

บทที่ 2

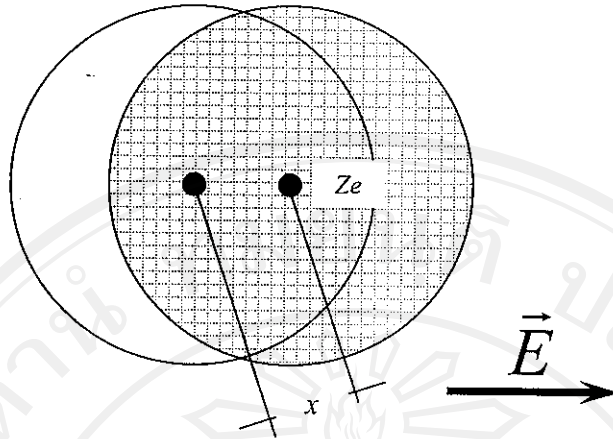
วรรณกรรมปริทัศน์

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวกับ สมบัติไดอิเล็กทริก ความเค้นแบบแกนเดี่ยว สารเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบต-เลดไทเทเนต เลดอินเดียมไนโอเบต-เลดไทเทเนต และ เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต-เลดซิงค์ไนโอเบต รวมทั้งผลของความเค้นแบบแกนเดี่ยวต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของสารเซรามิก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 สมบัติไดอิเล็กทริก[9-11]

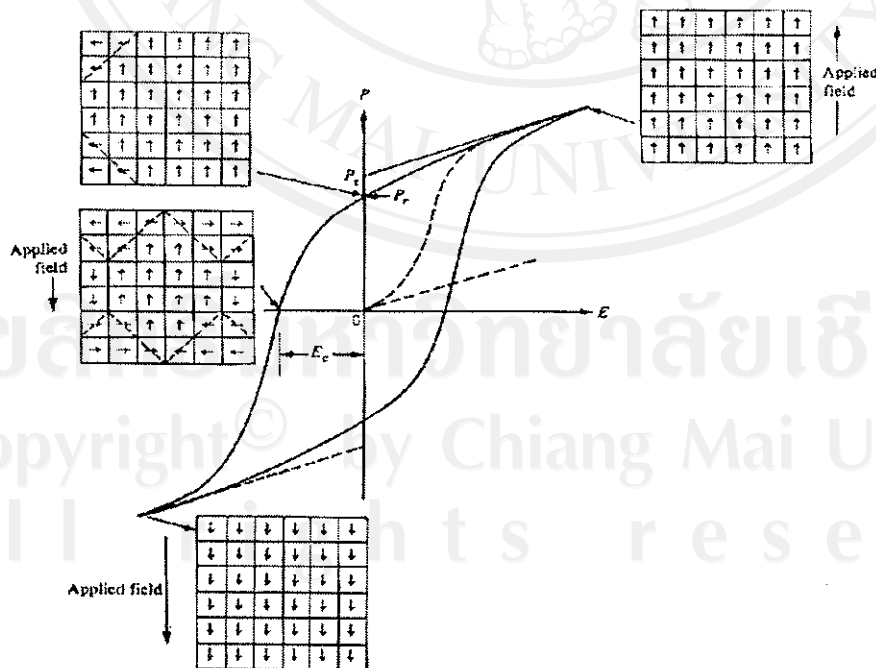
สารที่มีสมบัติไดอิเล็กทริก คือ สารที่มีสมบัติเป็นฉนวนที่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็นค่าที่บอกความสามารถในการเก็บประจุของสารไดอิเล็กทริกนั้นๆ หรือบอกให้ทราบว่าค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้สารไดอิเล็กทริกนั้นๆ จะเพิ่มขึ้นเป็นกี่เท่าตัวของตัวเก็บประจุสูญญากาศ

ทั้งนี้สารทุกชนิดจะประกอบด้วยส่วนย่อยที่เรียกว่าโมเลกุล ซึ่งโมเลกุลปกติประกอบด้วยกลุ่มโปรตอน และกลุ่มอิเล็กตรอน โดยมีจุดศูนย์กลางมวลร่วมกันและอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและแรงยึดเหนี่ยวภายในอะตอม เมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้ามากระทำกับโมเลกุลจะทำให้โมเลกุลเกิดการแยกประจุ โดยที่กลุ่มประจุบวกจะถูกผลักไปในทิศทางตามสนามไฟฟ้า และกลุ่มประจุลบจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางสวนทางกับสนามไฟฟ้า ดังนั้นโมเลกุลทุกโมเลกุลของสารก็จะก่อตัวเป็นโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) เล็กๆ และชี้ในทิศทางเดียวกับทิศของสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ซึ่งสารไดอิเล็กทริกประเภทนี้เป็นสารประเภทโมเลกุลไม่มีขั้ว (non-polar molecule) ดังรูป 2.1 นอกจากนี้ยังมีสารไดอิเล็กทริกบางชนิดที่มีโมเลกุลก่อตัวเป็นโมเมนต์ขั้วคู่อยู่แล้ว แต่ทิศทางของขั้วคู่ไฟฟ้า (electric dipole) ชี้ในทิศทางที่ไม่เป็นระเบียบ (random) และเมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกมากระทำต่อโมเลกุล จะทำให้ขั้วคู่เล็กๆ เหล่านี้เรียงตัวในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเรียกโมเลกุลประเภทนี้ว่าโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) และเรียกโมเมนต์ประเภทนี้ว่า ขั้วคู่ถาวร (permanent dipole)[10]



รูป 2.1 ลักษณะของสารไดอิเล็กทริกที่เป็นสารไม่มีขั้วเมื่อมีสนามไฟฟ้าทำให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่[12]

มีสารบางชนิดที่ขั้วคู่ของโมเลกุลเรียงตัวกันตัวเอง โดยไม่ต้องใช้สนามไฟฟ้าจากภายนอก และขั้วคู่ของโมเลกุลเหล่านี้ยังสามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้ เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไป ซึ่งสารชนิดนี้เรียกว่า สารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric materials) และจะสามารถแสดงอำนาจไฟฟ้าด้วยตัวของมันเอง ซึ่งจะสามารถสังเกตสมบัติของสารชนิดนี้ได้จากเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอรีซิส (Ferroelectric hysteresis) ดังรูป 2.2 โดยมีตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ เช่น แบเรียมไทเทเนต (BaTiO_3) เป็นต้น



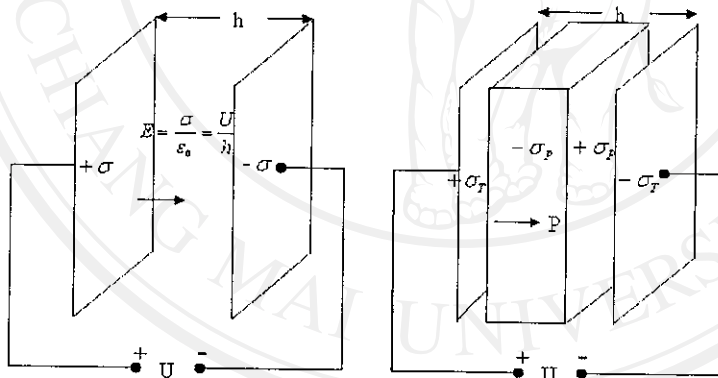
รูป 2.2 แสดงความสัมพันธ์ E-P ของสาร เฟอร์โรอิเล็กทริก[23]

ซึ่งลักษณะของกราฟมีรูปร่างคล้ายกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มสนามแม่เหล็กกับฟลักซ์แม่เหล็ก(B-H)ในวัสดุแม่เหล็ก แต่เฟร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอรีซิสจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับโพลาริเซชันภายในของสาร(E-P)

ลักษณะของการที่โมเลกุลของสารไดอิเล็กทริกก่อตัวเป็นคู่เล็กๆ แล้วจัดเรียงตัวกันในสนามไฟฟ้าเรียกว่า โพลาริเซชัน (polarization) โดยกำหนดให้โพลาริเซชันเป็นจำนวนโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ต่อหน่วยปริมาตร ถ้า N เป็นจำนวนโมเลกุลต่อหน่วยปริมาตรและทุกๆ โมเลกุลมีโมเมนต์ขั้วคู่เป็น $\vec{p}$ ดังนั้นจะได้โพลาริเซชันเป็น $\vec{P}$ เช่น

$$\vec{P} = N\vec{p} \quad (2.1)$$

และเมื่อสารไดอิเล็กทริกถูกโพลาริซ์โดยการให้สนามไฟฟ้าแก่สารไดอิเล็กทริกโดยผ่านแผ่นตัวนำคู่ขนานดังรูป 2.3 สมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปโดยพิจารณาจาก Gauss's theorem



รูป 2.3 ลักษณะตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนาน[9]

โดยที่สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นคู่ขนานที่เป็นสุญญากาศ คือ

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.2)$$

และเมื่อให้ความต่างศักย์ขนาดเดียวกันแก่แผ่นคู่ขนานที่มีสารไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างกลาง สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น คือ

$$E = \frac{\sigma_T - \sigma_P}{\epsilon_0} \quad (2.3)$$

$$\sigma_T = \epsilon_0 \vec{E} + \sigma_P \quad (2.4)$$

หรือ $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2.5)$

โดยที่ σ_P หรือ $\vec{P}$ คือ จำนวนโพลาริเซชัน
 σ_T หรือ $\vec{D}$ คือ total charge density or dielectric displacement
 $\vec{E}$ คือ สนามไฟฟ้าในตัวกลาง
 ϵ_0 คือ สภาพยอมของสุญญากาศมีค่า 8.854×10^{-12} F/m

สมบัติอีกอย่างหนึ่งของสารไดอิเล็กทริก คือ มีสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้าหรือ ความซาบซึมทางไฟฟ้า χ (electric susceptibility) กำหนดได้ด้วยสมการ (2.6)

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (2.6)$$

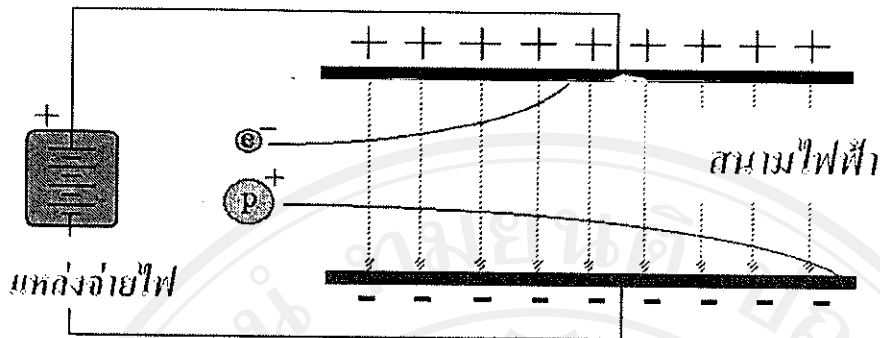
จากสมการ (2.5) และสมการ (2.6) จะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \chi \vec{E} \\ &= \epsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} \\ &= \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \end{aligned} \quad (2.7)$$

เราเรียกเทอม $(1+\chi)$ หรือ ϵ_r ว่า ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) อาจเขียนสมการที่ (2.7) ได้ดังนี้

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (2.8)$$

โดยที่ ϵ เรียกว่า สภาพยอมของสารไดอิเล็กทริก (permittivity)



รูป 2.4 ตัวเก็บประจุแบบคู่ขนาน[4]

สารไดอิเล็กทริกเป็นฉนวนที่ใช้ทำหน้าที่คั่นระหว่างตัวนำของตัวเก็บประจุ เพื่อกั้นและทำให้แรงดันสูงขึ้นกว่าถ้าหุ้มทั้งอากาศด้วย โดยมีค่าคงที่เป็นตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้สารไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นเป็นกี่เท่าของตัวเก็บประจุสุญญากาศ ดังสมการ

$$C = \epsilon_r C_0 \quad (2.9)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุของตัวเก็บประจุสุญญากาศ

C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น ϵ_r

โดยปกติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะแสดงเป็นค่าสัมพัทธ์ (ϵ_r) เทียบกับค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (ϵ_0) คือ

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.10)$$

และจากความสัมพันธ์ $C = Q/V$ สำหรับกรณีที่ไม่มีสารไดอิเล็กทริกจะได้ว่า

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.11)$$

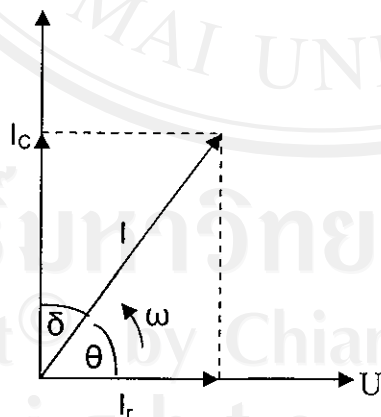
เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก

d คือ ความหนาของสารไดอิเล็กทริก

สำหรับตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ_r จะได้ว่า

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2.12)$$

ในทางปฏิบัติ เมื่อสารไดอิเล็กทริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ พฤติกรรมของสารจะต่างออกไปจากเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้ากระแสสลับ สนามไฟฟ้าจะสลับตาม รูปแบบของคลื่นไซน์ ($E = E_0 \sin(\omega t)$) ดังนั้น เมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ แก่สารไดอิเล็กทริก คู่ขั้วภายในสารไดอิเล็กทริกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมา ตามความถี่ของสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่ให้ ณ ความถี่สูง ไดโพลจะกลับตัวไม่ทันกับสนามไฟฟ้าที่ให้ ส่งผลให้เกิดรีแลกเซชัน (relaxation) ขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่า สนามไฟฟ้าเป็นพลังงานแบบหนึ่งซึ่งเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่สารไดอิเล็กทริก คู่ขั้วในสารไดอิเล็กทริกจะใช้พลังงานที่ให้ในการกลับตัวไป-มา แต่เมื่อที่ความถี่สูงๆ คู่ขั้วจะกลับตัวตามความถี่ไม่ทัน เมื่อกลับไม่ทันคู่ขั้วจึงไม่กลับตัว และเมื่อไม่กลับตัวแต่ยังรับพลังงานจากสนามไฟฟ้าอยู่พลังงานที่สารได้รับจะค่อยๆ สะสมเกิดเป็นความร้อนขึ้นเป็นการสูญเสียในสารไดอิเล็กทริก นอกจากนี้ความต้านทานภายในจะมีค่าลดลง จึงทำให้เกิดเฟสของกระแสไฟฟ้านำหน้าความต่างศักย์น้อยกว่า 90 องศา ซึ่งโดยปกติแล้ว กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟสนำหน้าความต่างศักย์เป็นมุม 90 องศา ดังรูป 2.5



รูป 2.5 ลักษณะมุมเฟสในตัวเก็บประจุในทางปฏิบัติ[9]

ดังนั้นทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเฉลี่ยเป็น

$$P_d = \frac{1}{2} (VI_c \tan \delta) = \frac{1}{2} (V^2 \omega C \tan \delta) \quad (2.13)$$

โดยที่ $\tan \delta$ เรียกว่า การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss tangent)

2.2 ความเค้นแบบแกนเดียว (uniaxial Stress)

ความเค้น (stress) เป็นสมบัติเชิงกลของวัสดุ ที่เป็นแรงต้านทานภายในของวัสดุที่พยายามต้านแรงภายนอกที่มากระทำ เพื่อไม่ให้วัสดุเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง โดยแรงต้านนี้จะกระทำอย่างสม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ดังนั้นจะได้ว่า

$$S = \frac{F}{A} \quad (2.14)$$

เมื่อ S คือ ความเค้น (stress)

F คือ แรงภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุ

A คือ พื้นที่หน้าตัด

ความเค้นจะมีหน่วยเป็น นิวตัน/เมตร² (N/m²) หรือพาสคาล (Pascal, Pa) และจะขึ้นกับลักษณะของแรงภายนอกที่มากระทำ เช่น วัสดุเมื่ออยู่ในสภาพถูกดึง (tension) จะเกิดความเค้นดึง (tensile stress) ถ้าวัสดุถูกกดหรืออัด (compression) จะเกิดความเค้นกด (compressive stress) หรือวัสดุได้รับแรงที่ทำให้ผิวด้านหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านผิวด้านตรงข้ามในลักษณะที่ถูกเฉือน (shear) จะเกิดความเค้นเฉือน (shear stress) ในขณะที่ความเค้นแบบแกนเดียว (uniaxial stress) เป็นแรงที่กระทำต่อวัสดุในทิศทางแกนเดียวเท่านั้น จะไม่มีแรงจากแกนอื่นมากระทำเพราะจะทำให้เกิดความเค้นเฉือน

All rights reserved

เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจากภายนอก จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างในทิศทางที่แรงมากระทำหรือเกิดความเครียด (strain) จะได้ว่า

$$e = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.15)$$

เมื่อ e คือ ความเครียด (strain)
 ΔL คือ ความยาวของชิ้นวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไป
 L คือ ความยาวของชิ้นวัสดุเดิม

ความเครียดไม่มีหน่วยระบุไว้ แต่นิยมบอกเป็น % elongation จะได้ว่า

$$\%elongation = \frac{\Delta L}{L} \times 100 \quad (2.16)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจะแสดงด้วยค่าอีลาสติคโมดูลัส (elastic modulus) หรือเรียกว่าค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) ซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุที่สามารถแสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุได้โดยที่

$$E = \frac{S}{e} \quad (2.17)$$

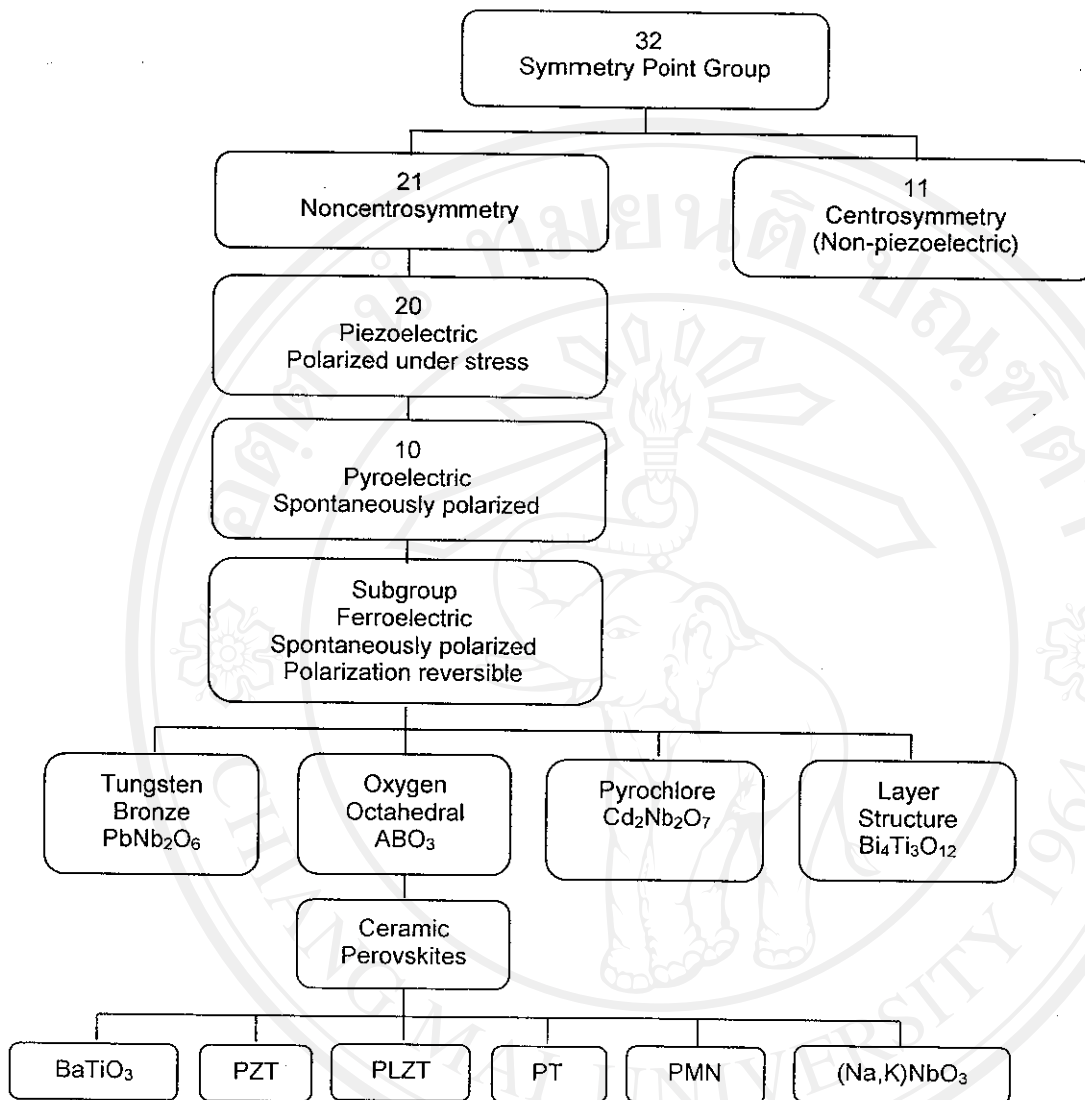
เมื่อ E คือ ค่าอีลาสติคโมดูลัส หรือโมดูลัสของยัง
 S คือ ความเค้น
 e คือ ความเครียด

2.3 ข้อมูลเบื้องต้นของสารเซรามิกเลดไทเทเนต, เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต, เลดแมกนีเซียมไนโอเบต, เลดอินเดียมไนโอเบต, และเลดซิงค์ไนโอเบต

ในระหว่าง ค.ศ.1880-1882 Pierre and Jacques Curie [1] ได้ทำการทดลองครั้งแรกเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริก (Piezoelectricity) กับสารประกอบผลึกเชิงเดี่ยว (single crystal compounds) และในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งการทดลองกระทำโดยการวัดประจุบนผิวของสารตัวอย่างและพบว่าประจุดังกล่าวแปรผันกับแรงเค้น สมบัติดังกล่าวภายหลังถูกขนาน

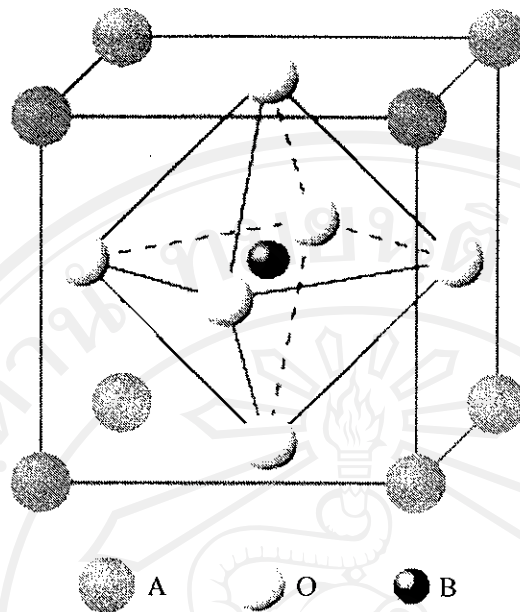
นามว่าสมบัติพิโซอิเล็กทริก ปรัชญาการณพิโซอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ที่สารสามารถเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชัน (polarization) ทางไฟฟ้าเมื่อได้รับพลังงานกล ในทำนองกลับกันเมื่อสารได้รับสนามไฟฟ้าก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและปริมาตรได้ ซึ่งสมบัติพิโซอิเล็กทริกมักจะพบได้ในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก

ความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุจะขึ้นอยู่กับสมบัติของหน่วยเซลล์ (unit cell) ของโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุ จากการแบ่งกลุ่มสมมาตรของผลึกแล้วสามารถ แบ่งออกได้เป็น 32 กลุ่ม [1] ใน 32 กลุ่มจะถูกแบ่งออกเป็น 2 พวก คือ 11 กลุ่มที่มีหน่วยเซลล์สมมาตรกับจุดศูนย์กลาง และ อีก 21 กลุ่มที่มีหน่วยเซลล์ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลาง และใน 21 กลุ่มนี้มีเพียง 20 กลุ่มเท่านั้นที่แสดงสมบัติพิโซอิเล็กทริก ใน 20 กลุ่มนี้จะมีเพียง 10 กลุ่มเท่านั้นที่มีขั้วในตัวเอง (spontaneous polarization, P_s) คือ เกิดโพลาไรเซชันได้ด้วยตัวของสารเองโดยไม่ต้องมีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไป ดังรูป 2.6 เมื่อสารเฟอร์โรอิเล็กทริกถูกนำมาใช้เป็นสารไดอิเล็กทริกจะแตกต่างจากสาร ไดอิเล็กทริกทั่วไป โดยเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่แรงพอจะทำให้ทิศทางของโพลาไรเซชันเปลี่ยนทิศทางได้ และเมื่อลดสนามไฟฟ้าลงจนเป็นศูนย์ ค่าโพลาไรเซชันจะไม่ลดลงเป็นศูนย์เหมือนสาร ไดอิเล็กทริกทั่วไป แต่ค่าโพลาไรเซชันจะลดลงเป็นศูนย์เมื่อให้สนามไฟฟ้าจนมีค่าเป็น E_c (E_c คือ coercive field) จึงทำให้เกิดวงวนฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ดังรูป 2.2 ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก[4]



รูป 2.6 แผนภาพแสดงการแบ่งกลุ่มวัสดุตามสมมาตร (symmetry)[1]

เซรามิกเลดไทเทเนต (PT), เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT), เลดแมกนีเซียมไนโอเบต (PMN), เลดอินเดียมไนโอเบต (PIN) และเลดซิงค์ไนโอเบต (PZN) ต่างก็เป็นเป็นสารเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่จัดอยู่ในกลุ่มของเซรามิกที่มีโครงสร้างแบบเพอโรพสไกต์ (perovskite) ซึ่งเป็นชื่อของกลุ่มที่มีโครงสร้างของแร่แคลเซียมไทเทเนต (CaTiO₃) ที่มีสูตรทั่วไปเป็น ABO₃ อย่างไรก็ตาม แคลเซียมไททานตไม่ได้แสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก แต่สารที่ถูกค้นพบภายหลังที่มีสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกหลายชนิดมีโครงสร้างอยู่ในกลุ่มนี้เช่น แบเรียมไททานต (BaTiO₃), เลดไทเทเนต (PbTiO₃) และเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃ หรือ PZT) เป็นต้น ซึ่งลักษณะโครงสร้างแบบเพอโรพสไกต์จะมีลักษณะเป็นโครงสร้างดังแสดงในรูป 2.7



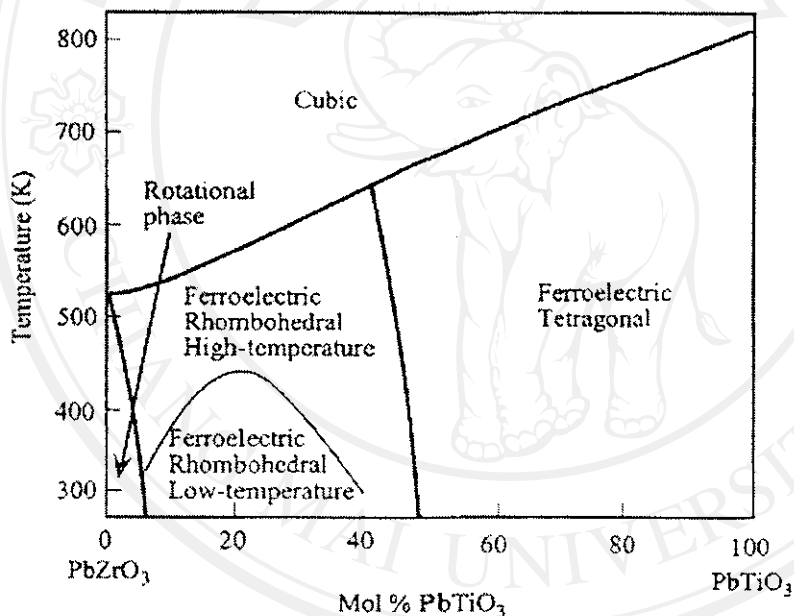
รูป 2.7 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์[9]

เลดไทเทเนต (PbTiO_3) เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ 495°C ซึ่งมีค่าสูงมาก และมีโครงสร้างแบบเตตระโกนอลคล้ายคลึงกับแบเรียมไทเทเนต แต่การเตรียมเซรามิกเลดไทเทเนตให้มีความหนาแน่นสูงทำได้ยากมากถ้าปราศจากการเติมสารเจือ เนื่องจากเมื่อทำการลดอุณหภูมิผ่านจุดคูรี จะทำให้เซรามิกเลดไทเทเนตเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกที่มีสมบัติเป็นพาราอิเล็กทริกไปเป็นเตตระโกนอล ซึ่งแกน c ของหน่วยเซลล์ของเลดไทเทเนตในขณะที่เป็นเตตระโกนอลนั้นมีความยาวมากกว่าแกน a ถึง 6% ทำให้เซรามิกเลดไทเทเนตมักจะแตกเป็นชิ้นๆ ในทางปฏิบัติแล้วเลดไทเทเนตนั้นไม่มีประโยชน์มากนัก แต่การพัฒนาสารละลายของแข็งของเลดไทเทเนตกับสารอื่นเช่น เลดเซอร์โคเนต (PbZrO_3) เกิดเป็นสารที่เรียกว่าเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตหรือที่รู้จักกันในชื่อ PZT นั้นก่อให้เกิดประโยชน์มากมายในการประยุกต์ใช้งานเป็นเซรามิกพิโซอิเล็กทริก[4]

เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริกที่นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมเนื่องจากแสดงสมบัติพิโซอิเล็กทริกได้ดี มีค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล (electromechanical coupling coefficient) และมีอุณหภูมิคูรีสูง ส่งผลให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ ที่สำคัญสามารถเตรียมได้ง่ายและหลากหลายองค์ประกอบและอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมก็ไม่สูงมากนัก เลดเซอร์โคเนตไทเทเนตเป็นสารละลายของแข็งที่เกิดจากเลดเซอร์โคเนต (Lead Zirconate, PbZrO_3) ซึ่งมีสมบัติเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก (antiferroelectric) และมีโครงสร้างเป็นออร์โท-รอมบิก (orthorhombic) กับ เลดไทเทเนต (Lead Titanate, PbTiO_3) ซึ่งแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก และมีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์แบบเตตระโกนอล (tetragonal perovskite) ซึ่งเมื่อรวมกัน

เป็น PZT แล้วจะมีโครงสร้างเป็นแบบ เพอโรฟสไกต์ ซึ่งไอออน ของ Ti^{4+} และ Zr^{4+} อยู่ ณ ตำแหน่ง B และ ไอออนของ Pb^{2+} อยู่ ณ ตำแหน่ง A ของหน่วยเซลล์

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี เซรามิก PZT จะมีโครงสร้างเป็น เพอโรฟสไกต์แบบคิวบิก (cubic perovskite structure) ซึ่งมีสมบัติเป็นพาราอิเล็กทริกและเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างจะเปลี่ยนเป็นเตตระโกนอลหรือรอมโบฮีดรอลซึ่งมีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนขององค์ประกอบ สมบัติทางด้านไดอิเล็กทริกและพิโซอิเล็กทริกของ PZT จะมีสมบัติที่โดดเด่นมาก ณ บริเวณรอยต่อเฟส (morphotropic phase boundary , MPB) โดยมีอัตราส่วนระหว่าง Zr:Ti เท่ากับ 52:48 ดังแสดงในรูป 2.8



รูป 2.8 แผนผังเฟสของเซรามิกระบบ PbZrO_3 - PbTiO_3 [9]

เนื่องจากบริเวณนี้มีเฟสพหุสณกันระหว่างเตตระโกนอล กับรอมโบฮีดรอล ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งบริเวณรอยต่อเฟสนี้สามารถทำขั้ว (poling) ได้ง่าย เนื่องจากการที่ทิศทางของสภาพขั้วในแต่ละเกรนสามารถเกิดการโพลาไรซ์ได้มากถึง 14 ทิศทาง คือ ในเฟสที่เป็นรอมโบฮีดรอล 8 ทิศทาง คือ $[111]$, $[\bar{1}\bar{1}1]$, $[1\bar{1}1]$, $[11\bar{1}]$, $[1\bar{1}\bar{1}]$, $[\bar{1}\bar{1}1]$, $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ และ $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ และ เฟสที่เป็น เตตระโกนอลอีก 6 ทิศทาง คือ $[100]$, $[\bar{1}00]$, $[010]$, $[0\bar{1}0]$, $[001]$ และ $[00\bar{1}]$

เลดแมกนีเซียมไนโอเบต ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ หรือ PMN เป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่จัดอยู่ในกลุ่มที่เรียกว่า รีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก (relaxor ferroelectric) กล่าวคือเป็นวัสดุที่มีสมบัติไดอิ

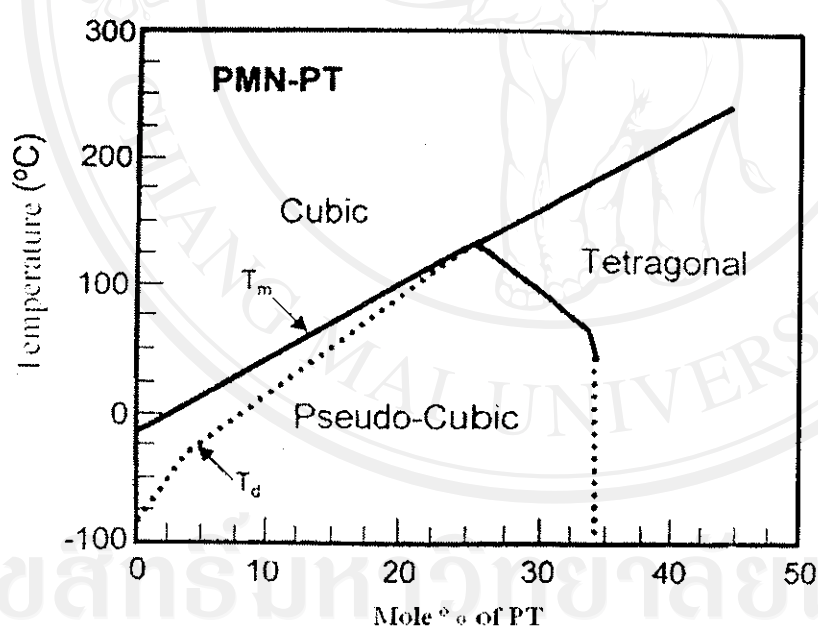
เล็กทรอนิกส์ขึ้นอยู่กับความถี่เป็นอย่างมาก ซึ่งสมบัติของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกจะแตกต่างจากวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ (normal ferroelectrics) ดังสรุปได้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างระหว่างเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติและแบบรีแลกเซอร์[4]

สมบัติ	เฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ	เฟอร์โรอิเล็กทริกแบบรีแลกเซอร์
ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติไดอิเล็กทริก	การเปลี่ยนเฟสที่รวดเร็ว (แบบ 1 st -order หรือ 2 nd -order ที่จุดคูรี T_c)	การเปลี่ยนเฟสแบบช้าๆ ที่อุณหภูมิ T_{max}
ผลของความถี่ต่อสมบัติไดอิเล็กทริก	ไม่ค่อยมีผล	มีผลอย่างชัดเจน
สมบัติไดอิเล็กทริกในช่วงพาราอิเล็กทริก ($T > T_c$)	เป็นไปตามกฎคูรี-ไวส์ (Curie-Weiss law)	เป็นไปตามกฎคูรี-ไวส์กำลังสอง (Curie-Weiss square law)
การมีขั้วไฟฟ้าคงค้าง (P_r)	ค่า P_r สูง	ค่า P_r ต่ำ
การกระเจิงแสง	ขึ้นกับทิศทางอย่างมาก	ไม่ค่อยขึ้นกับทิศทาง
การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	เกิดการแยกเส้นเนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อเปลี่ยนเฟสจากพาราอิเล็กทริกเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก	ไม่เกิดการแยกเส้น

เลดแมกนีเซียมไนโอเบต ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ หรือ PMN) เป็นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ที่สูงมากและสามารถเพิ่ม T_c ได้โดยการเติม Ti ในตำแหน่ง B แต่ความยุ่งยากในการผลิตวัสดุที่มี Pb และ Nb เป็นองค์ประกอบจะอยู่ที่การเกิดขึ้นของโครงสร้างชนิดไพโรคลอไรต์ (pyrochlore) ซึ่งจะทำให้สารเซรามิกที่เตรียมได้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ ในกรณีของ PMN นั้นไพโรคลอไรต์ที่พบจะมีส่วนประกอบเป็น $\text{Pb}_{1.83}\text{Nb}_{1.71}\text{Mg}_{0.29}\text{O}_{6.39}$ ซึ่งที่อุณหภูมิห้องเป็นวัสดุพาราอิเล็กทริกที่มี ϵ_r ประมาณ 130[4] ดังนั้นในการเตรียมสารเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบตจึงนิยมเตรียมด้วยวิธีโคลัมไบต์ (columbite method) ซึ่งเป็นวิธีเตรียมผงแบบสองขั้นตอน โดยเริ่มจากการเผาเตรียม (prereaction) ผงแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และผงไนโอเบียมออกไซด์ (Nb_2O_5) ให้อยู่ในรูปของผงโคลัมไบต์ที่มีสูตรเป็น MgNb_2O_6 เมื่อได้ผงโคลัมไบต์แล้วจึงนำผงที่ได้มาทำการเผาแคลไซต์อีกครั้งร่วมกับตะกั่ว (PbO) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นผง PMN ที่มีสูตรเป็น $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ทั้งนี้เมื่อนำสาร PMN ไปศึกษาถึงสมบัติไดอิเล็กทริกพบว่า อุณหภูมิคูรีของสาร PMN มีค่าต่ำ

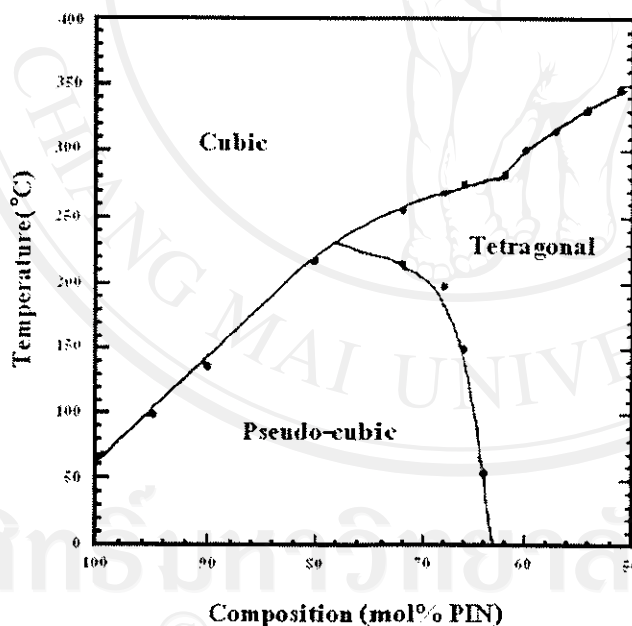
ประมาณ -10 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก ดังนั้นจึงมักจะนิยมผสมสาร PMN รวมเข้ากับสารเพอร์โรอิเล็กทริกอื่น เพื่อที่จะเพิ่มอุณหภูมิคูรีให้มีค่าสูงขึ้น โดยระบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือระบบสารละลายของแข็งของ $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 หรือ (PMN-PT) ซึ่งแผนผังเฟสของระบบนี้แสดงในรูปที่ 2.9 การเพิ่ม PT ซึ่งมีอุณหภูมิคูรีที่สูงถึง 495 องศาเซลเซียสเข้าไปในระบบมากขึ้นจะทำให้ T_c มีค่าสูงขึ้น และสมบัติทางไฟฟ้าของระบบดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงจากพฤติกรรมแบบรีแลกเซอร์ไปเป็นแบบพิโซอิเล็กทริกแบบอ่อน (soft piezoelectric) โดยที่ส่วนผสมที่ตำแหน่ง MPB (0.65PMN-0.35PT) นั้นจะมีสมบัติพิโซอิเล็กทริกซึ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทรานสดิวเซอร์พิโซอิเล็กทริก (piezoelectric transducers) ส่วนผสมที่ได้รับความนิยมมากที่สุดสำหรับระบบนี้คือ 0.9PMN-0.1PT ซึ่งมีอุณหภูมิคูรีใกล้อุณหภูมิห้องทำให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) สูงมาก และยังสามารถให้ความเครียดอิเล็กโตรสตริกทีฟ (electrostrictive strain) ถึง 0.1% ทำให้ถูกนำไปใช้ในตัวเก็บประจุแบบหลายชั้น (multilayer capacitors) และ แอ็กทูเอเตอร์ (actuators)[14]



รูป 2.9 แผนผังเฟสของสารละลายของแข็ง PMN-PT[14]

เลดอินเดียมไนโอเบต (PIN) เป็นสารเพอร์โรอิเล็กทริกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจมาก เนื่องจากสามารถเปลี่ยนสถานะจากเฟสที่มีสภาพเป็นรีแลกเซอร์ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นซูโดคิวบิก (pseudo-cubic) ให้กลายเป็นเฟสที่มีสภาพเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งมีโครงสร้างเป็นออโรธอมบิก (orthorhombic) ได้ด้วยการอบอ่อน (anneal)[6,7] ซึ่งในขณะที่เลดอินเดียมไนโอเบตอยู่ในสถานะที่เป็นรีแลกเซอร์นั้น เมื่อนำมาทำการวัดสมบัติไดอิเล็กทริกพบว่าที่ความถี่ 1 kHz มีค่าอุณหภูมิคูรีที่ต่ำ

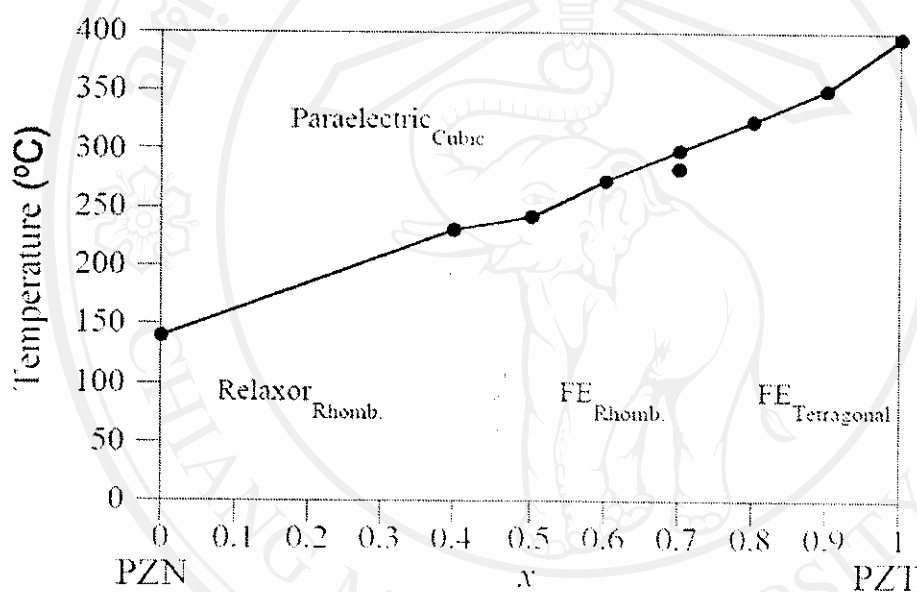
ประมาณ 66 องศาเซลเซียส)[6,7] โดยที่เมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีค่าอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ประมาณ 168 องศาเซลเซียส ในการสังเคราะห์เซรามิกเลดอินเดียมไนโอเบตให้บริสุทธิ์มักทำได้ยากเนื่องจากมีองค์ประกอบของ Pb และ Nb ซึ่งมักจะเกิดโครงสร้างชนิดไพโรคลออร์ (pyrochlore) ขึ้น ซึ่งจะทำให้สารเซรามิกที่เตรียมได้มีสมบัติไดอิเล็กทริกที่ไม่ดีนัก ดังนั้นจึงในการเตรียมสารเซรามิกเลดอินเดียมไนโอเบต จึงนิยมเตรียมด้วยวิธีวูล์ฟราไมต์ (wolframite method) ซึ่งเป็นวิธีเตรียมผงแบบสองขั้นตอน โดยเริ่มจากการเผาเตรียม (prereaction) ผงอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) และผงไนโอเบียมออกไซด์ (Nb_2O_5) ให้อยู่ในรูปของ InNbO_4 เมื่อได้ผง InNbO_4 แล้วจึงนำผงที่ได้มาทำการเผาเคลือบอีกครั้งร่วมกับตะกั่ว (PbO) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นผง PIN ที่มีสูตรเป็น $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$ นอกจากนี้แล้วมักจะผสมสาร PIN รวมเข้ากับสารเฟอร์โรอิเล็กทริกอื่น เพื่อที่จะลดปริมาณของไพโรคลออร์และเพิ่มอุณหภูมิคูรีให้มีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของการใช้งานสูงขึ้นด้วย โดยระบบที่ได้รับความสนใจคือ ระบบสารละลายของแข็งของ $\text{Pb}(\text{In}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 หรือ (PIN-PT) ซึ่งแผนผังเฟสของระบบนี้แสดงในรูปที่ 2.10



รูป 2.10 แผนผังเฟสของสารละลายของแข็ง PIN-PT[26]

เลดซิงค์ไนโอเบต (PZN) เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริกที่แสดงความเป็นรีแลกเซอร์อีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากผลึกเดี่ยวเลดซิงค์ไนโอเบตมีค่าไดอิเล็กทริกและค่าพิโซอิเล็กทริกสูงมาก ซึ่งสูงกว่าสารเฟอร์โรอิเล็กทริกที่สำคัญหลายชนิด เช่น เลดเซอร์โคเนตไททานเต เป็นต้น จึงมักนิยมนำไปประยุกต์ใช้ในทรานสดิวเซอร์และตัวขับเคลื่อน เลดซิงค์ไนโอเบตมีลักษณะโครงสร้างเป็นรอม

โบฮีตรอลและเมื่อวัดสมบัติไดอิเล็กทริกแล้วพบว่ามีความถี่อยู่ที่ประมาณ 140 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามในการเตรียมเลดซิงค์ในโอเบตมักจะมีเฟสไพโรคลอร์ (pyrochlore) เกิดขึ้นเสมอ ซึ่งจะทำให้สมบัติทางไฟฟ้าของเลดซิงค์ในโอเบตมีค่าน้อยลง[8] ดังนั้นในการเตรียมสารเซรามิกเลดซิงค์ในโอเบตจึงมักนิยมเตรียมด้วยวิธีโคลัมไบต์ (columbite method) ซึ่งเป็นวิธีเตรียมผงแบบสองขั้นตอนเพื่อลดปริมาณของเฟสไพโรคลอร์ และเพิ่มปริมาณของเฟสเพอรอฟสไกต์ให้มากขึ้น นอกจากนี้แล้วการผสมสารเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดอื่นรวมเข้ากับสาร PZN เช่น PZT ก็เป็นวิธีที่นิยมในการลดปริมาณของไพโรคลอร์ ซึ่งแผนผังเฟสของระบบ PZT-PZN แสดงในรูปที่ 2.11



รูป 2.11 แผนผังเฟสของสารละลายของแข็ง PZT-PZN[27]

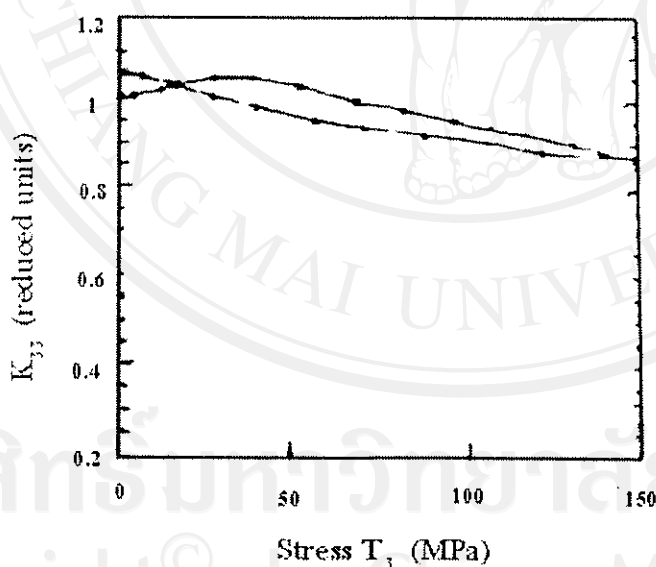
2.4 สมบัติไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดียว

สารเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก จะมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติไดอิเล็กทริกภายใต้สถานะที่มีความเค้น เนื่องจากการที่พลังงานเชิงกลเข้าไปเปลี่ยนแปลงพลังงานของโพลาริเซชัน ทำให้เกิดกระบวนการจัดเรียงตัวใหม่ของโดเมน (domain-reorientation process) ซึ่งในกระบวนการจัดเรียงตัวใหม่ของโดเมนจะดูเหมือนว่ามีการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน[15] โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงแตกต่างกันภายใต้ความเค้นที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเซรามิก องค์ประกอบของสารเซรามิก และการผ่านการทำซ้ำ

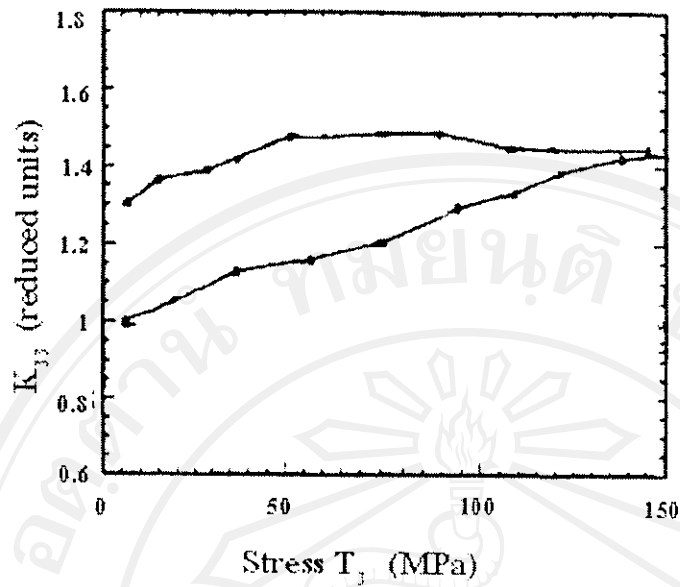
การศึกษาถึงผลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กทริกในวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของโดเมน จะสามารถช่วยให้เข้าใจโครงสร้างของโดเมน และกลไกที่เกิดขึ้นภายใน

โดเมนได้ดีขึ้น[16] สำหรับข้อมูลของการศึกษาถึงอิทธิพลของความเค้นต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกชนิดต่างๆ สามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้

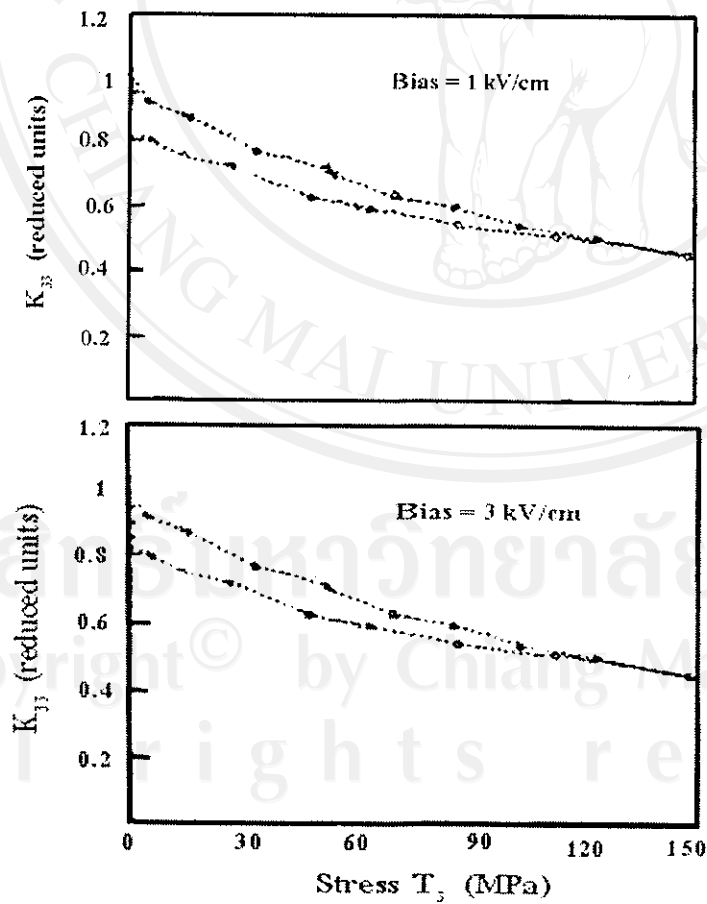
ในปี ค.ศ. 1996 Zhao และคณะ[16] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความเค้นเชิงกลต่อสมบัติไฟฟ้าเชิงกลของเซรามิก PZT และเซรามิก 0.9PMN-0.1PT จากผลการทดลองพบว่า ใน PZT-5H (soft PZT) (รูป 2.12) จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงความเค้น 0-40 MPa แต่หลังจากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็จะลดลงเมื่อความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 40 ถึง 150 MPa สำหรับเซรามิก PZT-8 (hard PZT) (รูป 2.13) จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 0-150 MPa ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของโดเมน (domain) เมื่อได้รับความเค้นจากภายนอก ซึ่งใน soft PZT จะมีการเปลี่ยนแปลงของโดเมนได้ง่ายกว่าใน hard PZT จึงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ soft PZT มีค่าลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น สำหรับการทดลองในเซรามิก 0.9PMN-0.1PT จะมีการให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกด้วย (1 kV/cm และ 3 kV/cm) (รูป 2.14) ซึ่งพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น (0-150 MPa) ทั้งสองสถานะของการให้สนามไฟฟ้าจากภายนอก



รูป 2.12 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, K_{33}) ที่เป็นผลมาจากความเค้นเชิงกลภายใต้สนามไฟฟ้าของเซรามิก PZT-5H[16]

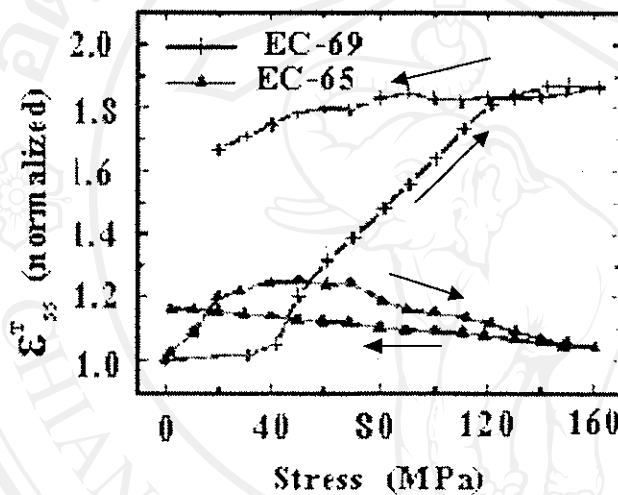


รูป 2.13 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, K_{33}) ที่เป็นผลมาจากความเค้นเชิงกลภายใต้สนามไฟฟ้าของเซรามิก PZT-8[16]



รูป 2.14 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, K_{33}) ที่เป็นผลมาจากความเค้นเชิงกลภายใต้สนามไฟฟ้าของเซรามิก 0.9PMN-0.1PT[16]

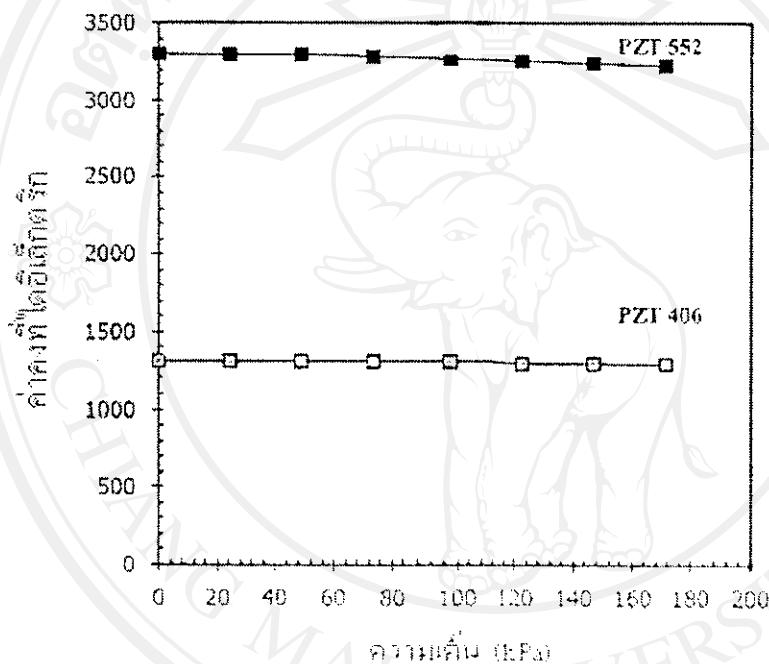
ต่อมาในปี ค.ศ. 2000 Yang และคณะ[17] ได้ศึกษาถึงผลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไพโซอิเล็กทริก สมบัติไดอิเล็กทริก และสมบัติเชิงกลของเซรามิก EC-69 (hard PZT) และ EC-65 (soft PZT) ซึ่งแสดงผลการทดลองดังรูป 2.15 จากผลการทดลองพบว่าใน EC-69 (hard PZT) จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นมากเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นในช่วง 0-160 MPa ส่วนใน EC-65 (soft PZT) จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยตามความเค้นที่เพิ่มขึ้น (0-160 MPa) เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของโดเมน การทำให้หมดสภาพความเป็นขั้ว และการเปลี่ยนทิศทางของโพลาริซเซชัน ใน hard PZT มีการเปลี่ยนแปลงได้ยากกว่าใน soft PZT



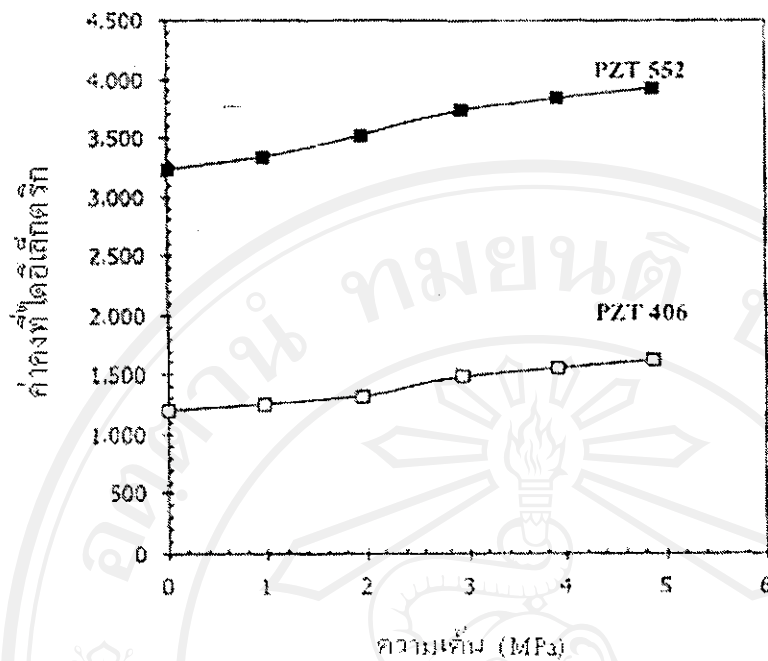
รูป 2.15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดียวของเซรามิก PZT[17]

ถัดมาในปี ค.ศ. 2003 สุพัตรา วงศ์แสนใหม่[18] ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT 552 (soft PZT) PZT 406 (hard PZT) และ PMN-PZT ภายใต้สภาวะความเค้นต่ำและสูง ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.16-2.21 โดยจากผลการทดลองพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ soft PZT มีการเปลี่ยนแปลงตามความเค้นมากกว่า hard PZT ทั้งในสภาวะความเค้นต่ำ (0-170 kPa) และสูง (0-5 MPa) เนื่องมาจากใน hard PZT จะมีโครงสร้างของโดเมนที่เสถียรกว่าใน soft PZT สำหรับเซรามิก PMN-PZT ที่ถูกทำขั้วแล้ว เมื่อทำการทดลองในสภาวะความเค้นต่ำ (0-700 kPa) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยโมลของ PZT แต่เมื่อทดลองในสภาวะความเค้นสูง (0-5 MPa) เซรามิกที่มี PMN เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งได้แก่ 0.9PMN-0.1PT และ 0.7PMN-0.3PT พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าลดลงเมื่อความเค้นสูงขึ้น ซึ่งในขณะที่เซรามิกที่มี PZT เป็นองค์ประกอบหลัก (0.1PMN-

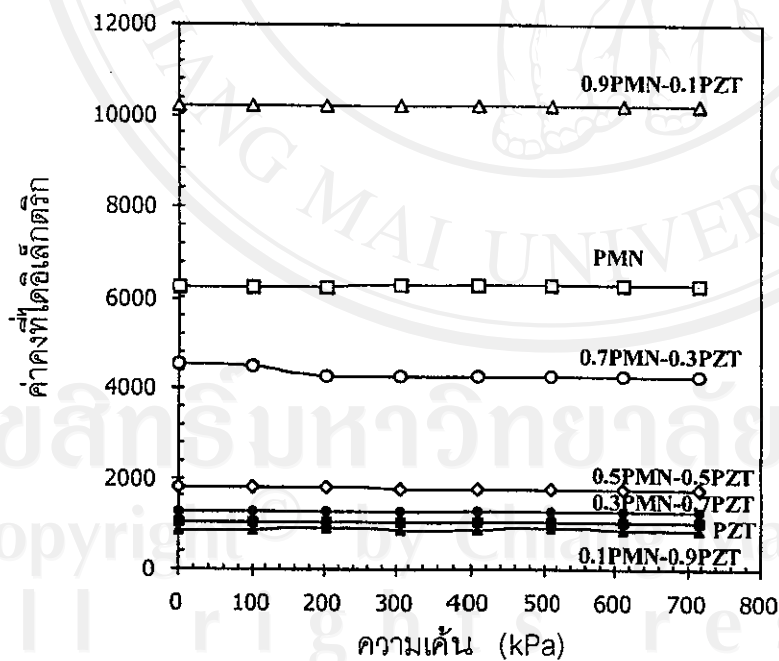
0.9PZT, 0.3PMN-0.7PZT และ 0.5PMN-0.5PZT) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเค้นสูงขึ้น ส่วนในเซรามิก PMN-PZT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้วนั้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงความเค้นต่ำ และจะคงที่เมื่อความเค้นสูงขึ้น โดยที่ไม่ขึ้นกับองค์ประกอบของสารเซรามิก ซึ่งแตกต่างจากเซรามิก PMN-PZT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว เนื่องจากภายใต้ความเค้นแบบแกนเดียว โครงสร้างของโดเมนจะต้องผ่านการเปลี่ยนทิศทางของโดเมน การจับกันของผนังโดเมน การลดการเสื่อมสภาพ และการทำให้หมดสภาพความเป็นขั้ว



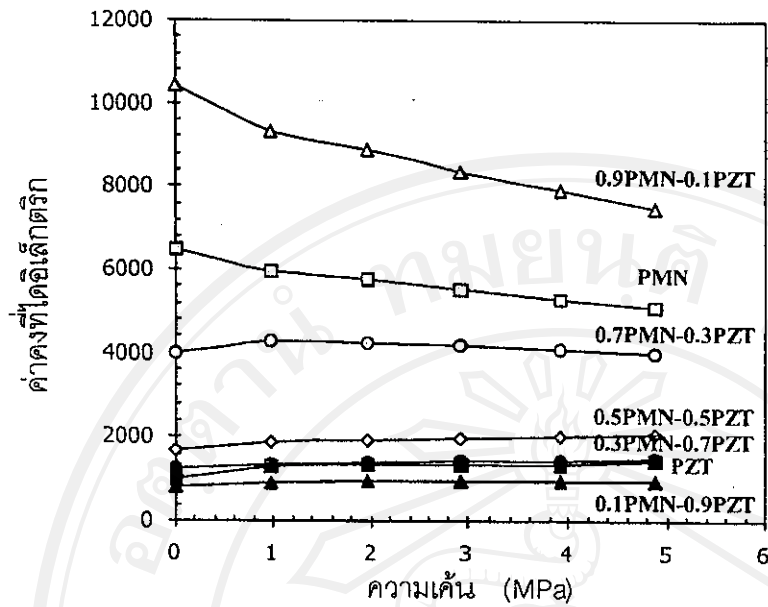
รูป 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก PZT406 และ PZT552 ภายใต้สภาวะความเค้นต่ำ[18]



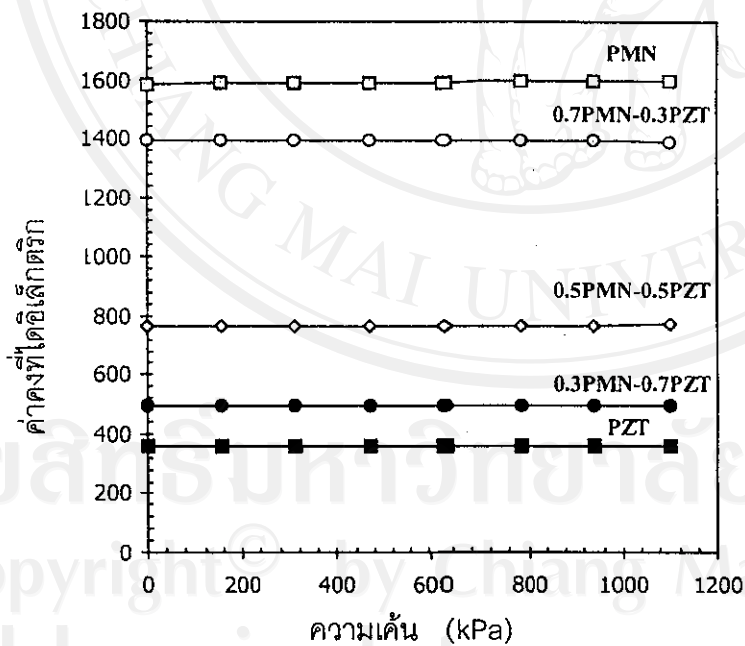
รูป 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก PZT406 และ PZT552 ภายใต้สภาวะความเค้นสูง[18]



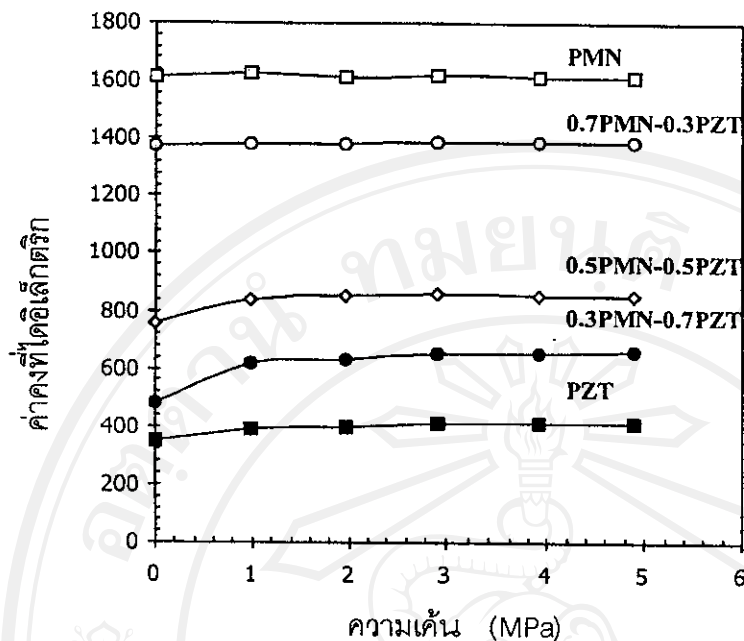
รูป 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก PMN-PZT ที่ถูกทำซ้ำแล้ว ภายใต้สภาวะความเค้นต่ำ[18]



รูป 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความเค้นของเซรามิก PMN-PZT ที่ถูกทำขึ้นแล้ว ภายใต้สภาวะความเค้นสูง[18]

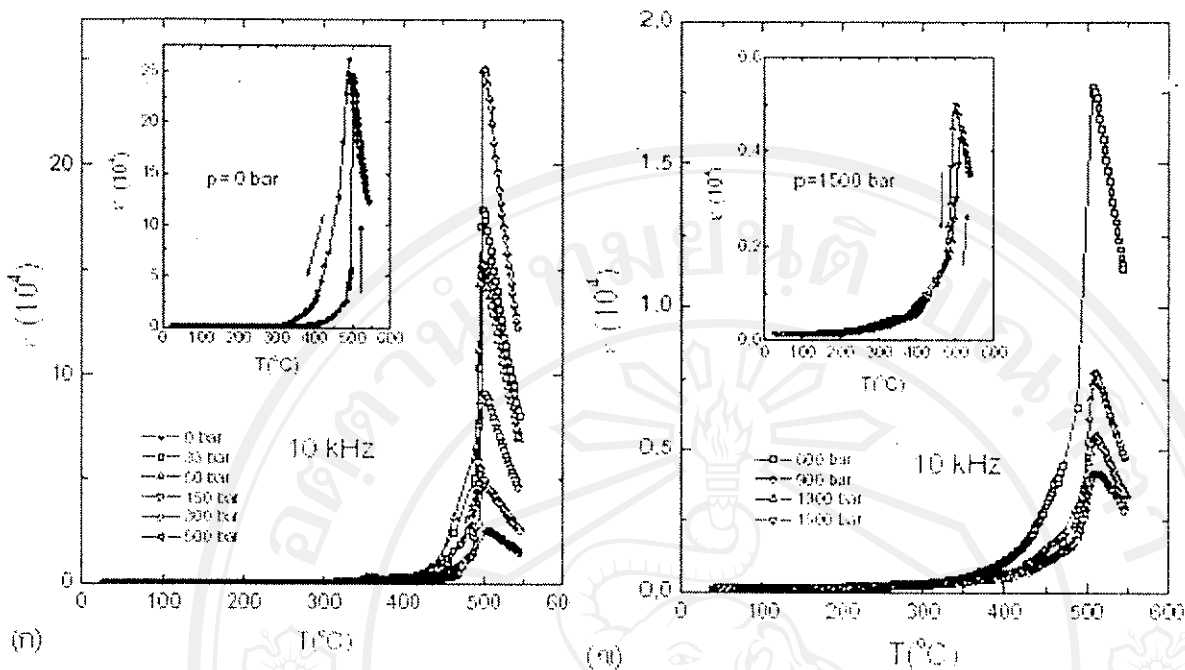


รูป 2.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความเค้นของเซรามิก PMN-PZT ที่ไม่ถูกทำขึ้นแล้ว ภายใต้สภาวะความเค้นต่ำ[18]



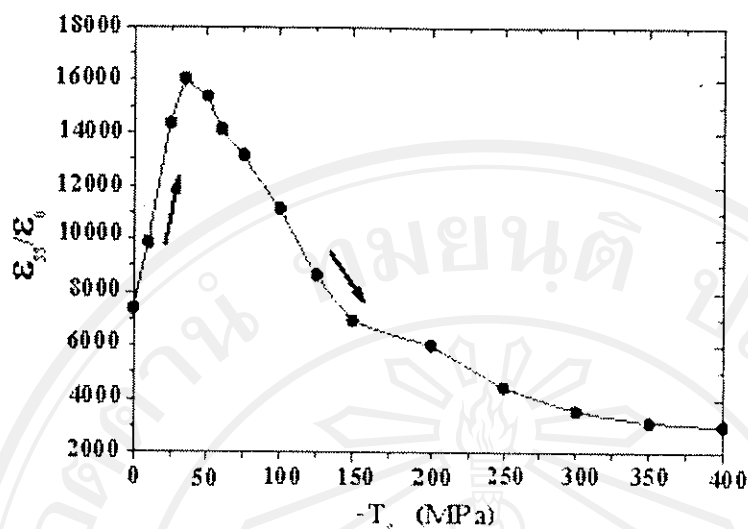
รูป 2.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความเค้นของเซรามิก PMN-PZT ที่ไม่ถูกทำซ้ำ ภายใต้สภาวะความเค้นสูง[18]

ในปี ค.ศ. 2003 เช่นเดียวกัน Suchanicz และคณะ[19] ได้ทำการศึกษาลักษณะของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของผลึกเดี่ยว PbTiO_3 ซึ่งแสดงผลการทดลองดังรูป 2.22 โดยพบว่าความเค้นที่ให้เข้าไปจะเลื่อนอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกเป็นเทอร์โรโกนอล และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าลดลงเมื่อความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้น



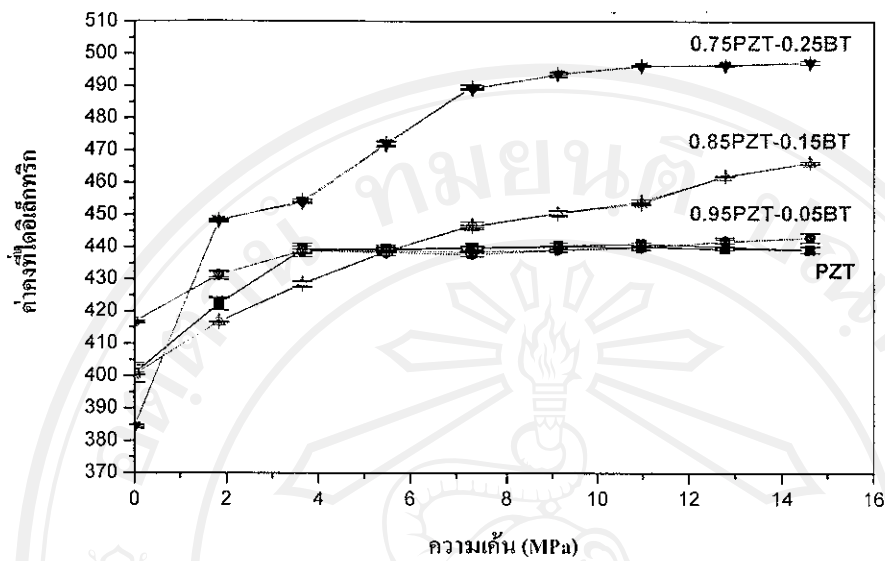
รูป 2.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของผลึกเดี่ยว PbTiO_3 กับอุณหภูมิที่ความดันต่างๆ กัน (ก) ที่ความดัน 0-500 bar (ข) ที่ความดัน 600-1500 bar[19]

ต่อมาในปี ค.ศ. 2004 Zhou และคณะ[20] ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติสัณฐานวิทยาของ soft PZT ซึ่งแสดงผลการทดลองดังรูป 2.23 โดยจากการทดลองพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 7400 เมื่อความเค้นมีค่าเป็นศูนย์ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น แต่หลังจากที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์มีค่าสูงสุด 16000 ที่ความเค้นเท่ากับ -35 MPa ก็จะมีค่าลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ที่ความเค้นเท่ากับ -400 MPa โดเมนทั้งหมดจะมีการจัดเรียงตัวตั้งฉากกับสนามที่ให้เข้าไป ซึ่งจากการทดลองสามารถกล่าวได้ว่าความเค้นจะมีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก

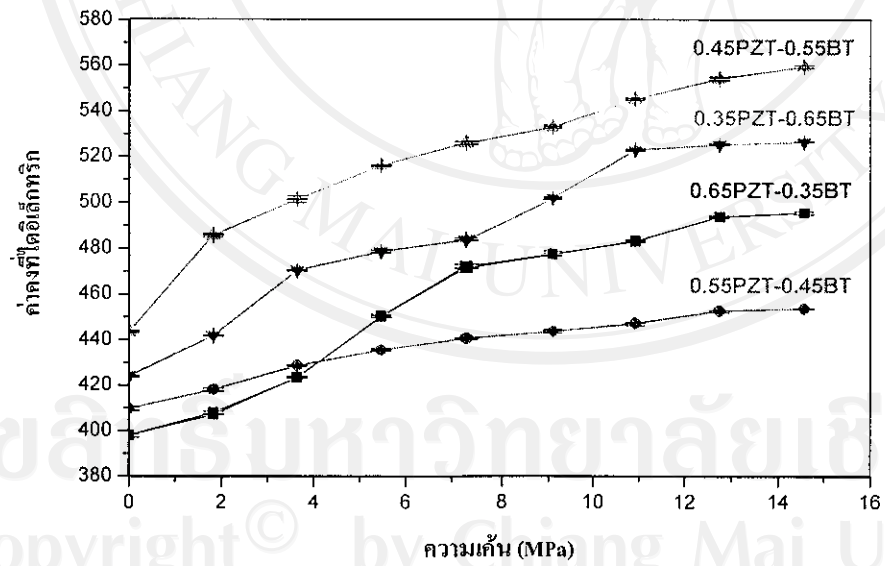


รูป 2.23 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (วัดจากความชันของ P-E curves กับสนามไฟฟ้า) เมื่อความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้น[20]

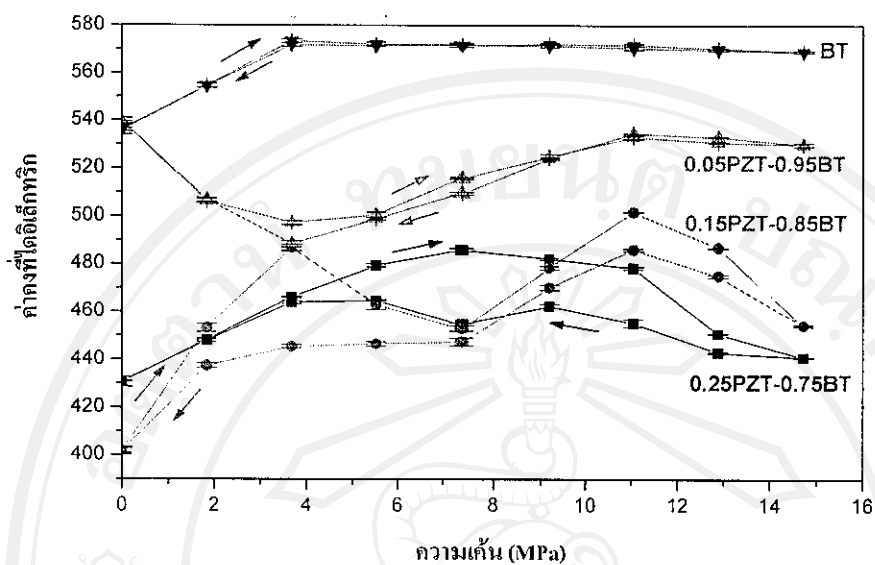
ต่อมาในปี ค.ศ. 2005 สวรินทร์ จมึงลาภ[21] ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต-แบเรียมไทเทเนต โดยจากการทดลองพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{PZT}-x\text{BT}$ ที่ยังไม่ได้ผ่านการทำขั้ว พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ยกเว้นในเซรามิกที่มี BT เป็นองค์ประกอบหลัก ($0.75 \leq x \leq 0.95$) จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในทิศทางที่ลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในระบบเซรามิก $(1-x)\text{PZT}-x\text{BT}$ ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.24-2.29 ทั้งนี้ในเซรามิกที่ผ่านการทำขั้วแล้วนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติไดอิเล็กทริกที่แน่นอนมากกว่าในเซรามิกที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงในเซรามิก PMN-PZT ทั้งที่ผ่านการทำขั้วแล้ว และยังไม่ได้ผ่านการทำขั้ว จากงานวิจัยของสุพัตรา



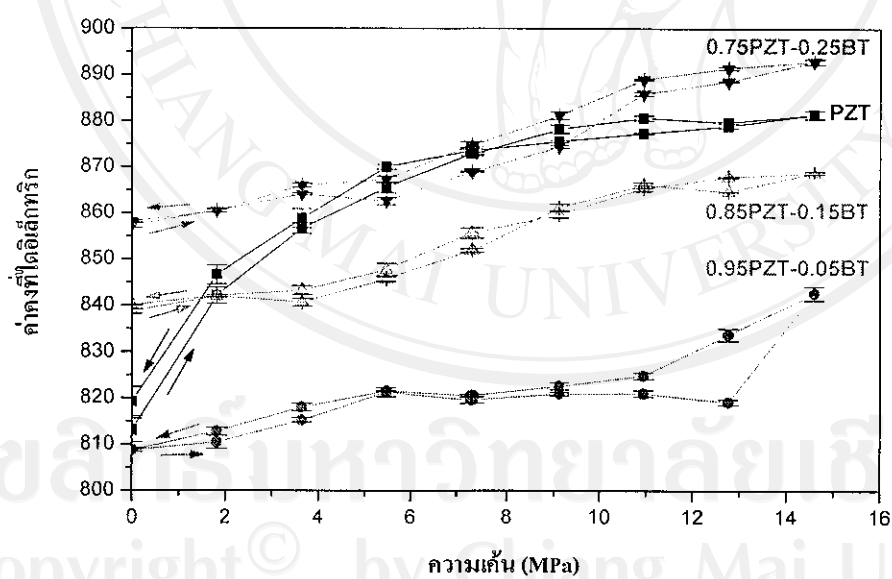
รูป 2.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก PZT, 0.95PZT-0.05BT, 0.85PZT-0.15BT และ 0.75PZT-0.25BT ที่ไม่ถูกทำจั่ว[21]



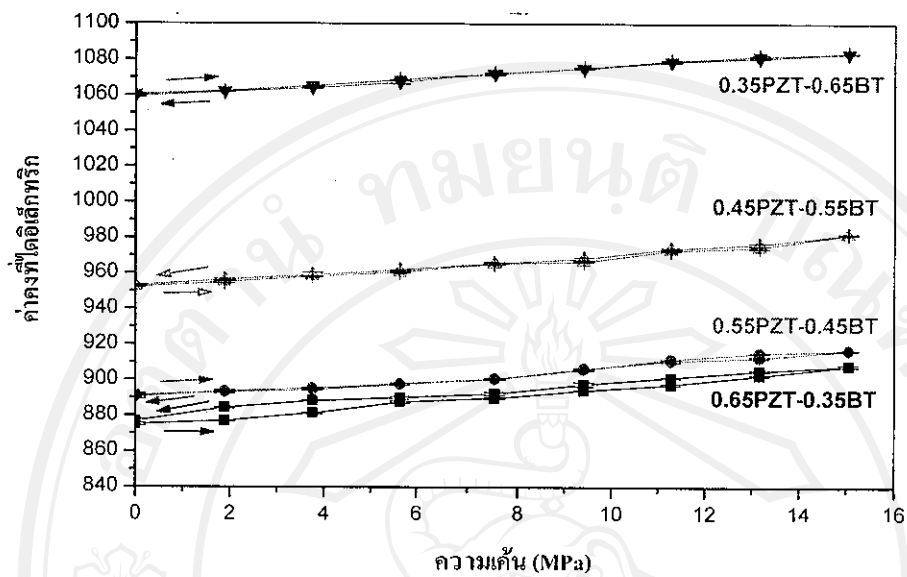
รูป 2.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.65PZT-0.35BT, 0.55PZT-0.45BT, 0.45PZT-0.55BT และ 0.35PZT-0.65BT ที่ไม่ถูกทำจั่ว[21]



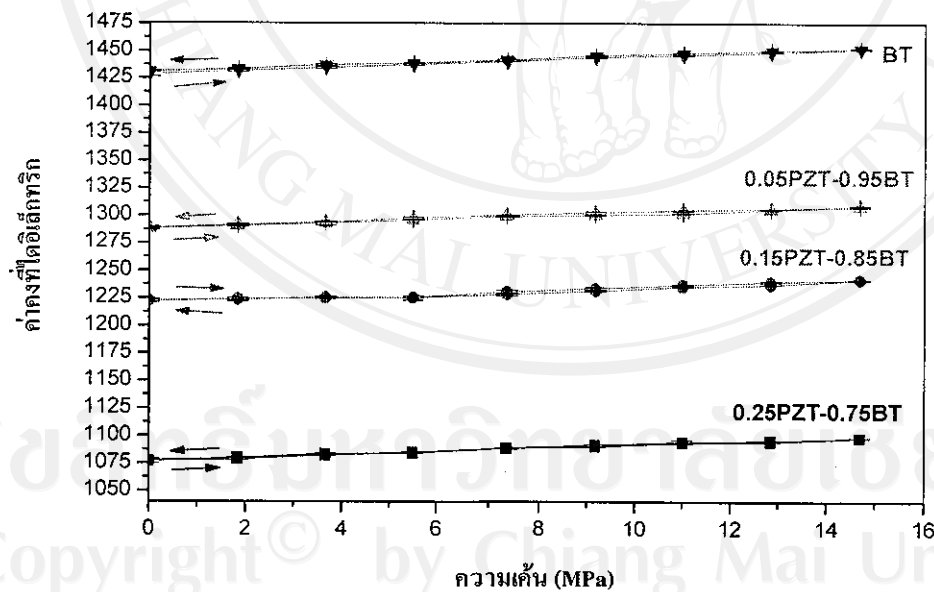
รูป 2.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.25PZT-0.75BT, 0.15PZT-0.85BT, 0.05PZT-0.95BT และ BT ที่ไม่ถูกทำซ้ำ[21]



รูป 2.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก PZT, 0.95PZT-0.05BT, 0.85PZT-0.15BT และ 0.75PZT-0.25BT ที่ผ่านการทำซ้ำแล้ว[21]



รูป 2.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.65PZT-0.35BT, 0.55PZT-0.45BT, 0.45PZT-0.55BT และ 0.35PZT-0.65BT ที่ผ่านการทำซ้ำแล้ว[21]



รูป 2.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.25PZT-0.75BT, 0.15PZT-0.85BT, 0.05PZT-0.95BT และ BT ที่ผ่านการทำซ้ำแล้ว[21]

สำหรับเซรามิกในระบบ PMN-PT, PIN-PT และ PZT-PZN ยังไม่พบว่ามีการศึกษาถึงสมบัติไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดียวของสารเซรามิกในระบบนี้ จึงเป็นที่น่าสนใจในการทำการศึกษาอิทธิพลดังกล่าว เพื่อเป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่และเป็นส่วนช่วยในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง หรือศึกษาสมบัติอื่นๆต่อไปได้



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved