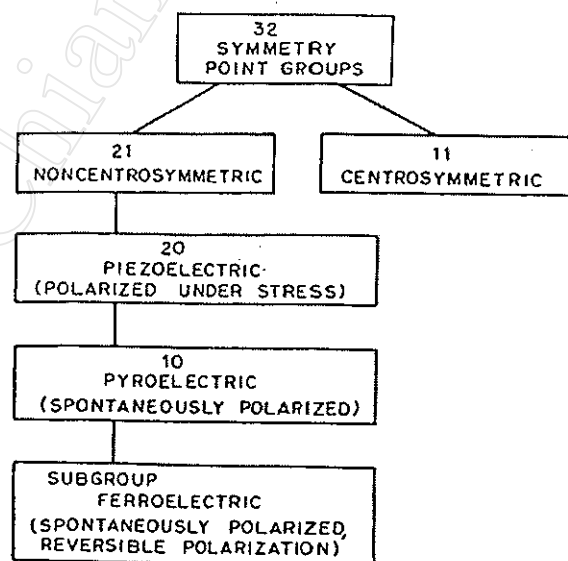


## บทที่ 2

### ทฤษฎี

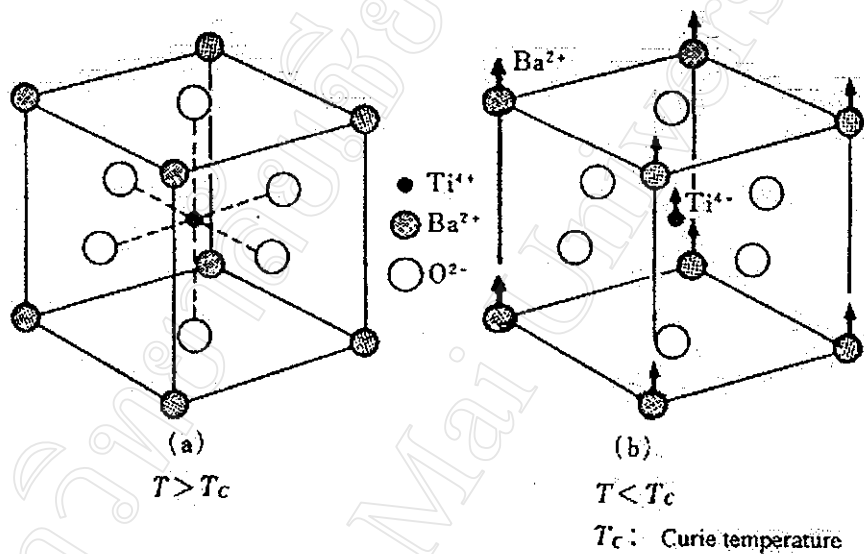
#### 2.1 Piezoelectricity

พิโซอิเล็กทริกซิตี คือ ปรากฏการณ์ที่สารสามารถเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันทางไฟฟ้าเมื่อได้รับความเครียดทางกล ในทำนองกลับกันเมื่อสารได้รับสนามไฟฟ้าก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด และปริมาตรได้ ซึ่งสารที่จะแสดงสมบัติ Piezoelectricity ได้นั้น จะมีลักษณะของโครงสร้างผลึกเป็นแบบหน่วยเซลล์ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลาง (noncentrosymmetric class) เมื่อพิจารณาสมมาตรของผลึกแล้ว สามารถแบ่งออกได้เป็น 32 กลุ่ม ใน 32 กลุ่ม จะถูกแบ่งออกเป็น 2 พวกคือ 11 กลุ่ม ที่มีหน่วยเซลล์สมมาตรกับจุดศูนย์กลาง และอีก 21 กลุ่ม ที่มีหน่วยเซลล์ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลาง และใน 21 กลุ่มนี้มีเพียง 20 กลุ่ม เท่านั้น ที่แสดงสมบัติพิโซอิเล็กทริก อีกหนึ่งกลุ่มไม่แสดงสมบัติพิโซอิเล็กทริก เนื่องจากเมื่อสารอยู่ในความเครียดแล้ว สารมีสมมาตรกับจุดศูนย์กลาง (ส่งผลให้โพลาไรเซชันรวมหักล้างกันหมด) ส่งผลให้ไม่แสดงสมบัติพิโซอิเล็กทริก และใน 20 กลุ่มนี้จะมีเพียง 10 กลุ่ม เท่านั้นที่มีสมบัติ Spontaneous polarization คือเกิด โพลาไรเซชัน ได้ด้วยตัวของสารเชิงโดยไม่ต้องมีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไป



รูปที่ 2.1 แสดงการจำแนกสารโดยใช้สมมาตรของผลึก

วัสดุเซรามิกบางชนิดที่มีโครงสร้างแบบอ็อกทีก และ เป็นพวกหน่วยเซลล์ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลาง ภายใน Unit cell ของเซรามิกประเภทนี้จะมีผลของ Electric dipole เกิดขึ้นเล็กน้อย เช่น Barium Titanate ( $\text{BaTiO}_3$ ) ณ ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $120^\circ\text{C}$  ( $\text{BaTiO}_3$ ) มีโครงสร้างผลึกแบบ perovskite ที่มีสมมาตรเป็น cubic Perovskite แต่ เมื่อลดอุณหภูมิต่ำกว่า  $120^\circ\text{C}$   $\text{Ti}^{4+}$  ไอออนที่อยู่ตรงกลาง และ  $\text{O}^{2-}$  ไอออนที่อยู่หน้าทั้ง 8 ด้าน จะเกิดการเลื่อนกันในทิศทางตรงกันข้ามเล็กน้อย ส่งผลให้เกิด electric dipole moment ขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของ  $\text{BaTiO}_3$  เป็น Tetragonal Perovskite ดังรูปที่ 2.2

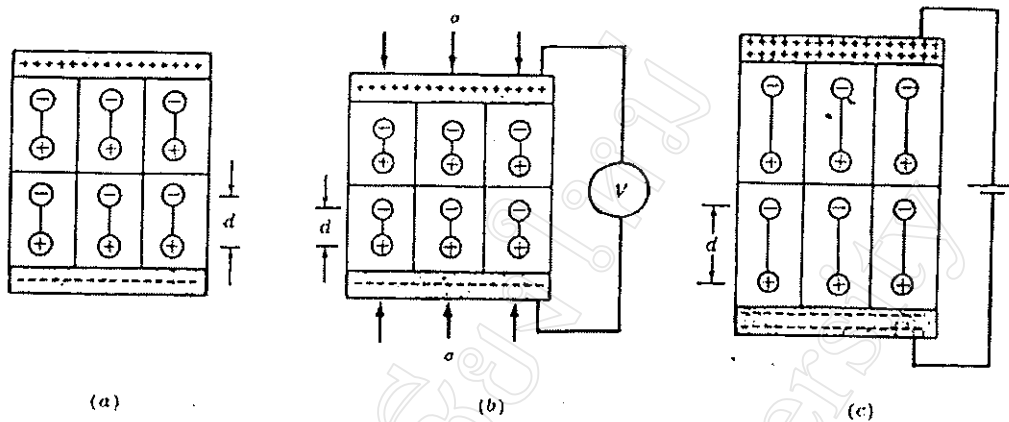


รูปที่ 2.2 แสดง Unit cell ของ  $\text{BaTiO}_3$  ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อ อุณหภูมิสูงกว่า อุณหภูมิคูรี

ซึ่ง ณ อุณหภูมิ  $120^\circ\text{C}$  นี้เรียกว่า อุณหภูมิ คูรี ซึ่งก็คือ อุณหภูมิที่สาร Ferroelectric เปลี่ยนเป็น paraelectric นั้นเอง ซึ่งสืบเนื่องจากโครงสร้างภายในของสารเปลี่ยนแปลงนั่นเอง หากพิจารณาอุณหภูมิวิกฤตนี้ สารแต่ละตัวจะมี Curic temperature ต่างกันออกไปขึ้นกับชนิดของสารนั่นเอง

เมื่อพิจารณา  $\text{BaTiO}_3$  ณ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า Curic temperature เมื่ออยู่ในสถานะที่มีสนามไฟฟ้า dipole ภายใน  $\text{BaTiO}_3$  จะถูกสถานะไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันสนามไฟฟ้าที่ใส่ ส่งผลให้เมื่อรวม Dipole moment ของ  $\text{BaTiO}_3$  ก็จะเท่ากับผลรวมของ Dipole moment ของแต่ละ Unit cell ที่ประกอบขึ้นเป็น  $\text{BaTiO}_3$  ปรากฏการณ์เช่นนี้เองส่งผลให้  $\text{BaTiO}_3$  นั้นแสดง Dipole moment ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีความเข้มสูง ส่งผลให้แสดงผลของ พิโซอิเล็กตริก ออกมา

หากพิจารณา Electric dipole ในวัสดุ พิโซอิเล็กตริก ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 (a)แสดงภาพจำลอง electric dipoles ในวัสดุ Piezoelectric  
 (b)การเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุถูกแรงอัด  
 (c) การเปลี่ยนแปลงขนาดเมื่อวัสดุถูกใส่ความต่างศักย์เข้าไป

จะเห็นได้ว่าทั้งสองด้านของวัสดุมีประจุที่แตกต่างกัน ด้านหนึ่งแสดงประจุบวก และอีกด้านแสดงประจุลบ เมื่อออกแรงกดอัดวัสดุ แรงกดอัดจะลดระยะห่างระหว่าง dipoles ส่งผลให้ผลรวมของ dipole moment ของวัสดุทั้งหมดลดลง เป็นผลทำให้ความหนาแน่นของประจุ และความแตกต่างของความต่างศักย์ที่ปลายทั้งสองด้านเกิดการเปลี่ยนแปลงในทางตรงกันข้าม ถ้ามีการให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุมีขนาดยืดยาวออก

ผลของ พิโซอิเล็กทริก เป็นผลทาง Electromechanical ของวัสดุนั้นคือ สามารถเปลี่ยนแรงทางกลไปเป็นไฟฟ้า และสามารถเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่ได้รับไปเป็นแรงทางกลได้

## 2.2 Spontaneous Polarization (Ps)

หากพิจารณาในกลุ่มสารที่แสดงสมบัติพิโซอิเล็กทริก จะมีสารในกลุ่มพิโซอิเล็กทริกบางตัวที่แสดงสภาพขั้ว หรือเกิดไดโพลโมเมนต์ได้ด้วยตัวเอง แม้ไม่ได้รับสนามไฟฟ้ากระทำเรียกกลุ่มสารพวกนี้ว่า เกิด "Spontaneous Polarization" หรืออาจกล่าวได้ว่า spontaneous polarization คือค่าของ dipole moment ต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยถึงแม้ว่า ผลึกที่มี polax axes (20 กลุ่มที่หน่วยเซลล์ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลาง) จะแสดงสมบัติ "Piezoelectric effect" แต่ก็ไม่จำเป็นว่าทุกตัวจะมี Spontaneous Polarization จะมีเพียง 10 กลุ่มใน 21 กลุ่ม เท่านั้นที่แสดงสมบัติ Spontaneous Polarization (Ps) และ

หากค่า Spontaneous Polarization ขึ้นกับอุณหภูมิเราเรียกกลุ่มนี้ว่า Pyroelectric effect ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกโดย Teophrast ซึ่งค่า Spontaneous Polarization มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังสมการ

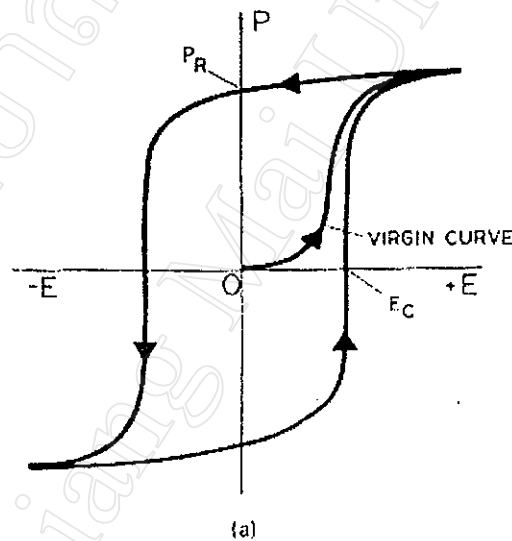
$$\Delta P_s = \pi \Delta T$$

$\Delta P_s$  = การเปลี่ยนแปลง Spontaneous Polarization

$\pi$  = Pyroelectric coefficient

$\Delta T$  = การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ซึ่งจาก Pyroelectric crystal นั้นแสดงสมบัติ Spontaneous Polarization  $P_s$  ขึ้นกับอุณหภูมิ แล้วถ้าค่า Spontaneous Polarization นั้นยังสามารถถูกสลับได้โดยการให้สนามไฟฟ้าแล้ว เรียกสารพวกนี้ว่า Ferroelectric ซึ่งจะสังเกตได้จากการหา Ferroelectric hysteresis ที่แสดงดังรูปที่ 2.4



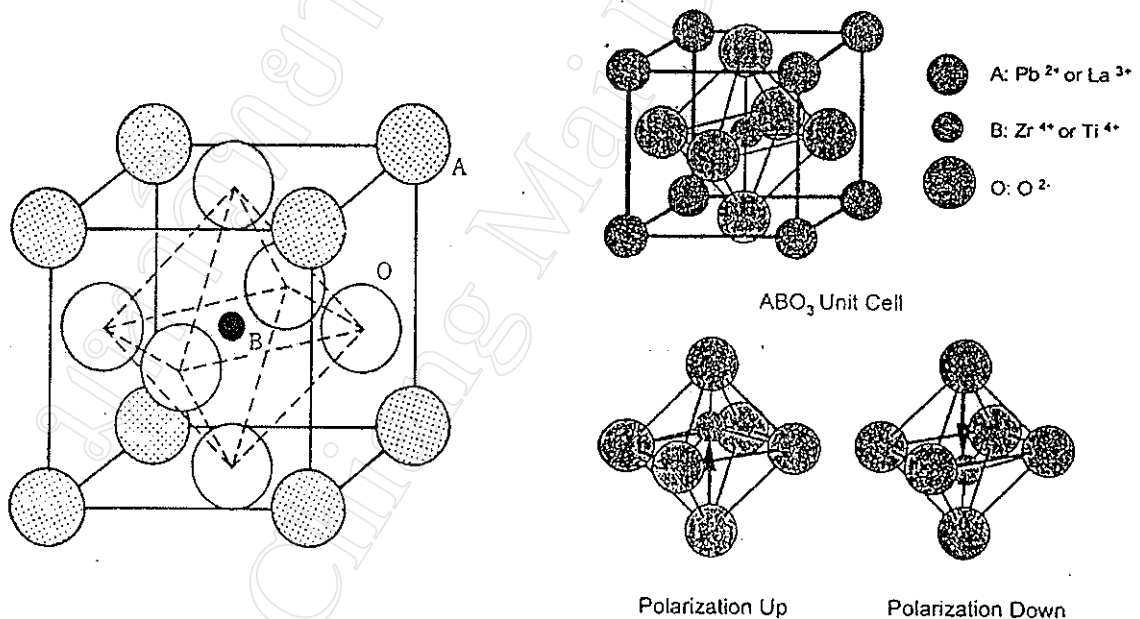
รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ E-P ของสาร Ferroelectric

พิจารณาเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าจะไปเหนี่ยวนำให้ Dipole เกิดการจัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าที่กระทำ ส่งผลให้ค่า Polarization เพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้จุดอิ่มตัว  $P_{sat}$  (saturation Polarization) และเพื่อลดสนามไฟฟ้าที่ให้ ค่า Polarization มีได้ลดตาม กราฟตอนแรกจะเห็นได้ว่าเมื่อลดสนามไฟฟ้าเป็น 0 domain ในวัสดุบางตัวจะเรียงตัวใหม่ ส่งผลให้ค่า Polarization ลดลงเล็กน้อย เรียก remnant polarization  $P_r$  และเมื่อกลับทิศทางในการให้สนามไฟฟ้า ผลึกจะถูก depolarized ด้วยสนามไฟฟ้าที่กลับช่วงจนค่า Polarization ลดลงเป็นศูนย์ ค่าสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้เพื่อลดค่า Polarization ให้เป็นศูนย์นี้เรียก Coercive Field strength ( $E_c$ )

ลักษณะของ Curve แสดงความสัมพันธ์ E-P เช่นนี้แสดงปรากฏการณ์ Ferroelectric ซึ่งมีรูปร่างคล้ายกับ curve ของ B-H ในวัสดุแม่เหล็ก

### 2.3 โครงสร้างแบบ เพอโรฟสไกต์

เพอโรฟสไกต์ เป็นชื่อของสาร  $\text{CaTiO}_3$  ซึ่งมีสูตรเป็น  $\text{ABO}_3$  แต่สารที่แสดงสมบัติ Ferroelectric ส่วนใหญ่มีสูตรโครงสร้างเหมือนกับสารเพอโรฟสไกต์ ดังนั้นจึงจัดกลุ่มเรียกระบบพวกนี้ว่า เพอโรฟสไกต์ ซึ่งจริง ๆ แล้วสารเพอโรฟสไกต์ เองก็ไม่ได้แสดงสมบัติ เฟอร์โรอิเล็กทริก หากพิจารณาโครงสร้างแบบ เพอโรฟสไกต์ เป็นการจัดเรียงของ Atom A และ Atom B แบบ Complexoxide ซึ่งลักษณะเป็นการร่วมกันระหว่าง cation และ anion สร้าง close pack structure แบบ cubic closed pack structure โดยที่ B site อยู่ตรงกลาง A site เป็น Atom ที่อยู่ Octahedral site ของ B และ  $\text{O}_3$  อยู่ที่มุมทั้ง 8 ดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะโครงสร้างแบบ เพอโรฟสไกต์

ซึ่งอาจแบ่งโครงสร้างของ perovskite ออกเป็น 2 แบบ

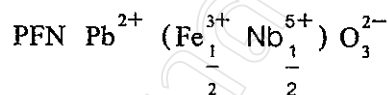
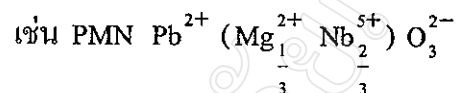
1. Ideal perovskite ( $\text{ABO}_3$ )
2. Complex perovskite ( $\text{A}'\text{A}''\text{B}'\text{B}''\text{O}_3$ )

Ideal perovskite เป็น โครงสร้างของ perovskite ที่ ณ ตำแหน่ง A site และ B site เป็น Atom ของธาตุชนิดหนึ่งชนิดใด เลยไม่ได้แบ่งตำแหน่งนี้ให้ธาตุอื่นอยู่ ซึ่งเมื่อพิจารณา Complex perovskite อาจแบ่งย่อยออกได้อีก 2 แบบ

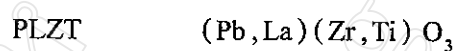
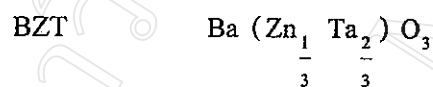
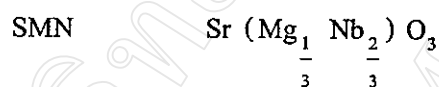
1. Lead – Based complex perovskite
2. Free Lead based complex perovskite

เมื่อพิจารณา Lead based complex perovskite ณ ตำแหน่ง A site เป็นตำแหน่งของ Lead (Pb) และ B site จะเป็นการอยู่ร่วมกันระหว่างธาตุอื่นอย่างน้อย 2 ธาตุ

ในทำนองเดียวกันสำหรับ Free Lead based Complex Perovskite ตำแหน่ง A site ไม่ได้มี Lead อยู่ ณ ตำแหน่งนี้แล้ว แต่ทั้ง A site และ B site เป็นการอยู่ร่วมกันของ Atom ธาตุอื่นทั้งสอง ตำแหน่ง ยกตัวอย่าง สำหรับ Lead based Complex Perovskites



และ Free Lead based Complex Perovskite เช่น



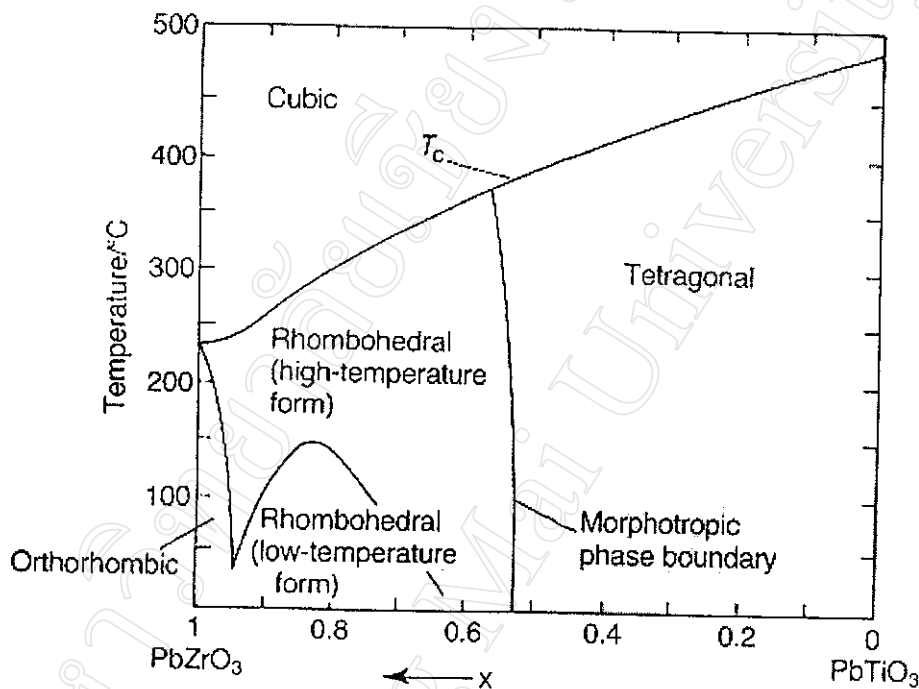
เป็นต้น

## 2.4 Lead Zirconate Titanate

Lead Zirconate Titanate (PZT) เป็นสารละลายของแข็งที่เกิดจาก  $\text{PbZrO}_3$  ซึ่งมีสมบัติเป็น antiferroelectric และมีโครงสร้างเป็น orthorhombic กับ  $\text{PbTiO}_3$  ซึ่งแสดงสมบัติ ferroelectric และมีโครงสร้างแบบ tetragonal perovskite ซึ่งเมื่อรวมกัน เป็น PZT แล้วก็จะมีโครงสร้างแบบ perovskite ซึ่ง  $\text{Ti}^{4+}$  และ  $\text{Zr}^{4+}$  ion จะแบ่งกันอยู่ ณ ตำแหน่ง B site ของโครงสร้าง perovskite

ณ ที่อุณหภูมิสูง PZT จะมีโครงสร้างแบบ Cubic perovskite structure ส่งผลให้แสดงสมบัติ paraelectric และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า curie temperature. โครงสร้าง cubic จะเปลี่ยนเป็น tetragonal หรือ rhombohedral phase ส่งผลให้สมบัติ paraelectric เปลี่ยนเป็น ferroelectric ด้วย เมื่อพิจารณา tetragonal phase directions จะมี spontaneous polarization ไปใน (100) และสำหรับ rhombohedral phase จะมี polarization ไปใน direction (111) จาก phase diagram ของ PZT หากพิจารณา ณ อัตรา

ส่วน Zr/Ti เท่ากับ 52/48 จะตรงกับเส้น morphotropic phase boundary ซึ่ง ณ บริเวณนี้สารจะแสดงสมบัติของ ferroelectric ที่เด่นชัดที่สุด เนื่องจากมีโครงสร้าง 2 ชนิด ในสารคือ Tetragonal กับ orthorhombic phase ณ ที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลให้เซรามิก PZT ณ ส่วนผสม MPB จะแสดงสมบัติ piezoelectric ที่ดีที่สุด



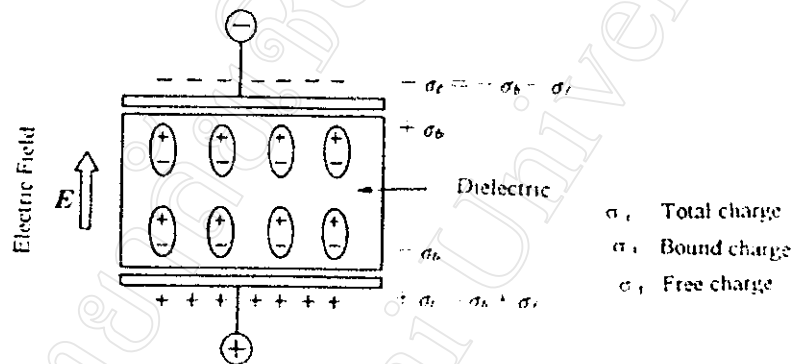
รูปที่ 2.6 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ  $\text{PbZrO}_3$ - $\text{PbTiO}_3$

สมบัติของสารพีโซอิเล็กทริก เซรามิก สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเติมสารเจือ ซึ่งสารเจือที่เติมคือ ion ที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดแตกต่างกับ ion ของ lattice พีโซอิเล็กทริก PZT เซรามิก ซึ่งมีส่วนผสม ณ ตำแหน่ง MPB สามารถเจือ ion เพื่อประกอบตัวเป็น “hard” และ “soft” PZT ได้ สำหรับ Hard PZT เป็นการเจือ acceptor ions เช่น  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  (สำหรับตำแหน่ง A site และ  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$  สำหรับ B site สำหรับสมบัติของ Hard PZT นั้นจะแสดงค่า permittivity ที่ต่ำ และ electrical losses ที่ต่ำ และยังให้ค่า piezoelectric coefficients และยังสามารถทำการ pole ได้ยากด้วย ในทำนองกลับกัน สำหรับ Soft PZT เป็นการเจือ donor ions เช่น  $\text{La}^{3+}$  สำหรับ A site และ  $\text{Nb}^{5+}$ ,  $\text{Sb}^{5+}$  สำหรับตำแหน่ง B site ส่งผลให้สมบัติต่าง ๆ ของสารเปลี่ยนแปลงไปนั่นคือ ค่า permittivity มีค่าสูง รวมไปถึงค่า electrical losses และ piezoelectric coefficients และยังสามารถโพลได้ง่ายอีก

## 2.5 สมบัติทางไฟฟ้า

### 2.5.1 สมบัติไดอิเล็กตริก

วัสดุไดอิเล็กตริก เป็นชนิดหนึ่งของฉนวนซึ่งไม่นำไฟฟ้า และยังสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้อีกด้วย ซึ่งค่าความสามารถในการกักเก็บประจุไฟฟ้าของสารไดอิเล็กตริก เรียกว่า ค่า Capacitance เมื่อใส่สนามไฟฟ้าแก่สารไดอิเล็กตริก สารไดอิเล็กตริก Polarization ขึ้น ซึ่งเท่ากับ Net Polarization / Unit Volume ซึ่งถ้าค่า Polarization สูงก็ส่งผลให้สาร dielectric มีค่า Capacitance สูงด้วย



รูปที่ 2.7 แสดงภาพ Polarization ที่เกิดขึ้นในสาร ไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า

หากพิจารณาวัสดุไดอิเล็กตริกอยู่ในแผ่นตัวนำคู่ขนาน เมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่แผ่นตัวนำ ประจุที่อยู่บนแผ่นตัวนำคู่ขนาน จะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบริเวณผิวหน้าของวัสดุไดอิเล็กตริก ( $\sigma_T$ ) เมื่อพิจารณาสนามที่เกิดขึ้นภายในวัสดุไดอิเล็กตริก จากกฎของ Gauss

$$E = \frac{\sigma_T - \sigma_p}{\epsilon_0}$$

$$\sigma_T = \vec{E}\epsilon_0 + \sigma_p$$

โดยที่

$$\sigma_p = \text{Polarization}$$

$$\sigma_T = \text{Surface density or displacement } \vec{D}$$



$$\vec{D} = \vec{E}\epsilon_0 + \sigma_p \quad (1)$$

พิจารณา

$$\vec{P} \propto \vec{E}$$

$$\vec{P} = \epsilon_0 X_e \vec{E}$$

$$\vec{E} = \frac{U}{h} \quad (2)$$

$$\vec{P} = \epsilon_0 X_e \frac{U}{h} \quad (3)$$

ดังนั้น

$$\text{จาก } \vec{D} = \sigma_T = \frac{\theta}{A}$$

$$\frac{\theta}{A} = \frac{U}{h} \epsilon_0 + \epsilon_0 X_e \frac{U}{h}$$

$$\frac{\theta}{U} = \epsilon_0 \frac{A}{h} (1 + X_e)$$

$$c = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{h}$$

|        |              |     |                                                                    |
|--------|--------------|-----|--------------------------------------------------------------------|
| โดยที่ | $\theta$     | คือ | ประจุรวม (total charge / coulomb)                                  |
|        | $A$          | คือ | พื้นที่หน้าตัดของแผ่นโลหะตัวนำ                                     |
|        | $U$          | คือ | ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่วัสดุไดอิเล็กตริก                               |
|        | $c$          | คือ | ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุ                                             |
|        | $\epsilon_0$ | คือ | ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในสุญญากาศ                                     |
|        | $\epsilon_r$ | คือ | ค่าความสามารถในการกักเก็บประจุของสารไดอิเล็กตริกเมื่อเทียบกับอากาศ |
|        | $h$          | คือ | ความหนา                                                            |

### 2.5.2 การสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กตริก

เมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ พฤติกรรมของวัสดุจะแตกต่างออกไปเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้ากระแสสลับ  $E = E_0 \sin \omega t$  สนามไฟฟ้าจะสลับตามรูปแบบของคลื่นไซน์ ดังนั้นเมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ แก้ววัสดุไดอิเล็กตริก ไดโพลภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลับไปมาตามความถี่ของสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่ให้ ณ ที่ความถี่สูง ไดโพลจะกลับตัวไม่ทันกับสนามที่ให้ส่งผลให้เกิด Relaxation ขึ้นหรืออาจกล่าวได้ว่า สนามไฟฟ้าเป็นพลังงานแบบหนึ่งซึ่งเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุไดอิเล็กตริก ไดโพลในวัสดุไดอิเล็กตริกจะใช้พลังงานที่ให้การกลับตัวไปมา แต่เมื่อที่ความถี่สูง ไดโพลกลับไม่ทัน เพื่อกลับไม่ทัน ไดโพลจึงไม่กลับตัว เมื่อไม่กลับตัวแต่ยังรับพลังงานจากสนามไฟฟ้าอยู่พลังงานที่สารได้รับจะค่อยๆ สะสมเกิดเป็นความร้อนขึ้นเป็นการสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กตริก

พิจารณา

$$U = U_0 \sin \omega t \quad (1)$$

$$U' = U_0 \omega \cos \omega t$$

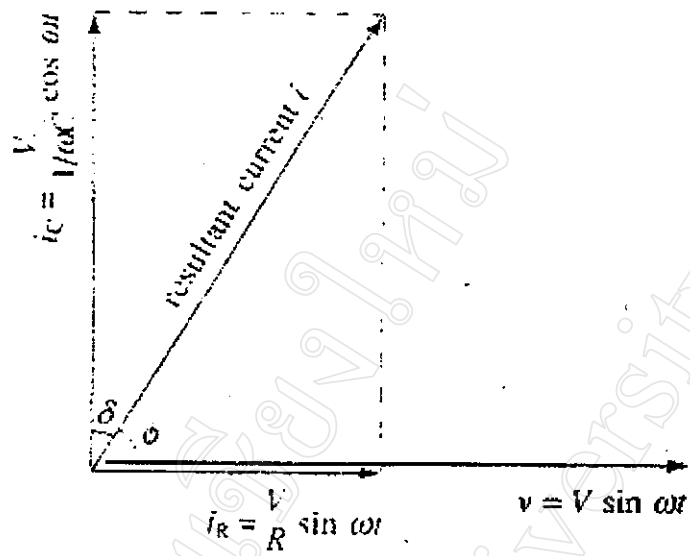
$$U' = U_0 \omega \left( \sin \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

จาก

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt}$$

$$I = C U_0 \omega \left( \sin \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (2)$$

จากสมการจะเห็นว่ากระแสจะนำศักย์ไฟฟ้าอยู่  $90^\circ$  เป็นไปตามทฤษฎีจะไม่เกิดการสูญเสียเกิดขึ้น แต่ในความเป็นจริงกระแสมีได้นำศักย์ไฟฟ้าอยู่  $90^\circ$  ส่งผลให้เกิดการสูญเสียเกิดขึ้น



รูปที่ 2.8 แสดงค่า loss tangent ที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริก  
พิจารณากระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสีย  $I_1$

$$\bar{P}_{\text{loss}} = \frac{1}{T} \int_0^T I_1 U dt$$

$$I_1 = I_o \cos(\omega t - \delta)$$

$$\bar{P}_{\text{loss}} = \frac{1}{2} I_c U_o \tan \delta$$

$$I_c = C U_o \omega$$

$$\bar{P}_{\text{loss}} = \frac{1}{2} C U_o^2 \omega \tan \delta$$

$$\text{แทน } C = \epsilon_o \epsilon_r \frac{A}{h} \quad \text{และ} \quad U = \frac{E}{h}$$

$$\bar{P}_{\text{loss}} = \frac{1}{2} \epsilon_o \epsilon_r A E^2 h \tan \delta \omega$$

$$\frac{\bar{P}_{\text{loss}}}{V} = \frac{1}{2} E^2 \epsilon_o \epsilon_r \omega \tan \delta$$

$$\sigma_{AC} = \epsilon_o \epsilon_r \omega \tan \delta$$

$$\text{Loss factor} = \epsilon_r \tan \delta$$

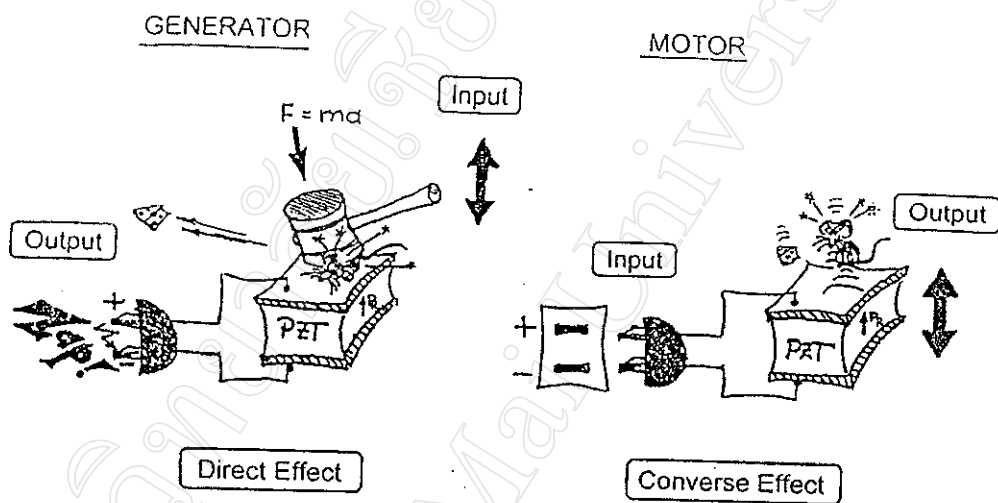
$$\sigma_{AC} = \text{ค่าการนำในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ}$$

$$\tan \delta = \text{dissipation factor หรือ loss tangent}$$

### 2.5.3 สมบัติพิโซอิเล็กทริก

สมบัติพิโซอิเล็กทริกเป็นสมบัติเฉพาะของสารนั้นคือ สารสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับไปเป็นพลังงานกล ในทางกลับกันยังสามารถเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้อีกด้วย ดังนั้นจึงสามารถแบ่งปรากฏการณ์ทางพิโซอิเล็กทริกออกเป็น 2 ประเภทคือ

- ปรากฏการณ์แบบ direct
- ปรากฏการณ์แบบ converse



รูปที่ 2.9 แสดงปรากฏการณ์ 2 แบบ คือ Direct Effect และ Converse Effect ในสาร พิโซอิเล็กทริก

พิจารณาปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกแบบ direct คือ เมื่อสารได้รับความเค้นจากภายนอก สารจะสร้างประจุไฟฟ้าขึ้นที่ผิวของสารเรียก Direct Effect ในทำนองกลับกัน เมื่อสารได้รับสนามไฟฟ้า สารจะเปลี่ยนสนามไฟฟ้าที่ได้เป็นการยืดหดตัวเรียก Converse Effect สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทั้งสองด้วยสมการดังนี้

$$P_i = d_{ij} T_j \quad i = 1, 2, 3$$

$$j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

โดยที่  $P_i$  = โพลาริเซชันทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (Electrical polarization)  
 $T_j$  = ความเค้นที่ใส่ให้แก่สารพิโซอิเล็กทริก (applied mechanical)  
 $d_{ij}$  = สัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริก (piezoelectric change coefficient) ในทิศทาง  $i$   
 $j$  มีหน่วยเป็น C/N

สำหรับกรณีพิโซอิเล็กทริกแบบ converse สามารถพิจารณาได้จากสมการ

$$S_j = d_{ij} E_i \quad i = 1, 2, 3$$

$$j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

โดยที่  $S_j$  = ความเครียดที่เกิดขึ้น (mechanical strain) ในทิศทาง  $j$   
 $E_i$  = สนามไฟฟ้าที่ให้กับสารพิโซอิเล็กทริก (electric field) ในทิศทาง  $i$

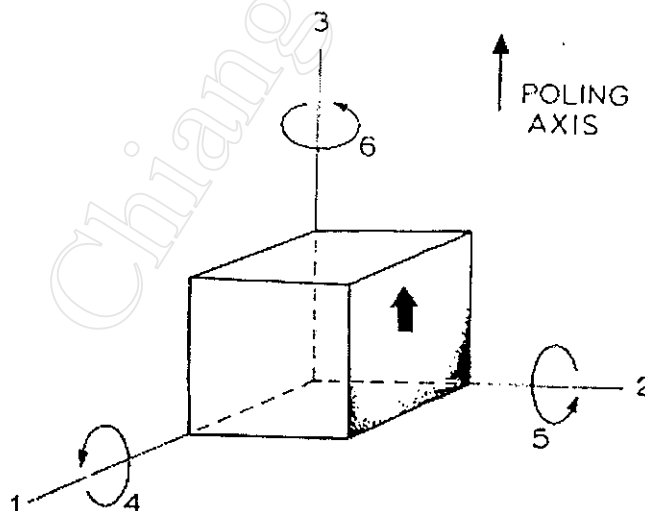
#### 2.5.4 Piezoelectric charge coefficient $d_{ij}$ (C/N)

ค่าปริมาณของประจุไฟฟ้าที่สร้างขึ้นบนผิวของวัสดุพิโซอิเล็กทริกซึ่งตัววัสดุพิโซอิเล็กทริกจะสร้างขึ้นเมื่อได้รับแรง (stress, strain) ต่อหนึ่งหน่วยนิวตันทั้ง Direct Effect และ Converse Effect

$i$  คือ ทิศทางของโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นในวัสดุ  
 $j$  คือ ทิศทางของความเค้นที่ให้แก่สารพิโซอิเล็กทริก หรือ ทิศทางของความเครียดที่สารยืดหด

เช่น

$d_{33}$  คือ ค่าปริมาณของประจุไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในทิศทาง 3 (แกน Z) เมื่อสารได้รับความเค้นในทิศทาง 3 (แกน Z)  
 $d_{31}$  คือ ค่าประจุที่สารสร้างขึ้นในทิศทาง 3 (แกน Z) เมื่อสารได้รับความเค้นในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางที่สารสร้างประจุ (1,2) (แกน x หรือ แกน y)



รูปที่ 2.10 แสดงการกำหนดทิศทางในสารพิโซอิเล็กทริก

### 2.5.5 Piezoelectric Voltage Coefficient $g_{ij}$ [ $\text{V}\text{N}^{-1}$ ]

ค่าปริมาณของความต่างศักย์ที่สารพิโซอิเล็กทริกสร้างขึ้นเมื่อได้รับความเค้นทั้งในกรณี Direct Effect และ Converse Effect

$i$  คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารพิโซอิเล็กทริก หรือบอกทิศทางของ Dielectric Displacement

$j$  คือ ทิศทางของแรงที่สารได้รับหรือทิศทางของความเครียดที่สารยืดออก ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$E_i = g_{ij} T_j \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3 \\ j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \end{matrix}$$

$E_i$  = สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (Electric field) ที่เกิดขึ้นในทิศทาง  $i$

$T_j$  = ความเค้นที่ใส่ให้กับสารพิโซอิเล็กทริก (apply mechanical stress) ในทิศทาง  $j$

$g_{ij}$  = สัมประสิทธิ์แรงดันพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Voltage coefficient  $X$  ในทิศ  $ij$  มีหน่วยเป็น  $\text{V/N}$ )

และยังแสดงความสัมพันธ์กับค่า Piezoelectric charge coefficient ( $d_{ij}$ ) และสัมประสิทธิ์แรงดันพิโซอิเล็กทริกดังสมการ

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

$K$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant)

$\epsilon_0$  คือ permittivity ของ free space ( $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ )

### 2.5.6 Compliance $S_{ij}$ ( $\text{m}^2\text{N}^{-1}$ )

ค่าของความเครียดที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยความเค้นหรืออาจกล่าวได้ว่า เป็นส่วนกลับของค่า modulus of elasticity เช่น

$S_{11}^E$  คือ ค่าความเครียดที่ได้ในทิศทาง 1 (แกน  $X$ ) เมื่อค่าความเค้นที่ได้ในทิศทาง 1 เช่นเดียวกันโดยมีเงื่อนไขคือ ค่าสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบต้องคงที่

$S_{36}^D$  คือ ค่าความเครียดในทิศทาง 3 เมื่อสารได้รับ shear stress ในทิศทางเดียวกันภายใต้เงื่อนไขที่ค่า Dielectric Displacement คงที่

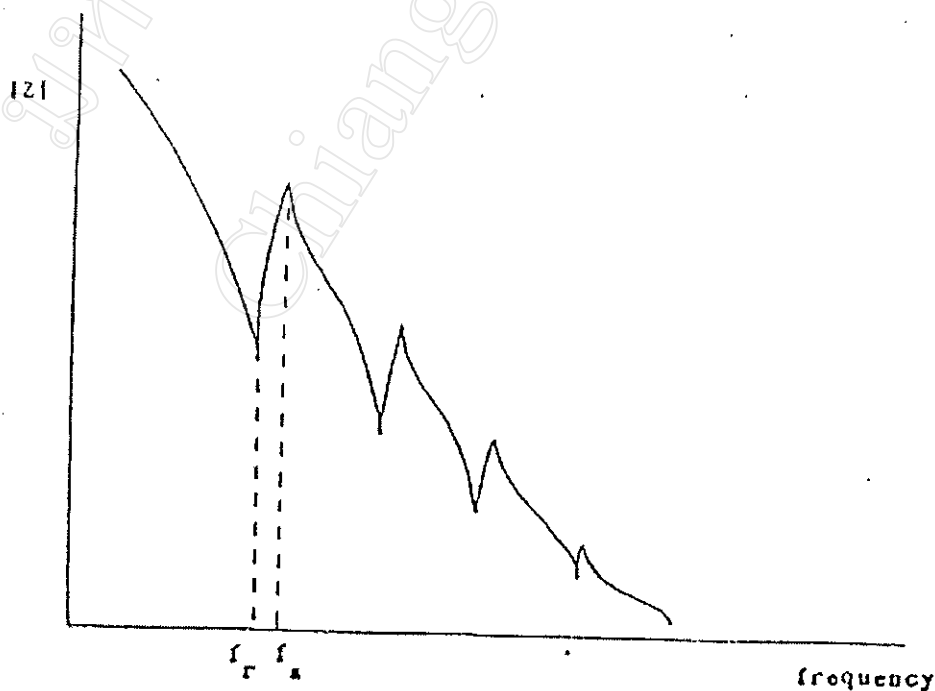
### 2.5.7 Piezoelectric Coupling Factor ( $K_{ij}$ )

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานกล (mechanical stress) ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า (electrical energy) Direct ในทำนองกลับกับค่าพลังงานไฟฟ้า (electrical energy) ไปเป็น mechanical stress (converse effect)

$$k^2 = \frac{\text{output mechanical energy}}{\text{input electrical energy}} = \frac{\text{output electrical energy}}{\text{input mechanical energy}}$$

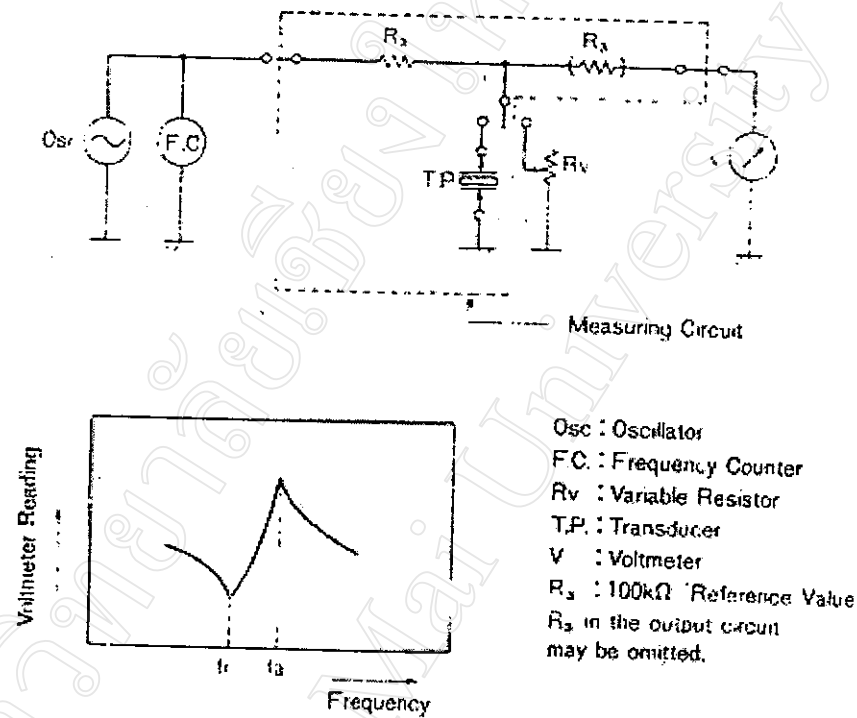
ในผลึกพิโซอิเล็กทริกที่ไม่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีค่าน้อย ( $k < 0.1$ ) ในเซรามิกที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกมีค่าสูง ( $k \leq 0.9$ ) โดยปกติแล้วค่า  $k$  จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปพลังงานไม่สมบูรณ์ และค่า  $k$  ที่วัดได้นั้นก็มิได้ออกประสิทธิภาพที่แท้จริงของสารพิโซอิเล็กทริก เนื่องจากพลังงานบางส่วนถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนและบางส่วนตัวสารพิโซอิเล็กทริกจะทำการเปลี่ยนแปลงภายในตัวเนื้อสารเองเพื่อลดพลังงานที่ได้รับมา

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า impedance กับความถี่ทำให้สามารถหาค่า  $k$  ได้จากพฤติกรรมทางไฟฟ้ากระแสสลับของพิโซอิเล็กทริก ตามความสัมพันธ์ที่แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง impedance กับ ความถี่

โดยความถี่ที่ให้ค่า Impedance สูงสุดว่าเป็น Resonance frequency ( $f_r$ ) และ ณ จุดที่แสดงค่า impedance ต่ำที่สุดเรียก Antiresonance frequency ( $f_a$ ) และสำหรับกราฟ Impedance กับความถี่สามารถหาได้จากวงจรดังรูปที่ 2.12



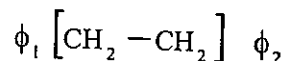
รูปที่ 2.12 แสดงวงจรที่ใช้ในการหาค่า Resonance frequency ( $f_r$ ) และ Antiresonance frequency ( $f_a$ )

สามารถคำนวณหาค่า  $k$  ได้ดังสมการ

$$k_p = \sqrt{2.5 \left( \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_r^2} \right) + 0.038}$$

## 2.6 พอลิเมอร์

คำพอลิเมอร์เป็นคำทับศัพท์ภาษาอังกฤษ polymer ซึ่งมีรากศัพท์มาจากคำกรีกคือ poly ที่หมายถึงจำนวนมากกับ meros ที่หมายถึงส่วน (part) พอลิเมอร์เป็นโมเลกุลยาวซึ่งประกอบด้วยหน่วยเล็กๆ ที่เรียกว่า มอนอเมอร์ (monomers) เชื่อมต่อกัน ยกตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene) มีสูตรโครงสร้างเป็น



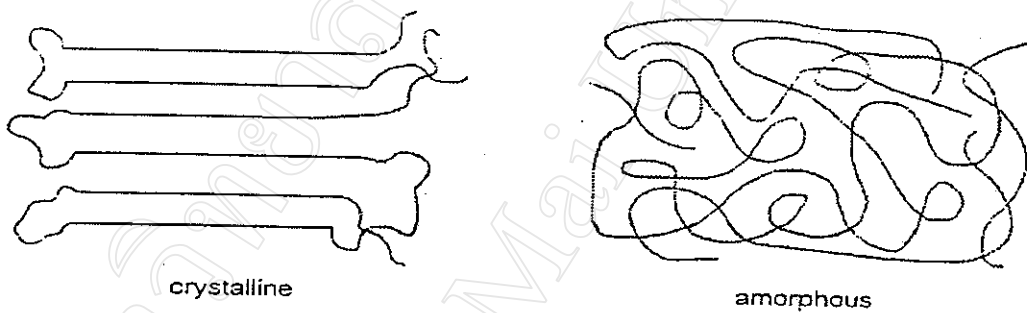
โมเลกุลพอลิเอทิลีนประกอบด้วย เอทิลีนมอนอเมอร์จำนวน  $n$  ตัวเชื่อมต่อกันปกติ  $n$  จะมีขนาด  $10^4$  แต่อาจสูงหรือต่ำกว่าก็ได้ หมู่ปลายเล็กๆ  $\phi_1$  และ  $\phi_2$  มีปริมาณความเข้มข้นน้อยมาก



และหมู่ปลายเหล่านี้ไม่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ แต่อาจมีผลต่อเสถียรภาพทางเคมีของพอลิเมอร์ เช่น สำหรับพอลิเมอร์บางอย่างที่มีหมู่ปลายที่ไม่เสถียร เมื่อถูกทำให้ร้อนหรือโดนแสงแดดนานๆ จะสามารถเริ่มปฏิกิริยาให้เกิดการเสื่อมสภาพของโมเลกุลได้

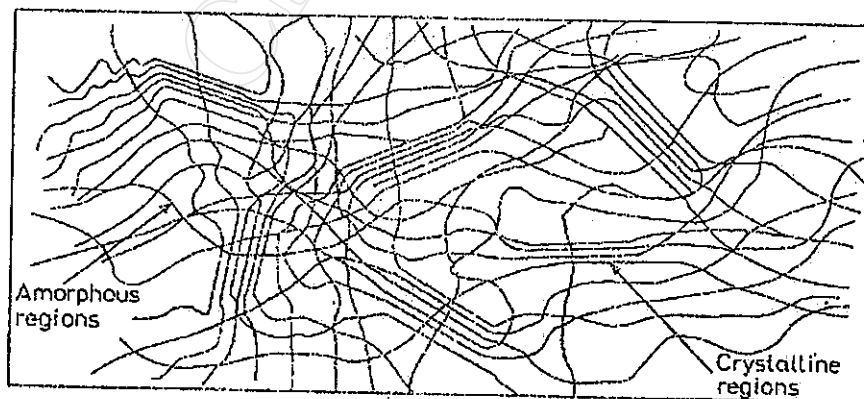
โดยทั่วไปแล้วจะไม่เขียนหมู่ปลายทั้งสองข้าง สำหรับการเขียนสูตรโครงสร้างจะเขียนเฉพาะสูตรในวงเล็บใหญ่ ซึ่งเป็นหน่วยที่ซ้ำๆ กัน (repeating unit) เท่านั้น

สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นsemi-crystalline นี่คือการผสมของผลึกเล็กๆ และ amorphous และหลอมในช่วงกว้างของอุณหภูมิแทนที่จะมีจุดหลอมเหลวหนึ่ง ส่วนที่เป็น crystalline แสดงความเป็นระเบียบอย่างมากโดยการทบและพับของสายโซ่พอลิเมอร์ โครงสร้าง amorphous หรือ glass-like แสดงความไม่เป็นระเบียบและสายโซ่พันกันดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะของพอลิเมอร์ส่วนที่เป็นsemi-crystalline และamorphous

มีพอลิเมอร์บางอย่างเป็นamorphous อย่างสมบูรณ์ แต่ส่วนใหญ่ล้วนเป็นการผสมของบริเวณที่พันกันและไม่เป็นระเบียบล้อมรอบพื้นที่ที่เป็นcrystalline การผสมกันแสดงดังรูปที่ 2.14

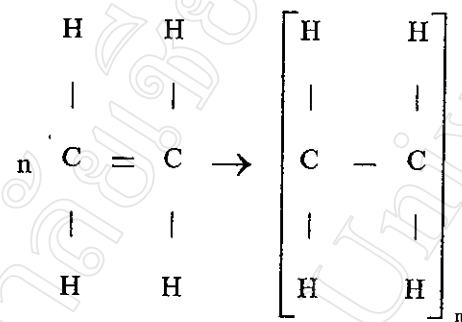


รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย ส่วนที่เป็นsemi-crystalline และamorphous

### 2.6.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene PE)

พอลิเอทิลีนหรือเอทิลีน (Polythene) เป็นพลาสติกที่มีปริมาณการใช้สูงสุดในบรรดาพลาสติกทั้งหมด พอลิเอทิลีนเป็นเทอร์มอพลาสติกที่เตรียมจากมอนอเมอร์เอทิลีนเทอร์มอพลาสติก (thermoplastics) เป็นพลาสติกที่เมื่อนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์แล้วยังสามารถนำกลับมาหลอมใหม่ใช้งานใหม่ได้เรื่อยๆ

มอนอเมอร์เอทิลีนรวมตัวกลายเป็นพอลิเอทิลีน โดยเกิดปฏิกิริยาแบบพอลิเมอไรเซชันแบบรวมตัวซึ่งก็คือ เกิดจากมอนอเมอร์ที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated monomers) ซึ่งมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเขียนปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้



แก๊สเอทิลีน

PE

จำนวนของอะตอมในพอลิเมอร์เท่ากับของอะตอมใน  $n$  มอนอเมอร์ซึ่งมาเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน ไม่มีโมเลกุลเล็กๆ เช่น น้ำ เกิดจากปฏิกิริยาคู่ด้วยพันธะคู่ของมอนอเมอร์เปิดออกและเกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อกัน

พอลิเอทิลีน แบ่งตามช่วงความหนาแน่นได้ 3 ชนิดคือ

- 1) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE, low density polyethylene) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.910 – 0.925 LDPE นี้มีจุดหลอมเหลวประมาณ 110°C สภาพความเป็นผลึก 60 – 70% โมเลกุลมีกิ่ง (branch) มาก
- 2) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE, medium density polyethylene) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.926 – 0.940 MDPE นี้ไม่ค่อยมีผลิตขายสำหรับทำผลิตภัณฑ์โดยทั่วไป
- 3) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE, high density polyethylene) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.941 – 0.965 HDPE นี้มีจุดหลอมเหลวประมาณ 135°C สภาพความเป็นผลึก 80 – 95% ดังนั้นจึงมีความทึบมากกว่า LDPE และ MDPE โมเลกุลเป็นแบบเชิงเส้น (linear)

### 2.6.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมของเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์

สำหรับพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกอุณหภูมิมีผลต่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์ชนิดนี้มาก เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดนี้ยึดกันเป็นสายโซ่ด้วยพันธะแวนเดอร์วาลส์ ดังนั้นเมื่อถูกความเค้นกระทำสายโซ่จะเลื่อนผ่านซึ่งกันและกันและจะทำลายพันธะที่ยึดเหนี่ยวนี้และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความแข็งแรงของพันธะแวนเดอร์วาลส์จะลดลงซึ่งส่งผลทำให้รูปแบบทางกายภาพของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งที่อุณหภูมิสูงมากๆ พันธะโคเวเลนต์ที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในสายโซ่แบบเส้นตรงอาจถูกทำลาย นั่นคือพอลิเมอร์เสื่อมสภาพเรียกอุณหภูมิ ณ จุดนั้นว่า (Degradation temperature  $T_d$ ) และเมื่ออุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกที่ค่าสูง แต่ต่ำกว่า  $T_d$  ความเหนียวจะลดต่ำลงสายโซ่อาจเคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องอาศัยแรงกระทำจากภายนอก ดังนั้นเมื่อแรงภายนอกมากระทำส่งผลให้เกิดการไหล ดังนั้นจึงนำพอลิเมอร์ไปหล่อขึ้นรูปได้และเมื่อทำการลดอุณหภูมิ ค่าความเหนียวก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

อุณหภูมิที่สำคัญอีกอย่างคือ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature :  $T_m$ ) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิดซึ่ง ณ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_m$  คุณสมบัติพอลิเมอร์จะเป็นอีกอย่างหนึ่ง นั่นคือ แข็งแกร่ง และคงสภาพรูปทรงไว้ได้ แม้ว่า โครงสร้างของสายโซ่จะมีการบิดตัวและพันกัน เมื่อมีความเค้นภายนอกกระทำ สายโซ่จะเกิดการเคลื่อนที่ได้ ส่งผลให้ความแข็งแรงและมอดูลัสมีค่าน้อยในขณะที่ค่าความเครียดจะสูง มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymer)

| คุณสมบัติที่สำคัญต่างๆ ของพอลิเอทิลีน |      |               |
|---------------------------------------|------|---------------|
| อุณหภูมิทรานซิชัน( $T_g$ )            |      | -125°C        |
| อุณหภูมิหลอมเหลว                      |      | 146°C         |
| อัตราการลุกไหม้                       |      | 3 นิ้ว/นาทีก  |
| ความถ่วงจำเพาะ                        | LDPE | 0.910 – 0.925 |
|                                       | MDPE | 0.926 – 0.940 |
|                                       | HDPE | 0.941 – 0.965 |

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆ ของพอลิเอทิลีน

สิ่งที่พบทั่วไปเกี่ยวกับ  $T_g$  และ  $T_m$

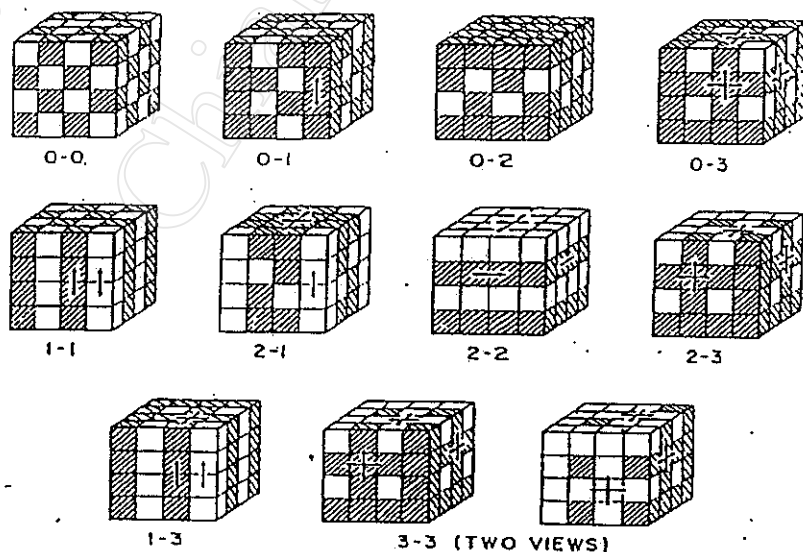
สำหรับพอลิเมอร์ที่มีหน่วยซ้ำๆ กันเป็นแบบสมมาตร (Symmetrical repeating) เช่น พอลิเอทิลีน จะมีอัตราส่วน  $T_g/T_m \approx 2/3$  และสำหรับพอลิเมอร์ที่มีหน่วยซ้ำๆ กันแบบอสมมาตร

(Unsymmetrical repeating repeating) เช่น พอลิเอทิลีนจะมีอัตราส่วน  $T_g/T_m \approx 2/3$  และสำหรับทุกกรณี  $T_g < T_m$  เสมอ

## 2.7 วัสดุผสม

### 2.7.1 วัสดุผสม หรือ วัสดุประกอบ (Composites materials)

คือ วัสดุที่เกิดขึ้นโดยการผสมกันหรือประกอบกันของวัสดุต่างชนิดกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ให้ยึดติดกันเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมิใช่เป็นการละลายวัสดุชนิดหนึ่งในอีกชนิดหนึ่ง โดยการยึดติดกันนี้ยังสามารถแบ่งแยกวัสดุแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบได้ด้วยตา หรือกล้องแสง หรือจุลทรรศน์อิเล็กตรอน วัสดุผสมจึงเป็น multiphase material มีสมบัติที่เป็นองค์ประกอบรวมของวัสดุผสม ซึ่งอาจมีสมบัติแตกต่างออกไปจากสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุผสมนั้น เมื่อวัสดุองค์ประกอบอยู่อย่างโดดเดี่ยว โดยทั่วไปแล้ววัสดุผสมจะมีสมบัติในการใช้ประโยชน์ได้เหมาะสมดีกว่าวัสดุชนิดเดียวอย่างโดดเดี่ยว วัสดุที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุผสมนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ matrix phase และ dispersed phase ซึ่ง matrix phase จะเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่เชื่อมและยึดเกาะ dispersed phase ให้รวมเป็นอันเดียวกัน ส่วน dispersed phase เป็นองค์ประกอบที่เหลือของวัสดุผสม ที่กระจายตัวในลักษณะต่างๆ ใน matrix phase วัสดุผสมนั้นสามารถแบ่งตามลักษณะของชนิด ขนาดและรูปร่าง และลักษณะโครงสร้างการเรียงตัวของ dispersed phase หากพิจารณาการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสมีการเรียงตัวติดกันใน 3 มิติ สำหรับวัสดุผสม 2 เฟสนั้นสามารถจัดเรียงติดกันได้ 10 แบบคือ 0-0, 1-0, 2-0, 3-0, 1-1, 2-1, 3-1, 2-2, 2-3, 3-3 ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะความเป็นไปได้ของการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟส 10 แบบ ของวัสดุผสมระหว่าง 2 เฟส

### 2.7.2 วัสดุผสมพีโซอิเล็กทริก

วัสดุผสมพีโซอิเล็กทริกถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นมา เนื่องจากเซรามิกพีโซอิเล็กทริก ในการใช้งานบางอย่างไม่เหมาะสมเช่น งานทางทรานสดิวเซอร์ เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ทางอะคูสติกของสาร พีโซอิเล็กทริกมีค่าสูงกว่าค่าอิมพีแดนซ์ทางอะคูสติกของตัวกลางที่สัญญาณผ่าน จึงก่อให้เกิดการไม่เข้ากันของอิมพีแดนซ์ทางอะคูสติกส่งผลให้ความสามารถในการแยกรายละเอียดต่ำ วัสดุผสมพีโซอิเล็กทริกจึงได้เข้ามามีบทบาทอย่างสูงในการใช้งานเป็นทรานสดิวเซอร์ ซึ่งสมบัติวัสดุผสมนั้นจะเป็นลักษณะของการผสมสมบัติของแต่ละเฟสของวัสดุผสม ซึ่งการออกแบบวัสดุผสมนั้นจะส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุผสมด้วย

ซึ่งในการทดลองและวิจัยในครั้งนี้ศึกษาวัสดุผสมแบบ 0-3 ระหว่างพีโซอิเล็กทริก เซรามิก และพอลิเมอร์ ซึ่งลักษณะการผสมคือ สารพีโซอิเล็กทริกไม่มีการเรียงติดกันเลยในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งในขณะที่เฟส พอลิเมอร์มีการเรียงติดกันใน 3 ทิศทาง

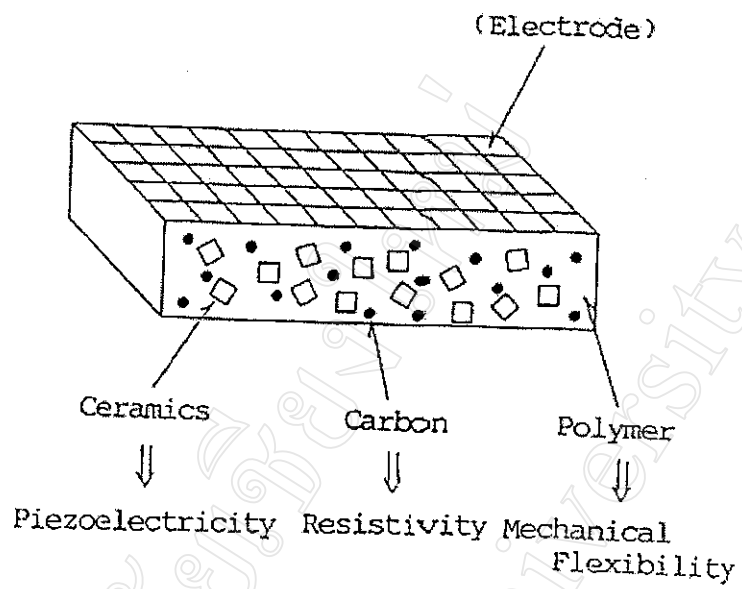
### 2.7.3 การโพลวัสดุผสมแบบ 0-3

สำหรับพีโซคอมโพสิตแบบ 0-3 นั้น ลักษณะการจัดเรียงตัวคือ เซรามิกพีโซอิเล็กทริก เรียงตัวกระจายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ดังนั้นเมื่อวัสดุผสมได้รับการโพล ถ้าให้สนามไฟฟ้าที่สารเซรามิก พีโซอิเล็กทริกได้รับในวัสดุผสมเท่ากับ  $E_1$  จะได้สมการ

$$E_1 = \frac{3K_2}{K_1 + 3K_2} E_0$$

จากสมการ  $K_1$  และ  $K_2$  คือ ค่าไดอิเล็กตริกของเกรนพีโซอิเล็กทริกและพอลิเมอร์และ  $E_0$  คือ ค่าสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้แก่วัสดุผสมสำหรับวัสดุผสม 0-3 ระหว่างพ ZT กับพอลิเมอร์  $K_1$  มีค่า  $\sim 1800$   $K_2 \sim 5$  ถ้าให้สนามภายนอกเท่ากัน 100KV/cm ค่าสนามไฟฟ้าที่เซรามิกได้รับจากสมการอยู่ประมาณ 1 KV/cm ซึ่งไม่เพียงพอต่อการโพล PZT ถ้าต้องการให้  $E_1 \sim E_0$  ค่า Dielectric ของเฟสเซรามิกและพอลิเมอร์ต้องมีค่าใกล้เคียงกัน

แนวทางหนึ่งที่จะโพลวัสดุผสม 0-3 คือการเติมเฟสตัวนำเพียงเล็กน้อยในวัสดุผสม PZT-Polymer เพื่อช่วยในการทำให้การโพลเกิดขึ้นได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะการกระจายตัวของเฟสตัวนำในวัสดุผสม

## สาระสำคัญจากเอกสารที่ได้มีการวิจัยมา

(1986) Sa-Gong และคณะ ได้ศึกษาการทำการปรับปรุงวิธีการโพลโดยการเพิ่มเฟสตัวนำในวัสดุผสม ซึ่งเฟสที่เติมเช่น คาร์บอนเกรไฟต์ เจอร์มาเนียม และซิลิกอน พบว่าวัสดุผสมที่ได้จะใช้สนามไฟฟ้าที่ต่ำในขบวนการโพล และผลที่ได้มีสมบัติเหมือนกับวัสดุผสมที่ไม่ได้ใส่เฟสตัวนำ

(1986) Wersing และคณะ ศึกษาการเตรียมวัสดุผสม 0-3 และทำการปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อใช้ในการประยุกต์เป็นออสซิลเลเตอร์โซนิคทรานสดิวเซอร์ สำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์

(1986) Varapasad และคณะ ได้ศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและพฤติกรรมการนำไฟฟ้าของวัสดุผสม พบว่าอัตราส่วนผสมของวัสดุส่งผลต่อพฤติกรรมการนำไฟฟ้าและสมบัติไดอิเล็กตริก

(1989) Hanner และคณะ ได้ศึกษาวิธีการเตรียมวัสดุผสม 0-3 เป็นฟิล์มบางและศึกษาสมบัติไพโซอิเล็กตริก พบว่าค่า  $d_{33}$ ,  $g_{33}$  และ figure of merit สำหรับการใช้งานเป็น Hydrophone นั้นมีค่าสูงกว่าการเตรียมแบบเดิมมาก

(1989) Moon-Ho Lee และคณะ ได้ศึกษาขบวนการโพลวัสดุผสม Lead Titanate Epoxy (0-3) โดยการเตรียม PT ด้วยวิธี Coprecipitated โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของ PT พบว่าขนาดของ fine  $PbTiO_3$  ต้องการเวลาในการโพลมากกว่าขนาดอนุภาคของ  $PbTiO_3$  ที่ใหญ่และยังพบอีกว่า ค่า  $d_{33}$  ลดลงเมื่อขนาด particlesize ลดลง

(1989) Lee และคณะ ศึกษาอุณหภูมิขององค์ประกอบของแต่ละเฟสซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นและสมบัติไดอิเล็กตริกและสมบัติไพโซอิเล็กตริก พบว่าปริมาณรูพรุนมีผลต่อค่าความหนาแน่นของสาร ถ้ารูพรุนมากความหนาแน่นของสาร , สมบัติไดอิเล็กตริก และสมบัติไพโซอิเล็กตริกมีแนวโน้มลดลง

(1989) Waller และคณะ ศึกษาวิธีการโพลวัสดุผสม 0-3 โดยใช้เทคนิค Corona Discharge technique มาใช้ในการปรับปรุงวิธีการโพล พบว่าการใช้เทคนิค Corona Discharge ให้ผลที่ดีกว่าการโพลแบบเดิม

(1995) เชดคักดี แซลลี่ ศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกและไพโซอิเล็กตริกในวัสดุผสมแบบ 0-3 ที่แชดที่กับเทอร์มoplastik พบว่าค่า  $d_{33}$  ของวัสดุผสม 0-3 มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกที่แชดที่เบพอลิเมอร์ และการโพลมีผลต่อความเป็นไพโซอิเล็กตริกเท่านั้น ทั้งนี้ความเป็นไพโซอิเล็กตริก ในวัสดุผสมมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกที่แชดที่และสำหรับค่าไดอิเล็กตริก การโพลไม่ค่อยมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

(1990) Fidleris และคณะ ศึกษาวัสดุผสม 0-3 โดยใช้ Co-polymer เป็นเมตริกซ์พอลิเมอร์ทำการวัดค่า  $d_{33}$ ,  $g_{33}$  ในการประยุกต์ใช้งานทางด้าน hydrostatic acoustic transducer

(1998) Chen ศึกษาการเตรียมวัสดุผสม 0-3 ระหว่างเลดติตานเนต เซรามิกกับ Co-Polymer โดยเตรียมเซรามิกด้วยวิธี sol-gel ซึ่งวิธีนี้ได้ขนาดของอนุภาคเซรามิกมีขนาดเล็กระดับ nanocrystalline powder ซึ่งพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเตรียมแล้วได้สมบัติทาง pyroelectric ที่ดีคือ  $700^{\circ}\text{C}$

(1999) สนิ บุญญกุล ศึกษาสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและการประยุกต์วัสดุผสม 0-3 พีแซดที่กับพอลิเมอร์พบว่าค่า  $d_{33}$  ของวัสดุผสม 0-3 มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกพีแซดที่กับพอลิเมอร์ และยังพบอีกว่าขนาดของผงสารเซรามิกที่ใหญ่ขึ้น ค่า  $d_{33}$  มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น