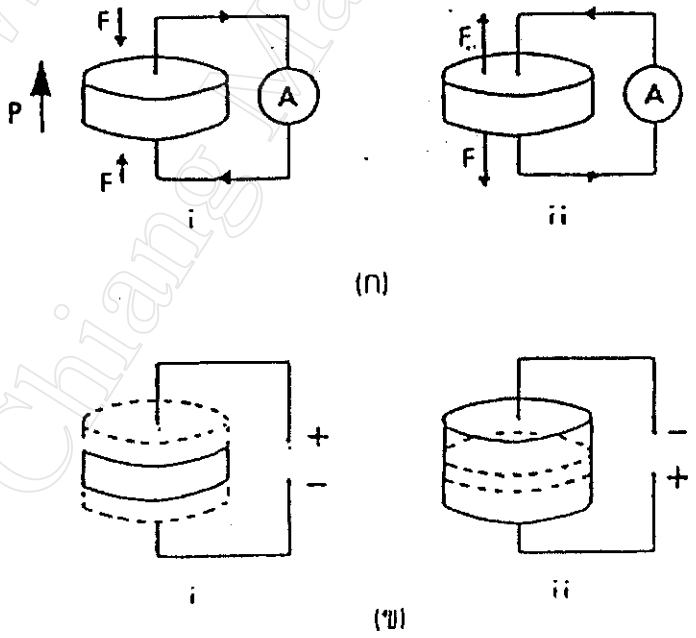
บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 ความเป็นเพียโซอิเลกตริก

สมบัติความเป็นเพียโซอิเลกตริก คือ สมบัติที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้ามาเป็นพลังงานกล ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับสมบัติเฉพาะของสาร สารเพียโซอิเลกตริกนี้มีสมบัติทำให้มีโพลาไรเซชัน (Polarization) เมื่อมีแรงกระทำที่ผิวและในทางกลับกันเมื่อให้สนามไฟฟ้ากับสาร จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดดังในรูป 2.1 แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์เพียโซอิเลกตริกแบบ direct นั่นคือ จะมีการเปลี่ยนแปลง polarization เมื่อสารถูกแรงกระทำ หรือเกิดความเค้น (Stress) ในขณะที่ปรากฏการณ์เพียโซอิเลกตริกแบบ converse จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนขนาดและปริมาตร หรือความเครียด (Strain) ในสนามไฟฟ้าที่ใส่



รูป 2.1 แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเลกตริกแบบ direct (ก) และแบบ converse (ข)

ซึ่งปรากฏการณ์เพียโซอิเลกตริกเหล่านี้ สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ดังนี้

$$D = dX + \varepsilon^{X}E \qquad (2.1)$$

$$x = s^{E}X + dE \qquad (2.2)$$

เมื่อ D คือ ค่า electric displacement (พิจารณาว่ามีค่าเท่ากับการโพลาไรเซชัน)

x คือ ค่าความเครียด (stress)

E คือ ขนาดของสนามไฟฟ้า

X คือ ค่าความเค้น (strain)

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเลกตริก (piezoelectric coefficient)

s คือ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ (material compliance) อันเป็นส่วนกลับของความแข็งตัว(inverse of stiffness)

ε คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity)

สมการที่ 2.1 อธิบายปรากฏการณ์แบบ direct คือ เมื่อมีการให้ความเครียดทางกลศาสตร์ จะทำให้เกิด polarization ส่วนสมการที่ 2.2 อธิบายปรากฏการณ์ converse คือ เมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่สาร จะเกิดการเคลื่อนที่ทางกลศาสตร์ ซึ่งทั้งสองสมการเป็นการอธิบายจุดของสมการที่มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติระหว่างการหมุนที่แตกต่างกันไปของวัสดุ

ก่อนอื่นต้องทำความเข้าใจก่อนว่าในระบบผลึกทั่วไป (Crystallographic System) นั้น คำว่า point group คือ ประเภทของการทำให้เกิดสมมาตรของผลึกหรือโมเลกุลรอบจุดเดี่ยว ๆ 1 จุดในที่ว่าง โดยระหว่างกระบวนการจุดนี้จะอยู่นิ่งกับที่ ความเป็นเพียโซอิเลกตริกจะขึ้นกับสมบัติของหน่วยเซลล์พื้นฐานของโครงผลึกของสารที่มีผลึกของหน่วยเซลล์ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลางของเซลล์ (Noncentrosymmetry) มีการแบ่งชนิดของสมมาตรผลึกออกเป็น 32 กลุ่ม หรือ 32 point groups ซึ่งใน 32 point groups นี้ จะมีสารที่มีหน่วยเซลล์ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลางเซลล์อยู่ 21 point groups แต่มีเพียง 20 point groups เท่านั้นที่มีสมบัติเพียโซอิเลกตริก ส่วนอีก 1 point group จะไม่เป็นเพราะมีสมบัติสมมาตรอย่างอื่นมาเกี่ยวข้อง ทำให้ปริมาตรขจัดทางไฟฟ้ามีการหักล้างกันหมด

2.2 ผลของทิศทางที่มีต่อสมบัติเพียโซอิเลกตริก

โดยปกติแล้วผลของเพียโซอิเลกตริกจะขึ้นอยู่กับทิศทาง เนื่องจากผลของเพียโซอิเลกตริกมีคุณสมบัติเป็นเทนเซอร์ (tensor) เมื่อสารเพียโซอิเลกตริกถูกทำให้เกิดความเค้นจะมีโพลาไรเซชันเกิดขึ้น สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$P_i = d_{ijk} X_{jk} \quad ; \; ijk = 1, 2, 3 \qquad (2.3)$$

เมื่อ ijk คือ ทิศทางในแกนคาร์ทีเซียน

P_i คือ โพลาไรซ์ที่เกิดขึ้นในทิศทาง i ของเนื้อสารเมื่อถูกทำให้เกิดความเครียด

d_{ijk} คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเลกตริกในทิศทาง ijk

X_{jk} คือ ความเค้นที่ใส่ให้กับสารเพียโซอิเลกตริกในทิศทาง jk

สามารถแสดงตัวอย่างของโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นในทิศทาง i เพื่ออ้างอิงจากสมการ (2.3) ดังนี้

$$P_i = d_{111}X_{11} + d_{112}X_{12} + d_{113}X_{13} + d_{121}X_{21} + d_{122}X_{22} + d_{123}X_{23} + d_{131}X_{31} + d_{132}X_{32} + d_{133}X_{33} \qquad (2.4)$$

โดยทั่วไปสารจะมีความเค้น X_{jk} กับ X_{kj} ที่สมมูลกัน ดังนั้นเมตริกสามารถลดลงจากความเค้น 9 ตัว มาเป็น 6 ตัว ที่เป็นอิสระต่อกัน และเขียนแทนด้วย

$$\begin{matrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} \end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix} X_1 & X_6 & X_5 \\ X_6 & X_2 & X_4 \\ X_5 & X_4 & X_3 \end{matrix} \qquad (2.5)$$

ดังนั้นผลของเพียโซอิเลกตริกแบบ direct จะเป็น

$$P_i = d_{ij} X_j \quad ; i = 1, 2, 3 \; j = 1, 2, ..., 6 \qquad (2.6)$$

เมื่อ X_1, X_2, X_3 เป็นความเค้นที่กระทำตามแนวยาว และ
X_4, X_5, X_6 เป็นความเค้นที่กระทำตามแนวเฉือน

ในทำนองเดียวกันสำหรับกรณีของเพียโซอิเลกตริกแบบ converse เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าจะมีขนาดที่เปลี่ยนแปลงไป ความเครียดสามารถพิจารณาได้จากสมการ

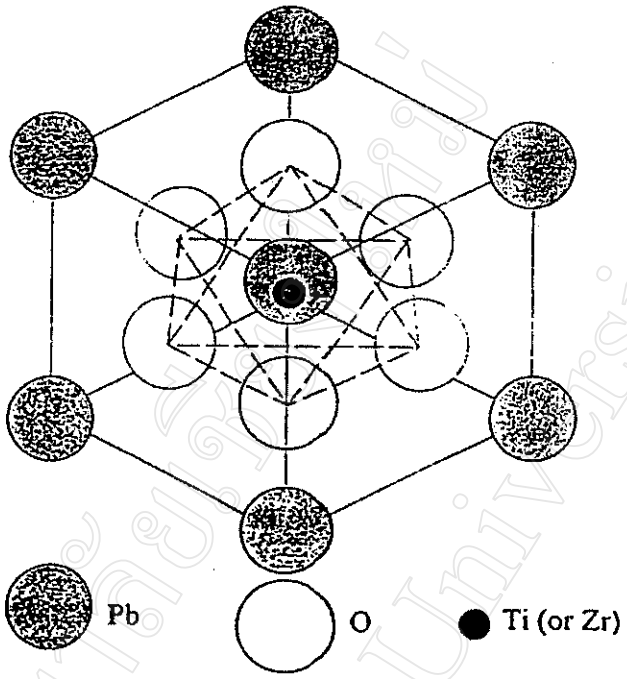
$$X_j = d_{ij} E_i \qquad ; i = 1, 2, 3 \quad j = 1, 2, \ldots, 6 \qquad (2.7)$$

เมื่อ X_j คือ ความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทาง j ของผลึกเพียโซอิเลกตริก
E_i คือ สนามไฟฟ้าที่ให้ในทิศทาง i ของสาร

2.3 โครงสร้างสารของเลดเซอร์โคเนตติตาเนต

ในปี ค.ศ. 1947 มีการค้นพบสารที่มีโครงสร้างแบบ perovskite ซึ่งสารตัวแรกที่มีการค้นพบและมีสมบัติเป็นเซรามิกส์เพียโซอิเลกตริก คือ แบเรียมติตาเนต ซึ่งมีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในฐานะที่เป็นตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ส่วนเพียโซอิเลกตริกทรานสดิวเซอร์จะใช้พีแซดที (เลดเซอร์โคเนตติตาเนต) เพราะเซรามิกส์พีแซดทีนี้จะมีอุณหภูมิคูรีสูง (ประมาณ 350 ^{0}C) มีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเลกตริก และ Piezoelectric coupling factor สูงมาก

ลักษณะโครงสร้างแบบ perovskite ของเลดเซอร์โคเนตติตาเนต ($Pb(Ti,Zr)O_3$) หรือเรียกย่อว่า พีแซดที (PZT) นี้ จะประกอบไปด้วยเลดเซอร์โคเนต ($PbZrO_3$) และเลดติตาเนต ($PbTiO_3$) กระจายกันอยู่ สมมติให้โครงสร้างผลึกมีรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ Pb^{+2} เป็นอิออนที่อยู่ตามมุมของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ และ O^{-2} อยู่ที่ face center ส่วน Ti^{+4} และ Zr^{+4} จะอยู่เลื่อนไปจาก body center เล็กน้อย ดังรูปที่ 2.2



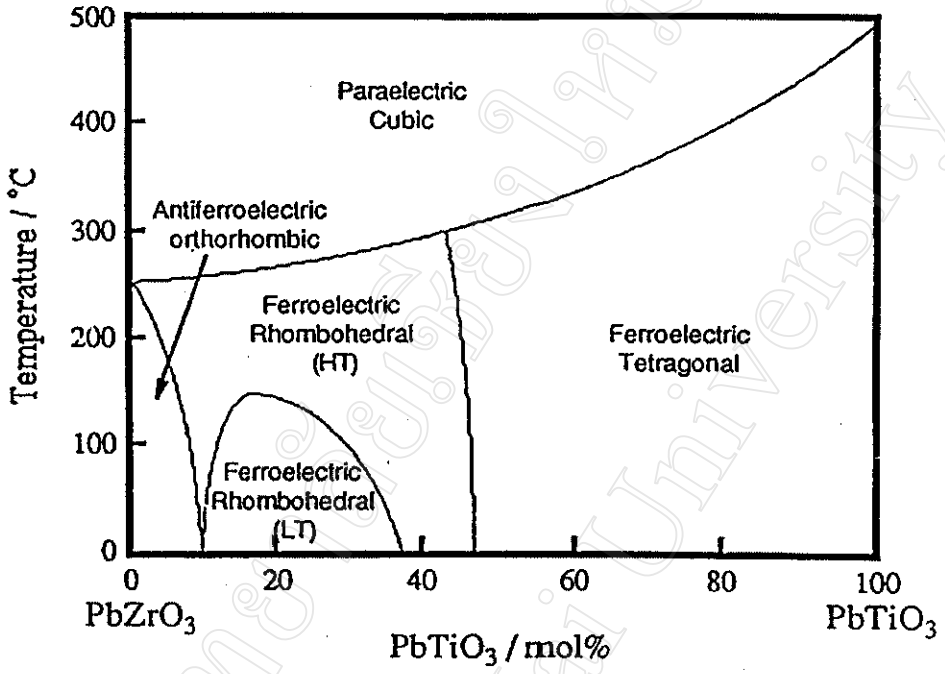
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของ PZT ที่เป็นแบบ perovskite

เนื่องจากเลดเซอร์โคเนตติตาเนต ประกอบด้วย เลดเซอร์โคเนต ($PbZrO_3$) และเลดติตาเนต ($PbTiO_3$) โครงสร้างผลึกจึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราส่วนของเลดเซอร์โคเนต และเลดติตาเนต แสดงดึง phase diagram ของระบบ ($Pb(Ti,Zr)O_3$) ดังรูปที่ 2.3

สำหรับ $PbZrO_3$ บริสุทธิ์จะมีโครงสร้างเป็น orthorhombic และเป็น antiferoelectric ในขณะที่ $PbTiO_3$ บริสุทธิ์มีโครงสร้าง perovskite เป็น tetragonal และเป็นเฟร์โรอิเล็กตริก ในวัสดุที่มีสมบัติ antiferoelectric นั้น แต่ละหน่วยเซลล์จะมีโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นและหน่วยเซลล์ที่อยู่ติดกันจะมีทิศทางของโพลาไรเซชันเรียงตัวอยู่ในทิศทางตรงกันข้าม เป็นผลทำให้โพลาไรเซชันสุทธิในวัสดุ antiferoelectric มีค่าเป็นศูนย์

เมื่อมีการเติม $PbTiO_3$ ประมาณ 5 mol % ลงใน $PbZrO_3$ บริสุทธิ์ จะทำให้เกิดเฟส rhombohedral ที่เป็นเฟร์โรอิเล็กตริก แต่ละส่วนผสมระหว่าง $PbTiO_3$ และ $PbZrO_3$ ซึ่งเป็นพีแซดทีที่มีการนิยมใช้มากที่สุดจะอยู่ที่บริเวณใกล้ขอบเฟส (Phase boundary) ระหว่างเฟส rhombohedral และเฟส tetragonal ณ ที่ขอบเขตนี้จะมีผลึกเฟร์โรอิเล็กตริกของ rhombohedral และ เฟส tetragonal รวมกันอย่างสมดุล โดยที่เกือบจะไม่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ซึ่งจะเรียกว่า Morphotropic Phase

Boundary (MPB) พบว่ายิ่งใกล้ MPB สารจะมีความเป็นเพียโซอิเลกตริกแรงมาก โดยจะเสถียรในช่วงอุณหภูมิ –200 °C ถึง 150 °C



รูปที่ 2.3 เฟสไดอะแกรมระบบ $PbTiO_3$ - $PbZrO_3$

พีแซดทีจะมีสมบัติเป็น paraelectric และมีโครงสร้างเป็น perovskite ที่อุณหภูมิสูง แต่ถ้าเซรามิกส์พีแซดทีถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำลงกว่าอุณหภูมิคูรีแล้วโครงสร้างจะเปลี่ยนเป็นเฟร์โรอิเล็กตริกในเฟส tetragonal หรือ rhombohedral ซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนผสมระหว่าง $PbTiO_3$ และ $PbZrO_3$

ในการเตรียมเซรามิกส์พีแซดทีนั้น เป็นการยากที่จะเตรียมส่วนผสมของเซรามิกส์พีแซดทีในบริเวณ MPB ที่แน่นอน เพราะที่ขอบเขตนี้เฟสทั้งสอง คือ tetragonal และ rhombohedral นี้มีการกระจายอยู่ร่วมกัน ความกว้างของบริเวณที่กระจายอยู่จะไม่แน่นอน ซึ่งจะไม่ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ที่ควบคุมในกระบวนการเตรียมเซรามิกส์ ดังนั้นการทำวัสดุพีแซดทีเฟสเดี่ยว คือ เฟส tetragonal เดี่ยว ๆ หรือเฟส rhombohedral เดี่ยว ๆ นั้นต้องทำให้เซอร์โคเนียมและติตาเนียมมีการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันในระดับอะตอม ซึ่งเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก แต่ในปัจจุบันกระบวนการเตรียมเซรามิกส์ได้มีการพัฒนาขึ้น ซึ่งสามารถลดบริเวณที่มีการกระจายอยู่ร่วมกันได้

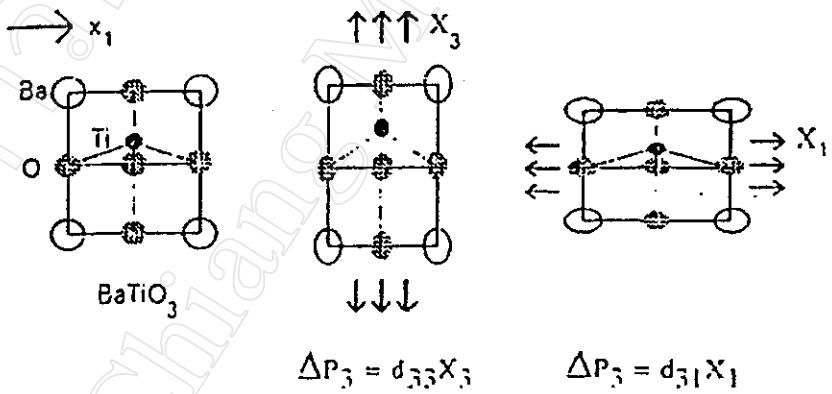
2.4 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเลกตริก

ความเป็นเพียโซอิเลกตริกขึ้นกับทิศทางดังที่สามารถแสดงสมการได้ในรูปเมตริก เป็นผลทำให้สัมประสิทธิ์เพียโซอิเลกตริกมีหลายตัวตามทิศทางต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับผลที่เกิดเมื่อมีการให้ความเค้น หรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.4 ตามปกติแล้วเมื่อแผนภาพให้ทิศทางโพลาร์ในทิศทาง 3 โดยที่ทิศทาง 1 และ 2 ตั้งฉากกันและเป็นทิศทางที่สมมูลกัน ดังนั้นเซรามิกส์ที่เป็นเฟร์โรอิเล็กตริกจะมีทิศทางที่สัมประสิทธิ์เพียโซอิเลกตริกไม่เป็นศูนย์ ได้แก่ d_{33}, d_{31} และ d_{15}

- d_{33} เป็นสัมประสิทธิ์เพียโซอิเลกตริกตามยาว มีความสัมพันธ์กับโพลาไรเซชันในทิศทาง 3 ที่เกิดจากความเครียดในทิศทางเดียวกัน

- d_{31}เป็นสัมประสิทธิ์เพียโซอิเลกตริกตามขวางสัมพันธ์กับโพลาไรเซชันในทิศทาง 3 ที่เกิดจากความเครียดในแนวตั้งฉาก (1 หรือ 2)

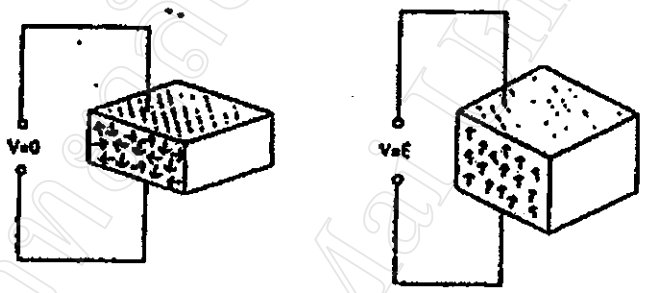
- d_{15} เป็นสัมประสิทธิ์เพียโซอิเลกตริกในแนวเฉือน สัมพันธ์กับโพลาไรเซชันในทิศทาง 1 ที่เกิดจากความเครียดเฉือนรอบแกน 2



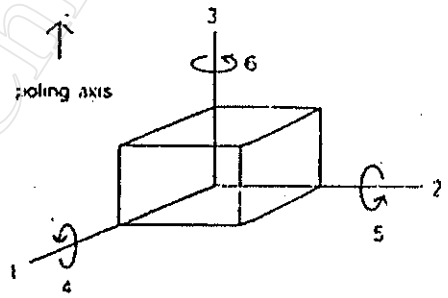
รูปที่ 2.4 แผนภาพสองมิติของโครงสร้างแบบ perovskite ของ $BaTiO_3$
แสดงการเลื่อนตำแหน่งของอิออนติตาเนตในทิศทาง 3

2.5 Poling

โดยทั่วไปสารเพียโซอิเลกตริกเซรามิกส์ที่ประกอบด้วยหน่วยเซลล์เล็ก ๆ มีไดโพลในเนื้อสารเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบซึ่งเป็นผลทำให้สารเซรามิกส์มีความเฉื่อย ไม่ว่องไว (inactive) ไม่สามารถวัดค่าทางเพียโซอิเลกตริกได้ จึงต้องมีการ poling หรือ polarizing สารเซรามิกส์พีแซดทีโดยการให้สนามไฟฟ้า ซึ่งสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงเพียงพอจะทำให้ไดโพลในเนื้อสารมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ในทิศทางเดียวกันตามทิศทางสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป ซึ่งการจัดเรียงตัวกันใหม่ของไดโพลจะมีผลทำให้สารมีการขยายตัวเล็กน้อยตามทิศทางการ poling แต่จะมีการหดตัวเล็กน้อยในทิศทางที่ตั้งฉากกับการ poling สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 และการกำหนดแกนและสัญลักษณ์ของแกนดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 แสดงผลการ poling และทิศทางของไดโพลและขนาดของสารที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 2.6 แสดงเครื่องหมายของแกนอ้างอิงของสารเพียโซอิเลกตริก

เมื่อให้สนามไฟฟ้าที่แรงพอที่จะทำให้เนื้อสารเซรามิกส์พีแซดทีมีการจัดเรียงโดเมน 180^0 ไปตามทิศทางของสนามที่ให้ สนามจะมีผลกับโดเมน 90^0 ของเฟส tetragonal และโดเมน 70^0 และ 109^0 ของเฟส rhombohedral ซึ่งเป็นผลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของเซรามิกส์ โดยจะมีการยืดออกในทิศทางของสาม และหดตัวในทิศทางตั้งฉาก แต่หลังจากที่เอาสนามออกแล้ว ความเค้นที่ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโพลาร์ในทุกแห่งมีการปรับเปลี่ยนกลับไปในทิศทางเดิม และส่วนใหญ่แล้วที่จัดเรียงตามสนามยังคงอยู่ถาวร

การโพลที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดของเซรามิกส์พีแซดทีนั้น จะอยู่ที่บริเวณใกล้กับ MPB เพราะโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเองภายในแต่ละเกรนสามารถถูกปรับเปลี่ยนทิศทางในการจัดเรียงหนึ่งในสิบสี่ทิศทางที่เป็นไปได้ (8 ทิศทางของ [111] ของหน่วยเซลล์ rhombohedral และ 6 ทิศทางของ [100] ของหน่วยเซลล์ tetragonal) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีสมบัติเพียโซอิเลกตริกของเซรามิกส์พีแซดทีค่อนข้างมาก โดยเฉพาะบริเวณใกล้ MPB

2.6 Electromechanical Coupling Factor ของสารเพียโซอิเลกตริก

ค่า Electromechanical Coupling Factor (k) เป็นตัวบอกถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานในสารเพียโซอิเลกตริก ซึ่งนิยามดังนี้

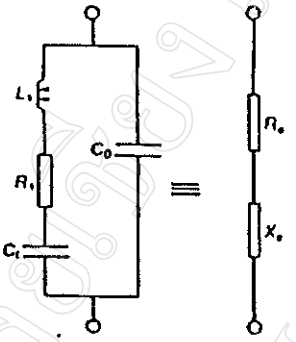
$$k^2 = \frac{\text{Output Mechanical Energy}}{\text{Input Electrical Energy}} \qquad (2.9)$$

or

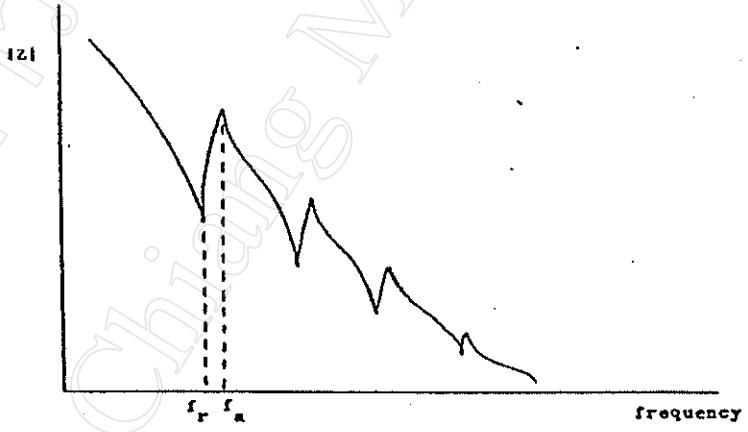
$$k^2 = \frac{\text{Output Mechanical Energy}}{\text{Input Electrical Energy}} \qquad (2.10)$$

Electromechanical coupling factor นี้เป็นปริมาณเทนเซอร์ ซึ่งในแต่ละทิศทางของ Electromechanical coupling factor (k_{ij}) นี้จะสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์เพียโซอิเลกตริก (d_{ij}) ซึ่งค่า Electromechanical coupling factor ในผลึกเพียโซอิเลกตริกจะมีค่าน้อย ($k< 0.1$) แต่ในเซรามิกส์ที่เป็นเฟร์โรอิเล็กตริกจะมีค่าสูง ($0.4 \leq k \leq 0.7$) และยิ่งกว่านั้น ในผลึกที่เป็นเฟร์โรอิเล็กตริกจะมีค่าสูงมาก ($k \leq 0.9$) ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานจะไม่สมบูรณ์ ค่า k จึงน้อยกว่า 1.0

โดยทั่วไปพฤติกรรมทางไฟฟ้ากระแสสลับของเซรามิกส์เพียโซอิเลกตริก เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าหรือความเค้น สามารถแสดงวงจรเทียบเท่าดังปรากฏในรูปที่ 2.7 และเมื่อทำการวัดค่า impedance จากวงจรจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ของ impedance กับ frequency ได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 แสดงวงจรเทียบเท่าสำหรับการวัด resonance ของชิ้นสารเพียโซอิเลกตริก



รูปที่ 2.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง impedance กับความถี่

จากการพิจารณาค่าความแตกต่างของความถี่ ระหว่างค่าความถี่ของ impedance สูงสุด (antiresonance ; f_a) กับความถี่ของ impedance ต่ำสุด (resonance ; f_r) ค่า electromechanical coupling coefficient ; k) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

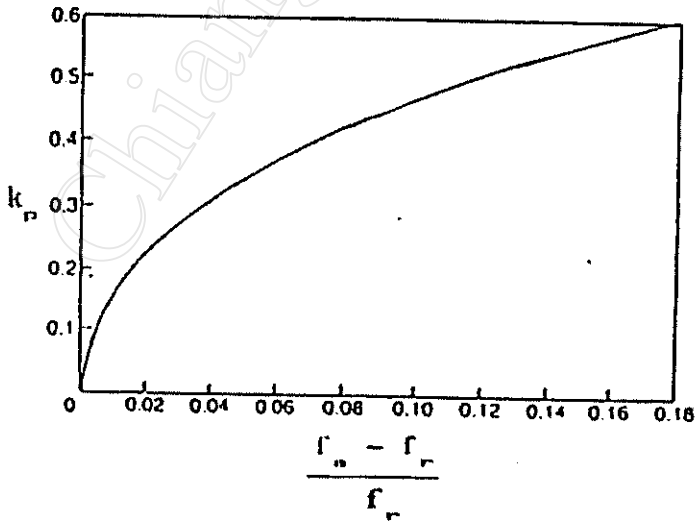
$$k_{33} = \sqrt{\frac{\pi f_r}{2 f_a} \tan\left(\frac{\pi}{2}\frac{f_a - f_r}{f_a}\right)} \qquad \text{for Cylindrical rod} \qquad (2.11)$$

$$k_{31} = \sqrt{\frac{\frac{\pi f_a}{2 f_r}\tan\left(\frac{\pi f_a - f_r}{2 f_r}\right)}{1 + \frac{\pi f_a}{2 f_r}\tan\left(\frac{\pi f_a - f_r}{2 f_r}\right)}} \qquad \text{for Rectangular plate} \qquad (2.12)$$

$$k_p = \sqrt{1 - k_p^{\,2}(\text{Bessel function})} \qquad \text{for Disc} \qquad (2.13)$$

ค่า electromechanical coupling coefficient ของสารรูปแผ่นจานกลม (disc) มักเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า planar coupling coefficient ; k_p และจะเห็นได้ว่าสมการที่ (2.13) มีความยุ่งยากของ Bessel function เข้ามาเกี่ยวข้อง จึงมักแสดงผลลัพธ์ออกมาในรูปกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.9 หรืออาจคำนวณจากสมการที่ (2.14)

$$k_p = \sqrt{\frac{2.5(f_a^2 - f_r^2)}{f_r^2} + 0.038} \qquad (2.14)$$

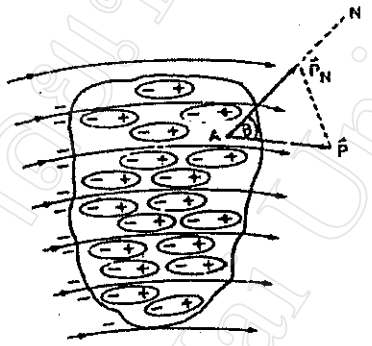


รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_p กับ $\frac{f_a - f_r}{f_r}$ ของสารที่เป็นแผ่นจานกลม

2.7 สมบัติไดอิเล็กตริก

Polarization คือ ปรากฏการณ์เมื่อวางวัตถุในสนามไฟฟ้า โมเลกุลหรืออะตอมของมันจะกลายเป็นขั้วคู่ไฟฟ้า มีทิศเดียวกับสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป ไม่ว่าจะเป็นเพราะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนปรวนแปรไปหรือการจัดวางตัวของขั้วคู่ที่ถาวรก็ตาม

การเกิดโพลาไรเซชัน จะเทียบได้ว่าเป็นขั้วคู่ไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีแนวโน้มจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่สนามมีความเข้มมากขึ้น พิจารณาดังรูปที่ 2.10

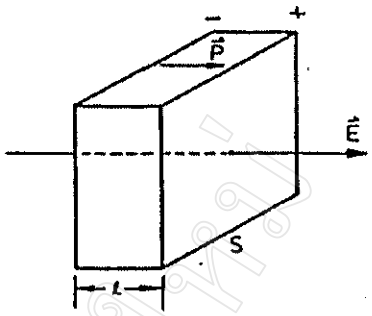


รูปที่ 2.10 แสดงสนามไฟฟ้าที่ทำให้วัตถุเกิดมีโพลาไรเซชัน

สำหรับตัวกลางที่ไม่เป็นตัวนำ แต่เมื่อมีสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการโพลาไรซ์ได้ เรียกว่า ไดอิเล็กตริก (dielectric) การเกิดโพลาไรซ์ทำให้มีประจุบวกทางด้านหนึ่งและลบทางด้านตรงข้ามของวัตถุ วัตถุนั้นจะเทียบได้ว่าเป็นขั้วคู่ไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ไปในทางที่สนามมีความเข้มเพิ่มขึ้น

เวกเตอร์ของโพลาไรเซชัน ($\vec{P}$) สำหรับวัตถุใด ๆ มีคำจำกัดความว่า เป็นโมเมนต์ขั้วคู่ไฟฟ้าของตัวกลางต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ดังนั้นถ้า $\vec{p}$ เป็นโมเมนต์ขั้วคู่ที่เกิดขึ้นในแต่ละอะตอมหรือโมเลกุล และ n เป็นจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เวกเตอร์ของโพลาไรเซชันจะเป็น

$$\vec{P} = n\vec{p} \qquad (2.15)$$



รูปที่ 2.11 แสดงภาพแผ่นวัตถุที่ถูกโพลาไรซ์แล้ว

พิจารณาวัตถุที่เป็นแผ่นหนา l และมีพื้นผิว S วางตั้งฉากกับสนามเรียบ $\vec{E}$ ดังรูปที่ 2.11 โพลาไรเซชัน $\vec{P}$ จะขนานกับ $\vec{E}$ และตั้งฉากกับ S ด้วย ปริมาตรของแผ่นวัตถุนี้คือ lS ดังนั้นไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้า คือ

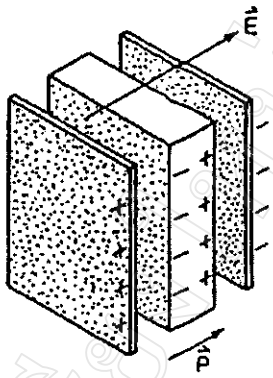
$$\vec{P}\ (lS) = (\vec{P}\ S)l \qquad (2.16)$$

แต่ lS คือ ระยะระหว่างประจุบวกและลบซึ่งปรากฏบนผิวทั้งสอง ดังนั้นจากคำจำกัดความของโมเมนต์คู่ควบ ซึ่งมีค่าเท่ากับประจุคูณด้วยระยะทาง จึงสรุปได้ว่าประจุทั้งหมดที่ปรากฏบนแต่ละผิวมีค่าเป็น PS ดังนั้นประจุต่อหน่วยบนพื้นที่ คือ σ_p บนผิวของแผงวัสดุนี้เป็น P หรือ

$$\sigma_p = P \qquad (2.17)$$

แม้ว่าผลข้างต้นนี้จะได้มาจากการคำนวณ โดยอาศัยวัสดุที่มีรูปทรงเรขาคณิต แต่โดยทั่วไปก็ยังสามารถเป็นจริงและสามารถให้คำจำกัดความได้ว่า ประจุต่อหน่วยพื้นที่บนผิวของแผ่นวัตถุที่โพลาไรซ์จะมีค่าตัวเลขเท่ากับองค์ประกอบของโพลาไรเซชันในแนวที่ตั้งฉากกับผิวของแผ่นวัตถุ

ไดอิเล็กตริกที่มีโพลาไรเซชัน (Polarized dielectric) มีประจุจำนวนหนึ่งบนผิวของมัน (และทั่วทั้งปริมาตรถ้ามีโพลาไรเซชันสม่ำเสมอ) ประจุที่เกิดจากโพลาไรเซชันเหล่านี้คงเกาะอยู่กับอะตอมหรือโมเลกุล หรือก๊าซที่แตกตัวเป็นไอออนจะมีประจุไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ได้ตลอดแท่งวัตถุนั้นจึงเรียกว่า ประจุอิสระ นี่คือความแตกต่างระหว่างประจุอิสระกับประจุเนื่องจากโพลาไรเซชัน



รูปที่ 2.12 แสดงไดอิเล็กตริกที่ถูกวางไว้ระหว่างแผ่นขนานที่มีประจุชนิดตรงกันข้าม

พิจารณาแผ่นวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริกที่วางอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำที่ขนานกัน ดังรูปที่ 2.12 และมีประจุจำนวนเท่ากันแต่ต่างชนิดกัน ความหนาแน่นของประจุอิสระที่ผิวแผ่นซ้ายมือเป็น $+\sigma$ และแผ่นขวามือเป็น $-\sigma$ ประจุเหล่านี้ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่โพลาไรซ์แผ่นวัสดุนี้ก่อให้เกิดประจุเนื่องจากโพลาไรเซชันบนแต่ละผิวของแผ่นวัสดุ ประจุเนื่องจากโพลาไรเซชันเหล่านี้มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับประจุบนแผ่นตัวนำ ดังนั้นประจุเนื่องจากโพลาไรเซชันบนผิวของแผ่นไดอิเล็กตริกจะทำหน้าที่ลบล้างประจุอิสระบางส่วนบนแผ่นตัวนำ ถ้าให้ P เป็นขนาดโพลาไรเซชันในแผ่นวัสดุนี้ ความหนาแน่นประจุที่ผิวหน้าด้านซ้ายของแผ่นวัสดุ คือ $\sigma = -P$ ขณะที่ผิวหน้าด้านขวาเป็น $\sigma = +P$ ความหนาแน่นประจุที่ก่อให้เกิดผลหรือประจุปรากฏที่ผิวด้านซ้าย จะเป็น

$$\sigma = \sigma_f + \sigma_p$$

or

$$\sigma = \sigma_f + P \qquad (2.18)$$

โดยที่ σ_f เป็นความหนาแน่นของประจุอิสระ จากลักษณะแบบเดียวกันทางด้านขวาได้ผลตรงกันข้าม ประจุที่ผิวเหล่านี้ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอในบริเวณนั้น นิยามว่า สนามไฟฟ้าที่ผิวตัวนำมีค่า ดังนั้นจะได้ว่า

$$E = \frac{1}{\varepsilon_0}(\sigma_f - P)$$

$$\sigma_f = \varepsilon_0 E + P \qquad (2.19)$$

สมการที่ (2.19) ให้ความสัมพันธ์ระหว่างประจุอิสระบนผิวของตัวนำที่ขนาบไดอิเล็กตริกกับสนามไฟฟ้าในไดอิเล็กตริก และโพลาไรเซชันของไดอิเล็กตริก ในกรณีที่พิจารณาอยู่นี้ E และ P เป็นเวกเตอร์ที่มีทิศทางเดียวกัน ดังนั้นสมการที่ (2.19) จึงเป็นปริมาณเวกตอร์ใหม่ในรูปสนามเวกเตอร์มีชื่อเรียกว่า การขจัดทางไดอิเล็กตริก (electric displacement) ซึ่งนิยามได้ดังนี้

$$D = \varepsilon_0 E + P \qquad (2.20)$$

โดยทั่วไปโพลาไรเซชัน $\overline{P}$ ที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้าจึงมักเขียนได้ว่า

$$P / \varepsilon_0 E = \chi_e \qquad (2.21)$$

เมื่อ χ_e คือ ค่าซึมซาบทางไฟฟ้า เป็นค่าคงที่ที่ไม่มีหน่วย

ε_0 คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ของสูญญากาศ ($= 8.85 \times 10^{-12}$ Fm^{-1})

ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (2.20) ได้ใหม่เป็น

$$D = \varepsilon_0 E + \varepsilon_0 \chi_e E = \varepsilon_0 (1+\chi_e) E \qquad (2.22)$$

แต่โดยทั่วไปจะเขียนอยู่ในรูป

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \qquad (2.23)$$

เมื่อ ε_r คือ สภาพยอมสัมพัทธ์

2.8 การเตรียมสารเซรามิกส์เลดเซอร์โคเนตติตาเนต (เซรามิกส์พีแซดที)

ในการนำเซรามิกส์พีแซดทีไปใช้งาน ต้องมีการเตรียมให้มีรูปทรงต่าง ๆ เช่น เป็นแผ่น แท่ง ทรงกระบอก ท่อ แท่งสี่เหลี่ยม วงแหวน จานกลม ฯลฯ จะมีขั้นตอนหลักในกระบวนการเตรียมอยู่ 3 ขั้นตอน นั่นคือ การเตรียมผง (powder preparation) การขึ้นรูป (green forming) ซึ่งปกติมักใช้การอัด และขั้นตอนสุดท้ายคือ การเผาซินเตอร์ (sintering)

2.8.1 การเตรียมผง (Powder Preparation)

ปัจจุบันเทคโนโลยีการเตรียมผงสารพีแซดทีโดยทั่วไป มักจะได้จากวิธีการบดผสมแบบธรรมดา (conventional milling) และกระบวนการเผาแคลไซน์ (calcination processing) โดยการนำสารประกอบออกไซด์มาผสมแบบเปียก (wet-mixed) ในเครื่องบดแบบสั่น แล้วทำให้แห้ง หลังจากนั้นนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิประมาณ 800-1000 ^{0}C จะได้สารที่เกาะตัวรวมกันเป็นก้อนแข็ง จึงต้องนำมาบดอีกครั้งให้แตกเป็นผง ผงนี้จะถูกฉีดพ่นทำให้แห้ง (spray-dry) จะได้ผงพีแซดทีสำหรับนำไปใช้ในการขึ้นรูป การเตรียมผงนี้มีข้อควรระวัง คือ ส่วนผสมทุกชนิดต้องมีการควบคุมอย่างละเอียด เพราะสมบัติของพีแซดทีขึ้นกับ PbO stoichiometry, อัตราส่วนของ Zr/Ti และ ปริมาณสารเจือต่าง ๆ

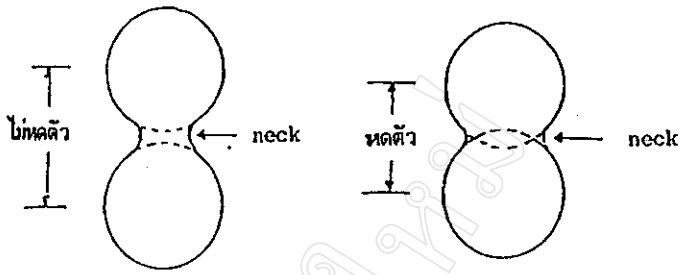
2.8.2 การขึ้นรูป (Green Forming)

การผลิตเซรามิกส์พีแซดที มีวิธีการขึ้นรูปอยู่หลายวิธี ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เช่น วิธีการอัด (dry-pressing), การทำเป็นแผ่น (tape-casting) ฯลฯ ในการอัดผงสารพีแซดทีนั้นจะทำการอัดผิวหน้าทั้งสองด้วยแรงดันสูง ๆ เมื่อผ่านการอัดผิวหน้าทั้งสองด้านของสารจะติดกันแน่นและคงรูปอยู่ได้ การอัดนั้นจะอัดให้แน่นได้จนถึงจุด ๆ หนึ่งเท่านั้น ไม่ว่าจะเพิ่มแรงดันขึ้นอีกเท่าใดก็ตาม

2.8.3 การเผาซินเตอร์ (Sintering)

ผงสารตัวอย่างที่ผ่านการอัดและคงรูปอยู่แล้ว สารตัวอย่างจะมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วยการนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง ๆ นั่นคือ เป็นการช่วยให้โมเลกุลยึดเหนี่ยวกันมากขึ้น เนื่องจากมีการกระตุ้นให้อะตอมของสารเกิดการแพร่เข้าหากัน ทำให้จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคที่เรียกว่า คอ (neck) มีความหนาเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งการเกิดคอมากจะทำให้สารตัวอย่างมีความหนาและแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิม

ขั้นตอนการเผาซินเตอร์เป็นขั้นตอนการทำให้อะตอมของสารเซรามิกส์พีแซดทีอยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น ซึ่งขั้นตอนนี้จะมีการระเหยของ PbO ที่อุณหภูมิประมาณ 1250-1300 ^{0}C ด้วยเหตุนี้เซรามิกส์พีแซดทีโดยทั่วไปจะถูกเผาซินเตอร์ที่ในบรรยากาศของ PbO เพื่อป้องกันการสูญหายของ PbO นอกจากนี้สภาพเงื่อนไขอื่น ๆ ในการเผาซินเตอร์ เช่น อุณหภูมิ, เวลา, อัตราการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิ เป็นต้น มีความสำคัญมากต่อ PbO stoichiometry สำหรับเรื่องโครงสร้างระดับจุลภาค (microstructure) โดยเฉพาะขนาดของเกรน (grain size) ของเซรามิกส์พีแซดทีจะถูกควบคุมระหว่างกระบวนการเผาซินเตอร์ด้วย



รูปที่ 2.13 แสดงการเกิดคอ (neck)

ในขบวนการซินเตอร์นั้นสามารถแบ่งขั้นตอนการซินเตอร์ออกเป็น 3 ระยะ คือ

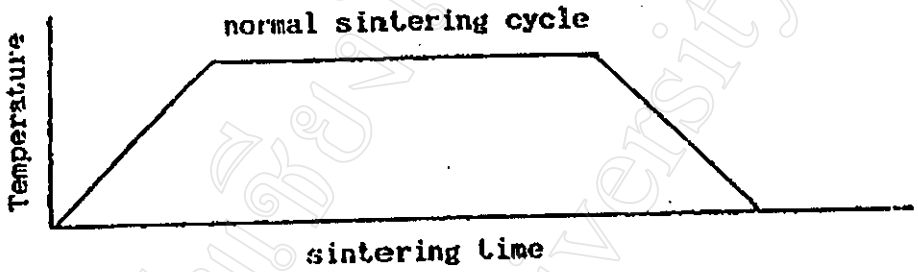
1. ระยะแรก (initial stage)
2. ระยะกลาง (intermediate stage)
3. ระยะสุดท้าย (final stage)

การเปลี่ยนแปลง microstructure ที่สังเกตได้จากระยะทั้งสามของขบวนการเผาซินเตอร์แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาซินเตอร์

ระยะของการเปลี่ยนแปลง	การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น
ระยะแรก (initial stage)	ผิวหน้าของอนุภาคมีความเรียบ, มีการเกิด grain boundary, เกิดคอ (neck) มีการเชื่อมต่อเกิดขึ้นที่รอบ ๆ อนุภาค, ความพรุนลดน้อยลงกว่า 12 %
ระยะกลาง (intermediate stage)	มีการหดตัวของรูที่เปิดเชื่อมต่อระหว่าง grain boundary นั่นคือเกิดรูพรุนเพิ่มขึ้น, มีการเติบโตของเกรนอย่างช้า ๆ
ระยะสุดท้าย (1) (final:1)	รูพรุนที่เกิดขึ้นจะเป็นรูปิด,มีก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาโดยมีความหนาแน่นประมาณ 92 %, รูพรุนที่เกิดขึ้นระหว่าง grain boundary จะปิด ซึ่งการหดตัวของรูพรุนจะเป็นตัวจำกัดขนาดของเกรน
ระยะสุดท้าย (2) (final:2)	เกรน ส่วนใหญ่จะมีขนาดใหญ่ขึ้น, รูพรุนที่อยู่ระหว่างเกรนขนาดใหญ่นั้นจะมีการหดตัวลงอย่างช้า ๆ

สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ถ้าผงสารไม่บริสุทธิ์พอ สารอาจมีการหลอมเหลวที่อุณหภูมิจำกัด (sintering temperature) ในขณะที่ผงสารชนิดเดียวกันแต่มีความบริสุทธิ์มากกว่าจะไม่หลอมเหลว นอกจากนี้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของการเผาสารในกระบวนการซินเตอร์ที่เหมาะสมจะแสดงไว้ดังรูป 2.14

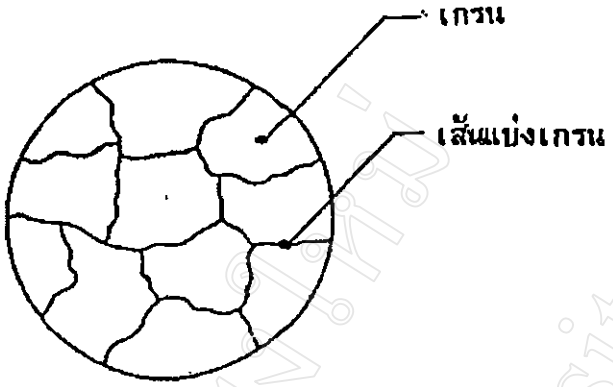


รูปที่ 2.14 แสดง normal sintering cycle

ดังนั้นเวลาที่ใช้ในกระบวนการซินเตอร์ก็เป็นปัจจัยที่สำคัญมากและเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิด้วย นั่นคือ ที่อุณหภูมิสูง ๆ อะตอมของสารจะเกิดการแพร่อย่างรวดเร็ว จึงใช้เวลาในการเผาซินเตอร์สั้น แต่ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำ การแพร่จะเป็นไปได้อย่างช้า ๆ จึงต้องใช้เวลาในการเผาเพิ่มขึ้น

2.9 โครงสร้างระดับจุลภาค

ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของสารโดยทั่วไปแล้ว จะประกอบด้วยผลึกเล็ก ๆ ที่เรียกว่าเกรน (grain) ภายในเกรนอะตอมของสารจะมีการจัดวางตัวในแบบเดียวกัน แต่ละเกรนจะถูกแบ่งแยกออกจากกันโดยจะมีเส้นแบ่งเกรน หรือที่เราเรียกว่า grain boundary เป็นตัวกั้น ซึ่งบริเวณนี้เป็นบริเวณที่จะเกิดปฏิกิริยาง่ายกว่าส่วนอื่น เนื่องจากการจับตัวของอะตอมจะไม่แน่นเท่ากับภายในเกรน ดังนั้นเมื่อมีการนำสารตัวอย่างไปขัดผิวหน้าและผ่านการ etching จะมีผลทำให้อะตอมในบริเวณเส้นแบ่งเกรนถูกกัดกร่อนเป็นร่อง เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ส่วนที่เป็นร่องนี้จะไม่สะท้อนแสง ทำให้สามารถมองเห็นเส้นแบ่งเกรนได้ สามารถแสดงลักษณะดังกล่าว ดังรูปที่ 2.15



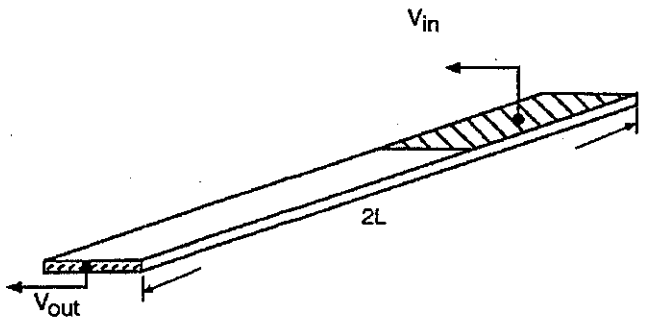
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเกรน

นอกจากที่กล่าวมาในการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค ขนาดของเกรนก็เป็นสิ่งที่สำคัญ เนื่องจากมีผลต่อพื้นที่และความยาวของเส้นแบ่งเกรน โดยขนาดของเกรนนั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนของนิวเคลียสที่เกิดขึ้น และอัตราการลดลงของอุณหภูมิ กล่าวคือถ้าลดอุณหภูมิให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ จำนวนนิวเคลียสจะเกิดขึ้นน้อย ทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้ามถ้าลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว ผลที่ได้จะมีจำนวนนิวเคลียสเกิดขึ้นมากและเกรนที่ได้จะมีขนาดเล็ก

2.10 ความรู้พื้นฐานในการประยุกต์เพียโซอิเลกตริก ในหม้อแปลง

2.10.1 การต่อขั้วสารเพียโซอิเลกตริกเพื่อประยุกต์ใช้ทำเป็นหม้อแปลง

โดยพื้นฐานของเพียโซอิเลกตริกทรานสฟอร์มเมอร์จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า (electrode) 2 ชุดที่แตกต่างกัน ประกบติดอยู่กับอุปกรณ์เพียโซเซรามิกส์เพียงชิ้นเดียว คลื่นนิ่ง (standing wave) ที่มีความยาวคลื่นเชิงกลเท่ากับความยาวของแท่งเพียโซเซรามิกส์เท่านั้นที่จะส่งผ่านกำลังสูงสุดให้กับแท่งอุปกรณ์เพียโซเซรามิกส์ที่เป็นแกนร่วมของขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

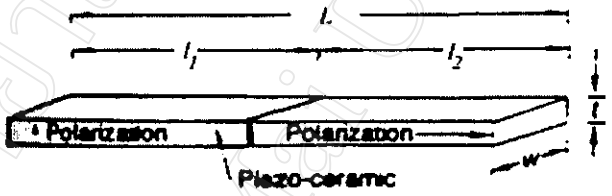


รูปที่ 2.16 แสดงการต่อขั้วของสารเพียโซอิเลกตริกทรานสฟอร์มเมอร์

เมื่อให้แหล่งจ่ายที่เป็นกระแสสลับกับเพียโซอิเลกตริกทรานสฟอร์มเมอร์จะทำให้อุปกรณ์เพียโซเซรามิกส์เกิดการสั่น คลื่นเชิงกลนี้จะถูกส่งผ่านชั้นสารชั้นที่เป็นด้านขาเข้าไปยังด้านออกด้วยปัจจัยของการเชื่อมโยงไฟฟ้าเชิงกล และที่ด้านขาออกก็จะเกิดปรากฏการณ์ stiffness effect ตรงกันข้ามกับขาเข้าจึงกลายเป็นแรงดันส่งออกไป สำหรับการพิจารณาสารเพื่อเลือกเป็นอุปกรณ์เพียโซเซรามิกส์ในเพียโซอิเลกตริกทรานสฟอร์มเมอร์จึงต้องดูอัตราส่วนคุณสมบัติที่เรียกว่า anisotropy ระหว่าง k_t / k_p

2.10.2 รูปแบบโครงสร้างพื้นฐานของเพียโซอิเลกตริกทรานสฟอร์มเมอร์

ในการพิจารณาโครงสร้างที่เป็นรูปแบบพื้นฐานที่จะแสดงให้เห็นนี้ เป็นรูปแบบอย่างง่ายที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ในการที่สารเพียโซอิเลกตริก สามารถที่จะประยุกต์ใช้ทำเป็นตัวเพียโซอิเลกตริกทรานสฟอร์มเมอร์ได้ รูปแบบอย่างง่ายนี้แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบอย่างง่ายของตัวเพียโซอิเลกตริกทรานสฟอร์มเมอร์

จากรูป เมื่อให้ L เป็นความยาวของแผ่นชิ้นงาน เมื่อมีคลื่นนิ่งที่มีความยาวเท่ากับแผ่นชิ้นงาน (L) ถูกกระตุ้น จะได้ว่า จะมีคลื่นนิ่งของความยาวครึ่งคลื่นปรากฏอยู่บนฝั่งของ input (l_1) และฝั่งของ output (l_2) ของชิ้นงาน ค่าอัตราส่วนของกำลังขยาย (gain, V_{out} / V_{in}) ที่ได้จากรูปแบบของชิ้นงานนี้ จะมีค่าตามสมการที่ 2.24

$$r = \left(\frac{4}{\pi^2}\right) k_{31} k_{33} Q_m \left(\frac{l_2}{t}\right) \left[\frac{2\sqrt{s_{33}^E / s_{11}^E}}{1+\sqrt{s_{33}^E / s_{11}^E}}\right] \qquad (2.24)$$

เมื่อ r คือ อัตราส่วนของกำลังขยาย

k_{ij} คือ coupling coefficient

Q_m คือ mechanical quality factor

l_2 คือ ความยาวของชิ้นงานฝั่ง output (mm)

t คือ ความหนาของชิ้นงาน (mm)

s_{ij} คือ elastic compliance (m^2/N)

2.10.2.1 เรโซแนนซ์โหมด (Resonance mode)

ในกรณีที่คลื่นกลเคลื่อนที่ในตัวกลางจะมีความสัมพันธ์เป็น

$$m\pi = \tan\left(\frac{\omega L}{2v}\right) \tag{2.25}$$

เมื่อ m คือ เป็นจำนวนจริงใดๆ

ω คือ $2\pi f$ (radian)

L คือ ความยาวของชิ้นงาน (m)

v คือ ความเร็วของคลื่นกลที่เคลื่อนที่ในเนื้อสาร (m/s)

เมื่อให้ขั้วไฟฟ้าของขาเข้าวางในตำแหน่งที่เกิดความเค้นเป็นศูนย์จะทำให้แผ่นอุปกรณ์เพียโซเซรามิกส์เปลี่ยนตำแหน่งจากเดิมมากที่สุดและจะเกิดการส่งถ่ายพลังงานสูงสุด ซึ่งโหมดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อป้อนแหล่งจ่ายพลังงานให้กับขาเข้าที่ความถี่ทำงานวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.18 โดยที่

$$L_A = \left(\frac{\rho}{8}\right)\left(\frac{Lt}{w}\right)\left(\frac{s_{11}^E}{d_{11}^E}\right) \tag{2.26}$$

$$C_A = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)\left(\frac{Lt}{w}\right)\left(\frac{d_{31}^E}{s}\right) \tag{2.27}$$

เมื่อ L_A คือ ค่าความเหนี่ยวนำของชิ้นงาน (H)

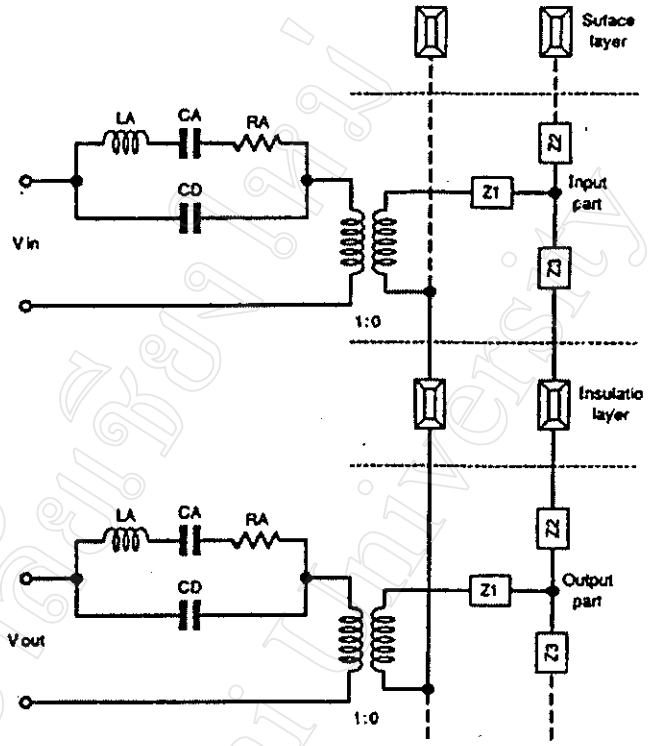
C_A คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชิ้นงาน (F)

L คือ ความยาวของ PZTของชิ้นงาน (m)

T คือ ความหนาของชิ้นงาน (m)

W คือ ความหนาของชิ้นงาน (m)

ρ คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (kg/m^3)



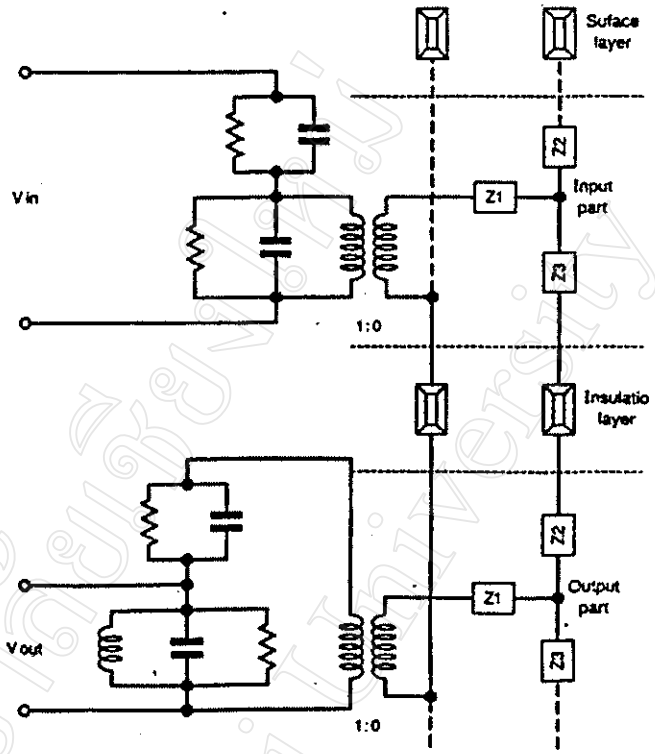
รูปที่ 2.18 แสดงวงจรสมมูลของเรโซแนนซ์โหมด

ในโหมดนี้จะมีความถี่ทำงานเป็นไปตามสมการ

$$f_r = \frac{1}{\left(2L\sqrt{\rho s_{11}^{E}}\right)} = \frac{v}{2L} \qquad (2.28)$$

2.10.2.2 แอนติเรโซแนนซ์โหมด (Antiresonance mode)

ในโหมดนี้จะเกิดเมื่อค่าของการเชื่อมโยงไฟฟ้าเชิงกลของชั้นสารต่ำ แต่ให้ค่าความต้านทานวงจรที่สูง ดังในวงจรสมมูลในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงวงจรสมมูลของแอนติเรโซแนนซ์โหมด

การคำนวณหาค่าความถี่ของโหมดนี้ (f_a) หาได้จาก

$$\frac{\Delta f}{f_r} = \frac{4k_{31}^2}{(1-k_{31}^2)(\pi^2)} \qquad (2.29)$$

เมื่อ $\Delta f = f_a - f_r$

ในปัจจุบันการใช้งานของของเพียโซอิเลกตริกทรานสฟอร์มเมอร์ยังอยู่ในขอบเขตที่จำกัด เนื่องจากคุณลักษณะของเพียโซอิเลกตริกทรานสฟอร์มเมอร์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามโหลดและอุณหภูมิทำงาน

2.11 วิธีการหาค่าสมบัติชนิดต่างๆ ของสาร ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2.11.1 วิธีการวิเคราะห์สารตัวอย่างโดยวิธี X- ray Diffraction

เป็นวิธีการวิเคราะห์เพื่อให้ทราบชนิดของสารตัวอย่างโดยอาศัยหลักการของการ Diffraction ของรังสีเอกซ์ที่ยิงเข้าไปสู่เนื้อสารและมีการเลี้ยวเบนของรังสีเกิดการแทรกสอดกันที่มุมต่างๆ โดยที่สารแต่ละชนิดจะมีค่าของชุดมุมของการเลี้ยวเบนที่แตกต่างกัน และอาศัยสมการของ Bragg (Bragg' s law) มาเป็นตัวช่วยในการคำนวณ

วิธีการวิเคราะห์สามารถทำได้ดังนี้

1. นำสารผงตัวอย่างบรรจุใส่ลงใน ภาชนะบรรจุผง (holder) อัดให้แน่นและปาดผิวหน้าให้เรียบ
2. ใส่ภาชนะบรรจุผงที่เตรียมไว้ใส่ในเครื่อง X- ray Diffraction
3. ทำการตั้งค่าต่างๆที่ต้องการเช่น ช่วงของมุมที่ต้องการ, จำนวนองศา/ step และเวลาในการเก็บข้อมูลในแต่ละ step
4. เมื่อ run เครื่องจะได้ผลออกมาในรูปของกราฟที่เรียกว่า X- ray diffraction pattern
5. นำค่ามุมที่ได้ (2θ) จากพีคต่างๆมาวิเคราะห์หาค่า d-spacing โดยใช้สมการของ Bragg คือ

$$2d\sin\theta = n\lambda \qquad (2.30)$$

เมื่อ d คือ ค่า d-spacing

θ คือ diffraction angle

λ คือ ความยาวคลื่นของ X- ray (1.54 Å)

6. นำค่า d- spacing ที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับ JCPDS files.

2.11.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่น

วิธีการหาค่าความหนาแน่นที่ใช้เรียกว่า วิธีการหาค่าความหนาแน่นโดยการแทนที่น้ำ ทำได้โดย

1. นำชิ้นงานเซรามิกส์มาอบให้แห้ง ในตู้อบที่อุณหภูมิ 110 $^{\circ}$C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. ชั่งชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อหาค่าน้ำหนักในอากาศ บันทึกผลเป็น W_1

3. นำชิ้นงานไปต้มในบีกเกอร์ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำเข้าไปแทนที่อากาศในเม็ดสาร จนกระทั่งอิ่มตัว
4. นำชิ้นงานมาทำการชั่งโดยเครื่องชั่งแบบละเอียด โดยทำการชั่งในน้ำ บันทึกผลเป็น W_3 และนำชิ้นงานออกมาซับน้ำให้แห้ง ชั่งในอากาศอีกครั้ง บันทึกผลเป็น W_2
5. นำผลที่ได้มาคำนวณค่าความหนาแน่นโดยคำนวณได้จากสมการ 2.31

$$\rho = \frac{W_1}{W_2 - W_3}\rho_{น้ำ} \qquad (2.31)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน (g/cm^3)

$\rho_{น้ำ}$ คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำ ในอุณหภูมิขณะที่ทำการทดลอง (g/cm^3)

W_1 คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังการอบ (g)

W_2 คือ น้ำหนักชิ้นงานชั่งในอากาศหลังการต้มในน้ำแล้วเช็ดให้แห้ง (g)

W_3 คือ น้ำหนักชิ้นงานชั่งในน้ำ (g)

2.11.3 วิธีการหาค่าความหดตัว (Shrinkage) ของชิ้นงาน

ในการหาค่าความหดตัวของชิ้นงานหาได้จาก

1. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานที่ได้หลังจากอัดขึ้นรูปแบบ disc หรือ อาจจะใช้วิธีการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของช่องของบล็อกอัดสารก็ได้ บันทึกค่าเป็น ϕ_1
2. นำชิ้นงานของสารตัวอย่างไปผ่านการเผาซินเตอร์
3. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานที่ผ่านการเผาแล้ว บันทึกค่าเป็น ϕ_2
4. นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าความหดตัวตามสมการที่ 2.32

$$\text{ค่าความหดตัว} = \frac{(\phi_2 - \phi_1)}{\phi_1} \times 100 \qquad (2.32)$$

เมื่อ ϕ_1 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนการเผาซินเตอร์ (mm)

ϕ_2 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานหลังการเผาซินเตอร์ (mm)

2.11.4 วิธีการหาค่าความพรุน (Porosity)

วิธีการหาค่าความพรุน สามารถทำได้โดย

1. นำเม็ดสารที่ผ่านการซินเตอร์แล้ว แล้วนำไปชั่งสารโดยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. นำเม็ดสารไปต้มในบีกเกอร์ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำเข้าไปแทนที่อากาศในเม็ดสาร จนกระทั่งอิ่มตัว
3. ปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิของห้องในน้ำ
4. จากนั้นนำสารตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว ไปชั่งน้ำหนักในอากาศโดยเครื่องชั่งละเอียดอีกครั้ง
5. นำน้ำหนักที่ได้จากครั้งแรก (W_1) และครั้งที่ 2 (W_2) ไปคำนวณหาค่า porosity จากสูตร

$$\text{ร้อยละของความพรุนโดยน้ำหนัก} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \qquad (2.33)$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักของเม็ดสารตัวอย่างที่ผ่านการอบให้แห้งแล้ว (g)

W_2 คือ น้ำหนักของเม็ดสารตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (g)

2.11.5 วิธีการหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative Permittivity)

โดยการใช้เครื่องวัดค่า capacitance ทำการวัดค่า C แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า relative permittivity (ε_r) โดยใช้สมการที่ 2.34

$$C = \varepsilon_o \varepsilon_r \left(\frac{A}{d} \right) \qquad (2.34)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)

d คือ ความหนา (m^2)

ε_o คือ 8.85×10^{-12} (F / m)

C คือ ค่าความจุไฟฟ้า (F)

2.11.6 วิธีการหาค่า Resonance frequency (f_r) และ Antiresonance frequency (f_a)

เป็นวิธีการทดลอง เพื่อหาค่าของ f_r , f_a โดยได้อาศัยแนวคิดจากการที่สารจะเปลี่ยนแปลงค่าของอิมพิแดนซ์ของเม็ดสารตัวอย่างที่ตอบสนองต่อค่าของสนามไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ไม่เท่ากัน โดยค่าอิมพิแดนซ์ของสารตัวอย่างจะมีค่า minimum ที่ความถี่เรโซแนนซ์ และสารตัวอย่างจะมีค่าของอิมพิแดนซ์ที่ maximum ที่ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ โดยมีวิธีการวัด คือ

1. นำสารตัวอย่างที่ได้จากการโพลแล้วมาต่อกับตัวต้านทานภายนอก (ค่าสูง) และเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ (frequency generator) โดยวงจรอนุกรม
2. ต่อเครื่อง frequency counter คล่อมเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่เพื่อใช้อ่านค่าของความถี่
3. ต่อเครื่อง oscilloscope คล่อมสารตัวอย่างเพื่อใช้ในการสังเกตค่าการตอบสนองสัญญาณความถี่ของเม็ดสารตัวอย่าง
4. เปลี่ยนค่าความถี่ที่ป้อนให้แก่วงจรโดยปรับที่ตัวกำเนิดสัญญาณความถี่แล้วสังเกตค่าที่ปรากฏบนจอ oscilloscope
5. บันทึกค่าความถี่ที่ทำให้สัญญาณที่ปรากฏบนจอ oscilloscope มีค่า minimum ให้เป็น f_r และ ความถี่ที่ทำให้สัญญาณบนจอ oscilloscope มีค่า maximum เป็น f_a

2.11.7 วิธีการหาค่า Dielectric Strength

ค่า dielectric strength มีประโยชน์ในการพิจารณาเพื่อหาค่าของสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการโพลสาร โดยที่ได้สารที่มีคุณภาพดีที่สุดและสารไม่ถูกทำลาย สามารถหาค่าของ dielectric strength ได้โดย

1. นำเม็ดสารที่ผ่านกระบวนการเผาซินเตอร์แล้วมาขัดผิวให้เรียบแล้วทากาวเงินที่เม็ดสารทั้งสองด้านตรงข้ามกัน
2. ทำการต่อขั้วเม็ดสารตัวอย่างกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ที่มีวงจรการตัดไฟเมื่อเกิดการลัดวงจรทางไฟฟ้า
3. ทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งเม็ดสารตัวอย่างเกิดการ breakdown
4. บันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเป็นค่า break down voltage
5. สามารถคำนวณค่า dielectric strength จากค่า breakdown voltage ที่ได้หารด้วยค่าความหนาของเม็ดสารตัวอย่าง

2.11.8 วิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบแนวระนาบ (k_p)

ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบแนวระนาบ (Planar Coupling Coefficient, k_p) เป็นค่าๆหนึ่งที่สามารถบ่งชี้ถึงสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงพลังงาน สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 2.14 และใช้ค่า f_r , f_a ที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่า โดยมีข้อจำกัดที่ว่าการใช้สมการที่ 2.14 นี้ รูปร่างของสารตัวอย่างจะต้องมีลักษณะแบบ disc เท่านั้น

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University