บทที่ 2
วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ประวัติโดยสังเขปของการค้นพบวัสดุชนิดเฟร์โรอิเล็กทริก [11]

ช่วงเวลาตั้งแต่ต้นปี ค.ศ. 1800 ถึง 1999 มีการค้นพบปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริกดังนี้

- ค.ศ. 1940 กำเนิดของเซรามิกชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก
- ค.ศ. 1950 เริ่มมีการพัฒนาเซรามิกชนิดเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT
- ค.ศ. 1960 มีการวิจัยและพัฒนาเซรามิกโปร่งแสงชนิดเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead Lanthanum Zirconate Titanate, PLZT)
- ค.ศ. 1970 มีการใช้เฟอร์โรอิเล็กทริกคอมโพสิท (Ferroelectric composite)
- ค.ศ. 1980 มีการพัฒนาเซรามิกรีแลกเซอร์ (relaxor) ชนิดเลดแมกนีเซียมไนโอเบต (Lead Magnesium Niobate, PMN) และการใช้เทคนิคโซล-เจล (sol-gel process) ในการทำฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริก
- ค.ศ. 1990 ประดิษฐ์ the strain-amplified actuator
- ปัจจุบันมีการขึ้นรูปฟิล์มเฟอร์โรอิเล็กทริกบนแผ่นซิลิคอน

2.1.1 การค้นพบเซรามิกชนิดเฟร์โรอิเล็กทริก [11]

การค้นพบปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริก และเพียโซอิเล็กทริกเริ่มได้รับความสนใจในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 (กลางปีค.ศ. 1940) ซึ่งมีความต้องการใช้งานตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากขึ้น วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุประเภทสเตียไทต์ (steatite) ไมก้า (miga) ไททาเนีย (TiO_2) แมกนีเซียม-ไททาเนต ($MgTiO_3$) และแคลเซียมไททาเนต ($CaTiO_3$) ซึ่งมีค่าไดอิเล็กทริกเท่ากับ 100 หรือน้อยกว่านั้น จากการศึกษาของ Thurnauer Wainer และ Solomon มีผลยืนยันว่าแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่า 1100 ในช่วงปลายสงครามโลกครั้งที่ 2 จึงเริ่มมีการตีพิมพ์การวิจัยในเรื่องเหล่านี้ออกสู่สาธารณะมากขึ้น และหลายประเทศให้ความสนใจศึกษา เช่น สหรัฐอเมริกา อังกฤษ รัสเซีย และญี่ปุ่น

ในปี ค.ศ. 1945 และ 1946 มีรายงานการศึกษาของ Wul และ Goldman จากรัสเซีย และกลุ่มของ Hipple จาก MIT เสนอว่าแบเรียมไททาเนตมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงเพราะมีคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก และกลุ่มของ Gray พบว่าการให้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกสามารถจัดเรียงโดเมนภายในเกรนทำให้เซรามิกมีคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก และเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งการจัดเรียงตัวด้วยกระแสไฟฟ้าเช่นนี้เรียกว่า โพลลิ่ง (poling) ต่อมากระบวนการนี้จึงเป็นกุญแจสำคัญที่เปลี่ยนเซรามิกที่เฉื่อยไปเป็นวัสดุที่ตอบสนองต่อเชิงกล-ไฟฟ้า (electromechanical) งานวิจัยเหล่านี้เป็นการค้นพบที่มีคุณค่ามากเพราะเปลี่ยนแนวความคิดที่ว่าเซรามิกไม่สามารถแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากผลึกที่ผ่านการเผาอบผนึก (sintering) จะมีการจัดเรียงตัวแบบไม่มีทิศทางและมีผลให้โพลาไรเซชันโดยรวมมีค่าเป็นศูนย์เพราะหากเป็นวัสดุที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกแล้วจะสามารถเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับการจัดเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กในวัสดุแม่เหล็ก

อาจกล่าวได้ว่ามี 3 ขั้นตอนที่ทำให้เกิดความรู้และความเข้าใจปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริก คือ

1. การค้นพบว่าแบเรียมไททาเนตมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง
2. การค้นพบปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริกทำให้แบเรียมไททาเนตมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง
3. การค้นพบการจัดเรียงไดโพลของผลึก/โดเมนภายในเซรามิกเชิงซ้อนอันเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอก ซึ่งทำให้เซรามิกเหล่านั้นมีสมบัติคล้ายผลึกเดี่ยว

2.1.2 เฟร์โรอิเล็กทริก [11-13]

จาก 20 point group ของผลึกที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง (noncentrosymmetric) ที่เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะมีอยู่ 10 point group ที่มีขั้ว (polar) และเกิดไดโพลโมเมนต์ได้ด้วยตัวเอง แม้ไม่ได้รับสนามไฟฟ้ากระทำซึ่งเรียกกลุ่มสารพวกนี้ว่าโพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous polarization) โดยที่ผลึกมีขั้วเหล่านี้จะมีสภาพเป็นเพียโซอิเล็กทริกที่ดี ในกรณีที่ให้สนามไฟฟ้าแรงพอที่ทำให้ทิศทางของเวกเตอร์โพลาไรเซชันเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งสารใน point group นี้เรียกว่า เฟร์โรอิเล็กทริก กล่าวคือสารเฟร์โรอิเล็กทริกทุกชนิดมีสภาพเป็นเพียโซอิเล็กทริก แต่สารเพียโซ-อิเล็กทริกไม่จำเป็นจะต้องมีสภาพเป็นเฟร์โรอิเล็กทริก

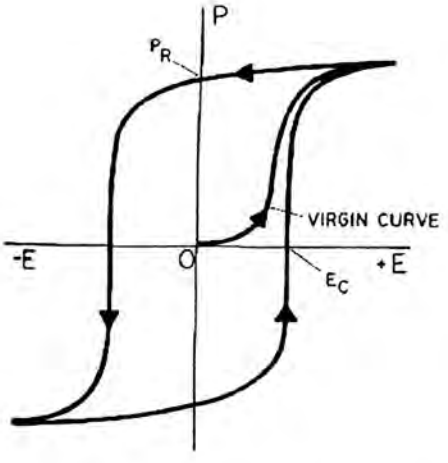
สำหรับโครงสร้าง ในสารเฟร์โรอิเล็กทริก นั้นพบว่าจะมีโดเมน (Domain) ที่มีขั้วอยู่และจะวางตัวในทิศทางเป็นแบบสุ่มดังรูปที่ 2.1 แต่เมื่อใดที่มีสนามไฟฟ้าภายนอกที่มีความแรงมากพอมากระทำกับสารจะทำให้โดเมนเหล่านั้นตอบสนองไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะมีการใช้พลังงานที่จะนำมาใช้ในการเปลี่ยนทิศทางหรือการหมุนของโดเมน

(ก) (ข)

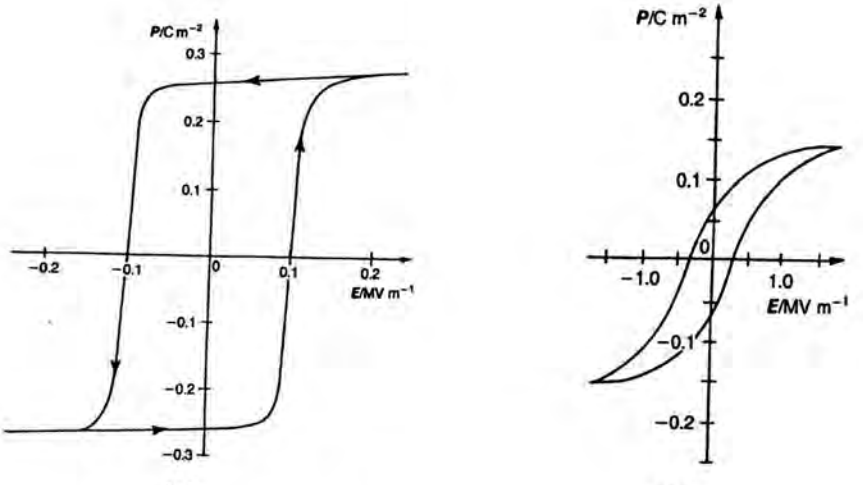
รูปที่ 2.1 (ก) แสดงโดเมนในผลึกเชิงเดี่ยว $BaTiO_3$ (ข) แสดงโดเมนในเซรามิก $BaTiO_3$ [2]

ซึ่งการศึกษาสมบัติเฟร์โรอิเล็คทริกจะทำโดยการศึกษา วงฮิสเทอรีซีส (hysteresis loop) ดังรูปที่ 2.2 และปริมาณที่สำคัญใน วงฮิสเทอรีซีส ได้แก่ ค่าสภาพคงเหลือของโพลาไรเซชัน (remanent polarization, P_r) ซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกถึงความเป็นเฟร์โรอิเล็กทริก ของสารนั้นๆ นอกจากนั้นแล้วค่าสนามลบล้าง (coercive field ; E_c) จะเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางของโดเมนได้ และยังเกี่ยวข้องกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับสารที่เป็นเซรามิกอีกด้วย ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการหมุนทิศทางของโดเมนจะหาได้จากพื้นที่ของวงฮิสเทอรีซีส

โดยทั่วไปแล้วในเซรามิกเฟร์โรอิเล็กทริกจะให้ลักษณะของวงฮิสเทอรีซีส ที่มีลักษณะโค้งมากกว่าผลึกเชิงเดี่ยว ทั้งนี้เพราะผลึกเชิงเดี่ยวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ในทันทีที่ให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอกเข้าไป เนื่องจากมีโดเมนจำนวนน้อย และโดเมนมีขนาดใหญ่ จึงเกิดการเรียงตัวได้เร็วกว่าโดเมนที่มีขนาดเล็ก และมีจำนวนมากอย่างในเซรามิก ซึ่งทำให้รูปร่างของวงฮิสเทอรีซีส ของผลึกเดี่ยวออกมาเป็นสี่เหลี่ยมมากกว่าดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 วงฮิสเทอรีซีส ของสารเฟร์โรอิเล็คทริก [1]



รูปที่ 2.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโพราไรซ์เซชันและสนามไฟฟ้า ของ (ก) ผลึกเชิงเดี่ยว ของ $BaTiO_3$ (ข) เซรามิก $BaTiO_3$ [2]

สำหรับพื้นที่ใต้กราฟของวงฮิสเทอรีซีสนั้นสามารถบอกถึงการสูญเสียพลังงานได้ด้วย กล่าวคือ ยิ่งวงฮีสเตอรรีซีสกว้างเท่าไหร่ยิ่งทำให้ต้องมีการสูญเสียพลังงานในเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเท่านั้น และยิ่งวงฮีสเตอรีซีสแคบเท่าไหร่การสูญเสียพลังงานยิ่งจะน้อยลงตามไปด้วย

2.2 พื้นฐานปรากฏการณ์เซรามิกชนิดเพียโซอิเล็กทริกในของแข็ง [10-12]

ในปี พ.ศ. 2423 มีการค้นพบว่าวัสดุบางกลุ่มมีสภาพเพียโซอิเล็กทริกโดย ชองส์ และ ปีแอร์ คูรี (Jacques and Pierre Curie) ขณะที่ได้ทำการศึกษาถึงผลของความดันต่อประจุไฟฟ้าในผลึกของสารประกอบเชิงเดี่ยว (single crystal compound) บางประเภท เช่น ควอร์ซ (quartz) ซิงค์เบลน (zincblende) และ ทัวมาลีน (tourmaline)

คำว่า "เพียโซ" ซึ่งมาจากภาษากรีกแปลว่า "กด" ดังนั้นสมบัติเพียโซอิเล็กทริก คือการเกิดกระแสไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการได้รับแรงกดซึ่งเป็นแรงทางกล ทำให้เกิดความเครียด (strain) ในผลึกซึ่งเกิดการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันเรียกว่าการโพลาไรเซชัน (polarization) และให้กระแสไฟฟ้าออกมา ปริมาณและเครื่องหมายของการโพลาไรเซชันจะแปรผันตามความเครียดที่ได้รับ

2.2.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริก[10-13]

ความเข้าใจในโครงสร้างภายในของวัสดุนั้นเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการศึกษาสมบัติ เพียโซอิเล็กทริกของของแข็ง เมื่อทำการพิจารณาวัสดุที่มีผลึกเดี่ยวพบว่า ผลึกมีองค์ประกอบทางเคมีคงที่ และประกอบด้วยไอออน (อะตอมที่มีประจุ) เรียงตัวกันซ้ำๆ ต่อกันเป็นเครือข่าย เกิดเป็นระนาบผลึก (lattice) หน่วยที่เล็กที่สุดที่มีความสมมาตรเรียกว่าหน่วยเซลล์ (unit cell) และเป็นตัวบอกความเป็นไปได้ของการมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกในผลึก เนื่องจากความสมมาตรของโครงสร้างผลึกภายในถูกสะท้อนด้วยความสมมาตรของสมบัติที่วัสดุนั้นแสดงออกมา

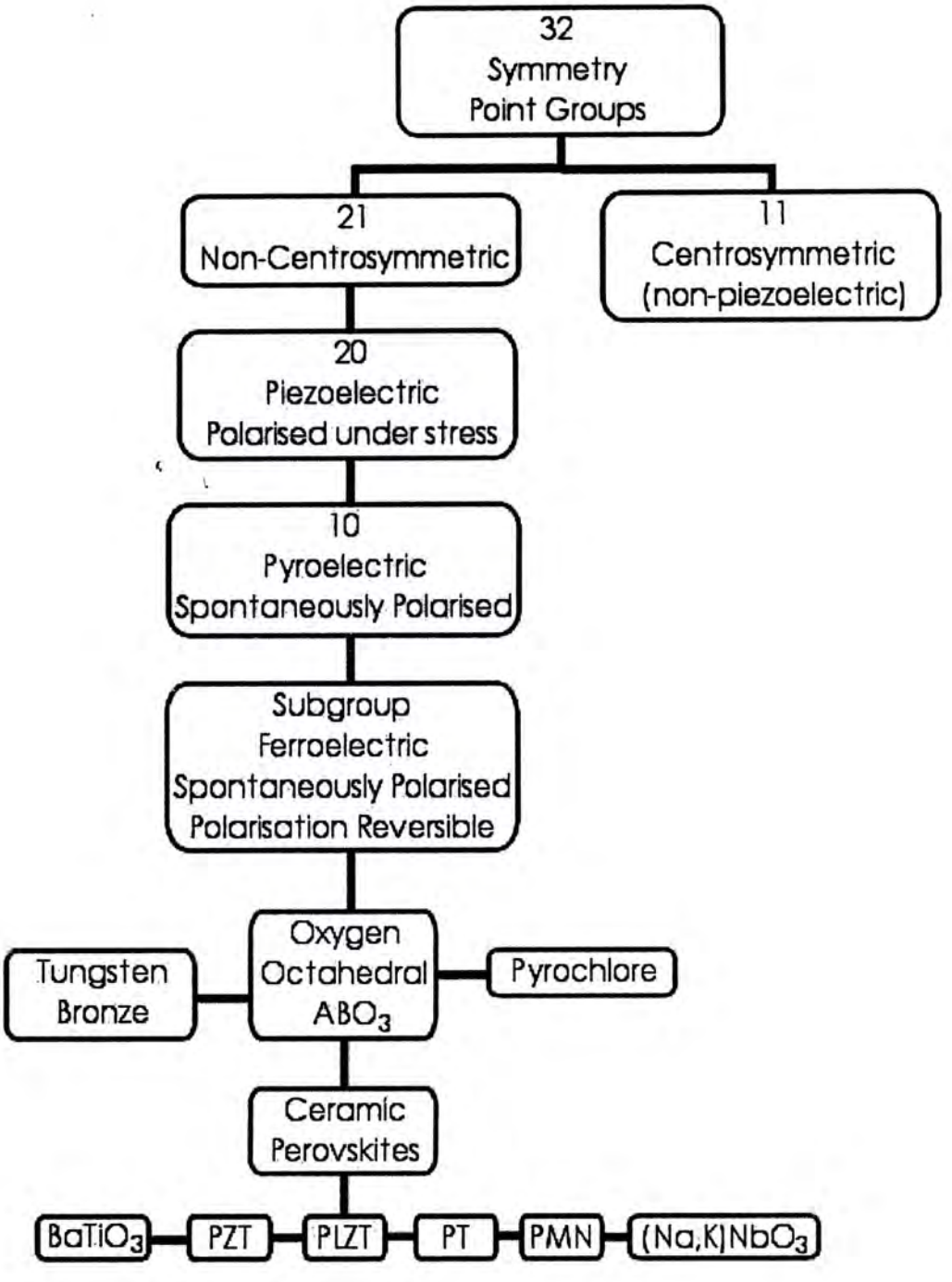
นักผลึกศาสตร์แบ่งผลึกเป็น 32 กลุ่ม ดังแสดงในรูป 2.4 จากผลึก 32 กลุ่มดังกล่าว มี 21 กลุ่มที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง (noncentrosymmetric) ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกซึ่งพบถึง 20 กลุ่ม อีกหนึ่งกลุ่มที่เหลือไม่มีสภาพเป็นเพียโซอิเล็กทริกแม้จะอยู่ในกลุ่มที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง เพราะเกิดปรากฏการณ์พิเศษบางอย่าง การไม่มีสมมาตรของศูนย์กลางเป็นสภาวะสำคัญที่ทำให้เกิดสภาพเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากแรงกดที่ให้กับวัสดุเป็นแบบที่มีสมมาตรของศูนย์กลาง จึงทำให้ผลรวมของการเคลื่อนที่ของประจุบวกและลบสามารถสร้างไดโพลไฟฟ้าขึ้นมา หรือที่เรียกว่าเกิดโพลาไรเซชัน ความแตกต่างของวัสดุที่เป็นเพียโซอิเล็กทริก กับเฟร์โรอิเล็กทริก คือวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไม่สามารถเกิดโพลาไรเซชันด้วยตัวเอง แต่จะเกิดเมื่อให้แรงทางกลต่อผลึกเท่านั้น สภาพเพียโซอิเล็กทริกเกิดขึ้นได้สองแบบคือแบบที่เป็น

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

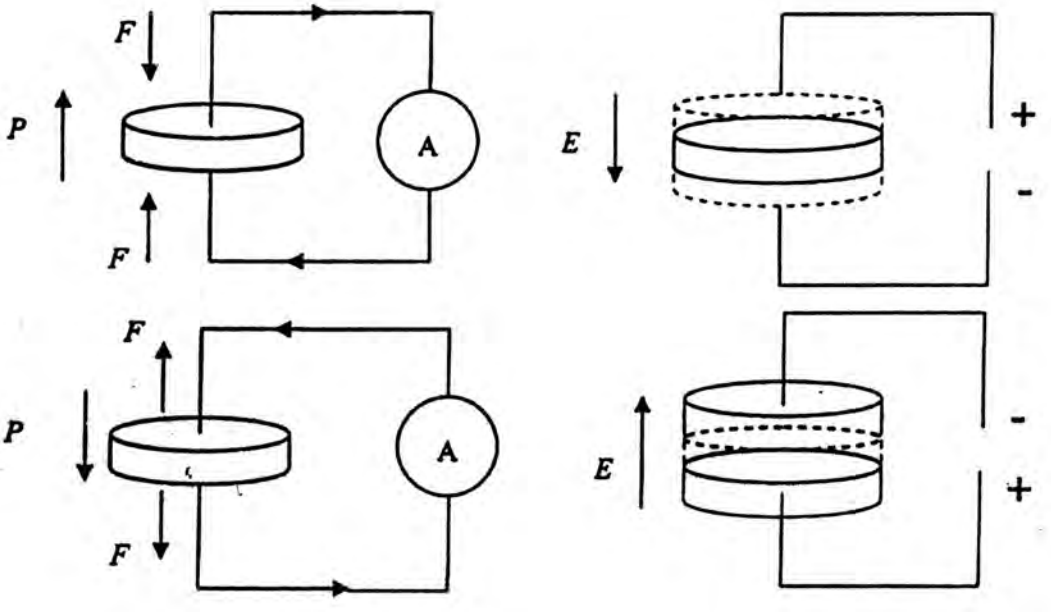
เส้นตรง (direct effect) และแบบผันกลับได้ (converse effect) ซึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันเมื่อสารถูกแรงกลกระทำ หรือเกิดความเค้น (stress) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าเป็นปรากฏการณ์เพียโซ-อิเล็กทริกแบบเส้นตรง และการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงขนาด หรือเกิดความเครียดในสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป เรียกว่าเป็นปรากฏการณ์เพียโซอิเล็ก-ทริกแบบผันกลับ ดังแสดงในรูป 2.5 และระดับการเกิดโพลาไรเซชันจะขึ้นกับระดับความเครียดที่เกิดจากแรงที่ได้รับ และเครื่องหมายของประจุที่เกิดขึ้นอยู่กับว่าแรงที่ให้เป็นแรงดึงหรือแรงกด

กระบวนการโพลลิง (poling) เป็นกระบวนการที่สำคัญที่จะทำให้เกิดสภาพเพียโซอิเล็กทริกในเซรามิกชนิดเฟร์โรอิเล็กทริก ในระหว่างกระบวนการโพลลิงวัสดุจะเกิดการขยายตัวตามแนวแกนสนามไฟฟ้าเล็กน้อย และเกิดการหดตัวในทิศทางที่ตั้งฉากทั้งสองทิศทางเล็กน้อยเช่นกัน ระดับความแรงของสนามไฟฟ้า และอุณหภูมิในการโพลลิงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดการจัดทิศทางและสมบัติที่ได้ของวัสดุ เซรามิกทุกชนิดที่ผ่านการเผาซินเตอร์แล้วจะมีสมบัติโดยรวมที่เหมือนกันในทุกทิศทาง (isotropic) หากไม่มีการโพลลิง เซรามิกจะไม่เปลี่ยนสภาพแม้ว่าแต่ละผลึกจะมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกอยู่แล้วก็ตามดังแสดงในรูปที่ 2.6 เซรามิกที่ผ่านการโพลลิงมีประโยชน์มากมายเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกินอุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) เพราะเซรามิกจะเสียสภาพโพลาไรเซชันที่เกิดจากการโพลลิงที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (T_c)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 05 ต.ค. 2555
เลขทะเบียน 249123
เลขเรียกหนังสือ

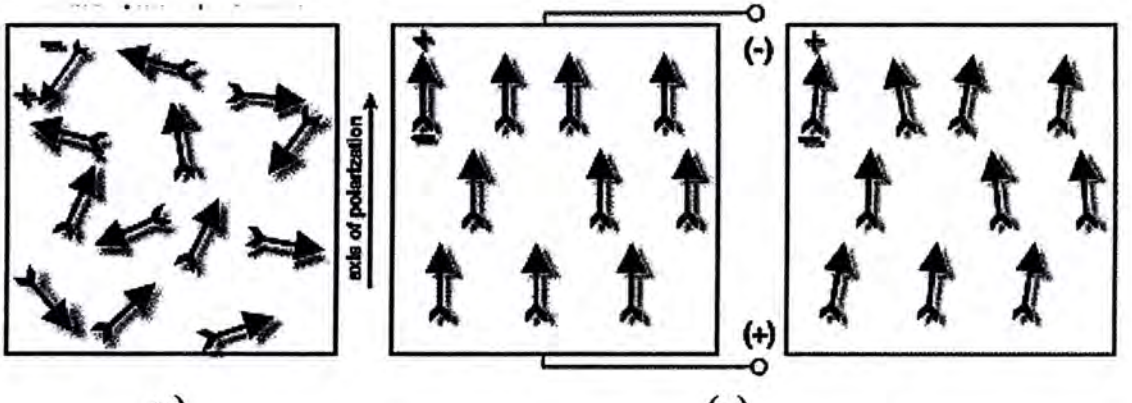


รูปที่ 2.4 การแบ่งกลุ่มของผลึกของวัสดุใน 32 กลุ่ม [11]



(ก) (ข)

รูปที่ 2.5 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในสารเพียโซอิเล็กทริก (ก) แบบตรง (ข) แบบย้อนกลับ [13]



(ก) (ข)

รูปที่ 2.6 แสดงไดโพลภายในเนื้อสาร (ก) ก่อนทำการโพลลิง
(ข) ระหว่างการโพล (ค) ภายหลังการโพล [14]

ดังที่กล่าวมาแล้วว่ากระบวนการโพลลิ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญที่จะทำให้เกิดสภาพเพียโซอิ-เล็กทริกในเซรามิกชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก หากไม่มีการโพลลิ่งเซรามิกจะไม่เปลี่ยนสภาพแม้ว่าแต่ละผลึกจะเป็นเพียโซอิเล็กทริกอยู่แล้วก็ตาม เซรามิกที่ผ่านการโพลลิ่งมีประโยชน์มากเมื่อ

ใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกินอุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) เพราะเซรามิกจะเสียสภาพโพลาไรเซชันที่เกิดจากการโพลลิ่งที่อุณหภูมิสูงกว่า T_c

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกมีกลไกการทำงานสองรูปแบบที่นำมาใช้งานกันในผลึกที่เป็น เพียโซอิเล็กทริกโดยทั่วๆไป และในเซรามิกชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก รูปแบบแรกคือผลทางตรง (direct effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดประจุไฟฟ้าจากการให้แรงกล เช่น เครื่องกำเนิดสัญญาณ (generator) และผลย้อนกลับ (converse effect) ซึ่งการเคลื่อนที่เป็นการทำงานทางกลซึ่งเกิดจากการให้สนามไฟฟ้าเข้าไป เช่น มอเตอร์ (motor)

สมการพื้นฐานที่อธิบายผลทั้งสองแบบคือ

$$D = dE + \varepsilon^T E \quad \text{(generator)} \tag{2.1}$$

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

เมื่อ D คือ dielectric displacement (polarization)

T คือ ความเค้น (stress)

E คือ สนามไฟฟ้า (electric field)

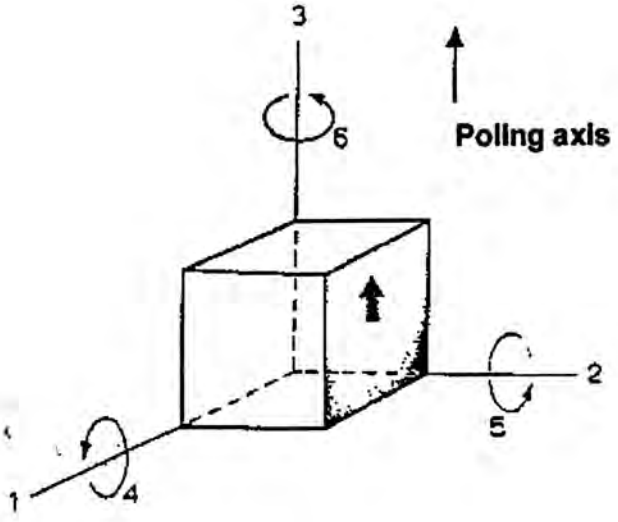
S คือ ความเครียด (strain)

d คือ ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก

s คือ ค่าการให้ตัวของวัสดุ (material compliance (modulus of elasticity))

ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric permittivity)

สมการที่ (1) และ (2) อธิบายสมบัติที่เกิดจากการจัดเรียงไดโพลในทิศทางที่แตกต่างกันของวัสดุ และความเชื่อมโยงระหว่างคุณสมบัติต่างๆของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เช่น การโพลาไรเซชัน และความเครียด (strain) กับทั้งสภาวะทางกล และทางไฟฟ้าของวัสดุ นอกจากนี้สมบัติเหล่านี้ยังขึ้นอยู่กับทิศทางซึ่งจะระบุด้วยตัวห้อย (subscript) เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} แสดงโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นในทิศทาง 3 เมื่อแรงกระทำในทิศทาง 1 ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงเครื่องหมายของแกนสำหรับ poled เซรามิก

ความสัมพันธ์โดยทั่วไปของค่าสัมประสิทธิ์นี้คือ

$$D_3 = d_{33}T_3 \text{ (direct effect)} \qquad (2.3)$$

$$S_3 = d_{33}E_3 \text{ (converse effect)} \qquad (2.4)$$

เมื่อ d มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากันทั้งสองสมการ โดยทั่วไป d มีค่าอยู่ในช่วง $\times 10^{-12}$ C/N สำหรับกลไกทางตรง และ $\times 10^{-12}$ m/V สำหรับกลไกย้อนกลับ วัสดุที่ใช้งานในอุปกรณ์ที่ใช้หลักการสั่น เช่น เครื่องโซนาร์ และเครื่องบันทึกเสียงจะต้องการ d ที่มีค่าสูง

นอกจากค่า d แล้ว ค่า g ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรเปิดก็นำมาใช้ในการอธิบายเซรามิก ชนิดเพียโซอิเล็กทริกสำหรับความสามารถในการให้ความต่างศักย์สูงต่อหน่วยของความเค้นที่ได้รับ ค่า g มีความสัมพันธ์กับ d ดังนี้

$$g = \frac{d}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \qquad (2.5)$$

เมื่อ ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant)

ε_0 คือ สภาพยอม (permittivity) ของอากาศ มีค่า 8.854×10^{-12} F/m

สำหรับค่า piezoelectric coupling factor (k_{33}, k_{31}, และ k_p) เป็นวิธีการวัดระดับของผลทางกล-ไฟฟ้า (electromechanical) ได้โดยตรง และสะดวก เช่น ความสามารถของทรานสดิวเซอร์ที่จะเปลี่ยนจากพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่ง หากเป็นกลไกลทางตรงจะแสดงในรูปรากที่สองของอัตราส่วนของพลังงานที่ให้ออกมาในรูปของไฟฟ้าต่อพลังงานทางกลที่ให้เข้าไป หรือหากเป็นกลไกย้อนกลับจะอยู่ในรูปรากที่สองของอัตราส่วนของพลังงานทางกลที่ให้ออกมาต่อพลังงานไฟฟ้าที่ให้เข้าไป เนื่องจากการเปลี่ยนรูปของพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลจะไม่สมบูรณ์ ดังนั้น k จะน้อยกว่า หนึ่งเสมอ สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกต้องการค่า k ที่สูง เซรามิกโดยทั่วไปมีค่า k_p อยู่ในช่วง 0.35 สำหรับแบเรียมไทเทเนต และสูงถึง 0.72 สำหรับ PLZT

ค่า piezoelectric coupling factor (k_{33}, k_{31}และ k_p) ค่า k นิยามว่า

$$k = \sqrt{\frac{Energy\ Output}{Total\ Mechanical\ Energy\ input}}$$

สำหรับผลทางตรง และในทางกลับกันสำหรับผลย้อนกลับทั้งสองกรณี k จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

สำหรับ k_p (planar coupling coefficient) เป็นสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวกับความถี่ที่ maximum impedance (antiresonant frequency, f_a และ resonant frequency, f_r) ซึ่งคำนวณตามสูตร (กรณีชิ้นงานอยู่ในรูปแผ่นดิสก์)

$$k_p = \left[\left(1 - k_p^{\,2}\right)\left(Besselfunction\right)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (2.6)$$

เนื่องจากความยุ่งยากสูตรในสมการที่ 6 ลดรูปเป็น

$$k_p = \left[2.5\frac{\left(f_a^{\,2} - f_r^{\,2}\right)}{f_r^{\,2}} + 0.038\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (2.7)$$

คุณสมบัติทั้งหมดที่ได้กล่าวถึงอาจจะพบได้ในเพียโซเซรามิกซึ่งก็คือเฟร์โรอิเล็กทริกที่ผ่านการโพลลิ่งนั่นเอง ในระหว่างกระบวนการโพลลิ่งวัสดุจะเกิดการขยายตัวตามแนวแกนการโพลลิ่งเล็กน้อยและเกิดการหดตัวในทิศทางที่ตั้งฉากทั้งสองทิศทางเล็กน้อยเช่นกัน ระดับความแรงของสนามโพลลิ่ง และอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดการจัดทิศทาง และคุณสมบัติที่ได้ของวัสดุ โครงสร้างของวัสดุเป็นสิ่งบอกระดับการโพลลิ่งได้ด้วย เช่น เฟสเตตระโกนอลทำได้ถึง 83 เปอร์เซ็นต์ เฟสรอมโบฮีดรอนทำได้ถึง 86 เปอร์เซ็นต์ และมากถึง 91 เปอร์เซ็นต์สำหรับเฟสออร์โธรอมบิค ซึ่งเป็นค่าที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผลึกเดี่ยวหรือโดเมนเดี่ยว จึงกล่าวได้

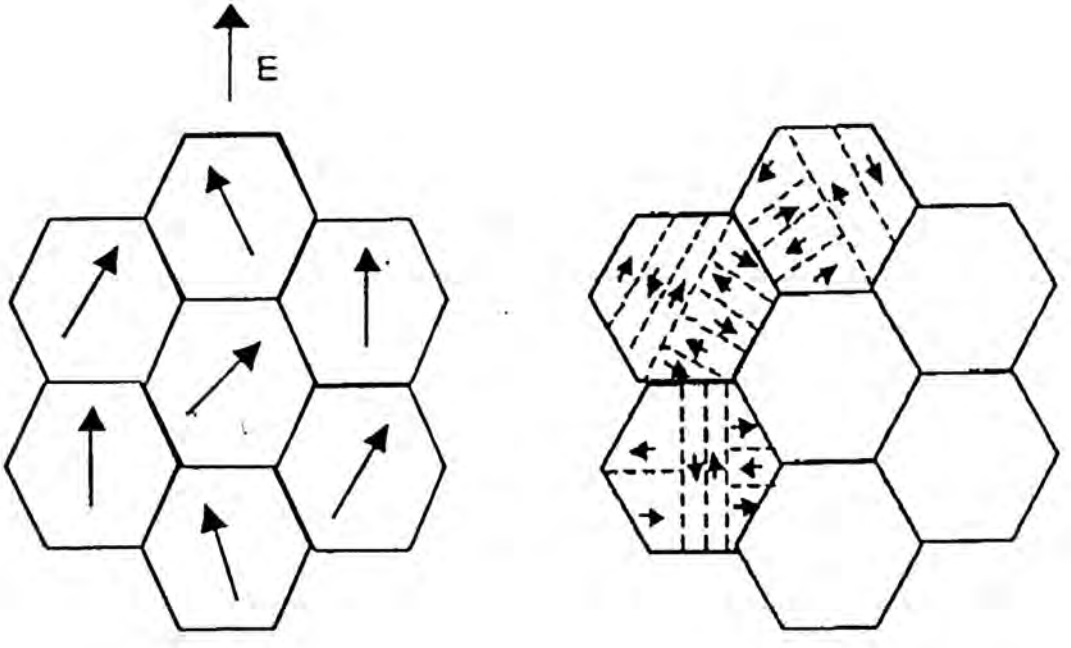
ว่าเซรามิกทุกชนิดที่ผ่านการซินเทอร์ริง และมีสภาพเมื่อมองโดยรวมมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (isotropic) และจะต้องผ่านการโพลลิ่งเพื่อทำให้เป็นเพียโซอิเล็กทริก วัสดุเหล่านั้นเป็นทั้งสารเฟร์โรอิเล็กทริก และเป็นเพียโซอิเล็กทริกด้วย

2.2.2 อุณหภูมิคูรี และการเปลี่ยนเฟส [15]

การเปลี่ยนแปลงของเฟสในสารเฟร์โรอิเล็กทริก จะสอดคล้องกับการเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และโพลาไรเซชันทางไฟฟ้าของวัสดุ อุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) เป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเฟสจาก พาราอิเล็กทริกเฟส (paraelectric phase) ที่อุณหภูมิ $T > T_c$ ซึ่งวัสดุจะไม่แสดงสมบัติความเป็นโพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous polarization) ไปยัง เฟร์โรอิเล็กทริกเฟส (ferroelectric phase) ที่อุณหภูมิ $T < T_c$ ซึ่งวัสดุจะแสดงสมบัติโพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเอง อีกทั้งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) ของวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลง และมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิคูรีด้วย ที่อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิคูรี โครสร้างเฟสจะมีโครงสร้างเป็นพาราอิเล็กทริก และจะไม่มีการแสดงสมบัติความเป็นเฟร์โรอิเล็กทริกใดๆออกมา ซึ่งโครงสร้างเฟร์โรอิเล็กทริกจะเกิดขึ้นจากการบิดเบี้ยว หรือเสียรูปร่างไปของโครงสร้างพาราอิเล็กทริก โดยที่โครงสร้างเฟร์โรอิเล็กทริกจะมีความสมมาตรของโครงสร้างที่น้อยกว่าโครงสร้างพาราอิเล็กทริก ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีไอออนจะมีการเคลื่อนในตำแหน่งที่สมดุล ซึ่งจะทำให้เกิดโพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเองเกิดขึ้น

2.3 โพลาไรเซชัน [11,13]

หากพิจารณาสารเซรามิก ที่ประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กที่มีทิศทางของไดโพลต่างกัน การที่ไดโพลเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ มีผลทำให้เซรามิกไม่สามารถแสดงสมบัติ และวัดค่าเพียโซอิเล็กทริกได้ แต่เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไป จะเป็นการสร้างขั้วให้แก่สาร ซึ่งจะทำให้เกิดโพลาไรเซชัน หรือไดโพลภายในเนื้อสารให้อยู่ในทิศทางใกล้เคียงกัน หรือทิศทางเดียวกับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ดังรูป 2.8 เพื่อเพิ่มสมบัติการเป็นเพียโซอิเล็กทริก และสมบัติทางไฟฟ้าด้วย



รูปที่ 2.8 แสดงการจัดเรียงไดโพลภายในเนื้อสารก่อน และภายหลังการให้สนามไฟฟ้า [13]

2.4 สมบัติไดอิเล็กทริก [12-14]

วัสดุไดอิเล็กทริก ถือได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไปแล้ววัสดุไดอิเล็กทริกจะมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าซึ่งไม่นำไฟฟ้า แต่จะมีความแตกต่างจากฉนวนไฟฟ้าโดยทั่วไปคือการมีสมบัติของการเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งค่าความสามารถในการกักเก็บประจุไฟฟ้าของสารไดอิเล็กทริกนี้จะเรียกว่า ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) เมื่อทำการให้สนามไฟฟ้าแก่สารไดอิเล็กทริก สารไดอิเล็กทริกจะเกิดโพลาไรเซชันขึ้น ซึ่งจะมีค่าเท่ากับผลรวมของโพลาไรเซชันต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (net polarization/unit volume) ซึ่งถ้ามีค่าโพลาไรเซชันสูงจะส่งผลให้สารไดอิเล็กทริกมีค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย

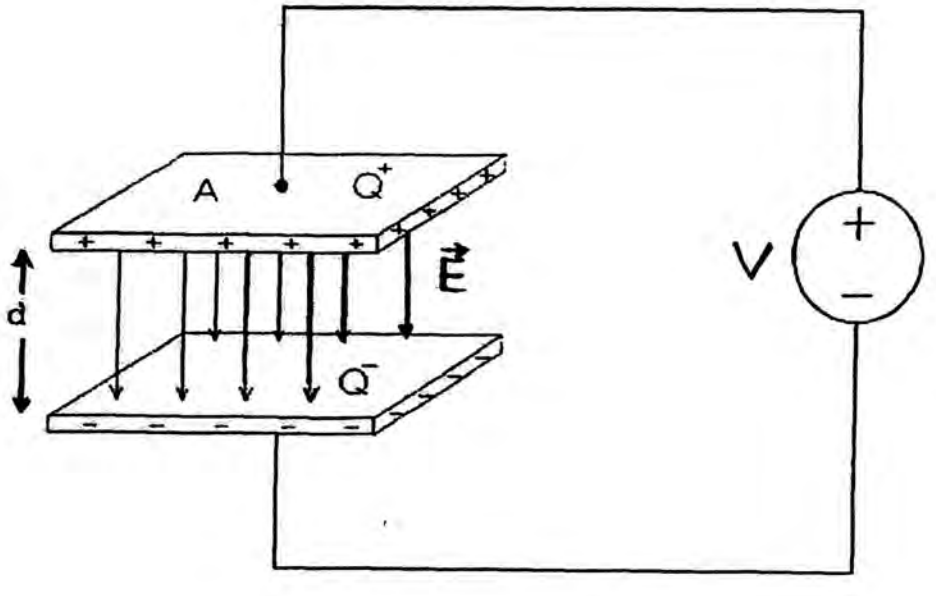
2.4.1ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ε_r) [12-16]

จากรูป 2.9 เป็นตัวเก็บประจุอย่างง่ายคือ เป็นแผ่นขนานที่ทำด้วยโลหะโดยมีระยะห่างเท่ากับ d พื้นที่ของแผ่นเท่ากับ A ระหว่างแผ่นขนานเป็นสุญญากาศ เมื่อมีศักย์ไฟฟ้า V คร่อมแผ่นขนานโดยที่แผ่นโลหะแผ่นหนึ่งจะเป็นแผ่นประจุ +Q และอีกแผ่นหนึ่งจะเป็นประจุ –Q ค่าประจุนี้จะเป็นสัดส่วนกับ V ดังสมการ 2.8

$$Q = CV \tag{2.8}$$

หรือ $$C = \frac{Q}{V}$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) มีหน่วยเป็น
คูลอมบ์ต่อโวลต์ (C/V) หรือ ฟารัด (F)



รูป 2.9 ตัวเก็บประจุแผ่นขนานเมื่อไม่มีสารไดอิเล็กทริก [16]

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

สารไดอิเล็กทริกเป็นฉนวนที่ใช้ทำหน้าที่คั่นระหว่างตัวนำของตัวเก็บประจุ เพื่อกั้นให้ความหนาแน่นประจุสูงขึ้นกว่าแก๊สรวมของทั้งอากาศ โดยมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) เป็นตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้สารไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นเป็นกี่เท่าของตัวเก็บประจุอากาศ ดังสมการ 2.9

$$C = \varepsilon C_0 \qquad (2.9)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุของตัวเก็บประจุสุญญากาศ

C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริก

ε คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า

โดยปกติค่าสภาพยอมจะแสดงเป็นค่าสัมพัทธ์ (ε_r) เทียบกับค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (ε_0) คือ

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \qquad (2.10)$$

เมื่อ ε_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศมีค่า 8.854×10^{-12} F/m

ε_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

และจากความสัมพันธ์ C = Q/V สำหรับที่ไม่มีสารไดอิเล็กทริกจะได้ว่า

$$C = C_0 \frac{\varepsilon_0 A}{d_0} \qquad (2.11)$$

เมื่อ A เมื่อ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก

d_0 เมื่อ ระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนานที่ไม่มีสารไดอิเล็กทริก

สำหรับตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ε_r จะได้ว่า

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{d} \qquad (2.12)$$

เมื่อ ε_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศมีค่า 8.854×10^{-12} F/m

ε_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริก

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก

d คือ ความหนาของสารไดอิเล็กทริก

ความจุไฟฟ้าบอกถึงความสามารถในการเก็บประจุ ยิ่งมีความจุไฟฟ้ามากเท่าใดยิ่งเก็บประจุได้มากเท่านั้น ถ้าหากตัวเก็บประจุมีขนาดพื้นที่หน้าตัดมากกว่าระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนาน จะได้ว่าความจุไฟฟ้ามีค่าดังสมการ 2.12 การมีไดอิเล็กทริกอยู่ในตัวเก็บประจุ จะช่วยเพิ่มพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุให้สามารถสร้างตัวเก็บประจุขนาดเล็กแต่ความจุไฟฟ้าสูงได้

2.4.2 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (tanδ) [12-14]

ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss, tanδ) สำหรับเซรามิกนั้นเป็นค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการให้พลังงานไฟฟ้าแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปเป็นรูปแบบอื่นๆ เช่นเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อนเป็นต้น ซึ่งสามารถประมาณได้จากสัดส่วนของความได้เปรียบทางพลังงานของวงจรแผ่นตัวนำคู่ขนาน และสามารถวัดได้จากวงจรอิมพีแดนซ์ ซึ่งปริมาณของค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกนั้นสามารถประมาณได้ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์

2.4.3 ค่าคงที่ความถี่ (N) [16]

เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกอยู่ในสนามไฟฟ้าที่มีความถี่สูงๆ วัสดุจะแสดงลักษณะของการสลับขั้วของสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นจะส่งผลให้มีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำ จะแสดงปรากฏการณ์การเกิดความถี่เรโซแนนซ์ในแนวระนาบและแนวรัศมีขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ (f_s) โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของความถี่เรโซแนนซ์ในแนวรัศมี (N_p) และเส้นผ่านศูนย์กลางของเซรามิก (d) จะแสดงด้วยสมการ

$$N_p = f_s \times d \qquad (2.13)$$

ที่ความถี่เรโซแนนซ์สูงๆ วัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำ จะไม่สามารถนำทิศทางของความถี่เรโซแนนซ์มาคิด ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความถี่เรโซแนนซ์ (f_s) โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของความถี่เรโซแนนซ์ในแนวระนาบ (N_t) และความหนาของเซรามิก (h) จะแสดงด้วยสมการ

$$N_t = f_s \times h \qquad (2.14)$$

2.5 การประยุกต์ใช้งานของเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก [13]

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกนั้นได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generators)

เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกสามารถทำให้เกิดความต่างศักย์สูง ซึ่งทำให้เกิดประกายไฟระหว่างช่องห่างตัวนำได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นตัวจุดประกายไฟ อุปกรณ์การเชื่อม ซึ่งมีขนาดเล็ก และไม่ซับซ้อนอีกด้วย

2. อุปกรณ์รับรู้ (Sensors)

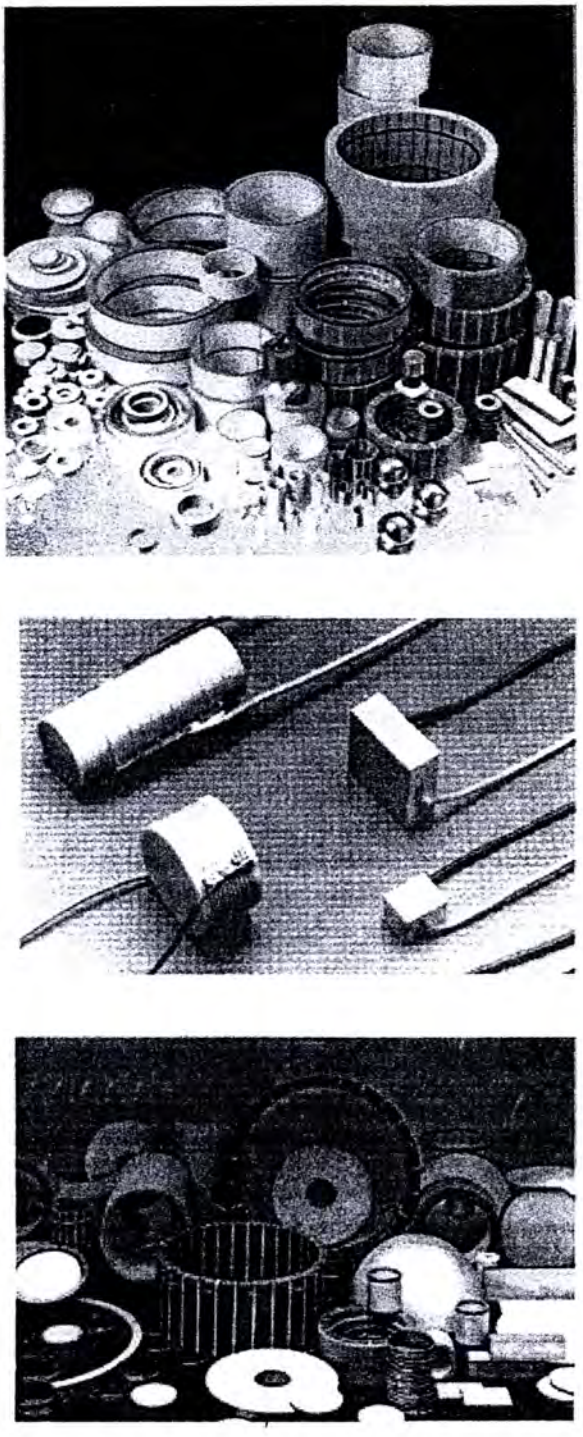
เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกยังสามารถนำมาทำเป็นอุปกรณ์รับรู้ โดยการแปลงพารามิเตอร์ทางกายภาพเช่น อุปกรณ์ตรวจจับความเร็ว ความดัน หรือการสั่นสะเทือนให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้าเป็นต้น

3. แอคชูเอเตอร์ (Actuators)

การนำเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมาใช้เป็นแอคชูเอเตอร์นั้น เป็นการดึงเอาสมบัติที่โดดเด่นของวัสดุชนิดนี้ในด้านของ การเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้กลายเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาด หรือใช้ในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงทิศทาง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในอุปกรณ์ทางกล เลนส์ และอุปกรณ์ทางแสงที่ต้องการความแม่นยำได้เป็นอย่างดี การลดขนาดลงของมอเตอร์ และอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนไหวเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้มีการพัฒนาเพียโซอิเล็กทริกมอเตอร์ ซึ่งมีขนาดที่เล็ก และมีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูง

4. แทรนส์ดิวเซอร์ (Transducer)

เพียโซอิเล็กทริกแทรนส์ดิวเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นพลังงานในรูปแบบอื่นเช่น พลังงานกล พลังงานเสียง เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย หนึ่งในนั้นคือการนำไปเป็นเครื่องกำเนิดการสั่นแบบเหนือเสียง (ultrasonic vibrations) ซึ่งนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ทำความสะอาด ตัวทำละอองจากของเหลว ตัวเจาะและบดเซรามิก หรือวัสดุที่มีความแข็ง การเชื่อมพลาสติก อุปกรณ์การวินิจฉัยโรคเป็นต้น จากเหตุผลที่วัสดุเพียโซอิ-เล็กทริกสามารถเกิดปรากฏการณ์แบบผันกลับได้ทั้งการสร้างสัญญาณเหนือเสียง และการรับสัญญาณการสะท้อนได้นั้น จึงเกิดการนำปรากฏการณ์ทั้งสองมาใช้ประโยชน์ อย่างกว้างขวางในเรื่องของการวัดระยะทาง อัตราการไหล รวมไปถึงการวัดระดับของของเหลว ซึ่งอาศัยสมบัติของความแตกต่างของการเคลื่อนที่ของเสียงในของเหลว และในอากาศ

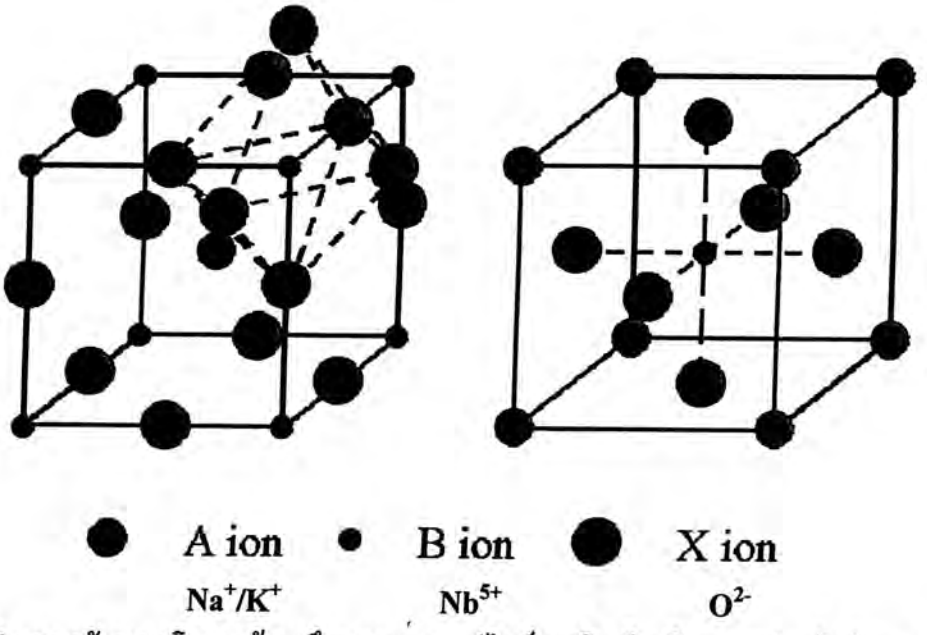


รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของการนำเซรามิกเพียโซอิเล็กตริกไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ [11]

2.6 โซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต ($Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$) [11,17,18]

โซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต (sodium potassium niobate: $Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$) หรือ NKN เป็นสารประกอบเพียโซอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นเพอรอฟสไกต์เชิงซ้อน (complex perovskite) โดยทั่วไปสารประกอบ $Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$ ที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์จะมีสูตรโครงสร้างเป็น ABO_3 ดังรูป 2.11

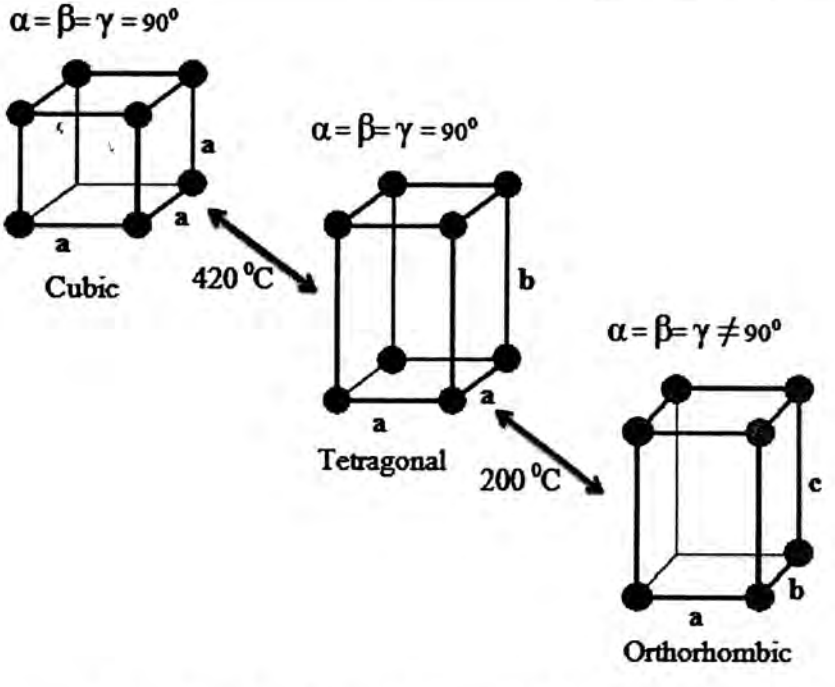
จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ได้มีการรายงานถึงโครงสร้างของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียม-ไนโอเบต ($Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$) ซึ่งพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกตามอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงไป ณ ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) โครงสร้างผลึกของ $Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$ เป็นออร์โทรอมบิก (orthorhombic) ซึ่งมีสมบัติเป็นเฟร์โรอิเล็กทริก และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นที่ประมาณ 200 °C โครงสร้างเฟสจะเปลี่ยนเปลี่ยนไปเป็นเตตระโกนอล (tetragonal) ซึ่งมีสมบัติเป็นเฟร์โรอิเล็กทริก และเปลี่ยนไปเป็นคิวบิก (cubic) ที่อุณหภูมิประมาณ 420°C ซึ่งมีสมบัติเป็นพาราอิเล็กทริก ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟไกต์ของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต [16]

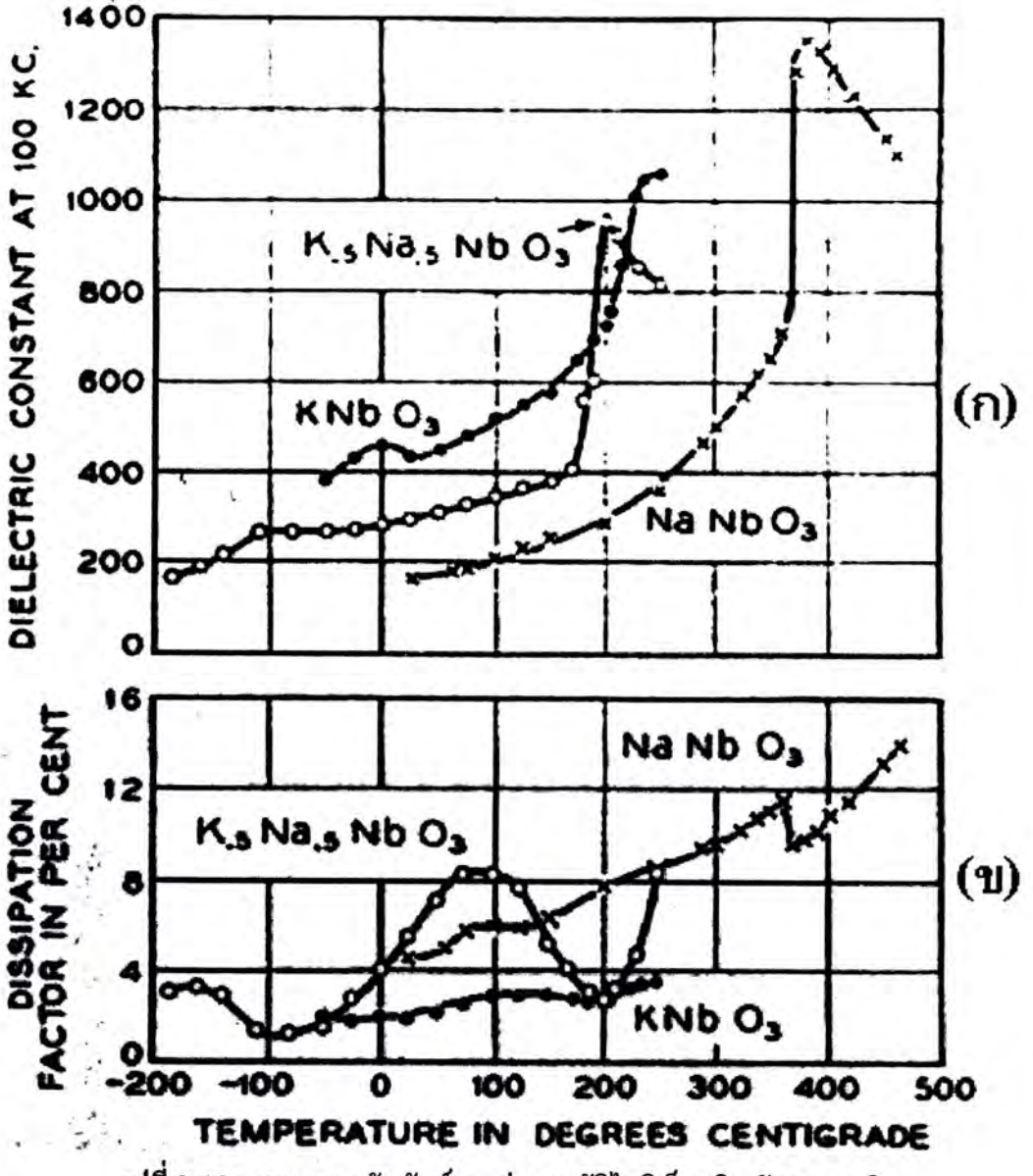
ตาราง 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตในช่วงอุณหภูมิต่างๆ [16]

ช่วงอุณหภูมิ(องศาเซลเซียส) °C	โครงสร้างผลึก
< 200	ออร์โทรอมบิก
ตั้งแต่ 200 ถึง 420	เตตระโกนอล
> 420	คิวบิก

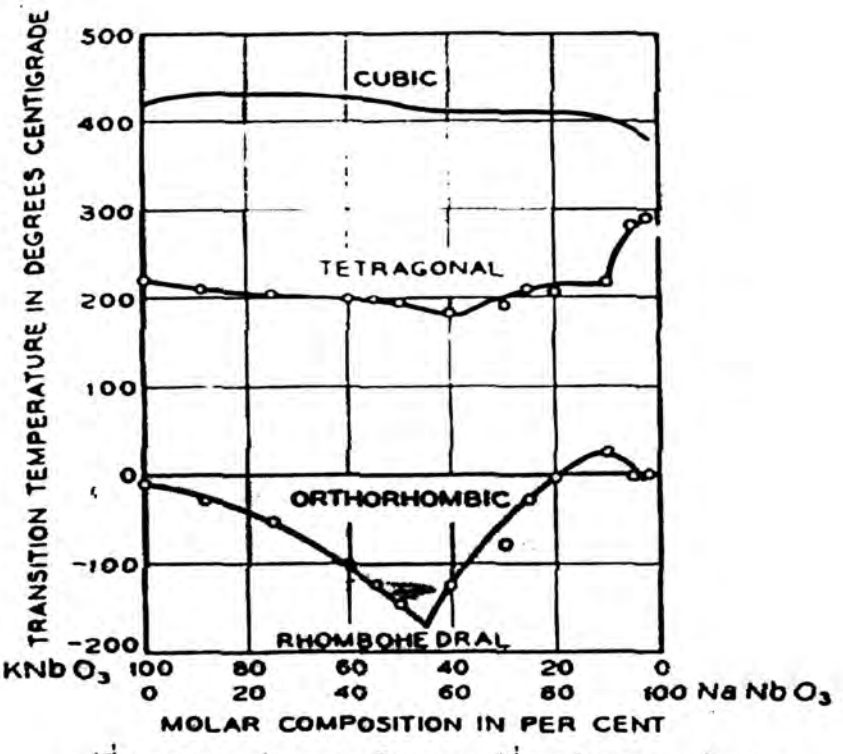


รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างผลึกของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

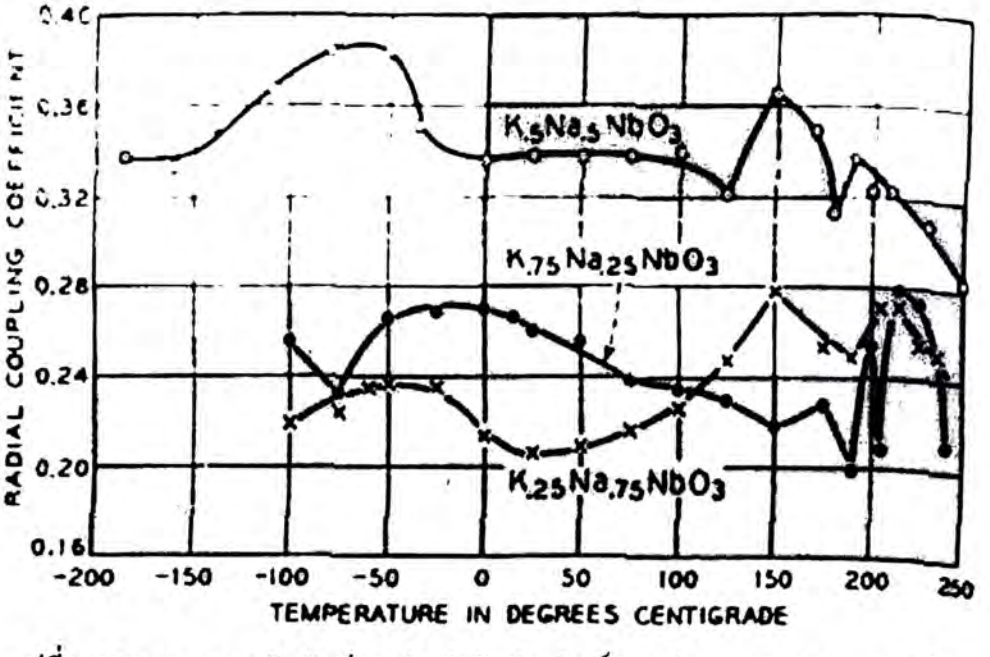
สมบัติไดอิเล็กทริกของ $Na_{0.5}K_{0.5}NbO_3$ ได้แก่ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และค่าการสูญเสียได-อิเล็กทริก อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการใช้งานของวัสดุมีผลทำให้สมบัติทั้ง 2 ชนิดเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าไปตามขนาดของความถี่ที่ใช้วัด อุณหภูมิในขณะวัดและค่าความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า (electric field strength) ในระหว่างการโพลลิง (poling) นั้น ค่าการตอบสนองทางสภาพยอมสัมพัทธ์ นี้เป็นผลมาจากการเปลี่ยนตำแหน่งในระยะสั้น (short-range displacements) ของประจุภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้านั่นเอง การเปลี่ยนตำแหน่งของประจุนำไปสู่การเก็บพลังงานไฟฟ้า และส่งผลกระทบต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ สำหรับค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss) เป็นสมบัติที่แสดงถึงพลังงานสัมพัทธ์ที่ต้องใช้ในการเก็บประจุจำนวนหนึ่ง



รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิของสารประกอบโซเดียมไนโอเบต โพแทสเซียมไนโอเบตและสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตที่อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยโมล (ก) ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก [19]



รูปที่ 2.14 แสดงช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตที่อัตราส่วนต่างๆ [19]



รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบในแนวรัศมี กับอุณหภูมิของสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตที่อัตราส่วนต่างๆ [19]

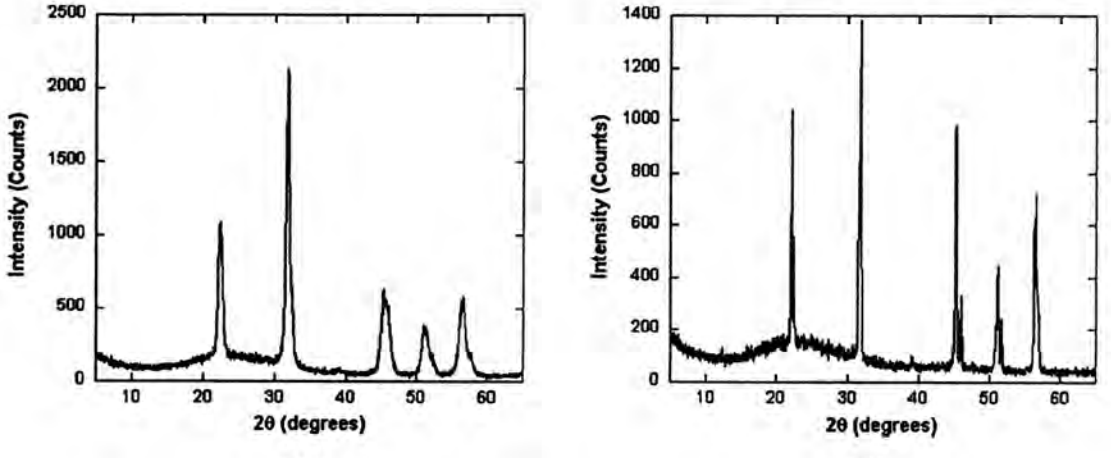
Dielectric constant (100 kc.)	290
Dissipation factor (100 kc.)	~4.0%
Specific resistivity	$\sim 10^{12}$ ohm-cm.
Density	4.25 gm./cm.^{3}
Poisson's ratio (assumed)	0.27
Radial coupling coefficient	0.34 to 0.39
Frequency constant ($f_r \cdot a$)	167 kc.-cm.
Mechanical Q (radial)	130
Young's modulus	1.04×10^{12} dynes/sq. cm. 1.04×10^{11} newtons/sq. m.
Piezoelectric constant d_{31}	97×10^{-6} statcoulombs/dyne 32×10^{-12} coulombs/newton
Piezoelectric constant g_{31}	4.2×10^{-4} cm.-statvolts/dyne 12.6×10^{-3} meter-volts/newton
Piezoelectric constant d_{33}*	240×10^{-6} statcoulombs/dyne 80×10^{-12} coulombs/newton
Piezoelectric constant g_{33}*	10.5×10^{-4} cm.-statvolts/dyne 31.5×10^{-3} meter-volts/newton
Coupling coefficient k_{33}*	0.51

* Estimated values.

รูปที่ 2.16 แสดงสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าของสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตที่อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยโมล [20]

2.7 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในปี ค.ศ. 2005 H. Birol และ คณะ [23] ได้ศึกษาสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตด้วยวิธีการด้วยวิธีมิกซ์ออกไซด์แบบดั้งเดิมได้การควบคุมปัจจัยต่างๆ ทั้งความชื้นและอุณหภูมิในการเผาผนึก เพื่อให้ได้ชิ้นงานเซรามิกที่มีความหนาแน่นที่สูง โดยทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 825 °C เป็นเวลา 4 h จากนั้นทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1114 °C เป็นเวลา 2 h หลังจากนั้นนำเซรามิกที่ได้มาหาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าสามารถทำการเตรียมชิ้นงานเซรามิกให้มีความหนาแน่นสูงถึงร้อยละ 95 ของความหนาแน่นทางทฤษฎี และพบว่าลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานเซรามิกมีความคมชัด และเกิดการแยกตัวของพีคที่ชัดเจนขึ้น มีบวมของพีคลดลง แต่จะมีความสูงของพีคที่ต่ำลงเล็กน้อยดังในรูปที่ 2.17



(ก) (ข)

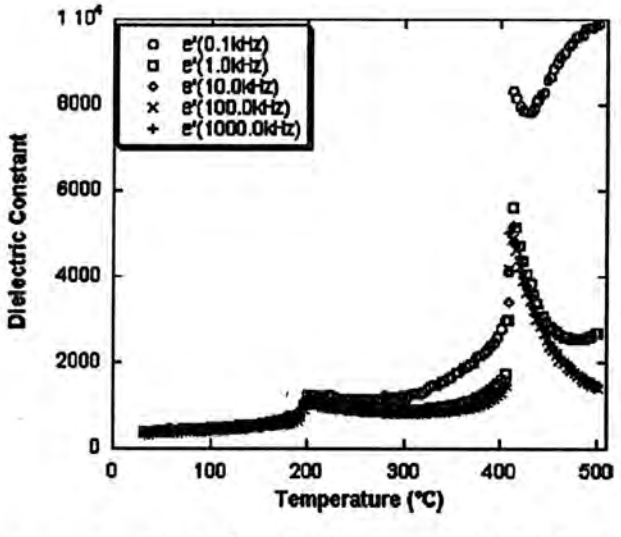
รูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ (ก) ผงแคลไซน์ (ข) ชิ้นงานเซรามิกของสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต [23]

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ค่าแฟคเตอร์ไฟฟ้าคู่ควบ อยู่ที่ประมาณ 100 pC/N และ 0.39 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

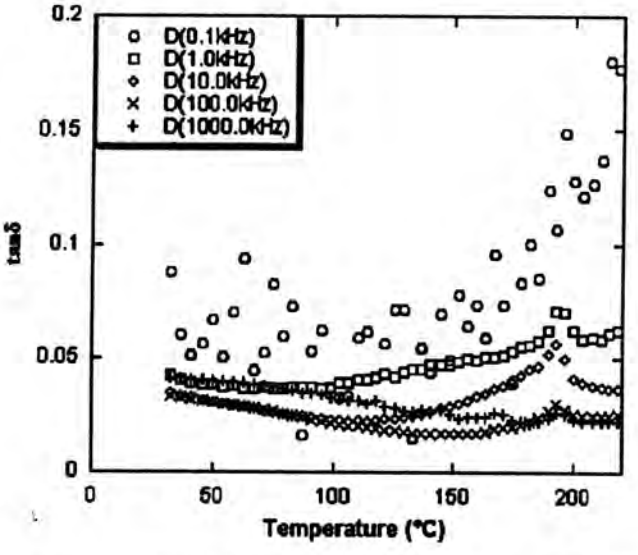
ตาราง 2.2 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต [23]

Properties	Air-sintered, Jaeger–Egerton[4], $K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$	Air-sintered, Kosec[5], $K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$	Air-sintered, this study, $K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$	Hot-pressed, Jaeger–Egerton[4], $K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$
ρ (10^3 kg/m^3)	4.25	4.20	4.30	4.46
%TD	94.24	93.13	95.3	98.89
d_{33} (pC/N)	80		110	160
d_{31} (pC/N)	32		43.4	49
k_p	0.36	0.23	0.39	0.45
k_t			0.45	
k_{31}	0.22		0.23	0.27
σ_{12}	0.27 (assumed)		0.33	0.27 (assumed)

สำหรับค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์นั้น พบว่าว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงและรวดเร็วที่ 2 ช่วงอุณหภูมิคือที่ประมาณ 200 และ 420 °C ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก ออร์โทรอมบิก ไปเป็นโครงสร้าวเตตระโกนอล และโครงสร้างคิวบิกตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างนี้เองมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ในทุกความถี่ที่ทำการตรวจสอบและสำหรับค่าสูญเสียสภาพไดอิเล็กทริกพบว่ามีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และรูปที่ 2.19 ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่าลักษณะของวงฮิสเทอรีซีสที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปในรูปแบบของเฟร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอรีซีสโดยได้ค่าสนามลบล้างแม่เหล็ก ที่ประมาณ 20 kV/cm และ สภาพคงเหลือของโพลาไรเซชัน 20 $\mu C/cm^2$



รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับอุณหภูมิ [23]

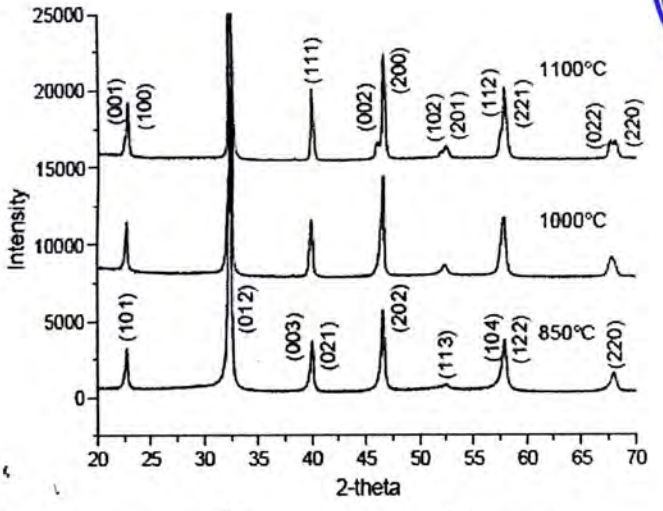


รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิ [23]

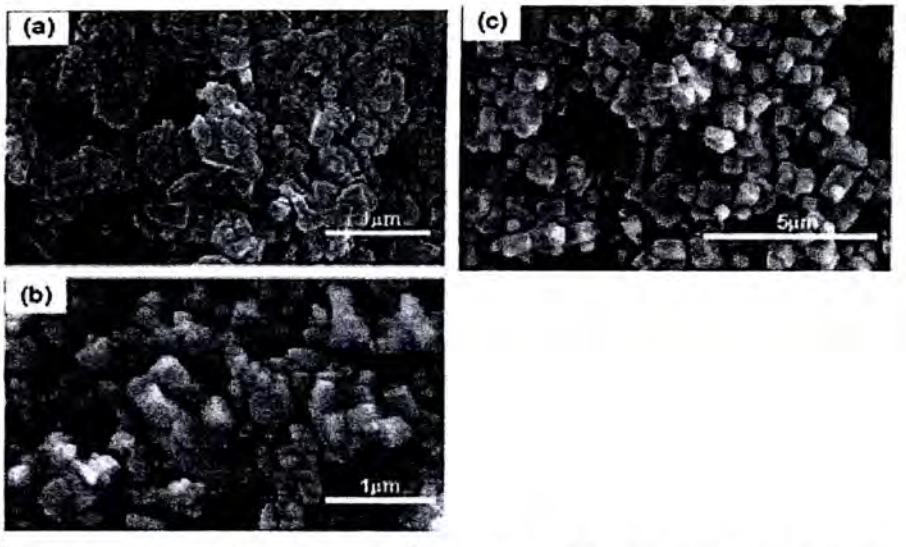
ในช่วงระยะเวลาเดียวกันนี้ W. Chen และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาสารประกอบโซเดียมบิสมัทไททาเนตแบเรียมไททาเนตด้วยกระบวนการเกลือหลอมเหลว โดยใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์และเกลือโพแทสเซียมคลอไรด์ผสมกับโซเดียมบิสมัทไททาเนตแบเรียมไททาเนต ด้วยอัตราส่วน1:1 โดยเขาได้ทำการเผาแคลไซน์จากอุณหภูมิ 850 -1100 °C เป็นเวลา 2 h หลังจากการเผาแคลไซน์แล้ว ผงที่ได้จะถูกนำมาล้างเอาเกลือออกด้วยน้ำกลั่นไม่มีประจุ (D.I.water) แล้วทำการทดสอบด้วยซิลเวอร์ไนเตรตเพื่อหาไอออนของคลอไรด์ที่หลงเหลืออยู่ จากนั้นนำผงของสารประกอบที่ได้ที่ทำการหาคุณลักษณะเฉพาะและสมบัติทางกายภาพต่อไปตามลำดับ

จากการศึกษาด้วยการเลี้ยนเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่า สารประกอบดังกล่าวมีโครงสร้างเป็นเพอรอฟสไกต์ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยสมมาตรรอมโบฮีดรอล และเริ่มมีการเกิดเฟสที่สมบูรณ์ตั้งแต่อุณหภูมิแคลไซน์ 850 °C ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และเมื่อนำผงที่เตรียมได้จากกระบวนการนี้ไปทำการหาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าขนาดของอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยที่อุณหภูมิแคลไซน์ 850 °C มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 100 nm แต่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และที่ อุณหภูมิ 1000-1100 °C มีขนาดอนุภาคประมาณ 100-200 nm ดังแสดงในรูปที่ 2.21

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



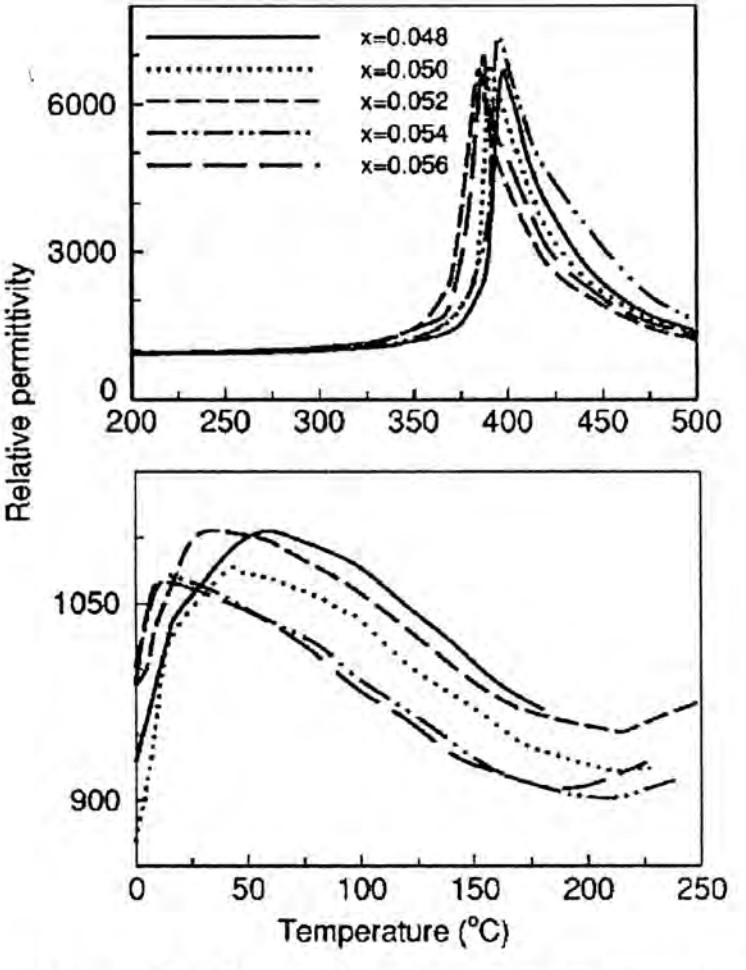
รูปที่ 2.20 แสดงการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ [24]



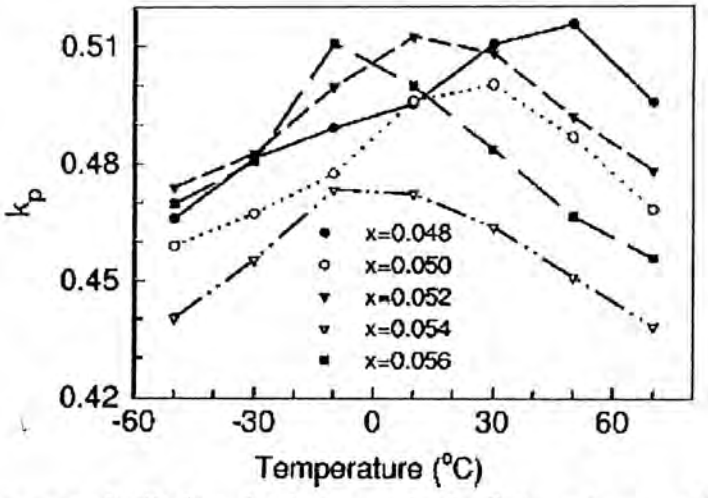
รูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคที่อุณหภูมิ (a) 850, (b) 1000, (c) 1100 °C [24]

ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 G.Z. Zang และ คณะ [25] ได้ศึกษาสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนตด้วยวิธีการด้วยวิธีมิกซ์ออกไซด์แบบดั้งเดิม โดยเขาและคณะได้ทำการผสมลิเทียมแอนติโมเนตที่อัตราส่วนโดยโมลตั้งแต่ x = 0.048, 0.050, 0.052, 0.054, และ 0.056 ตามลำดับ เมื่อเตรียมแต่ละเงื่อนไขได้แล้วเขาและคณะก็ทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 880 °C เป็นเวลา 4 h จากนั้นทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1080 °C เป็นเวลา 3 h หลังจากนั้นนำเซรามิกที่ได้มาหาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าตามลำดับ

จากการศึกษาพบว่า สามารถทำการเตรียมชิ้นงานเซรามิกให้มีความหนาแน่นสูงถึงมากกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นทางทฤษฎี ต่อจากนั้นเขาและคณะได้นำเซรามิกที่เซรามิกที่เตรียมได้นำไปทดสอบหาสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และค่าแฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าโดยองค์ประกอบของลิเทียมแอนติโมเนตที่ x = 0.052 ให้สภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และค่าแฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบที่อุณหภูมิห้องมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่นๆ โดยมีค่าประมาณ 1372 และ 0.51 ตามลำดับ โดยมีอุณหภูมิคูรีที่ 385 °C ดังแสดงในรูปที่ 2.22 และรูปที่ 2.23

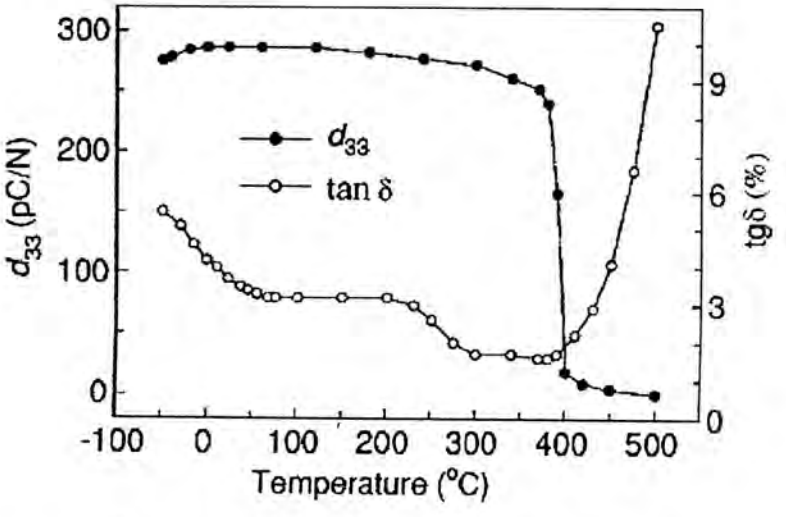


รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กับอุณหภูมิ [25]



รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบกับอุณหภูมิ [25]

หลังจากนั้น เขาและคณะได้นำเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนต ที่มีองค์ประกอบของลิเทียมแอนติโมเนต x = 0.052 ที่เตรียมได้ ซึ่งให้ค่าไดอิเล็กทริกสูงที่สุด มาทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและค่าสูญเสียความเป็นไดอิเล็กทริก จากการทดสอบพบว่าเซรามิกที่เงื่อนไขนี้ให้ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องประมาณ 286 pC/N และ 0.019 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.24 และตารางที่ 2.3



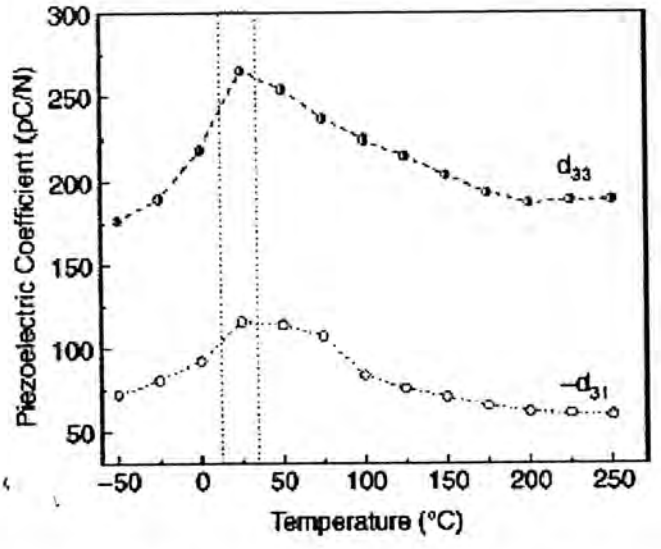
รูปที่ 2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิ [25]

ตาราง 2.3 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนต [25]

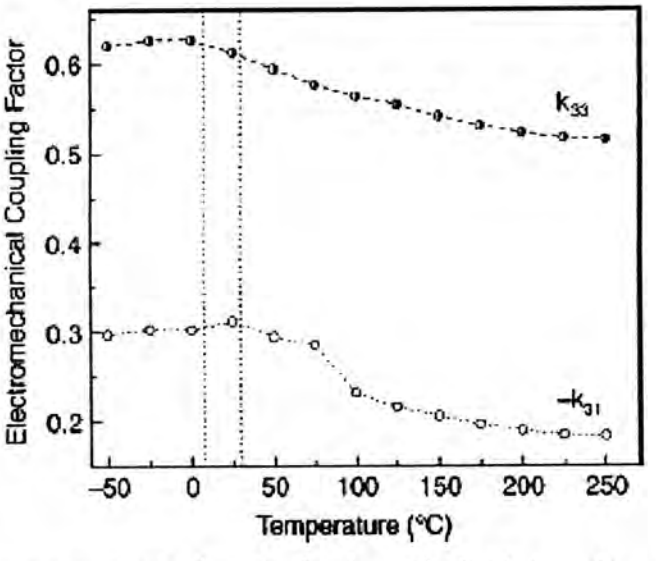
Compositions	ρ (g/cm^3)	d_{33} (pC/N)	T_C (°C)	k_p	$\varepsilon/\varepsilon_0$	tan δ
x=0.048	4.27	265	398	0.51	1244	0.021
x=0.050	4.26	283	392	0.50	1288	0.019
x=0.052	4.28	286	385	0.51	1372	0.019
x=0.054	4.28	269	394	0.47	1296	0.018
x=0.056	4.32	272	387	0.49	1339	0.017

ในช่วงระยะเวลาเดียวกันนี้ S. Zhang และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนตด้วยกระบวนการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยใช้ โซเดียมคาบอเนต โพแทสเซียมคาบอเนต ไนโอเบียมออกไซด์ ลิเทียมคาบอเนต และแอนติโมนีออกไซด์ เป็นวัตถุดิบ บดผสมกันเป็นเวลา 24 h จากนั้นนำผงของสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนตที่ได้มาเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 2 h และทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1060 – 1200 °C เป็นเวลา 2 h เมื่อได้เป็นเซรามิกแล้ว เขาและคณะจึงได้ทำการศึกษาสมบัติกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้า

จากการศึกษาพบว่า สามารถทำการเตรียมชิ้นงานเซรามิกให้มีความหนาแน่นสูงถึง 4.30 g/cm^3 คิดเป็นร้อยละ 95 ของความหนาแน่นทางทฤษฎี หลังจากนั้นเขาและคณะได้นำเซรามิกที่เตรียมได้จากกระบวนการนี้ไปทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็ก ทริกและค่าแฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบ จากการทดสอบพบว่าเซรามิกที่เตรียมด้วยกระบวนการนี้ให้ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและค่าแฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบที่อุณหภูมิห้องประมาณ 265 pC/N และ 0.60 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.25 และ รูปที่ 2.26

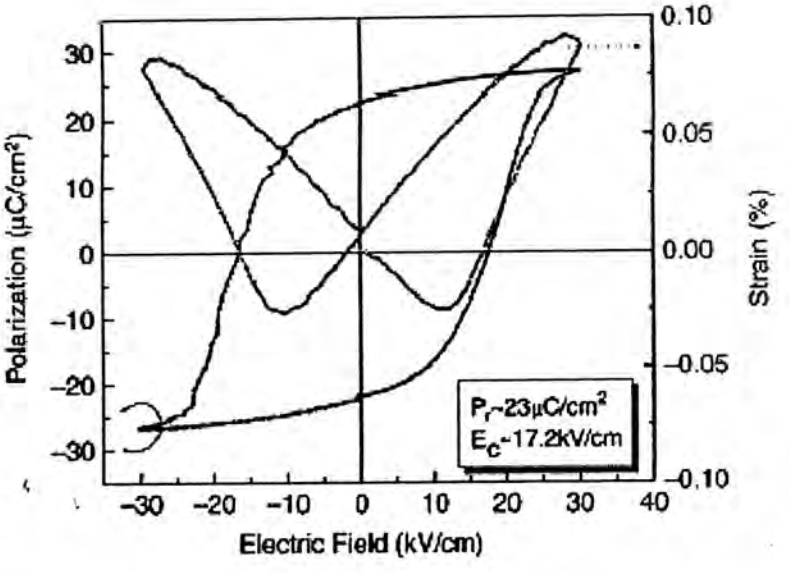


รูปที่ 2.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกกับอุณหภูมิ [26]



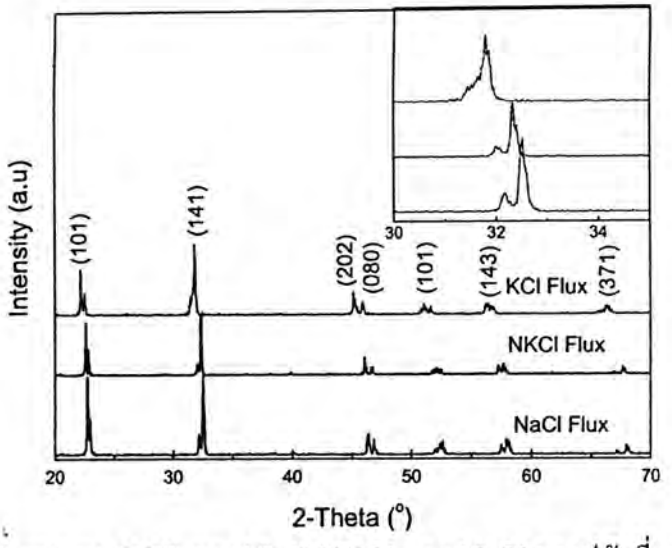
รูปที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์กลไฟฟ้าคู่ควบกับอุณหภูมิ [26]

นอกจากนั้นแล้ว เขาและคณะยังได้ทำการศึกษาสมบัติเฟร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนตที่เตรียมได้จากกระบวนการนี้ จากการศึกษาพบว่าเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนตให้ค่าสนามไฟฟ้าลบล้างที่ประมาณ 17.2 kV/cm และสภาพคงเหลือของโพลาไรเซชันอยู่ที่ 23 $\mu C/cm^2$ ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แสดงวงฮีสเทอรีซีสและความเค้นของเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนตที่อุณหภูมิห้อง [26]

ในช่วงระยะเวลาเดียวกันนี้ Zeng และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์โซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตด้วยวิธีการแบบผสมเกลือหลอมเหลว โดยการศึกษาเริ่มจากการนำสารตั้งต้นซึ่งก็คือ K_2CO_3, Na_2CO_3 และ Nb_2O_5 มาทำการบดผสมในตัวกลางที่เป็นเอทานอลเป็นเวลา 8 h หลังจากนั้นนำมาผสมกับ KCl และ NaCl แล้วนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิระหว่าง 700-1050 °C เป็นเวลานาน 90 min หลังจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน เพื่อล้างเอาไอออนของเกลือออก พบว่าจากรูปที่ 2.28 แสดงผล XRD ของ NaCl, KNCl และ NaCl ของฟลักที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ 900 °C โดยทั้ง 3 เฟสแสดงเฟสของ Orthorhombic โดยแสดงในช่วง 2θ = 30 °C – 35 °C จะพบว่ามีการเลื่อนของพีคไปแตกต่างกัน โดยแลตทิซพารามิเตอร์แสดงในรูปที่ 2.28 โดยพบว่ามีความใกล้เคียงกับ $NaNbO_3$ บริสุทธิ์ (a=5.5687 A°, b=15.523 A°, c=5.5047 A°) โดยพบว่า NKCl, KCl มีจำนวนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.28 แสดงผล XRD ของ NaCl,NKCl และ NaCl ของฟลักที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ 900 °C [27]

ตาราง 2.4 แสดงแลตทิซพารามิเตอร์ของโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตที่ฟลักแตกต่างกัน [27]

	a (Å)	b (Å)	c (Å)	V (Å^3)
In NaCl flux	5.5618	15.4894	5.4893	472.8974
In NKCl flux	5.5899	15.5689	5.5392	482.0688
In KCl flux	5.6865	15.7888	5.6571	507.9115

ในการ EDX ไม่พบ K^+ ในการสังเคราะห์ผง NaCl โดยที่ความเข้มข้นของ X เพิ่มขึ้น 0.1 และ 0.77 ในผง $K_xNa_{1-x}NbO_3$ ในผง NKCl และ KCl ตามลำดับ แสดงได้อย่างชัดเจนว่าเกลือมีผลกระทบต่อองค์ประกอบของผงและ X มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 - 0.77 โดยการเพิ่มของ KCl และการเพิ่มของอุณหภูมิมีผลเพียงเล็กน้อยที่อุณหภูมิระหว่าง 750 - 1000 °C ความเข้มข้นของ K^+ เกือบไม่เปลี่ยนแปลงเลย

นอกจากนั้นยังพบว่าเกลือมีผลกระทบต่อสัญฐานวิทยาของผง ดังรูปที่ 2.29 ที่ 900 °C จะเห็นว่ามีการรวมตัวกันน้อย ผง NKCl ได้อนุภาคใหญ่ที่สุด 500 nm ในขณะที่ NaCl และ KCl มีขนาดอนุภาค 20 - 30 และ 100 nm ตามลำดับ ฟลักซ์ของ KCl มีจุดยูแทคติกที่ 650 °C เพื่อให้ K^+ และ Na^+ มีอัตราการแพร่ที่สูงขึ้นที่ 900 °C ในทางกลับกัน NaCl มีอนุภาคใหญ่กว่าและมีจุดหลอมเหลวสูงกว่า โดยอยู่ที่ 801 °C และ KCl อยู่ที่ 776 °C

รูปที่ 2.29 แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของโซเดียมไนโอเบตที่ผสมกับ (a) KCl, (b) NaCl, (c) NKCl เผาที่อุณหภูมิ 900 °C [27]

จากการค้นคว้าเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องพบว่า สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนตนั้น มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่งทั้งในด้านของพัฒนาทั้งในกระบวนการเตรียมรวมถึง การเติมสารเจือ เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติของวัสดุ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจจะศึกษาเตรียมสารประกอบโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบตลิเทียมแอนติโมเนต ด้วยกระบวนการเกลือหลอมเหลว อย่างละเอียด ซึ่งน่าจะสามารถสร้างองค์ความรู้ใหม่ ที่มีประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดใหม่ๆ ที่มีสมบัติที่ดี เพื่อที่จะสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในระดับสูงขึ้น อีกทั้งยังจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป