

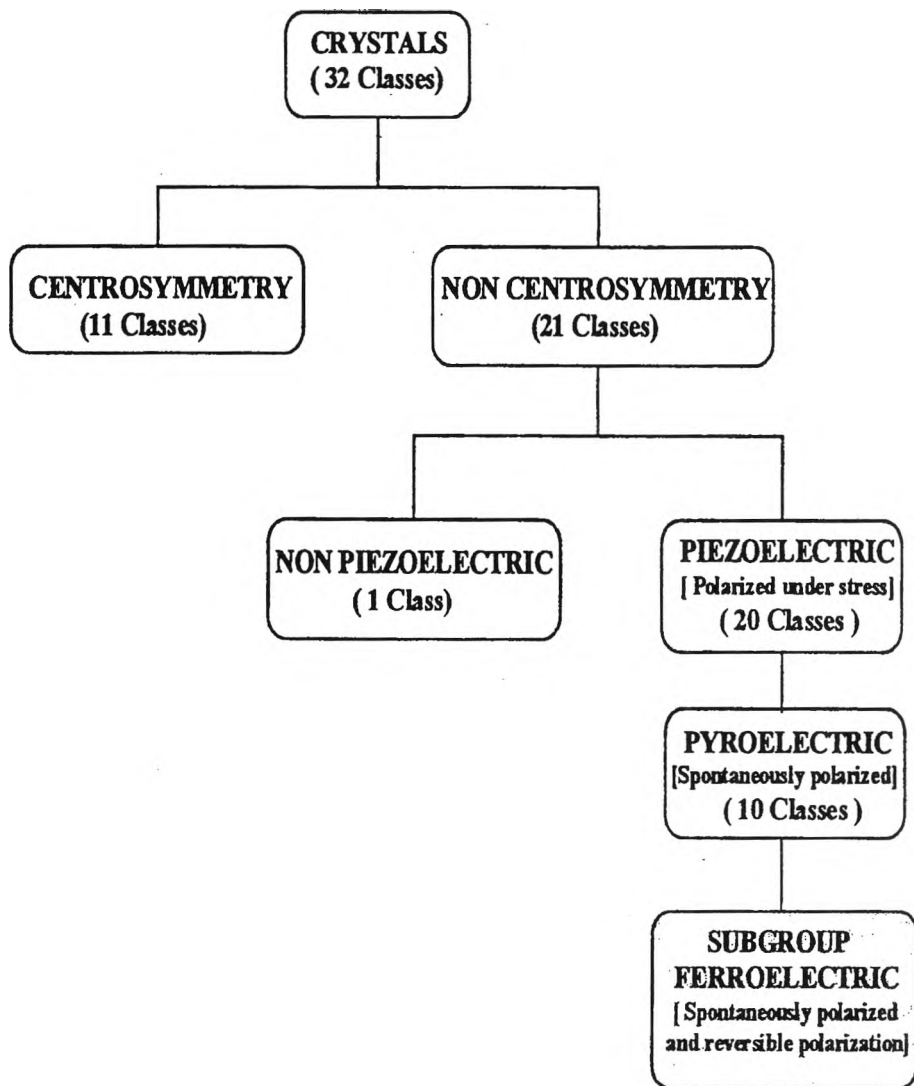
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

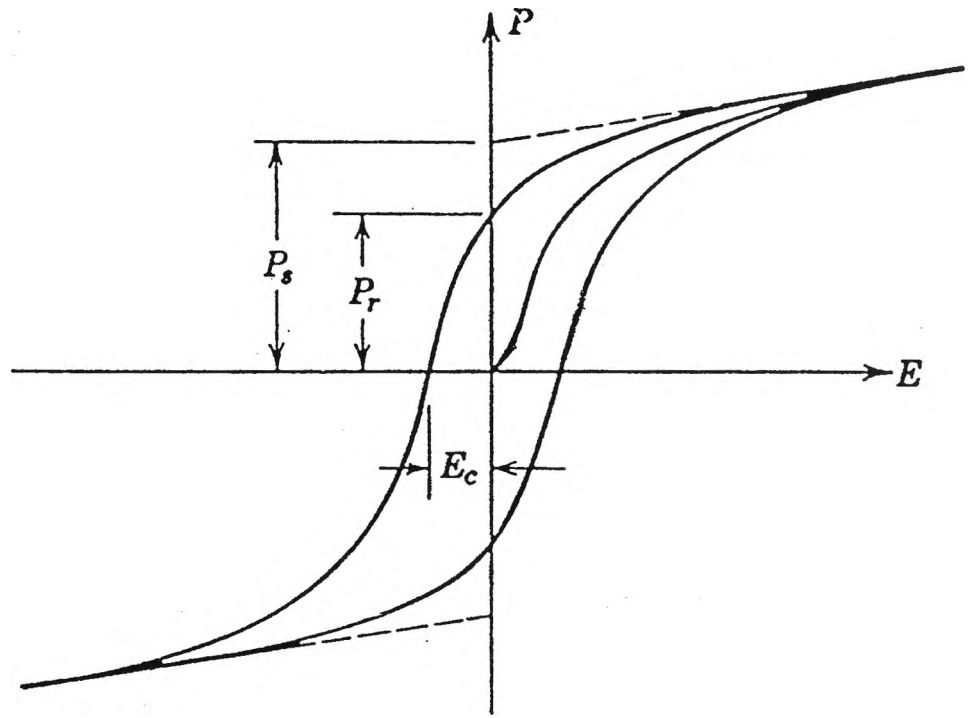
2.1 ทฤษฎีเฟอร์โรอิเล็กทริก

สารเฟอร์โรอิเล็กทริก หมายถึง สารที่สามารถเกิดขั้วขึ้นได้เอง (Spontaneous polarization) เมื่อเราให้สนามไฟฟ้าแก่สารนั้น ได้มีการจำแนกระบบผลึกของธาตุโดยอาศัยโครงสร้างผลึกออกเป็น 7 ระบบ ได้แก่ triclinic monoclinic orthorhombic tetragonal rhombohedral hexagonal และ cubic ซึ่งสามารถแบ่งตามโครงสร้างผลึก (Symmetry elements) เป็น 32 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ใน 32 กลุ่มนี้สามารถแบ่งย่อยได้เป็นผลึกที่มีศูนย์กลางของสมมาตร (Centrosymmetry) 11 กลุ่ม และผลึกที่ไม่มีศูนย์กลางของสมมาตร (Non-centrosymmetry) 21 กลุ่ม โดย 20 กลุ่ม จะมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก จะเกิดขั้วทางไฟฟ้าภายใต้สนามไฟฟ้าหรือแรงที่ให้ ยกเว้นในกลุ่มระบบผลึก 432 โดย 10 กลุ่มในเพียโซอิเล็กทริกจะมีสมบัติทางโพโรอิเล็กทริก คือ เกิดขั้วทางไฟฟ้าขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

Non-linear P-E hysteresis loop เป็นสมบัติสำคัญของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยเมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในสารเฟอร์โรอิเล็กทริกจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโดเมนที่ไม่เป็นระเบียบให้เป็นระเบียบ และอยู่ในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ทำให้เกิดสภาพขั้วทางไฟฟ้า (Polarization) ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในช่วงแรก โดเมนที่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ จะเกิดการจัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งโดเมนเกือบทั้งหมดจะเรียงตัวในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า จะได้จุด P_s (Saturation polarization) และเมื่อลดสนามไฟฟ้าลงจนเป็นศูนย์ โดเมน (domain) บางส่วนพยายามที่จะเคลื่อนที่กลับทิศเดิม แต่ยังมีบางโดเมนที่ไม่สามารถเปลี่ยนกลับมายังทิศเดิมได้ ค่าของโพลาริเซชันเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าอยู่นี้ เรียกว่า P_r (Remanent polarization) และเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามไปจนโพลาริเซชันเท่ากับศูนย์ เรียกสนามไฟฟ้า ณ จุดนี้ว่า E_c (Coercive field) เมื่อเพิ่มสนามมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งโดเมนเกือบทั้งหมดเรียงตัวในทิศเดียวกับสนามไฟฟ้าอีกครั้ง ได้จุด $-P_s$ ซึ่งโพลาริเซชันจะมีทิศตรงข้ามกับครั้งแรก จากนั้นจึงลดสนามไฟฟ้ามาที่ $E=0$ โดเมนบางส่วนจะเกิดการกลับทิศ แต่ยังคงมีค่าโพลาริเซชันเหลืออยู่ มีค่าเท่ากับ $-P_r$ เมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าในทิศเดียวกับครั้งแรกเรื่อยๆ โดเมนจะจัดเรียงตัวไปในทิศเดียวกับสนามไฟฟ้าที่ให้ ได้เป็น hysteresis loop ขึ้น ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 การจำแนกระบบโครงสร้างผลึกใน 32 กลุ่ม⁽¹⁾



รูปที่ 2.2 Hysteresis loop ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก ⁽²⁾

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเพียโซอิเล็กทริก

จากสมบัติทางตรง เมื่อให้แรงเค้นทางกล (Mechanical stress ,T) จะทำให้เกิด dielectric displacement (D) ขึ้น ส่วนสมบัติเพียโซอิเล็กทริกทางอ้อมนั้น เมื่อผ่านสนามไฟฟ้า (E) เข้าไปจะเกิดแรงเครียดทางกล (Mechanical strain ,S) สามารถสรุปได้ดังสมการต่อไปนี้

$$D = dT + \epsilon^T E \quad \text{สมบัติทางตรง} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$S = s^E T + d^E E \quad \text{สมบัติทางอ้อม} \quad \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อค่า $d, d^E =$ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก

$s^E =$ ความสามารถยืดหยุ่นเชิงกล (Mechanical compliance)เมื่อสนามไฟฟ้าคงที่

$\epsilon^T =$ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อแรงเค้นคงที่

ถ้านำหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์มาประกอบพร้อม สามารถเขียนความสัมพันธ์ของสมการใหม่ ดังนี้

$$d = D/T = S/E \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad d = d^E$$

เขียนสมการใหม่ในรูปของ

$$g = E/T = S/D \quad \dots\dots\dots(4)$$

เมื่อ $g =$ ค่าคงที่ศักย์ไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric voltage coefficient) ค่าคงที่ d และ g ยังมีความสัมพันธ์กันคือ

$$d/g = \epsilon^T = K\epsilon_0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

เมื่อ $K =$ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (Relative permittivity)

$\epsilon_0 =$ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสุญญากาศ ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m)

ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ใช้ในการบอกความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล หรือพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า คือ electromechanical coupling factor (k)

$$k^2 = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานกล}}{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ให้เข้าไป}} \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{หรือ } k^2 = \frac{\text{พลังงานกลที่ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า}}{\text{พลังงานกลที่ให้เข้าไป}} \dots\dots\dots(7)$$

ค่า k ในผลึกที่ไม่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกจะมีค่าน้อยมาก ($k < 0.1$) แต่ในสารที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกจะมีค่าสูง ($0.4 \leq k \leq 0.7$) ทั้งนี้ค่า k จะน้อยกว่า 1 เสมอ เนื่องจากการเปลี่ยนพลังงานจากรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่งจะเกิดไม่สมบูรณ์ 100 เปอร์เซ็นต์

ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (d_{ij}) เป็นค่าที่ขึ้นกับทิศทางของสนามไฟฟ้า dielectric displacement แรงเค้น และแรงเครียด โดย i แสดงถึงทิศทางของสนามไฟฟ้า (electrical direction) ส่วน j แสดงถึงทิศทางการเปลี่ยนแปลงเชิงกล (mechanical direction) ดังนั้นจึงมักจะมีตัวเลขเพื่อแสดงทิศทางระบุอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แสดงทิศทางของขั้วไฟฟ้าในแกนที่ 1 2 และ 3 ระนาบเฉือน (shear plane) แทนด้วยเลข 4 5 6 ซึ่งเป็นระนาบที่อยู่ตั้งฉากกับแกนทั้ง 3 คือ 1 2 3 ตามลำดับ⁽¹⁾

ตัวอย่างการแสดงทิศทาง d_{31} หมายถึง ค่าคงที่เมื่อให้สนามไฟฟ้าไปตามแกนที่เกิดขั้ว (แกน 3) แต่จะเกิดแรงเครียดตามระนาบที่ตั้งฉาก (แกน 1)

d_{33} หมายถึง ค่าคงที่เมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้ไปตามแกนที่มีขั้ว และแรงเครียดที่เกิดขึ้นในแนวเดียวกัน

ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก hydrostatic stress อย่างเช่น d_h (hydrostatic strain coefficient) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$d_h = d_{31} + d_{32} + d_{33} \dots\dots\dots(8)$$

แต่สำหรับโครงสร้างเตตระโกนอล

$$d_h = d_{33} + 2d_{31} \quad \dots\dots\dots(9)$$

และค่า g_h (hydrostatic voltage coefficient) ยังสัมพันธ์กับ d_h ดังนี้

$$g_h = d_h / (K\epsilon_0) \quad \dots\dots\dots(10)$$

ซึ่ง d_h = hydrostatic strain coefficient เป็นค่าที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของแรง (stress) ที่ให้เข้าไป ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น : (pC/N)

g_h = hydrostatic voltage coefficient เป็นค่าที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป และทำให้เกิดการยืดหดตัว (hydrostatic strain) : (mVm/N)

$$\text{Figure of merit (F.O.M.)} = d_h g_h \dots\dots(11)$$

ซึ่งค่าทั้งสามตัวนี้บอกถึงความสามารถในการตรวจสอบสัญญาณของทรานสดิวเซอร์ในอุปกรณ์ไฮโดรโฟน ค่า F.O.M. ที่สูงทำให้การตรวจจับสัญญาณได้ดีขึ้น โดยค่า F.O.M. สามารถอยู่ในช่วง 100-50000 m^2/N ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุ (material) วิธีการผลิตและลักษณะการเชื่อมต่อกัน (connectivity)

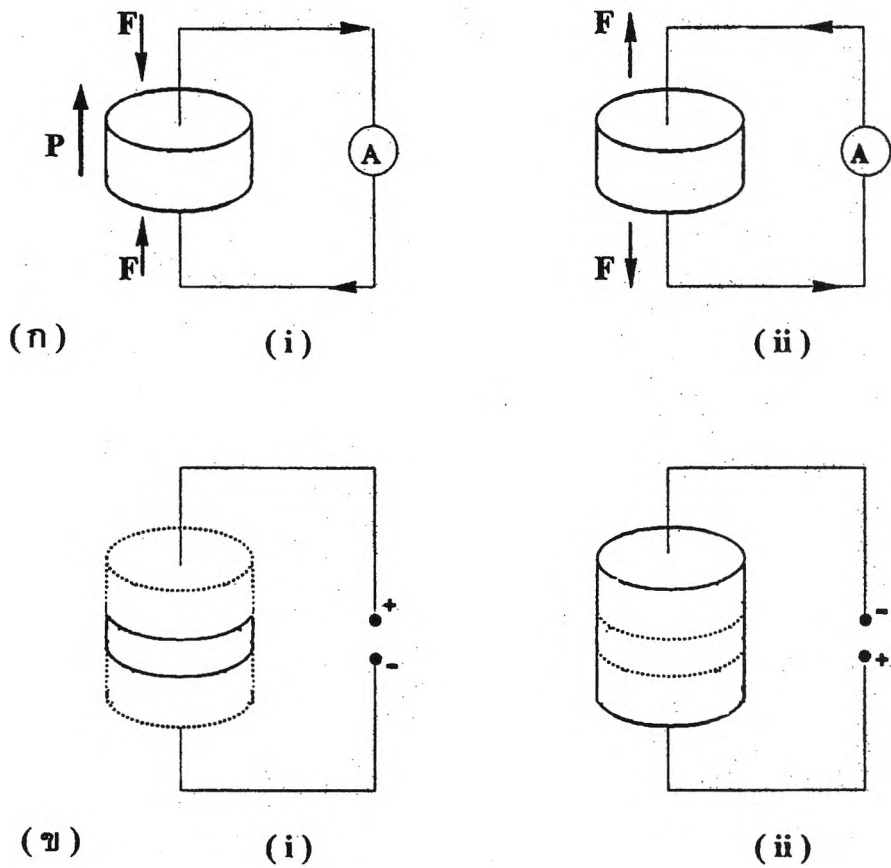
2.3 สมบัติเพียโซอิเล็กทริก

Piezoelectricity เป็นสมบัติเฉพาะกลุ่มของผลึกที่ไม่มีศูนย์กลางสมมาตร ซึ่งถูกค้นพบโดย Pierre และ Jacques Curie ในปี ค.ศ.1880 ในระหว่างที่ได้ทำการศึกษาผลึกควอตซ์ (quartz) ซิงค์ เบลน (Zinc blende) ทัวร์มาลีน (tourmaline) และโรเชลล์ ซอล (Rochelle salt) พบว่า เมื่อให้แรงกดแก่ผลึกจะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น (electric charge) และในทางตรงกันข้ามเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่ผลึกก็จะเกิดการยืดหดตัวของผลึก ต่อมาในปี 1881 W. Hankel ได้ตั้งคำนิยามของปรากฏการณ์นี้ว่า "Piezoelectricity" (pressure electricity)⁽¹⁾

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

1. คุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกทางตรง (direct piezoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์ซึ่งเมื่อให้แรงกด (compressive stress) แก่สารจะเกิดประจุไฟฟ้าขึ้น หรือถ้าให้แรงดึง (tensile stress) แก่สารก็จะเกิดประจุไฟฟ้าขึ้นเช่นกัน แต่จะมีการไหลของประจุไฟฟ้าออกมาในทิศทางตรงกันข้ามกับกรณีแรก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก)

2. คุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกทางอ้อม (converse piezoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์ซึ่งเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่สาร สารจะเกิดการขยายหรือหดตัว ถ้าสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปมีทิศเดียวกับทิศโพลาไรซ์ ชิ้นงานก็จะหดตัว ถ้ามีทิศตรงข้าม ชิ้นงานจะขยายตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข)



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาเพียโซอิเล็กทริก⁽³⁾

ก. ปฏิกิริยาเพียโซอิเล็กทริกทางตรง (direct piezoelectric effect)

(i) ผลของแรงกด (compressive stress) ทำให้เกิดกระแสไหลเข้าวงจร

(ii) ผลของแรงดึง (tensile stress) ทำให้เกิดกระแสไหลออกจากวงจร

ข. ปฏิกิริยาเพียโซอิเล็กทริกทางอ้อม (converse piezoelectric effect)

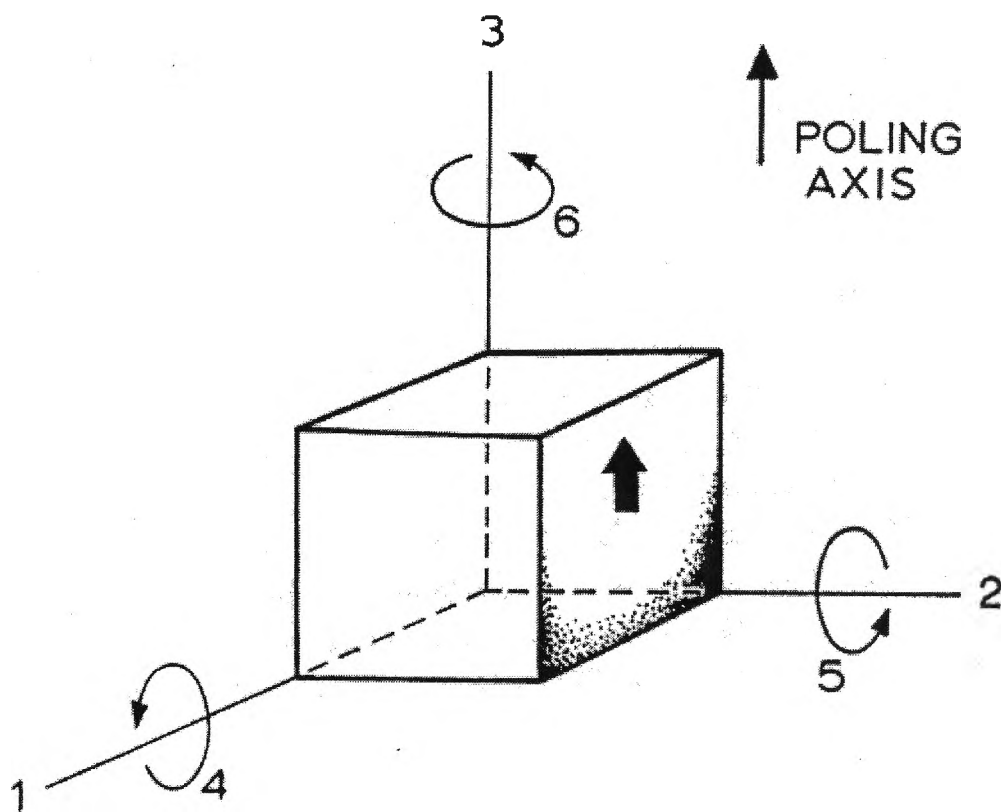
(i) สนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปมีทิศเดียวกับทิศการโพลาไรซ์จึงทำให้สารหดตัว

(ii) สนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปมีทิศตรงข้ามกับทิศการโพลาไรซ์จึงทำให้สารขยายตัว

สมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่กล่าวมาแล้วสามารถนำมาประยุกต์ ในการประดิษฐ์เครื่องมือต่างๆ โดยใช้ประโยชน์จากสมบัติของการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า และสมบัติของการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การนำสารเพียโซอิเล็กทริกไปใช้ประโยชน์⁽⁴⁾

Devices based on direct piezoelectric effect	Devices based on converse piezoelectric effect	Devices based on both effects
<ul style="list-style-type: none"> - Igniters - Keys, push buttons - Pickup cartridge - Acceleration sensors <ul style="list-style-type: none"> - Crash sensor - Ultrasound sensors - Microphone <ul style="list-style-type: none"> - Microphone - Hydrophone - Knock sensor - Pressure sensor 	<ul style="list-style-type: none"> - Elongators <ul style="list-style-type: none"> - Adjustment of laser, optical fiber, lithography mask and magnetic head - Fast injection valve - Active damping - Bending transducer - Relay - Valve - Braille pad - Piezo motors - Ink jet printer - Ultrasound transducers <ul style="list-style-type: none"> - Buzzer - Loudspeaker - Liquid atomizer - Cleaning systems - Lithotripter 	<ul style="list-style-type: none"> - Frequency filters <ul style="list-style-type: none"> - Bulk/SAW resonators - Bulk/Surface Acoustic Wave (SAW) filters for entertainment and telecommunication - Delay lines <ul style="list-style-type: none"> - Bulk/SAW delay lines - SAW correlator/convolver - Transformers <ul style="list-style-type: none"> - Piezo coupler - High voltage transformer - Sonar sensors <ul style="list-style-type: none"> - Presence detector - Distance/Level meter - Flow/Heater meter - Flow velocity meter - Recognition systems - Ultrasonic imager



รูปที่ 2.4 แสดงทิศทางระนาบและระนาบของวัสดุเฟียโซอิเล็กทริก⁽³⁾

2.4 สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

2.4.1 สารเพียโซอิเล็กทริกในธรรมชาติ

ในปี คศ.1880 ได้ค้นพบสมบัติเพียโซอิเล็กทริกในสารที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ผลึกควอทซ์ และโรเซล ซอลท์

ควอทซ์ (SiO_2) เป็นสารที่นิยมนำมาประยุกต์เป็นทรานสดิวเซอร์ เนื่องจากมีความแข็งและไม่ดูดซึมความชื้น ทำงานได้ดีในช่วงความถี่อัลตราโซนิก ($>20\text{kHz}$.) ทนต่ออุณหภูมิ และสนามไฟฟ้าแรงสูง แต่ประสิทธิภาพต่ำเมื่อใช้กับตัวกลางที่เป็นของเหลว (liquid media) และในการนำมาใช้เป็นทรานสดิวเซอร์จำเป็นต้องตัดเป็นแผ่นบาง ๆ ตามลักษณะควอทซ์แม่แบบ (mother quartz) ลักษณะเป็นผลึกหกเหลี่ยมปริซึม และปลายทั้งสองเป็นรูปปิรามิด สมบัติของแผ่นควอทซ์ที่ใช้งานทางด้านทรานสดิวเซอร์จะขึ้นกับลักษณะการตัดว่าขนานกับแกนใด เช่น ตัดขนานแกน X หรือแกน y จะใช้งานทางด้านอัลตราโซนิก⁽⁵⁾ เนื่องจากเมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไปแก่แผ่นควอทซ์ จะเกิดการหดและขยายตัวตามทิศทางความหนาของแผ่นควอทซ์

โรเซล ซอลท์ ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ใช้มากกับอุปกรณ์ที่ใช้ในน้ำ เป็นสารทรานสดิวเซอร์ที่มีกำลังต่ำ แต่จ่าย มีจุดหลอมที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส สามารถละลายน้ำได้ซึ่งเป็นข้อเสียของสารชนิดนี้เมื่อเทียบกับควอทซ์ แต่โรเซล ซอลท์ จะมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกสูงกว่าควอทซ์ เนื่องจากมีค่า d_{33} เท่ากับ 290 pC/N และ K เท่ากับ 350 ในขณะที่ควอทซ์มีค่า d_{33} เท่ากับ 2.3 pC/N และ K เท่ากับ 4.5 ดังนั้นในการใช้งานในของเหลวจะต้องห่อหุ้มสารชนิดนี้เพื่อป้องกันการซึมผ่านของสารละลาย

เนื่องจากเพียโซอิเล็กทริกในธรรมชาติ มีข้อจำกัดทางด้านรูปทรง สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกต่ำและอุณหภูมิในการใช้งานแคบ ดังนั้นจึงได้มีการสังเคราะห์เพียโซอิเล็กทริกขึ้นมา ใน คศ.1941 ค้นพบสารแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (K) สูงกว่า 1200 และต่อมาในปี คศ.1944 ได้ค้นพบโครงสร้างเพอร์อฟสไกท์ (Perovskite structure: ABO_3) ในโครงสร้างของ BaTiO_3 ⁽⁶⁾

2.4.2 สารเพียโซอิเล็กทริกสังเคราะห์

2.4.2.1 สารแบเรียมไททานेट (BaTiO_3)

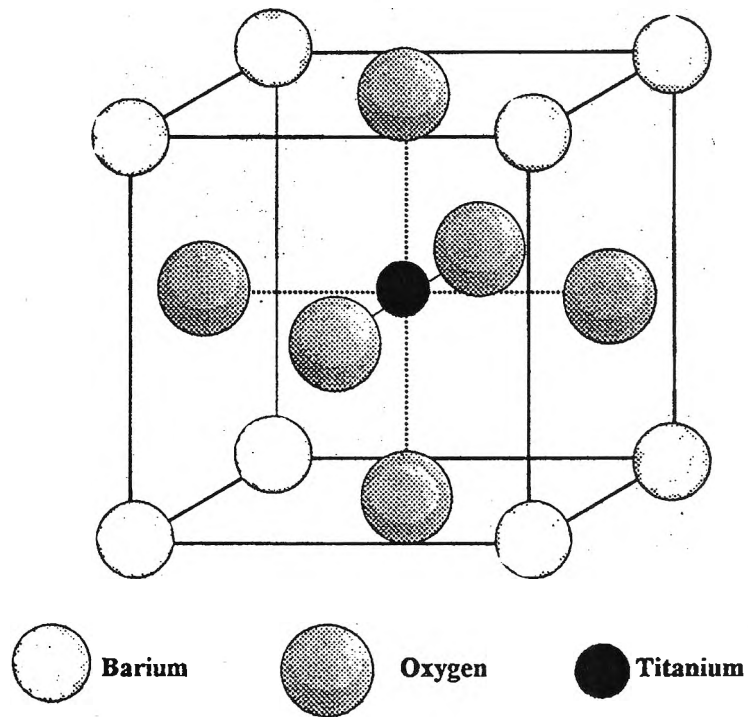
BaTiO_3 เป็นสารต้นแบบของโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ ดังรูปที่ 2.5 อีออนของแบเรียม (Ba^{2+}) จะอยู่ที่มุมของลูกบาศก์ อีออนของออกซิเจน (O^{2-}) จะอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางแต่ละด้านของลูกบาศก์ และอีออนของไททานเนียม (Ti^{4+}) จะอยู่ตรงกึ่งกลางของลูกบาศก์โดยจะอยู่ในโครงสร้างออกตะฮีดรอล (octahedral) ซึ่งล้อมรอบด้วย 6 ออกซิเจนอีออน การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ BaTiO_3 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 130 องศาเซลเซียส BaTiO_3 จะมีโครงสร้างผลึกเป็นรูปคิวบิก (cubic) ซึ่งมีสมบัติพาราอิเล็กทริก (paraelectric) เมื่อลดอุณหภูมิลดต่ำกว่า 130 องศาเซลเซียส จะมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยจะเกิดการเคลื่อนที่ของ Ti^{4+} ออกจากตำแหน่งศูนย์กลางทำให้เกิดไดโพลขึ้น โครงสร้างผลึกเปลี่ยนจากคิวบิกเป็นเตตระโกนอล ซึ่งการเปลี่ยนเฟสทำให้สมบัติทางไฟฟ้าสูงขึ้นมาก อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างนี้ เรียกว่า อุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) สารที่มีโครงสร้างชนิดเดียวกับแบเรียมไททานेट เช่น สารเลดไททานेट (PbTiO_3) เลดเซอร์โคเนตไททานेट (PZT) เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานेट (PLZT) และเลดแมกนีเซียมไนโอเบต (PMN)

2.4.2.2 สารเลดเซอร์โคเนตไททานेट (PZT)

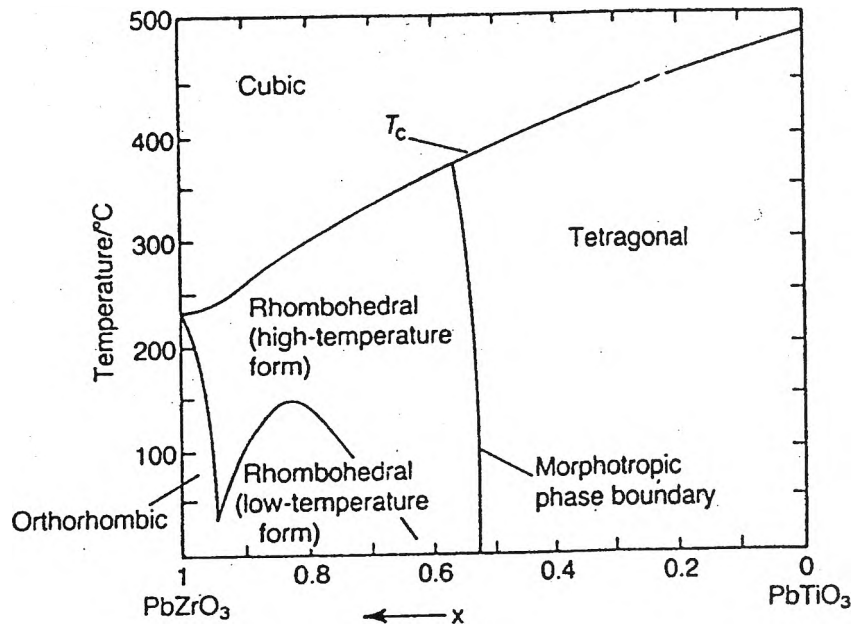
สารเลดเซอร์โคเนตไททานेट (PZT) เป็นสารที่เกิดจากสารละลายของแข็ง (solid solution) ระหว่างเลดเซอร์โคเนต (PbZrO_3) และเลดไททานेट (PbTiO_3) โดยเกิดจากการแทนที่อีออนไททานเนียม (Ti^{4+}) ด้วยอีออนเซอร์โคเนียม (Zr^{4+}) ซึ่งจะทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนจากเตตระโกนอลไปเป็นรอมโบฮีดรอล ดังแสดงในรูป 2.6 และบริเวณที่มีอัตราส่วนระหว่าง PbZrO_3 : PbTiO_3 ประมาณ 0.52:0.48 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีโครงสร้างผลึกทั้งสองอยู่ร่วมกัน เรียกพื้นที่ส่วนนี้ว่า มอร์โฟโทรปิกเฟสบาวเดอริ (Morphotropic phase boundary : MPB) โดยจะแสดงค่าเพียโซอิเล็กทริก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและ Coupling coefficient สูง ดังแสดงในรูป 2.7 เนื่องจากโครงสร้างเตตระโกนอลสามารถมีทิศที่ไดโพลสามารถเกิดการเรียงตัวไปตามสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปได้ 6 ทิศทาง ส่วนโครงสร้างรอมโบฮีดรอลมี 8 ทิศทาง ดังนั้นบริเวณมอร์โฟโทรปิกเฟสบาวเดอริ สามารถมีทิศในการจัดเรียงตัวของไดโพลได้ถึง 14 ทิศทาง จึงทำให้มีโอกาสเกิดขั้ว (polarization) ได้ง่ายในระหว่างการทำขั้ว (poling) ดังนั้น จึงมักจะนำส่วนผสมนี้มาใช้ประดิษฐ์อุปกรณ์ต่าง ๆ

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาสารเลดเซอร์โคเนตไททานेटขึ้นมาใช้แทนแบเรียมไททานेट ในการผลิตทรานสดิวเซอร์ เนื่องจากมีค่า electromechanical coupling factor (k_p) และอุณหภูมิคูรี

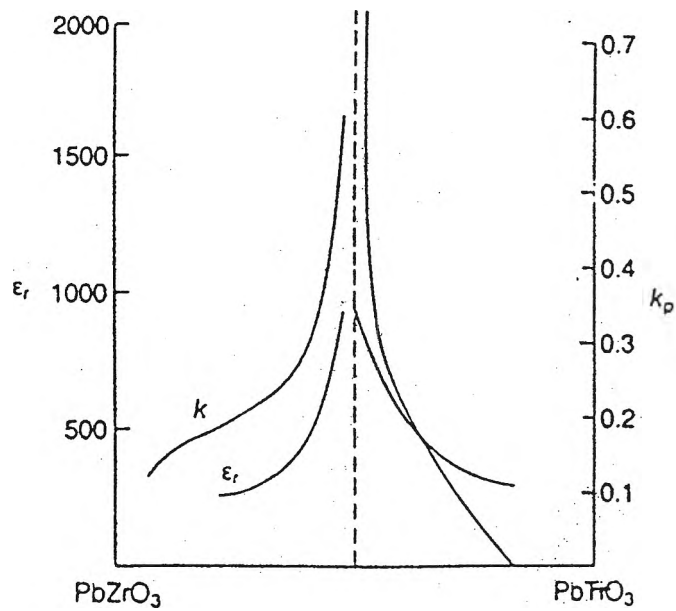
(T_c) ที่สูงกว่า จึงสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้นได้ สามารถทำให้เกิดขั้วได้ง่าย และสามารถเจือไอออนของโลหะชนิดอื่นให้อยู่ในรูปสารละลายของแข็ง (solid solution) เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาสมบัติด้านต่าง ๆ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ของสารแบเรียมไททาเนต⁽³⁾



รูปที่ 2.6 เฟสไดอะแกรมของ $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ ⁽⁷⁾



รูปที่ 2.7 ค่า Coupling coefficient (k_p) และ Permittivity (ϵ_r) ที่ส่วนผสมต่าง ๆ ระหว่าง PbZrO_3 และ PbTiO_3 ⁽⁷⁾

2.5 พอลิเมอร์ที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

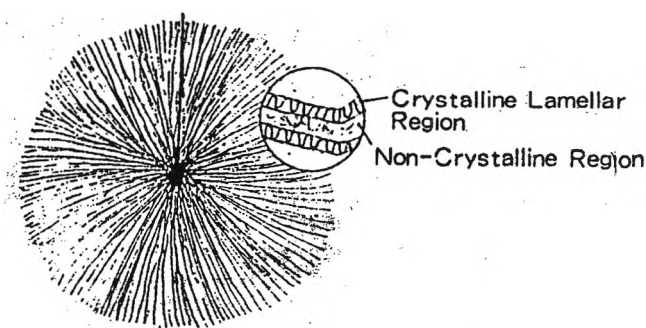
พอลิเมอร์ที่แสดงสมบัติทางด้านเฟอร์โรอิเล็กทริก ได้แก่ พอลิไวนิลิดีน ฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride : PVDF) ไวนิลิดีน ฟลูออไรด์-ไตรฟลูออโรเอทิลีน (Vinylidene fluoride-trifluoroethylene : VDF-TrFE) ไวนิลิดีน ฟลูออไรด์-เตตระฟลูออโรเอทิลีน (Vinylidene fluoride-tetrafluoroethylene : VDF-TeFE) พอลิเมอร์ร่วมของไวนิลิดีน ไซยาไนด์ กับไวนิล อะซิเตท (Copolymers of vinylidene cyanide with n-fatty acid vinyl ester : P(VDCN-VAc)) ไนลอนที่มีอะตอมคาร์บอนในหน่วยซ้ำเป็นเลขคี่ (Odd nylons) โพลียูเรีย (Polyureas) ฯลฯ ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำพอลิเมอร์เหล่านี้มาใช้เป็นทรานสดิวเซอร์ทางการแพทย์ และเครื่องมือตรวจสอบวัสดุแบบไม่ทำลาย (nondestructive testing : NDT)⁽⁸⁾ สมบัติต่างๆของเฟอร์โรอิเล็กทริกพอลิเมอร์ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของเฟอร์โรอิเล็กทริกพอลิเมอร์^(8,9)

Property	PVDF	P(VDF-TrFE)	P(VDF-TeFE)	P(VDCN-VAc)	Oriented Nylon-7
Dielectric constant, ϵ_r at 1-10 MHz.	6.0	5.0	5.5	6.0	2.5
Dielectric loss, Tan δ at 1-10 MHz.	0.25	0.12	0.20	-	0.22
Mechanical Quality factor	10	25	15	-	8
Electromechanical coupling, k_t	0.20	0.30	0.21	0.22	0.10
Density (10^3 kg/m^3)	1.78	1.88	1.90	1.20	-
Sound velocity (m/s)	2200	2400	2200	2620	2000
Acoustic impedance, Z_0 ($10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$)	3.9	4.5	4.2	3.1	2.23

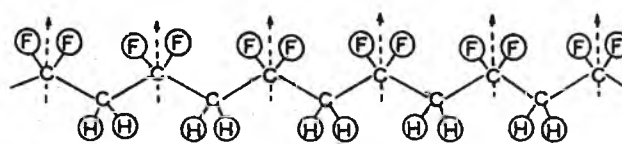
2.5.1 Polyvinylidene fluoride : PVDF

PVDF มีสูตรทางเคมี คือ $-(\text{CH}_2-\text{CF}_2)-$ ซึ่งลักษณะของโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semicrystalline) โดยจะมีผลึกที่เกิดจากสายโซ่โมเลกุลที่จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบซ้อนทับกันเป็นแผ่นแบน โดยเรียกโครงสร้างส่วนนี้ว่า lamellar รวมอยู่กับเฟสอสัณฐาน (amorphous region) ซึ่งเกิดจากสายโซ่โมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบ ดังแสดงรูปที่ 2.8 ผลึกแบบ lamellar จะโตออกจากศูนย์กลางของโครงสร้างทรงกลม (spherulite) โดยจะสลับกันระหว่างผลึกแบบ lamellar และเฟสอสัณฐาน ความเป็นผลึกของ PVDF มีมากถึง 50 – 70 %



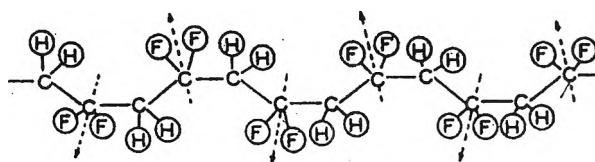
รูปที่ 2.8 โครงสร้างแบบสเฟียรูไรท์ของ PVDF⁽¹⁰⁾

ผลึก lamellar จะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันถึง ๔ แบบ คือ แบบ I (β -phase) แบบ II (α -phase) แบบ III (γ -phase) และ แบบ IV (δ -phase)⁽⁹⁾ โครงสร้างผลึกแบบที่ I III และ IV ผลึกแต่ละหน่วยจะมีโมเมนต์ขั้วคู่สุทธิ (dipole moment) และแบบ I (β -phase) จะมีขั้วคู่สุทธิสูงที่สุด ส่วนแบบที่ II (α -phase) จะไม่มีขั้วคู่สุทธิจึงเป็นโครงผลึกแบบไม่มีขั้ว ดังแสดงรูปที่ 2.9 เฟส β จะมีการจัดเรียงตัวโดยมีโมเมนต์ขั้วคู่อยู่ในทิศเดียวกัน จึงทำให้เฟส β นี้มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกในตัวเอง จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางทรานสดิวเซอร์และเซนเซอร์ได้ ส่วนเฟส α นั้นจะมีการจัดเรียงตัวของโมเมนต์ขั้วคู่ในทิศที่เกิดการหักล้างกันเอง เนื่องจากมีทิศตรงกันข้ามจึงทำให้เฟสนี้ไม่มีขั้ว



Form I (β -phase)

(ก)



Form II (α -phase)

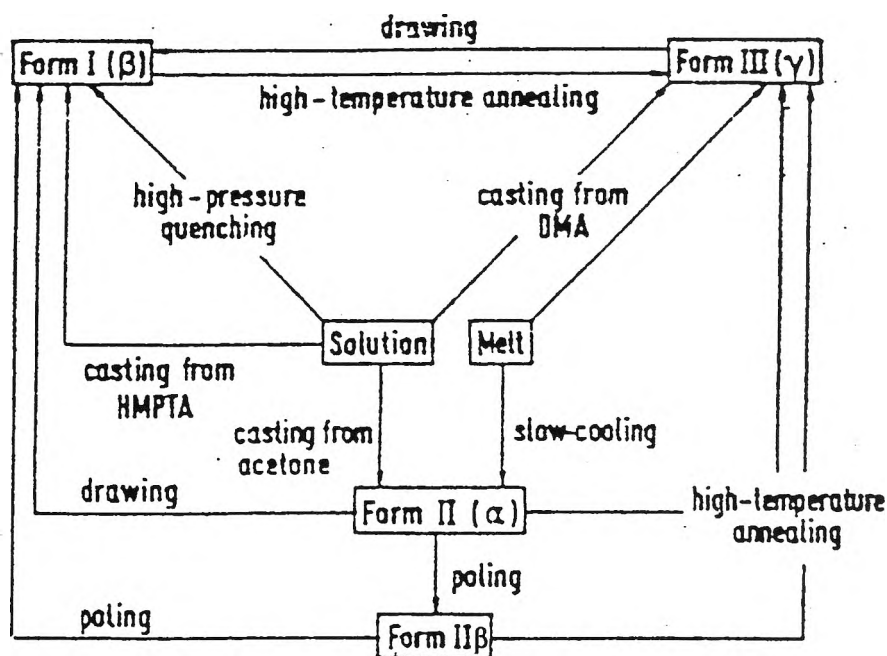
(ข)

รูปที่ 2.9 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์ขั้วคู่ของ PVDF⁽¹⁰⁾

ก) เฟส β โมเมนต์ขั้วคู่เรียงตัวในทิศทางเดียวกัน จึงเป็นโครงสร้างที่มีขั้ว

ข) เฟส α โมเมนต์ขั้วคู่เรียงตัวในทิศตรงข้ามกัน จึงเป็นโครงสร้างที่ไม่มีขั้ว

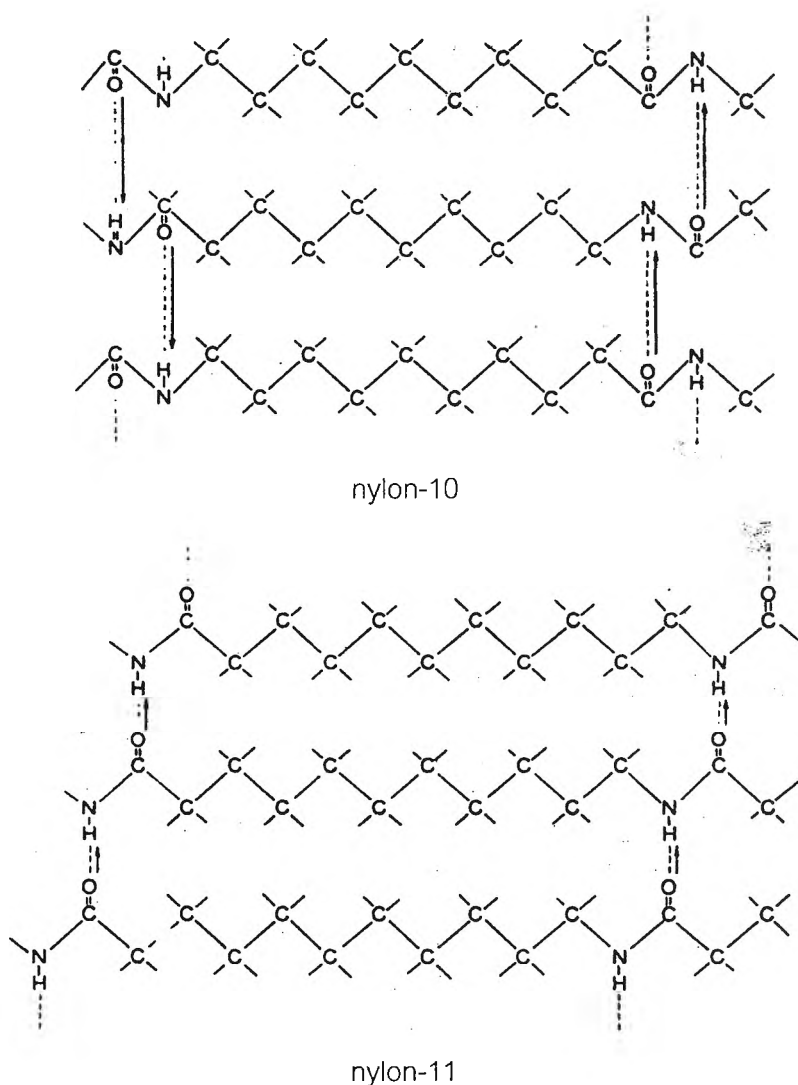
โครงสร้างแต่ละแบบสามารถเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างกันได้ โดยการยืด การจัดขั้ว การอบที่อุณหภูมิสูงและการหล่อฟิล์มในสารละลายต่างชนิดกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกแบบต่าง ๆ ของ PVDF⁽¹¹⁾

2.5.2 Odd Nylons

Odd Nylons เป็นพอลิเมอร์อีกตัวหนึ่งที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและไพโรอิเล็กทริก ซึ่งถูกค้นพบโดย Newnham และคณะ ในปี ค.ศ.1980 โดยการนำ Nylon-11 มาหลอม (melt) และทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว (quench) จากนั้นจึงนำมาดึง (draw) ให้เป็นแผ่นฟิล์ม รูปที่ 2.11 แสดงความแตกต่างของโครงสร้าง even nylon และ odd nylon ซึ่งมีผลต่อความเป็นเพียโซอิเล็กทริก โครงสร้างทั้งสองจะมีจำนวนอะตอมคาร์บอนในหน่วยซ้ำที่เป็นจำนวนคู่และคือโดยโครงสร้างที่มีคาร์บอนอะตอมเป็นจำนวนคี่จะไม่มีขั้วคู่สุทธิ เนื่องจากทิศของขั้วหักล้างกันเองส่วนโครงสร้างที่มีคาร์บอนอะตอมเป็นจำนวนคี่นั้นจะมีขั้วเนื่องจากหมู่ฟังก์ชัน C=O ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน

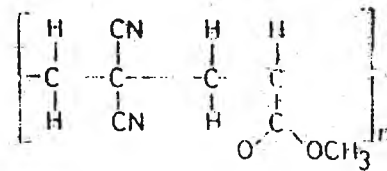


รูปที่ 2.11 โครงสร้างของ Nylon-10 และ Nylon-11⁽¹⁰⁾

ที่ทำให้ชั่วเกิดเรียงตัวอยู่ในแนวเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถเกิด spontaneous polarization ได้จึงแสดงสมบัติไพโรอิเล็กทริกและเพียโซอิเล็กทริก โดย Brown และคณะ⁽⁹⁾ ได้ทำการเปรียบเทียบผลการใช้งานทางด้านอัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ของแผ่นฟิล์ม Nylon 5 7 และ 11 พบว่า พอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิดมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับแผ่นฟิล์ม PVDF

2.5.3 Vinylidene cyanide and vinyl acetate copolymers (P(VDCN/VAc))

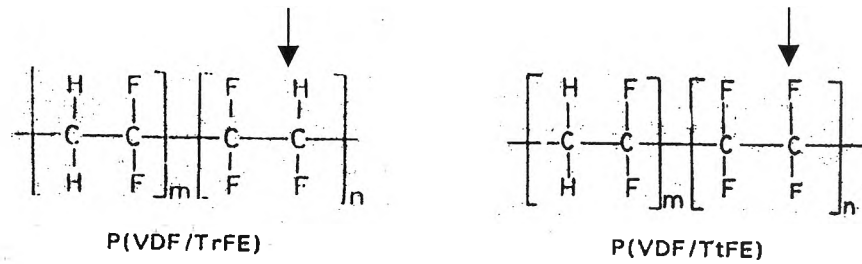
พอลิไวนิลิดีนไซยาไนด์ (PVDCN) มีโครงสร้างคือ $[-CH_2C(CH_2)_2-]$ ซึ่ง homopolymer VDCN มีสมบัติไพโรอิเล็กทริก เนื่องจากมีสภาพความเป็นขั้วสูง (high dipole moment) แต่ไม่สามารถทนต่อบรรยากาศทั่วไปได้ (ambient condition) จึงได้มีการสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ร่วมขึ้นระหว่างไวนิลิดีนไซยาไนด์ (VDCN) และ ไวนิลอะซิเตท (VAc) ช่วยปรับค่าเพียโซอิเล็กทริกในพอลิเมอร์ร่วม VDCN/VAc มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากสภาพขั้ว (dipoles) เกิดจากการเรียงตัวของโครงสร้าง C-C-C=N ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้าง P(VDCN/VAc)⁽⁹⁾

2.5.4 PVDF Copolymer

พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง VDF กับ ไตรฟลูออไรด์เอทิลีน (TrFE) หรือ เตตระฟลูออไรด์เอทิลีน (TtFE) โดยมี VDF 50-80 โมลเปอร์เซ็นต์ ส่งผลต่อค่าทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันไป โครงสร้างของพอลิเมอร์ร่วม P(VDF/TrFE) และ P(VDF/TtFE) เป็นโครงสร้างเดียวกับ β -PVDF ดังแสดงในรูป 2.13 ประโยชน์ของการทำพอลิเมอร์ร่วมคือ ฟลูออรีนอะตอมจะเป็นตัวผลักสายโซ่แต่ละสายไม่ให้พันกัน จึงทำให้โครงสร้างพอลิเมอร์ร่วมยังมีสภาพขั้วอยู่ ดังนั้น ในการนำพอลิเมอร์ร่วมนี้มาใช้งานจึงไม่จำเป็นต้องผ่านการดึง (stretching) หรือ การอบ (annealing) สามารถมีโครงสร้างแบบ β -phase ได้



รูปที่ 2.13 โครงสร้าง P(VDF/TrFE) และ P(VDF/TtFE)⁽¹⁰⁾

2.6 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก-พอลิเมอร์ (Ceramic-Polymer Composite)

วัสดุเชิงประกอบ (Composite material) เป็นวัสดุที่เกิดจากการรวมกันของวัสดุที่ต่างชนิดกัน และต่างสมบัติกัน เพื่อให้ได้วัสดุใหม่ที่มีสมบัติตามต้องการในการใช้งาน สำหรับวัสดุเชิงประกอบของสารอิเล็กทริกจะนำไปประยุกต์ใช้ในงานอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ อาทิเช่น underwater-hydrophone เป็นอุปกรณ์ที่รับคลื่นเสียงใต้น้ำโดยสามารถจับสัญญาณที่มีระดับความถี่ต่ำกว่า 40 kHz.⁽¹²⁻¹⁵⁾ และเครื่องมือทางการแพทย์ (Biomedical imaging) เป็นอุปกรณ์เพื่อตรวจดูอวัยวะต่างๆ ภายในร่างกายและทารกในครรภ์โดยอุปกรณ์ชนิดนี้จะใช้ความถี่สูงถึง 1-30 MHz.⁽¹⁶⁾

2.6.1 การนำวัสดุเชิงประกอบไปใช้ในงานทางไฟฟ้า

Hydrophone เป็นเครื่องมือรับสัญญาณเสียงใต้น้ำ โดยสมบัติของสารที่เป็นทรานสดิวเซอร์ในไฮโดรโฟนที่ดีควรจะมีค่านาน่าแน่นต่ำ ใกล้เคียงกับค่านาน่าแน่นของน้ำ เพื่อประโยชน์ในการรับส่งสัญญาณต่างๆ ได้อย่างสมบูรณ์ มีความยืดหยุ่นได้ทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานสามารถโค้งงอตามลักษณะการนำไปใช้งาน ค่า d_n และ g_n ค่อนข้างจะคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความดัน อุณหภูมิและความถี่ โดยผลคูณของตัวแปรทั้งสอง $d_n g_n$ (figure of merit) ที่สูงเป็นตัวบอกระดับประสิทธิภาพที่ดีของไฮโดรโฟน ตัวอย่างการนำไฮโดรโฟน⁽¹⁷⁾ ไปประยุกต์ใช้งาน เช่น ระบบโซนาร์สำหรับเรือดำน้ำบอกตำแหน่งเรือ ฝูงปลา หรือตรวจวัดแผ่นดินไหว เป็นต้น

Medical Ultrasonic Imaging เป็นอุปกรณ์เพื่อตรวจอวัยวะภายในร่างกายเพื่อประโยชน์ในการวินิจฉัยโรค และสามารถตรวจดูทารกในครรภ์ได้โดยสามารถเห็นภาพได้เหมือนจริงและเป็นภาพสามมิติ โดยหลักการการทำงานของทรานสดิวเซอร์ชนิดนี้คือ pulse-echo modality โดยเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์จะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวส่งและตัวรับคลื่นอัลตราซาวด์ เมื่อส่งคลื่นเสียงไปกระทบอวัยวะที่ต้องการตรวจสอบและรับคลื่นเสียงบางส่วนที่สะท้อนกลับจากบริเวณที่มีค่าอิม

พีแดนซ์ทางเสียง (acoustic impedance) ที่ต่างกัน สัญญาณที่สะท้อนกลับมากจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยทรานสดิวเซอร์ ซึ่งสมบัติที่สำคัญในการรับสัญญาณที่ถ่ายทอดให้ออกมาชัดเจนขึ้นอยู่กับค่า acoustic impedance (Z : เป็นผลคูณระหว่างความหนาแน่นของตัวกลางกับความเร็วเสียงเมื่อผ่านตัวกลางนั้น : $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$, MRayl) ระหว่างทรานสดิวเซอร์และอวัยวะที่ตรวจควรมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอวัยวะแต่ละชนิดจะมีค่า Z ไม่เท่ากัน อย่างเช่น เลือด กล้ามเนื้อ ไขมัน และเนื้อเยื่อ มีค่า Z ในช่วง $1.3\text{-}1.7 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ส่วนกระดูกมีค่า Z ในช่วง $3.8\text{-}7.4 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ⁽¹⁶⁾

สารเลดเซอร์โคเนตโททานेट (PZT)⁽¹⁷⁾ เป็นที่นิยมนำมาผลิตเป็นทรานสดิวเซอร์ เนื่องจากมีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกสูง แต่สำหรับการใช้งานทางด้านไฮโดรโฟนนั้น PZT ยังไม่เหมาะสมเนื่องจากมีค่า d_n ค่อนข้างต่ำ ($d_n = d_{33} + 2d_{31}$) จากความสัมพันธ์ระหว่าง $d_{33} \approx 2d_{31}$ แต่ทั้งสองตัวนี้จะมีเครื่องหมายตรงข้ามกันจึงทำให้ d_n มีค่าต่ำ ส่วนค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (K) มีค่าสูงมากประมาณ 1800 จึงส่งผลให้ค่า g_n ต่ำลงด้วยจากความสัมพันธ์ ($g_n = d_n/(\epsilon_0 K)$) นอกจากนี้ PZT ยังมีความหนาแน่นสูงถึง $7.9 \text{ g}/\text{cm}^3$ และมีค่า acoustic impedance $30\text{-}36 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$ ซึ่งสูงมากเมื่อเทียบกับค่า acoustic impedance ของน้ำหรือเนื้อเยื่อ จึงไม่สามารถส่งคลื่นเสียงผ่านเข้าไปในเนื้อเยื่อได้ นอกจากนี้ยังมีสารอื่นที่ใช้ในงานนี้ เช่น เลดเมตาไนโอเบต (PbNb_2O_6)⁽¹⁸⁾ และเลดโททานेट (PbTiO_3)⁽¹⁹⁾ ซึ่งทั้งสองตัวนี้มีค่า d_n และ g_n สูงกว่า PZT แต่ไม่นิยมใช้เนื่องจากมีปัญหาในการขึ้นรูปเพราะมี anisotropy สูงมาก

พอลิเมอร์ที่มีสมบัติทางด้านเพอร์โรอิเล็กทริกมีอยู่หลายชนิด เช่น Polyvinylidene fluoride (PVDF) PVDF copolymer เช่น Polyvinylidene trifluoroethylene และ Polyvinylidene tetrafluoroethylene Copolymer of vinylidene cyanide และ vinylacetate Odd numbered Nylons ซึ่งสมบัติที่เด่นๆของเพอร์โรอิเล็กทริกพอลิเมอร์ จะช่วยให้สารที่เตรียมได้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ช่วยให้ชิ้นงานมีการโค้งงอได้ มีความหนาแน่นและ acoustic impedance ต่ำ จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบ มีค่า acoustic impedance ที่ต่ำไปด้วย ช่วยให้เกิดการเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อในร่างกายหรือน้ำซึ่งมีค่า acoustic impedance ต่ำเช่นกัน ทำให้เราได้รับสัญญาณที่สะท้อนบริเวณตัวกลางทั้งสองอย่างชัดเจน นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบยังมีค่า figure of merit ($d_n g_n \approx 1000 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$) สูงมากเมื่อเทียบกับ PZT ($d_n g_n \approx 100 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$) ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญในการใช้งานทางด้านไฮโดรโฟน แต่เพอร์โรอิเล็กทริกพอลิเมอร์ก็มีข้อเสีย คือ dielectric constant (K) planar electromechanical coupling (k_p) thickness coupling coefficient (k_t) piezoelectric coefficient (d_{33}) ต่ำ การทำให้เกิดขั้วจึงต้องใช้สนามไฟฟ้าสูงมาก และที่สำคัญมี

ราคาแพง ดังนั้นการแก้ปัญหาจึงทำโดยการนำสารทั้งสองชนิดมาผสมกันเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ โดยอยู่ในรูปของวัสดุเชิงประกอบ

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก พอลิเมอร์และวัสดุเชิงประกอบ⁽¹⁶⁾

Parameter	Ceramic	Polymer	PZT-Polymer composite
Acoustic impedance kg/(m ² s)	30 (-)	4.3 (+)	10 (can be tailored)(+)
Coupling factor	0.5-0.7 (+)	0.1-0.3 (-)	0.5-0.7 (+)
Dielectric constant	200-5000 (+)	6-10 (-)	Proportional to vol% PZT (+)
Tan δ	0.02 (+)	0.25 (+)	0.02 (+)
Cost and ease of fabrication	Cheap	Expensive	Medium

+ ค่าที่ยอมรับได้ในการนำไปใช้งาน

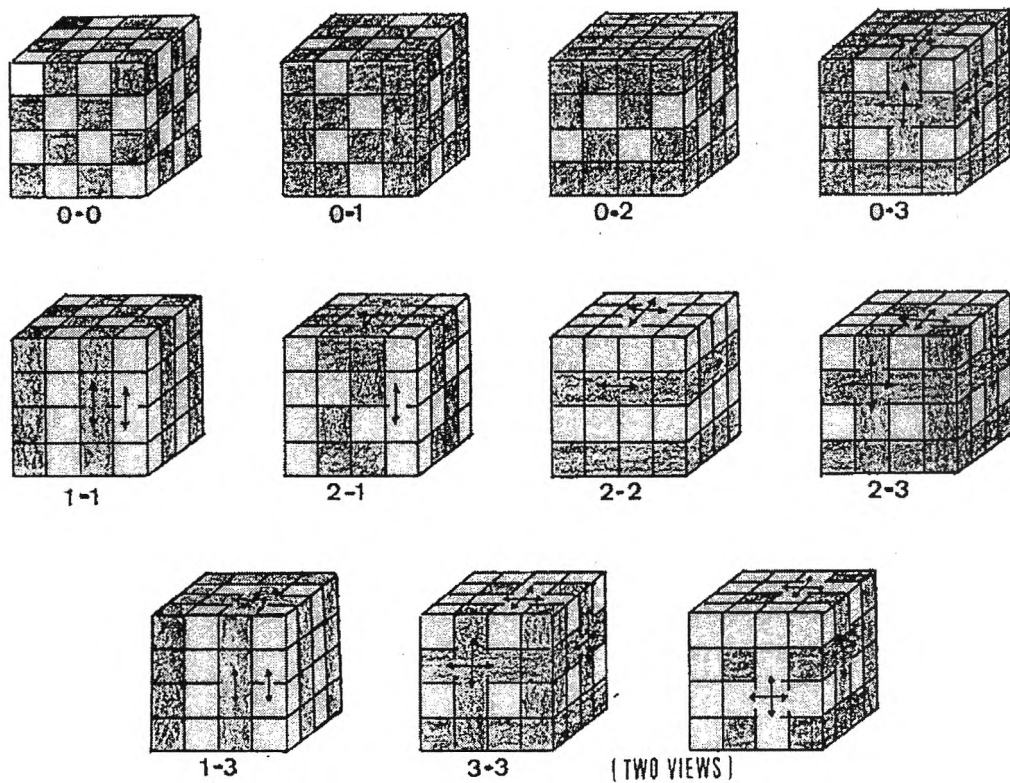
- ค่าที่ต่ำเกินไปในการนำไปใช้งาน

วัสดุเชิงประกอบเพียโซอิเล็กทริกประกอบด้วย เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและพอลิเมอร์ ซึ่งมีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานทางด้านทรานสดิวเซอร์ทางการแพทย์และไฮโดรโฟน มากกว่าการใช้สารเซรามิกชนิดเดียว (single phase) ซึ่งในช่วง 20 ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาวิธีการผลิตและปรับปรุงสมบัติต่างๆของวัสดุเชิงประกอบเพียโซอิเล็กทริก โดยศึกษาการขึ้นรูป การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม การจัดเรียงตัวและเชื่อมต่อกัน (connectivity)

2.6.2 การเชื่อมต่อกัน (Connectivity)

ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบนั้น นอกจากจะเลือกสารเซรามิกและพอลิเมอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานด้านที่ต้องการแล้ว สิ่งที่สำคัญมากในการผลิตวัสดุเชิงประกอบเพื่อให้ได้สมบัติไฟฟ้าและทางกลดีขึ้นนั้น คือ รูปแบบการจัดเรียงตัวหรือการเชื่อมต่อกัน (connectivity) ระหว่างเฟสเซรามิกและพอลิเมอร์ นิยามโดย Newnham และคณะ⁽²⁰⁾ ในแต่ละรูปแบบจะมีการเชื่อมต่อกันของเฟสเซรามิกและพอลิเมอร์ในหนึ่ง สอง หรือ สามทิศทาง แบ่งเป็น 10 ลักษณะ คือ 0-0 0-1

0-2 0-3 1-1 1-2 1-3 2-2 2-3 และ 3-3 ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ตัวเลขที่ใช้ จะเป็นตัวกำหนดเฟสของตัวเติม (filler) และเฟสของตัวโครงสร้าง (matrix) โดยตัวเลขตัวแรกแสดงถึงเฟสของตัวเติม และตัวที่สองแสดงถึงเฟสของตัวโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น อนุภาคของเซรามิกฝังและกระจายอยู่ในเฟสของพอลิเมอร์ โดยเฟสพอลิเมอร์จะมีการเชื่อมต่อกันทั้งสามทิศทาง เรียกว่า การเชื่อมต่อแบบ "0-3" หรือ ถ้ามีเส้นใย (fiber) เซรามิกฝังอยู่ในเฟสพอลิเมอร์ จะเรียกรูปแบบนี้ว่าการเชื่อมต่อแบบ "1-3"



รูปที่ 2.14 ลักษณะการเชื่อมต่อกัน (connectivity) ของวัสดุเชิงประกอบเซรามิก-พอลิเมอร์⁽²¹⁾

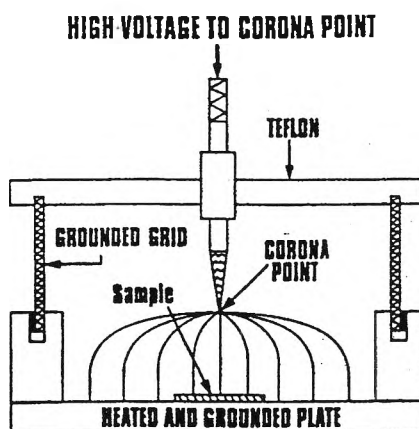
2.6.3 วัสดุเชิงประกอบชนิด 0-3

วัสดุเชิงประกอบชนิด 0-3 นี้ สามารถใช้ผลิตชิ้นงาน เป็นจำนวนมากๆได้ (mass production) มีต้นทุนการผลิตต่ำและสามารถผลิตได้หลายรูปแบบ เช่น แผ่นบาง (thin sheet) แท่ง (extruded bars) เส้นใย (fiber) และรูปร่างตามแม่แบบ (molded shapes) โดยสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ 0-3 นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารพียโซเซรามิกและพอลิเมอร์และวิธีที่ใช้ในการผลิต เช่น พอลิเมอร์ที่สามารถใช้ได้มี 2 ชนิด⁽²⁰⁾ คือ

1. thermoset polymer เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถแข็งตัวขณะที่ให้ความร้อน เช่น อีพ็อกซี (epoxy) ดังนั้นในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ สามารถกวนผสมสารเซรามิกกับพอลิเมอร์โดยมือและขึ้นรูปชิ้นงานได้ที่อุณหภูมิห้อง
2. ส่วนพอลิเมอร์ชนิด thermoplastic สามารถขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบได้ 2 วิธี
 - วิธี hot-rolling⁽²²⁾ ลักษณะของการขึ้นรูปวิธีนี้เริ่มโดยนำพอลิเมอร์มาให้ความร้อนโดยเครื่อง hot rolling machine จะตั้งอุณหภูมิที่เครื่องอยู่ในช่วงระหว่างพอลิเมอร์อ่อนตัว (softening temperature) กับอุณหภูมิหลอมตัวของพอลิเมอร์ (melting temperature) เมื่อพอลิเมอร์เริ่มอ่อนตัวจึงค่อยๆใส่ผงเซรามิกลงไปทีละน้อย ในขณะที่เครื่องจะบดผสมอนุภาคเซรามิกให้ผสมกับแผ่นพอลิเมอร์ จนเกิดการผสมกันอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นจึงนำแผ่นพอลิเมอร์ที่ผสมเซรามิกแล้วไปขึ้นรูปโดย hot-press อีกครั้งเพื่อให้ได้ความหนาที่ต้องการ
 - นำพอลิเมอร์มาละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสมก่อน^(23,24) จากนั้นจึงนำผงเซรามิกผสมลงไปแล้วจึงระเหยตัวทำละลายนั้นออกไป จะได้อนุภาคเซรามิกที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ แล้วจึงนำผงวัสดุเชิงประกอบไปขึ้นรูปโดยวิธี hot-press อีกครั้ง

Safari และคณะ⁽²⁵⁾ ทำการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบชนิด 0-3 โดยใช้ปริมาณเซรามิกสูงมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้วิธีการขึ้นรูปวิธีใหม่เรียกว่า fired composite (การนำเซรามิกมาผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) อัดขึ้นรูปให้เป็นเม็ดและเผาเอาสาร PVA ออก จากนั้นนำไปจุ่มในสารพอลิเมอร์ที่ต้องการ จะได้วัสดุเชิงประกอบ) และเปรียบเทียบกับวิธีเดิม warm die pressing (การนำสารวัสดุเชิงประกอบมาอัดขึ้นรูปพร้อมให้ความร้อนไปด้วย) สารเซรามิก (filler material) ที่ใช้คือ เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) และเลดไททาเนต (PT) ผลที่ได้คือการขึ้นรูปโดยวิธีใหม่สามารถใส่สารเซรามิกลงในวัสดุเชิงประกอบ ได้มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จึงทำให้มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกดีขึ้นจากเดิม d_{33} และ d_h เท่ากับ 90 และ 35 pC/N ตามลำดับ และ figure of merit (d_h/g_p) สูงกว่าวิธีเดิมถึง 5 เท่า นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการเหนี่ยวนำให้เกิดขั้ว (poling) โดยวิธี Corona poling (การ pole โดยวิธี corona^(26,27) ดังภาพที่

2.15 จะทำ electrode ที่ชิ้นงานเพียงด้านเดียวซึ่งจะวางติดอยู่บน heated ground plate จากนั้นประจุไฟฟ้าจะถูกพ่นลงไปยังผิวด้านบนของชิ้นงานที่ไม่มี electrode จึงทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวหน้าทั้งสองของชิ้นงาน ประโยชน์ของการ pole โดยวิธีนี้ คือ ไม่ทำให้เกิดการลัดวงจรเนื่องจากทำ electrode เพียงด้านเดียว และสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมและสามารถทำในชิ้นงานที่มีพื้นที่กว้างๆ เช่น แผ่นฟิล์มได้ เปรียบเทียบกับวิธี Conventional poling (นำชิ้นงานไปทำ electrode ทั้งสองข้างของชิ้นงาน จากนั้นนำไปจุ่มในน้ำมันซิลิโคนที่ให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ และให้สนามไฟฟ้าแก่ชิ้นงาน) พบว่า Corona poling จะให้ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (K) สูงกว่าวิธีเดิมประมาณ 10–15 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของเครื่อง Corona poling ⁽²¹⁾

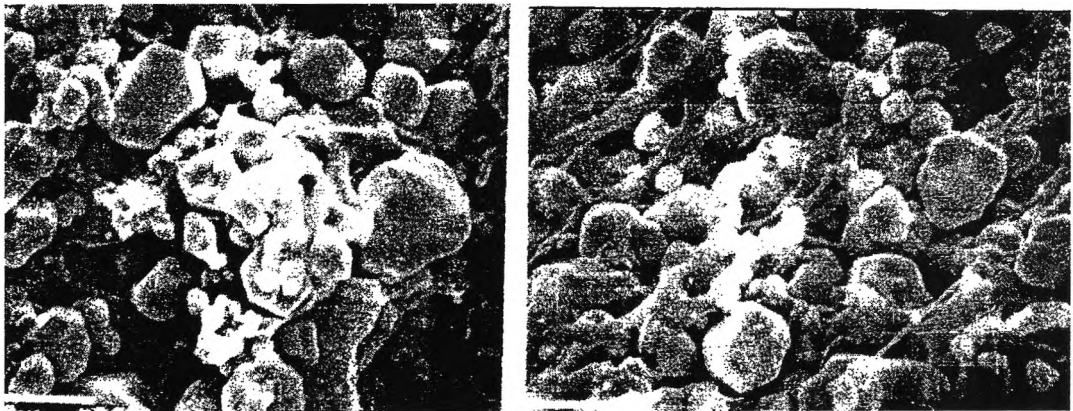
โดยปกติแล้วการเตรียมสารเซรามิกที่ใช้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบจะใช้วิธี mixed oxide โดยการนำสารออกไซด์มาผสมกัน จากนั้นนำไปเผา (calcine) ที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม แต่วิธีนี้ไม่สามารถควบคุมขนาดของเซรามิกได้

Safari และคณะ⁽²⁸⁾ พบว่าการเตรียมเซรามิกโดยวิธีการตกตะกอนร่วม (Coprecipitation) ที่ให้อนุภาคที่ตกลงมาจะมีลักษณะกลมละเอียด ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3 ไมครอน และมีการกระจายของอนุภาคในช่วงแคบๆ เตรียมวัสดุเชิงประกอบโดยนำสารเซรามิกที่เตรียมได้ผสมลงในพอลิเมอร์เจลแล้ววัดค่าทางไฟฟ้า พบว่าสารที่เตรียมได้ให้ค่า d_{33} เท่ากับ 60 pC/N d_n เท่ากับ 43 pC/N g_n เท่ากับ 97×10^{-3} Vm/N และ $d_n g_n$ เท่ากับ 4170×10^{-5} m²/N ซึ่งมีค่าที่สูงถึงสองเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารเชิงประกอบเซรามิกที่เตรียมจากวิธี sol gel และ mixed oxide

นอกจากนี้การผลิตวัสดุเชิงประกอบ 0-3 นั้นจะมีปัญหาเกี่ยวกับการกระจายระหว่างเฟสของเซรามิกและเฟสของพอลิเมอร์ไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดรูพรุน (void) ขึ้นภายในชิ้นงานส่งผลให้เกิดปัญหาในการทำให้เกิดขั้ว (poling) ซึ่งชิ้นงานจะไม่สามารถทนสนามไฟฟ้าที่สูง ๆ ได้ขณะทำการโพล ชิ้นงานจึงแตก

Han และคณะ⁽²⁹⁾ จึงได้ปรับปรุงการผลิตสารเซรามิกเพื่อใช้ในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ 0-3 โดยวิธีคอลลอยด์ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. อนุภาคเซรามิกจะกระจายอยู่ในสารละลายพอลิเมอร์ เพื่อให้สารละลายพอลิเมอร์ไปเคลือบผิวของอนุภาคเซรามิก
2. จากนั้นจึงเติมน้ำลงไปเพื่อทำให้อนุภาคเซรามิก-พอลิเมอร์ตกตะกอนออกมา ลักษณะเป็น ceramic-polymer coacervation (สารพอลิเมอร์สามารถเคลือบอยู่บนอนุภาคเซรามิกจึงทำให้อนุภาคเซรามิกแยกออกจากกัน ไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน) และละลายพอลิเมอร์ส่วนเกินออกไป
3. แล้วจึงกรองคอลลอยด์ที่ได้ออกมา
4. นำไปอัดขึ้นรูป จะได้วัสดุเชิงประกอบชนิด 0-3 ที่มีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอและโครงสร้างใกล้เคียงกัน (uniform morphology) ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ลักษณะโครงสร้างอนุภาควัสดุเชิงประกอบที่เตรียมโดย

ก) การผสมกันของออกไซด์

ข) วิธีคอลลอยด์

(Conventional method)

(Coacervation- colloidal filtration)

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นการที่สารพอลิเมอร์สามารถเคลือบอยู่บนผิวของอนุภาคเซรามิกได้อย่างทั่วถึงจึงช่วยปรับปรุงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก d_{33} d_h g_h และ $d_h g_h$ สูงถึง 65 pC/N 41 pC/N 145×10^{-3} Vm/N และ 6000×10^{-15} m²/N ตามลำดับและสามารถให้สนามไฟฟ้าเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วได้ถึง 150 kV/cm

H.G. Lee และ H.G.Kim⁽³⁰⁾ ได้ทำการวิจัยพบว่าลักษณะจุลโครงสร้าง (microstructure) มีอิทธิพลต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบชนิด 0-3 ระหว่าง เลดเซอร์โคเนตไททานเตและฟีนอลิก (phenolic resin) โดยศึกษาตำแหน่งที่เกิดรูพรุนซึ่งพบว่ารูพรุนในวัสดุเชิงประกอบสามารถเกิดได้ 3 ตำแหน่ง คือ รูพรุนในเนื้อพอลิเมอร์ (matrix pore) รูพรุนในอนุภาคเซรามิก (particle pore) และรูพรุนระหว่างเนื้อเซรามิกกับพอลิเมอร์ (interface pore)

การศึกษาผลของอนุภาคของเซรามิกในวัสดุเชิงประกอบต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (K) และเพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) โดย Lee และ Kim⁽³¹⁾ และ Tandon และคณะ⁽³²⁾ พบว่าถ้าขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นจาก 5-100 ไมโครเมตร จะส่งผลให้เพียโซอิเล็กทริกสูงขึ้นเช่นกัน และไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออนุภาคเซรามิกมีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร นอกจากนี้สภาวะที่ใช้ในการโพล เช่น สนามไฟฟ้า เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมมีผลต่อสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกเช่นกัน

2.6.4 วัสดุเชิงประกอบชนิด 1-3

วัสดุเชิงประกอบชนิด 1-3 เป็นลักษณะของการเชื่อมต่อกันของเฟสเซรามิกในทิศทางเดียว ส่วนพอลิเมอร์จะเชื่อมกันทั้งสามทิศทาง การขึ้นรูปทำได้หลายวิธี เช่น Rod placement⁽³³⁾ Dice and fill⁽³⁴⁾ Lost mold⁽³⁵⁾ Injection molding⁽¹⁵⁾ Tape lamination⁽³⁶⁾ และ Relic process⁽³⁷⁻⁴⁰⁾ สำหรับวัสดุเชิงประกอบชนิด 1-3 เส้นใยหรือแท่งเซรามิกที่ฝังอยู่ในพอลิเมอร์นั้นควรจะมีขนาดเล็กในระดับมิลลิเมตรจนถึงไมโครเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการใช้งานในแต่ละความถี่ โดยปกติแล้วเครื่องมือทางการแพทย์จะใช้ความถี่ในช่วง 1-30 MHz. ดังนั้นรูปร่างของเซรามิกที่ใช้ควรจะต้องมีขนาดเล็กตาม จึงจะทำให้สัญญาณภาพที่เกิดดีขึ้น (high resolution)

Rod placement เป็นวิธีการขึ้นรูปโดยนำสาร PZT ผสมกับตัวประสาน (binder) ให้มีส่วนผสมลักษณะขี้หนู (paste) จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นแท่งโดยวิธี extrusion และนำไปเผาซินเตอร์ แท่งเซรามิกมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 254 μm และนำไปเรียงในแม่แบบทองเหลืองที่ถูกเจาะรูไว้ จากนั้นจึงนำไปจุ่มลงในอิพอกซีพอลิเมอร์ตามสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิกขึ้นอยู่กับระยะห่างที่แท่งเซรามิกถูกจัดเรียงในแม่แบบทองเหลือง Klicker และคณะ⁽³⁰⁾ พบว่าปริมาณเซรามิก 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรให้ค่า K เท่ากับ 400 d_{33} เท่ากับ 320 pC/N d_{h} เท่ากับ 100 pC/N แต่วิธีนี้จะมีข้อจำกัด คือ ใช้เวลาในการขึ้นรูปแท่งเซรามิกนาน และมักจะแตกหักได้ และขนาดของแท่งเซรามิกที่ได้มีขนาดใหญ่ ปรับปรุงการขึ้นรูปแท่งเซรามิกให้เล็กลงกว่าเดิมโดยวิธี Viscous

phase^(41,42) วิธีนี้สามารถผลิตแท่ง PZT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กถึง 20 ไมครอน และผลิตได้จำนวนมาก ดังรูปที่ 2.17

Dice and fill วิธีนี้ขึ้นรูปเซรามิกโดยการเจาะแม่แบบเซรามิกซึ่งมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมในแนวขนาน และทำการเจาะอีกครั้งตามแนวที่ตั้งฉากกับครั้งแรก จะได้แท่งเซรามิกซึ่งยังคงติดอยู่กับฐานเซรามิก จากนั้นจึงเติมพอลิเมอร์ลงไปบริเวณที่ว่างระหว่างแท่งเซรามิกจนเต็ม จึงตัดส่วนฐานเซรามิกออกไป ดังรูปที่ 2.18 ในทางการค้าจะใช้การขึ้นรูปโดยวิธีนี้สำหรับการผลิตทรานสดิวเซอร์ที่ใช้ตรวจจอวัยวะภายในร่างกาย

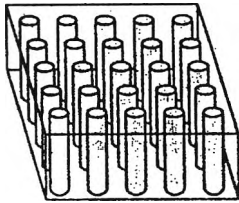
Lost mold ทำโดยเทสารของผสมระหว่าง PZT และตัวประสาน (binder) ลงในแม่แบบพลาสติกโดยแม่แบบขึ้นรูปมาจากวิธี injection molding จากนั้นจึงเผาไล่ binder ขึ้นงานหลังเผาซินเตอร์มีความหนาแน่นสูงมากกว่า 98 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของแท่งเซรามิกเล็กถึง 100 ไมครอน จากนั้นจึงนำพอลิเมอร์เทลงในชิ้นงานก็จะได้วัสดุเชิงประกอบ ดังรูปที่ 2.19

Injection molding เป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบชนิด 1-3 ดังรูปที่ 2.20 สารเซรามิกจะถูกฉีดเข้าไปในแม่แบบที่เตรียมไว้ จากนั้นจึงนำไปเผาไล่ตัวประสาน และทำการเผาซินเตอร์และทำเป็นวัสดุเชิงประกอบโดยการเทพอลิเมอร์ลงไปให้แท่งเซรามิกที่เตรียมไว้ ซึ่งวิธีนี้สามารถผลิตแท่งเซรามิกได้เป็นจำนวนมากกว่า 100 แท่ง และมีขนาดเล็ก 50 ไมโครเมตร สามารถเว้นระยะระหว่างช่องของแท่งเซรามิกตามต้องการ เป็นวิธีที่เร็วและเหมาะสำหรับนำไปผลิตในอุตสาหกรรม

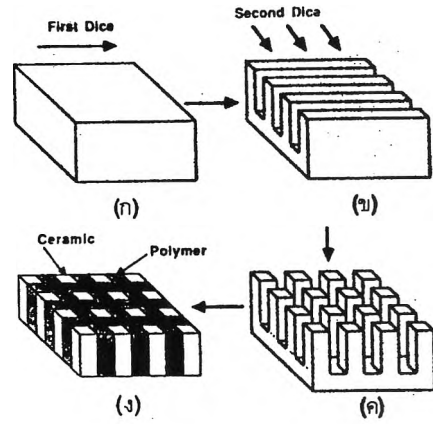
Tape-lamination วิธีนี้สามารถทำได้ง่ายกว่าวิธี dice and fill และสามารถลดความหนาของสารเซรามิกและพอลิเมอร์ได้เป็น 15 และ 6 ไมครอนตามลำดับ นอกจากนี้ยังช่วยให้การเชื่อมกันระหว่างแผ่นเซรามิกและพอลิเมอร์แน่นขึ้น มีผลให้มีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของสารเหมาะที่นำไปทำเป็น ทรานสดิวเซอร์เพื่อใช้ในงานที่มีความถี่สูงๆ ได้ ดังรูปที่ 2.21

Relic process เป็นวิธีใหม่เพื่อใช้ในการผลิตแท่งเซรามิกให้มีขนาดเล็กมาก (fine scale) โดยมีการขึ้นรูป ดังนี้

1. เตรียมสาร PZT จากสารละลายอัลคอกไซด์ของ Pb Zr Ti
2. นำแผ่นเส้นใยคาร์บอน(carbon template) ซึ่งเป็นแม่แบบไปจุ่มลงในสารละลาย PZT ที่เตรียมไว้ ข้อดีของ carbon template คือ พื้นที่หน้าตัดนั้นมีรูพรุนอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นสาร PZT สามารถเข้าไปอยู่ในรูพรุนได้อย่างทั่วถึง
3. เผาเส้นใยคาร์บอนออกจะได้ PZT ที่มีลักษณะเดียวกับ carbon template
4. นำ PZT relic ที่ได้ไปเผาซินเตอร์เพื่อเพิ่มความหนาแน่นเพิ่มขึ้น
5. นำ PZT relic ที่เผาแล้วไปจุ่มในพอลิเมอร์จะได้ชิ้นงานของแผ่นเส้นใย PZT/พอลิเมอร์ ดังรูปที่ 2.2

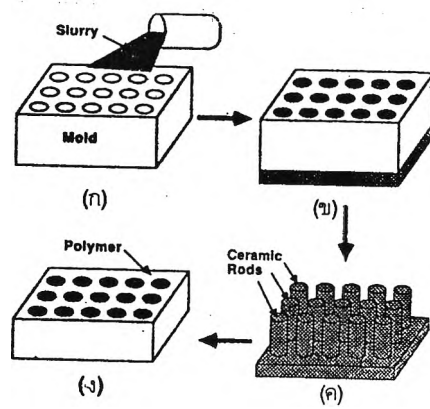


รูปที่ 2.17 Rod placement



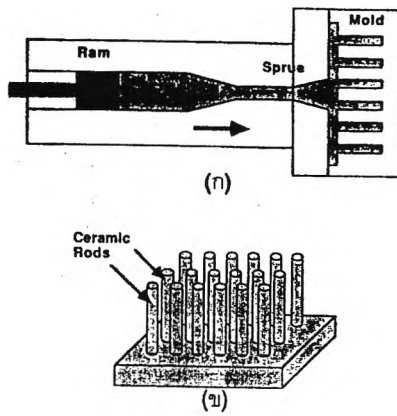
รูปที่ 2.18 Dice and fill

ก) แท่งเซรามิกรูปสี่เหลี่ยม ข) เจาะเซรามิกครั้งที่ 1 (2-2)
 ค) เต็มสารพอลิเมอร์ (1-3) ง) เจาะเซรามิกครั้งที่ 2

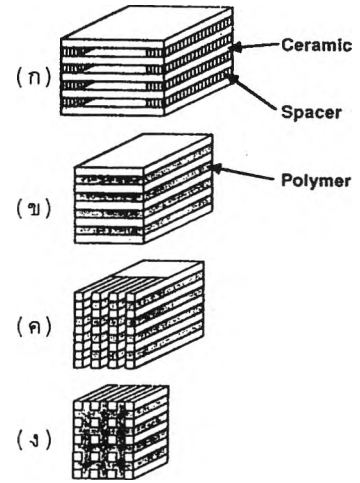


รูปที่ 2.19 Lost-mold

ก) เต็มสลิลิปลงแม่แบบ ข) แม่แบบก่อนเผา
 ค) แม่แบบหลังเผา ง) เต็มพอลิเมอร์(1-3)



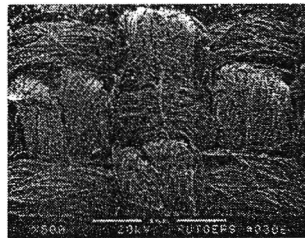
รูปที่ 2.20 การเตรียมแท่งเซรามิกโดย Injection molding
 ก) ฉีดสารเซรามิกเข้าแม่แบบ ข) เผาไล่ตัวประสานออก



รูปที่ 2.21 Tape-lamination
 ก) วางแผ่นเซรามิกเรียงซ้อนกัน
 ข) เติมพอลิเมอร์ลงในช่องว่าง (2-2)
 ค) เจาะแผ่นเซรามิก-พอลิเมอร์
 ง) เติมพอลิเมอร์ลงในช่องว่าง (1-3)



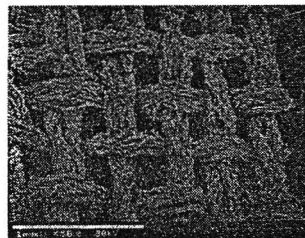
(ก) แม่แบบเส้นใยคาร์บอน



(ข) เส้นใยคาร์บอนหลังจุ่ม PZT



(ค) เผา PZT relic



(ง) ความหนาแน่นของ PZT relic หลังเผา

รูปที่ 2.22 Relic process

2.6.5 วัสดุเชิงประกอบชนิด 3-3

เป็นรูปแบบของการเชื่อมต่อกันของเซรามิกและพอลิเมอร์ โดยเฟสแต่ละเฟสจะเชื่อมต่อกันเองทั้งสามทิศทาง เรียกว่าวัสดุเชิงประกอบชนิด 3-3 โดย Skinner และคณะ (1978) ได้ศึกษาวิธีการขึ้นรูปโดยวิธีที่เรียกว่า coral replamine โดยการนำประการังมาหล่อด้วยขี้ผึ้ง (casting wax) จากนั้นเอาประการังออกโดยนำไปจุ่มลงในกรดไฮโดรคลอริก ดังนั้นจึงได้โครงสร้างของขี้ผึ้งที่เหมือนกับประการังไว้ จึงนำโครงสร้างนี้ไปจุ่มลงในสารละลายเซรามิก แล้วจึงนำไปเผาไล่ขี้ผึ้งออก ซึ่งจะเหลือแต่โครงสร้างเซรามิก นำไปเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำโครงสร้างเซรามิกไปจุ่มในพอลิเมอร์ที่มีความหนืดที่เหมาะสม จะได้วัสดุเชิงประกอบชนิด 3-3 ซึ่งสามารถช่วยปรับสมบัติทางด้านไฟฟ้าและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบให้ดีขึ้นได้ เนื่องจากสามารถวัดค่าทางไฟฟ้าได้จากทั้งสองเฟสเพราะวัสดุเชิงประกอบชนิด 3-3 นี้ เฟสของเซรามิกและพอลิเมอร์จะติดต่อเชื่อมกันดังนั้นค่าที่ได้จะเป็นสมบัติทั้งสองเฟส ผลที่ได้ออกมานั้นวัสดุเชิงประกอบจะมีความหนาแน่นต่ำซึ่งช่วยให้เข้ากันได้กับน้ำหรือเนื้อเยื่อในร่างกายและเพิ่มความยืดหยุ่นให้มากขึ้นซึ่งจะมีผลต่อการนำไปขึ้นรูปขึ้นงานให้เหมาะกับงานที่จะใช้ แต่วิธีนี้ไม่สมควรนำมาใช้เนื่องจากต้องใช้ประการังมาทำเป็นแบบและไม่เหมาะสมในการผลิตเป็นอุตสาหกรรม

Shrout และคณะ⁽⁴³⁾ จึงได้ปรับปรุงการขึ้นรูปใหม่ โดยใช้เม็ดพลาสติก (polymethylmethacrylate: PMM) ผสมกับสารเซรามิก (PZT) จากนั้นนำไปขึ้นรูปและเผาเม็ดพลาสติกออก ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า burned-out plastic spheres (BURPS) จะได้ชิ้นงานที่มีรูพรุน จากนั้นจึงนำไปจุ่มในพอลิเมอร์ จะได้วัสดุเชิงประกอบชนิด 3-3 ต่อมาได้พัฒนาเพื่อให้ได้ค่าทางไฟฟ้าสูงขึ้นโดย Panda และคณะ⁽⁴⁴⁾ ได้นำเครื่องคอมพิวเตอร์มาช่วยในการขึ้นรูปขึ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่มีโครงสร้างแบบ ladder และ 3-D honeycomb