

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

กระบวนการสร้างและสมบัติทางไฟฟ้า  
ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์  
Fabrication Process and Electronic  
Properties of Piezoelectric Transformer



๒พ.  
พ837ก  
2550

เลขหมู่.....**82208**  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....**9 ก.ค. 2551**

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

11 4258 A&G  
b.....  
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุก

กระบวนการสร้างและสมบัติทางไฟฟ้า  
ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์  
**Fabrication Process and Electronic  
Properties of Piezoelectric Transformer**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

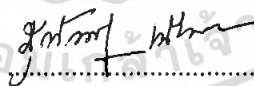
ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง กระบวนการสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

ผู้จัดทำ

1. นายพุทธิพงษ์ เกียรติสูงชาติ รหัส 47012223
2. นายศุภวัฒน์ โอพารวัฒน์ รหัส 47012230



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

( ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กระบวนการสร้างและสมบัติทางไฟฟ้า ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

นายพุทธิพงษ์ เกียรติสูงชาติ รหัส 47012223  
นายศุภวัฒน์ โอพารวัฒน์กุล รหัส 47012230  
ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ดร.นราธิป วิทยากร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
อาจารย์รังสรรค์ เมืองเหลือ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
ปีการศึกษา 2550

## บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาเตรียมสารละลายของแข็งของ  $Pb_{0.97}Sr_{0.03}[(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.07}(Zn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.06} \times (Zr_{1-x}Ti_x)_{0.87}]O_3 + 0.3 \text{ wt\% } Nb_2O_5 + 0.3 \text{ wt\% } CuO + 0.3 \text{ wt\% } Bi_2O_3 + 0.1 \text{ wt\% } Li_2CO_3$  (PZN-PMnN-PZT) ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Zr/Ti ทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ Zr/Ti = 0.48/0.52 0.50/0.50 และ 0.52/0.48 ตามลำดับ ศึกษาการเกิดเฟสบริสุทธิ์และโครงสร้างผลึกของผง PZN-PMnN-PZT ด้วยวิธีเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยาและโครงสร้างจุลภาคของผงและเซรามิก PZN-PMnN-PZT ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากนั้นทำการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กตริกและเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิกที่เตรียมได้ จากผลการทดลองพบว่าสามารถเตรียมผง PZN-PMnN-PZT ให้มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่มีความบริสุทธิ์สูงได้ที่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Zr/Ti และยังคงพบว่ามีสัดส่วนของ Ti เพิ่มขึ้น โครงสร้างผลึกเปลี่ยนโครงสร้างจากรวมโมโนโครลไปเป็นโครงสร้างเทอร์โกนอล จากการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กตริกพบว่าสัดส่วนของ Ti นั้นสามารถเพิ่ม อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ( $T_m$ ) ยิ่งไปกว่านั้นสมบัติฮิสเทอรีซิสชี้ให้เห็นว่าเซรามิก PZN-PMnN-PZT แสดงค่าโพลาไรเซชันอิ่มตัว (Saturated polarization;  $P_s$ ) ลดลงเมื่อสัดส่วนของ Ti เพิ่มขึ้น

# Fabrication Process and Electronic Properties of PiezoelectricTransformer

Mr. Puttiphong Kiatsoongchart I.D. 47012223

Mr. Supawat Olanwattanakul I.D. 47012230

Assist.Prof. Dr. Surasak Niemchareon Advisor

Dr. Naratip Vittayakorn Co – Advisor

Ajarn. Rangson Muanglua Co – Advisor

Educational Year 2007

## Abstract

This purpose of this thesis is to present the preparation of the solution of the solid  $\text{Pb}_{0.97}\text{Sr}_{0.03}[(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.07}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.06} \times (\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)_{0.87}]_3\text{O}_3 + 0.3 \text{ wt}\% \text{ Nb}_2\text{O}_5 + 0.3 \text{ wt}\% \text{ CuO} + 0.3 \text{ wt}\% \text{ Bi}_2\text{O}_3 + 0.1 \text{ wt}\% \text{ Li}_2\text{CO}_3$  (PZN-PMnN-PZT) by using solid state reaction method. Three of Zr/Ti ratio have been studied Zr/Ti = 0.48/0.52 0.50/0.50 and 0.52/0.48 respectively. Purity phase and the crystal structure is also investigated using XRD (X – ray diffraction technique) and the characteristics and the microstructure of powder and the ceramic PZN-PMnN-PZT is studied using SEM (Scanning Electron Microscope). Finally, the ceramic's dielectric and piezoelectric properties are inspected. For the experimental as preparation of PZN-PMnN-PZT powder is many pure Perovskite structure at three of Zr/Ti ratio and Ti ratio increase. The crystal structure is Rhombohedral structure change Tetragonal structure. For the ceramic's dielectric as Ti ratio increase can  $T_m$  increase. Hysteresis loop for PZN-PMnN-PZT ceramics show as saturated polarization decrease at Ti ratio increase.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ศศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.นราธิป วิทยากร และ อาจารย์รังสรรค์ เมืองเหลือ ที่ให้คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ที่มีคุณค่าแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ โรงเรียนเทพศิรินทร์ที่ให้ความรู้ การอบรมสั่งสอน คุณธรรมและจริยธรรมและ อาจารย์ทุกท่านในโรงเรียนเทพศิรินทร์ ให้ความรู้และประสบการณ์ที่มีคุณค่าแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ศศ.ดร.กิติพล ชิตสกุล และ อาจารย์ยอติณัฐ ปิ่นเงิน ที่ให้คำปรึกษาและให้ความรู้ และความช่วยเหลือแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณพี่นักศึกษาปริญญาโท พี่ติ๊ะ พี่ไผ่ พี่ตูน พี่แนน พี่บอย พี่สา และ เพื่อนแวน เพื่อนรี น้องน้อย น้องฉนิ ที่คอยช่วยเหลือและคอยแนะนำให้คำปรึกษาแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และ รุ่นน้อง โตะเทพที่ลาดกระบัง และ เพื่อนคณะวิทยาศาสตร์ คอยเป็นกำลังใจและช่วยเหลือ สนับสนุนสิ่งดีๆ ให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สจล.ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ ที่ดีแก่ข้าพเจ้าและขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี สจล. ที่ให้ใช้สถานที่และอุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ ในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ บิดา มารดา ที่คอยเลี้ยงดู เป็นที่รักและเคารพอย่างยิ่งแก่ข้าพเจ้า

สุดท้ายต้องขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับครูอาจารย์ ทุกท่าน และ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ ในการทำวิจัย

พชลพงษ์ เกียรติสูงชาติ

(นายพุทธพงษ์ เกียรติสูงชาติ)

หาญศักดิ์วัฒน์ โอฬารวัฒนกุล

(นายศุภวัฒน์ โอฬารวัฒนกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 เพียโซอิเล็กทริก.....	5
2.2 การประยุกต์ใช้สารเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก และอิเล็กโทรสตรักทีฟ.....	6
2.3 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์.....	8
2.3.1 การทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์.....	8
2.3.2 ชนิดของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์.....	10
2.3.2.1 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ ชนิด Rosen Type .....	10
2.3.2.2 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ ชนิด Thickness Vibration Mode.....	11
2.3.2.3 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ ชนิด Radial Vibration Mode.....	12
2.4 ลักษณะเฉพาะทั่วไปและการประดิษฐ์สารพีแซดที.....	13
2.4.1 เลดเซอร์โคเนต-เลดไทเทเนต( $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ ).....	13
2.4.2 การประดิษฐ์สารพีแซดที.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5	การเตรียมผงจากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง.....	22
2.6	การเผาแคลไซน์.....	25
2.7	ซินเตอร์เซรามิก.....	27
บทที่ 3	กระบวนการเตรียมและการวัด.....	30
3.1	สารเคมี.....	30
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้.....	31
3.3	กระบวนการเตรียมผง PMN_PZN_PZT.....	32
3.4	กระบวนการเตรียมเซรามิก.....	35
3.5	การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์(XRD).....	38
3.6	การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก.....	40
3.6.1	การหาค่าความหนาแน่น.....	40
3.7	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก.....	40
3.8	การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก.....	41
3.8.1	การตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก.....	41
บทที่ 4	ผลการทดลองและอภิปราย.....	42
4.1	ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์(XRD) ของผง PMnN-PZN-PZT.....	42
4.2	ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก PMnN-PZN-PZT.....	45
4.3	ผลการตรวจสอบ โครงผลึกของเซรามิก.....	48
4.4	ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า.....	51
4.4.1	สมบัติทางไดอิเล็กทริก.....	51
4.5	ตรวจสอบทางเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอเรซิส.....	60
4.6	ผลการทดสอบเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	67
เอกสารอ้างอิง.....	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของหม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งแบบแม่เหล็กไฟฟ้า และแบบเซรามิกส์.....12
4.1	แสดงค่าความหนาแน่นของ $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ เซรามิก(PMnN-PZN-PZT) ที่อุณหภูมิ 1100 °ซ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง.....46
4.2	แสดงสมบัติทางไดอิเล็กทริกของ $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ .....60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ก) ปราบกฏการณ์พีโซอิเล็กทริกโดยตรง.....	5
2.1 ข) ปราบกฏการณ์พีโซอิเล็กทริกโดยอ้อม.....	5
2.2 ตัวอย่างของอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกและ อิเล็กโตรสตรักที่ฟจาก PZT PLZT และ PMN.....	7
2.3 ตัวอย่างของเซรามิกที่ใช้ในการประยุกต์ต่าง ๆ.....	7
2.4 การสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าและ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการสั่นสะเทือน.....	9
2.5 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ที่มีการประยุกต์มา จากการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก.....	9
2.6 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์.....	10
2.7 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ชนิด Rosen Type.....	11
2.8 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ชนิด Thickness Vibration Mode.....	11
2.9 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ชนิด Radial Vibration Mode.....	12
2.10 สนามขจัดไดอิเล็กทริกที่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันอัดแกนเดี่ยว สำหรับสาร PZT .....	14
2.11 เสถียรภาพของเฟสในระบบ $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ .....	16
2.12 ค่าสัมประสิทธิ์การคู่ควบและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ใน ช่วงต่างๆขององค์ประกอบทางเคมีในระบบพีแซดที่.....	17
2.13 วงรอบ P-E กับการเพิ่มขึ้นของความแรงสนามไฟฟ้า ตรงส่วนปลายยอดที่ 50 Hz สำหรับเซรามิกที่ เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริก.....	19
2.14 อิทธิพลของการเดินเลานทานัมที่มีต่อสภาพด้านทาน ไฟฟ้าของสารเซรามิก.....	20
2.15 เคาแผลแบบหมุน.....	26
2.16 (ก) การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น ทรงกลมสัมผัสกัน.....	27
2.16 (ข) ช่วงสุดท้ายของการซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น.....	27
2.16 (ค) การซินเตอร์ช่วงกลาง เกรนเปลี่ยนรูปร่าง.....	27
2.16 (ง) การซินเตอร์ช่วงสุดท้าย รูปกรุนเป็นแบบทรงแหรีด.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 (ก) การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น.....	29
2.17 (ข) การซินเตอร์ช่วงกลาง.....	29
2.17 (ค) การซินเตอร์ช่วงสุดท้าย.....	29
3.1 การบดขยี้ด้วยเครื่องบดขยี้ (Ball-milling).....	33
3.2 เตาไฟฟ้าสำหรับเผาสาร.....	33
3.3 แผนผังการเตรียมผง PMN-PZT-PZN.....	34
3.4 การจัดเรียงชิ้นงานในถ้วยอะลูมินาสำหรับการเผาซินเตอร์.....	36
3.5 แผนผังการเผาซินเตอร์.....	36
3.6 แผนผังกระบวนการเตรียมเซรามิก.....	37
3.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	38
3.8 เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance.....	39
3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลิตโดยบริษัท LEO รุ่น LEO 1455 VP.....	41
4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงในระบบ $PbS(MnN)_{0.07}(ZnN)_{0.06}(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ (PMnN-PZN-PZT).....	42
4.2 แสดงลักษณะและตำแหน่งของเฟสไพโรคลอร์(pyrochlore).....	43
4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงในระบบ $PbS(MnN)_{0.07}(ZnN)_{0.06}(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ (PMnN-PZN-PZT) เปรียบเทียบกับแฟ้มข้อมูลมาตรฐาน JCPDS file no. 33-0784 ของสารประกอบเลคเซอร์โคเนตไทเทเนต(PZT).....	44
4.4 แสดงลักษณะของ $PbS(MnN)_{0.07}(ZnN)_{0.06}(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ เซรามิก (PMnN-PZN-PZT) สักส่วนองค์ประกอบต่างๆ หลังจากผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 °ซ 6 ชั่วโมง.....	45
4.5 แสดงลักษณะของเกรนบนพื้นผิวของ PMnN-PZN-PZT เซรามิกแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 °ซ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก (PMnN-PZN-PZT) ที่ค่า $x$ มีค่าเท่ากับ 0.48 0.50 และ 0.52 .....	48
4.7 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟีก (2 0 0) ของเซรามิก (PMnN-PZN-PZT) โดยที่ $x = 0.52$ $x = 0.50$ $x = 0.48$ .....	50
4.8 แสดงผลกระทบของสัดส่วนองค์ประกอบเซรามิก PMnN-PZT-PZN ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก.....	51
4.9 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีสัดส่วน $x = 0.48$ เทียบกับอุณหภูมิ ที่ความถี่ระหว่าง 100 Hz – 100kHz.....	52
4.10 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีสัดส่วน $x = 0.50$ เทียบกับอุณหภูมิ ที่ความถี่ระหว่าง 100 Hz – 100kHz.....	53
4.11 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีสัดส่วน $x = 0.52$ เทียบกับอุณหภูมิ	
4.12 แสดงผลกระทบจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปต่อค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของ $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ เซรามิก PMnN-PZT-PZN.....	56
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิ ที่เปลี่ยนแปลงไปของเซรามิก PMnN-PZT-PZN ที่ความถี่ 1 kHz.....	57
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส( $T_m$ ) และสัดส่วนองค์ประกอบ.....	57
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{1}{\epsilon_r} - \frac{1}{\epsilon_{r,\max}}\right)$ และ $\ln(T - T_m)$ ของเซรามิก PMnN-PZT-PZN.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16	แสดงลักษณะฮิสเทอเรซิสลูปของ $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ เซรามิก $\text{PMnN-PZT-PZN}$ แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบความเข้มข้น โดยทำการตรวจสอบพร้อมการเปลี่ยนแปลงที่ศักย์ไฟฟ้า.....61
4.17	แสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะฮิสเทอเรซิสของ $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ เซรามิก $\text{PMnN-PZT-PZN}$ เมื่อสัดส่วนองค์ประกอบ $x$ เปลี่ยนแปลง.....62
4.18	แสดงผลการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าต่อสนามไฟฟ้าบังคับ( $E_c$ ) และค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว( $P_s$ )และค่าโพลาริเซชันคงเหลือ( $P_r$ ) ของ $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ เซรามิก $\text{PMnN-PZT-PZN}$ .....63
4.19	แสดงรูปวงจรถ้าหาความถี่เรโซแนนซ์.....64
4.20	แสดงกราฟความถี่เรโซแนนซ์.....64
4.21	รูปวงจรถดสอบการทำงานเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์.....65
4.22	แสดงกราฟเมื่อป้อนความถี่เรโซแนนซ์ 3.5 MHz แรงดัน 10 V.....65
4.23	แสดงกราฟเมื่อป้อนความถี่ 2.5 MHz แรงดัน 10 V.....66
4.24	แสดงกราฟเมื่อป้อนความถี่ 1 MHz แรงดัน 10 V.....66

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้ถูกค้นพบครั้งแรกโดยพี่น้องคูรี(Jacque and Pierre Curie ) ในปี ค.ศ. 1880 ซึ่งค้นพบในสารประกอบที่เป็นผลึกเดี่ยว( Single Crystal ) เช่น ควอตซ์และเกลือโรเซตล์

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก คือ ปรากฏการณ์ที่วัสดุเมื่อได้รับความเค้นแล้วเป็นผลทำให้เกิดความเครียดในวัสดุ ส่งผลให้วัสดุนั้นเกิดการโพลาไรเซชันทางไฟฟ้า ซึ่งปรากฏการณ์ในลักษณะนี้เรียกว่า “ ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง ” ( Direct piezoelectric effect ) และ ในทางตรงกันข้าม เมื่อวัสดุนี้อย่างสามารถเกิดความเครียดซึ่งเป็นสัดส่วนเดียวกับสนามไฟฟ้าที่ได้รับเข้าไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม ” และในปัจจุบันยังมีการนำเพียโซอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง เช่น ระบบโซนาร์ ระบบหัวฉีดน้ำมัน และใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างมากมาย ได้แก่ เซนเซอร์(Sensor) , ตัวขับเคลื่อน( Actuator )

ปัจจุบันได้มีการนำเพียโซอิเล็กทริกนั้นนำมาประยุกต์ใช้เป็น เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างมาจากสารเซรามิก เช่น ควอตซ์(Quartz) ลิเทียมไนโอเบท(Lithium Niobate) และ PZT (Lead Zirconate Titanat) มีหลักการทำงาน โดยอาศัยการสั่นสะเทือนเป็นตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงานและมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ มีขนาดบาง น้ำหนักเบา ทำงานโดยไม่ใช้การเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กเพื่อส่งถ่ายพลังงานและยังมีประสิทธิภาพสูง

โครงสร้างและการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ มีการประยุกต์ใช้มาจากหลักการทำงานของเพียโซอิเล็กทริก โดยการนำเพียโซอิเล็กทริกสองชิ้นมาเชื่อมต่อกันโดยชิ้นแรกทำหน้าที่เป็นแอคชูเอเตอร์ (Piezoelectric Actuators) และ ชิ้นที่สองทำหน้าที่เป็นทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducers) เมื่อนำทั้งสองชิ้นมาเชื่อมต่อกันก็กลายเป็นเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ปัจจุบันเทคโนโลยีส่วนใหญ่มีแนวทางในการพัฒนาที่จะให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดที่บาง จึงการนำเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ เช่น Inverter, AC adapter, Battery Charger, Signal Isolation และ DC/DC Converter เป็นต้น

เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต  $[Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3]$ :PZT ถือได้ว่าเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ได้รับความนิยมอย่างสูง ทั้งในเรื่องของการศึกษาค้นคว้าเชิงวิชาการ และการประยุกต์ในการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่างๆ เนื่องจาก PZT เป็นสารที่แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกที่โดดเด่น สามารถเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึงร้อยละ 45 - 55 ขึ้นกับสารที่เจือ ยิ่งไปกว่านั้น PZT ยังมีอุณหภูมิคูรีที่สูงจาก 230 – 490°C ขึ้นกับอัตราส่วน Zr:Ti โดยอัตราส่วนที่แสดงคุณสมบัติไพโซอิเล็กทริกที่โดดเด่น ได้แก่ อัตราส่วน Zr:Ti มีค่าเท่ากับ 0.52 : 0.48 ซึ่งเป็นบริเวณรอยต่อเฟส (morphotropic phase boundary (MPB)) ยิ่งไปกว่านั้นการเตรียมเซรามิกส์ PZT ให้มีความบริสุทธิ์และความหนาแน่นสูงนั้นสามารถเตรียมได้ไม่ยุ่งยาก และสารตั้งต้นในการเตรียมมีราคาถูกเหมาะสมใช้ในอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีความพยายามมาโดยตลอดที่จะคิดค้นหา วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ให้ดียิ่งขึ้น ควบคู่ไปกับการพยายามในการลดขนาดของอุปกรณ์เหล่านี้ให้เล็กลงไปเรื่อย ๆ โดยยังคงสามารถรักษาประสิทธิภาพไว้ให้ได้เท่าเดิมและหากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้มากกว่าเดิมได้ก็ยิ่งดี และดังนั้นจึงมีความพยายามอย่างสูงที่จะปรับปรุงสมบัติของ PZT ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า หากทำการผสมสารเฟอร์โรอิเล็กทริก PZT เข้ากับแบบริเล็กเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก สมบัติของสารละลายของแข็งดังกล่าวที่ได้ออกมาจะเป็นสมบัติทางไฟฟ้าที่สูงกว่า PZT บริสุทธิ์ เช่น PZT-PZN และ PZT-PMnN

ดังนั้นในโครงการนี้ได้ทำการศึกษาร่วมกันการสังเคราะห์ผงและเตรียมเซรามิก PZN-PMnN-PZT ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Zr/Ti ทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ Zr/Ti = 0.48/0.52 0.50/0.50 0.52/0.48 ตามลำดับเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้สารมีความบริสุทธิ์สูงเป็นหลัก และรวมทั้งเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ผงและเตรียมเซรามิกของ PZN-PMnN-PZT ให้มีความบริสุทธิ์และความหนาแน่นสูง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ผง PZN-PMnN-PZT
- เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมเซรามิก PZN-PMnN-PZT
- เพื่อศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและสมบัติไดอิเล็กทริกเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- เตรียมการสังเคราะห์ผงของ PZN-PMnN-PZT ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Zr/Ti ทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ Zr/Ti = 0.48/0.52 0.50/0.50 และ 0.52/0.48 ตามลำดับ
- เตรียมเซรามิกความหนาแน่นสูง ของสารในระบบ PZN-PMnN-PZT
- ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก และตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของเซรามิกที่เตรียมได้

### 1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

- ศึกษาและค้นคว้ารวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- จัดซื้อวัสดุอุปกรณ์
- เตรียมผงของสารในระบบ PZN-PMN-PZT ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Zr/Ti ทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ Zr/Ti = 0.48/0.52 0.50/0.50 และ 0.52/0.48 ตามลำดับ
- ทำการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของผงสารตัวอย่างทั้งหมดที่เตรียมได้จากการเผาแคลไซน์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)
- เมื่อได้ผงสารตัวอย่างที่มีความบริสุทธิ์สูง นำผงที่ได้มาผ่านกระบวนการร่อนคัดขนาด และทำการขึ้นรูปให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 เซนติเมตร และทำการเผาซินเตอร์ในเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงโดยใช้ผง  $PbZrO_3$  กลบเพื่อลดการระเหยของตะกั่ว
- ทำการหาความหนาแน่นของเซรามิกที่ได้ โดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำของอาร์คิมิดีส และนำเซรามิกที่ได้มาตรวจสอบเฟสที่ปรากฏด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ (XRD) และตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก PZN-PMnN-PZT ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- ตรวจสอบสมบัติโคอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZN-PMnN-PZT ที่สัดส่วนต่าง ๆ กัน

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- สามารถเตรียมการสังเคราะห์ผงและเตรียมเซรามิก PZN-PMnN-PZT ที่มีความบริสุทธิ์ และมีความหนาแน่นสูงได้
- สามารถนำสารเพียโซอิเล็กทริกในระบบ PZN-PMnN-PZT ไปประยุกต์ใช้เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

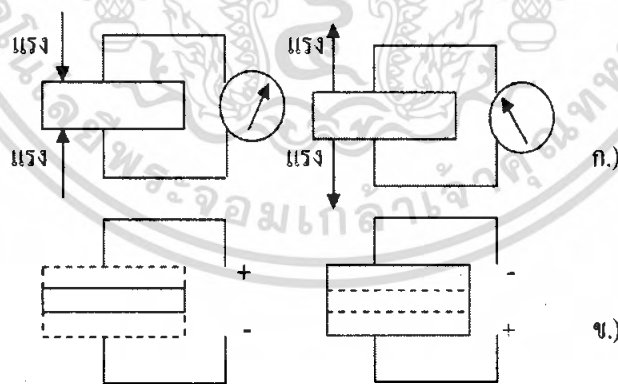
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้ถูกค้นพบครั้งแรกโดยพี่น้องคูรี (Jacque และ Pierre Curie) ในปี ค.ศ. 1880 ซึ่งค้นพบในสารประกอบที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single crystal) เช่น ควอตซ์ และ เกลือโรเชลล์ (Rochelle salt,  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) (W.P.Mason, 1981) ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุประเภทนี้มาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง เช่น ระบบโซนาร์ หม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริก และใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างมากมาย ได้แก่ เซนเซอร์ (Sensor) และตัวขับเคลื่อน (Actuator)

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก คือ ปรากฏการณ์ที่วัสดุเมื่อได้รับความเค้นแล้วเป็นผลทำให้เกิดความเครียดในตัววัสดุ ส่งผลให้วัสดุนั้นเกิดการโพลาไรเซชันทางไฟฟ้า ซึ่งปรากฏการณ์ในลักษณะนี้เรียกว่า “ ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกโดยตรง ” ดังรูปที่ 2.1 ก) ในทางตรงกันข้ามเมื่อวัสดุนี้ยังสามารถเกิดความเครียดซึ่งเป็นสัดส่วนเดียวกับสนามไฟฟ้าที่ได้รับเข้าไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกโดยอ้อม ” ดังรูปที่ 2.1 ข)



รูปที่ 2.1 ก) ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกโดยตรง [1]

ข) ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกโดยอ้อม [1]

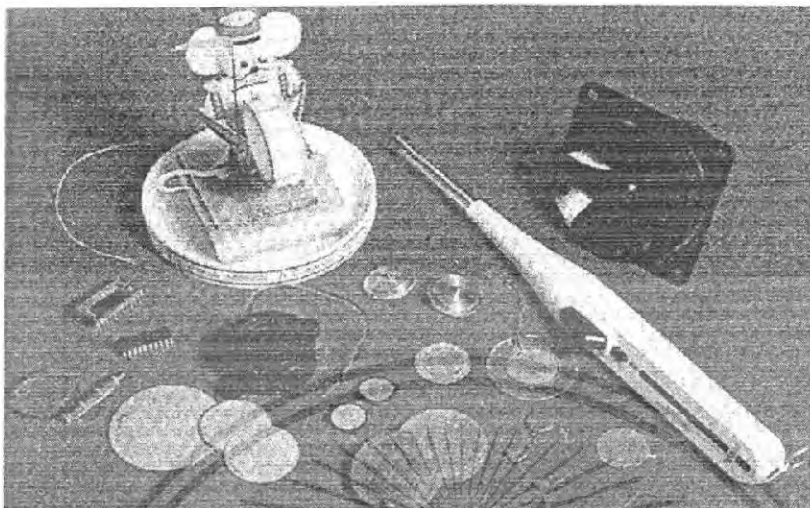
สมบัติเพียโซอิเล็กทริกนี้มาจากลักษณะพื้นฐานของธาตุภายในหน่วยเซลล์(Unit cell) ในโครงสร้างผลึกของวัสดุ โดยในวัสดุที่เป็นผลึกทั้งหมดจะแบ่งได้ตามสมมาตรออกเป็น 32 กลุ่ม แบ่งออกเป็นกลุ่มที่มีสมมาตรผ่านศูนย์กลาง (Center of symmetry) 11 กลุ่ม ซึ่งไม่มีขั้วไฟฟ้า (Non-polar) และ 21 กลุ่มมีสมมาตรไม่ผ่านศูนย์กลาง (Non-center of symmetry) ประกอบด้วย กลุ่มที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก 20 กลุ่มและอีก 1 กลุ่มที่เมื่อได้รับแรงกระทำแล้วทำให้สมมาตรเปลี่ยนไปเป็นสมมาตรที่ผ่านศูนย์กลางจึงไม่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกใน 20 กลุ่มที่ แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก นั้นจะมี 10 กลุ่มที่เกิดโพลาไรเซชันขึ้นแรงได้โดยไม่ต้องเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าภายนอก (Spontaneous polarization,  $P_s$ ) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เรียกว่า ไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric) แต่ถ้าโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นนี้สามารถสลับโพลาไรเซชันได้เมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกจะเรียกว่า เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) กลุ่มโครงสร้างของผลึกที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกประกอบด้วย

- โครงสร้างแบบทังสเตนบรอนซ์ เช่น  $\text{PbNb}_2\text{O}_6$
- โครงสร้างออกตะฮีดรอลของออกซิเจน เช่น สารที่มีสูตรโครงสร้างเป็น  $\text{ABO}_3$
- ผลึกประเภทไพโรคลอร์ เช่น  $\text{Cd}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$
- โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นชั้นๆ เช่น  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$

โครงสร้างที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่น่าสนใจนั้นส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างออกตะฮีดรอลของออกซิเจนชนิดเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) ซึ่งได้มีงานวิจัยต่างๆ ที่ศึกษาคุณสมบัติของสารในระบบนี้ เช่น  $\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$  (PZT)  $\text{BaTiO}_3$  (BT) และ  $\text{PbZrO}_3$  (PZ) เป็นต้น

## 2.2 การประยุกต์ใช้สารเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกและอิเล็กโตรสทริกทีฟ

สารเพียโซอิเล็กทริกและอิเล็กโตรสทริกทีฟได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มากมาย อุปกรณ์ในรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงบางส่วนของ การประยุกต์ใช้เหล่านั้น นอกจากนี้ตัวอย่างของเซรามิกที่ใช้ในการประยุกต์ต่าง ๆ ซึ่งมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันนั้นในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกและอิเล็กโทรสตริกที่ฟจาก PZT PLZT และ PMN เริ่มจากมุมขวาไปตามเข็มนาฬิกา : ทวิตเตอร์ เครื่องจุดเตาแก๊ส ไบโมร์ฟ ตัวสั่นพ้อง ระดับความถี่ปานกลาง เซรามิกสำหรับเครื่องทำความสะอาดยืดหยุ่น เซรามิกเรโซนาเตอร์ ตัวขับเร้า PMN หน่วยความจำเฟอร์ไรต์อิเล็กทริก อุปกรณ์ PLZT ของเล่นจากเซรามิกเรโซนาเตอร์ ตัวขับเร้ามอนิเตอร์และยูนิมอร์ฟ [2]



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของเซรามิกที่ใช้ในการประยุกต์ต่าง ๆ [2]

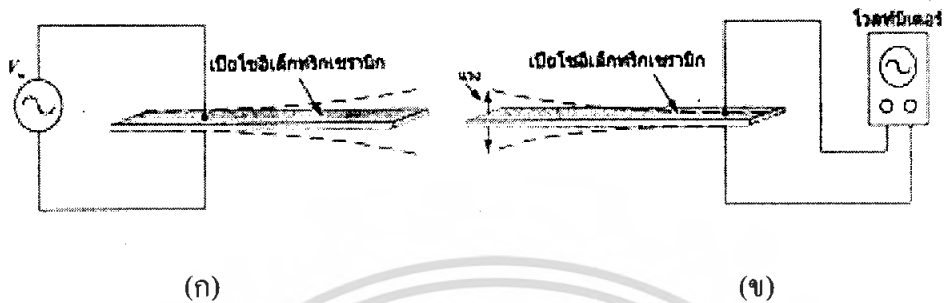
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ประโยชน์ที่เห็นได้ชัดเจนมากที่สุดของปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง คือ การให้กำเนิดความต่างศักย์สูงด้วยแรงเค้นอัด เช่น ตัวจุดประกายเกิดในอากาศ หรือในทางตรงข้ามปรากฏการณ์เพียวโซอิเล็กทริก โดยอ้อมนั้นสามารถผลิตการเคลื่อนที่ปริมาณน้อยๆ ด้วยการให้สนามไฟฟ้ากับชิ้นงานของเซรามิก การสั่นสะเทือนนั้นสามารถผลิตได้ด้วยการให้สนามไฟฟ้า กระแสสลับกับชิ้นเซรามิก และยังสามารถถูกตรวจวัดด้วยการขยายสัญญาณความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น จากอิทธิพลของการสั่นสะเทือนที่กระทบบนผิวของเซรามิก หรือแม้แต่การใช้แผ่นเซรามิกบางมา ทำชิ้นส่วนที่โค้งงอได้ง่ายซึ่งใช้ในเครื่องอ่านสัญญาณบนเครื่องเล่นแผ่นเสียง เหล่านี้ล้วนแต่เป็น ตัวอย่างง่าย ๆ ของการใช้ประโยชน์จากวัสดุเพียวโซอิเล็กทริกและอิเล็กโทรสตริกทีฟ ซึ่งจะต้องมีการเลือกรูปร่างและส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับแต่ละการประยุกต์ใช้งาน ในที่นี้จะขอยกตัวอย่าง เฉพาะบางกรณีที่มีความสำคัญในทางปฏิบัติและสามารถเข้าใจถึงแนวคิดสำคัญ เช่น หม้อแปลง เพียวโซอิเล็กทริก เป็นต้น

## 2.3 เพียวโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Piezoelectric Transformer)

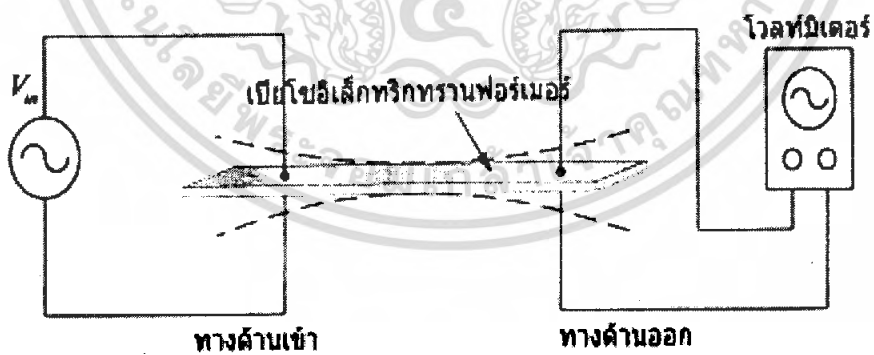
### 2.3.1 การทำงานของเพียวโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

เพียวโซทรานส์ฟอร์มเมอร์ คือการนำหลักการการทำงานของเพียวโซอิเล็กทริกเซรามิกมาประยุกต์ใช้งานเป็นทรานส์ฟอร์มเมอร์ โดยอาศัยการสั่นสะเทือนทางกลศาสตร์เป็นตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน แบ่งการทำงานออกเป็นสองส่วนด้วยกัน คือ ส่วนของเพียวโซอิเล็กทริกเซรามิกที่มีการสั่นสะเทือน เนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้า (เพียวโซอิเล็กทริกแอกชูเอเตอร์, Piezoelectric actuators) เรียกว่า ส่วนด้าน ทางเข้า ส่วนนี้เปรียบเสมือนการทำงานของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ (ก) และส่วนของเพียวโซอิเล็กทริกเซรามิก ที่เกิดแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากการสั่นสะเทือน (เพียวโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์, Piezoelectric transducers) เรียกว่า ส่วนทางด้านขาออกส่วนนี้เปรียบเสมือนกับการทำงานของเจเนอเรเตอร์ ดังแสดงดังรูปที่ (ข)



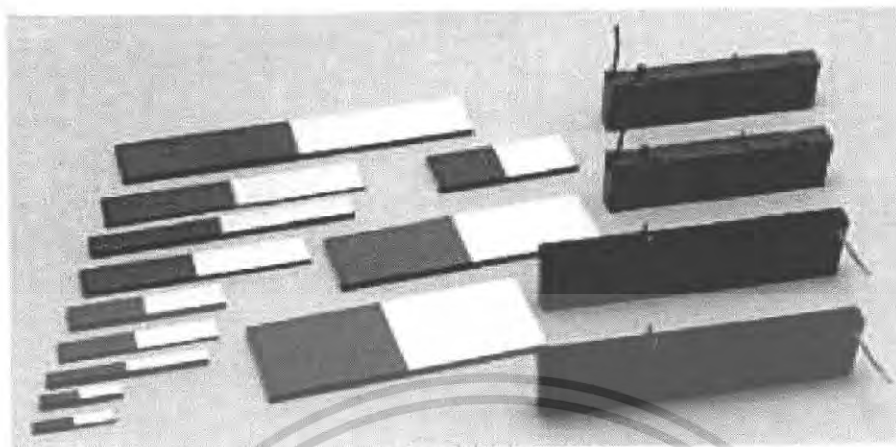
รูปที่ 2.4 (ก) การสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า (ข)แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการสั่นสะเทือน[3]

เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์จะใช้หลักการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมาประยุกต์ใช้งานเป็นทรานฟอร์เมอร์ที่มีการส่งถ่ายพลังงานโดยอาศัยการสั่นสะเทือนของเซรามิกเป็นตัวกลาง และเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่สูงที่ทางด้านเข้าจะทำให้ สารเซรามิกภายในเกิดการสั่นสะเทือนมีผลทำให้สารเซรามิกทางด้านขาออกเกิดแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงหลักการทำงานในรูปที่ 2.5 และแสดงเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ในอุตสาหกรรม ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ที่มีการประยุกต์มาจากการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

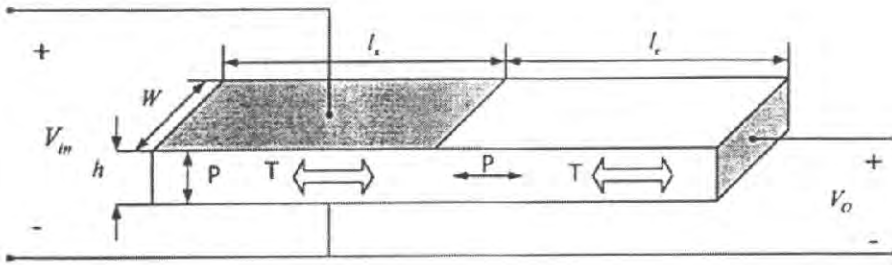
### 2.3.2 ชนิดของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คือการประยุกต์ใช้งานของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ที่มีการทำงานเป็นแบบสองแบบด้วยกัน คือทางด้านเข้าทำงานในโหมดของเพียโซอิเล็กทริกแอกชวลเอเตอร์ และทางด้านขาออกทำงานในโหมดของเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ โดยมีโครงสร้างแบบต่างๆตามลักษณะการนำไปใช้งาน แบ่งโครงสร้างหลักๆออกเป็น 3 แบบด้วยกัน

#### 2.3.2.1 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ ชนิด Rosen Type

มีการทำงานในลักษณะของ Transverse mode เพียโซอิเล็กทริกแอกชวลเอเตอร์ และ Longitudinal Mode เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าจะเกิดการสั่นสะเทือนของสารเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางของความหนา ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนของสารเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางของความยาวทางด้านออกจะเกิดการสั่นสะเทือนในทิศทางของความยาวด้วยจึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก การทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ชนิดนี้มีอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าต่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกที่สูงจึงเหมาะที่จะนำไปใช้งานที่มีแรงดันไฟฟ้าสูง เช่น เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับหลอด LCD(Liquid Crystal Display) ที่ใช้ในหน้าจอ Notebook ดังแสดงในรูปที่ 2.7

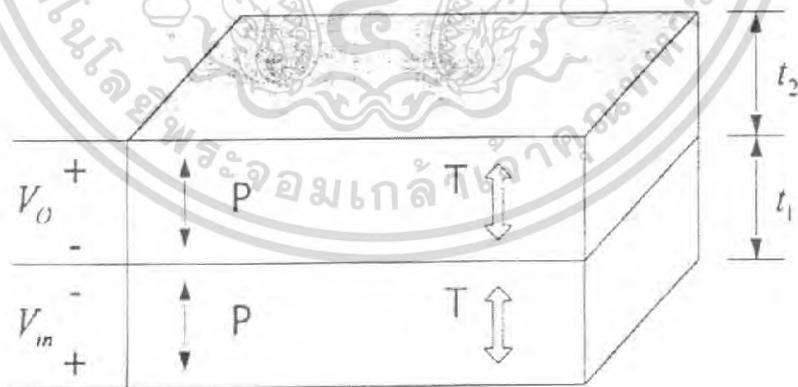
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ชนิด Rosen Type [4]

### 2.3.2.2 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ ชนิด Thickness Vibration Mode

มีการทำงานในลักษณะของ Longitudinal mode เพียโซอิเล็กทริกแอกชวลเอเตอร์ และ Longitudinal Mode เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าจะเกิดการสั่นสะเทือนของสารเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางของความหนา ส่งผลให้ทางด้านออกเกิดการสั่นสะเทือนของสารเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางของความหนาด้วย และเกิดแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ชนิดนี้มีแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกต่ำจึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในงานที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าต่ำ เช่น Adapter เป็นต้น

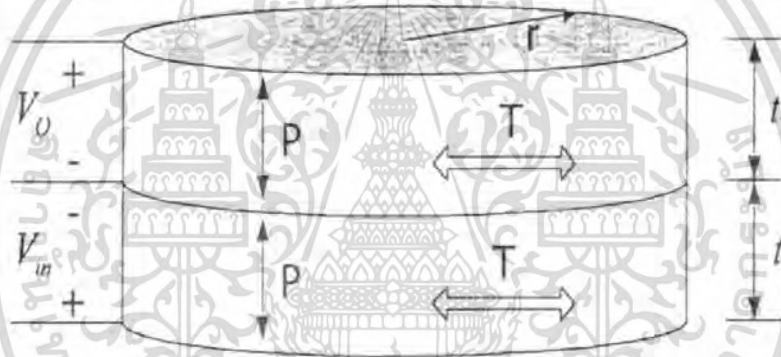


รูปที่ 2.8 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ชนิด Thickness Vibration Mode [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2.3 เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ชนิด Radial Vibration Mode

มีการทำงานในลักษณะของ Transverse mode เพียโซอิเล็กทริกแอคชูเอเตอร์ และ Transverse Mode เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าเกิดการสั่นสะเทือนของสารเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางของความหนาตรงจุดศูนย์กลางของวงกลมทำให้เกิดการสั่นสะเทือนไปในทิศทางของรัศมีทำให้ในส่วนของทางด้านออกเกิดการสั่นสะเทือนไปในทิศทางของรัศมีด้วยการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ชนิดนี้มีการนำไปทำเป็น ballasts และ adapters เป็นต้น



รูปที่ 2.9 เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ชนิด Radial Vibration Mode [4]

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งแบบแม่เหล็กไฟฟ้าและแบบเซรามิกส์

	ลักษณะเฉพาะ (characteristics)	ชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic transformers)	ชนิดเซรามิกส์ (piezoelectric transformers)
โครงสร้าง (structure)	วัสดุ (materials)	ลวดเหล็ก และแท่ง แม่เหล็ก	เพียโซอิเล็กทริก เซรามิกส์
	ขนาด - น้ำหนัก	ใหญ่ - หนัก	เล็ก - เบา
	การประกอบ (mounting)	ง่าย	เฉพาะในจุดที่ปราศจาก การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงาน (performance)	ค่าเปรียบเทียบความต่างศักย์ (voltage step – up ratio)	ปานกลาง - สูง	สูงมาก
	กระแสที่จ่าย (output current)	มาก	น้อย
	ความเป็นฉนวนไฟฟ้า ระหว่างส่วนป้อน และจ่าย พลังงาน	ดี	ดีมาก
	ประสิทธิภาพ (efficiency)	มากกว่า 80 %	มากกว่า 95 %
	ความถี่ของความต่างศักย์ที่ ให้	กว้าง	แคบ
	การรบกวนของคลื่นแม่เหล็ก (magnetic noise)	สูง	ไม่มี
	การติดไฟ (combustibility)	อาจติดไฟได้	ไม่ติดไฟ

## 2.4 ลักษณะเฉพาะทั่วไปและการประดิษฐ์สารพีแซดที

### 2.4.1 เลคเซอร์โคเนต-เลคไทเทเนต( $\text{PbZrO}_3$ - $\text{PbTiO}_3$ )

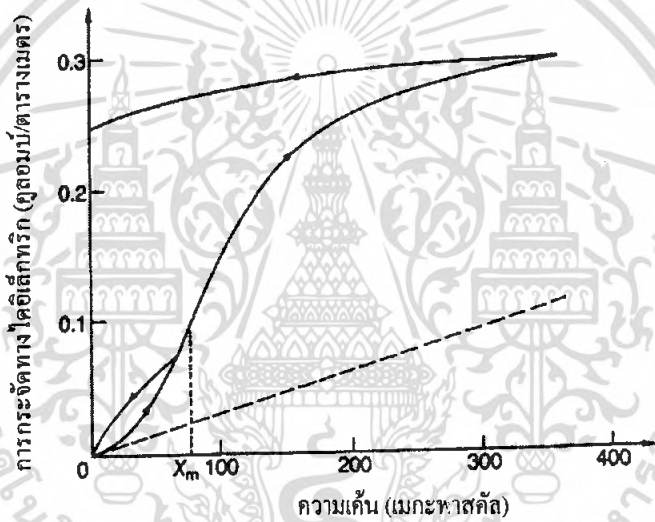
เลคเซอร์โคเนต( $\text{PbZrO}_3$ ) มีจุดคูรีอยู่ที่ 234 °ซ โดยมีโครงสร้างแบบออร์โทโรมบิกคล้ายคลึงกับแบเรียมไทเทเนตแบบออร์โทโรมบิก แต่มีสมบัติเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกอันเนื่องมาจากไดโพลซึ่งเกิดจากการจัดของไอออน  $\text{Zr}^{4+}$  เมื่อเทียบกับไอออน  $\text{O}^{2-}$  ที่อยู่รอบทั้ง 6 นั้นจะมีการจัดเรียงตัวในลักษณะที่เข้าไปในทิศทางตรงกันข้ามสลับกันไปทำให้การมีขั้วไฟฟ้าแบบเกิดขึ้นเอง มีค่ารวมเป็นศูนย์

เลคไทเทเนต( $\text{PbTiO}_3$ ) จะมีจุดคูรีที่สูงกว่าเลคเซอร์โคเนตโดยอยู่ที่ 495 °ซ และมีโครงสร้างแบบเทตระโกนอลคล้ายคลึงกับแบเรียมไทเทเนต แต่เนื่องจากแกน C ของเลคไทเทเนตนั้นมีความยาวถึง 6% มากกว่าแกน A ทำให้เซรามิกเลคไทเทเนตนั้นยากในการทำขั้วและมักจะแตกเป็นชิ้นๆภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงสูงๆ

ในทางปฏิบัติแล้วเลคเซอร์โคเนตและเลคไทเทเนตนั้นไม่มีประโยชน์มากนัก แต่การพัฒนาสารละลายของแข็งของวัสดุทั้งสอง กล่าวคือ  $\text{PbZrO}_3$ - $\text{PbTiO}_3$  หรือ  $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_6$  หรือที่รู้จักในชื่อ PZT นั้นก่อให้เกิดประโยชน์มากมายในการประยุกต์ใช้งานเป็นเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งการพัฒนาาระบบ PZT นั้นได้เกิดขึ้นในช่วงทศวรรษ 1950

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลคเซอร์โคเนตไทเทเนต(  $Pb(ZrTi)O_3$  หรือ PZT )นั้นมีโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์ และเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก แผนภูมิวิภาค ของระบบ PZT แสดงดังในรูปที่ 2.13 ซึ่งชี้ให้เห็นถึงลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งคือแนว MPB ซึ่งเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างอย่างทันทีทันใดที่ส่วนผสมใด ๆ ในช่วงของสารละลายของแข็งโดยไม่มี การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระบบ PZT นั้น MPB เกิดขึ้นใกล้เคียงกับที่ส่วนผสมของ  $PbZrO_3 : PbTiO_3$  เป็น 1:1 ซึ่งที่ MPB นี้จะมีสมบัติไดอิเล็กทริกและสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อสูงสุด ซึ่งจะได้มีการนำส่วนผสมนี้นำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง



รูปที่ 2.10 สนามขจัดไดอิเล็กทริกที่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันอัดแกนเคียวสำหรับสาร PZT ที่เจือด้วยตัวให้โดยที่(----) แสดงผลลัพธ์ที่คาดในกรณีที่มีค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกต่ำ[2]

รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุและความเค้นอัดสำหรับ PZT ที่เจือด้วยตัวให้ซึ่งชี้ให้เห็นว่าประจุที่เกิดขึ้นนั้นมีมากกว่าที่คาดไว้จากสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่มีความเค้นต่ำ โดยประจุส่วนที่เกินมาเชื่อว่ามาจากการสลับทิศทางของโดเมนแบบ  $90^\circ$  จะย้อนกลับได้ แต่เมื่อระดับความเค้นสูงขึ้น การเคลื่อนที่ดังกล่าวจะไม่สามารถย้อนกลับได้ทำให้ประจุส่วนเกินมีมากขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ลักษณะนี้ถูกนำไปใช้ในการจุดแก๊สโดยการเกิดประกาย

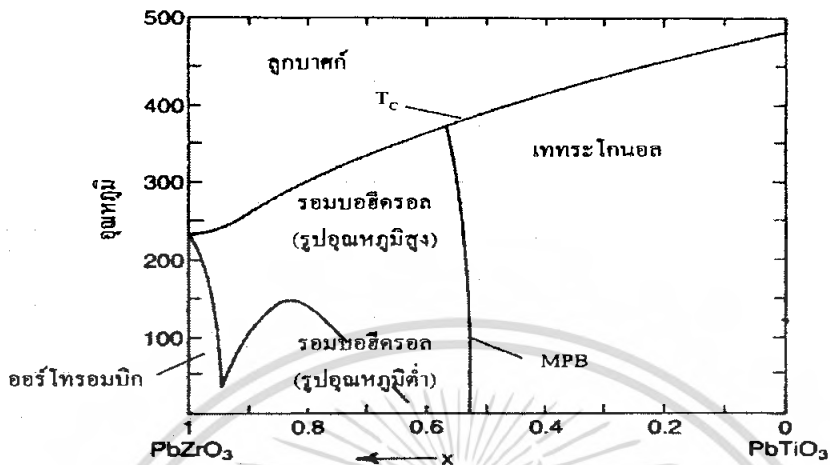
เนื่องจาก PZT ที่เจือด้วยตัวให้มีความยืดหยุ่นทางไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์  $d$  ที่สูงกว่า PZT ที่เจือด้วยตัวรับ ทำให้เหมาะสมที่จะใช้ในการแปลงการสั่นทางกลไปเป็นการสั่นทางไฟฟ้าและด้วยเหตุที่ PZT ที่เจือด้วยตัวให้มีความเปราะและการสูญเสียมากกว่า ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นตัว

เอกสรองคลื่นสา แต่อย่างไรก็ตามด้วยสัมประสิทธิ์การเชื่อมตามอายุที่ต่ำ PZT นำที่เจือด้วยตัวให้จะมีไม่วกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ในหลายกรณีเช่นกัน สาร PZT ที่เจือด้วยตัวรับสามารถทำให้มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความถี่สั่นพ้องที่มีค่าต่ำลงได้ด้วยการเติมธาตุแอลคาไลน์เอิร์ทเข้าไปแทนที่ตะกั่ว และปรับอัตราส่วนของเซอร์โคเนียมต่อไทเทเนียม นอกจากนี้การเติม Cr หรือ Li (<1%) ลงในตำแหน่ง B จะช่วยในการลดการเสื่อมอายุที่มีมากใน PZT ที่เจือด้วยตัวรับ ส่วนในบางกรณีที่ต้องการ PZT ที่มีการสูญเสียทางกลและทางไดอิเล็กทริกที่ต่ำ รวมทั้งสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่สูงนั้น สามารถทำได้โดยมีประสิทธิผลที่สุดด้วยการแทนที่ตำแหน่ง B ด้วยการผสมระหว่างตัวให้และตัวรับ เช่น Nb และ Mg ด้วยสัดส่วนอะตอม 2:1

สารเพียโซเซรามิกตัวแรกที่มีการพัฒนาขึ้นมาในเชิงพาณิชย์ก็คือสาร  $\text{BaTiO}_3$  ซึ่งถือว่าเป็นต้นแบบของบรรดาสารเฟอร์โรอิเล็กทริก ในช่วงหลังจากปี ค.ศ. 1950 ก็ได้มีการค้นพบว่าสารละลายของแข็งในระบบ  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$  หรือที่นิยมเรียกกันทั่วไปว่าพีแซดที(PZT) ซึ่งมีโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์(perovskite) เช่นเดียวกับสาร  $\text{BaTiO}_3$  นั่นก็เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเช่นเดียว และในปัจจุบันนี้สาร PZT ที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ กันไปก็ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกชนิดต่างๆ เป็นจำนวนมากที่สุดแล้ว

แผนภาพเฟสของพีแซดทีที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 โดยมีลักษณะเด่นที่สำคัญมากอยู่ที่แนวขอบเฟสมอร์โฟโทรปิก(morphotropic phase boundary) หรือที่เรียกว่า MPB ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ในช่วงของการเกิดสารละลายของแข็งที่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างองค์ประกอบทางเคมีเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน ณ อุณหภูมิคงที่ โดยในระบบของสารพีแซดทีนั้นแนว MPB จะเกิดขึ้นใกล้กับบริเวณองค์ประกอบที่มี  $\text{PbZrO}_3:\text{PbTiO}_3$  เป็น 1:1 ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีที่อยู่ใกล้กับแนวMPB จะมีค่าสัมประสิทธิ์การคู่ควบและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์พุ่งขึ้นสูงมากดังแสดงในรูป 2.12 และลักษณะเด่นเช่นนี้ก็ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์กันอย่างแพร่หลายมานานแล้ว



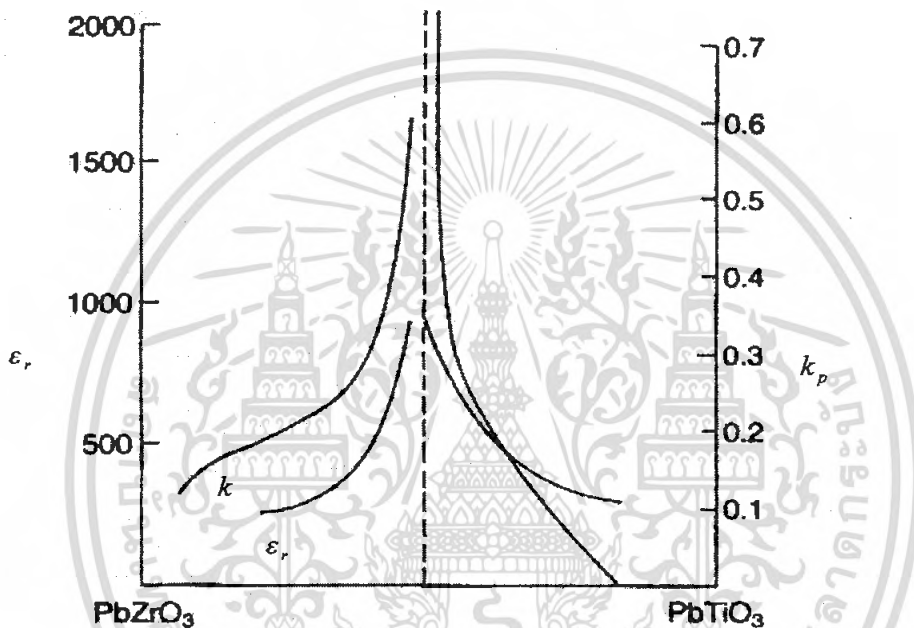
รูปที่ 2.11 เสถียรภาพของเฟสในระบบ  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  [2]

โครงสร้างของโดเมนนั้นจะมีอิทธิพลที่สำคัญหลายอย่างต่อพฤติกรรมทางไฟฟ้าของสารเพียโซเซรามิก ในขณะที่โครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ภายในเซรามิกนั้นเกิดการยื่นตัวลงมาจนผ่านจุดคูรีของสารจะทำให้มีการหดตัวของโครงสร้างแบบไอโซทรอปิก (isotropic contraction) เกิดขึ้นเนื่องจากว่าบรรดาผลึกที่เป็นส่วนประกอบของเซรามิกนั้น จะมีการจัดวางทิศทางการสลับอย่างใดก็ตามการการจัดวางทิศทางของแกนผลึกนั้นมีแนวโน้มที่ต้องการจะทำให้รูปร่างของแต่ละผลึกเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) อยู่แล้วเพียงแต่ว่าบรรดาโพรงที่ผลึกเหล่านี้ครอบครองอยู่นั้นเกิดการหดตัวแบบไอโซทรอปิกเข้ามาขัดขวางเอาไว้ และจึงทำให้มีระบบของโดเมนที่มีการจัดวางทิศทางแตกต่างกันอย่างสลับซับซ้อนเกิดขึ้นมา เพื่อลดพลังงานของความเครียดแบบยืดหยุ่นให้ต่ำที่สุดเป็นผลสืบเนื่องตามมา

การให้สนามไฟฟ้าที่มีความแข็งแรงเพียงพอเข้าไปจะสามารถทำการจัดวางทิศทางของโดเมนแบบ  $180^\circ$  และให้อยู่ในทิศทางที่ใกล้เคียงกับทิศทางของสนามไฟฟ้ามากที่สุดเท่าที่การวางทิศทางของแกนผลึกจะยอมให้ได้ นอกจากนี้สนามไฟฟ้าง่ายๆก็ยังมีอิทธิพลต่อการจัดวางทิศทางของโดเมนแบบ  $90^\circ$  ในวัสดุที่มีเฟสเป็นรอมบอยอีครอลอีกด้วย เพียงแต่ว่าการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้านั้น และจะถูกกำจัดเอาไว้โดยสภาพของความเครียดภายในผลึกและระหว่างผลึก การเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยรวมของเซรามิกที่เกิดขึ้นนั้น จะประกอบไปด้วยการขยายตัวออกไปทิศทางของสนามไฟฟ้า และการหดตัวเข้ามาในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของสนามไฟฟ้า เมื่อเอา

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สนามไฟฟ้าที่ให้ออกไป ความเครียดภายในบางบริเวณจะทำให้เกิดการจัดวางทิศทางเชิงขั้วขึ้นมา เพื่อพยายามทำให้ระบบมีการกลับคืนไปสู่สภาพของการจัดวางทิศทางแบบเดิม ให้ได้แต่ว่าการจัดวางทิศทางใหม่นั้นส่วนใหญ่จะเป็นแบบถาวร



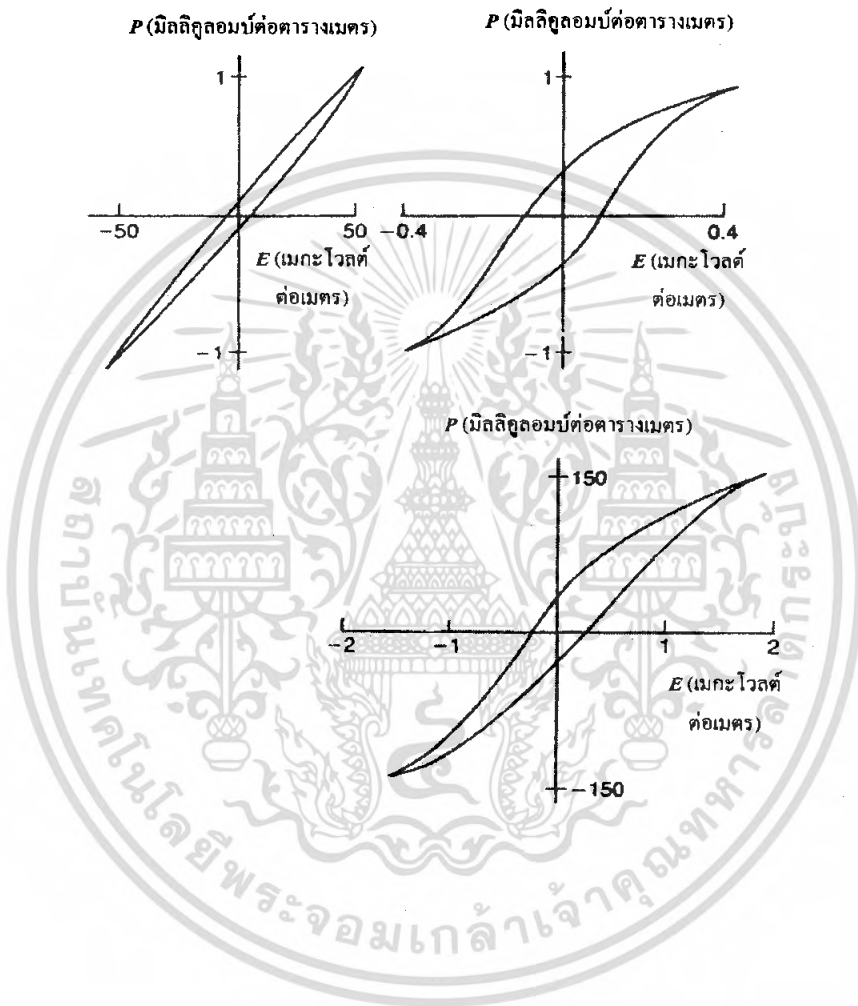
รูปที่ 2.12 ค่าสัมประสิทธิ์การคู่ควบและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ในช่วงต่างๆขององค์ประกอบทางเคมีในระบบพีเซดิก[2]

การให้ความเค้นจากภายนอกเข้าไปจะมีผลต่อความเครียดภายในตัวเซรามิกและ โครงสร้างของโดเมนก็จะมีการตอบสนองต่อความเครียดดังกล่าวด้วย กระบวนการเช่นนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์เฟอร์โรอีลาสติก(ferroelastic effect) การกดอัดวัสดุจะทำให้มีการวางทิศทางเชิงขั้วในแนวตั้งฉากกับความเค้น ในขณะที่การดึงวัสดุจะทำให้มีการวางทิศทางเชิงขั้วที่ขนานไปกับแนวของแรงดึง ดังนั้นสภาพมีขั้วที่เกิดขึ้นมาจากสนามไฟฟ้าที่ผ่านการเปลี่ยนแปลงของโดเมนแบบ  $90^\circ$  จึงสามารถทำให้กลับคืนไปสู่สภาพเดิมได้ด้วยการให้ความเค้นอัดเข้าไปในทิศทางของสนามไฟฟ้าแทน ซึ่งความเค้นจะไม่มีผลต่อการเกิดโดเมนแบบ  $180^\circ$  ยกเว้นเสียแต่ว่าพฤติกรรมของโดเมนเหล่านี้อาจจะเกิดการเชื่อมต่อกันกับการเปลี่ยนแปลงของโดเมนแบบอื่นๆ ได้ การทำให้เซรามิกแบบแอนไอโซทรอปิกมีแกนเชิงขั้วเกิดขึ้นนั้น สามารถทำได้โดยการสนามไฟฟ้าสถิต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง 82208

ขนาด 1-4 เมกะโวลต์ต่อเมตร เป็นเวลานานหลายนาที่ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  ขึ้นไปเพื่อทำให้เกิดการจัดวางทิศทางของโดเมน โดยการเคลื่อนที่ของโดเมนที่อุณหภูมิสูงจะเกิดได้รวดเร็วมากกว่าแต่การปรับแนวสูงสุด(maximum alignment)ของโดเมนแบบ  $90^{\circ}$  นั้นก็ต้องการเวลานานพอสมควรเพื่อสร้างเสถียรภาพให้คงอยู่ได้ กระแสรั่วจะเป็นตัวจำกัดค่าอุณหภูมิและสามารถจะทำให้อุณหภูมิกายในตัววัสดุเพิ่มขึ้นจนเกิดการทลายจากความร้อนได้ ดังนั้นค่าความคงทนการทลายจึงเป็นตัวแปรที่จำกัดค่าของสนามไฟฟ้า ถ้าความต่างศักย์ที่ให้เข้าไปนั้นมีขนาดเกินกว่า 1 กิโลโวลต์ขึ้นไปก็จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบเพื่อให้แน่ใจว่าพื้นผิวที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นมีความสะอาดมากพอ และจะต้องจุ่มตัววัสดุที่ต้องทำให้มีขั้วนั้นลงไปในน้ำมันที่เป็นฉนวนด้วยเพราะการทลายที่พื้นผิวระหว่างขั้วไฟฟ้าที่อยู่บนผิวของวัสดุที่มีสภาพะยอมสูงนั้นจะเกิดขึ้นได้ง่ายมากเมื่อวางวัสดุไว้ในอากาศ

การทำลายความมีขั้วนั้นสามารถทำได้โดยการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามที่ใช้ในการทำให้มีขั้ว หรือในบางกรณีก็ใช้วิธีการให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับค่าสูงเข้าไปแล้วค่อยๆ ลดลงให้กลายเป็นศูนย์ แต่ก็มีอันตรายในเรื่องของความร้อนสูงเนื่องจากที่สนามค่าสูงนั้นจะมีการสูญเสียเป็นความร้อนของไดอิเล็กทริกที่สูง เป็นผลสืบเนื่องตามมาด้วย สารเซรามิกในบางองค์ประกอบนั้นสามารถจะทำให้หมดความมีขั้วลงได้โดยการให้ความร้อนอัดเข้าไป การทำลายความมีขั้วอย่างสมบูรณ์นั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงจนเกินจุดคูรีของวัสดุแล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวลงมาโดยปราศจากสนามไฟฟ้าออก

สนามไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้ผนังของโดเมนนั้นเกิดการแกว่งไปมา ที่สนามไฟฟ้าค่าต่ำการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนแบบ  $90^{\circ}$  แบบ  $71^{\circ}$  หรือแบบ  $109^{\circ}$  จะทำให้เกิดวงรอบของความเค้นความเครียดที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของพลังงานไฟฟ้าในบางส่วน ไปเป็นความร้อน ดังนั้นจึงถือว่ามีส่วนร่วมต่อการทำให้เกิดการสูญเสียของสารไดอิเล็กทริก เมื่อสนามไฟฟ้าตรงส่วนปลายยอดของวงรอบนั้นสูงเพียงพอ ที่จะทำให้มีการเกิดขั้วขึ้นเองกลับไปสู่สภาพเดิมได้ก็จะทำให้วัสดุมีการสูญเสียพลังงานที่สูงมากขึ้น ดังแสดงได้ด้วยลักษณะของการขยายตัวออกอย่างมากมาของวงจรัสทีเออร์ซิส ดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 วงรอบ P-E กับการเพิ่มขึ้นของความแรงสนามไฟฟ้า ตรงส่วนปลายยอดที่ 50 Hz สำหรับเซรามิกที่เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริก [2]

การเสื่อมตามอายุ (ageing) นั้นมีอิทธิพลต่อสมบัติหลาย ๆ อย่างของเซรามิกที่เป็นสารเพียโซอิเล็กทริกทุก ๆ สิบปี ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของเซรามิกส่วนใหญ่จะลดลงเพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้ว่าค่าคงตัวของความถี่จะเพิ่มขึ้นก็ตามหลังจากที่มีการเสื่อมตามอายุเกิดขึ้น ค่าตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนของวัสดุจะลดลงและจะทำให้เพิ่มขึ้นได้อีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับขนาดประมาณ 0.2 – 0.4 เมกะโวลต์ต่อเมตรเข้าไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเร่งให้เซรามิกมีการเสื่อมตามอายุเร็วยิ่งขึ้นและทำให้สมบัติต่างๆ มีเสถียรภาพนั้นสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนเข้าไปจนถึงที่อุณหภูมิประมาณ  $80^{\circ}\text{C}$  ในกรณีของสาร  $\text{BaTiO}_3$  หรือสูงกว่านี้ถ้าเป็นกรณีของสารพีแซคที

การเสื่อมตามอายุของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย เมื่อความเข้มข้นของตำแหน่งช่องว่างออกซิเจนนั้นเพิ่มขึ้น และโดยการเจือหรือไม่ก็โดยการให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศแบบรีดิวซ์ปานกลาง และการเสื่อมตามอายุจะค่อยๆ ลดลงทีละน้อยเมื่อความเข้มข้นเหล่านี้ลดน้อยลง ซึ่งได้มีการเสนอกันว่ามีข้อบกพร่องที่มึประจุติดลบและ  $V_o$  ประจุบวก โดยข้อบกพร่องเหล่านี้จะมีการปรับแนวให้อยู่ในทิศทางเชิงขั้วโดยการเคลื่อนที่ของ  $V_o$  ซึ่งเป็นผลของการรวมกันระหว่างกิริยาของสนามเฉพาะที่ซึ่งเกี่ยวพันกันกับ  $P_s$  และโฟนอนต่อมาบรรดาข้อบกพร่องเหล่านี้จะทำหน้าที่ในการจ่ายสนามภายในเข้าไป ทำให้การจัดเรียงของโดเมนนั้นมีเสถียรภาพมากขึ้น

ส่วนอีกกลไกหนึ่งที่น่าจะเป็นไปได้ก็น่ามาจากอิทธิพลของความเค้นเฉพาะที่มีสาเหตุมาจากความเป็นไอโซทรอปิกของแกนที่เพิ่มขึ้นภายในเกรนขณะที่กำลังเย็นตัวลงมาต่ำกว่า  $T_c$  การจัดเรียงของโดเมนแบบพลังงานต่ำอาจจะเกิดขึ้นมา โดยอิทธิพลของโฟนอนที่อุณหภูมิห้อง และอาจจะมึอิทธิพลของความเข้มข้นของ  $V_o$  ที่สูงขึ้นมาช่วยเสริมด้วยนอกจากนี้ก็ยังมีการนำเสนอกลไกแบบอื่นๆ ที่ว่าบรรดาความบกพร่อง อย่างเช่น  $V_o$  นั้นอาจจะมีการแพร่เข้าไปภายในผนังของ โดเมนและทำให้เกิดเสถียรภาพมากขึ้นตามมา สำหรับเนื้อหาที่จะนำเสนอในหัวข้อต่อไปนั้นจะกล่าวถึงการประดิษฐ์สารพีแซคที

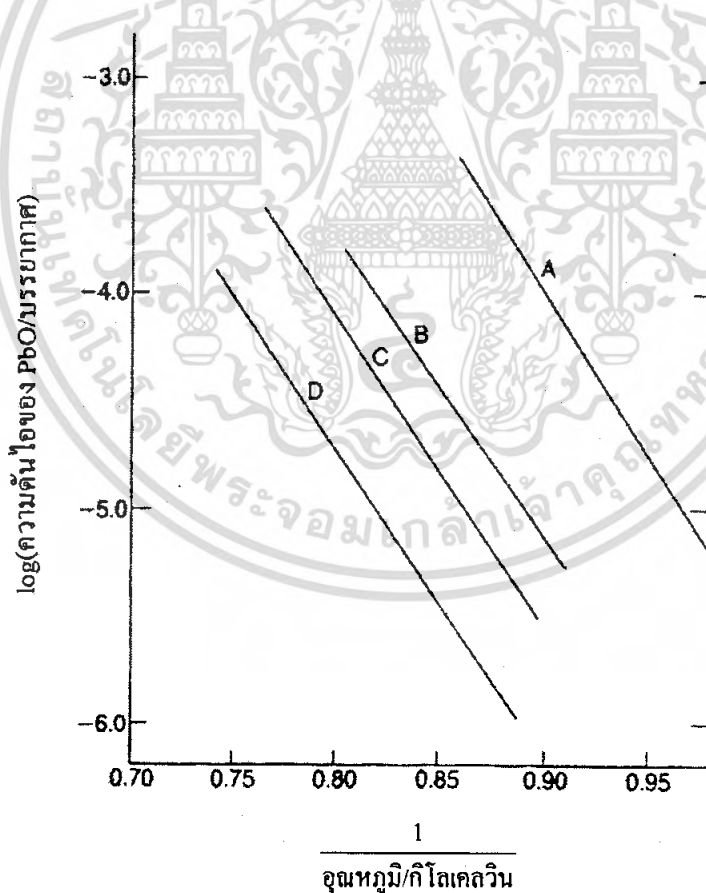
#### 2.4.2 การประดิษฐ์สารพีแซคที

การประดิษฐ์เซรามิกที่เป็นสารเพียโซอิเล็กทริกนั้นสามารถใช้เทคโนโลยีผงแบบปรกติได้ซึ่งการจะทำให้ได้ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ต่างๆ นั้น องค์ประกอบทางเคมีของสารจะต้องมีความใกล้เคียงกับปริมาณสัมพัทธ์ ปริมาณของรีเอเจนต์ช่วยหลอม(fluxing reagents) และสารเจือปนจะต้องมีค่าต่ำสุดและความหนาแน่นของเซรามิกจะต้องมีค่าสูงเท่าที่จะเป็นไปได้ และจะต้องพยายามทำให้มีการปนเปื้อนในระหว่างที่มีการบดย่อยด้วยลูกบอลแบบเปียกน้อยที่สุด โดยการใส่ลูกบอลที่มีเซอร์โคเนียเป็นองค์ประกอบหลัก

องค์ประกอบทางเคมีของสารส่วนใหญ่ที่นิยมใช้ในปัจจุบันจะมีสารตะกั่ว ( $\text{PbO}$ ) เป็นส่วนประกอบหลัก แม้ว่าจะมีการระเหยเกิดขึ้นเหนืออุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$  รูปที่ 2.14 แต่ก็ต้องพยายามทำการรักษาปริมาณ  $\text{PbO}$  เอาไว้ให้ได้ในระหว่างที่มีการซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิที่อาจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสูงจนถึง  $1300^{\circ}\text{C}$  โดยปรกติแล้วการแคลไซน์จะกระทำในถ้วยอะลูมินาที่มีฝาปิด สำหรับการซินเตอร์ในขั้นตอนสุดท้ายนั้นจะนิยมใช้ผงที่มีปริมาณของตะกั่วอยู่สูง อย่างเช่น ผง  $\text{PbZrO}_3$ , โรยรอบ ๆ ชิ้นงานที่วางอยู่ภายในถ้วยอะลูมินาแบบมีฝาปิด เนื่องจากการเข้าถึงบรรยากาศนั้นถูกจำกัดจึงทำให้  $\text{PbO}$  สามารถที่จะถูกรีดิวซ์(reduced) ให้กลายเป็นตะกั่ว(โลหะ)ได้ง่ายมาก ซึ่งจะต้องมีการกำจัดส่วนประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ทั้งหมดออกไปก่อนที่จะทำการซินเตอร์ โดยการทำการเผาเบื้องต้นที่อุณหภูมิประมาณ  $600^{\circ}\text{C}$  ในอากาศ การเผาในขั้นตอนสุดท้ายโดยปรกติจะกระทำในเตาไฟฟ้าที่มีการใส่ชิ้นงานเข้าไปเพื่อทำการเผาเป็นชุดๆ แม้ว่าจะกระทำด้วยความระมัดระวัง โดยปรกติแล้วก็จะมีการสูญเสียของ  $\text{PbO}$  ออกไปประมาณร้อยละ 2-3 ของปริมาณ  $\text{PbO}$  ในตอนเริ่มต้นซึ่งก็สามารถจะทำการชดเชยกันได้โดยใช้วิธีการเพิ่มปริมาณของสารตั้งต้นดังกล่าวให้มากขึ้น



รูปที่ 2.14 อิทธิพลของการเดินแลนทานัมที่มีต่อสภาพด้านทานไฟฟ้าของสารเซรามิก [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากวิธีการเผาในถ้วยปิดสนิทแล้วก็ยังมีวิธีการเผาแบบรวดเร็วที่มีการวางชิ้นงานไว้บนสายพานซึ่งกำลังเคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงมากๆ ภายในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ในเตาเผาชนิดพิเศษ และซึ่งกระบวนการนี้สามารถจะนำไปใช้กับการประดิษฐ์เซรามิกที่เป็นแผ่นบางได้ดีมาก

ความยุ่งยากที่เกิดขึ้นกับพวกสารองค์ประกอบที่มีปริมาณของ  $ZrO_2$  สูงๆ นั้นเกิดจากความเฉื่อยในการทำปฏิกิริยาของวัสดุบางเกรด ผง  $TiO_2$  ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นผงสีนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับ  $PbO$  ได้อย่างรวดเร็วและสารไทเทเนตที่ได้ก็จะค่อยๆ ทำปฏิกิริยากับไอออน  $Zr^{4+}$  อย่างช้าๆ แต่ก็มีสารตั้งต้นของ  $ZrO_2$  คุณภาพดีที่ยังไม่ได้ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงมาก่อนซึ่งจะสามารถทำปฏิกิริยา  $PbO$  ได้เร็วกว่า ดังนั้นสารผสมของ  $Pb(Zr,Ti)O_3$  จึงเกิดขึ้นในช่วงระยะต้นๆ นอกจากนี้ก็ยังมีปัญหาที่สามารถจะเกิดขึ้นจากการบดย่อยด้วยการใช้เวลานานในขั้นตอนการผสมสารได้ตลอดจนถึงการเผาแคลไซน์ครั้งที่สองหลังจากที่ทำการบดย่อยสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาในตอนเริ่มต้น

ส่วนประกอบทางเคมีทุก ๆ ตัวของสาร PZT นั้นสามารถจะทำการเตรียมได้โดยใช้วิธีการตกตะกอนจากสารละลายของไนเตรดแล้วได้เป็น ผงที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมีและมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง ผงดังกล่าวนี้ยังสามารถที่จะเตรียมได้จากการเผาแคลไซน์สารพวกซิงเตรด ซึ่งมีไอออนอยู่ที่ตำแหน่ง A และที่ตำแหน่ง B ในอัตราส่วน 1:1 ซึ่งการนำผงเหล่านี้มาใช้จะทำให้สามารถทำการเผาซินเตอร์วัสดุได้ด้วยการใช้อุณหภูมิที่ต่ำลง นอกจากจะเป็นการประหยัดพลังงานแล้วก็ยังเป็นการช่วยลดโอกาสของการสูญเสีย  $PbO$  จากการระเหยออกไปได้อีกด้วยแต่อย่างไรก็ตาม เซรามิกที่เตรียมได้จากวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่า โดยเริ่มจากสารผสมของพวกออกไซด์หรือคาร์บอเนตต่างๆ นั้นก็ล้วนแล้วแต่มีคุณภาพที่เพียงพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลักทางด้านเพียโซอิเล็กทริกอยู่แล้ว

การอัดด้วยแม่พิมพ์สามารถนำมาใช้สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างง่ายๆ ได้ดี แต่ถ้าจะให้มีการขึ้นรูปเป็นแท่งยาวที่มีขนาดหน้าตัดสม่ำเสมอก็ควรจะใช้วิธีการอัดรีด แทนและถ้าต้องการให้เป็นแผ่นที่แบนเรียบและบางนั้นก็ยังสามารถจะใช้วิธีการหล่อแถบหรือการรีดเทปได้ ส่วนในกรณีของชิ้นงานที่เป็นรูปวงแหวนขนาดใหญ่ และพวกที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนมากขึ้นนั้นจะนิยมใช้วิธีการหล่อสลีปในการขึ้นรูป

เซรามิกที่ผ่านการซินเตอร์โดยปรกติแล้วจะมีความหนาแน่นที่สูงกว่าร้อยละ 95 ของค่าทางทฤษฎีและมีขนาดของผลึกอยู่ในช่วงประมาณ 5 – 30 ไมโครเมตร การมี  $PbO$  เกินมาหรือว่าขาดพร่องไปส่วนแต่มีผลในเชิงลบต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกทั้งสิ้นและ ดังนั้นการควบคุมกระบวนการผลิตอย่างระมัดระวังเป็นพิเศษในทุกขั้นตอนจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นเสมอ หลังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

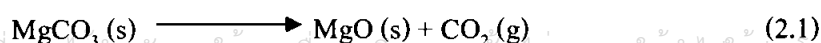
จากที่มีการตัดแต่งหรือกระบวนการสุดท้ายเท่าที่จำเป็นเพื่อให้ได้เซรามิกที่มีรูปร่างตรงตามที่ต้องการแล้วจึงนำเซรามิกดังกล่าวไปทำการติดขั้วไฟฟ้าต่อไป ซึ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานทางไฟฟ้าส่วนใหญ่จะนิยมใช้สีที่มีสูตรเหมาะสมและมีอนุภาคของเงินปนอยู่ทาลงไปบนผิวที่ต้องการจะทำให้เป็นขั้วไฟฟ้าแล้วจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600-800 °ซ ส่วนในกรณีของวัสดุที่เป็นแผ่นบางๆ นั้นก็อาจจะเลือกใช้วิธีการระเหยเป็นไอ หรือวิธีการฉาบด้วยโลหะพวก Ni-Cr หรือทอง เป็นต้น

สำหรับวิธีการทำให้มีเซรามิกมีขั้ว(poling)นั้นจะเริ่มจากการจุ่มชิ้นเซรามิกลงไปในส่วนที่เป็นฉนวนแล้วให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 100-150 °ซ เข้าไปจากนั้นจึงใส่สนามไฟฟ้าขนาด 1-4 เมกะโวลต์ต่อเมตรเข้าไป ในกรณีของสาร BaTiO<sub>3</sub> นั้นจะต้องพยายามรักษาสนามไฟฟ้าที่ให้เอาไว้ตลอดเวลาในขณะที่เซรามิกมีการเย็นตัวลงมาจนต่ำกว่าจุดคูรีประมาณ 50 °ซ สำหรับในกรณีของสาร PZT นั้นจะต้องเลือกใช้อุณหภูมิและความต่างศักย์ให้เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกสูงสุด โดยไม่มีกระแสรั่วเกิดขึ้นจนถึงระดับที่สามารถจะทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมากและนำไปสู่การทลายทางไฟฟ้าของเซรามิกในที่สุดการใช้สนามไฟฟ้าค่าสูงนั้นจะสามารถกระทำได้ไม่ยากถ้าทำการจ่ายในรูปแบบของพัลส์สั้นๆ

การทำให้เซรามิกมีขั้วด้วยวิธีการคอโรนา(corona poling)หรือการปล่อยประจุไฟฟ้าแบบคอโรนาก็สามารถนำมาใช้ได้เช่นกัน ซึ่งในกรณีเช่นนี้จะอาศัยหลักการให้ความต่างศักย์ขนาด 10<sup>4</sup> โวลต์เข้าไป ด้วยการใส่เข็มเดี่ยวหรือแบบเป็นชุดที่มีปลายเข็มอยู่ห่างจากพื้นผิวของเซรามิกเพียงไม่กี่มิลลิเมตรเท่านั้น และต่อสายดินเข้ากับชิ้นเซรามิกด้านตรงข้าม ลักษณะเช่นนี้จะทำให้มีสนามไฟฟ้าค่าสูงเกิดขึ้นในเซรามิกได้ ข้อดีของการทำให้มีขั้วด้วยวิธีการคอโรนาก็คือ การช่วยลดความเสี่ยงของการทลายทางไฟฟ้าลงที่ละน้อย เนื่องจากว่าประจุของการเกิดขั้วนั้นไม่สามารถที่จะมีการวิ่งผ่านตามช่องไปยังจุดอ่อนของตัววัสดุได้อย่างรวดเร็วเหมือนกับที่เกิดขึ้นในกรณีของการใช้ขั้วไฟฟ้าโลหะเป็นพาหะนำประจุ

## 2.5 การเตรียมผงจากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

วิธีการนี้จะอาศัยการเกิดปฏิกิริยาที่มีการสลายตัวของตัวทำปฏิกิริยาที่มีสถานะเป็นของแข็งด้วยความร้อนแล้วได้เป็นของแข็งชนิดใหม่กับแก๊ส เช่น การเตรียมผงแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โดยอาศัยการสลายตัวด้วยความร้อนของแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO<sub>3</sub>) พร้อมกับมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เกิดขึ้นตามสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการเตรียมผงจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของแข็งที่ผสมกันอยู่นั้น ป็นอีกวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในการเตรียมผงเซรามิกของพวกสารประกอบของออกไซด์เชิงซ้อน ซึ่งโดยปกติจะใช้ตัวทำปฏิกิริยาที่เป็นสารพวกคาร์บอเนต ในเตรท ซัลเฟต ออกซาเลต หรือแอซิเตท ดังตัวอย่างของการเตรียมแบเรียมไทเทเนตจากปฏิกิริยาระหว่างแบเรียมคาร์บอเนต ( $\text{BaCO}_3$ ) กับไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ตามสมการ



การให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของแข็ง เพื่อให้เกิดการสลายตัว หรือเกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารตั้งต้นต่างชนิดกันแล้วเกิดเป็นของแข็งชนิดใหม่ขึ้นมานั้น ทางด้านเซรามิกจะเรียกกระบวนการดังกล่าวว่า การแคลไซน์ (calcination)

พิจารณาการเตรียมผงแมกนีเซียมออกไซด์ จากการสลายตัวของแมกนีเซียมคาร์บอเนตด้วยความร้อนตามสมการที่ 2.1 เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (endothermic) อย่างรุนแรง ซึ่งเป็นลักษณะปกติของปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนทั่ว ๆ ไป จึงต้องอาศัยการให้พลังงานความร้อนแก่ตัวทำปฏิกิริยาที่เพียงพอต่อการทำให้เกิดการสลายตัว นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงเรื่องของสมดุลความดันเนื่องจากในระบบจะมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น

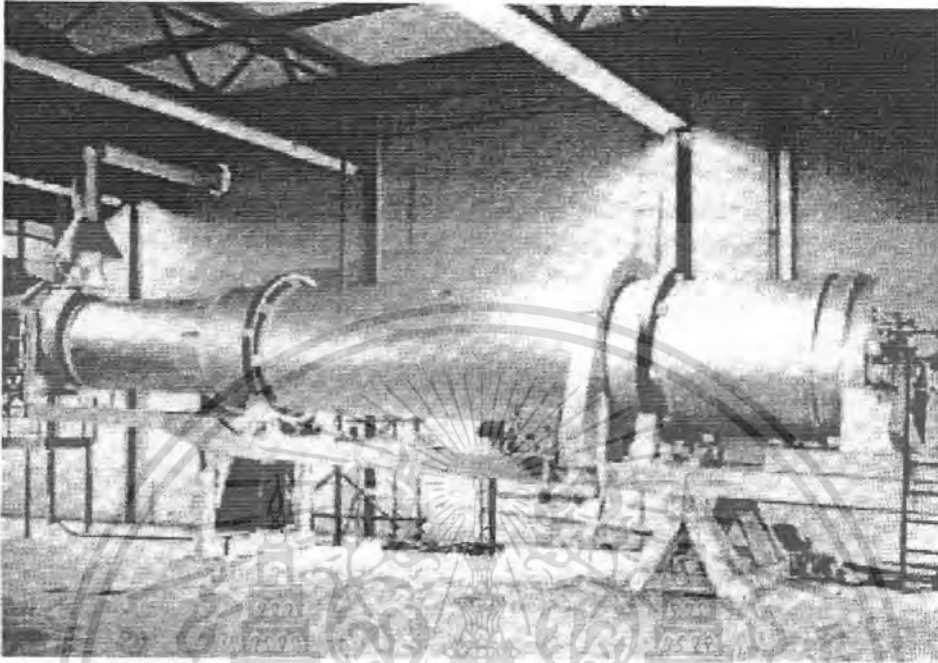
ทำให้ต้องคำนึงถึงค่าความดันส่วนย่อยที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อการสลายตัวของแมกนีเซียมคาร์บอเนตในทุกค่าของอุณหภูมิ

การเตรียมผงจากปฏิกิริยาสถานะของแข็งมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างน้อย แต่ผงที่เตรียมได้มักจะมีปัญหาเรื่องการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนโต ทำให้ต้องมีการบดย่อยลดขนาดอยู่เสมอ เนื่องจากการบดย่อยมีการใช้ลูกบด จึงมีโอกาสนำให้ผงที่เตรียมได้มีสารแปลกปลอมปะปนมาด้วยและเมื่อนำไปใช้อาจจะทำให้เกิดเฟสที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ได้ และนอกจากนี้การบดย่อยลดขนาดยังทำให้ไม่สามารถควบคุมรูปร่างของอนุภาคที่เตรียมได้อีกต่อไป

## 2.6 การแคลไซน์(Calcination)

การแคลไซน์เป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้ส่วนประกอบต่างๆเกิดมีอันตรกิริยาต่อกัน โดยอาศัยกลไกการแพร่ระหว่างกันของพวกไอออน จึงเป็นวิธีการช่วยลดขอบเขตของการแพร่ที่จะต้องทำให้เกิดขึ้นในช่วงของขั้นตอนการซินเตอร์ลง เพื่อให้ได้วัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน จึงอาจจะพิจารณาการแคลไซน์ว่าเป็นเพียงส่วนหนึ่งของขั้นตอนในการผสมสารก็ยังคงซึ่งเงื่อนไขในการเผาแคลไซน์นั้น เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการควบคุมพฤติกรรมการหดตัวของวัสดุในช่วงของการซินเตอร์ เฟสสุดท้ายที่เราต้องการนั้นอาจจะยังไม่เกิดขึ้นมาอย่างสมบูรณ์ในตอนี้ แต่เกรเดียนต์ทางเคมีที่ยังหลงเหลืออยู่ภายในสารก็จะจะไปช่วยเสริมกระบวนการซินเตอร์ได้ภายหลัง สิ่งที่สำคัญก็คือว่า การแคลไซน์นั้นควรจะให้ผลผลิตที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นไปตามที่ต้องการให้มากที่สุด การแคลไซน์นั้นสามารถทำได้โดยการใส่อนุภาคผงที่ผ่านกระบวนการผสมสารมาแล้วลงไปในตัวหรือเบ้า(crucible)สำหรับเผาสารที่เป็นซุคๆ หรือในการเผาแบบต่อเนื่อง ซึ่งด้วยเผาสารที่นำมาใช้ก็ควรจะปิดฝาปิดด้วย เพราะถ้าหากว่าสารที่จะเผานั้นมีส่วนประกอบทางเคมีที่สามารถเกิดการระเหยได้ง่าย อย่างเช่น ในกรณีที่มีตะกั่วออกไซด์รวมอยู่ด้วย พื้นผิวของถ้วยเผาสารที่มีการสัมผัสกับอนุภาคผงโดยตรงจะต้องไม่เกิดการทำปฏิกิริยาเคมีกันเพื่อป้องกันปัญหาเรื่องการปนเปื้อน และเพื่อจะได้นำถ้วยเผาสารกลับมาใช้ใหม่ได้อีก เนื่องจากว่าอนุภาคผงเป็นวัสดุที่มีสภาพนำความร้อนต่ำ ดังนั้น อุณหภูมิที่มีความสม่ำเสมอเพียงพอจึงมักจะอยู่แถวๆบริเวณที่ลึกลงไปจากผิวหน้าของอนุภาคผงเพียงไม่กี่เซนติเมตรเท่านั้น ถ้าหากว่ามีการใช้อุณหภูมิที่สูงที่สุดเป็นเวลานานเพียง 1 ชั่วโมงหรือ 2 ชั่วโมง

นอกจากนี้กระบวนการแคลไซน์ยังสามารถกระทำได้อย่างต่อเนื่อง ด้วยการใส่เตาเผาแบบหมุน(rotary kiln) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งประกอบด้วยท่อปลายปิดที่มีการหมุนตัวอย่างช้าๆ ไปรอบๆแกนหมุนที่มีการวางตัวอยู่ในแนวนอน เริ่มจากการใส่ผงลงมาจากทางด้านบนของท่อจนมาโผล่ที่ด้านล่างในสถานะต่างๆ ตามที่ต้องการ โดยปรกติแล้วเตาเผาแบบนี้จะใช้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของน้ำมันหรือแก๊สเป็นหลัก



รูปที่ 2.15 เตาเผาแบบหมุน[5]

เนื่องจากว่าผงที่ผ่านการแคลไซน์แล้วมักจะมีการยึดเกาะกันของอนุภาคอยู่ในรูปของก้อนหยาบ จึงต้องนำมาทำการบดย่อยให้เป็นผงละเอียด หรือทำเป็นน้ำสลิปที่มีความเหมาะสมสำหรับ ขั้นตอนการขึ้นรูปต่อไปอีกทีหนึ่ง โดยจะต้องมีความระมัดระวังในเรื่องของปัญหาการปนเปื้อน ด้วยโดยปรกติ การลดขนาดของอนุภาคในช่วงเริ่มต้นเพื่อเตรียมอนุภาคผงให้มีขนาดที่เหมาะสม สำหรับกระบวนการบดย่อยในขั้นตอนต่อไปนั้น สามารถจะทำให้ด้วยการใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่หลากหลายชนิด อาทิเช่น เครื่องบดหยาบแบบพินฉลามสามารถจะทำให้ก้อนวัสดุที่มีขนาดในระดับ เซนติเมตรลดลงมาอยู่ในระดับมิลลิเมตรได้ ในขณะที่การบดย่อยด้วยก้อนซึ่งประกอบด้วยการ หมุนของแกนที่มีหนามเหล็กยื่นออกไปรอบทิศทางดีไปยังวัสดุที่ใส่เข้ามา สามารถจะทำให้ได้ อนุภาคผงที่มีขนาดเล็กกว่าที่ได้จากวิธีการใช้เครื่องบดหยาบแบบพินฉลาม

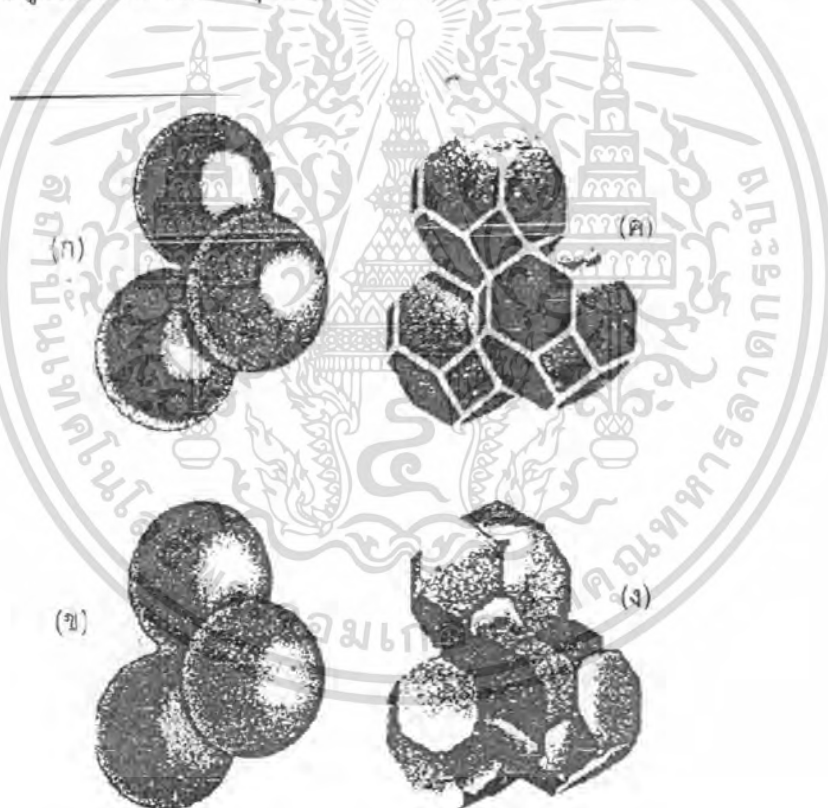
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 ซินเตอร์เซรามิก

กระบวนการซินเตอร์นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อกระบวนการผลิตเซรามิก เซรามิกจะต้องถูกเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้โครงสร้างทางจุลภาค (microstructure) ตามที่ต้องการ ซึ่งจะส่งผลให้ได้เซรามิกที่มีคุณสมบัติต่างๆตามที่ต้องการด้วย

### ขั้นตอนการซินเตอร์

การแบ่งช่วงการซินเตอร์นั้นจะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอนุภาคที่มาเชื่อมต่อกันและการหายไปของรูพรุน สำหรับวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกแข็งเชื่อม แสดงดังรูป 2.16 ซึ่งแสดงโครงสร้างรูปทรงเรขาคณิตในอุดมคติที่ผ่านกระบวนการซินเตอร์



รูป 2.16

- (ก) การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น ทรงกลมสัมผัสกัน[5]
- (ข) ช่วงสุดท้ายของการซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น ทรงกลมเริ่มเชื่อมติดกัน[5]
- (ค) การซินเตอร์ช่วงกลาง เกรนเปลี่ยนรูปร่าง[5]
- (ง) การซินเตอร์ช่วงสุดท้าย รูพรุนเป็นแบบเทระฮีดรอล[5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น (initial stage of sintering)

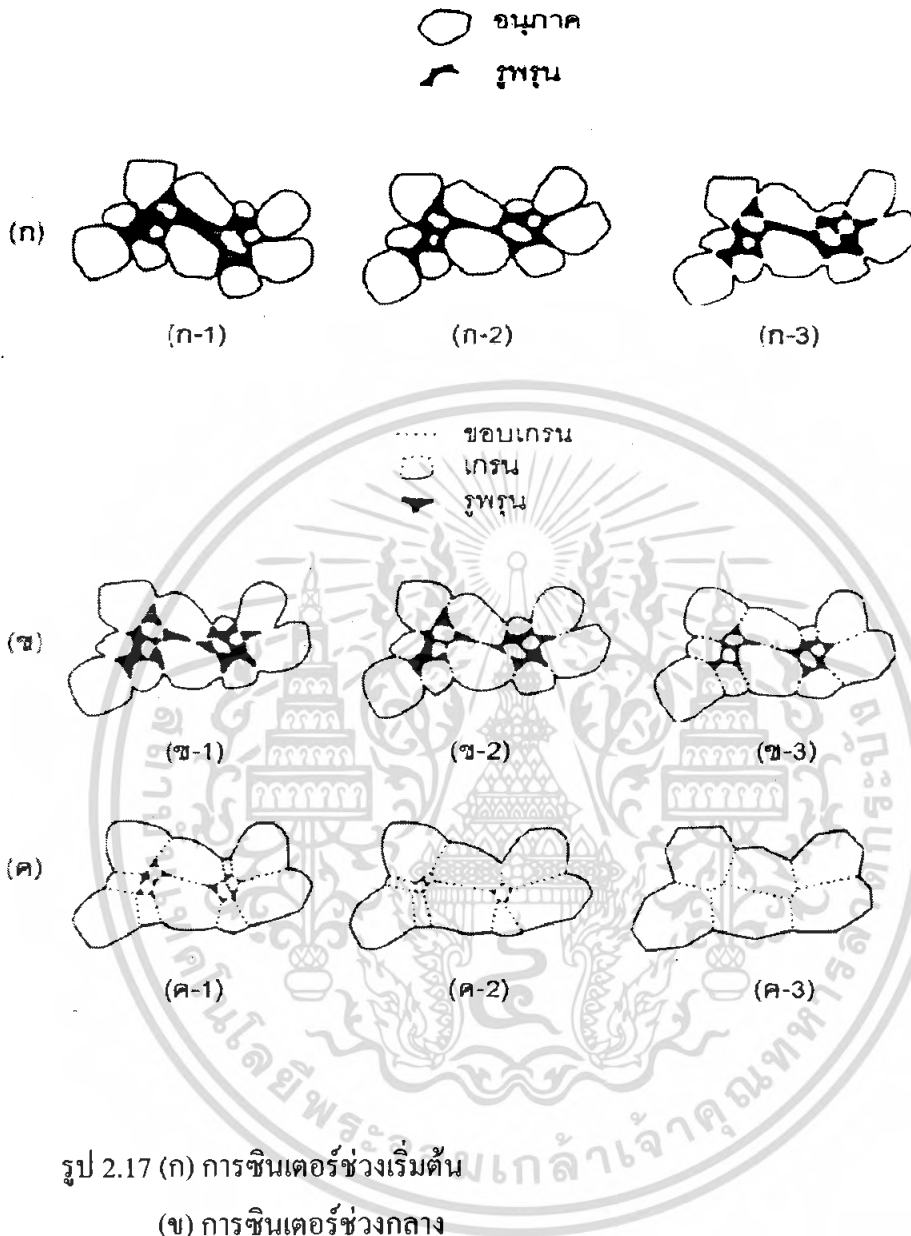
การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้นจะประกอบด้วยการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาค (rearrangement of particles) และเกิดการเติบโตของบริเวณระหว่างแต่ละอนุภาค หรือที่รู้จักกันว่า คอ อย่างรวดเร็วในเบื้องต้น แสดงดังรูป 2.17 (ก) การซินเตอร์ช่วงนี้จะเกิดขึ้นจนกระทั่งรัศมีของคามีค่าประมาณ 0.4-0.5 เท่าของรัศมีอนุภาค

### การซินเตอร์ช่วงกลาง (intermediate stage of sintering)

การซินเตอร์ช่วงกลางจะเริ่มต้นเมื่อรูพรุนมีรูปร่างสมดุล (equilibrium shape) ซึ่งจะพิจารณาได้จากแรงตึงผิวและแรงระหว่างผิว ส่วนเฟสของรูพรุนก็ยังคงมีความต่อเนื่องกันอยู่ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอนุภาคในการซินเตอร์ช่วงกลางนี้แสดงดังรูป 2.17 (ข) จะเห็นว่าขนาดของคอจะใหญ่ขึ้น ปริมาตรรูพรุนน้อยลง และจุดศูนย์กลางของอนุภาคจะเข้ามาใกล้กันมากขึ้น จึงส่งผลให้การหดตัวสัมพันธ์กันกับปริมาณของรูพรุนที่น้อยลง ส่วนขอบเกรนจะเริ่มเคลื่อน ทำให้เกรนเริ่มโตและเกรนที่อยู่ข้างเคียงหายไปจนเกรนดังกล่าว ดังนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงเรขาคณิตของเกรน คอ และรูพรุนต่อไป การซินเตอร์ช่วงกลางนี้จะเกิดจนกว่ารูพรุนจะมาเชื่อมต่อกันและสิ้นสุดเมื่อรูพรุนเริ่มแยกตัวออกจากกันเป็นรูพรุนเดี่ยว ๆ (isolated pores) การหดตัวในช่วงนี้จึงมากกว่าช่วงอื่น ๆ

### การซินเตอร์ช่วงสุดท้าย (final stage of sintering)

การพัฒนาโครงสร้างทางจุลภาคของการซินเตอร์ช่วงสุดท้ายนี้ มิได้หลากหลายรูปแบบ รูพรุนจะถูกกำจัดออกจากระบบโดยยังคงอยู่ใกล้กับขอบเกรน อย่างไรก็ตามถ้าการเติบโตของขอบเกรนเร็วเกินไป ขอบเกรนจะเคลื่อนที่เร็วกว่ารูพรุน ส่งผลให้รูพรุนแยกตัวไปอยู่ในเกรน เมื่อเกรนเติบโตต่อไปจะทำให้รูพรุนถูกแยกออกจากขอบเกรน ซึ่งจะทําให้ลดโอกาสการถูกกำจัดออกไปได้ ดังนั้นการเติบโตของเกรนควรได้รับการควบคุมเป็นอย่างดี เพื่อให้การกำจัดรูพรุนเป็นไปได้มากที่สุด การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอนุภาคในการซินเตอร์ช่วงสุดท้ายนี้แสดงดังรูป 2.17 (ค)



รูป 2.17 (ก) การซิงเตอร์ช่วงเริ่มต้น

(ข) การซิงเตอร์ช่วงกลาง

(ค) การซิงเตอร์ช่วงสุดท้าย เมื่อ

(ก-1) อนุภาคผงเริ่มต้น (ก-2) มีการจัดเรียงตัวใหม่ (ก-3) การเกิดคอ

(ข-1) มีการเติบโตของคอและเกิดการหดตัวเชิงปริมาตร (ข-2) ขอบของเกรนยาวขึ้น (ข-3) เมื่อคอโตมากขึ้นขอบของเกรนยาวยิ่งขึ้นมีการหดตัวและขยายขนาดของเกรน

(ค-1) เกรนโตขึ้นพร้อมทั้งมีรูพรุนเกิดขึ้น (ค-2) เกรนโตขึ้นแต่ความพรุนลดลง

(ค-3) เกรนโตพร้อมทั้งรูพรุนถูกกำจัดออกไป[5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### กระบวนการเตรียมและการวัด

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมและการตรวจสอบเซรามิกที่ใช้ในโครงการนี้ โดย การเตรียมผงของ  $Pb_{0.97}Sr_{0.03}[(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.07}(Zn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.06} \times (Zr_{1-x}Ti_x)_{0.87}]O_3 + 0.3 \text{ wt\% } Nb_2O_5 + 0.3 \text{ wt\% } CuO + 0.3 \text{ wt\% } Bi_2O_3 + 0.1 \text{ wt\% } Li_2CO_3$  (PZN-PMnN-PZT) โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Zr/Ti ทั้งหมด 3 อัตราส่วนที่  $x = 0.52 \quad 0.50 \quad 0.48$  ตามลำดับ จากนั้นกล่าวถึงขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกที่เตรียมได้ โดยมีรายละเอียดที่เกี่ยวกับสารเคมี วัสดุอุปกรณ์ กระบวนการเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะดังจะแสดงตามลำดับต่อไปนี้

#### 3.1 สารเคมี

- เลดออกไซด์ (Lead Oxide; PbO)
- เซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium Oxide; ZrO<sub>2</sub>)
- ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide; TiO<sub>2</sub>)
- ไนโอเบียมออกไซด์ (Niobium Oxide; Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)
- ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide; ZnO)
- คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper Oxide; CuO)
- สตรอนเทียมคาร์บอเนต (Strontium Carbonate; SrCO<sub>3</sub>)
- ลิเทียมคาร์บอเนต (Lithium Carbonate; Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)
- แมงกานีสคาร์บอเนต (Manganese Carbonate; MnCO<sub>3</sub>)
- บิสมัทออกไซด์ (Bismuth Oxide; Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinylalcohol; PVA)
- อะลูมินา (Alumina; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- เอทานอล (Ethanol)
- น้ำกลั่น
- ผงขัดอะลูมินา
- กาวเงิน (Silver paint)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

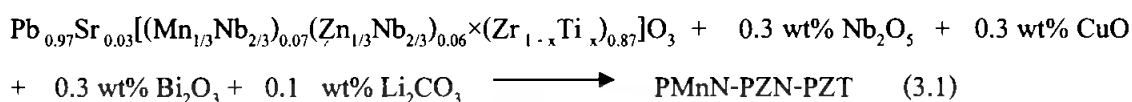
### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้

- เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม ผลิตโดยบริษัท Sartorius
- กระจกฟอยล์
- ซ้อนตักสารทำด้วยสแตนเลส
- กระจป้องกันพลาสติกพร้อมฝาปิด ใช้สำหรับบดย่อย
- เทปพันท่อ
- ยางในรถยนต์
- ลูกบดเซอร์โคเนีย (zirconia)
- เครื่องบดย่อย
- เตาแผ่นความร้อน (hot plate) พร้อมตัวผสมสารแบบแม่เหล็ก (magnetic stirrer)
- แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (magnetic bar)
- ตู้อบสารอุณหภูมิ 200 ° ซ ผลิตโดยบริษัท Memmert
- เตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง ผลิตโดยบริษัท Nabertherm
- เตาเผา (crucible) พร้อมฝาปิด
- ครอบบดสาร
- แม่พิมพ์โลหะสำหรับอัดขึ้นรูป
- เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก
- คีมหนีบ
- ปีกเกอร์ขนาดต่าง ๆ
- กระจกทรายเบอร์ 1000 และ 1200
- กระจกชน
- เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) รุ่น D8 Advance
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ผลิตโดยบริษัท LEO รุ่น LEO 1455 VP
- ชุดอุปกรณ์วงจร Sawyer – Tower สำหรับการวัดฮิสเทอเรซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 กระบวนการเตรียมผง PMN-PZN-PZT

เตรียมผงในระบบ PMN-PZN-PZT โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน Zr/Ti = 48/52 50/50 และ 52/48 ตามลำดับ ซึ่งสามารถเตรียมได้ดังสมการที่ 3.1 ดังนี้



- ชั่งสารตั้งต้นตามอัตราส่วนที่ได้คำนวณไว้ในกระดาษพอยล์
- ผสมสารตั้งต้นที่ชั่งไว้เข้าด้วยกันในกระป๋องพลาสติกที่บรรจุลูกบดเซอร์โคเนียแล้วเติมเอทานอลลงไปจนท่วมลูกบด จากนั้นปิดฝาให้แน่นพร้อมกับพันเทปเพื่อป้องกันการรั่ว
- นำไปทำการบดย่อยด้วยเครื่องบดย่อยเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.1
- แยกสารตั้งต้นที่ผ่านการบดย่อยแล้วออกจากลูกบดลงในบีกเกอร์ด้วยกระดาษกรองแล้วล้างด้วยเอทานอล
- นำสารตั้งต้นที่ได้ไประเหยเอทานอลออก โดยการให้ความร้อนด้วยเตาแผ่นความร้อนพร้อมกับการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กตลอดเวลา ทั้งไว้จนเอทานอลระเหยออกหมดแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำสารที่อบแล้วมาบดด้วยครกบดสาร
- เมื่อบดสารเสร็จแล้วนำไปใส่ลงในเบ้าเผาพร้อมปิดฝาแล้วนำไปเผาแคลไซน์โดยเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.2
- แบ่งสารที่เผาแคลไซน์แล้วไปตรวจสอบความบริสุทธิ์ของผงสารตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(XRD)



รูปที่ 3.1 การบดขยี้ด้วยเครื่องบดขยี้ (Ball-milling)



รูปที่ 3.2 เตาไฟฟ้าสำหรับเผาสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



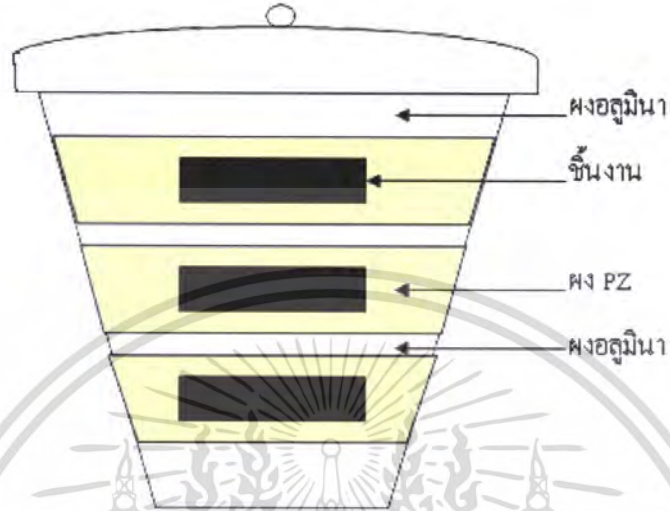
รูปที่ 3.3 แผนผังการเตรียมผง PMN-PZT-PZN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

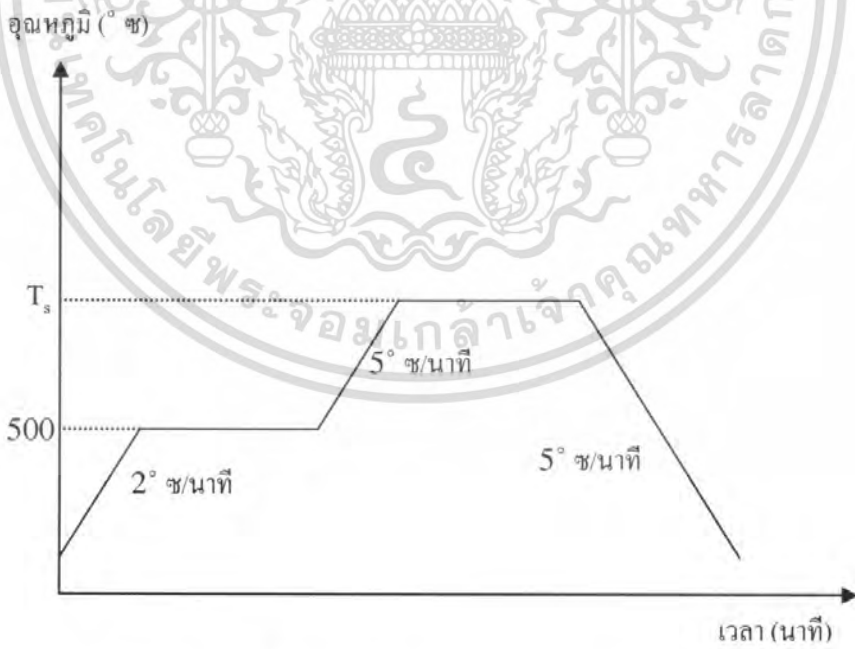
### 3.4 กระบวนการเตรียมเซรามิก

เมื่อได้ผงที่ผ่านการแคลไซน์และตรวจสอบความบริสุทธิ์แล้ว นำผงดังกล่าวมาขึ้นรูปเพื่อทำการเตรียมเป็นเซรามิก

- ชั่งผงสารตัวอย่างประมาณ 1.5 กรัม ลงในกระดาษฟอยล์
- นำผงสารที่ชั่งแล้วมาบดให้ละเอียดด้วยครกบดสาร แล้วหยดสารละลายโพลิไวนิลแอลกอฮอล์(Polyvinyl Alcohol : PVA) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 % โดยน้ำหนักลงไปประมาณ 1 หยดเพื่อเป็นตัวช่วยประสานจากนั้นบดให้เข้ากันแล้วเทลงในแม่พิมพ์โลหะ
- นำสารที่ผสมกับสารละลายโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ แล้วไปขึ้นรูปเป็นแผ่นกลม โดยใช้เครื่องอัดระบบไฮดรอลิกด้วยแรงดัน 3 ตัน เป็นเวลานาน 30 วินาที
- เมื่อได้ชิ้นงานที่ผ่านการอัดรูป(Green Body) แล้วจึงนำมาจัดเรียงลงในเบ้าเผาตั้งรูปที่ 3.4 โดยรองพื้นด้วยอะลูมินาและกลบด้วยผงเลคเซอร์โคเนต(PZ) เพื่อควบคุมบรรยากาศในการเผา และป้องกันการระเหยของตะกั่วในรูปของ PbO ออกจากชิ้นงานในระหว่างที่ทำการเผา แล้วจึงกลบด้วยผงอะลูมินาทับอีกชั้นหนึ่งเพื่อช่วยให้มีการไหลเวียนของความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเท่า ๆ กันในทุกทิศทาง จากนั้นปิดฝาด้วยอะลูมินาให้สนิทแล้วนำไปเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ กันจาก 950 °ซ - 1100 °ซ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีอัตราการขึ้น - ลงอุณหภูมิ 5 °ซ ต่อนาที ในกระบวนการเผาซินเตอร์ของเซรามิกนั้นจะต้องทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 °ซ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมงก่อน โดยมีอัตราการขึ้น - ลงอุณหภูมิ 2 °ซ ต่อนาที เพื่อกำจัด PVA ออกไป จากนั้นจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นต่อไปจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการเผาซินเตอร์ ดังแผนภาพแสดงในรูปที่ 3.5 และกระบวนการเตรียมเซรามิกทั้งหมดได้ทำการแสดงไว้ในแผนภาพรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.4 การจัดเรียงชั้นงานในถ้วยอะสุมินาสำหรับการเผาซินเตอร์



รูปที่ 3.5 แผนผังการเผาซินเตอร์ (โดย  $T_s$  คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แผนผังกระบวนการเตรียมเซรามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(XRD)

เมื่อทำการเผาเคลือบชิ้นผงสารตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Zr/Ti ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น นำผงที่ได้มาทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(XRD) โดยแสดงผลออกมาเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(X-Ray diffraction pattern)

โดยปกติผลึกจะมีลักษณะการเรียงตัวของอะตอมเป็นชั้น ๆ ซึ่งลักษณะการเรียงตัวนี้จะแตกต่างกันไปในผลึกแต่ละชนิดซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัว เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบผลึกจะทำให้เกิดการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์จากหุระนาบเหล่านี้ โดยเป็นไปตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งจะสามารถหาระยะห่างระหว่างระนาบได้

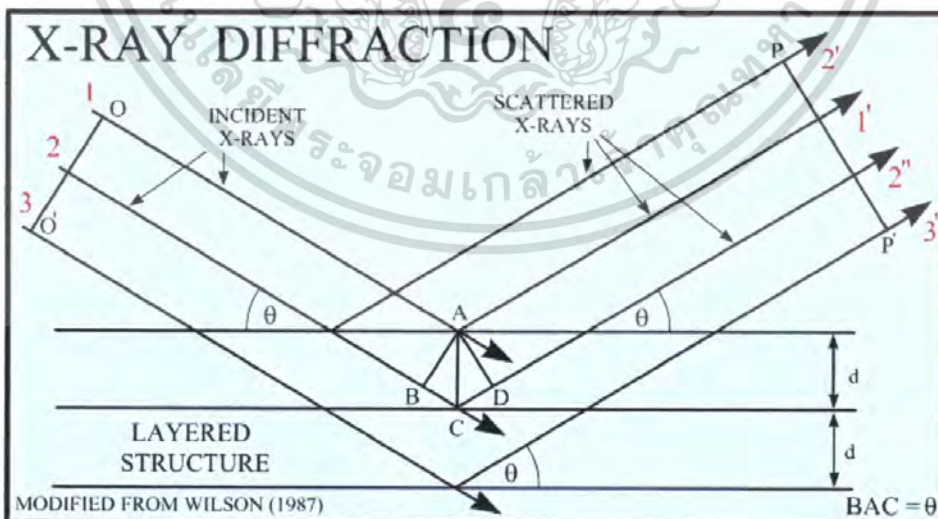
$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (3.2)$$

เมื่อ  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (hkl)

$\theta$  คือ มุมตกกระทบ

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ( $\lambda=1.54\text{\AA}$ )

$n$  คือ เลขใด ๆ  $n = 1, 2, 3, \dots$



รูปที่ 3.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง สามารถทำได้โดยการนำข้อมูลที่ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไปเทียบกับข้อมูลในไฟล์ JCPDS ซึ่งเป็นฐานข้อมูล XRD โดยจะทำควบคู่ไปกับการเปรียบเทียบเชิงปริมาณของเฟสที่เกิดขึ้นด้วยการใช้สมการที่ดัดแปลงมาจากสมการดั้งเดิม ในการคำนวณหาปริมาณเฟสที่เกิดขึ้น ในกรณีที่มีเฟสปรากฏไม่เกิน 2 เฟส ซึ่งจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ของเงื่อนไขที่ใช้ในการเผาแคลไซน์กับพฤติกรรมการเกิดเฟสของสารตัวอย่างได้ โดยสมการดังกล่าว คือ

$$\text{เปอร์เซ็นต์เฟรอสโกต์} = \frac{I_{\text{perov.}} \times 100}{I_{\text{perov.}} + I_{\text{pyro.}}} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $I_{\text{perov.}}$  คือ ความเข้มสูงสุดของพีคที่รังสีเอ็กซ์ของเฟสเฟรอสโกต์  
 $I_{\text{pyro.}}$  คือ ความเข้มสูงสุดของพีคที่รังสีเอ็กซ์ของเฟสไพโรคลอ



รูปที่ 3.8 เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก

#### 3.6.1 การหาค่าความหนาแน่น (density)

ในการหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานเซรามิก อาศัยหลักการแทนที่น้ำของอาร์คิมิดีส (Archimedes) ทำได้โดยการนำเซรามิกที่เตรียมได้มาต้มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในอากาศแล้วจึงนำมาชั่ง โดยชั่งในน้ำและชั่งในอากาศขณะเปียก หลังจากนั้นนำเซรามิกดังกล่าวไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมงให้แห้ง ก่อนนำมาชั่งในอากาศอีกครั้งหนึ่ง คำนวณหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานจากสมการที่ 3.4

$$\rho_c = \frac{w_1}{(w_2 - w_3)} \times \rho_{H_2O} \quad (3.4)$$

เมื่อ	$\rho_c$	คือ ความหนาแน่นของเซรามิกที่อุณหภูมิขณะทดลอง
	$\rho_{H_2O}$	คือ ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิขณะทดลอง
	$w_1$	คือ น้ำหนักของเซรามิกที่ชั่งในอากาศ
	$w_2$	คือ น้ำหนักของเซรามิกที่ชั่งในอากาศขณะเปียก
	$w_3$	คือ น้ำหนักของเซรามิกที่ชั่งในน้ำ

### 3.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก ทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ข้อมูลที่ได้จะบอกถึงลักษณะรูปร่างและขนาดของเกรน (grain) ของเซรามิกได้ นอกจากนี้ยังสามารถบอกถึงขนาดและรูปร่างของสิ่งแปลกปลอมที่เกิดขึ้นได้ด้วย ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ลักษณะโครงสร้างจุลภาคกับเงื่อนไขในการเผาซินเตอร์ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์กับขนาดของเกรนที่ปรากฏ เป็นต้น



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลิตโดยบริษัท LEO รุ่น LEO 1455 VP[1]

### 3.8 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก

#### 3.8.1 การตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก

ในการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกด้วยการวัดค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ( $\tan \delta$ ) ของสารตัวอย่าง ใช้วิธีการวัดค่าความสามารถในการเก็บกักประจุของเซรามิกแล้วคำนวณหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ดังสมการ 3.5 โดยเริ่มการนำเซรามิกที่เตรียมได้มาทำการขัดผิวของชิ้นงานให้เรียบขนานกันทั้งสองหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ แล้วทำการขัดด้วยผงอลูมินาอีกครั้ง นำชิ้นงานที่ทำการขัดเสร็จแล้วไปอบในเตาอบเพื่อไล่น้ำออกจากชิ้นงานให้หมด จากนั้นนำเซรามิกมาทำขั้วไฟฟ้า โดยเคลือบด้วยทองคำด้วยเทคนิค Sputtering แล้วจึงนำชิ้นงานไปตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

$$\epsilon_r = \frac{tC}{\epsilon_0 A} \quad (3.5)$$

เมื่อ	$\epsilon_r$	คือ	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสารตัวอย่าง
	$\epsilon_0$	คือ	ค่าสภาพยอมของสูญญากาศ มีค่าเท่ากับ $8.854 \times 10^{-15}$ F/mm
	t	คือ	ความหนาของสารตัวอย่าง(mm)
	C	คือ	ค่าที่ได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของสารตัวอย่าง
	A	คือ	พื้นที่ขั้วไฟฟ้าบนผิวของสารตัวอย่าง(mm <sup>3</sup> )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

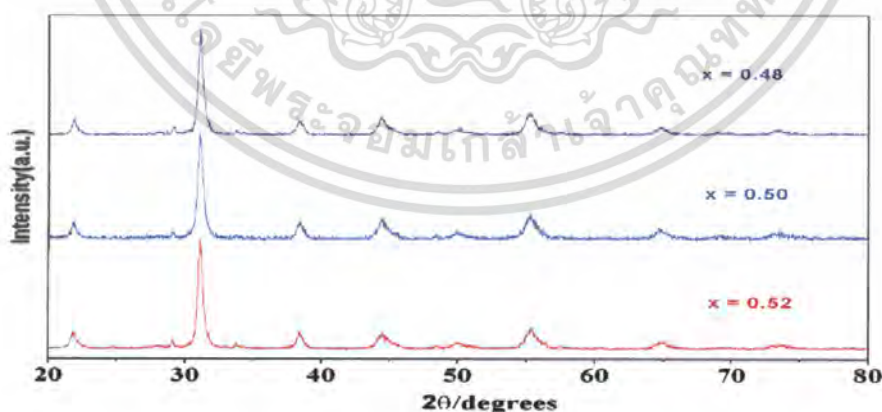
### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมผงและเซรามิกในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  ที่  $x$  มีค่าเท่ากับ 0.48 0.50 0.52 โดยมีผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเซรามิกที่เตรียมได้ พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์(XRD) ของผง

##### PMnN-PZN-PZT

เมื่อทำการเผาแคลไซน์ผงในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  โดย  $x$  มีค่าเท่ากับ 0.48 0.50 และ 0.52 ที่อุณหภูมิ 850 °ซ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น-ลงที่อุณหภูมิ 20 °ซต่อนาที แล้วนำสารมาทำการตรวจสอบชนิดของเฟสที่เกิดขึ้น องค์ประกอบของสารตัวอย่าง และลักษณะโครงสร้างของสารตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ดังได้แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  ทุกสัดส่วนองค์ประกอบในรูปแบบที่ 4.1

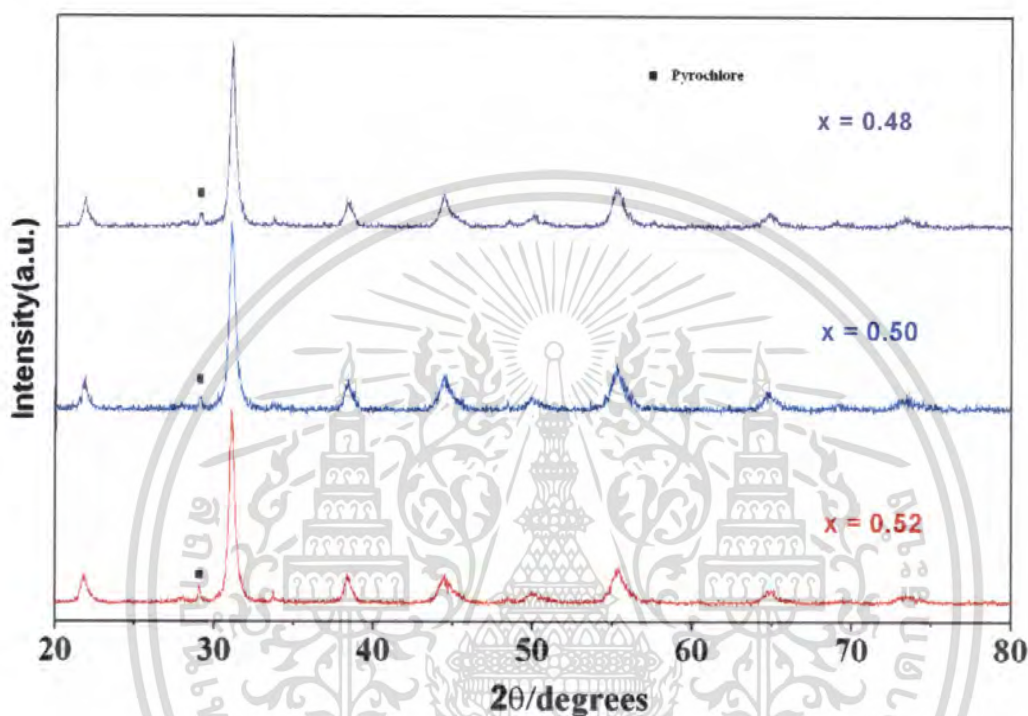


รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT)

จากรูปที่ 4.1 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT) ทุกสัดส่วนองค์ประกอบมีเฟสไพโรคลอโรเจปอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ในเฟสเพอโรฟสไกต์ของ  $\text{PbS(MnN)}_{0.07}(\text{ZnN)}_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT) อยู่ ณ ตำแหน่ง 2 $\theta$  ประมาณ 29 ถึง 30 ดังแสดงในรูปที่ 4.2

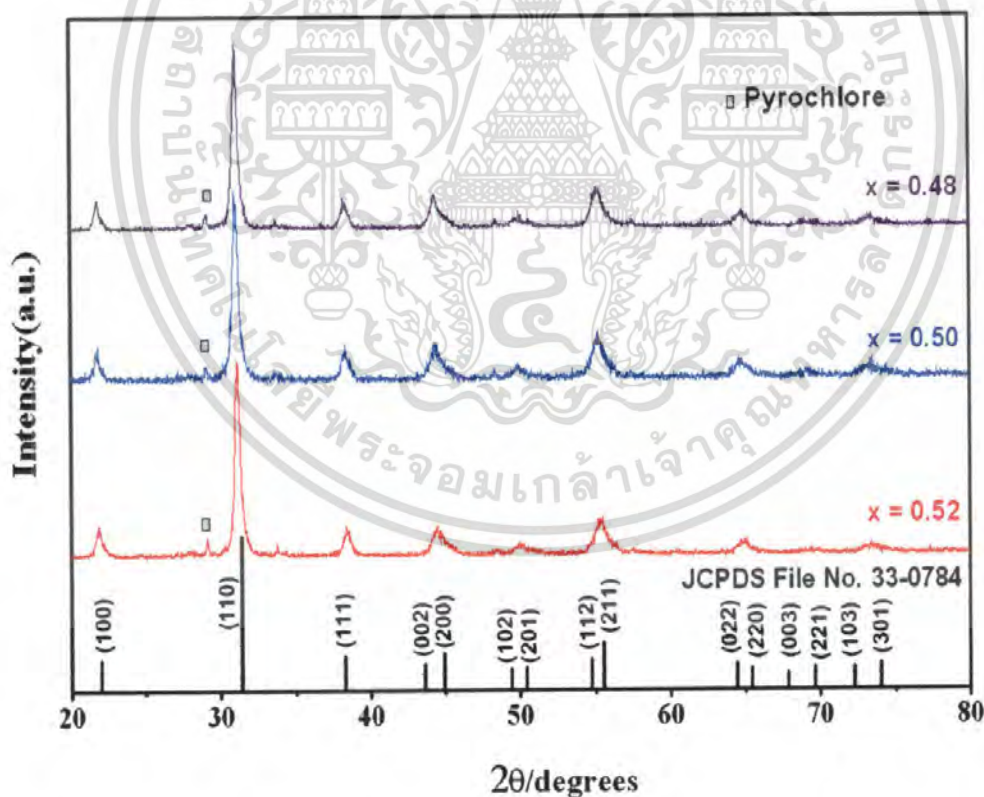


รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะและตำแหน่งของเฟสไพโรคลอรั (pyrochlore)

จากการพิจารณาเฟสไพโรคลอรัพบว่าเฟสไพโรคลอรัที่เกิดขึ้น คือ เฟสของ  $\text{PbO}$  ที่เป็นสารตั้งต้น เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมมีการเติมปริมาณ  $\text{PbO}$  ในสัดส่วนที่มากเกินไป (ร้อยละ 2 โดยโมล) เพราะตะกั่วสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิค่าประมาณ  $900^\circ\text{C}$  แต่ในการทดลองได้ทำการเผาแคลไซน์ผง  $\text{PbS(MnN)}_{0.07}(\text{ZnN)}_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT) ที่อุณหภูมิ  $850^\circ\text{C}$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ตะกั่วจะสามารถระเหยได้ จึงเป็นเหตุที่ให้เกิดเฟสไพโรคลอรั ที่  $2\theta$  ประมาณ 29 ถึง 30 ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  ( $\text{PMnN-PZN-PZT}$ ) ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ พบว่าผงในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  ( $\text{PMnN-PZN-PZT}$ ) ทุกสัดส่วนองค์ประกอบจะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ใกล้เคียงกับข้อมูลของสารประกอบเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต( $\text{PZT}$ )ที่มีสูตรโมเลกุลเป็น  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$  ในเพิ่มข้อมูล JCPDS file no 33-0784 ที่มีโครงสร้างแบบเพโรชโลนอิลพิคที่มีความเข้มสูงสุดอยู่ ณ ตำแหน่งของค่า  $2\theta$  เป็น 31.387 69.645 91.089 ตามลำดับ มีค่าแลตติสพารามิเตอร์ที่  $a = 4.036 \text{ \AA}$  และ  $c = 4.146 \text{ \AA}$  และที่สัดส่วนองค์ประกอบของ  $x$  เพิ่มมากขึ้น รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะใกล้เคียงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะใกล้เคียงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต( $\text{PZT}$ ) ในเพิ่มข้อมูล JCPDS file no 33-0784 มากขึ้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.3

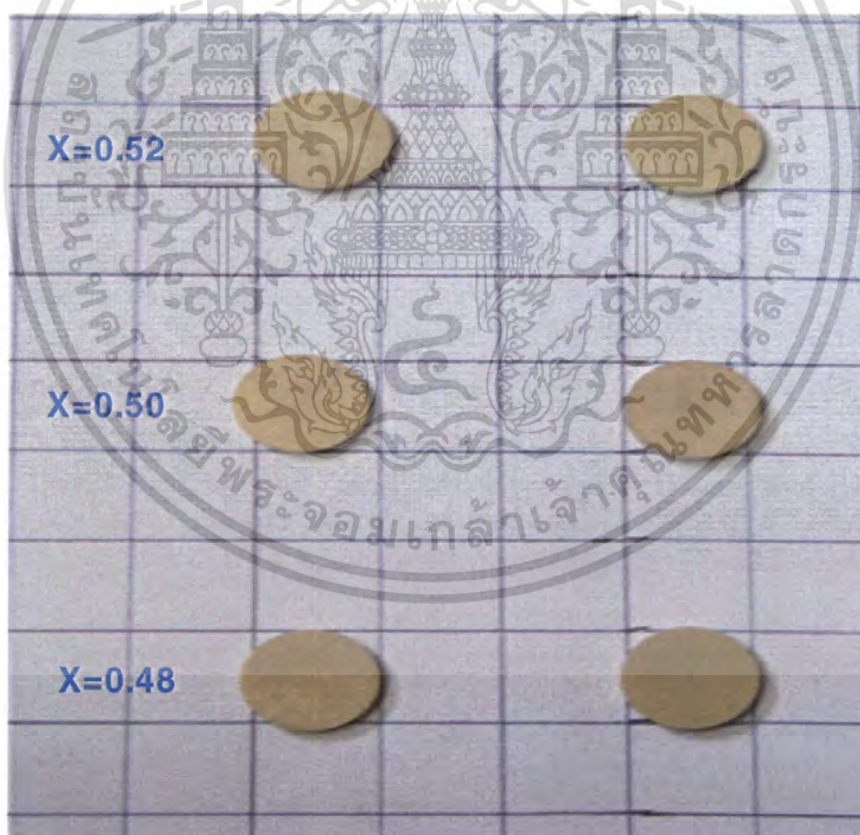


รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  ( $\text{PMnN-PZN-PZT}$ ) เปรียบเทียบกับเพิ่มข้อมูลมาตรฐาน JCPDS file

no. 33-0784 ของสารประกอบเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต( $\text{PZT}$ ) ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก $\text{PMnN-PZN-PZT}$

หลังจากเตรียมผง  $\text{PbS(MnN)}_{0.07}(\text{ZnN)}_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  ( $\text{PMnN-PZN-PZT}$ ) ได้แล้ว นำผงที่เตรียมได้จากการอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดกลมและทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ  $1100^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมงจะได้เซรามิก  $\text{PbS(MnN)}_{0.07}(\text{ZnN)}_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  ( $\text{PMnN-PZN-PZT}$ ) ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าโดยภาพรวมแล้วเซรามิกที่ได้นั้นมีลักษณะรูปร่างสมส่วนไม่มีการบิดเบี้ยวหรือแตกร้าวในชิ้นงาน สำหรับเซรามิก  $\text{PMnN-PZN-PZT}$  มีสีเหลืองเข้มสม่ำเสมอ สำหรับเซรามิก  $\text{PbS(MnN)}_{0.07}(\text{ZnN)}_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  ( $\text{PMnN-PZN-PZT}$ ) ที่สัดส่วนองค์ประกอบที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน  $x$  เท่ากับ 0.48 0.50 และ 0.52 จะมีสีที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากสีเหลืองเข้มตามลำดับ โดยทุกส่วนองค์ประกอบจะมีขนาดใกล้เคียงกัน ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์  $1100^\circ\text{C}$  6 ชั่วโมง



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของ  $\text{PbS(MnN)}_{0.07}(\text{ZnN)}_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก ( $\text{PMnN-PZN-PZT}$ )

สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ หลังจากผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ  $1100^\circ\text{C}$  6 ชั่วโมง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

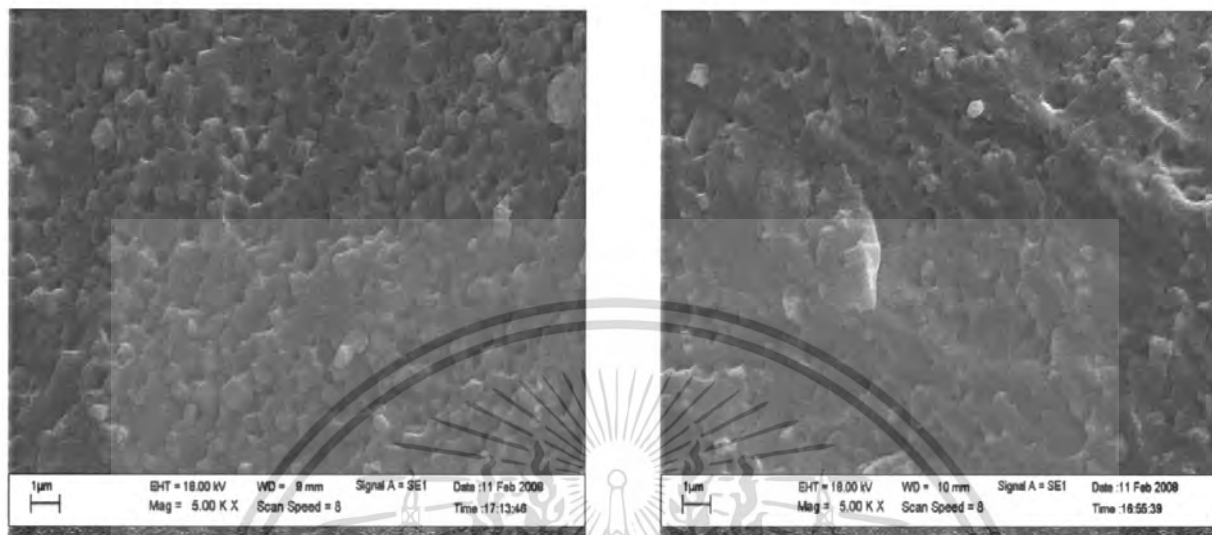
จากนั้นนำเซรามิก  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT) มาตรวจสอบความหนาแน่นด้วยการแทนที่น้ำของอาร์คิมิดีสและคำนวณร้อยละ โดยเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี พบว่าจะได้ผลการตรวจสอบดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก(PMnN-PZN-PZT) ที่อุณหภูมิซินเตอร์  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ส่วนประกอบ	ค่าความหนาแน่น(%) 1100 °ซ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
X = 0.48	94.05
X = 0.50	94.03
X = 0.52	95.21

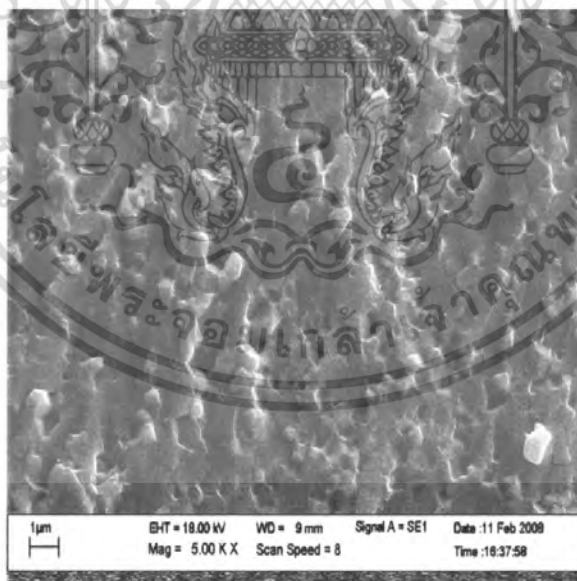
จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti เพิ่มมากขึ้นนั้น ค่าความหนาแน่นที่ตรวจสอบได้จะคงที่ ซึ่งบ่งบอกถึงสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti ไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่น และอุณหภูมิการเผาไหม้จะส่งผลต่อความหนาแน่น โดยพบว่าที่อุณหภูมิ  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมงให้ค่าความหนาแน่นมากกว่าร้อยละ 90

จากนั้นตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก PMnN-PZN-PZT โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวหน้าชิ้นงานของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก PMnN-PZN-PZT ในสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ ที่เผาซินเตอร์แล้ว พบว่าเซรามิกมีโครงสร้างจุลภาคที่มีรูพรุนค่าและลักษณะของเกรนมีขนาดใกล้เคียงกัน เรียงตัวชิดกันโดยขนาดเกรนอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 6 ไมครอนซึ่งจากการที่โครงสร้างมีรูพรุนค่า และขนาดเกรนใกล้เคียงกัน ทำให้มีความหนาแน่นสูง



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของเกรนบนพื้นผิวของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก

แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 °ซ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

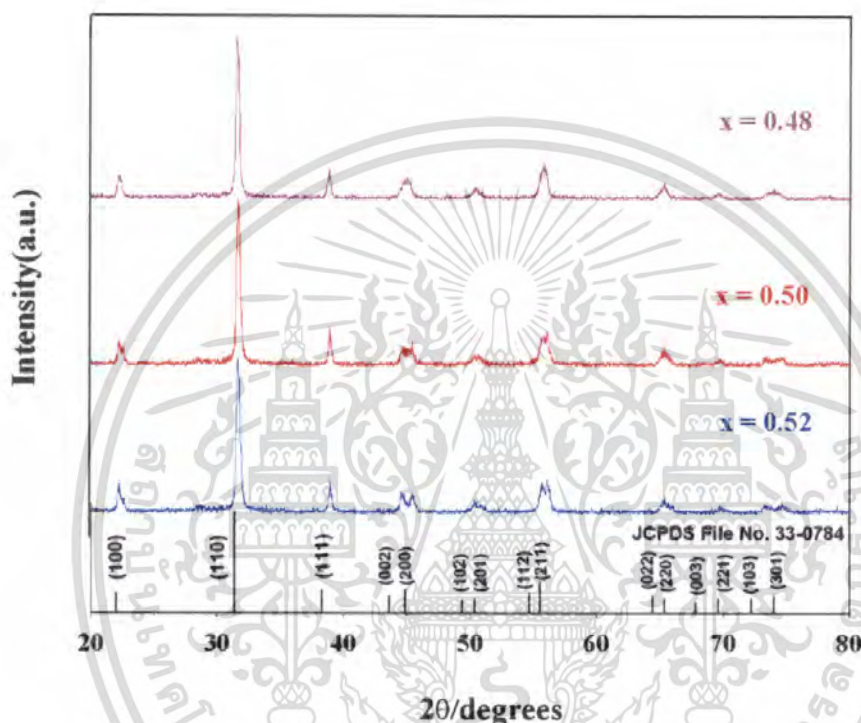
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นองญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(ก)  $x = 0.52$  (ข)  $x = 0.50$  (ค)  $x = 0.48$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของเซรามิก

นำเซรามิกที่มีความหนาแน่นดีที่สุดมาตรวจสอบ โครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์(XRD) ดังแสดงในรูปที่ 4.6

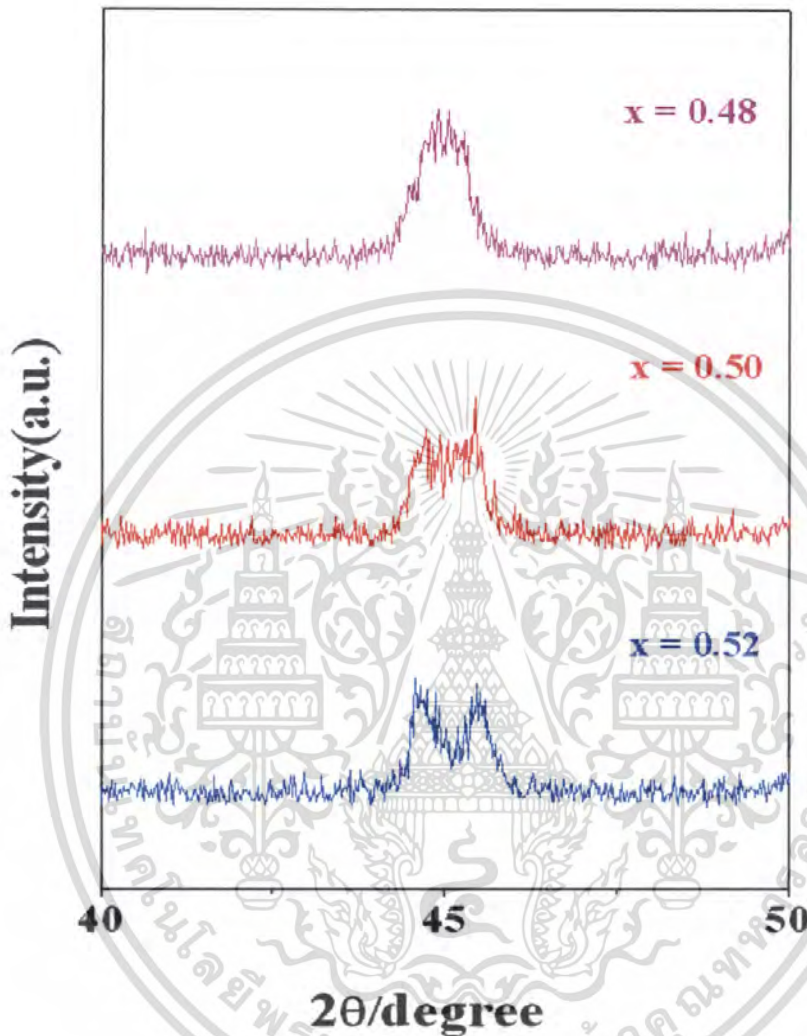


รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  ที่ค่า  $x$  มีค่าเท่ากับ 0.48 0.50 และ 0.52

จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  ( $\text{PMnN-PZN-PZT}$ ) ทุกสัดส่วนองค์ประกอบใกล้เคียงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  ( $\text{PMnN-PZN-PZT}$ ) โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของทุกสัดส่วนองค์ประกอบนั้นไม่มีเฟสไพโรคลออร์(pyrochlore) เจือปน เนื่องจากเมื่อทำการเผาซินเตอร์แล้วปริมาณ  $\text{PbO}$  ที่มากเกินไปได้ระเหยไปในช่วงอุณหภูมิ  $900^\circ\text{C}$  ทำให้ไม่พบเฟสไพโรคลออร์ในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  ทุกสัดส่วนองค์ประกอบแต่ถ้าไม่มีการเพิ่มปริมาณ  $\text{PbO}$  ให้มากเกินไปแล้ว เมื่อทำการเผาซินเตอร์เซรามิก  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  ( $\text{PMnN-PZN-PZT}$ ) ที่ได้ จะมีปริมาณออกซิเจนส่วนเกินในปริมาณที่น้อยมาก ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PbO หายไปบางส่วนทำให้เซรามิกที่ได้จะไม่ใช่เซรามิกในระบบที่ต้องการ ยิ่งไปกว่านั้นเซรามิกในระบบมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ใกล้เคียงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต(PZT) ในแฟ้มข้อมูล JCPDS file no 33-0784 ที่มีโครงสร้างแบบ เทตระโกนอลมีค่าแลตติสพารามิเตอร์ที่  $a = 4.036 \text{ \AA}$  และ  $c = 4.146 \text{ \AA}$  และเมื่อสัดส่วน องค์ประกอบของ  $x$  เพิ่มมากขึ้น รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะใกล้เคียงกับรูปแบบการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต(PZT) ในแฟ้มข้อมูล JCPDS file no 33-0784 มากขึ้นตามลำดับเช่นเดียวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT)

รูปที่ 4.7 เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT) ที่ (200) หรือช่วงค่า  $2\theta$  เท่ากับ 40 ถึง 50 พบว่าที่  $x = 0.48$  เป็นฟีกเดียว เนื่องจากผลึกมีรูปร่างเป็นแบบรอมโบฮีดรอล (มีด้าน  $a$   $b$  และ  $c$  ของผลึกเท่ากัน ระยะห่างระหว่างระนาบมีค่าเท่ากัน ทำให้เมื่อตรวจวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะปรากฏเพียงฟีกเดียว) และที่  $x = 0.52$  ฟีกมีแยกออกเป็น 2 ฟีก เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลง รูปร่างของผลึกจากรอมโบฮีดรอลมาเป็นเทตระโกนอลเรียบร้อยแล้ว เพราะผลึกที่มีโครงสร้างเป็น แบบเทตระโกนอล คือ ด้าน  $a$  และ  $b$  ของผลึกเท่ากันแต่ไม่เท่ากับด้าน  $c$  ของผลึก ระยะห่าง ระหว่างระนาบมีค่าต่างกัน เมื่อทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ได้ฟีกที่มีการ แยกเป็น 2 ฟีก ดังรูปที่ 4.7 จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้สรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณ Ti มีผลต่อการเปลี่ยนเฟสของเซรามิกในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT) โดยที่ บริเวณสัดส่วนที่  $x = 0.50$  น่าจะเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนเฟสจากรอมโบฮีดรอลมาเป็น เทตระโกนอล คือ จะพบเฟสรอมโบฮีดรอลและเฟสเทตระโกนอล อยู่รวมกัน เนื่องจากลักษณะ ของฟีกจะซ้อนทับกัน

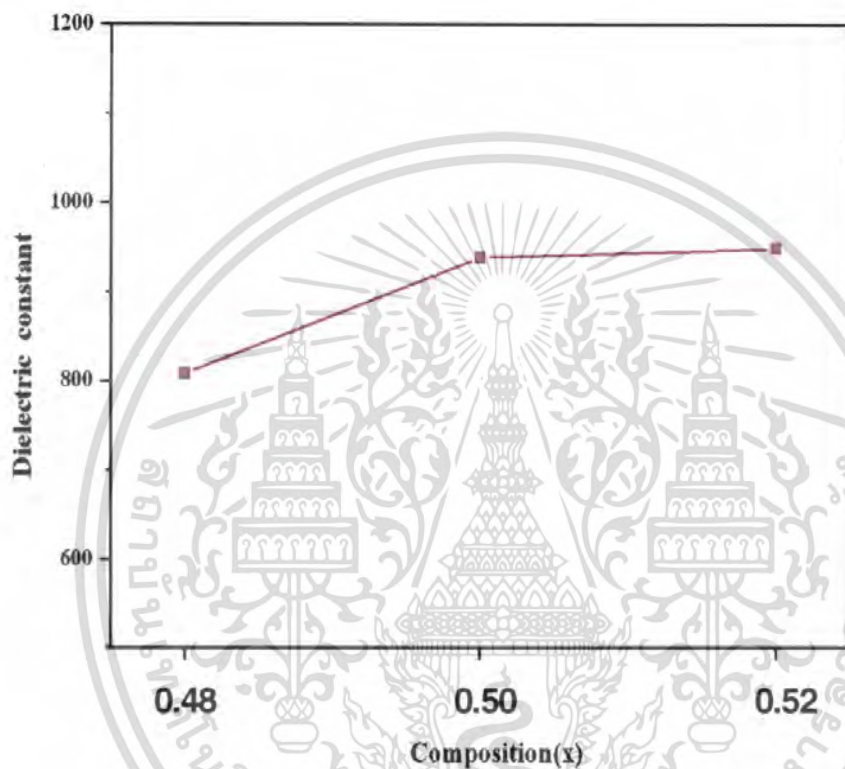


รูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์ม (2 0 0) ของเซรามิก  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  โดยที่  $x = 0.52$   $x = 0.50$   $x = 0.48$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

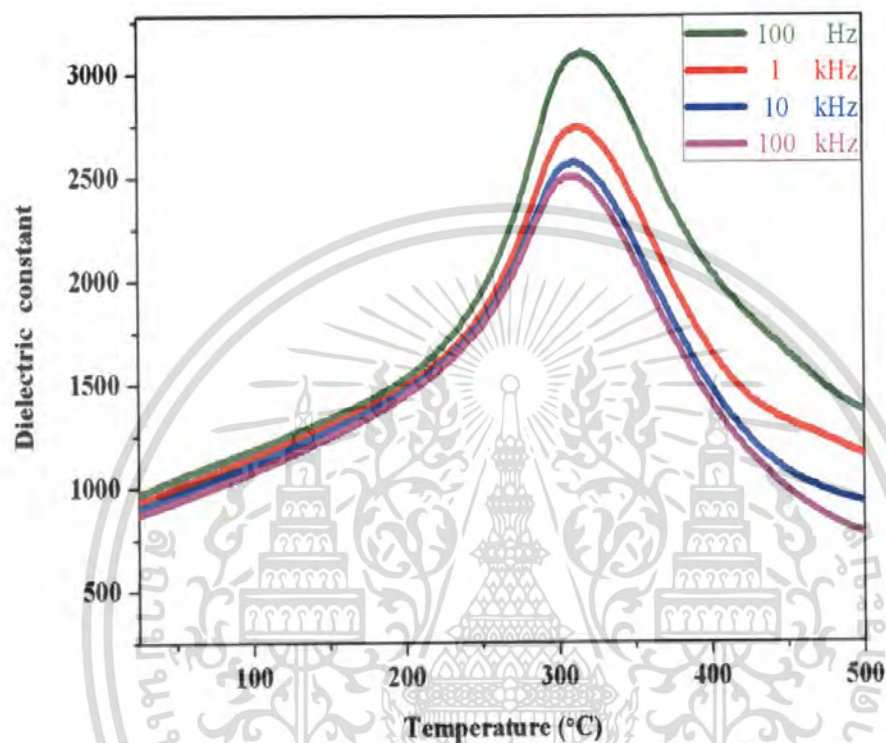
## 4.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

### 4.4.1 สมบัติทางไดอิเล็กทริก



รูปที่ 4.8 แสดงผลกระทบของสัดส่วนองค์ประกอบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก PMnN-PZT-PZN ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

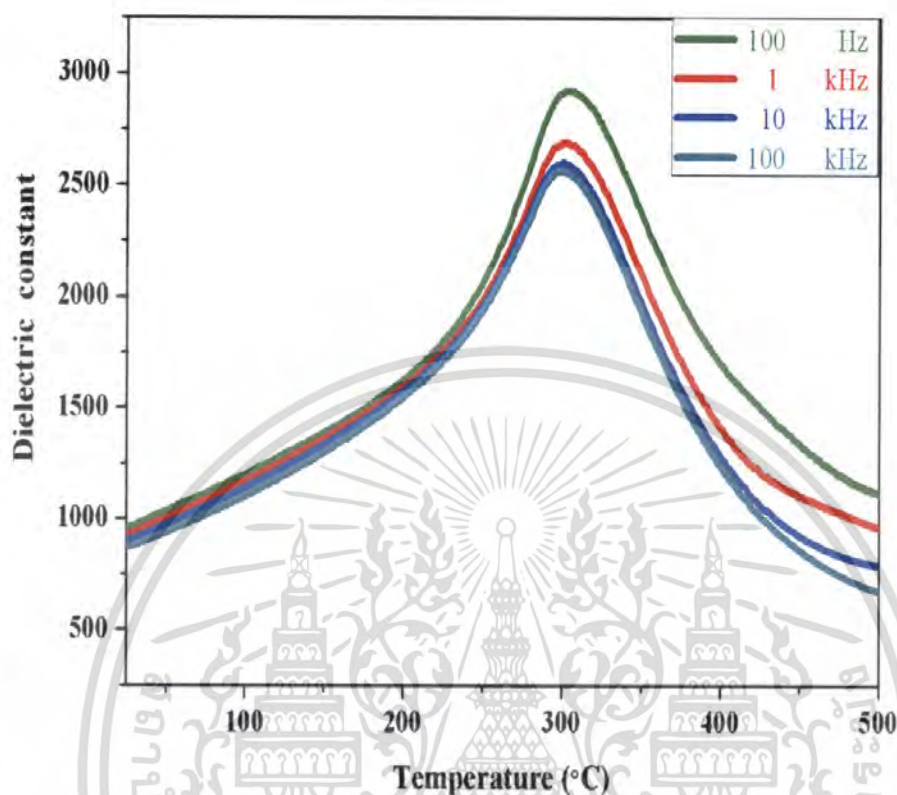
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและสัดส่วนองค์ประกอบของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก PMnN-PZT-PZN พบว่าเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti เพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากผลของความหนาแน่นของ เซรามิกเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.9 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีสัดส่วน  $x = 0.48$  เทียบกับอุณหภูมิที่ความถี่ระหว่าง 100 Hz – 100kHz

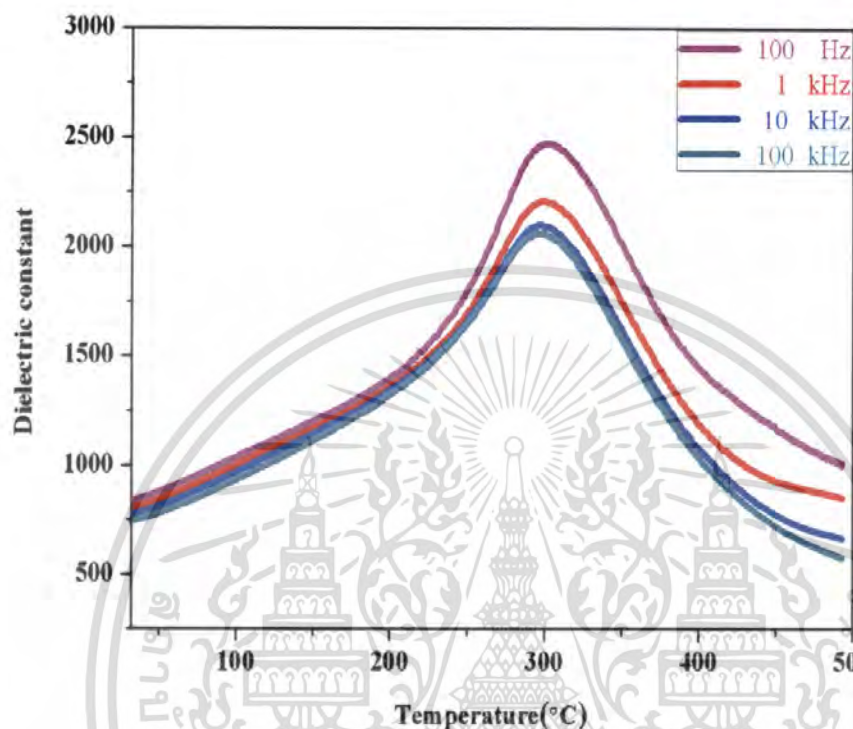
จากรูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่างๆ กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป และจากผลการตรวจสอบนี้บอกถึงค่าอุณหภูมิและความถี่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกคั้งนี้ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.48$  ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าคงที่จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิประมาณ  $243^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะสูงขึ้นจนถึงประมาณ  $2471$  ที่อุณหภูมิประมาณ  $300^{\circ}\text{C}$  ซึ่งก็คืออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ( $T_m$ ) หลังจากอุณหภูมินี้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีสัดส่วน  $x = 0.50$  เทียบกับอุณหภูมิที่ความถี่ระหว่าง 100 Hz – 100kHz

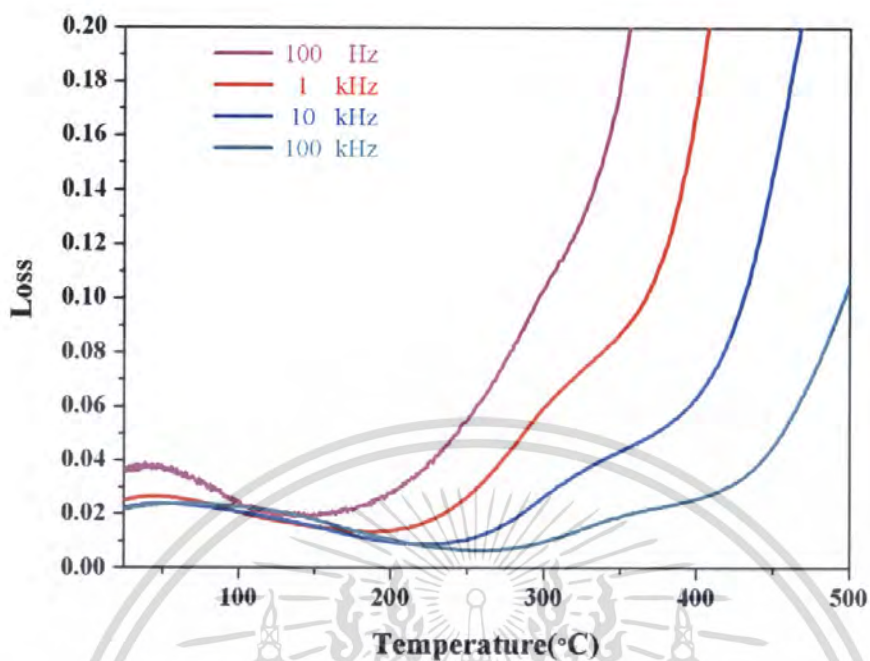
จากรูปที่ 4.10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่างๆ กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป และจากผลการตรวจสอบนี้บอกถึงค่าอุณหภูมิและความถี่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกดังนี้ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.50$  ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าคงที่จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิประมาณ  $245^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะสูงขึ้นจนถึงประมาณ  $2929$  ที่อุณหภูมิประมาณ  $305^{\circ}\text{C}$  ซึ่งก็คืออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ( $T_m$ ) หลังจากอุณหภูมินี้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกตกลง



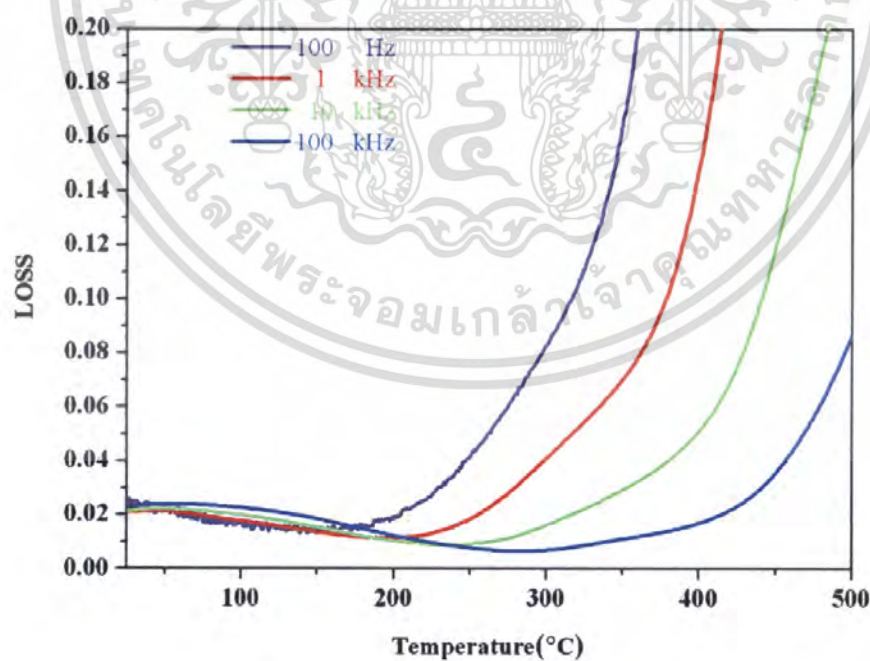
รูปที่ 4.11 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีสัดส่วน  $x = 0.52$  เทียบกับอุณหภูมิที่ความถี่ระหว่าง 100 Hz – 100kHz

จากรูปที่ 4.11 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่างๆ กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป และจากผลการตรวจสอบนี้บอกถึงค่าอุณหภูมิและความถี่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกดังนี้ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.52$  ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าคงที่จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิประมาณ  $242^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะสูงขึ้นจนถึงประมาณ 3090 ที่อุณหภูมิประมาณ  $315^{\circ}\text{C}$  ซึ่งก็คืออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ( $T_m$ ) หลังจากอุณหภูมินี้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

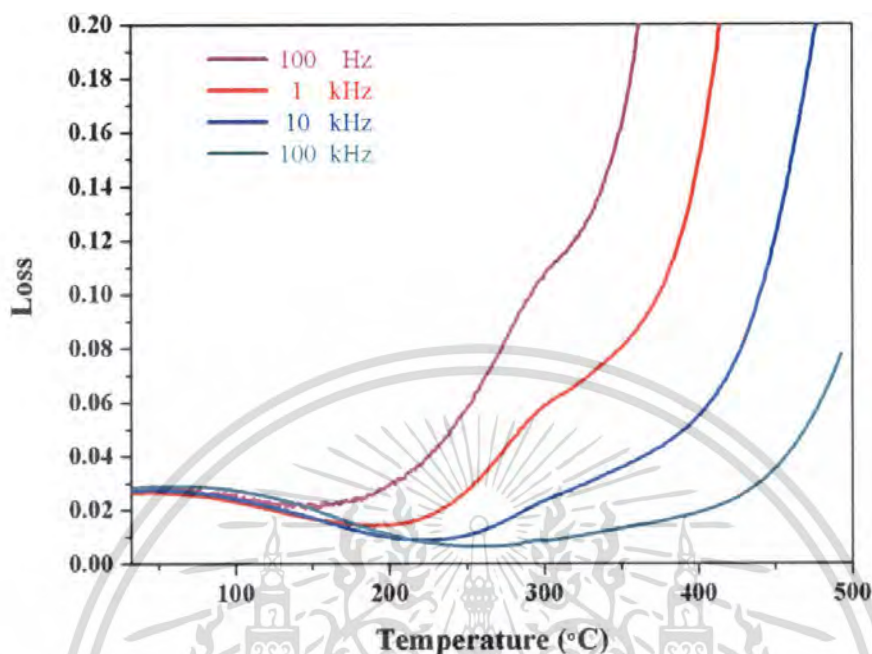


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

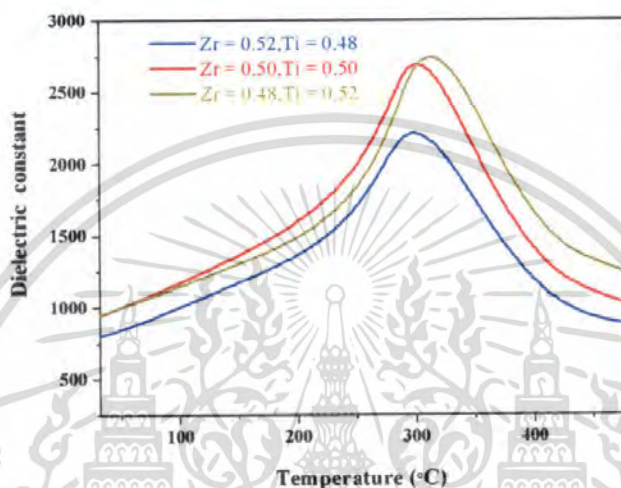


รูปที่ 4.12 แสดงผลกระทบจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปต่อค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก PMnN-PZT-PZN  
(ก)  $x = 0.48$  (ข)  $x = 0.50$  (ค)  $x = 0.52$

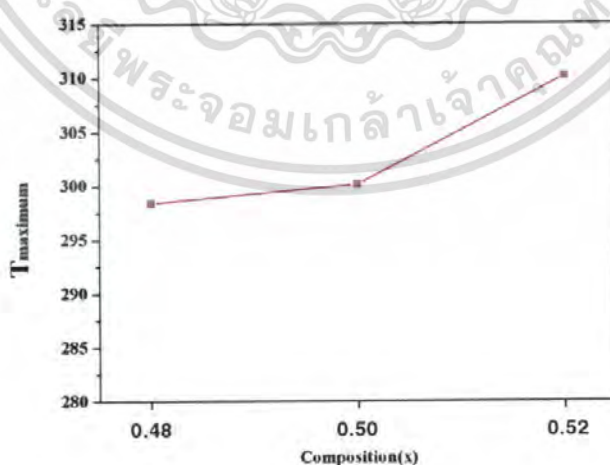
จากรูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่าง ๆ กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจากผลการตรวจสอบนี้ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกนั้นจะพบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.48$ ,  $x = 0.50$ ,  $x = 0.52$  จะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกสูงอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากอุณหภูมิที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงนั้น มักจะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเกิดขึ้นด้วยเสมอและยังพบอีกว่าที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของ PMnN-PZT-PZN เซรามิกทุกสัดส่วนองค์ประกอบนั้นจะให้ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่สูงมาก และที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอุณหภูมิเหนืออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจะส่งผลให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมของธาตุนั้นหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การโพลาไรเซชันภายในผลึกมีมากขึ้น จากปรากฏการณ์นี้ส่งผลให้โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นไม่สามารถสลับขั้วตามสนามไฟฟ้ากระแสสลับได้ทัน ส่งผลให้เกิดความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจึงสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าความถี่นั้นมีผลต่อลักษณะของกราฟค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบได้แตกต่างกัน โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบของ  $x = 0.48, x = 0.50, x = 0.52$  นั้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก PMnN-PZT-PZN ที่ความถี่ 1 kHz



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ( $T_{max}$ ) และสัดส่วนองค์ประกอบ  $X = 0.48, x = 0.50, x = 0.52$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

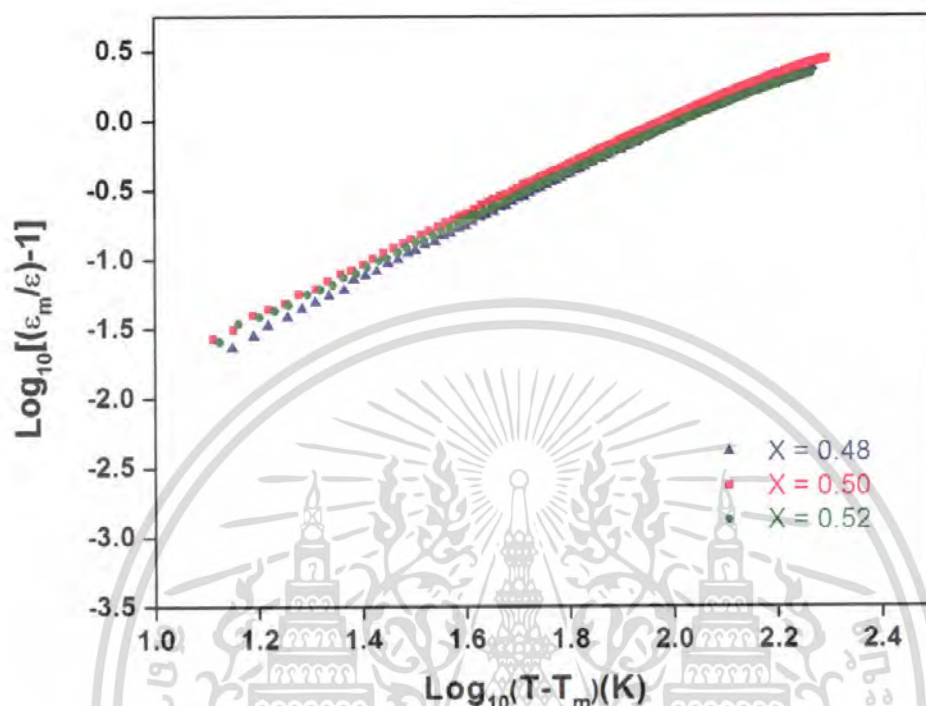
จากลักษณะกราฟรูปที่ 4.13 เมื่อนำค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของเซรามิกแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบมาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นกราฟแสดงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ  $\text{PMnN-PZN-PZT}$  จากกราฟเมื่อสัดส่วน องค์ประกอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ลักษณะของกราฟค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกว้างขึ้น และยังพบว่าเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti เพิ่มมากขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย นอกจากนี้อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ( $T_m$ ) นี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti เพิ่มมากขึ้น

จากทฤษฎีอุณหภูมิและการเปลี่ยนเฟสนั้น (Lu and Hwang, 1999b; Safari et al., 1996; Vitayakorn, 2005) กล่าวว่าสารนอลมัลเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่เหนืออุณหภูมิกการเปลี่ยนเฟสนั้นจะเป็นไปตามกฎของคูรี-ไวส์ โดยที่เหนืออุณหภูมินั้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสารจะลดลงต่ำกว่าค่าสภาพยอมในสูญญากาศ แต่สำหรับสารรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะอธิบายได้ตามสมการดังนี้

$$\frac{1}{\epsilon_r} - \frac{1}{\epsilon_{r,\max}} = \frac{(T - T_m)^\gamma}{2\epsilon_{r,\max}\delta^\gamma} \quad (1)$$

โดย  $\epsilon_r$  เป็นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์  $\epsilon_{r,\max}$  เป็นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงสุดที่ตรวจวัดได้  $\gamma$  เป็นค่าองศาของสมบัติรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก ถ้าค่านี้เท่ากับ 1 แสดงว่าจะมีพฤติกรรมเป็นไปตามกฎของคูรี-ไวส์ แต่ถ้าค่านี้มีค่าเท่ากับ 2 จะทำให้มีพฤติกรรมเป็นกำลังสองของคูรี-ไวส์ ส่วนค่า  $\delta$  เป็นค่าที่แสดงถึงการกระจายของพิกสภาพยอมสัมพัทธ์ ซึ่งถ้าค่านี้มีมากจะส่งผลให้ลักษณะกราฟนั้นกว้างขึ้นด้วย เมื่อนำสมการที่ 1 มาจัดอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\ln\left(\frac{1}{\epsilon_r} - \frac{1}{\epsilon_{r,\max}}\right) = \gamma \ln(T - T_m) - (\gamma \ln \delta + \ln 2 \epsilon_{r,\max}) \quad (2)$$



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\left(\frac{1}{\epsilon_r} - \frac{1}{\epsilon_{r,max}}\right)$  และ  $\ln(T - T_m)$  ของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก PMnN-PZT-PZN

จากสมการที่ 2 จะเป็นสมการเส้นตรงเมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\left(\frac{1}{\epsilon_r} - \frac{1}{\epsilon_{r,max}}\right)$  และ  $\ln(T - T_m)$  จากข้อมูลค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ดังรูปที่ 4.13 นั้นจะสามารถหาความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2 โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\left(\frac{1}{\epsilon_r} - \frac{1}{\epsilon_{r,max}}\right)$  และ  $\ln(T - T_m)$  ซึ่งจะได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ 4.15 จากกราฟพบว่าเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti เพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งความชันของเส้นกราฟนั้นจะเป็นค่า  $\gamma$  จากนั้นนำค่า  $\gamma$  มาคำนวณหาค่า  $\delta$  ตามสมการที่ 2 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2 จากผลการคำนวณนี้ค่า  $\gamma$  นั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti เพิ่มขึ้นบ่งบอกถึงการมีสมบัติรีแลกเวอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกมากขึ้นตามการเพิ่มสัดส่วนองค์ประกอบและค่า  $\delta$  จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มสัดส่วนองค์ประกอบ แสดงถึงการ

เอกสารที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายพิกสภาพยอมสัมพัทธ์ โดยลักษณะพิกจะกว้างขึ้นตามสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti ที่เพิ่มขึ้นด้วย

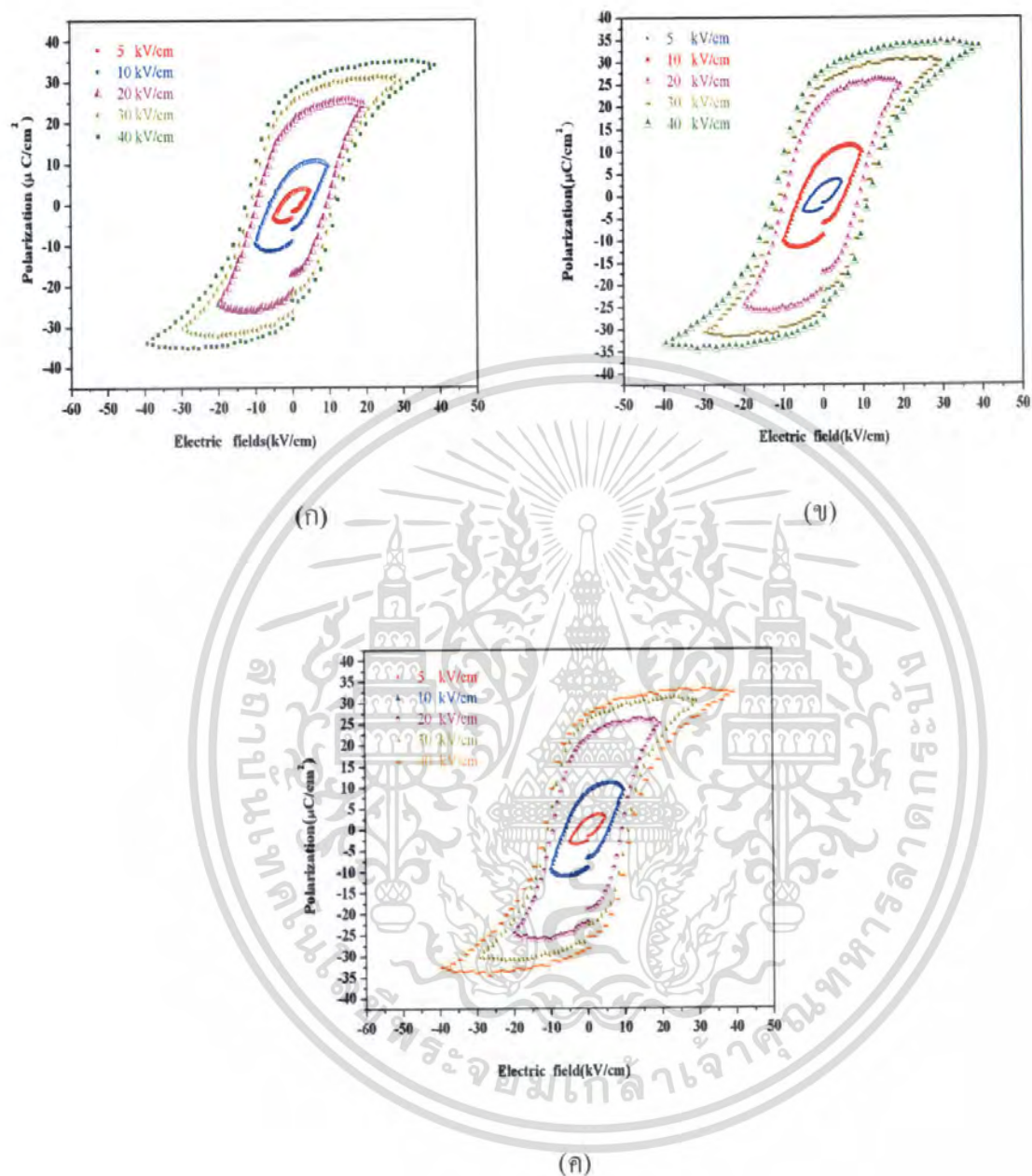
ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางไดอิเล็กทริกของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$

ส่วนประกอบ	$T_m(^{\circ}\text{C})$	$\epsilon_{r,\text{max}}$	$\delta$	$\gamma$
X=0.48	296	2057	1.84	1.53
X=0.50	299	2568	1.76	1.56
X=0.52	310	2503	1.82	1.67

#### 4.5 ตรวจสอบทางเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอเรซิส

จากนั้นนำ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก  $\text{PMnN-PZT-PZN}$  มาตรวจสอบทางเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอเรซิส ซึ่งการตรวจสอบนี้เป็นส่วนหนึ่งของการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก โดยตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ได้รับและค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นมา ซึ่งมีลักษณะตามรูปที่ 4.16 เป็นรูปที่แสดงผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าต่อลักษณะฮิสเทอเรซิสลูปของเซรามิก  $\text{PMnN-PZT-PZN}$  ในสัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.48, x=0.50, x=0.52$  โดยเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นพบว่าลักษณะของฮิสเทอเรซิสลูปของเซรามิกแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบจะมีขนาดใหญ่มากขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาริเซชันคงเหลือ ( $P_r$ ) ค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว ( $P_s$ ) และค่าสนามไฟฟ้าบังคับ ( $E_c$ ) จะพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของฮิสเทอเรซิสลูปใหญ่ขึ้น เนื่องจากค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว และค่าโพลาริเซชันคงเหลือเพิ่มขึ้นแต่ค่าสนามไฟฟ้าบังคับนั้นค่อนข้างคงที่ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำ (5 กิโลโวลต์) จะเหนี่ยวนำให้เกิดการโพลาริเซชันได้น้อยจึงทำให้ลักษณะของฮิสเทอเรซิสลูปที่ค่อนข้างเล็ก และเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจะทำให้เหนี่ยวนำให้เกิดโพลาริเซชันมากขึ้นจนถึงค่าศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งลักษณะฮิสเทอเรซิสลูปจะเริ่มคงที่ (40 กิโลโวลต์) เพราะศักย์ไฟฟ้าค่า นี้จะทำให้ผลึกเกิดการโพลาริเซชันจนเกือบทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะฮิสเทอริซิสลูปของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก PMnN-PZT-PZN แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบความเข้มข้น โดยทำการตรวจสอบพร้อมการเปลี่ยนแปลงที่ศักย์ไฟฟ้า

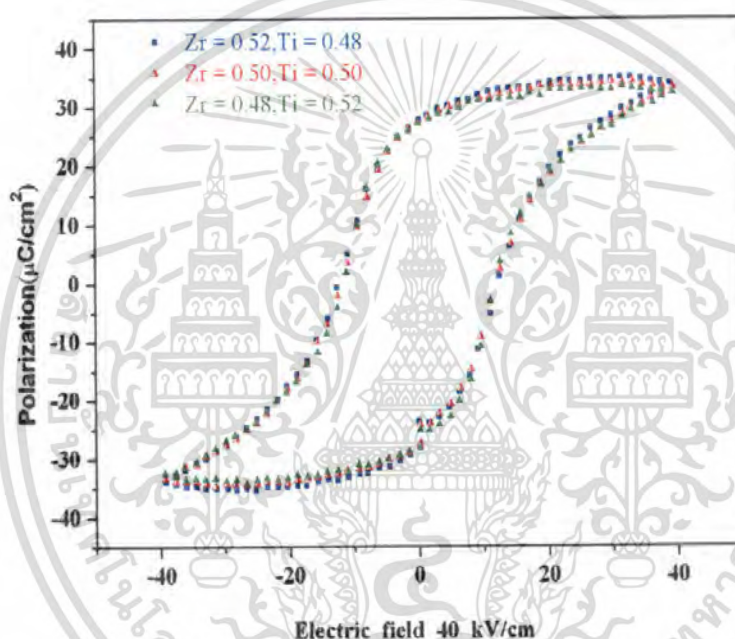
(ก)  $x = 0.48$

(ข)  $x = 0.50$

(ค)  $x = 0.52$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

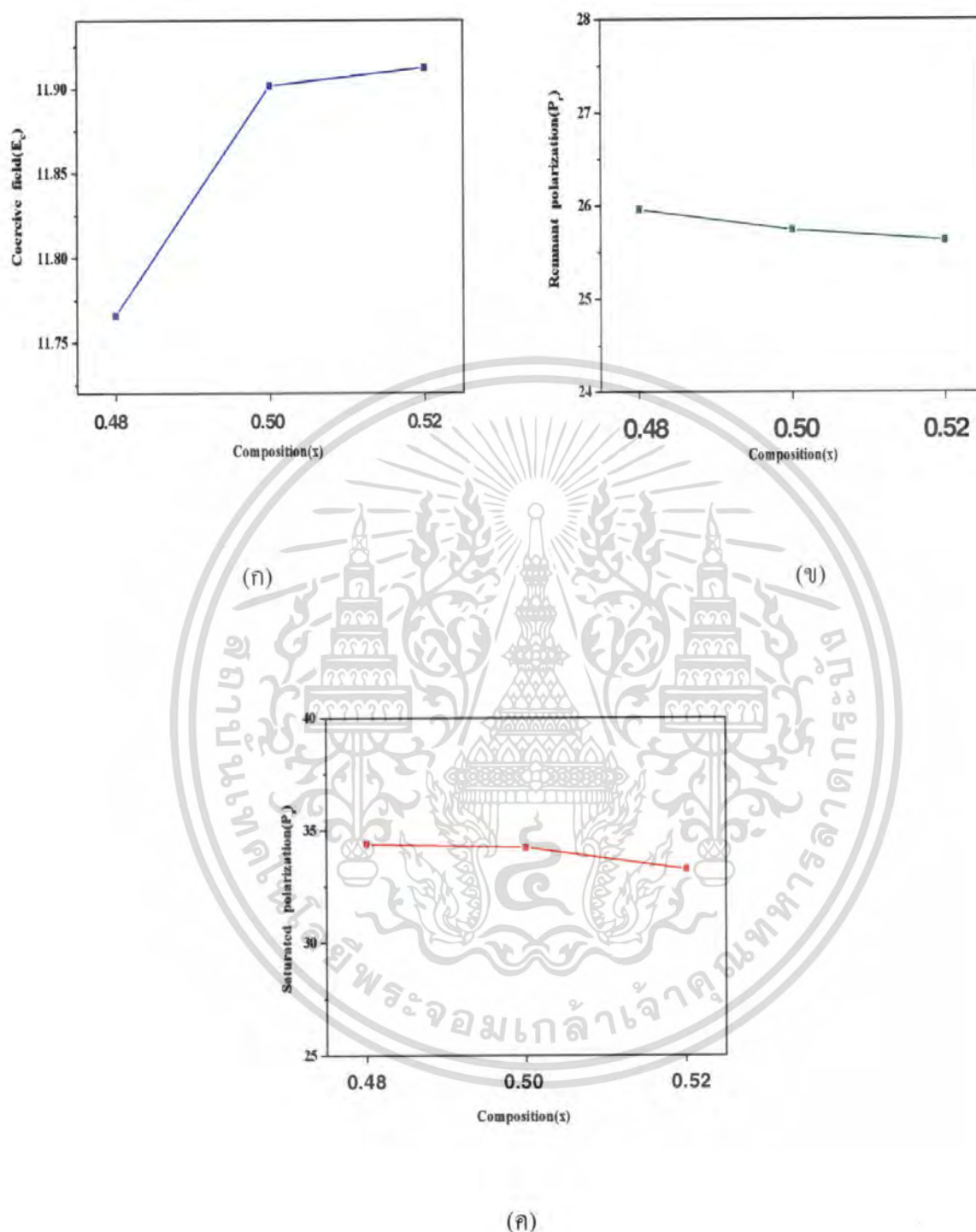
จากนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะฮิสเทอเรซิสลูปของแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบดังรูปที่ 4.17 ซึ่งแสดงผลกระทบของสัดส่วนองค์ประกอบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก  $\text{PMnN-PZT-PZN}$  ต่อลักษณะของฮิสเทอเรซิสลูป จากผลการเปรียบเทียบนี้พบว่า ลักษณะของฮิสเทอเรซิสลูปจะมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยค่าโพลาริเซชันคงเหลือจะลดลงและค่าสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ส่วนค่าโพลาริเซชันอิ่มตัวนั้นจะมีแนวโน้มที่ลดลง



รูปที่ 4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะฮิสเทอเรซิสของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก  $\text{PMnN-PZT-PZN}$  เมื่อสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  เปลี่ยนแปลง

จากนั้นเมื่อนำค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว ค่าโพลาริเซชันคงเหลือ และค่าสนามไฟฟ้าบังคับของแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบมาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชันอิ่มตัว ค่าโพลาริเซชันคงเหลือและค่าสนามไฟฟ้าบังคับของแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ จากกราฟนี้พบว่า เมื่อสัดส่วนขององค์ประกอบของ  $\text{Ti}$  เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันอิ่มตัวและค่าโพลาริเซชันมีแนวโน้มลดลงและค่าสนามไฟฟ้าบังคับมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะเป็นไปดังรูปที่ 4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

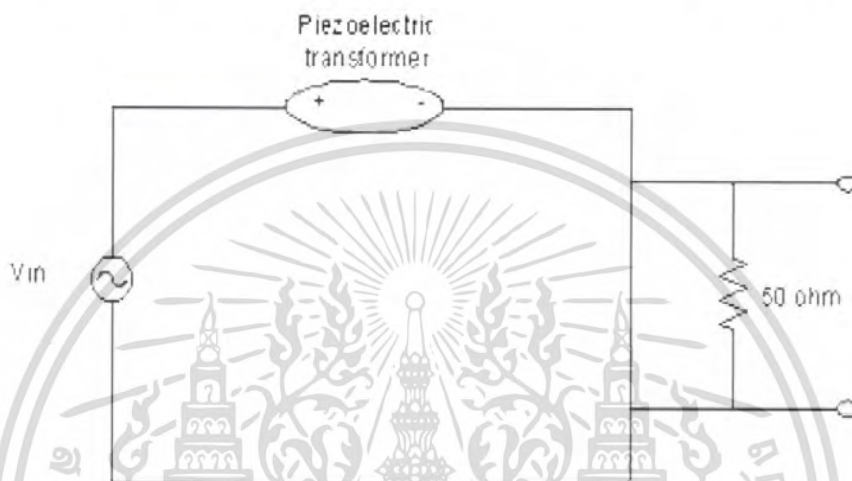


รูปที่ 4.18 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าต่อสนามไฟฟ้าบังคับ ( $E_c$ ) และค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว ( $P_r$ ) และค่าโพลาริเซชันคงเหลือ ( $P_s$ ) ของ  $\text{PbS(MnN)}_{0.07}\text{(ZnN)}_{0.06}\text{(Zr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{)}\text{O}_3$  เซรามิก PMnN-PZT-PZN ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.48, x = 0.50, x = 0.52$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

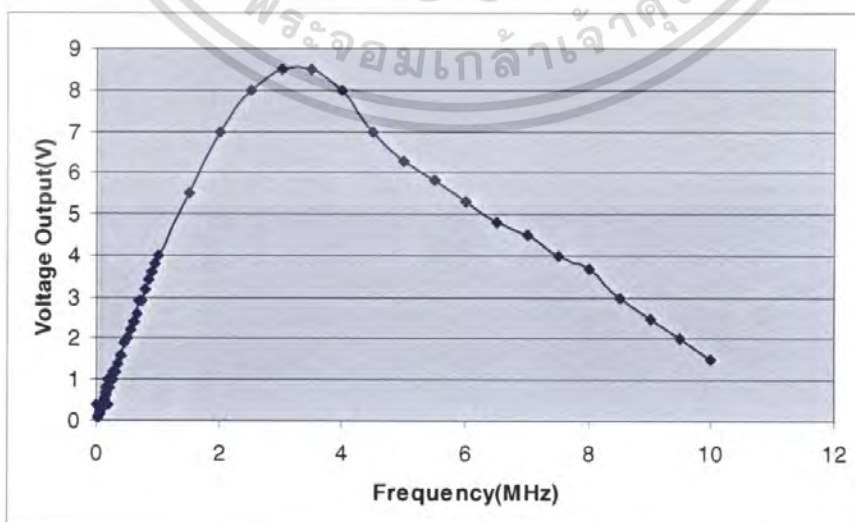
#### 4.6 ผลการทดสอบใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

หลังจากทำการอัดเป็นเม็ดเซรามิกและนำไปทำการ โพลซ์ไว้เรียบร้อยแล้วนั้น นำไปทำการทดสอบใช้งาน โดยต้องหาความถี่เรโซแนนซ์ก่อน เพราะต้องหาสมบัติทางไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ว่าที่ความถี่สูงสุดจะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด ดังวงจรดังรูปที่ 4.19



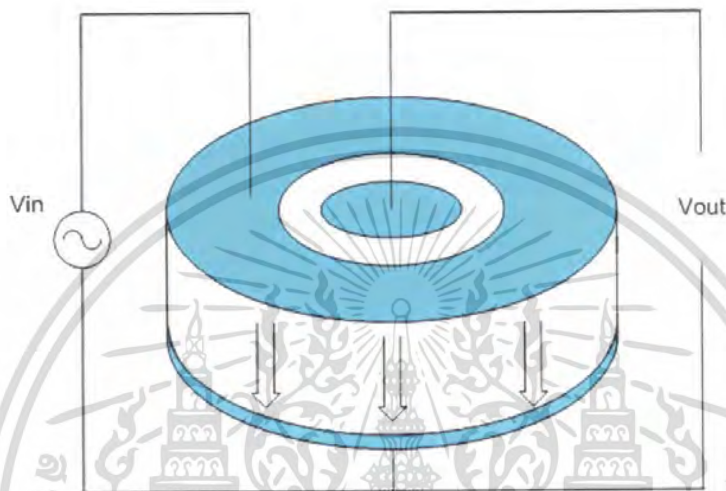
รูปที่ 4.19 แสดงรูปวงจรที่หาความถี่เรโซแนนซ์

เมื่อทำการต่อวงจรตามรูปที่ 4.19 นั้น สามารถหาความถี่เรโซแนนซ์ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ได้ 3.5 MHz ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.20



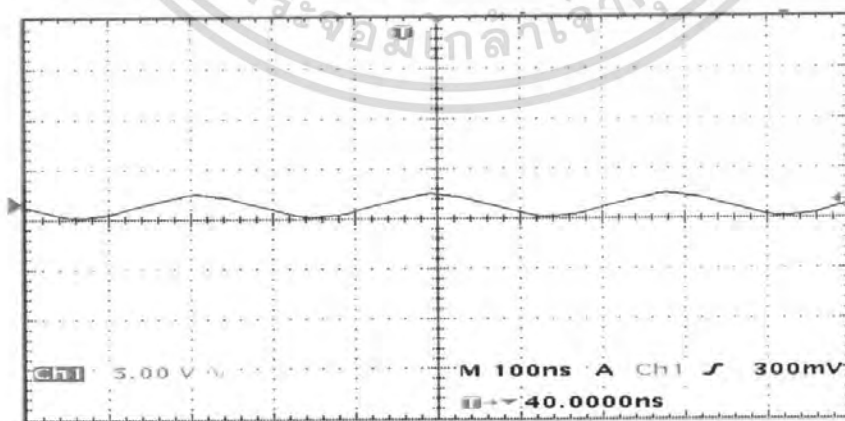
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับการเรียนการสอนที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการหาความถี่เรโซแนนซ์ได้แล้วก็นำเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ไปทดสอบว่าสามารถทำงานได้หรือไม่ โดยต่อวงจรตามรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 รูปวงจรทดสอบการทำงานเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

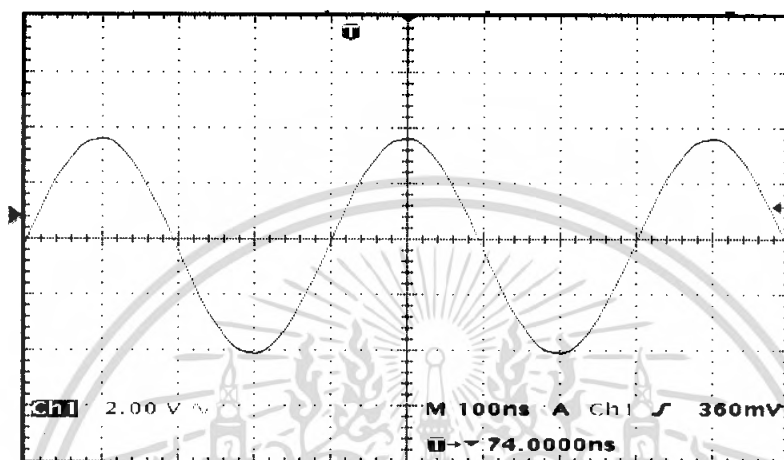
เมื่อต่อวงจรตามรูปที่ 4.21 ทำการป้อนความถี่เรโซแนนซ์ 3.5 MHz แรงดัน 10 V สามารถวัดแรงดันที่ขาออกได้ 2.5 MHz ได้ความถี่ที่ 3.3 MHz ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงกราฟเมื่อป้อนความถี่เรโซแนนซ์ 3.5 MHz แรงดัน 10 V

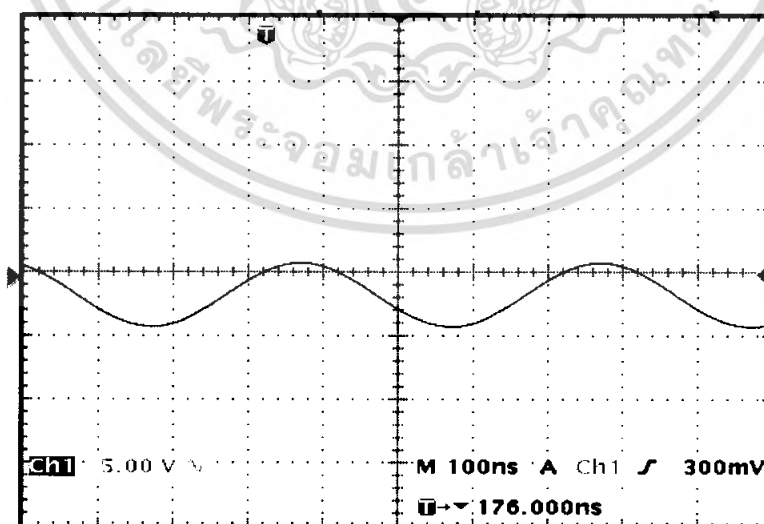
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเปลี่ยนความถี่โดยป้อนความถี่ที่ 2.5 MHz แรงดัน 10 V สามารถวัดแรงดันที่ขาออกได้ 7.6 MHz ได้ความถี่ที่ 2.5 MHz ดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 แสดงกราฟเมื่อป้อนความถี่ 2.5 MHz แรงดัน 10 V

ทำการเปลี่ยนความถี่โดยป้อนความถี่ที่ 1 MHz แรงดัน 10 V สามารถวัดแรงดันที่ขาออกได้ 6 MHz ได้ความถี่ที่ 2.3 MHz ดังแสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟเมื่อป้อนความถี่ 1 MHz แรงดัน 10 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุป

#### สรุปผลการทดลอง

1. สามารถเตรียมผง  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT) ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ให้ได้เฟสเพอโรฟสไกต์ที่มีความบริสุทธิ์สูง พบว่าสัดส่วนที่องค์ประกอบของผง  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT) เผาแคลไซน์จะใช้ที่อุณหภูมิ 850 °ซ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตรา 20 °ซ ต่อนาที
2. เมื่อนำมาตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผง PMnN-PZN-PZT แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบพบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารระบบ PMnN-PZN-PZT แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบ Ti เพิ่มขึ้นพบว่ามีการเฟสไฟโรคลอร์เกิดขึ้นด้วย
3. สามารถเตรียม  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก PMnN-PZN-PZT แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบให้มีความบริสุทธิ์สูงและมีค่าความหนาแน่นมากกว่าร้อยละ 90 โดยอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดคือ 1100 °ซ เป็นเวลา 6 ชั่วโมงด้วยอัตรา 5 °ซต่อนาที เนื่องจากให้ค่าความหนาแน่นมากที่สุดอยู่ในช่วงร้อยละ 94.03 ถึง 95.21 และยังพบอีกว่าสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti นั้นไม่ส่งผลต่อความหนาแน่น โดยค่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซินเตอร์และสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti ไม่ส่งผลต่อค่าการหดตัวเช่นเดียวกับค่าความหนาแน่น
4. เมื่อนำมาตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิก PMnN-PZN-PZT แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก PMnN-PZN-PZT แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบ เมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti เท่ากับ 0.52 พบว่ามีการแยกฟีก 2 ฟีกซึ่งแสดงว่าเป็นเฟสเทอร์โกนอลและเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti ลดลงจะเปลี่ยนเป็นฟีกเดียวซึ่งแสดงว่าเป็นเฟสโรมโบฮีดรอล เมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti เท่ากับ 0.50 น่าจะเป็นบริเวณที่มีทั้งเฟสเทอร์โกนอลและเฟสโรมโบฮีดรอลทั้ง 2 เฟสอยู่ร่วมกัน นั่นคือ มอร์โฟทรอบิกเฟสบาวเดรี

5. จากการตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่อความถี่ที่ได้รับเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก  $\text{PMnN-PZN-PZT}$  แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น พร้อมกับมีค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย
6. จากการตรวจสอบทางเฟอร์โรฮิสเทอเรซิสของ  $\text{PbS(MnN)}_{0.07}(\text{ZnN)}_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก  $\text{PMnN-PZN-PZT}$  นั้นแสดงให้เห็นการเกิดโพลาริเซชันเมื่อได้รับความต่างศักย์ไฟฟ้าภายนอก ซึ่งพบเมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์จากต่ำไปสูง (5 kV – 40 kV) พบว่าจะทำให้ขนาดของฮิสเทอเรซิสลูปใหญ่ขึ้น โดยทำให้ค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว ค่าโพลาริเซชันคงเหลือและค่าสนามไฟฟ้าบังคับเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันอิ่มตัวนั้นลดลง ค่าโพลาริเซชันคงเหลือลดลง และค่าสนามไฟฟ้าบังคับเพิ่มขึ้น
7. จากการทดสอบสามารถหาความถี่เรโซแนนซ์ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์ ได้ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเท่ากับ 3.5 MHz เพื่อหาว่าความถี่ที่สูงที่สุดนั้นสามารถให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงได้
8. สารเพียโซอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นมาสามารถนำไปใช้งานเป็นเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์ได้ และยังคงมีการศึกษาและพัฒนาเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์เพิ่มเติมต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ปริชญานิพนธ์ ของคณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี  
สาขาเคมีอุตสาหกรรม-เครื่องมือวิเคราะห์ ปีการศึกษา 2549 สจล.
- [2] ดร.รัตติกร์ ยี่มนิรัฐและผศ.ดร.สุพล อนันตา วิชาอิเล็กทรอนิกส์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2545  
เล่ม 3.
- [3] วิทยานิพนธ์ เรื่องการสร้างและวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าสมมูล BVD ของ  
สารเพียโซอิเล็กทริก, เกล็ดมัทซึ จีระพันธุ์, สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. พ.ศ. 2549.
- [4] วิทยานิพนธ์ เรื่องการศึกษาเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์สำหรับ  
การประยุกต์ใช้งานในวงจรจ่ายกำลังแบบ Switching, มณฑล นาวงษ์  
สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม บัณฑิตวิทยาลัย วิศวกรรมศาสตร์ สจล.  
พ.ศ. 2546.
- [5] ดร.รัตติกร์ ยี่มนิรัฐและผศ.ดร.สุพล อนันตา วิชาอิเล็กทรอนิกส์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2545  
เล่ม 1.
- [6] ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ.
- [7] Fabrication and characterization of piezoelectric  $Pb(Zr,Ti)O_3$ -  
 $Pb(Mn,W,Sb,Nb)O_3$  step-down Piezoelectric transformer.
- [8] Electrical properties of low temperature sintering multilayer  
piezoelectric transformer using  $Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ -  
 $Pb(Zr,Ti)O_3$  ceramics.
- [9] High Power Piezoelectric Transformer, K. Uchino, P. Laoratanakul,  
S. Manuspiya and A. Vazquez-Carazo([www.psu.edu/dept/ICAT](http://www.psu.edu/dept/ICAT)).  
Fabrication and electrical characteristics of piezoelectric  
PMN-PZN-PZT ceramics Transformer.
- [10] Electrical characteristics of high power piezoelectric transformer  
for 28 W fluorescent lamp.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Fabrication and characteristics of PDA LCD backlight driving circuits using Piezoelectric transformer.
- [12] Perovskite formation, dielectric and ferroelectric properties of  $\text{PbZrO}_3$ - $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  Ceramics via a columbite precursor synthetic route.
- [13] The morphotropic phase boundary and dielectric properties of the  $x\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$ - $(1-x)\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  perovskite solid solution.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้