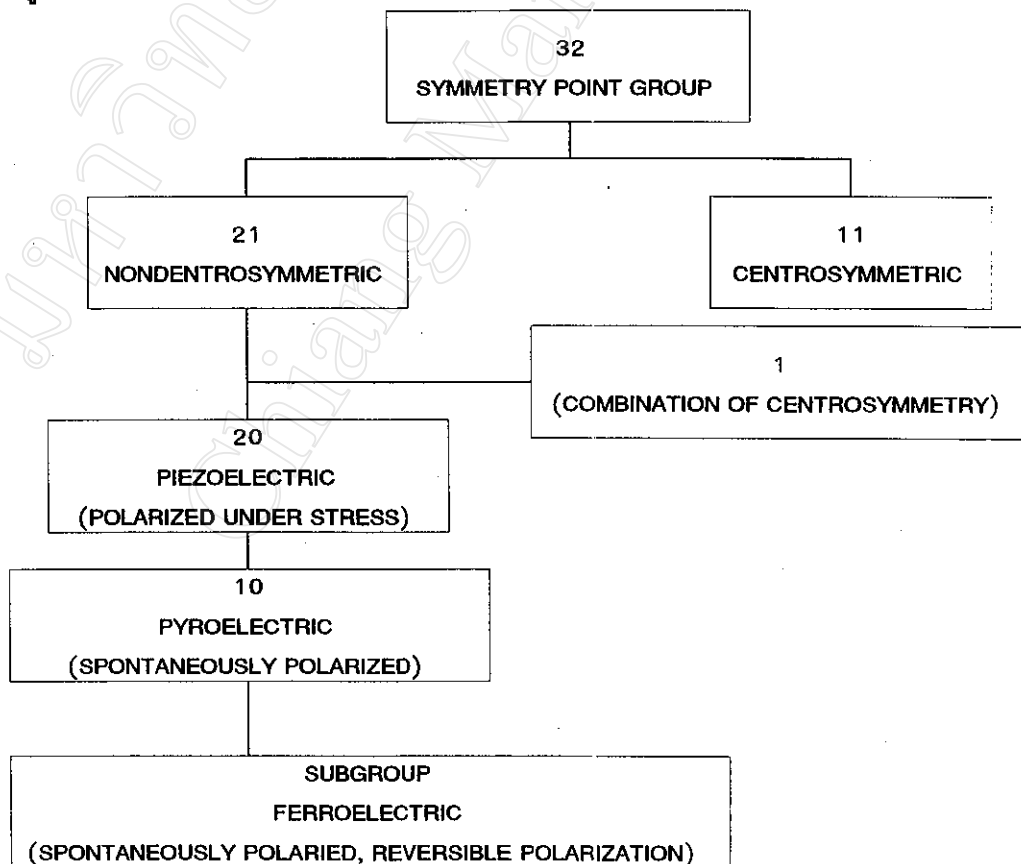


บทที่ 2

ทฤษฎี

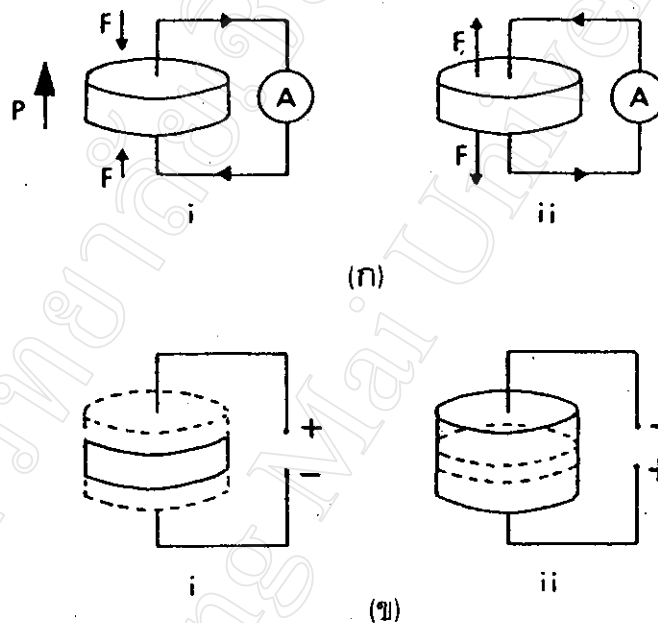
2.1 สารเพียโซอิเล็กทริก

สารเพียโซอิเล็กทริกเป็นสารที่สามารถแสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกได้ ซึ่งสมบัตินี้เป็นสมบัติที่อธิบายจากปรากฏการณ์ การเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชันทางไฟฟ้า (electric polarization) ซึ่งเกิดจากความเครียดเชิงกล (mechanical strain) ซึ่งสมบัติชนิดนี้จะเกิดขึ้นกับสารเพียงบางกลุ่ม โดยทั่วไปมีการแบ่งชนิดสมมาตรของผลึกออกเป็น 32 กลุ่ม หรือ 32 point group ซึ่งใน 32 point group นี้จะมีสารที่มีหน่วยเซลล์ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลางเซลล์อยู่ 21 กลุ่ม ใน 21 กลุ่มนี้จะมีเพียง 20 กลุ่มที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก ส่วนอีก 1 กลุ่มที่เหลือจะไม่สามารถแสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากมีสมมาตรอย่างอื่นมาเกี่ยวข้อง ทำให้ปริมาณการจัดทางไฟฟ้าหักล้างกันหมด และสามารถแสดงการจำแนกสารออกเป็นกลุ่มต่างๆ ได้ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 การจำแนกสารโดยอาศัยสมมาตรของผลึก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกนั้นสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ปรากฏการณ์แบบ direct และปรากฏการณ์แบบ converse โดยที่ปรากฏการณ์แบบ direct นั้นจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชัน เมื่อสารถูกแรงกลกระทำ หรือเกิดความเค้น (stress) ในขณะที่ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบ converse เกี่ยวข้องกับขนาดและปริมาณที่เปลี่ยนไปหรือความเครียด (strain) เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้า⁽²⁾ แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกดังรูป 2.2

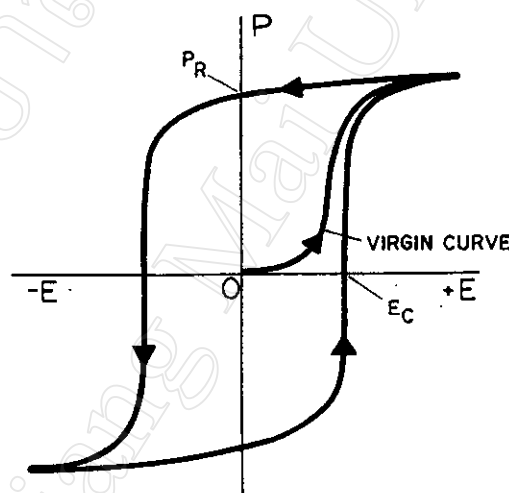


รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (ก) แบบ direct (ข) แบบ converse

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทั้งสองถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เมื่อพิจารณาถึงสารในกลุ่มเพียโซอิเล็กทริก ยังสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มย่อยได้อีก สำหรับสารบางชนิดยังแสดงสมบัติทางพาราอิเล็กทริก และเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ แต่อย่างไรก็ตาม พบว่า ผลของเพียโซอิเล็กทริกในผลึกเดี่ยว เช่น ควอตซ์จะน้อยมาก เมื่อเทียบกับผลของเพียโซอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก

2.1.1 สารเฟอร์โรอิเล็กตริก

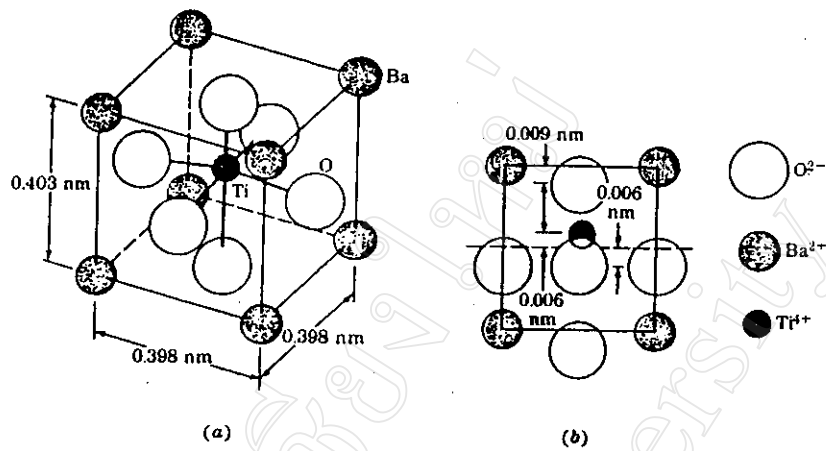
ผลึกเฟอร์โรอิเล็กตริกสามารถมีไดโพลโมเมนต์ถาวรเกิดขึ้นภายในผลึก โดยทั่วไปเมื่อนำสารไดอิเล็กตริกมาวางในสนามไฟฟ้าจะเกิดโพลาไรเซชันขึ้นในสาร และเมื่อสนามไฟฟ้าลดลงจนเป็นศูนย์ โพลาไรเซชันในสารไดอิเล็กตริกจะกลายเป็นศูนย์ด้วย แต่ในกรณีสารเฟอร์โรอิเล็กตริกนั้น เมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอกเข้าไป จะเกิดโพลาไรเซชันขึ้นในเนื้อสาร แต่เมื่อลดสนามไฟฟ้าลงจนเป็นศูนย์ ปรากฏว่ายังคงมีโพลาไรเซชันอยู่ และค่าโพลาไรเซชันจะเป็นศูนย์เมื่อสนามไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับ $-E_c$ ดังรูป 2.3 และสามารถทำให้สารแสดงสถานะเฟอร์โรอิเล็กตริกนี้ได้โดยการลดอุณหภูมิ เพราะปกติแล้วสถานะเฟอร์โรอิเล็กตริกจะไม่ปรากฏขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ (T_c) ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติผลึกจะอยู่ในสถานะพาราอิเล็กตริก (paraelectric)



รูปที่ 2.3 แสดงเส้นวงฮิสเทอรีซิส ของผลึกเฟอร์โรอิเล็กตริก

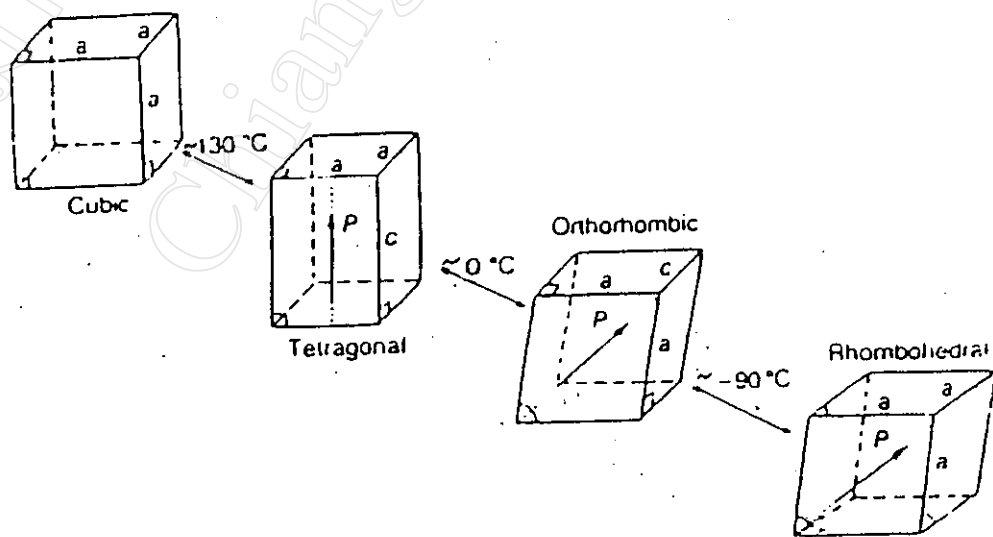
2.1.2 โครงสร้างผลึกเฟอร์โรอิเล็กตริก

เนื่องจากแบเรียมไทตาเนต (BaTiO_3) เป็นเซรามิกเพียโซอิเล็กตริกที่ถูกค้นพบก่อนสารอื่น จึงนิยมใช้เป็นต้นแบบในการอธิบายพฤติกรรมของเฟอร์โรอิเล็กตริก นั่นคือ BaTiO_3 มีโครงสร้างเป็นเพอรอฟสไกต์ (perovskite) ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (ประมาณ 130°C) หน่วยเซลล์เป็นแบบคิวบิก (cubic) ลักษณะการจัดเรียงตัวดังรูปที่ 2.4 แต่ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างจะบิดเบี้ยวเล็กน้อยเป็น เตตระโกนอล (tetragonal) ทำให้เกิด dipole moment ในทิศทางแกน C



รูปที่ 2.4 หน่วยเซลล์ของแบเรียมไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบคิวบิก

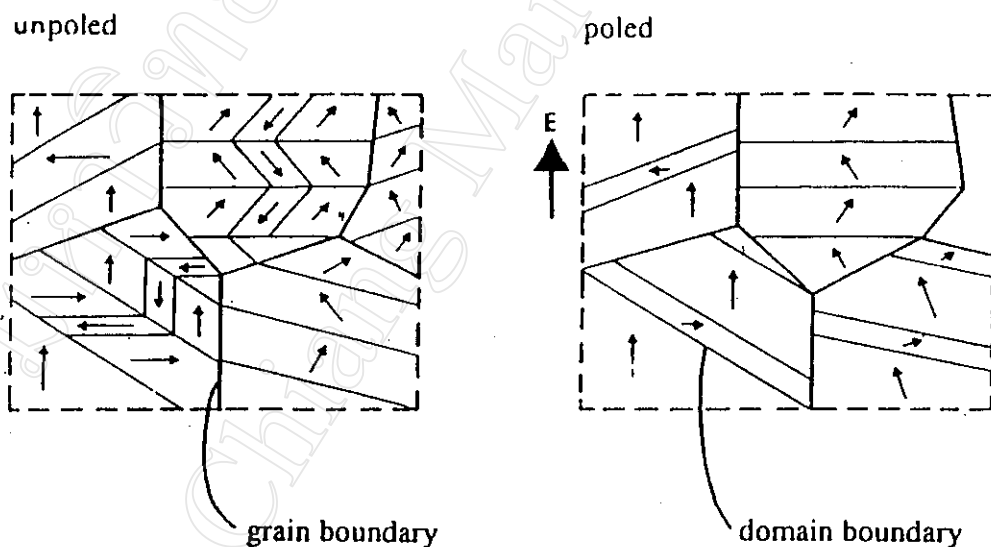
และเมื่ออยู่ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำลง โครงสร้างจะแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ พิจารณาตามรูปที่ 2.5 ที่อุณหภูมิ 0°C หน่วยเซลล์จะเปลี่ยนแปลงจากเตตระโกนอล (tetragonal) ไปเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) โดยมีแกนโพลาร์ขนานกับระนาบหน้าของแนวทะแยง และที่อุณหภูมิ -80°C จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) โดยมีแกนโพลาร์ทะแยงตามเซลล์



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนโครงสร้างของแบเรียมไททาเนตที่อุณหภูมิต่างๆ

โครงสร้างแบบเรียมิตาเนดเมื่อเปลี่ยนจากคิวบิกเป็นเตตระโกนอล จะเกิดโพลาริเซชันขึ้นเอง (spontaneous polarization) ตามแนว (100) ที่เรียกว่าเป็นคิวบิกเทียม (pseudo-cubic) ถ้าให้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มเพียงพอในทิศทาง (010) (001) หรือในทิศทางตรงข้ามกับทิศโพลาริปกติ จะมีผลทำให้โพลาริเซชันเปลี่ยนทิศทาง และที่อุณหภูมิลดต่ำกว่า 0°C จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างโพลาริเซชันขึ้นในทิศทาง (011) และที่อุณหภูมิต่ำกว่าประมาณ -90°C จะเกิดในทิศทาง (111)

ที่ระหว่างอุณหภูมิประมาณ 0°C และ 130°C นั้น โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองในผลึกอาจจะมีทิศทางใดๆ ตามแกนทั้งสาม ดังนั้นในสารจะมีโพลาริเซชันเรียงไม่เป็นรูปแบบเดียวกัน แต่จะมีบริเวณเฉพาะที่มีการเรียงโพลาริเซชันในทิศทางเดียวกัน เรียกบริเวณเหล่านั้นว่า โดเมน (domain) แต่ละโดเมนจะถูกกันด้วยผนังโดเมน (domain wall) แต่เมื่อให้สนามไฟฟ้า โพลาริเซชันพยายามจัดตัวเรียงตามสนาม ทำให้โครงสร้างโดเมนจะเปลี่ยนลักษณะดังรูป 2.6



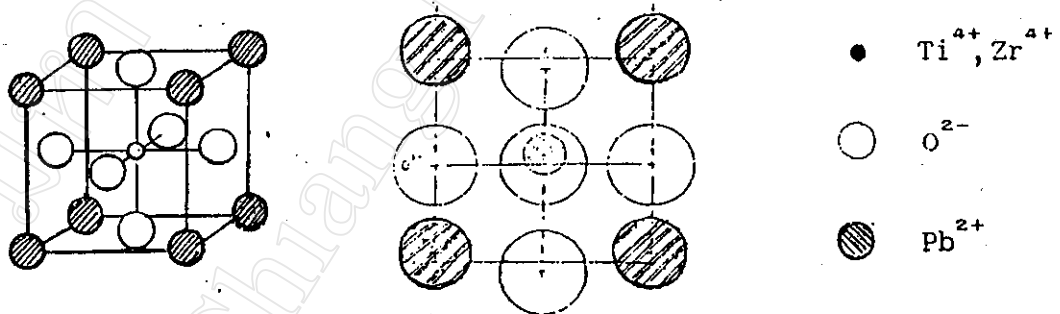
รูปที่ 2.6 การเรียงโดเมนก่อนและหลังทำการให้สนามไฟฟ้า

2.2 เลดเซอร์โคเนติตาเนต

หลังจากที่มีการค้นพบสารที่มีโครงสร้างแบบ perovskite ซึ่งสารตัวแรกที่มีการค้นพบและมีสมบัติเป็นเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก คือ แบเรียมติตาเนต ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ส่วนเลดเซอร์โคเนติตาเนต หรือ พีแซดที นั้นมักนิยมมาใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ เนื่องจากมีอุณหภูมิคูรีสูง (ประมาณ 350°C) นอกจากนี้ยังมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและ Piezoelectric Coupling Factor สูงมาก

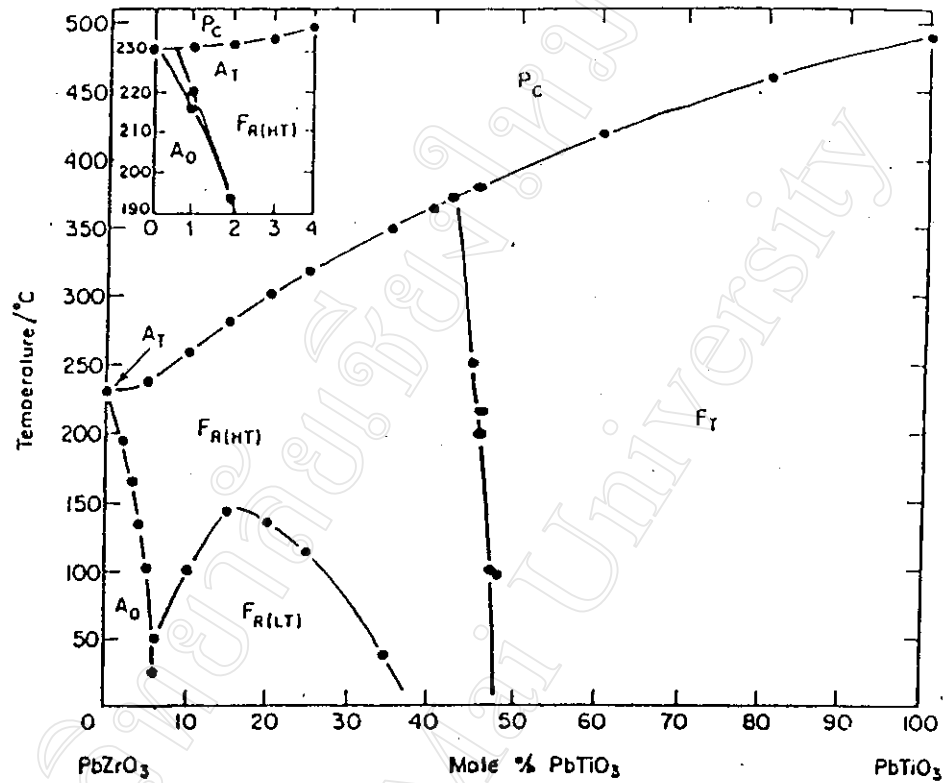
2.2.1 โครงสร้างของพีแซดที

ลักษณะโครงสร้างแบบ perovskite ของพีแซดทีนี้ จะประกอบด้วยเลดเซอร์โคเนต (PbZrO_3) และเลดติตาเนต (PbTiO_3) กระจายกันอยู่ สมมติให้โครงสร้างผลึกเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ Pb^{2+} เป็นไอออนที่อยู่ตามมุมของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ O^{2-} อยู่ที่ face centre ส่วน Ti^{4+} และ Zr^{4+} จะอยู่เลื่อนไปจาก body centre เล็กน้อย ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกพีแซดทีที่เป็นแบบ perovskite

เนื่องจากพีแซดที ประกอบด้วย เลดเซอร์โคเนต (PbZrO_3) และเลดติตาเนต (PbTiO_3) โครงสร้างผลึกจึงขึ้นกับอุณหภูมิและอัตราส่วนของเลดเซอร์โคเนต และ เลดติตาเนต สามารถแสดง phase diagram ของระบบ $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เฟสไดอะแกรมของระบบ PbTiO_3 - PbZrO_3

สำหรับ PbZrO_3 บริสุทธิ์มีโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก และเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Antiferroelectric) ในขณะที่ PbTiO_3 บริสุทธิ์มีโครงสร้าง perovskite เป็นเตตระโกนอล และเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก ในวัสดุที่มีสมบัติแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก แต่ละหน่วยเซลล์จะมีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง และหน่วยเซลล์ที่อยู่ติดกันจะมีทิศทางของโพลาริเซชันเรียงตัวในทิศทางตรงข้าม เป็นผลให้โพลาริเซชันสุทธิในวัสดุแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกมีค่าเป็นศูนย์

แต่เมื่อทำการเติม PbTiO_3 ประมาณ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ลงใน PbZrO_3 บริสุทธิ์จะทำให้เกิดเฟสรวมไบอีตรอลที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก (F_r) แต่ในพีแชนด์ที่ทั่วไปนิยมเตรียมในอัตราส่วนที่บริเวณใกล้ขอบเฟส (Phase Boundary) ระหว่างเฟสรวมไบอีตรอล และเฟสเตตระโกนอล ซึ่งที่บริเวณของเขตนี้จะมีผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกของรวมไบอีตรอล และเตตระโกนอลรวมกันอย่างสมดุล โดยที่เกือบจะไม่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เรียกบริเวณนี้ว่า Morphotropic

Phase Boundary (MPB) พบว่ายิ่งใกล้ MPB สารจะมีความเป็นเพียโซอิเล็กตริกที่แรงมาก โดยจะเสถียรในช่วงอุณหภูมิ -200°C ถึง 150°C

ในการเตรียมเซรามิกพีแชนต์นั้นเป็นการยากที่จะเตรียมส่วนผสมของเซรามิกพีแชนต์ในบริเวณ MPB ที่แน่นอน เพราะที่ขอบเขตนี้เฟสทั้งสอง คือ เตตระโกนอล และ รอมโบอีตรอลมีการกระจายอยู่ร่วมกัน ความกว้างของบริเวณที่กระจายอยู่จะไม่แน่นอนซึ่งไม่ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ที่ควบคุมในการเตรียมเซรามิก ดังนั้นการท้าวสตุพีแชนต์ที่เฟสเดียว คือเฟส เตตระโกนอลเดี่ยวๆ หรือเฟสรอมโบอีตรอลเดี่ยวๆ จึงต้องมีการทำให้เซอร์โคเนียม และ ดีตาเนียม มีการรวมตัวกันในระดับอะตอม ซึ่งเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก แต่ปัจจุบันกระบวนการเตรียมได้พัฒนาขึ้น สามารถลดบริเวณที่มีการกระจายอยู่ร่วมกันได้

2.3 สมบัติเพียโซอิเล็กตริก

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า ปรากฏการณ์ทางเพียโซอิเล็กตริกสามารถจำแนกได้ 2 ประเภท คือ ปรากฏการณ์แบบ direct และแบบ converse สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทั้งสองด้วยสมการดังนี้

$$P_i = d_{ij}T_j \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3 \\ j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \end{matrix} \quad (2.1)$$

โดยที่ P_i คือ โพลาริเซชันทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (electrical polarization) ในทิศทาง i

T_j คือ ความเค้นที่ใส่ให้กับสารเพียโซอิเล็กตริก (applied mechanical stress) ที่ให้ในทิศทาง j

d_{ij} คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กตริก (piezoelectric change coefficient) ในทิศทาง ij มีหน่วยเป็น Coulomb/Newton

ในทำนองเดียวกัน สำหรับกรณีเพียโซอิเล็กตริกแบบ converse เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้า ขนาดของสารจะเปลี่ยนแปลงไป (ความเครียด) สามารถพิจารณาได้จากสมการ (2.2)

$$S_j = d_{ij}E_i \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3 \\ j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \end{matrix} \quad (2.2)$$

โดยที่ S_j คือ ความเครียดที่เกิดขึ้น (mechanical strains) ในทิศทาง j

E_i คือ สนามไฟฟ้าที่ให้กับสารเพียโซอิเล็กตริก (electrical field) ในทิศทาง i

ส่วนพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริกคือ สัมประสิทธิ์แรงดันเพียโซอิเล็กตริก (piezoelectric voltage coefficient, g_{ij}) สามารถอธิบายได้ดังสมการ (2.3)

$$E_i = g_{ij} T_j \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3 \\ j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \end{matrix} \quad (2.3)$$

โดยที่ E_i คือ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (electric field) ที่เกิดขึ้นในทิศทาง i
 T_j คือ ความเค้นที่ใส่ให้กับสารเพียโซอิเล็กตริก (applied mechanical stress) ในทิศทาง j
 g_{ij} คือ สัมประสิทธิ์แรงดันเพียโซอิเล็กตริก (piezoelectric voltage coefficient) ใน ทิศทาง ij มีหน่วยเป็น Volt-metre/Newton

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กตริก (d_{ij}) และสัมประสิทธิ์แรงดันเพียโซอิเล็กตริกสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.4)

$$g_{ij} = \frac{d_{ij}}{K\epsilon_0} \quad (2.4)$$

โดยที่ K คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant)
 ϵ_0 คือ permittivity ของ free space (8.854×10^{-12} Farad/metre)

นอกจากสมการข้างต้นยังสามารถอธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริกที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ 4 ตัว ได้แก่ ความเครียด S ความเค้น T การขจัดไดอิเล็กตริก D และสนามไฟฟ้า E ได้ดังนี้

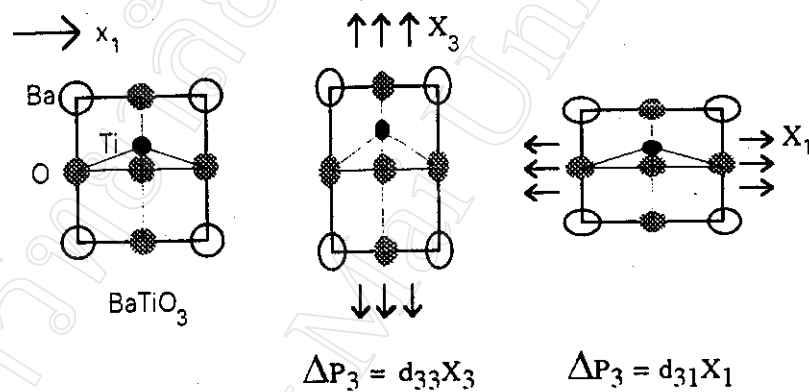
$$D = d_T + e^T E \quad (2.5)$$

$$S = s^E T + dE \quad (2.6)$$

โดยที่ D คือ การขจัดไดอิเล็กตริก (dielectric displacement)
 T คือ ความเค้น (stress)
 E คือ สนามไฟฟ้า (electric field)
 d คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กตริก (piezoelectric coefficient)
 S คือ ความเครียด (strain)
 s คือ material compliance
 e คือ dielectric constant

2.3.1 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กตริก

สมการที่ (2.5) และ (2.6) นี้อยู่ในรูปเมตริกซ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่จะขึ้นกับทิศทาง นั่นคือ ความเป็นเพียโซอิเล็กตริกขึ้นกับทิศทาง ซึ่งทิศทางที่กล่าวนี้คือ ทิศทางของโพลาริเซชันที่เปลี่ยน (หรือความเครียด) ที่เกิดจากการให้ความเค้น (หรือสนามไฟฟ้า) ในทิศทางต่างๆ ซึ่งโดยทั่วไปให้ทิศทางโพลาริในทิศทาง 3 ขณะที่ทิศทาง 1 และ 2 ตั้งฉากและสมมูลกัน ดังนั้นเซรามิกที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กตริก จะมีสามทิศทางที่สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กตริกไม่เป็นศูนย์ นั่นคือ d_{33} , d_{31} และ d_{15} สามารถแสดงภาพความสัมพันธ์ของโพลาริเซชันที่เปลี่ยน (หรือความเครียด) ที่เกิดจากความเค้น (สนามไฟฟ้า) ที่ให้ในทิศทางต่างๆ ได้ดังภาพ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนภาพ 2 มิติ ของโครงสร้างแบบ perovskite ของ BaTiO₃

แสดงการเลื่อนตำแหน่งของไอออนิติตาเนตในทิศทางต่างๆ

- ค่า d_{33} เป็นค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กตริกตามยาว เมื่อมีการให้ความเค้นในทิศทาง 3 แล้วทำให้เกิดโพลาริเซชันในทิศทางเดียวกัน
- ค่า d_{31} เป็นค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กตริกตามขวาง สัมพันธ์กับโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นในทิศทาง 3 ที่เกิดจากการให้ความเค้นในทิศทางตั้งฉาก (ทิศทาง 1 หรือ 2)
- ค่า d_{15} เป็นค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กตริกแนวเฉือน สัมพันธ์กับโพลาริเซชันในทิศทาง 1 ที่เกิดจากความเค้นเฉือนรอบแกน 2

2.3.2 Piezoelectric Coupling Factor

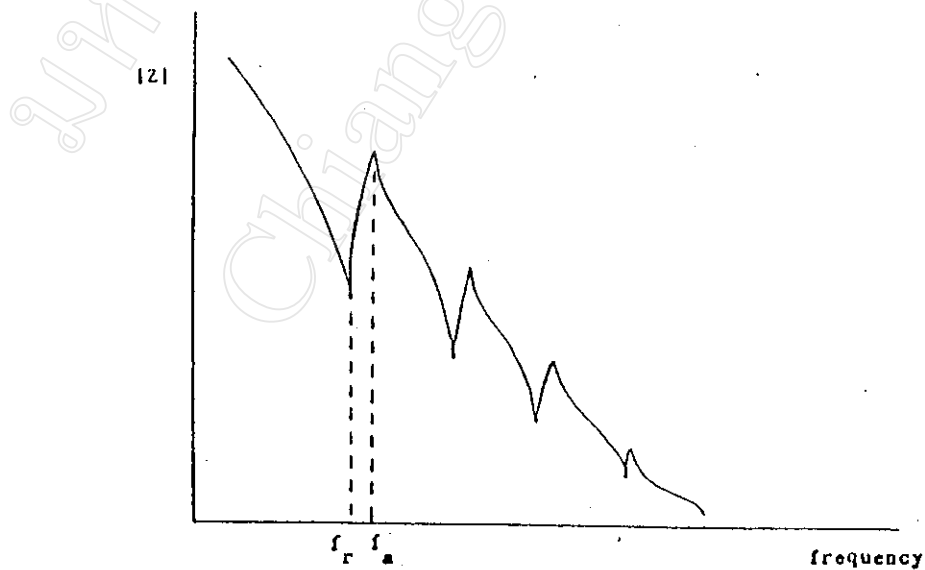
พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่สำคัญคือ electromechanical factor (k) เป็นตัวบอกประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานในสารเพียโซอิเล็กทริก นิยามดังสมการ (2.7)

$$k^2 = \frac{\text{output mechanical energy}}{\text{input electrical energy}} \quad (2.7)$$

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

electromechanical coupling factor นี้เป็นปริมาณเทนเซอร์ (k_{ij}) ซึ่งสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{ij}) ในผลึกเพียโซอิเล็กทริกที่ไม่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกมีค่าน้อย ($k < 0.1$) ในเซรามิกที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกมีค่าค่อนข้างสูง ($0.4 \leq k \leq 0.7$) แต่สำหรับผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีค่าสูงมาก ($k \leq 0.9$) ค่า k จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปพลังงานไม่สมบูรณ์

สามารถหาค่า k โดยอาศัยพฤติกรรมทางไฟฟ้ากระแสสลับของเพียโซอิเล็กทริก ทำการวัดค่า impedance เทียบกับความถี่ ลักษณะความสัมพันธ์แสดงดังรูป 2.10

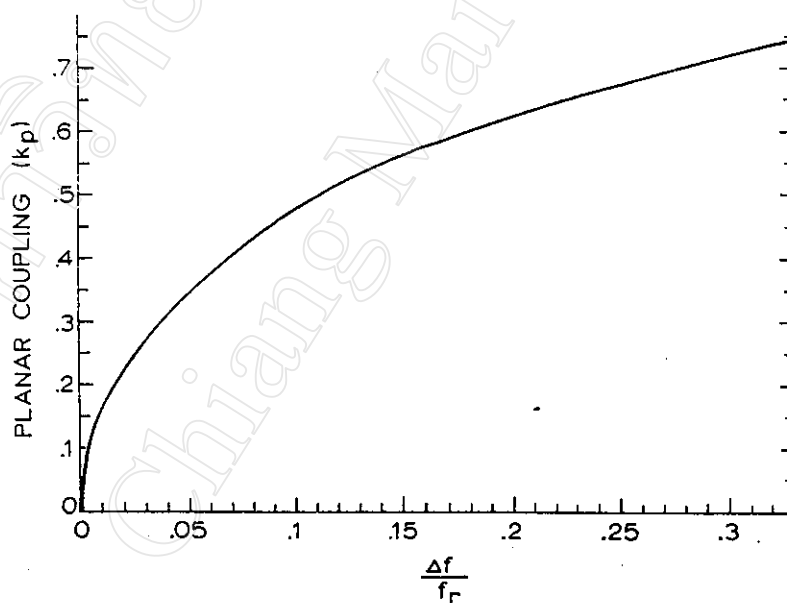


รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง impedance กับความถี่

เรียกความถี่ที่ให้ impedance สูงสุดว่าเป็นจุด antiresonance frequency (f_a) และ ที่ impedance ต่ำสุดว่าเป็นจุด resonance frequency (f_r) หลังจากนั้นนำค่า f_r และ f_a ที่ได้มา คำนวณหาค่า k ซึ่งในกรณีของสารที่มีลักษณะเป็นแผ่นจานกลม จะแทนด้วยตัวแปร k_p (planar coupling factor) ซึ่งสามารถหาได้โดยสมการ (2.8)

$$k_p = \sqrt{(1 - k_p^2)(\text{Bessel function})} \quad (2.8)$$

เห็นว่าสมการ (2.8) มีความยุ่งยากของ Bessel function โดยทั่วไปมักนิยามหาค่า k_p โดยใช้กราฟดังรูป 2.11 หรือ คำนวณจากสมการ (2.9)



รูปที่ 2.11 ค่า k_p สำหรับสารที่มีรูปร่างเป็นแผ่นจานกลม (disk)

$$k_p = \sqrt{\frac{2.5(f_a^2 - f_r^2)}{f_r^2}} + 0.038 \quad (2.9)$$

2.4 สมบัติไดอิเล็กตริก

โดยทั่วไปวัสดุที่ความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ต่างกัน ชนิดที่นำไฟฟ้าได้ดีจัดว่าเป็นวัสดุนำ ชนิดที่นำไฟฟ้าไม่ได้ หรือได้น้อยมากจัดว่าเป็นวัสดุฉนวน สาเหตุที่นำไฟฟ้าไม่ได้ เพราะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระ แต่เมื่อผ่านสนามไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุฉนวน จะเกิดปรากฏการณ์โพลาไรเซชันขึ้นได้ เรียก วัสดุฉนวนนี้ว่า วัสดุไดอิเล็กตริก

2.4.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าการกระจัดอิเล็กตริก (electric displacement : D) เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้า (E) ภายในวัสดุไดอิเล็กตริกนั้น ความสัมพันธ์แสดงดังสมการ (2.10)

$$D = \epsilon_0 E_a = \epsilon_0 k' E \quad (2.10)$$

โดยที่ D คือ การกระจัดอิเล็กตริก (electric displacement)

E_a คือ สนามไฟฟ้าที่ให้

E คือ สนามไฟฟ้าภายในวัสดุ

ϵ_0 คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ (permittivity of vacuum or dielectric constant
 $= 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)

k' คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant)

จากสมการ (2.10)

$$k' = \frac{D}{\epsilon_0 E} = \frac{a'/A}{\epsilon_0 V/d} \quad (2.11)$$

$$Q = \epsilon_0 k' \frac{A}{d} V = CV \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$C = \epsilon_0 k' \frac{A}{d} \quad (2.13)$$

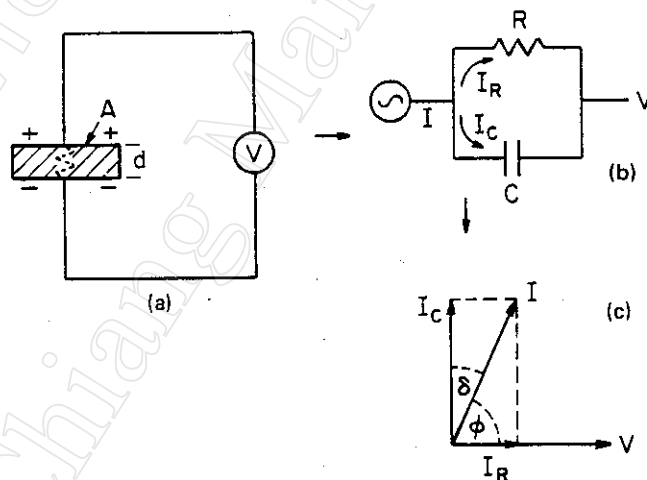
$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.14)$$

ดังนั้น

$$k' = \frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.15)$$

โดยที่ Q คือ ประจุรวม (total charge : coulomb) ,
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นโลหะที่ประกบวัสดุไดอิเล็กตริก
 V คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ให้
 d คือ ความหนา
 C และ C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุและของอากาศตามลำดับ
 ϵ คือ ค่า permittivity ของสาร

สามารถแสดงภาพเมื่อมีการวางตัวเก็บประจุ ซึ่งทำขึ้นจากการนำแผ่นโลหะมาประกบวัสดุไดอิเล็กตริก ในสนามไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสสลับดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 การวางตัวเก็บประจุ

- (a) ในสนามไฟฟ้ากระแสตรง (b) ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ
 (c) แสดงค่า loss tangent ที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริก

2.4.2 การสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กตริก

เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับกับวัสดุไดอิเล็กตริก พบว่าพฤติกรรมของวัสดุจะแตกต่างไปจาก เมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง กล่าวคือ พารามิเตอร์ต่างๆ มักจะอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน สามารถเขียนสมการ (2.12) ใหม่ได้ดังนี้

$$Q = CV_0 e^{i\omega t} \quad (2.16)$$

เมื่อ $V = V_0 e^{i\omega t}$

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} = i\omega CV = i\omega C_0 \epsilon_0 k' V \quad (2.17)$$

โดยที่ I คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่เวลา (t) ใดๆ ซึ่ง I ประกอบไปด้วย vector component I_C และ I_R ในกรณีของการสูญเสียทางไฟอ์เลกตริกแสดงให้เห็นจากวงจรจำลองที่ประกอบไปด้วย ตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ดังรูป 2.11 (b) I_C คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุซึ่งเป็นสัดส่วนกับประจุที่ถูกกักเก็บไว้ในตัวเก็บประจุนั้น ซึ่งมีเฟสนำแรงดัน V อยู่ 90° ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน (I_R) จะมีเฟสเดียวกันกับ V ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียพลังงานในวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งลักษณะนี้สามารถอธิบายได้โดยใช้ค่า permittivity ที่อยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน หรือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ดังสมการ

$$I = i\omega C_0 \epsilon_0 (k' - ik'') V \quad (2.18a)$$

$$= i\omega C_0 \epsilon_0 k' V + \omega C_0 \epsilon_0 k'' V \quad (2.18b)$$

$$= I_C + I_R \quad (2.18c)$$

สามารถเขียนกระแสให้อยู่ในรูปของ dissipation factor : $\tan \delta$ ได้ดังนี้

$$\tan \delta = \left| \frac{I_R}{I_C} \right| = \frac{\omega C_0 \epsilon_0 k'' V}{\omega C_0 \epsilon_0 k' V} = \frac{k''}{k'} \quad (2.19)$$

เรียกเทอม $\tan \delta$ ว่า dissipation factor หรือ loss tangent ส่วนพารามิเตอร์ k'' คือ dielectric loss factor พิจารณาภาพ 2.11 (c) ถ้ามุม δ เล็กการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกจะมีค่าน้อย และเรียกมุม δ ว่าเป็น loss angle⁽²⁾

2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับพอลิเมอร์

พอลิเมอร์เป็นโมเลกุลสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ เกิดจากการเชื่อมต่อกันของโมเลกุลขนาดเล็ก (mer) ผลจากการเชื่อมต่อกันทำให้มีมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้น มีความแข็งแรงมากขึ้น และมีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น สามารถจำแนกประเภทของพอลิเมอร์ได้โดยอาศัยหลักเกณฑ์ต่างๆ แต่วิธีที่ง่ายที่สุด คือ การจำแนกตามพฤติกรรมหรือคุณสมบัติเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

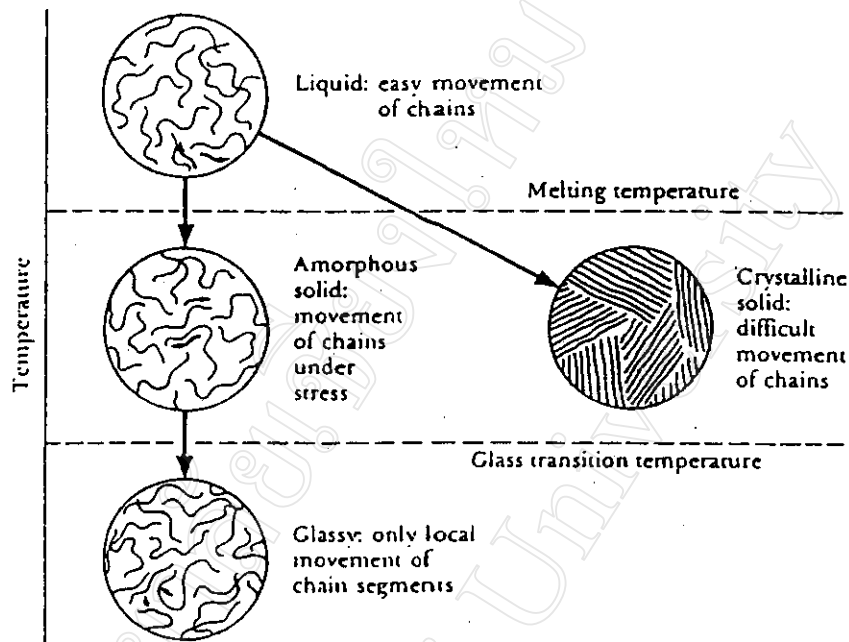
1. เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (thermoplastic polymer) ลักษณะของโมเลกุลต่อกันเป็นเส้นตรงเชื่อมต่อเป็นสายโซ่ยาว เกิดจากปฏิกิริยาการรวมตัว (addition) หรือการควบแน่น (condensation) พฤติกรรมของพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการผิรุ่ยขึ้นในโครงสร้างของสายโซ่ มีผลทำให้ความแข็งแรงของพันธะลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงแล้วให้ความร้อนอีกจะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรม หรือคุณสมบัติของพอลิเมอร์ชนิดนี้ ยกตัวอย่างเช่น โพลีเอทิลีน (PE), โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC)

2. เทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ (thermosetting polymer) ลักษณะโมเลกุลต่อกันเป็นร่างแห ทำให้มีความแข็งแรงค่อนข้างมาก เกิดจากปฏิกิริยาควบแน่น หลังจากเกิดขึ้นแล้ว เทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์จะไม่สามารถผ่านกระบวนการทางความร้อนได้อีก ยกตัวอย่างเช่น เรซิน (resin)

3. อีลาสโตเมอร์ (elastomer) โดยส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาการรวมตัว (addition) ลักษณะโมเลกุลเป็นสายโซ่ที่มีการเชื่อมต่อกัน (linear cross-link chain) คุณสมบัติที่สำคัญคือสามารถผิรุ่ยแบบยืดหยุ่นได้มาก (high elasticity) โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยกตัวอย่างเช่น ยาง (rubber)

2.5.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมของเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์

ในที่นี้สนใจพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติแบบเทอร์โมพลาสติก ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์ กล่าวคือโมเลกุลของพอลิเมอร์มีการเรียงต่อกันเป็นสายโซ่ที่ยึดติดกันไว้ด้วย พันธะแวนเดอร์วาลส์ ดังนั้นเมื่อมีความดันมากกระทำสายโซ่จะเลื่อนผ่านซึ่งกันและกัน และจะทำลายพันธะที่ยึดเหนี่ยวนี้ หรือเมื่อโมเลกุลของพอลิเมอร์อยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ความแข็งแรงของพันธะจะลดลง ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการผิรุ่ยแบบเหนียวหนืดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามตามลักษณะโครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์ก็ส่งผลกับการผิรุ่ยในลักษณะนี้ด้วย การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและพฤติกรรมของเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ที่มีลักษณะสายโซ่เป็นแบบเส้นตรงเทียบกับอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ผลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างและพฤติกรรมของเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์⁽¹⁸⁾

ที่อุณหภูมิสูงมากๆ พันธะโควาเลนต์ที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในสายโซ่แบบเส้นตรงอาจถูกทำลาย คือ พอลิเมอร์เกิดการไหม้ เรียกอุณหภูมิ ณ จุดนั้นว่า อุณหภูมิที่ทำให้พอลิเมอร์เสื่อมสลาย (degradation temperature : T_d) และเมื่ออุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกแบบเส้นตรงมีค่าสูง แต่ต่ำกว่า T_d ความหนืดจะลดต่ำลง สายโซ่อาจจะเคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องอาศัยแรงกระทำจากภายนอก และถ้ามีแรงภายนอกมากกระทำมีผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหลราวกับว่าไม่มีความเครียดยืดหยุ่น สามารถนำพอลิเมอร์ไปหล่อขึ้นรูปได้ และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ความหนืดจะเพิ่มมากขึ้น และการเคลื่อนที่ของสายโซ่จะเป็นไปได้ยาก

อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature : T_m) เป็นคุณสมบัติเฉพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_m พอลิเมอร์จะมีสมบัติแข็งเกร็ง และคงสภาพรูปทรงไว้ได้ แม้ว่าโครงสร้างของสายโซ่จะมีการบิดตัวและพันกัน เมื่อมีความเค้นภายนอกกระทำ สายโซ่จะเกิดการเคลื่อนที่ได้ ทำให้ความแข็งแรงและมอดูลัสมีค่าน้อย ในขณะที่ค่าความเครียดจะสูง มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymer) และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง จะเกิดการผิดรูปแบบยืดหยุ่นมากขึ้น แต่การผิดรูปแบบเหนียวหนืดลดลง พอลิเมอร์จึงมีลักษณะคล้ายยาง

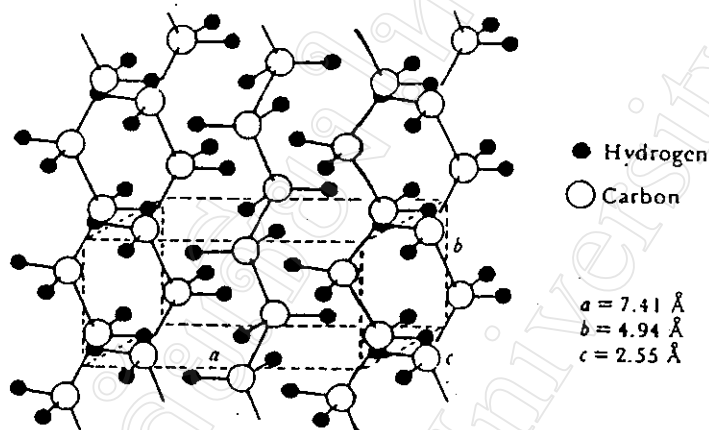
มีโมดูลัสและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ความเครียดลดลง มีขีดจำกัดในการเปลี่ยนรูปร่างของพอลิเมอร์ ขณะที่อุณหภูมิของพอลิเมอร์หรือสัณฐานลดลงเรื่อยๆ ค่าความหนืดยิ่งลดลงจนกระทั่งมีการเคลื่อนที่เฉพาะของกลุ่มโมเลกุลในสายโซ่เพียงเล็กน้อย และจะไม่เกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ณ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนเป็นแก้ว (glass transition temperature : T_g) พอลิเมอร์แบบเส้นตรงจะมีความแข็งแต่เปราะ มีพฤติกรรมคล้ายแก้วเซรามิก อุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิที่เปลี่ยนเป็นแก้วของเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์บางชนิด แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิที่เปลี่ยนเป็นแก้วของเทอร์โมพลาสติก⁽³⁾

Polymer	T_m [°C]	T_d [°C]
Addition polymers		
Low-density polyethylene	115	-120
High-density polyethylene	137	-120
Polyvinyl chloride	175-212	87
Polypropylene	168-176	-16
Polystyrene	240	85-125
Polyacrylonitrile	320	107
Teflon	327	
Polychlorotrifluoroethylene	220	
Polymethyl methacrylate [acrylic]		90-125
ABS		88-125
Condensation polymers		
Acetal	181	-85
6, 6-Nylon	265	50
Cellulose acetate	230	
Polycarbonate	230	145
Polyester	55	75

พอลิเมอร์บางชนิดจะมีสภาพเป็นผลึกได้เมื่อทำให้อุณหภูมิลดลงจนต่ำกว่า T_m การตกผลึกจะเกิดขึ้นได้ง่าย สำหรับพอลิเมอร์ที่เกิดจากการรวมตัวอย่างง่าย เมื่อไม่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ หรือกลุ่มอะตอม มาขัดขวางการมีสมมาตรของสายโซ่ หรือมาขัดขวางการจัดเรียงตัวแบบ

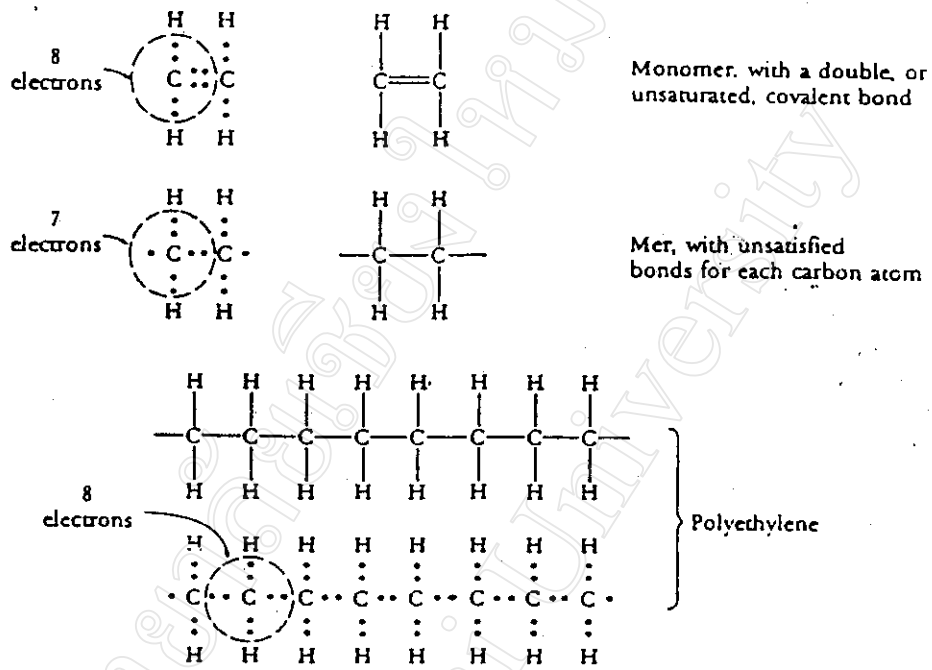
หนาแน่นของสายโซ่ ซึ่งการจัดเรียงตัวลักษณะนี้มีผลทำให้ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ที่เป็นผลึกมีค่าสูงขึ้น และโครงสร้างจะดูคล้ายกับว่าเป็นหน่วยเซลล์ (unitcell) ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงหน่วยเซลล์ของผลึกโพลิเอทิลีน⁽³⁾

2.5.2 โพลิเอทิลีน

เป็นการเกิดของพอลิเมอร์แบบรวมตัว (addition) ที่ง่ายที่สุด จากโมเลกุลของเอทิลีน (C_2H_4) ซึ่งมีอะตอมของคาร์บอนเชื่อมกันด้วยพันธะคู่ชนิดโคเวเลนต์ (covalent bond) โดยคาร์บอนจะใช้อิเล็กตรอนหนึ่งคู่จากแต่ละอะตอมร่วมกัน ขณะที่ไฮโดรเจน 2 อะตอมสร้างพันธะกับแต่ละอะตอมของคาร์บอน เรียกโมเลกุลของเอทิลีนลักษณะนี้ว่าโมโนเมอร์ (monomer) และเมื่อได้รับความร้อน ความดัน หรือตัวเร่งปฏิกิริยา มีผลทำให้พันธะคู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอนกลายเป็นพันธะเดี่ยว ไม่เสถียร ขณะนี้เรียกโมเลกุลของเอทิลีนว่าเมอร์ (mer) แต่เมื่อเมอร์ดังกล่าวมีการรวมตัวเป็นสายโซ่ โดยคาร์บอนจะเรียงกันเป็นสายยาว มีการสร้างพันธะเชื่อมกันในสายโซ่ พันธะคาร์บอนจะมีความเสถียรและโมเลกุลมีความแข็งแรง สายโซ่ของโมเลกุลที่เกิดจากหลายเมอร์มีพันธะต่อกันว่า พอลิเมอร์ และเนื่องจากเกิดจากเมอร์ของเอทิลีน จึงเรียกพอลิเมอร์นี้ว่า โพลิเอทิลีน ลักษณะโมเลกุลโพลิเอทิลีนแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเกิดโพลิเอทิลีนจากปฏิกิริยารวมตัวของโมเลกุลเอทิลีน⁽³⁾

2.5.3 การหาความหนาแน่นของพอลิเมอร์

โพลิเอทิลีนที่มีอยู่ในท้องตลาดแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE) และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE) ค่าความหนาแน่นขึ้นกับโครงสร้างของสายโซ่ ถ้ามีการแตกแขนงมาก ความหนาแน่นยิ่งต่ำ มีผลทำให้จุดหลอมเหลวต่ำกว่าพวกความหนาแน่นสูง นอกจากนี้ความหนาแน่นยังขึ้นกับขบวนการผลิต ในการทดลองนี้เลือกใช้โพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เนื่องจากเป็นพวกพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymer) ที่อุณหภูมิห้อง และมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยทั่วไป HDPE มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ดังนั้นในการชั่งมวลหาความหนาแน่นโดยหลักการแทนที่ของเหลวจึงใช้น้ำไม่ได้ จึงใช้เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) ที่มีความหนาแน่นประมาณ 0.8 g/cm^3 (ที่อุณหภูมิ 23°C)⁽⁴⁾ แทนส่วนวิธีการซึ่งเหมือนการหาความหนาแน่นผงเซรามิกในหัวข้อ 3.2.3

2.6 ของผสมเพียโซอิเล็กทริกและพอลิเมอร์

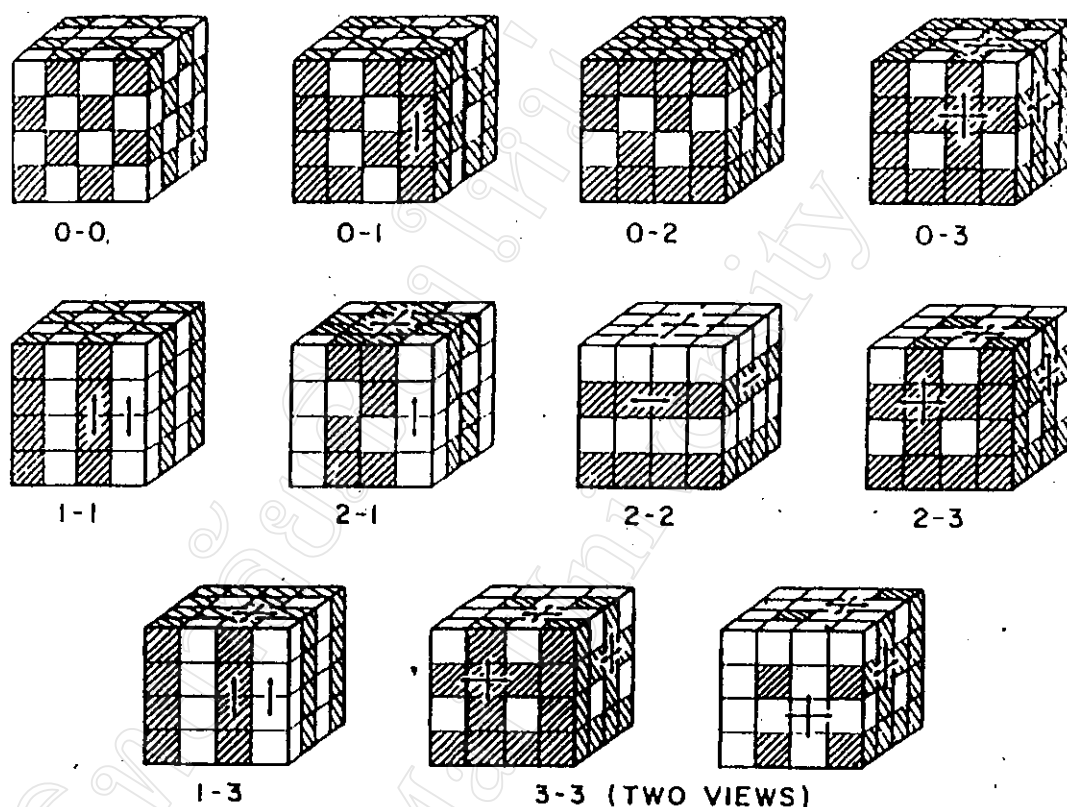
วัตถุประสงค์หลักในการพัฒนาของผสม เพื่อสร้างสารที่มีสมบัติเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ที่สารเฟสเดียวทำไม่ได้ เช่นในทรานสดิวเซอร์ที่ใช้ในอุปกรณ์การแพทย์ ต้องการใช้สารที่มีคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่ดี แต่มีความหนาแน่นต่ำ เพื่อต้องการให้ความหนาแน่นสอดคล้องกับความหนาแน่นของน้ำ ในขณะที่เดียวกันก็มีความยืดหยุ่น ซึ่งสมบัติเช่นนี้ไม่พบในสารเฟสเดียว แต่เป็นสมบัติร่วมของของผสมสองเฟส หรือมากกว่า จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านนี้อย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน

2.6.1 การเรียงติดกัน

โดยทั่วไปสมบัติต่างๆของของผสม มีความสัมพันธ์กับสมบัติพื้นฐานขององค์ประกอบแต่ละเฟส ปริมาณและลักษณะการเรียงติดกัน ซึ่งแนวความคิดการเรียงติดกันซึ่งอธิบายโดย Newnham ดังนี้คือ พิจารณาถึงการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสว่ามีการเรียงติดกันใน 3 มิติอย่างไร ในกรณีของผสม 2 เฟส จะมีการเรียงติดกันทั้งหมด 10 แบบ คือ 0-0, 1-0, 2-0, 3-0, 1-1, 2-1, 3-1, 2-2, 2-3, และ 3-3 แสดงดังรูป 2.12 ความหมายของตัวเลขแต่ละตัวคือ เลขตัวแรกแสดงถึงทิศทางการเรียงติดกันของเฟสที่หนึ่ง และเลขตัวที่สองแสดงถึงทิศทางการเรียงติดกันของเฟสที่สอง ยกตัวอย่างเช่น ของผสมแบบ 0-3 ระหว่างเพียโซเซรามิกและพอลิเมอร์ หมายถึง สารเพียโซเซรามิกไม่มีการการเรียงติดกันเลย ในขณะที่เฟสของพอลิเมอร์มีการเรียงติดกันในสามทิศทาง หรืออาจอธิบายได้ว่าอนุภาคเซรามิกกระจายอยู่ในเมตริกซ์พอลิเมอร์นั่นเอง

2.5.2 ของผสมแบบ 0-3

ของผสมแบบที่มีรูปแบบง่ายที่สุดคือ แบบ 0-3 เป็นลักษณะของผงเซรามิกกระจายอยู่ในเมตริกซ์พอลิเมอร์ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ข้อดีที่สำคัญของของผสมแบบ 0-3 คือสามารถเตรียมให้อยู่ในรูปแบบต่างๆ ได้ง่าย และวิธีการเตรียมไม่ซับซ้อนยุ่งยาก สามารถเตรียมได้ในปริมาณมาก (mass-produced)⁽³⁾ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าปัญหาที่สำคัญในการเตรียมของผสมแบบนี้คือ การกระจายตัวของผงเซรามิกมักไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีผลต่อสมบัติของของผสม



รูปที่ 2.16 ลักษณะการเรียงติดกันของของผสมสองเฟส

2.6 งานวิจัยที่ผ่านมา

ในปี 1976 T.R.Shorout และคณะ⁽⁴⁾ ได้ทำการเตรียมของผสมระหว่างเซรามิกพีแซดทีและพอลิเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ใช้คือ โพลียูรีเทน (Polyurethane) พบว่าสมบัติทางเพียโซอิเล็กตริกของของผสมมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเซรามิกพีแซดที และ PVDF ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถแสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กตริกได้

ในปี 1980 A.Safari⁽⁵⁾ ทำการทดลองเตรียมของผสมแบบ 0-3 โดยใช้เลดติตาเนตเป็นเฟสเซรามิก โดยใช้เทคนิคการเตรียมเลดติตาเนตแบบ mixed oxide, sol-gel และวิธีตกตะกอนร่วม (coprecipitation) พบว่าของผสมที่เตรียมจากเซรามิกที่ผ่านการเตรียมโดยวิธี coprecipitation จะมีสมบัติทางเพียโซอิเล็กตริกดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีกสองวิธีที่กล่าวมาข้างต้น

ในปี 1983 H.Banno และคณะ⁽⁶⁾ ได้ทำการเตรียมของผสมแบบ 0-3 โดยใช้เฟสเซรามิกเป็นเลตติตาเนตเซรามิกแทนพีแซดทีเซรามิก เพื่อจุดประสงค์ในการใช้งานทางด้าน hydrostatic properties พบว่าสมบัติของผสมที่ใช้เลตติตาเนตเป็นเฟสเซรามิกจะได้ค่า hydrostatic voltage ที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของผสมที่ใช้พีแซดทีเป็นเฟสเซรามิก

ในปี 1986 S. Sa-Gong และคณะ⁽⁷⁾ ได้ทำการปรับปรุงวิธีการโพลโดยการเพิ่มเฟสตัวนำลงในของผสม ซึ่งเฟสที่เติมลงไปนี้เป็นสารกึ่งตัวนำ เช่น คาร์บอน เจอร์มาเนียม หรือซิลิกอน โดยของผสมนี้ถึงแม้จะทำการโพลในสนามไฟฟ้าที่ต่ำ แต่ผลที่ได้มีสมบัติเหมือนกับของผสมที่ไม่ได้ใส่เฟสตัวนำ

ในปี ค.ศ.1986 Wersing⁽⁸⁾ เตรียมของผสมแบบ 0-3 และปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อใช้ในการประยุกต์เป็นอัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ สำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์ ในปีเดียวกัน Varaprasad และคณะ⁽⁹⁾ ได้ทำการทดลองใช้พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ เป็นเมตริกซ์พอลิเมอร์แล้วศึกษาพฤติกรรมการนำไฟฟ้าของของผสมที่เตรียมได้

ในปี 1989 H.G.Lee และคณะ⁽¹⁰⁾ ทำการศึกษาพบว่ารูพรุนขององค์ประกอบแต่ละเฟส เช่นรูพรุนของเซรามิก และรูพรุนที่วอยต่อของ phase ต่างมีผลต่อค่าความหนาแน่นสมบัติไดอิเล็กตริก และสมบัติเพียโซอิเล็กตริก

ในปีเดียวกัน D.Waller และคณะ⁽¹¹⁾ ศึกษาวิธีการโพลของผสมแบบ 0-3 และได้นำเทคนิคที่เรียกว่า Corona Discharge technique มาใช้ปรับปรุงวิธีการโพล

วิธีการเตรียมของผสมแบบ 0-3 เป็นแผ่นฟิล์มบาง ถูกเสนอโดย Hanner และคณะ⁽¹²⁾ พบว่าค่า d_h , g_h และ figer of merit สำหรับการใช้งานเป็น hydrophone มีค่าสูงกว่าการเตรียมแบบเก่า

ในปี 1990 S.Fidleris และคณะ⁽¹³⁾ ได้ทดลองเตรียมของผสมแบบ 0-3 โดยให้พอลิเมอร์ร่วม (co-polymer) เป็นเมตริกซ์พอลิเมอร์ แล้วทำการวัดค่า d_h , g_h ในการประยุกต์ใช้งานทางด้าน hydrostatic acoustic transducer

ในปีต่อมา T.E.Petroff และคณะ⁽¹⁴⁾ และคณะทำการศึกษาถึง อิทธิพลของผิวสัมผัสระหว่างผงเซรามิกกับเมตริกซ์พอลิเมอร์ ที่มีต่อค่า $d_h g_h$ และ figer of merit ($d_h g_h / \tan \delta$) พบว่าของผสมที่เตรียมขึ้นจากผงเซรามิกที่ผ่านการเคลือบด้วย 10-undecenoylazide และ hexane (1:50 weight%) จะให้ค่า $d_h g_h$ และ $\tan \delta$ สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของผสมที่เตรียมจากผงพีแซดทีเซรามิกที่ไม่ผ่านการเคลือบ

ในปี 1998 Y.Chen และคณะ⁽¹⁵⁾ เตรียมของผสมแบบ 0-3 ระหว่างเลดติตนาเต เซรามิก และพอลิเมอร์ร่วม (co-polymer) โดยเลดติตนาเตเตรียมจากกระบวนการ sol-gel ได้ผงที่มีขนาดเล็ก (nanocrystalline powder) และพบว่าผงเซรามิกที่ผ่านการเผา (annealing) ที่อุณหภูมิประมาณ 700°C มีความเหมาะสมในการใช้เตรียมของผสมเพื่อจุดประสงค์ในการใช้งานด้าน pyroelectric sensor เนื่องจากคุณสมบัติทาง pyroelectric ที่ดี