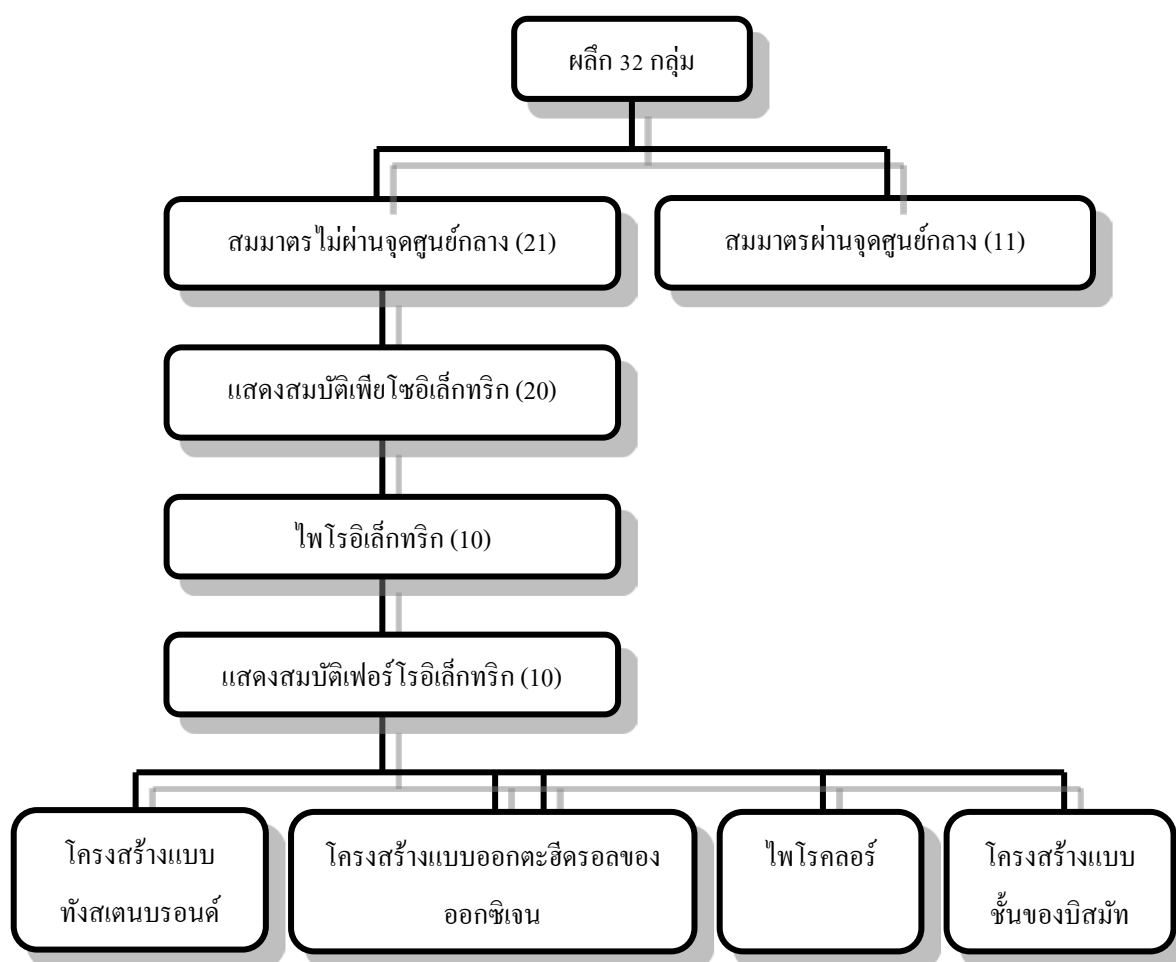


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric Material) [1, 2]

ปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริก เป็นปรากฏการณ์ของผลึกที่สามารถเกิดการโพลาไรเซชันได้เอง โดยที่ไม่มีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก ซึ่งการโพลาไรเซชันนี้สามารถที่จะสลับขั้วไปในทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้เข้าไปได้ เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าภายนอกที่เหมาะสม



ภาพที่ 2.1 ก เซรามิกเพอร์อฟสไกต์ ใช้พื้นฐานสมมาตรของผลึก [1]

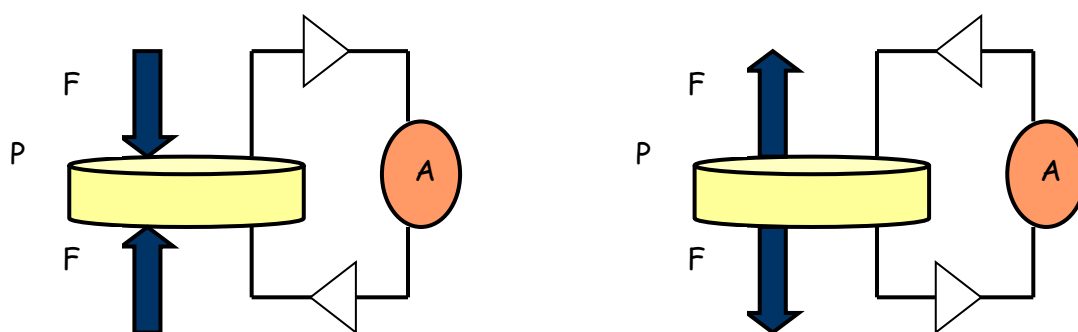
ปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริกนี้ ถูกค้นพบโดย J. Valasek [2] ในปี ค.ศ.1921 ซึ่งพบในผลึกเดี่ยว (Single crystal) ของเกลือโรเชลล์ (Rochelle salt) โดยทั่วไปผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 32 กลุ่มตามความสมมาตร และในจำนวนนี้สามารถแบ่งเป็นผลึกที่มีลักษณะสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง (Centrosymmetry) 11 กลุ่ม และที่มีลักษณะสมมาตรไม่ผ่านจุดศูนย์กลาง (Non-centrosymmetry) อีก 21 กลุ่ม ซึ่งในกลุ่มนี้สามารถแสดงสมบัติที่เป็นเพียโซอิเล็กทริก 20 กลุ่ม และใน 20 กลุ่มนี้มี 10 กลุ่มเท่านั้นที่สามารถแสดงสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ ดังภาพที่ 2.1

2.2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) [1, 2]

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก มีทั้งที่พบในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ โดยวัสดุที่พบในธรรมชาติ ได้แก่ แร่ควอตซ์ แร่ทัวร์มาลีน ส่วนวัสดุสังเคราะห์ ได้แก่ แบเรียมไททาเนต (Barium titanate) เลดไททาเนต (Lead titanate) และเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) เป็นต้น สมบัติเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectricity) ของสาร สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct effect) และสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (Reverse effect)

2.2.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct Effect)

คือสมบัติของสารที่สามารถสร้างประจุไฟฟ้าออกมาที่ผิวหน้า เมื่อมีแรงกด (Stress) มากระทำต่อสาร ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct effect)

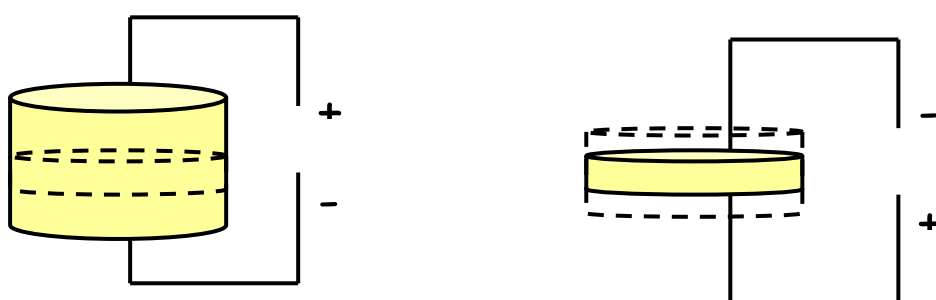
โดยสัญลักษณ์ P แทนเวกเตอร์ของความเป็นขั้วไฟฟ้าในเนื้อสาร (Polarization)

$$\text{จะได้ว่า} \quad D = \frac{Q}{A} = dT \quad (2.1)$$

เมื่อ	T	คือ แรงที่มากระทำต่อพื้นที่หน้าตัด (Stress) (N/m^2)
	D	คือ ความหนาแน่นประจุบนผิวไดอิเล็กทริก (Dielectric displacement)
	Q	คือ ประจุไฟฟ้า (Coulombs: C)
	d	คือ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant) ของสาร (C/N)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของเนื้อสาร (m^2)

2.2.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (Reverse Effect)

สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม เป็นสมบัติของสารที่สามารถยืดหรือหดตัวได้เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (Reverse effect)

สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$S = dE \quad (2.2)$$

เมื่อ S คือ ความเครียดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อสาร (Strain) ($S = \Delta L/L_0$)
 E คือ สนามไฟฟ้า (N/C)

โดยสัญลักษณ์ d สามารถใช้แทนค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกทั้งแบบทางตรงและทางอ้อมได้ เนื่องจากเป็นอัตราส่วนของการเปลี่ยนรูปพลังงาน

จากสมการ 2.1 และ 2.2 เมื่อพิจารณาถึงสมบัติของค่าความยืดหยุ่น (Elastic) และค่าไดอิเล็กทริกของเนื้อสาร สามารถเขียนเป็นสมการเพียโซ อิเล็กทริกได้ดังนี้

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2.3)$$

$$E = s^E T + dE \quad (2.4)$$

เมื่อ D คือ ค่าความหนาแน่นประจุบนผิวไดอิเล็กทริก (Dielectric displacement)
 E คือ สนามไฟฟ้า (N/C)
 T คือ แรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัด (Stress) (N/m^2)
 d คือ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant) ของสาร (C/N)
 ϵ^T คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)
 โดยสัญลักษณ์ด้วย T แทนสถานะที่แรงกดคงที่
 s^E คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของสาร (Elastic coefficient)
 โดยสัญลักษณ์ด้วย E แทนสถานะที่สนามไฟฟ้าคงที่

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้หลากหลาย ขึ้นกับปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลง ในกรณีที่มีการป้อนแรงดันให้วัสดุทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือเกิดแรงกล สามารถนำมาใช้เป็นทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ในอุปกรณ์อัลตราโซนิก (Ultrasonic) ทางการแพทย์ ไมโครโฟน (Microphone) และนำมาใช้เป็นตัวขับเคลื่อน (Actuator) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประกอบที่สำคัญของเครื่องพิมพ์ ชัตเตอร์ (Shutter) ในกล้องถ่ายรูป วาล์วไฮดรอลิก (Hydraulic valve) เป็นต้น และในกรณีให้แรงแก่วัสดุทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า สามารถใช้เป็นอุปกรณ์จุดแก๊ส (Gas ignitor) ในเตาเครื่องทำความร้อน ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ใช้เป็นตัวตรวจวัดความดัน (Pressure sensor) เป็นต้น

2.3 การเกิดโพลาริเซชันตัวเอง (Spontaneous Polarization) [3]

จากการแบ่งกลุ่มผลึก พบว่า มีผลึก 20 กลุ่ม ที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก แต่มีกลุ่มผลึกเพียง 10 กลุ่ม ที่สามารถเกิดโพลาริเซชันตัวเอง ในบรรดาสมมาตร 20 กลุ่มที่แสดง

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก จะมี 10 กลุ่มสมมาตรที่มีเพียงหนึ่งแกนทิศทาง ได้แก่ $1, 2, m, mm2, 4, 4mm, 3, 3m, 6$ และ $6mm$ โดยผลึกที่มีกลุ่มสมมาตรนี้จะมีแกนหมุนเดียวแต่ไม่มีระนาบสะท้อนที่ตั้งฉากกับแกนนี้ ตามแนวแกนหมุนนี้การจัดเรียงอะตอมที่ปลายหนึ่งจะต่างจากปลายอื่น (ปลายตรงข้าม) โดยจะเรียกผลึกนี้ว่าผลึกขั้ว (Polar crystal) ซึ่งแสดงการเกิดโพลาริเซชันตัวเอง (Spontaneous polarization) การเกิดโพลาริเซชันตัวเองคือค่าของโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร หรือค่าของประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนพื้นผิวที่ตั้งฉากกับแกนโพลาริเซชัน โดยส่วนใหญ่แกนของโพลาริเซชันมักอยู่ในแนวเดียวกับแกนผลึก

ถึงแม้ว่าผลึกที่มีแกนขั้วจะแสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก แต่ไม่จำเป็นต้องมีแวกเตอร์ของการเกิดโพลาริเซชันตัวเอง เนื่องจากผลของโมเมนต์ไฟฟ้าตามแกนขั้วทั้งหมดอาจเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงมีเพียงผลึกที่มีแกนขั้วเดียวที่แสดงแวกเตอร์การเกิดโพลาริเซชันตัวเอง (P_S) โดยทั่วไปการเกิดโพลาริเซชันตัวเองนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากประจุบนพื้นผิวของผลึก เนื่องจากประจุนี้ถูกชดเชยด้วยตัวนำภายในหรือภายนอกที่นำกระแสไฟฟ้าหรือโดยประจุนรรอยต่อของผลึกแฝด (Twins)

ผลึกที่แสดงการเกิดโพลาริเซชันตัวเองจะประกอบด้วยไอออนบวกและลบ ในบางช่วงอุณหภูมิ ไอออนนี้จะอยู่ที่ตำแหน่งสมมาตรที่มีพลังงานอิสระของผลึกต่ำสุดและศูนย์กลางของประจุบวกจะไม่ถูกจำกัดด้วยศูนย์กลางของประจุลบ ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกของผลึกเพอโรอิเล็กทริกแบเรียมไททาเนต (Barium titanate) โดยที่เหนืออุณหภูมิคูรี (Curie temperature) ที่ 120°C โครงสร้างผลึกต้นแบบจะเป็นคิวบิก (Cubic) ที่มี Ba^{2+} ไอออนอยู่ที่มุมของลูกบาศก์ O^{2-} ไอออนอยู่ที่กึ่งกลางของหน้าและ Ti^{4+} ไอออนอยู่ที่จุดศูนย์กลางของลูกบาศก์ ดังแสดงในภาพที่ 2.4(ก) และที่ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีโครงสร้างจะผิดรูปไปเล็กน้อย ด้วยการถูกแทนที่ของ Ba^{2+} และ Ti^{4+} ไอออนที่สัมพันธ์กับ O^{2-} ไอออนโดยการสร้างคู่ขั้ว ดังแสดงในภาพที่ 2.4(ข) ดังนั้นจึงอาจเห็นแต่ละคู่ของไอออนบวกและลบเป็นขั้วคู่ไฟฟ้า (Electric dipole) และการเกิดโพลาริเซชันตัวเอง (โมเมนต์ขั้วคู่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร) จะเกิดจากกลุ่มของขั้วคู่นี้ (ที่ชี้ในทิศทางเดียวกัน)

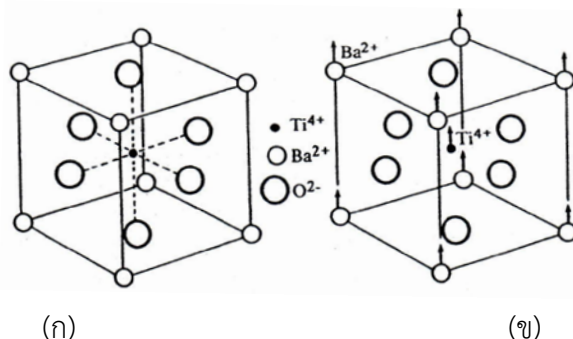
การเปลี่ยนแปลงปริมาณโพลาริเซชันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เรียกว่าปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric effect) ซึ่งปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric effect) ถูกค้นพบในทัวร์มาลีน (Tourmaline) โดย Teophrast (314 ปีก่อนคริสต์ศักราช) และถูกตั้งชื่อโดย Brewster ในปี ค.ศ. 1824 ทฤษฎีเทอร์โมไดนามิก (Thermodynamic theory) แรกถูกแสดงโดย Thompson (ต่อมาคือ Lord Kelvin) ในปี ค.ศ. 1878 และได้รับการพัฒนาโดย Voigt ในปี ค.ศ. 1897 และทฤษฎีควอนตัม (Quantum theory) ในส่วนของไดนามิกแลตทิซของผลึก (Crystal lattice dynamics) และกลศาสตร์ควอนตัม (Quantum mechanics) ได้รับการพัฒนาโดย Born ในปี ค.ศ. 1945

ปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric effect) สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.5

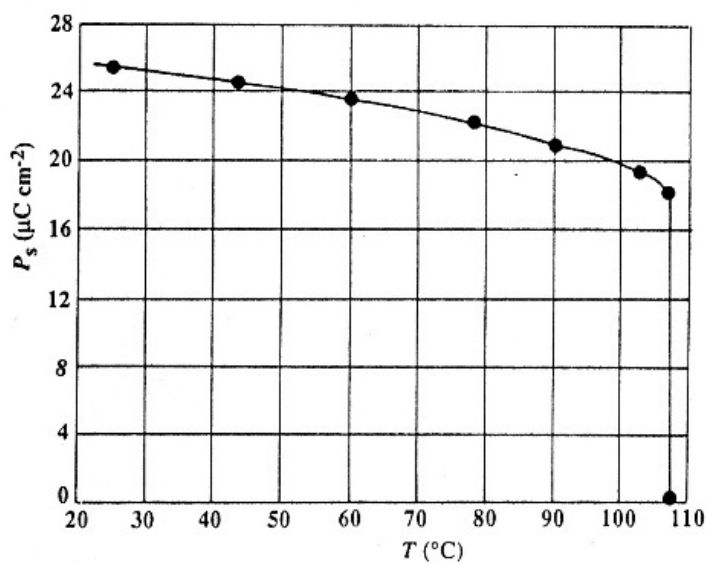
$$\Delta P_S = \pi \Delta T \quad (2.5)$$

เมื่อ ΔP_S คือ ปริมาณการเกิดโพลาริเซชันที่เปลี่ยนแปลงไป ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)
 π คือ ค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric coefficient)
 ΔT คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ($^\circ\text{C}$)

ภาพที่ 2.5 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริกในผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริก BaTiO_3 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจะพบการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นประจุบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ตั้งฉากกับแกน z ในผลึก โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณการเกิดโพลาริเซชันลดลง และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนเป็นศูนย์เมื่อให้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของแบเรียมไททาเนต (โครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์) (ก) เหนืออุณหภูมิคูรีมีโครงสร้างเป็นคิวบิก (ข) ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีมีโครงสร้างเป็นเตตระโกนอลที่มีไอออนของ Ba^{2+} และ Ti^{4+} เคลื่อนที่สัมพันธ์กับไอออนของ O^{2-} [3]

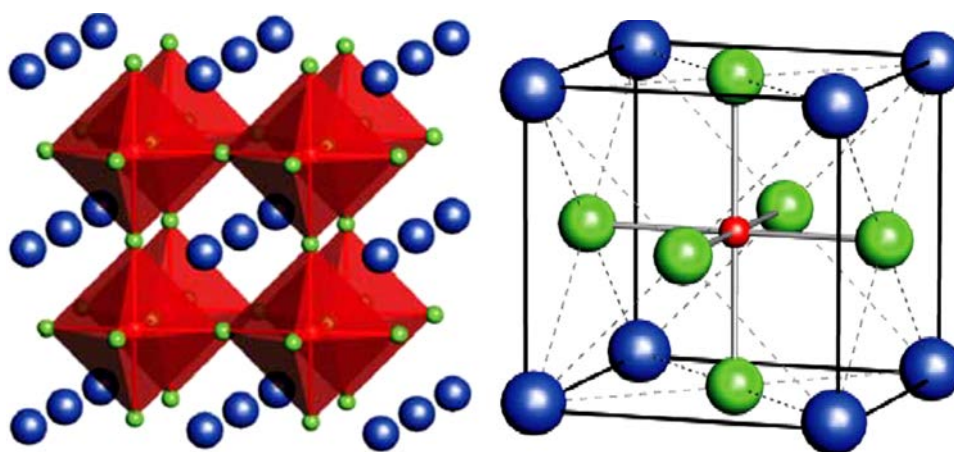


ภาพที่ 2.5 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อปริมาณการเกิดโพลาริเซชันของผลึก BaTiO_3 [3]

ซึ่งมีวัสดุไพโรอิเล็กทริกไม่มากที่มีสมบัติในการสลับขั้วหรือเปลี่ยนทิศทางของโพลาริเซชันด้วยการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปหรือให้แรงเค้นเชิงกล เมื่อเกิดการเปลี่ยนทิศทางของโพลาริเซชันเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะเรียกวัดนี้ว่า เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) แต่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงเค้น จะเรียกว่าเฟอร์โรอีลาสติก (Ferroelastic) ซึ่งลักษณะดังกล่าวของวัสดุไพโรอิเล็กทริกไม่สามารถคาดเดาได้จากโครงสร้างผลึก จะต้องทำการทดลอง

2.4 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ (Perovskite Structure) [1, 4, 7]

โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ เป็นชื่อที่เรียกกันตามชื่อของแร่แคลเซียมไททานेट (CaTiO_3) มีสูตรโครงสร้างทั่วไปเป็น ABO_3 เมื่อ O คือ ออกซิเจน A คือไอออนบวกที่มีรัศมีไอออนขนาดใหญ่ และ B คือไอออนบวกที่มีรัศมีไอออนขนาดเล็ก แสดงดังภาพที่ 2.6 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์นี้มีพื้นฐานมาจากการเชื่อมต่อกันในสามมิติของทรงแปดหน้า (Octahedral) ที่เกิดจาก BO_6 ซึ่งไอออนบวก A และไอออนลบของออกซิเจนจะจัดเรียงตัวแบบบรรจุชิดรูปลูกบาศก์ (Cubic closed packed) โดยไอออนบวก A จะอยู่ที่มุมของหน่วยเซลล์ ออกซิเจนจะอยู่ที่หน้าของหน่วยเซลล์ และไอออนบวก B จะแทรกอยู่ในช่องว่างกลางทรงแปดหน้า (Octahedral side)



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ [7]

เพอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบที่มีสูตรเคมีเป็น $\text{A}^{2+}\text{B}^{4+}\text{O}^{2-}_3$ หรือ $\text{A}^{1+}\text{B}^{5+}\text{O}^{2-}_3$ ส่วนสารประกอบเพอโรฟสไกต์ที่มีสูตรเคมีเป็น $\text{A}^{3+}\text{B}^{3+}\text{O}^{2-}_3$ นั้นมีอยู่หลายชนิด แต่ไม่พบที่แสดงสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก นอกจากนี้ยังพบว่าในสารประกอบเพอโรฟสไกต์ชนิดต่างๆ ค่ารัศมีไอออนิกของไอออน A และ B มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่กว้าง

สถานะภาพของการบรรจุอะตอมของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์จะถูกวิเคราะห์หาค่าทอลาแรนซ์แฟกเตอร์ (Tolerance factor หรือ t) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.6 หรือ 2.7

$$R_A + R_O = t(2)^{1/2} (R_B + R_O) \quad (2.6)$$

หรือ

$$t = (R_A + R_O) / (2)^{1/2} (R_B + R_O) \quad (2.7)$$

เมื่อ R_A , R_B , R_O คือ รัศมีไอออนของไอออน A B และ ออกซิเจนตามลำดับ

เมื่อ t มีค่าเท่ากับ 1 การบรรจุไอออนของโครงสร้างจะเป็นแบบในอุดมคติ ถ้าค่า t มีค่ามากกว่า 1 ที่ว่างจะมีขนาดใหญ่เกินไปสำหรับไอออน B ดังนั้นไอออน B จึงสามารถเคลื่อนที่ได้ภายในช่องว่างทรงแปดหน้า โดยทั่วไปการเกิดโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่เสถียรจะมีค่า t อยู่ในช่วง $0.95 < t < 1.06$ การบรรจุอะตอมของโครงสร้างนอกจากขนาดของไอออนแล้วยังมีปัจจัยอื่นที่ต้องพิจารณาร่วมด้วย เช่น ความสามารถในการเกิดขั้ว (Polarizability) และลักษณะของพันธะ

โดยเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพอรอฟสไกต์ ตัวอย่างเช่น แบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) เลดไททาเนต (PbTiO_3) เลดเซอร์โคเนต (PbZrO_3) เลดเซอร์โคเนตไททาเนต ($\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$) เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต (PLZT) โพแทสเซียมไนโอเบต (KNO_3) โพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบต ($\text{K}_x\text{Na}_{1-x}\text{NbO}_3$) โพแทสเซียมแทนทาลเลตไนโอเบต ($\text{KTa}_x\text{Nb}_{1-x}\text{O}_3$) เป็นต้น นอกจากนี้โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ก็ยังจัดเป็นส่วนประกอบย่อยของหน่วยโครงสร้างที่อยู่ภายในโครงสร้างที่มีความสลับซับซ้อนมาก ๆ บางประเภท อย่างเช่นสารตัวนำยิ่งยวด (Superconductors) อีกด้วย

เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกตัวแรกที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ คือแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) สมบัติไดอิเล็กทริกที่โดดเด่นของแบเรียมไททาเนตถูกค้นพบในปี 1943 โดย Wainer และ Salomon ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา Ogawa ในประเทศญี่ปุ่น และ Wul และ Goldman ในประเทศรัสเซียซึ่งการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกทำได้โดยใช้ตัวอย่างเป็นเซรามิกแบเรียมไททาเนต ต่อมาในปี 1945-1946 มีการรายงานสมบัติความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกของแบเรียมไททาเนต โดย Hippel และคณะ และ Wul และ Goldman ปี 1947 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในแบเรียมไททาเนตได้ถูกค้นพบโดย Roberts และหลังจากนั้นไม่นานเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่เป็นสารละลายของแข็งในกลุ่ม $(\text{Pb}_x\text{Ba}_{1-x})\text{TiO}_3$ และ $(\text{Ca}_x\text{Ba}_{1-x})\text{TiO}_3$ ได้ถูกศึกษาอย่างกว้างขวางและประสบความสำเร็จเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้

ขณะที่ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสารละลายของแข็งของสารในกลุ่มแบเรียมไททาเนตกำลังถูกพัฒนาขึ้นมานั้น ก็ได้มีการค้นพบสารเฟอร์โรอิเล็กทริกและแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบ ABO_3 ที่มีโครงสร้างแบบทรงแปดหน้าของออกซิเจนมากมายหลายชนิดเช่น PbTiO_3 , KNbO_3 , KTaO_3 , NaNbO_3 , NaTaO_3 , PbZrO_3 , PbHfO_3 , LiNbO_3 และ LiTaO_3 ซึ่งในจำนวนสารที่ค้นพบทั้งหมดนี้ PbZrO_3 (เลดเซอร์โคเนต) และ PbTiO_3 (เลดไททาเนต) เป็นเซรามิกที่มีโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ที่มีความสำคัญ ซึ่งในปี 1950 มีการรายงานสมบัติไดอิเล็กทริกที่โดดเด่นของเลดเซอร์โคเนต และมีการยืนยันสมบัติความเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Antiferroelectric) และมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ที่ซับซ้อนขึ้น (Complex perovskite) ซึ่งงานวิจัยนี้มีผลต่อการพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นอย่างมาก

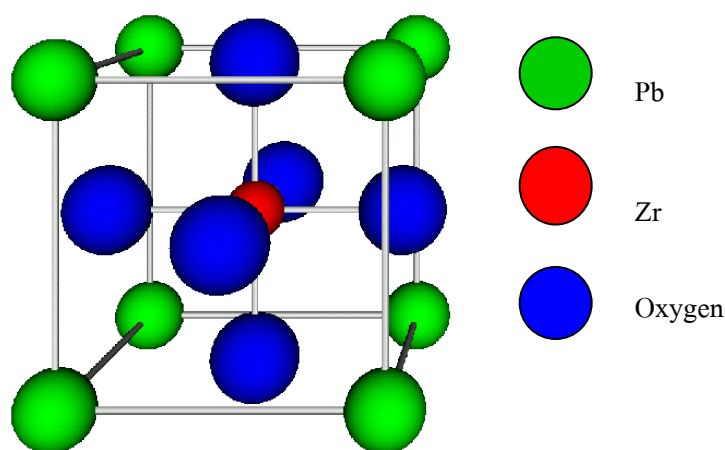
2.5 เลดเซอร์โคเนต (Lead zirconate; PbZrO_3 or PZ) [5, 6]

เลดเซอร์โคเนต (PbZrO_3 or PZ) ค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1951 โดย Sawaguchi และคณะ ซึ่งเป็นสารเพียโซอิเล็กทริกชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ โดยมีไอออนของเลด (Pb^{2+}) อยู่ในตำแหน่ง A (A-site) ไอออนของเซอร์โคเนียม (Zr^{4+}) อยู่ในตำแหน่ง B (B-site) และอยู่ในออกตะฮีดรอล (Octahedral) ของออกซิเจนที่อยู่ตรงกลางของแต่ละหน้าของหน่วยเซลล์ ภาพที่ 2.7 ที่อุณหภูมิต่ำของเลดเซอร์โคเนต (PZ) แสดงสมบัติแบบแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Antiferroelectric) มีโครงสร้างแบบออโรธอมบิก (Orthorhombic; $a = 5.89 \text{ \AA}$, $b = 11.76 \text{ \AA}$ และ $c = 8.22 \text{ \AA}$) [5] ซึ่งมีอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงเฟสจากออโรธอมบิกไปเป็นคิวบิกที่อุณหภูมิประมาณ 230°C โดยโครงสร้างของเลดเซอร์โคเนตหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบไปด้วยเฟสเพอรอฟสไกต์ 8 หน่วย และในปี ค.ศ.1952 Jaffe และคณะ ได้พบว่าเลดเซอร์โคเนตเป็นสารเพียโซอิเล็กทริกที่สามารถเปลี่ยนแปลงเฟสแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ (ภายใต้การให้สนามไฟฟ้าแก่สารที่มีเฟส

แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก) ทำให้เกิดการสะสมของพลังงานขึ้น ดังนั้นเซรามิกเลดเซอร์โคเนตจึงเป็นวัสดุที่สามารถนำมาประยุกต์เป็นตัวกักเก็บพลังงาน (Energy storage) ได้

เลดเซอร์โคเนต (PZ) เป็นสารที่มีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นมาก สามารถที่จะเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูง และยังมีค่าสัมประสิทธิ์คู่วบไฟฟ้าเชิงกลที่สูง ทำการจัดเรียงข้อไฟฟ้าได้ง่าย มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง และง่ายต่อการเผาซินเตอร์ (Sintering) เพราะใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก จึงทำให้สามารถลดต้นทุนในกระบวนการผลิตลงได้อย่างมาก ยิ่งไปกว่านั้น การเตรียมเซรามิก PZ ให้มีความบริสุทธิ์สูงและความหนาแน่นสูงนั้นสามารถเตรียมได้ไม่ยุ่งยาก ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้สารประกอบกลุ่มนี้ได้มีการศึกษาค้นคว้า และพัฒนากันอย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบัน อาทิ เช่น สารในระบบเลดไททาเนต (PbTiO_3) เลดเซอร์โคเนต ไททาเนต (PZT) เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต (PLZT) เลดแมกนีเซียมไนโอเบต (PMN) เลดนิเกิลไนโอเบต (PNN) และเลดซิงค์ไนโอเบต (PZN) เป็นต้น

การประยุกต์ใช้สารเซรามิกที่มีโครงสร้างเพอรอฟไกต์ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญต่าง ๆ นั้น ล้วนแล้วแต่อาศัยกลไกการเกิดขั้วขึ้นเองตามธรรมชาติ (Spontaneous polarization) หรือจากการเหนี่ยวนำด้วยการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในผลึกตามความเหมาะสม ซึ่งการเกิดขั้วไฟฟ้าแบบถาวรนั้นจะทำให้เกิดการคู่วบกัน (Coupling) ระหว่างสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปกับ สมบัติไดอิเล็กทริก สมบัติเชิงกล หรือสมบัติเชิงแสงของผลึกในระหว่างที่ผลึกนั้นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (เฟส) โดยพบว่าม้งานวิจัยส่วนมากนิยมนำเลดเซอร์โคเนตมาทำวัสดุอิเล็กทรอนิกส์จำพวกไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Microelectronics) การนำไปใช้เป็นหน่วยเก็บพลังงานสำหรับไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเก็บประจุ และแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า รวมทั้งยังทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นในระบบไมโครอิเล็กทรอนิกส์เชิงกล (Microelectromechanical systems; MEMs) ได้เป็นอย่างดี



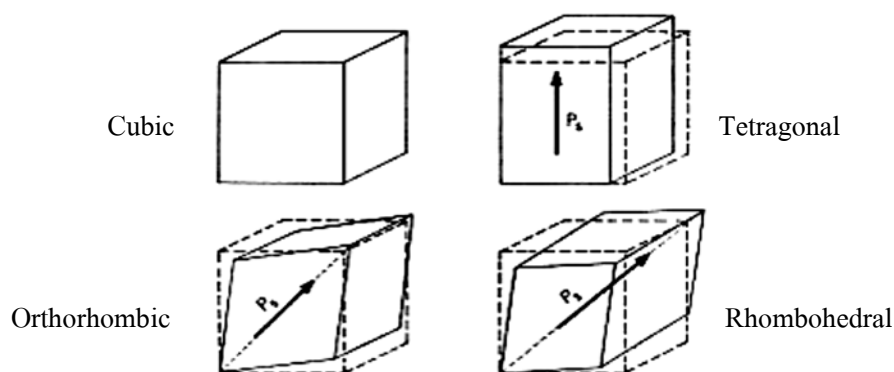
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของเลดเซอร์โคเนต (Lead zirconate)

2.6 แบบเรียมไททาเนต (Barium titanate; BaTiO_3) [7, 8]

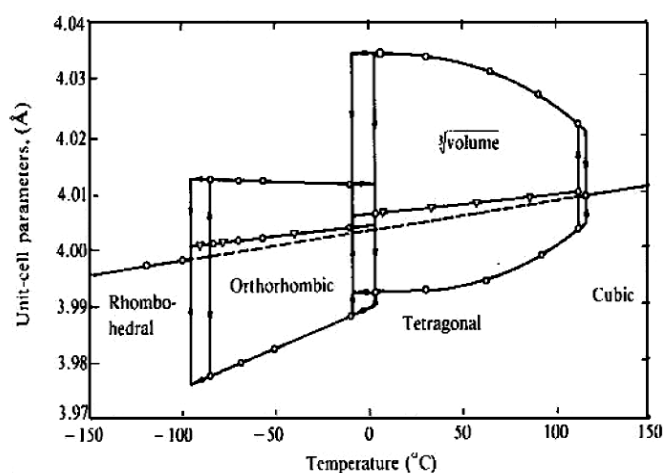
แบบเรียมไททาเนต (Barium titanate) เป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในนามวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) มีการค้นพบมาแล้วมากกว่า 60 ปีที่ผ่านมา โดยแบบเรียมไททาเนตนั้นเป็นวัสดุเซรามิกที่มีสมบัติไดอิเล็กทริก สามารถใช้ในตัวเก็บประจุ ทั้งในรูปแบบการเก็บประจุแบบ

แผ่นกลมและมัลติเลเยอร์เซรามิก หรือ MLCC เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) สำหรับไมโครโฟน อุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณ (Transducer) เป็นต้น

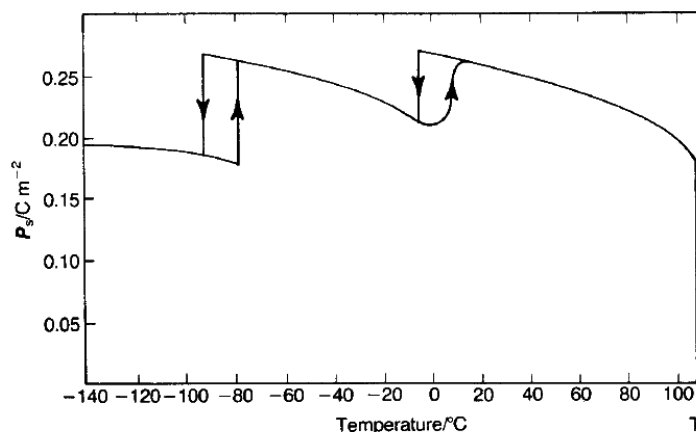
แบเรียมไททาเนต มีโครงสร้างผลึกพื้นฐานอยู่ 2 รูปแบบ คือ 1. โครงสร้างผลึกแบบเพอร์รอฟสไกต์ (Perovskite) ซึ่งมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) จะขึ้นกับอุณหภูมิ โดยโครงสร้างของสาร BaTiO_3 ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดอุณหภูมิคูรี 120°C (T_c) ลงมานั้น จะเกิดการบิดเบี้ยว ไปเป็นเฟสเตตระโกนอล โดยมีโมเมนต์ขั้วคู่เกิดขึ้นมาในทิศทางตามแนวแกน c จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงมาถึงที่อุณหภูมิประมาณ 5°C จึงเปลี่ยนจากเฟสเตตระโกนอล ไปเป็นเฟสออร์ทอโรมบิก และที่อุณหภูมิต่ำกว่า -90°C ก็จะเปลี่ยนจากเฟสออร์ทอโรมบิก ไปเป็นเฟสโรมโบฮีดรัล ตามลำดับ ดังแผนภาพแสดงในรูป 2.10(ก) ซึ่งการเปลี่ยนเฟสของสาร BaTiO_3 ตามอุณหภูมิ ดังที่กล่าวมานี้จะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าที่มีขั้วในตัวเอง (Spontaneous polarization) และค่าความยินยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) ดังแสดงในรูป 2.10(ข) และ (ค) ตามลำดับ 2. โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ซึ่งไม่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Non-Ferroelectric Hexagonal) ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเสถียรที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 1460°C และยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิห้องได้ดีอีกด้วย



(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงผลึกของแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) [7]



(ข) แลตทิซพารามิเตอร์ของแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) ในแต่ละอุณหภูมิ [7]

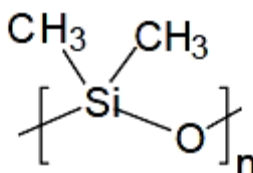


(ค) ค่าความยินยอมสัมพัทธ์ที่วัดตามแนวแกน a และ c ของสาร BaTiO₃ ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ [8]

ภาพที่ 2.8 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแบเรียมไททานेट (BaTiO₃)

2.7 พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS) [9, 10]

พอลิไดเมทิลซิลอกเซน เป็นพอลิเมอร์ที่ถูกใช้ในยางซิลิกอน สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับเป็นฉนวนกันไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่ใช้งานกลางแจ้ง โดยพอลิไดเมทิลซิลอกเซน ประกอบด้วยสารอินทรีย์เป็นแถบกลางที่มี ซิลิกอน (Silicon) และออกซิเจน (Oxygen) สลับกัน มีหมู่เมทิล (Methyl) เกาะที่ตำแหน่งอะตอมซิลิกอนซึ่งเป็นโครงสร้างหน่วยซ้ำของพอลิเมอร์ (รูป 2.9)



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของ PDMS [9]

2.7.1 สมบัติของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน

(1) พอลิไดเมทิลซิลอกเซน เมื่อทำการเชื่อมโยงแล้ว (Cross-linked) จะมีลักษณะเป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นได้ ในสภาวะนี้พอลิเมอร์จะไม่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรเมื่ออยู่ภายใต้ความเค้น (stress) หรือ ความเครียด (strain) พอลิเมอร์จะกลับสู่รูปร่างเดิมเมื่อทำการปล่อยแรง

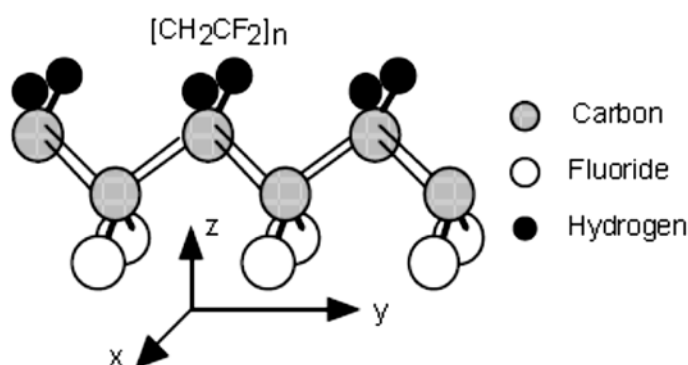
(2) พอลิไดเมทิลซิลอกเซน โดยทั่วไปแล้วจัดเป็นสารเคมีประเภทเฉื่อย มีจุดเด่นคือไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถซึมผ่านพื้นผิวได้ จากสมบัตินี้พอลิไดเมทิลซิลอกเซน จึงถูกนำไปใช้อย่างมากในระบบของไหลจุลภาค (microfluidic) แต่อย่างไรก็ตามตัวทำละลายอินทรีย์ส่วนใหญ่ยังคงสามารถซึมผ่านพื้นผิวของพอลิไดเมทิลซิลอกเซนได้ จึงต้องเลือกใช้งานให้เหมาะสม

(3) พอลิไดเมทิลซิลอกเซน เป็นวัสดุใส มีสมบัติที่แสงทะลุผ่านได้ นอกจากนี้ เวลาที่โมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงและอุณหภูมิที่ใช้ระหว่างการเชื่อมโยงสามารถกำหนดค่าดัชนีการหักเหแสง (refractive index) ของชิ้นงาน

(4) พันธะของ Si-O ภายใน PDMS จะมีขั้วที่แข็งแรงมาก เนื่องจากมีหมู่เมทิลที่เป็นกึ่งที่ป้องกันไม่ให้ขั้วของ Si-O อยู่ใกล้กันมากเกินไป ทำให้มีแรงระหว่างโมเลกุลต่ำ โดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยแรงลอนดอน-แวนเดอร์วาลส์ (London-van der Waals interactions) แรงนี้จะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น โดยความมีขั้วของโมเลกุล (polarizability) ทำให้ซิลิโคนมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ที่สูงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene)

ในพอลิเมอร์อินทรีย์ส่วนใหญ่ พบว่าแรงดึงดูดที่แข็งแรงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก สำหรับซิลิโคนแรงระหว่างโมเลกุล (intermolecular forces) มีค่าต่ำและไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิ ดังนั้น ความหนืด (viscosity) สมบัติเชิงกล (mechanical properties) สมบัติไดอิเล็กตริก (dielectric properties) และสมบัติทางกายภาพ (physical properties) อื่นๆ จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง โดยวัสดุพอลิไดเมทิลซิลอกเซน มีการใช้งานทั่วไปในการผ่าตัดศัลยกรรม และคอนแทคเลนส์

2.8 พอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ (Polyvinylidene difluoride; PVDF) [11-13]



ภาพที่ 2.11 โครงสร้างของ PVDF [13]

ตารางที่ 2.1 สมบัติเพียโซอิเล็กตริกของ PVDF เทียบกับ PZT และ BaTiO₃ ที่อุณหภูมิ 20°C [11]

Property	Unit	PVDF	BaTiO ₃	PZT
Dielectric Constant	-	12	600-1200	<1000-4000
Piezoelectric Constant	Charge pC/N	$d_{31}=20$ $d_{33}=-30$	-30 - -60	-100 ->-600
	%	11	21	30-75
Electromechanic Coupling	10^{10} N/m ²	0.3	11-12	

Factor	10^6	2.3	25	6-9
Young's Modulus	$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})^*$	1780	5300-5700	30
Acoustic Impedance	kg/m^2			7500-7700
Density				

หมายเหตุ : * MRa (megarayleigh) ($1\text{Ra} = 1 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$)

พอลิไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสูตรทางเคมีว่า $(\text{CH}_2-\text{CF}_2)_n$ มีโครงสร้าง ดังภาพที่ 2.10 ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก โดย PVDF มีค่า k_p และ d_{33} ที่ต่ำกว่า PZT มาก ดังตารางที่ 2.1 แต่อย่างไรก็ตาม PVDF มีข้อดีหลายประการ คือ มีค่า piezoelectric voltage constant (g) สูง ยึดได้มากกว่า PZT ทนต่อการไหล มี dielectric strength สูงกว่า PZT และมีค่า acoustic impedance ที่เข้าได้กับน้ำและร่างกายมนุษย์

PVDF อาจนำไปใช้ในรูปของคอมโพสิตกับเซรามิก การนำไปทำคอมโพสิตจะทำให้วัสดุผสมมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเนื่องจากการรวมข้อดีของวัสดุสองชนิดเข้าด้วยกัน

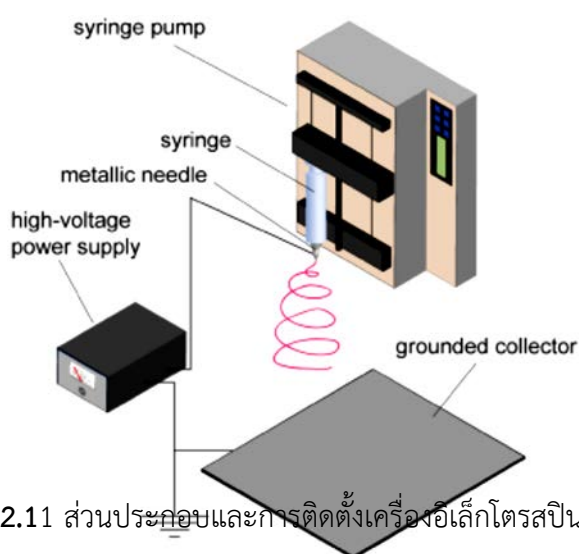
2.9 เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning Technique) [14-17]

อิเล็กโตรสปินนิงเป็นเทคนิคในการเตรียมวัสดุที่มีโครงสร้างนาโนแบบ 1 มิติ โดยการฉีดลำของสารละลายชนิดหรือหลอมเหลวจากท่อออกมาเป็นเส้นใยบาง ซึ่งต่างจากกระบวนการฉีดเส้นใยแบบดั้งเดิมตรงที่ใช้อันตรกิริยาทางไฟฟ้าสถิตเป็นแรงขับเคลื่อนแทนการดึงยืดเชิงกล โดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงจะใช้ในการฉีดเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กถึงระดับนาโนเมตร

การติดตั้งเครื่องอิเล็กโตรสปินนิงประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากำลังสูง หัวฉีด และวัสดุรองรับที่นำไฟฟ้า โดยเข็มโลหะจะทำหน้าที่เป็นหัวฉีด และอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil) ทำหน้าที่เป็นวัสดุรองรับ ดังภาพที่ 2.11 ซึ่งเป็นระบบที่ไม่มีความซับซ้อนค่าใช้จ่ายน้อยและใช้งานได้สะดวก ทั้งนี้ในระบบที่มีการพัฒนาอาจจะเพิ่มอุปกรณ์สำหรับควบคุมการไหลของสารละลาย ซึ่งจะทำให้อัตราการป้อนสารละลายคงที่ ทำให้การสังเคราะห์เส้นใยมีประสิทธิภาพโดยสามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้ต่อเนื่องมากขึ้น โดยมีวิธีการคือจะบรรจุสารละลายที่ต้องการฉีดลงในหลอดฉีดยาพลาสติกที่ต่อกับเข็มโลหะ สำหรับการทดลองโดยเฉพาะการฉีดเส้นใยนาโนเซรามิกนั้นการติดตั้งเครื่องมือจะต้องทำในระบบปิด เนื่องจากอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและบรรยากาศได้ ส่วนวัสดุรองรับที่ใช้นั้นสามารถใช้วัสดุและรูปร่างได้หลากหลาย โดยเส้นใยอาจจะถูกรองรับด้วยแผ่นโลหะหรือถูกม้วนเก็บอย่างเป็นระเบียบ หรืออาจจะถูกรองรับด้วยน้ำหรือของเหลวอื่น แต่โดยทั่วไปจะนิยมใช้วัสดุที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า

อิเล็กโตรสปินนิงเป็นเทคนิคที่ใช้พื้นฐานทางไฟฟ้าสถิต เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบ จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นที่ปลายเข็ม และเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าจนถึงค่าหนึ่ง แรงทางไฟฟ้าสถิตจะมากกว่าแรงดึงดูดและเกิดแรงขับลำสารละลายออกจากเข็ม โดยลำของสารละลายจะพุ่งและเกิดการบิดโค้งอย่างรวดเร็วออกมาเป็นลำยาวอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดเป็นเส้นใยบาง และสม่ำเสมอ เมื่อสารละลายเกิดการระเหยอย่างรวดเร็วขณะกระบวนการฉีด เส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดลดลง ทำให้เกิดเป็นเส้นใยที่มีขนาดเล็ก สุดท้ายเส้นใยจะไปเกาะบนวัสดุรองรับ ซึ่งเป็นผลของแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงของนาโนเมตรถึงไมโครเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับ

สมบัติของสารละลายและปัจจัยในการฉีดอื่นๆ โดยการฉีดเส้นใยสามารถทำได้ทั้งแนวราบและแนวตั้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนืดของสารตัวอย่างที่ใช้



ภาพที่ 2.11 ส่วนประกอบและการติดตั้งเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ [14]

2.10 กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel Process) [14, 18]

กระบวนการเตรียมโซล - เจล (Sol-gel) เป็นกระบวนการเตรียมทางเคมีแบบเปียก (Wet process) ชนิดหนึ่งที่มีความนิยมอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงในการเตรียมเซรามิกที่มีคุณภาพ ความสนใจในเทคนิคโซล - เจล เริ่มศึกษาตั้งแต่กลางคริสต์ศตวรรษที่ 19 เมื่อมีการเตรียมซิลิกาเจล (Silica gel) จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ภายใต้อิทธิพลของสารเตตระเอธิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate; $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$; TEOS) วิธีการนี้ได้รับความสนใจจากนักเคมีเป็นอย่างมาก แม้วานักเคมียังไม่ค่อยเข้าใจปรากฏการณ์ดังกล่าวมากนัก ในช่วงทศวรรษ 1980's ได้มีการประยุกต์ใช้การเตรียมแบบ โซล-เจล กับเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก เช่น แบเรียมไทเทเนต (BaTiO_3) เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต ($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$) เป็นต้น

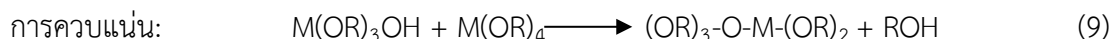
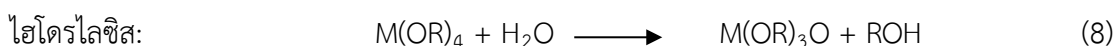
โดยการผลิวัสดุนาโนจากวิธีโซล-เจล ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตเซรามิกทั่วไป และได้ถูกพัฒนาสำหรับการเตรียมเซรามิกที่อุณหภูมิต่ำในรูปของการเคลือบผิว (Coating) ฟิล์มบาง (Thin film) และเส้นใย (Fiber) ในการนำไปใช้งานต่างๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) แบตเตอรี่ (Battery) ตัวตรวจจับ (Sensor) อุปกรณ์ไฟฟ้า (Electronics) และอุปกรณ์ทางแสง (Optic) เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันเทคนิคโซล-เจลได้ถูกนำมาใช้ควบคู่กับเทคนิคอ

เล็กโตรสปีนนิ่งในการผลิตเส้นใยนาโนเซรามิกและพอลิเมอร์ที่มีการควบคุมสัดส่วน ขนาด และรูปร่างได้

ในการเลือกใช้สารละลายนั้น ส่วนใหญ่มักจะใช้สารละลายของสารประกอบโลหะอินทรีย์ เช่น โลหะอัลคอกไซด์ ที่อยู่ในแอลกอฮอล์ที่เหมาะสม โดยโลหะอัลคอกไซด์เหล่านี้มีสูตรทั่วไปว่า $M(OR)_x$ ซึ่งอาจจะได้มาจากไฮดรอกไซด์ของโลหะ $M(OH)_x$ หรือจากแอลกอฮอล์ (ROH) ที่มี R เป็นสารในกลุ่มแอลคิลและมีโลหะ M เข้าไปอยู่แทนที่ไฮดรอกซิลโปรตอน

โดยอาศัยการกวนให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องเพียงเล็กน้อย (ปกติจะใช้อุณหภูมิประมาณ 50-90°C) ซึ่งจะต้องมีความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา และค่าพีเอชของสารละลายที่เหมาะสม จึงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และการควบแน่น (Condensation) แล้วได้สายโซ่พอลิเมอร์ออกมา

ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ใช้โลหะที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับสี่ (M^{4+}) อาจเกิดปฏิกิริยาดังนี้



การเกิดเป็นพอลิเมอร์โดยอาศัยกลไกการแยกสลายด้วยน้ำและการควบแน่น แล้วเกิดมีการเชื่อมต่อข้ามสายจนเกิดการพันกันเป็นโครงข่ายสามมิติ จะทำให้สารผสมมีความหนืดสูงมากขึ้นเรื่อยๆ จนเข้าสู่สภาพที่เรียกว่า เจล กระบวนการต่อมา คือ ทำการระเหยของเหลวที่อยู่ในตัวเจลออกไป (Dehydration) ความแข็งแรงของเจลจะช่วยป้องกันไม่ให้อะตอมย้ายตำแหน่ง หรือหลุดออกไปจากกันในระหว่างที่มีการทำให้เจลแห้ง ช่วยให้ควบคุมความสม่ำเสมอและความเป็นเนื้อเดียวกัน ในระดับโมเลกุลให้คงอยู่ได้

ในกระบวนการเตรียมโซล-เจลนั้น การเตรียมสารให้เป็นเนื้อเดียวกันและเกิดเป็นโซลหรือเจลที่เสถียรนั้นทำได้ยาก เนื่องจากผลของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และการควบแน่น (Condensation) ของโลหะหรือเกลืออัลคอกไซด์ (Alkoxide salt) ถ้าสารตั้งต้นตั้งแต่ 2 ชนิด มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ต่างกันจะทำให้การควบคุมความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ของโซลทำได้ยาก โดยจะเกิดการแยกเฟส (Phase) ในระบบขึ้น ซึ่งปัญหานี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปีนนิ่ง ในกระบวนการอิเล็กโตรสปีนนิ่งนั้น ปฏิกิริยาของโซล-เจลได้แก่ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การควบแน่น (Condensation) และการเกิดเจล (Gelation) จะถูกจำกัดในบริเวณเล็กๆ (บนลำของสารและเส้นใยนาโน) อีกทั้งเนื่องจากการโค้งงออย่างรวดเร็วและการดึงยึดของ สารละลาย ทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายในลำสารละลายระเหยอย่างรวดเร็ว และองค์ประกอบอื่นๆ จะแข็งตัวแล้วคงอยู่ในเส้นใย ซึ่งสามารถป้องกันหรือลดการแยกเฟสขององค์ประกอบต่างๆ ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ ตัวอย่างเช่น

การทำงานพื้นฐานในการเตรียมอิเล็กโตรสปีนนิ่งของสารละลายตั้งต้นเซรามิกและสารละลายพอลิเมอร์นั้นมีความแตกต่างกันไม่มากนัก แต่อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาบางชนิด เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) ปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation reaction) และการเกิดเจล (Gelation) ของสารตั้งต้นเซรามิกมักมีผลต่อกระบวนการฉีด จึงต้องมีการควบคุมเป็นพิเศษเพื่อให้กระบวนการเป็นไปได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ปัญหาหนึ่งที่พบในการฉีดเส้นใย ได้แก่ การอุดตันของหัวฉีด

และเส้นใยที่ได้ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งปัญหานี้มักเกิดจากการควบคุมปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และอัตราในการเกิดเจลของสารตั้งต้น เซรามิกได้ไม่ดี ถ้าการเกิดเจลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่สารละลายจะทำให้ล้าของสารละลายสามารถดึงยึดได้น้อย ทำให้เกิดเป็นเส้นใยที่หนาหรือเกิดการอุดตันของหัวฉีดขึ้นได้ ซึ่งมี 2 วิธีที่จะช่วยแก้ปัญหานี้ได้ วิธีแรกคือการเปลี่ยนสารตั้งต้นหรือการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงในสารละลาย เพื่อควบคุมปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และอัตราในการเกิดเจล อีกวิธีคือการควบคุมสภาพแวดล้อมรอบๆลำสารละลาย โดยบรรยากาศที่มีความชื้นน้อยหรืออ้อมด้วยไอของตัวทำละลายจะสามารถลดอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และอัตราเร็วในการเกิดเจลได้ และยังทำให้การฉีดสารละลายทำได้ต่อเนื่องง่ายขึ้น

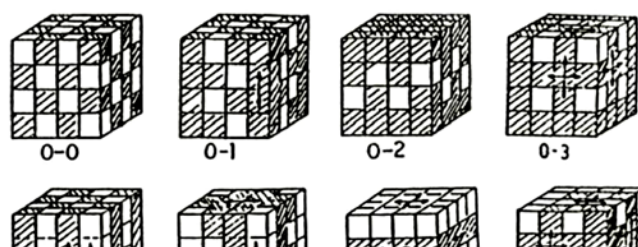
2.11 คอมโพสิต (composite) [11, 19, 34]

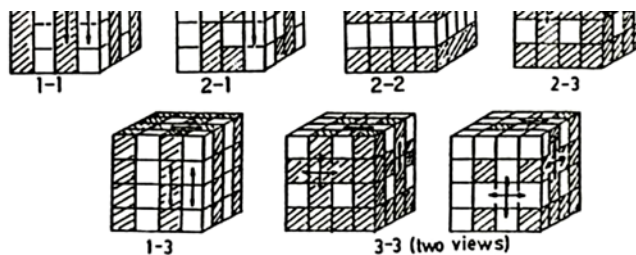
คอมโพสิต เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยการรวมวัสดุตั้งแต่ 2 ประเภทเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปคอมโพสิตจะมีวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (Matrix) และวัสดุเสริมแรง (Reinforcement materials) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักนั้น วัสดุที่เป็นเนื้อหลักจะรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลักให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้นกอน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ แทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก (Base materials) อย่างโลหะ เซรามิก หรือพอลิเมอร์ ผลของการรวมวัสดุต่างกัน 2 ประเภทเข้าด้วยกันทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงโดยรวมมากกว่าเมื่อเทียบกับความแข็งแรงของวัสดุแต่ละประเภทโดยลำพัง

2.11.1 การจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสในคอมโพสิต

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 2.12 โดยตัวเลขตัวแรกจะบอกถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริก ส่วนเลขตัวหลังจะบอกถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่เป็นเมทริก

การเตรียมคอมโพสิตที่นิยมจะมี 2 แบบ คือแบบ 0-3 และแบบ 1-3 คอมโพสิต สำหรับแบบ 0-3 คอมโพสิตคือคอมโพสิตที่มีเซรามิกเป็น active phase มี connectivity 0 ทิศทางและพอลิเมอร์เป็น passive phase มี connectivity 3 ทิศทาง ส่วนแบบ 1-3 คอมโพสิตเป็นคอมโพสิตที่เซรามิกเป็น active phase มี connectivity 1 ทิศทางและพอลิเมอร์ที่เป็น passive phase มี connectivity 3 ทิศทางดังแสดงในภาพที่ 2.13

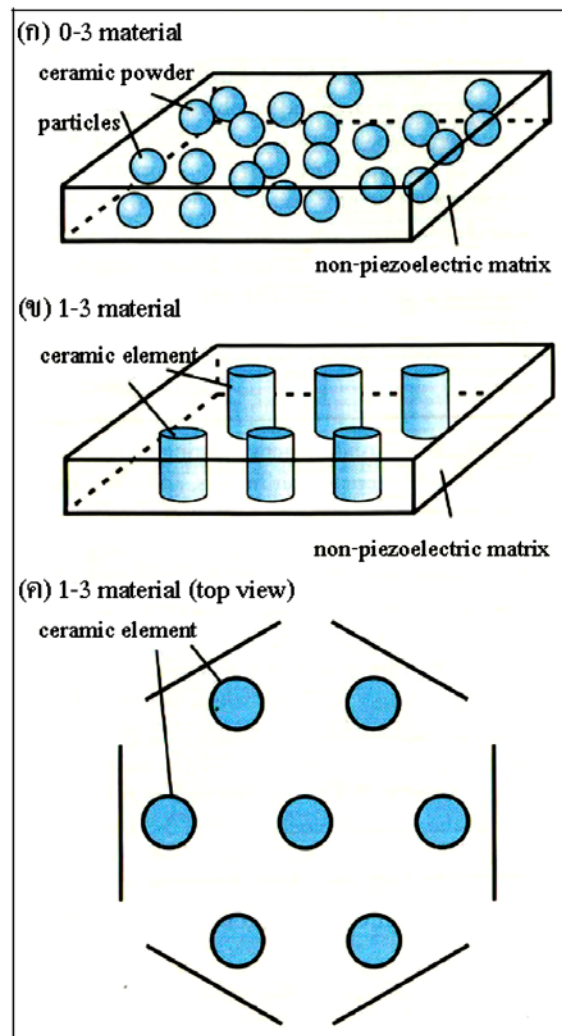




ภาพที่ 2.12 รูปแบบการเชื่อมต่อเฟสแบบต่างๆ ของวัสดุผสมที่มี 2 เฟส [19]

วัสดุคอมโพสิตที่มีรูปแบบง่ายที่สุดคือ 0-3 ซึ่งประกอบด้วยผงเซรามิกกระจายอยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ (polymer matrix) การเรียงติดกันแบบ 0-3 คือ เซรามิกเชื่อมต่อกันใน 3 มิติ และมีพอลิเมอร์บรรจุในรูพรุนในเนื้อเซรามิก อย่างไรก็ตาม เป็นการยากที่จะมีการเรียงติดกันแบบใดแบบหนึ่งล้วนๆ ทั้งนี้ขึ้นกับขั้นตอนวิธีการเตรียม

พอลิเมอร์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (amorphous structure) ส่วนเซรามิกมีโครงสร้างผลึก ทำให้วัสดุคอมโพสิตแบบ 0-3 มีเฟสที่ผลึก กระจายอยู่ในเมทริกซ์อสัณฐาน ข้อเด่นที่สำคัญมากของวัสดุคอมโพสิตนี้คือ การขึ้นรูปเป็นรูปร่างแบบต่างๆ ได้ง่าย เช่น การทำเป็นแผ่นบาง การทำเป็นแบบเส้นใย เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นโซนาร์และไฮโดรโฟน



ภาพที่ 2.13 คอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์กับเซรามิก (ก) แบบ 0-3 คอมโพสิต (ข)-(ค) แบบ 1-3 คอมโพสิต [11]

วัสดุคอมโพสิตที่มีลักษณะการเรียงติดกันแบบ 0-3 เป็นวัสดุที่สามารถเตรียมได้ง่ายและสะดวกที่สุดใน 10 รูปแบบ โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเซรามิก (Volume fraction of ceramic, ϕ) กับพอลิเมอร์ แสดงดังสมการที่ (2.8)

$$m_c = m_p \times \frac{\rho_c}{\rho_p} \times \frac{\phi}{1-\phi} \quad (2.8)$$

โดยที่ m_c คือ มวลของเซรามิก
 m_p คือ มวลของพอลิเมอร์
 ρ_c คือ ความหนาแน่นของเซรามิก (BaTiO_3 6.08 g/cm^3)
 ρ_p คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ (PVDF 1.78 g/cm^3)
 ϕ คือ สัดส่วนของเซรามิก

ความหนาแน่นของคอมโพสิตมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของเซรามิกและความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ดังสมการ

$$\rho = \phi \rho_c + (1-\phi) \rho_p \quad (2.9)$$

เมื่อ ρ_c คือ ความหนาแน่นของคอมโพสิต

ทำนองเดียวกันกับสมการที่ (2.4) สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความจุความร้อนของคอมโพสิตกับความจุความร้อนของเซรามิกและพอลิเมอร์ดังสมการ

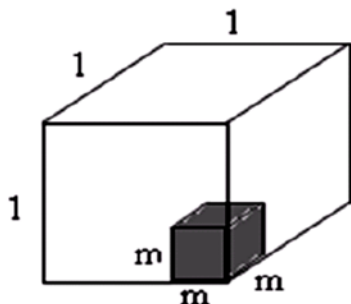
$$C = \phi C_c + (1-\phi) C_p \quad (2.10)$$

เมื่อ C , C_c และ C_p คือ ความจุความร้อนของคอมโพสิต, เซรามิกและพอลิเมอร์ ตามลำดับ

แบบจำลองของเพาเออร์ (Pauer model) เป็นแบบจำลองที่สามารถอธิบายลักษณะของ 0-3 คอมโพสิตที่มีสัดส่วนเซรามิกน้อยๆ แสดงดังภาพที่ 2.14

ในแบบจำลองนี้ หนึ่งหน่วยลูกบาศก์ของคอมโพสิตจะถูกบรรจุด้วยหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เล็กๆ ของเซรามิกที่มีความยาวด้านละ m ซึ่งมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับหนึ่งหน่วยลูกบาศก์ของคอมโพสิต สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.11)

$$\phi = m^3 \quad (2.11)$$



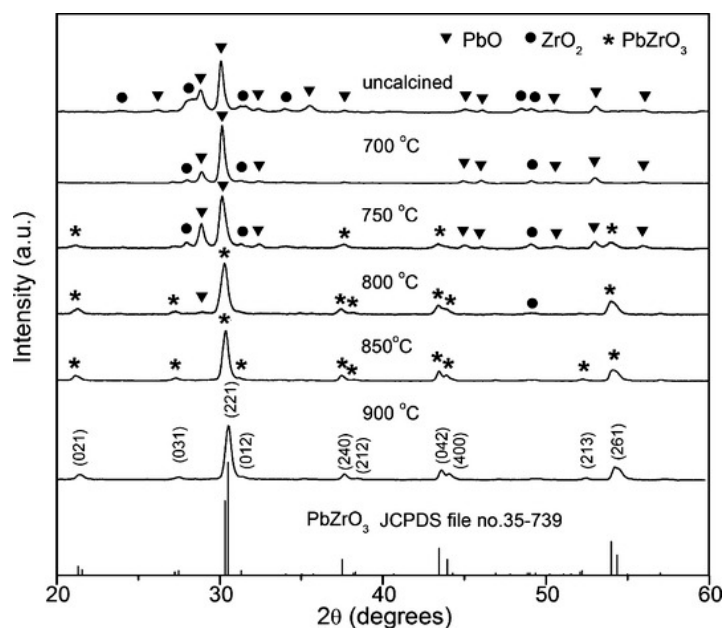
ภาพที่ 2.14 แบบจำลองของเพาเออร์ 0-3 คอมโพสิต [34]

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

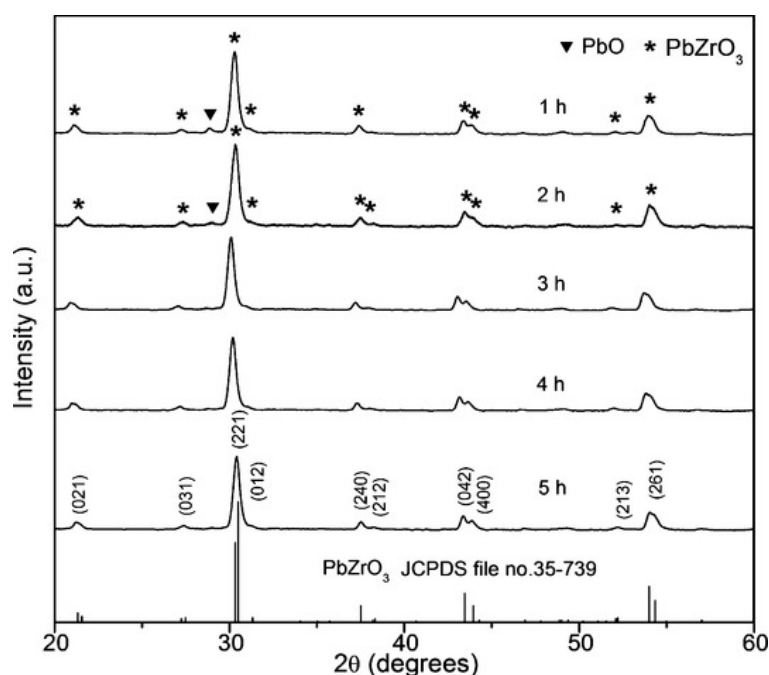
จากการที่เลดเซอร์โคเนต (Lead zirconate; PZ) เป็นสารที่มีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่นและแสดงสมบัติแบบแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก ทำให้มีการนำเลดเซอร์โคเนตไปประยุกต์ใช้งานหลายด้าน นักวิทยาศาสตร์หลายท่านจึงให้ความสนใจที่จะทำการศึกษาหลักการและวิธีการเตรียมเลดเซอร์โคเนต (PZ) จากสารตั้งต้นและวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน

Supon Ananta และคณะ [18] ได้ศึกษาเงื่อนไขในการเผาแคลไซน์ (Calcination) ที่มีผลต่อขนาดอนุภาคของผงผลึก PZ ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-State reaction) จากสารตั้งต้นเลดออกไซด์ (PbO) และเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO₂) โดยการบดย่อยผสมด้วยลูกบด (Ball milling) ในตัวทำละลายเอทานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ

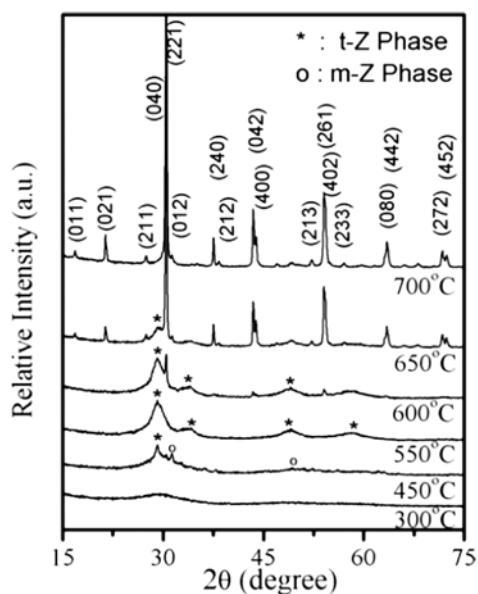
700-900°C เป็นเวลา 1-5 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 1-20°C/นาที ภายใต้บรรยากาศของ PbZrO_2 ในถ้วยอะลูมินา (Alumina crucible) เมื่อได้ผงผลึกจากการเผาแคลไซน์แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างที่ได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) โดยเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS ข้อมูลหมายเลข 35-739 จากภาพที่ 2.15 พบว่าที่อุณหภูมิ 750°C เริ่มเกิดผลึกของ PZ ขึ้น แต่ยังคงมีสารตั้งต้นเหลืออยู่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น พบว่าปฏิกิริยาเกิดได้สมบูรณ์มากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 800°C ขึ้นไปได้ผลึกของ PZ ที่มีความบริสุทธิ์ และใช้เวลาในการเผาแคลไซน์นาน 3 ชั่วโมง ที่อัตราเพิ่ม/ลดอุณหภูมิ 10°C/นาที ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PZ ที่เวลาในการเผาแคลไซน์ 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 10°C/นาที [18]



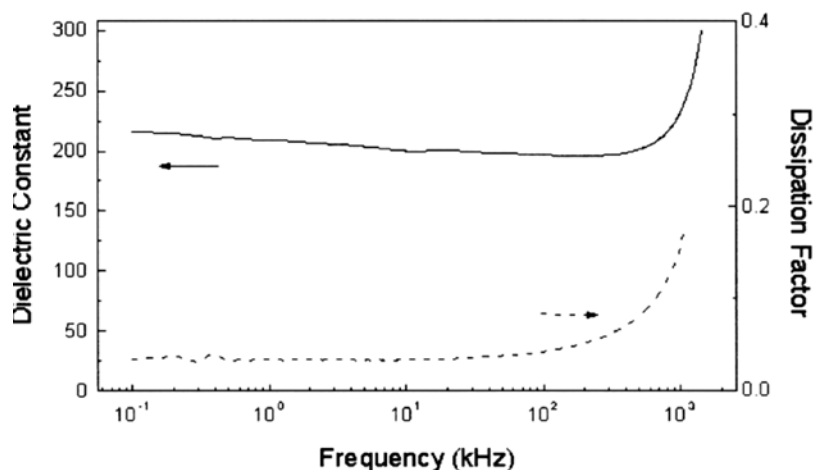
ภาพที่ 2.16 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผลึก PZ จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C และอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 10°C/นาที [18]



ภาพที่ 2.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงผลึก PZ ที่เตรียมได้จากกระบวนการโซลเจล ภายหลังการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆเป็นเวลา 1 ชั่วโมง [20]

ในปี 2009 Singh และคณะ [20] ได้ทำการประดิษฐ์ผงผลึกนาโน PZ ด้วยเทคนิคโซลเจล โดยใช้เลดอะซิเตตไตรไฮเดรต (Lead acetate trihydrate; $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และสารละลาย เซอร์โคเนียมบิวทอกไซด์ (Zirconium (IV) butoxide; $\text{Zr}(\text{OC}_4\text{H}_9)_4$) เป็นสารตั้งต้น พบว่าผงผลึก PZ ที่เตรียมได้จากกระบวนการโซลเจลใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เพื่อให้เกิดผงผลึกบริสุทธิ์ที่ต่ำกว่าจากผงผลึก PZ ที่เตรียมจากวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งแบบทั่วไป โดยสามารถเตรียมผงผลึกบริสุทธิ์ PZ ได้ที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังภาพที่ 2.17

ในปี 1998 Kim และคณะ [21] ได้รายงานการเตรียม PZ ในรูปของฟิล์มบางด้วยเทคนิค แมกนีตรอนสปัตเตอริงร่วม (Reactive magnetron co-sputtering) และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 700°C ซึ่งพบว่ามีค่าโพลาไรเซชันสูงสุดที่ $41 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องเป็น 196 ที่ความถี่ 100 kHz โดยมีค่ามากกว่าในรูปของบัลค์เซรามิกดัง ภาพที่ 2.18 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของฟิล์ม

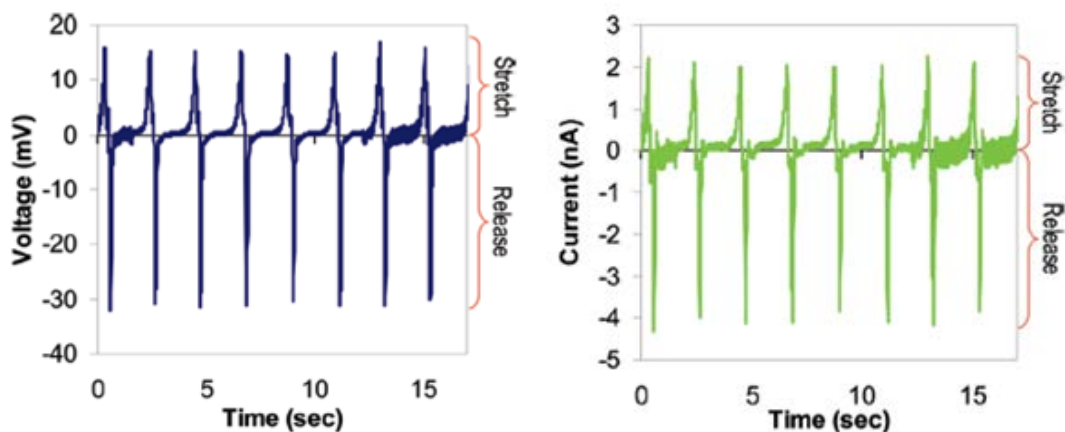


ภาพที่ 2.18 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของฟิล์มบาง PZ ในช่วงความถี่ 10^{-1} - 10^3 kHz [21]

จะเห็นได้ว่าการเตรียมเซรามิกให้มีขนาดที่เล็กลงในระดับนาโนเมตรและการลดมิติลง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุ ทำให้เซรามิกที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้น ดังนั้นการเตรียมวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในรูปของวัสดุนาโนจึงได้รับความสนใจอย่างมาก

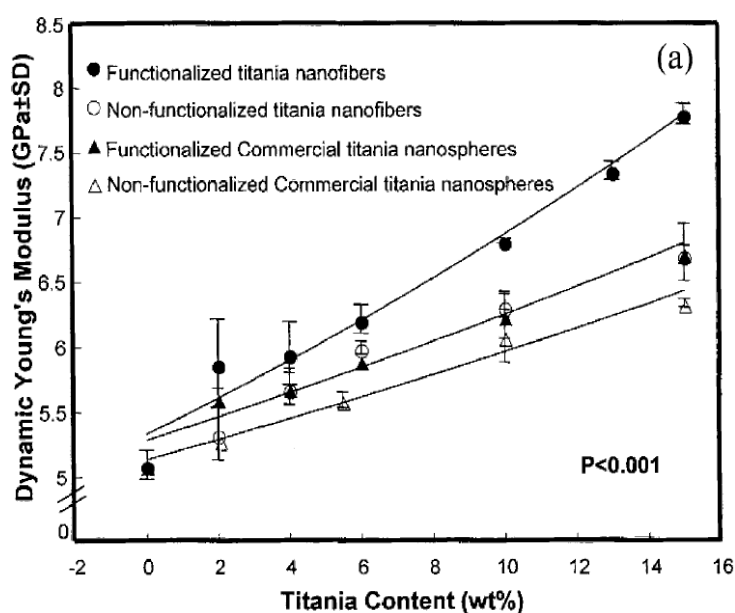
นอกจากนี้ยังพบว่ามีโพลิเมอร์ที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกได้ ยกตัวอย่างเช่น PVDF ซึ่งได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิจัยในการพัฒนาอุปกรณ์บนพื้นฐานของสภาพเพียโซอิเล็กทริก เช่น เครื่องอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ใต้น้ำ (underwater ultrasonic transducers) และเครื่องอิเล็กทรอนิกส์อะคูสติกทรานสดิวเซอร์ (electroacoustic transducers) เช่น ไมโครโฟน หูฟัง และลำโพง

ในปี 2010 Chang และคณะ [22] ได้ทำการศึกษากการเตรียมเส้นใยนาโน PVDF จากการกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระดับนาโน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแปลงพลังงานจากแหล่งพลังงานเชิงกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง โดยใช้ต้นทุนต่ำ และไม่ใช้สารกึ่งตัวนำ ซึ่งวัสดุนาโนอินทรีย์ได้รับความสนใจสำหรับการใช้งานมากมาย รวมทั้งการเก็บพลังงาน โดยทำการเตรียมเส้นใยพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงที่มีการยืดเชิงกลและการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า ซึ่งเส้นใยเพียโซอิเล็กทริกนับว่าเป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจอย่างมาก เมื่อเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างทั่วไป เช่น บัลค์ (bulk) หรือฟิล์มบาง เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการออกแบบและการนำไปใช้งานในโครงสร้างที่หลากหลาย อีกทั้งยังสามารถเตรียมเส้นใยได้จากสารเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิกหลากหลายชนิด จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าวัสดุกำเนิดพลังงานจากเส้นใยนาโนจะแสดงพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงกว่าฟิล์มบาง ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในตัวตรวจจับและแอคชูเอเตอร์ โดยเส้นใยที่ได้มีขนาดอยู่ในช่วง 500 nm ถึง 6.5 μm ซึ่งให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแส 5-30 mV และ 0.5-3 nA ตามลำดับ แสดงในภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสที่วัดได้สัมพันธ์กับเวลาภายใต้ความถี่คดอดที่ 2 Hz [22]

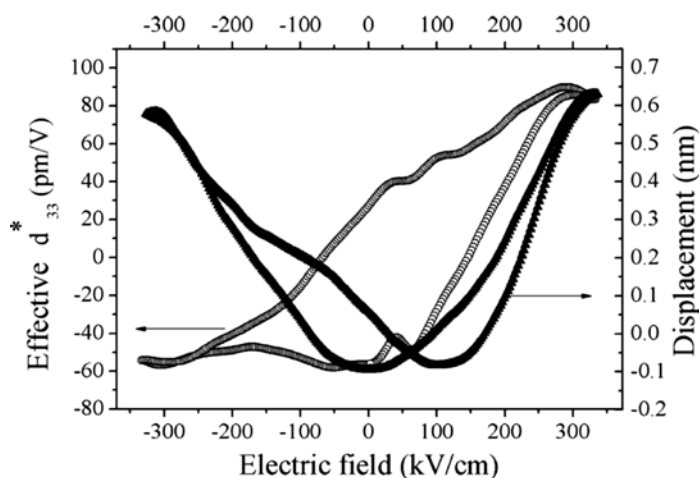
มีงานวิจัยต่างๆ ที่ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์เส้นใยนาโนเพียโซอิเล็กทริกอย่างต่อเนื่องในปี 2007 Khaled และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาการเตรียมเส้นใยนาโนคอมโพสิตของไททาเนียมออกไซด์กับพอลิเมทิลเมทาอะคริเลท (TiO_2/PMMA) พบว่าเส้นใยคอมโพสิตที่เตรียมได้ให้ค่าความแข็งแรงยืดหยุ่น (Young's modulus) ที่สูงถึง 7.7 GPa ที่ปริมาณของไททาเนียม 15 % โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าอนุภาคนาโน (6.5 GPa) ดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 ค่าความแข็งแรงยืดหยุ่น (Young's modulus) เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณไททาเนียม ของ (●) เส้นใยนาโนไททาเนียมเปรียบเทียบกับ (▲) อนุภาคนาโน [23]

ในปี 2009 Li และคณะ [24] ได้ทำการสังเคราะห์เส้นใย BT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 92-182 นาโนเมตร ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงพบว่าเส้นใยที่ได้มีอุณหภูมิคูรีสูงถึง 220°C ซึ่งมากกว่าบล็ค BT ($T_c \approx 130^\circ\text{C}$) และในปี 2010 Liao และคณะ [25] ได้ทำการสังเคราะห์เส้นใยใน

ระบบ $\text{Bi}_{3.15}\text{Nd}_{0.85}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BNT) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30-200 นาโนเมตร พบว่าเส้นใยที่ได้มีอุณหภูมิคูรีสูงถึง 500 °ซ และมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่ 89 pm/V (ดังภาพที่ 2.21) ซึ่งสูงกว่าค่าที่วัดได้จากบัลก์ BNT



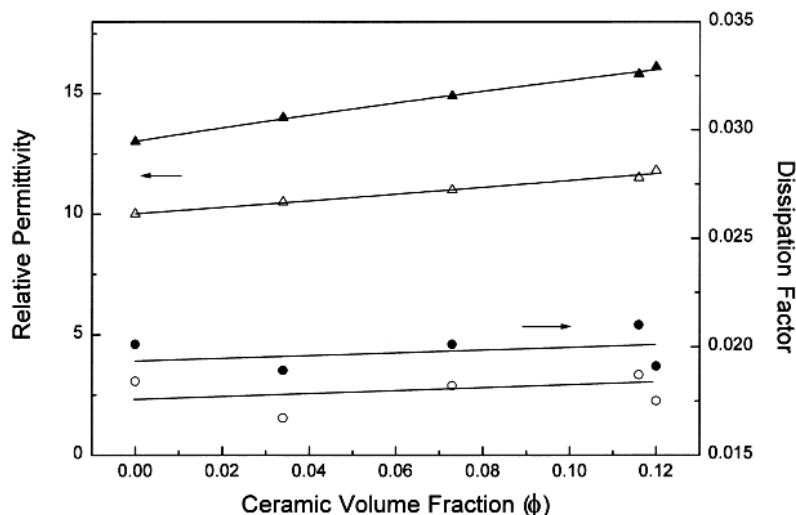
ภาพที่ 2.21

ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเพียโซอิเล็กทริกกับสนามไฟฟ้าของเส้นใยนาโน BNT [25]

อย่างไรก็ตามเส้นใยเซรามิกที่เตรียมได้นั้นค่อนข้างเปราะ ไม่เหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน จึงได้มีการศึกษาการขึ้นรูปในรูปแบบของวัสดุคอมโพสิต

โดยในปี 1991 เชตส์คัตต์ แซลลี่ [26] ได้เตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 ระหว่าง PZT กับพอลิเอทิลีน โดยวิธีอัดรีดเป็นแผ่น (Calendering method) โดยเตรียมผงเซรามิกด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) และทำการศึกษาสมบัติต่างๆ พบว่า วัสดุผสมที่เตรียมได้มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและไดอิเล็กทริกสัมพันธ์กับปริมาตรของ PZT สำหรับวัสดุผสมที่เติม 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

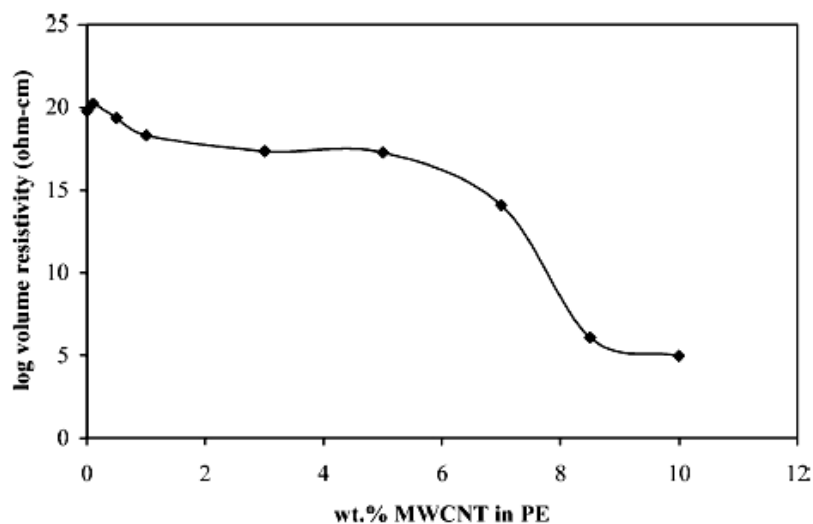
ในปี 1998 Chan และคณะ [27] เตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 ระหว่างเลดไทเทเนตเซรามิก (PbTiO_3 หรือ PT) และโวนิลิดีนฟลูออไรด์-ไตรฟลูออโรเอทิลีนโคพอลิเมอร์ ([P(VDF-TrFE)]) โดยเตรียมเลดไทเทเนตด้วยกระบวนการโซล-เจล ทำให้ได้ผงเซรามิกที่มีขนาดเล็ก (Nanocrystalline powder) และเตรียมวัสดุผสมชนิดฟิล์มบางแบบ 0-3 ที่มีผงเซรามิก PT กระจายอยู่ในพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเคลือบ (Spin-coating technique) และได้ศึกษาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก พบว่าเมื่อปริมาณผงเซรามิกเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) และการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dissipation factor) ของคอมโพสิตที่มีปริมาตรต่าง ๆ กันของวัสดุผสมก่อนและหลังการโพลิง (Poling) [27]

ในปี 2001 Ploss และคณะ [28] ศึกษาขั้นตอนการโพลของวัสดุผสมระหว่างสารเซรามิก PZT กับโวนิลิดีนฟลูออไรด์-ไตรฟลูออโรเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (P(VDF-TrFE)) โดยเตรียมคอมโพสิต ด้วยวิธีการหล่อด้วยตัวทำละลายแล้วตามด้วยเทคนิคการกดอัด (Compression moulding) จากการศึกษาพบว่า การโพลวัสดุผสมในแต่ละขั้นตอน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมและการเพิ่มอุณหภูมิหรือการเพิ่มสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการโพลจะมีผลทำให้ค่า d_{33} ของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อปริมาณสารเซรามิก PZT เพิ่มขึ้นสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมจะดีขึ้น

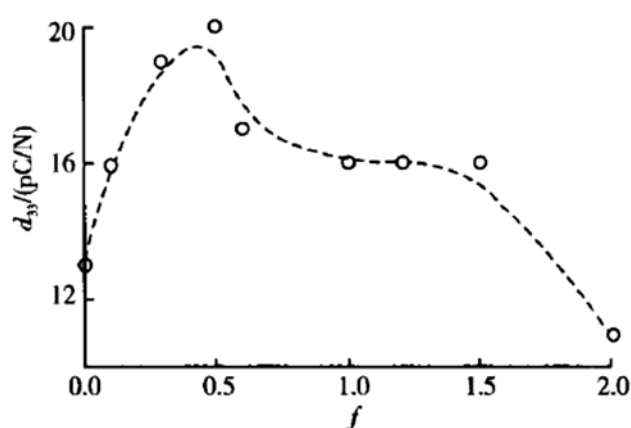
ในปี 2005 Tony McNally และคณะ [29] ได้ศึกษาวัสดุผสมของพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) กับท่อนาโนคาร์บอน (multiwalled carbon nanotubes; MWCNTs) ด้วยสัดส่วนตั้งแต่จาก 0.1 ถึง 10 โดยน้ำหนัก และเตรียมได้จากการการผสมกันโดยใช้เครื่องรีดแบบสกรูคู่ (mini-twin screw extruder) โดยพบว่าที่ประมาณ 7.5% โดยน้ำหนักจะเกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาค (Percolation threshold) และการนำไฟฟ้า (electrical Conductivity) ของ PE จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) และค่าการยืดของชิ้นงานที่จุดขาด (elongation at break) ของวัสดุประกอบนาโนจะลดลงเมื่อเพิ่ม MWCNTs และพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของ PE เพิ่มขึ้น 20 K เมื่อเติม MWCNT 10% โดยน้ำหนัก



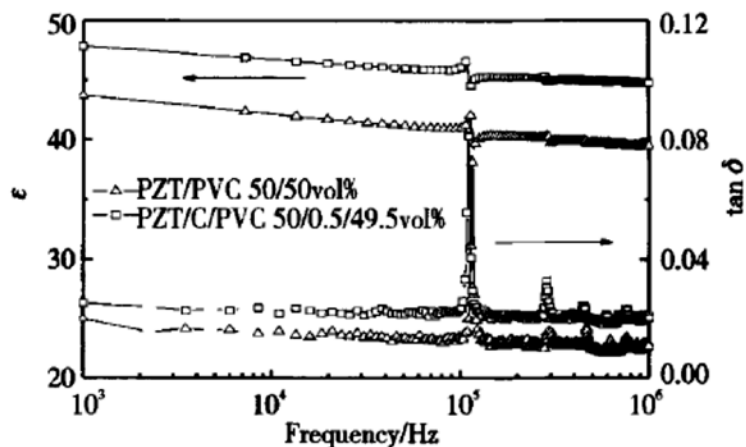
ภาพที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความต้านทานของนาโนคอมโพสิต PE/MWCNT [29]

จากภาพที่ 2.23 แสดงให้เห็นว่าปริมาณความต้านทาน (volume resistivity) และการนำไฟฟ้า (conductivity) มีการเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนน้ำหนักของ MWCNT ที่เติมลงใน PE เมทริกซ์ โดยปริมาณความต้านทาน (volume resistivity) จะปรับตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาตรของ MWCNT

ในปี 2006 Liu และคณะ [30] ได้ศึกษาสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและไดอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PZT และพอลิไวนิลคลอไรด์ ที่มีการเติมแกรไฟต์ในวัสดุคอมโพสิต โดยเตรียมวัสดุคอมโพสิตด้วยเทคนิคกดอัดร้อน (Hot-pressing) จากการศึกษา พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่เติมแกรไฟต์โดยสัดส่วนโดยปริมาตร เท่ากับ 0.5 มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่สูงกว่าวัสดุคอมโพสิตที่ไม่เติมแกรไฟต์ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 2.24 และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่า ดังภาพที่ 2.25

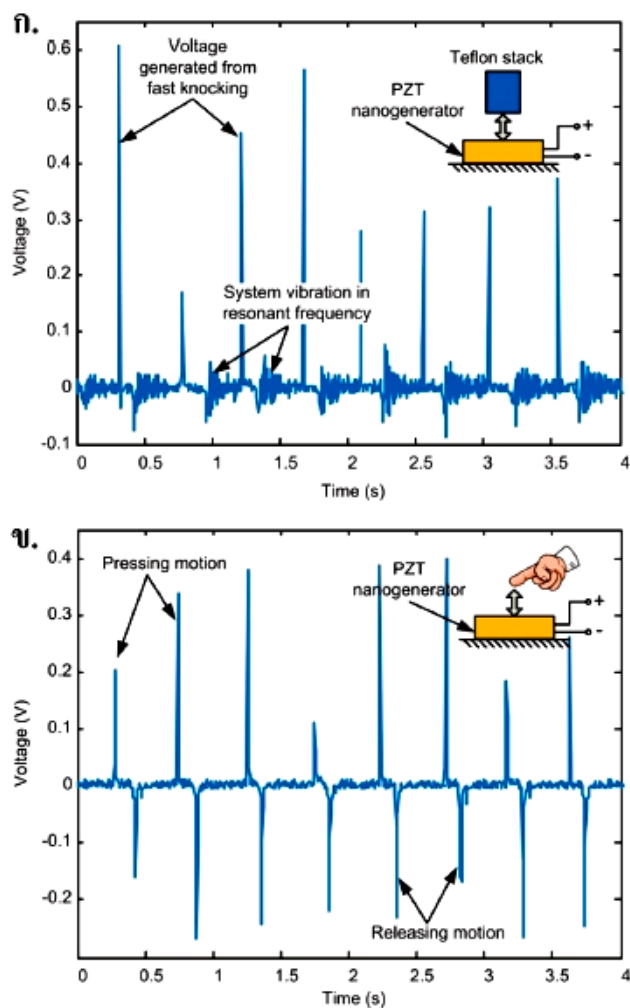


ภาพที่ 2.24 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต PZT/PVC 50/50 vo1% และ PZT/C/PVC 50/0.5/49.5 vo1% ที่อุณหภูมิห้อง [30]



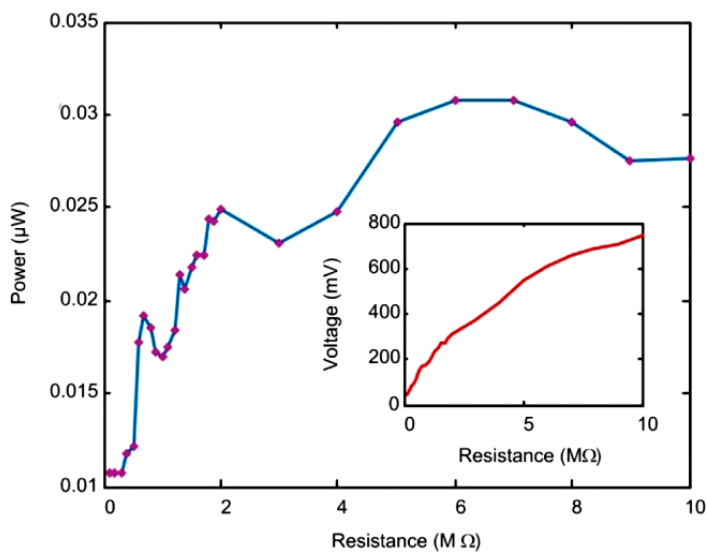
ภาพที่ 2.25 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกของคอมโพสิต PZT/C/PVC 50/f/(50 - f) กับสัดส่วนโดยปริมาตรของคาร์บอน [30]

ในปี 2007 H. Chen และคณะ [31] ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PZT กับพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) โดยเตรียม PZT ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) และเตรียมวัสดุคอมโพสิตโดยวิธีแทรกซึมพอลิเมอร์เหลวเข้าไปในรูพรุนของ PZT จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณของ PZT เซรามิกลดลง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่า d_{33} ของวัสดุคอมโพสิตมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าที่สัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกที่เท่ากัน วัสดุคอมโพสิตแบบแผ่น (Sheet) มีความทนต่อการแตกหัก (Fracture strength) สูงกว่าวัสดุคอมโพสิตรูพรุน โดยวัสดุคอมโพสิตชนิดนี้เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุตรวจวัด (Sensors) และแอคชูเอเตอร์ (Actuators)



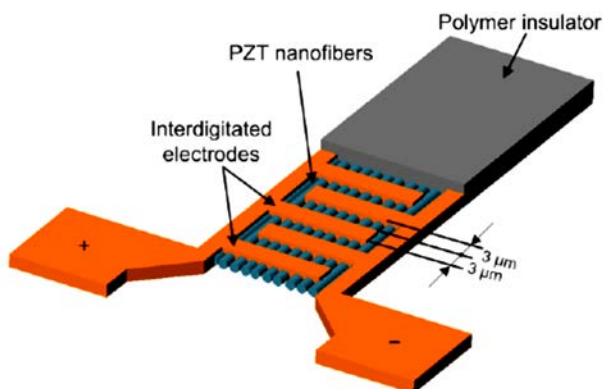
ภาพที่ 2.26 ค่าศักย์ไฟฟ้าของวัสดุ PZT เมื่อให้แรงเชิงกล โดยใช้ ก) แท่งเทฟลอน และ ข) นิ้วมือกดที่เวลาต่างกัน [31]

ในปี 2010 X. Chen และคณะ [32] ได้ทำการประดิษฐ์วัสดุเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระดับนาโน (nanogenerator) จากเส้นใยนาโนเพียโซอิเล็กทริกของ PZT ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 นาโนเมตร จัดเรียงบนแพลตฟอร์มอินเตอร์ดิคตอเล็กโตรดบนแผ่นซิลิกอนจากนั้นเคลือบด้วยพอลิเมอร์ PDMS พบว่าเมื่อให้แรงเชิงกลกับวัสดุโดยใช้แท่งเทฟลอนกดลงไปบนแหล่งกำเนิดไฟฟ้า PZT จะให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าออกมาถึง 600 mV ดังภาพที่ 2.26 ก และเมื่อเปลี่ยนแรงที่ให้โดยใช้นิ้วมือกดจะให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.63 V (ภาพที่ 2.26 ข) นอกจากนี้เมื่อให้ความต้านทานแก่วัด 6 MΩ พบว่าวัดค่ากำลังไฟฟ้าได้ถึง 0.3 μW แสดงดังภาพที่ 2.27

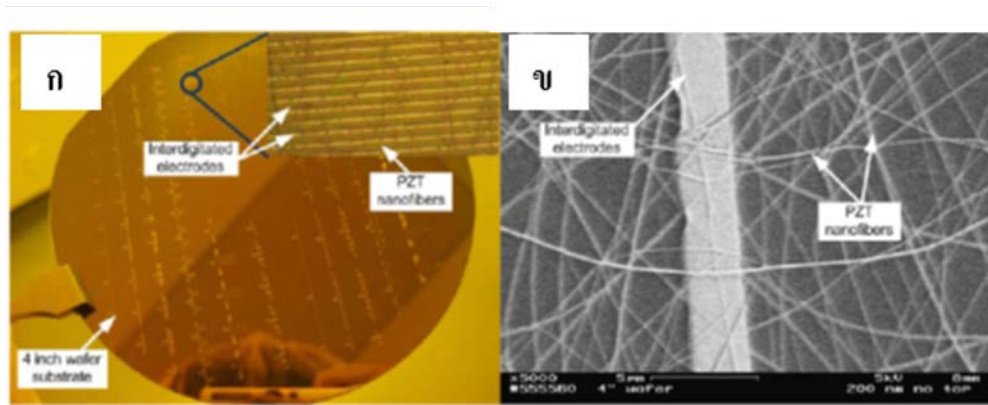


ภาพที่ 2.27 ค่ากำลังไฟฟ้าของวัสดุ PZT ที่ความต้านทานต่างๆ [32]

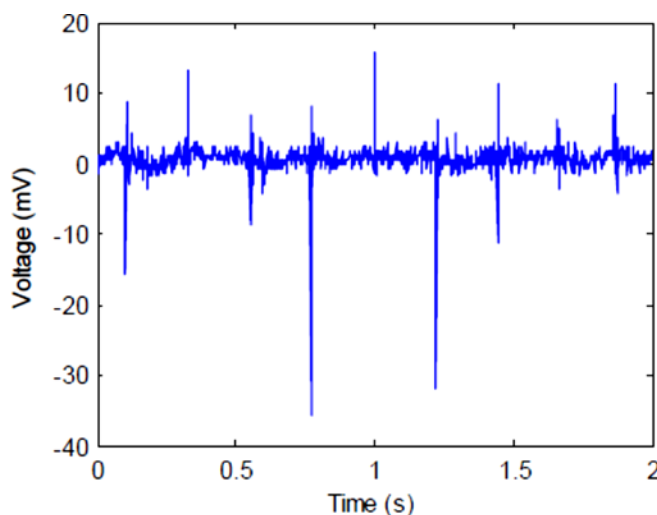
ในปี 2011 Chen และคณะ [33] ได้ทำการประดิษฐ์ เส้นใยนาโนคอมโพสิตที่สามารถสร้างพลังงานตัวเอง (self-powered Nanoscale Active Fiber Composite; NAFC) ในการสร้างตัวตรวจจับที่มีความไวสูงบนพื้นฐานของการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติก โดยการจัดเรียงเส้นใยนาโน PZT ขนาด 80 นาโนเมตร บนแผ่นซิลิกอน จากนั้นสร้างอินเตอร์ดิจิตอลเล็กทรอบบนเส้นใยจากนั้น สปินทับด้วยชั้นของพอลิเมอร์ PDMS ดังภาพที่ 2.28 และ 2.29 จากนั้นทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเทียบกับเวลาพบว่าสามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้ออกมาได้ถึง 35 mV ดังภาพที่ 2.30



ภาพที่ 2.28 แผนภาพจำลองของตัวตรวจจับ PZT NAFCs AE [33]



ภาพที่ 2.29 เวเฟอร์ของอินเตอร์ดิจิตัลโทรดกับเส้นใย PZT ที่ได้จาก ก) กล้องแสง และ ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [33]



ภาพที่ 2.30 สัญญาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวตรวจจับเทียบกับเวลา [33]

อย่างไรก็ตามในขณะที่ผลข้างต้นนี้เป็นที่โดดเด่น เรายังคงต้องการอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพการส่งออกของพลังงานที่สูงโดยใช้วัสดุเพอโรอิเล็กทริกที่เตรียมได้ง่ายและไม่เป็นพิษ

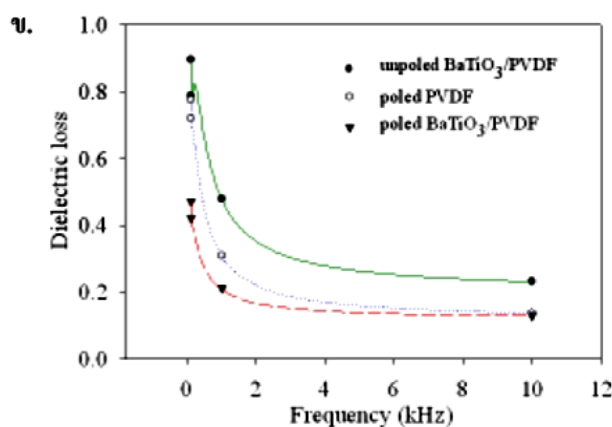
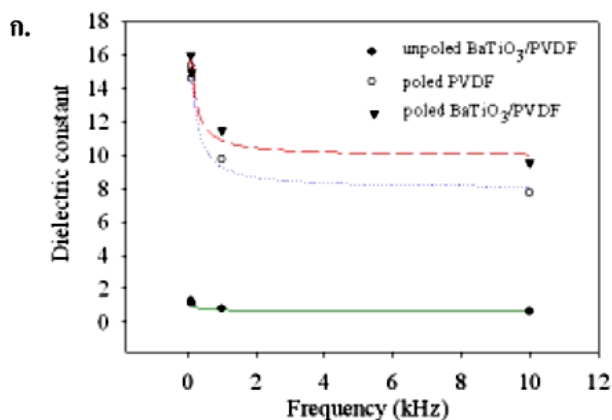
ในปี 2006 Hajeesaeh และคณะ[34]ได้ทำการเตรียมคอมโพสิต $\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$ เพื่อให้ได้คอมโพสิตแบบ 0-3 โดยไม่มีการเชื่อมต่อกันของผงเซรามิก จึงใช้แบเรียมไททาเนต ที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรต่ำเท่ากับ 0.3 ใส่ลงในเมทริกซ์พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) และกวนของผสมอย่างต่อเนื่อง จากนั้นทำการขึ้นรูปคอมโพสิตเป็นแผ่น จากการตรวจสอบโครงสร้างของคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าการเรียงตัวของแบบ 0-3 จากนั้นนำแบบจำลองทางทฤษฎีและสมการมาใช้ในการศึกษาคอมโพสิตเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยมีค่าความหนาแน่น และค่าความจุความร้อนเท่ากับ 3.21103 kg/m^3 และ $3021.7 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ตามลำดับ ดังตารางที่ 2.2 โดยคอมโพสิตได้ผ่านการโพลิงแบบโคโรนา ก่อนการทดสอบการตอบสนองทางไดอิเล็กทริก พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตที่ 1 kHz ที่อุณหภูมิห้อง เท่ากับ 11.5 และ 0.21 ตามลำดับ ดังภาพที่ 2.31 โดยการเป็นไดอิเล็กทริกที่ดีและมีความสามารถในการดัดงอได้

ของสาร ซึ่งชี้ให้เห็นว่าคอมโพสิตนี้น่าสนใจสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการน้ำหนักเบา ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ผลิตง่ายและราคาไม่แพง

ในปี 2009 F. Fang และคณะ [35] ได้ศึกษาลักษณะพฤติกรรมการเสียรูปและการแตกหักภายใต้แรงดึงในทิศทางเดียวของคอมโพสิตแบบ 0-3 ของ BaTiO_3 /poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) จากภาพที่ 2.32 การเพิ่มปริมาณของผง BaTiO_3 ขนาดเล็ก เข้าไปจะยับยั้งการเจริญเติบโตของขนาดผลึก ทำให้เกิดการลดลงของขนาดผลึกและรวมตัวกันแบบหลวมๆ ในโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล ดังนั้นความเครียดของการแตกหักของคอมโพสิตจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงแตกหักลดลง

ตารางที่ 2.2 ความหนาแน่น ค่าความจุความร้อน ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของคอมโพสิต BaTiO_3 /PVDF ที่ได้จากการคำนวณ [34]

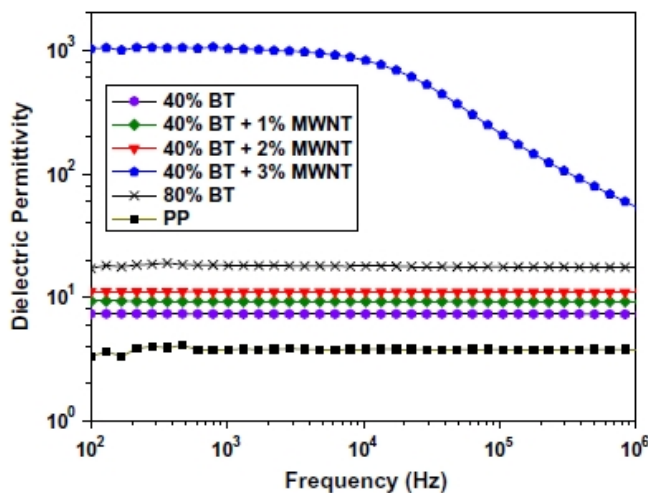
Materials	Density at 25°C $10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Heat capacity (J/kg°C)	Dielectric constant (at 1 kHz, 25°C)	Dielectric loss (at 1 kHz, 25°C)
Poled PVDF	1.901	2322.7	8.4 - 13.51	-
Poled BaTiO_3	5.462	738.6	13012	-
Unpoled BaTiO_3 /PVDF	-	-	0.8	0.48
Poled PVDF	-	-	9.7	0.31
Poled BaTiO_3 /PVDF	3.21 (3.04)	3021.7 (1847.5)	11.5	0.21



ภาพที่ 2.31 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก (ข) ของคอมโพสิต BaTiO₃/PVDF ที่ 1 kHz [34]

ภาพที่ 2.32 กราฟ Stress-strain ของวัสดุคอมโพสิตและฟิล์มโพลิเมอร์ภายใต้การดึงยืดในทิศทางเดียว [35]

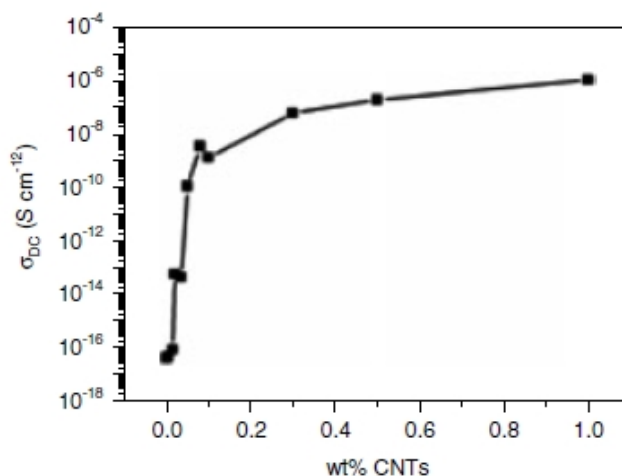
ในปี 2010 Chang-Rong Yu และคณะ[36] ได้ทำการศึกษาโนคอมโพสิตของโพลิโพรพิลีน (Polypropylene;PP) และแบเรียมไททาเนต (BaTiO₃;BT) และทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWNT) พบว่าที่ BT 40 wt.% ที่มี MWNT 2 wt.% ค่าสภาพยอมไดอิเล็กทริก (dielectric permittivity) มีค่าถึง 28 ที่ 100 Hz โดยมค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในระดับที่ต่ำ และเมื่อเพิ่มปริมาณของ MWNT เป็น 3% ทำให้ค่าสภาพยอมไดอิเล็กทริก (dielectric permittivity) ของ คอมโพสิต PP/BT เพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 2.33 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อเทียบกับความถี่ของคอมโพสิต PP/40 wt. % BT ที่ 0–3 wt.% MWNT [36]

ในปี 2010 Jeffrey Salzbrenner และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาผลกระทบทางไฟฟ้าและทางเชิงกลของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNT) ที่อยู่บนพื้นผิวของพอลิไธไมนไฮดรอกเซน

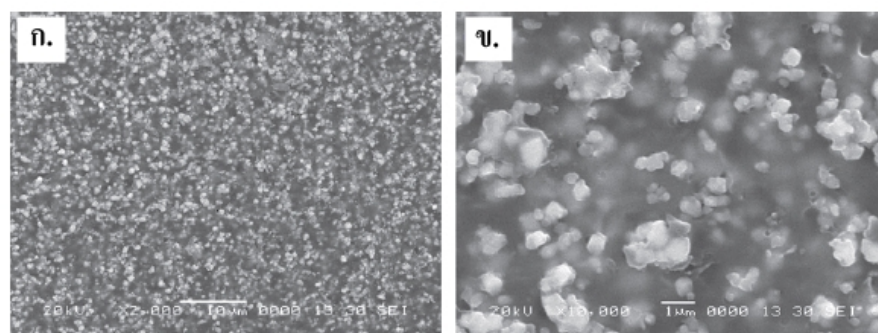
(PDMS) พบว่าจากการรวมกันของท่อนาโนคาร์บอนบนพื้นผิวไม่เพียงมีผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเท่านั้น แต่ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดในด้านของประสิทธิภาพทางไฟฟ้า โดยพบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CNT เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 2.34



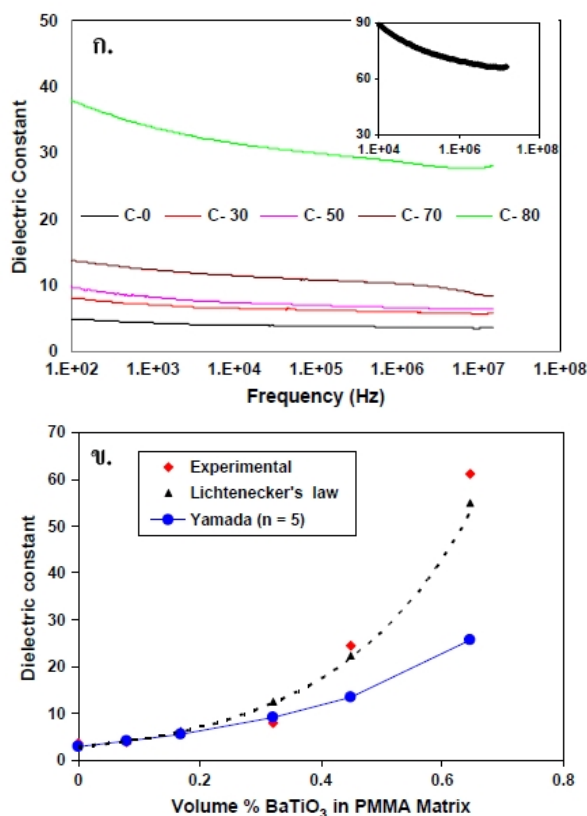
ภาพที่ 2.34 ค่าการนำไฟฟ้าเทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CNT [37]

ต่อมา R.K. Goyal และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาวัสดุผสมของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethyl methacrylate; PMMA) กับ BaTiO₃ โดยเตรียมได้จากการทำเป็นสารละลายอย่างง่าย (simple solution method) และตามด้วยการกดอัดด้วยความร้อน (hot pressing) โดยใช้ปริมาณ BaTiO₃ ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0-65 % โดยปริมาตร ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจากเทคนิค SEM แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวและการยึดเกาะกันที่ดีของ BaTiO₃ กับ PMMA

จากภาพที่ 2.35 แสดงให้เห็นภาพ SEM ของวัสดุผสมที่มี BT 45 % โดยปริมาตรจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอนุภาค BT กระจายอยู่ในเมทริกซ์ แต่บางครั้งพบว่าการรวมตัวของ BT จะส่งผลทำให้เกิดช่องว่าง ส่งผลให้ความหนาแน่นที่ได้ต่ำกว่าความหนาแน่นทางทฤษฎี



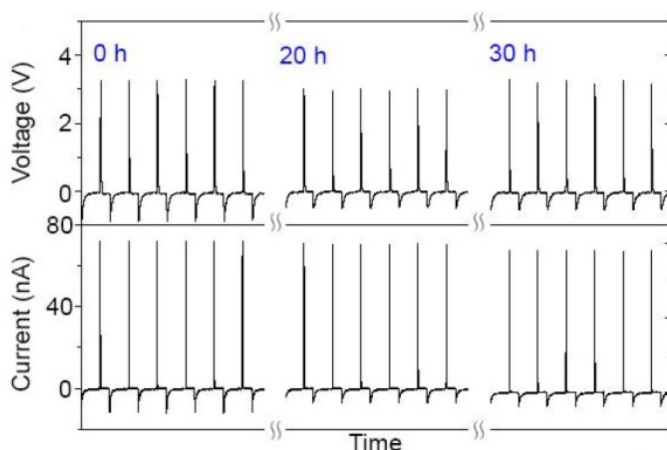
ภาพที่ 2.35 SEM ของ PMMA/BaTiO₃ คอมโพสิตที่ BaTiO₃ 45% ปริมาตร
(ก) กำลังขยายกล้องต่ำ (ข) กำลังขยายกล้องสูง [38]



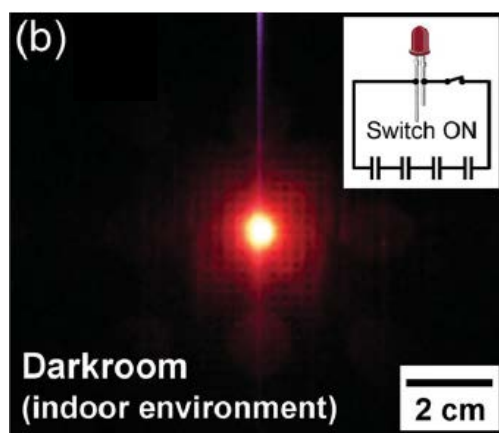
ภาพที่ 2.36 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมขึ้นกับ (ก) ความถี่ (ข) ปริมาตร BT ใน PMMA เมทริกซ์ [38]

จากรูป 2.36(ก) และ 2.36(ข) จะแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของวัสดุผสม PMMA/BT จะขึ้นอยู่กับลอการิทึมของความถี่และปริมาตร BT ที่ใส่ตามลำดับ โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่มีปริมาตร BT 45% ขึ้นไปจะค่อนข้างเสถียรที่ความถี่ต่าง ๆ ดังรูป 2.36(ก) และพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ BT ใน PMMA เมทริกซ์ ดังรูป 2.36(ข) ซึ่งการที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นนั้นเนื่องจากโพลาริเซชันของ BT สูงกว่าใน PMMA เมทริกซ์

โดยในปี 2011 Jung และคณะ [39] ได้รายงานการประดิษฐ์วัสดุกำเนิดไฟฟ้าปลอดสารตะกั่วระดับนาโนที่มีความยืดหยุ่นและให้ประสิทธิภาพสูง โดยใช้ลวดนาโน (nanowire) ของโซเดียมไนโอเบต (sodium niobate; NaNbO_3 ; NN) เตรียมเป็นคอมโพสิตกับพอลิเมอร์ (polydimethyl siloxane; PDMS) โดยทำการเตรียมลวดนาโน NN จากวิธีไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) ที่อุณหภูมิต่ำและเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งพบว่าอุปกรณ์คอมโพสิตของลวดนาโน NN กับ PDMS พอลิเมอร์ให้สัญญาณเพียโซอิเล็กทริกที่สูงและมีความเสถียร ดังภาพที่ 2.37 โดยแสดงศักย์ไฟฟ้าออกมา 3.2 V และให้กระแส 72 nA (ความหนาแน่นกระแส 16 nA/cm^2) ภายใต้ความเครียดกดอัด 0.23% ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าลวดนาโน NN อาจนำไปประยุกต์ใช้ได้ดีในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไร้สารตะกั่วในระดับที่ใหญ่ขึ้น

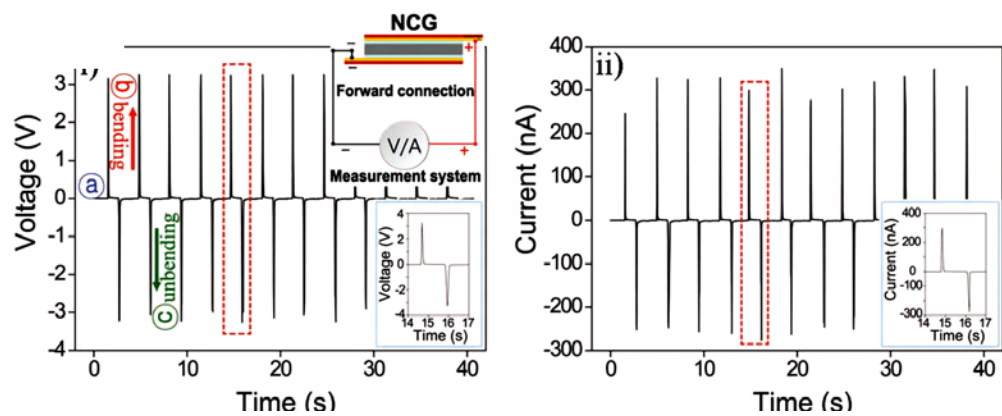


ภาพที่ 2.37 เสถียรภาพของคอมโพสิตภายใต้ความเครียดกดอัด 0.23% เป็นเวลา 30 ชั่วโมงที่ความถี่ 0.33 Hz (ประมาณ 36000 รอบ) [39]



ภาพที่ 2.38 ภาพจากกล้องดิจิทัลแสดงแสงจากหลอด LED ที่เปิดด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโนคอมโพสิต [40]

ในปี 2012 Park และคณะ [40] ได้ทำการประดิษฐ์วัสดุกำเนิดพลังงานนาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้ง่าย ต้นทุนต่ำ และมีพื้นที่ผิวสูงได้จากอนุภาคนาโน BT ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล ร่วมกับนาโนคาร์บอนโดยทำการกระจายตัวในพอลิเมอร์ PDMS ด้วยวิธีการปั่นกววนเชิงกล จากนั้นทำการหมุนเคลือบบนแผ่นรองรับพลาสติกที่เคลือบด้วยโลหะ พบว่าภายใต้การเปลี่ยนแปลงเชิงกลจากภายนอกโดยการงอหรือจากการเคลื่อนไหวของร่างกายมนุษย์จากมือหรือเท้า จะทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าจากอุปกรณ์ขึ้นและสามารถจ่ายให้กับหลอด LED ได้ดังภาพที่ 2.38 จากการบิดงอวัสดุอย่างต่อเนื่องพบว่าให้ศักย์ไฟฟ้าออกมา 3.2 V และให้กระแส 250-350 nA แสดงในภาพที่ 2.39



ภาพที่ 2.39 สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสที่วัดได้จากอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโนคอมโพสิต ขณะทำการบิดอย่างต่อเนื่อง [40]