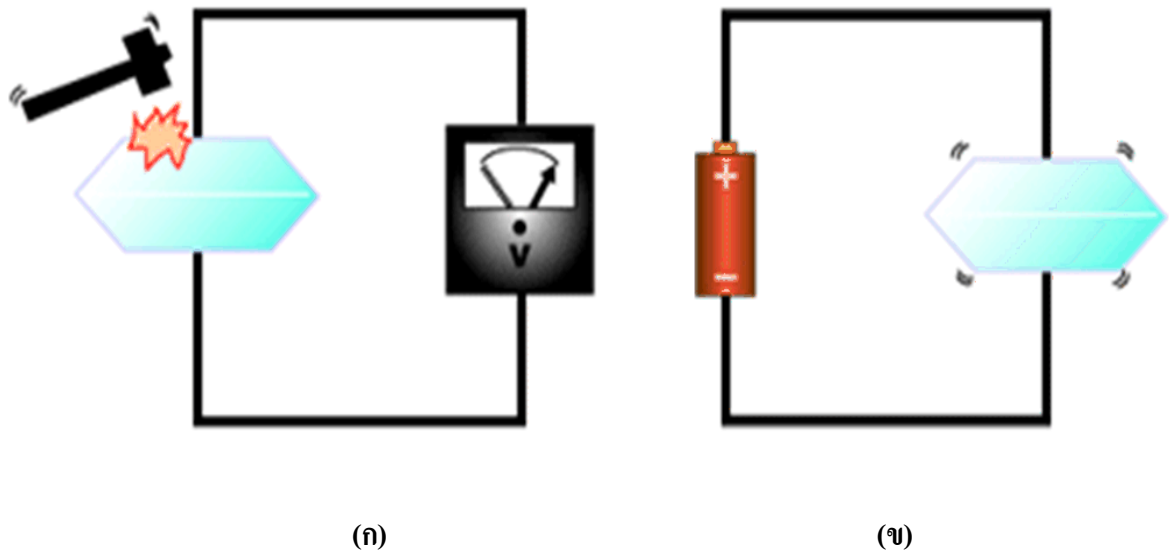


บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ของวัสดุถูกค้นพบในปี 1880 โดย Jacques และ Pierre Curie โดยการศึกษาอิทธิพลของแรงกดต่อประจุไฟฟ้าของผลึก เช่น ควอตซ์ (Quartz), ซิงค์เบลนด์ (Zinc blende) และ ทัวร์มาไลน์ (Tourmaline) เป็นต้น โดยชื่อ “piezo” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก หมายถึง “การกด” ซึ่งปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก คือ ปรากฏการณ์ที่วัสดุสามารถเกิดขั้วไฟฟ้า (electrical polarization) ขึ้นเนื่องจากความเครียด (strain) ในวัสดุ เมื่อได้รับความเค้น (Stress) เข้าไป โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง (direct piezoelectric effect)” ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ก) และในทางกลับกันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกแล้วสามารถเกิดความเครียดซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปได้นั้น จะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม (Converse piezoelectric effect)” ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ข)



รูปที่ 2.1 (ก) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรงและ (ข) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม

สมการพื้นฐานที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทั้ง 2 ปรากฏการณ์ โดยพิจารณาจากสมบัติทางไฟฟ้าและการยืดหยุ่นของวัสดุ คือ

$$D = dE + \epsilon^T E \quad (\text{ปรากฏการณ์โดยตรง}) \quad (2.1)$$

$$S = s^E T + dE \quad (\text{ปรากฏการณ์โดยอ้อม}) \quad (2.2)$$

โดยที่	D	คือ	ค่าการแทนที่ทางไฟฟ้า (dielectric displacement)
	T	คือ	ความเค้น (stress)
	E	คือ	สนามไฟฟ้า (electric field)
	S	คือ	ความเครียด (strain)
	d	คือ	สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient)
	s	คือ	ความหยุ่นของวัสดุ (ส่วนกลับของมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น)
	ϵ	คือ	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity)

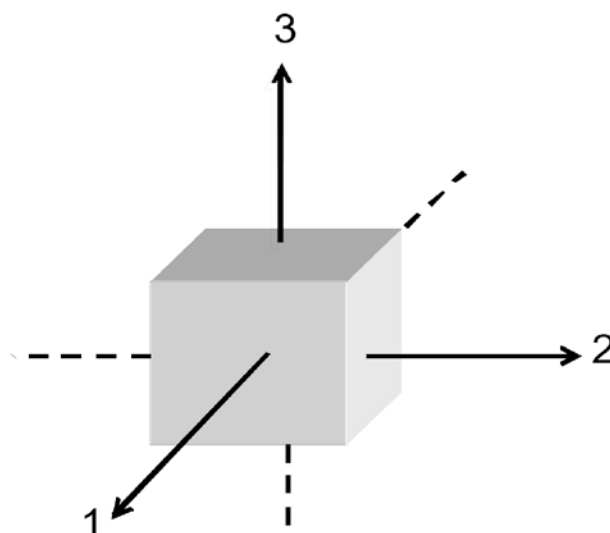
โดยตัวยกกำลังในสมการทั้งสองนี้แสดงถึงปริมาณที่เป็นค่าคงที่ ซึ่งในสมการที่ 2.1 บ่งบอกว่าความเค้นเป็นค่าคงที่ ส่วน s^E ในสมการที่ 2.2 นั้น มีสนามไฟฟ้าเป็นค่าคงที่จากรูปแบบของสมการทั้งสองนี้จะแสดงถึงความแตกต่างของการจัดเรียงตัวในวัสดุซึ่งจะสัมพันธ์กับสมบัติของวัสดุนั้นๆ นอกจากนี้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกยังมีสมบัติที่ขึ้นกับทิศทาง จึงต้องมีการระบุเป็นตัวห้อยไว้เพื่อแสดงถึงเงื่อนไขของสภาวะที่กำหนด เช่น d_{31} เป็นสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่แสดงถึงความสัมพันธ์ในการเกิดโพลาริเซชัน (ปรากฏการณ์โดยตรง) ในแนวตั้งฉากกับขั้วไฟฟ้าในทิศทาง 3 หรือในแนวตั้งของวัสดุ เมื่อมีการให้ความเค้นในทิศทาง 1 หรือด้านข้างของวัสดุ (ดังแสดงในรูปที่ 2.2) และค่า d_{33} ที่แสดงการเกิดโพลาริเซชันในทิศทาง 3 เมื่อมีการให้ความเค้นในทิศทาง 3 เป็นต้น

$$D = d_{33} T_3 \quad (\text{ปรากฏการณ์โดยตรง}) \quad (2.3)$$

$$S = d_{33} E_3 \quad (\text{ปรากฏการณ์โดยอ้อม}) \quad (2.4)$$

สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นต้องการสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและค่าสภาพยอมสัมประสิทธิ์ที่มีค่าสูง เพื่อนำไปใช้ในอุปกรณ์ที่มีการสั่นและการเคลื่อนไหว เช่น เครื่องสัญญาณสะท้อน (sonar) และเครื่องสำหรับรับฟัง (sounder)

โดยทั่วไปผลึกนั้นสามารถแบ่งกลุ่มตามสมมาตรได้ 32 กลุ่ม โดย 11 กลุ่มนั้นมีลักษณะสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง (Centrosymmetry) ส่วนที่เหลืออีก 21 กลุ่มนั้นมีลักษณะสมมาตรไม่ผ่านจุดศูนย์กลาง (Non-centrosymmetry) ซึ่งผลึกในกลุ่มนี้จะแสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก 20 กลุ่ม ส่วนอีก 1 กลุ่มไม่แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากผลึกจะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างที่มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลางเมื่อได้รับแรงกระทำ โดยผลึกเพียโซอิเล็กทริกทั้ง 20 กลุ่มนี้มีเพียง 10 กลุ่มที่สามารถเกิดโพลาไรซ์ตัวเอง (Spontaneous polarization)



รูปที่ 2.2 ทิศทางของโพลาไรเซชันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าและความเค้นแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

การเกิดโพลาไรเซชันนี้สามารถสลับขั้ว (switching) ไปในทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้เข้าไปได้ จะเรียกผลึกกลุ่มนี้ว่า เฟอโรโรอิเล็กทริก (ferroelectric) ซึ่งผลึกเฟอโรโรอิเล็กทริกนี้สามารถแบ่งย่อยตามโครงสร้างได้ดังนี้ กลุ่มโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ (Perovskite structure) กลุ่มโครงสร้างทังสเตนบรอนซ์ (Tungsten-bronze structure) และกลุ่มโครงสร้างชั้นของบิสมัท (Bismuth-layer structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

2.2 ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์

กลุ่มผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์นั้น เป็นกลุ่มผลึกที่มีการศึกษากันมากกลุ่มหนึ่ง โดยชื่อเพอโรฟสไกต์นั้นเป็นชื่อที่เรียกตามชื่อโครงการงานของแร่แคลเซียมไททานต (CaTiO_3) มีสูตรโครงสร้างทั่วไปเป็น ABO_3 เมื่อ A และ B เป็นไอออนบวก (cation) และมีขนาดไอออนที่แตกต่างกันมาก โดย A เป็นไอออนบวกที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยโครงสร้างเพอโรฟสไกต์นั้นแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

2.2.1 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ในอุดมคติ

โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ในอุดมคตินั้นเป็นโครงสร้างที่มีสมมาตรสูงและอยู่ในเฟสคิวบิกพาราอิเล็กทริกที่เกิดจากเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูงเกินอุณหภูมิคูรี ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งโครงสร้างเพอโรฟสไกต์นี้มีพื้นฐานมาจากหน่วยเซลล์แบบ face – center cubic closed packing (FCC) โดยไอออนบวก A ซึ่งมีขนาดรัศมีไอออนใหญ่จะจัดเรียงตัวกับไอออนลบของออกซิเจนเกิดเป็นโครงสร้างแบบ FCC และไอออนบวก B ซึ่งมีขนาดรัศมีไอออนเล็กจะเข้าไปอยู่ในช่องว่างทรงแปดหน้า (octahedral hold) ที่เกิดจากออกซิเจน สำหรับไอออน B นั้นจะมีเพียงไอออนลบของออกซิเจนล้อมรอบอยู่ 12 ไอออน และในแต่ละไอออนลบของออกซิเจนจะมีไอออนบวก A และ B ล้อมรอบอยู่ 4 และ 2 ไอออน ตามลำดับ

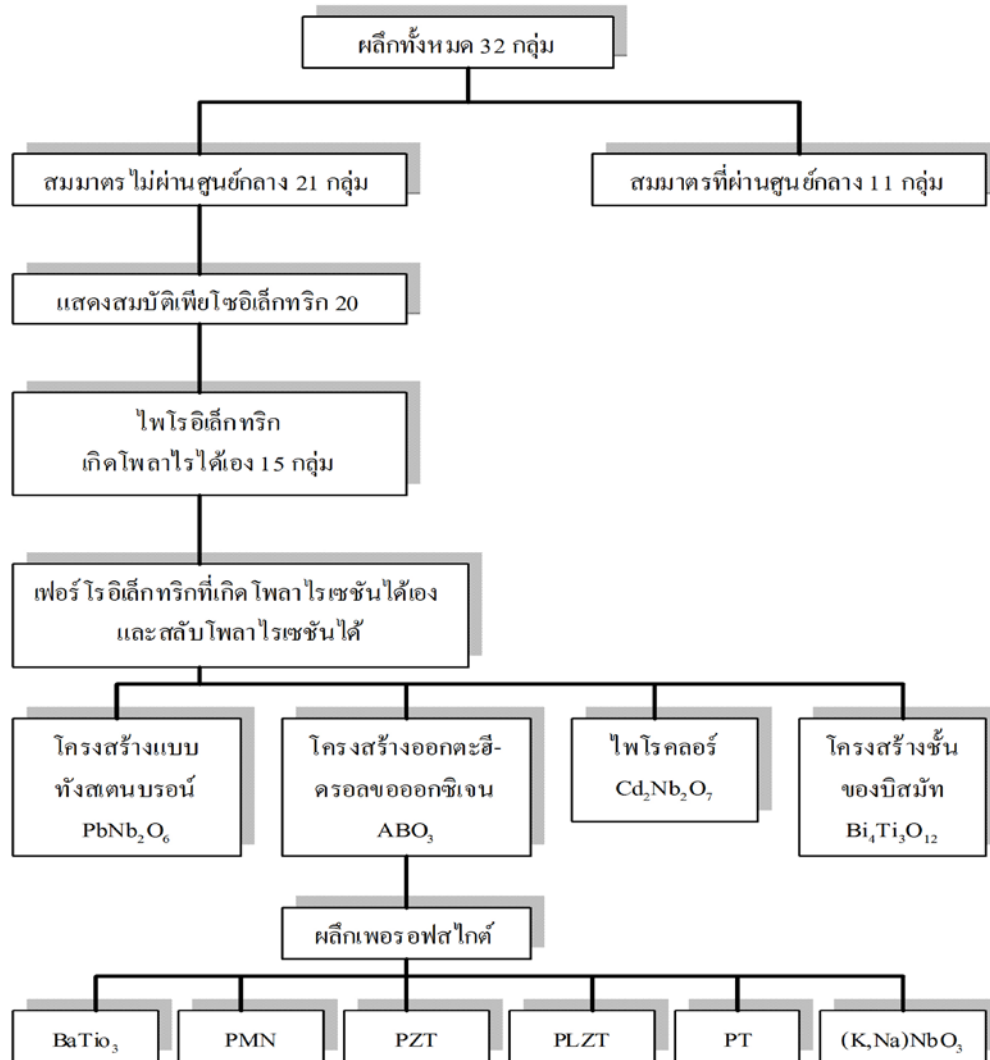
2.2.2 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์เชิงซ้อน

โครงสร้างเพอโรฟสไกต์เชิงซ้อน (complex perovskite structure) นี้แตกต่างจากโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ในอุดมคติ โดยตำแหน่ง A และ B นั้นมีไอออนบวกของธาตุได้หลายชนิด ซึ่งไอออนบวกที่ตำแหน่ง A มีรัศมีไอออนใหญ่กว่าไอออนบวกที่ตำแหน่ง B ที่อยู่ในช่องว่างออกตะฮีดรอลของออกซิเจน เช่น เลดแมกนีเซียมไนโอเบต ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$) เลดซิงค์แทนทาลเลต ($\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$) เลดโคบอลต์ไนโอเบต ($\text{Pb}(\text{Co}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$) เลดแบเรียมเซอร์โคเนต ($(\text{Pb}_{1-x}\text{Ba}_x)\text{ZrO}_3$) แบเรียมสตรอนเซียมไททานต ($(\text{Ba}_{0.60}\text{Sr}_{0.40})\text{TiO}_3$) และ เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานต ($(\text{Pb}_{1-x}\text{La}_{2x/3})(\text{Zr}_{1/y}\text{TiO}_y)\text{O}_3$) เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างเพอโรฟสไกต์เชิงซ้อนสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

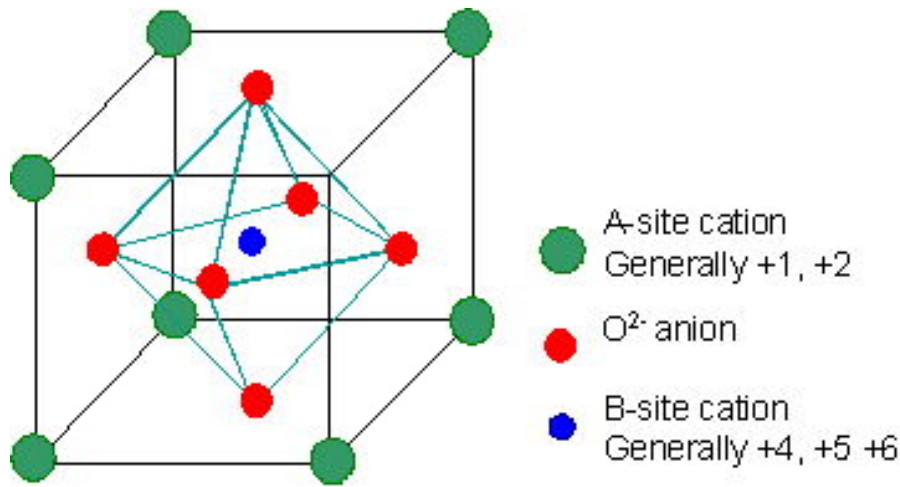
1. $(A'A'')\text{BO}_3$
2. $A(B'B'')\text{O}_3$
3. $A'A'B'B''\text{O}_3$

โดยไอออนบวกที่ตำแหน่ง A และ B นั้นจะจัดเรียงในหน่วยเซลล์ตามสัดส่วนที่เหมาะสม เช่น โครงสร้างเพอโรฟไกต์เชิงซ้อนแบบที่มีไอออนที่ตำแหน่ง B หลายชนิด $(A(B'B'')O_3)$ แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งการแทนที่ของไอออนที่ตำแหน่ง B นั้นสามารถเกิดขึ้นได้หลายแบบ

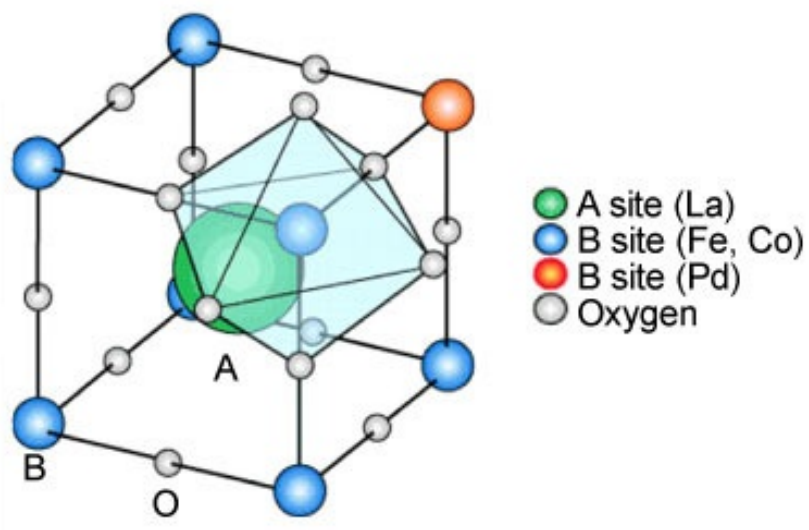
ในปี 1926 Goldschmidt ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของโครงสร้างเพอโรฟไกต์ โดยใช้ค่าทอลาเรนซ์แฟกเตอร์ (tolerance factor หรือ t) โดยอ้างถึงโครงสร้างเพอโรฟไกต์ในอุดมคติว่าไอออนบวก B นั้นจะต้องมีขนาดพอดีกับช่องว่างทรงแปดหน้าของออกซิเจนและไอออนบวก A จะต้องมีขนาดพอดีกับช่องว่างระหว่างทรงแปดหน้าของออกซิเจน ดังรูปที่ 2.6



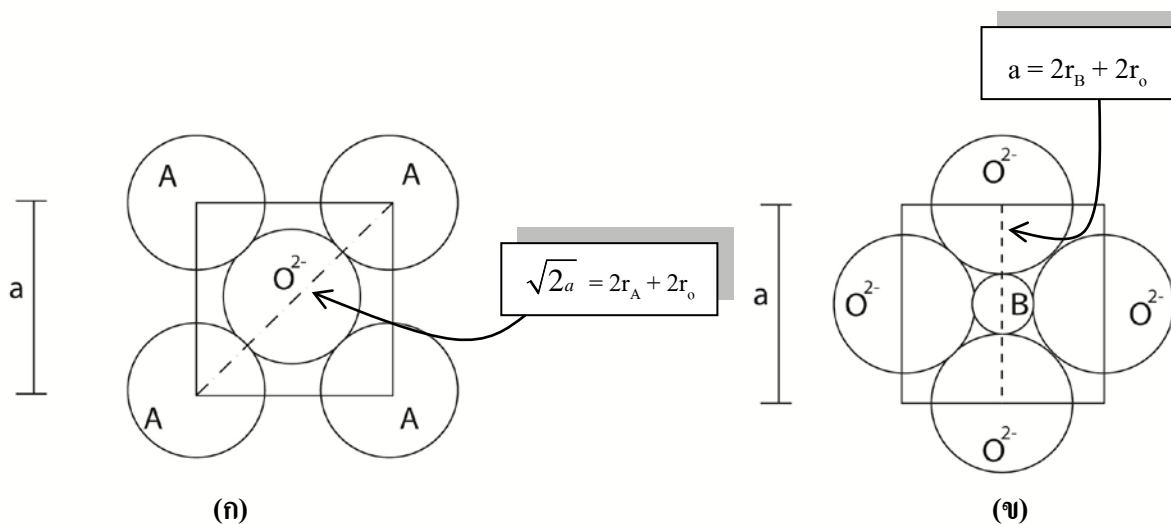
รูปที่ 2.3 แผนผังแสดงการแบ่งกลุ่มของผลิตภัณฑ์โดยการใช้พื้นฐานสมมาตรของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.4 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ในอุดมคติ โดยไอออนบวก B ซึ่งมีขนาดเล็กจะอยู่ในช่องว่างทรงแปดหน้าของไอออนออกซิเจน และไอออนบวก A ซึ่งมีขนาดใหญ่จะอยู่ที่มุมทั้งแปดของหน่วยเซลล์



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างเพอโรฟสไกต์เชิงซ้อนที่มีไอออนที่ตำแหน่ง B หลายชนิด



รูปที่ 2.6 ภาพตัดขวางของหน่วยเซลล์เพอโรฟไกต์ในอุดมคติ (ABO_3) ใน (ก) ระนาบ (100) และ (ข) ระนาบ (200)

ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีไอออนได้ ดังนี้

จากระนาบ (100) จะได้
$$\sqrt{2}a = 2r_A + 2r_O \quad (2.5)$$

จากระนาบ (200) จะได้
$$a = 2r_B + 2r_O \quad (2.6)$$

จากสมการ 2.5 และ 2.6 จะได้
$$r_A + r_O = \sqrt{2}a (2r_B + 2r_O) \quad (2.7)$$

โดยที่ r_A, r_B, r_O คือ รัศมีไอออนของไอออน A B และออกซิเจนตามลำดับ

A คือ แลตทิซพารามิเตอร์ (lattice parameter)

จากสมการที่ 2.7 สามารถอธิบายถึงความเสถียรของโครงสร้างเพอโรฟไกต์อื่นๆ ได้ด้วยค่าทอลาเรนซ์แฟคเตอร์ (t) ดังสมการ

$$t = \frac{r_A + r_O}{\sqrt{2}(r_B + r_O)} \quad (2.8)$$

ค่า t นี้เป็นตัวบ่งชี้การบิดเบือนโครงสร้างเพอรอฟไกต์ในอุดมคติได้ โดยโครงสร้างเพอรอฟไกต์ที่เสถียรจะมีค่า t อยู่ในช่วง $0.95 < t < 1.06$ ถ้าค่า $t = 1$ แสดงว่ามีโครงสร้างเหมือนกับโครงสร้างเพอรอฟไกต์ในอุดมคติ ซึ่งจะเรียกว่าเพอรอฟไกต์สมบูรณ์ (perfect perovskite) เช่น สทรองเนียมไททานเนต (SrTiO_3) เป็นต้น หาก $t > 1$ แสดงว่าขนาดไอออนบวก B มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างทรงแปดหน้าทีเข้าไปอยู่ทำให้โครงสร้างที่ได้มีขั้วเกิดขึ้น เช่น แบเรียมไททานเนต (BaTiO_3) เป็นต้น แต่ถ้า $t < 1$ แสดงว่าไอออนบวก A มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับช่องว่างระหว่างทรงแปดหน้า ทำให้ไอออนบวก A ไม่สามารถสร้างพันธะกับไอออนของออกซิเจนได้ทั้ง 12 ไอออน เช่น แคลเซียมไททานเนต (CaTiO_3) เป็นต้น ในกรณีที่ t มีค่าน้อยมากๆ ไอออนบวก A อาจจะสามารถสร้างพันธะกับไอออนของออกซิเจนได้เพียง 6 ไอออน เช่น ลิเทียมไนโอเบต (LiNbO_3) เป็นต้น โดยปกติโครงสร้างเพอรอฟไกต์ที่มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล จะมีค่า $t > 0.98$ และจะมีโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอลเมื่อ $t < 0.98$ นอกจากนี้สามารถทำนายระบบผลึกของโครงสร้างเพอรอฟไกต์ของสารประกอบต่างๆ ได้จากแผนภาพเฟส

2.3 วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริกถูกค้นพบครั้งแรกโดย J. Valasek ในปี ค.ศ. 1921 ในผลึกเชิงเดี่ยว (Single crystal) ของเกลือโรเชลล์ (Rochelle salt) ซึ่งปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริก คือ ปรากฏการณ์ของผลึกที่สามารถเกิดโพลาริเซชันได้เอง แม้ว่าไม่ได้ถูกเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้าภายนอก และโพลาริเซชันนี้สามารถสลับขั้ว (switching) ได้ โดยการให้สนามไฟฟ้าภายนอกที่เหมาะสม วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ เฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ (normal ferroelectric หรือ FE) แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก (anti ferroelectric หรือ AFE) และรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก (relaxor ferroelectric หรือ RFE) ซึ่งสมบัติโดยทั่วไปของเฟอร์โรอิเล็กทริกทั้ง 3 แบบมี ดังนี้

2.3.1 เฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ

2.3.1.1 การเกิดโพลาริเซชันได้เองและปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก

การเกิดโพลาริเซชันได้เองของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ (normal ferroelectric) นั้นพิจารณาได้จากปริมาณโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรหรือปริมาณประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนผิวให้ตั้งฉากกับทิศทางของโพลาริเซชัน อย่างไรก็ตามผลึกทั้ง 20 กลุ่มที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกนี้มีเพียง 10 กลุ่มเท่านั้น ที่สามารถเกิดโพลาริเซชันได้เอง โดยกลุ่มผลึกที่มีลักษณะการเกิดโพลาริเซชันได้เองที่ขึ้นกับอุณหภูมินั้น จะเรียกว่า “ปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก

(pyroelectric effect)” ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเทอมของค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric coefficient หรือ π) ดังสมการที่ 2.9

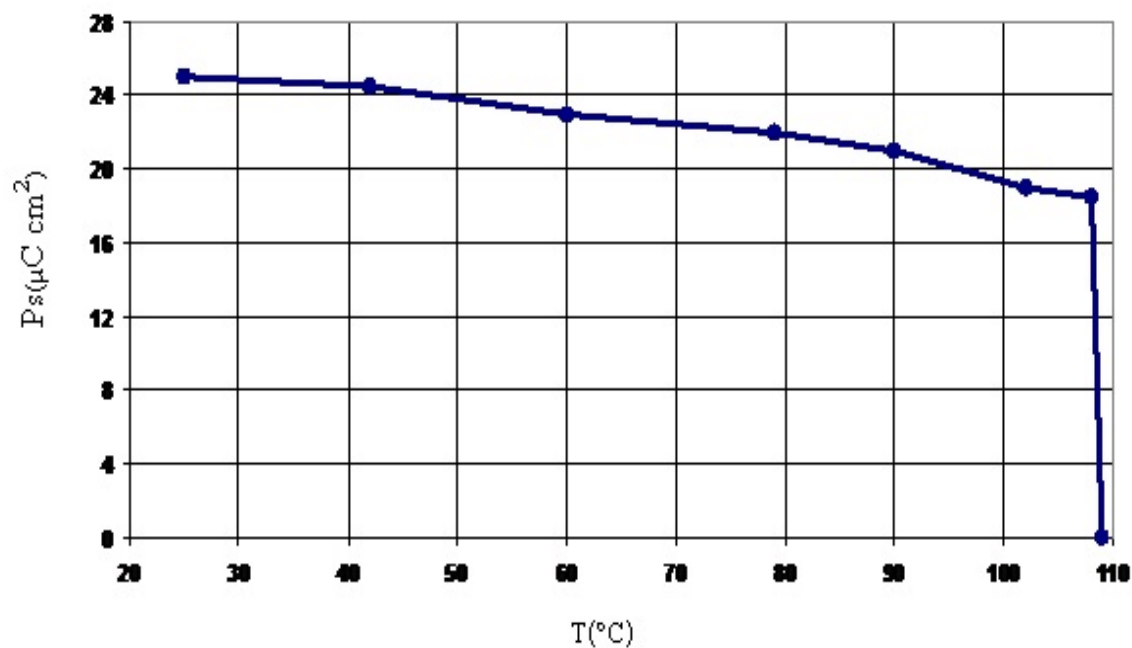
$$\Delta P_s = \pi \Delta T \quad (2.9)$$

โดยที่ ΔP_s คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงไปของการเกิดโพลาริเซชัน (มีหน่วยเป็น mC/cm^2)

ΔT คือ อุณหภูมิของผลึกที่เปลี่ยนแปลงไป (มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$)

π คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของไพโรอิเล็กทริก

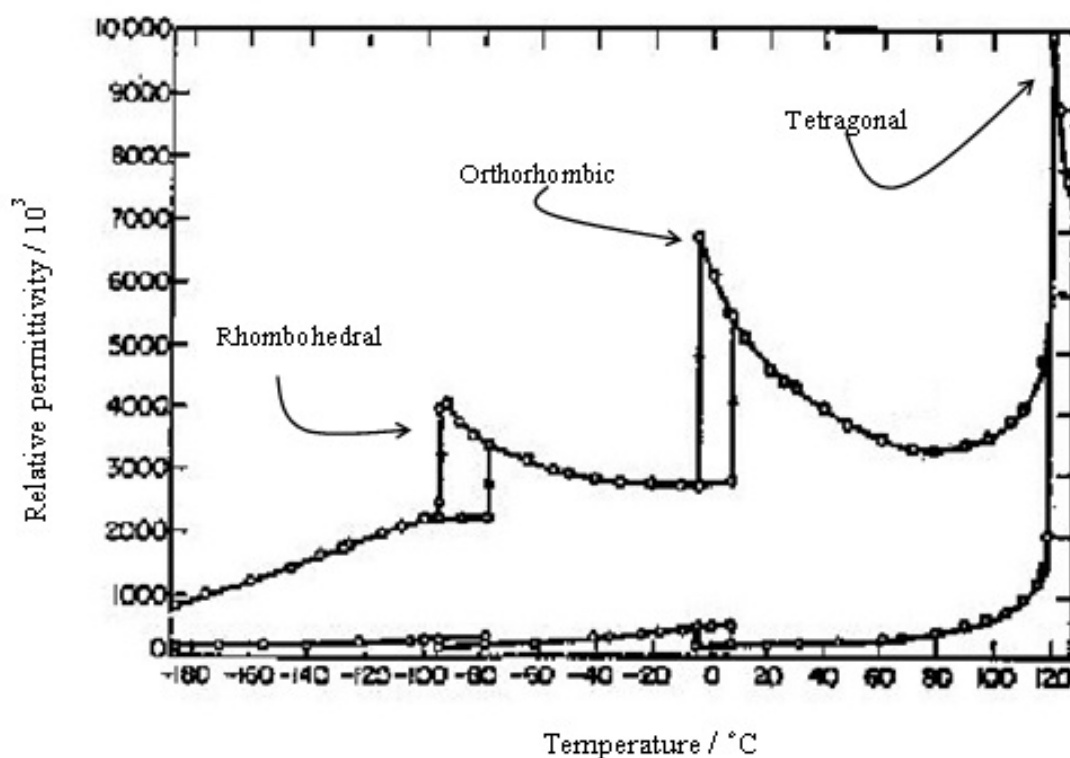
รูปที่ 2.7 นั้นเป็นตัวอย่างการเกิดปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริกในผลึก BaTiO_3 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการเกิดโพลาริเซชันนั้นจะลดลงและจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิของผลึกมีค่ามากกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature หรือ T_C)



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณการเกิดโพลาริเซชันของผลึก BaTiO_3

2.3.1.2 อุณหภูมิและการเปลี่ยนเฟส

ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้นสามารถที่จะเกิดการเปลี่ยนเฟสได้หลายเฟสตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป โดยอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสของผลึก จะเรียกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส (phase transition temperature) ซึ่งถ้ามีการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริก (ไม่มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง) ไปเป็นควิบิกพาราอิเล็กทริก (มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง) จะเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสนี้ว่า อุณหภูมิคูรี (Curie temperature หรือ T_C) ซึ่งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity หรือ ϵ_r) ณ อุณหภูมิคูรีนั้นจะมีค่าสูงที่สุดโดยพิกของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้นจะมีลักษณะเป็นพีกแหลม (sharp peak) ไม่ขึ้นกับความถี่ ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นตัวอย่างการเปลี่ยนเฟสจากรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) ไปเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) และจากออร์โธโรมบิกไปเป็นเตตระโกนอล (tetragonal) ตามลำดับ และมีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ประมาณ 120°C โดยมีการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริกเตตระโกนอลไปเป็นพาราอิเล็กทริกที่



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) กับอุณหภูมิของผลึกแบเรียมไททานเตด (BaTiO_3)

โดยที่ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎคูรี-ไวส์ (Curie-Weiss law)

$$\epsilon = \epsilon_0 + C/(T-T_0) \quad (2.10)$$

โดยที่ ϵ คือ ค่าสภาพยอม (Permittivity) ของวัสดุที่ตรวจวัด

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (8.854×10^{-12} F/m)

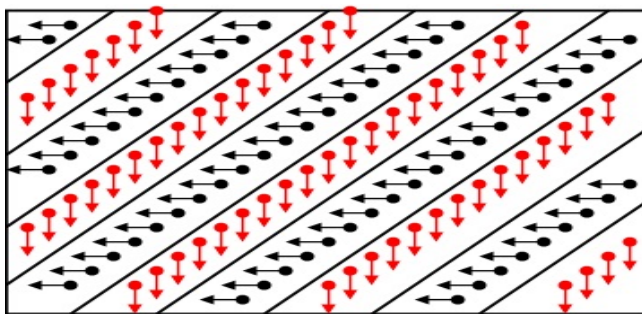
C คือ ค่าคงที่คูรี (Curie constant)

T_0 คือ อุณหภูมิคูรี (มีหน่วยเป็น °C)

T คือ อุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์ (มีหน่วยเป็น °C)

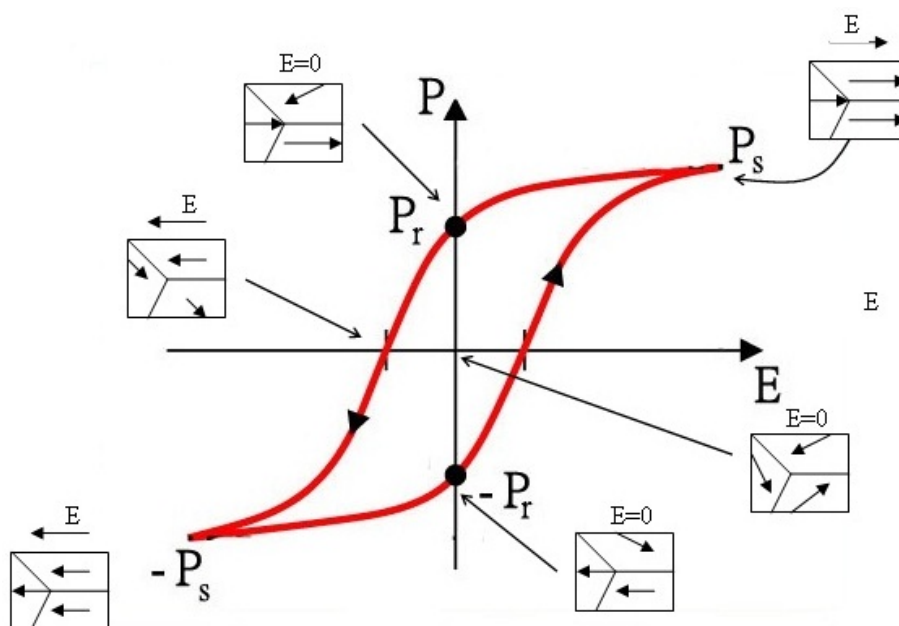
2.3.1.3 เฟอร์โรอิเล็กทริกโดเมนและวงวนฮีสเทอรีซิส

ในผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีบริเวณที่เกิดโพลาริเซชันในลักษณะที่เหมือนกัน และทิศทางของโดเมนวางตัวในทางเดียวกันซึ่งเรียกว่า เฟอร์โรอิเล็กทริกโดเมน (ferroelectric domain) ซึ่งอาจจะมีหนึ่งโดเมน (single domain) หรือ หลายโดเมน (multiple domain) ก็ได้ โดยรอยต่อระหว่างโดเมนจะเรียกว่า ผนังโดเมน (domain wall) แต่เมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอกที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการเลื่อนของผนังโดเมนและเกิดเป็นโดเมนเชิงเดี่ยวได้ และเมื่อผลึกได้รับสนามไฟฟ้าที่แรงพอก็จะสามารถสลับโพลาริเซชันในโดเมนได้ ซึ่งเรียกว่า การสลับขั้วโดเมน (domain switching) สำหรับผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้นจะมีขนาดของโดเมนอยู่ในระดับไมโครเมตรและมีลักษณะโดเมนดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะโดเมนของผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ

ความแตกต่างระหว่างผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกและผลึกไพโรอิเล็กทริกคือ ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้น สามารถสลับขั้วโพลาริเซชันตามทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้เข้าไปซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถตรวจสอบได้ด้วย การวัดวงวนฮิสเทอรีซิส ซึ่งลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้นจะมีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยม (square loop) แสดงดังรูปที่ 2.10 จากรูปเมื่อเพิ่มความเค้นของสนามไฟฟ้าในทางบวกจะทำให้โดเมนในผลึกพยายามจัดเรียงตัวในทิศทางตามสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปจนถึงจุดสูงสุดที่โดเมนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ปริมาณของการโพลาริเซชันจะมีค่าสูงสุด เรียกจุดนี้ว่า ค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว (saturated polarization หรือ P_{sat}) และเมื่อหยุดให้สนามไฟฟ้า ค่าโพลาริเซชันจะไม่ลดลงมาจนเหลือศูนย์ เนื่องจากบางโดเมนยังคงสภาพการโพลาริเซชันในทิศทางเดิมอยู่ (ทิศทางบวก) จึงทำให้เกิดเป็นค่าโพลาริเซชันคงเหลือ (remnant polarization หรือ P_r) และเมื่อเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม (ทิศทางลบ) จะทำให้ค่าโพลาริเซชันลดลง และจะเรียกความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ทำให้ค่าโพลาริเซชันเป็นศูนย์ว่า สนามไฟฟ้าบังคับ (coercive field หรือ E_c) และเมื่อความเข้มสนามไฟฟ้ามากกว่า E_c จะทำให้โดเมนเกิดการสลับทิศทางทำให้เกิดเป็นลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิสขึ้น โดยค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว ค่าโพลาริเซชันคงเหลือ และค่าสนามไฟฟ้าบังคับของเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้นจะมีค่าค่อนข้างสูง



รูปที่ 2.10 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ลูกศรแสดงทิศทางโพลาริเซชันในแต่ละโดเมน)

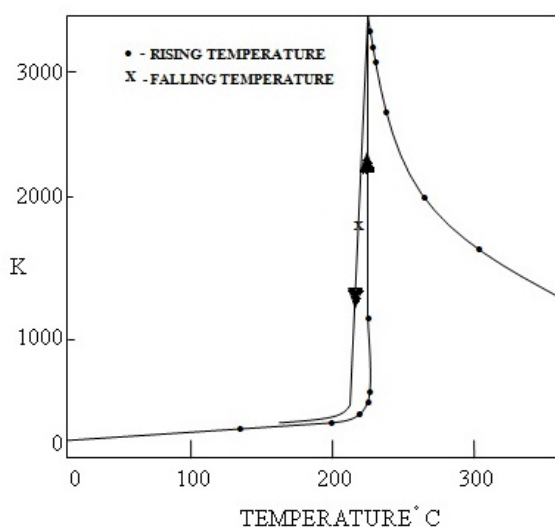
2.3.2 แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก

2.3.2.1 การเกิดโพลาริเซชันตัวเองและปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก

การเกิดโพลาริเซชันตัวเองของวัสดุแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นพิจารณาได้จากปริมาณโมเมนต์ขั้วคู่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรหรือปริมาณประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนพื้นผิวให้ตั้งฉากกับทิศทางของโพลาริเซชันได้เช่นเดียวกับเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ นอกจากนี้การเกิดโพลาริเซชันตัวเองนั้นยังขึ้นกับอุณหภูมิโดยมีการเกิดปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก ซึ่งสามารถใช้สมการที่ 2.9 อธิบายได้เช่นกัน เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการเกิดโพลาริเซชันนั้นจะค่อยๆลดลงและจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิของผลึกมีค่ามากกว่าอุณหภูมิคูรี

2.3.2.2 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส

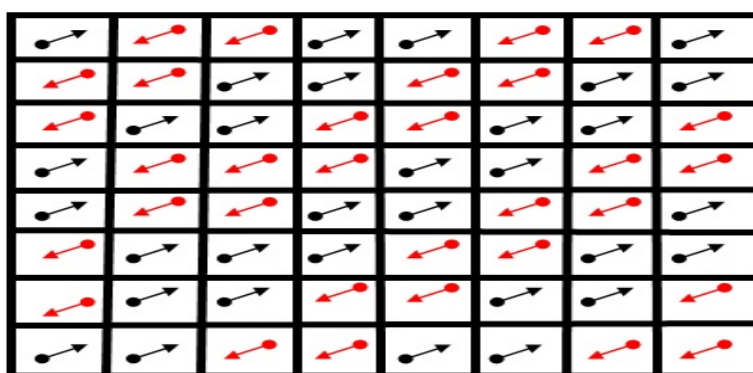
ผลึกแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นสามารถที่จะเกิดการเปลี่ยนเฟสได้หลายเฟสตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเช่นเดียวกับเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนเฟสจากแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริก จะเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสนี้ว่า อุณหภูมิคูรี ซึ่งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ณ อุณหภูมิคูรีนั้นจะมีค่าสูงที่สุด โดยพีคของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของผลึกแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีลักษณะเป็นพีคแหลมคล้ายกับพีคของเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎคูรี-ไวส์ (สมการที่ 2.10) แต่ไม่ขึ้นกับความถี่เช่นเดียวกับเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของผลึก PZ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

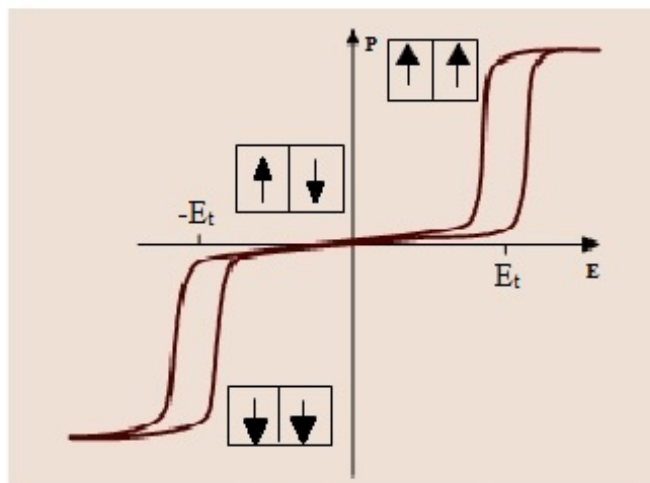
2.3.2.3 เฟอโรโรอิเล็กทริกโดเมนและวงวนฮิสเทอรีซิส

สำหรับเฟอโรโรอิเล็กทริกโดเมนของแอนติเฟอโรโรอิเล็กทริกนั้นจะมีทิศทางของโดเมนที่ตรงข้ามและสลับกันไปทั้งผลึก ส่งผลให้ค่าโพลาไรเซชันรวมของผลึกเป็นศูนย์ แต่เมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอกที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการสลับขั้วโดเมนได้เช่นกัน โดยลักษณะ โดเมนและตัวอย่างของโดเมนของแอนติเฟอโรโรอิเล็กทริกนั้นแสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งขนาดโดเมนของแอนติเฟอโรโรอิเล็กทริกนั้นจะมีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตร เช่นเดียวกับเฟอโรโรอิเล็กทริกแบบปกติ



รูปที่ 2.12 ลักษณะ โดเมนของผลึกแอนติเฟอโรโรอิเล็กทริก

สำหรับลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของแอนติเฟอโรโรอิเล็กทริกนั้นจะมีลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสคู่(double hysteresis loop) แสดงดังในรูปที่ 2.13 จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุแอนติเฟอโรโรอิเล็กทริกจะเหนี่ยวนำให้โพลาไรเซชันของแอนติเฟอโรโรอิเล็กทริกเป็นไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า จนปริมาณสนามไฟฟ้าที่ให้สูงเกินค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต (ตำแหน่ง ข) ค่าโพลาไรเซชันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าโพลาไรเซชันอิ่มตัว (ตำแหน่ง ค) โดยทิศทางของโพลาไรเซชันนั้นจะมีทิศทางไปในทางเดียวกัน จากนั้นเมื่อลดปริมาณของสนามไฟฟ้าที่ให้ค่าโพลาไรเซชันจะค่อยๆ ลดลงจนถึงค่าสนามไฟฟ้าค่าหนึ่ง (ตำแหน่ง ง) ค่าโพลาไรเซชันจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (ตำแหน่ง จ) จากนั้นค่าโพลาไรเซชันจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ค่าโพลาไรเซชันของผลึกก็จะเป็นศูนย์ (ตำแหน่ง ก) ผลึกนั้นจะกลับสู่ลักษณะการโพลาไรแบบตรงกันข้ามโดยสมบูรณ์อีกครั้ง และเมื่อให้สนามไฟฟ้าที่เป็นลบก็จะเกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกันซึ่งแอนติเฟอโรโรอิเล็กทริกชนิดแรกที่ถูกค้นพบคือ PZ



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้า (P-E hysteresis) ของผลึกแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก

PZ ถูกค้นพบโดย Sawaguchi และคณะวิจัย แสดงสมบัติเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องมีโครงสร้างเป็นออร์โทโรมบิก โดยมี $a = 5.87\text{\AA}$, $b = 11.74\text{\AA}$ และ $c = 8.20\text{\AA}$ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปถึง $236\text{ }^{\circ}\text{C}$ (อุณหภูมิคูรีของ PZ) นั้น PZ จะเปลี่ยนสมบัติจากแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริก (paraelectric หรือ PE) และเปลี่ยนโครงสร้างจากออร์โทโรมบิกไปเป็นคิวบิก พร้อมทั้งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.14 นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถเกิดเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่อยู่ระหว่างเฟสแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกกับพาราอิเล็กทริกได้แต่เป็นช่วงที่แคบมาก โดยจะเกิดในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีประมาณ $10\text{-}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยการเปลี่ยนเฟสจากแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติของ PZ นั้นสามารถชักนำให้เกิดได้โดยให้กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิหรือความดันอุทกสถิต (hydrostatic pressure) ที่สูงพอ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณอย่างมาก เนื่องจากหน่วยเซลล์ของเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้นจะมีขนาดใหญ่กว่าหน่วยเซลล์ของเฟสแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกทำให้เกิดความเครียดตามยาว (longitudinal strain) ขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนเฟสจากแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติของ PZ นี้เป็นลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บพลังงาน แต่ช่วงอุณหภูมิที่เกิดเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินี้จะขึ้นกับสัดส่วนองค์ประกอบและเงื่อนไขที่ใช้ในเกิดขึ้นของสารตัวอย่าง ซึ่งพบว่าเกิดเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติได้ดีในสารละลายของแข็งที่มี

PZ เป็นองค์ประกอบแต่ช่วงอุณหภูมิที่เกิดเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินี้จะแคบลงเมื่อมีปริมาณของ PZ เพิ่มสูงขึ้น

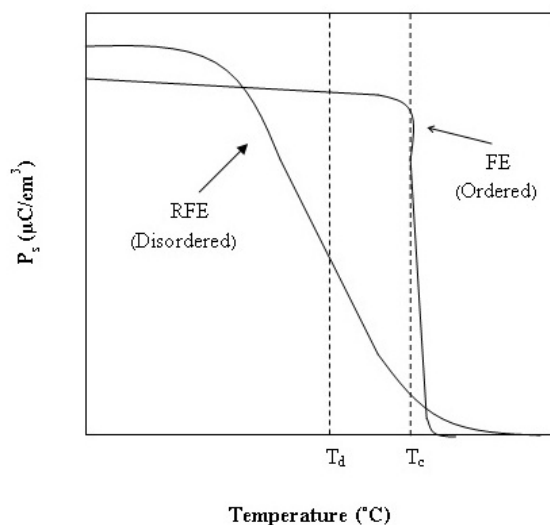
เซรามิก PZ นี้สามารถเตรียมได้ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง จากสารประกอบออกไซด์คือ PbO และ ZrO_2 โดยใช้อุณหภูมิสูง โดยเฟสเดี่ยวของ PZ นั้นจะเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า $1200^{\circ}C$ และผงของ PZ นั้นสามารถเตรียมได้ด้วยกระบวนการทางเคมี

2.3.3 รีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก

2.3.3.1 การเกิดโพลาริเซชันได้เองและปรากฏการณ์ไฟโรอิเล็กทริก

การเกิดโพลาริเซชันได้เองของวัสดุรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก (relaxor ferroelectric) นั้นพิจารณาได้จากปริมาณ โมเมนต์ขั้วคู่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเช่นกัน และค่าโพลาริเซชันของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอีกด้วย แต่จะต่างจากเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติและแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยค่าโพลาริเซชันของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะค่อยๆลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แม้ว่าอุณหภูมิจะสูงเกินอุณหภูมิโพลาริเซชัน (Temperature of depolarization หรือ T_d) ก็ยังมีค่าโพลาริเซชันอยู่และจะค่อยๆลดลงจนค่าโพลาริเซชันเป็นศูนย์ โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาริเซชันเทียบอุณหภูมิของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก และเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้น แสดงดังรูปที่

2.14



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาริเซชันเทียบอุณหภูมิของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก และเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ

2.3.3.2 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส

รีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะค่อยๆ เกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นพาราอิเล็กทริกเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสนี้ว่า อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส ซึ่งต่างจากเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติและแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่เรียกอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นพาราอิเล็กทริกว่า อุณหภูมิคูรี โดยพิกของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีลักษณะเป็นพีคฐานกว้าง (board peak) คล้ายระฆังคว่ำ ซึ่งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิ และสามารถอธิบายได้ด้วยกฎคูรี-ไวส์กำลังสอง (Curie-Weiss square law) ดังสมการที่ 2.11

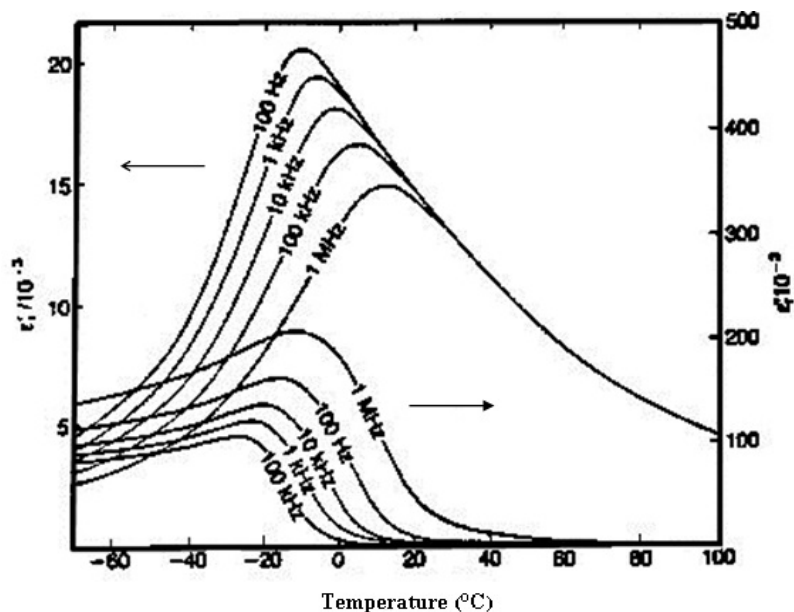
$$1/\epsilon = 1 + (T - T_m)^2 / 2\delta^2 \quad (2.11)$$

โดยที่ ϵ คือ ค่าสภาพยอม (Permittivity) ของวัสดุที่ตรวจวัด

δ คือ ค่าองศาของการแพร่ (Degree of diffuseness)

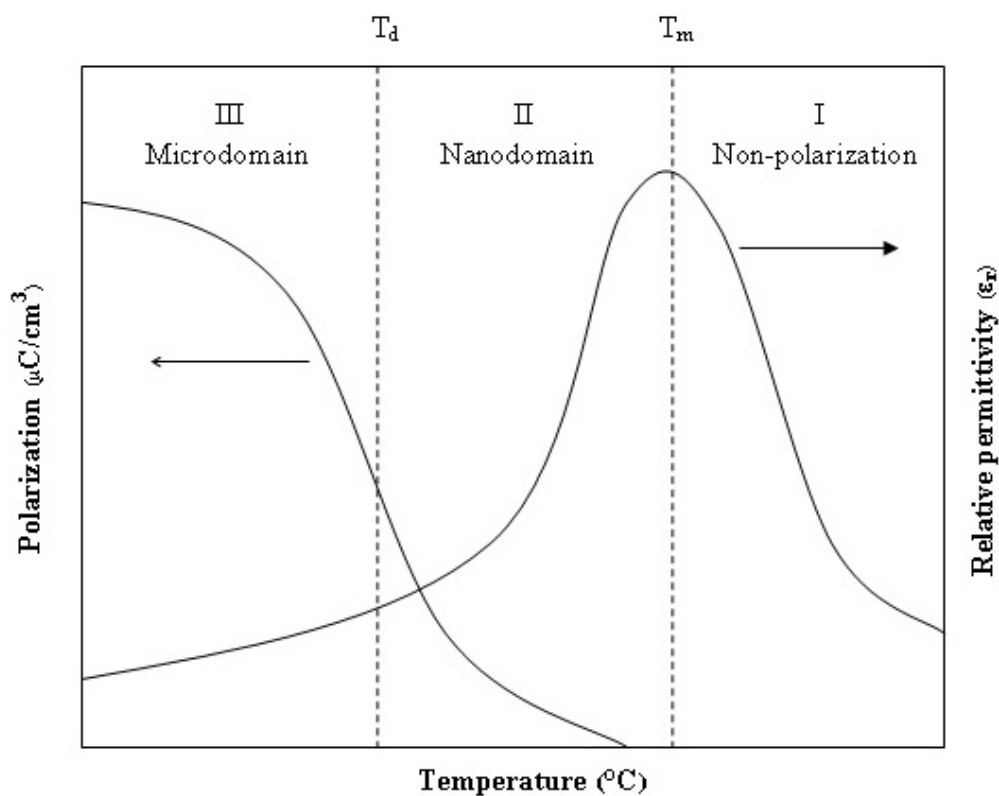
T_m คือ อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส (มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$)

T คือ อุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์ (มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$)



รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสาร PMN

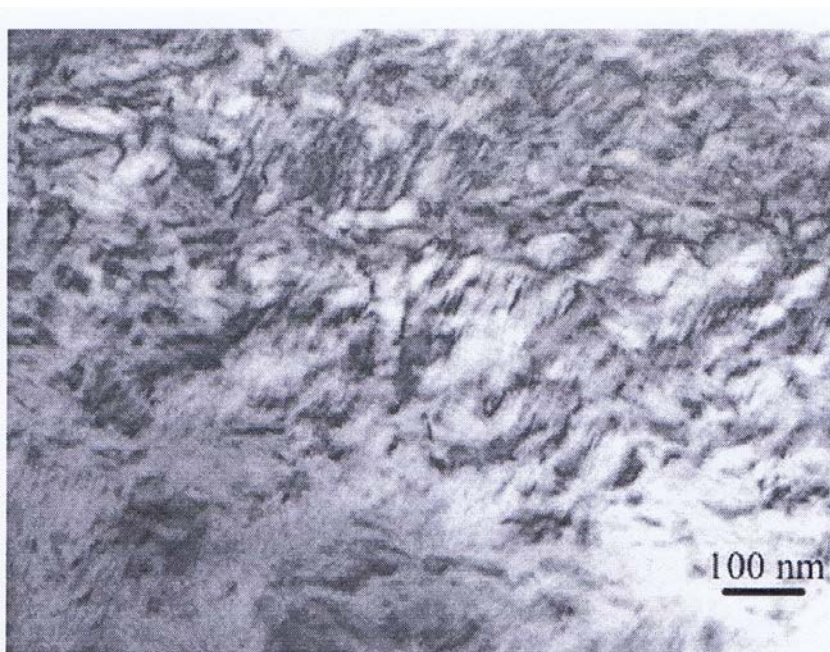
นอกจากนี้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะขึ้นกับความถี่ที่ได้รับ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของแต่ละองค์ประกอบที่ไม่เข้ากัน ตัวอย่างเช่น PMN มีความผิดปกติของตำแหน่ง B (B-site) ที่มีไอออนของแมกนีเซียมและไนโอเบียมเป็นองค์ประกอบ ซึ่งแต่ละองค์ประกอบจะมีการเปลี่ยนเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิแตกต่างกันส่งผลให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่ได้นั้นอยู่ในช่วงอุณหภูมิกว้างขึ้น ตัวอย่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของ PMN ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.15 และ 2.16 และเมื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าโพลาริเซชันเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะค่อยๆเพิ่มขึ้น ส่วนค่าโพลาริเซชันจะค่อยๆ ลดลงจนอุณหภูมิต่ำกว่า T_m ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่ค่าโพลาริเซชันนั้นมีค่าเป็นศูนย์ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิต่ำกว่า T_d ของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะต่ำกว่าอุณหภูมิต่ำกว่า T_m



รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาริเซชันและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เทียบอุณหภูมิของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก

2.3.2.3 เฟอร์โรอิเล็กทริกโดเมนและวงวนฮิสเทอรีซิส

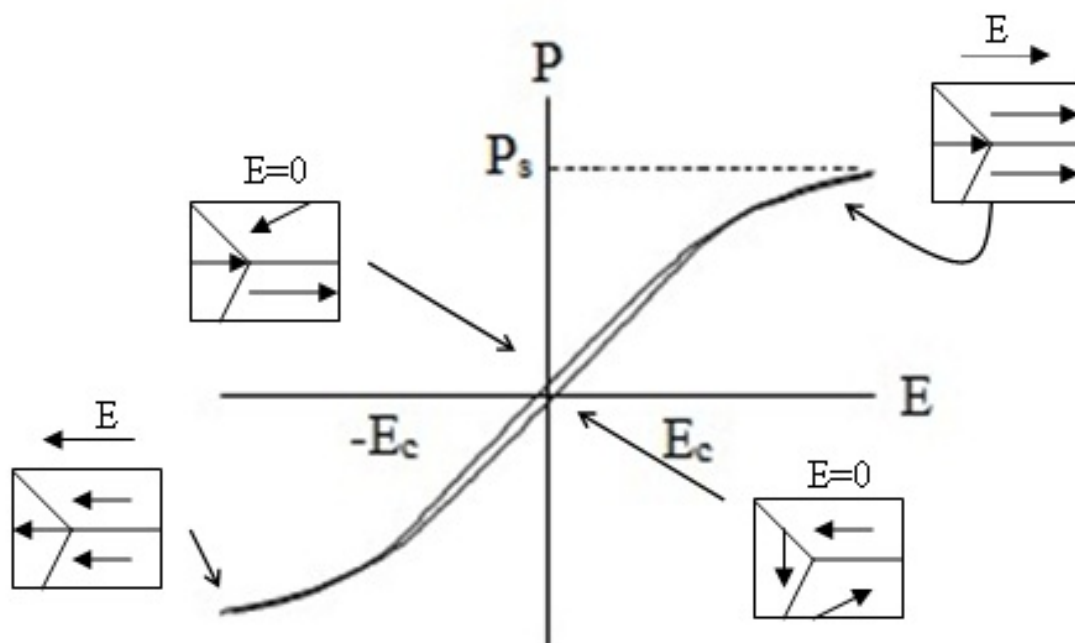
รีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกอีกแบบหนึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์เชิงซ้อน มีสูตรทั่วไปเป็น $Pb(B'B'')O_3$ โดย B' เป็นไอออนบวกที่มีประจุต่ำกว่าเช่น Mg^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} และ Co^{2+} เป็นต้น ส่วน B'' เป็นไอออนบวกที่มีประจุสูงกว่าเช่น Nb^{5+} , Ta^{5+} และ W^{5+} เป็นต้น ตัวอย่างเช่น $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (PMN), $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (PZN) และ $Pb(Sc_{1/2}Ta_{1/2})O_3$ (PST) เป็นต้น ซึ่งเฟอร์โรอิเล็กทริกโดเมนของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะเป็นนาโนโดเมน แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 นาโนโดเมนบนผิวผลึกรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกของ PZN-PZT

สำหรับวงวนฮิสเทอรีซิสของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสที่แคบ (slim hysteresis loop) แสดงดังรูปที่ 2.18 จากรูป เมื่อให้สนามไฟฟ้าในทางบวกแก่วัสดุรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก โดเมนในผลึกจะเกิดการจัดเรียงตัวเสถียรตามสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปจนถึงจุดสูงสุดที่โดเมนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ปริมาณของการโพลาไรเซชันจะมีค่าสูงสุด เรียกจุดนี้ว่า ค่าโพลาไรเซชันอิ่มตัว และเมื่อหยุดให้สนามไฟฟ้าค่าโพลาไรเซชันจะลดลงมาจนเกือบเป็นศูนย์ แต่ยังมี

บางโดเมนยังคงสภาพการโพลาไรเซชันในทิศทางเดิมอยู่ (ทิศทางบวก) จึงทำให้เกิดเป็นค่าโพลาไรเซชันคงเหลือ และเมื่อให้ค่าสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม (ทิศทางลบ) จะทำให้ค่าโพลาไรเซชันลดลงและเกิดปรากฏการณ์คล้ายกับการให้สนามไฟฟ้าทางบวกเกิดเป็นวงวนฮิสเทอรีซิสขึ้น โดยค่าโพลาไรเซชันคงเหลือและค่าสนามไฟฟ้าบังคับของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีค่าน้อยกว่าเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ



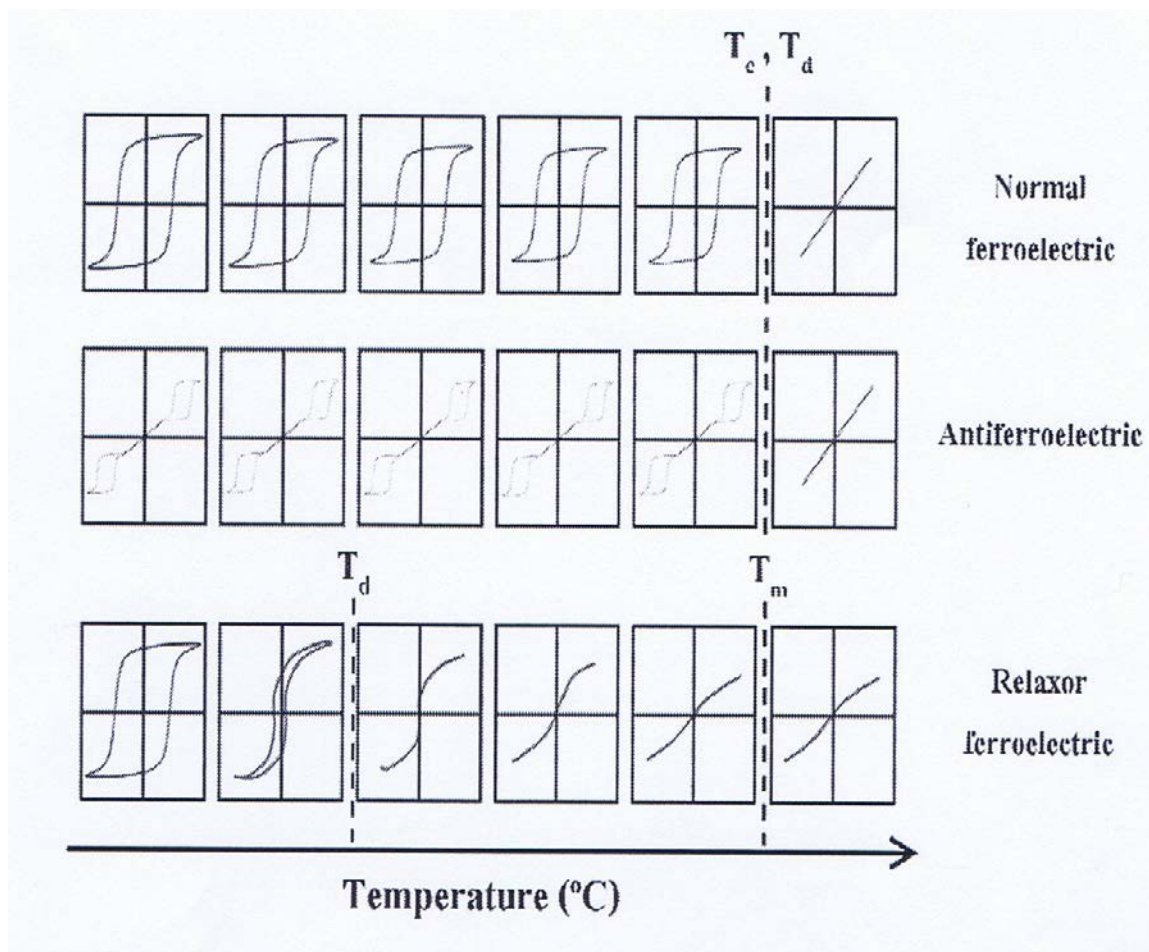
รูปที่ 2.18 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก

จากสมบัติดังกล่าวของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำเป็นตัวเก็บประจุ และยังมีการพัฒนาสมบัติดังกล่าวให้ดีขึ้น โดยนำสารรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกมาผสมกับสารประเภทอื่น เช่น เฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ เพื่อให้สมบัติที่โดดเด่นขึ้น เช่น เลดซิงค์ในโอเบต-เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZN-PZT) เป็นจนถึงทุกวันนี้ก็ตาม แต่ว่าในโอเบียม (Nb) และแทนทาลัม (Ta) นั้นเป็นธาตุในหมู่เดียวกันตามตารางธาตุ มีประจุเท่ากันและมีรัศมีไอออนใกล้เคียงกันมาก สารละลายของแข็งในระบบ PZnTa นั้นจึงเป็นระบบที่น่าสนใจเช่นกัน

ซึ่งสมบัติที่แตกต่างกันและลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสระหว่างเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก และรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นแสดงไว้ดังตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.20

ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างระหว่างสมบัติของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก และรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก

สมบัติของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก	เฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ	แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก	รีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก
1.ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับอุณหภูมิ	มีพีคลำดับที่ 1 และ 2 ลักษณะเป็นพีคแหลม ฐานแคบ	มีพีคลำดับที่ 1 และ 2 ลักษณะเป็นพีคแหลม ฐานแคบ	พีคมีลักษณะฐานกว้าง เกิดขึ้นที่อุณหภูมิคูรี
2.ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับความถี่	ขึ้นกับความถี่เพียงเล็กน้อย	ขึ้นกับความถี่เพียงเล็กน้อย	ขึ้นกับความถี่มาก
3.พฤติกรรมการเก็บประจุในช่วงพาราอิเล็กทริก $T > T_c$	เป็นไปตามกฎของ คูรี-ไวส์	เป็นไปตามกฎของ คูรี-ไวส์	เป็นไปตามกฎของ คูรี-ไวส์กำลังสอง
4.ค่าโพลาริเซชันคงเหลือ	มีค่าโพลาริเซชันคงเหลือมาก	มีค่าโพลาริเซชันคงเหลือ	มีค่าโพลาริเซชันคงเหลือน้อย
5.การกระเจิงของแสง	มีการกระเจิงของแสงในแต่ละทิศทางแตกต่างกันมาก	มีการกระเจิงของแสงในแต่ละทิศทางแตกต่างกันมาก	มีการกระเจิงของแสงในแต่ละทิศทางแตกต่างกันน้อย
6.การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	พบการแยกออกของสเปกตรัมรังสีเอกซ์เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนเฟสจากพาราอิเล็กทริกไปเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก	พบการแยกออกของสเปกตรัมรังสีเอกซ์เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนเฟสจากพาราอิเล็กทริกไปเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก	ไม่สามารถตรวจพบการแยกออกของสเปกตรัมรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนเฟสจากพาราอิเล็กทริกไปเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก
7.อุณหภูมิคูรี (T_c)	มีได้ค่าเดียว	มีได้ค่าเดียว	มีได้หลายค่าขึ้นอยู่กับความถี่

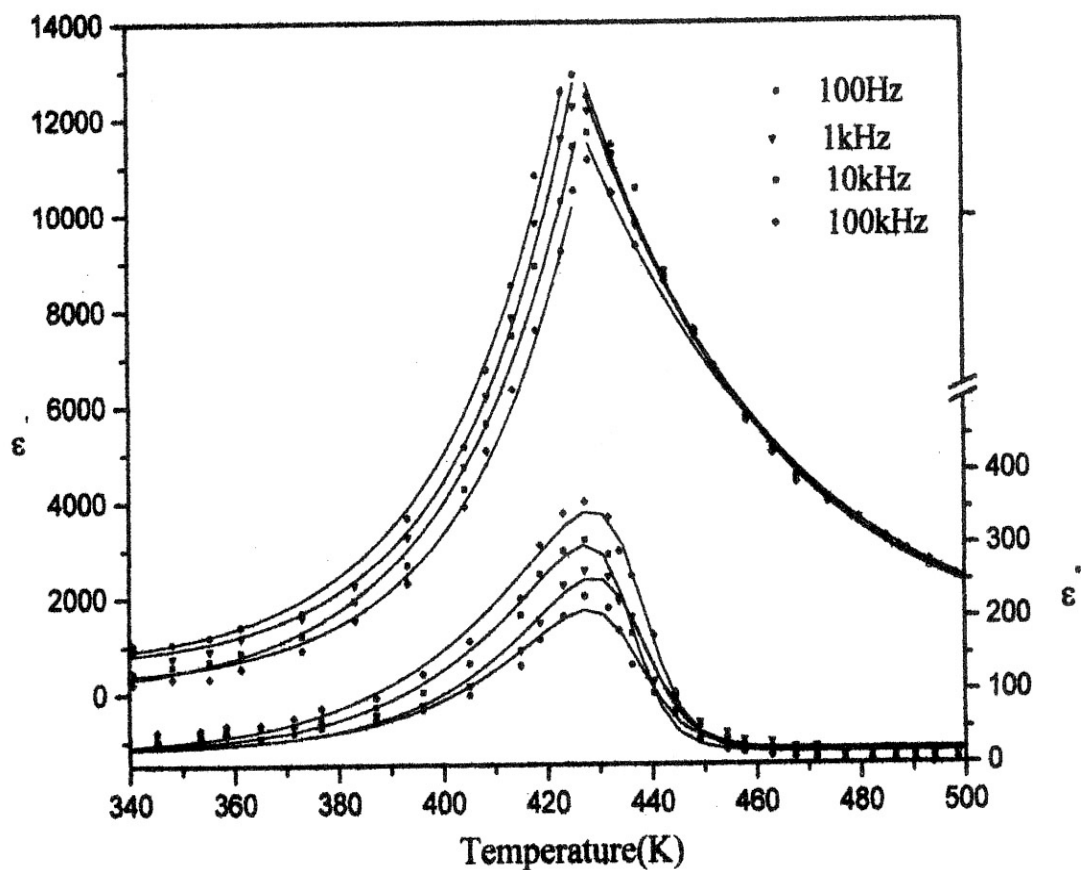


รูปที่ 2.19 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก และรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

2.4 เลดนิคเกิลไนโอเบต-เลดเซอร์โคเนต ($\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3$, PNN-PZ)

ในการผสมระหว่างสารที่มีสมบัติแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกและรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้น ยังมีข้อมูลที่จำกัด ซึ่งในปี ค.ศ. 2001 Singh และคณะ ทำการศึกษาสารในระบบนี้โดยมีองค์ประกอบระหว่าง PZ ที่เป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกและ PMN เป็นรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของรีแลกเซอร์ไปเป็นนอลมัลเฟอร์โรอิเล็กทริก และตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก พบว่าที่สัดส่วน $x = 0.5$ นั้นจะให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงมาก ดังรูปที่ 2.20 และมีพฤติกรรม

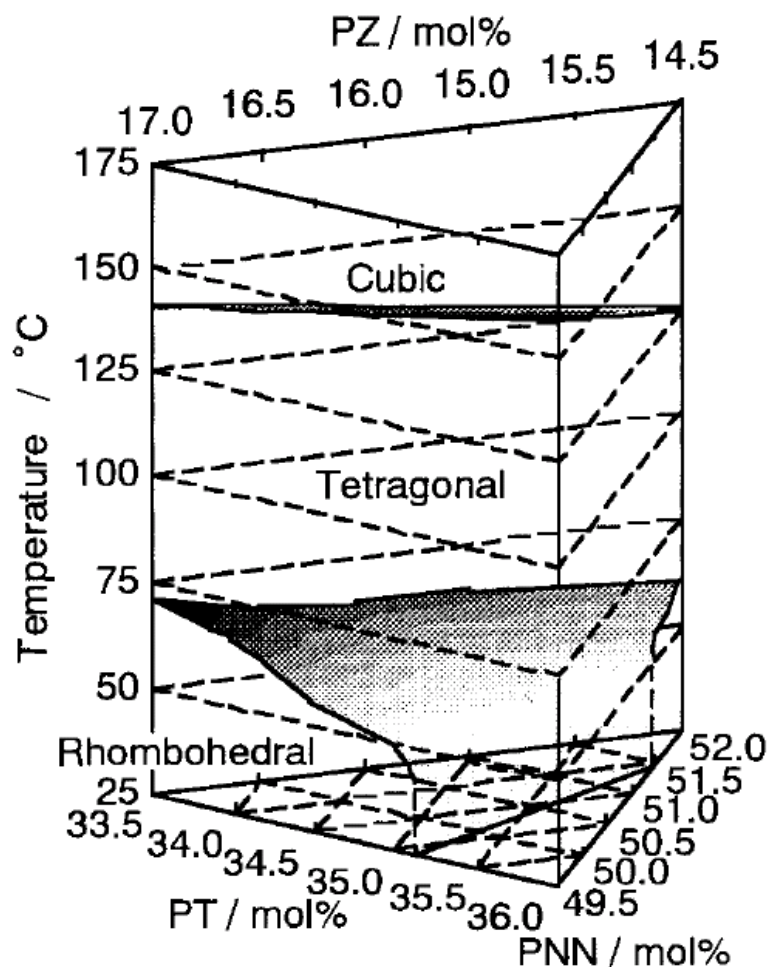
ของนอลมัลเฟอร์โรอิลีทริก ส่วนการผสมระหว่าง PZ และ PNN นั้นยังมีข้อมูลน้อยมากและสาเหตุนี้เองจึงเป็นจุดประสงค์หลักของงานวิจัยในครั้งนี้



รูปที่ 2.20 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ 0.5PMN-0.5PZ

ในงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวเนื่องกับการผสมที่ใช้ PZ และ PNN เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่แล้วจะเป็นทำการศึกษาสมบัติของสารในระบบ 3 องค์ประกอบของ PZ PT และ PNN โดยในปี ค.ศ. 1999 Kondo และคณะ ทำการศึกษาสมบัติไพโซอิเล็กทริกและตรวจหาเฟสรอยต่อที่เหมาะสม (MPB) ของสารระบบ PNN-PT-PZ ในสัดส่วน aPNN-bPT-cPZ ซึ่ง a อยู่ในช่วง 0.495-0.52 b อยู่ในช่วง 0.335-0.36 และ c อยู่ในช่วง 0.145-0.17 โดย $a + b + c = 1$ พบว่าสมบัติไพโซอิเล็กทริกดีที่สุดนั้นมีสัดส่วน a : b : c เป็น 50 : 34.5 : 15.5 ให้ โดยทำการตรวจสอบค่า k_{33} ได้มากกว่า 0.8 และมีการเปลี่ยนเฟสเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากรอมโบฮีดรอล (Rhombohedral) ไปเป็นเตตระโกนัล (Tetragonal) และ

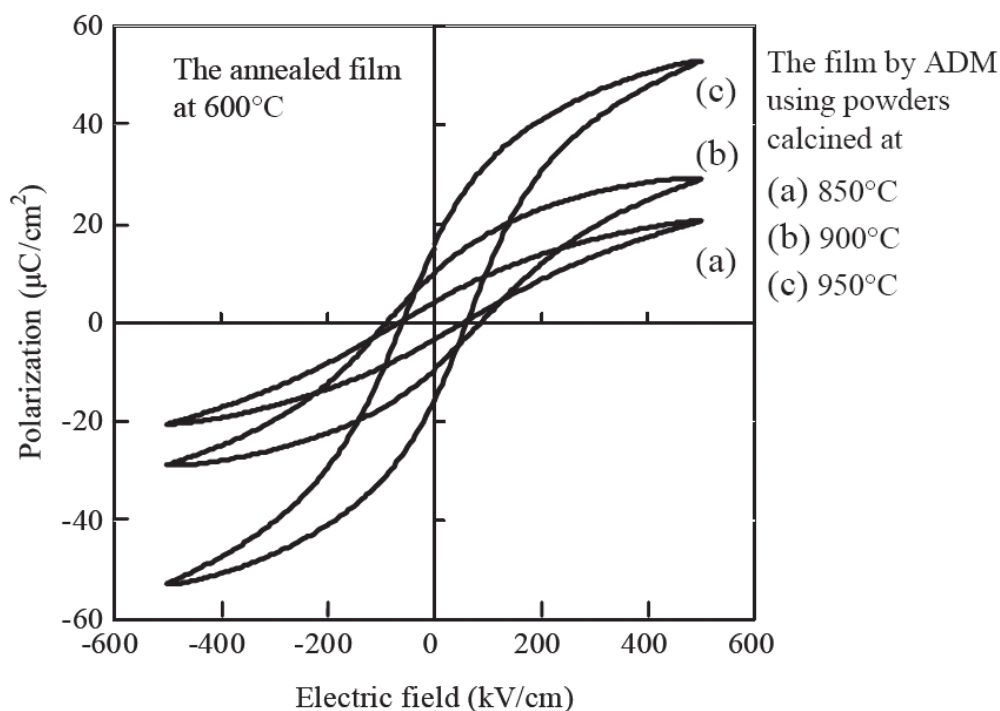
เปลี่ยนไปเป็นคิวบิก (Cubic) ซึ่งพบ MPB อยู่ในช่วงของเฟสรวมโบฮีดรอล (Rhombohedral-rich) ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 เฟสไดอะแกรมแสดงการเปลี่ยนเฟสและเฟสรอยต่อที่เหมาะสม MPB ของสาร PNN-PT-PZ

ในปีต่อมา Kawakami และคณะ ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มหนาของ PNN-PZT ด้วยวิธีฉีดเกาะของละอองเซรามิก (The aerosol deposition method, ADM) โดยทำการพ่นผงเซรามิก PNN-PZT ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 °C , 900 °C และ 950 °C ลงบนแผ่นสแตนเลส สตีล และทำการเผาแอนนิล (Anneal) ที่อุณหภูมิ 600 °C เพื่อให้เกิดเป็นผลึกรวมของ PNN-PZT เมื่อตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย ค่าโพลาริเซชันคงเหลือ (P_r) มีค่าเป็น 18 ไมโครคูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

ค่าสนามไฟฟ้าบังคับ (E_c) มีค่าเท่ากับ 65 กิโลโวลต์ตั้งรูปที่ 2.22 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์มีค่าเป็น 750 และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ที่ความถี่เท่ากันนี้มีค่าเท่ากับ 0.04



รูปที่ 2.22 แสดงกราฟฮิสเทอรีซิสของฟิล์ม PNN-PZT

แต่จากการศึกษาของ สุภมาศ วิรุณจิตร และคณะจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้ทำการเตรียมเซรามิก $(1-x)\text{PZ}-x\text{PNN}$ (PZ-PNN) พบว่าแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบ เมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ PNN เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เปลี่ยนแปลงจาก PZ จนมีลักษณะคล้ายรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ PNN ซึ่งพบว่าโครงสร้างจะเปลี่ยนจากออร์โทโรมบิกไปเป็นเป็นรอมโบฮีดรอล และเป็นคิวบิกเสมือนในที่สุด และทำการตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าสัดส่วนองค์ประกอบ PNN ส่งผลต่อการลดอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส โดยจะลดจาก 230 °C ลงมาถึง 80 °C ซึ่งจะลดลงตามสมการ $232.19-285x$ °C นอกจากนี้พบว่าเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ PNN เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เซรามิกในระบบ

(1-x)PZ-xPNN (PZ-PNN) มีความเป็นรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกมากขึ้นโดยรวมทั้งจากการตรวจสอบทางเฟอร์โรฮิสเทอเรซิสของ (1-x)PZ-xPNN เซรามิก (PZ-PNN) นั้นแสดงให้เห็นการเกิดโพลาริเซชันเมื่อได้รับความต่างศักย์ไฟฟ้าภายนอก ซึ่งพบเมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์จากต่ำไปสูง (5 กิโลโวลต์ถึง 30 กิโลโวลต์) พบว่าจะทำให้ขนาดของฮิสเทอรีซิสลูปใหญ่ขึ้น โดยทำให้ค่าโพลาริเซชันอิมพัลส์ ค่าโพลาริเซชันคงเหลือ และค่าสนามไฟฟ้าบังคับเพิ่มขึ้น และค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดโพลาริเซชันได้มากพอคือที่ 25 กิโลโวลต์ นอกจากนี้พบว่าเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ PNN เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันอิมพัลส์ ค่าโพลาริเซชันคงเหลือ และค่าสนามไฟฟ้าบังคับลดลง

2.5 การวัดเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอรีซิส โดยใช้วงจรรอว์เยอร์-ทาวเวอร์

2.5.1 ตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก

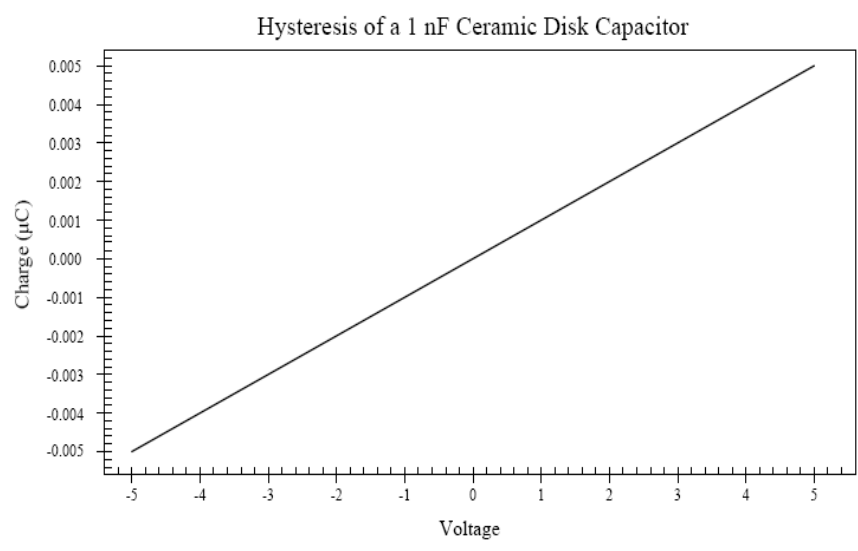
ตัวเก็บประจุโดยทั่วไปจะถูกนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวางสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในปัจจุบันได้สนับสนุนให้กลายเป็นอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น ดังสมการที่แสดงข้างล่าง

$$\begin{aligned} \text{ประจุไฟฟ้า} &= \text{ความจุไฟฟ้า} \times \text{แรงดันไฟฟ้า} \\ \text{หรือ} \quad Q &= CV \end{aligned} \quad (2.12)$$

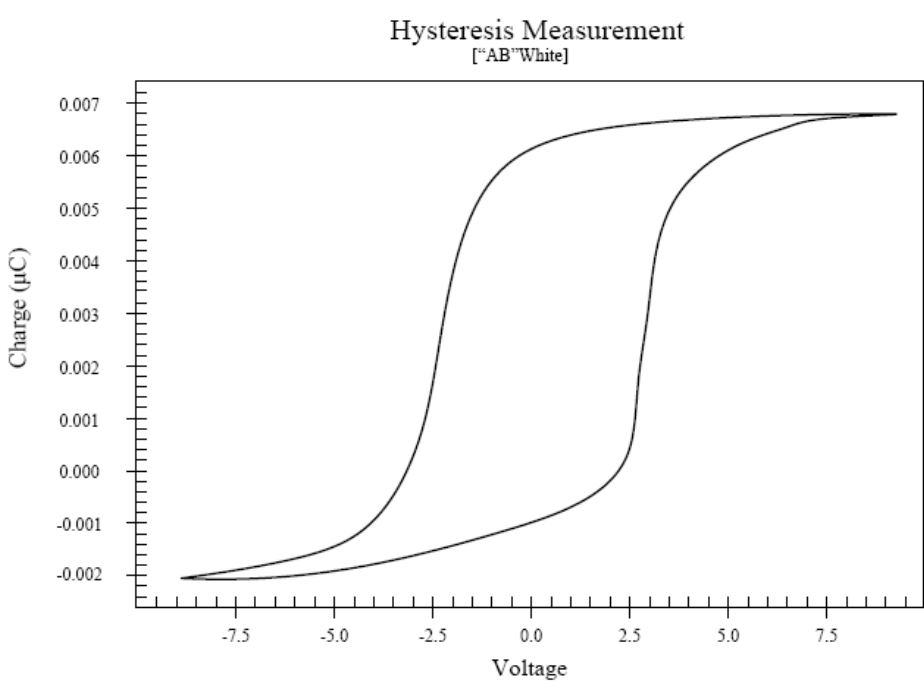
อย่างที่เข้าใจได้ง่ายๆ Q คือจำนวนของอิเล็กตรอนที่ออกมาจากตัวเก็บประจุ ด้วยการให้แรงดันไฟฟ้า (เมื่อแรงดันไฟฟ้าเป็นบวก ค่า Q ก็จะเป็นบวกเหมือนกัน) ในตัวเก็บประจุที่เป็นเชิงเส้น จะมีจำนวนของอิเล็กตรอนอย่างแน่นอนและแปรกับแรงดันไฟฟ้า (V) และความจุไฟฟ้า (C) และในตัวเก็บประจุที่เป็นเชิงเส้น ค่า C จะมีค่าคงที่และไม่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า แต่ถ้าเราป้อนคลื่นรูปสามเหลี่ยมให้กับตัวเก็บประจุที่เป็นเชิงเส้นนี้จำนวนของอิเล็กตรอนที่ได้มา หรือเข้าไปใน เป็นไปตามสัญญาณแรงดันที่ป้อนให้ โดยจะได้เส้นตรงออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.23

จากรูปที่ 2.23 นั้น แกนนอนคือค่าแรงดันไฟฟ้า ส่วนแนวตั้งก็จะเป็นประจุของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้า-ออก จากตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุบางชนิดมีการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความน่าสนใจ โดยสามารถนำไปใช้งานด้านการจดจำ, เซนเซอร์แรงดัน, เซนเซอร์ความร้อน และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่มีประโยชน์หลายชนิด เป็นต้น โดยส่วนมากตัวเก็บประจุเหล่านี้จะถูกเรียกว่า ตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริกและยังมีตัวเก็บประจุที่ไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอื่นๆ อีกที่เรียกว่า ตัวเก็บประจุชนิดพาราอิเล็กทริก และตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กทริค (electret capacitor)

ซึ่งเราอาจจะรู้จักชื่ออิเล็กทรอนิกส์กันบ้างแล้ว โดยตัวเก็บประจุอิเล็กทรอนิกส์นี้จะถูกนำมาใช้ในไมโครโฟน, เทปของเครื่องบันทึกเสียง และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวกับการควบคุมเสียงด้วยมือ



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้น

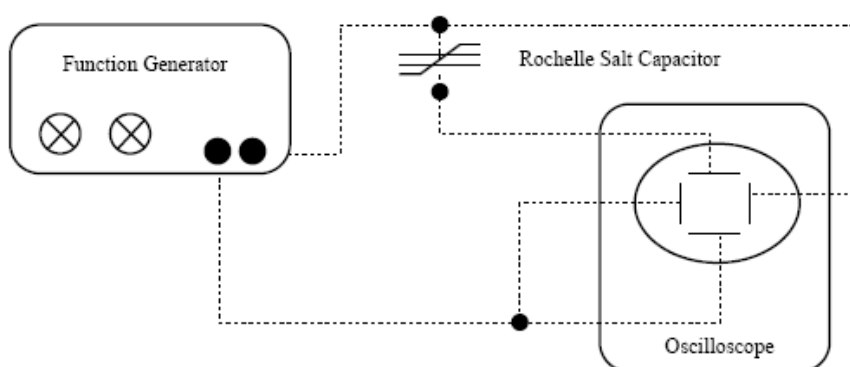


รูปที่ 2.24 วงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้จากตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์รืออิเล็กทริก

ในรูปที่ 2.24 เป็นรูปที่แสดงความสัมพันธ์ของประจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังเช่นตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก และให้ผลของประจุกับแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบวงวนฮิสเทอรีซิส

2.5.2 ความเป็นมา และวงจรวัดวงวนฮิสเทอรีซิสแบบซอร์เวอ์-ทาวเวอร์

จากการทดลอง เราสามารถเป็นวงจรไฟฟ้าอย่างง่ายๆ เพื่อที่จะวัดค่าฮิสเทอรีซิสได้โดยใช้แหล่งจ่ายสัญญาณไฟฟ้า และเครื่องออสซิลโลสโคป โดยซอร์เวอ์และทาวเวอร์ได้เป็นผู้ริเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1929 เพื่อวัดค่าของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกในยุคแรก คือ เกลือโรเชลล์ (Rochelle salt) และเป็นการวัดที่รู้จักกันดี โดยการนำตัวเก็บประจุสองตัวมาต่ออนุกรมกันและให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองนี้ โดยซอร์เวอ์และทาวเวอร์ได้ใช้ความจุไฟฟ้าจากแผ่นเบียงเบนของออสซิลโลสโคปในยุคแรกต่ออนุกรมเข้ากับตัวเก็บประจุไฟฟ้าเกลือโรเชลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.25

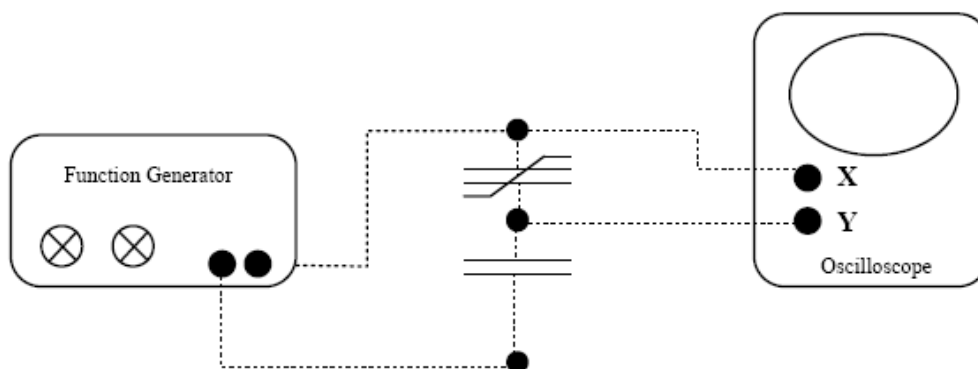


รูปที่ 2.25 วงจรไฟฟ้าซอร์เวอ์-ทาวเวอร์ในยุคแรก

ออสซิลโลสโคปในยุคแรกได้ถูกเชื่อมต่อกับสัญญาณโดยตรงที่มาจากแผ่นเบียงเบนในหลอดรังสีแคโทด ความจุไฟฟ้าจากแผ่นเบียงเบนในแนวตั้ง (ในสัญญาณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าเท่ากับ 1.0) จะส่งผลให้มีการตรวจจับประจุไฟฟ้ามาจากตัวเก็บประจุเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยแรงดันไฟฟ้าจะทำ

ให้เกิดการเบี่ยงเบนในแนวด้วยประจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุเฟอร์โรอิเล็กทริกจะทำให้ล้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงจากตำแหน่งกึ่งกลาง แรงดันไฟฟ้าจะกระตุ้นที่ตกคร่อมกับตัวเก็บประจุเฟอร์โรอิเล็กทริกจะเปลี่ยนไปยังแผ่นเบี่ยงเบนในแนวอน ทำให้ล้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปทางซ้ายหรือขวาไปยังพื้นผิวที่ถูกเคลือบด้วยสารเรืองแสงในหลอดรังสีแคโทด โดยจะมีสองสัญญาณซึ่งทำงานร่วมกันจนเกิดวงวนฮิสเทอรีซิสขึ้น ดังแสดงในรูป 2.24 และถ้าหากตัวเก็บประจุเกลือโรเซสลิได้ถูกแทนที่ตัวเก็บประจุที่เป็นเชิงเส้น ดังเช่น ซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 2.23 แทนที่จะเกิดวงวนฮิสเทอรีซิส

วงจรถอว์เซอร์-ทาวเวอร์ได้ถูกพัฒนาต่อมา เนื่องจากออสซิลโลสโคปในปัจจุบันนั้นจะมีวงจรถายแบบฟรอนท์-เอนด์ (front-end amplifier) และมีความต้านทานขาเข้าสูง ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับวงจรถายแบบเดิมที่ใช้ในการวัด จึงไม่สามารถนำไปใช้วัดวงวนฮิสเทอรีซิสได้ ดังนั้นวงจรถอว์เซอร์-ทาวเวอร์จึงใช้ตัวเก็บประจุที่เป็นเชิงเส้นแทนที่ ซึ่งสามารถวัดได้เช่นเดียวกับวงจรถายแบบในชุดแรก วงจรไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นใหม่ แสดงดังในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 วงจรถอว์เซอร์-ทาวเวอร์ที่ใช้ตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้น (C_0) ในการค่าประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก (C_s)

แหล่งจ่ายสัญญาณไฟฟ้าจะเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ กลุ่มของประจุจะเกิดขึ้นที่ด้านบนของตัวเก็บประจุเฟอร์โรอิเล็กทริก ในขณะที่เดียวกันประจุไฟฟ้าก็จะมีแรงออกจากด้านตรงข้ามของตัวเก็บประจุเฟอร์โรอิเล็กทริกและเก็บสะสมพลังงานไว้และส่งผลกระทบต่อไป

ยังด้านบนของตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้น ซึ่งสอดคล้องกับสมการ $Q = CV$ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้นจะแสดงให้เห็นถึงจำนวนของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้า-ออกจากตัวเก็บประจุเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยมีผลการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบของคลื่นสัญญาณที่แสดงในช่องรับสัญญาณที่ 2 ของออสซิลโลสโคป โดยจะวัดเป็นแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้น ขณะเดียวกันช่องรับสัญญาณที่ 1 ของออสซิลโลสโคปจะวัดแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจากแหล่งจ่ายสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งการแสดงกราฟในโหมด XY ของออสซิลโลสโคปแสดงให้เห็นเป็นวงวนฮิสเทอรีซิส

โดยทั่วไปรูปวงวนฮิสเทอรีซิสจะเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชัน (ในแกน X) และสนามไฟฟ้า (ในแกน Y) ที่วางรบกวนแรงดันคลื่นรูปไซน์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสอง และเมื่อต้องการค่าสนามไฟฟ้า (E) ของเฟอร์โรอิเล็กทริกสามารถหาได้จากสมการที่ (2.13) ก็คือ

$$E = \frac{V_{CS}}{d} \quad (2.13)$$

โดยที่ V_{CS} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก

d คือ ความหนาของตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก

และเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าอ้อมตัวของตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก ในบางครั้งอาจต้องป้อนแรงดันให้กับตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก ($d \approx 1-2$ mm) สูงหลายพันโวลต์ ซึ่งจะส่งผลให้เครื่องออสซิลโลสโคปเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นวงจรซอร์เซอร์-ทาวเวอร์จึงได้ถูกปรับปรุงใหม่ด้วยการเพิ่ม R_1 และ R_2 ขนานกับ C_s และ C_0 ดังแสดงในรูปที่ 2.27 เพื่อลดแรงดันให้เหมาะสมกับการวัดสัญญาณจากออสซิลโลสโคป (V_{R2} และ V_{C0}) ซึ่งแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเฟอร์โรอิเล็กทริก (V_{CS}) มีค่าเท่ากับ

$$V_{CS} = (V_{R1} + V_{R2}) - V_{C0} \quad (2.14)$$

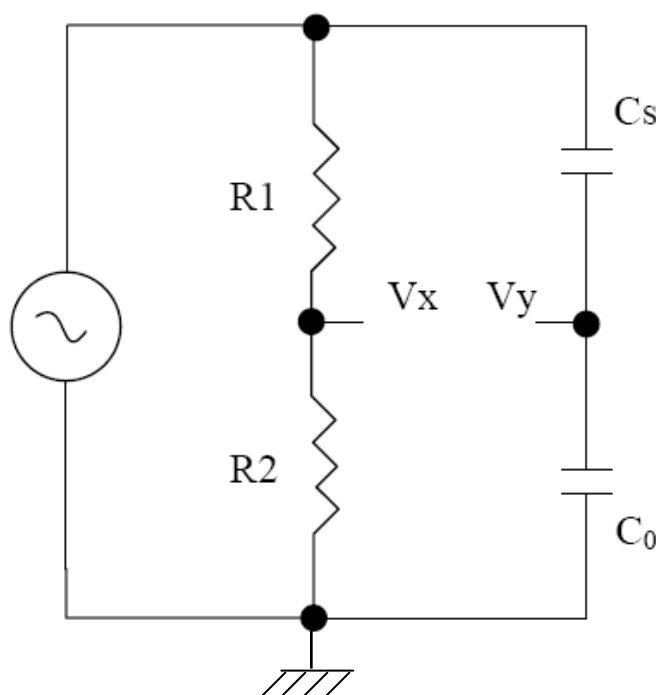
และ

$$V_{R1} = \frac{R_1}{R_2} \cdot V_{R2} \quad (2.15)$$

โดยที่ V_{R1} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวความต้านทาน R_1

V_{R2} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวความต้านทาน R_2

V_{C0} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_0



รูปที่ 2.27 วงจรซอว์เออร์-ทาวเวอร์ที่ใช้ในการทดลอง เมื่อแรงดัน V_s มีค่าสูงมาก โดยที่ $V_x = V_{R2}$ และ

$$V_y = V_{C0}$$

ส่วนค่าโพลาริเซชัน (P) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ

$$P = \frac{Q}{A} \quad (2.16)$$

โดยที่ Q คือ ประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_0 (= ประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_s)

A คือ พื้นที่ของตัวเก็บประจุ C_s

ดังนั้น

$$P = \frac{C_0 \cdot V_{C0}}{A} \quad (2.17)$$