

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสมบัติไดอิเล็กทริก ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ PZT ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 สมบัติไดอิเล็กทริก

สมบัติไดอิเล็กทริก คือสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าในวัสดุที่เมื่อวัสดุนี้อยู่ในสภาวะปกติจะประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีจุดศูนย์กลางมวลร่วมกันระหว่างโปรตอนและอิเล็กตรอนที่อยู่ภายใต้แรงยึดของโมเลกุล และแรงยึดของอะตอมภายในเนื้อสารจึงไม่มีประจุไฟฟ้าอิสระ แต่เมื่อสารได้รับกระแสไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลเกิดแรงทางไฟฟ้า ทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศของสนาม ส่วนกลุ่มประจุลบถูกผลักไปในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้โมเลกุลของสารเกิดไดโพลโมเมนต์ขึ้นมา

สารไดอิเล็กทริกถูกค้นพบในช่วงปี ค.ศ. 1921 โดยวัสดุตัวแรกที่ค้นพบ คือแบเรียมไททาเนต (BT) นิยมนำมาใช้ในการเก็บประจุไฟฟ้า เนื่องจากมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูง จากนั้นก็ได้ค้นพบสารไดอิเล็กทริกใหม่ๆ เช่นเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) แมกนีเซียมไนโอเบต (PMN) เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต (PLZT) เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้มีสภาพยอมสัมพัทธ์ที่สูงเช่นกัน สารไดอิเล็กทริกมีสมบัติที่น่าสนใจ คือสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ โดยความสามารถในการเก็บประจุของสารไดอิเล็กทริกนั้นจะเปรียบเทียบกับ การเก็บประจุไฟฟ้าของสุญญากาศว่าสามารถเก็บประจุได้เพิ่มขึ้นกี่เท่า ดังสมการ (2.1)

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r = \frac{A}{d} \quad (2.1)$$

- เมื่อ
- C คือ ค่าความสามารถในการกักเก็บประจุของสาร (F)
 - ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} (F/m)
 - ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กทริก
 - A คือ พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าบนผิวของสารไดอิเล็กทริก (m^2)
 - d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (m)

โดยค่า ϵ_r จะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพและความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของสารไดอิเล็กทริกนั้นๆ ว่ามีค่าเป็นกี่เท่าของสุญญากาศ ดังตาราง 2.1 และสมการ (2.1) จะเห็นว่าความสามารถในการเก็บประจุจะแปรผันตรงกับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และรูปทรงของตัวเก็บประจุ การเก็บประจุไฟฟ้าที่สมบูรณ์ที่สุดจะต้องไม่นำไฟฟ้าเลยถ้าหากได้รับกระแสไฟฟ้าตรง นั่นคือ จะต้องไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือมีความต้านทานสูงเป็นอนันต์ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในบริเวณน้อยๆ ที่เรียกว่า กระแสรั่ว เกิดขึ้น

ตาราง 2.1 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกบางชนิด [9]

ชนิดของเซรามิก	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r)	ค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อนทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$)
BaTiO ₃	1,700	1.0
Pb(Zr _{0.53} Ti _{0.47})O ₃	544	0.5
Pb(Zr _{0.52} Ti _{0.48})O ₃	1,060	—
Pb(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃	20,000	0.1
Pb(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ -PbTiO ₃ -PbZrO ₃	550-9,000	0.2-2.5

2.2 สมบัติทางกลของเซรามิก

โดยทั่วไปสมบัติของเซรามิกจะเปราะ และค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) แตกต่างกันมาก นั่นคือมีค่าตั้งแต่ต่ำกว่า 100 psi (0.69 MPa) จนถึงค่าสูงประมาณ 106 psi (7×10^3 MPa) เช่นอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ถูกเตรียมในสภาวะที่ควบคุมอย่างระมัดระวัง นอกจากนี้วัสดุเซรามิกยังมีค่าความต้านทานแรงอัด (compressive strength) แตกต่างกับค่าความต้านทานแรงดึงอย่างมาก คือมีค่าสูงกว่าความต้านทานแรงดึงประมาณ 5-10 เท่า ดังแสดงในตาราง 2.2 และเนื่องจากพันธะระหว่างอะตอมหรือไอออนภายในโครงสร้างของเซรามิกเป็นพันธะแบบไอออนิก-โคเวเลนต์ ดังนั้นวัสดุเซรามิกหลายชนิดมักจะแข็งและมีค่าความต้านทานต่อการขยายตัวของรอยแตก (fracture toughness) ที่ต่ำ อย่างไรก็ตามก็มีวัสดุเซรามิกบางชนิดที่มีความอ่อนง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เช่นพลาสติกเคลย์ เนื่องจากพันธะระหว่างชั้นเป็นพันธะแบบอ่อน

ตาราง 2.2 สมบัติเชิงกลของเซรามิกบางชนิด [10]

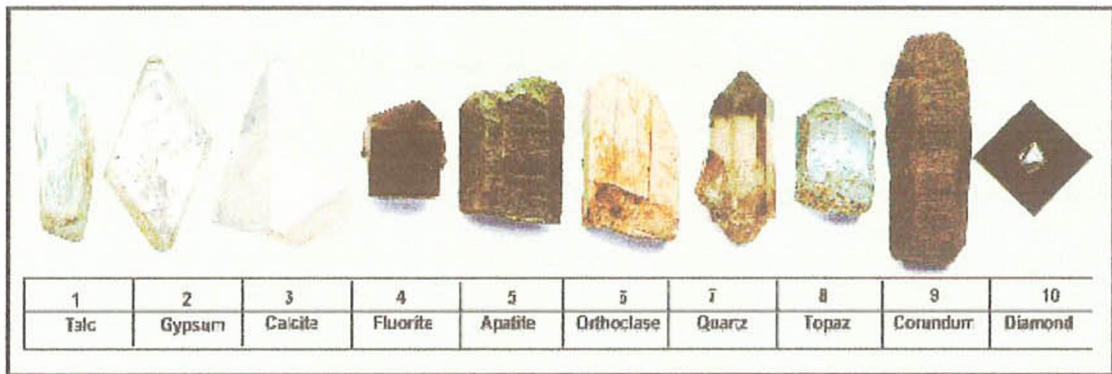
Ceramics	Density (g/cm ³)	Compressive Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Flexural Strength (MPa)	Fracture Strength (MPa)
Al ₂ O ₃ (99%)	3.85	2585	207	345	4
Si ₃ N ₄ (hot-pressed)	3.19	3450	–	690	6.6
Si ₃ N ₄ (reaction- bonded)	2.80	770	–	255	3.6
SiC (sintered)	3.10	3860	170	550	4
ZrO ₂ –9%MgO (partially stabilized)	5.50	1860	–	690	8+

ความแข็ง (Hardness)

ความแข็ง คือความสามารถในการต้านทานการทะลุของวัสดุจากการกระทำของวัสดุที่แข็งกว่า [11] จุดมุ่งหมายของการทดสอบความแข็งเพื่อกำหนดความเหมาะสมของวัสดุสำหรับกำหนดรูปแบบ และเพื่อตรวจสอบสมบัติพิเศษภายในวัสดุ ซึ่งค่าความแข็งของวัสดุเป็นดัชนีที่สามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อการขีดข่วนที่บริเวณผิวของวัสดุด้วย โดยปกติแล้วเซรามิกจะจัดอยู่ในวัสดุประเภทที่มีความแข็งสูงมาก หรือเซรามิกเป็นวัสดุที่สามารถทนต่อการขีดข่วนได้ดี โดยวิธีการวัดความแข็งนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ตามลักษณะการวัดดังนี้

1. ค่าความแข็งเชิงเปรียบเทียบ

เป็นวิธีการบ่งบอกถึงความแข็งแรงของวัสดุโดยอาศัยการเปรียบเทียบกับค่าความแข็งของวัสดุมาตรฐานซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 10 ระดับในสเกลของ Mohs (รูป 2.1) โดยวัสดุมาตรฐานที่มีความแข็งในระดับต่ำสุดคือ ทาร์ค (talc) ซึ่งมีค่าความแข็งเป็นอันดับ 1 และวัสดุที่มีความแข็งมากที่สุดคือ เพชร ซึ่งมีค่าความแข็งเป็นอันดับ 10 จากนั้นนำวัสดุที่ต้องการทราบค่าความแข็งมาขีดกับวัสดุมาตรฐาน แล้วทำการเปรียบเทียบดูว่าอยู่ในระดับใด ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าที่เปรียบเทียบคร่าวๆ เท่านั้น จึงไม่มีความแน่นอนและไม่มีหน่วย



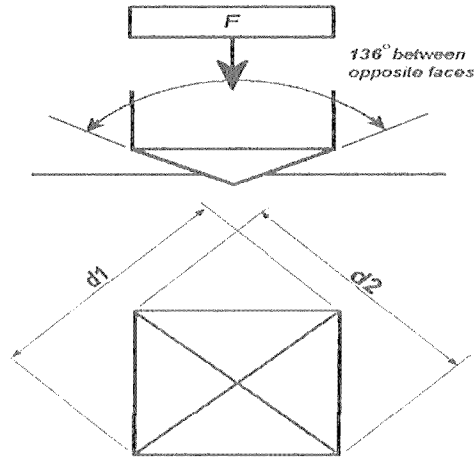
รูป 2.1 ลำดับความแข็งของวัสดุตามสเกล Mohs [11]

2. ค่าความแข็งที่ได้จากการกดด้วยวัสดุที่แข็งกว่า

เป็นวิธีที่นิยมในการหาค่าความแข็งของวัสดุมากที่สุดเนื่องจากให้ค่าตัวเลขที่แน่นอน โดยอาศัยหลักการกดวัสดุที่มีปลายหัวกดขนาดเล็กลงไปในผิวหน้าด้วยแรงขณะหนึ่งที่ทราบค่า สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การทดสอบระดับมาโคร (macrohardness testing) จะทดสอบด้วยน้ำหนักกดมากกว่า 1,000 กรัม ตัวอย่างคือ บริเนลล์และร็อคเวลล์ (Brinell and Rockwell indentation) และการทดสอบระดับจุลภาค (microhardness testing) จะทดสอบด้วยน้ำหนักกดน้อยกว่า 1,000 กรัม ตัวอย่างคือ วิกเกอร์และนูป (Vickers and Knoop indentation) จากนั้นจึงทำการตรวจสอบลักษณะของรอยกดที่เกิดขึ้นของชิ้นงานซึ่งค่าความแข็งที่ได้จะเป็นการคำนวณจากแรงที่ให้เปรียบเทียบกับพื้นที่ของรอยกดที่เกิดขึ้น และอาจจะพิจารณาโดยเปรียบเทียบจากลักษณะของรอยกดได้ว่า ถ้าหารอยกดมีขนาดใหญ่ลึกกว่าแสดงว่าชิ้นงานนั้นมีความแข็งต่ำกว่า สำหรับลักษณะของหัวกดนั้นมีอยู่หลายแบบด้วยกันแต่แบบที่นิยมใช้ในการตรวจสอบความแข็งของเซรามิก ก็คือ

แบบวิกเกอร์ (Vickers indentation)

การทดสอบแบบวิกเกอร์จะใช้หัวกดที่ทำมาจากเพชร ที่ฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีมุมระหว่างกัน 136° ความลึกของรอยกดมีค่าประมาณ $1/7$ เท่าของความยาวของเส้นทแยงมุม และต้องทำการวัดเส้นทแยงมุมทั้ง 2 ด้านแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย (รูป 2.2) ค่าที่ได้จะอยู่ในรูป Vickers hardness number ซึ่งก็คือ อัตราส่วนของน้ำหนักที่ใช้ในการกดกับพื้นที่เกิดรอยดงสมการ (2.2) [12]



รูป 2.2 ลักษณะหัวกดและรอยกดแบบวิกเกอร์ [13]

$$H_V = (1.854) \frac{F}{d^2} \quad (2.2)$$

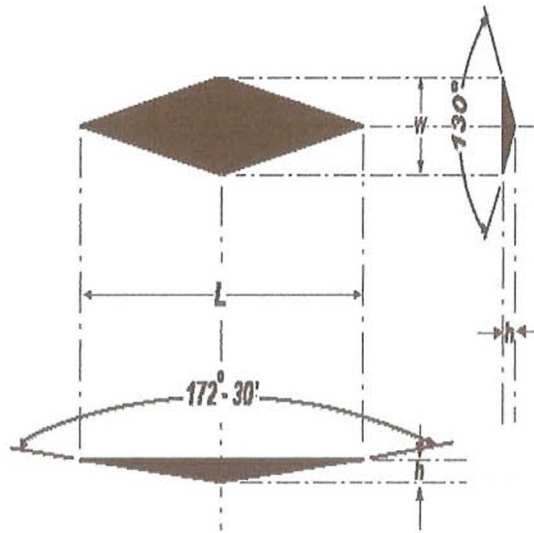
เมื่อ H_V คือ ค่าความแข็งในหน่วยของวิกเกอร์ (kg/mm^2)

F คือ น้ำหนักที่ให้แก่วัด (kg)

d คือ ค่าความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมของรอยกด (μm)

แบบนूप (Knoop indentation)

การทดสอบแบบนूपจะใช้หัวกดที่ทำมาจากเพชรที่มีฐานเป็นรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ที่มีความยาวของด้านหนึ่งยาวกว่าอีกด้านหนึ่ง 7 เท่า มีมุมทางยาว $170^\circ 30'$ และมุมตรงข้าม 130° รูปแบบของรอยกดเป็นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนที่มีด้านขนานกัน 2 ด้าน แต่จะทำการวัดเฉพาะด้านแกนยาวเท่านั้น สำหรับความลึกของรอยกดจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 1:30 ของเส้นทแยงมุมด้านที่ยาว (รูป 2.3) ผลการทดลองจะอยู่ในรูปของ Knoop hardness number ซึ่งก็คือ อัตราส่วนน้ำหนักกดกับพื้นที่ที่ถูกกดลงไป ดังสมการ (2.3)



รูป 2.3 ลักษณะหัวกดและรอยกดแบบนูน [14]

$$H_k = (14.23) \frac{F}{d^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ H_k คือ ค่าความแข็งในหน่วยของนูน (kg/mm^2)

F คือ น้ำหนักที่ให้แก่วัด (kg)

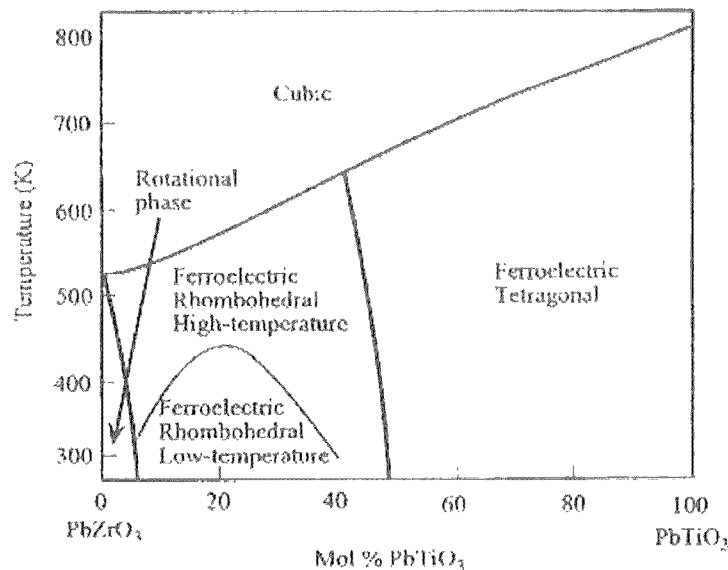
d คือ ค่าความยาวของเส้นทแยงมุมด้านยาวของรอยกด (μm)

2.3 เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead zirconate titanate)

เลดเซอร์โคเนตไททาเนต เป็นสารพีโซอิเล็กทริกที่มีการนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากแสดงสมบัติพีโซอิเล็กทริกได้ดี [1] มีค่าสัมประสิทธิ์คูลัมไฟฟ้าเชิงกลสูง มีอุณหภูมิคูรีที่สูงส่งผลให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงสุดได้ดี ที่สำคัญสามารถเตรียมได้ง่ายและหลากหลายองค์ประกอบ อุณหภูมิที่ใช้ก็ไม่สูงมากนัก จึงทำให้เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนตเป็นที่นิยม

เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) มีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ประมาณ 390°C [15] ซึ่งอุณหภูมิคูรีนี้จะเปลี่ยนแปลงเมื่อองค์ประกอบของสารเปลี่ยนแปลงไปโดย ณ ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี เลดเซอร์โคเนตไททาเนตจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพอรอฟสไกต์ ที่มีหน่วยเซลล์แบบคิวบิกซึ่งส่งผลให้แสดงสมบัติเป็นพาราอิเล็กทริก เมื่อทำการลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี ลักษณะของหน่วยเซลล์จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบเตตระโกนอล (tetragonal) หรือ ромbohedral (rhombohedral) ซึ่งส่งผลให้สมบัติของเซรามิกเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยในกรณีของ

เฟสเตตระโกนอลนั้นจะเกิดกระบวนการ โพลาริเซชันขึ้นได้เองในทิศทาง (100) ส่วนในกรณีของเฟสโรมโบอีดรอล กระบวนการโพลาริเซชันจะเกิดขึ้นเองในทิศทาง (111) และยังพบอีกว่าสมบัติทางด้านไฟฟ้าของเลดเซอร์โคเนตไททาเนตนั้น แสดงสมบัติที่โดดเด่นมากในสัดส่วนของ Zr:Ti อยู่ที่ 52:48 หรือ 53:47 ซึ่งอยู่ใน บริเวณที่เรียกว่า รอยต่อเฟสที่มีสัณฐานเหมือนกัน (Morphotropic Phase Boundary : MPB) [16] ดังเฟสไดอะแกรมในรูป 2.4



รูป 2.4 เฟสไดอะแกรมของสารในระบบ PZT [17]

2.4 เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2)

เซอร์โคเนียมออกไซด์ มีลักษณะเป็นผงสีขาว หนัก ไม่มีกลิ่น มีจุดหลอมเหลวสูง ประมาณ $2685\text{--}2745\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีจุดเดือดประมาณ $4300\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 123.22 ค่าความแข็งอยู่ในช่วง 6.5–7 ตามสเกลของ Mohs [18] โครงสร้างผลึกของเซอร์โคเนียมออกไซด์มีอยู่ 3 แบบซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ นั่นคือ คิวบิก (cubic) เตตระโกนอล (tetragonal) และโมโนคลีนิก (monoclinic) ซึ่งที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ $2370\text{ }^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไป โครงสร้างผลึกเป็นคิวบิก อุณหภูมิปานกลาง ในช่วง $1170\text{--}2370\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีโครงสร้างผลึกเป็นเตตระโกนอล และอุณหภูมิต่ำกว่า $1170\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีโครงสร้างเป็นโมโนคลีนิก การเปลี่ยนโครงสร้างจากเตตระโกนอลเป็นโมโนคลีนิก เป็นสาเหตุทำให้เกิดการแตกหักของวัสดุได้ พฤติกรรมนี้ทำให้สมบัติเชิงกลของเซอร์โคเนียมออกไซด์ไม่สามารถนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรมได้ จึงได้ทำการเติมสารประกอบออกไซด์ลงไป ในเซอร์โคเนียมออกไซด์ เช่นอิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) เติมลงในเซอร์โคเนียมออกไซด์จำนวนเล็กน้อย จะทำให้โครงสร้างของเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เผาแล้ว คงรูปเป็นผลึกรูปเตตระโกนอล แม้จะเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้องแล้ว ซึ่งเรียกว่าเตตระโกนอลเซอร์โคเนียโพลีคริสตัล (tetragonal

zirconia polycrystal) หรือ TZP ซึ่งเซอร์โคเนียมออกไซด์ชนิด TZP นี้มีความเหนียวดีมาก ไม่แตกหักง่าย แม้จะทำหล่นพื้นก็ตาม สมบัติของเซอร์โคเนียมออกไซด์ คือ เป็นวัสดุทนไฟเหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง สามารถนำไฟฟ้าได้ มีความหนาแน่นสูง เหนียวทนต่อการแตกหักและมีความแข็งแรงสูง เป็นต้น เซอร์โคเนียมออกไซด์ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางทางด้านงานวิจัยและอุตสาหกรรม เช่นใช้เป็นผงสำหรับขัด ใช้เป็นเยื่อหุ้มเซลล์เชื้อเพลิง เป็นลูกบอล ความหนาแน่นสูงและลูกบดย่อยพลอยเพราะมีความแข็งแรงสูง เป็นต้น [19]

2.5 แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

แมกนีเซียมออกไซด์ คือแร่ที่เป็นของแข็งสีขาว มีอยู่ตามธรรมชาติ มีสูตรเคมีคือ MgO มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ $2800\text{ }^{\circ}C$ และจุดเดือดเท่ากับ $3600\text{ }^{\circ}C$ โครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิกซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกับโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 40.32 และมีค่าความแข็งแบบมูสส์เท่ากับ 6.79 GPa [20]

ประโยชน์ของแมกนีเซียมออกไซด์ [21] ได้แก่ ใช้เป็นฉนวนในอุตสาหกรรมสายเคเบิล ใช้เป็นตัวพื้นในวัสดุทนความร้อน เป็นองค์ประกอบของพลุไฟและหัวไม้ขีดไฟ ใช้ผลิตเซลล์สะสมไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กและเบาบาง ใช้ในงานโครงสร้าง ซึ่งทั้งหมดใช้ในรูปแบบของโลหะเจือ เช่นทำกระจกขึ้นส่วนรถยนต์กระป๋อง ภาชนะบรรจุของ เครื่องยนต์ เฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ.1999 Kenji Tajima และคณะ [5] ทำการทดลองเติมสาร MgO ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนลงในสารประกอบ PZT ได้ศึกษาถึงสมบัติเชิงกลและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่เติมอนุภาคเหล่านี้ พบว่าค่าความแข็งแรงของเซรามิก PZT ที่เติม MgO ในปริมาณ 0.1 vol% ให้ค่าความแข็งแรงของเซรามิก PZT ที่ดีขึ้น เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกพบว่าเมื่อเติม MgO ในปริมาณ 0.1 vol% พบว่ารอยแตกมีการเปลี่ยนจาก intergranular ไปเป็น intragranular และขนาดเกรนเล็กลงซึ่งเซรามิก PZT มีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ $8\text{ }\mu m$ แต่เมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนลงไปพบว่าขนาดเกรนเฉลี่ยมีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ $1\text{ }\mu m$ สมบัติเชิงกลและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแสดงค่าที่ดีเมื่อเติมอนุภาคระดับนาโนของ MgO ที่ปริมาณ 0.1 vol%

ในปี ค.ศ. 2006 Praveen Kumar และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาผลของรูพรุนต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก PZT ที่มีความพรุน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เซรามิก PZT เป็นวัสดุหลัก โดยเริ่มจากการนำมาซึ่งและบดผสมเปียกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้เม็ดบอลเซอร์โคเนีย เมื่อได้ผสมแล้วนำไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำ

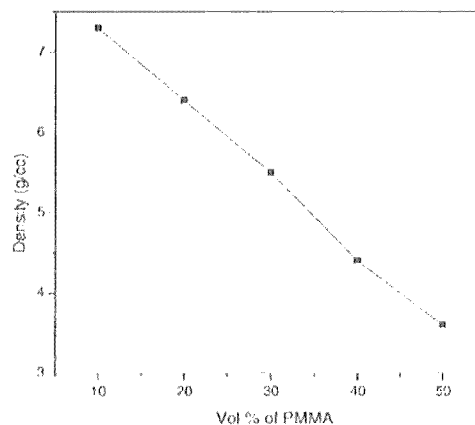
ผง PZT ที่แคลไซน์แล้วมาผสม polymethyl methacrylate (PMMA) ในปริมาณร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยปริมาตร และบดโดยใช้ครกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมาอัดขึ้นรูป จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500–600 °C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อไล่ PMMA ออก เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1280 °C เผาแช่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

รูป 2.5 แสดงความหนาแน่นของตัวอย่างกับปริมาณของ PMMA พบว่าความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ PMMA เพิ่มขึ้น คือการลดความต้านทานเสียง (z) ของวัสดุ เนื่องจากความต้านทานเสียงเป็นผลของความหนาแน่น (ρ) และความเร็วเสียง (c) ในวัสดุ คือ $z = \rho c$ ในทำนองเดียวกันการเพิ่มขึ้นของความพรุนเป็นการลดความเร็วเสียงในวัสดุ ความหนาแน่นของวัสดุที่ลดลง ความพรุนที่มากขึ้น มีผลต่อสมบัติความเป็นฉนวนและสมบัติโพลาไรซ์ไดอิเล็กตริก สอดคล้องกับสมการ (4)

$$\text{Porosity (P)} = \left(\frac{1 - \rho}{\rho_0} \right) \times 100 (\%) \quad (4)$$

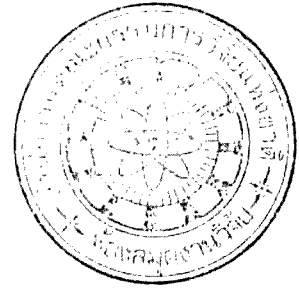
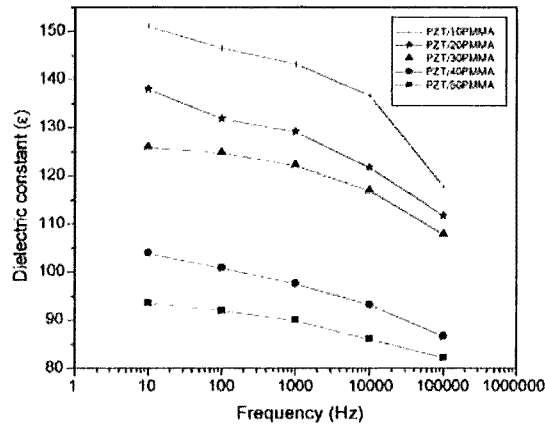
เมื่อ ρ_0 คือ ความหนาแน่นในทฤษฎีของ PZT มีค่าเท่ากับ 7.82 g/cm³

ρ คือ ความหนาแน่นของเซรามิก PZT ที่มีรูพรุน

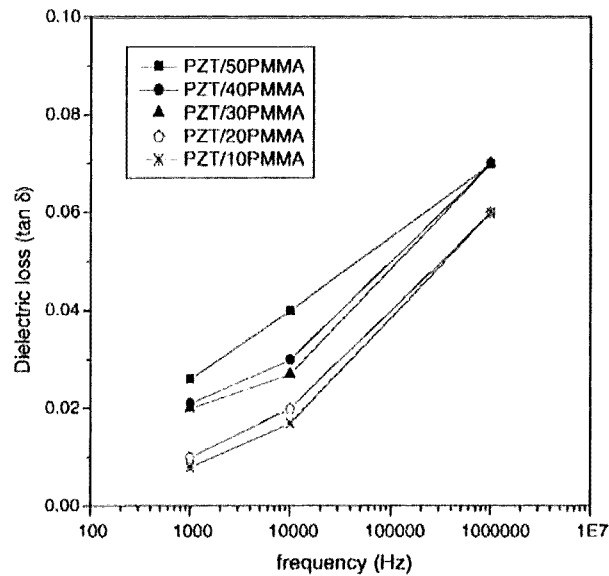


รูป 2.5 ความหนาแน่นของเซรามิก PZT ที่มีความพรุนเทียบกับปริมาณ PMMA

รูป 2.6 และ 2.7 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของเซรามิก PZT ที่มีรูพรุน วัดที่ความถี่ต่างกัน พบว่าที่ความถี่เพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลง แต่ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการที่มีรูพรุนมากในเซรามิก PZT ที่มีความพรุนส่งผลให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ต่ำและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกที่สูง [23]

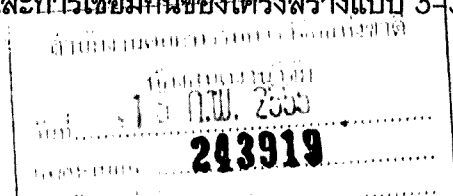


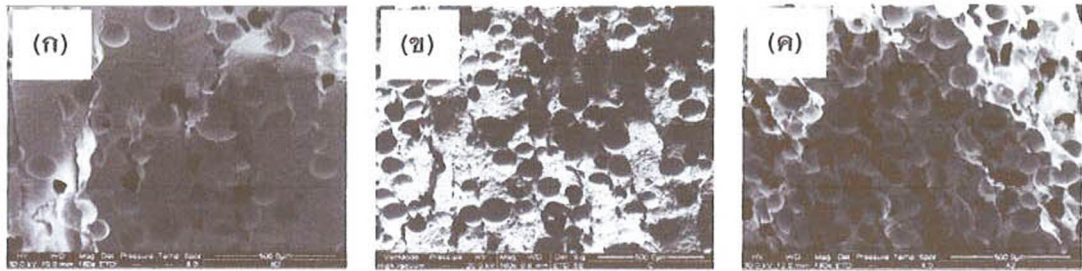
รูป 2.6 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่มีความพรุนเทียบกับความถี่



รูป 2.7 ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่มีความพรุนเทียบกับความถี่

รูป 2.8 (ก-ค) แสดงภาพถ่าย SEM ของรอยหักของเซรามิก PZT ที่มีความพรุน ในรูป 2.8 (ก) จะแสดงให้เห็นว่ามีรูพรุนต่ำเป็นเพราะมีการเติม PMMA ในปริมาณที่น้อย (10 vol%) และสิ่งนี้ที่ทำให้มีผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ความต้านทานเสียงและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกลดลง ตามลำดับ รูป 2.8 (ข) แสดงการมีรูพรุนในปริมาณปานกลางซึ่งเป็นโครงสร้างในลักษณะเชื่อมกันแบบ 3-3 ในทางตรงกันข้าม ในรูป 2.8 (ค) แสดงการมีรูพรุนที่สูงซึ่งเป็นโครงสร้างการเชื่อมต่อกันแบบ 3-3 ที่ครอบคลุมบริเวณรอยหัก ซึ่งให้ค่าความต้านทานเสียงและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่า รอยหักมีลักษณะตั้งฉากกับทิศทางแรงอัด สาเหตุน่าจะมาจากแรงอัดบีบผง PZT มากกว่าบีบ โพลีเมอร์ PMMA ผลข้างต้นแสดงผลของความพรุนและการเชื่อมกันของโครงสร้างแบบ 3-3

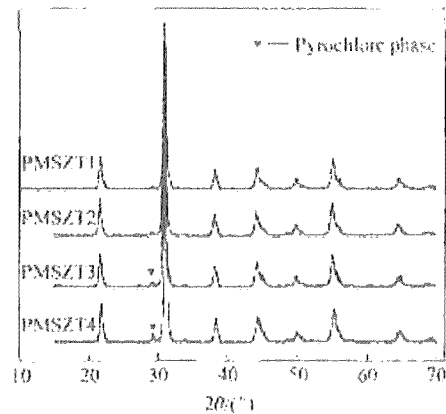




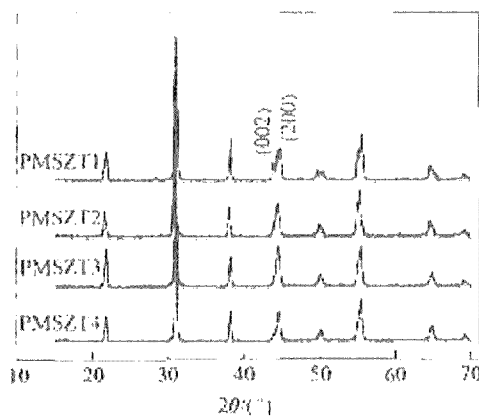
รูป 2.8 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยหักของเซรามิก PZT ที่มีความพรุนต่างกันของ (ก) PZT/10PMMA, (ข) PZT/30PMMA และ (ค) PZT/50PMMA

ในปี ค.ศ. 2006 Du Hong-liang และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาถึงอุณหภูมิซินเตอร์ และวัสดุผสมที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของเซรามิก PMS-PZT โดยมีสูตรคือ $x\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3-(1-x)\text{Pb}-(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$ ซึ่ง $x = 0.06, 0.07, 0.08$ และ 0.09 (เรียกเซรามิกเหล่านี้ว่า PMSZT1, PMSZT2, PMSZT3 และ PMSZT4 ตามลำดับ) ซึ่งถูกเตรียมโดยวิธีการเตรียมเซรามิกแบบดั้งเดิม นำสารตั้งต้น ได้แก่ Pb_3O_4 , ZrO_2 , TiO_2 , MnO_2 และ Sb_2O_3 มาผสมกันแล้วบดผสมเปียกด้วยเม็ดบดเซอร์โคเนีย เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปอัดขึ้นรูปและเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างกัน (ตั้งแต่ $1100-1300^\circ\text{C}$) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เมื่อตรวจสอบโครงสร้างเฟสของผงเซรามิก PMS-PZT ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่า เมื่อปริมาณการเติม PMS น้อยกว่า 0.08 โมล โครงสร้างเฟสเป็นเพอรอพลไกต์บริสุทธิ์ที่เท่านั้นไม่พบโครงสร้างของไฟโรคลอร์ แต่เมื่อปริมาณ PMS มากกว่า 0.8 โมล พบเฟสของโครงสร้างไฟโรคลอร์เกิดขึ้น ซึ่งจะพบมากขึ้นเมื่อปริมาณ PMS มากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่า PMS ไม่สามารถแยกออกเป็นเฟสเดี่ยวได้ [25] ดังรูป 2.9 จากการตรวจสอบโครงสร้างเฟสของเซรามิก PMS-PZT ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C (รูป 2.10) พบว่าโครงสร้างเฟสของเซรามิกทั้งหมดเป็นเพอรอพลไกต์บริสุทธิ์ ซึ่งจะเห็นว่าการที่อุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้นทำให้เฟสของไฟโรคลอร์หายไป นอกจากนี้จะเห็นว่าจะมีการแยกฟีดที่ตำแหน่ง (200) และเริ่มเป็นฟีดเดี่ยวเมื่อปริมาณ PMS มากขึ้น ซึ่งจะบอกให้รู้ถึงเฟสเตตระโกนอลและเฟสรอมโบอีตรอล โดยการวิเคราะห์โดยฟีด (002) และ (200) ในช่วง 2θ มีค่า 45° การแยกของฟีด (002) และ (200) ซึ่งให้เห็นถึงว่า PMS-PZT เป็นเฟโรอิเล็กทริกเตตระโกนอล (F_T) ในขณะที่ถ้าเป็นเฟสเดี่ยวฟีด (200) แสดงเฟสเป็นเฟโร อิเล็กทริก รอมโบอีตรอล (F_R) [26, 27] ดังนั้นเฟสของเซรามิก PMS-PZT เปลี่ยนจากเฟสเตตระโกนอลไปเป็นเฟสรอมโบอีตรอลเมื่อปริมาณ PMS เพิ่มขึ้น

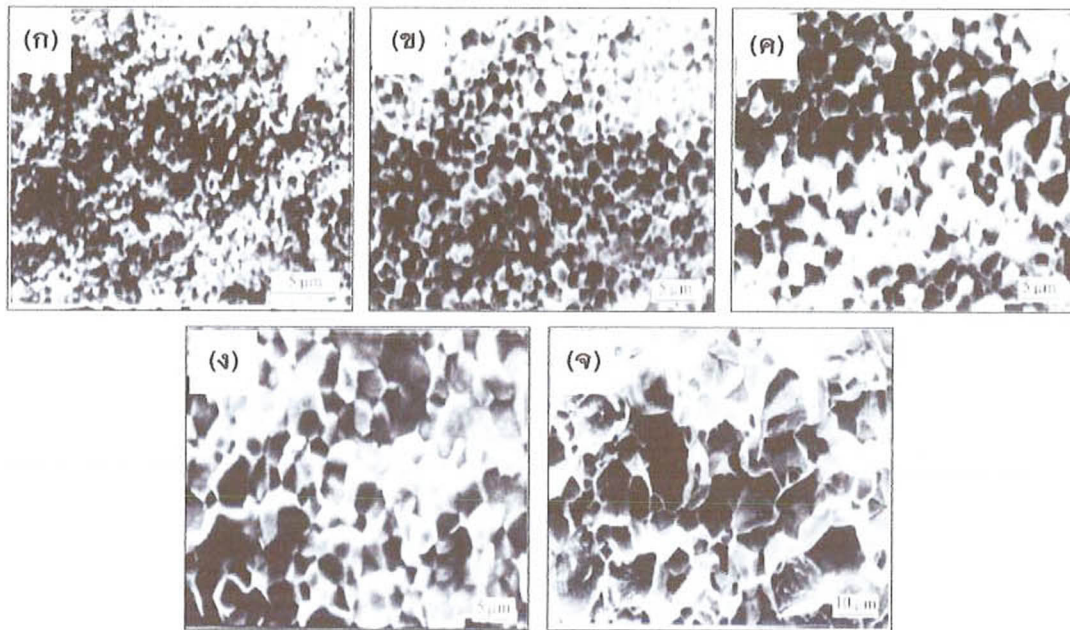


รูป 2.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PMS-PZT ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

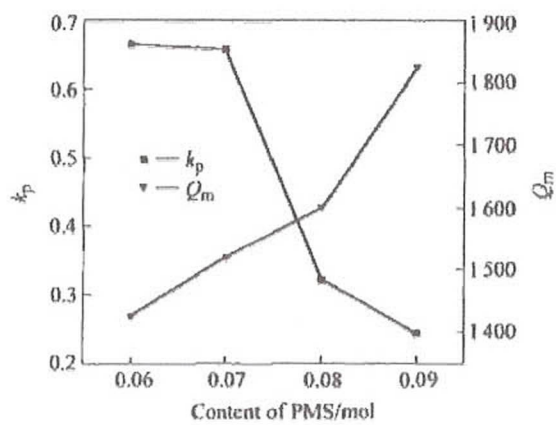


รูป 2.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PMS-PZT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

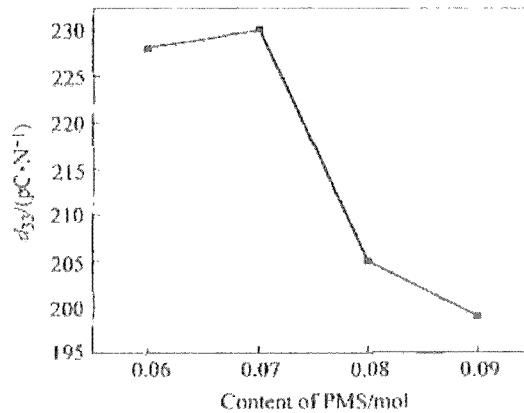
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคพบว่าขนาดเกรนมีขนาดและลักษณะการเชื่อมต่อกันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์สูงในเซรามิก PMSZT2 จากรูป 2.11 (ง) ลักษณะของเกรนเป็นเนื้อเดียวกันและไม่มีรูพรุน สามารถหาขนาดเกรนเฉลี่ยได้ประมาณ 3.4 μm และยังพบว่าถ้าหากอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ที่มากกว่า 1250 °C ลักษณะเกรนจะไม่เป็นเนื้อเดียวกันเพราะลักษณะของเกรนที่ใหญ่มากกว่าปกติ ดังรูป 2.11 (จ)



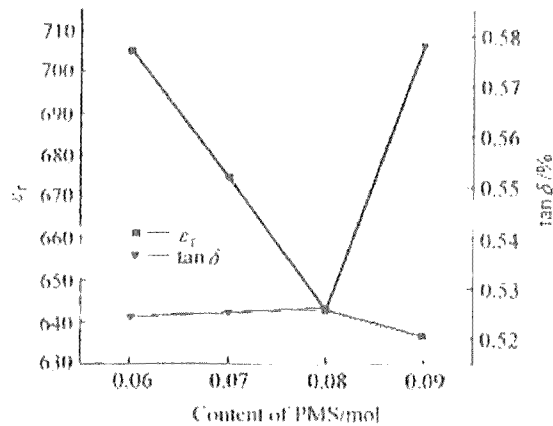
รูป 2.11 ภาพถ่าย SEM บริเวณรอยหักของเซรามิก PMSZT2 ที่แปรค่าอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ (ก) 1100 °C, (ข) 1150 °C, (ค) 1200 °C, (ง) 1250 °C และ (จ) 1300 °C



รูป 2.12 ค่า K_p และ Q_m เทียบกับปริมาณการเติม PMS ของเซรามิก PMS-PZT



รูป 2.13 ค่า d_{33} เทียบกับปริมาณการเติม PMS ของเซรามิก PMS-PZT

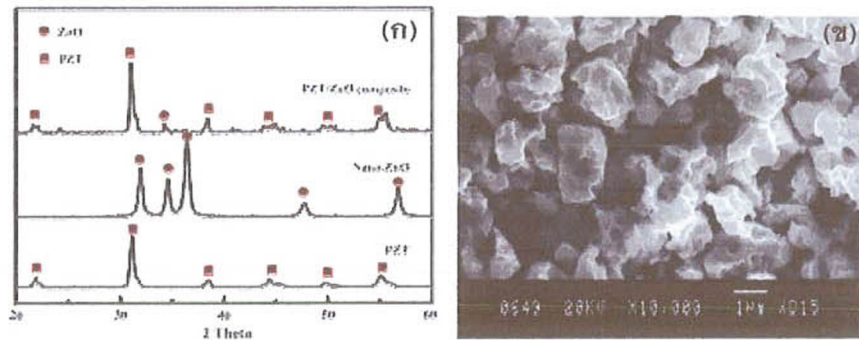


รูป 2.14 ค่า ϵ_r และ $\tan \delta$ เทียบกับปริมาณการเติม PMS ของเซรามิก PMS-PZT

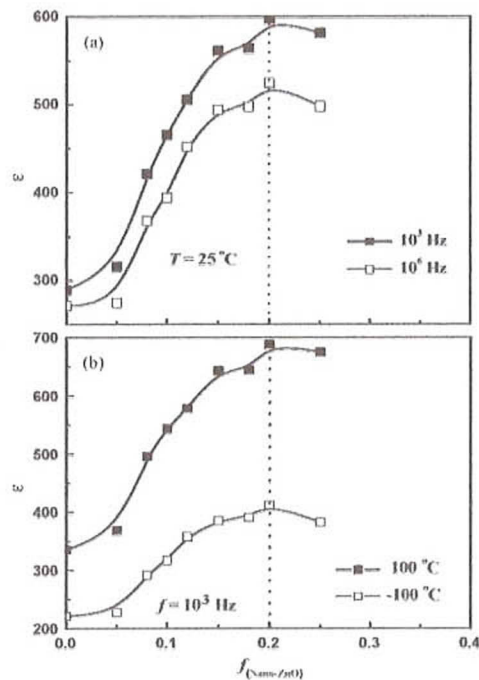
จากรูป 2.12 และ 2.13 จะเห็นว่าค่า K_p และ d_{33} มีค่าลดลงเมื่อปริมาณการเติม PMS มากขึ้นแต่ในขณะที่ค่า Q_m มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PMS มากขึ้นด้วยเช่นกัน จากนั้นทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ณ อุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่อเติมปริมาณ PMS มากขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนั้นลดลงแต่ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูป 2.14

ในปี ค.ศ. 2008 Zhi-Min Dang และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของสภาพยอมสัมพัทธ์ของไดอิเล็กทริกในเซรามิก ZnO/PZT เมทริกซ์นาโนคอมโพสิต ถูกเตรียมด้วยวิธีการเตรียมเซรามิกแบบดั้งเดิม เมื่อตรวจสอบโครงสร้างเฟสพบว่าเฟสของ PZT/ZnO ที่เติม ZnO = 20 vol% มีเฟสของ PZT และเฟสของ ZnO ในระดับนาโนแสดงในรูป 2.15 (ก) และแสดงลักษณะของรูปร่างทั่วไปพบว่ามีการพ่นเกิดขึ้นเนื่องจากการกัดด้วยกรด HF นอกจากนี้ยังสามารถเห็นอนุภาค PZT ที่มาก ซึ่งเป็นกระบวนการพัฒนาเป็นผลึกของเซรามิก

PZT ดังรูป 2.15 (ข) ศึกษาสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไดอิเล็กทริก พบว่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไดอิเล็กทริกของเซรามิกนี้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติม ZnO ระดับนาโนที่มากขึ้นจะเห็นได้ชัดจากรูป 2.16 (ก-ข)



รูป 2.15 (ก) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง PZT บริสุทธิ์ ผง ZnO ในระดับนาโน และผง PZT/ZnO (ข) ภาพถ่าย SEM ของเซรามิก ZnO/PZT เมื่อเติม ZnO ระดับนาโนในปริมาณ 20 vol%



รูป 2.16 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของไดอิเล็กทริก ϵ เทียบกับปริมาณการเติม ZnO ระดับนาโนของเซรามิก ZnO/PZT คอมโพสิต (a) ที่ความถี่ 10^3 และ 10^6 Hz (25°C) และ (b) ที่ -100 และ 10°C (10^3 Hz)