



การศึกษาการขึ้นรูปและสมบัติไพโซอิเล็กทริกจากผลของการเจือปนทังนัมในพีซีทีที่ขึ้นรูปโดย
เทคนิคหล่อแผ่นบาง

THE STUDY OF FABRICATION AND PIEZOELECTRIC PROPERTIES WITH
LANTHANUM DOPING IN PZT BY TAPE CASTING METHOD

ภกนิ ทองฤทธิ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2561

การศึกษาการขึ้นรูปและสมบัติไฟโอโซอิลีกริกจากผลของการเจือปนน้ำมันในพีซีทีที่
ขึ้นรูปโดยเทคนิคหล่อแผ่นบาง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

THE STUDY OF FABRICATION AND PIEZOELECTRIC PROPERTIES WITH
LANTHANUM DOPING IN PZT BY TAPE CASTING METHOD



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for MASTER OF SCIENCE (Materials Science)
Faculty of Science Srinakharinwirot University
2018
Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการขึ้นรูปและสมบัติไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์จากผลของการเจือปนทานัมในพีซีทีที่ขึ้นรูปโดย

เทคนิคหล่อแผ่นบาง

ของ

ภคินี ทองฤทธิ์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์จักรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัทมาศ บิณฑจิตต์)

..... ประธาน

(ดร.ภาวดี อังค์วัฒนะ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารียา เขี่ยมบุญ)

ชื่อเรื่อง	การศึกษาการขึ้นรูปและสมบัติไพโซอิเล็กทริกจากผลของการ เจือปนทานัมในพีซีทีที่ขึ้นรูปโดยเทคนิคหล่อแผ่นบาง
ผู้วิจัย	ภคินี ทองฤทธิ์
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปัทมาศ บินจัตติ

สมบัติไพโซอิเล็กทริกของเลดเซอร์โคเนตไททานेट (PZT) สามารถควบคุมได้โดยการเจือปนทานัมเข้าไปในระบบเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการขึ้นรูป โครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค และสมบัติไพโซอิเล็กทริก ของเลดเลขนานัมเซอร์โคเนต $[(\text{Pb}_{1-x}\text{La}_x)(\text{Zr}_{1-y}\text{Ti}_y)\text{O}_3]$, PLZT] ที่อัตราส่วน Zr/Ti เป็น 65/35 โดยเจือปนทานัม 8.9 และ 10 mol% ด้วยวิธีหล่อแผ่นบาง โดยสเลอรี PLZT สามารถขึ้นรูปแบบแผ่นได้ดี แผ่น PLZT หลังการเผาผลึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 30 min หนา 339 – 371 μm โครงสร้างผลึกของแผ่น PLZT เป็นแบบ perovskite polycrystalline คือ (100) (110) (111) (200) (210) และ (211) โดยไม่มีเฟสอื่นเจือปน และการเจือปนทานัมในปริมาณต่างกันเข้าไปในเลดเซอร์โคเนตไททานेटได้เฟสที่ไม่แตกต่างกัน จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาค พบว่า แผ่น PLZT มีเกรนอยู่ในช่วง 0.57 – 0.85 μm แผ่น PLZT ที่มีการเจือปนทานัมปริมาณต่ำจะแสดงเกรนขนาดใหญ่ ในส่วนของสมบัติไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง แผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 9/65/35 ให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (permittivity) สูงสุดที่ 713 และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss) 3.9% ที่ความถี่ 1 kHz สมบัติไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่าง ๆ แผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 ให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (permittivity) สูงสุดที่ 1768.42 และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss) 3.7% มีอุณหภูมิคูรีสูงสุดประมาณ 175°C และสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก แผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 เป็นไพโซอิเล็กทริกแบบอ่อน โดยวงฮิสเทอรีซิสให้ค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว (P_r) ค่าโพลาริเซชันคงค้าง (P_r) และสนามไฟฟ้าภายนอก (E_c) สูงสุดเป็น 12.50 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 5.97 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ และ 14.10 kV/cm ตามลำดับ

คำสำคัญ : เลดเลขนานัมเซอร์โคเนตไททานेट เทปคลาสติง สมบัติไพโซอิเล็กทริก

Title	THE STUDY OF FABRICATION AND PIEZOELECTRIC PROPERTIES WITH LANTHANUM DOPING IN PZT BY TAPE CASTING METHOD
Author	PAKINEE THONGRIT
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2018
Thesis Advisor	Assistant Professor Patamas Bintachitt

The piezoelectric properties of Lead Zirconate Titanate (PZT) can be controlled by doping with lanthanum for electronic applications. In this research, the fabrication, crystal structure, microstructure, and dielectric properties of Lead Lanthanum Zirconate Titanate $[(\text{Pb}_{1-x}\text{La}_x)(\text{Zr}_{1-y}\text{Ti}_y)\text{O}_3]$, PLZT] tapes with Zr/Ti at a ratio of 65/35 and doped with 8 9 and 10 mol% lanthanum were investigated. The PLZT tapes could also well fabricated. After PLZT tapes were sintered at 1100°C for 30 min, the thicknesses of PLZT tapes were about 339 – 371 μm . The crystal structure of PLZT tapes consisted of perovskite polycrystalline with (100) (110) (111) (200) (210) and (211) without second phases and all levels of La doping showed no differences in terms of phases. The grain sizes of PLZT tapes were 0.57 – 0.85 μm . The lower percent of La doping showed bigger grain sizes. At room temperature, the dielectric property of PLZT with 9/65/35 performed the highest permittivity of 713 with a dielectric loss of 3.9% at 1 kHz. At various temperatures, the dielectric property of PLZT with 8/65/35 performed at the highest permittivity of 1768 with dielectric loss of 3.7 % and the highest Curie Temperature of 175 °C. For ferroelectric property, PLZT was at 8/65/35 and a soft piezoelectric. The hysteresis loop exhibited the highest saturated polarization (P_s) remanent polarization (P_r) and coercive field (E_c) of 12.50 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 5.97 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ and 14.10 kV/cm, respectively.

Keyword : Lead lanthanum zirconate titanate Tape casting Piezoelectric properties

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีเนื่องจากได้รับความเมตตาจาก ผศ.ดร.ปัทมาศ บินทจิตต์ ที่กรุณาเสียสละเวลาให้ความรู้ คำปรึกษา ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับปริญญานิพนธ์ รวมถึงในด้านอื่นๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัย อีกทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องปริญญานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่เสมอมา จนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งใจและกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ ดร.ภาวดี อังคัฒนะ รองผู้อำนวยการศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักพัฒนา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ความกรุณาในการเป็นประธานในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ อีกทั้งยังให้ความรู้ ให้คำแนะนำ แก้ไขเพิ่มเติม รวมถึงเอื้อเฟื้อวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือทดสอบในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อารียา เอี่ยมบุญ ที่ได้เป็นกรรมการในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติมทำให้ปริญญานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ นายชัยนพ นิลกำจร นักวิทยาศาสตร์ ห้องปฏิบัติการฟิล์มชั้นสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องอัดไฮดรอลิก ขอขอบคุณ นางสาวปัทมาภรณ์ ธิมากุล ผู้ช่วยนักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ในการใช้เครื่องเตาเผา ขอขอบคุณ นางสาวจารุวรรณ ธรรมประสิทธิ์ และนายอานนท์ ไกรป็อก ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือผู้เขียนด้วยความปรารถนาดีเสมอมา

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เตาเผา ขอขอบคุณ หน่วยวิจัยวัสดุขั้นสูง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ เครื่อง LCR meter รุ่น A4980 Agilent และเครื่อง Ferroelectric test system (Precision RT66B 4KV-HVI) ขอขอบคุณ บริษัท แมกเนคอมพ์ ฟริชชั่น เทคโนโลยี จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง Q150R Rotary-Pumped Sputter Coater/Carbon Coater

ขอขอบคุณกัลยาณมิตรของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนตลอดมา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นางสาวธิดารัตน์ อินณรงค์ และนางสาวจิณิสา ชูเลิศ ผู้ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และเป็นกำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำปริญญานิพนธ์ด้วยความเต็มใจและความปรารถนาดีเสมอมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณครอบครัว คุณพ่อคุณ คุณแม่รยา และนายศรัณยู ทองฤทธิ ที่ช่วยสนับสนุนในด้านการศึกษาแก่ผู้เขียน ให้ความรัก ความเข้าใจและเป็นกำลังใจสำคัญซึ่งทำให้ปริญญาพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้

ภคินี ทองฤทธิ



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1. ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
3. ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
1. ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์	4
1.1 ทฤษฎีไฟโอดีอิเล็กทรอนิกส์	4
1.1.1 ปฏิกิริยาการนำไฟโอดีอิเล็กทรอนิกส์	4
1.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเพอร์ออฟสไกต์	5
1.1.3 การทำโพลีเมอร์ไฟโอดีอิเล็กทรอนิกส์.....	6
1.2 ทฤษฎีเฟอร์โรอิเล็กทริก.....	8
1.2.1 การเกิดโพลาไรเซชันตัวเองและปฏิกิริยาไฟโอดีอิเล็กทรอนิกส์	10
1.2.2 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส	11
1.2.3 เฟอร์โรอิเล็กทริกโดเมนและวงฮิสเทอรีซิส	13

2. สมบัติไฟโอโซอิลิกทริก	15
2.1 สัมประสิทธิ์ไฟโอโซอิลิกทริก	15
2.2 สมบัติไดอิลิกทริก	17
3. ประเภทของวัสดุไฟโอโซอิลิกทริก	21
3.1 สารประกอบไฟโอโซอิลิกทริกแบบอ่อน	21
3.2 สารประกอบไฟโอโซอิลิกทริกแบบแข็ง	21
4. สารประกอบไฟโอโซอิลิกทริก.....	22
4.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแบเรียมไททาเนต	22
4.2 เลดเซอร์โคเนตไททาเนต.....	24
4.2.1 เฟสไดอะแกรมของเลดเซอร์โคเนตไททาเนต.....	26
4.2.2 การเจือในเลดเซอร์โคเนตไททาเนต.....	28
4.3 เฟสไดอะแกรมของเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต.....	28
5. การขึ้นรูปเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนตด้วยวิธีหล่อแผ่นบาง	30
5.1 การเตรียมชิ้นงานไฟโอโซอิลิกทริก	30
5.2 กระบวนการบดย่อยผสมด้วยลูกบอล	31
5.3 การขึ้นรูปเซรามิก	32
5.4 การเผาผนึก.....	33
6. การวิเคราะห์สมบัติเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต.....	35
6.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	35
6.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	37
6.3 การวิเคราะห์สมบัติไดอิลิกทริก.....	38
6.4 การวิเคราะห์สมบัติเฟอร์โรอิลิกทริก	40
6.5 การวิเคราะห์สมบัติไฟโอโซอิลิกทริก	41
7. การประยุกต์ใช้งานของไฟโอโซอิลิกทริก	43

7.1 เครื่องมือควบคุมความถี่.....	43
7.2 แอคชูเอเตอร์.....	43
7.3 อุปกรณ์ตรวจวัด.....	44
7.4 ทรานส์คิวเซอร์.....	44
8. งานวิจัย PLZT ที่เกี่ยวข้อง	44
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	51
1. วัสดุและสารเคมี	51
2. อุปกรณ์และเครื่องมือการทดลอง	52
3. ขั้นตอนขึ้นรูปวัสดุเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานตด้วยวิธีหล่อแผ่นบาง	53
3.1 การเตรียมสเลอรีเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานต	53
3.2 การขึ้นรูปแผ่น PLZT ด้วยวิธีหล่อแผ่นบาง	54
3.3 การเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PLZT.....	55
3.4 การเผาผนึก.....	56
3.5 การทำขั้วอิเล็กโทรดแก่แผ่น PLZT	58
4. การวิเคราะห์แผ่นเทปเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานต	59
4.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึก	59
4.2 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	60
4.3 วิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก	61
4.4 วิเคราะห์สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก	62
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	63
1. ผลการศึกษา PLZT ที่ขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นบาง	63
2. ผลการเพิ่มความแข็งแรงโดยการซ้อนทับและการเผาผนึกของแผ่น PLZT	64
3. ผลการวิเคราะห์แผ่น PLZT เจือแลนทานัมที่ปริมาณ 8, 9 และ 10 mol%	65
3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่น PLZT.....	65

3.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของแผ่น PLZT.....	66
3.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาของแผ่น PLZT.....	67
3.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PLZT	68
3.4.1 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ขึ้นกับความถี่.....	68
3.4.2 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิ.....	70
3.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของแผ่น PLZT	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	75
1. สรุปผลการวิจัย	75
2. ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม	79
ประวัติผู้เขียน	83

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 การเปรียบเทียบสมบัติของสารไพโซอิเล็กทริกเซรามิกแบบอ่อนและแบบแข็ง.....	22
ตาราง 2 เปรียบเทียบลักษณะการเผาผนึกแบบเกิดเฟสของแข็งและเฟสของเหลวในขณะเผาผนึก.....	35
ตาราง 3 ชื่อสารเคมีที่ใช้เตรียมผง PLZT	51
ตาราง 4 ส่วนผสมของสเลอรี PLZT.....	53
ตาราง 5 แสดงขนาดเกรนของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35.....	67
ตาราง 6 แสดงความหนาของแผ่น PLZT หลังการเผาที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35.....	68
ตาราง 7 สมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 ที่ความถี่ 1 kHz.....	70
ตาราง 8 สมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	71
ตาราง 9 สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35	74
ตาราง 10 สมบัติทางกายภาพและสมบัติไพโซอิเล็กทริกของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35	77

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (ก) แบบทางตรง (direct piezoelectric effect) (ข) แบบผกผัน (converse piezoelectric effect).....	5
ภาพประกอบ 2 โครงสร้างผลึกเพอโรฟสไกต์ (perovskite crystal structure).....	6
ภาพประกอบ 3 การเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุขณะเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้า (ก) ก่อนให้สนามไฟฟ้า (ข) ขณะให้สนามไฟฟ้า (ค) หยุดให้สนามไฟฟ้า.....	7
ภาพประกอบ 4 ไดโพลภายในวัสดุ (ก) ก่อนการโพลี้ง (ข) ขณะทำการโพลี้งจนเกือบสมบูรณ์ (ค) หลังการโพลี้งและนำแรงดันไฟฟ้าออกแล้ว	8
ภาพประกอบ 5 การแบ่งผลึกด้วยการพิจารณาจากสมมาตรของผลึก	9
ภาพประกอบ 6 การกระจายในโพลาริเซชันของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่าง ๆ	10
ภาพประกอบ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) กับอุณหภูมิของผลึกแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3).....	12
ภาพประกอบ 8 การจัดเรียงไดโพลภายในเนื้อวัสดุ (ก) ก่อนการให้สนามไฟฟ้า (ข) หลังการให้สนามไฟฟ้า	13
ภาพประกอบ 9 ลักษณะวงฮิสเทอรีซิสแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าโพลาริเซชัน (polarization, P) กับค่าสนามไฟฟ้า (electric field, E) ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก	14
ภาพประกอบ 10 ทิศทางของแรงกระทำที่มีผลต่อวัสดุไพโซอิเล็กทริก	16
ภาพประกอบ 11 แผนภาพแสดงชนิดของการโพลาริเซชันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้า	18
ภาพประกอบ 12 (ก) ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน 2 ชุดที่ต่อในวงจรไฟฟ้าเดียวกันตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน 2 ชุดที่ต่อในวงจรไฟฟ้าเดียวกัน (ข) ตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นขนาน.....	19
ภาพประกอบ 13 แสดงลักษณะโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ของสารของแบเรียมไททาเนต	23
ภาพประกอบ 14 (ก) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแบเรียมไททาเนต ณ อุณหภูมิต่าง ๆ (ข) ระยะของขอบเซลล์ที่มีการเปลี่ยนแปลง ณ อุณหภูมิต่างๆ.....	24

ภาพประกอบ 15 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ของเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate; PZT) (ก) แบบคิวบิก (cubic) (ข) เตตระโกนอล (tetragonal).....	25
ภาพประกอบ 16 เฟสไดอะแกรมของเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (phase diagram of lead zirconate titanate).....	27
ภาพประกอบ 17 สภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) ของวัสดุไพโซอิเล็กทริก	27
ภาพประกอบ 18 โครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite crystal structure).....	29
ภาพประกอบ 19 เฟสไดอะแกรมของสารประกอบ $\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3$ ที่มีการเจือปนลานทานัม (La^{3+}).30	
ภาพประกอบ 20 ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดด้วยลูกบอล (Ball milling) 32	
ภาพประกอบ 21 ขั้นตอนในการเกิดกระบวนการเผาผนึก	33
ภาพประกอบ 22 การเปรียบเทียบลักษณะการเผาผนึกแบบ (ก) ของเหลว (ข) ของแข็ง.....	34
ภาพประกอบ 23 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อตกกระทบกับหน่วยเซลล์.....	36
ภาพประกอบ 24 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	38
ภาพประกอบ 25 สัญลักษณ์ตัวเหนี่ยวนำ (ก) แกนอากาศ (ข) แกนเหล็ก (ค) แกนเฟอร์ไรท์.....	39
ภาพประกอบ 26 สัญลักษณ์ตัวเก็บประจุ.....	40
ภาพประกอบ 27 สัญลักษณ์ตัวต้านทาน.....	40
ภาพประกอบ 28 แผนภาพและเครื่องมือการวิเคราะห์ PE hysteresis ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก ...	41
ภาพประกอบ 29 ชุดทดสอบค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกด้วยวิธี Static test.....	42
ภาพประกอบ 30 ชุดทดสอบค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกด้วยวิธี Quasi static	43
ภาพประกอบ 31 วงฮิสเตอร์ซิสของอุณหภูมิการเผาผนึกที่ต่างกัน.....	45
ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงสมบัติไดอิเล็กทริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิบน substrate ที่ต่างกัน	46
ภาพประกอบ 33 วงฮิสเตอร์ซิสของความสัมพันธ์ระหว่าง สนามไฟฟ้าและโพลาไรเซชันของฟิล์มบาง PLZT ที่มีการเติมตะกั่วที่มากเกินพอ ร้อยละ 5 และ 15 โดยโมล ผ่านการอบอ่อนที่ 700°C	47
ภาพประกอบ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่ขึ้นกับความถี่ของแผ่น PLZT-PZN	48

ภาพประกอบ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่ขึ้นอุณหภูมิในช่วง 50-100°C ของ PLZT (a) ก่อนการโพลิ่ง และ (b) หลังการโพลิ่ง.....	49
ภาพประกอบ 36 สมบัติทางไฟฟ้าของ PLZT ที่อัตราส่วน 9/65/35 ด้วยวิธี Solid phase reaction Hydrothermal และ Partial co-precipitation.....	50
ภาพประกอบ 37 ขั้นตอนการเตรียมสเลอรี PLZT.....	54
ภาพประกอบ 38 ขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่น PLZT ด้วยวิธีหล่อแผ่นบาง.....	55
ภาพประกอบ 39 ขั้นตอนการเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PLZT	56
ภาพประกอบ 40 การเผาผนึก	57
ภาพประกอบ 41 ขั้นตอนการเตรียมการเผาผนึกแผ่น PLZT	57
ภาพประกอบ 42 การทำขั้วอิเล็กโทรดให้แก่แผ่น PLZT โดยเคลือบด้วยชั้นแพลเลเดียม.....	58
ภาพประกอบ 43 การเตรียมชิ้นงานก่อนเข้าเครื่อง X-Ray Diffractometer	59
ภาพประกอบ 44 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD).....	59
ภาพประกอบ 45 การเตรียมชิ้นงานก่อนเข้าเครื่อง Scanning Electron Microscope (ก) แผ่น PLZT ที่ใช้วิเคราะห์พื้นผิว (ข) แผ่น PLZT ที่ใช้วิเคราะห์ความหนา	60
ภาพประกอบ 46 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	60
ภาพประกอบ 47 เครื่อง LCR meter	61
ภาพประกอบ 48 เครื่อง ferroelectric test system	62
ภาพประกอบ 49 แผ่น PLZT ขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแผ่นบางที่ความหนา 1250 μm ที่อัตราส่วน (ก) 8/65/35 (ข) 9/65/35 และ (ค) 10/65/35	63
ภาพประกอบ 50 แผ่น PLZT ก่อนการซ้อนทับ หลังการซ้อนทับ และหลังเผาผนึก ด้วยอุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 30 min ที่อัตราส่วน (ก) 8/65/35 (ข) 9/65/35 และ (ค) 10/65/35.....	64
ภาพประกอบ 51 โครงสร้างผลึกของแผ่น PLZT เจือเลนทาทันในปริมาณต่างกัน	65
ภาพประกอบ 52 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PLZT เจือเลนทาทันในปริมาณต่างกัน	66
ภาพประกอบ 53 ความหนาของแผ่น PLZT เจือเลนทาทันในปริมาณต่างกัน ที่อัตราส่วน (ก) 8/65/35 (ข) 9/65/35 และ (ค) 10/65/35 จากภาพตัดขวางของโครงสร้างทางจุลภาค.....	68

ภาพประกอบ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก ที่ ขึ้นกับความถี่ของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35	69
ภาพประกอบ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก	71
ภาพประกอบ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าที่ 10 20 30 40 50 และ 60 kV/cm ที่อัตราส่วน (ก) 8/65/35 (ข) 9/65/35 และ (ค) 10/65/35 ของแผ่น PLZT	73
ภาพประกอบ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าที่ 60 kV/cm ของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35.....	74



บทที่ 1

บทนำ

1. ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาวัสดุไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการนำมาผลิตในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมอีกหลายประเภท อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่ถูกนำมาศึกษาเพื่อพัฒนาต่ออย่างแพร่หลาย เนื่องจากวัสดุไพโซอิเล็กทริกมีสมบัติคือ เมื่อวัสดุไพโซอิเล็กทริกได้รับแรงกล (mechanical force) จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า (voltage) เรียกว่าปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (direct piezoelectric effect) ในทางกลับกัน เมื่อวัสดุไพโซอิเล็กทริกได้รับแรงดันไฟฟ้าจะทำให้มีการเปลี่ยนรูปร่าง (deformation) หรือเกิดแรงกล ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบผกผัน (converse piezoelectric effect) ด้วยสมบัติของวัสดุไพโซอิเล็กทริกทำให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นำมาประยุกต์ใช้งานอย่างหลากหลาย เช่น เซนเซอร์ (sensors) ทรานสดิวเซอร์ (transducers) ตัวเก็บประจุ (capacitors) และแอคชูเอเตอร์ (actuators) เป็นต้น (Buchanan, 1986; Suaprasert, 2014; Taunaumang, 1994; Trolier, 2004) ทั้งนี้ วัสดุไพโซอิเล็กทริกที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย คือ เลดเซอร์โคเนตไททานेट มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ เกิดจากสารละลายของแข็ง (solid solution) ระหว่าง เลดเซอร์โคเนต (Lead Zirconate; PbZrO_3) กับ เลดไททานेट (Lead Titanate; PbTiO_3) ซึ่งอัตราส่วนระหว่างเซอร์โคเนียมต่อไททานีม (Zr/Ti) มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้า และเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงมีการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเลดเซอร์โคเนตไททานेट โดยการเติมสารเจือ (dopants) เข้าไปในระบบของเลดเซอร์โคเนตไททานेट โดยสารเจือที่นิยมอย่างมากตัวหนึ่ง คือ แลนทานัม (La^{3+}) การเจือแลนทานัมเข้าไปในระบบเลดเซอร์โคเนตไททานेट กลายเป็นเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานेट (Lead Lanthanum Zirconate Titanate; PLZT) มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{Pb}_{(1-x)}\text{La}_x(\text{Zr}_y\text{Ti}_{(1-y)})\text{O}_3$ สารเจือแลนทานัม (La^{3+}) เป็นสารเจือชนิดอ่อน (soft dopant) เมื่อเจือแลนทานัม (La^{3+}) เข้าไปในระบบเลดเซอร์โคเนตไททานेट แลนทานัมจะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของเลด (Pb^{2+}) ทำให้ตำแหน่งของโครงสร้างเลดเซอร์โคเนตไททานेटมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติไพโซอิเล็กทริก คือ มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกที่ดี และมีสภาพการเคลื่อนที่บริเวณผนังโดเมนเพิ่มขึ้น (Bintachitt, 2009; Hotza, 1995; วันทนิย์, 2004)

สิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงนอกจากสมบัติที่ดีของวัสดุแล้ว คือกระบวนการผลิตเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าเชิงอุตสาหกรรม ที่สามารถผลิตชิ้นงานได้ครั้งละปริมาณมากและมีวิธีการผลิตที่ไม่ซับซ้อน การขึ้นรูปวัสดุแบบแผ่นจึงเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเพราะสามารถจัดเก็บได้ง่ายแม้มีปริมาณที่มาก วิธีการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นบาง (tape casting) เป็นวิธีหนึ่งในการขึ้นรูปเซรามิกที่ไม่ซับซ้อน สามารถควบคุมความหนาของแผ่นเทพได้ ผลิตได้ครั้งละปริมาณมาก และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ โดยการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นบางมีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบ แบ่งตามชนิดของตัวทำละลาย (solvent) ที่ใช้ คือ แบบตัวทำละลายที่ไม่ใช้น้ำ (non-aqueous solvent) และแบบตัวทำละลายที่ประกอบด้วยน้ำ (aqueous solvent) (Moulson, 2003; William, 2003) ด้วยเหตุผลเรื่องความปลอดภัยไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังใช้ต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ ทำให้ตัวทำละลายที่ประกอบด้วยน้ำเป็นตัวเลือกที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย แม้จะมีข้อจำกัดในเรื่องของการระเหยที่ช้าและขึ้นรูปได้ยากกว่าแบบตัวทำละลายที่ไม่ใช้น้ำ แต่การเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและติดไฟได้ง่ายก็เป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ระบบตัวทำละลายที่ไม่ใช้น้ำไม่ได้รับความนิยมในการใช้งาน (Qin, 2012; Timakul, 2008)

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยทำการศึกษาแผ่นไพโซอิเล็กทริกเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานेट (PLZT) ในอัตราส่วนของ Zr/Ti เป็น 65/35 ที่มีการเจือแลนทานัมในปริมาณ 8 9 และ 10 mol% ขึ้นรูปแบบแผ่นด้วยวิธีหล่อแผ่นบางโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย โดยทำการศึกษาโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค และสมบัติไพโซอิเล็กทริกของวัสดุเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานेट และนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาวัสดุเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานेट (PLZT) และวิธีการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นบาง

2.2 เพื่อศึกษาผลของการเจือแลนทานัมของแผ่น PLZT ต่อการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นบาง

2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึก โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติไพโซอิเล็กทริกของวัสดุเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานेट (PLZT)

3. ขอบเขตของงานวิจัย

3.1 ศึกษาผลของการเจือแลนทานัมในปริมาณที่ต่างกันเป็น 8 9 และ 10 mol% ต่อการขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแผ่นบาง โครงสร้างผลึก โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติไพโซอิเล็กทริกของแผ่น PLZT

3.2 ศึกษาโครงสร้างผลึก โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติไพโซอิเล็กทริกของแผ่น PLZT ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และ เครื่อง LCR Meter

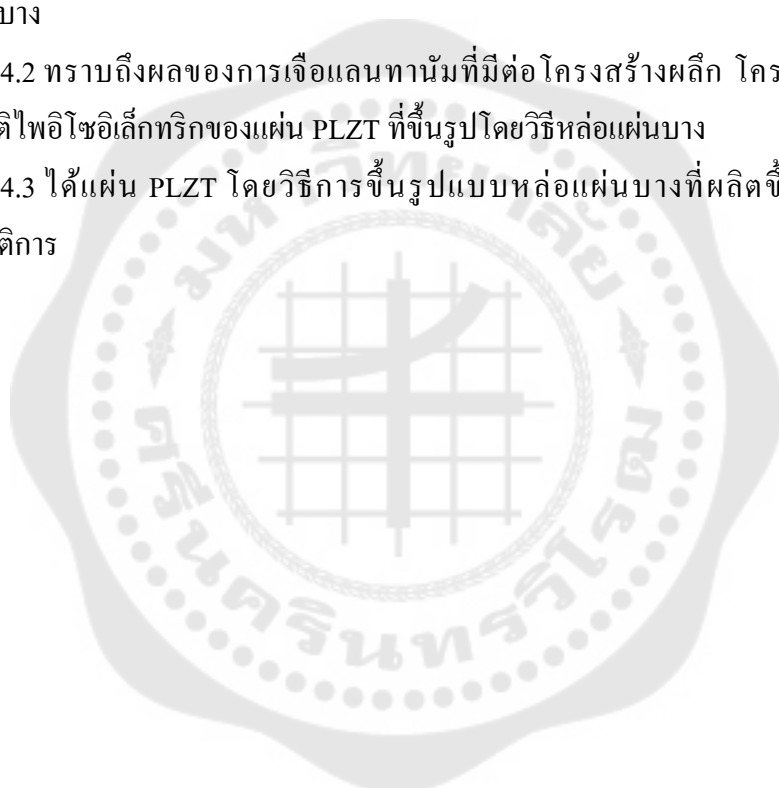
3.3 ผลิตแผ่น PLZT โดยวิธีการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นบาง

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

4.1 ทราบผลของการเงื่อนไขต่าง ๆ ที่มีต่อโครงสร้างผลึก โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติไพโซอิเล็กทริกของแผ่น PLZT ที่ขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นบาง

4.2 ทราบถึงผลของการเงื่อนไขที่มีต่อโครงสร้างผลึก โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติไพโซอิเล็กทริกของแผ่น PLZT ที่ขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นบาง

4.3 ได้แผ่น PLZT โดยวิธีการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นบางที่ผลิตขึ้นได้เองในระดับห้องปฏิบัติการ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะนำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุไพโซอิเล็กทริก วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก การประยุกต์ใช้งานวัสดุไพโซอิเล็กทริก การขึ้นรูปเซรามิก โดยมุ่งเน้นไปที่การขึ้นรูปด้วยเทคนิคหล่อแผ่นบาง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานेट

1. ทฤษฎีอิเล็กโตรเซรามิก

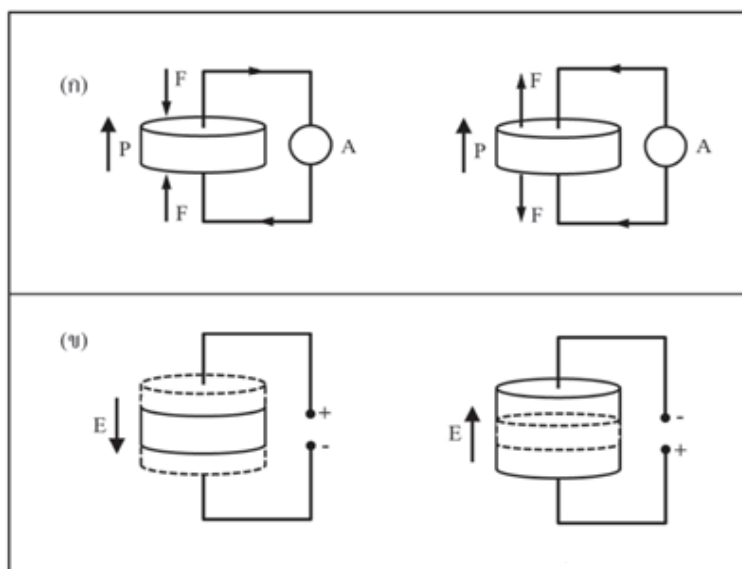
1.1 ทฤษฎีไพโซอิเล็กทริก

1.1.1 ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลและสมบัติทางไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (direct piezoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุไพโซอิเล็กทริกสามารถเกิดขั้วไฟฟ้า (electrical polarization) ในวัสดุขึ้นเมื่อได้รับความเค้น (stress) ตัวอย่างเช่น เซนเซอร์ (sensor) ดังภาพประกอบ 1 (ก)

2. ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบผกผัน (converse piezoelectric effect) เป็นปรากฏการณ์ในทางตรงกันข้าม คือเมื่อวัสดุไพโซอิเล็กทริกได้รับพลังงานไฟฟ้า แล้วสามารถเกิดความเครียด (strain) ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปได้ ตัวอย่างเช่น แอคชูเอเตอร์ (actuator) ดังภาพประกอบ 1 (ข)



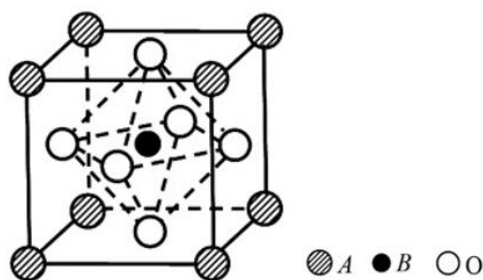
ภาพประกอบ 1 ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (ก) แบบทางตรง (direct piezoelectric effect)

(ข) แบบผกผัน (converse piezoelectric effect)

ที่มา: Moulson AJ., & Herbert JM. (2003). *Electroceramics* (2nd edition ed.). p. 340.

1.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์

ลักษณะโครงสร้างผลึกของวัสดุไพโซอิเล็กทริก คือ โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ (perovskite structure) มีสูตรเคมีทั่วไปเป็น ABO_3 โดย อะตอม A และ อะตอม B คืออะตอมแคตไอออน (cation) แคตไอออน A จะมีขนาดใหญ่กว่าแคตไอออน B และ O คืออะตอมออกซิเจน หรือแอนไอออน (anion) ถ้าพิจารณา หน่วยเซลล์ (unit cell) ของโครงสร้างนี้ ดังภาพประกอบ 2 โดยที่อะตอม A จะอยู่ที่มุมทั้ง 8 ของหน่วยเซลล์ อะตอม B จะอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางของหน่วยเซลล์ และมีการจัดเรียงตัวแบบออกตะฮีดรอล (octahedral site) ส่วนอะตอม O จะอยู่ที่ตรงกลางของทั้ง 6 หน้าของหน่วยเซลล์ เพอโรฟสไกต์มีพื้นฐานมาจากหน่วยเซลล์แบบ face-center cubic closed pack (FCC) (Xu, 2010)



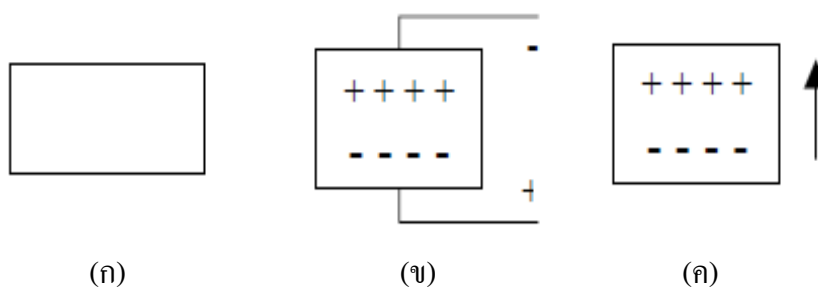
ภาพประกอบ 2 โครงสร้างผลึกเพอโรฟสไกต์ (perovskite crystal structure)

ที่มา: Xu N., Zhao H., Zhou X., & Wei W. (2010). Dependence of critical radius of the cubic perovskite ABO_3 oxides on the radius of A- and B-site cations. 35(14): 7296.

สารประกอบที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์จะรวมไปถึงพวกสารประกอบในกลุ่มไททานเตต (titanates) หลาย ๆ ชนิด สารที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เซรามิก ได้แก่ แบเรียมไททานเตต (barium titanate, $BaTiO_3$) เลดไททานเตต (lead titanate, $PbTiO_3$) เลดเซอร์โคเนต (lead zirconate) เช่น เลดเซอร์โคเนตไททานเตต (lead zirconate titanate, $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$)

1.1.3 การทำโพลิงวัสดุไพโซอิเล็กทริก

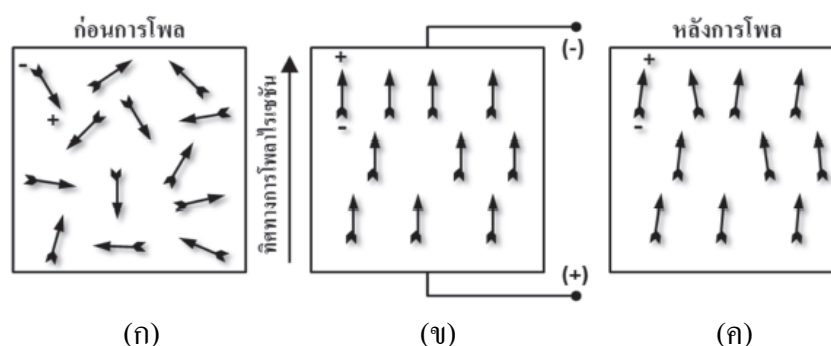
ผลึกที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง เกิดจากการแยกกันระหว่างประจุบวกและประจุลบ ซึ่งก็คือการมีไดโพลไฟฟ้า (electric dipole) ทำให้ผลรวมของประจุบวกและประจุลบไม่เท่ากับศูนย์ เกิดเป็นสารที่มีขั้วและเมื่อมีการให้แรงกด หรือแรงดันไฟฟ้าจะเกิดการเคลื่อนที่ของไดโพล เรียกว่า การเกิดโพลาริเซชัน (polarization) ซึ่งเป็นสภาวะที่ทำให้เกิดสภาพไพโซอิเล็กทริก แต่วัสดุไพโซอิเล็กทริกที่ไม่ได้รับแรงกดหรือแรงดันไฟฟ้ามีการจัดเรียงตัวในทิศทางแบบสุ่ม ทำให้โพลาริเซชันรวมมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาสารเซรามิกที่มีทิศทางของไดโพลไม่เรียงตัวเป็นระเบียบนี้ ทำให้ไม่สามารถวัดค่าไพโซอิเล็กทริกได้ ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกในวัสดุเซรามิกจะเกิดขึ้นได้นั้น วัสดุต้องผ่านกระบวนการโพลลิ่งก่อนนำมาใช้งาน ซึ่งกระบวนการโพลลิ่ง (poling) คือการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในตัววัสดุทำให้เกิดการโพลาริเซชัน โดยไดโพลไฟฟ้าจะเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปและอยู่ในทิศทางใกล้เคียงกันหรือทิศทางเดียวกับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ดังนั้นสภาพความเป็นไพโซอิเล็กทริกในวัสดุเซรามิกที่ไม่ผ่านการโพลลิ่งจะไม่มี การเปลี่ยนสภาพของวัสดุ แม้ว่าแต่ละผลึกจะเป็นไพโซอิเล็กทริกอยู่แล้วก็ตาม (Haertling, 1999; Moulson, 2003; สุธรรม, 2008) ดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 การเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุขณะเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้า
(ก) ก่อนให้สนามไฟฟ้า (ข) ขณะให้สนามไฟฟ้า (ค) หยุดให้สนามไฟฟ้า

ที่มา : APC International. (2002). Piezoelectric ceramic: Principles and applications.
(ออนไลน์)

ในระหว่างกระบวนการโพลีโกลี้งวัสดุจะเกิดการขยายตัวตามแนวแกนสนามไฟฟ้า และเกิดการหดตัวในทิศทางที่ตั้งฉากทั้งสองทิศทาง หลังจากการโพลีโกลี้งถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามไฟฟ้าแล้วก็ตาม แต่โพลีโกลี้งภายในเซรามิกส่วนใหญ่ยังคงเรียงตัวในทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ได้ทำการโพลีโกลี้ง โพลีโกลี้งเหล่านี้เรียกว่า โพลีโกลี้งคงค้าง ดังภาพประกอบ 4 และปัจจัยที่มีผลต่อการโพลีโกลี้ง คือ ระดับความแรงของสนามไฟฟ้า เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการโพลีโกลี้ง ซึ่งจะกำหนดความสามารถในการเปลี่ยนทิศทางของไดโพลและสมบัติของวัสดุ โดยปกติการโพลีโกลี้งจะทำภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิสูงแต่ไม่เกินอุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) ของวัสดุแต่ละชนิด เนื่องจากเซรามิกจะเสียสภาพโพลีโกลี้งที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (Haertling, 1999; Moulson, 2003; สุธรรม, 2008)



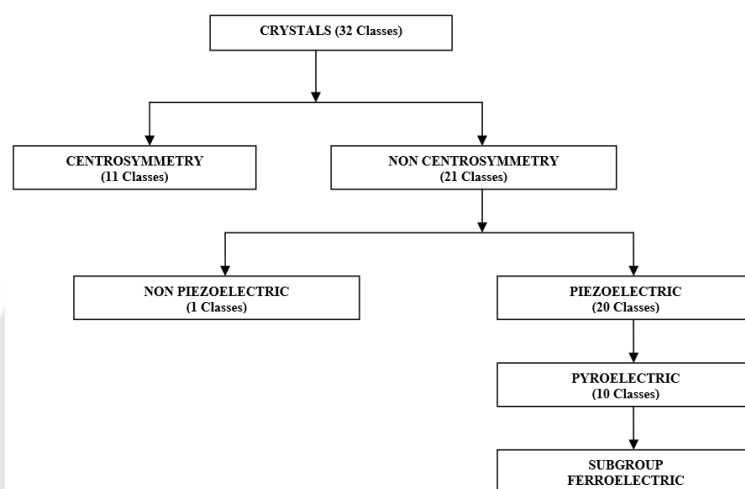
ภาพประกอบ 4 โดโพลภายในวัสดุ (ก) ก่อนการ โพล (ข) ขณะทำการ โพล (ค) หลังการ โพล และนำแรงดันไฟฟ้าออกแล้ว

ที่มา : APC International. (2002). Piezoelectric ceramic: Principles and applications. (ออนไลน์)

1.2 ทฤษฎีเฟอร์โรอิเล็กทริก

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่มีโพลาริเซชันเกิดขึ้นเองในผลึก (spontaneous polarization, P_s) และมีความสามารถเรียงตัวได้ตามสนามไฟฟ้า (re-oriented by applied electric field) สำหรับผลึกในธรรมชาติ นักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่ม เช่น ลอร์ดเคลวิน (Lord Kelvin) วัลด์มาร์ วอยท์ (Woldemar Voigt) อธิบายปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกอย่างมีระบบ โดยสมบัติไพโซอิเล็กทริกจะขึ้นกับหน่วยเซลล์พื้นฐาน โครงผลึกของสาร หน่วยที่เล็กที่สุดเรียกว่า หน่วยเซลล์ จึงมีการจัดกลุ่มผลึกโดยพิจารณาจากสมมาตรของผลึก แบ่งออกเป็น 32 กลุ่ม (symmetry point groups) ดังภาพประกอบ 5 ภายใน 32 กลุ่ม ถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีสมมาตรแบบจุดศูนย์กลาง (centrosymmetric or non-piezoelectric) มี 11 กลุ่มย่อย โดยในกลุ่มนี้ จะไม่มีขั้วไฟฟ้า (non-polar) และกลุ่มไม่มีสมมาตรแบบจุดศูนย์กลางสมมาตรของหน่วยเซลล์ (noncentrosymmetric) มี 21 กลุ่มย่อย ถึงแม้ว่า 21 สมมาตรดังกล่าวอยู่ในเงื่อนไขที่สามารถแสดงคุณสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ แต่มีอยู่หนึ่งสมมาตรใน 21 กลุ่มนี้ที่ไม่แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริก ดังนั้นจึงเหลือสมมาตรที่ไม่มีศูนย์กลางอยู่เพียง 20 กลุ่มเท่านั้นที่สามารถแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ และภายใน 20 กลุ่มนี้มี 10 กลุ่มย่อยที่ไม่มีโพลาริเซชันแบบถาวร หรือที่เรียกว่า โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง ที่เหลืออีก 10 กลุ่มย่อยเป็นสมมาตรที่มีโพลาริเซชันแบบถาวร หรือโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเฟส

ของผลึกเมื่ออุณหภูมิลดลงผ่านอุณหภูมิคูรี ดังนั้นผลึกที่มีสมมาตรในกลุ่มนี้สามารถแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกและไพโรอิเล็กทริก นอกจากนั้น โพลาริเซชันของผลึกบางตัวในกลุ่มนี้สามารถเรียงตัวได้ในทิศทางตามที่เป็นสนามไฟฟ้าให้กับผลึกซึ่งโดยผลึกที่มีสมบัติดังกล่าวในกลุ่มย่อยสุดท้ายนี้เรียกว่า ผลึกที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric crystal) จึงกล่าวได้ว่า วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นทั้งวัสดุไพโซอิเล็กทริกและไพโรอิเล็กทริก (Newnham, 2005; กฤษณา, 2004)



ภาพประกอบ 5 การแบ่งผลึกด้วยการพิจารณาจากสมมาตรของผลึก

ที่มา: กฤษณา บุญชม. (1998). สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของของผสม PZT/PVC แบบ 0-3.

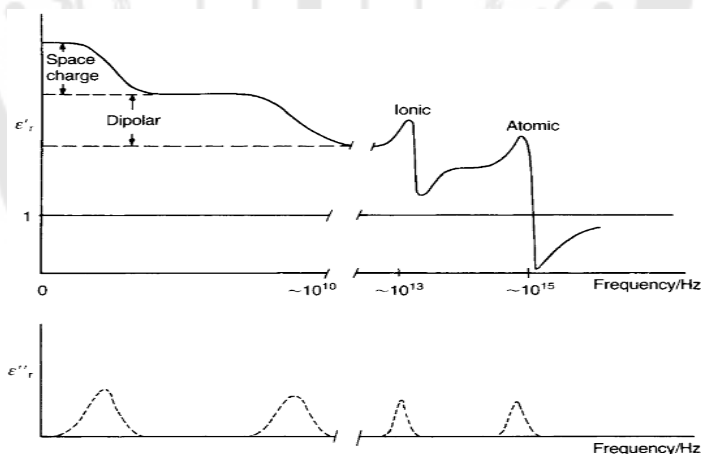
p 5.

จาก 20 point group ของผลึกที่ไม่มีความสมมาตรของจุดศูนย์กลางที่เป็นไพโซอิเล็กทริกจะมี 10 point group ที่มีขั้ว (polar) มีผลรวมของไดโพลไม่เท่ากับศูนย์ หรือมีโพลาริเซชันเกิดขึ้นเองได้ในผลึก และเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไป ไดโพลสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้แล้ววัสดุ เรียกการเปลี่ยนทิศทางของไดโพลนี้ว่าการสวิชชิง (switching) หรือมีความสามารถเรียงตัวได้ตามสนามไฟฟ้า (re-oriented by applied electric field) ซึ่งเรียกผลึกที่มีสมบัติดังกล่าวนี้ว่า วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า วัสดุที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกจะเป็นทั้งวัสดุไพโซอิเล็กทริกและไพโรอิเล็กทริก แต่วัสดุไพโซอิเล็กทริกไม่จำเป็นต้องเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Bintachitt, 2009; Haertling, 1999; Moulson, 2003)

สารเฟอร์โรอิเล็กทริกแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ กลุ่มเกลือโรเชลล์ (Rochelle salt) กลุ่มเคดีพี (KDP) กลุ่มทีจีเอส (TGS) และกลุ่มเพอโรฟสไกต์ (Perovskites) โดยที่กลุ่มเพอโรฟสไกต์ มีความโดดเด่น คือ เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง และมีโครงสร้างอย่างง่าย เช่น BaTiO_3

1.2.1 การเกิดโพลาริเซชันตัวเองและปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีโพลาริเซชันเกิดขึ้นเองได้ในผลึก แม้ว่าไม่ได้ถูกเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้าภายนอก และโพลาริเซชันนี้สามารถกลับชั่วแวริ่งตัวได้ตามสนามไฟฟ้า โดยการให้สนามไฟฟ้าภายนอกที่เหมาะสม การเกิดโพลาริเซชันตัวเองของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้น พิจารณาได้จากปริมาณโมเมนต์คู่ควบ (dipole moment) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร หรือปริมาณประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนพื้นผิวที่ตั้งฉากกับทิศทางของโพลาริเซชัน การโพลาริเซชันของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงตามสนามไฟฟ้าทั้งหมดเกิดขึ้นในช่วงความถี่ต่ำ เมื่อความถี่สูงขึ้นการโพลาริเซชันจะไม่เป็นแบบช่วงยาวตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ในทางกลับกัน การกระจายค่าของสภาพยอมไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นหากความถี่เพิ่มสูงขึ้น (Jullian, 2003; Moulson, 2003; Smolenskii, 1961) ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 การกระจายในโพลาริเซชันของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่าง ๆ

ที่มา: Moulson AJ., & Herbert JM. (2003). *Electroceramics* (2nd edition ed.). p. 70.

อย่างไรก็ตามผลึกทั้ง 20 กลุ่มที่แสดงสมบัติไพโรอิเล็กทริกนี้ มีเพียง 10 กลุ่มเท่านั้น ที่สามารถเกิดโพลาริเซชันตัวเอง โดยกลุ่มผลึกที่มีลักษณะการเกิดโพลาริเซชันตัวเอง

ที่ขึ้นกับอุณหภูมินั้นจะเรียกว่า “ปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric effect)” ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเทอมของค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric coefficient หรือ π) ดังสมการ

2.1

$$\Delta P_s = \pi \Delta T \quad (2.1)$$

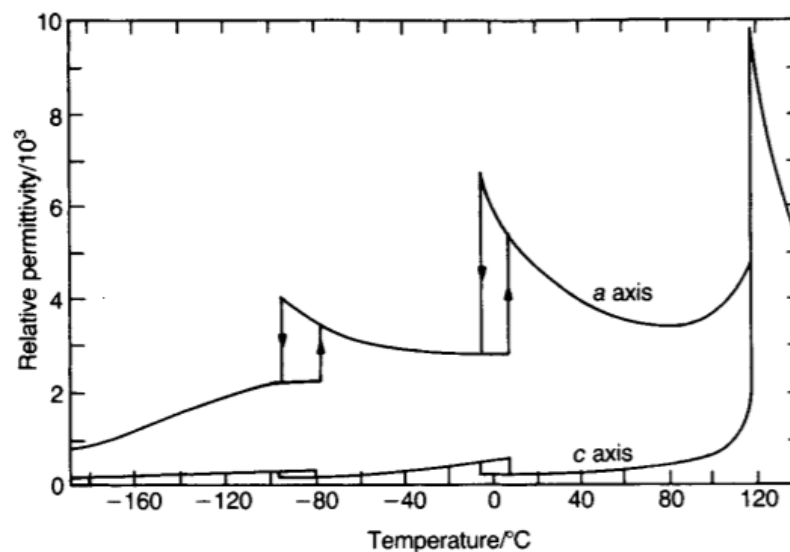
เมื่อ ΔP_s คือ ปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปของการเกิดโพลาไรเซชัน (mC/cm^2)

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

π คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของไพโรอิเล็กทริก

1.2.2 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส

ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นเกิดการเปลี่ยนเฟสได้หลายเฟสตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป โดยอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสของผลึก เรียกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส (phase transition temperature) ซึ่งถ้ามีการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริก (ไม่มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง) ไปเป็นคิวบิกพาราอิเล็กทริก (มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง) จะเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสนี้ว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature หรือ T_c) ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงเฟสของผลึกแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) ซึ่งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity หรือ ϵ_r) ที่อุณหภูมิคูรีจะสูงที่สุด โดยพีคของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้นจะมีลักษณะเป็นพีคแหลม (sharp peak) ไม่ขึ้นกับความถี่ ดังภาพประกอบ 7 ซึ่งเป็นตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงเฟสของผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) โดยมีการเปลี่ยนเฟสจากอโรโทรมบิก (orthorhombic) ไปเป็นออร์โทโรมบิก (orthorhombic) และจากออร์โทโรมบิกไปเป็นเตตระโกนอล (tetragonal) ตามลำดับ และมีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ประมาณ 120°C โดยมีการเปลี่ยนแปลงเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริกเตตระโกนอลไปเป็นพาราอิเล็กทริกที่มีระบบผลึกเป็นคิวบิก (Jullian, 2003; Moulson, 2003; Smolenskii, 1961)



ภาพประกอบ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) กับอุณหภูมิของผลึก
แบเรียมไททานेट (BaTiO_3)

ที่มา: Moulson AJ., & Herbert JM. (2003). Electroceramics (2nd edition ed.). p. 73.

ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งสามารถ
อธิบายได้ด้วยกฎคูรี-ไวส์ (Curie-Weiss law) ดังสมการ 2.2

$$\epsilon = \frac{\epsilon_0 + C}{T - T_0} \quad (2.2)$$

โดย ϵ คือ ค่าสภาพยอม (permittivity) ของวัสดุที่ตรวจวัด

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ ($8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)

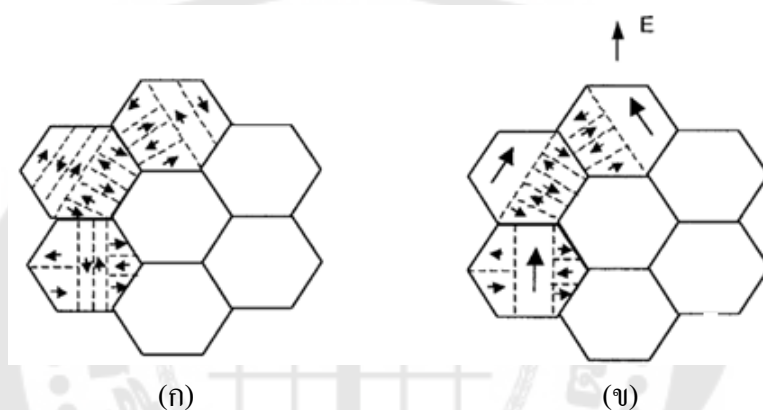
C คือ ค่าคงที่คูรี (Curie constant)

T_0 คือ อุณหภูมิคูรี ($^{\circ}\text{C}$)

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

1.2.3 เฟอโรอิเล็กทริกโดเมนและวงฮิสเทอรีซิส

ในผลึกเฟอโรอิเล็กทริกนั้นจะมีบริเวณที่เกิดการโพลาไรเซชันในทิศทางเดียวกัน โดยในบริเวณนั้นเรียกว่า เฟอโรอิเล็กทริกโดเมน (ferroelectric domain) ก่อนมีการให้สนามไฟฟ้า ไดโพลมีทิศทางกระจายตัว ทำให้เซรามิกไม่แสดงสมบัติและวัดค่าโพลาไรเซชันได้ ดังภาพประกอบ 8 (ก) หลังจากมีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไป ไดโพลมีการเรียงตัวตามสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดโพลาไรเซชันหรือไดโพลภายในเนื้อวัสดุให้มีทิศทางใกล้เคียงกัน หรืออาจมีทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ซึ่งเรียกว่า การสลับขั้วโดเมน (domain switching) มีลักษณะโดเมน ดังภาพประกอบ 8 (ข) (Jullian, 2003; Moulson, 2003; Smolenskii, 1961)

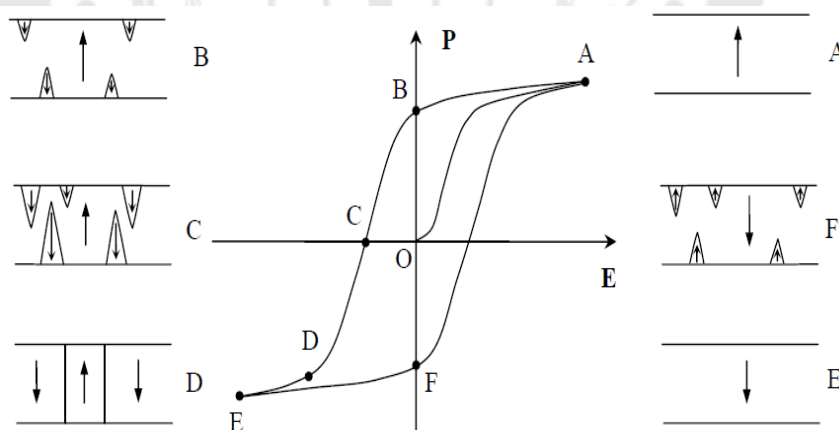


ภาพประกอบ 8 การจัดเรียงไดโพลภายในเนื้อวัสดุ
(ก) ก่อนการให้สนามไฟฟ้า (ข) หลังการให้สนามไฟฟ้า

ที่มา: Moulson A.J., & Herbert J.M. (2003). *Electroceramics* (2nd edition ed.). p. 76.

สมบัติเฟอโรอิเล็กทริกหรือสภาพการเกิดขั้วได้เองเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าของสาร สามารถอธิบายได้โดยใช้วงฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ซึ่งลักษณะวงฮิสเทอรีซิสของเฟอโรอิเล็กทริกนั้น เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชัน (polarization, P) กับค่าสนามไฟฟ้า (electric field, E) ดังภาพประกอบ 9 พิจารณาจากรูปเป็นลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่าง P กับ E ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของวงฮิสเทอรีซิส (non-linear P - E hysteresis loop) จะเกิดขึ้นเมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารเฟอโรอิเล็กทริก จะทำให้เกิดการเรียงตัวของไดโพลไฟฟ้าจากไม่เป็นระเบียบกลายเป็นไดโพลไฟฟ้าที่มีทิศทางเดียวกับทิศของสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ซึ่งเรียกลักษณะนี้ว่า การโพลาไรเซชัน (polarization) เมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในช่วงแรก ไดโพลซึ่งมี

ลักษณะการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบจะเริ่มมีการเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าและจะมีการเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีทิศทางเดียวกัน และในบริเวณหรือปริมาตรที่มีไดโพลในทิศทางเดียวกัน คือโดเมนจากการให้สนามไฟฟ้า ไดโพลเกือบทั้งหมดมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า ที่บริเวณนี้จะได้จุดโพลาริเซชันอิ่มตัว (saturation polarization, P_s) หลังจากนั้นเมื่อมีการลดสนามไฟฟ้าลงจนกระทั่งเป็นศูนย์ ไดโพลบางส่วนจะเคลื่อนที่กลับทิศทางเดิมและยังมีไดโพลบางส่วนที่ไม่เคลื่อนที่กลับทิศทางเดิม เรียกจุดนี้ว่า โพลาริเซชันคงค้าง (remanent polarization, P_r) และเมื่อมีการเพิ่มสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับตอนเริ่มต้นจนจุดหัวไฟฟ้าคงตัวเท่ากับศูนย์เรียกสนามไฟฟ้า ณ จุดนี้ว่าสนามไฟฟ้าบังคับ (coercive field, E_c) เมื่อมีการเพิ่มสนามไฟฟ้าขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งไดโพลทั้งหมดมีการจัดเรียงตัวในทิศเดียวกันกับสนามไฟฟ้าอีกครั้งจะได้จุด $-P_s$ เครื่องหมายลบแสดงถึงโพลาริเซชันที่มีทิศตรงข้ามกับตอนแรก หลังจากนั้นลดสนามไฟฟ้าลงให้เท่ากับศูนย์อีกครั้ง จะมีไดโพลบางส่วนที่มีการกลับทิศแต่ยังมีค่าโพลาริเซชันบางส่วนเหลืออยู่ ซึ่งที่จุดนี้เรียก $-P_r$ และเมื่อมีการเพิ่มสนามไฟฟ้าในทิศทางเดียวกับตอนเริ่มต้น ไดโพลจะมีการจัดเรียงตัวไปในทิศเดียวกับสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเป็นวงฮิสเทอรีซิส (Bintachitt, 2009; Jullian, 2003; Moulson, 2003)



ภาพประกอบ 9 ลักษณะวงฮิสเทอรีซิสแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง

ค่าโพลาริเซชัน (polarization, P) กับค่าสนามไฟฟ้า (electric field, E) ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก

ที่ ม ๑: Bintachitt P. (2009). Local origin of macroscopic properties and patterning in $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$. p. 8.

2. สมบัติไพโซอิเล็กทริก

2.1 สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก

จากปรากฏการณ์ทางตรง เมื่อให้แรงเค้นทางกล (mechanical stress, T) จะทำให้สารเกิดค่าการกระจัดทางไฟฟ้า (dielectric displacement, D) ส่วนปรากฏการณ์แบบกลับนั้นเมื่อผ่านสนามไฟฟ้า (E) เข้าไปจะเกิดแรงหรือเกิดลักษณะความเครียดทางกล (mechanical strain, S) ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ดังสมการ 2.3 และ 2.4

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2.3)$$

$$S = s^E T + dE \quad (2.4)$$

เมื่อ D คือ การกระจัดของไดอิเล็กทริก (dielectric displacement)

T คือ ความเค้น (stress)

E คือ สนามไฟฟ้า (electric field)

S คือ ความเครียด (strain)

d คือ สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient)

s^E คือ ค่าโมดูลัสของการยืดหยุ่น (material compliance or modulus of elasticity) เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าคงที่

ϵ^T คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric permittivity or dielectric constant) เมื่อค่าความเค้นคงที่

ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของผลึก ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกมีหลายค่า ซึ่งกำหนดด้วยการระบุตัวอักษร d, e, g, h เป็นสัญลักษณ์แทนค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกเพื่อให้่ายต่อการอธิบาย ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกที่มีความสำคัญคือ ค่า d ซึ่งเป็นค่าที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโพลาไรเซชันกับค่าความเค้นที่เกิดขึ้น และยังแสดงถึงค่าความเครียดที่เป็นผลมาจากการเกิดสนามไฟฟ้าตามกฎของการอนุรักษ์พลังงาน

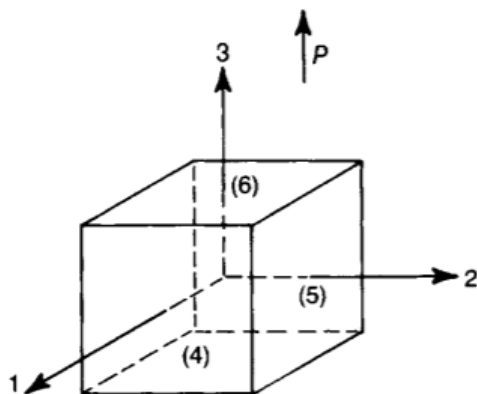
โดยทั่วไปนิยมเขียนสัญลักษณ์ของค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกเป็น d_{ij} เครื่องหมายแสดงสมบัติของวัสดุไพโซอิเล็กทริกมักจะประกอบด้วยตัวเลข 2 ตัว คือ i แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้เข้าไปในวัสดุ หรือที่วัสดุให้ออกมาเมื่อถูกแรงทางกลกระทำ และ j แสดงทิศทางที่วัสดุไพโซอิเล็กทริกยืดหรือหดเมื่อถูกสนามไฟฟ้าภายนอกกระทำ หรือทิศทางที่ให้แรงทางกล

กระทำต่อวัสดุไพโซอิเล็กทริก หมายเลขถูกกำหนดโดยอ้างอิงกับทิศทางโพลาริเซชัน ดังภาพประกอบ 10 จากภาพ หมายเลข 3 เป็นทิศทางในแนวแกน z ของผลึกซึ่งขนานกับทิศที่เหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้าในวัสดุ ในขณะที่แกน x และแกน y แทนด้วยหมายเลข 1 และ 2 ตามลำดับ ส่วนหมายเลข 4 5 และ 6 หมายถึงแรงเฉือนรอบ ๆ แกน x y และ z ตามลำดับ เนื่องจากความเป็นไพโซอิเล็กทริกขึ้นกับทิศทาง ทำให้สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกมีหลายค่าตามทิศต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับโพลาริเซชันที่เปลี่ยนไปเมื่อได้รับความเค้นหรือสนามไฟฟ้าที่ให้ในทิศทางนั้น โดยทั่วไปให้ความเค้นหรือสนามไฟฟ้าในทิศหมายเลข 3 ขณะที่ทิศหมายเลข 1 และ 2 ตั้งฉากและมีทิศทางที่สมมูลกัน ดังนั้นวัสดุเซรามิกที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีสามทิศทางที่สัมพันธ์กับไพโซอิเล็กทริกไม่เป็นศูนย์ ได้แก่ d_{33}, d_{31}, d_{15} (Baoshan, 2005; Cross, 1996) ตัวอย่างเช่น

d_{33} เป็นสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกที่แสดงโพลาริเซชันในแนวแกน 3 เนื่องจากการป้อนสนามไฟฟ้าทำให้เกิดความเค้นในแนวแกน 3

d_{31} เป็นสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกแสดงค่าโพลาริเซชันที่เกิดในทิศทางที่ 3 เมื่อแรงกระทำในทิศทางที่ 1

d_{15} เป็นสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกในแนวเฉือนที่เกิดจากความเครียดรอบแกน 2 สัมพันธ์กับโพลาริเซชันในทิศทาง 1



ภาพประกอบ 10 ทิศทางของแรงกระทำที่มีผลต่อวัสดุไพโซอิเล็กทริก

ที่มา: Moulson AJ., & Herbert JM. (2003). *Electroceramics* (2nd edition ed.). p. 348.

ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกมีความสัมพันธ์กับการกระจัด ความเค้นหรือความเครียด และสนามไฟฟ้า ดังสมการ 2.5

$$d = \frac{D}{T} = \frac{S}{E} \quad (2.5)$$

เมื่อ d คือ สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient)

D คือ การกระจัดของไดอิเล็กทริก (dielectric displacement)

T คือ ความเค้น (stress)

E คือ สนามไฟฟ้า (electric field)

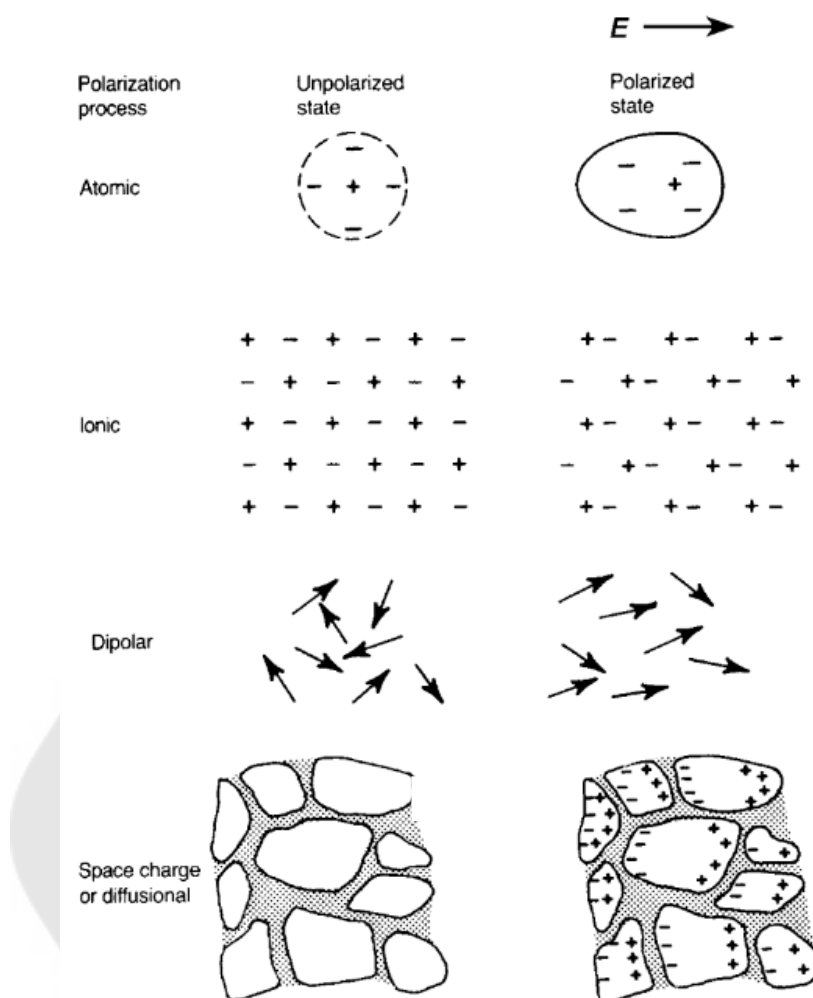
S คือ ความเครียด (strain)

นอกจากนี้ยังมีค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric constant) อีกตัวหนึ่ง คือค่าคงที่ความต่างศักย์ (piezoelectric voltage constant; g_i) เป็นปริมาณของความต่างศักย์ที่วัสดุไพโซอิเล็กทริกสร้างขึ้นเมื่อได้รับความเค้น ทั้งแบบตรงและแบบผันกลับ มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเมตร (V/m) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (d) และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) ดังสมการ 2.6

$$g_{ij} = \frac{d_{ij}}{\epsilon'} = \frac{d_{ij}}{\epsilon_r \epsilon_0} = \frac{E}{T} = \frac{S}{D} \quad (2.6)$$

2.2 สมบัติไดอิเล็กทริก

สมบัติไดอิเล็กทริกคือสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าในวัสดุ เมื่อวัสดุอยู่ในสภาวะปกติจะประกอบไปด้วยโมเลกุลที่จัดศูนย์กลางมวลรวมกันระหว่างโปรตอนและอิเล็กตรอนที่อยู่ภายใต้แรงยึดของโมเลกุลและแรงยึดของอะตอมภายในเนื้อสารจะมีประจุไฟฟ้าอิสระ แต่เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลเกิดแรงทางไฟฟ้า ทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศของสนาม ส่วนกลุ่มประจุลบถูกผลักไปในทิศตรงกันข้าม ทำให้โมเลกุลของสารเกิดโมเมนต์คู่ควม (dipole moment) ขึ้นมา (Moulson, 2003; Wiliam, 2003) ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 แผนภาพแสดงชนิดของการโพลาไรเซชันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้า

ที่มา: William D. C. (2003). Materials Science and Engineering an Introduction. p. 732.

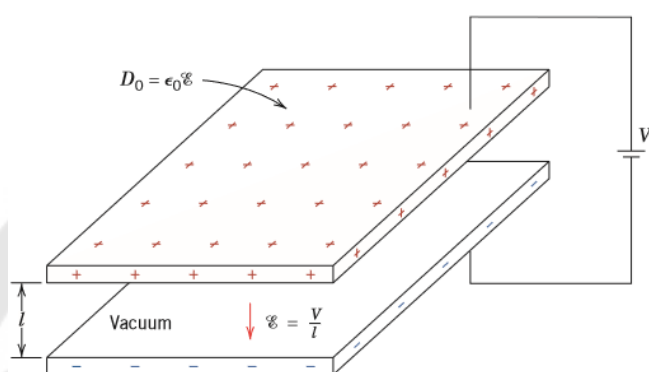
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก โดยมีค่าเป็นจำนวนเท่าของสภาพยอมของสุญญากาศ ซึ่งความสามารถในการเก็บประจุแปรผันตรงกับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และรูปทรงของตัวเก็บประจุ ดังนั้นการเก็บประจุไฟฟ้าที่สมบูรณ์ที่สุดจะต้องไม่นำไฟฟ้า หรือมีความต้านทานสูงเป็นอนันต์ เมื่อทำการให้สนามไฟฟ้า (E) บนตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนานที่มีวัสดุไดอิเล็กทริก จะเกิดประจุขึ้นที่ผิววัสดุไดอิเล็กทริก (William, 2003) ดังภาพประกอบ 12 ซึ่งได้ความสัมพันธ์ ดังสมการ 2.7

$$p = qd \quad (2.7)$$

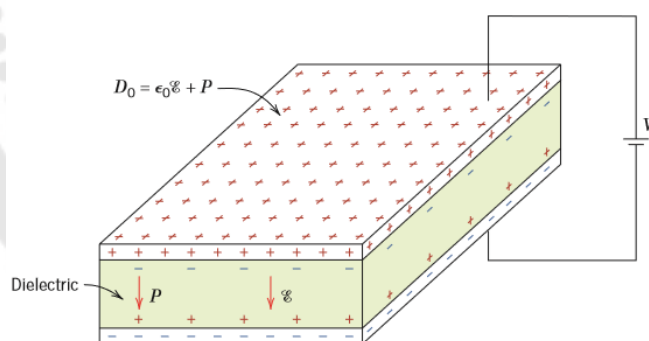
เมื่อ p คือ ไดโพลโมเมนต์

q คือ ประจุ

d คือ การกระจัดระหว่างประจุลบและประจุบวก



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 12 (ก) ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน 2 ชุดที่ต่อในวงจรไฟฟ้าเดียวกันตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน 2 ชุดที่ต่อในวงจรไฟฟ้าเดียวกัน (ข) ตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นขนาน

ที่มา: William D. C. (2003). Materials Science and Engineering an Introduction. p. 703.

จากพฤติกรรมของวัสดุไดอิเล็กทริก D บอกถึงการกระจัดของไดอิเล็กทริก (dielectric displacement) ดังสมการ 2.8

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.8)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า (capacitance, C) กับประจุไฟฟ้า (charge, Q) และความต่างศักย์ (potential, V) ดังสมการ 2.9

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.9)$$

สำหรับตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) จะมีค่าความจุไฟฟ้า ดังสมการ 2.10 และ 2.11

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2.10)$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (2.11)$$

ดังนั้น ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ดังสมการ 2.12

$$\epsilon_r = \frac{Cd}{\epsilon_0 A} \quad (2.12)$$

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

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

d คือ ความหนาของสารไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็นเมตร (m)

3. ประเภทของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

สารประกอบไพโซอิเล็กทริกสามารถแบ่งตามลักษณะสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้เป็น 2 ชนิดคือ สารประกอบไพโซอิเล็กทริกแบบอ่อน (soft piezoelectric materials) และสารประกอบไพโซอิเล็กทริกแบบแข็ง (hard piezoelectric materials)

3.1 สารประกอบไพโซอิเล็กทริกแบบอ่อน

เกิดจากการแทนที่อะตอมบางอะตอมในสารไพโซอิเล็กทริกเซรามิกด้วยอะตอมจำพวกที่ให้อิเล็กตรอน (donor) เช่น การแทนที่ Pb^{2+} ใน $\text{Pb}(\text{Zr}^{4+} \text{Ti}^{4+})\text{O}_3$ ด้วย La^{3+} ดังนั้นการเติม donor dope ลงใน PZT จะทำให้เกิดสถานะที่มีประจุบวกเกิน วัสดุ มักจะเกิดสมดุลประจุโดยการเกิด metal vacancy ทำให้โดเมนเกิดการจัดเรียงตัวได้ดียิ่งขึ้นเมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ดังนั้น soft PZT จึงมักจะมีค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า (k_p) ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (d) ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ที่มีค่าสูง และมีค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (Q_m) ต่ำ วัสดุพวกนี้มักจะถูกทำลายด้วยไฟฟ้าได้ง่าย โดย soft PZT มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่สูง จึงไม่ค่อยถูกนำไปใช้งานที่ต้องใช้ความถี่สูง ๆ หรืองานที่ต้องใช้สนามไฟฟ้ามาก ๆ เพราะจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานและมีความร้อนสูง จึงมักถูกนำไปใช้กับงาน sensor (APC International, 2002; Michel, 1997)

3.2 สารประกอบไพโซอิเล็กทริกแบบแข็ง

สารประกอบไพโซอิเล็กทริกแบบแข็งจะตรงข้ามกับสารไพโซอิเล็กทริกแบบอ่อน เกิดจากการแทนที่อะตอมในสารตั้งต้นด้วยอะตอมจำพวกที่รับอิเล็กตรอน (acceptor) เช่น การแทนที่ Pb^{2+} ใน $\text{Pb}(\text{Zr}^{4+} \text{Ti}^{4+})\text{O}_3$ ด้วย Na^+ ดังนั้นการเติม acceptor dope เข้าไปใน PZT ทำให้เกิดสภาพขาดบวก จึงต้องสมดุลประจุโดยการเกิด oxygen vacancy จะเห็นว่า hard PZT มีสมบัติที่ตรงข้ามกับ soft PZT กล่าวคือถูก pole และถูก depole ได้ยากกว่า แต่มักจะมีค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า (k_p) ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (d) ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) ต่ำกว่า และมีค่า mechanical quality factors (Q_m) สูงกว่า soft PZT ส่วนใหญ่แล้วพวก hard PZT ถูกนำไปใช้งานในด้านที่ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าและแรงกลที่สูง คือ สาร hard PZT จะมีอุณหภูมิคูรีและค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลที่สูง แต่จะมีค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของสารไพโซอิเล็กทริกทั้งสองแบบ (APC International, 2002; Michel, 1997) ดังตาราง 1

ตาราง 1 การเปรียบเทียบสมบัติของสารไพโซอิเล็กทริกเซรามิกแบบอ่อนและแบบแข็ง

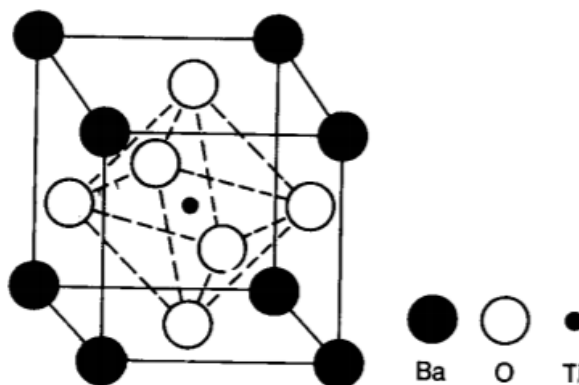
สมบัติ	สารไพโซอิเล็กทริก	สารไพโซอิเล็กทริก
	แบบอ่อน	แบบแข็ง
ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (d)	สูง	ต่ำ
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r)	สูง	ต่ำ
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (K)	สูง	ต่ำ
ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$)	สูง	ต่ำ
สภาพความต้านทานไฟฟ้า (ρ)	สูงมาก	ต่ำ
ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า (k_p)	สูง	ต่ำ
ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Z_r)	สูง	ต่ำ
สนามไฟฟ้าภายนอก (E_c)	ต่ำ	สูง
ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (Q_m)	ต่ำ	สูง
โพลาไรเซชัน (P)	ง่าย	ยากมาก

ที่มา : APC International. (2002). Piezoelectric ceramic: Principles and applications. (ออนไลน์)

4. สารประกอบไพโซอิเล็กทริก

4.1 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแบเรียมไททาเนต

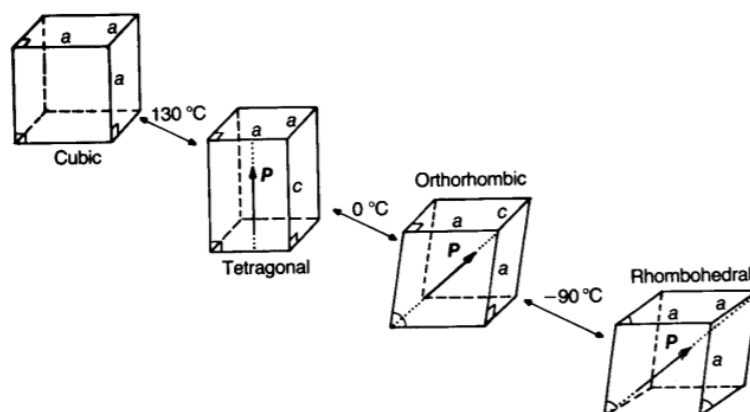
แบเรียมไททาเนต (barium titanate; BaTiO_3) มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก (cubic) ซึ่งมีอุณหภูมิคูรีประมาณ 130°C ดังภาพประกอบ 13 พิจารณาจากภาพประกอบ ไอออนของแบเรียม (Ba^{2+}) จะอยู่ที่มุมทั้งแปดของโครงสร้าง ไอออนของออกซิเจน (O^{2-}) จะอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของของแต่ละด้าน และไอออนของไททานเนียม (Ti^{4+}) จะอยู่ตรงกึ่งกลางของของโครงสร้าง โดยจะอยู่ในตำแหน่งออกตะฮีดรอล (octahedral site) ซึ่งจะถูกล้อมรอบด้วยไอออนของออกซิเจนจำนวน 6 ไอออน (Moulson, 2003)



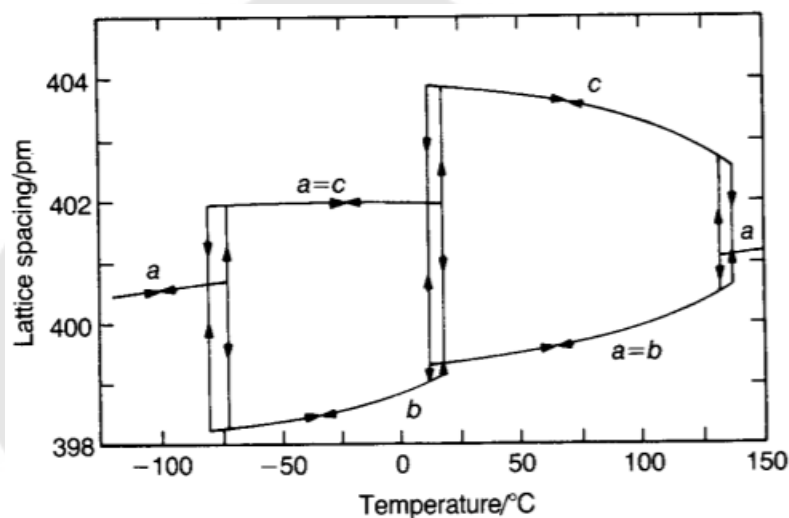
ภาพประกอบ 13 แสดงลักษณะโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ของสารของแบเรียมไททานेट

ที่มา: Moulson AJ., & Herbert JM. (2003). *Electroceramics* (2nd edition ed.). p. 71.

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแบเรียมไททานेटจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 130°C แบเรียมไททานेटจะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก ซึ่งจะมีสมบัติเป็นพาราอิเล็กทริก แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 130°C จะมีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยจะเกิดการบิดเบี้ยวไปเป็นโครงสร้างเตตระโกนอล โดยมีโมเมนต์ขั้วคู่เกิดขึ้นมาในทิศทางตามแนวแกน c จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงมาถึงที่อุณหภูมิประมาณ 5°C จึงเปลี่ยนจากโครงสร้างเตตระโกนอลไปเป็นโครงสร้างออโธโรมบิก และที่อุณหภูมิต่ำกว่า -90°C ก็จะเปลี่ยนจากโครงสร้างออโธโรมบิกไปเป็นโครงสร้างรอมโบอีดรอล ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 14 (ก) ซึ่งการเปลี่ยนโครงสร้างของสาร BaTiO_3 ตามอุณหภูมิดังที่กล่าวมานี้ จะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าที่มีขั้วในตัวเอง (spontaneous polarization) (Cross, 1996; Moulson, 2003) ดังภาพประกอบ 14 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 14 (ก) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแบเรียมไททานเต ๓ อุณหภูมิต่างๆ
(ข) ระยะของขอบเซลล์ที่มีการเปลี่ยนแปลง ๓ อุณหภูมิต่างๆ

ที่มา: Moulson AJ., & Herbert JM. (2003). *Electroceramics* (2nd edition ed.). p. 72.

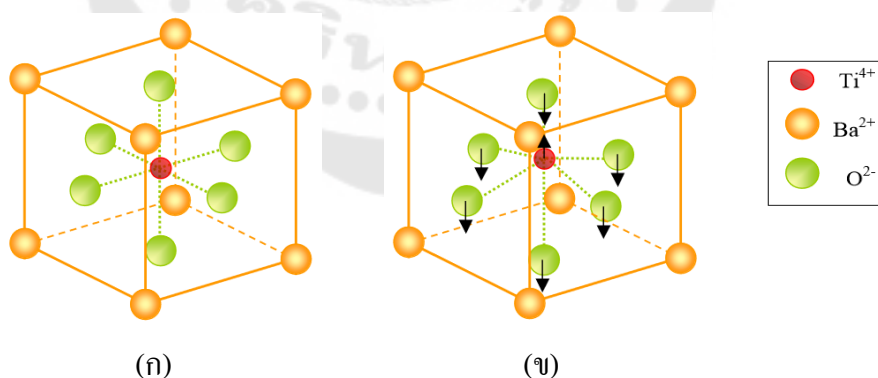
4.2 เลดเซอร์โคเนตไททานเต

เลดเซอร์โคเนตไททานเต (Lead Zirconate Titanate, $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$) เป็นสารที่เกิดจากสารละลายของแข็ง (solid solution) ระหว่างเลดเซอร์โคเนต (PbZrO_3) ซึ่งค้นพบตั้งแต่ ค.ศ.1950 มีสมบัติเป็นแอนไทเฟอร์โรอิเล็กทริก (antiferroelectric) มีโครงสร้างเป็นแบบออร์ทอโรมบิก (orthorhombic) และเลดไททานเต (PbTiO_3) ที่มีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก

(ferroelectric) มีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล (tetragonal) โดยเกิดจากการแทนที่ไอออนไททาเนียม (Ti^{4+}) ด้วยไอออนเซอร์โคเนียม (Zr^{4+})

เลดเซอร์โคเนตไททาเนตมีสูตรทางเคมี คือ $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ และมีโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ โดยมีอะตอมของตะกั่ว (Pb) อยู่ที่มุมทั้งแปดของหน่วยเซลล์ มีอะตอมของออกซิเจน (O) อยู่ตรงกลางของแต่ละหน้าทั้งหกของหน่วยเซลล์ และมีอะตอมของเซอร์โคเนียม (Zr) และอะตอมของไททาเนียม (Ti) อยู่ตรงกลางแบบสลับสับเปลี่ยนกันไป โดยโครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และตามการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเซอร์โคเนียมต่อไททาเนียม ตัวอย่าง หน่วยเซลล์แบบคิวบิกและเตตระโกนอลของ PZT (Michel, 1997) ดังภาพประกอบ 15 (ก)

เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างแบบคิวบิกจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างเตตระโกนอล ดังภาพประกอบ 15 (ข) ไอออนที่ตำแหน่ง B จะไม่อยู่ในลักษณะสมมาตร ดังนั้นเมื่อมีการให้แรงหรือให้สนามไฟฟ้าเข้าไป จะทำให้เกิดการเลื่อนของไอออนในตำแหน่ง B ทำให้เกิดเป็นลักษณะของไดโพลขึ้น ดังนั้นที่โครงสร้างเตตระโกนอลจะมีโพลาริเซชันแบบเกิดขึ้นเองได้ในทิศทาง $\langle 100 \rangle$ และสำหรับโครงสร้างรอมโบฮีดรอลจะมีโพลาริเซชันในทิศทาง $\langle 111 \rangle$ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างแบบคิวบิกสามารถเปลี่ยนเป็นแบบโครงสร้างเตตระโกนอล หรือโครงสร้างรอมโบฮีดรอลได้ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของเซอร์โคเนียมต่อไททาเนียม (Zr/Ti) ส่งผลให้สมบัติพาราอิเล็กทริกเปลี่ยนเป็นสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Cross, 1996; Ernest, 1964)

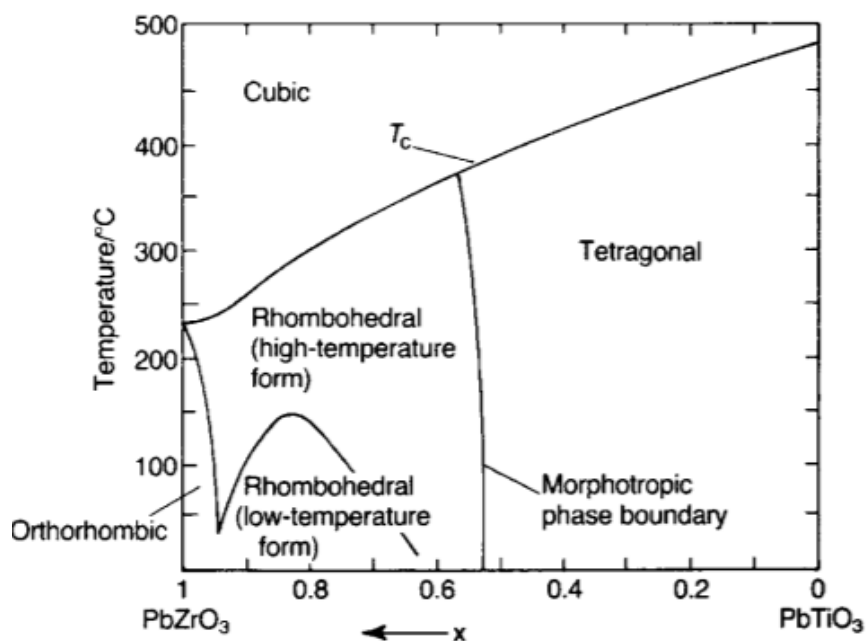


ภาพประกอบ 15 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟสไกต์ของเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate; PZT) (ก) แบบคิวบิก (cubic) (ข) เตตระโกนอล (tetragonal)

ที่ ม ๑: Jullian C. (2003). Investigation of polarization switching over broad time and field domain in various ferroelectrics. p. 9.

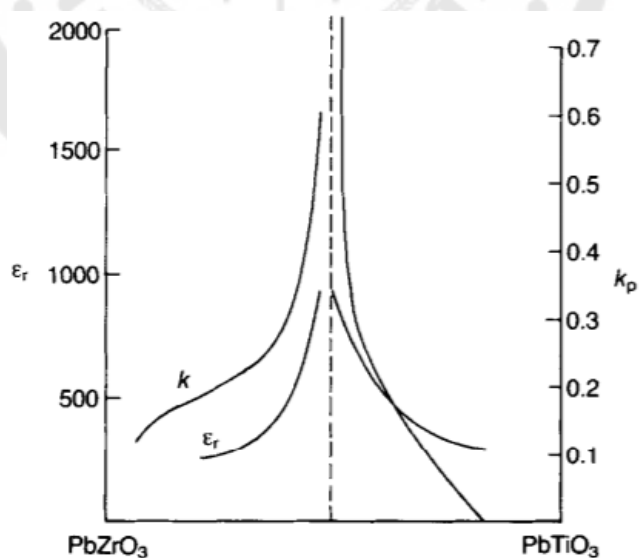
4.2.1 เฟสโคอะแกรมของเลดเซอร์โคเนตไททานेट

เลดเซอร์โคเนตไททานेटเป็นวัสดุที่มีสมบัติไพโซอิเล็กทริกและมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพอรอฟสไกต์ ทำให้แสดงสมบัติเป็นแบบพาราอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (350°C) เกิดจากการนำ PbTiO_3 ($T_c = 475^{\circ}\text{C}$) กับ PbZrO_3 ($T_c = 234^{\circ}\text{C}$) มาผสมกัน เมื่อ PbTiO_3 เย็นตัวผ่าน T_c แล้ว PbTiO_3 จะเปลี่ยนโครงสร้างจากคิวบิกเป็นเตตระโกนอล ที่มีความยาวด้านแกน z ยาวกว่าแกน x และ y ถึง 6% ความแตกต่างดังกล่าว ส่งผลให้มีความเค้นภายในชิ้นงานสูงมากขึ้น PbTiO_3 บริสุทธิ์ที่เย็นตัวผ่าน T_c ลงมามักจะแตกร้าว แต่เมื่อ PbZrO_3 เย็นตัวผ่าน T_c จะทำให้ PbZrO_3 เปลี่ยนโครงสร้างจากคิวบิกไปเป็นออร์ทอรอมบิกที่มีสมบัติแบบ antiferroelectric เพราะโพลาไรเซชันที่เกิดจากการหนีศูนย์กลางของ Zr^{2+} จะหันทิศสลับกันจนหักล้างกันไปหมด เมื่อนำ PbTiO_3 กับ PbZrO_3 มารวมกันในสัดส่วนต่าง ๆ จะได้ $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ ที่มี phase boundary ดังภาพประกอบ 16 บริเวณที่ x มีค่าประมาณ 0.52 เป็นบริเวณที่มีความพิเศษ เพราะเป็นบริเวณที่ $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ จะเปลี่ยนจากเตตระโกนอลเป็นออร์ทอรอมบิก โดยที่ขอบเขต phase boundary บริเวณนี้เกือบจะเป็นเส้นตรงที่ตั้งฉากกับแกน x แสดงว่าการเปลี่ยนแปลง phase boundary ข้างต้นนี้ เกิดขึ้นได้ทุกช่วงอุณหภูมิ เรียกช่วงบริเวณนี้ว่า บริเวณรอยต่อเฟส (morphotropic phase boundary; MBP) เป็นบริเวณที่มีอัตราส่วนระหว่าง PbZrO_3 : PbTiO_3 ที่ประมาณ 0.52:0.48 เป็นช่วงที่สารเลดเซอร์โคเนตไททานेटมีสมบัติทางไพโซอิเล็กทริกที่ดี โดยจะแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สูง ซึ่งเป็นช่วงที่ PZT เปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ที่ช่วงบริเวณนี้ PZT จะมีสมบัติไพโซอิเล็กทริกสูงสุด นักวิจัยเชื่อว่าสาเหตุที่ PZT มีสมบัติไพโซอิเล็กทริกสูงสุดในช่วง MPB เพราะช่วงนี้ PZT เกิดอยู่ในรูป 2 เฟส คือเตตระโกนอลกับรอมโบอีดรอล ซึ่งมีโพลาไรเซชัน 6 และ 8 ทิศทางตามลำดับ ดังนั้นบริเวณ MBP จึงมีทิศทางในการจัดเรียงตัวได้ถึง 14 ทิศทาง ทำให้มีโอกาสเกิดข้อได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง ง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ข้อเมื่อได้รับพลังงานจากภายนอกและเป็นสัดส่วนที่แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกดีที่สุด ดังภาพประกอบ 17 ดังนั้นเมื่อนำไปโพลลิ่งจะทำให้จัดเรียงโดเมนตามทิศที่โพลได้มาก จึงแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้มากขึ้น PZT ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักจะมีส่วนประกอบทางเคมีที่ MPB คือ $\text{Pb}(\text{Ti}_{0.48}\text{Zr}_{0.52})\text{O}_3$ ซึ่งเขียนแทนด้วย PZT (Ernest, 1964; Moulson, 2003)



ภาพประกอบ 16 เฟสไดอะแกรมของเลดเซอร์โคเนตไททาเนต
(phase diagram of lead zirconate titanate)

ที่มา: Moulson AJ., & Herbert JM. (2003). Electroceramics (2nd edition ed.). p. 335.



ภาพประกอบ 17 สภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) ของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

ที่มา: Moulson AJ., & Herbert JM. (2003). Electroceramics (2nd edition ed.). p. 336.

4.2.2 การเจือในเลดเซอร์โคเนตไททานเนต

การเจือสารลงในเลดเซอร์โคเนตไททานเนต มีทั้งหมด 2 ประเภทใหญ่ คือ การเจือแล้วกลายเป็นไพโซอิเล็กทริกแบบอ่อน (soft piezoelectric) และการเจือแล้วกลายเป็นไพโซอิเล็กทริกแบบแข็ง (hard piezoelectric) การเจือทำได้โดยการเติมตัวโดป (dopant) เข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น โดยสารที่เติมลงไปจะช่วยกระตุ้นการจัดทิศทางใหม่ของโดเมน ส่งผลต่อสภาพเฟอร์โรอิเล็กทริกให้มีสมบัติไพโซอิเล็กทริก สมบัติไดอิเล็กทริก สมบัติไฟฟ้าเชิงกลและไฟฟ้าเชิงแสงที่สูงขึ้น พิจารณาความบกพร่องของผลึก (crystallographic deficiencies) โดยผลของสารเจือที่มีผลต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก จากกลุ่มไอออนที่ใช้เป็นสารเจือในการเตรียม PZT (Haertling, 1999; สุธรรม, 2008) ประกอบด้วย

1) สารเจือออฟเวเลนซ์โคเนอร์ (soft-dopants or off-valent donors) เป็นการเติมอะตอมหรือไอออนที่มีเวเลนซ์มากกว่าไอออนในโครงสร้างของ PZT ได้แก่การเติม Nb^{2+} (แทนที่ Zr^{4+} หรือ Ti^{4+}) หรือ La^{3+} (แทนที่ Pb^{2+}) ซึ่งการเข้าไปแทนที่นี้จะลดสภาพไฟฟ้าตามธรรมชาติแบบ P-type ของ PZT ลง ส่งผลทำให้สภาพต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างน้อย 3 เท่าตัว นอกจากนี้ สารเติมจะช่วยกระตุ้นการจัดทิศทางใหม่ (reorientation) ของโดเมน ทำให้เซรามิกมีวงฮิสเทอรีซิสแบบสี่เหลี่ยม มีค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_c) ต่ำ โดยมีค่าโพลาริเซชันค้าง (P_r) ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (K) สูง

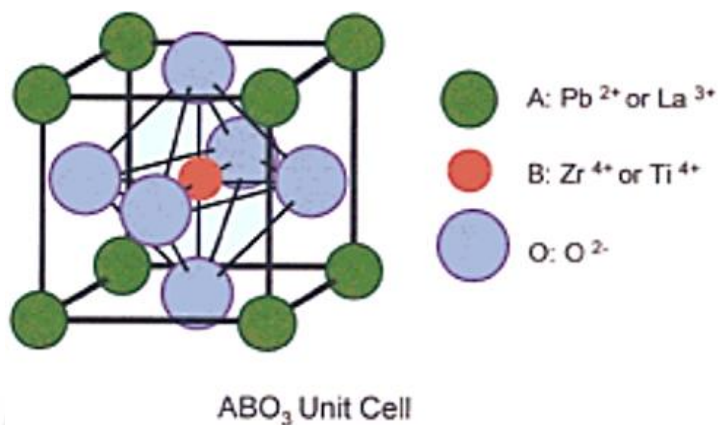
2) สารเจือไอโซเวเลนซ์โคเนอร์ (Iso-valent donors) ได้แก่ การเติม Sr^{2+} (แทนที่ Pb^{2+}) และ Sn^{4+} (แทนที่ Zr^{4+} หรือ Ti^{4+}) สำหรับการเข้าแทนที่ของไอออนที่มีเวเลนซ์และขนาดไอออนที่เท่ากันนี้ พบว่าไอออนดังกล่าวจะรวมตัวกับไอออนในระบบ และเกิดการตกตะกอน (precipitation) บริเวณของเกรน

3) สารเติมออฟเวเลนซ์แอคเซปเตอร์ (hard-dopants or Off-valent acceptor) ได้แก่ การเติม Fe^{3+} ซึ่งจะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ Zr^{4+} หรือ Ti^{4+} โดย Fe^{3+} ซึ่งมีขนาดใหญ่จะถูกยึดไว้ด้วยช่องว่างของออกซิเจน จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงทิศทางของโดเมนเป็นไปได้ยาก ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (K) และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ต่ำ

4.3 เฟสโคอะแกรมของเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานเนต

เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานเนต (lead lanthanum zirconate titanate; PLZT) มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก (cubic) มีสูตรทางเคมีเป็น $(\text{Pb}_{(1-x)}\text{La}_x)(\text{Zr}_y\text{Ti}_{(1-y)})\text{O}_3$ โดยมีอะตอมของตะกั่ว (Pb) และอะตอมของแลนทานัม (La) แบบสลับสับเปลี่ยนกันไปอยู่ที่มุมทั้งแปดของหน่วยเซลล์ มีอะตอมของออกซิเจน (O) อยู่ตรงกลางของ

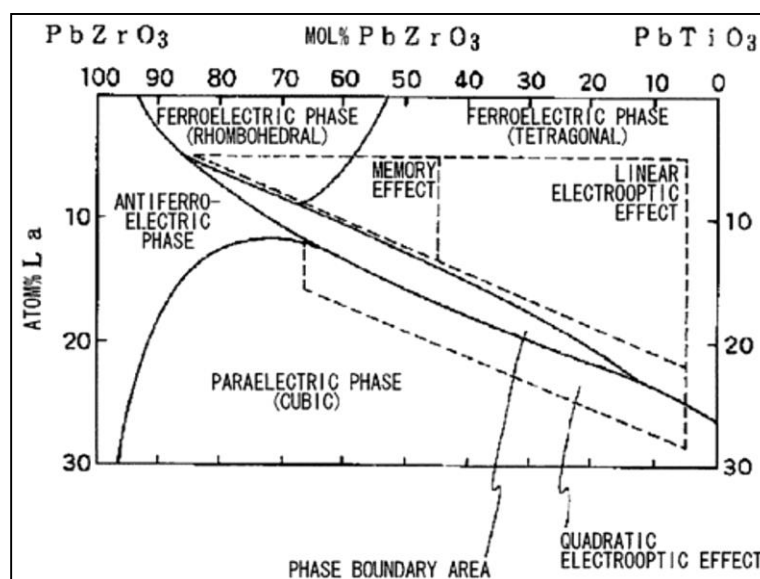
แต่ละหน้าทั้งหกของหน่วยเซลล์ และมีอะตอมของเซอร์โคเนียม (Zr) และอะตอมของไทเทเนียม (Ti) อยู่ตรงกลางแบบสลับสับเปลี่ยนกันไป ดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 โครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite crystal structure)

ที่มา: Haertling G. H. (1999). Ferroelectric ceramic: history and technology. 82(1): 801.

เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานต เป็นไพโซอิเล็กทริกแบบอ่อน เกิดจากการเจือสารเจือแบบอ่อน (soft dopant) คือ แลนทานัม (La^{3+}) ที่นำไปเจือในระบบ PZT เกิดเป็น PLZT โดย La^{3+} ที่เจือเข้าไปในระบบ PZT จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ Pb^{2+} ซึ่งทำให้วัสดุ PLZT เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติ ดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 เฟสไดอะแกรมของสารประกอบ PbTiO_3 - PbZrO_3 ที่มีการเจือปนลานทานัม (La^{3+})

ที่มา: Moulson AJ., & Herbert JM. (2003). *Electroceramics* (2nd edition ed.). p. 450.

5. การขึ้นรูปเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานเตด้วยวิธีหล่อแผ่นบาง

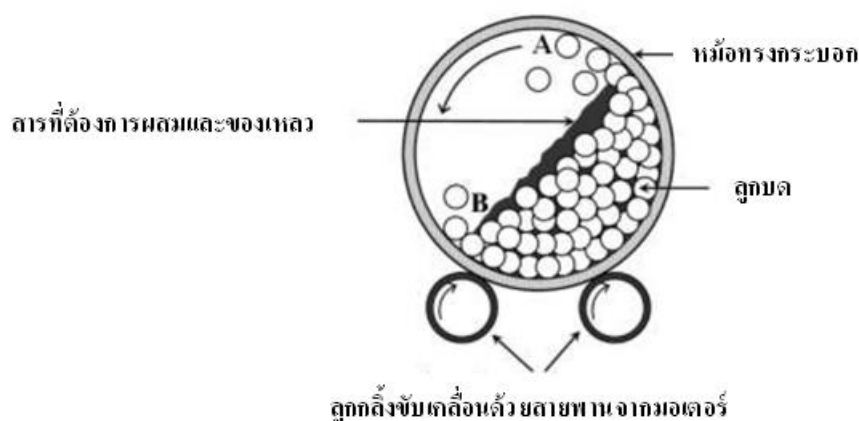
5.1 การเตรียมชิ้นงานไพโอโซอิเล็กทริก

โดยทั่วไปการเตรียมผงไพโอโซอิเล็กทริกเซรามิกมักจะมีวิธีการเตรียมโดยการใช้ผงที่ทำจากออกไซด์หลายชนิดมาผสมกัน เรียกวิธีนี้ว่า วิธีผสมสารออกไซด์ (mixed – oxide, MO) ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดและง่ายในการเตรียมสาร สำหรับกระบวนการผสมสารโดยใช้ออกไซด์ จะเริ่มจากการชั่งสารออกไซด์แต่ละชนิดหรือองค์ประกอบอื่น ๆ เช่นคาร์บอนหรือไนโตรเจน ซึ่งจะสลายตัวกลายเป็นออกไซด์เมื่อเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800 – 900 °C ให้ได้อัตราส่วนตามที่ต้องการ หลังจากนั้นนำสารผสมที่ได้ไปทำการบดเปียก (wet milling) สำหรับขั้นตอนในการบดเปียกนั้นถือว่าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง การใช้เวลาในการบดไม่เพียงพออาจทำให้เกิดผลเสียหาย เนื่องจากเกิดความไม่สม่ำเสมอทางเคมีในระดับที่ต้องการ หรือถ้าหากใช้เวลาในการบดมากเกินไป อาจจะทำให้เกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างลูกบดกับอนุภาคของสาร ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของส่วนผสมได้ โดยส่วนใหญ่แล้วลูกบดที่ใช้จะต้องทำจากวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น อะลูมินาหรือเซอร์โคเนีย หรือที่ใช้บดส่วนใหญ่จะทำจากพลาสติก และของเหลวที่ใช้เป็นตัวกลางในการบดต้องเป็นของเหลวที่สามารถระเหยออกไปได้ง่าย เช่น แอลกอฮอล์ สำหรับเวลาในการบดของสารไพโอโซอิเล็กทริกนั้นจะอยู่ที่ช่วงประมาณ 24-48 h หลังจากนั้นผงที่ได้จากการบดจะนำไป

เผาแคลไซน์เพื่อให้สารผสมเกิดปฏิกิริยากัน ซึ่งโดยทั่วไปสารที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ มักจะใช้ อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ที่ประมาณ 850°C เนื่องจากหากใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ สูงเกินไป จะเกิดการระเหยของตะกั่วซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 880°C เมื่อผ่านการเผา แคลไซน์เรียบร้อยแล้ว จะนำผงเซรามิกที่ได้ไปกรองผ่านตะแกรงเพื่อให้ได้ขนาดของอนุภาคตามที่ต้องการก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปต่อไป (ชัยญาพันธ์, 2013; สุรศักดิ์, 2010)

5.2 กระบวนการบดย่อยผสมด้วยลูกบอล

กระบวนการเตรียมผงให้มีขนาดเล็กด้วยการทำให้อนุภาคขนาดใหญ่แตกออกโดย อาศัยแรงกด เรียกว่า การบด (comminution) ซึ่งได้แก่ การบดหยาบ (clushing) การบดละเอียด (grinding) และการบดย่อย (milling) กระบวนการเหล่านี้ได้รับความนิยมสูงในการนำมาใช้เพื่อ ลดขนาดอนุภาค ใช้ทำลายอนุภาคผงที่มีรูพรุนหรือสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ข้างในให้แตกออก ช่วย ปรับพฤติกรรมการແຈ່ງແຈ້ງอนุภาคด้วยการลดขนาดของอนุภาคที่โตที่สุดลง ทำให้จำนวนของ อนุภาคนขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น ช่วยปรับปรุงรูปร่างของอนุภาค ช่วยแยกกลุ่มก้อนหรือกระจุกอนุภาค ออกจากกัน นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการผสมอนุภาคผงต่างชนิดกัน ให้เกิดการผสมผสาน เข้าไปพร้อม ๆ กับการลดขนาดของอนุภาค กระบวนการบดย่อยด้วยลูกบอล (ball milling) เป็น เทคนิคหนึ่งที่ยอดนิยมใช้ในปัจจุบัน ซึ่งเป็นกระบวนการบดย่อยผสมอนุภาคโดยอาศัยการหมุนหม้อบด ซึ่งเป็นแท่งกลวงทรงกระบอกมีฝาเปิด-ปิดอยู่ปลายด้านหนึ่ง ดังภาพประกอบ 20 สำหรับหม้อบด ในระดับห้องปฏิบัติการมักทำด้วยพลาสติก ที่สามารถกำจัดเศษพลาสติกที่ปนเปื้อนมากับการบด ย่อยได้ด้วยการเผาที่อุณหภูมิต่ำ ในหม้อบดจะมีการใส่สารที่จะทำการบดผสมพร้อมลูกบอลบด (grinding media) และสารที่ช่วยในการหล่อลื่น ลงไปในปริมาณที่เหมาะสมกับขนาดของหม้อบด โดยจะต้องมีการปรับอัตราส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้ในหม้อบด ให้ระบบทั้งหมดสามารถเกิด พฤติกรรมบดย่อยในลักษณะดังกล่าวคือ ลักษณะของลูกบอลจะต้องเคลื่อนที่ในลักษณะคล้ายกับ ตัวอักษร D โดยมีการเคลื่อนที่จากตำแหน่ง B ขึ้นไปจนถึงตำแหน่ง A แล้วตกลงมากระแทกกับ วัสดุด้านล่าง จากนั้นมีการหมุนเบียดเสียดกัน และมีการเลื่อนไหลเป็นวัฏจักรเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ ทำให้ อนุภาคของสารมีขนาดลดลง เนื่องจากการกระแทกของลูกบอลถูกขัดสีระหว่างหม้อบดและลูกบอล กับผนังหม้อบด ในขณะที่พฤติกรรมเหล่านี้สามารถช่วยให้อนุภาคมีขนาดลดลง การเกิดสิ่งเจือปนก็ อาจมีขึ้นในขั้นตอนเหล่านี้เช่นกัน ไม่ว่าจะเป็นชิ้นส่วนของลูกบอล หรือผนังของหม้อบดที่สึกกร่อน หลุดปะปนออกมาด้วย ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถป้องกันได้โดยการเลือกใช้ลูกบอลที่มีคุณภาพสูง และหม้อบดที่สามารถกำจัดออกได้ที่อุณหภูมิต่ำ เช่น หม้อบดพลาสติก (สุรศักดิ์, 2010)



ภาพประกอบ 20 ภาพตัดขวางแสดงองค์ประกอบหลักของการบดขยี้ด้วยลูกบอล (Ball milling)

ที่มา: สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. (2010). การสังเคราะห์และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกระบบ $(\text{Bi}_{1/2}\text{K}_{1/2})\text{TiO}_3\text{-LiSbO}_3$. p. 44.

5.3 การขึ้นรูปเซรามิก

การขึ้นรูป เป็นการเตรียมชิ้นงานจากผงที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมอนุภาค ไปขึ้นรูปให้ได้รูปร่างและขนาดของชิ้นงานตามที่ต้องการ สำหรับวิธีการขึ้นรูปที่สะดวกและนิยมที่สุดคือวิธีการขึ้นรูปโดยการอัดแบบไม่ใช้ความร้อน (cold pressing) นอกจากนี้ยังมีวิธีการขึ้นรูปแบบอื่น เช่น การขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นบาง (tape casting) การขึ้นรูปแบบโรลคอมแพคชัน (roll compaction) การหล่อขึ้นรูป (slip casting) วิธีในการขึ้นรูปเหล่านี้จะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งการจะเลือกใช้วิธีใด จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และความซับซ้อนของชิ้นงาน รวมทั้งค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตชิ้นงาน (อารี, 1998)

การเตรียมเซรามิกโพไลโซอิดเล็กทริกที่นิยมกันมากที่สุดคือ การผลิตเซรามิกจากการใช้ผง (powders) เป็นวัตถุดิบ ซึ่งคุณภาพของผงที่นำมาใช้นั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะกำหนดคุณภาพของเซรามิกที่ได้ โดยจะพิจารณาขนาด (size) รูปร่าง (shape) การแจกแจงของขนาด (size distribution) สถานะของการรวมกลุ่ม (state of agglomeration) องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) องค์ประกอบของเฟส (phase composition) โครงสร้าง (structure) และสมบัติทางเคมีของพื้นผิว (chemical properties of surface) ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญของอนุภาคผง เพื่อความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการผลิตเป็นเซรามิก

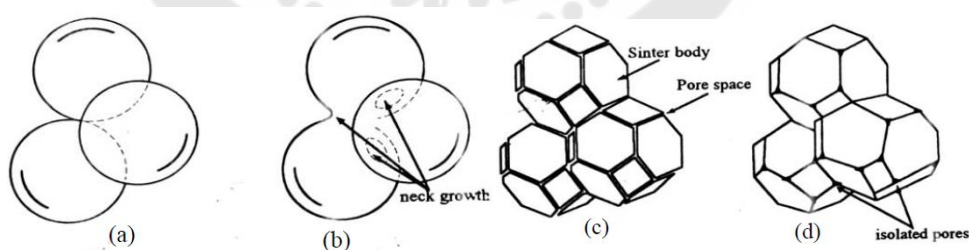
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมสเลอรี (slurry) ที่สามารถขึ้นรูปได้โดยใช้วิธีการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นบาง (tape casting) โดยสิ่งสำคัญในการเตรียมแผ่นเทปคือ การเตรียมสเลอรี

ที่ประกอบด้วยผงเซรามิก (ceramic powder) ตัวทำละลาย (solvent) ตัวประสาน (binder) สารเพิ่มความเหนียว (plasticizer) สารช่วยกระจายตัว (dispersant) และสารลดฟอง (antifoamer) เมื่อได้สเลอรีแล้ว จะเทสเลอรีลงในแฮนด์แคสต์ ทำการเลื่อนแฮนด์แคสต์ไปบนแผ่นรอง จะได้แผ่นเทป PLZT จากนั้นจะนำแผ่นเทป PLZT ไปใส่เบ้าหลอมเพื่อทำการเผาผนึก

5.4 การเผาผนึก

การเผาผนึก คือกระบวนการที่ทำเพื่อให้อนุภาคของวัตถุดิบหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้เกิดพันธะยึดเหนี่ยวต่อกัน ซึ่งการเผาผนึกนั้นเป็นกระบวนการที่สำคัญที่จะช่วยกำหนดสมบัติของสาร กลไกในการเผาผนึกของสารแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ

1. ขั้นเริ่มต้น (initial stage) ในขั้นตอนนี้อนุภาคจะเริ่มขยับตัวเพื่อให้มีจุดสัมผัสกับอนุภาคที่อยู่รอบ ๆ ข้างให้มากที่สุด หลังจากนั้นก็จะเริ่มเกิดรอยต่อระหว่างอนุภาค (neck)
2. ขั้นตอนกลาง (intermediate stage) ในขั้นตอนนี้จะมีการโตขึ้นของรอยต่อระหว่างอนุภาค ทำให้รูพรุนที่อยู่ระหว่างอนุภาคลดลง ชิ้นงานเริ่มหดตัว ในขณะเดียวกันจุดศูนย์กลางของอนุภาคก็จะเริ่มเคลื่อนเข้าหากัน
3. ขั้นตอนสุดท้าย (final stage) ขั้นตอนนี้จะเริ่มต้นจากการที่รูพรุนเริ่มเคลื่อนที่ออกไปจากชิ้นงาน และระบบของชิ้นงานก็จะมีการลดพลังงานพื้นผิว (surface energy) ลง โดยลักษณะของเกรนที่มีขนาดเล็กจะโดนเกรนที่มีขนาดใหญ่กลืน เพื่อเป็นการลดพลังงานพื้นผิว ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานมีขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้น โดยขั้นตอนในการเกิดกระบวนการเผาผนึก (Baoshan, 2005; สุทัศน์, 2006) ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 ขั้นตอนในการเกิดกระบวนการเผาผนึก

ที่มา: สุทัศน์ จันบัวลา. (2006). การศึกษาสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของสาร $\text{PMnN} - \text{PZT}$ ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำสำหรับประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเพียโซอิเล็กทริก. p. 29.

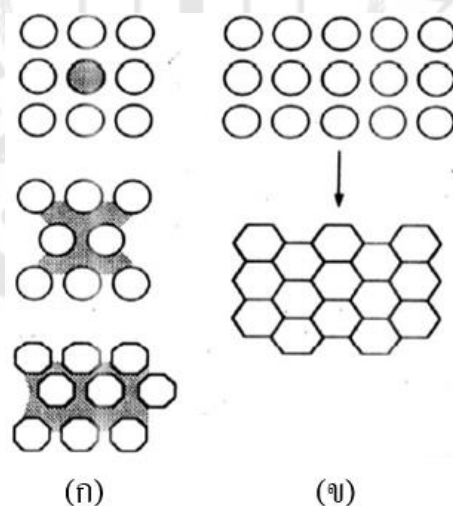
การเผาผนึกสามารถจำแนกชนิดได้เป็น 2 ชนิดคือ

1) การเกิดเฟสของเหลวขณะเผาผนึก

การเกิดเฟสของเหลวของเหลวขณะเผาผนึก (liquid phase sintering) คือลักษณะของการเผาผนึกที่มีเนื้อสารบางส่วนหรือทั้งหมดอยู่ในสภาพของเหลว ซึ่งลักษณะการเกิดเฟสของเหลวในขณะเผาผนึก เป็นกลไกที่สำคัญในการเผาผนึกสาร เนื่องจากขณะเกิดเฟสของเหลวในขณะเผาผนึกจะทำให้ลักษณะการเรียงตัวของอนุภาคเกิดได้ง่ายขึ้น และนอกจากนั้นยังทำให้กลไกในการเคลื่อนที่เข้าหากัน (diffusion) เกิดได้เร็วยิ่งขึ้น ดังนั้นข้อดีของการเกิดเฟสของเหลวในขณะเผาผนึกคือ สามารถทำให้การเผาผนึกชิ้นงานให้เกิดได้เร็วขึ้นและใช้อุณหภูมิในการเผาผนึกที่ต่ำลง (Baoshan, 2005; สุทัศน์, 2006) ดังภาพประกอบ 22 (ก)

2) การเกิดเฟสของแข็งขณะเผาผนึก

การเกิดเฟสของแข็งของแข็งขณะเผาผนึก (solid phase sintering) คือกระบวนการในการเผาผนึกสารที่มีลักษณะการเกิดเป็นเฟสของแข็งอย่างเดียว โดยจะเกิดจากการที่อนุภาคเกิดการแพร่ (diffusion) ในบริเวณพื้นผิวของมันเอง ซึ่งจะเกิดจากความแตกต่างของพลังงานที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาค (Baoshan, 2005; สุทัศน์, 2006) ดังภาพประกอบ 22 (ข)



ภาพประกอบ 22 การเปรียบเทียบลักษณะการเผาผนึกแบบ (ก) ของเหลว (ข) ของแข็ง

ที่มา: สุทัศน์ จันบัวลา. (2006). การศึกษาสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของสาร $\text{PMnN} - \text{PZT}$ ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำสำหรับประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเพียโซอิเล็กทริก. p. 30.

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเผาผนึกแบบการเกิดของเหลวในขณะเผาผนึกและการเผาผนึกแบบการเกิดของแข็ง ได้ข้อแตกต่างดังตาราง 2

ตาราง 2 เปรียบเทียบลักษณะการเผาผนึกแบบเกิดเฟสของแข็งและเฟสของเหลวในขณะเผาผนึก

ลักษณะเฉพาะ	การเผาผนึกแบบเกิดเฟส ของแข็ง	การเผาผนึกแบบเกิดเฟส ของเหลว
เวลาที่ใช้	มาก	น้อย
อุณหภูมิที่ใช้	สูง	ต่ำ
ความหนาแน่น	น้อย	มาก
การหดตัว	น้อย	มาก
สมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงาน	ไม่เปลี่ยนแปลง	เปลี่ยนแปลง
สมบัติทางกลของชิ้นงาน	ไม่เปลี่ยนแปลง	เปลี่ยนแปลง

ที่มา: สุทัศน์ จันบัวลา. (2006). การศึกษาสมบัติทางไพโซอิเล็กทริกของสาร PMnN – PZT ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำสำหรับประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเพียโซอิเล็กทริก. p. 32.

ชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกแล้ว จะมาตัดเป็นแผ่นตามขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นจะนำชิ้นงานไปขัด ทำขั้วอิเล็กโทรด และทดสอบสมบัติทางไพโซอิเล็กทริกต่อไป

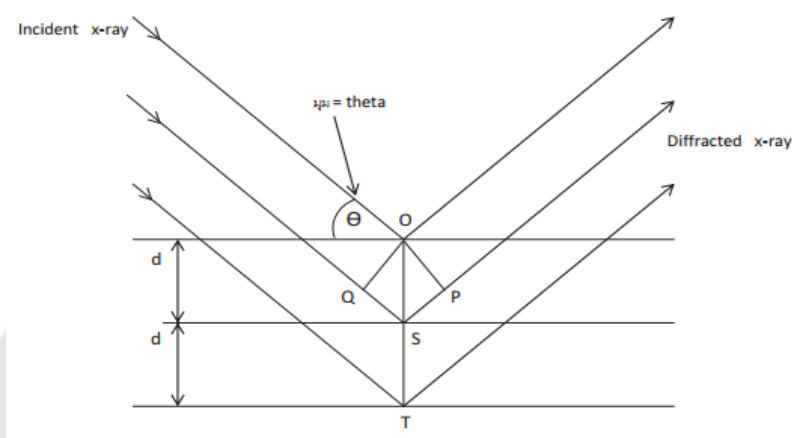
6. การวิเคราะห์สมบัติเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานต

6.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

X-ray diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของหน่วยเซลล์ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน จึงสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้

หลักการของ XRD คือ รังสีเอกซ์ตกกระทบบกับผิวของผลึกในมุมตกกระทบบที่เหมาะสม รังสีเอกซ์บางส่วนเกิดการเลี้ยวเบน (diffract) บางส่วนกระจัดกระจายและผ่านทะลุลง

ไปยังผิวชั้นที่สองของผลึกที่ต่ำลงไป เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์อีกครั้ง และรังสีเอกซ์บางส่วนก็จะทะลุลงไปยังผิวผลึกชั้นที่สามจะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เช่นนี้เรื่อย ๆ ซึ่งสามารถอธิบายและเขียนเป็นสมการ ตามกฎของเซอร์คัมบลิวเอช แบรกก์ นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษที่อาศัยหลักการทางฟิสิกส์โดยการเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์เพื่อใช้อธิบายโครงสร้างของผลึกเมื่อตกกระทบเข้ากับรังสีเอกซ์ด้วยมุมตกกระทบที่แตกต่างกัน โดยมีระยะห่างและความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไป (Labratories, 2017) ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อตกกระทบกับหน่วยเซลล์

ที่มา: EAG Labratories. (2017). X-RAY POWDER DIFFRACTION. (ออนไลน์)

ถ้ารังสีเอกซ์เกิดการเลี้ยวเบนจากชุดระนาบเดียวกัน มีเฟสตรงกันจะเป็นไปตามกฎของแบรกก์ ดังสมการ 2.13

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (2.13)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

θ คือ มุมตกกระทบระหว่างรังสีเอกซ์กับระนาบในผลึก

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบในผลึก

n คือ ลำดับการเลี้ยวเบน โดยเป็นเลขจำนวนเต็ม

6.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง สามารถใช้ในการแยกชัดดีเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000-100,000 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอน โดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอนถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตนด์ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก หรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็ก ทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่มากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกมีหลายระดับพลังงาน สามารถแบ่งได้ดังนี้

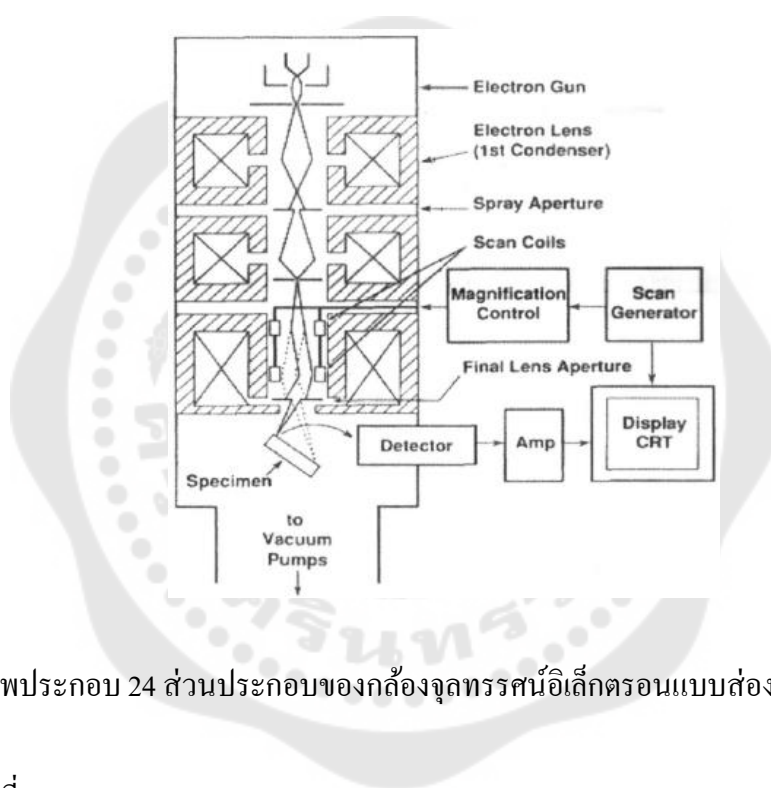
อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดจากชั้นการนำ (conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (valance band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูง สามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างเป็นภาพที่บริเวณผิวของชิ้นงาน สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (back scattered electron) เกิดจากลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิชนกับชิ้นงานและสูญเสียพลังงานให้แก่อะตอม ส่งผลให้เกิดการกระเจิงกลับออกจากชิ้นงาน ค่าพลังงานต่าง ๆ ที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงสามารถใช้สร้างภาพ แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้มและความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูง วิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานต่าง ๆ (K, L, M, ...) ได้รับความร้อนมากพอแล้วหลุดออกจากชั้นพลังงาน อิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานถัดไป จะเข้ามาแทนที่และเกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ถูกปล่อยออกมานี้ สามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุในเชิงคุณภาพและปริมาณ ซึ่งค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ โดยจะใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลกับเครื่อง SEM

หลักการทำงานของเครื่อง SEM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน จะทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนป้อนให้กับระบบ ซึ่งกลุ่มอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า

จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้ จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป (biotechnology, 2017) ดังภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 24 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

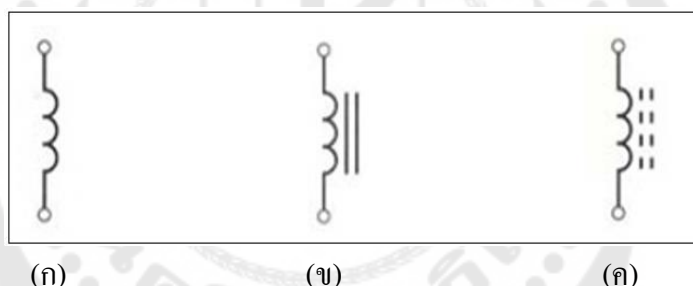
ที่ ม 1 : N center for biotechnology. (2017). Scanning Electron Microscope (SEM). (ออนไลน์)

6.3 การวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก

วิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PLZT โดยทำขั้วอิเล็กโทรดให้แก่แผ่น PLZT เพื่อทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าของแผ่น PLZT ทำการเคลือบเพลเลเดียมที่แผ่น PLZT ทั้งด้านบนและด้านล่าง จากนั้นนำแผ่น PLZT ที่มีขั้วอิเล็กโทรดไปวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR ซึ่งอุปกรณ์ภายในวงจรไฟฟ้าหลัก ๆ จะมีอยู่ 3 ชนิดใหญ่ ๆ ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L-Inductance), ตัวเก็บประจุ (C-Capacitance) และตัวต้านทาน (R-Resistance) ซึ่งนิยมเรียก

รวม ๆ ว่า แอลซีอาร์ (LCR) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่นิยมใช้โดยทั่วไปสำหรับใช้วัดอุปกรณ์ภายในวงจรไฟฟ้าต่าง ๆ (circuit component parts) โดยเครื่องวัดแอลซีอาร์ จะใช้เพื่อตรวจสอบค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance) ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ค่าความต้านทานไฟฟ้า (resistance) ค่าการนำไฟฟ้า (conductance) และค่าความสูญเสีย (dissipation factor)

1) ตัวเหนี่ยวนำ (inductor) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการปรับความถี่ของเครื่องรับวิทยุและโทรทัศน์ โดยอาศัยหลักการของลวดทองแดง นำมาขดหลาย ๆ รอบ เรียกว่าคอยล์ (coil) หรือ “แอล” แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปเพื่อให้แสดงคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ โครงสร้างประกอบด้วยขดลวด (coil) พันรอบแกน (core) ซึ่งแกนนี้อาจเป็นแกนอากาศ แกนเหล็ก หรือแกนเฟอร์ไรท์ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการเหนี่ยวนำไฟฟ้า มีสัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำ ดังภาพประกอบ 25 โดยตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะมีคุณสมบัติในการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า โดยเกิดขึ้นในรูปของสนามแม่เหล็ก ภายในตัวเหนี่ยวนำมีค่าที่เรียกว่า ค่าความเหนี่ยวนำ (inductance) มีหน่วยเป็น “เฮนรี (Henry)” (Electronics Tutorials, 2018)



(ก)

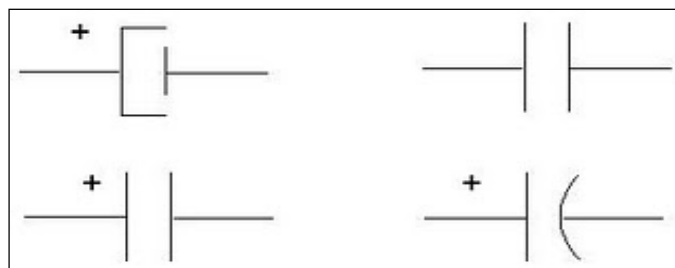
(ข)

(ค)

ภาพประกอบ 25 สัญลักษณ์ตัวเหนี่ยวนำ (ก) แกนอากาศ (ข) แกนเหล็ก (ค) แกนเฟอร์ไรท์

ที่มา: Electronics Tutorials. (2018). The Inductor. (ออนไลน์)

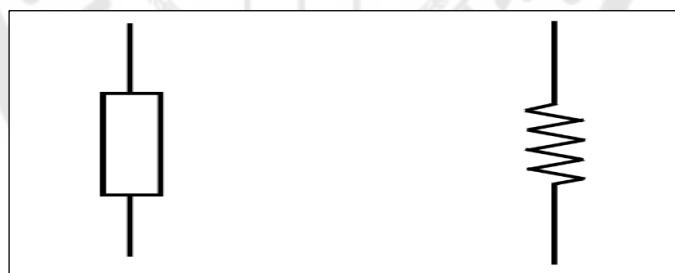
2) ตัวเก็บประจุ (capacitor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บประจุ (charge) และสามารถคายประจุ (discharge) ได้ โดยตัวเก็บประจุเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าคอนเดนเซอร์ (condensor) หรือเรียกย่อ ๆ ว่าซี (C) หน่วยของตัวเก็บประจุคือฟารัด (Farad) ทำได้โดยนำสารตัวนำ 2 ชิ้นมาวางในลักษณะขนานใกล้ ๆ กัน แต่ไม่ได้ต่อกัน ระหว่างตัวนำทั้งสองจะถูกกั้นด้วยฉนวนที่เรียกว่าไดอิเล็กทริก (dielectric) ซึ่งไดอิเล็กทริกนี้อาจเป็นอากาศ พลาสติก เซรามิกหรือสารที่มีสภาพคล้ายฉนวน เป็นต้น มีสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ ดังภาพประกอบ 26 (Wikipedia, 2018)



ภาพประกอบ 26 สัญลักษณ์ตัวเก็บประจุ

ที่มา: Wikipedia. (2018). Capacitor. (ออนไลน์)

3) ตัวต้านทาน (resistor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า ตัวต้านทานที่ต่ออยู่ในวงจรไฟฟ้า ทำหน้าที่ลดแรงดันและจำกัดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร ตัวต้านทานมีรูปแบบและขนาดแตกต่างกันตามลักษณะของการใช้งาน ความต้านทานวัดเป็นหน่วย “โอห์ม” เขียนแทนด้วย Ω (โอเมก้า) ซึ่งค่าความต้านทาน 1Ω หมายถึง การป้อนแรงดันไฟฟ้าขนาด 1 V ไหลผ่านตัวต้านทาน แล้วมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน 1 A มีสัญลักษณ์ตัวต้านทาน ดังภาพประกอบ 27 (Menglab, 2018)



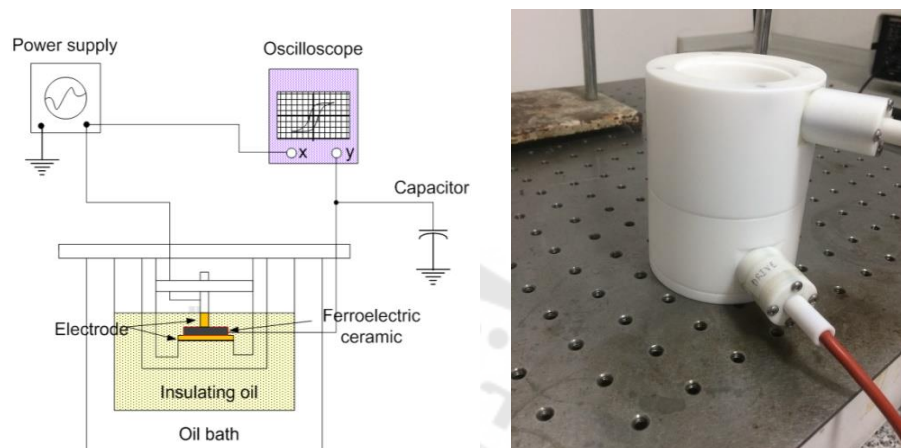
ภาพประกอบ 27 สัญลักษณ์ตัวต้านทาน

ที่มา: Menglab. (2018). Resistor. (ออนไลน์)

6.4 การวิเคราะห์สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

การวิเคราะห์วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกเพื่อหาวงฮิสเทอรีซิส เป็นการวัดค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงาน โดยการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าภายนอกให้กับชิ้นงานด้วยการใช้ วงจรอย่างง่าย คือ Sawyer-Tower ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ตัวเก็บประจุมาตรฐาน

และชิ้นงานเซรามิกที่ต้องการวัด ทำให้ได้กราฟ PE hysteresis ในแนวแกนตั้งจะแสดงค่าโพลาริเซชัน (C/cm^2) และแกนนอนจะแสดงค่าสนามไฟฟ้า (V/cm) จากแหล่งจ่ายที่ผ่านชิ้นงาน ลักษณะกราฟ PE hysteresis ดังภาพประกอบ 28 (ยุทธพงษ์, 2013)



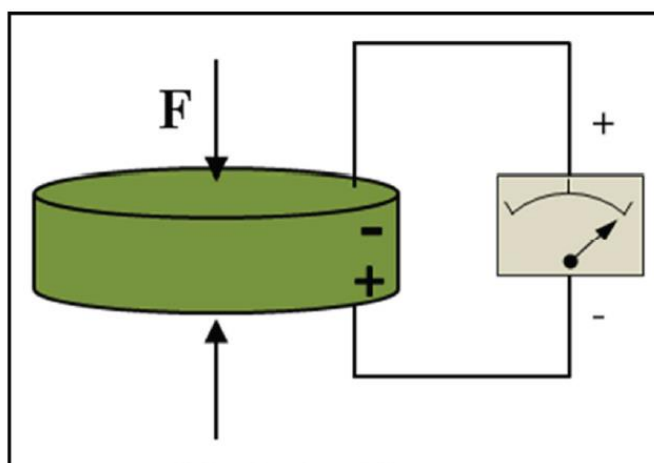
ภาพประกอบ 28 แผนภาพและเครื่องมือการวิเคราะห์ PE hysteresis ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

ที่มา: ยุทธพงษ์ ศรีทธา. (2013). การศึกษาผลกระทบของแรงกดและความถี่เชิงกลที่มีต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพโซอิเล็กทริก. p. 32.

6.5 การวิเคราะห์สมบัติไพโซอิเล็กทริก

การวิเคราะห์สมบัติไพโซอิเล็กทริกโดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกทำได้โดยการนำชิ้นงานที่ผ่านการทำขั้วแล้ว ไปวิเคราะห์ค่าด้วยเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก ซึ่งมี 2 วิธี คือ Static test และ Quasi-static

1. วิธี Static test เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็วที่สุด โดยใช้หลักการของการใช้แรงทางกลกระทำต่อผลึกหรือสารที่ต้องการวัด ซึ่งทำให้เปิดประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวของอิเล็กโทรด ปริมาณ ประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณแรงทางกลที่กระทำต่อสารทดสอบ ดังภาพประกอบ 29 (Taunaumang, 1994; กิ่งกาญจน์, 2013)



ภาพประกอบ 29 ชุดทดสอบค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกด้วยวิธี Static test

ที่มา: กิ่งกาญจน์ สระบัว, (2013). การศึกษาผลกระทบของแรงกดและความถี่เชิงกลที่มีต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพโซอิเล็กทริก. p. 31.

2. วิธี Quasi-static เนื่องจากชุดทดสอบค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกด้วยวิธี Static test ทำให้ประจุที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยและอาจเกิดการสูญเสียก่อนที่จะทำการวัด ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงแรงทางกลที่กระทำต่อสารในรูปแบบของฟังก์ชันไซน์ และวัดค่าประจุไฟฟ้า (Q) ที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าผ่านตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C) ที่ต่อขนานกับสารที่ต้องการวัดเรียกวิธีนี้ว่า วิธี Quasi-static (Taunaumang, 1994; กิ่งกาญจน์, 2013) ดังภาพประกอบ 30 ซึ่งสัมพันธ์กับไพโซอิเล็กทริก สามารถคำนวณหาได้จากสมการ 2.14

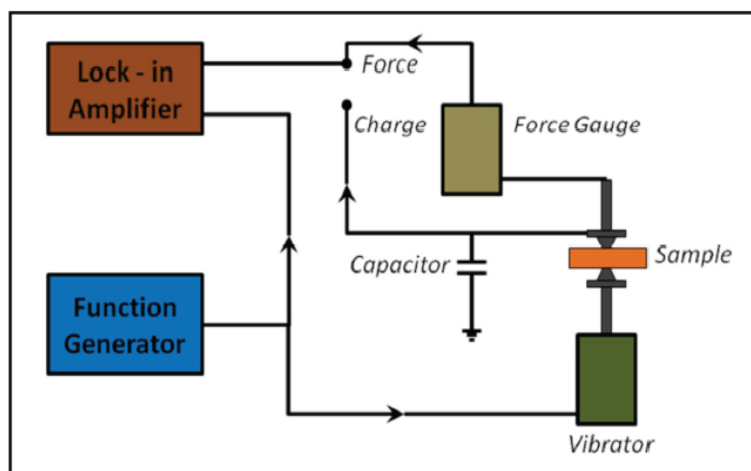
$$d = \frac{D}{\sigma} = \frac{Q}{F} = \frac{CV}{F} \quad (2.14)$$

เมื่อ Q คือ ค่าของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

V คือ ศักย์ไฟฟ้า

F คือ แรงทางกลที่กระทำต่อสาร

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ



ภาพประกอบ 30 ชุดทดสอบค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริกด้วยวิธี Quasi static

ที่มา: กิ่งกาญจน์ สระบัว. (2013). การศึกษาผลกระทบของแรงกดและความถี่เชิงกลที่มีต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก. p. 32.

7. การประยุกต์ใช้งานของไพเอโซอิเล็กทริก

เนื่องด้วยสมบัติที่โดดเด่นของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกที่สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า และเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้ ทำให้มีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ สามารถแบ่งการนำวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกไปใช้งานได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ (Uchino, 2000; Yuhuan, 1991) ดังนี้

7.1 เครื่องมือควบคุมความถี่

เครื่องมือควบคุมความถี่จะอาศัยหลักการสั่น โดยลักษณะการสั่นจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของสารไพเอโซอิเล็กทริก ผลของการสั่นที่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของสารตัวนั้นทำให้สารเกิดการสั่นอย่างแรง ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว จึงสามารถกรองคลื่นบริเวณพื้นผิว (surface acoustic) ในบางความถี่ได้

7.2 แอคชูเอเตอร์

แอคชูเอเตอร์ใช้หลักของการที่วัสดุไพเอโซอิเล็กทริกเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและรูปร่างของวัสดุนั้นภายใต้สนามไฟฟ้าที่วัสดุได้รับ เช่น เครื่องกำเนิดความต่างศักย์สูง (high voltage generators) เป็นลักษณะของสารไพเอโซอิเล็กทริกที่ต้องใช้งานที่ความต่างศักย์สูง เช่น อัลตราโซนิคมอเตอร์ (ultrasonic motor) และมีความแม่นยำสูง

ใช้สำหรับปรับเครื่องมือกล กระจก เลนส์ ควมคุมวาล์วไฮดรอลิก เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน

7.3 อุปกรณ์ตรวจวัด

ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับหรือรับรู้การเปลี่ยนแปลงปริมาณทางกายภาพของตัวแปรต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ แสง สี เสียง ระยะทาง การเคลื่อนที่ ความดัน และการไหล เป็นต้น แล้วเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสัญญาณหรือข้อมูลที่สอดคล้องและเหมาะสมผ่านทรานส์ดิวเซอร์เป็นปรากฏการณ์ทางตรง คือเปลี่ยนสัญญาณทางกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งสมบัติของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ดีต้องมีความแม่นยำ (accuracy) มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ (sensitivity) และมีอายุการใช้งานที่ดี (reliability) หลักการทำงานคือ ทำให้เกิดความต่างศักย์ของสารไพโซอิเล็กทริกซึ่งจะทำให้เกิดการสั่นและจะส่งคลื่นเหนือเสียงออกไป ตัวอย่างของแผ่นเซรามิกไพโซอิเล็กทริกที่ใช้งานเป็นตัวตรวจวัด เช่น เซรามิกไพโซอิเล็กทริกสำหรับติดตั้งรถยนต์ เมื่อรถถอยจะเกิดความต่างศักย์ของสารไพโซอิเล็กทริกซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นออกไป และเมื่อคลื่นวิ่งชนวัตถุด้านหลังรถจะสะท้อนกลับผ่านสารไพโซอิเล็กทริกที่จะแปลงสัญญาณเป็นแสงหรือสัญญาณเสียงอีกครั้ง

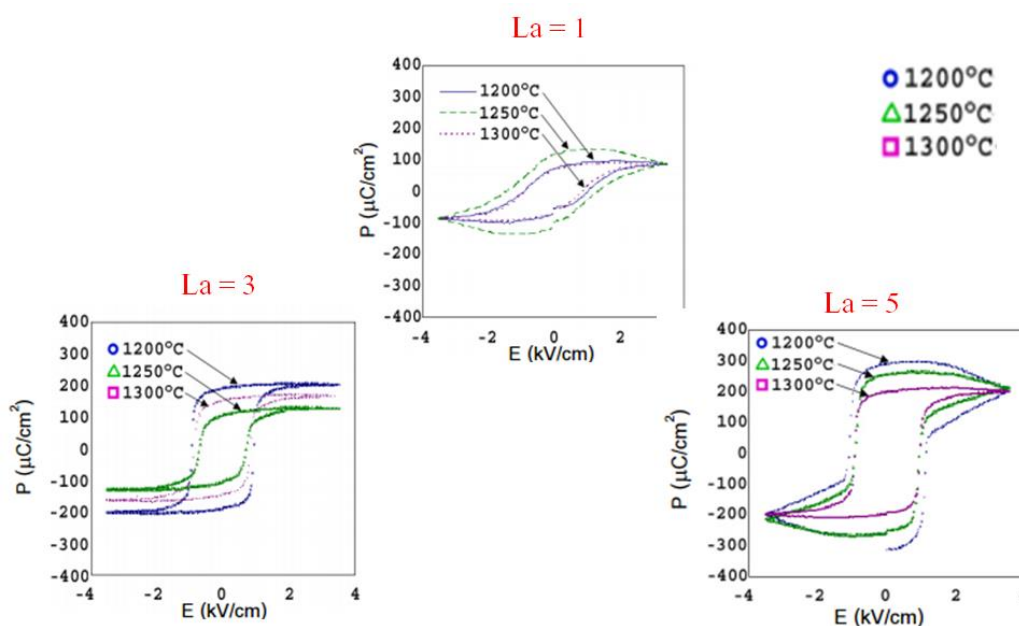
7.4 ทรานส์ดิวเซอร์

ทรานส์ดิวเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการในการแปลงสัญญาณจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานการสั่นเชิงกล และสามารถเกิดปรากฏการณ์แบบผันกลับ ซึ่งมักอยู่ในรูปของเสียง เช่น buzzer หรือ ultrasound สารไพโซอิเล็กทริกจะทำหน้าที่รับคลื่นเสียงหรือเก็บสัญญาณโดยการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นไฟฟ้า เป็นต้น

8. งานวิจัย PLZT ที่เกี่ยวข้อง

Supreya และคณะ ศึกษาผลของสารเจือปนแลนทานัมที่อุณหภูมิเผาผนึกแตกต่างกัน ที่ส่งผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและไพโซอิเล็กทริก ที่อัตราส่วนของ Zr/Ti เป็น 54/46 เติร์ยมฟิล์มบาง PLZT โดยใช้อัตราส่วนของ Zr/Ti เป็น 54/64 และมีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารเจือปนแลนทานัมเป็น 1 3 และ 5 mol% โดยวิธี conventional ceramic mixing ที่มีอุณหภูมิเผาผนึกแตกต่างกัน 3 อุณหภูมิเป็น 1200°C 1250°C และ 1300°C จากกราฟฮิสเตอร์ซิสของ PLZT เมื่อมีการใส่สารเจือ La ที่ต่างกันเป็น 1 3 และ 5 mol% ที่อุณหภูมิแตกต่างกันเป็น 1200°C 1250°C และ 1300°C พบว่า วงฮิสเตอร์ซิสของฟิล์มที่ใส่สารเจือปนแลนทานัมปริมาณ 5 mol% ที่อุณหภูมิ 1200°C มีวงฮิสเตอร์ซิสที่กว้าง มีค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_c) และโพลาริเซชันคงค้าง (P_r) สูงสุด ขนาดเกรนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และลดปริมาณสารเจือปนแลนทานัม $Pb_{0.95}La_{0.05}(Zr_{0.54}Ti_{0.46})O_3$ ที่อุณหภูมิเผาผนึก

1200°C แสดงค่าที่ดีของสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ไดอิเล็กทริกและไพโซอิเล็กทริก ซึ่งสารเจือปนแลนทานัมไม่มีผลกับ tetragonal parameters ความแตกต่างของอุณหภูมิ 1000°C 1250°C และ 1300°C ที่ส่งผลต่อโพลาริเซชันคงค้าง สนามไฟฟ้าภายนอก ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ค่าความสูญเสีย ไดอิเล็กทริก และค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก เมื่อมีปริมาณการเจือปนแลนทานัมเป็น 1 3 และ 5 mol% พบว่า เมื่ออุณหภูมิ 1200°C เจือปนแลนทานัมปริมาณ 5 mol% มีค่าที่ดีที่สุด (Supreya, 2007) ดังภาพประกอบ 31



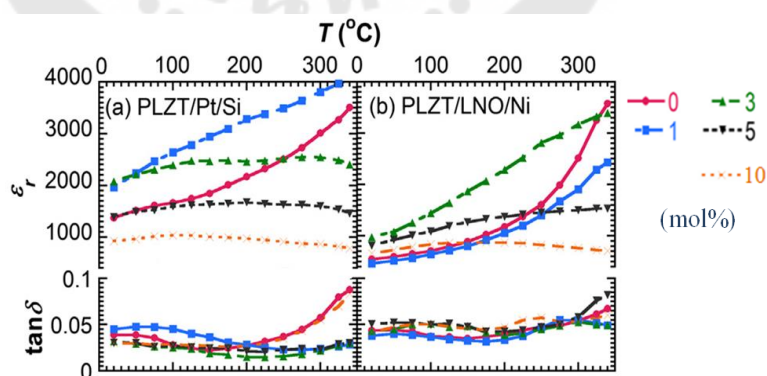
ภาพประกอบ 31 วงฮิสเตอร์ซิสของอุณหภูมิการเผาผลาญที่แตกต่างกัน

ที่ ม 1: Supreya T. & Krit K. (2007). Characterization of Lead Lanthanum Zirconate Titanate (PLZT) Ceramics Sintered at Various Temperatures. 41(5): 196.

Hu และคณะ ศึกษาผลของอัตราส่วน Zr/Ti ที่แสดงพฤติกรรมแบบ relaxor ferroelectric และการเก็บพลังงานของฟิล์มบาง PLZT ที่ปลูกบน platinized silicon Pt/Si เพื่อนำมาผลิตเป็น capacitor โดยเตรียมฟิล์มบาง PLZT ที่มีปริมาณสารเจือปนแลนทานัม 8 mol% ที่มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ Zr/Ti เป็น 70/30 65/35 58/48 52/48 45/55 และ 40/60 บน substrates platinized silicon (Pt/Si) ด้วยวิธี spin coating ความแตกต่างของอัตราส่วน Zr/Ti เมื่อเพิ่มไททาเนียม (Ti) พบว่า peak มีการ shift มากขึ้นและพบว่า lattice parameter ของ film และ bulk ลดลงแบบ linear

โดยที่ lattice parameter ของ film มากกว่าของ bulk เมื่อไททาเนียมเพิ่มสูงขึ้น ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ จะมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกและ dielectric tunability (%) มีค่าลดลง ค่าโพลาไรเซชันอิ่มตัว (P_r) มีแนวโน้มสูงขึ้น และสูงสุดที่ Ti = 48 % หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าโพลาไรเซชันคงค้าง (P_r) และ ค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_c) มีค่าสูงสุดที่ Ti = 60 % (Hu, 2014)

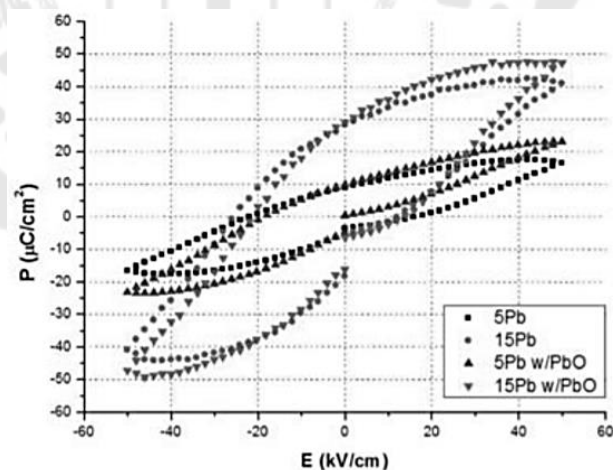
Tong และคณะ ศึกษาโครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าของ PLZT ที่อัตราส่วน Zr/Ti เป็น 52/48 โดยมีการปรับเปลี่ยนสารเจือปนที่ทำการปลูกฟิล์มบน substrate 2 ชนิด คือ silicon substrate และ nickel substrate โดยเตรียมฟิล์มบาง PLZT ที่อัตราส่วนของ Zr/Ti เป็น 52/48 และมีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารเจือปนเป็น 0 1 3 5 และ 10 mol% บน substrate platinized silicon (Pt/Si) และ substrate นิกเกิลที่มี buffer เป็นแลนทานัมนิกเกิลออกไซด์ (LNO/Ni) โดยกระบวนการ sol-gel ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของ substrate ที่ต่างกัน เมื่อมีการใส่สารเจือ La พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิคูรี ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของฟิล์มที่ใส่สารเจือแลนทานัม 0 และ 1 mol% ที่ปลูกบน Pt/Si และฟิล์มที่ใส่สารเจือแลนทานัม 0 1 และ 3 mol% ที่ปลูกบน LNO/Ni มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และหลังจากผ่านอุณหภูมิคูรีจะมีแนวโน้มลดลง โดยฟิล์มที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์คงที่ แสดงให้เห็นถึงความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในขณะที่ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แม้จะมีการเพิ่มอุณหภูมิ มีค่าอยู่ที่ 0.05 ซึ่งไม่เกินค่าความสูญเสียมาตรฐานที่ อยู่ระหว่าง 0.01-0.05 (Tong, 2013) ดังภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงสมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิตน substrate ที่ต่างกัน

ที่มา: Tong et al. (2013). Effect of lanthanum content and substrate strain on structural and electrical properties of lead lanthanum zirconate titanate thin films. 140(2): 430.

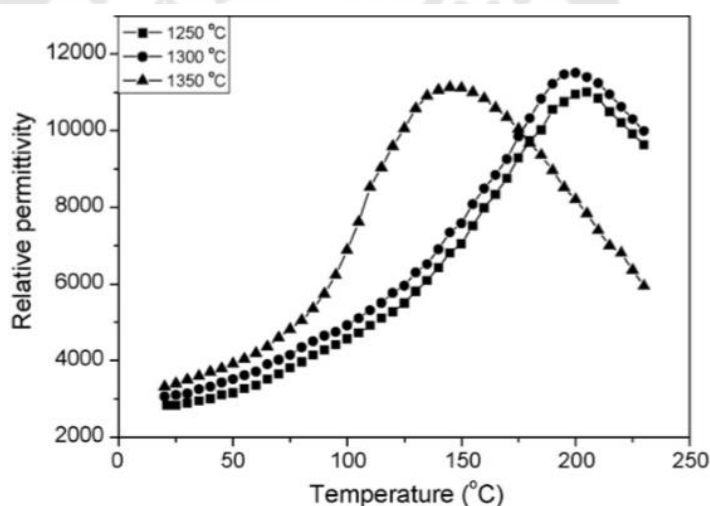
นันทพร ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางเลดแทนทานัมเซอร์โคเนตไททานเนต PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 โดยวิธี sol-gel บนแผ่นรองแก้วเคลือบอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีจุ่มเคลือบและผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600-700°C การเติมปริมาณตะกั่วที่มากเกินไปลงใน sol เริ่มต้นมีผลต่อการเกิดเฟสเพอรอฟสไกต์และโครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม การเคลือบชั้นบนด้วย PbO ช่วยลดเซกการสูญเสียตะกั่วในช่วงอุณหภูมิการอบอ่อน โดยทำการศึกษาผลของปริมาณการเติมตะกั่วที่มากเกินไป เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มที่ผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิเท่ากัน ทั้งในกรณีที่ฟิล์มมีการเติมตะกั่วที่มากเกินไปร้อยละ 5 และ 15 และวิเคราะห์เฟสและโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางทดสอบโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าฟิล์มบางที่มีการเติมปริมาณตะกั่วที่มากเกินไปและมีการเคลือบชั้น PbO มีปริมาณเฟสเพอรอฟสไกต์ที่มากขึ้นและโครงสร้างจุลภาคมีความสม่ำเสมอและมีความหนาแน่นสูง ฟิล์มบางที่มีการเติมตะกั่วที่มากเกินไปร้อยละ 15 โดยโมลและเคลือบชั้น PbO มีค่าโพลาริเซชันคงเหลือที่สูงกว่าฟิล์มที่ไม่มีการเคลือบด้วย PbO ซึ่งแสดงถึงสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ดี นอกจากนี้ฟิล์มที่มีการเคลือบชั้น PbO มีค่าสนามไฟฟ้าหักล้างน้อยกว่าฟิล์มที่ไม่มีการเคลือบชั้น PbO ซึ่งสังเกตได้จากขนาดของวงฮิสเทอรีซิสมีรูปร่างแคบลง เนื่องจากการสูญเสียไดอิเล็กทริกลดลง ดังภาพประกอบ 33 (นันทพร, 2013)



ภาพประกอบ 33 วงฮิสเทอรีซิสของความสัมพันธ์ระหว่าง สนามไฟฟ้าและโพลาริเซชันของฟิล์มบาง PLZT ที่มีการเติมตะกั่วที่มากเกินไป ร้อยละ 5 และ 15 โดยโมล ผ่านการอบอ่อนที่ 700°C

ที่มา: นันทพร คงกะจันทร์. (2013). Effects of PbO Cover Coat on Physical Properties of PLZT Thin Films Prepared by Sol-gel Process. p. 7.

Yun และคณะ ได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ PLZT-PZN ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีเทปคาสต์ และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1250-1350°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค พบว่า ขนาดเกรนและรูพรุนจะมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เผาผนึก ขนาดเกรนจะเพิ่มขึ้น และสมบัติทางไฟฟ้าของแผ่น PLZT-PZN การเติม PZN มีผลทำให้ อุณหภูมิการเผาผนึกลดลงและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น เมื่อเผาผนึกด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น มีผล ทำให้อุณหภูมิคูรีมีค่าลดลง โดยตัวอย่างที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1250°C 1300°C และ 1350°C มีอุณหภูมิคูรีเท่ากับ 205°C 200°C และ 145°C ตามลำดับ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแผ่น PLZT-PZN มีค่าอยู่ระหว่าง 2800-3400 และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 1.51-0.74% ณ อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่น PLZT-PZN ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1250°C มีสภาพยอมสัมพัทธ์สูง ที่สุดซึ่งเท่ากับ 11,000 ดังภาพประกอบ 34 (Yun, 2008)

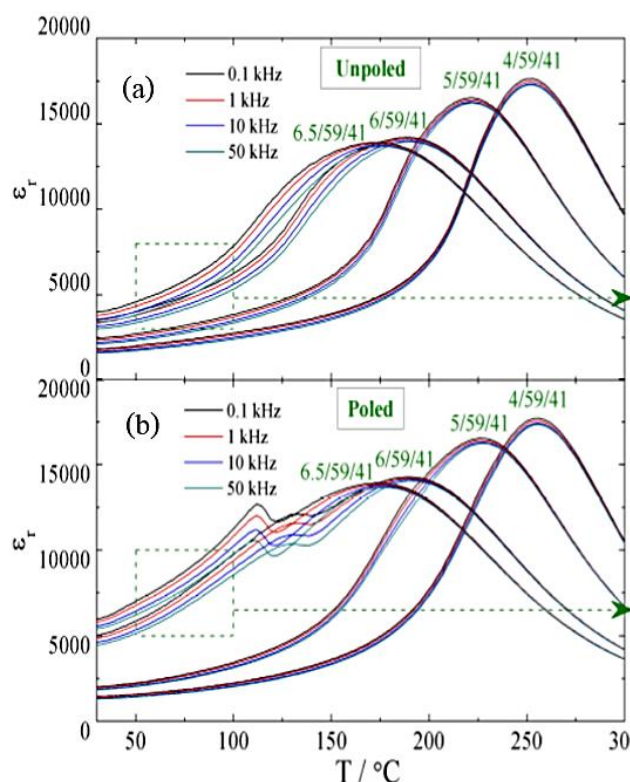


ภาพประกอบ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่ขึ้นกับความถี่ของแผ่น PLZT-PZN

ที่มา: Yun T. C. et al. (2008). Temperature dependence of dielectric and piezoelectric properties of PLZT-PZN ceramic tapes. 449: 102.

Yufeng และคณะ ได้ศึกษาโครงสร้างเฟสและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ PLZT เมื่อมีการเจือปนทานัมปริมาณ 0-6.5 mol% โดยใช้อัตราส่วน Zi/Ti เป็น 59/41 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแลนทานัม ผลึกมีการเปลี่ยนเฟสจากอโรโมโบอีทรอลเป็นเตตระโกนอล และค่า piezoelectric charge coefficient (d_{33}) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแลนทานัมเพิ่มขึ้นจาก 5 mol%

เป็น 6.5 mol% ผลจากไดอิเล็กทริกสเปกตรัมแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแลนทานัม วัสดุมีการเปลี่ยนสมบัติจาก normal เป็น relaxor ferroelectric ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ พบว่า แผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 6.5/59/41 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีที่สุดโดยมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เป็น 6076 ดังภาพประกอบ 35 (Yufeng, 2017)

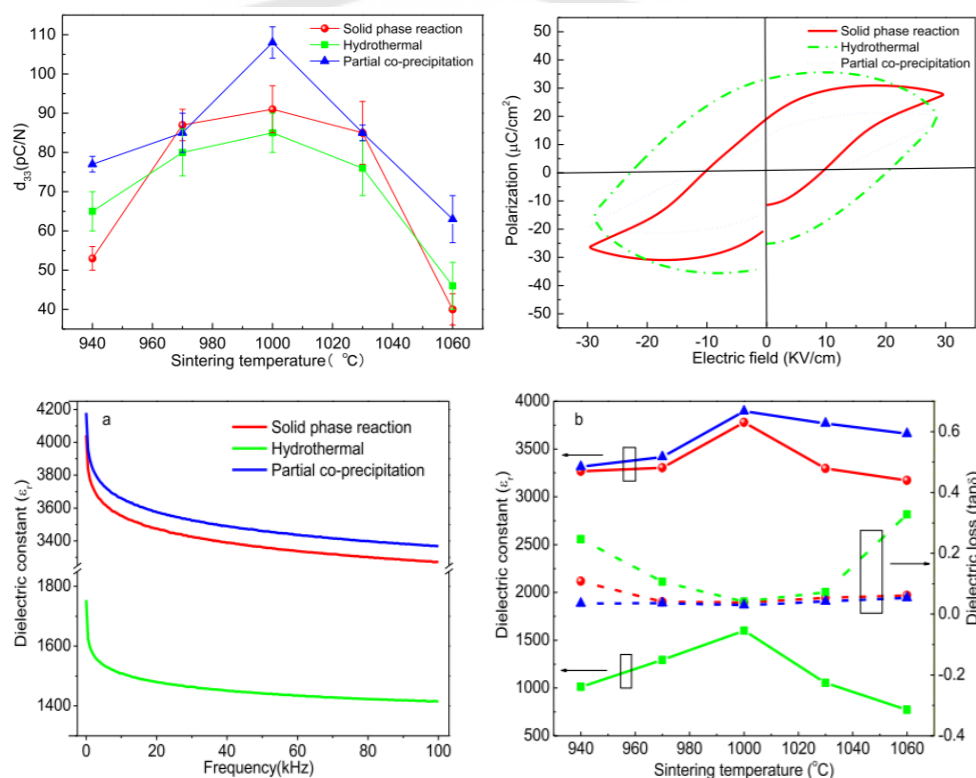


ภาพประกอบ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่ขึ้นอุณหภูมิในช่วง 50-100°C ของ PLZT (a) ก่อนการโพลลิ่ง และ (b) หลังการโพลลิ่ง

ที่ ม 1: Yun T. C. et al. (2017). High piezoelectricity of PLZT ceramics with strong frequency-dielectric dispersion below depolarization temperature. p. 8.

Can และคณะ ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ PLZT ที่อัตราส่วน Zr/Ti เป็น 65/35 โดยมีการเจือแลนทานัมเข้าไปเป็น 9 mol% ด้วยวิธีการเตรียมที่ต่างกัน คือ วิธี Solid phase reaction วิธี Hydrothermal และวิธี Partial co-precipitation ทำการขึ้นรูปแบบ cold isostatic press ที่

288 MPa ซึ่งมีการลดอุณหภูมิเผาผนึกจาก 1200°C ไปที่ 1000°C และลดเวลาในการเผาผนึกจาก 120 min ไปเป็น 80 min จากผลการศึกษาโครงสร้างผลึก พบว่า เป็น perovskite crystalline โดยไม่มีเฟสอื่นเจือปน โดยพบว่าการเตรียมผงด้วยวิธี Partial co-precipitation ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดเป็น 96.5% และให้สมบัติทางไฟฟ้าที่ดีที่สุด โดยให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็น 3895 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกเป็น 0.029 สัมประสิทธิ์โพโซโซอิเล็กตริก d_{33} เป็น 108 ซึ่งวงฮิสเทอรีซิสของ PLZT ให้ค่าโพลาริเซชันคงที่ค้างเป็น $13.22 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และค่าสนามไฟฟ้าภายนอกเป็น 10.56 kV/cm ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นออปติคัลสวิตช์ โดยให้ค่าการส่งผ่านสูงถึง 53.8% ที่ความยาวคลื่น 850 nm ดังภาพประกอบ 36 (Can, 2017)



ภาพประกอบ 36 สมบัติทางไฟฟ้าของ PLZT ที่อัตราส่วน 9/65/35 ด้วยวิธี Solid phase reaction Hydrothermal และ Partial co-precipitation

ที่ ม ๑ : Can H. et al. (2017). Effect of preparation process on properties of PLZT (9/65/35) transparent ceramics. 723: 608.

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือ การขึ้นรูปเซรามิกเลดแลนทานัม เซอร์โคเนตไททาเนตด้วยเทคนิคหล่อแผ่นบาง การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และการวิเคราะห์สมบัติไฟอโรอิเล็กทริก โดยมีรายละเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

1. วัสดุและสารเคมี

1.1 พงเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต (lead lanthanum zirconate titanate) 3 สูตร คือ $(\text{Pb}_{0.92}\text{La}_{0.08})(\text{Zr}_{0.65}\text{Ti}_{0.35})\text{O}_3$ หรือ (8/65/35), $(\text{Pb}_{0.91}\text{La}_{0.09})(\text{Zr}_{0.65}\text{Ti}_{0.35})\text{O}_3$ หรือ (9/65/35) และ $(\text{Pb}_{0.90}\text{La}_{0.10})(\text{Zr}_{0.65}\text{Ti}_{0.35})\text{O}_3$ หรือ (10/65/35) ซึ่งเตรียมขึ้นโดยใช้สารเคมี ดังตาราง 3

ตาราง 3 ชื่อสารเคมีที่ใช้เตรียมผง PLZT

ชื่อสารเคมี	บริษัท
1. เลดออกไซด์ (lead oxide)	Sigma Aldrich
2. แลนทานัมออกไซด์ (lanthanum oxide)	Sigma Aldrich
3. เซอร์โคเนียมออกไซด์ (zirconium oxide)	Sigma Aldrich
4. ไททาเนียมออกไซด์ (Titanium Oxide)	Sigma Aldrich

- 1.2 น้ำปราศจากไอออน
- 1.3 ตัวประสาน
- 1.4 สารช่วยกระจายตัว
- 1.5 สารเพิ่มความเหนียว
- 1.6 สารลดฟอง

2. อุปกรณ์และเครื่องมือการทดลอง

ตาราง 4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์	เครื่องมือ
1. น้ำกากอนามัย	1. เครื่องบดผสมสารแบบแม่เหล็ก
2. ถังมือยาง	2. เครื่องซังดิจิตอล
3. หลอดหยด	3. เครื่องบดย่อยแบบหมุน
4. ซ้อนตักสาร	4. เครื่องอัดไฮโดรลิก
5. แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร	5. เต้าเผา
6. ปีกเกอร์ ขนาด 50 และ 150 mL	6. หัววัด
7. ขวดพลาสติก nalgene ขนาด 250 mL	7. เครื่อง X-Ray Diffractometer
8. เม็ดบด YSZ	8. เครื่อง Scanning Electron Microscope
9. หม้อบดสำหรับการบดย่อยแบบหมุน	9. เครื่อง Quarum 150 R ES
10. ตะแกรงลวด	10. เครื่อง LCR meter
11. แผ่นรอง	11. เครื่อง Ferroelectric test system
12. แชนด์แคสท์	
13. เทปกาวย	
14. อุปกรณ์สำหรับตัดชิ้นงาน	
15. คีมคีบ	
16. เบ้าหลอมเซรามิก	
17. อุปกรณ์สำหรับการอัด	
18. ถังชิปลือกขนาดต่าง ๆ	
19. กล้องใส่ชิ้นงาน	

3. ขั้นตอนขึ้นรูปวัสดุเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานตด้วยวิธีหล่อแผ่นบาง

3.1 การเตรียมสเลอรีเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานต

3.1.1 เตรียมส่วนผสมของสเลอรี PLZT โดยชั่งส่วนผสมตามลำดับคือ ผง PLZT น้ำปราศจากไอออน ตัวประสาน สารช่วยกระจายตัว และเม็ดยกด (จารูวรรณ, 2017) โดยส่วนผสมของสเลอรี PLZT ดังตาราง 4

ตาราง 4 ส่วนผสมของสเลอรี PLZT

ชื่อสาร	ปริมาณ (wt.%)
1. ผง PLZT	55.90
2. น้ำปราศจากไอออน	17.10
3. ตัวประสาน	24.70
4. สารช่วยกระจายตัว	1.90
5. สารเพิ่มความเหนียว	0.20
6. สารลดฟอง	0.20

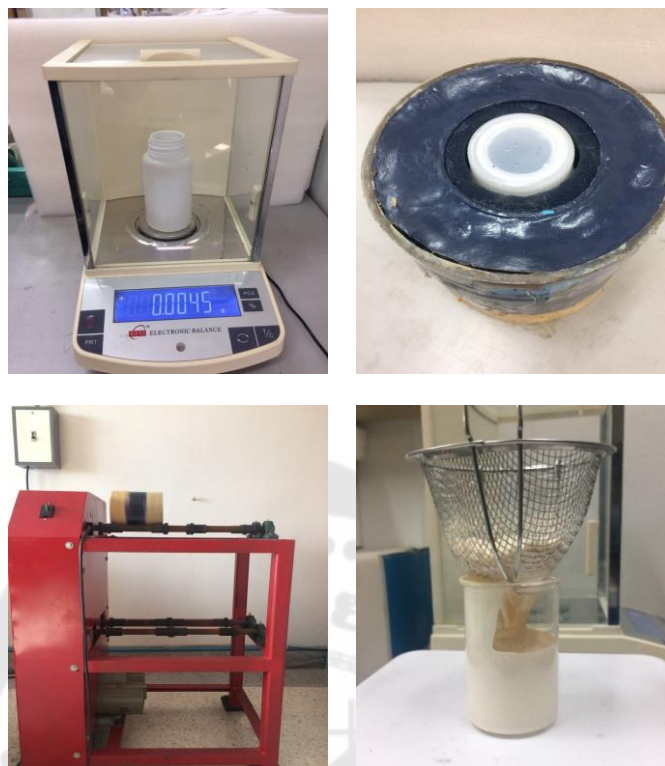
ที่มา: จารูวรรณ จันทะพาหะ. (2017). การศึกษาระบบออร์แกนิกที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบต่อการขึ้นรูปของพีแอลซีทีโดยเทปคาสติง. p. 28.

3.1.2 ทำการบดย่อย โดยบรรจุวัสดุสเลอรีใส่ลงในหม้อบด แล้วนำหม้อบดไปบดย่อยด้วยเครื่องบดย่อยแบบหมุนเป็นเวลา 5 h

3.1.3 แยกเม็ดยกดออกจากสเลอรี โดยนำขวดบรรจุสเลอรีที่ผ่านกระบวนการบดย่อยออกจากเครื่องบดย่อยแบบหมุน แล้วเทสเลอรีลงในบีกเกอร์โดยผ่านตะแกรงลวด

3.1.4 ทำส่วนผสมของสเลอรีให้เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น โดยใส่แท่งแม่เหล็กลงในบีกเกอร์ที่มีสเลอรี แล้ววางบีกเกอร์บนเครื่องบดผสมสารแบบแม่เหล็ก

3.1.5 เติมตัวประสาน สารเพิ่มความเหนียว และสารลดฟอง โดยแต่ละสารจะมีระยะเวลาการกวนเป็นเวลา 5 min กวนส่วนผสมให้เข้ากัน แสดงขั้นตอนการเตรียมสเลอรีดังภาพประกอบ 37



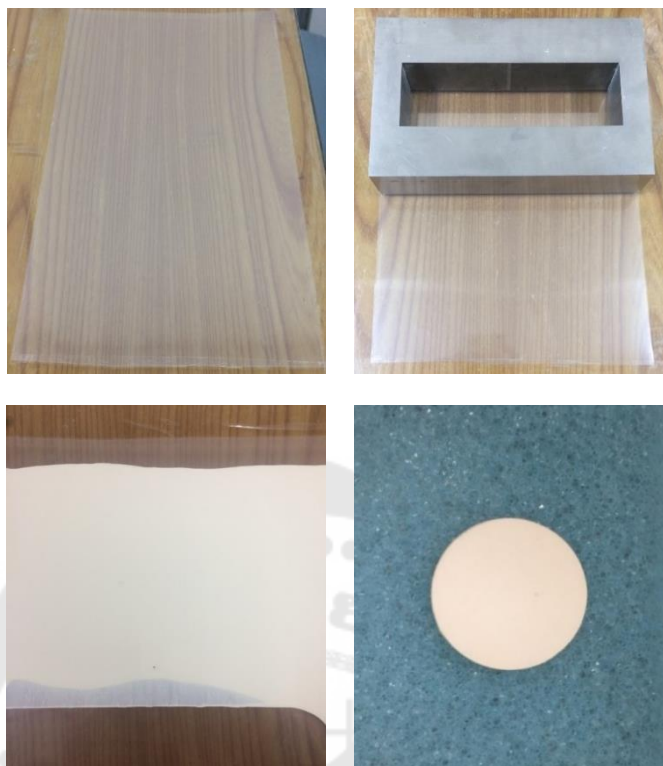
ภาพประกอบ 37 ขั้นตอนการเตรียมสเลอรี PLZT

3.2 การขึ้นรูปแผ่น PLZT ด้วยวิธีหล่อแผ่นบาง

3.2.1 นำแฮนด์แคสท์วางบนแผ่นรองที่เตรียมไว้ จากนั้นเทสเลอรีที่ได้ลงในแฮนด์แคสท์ และทำการเลื่อนแฮนด์แคสท์ไปบนแผ่นรอง

3.2.2 ได้แผ่น PLZT ที่ยังไม่แห้ง ทำให้แผ่น тепแห้งโดยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 h

3.2.3 ทำการตัดแผ่น PLZT ด้วยอุปกรณ์สำหรับตัดชิ้นงาน ให้เป็นรูปวงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 mm และลอกแผ่น PLZT ที่ตัดเป็นวงกลมออกจากแผ่นรอง แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปแบบแผ่นก่อนการเผาผนึก ดังภาพประกอบ 38



ภาพประกอบ 38 ขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่น PLZT ด้วยวิธีหล่อแผ่นบาง

3.3 การเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PLZT

3.3.1 ทำการซ้อนทับเพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยการวางแผ่น PLZT ซ้อนกัน 2 แผ่น ใช้อุปกรณ์การอัดทำให้แผ่น PLZT แนบชิดกัน

3.3.2 ทำการอบแผ่น PLZT โดยนำอุปกรณ์การอัดที่มีแผ่น PLZT เข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 min

3.3.3 นำอุปกรณ์การอัดที่มีแผ่น PLZT ไปกดด้วยเครื่องไฮดรอลิก โดยใช้แรงกด 5000 N นาน 6 s (อานนท์, 2017) และนำแผ่น PLZT ที่ได้ออกจากอุปกรณ์การอัด ดังภาพประกอบ



ภาพประกอบ 39 ขั้นตอนการเพิ่มความแข็งแรงของแผ่น PLZT

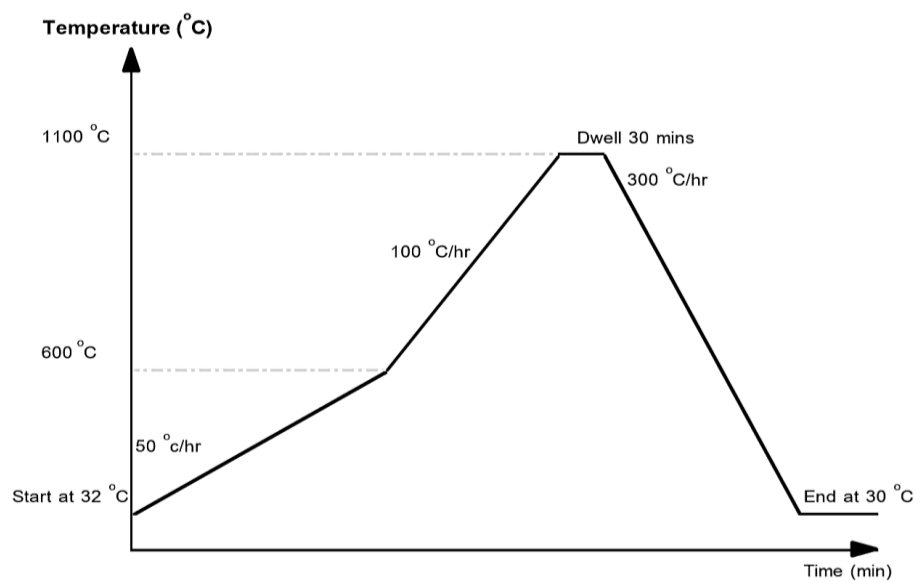
3.4 การเผาผนึก

3.4.1 วางแผ่น PLZT ในเบ้าหลอมเซรามิก จากนั้นนำแผ่นเซรามิกวางทับบนแผ่น PLZT

3.4.2 นำเบ้าหลอมเซรามิกที่มีแผ่น PLZT ใส่ในเตาเผาเพื่อทำการเผาผนึก

3.4.3 เผาผนึกแผ่น PLZT ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 30 min โดยการเผาผนึกในช่วงแรก อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้น จากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิ 600°C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 50°C/h ต่อมาจะเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีก จาก 600°C ไปจนถึง 1100°C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 100°C/h และอุณหภูมิจึงที่ 1100°C เป็นเวลา 30 min จากนั้นลดอุณหภูมิลงจาก 1100°C ถึงอุณหภูมิห้อง ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิจึงเป็น 300°C/h ดังภาพประกอบ 40

3.4.4 เมื่อเตาเผามีอุณหภูมิห้องแล้ว นำแผ่นเทป PLZT ออกจากเตาเผา จะได้แผ่นเทป PLZT ออกมา แสดงขั้นตอนการเตรียมการเผาผนึกของแผ่น PLZT ดังภาพประกอบที่ 41



ภาพประกอบ 40 การเผาผนึก

ที่มา: จารุวรรณ จันทะพาหะ. (2017). การศึกษาระบบบอร์แกนิกที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบต่อการขึ้นรูปของพีแอลซีทีโดยเทปคาสติ้ง. p. 33.



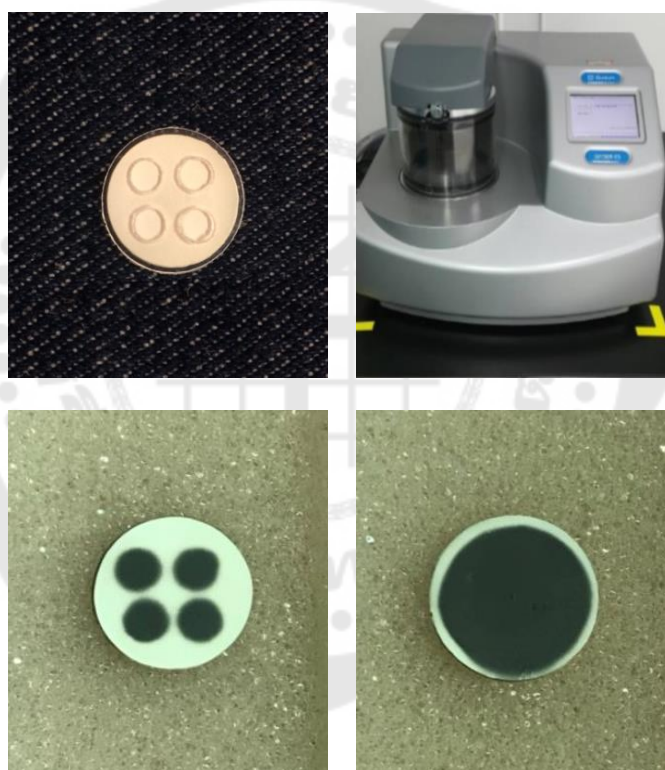
ภาพประกอบ 41 ขั้นตอนการเตรียมการเผาผนึกแผ่น PLZT

3.5 การทำขั้วอิเล็กโทรดแก่แผ่น PLZT

3.5.1 ตัดแผ่นพลาสติกเป็นวงกลมขนาด 13 mm จากนั้นนำแผ่นพลาสติกที่ได้มาตัดเป็นวงกลมขนาด 3 mm จำนวน 4 จุดด้วยเครื่องมือตัด

3.5.2 ทำขั้วอิเล็กโทรดแก่แผ่น PLZT โดยนำแผ่นพลาสติกมาวางบนแผ่น PLZT แล้วทำการเคลือบด้วยแพลเลเดียมโดยเครื่อง Quorum 150 R ES

3.5.3 ได้แผ่น PLZT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว โดยด้านบนจะเป็นรูปวงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm จำนวน 4 จุด และด้านล่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 mm จำนวน 1 จุด ดังภาพประกอบ 42



ภาพประกอบ 42 การทำขั้วอิเล็กโทรดให้แก่แผ่น PLZT โดยเคลือบด้วยชั้นแพลเลเดียม

4. การวิเคราะห์แผ่นเทปเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานเนต

นำแผ่น PLZT ที่ได้ไปทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) วิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริกด้วยเครื่อง LCR Meter วิเคราะห์สมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกด้วยเครื่อง Ferroelectric test system

4.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึก

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่น PLZT โดยการเตรียมแผ่น PLZT แต่ละชนิดลงใน sample holder ดังภาพประกอบ 43 จากนั้นนำชิ้นงานเข้าเครื่อง XRD (PANalytical รุ่น X'Pert PRO) ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ดังภาพประกอบ 44 ทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก โดยผลที่แสดงออกมาจะอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง intensity กับมุม 2θ แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานจากแฟ้ม JCPDS



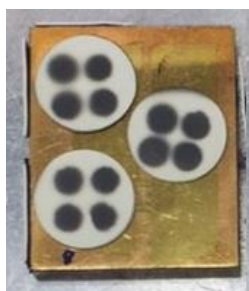
ภาพประกอบ 43 การเตรียมชิ้นงานก่อนเข้าเครื่อง X-Ray Diffractometer



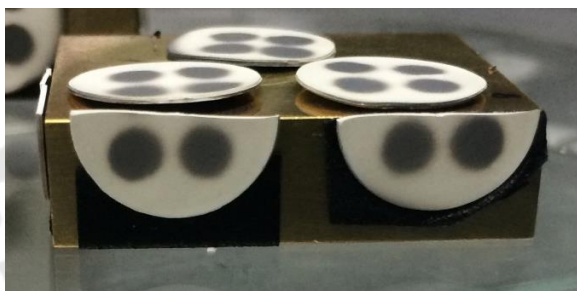
ภาพประกอบ 44 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

4.2 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของแผ่น PLZT โดยการนำชิ้นงาน PLZT ที่ผ่านการเคลือบด้วยแพลเลเดียมเพื่อให้วัสดุสามารถนำไฟฟ้าได้ มาทำการวิเคราะห์ ดังภาพประกอบ 45 โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM, Hitachi รุ่น S-3400N) ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ดังภาพประกอบ 46



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 45 การเตรียมชิ้นงานก่อนเข้าเครื่อง Scanning Electron Microscope

(ก) แผ่น PLZT ที่ใช้วิเคราะห์พื้นผิว (ข) แผ่น PLZT ที่ใช้วิเคราะห์ความหนา



ภาพประกอบ 46 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

4.3 วิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก

การวิเคราะห์เพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าและค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกของแผ่น PLZT โดยนำแผ่น PLZT ที่ผ่านการทำขั้วอิเล็กโทรดแล้วมาใช้ในการวิเคราะห์ แผ่น PLZT ถูกเคลือบด้วยแพทเลเดียมทั้งด้านบนและด้านล่างด้วยเครื่อง Quarum 150 R ES ซึ่งอิเล็กโทรดทางด้านบนของแผ่น PLZT จะเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm จำนวน 4 จุด และด้านล่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 mm จำนวน 1 จุด จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง LCR meter (Agilent รุ่น A4980) ที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ดังภาพประกอบ 47



ภาพประกอบ 47 เครื่อง LCR meter

4.4 วิเคราะห์สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

การวิเคราะห์เพื่อหา polarization-electric field hysteresis loop หรือ PE hysteresis ของแผ่น PLZT โดยนำแผ่น PLZT ที่ผ่านการทำขั้วอิเล็กโทรดแล้วมาใช้ในการวิเคราะห์ จากนั้นวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ferroelectric test system (Precision RT66B 4KV-HVI) ที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ดังภาพประกอบ 48



ภาพประกอบ 48 เครื่อง ferroelectric test system

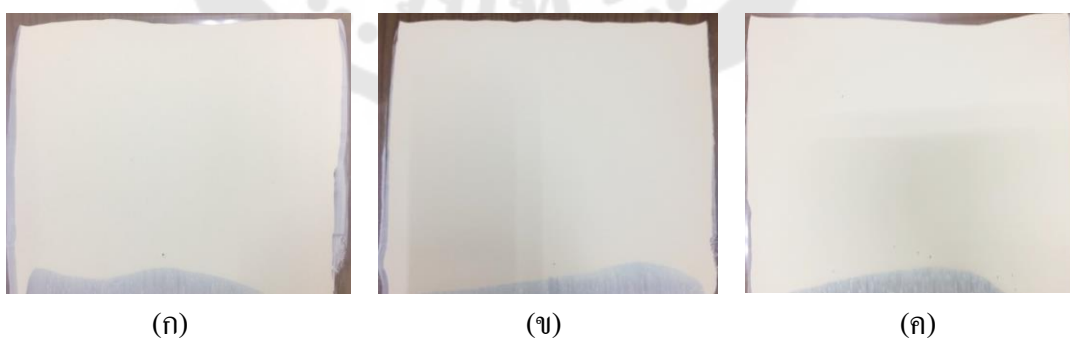
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยและอภิปรายผลการศึกษารูปร่างและสมบัติไพโซอิเล็กทริกจากผลของการเจือปนทานัมในพีซีทีที่ขึ้นรูปโดยเทคนิคหล่อแผ่นบาง โดยศึกษาปริมาณการเจือปนทานัม 8 9 และ 10 mol% ที่อัตราส่วนของเซอร์โคเนียมต่อไททาเนียม 65 และ 35 วิเคราะห์โครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค และสมบัติไพโซอิเล็กทริกของแผ่น PLZT

1. ผลการศึกษา PLZT ที่ขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นบาง

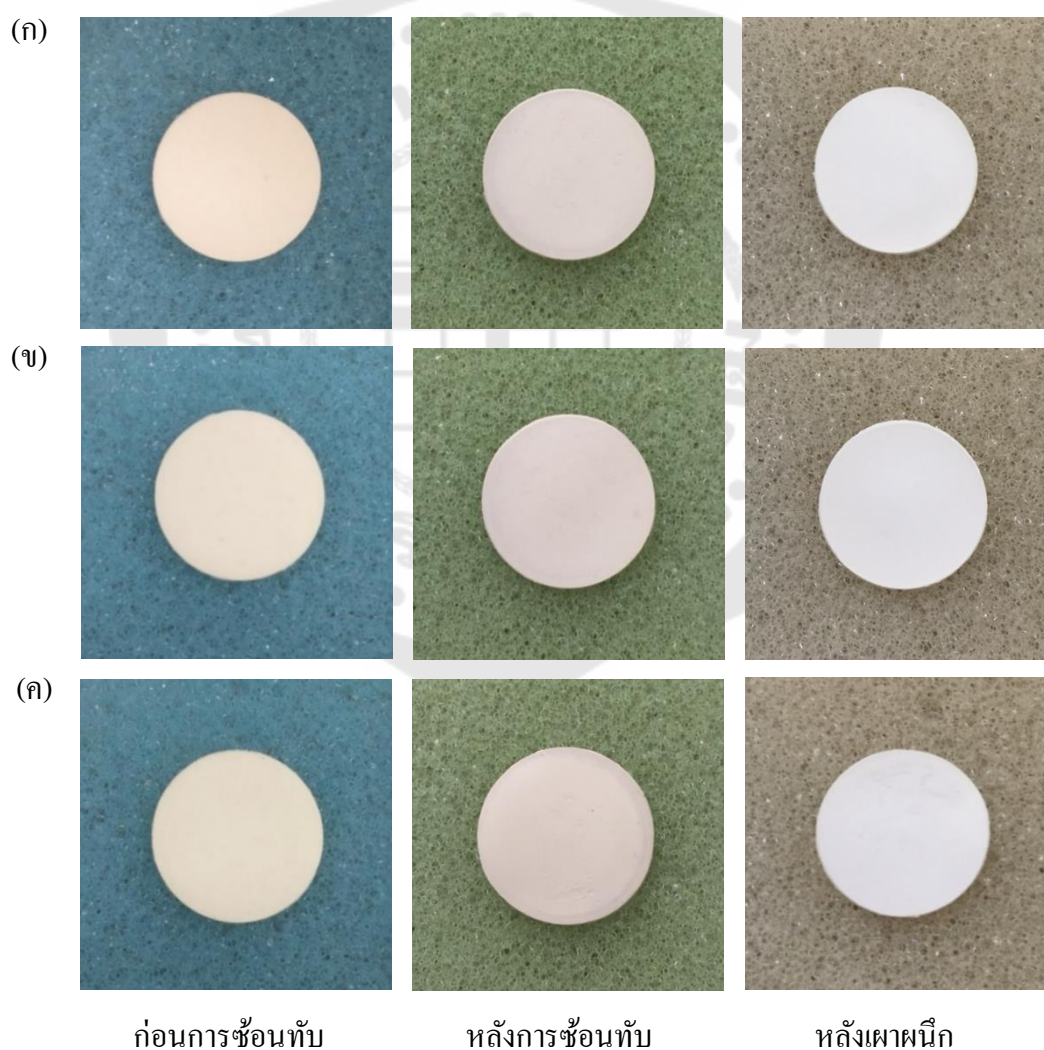
ผลการขึ้นรูปแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 ด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นบาง จากการทดลองพบว่า ปริมาณของการเจือปนทานัมใน PZT ที่ต่างกันสามารถขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นบางได้ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากสเลอรี PLZT แต่ละชนิดที่ได้จากการบดย่อยมีความเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อเติมตัวประสานและสารเพิ่มความเหนียว จะสังเกตเห็นฟองอากาศเกิดขึ้นหลังจากการกวน แต่เมื่อใส่สารลดฟองและกวนส่วนผสมให้เข้ากันอีกครั้งพบว่าสเลอรี PLZT ที่ได้มีฟองอากาศลดลง มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น เมื่อทำการหล่อแผ่นบางทำให้ได้แผ่น PLZT ที่ดี โดยมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ มีความเป็นเนื้อเดียวกัน เกิดฟองอากาศเพียงเล็กน้อย และไม่มีช่วงของแผ่นเทปที่ขาดออกจากกัน ดังภาพประกอบ 49



ภาพประกอบ 49 แผ่น PLZT ขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแผ่นบางที่ความหนา 1250 μm
ที่อัตราส่วน (ก) 8/65/35 (ข) 9/65/35 และ (ค) 10/65/35

2. ผลการเพิ่มความแข็งแรงโดยการซ้อนทับและการเผาผนึกของแผ่น PLZT

ผลการศึกษาแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 เตรียมขึ้นจาก แผ่นแคลสท์ที่ความหนา 1250 μm เมื่อนำแผ่น PLZT ที่ได้มาตัดและลอกออกจากแผ่นรอง พบว่า แผ่น PLZT แต่ละชนิดสามารถตัดและลอกออกจากแผ่นรองได้ง่าย เนื่องจากแผ่นเทปแห้งสนิท และมีการระเหยได้ดีที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังจากนำไปเพิ่มความหนาและความแข็งแรงโดยการ ซ้อนทับแผ่น PLZT 2 แผ่น พบว่า แผ่น PLZT ซ้อนทับกันแนบสนิท มีรอยดำจากการกดทับ เล็กน้อย และเมื่อนำไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 30 min พบว่า แผ่น PLZT มีความเปราะ สูง ชิ้นงานมีขนาดเล็กลง และรอยดำที่เกิดจากการกดอัดหายไป ดังภาพประกอบ 50



ภาพประกอบ 50 แผ่น PLZT ก่อนการซ้อนทับ หลังการซ้อนทับ และหลังเผาผนึก

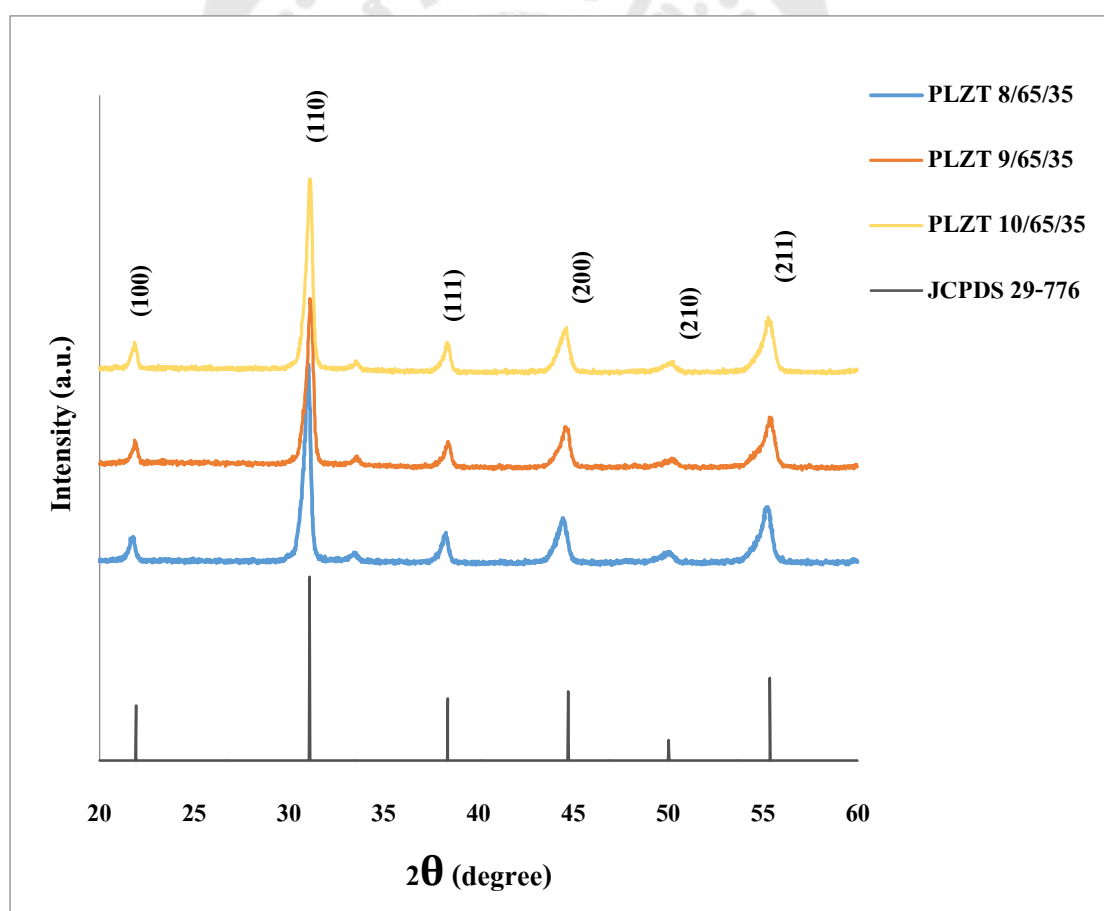
ด้วยอุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 30 min ที่อัตราส่วน (ก) 8/65/35 (ข) 9/65/35 และ (ค) 10/65/35

3. ผลการวิเคราะห์แผ่น PLZT เจือแลนทานัมที่ปริมาณ 8, 9 และ 10 mol%

3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่น PLZT

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่น PLZT ด้วยเครื่อง XRD โดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานจากแฟ้ม JCPDS# 29-776 พบว่า แผ่น PLZT มีโครงสร้างผลึกแบบ perovskite polycrystalline โดยพบว่าระนาบที่เกิดขึ้นได้แก่ (100) (110) (111) (200) (210) และ (211) ดังภาพประกอบ 51

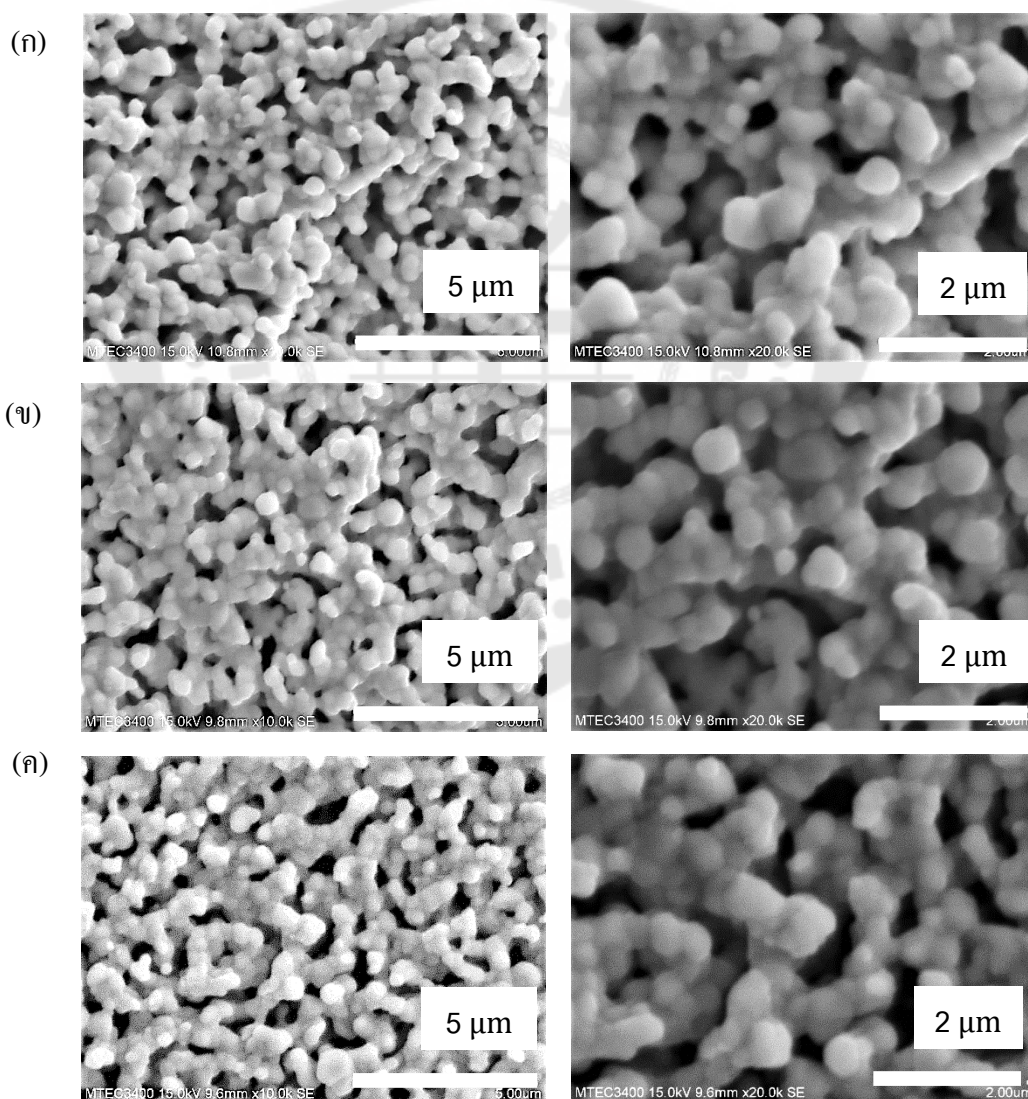
เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้น พบว่า แผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 เจือแลนทานัมในปริมาณ 8 9 และ 10 mol% มีโครงสร้างผลึกที่เหมือนกัน ดังนั้นจากผลที่ได้สามารถสรุปว่า การเจือแลนทานัมในปริมาณต่างกันเข้าไปในเลดเซอร์โคเนตไททานेटได้ผลที่ไม่แตกต่างกัน



ภาพประกอบ 51 โครงสร้างผลึกของแผ่น PLZT เจือแลนทานัมในปริมาณต่างกัน
ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35

3.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของแผ่น PLZT

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของแผ่น PLZT ด้วยเครื่อง SEM ดังภาพประกอบ 52 พบว่าขนาดเกรนของแผ่น PLZT ที่มีการเจือปริมาณแลนทานัมในปริมาณต่างกัน จะแสดงโครงสร้างจุลภาคและขนาดของเกรนที่ต่างกัน การเจือแลนทานัมเข้าไปในเลดเซอร์โคเนตไททาเนตที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 ได้ขนาดเกรนเป็น 0.85 0.70 และ 0.57 μm ตามลำดับ โดยแผ่น PLZT ที่มีการเจือแลนทานัมในปริมาณต่ำ มีแนวโน้มแสดงลักษณะเกรนขนาดใหญ่และมีรูพรุนประมาณ 25% ดังนั้นการเจือแลนทานัมเข้าไปในเลดเซอร์โคเนตไททาเนตปริมาณต่ำส่งผลให้มีขนาดเกรนใหญ่ ดังตาราง 5



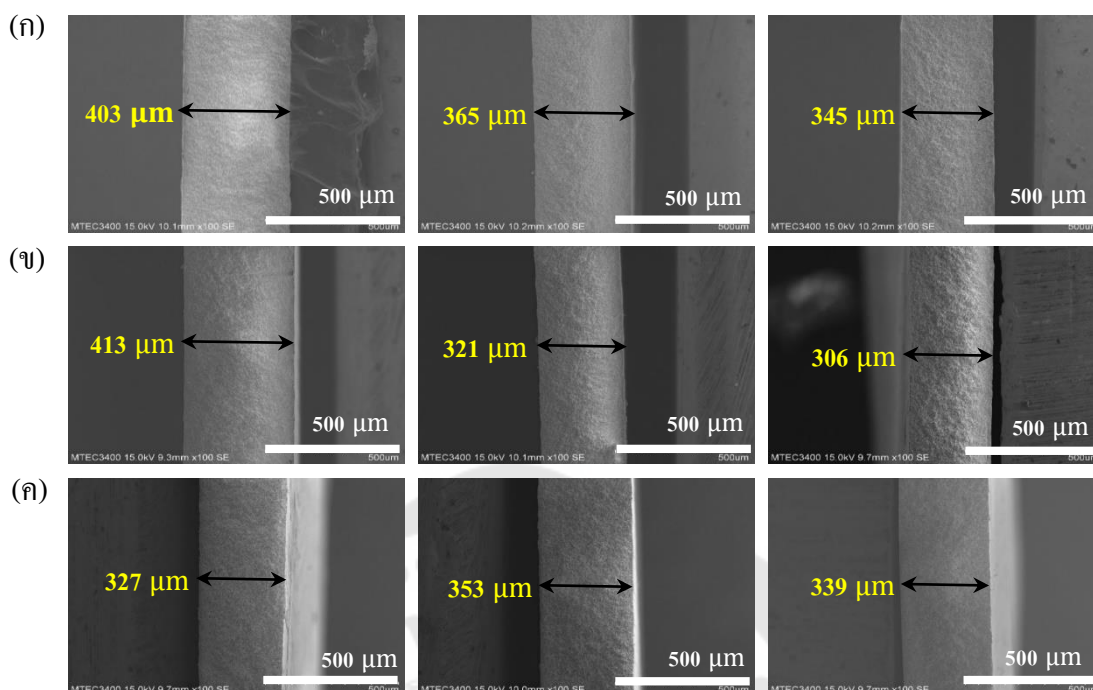
ภาพประกอบ 52 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น PLZT เจือแลนทานัมในปริมาณต่างกัน
ที่อัตราส่วน (ก) 8/65/35 (ข) 9/65/35 และ (ค) 10/65/35

ตาราง 5 แสดงขนาดเกรนของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35

แผ่น PLZT	ขนาดเกรน (μm)
8/65/35	0.19 - 0.85
9/65/35	0.17 - 0.70
10/65/35	0.12 - 0.57

3.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาของแผ่น PLZT

การวิเคราะห์ความหนาของแผ่น PLZT ทำโดยการตัดขวาง (cross section) แผ่น PLZT ที่เตรียมได้ ความหนาของแผ่น PLZT ดังภาพประกอบ 53 อุณหภูมิจากการเผาผนึกแผ่น PLZT หลังจากซ้อนกันแล้วกดทับด้วยแรงอัดทำให้เกิดการแพร่ของอะตอมเข้าหากัน และเกิดจุดสัมผัส ทำให้อะตอมยึดเหนี่ยวกันมากขึ้น ซึ่งการเผาผนึกส่งผลให้จุดศูนย์กลางของเกรนเคลื่อนที่เข้าหากัน และทำให้เกิดการหดตัวระหว่างการเผาผนึก (Hotza, 1995) จากภาพตัดขวาง พบว่า แผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 เกิดการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคที่เชื่อมติดกัน ทำให้แผ่น PLZT แนบสนิทเป็นแผ่นเดียวกันไม่มีรอยต่อระหว่างแผ่น และความหนาหลังการเผาผนึกเฉลี่ยเป็น 371 346 และ 339 μm ตามลำดับ ดังตาราง 6 ความผันแปรของความหนานี้อาจเกิดได้จากหลายปัจจัย เนื่องจากการทำแฮนด์แคสต์เป็นการใช้แรงผู้ทำการทดลองซึ่งอาจมีแรงไม่สม่ำเสมอในแต่ละครั้งที่ทำการขึ้นรูป จึงส่งผลให้ความหนามีความผันแปร



ภาพประกอบ 53 ความหนาของแผ่น PLZT เจือเลนทานัมในปริมาณต่างกัน
 ที่อัตราส่วน (ก) 8/65/35 (ข) 9/65/35 และ (ค) 10/65/35 จากภาพตัดขวางของโครงสร้างทางจุลภาค
 ตาราง 6 แสดงความหนาของแผ่น PLZT หลังการเผาที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35

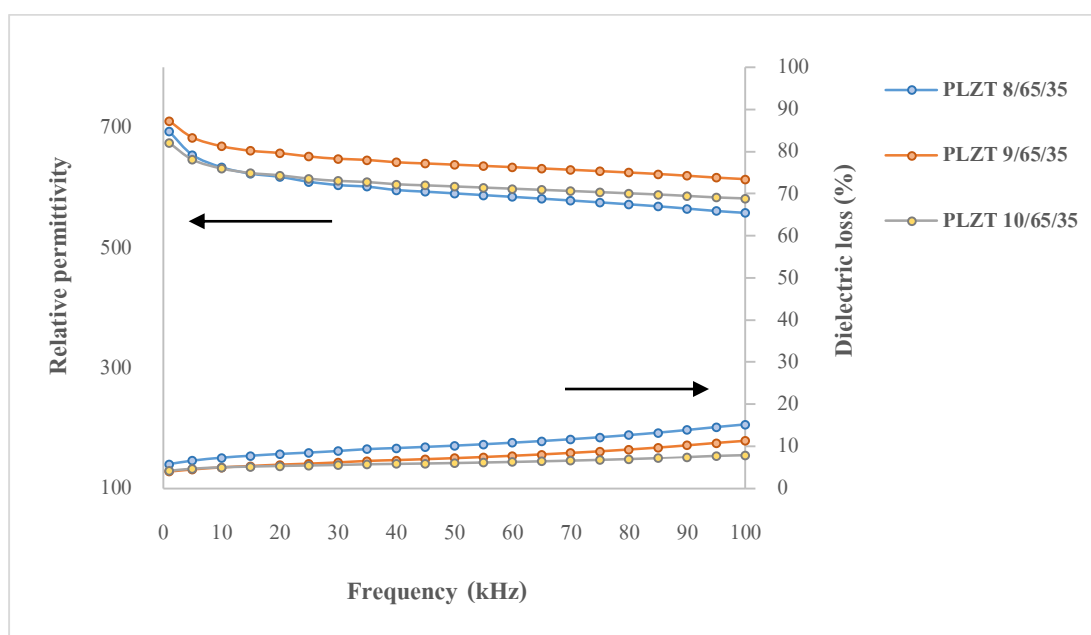
แผ่น PLZT	ความหนาของแผ่น PLZT			
	ค่าที่วัดได้ (μm)			ค่าเฉลี่ย (μm)
8/65/35	403	365	345	371
9/65/35	413	321	306	346
10/65/35	327	353	339	339

3.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PLZT

3.4.1 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ขึ้นกับความถี่

ผลการวัดค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (permittivity) และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss) ของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 ที่ความถี่ 20 Hz-100 kHz ดังภาพประกอบ 54 พิจารณาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของแผ่น PLZT ที่ความถี่ 1 kHz พบว่า ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงสุด เมื่อปริมาณการเจือเลนทานัมของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน

9/65/35 มีค่าสูงสุดเป็น 713 เมื่อเทียบกับอัตราส่วน 8/65/35 และ 10/65/35 ซึ่งมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ต่ำกว่าเป็น 696 และ 676 ตามลำดับ ส่วนค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของแผ่น PLZT ที่ความถี่ 1 kHz พบว่าค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของการเจือปนทานัมเข้าไปในเลดเซอร์โคเนตไทเทนาตที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 คือ 3.9% 4.1% และ 5.9% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า แผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 9/65/35 จะมีค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำสุดเป็น 3.9 % ดังตาราง 7



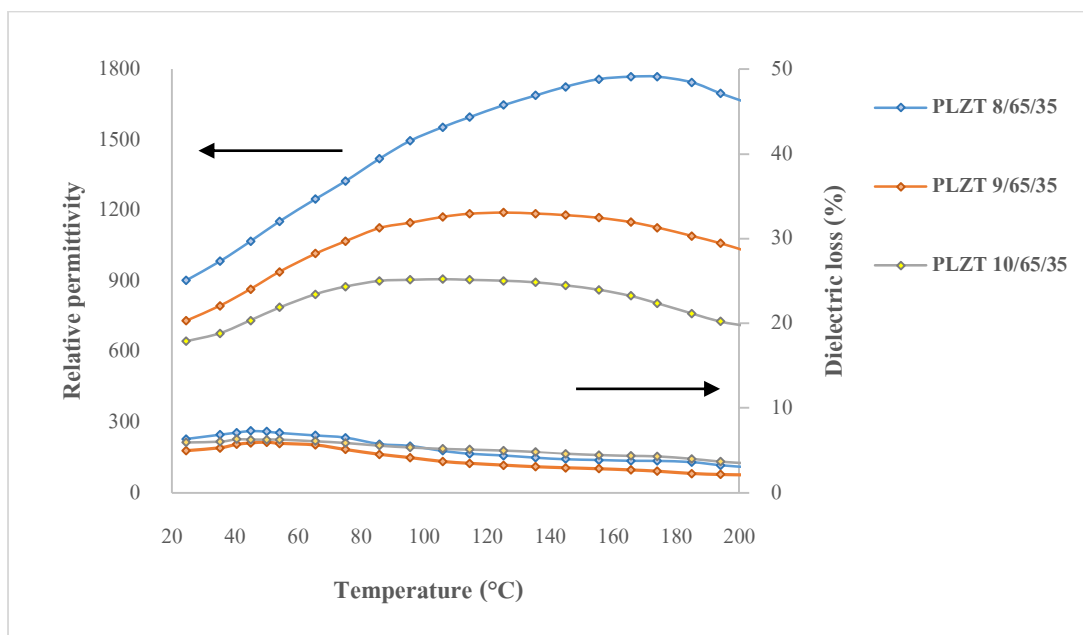
ภาพประกอบ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่ของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35

ตาราง 7 สมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 ที่ความถี่ 1 kHz

สมบัติ ไดอิเล็กทริก	แผ่น PLZT	ค่าที่วัดได้				
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	ค่าเฉลี่ย
ค่าสภาพยอม สัมพัทธ์	8/65/35	705	694	691	692	696
	9/65/35	766	592	663	829	712
	10/65/35	707	754	636	608	676
ค่าความสูญเสีย	8/65/35	3.2	4.6	4.7	3.8	4.1
ไดอิเล็กทริก	9/65/35	3.6	3.2	4.6	4.3	3.9
(%)	10/65/35	5.7	6.0	5.5	5.5	5.7

3.4.2 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

ผลการวิเคราะห์ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเครื่อง LCR meter แสดงความสัมพันธ์ดังภาพประกอบ 55 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น เมื่อถึงอุณหภูมิหนึ่งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าสูงสุด และมีค่าลดลงมา จุดที่ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงสุด คือจุดที่วัสดุมีการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก และเรียกจุดนี้ว่าจุดคูรี (Curie Point) (Jeffe, 1971) จากการทดลองพบว่า แผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงสุดเป็น 1768 ที่อุณหภูมิจุดคูรีประมาณ 175°C อัตราส่วน 9/65/35 มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ต่ำกว่าเป็น 1191 ที่อุณหภูมิที่จุดคูรีประมาณ 125°C และอัตราส่วน 10/65/35 มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ต่ำสุดเป็น 908 ที่อุณหภูมิจุดคูรีประมาณ 105°C เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของแลนทานัมของแผ่น PLZT พบว่า การเจือแลนทานัมเข้าไปในเลดเซอร์โคเนตไททานเนตในปริมาณต่ำ มีผลทำให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงและอุณหภูมิคูรีเพิ่มขึ้น สำหรับการศึกษาค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกของแผ่น PLZT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกของการเจือแลนทานัมเข้าไปในเลดเซอร์โคเนตไททานเนตที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 คือ 3.7% 3.2% และ 5.2% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า แผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 9/65/35 จะมีค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำสุดเป็น 3.2% ดังตาราง 8



ภาพประกอบ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก ที่ขึ้นกับอุณหภูมิของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35

ตาราง 8 สมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

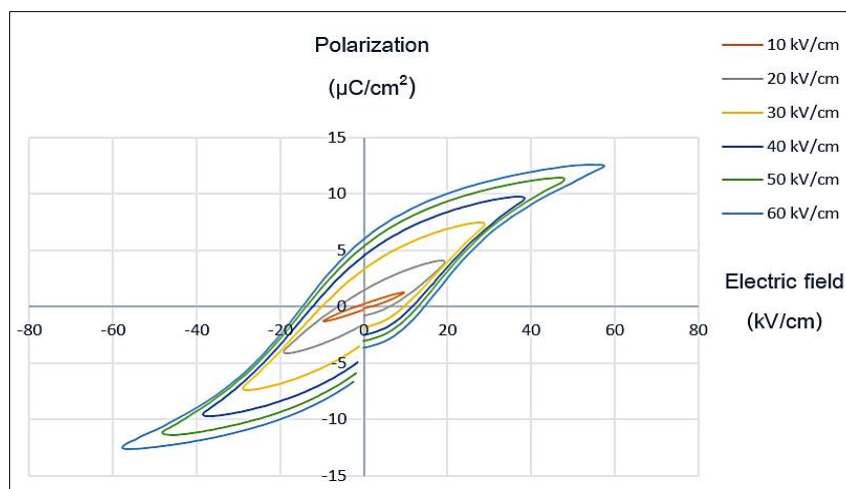
สมบัติ	แผ่น PLZT		
	8/65/35	9/65/35	10/65/35
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์	1768	1191	908
ค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริก (%)	3.7	3.2	5.2
ค่าอุณหภูมิคูรี (°C)	175	125	105

3.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติเฟอร์โรอิเล็กตริกของแผ่น PLZT

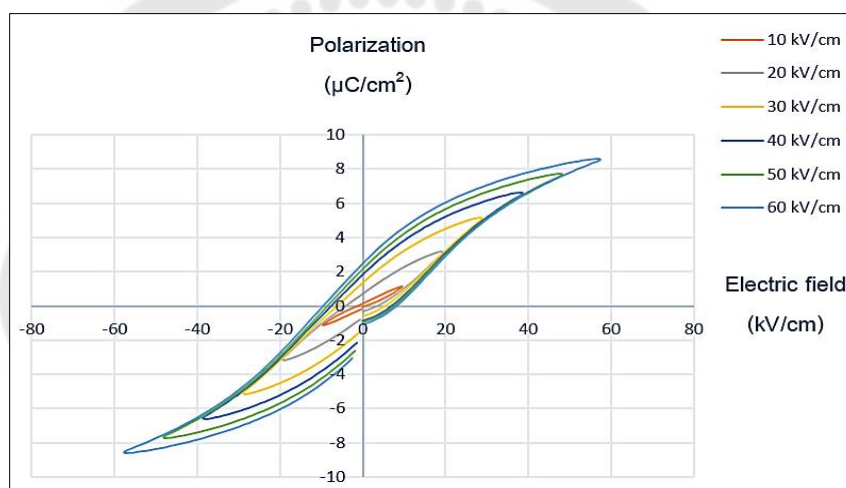
ผลการวิเคราะห์ฮิสเทอรีซิสของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าที่ 10 20 30 40 50 และ 60 kV/cm ดังภาพประกอบ 56 พบว่า ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 แสดงความเป็นโพซิอิเล็กตริกแบบอ่อน เมื่อปริมาณแลนทานัมเพิ่มสูงขึ้น เฟสเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากความเป็นเฟอร์โรอิเล็กตริกไปสู่รีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กตริก (relaxor ferroelectric) ซึ่งอยู่

บริเวณรอยต่อเฟส (morphotropic phase boundary; MBP) เมื่อนำค่าโพลาริเซชันที่สนามไฟฟ้า 60 kV/cm ของแต่ละส่วนประกอบมาเปรียบเทียบกัน ดังภาพประกอบ 57 พบว่า ที่อัตราส่วน 8/65/35 มีวงฮิสเทอรีซิสขนาดใหญ่ แสดงลักษณะเฟอร์โรอิเล็กทริก ให้ค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว (P_s) ค่าโพลาริเซชันคงค้าง (P_r) และค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_c) เป็น $12.50 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $5.97 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และ $14.10 \text{ kV}/\text{cm}$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วน 9/65/35 มีวงฮิสเทอรีซิสแบบวงแคบ เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกหรือเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบสลิม (slim-loop ferroelectric, SFE) (Haertling, 1999; Moulson, 2003) ให้ค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว (P_s) ค่าโพลาริเซชันคงค้าง (P_r) และค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_c) เป็น $8.53 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $2.47 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และ $7.07 \text{ kV}/\text{cm}$ ตามลำดับ และที่อัตราส่วน 10/65/35 แสดงพฤติกรรมแบบรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก (relaxor ferroelectric) มีวงฮิสเทอรีซิสแบบวงแคบ ให้ค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว (P_s) ค่าโพลาริเซชันคงค้าง (P_r) และค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_c) เป็น $7.39 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $1.81 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และ $7.07 \text{ kV}/\text{cm}$ ซึ่งจะเห็นว่า แผ่น PLZT ที่มีการเจือแลนทานัมเข้าไปในเลคเซอร์โคเนตไททานเนต ในปริมาณต่ำ ส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว (P_s) ค่าโพลาริเซชันคงค้าง (P_r) และค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_c) มีค่าสูง โดยแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 มีค่าสูงสุด ดังตาราง 9

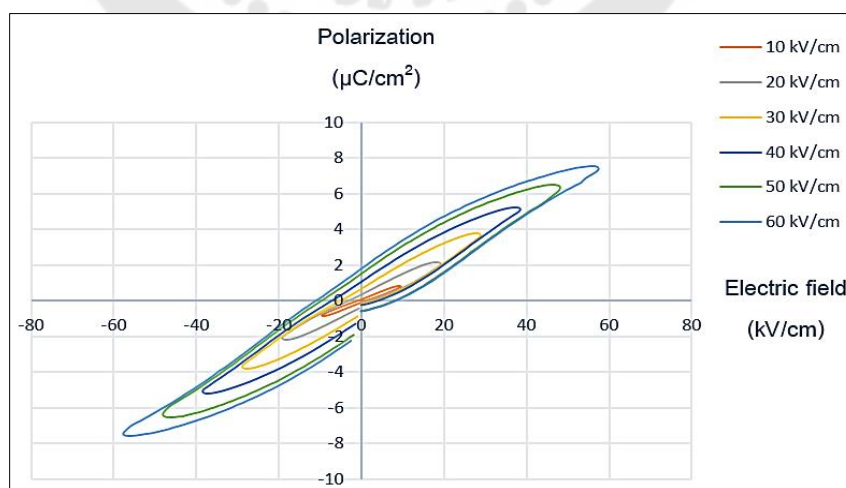
(ก)



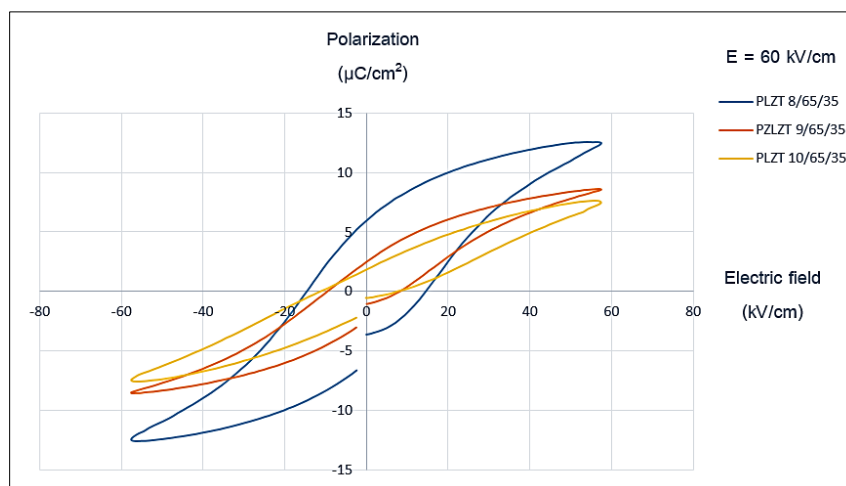
(ข)



(ค)



ภาพประกอบ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าที่ 10 20 30 40 50 และ 60 kV/cm ที่อัตราส่วน (ก) 8/65/35 (ข) 9/65/35 และ (ค) 10/65/35 ของแผ่น PLZT



ภาพประกอบ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าที่ 60 kV/cm ของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35

ตาราง 9 สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35

วงฮิสเตอร์ีซิสของแผ่น PLZT			
แผ่น PLZT	P_s ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	P_r ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	E_c (kV/cm)
8/65/35	12.50	5.97	14.10
9/65/35	8.53	2.47	7.07
10/65/35	7.39	1.81	6.87

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการขึ้นรูปและสมบัติโพธิโซอิเล็กทริกจากผลของการเจือปนทานัมในพีซีทีที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 ขึ้นรูปโดยเทคนิคหล่อแผ่นบาง สามารถสรุปและอภิปรายผลการทดลอง ดังนี้

1. การขึ้นรูปแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 ด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นบาง พบว่า สามารถขึ้นรูปแบบแผ่นบางได้ดี ไม่มีช่วงของแผ่นเทปที่ขาดออกจากกัน
2. แผ่น PLZT หลังจากการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 30 min มีความเปราะสูงง่ายต่อการแตกหัก มีขนาดเล็กกลาง และรอยดำที่เกิดจากการกัดอัดหายไป
3. การเจือปนทานัมในปริมาณต่างกันเข้าไปในเลดเซอร์โคเนตไททานेटได้เฟสที่ไม่แตกต่างกัน โดยมีโครงสร้างผลึกแบบ perovskite polycrystalline เป็น (100) (110) (111) (200) (210) และ (211)
4. โครงสร้างจุลภาคของแผ่น PLZT แสดงการเกาะตัวของเกรนที่ดี มีรูพรุนประมาณ 25%
5. การเจือปนทานัมปริมาณต่ำ ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ โดยขนาดเกรนอยู่ในช่วง 0.57-0.85 μm ที่อัตราส่วน 8/65/35 เกรนมีขนาดใหญ่สุดเป็น 0.85 μm และที่อัตราส่วน 10/65/35 เกรนมีขนาดเล็กสุดเป็น 0.57 μm
6. ขึ้นรูปแผ่น PLZT ด้วยแฮนด์แคสท์ที่ความหนา 1250 μm ซ้อนทับจำนวนสองแผ่น พบว่าความหนาของแผ่น PLZT อยู่ในช่วง 339-371 μm ที่อัตราส่วน 10/65/35 มีความหนาดำสุดเป็น 339 μm และที่อัตราส่วน 8/65/35 มีความหนาสูงสุดเป็น 371 μm โดยหลังการเผาผนึกแผ่น PLZT มีความหนาลดลง 85-87 %
7. แผ่น PLZT อัตราส่วน 9/65/35 ที่ความถี่ 1 kHz แสดงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงสุดเป็น 712.48 และแสดงค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำสุดเป็น 3.9 %
8. แผ่น PLZT อัตราส่วน 8/65/35 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงสุดเป็น 1768.42 มีค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกเป็น 3.7 % และมีอุณหภูมิคูรีประมาณ 175°C
9. การเจือปนทานัมปริมาณต่ำ มีผลทำให้ค่าโพลาไรเซชันอิมตัว (P_r) ค่าโพลาไรเซชันคงค้าง (P_r) และค่าสนามไฟฟ้าภายนอก (E_c) มีค่าสูง ที่อัตราส่วน 8/65/35 แสดงค่าวงฮิสเทอรีซิสสูงสุด และที่อัตราส่วน 10/65/35 แสดงค่าวงฮิสเทอรีซิสต่ำสุด

ดังนั้น จากการขึ้นรูปแผ่น PLZT ที่อัตราส่วนของ Zr/Ti เป็น 65/35 ด้วยการเจือ แลนทานัม 8.9 และ 10 mol% โดยวิธีหล่อแผ่นบาง พบว่า สเลอรี PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 สามารถขึ้นรูปแบบแผ่นได้ดี โดยสเลอรี PLZT มีความเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 30 min แผ่น PLZT มีความเปราะสูง ความหนาหลัง การเผาผนึก อยู่ในช่วง 339-371 μm ได้โครงสร้างผลึกของแผ่น PLZT เป็นแบบ perovskite polycrystalline เป็น (100) (110) (111) (200) (210) และ (211) และการเจือแลนทานัมในปริมาณ ต่างกันเข้าไปในเลดเซอร์โคเนตไททาเนต ได้เฟสที่ไม่แตกต่างกัน จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาค พบว่า แผ่น PLZT มีเกรนอยู่ในช่วง 0.57-0.85 μm แผ่น PLZT ที่มีการเจือแลนทานัมปริมาณต่ำ จะ แสดงลักษณะของรูพรุนต่ำ ในส่วนของสมบัติไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง แผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 9/65/35 ให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (permittivity) สูงสุดที่ 713 และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss) 3.9% ที่ความถี่ 1 kHz สมบัติไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่าง ๆ แผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 ให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (permittivity) สูงสุดที่ 1768 และค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss) 3.7 % มีอุณหภูมิคูรีสูงสุดประมาณ 175°C และสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก แผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35 เป็นไพโซอิเล็กทริกแบบอ่อน โดยวงฮิสเตอร์ซิสให้ค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว (P_r) ค่าโพลาริเซชันคงค้าง (P_r) และสนามไฟฟ้าภายนอก (E_c) สูงสุดเป็น 12.50 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 5.97 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ และ 14.10 kV/cm ตามลำดับ ดังตาราง 10

ตาราง 10 สมบัติทางกายภาพและสมบัติไพโอโซอิเล็กทริกของแผ่น PLZT ที่อัตราส่วน 8/65/35
9/65/35 และ 10/65/35

สมบัติ	แผ่น PLZT		
	8/65/35	9/65/35	10/65/35
การขึ้นรูปแบบแผ่นบาง	ขึ้นรูปได้ดี	ขึ้นรูปได้ดี	ขึ้นรูปได้ดี
โครงสร้างผลึก	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง
ความหนาของแผ่น PLZT (μm)	371	346	339
ขนาดเกรน (μm)	0.19 - 0.85	0.17 - 0.70	0.12 - 0.57
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิห้อง	696	712	676
ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก ที่อุณหภูมิห้อง (%)	5.7	3.9	4.1
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงสุด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ	1768	1191	908
ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (%)	3.7	3.2	5.2
อุณหภูมิคูรี ($^{\circ}\text{C}$)	175	125	105
โพลาริเซชันอิ่มตัว ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	12.50	8.53	7.39
โพลาริเซชันคงค้าง ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	5.97	2.47	1.81
สนามไฟฟ้าภายนอก (kV/cm)	14.10	7.07	6.87

2. ข้อเสนอแนะ

การศึกษาการขึ้นรูปและสมบัติไพโอโซอิเล็กทริกจากผลของการเจือปนทานัมในพีซีทีที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 ขึ้นรูปโดยเทคนิคหล่อแผ่นบาง พบว่างานวิจัยควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อการพัฒนาและนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป เช่น การเตรียมชิ้นงานที่มีประสิทธิภาพ การสร้างอุปกรณ์เพื่อใช้กับเครื่องมือวิเคราะห์ และการนำชิ้นงานไปวิเคราะห์สมบัติในด้านอื่น ๆ ดังนี้

1. ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล หากทำการเตรียมชิ้นงานได้ความหนาที่แน่นอนได้ จะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ดีขึ้น
2. สร้างหัววัดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผล เนื่องจากแผ่น PLZT ที่ผ่านการเผาผนึกจะมีความเปราะสูง เมื่อนำไปวิเคราะห์ผล หัววัดจะสัมผัสกับชิ้นงานโดยตรง หากสามารถสร้างหัววัดได้อย่างมีประสิทธิภาพจะทำให้ลดความเสียหายของชิ้นงานได้
3. ศึกษาความหนาของแผ่น PLZT โดยการปรับเปลี่ยนความหนาที่อัตราส่วน 8/65/35 9/65/35 และ 10/65/35 เพื่อวิเคราะห์หาผลทางกายภาพและสมบัติโพิโซอิเล็กทริกที่ดี
4. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่น PLZT เช่น การหดตัว การโค้งงอของแผ่น PLZT หลังการเผาผนึก เนื่องจากหลังการเผาผนึก แผ่น PLZT จะเกิดการหดตัวและโค้งงอ
5. วิเคราะห์สมบัติอื่นๆ เช่น สภาพความต้านทานไฟฟ้า (ρ) ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า (k_p) ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Z_r) และค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (Q_m) เป็นต้น

บรรณานุกรม

- APC International, L. (2002). Piezoelectric ceramic: Principles and applications. Retrieved from <https://www.americanpiezo.com/>
- Baoshan, L., Zhigang, Z., Guorong, L., & Aili, D. (2005). Microstructure and electromechanical Properties in PMnN – PZT ceramic sintered at difference temperature *J.Mater. Sci Techno* 3(1), 386-390.
- Bintachitt, P. (2009). Local origin of macroscopic properties and patterning in $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$. *Dissertation Ph.D. Material Science and Engineering*. Retrieved from https://www.mri.psu.edu/sites/default/files/file_attach/P.%20Bintachitt.pdf
- biotechnology, N. c. f. (2017). Scanning Electron Microscope (SEM) Retrieved from <https://biotech.unl.edu/field-emission-scanning-electron-microscope>
- Buchanan, R. (1986). *Ceramic material for eletroceramics; processing properties and application*. Marcel Dekker.
- Can, H., Jianmei, X., Zhou, F., Ding, A., Wei, Z., Ling, Z., . . . Qing, W. (2017). Effect of preparation process on properties of PLZT (9/65/35) transparent ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, 723, 602-610.
- Cross, L. E. (1996). Ferroelectric materials for electromechanical transducer applications. *Materials Chemistry and Physics*, 43(2), 108-115. doi:[https://doi.org/10.1016/0254-0584\(95\)01617-4](https://doi.org/10.1016/0254-0584(95)01617-4)
- Electronics Tutorials. (2018). The Inductor. Retrieved from <https://www.electronics-tutorials.ws/inductor/inductor.html>
- Ernest, M. L., Carl, R. R., & Howard, F. M. (1964). *Phase Diagrams* (3rd edition ed.). America: The American Ceramic Society.
- Haertling, G. H. (1999). Ferroelectric ceramic : history and technology. *J Am Ceram* 82(1), 797-818.
- Hotza, D., & Greil, P. (1995). Review: aqueous tape casting of ceramic powders. *Materials Science and Engineering: A*, 202(1), 206-217. doi:[https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)09785-6](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)09785-6)
- Hu, Z., Ma, B., Liu, S., Narayanan, M., & Balachandran, U. (2014). Relaxor behavior and energy storage performance of ferroelectric PLZT thin films with different Zr/Ti ratios. *Ceramics International*, 40(1, Part A), 557-562. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.05.139>
- Jeffe, B., Cook, W., & Jeffe, H. (1971). Piezoelectric ceramics. *Academic Press Inc (London) Ltd*.

- Jullian, C. (2003). Investigation of porlarization switching over broad time and field domain in various ferroelectrics Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/168f/d4a51c39a55934f1491ff1d63c8ee3f2ab99.pdf>
- Labratories, E. (2017). X-RAY POWDER DIFFRACTION (XRD). Retrieved from <https://www.eag.com/x-ray-diffraction-xrd>
- Menglab. (2018). Resistor. Retrieved from <http://menglab.blogspot.com/2016/06/2.html>
- Michel, W. B. (1997). *Fundamentals of Ceramics* (1st Edition ed.): The Mcgraw – Hill
- Moulson, A., & Herbert, J. (2003). *Electroceramics* (2nd edition ed.): John Wiley & Sons.
- Moulson AJ, H. J. (2003). *Electroceramics* (2 nd ed.).
- Newnham R. E. (2005). *Properties of Materials (Anisotropy, Symmetry, Structure)* (O. U. Press Ed.): OUP Oxford.
- Qin, L., Sun, Y., Wang, Q., & Zhong, Y. (2012). Fabrication and characterization of thick-film piezoelectric lead zirconate titanate ceramic resonators by tape-casting. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 59(12), 2803-2812. doi:10.1109/TUFFC.2012.2522
- Smolenskii, G. A. (1961). New Ferroelectrics of Complex Composition IV. *Sov. Phys. Solid State*, 2, 1298.
- Suaprasert, P., Aungkavattana, P., & Bintachitt, P. (2014). Study of the Factors Affecting the Mechanical, Electrical, and Piezoelectric Properties of PZT Micro-Actuator. *Ferroelectrics*, 459(1), 32-37. doi:10.1080/00150193.2013.837753
- Supreya, T., & Krit, K. (2007). Characterization of Lead Lanthanum Zirconate Titanate (PLZT) Ceramics Sintered at Various Temperatures. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*, 41(5), 192 – 197.
- Taunaumang, H. (1994). Electromechanical properties of 1-3 piezoelectric ceramic/piezoelectric polymer composites. 76(1), 484-489. doi:10.1063/1.357099
- Timakul, P., Jinawath, S., & Aungkavattana, P. (2008). Fabrication of electrolyte materials for solid oxide fuel cells by tape-casting. *Ceramics International*, 34(4), 867-871. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.09.038>
- Tong, S., Narayanan, M., Ma, B., Liu, S., Koritala, R. E., Balachandran, U., & Shi, D. (2013). Effect of lanthanum content and substrate strain on structural and electrical properties of lead lanthanum zirconate titanate thin films. *Materials Chemistry and Physics*, 140(2), 427-430.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.03.067>

Trolier, M. S., & Muralt, P. (2004). Thin film piezoelectrics for MEMS *Journal of Electroceramics* 12(1), 7-17. doi:<https://doi.org/10.1023/B:JECR.0000033998.72845.51>

Uchino, K. (2000). *Ferroelectric devices* (2nd Edition ed.): CRC Press, Inc. Boca Raton, FL, USA ©2009.

Wikipedia. (2018). Capacitor. Retrieved from <https://en.wikipedia.org/wiki/Capacitor>

William, D. C. (2003). *Materials science and engineering an introduction* Retrieved from https://abmpk.files.wordpress.com/2014/02/book_maretil-science-callister.pdf

William, D. C. (2003). *Materials Science and Engineering an Introduction*.

Xu Nansheng, Zhao Hailei, Zhou Xiong, & Wei Wenjing. (2010). Dependence of critical radius of the cubic perovskite ABO_3 oxides on the radius of A- and B-site cations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(14), 7295-7301.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.149>

Yufeng, L., Zhiyuan, L., & Zhanpeng, Z. (2017). High piezoelectricity of PLZT ceramics with strong frequency-dielectric dispersion below depolarization temperature.

Yuhuan, X. (1991). *Ferroelectric materials and their application*: North Holland

Yun, T. C., Shih, C. L., & Syh, Y. C. (2008). Temperature dependence of dielectric and piezoelectric properties of PLZT-PZN ceramic tapes. *Journal of Alloys and Compounds*, 449, 101–104.

กฤษฎา บุญชม. (2004). สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของของผสม *PZT/PVC* แบบ 0-3. (ปริญญานิพนธ์ วท.ม. (สาขาวัสดุศาสตร์)), บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

กึ่งกาญจน์ สระบัว. (2013). การศึกษาผลกระทบของแรงกดและความถี่เชิงกลที่มีต่อการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุโพไลโซอิเล็กทริก (ปริญญานิพนธ์ วศ.ม. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า), บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

จารุวรรณ จันทะพาหะ. (2017). ผลของระบบออร์แกนิกที่มีต่อสมบัติโพไลโซอิเล็กทริกของพีแอลซีทีที่ขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้ง. (ปริญญานิพนธ์ วท.ม. สาขาวัสดุศาสตร์), บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

ชญัญพันธ์ ขาเกษม. (2013). การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการขึ้นรูปวัสดุไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยใช้เทคนิคการหล่อขึ้นรูปแบบเทป. (ปริญญานิพนธ์ วศ.ม. (สาขาอุตสาหกรรม)), บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- นันทพร คงกะจินทร์. (2013). Effects of PbO Cover Coat on Physical Properties of PLZT Thin Films Prepared by Sol-gel Process. วิศวกรรมสาร มก, ฉบับที่ 85 ปีที่ 26 กรกฎาคม - กันยายน 2556.
- ยุทธพงษ์ ศรีทธา. (2013). ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของสารบิสเมทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต. (ปริญญานิพนธ์ วศ.ม. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า), บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสุรนารี.
- วันทนีย์ เชียรธานรักษ์. (2004). การเตรียมแผ่นเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตเจือเลนทามันโดยวิธีการหล่อขึ้นรูป (ปริญญานิพนธ์ วท.ม. สาขาวัสดุศาสตร์), บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สุทัศน์ จันบัวลา. (2006). การศึกษาสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของสาร $PMnN-PZT$ ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำสำหรับประยุกต์ใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดเพียโซอิเล็กทริก. (ปริญญานิพนธ์ วท.ม. สาขาวัสดุศาสตร์), มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต.
- สุธรรม ศรีหล่มสัก. (2008). เอกสารประกอบการสอนรายวิชา *Introduction to Piezoelectric Ceramics*. Retrieved from มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา:
- สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. (2010). การสังเคราะห์และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกระบบ $(Bi_{1/2}K_{1/2})TiO_3-LiSbO_3$. (ปริญญานิพนธ์ วศ.ม. สาขาวิศวกรรมศาสตร์), บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อานนท์ ไกรป๋อก. (2017). ผลของตัวประสานต่อการขึ้นรูปแบบเทปคาสติ้งและสมบัติของวัสดุโพซิอิเล็กทริก. (ปริญญานิพนธ์ วท.ม. สาขาวัสดุศาสตร์), บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- อารี ธนบุญสมบัติ. (2541). *Advanced ceramics*. Retrieved from MTEC กรกฎาคม - กันยายน:

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

ภคินี ทองฤทธิ์

วัน เดือน ปี เกิด

4 กุมภาพันธ์ 2537

สถานที่เกิด

ตำบลโคกกลอย อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา

วุฒิการศึกษา

พ.ศ. 2555

มัธยมศึกษาตอนปลาย

จาก โรงเรียนทุ่งโพธิ์วิทยา จังหวัดพังงา

พ.ศ. 2559

วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ที่อยู่ปัจจุบัน

24 หมู่ 5 ตำบลโคกกลอย อำเภอตะกั่วทุ่ง จังหวัดพังงา

ผลงานตีพิมพ์

ธัญนพ นิลกำจร, ชีรฉวีลย์ ปานกลาง, พันธุ์ศักดิ์ ศิริรักษา, ภคินี ทองฤทธิ์, ศิริสกุล สันตะวงศ์, รัตนสุตา สุภคณัยสร, และพงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริชัย.
(2018). การศึกษาการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กผ่านการจัดเรียงแม่เหล็กแบบฮอลแบ์ค. Phranakhon Rajabhat Research Journal (Science and Technology), 13 (1), 155-163.