

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทที่ 2 นี้กล่าวถึงรายละเอียดของประวัติการค้นพบปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก การจำแนกวัสดุคอมโพสิต ทฤษฎี 0 – 3 คอมโพสิต กระบวนการขึ้นรูปแบบเทป สมบัติไพโซอิเล็กทริก สมบัติไพโรอิเล็กทริก สมบัติไดอิเล็กทริกและการสูญเสียไดอิเล็กทริก ทฤษฎีของระบบอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์ และสมบัติพื้นฐานของสารตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย โดยแยกเป็นหัวข้อ ดังนี้

2.1 ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก

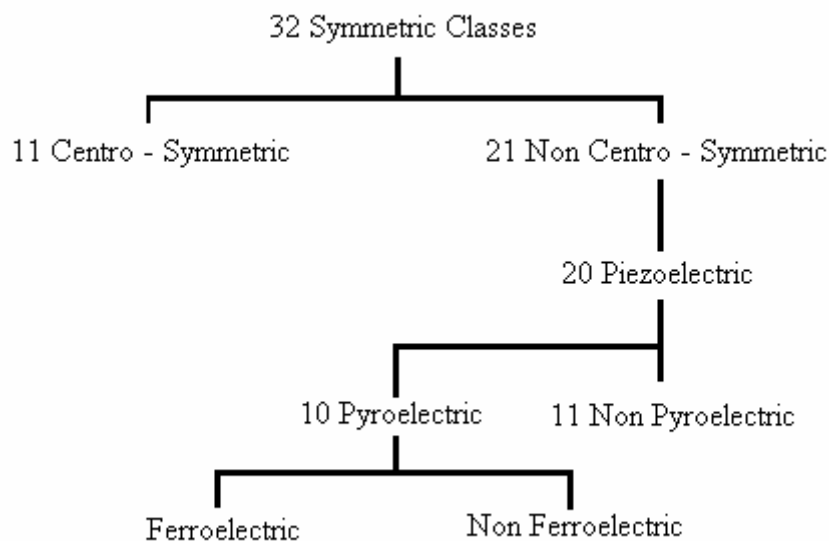
คำว่า “piezo” ในภาษาอังกฤษ มาจากภาษากรีกซึ่งหมายถึง “to press” การนำคำว่า “piezo” มาใช้กับคำว่า “electric” เป็น “piezoelectric” หรือ “ไพโซอิเล็กทริก” จึงเกี่ยวข้องกับสมบัติทางกลและสมบัติทางไฟฟ้า มีการค้นพบปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1880 โดยสองพี่น้องชื่อ ปีแอร์ กูรี (Pierre Curie) และ แจ็ก กูรี (Jacques Curie) ทั้งสองพบว่าเมื่อให้แรงกดแก่ผลึกบางชนิด เช่น ทัวร์มาลีน (tourmaline) ควอตซ์ (quartz) โทปาซ (topaz) และเกลือโรเชลล์ (Rochelle salt) จะมีประจุบวกที่ผิวหน้า (surface) ด้านหนึ่งและมีประจุลบด้านหนึ่งของผลึก โดยที่ปริมาณประจุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงกด เมื่อเอาแรงกดออก ประจุที่ผิวหน้าทั้งสองจะหายไป ปรากฏการณ์ที่พบในลักษณะนี้ถูกนิยามเป็นปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบตรง (direct piezoelectric effect) ต่อมาในปี ค.ศ. 1881 ลิปแมนน์ (Lippmann) คือผู้ที่ทำนายโดยอาศัยทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกว่ามีปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบกลับ (converse piezoelectric effect) ด้วย และพี่น้องตระกูลคูรีก็ได้ทำการทดลองพิสูจน์คำทำนายดังกล่าวนี้ได้สำเร็จในปี ค.ศ. 1881 เช่นกัน

นับตั้งแต่การค้นพบปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกในปี ค.ศ. 1880 ใน 20 ปีต่อมา เป็นช่วงของการศึกษาค้นคว้าเพื่อวางรากฐานทางด้านไพโซอิเล็กทริก มีนักวิจัยหลายกลุ่มที่มีส่วนในการศึกษาค้นคว้า นักวิจัยที่มีชื่อเสียง เช่น ลอร์ด เคลวิน (Lord Kelvin) โวลต์มาร์ วอยท์ (Woldemar Voigt) ร่วมกันวางกฎเกณฑ์และทฤษฎีเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกอย่างเป็นระบบ มีการจัดกลุ่มผลึกโดยละเอียดตามความสมมาตร (symmetry) ของผลึกเป็น 32 กลุ่มผลึก (crystal class หรือ point group) จากกลุ่มผลึกทั้งหมด มี 21 กลุ่มผลึกที่ขาดจุดศูนย์กลางความสมมาตร (centre of

symmetry) และในจำนวนนี้มี 20 กลุ่ม ที่แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริก ดังภาพประกอบที่ 2.1 การประยุกต์ใช้งานผลึกที่มีสมบัติไพโซอิเล็กทริกเริ่มเป็นรูปเป็นร่างในปี 1917 โดย พอล แลงจิวิน (Paul Langevin) ชาวฝรั่งเศส ซึ่งประสบความสำเร็จจากการใช้ผลึกควอตซ์เป็นตัวส่ง (transmitter) และตัวรับ (receiver) คลื่นเสียง (acoustic wave) ที่เดินทางในน้ำ ซึ่งเป็นหลักการของเครื่องโซนาร์ (sonar) ในเวลาต่อมา

หลังจากปี ค.ศ.1965 การวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้วัสดุไพโซเซรามิก (piezoceramic) มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วและแพร่หลายไปทั่วโลก มีการผลิตวัสดุไพโซอิเล็กทริกใหม่ๆ เช่น ไมโครโฟนขนาดจิ๋วความไวสูง (small sensitive microphone) ตัวจุดประกายไฟ (ignitor) ไฮโดรโฟน (hydrophone) ทรานสดิวเซอร์ (transducer) อุปกรณ์จัดตำแหน่งระดับจุลภาค (micropositionor) เป็นต้น

ในปัจจุบันการวิจัยทางด้านไพโซอิเล็กทริกได้มุ่งไปที่การประยุกต์ใช้งานวัสดุที่มีสมบัติไพโซอิเล็กทริกชนิดต่างๆ มากขึ้น โดยเฉพาะด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่เน้นการลดขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงโดยอาศัยสมบัติไพโซอิเล็กทริกของสารซึ่งมีการพัฒนาควบคู่กันไปกับการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ นอกจากนี้ การวิจัยพื้นฐานทางด้านไพโซอิเล็กทริกก็ยังมี ความสำคัญและยังสร้างความท้าทายให้กับนักวิจัยรุ่นใหม่เนื่องจากวิทยาการด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เช่น วิทยาการของเครื่องมือวัดและเครื่องมือตรวจสอบชิ้นงาน หรือ กระบวนการเตรียมสารตัวอย่างที่อาศัยเทคโนโลยีที่สามารถควบคุมคุณภาพของสารตัวอย่างได้อย่าง สม่ำเสมอ จึงส่งผลให้การวิจัยทางด้านไพโซอิเล็กทริกก้าวหน้าตามไปด้วย และค้นพบ ปรากฏการณ์ใหม่ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมบัติไพโซอิเล็กทริกมากขึ้น



ภาพประกอบที่ 2.1 แสดงการจัดกลุ่มผลึกตามความสมมาตรของผลึก
(ที่มา : Lang and Gupta, 2000)

2.2 การจำแนกวัสดุคอมโพสิต

โดยทั่วไปวัสดุคอมโพสิต ประกอบขึ้นจากการรวมกันของส่วนประกอบตั้งแต่ 2 ส่วนขึ้นไป ส่วนประกอบที่มารวมกันจะมีความแตกต่างกันทั้งในด้านรูปแบบ องค์ประกอบทางเคมี และไม่เป็นตัวทำลายของซึ่งกันและกัน สมบัติเดิมของส่วนประกอบแต่ละส่วน จะมีสมบัติอย่างไรอย่างหนึ่งดีเด่นมากกว่ากัน เมื่อเอามาทำวัสดุคอมโพสิต จะได้วัสดุใหม่ที่มีสมบัติที่ดีทั้งหลายของส่วนประกอบตั้งต้นรวมอยู่ในวัสดุคอมโพสิตนั้น

การจำแนกวัสดุคอมโพสิตแบ่งออกเป็นประเภทตามลักษณะของการมารวมกัน 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ รวมกันโดยการดัดแปลงผิวนอก (surface modification) โดยการทำให้เป็นวัสดุเสริมกำลัง(reinforced material) และโดยการรวมอนุภาคเล็กๆเข้าด้วยกัน (agglomerated material) ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละประเภทดังต่อไปนี้

1. การดัดแปลงผิวนอก

เนื่องจากบริเวณผิวนอกของวัสดุ เป็นบริเวณที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมโดยตรงจึงมักเกิดความเสียหายเป็นส่วนแรก โดยเฉพาะโลหะมักจะเกิดจากการกัดกร่อนที่ผิวได้ง่าย เมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่น การทำให้ผิวนอกต่างออกไปก็จะได้เป็นชั้นป้องกันเนื้อวัสดุภายในให้คงทน ใช้งานได้นานขึ้น วิธีการต่างๆ ที่ใช้ดัดแปลงผิวนอก ได้แก่

1.1 การทาสี เคลือบผิว (coating) ที่นิยมนั้นคือการทาสี เพราะสะดวก ลงทุนน้อยและยังช่วยให้วัสดุทนทานขึ้นนอกเหนือไปจากช่วยในการป้องกันผิววัสดุ สีจัดเป็นสารอินทรีย์ที่ผลิตขึ้นจากผงสี ตัวประสานพวกเรซินและสารทำให้เงาเป็นตัวทำลายผงสีและตัวประสานให้เข้ากันดี ก่อนที่จะนำทาบผิววัสดุอื่น ในบางครั้งอาจจะทาสีรองพื้นก่อน เพื่อให้สีที่ต้องการจะทาดมผิววัสดุได้ดีขึ้น

1.2 การเปลี่ยนผิว (surface alterations)

1.3 การชุบด้วยไฟฟ้า (electroplating)

2. การเสริมกำลัง

2.1 การเสริมกำลังแบบกระจาย (dispersion-strengthened materials)

2.2 การเสริมกำลังด้วยเส้นใย (fiber reinforcement)

2.2.1 เส้นใยที่ใช้เสริมกำลัง

เส้นใยแก้วหรือใยแก้ว (glass fiber)

เส้นใยคาร์บอน (carbon fibers)

เส้นใยแอรามิด (aramid fiber, aromatic polyamide fiber)

2.2.2 วัสดุที่นำมาเสริมกำลัง (matrix material)

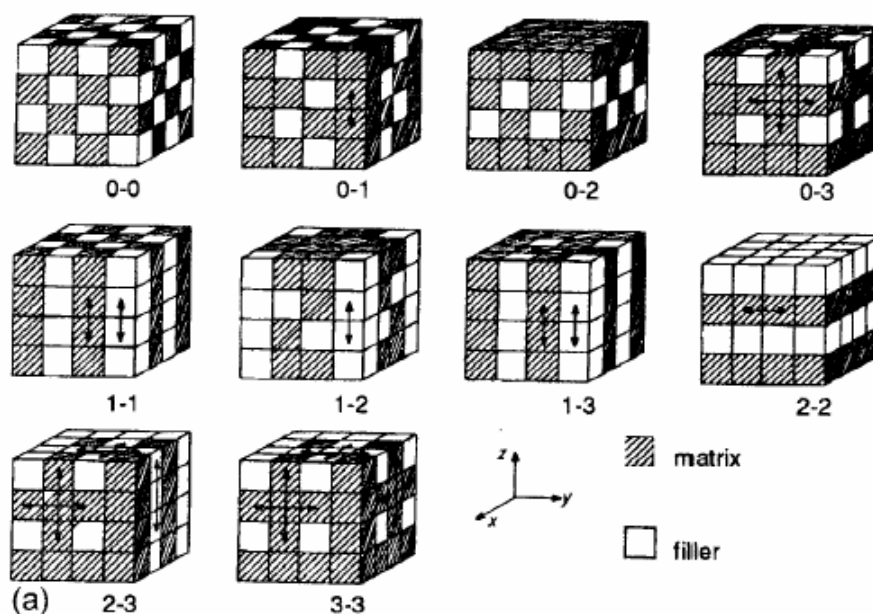
พลาสติกเทอร์โมเซตพลาสติก (thermoset plastics)

โพลีเอสเตอร์ (poly ester)

อีพอกซี (epoxy)

3. การรวมอนุภาคเล็กๆเข้าด้วยกัน

การจำแนกวัสดุคอมโพสิตตามลักษณะการเรียงติดกันของเฟสย่อยตามแนวความคิดของ Newnham และคณะ (Newnham *et al.*, 1980) กำหนดเป็นตัวเลข ตั้งแต่ ศูนย์ (หมายถึงไม่ติดกันเลย) 1, 2 และ 3 การจับคู่ตัวเลข ทำให้ได้การเรียงติดกันทั้งหมด 10 แบบ คือ 0-0, 0-1, 2-0, 3-0, 1-1, 2-1, 3-1, 2-2, 2-3, และ 3-3 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.2 ตัวอย่างเช่นวัสดุคอมโพสิต 0-3 หมายถึงอนุภาคไฟอโรอิเล็กทริกเซรามิกกระจายในเมทริกซ์โพลีเมอร์ วัสดุคอมโพสิต 1-3 หมายถึง แท่งไฟอโรเซรามิกเรียงขนานกันในเมทริกซ์โพลีเมอร์ ถ้าของผสมประกอบด้วย 3 เฟส จะสามารถจัดเรียงติดกันได้ 20 แบบ และของผสมประกอบด้วย 4 เฟส จะจัดเรียงติดกันได้ 35 แบบ



ภาพประกอบที่ 2.2 การเรียงติดกัน 10 รูปแบบของวัสดุคอมโพสิตที่มี 2 เฟส
(ที่มา : Newnham *et al.*,1980)

วัสดุคอมโพสิตแบบที่มีรูปแบบง่ายที่สุด คือ 0-3 ซึ่งประกอบด้วยผงเซรามิกกระจายอยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ (polymer matrix) การเรียงติดกันแบบ 0-3 คือ เซรามิกเชื่อมต่อกันใน 3 มิติ และมีพอลิเมอร์บรรจุในรูพรุนในเนื้อเซรามิก อย่างไรก็ตาม เป็นการยากที่จะมีการเรียงติดกันแบบใดแบบหนึ่งล้วนๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขั้นตอนวิธีการเตรียม

พอลิเมอร์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (amorphous structure) ส่วนเซรามิกมีโครงสร้างผลึก ทำให้วัสดุคอมโพสิตแบบ 0-3 มีเฟสที่ผลึก กระจายอยู่ในเมทริกซ์อสัณฐาน ข้อเด่นที่สำคัญมากของวัสดุคอมโพสิตนี้ คือ การขึ้นรูปเป็นรูปร่างแบบต่างๆ ได้ง่าย เช่น การทำเป็นแผ่นบาง การทำเป็นแบบเส้นใย เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้เป็น โชนาร์ และไฮโดรโฟน

2.3 ทฤษฎี 0 – 3 คอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตที่มีลักษณะการเรียงติดกันแบบ 0 – 3 เป็นวัสดุที่สามารถเตรียมได้ง่ายและสะดวกที่สุดใน 10 รูปแบบที่กล่าวมาข้างต้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเซรามิก (Volume fraction of ceramic, ϕ) กับพอลิเมอร์ แสดงดังสมการที่ (2.1)

$$m_c = m_p \times \frac{\rho_c}{\rho_p} \times \frac{\phi}{1-\phi} \quad (2.1)$$

โดยที่ m_c คือ มวลของเซรามิก
 m_p คือ มวลของพอลิเมอร์
 ρ_c คือ ความหนาแน่นของเซรามิก (BaTiO_3 6.08 g/cm^3)
 ρ_p คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ (PVDF 1.78 g/cm^3)
 ϕ คือ สัดส่วนของเซรามิก

ความหนาแน่นของคอมโพสิตมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของเซรามิกและความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ดังสมการ

$$\rho = \phi\rho_c + (1-\phi)\rho_p \quad (2.2)$$

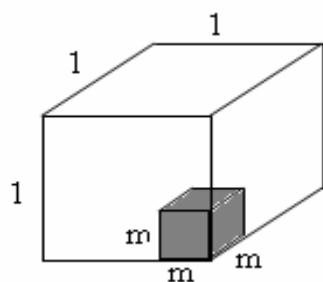
เมื่อ ρ_c คือ ความหนาแน่นของคอมโพสิต

ทำนองเดียวกันกับสมการที่ (2.2) สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความจุความร้อนของคอมโพสิตกับค่าความจุความร้อนของเซรามิกและพอลิเมอร์ ดังสมการ

$$c = \phi c_c + (1-\phi)c_p \quad (2.3)$$

เมื่อ c , c_c และ c_p คือ ความจุความร้อนของคอมโพสิต, เซรามิกและพอลิเมอร์ ตามลำดับ

แบบจำลองของเพาเออร์ (Pauer model) เป็นแบบจำลองที่สามารถอธิบายลักษณะของ 0 – 3 คอมโพสิตที่มีสัดส่วนของเซรามิกน้อย ๆ แสดงดังภาพประกอบที่ 2.3



ภาพประกอบที่ 2.3 แบบจำลองของเฟาเออร์สำหรับ 0 – 3 คอมโพสิต

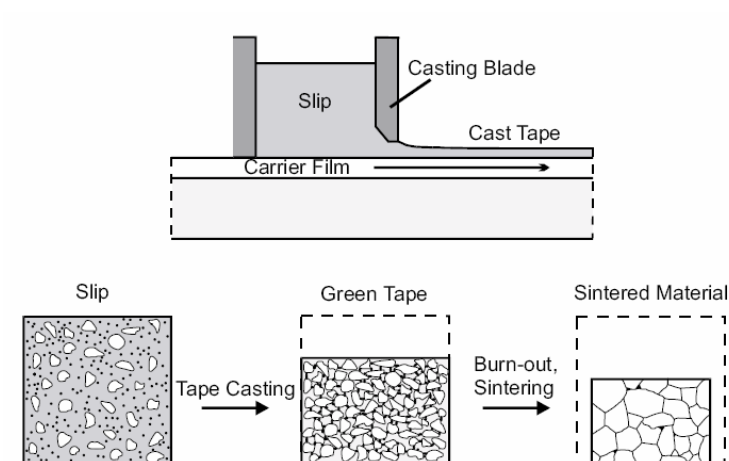
(ที่มา : Newnham *et al.*,1980)

ในแบบจำลองนี้ หนึ่งหน่วยลูกบาศก์ของคอมโพสิตจะถูกบรรจุด้วยหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เล็ก ๆ ของเซรามิกที่มีความยาวด้านละ m ซึ่งขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับหนึ่งหน่วยลูกบาศก์ของคอมโพสิต สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.4)

$$\phi = m^3 \quad (2.4)$$

2.4 การขึ้นรูปแบบเทป

การขึ้นรูปแบบเทปหรือการหล่อแผ่นบาง (tape casting) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูปให้ได้แผ่นที่มีความราบเรียบและสม่ำเสมอ ของเหลวที่ต้องการขึ้นรูปนั้นควรมีลักษณะที่ไม่เหลวหรือข้นเกินไปและจะถูกเทลงในกรวยใส่ของเหลว (slip hopper) ของเหลวก็ไหลออกและทำให้เป็นแผ่นโดยการปาดสารของใบมีด (casting blade) ได้แผ่นฟิล์มที่ราบเรียบอยู่บนฐานเลื่อนฟิล์ม (carrier film) ผ่านส่วนที่ให้ความร้อนเพื่อให้ฟิล์มแห้ง ซึ่งจะได้แผ่นฟิล์มที่มีความหนาในช่วง 0.025 – 1.27 mm (Mistler *et al.*,1978)



ภาพประกอบที่ 2.4 แสดงการทำงานของกระบวนการขึ้นรูปแบบเทป

(ที่มา : Mistler *et al.*,1978)

2.5 สมการทางไพโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกเกี่ยวข้องกับสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของวัสดุ กล่าวคือเมื่อให้ความเค้นกล (mechanical stress, T) แก่วัสดุไพโซอิเล็กทริก จะเกิดการกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement, D) ขึ้น ในทางกลับกัน เมื่อให้สนามไฟฟ้า (electric field, E) แก่วัสดุไพโซอิเล็กทริก จะเหนี่ยวนำให้เกิดความเครียด (mechanical strain, S) ขึ้น ความสัมพันธ์เหล่านี้แสดงในสมการ ดังนี้

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2.5)$$

$$S = s^E T + dE \quad (2.6)$$

- เมื่อ
- D คือ การกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement)
 - T คือ ความเค้นกล (mechanical stress)
 - S คือ ความเครียดกล (mechanical strain)
 - E คือ สนามไฟฟ้า (electric field)
 - d คือ ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient)

s^E คือ ค่าคงที่ยืดหยุ่น (elastic constant หรือ elastic compliance) มีหน่วยเป็น m^2 / N ภายใต้สนามไฟฟ้าคงที่

ϵ^T คือ สภาพยอมรับได้ (permittivity) มีหน่วยเป็น F/m ภายใต้ความเค้นคงที่

จากสมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6) เมื่อโพซิโวลีแอกทริก อยู่ในสนามไฟฟ้าคงที่ ในที่นี้ให้ $E = 0$ สมการที่ (2.5) ลดรูปเป็น

$$D = dT \quad (2.7)$$

ทำนองเดียวกันกับสมการที่ (2.7) กรณีที่ความเค้นกลที่กระทำต่อวัสดุโพซิโวลีแอกทริกมีค่าคงที่หรือมีค่าเป็นศูนย์ สมการที่ (2.6) ลดรูปเป็น

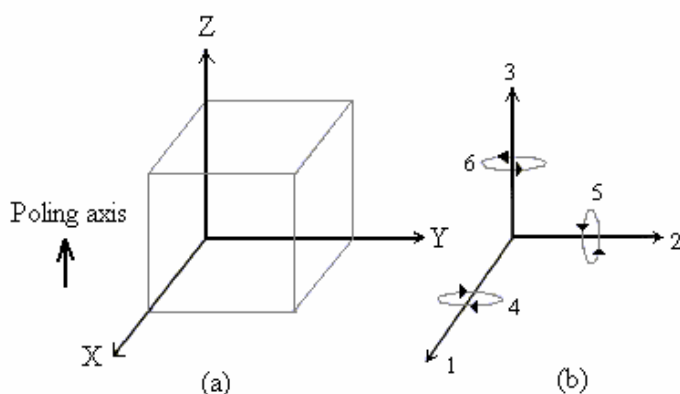
$$S = dE \quad (2.8)$$

ค่าคงที่โพซิโวลีแอกทริก d ในสมการที่ (2.7) และสมการที่ (2.8) เป็นค่าคงที่โพซิโวลีแอกทริกที่ได้จากปรากฏการณ์โพซิโวลีแอกทริกแบบตรงและแบบผกกลับ ตามลำดับ และถ้าหากสารตัวอย่างไม่มีสมบัติโพซิโวลีแอกทริก ($d = 0$) สมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6) หมายถึงสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของสารทั่วไปดังสมการ

$$D = \epsilon^T E \quad (2.9)$$

$$S = s^E T \quad (2.10)$$

สัมประสิทธิ์โพซิโวลีแอกทริกบางชนิด มีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความเครียด และการกระจัดทางไฟฟ้าใน 3 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน จึงมีระบุตัวเลขห้อยท้าย 2 ตัว เช่น d_{33} d_{15} เป็นต้น โดยตัวเลขเหล่านี้หมายถึงทิศทางต่างๆ ดังภาพประกอบที่ 2.5



ภาพประกอบที่ 2.5 แสดงเครื่องหมายของแกนสำหรับวัสดุไพโซเซรามิก

ในรูป (a) แสดงถึงลักษณะแกนหลัก 3 ทิศทาง ส่วนรูป (b) ใช้สำหรับวัสดุไพโซเซรามิกโดยใช้ตัวเลขเป็นตัวกำกับแกนคือใช้เลข 1, 2 และ 3 ใช้แทนแนวแกน X แนวแกน Y และทิศทางในแนวแกน Z ตามลำดับ ส่วนเลข 4, 5 และ 6 แสดงถึงแกนเฉือน (shear axis) รอบแกน 1, 2 และ 3 ตามลำดับ เมื่อตัวเลขแรกหมายถึง ทิศทางโพลาริเซชัน ตัวเลขตัวที่สองจะหมายถึงทิศทางของความเครียด

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของค่าไพโซอิเล็กตริกกับตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

ค่าคงที่ไพโซ- อิเล็กตริก	นิยาม	หน่วย SI
d	$\frac{\partial D}{\partial T}$ ปราคฏการณ์ไพโซอิเล็กตริกแบบตรงเมื่อ E คงที่	$C.N^{-1}$
	$\frac{\partial S}{\partial E}$ ปราคฏการณ์ไพโซอิเล็กตริกแบบผันกลับเมื่อ T คงที่	$m.V^{-1}$
g	$\frac{\partial E}{\partial T}$ ปราคฏการณ์ไพโซอิเล็กตริกแบบตรงเมื่อ D คงที่	$V.m.N^{-1}$
	$\frac{\partial S}{\partial D}$ ปราคฏการณ์ไพโซอิเล็กตริกแบบผันกลับเมื่อ T คงที่	$m^2.C^{-1}$
e	$\frac{\partial D}{\partial S}$ ปราคฏการณ์ไพโซอิเล็กตริกแบบตรงเมื่อ E คงที่	$C.m^{-2}$
	$\frac{\partial T}{\partial E}$ ปราคฏการณ์ไพโซอิเล็กตริกแบบผันกลับเมื่อ S คงที่	$N.mV^{-1}$
h	$\frac{\partial E}{\partial S}$ ปราคฏการณ์ไพโซอิเล็กตริกแบบตรงเมื่อ D คงที่	$V.m^{-1}$
	$\frac{\partial T}{\partial D}$ ปราคฏการณ์ไพโซอิเล็กตริกแบบผันกลับเมื่อ S คงที่	$N.C^{-1}$

ค่าคงที่ไพโซโซอิเล็กทริกในตารางที่ 2.1 นั้นมีความสัมพันธ์กับสมการ (2.11) และสมการที่ (2.12) ดังนี้

$$e = cd \quad (2.11)$$

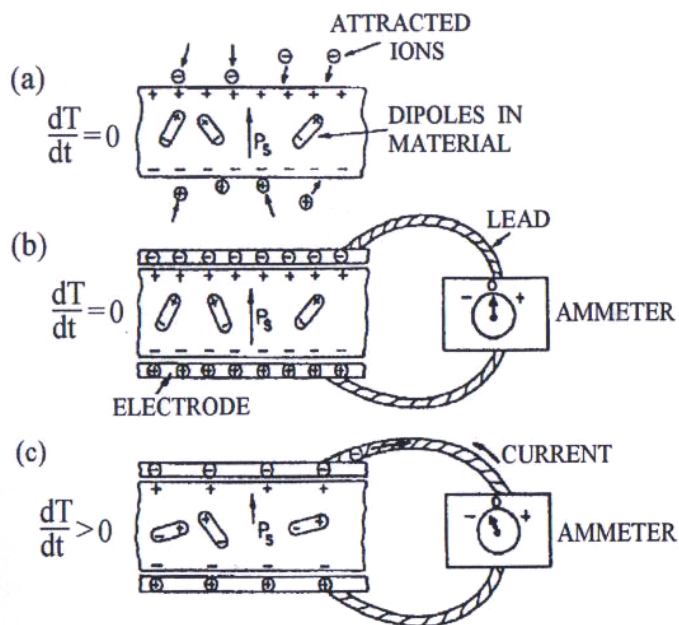
$$e = \epsilon h \quad (2.12)$$

- เมื่อ c คือ ค่าคงที่ความแข็งของวัสดุ (stiffness constant)
 ϵ คือ ค่าสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของวัสดุ
 h คือ ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกความเค้น (piezoelectric stress coefficient)

2.6 สมบัติไพโซอิเล็กทริก

ปี ค.ศ. 1756 นักวิทยาศาสตร์ ในเมืองเบอร์ลิน ประเทศเยอรมันชื่อ Franz Theodor Aepinus สังเกตแร่ทัวมาลีน เมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะมีประจุไฟฟ้าอยู่ที่ผิวคนละข้าง ทำให้นำแร่ชนิดนี้มาใช้ประโยชน์เกิดประจุไฟฟ้า ต่อมา Canton เป็นบุคคลที่สังเกตเห็นว่าการลดอุณหภูมิในแร่ทัวมาลีนเป็นสาเหตุทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ในระหว่างศตวรรษที่ 19 การวิจัยงานไพโซอิเล็กทริกเริ่มมีมากขึ้น มีการพัฒนาเทคนิคในการวัดกระแสไฟฟ้าไพโซอิเล็กทริกและประยุกต์ใช้งานสารไพโซอิเล็กทริกมากขึ้นในปี ค.ศ. 1859 Jean - Mothee Gaugain ได้ทำเครื่องวัดกระแสไพโซอิเล็กทริก และในปี ค.ศ. 1992 Matossi ทำการทดลองทำหัววัดจากแร่ทัวมาลีน

โดยนิยาม ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกคือการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผลึก ซึ่งทำให้มีการเคลื่อนที่ของไดโพลโมเมนต์ ไปในทิศทางเดียวกัน การเปลี่ยนโพลาริเซชันเป็นผลทำให้ประจุที่พื้นผิวเปลี่ยนไป ดังภาพประกอบที่ 2.6



ภาพประกอบที่ 2.6 ปรัชญาการไฟฟ้าโรอิเล็กตริก

(ที่มา : Lang and Gupta, 2000)

เมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ T สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าโรอิเล็กตริก เป็นฟังก์ชันกับเวลา $I(t)$ ได้ดังนี้ (Ploss and Domig, 1984), (Lang and Gupta, 2000)

$$p = \frac{I(t)}{A} \frac{1}{dT/dt} \tag{2.13}$$

เมื่อ A คือพื้นที่ขั้วไฟฟ้า และ dT/dt เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือสามารถเขียนสมการใน พจน์ของ การเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชัน ดังสมการ

$$\Delta P = \frac{\Delta Q}{A} \tag{2.14}$$

$$\Delta P = p \Delta T \tag{2.15}$$

$$p = \frac{\Delta Q}{A \Delta T} \tag{2.16}$$

โดยที่

$$I(t) = \text{การเปลี่ยนแปลงกระแสไฟโรอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นกับเวลา มีหน่วยเป็น A}$$

$$\frac{dT}{dt} = \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลา มีหน่วยเป็น } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\Delta P = \text{โพลาริเซชันที่เปลี่ยนเนื่องจากอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น } \text{C} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\Delta Q = \text{ประจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชันตามอุณหภูมิที่เปลี่ยน มีหน่วยเป็น C}$$

$$\Delta T = \text{อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง มีหน่วยเป็น } ^\circ\text{C}$$

$$A = \text{พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า มีหน่วยเป็น } \text{m}^2$$

$$p = \text{ค่าคงที่ไฟโรอิเล็กทรอนิกส์ มีหน่วยเป็น } \frac{\text{C}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

ความต่างศักย์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังสมการ

$$T = \frac{V - 100}{0.385} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.17)$$

เมื่อกระแสไฟฟ้าของวงจรเท่ากับ 1 mA และ V มีหน่วยเป็น mV

2.7 สมบัติไดอิเล็กตริกและการสูญเสียไดอิเล็กตริก

วัสดุทุกประเภทจะมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าที่ขึ้นกับลักษณะสมบัติทางไดอิเล็กตริก การตรวจหาลักษณะสมบัติทางไดอิเล็กตริกที่ถูกต้องและแม่นยำจึงมีความสำคัญในการนำวัสดุเหล่านั้นมาประยุกต์ใช้งาน การตรวจหาคณะสมบัติทางไดอิเล็กตริกนี้ นำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการในอุตสาหกรรมหลายประเภทอย่างเช่น อาหาร ยาง พลาสติก และเซรามิก เป็นต้น

สารใด ๆ จะเรียกว่าเป็นสารไดอิเล็กตริกก็ต่อเมื่อมีความสามารถในการสะสมพลังงาน เมื่อตกอยู่ภายใต้อำนาจของสนามไฟฟ้า หากป้อนแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงคร่อมตัวเก็บประจุแบบแผ่นคู่ขนาน จะทำให้มีประจุสะสมภายในสารไดอิเล็กตริกมากกว่ากรณีที่ปล่อยให้ว่างระหว่างแผ่นเป็นสุญญากาศ สารไดอิเล็กตริกจะเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าโดยการทำให้ประจุที่ขั้วไดอิเล็กโตรดเป็นกลาง ซึ่งจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายนอก ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ดังสมการ (2.18)

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.18)$$

โดยที่ ϵ^* = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (complex relative permittivity)
 ϵ' = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกส่วนจริง (real)
 ϵ'' = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกส่วนจินตภาพ (imaginary)

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (ϵ^*) ประกอบด้วยส่วนจริง (ϵ') ที่แสดงถึงความสามารถในการเก็บพลังงานและส่วนจินตภาพ (ϵ'') ที่แสดงถึงความสูญเสียพลังงาน

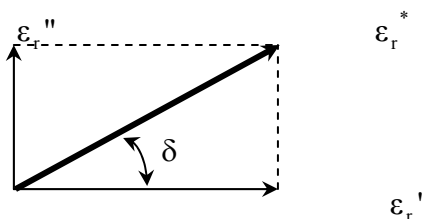
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ^*) มีค่าเท่ากับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าสภาพยอมของสารเทียบกับค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (permittivity in free space, ϵ_0) โดยที่

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m ดังสมการที่ (2.19) และสมการที่ (2.20)

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.19)$$

$$\epsilon_r^* = \frac{\epsilon^*}{\epsilon_0} = (\epsilon'/\epsilon_0) - j(\epsilon''/\epsilon_0) \quad (2.20)$$

ส่วนจริงของสภาพยอม (ϵ_r') เป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณพลังงานจากสนามไฟฟ้าภายนอกที่สารสามารถจุไว้ได้ในกรณีของแข็ง หรือของเหลวทั่วไป จะมีค่ามากกว่า 1 เสมอ ส่วนจินตภาพของสภาพยอม (ϵ_r'') เรียกว่าแฟกเตอร์การสูญเสีย (loss factor) เป็นตัววัดว่าสารนั้นทำให้เกิดความสูญเสียของพลังงานจากสนามไฟฟ้าภายนอกมากน้อยเพียงใด จะมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ การระบุความสูญเสีย อาจทำได้ในพจน์ของแทนเจนต์ความสูญเสีย (loss tangent, $\tan(\delta)$) ซึ่งมีความหมาย ทางเวกเตอร์วิเคราะห์ (vector analysis) ดังภาพประกอบที่ 2.6 ภาพยอมเชิงซ้อนในรูปของเวกเตอร์ โดยให้ส่วนจินตภาพทำมุม 90° กับส่วนจริงจะได้ว่าเวกเตอร์ลัพธ์ (ϵ_r^*) จะทำมุม δ กับส่วนจริง (ϵ_r') ค่าความสูญเสียสัมพัทธ์ของสารใด ๆ คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่สูญเสียต่อพลังงานที่สะสมไว้



ภาพประกอบที่ 2.7 แผนภาพเวกเตอร์ของแทนเจนต์ความสูญเสีย

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.21)$$

ในทางปฏิบัติค่าคงที่ไดอิเล็กตริก มีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าดังสมการ

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{tC}{\epsilon_0 A} \quad (2.22)$$

โดยที่ ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าสัมพัทธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
คือ ส่วนจริงในสมการ (2.18)

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

C คือ ค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น F

t คือ ความหนาของสารตัวอย่าง มีหน่วยเป็น m

A คือ พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า มีหน่วยเป็น m^2

ทำนองเดียวกันสามารถวัดค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกในพจน์ของ Dissipation factor, D ซึ่งหมายถึงส่วนจินตภาพของสมการ (2.18)

2.8 ทฤษฎีของระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์

อินเทอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคิลสันเป็นระบบทางแสงที่มีรูปแบบเรียบง่ายในการจัดวางอุปกรณ์ ในงานวิจัยนี้ใช้ลำแสงและความถี่เดียวกัน ตกกระทบผิวหน้าสารตัวอย่างและกระจกอ้างอิงก่อนที่จะแทรกสอดกัน (interference) หลักการเบื้องต้นคือลำแสงจากแหล่งกำเนิดจะถูกแบ่งที่ตัวแบ่งแสง (beam splitter) ออกเป็นสองลำแสงย่อยเดินทางตั้งฉากซึ่งกันและกันไปตกกระทบผิวหน้ากระจกเรียบและสะท้อนกลับมาที่ตัวแบ่งแสงอันเดิม ลำแสงทั้งสองจะมีการแทรกสอดกัน เกิดริ้ว (fringe) รูปวงกลมหลายวงที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน (fringe of equal inclination) เส้นทางที่แต่ละลำแสงเดินทาง (optical path length) จะแตกต่างกันเล็กน้อย ถ้า Δd เป็นผลต่างของทางเดินแสงทั้งสอง (path length difference) I คือความเข้มแสงของริ้วแทรกสอด (Hariharan, 1991) จะได้ว่า

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi\Delta d}{\lambda}\right) \quad (2.23)$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่นแสงเลเซอร์ สมการที่ (2.23) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความเข้มแสงที่มีค่าสูงสุด (I_{\max}) และต่ำสุด (I_{\min}) ได้ดังนี้

$$I = \frac{1}{2}(I_{\max} + I_{\min}) + \frac{1}{2}(I_{\max} - I_{\min})\cos\left(\frac{4\pi\Delta d}{\lambda}\right) \quad (2.24)$$

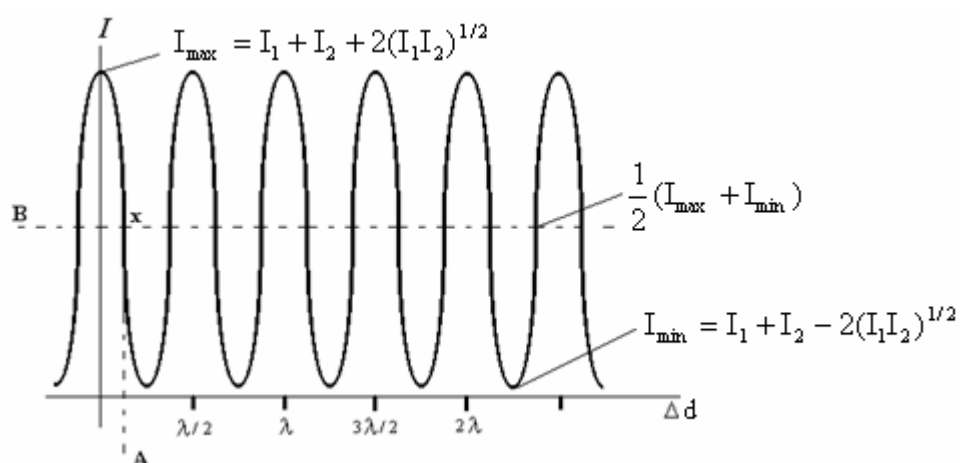
จากสมการที่ (2.24) เมื่อ $\cos\left(\frac{4\pi\Delta d}{\lambda}\right) = 0$ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มากที่สุด (maximum change) ของความเข้มแสง ค่าความเข้มแสงที่เงื่อนไขนี้คือ

$$I = \frac{1}{2}(I_{\max} + I_{\min}) \quad (2.25)$$

และค่า Δd ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าว คือ

$$\Delta d = (2n + 1)\frac{\lambda}{8} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.26)$$

สามารถเขียนรูปเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและ Δd ได้ดังภาพประกอบที่ 2.8

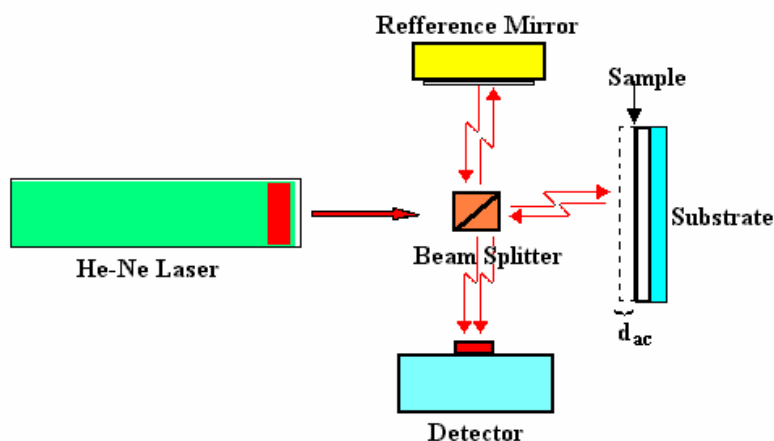


ภาพประกอบที่ 2.8 แสดงความเข้มแสงที่จุดศูนย์กลางของริ้วแทรกสอดที่ Δd ต่างๆ จุด x ในภาพ

คือจุดกึ่งกลางของความเข้มแสง สอดคล้องกับ $\Delta d = \frac{\lambda}{8}$

(ที่มา : Kwaaitaal *et al.*, 1980)

จากหลักการของระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ดังกล่าว มีการพัฒนาระบบ โดยให้ลำแสงหนึ่งตกกระทบบกับสารที่ต้องการวัดค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริก อีกลำแสงหนึ่งตกกระทบบกับแผ่นทรานส์ดีวเซอร์ ไพเอโซอิเล็กทริก (piezoelectric transducer) เมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอกสารตัวอย่างและแผ่นทรานส์ดีวเซอร์ (พร้อมทั้งกระจกอ้างอิง) จะสั่นและเคลื่อนที่สัมพันธ์กัน แสดงในภาพประกอบที่ 2.8 ด้วยเหตุนี้จำเป็นที่จะต้องปรับให้ระบบทำงานสอดคล้องกับสมการที่ (2.25) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่แสดงว่าระบบมีสภาพไว (sensitivity) ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงมากที่สุด จากภาพประกอบที่ 2.8 สภาพที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงคือจุด x ซึ่งมีความชันมากที่สุด (ความชัน = $\frac{\Delta I}{\Delta d}$) (Vilkomerson, 1976) ถ้าค่า Δd เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงทันที ค่า Δd ที่เกิดขึ้นนี้จะอยู่ในระดับเศษส่วนของ λ ของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ สามารถบ่งชี้กำลังแยกแยะการกระจัด (displacement resolution) ของระบบได้จากค่า Δd ถ้าระบบทำงานด้วยความเร็วสูงสุดคงที่สม่ำเสมอตลอดเวลาในขณะที่ผลการทดลองแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพ (stability)



ภาพประกอบที่ 2.9 แสดงการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันระหว่างกระจกอ้างอิงและสารตัวอย่างเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก
(ที่มา : Hariharan, 1991)

ถ้ากำหนดให้ d_{ac} คือแอมพลิจูดการสั่นของผิวหน้าสารตัวอย่างเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก การเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าสารตัวอย่างทำให้ค่า Δd ในสมการที่ (2.26) เปลี่ยนไปดังสมการที่ (2.27)

$$\Delta d = d_{ac} + \frac{(2n+1)\lambda}{8} \quad (2.27)$$

เมื่อ $d_{ac} = d_0 \cos \omega t$ (Zhang *et al.*, 1987) ดังนั้นความเข้มแสงที่ขึ้นอยู่กั Δd ในสมการที่ (2.24) สามารถเขียนใหม่ให้ขึ้นอยู่กั d_{ac} ได้ดังนี้

$$I = \frac{1}{2}(I_{\max} + I_{\min}) + \frac{1}{2}(I_{\max} - I_{\min}) \sin\left(\frac{4\pi d_{ac}}{\lambda}\right) \quad (2.28)$$

ถ้าการกระจัดของผิวหน้าสารตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าระยะที่ทำให้เกิดการเลี้ยวทแยงสอดมากๆ สามารถประมาณค่า $\sin\left(\frac{4\pi d_{ac}}{\lambda}\right) \approx \frac{4\pi d_{ac}}{\lambda}$ ได้ และสมการที่ (2.28) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$I = \frac{1}{2}(I_{\max} + I_{\min}) + \frac{1}{2}(I_{\max} - I_{\min}) \left(\frac{4\pi d_{ac}}{\lambda}\right) \quad (2.29)$$

จากสมการที่ (2.29) จะเห็นได้ว่าความเข้มแสงแปรผันโดยตรงกับค่า d_{ac} หรือแปรผันกับการกระจัดของผิวหน้าสารตัวอย่างนั่นเอง และส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ที่หัววัดแสงวัดได้ (V_{out}) ซึ่งบันทึกค่าโดยเครื่องขยายสัญญาณลือกอินมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับ d_{ac} ดังสมการที่ (2.30)

$$V_{out} = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) V_{p-p} d_{ac} \quad (2.30)$$

เมื่อ V_{p-p} เป็นความต่างศักย์จากจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (sinusoidal peak-to-peak voltage) ที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจากรีวหนึ่งไปยังรีวถัดไป อย่างไรก็ตาม ค่าความเข้มแสงที่หัววัดแสงวัดได้มีองค์ประกอบของกระแสตรงอยู่ด้วย องค์ประกอบนี้คือค่าความเข้มแสงในพจน์แรกของสมการที่ (2.29) นั่นเอง ความต่างศักย์ที่ปรากฏบนเครื่องขยายสัญญาณลือกอินเป็นความต่างศักย์กระแสสลับเท่านั้น ค่าที่อ่านได้จึงเป็นค่าความต่างศักย์ของพจน์ที่

สองในสมการที่ (2.29) ซึ่งสอดคล้องกับการกระตุ้น d_{ac} นั้นเอง จากคำนิยามของค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกในแนวความหนาคืออัตราส่วนระหว่างการกระตุ้นต่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนจะได้สมการที่ใช้คำนวณค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกดังกล่าว ดังนี้

$$d_{ii} = \frac{d_{ac}}{V_{rms}} \quad (2.31)$$

เมื่อ V_{rms} คือศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับสารตัวอย่าง สมการที่ (2.30) และสมการที่ (2.31) สามารถเขียนรวมกันเพื่อนำไปใช้งานจริง ดังนี้

$$d_{ii} = \frac{\lambda V_{out}}{2\pi V_{p-p} V_{rms}} \quad (2.32)$$

ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์วัดการกระตุ้นในแนวความหนาของสารตัวอย่างเนื่องจากสนามไฟฟ้าโดยการบันทึกค่า V_{out} จากเครื่องขยายสัญญาณล็อกอิน และใช้สมการที่ (2.32) ในการคำนวณค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (d_{33}) ของสารตัวอย่าง

2.9 สมบัติของสารตัวอย่าง

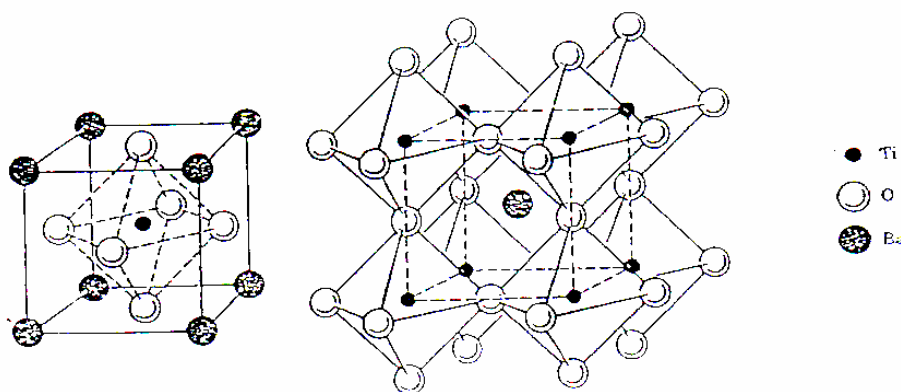
2.9.1 แบเรียมไททานเต

แบเรียมไททานเต เป็นสารที่มีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกันกับพวกสารประกอบในกลุ่ม เพอร์รอฟสไกต์ (perovskite) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสที่ขึ้นกับอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากช่วง $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ไปจนถึงอุณหภูมิสูงกว่า $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ แบเรียมไททานเตจะมีเฟสเปลี่ยนแปลงจากรอมโบฮีดรอลไปเป็นออร์โธ รอมบิก (orthorhombic) เตตระกอนอล (tetragonal) และคิวบิก (cubic) ตามลำดับในที่สุด

ตารางที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของแบเรียมไททานเนตในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

ช่วงอุณหภูมิ (°C)	โครงสร้างผลึก
ต่ำกว่า -90	โรมโบอีดรอล
ตั้งแต่ -90 ถึง 5	ออร์โธโรมบิก
สูงกว่า 5 ถึง 120	เตตระโกนอล
สูงกว่า 120	คิวบิก

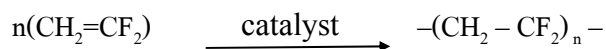
ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (T_c) แบเรียมไททานเนตมีลักษณะของหน่วยเซลล์เป็นแบบคิวบิก ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยมีไอออนของ Ba^{2+} อยู่ที่มุมทั้งแปด มีไอออนของ O^{2-} อยู่ที่จุดใจกลางผิวน้ำทั้งหก และมีไอออนของ Ti^{4+} อยู่ที่ใจกลาง ของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ซึ่งมีความสมดุลของประจุไฟฟ้าจึงไม่เกิดปรากฏการณ์โพลาไรเซชันขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างผลึกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปโดยที่ไอออนของ Ba^{2+} และ Ti^{4+} จะเกิดการเลื่อนขึ้นไปจากตำแหน่งสมดุลเล็กน้อย เสมือนหนึ่งว่าไอออนของ O^{2-} เกิดการเลื่อนลงมาแสดงดังภาพประกอบที่ 2.9 และทำให้เกิดความไม่สมดุลทางไฟฟ้าขึ้นในหน่วยเซลล์และเรียกกระบวนการดังกล่าวนี้ว่าโพลาไรเซชัน



ภาพประกอบที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเพอร์รอฟสไกต์ของ $BaTiO_3$
(ที่มา : Newnham, 1997)

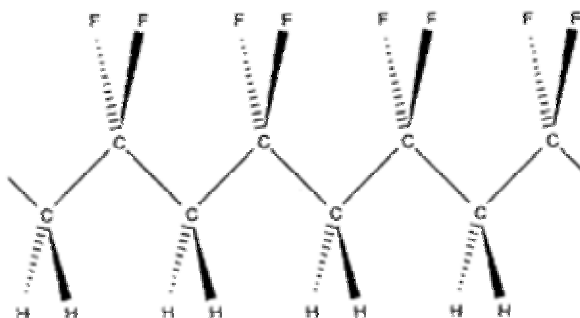
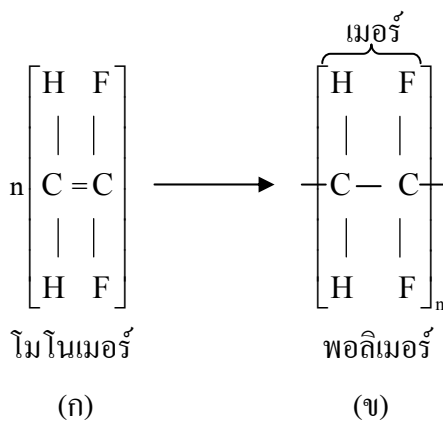
2.9.2 พอลิเมอร์ PVDF

PVDF เป็นพอลิเมอร์แบบเทอร์โมพลาสติกมีสูตรเคมี $(-CH_2-CF_2-)_n$ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาการเติม (addition reaction) ของหน่วยโมโนเมอร์ VDF ต่อกันเป็นโซ่ยาว



โดย $n > 1,000$ โมโนเมอร์

สูตรโครงสร้างโมโนเมอร์ และพอลิเมอร์ PVDF และโครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่จัด พอลิเมอร์ PVDF มีลักษณะดังภาพประกอบที่ 2.10

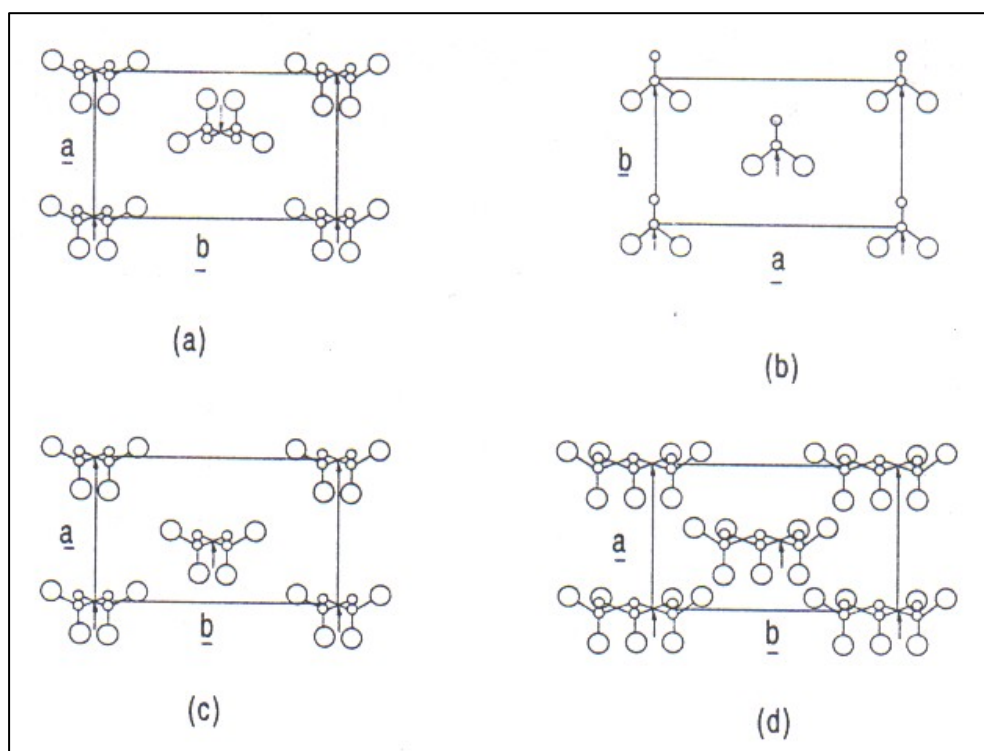


(ค)

ภาพประกอบที่ 2.11 ลักษณะสูตร โครงสร้าง (ก) โมโนเมอร์ (ข) พอลิเมอร์ PVDF (ค) โครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ PVDF (ที่มา: Eisenmenger *et al.*, 1999)

โครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ PVDF มีลักษณะหน่วยเซลล์และเฟสต่าง ๆ เมื่อฉายลงบนระนาบที่ตั้งฉากกับแกน C ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.12 ต่อมาเมื่อมีการศึกษาพบว่า PVDF แสดงเฟสของผลึกที่มีลักษณะต่างกัน 6 เฟส แต่โครงสร้างผลึกที่เป็นพื้นฐานมากที่สุดมี 4 เฟส โดย

ผู้ที่ได้ศึกษาและสามารถอธิบายรายละเอียดของเฟสทั้ง 4 ได้อย่างสมบูรณ์มีดังนี้ เฟสบีตา (Lando *et al.*, 1966) เฟสแอลฟา (Weinhold *et al.*, 1980) เฟสแกมมา (Bachmann and Lando, 1981) และเฟส เดลตา (Takahashi and Tadokoro, 1980) ดังนี้

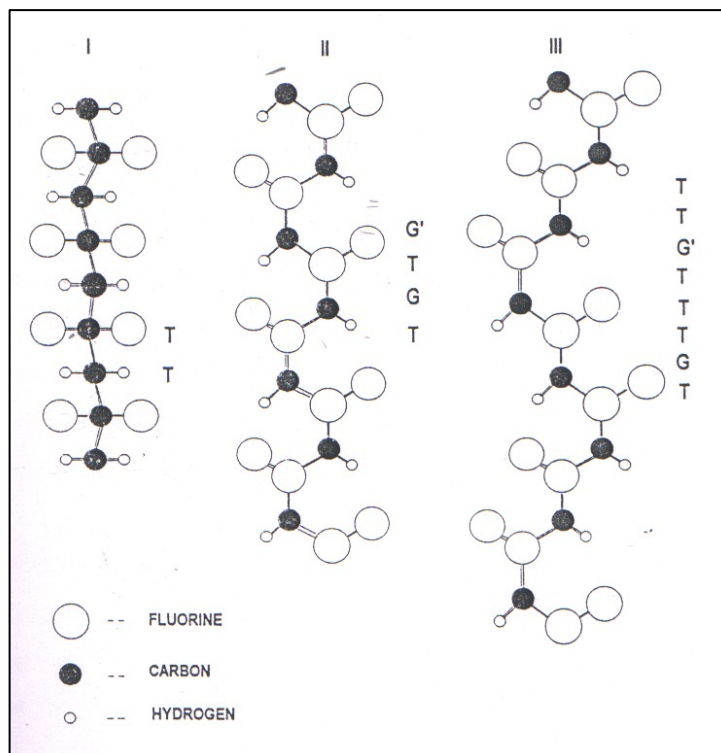


ภาพประกอบที่ 2.12 หน่วยเซลล์ของพอลิเมอร์ PVDF 4 เฟส (a) เฟสแอลฟา (b) เฟสบีตา (c) เฟส เดลตา (d) เฟสแกมมา ◦ แทนอะตอมของคาร์บอน ○ แทนอะตอมของ ฟลูออรีน ส่วนอะตอมของไฮโดรเจนไม่แสดงในภาพ (ที่มา: Lovinger, 1982)

2.8.2.1 ฟอรัม I หรือเฟสบีตา (β - phase)

เฟสบีตามีลักษณะ โครงผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) มีขนาดโครง ผลึก $a = 8.45 \text{ \AA}$, $b = 4.88 \text{ \AA}$, $c = 2.55 \text{ \AA}$ (Hasegawa *et al.*, 1970) โซ่โมเลกุลรูปแบบซิกแซก (zigzag) all - trans (T-T-T) ดังภาพประกอบที่ 2.12 โซ่พอลิเมอร์จะถูกยึดไว้ใน โครงผลึกด้วย โมเมนต์ขั้วคู่ของโซ่ที่เรียงกันแบบขนานกับแกน b เป็นผลให้ผลึกมีขนาดใหญ่ และมีโมเมนต์ขั้วคู่ สุทธิ (net dipole moment) มากกว่าเฟสอื่น ๆ Tashiro (Tashiro, 1995) ได้ศึกษาการเตรียม พอลิเมอร์

ให้ได้เฟสบีตาโดยการดึงพอลิเมอร์เฟสแอลฟาที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ Lando (Lando *et al.*, 1966) ได้ดึงฟิล์มที่อุณหภูมิสูงกว่า 60°C ต่อมา Kobayashi (Kobayashi *et al.*, 1975) ได้ศึกษาว่าควรดึงฟิล์มที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว

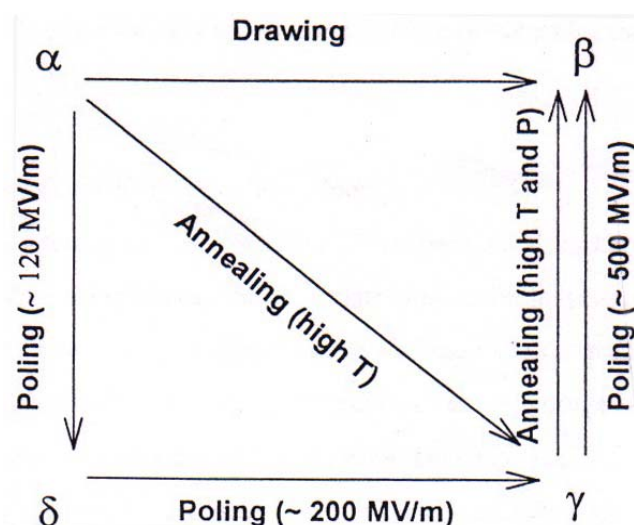


ภาพประกอบที่ 2.13 โซ่โมเลกุลพหุสัณฐาน ของพอลิเมอร์ PVDF
(ที่มา : Tashiro *et al.*, 1989)

2.8.2.2 ฟอรัม II หรือเฟสแอลฟา (α - phase)

เฟสนี้มีโครงสร้างแบบออร์โทโรมบิกมีขนาดโครงสร้าง $a = 4.96 \text{ \AA}$, $b = 9.64 \text{ \AA}$, $c = 4.62 \text{ \AA}$ (Hasegawa *et al.*, 1970) มีการจัดเรียงของโซ่แบบ trans - gauche - trans - gauche (TGTG') ดังภาพประกอบที่ 2.12 โดยโมโนเมอร์จะเรียงตัวทำมุม 120° ค่าโมเมนต์ขั้วคู่มีค่าเท่ากับ $7.01 \times 10^{-30} \text{ C.m}$ ที่อุณหภูมิห้องเฟสนี้มีโครงสร้างที่เสถียรภาพกว่าเฟสบีตามิโมเมนต์ขั้วคู่สุทธิเป็นศูนย์ซึ่งไม่มีสภาพความเป็นขั้ว แต่สามารถทำให้เปลี่ยนไปเป็นเฟสที่มีขั้วอย่างเฟส เดลตา โดยการให้สนามไฟฟ้าภายนอก และสามารถเปลี่ยนไปเป็นเฟสบีตาโดยการให้สนามไฟฟ้าสูง ๆ (Das - Gupta and Doughty, 1978) ซึ่งสนับสนุนรายงานของ Kobayashi และ คณะ

(Kobayashi *et al.*, 1975) ซึ่งนำพอลิเมอร์เฟสแอลฟาผ่านกระบวนการโพลิงโดยการให้สนามโพลิงสูง ๆ ประมาณ 120 MV/m จะเปลี่ยนรูปแบบไปเป็นเฟสเดลตาและจะเปลี่ยนรูปแบบไปเป็นเฟสแกมมาเมื่อผ่านสนามโพลิงประมาณ 200 MV/m และถ้าโพลิงที่ 500 MV/m หรืออบอุ่นที่อุณหภูมิและความดันสูง เฟสแกมมาจะเปลี่ยนรูปแบบไปเป็นเฟสบีตา ดังภาพประกอบที่ 2.13 แต่เฟสแอลฟาต่างจากเฟสบีตา คือ ไม่แสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก แต่แสดงสมบัติไพโซ - ไพโรอิเล็กทริก (Davies, 1980)



ภาพประกอบที่ 2.14 แผนภาพแสดงวิธีการเปลี่ยนเฟสของพอลิเมอร์ PVDF
(ที่มา : Furukawa, 1989)

2.8.2.3 ฟอรัม III หรือเฟสแกมมา (γ - phase)

เฟสนี้มีผู้ค้นพบคนแรกคือ Natta และคณะ (Natta *et al.*, 1965) พบในพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากกระบวนการดังต่อมา Takahashi และ Tadokoro (Takahashi and Tadokoro, 1980) ศึกษาโครงสร้างผลึก พบว่าเฟสนี้มีลักษณะโซ่แบบ TTTGTTTG' (T3GT3G') อยู่ในโครงผลึกแบบโมโนคลินิก (monoclinic) มีขนาดโครงผลึก $a = 4.96 \text{ \AA}$, $b = 9.58 \text{ \AA}$, $c = 9.23 \text{ \AA}$ จากการที่โซ่ของโมเมนต์ขั้วคู่ตั้งฉากกับแกนโซ่ดังภาพประกอบที่ 2.11 เป็นผลให้เฟสแกมมาของพอลิเมอร์ PVDF แสดงสมบัติไพโซ - ไพโรอิเล็กทริกด้วย (Weinhold *et al.*, 1984)

2.8.2.4 ฟอรัม IV หรือเฟสเดลตา (δ -phase)

Naegele และ Yoon (Naegele and Yoon, 1978) ได้รายงานว่ามีลักษณะโซ่และขนาดของเซลล์หน่วยคล้ายกับเฟสแอลตา แต่เฟสเดลตามีโซ่ขนานกับโมเมนต์ขั้วคู่ทำให้โครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โทโรมบิก และข้อมูลได้รับการยืนยันอีกครั้งจากรายงานของ Bachmann และคณะ (Bachmann *et al.*, 1980) และยังคงศึกษาขนาดของโครงสร้างผลึกโดยที่ $a = 4.96 \text{ \AA}$, $b = 9.62 \text{ \AA}$, $c = 4.62 \text{ \AA}$ มีลักษณะโซ่แบบ TGTG' และพบว่าเฟสเดลตามีสภาพขั้วไฟฟ้าแสดงสมบัติไพโซ - ไพโรอิเล็กตริก แต่เฟสเดลตาและเฟสแกมมามีขนาดโมเมนต์ขั้วคู่สุทธิน้อยกว่าเฟสบีตาเตรียมได้โดยการให้อุณหภูมิสูงกับผลึกที่หลอมเหลวหรือนำเฟสแอลฟามาผ่านกระบวนการโพลิงที่ 100 MV/m

2.8.2.5 ฟอรัม V หรือ (ϵ -phase)

จากรายงานของ Lovinger (Lovinger, 1987) พบว่าเฟสนี้ได้จากกระบวนการอบอ่อน มีโครงสร้างแบบโมโนคลินิกมีขนาดโครงสร้างผลึกดังนี้ $a = 4.96 \text{ \AA}$, $b = 9.58 \text{ \AA}$, $c = 4.23 \text{ \AA}$ พบว่ามีลักษณะการเรียงตัวของโซ่คล้ายกับเฟสแกมมาแต่ขนานกันในทิศทางตรงข้ามและแสดงสมบัติไพโซ - ไพโรอิเล็กตริก

2.8.2.6 ฟอรัม VI หรือ (ζ -phase)

ได้จากการผสมกันระหว่างเฟสแอลฟาและเฟสแกมมา เมื่อนำฟิล์มผ่านการเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าให้เปลี่ยนจากเฟสแอลฟาไปเป็นเดลตา มีลักษณะและคุณสมบัติคล้ายกับเฟสแอลฟา (Weinhold *et al.*, 1984)