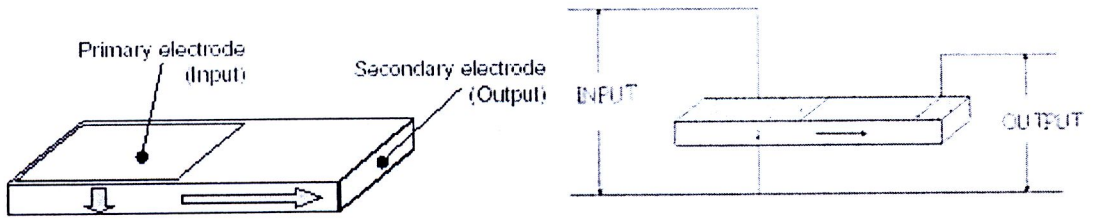
บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 ความเป็นพิโซอิเล็กตริก [1]

ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังดันหรือปรากฏการณ์พิโซอิเล็กตริกซิตี้ (piezoelectricity) ได้ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกโดย Jacques และ Pierre Curie ซึ่งได้ค้นพบในระหว่างทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของแรงดันที่มีต่อการเกิดประจุไฟฟ้าของผลึก (crystal) ได้แก่ ควอทซ์ (quartz) ซิงเบลนด์ (zincblende) และทัวมาลีน (tourmaline) เป็นต้น ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กตริก เป็นปรากฏการณ์ที่แสดงถึงการสร้างประจุไฟฟ้าให้เกิดขึ้น อันเป็นผลมาจากแรงกดอัดเชิงกล (mechanical pressure) หรืออีกนัยหนึ่งคือ ปรากฏการณ์ที่ใช้เรียกการเกิดกระบวนการที่ทำให้เกิดขั้วไฟฟ้า (electric polarization) ขึ้นในวัสดุ เมื่อได้รับความเครียดเชิงกล (Mechanical strain) ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เป็นสัดส่วนกับความเครียดที่วัสดุนั้นได้รับ

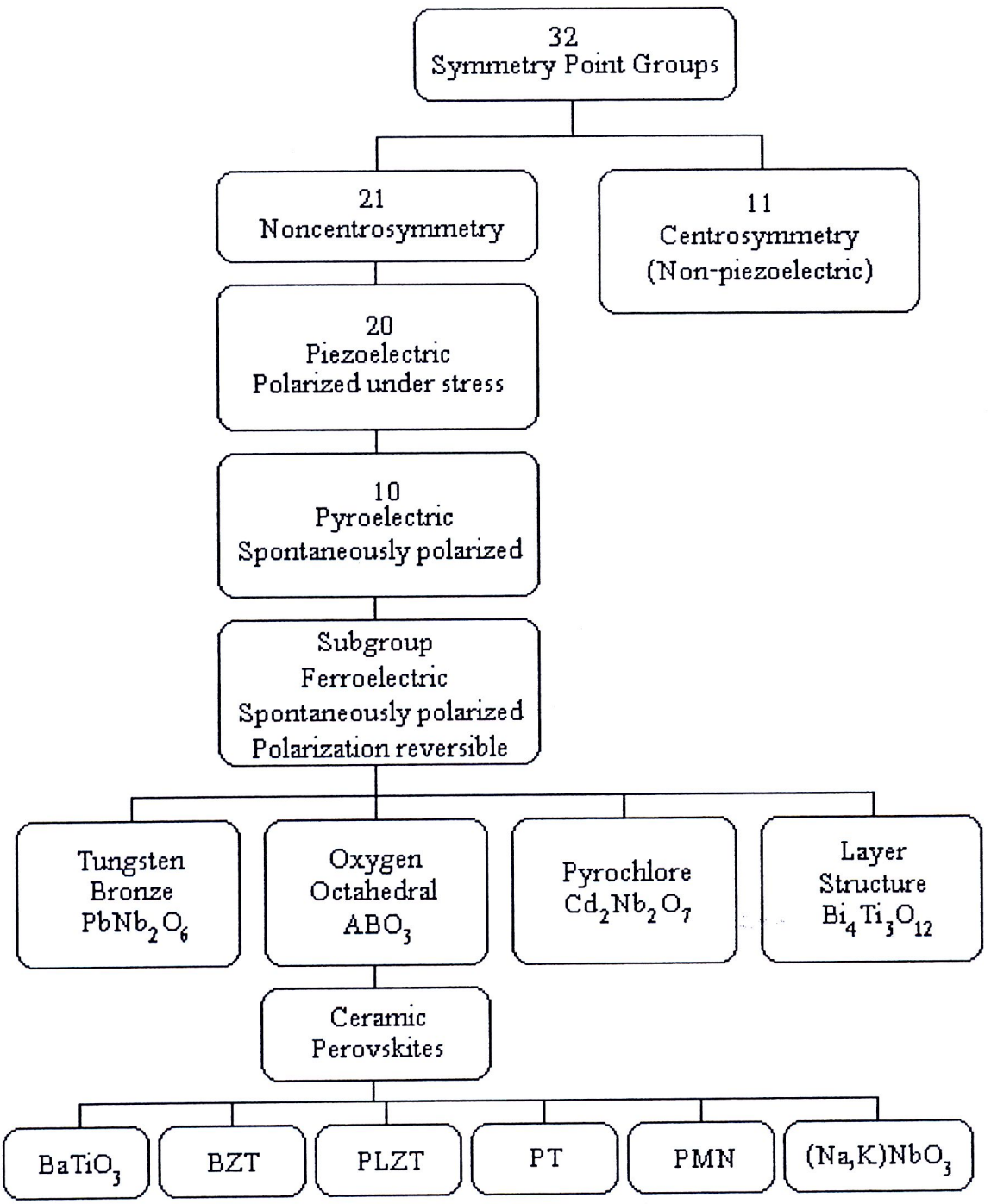
ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กตริกมีอยู่ 2 แบบ คือ ปรากฏการณ์แบบตรง (direct effect) เมื่อสาร PZT ถูกแรงกลมากระทำให้เกิดความเค้น (stress) ขึ้น จะส่งผลให้เกิดมีขั้วไฟฟ้า และเกิดประจุขึ้นมาบนผิวของตัววัสดุ และปรากฏการณ์ย้อนกลับ (converse effect) เมื่อสารได้รับสนามไฟฟ้าจากภายนอก ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างในรูปของการยืดและหดตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.1



(A) (B)

รูปที่ 2.1 แสดงปรากฏการณ์พิโซอิเล็กตริกในเซรามิก PZT ทั้งสองแบบ (A) แบบปรากฏการณ์ตรง และ (B) แบบปรากฏการณ์ย้อนกลับ [1], [2]

ความเป็นพิโซอิเล็กตริกจะขึ้นอยู่กับสมมาตร (Symmetry) ของหน่วยเซลล์ (unit cell) โดยสารที่สามารถแสดงสมบัติความเป็นพิโซอิเล็กตริกได้ดีนั้น จะต้องมีหน่วยเซลล์ประเภทที่ไม่มีจุดศูนย์กลางสมมาตร (noncentrosymmetry) ซึ่งพิจารณาระบบของสมมาตรทั้ง 32 กลุ่มจุด (point groups) ในทางผลึกวิทยา พบว่ามีกลุ่มจุดที่มีหน่วยเซลล์เป็นแบบดังกล่าวเพียง 21 กลุ่มจุด โดยมีกลุ่มจุด 20 ที่สามารถแสดงสมบัติความเป็นพิโซอิเล็กตริกได้



รูปที่ 2.2 แสดงการจัดแบ่งกลุ่มของวัสดุพวกอิเล็กโตรเซรามิกด้วยการใช้สมมาตรของวัสดุ [1]

2.2 สมบัติพิโซอิเล็กตริก [1]

ปรากฏการณ์ทางพิโซอิเล็กตริกสามารถจำแนกได้สองประเภท คือ ปรากฏการณ์แบบ Direct และแบบ converse สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทั้งสองด้วยสมการดังนี้

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

โดยที่ P_i คือ โพลาไรเซชันทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (electrical polarization) ในทิศทาง i

T_j คือ ความเค้นที่ใส่ให้กับสารพิโซอิเล็กตริก (applied mechanical stress) ในทิศทาง j

d_{ij} คือ สัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กตริก (piezoelectric charge coefficient) ในทิศทาง ij มีหน่วยเป็น Coulomb/Newton

ในทำนองเดียวกัน สำหรับกรณีพิโซอิเล็กตริกแบบ Converse เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้า ขนาดของสารจะเปลี่ยนแปลงไป (ความเครียด) สามารถพิจารณาได้จากสมการ

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

โดยที่ S_j คือ ความเครียดที่เกิดขึ้น (mechanical strains) ในทิศทาง j

E_i คือ สนามไฟฟ้าที่ให้กับสารพิโซอิเล็กตริก (electric field) ในทิศทาง i

ส่วนพารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับปรากฏการณ์พิโซอิเล็กตริก คือ สัมประสิทธิ์แรงดันพิโซอิเล็กตริก (Piezoelectric voltage coefficient, g_{ij}) สามารถอธิบายได้ดังสมการ

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

โดยที่ E_i คือ สนามไฟฟ้าที่ให้กับสารพิโซอิเล็กตริก (electric field) ในทิศทาง i

T_j คือ ความเค้นที่ใส่ให้กับสารพิโซอิเล็กตริก (applied mechanical stress) ในทิศทาง j

g_{ij} คือ สัมประสิทธิ์แรงดันพิโซอิเล็กตริก (piezoelectric voltage coefficient, g_{ij}) ในทิศทาง ij มีหน่วยเป็น Volt-metre/Newton

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กตริก (d_{ij}) และสัมประสิทธิ์แรงดันพิโซอิเล็กตริกสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$g_{ij} = \frac{d_{ij}}{K_{\varepsilon_0}} \qquad (2.4)$$

โดยที่ K คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant)

ε_0 คือ permittivity ของ free space (8.854×10^{-12} farad/meter)

นอกจากสมการข้างต้นแล้ว ยังสามารถอธิบายปรากฏการณ์พิโซอิเล็กตริกที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ 4 ตัว ได้แก่ ความเครียด (S) ความเค้น (T) การขจัดไดอิเล็กตริก (D) และสนามไฟฟ้า (E) ได้ดังนี้

$$D = dT + e^{T}E \qquad (2.5)$$

$$S = s^{E}T + dE \qquad (2.6)$$

โดยที่ D คือ การขจัดไดอิเล็กตริก

T คือ ความเค้น (stress)

E คือ สนามไฟฟ้า (electric field)

d คือ สัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กตริก (piezoelectric coefficient)

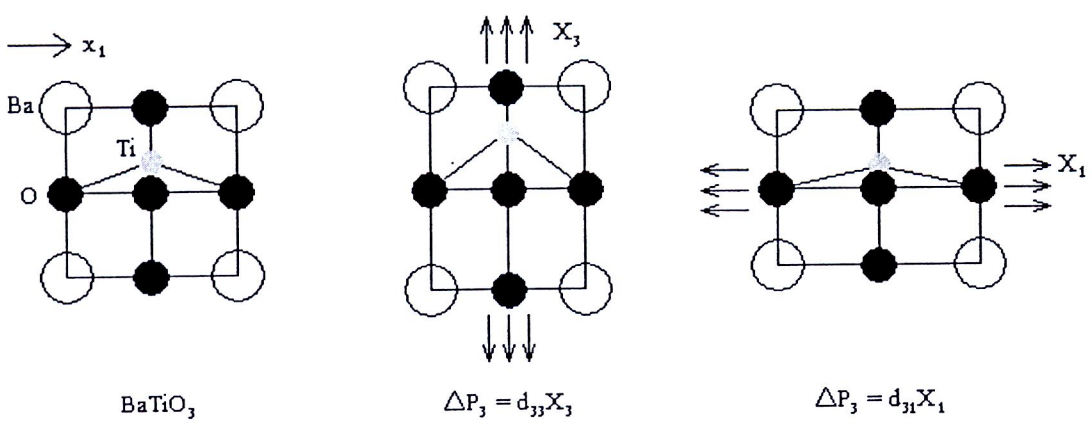
S คือ ความเครียด (strain)

s คือ material compliance

ε_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant)

2.2.1 สัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กตริก

สมการที่ (2.5) และ (2.6) นี้อยู่ในรูปเมทริกซ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่จะขึ้นกับทิศทาง นั่นคือ ความเป็นพิโซอิเล็กตริกขึ้นกับทิศทาง ซึ่งทิศทางที่กล่าวนี้คือทิศทางของโพ-ลาไรเซชันที่เปลี่ยน (หรือความเครียด) ที่เกิดจากการให้ความเค้น (หรือสนามไฟฟ้า) ในทิศทางต่าง ๆ ซึ่งโดยทั่วไปให้ทิศทางโพลาร์ในทิศทาง 3 ขณะที่ทิศทาง 1 และ 2 ตั้งฉากและสมมูลกัน ดังนั้นเซรามิกที่เป็นเฟร์โรอิเล็กตริก จะมีสามทิศทางที่สัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กตริกไม่เป็นศูนย์ นั่นคือ d_{33}, d_{31} และ d_{15} สามารถแสดงภาพความสัมพันธ์ของโพลาไรเซชันที่เปลี่ยน (หรือความเครียด) ที่เกิดจากความเค้น (สนามไฟฟ้า) ที่ให้ในทิศทางต่าง ๆ ได้ดังรูป



รูปที่ 2.3 แผนภาพ 2 มิติ ของโครงสร้างแบบ perovskite ของ $BaTiO_3$ แสดงการเลื่อนตำแหน่งของอิออนดิตาเนตในทิศทางต่างๆ[1]

เมื่อ

ค่า d_{33} เป็นสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กตริกตามยาว เมื่อมีการให้ความเค้นในทิศทาง 3 แล้วทำให้เกิด โพลาไรเซชันในทิศทางเดียวกัน

ค่า d_{31} เป็นสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กตริกตามขวาง สัมพันธ์กับโพลาไรเซชันที่เกิดในทิศทาง 3 ที่เกิดจากการให้ความเค้นในทิศทางที่ตั้งฉาก (ทิศทาง 1 หรือ 2)

ค่า d_{15} เป็นสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กตริกแนวเฉือน สัมพันธ์กับโพลาไรเซชันที่เกิดในทิศทาง 1 ที่เกิดจากความเค้นเฉือนรอบแกน 2

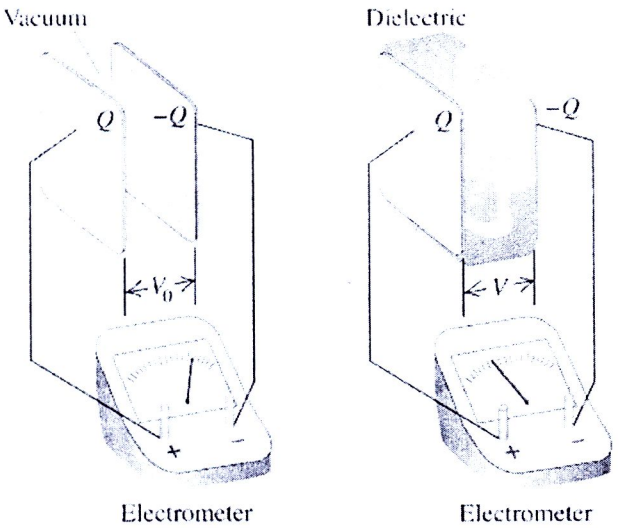
2.3 สมบัติไดอิเล็กตริก [1]

2.3.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

โดยทั่วไปวัสดุที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ต่างกัน ชนิดที่นำไฟฟ้าได้ดีจัดว่าเป็นวัสดุตัวนำ ชนิดที่นำไฟฟ้าไม่ได้หรือได้น้อยมากจัดว่าเป็นวัสดุฉนวน จะเกิดปรากฏการณ์โพลาไรเซชันขึ้นได้ เรียกวัสดุฉนวนนี้ว่า “วัสดุไดอิเล็กตริก”

สารทุกชนิดประกอบด้วยส่วนย่อย คือ โมเลกุล ซึ่งโมเลกุลโดยปรกติประกอบด้วยกลุ่มโปรตอนและอิเล็กตรอน มีจุดศูนย์กลางร่วมกันและอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและแรงยึดเหนี่ยวของอะตอม เมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้า มากระทำกับโมเลกุลจะทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศทางของสนาม และกลุ่มประจุลบ จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามดังนั้นโมเลกุลทุกโมเลกุลของสาร ต่างก็ก่อตัวเป็นโมเลกุลขั้วคู่ (Dipole moment) โดยมีขั้วเล็กๆเรียงต่อในทิศทางเดียวกันตามทิศทางสนามไฟฟ้า อย่างไรก็ตามสารไดอิเล็กตริกประเภทนี้ เป็นสารประเภทโมเลกุลไม่มีขั้ว (Non-polar molecule)

สารไดอิเล็กตริกบางชนิดที่โมเลกุลก่อตัวเป็นขั้วทางไฟฟ้า (dielectric dipole) ชี้ในทิศทางที่ไม่เป็นระเบียบ และเมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกเข้ามากระทำจะส่งผลให้ขั้วเล็กๆเหล่านี้ เกิดการเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเรียกโมเลกุลประเภทนี้ว่าขั้วคู่ถาวร (permanent dipole)นอกจากนี้ยังพบว่ามีสารในบางประเภท ที่มีโมเลกุลที่สามารถเรียงตัวกันได้เองโดยไม่ต้องใช้สนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้ามมากระทำ โดยเรียกสารประเภทนี้ว่า สารเฟร์โรอิเล็กตริก (ferroelectric materials) เช่น เลดเซอร์โคเนตติตาเนต (PZT) เป็นต้น ซึ่งสามารถอธิบายผลของไดอิเล็กตริกในบรรยากาศและ เมื่อผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกดังรูป รูป 2.4



(a) (b)

รูปที่ 2.4 ผลของไดอิเล็กตริกระหว่างตัวเก็บประจุคู่ขนาน โดยใช้อิเล็กโทรมิเตอร์ วัดความต่างศักย์เมื่อ ให้ประจุเข้าไป (a) อากาศพบว่าความต่างศักย์มีค่าเป็น V_o และ (b) ผ่านแผ่นไดอิเล็กตริกมีความต่างศักย์ V น้อยกว่า V_o [13]

สำหรับวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีการขจัดไดอิเล็กตริก (Dielectric displacement: D) เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้า (E) ภายในวัสดุไดอิเล็กตริกนั้น ความสัมพันธ์แสดงดังสมการ

$$D = \varepsilon_0 E_a = \varepsilon_0 k' E \qquad (2.7)$$

โดยที่ D คือ การขจัดไดอิเล็กตริก (dielectric displacement)

E_a คือ สนามไฟฟ้าที่ให้

E คือ สนามไฟฟ้าภายในวัสดุ

ε_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศ (permittivity of vacuum or dielectric constant = 8.854×10^{-12} F/m)

k' คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant)

จากสมการ

$$k' = \frac{D}{\varepsilon_0 E} = \frac{Q/A}{\varepsilon_{0v}/d} \qquad (2.8)$$

$$Q = \varepsilon_0 k' \frac{A}{d} V = CV \qquad (2.9)$$

$$C = \varepsilon_0 k' \frac{A}{d} \tag{2.10}$$

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \tag{2.11}$$

ดังนั้น

$$k' = \frac{c}{c_0} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{2.12}$$

โดยที่ Q คือ ประจุรวม (total charge: coulomb)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นโลหะที่ประกบวัสดุไดอิเล็กตริก

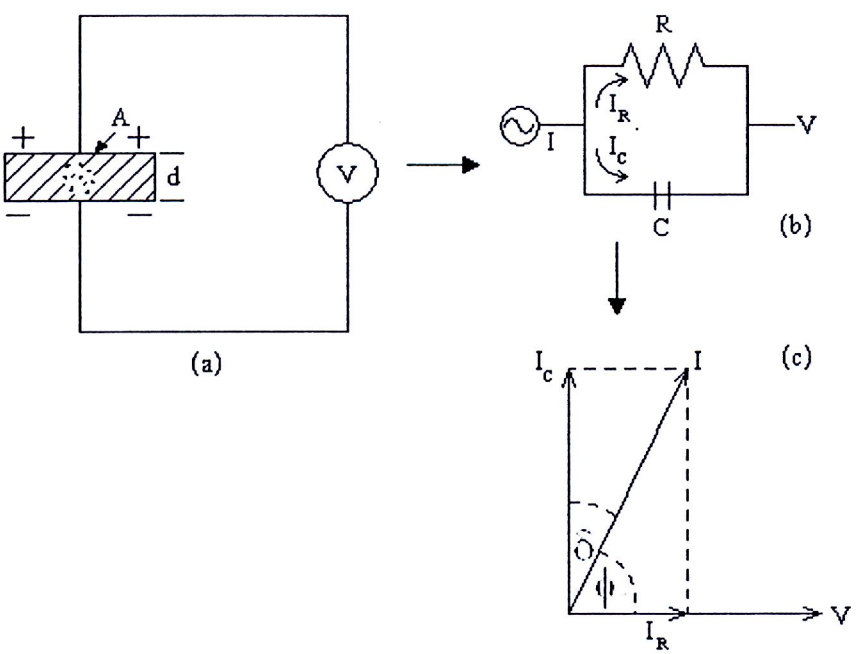
V คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ให้

d คือ ความหนา

C และ C_0 คือ ความจุไฟฟ้าของวัสดุและของอากาศตามลำดับ

ε คือ ค่า Permittivity ของสาร

ความสามารถแสดงภาพเมื่อมีการวางตัวเก็บประจุ ซึ่งทำขึ้นจากการนำแผ่นโลหะมาประกบวัสดุไดอิเล็กตริก ในสนามไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสไฟฟ้าสลับ ดังรูป

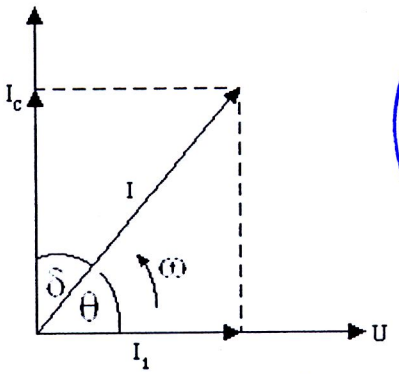


รูปที่ 2.5 การจัดวางตัวเก็บประจุ (a) ในสนามไฟฟ้ากระแสตรง (b) ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ (c) แสดงค่า loss tangent ที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริก [1]

2.3.2 การสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กตริก [3]

เมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ พฤติกรรมของวัสดุจะต่างออกไปจากเมื่ออยู่สนามไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้ากระแสสลับ สนามไฟฟ้าจะสลับตามรูปแบบของคลื่นไซน์ ($E=E_0 sin\omega t$) ดังนั้น เมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับแก่วัสดุไดอิเล็กตริก ไดโพลภายในวัสดุไดอิเล็กตริกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาตามความถี่ของสนามไฟฟ้า กระแสสลับที่ให้ซึ่ง ณ ความถี่สูง ไดโพลจะกลับตัวไม่ทันกับสนามไฟฟ้าที่ให้ ส่งผลให้เกิดรีแลกเซชัน (relaxation) ขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่า สนามไฟฟ้าเป็นพลังงานแบบหนึ่ง ซึ่งเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุไดอิเล็กตริก ไดโพลในวัสดุไดอิเล็กตริกจะใช้พลังงานที่ให้ในการกลับตัวไปมา แต่เมื่อที่ความถี่สูง ๆ ไดโพลจะ กลับตัวตามความถี่ไม่ทัน เมื่อกลับไม่ทันไดโพลจึงไม่กลับตัวและเมื่อไม่กลับตัว แต่ยังรับพลังงานจากสนามไฟฟ้าอยู่ พลังงานที่สารได้รับจะค่อยๆ สะสมจนเกิดเป็นความร้อนขึ้นเป็นการสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กตริก

ตามทฤษฎีจะไม่เกิดการสูญเสียขึ้น แต่ในความเป็นจริงกระแสมิได้นำศักย์ไฟฟ้าอยู่ 90° ส่งผลให้เกิดการสูญเสียขึ้น



รูปที่ 2.6 การนิยาม Loss Tangent ที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริก [3]

เรียกเทอม tan δ ว่า dissipation factor หรือ loss tangent พิจารณาภาพ ถ้ามุม δ เล็ก การสูญเสียทางไดอิเล็กตริกจะมีค่าน้อยและเรียกมุม δ ว่าเป็น loss angle

2.4 สมบัติเฟร์โรอิเล็กตริก [6]

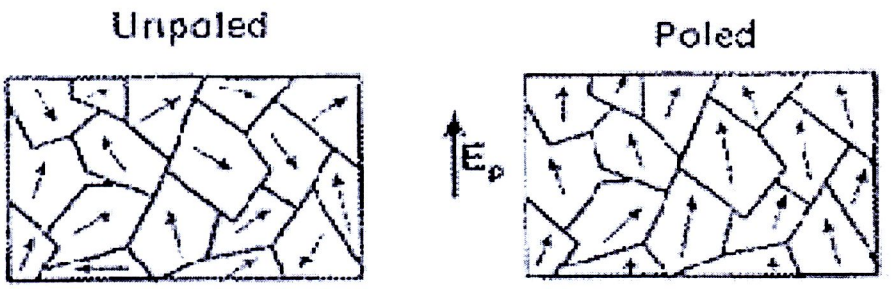
วัสดุเฟร์โรอิเล็กตริก คือ วัสดุมีขั้วซึ่งในสภาวะที่ไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกแล้วมีทิศทางการจัดเรียงตัวในสถานะสมดุลของเวกเตอร์สภาพการมีขั้วขึ้นเอง (spontaneous polarization) อย่างน้อย 2 ทิศทาง และเวกเตอร์สภาพการมีขั้วขึ้นเองทั้งสองนี้สามารถสลับทิศทางกันได้โดยการใช้สนามไฟฟ้า วัสดุเฟร์โรอิเล็กตริกส่วนมากจะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากสภาพไม่เป็นเฟร์โรอิเล็กตริก (หรือพาราอิ-เล็กตริก) ที่อุณหภูมิสูงไปสู่สภาพเฟร์โรอิเล็กตริก

ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งโดยปกติแล้วในสถานะพาราอิเล็กตริกวัสดุดังกล่าวอาจมีสมบัติพิโซอิเล็กตริกหรือไม่ก็ได้ และมักจะไม่เป็นวัสดุมีขั้ว ทั้งนี้สมมาตรของโครงสร้างในสถานะ เฟร์โรอิเล็กตริกจะต่ำกว่าสมมาตรของสถานะพาราอิเล็กตริกเสมอ อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสถานะจากพาราอิเล็กตริกมาเป็นเฟร์โรอิเล็กตริก (และในทางกลับกัน) นั้นเรียกว่า "อุณหภูมิคูรี" (Curie temperature หรือ Curie point : T_c) ทั้งนี้เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า T_c สภาพยอมไดอิเล็กตริกจะลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิโดยเป็นไปตามกฎคูรี-ไวสส์ (Curie-Weiss law)

วัสดุเฟร์โรอิเล็กตริกบางชนิด เช่น แบเรียมติตาเนต ($BaTiO_3$) นั้นสามารถที่จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างหลายครั้งในสภาพที่ยังคงเป็นเฟร์โรอิเล็กตริกอยู่ ทั้งนี้เฉพาะอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสถานะเข้าสู่เฟร์โรอิเล็กตริกครั้งแรกเท่านั้นที่เรียกว่า "อุณหภูมิคูรี" (Curie point) การเปลี่ยนสถานะเข้าสู่สภาพ เฟร์โรอิเล็กตริกมักจะตามมาด้วย การเปลี่ยนแปลงอย่างผิดปกติในสมบัติไดอิเล็กตริก ความยืดหยุ่น ความร้อน และอื่นๆ ของวัสดุ และตามมาด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดของเซลล์หน่วยของผลึก โดยความเครียดที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า "ความเครียดเกิดขึ้นเอง(spontaneous strain, x_s)" ซึ่งแสดงความแตกต่างสัมพันธ์ของขนาดเซลล์หน่วยในสถานะเฟร์โรอิเล็กตริกและพาราอิเล็กตริก

2.4.1 การทำให้เกิดสภาพขั้วหรือการโพล (Poling) [6]

เนื่องด้วยความซับซ้อนของเงื่อนไขขอบเขตความยืดหยุ่นและไฟฟ้าในแต่ละเกรนทำให้เกรน เฟร์โรอิเล็กตริกในเซรามิกและฟิล์มพหุผลึกต้องประกอบไปด้วยหลาย ๆ โดเมนเสมอ ถ้าทิศทางของสภาพการมีขั้วขึ้นเองทั่วทั้งวัสดุมีการกระจายตัวอย่างสุ่ม หรือกระจายตัวในลักษณะที่นำไปสู่สภาพการมีขั้วรวมเป็นศูนย์แล้ว ปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กตริกและพิโซอิเล็กตริกในแต่ละโดเมนจะหักล้างกันจนไม่แสดงสมบัติดังกล่าวออกมา วัสดุเฟร์โรอิเล็กตริกพหุผลึกอาจจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วได้โดยการใช้สนามไฟฟ้าสูง ๆ (10-100 kV/cm) และที่อุณหภูมิสูงพร้อมกัน โดยเรียกกระบวนการเช่นนี้ว่า "การทำให้เกิดสภาพขั้ว" หรือ "การโพล (poling)" ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนทิศทางของเกรนได้ แต่เปลี่ยนทิศทางของโดเมนในแต่ละเกรนให้อยู่ในทิศทางของสนามไฟฟ้าได้



(A) (B)

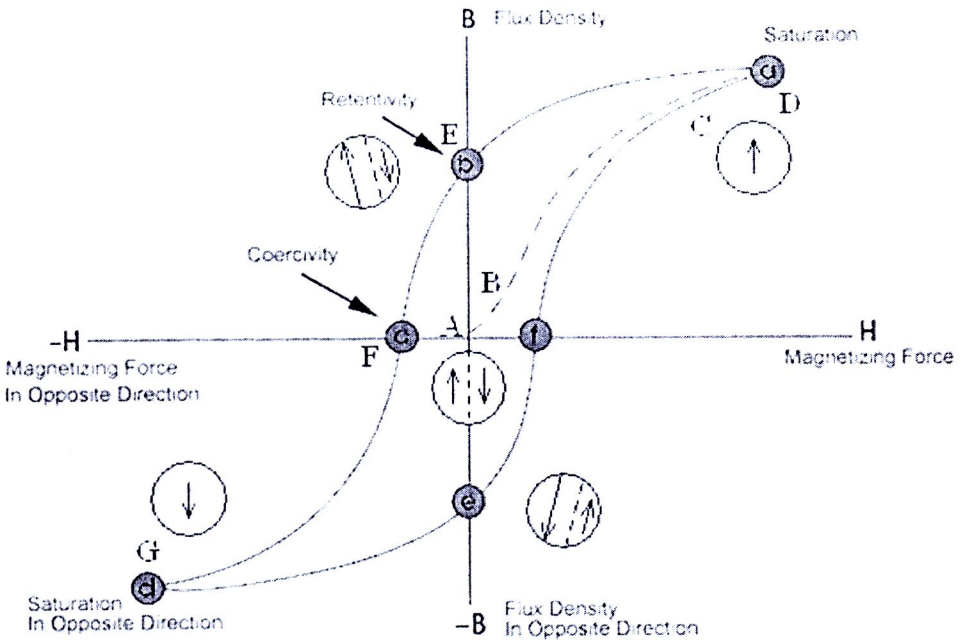
รูปที่ 2.7 แสดงโมเมนต์ขั้วคู่ภายในเนื้อสาร (A) ก่อนทำการสร้างขั้ว และ (B) หลังทำการสร้างขั้ว [14]

ทั้งนี้วัสดุเฟร์โรอิเล็กตริกพหุผลึกที่ถูกทำให้เกิดสภาพขั้วแล้ว จะแสดงสมบัติไพโรอิเล็กตริกและ พิโซอิเล็กตริก ถึงแม้ว่าจะยังคงมีผนังโดเมนจำนวนมากอยู่ ผลึกเชิงเดี่ยวเฟร์โรอิเล็กตริกที่ปลูกได้มักจะประกอบไปด้วยโดเมนจำนวนมากและอาจจะแสดงสมบัติไพโรอิเล็กตริกและพิโซอิเล็กตริก อย่างอ่อน ๆ ผลึกเชิงเดี่ยวที่ไม่มีโดเมนจะถูกเรียกว่าอยู่ใน "สถานะโดเมนเดี่ยว" (Single domain หรือ monodomain) ซึ่งลักษณะเช่นนี้อาจทำให้เกิดขึ้นได้ในผลึกเชิงเดี่ยวโดยกระบวนการทำให้เกิดสภาพขั้ว

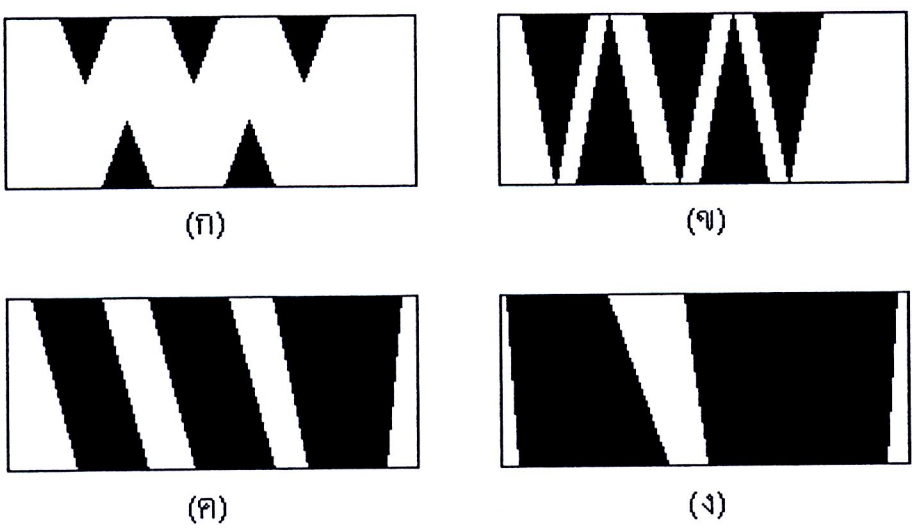
สภาพการมีขั้วหลังจากสนามไฟฟ้าถูกนำออกไปแล้ว (สนามไฟฟ้าเป็นศูนย์) เรียกว่า "สภาพการมีขั้วตกค้าง" (remanent polarization) P_R ทั้งนี้สภาพการมีขั้วตกค้างสูงสุด $(P_R)_{max}$ ที่จะมีได้ในวัสดุพหุผลึกจะขึ้นอยู่กับสถานะโดเมนที่มีได้ในวัสดุเฟร์โรอิเล็กตริกที่ประกอบไปด้วยผนังโดเมน 180° เท่านั้น ในสถานะพหุผลึก $(P_R)_{max}$ จะมีได้เพียง 0.25 P_S ในขณะที่วัสดุเฟร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอลซึ่งมีสถานะโดเมนที่มีได้อยู่ 6 สถานะ จะมี $(P_R)_{max}$ ได้เท่ากับ 0.83 P_S ในขณะที่ในโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรัลซึ่งมีสถานะโดเมนที่มีได้อยู่ 8 สถานะ มีค่า $(P_R)_{max}$ เท่ากับ 0.87 P_S และสำหรับโครงสร้างแบบออร์โทรอมบิกซึ่งมีสถานะโดเมนที่มีได้อยู่ 12 สถานะ ทำให้มีค่า $(P_R)_{max}$ เท่ากับ 0.91 P_S ทั้งนี้ค่าเหล่านี้เป็นค่าสูงสุดในอุดมคติที่เกิดขึ้นจากการจัดทิศทางของโดเมนทั้งหมดตามทิศทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดตามอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ให้ ซึ่งในความเป็นจริงมักจะมีค่าต่ำกว่าเสมอเนื่องจากหลาย ๆ โดเมนก็ไม่สามารถเปลี่ยนทิศทางการจัดเรียงตัวได้ด้วยเหตุผลของความเค้นภายในและสนามไฟฟ้าภายในเกรนซึ่งค่อนข้างซับซ้อน นอกจากนี้โดเมนบางส่วนยังคืนสู่ทิศทางเดิม เมื่อสนามไฟฟ้าถูกนำออกไป ถ้าสมมาตรของวัสดุเฟร์โรอิ-เล็กตริกนั้นอนุญาตที่จะให้มีผนังโดเมนที่ไม่ใช่ 180° ได้ กระบวนการทำให้เกิดสภาพขั้วจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานด้วย เนื่องจากการจัดทิศทางใหม่ของผนังโดเมนที่ไม่ใช่ 180° จะเกี่ยวพันกับการจัดทิศทางใหม่ของความเครียดที่เกิดขึ้นเอง

2.4.2 วงวนฮิสเทอรีซิสเฟร์โรอิเล็กตริก (Ferroelectric hysteresis loop) [6]

คุณลักษณะที่สำคัญที่สุดของวัสดุเฟร์โรอิเล็กตริก คือการกลับทิศของสภาพการมีขั้ว (polarization reversal หรือ switching) โดยสนามไฟฟ้า ผลสืบเนื่องอันหนึ่งของการกลับทิศของโดเมนในวัสดุเฟร์โรอิ-เล็กตริก คือการเกิดของวงวนฮิสเทรีซิสเฟร์โรอิเล็กตริก โดยสามารถสังเกตได้จากการทดลองโดยใช้วงจร Sawyer-Tower ซึ่งการเกิดขึ้นของวงวนฮิสเทอรีซิสสามารถอธิบายได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ เมื่อมีสนามไฟฟ้าและกระแสสลับต่ำ ๆ สภาพการมีขั้วจะเพิ่มแบบเชิงเส้นกับขนาดของสนาม ซึ่งสอดคล้องกับช่วง AB ของรูปที่ 2.8 ในช่วงนี้สนามไฟฟ้าจะไม่สูงพอที่จะกลับทิศของโดเมนที่มีทิศทางของสภาพการมีขั้วที่ไม่เป็นที่ชื่นชอบ และเมื่อสนามเพิ่มขึ้นสภาพการมีขั้วที่มีทิศทางดังกล่าวก็จะเริ่มกลับทิศไปตามสนามไฟฟ้า และมีการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของประจุที่วัดได้สูงขึ้น (ช่วง BC) การตอบสนองของสภาพการมีขั้วในช่วงนี้จะมีความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่มาก เมื่อโดเมนทั้งหมดถูกจัดทิศทางใหม่แล้ว (จุด C) สภาพเฟร์โรอิเล็กตริกจะมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นอีกครั้ง (ช่วง CD) ต่อมาเมื่อเริ่มลดสนามไฟฟ้าลง โดเมนบางส่วนก็จะกลับไปสู่ทิศทางเดิม (back-switching) แต่ที่ตำแหน่งสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ (จุด E) สภาพการมีขั้วจะไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นถ้าจะทำให้สภาพการมีขั้วหมดไป สนามไฟฟ้าจะต้องถูกกลับทิศ (จุด F) และเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามก็จะทำให้มีการจัดเรียงทิศของไดโพลใหม่ ก่อนที่จะถึงจุดอิ่มตัว (saturation) (จุด G) แล้วก็มีการลดสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ และต่อมาเมื่อกลับทิศทางของสนามไฟฟ้าอีกครั้ง ก็จะครบรอบของการทดลอง สภาพการมีขั้วเมื่อสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ (จุด E) เรียกว่า “สภาพการมีขั้วตกค้าง” (remanent polarization) สนามไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการลดสภาพการมีขั้วให้กลับสู่ศูนย์อีกครั้งเรียกว่า “สนามไฟฟ้าลบล้าง” (coercive field) E_c สำหรับสภาพการมีขั้วเกิดขึ้นเอง P_S มักจะถูกกำหนดให้เป็นจุดตัดแกนสภาพการมีขั้วของเส้นตรงที่ลากต่อมาจากช่วงเชิงเส้น CD นอกจากนี้ยังต้องกล่าวว่าสนามไฟฟ้าลบล้าง E_c ซึ่งได้จากจุดตัดของวงวนฮิสเทอรีซิสกับแกนสนามไฟฟ้านั้นไม่ใช่ค่าสนามไฟฟ้าเริ่มเปลี่ยนสัมบูรณ์ (absolute threshold field) ถ้าสนามไฟฟ้าต่ำ ๆ ถูกให้กับวัสดุเฟร์โรอิเล็กทริกเป็นระยะเวลานาน (มาก) แล้ว สภาพการมีขั้วก็จะเกิดการกลับทิศในที่สุด สำหรับการกลับทิศของสภาพการมีขั้วเกิดขึ้นได้โดยการเติบโต (growth) ของโดเมนที่มีทิศทางตรงกันข้ามกัน ด้วยการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนและโดยการเกิดใหม่ (nucleation) และการเติบโตของโดเมนที่มีทิศทางตรงกันข้ามกัน (growth of unparallel domains)



รูปที่ 2.8 วงวนฮิสเทอรีซิสเฟร์โรอิเล็กทริก วงกลมที่มีลูกศรด้วยแสดงให้เห็นถึงสภาพการมีขั้วของวัสดุในสนามแม่เหล็ก [15]



รูปที่ 2.9 กระบวนการในการกลับทิศของสภาพมีขั้วในวัสดุเฟร์โรอิเล็กตริก [1]

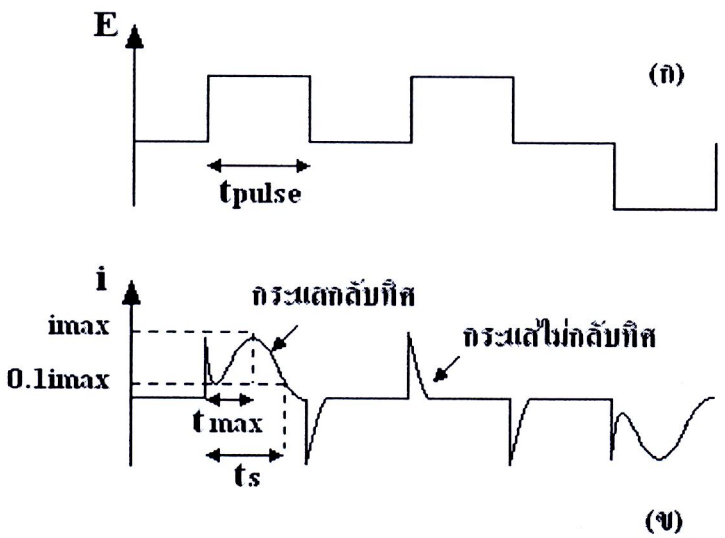
(ก) การเกิดใหม่ของโดเมนที่จัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกัน

(ข) การเติบโตของโดเมนที่จัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามกัน

(ค) การเคลื่อนที่ด้านข้างของผนังโดเมน

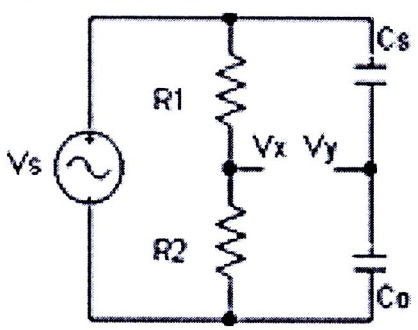
(ง) การรวมตัวกันของหลายๆ โดเมน

ในการทดลองนั้น การศึกษาการกลับทิศทางสภาพการมีขั้วมักจะใช้สัญญาณเป็นห้วง ๆ ซึ่งมีข้อดีสองประการคือ สนามไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ระหว่างการกลับทิศและลักษณะการศึกษาดังกล่าวจะเหมือนดังในการใช้งานจริงสำหรับการประยุกต์ใช้ในหน่วยความจำ

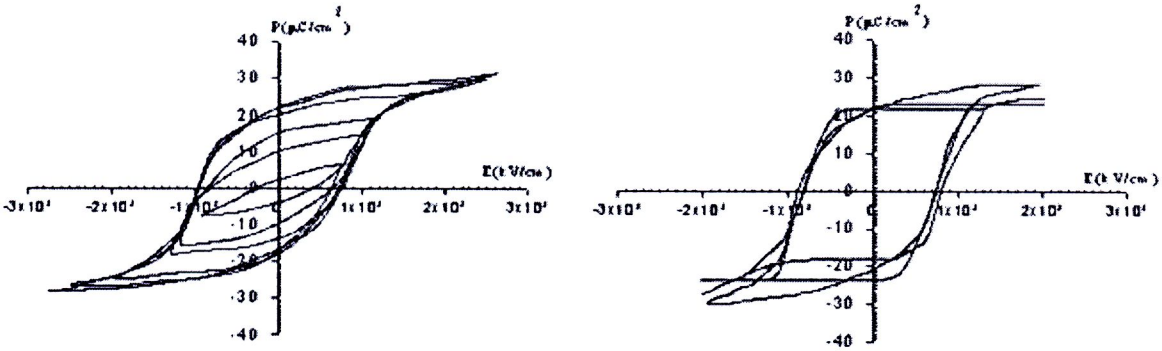


รูปที่ 2.10 กระแสกลับทิศและกระแสฉับพลันระหว่างการเกิดการกลับทิศของสภาพการมีขั้ว (ก) สนามไฟฟ้า (ข) กระแสที่ขึ้นกับเวลา [1]

อย่างไรก็ตาม ก็ยังสามารถที่จะใช้วงจรที่มีการให้สนามแบบต่อเนื่อง เช่น วงจร Sawyer-Tower ในการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสได้เช่นกัน



รูปที่ 2.11 วงจร Sawyer-Tower อย่างง่ายที่ใช้ในการวัดวงวนฮิสเทอรีซิส (R_1=6.8MΩ R_2=10kΩ C_0=0.1 μF C_s=PZT, C_0>>C_s) [16]



(ก) (ข)

รูปที่ 2.12 ตัวอย่างของวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้จากการวัดด้วยวงจร Sawyer-Tower โดย (ก) ใช้สนามไฟฟ้าต่าง ๆ และ (ข) ใช้ความต้านทานต่างๆ [16]

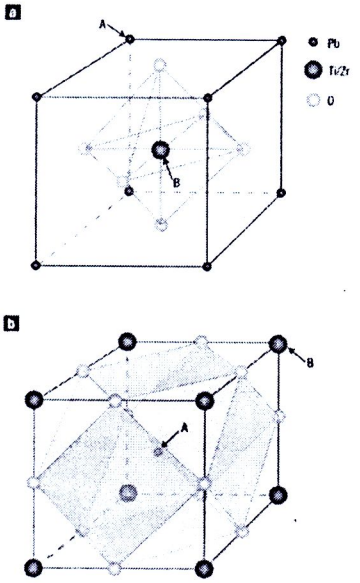
2.5 โครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์ [1]

เพอร์รอฟสไกต์เป็นชื่อของสาร $CaTiO_3$ ซึ่งมีสูตรเป็น ABO_3 แต่สารที่แสดงสมบัติเฟร์โรอิเล็กตริก (Ferroelectric) ส่วนใหญ่มีสูตรโครงสร้างเหมือนกับสารเพอร์รอฟสไกต์ ดังนั้นจึงจัดกลุ่มเรียกสารพวกนี้ว่า เพอร์รอฟสไกต์ ซึ่งจริงๆ แล้ว สารเพอร์รอฟสไกต์ก็ไม่ได้แสดงสมบัติเฟร์โรอิเล็กตริก หากพิจารณาโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์เป็นการจัดเรียงตัวของ Atom A และ Atom B แบบ Complex oxide ซึ่งลักษณะเป็นการร่วมกันระหว่าง cation และ anion สร้าง close pack structure แบบ cubic close pack structure โดยที่ B site อยู่ตรงกลาง A site เป็น atom อยู่ที่มุมทั้ง 8 และอะตอมของ oxide จะอยู่กลางหน้าทั้ง 6 ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งอาจแบ่งโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ออกเป็น 2 แบบ

1. Ideal perovkite (ABO_3)
2. Complex perovskite (A' A'' B' B'' O_3)

Ideal perovskite เป็นโครงสร้างของเพอร์รอฟสไกต์ที่ ณ ตำแหน่ง A site และ B site เป็นอะตอมของธาตุชนิดหนึ่งชนิดใดเลยไม่ได้แบ่งตำแหน่งนี้ให้ธาตุอื่นอยู่ ซึ่งเมื่อพิจารณา Complex perovskite อาจแบ่งย่อยออกได้อีก 2 แบบ

1. Lead-Based complex perovskite
2. Free Lead base complex perovskite



รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์ [7]

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

ในทำนองเดียวกัน สำหรับ Free Lead base complex perovskite ตำแหน่ง A site ไม่ได้มี Lead อยู่ ณ ตำแหน่งนี้แล้ว แต่ทั้ง A site และ B site เป็นการอยู่ร่วมกันของอะตอมธาตุอื่นทั้งสองตำแหน่ง ยกตัวอย่างสำหรับ Lead-Based เช่น

PMN $$Pb^{2+}\left(Mg^{2+}_{\frac{2}{3}}Nb^{5+}_{\frac{2}{3}}\right)O_3^{2-}$$

PFN $$Pb^{2+}\left(Fe^{2+}_{\frac{1}{2}}Nb^{3+}_{\frac{1}{2}}\right)O_3^{2-}$$

และ Free Lead based Complex perovskite เช่น

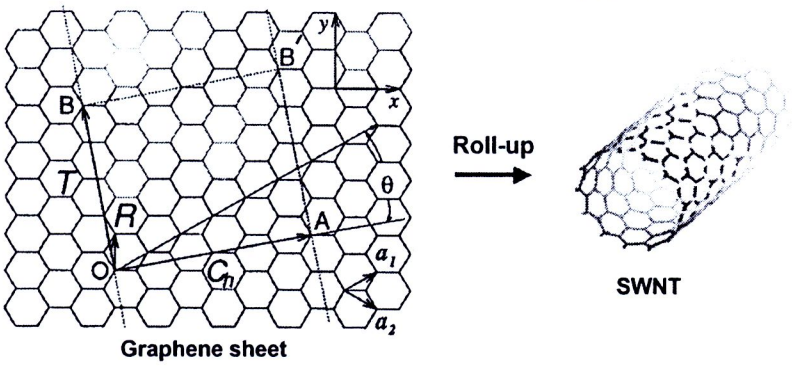
SMN $$Sr^{2+}\left(Mg_{\frac{1}{3}}Nb_{\frac{2}{3}}\right)O_3$$

BZT $$Ba\left(Zn_{\frac{1}{3}}Ta_{\frac{2}{3}}\right)O_3$$

2.6 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbonnanotube: CNTs)

ท่อนาโนเป็นวัสดุนาโนชนิดหนึ่งที่ประกอบขึ้นเป็นโครงสร้างจากอะตอมของคาร์บอน โดยโครงสร้างแต่ละหน่วยย่อยของผนังท่อประกอบขึ้นจากวงแหวนรูปหกเหลี่ยมคือ จะมีอะตอมของคาร์บอนในแต่ละวงแหวนจำนวนหกอะตอม

ท่อนาโนคาร์บอนค้นพบครั้งแรก เมื่อปี พ.ศ.2534 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ Sumio Iijima [17] ภายหลังการค้นพบฟลูเลอร์รีน (Fullerene) 6 ปี มีลักษณะเหมือนกับแผ่นแกรไฟต์ที่ม้วนเป็นท่อแสดงดังรูป 2.14 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 นาโนเมตร จนถึงหลายสิบนาโนเมตร โดยที่อะตอมคาร์บอนเหล่านี้เชื่อมต่อกันแบบ sp [17]

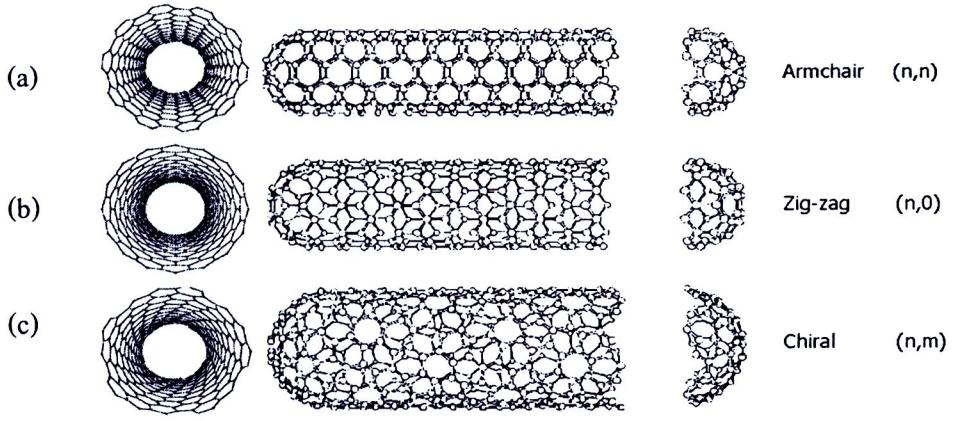


รูปที่ 2.14 ลักษณะของท่อนาโนคาร์บอน [18]

2.6.1 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

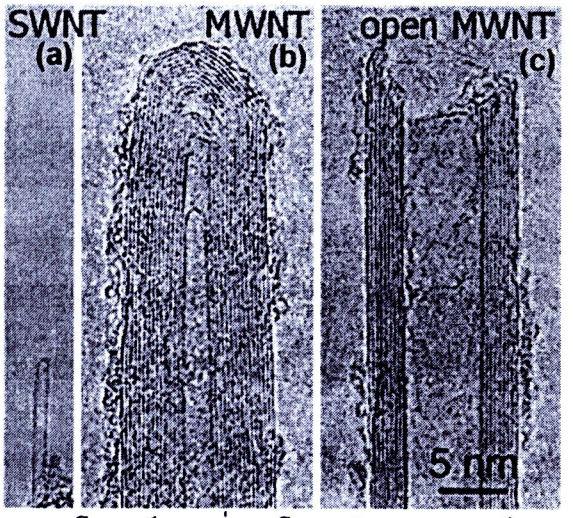
โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (single–walled nanotubes; SWNTs) มี 3 รูปแบบ คือ แบบ Armchair แบบ Zig-zag และแบบ Chiral แสดงดังรูป 2.15



รูปที่ 2.15 รูปแบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน (a) แบบ Armchair, (b) แบบ Zig–zag และ (c) แบบ Chiral [19]

2) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (multiple-walled nanotubes; MWNTs) คือ ท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังซ้อนกันอยู่หลายชั้น ดังรูป 2.16



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างภาพท่อนาโนคาร์บอนที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์ชนิด Transmission Electron Microscopy (TEM) [19]

(a) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Single-Walled Nanotubes, SWNTs)

(b) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multiple-Walled Nanotubes, MWNTs) แบบท่อปลายปิด

(c) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multiple - Walled Nanotubes, MWNTs) แบบท่อปลายเปิด

2.6.2 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนมีราคาสูงมากเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางกายภาพ เชิงกล ไฟฟ้า และความร้อนที่ดีมาก ซึ่งสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับวิธีสังเคราะห์ ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน (SWNT และ MWNT) เส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะโครงสร้างของท่อนาโน เช่น ลวดลายตามผนังของท่อ เป็นต้น สมบัติโดยทั่วไปของท่อนาโนคาร์บอน มีดังต่อไปนี้

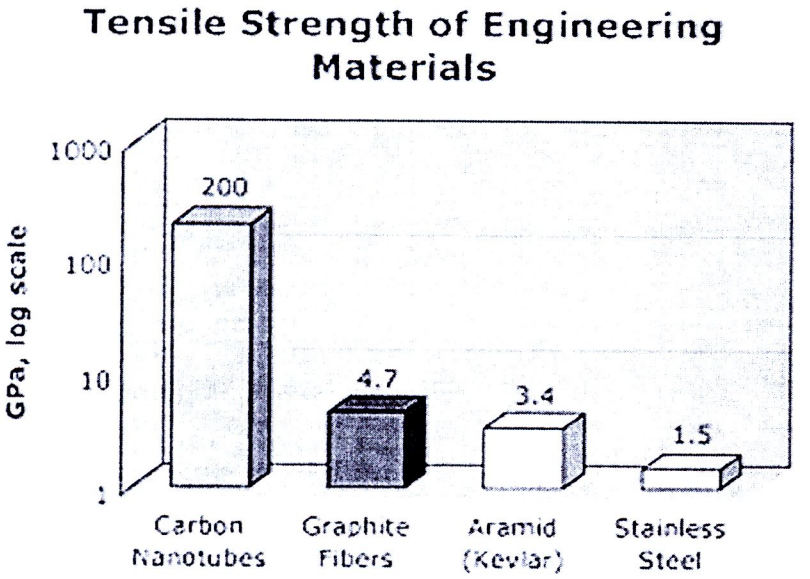
1.) สมบัติทางกายภาพ

ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว (SWNTs) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.7 และ 2 นาโนเมตร ส่วนท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWNTs) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออยู่ในช่วง 10–300 นาโนเมตร และมีช่องว่างระหว่างชั้นของแต่ละท่อประมาณ 0.34–0.36 นาโนเมตร ความยาวของท่อนาโนคาร์บอนโดยทั่วไปอยู่ในช่วงไมโครเมตรทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมาก ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุเสริม แรงหรือการนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้ในงานบางอย่างได้โดยตรง ท่อนาโนคาร์บอนมี

น้ำหนักเบา โดยมีค่าความหนาแน่นเพียง 1.33–1.40 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่น 2.7 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนยังเป็นโมเลกุลของคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวมากถึง 1,250 ตารางเซนติเมตร/กรัม ซึ่งมากกว่าคาร์บอนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (active carbon) ถึง 2 เท่า

2.) สมบัติเชิงกล

เนื่องจากโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนและพันธะของคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตรเท่านั้น ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งแรงกว่าเพชรและแกรไฟต์ กล่าวคือ มีค่าความยืดหยุ่นหรือค่าโมดูลัสของยัง (Young's Modulus) สูงถึง 1 TPa และมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) สูงถึง 200 GPa ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าที่มีค่าเพียง 1.5 จิกะปาสคาลเท่านั้น นอกจากนี้ท่อชนิดผนังชั้นเดียวยังสามารถถูกดึงยืดได้ถึง 10–13 เปอร์เซ็นต์ ก่อนที่จะขาดอีก [10]



รูปที่ 2.17 แสดงการเปรียบเทียบค่า Tensile Strength ของท่อนาโนคาร์บอนกับวัสดุต่างๆ [20]

3.) สมบัติทางไฟฟ้า

ท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าตัวนำไฟฟ้าทุกชนิดและมีคุณสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวดในบางสภาวะได้ด้วย ซึ่งท่อนาโน 1 มัด สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 109 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร ขณะที่ทองแดงมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดเพียงแค่ 106 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร นอกจากท่อนาโน-คาร์บอนจะมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าแล้ว ยังสามารถเป็นสารกึ่งตัวนำเหมือนซิลิกอนได้ด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้ เช่น การที่ท่อนาโนมีลวดลายผนังท่อที่ต่างกันทำให้การนำไฟฟ้าของท่อนาโนต่างกัน โครงสร้างของท่อนาโนแบบ Armchair จะแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนตัวนำไฟฟ้า ขณะที่โครงสร้างแบบ Zigzag แสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า ส่วนแบบ Chiral จะมีอยู่ระหว่างสองแบบแรก

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและทิศทางการจัดเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยม (helicity or chirality) ที่ทำมุมเทียบกับแกนของท่อ (chiral angle) [10]

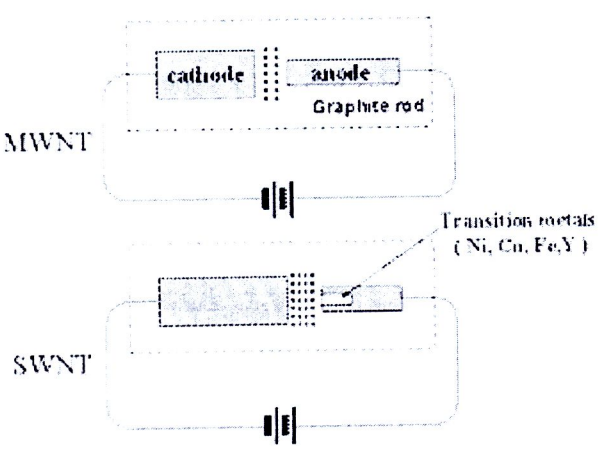
2.6.3 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน (Synthesis of carbon nanotubes)

เนื่องจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนมีหลายเทคนิค ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป ทั้งในด้านขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณและความบริสุทธิ์ของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ โดยสามารถแบ่งวิธีการสังเคราะห์หลักๆได้ดังนี้คือ

1. วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge) [8]
2. วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Vaporization) [20-22]
3. วิธีอิเล็กโตรไลซิส (Electrolysis) [23]
4. วิธีการตกสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) [24-27]

2.6.3.1 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge)

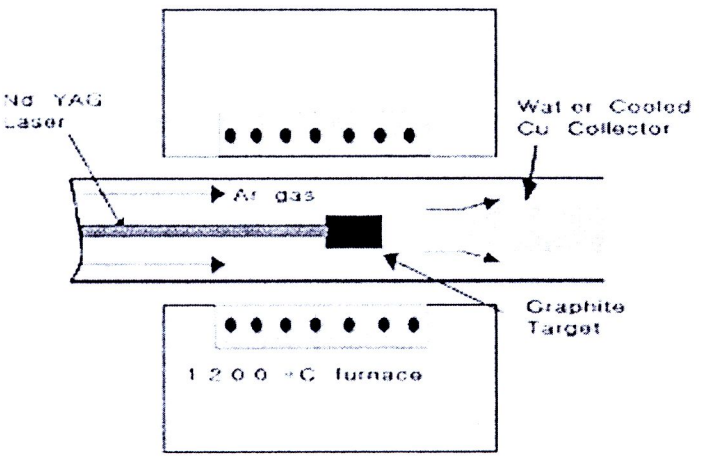
เป็นการสังเคราะห์โดยใช้การจ่ายกระแสตรงประมาณ 50-120 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ประมาณ 18-40 โวลต์ ตกคร่อมระหว่างแท่งแกรไฟต์สองแท่งที่วางใกล้ๆ กัน มีระยะห่างระหว่างแท่งประมาณ 1 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สฮีเลียม อาร์กอนที่ความดันต่ำระหว่าง 50-700 มิลลิเมตรปรอท จะทำให้มีความร้อนสูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเกิดเป็นสถานะพลาสมาขึ้น ส่งผลให้เกิด ท่อนาโน-คาร์บอนขึ้นตรงบริเวณกลางขั้วของแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ ซึ่งการควบคุมขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนนั้น อาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของการเกิดสถานะพลาสมา นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดชนิดของท่อนาโนคาร์บอนได้โดยการผสมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ เป็นโลหะคะตะลิสต์ (Metal catalyst) เพื่อช่วยให้เกิดการสร้างท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว ดังรูป 2.18



รูปที่ 2.18 แผนภาพกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ [21]

2.6.3.2 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Vaporization)

วิธีนี้จะใช้แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูง ยิงไปยังเป้า ซึ่งเป็นแกรไฟต์ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สฮีเลียม อาร์กอน เป็นต้น ความดันต่ำประมาณ 500 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส โดยเทคนิคนี้คล้ายกับวิธีอาร์คดิสชาร์จ คือ จะผสมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์เป็นโลหะคะตะลิสต์ (Metal catalyst) เพื่อช่วยให้เกิดท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว ดังรูป 2.19



รูปที่ 2.19 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ [22]

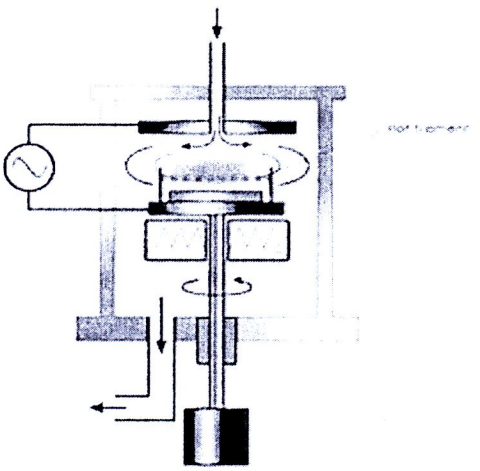
2.6.3.3 วิธีอิเล็กโตรไลซิส (Electrolysis)

เป็นวิธีการให้กระแสไฟฟ้าผ่านระหว่างขั้วแกรไฟต์ขณะจุ่มอยู่ในของเหลวที่เรียกว่าอิเล็กโทรไลท์ เช่น ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยการผสมหรือเจือสารอิเล็กโทรไลท์ด้วยธาตุหรือสารประกอบอื่นๆ เช่น ผสมด้วยเกลือที่มีบิสมัสและปรอทจะสามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนได้

2.6.3.4 วิธีการตกสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition, CVD)

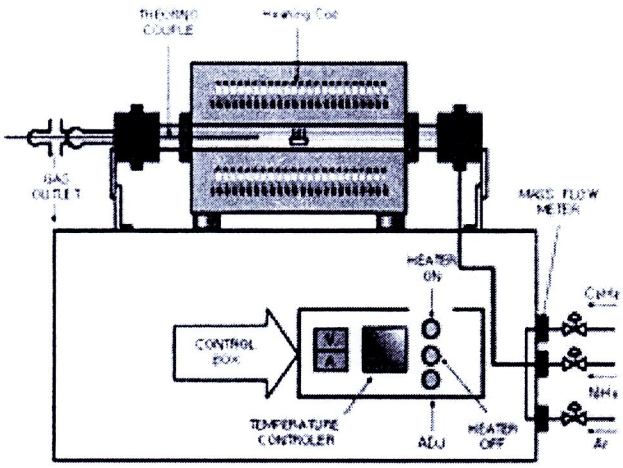
เป็นวิธีสร้างท่อนาโนคาร์บอน ด้วยการให้ความร้อนไปยังแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เพื่อสร้างท่อนาโนคาร์บอน โดยแก๊สที่นิยมใช้ คือ คาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) มีเทน (CH_4) และอะเซทิลีน (C_2H_2) ซึ่งเทคนิคนี้ต้องอาศัยโลหะตัวคะตะลิสต์ (Metal catalyst) เช่น เหล็ก นิกเกิล และ โคบอลต์ เป็นต้น เป็นตัวช่วยให้เกิดการสร้างท่อนาโนคาร์บอน โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ประมาณ 650-900 องศาเซลเซียส ซึ่งเทคนิคนี้สามารถควบคุมขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้ โดยการควบคุมขนาดของตัวคะตะลิสต์ และอัตราการไหลของแก๊ส ตามลำดับ ทั้งนี้เทคนิคก็ต้องทำภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สฮีเลียม อาร์กอน เป็นต้น ซึ่งเทคนิคนี้สามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนได้ในปริมาณมาก และมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งวิธีนี้มีหลายเทคนิคด้วยกันคือ

1) เทคนิคการตกสะสมไอสารเคมีด้วยพลาสมา (Plasma enhanced chemical vapor deposition) [28] โดยให้ความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เพื่อให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนของอะเซทิลีน มีเทน เอทิลีน เกิดการแตกตัว และตกบนฐานรอง เช่น ซิลิกอน ซิลิกอนไดออกไซด์ และแก้ว โดยมีโลหะตัวคะตะลิสต์ (Metal catalyst) เช่น เหล็ก นิกเกิล และ โคบอลต์ เป็นต้น เคลือบอยู่บนผิว เพื่อช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็นท่อนาโนคาร์บอน ดังรูป 2.20



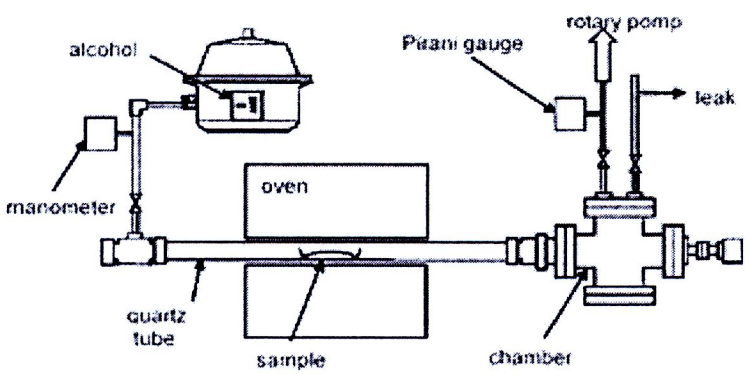
รูปที่ 2.20 แผนภาพแสดงกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีการตกสะสมไอสารเคมีด้วยพลาสมา [21]

2) เทคนิคการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน (Thermal chemical vapor deposition) [29] โดยเทคนิคนี้จะใช้ เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ หรือโลหะผสมของทั้งสามชนิดนี้ เป็นตัวคะตะลิสต์ให้ตกเคลือบบนฐานรอง หลังจากนำฐานรองไปทำการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก หรือแก๊สแอมโมเนีย เพื่อให้เกิดก้อนอะตอมของโลหะที่เรียกว่า “การเกิดใหม่ (nucleation)” แล้วนำไปปลูกท่อนาโนคาร์บอน โดยนำไปใส่ในห้องเผาซึ่งจะใช้อุณหภูมิประมาณ 750-1050 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของไฮโดรคาร์บอนและอาร์กอน ดังรูป 2.21



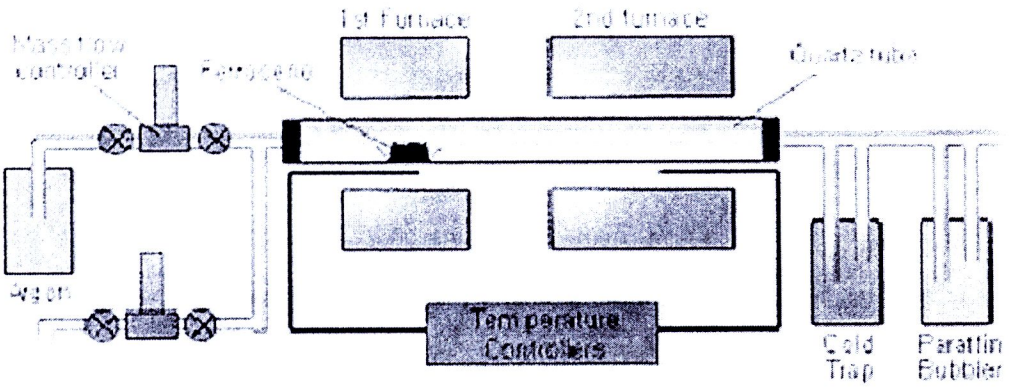
รูปที่ 2.21 แผนภาพแสดงกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีการตกสะสมไอสารเคมีด้วยความร้อน [21]

3) เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Alcohol catalytic chemical vapor deposition, ACVD) ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวคะตะลิสต์ เช่น เหล็กและโคบอลต์ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดกระบวนการตกสะสมไอเคมีได้รวดเร็วยิ่งขึ้นดังรูป 2.22



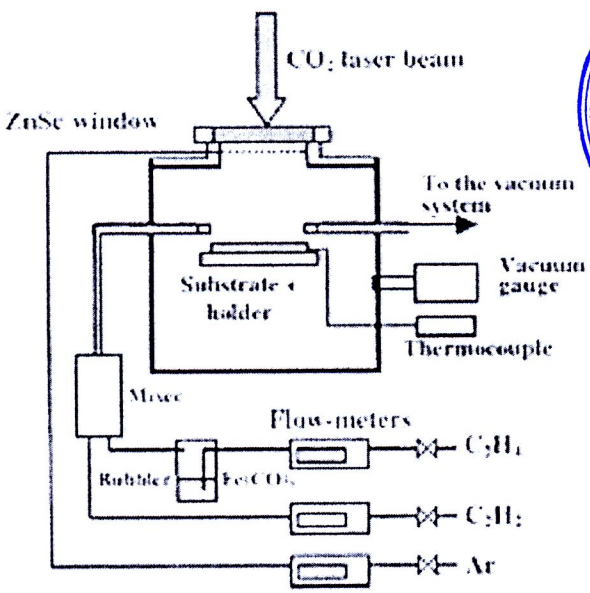
รูปที่ 2.22 เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [30]

4) เทคนิคการแบ่งเฟสในการปลูก (Vapor phase growth) เป็นการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการแบ่งพื้นที่ในห้องทดลองเป็นสองส่วน โดยวางภาชนะใส่ผงโลหะคะตะลิสต์ในพื้นที่ส่วนแรกซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าพื้นที่ส่วนที่สอง เมื่อปล่อยแก๊สไฮโดรคาร์บอนเข้ามา ก็พาไอของคะตะลิสต์ที่ระเหยออกมาไปรวมตัวกันในพื้นที่ส่วนที่สอง และเกิดการจัดเรียงตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอนขึ้น ทั้งชนิดผนังชั้นเดียวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4 นาโนเมตร และชนิดผนังหลายชั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70-100 นาโนเมตร ดังรูป 2.23



รูปที่ 2.23 เทคนิคการแบ่งเฟสในการปลูก [21]

5) เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งความร้อน (Laser-assisted thermal chemical vapor deposition, LCVD) เป็นการใช้เลเซอร์ เป็นแหล่งให้ความความร้อน และใช้โลหะคะตะลิสต์ จากสารละลาย เหล็ก เพนตะคาร์บอนนิล $Fe(CO)_5$ โดย ไอระเหยของเหล็กจะผสมกับแก๊สไฮโดรคาร์บอนในห้องผสม แล้วถูกทำให้ร้อนด้วยแสงเลเซอร์ เกิดการก่อตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอน ดังรูป2.24



รูปที่ 2.24 เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งความร้อน [30]

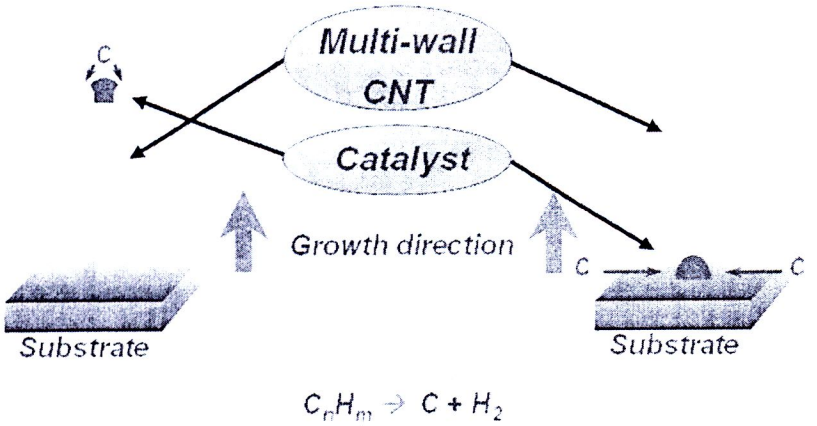
2.6.4 ทฤษฎีการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน (Growth mechanism)

การเกิดท่อนาโนคาร์บอนมีหลายทฤษฎีที่ใช้อธิบายการสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอน แต่นักวิทยาศาสตร์ยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนถึงรายละเอียดที่แน่นอนในเรื่องนี้ มีทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย คือ Vapor-Liquid-Solid (VLS) Method [31], [32] ซึ่งอธิบายว่า เมื่อให้ความร้อนแก่วัตถุดิบเริ่มต้นทำให้เกิดการแตกตัวของคาร์บอนและธาตุอื่นๆ จากนั้นจะมีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะตอมคาร์บอนกับผิวโลหะคะตะลิสต์ โดยอะตอมของคาร์บอนจะแพร่ไปรวมตัวกันและสะสมจนเกิดการตกตะกอนของคาร์บอนที่มีความอิ่มตัวสูงปกคลุมพื้นผิวโลหะคะตะลิสต์ จนทำให้เกิดการสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอนในที่สุด

การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบ Tip growth และแบบ Base growth ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างโลหะคะตะลิสต์กับฐานรอง (Substrate) โดยที่

1. ถ้าหากอันตรกิริยาระหว่างโลหะคะตะลิสต์กับฐานรองอ่อน (Weak substrate-catalyst interaction) ท่อนาโนคาร์บอนจะมีการเติบโตเป็นแบบ Tip growth [34] ซึ่งจะพบโลหะคะตะลิสต์จะอยู่ด้านบนของปลายท่อ ดังแสดงในรูป 2.25 (ก)

2. ถ้าหากอันตรกิริยาระหว่างโลหะคะตะลิสต์กับฐานรองแข็งแรง (Strong substrate-catalyst interaction) ท่อนาโนคาร์บอนจะมีการเติบโตเป็นแบบ Base growth ซึ่งจะพบโลหะคะตะลิสต์จะอยู่ด้านล่างของท่อ ดังแสดงในรูป 2.25 (ข)



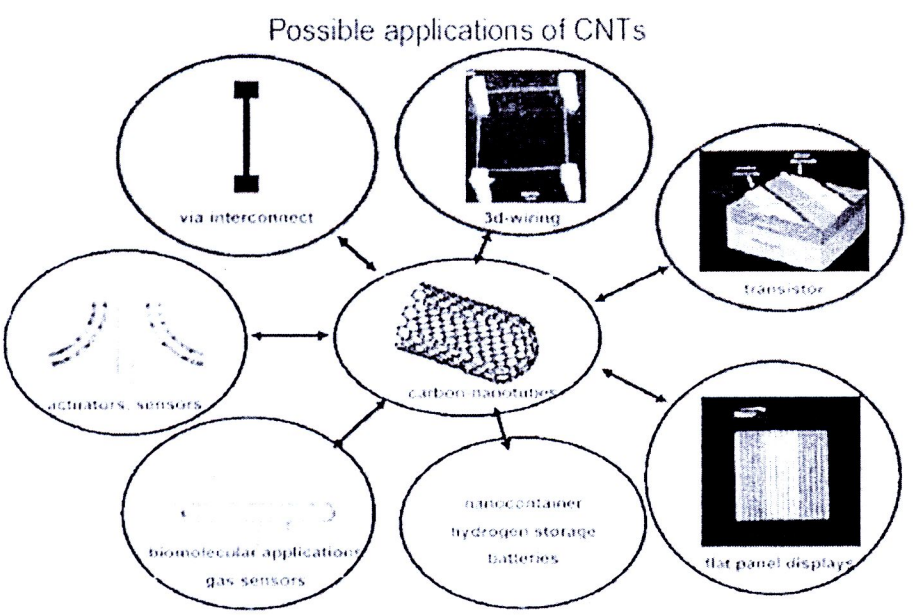
รูปที่ 2.25 การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน [34]

(ก) แบบ Tip growth

(ข) แบบ Base growth

2.6.5 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอน (Applications) [35]

- เป็นขั้วไฟฟ้าทางเคมีและแหล่งจ่ายพลังงานจากการแตกตัวให้แก๊สไฮโดรเจน (Electrochemical and gas phase hydrogen storage)
- เป็นวัสดุผสมท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubee composites)
- ทำพลาสติกชนิดนำไฟฟ้า (Conductive Plastics for Electrostatic Painting and Static Dissipation)
- เป็นอุปกรณ์ป้องกันสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic Inference Shielding, EMI)
- ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Super capacitor)
- เป็นแบตเตอรี่ชนิดประจุลิเทียม (Lithium ion betteries)
- เป็นอุปกรณ์ใช้ในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Display)
- เป็นเยื่อเลือกผ่านแลกเปลี่ยนโปรตอน เพื่อเป็นแหล่งพลังงาน (Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells)
- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กระดับนาโนเมตร (Nanoelectronics)
- หัววัดของเครื่องวัดแรงระหว่างอะตอม (AFM Tips)
- เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ (Nanotube Actuators sensors)



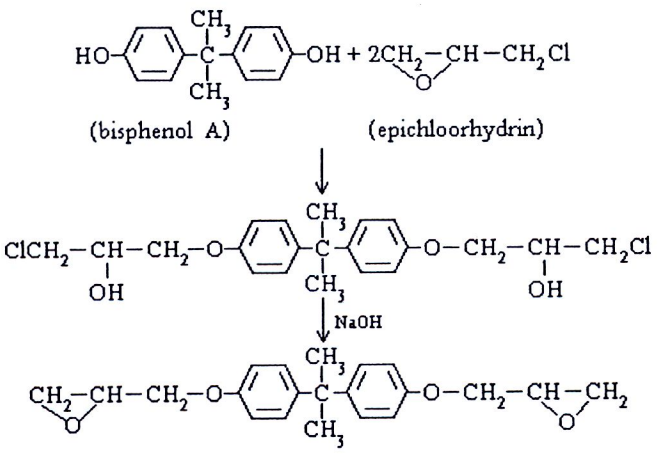
รูปที่ 2.26 แสดงการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้ [36]

2.7 อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin) [3]

บางทีเรียกกันว่า อีพ็อกไซด์เรซิน (Epoxide resin) หรือในยุโรปเรียกกันว่า อีทอกซิลีนเรซิน (Ethoxyline resins) ใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวางในทางอุตสาหกรรม โดย 60 เปอร์เซนต์จะใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิว

2.7.1 การเตรียมอีพ็อกซีเรซิน [2]

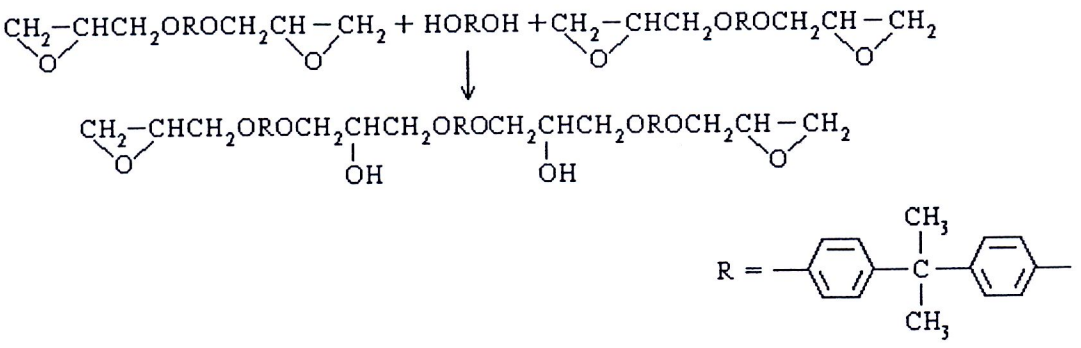
อีพ็อกซีเรซินเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างไดหรือโพลิ-ไฮดริกฟีนอล และอีพิแฮโลไฮดริน (Epihalohydrin) โพลิไฮดริกฟีนอลที่ใช้กันมากได้แก่บิสฟีนอลเอ (Bisphenol-A) สำหรับอีพิแฮโลไฮดรินที่สำคัญในการค้า คือ อีพิคลอร์ไฮดริน (Epchlorhydrin) ปฏิกิริยาการเกิดอีพ็อกซีเรซินมีดังนี้



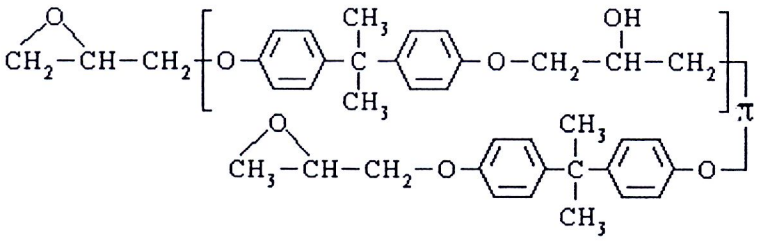
(1) อีพิคลอร์ไฮดริน และบิสฟีนอล–เอ ทำปฏิกิริยากัน โดยมีด่างเป็นตัวเร่ง ดังแสดง

(2) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาขั้นแรก จะทำปฏิริยากับบิสฟีนอล-เอต่อไป ซึ่งจะทำให้วงอีพ็อกซี

(epoxy ring) เปิดออก



(3) ปฏิกิริยาเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงขั้นของพอลิเมอร์ และเนื่องจากปลายโซ่ทั้ง 2 ข้างจะสิ้นสุดด้วยหมู่อีพ็อกซี ดังนั้นปฏิกิริยานี้ต้องมีอีพิคลอร์เหลือเฟือ อีพ็อกซีเรซินจะมีโครงสร้างดังนี้



2.7.2 สมบัติของอีพ็อกซีเรซิน [2]

อีพ็อกซีเรซินมีสมบัติในการเคลือบผิวหน้าดี ทั้งนี้เพราะ

1.) อีพ็อกซีเรซินมีความทนทานต่อสารเคมีต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกด่างทั้งหลาย ทั้งนี้เพราะโมเลกุลไม่มีหมู่เอสเทอร์ที่จะถูกสปอนิไฟด์ได้มีแต่พันธะอีเทอร์ และพันธะคาร์บอนเท่านั้น
2.) อีพ็อกซีเรซินมีสมบัติยึดเกาะผิวหน้าต่างๆ ได้ดีทั้งนี้เพราะโซ่โพลิเมอร์มีปริมาณของหมู่ที่มีขั้วสูงนอกจากนี้ การมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ห่างกันอย่างเป็นระเบียบในโมเลกุล จะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดีเป็นผลให้มีแรงดึงดูดระหว่างโซ่สูง
3.) อีพ็อกซีเรซินมีความแข็งแรงดี และอ่อนแต่ไม่เปราะ การที่โมเลกุลมีหมู่อะโรมาติกอยู่บนโซ่ทำให้โซ่แข็งดังนั้นทำให้อีพ็อกซีทนความร้อนได้ดี ในขณะเดียวกันจากการที่โซ่มีพันธะเดี่ยวจึงทำให้โมเลกุลสามารถเกิดการหมุนรอบๆ พันธะเดี่ยวจึงทำให้อีพ็อกซีเรซินมีความอ่อนตัวดีแต่ไม่เปราะ

หมู่อีพ็อกซีและหมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่ในโมเลกุล ทำให้อีพ็อกซีเรซินเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันหรือเกิดการบ่มต่อไปได้ ทำให้โครงสร้างสามมิติแข็งแรง ทนทานและใช้ประโยชน์ดี อีพ็อกซีเรซินมีจุดอ่อนอยู่บ้างคือ ไม่ละลายในตัวทำละลายราคาถูก และไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับเรซินบางชนิด

นอกจากนี้ ฟิล์มที่ได้จากอีพ็อกซีอาจร่วนเมื่ออยู่ภายนอกเป็นระยะเวลานาน ๆ และความทนน้ำก็ด้อยลงด้วย

ตัวทำละลายของอีพ็อกซีเรซิน ได้แก่ เมทิลเอทิลคีโตน ไกลคอลอีเทอร์ และไดอะซีโตน เนื่องจากตัวทำละลายเหล่านี้มีราคาแพง ดังนั้นจึงมีการเติมแอลกอฮอล์หรือตัวทำละลายอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนผสมไปด้วยเพื่อลดต้นทุน

เรซินที่เข้าได้เป็นเนื้อเดียวกับอีพ็อกซีเรซิน ได้แก่ บิวทิวเลเตดยูเรียเรซิน บิวทิวเลเตดเมลามีนเรซิน ฟีนอลลิกเรซิน ประเภทรีโซลและบิวทิวเลเตดรีโซล ไวนิลเรซิน อะครีลิกเรซินและอัลคิดเรซิน

2.7.3 อีพ็อกซีเรซินชนิด 2 ส่วน (two-packing epoxy resin coating) [1]

ในทางอุตสาหกรรมเคลือบผิว อีพ็อกซีเรซินเพียงลำพังไม่สามารถใช้งานได้ดี เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของเรซินต่ำ อย่างไรก็ตามสามารถบ่มอีพ็อกซีเรซินให้เกิดเป็นโมเลกุลที่มีโครงสร้างเป็นตาข่ายได้ด้วยสารหลายชนิด ดังนั้นการใช้งานของอีพ็อกซีเรซินจะจัดอยู่ในประเภท Two-packing คือจะมีสารสองส่วนแยกกันอยู่ ส่วนหนึ่งคืออีพ็อกซีเรซิน อีกส่วนหนึ่งเป็นสารทำให้แข็ง หรือทำให้เกิดปฏิกิริยา ซึ่งเรียกว่า สารบ่ม

การใช้งานจะต้องเอาทั้งสองส่วนมาผสมกัน และหลังจากที่ผสมกันแล้วจะต้องรีบใช้ส่วนผสมให้หมดโดยเร็ว เพราะจะเกิดการบ่มเป็นฟิล์มที่แห้งแข็ง อายุการใช้งานผสมของอีพ็อกซีเรซินขึ้นอยู่กับชนิดของสารบ่มที่ใช้โดยปกติมักบ่มอีพ็อกซีเรซินที่อุณหภูมิห้อง

2.7.4 ประเภทของสารบ่ม [2]

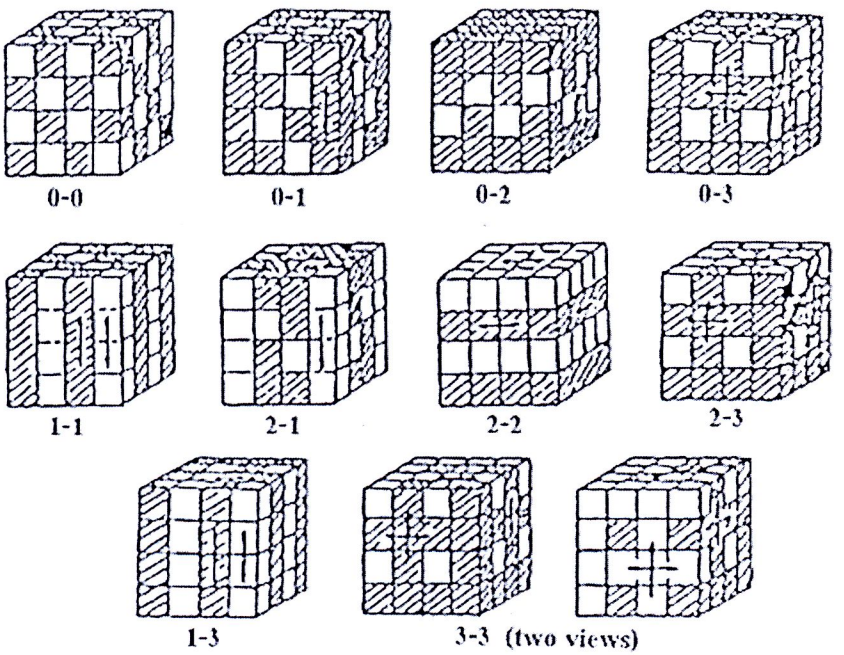
1.) อะลิฟาติกพอลิแอมีน
2.) อะโรมาติกพอลิแอมีน
3.) โพลีเอไมด์เรซิน
4.) กรดและเอซิดแอนไฮไดรด์
5.) ยูเรียและเมลามีนเรซิน
6.) ฟีนอลิกเรซิน
7.) ไอโซไซยาเนต

สารบ่มอาจเรียกว่า สารเชื่อมโยง (Cross-linker) หรือสารช่วยแข็งตัว (hardeners)

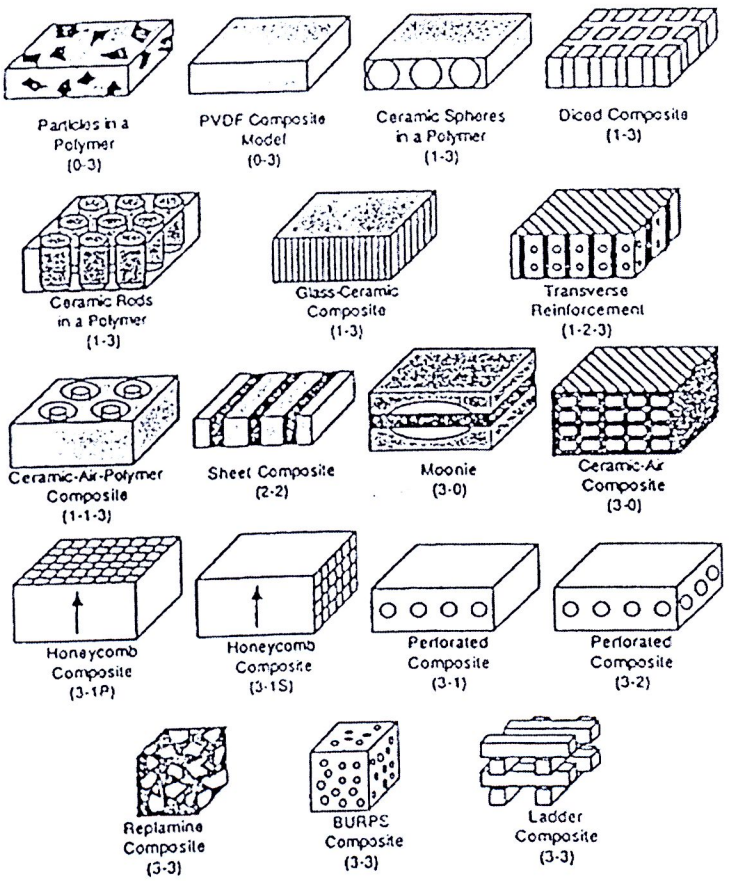
2.8 วัสดุผสม (Composite materials) [37]

วัสดุผสม คือ วัสดุที่เกิดขึ้นจากการผสมหรือประกอบกันของวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยมีการยึดติดกัน ซึ่งยังคงสามารถแบ่งแยกวัสดุแต่ละชนิดออกจากกันได้ด้วยตาหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน วัสดุผสมเป็นวัสดุหลายเฟส (multiphase materials) ที่มีสมบัติการรวมกันระหว่างสมบัติของวัสดุที่นำมารวมกัน และสามารถแสดงสมบัติที่ดีของแต่ละเฟสร่วมกัน วัสดุที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุผสมนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ เมทริกซ์เฟส (matrix phase) และเฟสกระจาย (dispersed phase) ซึ่งเมทริกซ์เฟสเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานและยึดเกาะเฟสกระจายให้รวมเป็นอันเดียวกัน ส่วนเฟสกระจายเป็นองค์ประกอบที่กระจายตัวในลักษณะต่างๆ กันในเมทริกซ์เฟส วัสดุผมนั้นสามารถแบ่งได้ตามชนิด ขนาด รูปร่าง และลักษณะโครงสร้างของเฟสกระจาย หากพิจารณาการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสที่มีการจัดเรียงตัวติดกันใน 3 มิติ สำหรับวัสดุผสมที่มี 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 2.7 [5] โดยตัวเลขตัวแรกจะบอกถึงลักษณะ

การเชื่อมต่อกันของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ ในช่วงระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาวัสดุผสมได้ถูกเตรียมจากโพลิเมอร์ที่ค่อนข้างเฉื่อย (non-active) เช่น อีพ็อกซี (epoxy) กับเซรามิกที่เป็นพวกพิโซอิเล็กตริก เช่น เลดเซอร์โคเนตติตาเนต (PZT) ที่อาจอยู่ในรูปของผง เส้นใย แผ่นบางซ้อนกันหลายชั้น หรือแบบที่มีโครงสร้างซับซ้อนใน 3 มิติ เป็นต้น [38]



รูปที่ 2.27 แสดงลักษณะรูปแบบการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟส 10 แบบ ของวัสดุผสมที่มี 2 เฟส [38]



รูปที่ 2.28 แสดงการพัฒนารูปแบบของวัสดุผสมแบบต่าง ๆ [38]

การออกแบบและผลิตวัสดุผสมเพื่อนำไปใช้งานได้กลายเป็นหัวข้อสำคัญของงานวิจัยจำนวนมาก อีกทั้งยังเป็นแรงผลักดันที่ทำให้วัสดุผสมมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากความต้องการที่จะรวมสมบัติเด่นของวัสดุต่างๆ เข้าด้วยกัน ซึ่งโดยปกติแล้วไม่สามารถหาได้จากวัสดุชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียวได้ ทำให้ในปัจจุบันได้มีการมุ่งพัฒนาการผลิตวัสดุผสมที่มีสมบัติหลาย ๆ อย่างเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานแต่ละประเภทให้มากที่สุด ซึ่งในกรณีของวัสดุผสมพวกเซรามิกพิโซ-
อิเล็กตริกนั้นก็จะเน้นที่เรื่องของการพัฒนาวัสดุให้มีสมบัติพิโซอิเล็กตริกที่ดีขึ้น สามารถทำเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นดีและโดยเฉพาะอย่างยิ่งการมีความไวทางพิโซอิเล็กตริก (Piezoelectric sensitivity) สูงพร้อมกับมีความหนาแน่นของวัสดุต่ำเพื่อทำให้มีค่าความต้านทานพลังงานเสียงเชิงซ้อน (acoustic impedance หรือ ค่า Z) ใกล้เคียงกับค่าของตัวกลางที่ต้องส่งคลื่นความถี่ผ่านเข้าไปเพื่อใช้ในการตรวจสอบวัสดุในตัวกลางนี้

เนื่องจากเซรามิกพิโซอิเล็กตริกส่วนใหญ่เป็นสารที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดพิโซอิเล็กตริก (Piezoelectric strain coefficient หรือ d_{33} และ d_h) สูง มีค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อพลังงานกล-ไฟฟ้าเชิงความหนา (k_t) สูง มีค่าสภาพะยอมสัมพัทธ์หรือ ε_r สูงและมีค่าการสูญเสีย

ทางไดอิเล็กตริก (dielectric loss หรือ tanδ) ที่ต่ำ [8] งานวิจัยจำนวนมากจึงมุ่งความสนใจมาที่กลุ่มเซรามิกพิโซอิเล็กตริก

แต่อย่างไรก็ตามค่า Z ของเซรามิกพิโซอิเล็กตริกนั้นจะมีค่าสูงกว่าค่า Z ของตัวกลางที่สัญญาณเสียงต้องเคลื่อนที่ผ่านในการใช้งานจริง เช่น น้ำ อากาศ และเนื้อเยื่อมนุษย์ ดังนั้นเมื่อนำมาใช้งานเป็นทรานสดิวเซอร์ในการตรวจจับสัญญาณต่าง ๆ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเพีย-โซอิเล็กตริกกับตัวกลางที่สัญญาณต้องเคลื่อนผ่าน ส่งผลให้ทรานสดิวเซอร์มีความสามารถในการแยกรายละเอียดได้ต่ำลง [38]

นอกจากนี้เซรามิกพิโซอิเล็กตริกยังมีจุดด้อยบางประการ เช่น เปราะและเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยาก เมื่อทำการพิจารณาถึงโพลิเมอร์พิโซอิเล็กตริก เช่น พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF หรือ PVF_2) พบว่าวัสดุประเภทนี้มีความยืดหยุ่นสูง และมีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้ค่า Z ของวัสดุนี้มีค่าใกล้เคียงกับของน้ำ และเนื้อต่าง ๆ ในร่างกายมนุษย์ ทำให้พอลิเมอร์พิโซอิเล็กตริกสามารถนำมาใช้ทำเป็นทรานสดิวเซอร์สำหรับวัดความสั่นสะเทือนใต้น้ำ หรือวัดความดันภายในร่างกายมนุษย์ได้ดีกว่าเซรามิกพิโซอิเล็กตริก แต่อย่างไรก็ตามวัสดุประเภทนี้ก็มีจุดด้อยอยู่ตรงที่มีค่า d_{33} และค่า d_h ที่ค่อนข้างต่ำและต้องมีการใช้สนามไฟฟ้าแรงสูงในการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าอีกด้วย ถึงแม้ว่าจะมีกรรมวิธีในการปรับปรุงวัสดุพอลิเมอร์หลายอย่าง เช่น การปรับปรุงโดยการใช้โคพอลิเมอร์ระหว่างไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (VDF) และไตรฟลูออโรเอทธิลีน (TrFE) ซึ่งจะให้สมบัติที่ดีกว่า PVDF และนอกจากนี้ยังสามารถทำการผลิตเป็นวัสดุผสมได้ง่ายกว่าเพราะไม่ต้องผ่านกระบวนการยืดดึงก่อนใช้งานและใช้สนามไฟฟ้าต่ำในการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า [38]

ถึงแม้ว่าโคโพลิเมอร์จะมีข้อดีอยู่หลายประการแต่ก็มีข้อเสียตรงที่มีค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (tanδ) ที่สูงถึงประมาณร้อยละ 10 ในขณะที่มีค่า ε_r สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 6-10 เท่านั้น และนอกจากนี้ก็ยังมีค่า d_{33} กับ d_h ที่ต่ำเกินไป ดังนั้นการปรับปรุงแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจเช่นเดียวกับเรื่องของความพยายามที่จะนำสมบัติเด่นของวัสดุแต่ละชนิดมารวมกัน เพื่อให้ได้วัสดุผสมที่มีสมบัติที่ดีขึ้น [38]

การออกแบบลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุ โดยการนำเซรามิกและโพลิเมอร์มาผสมกันเป็นวัสดุผสมพิโซอิเล็กตริก ทำให้สามาถปรับเปลี่ยนสมบัติของวัสดุที่สำคัญต่อการนำมาใช้งานด้านทรานสดิวเซอร์ได้ สำหรับสมบัติต่าง ๆ ของเซรามิก โพลิเมอร์ และวัสดุผสมได้สรุปเปรียบเทียบไว้ดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุระหว่างเซรามิก พอลิเมอร์ และวัสดุผสม [39]

ตัวแปร	เซรามิก	พอลิเมอร์	วัสดุผสม PZT กับพอลิเมอร์
ค่าความต้านทานพลังงานเสียงเชิงซ้อน (Z)	30	4.3	10
ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบ (k)	0.5-0.7	0.1-0.3	0.5-0.7
ค่าสภาพะยอมสัมพัทธ์ (ε_r)	200-5000	6-10	ขึ้นอยู่กับปริมาณ PZT
ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (tanδ)	0.02	0.25	0.02
ค่าใช้จ่าย	ถูก	แพง	ปานกลาง