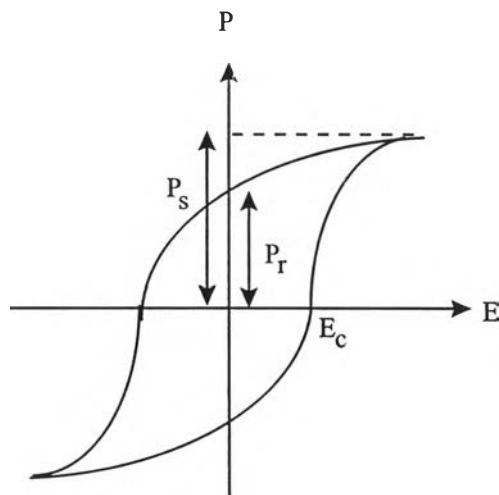


บทที่ 2

ทฤษฎีเฟอร์โรอิเล็กทริก

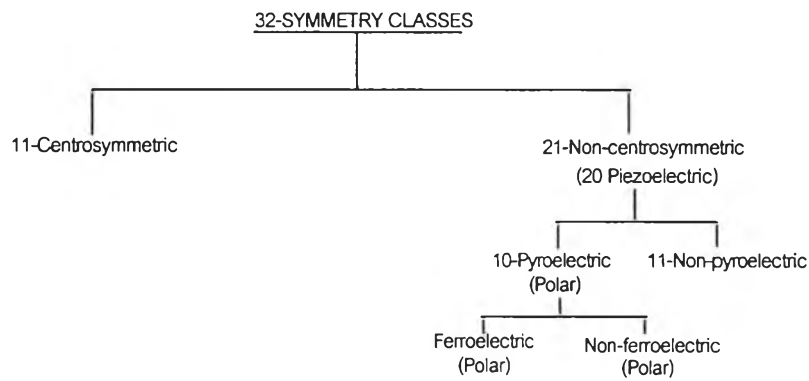
โดยทั่วไป เมื่อให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกแก่สารไดอิเล็กทริกจะทำให้เกิดโพลาริเซชัน (ไดโพลต่อปริมาตร) ขึ้น แต่เมื่อสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ทำให้โพลาริเซชันมีค่าเป็นศูนย์ทันที สำหรับสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric) ถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามไฟฟ้าจากภายนอกแต่สารนี้ก็ยังมีโพลาริเซชันอยู่



รูปที่ 2.1 แสดงวงแหวนความล่า (hysteresis loop) ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าสำหรับสารเฟอร์โรอิเล็กทริก เมื่อสนามไฟฟ้าที่ผ่านสารเป็นศูนย์ โพลาริเซชันจะไม่เป็นศูนย์ แต่จะเป็นศูนย์เมื่อ $E = E_c$ เมื่อ E_c คือสนามโคอีซีฟ (coercive field) แสดงว่าในสถานะเฟอร์โรอิเล็กทริกสารจะมีไดโพลถาวร (Lines and Glass, 1977) ดังนั้น อาจทำให้สารบางชนิดแสดงสถานะเฟอร์โรอิเล็กทริกได้โดยไม่ต้องใช้สนามไฟฟ้าจากภายนอกเลย แต่จะใช้การลดอุณหภูมิแทน โดยทั่วไปสารนี้จะไม่แสดงสถานะเฟอร์โรอิเล็กทริกเมื่อมีอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ (critical temperature " T_c ") หรืออุณหภูมิคูรี (Curie temperature) ถ้าสารมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติจะทำให้สารอยู่ในสถานะพาราอิเล็กทริก (paraelectric) (Kittel, 1988) โดยทั่วไปสารเฟอร์โรอิเล็กทริกสามารถแสดงสมบัติโพโรอิเล็กทริกได้

จากโครงสร้างผลึกในระดับจุลภาค (microscopic) ทั้งหมด 32 แบบ (point group) พบว่ามีโครงสร้างผลึก 10 แบบ ที่มีสมบัติไพโรอิเล็กทริก (Ikeda, 1990) (Nye, 1957) สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



2.1 สมการสถานะไพโรอิเล็กทริก

พิจารณาอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างสมบัติทางความร้อน กล และไฟฟ้า เมื่อกำหนดให้ T, X_{ij}, E_n แทนอุณหภูมิ (temperature) ความเค้น (stress) สนามไฟฟ้า (electric field) ตามลำดับ โดยตัวแปรอินเทนสึฟ (intensive variables) เหล่านี้เป็นตัวแปรอิสระ (independent variables) และให้ S, x_{ij}, D_n แทนเอนโทรปีต่อปริมาตร (entropy per volume) ความเครียด (strain) การขจัดทางไฟฟ้า (electric displacement) ตามลำดับ จากทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ (thermodynamics) พลังงานอิสระของกิบส์ต่อปริมาตรของระบบ (Gibbs free energy per volume) $G(T, X, E)$ เขียนได้เป็น (Ikeda, 1990)

$$G = U - TS - X_{ij}x_{ij} - E_n D_n \quad (2.1)$$

เมื่อ U คือพลังงานภายใน (internal energy) โดย $U(S, x, D)$

จากกฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ จะได้

$$dG = -SdT - x_{ij}dX_{ij} - D_n dE_n \quad (2.2)$$

จากผลต่างอนุพันธ์แม่นตรง (exact differential) แสดงว่า

$$S = -\left[\frac{\partial G}{\partial T}\right]_{X,E}, \quad x_{ij} = -\left[\frac{\partial G}{\partial X_{ij}}\right]_{T,E}, \quad D_n = -\left[\frac{\partial G}{\partial E_n}\right]_{T,X} \quad (2.3)$$

สามารถเขียนแต่ละเทอมในสมการ (2.3) ให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equations) ได้ 3 สมการ คือ

$$dS = \left[\frac{\partial S}{\partial T}\right]_{X,E} dT + \left[\frac{\partial S}{\partial X_{ij}}\right]_{E,T} dX_{ij} + \left[\frac{\partial S}{\partial E_m}\right]_{X,T} dE_m \quad (2.4ก)$$

$$dx_{ij} = \left[\frac{\partial x_{ij}}{\partial T}\right]_{X,E} dT + \left[\frac{\partial x_{ij}}{\partial X_{kl}}\right]_{E,T} dX_{kl} + \left[\frac{\partial x_{ij}}{\partial E_m}\right]_{X,T} dE_m \quad (2.4ข)$$

$$dD_n = \left[\frac{\partial D_n}{\partial T}\right]_{X,E} dT + \left[\frac{\partial D_n}{\partial X_{kl}}\right]_{E,T} dX_{kl} + \left[\frac{\partial D_n}{\partial E_m}\right]_{X,T} dE_m \quad (2.4ค)$$

จากสมการ (2.4) สามารถนิยามค่าคงที่ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$s_{ijkl}^{E,T} = -\left[\frac{\partial^2 G}{\partial X_{ij} \partial X_{kl}}\right]_{E,T} = \left[\frac{\partial x_{ij}}{\partial X_{kl}}\right]_{E,T} \quad (2.5ก)$$

$$\varepsilon_{nm}^{X,T} = -\left[\frac{\partial^2 G}{\partial E_n \partial E_m}\right]_{X,T} = \left[\frac{\partial D_n}{\partial E_m}\right]_{X,T} \quad (2.5ข)$$

$$\frac{\rho C^{X,E}}{T} = -\left[\frac{\partial^2 G}{\partial T^2}\right]_{X,E} = \left[\frac{\partial S}{\partial T}\right]_{X,E} \quad (2.5ค)$$

$$d_{nij}^T = -\left[\frac{\partial^2 G}{\partial X_{ij} \partial E_n}\right]_{T} = \left[\frac{\partial D_n}{\partial X_{ij}}\right]_{E,T} = \left[\frac{\partial x_{ij}}{\partial E_n}\right]_{X,T} \quad (2.5ง)$$

$$\alpha_{ij}^E = -\left[\frac{\partial^2 G}{\partial X_{ij} \partial T}\right]_{E} = \left[\frac{\partial x_{ij}}{\partial T}\right]_{X,E} = \left[\frac{\partial S}{\partial X_{ij}}\right]_{E,T} \quad (2.5จ)$$

$$p_n^x = - \left[\frac{\partial^2 G}{\partial T \partial E_n} \right]_X = \left[\frac{\partial D_n}{\partial T} \right]_{X,E} = \left[\frac{\partial S}{\partial E_n} \right]_{X,T} \quad (2.5ก)$$

- เมื่อ s คือสัมประสิทธิ์ความหยุ่น (elastic compliance coefficient)
 ϵ คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant)
 C คือค่าความร้อนจำเพาะต่อมวล (specific heat per mass)
 ρ คือความหนาแน่น (density)
 d คือสัมประสิทธิ์ความเครียดเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric strain coefficient)
 α คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวความร้อนเชิงเส้น (linear thermal expansion coefficient)
 p คือสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric coefficient)

จะเห็นได้ว่า s, ϵ, C เป็นค่าคงที่หลัก (principal constants) ที่แสดงสมบัติทางกล ไฟฟ้า และความร้อน ตามลำดับ ส่วน d, α, p เป็นค่าคงที่คู่ควบ (coupling constants) ของสองระบบ

เมื่อหาอนุพันธ์ (differentiate) ฟังก์ชัน G ดังสมการ (2.3) และจากนิยามของค่าคงที่ต่าง ๆ ดังสมการ (2.5) จะได้สมการสถานะเชิงเส้น (linear equations of states) ดังนี้

$$\Delta S = \left(\frac{\rho C^{X,E}}{T} \right) \Delta T + \alpha_{ij}^E X_{ij} + p_m^X E_m \quad (2.6ก)$$

$$x_{ij} = \alpha_{ij}^E \Delta T + s_{ijkl}^{E,T} X_{kl} + d_{mij}^T E_m \quad (2.6ข)$$

$$D_n = p_n^X \Delta T + d_{nkl}^T X_{kl} + \epsilon_{nm}^{X,T} E_m \quad (2.6ค)$$

ในที่นี้ใช้การรวมยอดไอน์สไตน์ (Einstein summation) (Nye, 1957) โดยดัชนีล่าง (subscript) $i, j, k, l, m, n = 1, 2, 3$ ดัชนีบน (superscript) แสดงถึงตัวบังคับ (constraints) ที่ใช้สำหรับวัดค่าคงที่ทางกายภาพหรือเป็นเงื่อนไขในการวัด (measurement condition) เช่น ถ้าจะวัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกจะต้องให้ความดันคงที่ และตัวที่มีดัชนีบน 2 ตัว เช่น

$\varepsilon^{X,T}$ จะหมายถึงสภาพยอมของสาร ภายใต้เงื่อนไขของขบวนการไอโซเทอร์มอล (isothermal “ $\Delta T = 0$ ”) และความเค้นอิสระ (stress-free “ $X = 0$ ”)

สมการ (2.6) แสดงถึงความสัมพันธ์มูลฐาน (constitutive relation) ของสมบัติคู่ควบ เรียกว่า เป็นความสัมพันธ์แบบ (T, X, E) จะเห็นได้ว่า ค่าคงตัวคู่ควบ d , α และ p แสดงถึงปรากฏการณ์ไฟฟ้าเชิงกล (electromechanical effect) ปรากฏการณ์ความร้อนเชิงกล (thermomechanical effect) และปรากฏการณ์ความร้อนเชิงไฟฟ้า (thermoelectric effect) ตามลำดับ

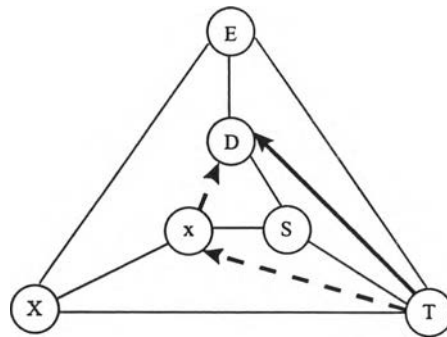
เทอม pE ในสมการ (2.6ก) แสดงถึงปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริกย้อนกลับ หรือ ปรากฏการณ์อิเล็กโตรคาลอริก (electrocaloric effect)

ในทำนองเดียวกัน ถ้ากำหนดให้ T , x และ E เป็นตัวแปรอิสระ จะได้พลังงานอิสระของกิบส์ $G_2(T, x, E)$ และสามารถหาความสัมพันธ์แบบ (T, x, E) ได้ จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่าง p_n^x และ p_n^x ได้ คือ

$$p_n^x = p_n^x + \alpha_{kl}^E e_{nkl}^T \quad (2.7)$$

เมื่อ e_{nkl}^T คือสัมประสิทธิ์ความเค้นเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric stress coefficient)

จากสมการ (2.7) จะเห็นได้ว่าปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก นอกจากจะเกี่ยวข้องกับสมบัติทางความร้อนและไฟฟ้าแล้ว ยังมีสมบัติทางกลด้วย โดยเทอม p^x เรียกว่า สัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกปฐมภูมิ (primary or true pyroelectricity) ส่วนเทอมที่สองด้านขวามือคือ สัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกทุติยภูมิ (secondary or false pyroelectricity) สามารถแสดงทางเดิน (path) ได้เป็น $T \rightarrow x \rightarrow D$ ดังรูปที่ 2.2 ดังนั้นเมื่อปล่อยให้ฟิล์มเกิดความเครียดเนื่องจากการขยายตัวความร้อน (thermal expansion) จะได้ทางเดินที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกเป็น $x \rightarrow D$



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกปฐมภูมิและทุติยภูมิ

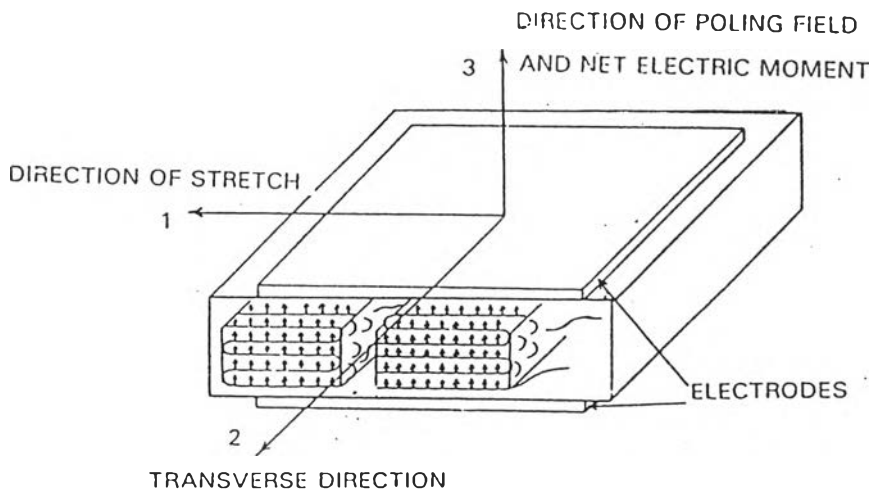
จากสมการ (2.7) สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$p_n^x = p_n^x + \alpha_{kl}^E [s^{-1}]_{klj}^{E,T} d_{nij}^T \quad (2.8)$$

เมื่อ $[s^{-1}]_{klj}^{E,T}$ คือค่าคงที่ความแข็งหยุ่น (elastic stiffness constant)

สมการ (2.8) แสดงสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกทุติยภูมิ ในเทอมของสัมประสิทธิ์การขยายตัวความร้อนเชิงเส้น ค่าคงที่ความแข็งหยุ่น และค่าคงที่ความเครียดเพียงไพโรอิเล็กทริก (ตามทางเดิน $T \rightarrow x \rightarrow X \rightarrow D$ ดังในรูปที่ 2.2)

ปริมาณต่าง ๆ ในสมการ (2.6) แทนด้วยเทนเซอร์ (tensor) (Nye, 1957) ดังนั้นในทางปฏิบัติอาจจะเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ได้ (matrix equation) ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริกเท่านั้น ก็คือพิจารณาจากสมการ (2.6ค) สำหรับพอลิเมอร์ไพโรอิเล็กทริก เช่น พิล์ม PVDF ซึ่งเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก เมื่อนำมายืด (stretch) ประมาณ 4 เท่า จะทำให้โซ่โมเลกุลยืดออกตามแนวตั้ง ไดโพลจะมีทิศตั้งฉากกับโซ่โมเลกุล แต่ไดโพลรวมมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นต้องให้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงในแนวตั้งฉากกับฟิล์ม ($E_1 = E_2 = 0$) เพื่อทำให้ผลึกเล็ก ๆ ของฟิล์มหมุนตัวจนไดโพลของแต่ละผลึกชี้ไปในทิศเดียวกัน แสดงว่าฟิล์มมีไดโพลสุทธิอยู่เฉพาะบนแนว 3 (direction of poling field) เท่านั้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงประจุบนผิวแนว 1 (direction of stretch) และ แนว 2 (transverse direction) นั่นคือ $P_1 = P_2 = 0$ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงทิศของเวกเตอร์ทางกลและไฟฟ้าของฟิล์มพอลิเมอร์เมื่อถูกยืดและจัดขั้ว

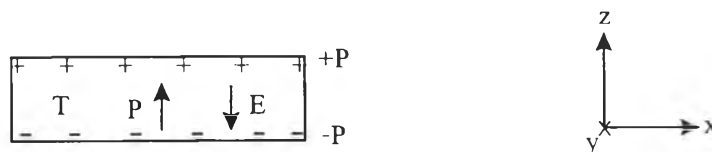
สำหรับสารเฟอร์โรอิเล็กทริก สัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกมีค่าเป็นลบ เนื่องจากโพลาไรเซชันของสารจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะได้เทนเซอร์ไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric tensor) เป็น

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_3^- \end{bmatrix} \tag{2.9ก}$$

ในกรณีที่ไม่มีความเค้น ($X = 0$) สมการ (2.6ค) สามารถเขียนได้เป็น

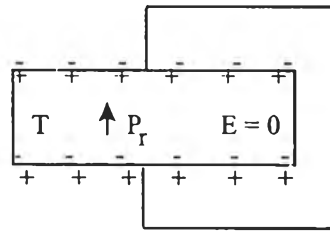
$$D_3 = p_3 \Delta T + \epsilon_{33} E_3 \tag{2.9ข}$$

2.2 การทำงานของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก



รูปที่ 2.4 แสดงฟิล์มไพโรอิเล็กทริกในสภาพทั่วไป

จากรูปที่ 2.4 फिल्मไพโรอิเล็กทริก PVDF ที่ด้านบนและด้านล่างของฟิล์มมีโลหะตัวนำเป็นอิเล็กโทรด (เพื่อความสะดวกในการอธิบาย ในรูปได้ขยายความหนาของฟิล์ม) ตามรูป P คือโพลาริเซชันของฟิล์ม มีทิศขึ้น $(+\hat{z})$ และตั้งฉากกับระนาบของฟิล์ม (ระนาบ xy) จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ ให้คิดว่าบริเวณเนื้อสารจะมีประจุโพลาริเซชัน (polarization charge) ที่ด้านบนและด้านล่าง เป็น $\vec{P} \cdot \hat{z}$ หรือเท่ากับ $+P$ และ $-P$ ตามลำดับ สนามไฟฟ้าภายในฟิล์มเนื่องจากไดโพลมีค่าเป็น $E = -\frac{P}{\epsilon_0} \hat{z}$ (ในระบบ SI) เมื่อ ϵ_0 คือสภาพยอมของสุญญากาศ (permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร

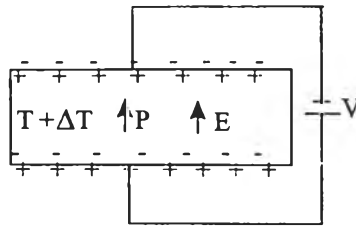


รูปที่ 2.5 แสดงฟิล์มไพโรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ T เมื่ออิเล็กโทรดทั้งสองถูกตัดวงจร

เมื่อตัดวงจรระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ทำให้สนามไฟฟ้าภายในฟิล์มเป็นศูนย์ (electrically free) แสดงว่าประจุลบจะเคลื่อนย้ายออกจากอิเล็กโทรดด้านล่างขึ้นไปอยู่ที่อิเล็กโทรดด้านบน เมื่อรวมกับประจุโพลาริเซชันด้านบนของฟิล์มแล้ว จะอยู่ในสภาพเป็นกลาง (neutralized) และทิ้งประจุบวกไว้ที่ด้านล่าง เมื่อรวมกับประจุโพลาริเซชันด้านล่างแล้ว จะอยู่ในสภาพเป็นกลางเช่นกัน ในขณะนี้โพลาริเซชันของฟิล์ม P จะเปลี่ยนเป็น P_r หรือโพลาริเซชันตกค้าง (remanent polarization) ซึ่งก็คือโพลาริเซชัน เมื่อ $E = 0$ และ $X = 0$ (free state) แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ถ้าให้ D_r เป็นการขจัดทางไฟฟ้าที่ผ่านฟิล์ม มีทิศ $+\hat{z}$ และ $\pm Q$ เป็นประจุโพลาริเซชันที่อิเล็กโทรดพื้นที่ A จะได้

$$D = \frac{Q}{A} = D_r = P_r \quad (2.10ก)$$

$$E = 0 \quad (2.10ข)$$



รูปที่ 2.6 แสดงฟิล์มไฟโรอิเล็กทริกเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนเป็น $T + \Delta T$ และมีความต่างศักย์ V ต่อกับอิเล็กโทรดทั้งสองทำให้ฟิล์มมีสนามไฟฟ้า E

จากรูปที่ 2.6 ถ้าให้ความต่างศักย์ V ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง จะเกิดสนามไฟฟ้าที่ผ่านฟิล์ม

$$E = \frac{V}{b} \quad (2.11)$$

เมื่อ b คือความหนาของฟิล์ม

เนื่องจากถ้าไม่มีความเค้น ($X = 0$) โพลาริเซชันของสารไฟโรอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ นั่นคือ $P(E, T)$ ดังนั้นถ้าใช้การกระจายอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series expansion) รอบจุดที่สนามไฟฟ้าเป็นศูนย์และอุณหภูมิเริ่มต้น T_0 จะได้

$$P(E, T) = P(0, T_0) + \left(\frac{\partial P}{\partial E} \right)_{T=T_0} E + \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{E=0} dT$$

$$P = P_s + \chi \epsilon_0 E + p(T - T_0) \quad (2.12)$$

โดย χ คือสภาพซึมซับได้ไดอิเล็กทริก (dielectric susceptibility) ของฟิล์ม

P_s คือสปอนเตเนียสโพลาริเซชัน (spontaneous polarization) หรือโพลาริเซชัน

เมื่อ $E = 0$ และ $T = T_0$

สมการ (2.12) สามารถเขียนได้เป็น

$$P = P_s + \chi \epsilon_0 E + p \Delta T \quad (2.13)$$

สมการ (2.13) หมายความว่า ถ้ามีรังสีอินฟราเรดมาตกกระทบฟิล์ม ทำให้ฟิล์มร้อนขึ้น ΔT เนื่องจากการสั่นไหวของโมเลกุลเพิ่มขึ้น ทำให้โพลาไรเซชันของฟิล์มเปลี่ยนไป

จากทฤษฎีไฟฟ้าสถิต (Duffin, 1990)

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (2.14)$$

จากสมการ (2.10ก) , (2.13) และ (2.14) จะได้

$$D - D_r = \varepsilon_0(1 + \chi)E + p\Delta T \quad (2.15)$$

ในที่นี้ $D_r = P_r$ หรือ P เมื่อ $E = 0$ และ $T = T_0$, เนื่องจาก $\varepsilon_0(1 + \chi) = \varepsilon$ ดังนั้นจะได้

$$\Delta D = \varepsilon E + p\Delta T \quad (2.16)$$

ซึ่งเหมือนกับสมการ (2.6ก) ในกรณีที่ $X = 0$ และถ้า E ผ่านฟิล์มในแนวที่ 3 ($E = E_3$) สมการ (2.16) จะกลายเป็นสมการ (2.9ข) สมการนี้แสดงถึงประจุไฟฟ้าจริงต่อพื้นที่ของอิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้น เมื่อสนามไฟฟ้าที่ผ่านฟิล์มเพิ่มจาก 0 เป็น E_3 และอุณหภูมิเปลี่ยนจาก T เป็น $T + \Delta T$

2.3 การวัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก

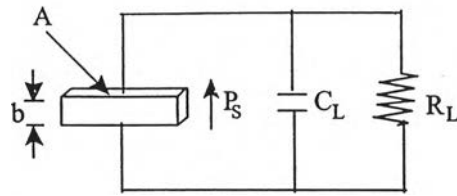
เมื่อมีรังสีอินฟราเรดตกกระทบฟิล์ม (ฟิล์มร้อนขึ้น) โพลาไรเซชันจะลดลง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลจากอิเล็กโทรดล่างไปอิเล็กโทรดบน จาก

$$J = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.17)$$

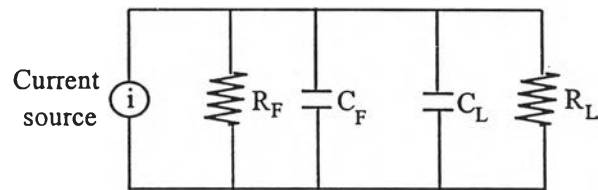
เมื่อ J คือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density) ในแนว 3

σ คือสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม (film conductivity)

E คือสนามไฟฟ้าที่ผ่านฟิล์ม ในแนว 3



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.7 (ก) แสดงวงจรวัดไฟโรอิเล็กทรอนิกส์
(ข) แสดงวงจรไฟฟ้าเสมือน

จากรูปที่ 2.7 (ก) ถ้าฟิล์มต่อกับวงจรภายนอก (Lines and Glass, 1977) จะได้

$$AJ + bC_L \frac{\partial E}{\partial t} + b \frac{E}{R_L} = 0 \quad (2.18)$$

เมื่อ C_L คือความจุของโหลด (load capacitance)

R_L คือความต้านทานของโหลด (load resistance)

วงจรในรูป (2.7ข) คือวงจรไฟฟ้าเสมือน (equivalent electrical circuit) ของรูป (2.7ก)
จากการพิจารณาสมการ (2.16) ถึง (2.18) จะได้

$$(C_F + C_L) \frac{\partial V}{\partial t} + \left(\frac{1}{R_F} + \frac{1}{R_L} \right) V = -Ap \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.19)$$

เมื่อ $C_F = \frac{\epsilon A}{b}$ คือความจุของฟิล์ม (film capacitance)

$R_F = \frac{b}{\sigma A}$ คือความต้านทานของฟิล์ม (film resistance)

จากสมการ (2.19) เทอมแรกด้านซ้ายมือคือกระแสของตัวจุไฟฟ้า (capacitor current) ส่วนเทอมที่สองหมายถึงกระแสการนำ (conduction current) และเทอมด้านขวามือไม่ขึ้นกับความต่างศักย์ที่ให้แก่ฟิล์ม ดังนั้นจากสมการนี้ฟิล์มทำหน้าที่คล้ายเป็นแหล่งกำเนิดกระแส (current source) ให้ความต้านทานของฟิล์มและโหลดวงจรขนาน (parallel film-load impedance)

ในทางปฏิบัติ เทคนิคที่ใช้ในการวัดสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริก คือเราจะวัดความต่างศักย์ ประจุ หรือกระแส เมื่ออุณหภูมิของฟิล์มเปลี่ยนไป โดยสามารถหาได้จากผลการเฉลยของสมการ (2.19) เช่น ถ้าต้องการหาความต่างศักย์ไฟโรอิเล็กทริก ก็จะได้

$$\Delta V = -\frac{Ap}{C} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \int_0^t \exp\left(\frac{t'}{RC}\right) \left(\frac{dT}{dt'}\right) dt' \quad (2.20)$$

เมื่อ R และ C คือพารามิเตอร์ของฟิล์มและโหลดวงจรขนาน (parallel film-load

parameter) โดย $C = C_L + C_F$ และ $R = \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_F}\right)^{-1}$

ถ้าฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างทันทีทันใด หรืออย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับค่าเวลาผ่อนคลายทางไฟฟ้า (electrical time constant) RC จะได้

$$\Delta V = -\frac{Ap\Delta T}{C} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.21) จะเห็นได้ว่า เมื่อมีรังสีอินฟราเรดตกกระทบฟิล์ม ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้น ถ้าใช้โวลต์มิเตอร์ตัวเลขธรรมดา (ส่วนใหญ่มีความต้านทานภายในประมาณ 10 เมกกะโอห์ม) วัดความต่างศักย์จากฟิล์ม พบว่าจะอ่านความต่างศักย์แทบไม่ทัน เพราะประจุไฟฟ้าเคลื่อนย้ายออกจากฟิล์มอย่างรวดเร็ว ดังนั้น ในการวัดความต่างศักย์จะใช้อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีความต้านทานภายในประมาณ 200 เทอราโอห์ม เพื่อทำให้ค่าเวลาผ่อนคลายทางไฟฟ้ามากขึ้น

ถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไม่มาก ที่เวลา t ซึ่งน้อยกว่าค่าเวลาผ่อนคลาย RC มาก ๆ จะได้

$$\Delta V = -ApR \frac{dT}{dt} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right\} \quad (2.22)$$

โดยทั่ว ๆ ไป ในการวัดกระแส หรือประจุไฟโรอิเล็กทริก จะทำโดยใช้วิธีลัดวงจรระหว่างขั้วทั้งสองของอิเล็กโทรด ($E = 0$) จากนิยามของสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริกคือการเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชันเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป นั่นคือ

$$P_{(experiment)} = \frac{1}{A} \frac{dQ}{dT} \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.21) และ (2.22) จะเห็นได้ว่าในการหาสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริก จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์หลายตัว แต่จากสมการ (2.23) ถ้าเรารู้พื้นที่อิเล็กโทรดของฟิล์ม สามารถวัดประจุไฟฟ้าและอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของฟิล์มได้ ก็ทำให้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริกได้ ดังนั้น ในทางปฏิบัติจะคำนวณสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริกจากสมการ (2.23)

2.4 สมบัติไฟโรอิเล็กทริกในพอลิเมอร์

ที่กล่าวมาแล้วเป็นทฤษฎีไฟโรอิเล็กทริกสำหรับสารโดยทั่วไป แต่สมบัติไฟโรอิเล็กทริกในพอลิเมอร์ (Wada and Hayakawa, 1976) (Mort and Pfister, 1982) พบว่า เกิดจากปัจจัย 2 ประการ คือ

1. สมบัติไฟโรอิเล็กทริกภายในพอลิเมอร์ (intrinsic pyroelectricity) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางกายภาพของโมเลกุลในพอลิเมอร์นั้น
2. มีประจุอิสระถูกกักไว้ภายในพอลิเมอร์นั้นทำให้เกิดสภาพวิวิธพันธ์ (heterogeneity) คือแผ่นพอลิเมอร์มีความไม่สม่ำเสมอในเนื้อสาร

สำหรับทฤษฎีไฟโรอิเล็กทริกของ PVDF ได้มีแบบจำลอง (model) ที่สร้างขึ้นมาอธิบาย เช่น แบบจำลองของวาคะ (Wada's model) ซึ่งเป็นแบบจำลองของพอลิเมอร์กิ่งผลึกแบบมีขั้วสมมติให้มีผลึกรูปทรงกลมกระจายอยู่ในเฟสอสัณฐาน (Wada and Hayakawa, 1981) และแบบจำลองของบรอดเฮิร์สต์ (Broadhurst's model) โดยจะกล่าวถึงโครงสร้างที่แท้จริงของ PVDF

และผลของประจุอิสระที่มีต่อโพลาริเซชัน (Broadhurst *et al.*, 1978) แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ได้กล่าวถึงรายละเอียดของแต่ละแบบจำลอง

สรุปว่าจากแบบจำลองทั้งสองได้ $P \propto P_s$ จะพัฒนาฟิล์มให้มี p มาก ต้องทำให้ P_s มีค่ามาก ดังจะกล่าวในบทต่อไป