
g	คือ ความโน้มถ่วงของโลก (10 m/s^2)
ω	คือ ความถี่เชิงมุม
η	คือ ความหนืดของ dispersant
θ	คือ เวลาที่อนุภาคใช้ตกหรือยกไปถึงระดับคงที่
β	คือ ความเร่งเชิงมุม

3.5.2 การวิเคราะห์เฟส

เฟสของสารที่อุณหภูมิห้องถูกวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer (XD-610) สำหรับสารตัวอย่างแบบผงอนุภาคจะถูกอัดจนแน่นเต็มช่องแผ่นอลูมิเนียมรองรับตัวอย่าง (Aluminium holder) ส่วนเม็ดสารตัวอย่างจะถูกติดในช่องแผ่นอลูมิเนียมรองรับตัวอย่าง โดยใช้คีนน้ำมันช่วยพยุงและผิวหน้าของเม็ดสารควรเรียบขนานกับแผ่นอลูมิเนียม การวิเคราะห์เฟสใช้ Cu-K α radiation ที่ค่า $\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$ มุม $2\theta = 20 - 60^\circ$ และเดือนมุมวิเคราะห์ด้วยอัตรา 2 องศาต่อนาที ผลการวิเคราะห์แสดงค่า d, I และ 2θ พร้อม X-ray diffraction pattern นำข้อมูลที่ได้ไปทำการเปรียบเทียบกับการคำนวณมาตรฐานของสารตั้งต้นและสาร PZT ดังแสดงในภาคผนวก ข.

3.5.3 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของผงอนุภาคและแท่งเซรามิกถูกวิเคราะห์โดยอาศัยหลักของอาร์คิมิดีส วิธีการนี้ชั่ง pycnometer ความจุ 100 มล. พร้อมฝาปิดถูกชั่งน้ำหนักเป็น B จากนั้นบรรจุสารที่ต้องการวิเคราะห์อย่างน้อย 5 กรัมลงในขวดแล้วชั่งน้ำหนักเป็น P ค่อยๆเทน้ำกลั่นลงในขวดที่มีสารอยู่อย่างช้าๆประมาณ 2 ใน 3 ของปริมาตรขวด นำขวดเข้าเครื่องดูดอากาศประมาณ 5-10 นาที เพื่อลดอากาศที่แทรกอยู่ตามรูพรุนและเพื่อให้อนุภาคขนาดเล็กตกตะกอนลงสู่ด้านล่างขวด เติมน้ำกลั่นลงในขวดซ้ำจนน้ำเต็มขวด ปิดฝาขวดแล้วเช็ดน้ำรอบขวดออกให้แห้งชั่งน้ำหนักรวมของขวดที่บรรจุสารและน้ำจนเต็มเป็น T ทำความสะอาดขวด pycnometer และอบจนแห้งใน desiccator จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงในขวดเปล่าอีกครั้งจนเต็ม ปิดฝาและเช็ดรอบขวดให้แห้งจึงนำไปชั่งและบันทึกค่าเป็น W คำนวณความหนาแน่นของผงอนุภาคโดยใช้สมการ

$$\rho_c = \frac{(P - B)\rho_w}{(W - B) - (T - P)}$$

โดยที่ ρ_c	คือ ความหนาแน่นของผงอนุภาคหรือแท่งเซรามิก (g/cm^3)
ρ_w	คือ ความหนาแน่นของน้ำที่ 26°C (0.9968 g/cm^3)
B	คือ น้ำหนักของขวด pycnometer พร้อมฝาปิด (g)
P	คือ น้ำหนักของขวดซึ่งบรรจุสารพร้อมฝาปิด (g)
T	คือ น้ำหนักของขวดซึ่งบรรจุสารและน้ำกลั่นพร้อมฝาปิด (g)
W	คือ น้ำหนักของขวดซึ่งบรรจุน้ำกลั่นพร้อมฝาปิด (g)

สำหรับความหนาแน่นของเม็ดสารหลังเผาซินเทอร์ภูวิเคราะห์โดยนำเม็ดสารที่ผ่านการจัดปรับขนาดและผิวหน้าเข้าสู่อบจนแห้ง เม็ดสารถูกปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งน้ำหนักแห้งบนเครื่องชั่งที่มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 และบันทึกค่าเป็น D จากนั้นนำเม็ดสารไปต้มในน้ำเดือดนาน 2 ชม. แล้วเซวไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 24 ชม. จนแน่ใจว่าเม็ดสารอิ่มตัวก่อนนำไปชั่งน้ำหนักอิมด้ว (S) และน้ำหนักเม็ดสารอิมด้วแขวนลอย (I) ค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) ระดับรูพรุน (Apparent porosity) และการดูดซับน้ำ (Water adsorption) คำนวณจากสมการ

$$\rho_{\text{bulk}} = \frac{D}{S-I}$$

$$\rho_{\text{apparent}} = \frac{D}{D-I}$$

$$\text{ระดับรูพรุน (Apparent porosity)} = \frac{S-D}{S-I}$$

$$\text{การดูดซับน้ำ (Water absorption)} = \frac{S-D}{D}$$

- โดยที่ ρ_{bulk} คือ ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)
 ρ_{apparent} คือ ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm^3)
 D คือ น้ำหนักแห้งของเม็ดสารที่ชั่งในอากาศ (g)
 S คือ น้ำหนักอิมด้วของเม็ดสาร (g)
 I คือ น้ำหนักอิมด้วของเม็ดสารที่ชั่งในน้ำ (g)

ค่าเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นทางทฤษฎีของสารเซรามิกคำนวณจากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นทางทฤษฎี} = \frac{\rho_{\text{ท.}}}{\text{TD.}} * 100\%$$

โดยที่ ρ_{bulk} คือ ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)
TD. คือ ความหนาแน่นทางทฤษฎี (g/cm^3)

ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี (Theoretical density) สามารถคำนวณจากสมการ

$$\text{ความหนาแน่นทางทฤษฎี} = \frac{M}{VN_A * (10^{-23})} \quad (\text{g/cm}^3)$$

โดยที่ M คือ น้ำหนักของสารประกอบหนัก 1 โมล (g)
V คือ ปริมาตรของหน่วยเซลล์ (cm^3) ในกรณีผลึกเตตระโกนอล $V = a^2 c$ (\AA)³
 N_A คือ เลขอโวกาโดรหรือจำนวนอนุภาคหนัก 1 โมล ($N_A = 6.02 * 10^{23}$ โมเลกุล)

การคำนวณค่า lattice parameters และความหนาแน่นทางทฤษฎีแสดงใน
ภาคผนวก ก.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.4 จุลโครงสร้าง

จุลโครงสร้างของเซรามิกและวัสดุเชิงประกอบถูกวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope, SEM (JSM-T330A) สำหรับเม็ดสารหลังเผาซินเทอร์จะถูกขัดปรับผิวหน้าจนเรียบและไม่มีร่องรอยขีดปรากฏอยู่ ทำ etching เม็ดสารด้วยกรด HCl (5%) + HF (2-3 หนค) นาน 5-10 วินาที เพื่อให้เห็นขอบเกรนชัดเจนก่อนติดเม็ดสารบนสตัด (Stud) และเคลือบทองคำด้วยเครื่อง Ion coater ด้วยศักย์ไฟฟ้า 5 kV นาน 5 นาที เพื่อให้เกิดการนำสัญญาณได้นำเม็ดสารเข้าเครื่อง SEM เพื่อดูรูปร่างและลักษณะของเกรนและรูพรุนที่บริเวณต่างๆ ขนาดเกรนของตัวอย่างได้จากการวัดขนาดเกรนบนรูปถ่ายโดยกำหนดเส้นความยาวที่แน่นอนและนับจำนวนเกรนที่เส้นความยาวพาดผ่าน คำนวณขนาดของเกรนจากความยาวของเส้นพาดผ่านหารด้วยจำนวนเกรนที่วัดได้

สำหรับการศึกษาจุลโครงสร้างของแท่งเซรามิก แท่งเซรามิกตัวอย่างถูกนำมาติดบนสตัดตามแนวความยาวเพื่อสังเกตพื้นผิวภายนอก และติดแนวตั้งฉากกับสตัดเพื่อสังเกตพื้นผิวหน้าตัดของแท่งเซรามิก ส่วนการวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 เม็ดสารที่ผ่านการขัดจนเหลือความหนา 0.85 มม. ถูกติดบนสตัด และเคลือบทองคำบนผิวหน้า จากนั้นนำเข้าเครื่อง SEM เพื่อถ่ายภาพตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ผล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.5 เปอร์เซนต์น้ำหนักสูญหายและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงขนาด

เปอร์เซนต์น้ำหนักสูญหายหลังเผาแคลไซต์หรือซินเทอร์คำนวณจากสมการ

$$\text{เปอร์เซนต์น้ำหนักสูญหาย} = \frac{W_B - W_A}{W_B} * 100\%$$

โดยที่ W_B คือ น้ำหนักก่อนเผา (g)

W_A คือ น้ำหนักหลังเผา (g)

การเปลี่ยนแปลงขนาดหลังเผาซินเทอร์ของเม็ดสารหรือการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดสารหลังเผาซินเทอร์คำนวณจากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงขนาด} = \frac{D_B - D_A}{D_A} * 100\%$$

โดยที่ D_B คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนเผาซินเทอร์ (mm)

D_A คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังเผาซินเทอร์ (mm)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.6 สมบัติทางไฟฟ้าและเทียโซอิเล็กทริก

เมื่อดาวที่ผ่านการไหลและถูกปล่อยไว้ 1 วันก่อนการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าและเทียโซอิเล็กทริก สมบัติทางไดอิเล็กทริกได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Relative dielectric constant, K) และ ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss, $\tan \delta$) สามารถทราบได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้า (C) ของเมื่อดาว และค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ด้วยเครื่อง HP4192A Impedance analyzer ในการวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่า C และ $\tan \delta$ ของเมื่อดาวที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้อุณหภูมิ 1 kHz

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (K) (หรือ “ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก” สำหรับรายงานนี้) เป็นอัตราส่วนประจุที่ถูกสะสมบนผิวอิเล็กโทรดที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกกันเทียบกับประจุที่ถูกสะสมบนผิวอิเล็กโทรดชนิดเดียวกันในสูญญากาศ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$K = \frac{C}{C_0} = \frac{Q}{Q_0} = \frac{\epsilon A / l}{\epsilon_0 A / l} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

หรือ

$$K = \frac{\alpha}{\epsilon_0 A}$$

- โดยที่ C, C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริกและสูญญากาศตามลำดับ (nF)
 Q, Q_0 คือ ค่าประจุสะสมในวัสดุไดอิเล็กทริกและสูญญากาศตามลำดับ (C)
 ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุไดอิเล็กทริก (F/m)
 ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสูญญากาศมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m
 A คือ พื้นที่ผิวหน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)
 l คือ ความหนาของชิ้นงาน (m)

สำหรับสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่า piezoelectric charge d_{33} constant, piezoelectric voltage g_{33} constant, piezoelectric coupling factor k_p และ mechanical coupling factor Q_m

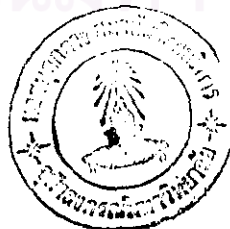
ค่า d_{33} constant เป็นค่าประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแนวแกน z เมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระทำในแนวแกน z สามารถตรวจวัดโดยใช้เครื่อง Berlincourt d_{33} piezoelectric meter ซึ่งมีหลักการและลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ การตรวจสอบใช้ความถี่ 100 Hz และแรง 1.5 ปอนด์ หรือการกระจัดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร กระทำต่อชิ้นงานและอ่านค่า d_{33} บริเวณที่ทำการวัดได้โดยตรง ค่า d_{33} ของชิ้นงานเฉลี่ยจากการวัดค่าทั้งหมด 12 บริเวณ (ผิวด้านบนและผิวด้านล่างด้านละ 6 บริเวณ) ค่า d_{33} ของแต่ละกลุ่มตัวอย่างเฉลี่ยจากค่า d_{33} ของชิ้นงานจำนวน 3 เม็ด

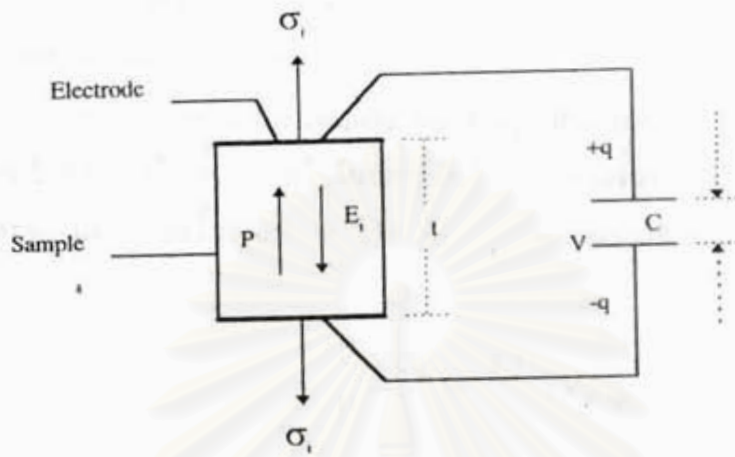
ค่า piezoelectric voltage g_{33} coefficient สามารถคำนวณจากสมการ

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_0 K}$$

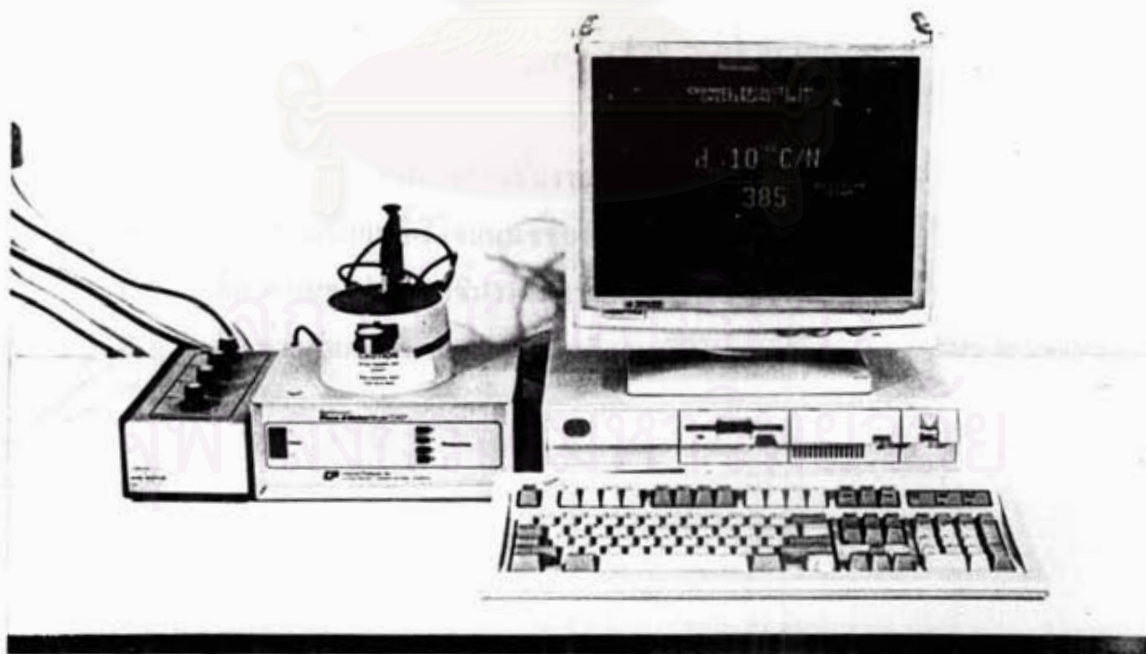
- โดยที่ g_{33} คือ Piezoelectric voltage g_{33} coefficient ของชิ้นงาน ($* 10^{-3}$ Vm/N)
 d_{33} คือ Piezoelectric d_{33} coefficient ของชิ้นงาน (pC/N)
 K คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 kHz (ไม่มีหน่วย)
 ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ $8.85*10^{-12}$ F/m

ค่า g_{33} ในรายงานเป็นค่าโดยประมาณเนื่องจากค่า d_{33} และค่า K เป็นค่าที่วัดในช่วงความถี่ต่างกัน ในการคำนวณค่า g_{33} ที่ถูกต้องควรใช้ข้อมูลของค่า d_{33} และค่า K วัดที่ความถี่เดียวกัน





รูปที่ 3.9 หลักในการวัดค่า d_{33}



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์สำหรับวัดค่า d_{33}

เครื่อง HP4192A impedance analyzer ถูกใช้เพื่อตรวจสอบความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และแอนตี้-เรโซแนนซ์ (f_a) ของชิ้นงานสำหรับคำนวณค่า piezoelectric planar coupling factor (k_p) และ mechanical loss (Q_m)

ค่า piezoelectric coupling factor, k_p เป็นค่าแสดงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า (หรือในทางกลับกัน) ของชิ้นงานรูปเมดที่มีสัดส่วนตัวผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของชิ้นงานมากกว่า 10 ค่า k_p คำนวณจากสมการ

$$k_p = \sqrt{\frac{2.52(f_a - f_r)}{f_r}} + 0.038$$

Mechanical quality factor (Q_m) เป็นค่าบอกความสามารถในการส่งผ่านพลังงานที่ถูกแปลงแล้ว คำนวณจากสมการ

$$Q_m = \frac{f_r^2}{2\pi f_r C Z_r (f_a^2 - f_r^2)}$$

- โดยที่ f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของชิ้นงาน (kHz)
 f_a คือ ความถี่แอนตี้-เรโซแนนซ์ของชิ้นงาน (kHz)
 C คือ ความจุไฟฟ้าของชิ้นงานที่ความถี่ 1 kHz (nF)
 Z_r คือ ค่าความต้านทานของชิ้นงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Ohm)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย