

บทที่ 2

ทฤษฎี สมมติฐาน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ของงานวิจัยการประดิษฐ์และการหาลักษณะเฉพาะของสารละลายของแข็งไร้ตะกั่ว บิสมัทโซเดียมโพแทสเซียมไททานเต-สตรอนเชียมไอรอนแทนทาเลตเซรามิก ได้กล่าวถึงในส่วนของ แนวคิดทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

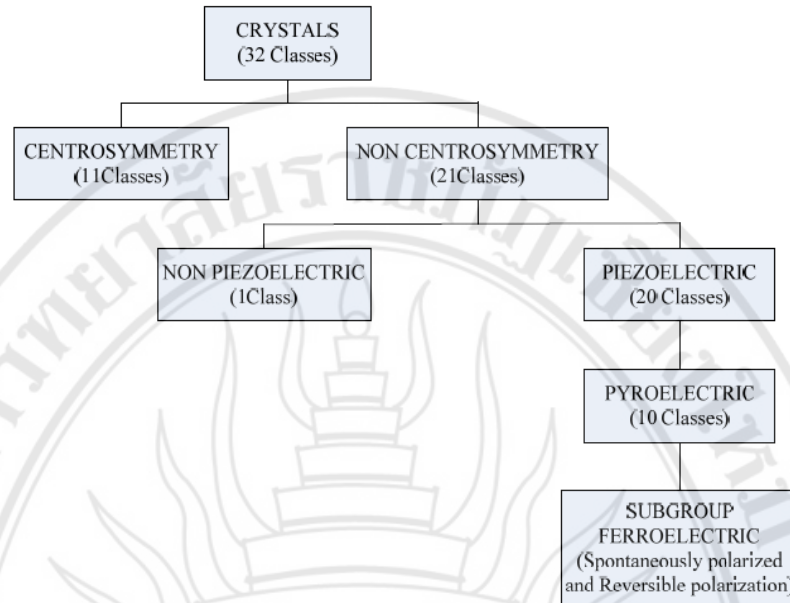
2.1 แนวคิดทฤษฎีพื้นฐาน

2.1.1 เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric)

ฌาคส์ และ ปีแอร์ คูรี (Jacques and Pierre Curie) ได้ค้นพบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) เป็นครั้งแรกในโลกในปี ค.ศ. 1880 ซึ่งพวกเขาค้นพบจากผลึกของ สารประกอบเชิงเดี่ยว (single crystal compound) เช่น ควอตซ์ (quartz) ซิงค์เบลน (zinc blende) และ ทัวร์มาลีน (tourmaline) [24] โดยพบว่าเมื่อให้แรงกดกับวัสดุดังกล่าวแล้วทำให้เกิด กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ดังนั้นพวกเขาจึงเรียกปรากฏการณ์ที่พบนี้ว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก ซึ่งคำว่า “เพียโซ” มาจากภาษากรีกที่แปลว่า “กด”

1) เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก (piezoelectric ceramic)

เซรามิกที่มีสมบัติที่สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก จะเกิดในสารบางชนิด เท่านั้น เช่น ในผลึกเชิงเดี่ยว (single crystal) และในสารประกอบประเภทเพโรอิเล็กทริก สารเพียโซอิเล็กทริกจะมีสมบัติทำให้มีโพลาริเซชัน (polarization) นั่นคือเกิดกระแสไฟฟ้าที่เป็นผลเนื่องจากการได้รับแรงกดซึ่งเป็นแรงทางกลทำให้เกิดความเครียด (strain) ในผลึกซึ่งเกิดการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันเรียกว่าโพลาริเซชัน (polarization) และให้กระแสไฟฟ้าออกมา ปริมาณและเครื่องหมายของการโพลาริเซชันจะแปรผันตามความเครียดที่ได้รับความเข้าใจในโครงสร้างภายในของวัสดุ นั้น เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการศึกษาสมบัติ เพียโซอิเล็กทริกของของแข็ง เมื่อทำการพิจารณา วัสดุที่มีผลึกเดี่ยวพบว่า ผลึกมีองค์ประกอบทางเคมีคงที่ และประกอบด้วยไอออน(อะตอมที่ที่ประจุ) เรียงตัวกันซ้ำๆ ต่อกันเป็นเครือข่าย เกิดเป็นระนาบผลึก (lattice) หน่วยที่เล็กที่สุดที่มีความสมมาตร เรียกว่าหน่วยเซลล์ (unit cell) และเป็นตัวบอกความเป็นไปได้ของการมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกใน ผลึก เนื่องจากความสามารถของโครงสร้างผลึกภายในถูกสะท้อนด้วยความสมมาตรของสมบัตินั้นแสดงออกมา โดยนักฟิสิกส์ศาสตร์แบ่งผลึกออกเป็น 32 กลุ่ม ดังภาพที่ 2.1

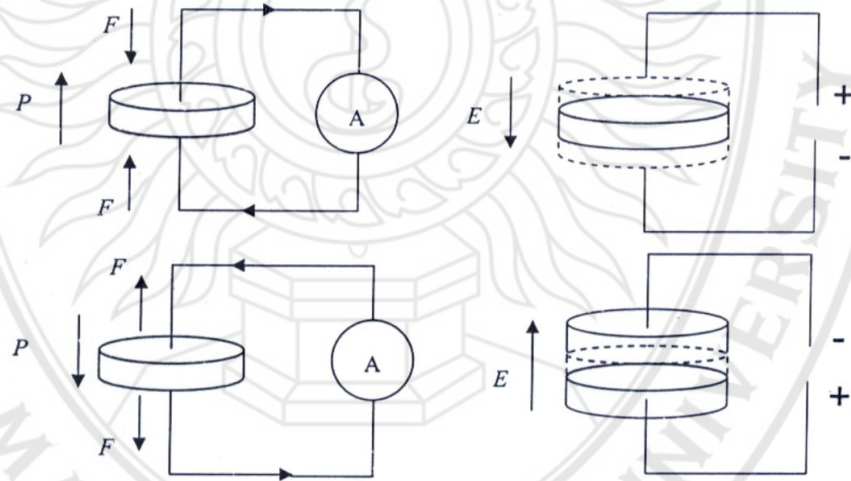


ภาพที่ 2.1 การแบ่งกลุ่มของผลึกของวัสดุใน 32 กลุ่ม [1]

จากผลึก 32 กลุ่มดังกล่าว มี 21 กลุ่มที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง (non-centrosymmetric) ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ เพียโซอิเล็กทริกซึ่งพบถึง 20 กลุ่ม อีกกลุ่มหนึ่งที่เหลือไม่มีสภาพเป็นเพียโซอิเล็กทริกแม้จะอยู่ในกลุ่มที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลางเพราะเกิดปรากฏการณ์พิเศษบางอย่าง การไม่มีสมมาตรของศูนย์กลางเป็นสภาวะที่สำคัญที่ทำให้เกิดสภาพเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากแรงกดที่ให้กับวัสดุเป็นแบบที่สมมาตรของศูนย์กลาง และไม่สามารถทำให้เกิดโพลาไรเซชัน เช่น การเกิดโพลาไรเซชันแบบเวกเตอร์ (vector-quality-like polarization) นอกจากนี้ว่าวัสดุนั้นจะมีลักษณะไม่สมมาตรของศูนย์กลางอยู่เอง ซึ่งจะทำให้ผลรวมของการเคลื่อนที่ของประจุบวกและลบสามารถสร้างไดโพลไฟฟ้าขึ้นมาหรือที่เรียกว่า การเกิดโพลาไรเซชัน ความแตกต่างของวัสดุที่เป็นเพียโซอิเล็กทริกกับเฟอร์โรอิเล็กทริก คือวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไม่สามารถเกิดโพลาไรเซชันด้วยตัวเอง แต่จะเกิดเมื่อให้แรงทางกลต่อผลึกเท่านั้น

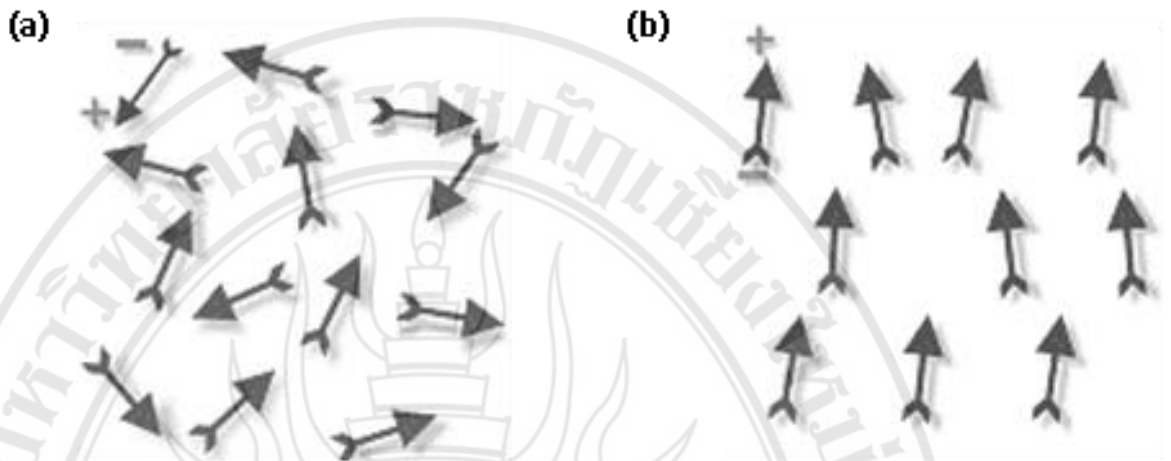
สภาพเพียโซอิเล็กทริกเกิดขึ้นได้สองแบบคือ แบบที่เป็นทางตรง (direct effect) และแบบผกผัน (converse effect) ซึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันเมื่อสารถูกแรงกลกระทำ หรือเกิดความเค้น (stress) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง และการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนขนาดและปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไป หรือเกิดความเครียดในสนามไฟฟ้าที่ให้

เข้าไป เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบผันกลับ ดังแสดงในภาพที่ 2.2 และระดับการเกิดโพลาริเซชันจะขึ้นกับระดับความเครียดจากแรงที่ได้รับ และเครื่องหมายของประจุที่เกิด ขึ้นอยู่กับว่าแรงที่ให้เป็แรงดึงหรือแรงกด สมบัติดังกล่าวอาจพบได้ในเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ซึ่งเพียโซอิเล็กทริกที่ผ่านการโพลิงนั่นเอง ในระหว่างกระบวนการโพลิงวัสดุจะเกิดการขยายตัวตามแนวแกนการโพลเล็กน้อย และเกิดการหดตัวในทิศทางที่ตั้งฉากทั้งสองทิศทางเล็กน้อยเช่นกัน ระดับความแรงของสนามการโพลและอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดการจัดทิศทางและสมบัติที่ได้ของวัสดุ การจัดเรียงตัวไม่มีทางเสร็จสมบูรณ์และโครงสร้างผลึกของวัสดุก็เป็นสิ่งที่บอกระดับการการโพลได้ด้วย เช่น เฟสเทระโกนอล ทำได้ถึงร้อยละ 83 เฟสโรมโบฮีดรอลทำได้ถึงร้อยละ 86 และมากถึงร้อยละ 91 สำหรับเฟสออร์โธโรมบิก ซึ่งเป็นค่าที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผลึกเดี่ยวหรือโดเมนเดี่ยว กล่าวได้ว่า เซรามิกทุกชนิดที่ผ่านการเผาผนึกแล้วจะมีสภาพโดยรวมมีสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic) และจะต้องผ่านการโพลเพื่อทำให้เป็นเพียโซอิเล็กทริก โดยวัสดุนั้นเป็นทั้งสารเพียโซอิเล็กทริกและเพียโซอิเล็กทริกด้วย



ภาพที่ 2.2 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในสารเพียโซอิเล็กทริก [24]

กระบวนการโพล เป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญที่จะทำให้เกิดสภาพเพียโซอิเล็กทริกในเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก หากไม่มีการโพลเซรามิกจะไม่เปลี่ยนสภาพแม้ว่าแต่ละผลึกจะเป็นเพียโซอิเล็กทริกอยู่แล้วก็ตาม เซรามิกที่ผ่านการโพลมีประโยชน์มากเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกินอุณหภูมิคูรี (curie temperature : T_c) เพราะเซรามิกจะเสียสภาพโพลาริเซชันที่เกิดจากการโพลที่อุณหภูมิสูงกว่า T_c

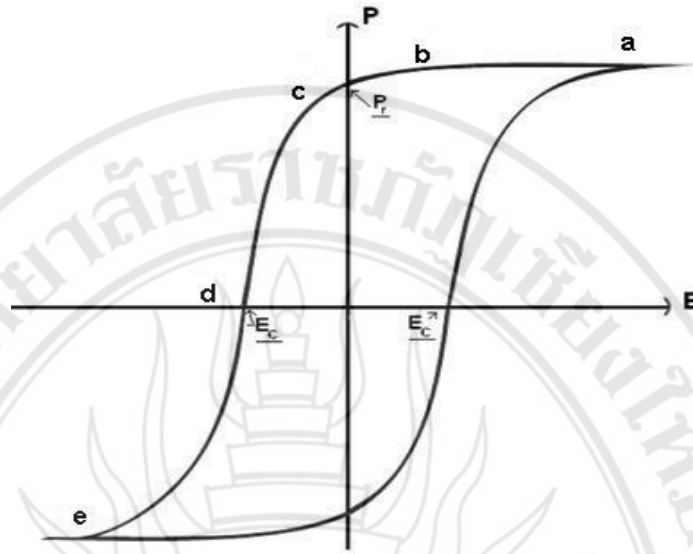


ภาพที่ 2.3 ไดโพลภายในเนื้อสาร (a) ก่อนทำการโพลลิ่ง และ (b) หลังทำโพลลิ่ง [24]

2.1.2 เฟร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric)

สารเฟร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric) [1,24-25] จัดอยู่ในผลึกประเภทพวกที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง (noncentro-symmetric) โดยมี 21 กลุ่ม พบว่ามี 20 กลุ่มเป็นพวกเพียโซอิเล็กทริก ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า วัสดุเฟร์โรอิเล็กทริกจะเป็นสารเพียโซอิเล็กทริก แต่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะไม่เป็นสารเฟร์โรอิเล็กทริก สามารถเกิดโพลาริเซชันขึ้นเองได้ (spontaneous polarization) ในวัสดุ นั่นคือ ขั้วไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงไปในทิศทางเดียวกันถึงแม้จะไม่มีสนามมากระทำก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจาก ขั้วไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัสดุสามารถส่งแรงที่มีขนาดสูงมากพอ ที่จะทำให้ขั้วไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียงจัดเรียงในทิศทางเดียวกันและวัสดุสามารถกลับทิศ (reverse) โดยการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปได้ โดยที่สนามไฟฟ้านั้นต้องไม่มีค่าสูงกว่าค่า dielectric breakdown ซึ่งเป็นค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดก่อนที่วัสดุนั้นจะกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า (electric conductor)

วัสดุเฟร์โรอิเล็กทริกที่มีการเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิด้วย ถือว่าเป็นวัสดุ ไดอิเล็กทริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากกว่า 1000 เป็นวัสดุที่มีสมบัติพิเศษที่ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ในที่นี้จะกล่าวถึงการนำวัสดุเฟร์โรอิเล็กทริกมาใช้ประโยชน์เฉพาะในมุมมองของการเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก



ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับโพลาไรเซชันของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก

เมื่อมีการนำสารไดอิเล็กทริกมาวางในสนามไฟฟ้าจะเกิดการโพลาไรเซชันขึ้นภายในสารนั้น และเมื่อลดสนามไฟฟ้าที่ให้นกกลายเป็นศูนย์ โพลาไรเซชันในสารไดอิเล็กทริกก็จะกลายเป็นศูนย์ทันที แต่มีสารบางอย่างเมื่อเราให้สนามไฟฟ้าภายนอกเข้าไป ทำให้เกิดการโพลาไรเซชันและเมื่อลดสนามไฟฟ้าลงจนเป็นศูนย์ โพลาไรเซชันจะไม่เป็นศูนย์ในสารไดอิเล็กทริก แต่มักจะเป็นศูนย์เมื่อ $E_c = -E_c$ (เมื่อ $-E_c$ = ค่าสนามลบข้างโพลาไรเซชัน) ทำให้เกิดวงวนของฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ซึ่งเป็นลักษณะของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก ดังภาพที่ 2.4 แสดงว่าในสารนั้นมีโมเมนต์คู่ขั้วถาวรอยู่ แม้ไม่มีการให้สนามไฟฟ้าทำให้มีการลดอุณหภูมิแทน โดยปกติสถานะเฟอร์โรอิเล็กทริกไม่ปรากฏที่อุณหภูมิสูงกว่าที่แน่นอนค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า อุณหภูมิคูรี (T_c) ณ อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิคูรีนั้นผลึกจะอยู่สถานะพาราอิเล็กทริก (paraelectric)

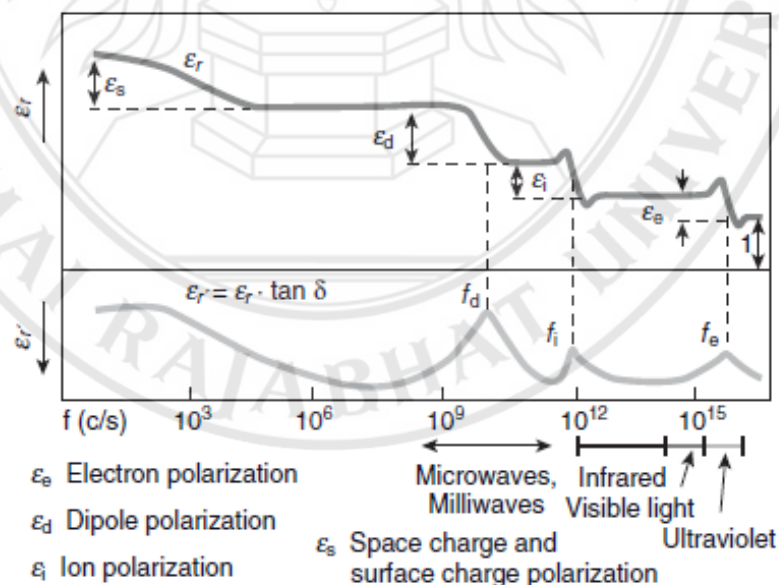
2.1.3 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส (Curie temperature and phase transition) [26]

การเปลี่ยนแปลงของเฟสในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก จะสอดคล้องกับการเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและการโพลาไรเซชันทางไฟฟ้าของวัสดุ อุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) เป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเฟสจากพารา อิเล็กทริก (paraelectric phase) ที่อุณหภูมิ $T > T_c$ ซึ่งวัสดุจะไม่แสดงสมบัติการโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเองได้ (spontaneous polarization) ไปยังเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric phase) ที่อุณหภูมิ $T < T_c$ วัสดุนี้จะแสดงสมบัติโพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเอง นอกจากนี้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

(relative permittivity) ของวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงและมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิคูรีด้วย ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างเฟสจะมีโครงสร้างเป็นพาราอิเล็กทริกและจะไม่มี การแสดงสมบัติความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกใด ๆ ออกมา ซึ่งโครงสร้างเฟอร์โรอิเล็กทริกจะเกิดขึ้นจากการบิดเบี้ยว หรือเสียรูปร่างไปของโครงสร้างพาราอิเล็กทริก โดยที่โครงสร้างเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีสมมาตรของ โครงสร้างที่น้อยกว่าโครงสร้างพาราอิเล็กทริก ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีไอออนจะมีการเคลื่อนใน ตำแหน่งสมดุล ซึ่งจะทำให้เกิดโพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเองเกิดขึ้น

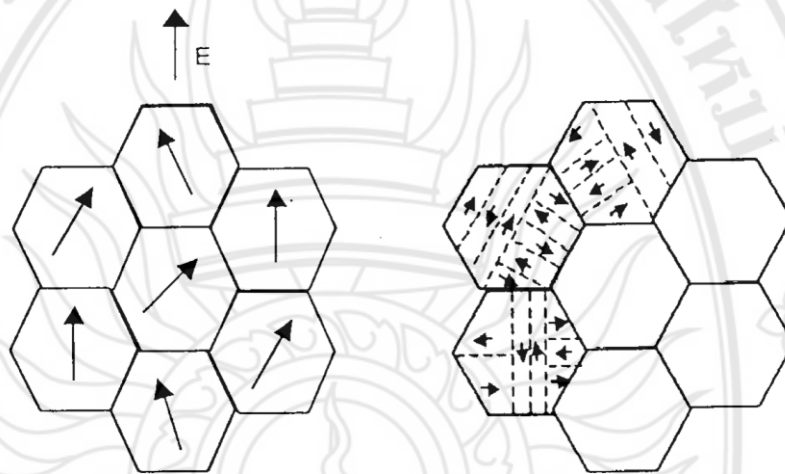
2.1.4 โพลาไรเซชัน (polarization) [24, 27]

เมื่อให้สนามไฟฟ้ากับวัสดุเซรามิก ประจุไฟฟ้าภายในวัสดุจะเกิดการเลื่อนและการโพลาไรเซชันจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับขนาดของบริเวณที่ได้รับผลกระทบ นั้น โดยประกอบไปด้วยโหมดที่ต่างกัน 4 โหมดของการเกิดโพลาไรเซชันสามารถอธิบายได้คือ การเกิดโพลาไรเซชันระดับอิเล็กตรอน (electronic polarization) การโพลาไรเซชันระดับไอออน (ionic polarization) การโพลาไรเซชันแบบขั้วคู่ (dipole polarization) การโพลาไรเซชันของประจุอากาศ และแบบประจุพื้นผิว (space and surface charge polarization) การโพลาไรเซชันจะเกิดที่อุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลง การโพลาไรเซชันของวัสดุสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงตามสนามไฟฟ้า ทั้งหมดในช่วงของความถี่ต่ำมาก และเมื่อความถี่สูงขึ้นการโพลาไรเซชันจะไม่เป็นแบบช่วงยาวตาม การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า และในทางตรงกันข้ามการกระจายค่าของไดอิเล็กทริกจะเกิดขึ้นเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น (แสดงในภาพที่ 2.5)



ภาพที่ 2.5 การกระจายในโพลาริเซชันของวัสดุไดอิเล็กทริก [27]

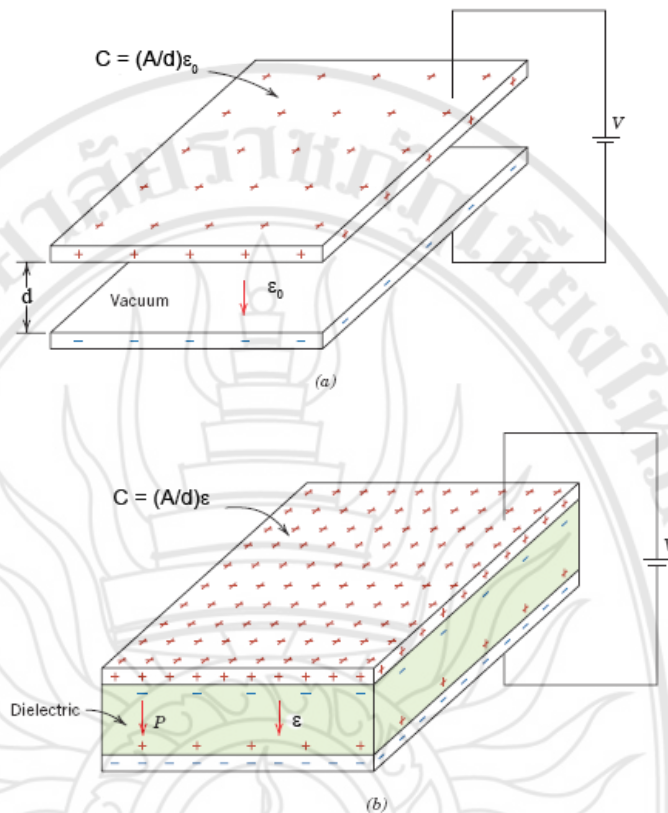
หากพิจารณาสารเซรามิก ที่ประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กที่มีทิศทางของไดโพลต่างกัน การที่ไดโพลเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ มีผลทำให้เซรามิกไม่สามารถแสดงสมบัติ และวัดค่าเพียโซอิเล็กทริกได้ แต่เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไป จะเป็นการสร้างขั้วให้แก่สาร ซึ่งจะทำให้เกิดโพลาริเซชัน หรือไดโพลภายในเนื้อสารให้อยู่ในทิศทางใกล้เคียงกัน หรือทิศทางเดียวกับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ดังภาพที่ 2.6 เพื่อเพิ่มสมบัติการเป็นเพียโซอิเล็กทริก และสมบัติทางไฟฟ้าด้วย



ภาพที่ 2.6 การจัดเรียงไดโพลภายในเนื้อสารภายหลังและก่อนการให้สนามไฟฟ้า [24]

2.1.5 สมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties)

สารทุกชนิดประกอบด้วยส่วนย่อยคือ โมเลกุลโดยปกติประกอบด้วยกลุ่มโปรตอนและอิเล็กตรอนมีจุดศูนย์กลางมวลร่วมกัน และอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและแรงยึดเหนี่ยวของอะตอม [28] เมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้ามากระทำกับโมเลกุล จะทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศทางของสนาม และกลุ่มประจุลบจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม



ภาพที่ 2.7 ลักษณะตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนานเมื่อให้ประจุเข้าไป (a) ระหว่างแผ่นคู่ขนานเป็นสุญญากาศ และ (b) ระหว่างแผ่นคู่ขนานเป็นสารไดอิเล็กทริก [28]

ดังนั้นโมเลกุลทุกโมเลกุลของสารต่างก่อตัวเป็นโมเลกุลขั้วคู่ (dipole moment) โดยมีขั้วเล็กๆ เรียงต่อกันในทิศเดียวกันตามทิศของสนามไฟฟ้า อย่างไรก็ตามสารไดอิเล็กทริกประเภทนี้เป็นสารประเภทโมเลกุลไม่มีขั้ว (non-polar molecule) สารไดอิเล็กทริกบางชนิดที่มีโมเลกุลก่อตัวเป็นขั้วคู่ไฟฟ้า (dielectric dipole) ซึ่งในทิศทางไม่เป็นระเบียบ และเมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกมากระทำต่อมันจะทำให้ขั้วคู่เล็กๆ เหล่านี้เรียงตัวในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเรียกโมเลกุลประเภทนี้ว่า ขั้วคู่ถาวร (permanent dipole) มีสารบางอย่างที่มีโมเลกุลเรียงตัวกันได้เองโดยไม่ต้องใช้สนามไฟฟ้าจากภายนอก เรียกสารชนิดนี้ว่า สารเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยทั่วไปวัสดุไดอิเล็กทริกจะเป็นวัสดุที่มีค่าสภาพความต้านทานสูง ในการพิจารณาวัสดุไดอิเล็กทริกมักจะกล่าวถึงพจน์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก โดยในกรณีแผ่นโลหะคู่ขนานที่มีสารไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างแผ่นโลหะคู่ขนาน พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกดังนี้

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

(2.1)

เมื่อ ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก C คือ ค่าความจุไฟฟ้า d คือ ความหนาของชั้นงาน A คือ พื้นที่ของชั้นงาน ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ ถ้าป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้กับตัวเก็บประจุ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุมีเฟสหน้าความต่างศักย์เป็นมุม 90 องศา แต่ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียเนื่องจากการที่ไดอิเล็กทริกมีความต้านทานไม่ถึงอนันต์ ทำให้เกิดเฟสของกระแสไฟฟ้านำหน้าความต่างศักย์น้อยกว่า 90 องศา เรียกว่า แฟกเตอร์การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss tangent)

2.5.1 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss; $\tan \delta$)

ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกสำหรับเซรามิกนั้นเป็นค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการให้พลังงานไฟฟ้า

แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปเป็นรูปแบบอื่นๆ เช่น เปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อน เป็นต้น ซึ่งสามารถประมาณได้จากสัดส่วนของความได้เปรียบทางพลังงานของวงจรแผ่นตัวนำคู่ขนาน และสามารถวัดได้จากวงจรอิมพีแดนซ์ ซึ่งปริมาณของค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกนั้นสามารถประมาณได้ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์

2.1.6 บิสมาทโซเดียมโพแทสเซียมไททานเตต ($\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_y\text{K}_{1-y})_{0.5}\text{TiO}_3$)

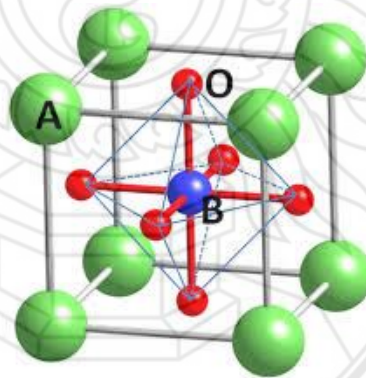
วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่ใช้กันอยู่แพร่หลายสำหรับทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำมาจากสารประกอบ 2 หรือ 3 องค์ประกอบ (binary and ternary system) ของสารเซรามิกซึ่งมีตะกั่วเป็นส่วนผสมที่สำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารที่รู้จักกันดี คือ เลดเซอร์โคเนตไททานเตต (lead zirconate titanate); PZT อย่างไรก็ตาม การที่ออกไซด์ของตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุประเภทนี้ ก่อให้เกิดปัญหาหลายประการ ทั้งในการผลิตและการใช้งานเนื่องจาก

1. ออกไซด์ของตะกั่วมีจุดระเหยต่ำ (ประมาณ 800 °C) ทำให้ต้องควบคุมบรรยากาศในการเผาอบผง (sintering) อย่างรัดกุมเพื่อให้อัตราส่วนของส่วนผสมของวัสดุที่ถูกเผาถูกต้อง

2. ออกไซด์ของตะกั่วระเหยได้ง่ายทำให้ความสามารถในการผลิตซ้ำให้เหมือนเดิม (reproducibility) ทำได้ยาก
3. ออกไซด์ของตะกั่วเป็นพิษ ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางอากาศ ซึ่งหลายประเทศ โดยเฉพาะ ประเทศสหรัฐอเมริกาได้เพิ่มข้อจำกัดสำหรับปริมาณการใช้ของสารประเภทนี้ มากขึ้น และในปัจจุบันสารชนิดนี้เป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 3 ตามระเบียบกระทรวง อุตสาหกรรมในประเทศไทย

ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาส่วนของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ให้เป็นสารประกอบที่ปลอดภัยจาก ออกไซด์ของตะกั่ว หรือให้มีสารประเภทนี้เป็นองค์ประกอบในปริมาณน้อยจึงเป็นเรื่องที่สำคัญและ สามารถช่วยลดปัญหาทางมลภาวะจากการใช้ออกไซด์ของตะกั่วและอาจมีผลกระทบต่ออุตสาหกรรม อันใกล้

บิสมัทโซเดียมโพแทสเซียมไททานेट ($\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_y\text{K}_{1-y})_{0.5}\text{TiO}_3$) หรือที่ใช้ตัวย่อว่า BNKT เป็น สารประกอบที่มีโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์ (perovskite) ที่มีความซับซ้อน โดยทั่วไป สารประกอบซึ่งมีโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์จะมีสูตรโครงสร้างเป็นแบบ ABO_3 ดังภาพ 2.8



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างผลึกแบบเพอร์รอฟสไกต์

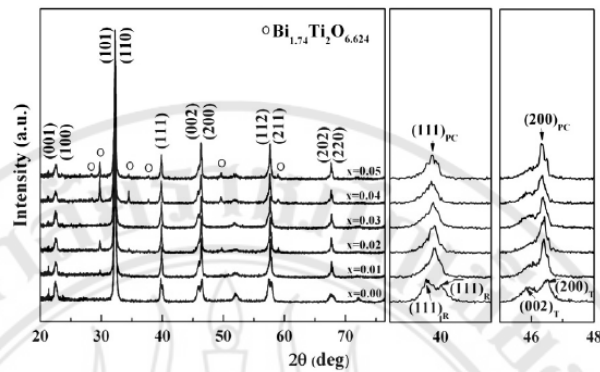
จากการศึกษาลักษณะผลึกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ที่สูงพบว่าสารที่มีค่า ความสามารถในการโพลาไรซ์เชิงไฟฟ้า (electronic polarizability) สูงมีสาเหตุมาจาก oxygen octahedral ของไอออนประจุบวกซึ่งอยู่ที่ B-site และ A-site ในกรณีไอออนของตะกั่ว (Pb^{2+}) เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่ไม่ได้ถูกแชร์อยู่ในชั้น 6s จึงทำให้มีค่าความสามารถในการโพลาไรซ์เชิงไฟฟ้าที่

สูง ซึ่งมีผลต่อสารประกอบของไอออนชนิดนี้ และจากสมมติฐานที่ว่าความสามารถในการโพลาไรซ์เอง (spontaneous polarizability) ของสารประกอบที่มีโครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ที่ไอออนของ A-site ซึ่งอาจเป็นแทลเลียมหรือบิสมัทก่อให้เกิดสารประกอบหลายชนิด ซึ่งมีสูตรทางเคมีทั่วไปดังต่อไปนี้ $[A^{+}_{0.5}B^{3+}_{0.5}]B^{4+}O_3$, $[A^{3+}_{0.5}Ti^{+}_{0.5}]B^{4+}O_3$, $Bi^{3+} B^{3+} O_3$ และ $Ti^{+}B^{5+}O_3$ เป็นต้น สำหรับสารประกอบที่น่าสนใจ คือบิสมัทโซเดียมไททานเตเฟอร์โรอิเล็กทริก (bismuth sodium titanate ferroelectric) เนื่องจากสารประกอบระบบนี้มีความเป็นไปได้ที่จะมีสมบัติที่สามารถนำมาทดแทนการใช้สารประกอบที่มีออกไซด์ของตะกั่วเป็นองค์ประกอบ

BNKT เป็นสารละลายของแข็งจากบิสมัทโซเดียมไททานเตและบิสมัทโพแทสเซียมไททานเต $yBNT-(1-y)BKT$ โดยลักษณะโครงสร้างผลึก ณ อุณหภูมิห้องจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณสัดส่วนของโพแทสเซียมสารประกอบ และพบว่า สัดส่วนผสมที่ใกล้เคียงกับบริเวณรอยต่อเฟสที่มีสัญญาณเหมือนกัน (morphotropic phase boundary; MPB) เมื่อ $0.16 < y < 0.20$ ให้ค่าสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงระบบผลึกตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ณ อุณหภูมิห้อง ($25^{\circ}C$) ระบบผลึกของ BNKT เป็นรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) ซึ่งมีสมบัติทางไฟฟ้าเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ระบบผลึกจะเปลี่ยนไปเป็นเตตระโกนอล (tetragonal) และผลึกลูกบาศก์ (cubic) ตามลำดับ ซึ่งพบจะมีผลกระทบต่อนสมบัติทางไฟฟ้าเช่นกัน โดยที่จะเปลี่ยนไปเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก (antiferroelectric) และ พาราอิเล็กทริก (paraferroelectric) ตามลำดับ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

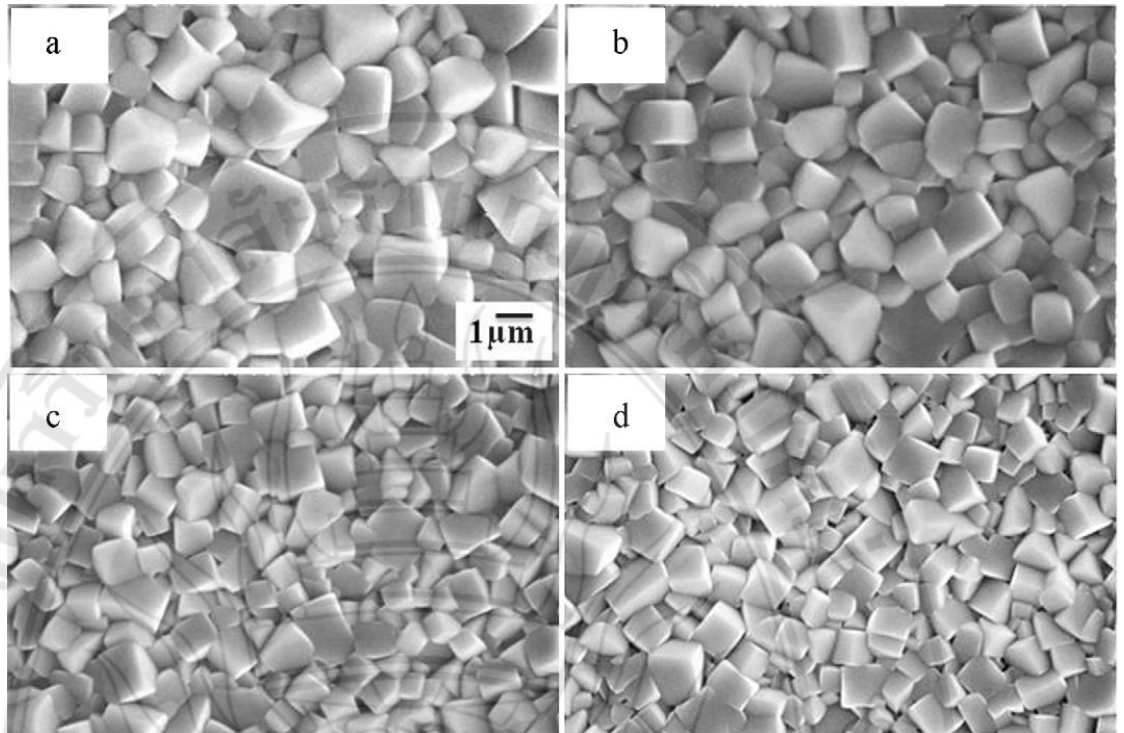
ในปี 2010 Ky-Nam Pham และคณะ [19] ได้ศึกษาผลการเจือไนโอเบียมในเซรามิกบิสมัทโซเดียมไททานเตและบิสมัทโพแทสเซียมไททานเต โดยเซรามิกบิสมัทโซเดียมไททานเตและบิสมัทโพแทสเซียมไททานเตในสัดส่วน $Bi_{0.5}(Na_{0.82}K_{0.18})_{0.5}TiO_3$ พบว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เจืออยู่ในช่วง MBP โดยมีเฟสรอมโบฮีดรอลและเตตระโกนอลอยู่ จากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของเฟสไปเป็นควบิกเมื่อเจือไนโอเบียมที่ปริมาณมากขึ้นดังภาพ 2.9



ภาพที่ 2.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อเจือไนโอเบียมในเซรามิกบิสมาทโซเดียมไททานตและบิสมาทโพแทสเซียมไททานต [19]

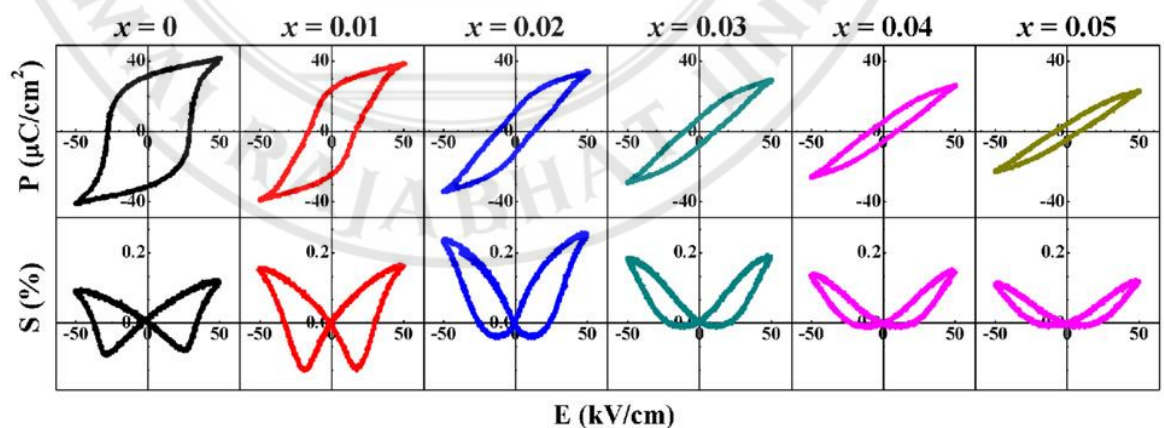
และยังพบอีกว่าที่การเจือไนโอเบียมร้อยละ 3 โดยโมลชิ้นงานตัวอย่างให้ค่าความเครียดที่เหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก สูงถึง 641 พิโกเมตรต่อโวลต์

ในปี 2011 Aman Ullah และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมต่อโครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกบิสมาทโซเดียมโพแทสเซียมไททานต โดยสัดส่วนที่ทำการศึกษาคือ $0.975[\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{1-x}\text{K}_x)_{0.5}\text{TiO}_3]-0.025\text{BiAlO}_3$ โดยที่ x อยู่ในช่วง 0-0.25 พบว่าที่ x เท่ากับ 0.22 ให้ค่าความเครียดที่เหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก สูงถึง 533 พิโกเมตรต่อโวลต์ และความเข้มข้นของโพแทสเซียมที่มากขึ้นส่งผลให้ได้ขนาดเกรนที่เล็กลงดังแสดงในภาพที่ 2.10



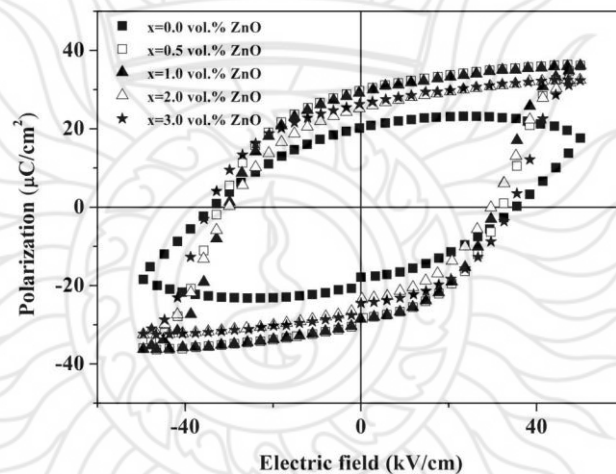
ภาพที่ 2.10 ภาพถ่าย SEM ของเซรามิก BNKT-BA ที่เติมโพแทสเซียมที่สัดส่วน x เท่ากับ 0.15, 0.20, 0.22 และ 0.25 [20]

ในปี 2013 Han Bak Lee และคณะ [21] ได้ทำการสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของสารละลายของแข็งระหว่างระบบบิสมัทโซเดียมโพแทสเซียมไททานเตกับระบบแบเรียมแคลเซียมเซอร์โคเนตตามสัดส่วนดังนี้ $(1-x)\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.82}\text{K}_{0.18})_{0.5}\text{TiO}_3-x(\text{Ba}_{0.8}\text{Ca}_{0.2})\text{ZrO}_3$ ที่สัดส่วน x เท่ากับ 0.01-0.05 พบว่าผลของสัดส่วน x ทำให้ได้วงจรวีสเทอร์ริสที่แคบคดังแสดงใน ภาพที่ 2.11 อีกทั้งให้ค่าให้ค่าความเครียดที่เหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก สูงสุดถึง 549 พิโกเมตรต่อโวลต์



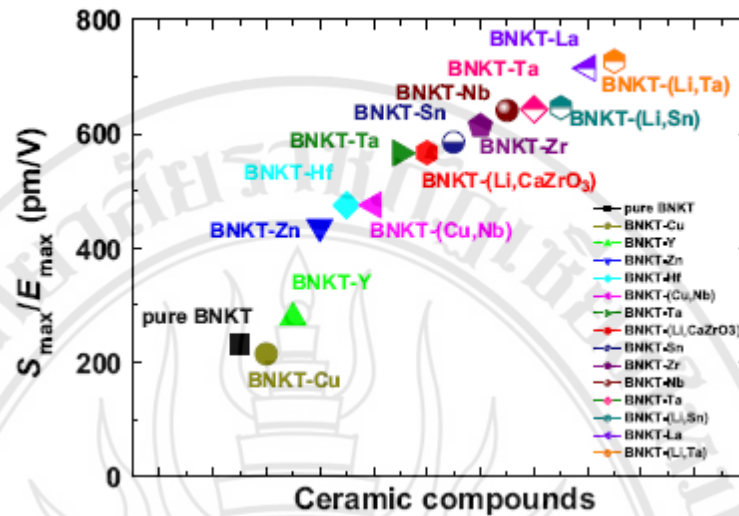
ภาพที่ 2.11 ผลของ BCZ ที่ผสมใน BNKT เซรามิกต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและสมบัติ
ความเครียด[21]

ในปี 2014 Chanade Wichasilp และคณะ [22] ได้ทำการสังเคราะห์และวิเคราะห์สมบัติของ เซรามิกบิสมาทโซเดียมโพแทสเซียมไททาเนตที่เติมด้วยซิงค์ออกไซด์นาโนพบว่าการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์นี้สามารถปรับปรุงสมบัติความเป็นผลึก ไดอิเล็กทริก และเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก ระบบนี้ได้ และยังสามารถทำให้ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกลดลงในการเติมไปเพียงเล็กน้อย ซึ่งบ่งชี้ว่าค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกสามารถปรับปรุงโดยการเติมอนุภาคนาโนนี้ ยิ่งไปกว่านั้นสมบัติ เฟอร์โรอิเล็กทริกก็ยังดีขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.12



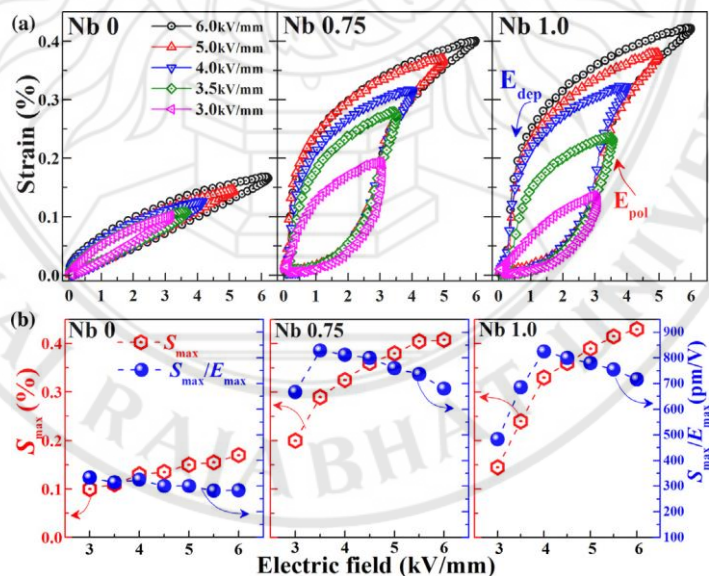
ภาพที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้าของเซรามิก BNKT/xZnO
[22]

ในปี 2015 Nguyen van Quyet และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาผลการเจือปนในเซรามิกบิสมาทโซเดียมโพแทสเซียมไททาเนตกับแคลเซียมเซอร์โคเนต ในสัดส่วน $0.97\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.4-x}\text{Li}_x\text{K}_{0.1}\text{TiO}_3-0.03\text{CaZrO}_3$ (BNKTCZ-xLi) ($x = 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$, และ 0.05) พบอีกว่าที่การเจือปนโอเปียมร้อยละ 5 โดยโมลชิ้นงานตัวอย่างให้ค่าความเครียดที่เหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก สูงถึง 567 พิโกเมตรต่อโวลต์ อย่างไรก็ตามงานวิจัยได้รวบรวมข้อมูลที่น่าสนใจเกี่ยวกับการเพิ่มของความเครียด (strain) เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติของเซรามิกบิสมาทโซเดียมโพแทสเซียมไททาเนตดังในภาพที่ 2.13



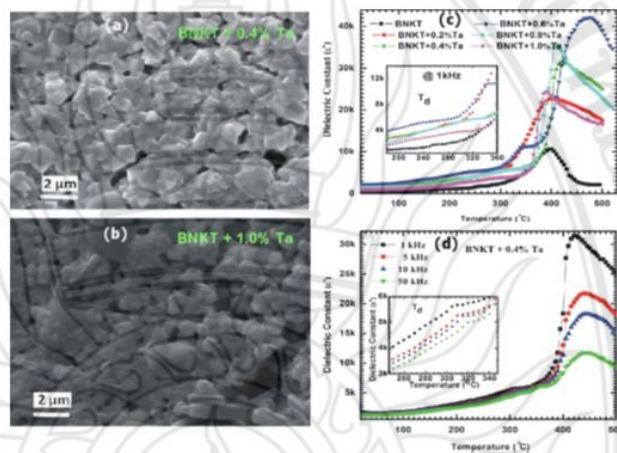
ภาพที่ 2.13 สมบัติของความเครียดที่ถูกเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่างที่ถูกปรับปรุงสมบัติโดยใช้สารเจือต่าง ๆ กัน [23]

adnan Maqbool et al. (2015) [24] ได้ศึกษาเซรามิกไร้ตะกั่วระบบ $0.99[(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})_{0.935}\text{Ba}_{0.065}\text{Ti}_{(1-x)}\text{Nb}_x\text{O}_3]-0.01\text{SrZrO}_3$ โดยที่ $\text{Nb}100x=0-1$ พบว่าเมื่อเพิ่มการเติมไนโอเบียมที่ $\text{Nb}1.0$ ให้ค่าความเครียดที่เหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก สูงถึง 825 พิโกเมตรต่อโวลต์ที่สนามไฟฟ้า 4 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร ตามภาพที่ 2.14 โดยมีขนาดเกรนที่ลดลงจาก 2.48 ถึง 1.89 ไมโครเมตรเมื่อมีการเติมไนโอเบียมมากขึ้น



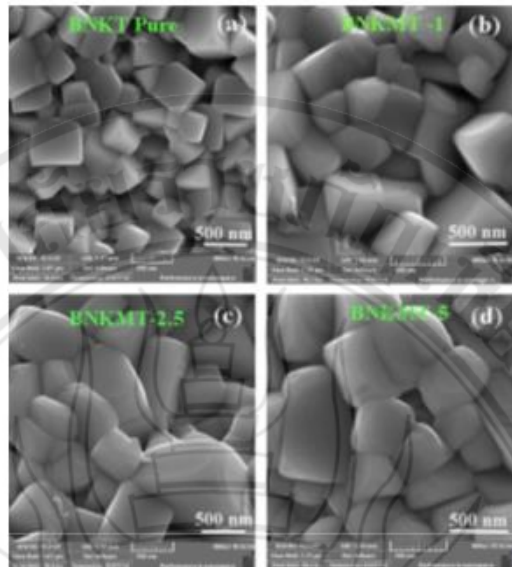
ภาพที่ 2.14 สมบัติของความเครียดที่ถูกเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่างเมื่อทำการเติมไนโอเบียมสูงขึ้น [24]

Krishan Kumar et al. (2015) [25] ได้ศึกษาเซรามิก $0.50(\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5})\text{TiO}_3$ - $0.50(\text{K}_{0.5}\text{Bi}_{0.5})\text{TiO}_3$ ที่เจือด้วยแทนทาลัม (Ta) โดยร้อยละโดยมวลตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 พบในช่วงของการเจือต่ำกว่าร้อยละ 0.4 ขนาดเกรนมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและขนาดเกรนใกล้เคียงกันแต่เมื่อทำการเจือมากขึ้นพบว่าขนาดของเกรนลดลง และในการเจือด้วยแทนทาลัมสามารถปรับปรุงสมบัติไดอิเล็กทริกที่เจือไปร้อยละ 0.6 ทำให้ได้ค่าไดอิเล็กทริกสูงสุด 42,100 วัดที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ขนาดเกรนและไดอิเล็กทริกแสดงในภาพที่ 2.15



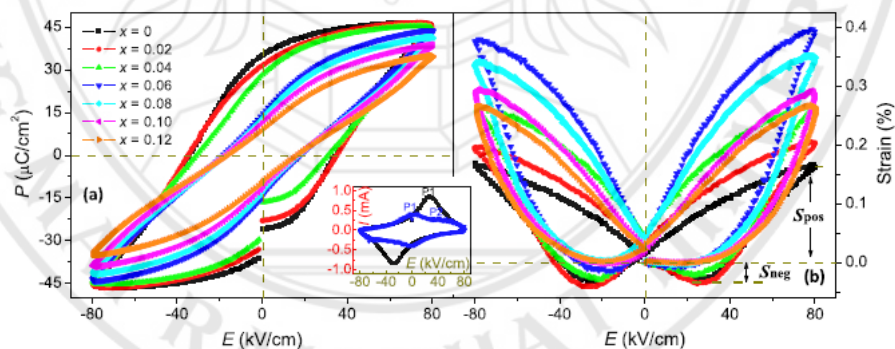
ภาพที่ 2.15 แสดงลักษณะของเกรนและค่าไดอิเล็กทริกเมื่อทำการเจือด้วย Ta [25]

ในปี 2016 Sonia Bhandari et al. [26] ได้ศึกษาเซรามิกระบบ $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.65}\text{K}_{0.35})_{0.5}(\text{Mn}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ โดยที่ x มีค่าอยู่ร้อยละ 0.0-0.5 พบว่าเมื่อเติมแมงกานีสสูงขึ้นมีผลทำให้ขนาดเกรนเพิ่มขึ้นจากที่ไม่ได้เติมมีขนาดเท่ากับ 0.52 ไมโครเมตร เป็น 0.52 ที่การเติมแมงกานีสที่ร้อยละ 0.25 ลักษณะของเกรนแสดงในภาพที่ 2.16 และในปริมาณการเติมที่ร้อยละ 0.25 ส่งผลให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) 176 พิโกคูลอมบ์ต่อนิวตัน



ภาพที่ 2.16 ขนาดเกรนเมื่อทำการเติมแมงกานีสมากขึ้น[26]

Jigong Hao et al. (2016) [27] ได้ทำการศึกษาเซรามิก $0.99[(1-x)\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.80}\text{K}_{0.20})_{0.5}\text{TiO}_3-x\text{BiFeO}_3]-0.01(\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{NbO}_3$ ที่ x เท่ากับ 0 ถึง 0.12 พบว่าเมื่อทำการเติมบิสเมทเพอร์ไรท์ทำให้มีขนาดเกรนโดยเฉลี่ยใหญ่ขึ้น ให้ค่าความเครียดที่เหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกสูงสุด 488 พิโกเมตรต่อโวลต์ที่สนามไฟฟ้า 8 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานที่ x เท่ากับ 0.06 ตามภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและความเครียดที่เหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกเมื่อทำการเติมบิสเมทเพอร์ไรท์ [27]

Pharatree Jaita et al. (2016) [28] ได้ทำการศึกษาสารละลายของแข็งระบบ $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.80}\text{K}_{0.20})_{0.5}\text{TiO}_3-(\text{Ba}_{0.70}\text{Sr}_{0.30})\text{TiO}_3$: (BNKT-BST) ที่สัดส่วนของแบเรียมสตรอนเทียมไททานेट

เท่ากับ 5 ร้อยละโดยโมล ให้ค่าความเครียดที่เหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกสูงสุด 732 พิโกเมตรต่อโวลต์ ตามตารางที่ 2.1 โดยที่แบเรียมสตรอนเทียมไททานเตมีผลทำให้มีขนาดยูนิตเซลล์ใหญ่ มีอัตราส่วนระหว่าง c/a มากขึ้น

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติความเครียดที่เหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกของวัสดุ(BNKT-BST) [28]

System	$S_{\max}$ (%)	d_{33}^* (pm/V)	$E_{\max}$ (kV/cm)
$\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.80}\text{K}_{0.20})_{0.5}\text{TiO}_3$	0.23	418	55
$\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.80}\text{K}_{0.20})_{0.5}\text{TiO}_3-0.05$ $(\text{Ba}_{0.70}\text{Sr}_{0.03})\text{TiO}_3$	0.40	732	55
$\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.80}\text{K}_{0.20})_{0.5}\text{TiO}_3-0.05$ $\text{Ba}(\text{Ti}_{0.90}\text{Sn}_{0.10})\text{O}_3$	0.36	649	55
$\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.78}\text{K}_{0.22})_{0.5}$ $(\text{Ti}_{1-x}\text{Z}_x)\text{O}_3$	0.43	614	70
$\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.80}\text{K}_{0.20})_{0.5}$ $\text{TiO}_3-\text{BiAlO}_3$	0.30	391	70
$\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.78}\text{K}_{0.22})_{0.5}\text{TiO}_3-$ $(\text{Bi}_{0.5}\text{La}_{0.5})\text{AlO}_3$	0.38	679	70
$\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.78}\text{K}_{0.22})_{0.5}$ $\text{TiO}_3-0.03\text{BiFeO}_3$	0.35	676	50
$(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3-\text{SrTiO}_3$	0.29	488	60
$[0.93(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3-$ $0.07\text{BaTiO}_3]-\text{Pr}$	0.43	770	55
$(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3-(\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5})$ $\text{TiO}_3-\text{SrTiO}_3$	0.36	600	60

วัสดุไพเอโซอิเล็กทริก

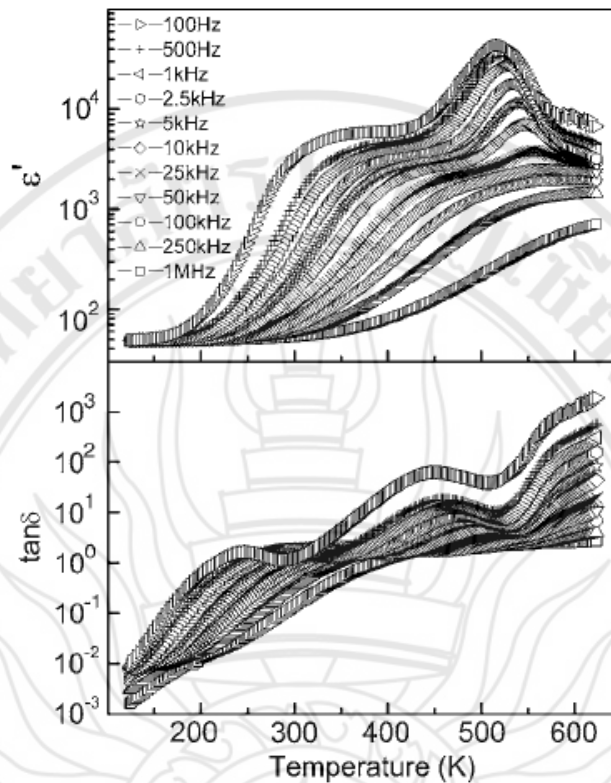
วัสดุที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงในปัจจุบันหรือที่นิยมเรียกกันว่าวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกซึ่งมีค่าไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 10^4 - 10^5 นั้น วัสดุในกลุ่มนี้ที่น่าสนใจได้แก่ กลุ่มของวัสดุที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น สตรอนเชียมไนโอเบต ($\text{SrFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$; (SFN)) และ แบเรียมไทแทนเต ($\text{BaFe}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3$; (BFT)) [29-31] เป็นต้น และวัสดุทั้งคู่นี้มีสมบัติเป็นรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกในช่วงอุณหภูมิกว้าง เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติของวัสดุชนิดนี้ มีรายงานว่าใช้วิธีสังเคราะห์สารละลายของแข็งใหม่ตัวอย่างเช่น $\text{Sr}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3-\text{PbTiO}_3$ แล้วทำให้สมบัติทางไดอิเล็กทริกดีขึ้น

ในส่วนของวัสดุเจแอนที่ไดอิเล็กทริกที่กล่าวถึงนี้มีโครงสร้างแบบคอมเพล็กซ์เพอโรสไกต์มีสูตรโครงสร้างทั่วไปเป็น $A(B'B'')O_3$ ถึงให้ค่าไดอิเล็กทริกที่สูงเซรามิกที่น่าสนใจในระบบนี้ได้แก่ สตรอนเชียมไอรอนไนโอเบต มีโครงสร้างเป็นมอนอคลินิก [32] ที่อุณหภูมิห้องแต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่ามิได้หลายโครงสร้างดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงโครงสร้างและตัวแปรของแลททิซของวัสดุระบบสตรอนเชียมไอรอนไนโอเบต

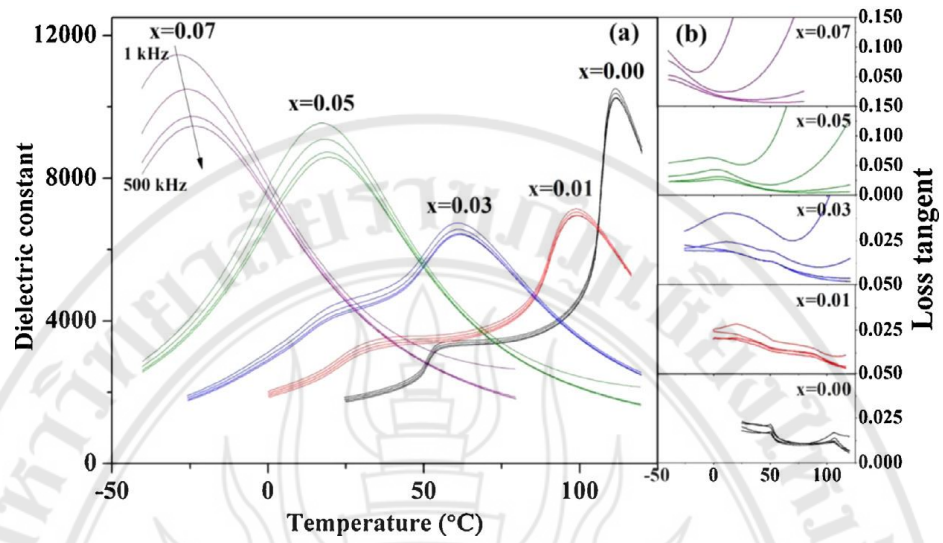
นักวิจัย	โครงสร้าง	ตัวแปรของแลททิซ (อังสตรอม)			มุม (องศา)
		a	b	c	β
Tezuka et al.	orthorhombic	5.6082	7.9642	5.6084	90
Rama et al.	orthorhombic	5.62	7.96	5.61	90
Liu et al	orthorhombic	5.6120	5.6050	7.9616	90
Ke et al.	orthorhombic	-	-	-	90
Tao et al.	cubic	3.987	-	-	90
Tao et al.	cubic	3.951	-	-	90
Sonali Saha and T P Sinba	Monoclinic	2.836	2.882	2.804	92.83
Tao et al.	Tetragonal	5.6078	5.6078	7.9658	90
Xia et al	Tetragonal	5.6082	5.6082	7.9720	90

ความหนาแน่นทางทฤษฎีของสตรอนเชียมไอรอนไนโอเบตมีค่าเท่ากับ 5.57 g/cm^3 สำหรับโครงสร้างคิวบิกและ 5.62 g/cm^3 สำหรับโครงสร้างเททาโกนอล สำหรับค่าของไดอิเล็กทริกและการค่าความสูญเสียทางไดอิเล็กทริกแสดงในภาพที่ 2.18

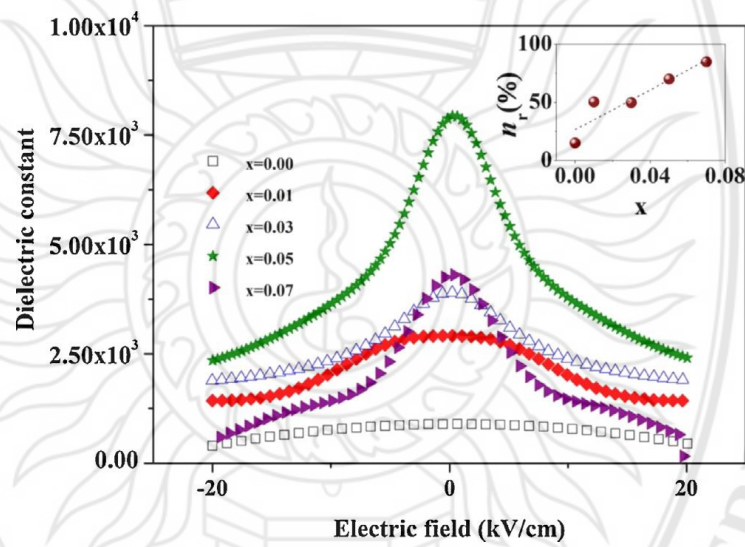


ภาพที่ 2.18 แสดงค่าไดอิเล็กทริกและค่าความสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุสตรอนเชียมไอรอนไนโอเบต [33]

นอกจากนี้ยังมีการรายงานผลการสังเคราะห์สารละลายของแข็งระหว่างเซรามิกที่มีโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ที่มีความโดดเด่นทางด้านเพียโซอิเล็กทริกกับทางด้านจางานที่ไดอิเล็กทริกในระบบแบเรียมเซอร์โคเนียมไททานเตกับแบเรียมไอรอนแทนทาเลต(BZT-BFT) [34] ผลที่ได้มีการปรับปรุงสมบัติไดอิเล็กทริกดังแสดงในภาพที่ 2.19 อีกทั้งยังส่งผลให้ได้สมบัติทูลานาลิทีที่สูงขึ้นตามภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.19 แสดงค่าไดอิเล็กทริกและค่าความสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ BZT-BFT [34]



ภาพที่ 2.20 สมบัติพุนาบีลิตี้ของวัสดุ BZT-BFT [34]