



รายงานโครงการวิจัย  
เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ประจำปีงบประมาณ 2550

เรื่อง

ทรานสฟอร์มเมอร์แบบเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกส์  
Piezoelectric Ceramics Transformer

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายรังสรรค์ เมืองเหนือ

RCH

TK

4872

.P54

ร 314 ๗

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 84493

วัน,เดือน,ปี..... 13 ต.ค. 2551

11 กค ๒๐1๒

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

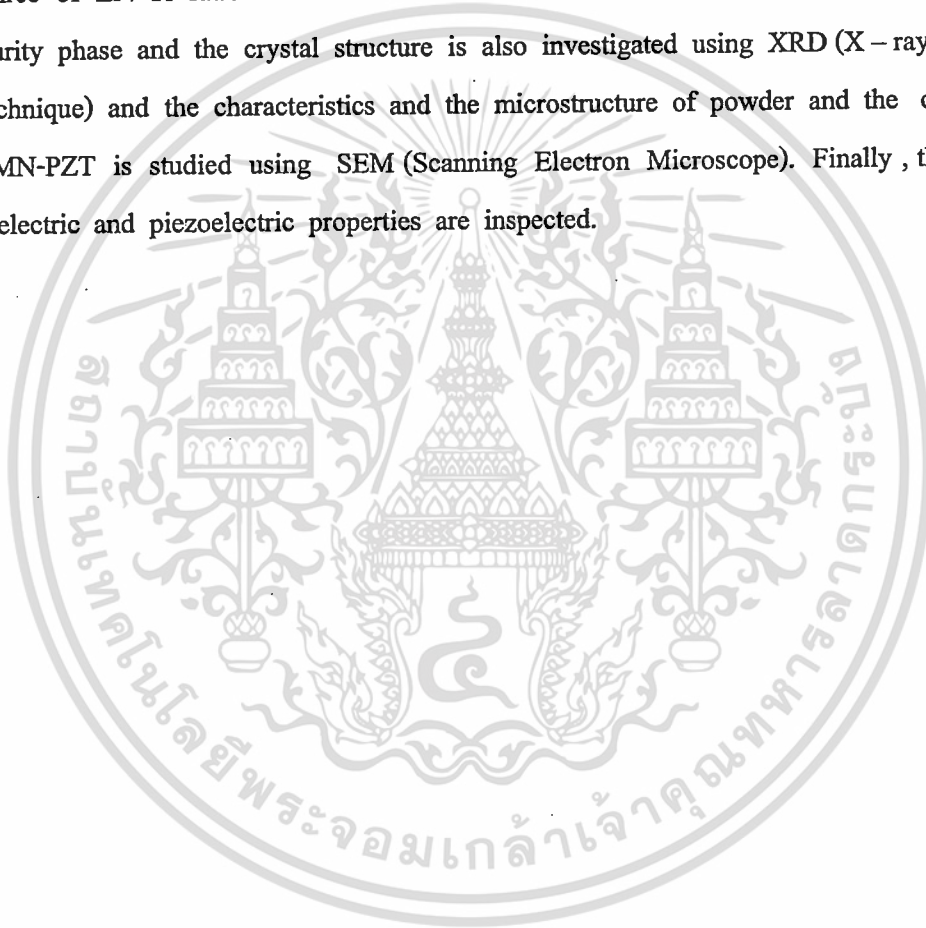
## บทคัดย่อ

ในโครงวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเตรียมสารละลายของแข็งของ  $Pb_{0.97}Sr_{0.03}[(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.07}(Zn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.06} \times (Zr_{0.48}Ti_{0.52})_{0.87}]O_3 + 0.3 \text{ wt\% } Nb_2O_5 + 0.3 \text{ wt\% } CuO + 0.3 \text{ wt\% } Bi_2O_3 + 0.1 \text{ wt\% } Li_2CO_3$  (PZN-PMN-PZT) ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid state reaction) โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Zr/Ti ทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ Zr/Ti = 48/52 50/50 และ 52/48 ตามลำดับ ศึกษาการเกิดเฟสบริสุทธิ์และโครงสร้างผลึกของผง PZN-PMN-PZT ด้วยวิธีเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคของผงและเซรามิก PZN-PMN-PZT ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากนั้นทำการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กตริกและเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิกที่เตรียมได้



### Abstract

This research studies the preparation of the solution of the solid  $\text{Pb}_{0.97}\text{Sr}_{0.03}[(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.07}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.06}(\text{Zr}_{0.48}\text{Ti}_{0.52})_{0.87}]\text{O}_3 + 0.3 \text{ wt}\% \text{Nb}_2\text{O}_5 + 0.3 \text{ wt}\% \text{CuO} + 0.3 \text{ wt}\% \text{Bi}_2\text{O}_3 + 0.1 \text{ wt}\% \text{Li}_2\text{CO}_3$  (PZN-PMN-PZT) by using solid state reaction method. Three of Zr/Ti ratio have been studied Zr/Ti = 48/52, 50/50 and 52/48 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-PMN-PZT is studied using SEM (Scanning Electron Microscope). Finally, the ceramic's dielectric and piezoelectric properties are inspected.



## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนอุดหนุนในการศึกษาและทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวิเคราะห์ฟิล์ม โลหะ ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ดร. นราธิป วิทยากร ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์

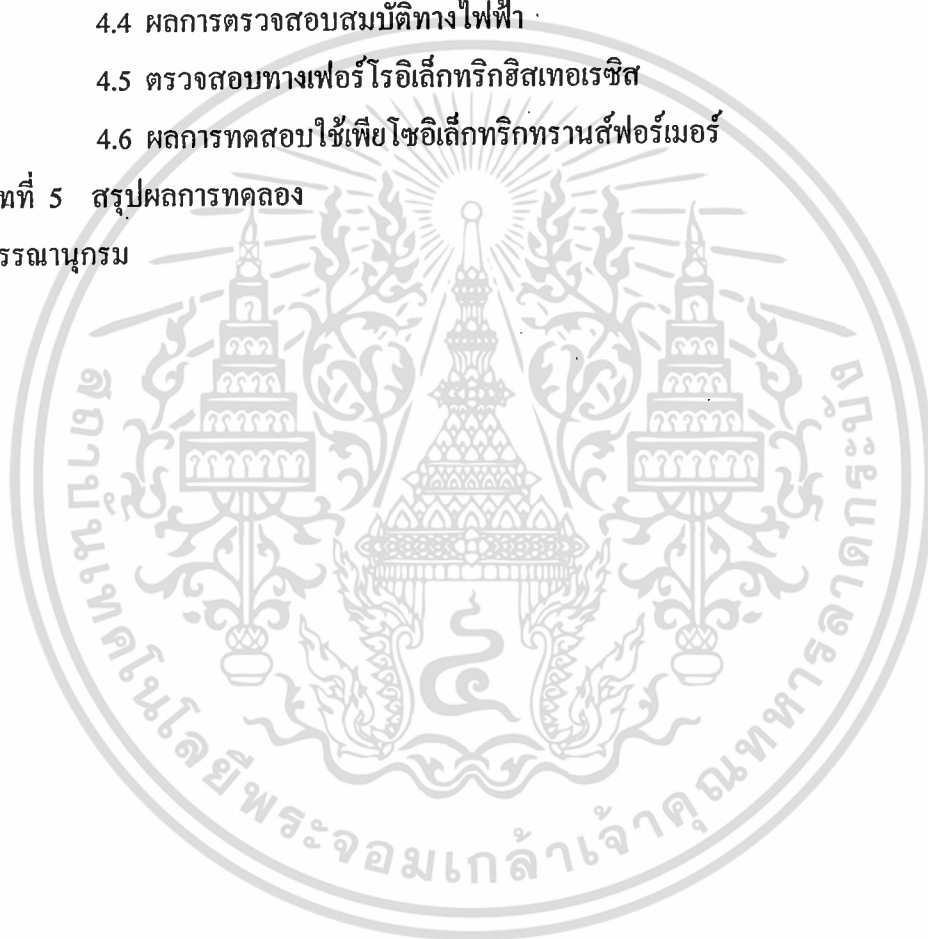
รังสรรค์ เมืองเหลือ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 เพียโซอิเล็กทริก	4
2.2 การประยุกต์ใช้สารเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก และอิเล็กโทรสตรักเจอร์	5
2.3 หม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริก	6
2.4 ลักษณะเฉพาะทั่วไปและการประดิษฐ์สารพีแซดที่	10
2.5 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกและอิเล็กโทรสตรักเจอร์	19
2.6 การเคลือบ	20
2.7 ซินเทอร์เซรามิก	21
บทที่ 3 กระบวนการเตรียมและการวัด	25
3.1 สารเคมี	25
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้	26
3.3 กระบวนการเตรียมผง PMN-PZN-PZT	26
3.4 กระบวนการเตรียมเซรามิก	29
3.5 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(XRD)	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก	34
3.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก	35
3.8 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย	41
4.1 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์(XRD) ของผง PMnN-PZN-PZT	37
4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก PMnN-PZN-PZT	39
4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของเซรามิก	43
4.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	45
4.5 ตรวจสอบทางเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอเรซิส	53
4.6 ผลการทดสอบใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์	57
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	60
บรรณานุกรม	62



## สารบัญรูปรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ปรัชญาการณพีโซอิเล็กทริก	4
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกและอิเล็กโตรสตรักทีฟจาก PZT, PLZT และ PMN	5
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของเซรามิกที่ใช้ในการประยุกต์ต่างๆ	6
รูปที่ 2.4 (ก) การสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการสั่นสะเทือน	7
รูปที่ 2.5 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ที่มีการประยุกต์มาจากการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	7
รูปที่ 2.6 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์	8
รูปที่ 2.7 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ชนิด Rosen Type	8
รูปที่ 2.8 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ชนิด Thickness Vibration Mode	9
รูปที่ 2.9 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ชนิด Radial Vibration Mode	9
รูปที่ 2.10 สนามขจัดไดอิเล็กทริกที่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันอัดแกนเดียวสำหรับสาร PZT จี้อด้วยตัวให้โดยที่(-) แสดงผลลัพธ์ที่คาดในกรณีที่มีค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก	11
รูปที่ 2.11 เสถียรภาพของเฟสในระบบ $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$	12
รูปที่ 2.12 ค่าสัมประสิทธิ์การคู่ควบและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ในช่วงต่างๆขององค์ประกอบทางเคมีในระบบพีแซดที	13
รูปที่ 2.13 วงรอบ P-E กับการเพิ่มขึ้นของความแรงสนามไฟฟ้า ตรงส่วนปลายยอด ที่ 50 Hz สำหรับเซรามิกที่เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริก	15
รูปที่ 2.14 อิทธิพลของการเดินแล่นทานัมที่มีต่อสภาพด้านทานไฟฟ้าของสารเซรามิก	17
รูปที่ 2.15 เตาเผาแบบหมุน	21
รูปที่ 2.16 (ก) การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น ทรงกลมสัมผัสกัน (ข) ช่วงสุดท้ายของการซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น ทรงกลมเริ่มเชื่อมติดกัน (ค) การซินเตอร์ช่วงกลาง เกรนเปลี่ยนรูปร่าง (ง) การซินเตอร์ช่วงสุดท้ายรูพรุนเป็นแบบเททระฮีดรอล	

## สารบัญรูปลูกภาพ (ต่อ)

รูปที่ 2.17 การซินเตอร์	23
รูปที่ 3.1 การบดย่อยด้วยเครื่องบดย่อย (Ball-milling)	27
รูปที่ 3.2 เตาไฟฟ้าสำหรับเผาสาร	28
รูปที่ 3.3 แผนผังการเตรียมผง PMN-PZT-PZN	29
รูปที่ 3.4 การจัดเรียงชิ้นงานในถ้วยอะลูมินาสำหรับการเผาซินเตอร์	30
รูปที่ 3.5 แผนผังการเผาซินเตอร์	31
รูปที่ 3.6 แผนผังกระบวนการเตรียมเซรามิก	32
รูปที่ 3.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	33
รูปที่ 3.8 เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance	34
รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลิตโดยบริษัท LEO รุ่น LEO 1455 VP	35
รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงในระบบ $PbS(MnN)_{0.07}(ZnN)_{0.06}-(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ (PMnN-PZN-PZT)	37
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะและตำแหน่งของเฟสไพโรคลอร์(pyrochlore)	38
รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงในระบบ $PbS(MnN)_{0.07}(ZnN)_{0.06}-(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ (PMnN-PZN-PZT) เปรียบเทียบกับ เพิ่มข้อมูลมาตรฐาน JCPDS file no. 33-0784 ของสารประกอบ เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต(PZT)	39
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของ $PbS(MnN)_{0.07}(ZnN)_{0.06}(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ เซรามิก (PMnN-PZN-PZT) สกัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ หลังจากผ่านการซินเตอร์ ที่อุณหภูมิ 1100 °ซ 6 ชั่วโมง	40
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของเกรนบนพื้นผิวของ $PbS(MnN)_{0.07}(ZnN)_{0.06}(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ เซรามิกแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 °ซ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ก) x = 0.52 (ข) x = 0.50 (ค) x = 0.48	42
รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก $PbS(MnN)_{0.07}(ZnN)_{0.06}-(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ ที่ค่า x มีค่าเท่ากับ 0.48 0.50 และ 0.52	43
รูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของพีค (2 0 0) ของเซรามิก $PbS(MnN)_{0.07}-(ZnN)_{0.06}(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ โดยที่ x = 0.52 x = 0.50 x = 0.48	44
รูปที่ 4.8 แสดงผลกระทบของสัดส่วนองค์ประกอบ $PbS(MnN)_{0.07}(ZnN)_{0.06}$ $(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ เซรามิก PMnN-PZT-PZN ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปลภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.9	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีสัดส่วน $x = 0.48$ เทียบกับอุณหภูมิที่ความถี่ระหว่าง 100 Hz – 100kHz	46
รูปที่ 4.10	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีสัดส่วน $x = 0.50$ เทียบกับอุณหภูมิที่ความถี่ระหว่าง 100 Hz – 100kHz	47
รูปที่ 4.11	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีสัดส่วน $x = 0.52$ เทียบกับอุณหภูมิที่ความถี่ระหว่าง 100 Hz – 100kHz	48
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) $x = 0.52$	49
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป 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 ที่ความถี่ 1 kHz	50
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ( $T_m$ ) และสัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.48, x = 0.50, x = 0.52$	51
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	52
รูปที่ 4.16	แสดงลักษณะฮิสเทอเรซิสลูปของ $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$ เซรามิก PMnN-PZT-PZN แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบความเข้มข้นโดยทำการตรวจสอบพร้อมการเปลี่ยนแปลงที่ศักย์ไฟฟ้า $x = 0.48$ (ข) $x = 0.50$ (ค) $x = 0.52$	54
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 PMnN-PZT-PZN เมื่อสัดส่วนองค์ประกอบ $x$ เปลี่ยนแปลง	55
รูปที่ 4.18	แสดงผลการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าต่อสนามไฟฟ้าบังคับ ( $E_c$ ) และค่าโพลาริเซชัน อิมตัว ( $P_u$ ) 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 PMnN-PZT-PZN ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 0.48, x = 0.50, x = 0.52$	56

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.19	แสดงรูปวงจรถูกหักความถี่เรโซแนนซ์	57
รูปที่ 4.20	แสดงกราฟความถี่เรโซแนนซ์	57
รูปที่ 4.21	รูปวงจรถดสอบการทำงานเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์	58
รูปที่ 4.22	แสดงกราฟเมื่อป้อนความถี่เรโซแนนซ์ 3.5 MHz แรงดัน 10 V	58
รูปที่ 4.23	แสดงกราฟเมื่อป้อนความถี่ 2.5 MHz แรงดัน 10 V	59
รูปที่ 4.24	แสดงกราฟเมื่อป้อนความถี่ 1 MHz แรงดัน 10 V	59



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

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

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกคือ ปรากฏการณ์ที่วัสดุเมื่อได้รับความเค้นแล้วเป็นผลทำให้เกิด ความเครียดในวัสดุส่งผลให้วัสดุนั้นเกิดการโพลาริเซชันทางไฟฟ้า ซึ่งปรากฏการณ์ในลักษณะนี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง”(Direct piezoelectric effect) และในทางตรงกันข้าม เมื่อวัสดุนี้ ยังสามารถเกิดความเครียดซึ่งเป็นสัดส่วนเดียวกับสนามไฟฟ้าที่ได้รับเข้าไปปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม” และในปัจจุบันยังมีการนำเพียโซอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้อย่าง กว้างขวาง เช่น ระบบโซนาร์ ระบบหัวฉีดน้ำมันและใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างมากมาย ได้แก่ เซนเซอร์(Sensor) , ตัวขับเคลื่อน(Actuator)

ปัจจุบันได้มีการนำเพียโซอิเล็กทริกนั้นนำมาประยุกต์ใช้เป็น เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างมาจากสารเซรามิก เช่น ควอตซ์(Quartz) ลิเทียมไนโอเบท (Lithium Niobate) และ PZT (Lead Zirconate Titanat) มีหลักการทำงาน โดยอาศัยการสั่นสะเทือนเป็นตัวกลาง ในการส่งถ่ายพลังงานและมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ มีขนาดบาง น้ำหนักเบา ทำงานโดยไม่ใช้การ เหนียวนาของสนามแม่เหล็กเพื่อส่งถ่ายพลังงานและยังมีประสิทธิภาพสูง

โครงสร้างและการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ มีการประยุกต์ใช้มาจาก หลักการทำงานของเพียโซอิเล็กทริก โดยการนำเพียโซอิเล็กทริกสองชิ้นมาเชื่อมต่อกันโดยชิ้นแรกทำ หน้าที่เป็นแอคชูเอเตอร์(Piezoelectric Actuators) และชิ้นที่สองทำหน้าที่เป็นทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducers) เมื่อนำทั้งสองชิ้นมาเชื่อมต่อกันก็กลายเป็นเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์ม เมอร์ ปัจจุบันเทคโนโลยีส่วนใหญ่มีแนวโน้มในการพัฒนาที่จะให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดที่บาง จึงการนำเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ เช่น Inverter, AC adapter, Battery Charger, Signal Isolation และ DC/DC Converter เป็นต้น

เลคเซอร์โคเนตไทเทเนต  $[Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3]$ ;PZT ถือได้ว่าเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ได้รับความนิยมอย่างสูงทั้งในเรื่องของการศึกษาค้นคว้าเชิงวิชาการ และการประยุกต์ในการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่างๆ เนื่องจาก PZT เป็นสารที่แสดงสมบัติพิโซอิเล็กทริกที่โดดเด่น สามารถเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึงร้อยละ 45 - 55 ขึ้นกับ สารที่เจือ ยิ่งไปกว่านั้น PZT ยังมีอุณหภูมิคูรีที่สูง จาก 230 - 490°C ขึ้นกับอัตราส่วน Zr:Ti โดย อัตราส่วนที่แสดงคุณสมบัติพิโซอิเล็กทริกที่โดดเด่น ได้แก่ อัตราส่วน Zr:Ti มีค่าเท่ากับ 0.52 :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.48 ซึ่งเป็นบริเวณรอยต่อเฟส (morphotropic phase boundary (MPB)) ยิ่งไปกว่านั้นการเตรียมเซรามิก PZT ให้มีความบริสุทธิ์และความหนาแน่นสูงนั้นสามารถเตรียมได้ไม่ยุ่งยากและสารตั้งต้นในการเตรียมมีราคาถูกเหมาะสมใช้ในอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีความพยายามมาโดยตลอดที่จะคิดค้นหาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ให้ดียิ่งขึ้นควบคู่ไปกับความพยายามในการลดขนาดของอุปกรณ์เหล่านี้ให้เล็กลงไปเรื่อย ๆ โดยยังคงสามารถรักษาประสิทธิภาพไว้ให้ได้เท่าเดิมและหากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้มากกว่าเดิมได้ก็ยิ่งดีและดังนั้นจึงมีความพยายามอย่างสูงที่จะปรับปรุงสมบัติของ PZT ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า หากทำการผสมสารเฟอร์โรอิเล็กทริก PZT เข้ากับแบบรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกสมบัติของสารละลายของแข็งดังกล่าวที่ได้ออกมาจะเป็นสมบัติทางไฟฟ้าที่สูงกว่า PZT บริสุทธิ์ เช่น PZT-PZN และ PZT-PMnN

ดังนั้นในโครงการนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมการสังเคราะห์ผงและเตรียมเซรามิก 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 ตามลำดับ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้สารมีความบริสุทธิ์สูงเป็นหลักและรวมทั้งเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ผงและเตรียมเซรามิกของ 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 และทำการเผาซินเตอร์ ในเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงโดยใช้ผง  $PbZrO_3$  กลบเพื่อลดการระเหยของตะกั่ว
- ทำการหาความหนาแน่นของเซรามิกที่ได้ โดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำของอาร์คิมิดีส และนำเซรามิกที่ได้มาตรวจสอบเฟสที่ปรากฏด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ (XRD) และตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก PZN-PMnN-PZT ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- ตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZN-PMnN-PZT ที่สัดส่วนต่าง ๆ กัน

#### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- สามารถเตรียมการสังเคราะห์ผงและเตรียมเซรามิก PZN-PMnN-PZT ที่มีความบริสุทธิ์และมีความหนาแน่นสูงได้
- สามารถนำสารเพียโซอิเล็กทริกในระบบ PZN-PMnN-PZT ไปประยุกต์ใช้เป็นเฟอร์โรอิเล็กทรานส์ฟอร์เมอร์ต่อไป

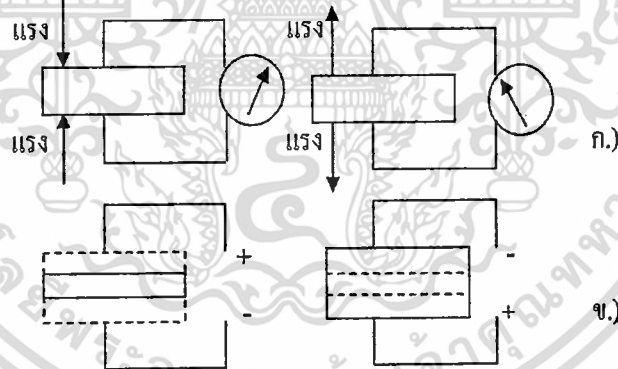
## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้ถูกค้นพบครั้งแรกโดยพี่น้องคูรี (Jacque และ Pierre Curie) ในปี ค.ศ. 1880 ซึ่งค้นพบในสารประกอบที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single crystal) เช่น คิวทซ์และเกลือโรเชลล์ (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 ส่งผลให้วัสดุนั้นเกิดการโพลาริเซชันทางไฟฟ้า ซึ่งปรากฏการณ์ในลักษณะนี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกโดยตรง” ดังรูปที่ 2.1 (ก) ในทางตรงกันข้ามเมื่อวัสดุนี้ยังสามารถเกิดความเครียดซึ่งเป็นสัดส่วนเดียวกับสนามไฟฟ้าที่ได้รับเข้าไปปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกโดยอ้อม” ดังรูปที่ 2.1 (ข)



รูปที่ 2.1 ก) ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกโดยตรง

ข) ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกโดยอ้อม

สมบัติเพียโซอิเล็กทริกนี้มาจากลักษณะพื้นฐานของธาตุภายในหน่วยเซลล์ (Unit cell) ในโครงสร้างผลึกของวัสดุ โดยในวัสดุที่เป็นผลึกทั้งหมดจะแบ่งได้ตามสมมาตรออกเป็น 32 กลุ่มแบ่งออกเป็นกลุ่มที่มีสมมาตรผ่านศูนย์กลาง (Center of symmetry) 11 กลุ่ม ซึ่งไม่มีขั้วไฟฟ้า (Non-polar) และ 21 กลุ่มมีสมมาตรไม่ผ่านศูนย์กลาง (Non-center of symmetry) ประกอบด้วยกลุ่มที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก 20 กลุ่มและอีก 1 กลุ่มที่เมื่อได้รับแรงกระทำแล้วทำให้สมมาตรเปลี่ยนไปเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมาตรที่ผ่านศูนย์กลางจึงไม่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกใน 20 กลุ่มที่แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกนั้นจะมี 10 กลุ่ม ที่เกิดโพลาริซันชันขึ้นได้โดยไม่ต้องเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าภายนอก (Spontaneous polarization, Ps) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเรียกว่า “ไพโรอิเล็กทริก” (Pyroelectric) แต่ถ้าโพลาริซันชันที่เกิดขึ้นนี้สามารถสลับโพลาริซันชันได้เมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกจะเรียกว่า “เฟอร์โรอิเล็กทริก”(Ferroelectric) กลุ่มโครงสร้างของผลึกที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกประกอบด้วย

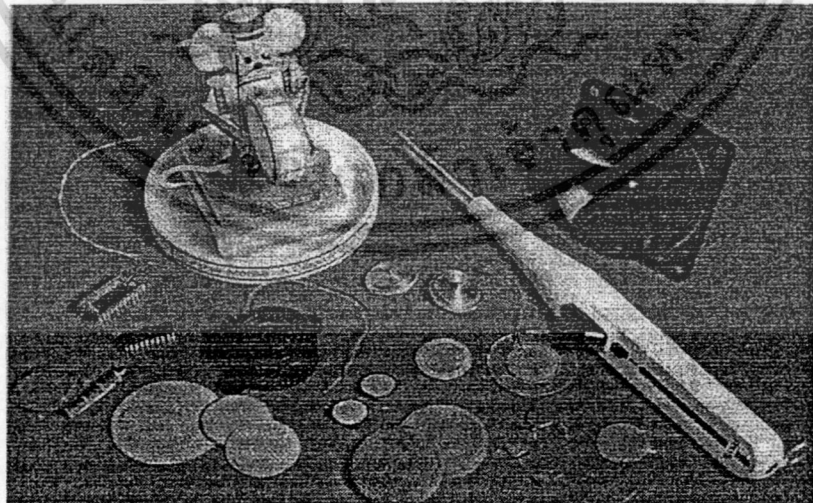
- โครงสร้างแบบทังสเตนบรอนซ์ เช่น  $\text{PbNb}_2\text{O}_6$
- โครงสร้างออกตะฮีดรอลของออกซิเจน เช่น สารที่มีสูตรโครงสร้างเป็น  $\text{ABO}_3$
- ผลึกประเภทไพโรคลอรั เช่น  $\text{Cd}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$
- โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นชั้นๆ เช่น  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$

โครงสร้างที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่น่าสนใจนั้นส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างออกตะฮีดรอลของออกซิเจนชนิดเพอโรฟสไกต์(Perovskite) ซึ่งได้มีงานวิจัยต่างๆที่ศึกษาคุณสมบัติของสารในระบบนี้ 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 การประยุกต์ใช้สารเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกและอิเล็กโตรสตริกทีฟ

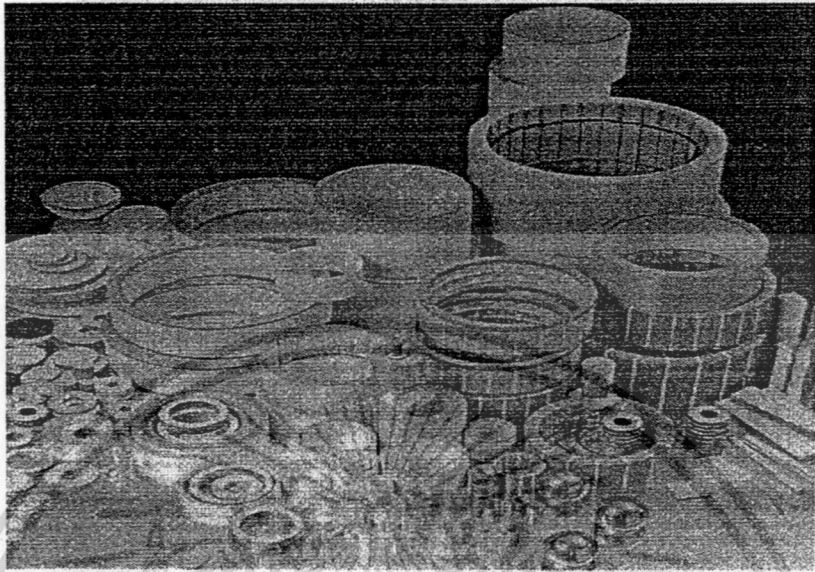
สารเพียโซอิเล็กทริกและอิเล็กโตรสตริกทีฟได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มากมายอุปกรณ์ในรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงบางส่วนของ การประยุกต์ใช้เหล่านั้น นอกจากนี้ตัวอย่างของเซรามิกที่ใช้ในการประยุกต์ต่างๆ ซึ่งมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันนั้นในรูปที่

2.3



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกและอิเล็กโตรสตริกทีฟจาก PZT PLZT และ PMN เริ่มจากมุมขวาไปตามเข็มนาฬิกา : ทวิตเตอร์ เครื่องจุดเตาแก๊ส ไบมอเตอร์ ตัวส่งพร้องระดับความถี่ปานกลาง เซรามิกสำหรับเครื่องทำความสะอาดเหนือเสียง เซรามิกเรโซนาเตอร์ ตัวจับเร้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PMN หน่วยความจำเฟอร์โรอิเล็กทริกอุปกรณ์ PLZT ของเล่นจากเซรามิกเรนโบว์ ตัวขับเร้ามนนี้ บัซเซอร์และยูนิมอร์ฟ



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของเซรามิกที่ใช้ในการประยุกต์ต่าง ๆ

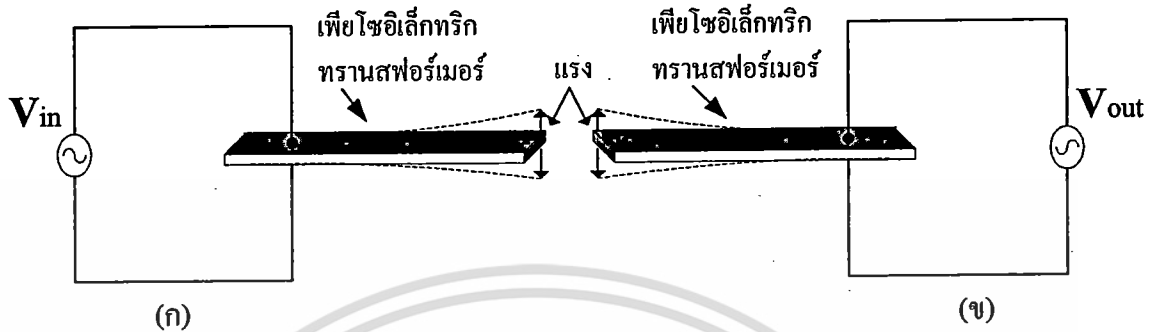
การใช้ประโยชน์ที่เห็นได้ชัดเจนมากที่สุดของปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง คือการให้กำเนิดความต่างศักย์สูงด้วยแรงเค้นอัด เช่น ตัวจุดประกายแก๊สในอากาศ หรือในทางตรงข้ามปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อมนั้นสามารถผลิตการเคลื่อนที่ปริมาณน้อย ๆ ด้วยการให้สนามไฟฟ้ากับชิ้นงานของเซรามิก การสั่นสะเทือนนั้นสามารถผลิตได้ด้วยการให้สนามไฟฟ้า กระแสสลับกับชิ้นเซรามิกและยังสามารถถูกตรวจวัดด้วยการขยายสัญญาณความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของการสั่นสะเทือนที่กระทบบนผิวของเซรามิกหรือแม้แต่การใช้แผ่นเซรามิกบางมาทำชิ้นส่วนที่โค้งงอได้ง่าย ซึ่งใช้ในเครื่องอ่านสัญญาณบนเครื่องเล่นแผ่นเสียงเหล่านี้ล้วนแต่เป็นตัวอย่างง่าย ๆ ของการใช้ประโยชน์จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและอิเล็กโตรสตริกทีฟ ซึ่งจะต้องมีการเลือกรูปร่างและส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับแต่ละการประยุกต์ใช้งาน ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างเฉพาะบางกรณีที่มีความสำคัญในทางปฏิบัติและสามารถเข้าใจถึงแนวคิดสำคัญ เช่น หม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริกเป็นต้น

## 2.3 เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Piezoelectric Transformer)

### 2.3.1 การทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

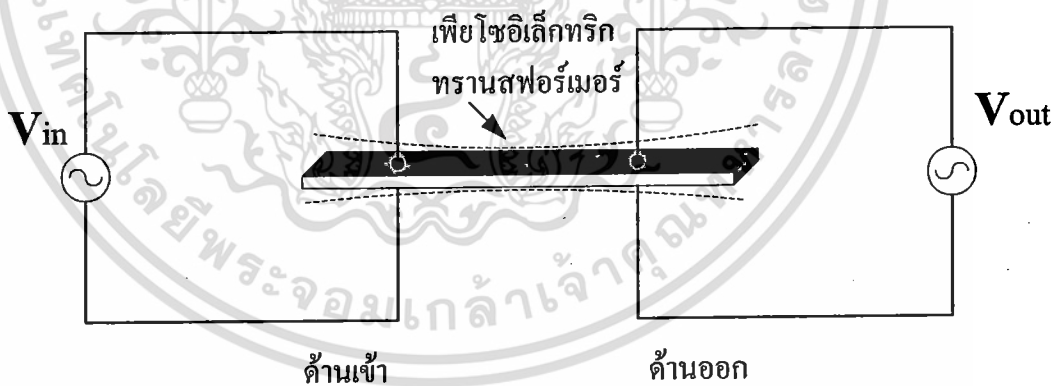
เพียโซทรานส์ฟอร์มเมอร์ คือการนำหลักการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมาประยุกต์ใช้งานเป็นทรานส์ฟอร์มเมอร์ โดยอาศัยการสั่นสะเทือนทางกลศาสตร์เป็นตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน แบ่งการทำงานออกเป็นสองส่วนด้วยกัน คือ ส่วนของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่มีการสั่นสะเทือนเนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้า (เพียโซอิเล็กทริกแอคชูเอเตอร์, Piezoelectric actuators) เรียกว่า ส่วนด้านทางเข้า ส่วนนี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบการทำงานของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ (ก) และส่วนของเปียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่เกิดแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากการสั่นสะเทือน(เปียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์, Piezoelectric transducers) เรียกว่า ส่วนทางด้านขาออกส่วนนี้เปรียบเสมือนกับการทำงานของเจนเนอเรเตอร์ ดังแสดงดังรูปที่ (ข)

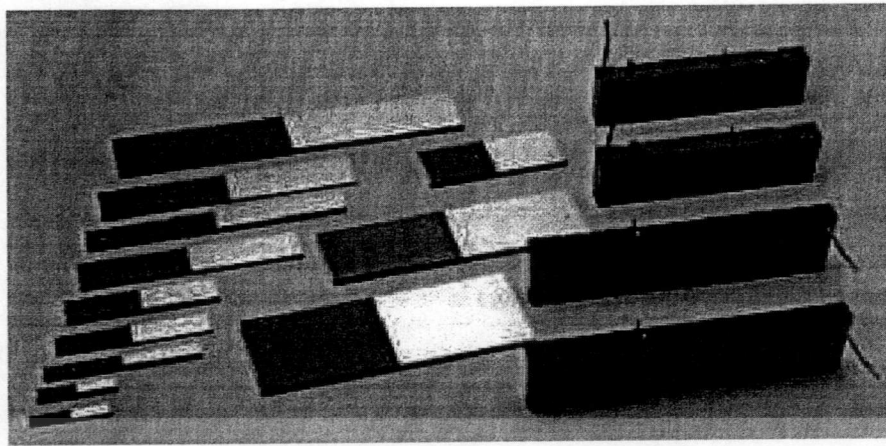


รูปที่ 2.4 (ก) การสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า (ข)แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการสั่นสะเทือน

เปียโซอิเล็กทริกทรานสปอร์เมอร์จะใช้หลักการทำงานของเปียโซอิเล็กทริกเซรามิกมาประยุกต์ใช้งานเป็นทรานสปอร์เมอร์ที่มีการส่งถ่ายพลังงาน โดยอาศัยการสั่นสะเทือนของเซรามิกเป็นตัวกลาง และเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่ที่ทางด้านเข้าจะทำให้ สารเซรามิกภายในเกิดการสั่นสะเทือนมีผลทำให้สารเซรามิกทางด้านขาออกเกิดแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงหลักการทำงานในรูปที่ 2.5 และแสดงเปียโซอิเล็กทริกทรานสปอร์เมอร์ในอุตสาหกรรม ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 เปียโซอิเล็กทริกทรานสปอร์เมอร์ที่มีการประยุกต์มาจากการทำงานของเปียโซอิเล็กทริกเซรามิก



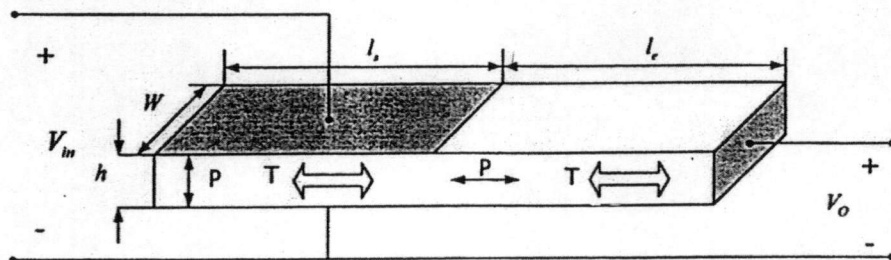
รูปที่ 2.6 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

### 2.3.2 ชนิดของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์

เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์คือ การประยุกต์ใช้งานของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ที่มีการทำงานเป็นแบบสองแบบด้วยกัน คือทางด้านเข้าทำงานในโหมดของเพียโซอิเล็กทริกแอกซวลเอเตอร์ และทางด้านขาออกทำงานในโหมดของเพียโซอิเล็กทริกทรานสคิวเซอร์ โดยมีโครงสร้างแบบต่างๆ ตามลักษณะการนำไปใช้งานแบ่งโครงสร้างหลักๆ ออกเป็น 3 แบบ

#### 2.3.2.1 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ ชนิด Rosen Type

มีการทำงานในลักษณะของ Transverse mode เพียโซอิเล็กทริกแอกซวลเอเตอร์และ Longitudinal Mode เพียโซอิเล็กทริกทรานสคิวเซอร์เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าจะเกิดการสั่นสะเทือนของสารเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางของความหนาส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนของสารเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางของความยาวทางด้านออกจะเกิดการสั่นสะเทือนในทิศทางของความยาวด้วยจึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก การทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ชนิดนี้มีอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าต่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกที่สูงจึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในงานที่มีแรงดันไฟฟ้าสูง เช่น เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับหลอด LCD(Liquid Crystal Display) ที่ใช้ในหน้าจอ Notebook ดังแสดงในรูปที่ 2.7

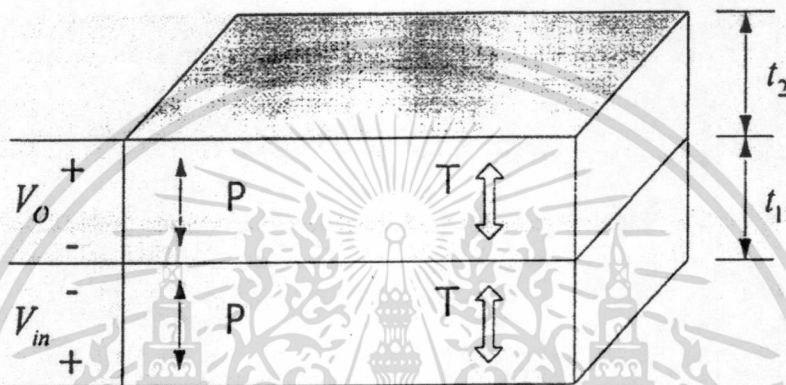


รูปที่ 2.7 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ชนิด Rosen Type

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2.2 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ ชนิด Thickness Vibration Mode

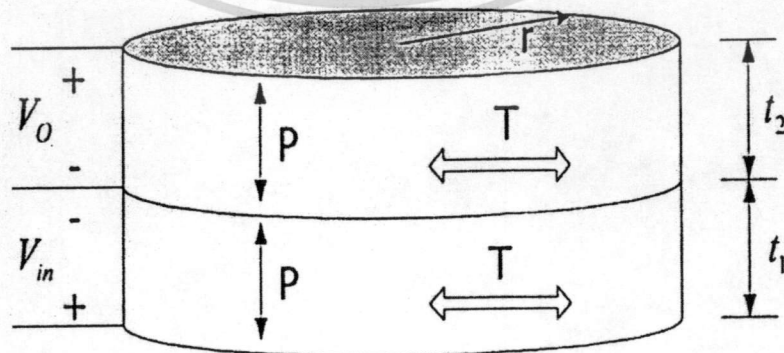
มีการทำงานในลักษณะของ Longitudinal mode เพียโซอิเล็กทริกแอกชวลเอเตอร์ และ Longitudinal Mode เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าจะเกิดการสั่นสะเทือนของสารเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางของความหนา ส่งผลให้ทางด้านออกเกิดการสั่นสะเทือนของสารเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางของความหนาด้วย และเกิดแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกการทำงาน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



รูปที่ 2.8 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ชนิด Thickness Vibration Mode

### 2.3.2.3 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ ชนิด Radial Vibration Mode

มีการทำงานในลักษณะของ Transverse mode เพียโซอิเล็กทริกแอกชวลเอเตอร์ และ Transverse Mode เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าเกิดการสั่นสะเทือนของสารเพียโซอิเล็กทริกในทิศทางของความหนาตรงจุดศูนย์กลางของวงกลมทำให้เกิดการสั่นสะเทือนไปในทิศทางของรัศมีทำให้ในส่วนของทางด้านออกเกิดการสั่นสะเทือนไปในทิศทางของรัศมีด้วยการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ชนิดนี้มีการนำไปทำเป็น ballasts และ adapters เป็นต้น



รูปที่ 2.9 เพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ชนิด Radial Vibration Mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งแบบแม่เหล็กไฟฟ้าและแบบเซรามิกส์

	ลักษณะเฉพาะ (characteristics)	ชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic transformers)	ชนิดเซรามิกส์ (piezoelectric transformers)
โครงสร้าง (structure)	วัสดุ (materials)	ลวดเหล็ก และแท่งแม่เหล็ก	เพียโซอิเล็กทริก เซรามิกส์
	ขนาด - น้ำหนัก	ใหญ่ - หนัก	เล็ก - เบา
	การประกอบ (mounting)	ง่าย	เฉพาะในจุดที่ปราศจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง
การทำงาน (performance)	ค่าเปรียบเทียบความต่างศักย์ (voltage step – up ratio)	ปานกลาง - สูง	สูงมาก
	กระแสที่จ่าย (output current)	มาก	น้อย
	ความเป็นฉนวนไฟฟ้าระหว่างส่วนป้อน และจ่ายพลังงาน	ดี	ดีมาก
	ประสิทธิภาพ (efficiency)	มากกว่า 80 %	มากกว่า 95 %
	ความถี่ของความต่างศักย์ที่ให้	กว้าง	แคบ
	การรบกวนของคลื่นแม่เหล็ก (magnetic noise)	สูง	ไม่มี
	การติดไฟ (combustibility)	อาจติดไฟได้	ไม่ติดไฟ

## 2.4 ลักษณะเฉพาะทั่วไปและการประดิษฐ์สารพีแชนดิก

### 2.4.1 เลดเซอร์โคเนต-เลดไทเทเนต( $\text{PbZrO}_3$ - $\text{PbTiO}_3$ )

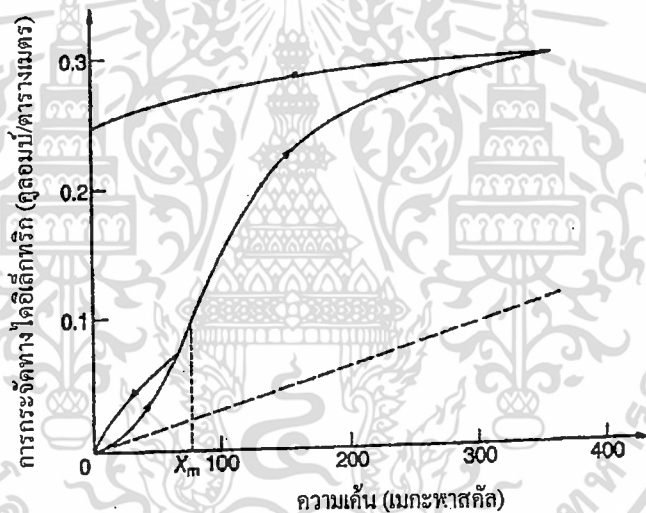
เลดเซอร์โคเนต( $\text{PbZrO}_3$ ) มีจุดคูรีอยู่ที่  $234\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยมีโครงสร้างแบบออร์โทโรมบิกคล้ายคลึงกับแบเรียมไทเทเนตแบบออร์โทโรมบิก แต่มีสมบัติเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกอันเนื่องมาจากไดโพลซึ่งเกิดจากการจัดของไอออน  $\text{Zr}^{4+}$  เมื่อเทียบกับไอออน  $\text{O}^{2-}$  ที่อยู่รอบทั้ง 6 นั้นจะมีการจัดเรียงตัวในลักษณะที่ชี้ไปในทิศทางตรงกันข้ามสลับกันไปทำให้การมีขั้วไฟฟ้าแบบเกิดขึ้นเอง มีค่ารวมเป็นศูนย์

เลดไทเทเนต( $\text{PbTiO}_3$ ) จะมีจุดคูรีที่สูงกว่าเลดเซอร์โคเนตโดยอยู่ที่  $495\text{ }^{\circ}\text{C}$  และมีโครงสร้างแบบเทตระโกนอลคล้ายคลึงกับแบเรียมไทเทเนต แต่เนื่องจากแกน C ของเลดไทเทเนตนั้นมีความ

ยาวถึง 6% มากกว่าแกน A ทำให้เซรามิกเลดไทเทเนตนั้นยากในการทำขั้วและมักจะแตกเป็นชิ้นๆ ภายใต้อสนามไฟฟ้ากระแสตรงสูงๆ

ในทางปฏิบัติแล้วเลดเซอร์โคเนตและเลดไทเทเนตนั้นไม่มีประโยชน์มากนัก แต่การพัฒนาสารละลายของแข็งของวัสดุทั้งสอง กล่าวคือ  $PbZrO_3$ - $PbTiO_3$  หรือ  $Pb(ZrTi)_O_6$  หรือที่รู้จักในชื่อ PZT นั้นก่อให้เกิดประโยชน์มากมายในการประยุกต์ใช้งานเป็นเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งการพัฒนา ระบบ PZT นั้นได้เกิดขึ้นในช่วงทศวรรษ 1950

เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต ( $Pb(ZrTi)O_6$  หรือ PZT) นั้นมีโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์และเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก แผนภูมิวัฏภาคของระบบ PZT แสดงดังในรูปที่ 2.13 ซึ่งชี้ให้เห็นถึงลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งคือแนว MPB ซึ่งเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างอย่างทันทีทันใดที่ส่วนผสมใด ๆ ในช่วงของสารละลายของแข็ง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระบบ PZT นั้น MPB เกิดขึ้นใกล้เคียงกับที่ส่วนผสมของ  $PbZrO_3$ : $PbTiO_3$  เป็น 1:1 ซึ่งที่ MPB นี้จะมีสมบัติไดอิเล็กทริกและสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อสูงสุด ซึ่งจะได้มีการนำส่วนผสมนี้ไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง



รูปที่ 2.10 สนามขจัด ไดอิเล็กทริกที่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันอัดแกนเดียวสำหรับสาร PZT แสดงผลลัพธ์ที่คาดในกรณีที่มีค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกต่ำ

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

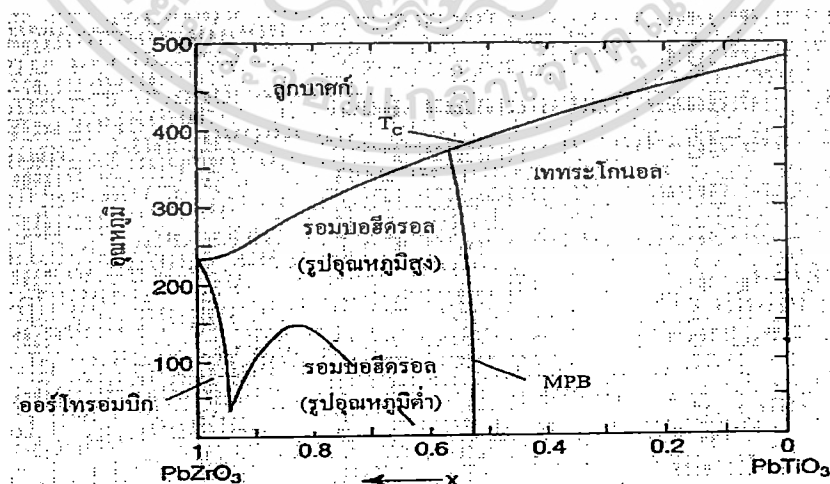
เนื่องจาก PZT ที่เจ็ด้วยตัวให้มีสภาพยอมทางไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์  $d$  ที่สูงกว่า PZT ที่เจ็ด้วยตัวรับ ทำให้เหมาะสมที่จะใช้ในการแปลงการสั่นทางกลไปเป็นการสั่นทางไฟฟ้าและด้วยเหตุที่ PZT ที่เจ็ด้วยตัวให้มีตัวแปรการสูญเสียมากกว่า ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นตัวกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่น แต่อย่างไรก็ตามด้วยสัมประสิทธิ์การเสื่อมตามอายุที่ต่ำ PZT ที่เจือด้วยตัวให้จะมีประโยชน์ในหลายกรณีเช่นกัน สาร PZT ที่เจือด้วยตัวรับสามารถทำให้มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความถี่สั่นพ้องที่มีค่าต่ำลงได้ด้วยการเติมธาตุแอลคาไลน์เอิร์ทเข้าไปแทนที่ตะกั่ว และปรับอัตราส่วนของเซอร์โคเนียมต่อไทเทเนียม นอกจากนี้การเติม Cr หรือ Li (<1%) ลงในตำแหน่ง B จะช่วยในการลดการเสื่อมอายุที่มีมากใน PZT ที่เจือด้วยตัวรับ ส่วนในบางกรณีที่ต้องการ PZT ที่มีการสูญเสียทางกลและทางไดอิเล็กทริกที่ต่ำ รวมทั้งสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่สูงนั้นสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุดด้วยการแทนที่ตำแหน่ง 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) เช่นเดียวกับกับสาร  $\text{BaTiO}_3$  นั้นก็เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเช่นเดียวและในปัจจุบันนี้สาร PZT ที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ กันไปก็ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกชนิดต่างๆ เป็นจำนวนมากที่สุด

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

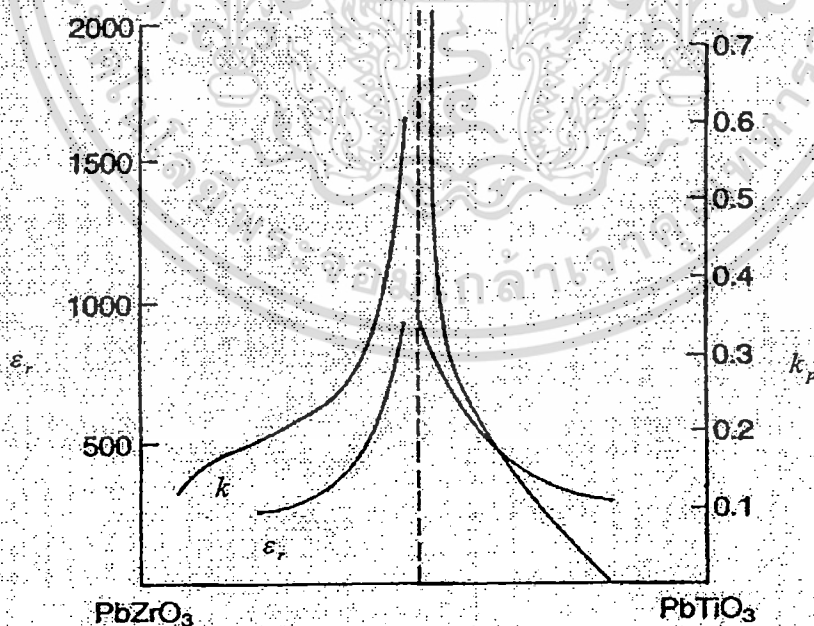


รูปที่ 2.11 เสถียรภาพของเฟสในระบบ  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของโดเมนนั้นจะมีอิทธิพลที่สำคัญหลายๆ อย่างต่อพฤติกรรมทางไฟฟ้าของสารเพียโซเซรามิก ในขณะที่โครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ภายในเซรามิกนั้นเกิดการยื่นตัวลงมาจนผ่านจุดคูรีของสารจะทำให้มีการหดตัวของโครงสร้างแบบไอโซทรอปิก (isotropic contraction) เกิดขึ้นเนื่องจากว่าบรรดาผลึกที่เป็นส่วนประกอบของเซรามิกนั้น จะมีการจัดวางทิศทางกันแบบสุ่ม อย่างไรก็ตามการจัดวางทิศทางของแกนผลึกนั้นมีแนวโน้มที่ต้องการจะทำให้รูปร่างของแต่ละผลึกเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) อยู่แล้วเพียงแต่ว่าบรรดาโพรงที่ผลึกเหล่านี้ครอบครองอยู่นั้นเกิดมีการหดตัวแบบไอโซทรอปิกเข้ามาขัดขวางเอาไว้ และจึงทำให้มีระบบของโดเมนที่มีการจัดวางทิศทางแตกต่างกันอย่างสลับซับซ้อนเกิดขึ้นมา เพื่อลดพลังงานของความเครียดแบบยืดหยุ่นให้ต่ำที่สุดเป็นผลสืบเนื่องตามมา

การให้สนามไฟฟ้าที่มีความแข็งแรงเพียงพอเข้าไปจะสามารถทำการจัดวางทิศทางของโดเมนแบบ 180° และให้อยู่ในทิศทางที่ใกล้เคียงกับทิศทางของสนามไฟฟ้ามากที่สุดเท่าที่การวางทิศทางของแกนผลึกจะยอมให้ได้ นอกจากนี้สนามไฟฟ้าง่ายๆ ยังมีอิทธิพลต่อการจัดวางทิศทางของโดเมนแบบ 90° ในวัสดุที่มีเฟสเป็นรอมบอยอโรอิกอีกด้วย เพียงแต่ว่าการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้านั้น และจะถูกกำจัดเอาไว้โดยสภาพของความเครียดภายในผลึกและระหว่างผลึกการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยรวมของเซรามิกที่เกิดขึ้นนั้น จะประกอบไปด้วยการขยายตัวออกไปทิศทางของสนามไฟฟ้าและการหดตัวเข้ามาในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของสนามไฟฟ้า เมื่อเอาสนามไฟฟ้าที่ให้ออกไป ความเครียดภายในบางบริเวณจะทำให้เกิดการจัดวางทิศทางเชิงขั้วขึ้นมาเพื่อพยายามทำให้ระบบมีการกลับคืนไปสู่สภาพของการจัดวางทิศทางแบบเดิม ให้ได้แต่ว่าการจัดวางทิศทางใหม่ๆ นั้นส่วนใหญ่จะเป็นแบบถาวร



รูปที่ 2.12 ค่าสัมประสิทธิ์การคู่ควบและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ในช่วงต่างๆขององค์ประกอบทางเคมีในระบบพีแซดที

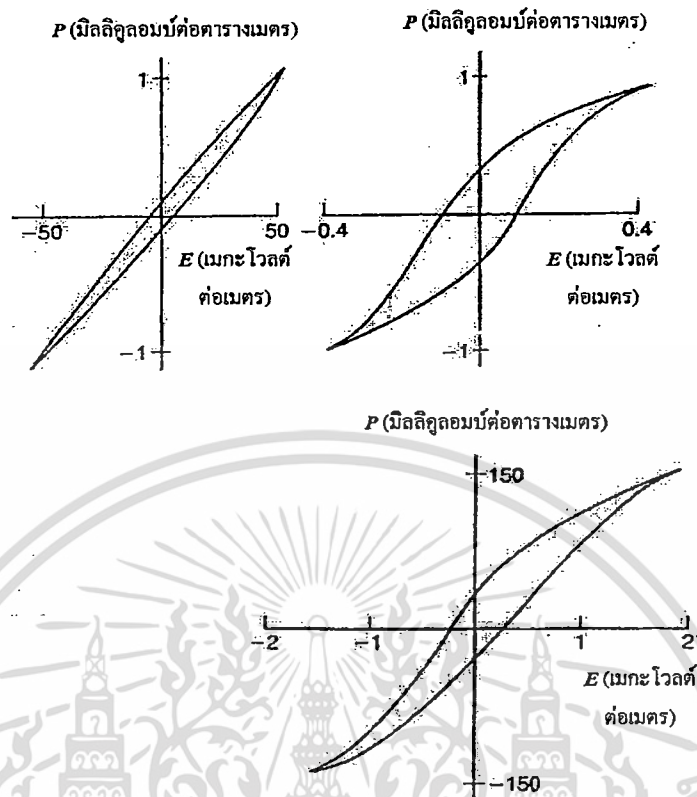
การให้ความเค้นจากภายนอกเข้าไปจะมีผลต่อความเครียดภายในตัวเซรามิกและโครงสร้างของโดเมนก็จะมี การตอบสนองต่อความเครียดดังกล่าวด้วย กระบวนการเช่นนี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์เฟอร์โรอีลาสติก”(ferroelastic effect) การกดอัดวัสดุจะทำให้มีการวางทิศทางเชิงขั้วในแนวตั้งฉากกับความเค้น ในขณะที่การดึงวัสดุจะทำให้มีการวางทิศทางเชิงขั้วที่ขนานไปกับแนวของแรงดึง ดังนั้นสภาพมีขั้วที่เกิดขึ้นมาจากสนามไฟฟ้าที่ผ่านการเปลี่ยนแปลงของโดเมนแบบ  $90^\circ$  จึงสามารถทำให้กลับคืนไปสู่สภาพเดิมได้ด้วยการให้ความเค้นอัดเข้าไปในทิศทางของสนามไฟฟ้าแทน ซึ่งความเค้นจะไม่มีผลต่อการเกิดโดเมนแบบ  $180^\circ$  ยกเว้นเสียแต่ว่าพฤติกรรมของโดเมนเหล่านี้อาจจะเกิดมีการเชื่อมต่อกันกับการเปลี่ยนแปลงของโดเมนแบบอื่นๆ ได้การทำให้เซรามิกแบบแอนไอโซทรอปิกมีแกนเชิงขั้วเกิดขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการสนามไฟฟ้าสถิตขนาด 1-4 เมกะโวลต์ต่อเมตร เป็นเวลานานหลายนาทิจที่อุณหภูมิสูงกว่า  $100^\circ\text{C}$  ขึ้นไปเพื่อทำให้เกิดการจัดวางทิศทางของโดเมน โดยการเคลื่อนที่ของโดเมนที่อุณหภูมิสูงจะเกิดได้รวดเร็วกว่าแต่การปรับแนวสูงสุด(maximum alignment) ของโดเมนแบบ  $90^\circ$  นั้นก็ต้องการเวลาที่นานพอสมควรเพื่อสร้างเสถียรภาพให้คงอยู่ได้ กระแสรั่วจะเป็นตัวจำกัดค่าอุณหภูมิและสามารถจะทำให้อุณหภูมิภายในตัววัสดุเพิ่มขึ้นจนเกิดการทลายจากความร้อนได้ ดังนั้นค่าความคงทนการทลายจึงเป็นตัวแปรที่จำกัดค่าของสนามไฟฟ้า ถ้าความต่างศักย์ที่ให้เข้าไปนั้นมีขนาดเกินกว่า 1 กิโลโวลต์ขึ้นไปก็จำเป็นต้องมีการตรวจสอบเพื่อให้แน่ใจว่าพื้นผิวที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นมีความสะอาดมากพอและจะต้องจุ่มตัววัสดุที่ต้องทำให้มีขั้วนั้นลงไป ในน้ำมันที่เป็นฉนวนด้วยเพราะการทลายที่พื้นผิวระหว่างขั้วไฟฟ้าที่อยู่บนผิวของวัสดุที่มีสภาพะยอมสูงนั้นจะเกิดขึ้นได้ง่ายมากเมื่อวางวัสดุไว้ในอากาศ

การทำลายความมีขั้วนั้นสามารถทำได้โดยการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามที่ใช้ในการทำให้มีขั้วหรือในบางกรณีก็ใช้วิธีการให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับค่าสูงเข้าไปแล้วค่อยๆ ลดลงให้กลายเป็นศูนย์ แต่ก็มีอันตรายในเรื่องของความร้อนสูงเนื่องจากที่สนามค่าสูงนั้นจะมีการสูญเสียเป็นความร้อนของไดอิเล็กทริกที่สูง เป็นผลสืบเนื่องตามมาด้วย สารเซรามิกในบางองค์ประกอบนั้นสามารถจะทำให้หมดความมีขั้วลงได้โดยการให้ความเค้นอัดเข้าไป การทำลายความมีขั้วอย่างสมบูรณ์นั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงจนเกินจุดคูรีของวัสดุแล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวลงมาโดยปราศจากสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้ผนังของโดเมนนั้นเกิดการแกว่งไปมา ที่สนามไฟฟ้าค่าต่ำ การเคลื่อนที่ของผนังโดเมนแบบ  $90^\circ$  แบบ  $71^\circ$  หรือแบบ  $109^\circ$  จะทำให้เกิดวงรอบของความเค้น ความเครียดที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของพลังงานไฟฟ้าในบางส่วนไปเป็นความร้อนดังนั้นจึงถือว่ามีส่วนร่วมต่อการทำให้เกิดการสูญเสียของสารไดอิเล็กทริก เมื่อสนามไฟฟ้าตรงส่วนปลายยอดของวงรอบนั้นสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดขั้วขึ้นเองกลับไปสู่สภาพเดิมได้ก็จะทำให้วัสดุมีการสูญเสียพลังงานที่สูงมากขึ้น ดังแสดงได้ด้วยลักษณะของการขยายตัวออกอย่างมากมายของวงจรรีซิสทีฟ

### ผังรูป 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 วงรอบ P-E กับ การเพิ่มขึ้นของความแรงสนามไฟฟ้า ตรงส่วนปลายยอด ที่ 50 Hz สำหรับเซรามิกที่เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริก

การเสื่อมตามอายุ (ageing) นั้นมีอิทธิพลต่อสมบัติหลายๆ อย่างของเซรามิกที่เป็นสารเพียโซอิเล็กทริกต่างๆ สิบปี ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของเซรามิกส่วนใหญ่จะลดลงเพียงไม่กี่เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้ว่าค่าคงตัวของความถี่จะเพิ่มขึ้นก็ตามหลังจากที่มีการเสื่อมตามอายุเกิดขึ้นค่าตัวประกอบการสูญเสียเป็นความร้อนของวัสดุจะลดลงและจะทำให้เพิ่มขึ้นได้อีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับขนาดประมาณ 0.2 – 0.4 เมกะโวลต์ต่อเมตร เข้าไปการเร่งให้เซรามิกมีการเสื่อมตามอายุเร็วยิ่งขึ้นและทำให้สมบัติต่างๆ มีเสถียรภาพนั้นสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนเข้าไปจนถึงที่อุณหภูมิประมาณ 80 ° ซ ในกรณีของสาร BaTiO<sub>3</sub> หรือสูงกว่านี้ถ้าเป็นกรณีของสารพีแซดที่

การเสื่อมตามอายุของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย เมื่อความเข้มข้นของตำแหน่งช่องว่างออกซิเจนนั้นเพิ่มขึ้นและโดยการเจือหรือ ไม่ก็โดยการให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศแบบรีดิวซ์ปานกลาง และการเสื่อมตามอายุจะค่อยๆ ลดลงทีละน้อยเมื่อความเข้มข้นเหล่านี้ลดน้อยลงซึ่งได้มีการเสนอกันว่ามีความถี่เกิดขึ้นมาระหว่างข้อบกพร่องที่มีประจุติดลบและ  $V_O$  ประจุบวกโดยข้อบกพร่องเหล่านี้จะมีการปรับแนวให้อยู่ในทิศทางเชิงขั้วโดยการเคลื่อนที่ของ  $V_O$  ซึ่งเป็นผลของการรวมกันระหว่างกิริยาของ

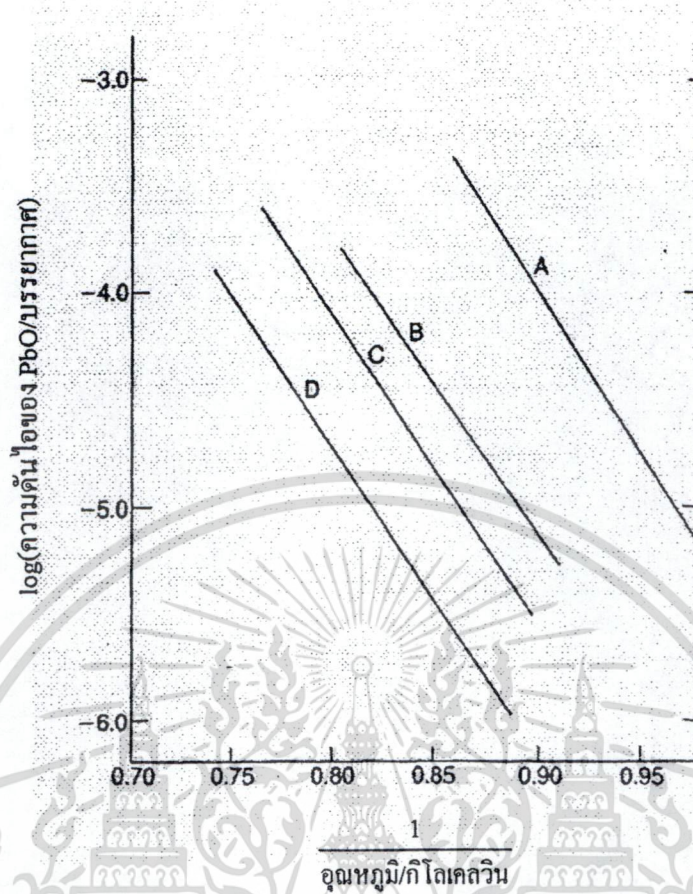
สนามเฉพาะที่ซึ่งเกี่ยวพันกันกับ  $P_s$  และโฟนอนต่อมามีราคาขั้วคู่เหล่านี้จะทำหน้าที่ในการจ่ายสนามภายในเข้าไปทำให้การจัดเรียงของโดเมนนั้นมีเสถียรภาพมากขึ้น

ส่วนอีกกลไกหนึ่งที่น่าจะเป็นไปได้ก็น่ามาจากอิทธิพลของความเค้นเฉพาะที่มีสาเหตุมาจากความเป็นแอนไอโซทรอปีของแกนที่เพิ่มขึ้นภายในเกรนขณะที่กำลังเย็นตัวลงมาต่ำกว่า  $T_c$  การจัดเรียงของโดเมนแบบพลังงานต่ำอาจจะเกิดขึ้นมา โดยอิทธิพลของโฟนอนที่อุณหภูมิห้องและอาจจะมีอิทธิพลของความเข้มข้นของ  $V_o$  ที่สูงขึ้นมาช่วยเสริมด้วยนอกจากนี้ก็ยังมีการนำเสนอกลไกแบบอื่นๆ ที่ว่าบรรดาความบกพร่อง อย่างเช่น  $V_o$  นั้นอาจจะมีการแพร่เข้าไปภายในผนังของโดเมนและทำให้เกิดเสถียรภาพมากขึ้นตามมา สำหรับเนื้อหาที่จะนำเสนอในหัวข้อต่อไปนั้นจะกล่าวถึงการประดิษฐ์สารพีแซดที่

#### 2.4.2 การประดิษฐ์สารพีแซดที่

การประดิษฐ์เซรามิกที่เป็นสารเพียโซอิเล็กทริกนั้นสามารถใช้เทคโนโลยีแบบปรกติได้ซึ่งการจะทำให้ได้ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์ต่างๆ นั้น องค์ประกอบทางเคมีของสารจะต้องมีความใกล้เคียงกับปริมาณสัมพัทธ์ปริมาณของรีเอเจนต์ช่วยหลอม (fluxing reagents) และสารเจือปนจะต้องมีค่าต่ำสุดและความหนาแน่นของเซรามิกจะต้องมีค่าสูงเท่าที่จะเป็นไปได้และจะต้องพยายามทำให้มีการปนเปื้อนในระหว่างที่มีการบดย่อยด้วยลูกบอลแบบเปียกน้อยที่สุด โดยการใส่ลูกบอลที่มีเซอร์โคเนียเป็นองค์ประกอบหลัก

องค์ประกอบทางเคมีของสารส่วนใหญ่ที่นิยมใช้ในปัจจุบันจะมีสารตะกั่ว (PbO) เป็นส่วนประกอบหลักแม้ว่าจะมีการระเหยเกิดขึ้นเหนืออุณหภูมิ  $800^\circ\text{C}$  รูปที่ 2.14 แต่ก็ต้องพยายามทำการรักษาปริมาณ PbO เอาไว้ให้ได้ในระหว่างที่มีการซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิที่อาจจะสูงจนถึง  $1300^\circ\text{C}$  โดยปรกติแล้วการแคลไซน์จะกระทำในถ้วยอะลูมินาที่มีฝาปิด สำหรับการซินเตอร์ในขั้นตอนสุดท้ายนั้นจะนิยมใช้ผงที่มีปริมาณของตะกั่วอยู่สูง อย่างเช่น ผง  $\text{PbZrO}_3$  โรยรอบๆ ชิ้นงานที่วางอยู่ภายในถ้วยอะลูมินาแบบมีฝาปิด เนื่องจากว่าการเข้าถึงบรรยากาศนั้นถูกจำกัดจึงทำให้ PbO สามารถที่จะถูกรีดิวซ์ (reduced) ให้กลายเป็นตะกั่ว (โลหะ) ได้ง่ายมาก ซึ่งจะต้องมีการกำจัดส่วนประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ทั้งหมดออกไปก่อนที่จะทำการซินเตอร์ โดยการทำการเผาเบื้องต้นที่อุณหภูมิประมาณ  $600^\circ\text{C}$  ในอากาศการเผาในขั้นตอนสุดท้ายโดยปรกติจะกระทำในเตาไฟฟ้าที่มีการใส่ชิ้นงานเข้าไปเพื่อทำการเผาเป็นชุดๆ แม้ว่าจะกระทำด้วยความระมัดระวัง โดยปรกติแล้วก็จะมีการสูญเสียของ PbO ออกไปประมาณร้อยละ 2-3 ของปริมาณ PbO ในตอนเริ่มต้นซึ่งก็สามารถจะทำการชดเชยกันได้โดยใช้วิธีการเพิ่มปริมาณของสารตั้งต้นดังกล่าวให้มากขึ้น



รูปที่ 2.14 อิทธิพลของการเดินแล่นทานัมที่มีต่อสภาพด้านทานไฟฟ้าของสารเซรามิก

นอกจากวิธีการเผาในด้วยปิคสนิทแล้วก็ยังมีวิธีการเผาแบบรวดเร็วที่มีการวางชิ้นงานไว้บนสายพานซึ่งกำลังเคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงมากๆ ภายในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ในเตาเผาชนิดพิเศษ และซึ่งกระบวนการนี้สามารถจะนำไปใช้กับการประดิษฐ์เซรามิกที่เป็นแผ่นบางได้ดีมาก

ความยุ่งยากที่เกิดขึ้นกับพวกสารองค์ประกอบที่มีปริมาณของ  $ZrO_2$  สูงๆ นั้นเกิดจากความเฉื่อยในการทำปฏิกิริยาของวัสดุบางเกรดของ  $TiO_2$  ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นผงสีนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับ  $PbO$  ได้อย่างรวดเร็วและสารไทเทเนตที่ได้ก็จะค่อยๆ ทำปฏิกิริยากับไอออน  $Zr^{4+}$  อย่างช้าๆ แต่ก็มีสารตั้งต้นของ  $ZrO_2$  คุณภาพดีที่ยังไม่ได้ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงมาก่อนซึ่งจะสามารถทำปฏิกิริยา  $PbO$  ได้เร็วกว่า ดังนั้นสารผสมของ  $Pb(Zr,Ti)O_3$  จึงเกิดขึ้นในช่วงระยะสั้นๆ นอกจากนี้ก็ยังปัญหาที่สามารถจะเกิดขึ้นจากการบดย่อยด้วยการใช้เวลานานในขั้นตอนการผสมสารได้ตลอดจนถึงการเผาแคลไซน์ครั้งที่สองหลังจากที่ทำการบดย่อยสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาในตอนเริ่มต้น

ส่วนประกอบทางเคมีต่างๆ ตัวของสาร PZT นั้นสามารถจะทำการเตรียมได้โดยใช้วิธีการตกตะกอนจากสารละลายของไนเตรคแล้วได้เป็นผงที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมีและมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง ผงดังกล่าวนี้ยังสามารถที่จะเตรียมได้จากการเผาแคลไซน์สารพวกซิทเรตซึ่งมีไอออนอยู่ที่ตำแหน่ง A และที่ตำแหน่ง B ในอัตราส่วน 1:1 ซึ่งการนำผงเหล่านี้มาใช้จะทำให้สามารถทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาซินเตอร์วัสดุได้ด้วยการใช้อุณหภูมิที่ต่ำลง นอกจากจะเป็นการประหยัดพลังงานแล้วก็ยังเป็นการช่วยลดโอกาสของการสูญเสีย PbO จากการระเหยออกไปได้อีกด้วยแต่อย่างไรก็ตาม เซรามิกที่เตรียมได้จากวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่า โดยเริ่มจากสารผสมของพวกออกไซด์หรือคาร์บอเนตต่างๆ นั้นก็ล้วนแล้วแต่มีคุณภาพที่เพียงพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลักทางด้านเพียโซอิเล็กทริกอยู่แล้ว

การอัดด้วยแม่พิมพ์สามารถนำมาใช้สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างง่ายๆ ได้ดี แต่ถ้าจะทำให้มีรูปร่างเป็นแท่งยาวที่มีขนาดหน้าตัดสม่ำเสมอก็ควรจะใช้วิธีการอัดรีดแทนและถ้าต้องการให้เป็นแผ่นที่แบนเรียบและบางนั้นก็สามารจะใช้วิธีการหล่อแถบหรือการรีดเทปได้ส่วนในกรณีของชิ้นงานที่เป็นรูปร่างแหวนขนาดใหญ่ และพวกที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนมากขึ้นนั้นจะนิยมใช้วิธีการหล่อสลิปในการขึ้นรูป

เซรามิกที่ผ่านการซินเตอร์โดยปรกติแล้วจะมีความหนาแน่นที่สูงกว่าร้อยละ 95 ของค่าทางทฤษฎีและมีขนาดของผลึกอยู่ในช่วงประมาณ 5-30 ไมโครเมตร การมี PbO เกินมาหรือว่าขาดพร่องไปล้วนแต่มีผลในเชิงลบต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกทั้งสิ้นและดังนั้นการควบคุมกระบวนการผลิตอย่างระมัดระวังเป็นพิเศษในทุกขั้นตอนจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นเสมอหลังจากที่มีการตัดแต่งหรือกระบวนการสุดท้ายเท่าที่จำเป็นเพื่อให้ได้เซรามิกที่มีรูปร่างตรงตามที่ต้องการแล้วจึงนำเซรามิกดังกล่าวไปทำการติดขั้วไฟฟ้าต่อไป ซึ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานทางไฟฟ้าส่วนใหญ่นั้นจะนิยมใช้สีที่มีสูตรเหมาะสมและมีอนุภาคของเงินปนอยู่ทาลงไปบนผิวที่ต้องการจะทำเป็นขั้วไฟฟ้าแล้วจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600-800 °C ส่วนในกรณีของวัสดุที่เป็นแผ่นบางๆ นั้นก็อาจจะเลือกใช้วิธีการระเหยเป็นไอหรือวิธีการฉาบด้วยโลหะพวก Ni-Cr หรือทองเป็นต้น

ถ้าห้วิธีการทำให้มีเซรามิกมีขั้ว(poling) นั้นจะเริ่มจากการจุ่มชิ้นเซรามิกลงในน้ำมันที่เป็นฉนวนแล้วให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 100-150 °C เข้าไปจากนั้นจึงใส่สนามไฟฟ้าขนาด 1-4 เมกะโวลต์ต่อเมตรเข้าไป ในกรณีของสาร BaTiO<sub>3</sub> นั้นจะต้องพยายามรักษาสภาพไฟฟ้าที่ให้เอาไว้ตลอดเวลาในขณะที่เซรามิกมีการเย็นตัวลงมาจนต่ำกว่าจุดคูรีประมาณ 50 °C สำหรับในกรณีของสาร PZT นั้นจะต้องเลือกใช้อุณหภูมิและความต่างศักย์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกสูงสุด โดยไม่มีกระแสรั่วเกิดขึ้นจนถึงระดับที่สามารถจะทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นมาอย่างมากและนำไปสู่การทลายทางไฟฟ้าของเซรามิกในที่สุดการใช้สนามไฟฟ้าค่าสูงนั้นจะสามารถกระทำได้ไม่ยากถ้าทำการจ่ายในรูปแบบของพัลส์สั้นๆ

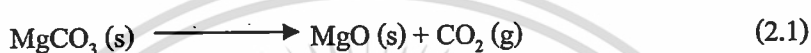
การทำให้เซรามิกมีขั้วด้วยวิธีการคอโรนา(corona poling) หรือการปล่อยประจุไฟฟ้าแบบคอโรนาก็สามารถนำมาใช้ได้เช่นกัน ซึ่งในกรณีเช่นนี้จะอาศัยหลักการให้ความต่างศักย์ขนาด 10<sup>4</sup> โวลต์เข้าไปด้วยการใช้เข็มเคียวหรือแบบเป็นชุดที่มีปลายเข็มอยู่ห่างจากพื้นผิวของเซรามิกเพียงไม่กี่มิลลิเมตรเท่านั้นและต่อสายดินเข้ากับชิ้นเซรามิกด้านตรงข้าม ลักษณะเช่นนี้จะทำให้มีสนามไฟฟ้าค่าสูงเกิดขึ้นในเซรามิกได้ข้อดีของการทำให้มีขั้วด้วยวิธีการคอโรนาคือ การช่วยลดความเสี่ยงของการทลายทางไฟฟ้าลงที่เล็กน้อย เนื่องจากว่าประจุของการเกิดขั้วนั้นไม่สามารถที่จะมีการวิ่งผ่านตามช่องไปยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดอ่อนของตัววัสดุได้อย่างรวดเร็วเหมือนกับที่ เกิดขึ้นในกรณีของการใช้ขั้วไฟฟ้าโลหะเป็นพาหะนำ ประจุ

## 2.5 การเตรียมผงจากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

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



ส่วนการเตรียมผงจากปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของแข็งที่ผสมกันอยู่นั้น เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในการเตรียมผงเซรามิกของพวกสารประกอบของออกไซด์เชิงซ้อน ซึ่งโดยปกติจะใช้ตัวทำปฏิกิริยาที่เป็นสารพวก คาร์บอเนต ไนเตรท ซัลเฟต ออกซาลेट หรือแอซิเตท ดังตัวอย่างของการเตรียมแบเรียมไทเทเนตจากปฏิกิริยาระหว่างแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO<sub>3</sub>) กับไทเทเนียมออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) ตามสมการ



การให้ความร้อนแก่สารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของแข็งเพื่อให้เกิดการสลายตัว หรือเกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารตั้งต้นต่างชนิดกันแล้วเกิดเป็นของแข็งชนิดใหม่ขึ้นมานั้น ทางด้านเซรามิกจะเรียกกระบวนการดังกล่าวว่า “การแคลไซน์”(calcination)

พิจารณาการเตรียมผงแมกนีเซียมออกไซด์ จากการสลายตัวของแมกนีเซียมคาร์บอเนตด้วยความร้อนตามสมการที่ 2.1 เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน(endothermic) อย่างรุนแรง ซึ่งเป็นลักษณะปกติของปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนต่างๆ ไป จึงต้องอาศัยการให้พลังงานความร้อนแก่ตัวทำปฏิกิริยาที่เพียงพอต่อการทำให้เกิดการสลายตัว นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงเรื่องของสมดุลความดันเนื่องจากในระบบจะมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นทำให้ต้องคำนึงถึงค่าความดันส่วนย่อยที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อการสลายตัวของแมกนีเซียมคาร์บอเนตในทุกค่าของอุณหภูมิ

การเตรียมผงจากปฏิกิริยาสถานะของแข็งมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างน้อย แต่ผงที่เตรียมได้มักจะมีปัญหาเรื่องการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน โตทำให้ต้องมีการบดย่อยลดขนาดอยู่เสมอ เนื่องจากการบดย่อยมีการใช้ลูกบด จึงมีโอกาสทำให้ผงที่เตรียมได้มีสารแปลกปลอมปะปนมาด้วยและเมื่อนำไปใช้อาจจะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดเฟสที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ได้ และนอกจากนี้การบดย่อยลดขนาดยังทำให้ไม่สามารถควบคุมรูปร่างของอนุภาคที่เตรียมได้อีกต่อไป

## 2.6 การแคลไซน์(Calcination)

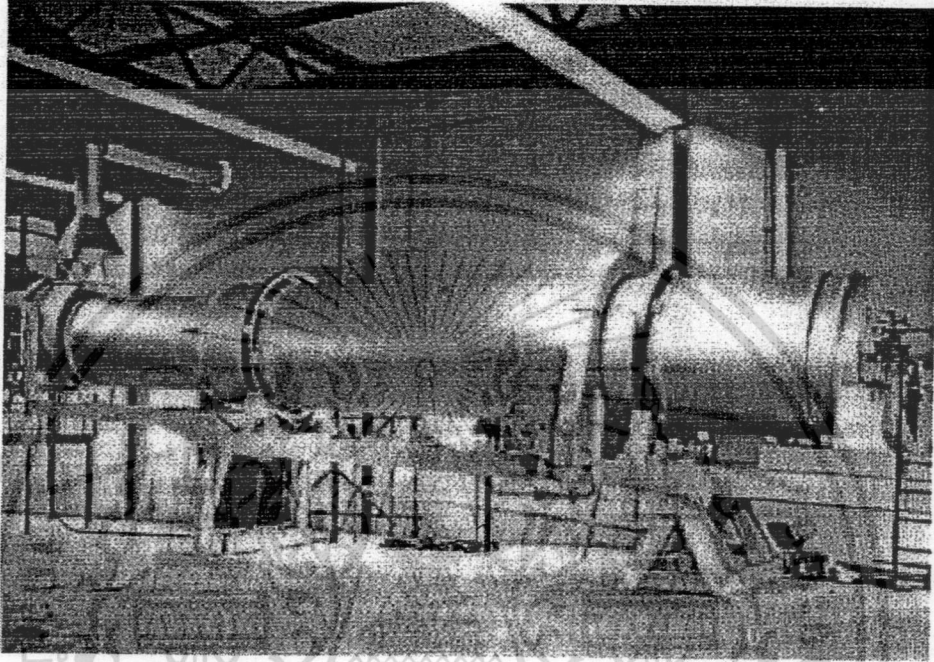
การแคลไซน์เป็นกระบวนการทางความร้อนที่นำให้ส่วนประกอบต่างๆ เกิดมีอันตรกิริยาต่อกัน โดยอาศัยกลไกการแพร่ระหว่างกันของพวกไอออน จึงเป็นวิธีการช่วยลดขอบเขตของการแพร่ที่จะต้องทำให้เกิดขึ้นในช่วงของขั้นตอนการซินเตอร์ลง เพื่อให้ได้วัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันจึงอาจจะพิจารณาการแคลไซน์ว่าเป็นเพียงส่วนหนึ่งของขั้นตอนในการผสมสารก็ยิ่งได้ ซึ่งเงื่อนไขในการเผาแคลไซน์นั้น เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการควบคุมพฤติกรรมของการหดตัวของวัสดุในช่วงของการซินเตอร์เฟสสุดท้ายที่เราต้องการนั้นอาจจะยังไม่เกิดขึ้นมาอย่างสมบูรณ์ในตอนนี้อย่างไรก็ตามแต่เกรเดียนต์ทางเคมีที่ยังหลงเหลืออยู่ภายในสารก็จะจะไปช่วยเสริมกระบวนการซินเตอร์ได้ภายหลังสิ่งที่สำคัญก็คือว่าการแคลไซน์นั้นควรจะให้ผลผลิตที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นไปตามที่ต้องการให้มากที่สุด การแคลไซน์นั้นสามารถทำได้โดยการใส่อนุภาคผงที่ผ่านกระบวนการผสมสารมาแล้วลงไปในตัวหรือเบ้า(crucible) สำหรับเผาสารที่เป็นชุดๆ หรือในการเผาแบบต่อเนื่อง ซึ่งถ้วยเผาสารที่นำมาใช้ก็ควรจะมีฝาปิดด้วย เพราะถ้าหากว่าสารที่จะเผานั้นมีส่วนประกอบทางเคมีที่สามารถเกิดการระเหยได้ง่าย อย่างเช่น ในกรณีที่มีตะกั่วออกไซด์รวมอยู่ด้วย พื้นผิวของถ้วยเผาสารที่มีการสัมผัสกับอนุภาคผงโดยตรงจะต้องไม่เกิดการทำปฏิกิริยาเคมีกันเพื่อป้องกันปัญหาเรื่องการปนเปื้อน และเพื่อจะได้นำถ้วยเผาสารกลับมาใช้ใหม่ได้อีก เนื่องจากว่าอนุภาคผงเป็นวัสดุที่มีสภาพนำความร้อนต่ำ ดังนั้น อุณหภูมิที่มีความสม่ำเสมอเพียงพอก็มักจะอยู่แถวๆ บริเวณที่ลึกลงไปจากผิวหน้าของอนุภาคผงเพียงไม่กี่เซนติเมตรเท่านั้น ถ้าหากว่ามีการใช้อุณหภูมิที่สูงที่สุดเป็นเวลานานเพียง 1 ชั่วโมงหรือ 2 ชั่วโมง

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

เนื่องจากว่าผงที่ผ่านการแคลไซน์แล้วมักจะมีการยึดเกาะกันของอนุภาคอยู่ในรูปของก้อนหยาบ จึงต้องนำมาทำการบดย่อยให้เป็นผงละเอียดหรือทำเป็นน้ำสลิตที่มีความเหมาะสมสำหรับขั้นตอนการขึ้นรูปต่อไปอีกทีหนึ่ง โดยจะต้องมีความระมัดระวังในเรื่องของปัญหาการปนเปื้อนด้วยโดยปรกติการลดขนาดของอนุภาคในช่วงเริ่มต้นเพื่อเตรียมอนุภาคผงให้มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการบดย่อยในขั้นตอนต่อไปนั้น สามารถจะทำให้ด้วยการใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่หลากหลายชนิด อาทิเช่น เครื่องบดหยาบแบบฟันฉลามสามารถจะทำให้ก้อนวัสดุที่มีขนาดในระดับเซนติเมตรลดลงมาอยู่ในระดับมิลลิเมตรได้ ในขณะที่การบดย่อยด้วยก้อนซึ่งประกอบด้วยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมุนของแกนที่มีหนามเหล็กยื่นออกไปรอบทิศทางดีไปยังวัสดุที่ใส่เข้ามา สามารถจะทำให้ได้อนุภาคผงที่มีขนาดเล็กกว่าที่ได้จากวิธีการใช้เครื่องบดหยาบแบบพื้นฉลาม



รูปที่ 2.15 เตาเผาแบบหมุน

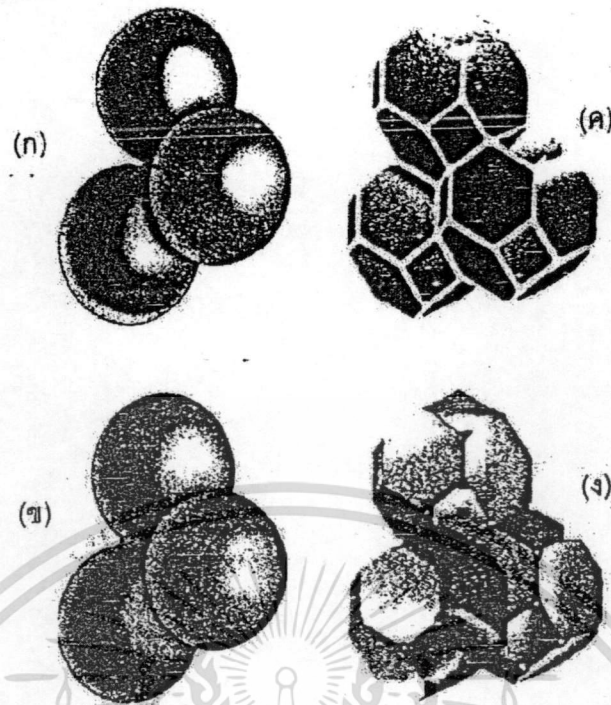
## 2.7 ซินเตอร์เซรามิก

กระบวนการซินเตอร์นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อกระบวนการผลิตเซรามิก เซรามิกจะต้องถูกเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้โครงสร้างทางจุลภาค (microstructure) ตามที่ต้องการ ซึ่งจะส่งผลให้ได้เซรามิกที่มีคุณสมบัติต่างๆตามที่ต้องการด้วย

### ขั้นตอนการซินเตอร์

การแบ่งช่วงการซินเตอร์นั้นจะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอนุภาคที่มาเชื่อมต่อกันและการหายไปของรูพรุน สำหรับวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกเชิงซ้อน แสดงดังรูป 2.16 ซึ่งแสดงโครงสร้างรูปทรงเรขาคณิตในอุดมคติที่ผ่านกระบวนการซินเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.16

- (ก) การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น ทรงกลมสัมผัสกัน  
 (ข) ช่วงสุดท้ายของการซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น ทรงกลมเริ่มเชื่อมติดกัน  
 (ค) การซินเตอร์ช่วงกลาง เกรนเปลี่ยนรูปร่าง  
 (ง) การซินเตอร์ช่วงสุดท้าย รูพรุนเป็นแบบเทพระฮีตรอด

#### 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)

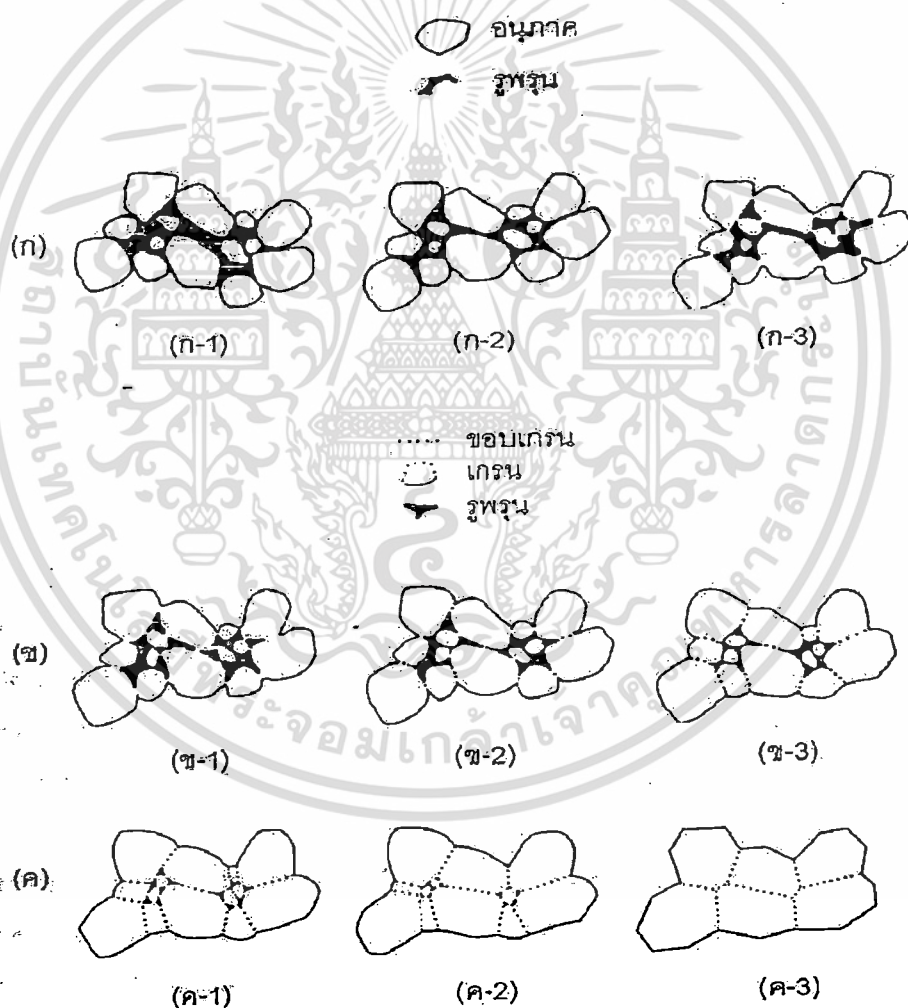
การซินเตอร์ช่วงกลางจะเริ่มขึ้นเมื่อรูพรุนมีรูปร่างสมดุล (equilibrium shape) ซึ่งจะพิจารณาได้จากแรงตึงผิวและแรงระหว่างผิว ส่วนเฟสของรูพรุนก็ยังคงมีความต่อเนื่องกันอยู่ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอนุภาคในการซินเตอร์ช่วงกลางนี้แสดงดังรูป 2.17 (ข) จะเห็นว่าขนาดของคอจะใหญ่ขึ้น ปริมาตรรูพรุนน้อยลง และจุดศูนย์กลางของอนุภาคจะเข้ามาใกล้กันมากขึ้นจึงส่งผลให้การหดตัวสัมพันธ์กันกับปริมาตรของรูพรุนที่น้อยลง ส่วนขอบเกรนจะเริ่มเคลื่อน ทำให้เกรนเริ่มโตและเกรนที่อยู่ข้างเคียงหายไปใเกรนดังกล่าว ดังนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเรขาคณิตของเกรน คอ และรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไป การซินเตอร์ช่วงกลางนี้จะเกิดจนกว่ารูพรุนจะมาเชื่อมต่อกันและสิ้นสุดเมื่อรูพรุนเริ่มแยกตัวออกจากกันเป็นรูพรุนเดี่ยว ๆ (isolated pores) การหดตัวในช่วงนี้จึงมากกว่าช่วงอื่น ๆ

**การซินเตอร์ช่วงสุดท้าย (final stage of sintering)**

การพัฒนาโครงสร้างทางจุลภาคของการซินเตอร์ช่วงสุดท้ายนี้ มีได้หลากหลายรูปแบบรูพรุน จะถูกกำจัดออกจากระบบโดยยังคงอยู่ใกล้กับขอบเกรน อย่างไรก็ตามถ้าการเติบโตของขอบเกรนเร็วเกินไป ขอบเกรนจะเคลื่อนที่เร็วกว่ารูพรุน ส่งผลให้รูพรุนแยกตัวไปอยู่ในเกรน เมื่อเกรนเติบโตต่อไปจะทำให้รูพรุนถูกแยกออกจากขอบเกรน ซึ่งจะทำให้ลดโอกาสการถูกกำจัดออกไปได้ ดังนั้นการเติบโตของเกรนควรได้รับการควบคุมเป็นอย่างดี เพื่อให้การกำจัดรูพรุนเป็นไปได้อย่างมากที่สุด การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอนุภาคในการซินเตอร์ช่วงสุดท้ายนี้แสดงดังรูป 2.17 (ค)



รูป 2.17 การซินเตอร์

(ก) การซินเตอร์ช่วงเริ่มต้น

(ข) การซินเตอร์ช่วงกลาง

(ค) การซินเตอร์ช่วงสุดท้าย เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### กระบวนการเตรียมและการวัด

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมและการตรวจสอบเซรามิกที่ใช้ในโครงการนี้ โดยการเตรียมผงของ  $\text{Pb}_{0.97}\text{Sr}_{0.03}[(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.07}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.06} \times (\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)_{0.87}]\text{O}_3 + 0.3 \text{ wt}\% \text{Nb}_2\text{O}_5 + 0.3 \text{ wt}\% \text{CuO} + 0.3 \text{ wt}\% \text{Bi}_2\text{O}_3 + 0.1 \text{ wt}\% \text{Li}_2\text{CO}_3$  (PZN-PMnN-PZT) โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Zr/Ti ทั้งหมด 3 อัตราส่วนที่  $x = 0.52, 0.50, 0.48$  ตามลำดับ จากนั้นกล่าวถึงขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกที่เตรียมได้ 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)

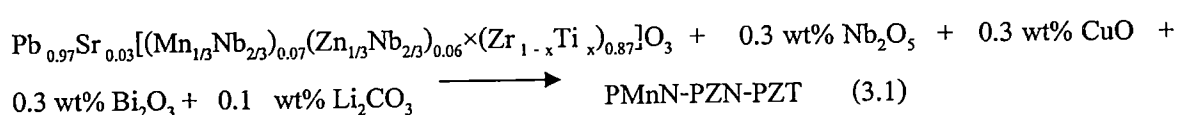
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้

- เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม ผลิตโดยบริษัท Sartorius
- กระดาษฟอยล์
- ซ้อนตักสารทำด้วยสแตนเลส
- กระจกป้องกันความร้อน
- เทปพันท่อ
- ยางในรถยนต์
- ลูกบดเซอร์โคเนีย (zirconia)
- เครื่องบดย่อย
- เตาแผ่นความร้อน (hot plate) พร้อมตัวผสมสารแบบแม่เหล็ก (magnetic stirrer)
- แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (magnetic bar)
- ตู้อบสารอุณหภูมิ 200° ซ ผลิตโดยบริษัท Memmert
- เตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง ผลิตโดยบริษัท Nabertherm
- เป้าเผา (crucible) พร้อมฝาปิด
- ครอบควดสาร
- แม่พิมพ์โลหะสำหรับอัดขึ้นรูป
- เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก
- คีมหนีบ
- บีกเกอร์ขนาดต่าง ๆ
- กระดาษทรายเบอร์ 1000 และ 1200
- กระชอน
- เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) รุ่น D8 Advance
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ผลิตโดยบริษัท LEO รุ่น LEO 1455 VP
- ชุดอุปกรณ์วงจร Sawyer – Tower สำหรับการวัดฮิสเทอรีซิส

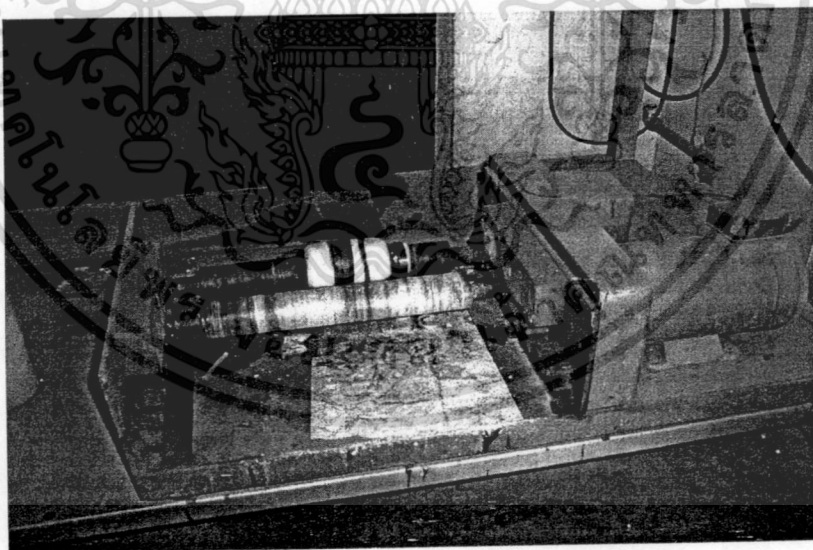
### 3.3 กระบวนการเตรียมผง PMN-PZN-PZT

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



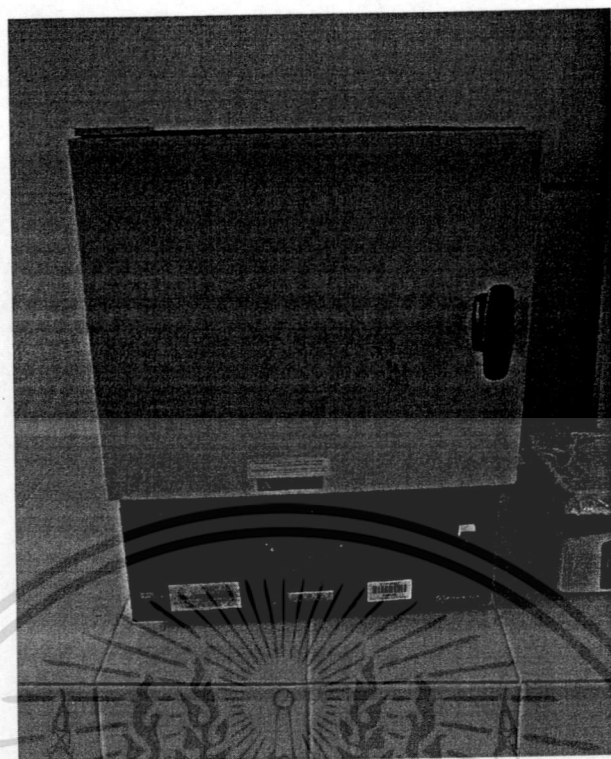
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ชั่งสารตั้งต้นตามอัตราส่วนที่ได้คำนวณไว้ในกระดาษพอยล์
- ผสมสารตั้งต้นที่ชั่งไว้เข้าด้วยกันในกระป๋องพลาสติกที่บรรจุลูกบดเซอร์โคเนียแล้ว เติมน้ำมันอลกลงไปจนท่วมลูกบด จากนั้นปิดฝาให้แน่นพร้อมกับพันเทป เพื่อป้องกันการรั่ว
- นำไปทำการบดย่อยด้วยเครื่องบดย่อยเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.1
- แยกสารตั้งต้นที่ผ่านการบดย่อยแล้วออกจากลูกบดลงในบีกเกอร์ด้วยกระชอน แล้วล้างด้วยเอทานอล
- นำสารตั้งต้นที่ได้ไปประเหยเอทานอลออก โดยการให้ความร้อนด้วยเตาแผ่น ความร้อนพร้อมกับการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กตลอดเวลา ทิ้งไว้จนเอทานอลระเหยออกหมดแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำสารที่อบแล้วมาบดด้วยครกบดสาร
- เมื่อบดสารเสร็จแล้วนำไปใส่ลงในเบ้าเผาพร้อมปิดฝาแล้วนำไปเผาแคลไซน์ โดยเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ  $850^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.2
- แบ่งสารที่เผาแคลไซน์แล้วไปตรวจสอบความบริสุทธิ์ของผงสารตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(XRD)



รูปที่ 3.1 การบดย่อยด้วยเครื่องบดย่อย (Ball-milling)

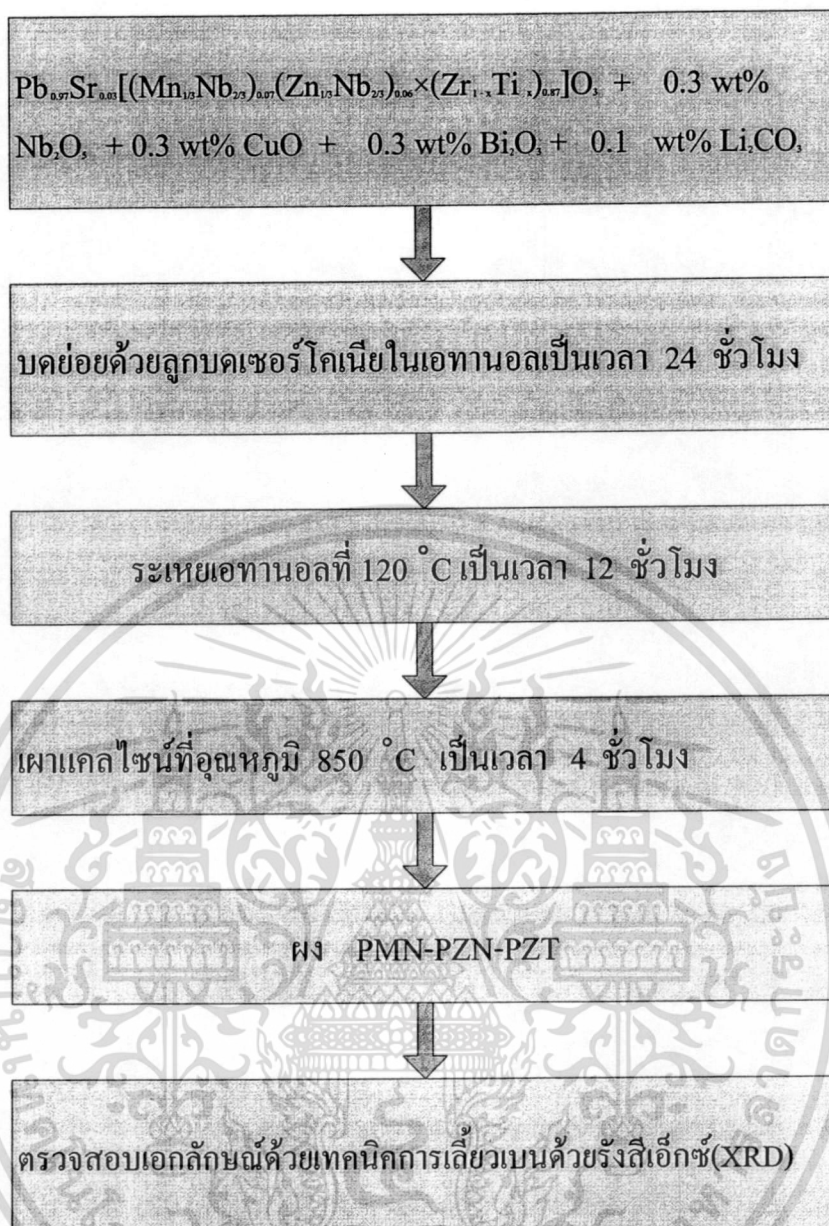
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 เตาไฟฟ้าสำหรับเอกสาร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนผังการเตรียมผง PMN-PZT-PZN

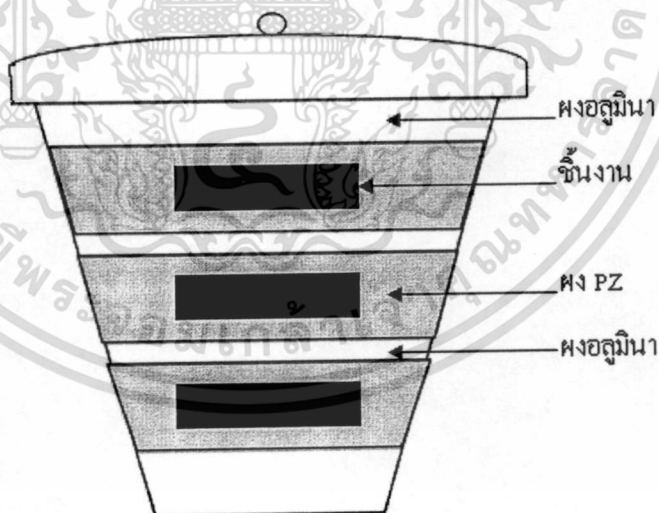
### 3.4 กระบวนการเตรียมเซรามิก

เมื่อได้ผงที่ผ่านการแคลไซน์และตรวจสอบความบริสุทธิ์แล้วนำผงดังกล่าวมาขึ้นรูปเพื่อทำการเตรียมเป็นเซรามิก

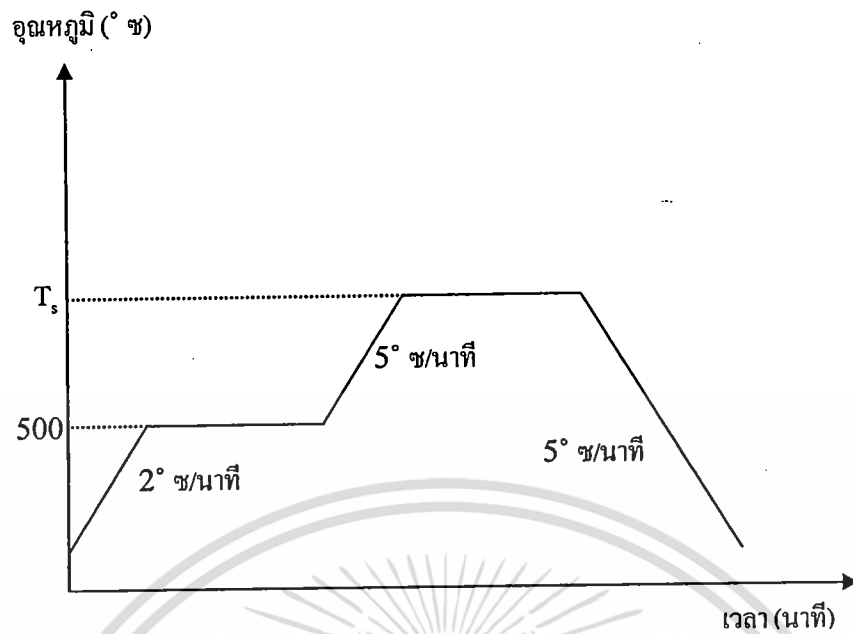
- ชั่งผงสารตัวอย่างประมาณ 1.5 กรัม ลงในกระดาษฟอยล์
- นำผงสารที่ชั่งแล้วมาบดให้ละเอียดด้วยครกบดสาร แล้วหยดสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์(Polyvinyl Alcohol : PVA) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5% โดยน้ำหนักลงไปประมาณ 1 หยดเพื่อเป็นตัวช่วยประสานจากนั้นบดให้เข้ากันแล้วเทลงในแม่พิมพ์โลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำสารที่ผสมกับสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ แล้วไปขึ้นรูปเป็นแผ่นกลม โดยใช้เครื่องอัดระบบไฮดรอลิกด้วยแรงดัน 3 ตัน เป็นเวลานาน 30 วินาที
- เมื่อได้ชิ้นงานที่ผ่านการอัดรูป (Green Body) แล้วจึงนำมาจัดเรียงลงในเบ้าเผา ดังรูปที่ 3.4 โดยรองพื้นด้วยอะลูมินาและกลบด้วยผงเลดเซอร์โคเนต (PZ) เพื่อควบคุมบรรยากาศในการเผา และป้องกันการระเหยของตะกั่วในรูปของ PbO ออกจากชิ้นงานในระหว่างที่ทำการเผา แล้วจึงกลบด้วยผงอะลูมินาทับอีกชั้นหนึ่งเพื่อช่วยให้มีการไหลเวียนของความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเท่า ๆ กัน ในทุกทิศทาง จากนั้นปิดฝาด้วยอะลูมินาให้สนิทแล้วนำไปเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันจาก  $950^{\circ}\text{C}$  -  $1100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีอัตราการขึ้น - ลงอุณหภูมิ  $5^{\circ}\text{C}$  ต่อนาที ในกระบวนการเผาซินเตอร์ของเซรามิกนั้นจะต้องทำการเผาที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ก่อน โดยมีอัตราการขึ้น - ลงอุณหภูมิ  $2^{\circ}\text{C}$  ต่อนาที เพื่อกำจัด PVA ออกไป จากนั้นจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นต่อไปจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการเผาซินเตอร์ ดังแผนภาพแสดงในรูปที่ 3.5 และกระบวนการเตรียมเซรามิกทั้งหมดได้ทำการแสดงไว้ในแผนภาพรูปที่ 3.6

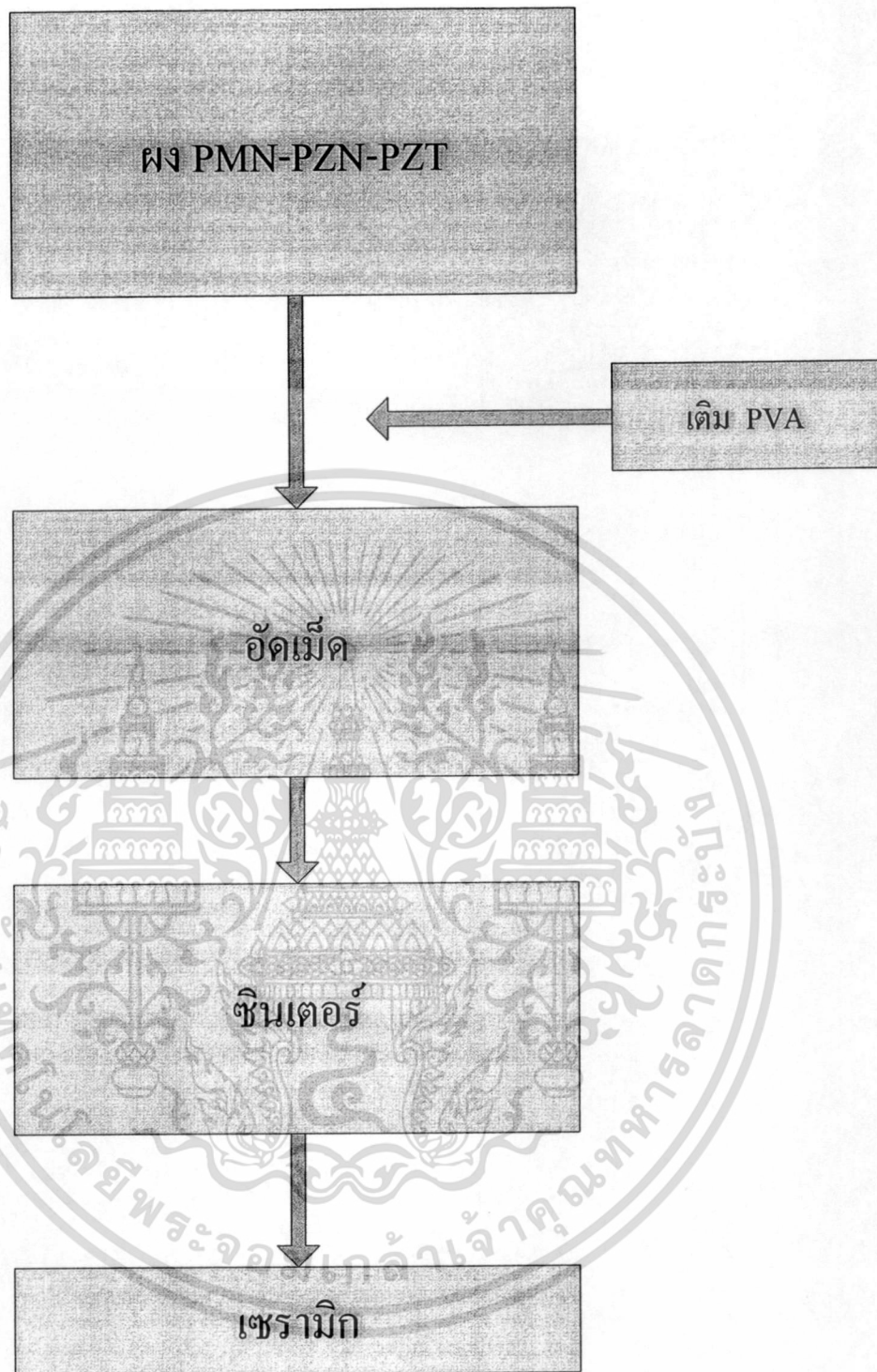


รูปที่ 3.4 การจัดเรียงชิ้นงานในถ้วยอะลูมินาสำหรับการเผาซินเตอร์



รูปที่ 3.5 แผนผังการเผาซินเตอร์  
(โดย  $T_s$  คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แผนผังกระบวนการเตรียมเซรามิก

### 3.5 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(XRD)

เมื่อทำการเผาแคลไซน์ผงสารตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Zr/Ti ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นนำผงที่ได้มาทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(XRD) โดยแสดงผลออกมาเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของ รังสีเอ็กซ์(X - Ray diffraction pattern)

โดยปกติผลึกจะมีลักษณะการเรียงตัวของอะตอมเป็นชั้น ๆ ซึ่งลักษณะการเรียงตัวนี้จะแตกต่างกันไปในผลึกแต่ละชนิดซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัว เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบผลึกจะทำให้เกิดการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์จากซุระนาบเหล่านี้ โดยเป็นไปตามกฎของแบรค (Bragg's law) ซึ่งจะสามารถหาระยะห่างระหว่างระนาบได้

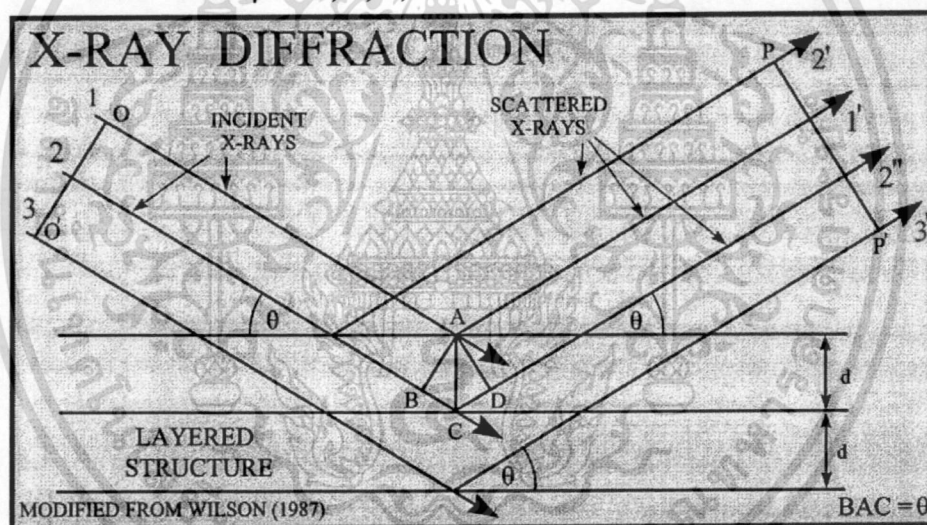
$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (3.2)$$

เมื่อ  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (hkl)

$\theta$  คือ มุมตกกระทบ

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

$n$  คือ เลขใด ๆ  $n=1, 2, 3, \dots$



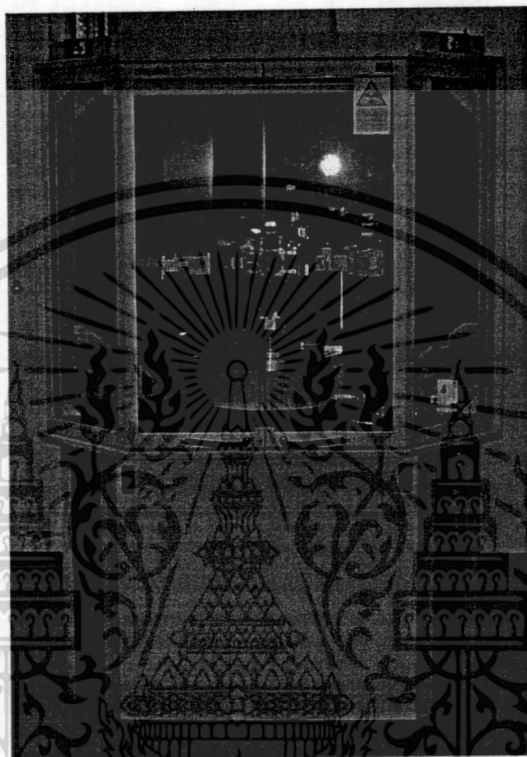
รูปที่ 3.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ  $I_{\text{perov.}}$  คือ ความเข้มสูงสุดของพีคริงส์เอ็กซ์ของเฟสเพอโรฟสไกต์  
 $I_{\text{pyro.}}$  คือ ความเข้มสูงสุดของพีคริงส์เอ็กซ์ของเฟสไพโรคลอ



รูปที่ 3.8 เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance

### 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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ซึ่งจะเป็ประโยชน์อย่างมากสำหรับการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคกับเงื่อนไขในการเผาซินเตอร์ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์กับขนาดของเกรนที่ปรากฏ เป็นต้น



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลิตโดยบริษัท LEO รุ่น LEO 1455 VP

### 3.8 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก

#### 3.8.1 การตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก

ในการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกด้วยการวัดค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ( $\tan \delta$ ) ของสารตัวอย่าง ใช้วิธีการวัดค่าความสามารถในการเก็บกักประจุของเซรามิกแล้วคำนวณหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ดังสมการ 3.5 โดยเริ่มการนำเซรามิกที่เตรียมได้มาทำการจัดผิวของชิ้นงานให้เรียบขนาดกันทั้งสองหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วทำการขัดด้วยผงอลูมินาอีกครั้ง นำชิ้นงานที่ทำการขัดเสร็จแล้วไปอบในเตาอบเพื่อไล่น้ำออกจากชิ้นงานให้หมด จากนั้นนำเซรามิกมาทำขั้วไฟฟ้า โดยเคลือบด้วยทองคำ ด้วยเทคนิค Sputtering แล้วจึงนำชิ้นงานไปตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

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

เมื่อ	$\epsilon_r$	คือ	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสารตัวอย่าง
	$\epsilon_0$	คือ	ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $8.854 \times 10^{-15}$ F/mm
	t	คือ	ความหนาของสารตัวอย่าง(mm)
	C	คือ	ค่าที่ได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของสารตัวอย่าง
	A	คือ	พื้นที่ขั้วไฟฟ้าบนผิวของสารตัวอย่าง(mm <sup>2</sup> )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

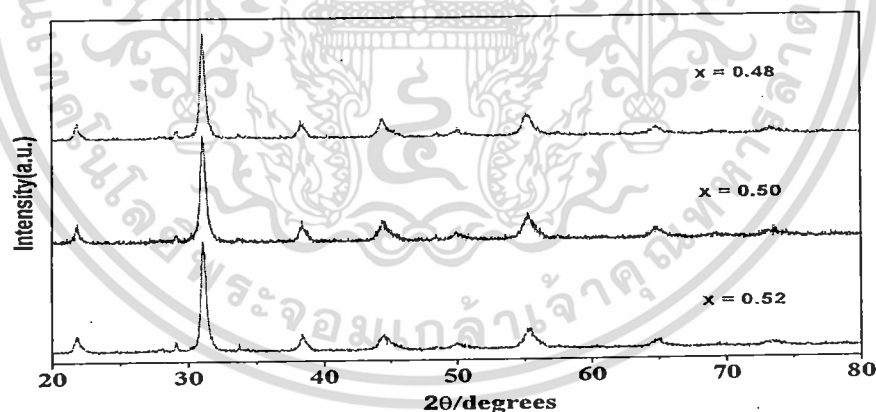
## บทที่ 4

### 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 โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเซรามิกที่เตรียมได้พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์(XRD) ของผง PMnN-PZN-PZT

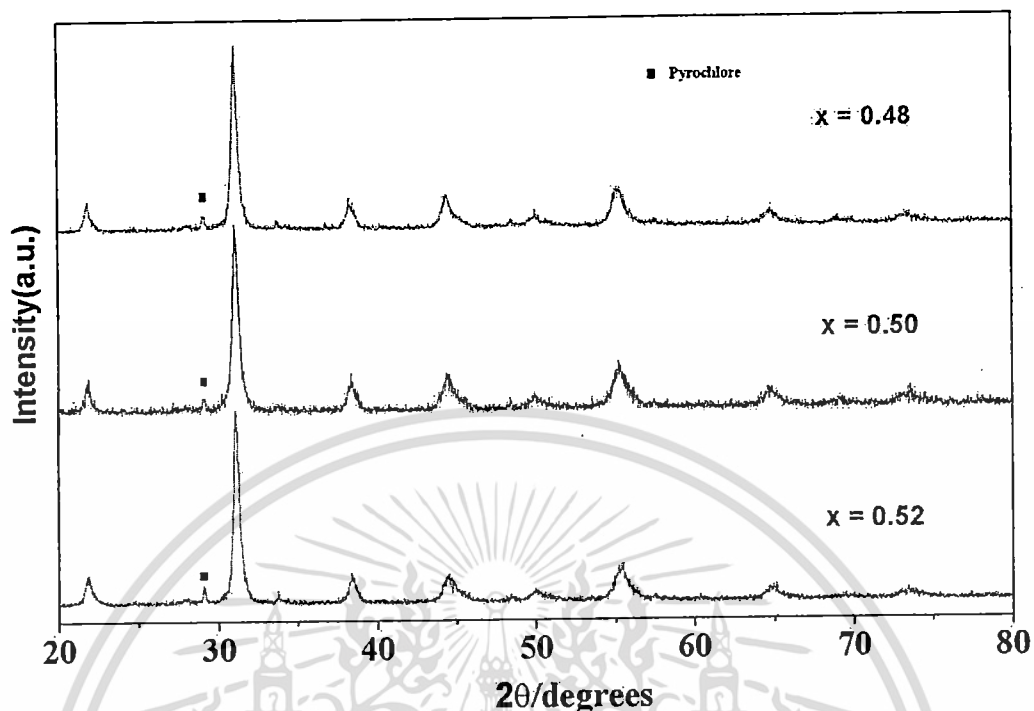
เมื่อทำการเผาแคลไซน์ผงในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  โดย  $x$  มีค่าเท่ากับ 0.48, 0.50 และ 0.52 ที่อุณหภูมิ 850 °ซ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราขึ้น-ลงที่อุณหภูมิ 20 °ซ ต่อนาที แล้วนำมาทำการตรวจสอบชนิดของเฟสที่เกิดขึ้น องค์ประกอบของสารตัวอย่างและ ลักษณะโครงสร้างของสารตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์(XRD) ดังได้แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  ทุกสัดส่วน องค์ประกอบในรูปที่ 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) ทุกสัดส่วนองค์ประกอบมีเฟสไพโรคลอรัเจอปนอยู่ในเฟสเพอโรฟสไกต์ของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT) อยู่ ณ ตำแหน่ง  $2\theta$  ประมาณ 29 ถึง 30 แสดงดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะและตำแหน่งของเฟสไพโรคลออร์(pyrochlore)

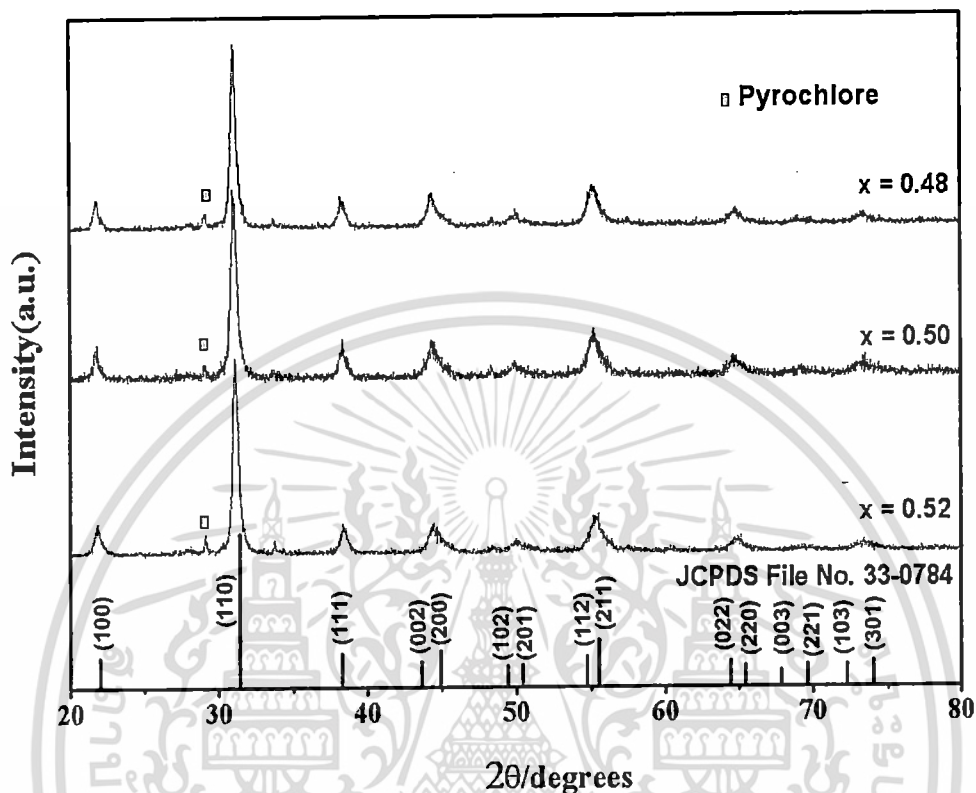
จากการพิจารณาเฟสไพโรคลออร์พบว่าเฟสไพโรคลออร์ที่เกิดขึ้น คือ เฟสของ PbO ที่เป็นสารตั้งต้น เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมมีการเติมปริมาณ PbO ในสัดส่วนที่มากเกินไป(ร้อยละ 2 โดยโมล) เพราะตะกั่วสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิประมาณ 900 °ซ แต่ในการทดลองได้ทำการเผาแคลไซน์ผง  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT) ที่อุณหภูมิ 850 °ซ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ตะกั่วจะสามารถระเหยได้ จึงเป็นเหตุที่ทำให้พบเฟสไพโรคลออร์ ที่ 2θ ประมาณ 29 ถึง 30 ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.2

เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงในระบบ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้เคียงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) ใน  
 เพิ่มข้อมูล JCPDS file no 33-0784 มากขึ้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.3

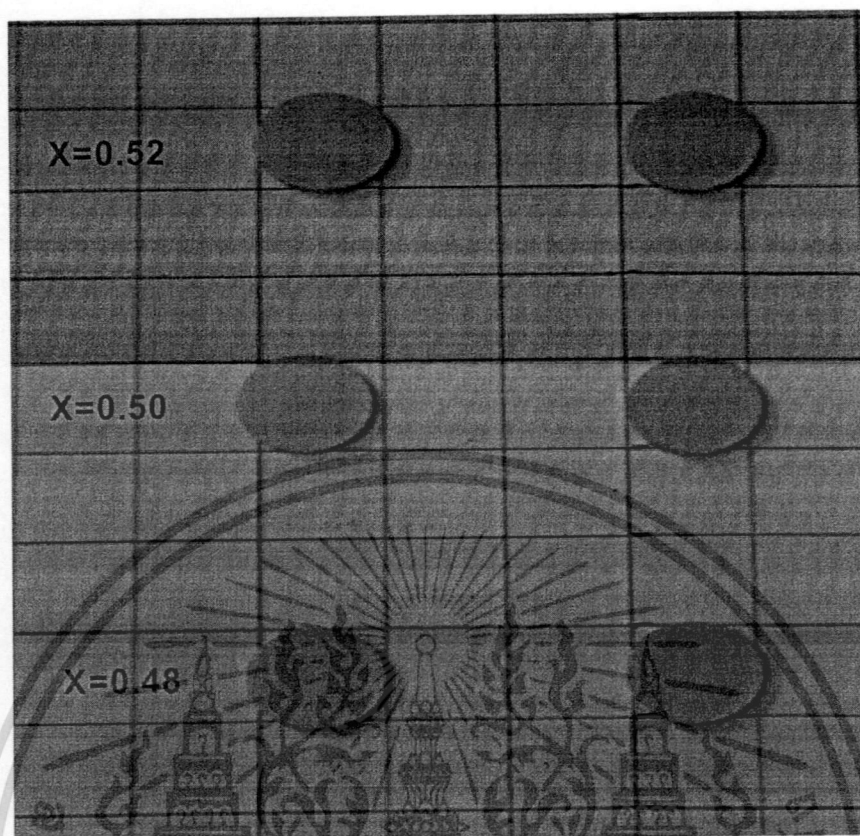


รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}-(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT) เปรียบเทียบกับเพิ่มข้อมูลมาตรฐาน JCPDS file no. 33-0784 ของสารประกอบเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT)

#### 4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก PMnN-PZN-PZT

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก (PMnN-PZN-PZT) สักส่วนองค์ประกอบต่างๆ หลังจากผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1100 °ซ 6 ชั่วโมง

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

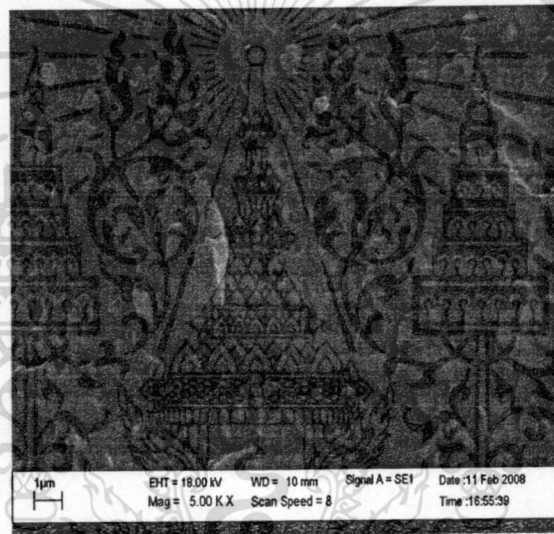
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก (PMnN-PZN-PZT) ที่อุณหภูมิซินเตอร์ 1100 °ซ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

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

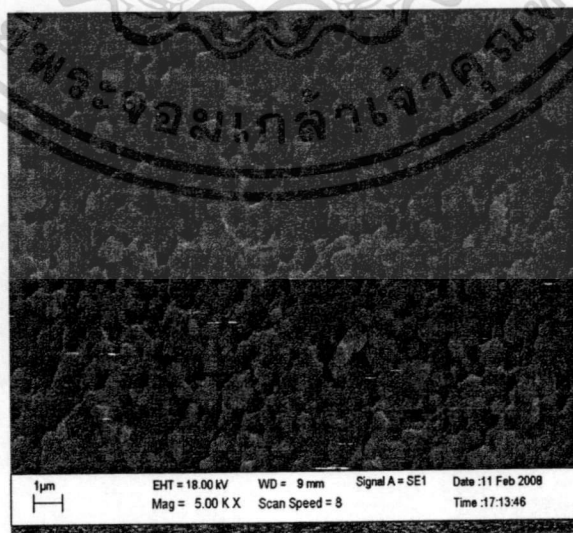
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti เพิ่มมากขึ้น ค่าความหนาแน่นที่ตรวจสอบได้จะคงที่ ซึ่งบ่งบอกถึงสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti ไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่น และอุณหภูมิการเผาไหม้จะส่งผลต่อความหนาแน่น โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 1100 °ซ 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  $\text{PMnN-PZN-PZT}$  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  $\text{PMnN-PZN-PZT}$  ในสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ ที่เผาซินเตอร์แล้ว พบว่าเซรามิกมีโครงสร้างจุลภาคที่มีรูพรุนต่ำและลักษณะของเกรนมีขนาดใกล้เคียงกันเรียงตัวชิดกัน โดยขนาดเกรนอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 6 ไมครอนซึ่งจากการที่โครงสร้างมีรูพรุนต่ำและขนาดเกรนใกล้เคียงกันทำให้มีความหนาแน่นสูง

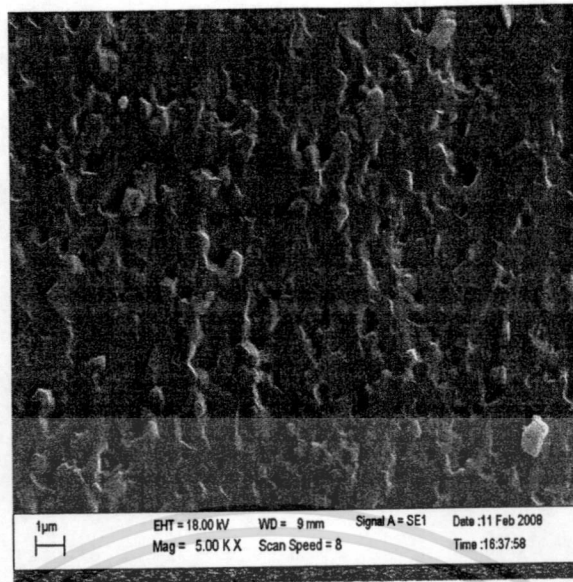


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(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  $1100^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

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

จากรูปที่

4.5

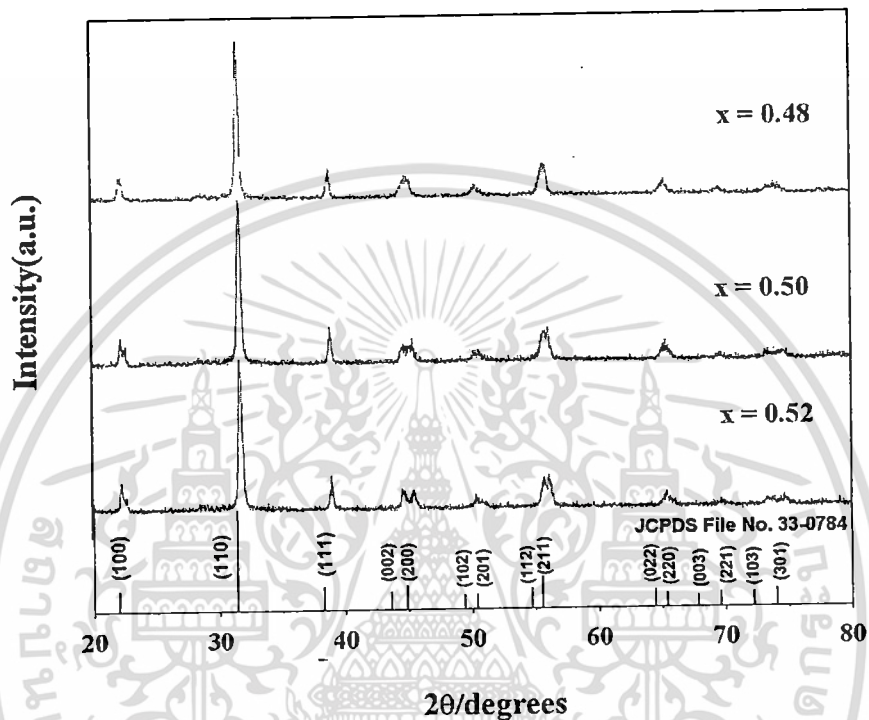
จะพบว่าลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ

$\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT) ทุกสัดส่วนองค์ประกอบใกล้เคียงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT) โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของทุกสัดส่วนองค์ประกอบนั้นไม่มีเฟสไพโรคลอไรด์ (pyrochlore) เจือปน เนื่องจากเมื่อทำการเผาซินเตอร์แล้วปริมาณ  $\text{PbO}$  ที่มากเกินไปจะหายไปในช่วงอุณหภูมิ  $900^\circ\text{C}$  ทำให้ไม่พบเฟสไพโรคลอไรด์ในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกในระบบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  ทุกสัดส่วนองค์ประกอบแต่ถ้าไม่มีการเพิ่มปริมาณ  $\text{PbO}$  ให้มากเกินไปแล้ว เมื่อทำการเผาซินเตอร์เซรามิก  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  (PMnN-PZN-PZT) ที่ได้จะมีปริมาณ  $\text{PbO}$  หายไปบางส่วนทำให้เซรามิกที่ได้จะไม่ใช่เซรามิกในระบบที่ต้องการ ยิ่งไปกว่านั้น เซรามิกในระบบมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ใกล้เคียงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) ในเพิ่มข้อมูล JCPDS file no 33-0784 ที่มีโครงสร้างแบบเทตระโกนอลมีค่าแลตติสพารามิเตอร์ที่  $a = 4.036 \text{ \AA}$  และ  $c = 4.146 \text{ \AA}$  และเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ  $x$  เพิ่มมากขึ้น รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะใกล้เคียงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) ในเพิ่มข้อมูล 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)

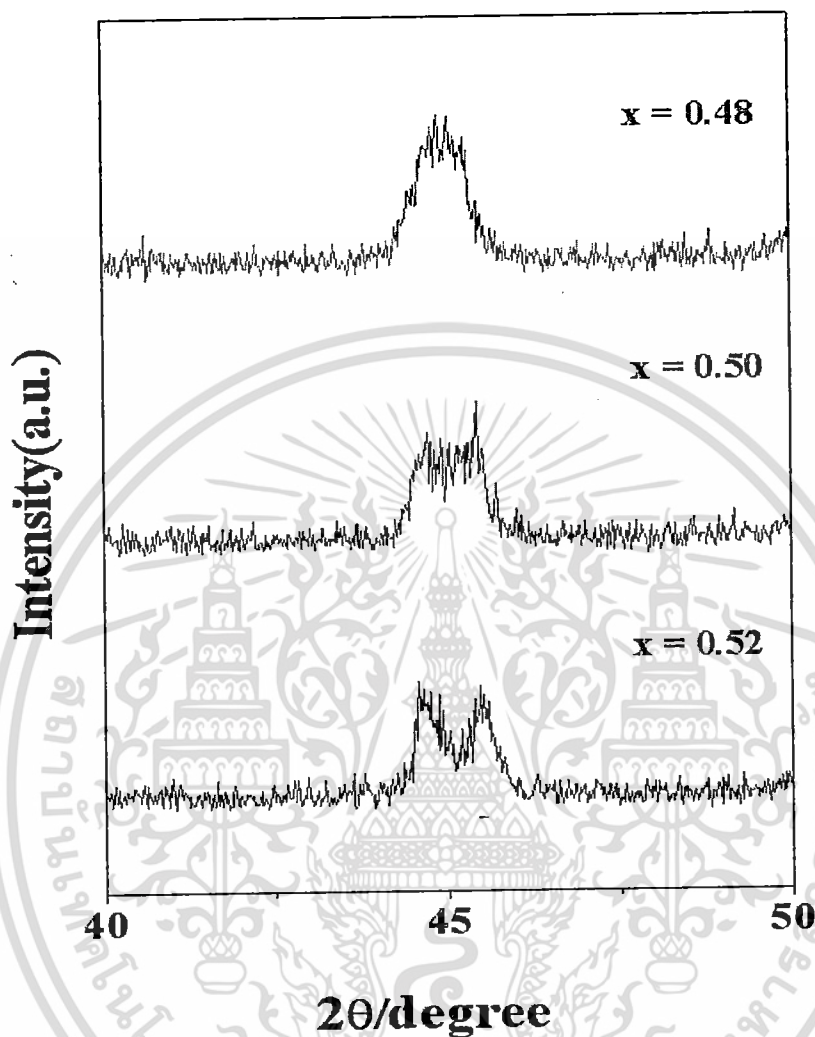
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของเซรามิก

นำเซรามิกที่มีความหนาแน่นดีที่สุดที่สุ่มมาตรวจสอบโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์(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



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  $x = 0.52$   $x = 0.50$   $x = 0.48$

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 (2 0 0) หรือช่วงค่า  $2\theta$  เท่ากับ 40 ถึง 50 พบว่าที่  $x = 0.48$  เป็นฟีดเดี่ยว เนื่องจากผลึกมีรูปร่างเป็นแบบรอมโบฮีดรอล (มีด้าน a b และ c ของผลึกเท่ากัน ระยะห่างระหว่างระนาบมีค่าเท่ากัน ทำให้เมื่อตรวจวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะปรากฏเพียงฟีดเดี่ยว) และที่  $x = 0.52$  ฟีดมีแยกออกเป็น 2 ฟีด เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกจากรอมโบฮีดรอลมาเป็นเทตระโกนอลเรียบร้อยแล้ว เพราะผลึกที่มีโครงสร้างเป็นแบบเทตระ

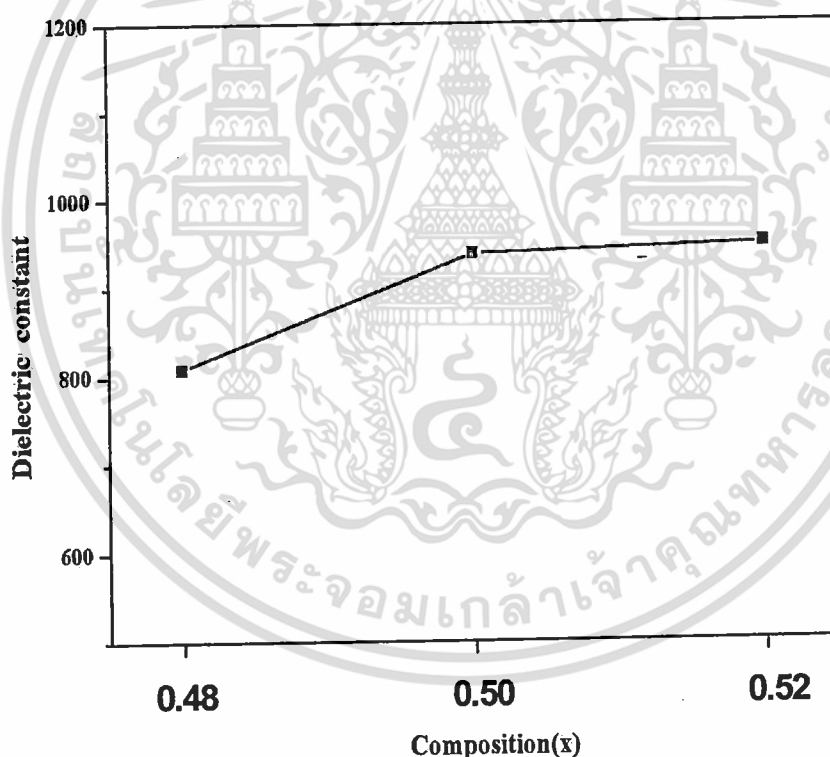
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โกนอล คือ ด้าน a และ b ของผลึกเท่ากันแต่ไม่เท่ากับด้าน c ของผลึก ระยะห่างระหว่างระนาบมีค่าต่างกัน เมื่อทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ได้พิกัดที่มีการแยกเป็น 2 พิกัด ดังรูปที่ 4.7 จากข้อมูลดังกล่าวมาข้างต้นทำให้สรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณ 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  $x = 0.50$  น่าจะเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนเฟสจากรวมโบฮีตรอลมาเป็น เทตระโกนอล คือ จะพบเฟสรวมโบฮีตรอลและเฟสเทตระโกนอล อยู่รวมกัน เนื่องจากลักษณะของพิกัดจะซ้อนทับกัน

#### 4.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

##### 4.4.1 สมบัติทางไดอิเล็กทริก

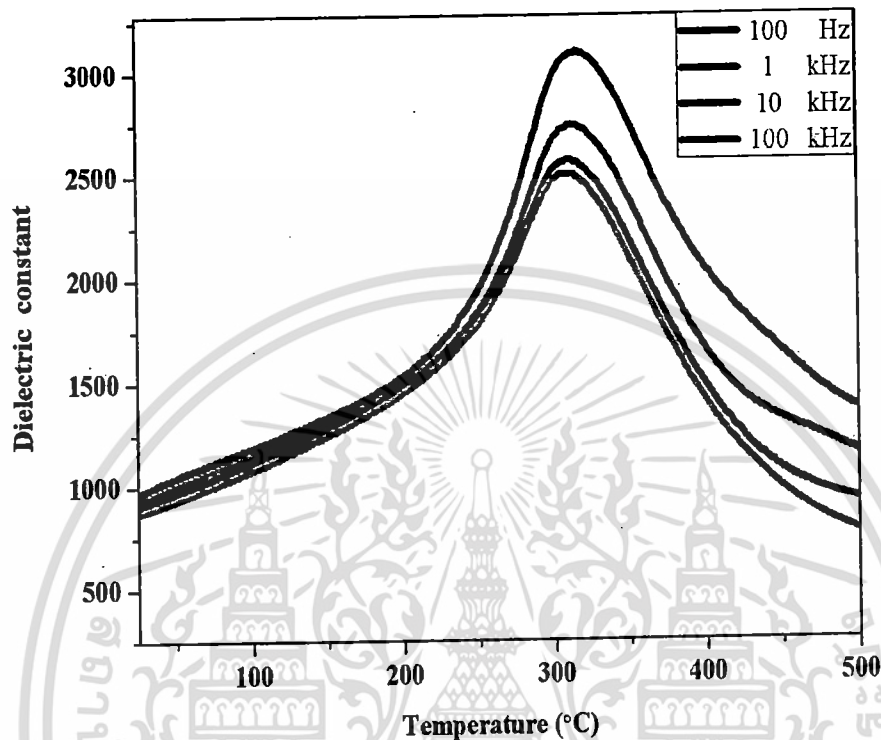
รูปที่ 4.8 แสดงผลกระทบของสัดส่วนองค์ประกอบ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$



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

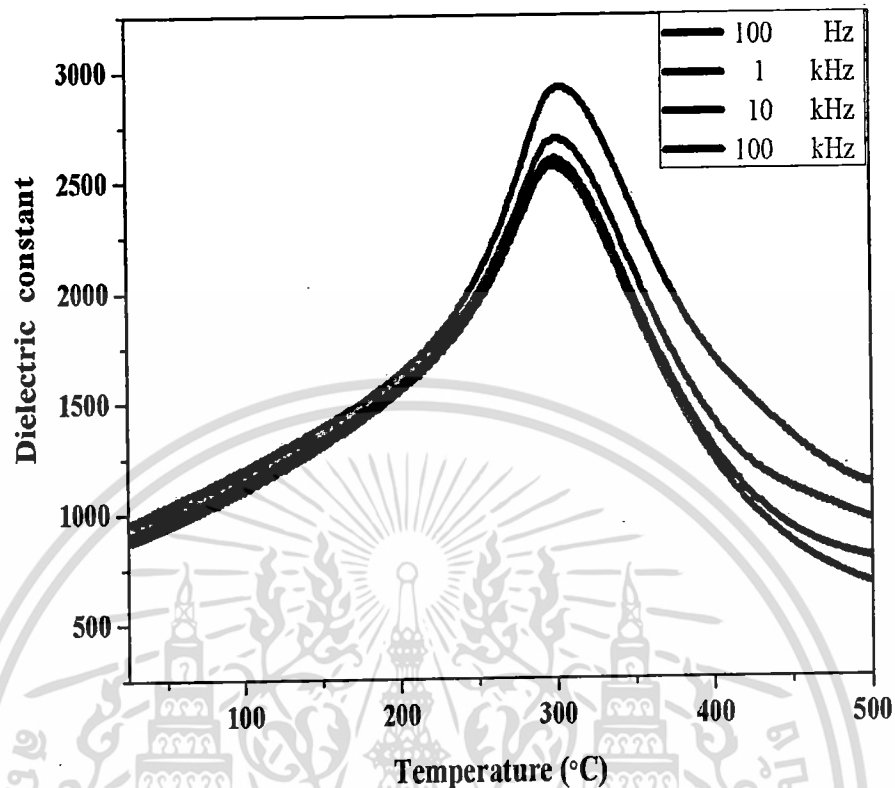
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและสัดส่วนองค์ประกอบของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก PMnN-PZT-PZN พบว่าเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ti เพิ่มขึ้นคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากผลของความหนาแน่นของเซรามิกเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ



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

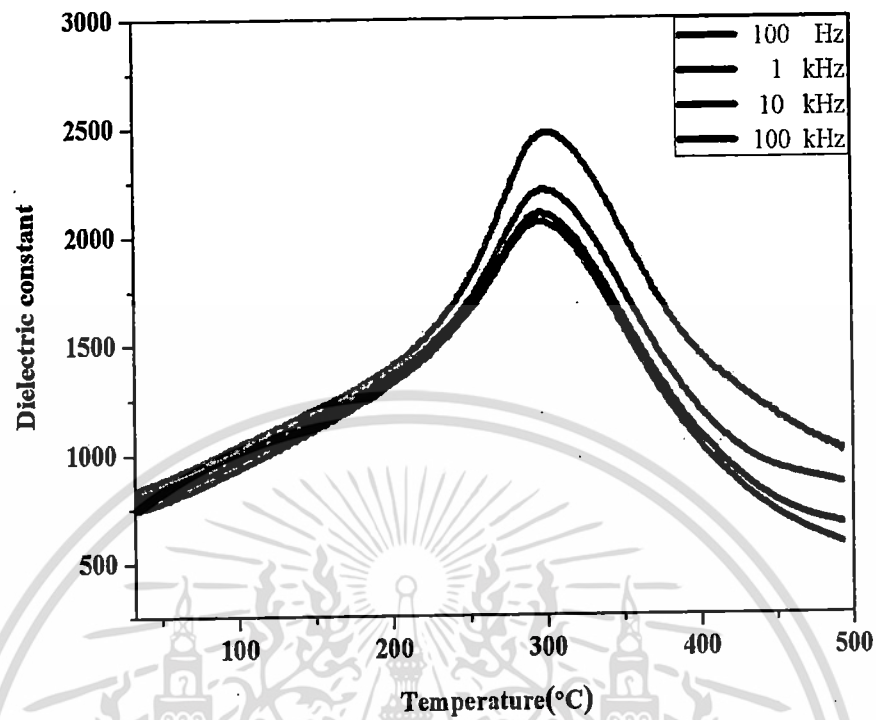
จากรูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่าง ๆ กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป และจากผลการตรวจสอบนี้บอกถึงค่าอุณหภูมิและความถี่ที่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกดังนี้ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.48$  ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าคงที่จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิประมาณ 243 °ซ หลังจากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะสูงขึ้นจนถึงประมาณ 2471 ที่อุณหภูมิประมาณ 300 °ซ ซึ่งก็คืออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ( $T_m$ ) หลังจากอุณหภูมินี้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง



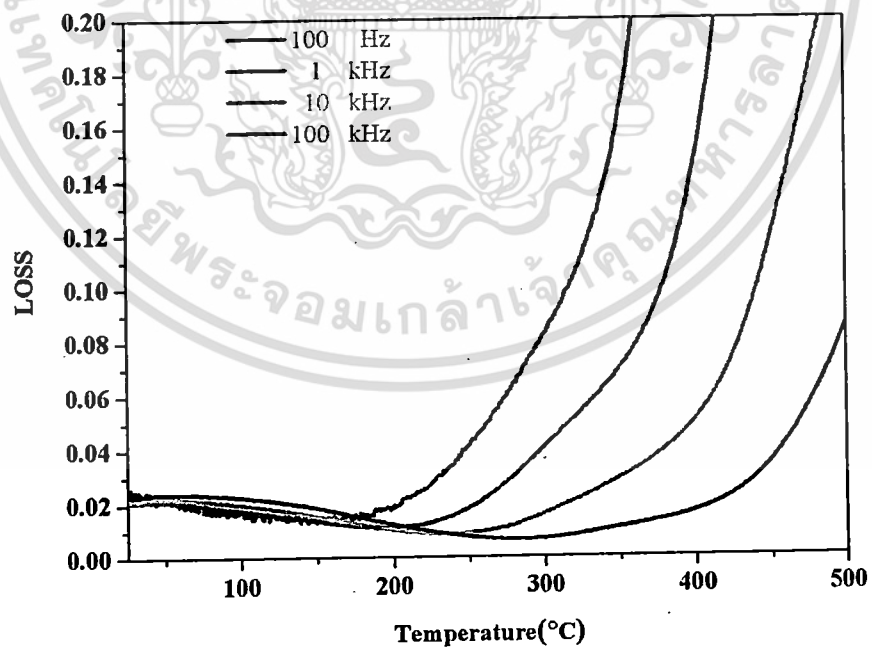
รูปที่ 4.10 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีสัดส่วน  $x = 0.50$  เทียบกับอุณหภูมิที่ความถี่ระหว่าง 100 Hz – 100kHz

จากรูปที่ 4.10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่าง ๆ กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป และจากผลการตรวจสอบนี้บอกถึงค่าอุณหภูมิและความถี่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกดังนี้ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.50$  ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าคงที่จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิประมาณ 245 °ซ หลังจากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะสูงขึ้นจนถึงประมาณ 2929 ที่อุณหภูมิประมาณ 305 °ซ ซึ่งก็คืออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ( $T_m$ ) หลังจากอุณหภูมินี้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง

จากรูปที่ 4.11 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่าง ๆ กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป และจากผลการตรวจสอบนี้บอกถึงค่าอุณหภูมิและความถี่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกดังนี้ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.52$  ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าคงที่จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิประมาณ 242 °ซ หลังจากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะสูงขึ้นจนถึงประมาณ 3090 ที่อุณหภูมิประมาณ 315 °ซ ซึ่งก็คืออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ( $T_m$ ) หลังจากอุณหภูมินี้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง

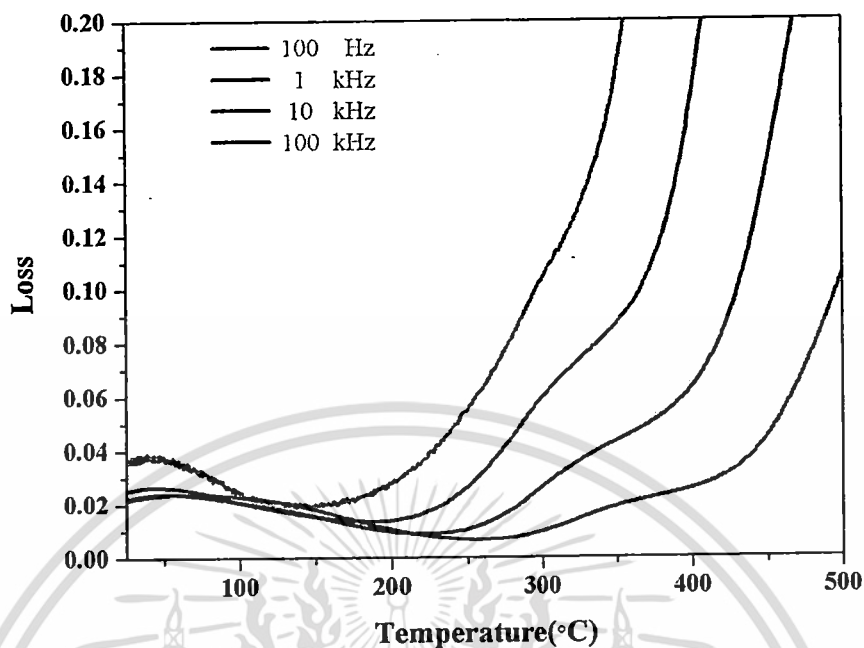


รูปที่ 4.11 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีสัดส่วน  $x = 0.52$  เทียบกับอุณหภูมิที่ความถี่ระหว่าง 100 Hz – 100kHz

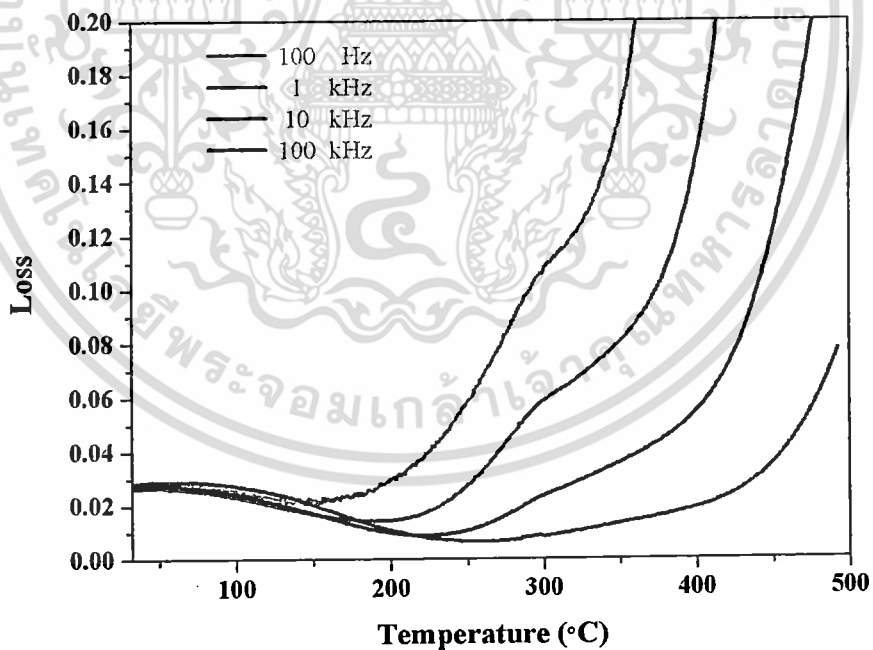


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

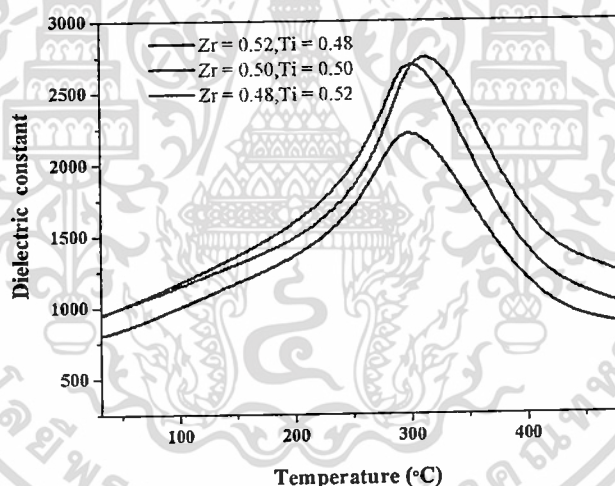
รูปที่ 4.12 แสดงผลกระทบจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปต่อค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของ

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

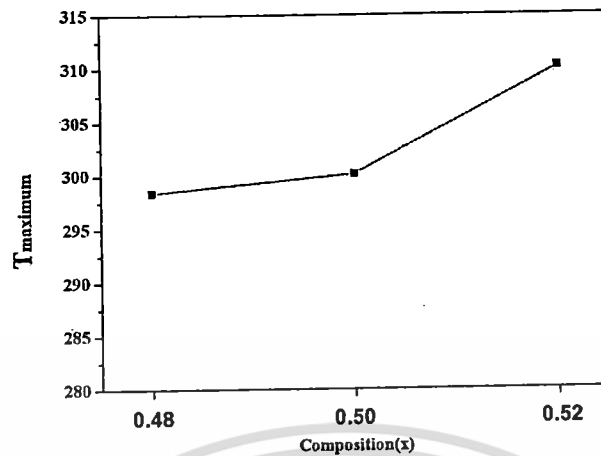
(ก)  $x = 0.48$     (ข)  $x = 0.50$     (ค)  $x = 0.52$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่างๆกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจากผลการตรวจสอบนี้ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกนั้นจะพบว่าที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.48$ ,  $x = 0.50$ ,  $x = 0.52$  จะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกสูงอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากอุณหภูมิที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงนั้น มักจะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเกิดขึ้นด้วยเสมอและยังพบอีกว่าที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของ  $\text{PMnN-PZT-PZN}$  เซรามิกทุกสัดส่วนองค์ประกอบนั้นจะให้ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่สูงมากและที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอุณหภูมิเหนืออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจะส่งผลให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมของธาตุนั้นหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การโพลาไรเซชันภายในผลึกมีมากขึ้น จากปรากฏการณ์นี้ส่งผลให้โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นไม่สามารถสลับขั้วตามสนามไฟฟ้ากระแสสลับได้ทันส่งผลให้เกิดความร้อนเพิ่มสูงขึ้นดังนั้นค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจึงสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าความถี่นั้นมีผลต่อลักษณะของกราฟค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบได้แตกต่างกัน โดยที่สัดส่วนองค์ประกอบของ  $x = 0.48$ ,  $x = 0.50$ ,  $x = 0.52$  นั้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง



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



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส( $T_m$ ) และสัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.48, x = 0.50, x = 0.52$

จากลักษณะกราฟรูปที่ 4.13 เมื่อนำค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของเซรามิกแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบมาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นกราฟแสดงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ PMnN-PZN-PZT จากกราฟเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ลักษณะของกราฟค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกว้างขึ้น และยังพบว่าเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti เพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ( $T_m$ ) นี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti เพิ่มขึ้น

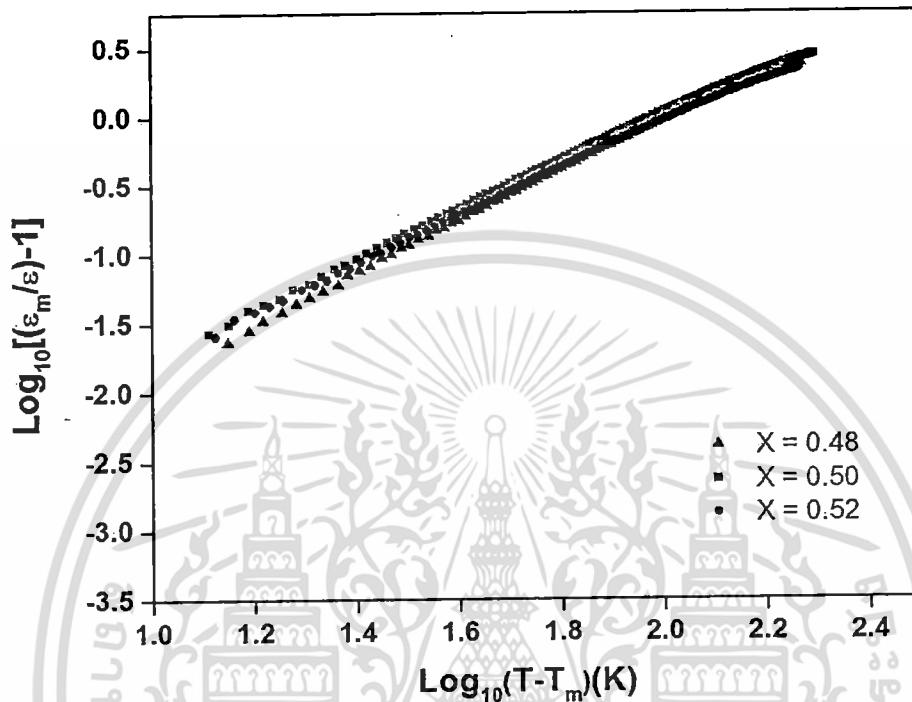
จากทฤษฎีอุณหภูมิและการเปลี่ยนเฟสนั้น (Lu and Hwang, 1999b; Safari et al., 1996; Vitayakorn, 2005) กล่าวว่าสารนอลมัลเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่เหนืออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสนั้นจะเป็นไปตามกฎของคูรี-ไวส์ โดยที่เหนืออุณหภูมินั้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสารจะลดลงต่ำกว่าค่าสภาพยอมในสูญญากาศ แต่สำหรับสารรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะอธิบายได้ตามสมการดังนี้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\left(\frac{1}{\varepsilon_r} - \frac{1}{\varepsilon_{r,\max}}\right)$  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  $\ln\left(\frac{1}{\varepsilon_r} - \frac{1}{\varepsilon_{r,\max}}\right)$  และ  $\ln(T - T_m)$  จากข้อมูลค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ดังรูปที่ 4.13 นั้นจะสามารถหาความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\left(\frac{1}{\varepsilon_r} - \frac{1}{\varepsilon_{r,\max}}\right)$  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  $\delta$  จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่ม

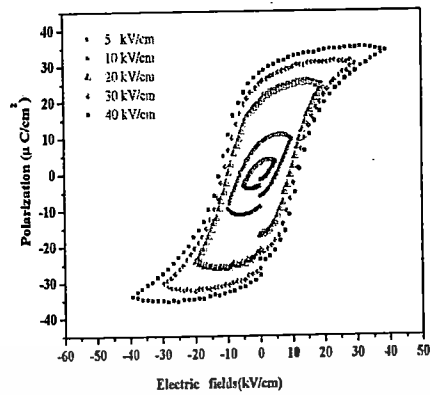
สัดส่วนองค์ประกอบแสดงถึงการกระจายพิกสภาพยอมสัมพัทธ์โดยลักษณะพิกจะกว้างขึ้นตามสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti ที่เพิ่มขึ้นด้วย

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

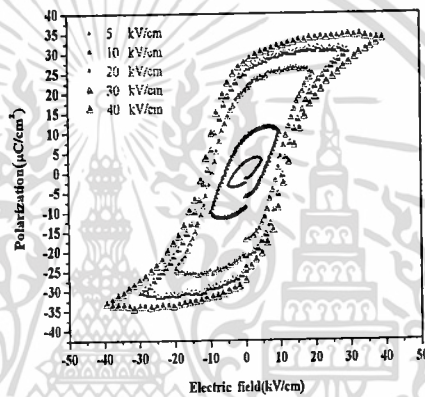
ส่วนประกอบ	$T_m(^{\circ}\text{C})$	$\epsilon_{r,\text{max}}$	$\delta$	$\gamma$
X=0.48	296	2057	1.84	1.53
X=0.50	299	2568	1.76	1.56
X=0.52	310	2503	1.82	1.67

#### 4.5 ตรวจสอบทางเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอเรซิส

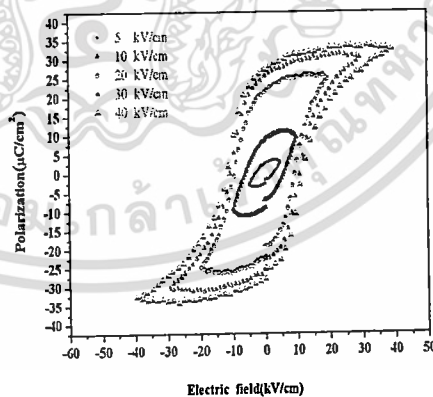
จากนั้นนำ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก PMn-PZT-PZN มาตรวจสอบทางเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอเรซิส ซึ่งการตรวจสอบนี้เป็นส่วนหนึ่งของการตรวจสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก โดยตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ได้รับและค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นมา ซึ่งมีลักษณะตามรูปที่ 4.16 เป็นรูปที่แสดงผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าต่อลักษณะฮิสเทอเรซิสลูปของเซรามิก PMn-PZT-PZN ในสัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.48, x = 0.50, x = 0.52$  โดยเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นพบว่าลักษณะของฮิสเทอเรซิสลูปของเซรามิกแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาริเซชันคงเหลือ ( $P_r$ ) ค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว ( $P_s$ ) และค่าสนามไฟฟ้าบังคับ ( $E_c$ ) จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของฮิสเทอเรซิสลูปใหญ่ขึ้นเนื่องจากค่าโพลาริเซชันอิ่มตัวและค่าโพลาริเซชันคงเหลือเพิ่มขึ้นแต่ค่าสนามไฟฟ้าบังคับนั้นค่อนข้างคงที่ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำ (5 กิโลโวลต์) จะเหนี่ยวนำให้เกิดการโพลาริเซชันได้น้อยจึงทำให้ลักษณะของฮิสเทอเรซิสลูปที่ค่อนข้างเล็ก และเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจะทำให้เหนี่ยวนำให้เกิดโพลาริเซชันมากขึ้นจนถึงค่าศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งลักษณะฮิสเทอเรซิสลูปจะเริ่มคงที่ (40 กิโลโวลต์) เพราะศักย์ไฟฟ้าค่านี้จะทำให้เกิดการโพลาริเซชันจนเกือบทั้งหมด



(ก)



(ข)



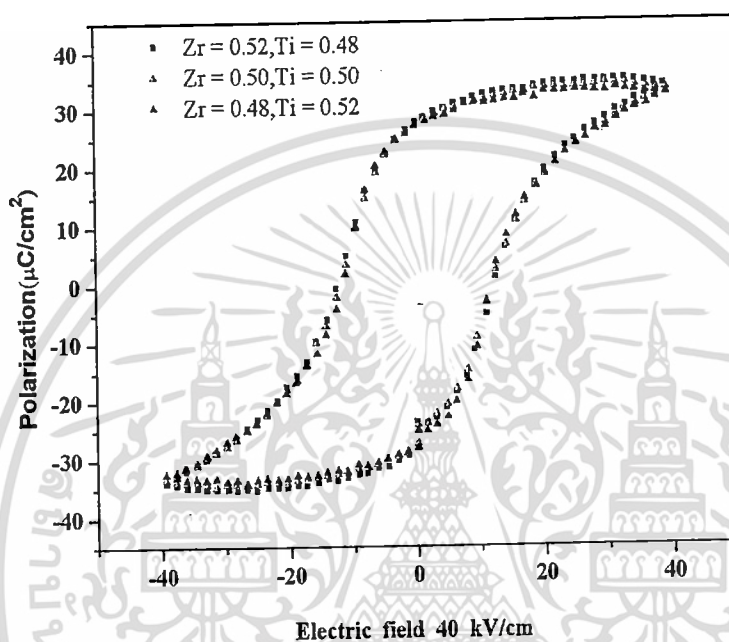
(ค)

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)  $x = 0.52$ 

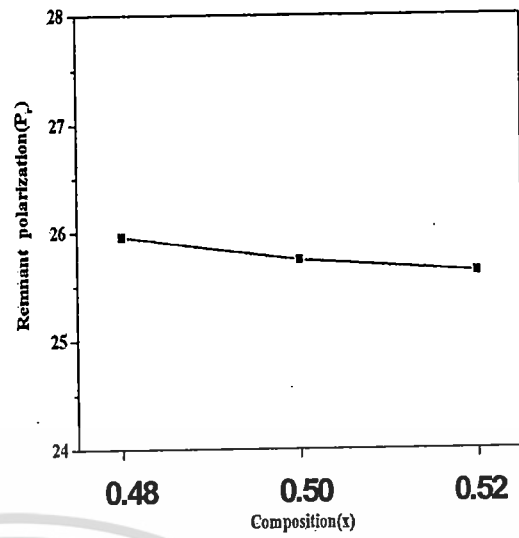
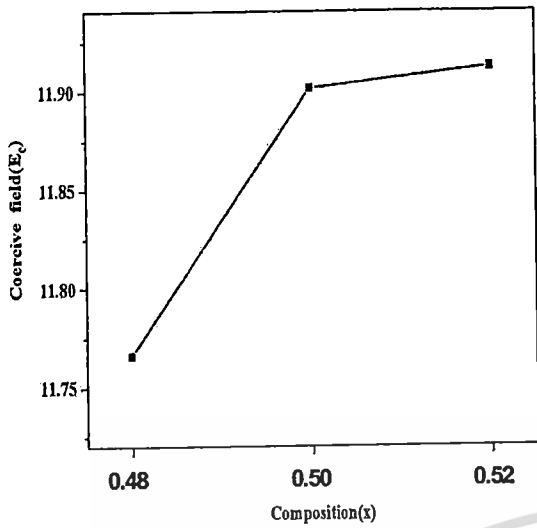
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 จากผลการเปรียบเทียบนี้พบว่าลักษณะของฮิสเทอเรซิสลูปจะมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยค่าโพลาริเซชันคงเหลือจะลดลงและค่าสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นส่วนค่าโพลาริเซชันอิมิตวั้นจะมีแนวโน้มที่ลดลง



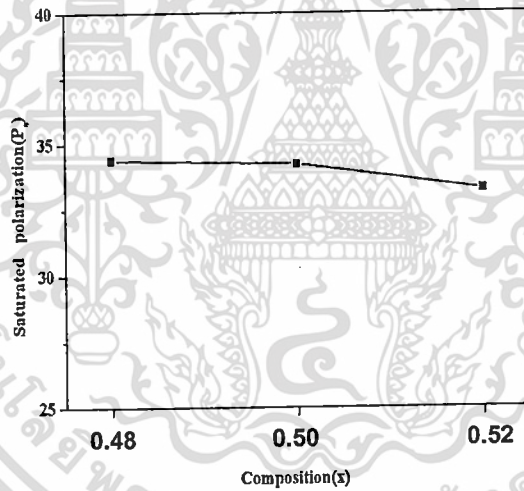
รูปที่ 4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะฮิสเทอเรซิสของ  $\text{PbS}(\text{MnN})_{0.07}(\text{ZnN})_{0.06}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$  เซรามิก  $\text{PMnN-PZT-PZN}$  เมื่อสัดส่วนองค์ประกอบ  $x$  เปลี่ยนแปลง

จากนั้นเมื่อนำค่าโพลาริเซชันอิมิตวั้น ค่าโพลาริเซชันคงเหลือ และค่าสนามไฟฟ้าบังคับของแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบมาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชันอิมิตวั้น ค่าโพลาริเซชันคงเหลือและค่าสนามไฟฟ้าบังคับของแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ จากกราฟนี้พบว่าเมื่อสัดส่วนของ  $\text{Ti}$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันอิมิตวั้นและค่าโพลาริเซชันมีแนวโน้มลดลงและค่าสนามไฟฟ้าบังคับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งจะเป็นไปดังรูปที่ 4.18



(ก)

(ข)



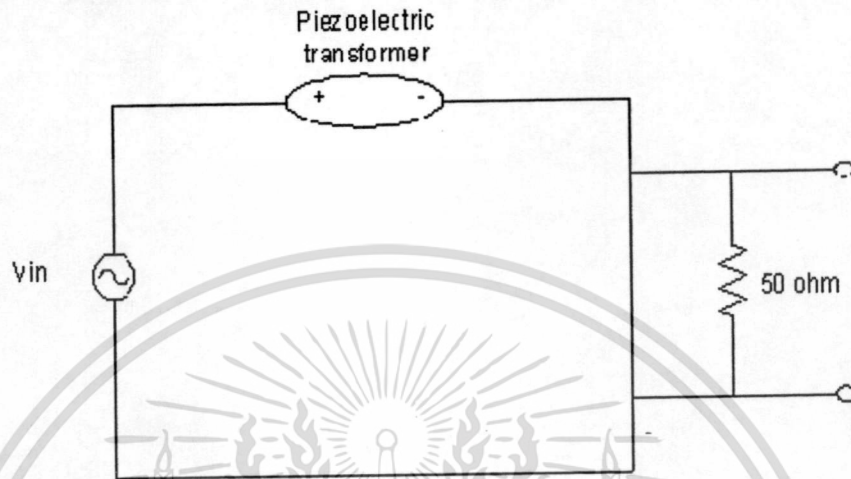
(ค)

รูปที่ 4.18 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าต่อสนามไฟฟ้าบังคับ ( $E_c$ ) และค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว ( $P_s$ ) และค่าโพลาริเซชันคงเหลือ ( $P_r$ ) ของ  $PbS(MnN)_{0.07}(ZnN)_{0.06}(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$  เซรามิก  $PMnN$ - $PZT$ - $PZN$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 0.48, x = 0.50, x = 0.52$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

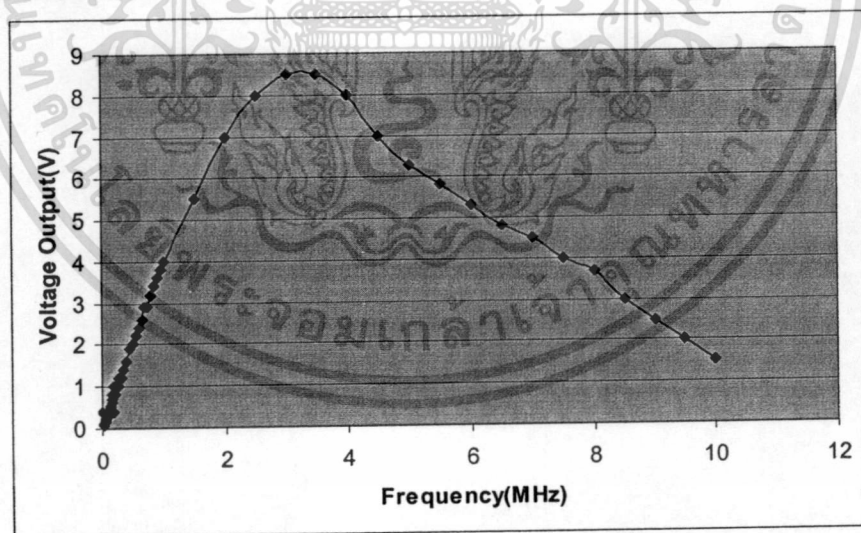
#### 4.6 ผลการทดสอบใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

หลังจากทำการอัดเป็นเม็ดเซรามิกและนำไปทำการโพลซ้ำเรียบร้อยแล้วนั้นนำไปทำการทดสอบใช้งานโดยต้องหาความถี่เรโซแนนซ์ก่อน เพราะต้องหาสมบัติทางไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ว่าที่ความถี่สูงสุดจะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด ดังวงจรดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงรูปวงจรที่หาความถี่เรโซแนนซ์

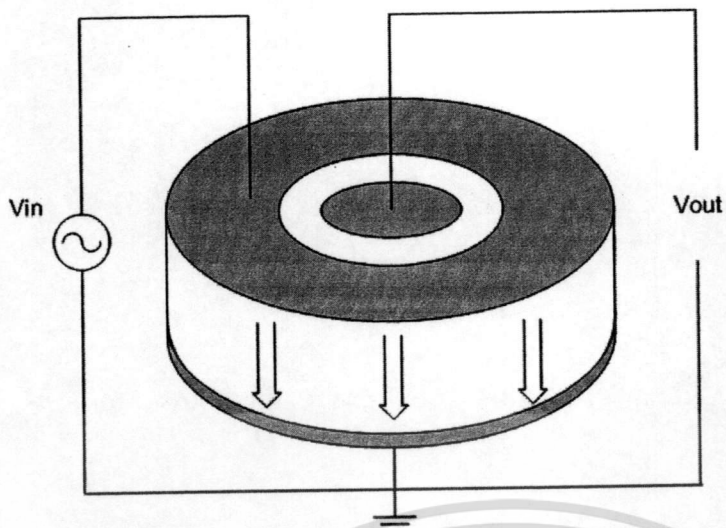
เมื่อทำการต่อวงจรตามรูปที่ 4.19 นั้น สามารถหาความถี่เรโซแนนซ์ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ได้ 3.5 MHz ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความถี่เรโซแนนซ์

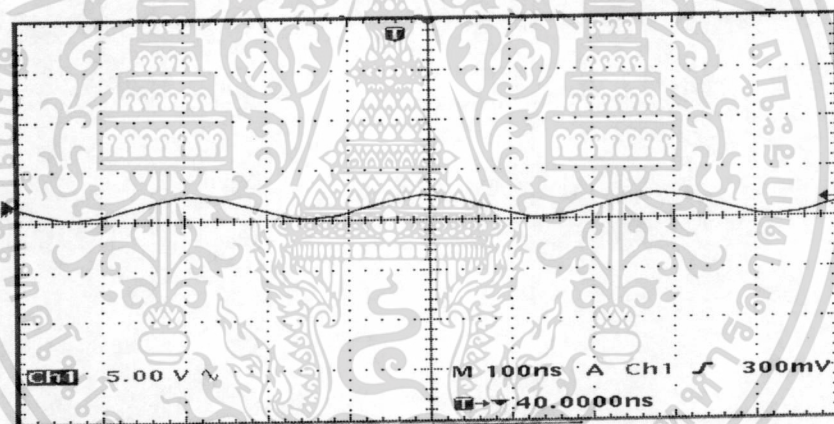
เมื่อทำการหาความถี่เรโซแนนซ์ได้แล้วนั้นนำเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ไปทดสอบว่าสามารถทำงานได้หรือไม่ โดยต่อวงจรตามรูปที่ 4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



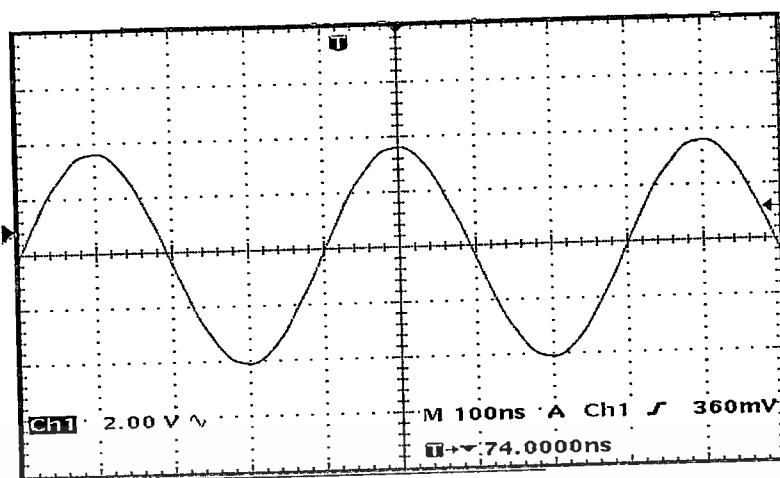
รูปที่ 4.21 รูปวงจรทดสอบการทำงานเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

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



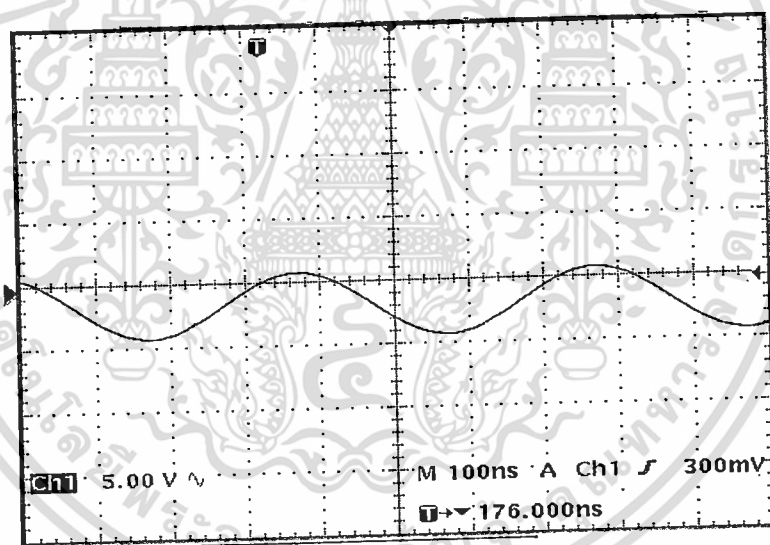
รูปที่ 4.22 แสดงกราฟเมื่อป้อนความถี่เรโซแนนซ์ 3.5 MHz แรงดัน 10 V

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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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 เพิ่มขึ้นพบว่าไม่มีเฟสไพโรคลอร์เกิดขึ้นด้วย
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 เนื่องจากให้ค่าความหนาแน่นมากที่สุดในช่วงร้อยละ 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 ฟีกซึ่งแสดงว่าเป็นเฟสเพอโรโกนอลและเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti ลดลงจะเปลี่ยนเป็นฟีกเดียวซึ่งแสดงว่าเป็นเฟสโรมโบฮีดรอล เมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ Ti เท่ากับ 0.50 น่าจะเป็นบริเวณที่มีทั้งเฟสเพอโรโกนอลและเฟสโรมโบฮีดรอลทั้ง 2 เฟสอยู่ร่วมกันนั่นคือ มอร์โฟทรอบิกเฟสบาวเดรี

5. จากการตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่อความถี่ที่ได้รับเพิ่มขึ้น

จะส่งผลให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก PMnN-PZN-PZT แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น พร้อมกับมีค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

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

## บรรณานุกรม

1. ชีรพงษ์ ศิลลาวงศ์สวัสดิ์, การประยุกต์สารเพียโซอิเล็กทริกในหม้อแปลง, วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2544.
2. สาวิตร์ ตันทนุช, เปียโซอิเล็กทริกทรานสฟอร์มเมอร์เทคโนโลยีหม้อแปลงตัวจิ๋วทรงประสิทธิภาพ,วารสารเคมีฯ,172, 265-271(2540)
3. คณิตา ตั้งคณานุกรณ์.(2546). เอกสารประกอบปฏิบัติการเคมีเครื่องมือวิเคราะห์ Thermogravitic Ananlysis(TGA). กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- 4 คณิตา ตั้งคณานุกรณ์.(2546). เอกสารประกอบปฏิบัติการเคมีเครื่องมือวิเคราะห์ 2 เรื่อง Thermal Ananlysis(TGA). กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
5. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์.(2548). เอกสารประกอบปฏิบัติการเคมีเครื่องมือวิเคราะห์ 2 เรื่อง การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
6. A.J. Moulson and J.M. Herbert, Electronic : Materials, Properties, and Applications, Chapman and Hall, London(1990).
7. N.Vittayakorn, G. Rujijanagul, Tawee Tunkasiri “Effects of carbon on properties of 0-3 PZT/HDPE Composites” The 27<sup>th</sup> Congress on Science and Technology of Thailand, Songkla University (2001)
8. N.Vittayakorn, G. Rujijanagul, Tawee Tunkasiri “Effect of Calcined Temperature to Phase Formation of zinc niobate and zirconium titanate” The 2<sup>nd</sup> Thailand Materials Science and Technology Conference, Bangkok (2002)
9. Naratip Vittayakorn, Theerachai Bongkarn “Preparation of Zirconium Titanate (ZrTiO<sub>4</sub>) powders via mixed oxide synthesis route” The Twenty-third Annual Conference Microscopy Society of Thailand (2006)
10. Naratip Vittayakorn, Chompoonuch Puchmark, Theerachai Bongkarn “Phase and Morphology Investigation of PZT-based powders prepared by Columbite-(Wolframite) Precursor” The Twenty-third Annual Conference Microscopy Society of Thailand (2006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. Naratip Vittayakorn, Chompoonuch Puchmark, Theerachai Bongkarn “Phase and Morphology Investigation of perovskite  $\text{Pb}_{(1-x)}\text{Ba}_x\text{ZrO}_3$  ceramics” The Twenty-third Annual Conference Microscopy Society of Thailand (2006)
12. C. Puchmark, T. Bongkarn, N. Vittayakorn, G. Rujijanagul “Effect of heating rate and dwell time on the grains size of lead zirconate titanate ceramics” The Twenty-third Annual Conference Microscopy Society of Thailand (2006)
13. T. Bongkarn, C. Puchmark, N. Vittayakorn, G. Rujijanagul “TG, DTA, and SEM studies of  $\text{Pb}_{(0.9)}\text{Ba}_{(0.1)}\text{ZrO}_3$  ceramics” The Twenty-third Annual Conference Microscopy Society of Thailand (2006)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้