บทที่ 3

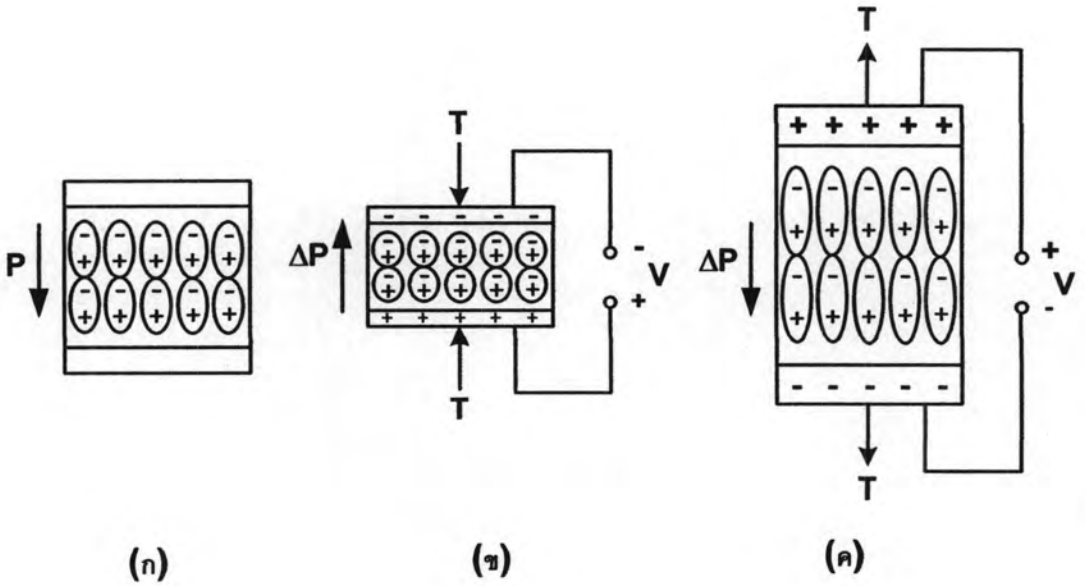
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ปรากฏกาณ์เพียโซอิเล็กทริก

คำว่า " เพียโซ (Piezo) " มาจากภาษากรีกมีความหมายว่า แรงดันหรือการกด ส่วน " อิเล็กทริก (Electric) " มีความหมายว่าไฟฟ้า ดังนั้นคำว่า " เพียโซอิเล็กทริก " จึงมีความหมายว่า ไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดัน กล่าวคือ เมื่อออกแรงหรือมีความเค้นมากระทำกับวัสดุจะสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของประจุไฟฟ้าบนผิวของวัสดุได้ โดยศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่กระทำต่อวัสดุ ซึ่งการที่วัสดุเปลี่ยนแรงเค้นที่อยู่ในรูปของพลังงานกลให้กลายเป็นศักย์ไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า ลักษณะดังกล่าวนี้จะเรียกว่า "ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง (Direct effect)" และในทางตรงกันข้าม เมื่อให้สนามไฟฟ้าผ่านเข้าไปในตัวของวัสดุ จะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดความเครียดแก่วัสดุขึ้น ผลก็คือจะทำให้วัสดุมีความยาวเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ลักษณะดังกล่าวนี้ก็จะเรียกว่า "ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม (Indirect effect)"

3.1.1) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง

เมื่อวัสดุได้รับความเค้นแล้วจะเกิดความเครียดซึ่งจะทำให้ระยะห่างระหว่างโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ลดลง การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ของวัสดุนี้จะมีผลทำให้ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าและความแตกต่างของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณปลายของวัสดุทั้งสองด้านเกิดการเปลี่ยนแปลง เกิดประจุโพลาไรเซชันที่เป็นลบบริเวณผิวด้านบนและบวกบริเวณผิวด้านล่าง ประจุโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้าอิสระที่ขั้วไฟฟ้าด้านบนเป็นประจุบวกและขั้วไฟฟ้าด้านล่างเป็นประจุลบ สามารถวัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าด้านบนต่อด้านล่างได้ ดังรูป 3.1



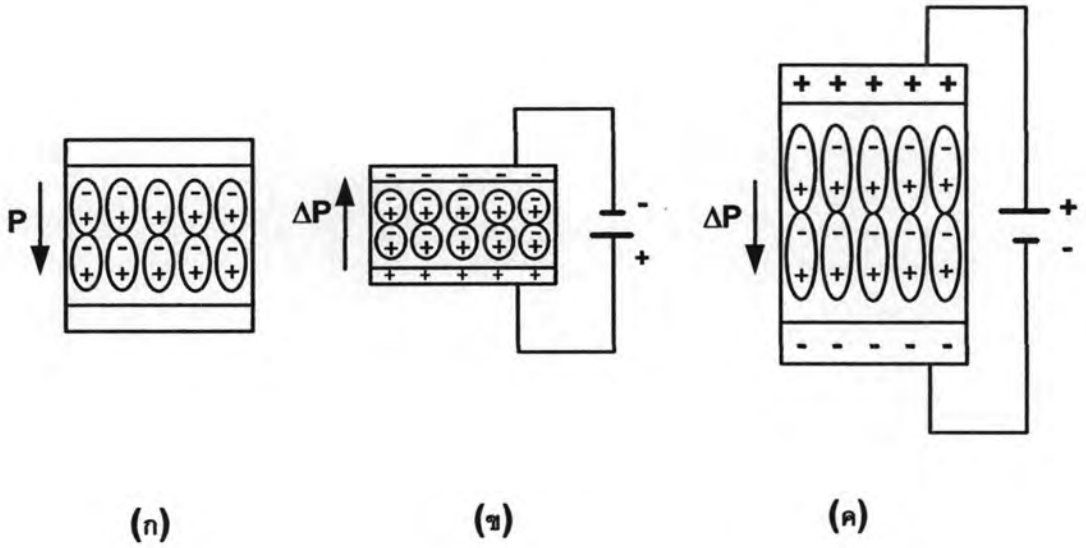
รูปที่ 3.1 การเกิดโพลาไรเซชันเพื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับความเค้น [10]

จากสมบัติดังกล่าวนี้ทำให้เราสามารถนำวัสดุที่มีคุณสมบัตินี้ไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์สำหรับรับคลื่นเสียงได้

3.1.2) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม

เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแล้ว โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับวัสดุ โดยต่อขั้วไฟฟ้าลบเข้ากับขั้วไฟฟ้าด้านบนของวัสดุและให้ขั้วไฟฟ้าบวกต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าด้านล่างของวัสดุ จะทำให้ประจุอิสระบนขั้วไฟฟ้าจะผลักประจุโพลาไรเซชัน ผลคือเกิดความเครียดขึ้นกับวัสดุ ทำให้โมเมนต์ขั้วคู่หดสั้นลง ในทางตรงกันข้าม ถ้ากลับขั้วแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวัสดุ ผลคือโมเมนต์ขั้วคู่จะยืดออก ทำให้วัสดุยาวขึ้น ดังรูป 3.2

ขอสงวนทางสถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า [10]

จากสมบัติดังกล่าวนี้ทำให้เราสามารถนำวัสดุที่มีคุณสมบัตินี้ไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์กำเนิดคลื่นเสียงได้

3.2 สภาพเพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกสามารถนิยามโดยอาศัยทฤษฎีทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) โดยพิจารณาการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างสมบัติทางกล ทางไฟฟ้า และความร้อนของวัสดุ โดยสมการเฟอโรอิเล็กทริกสามารถเขียนได้ในรูปสมการเชิงเส้น (Linear equation) ดังนี้

$$D = P\Delta T + dX + eE \tag{3.1}$$

$$x = \alpha\Delta T + sX + dE \tag{3.2}$$

จากสมการ (3.1) แสดงถึงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบตรง พิจารณาเมื่อมีความเค้นมากระทำต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยไม่มีการป้อนสนามไฟฟ้า (E = 0) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) ดังนั้นค่าการกระจัดทางไฟฟ้าในสมการที่ (3.1) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$D = dX \tag{3.3}$$

และในทางกลับกัน สมการ (3.2) แสดงถึงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม โดยเมื่อนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกวางไว้ในสนามไฟฟ้า จะทำให้เกิดความเครียดขึ้นกับวัสดุ ถ้าไม่มีความเค้นมากระทำต่อวัสดุ ($X = 0$) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) ดังนั้นค่าความเครียดที่จะเกิดขึ้นในวัสดุในสมการที่ (3.2) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$x = dE \tag{3.4}$$

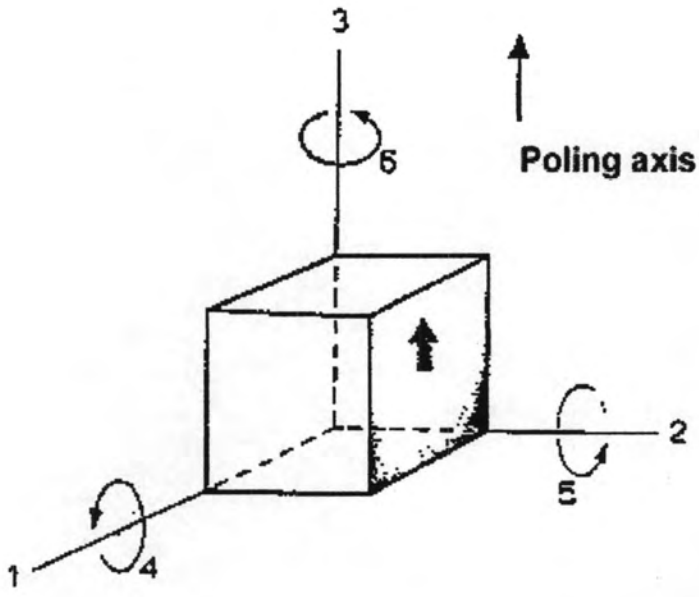
ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก ซึ่งจากสมการ (3.3) และ (3.4) จะเขียนความเค้นและความเครียดให้อยู่ในรูปเทนเซอร์อันดับ 2 และค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกจะเขียนให้อยู่ในรูปเทนเซอร์อันดับ 3

เทนเซอร์ความเค้น (Stress tensor) ใช้สัญลักษณ์ คือ X_{kl} คือปริมาณทางฟิสิกส์ที่อธิบายลักษณะของวัสดุเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ซึ่งความหมายของความเค้นคือ แรงต้านภายในเนื้อของวัสดุซึ่งจะมีค่าเท่ากับแรงภายนอกที่กระทำต่อพื้นที่ผิวที่ตั้งฉากของวัสดุ

นิยาม
$$X_{kl} = \frac{F_k}{A_l} \tag{3.5}$$

เมื่อ X_{kl} คือ เทนเซอร์ความเค้น
F_k คือ แรงภายนอกที่กระทำต่อวัสดุ
A_l คือ พื้นที่ผิวตั้งฉากที่ถูกกระทำ

ความเค้นสามารถแบ่งได้หลายประเภท ได้แก่ ความเค้นดึง (Tensile stress) ความเค้นอัด (Compressive stress) และความเค้นเฉือน (Shear stress) โดยแต่ละประเภทจะขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงที่กระทำ ซึ่งดัชนีล่างคือ k,l จะเป็นตัวระบุทิศทางของแรงที่กระทำต่อวัสดุและพื้นที่ที่ถูกแรงกระทำ โดย k,l จะมีค่าเป็น 1,2 และ 3 ซึ่งแสดงตามแนว x,y และ z ในปริภูมิตามลำดับ ดังนั้นจะได้องค์ประกอบของความเค้น 9 องค์ประกอบด้วยกันดังแสดงในรูป



รูปที่ 3.3 ทิศทางของแรงกระทำและพื้นที่ที่ถูกกระทำของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก [8]

จากรูปสามารถเขียนความเค้นที่อยู่ในแต่ละองค์ประกอบได้รูปของเมตริกซ์ที่มีมิติ 3 x 3 ได้ดังนี้

$$X_{kl} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} \end{pmatrix} \tag{3.6}$$

เมื่อพิจารณารูปร่างแบบสมมาตรจะได้ $X_{kl} = X_{lk}$
และจากเมตริกซ์ที่แสดงความเค้น ในสมการ (3.6) สามารถพิจารณาประเภทของความเค้นได้ดังต่อไปนี้
ความเค้นดึงเขียนแทนโดย

$$X_1 = X_{11}$$
$$X_2 = X_{22}$$
$$X_3 = X_{33}$$

ความเค้นเฉือนเขียนแทนโดย

$$X_4 = X_{23} = X_{32}$$
$$X_5 = X_{13} = X_{31}$$
$$X_6 = X_{12} = X_{21}$$

ดังนั้นสามารถเขียนองค์ประกอบของความเค้น 9 องค์ประกอบในสมการ (3.6) ใหม่ได้เป็น

$$X_t = \begin{pmatrix} X_1 & X_6 & X_5 \\ X_6 & X_2 & X_4 \\ X_5 & X_4 & X_3 \end{pmatrix} \tag{3.7}$$

ดังนั้น จากสมการ (3.3) เขียนใหม่ได้เป็น

$$D_n = d_{nt} X_t \tag{3.8}$$

เมื่อ n คือ ทิศทางของโพลาไรเซชัน

และ t คือ ทิศทางของความเค้นที่กระทำต่อวัสดุ

ดังนั้นค่าการกระจัดทางไฟฟ้าซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปเวกเตอร์ 3 องค์ประกอบ จะขึ้นกับขนาดและทิศทางของความเค้น ดังนี้

$$\begin{aligned} D_1 &= d_{11}X_1 + d_{12}X_2 + d_{13}X_3 + d_{14}X_4 + d_{15}X_5 + d_{16}X_6 \\ D_2 &= d_{21}X_1 + d_{22}X_2 + d_{23}X_3 + d_{24}X_4 + d_{25}X_5 + d_{26}X_6 \\ D_3 &= d_{31}X_1 + d_{32}X_2 + d_{33}X_3 + d_{34}X_4 + d_{35}X_5 + d_{36}X_6 \end{aligned} \tag{3.9}$$

ดังนั้นจากสมการ (3.9) แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ความเค้น ซึ่งอยู่ในรูปเมตริกซ์ที่มีองค์ประกอบ 6 องค์ประกอบกระทำต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริก จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันขึ้น ดังนั้น ค่าการกระจัดทางไฟฟ้าจึงเปลี่ยนแปลงตามปริมาณโพลาไรเซชัน ซึ่งขึ้นกับขนาดและทิศทางของความเค้น

ในทางตรงกันข้าม เทนเซอร์ความเครียด (Strain tensor) เป็นปริมาณที่บ่งบอกลักษณะการเปลี่ยนแปลงของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ซึ่งจะนิยามความเครียด คือ ค่าความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิมของวัสดุ สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$x_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial P_j} \tag{3.10}$$

เมื่อ x_{ij} คือ เทนเซอร์ความเครียด

u_i คือ การกระจัดในทิศทาง i

P_j คือ ตำแหน่งอ้างอิงในทิศทาง j

ค่าดัชนี i และ j บอกถึงทิศทางในระบบผลึกเช่นเดียวกับกรณีของเทนเซอร์ความเค้น และเนื่องจากเทนเซอร์ความเครียดมีสมบัติความเป็นสมมาตรในระบบผลึก ดังนั้น

$$x_{ij} = \begin{cases} 0 & , \ i = j \\ -x_{ji} & , \ i \neq j \end{cases} \tag{3.11}$$

โดยที่ค่า i , j มีค่าเป็น 1 , 2 , 3 ซึ่งแสดงตามแนว x , y และ z ในปริภูมิเวกเตอร์ ตามลำดับ

ดังนั้นจะได้องค์ประกอบของเทนเซอร์ความเครียด 9 องค์ประกอบด้วยกัน ดังสมการ

$$x_{ij} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} \end{pmatrix} \tag{3.12}$$

และสามารถเขียนองค์ประกอบของเทนเซอร์ความเครียดได้ใหม่ในรูปของเมตริกซ์ โดยอาศัยความเป็นสมมาตรของผลึกได้เป็น

$$x_{ij} = \begin{bmatrix} x_1 & x_6 & x_5 \\ x_6 & x_2 & x_4 \\ x_5 & x_4 & x_3 \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

ดังนั้นจากสมการ (3.13) อธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบกลับ ซึ่งเขียนสมการในรูปเทนเซอร์ใหม่ได้เป็น

$$x_s = d_{is}E_i \tag{3.14}$$

โดยที่ s และ i บอกถึงทิศทางการเกิดความเครียดและทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุ ตามลำดับ เมื่อนำสารวางไว้ในสนามไฟฟ้า E_i ซึ่งอยู่ในรูปเวกเตอร์ 3 องค์ประกอบตามแนวแกน x,y และ z ในระบบปริภูมิเวกเตอร์ จะทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงโพลาไรซัน ผลคือทำให้วัสดุที่ได้รับสนามไฟฟ้าจะเกิดการหดหรือขยายตัวของผลึกแล้วเกิดความเครียด x_s ขึ้น ซึ่งมีองค์ประกอบอยู่ด้วยกัน 6 องค์ประกอบ ดังสมการ (3.15) ซึ่งสามารถเขียนค่าความเครียดให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ 3 องค์ประกอบ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของสนามไฟฟ้า ดังนี้

$$\begin{aligned}
x_1 &= d_{11}E_1 + d_{12}E_2 + d_{13}E_3 + d_{14}E_4 + d_{15}E_5 + d_{16}E_6 \\
x_2 &= d_{21}E_1 + d_{22}E_2 + d_{23}E_3 + d_{24}E_4 + d_{25}E_5 + d_{26}E_6 \\
x_3 &= d_{31}E_1 + d_{32}E_2 + d_{33}E_3 + d_{34}E_4 + d_{35}E_5 + d_{36}E_6
\end{aligned} \tag{3.15}$$

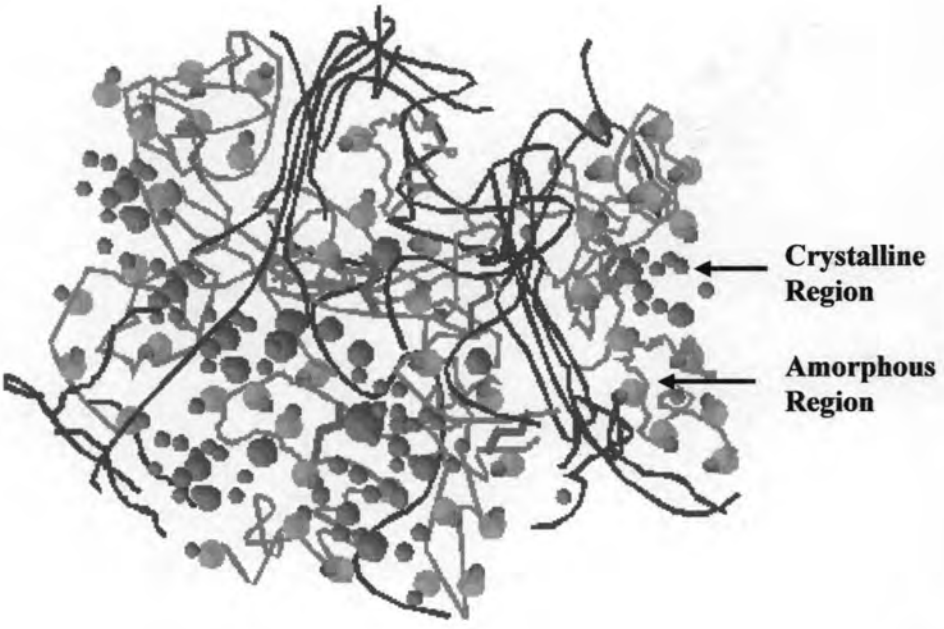
3.3 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

3.3.1 พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinlidene Fluoride)

ในปี ค.ศ.1969 นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อคาวาอิ ได้ค้นพบว่าเมื่อทำให้แผ่นฟิล์ม PVDF ผ่านกรรมวิธีทางกายภาพที่เหมาะสมแล้ว จะทำให้ได้ฟิล์ม PVDF ที่มีสภาพเพียโซอิเล็กทริกสูง ต่อจากนั้นก็ได้มีการศึกษาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดโพลิเมอร์กันอย่างแพร่หลาย จนปัจจุบันทราบถึงข้อมูลสำคัญที่ทำให้เข้าใจสมบัติต่างๆ ของสารชนิดนี้เป็นอย่างดี

โครงสร้างของ PVDF

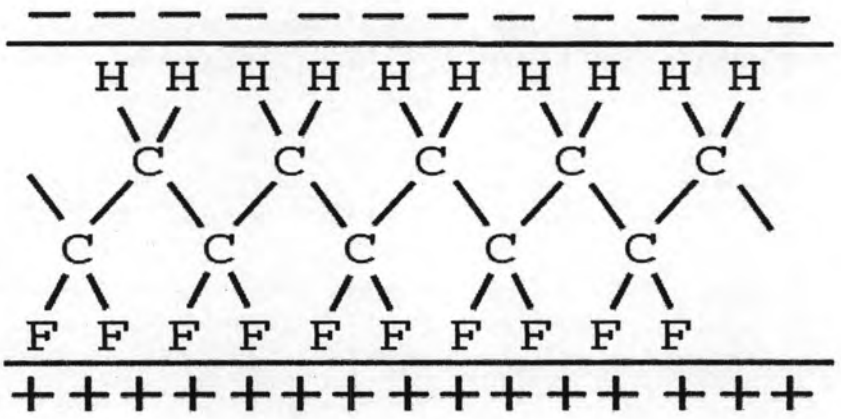
PVDF มีชื่อเต็มว่า "พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene Fluoride)" ซึ่งโพลิเมอร์ PVDF จัดเป็นโพลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline) คือมีส่วนที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) และแบบผลึก (Crystal) ปนกัน ดังรูป 3.4



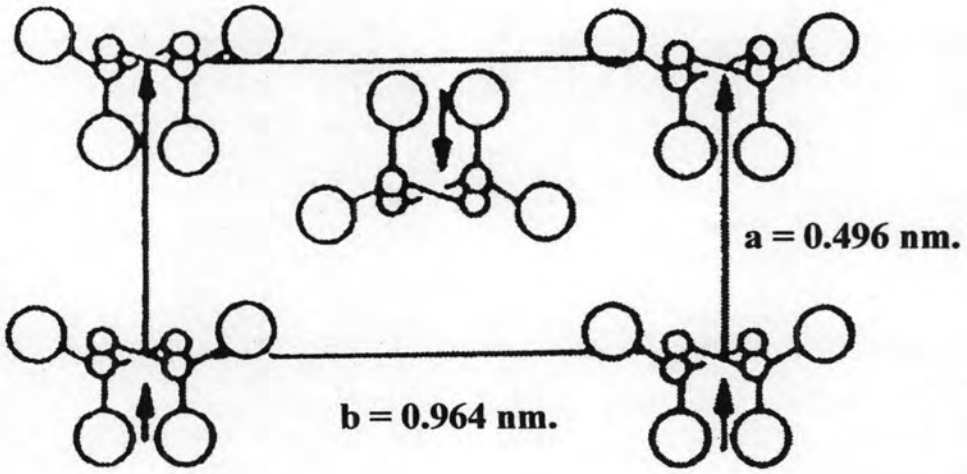
รูปที่ 3.4 โครงสร้างของฟิล์ม PVDF [11]

โดยจะประกอบด้วย มอนอเมอร์ของ CH_2 เรียงตัวกันเป็นสายโซ่ยาว มีสูตรโครงสร้างเป็น $(- CH_2CF_2 -)_n$ ดังรูปที่ 3.5 ฟิล์ม PVDF ถูกเตรียมโดยวิธีทำให้หลอมเหลว ณ อุณหภูมิสูง เมื่อฟิล์มอยู่ในรูปของเหลวแล้วก็จะนำไปหล่อ (Casting) ลงในแท่นพิมพ์ หลังจากนั้นเมื่อลดอุณหภูมิลงให้

ต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส ฟิล์ม PVDF จะเกิดการแข็งตัว จะได้ฟิล์ม PVDF ที่มีโครงสร้างแบบเฟสแอลฟา (α-phase) ซึ่งโครงสร้างของแต่ละเซลล์หน่วย (Unit cell) จะเป็นแบบออร์โทรอมบิก (Orthorhombic) ที่มีค่า a = 4.96 ° A , b = 9.64 ° A และ c = 4.62 ° A ดังรูป 3.6



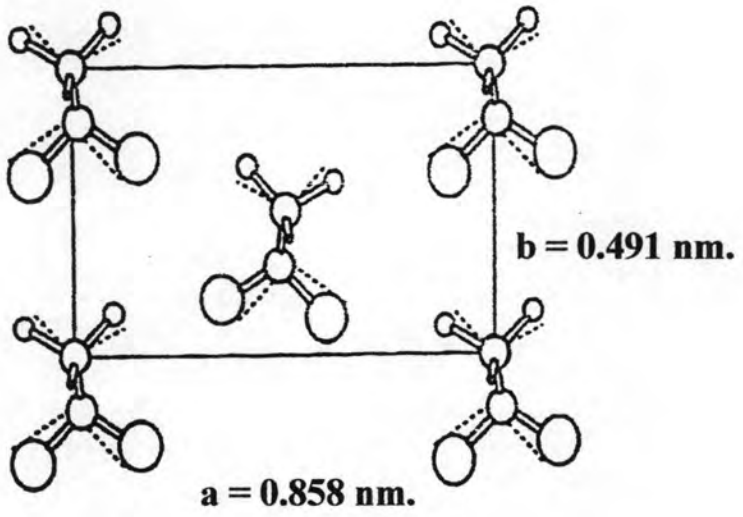
รูปที่ 3.5 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของฟิล์ม PVDF [11]



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของผลึก PVDF แบบเฟสแอลฟา [6,11]

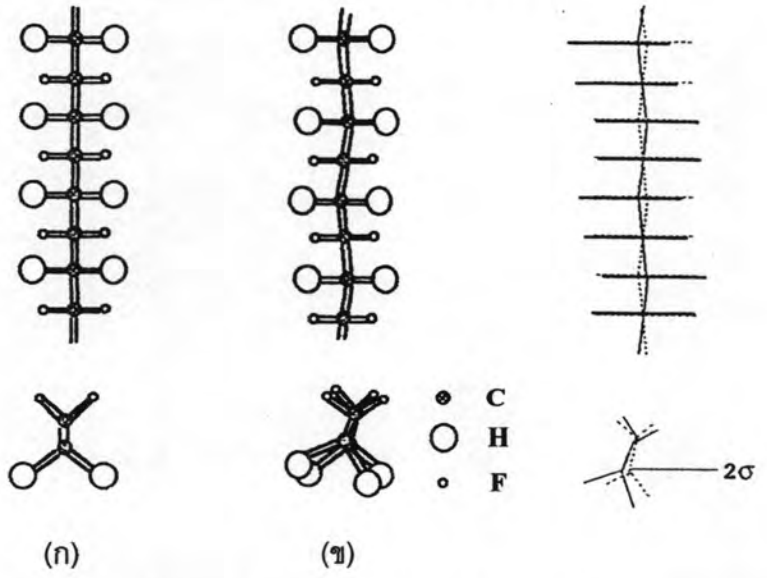
เมื่อพิจารณาในแต่ละเซลล์หน่วยจะประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุลสองสาย และทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของทั้งสองสายนี้มีทิศตรงข้ามกัน จึงทำให้ขั้วหักล้างกันหมด ผลก็คือทำให้ผลึก PVDF แบบนี้เป็นผลึกแบบไม่มีขั้ว มีโมเมนต์ขั้วคู่สุทธิเป็นศูนย์ จึงทำให้ฟิล์มแบบเฟสแอลฟา ไม่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก

ถ้าดึงฟิล์ม PVDF แบบเฟสแอลฟา ให้ยืดออกประมาณ 3-6 เท่าของความยาวเดิม จะทำให้สายโซ่โมเลกุลคาร์บอนยืดออกไปตามความยาว ซึ่งจะได้ผลึกที่มีโครงสร้างใหม่เป็นแบบเฟสเบตา (β-phase) ที่มีการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนและมีเซลล์หน่วยแบบออร์โทรอมบิก ที่มีค่า a = 8.58 ° A , b = 4.91 ° A และ c = 2.56 ° A ดังรูป 3.7



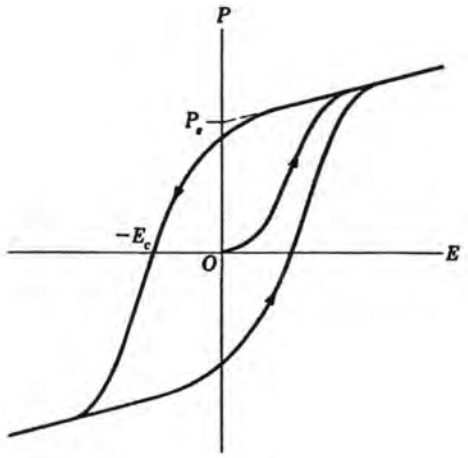
รูปที่ 3.7 โครงสร้างของผลึก PVDF แบบเฟสเบตา [6,11]

จากการศึกษาโดยรังสีเอกซ์พบว่า รัศมีแวนเดอวาลล์ของอะตอมฟลูออรีนเท่ากับ 1.35 °A และระยะระหว่างจุดกึ่งกลางของอะตอมฟลูออรีนมีค่าเท่ากับ 2.56 °A ซึ่งมีขนาดใหญ่เกินไปที่จะบรรจุลงในสายโซ่โมเลกุลนี้ ดังนั้นอะตอมคาร์บอนจึงต้องวางตัวบิดไปมาเล็กน้อยเพื่อให้อะตอมของฟลูออรีนสามารถบรรจุลงในสายโซ่โมเลกุลนี้ได้ ดังรูป 3.8 (ข)



รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบโครงสร้างการเรียงตัว (ก) โครงสร้างของผลึก PVDFแบบเฟสแอลฟา (ข) โครงสร้างของผลึก PVDF แบบเฟสเบตา [12]

เมื่อพิจารณาโมเมนต์ขั้วคู่ของสายโซ่โมเลกุลจะมีทิศเดียวกัน ทำให้ค่าโมเมนต์ขั้วคู่สุทธิไม่เป็นศูนย์ ผลึกแบบนี้จึงเป็นผลึกแบบมีขั้ว แต่ทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ของแต่ละผลึก จะวางตัวในระนาบของฟิล์มซึ่งมีทิศทางแบบสุ่ม ผลก็คือค่าโพลาไรเซชัน (Polarization) ของฟิล์มมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นหลังจากการยืดฟิล์ม PVDF แล้ว จะยังไม่มีไดโพลถาวรและยังไม่ใช่สารเพียโซอิเล็กทริก วิธีที่จะทำให้สารนี้เป็นสารเพียโซอิเล็กทริก ทำได้โดยการจัดเรียงขั้ว (Polling) โดยการป้อนสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงให้กับฟิล์ม เพื่อให้ฟิล์มมีค่าโพลาไรเซชันและสามารถแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกได้ ดังรูป 3.9

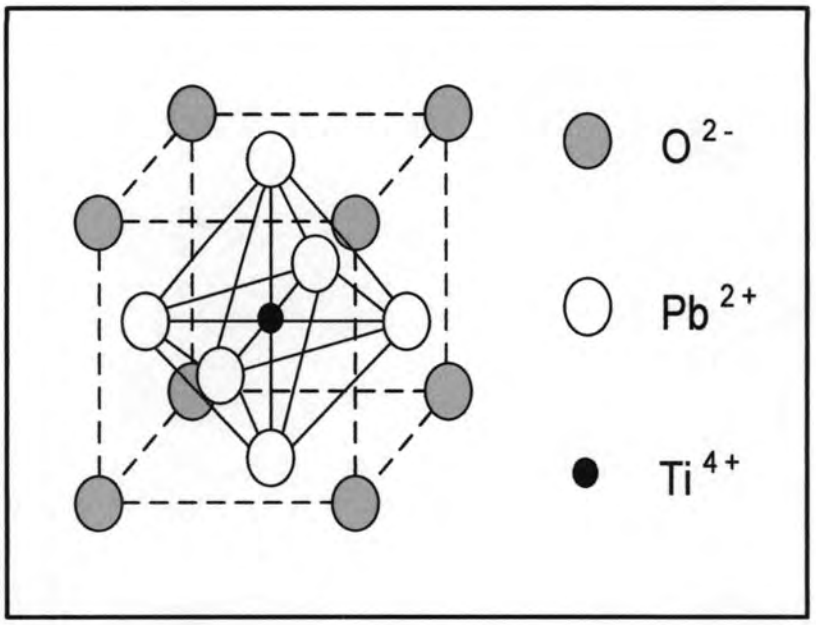


รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้ากับค่าโพลาไรเซชันของฟิล์ม PVDF [13]

3.3.2 เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate)

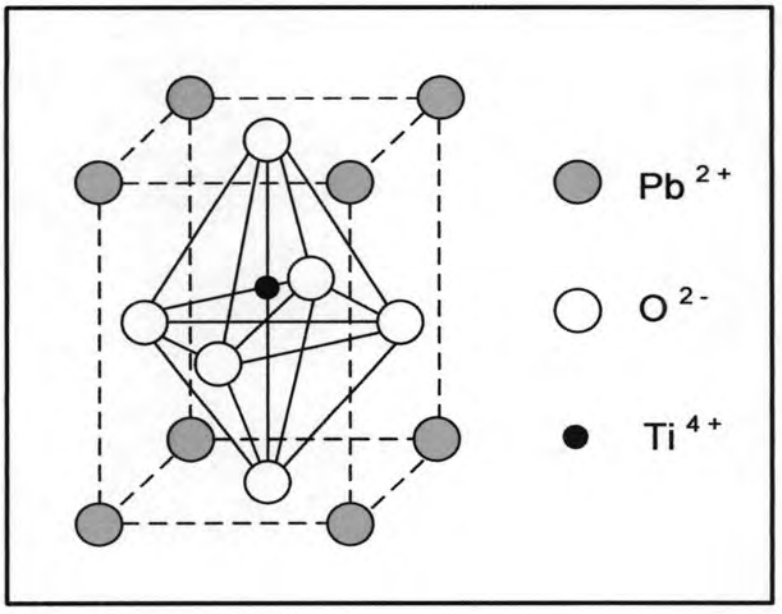
โครงสร้างของเลดเซอร์โคเนตไททาเนต

สาร PZT มีชื่อเต็มว่า " เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate) " มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $(Pb(Zr,Ti)O_3)$ ซึ่งเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่มีโครงสร้างของผลึกแบบเพอร์รอฟสไกท์ (Perovskite) ซึ่งประกอบด้วยไอออนของโลหะเททระวาเลนท์ไอออน (Tetravalent ion) ได้แก่ ไททาเนียมไอออน (Ti^{4+}) ที่มีอะตอมขนาดเล็กอยู่ที่กึ่งกลางของโครงสร้างของผลึก และมีไอออนของโลหะขนาดใหญ่กว่าเป็นพวกไดวาเลนท์ไอออน (Divalent) ได้แก่ ออกซิเจนไอออน (O^{2-}) อยู่ที่กึ่งกลางทั้งหกหน้าของโครงสร้างของผลึก และมีไดวาเลนท์ไอออนของตะกั่วไอออน (Pb^{2+}) อยู่ที่มุมทั้งแปดของโครงสร้างของผลึก นักวิทยาศาสตร์พบว่า ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างของผลึกที่ผ่านการซินเทอร์ (Sinter) แล้วเป็นแบบลูกบาศก์ (Cubic) ซึ่งไม่มีไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) เกิดขึ้น ผลของการไม่มีไดโพลโมเมนต์นี้จะทำให้ผลึกของ PZT สามารถแสดงคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกได้ ดังรูป 3.10



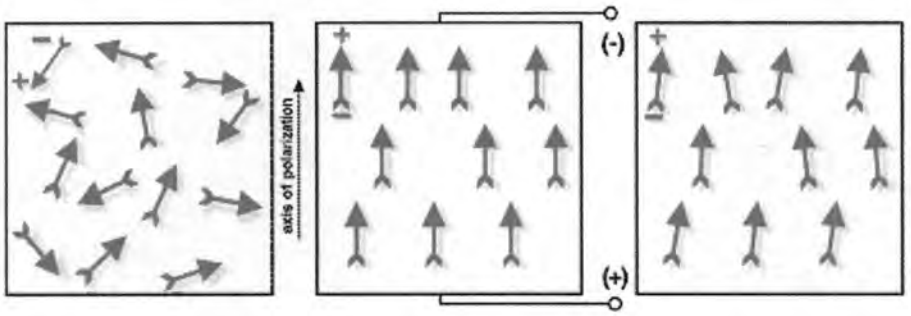
รูปที่ 3.10 โครงสร้างของสาร PZT แบบลูกบาศก์ [5,14]

เมื่อทำให้ผลึกมีอุณหภูมิลดต่ำลงกว่าอุณหภูมิคูรี ไอออนของไททาเนียมจะเลื่อนออกจากตำแหน่งศูนย์กลางที่ตำแหน่งเดิม ซึ่งจะทำให้ไดโพลไมเมนต์ภายในผลึกเกิดขึ้น ผลของการมีไดโพลโมเมนต์คือจะทำให้ผลึกสามารถแสดงคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกได้ จากการเลื่อนของไอออนของไททาเนียมทำให้โครงสร้างของผลึกเปลี่ยนจากรูปลูกบาศก์กลายเป็นรูปเตตระโกนอล (Tetragonal) ดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของสาร PZT แบบเตรตระโกนอล [5,14]

เมื่อทำให้ผลึกเกิดไดโพลโมเมนต์แล้ว จะทำให้มีโพลาไรเซชันเกิดขึ้นไปในทิศทางเดียวกันเป็นกลุ่มๆ เรียกว่า โดเมน (Domain) แต่ทิศทางของแต่ละโดเมนในผลึกจะกระจัดกระจายไม่มีทิศทางที่แน่นอน ซึ่งทำให้ไม่สามารถระบุทิศทางของโพลาไรเซชันรวมภายในผลึกได้ ดังรูป 3.12



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3.12 การเกิดโพลาไรเซชันภายในผลึกของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก [14]

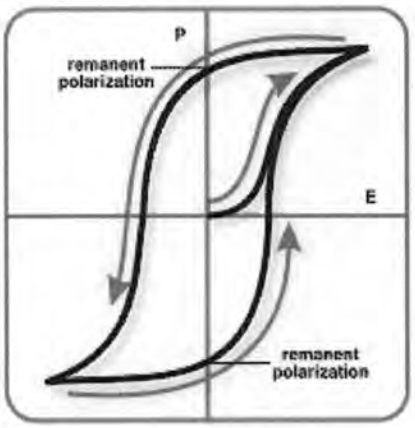
(ก) แสดงทิศทางของโพลาไรเซชันที่มีสภาพไร้ทิศทางของแต่ละโดเมน

(ข) แสดงทิศทางของโพลาไรเซชันเมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง

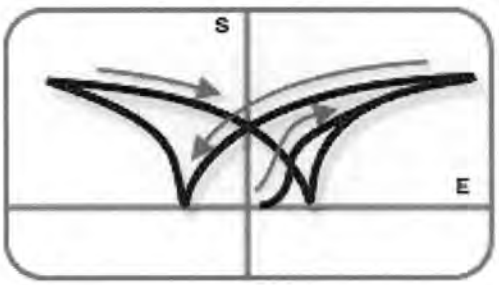
(ค) แสดงทิศทางของโพลาไรเซชันหลังหยุดให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง

ทิศทางของโดเมนแต่ละโดเมนภายในผลึกของเพียโซอิเล็กทริกสามารถเกิดขึ้นไปในทิศทางเดียวกันเพื่อให้เกิดโพลาไรเซชันภายในผลึกได้ โดยการป้อนสนามไฟฟ้าที่มีค่าความต่างศักย์สูงๆ โดยกระทำภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี ทั้งนี้เนื่องจากการให้สนามไฟฟ้าสูงกับผลึกนั้น จะทำให้โดเมนภายในผลึกที่เดิมเรียงตัวอยู่ในทุกทิศทางเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ไปในทิศทางเดียวกันโดยเป็นทิศที่ตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ซึ่งส่งผลให้ขนาดความยาวของโครงสร้างของผลึกยาวมากขึ้น (เปลี่ยนจากโครงสร้างแบบลูกบาศก์ไปเป็นแบบเททระโกนอล) ดังรูป 3.11 และเมื่อทำการหยุดป้อนสนามไฟฟ้า โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโดเมนภายในผลึกนั้นจะไม่กลับสู่สภาพเดิม ดังรูป 3.12

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ผ่านการโพล (Polling) แล้ว จะมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นกับค่าสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวัสดุเป็นลักษณะวงจรฮีสเทอรีซีส (Hysteresis) กล่าวคือ เมื่อให้สนามไฟฟ้ากับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแล้ว จะทำให้วัสดุเกิดโพลาไรเซชันเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่มีค่าโพลาไรเซชันที่คงที่ ซึ่งสนามไฟฟ้า ณ จุดนี้เป็นสนามไฟฟ้าที่สามารถให้ได้มากที่สุด และเมื่อลดค่าสนามไฟฟ้าลง ค่าโพลาไรเซชันจะไม่ลดลงตามเส้นโค้งเดิม และเมื่อลดค่าสนามไฟฟ้าลงมาจนมีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าโพลาไรเซชันจะไม่เป็นศูนย์ด้วย ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนี้มีค่าโพลาไรเซชันเกิดขึ้นในตอนต้นแล้ว เรียกว่า โพลาไรเซชันถาวร เมื่อให้สนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางในตอนแรกจะทำให้ค่าโพลาไรเซชันเกิดในลักษณะเดียวกัน แต่มีทิศทางตรงกันข้าม สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 3.13



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.13 การเกิดโพลาไรเซชันและการเกิดความเครียดทางกล (Mechanical strain) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เมื่อให้สนามไฟฟ้า [14]

(ก) แสดงวงจรฮีสเทอรีซิส (Hysteresis loop) หรือการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า

(ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือความเครียดทางกลตามทิศทางของโพลาไรเซชันของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า