

บทที่ 2

ทฤษฎี

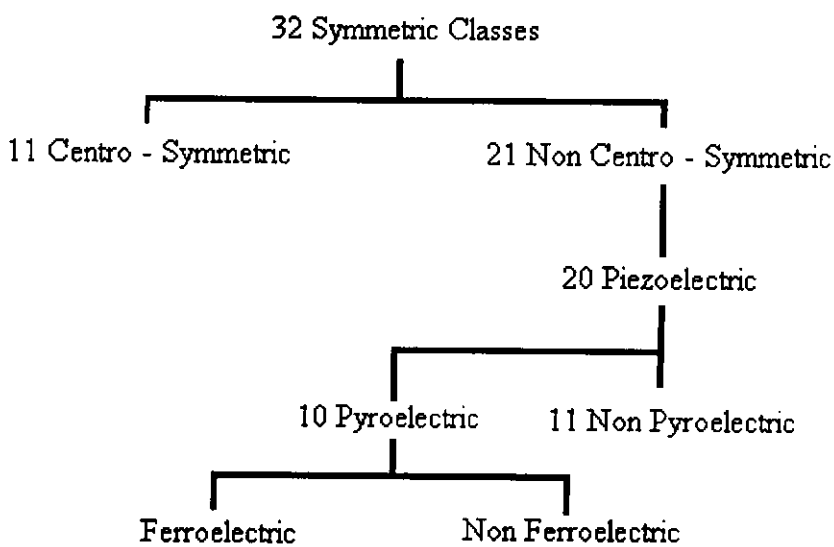
บทที่ 2 นี้กล่าวถึงประวัติการค้นพบปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก สมบัติของ PZT ทฤษฎี และค่าคงที่ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง โดยแยกเป็นหัวข้อ ดังนี้

1. ประวัติการค้นพบปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1880 โดยสองพี่น้องตระกูลคูรี คือ ปิแอร์ คูรี และ แจ็ก คูรี ทั้งสองแสดงให้เห็นว่า เมื่อให้แรงกดแก่ผลึกควออตซ์ (quartz) จะเกิดประจุที่บริเวณผิวของวัสดุ โดยปริมาณประจุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงกดแต่เมื่อเอาแรงกดออก ประจุที่บริเวณผิวหน้าทั้งสองจะหายไป ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่าปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบตรง คำว่า“piezo” มาจากภาษากรีก หมายถึง “to press” การนำคำว่า “piezo” มาใช้กับคำว่า “electric” เป็น “piezoelectric” ซึ่งเกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงไฟฟ้า และในปีต่อมา ลิปแมนน์ (Lippmann) ใช้ทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ทำนายว่า มีปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบผันกลับ ในวัสดุดังกล่าวเช่นกัน และปิแอร์และแจ็ก ก็สามารถพิสูจน์การทำนายดังกล่าวสำเร็จ ในระยะต่อมามีการศึกษาค้นคว้าเพื่อวางรากฐานทางด้านไพโซอิเล็กทริก ซึ่งมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่มีส่วนร่วมในการพัฒนาปรับปรุงวงกฏเกณฑ์และทฤษฎีต่างๆ เช่น ลอร์ดเคลวิน (Lord Kelvin) โวลต์มาร์ วอยท์ (Woldemar Voigt) ร่วมกันตั้งกฎและทฤษฎี เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก ความเป็นไพโซอิเล็กทริกนั้นจะขึ้นกับลักษณะสมมาตร (symmetry) ของหน่วยเซลล์ (unit cell) โดยสารที่สามารถแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้คตินั้นจะต้องมีหน่วยเซลล์ประเภทที่ไม่มีศูนย์กลางตามสมมาตร (non-centrosymmetry) ซึ่งมีการจัดกลุ่มผลึกตามความสมมาตร ของผลึกซึ่งแสดงดังภาพประกอบที่ 2.1 การจัดกลุ่มผลึกตามสมมาตรของผลึกสามารถแบ่งผลึกออกเป็น 32 กลุ่มผลึก (crystal class หรือ point group) โดยมีกลุ่มผลึก 21 กลุ่มผลึกที่ขาดจุดศูนย์กลางความสมมาตรและในจำนวนนี้มี 20 กลุ่ม ที่สามารถแสดงสมบัติความเป็นไพโซอิเล็กทริกได้

ต่อมาในปี ค.ศ. 1917 โดย พอล แลงจีวิน (Paul Langevin) ชาวฝรั่งเศสใช้ผลึกควออตซ์เป็นตัวส่ง (transmitter) และตัวรับ (receiver) คลื่นเสียง (acoustic wave) ที่เดินทางในน้ำ ซึ่งเป็นหลักการของเครื่องโซนาร์ (sonar) ในเวลาต่อมา ความสำเร็จของเครื่องโซนาร์ทำให้การวิจัย

ด้านการประยุกต์ใช้งานด้านวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก พัฒนาอย่างรวดเร็วและงานค้นคว้าวิจัยที่เด่นมากคือ งานของ เคดี (W. G. Cady) และมาสัน (W.P. Mason) แห่งห้องปฏิบัติการเบลล์ (Bell laboratory) ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ริเริ่มประยุกต์ใช้ผลึกควออร์ตซ์เป็นตัวสั่น (oscillator) และตัวกรอง (filter) สัญญาณความถี่ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ในระยะต่อมาผลึกไพเอโซอิเล็กทริกโดยเฉพาะ ควออร์ตซ์ ก็กลายเป็นชิ้นส่วนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าแทบทุกชนิด เช่น โทรทัศน์ นาฬิกา และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น



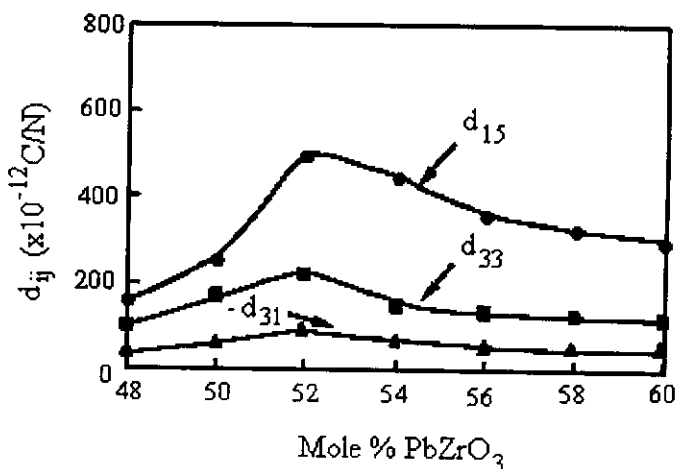
ภาพประกอบที่ 2.1 แสดงการจัดกลุ่มผลึกตามสมมาตรของผลึก (ที่มา : Lang and Gupta, 2000)

ในช่วงปี ค.ศ. 1940-1965 เป็นยุคของการศึกษาค้นคว้าทางวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก เพื่อประยุกต์ใช้ในทางการค้าและอุตสาหกรรม ประเทศสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และสหภาพโซเวียตรัสเซีย ตั้งกลุ่มวิจัยเพื่อพัฒนาทางด้านวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก ชนิดใหม่ๆ ซึ่งเป็นการพัฒนาที่สำคัญ คือการค้นพบ แบเรียมไทเทเนต (barium titanate) ซึ่งเป็นวัสดุไพเอโซเซรามิกชนิดแรก มีโครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ (Jaffe, 1971) แต่วัสดุดังกล่าว ไม่สามารถแสดงสมบัติไพเอโซอิเล็กทริกได้ เพราะว่าโครงสร้างผลึกดังกล่าวมีความสมมาตร จึงทำให้ผลรวมของการโพลาไรเซชันมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่เมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงความเข้มสูงแก่วัสดุไพเอโซเซรามิกทำให้จุดศูนย์กลางโครงสร้างผลึกขาดความสมมาตรไป และเมื่อเอาสนามไฟฟ้าออก วัสดุไพเอโซเซรามิก มีการดก้างของการโพลาไรเซชันจึงทำให้ค่าการโพลาไรเซชันรวมมีค่าไม่เท่ากับศูนย์จึงทำให้วัสดุดังกล่าวสามารถ

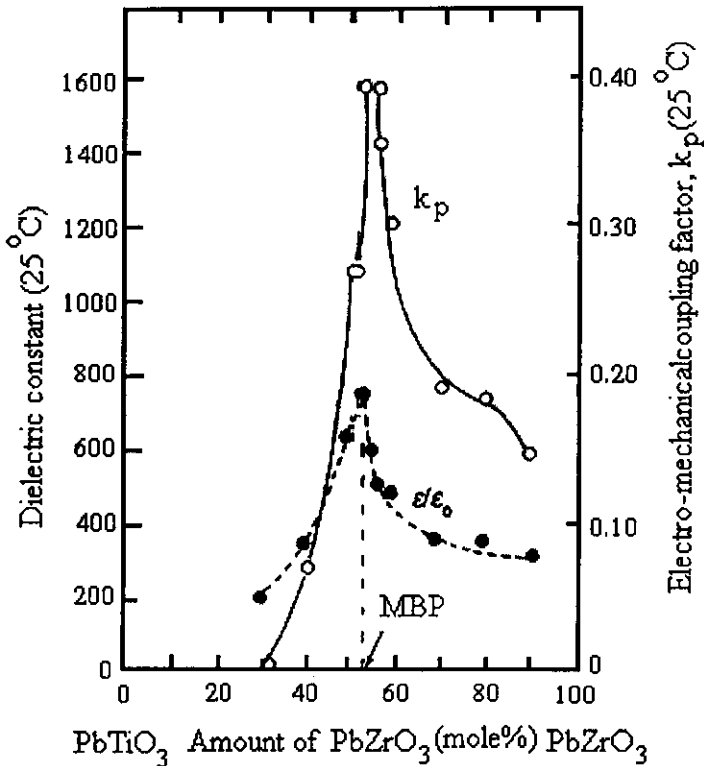
แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนแปลงที่สำคัญสำหรับวงการเซรามิก ในเวลาต่อมาได้มีการศึกษาพัฒนา เพื่อหาวัสดุเซรามิกชนิดอื่นที่สามารถแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ โดยใช้อะตอมของธาตุ เช่น ตะกั่ว(Pb) สตรอนเตียม (Sr) หรือ แคลเซียม (Ca) แทนที่อะตอมของแบเรียม (Ba) และใช้อะตอมเซอร์โคเนียม (Zr) หรือ ดีบุก (Sn) ลงไปแทนที่อะตอมไทเทเนียม (Ti) ทำให้ได้วัสดุเซรามิกชนิดใหม่เกิดขึ้นมากมาย เช่น แคลเซียมไทเทเนต (calcium titanate) เลดแมกนีเซียมไนโอเบต (lead magnesium niobate) เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไทเทเนต (lead lanthanum zirconate titanate) ลิเทียมไนโอเบต (lithium niobate) เลดไนโอเบต (lead niobate) และ เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (lead zirconate titanate)

2. เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต

ในปี ค.ศ. 1954 Jaffe และคณะ ศึกษาสมบัติของ PZT ใช้สารประกอบ เลดเซอร์โคเนตและเลดไทเทเนต ผสมรวมกันที่อัตราส่วนต่างๆ และตรวจสอบสมบัติไพโซอิเล็กทริกของสารประกอบ PZT ที่ได้พบว่าที่อัตราส่วน Zr : Ti เท่ากับ 55:45 (Ikeda, 1990) หรืออัตราส่วนใกล้เคียง PZT สามารถแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้สูงสุด คือมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าคัปปลิงแฟกเตอร์ และไพโซอิเล็กทริกสูงสุด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.2 และ 2.3



ภาพประกอบที่ 2.2 แสดงค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกกับจำนวนเปอร์เซ็นต์โมลระหว่าง PbTiO₃ กับ PbZrO₃ ที่อุณหภูมิ 25 °C (ที่มา : Setter, 2002)

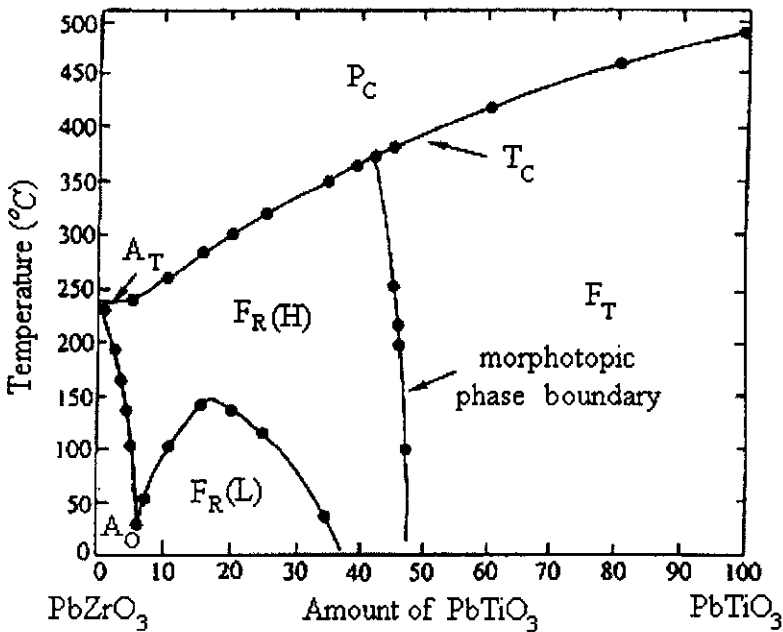


ภาพประกอบที่ 2.3 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าพลาแนร์คัปปลิงแฟกเตอร์กับจำนวนเปอร์เซ็นต์โมลระหว่าง PbTiO₃ กับ PbZrO₃ ที่อุณหภูมิ 25 °C (ที่มา :Jeffe, 1971)

ค่าคงที่โพธิโซอิเล็กทริกและค่าคัปปลิงแฟกเตอร์เป็นค่าที่ใช้สำหรับบ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการแสดงค่าสมบัติโพธิโซอิเล็กทริก และ PZT ที่อัตราส่วนดังกล่าวเรียกว่า มอร์โฟโทรปิกเฟสบาวเดรี (morphotropic phase boundary) หรือเรียกโดยย่อว่า MPB เป็นจุดแบ่งระหว่างเฟสเตตระโกนอล (tetragonal phase) กับเฟสโรมโบฮีดรัล (rhombohedral phase) แสดงดังภาพประกอบที่ 2.7 เป็นการยากที่จะพยายามหาส่วนผสมของ PZT ที่บริเวณ MPB ที่แน่นอน เนื่องจากการเตรียม PZT ที่มีเฟสเดี่ยวของโรมโบฮีดรัล หรือเฟสเดี่ยวของเตตระโกนอลในบริเวณขอบเขตนี้ทำได้ยาก ดังนั้นขอบเขตนี้จึงเป็นบริเวณของเฟสทั้งสองที่กระจายร่วมกัน ความกว้างของบริเวณกระจายอยู่รวมกันก็ไม่สัมพันธ์กับปัจจัยที่ไม่ถูกควบคุมในระหว่างกระบวนการเตรียม การที่จะทำ PZT เฟสเดี่ยว จะต้องทำให้เซอร์โคเนทและไทเทเนทรวมเป็นเนื้อเดียวกันในระดับอะตอมซึ่งยากมาก แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการเตรียม PZT โดยวิธีต่างๆ ทำให้สามารถลดการกระจายของทั้งสองนี้ลงได้

2.1. เฟสไดอะแกรมของ PZT

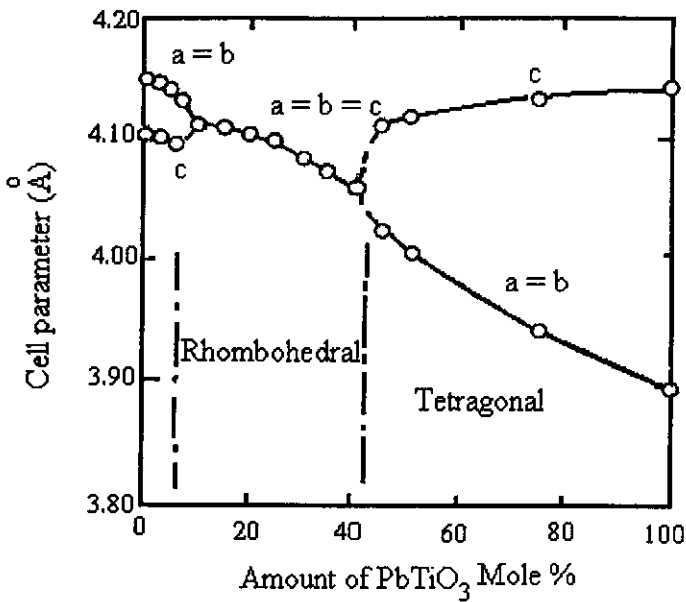
เฟสไดอะแกรมของโครงสร้างผลึก PZT จากภาพประกอบที่ 2.4 เมื่อพิจารณาจากเส้นอุณหภูมิคูรี (Currie line) ซึ่งเป็นเส้นแบ่งระหว่างเฟส 2 เฟส คือ บริเวณที่สูงกว่าอุณหภูมิคูรี PZT มีสมบัติเป็นพาราอิเล็กทริก² (paraelectric) และที่บริเวณต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี PZT จะมีเฟสเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก³ (ferroelectric phase) และที่บริเวณเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริก สามารถแบ่งได้เป็น 2 เฟส เช่นกัน โดยมีบริเวณ MPB เป็นจุดแบ่งเฟสทั้งสอง คือพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์โมลระหว่าง PbZrO_3 กับ PbTiO_3 จะเห็นว่าที่เปอร์เซ็นต์โมลระหว่าง PbZrO_3 น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ PZT จะมีโครงสร้างผลึกแบบรอมโบฮีดรัน และหากเปอร์เซ็นต์โมลของ PbTiO_3 มากกว่า PbZrO_3 PZT จะมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล และในภาพประกอบที่ 2.5 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความยาวโครงผลึกของ PZT ที่อัตราส่วนต่างๆ และที่อุณหภูมิ 25 °C



ภาพประกอบที่ 2.4 แสดงเฟส โครงสร้างผลึก PZT (ที่มา : Jeffe, 1971)

²พาราอิเล็กทริก คือ ปรากฏการณ์ที่แต่ละหน่วยเซลล์มีการโพลาไรเซชันเกิดขึ้นเองแต่ในแต่ละหน่วยเซลล์มีทิศทางโพลาไรเซชันเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามจึงทำให้โพลาไรเซชันรวมเป็นศูนย์

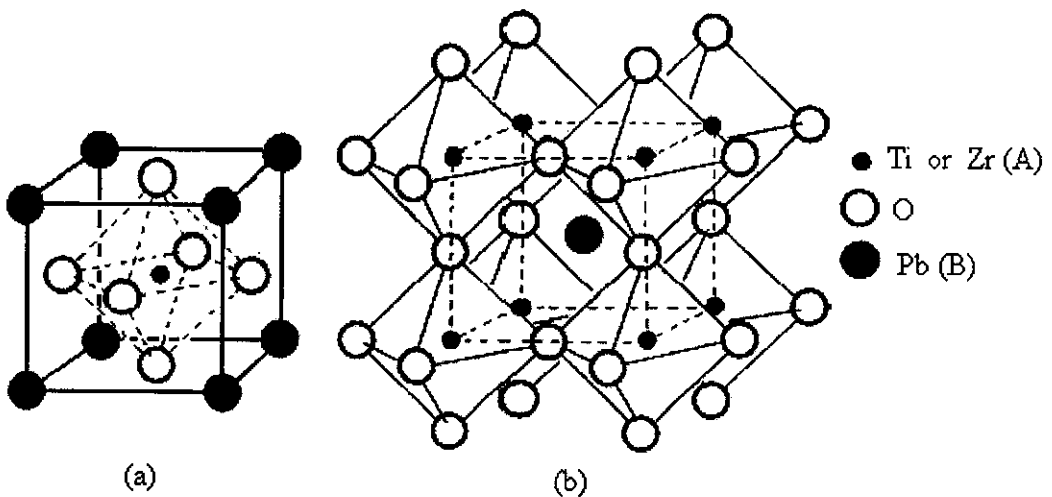
³เฟอร์โรอิเล็กทริก คือ ปรากฏการณ์ที่สารเกิดการกลับทิศการโพลาไรเซชันในเนื้อสารเมื่อได้รับสนามไฟฟ้าภายนอก



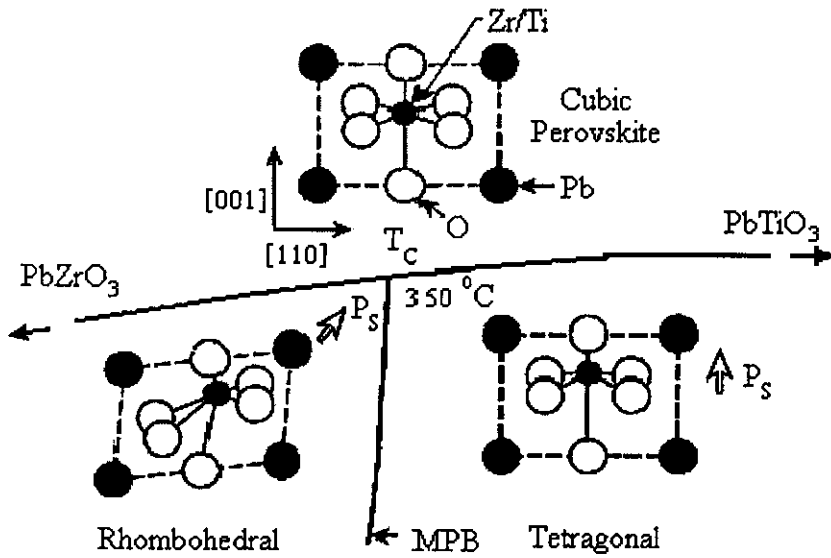
ภาพประกอบที่ 2.5 ค่าความยาวโครงผลึกของ PbTiO₃ – PbZrO₃ ที่อุณหภูมิ 25 °C (ที่มา : Shirane, 1952)

2.2. โครงสร้างเพอโรฟสไกต์

PZT คือสารประกอบ เลดเซอร์โคเนทกับเลดไทเทเนท มีสูตรเคมีคือ Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃ ซึ่งโครงสร้างผลึกเป็นเพอโรฟสไกต์ (ABO₃) ซึ่งมีอะตอมตะกั่วจะอยู่ที่มุมทั้งสี่หรือตำแหน่ง A อะตอมเซอร์โคเนียมหรือไทเทเนียมอยู่ตรงกลางโครงผลึกหรือที่ตำแหน่ง B และอะตอมของออกซิเจนจะอยู่ที่ตรงกลางผิวทั้งหมดของโครงผลึก แสดงดังภาพประกอบที่ 2.6

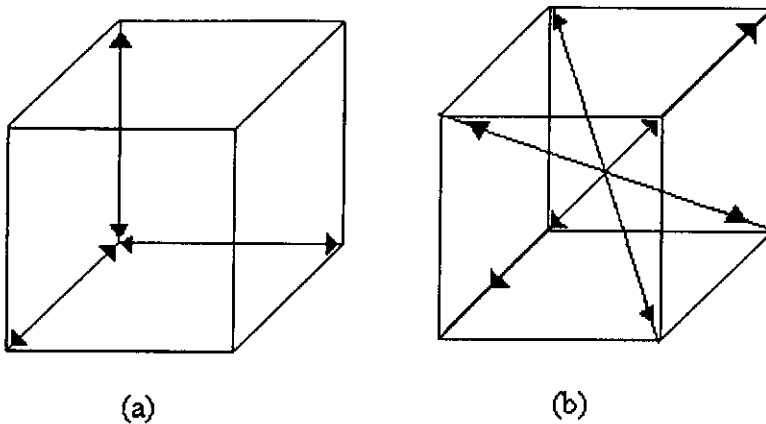


ภาพประกอบที่ 2.6 แสดง โครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์



ภาพประกอบที่ 2.7 แสดงลักษณะเฟสของ $\text{PbTiO}_3 - \text{PbZrO}_3$ ที่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อุณหภูมิคูรีและบริเวณ MPB (ที่มา : Newnham, 1997)

จากภาพประกอบที่ 2.7 บริเวณได้อุณหภูมิคูรี PZT จะมีลักษณะเฟส 2 เฟส คือเมื่อปริมาณของไทเทเนียมเพิ่มขึ้น (พิจารณาบริเวณ MPB) ลักษณะเฟสของ PZT มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล โครงสร้างดังกล่าวมีโพลาริเซชันเกิดขึ้นเองในทิศทาง $[001]$ แต่ในโครงสร้างผลึกดังกล่าว สามารถเกิดการโพลาริเซชันได้ทั้งหมดหกทิศทางคือ $[100]$ $[\bar{1}00]$ $[010]$ $[0\bar{1}0]$ $[001]$ และ $[00\bar{1}]$ ในกรณีที่ปริมาณของเซอร์โคเนียมมากขึ้น PZT มีโครงสร้างผลึกแบบรอมโบฮีดรัล และมีการโพลาริเซชันเกิดขึ้นเองในทิศทาง $[111]$ ซึ่งโครงสร้างผลึกแบบรอมโบฮีดรัลสามารถเกิดการโพลาริเซชันได้ทั้งหมดแปดทิศทาง คือ $[111]$ $[\bar{1}11]$ $[1\bar{1}1]$ $[11\bar{1}]$ $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ $[\bar{1}\bar{1}1]$ $[\bar{1}1\bar{1}]$ และ $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ PZT ที่บริเวณ MPB มีความเป็นไปได้สำหรับการเกิดการโพลาริเซชันได้ทั้งหมด 14 ทิศทาง สำหรับแต่ละเกรน (Jaffe, 1971) ทำให้ PZT ที่บริเวณ MPB แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้สูงสุด



ภาพประกอบที่ 2.8 (a) แสดง 6 ทิศทางสำหรับการโพลาไรเซชันในโครงผลึกแบบเตตระโกนอล
 (b) แสดง 8 ทิศทางสำหรับการโพลาไรเซชันในโครงผลึกแบบรอมโบฮีดรัล
 (ที่มา : Bedoya et al., 2000)

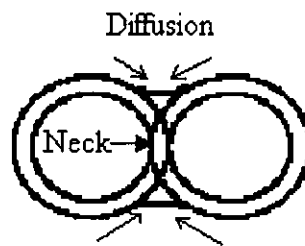
แต่ PZT ยังเป็นวัสดุที่มีสมบัติที่น่าสนใจอีกคือ แสดงสมบัติไพโรอิเล็กทริก⁴ (pyroelectric properties) และเพอร์โรอิเล็กทริกได้ ดังนั้นจึงทำให้ PZT มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน เช่นนำมาใช้เป็นเครื่องจับเร้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประกอบที่สำคัญของเครื่องพิมพ์ ฆดเตอร์ในกล้องถ่ายภาพ วาล์วไฮดรอลิก อุปกรณ์อัลตราโซนิก ในทางการแพทย์ ตัวทรานสดิวเซอร์ และในลำโพง เป็นต้น

3. กระบวนการอบผืน (sintering process)

คือกระบวนการทำให้อะตอมของสารเคลื่อนเข้าใกล้ชิดกันแต่ไม่หลอมรวมกัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น แรงอัดในการขึ้นรูปสารตัวอย่าง แต่แรงอัดนั้นสามารถทำให้อะตอมของสารเคลื่อนเข้าใกล้กันได้เพียงค่าหนึ่งเท่านั้น เพราะไม่ว่าจะออกแรงอัดมากเท่าไร ก็จะไม่ผลอีกและเมื่อสารตัวอย่างผ่านขบวนการอัดจะคงรูปอยู่ได้ แต่สารตัวอย่างยังขาดความแข็งแรงจะต้องนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงๆ เพื่อให้ความร้อนช่วยกระตุ้นให้อะตอมของสารเกิดการแพร่ (diffusion) เข้าหากัน ทำให้เกิดจุด

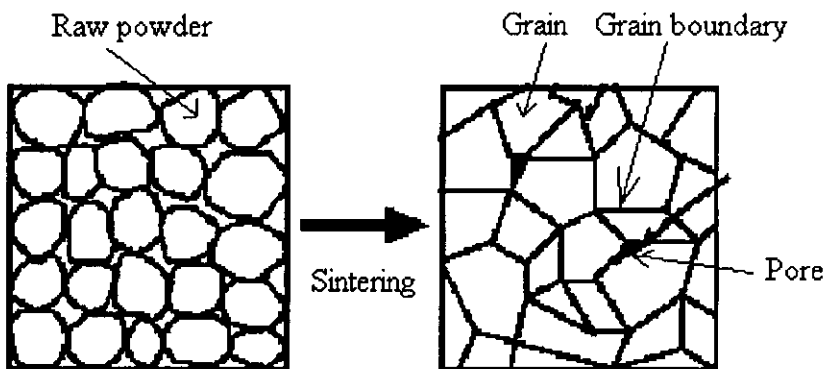
⁴ไพโรอิเล็กทริก คือ การเปลี่ยนแปลงการโพลาไรเซชันเมื่อสารมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

สัณฐานที่เรียกว่าคอ (neck) ทำให้อะตอมยึดเหนี่ยวกันมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.9 ในการเตรียมวัสดุเซรามิกจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงๆ ดังนั้นการควบคุมบรรยากาศเป็นเรื่องที่สำคัญมาก ทั้งนี้ เพื่อต้องการขจัดปฏิกิริยาเคมีที่ไม่ต้องการออกไป เช่น การเกิดออกไซด์ ขณะที่เพิ่มความร้อนระหว่างอบผนึกและการลดความร้อนจะต้องไม่เร็วจนเกินไปเพราะมีความสำคัญกับสมบัติของสารตัวอย่างที่ได้ แต่ถ้าหากสารตัวอย่างที่ใช้ไม่บริสุทธิ์พอ สารอาจจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ ในขณะที่ผงของสารชนิดเดียวกันแต่บริสุทธิ์จะไม่หลอมเหลวดังนั้นในกระบวนการอบผนึกสารตัวอย่างที่ได้จะมีสมบัติที่ด้อยกว่าขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของสารตัวอย่าง



ภาพประกอบที่ 2.9 แสดงการเกิดคอ (ที่มา : Uchino, 2000)

จากภาพประกอบที่ 2.9 จะเห็นว่าการเจริญเติบโตของส่วนคอนั้นขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ของอะตอมของสาร หรือการไหลออกจากช่องว่างระหว่างอนุภาคและรูพรุน ซึ่งการเคลื่อนที่หรือการขนส่งของผลึกเป็นไปโดยการแพร่

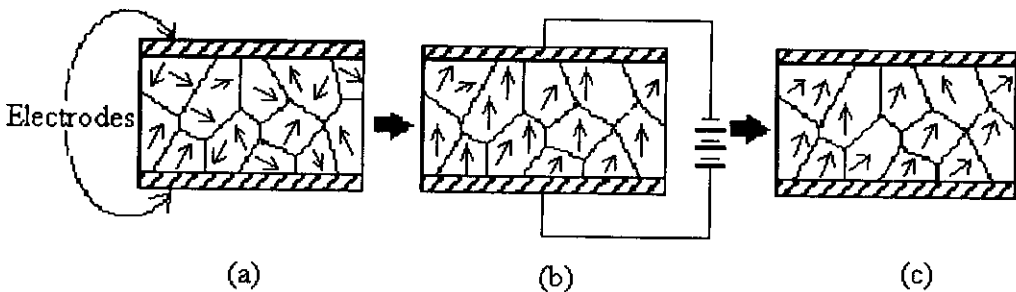


ภาพประกอบที่ 2.10 แสดงกระบวนการอบผนึก (ที่มา : Uchino, 2000)

จากภาพประกอบที่ 2.10 เมื่อพิจารณากระบวนการอบผนึกพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงคือ คอเริ่มก่อตัวที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค แต่อนุภาคยังแบ่งแยกกันอยู่ต่อมาที่คอเริ่มโตขึ้น ทำให้อนุภาคแต่ละอนุภาคยึดติดกันและสุดท้ายที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคถูกปิดกั้นและการขนส่งระหว่างพื้นผิวและไอถูกจำกัดออกไปปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอะตอมขณะอบผนึกการระเหยจากผิวหน้าหนึ่งและไปควบแน่นติดกับอีกผิวหน้าหนึ่ง การแพร่ตลอดผิวหน้าของเกรน หรือการแพร่ในทิศทางตรงกันข้ามของช่องว่างระหว่างอะตอมผ่านเกรน จะเห็นได้ว่ากลไกของการอบผนึกเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับอะตอมโดยตรง การแพร่ในทิศทางตรงกันข้าม จะทำให้จุดศูนย์กลางของเกรนเคลื่อนเข้าใกล้กัน และทำให้เกิดการหดตัวระหว่างการอบผนึก

4. กระบวนการโพลิง (poling process)

PZT เป็นวัสดุที่มีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง (spontaneous polarization) แต่ทิศทางของโพลาริเซชันในบริเวณ (region) ต่างๆ เป็นแบบสุ่ม (random) จึงทำให้ค่าโพลาริเซชันรวมมีค่าเท่ากับศูนย์จึงไม่แสดงสมบัติทางไพโซอิเล็กทริกออกมา แต่เมื่อได้รับสนามไฟฟ้ากระแสตรงความเข้มสูง จะทำให้โพลาริเซชันภายในบริเวณดังกล่าวเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ในทิศทางเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้า และเมื่อเอาสนามไฟฟ้าออก PZT ก็ยังคงมีโพลาริเซชันตกค้าง (residual polarization) อยู่ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำให้วัสดุ PZT สามารถแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้และเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการโพลิง ในกระบวนการโพลิงสำหรับวัสดุ PZT ใช้ค่าสนามไฟฟ้ากระแสตรงความเข้มสูงระหว่าง 2-3 kV/mm ณ อุณหภูมิ 100-150 $^{\circ}C$ (Jaffe, 1971) ในทางปฏิบัติขณะทำการโพลิงจะแช่สารไว้ในน้ำมันซิลิโคน เพื่อป้องกันการเกิดการสปาร์ค (sparks) ของสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่างอาจทำให้สารตัวอย่างแตกร้าวได้



ภาพประกอบที่ 2.11 แสดงการจัดเรียงตัวของโพลาริเซชันก่อนและหลังได้รับสนามไฟฟ้า

จากภาพประกอบที่ 2.11 (a) แสดงถึงลักษณะทิศทางการโพลาริเซชันภายในวัสดุหลังจากการเผาและทำซ้ำแล้ว (b) แสดงลักษณะทิศทางการโพลาริเซชันภายในวัสดุเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า ส่วน (c) แสดงการจัดเรียงตัวของการโพลาริเซชันก่อนและหลังได้รับสนามไฟฟ้า

5. สมบัติไพโซอิเล็กทริก

5.1. ปฏิกิริยาไพโซอิเล็กทริก

ปฏิกิริยาไพโซอิเล็กทริกเกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ คือ เมื่อให้ความเค้นกลแก่วัสดุไพโซเซรามิกจะก่อให้เกิดการกระจัดทางไฟฟ้าขึ้น ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุ ดังต่อไปนี้ (Setter, 2002)

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (2.1)$$

D	คือการกระจัดทางไฟฟ้า ⁵ (electric displacement)
T	คือความเค้นกล (mechanical stress) มีหน่วยเป็น N/m^2
E	คือสนามไฟฟ้า (electrical field) มีหน่วยเป็น V/m
d	คือค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกความเครียด (piezoelectric strain constant) มีหน่วยเป็น m/V
ε^T	คือสภาพยอมรับได้ (permittivity) ภายใต้อุณหภูมิคงที่ มีหน่วยเป็น F/m

ในงานวิจัยนี้ d คือ ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกความเครียดที่สนใจ และกล่าวถึงภายหลังสั้นๆ ว่าค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก

⁵ การกระจัดทางไฟฟ้า (D) มีความสัมพันธ์กับความเข้มสนามไฟฟ้า (E) และโพลาริเซชัน (P) ของวัสดุตั้งสมการ $D = \varepsilon E + P$ เมื่อ ε คือสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของตัวกลางสำหรับตัวกลางที่เป็นสุญญากาศ $\varepsilon = 8.854 \times 10^{-12}$ มีหน่วยเป็น F/m (Nye, 1987:68)

Central Library Prince of Songkla University

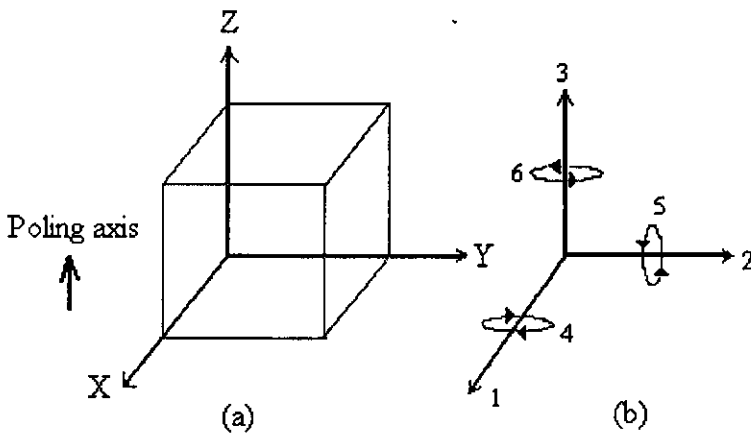
ในทางกลับกันเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุไพโซเซรามิก จะเหนี่ยวนำให้เกิดความเครียดขึ้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังสมการ

$$S = s^E T + dE \quad (2.2)$$

S คือความเครียดกล (mechanical strain)

s^E คือค่าคงที่ยืดหยุ่น (elastic compliance constant หรือ elastic constant) ภายใต้สนามไฟฟ้าคงที่มีหน่วยเป็น m/N

จากสมการ 2.1 และ 2.2 ค่าคงที่ต่างๆ ในวัสดุไพโซเซรามิก มีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความเครียด และการกระจัดทางไฟฟ้าใน 3 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน เนื่องจากสนามไฟฟ้าและกลไกความเค้น อยู่ในรูปของเวกเตอร์ สามารถใช้อธิบายเกี่ยวกับสมบัติดังกล่าวของสาร ในทิศทางต่างๆ ของวัสดุเพื่อความสะดวกในการอธิบายทิศทางต่างๆ ของวัสดุไพโซเซรามิกจึงกำหนดดั่งภาพประกอบที่ 2.12



ภาพประกอบที่ 2.12 แสดงเครื่องหมายของแกนสำหรับวัสดุไพโซเซรามิก

ในภาพประกอบที่ 2.12 (a) แสดงถึงลักษณะแกนโดยทั่วไปและในภาพประกอบที่ 2.12 (b) ใช้สำหรับวัสดุไพโซเซรามิกโดยใช้ตัวเลขเป็นตัวกำกับกับแกนคือใช้เลข 1 แทนทิศทางในแนวแกน X ใช้เลข 2 แทนทิศทางในแนวแกน Y และใช้เลข 3 แทนทิศทางในแนวแกน Z ทิศทางในแนวแกนเลข 3 ถูกเลือกให้เป็นทิศทางที่ใช้ในการโพลิง ส่วนเลข 4 แสดงถึงทิศทางแกนเฉือน

(shear axis) ในแนวแกนเลข 1 เลข 5 แสดงถึงทิศทางแกนเฉือนในแนวแกนเลข 2 และเลข 6 แสดงถึงทิศทางแกนเฉือนในแนวแกนเลข 3 ตัวอย่างเช่น ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริกความเครียด d_{33} หมายถึงมีโพลาริเซชันเกิดขึ้นในทิศทาง 3 เมื่อออกแรงกดในทิศทาง 3 หรือ ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริกความเครียด d_{31} หมายถึงมีโพลาริเซชันเกิดขึ้นในทิศทาง 3 เมื่อออกแรงกดในทิศทาง 1

5.2 ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริก

มีได้ 4 ค่าแตกต่างกันไปตามเงื่อนไขต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริกกับตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

	ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริก	ปรากฏการณ์	นิยาม	หน่วย SI
ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริก ความเครียด	d	เจนเนอเรเตอร์	$\frac{\partial D}{\partial T}$ เมื่อ E คงที่	$\frac{C}{N}$
		มอเตอร์	$\frac{\partial S}{\partial E}$ เมื่อ T คงที่	$\frac{m}{V}$
	e	เจนเนอเรเตอร์	$\frac{\partial D}{\partial S}$ เมื่อ E คงที่	$\frac{C}{m^2}$
		มอเตอร์	$\frac{\partial T}{\partial E}$ เมื่อ S คงที่	$\frac{N}{mV}$
ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริก ความเค้น	g	เจนเนอเรเตอร์	$\frac{\partial E}{\partial T}$ เมื่อ D คงที่	$\frac{Vm}{N}$
		มอเตอร์	$\frac{\partial S}{\partial D}$ เมื่อ T คงที่	$\frac{m^2}{C}$
	h	เจนเนอเรเตอร์	$\frac{\partial E}{\partial S}$ เมื่อ D คงที่	$\frac{V}{m}$
		มอเตอร์	$\frac{\partial T}{\partial D}$ เมื่อ S คงที่	$\frac{N}{C}$

ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริกในตารางที่ 2.1 นั้นมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 2.3 ถึง 2.4 ดังนี้

$$e = cd \quad (2.3)$$

$$e = \epsilon h \quad (2.4)$$

เมื่อ c คือค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (elastic stiffness constant หรือ moduli of elasticity)

ϵ คือค่าสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของวัสดุ

h คือ ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริกความเค้น (piezoelectric stress constant)

5.3. ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) หรือค่าสภาพยอมรับได้สัมพัทธ์ (relative permittivity) คืออัตราส่วนระหว่างค่าสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของวัสดุกับค่าสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าในสุญญากาศ และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss) หมายถึงอัตราส่วนความต้านทานต่อค่าต้านทานจินตภาพ ในวงจรสมมูลทางไฟฟ้าในวัสดุโพซิเซรามิก ในกรณีขนาน แสดงดังภาพประกอบที่ 2.13 (a) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสามารถวัดได้โดยตรงจากเครื่องวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อน (impedance analyzer) โดยทั่วไปจะวัดที่ความถี่ 1 kHz และใช้ค่าความต่างศักย์ในระดับมิลลิโวลต์ (Las, 2001) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสามารถคำนวณได้จากค่าความจุและขนาดของรูปทรงของสารตัวอย่างได้เช่นกัน โดยใช้สมการ (Hewlett Packard, 1987)

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{tC}{\epsilon_0 A} \quad (2.5)$$

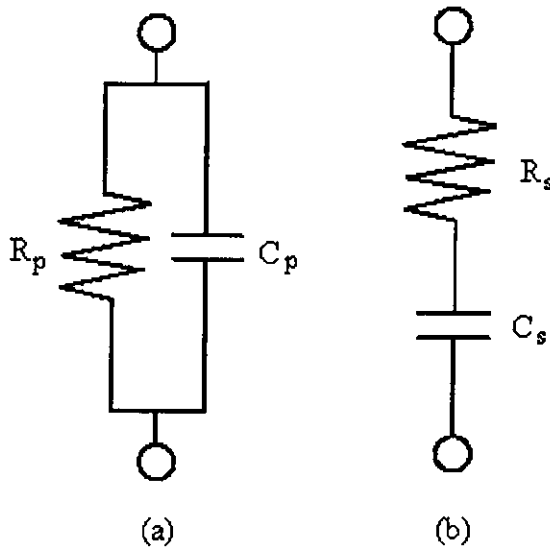
ซึ่ง	ϵ_r	คือค่าสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าสัมพัทธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
	ϵ_0	คือสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของสุญญากาศ ($8.854 \times 10^{-12} F/m$)
	t	คือความหนาของสารตัวอย่าง มีหน่วยคือ m
	A	คือพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า มีหน่วยคือ m^2
	C	คือค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยคือ F

หรือคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกโดยใช้ค่าความต้านทานเชิงซ้อนในการคำนวณได้เช่นกันแสดงดังสมการ (Foster et al., 1991)

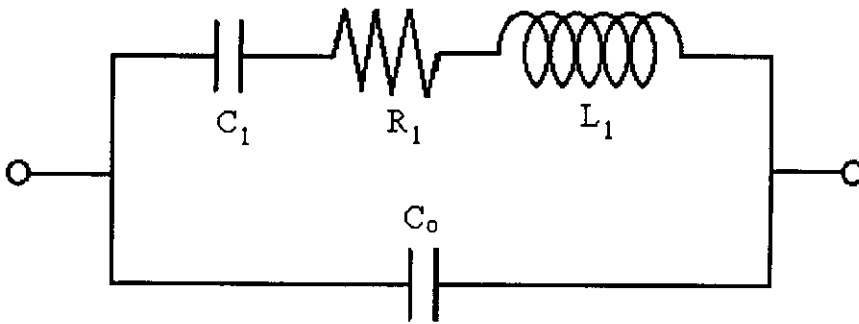
$$\epsilon_r = \frac{t}{\omega |Z| \epsilon_0 A} \quad (2.6)$$

Z คือ ค่าความต้านทานเชิงซ้อน มีหน่วยคือ Ω

ω คือ ความเร็วเชิงมุม มีหน่วยคือ rad/sec



ภาพประกอบที่ 2.13 แสดงลักษณะวงจรสมมูลใน PZT ในกรณีไม่เกิดการเรโซแนนซ์ (a) กรณีขนาน และ (b) กรณีอนุกรม (ที่มา : Jones, 1996)



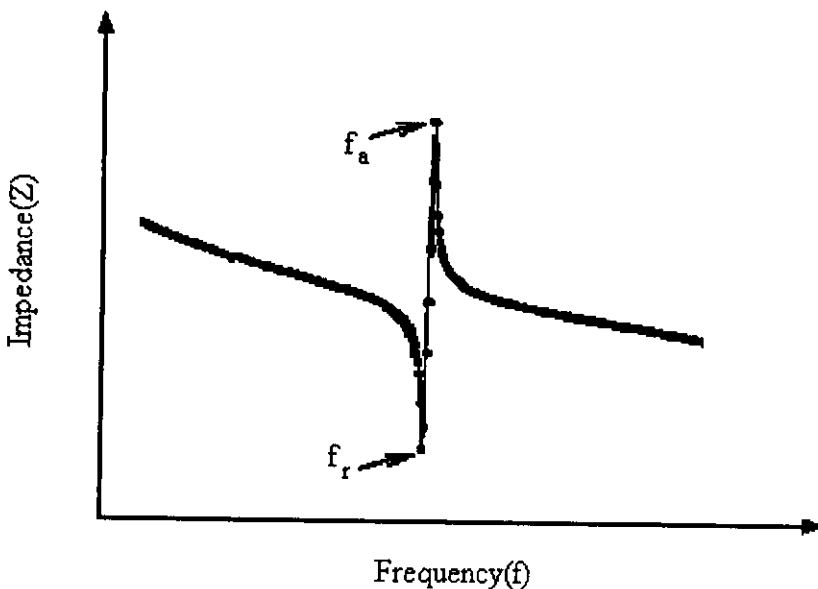
ภาพประกอบที่ 2.14 วงจรสมมูลของเมสัน (ที่มา : Mason et al., 1954)

5.4. วิธีการเรโซแนนซ์ (resonance methods)

วิธีเรโซแนนซ์ เป็นวิธีที่มีสำคัญมากสำหรับการตรวจสอบและคำนวณค่าคงที่ต่างๆ ในวัสดุไพโซเซรามิกวิธีนี้ใช้สมบัติทางไฟฟ้าในวัสดุไพโซอิเล็กทริก เพราะภายในวัสดุไพโซเซรามิกจะมีลักษณะสมมูลกับวงจรทางไฟฟ้าดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.14 ซึ่งเรียกว่าวงจรสมมูลของ

เมสัน (Mason's equivalent circuit) (Mason et al., 1954) คือภายในมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ ในตัวเดียวกัน

ดังนั้นเมื่อให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแก่วัสดุไพโซเซรามิกทำให้วัสดุไพโซเซรามิกเกิดการยืดหด และเมื่อเพิ่มขนาดของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจนกระทั่งมีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของวัสดุไพโซเซรามิก จะทำให้วัสดุไพโซเซรามิกเกิดการยืดหดมากที่สุด เรียกพฤติกรรมดังกล่าวนี้ว่า ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ (resonance effect) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเชิงซ้อนกับค่าความถี่ ซึ่งแสดงดังภาพประกอบที่ 2.15 ที่ค่าความต้านทานเชิงซ้อนมีค่าน้อยสุดเรียกค่าความถี่ที่จุดดังกล่าวว่า ความถี่เรโซแนนซ์ และที่ค่าความต้านทานเชิงซ้อนมีค่ามากที่สุดจะเรียกค่าความถี่ที่จุดนั้นว่าความถี่แอนติเรโซแนนซ์



ภาพประกอบที่ 2.15 แสดงลักษณะค่าความถี่เรโซแนนซ์และค่าความถี่แอนติเรโซแนนซ์
(ที่มา : Jordan et al., 2001)

ค่าความถี่จากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ที่ได้มีความสำคัญมากสำหรับวัสดุไพโซเซรามิก เพราะสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่คัปปลิงแพกเตอร์และค่าคงที่ต่างๆ ได้

5.5. ค่าคัปปลิงแฟกเตอร์

ค่าคัปปลิงแฟกเตอร์เป็นค่าที่ใช้ในการบ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือในทางกลับกันคือความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ค่าคัปปลิงแฟกเตอร์เป็นค่าคงที่ที่มีความสำคัญมากสำหรับปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกของวัสดุไพโซเซรามิก โดยสามารถนิยามเป็นสมการได้ว่า (Moulson and Herbert, 1991)

$$k^2 = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุ}}{\text{พลังงานกลที่วัสดุได้รับ}} \quad (2.11)$$

หรือ

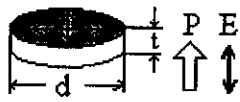
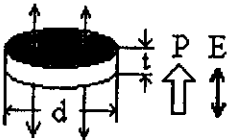
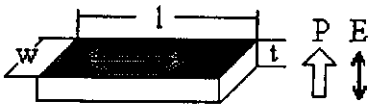
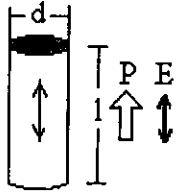
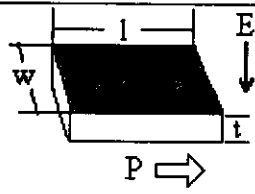
$$k^2 = \frac{\text{พลังงานกลที่ได้จากวัสดุ}}{\text{พลังงานไฟฟ้าที่วัสดุได้รับ}} \quad (2.12)$$

สำหรับค่าคัปปลิงแฟกเตอร์จะมีความสัมพันธ์กับค่า C_0 และ C_1 ในวงจรสมมูลเมสันดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.13 และสามารถเขียนเป็นสมการคือ

$$k^2 = \frac{C_1}{C_0 + C_1} = \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2} \quad (2.13)$$

ค่าคัปปลิงแฟกเตอร์ของวัสดุไพโซเซรามิกจะมีค่ามากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะของรูปทรง ขนาด และทิศทางการโพลาริเซชันภายในของวัสดุ ซึ่งในตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะทิศทางการยืดหด ทิศทางของการโพลาริเซชัน และทิศทางสนามไฟฟ้าสำหรับวัสดุไพโซเซรามิก ที่มีลักษณะรูปทรงต่างๆ

ตารางที่ 2.2 ลักษณะรูปทรงและทิศทางการยืดหดของวัสดุโพซิเซรามิก

รูปแบบการสั้น	รูปทรง/ทิศทางการสั้น	เงื่อนไข	ค่าค้ำปลิงแฟกเตอร์
แนวรัศมี		$d > 10t$	k_p
แนวความหนา		$d > 10t$	k_t
แนวความยาว		$l > 5t, w$	k_{31}
แนวความยาว		$l > 2.5d$	k_{33}
แนวเฉือน		$l > 3.5t, w$	k_{15}

(ที่มา : Setter, 2002)

ค่าค้ำปลิงแฟกเตอร์ สามารถคำนวณได้จากปรากฏการณ์เพเนเตรเตอร์และปรากฏการณ์มอเตอร์ ในงานวิจัยนี้คำนวณค่าค้ำปลิงแฟกเตอร์จากปรากฏการณ์มอเตอร์ โดยพิจารณาจากการตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่างๆ ที่ให้แก่วัสดุโพซิเซรามิก และเลือกเฉพาะความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์ มาใช้ในการคำนวณค่าค้ำปลิงแฟกเตอร์ ซึ่งค่าค้ำปลิงแฟกเตอร์ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของรูปทรง ทิศทางการโพลาริเซชัน เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการคำนวณค่า จึงแบ่งลักษณะของค่าค้ำปลิงแฟกเตอร์ตามลักษณะรูปทรงของสารตัวอย่างดังนี้

5.5.1. รูปกลมแบน

5.5.1.1. การยึดหดในแนวรัศมี

เมื่อให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับขนาดต่างๆ แก้ววัสดุไพโอโซเซรามิกรูปกลมแบน (thin disc) ทำให้วัสดุไพโอโซเซรามิกเกิดการยึดหดตัวในแนวรัศมี (radial mode) โดยที่ค่าคัปปลิงแฟกเตอร์นี้เรียกว่า ค่าพลาแนร์คัปปลิงแฟกเตอร์ (planar coupling factor) หรือใช้ตัวย่อว่า k_p แต่จะต้องมีอัตราส่วนระหว่างความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 10 ค่าพลาแนร์คัปปลิงแฟกเตอร์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า (Katiya and Srivastava, 1994)

$$\frac{k_p^2}{1-k_p^2} = \frac{(1-\sigma^E)J_1[\eta_1(1+\Delta f/f_r)] - \eta_1(1+\Delta f/f_r)J_0[\eta_1(1-\Delta f/f_r)]}{(1-\sigma^E)J_1[\eta_1(1+\Delta f/f_r)]} \quad (2.14)$$

โดยที่

- J_0 คือ เบสเซลฟังก์ชัน (Bessel function) อันดับที่สูง
- J_1 คือ เบสเซลฟังก์ชัน (Bessel function) อันดับที่สอง
- η_1 คือ ค่าบวกของรากที่ต่ำที่สุดของ $(1+\sigma^E)J_1(\eta) = \eta J_0(\eta)$
- σ^E คือ อัตราส่วนของปัวส์ซอง (Poisson's ratio)

โดยอัตราส่วนของปัวส์ซองสามารถนิยามได้ว่า

$$\sigma^E = \frac{\text{การผิดรูปในแนวตั้งฉากกับความเค้น}}{\text{การผิดรูปในแนวเดียวกับความเค้น}} \quad (2.15)$$

หรือ

$$\sigma^E = -\frac{s_{12}^E}{s_{11}^E} \quad (2.16)$$

โดยทั่วไปวัสดุไพโอโซเซรามิก มีค่าอัตราส่วนปัวส์ซองอยู่ในช่วง 0.28 และ 0.32 (IRE, 1961)

ซึ่งจากสมการที่ (2.14) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า (ชัยวัฒน์, 2534)

และ
$$k_p^2 = 2.51 \left(\frac{f_a^2 - f_r^2}{f_r^2} \right) + 0.038 \quad (2.17)$$

และคำนวณค่า k_{31} เมื่อทราบค่า k_p และ σ^E โดยสามารถเขียนเป็นสมการคือ (IRE, 1961)

$$k_{31}^2 = \frac{(1 - \sigma^E)}{2} k_p^2 \quad (2.18)$$

ค่าคงที่ของขั้วหยุ่น s_{11}^E สามารถหาได้เมื่อทราบค่าความถี่เรโซแนนซ์แสดงดังสมการ

$$\frac{1}{s_{11}^E} = \frac{\pi^2 r^2 f_r^2 (1 - \sigma^{E^2})}{\eta_1^2} \rho \quad (2.19)$$

และ

$$s_{11}^D = s_{11}^E (1 - k_{31}^2) \quad (2.20)$$

ค่าความเร็วเสียง ในวัสดุไพโซเซรามิกสามารถคำนวณจากสมการ

$$v^2 = \frac{1}{\left[s_{11}^E (1 - \sigma^{E^2}) \rho \right]} \quad (2.21)$$

โดยที่ v คือค่าความเร็วเสียงในวัสดุไพโซอิเล็กทริก มีหน่วยคือ m/s

ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก d_{31} สามารถหาได้สมการ (2.22)

$$d_{31} = k_{31} \sqrt{\epsilon_{33}^T s_{11}^E} \quad (2.22)$$

และ

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\epsilon_{33}^T} \quad (2.23)$$

5.5.1.2. การยึดหดในแนวหนา

ค่าคงที่คัปปลิงแฟกเตอร์นี้สามารถวัดโดยให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับขนาดแอมป์ลิจูดต่างๆ แก้ววัสดุโพซิเซรามิก แล้วทำให้วัสดุโพซิเซรามิกเกิดการยึดหดในแนวความหนา ดังนั้นค่าคัปปลิงแฟกเตอร์กรณีนี้หาได้โดยใช้สมการ

$$k_t^2 = \frac{\pi f_r}{2 f_a} \cot\left(\frac{\pi f_r}{2 f_a}\right) \quad (2.24)$$

5.5.2. รูปแผ่น

5.5.2.1. การยึดหดในแนวตามยาว

วัสดุโพซิเซรามิกที่มีลักษณะเป็นแผ่นรูปสี่เหลี่ยม (plate) เมื่อให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับขนาดต่างๆ ทำให้วัสดุโพซิเซรามิกเกิดการยึดหดในแนวตามยาว (length mode) ค่าคัปปลิงแฟกเตอร์หาได้โดยสมการ

$$\frac{k_{31}^2}{1 - k_{31}^2} = \frac{\pi f_a}{2 f_r} \cot\left(\frac{\pi f_a}{2 f_r}\right) \quad (2.25)$$

5.5.2.2. การยึดหดในแนวเฉือน

สารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแผ่นรูปสี่เหลี่ยมเมื่อให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับขนาดต่างๆ ทำให้วัสดุโพซิเซรามิกเกิดการยึดหดเกิดการยึดหดในแนวเฉือน (shear mode) โดยที่ทิศทางการโพลาริเซชันและทิศของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกัน ค่าคัปปลิงแฟกเตอร์หาได้โดยสมการ

$$k_{15}^2 = \frac{\pi f_r}{2 f_a} \cot\left(\frac{\pi f_r}{2 f_a}\right) \quad (2.26)$$

5.5.3. รูปทรงกระบอก

เมื่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับขนาดต่างๆ แก้ววัสดุโพซิเซรามิกทำให้สารเกิดการยึดหดในแนวตามยาว (longitudinal coupling factor) ในการคำนวณค่าคัปปลิงแฟกเตอร์ สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (2.27)

$$k_{33}^2 = \frac{\pi f_r}{2 f_a} \cot\left(\frac{\pi f_r}{2 f_a}\right) \quad (2.27)$$

ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริกและค่าคงที่ของการยืดหยุ่นสามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{1}{s_{33}^D} = 4\rho f_p^2 l^2 \quad (2.28)$$

$$s_{33}^E = \frac{s_{33}^D}{1 - k_{33}^2} \quad (2.29)$$

$$d_{33} = k_{33} \sqrt{\varepsilon_{33}^T s_{33}^E} \quad (2.30)$$

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\varepsilon_{33}^T} \quad (2.31)$$

วิธีการเรโซแนนซ์ที่กล่าวมาเหมาะสำหรับวัสดุไพเอโซเซรามิกที่มีการสูญเสียสัญญาณน้อยเมื่อใช้งานในสนามไฟฟ้า และมีการพัฒนาวิธีการเรโซแนนซ์ สำหรับวัดค่าคงที่ของสารวัสดุที่เป็นประเภทวัสดุประกอบระหว่าง PZT กับพอลิเมอร์บางชนิด ซึ่งเป็นวัสดุที่มักมีการสูญเสียสัญญาณเพื่อให้ได้ผลที่เป็นทั้งค่าจริงและค่าจินตภาพ โดยการใช้จำนวนเชิงซ้อนในสมการทั้งหมด (Kwok et al., 2000)

5.6. แฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor)

ได้จากการตรวจสอบสมบัติเรโซแนนซ์ของวัสดุไพเอโซเซรามิกคือวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนหรือความต้านทานจินตภาพเทียบกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งแสดงดังภาพประกอบที่ 2.15 ซึ่งบริเวณระหว่างความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์ วัสดุไพเอโซเซรามิกจะมีพฤติกรรมเป็นตัวนำและบริเวณที่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์และสูงกว่าความถี่แอนติเรโซแนนซ์วัสดุไพเอโซเซรามิกจะมีพฤติกรรมเป็นตัวเก็บประจุ ค่าแฟกเตอร์คุณภาพสามารถหาได้จากอัตราส่วนของค่าความต้านทานจินตภาพต่อค่าความต้านทาน โดยใช้ค่าที่ได้จากวงจรสมมูลแบบอนุกรมซึ่งแสดงดังภาพประกอบที่ 2.13 (b) ค่าแฟกเตอร์คุณภาพ คำนวณได้โดยสมการ

$$Q_m = \frac{1}{2\pi f_r Z_m C} \left(\frac{f_a^2}{f_a^2 - f_r^2} \right) \quad (2.32)$$

โดย

Q_m คือค่าแฟกเตอร์คุณภาพ

Z_m คือค่าความต้านทานเชิงซ้อนที่ความถี่เรโซแนนซ์ มีหน่วยเป็น Ω

6. การปรับปรุงสมบัติ PZT

ที่บริเวณ MPB ของ PZT มีสมบัติไพโซอิเล็กทริกสูงมาก แต่จำเป็นต้องปรับปรุงเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติบางอย่าง เพื่อได้สมบัติที่เหมาะสมตามความต้องการในการใช้งานด้านต่างๆ เช่น เครื่องตรวจจับการสั่นเชิงกล (mechanical vibration) ควรใช้ PZT ที่มีค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกความเค้นสูงในขณะที่ควรมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นจึงมีการดัดแปลง PZT เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ โดยใช้วิธีเติมสารเจือ (dopant)

6.1. การเติมสารเจือ (doping)

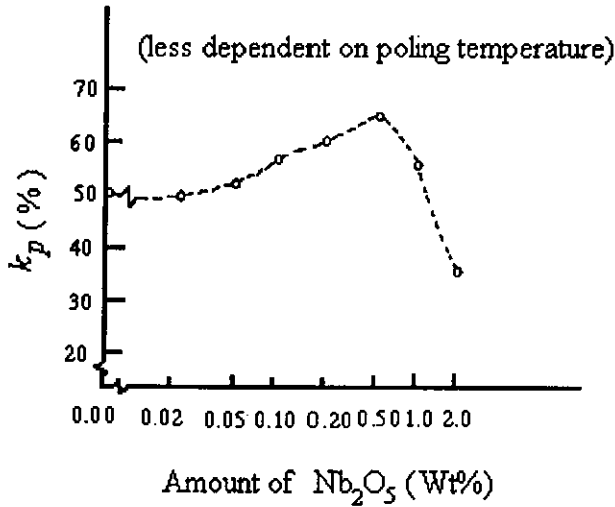
การเติมสารเจือใน PZT สามารถแบ่งได้ 3 วิธี คือ

1. การใช้อะตอมที่มีขนาดหรือเวเลนซ์อิเล็กตรอนใกล้เคียงกับขนาดอะตอมของ Pb^{2+} Ti^{4+} และ Zr^{4+} เป็นสารเจือเพื่อเข้าไปแทนที่ (substitution) ในตำแหน่ง ของ Pb^{2+} Ti^{4+} และ Zr^{4+} โดยจะใช้ Ba^{2+} หรือ Sr^{2+} เข้าแทนที่ใน Pb^{2+} และใช้ Sn^{4+} เข้าแทนที่ใน Zr^{4+} หรือ Ti^{4+} เพื่อให้ PZT มีค่า T_c ต่ำและค่า ε สูง ตัวอย่างเช่น $Pb_{0.95}Sr_{0.05}Zr_{0.52}Ti_{0.48}O_3$ โดยใช้ Sr^{2+} 5 เปอร์เซ็นต์เติมเข้าไปแทนที่ในอะตอมของ Pb^{2+}

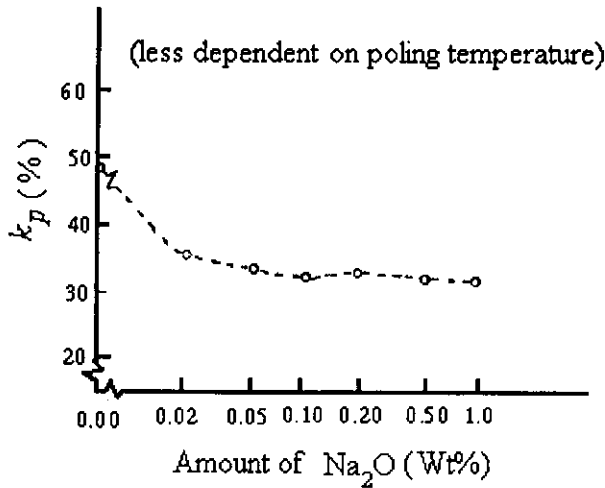
2. การใช้อะตอมของ La^{3+} Nd^{3+} Sb^{3+} Bi^{3+} หรือ Th^{4+} เข้าแทนที่ในตำแหน่งอะตอมของ Pb^{2+} และใช้ Nb^{5+} Sb^{5+} หรือ W^{6+} เข้าแทนที่ใน Zr^{4+} หรือ Ti^{4+} จัดเป็นสารเจือแบบซอฟท์ (soft dopants) ซึ่งจะทำให้ PZT มีค่า k_p ε R สูง และค่า Q_m ต่ำ ตัวอย่างเช่น $Pb_{0.97}La_{0.02}Zr_{0.52}Ti_{0.48}O_3$ โดยใช้ La^{3+} 2% เข้าแทนที่ Pb^{2+} และเกิดที่ว่าง 1 เปอร์เซ็นต์ หรือ $Pb_{0.97}Nb_{0.02}(Zr_{0.52}Ti_{0.48})_{0.98}O_3$ โดยที่มี Nb^{5+} เข้าแทนที่ใน Ti^{4+} หรือ Zr^{4+} 2% และเกิดที่ว่าง 1 เปอร์เซ็นต์ สำหรับที่ตำแหน่ง Pb^{2+} ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.16

3. การใช้อะตอมของ K^+ หรือ Na^+ เพื่อเข้าแทนที่ Pb^{2+} และใช้อะตอมของ Fe^{3+} Co^{2+} Mn^{2+} Ni^{2+} Mg^{2+} Al^{3+} Ga^{3+} In^{3+} Cr^{3+} และ Sc^{3+} เพื่อเข้าแทนที่ใน Zr^{4+} หรือ Ti^{4+} สารเจือเหล่านี้เรียกว่า สารเจือแบบฮาร์ด (hard dopants) และการเติมสารเจือวิธีนี้เพื่อจะให้ได้ PZT ที่มี ค่า Q_m สูง ค่า ε $\tan \delta$ และ k_p ต่ำ แต่ค่าสนามบังคับ (coercive field) และ ค่าแฟกเตอร์คุณภาพ

สูง ซึ่งจากภาพประกอบที่ 2.17 แสดงค่าคัปปลิงแฟกเตอร์เมื่อใช้ Na^+ เป็นสารเจือในใน PZT (Zr:Ti = 52:48)



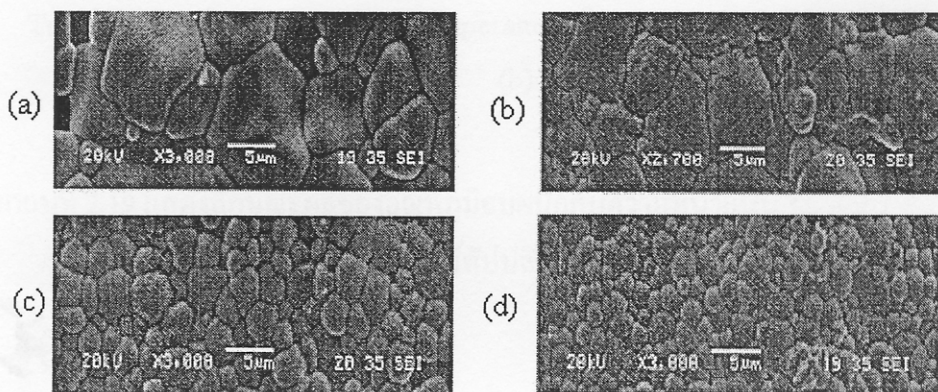
ภาพประกอบที่ 2.16 แสดงค่า k_p เมื่อเติมสารเจือคือ Nb_2O_5 ใน PZT (ที่มา : Tahahashi, 1970)



ภาพประกอบที่ 2.17 แสดงค่า k_p เมื่อเติมสารเจือคือ Na_2O ใน PZT (ที่มา : Tahahashi, 1971)

7. จุดโครงสร้างกับสมบัติไพโซอิเล็กทริก

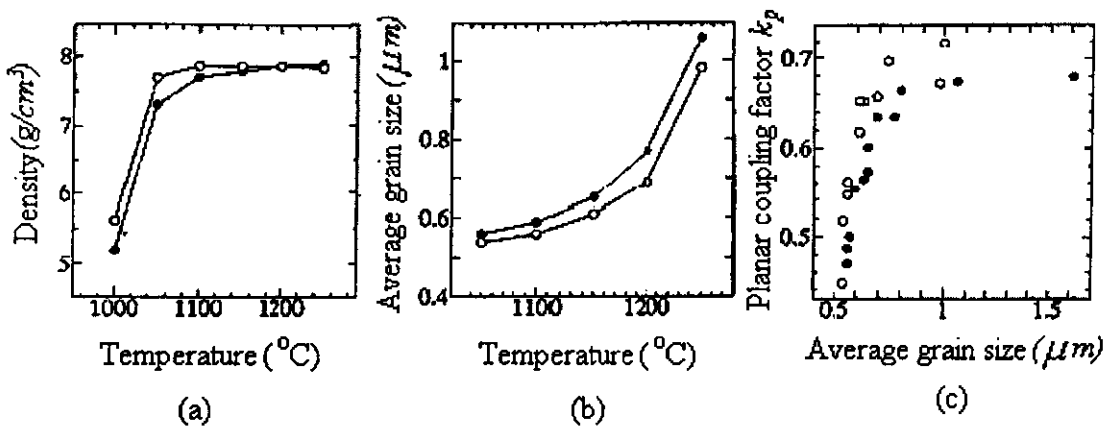
ลักษณะจุดโครงสร้างภายใน PZT ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลากหลาย เช่น ขนาดเกรน และ/หรือ ขอบเขตเกรน ความหนาแน่นและ/หรือความพรุน ความเป็นเนื้อเดียวกัน โดย Kong และคณะ (2000) ผลของเวลาในการบดผสมกับขนาดเกรนของ PZT ซึ่งแสดงดังภาพประกอบที่ 2.18



ภาพประกอบที่ 2.18 ลักษณะจุดโครงสร้างของ PZT เมื่ออบผนึ่ง $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 1 ชั่วโมง โดย (a) บดผสม 20 ชั่วโมง (b) บดผสม 40 ชั่วโมง (c) บดผสม 60 ชั่วโมงและ (d) บดผสม 80 ชั่วโมง (ที่มา : Kong et al., 2000)

ซึ่งขนาดของเกรนใน PZT จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและเงื่อนไขในการเผาอบผนึ่ง โดยทั่วไปขนาดของเกรนใน PZT จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการอบผนึ่งเพิ่มขึ้นซึ่งจะเพิ่มขึ้นตั้งแต่ระดับน้อยกว่าไมโครเมตรแต่จะไม่โตเกินกว่า $10\text{ }\mu\text{m}$ การใช้ออกไซด์ของโลหะเป็นสารเจือจะมีผลต่อการโตเกรน เนื่องจากกระบวนการอบผนึ่ง ซึ่ง Weston และคณะ (1969) รายงานว่า PZT ที่มีขนาดเกรนเฉลี่ย $5.5\text{ }\mu\text{m}$ เมื่อใช้ Fe_2O_3 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นสารเจือจะทำให้ขนาดเกรนลดลงถึง $2.7\text{ }\mu\text{m}$ แต่ในขณะเดียวกันค่าแฟกเตอร์คุณภาพเพิ่มขึ้นจาก 300 ถึง 900

ความหนาแน่นและ/หรือความพรุนนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการอบผนึ่งซึ่งจะมีผลต่อสมบัติไพโซอิเล็กทริกของ PZT เช่นกันซึ่งแสดงดังภาพประกอบที่ 2.19



ภาพประกอบที่ 2.19 แสดงลักษณะผลของอุณหภูมิอบเผือกกับความหนาแน่น ขนาดเกรนเฉลี่ย กับอุณหภูมิ และค่าพลาแนร์คัปปลิงแฟกเตอร์กับขนาดเกรนเฉลี่ย (ที่มา : Kudo, 1995)

ความเป็นเนื้อเดียวกันหรือความบริสุทธิ์ของสารมีผลต่อสมบัติไพเอโซอิเล็กทริกมากกว่าความหนาแน่นและขนาดเกรน Kim และคณะ (1991) ได้รายงานเกี่ยวกับสารประกอบ PZT ที่อัตราส่วนเหมือนกันแต่ได้จากกระบวนการเตรียมหลายๆ วิธีซึ่งจะได้สมบัติทางไฟฟ้าต่างกันเช่น PZT ที่ได้จากกระบวนการปฏิบัติการตรงจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำซึ่งแสดงให้เห็นว่าความไม่บริสุทธิ์ของสารตัวอย่างจะมีผลต่อสมบัติไพเอโซอิเล็กทริก