

บทที่ 2

ทฤษฎี และเหตุผล

2.1 วัสดุฉลาด (Smart materials) [7-20]

วัสดุฉลาด คือ วัสดุที่มีความสามารถในการตอบสนอง ต่อสิ่งเร้าภายนอก เช่น มีรูปร่างเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ หรือมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า เกิดขึ้นเมื่อมีความเค้น เป็นต้น

วัสดุฉลาดประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญคือเซ็นเซอร์ (Sensors) และแอคชูเอเตอร์ (Actuators)

1. เซ็นเซอร์ (Sensors)

เซ็นเซอร์ คือวัสดุหรืออุปกรณ์ที่สามารถรับรู้สิ่งที่มากระตุ้นและสามารถตอบสนองในรูปของสัญญาณ หรืออาจกล่าวได้ว่าเซ็นเซอร์คือตัวแปลงหรือทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ที่สามารถแปลงสิ่งเร้าที่มากระตุ้นให้อยู่ในรูปที่จะมีประโยชน์ต่อกรรมวิธีการใช้งานหรือเพื่อการประมวลผล สิ่งเร้าที่มากระตุ้นนี้ สามารถจำแนกได้เป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 6 ประเภท ดังปรากฏ ในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 ประเภทของสิ่งเร้า (Input) ที่เซ็นเซอร์สามารถตอบสนอง

สิ่งเร้า	ตัวอย่างของสมบัติที่เซ็นเซอร์สามารถประมวลผล
พลังงานจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical)	ความเข้มข้น อัตราการเกิดปฏิกิริยา ความต่างศักย์ ปฏิกิริยารีดอกซ์ สมบัติทางชีวภาพ
พลังงานไฟฟ้า (Electrical)	กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ ความต้านทาน ความนำไฟฟ้า ความถี่
พลังงานแม่เหล็ก (Magnetic)	ความเข้มแม่เหล็ก โมเมนต์ (Moment) ความซาบซึมได้ (Permeability) ความหนาแน่น ฟลักซ์ (Flux)
พลังงานกล (Mechanical)	ตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง แรง ความเค้น ความดัน ความเครียด การไหล มวล ความหนาแน่น โมเมนต์ (Moment) ทอร์ก (Torque) รูปร่าง ความเรียบผิว (Roughness) ทิศทางการเรียงตัว (Orientation) ความหนืด
การแผ่รังสี (Radiant)	ความเข้มข้น พลังงาน เฟส (Phase) ความยาวคลื่น แอมพลิจูด การจัดเรียงขั้ว (Polarization) การส่งผ่าน (Transmission)

ตาราง 2.1 ประเภทของสิ่งเร้า (Input) ที่เซ็นเซอร์สามารถตอบสนอง (ต่อ)

สิ่งเร้า	ตัวอย่างของสมบัติที่เซ็นเซอร์ สามารถประมวลผล
พลังงานความร้อน (Thermal)	ความร้อน อุณหภูมิ ฟลักซ์

นอกจากนี้สมบัติของวัสดุยังเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อการจัดแบ่งประเภทของเซ็นเซอร์ ซึ่งจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ขึ้นกับสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำเซ็นเซอร์นั้น ได้แก่

1) เซ็นเซอร์ที่สามารถให้สัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณออกโดยไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายกำลังช่วย (Auxiliary energy source) ตัวอย่างของเซ็นเซอร์ประเภทนี้ ได้แก่ เซลล์สุริยะ (Solar cell) และตัวอ่านอุณหภูมิ (Thermocouples) โดยเราเรียกเซ็นเซอร์ประเภทนี้ว่า เซ็นเซอร์แบบประกอบตัวเอง (Self-sustaining sensor)

2) เซ็นเซอร์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงสิ่งเร้าที่ไม่ใช่สัญญาณไฟฟ้าไปสู่สัญญาณไฟฟ้าโดยการใช้แหล่งจ่ายกำลังช่วย ตัวอย่างเซ็นเซอร์ประเภทนี้ ได้แก่ ตัวเกจวัดความเครียด (Strain gauges) และตัวต้านทานไฟฟ้าแรงดัน (Piezoresistors) โดยเราเรียกเซ็นเซอร์ ประเภทนี้ว่า เซ็นเซอร์แบบแปรตามพลังงาน (Power-dependent sensor)

เซ็นเซอร์ทั้ง 2 ประเภทข้างต้นสามารถนำมาใช้งานได้ทั้งในทางตรง (Direct types) และทางอ้อม (Indirect types) ตัวอย่างแบบทางตรงได้แก่ การแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ หรือความต้านทาน และแบบทางอ้อม ได้แก่ ปรากฏการณ์การอัดหรือยืดตัวแม่เหล็ก (Magnetostriction) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการรับรู้ได้มากกว่าหนึ่งประเภทของพลังงาน

2. แอ็กชูเอเตอร์ (Actuator)

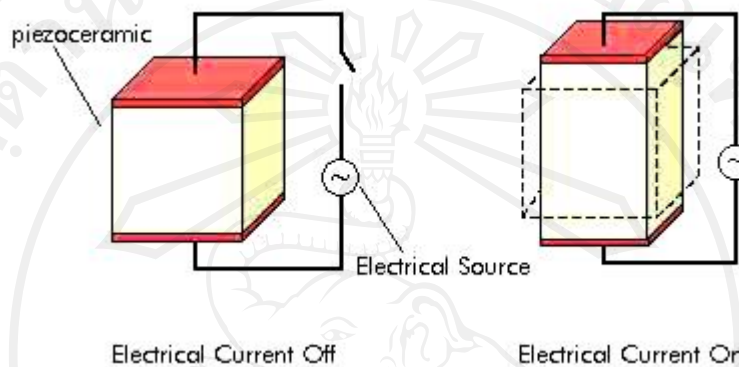
แอ็กชูเอเตอร์ คือ วัสดุที่ใช้ทำให้เกิดการขับเคลื่อนหรือเคลื่อนไหว โดยทั่วไปใช้คู่กับเซ็นเซอร์ โดยแอ็กชูเอเตอร์จะนำสัญญาณจากเซ็นเซอร์มาตอบสนองในรูปของการเคลื่อนที่

เซ็นเซอร์และแอ็กชูเอเตอร์ คือ อุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญสำหรับระบบการทำงานของวัสดุฉลาดหรือที่เรียกว่า “Smart materials” วัสดุที่ฉลาดนั้น สามารถแสดงความฉลาดในการทำงานออกมาได้หลากหลายแบบ เช่น การปรับระดับแสงและอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศ การควบคุมการเปิดและปิดไฟโดยใช้เสียง การซ่อมแซมตัวเองของสะพานเมื่อเกิดความเสียหาย และหุ่นยนต์ที่มีการทำงานคล้ายมนุษย์ เป็นต้น

ตัวอย่างของวัสดุที่นำมาใช้เป็นแอ็กชูเอเตอร์ที่ดี แบ่งได้เป็น 7 ประเภทใหญ่ๆ คือ

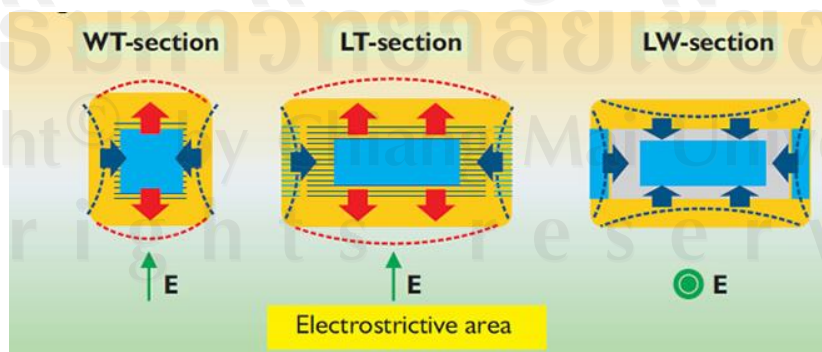
1. วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric material) เช่น สารประกอบเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตหรือที่รู้จักกันดีในชื่อพีแซดที (PZT) วัสดุประเภทเพียโซอิเล็กทริก คือวัสดุที่สามารถให้

สนามไฟฟ้าเมื่อมีแรงดันมากกระทำหรือในทางกลับกันคือสามารถให้ความเครียด (Strain) หรือการอัดตัว (Compression) หรือการยืดตัว (Elongation) เมื่อให้สนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูป 2.1 นอกจากนั้นสมบัติที่สำคัญยิ่งต่อการประยุกต์ใช้งานของวัสดุประเภทนี้ คือ การเปลี่ยนสถานะหรือเฟสเมื่ออุณหภูมิและองค์ประกอบเปลี่ยนไป



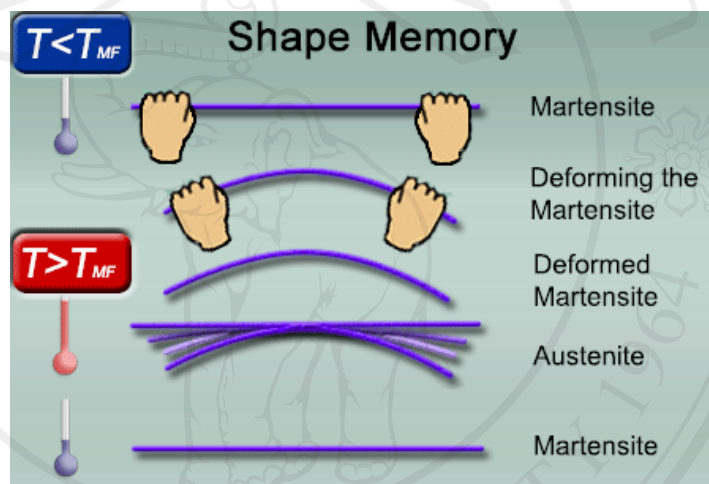
รูป 2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) [8]

2. วัสดุอิเล็กโตรสตริกทีฟ (Electrostrictive material) เช่น สารประกอบเลดแมงกานีสแมกนีเซียมไนโอเบียม วัสดุประเภทนี้มีลักษณะเหมือนวัสดุประเภทเพียโซอิเล็กทริกที่สามารถให้ความเครียดหรือการอัด หรือการยืดตัวเมื่อให้สนามไฟฟ้า อย่างไรก็ตามความแตกต่างกันของวัสดุทั้ง 2 ประเภทคือ วัสดุอิเล็กโตรสตริกทีฟจะเกิดการยืดตัวเพียงอย่างเดียวในทิศทางที่ไม่ขึ้นกับทิศทางของการให้สนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูป 2.2 ในขณะที่วัสดุประเภทเพียโซอิเล็กทริก จะเกิดการยืดตัวและการอัดตัวในทิศทางของการเกิดโพลาไรเซชัน (Polarization)



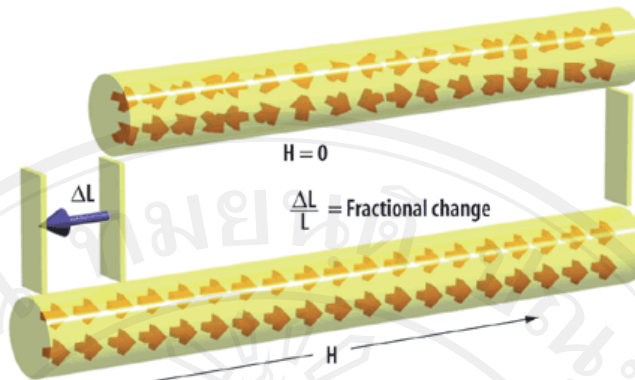
รูป 2.2 ปรากฏการณ์การยืดตัวไฟฟ้า (Electrostrictive effect) [9]

3. โลหะจำรูป (Shape Memory Alloys) คือ วัสดุที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างและขนาดไปยังรูปร่างและขนาดดั้งเดิม เมื่ออุณหภูมิที่ให้แก่วัสดุนั้นเปลี่ยนไป โดยทั่วไปโลหะจำรูปจะเกิดการเปลี่ยนรูป (Plastic deformation) ที่อุณหภูมิก่อนข้างต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โลหะดังกล่าวจะเปลี่ยนรูปร่างตัวเองไปยังจุดเดิม โลหะจำรูปที่กล่าวถึงนี้จะป็นชนิด “One-way shape memory” ดังแสดงในรูป 2.3 ส่วนวัสดุที่เปลี่ยนรูปร่างในช่วงอุณหภูมิที่ให่เย็นตัวลง จะเรียกว่า “Two-way shape memory” ตัวอย่างการนำวัสดุประเภทนี้ไปใช้งาน ได้แก่ แวนตา ตัวเปิดวาล์วในหม้อต้มกาแฟ อุปกรณ์และเครื่องมือที่โค้งงอใช้ในการผ่าตัด ซึ่งสามารถกลับคืนรูปร่างตรงดังเดิมเมื่อผ่านการฆ่าเชื้อ (Sterilization) เป็นต้น



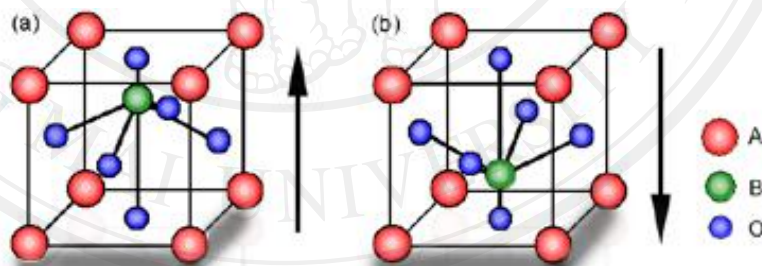
รูป 2.3 โลหะจำรูป (Shape memory Alloy) [10]

4. วัสดุแมกนีโตสตริกทิฟ (Magnetostrictive material) คือ วัสดุจำพวกเฟอร์โรแมกนีติก (Ferromagnetic) เช่น เหล็กและนิกเกิล ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีสนามแม่เหล็กผ่านวัสดุนั้น ตัวอย่างเช่นแท่งเหล็กที่วางไว้ในสนามแม่เหล็กในทิศทางตามยาวของแท่งเหล็กนั้น จะเกิดการยืดตัวตามแนวยาวของแท่งเหล็ก เมื่อมีสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มต่ำผ่าน และจะเกิดการอัดตัวหรือหดตัว เมื่อมีสนามแม่เหล็กความเข้มสูงผ่าน ดังแสดงในรูป 2.4 จากปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงมีการนำไปประยุกต์ทำแมกนีโตสตริกทิฟทรานสดิวเซอร์ (Magnetostrictive transducer)



รูป 2.4 ปรากฏการณ์แมกนีโตสตริกทิฟ (Magnetostrictive effect) [11]

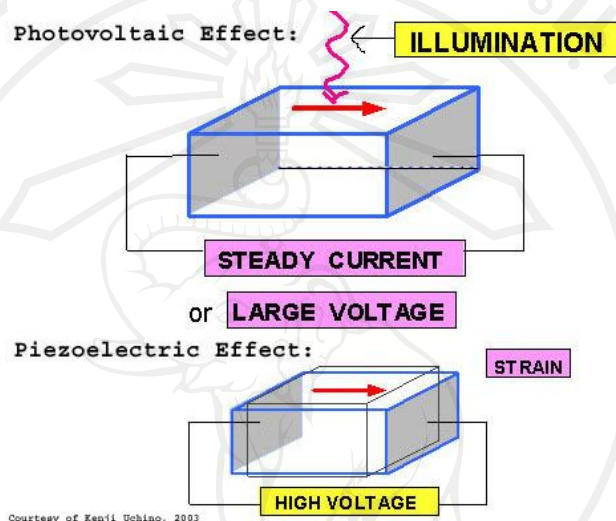
5. **วัสดุเพอโรฟสไกต์ (Perovskite)** ซึ่งเป็นชื่อเรียกเฉพาะของโครงสร้างของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric material) วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก คือ วัสดุที่สามารถเปลี่ยนทิศทางโพลาริเซชันภายใต้สนามไฟฟ้า เช่น แบเรียมไทเทเนต วัสดุประเภทนี้ทำหน้าที่สำคัญในวงจรไฟฟ้าคือเป็นตัวเก็บประจุ และสามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาะหว่างสัญญาณทางไฟฟ้ากับพลังงานในรูปแบบอื่นๆ



รูป 2.5 โครงสร้างแบเรียมไทเทเนต (BaTiO_3) : ปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric effect) ระหว่างการเคลื่อนของอะตอมกลาง [12]

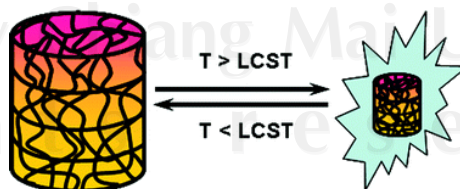
6. **วัสดุโฟโตสตริกทิฟ (Photostrictive material)** คือวัสดุที่สามารถเกิดปรากฏการณ์หนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแสงส่องกระทบ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ต้องมีปรากฏการณ์แสงขับเคลื่อนไฟฟ้า (Photovoltaic effect) เกิดขึ้น และต้องอาศัยปรากฏการณ์ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ที่เป็นแบบย้อนกลับคือแบบที่ให้ความเครียดเมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไป เช่น สารประกอบออกไซด์เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไทเทเนต หรือเรียกว่า สาร PLZT เมื่อแสงที่มี

ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่าพลังงานของช่องว่างระหว่างแถบ (Energy band-gap) ของวัสดุโฟโตสตริกทีฟ (Photostrictive) ตกกระทบลงมาถึงวัสดุประเภทนี้ซึ่งมีพฤติกรรมของปรากฏการณ์แสงขับเคลื่อนไฟฟ้า จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ในวัสดุนั้น ดังแสดงในรูป 2.6 และเนื่องจากวัสดุดังกล่าวเป็นเพียโซอิเล็กทริก กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการอัดหรือการยืดตัวขึ้นในวัสดุนั้น



รูป 2.6 ตัวอย่างปรากฏการณ์แสงขับเคลื่อนไฟฟ้า (Photovoltaic effect) และปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) [13]

7. วัสดุเคโมสตริกทีฟพอลิเมอร์ (Chemostriuctive Polymer) การอัดหรือยืดตัวด้วยเคมีเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในวัสดุประเภท พอลิเมอร์เมื่อมีการเปลี่ยนเฟส เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในวัสดุนั้น เช่น พอลิเมอร์เจล (Polymer gels) ที่มีการตอบสนองต่อความร้อนจะหดตัวเมื่อมีการระเหยของตัวทำละลาย



รูป 2.7 พอลิเมอร์เจล (Polymer gel) ที่มีการตอบสนองต่อความร้อน (Thermosensitive) เมื่อมีการระเหยของตัวทำละลาย (Solvent) [14]

2.2 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) [15]

คำว่า “เพียโซ” มาจากภาษากรีกที่แปลว่า “กด” ดังนั้นสมบัติเพียโซอิเล็กทริก คือ การเกิดกระแสไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการได้รับแรงกดซึ่งเป็นแรงทางกล

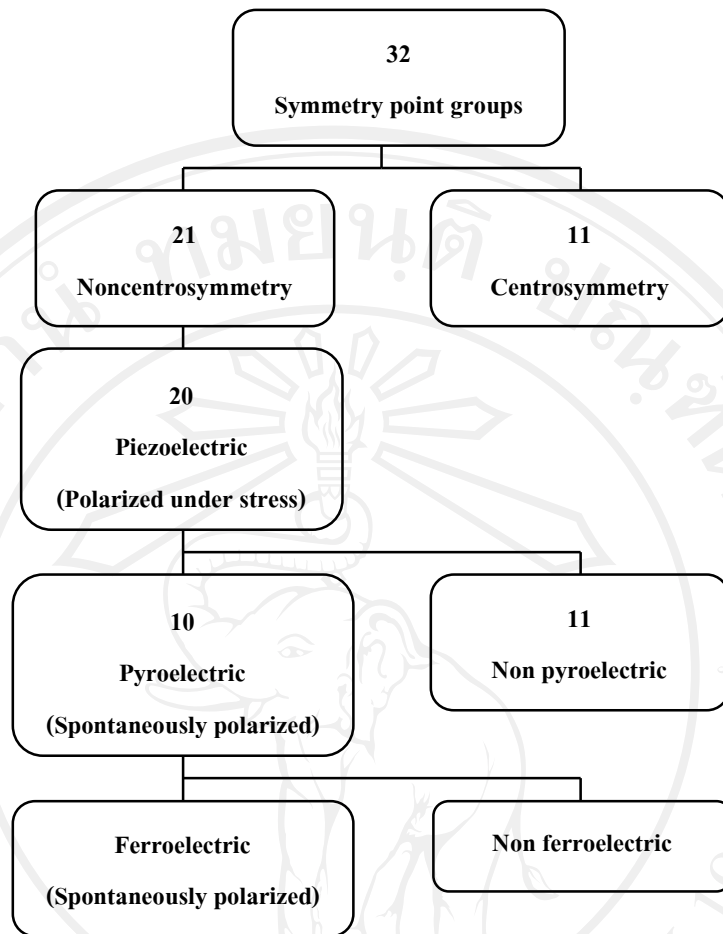
ในปี ค.ศ. 1880 Jacques และ Pierre Curie ได้ค้นพบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectricity) ขึ้นเป็นครั้งแรกในระหว่างการศึกษาผลของแรงดันที่มีต่อการเกิดประจุไฟฟ้าของผลึกของวัสดุประกอบเชิงเดี่ยว (Single crystal compound) บางประเภท เช่น ควอตซ์ (Quartz) ซิงค์เบลนด์ (Zincblend) และทัวร์มาลีน (Tourmaline)

2.2.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric properties) [16-18]

ปรากฏการณ์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะเกิดในวัสดุบางชนิด เช่น ผลึกเชิงเดี่ยว (Single crystal) วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีสมบัติถูกทำให้มีการโพลาไรเซชัน (Polarization) คือการเกิดกระแสไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการได้รับแรงกดซึ่งเป็นแรงทางกลทำให้เกิดความเครียด (Strain) ในผลึกซึ่งเกิดการจัดเรียงตัวไปในทางเดียวกันและให้กระแสไฟฟ้าออกมา ปริมาณและเครื่องหมายของการโพลาไรเซชันจะแปรผันตามความเครียดที่ได้รับ

ความเข้าใจในโครงสร้างภายในของวัสดุนั้น เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการศึกษาสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของของแข็ง เมื่อทำการพิจารณาวัสดุที่มีผลึกเดี่ยวพบว่า ผลึกมีองค์ประกอบทางเคมีคงที่และประกอบด้วยอออนเรียงตัวกันซ้ำๆ ต่อกันเป็นเครือข่าย เกิดเป็นระนาบผลึก (Lattice) หน่วยที่เล็กที่สุดที่มีความสมมาตรเรียกว่าหน่วยเซลล์ (Unit cell) และเป็นตัวบอกความเป็นไปได้ของการมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกในผลึก เนื่องจากความสมมาตรของโครงสร้างผลึกภายในถูกสะท้อนด้วยความสมมาตรของสมบัติที่วัสดุนั้นแสดงออกมา

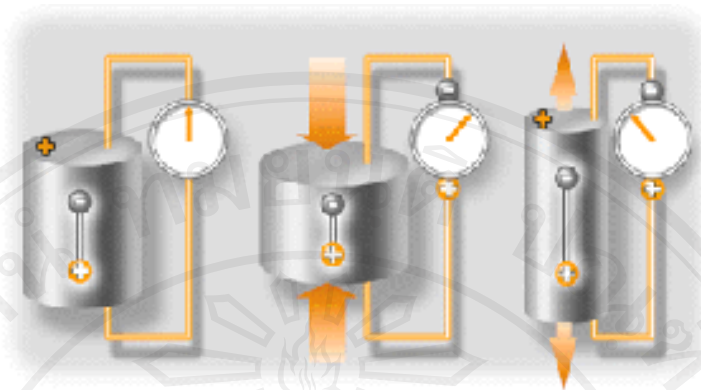
นักผลึกศาสตร์แบ่งผลึกเป็น 32 กลุ่มและใน 32 กลุ่มจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 11 กลุ่มที่มีหน่วยเซลล์สมมาตรกับจุดศูนย์กลาง และอีก 21 กลุ่มที่มีหน่วยเซลล์ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลาง และในผลึกจำนวน 21 กลุ่มนี้มีเพียง 20 กลุ่มเท่านั้นที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก ส่วนอีกหนึ่งกลุ่มไม่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกดังแสดงในรูป 2.8 เนื่องจากเมื่อสารอยู่ในความเครียดแล้ว สารจะมีสมมาตรกับจุดศูนย์กลาง (ทำให้โพลาไรเซชันรวมหักล้างกันหมด) ส่งผลให้ไม่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก และในผลึกจำนวน 20 กลุ่มนี้มีเพียง 10 กลุ่มเท่านั้นที่มีขั้วในตัวเอง (Spontaneous polarization, P_s) คือ เกิดการโพลาไรเซชันได้ด้วยตัวเองโดยไม่ต้องมีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไป นอกจากว่าวัสดุนั้นจะมีลักษณะไม่มีสมมาตรของศูนย์กลางอยู่เอง ซึ่งจะทำให้ผลรวมของการเคลื่อนที่ของประจุบวกและลบสามารถสร้างไดโพลไฟฟ้าขึ้นมาหรือที่เรียกว่าเกิดการโพลาไรเซชัน



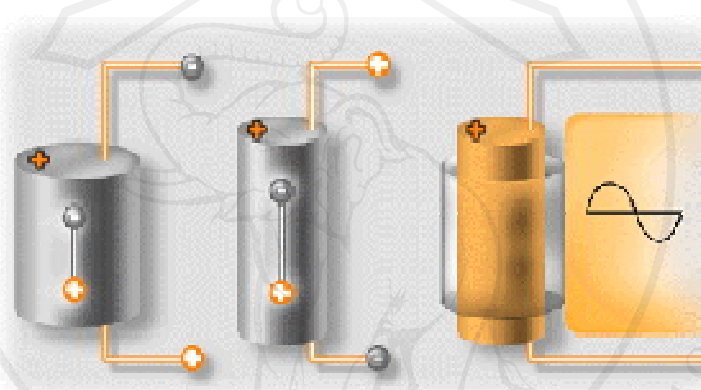
รูป 2.8 การแบ่งกลุ่มวัสดุตามลักษณะสมมาตร [19]

สภาพเพียโซอิเล็กทริกเกิดขึ้นได้สองแบบ คือ แบบทางตรง (Direct effect) และแบบผกผัน (Converse effect) ซึ่งก็คือการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันเมื่อสารถูกแรงกลกระทำหรือเกิดความเค้น (Stress) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าเป็นปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง และการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงขนาด หรือเกิดความเครียดในสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป เรียกว่าเป็นปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบผกผัน ดังแสดงในรูป 2.9 และระดับการเกิดโพลาริเซชันจะขึ้นกับระดับความเครียดที่เกิดจากแรงที่ได้รับ และเครื่องหมายของประจุที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับว่าแรงที่ให้เป็นแรงดึงหรือแรงกด

(a)



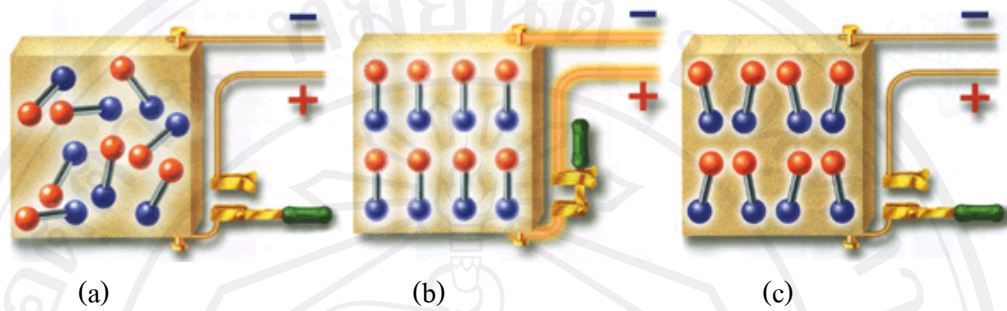
(b)



รูป 2.9 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (a) แบบทางตรง และ (b) แบบผกผัน [20]

สมบัติดังกล่าวอาจพบได้ในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ซึ่งก็คือเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ผ่านการโพลิง (Poling) นั้นเอง ในระหว่างกระบวนการโพลิงวัสดุจะเกิดการขยายตัวตามแนวแกนการโพลิงเล็กน้อย และเกิดการหดตัวในทิศทางที่ตั้งฉากทั้งสองทิศทางเล็กน้อยเช่นกัน ระดับความแรงของสนามการโพลิงและอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญ ในการกำหนดการจัดทิศทางและสมบัติที่ได้ของวัสดุ การจัดเรียงตัวไม่มีทางเสร็จสมบูรณ์และโครงสร้างผลึกของวัสดุก็เป็นสิ่งที่บอกระดับการโพลิงได้ด้วย เช่น เฟสเตตระโกนอล ทำได้ถึงร้อยละ 83 เฟสรวมโอบีครอลทำได้ถึงร้อยละ 86 และมากถึง ร้อยละ 91 สำหรับเฟสอโทรอมบิก ซึ่งเป็นค่าที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผลึกเดี่ยวหรือโดเมนเดี่ยว กล่าวได้ว่าเซรามิกทุกชนิดที่ผ่านการเผาซินเตอร์แล้วจะมีสภาพเหมือนมองโดยรวมมีสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic) และจะต้องผ่านการโพลิงเพื่อให้เป็นเพียโซอิเล็กทริก โดยวัสดุเหล่านั้นเป็นทั้งสารเฟอร์โรอิเล็กทริก และเป็นเพียโซอิเล็กทริกด้วย หากไม่มีการโพลิงเซรามิกจะไม่เปลี่ยนสภาพแม้ว่าแต่ละผลึกจะเป็นเพียโซอิเล็กทริกอยู่แล้วก็ตามดังแสดง

ในรูป 2.10 เซรามิกที่ผ่านการโพลลิงมีประโยชน์มากมายเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกินอุณหภูมิคูรี (Curie temperature : T_c) เพราะเซรามิกจะเสียสภาพโพลาริเซชันที่เกิดจากการโพลลิงที่อุณหภูมิสูงกว่า T_c



รูป 2.10 ไคโพลภายในเนื้อสาร (a) ก่อนทำการโพลลิง (b) ระหว่างทำการโพลลิง (c) หลังทำการโพลลิง [21]

2.2.2 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient: d_{33}) [22]

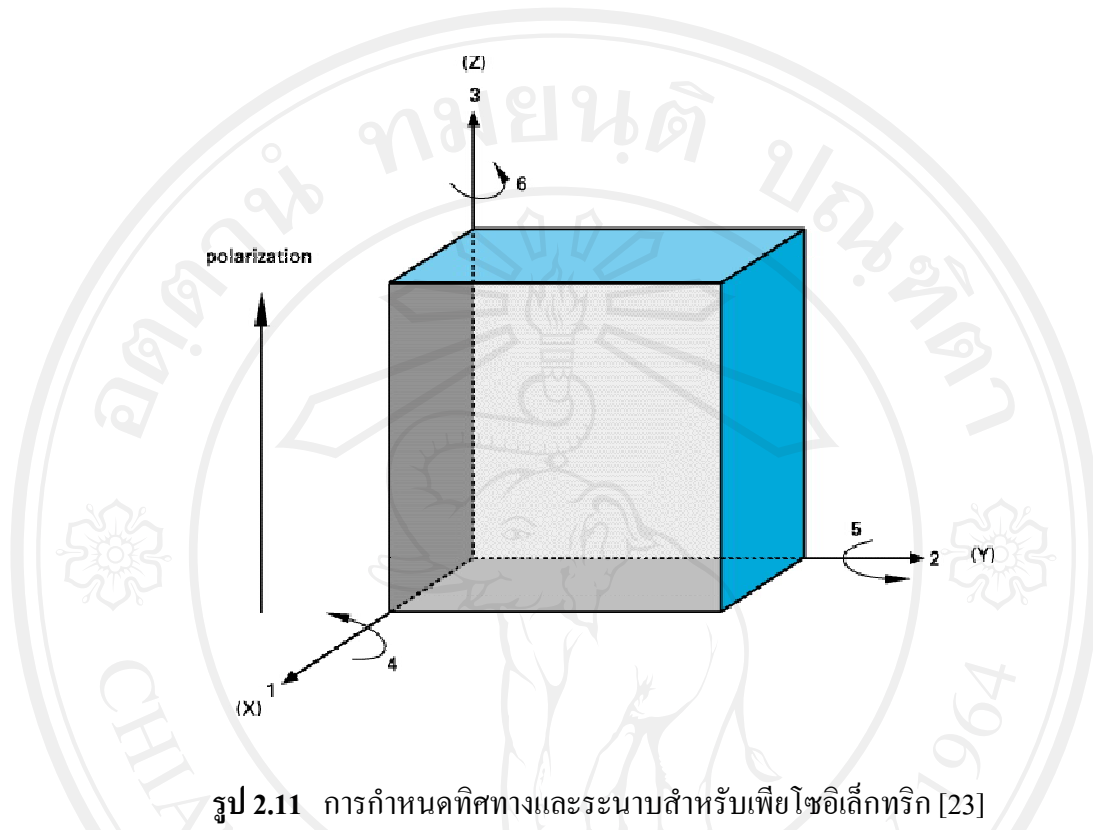
ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ 4 ตัว ได้แก่ ความเครียดเชิงกล (Mechanical strain: S) ความเค้นเชิงกล (Mechanical stress: T) สนามไฟฟ้า (Electric field: E) และการขจัดไดอิเล็กทริก (Dielectric displacement: D) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant: ϵ^T) ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric charge constant: d) และค่าคงที่ยืดหยุ่น (Elasticity constant: s^E) เนื่องจากเป็นค่าที่ขึ้นกับสมบัติที่ไม่เหมือนกันทุกทิศทาง (Anisotropy) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ความเครียดเชิงกลและการขจัดไดอิเล็กทริกสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.1) และ (2.2)

$$S = s^E T + dE \quad (2.1)$$

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2.2)$$

โดย ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ^T) นั้นมีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า (E) การขจัดไดอิเล็กทริก (D) และความเครียดเชิงกล (s^E) ซึ่งมีผลมาจากทิศทางเป็นสำคัญ พารามิเตอร์ด้านทิศทางนั้นถูกกำกับไว้ด้วยตัวเลข 1, 2 และ 3 ซึ่งจะสอดคล้องกับทิศทางในแนวแกน X, Y และ Z ตามลำดับ

ความเค้นเฉือนเชิงกล และความเครียดเฉือนในทิศทางตามแนวแกน X, Y และ Z ซึ่งแสดงออกมาด้วยตัวเลข 4, 5 และ 6 ตามลำดับดังแสดงในรูป 2.11



รูป 2.11 การกำหนดทิศทางและระนาบสำหรับเพียโซอิเล็กทริก [23]

สมบัติเพียโซอิเล็กทริกนั้นขึ้นกับทิศทาง ทำให้สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกมีหลายค่าตามทิศทางต่างๆ ที่สัมพันธ์กับโพลาริเซชันที่เปลี่ยน (หรือความเครียด) ที่เกิดจากความเค้น (หรือสนามไฟฟ้า) ที่ให้ในทิศทางต่างๆ โดยทั่วไปจะให้ทิศทางโพลาริเซชันในทิศทางที่ 3 ขณะที่ทิศทางที่ 1 และ 2 ตั้งฉากกันและเป็นทิศทางที่สมมูลกัน ดังนั้นเซรามิกที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมี 3 ทิศทางที่สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกมีค่าไม่เป็นศูนย์ ได้แก่ d_{33} , d_{31} และ d_{15}

- ค่า d_{33} เป็นค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกตามยาวเมื่อมีการให้ความเค้นในทิศทาง 3 (แกน Z) แล้วทำให้เกิดโพลาริเซชันในทิศทางเดียวกัน
- ค่า d_{31} เป็นค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกตามขวางสัมพันธ์กับโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นในทิศทาง 3 (แกน Z) ที่เกิดจากการให้ความเค้นในทิศทางตั้งฉาก (ทิศทาง 1 หรือ 2) (แกน X หรือ Y)
- ค่า d_{15} เป็นค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกตามแนวเฉือนสัมพันธ์กับโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นในทิศทาง 1 (แกน X) ที่เกิดจากการให้ความเค้นเฉือนรอบทิศทาง 2 (แกน Y)

สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33} , d_{31} และ d_{15}) และสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ (Voltage coefficient: g_{33} , g_{31} และ g_{15}) แสดงให้เห็นถึงพารามิเตอร์ทางด้านไฟฟ้าเชิงกลของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกระหว่างการขจัดและความเค้นหรือความเครียด และสนามไฟฟ้าซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$d = \frac{D}{T} = \frac{S}{E} \quad (2.3)$$

ขณะที่สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมือนกันในทางตัวเลขของทั้งสองปรากฏการณ์ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่มากนั้นจะนิยมนำมาใช้ในด้านของการเคลื่อนที่หรืออุปกรณ์ที่ต้องการการกระตุ้น เช่น ระบบโซนาร์สำหรับวัดระดับความลึกในทะเลเป็นต้น อีกทั้งสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ (g) ยังมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d) โดยทางค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) ดังนี้

$$g = \frac{d}{\epsilon_r \epsilon_0} = \frac{E}{T} = \frac{S}{D} \quad (2.4)$$

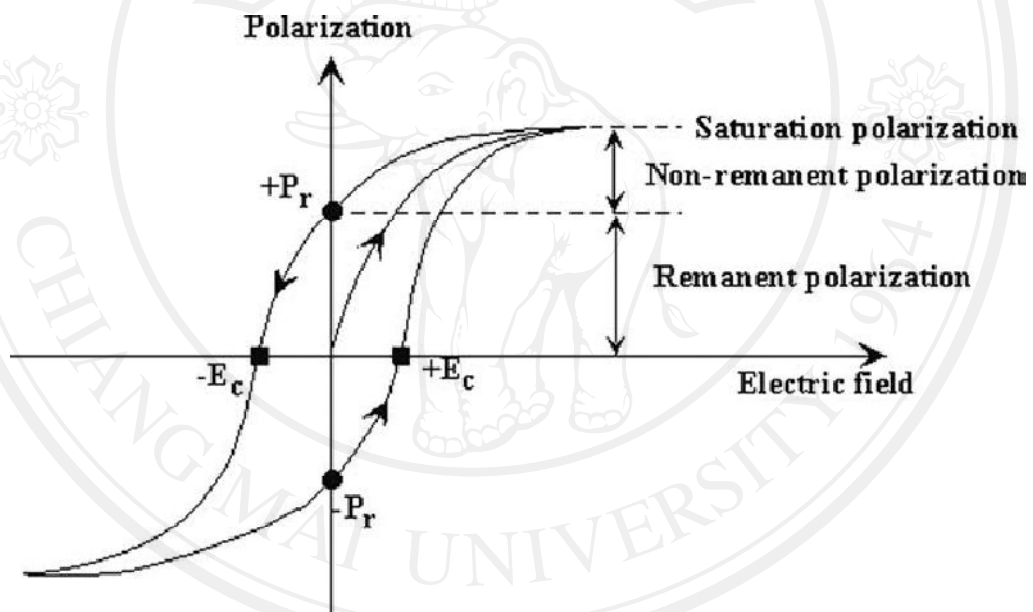
ค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ที่มากนั้นจะนิยมนำมาใช้ในด้านของวัสดุที่ต้องการสร้างความต่างศักย์ในการตอบสนองต่อความเค้นเชิงกล ตัวอย่างเช่น หัวจุดแก๊ส และเครื่องบันทึกเสียง เป็นต้น

2.2.3 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric effect) [18]

จาก 20 Point group ของผลึก Noncentrosymmetric เป็นเพียโซอิเล็กทริกจะมีอยู่ 10 Point groups ที่มีขั้ว (Polar) เกิดไดโพลโมเมนต์ได้ด้วยตนเอง แม้ไม่ได้รับสนามไฟฟ้ากระทำเรียกกลุ่มสารพวกนี้ว่า สปอนทานเนียส โพลาริเซชัน (Spontaneous polarization) ผลึกมีขั้วเหล่านี้เป็นเพียโซอิเล็กทริกอย่างมาก และกรณีที่ให้สนามไฟฟ้าแรงพอที่เข้าไปจะทำให้ทิศทางของเวกเตอร์โพลาริเซชันเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งในสาร Point groups นี้เรียกว่า เฟอร์โรอิเล็กทริก นั่นคือสารเฟอร์โรอิเล็กทริกทุกชนิดเป็นสารเพียโซอิเล็กทริก แต่เพียโซอิเล็กทริกไม่จำเป็นต้องเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก

ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกแสดงสมบัติไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) ถึงแม้ว่าเราจะนำสนามไฟฟ้าออกแล้วก็ตาม กล่าวว่ามีไดโพลโมเมนต์ถาวรอยู่ในผลึกในสถานะเฟอร์โรอิเล็กทริก จุดศูนย์กลางของประจุบวกของผลึกไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับประจุลบ

เมื่อเราเอาสารไดอิเล็กทริกมาวางในสนามไฟฟ้าจะเกิดโพลาไรเซชัน (Polarization) ขึ้นภายในสารนั้น และเมื่อลดสนามไฟฟ้าที่ให้งั้นเป็นศูนย์ โพลาไรเซชันในสารไดอิเล็กทริกก็จะกลายเป็นศูนย์ทันที แต่มีสารบางอย่างเมื่อเราให้สนามไฟฟ้าภายนอกเข้าไปทำให้เกิดมีโพลาไรเซชัน และเมื่อเราลดสนามไฟฟ้าลงจนเป็นศูนย์ โพลาไรเซชันจะไม่เป็นศูนย์ในสารไดอิเล็กทริก แต่มักจะเป็นศูนย์เมื่อ $E = -E_0$ ดังรูป 2.12 แสดงว่าในสารมีไดโพลโมเมนต์ถาวรอยู่แล้วหรืออาจกล่าวได้ว่าสารนั้นแสดงสถานะเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก และอาจทำให้สารแสดงสถานะเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยไม่ต้องใช้ไฟฟ้าเลย แต่เราใช้การลดอุณหภูมิแทน โดยปกติสถานะเฟอร์โรอิเล็กทริกจะไม่ปรากฏที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่แน่นอนค่าหนึ่งที่เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต (T_c) ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตนั้น ผลึกจะอยู่ในสถานะพาราอิเล็กทริก (Paraelectric)



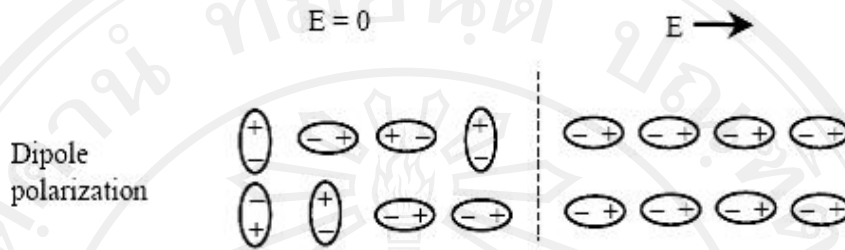
รูป 2.12 ความสัมพันธ์ E-P ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก [24]

2.2.4 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) [15]

สารไดอิเล็กทริกเป็นสารที่นิยมนำมาใช้ในการทำเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor) โดยในช่วงการค้นพบช่วงแรกนั้นสารที่นำมาใช้คือ ไมก้า (Mica) เป็นผลึกเชิงเดี่ยวของแร่ซิลิเกต ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากมีความเสถียรสูง

สมบัติไดอิเล็กทริก คือ สมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าในวัสดุโดยเมื่อวัสดุอยู่ในสภาวะปกติจะประกอบไปด้วยโมเลกุลที่มีจุดศูนย์กลางมวลร่วมกันระหว่างโปรตอนและอิเล็กตรอน โดยจะอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลและแรงยึดเหนี่ยวของอะตอม ภายในเนื้อสารจึงไม่มีประจุไฟฟ้า

อิสระ แต่เมื่อสารได้รับกระแสไฟฟ้าจะทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศทางของสนามไฟฟ้า ส่วนกลุ่มประจุลบถูกผลักไปในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้โมเลกุลของสารเกิดไดโพลโมเมนต์ ขึ้นมาดังแสดงในรูป 2.13

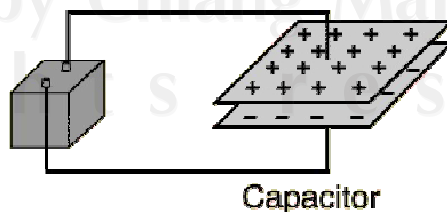


รูป 2.13 การเกิดโพลาริเซชัน [5]

ในสารไดอิเล็กทริกบางชนิดมีโมเลกุลที่มีขั้วอยู่แล้วเพียงแต่ทิศทางของไดโพลไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่สาร ไดอิเล็กทริกจะทำให้ไดโพลเล็กๆนี้เกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ เมื่อพิจารณาวลสารทั้งหมดจะพบว่าประจุบวกทั้งหมดย้ายออกจากประจุลบ ซึ่งปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า สารไดอิเล็กทริกนั้นถูกโพลาริซ์ (Polarized) ทิศทางของไดโพลจะตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้าที่ให้ โดยสมบัติไดอิเล็กทริก ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง 2 ตัว คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity: ϵ_r) และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss: $\tan \delta$) ดังมีรายละเอียดดังนี้

2.2.5 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity: ϵ_r) [15,18]

เมื่อพิจารณาตัวเก็บประจุอย่างง่าย คือ แผ่นโลหะตัวนำที่มีพื้นที่ เท่ากับ A ตารางเมตรสองแผ่นวางกันด้วยระยะห่าง d เมตร และระหว่างแผ่นทั้งสองเป็นสุญญากาศ ดังแสดงในรูป 2.14



รูป 2.14 ตัวเก็บแบบแผ่นขนาน [25]

เมื่อมีศักย์ไฟฟ้า V คร่อมแผ่นขนานโดยที่แผ่นโลหะแผ่นหนึ่งจะเป็นแผ่นประจุ $+Q$ และอีกแผ่นหนึ่งจะเป็นประจุ $-Q$ ค่าประจุนี้จะเป็นสัดส่วนกับศักย์ไฟฟ้า ดังสมการ (2.5)

$$Q = CV \quad (2.5)$$

หรือ $C = \frac{Q}{V}$

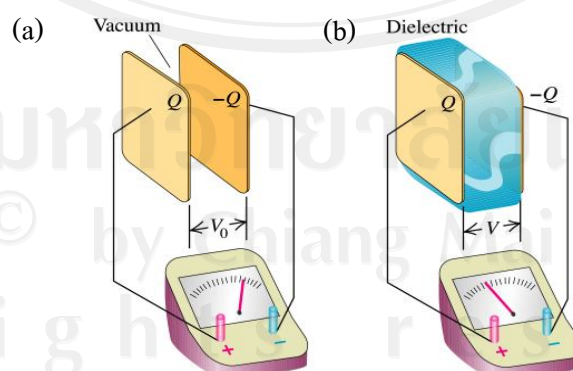
เมื่อ C คือ ค่าความจุ (Capacitance) มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อโวลต์ (C/V) หรือฟารัด (F)

ความจุไฟฟ้าบอกถึงความสามารถในการเก็บประจุ ยิ่งมีความจุไฟฟ้ามากเท่าใดยิ่งเก็บประจุได้มากเท่านั้น ถ้าหากตัวเก็บประจุมีขนาดพื้นที่ขนานมากกว่าระยะห่างระหว่างแผ่นขนานมากๆ จะสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าดังสมการ (2.6)

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.6)$$

เมื่อ ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ ซึ่งเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

ในกรณีที่มีสารไดอิเล็กทริกวางอยู่ระหว่างแผ่นขนานดังรูป 2.15 ความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าซึ่งเท่ากับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity: ϵ_r) นิยมเรียกกันว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของสารไดอิเล็กทริก



รูป 2.15 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานสองตัวสารไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลางและอีกตัวหนึ่งเป็นสุญญากาศ (a) มีสุญญากาศอยู่ตรงกลาง และ (b) มีสารไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลาง [26]

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.7)

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.7)$$

โดยค่า ϵ_r เป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพและความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของสารไดอิเล็กทริกนั้นๆว่ามีค่าเป็นกี่เท่าของสุญญากาศ ความสามารถในการเก็บประจุแปรผันตรงกับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และรูปทรงของตัวเก็บประจุ ดังนั้นการเก็บประจุไฟฟ้าที่สมบูรณ์ที่สุดวัสดุจะต้องไม่สามารถนำไฟฟ้าเลยเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าตรง นั่นคือ จะต้องไม่มีสภาพนำไฟฟ้าหรือความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติแล้วสารไดอิเล็กทริกที่ใช้งานจะมีค่าความต้านทานไม่เป็นอนันต์ จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในปริมาณเล็กน้อยที่เรียกว่า กระแสรั่ว (Leakage current) เกิดขึ้น

2.2.6 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss, $\tan \delta$) [15,18]

เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ พฤติกรรมวัสดุจะแตกต่างออกไปจากเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้ากระแสสลับ สนามไฟฟ้าจะสลับตามรูปแบบของคลื่นไซน์ ดังนั้นเมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับแก่วัสดุไดอิเล็กทริก ไดโพลภายในวัสดุไดอิเล็กทริกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลับไปมาตามความถี่ของสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่ให้ โดยที่ความถี่สูงไดโพลจะกลับตัวไม่ทันกับสนามไฟฟ้าที่ให้ ส่งผลให้เกิด Relaxation ขึ้นหรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุสารไดอิเล็กทริก ไดโพลในสารวัสดุไดอิเล็กทริกจะใช้พลังงานที่ให้การกลับตัวไปมา แต่เมื่อความถี่สูงไดโพลกลับไม่ทันจึงทำให้ไม่กลับตัว แต่ยังคงรับพลังงานจากสนามไฟฟ้าอยู่ พลังงานที่สารได้รับจะค่อยๆ สะสมเกิดเป็นความร้อนขึ้นเกิดเป็นการสูญเสียในวัสดุสารไดอิเล็กทริก

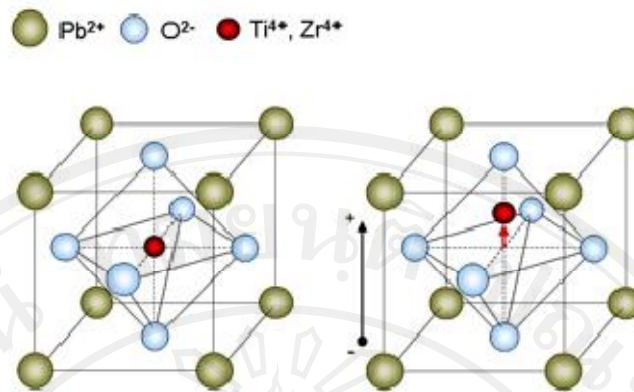
เมื่อพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิต่อค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก โดยทั่วไปแล้วค่านี้ควรจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งการที่เพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกนี้ มีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่ว นั่นคือ เกิดการลดลงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของสารไดอิเล็กทริก แต่ยังมีสาเหตุอื่น ๆ อีกที่ต้องนำมาพิจารณาร่วมกันคือ

- 1) การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไม่ถึงอนันต์
- 2) การสูญเสียเนื่องจาก Dipole relaxation
- 3) การสูญเสียเนื่องจาก Electron polarization
- 4) การสูญเสียเนื่องจากการสั่นของไอออน

สาเหตุในข้อ 3) และ 4) นั้น จะเกิดในย่านความถี่สูง ๆ เท่านั้น และสาเหตุสำคัญที่เกิดความสูญเสียในช่วงความถี่ต่างๆ มักมาจากสาเหตุในข้อ 1) และ 2) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ จะขึ้นกับประเภทของสารไดอิเล็กทริก ในสารประเภทมีขั้วนั้นจะมีการสูญเสียเนื่องจาก Dipole relaxation และการนำไฟฟ้า ซึ่งจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

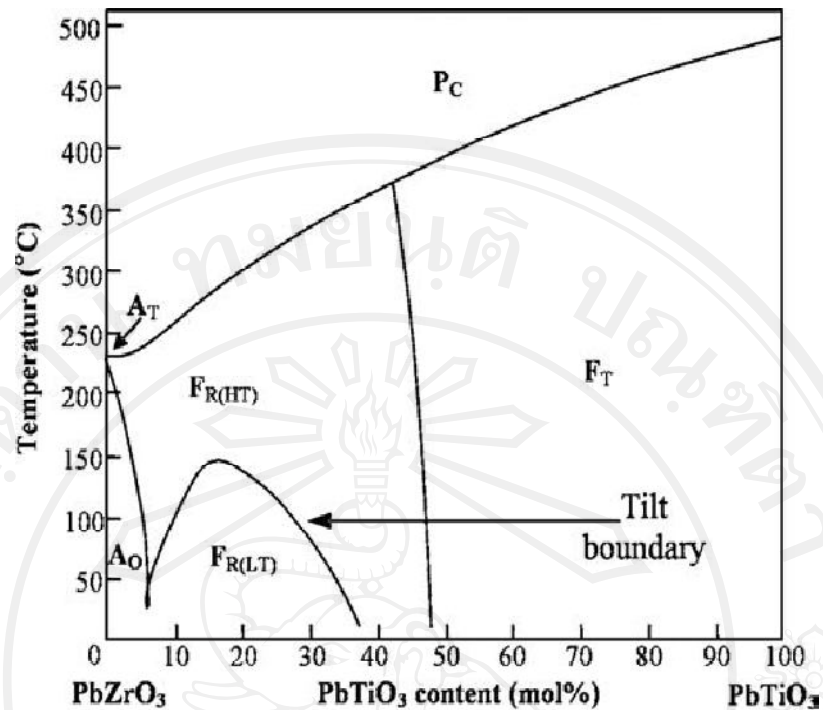
2.4 เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (Lead Zirconate Titanate, PZT) [16, 27]

เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (Lead Zirconate Titanate: $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$) หรือที่เรียกอย่างย่อว่า PZT จัดเป็นสารเพียโซอิเล็กทริก โดยสาร PZT เกิดขึ้นจากการรวมตัวระหว่าง PbZrO_3 และ PbTiO_3 ซึ่งที่อุณหภูมิห้อง PbZrO_3 บริสุทธิ์จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic) และเตตระโกนอล (Tetragonal) โดยมีสมบัติแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Antiferroelectric orthorhombic structure: A_0 และ Antiferroelectric tetragonal structure: A_T) กล่าวคือ แต่ละเซลล์จะมีโพลาไรเซชันเรียงตัวในทิศตรงข้ามกันเป็นผลให้โพลาไรเซชันสุทธิในวัสดุแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่ PbTiO_3 บริสุทธิ์จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล ซึ่งมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric tetragonal structures: F_T) โดยจะมีโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเองตามทิศ [001] ในกรณีที่มีอัตราส่วน $\text{Zr}:\text{Ti} = 0.52:0.48$ จะมีอุณหภูมิคูรีประมาณ 390 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite structure) ซึ่งมีสูตรทั่วไปคือ ABO_3 เป็นสารที่แสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) ที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอม A และอะตอม B แบบออกไซด์ที่ซับซ้อน (Complex oxides) ซึ่งลักษณะนี้เป็นการรวมกันระหว่างประจุบวกไอออน (Cation) และประจุลบไอออน (Anion) เป็นโครงสร้างลูกบาศก์แบบชิดสุด (Cubic close pack) ซึ่งไอออน Ti^{4+} และ Zr^{4+} จะแบ่งกันอยู่ ณ ตำแหน่ง B-site ของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ โดยที่ B-site อยู่ตรงกลาง A-site เป็นอะตอมที่อยู่ออกตระฮีดรอล (Octahedral) ของ B-site คือ มีอะตอมของตะกั่วอยู่ที่มุมทั้ง 8 ของลูกบาศก์ มีอะตอมของออกซิเจนอยู่กึ่งกลางของแต่ละหน้าทั้ง 6 ด้านและมีอะตอมของไทเทเนียมและเซอร์โคเนียมอยู่กลางลูกบาศก์ โดยเกาะกันกับอะตอมออกซิเจนรอบๆ แบบออกตะฮีดรอลของ TiO_6 หรือ ZrO_6 ดังรูป 2.16



รูป 2.16 โครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ของเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต [28]

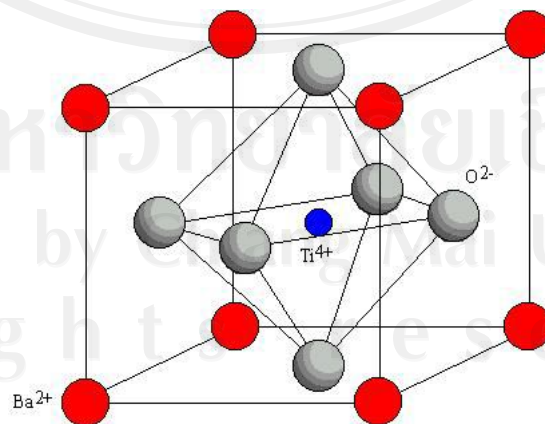
ณ อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี PZT จะมีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์แบบลูกบาศก์ (Cubic perovskite structure) ส่งผลให้แสดงสมบัติพาราอิเล็กทริก และเมื่อมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างลูกบาศก์จะเปลี่ยนไปเป็นเตตระโกนอนหรือรอมโบฮีดรอล (Rhombohedral) ซึ่งส่งผลทำให้สมบัติพาราอิเล็กทริกเปลี่ยนเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกด้วย เมื่อพิจารณาทิศทางการเกิดเฟสเตตระโกนอนจะมีโพลาริเซชันแบบต่อเนื่องไปในทิศทาง (100) และสำหรับเฟสรอมโบฮีดรอลจะมีโพลาริเซชันไปในทิศ (111) จากเฟสไดอะแกรมรูป 2.17 เมื่อพิจารณา ณ อัตราส่วน Zr/Ti เท่ากับ 52/48 พบว่าอยู่บนเส้น Morphotropic Phase Boundary (MPB) ซึ่งสารที่บริเวณนี้จะแสดงสมบัติของเฟอร์โรอิเล็กทริกที่เด่นชัดที่สุด เนื่องจากมีโครงสร้าง 2 ชนิด คือ เตตระโกนอนและรอมโบฮีดรอล อุณหภูมิห้อง ณ บริเวณขอบเขต MPB มีการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริก รอมโบฮีดรอล ที่อุณหภูมิสูง (Ferroelectric rhombohedral structure: $F_{R(HT)}$) ไปเป็นเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริก รอมโบฮีดรอล ที่อุณหภูมิต่ำ (Ferroelectric rhombohedral structure: $F_{R(LT)}$) โดยทั้ง 2 เฟสนี้มีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองตามทิศ [111] ส่งผลให้ PZT ณ ส่วนผสม MPB แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ดีที่สุดด้วย



รูป 2.17 เฟสไดอะแกรมของระบบ PbZrO_3 - PbTiO_3 [24]

2.5 แบเรียมไทเทเนต (Barium titanate: BT) [18]

แบเรียมไทเทเนตเป็น สารประกอบประเภทไทเทเนตที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก มีโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ มีสูตรทั่วไปเป็น ABO_3 และสูตรโมเลกุลเป็น BaTiO_3 ดังแสดงดังรูป 2.18 โครงสร้างของผลึกของแบเรียมไทเทเนตขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นอย่างมาก

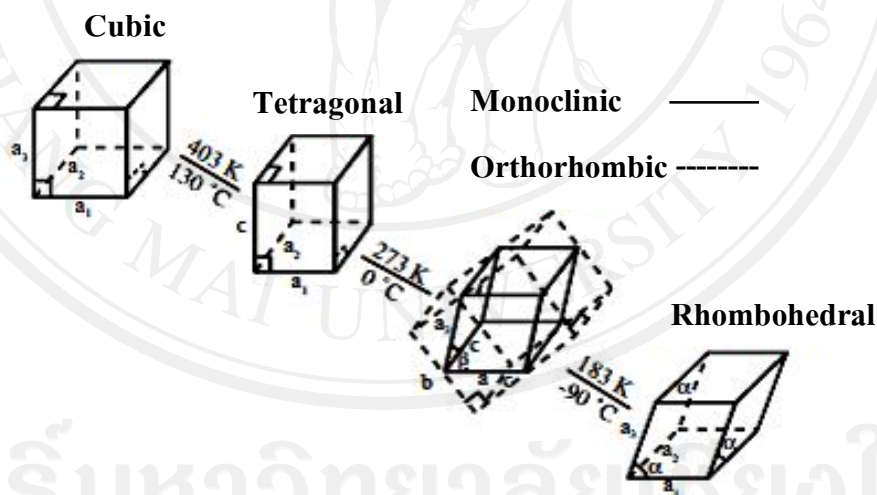


รูป 2.18 โครงสร้างผลึกของแบเรียมไทเทเนต (BaTiO_3) [29]

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของแบเรียมไทเทเนต พบว่า ที่อุณหภูมิคูรี (ประมาณ 130 องศาเซลเซียส) มีหน่วยเซลล์เป็นลูกบาศก์ (Cubic) แต่ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างเกิดการบิดเบี้ยวเล็กน้อยไปเป็นเตตระโกนอล ทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ในทิศทางแกน C และเมื่ออุณหภูมิต่ำลงอีกจะเปลี่ยนรูปโครงสร้างเป็นออร์ทอโรมบิก และโครงสร้างรอมโบฮีดรอล ตามลำดับ ดังตาราง 2.2 และ รูป 2.19

ตาราง 2.2 โครงสร้างผลึกของแบเรียมไทเทเนตในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

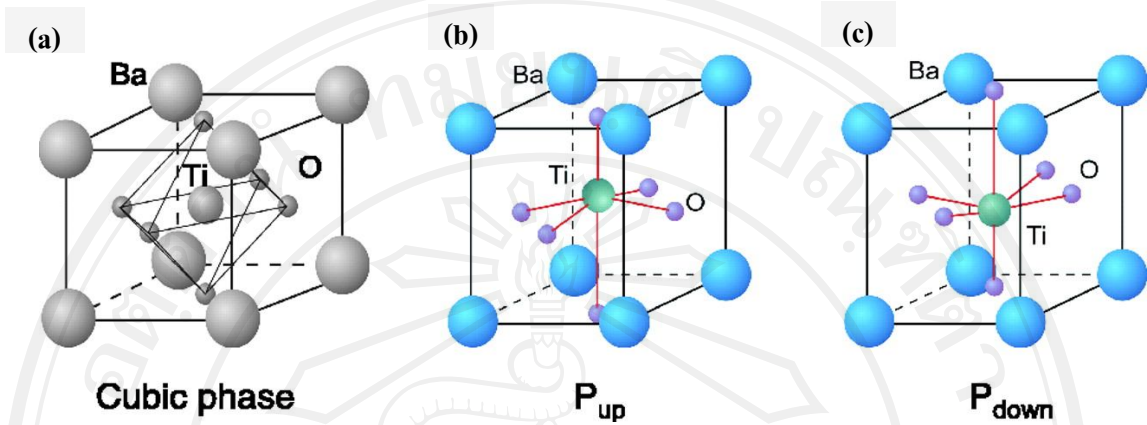
ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) °C	โครงสร้างผลึก
< -90	รอมโบฮีดรอล
ตั้งแต่ -90 ถึง 0	ออร์ทอโรมบิก
สูงกว่า 0 ถึง 130	เตตระโกนอล
>130	ลูกบาศก์



รูป 2.19 การเปลี่ยนแปลงชนิดเซลล์ของผลึกเดี่ยว BaTiO₃ [30]

ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีแบเรียมไทเทเนตเป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริก เนื่องจากมีโพลาริเซชันทางไฟฟ้าในตัวเอง และสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ โดยพบว่าแบเรียมอออน (Ba⁴⁺) และไทเทเนียมอออน (Ti⁴⁺) มีการเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิมเล็กน้อยเมื่อเทียบกับออกซิเจน (O²⁻) ดังแสดงในรูป 2.20 ทำให้เกิดโพลาริเซชันขึ้นในตัวของมันเอง โดยที่สารนั้นไม่ได้รับ

อิทธิพลจากภายนอก เช่น สนามไฟฟ้าที่มากระทำต่อสาร ดังนั้นไอออนบวกและไอออนลบในสารจะมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกัน ทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์อย่างถาวร

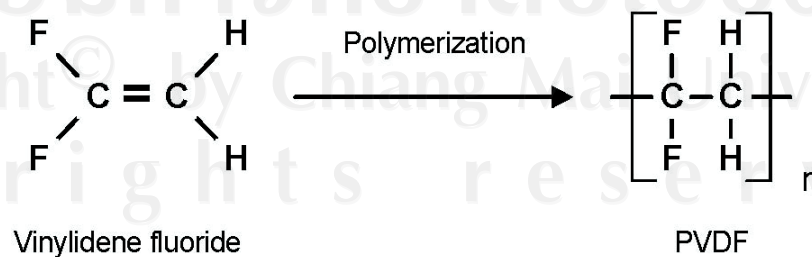


รูป 2.20 การเลื่อนตำแหน่งของอะตอมในแบเรียมไทเทเนต (BaTiO_3) โดยที่ (a) อุนหุมิสูงกว่าอุนหุมิคูรี (b) และ (c) อุนหุมิต่ำกว่าอุนหุมิคูรี [31]

2.6 พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ [32-34]

ในปี ค.ศ. 1969 Kawai ได้ทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง ซึ่งพบว่า มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกสูง พอลิเมอร์ชนิดนี้ คือ พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ Poly(vinylidene fluoride) หรือเรียกว่า PVDF

PVDF เป็นวัสดุพลาสติกชนิดพิเศษในตระกูลฟลูออโรพอลิเมอร์ (Fluoropolymer) เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) มีสูตรเคมี คือ $(-\text{CH}_2-\text{CF}_2-)_n$ เตรียมได้จากปฏิกิริยาการเติมของหน่วยมอนอเมอร์ไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Vinylidene fluoride monomer) ต่อกันเป็นสายโซ่ยาว ดังรูป 2.21

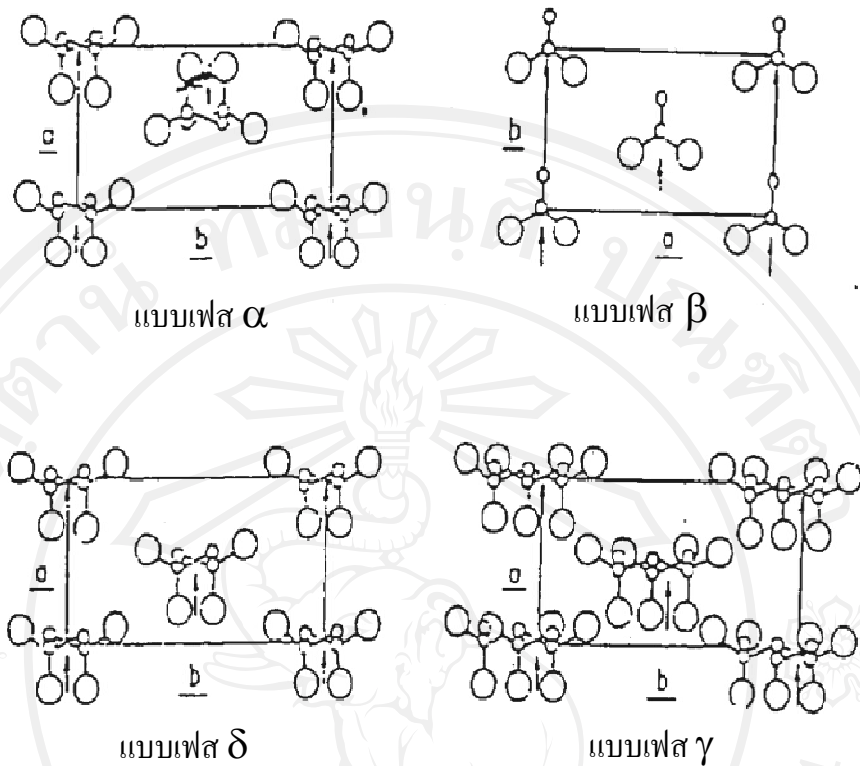


รูป 2.21 การสังเคราะห์พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) [35]

โดยทั่วไป PVDF จะถูกใช้ในงานที่ต้องการความบริสุทธิ์ มีความแข็งแรงสูง PVDF มีความสามารถในการต้านทานตัวทำละลาย กรด เบส และความร้อน เมื่อเทียบกับฟลูออโรพอลิเมอร์ (Fluoropolymers) อื่น ๆ นอกจากนี้ยังสามารถหลอมเหลวได้ง่ายเพราะจุดหลอมเหลวก่อนข้างต่ำ ประมาณ 177 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นค่าประมาณ 1.78 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีต้นทุนที่ต่ำเมื่อเทียบกับฟลูออโรพอลิเมอร์อื่น ๆ

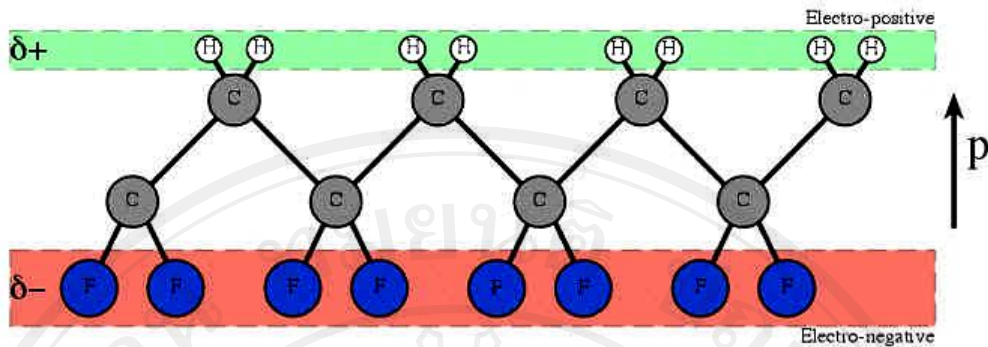
PVDF มีความเป็นผลึกอยู่ประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ โดยมีโครงสร้างผลึกอยู่ 4 รูปแบบ (ดังรูป 2.22) คือ

- 1) โครงสร้างผลึกแบบ II หรือแบบเฟส α ได้จากการตกผลึกของ PVDF ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก (Monoclinic structure) มีไดโพลโมเมนต์ที่มีองค์ประกอบทั้งแนวตั้งฉากและขนานกับสายโซ่โมเลกุล แต่ไดโพลโมเมนต์ของโมเลกุล 2 สายโซ่มีทิศทางตรงข้ามกัน ทำให้ผลึกแบบนี้ไม่มีโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเอง
- 2) โครงสร้างผลึกแบบ I หรือแบบเฟส β ได้จากการยืดฟิล์ม PVDF ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอโทรมบิก แต่ละหน่วยผลึกมีไดโพลสุทธิ (Net dipole) และจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ทำให้โพลาไรเซชันสุทธิเป็นศูนย์ จึงต้องทำการโพลด้วยสนามไฟฟ้าที่สูง ที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ในเวลาหลายชั่วโมง จะทำให้ฟิล์ม PVDF มีโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเองเกิดเพียงโซอิเล็กทริกได้
- 3) โครงสร้างผลึกแบบเฟส γ ได้จากการตกผลึก PVDF เหลว ภายใต้อุณหภูมิความดันบรรยากาศ และที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว ผลึกมีไดโพลสุทธิ
- 4) โครงสร้างผลึกแบบเฟส δ ได้จากการจัดจั่นด้วยสนามไฟฟ้าของฟิล์ม PVDF ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฟส α ผลึกแต่ละหน่วยมีไดโพลสุทธิ และมีโพลาไรเซชัน 4/7 เท่าของโครงสร้างผลึกแบบเฟส β



รูป 2.22 โครงสร้างผลึกของ PVDF [34]

แผ่นฟิล์ม PVDF ที่ผลิตในครั้งแรก จะมีผลึกแบบไม่มีขั้วปนอยู่ในออสถานฐาน (Amorphous) มาก ทำให้แผ่นฟิล์ม PVDF ไม่มีสภาพเพียโซอิเล็กทริก หลังจากการทำให้เปลี่ยนโครงสร้างโดยการยืดและทำการโพลดรูป 2.23 ด้วยสนามไฟฟ้าที่สูงทำให้แผ่นฟิล์ม PVDF มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก โครงสร้างผลึกแบบเฟส β จะมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกสูงสุด แผ่นฟิล์ม PVDF ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฟส β ปนอยู่สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การยืด การอบ การจัดขั้ว เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างผลึกแต่ละแบบสามารถเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างกันได้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต



รูป 2.23 การยืดและการโพลาไรซ์ฟิล์ม PVDF เฟส β [36]

การประยุกต์ใช้PVDFโดยทั่วไป

- 1) การทดสอบการตอบสนองพลวัต (Dynamic response) ของวัสดุผสม
- 2) Pressure pick ups: การกระจายตัวของความดันบนพื้นผิว อุปกรณ์วัดความเร่งหรือการสั่นสะเทือน (Accelerometers) กี๊ย์บอร์ด
- 3) ส่วนประกอบในอุปกรณ์ไฟฟ้า (Electrical Components): สวิตช์ (Switches) พัดลมไฟฟ้าขนาดเล็ก (Miniature electric fan)
- 4) Acoustic Components: ไมโครโฟน เครื่องตรวจจับคลื่นความถี่ (Ultrasonic detector) ไฮโดรโฟน โซนาร์
- 5) อุปกรณ์ออปติก (Optical Devices): การวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเลเซอร์ การเปลี่ยนแปลงของกระจก (Variable mirrors)

2.7 วัสดุคอมโพสิต (Composite materials) [37]

คอมโพสิต เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยการรวมวัสดุตั้งแต่ 2 ประเภทเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปคอมโพสิตจะมีวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (Matrix) และวัสดุเสริมแรง (Reinforcement materials) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักนั้น วัสดุที่เป็นเนื้อหลักจะรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลักให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก (Base materials) อย่างโลหะ เซรามิก หรือพอลิเมอร์ ผลของการรวมวัสดุต่างกัน 2 ประเภทเข้าด้วยกันทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงโดยรวมมากกว่าเมื่อเทียบกับความแข็งแรงของวัสดุแต่ละประเภทโดยลำพัง ปัจจุบันวัสดุคอมโพสิตแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer matrix composites, PMC's)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่พบเห็นได้ง่ายของคอมโพสิตกลุ่มนี้คือ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจาก “ไฟเบอร์กลาส” ต่าง ๆ พอลิเมอร์คอมโพสิตมีพอลิเมอร์ซึ่งอาจจะเป็นพลาสติกหรือยางเป็นเนื้อหลัก และใช้วัสดุเสริมแรงได้หลายชนิด เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และเส้นลวดโลหะ เป็นต้น

ข้อดี : น้ำหนักเบา

ข้อเสีย : ความแข็งแรงต่ำ ทนความร้อนสูงไม่ได้ ไม่นำไฟฟ้า

2. เซรามิกคอมโพสิต (Ceramic matrix composites, CMC's)

คอมโพสิตกลุ่มนี้รู้จักและคุ้นเคย คือ คอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปูน กรวด ทราย เหล็กเส้น) เป็นตัวแทนที่พบเห็นได้ทั่วไปของวัสดุกลุ่มนี้ ขณะที่วัสดุเซรามิกคอมโพสิตรุดหน้า (Advanced composite) มีเนื้อหลักเป็นเซรามิกและใช้วัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใย คอมโพสิตกลุ่มนี้มักนำมาใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เช่น กังหันใบพัดของเครื่องยนต์ไอพ่น เป็นต้น

ข้อดี : มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการสึกหรอและการสึกกร่อนได้ดี ทนความร้อนได้ดี

ข้อเสีย : เปราะ มีความเหนียวต่ำ

3. เมทัลคอมโพสิต (Metal matrix composites, MMC's)

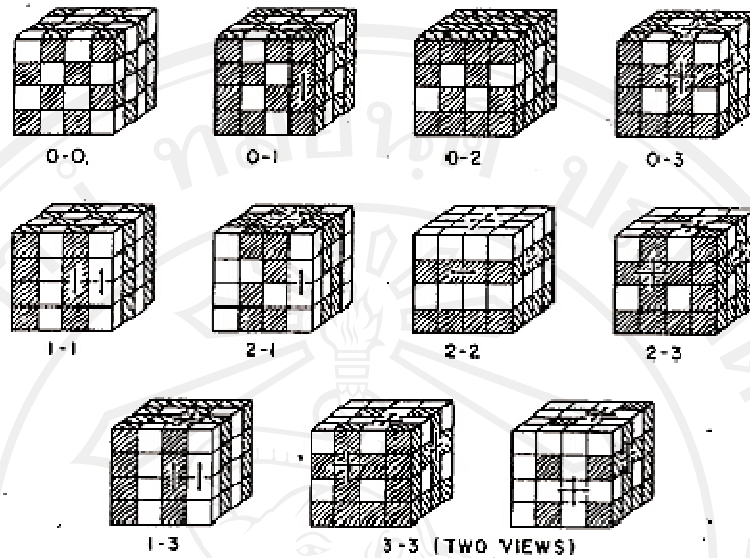
คอมโพสิตกลุ่มนี้พบมากในผลิตภัณฑ์กลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ เมทัลคอมโพสิตมีโลหะเป็นเนื้อหลัก เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น สำหรับวัสดุเสริมแรงของคอมโพสิตกลุ่มนี้เป็นวัสดุเซรามิก เช่น กลุ่มคาร์ไบด์ และกลุ่มไนไตรด์ เป็นต้น

ข้อดี : โลหะจะมีความแข็งแรงและมีความเหนียวสูง แก๊สสามารถซึมผ่านเนื้อโลหะได้ยาก มีการนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี

ข้อเสีย : เป็นสนิมง่ายและหนัก

2.8 การเรียงติดกันของวัสดุคอมโพสิต [38]

ในการเลือกเฟสของวัสดุคอมโพสิตแต่ละเฟส เพื่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน หรือสมบัติทางไฟฟ้า สัมพันธ์กับปริมาณ และรูปแบบการเรียงติดกันของแต่ละเฟส แนวความคิดของการเรียงติดกันถูกนำมาใช้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตโดย Newnham การเรียงติดกันอธิบายรูปแบบของแต่ละเฟสในวัสดุคอมโพสิต หากพิจารณาการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสที่มีการเรียงตัวติดกันใน 3 มิติ สำหรับวัสดุคอมโพสิตที่มี 2 เฟสนั้น สามารถจัดเรียงติดกันได้ 10 แบบ คือ 0-0, 0-1, 0-2, 0-3, 1-1, 1-2, 2-2, 1-3, 2-3 และ 3-3 ดังรูป 2.24 โดยตัวเลขตัวแรกจะบอกถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริก ส่วนเลขตัวหลังจะบอกถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่เป็นเมทริก



รูป 2.24 รูปแบบการเชื่อมต่อเฟสแบบต่างๆของวัสดุคอมโพสิตที่มี 2 เฟส [38]

วัสดุคอมโพสิตแบบที่มีรูปแบบง่ายที่สุดคือ แบบ 0-3 เป็นลักษณะของผงเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกกระจายอยู่ในเมทริกพอลิเมอร์ (Polymer matrix) พอลิเมอร์มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) แต่ผงเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกมีโครงสร้างเป็นผลึกทำให้โครงสร้างในวัสดุคอมโพสิตแบบ 0-3 ก่อนข้างจะคล้ายกับโครงสร้างของ PVDF ในแง่ทั้งสองมีเฟสที่เป็นผลึก (Crystalline phase) กระจายอยู่ในเมทริกอสัณฐาน (Amorphous matrix) ข้อดีที่สำคัญของวัสดุคอมโพสิตแบบ 0-3 คือขึ้นรูปเป็นรูปร่างแบบต่างๆ ได้ง่าย เช่น การทำเป็นแผ่นบาง การทำเป็นเส้นใย นอกจากนี้ยังสามารถเตรียมได้ในปริมาณมาก (Mass produced) ในการประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่

2.9 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

เชิดศักดิ์ แซ่ลี [39] ได้เตรียมวัสดุคอมโพสิต แบบ 0-3 ระหว่าง PZT กับพอลิเอทิลีน โดยวิธีอัดรีดแผ่น (Calendering method) แล้วอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดและผงเซรามิกเตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) เพลแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทำการศึกษาสมบัติต่างๆ พบว่า คอมโพสิตที่เตรียมได้มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและไดอิเล็กทริกสัมพันธ์กับปริมาตรของ PZT สำหรับคอมโพสิตที่เติม PZT 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ได้ 14.5 pC/N และ 18.8 ตามลำดับ โดยที่ค่า d_{33} ของ PZT วัดได้ 173 pC/N และค่า ϵ_r ของ PZT และพอลิเอทิลีน เท่ากับ 410 และ 4 ตามลำดับ

ศนิ บุญญกุล [22] ศึกษาการเตรียมคอมโพสิตระหว่าง PZT กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ซึ่งใช้ PZT ที่มีขนาด 36-316 ไมครอน นำมาผสมกับพอลิเอทิลีนโดยวิธีอัดรีดแผ่น (Calendering method) โดย PZT ถูกเตรียมขึ้นจากวิธีการ Mixed oxide จากการทดลอง พบว่า ขนาดของผง PZT มีผลต่อสมบัติกายภาพและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของคอมโพสิต โดยเมื่อขนาดผงเซรามิกเพิ่มขึ้น ค่า d_{33} ของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยที่ค่า d_{33} สูงสุด เท่ากับ 19.2 pC/N นอกจากนี้ยังพบว่าสมบัติเพียโซอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการโพลอีกด้วย

ธนพงศ์ สารอินทร์ [16] ศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกบิสมัทโซเดียมไทเทเนต (Bismuth sodium titanate) หรือ บีเอ็นที (BNT) กับอีพอกซีเรซินโดยใช้เทคนิคซัคชั่น (Suction method) สารเพียโซเซรามิกบีเอ็นทีซึ่งประกอบเป็น $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ ถูกเตรียมขึ้นโดยใช้เทคนิคการผสมแบบดั้งเดิม ซึ่งทำการเพลแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และเผาซินเตอร์ผงเซรามิกบีเอ็นทีที่อุณหภูมิ 1,075 องศาเซลเซียส ทำการผสมผงเซรามิกบีเอ็นทีกับอีพอกซีเรซินเป็นวัสดุคอมโพสิตแบบ 0-3 และทำการทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่า ปริมาณผงเซรามิกบีเอ็นทีในอีพอกซีเรซินที่สามารถขึ้นรูปได้สูงสุด คือ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และพบว่า ค่า d_{33} เพิ่มขึ้นตามขนาดอนุภาคที่เพิ่มขึ้น โดยอนุภาคขนาด 300-850 ไมครอน ให้ค่า d_{33} สูงสุด คือ 27 pC/N

Chen และคณะ [40] ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PZT กับพอลิเมอร์ชนิด Hydrogenated C5 aliphatic hydrocarbon tackifying resin โดยเตรียม PZT โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) และ PZT รูพรุนเตรียมโดยผสมผง PZT กับผงพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) และเตรียมวัสดุคอมโพสิตโดยวิธีแทรกซึมพอลิเมอร์เหลวเข้าไปในรูพรุนของ PZT รูพรุน จากการศึกษพบว่า เมื่อปริมาณของ PZT เซรามิกลดลง ค่าคงที่ไดอิเล็ก-

ทริกและค่า d_{33} ของวัสดุคอมโพสิตมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าที่สัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกที่เท่ากัน วัสดุคอมโพสิตแผ่นแน่น (Sheet) มีความทนต่อการแตกหัก (Fracture strength) สูงกว่า วัสดุคอมโพสิตรูพรุน พอลิเมอร์และวัสดุคอมโพสิตชนิดนี้เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุตรวจวัด (Sensors) และแอคชูเอเตอร์ (Actuators)

Ploss และคณะ [41] ศึกษาขั้นตอนการโพลของวัสดุคอมโพสิตระหว่างสารเซรามิก PZT กับไวนิลิดีนฟลูออไรด์-ไตรฟลูออโรเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (P(VDF-TrFE)) โดยเตรียมคอมโพสิตด้วยวิธีการหล่อด้วยตัวทำละลายแล้วตามด้วยเทคนิคการกดอัด (Compression moulding) จากการศึกษาพบว่า การโพลวัสดุคอมโพสิตในแต่ละขั้นตอน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิต และการเพิ่มอุณหภูมิหรือการเพิ่มสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการโพล จะมีผลทำให้ค่า d_{33} ของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อปริมาณสารเซรามิก PZT เพิ่มขึ้นสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิตดีขึ้น

Chan และคณะ [42] เตรียมวัสดุคอมโพสิต แบบ 0-3 ระหว่างเลดไทเทเนตเซรามิก (PbTiO_3 หรือ PT) และไวนิลิดีนฟลูออไรด์-ไตรฟลูออโรเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (P(VDF-TrFE)) โดยเตรียมเลดไทเทเนตเตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจล ทำให้ได้ผงเซรามิกที่มีขนาดเล็ก (Nanocrystalline powder) เผาปิ้ง (Annealing) ผงเซรามิกฟิที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และเตรียมวัสดุคอมโพสิตแบบ 0-3 ชนิดฟิล์มบางที่มีผงเซรามิกฟิที่กระจายอยู่ในพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคแบบหมุน (Spin-coating technique) และได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์สภาพยอม (Permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก พบว่าเมื่อปริมาณผงเซรามิกเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น

Rujijanagul และคณะ [43] ได้เตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างเลดไทเทเนตที่มีการปรับปรุง ($\text{Pb}_{0.88}\text{Sr}_{0.12}\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.44}\text{Sb}_{0.02}\text{O}_3$) กับพอลิเอทิลีน โดยเตรียมเลดไทเทเนตด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งและเตรียมวัสดุคอมโพสิตด้วยวิธีการรีดแผ่น และได้ศึกษาอิทธิพลของการเติมอนุภาคแกรไฟต์ต่อสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิต จากการศึกษาพบว่า เมื่ออนุภาคของเซรามิกที่มีการปรับปรุงมีขนาดเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้น และยังพบอีกว่าขนาดของอนุภาคแกรไฟต์มีผลต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิต โดยวัสดุคอมโพสิตที่เติมอนุภาคแกรไฟต์ขนาดเล็กมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกสูงกว่าวัสดุคอมโพสิตที่เติมอนุภาคแกรไฟต์ขนาดใหญ่

Lam และคณะ [44] ศึกษาสภาวะการโพลวัสดุคอมโพสิตแบบ 0-3 ระหว่างบิสมิทโซเดียม-แบเรียมไทเทเนต ($(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})_{0.94}\text{Ba}_{0.06}\text{TiO}_3$ หรือ BNBT) และไวนิลิดีนฟลูออไรด์-ไตรฟลูออโรเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (P(VDF-TrFE)) ต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิต พบว่าการโพลที่

อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสและใช้ความแรงสนามไฟฟ้า 50 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร เป็นเวลา 30 นาที ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ที่เหมาะสมที่สุด

Yang และคณะ [45] ได้เตรียมวัสดุคอมโพสิตอิเล็กทริกฟิล์มระหว่างพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) กับซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) โดยกระบวนการโซล-เจล (Sol-gel) และศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิต พบว่าวัสดุคอมโพสิตอิเล็กทริกที่เตรียมได้มีความยืดหยุ่นและมีสมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ดีเยี่ยมเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้ในทรานสดิวเซอร์และตัวตรวจวัดอิเล็กทริก

Liu และคณะ [46] ได้ศึกษาสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและไดอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิตระหว่างพีแซดทีเซรามิกและพอลิไวนิลคลอไรด์ และเติมแกรไฟต์ในวัสดุคอมโพสิตโดยเตรียมวัสดุคอมโพสิตด้วยเทคนิคกดอัดร้อน (Hot-pressing) จากการศึกษา พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่เติมแกรไฟต์โดยสัดส่วนของปริมาตร เท่ากับ 0.005 มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่เหมาะสมที่สุดซึ่งสูงกว่าวัสดุคอมโพสิตที่ไม่เติมแกรไฟต์ถึง 50 เปอร์เซ็นต์