



ผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การประดิษฐ์และวัดฮิสเทอรีซิสของ PZ-PNN

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก

Fabrication and Hysteresis Measurement of PZ-PNN Ceramic

Ferroelectric Material

จัดทำโดย

นายรังสรรค์ เมืองเหลือ

RC/H
TK
7871-1
.04
ร 314ก

b.19408529
i.....

เลขหมู่..... 121182
เลขทะเบียน.....
วัน, เดือน, ปี 25 ส.ย. 2555

ได้รับเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปีงบประมาณ 2554

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนอุดหนุนในการศึกษาและทำวิจัย

โครงการวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความกรุณาของ ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ ผศ.ดร.บราทีป วิทยากร ที่ให้คำแนะนำและช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ที่มีคุณค่า

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทที่คอยช่วยเหลือ

ขอขอบคุณนางสาวศุภมาส วิรุณจิตร ภาควิชาเคมี สจล. ที่ให้ความอนุเคราะห์ ในการวัดวงวนฮีสเทอรีซิส จากชุดทดสอบ Terk 609E-6



(นายรังสรรค์ เมืองเหลือ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประดิษฐ์และวัดฮีสเทอรีซิสของ PZ-PNN

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก

บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาศรียมเซรามิกระบบ $(1-x)PZ - (x)PNN$ ที่ $x = 0.5$ ซึ่งทำการศึกษาโครงสร้างของเซรามิก PZ-PNN ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ซึ่งมีโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ที่มีความบริสุทธิ์ โดยมีการเปลี่ยนโครงสร้างจากรอมโบฮีดรอลไปเป็นโครงสร้างแบบคิวบิกเสมือน จากนั้นศึกษาสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยวัดจากวงจรรชอว์เยอร์-ทาวเวอร์ที่จัดทำขึ้นและทำการสังเกตวงวนฮีสเทอรีซิสนั้นได้ทำการทดสอบปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อวงวนฮีสเทอรีซิส ได้แก่ แรงดัน ตัวเก็บประจุ ความถี่ และลักษณะของสัญญาณ สำหรับค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด มีค่าเท่ากับ $0.668 \mu F$ ซึ่งค่าที่ตัวเก็บประจูดังกล่าว เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับคโพลาริเซชันที่วัดด้วยชุดทดสอบ Trek 609E-6 ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างประมาณ 2.32 % สำหรับสัญญาณอินพุทนั้นเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ลักษณะวงวนฮีสเทอรีซิสเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสัญญาณอินพุทที่เหมาะสมที่สุดเป็นสัญญาณรูปไซน์

Fabrication and Hysteresis Measurement of PZ-PNN Ceramic Ferroelectric Material

Abstract

This thesis presents the preparation of $(1-x)\text{PZ}-x\text{PNN}$ ceramic system at $x=0.5$. This study also investigated PZ-PNN ceramic structure which has pure perovskite structure by using XRD (x-ray diffraction technique). This perovskite structure others from Rhombohedral to Pseudocubic structure. The thesis , then, studied ferroelectric characteristic by measuring from Sawyer-Tower circuit and examined the factors affecting to hysteresis loop including, voltage, capacitor, frequency and shape of signal. The capacitor is most suitable at $0.668 \mu\text{F}$. When compared the polarization value with Trek 609 E-6 measurement, there is the difference around 2.32 %. It is also stated that input signal is one of factor that changes the hysteresis shape. The input signal is suitable at sine wave.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อภาษาไทย	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 รายละเอียดของรายงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	4
2.2 ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นเพอรอฟสไกต์	7
2.2.1 โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ในอุดมคติ	7
2.2.2 โครงสร้างเพอรอฟสไกต์เชิงซ้อน	7
2.3 วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก	11
2.3.1 เฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ	11
2.3.1.1 การเกิดโพลาริเซชันได้เองและปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก	11
2.3.1.2 อุณหภูมิและการเปลี่ยนเฟส	13
2.3.1.3 เฟอร์โรอิเล็กทริกโดเมนและวงวนฮิสเทอรีซิส	14
2.3.2 แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก	16
2.3.2.1 การเกิดโพลาริเซชันได้เองและปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2.2 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส	16
2.3.2.3 เฟอโรโรอิเล็ทริกโดเมนและวงวนฮิสเทอรีซิส	17
2.3.3 รีแลกเซอร์เฟอโรโรอิเล็ทริก	19
2.3.3.1 การเกิดโพลาริเซชันตัวเองและปรากฏการณ์ไพโรอิเล็ทริก	19
2.3.3.2 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส	20
2.3.2.3 เฟอโรโรอิเล็ทริกโดเมนและวงวนฮิสเทอรีซิส	22
2.4 เลดนิคเกิลไนโอเบต – เลอเซอร์โคเนต ($\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3$, PNN-PZ)	25
2.5 การวัดเฟอโรโรอิเล็ทริกฮิสเทอรีซิส โดยใช้วงจรรอว์เยอร์ – ทาวเวอร์	29
2.5.1 ตัวเก็บประจุชนิดเฟอโรโรอิเล็ทริก	29
2.5.2 ความเป็นมา และวงจรวัดวงวนฮิสเทอรีซิสแบบรอว์เยอร์ – ทาวเวอร์	31
บทที่ 3 การเตรียมชิ้นงานของเซรามิก	35
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	35
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	36
3.3 กระบวนการเตรียมผง	37
3.3.1 การเตรียมนิกเกิลไนโอเบต (NiNb_2O_6)	37
3.3.2 การเตรียมผงในระบบเลอเซอร์โคเนต-เลดนิคเกิลไนโอเบต (PZ-PNN)	39
3.4 กระบวนการเตรียมเซรามิก	40
3.5 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)	43
3.6 การตรวจสอบสมบัติทางเฟอโรโรอิเล็ทริก	46
บทที่ 4 ระบบเครื่องวัดวงวนฮิสเทอรีซิสที่ควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW	47
4.1 ระบบเครื่องมือวัด	47
บทที่ 5 ผลการทดลอง	56
5.1 ระบบเครื่องมือวัด	56
5.2 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)	

ของผง PC-ZNN

57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ผลการตรวจสอบหม้อแปลง	58
5.4 ผลการทดสอบวงวนฮีสเทอรีซิสจากเครื่อง Trek 609E-6	60
5.5 ผลการทดสอบแรงดันต่อวงวนฮีสเทอรีซิส	61
5.6 ผลการทดสอบค่าตัวเก็บประจุต่อวงวนฮีสเทอรีซิส	63
5.7 ผลการทดสอบค่าความถี่ที่มีผลต่อวงวนฮีสเทอรีซิส	64
5.8 ผลการทดสอบลักษณะของสัญญาณที่มีผลต่อวงวนฮีสเทอรีซิส	65
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	67
บรรณานุกรม	68
ภาคผนวก	69



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ข้อแตกต่างระหว่างสมบัติของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก และรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก	24
5.1	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าโพลาริเซชันเมื่อเปรียบเทียบกับ กับกราฟที่วัดได้จากชุดทดลอง Trek 609E-6 ที่สนามไฟฟ้า 15 kV/cm	64



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 (ก) ปราบฏุกการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง	4
2.1 (ข) ปราบฏุกการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม	4
2.2 ทิศทางของโพลาริเซชันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าและความเค้นแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	6
2.3 แผนผังแสดงการแบ่งกลุ่มของผลึกโดยการใช้พื้นฐานสมมาตรของผลึก	8
2.4 โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ในอุดมคติ โดยไอออนบวก B ซึ่งมีขนาดเล็กจะอยู่ในช่องว่างทรงแปดหน้าของไอออนออกซิเจน และไอออนบวก A ซึ่งมีขนาดใหญ่จะอยู่ที่มุมทั้งแปดของหน่วยเซลล์	9
2.5 โครงสร้างเพอรอฟสไกต์เชิงซ้อนที่มีไอออนที่ตำแหน่ง B หลายชนิด	9
2.6 (ก) ภาพตัดขวางของหน่วยเซลล์เพอรอฟสไกต์ในอุดมคติ (ABO_3) ในระนาบ (100)	10
2.6 (ข) ภาพตัดขวางของหน่วยเซลล์เพอรอฟสไกต์ในอุดมคติ (ABO_3) ในระนาบ (200)	10
2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณการเกิดโพลาริเซชันของผลึก $BaTiO_3$	12
2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) กับอุณหภูมิของผลึกแบเรียมไททานเตด ($BaTiO_3$)	13
2.9 ลักษณะโดเมนของผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ	14
2.10 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ลูกศรแสดงทิศทางโพลาริเซชันในแต่ละโดเมน)	15
2.11 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของผลึก PZ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง	16
2.12 ลักษณะโดเมนของผลึกแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก	17
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้า (P-E hysteresis) ของผลึกแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก	18
2.14 การเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาริเซชันเทียบอุณหภูมิของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ	19
2.15 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสาร PMN	20

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.16 การเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาไรเซชันและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เทียบอุณหภูมิของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก	21
2.17 นาโนโดเมนบนผิวผลึกรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกของ PZN-PZT	22
2.18 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก	23
2.19 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกและรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	25
2.20 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ 0.5PMN-0.5PZ	26
2.21 เฟสไดอะแกรมแสดงการเปลี่ยนเฟสและเฟสรอยต่อที่เหมาะสม MPB ของสาร PNN-PT-PZ	27
2.22 กราฟฮิสเทอรีซิสของฟิล์ม PNN-PZT	28
2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้น	30
2.24 วงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้จากตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก	30
2.25 วงจรไฟฟ้าซอร์เบอร์-ทาวเวอร์ในยุคแรก	31
2.26 วงจรซอร์เบอร์-ทาวเวอร์ที่ใช้ตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้น (C_0) ในการคำนวณประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก (C_s)	32
2.27 วงจรซอร์เบอร์-ทาวเวอร์ที่ใช้ในการทดลอง เมื่อแรงดัน V_s มีค่าสูงมาก โดยที่ $V_x = V_{R2}$ และ $V_y = V_{C0}$	34
3.1 เครื่องบดย่อยผสมสารแบบการบดย่อยด้วยเม็ดบด	38
3.2 เตาไฟฟ้าสำหรับเผาสาร	38
3.3 แผนภาพแสดงกระบวนการบดย่อยผสมและเผาแคลไซน์ (MCP)	39
3.4 แผนผังแสดงการแคลไซน์ (โดย T_c คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์)	40
3.5 การจัดเรียงชั้นในถ้วยอลูมินาสำหรับการเผาซินเตอร์	41
3.6 แผนผังกระบวนการเตรียมเซรามิก	42
3.7 แผนผังแสดงการเผาซินเตอร์ (โดย TS คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ และ h คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการเผา)	43
3.8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบของอะตอม	44
3.9 เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D 8 Advanc	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	45
3.11 หลักการทำงานของอุปกรณ์วัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก	46
4.1 แผนภาพการทำงานของระบบเครื่องมือวัดวงวนฮิสเทอรีซิส โดยใช้วงจรถอว์เยอร์-ทาวเวอร์ DUT คือ device under test หรือตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	47
4.2 ภาพถ่ายของชุดระบบเครื่องมือวัดวงวนฮิสเทอรีซิส	48
4.3 โปรแกรม LabVIEW รุ่น 8.5 เมื่อเริ่มสั่งให้โปรแกรมทำงาน	49
4.4 หน้าต่างของ front panel และ block diagram ก่อนที่จะเริ่มต้น เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน	50
4.5 ตัวอย่างส่วนประกอบต่างๆ ของ icon และ connector ที่จะนำ มาเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน	50
4.6 แผนภาพการคำนวณหาค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้า เพื่อให้เครื่องคอมพิวเตอร์แสดงผล และเก็บข้อมูลของวงวนฮิสเทอรีซิส	51
4.7 โพลซาร์ทการทำงานทั้งหมดของโปรแกรมสำหรับวัดวงวนฮิสเทอรีซิส	52
4.8 ส่วนประกอบภายใน block diagram ที่แสดงการใส่ข้อมูลและ การเชื่อมต่อกับ digital oscilloscope ผ่าน GPIB interface	53
4.9 ส่วนประกอบภายใน block diagram ที่แสดงส่วนการคำนวณ amplitude	54
4.10 ส่วนประกอบภายใน block diagram ที่แสดงส่วนการพล็อต XY-กราฟ	54
4.11 ส่วนประกอบภายใน block diagram ที่แสดงส่วนการคำนวณ โพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้า	55
4.12 Front panel แสดงส่วนการป้อนข้อมูล, การแสดงผลของแรงดันไฟฟ้า และวงวนฮิสเทอรีซิส	55
5.1 แผนภาพการทำงานของระบบเครื่องมือวัดวงวนฮิสเทอรีซิส โดยใช้วงจรถอว์เยอร์-ทาวเวอร์ DUT คือ device under test หรือตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	56
5.2 แสดงรูปการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงในระบบ (1-x)PZ-xPNN	57
5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลง	59
5.4 วงวนฮิสเทอรีซิสที่วัดได้จากเครื่อง Trek 609E-6	60

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 กราฟวงวนฮีสเทอรีซิสที่ได้จาก Oscilloscope	61
5.6 กราฟลักษณะวงวนที่เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น	62
5.7 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าตัวเก็บประจุต่อลักษณะวงวนฮีสเทอรีซิส	63
5.8 กราฟเปรียบเทียบผลของความถี่ต่อลักษณะวงวนฮีสเทอรีซิส	65
5.9 กราฟเปรียบเทียบผลของลักษณะสัญญาณต่อลักษณะวงวนฮีสเทอรีซิส	66



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

สารเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric materials) ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างมากมาย โดยเฉพาะในตัวการสร้างตัวขับเคลื่อน (actuator) ตัวแปลง (transducer) และในเทคโนโลยีทางด้านอื่นๆ เช่น เครื่องฉายภาพกำลังสูง (high-power projector) ซึ่งในการประยุกต์ใช้งานเหล่านี้ สารเซรามิกจะถูกใช้ในสภาวะที่มีค่าสนามไฟฟ้าสูง

ในสารเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีโพลาริเซชันแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous polarization: P_{sat}) ที่สามารถสลับทิศทาง (switch) หรือจัดเรียงใหม่ (reorient) ได้ ด้วยการให้สนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ทำให้แตกต่างไปจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดอื่นๆ การสลับทิศทางของโพลาริเซชันสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยวงวนฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้า โดยสามารถวัดได้ด้วยการใช้วงจรซอว์เออร์-ทาวเวอร์ (Sawyer-Tower circuit) ซึ่งการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสนี้สามารถทำให้เข้าใจถึงกลไกการเกิดโพลาริเซชันภายในสารเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

การศึกษาโครงการนี้จึงได้ให้ความสนใจในการศึกษาสมบัติฮิสเทอรีซิสของสารเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก ด้วยการใช้อุปกรณ์วงจรซอว์เออร์-ทาวเวอร์ ศึกษาถึงอิทธิพลของสนามไฟฟ้าต่อลักษณะการเกิดโพลาริเซชัน และการเปลี่ยนแปลงของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรต่อลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิสที่เกิดขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์ ดังต่อไปนี้

- เพื่อศึกษารูปแบบวงวนฮิสเทอรีซิสของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก และ เพื่อศึกษาการเตรียมชิ้นงานของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก ด้วยกระบวนการสร้างแบบเทคนิคโคลัมไบต์ (Columbite) เพื่อศึกษาระบบควบคุมเครื่องมีดวัด และการแสดงผล ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยการใช้โปรแกรม LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เพื่อศึกษาถึงวงวนฮิสเทอรีซิสของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก ซึ่งมีผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้าและทางกล เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า และความจุไฟฟ้าที่วงจรชอว์เยอร์-ทาวเวอร์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา ดังนั้นขอบเขตของการศึกษาจึงเริ่มต้น ดังนี้

- ศึกษารายละเอียดด้านต่างๆ รวมถึงกระบวนการสร้างของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก
- ศึกษา และทำความเข้าใจเกี่ยวกับวงวนฮิสเทอรีซิสของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก
- ศึกษา และจัดเตรียมวงจรชอว์เยอร์-ทาวเวอร์ ที่ใช้วัด
- ศึกษา และเขียน โปรแกรมควบคุมการวัด และแสดงผลด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยผ่านระบบเชื่อมต่อแบบ GPIB (General Purpose Interface Bus) หรือชื่อมาตรฐาน คือ IEEE 488
- ทำการตรวจสอบ และวิเคราะห์ผลการทดลองสมบัติฮิสเทอรีซิสของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก ที่นำมาวัด
- สรุปผลการศึกษา และจัดทำรายงาน

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

- ศึกษา และค้นคว้ารวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- จัดซื้อวัสดุอุปกรณ์
- เตรียมวงจรชอว์เยอร์-ทาวเวอร์ ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้ในการวัด
- จัดเตรียมสารเซรามิก โซเดียมไบโอเบต และนำมาวัดหาค่าคุณสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอรีซิส โดยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้า (V_s) และค่าความจุไฟฟ้า (C_0) ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลที่มีต่อลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิส
- เปรียบเทียบผลการวัดด้วยวงจรชอว์เยอร์-ทาวเวอร์กับการวัดด้วยเทคนิคการวัดแบบอื่น

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- เข้าใจถึงวิธีการเตรียมสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก และสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกชนิดอื่นๆ ที่มีลักษณะการจัดเตรียมในลักษณะเดียวกันได้
- สามารถวัด และระบุสมบัติที่สำคัญของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก ที่นำมาวัดได้
- สามารถหาค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว (P_{sat}) ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก ที่นำมาวัดได้
- สามารถเข้าใจการจัดเรียงตัวของโดเมน (domain) ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 รายละเอียดของรายงาน

ในรายงานเล่มนี้ แบ่งเนื้อหาทั้งหมด 6 บท โดยแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

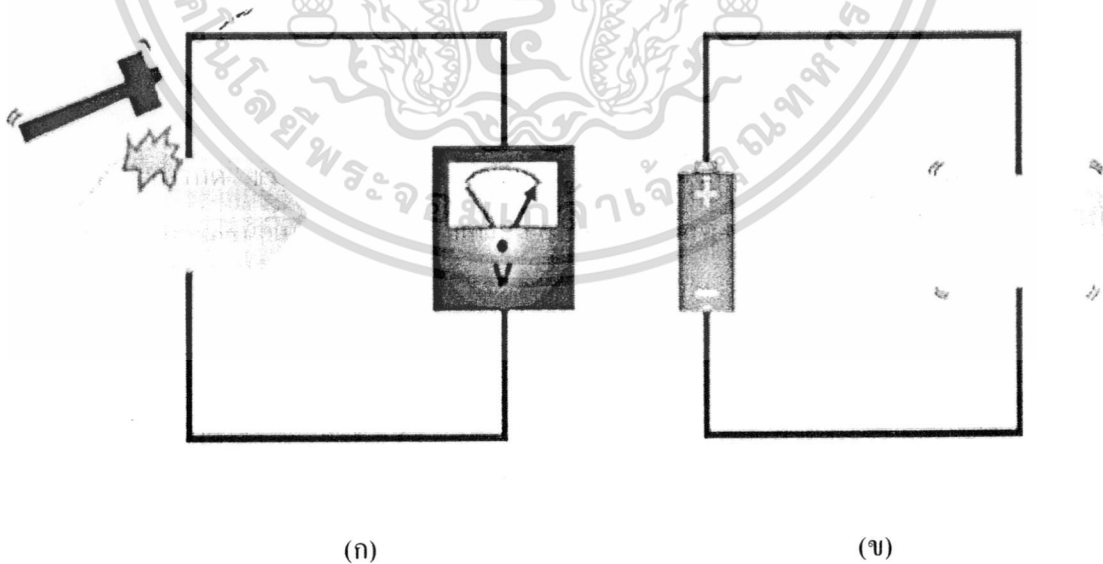
- บทที่ 1 เป็นบทนำ โดยกล่าวถึงความเป็นมาของโครงการ วัตถุประสงค์ของโครงการ ขอบเขตของการศึกษา ตลอดจนวิธีการดำเนินงาน เพื่อให้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อถัดมากล่าวถึงผลที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาโครงการนี้ และในตอนสุดท้ายได้กล่าวถึงรายละเอียดของเนื้อหา เพื่อให้ผู้สนใจได้ทราบถึงขอบเขตของการเขียนรายงานเล่มนี้
- บทที่ 2 เป็นส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะและสมบัติต่างๆ ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก จากนั้นได้กล่าวถึงผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นเพอโรสสไกต์ที่มีหลายลักษณะเพื่อให้เข้าใจพอสังเขป ในหัวข้อถัดมาได้อธิบายถึงวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งแบ่งได้เป็นแบบปกติ, แบบแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก และแบบรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก และในหัวข้อสุดท้ายได้กล่าวถึงการวัดเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอรีซิส โดยใช้วงจรรอว์เออร์-ทาวเวอร์
- บทที่ 3 กล่าวถึงการเตรียมชิ้นงานของเซรามิก ตั้งแต่สารเคมีเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง อุปกรณ์การทดลองที่เกี่ยวข้อง จนกระทั่งถึงกระบวนการเตรียมผงผลึก และสุดท้ายได้กล่าวถึงการตรวจสอบสมบัติของเซรามิก ที่เตรียมขึ้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ตามหลักของแบรค จากเครื่อง X-ray diffractometer
- บทที่ 4 เป็นการอธิบายเกี่ยวกับระบบการวัดวงวนฮิสเทอรีซิส ด้วยโปรแกรม LabVIEW รุ่น 8.5 รวมถึงวิธีใช้และรายละเอียดของโปรแกรม LabVIEW เบื้องต้น
- บทที่ 5 เป็นส่วนของการระบุยืนยัน โครงสร้างของสารที่นำมาวัด รวมไปถึงการทดลองในการหาค่าต่างๆที่มีผลต่อ การวัดวงวนฮิสเทอรีซิส
- บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ของวัสดุถูกค้นพบในปี 1880 โดย Jacques และ Pierre Curie โดยการศึกษากิริยาของแรงกดต่อประจุไฟฟ้าของผลึก เช่น ควอตซ์ (Quartz), ซิงค์เบลนด์ (Zinc blende) และ ทัวร์มาไลน์ (Tourmaline) เป็นต้น โดยชื่อ “piezo” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก หมายถึง “การกด” ซึ่งปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก คือ ปรากฏการณ์ที่วัสดุสามารถเกิดขั้วไฟฟ้า (electrical polarization) ขึ้นเนื่องจากความเครียด (strain) ในวัสดุ เมื่อได้รับความเค้น (Stress) เข้าไป โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง (direct piezoelectric effect)” ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ก) และในทางกลับกันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกแล้วสามารถเกิดความเครียดซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปได้นั้น จะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม (Converse piezoelectric effect)” ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ข)



รูปที่ 2.1 (ก) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรงและ (ข) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการพื้นฐานที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทั้ง 2 ปรากฏการณ์ โดยพิจารณาจากสมบัติทางไฟฟ้าและการยืดหยุ่นของวัสดุ คือ

$$D = dE + \epsilon^T E \quad (\text{ปรากฏการณ์โดยตรง}) \quad (2.1)$$

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

โดยที่	D	คือ	ค่าการแทนที่ทางไฟฟ้า (dielectric displacement)
	T	คือ	ความเค้น (stress)
	E	คือ	สนามไฟฟ้า (electric field)
	S	คือ	ความเครียด (strain)
	d	คือ	สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient)
	s	คือ	ความหยุ่นของวัสดุ (ส่วนกลับของมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น)
	ϵ	คือ	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity)

โดยตัวยกกำลังในสมการทั้งสองนี้แสดงถึงปริมาณที่เป็นค่าคงที่ ซึ่งในสมการที่ 2.1 บ่งบอกว่าความเค้นเป็นค่าคงที่ ส่วน s^E ในสมการที่ 2.2 นั้น มีสนามไฟฟ้าเป็นค่าคงที่จากรูปแบบของสมการทั้งสองนี้จะแสดงถึงความแตกต่างของการจัดเรียงตัวในวัสดุซึ่งจะสัมพันธ์กับสมบัติของวัสดุนั้นๆ นอกจากนี้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกยังมีสมบัติที่ขึ้นกับทิศทาง จึงต้องมีการระบุเป็นตัวห้อยไว้เพื่อแสดงถึงเงื่อนไขของสภาวะที่กำหนด เช่น d_{31} เป็นสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่แสดงถึงความสัมพันธ์ในการเกิดโพลาริเซชัน (ปรากฏการณ์โดยตรง) ในแนวตั้งฉากกับขั้วไฟฟ้าในทิศทาง 3 หรือในแนวตั้งของวัสดุ เมื่อมีการให้ความเค้นในทิศทาง 1 หรือด้านข้างของวัสดุ (ดังแสดงในรูปที่ 2.2) และค่า d_{33} ที่แสดงการเกิดโพลาริเซชันในทิศทาง 3 เมื่อมีการให้ความเค้นในทิศทาง 3 เป็นต้น

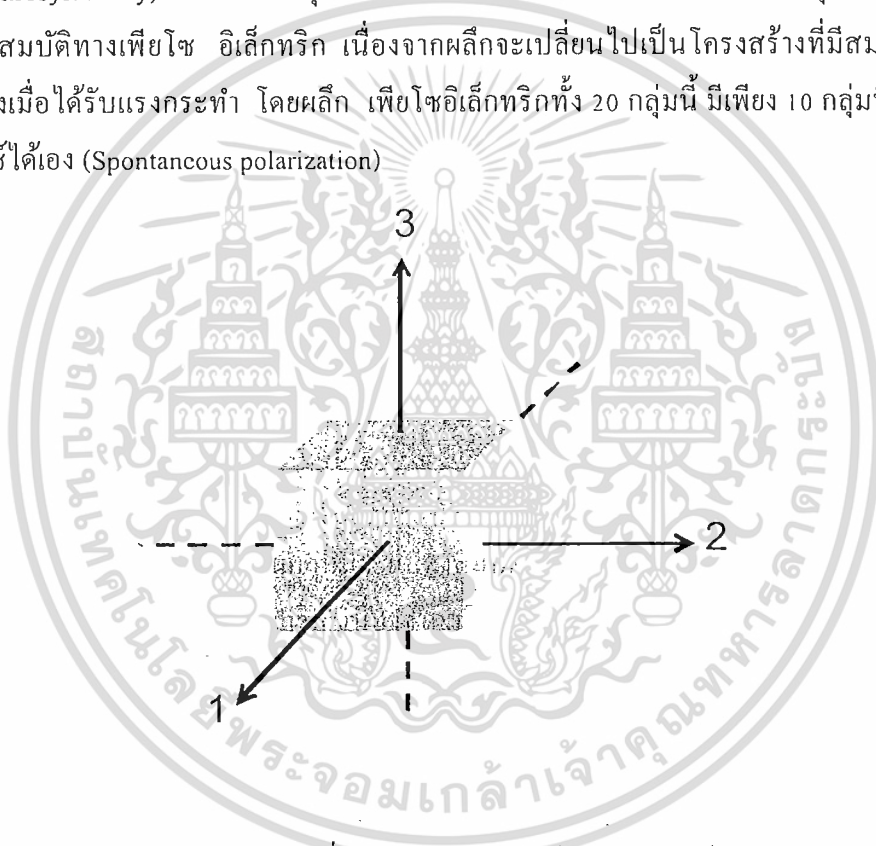
$$D = d_{33} T_3 \quad (\text{ปรากฏการณ์โดยตรง}) \quad (2.3)$$

$$S = d_{33} E_3 \quad (\text{ปรากฏการณ์โดยอ้อม}) \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นต้องการสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและค่าสภาพยอมสัมประสิทธิ์ที่มีค่าสูง เพื่อนำไปใช้ในอุปกรณ์ที่มีการสั่นและการเคลื่อนไหว เช่น เครื่องสัญญาณสะท้อน (sonar) และเครื่องสำหรับรับฟัง (sounder)

โดยทั่วไปผลึกนั้นสามารถแบ่งกลุ่มตามสมมาตรได้ 32 กลุ่ม โดย 11 กลุ่มนั้นมีลักษณะสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง (Centrosymmetry) ส่วนที่เหลืออีก 21 กลุ่มนั้นมีลักษณะสมมาตรไม่ผ่านจุดศูนย์กลาง (Non-centrosymmetry) ซึ่งผลึกในกลุ่มนี้จะแสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก 20 กลุ่ม ส่วนอีก 1 กลุ่มไม่แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากผลึกจะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างที่มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลางเมื่อได้รับแรงกระทำ โดยผลึก เพียโซอิเล็กทริกทั้ง 20 กลุ่มนี้ มีเพียง 10 กลุ่มที่สามารถเกิดโพลาริเซชันได้เอง (Spontaneous polarization)



รูปที่ 2.2 ทิศทางของโพลาริเซชันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าและความเค้นแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริก การเกิดโพลาริเซชันนี้สามารถสลับขั้ว (switching) ไปในทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้เข้าไปได้ จะเรียกผลึกกลุ่มนี้ว่า เฟอโรโรอิเล็กทริก (ferroelectric) ซึ่งผลึกเฟอโรโรอิเล็กทริกนี้สามารถแบ่งย่อยตามโครงสร้างได้ดังนี้ กลุ่มโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ (Perovskite structure) กลุ่มโครงสร้างทังสเตนบรอนซ์ (Tungsten-bronze structure) และกลุ่มโครงสร้างชั้นของบิสมัท (Bismuth-layer structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์

กลุ่มผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นเพอโรฟสไกต์นั้น เป็นกลุ่มผลึกที่มีการศึกษากันมากกลุ่มหนึ่ง โดยชื่อเพอโรฟไกต์นั้นเป็นชื่อที่เรียกตามชื่อโครงการงานของแร้แคลเซียมไททานेट (CaTiO_3) มีสูตรโครง-สร้างทั่วไปเป็น ABO_3 เมื่อ A และ B เป็นไอออนบวก (cation) และมีขนาดไอออนที่แตกต่างกันมาก โดย A เป็นไอออนบวกที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยโครงสร้างเพอโรฟไกต์นั้นแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

2.2.1 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ในอุดมคติ

โครงสร้างเพอโรฟไกต์ในอุดมคตินั้นเป็นโครงสร้างที่มีสมมาตรสูงและอยู่ในเฟสคิวบิกพาราอิเล็คทริกที่เกิดจากเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูงเกินอุณหภูมิคูรี ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งโครงสร้างเพอโรฟไกต์นี้มีพื้นฐานมาจากหน่วยเซลล์แบบ face – center cubic closed packing (FCC) โดยไอออนบวก A ซึ่งมีขนาดรัศมีไอออนใหญ่จะจัดเรียงตัวกับไอออนลบของออกซิเจนเกิดเป็นโครงสร้างแบบ FCC และไอออนบวก B ซึ่งมีขนาดรัศมีไอออนเล็กจะเข้าไปอยู่ในช่องว่างทรงแปดหน้า (octahedral hold) ที่เกิดจากออกซิเจน สำหรับไอออน B นั้นจะมีเพียงไอออนลบของออกซิเจนล้อมรอบอยู่ 12 ไอออน และในแต่ละไอออนลบของออกซิเจนจะมีไอออนบวก A และ B ล้อมรอบอยู่ 4 และ 2 ไอออน ตามลำดับ

2.2.2 โครงสร้างเพอโรฟไกต์เชิงซ้อน

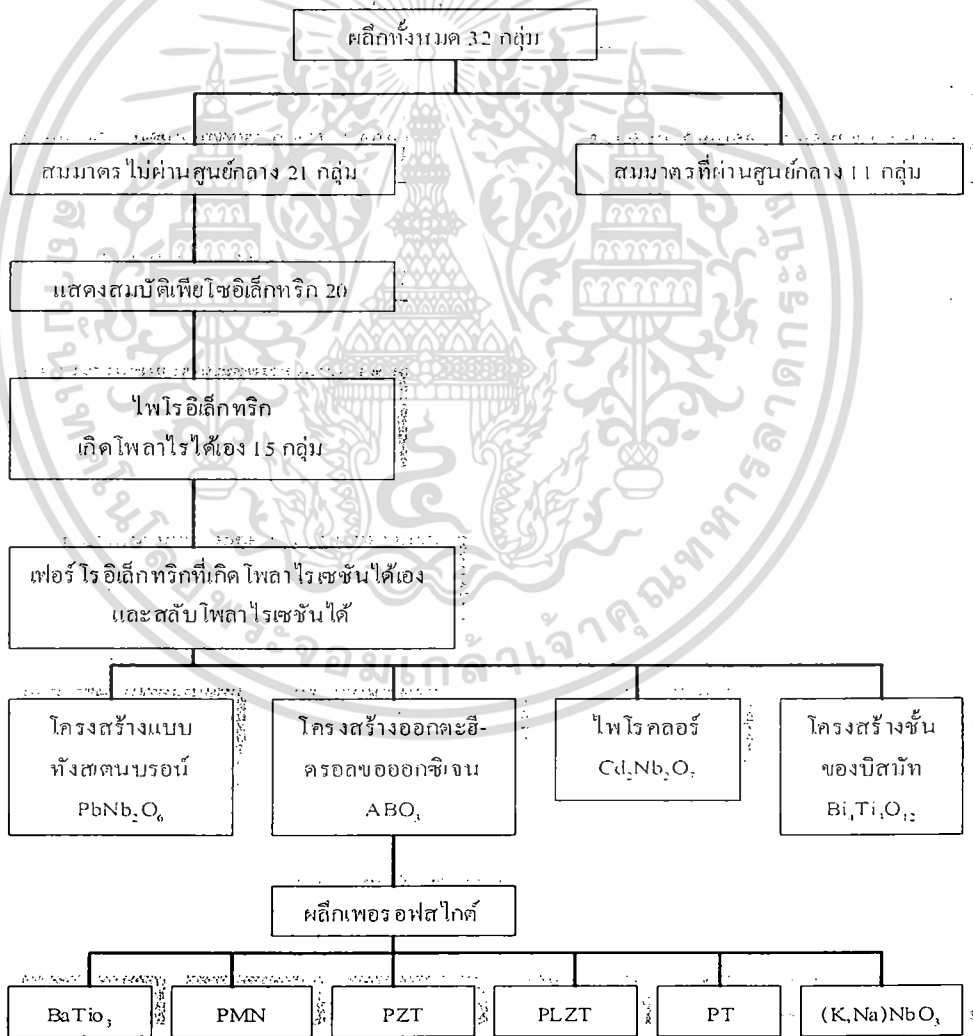
โครงสร้างเพอโรฟไกต์เชิงซ้อน (complex perovskite structure) นี้แตกต่างจากโครงสร้างเพอโรฟไกต์ในอุดมคติ โดยตำแหน่ง A และ B นั้นมีไอออนบวกของธาตุได้หลายชนิด ซึ่งไอออนบวกที่ตำแหน่ง A มีรัศมีไอออนใหญ่กว่าไอออนบวกที่ตำแหน่ง B ที่อยู่ในช่องว่างออกตะสี่ดรอของออกซิเจน เช่น เลดแมกนีเซียมไนโอเบต ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$) เลดซิงค์แทนทาลเลต ($\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$) เลดโคบอลต์ไนโอเบต ($\text{Pb}(\text{Co}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$) เลดแบเรียมเซอร์โคเนต ($(\text{Pb}_{1-x}\text{Ba}_x)\text{ZrO}_3$) แบเรียมสตรอนเซียมไททานेट ($(\text{Ba}_{0.60}\text{Sr}_{0.40})\text{TiO}_3$) และ เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททานेट ($(\text{Pb}_{1-x}\text{La}_{2x/3})(\text{Zr}_{1-y}\text{Ti}_y)\text{O}_3$) เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างเพอโรฟไกต์เชิงซ้อนสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. $(\text{A}'\text{A}'')\text{BO}_3$
2. $\text{A}(\text{B}'\text{B}'')\text{O}_3$
3. $\text{A}'\text{A}''\text{B}'\text{B}''\text{O}_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

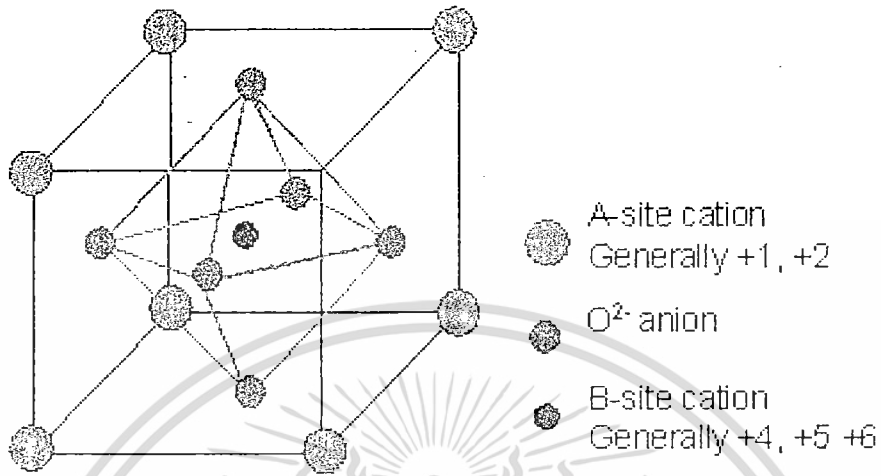
โดยไอออนบวกที่ตำแหน่ง A และ B นั้นจะจัดเรียงในหน่วยเซลล์ตามสัดส่วนที่เหมาะสม เช่น โครงสร้างเพอโรฟไกต์เชิงซ้อนแบบที่มีไอออนที่ตำแหน่ง B หลายชนิด $(A(B'B'')O_3)$ แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งการแทนที่ของไอออนที่ตำแหน่ง B นั้นสามารถเกิดขึ้นได้หลายแบบ

ในปี 1926 Goldschmidt ได้ทำการศึกษาความเสถียรของโครงสร้างเพอโรฟไกต์ โดยใช้ค่าทอลารานซ์แฟกเตอร์ (tolerance factor หรือ t) โดยอ้างถึงโครงสร้างเพอโรฟไกต์ในอุดมคติว่าไอออนบวก B นั้นจะต้องมีขนาดพอดีกับช่องว่างทรงแปดหน้าของออกซิเจนและไอออนบวก A จะต้องมีขนาดพอดีกับช่องว่างระหว่างทรงแปดหน้าของออกซิเจน ดังรูปที่ 2.6

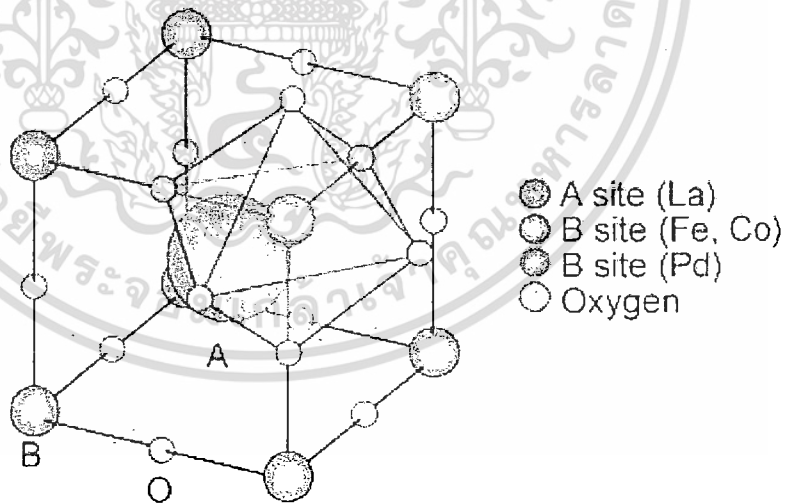


รูปที่ 2.3 แผนผังแสดงการแบ่งกลุ่มของผลึกโดยการใช้พื้นฐานสมมาตรของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

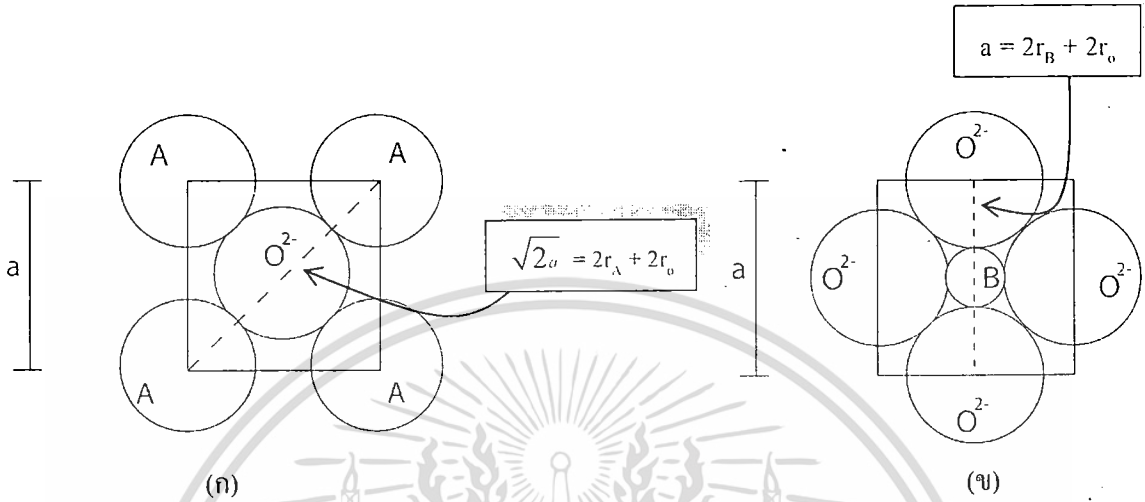


รูปที่ 2.4 โครงสร้างเพอร์อฟไกต์ในอุดมคติ โดยไอออนบวก B ซึ่งมีขนาดเล็กจะอยู่ในช่องว่างทรงแปดหน้าของไอออนออกซิเจน และไอออนบวก A ซึ่งมีขนาดใหญ่จะอยู่ที่มุมทั้งแปดของหน่วยเซลล์



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างเพอร์อฟไกต์เชิงซ้อนที่มีไอออนที่ตำแหน่ง B หลายชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ภาพตัดขวางของหน่วยเซลล์เพอโรฟไทต์ในอุดมคติ (ABO₃) ใน (ก) ระนาบ (100) และ (ข) ระนาบ (200)

ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีไอออนได้ ดังนี้

จากระนาบ (100) จะได้
$$\sqrt{2}a = 2r_A + 2r_O \tag{2.5}$$

จากระนาบ (200) จะได้
$$a = 2r_B + 2r_O \tag{2.6}$$

จากสมการ 2.5 และ 2.6 จะได้
$$r_A + r_O = \sqrt{2}a (2r_B + 2r_O) \tag{2.7}$$

โดยที่ r_A, r_B, r_O คือ รัศมีไอออนของไอออน A B และออกซิเจนตามลำดับ

A คือ แลตทิซพารามิเตอร์ (lattice parameter)

จากสมการที่ 2.7 สามารถอธิบายถึงความเสถียรของโครงสร้างเพอโรฟไทต์อื่นๆ ได้ด้วยค่าทอลาแรนซ์แฟคเตอร์ (t) ดังสมการ

$$t = \frac{r_A + r_O}{\sqrt{2}(r_B + r_O)} \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า t นี้เป็นตัวบ่งชี้การบิดเบือนโครงสร้างเพอโรฟไกต์ในอุดมคติได้ โดยโครงสร้างเพอโรฟไกต์ที่เสถียรจะมีค่า t อยู่ในช่วง $0.95 < t < 1.06$ ถ้าค่า $t = 1$ แสดงว่ามีโครงสร้างเหมือนกับโครงสร้างเพอโรฟไกต์ในอุดมคติ ซึ่งจะเรียกว่า เพอโรฟไกต์สมบูรณ์ (perfect perovskite) เช่น สทรอนเซียมไททานเนต (SrTiO_3) เป็นต้น หาก $t > 1$ แสดงว่าขนาดไอออนบวก B มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างทรงแปดหน้าทีเข้าไปอยู่ทำให้โครงสร้างที่ได้มีขั้วเกิดขึ้น เช่น แบเรียมไททานเนต (BaTiO_3) เป็นต้น แต่ถ้า $t < 1$ แสดงว่าไอออนบวก A มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับช่องว่างระหว่างทรงแปดหน้า ทำให้ไอออนบวก A ไม่สามารถสร้างพันธะกับไอออนของออกซิเจนได้ทั้ง 12 ไอออน เช่น แคลเซียมไททานเนต (CaTiO_3) เป็นต้น ในกรณีที่ t มีค่าน้อยมากๆ ไอออนบวก A อาจจะสามารถสร้างพันธะกับไอออนของออกซิเจนได้เพียง 6 ไอออน เช่น ลิเทียมไนโอเบต (LiNbO_3) เป็นต้น โดยปกติโครงสร้างเพอโรฟไกต์ที่มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล จะมีค่า $t > 0.98$ และจะมีโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอลเมื่อ $t < 0.98$ นอกจากนี้สามารถทำนายระบบผลึกของโครงสร้างเพอโรฟไกต์ของสารประกอบต่างๆ ได้จากแผนภาพเฟส

2.3 วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริกถูกค้นพบครั้งแรกโดย J. Valasek ในปี ค.ศ. 1921 ในผลึกเชิงเดี่ยว (Single crystal) ของเกลือโรเชลล์ (Rochelle salt) ซึ่งปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริก คือ ปรากฏการณ์ของผลึกที่สามารถเกิดโพลาริเซชันได้เอง แม้ว่าไม่ได้ถูกเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้าภายนอก และโพลาริเซชันนี้สามารถสลับขั้ว (switching) ได้ โดยการให้สนามไฟฟ้าภายนอกที่เหมาะสม วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ เฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ (normal ferroelectric หรือ FE) แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก (anti ferroelectric หรือ AFE) และรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก (relaxor ferroelectric หรือ RFE) ซึ่งสมบัติโดยทั่วไปของเฟอร์โรอิเล็กทริกทั้ง 3 แบบมี ดังนี้

2.3.1 เฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ

2.3.1.1 การเกิดโพลาริเซชันได้เองและปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก

การเกิดโพลาริเซชันได้เองของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ (normal ferroelectric) นั้นพิจารณาได้จากปริมาณโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรหรือปริมาณประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนผิวให้ตั้งฉากกับทิศทางของโพลาริเซชัน อย่างไรก็ตามผลึกทั้ง 20 กลุ่มที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกนี้มีเพียง 10 กลุ่มเท่านั้น ที่สามารถเกิดโพลาริเซชันได้เอง โดยกลุ่มผลึกที่มีลักษณะการเกิดโพลาริเซชันได้เองที่ขึ้นกับอุณหภูมินั้น จะเรียกว่า “ปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก

(pyroelectric effect)” ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยทอมของค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric coefficient หรือ π) ดังสมการที่ 2.9

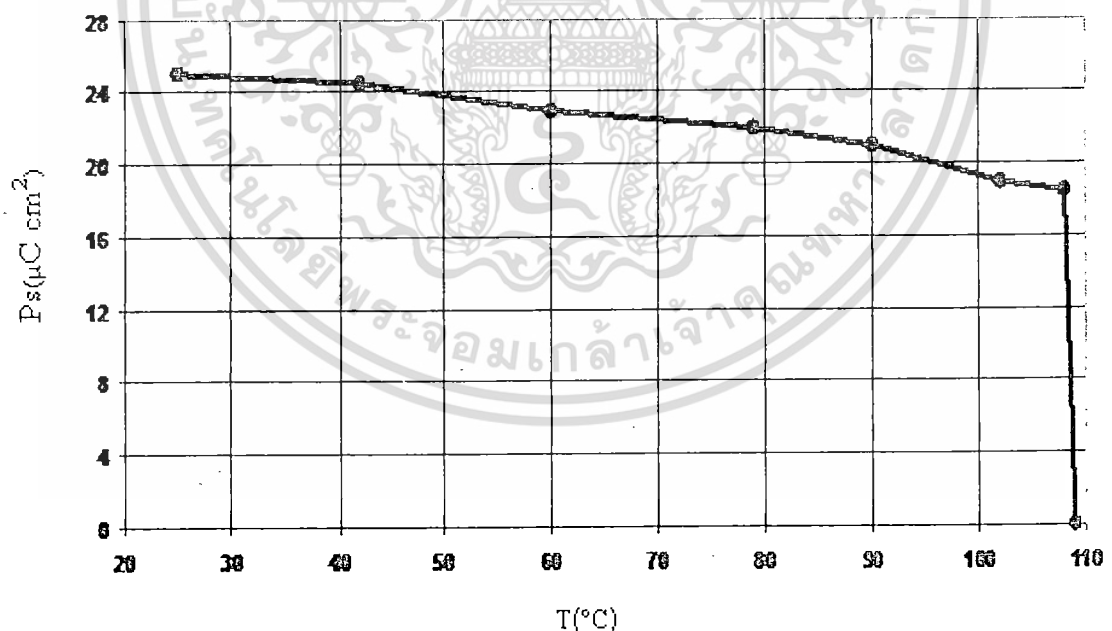
$$\Delta P_s = \pi \Delta T \quad (2.9)$$

โดยที่ ΔP_s คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงไปของการเกิดโพลาริเซชัน (มีหน่วยเป็น mC/cm^2)

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

π คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของไพโรอิเล็กทริก

รูปที่ 2.7 นั้นเป็นตัวอย่างการเกิดปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริกในผลึก BaTiO_3 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการเกิดโพลาริเซชันนั้นจะลดลงและจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิของผลึกมีค่ามากกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature หรือ T_c)

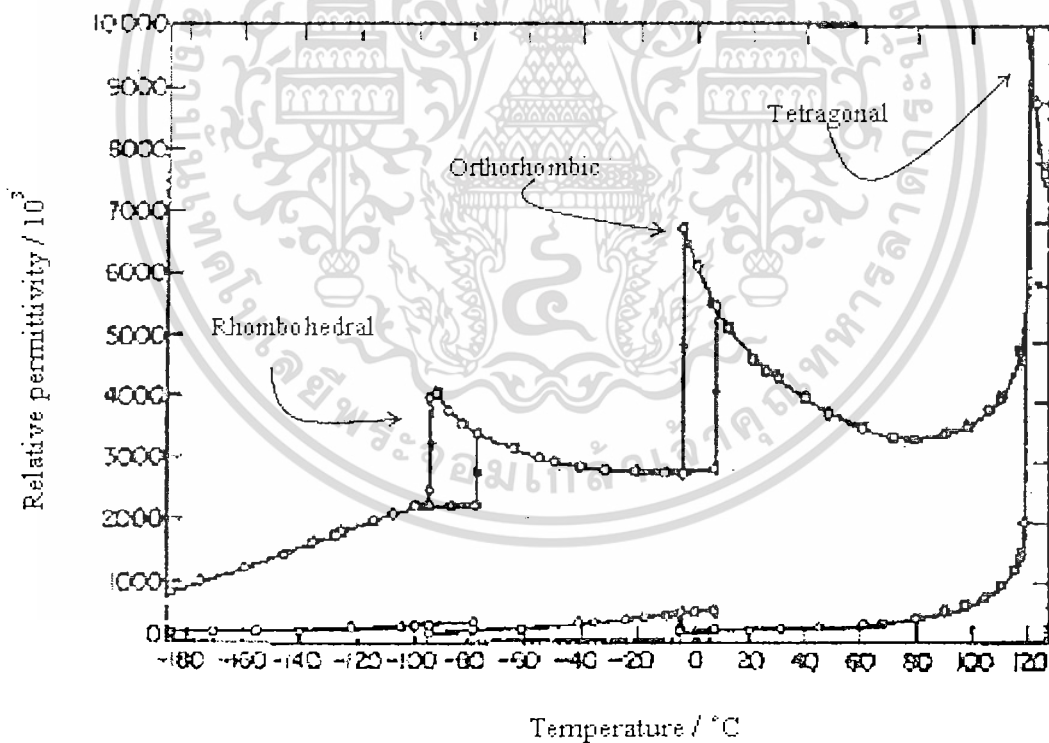


รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณการเกิดโพลาริเซชันของผลึก BaTiO_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 อุณหภูมิและการเปลี่ยนเฟส

ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้นสามารถที่จะเกิดการเปลี่ยนเฟสได้หลายเฟสตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป โดยอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสของผลึก จะเรียกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส (phase transition temperature) ซึ่งถ้ามีการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริก (ไม่มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง) ไปเป็นคิวบิกพาราอิเล็กทริก (มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง) จะเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสนี้ว่า อุณหภูมิคูรี (Curie temperature หรือ T_c) ซึ่งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity หรือ ϵ_r) ณ อุณหภูมิคูรีนั้นจะมีค่าสูงที่สุดโดยพีกของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้นจะมีลักษณะเป็นพีกแหลม (sharp peak) ไม่ขึ้นกับความถี่ ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นตัวอย่างการเปลี่ยนเฟสจากออร์โธโรฮีดรัล (rhombohedral) ไปเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) และจากออร์โธโรมบิกไปเป็นเตตระโกนอล (tetragonal) ตามลำดับ และมีอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ประมาณ 120°C โดยมีการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริกเตตระโกนอลไปเป็นพาราอิเล็กทริกที่



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) กับอุณหภูมิของผลึกแบเรียมไททานเตด (BaTiO_3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎคูรี-ไวส์ (Curie-Weiss law)

$$\epsilon = \epsilon_0 + C/(T-T_0) \quad (2.10)$$

โดยที่ ϵ คือ ค่าสภาพยอม (Permittivity) ของวัสดุที่ตรวจวัด

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (8.854×10^{-12} F/m)

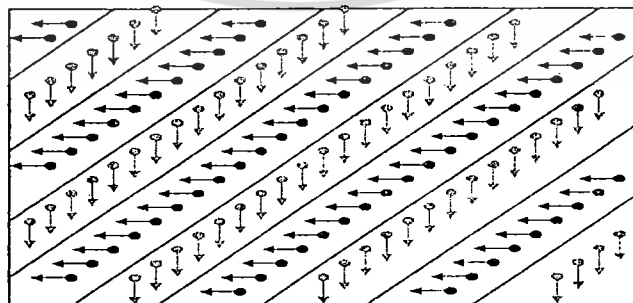
C คือ ค่าคงที่คูรี (Curie constant)

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

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

2.3.1.3 เฟอร์โรอิเล็กทริกโดเมนและวงวนฮิสเทอรีซิส

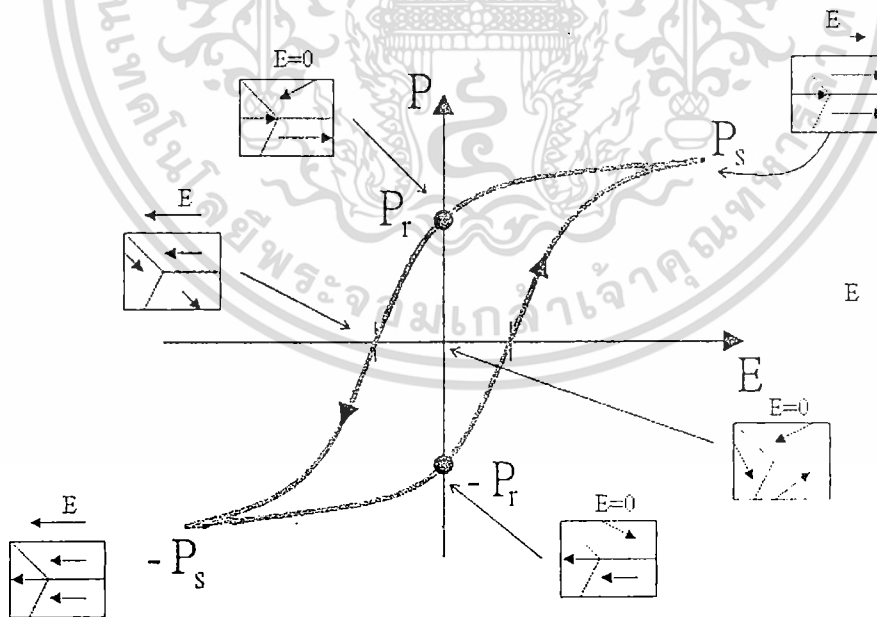
ในผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีบริเวณที่เกิดโพลาริเซชันในลักษณะที่เหมือนกัน และทิศทางของโดเมนวางตัวในทางเดียวกันซึ่งเรียกว่า เฟอร์โรอิเล็กทริกโดเมน (ferroelectric domain) ซึ่งอาจจะมีหนึ่งโดเมน (single domain) หรือ หลายโดเมน (multiple domain) ก็ได้ โดยรอยต่อระหว่างโดเมนจะเรียกว่า ผนังโดเมน (domain wall) แต่เมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอกที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการเลื่อนของผนังโดเมนและเกิดเป็นโดเมนเชิงเดี่ยวได้ และเมื่อผลึกได้รับสนามไฟฟ้าที่แรงพอก็จะสามารถสลับโพลาริเซชันในโดเมนได้ ซึ่งเรียกว่า การสลับขั้วโดเมน (domain switching) สำหรับผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้นจะมีขนาดของโดเมนอยู่ในระดับไมโครเมตรและมีลักษณะโดเมนดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะโดเมนของผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างระหว่างผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกและผลึกไพโรอิเล็กทริกคือ ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้น สามารถสลับขั้วโพลาริเซชันตามทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้เข้าไปซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถตรวจสอบได้ด้วย การวัดวงวนฮิสเทอรีซิส ซึ่งลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้นจะมีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยม (square loop) แสดงดังรูปที่ 2.10 จากรูปเมื่อเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าในทางบวกจะทำให้โดเมนในผลึกพยายามจัดเรียงตัวในทิศทางตามสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปจนถึงจุดสูงสุดที่โดเมนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ปริมาณของการโพลาริเซชันจะมีค่าสูงสุด เรียกจุดนี้ว่า ค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว (saturated polarization หรือ P_s) และเมื่อหยุดให้สนามไฟฟ้า ค่าโพลาริเซชันจะไม่ลดลงมาจนเหลือศูนย์ เนื่องจากบางโดเมนยังคงสภาพการโพลาริเซชันในทิศทางเดิมอยู่ (ทิศบวก) จึงทำให้เกิดเป็นค่าโพลาริเซชันคงเหลือ (remnant polarization หรือ P_r) และเมื่อเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม (ทิศทางลบ) จะทำให้ค่าโพลาริเซชันลดลง และจะเรียกความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ทำให้ค่าโพลาริเซชันเป็นศูนย์ว่า สนามไฟฟ้าบังคับ (coercive field หรือ E_c) และเมื่อความเข้มสนามไฟฟ้ามากกว่า E_c จะทำให้โดเมนเกิดการสลับทิศทางทำให้เกิดเป็นลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิสขึ้น โดยค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว ค่าโพลาริเซชันคงเหลือ และค่าสนามไฟฟ้าบังคับของเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้นจะมีค่าค่อนข้างสูง



รูปที่ 2.10 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ลูกศรแสดงทิศทางโพลาริเซชันในแต่ละโดเมน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

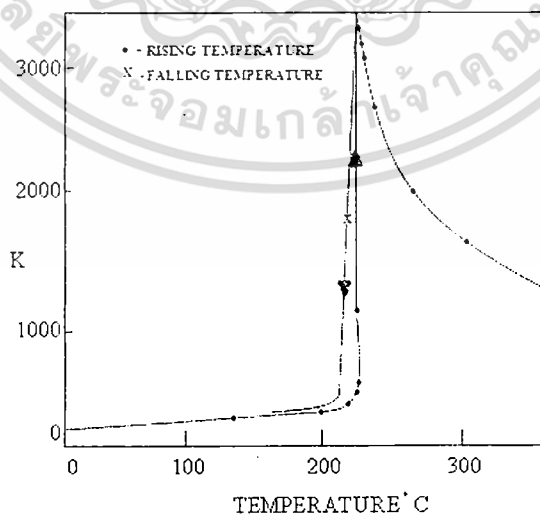
2.3.2 แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก

2.3.2.1 การเกิดโพลาริเซชันได้เองและปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก

การเกิดโพลาริเซชันได้เองของวัสดุแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นพิจารณาได้จากปริมาณโมเมนต์ขั้วคู่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรหรือปริมาณประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนพื้นผิวให้ตั้งฉากกับทิศทางของโพลาริเซชันได้เช่นเดียวกับเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ นอกจากนี้การเกิดโพลาริเซชันได้เองนั้นยังขึ้นกับอุณหภูมิโดยมีการเกิดปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก ซึ่งสามารถใช้สมการที่ 2.9 อธิบายได้เช่นกัน เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการเกิดโพลาริเซชันนั้นจะค่อยๆ ลดลงและจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิของผลึกมีค่ามากกว่าอุณหภูมิคูรี

2.3.2.2 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส

ผลึกแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นสามารถที่จะเกิดการเปลี่ยนเฟสได้หลายเฟสตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเช่นเดียวกับเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนเฟสจากแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริก จะเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสนี้ว่า อุณหภูมิคูรี ซึ่งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ณ อุณหภูมิคูรีนั้นจะมีค่าสูงที่สุด โดยพีคของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของผลึกแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีลักษณะเป็นพีคแหลมคล้ายกับพีคของเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎคูรี-ไวส์ (สมการที่ 2.10) แต่ไม่ขึ้นกับความถี่เช่นเดียวกับเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ แสดงดังรูปที่ 2.11

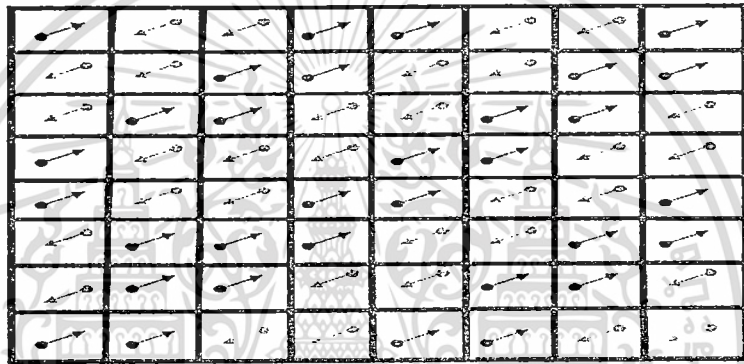


รูปที่ 2.11 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของผลึก PZ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

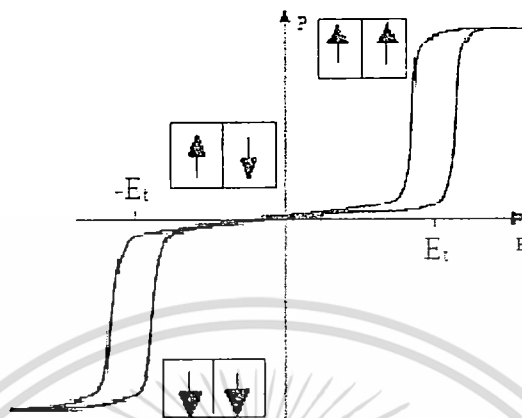
2.3.2.3 เฟอ์โรอิเล็กทริกโดเมนและวงวนฮิสเทอรีซิส

สำหรับเฟอ์โรอิเล็กทริกโดเมนของแอนติเฟอ์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีทิศทางของโดเมนที่ตรงข้ามและสลับกันไปทั้งผลึก ส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันรวมของผลึกเป็นศูนย์ แต่เมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอกที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการสลับขั้วโดเมนได้เช่นกันโดยลักษณะโดเมนและตัวอย่างของโดเมนของแอนติเฟอ์โรอิเล็กทริกนั้นแสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งขนาดโดเมนของแอนติเฟอ์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตร เช่นเดียวกับเฟอ์โรอิเล็กทริกแบบปกติ



รูปที่ 2.12 ลักษณะโดเมนของผลึกแอนติเฟอ์โรอิเล็กทริก

สำหรับลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของแอนติเฟอ์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสคู่(double hysteresis loop) แสดงดังในรูปที่ 2.13 จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุแอนติเฟอ์โรอิเล็กทริกจะเหนี่ยวนำให้โพลาริเซชันของแอนติเฟอ์โรอิเล็กทริกเป็นไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า จนปริมาณสนามไฟฟ้าที่สูงเกินค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต (ตำแหน่ง ข) ค่าโพลาริเซชันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าโพลาริเซชันอิ่มตัว (ตำแหน่ง ค) โดยทิศทางของโพลาริเซชันนั้นจะมีทิศทางไปในทางเดียวกัน จากนั้นเมื่อลดปริมาณของสนามไฟฟ้าที่ให้ค่าโพลาริเซชันจะค่อยๆ ลดลงจนถึงค่าสนามไฟฟ้าค่าหนึ่ง (ตำแหน่ง ง) ค่าโพลาริเซชันจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (ตำแหน่ง จ) จากนั้นค่าโพลาริเซชันจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ค่าโพลาริเซชันของผลึกก็จะเปลี่ยนเป็นศูนย์ (ตำแหน่ง ก) ผลึกนั้นจะกลับสู่ลักษณะการโพลาริเซชันแบบตรงกันข้ามโดยสมบูรณ์อีกครั้ง และเมื่อให้สนามไฟฟ้าที่เป็นลบก็จะเกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกันซึ่งแอนติเฟอ์โรอิเล็กทริกชนิดแรกที่ถูกค้นพบคือ PZ



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้า (P-E hysteresis) ของผลึกแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก

PZ ถูกค้นพบโดย Sawaguchi และคณะวิจัย แสดงสมบัติเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องมีโครงสร้างเป็นออร์โทโรมบิก โดยมี $a = 5.87 \text{ \AA}$, $b = 11.74 \text{ \AA}$ และ $c = 8.20 \text{ \AA}$ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปถึง $236 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (อุณหภูมิคูรีของ PZ) นั้น PZ จะเปลี่ยนสมบัติจากแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริก (paraelectric หรือ PE) และเปลี่ยนโครงสร้างจากออร์โทโรมบิกไปเป็นคิวบิก พร้อมทั้งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.14 นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถเกิดเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่อยู่ระหว่างเฟสแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกกับพาราอิเล็กทริกได้แต่เป็นช่วงที่แคบมาก โดยจะเกิดในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีประมาณ $10\text{-}25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยการเปลี่ยนเฟสจากแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติของ PZ นั้นสามารถชักนำให้เกิดได้โดยให้กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิหรือความดันอุทกสถิต (hydrostatic pressure) ที่สูงพอ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างมาก เนื่องจากหน่วยเซลล์ของเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้นจะมีขนาดใหญ่กว่าหน่วยเซลล์ของเฟสแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกทำให้เกิดความเครียดตามยาว (longitudinal strain) ขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนเฟสจากแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติของ PZ นี้เป็นลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บพลังงาน แต่ช่วงอุณหภูมิที่เกิดเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินี้จะขึ้นกับสัดส่วนองค์ประกอบและเงื่อนไขที่ใช้ในการเกิดขึ้นของสารตัวอย่าง ซึ่งพบว่าจะเกิดเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติได้ในสารละลายของแข็งที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PZ เป็นองค์ประกอบแต่ช่วงอุณหภูมิที่เกิดเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินี้จะแคบลงเมื่อมีปริมาณของ PZ เพิ่มขึ้น

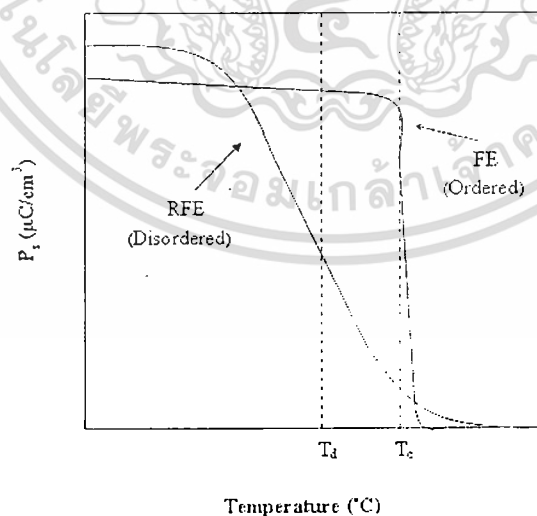
เซรามิก PZ นี้สามารถเตรียมได้ด้วยวิธีปฏิบัติทางสถานะของแข็ง จากสารประกอบออกไซด์คือ PbO และ ZrO_2 โดยใช้อุณหภูมิสูง โดยเฟสเดี่ยวของ PZ นั้นจะเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า $1200^{\circ}C$ และผงของ PZ นั้นสามารถเตรียมได้ด้วยกระบวนการทางเคมี

2.3.3 รีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก

2.3.3.1 การเกิดโพลาริเซชันได้เองและปรากฏการณ์ไฟโรอิเล็กทริก

การเกิดโพลาริเซชันได้เองของวัสดุรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก (relaxor ferroelectric) นั้นพิจารณาได้จากปริมาณโมเมนต์ขั้วคู่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเช่นกัน และค่าโพลาริเซชันของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอีกด้วย แต่จะต่างจากเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติและแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยค่าโพลาริเซชันของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะค่อยๆลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แม้ว่าอุณหภูมิจะสูงเกินอุณหภูมิโพลาริเซชัน (Temperature of depolarization หรือ T_d) ก็ยังมีค่าโพลาริเซชันอยู่และจะค่อยๆลดลงจนค่าโพลาริเซชันเป็นศูนย์ โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาริเซชันเทียบอุณหภูมิของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก และเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกตินั้น แสดงดังรูปที่

2.14



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาริเซชันเทียบอุณหภูมิของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก และเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.2 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส

รีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะค่อยๆ เกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นพาราอิเล็กทริกเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสนี้ว่า อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส ซึ่งต่างจากเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติและแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่เรียกอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นพาราอิเล็กทริกว่า อุณหภูมิคูรี โดยพีคของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีลักษณะเป็นพีคฐานกว้าง (broad peak) คล้ายระฆังคว่ำ ซึ่งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิ และสามารถอธิบายได้ด้วยกฎคูรี-ไวส์กำลังสอง (Curie-Weiss square law) ดังสมการที่ 2.11

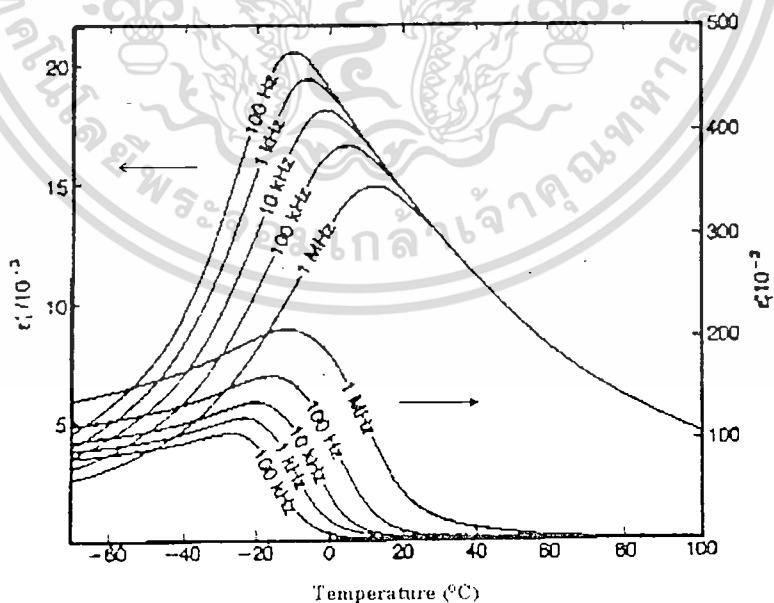
$$1/\epsilon = 1 + (T - T_m)^2 / 2\delta^2 \quad (2.11)$$

โดยที่ ϵ คือ ค่าสภาพยอม (Permittivity) ของวัสดุที่ตรวจวัด

δ คือ ค่าองศาของการแพร่ (Degree of diffuseness)

T_m คือ อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส (มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$)

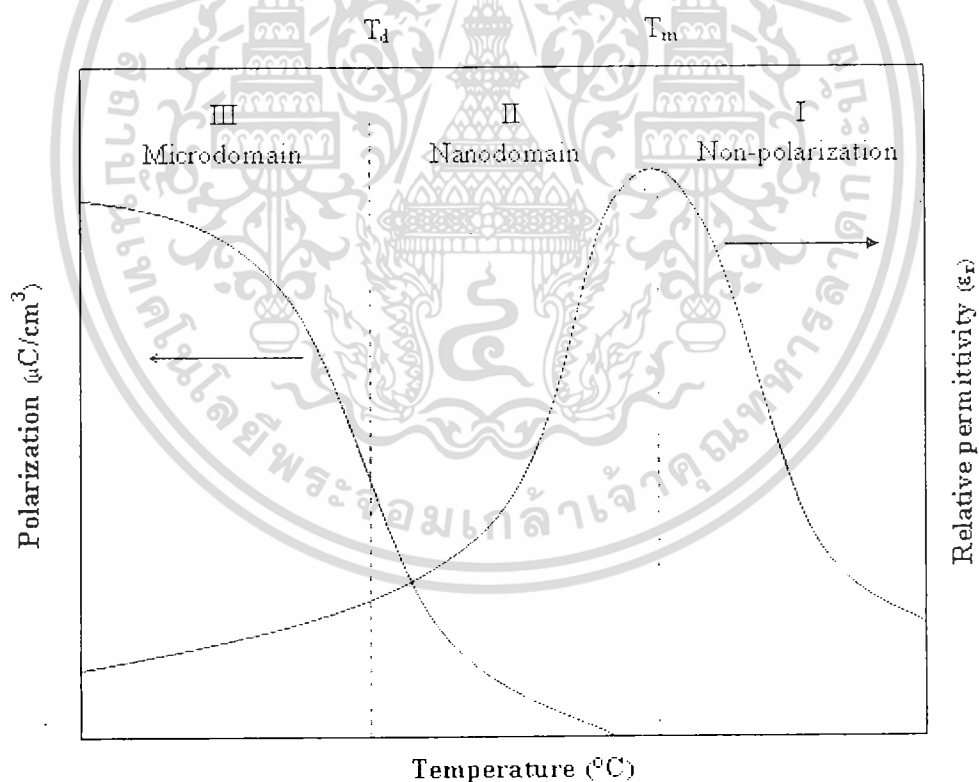
T คือ อุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์ (มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$)



รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสาร PMN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะขึ้นกับความถี่ที่ได้รับ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของแต่ละองค์ประกอบที่ไม่เข้ากัน ตัวอย่างเช่น PMN มีความผิดปกติของตำแหน่ง B (B-site) ที่มีไอออนของแมกนีเซียมและไนโอเบียมเป็นองค์ประกอบ ซึ่งแต่ละองค์ประกอบจะมีการเปลี่ยนเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิแตกต่างกันส่งผลให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น ตัวอย่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของ PMN ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.15 และ 2.16 และเมื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าโพลาริเซชันเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะค่อยๆเพิ่มขึ้น ส่วนค่าโพลาริเซชันจะค่อยๆ ลดลงจนอุณหภูมิต่ำกว่า T_m ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่ค่าโพลาริเซชันนั้นมีค่าเป็นศูนย์ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิต T_u ของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะต่ำกว่าอุณหภูมิต T_m

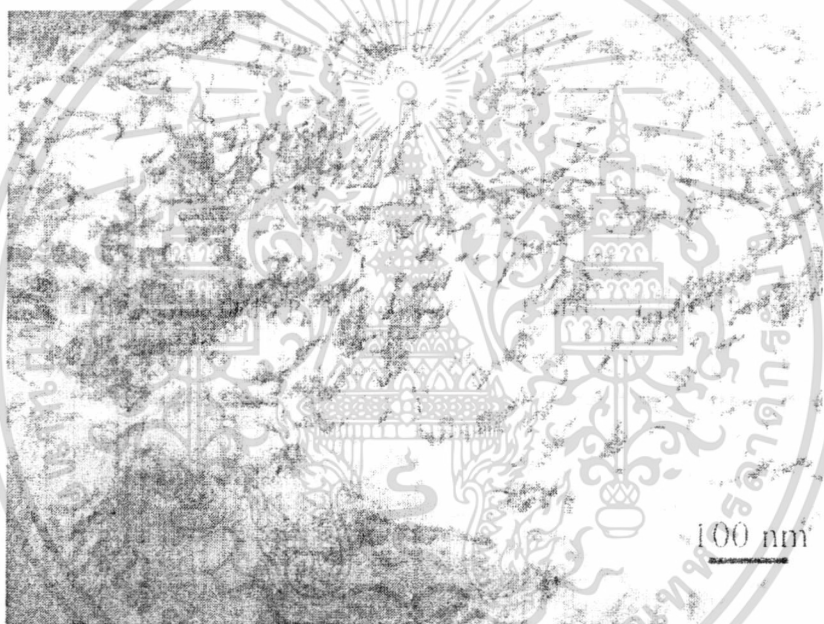


รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาริเซชันและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เทียบอุณหภูมิของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 เฟอร์โรอิเล็กทริกโดเมนและวงวนฮิสเทอรีซิส

รีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกอีกแบบหนึ่งที่มีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์เชิงซ้อน มีสูตรทั่วไปเป็น $Pb(B'B'')O_3$ โดย B' เป็นไอออนบวกที่มีประจุต่ำกว่าเช่น Mg^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} และ Co^{2+} เป็นต้น ส่วน B'' เป็นไอออนบวกที่มีประจุสูงกว่า เช่น Nb^{5+} , Ta^{5+} และ W^{6+} เป็นต้น ตัวอย่างเช่น $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (PMN), $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (PZN) และ $Pb(Sc_{1/2}Ta_{1/2})O_3$ (PST) เป็นต้น ซึ่งเฟอร์โรอิเล็กทริกโดเมนของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะเป็นนาโนโดเมน แสดงดังรูปที่ 2.17

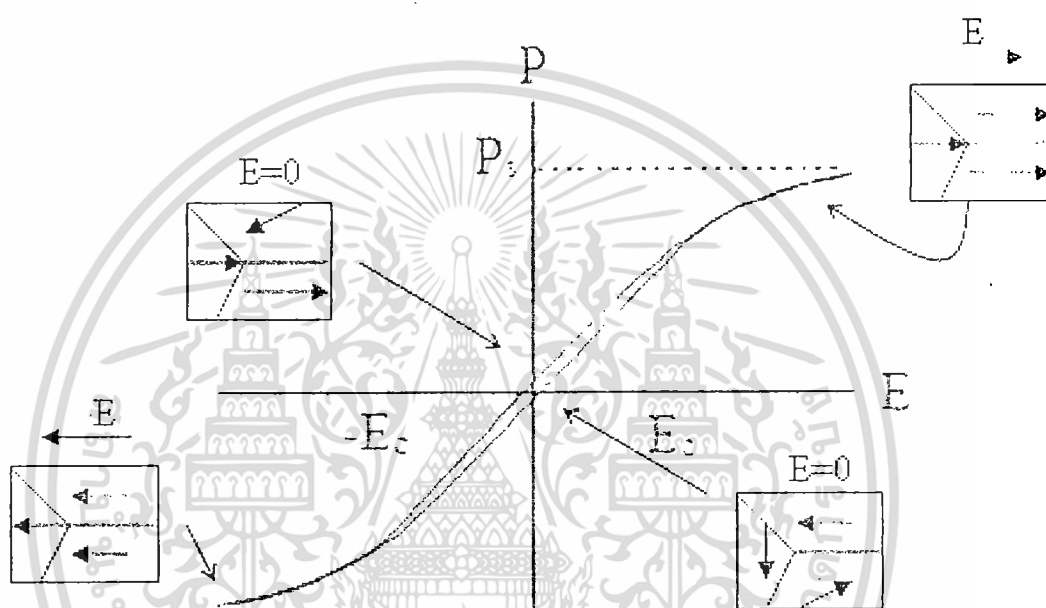


รูปที่ 2.17 นาโนโดเมนบนผิวผลึกรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกของ PZN-PZT

สำหรับวงวนฮิสเทอรีซิสของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสที่แคบ (slim hysteresis loop) แสดงดังรูปที่ 2.18 จากรูป เมื่อให้สนามไฟฟ้าในทางบวกแก่วัสดุรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก โดเมนในผลึกจะเกิดการจัดเรียงตัวสทิศทางตามสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปจนถึงจุดสูงสุดที่โดเมนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ปริมาณของการโพลาไรเซชันจะมีค่าสูงสุด เรียกจุดนี้ว่า ค่าโพลาไรเซชันอิ่มตัว และเมื่อหยุดให้สนามไฟฟ้าค่าโพลาไรเซชันจะลดลงมาจนเกือบเป็นศูนย์ แต่ยังมีบางโดเมนยังคงสภาพการโพลาไรเซชันในทิศทางเดิมอยู่ (ทิศทางบวก) จึงทำให้เกิดเป็นค่าโพลาไรเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นคงเหลือ และเมื่อให้ค่าสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม (ทิศทางลบ) จะทำให้ค่าโพลาไรเซชันลดลงและเกิดปรากฏการณ์คล้ายกับการให้สนามไฟฟ้าทางบวกเกิดเป็นวงวนฮิสเทอรีซิสขึ้น โดยค่าโพลาไรเซชันคงเหลือและค่าสนามไฟฟ้าบังคับของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะมีค่าน้อยกว่าเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ



รูปที่ 2.18 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก

จากสมบัติดังกล่าวของรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำเป็นตัวเก็บประจุ และยังมีการพัฒนาสมบัติดังกล่าวให้ดีขึ้นโดยนำสารรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกมาผสมกับสารประเภทอื่น เช่น เฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ เพื่อให้สมบัติที่โดดเด่นขึ้น เช่น เลดซิงค์ไนโอเบต-เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZN-PZT) เป็นจนถึงทุกวันนี้ก็ตาม แต่ว่าไนโอเบียม (Nb) และแทนทาลัม (Ta) นั้นเป็นธาตุในหมู่เดียวกันตามตารางธาตุ มีประจุเท่ากันและมีรัศมีไอออนใกล้เคียงกันมาก สารละลายของแข็งในระบบ PZnTa นั้นจึงเป็นระบบที่น่าสนใจเช่นกัน

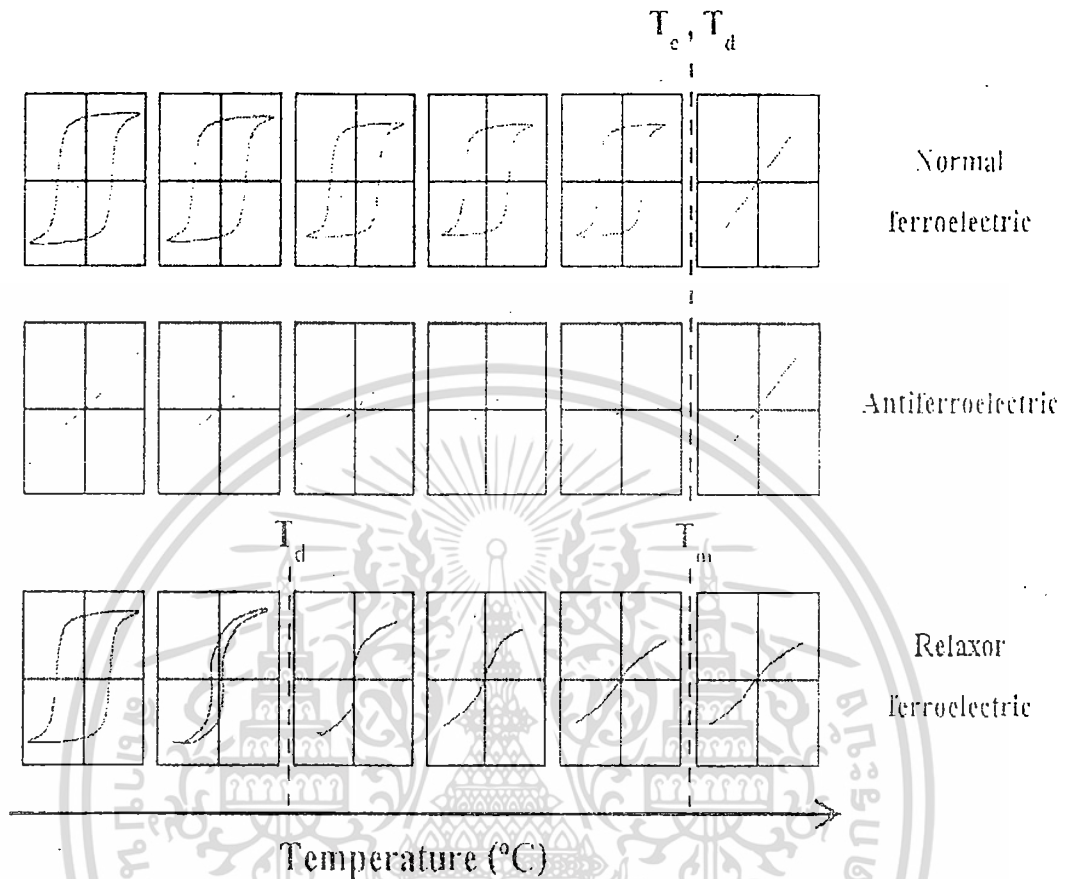
ซึ่งสมบัติที่แตกต่างกันและลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสระหว่างเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก และรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นแสดงไว้ดังตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างระหว่างสมบัติของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ แอนเฟอร์โรอิเล็กทริก และรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก

สมบัติของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก	เฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ	แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก	รีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก
1.ค่าสภาพยอมสัมพันธ์กับอุณหภูมิ	มีพีคลำดับที่ 1 และ 2 ลักษณะเป็นพีคแหลมฐานแคบ	มีพีคลำดับที่ 1 และ 2 ลักษณะเป็นพีคแหลมฐานแคบ	พีคมีลักษณะฐานกว้าง เกิดขึ้นที่อุณหภูมิคูรี
2.ค่าสภาพยอมสัมพันธ์กับความถี่	ขึ้นกับความถี่เพียงเล็กน้อย	ขึ้นกับความถี่เพียงเล็กน้อย	ขึ้นกับความถี่มาก
3.พฤติกรรมการเก็บประจุในช่วงพาราอิเล็กทริก $T > T_c$	เป็นไปตามกฎของ คูรี-ไวส์	เป็นไปตามกฎของ คูรี-ไวส์	เป็นไปตามกฎของ คูรี-ไวส์กำลังสอง
4.ค่าโพลาริเซชันคงเหลือ	มีค่าโพลาริเซชันคงเหลือมาก	มีค่าโพลาริเซชันคงเหลือ	มีค่าโพลาริเซชันคงเหลือน้อย
5.การกระเจิงของแสง	มีการกระเจิงของแสงในแต่ละทิศทางแตกต่างกันมาก	มีการกระเจิงของแสงในแต่ละทิศทางแตกต่างกันมาก	มีการกระเจิงของแสงในแต่ละทิศทางแตกต่างกันน้อย
6.การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	พบการแยกออกของสเปกตรัมรังสีเอกซ์เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนเฟสจากพาราอิเล็กทริกไปเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก	พบการแยกออกของสเปกตรัมรังสีเอกซ์เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนเฟสจากพาราอิเล็กทริกไปเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก	ไม่สามารถตรวจพบการแยกออกของสเปกตรัมรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนเฟสจากพาราอิเล็กทริกไปเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก
7.อุณหภูมิคูรี (T_c)	มีได้ค่าเดียว	มีได้ค่าเดียว	มีได้หลายค่าขึ้นอยู่กับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

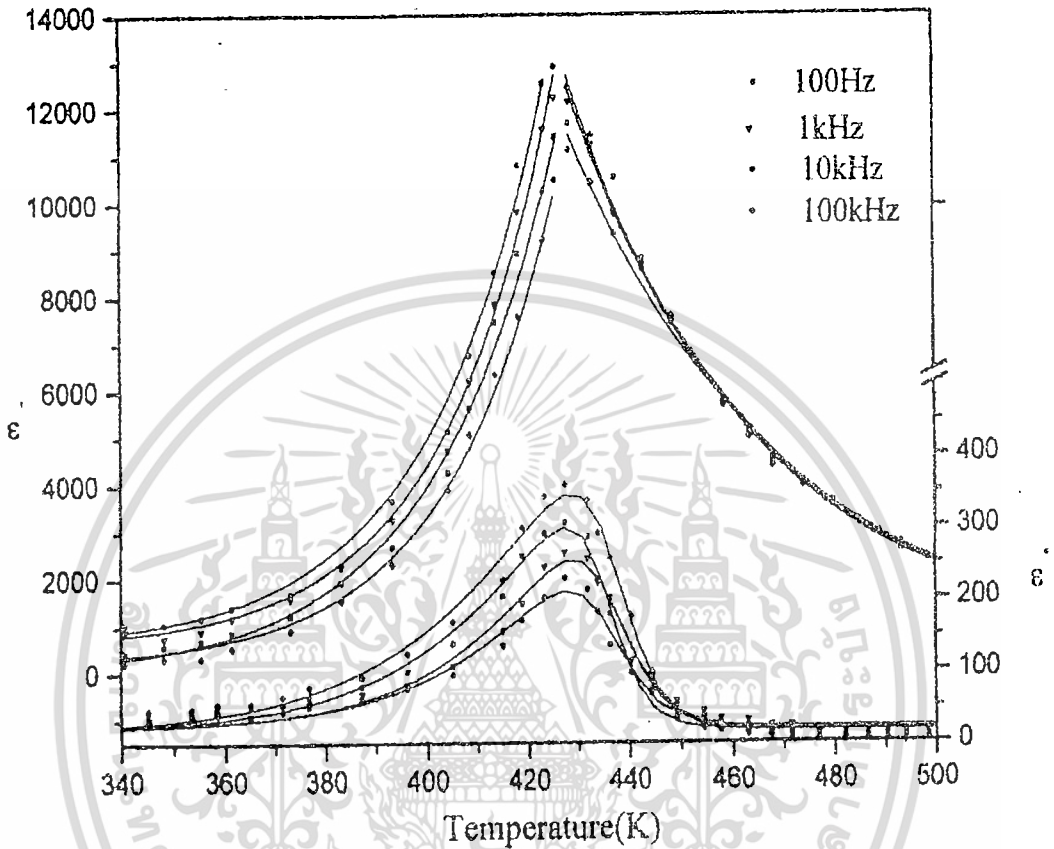


รูปที่ 2.19 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ แอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก และรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

2.4 เสดนิกเกิดไนโอเบต-เดดเซอร์โคเนต ($\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3$, PNN-PZ)

ในการผสมระหว่างสารที่มีสมบัติแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกและรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกนั้น ยังมีข้อมูลที่จำกัด ซึ่งในปี ค.ศ. 2001 Singh และคณะ ทำการศึกษาสารในระบอบนี้โดยมีองค์ประกอบระหว่าง PZ ที่เป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกและ PMN เป็นรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของรีแลกเซอร์ไปเป็นนอลมัลเฟอร์โรอิเล็กทริก. และตรวจสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก พบว่าที่สัดส่วน $x = 0.5$ นั้นจะให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงมาก ดังรูปที่ 2.20 และมีพฤติกรรมของนอลมัลเฟอร์โรอิเล็กทริก ส่วนการผสมระหว่าง PZ และ PNN นั้นยังมีข้อมูลน้อยมากและสาเหตุนี้เองจึงเป็นจุดประสงค์หลักของงานวิจัยในครั้งนี้

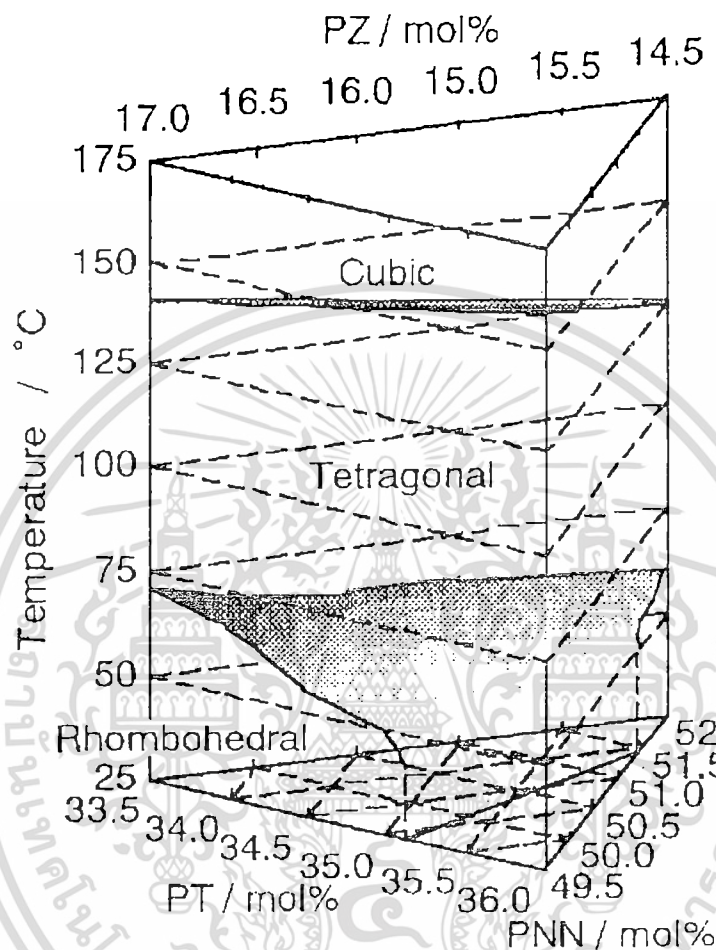
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ 0.5PMN-0.5PZ

ในงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับการผสมที่ใช้ PZ และ PNN เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่แล้วจะเป็นทำการศึกษาสมบัติของสารในระบบ 3 องค์ประกอบของ PZ, PT และ PNN โดยในปี ค.ศ. 1999 Kondo และคณะ ทำการศึกษาสมบัติพิโซอิเล็กทริกและตรวจหาเฟสรอยต่อที่เหมาะสม (MPB) ของสารระบบ PNN-PT-PZ ในสัดส่วน aPNN-bPT-cPZ ซึ่ง a อยู่ในช่วง 0.495-0.52 b อยู่ในช่วง 0.335-0.36 และ c อยู่ในช่วง 0.145-0.17 โดย $a + b + c = 1$ พบว่าสมบัติพิโซอิเล็กทริกดีที่สุดนั้นมีสัดส่วน a : b : c เป็น 50 : 34.5 : 15.5 ให้ โดยทำการตรวจสอบค่า k_{33} ได้มากกว่า 0.8 และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากระบบโรฮอโดรอล (Rhombohedral) ไปเป็นเทตระโกนัล (Tetragonal) และเปลี่ยนไปเป็นคิวบิก (Cubic) ซึ่งพบ MPB อยู่ในช่วงของเฟสโรฮอโดรอล (Rhombohedral-rich) ดังรูปที่ 2.21

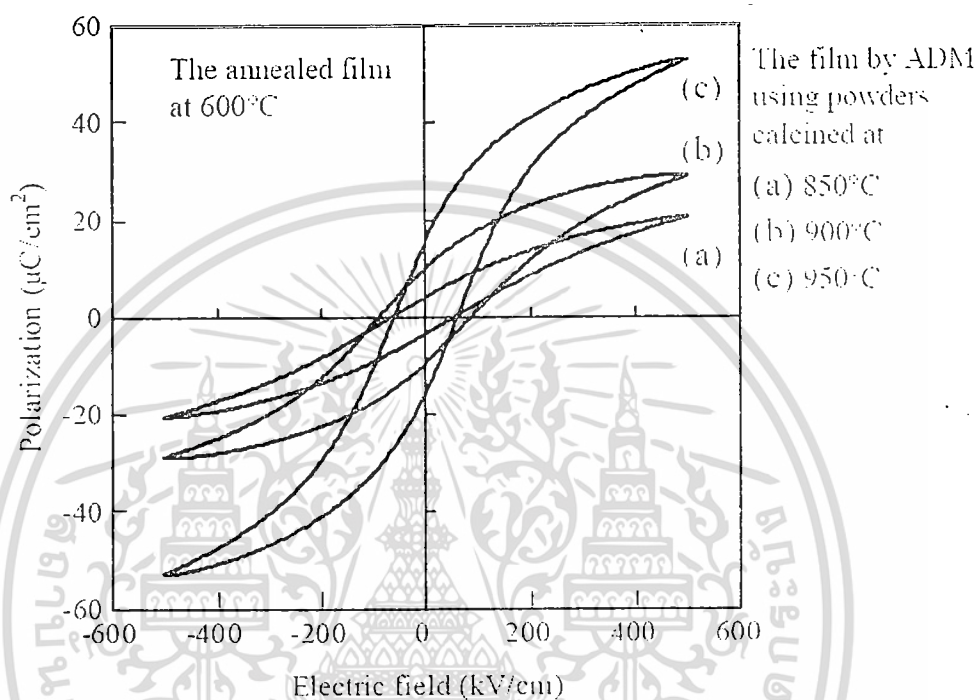
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 เฟสไดอะแกรมแสดงการเปลี่ยนเฟสและเฟสรอยต่อที่เหมาะสม MPB ของสาร PNN-PT-PZ

ในปีต่อมา Kawakami และคณะ ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มหนาของ PNN-PZT ด้วยวิธียัดเกาะของละอองเซรามิก (The aerosol deposition method, ADM) โดยทำการพ่นผงเซรามิก PNN-PZT ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 °C , 900 °C และ 950 °C ลงบนแผ่นสแตนเลส สตีล และทำการเผาแอนนัล (Anneal) ที่อุณหภูมิ 600 °C เพื่อให้เกิดเป็นผลึกรวมของ PNN-PZT เมื่อตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย ค่าโพลาไรเซชันคงเหลือ (p_r) มีค่าเป็น 18 ไมโครคูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าสนามไฟฟ้าบังคับ (E_c) มีค่าเท่ากับ 65 กิโลโวลต์ตั้งรูปที่ 2.22 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์มีค่าเป็น 750 และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ที่ความถี่เท่ากันนี้มีค่าเท่ากับ 0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงกราฟฮิสเทอรีซิสของฟิล์ม PNN-PZT

แต่จากการศึกษาของ สุภมาศ วิรุณจิตร และคณะจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการเตรียมเซรามิก $(1-x)\text{PZ}-x\text{PNN}$ (PZ-PNN) พบว่าแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบ เมื่อสัดส่วนองค์ประกอบ เมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ PNN เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เปลี่ยนแปลงจาก PZ จนมีลักษณะคล้ายรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ PNN ซึ่งพบว่าโครงสร้างจะเปลี่ยนจากออร์โทโรมบิกไปเป็นเป็นรอมโบฮีดรอล และเป็นคิวบิกเสมือนในที่สุด และทำการตรวจสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าสัดส่วนองค์ประกอบ PNN ส่งผลต่อการลดอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส โดยจะลดจาก $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ลงมาถึง $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะลดลงตามสมการ $232.19-285x\text{ }^{\circ}\text{C}$ นอกจากนี้พบว่าเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ PNN เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เซรามิกในระบบ $(1-x)\text{PZ}-x\text{PNN}$ (PZ-PNN) มีความเป็นรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกมากขึ้นด้วยรวมทั้งจากการตรวจสอบทางเฟอร์โรฮิสเทอรีซิสของ $(1-x)\text{PZ}-x\text{PNN}$ เซรามิก (PZ-PNN) นั้นแสดงให้เห็นการเกิดโพลาริเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้รับความต่างศักย์ไฟฟ้าภายนอก ซึ่งพบเมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์จากต่ำไปสูง (5 กิโลโวลต์ถึง 30 กิโลโวลต์) พบว่าจะทำให้ขนาดของอิมิตเตอร์ซิลิโคนใหญ่ขึ้น โดยทำให้ค่าโพลาริเซชันอิมิตัว ค่าโพลาริเซชันคงเหลือ และค่าสนามไฟฟ้าบังคับเพิ่มขึ้น และค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดโพลาริเซชันได้มากพอคือที่ 25 กิโลโวลต์ นอกจากนี้พบว่าเมื่อสัดส่วนองค์ประกอบของ PNN เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันอิมิตัว ค่าโพลาริเซชันคงเหลือ และค่าสนามไฟฟ้าบังคับลดลง

2.5 การวัดเฟอร์โรอิเล็กทริกอิมิตเตอร์ซิส โดยใช้วงจรรอว์เยอร์-ทาวเวอร์

2.5.1 ตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก

ตัวเก็บประจุโดยทั่วไปจะถูกนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวางสำหรับวงจรรอว์เยอร์-ทาวเวอร์ ซึ่งในปัจจุบันได้สนับสนุนให้กลายเป็นอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น ดังสมการที่แสดงข้างล่าง

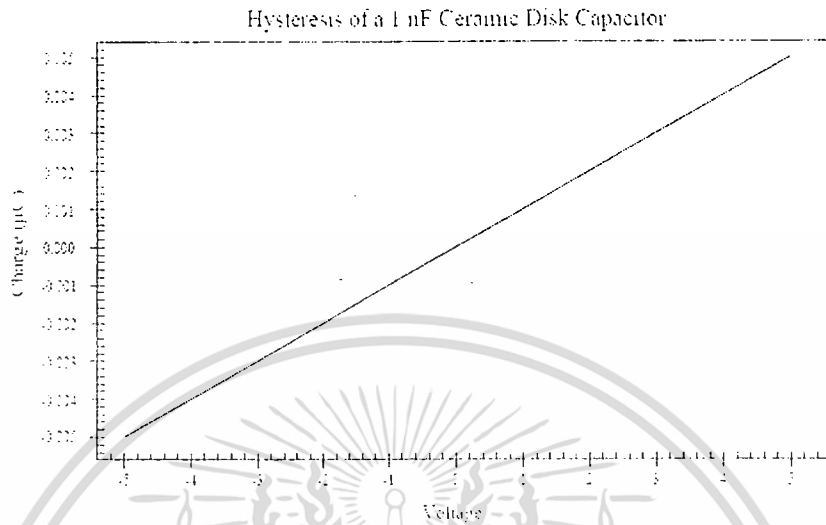
$$\text{ประจุไฟฟ้า} = \text{ความจุไฟฟ้า} \times \text{แรงดันไฟฟ้า}$$

หรือ $Q = CV$ (2.12)

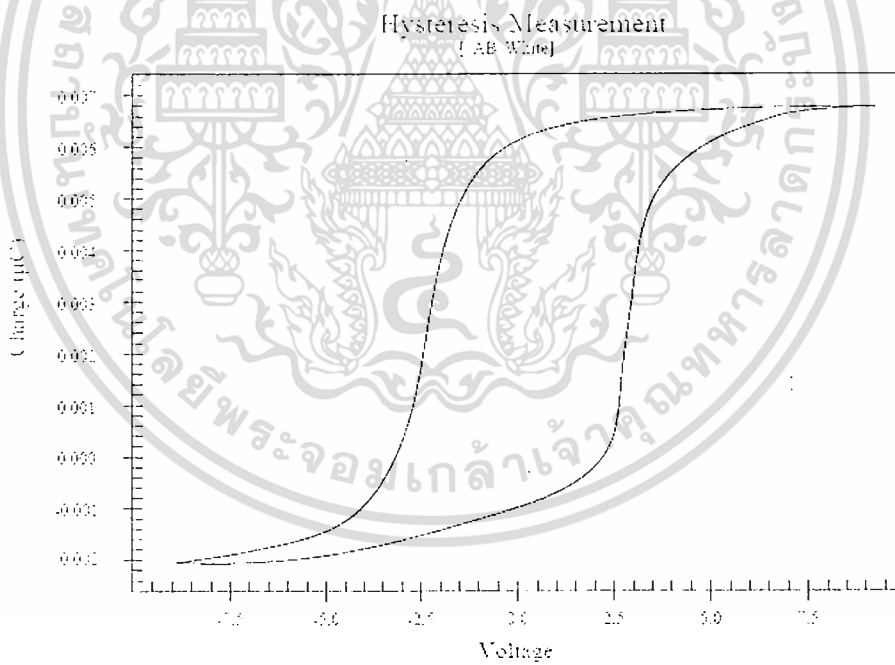
อย่างที่เข้าใจได้ง่ายๆ Q คือจำนวนของอิเล็กตรอนที่ออกมาจากตัวเก็บประจุ ด้วยการให้แรงดันไฟฟ้า (เมื่อแรงดันไฟฟ้าเป็นบวก ค่า Q ก็จะเป็นบวกเหมือนกัน) ในตัวเก็บประจุที่เป็นเชิงเส้น จะมีจำนวนของอิเล็กตรอนอย่างแน่นอนและแปรกับแรงดันไฟฟ้า (V) และความจุไฟฟ้า (C) และในตัวเก็บประจุที่เป็นเชิงเส้น ค่า C จะมีค่าคงที่และไม่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า แต่ถ้าเราป้อนคลื่นรูปสามเหลี่ยมให้กับตัวเก็บประจุที่เป็นเชิงเส้นนี้จำนวนของอิเล็กตรอนที่ได้มา หรือเข้าไปใน เป็นไปตามสัญญาณแรงดันที่ป้อนให้ โดยจะได้เส้นตรงออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.23

จากรูปที่ 2.23 นั้น แกนนอนคือค่าแรงดันไฟฟ้า ส่วนแนวตั้งก็จะเป็นประจุของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้า-ออก จากตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุบางชนิดมีการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความน่าสนใจ โดยสามารถนำไปใช้งานด้านการจดจำ, เซนเซอร์แรงดัน, เซนเซอร์ความร้อน และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่มีประโยชน์หลายชนิด เป็นต้น โดยส่วนมากตัวเก็บประจุเหล่านี้จะถูกเรียกว่า ตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริกและยังมีตัวเก็บประจุที่ไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอื่นๆ อีกที่เรียกว่า ตัวเก็บประจุชนิดพาราอิเล็กทริก และตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กทริก (dielectric capacitor) ซึ่งเราอาจจะรู้จักชื่ออิเล็กทริกกันบ้างแล้ว โดยตัวเก็บประจุอิเล็กทริกนี้จะถูกนำมาใช้ในไมโครโฟน, เทปของเครื่องบันทึกเสียง และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวกับการควบคุมเสียงด้วยมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบเซรามิกเชิงเส้น



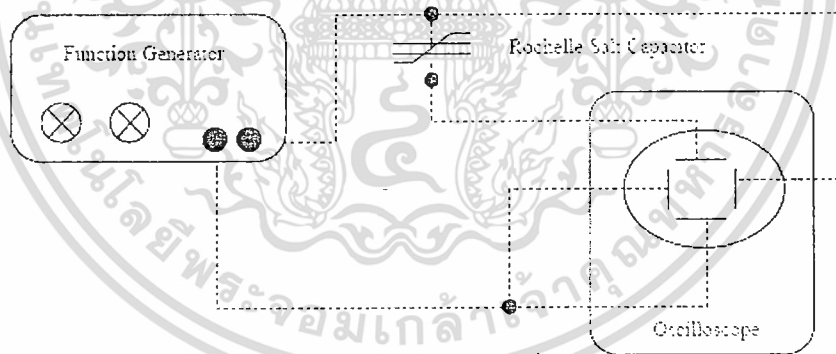
รูปที่ 2.24 วงวนฮิสเทรีซิสที่ได้จากตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์รี่อิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.24 เป็นรูปที่แสดงความสัมพันธ์ของประจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังเช่นตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์รี่โรเล็กทริก และให้ผลของประจุกับแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบวงวนฮิสเทอรีซิส

2.5.2 ความเป็นมา และวงจรวัดวงวนฮิสเทอรีซิสแบบซอว์เยอร์-ทาวเวอร์

จากการทดลอง เราสามารถเป็นวงจรไฟฟ้าอย่างง่าย เพื่อที่จะวัดค่าฮิสเทอรีซิสได้โดยใช้แหล่งจ่ายสัญญาณไฟฟ้า และเครื่องออสซิลโลสโคป โดยซอว์เยอร์และทาวเวอร์ได้เป็นผู้ริเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1929 เพื่อวัดค่าของวัสดุเฟอร์รี่โรเล็กทริกในยุคแรก คือ เกลือโรเชลล์ (Rochelle salt) และเป็นการวัดที่รู้จักกันดี โดยการนำตัวเก็บประจุสองตัวมาต่ออนุกรมกันและให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสองนี้ โดยซอว์เยอร์และทาวเวอร์ได้ใช้ความจุไฟฟ้าจากแผ่นเบี่ยงเบนของออสซิลโลสโคปในยุคแรกต่ออนุกรมเข้ากับตัวเก็บประจุไฟฟ้าเกลือโรเชลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.25



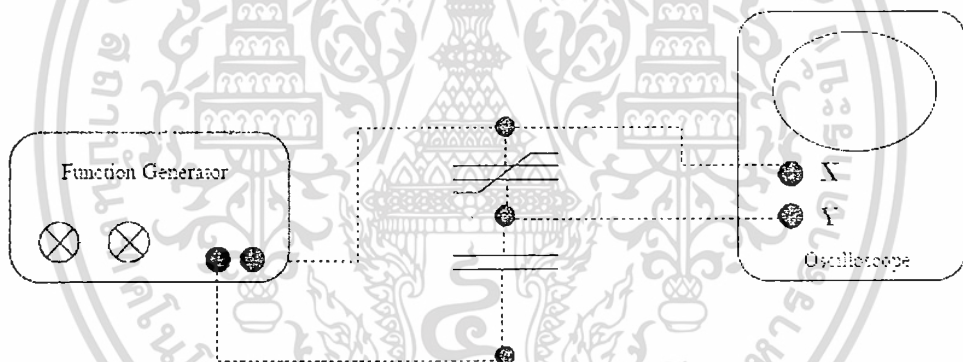
รูปที่ 2.25 วงจรไฟฟ้าซอว์เยอร์-ทาวเวอร์ในยุคแรก

ออสซิลโลสโคปในยุคแรกได้ถูกเชื่อมต่อกับสัญญาณ โดยตรงที่มาจากแผ่นเบี่ยงเบนในหลอดรังสีแคโทด ความจุไฟฟ้าจากแผ่นเบี่ยงเบนในแนวตั้ง (ในสัญญาณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าเท่ากับ 1.0) จะส่งผลให้มีการตรวจจับประจุไฟฟ้ามาจากตัวเก็บประจุเฟอร์รี่โรเล็กทริก โดยแรงดันไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนในแนวด้วยประจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุเฟอร์รี่โรเล็กทริกจะทำให้ล้อเล็กตรอนเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงจากตำแหน่งกึ่งกลาง แรงดันไฟฟ้าจะกระตุ้นที่ตกคร่อมกับตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟอร์โรอิเล็กทริกจะเปลี่ยนไปยังแผ่นเก็บประจุในแนวนอน ทำให้ล้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปทางซ้าย หรือขวาไปยังพื้นผิวที่ถูกเคลือบด้วยสารเรืองแสงในหลอดรังสีแคโทด โดยจะมีสองสัญญาณซึ่งทำงานร่วมกันจนเกิดวงวนฮิสเทอรีซิสขึ้น ดังแสดงในรูป 2.24 และถ้าหากตัวเก็บประจุเกลือโรเซลล์ได้ถูกแทนที่ตัวเก็บประจุที่เป็นเชิงเส้น ดังเช่น ซิลิคอน ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 2.23 แทนที่จะเกิดวงวนฮิสเทอรีซิส

วงจรซอร์-ทาวเวอร์ได้ถูกพัฒนาต่อมา เนื่องจากฮอสซิล โลส โกลป ในปัจจุบันนั้นจะมี วงจรขยายแบบฟรอนต์-เอนด์ (front-end amplifier) และมีความต้านทานขาเข้าสูง ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับวงจรเดิมที่ใช้ในการวัด จึงไม่สามารถนำไปใช้วัดวงวนฮิสเทอรีซิสได้ ดังนั้นวงจรซอร์-ทาวเวอร์จึงใช้ตัวเก็บประจุที่เป็นเชิงเส้นแทนที่ ซึ่งสามารถวัดได้เช่นเดียวกับวงจรในยุคแรก วงจรไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นใหม่ แสดงดังในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 วงจรซอร์-ทาวเวอร์ที่ใช้ตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้น (C_0) ในการค่าประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก (C_S)

แหล่งจ่ายสัญญาณไฟฟ้าจะเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ กลุ่มของประจุจะเกิดขึ้นที่ด้านบนของตัวเก็บประจุเฟอร์โรอิเล็กทริก ในขณะที่เดียวกันประจุไฟฟ้าก็จะมีแรงออกจากด้านตรงข้ามของตัวเก็บประจุเฟอร์โรอิเล็กทริกและเก็บสะสมพลังงานไว้ และส่งผลกระทบต่อไปยังด้านบนของตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้น ซึ่งสอดคล้องกับสมการ $Q = CV$ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้นจะแสดงให้เห็นถึงจำนวนของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้า-ออกจากตัวเก็บประจุ

เฟอร์โรอิเล็กทริก โดยมีผลการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบของคลื่นสัญญาณที่แสดงในช่องรับสัญญาณที่ 2 ของออสซิลโลสโคป โดยจะวัดเป็นแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบเชิงเส้น ขณะเดียวกันช่องรับสัญญาณที่ 1 ของออสซิลโลสโคปจะวัดแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจากแหล่งจ่ายสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งการแสดงกราฟในโหมด XY ของออสซิลโลสโคปแสดงให้เห็นเป็นวงวนฮิสเทอรีซิส

โดยทั่วไปรูปวงวนฮิสเทอรีซิสจะเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชัน (ในแกน X) และสนามไฟฟ้า (ในแกน Y) ที่วงจรป้อนแรงดันคลื่นรูปไซน์ได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าดกคร่อมตัวเก็บประจุทั้งสอง และเมื่อต้องการค่าสนามไฟฟ้า (E) ของเฟอร์โรอิเล็กทริกสามารถหาได้จากสมการที่ (2.13) คือ

$$E = \frac{V_{CS}}{d} \quad (2.13)$$

โดยที่ V_{CS} คือ แรงดันไฟฟ้าดกคร่อมตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก

d คือ ความหนาของตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก

และเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าอิมตัวของตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก ในบางครั้งอาจต้องป้อนแรงดันให้กับตัวเก็บประจุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก ($d \approx 1-2 \text{ mm}$) สูงหลายพัน โวลต์ ซึ่งจะส่งผลให้เครื่องออสซิลโลสโคปเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นวงจรชอว์เยอร์-ทาวเวอร์จึงได้ถูกปรับปรุงใหม่ด้วยการเพิ่ม R_1 และ R_2 ขนานกับ C_s และ C_c ดังแสดงในรูปที่ 2.27 เพื่อลดแรงดันให้เหมาะสมกับการวัดสัญญาณจากออสซิลโลสโคป (V_{R2} และ V_{C0}) ซึ่งแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุเฟอร์โรอิเล็กทริก (V_{CS}) มีค่าเท่ากับ

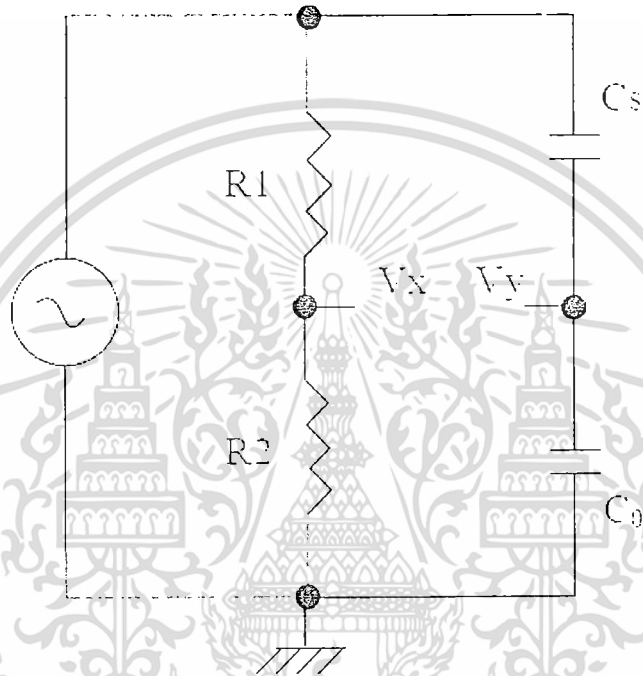
$$V_{CS} = (V_{R1} + V_{R2}) - V_{C0} \quad (2.14)$$

และ

$$V_{R1} = \frac{R_1}{R_2} \cdot V_{R2} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ V_{R1} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวความต้านทาน R_1
 V_{R2} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวความต้านทาน R_2
 V_{C0} คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_0



รูปที่ 2.27 วงจรซอว์เยอร์-ทาวเวอร์ที่ใช้ในการทดลอง เมื่อแรงดัน V_s มีค่าสูงมาก โดยที่ $V_x = V_{R2}$ และ $V_y = V_{C0}$

ส่วนค่าโพลาริเซชัน (P) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ

$$P = \frac{Q}{A} \tag{2.16}$$

โดยที่ Q คือ ประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_0 (= ประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ C_s)
A คือ พื้นที่ของตัวเก็บประจุ C_s

ดังนั้น

$$P = \frac{C_0 \cdot V_{C0}}{A} \tag{2.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การเตรียมชิ้นงานของเซรามิก

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมและการตรวจสอบเซรามิก โดยเริ่มจากการเตรียมผงนิเกิลในไอเบต (NiNb_2O_6) และผงในระบบ $(1-x)\text{PbZrO}_3-x\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (PZ-PNN) ที่ x มีค่าเท่ากับ 0.5 จากนั้นนำผงผลิตภัณฑ์ที่ได้มาเตรียมเป็นเซรามิกเพื่อศึกษาสมบัติความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกที่เตรียมได้ด้วยจรรยา-ทาวเวอร์ โดยมีรายละเอียดที่เกี่ยวกับสารเคมี วัสดุอุปกรณ์ และกระบวนการเตรียม แสดงไว้ตามลำดับ ดังต่อไปนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เลดออกไซด์ (PbO) ความบริสุทธิ์ร้อยละ ≥ 99.0 ผลิตโดยบริษัท Fluka ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
2. เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ผลิตโดยบริษัท Fluka ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
3. นิกเกิลออกไซด์ (NiO) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ผลิตโดยบริษัท Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. ไนโอเบียมออกไซด์ (Nb_2O_5) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 ผลิตโดยบริษัท Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 ผลิตโดยบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
6. โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ผลิตโดยบริษัท Fluka ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
7. ผงขัดอลูมินาขนาดอนุภาค 1 ไมโครเมตร
8. อลูมินา
9. กาวเงิน
10. กาวอีพอกซี
11. น้ำมันซิลิโคน (silicone oil)
12. น้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม ผลิตโดยบริษัท Sartorius
2. กระจบป้องกันพลาสติกพร้อมฝาปิด ใช้สำหรับบดย่อย
3. ลูกบดเซอร์โคเนีย (ZrO_2)
4. เครื่องบดย่อยผสมสารแบบบดย่อยด้วยเม็ดบด (Ball-milling)
5. บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
6. บีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร
7. บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
8. บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
9. กระดาษฟอยล์ (Foil)
10. เตาแผ่นให้ความร้อน (Hot plate) พร้อมตัวผสมสารแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
11. แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (Magnetic bar)
12. โกร่งบดสาร (Agate mortar)
13. ซ้อนตักสารทำด้วยสแตนเลส
14. ซ้อนตักสารทำด้วยพลาสติก
15. เส้นยางในรถยนต์
16. เทปขาวพันท่อ
17. ตู้อบสารอุณหภูมิ 200°C ผลิตโดยบริษัท Memmert
18. เตาไฟฟ้าอุณหภูมิ 1500 °C สำหรับเผาสาร ผลิตโดยบริษัท Vecstar
19. ถ้วยอลูมินา (Alumina crucible) พร้อมฝาปิด
20. แม่พิมพ์โลหะสำหรับอัดขึ้นรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร
21. แม่พิมพ์โลหะสำหรับอัดขึ้นรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร
22. เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก
23. คีมหนีบ
24. เส้นลวดทองแดง
25. กระดาษทรายเบอร์ 400 600 800 1000 และ 1200

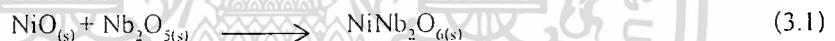
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26. กระชอน
27. เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer) รุ่น D 8 Advance
28. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ผลิตโดยบริษัท LEO รุ่น LEO 1455 VP
29. เครื่องวัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกผลิตโดยบริษัท Radiant รุ่น RT66B high voltage 4 kV

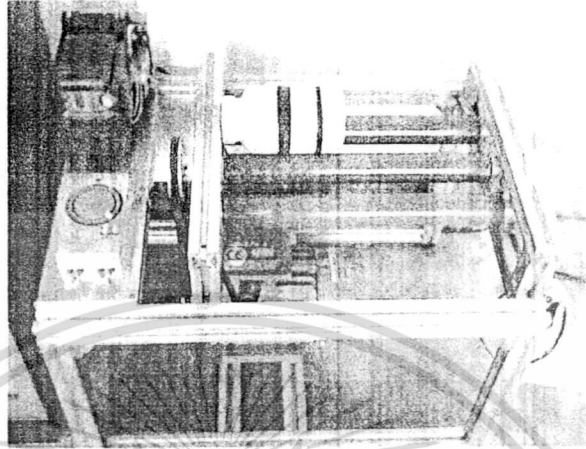
3.3 กระบวนการเตรียมผง

3.3.1 การเตรียมนิกเกิลไนโอเบต (NiNb_2O_6)

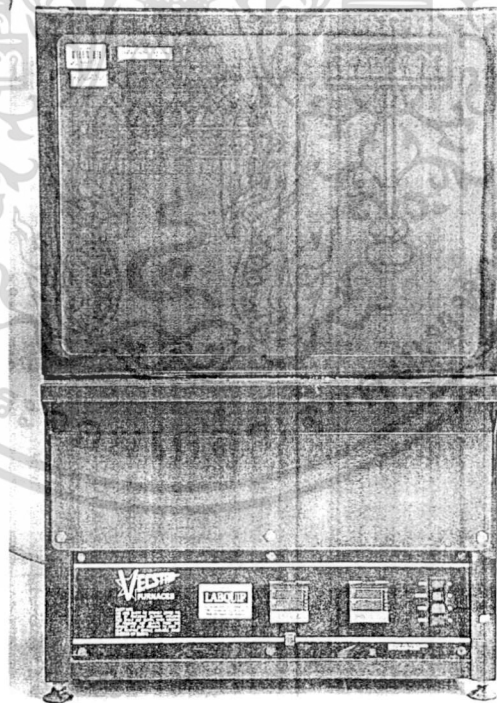
ทำการเตรียมนิกเกิลไนโอเบต (NiNb_2O_6) ด้วยวิธีโคลัมไบต์ เริ่มจากสารตั้งต้นซึ่งก็คือ นิกเกิลออกไซด์ (NiO) และ ไนโอเบียมออกไซด์ (Nb_2O_5) ตามสัดส่วนที่เหมาะสมโดยอาศัยสมการเคมีที่ 3.1 ดังนี้



นำสารตั้งต้นที่ชั่งตามสัดส่วนที่ต้องการมาใส่ลงในกระป๋องพลาสติกที่บรรจุลูกบดเซอร์โคเนียแล้วเติมเอทิลแอลกอฮอล์ลงไปด้วย เพื่อเป็นตัวช่วยในการหล่อลื่นปิดฝาให้สนิทแล้วนำไปทำการบดย่อยผสมสารด้วยเครื่องบดย่อยผสมสารแบบบดย่อยด้วยเม็ดบด (Ball-milling) (ดังรูปที่ 3.1) เป็นเวลา 18 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ออกด้วยเตาแผ่นให้ความร้อน และนำไปอบให้แห้ง จากนั้นนำผงที่ผ่านการอบแห้งแล้วใส่ลงในถ้วยอลูมินาปิดฝาให้สนิท นำไปทำการเผาแคลไซน์ด้วยเตาไฟฟ้า (ดังรูปที่ 3.2) ที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น-ลงอุณหภูมิ 5 °C ต่อนาที โดยแสดงแผนผังกระบวนการบดย่อยผสมและเผาแคลไซน์ดังรูปที่ 3.3 และแผนผังในการแคลไซน์ดังรูปที่ 3.4 แล้วทำการพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)



รูปที่ 3.1 เครื่องบดขยอยผสมสารแบบการบดขยอยด้วยเม็ดบด

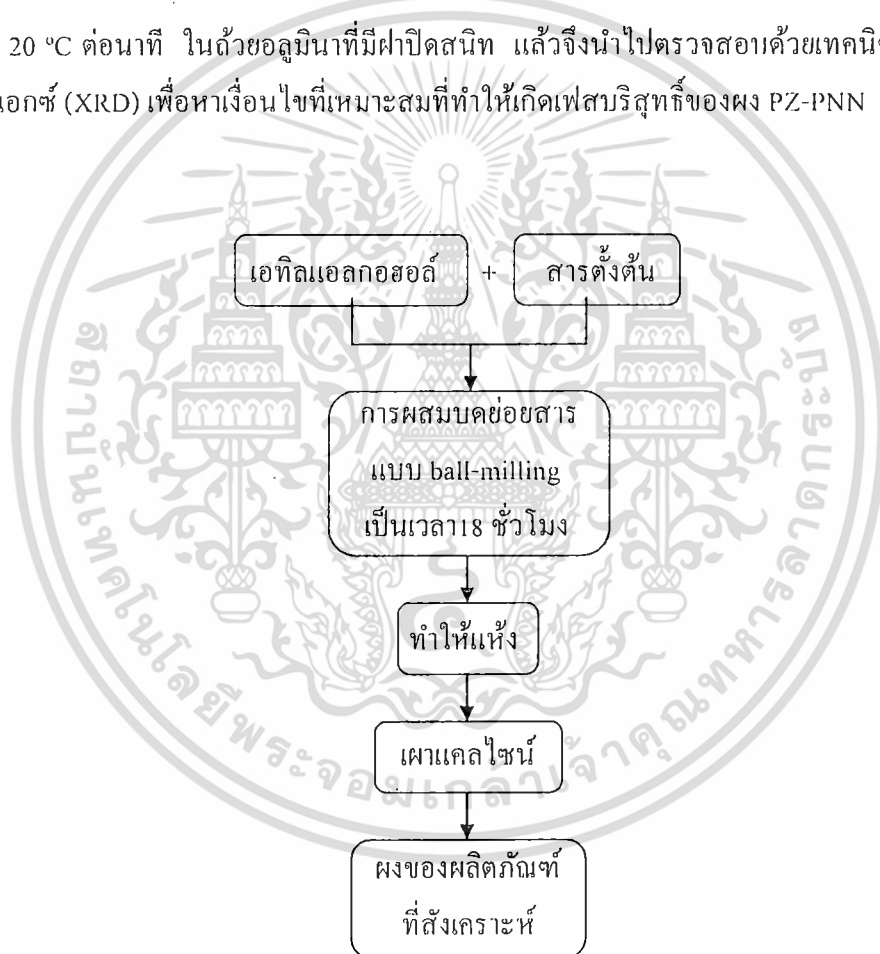


รูปที่ 3.2 เตาไฟฟ้าสำหรับเผาสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

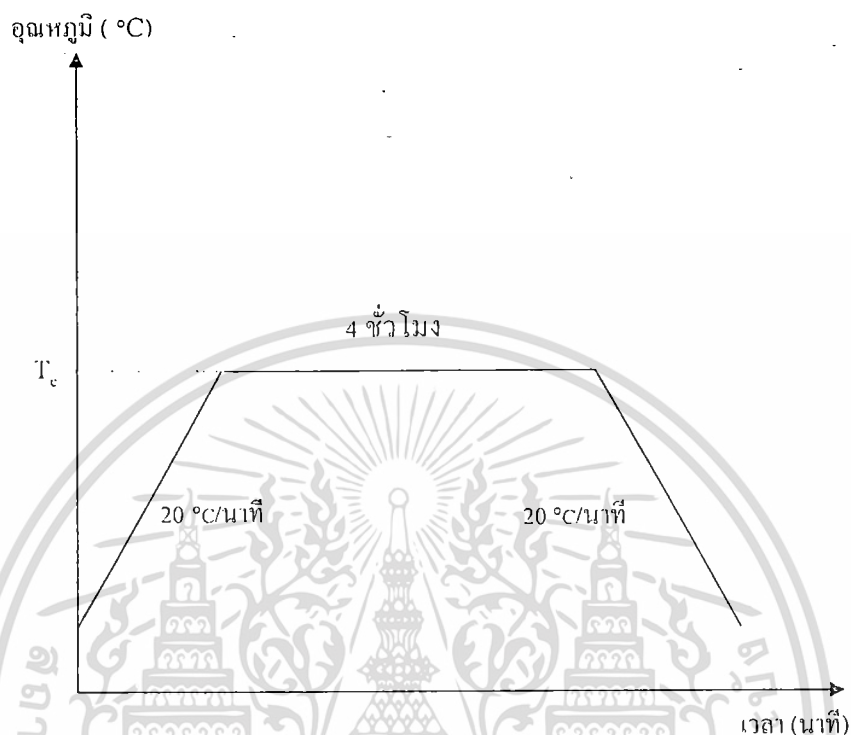
3.3.2 การเตรียมผงในระบบเลเซอร์โคเนต-เลดนิเกิลในโอเบต (PZ-PNN)

การเตรียมผงเลเซอร์โคเนต-เลดนิเกิลในโอเบต $(1-x)\text{PbZrO}_3-x\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (PZ-PNN) ในอัตราส่วนผสมโดยโมล $x = 0.5$ สามารถทำได้โดยการนำเลดออกไซด์ (PbO) เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) และผงของนิเกิลในโอเบต (NiNb_2O_6) ที่เตรียมมาแล้วในข้างต้น มาผสมกันโดยผ่านกระบวนการเตรียมเช่นเดียวกับการเตรียมผงนิเกิลในโอเบต (NiNb_2O_6) ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.1 จะได้เป็นผงผสม PZ-PNN จากนั้นทำการเผาแคลไซน์เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น-ลง อุณหภูมิ $20\text{ }^\circ\text{C}$ ต่อนาที ในด้วยอุณหภูมิที่มีฝาปิดสนิท แล้วจึงนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดเฟสบริสุทธิ์ของผง PZ-PNN



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงกระบวนการบดย่อยผสมและเผาแคลไซน์ (MCP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงการแคลไซน์
(โดย T_c คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์)

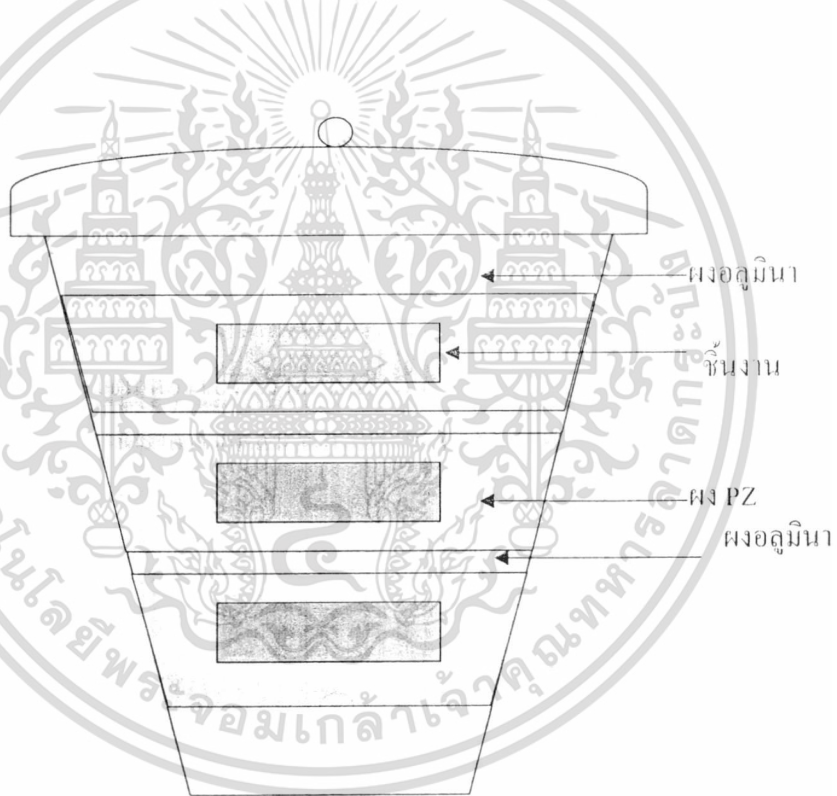
3.4 กระบวนการเตรียมเซรามิก

นำผงที่เตรียมได้มาอัดขึ้นรูปแบบ uniaxial pressing ครั้งละประมาณ 1.5 กรัม โดยผสมสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักลงไปด้วยประมาณ 1-2 หยด เพื่อเป็นตัวช่วยประสานให้ผงเกาะกันดีขึ้น โดยขึ้นงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นกลม (Disk) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 มิลลิเมตร โดยทำการอัดในแม่พิมพ์โลหะด้วยเครื่องอัดระบบไฮดรอลิก ด้วยความดัน 3 ตัน เป็นเวลานาน 30 วินาที เมื่อได้ชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูป (Green body) แล้วจึงนำมาจัดเรียงลงในถ้วยอลูมินา (รูปที่ 3.5) จากนั้นทำการกลบชิ้นงานด้วยผงเลดเซอร์โคเนต (PZ) เพื่อควบคุมบรรยากาศในการเผาและป้องกันการระเหยของตะกั่วในรูปของ PbO ออกจากชิ้นงานในระหว่างที่ทำการเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

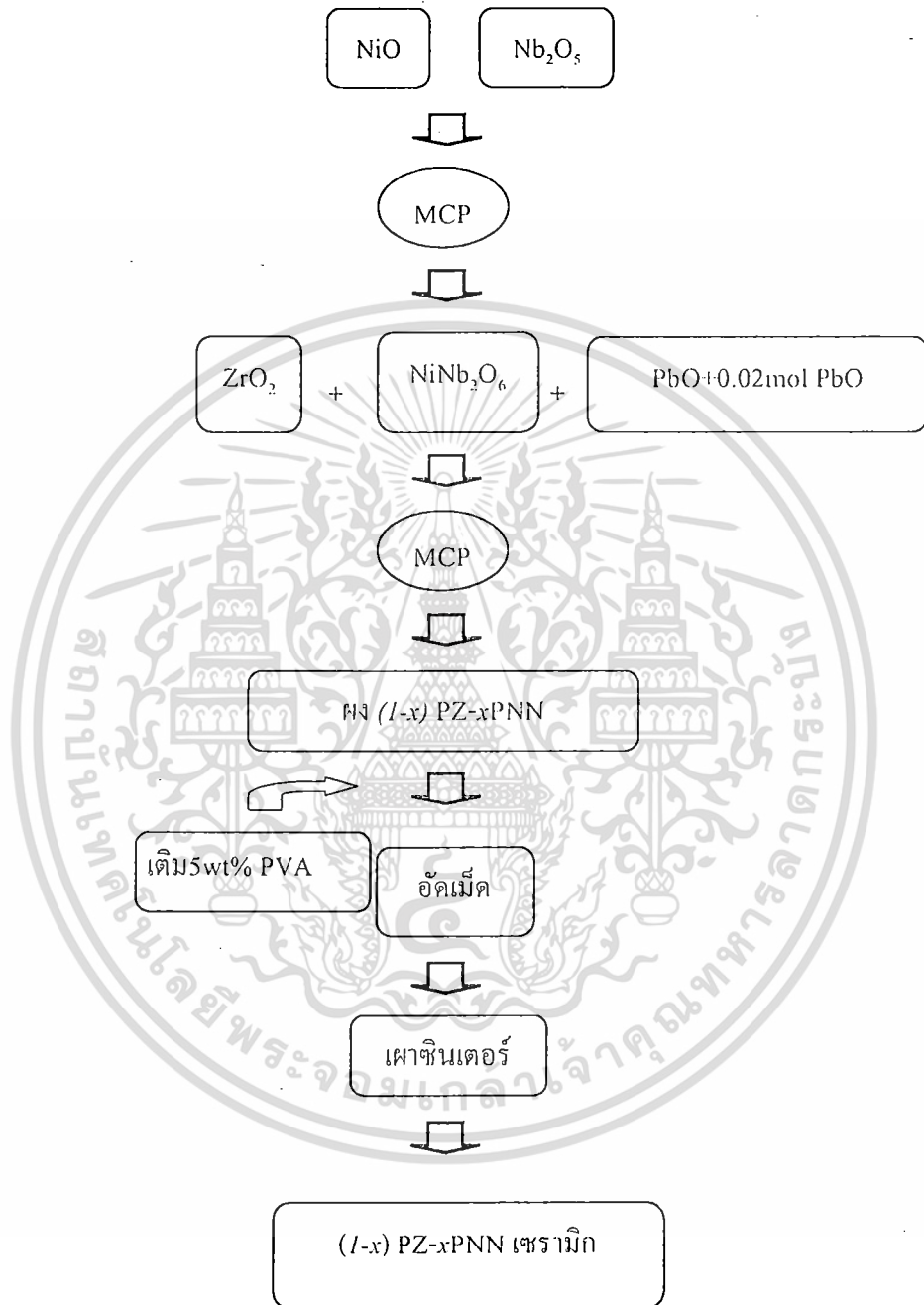
แล้วจึงกลับด้วยผงอลูมินาทับอีกชั้นหนึ่งเพื่อช่วยให้มีการไหลเวียนของความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเท่าๆ กัน ในทุกทิศทาง จากนั้นปิดฝาด้วยอลูมินาให้สนิทแล้วนำไปเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ (1100 °C-1250 °C) เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมง โดยมีอัตราการขึ้น-ลงอุณหภูมิ 5 °C ต่อนาที

ในกระบวนการเผาซินเตอร์ของเซรามิกนั้นจะต้องทำการเผาแซ่ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมงก่อน โดยมีอัตราการขึ้น-ลงอุณหภูมิ 2 °C ต่อนาที เพื่อกำจัด PVA ออกไป จากนั้นจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นต่อไปจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการเผาซินเตอร์ ดังแผนภาพแสดงในรูปที่ 3.7 และกระบวนการเตรียมเซรามิกทั้งหมดได้ทำการแสดงไว้ในแผนภาพรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 การจัดเรียงชิ้นงานในด้วยอลูมินาสำหรับการเผาซินเตอร์

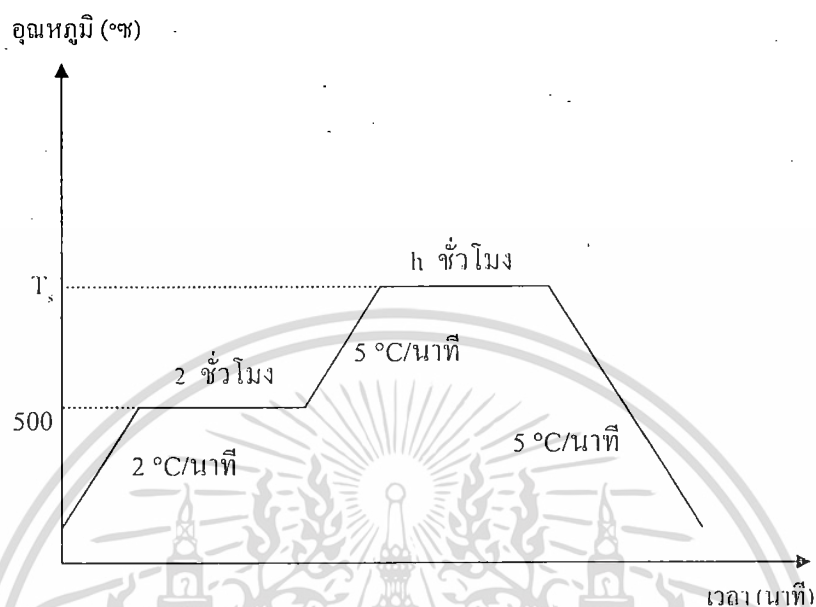
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MCP = กระบวนการบดย่อยผสมและเผาแคลไซน์

รูปที่ 3.6 แผนผังกระบวนการเตรียมเซรามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



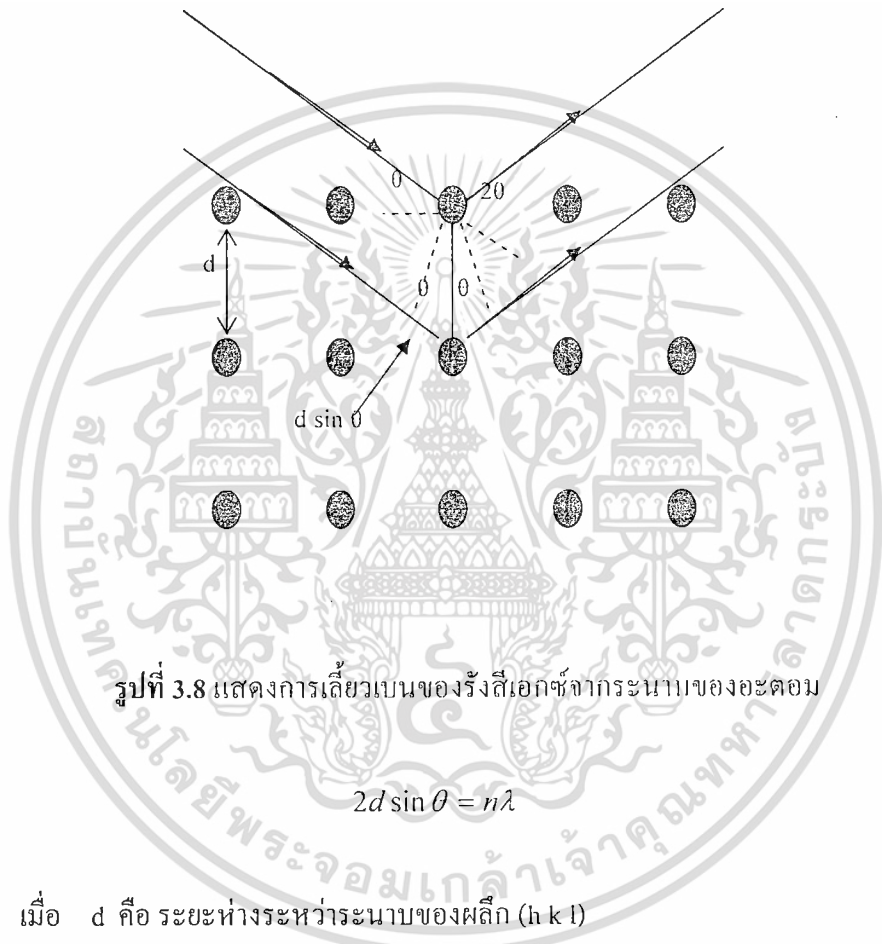
รูปที่ 3.7 แผนผังแสดงการเผาซินเตอร์
(โดย T_s คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ และ h คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการเผา)

3.5 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

ในโครงการพิเศษนี้ได้ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique) ในการตรวจสอบหาชนิดและปริมาณของเฟสที่เกิดขึ้นองค์ประกอบของสารตัวอย่าง ลักษณะโครงสร้างของสารตัวอย่างโดยอาศัยหลักการตกกระทบของรังสีเอกซ์ลงบนผิววัสดุแล้วเกิดการกระเจิง (Scattering) และเลี้ยวเบนโดยมีมุมในการเลี้ยวเบนแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ โครงสร้างผลึกและระนาบ ($h k l$) ที่รังสีตกกระทบภายในวัสดุ โดยที่รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุแต่ละชนิดนั้นก็จะมีค่าเฉพาะเจาะจงสำหรับวัสดุนั้นๆ ดังนั้นเมื่อนำเครื่องมือสำหรับการตรวจวัด (Detector) มารองรับรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาจากวัสดุในตำแหน่งต่างๆก็จะสามารถตรวจสอบได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุหรือสารชนิดใดโดยพิจารณาจากข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมของแบรกก์ (Bragg's angle) ดังแสดงในสมการ 3.2 และความเข้มของฟิรังก์ซ์ (Intensity : I) ของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏ (รูปที่ 3.8) ซึ่งดังที่กล่าวมาแล้วว่าสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบของการเลี้ยวเบนที่เป็นลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไปจึงสามารถนำรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตรวจสอบได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลของสารชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS files) เพื่อตรวจสอบชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นได้ โดยเริ่มจากการนำผงและชิ้นงานเซรามิกที่เตรียมได้มาแพคใส่ใน holder จากนั้นนำไปวางที่

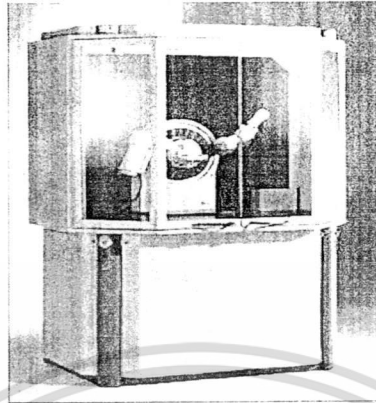
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณช่องสำหรับวางชิ้นงานในเครื่อง X-ray diffractometer (รูปที่ 3.9) แล้วจึงเดินเครื่องโดยใช้เฝ้าทองแดง ($\text{CuK}\alpha$) เป็นตัวกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นประมาณ 1.54 Å ออกมาด้วย Step ประมาณ 2 องศาต่อนาที จากค่ามุม 2θ ที่ 20 องศา ไปจนถึงที่ค่ามุม 2θ ที่ 60 องศา



- เมื่อ d คือ ระยะห่างระนาบของผลึก ($h k l$)
 θ คือ มุมระหว่างรังสีเอกซ์ตกกระทบกับระนาบของผลึก
 n คือ เลขใดๆ $n = 1, 2, 3, \dots$
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (1.54 Å)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

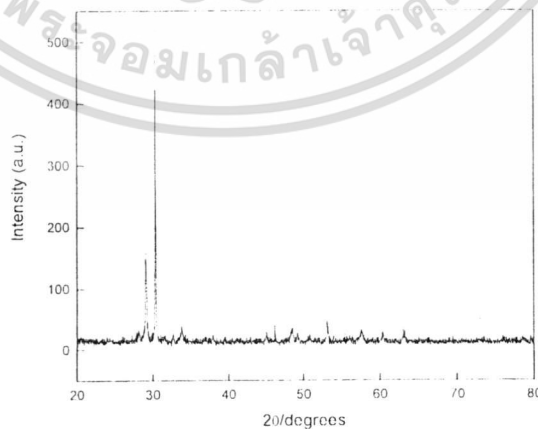


รูปที่ 3.9 เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D 8 Advance

เมื่อได้ผลการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) จะแสดงในรูปของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้ม (Intensity :I) กับค่ามุม 2θ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ให้นำข้อมูลที่ได้มา คำนวณหาร้อยละโดยนำหนักของสารประกอบเพอโรฟสไกต์ (%perovskite) ตามสมการ 3.3 ดังนี้ (Vitayakorn, 2005)

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

เมื่อ I_{perov} คือ ค่าความเข้มสูงสุดของพีคที่รังสีเอกซ์ของเฟสเพอโรฟสไกต์ที่ต้องการ
 I_{pyro} คือ ค่าความเข้มสูงสุดของพีคที่รังสีเอกซ์ของเฟสที่แปลกปลอม

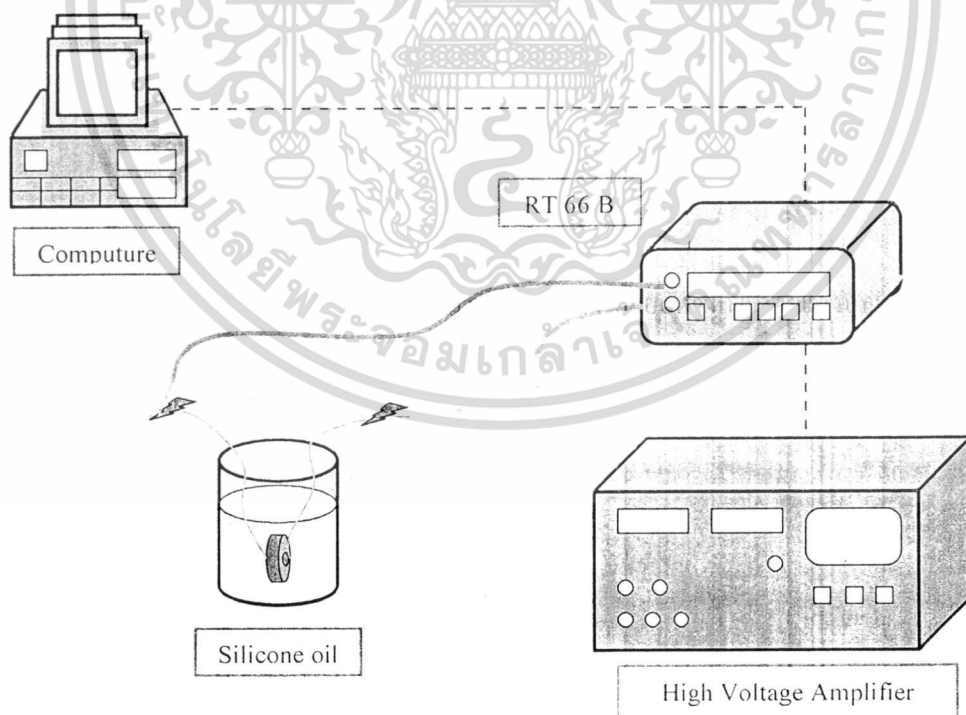


รูปที่ 3.10 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การตรวจสอบสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริก

ในการตรวจสอบสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกด้วยการวัดค่าการโพลาไรเซชันของชิ้นงานเซรามิกเมื่อให้สนามไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการวัดค่าโพลาไรเซชันที่สนามไฟฟ้าบังคับ 5 10 15 20 และ 25 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร เท่ากับโดยเริ่มจากการนำเซรามิกที่เตรียมได้มาทำการขัดผิวของชิ้นงานให้เรียบขนานกันทั้งสองหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับจนชิ้นงานมีความหนาประมาณ 0.24 มิลลิเมตร นำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกส์เป็นเวลานาน 15-30 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงาน นำชิ้นงานไปอบในเตาอบเพื่อไล่น้ำออกจากชิ้นงานให้หมด จากนั้นนำชิ้นงานมาทำขั้วไฟฟ้าด้วยการทาฉนวนทั้งสองหน้าของชิ้นงาน เผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นของอุณหภูมิ 2°C ต่อนาที แล้วจึงลดอุณหภูมิลงมาที่ 300 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา 1000 นาที นำชิ้นงานที่ผ่านการทาฉนวนเรียบร้อยแล้วติดขดลวดทองแดงด้วยการอ็อกซี นำชิ้นงานไปตรวจวัดค่าการโพลาไรเซชันของชิ้นงานด้วยการใช้ชุดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.11 โดยชุดวัด Terk ประกอบด้วย High Voltage Amplifier, RT 66 B, Computer



รูปที่ 3.11 หลักการทำงานของอุปกรณ์วัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

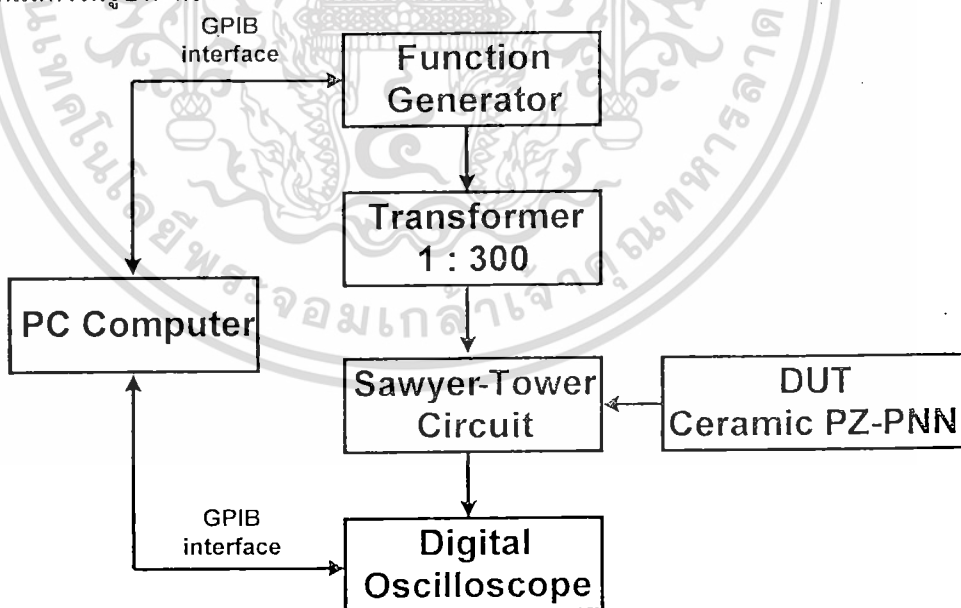
บทที่ 4

ระบบเครื่องวัดวงวนฮีสเทอรีซิสที่ควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW

การวัดวงวนฮีสเทอรีซิสในบทนี้ เครื่องมือวัดจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) รุ่น 8.5 จะช่วยให้การวัดสะดวกและง่ายขึ้น นอกจากนี้โปรแกรมยังช่วยคำนวณและตรวจสอบความถูกต้องของผลการวัดที่ได้ด้วยอย่างไรก็ตามการวัดวงวนฮีสเทอรีซิสในเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก ในรายงานนี้ได้ใช้แรงดันไฟฟ้าสูงมากกว่า 1,000 V ดังนั้นจึงต้องเพิ่มความระมัดระวังเป็นพิเศษทั้งอุปกรณ์ที่ใช้งานและผู้ทำการทดลองวัดด้วย หลังจากทำการวัดแล้วข้อมูลจะถูกเก็บในไฟล์ข้อมูลของ Microsoft Excel จากนั้นจะนำไปหาค่าความหนาแน่นโพลาไรเซชัน และค่าสนามไฟฟ้าของเฟอร์โร อิเล็กทริกสารเซรามิก PZ-PNN ต่อไป

4.1 ระบบเครื่องมือวัด

ระบบเครื่องมือวัดที่ใช้วัดวงวนฮีสเทอรีซิส อธิบายได้ดังแผนภาพการทำงานของระบบเครื่องมือวัดที่แสดงในรูปที่ 4.1



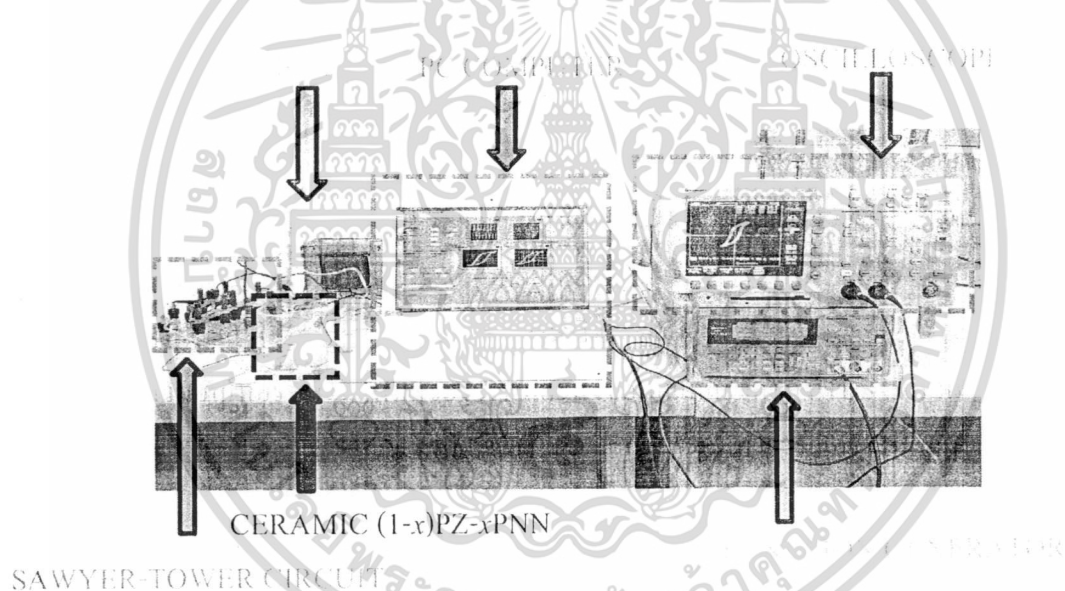
รูปที่ 4.1 แผนภาพการทำงานของระบบเครื่องมือวัดวงวนฮีสเทอรีซิส โดยใช้วงจรรซอร์-ทาวเวอร์

DUT คือ device under test หรือตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 4.1 เครื่องคอมพิวเตอร์จะควบคุมการให้แรงดัน และกำหนดค่าความถี่ของคลื่นรูปไซน์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ ซึ่งในที่นี้ใช้เครื่อง Arbitrary Function Generator รุ่น AFG320 ของบริษัท Tektronix จากนั้น สัญญาณคลื่นรูปไซน์จากเครื่อง AFG320 จะถูกขยายแรงดันให้มีค่าแรงดันที่เหมาะสม (0-2000 V) ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อป้อนให้ชิ้นงานเฟอร์โรเซรามิก สัญญาณขาออกจากวงจรซอร์-ทาวเวอร์จะถูกวัดด้วยเครื่อง Digital Oscilloscope รุ่น TDS 3012B เพื่อแสดงวงวนฮิสเทอรีซิสในโหมดของ XY และส่งข้อมูลแต่ละจุดของ TDS 3012B ที่อ่านได้ไปเก็บยังแฟ้มข้อมูล เพื่อจะทำการเขียนกราฟที่ถูกต้องอีกครั้งหนึ่งพร้อมนำการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

ในรูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของระบบการวัดวงวนฮิสเทอรีซิส ที่มีหลักการทำงานง่าย ๆ ดังที่อธิบายไว้ข้างต้น



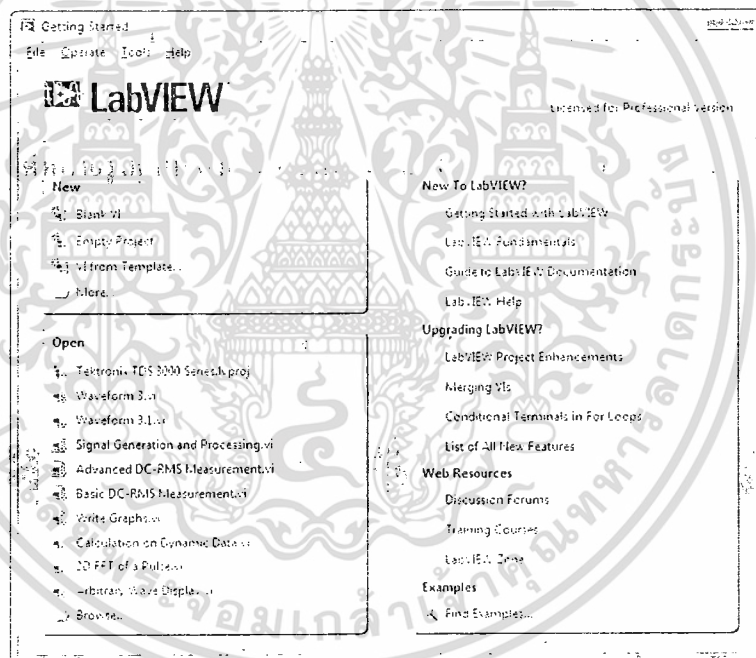
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของชุดระบบเครื่องมือวัดวงวนฮิสเทอรีซิส

สำหรับโปรแกรมที่ใช้ควบคุมเครื่องมือวัดจะใช้โปรแกรม LabVIEW ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาให้อยู่ในลักษณะของรูปภาพ ตัวโปรแกรมจะใช้ระบบคำสั่งเป็นแบบรูปภาพแทนฟังก์ชันการทำงานต่างๆ ซึ่งจะแตกต่างกับโปรแกรมควบคุมอื่นๆ ที่ทั่วไปที่จะใช้ภาษาคอมพิวเตอร์ เช่น อาจจะเป็นภาษา C หรือ ภาษา BASIC เป็นต้น ด้วยการเขียน โปรแกรมควบคุมในลักษณะของรูปภาพนี้ง่ายกว่าทั้งการเขียนและแก้ไขโปรแกรม เมื่อเปรียบเทียบกับ การเขียนด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้รูปภาพและคำอธิบายรูปภาพต่างๆ ที่นำมาใช้นั้น ได้ถูกออกแบบให้เป็นรูปแบบที่คุ้นเคยกับงานทางด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิศวกรรมและวิทยาศาสตร์เป็นอย่างดี สำหรับตัวโปรแกรมนั้นสามารถใช้การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (interface) ได้หลายรูปแบบ ดังเช่น GPIB, VXI, RS-232 และ/หรือ Internet เป็นต้น และยังสามารถเก็บค่า และทำการคำนวณได้อย่างหลากหลาย ซึ่งตัวโปรแกรมมีส่วนประกอบหลัก ดังนี้

1. front panel เพื่อให้ผู้ใช้ติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกและเป็นส่วนที่ใช้สั่ง โปรแกรมให้ทำงาน
2. block diagram เป็นเสมือนส่วนควบคุมการทำงานของโปรแกรม ซึ่งเป็นส่วนที่เราเขียนขึ้นมา
3. icon และ connector เป็นองค์ประกอบที่เรานำมาเขียน โปรแกรมให้ทำงานตามที่เราต้องการ



รูปที่ 4.3 โปรแกรม LabVIEW รุ่น 8.5 เมื่อเริ่มสั่งให้โปรแกรมทำงาน

ในรูปที่ 4.3 เป็นภาพแสดงส่วนต่างๆ เริ่มแรกของ โปรแกรมที่ต้องการใช้งาน ส่วนในรูปที่ 4.4 แสดงหน้าต่างของส่วน front panel และ block diagram ซึ่งเป็นพื้นที่ใช้สำหรับเขียน และแสดงผลของโปรแกรม ควบคุม ส่วนในรูปที่ 4.4 แสดงรูปภาพของส่วน Icon และ Connector ซึ่งองค์ประกอบที่จะนำมาเขียนโปรแกรม

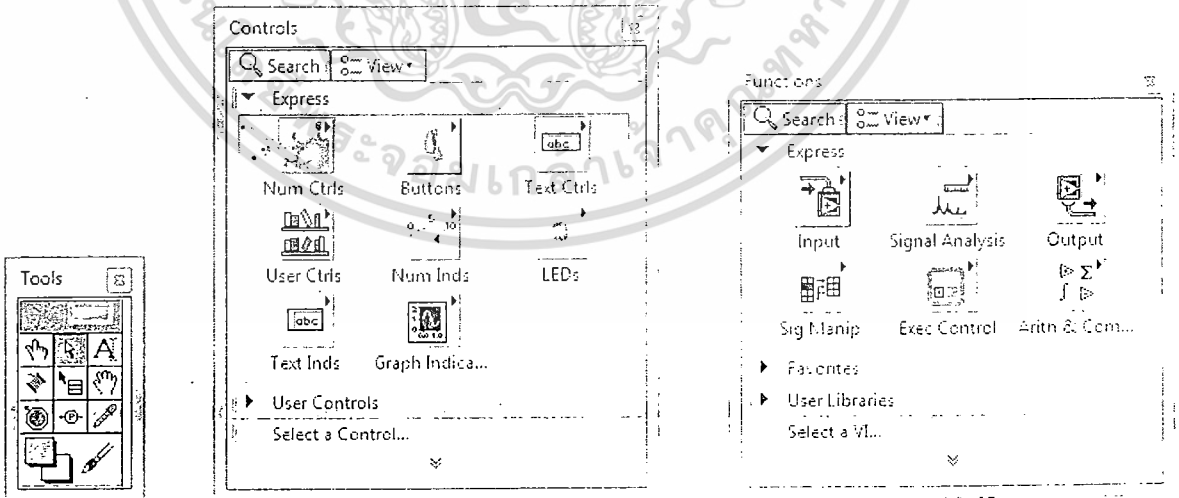
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Front Panel

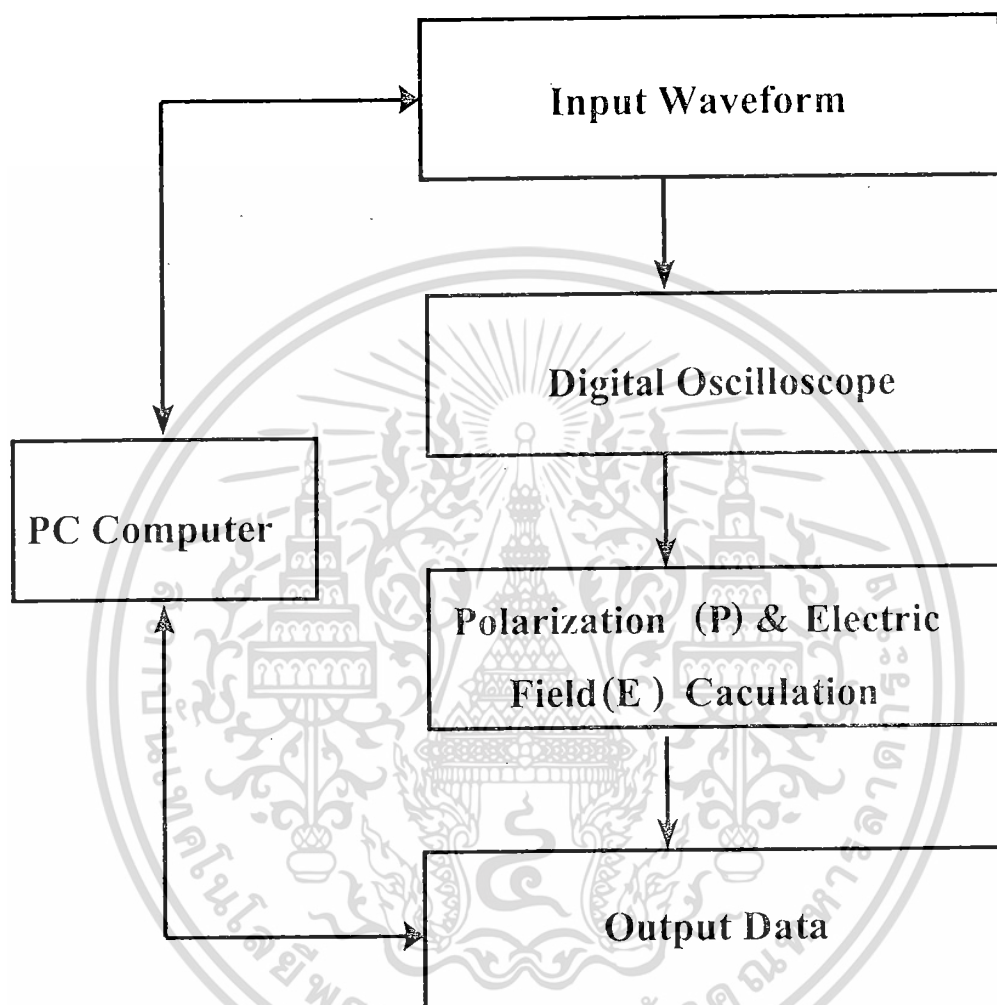
Block diagram

รูปที่ 4.4 หน้าต่างของ front panel และ block diagram ก่อนที่จะเริ่มต้นเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างส่วนประกอบต่างๆ ของ icon และ connector ที่จะนำมาเขียน โปรแกรมควบคุมการทำงาน

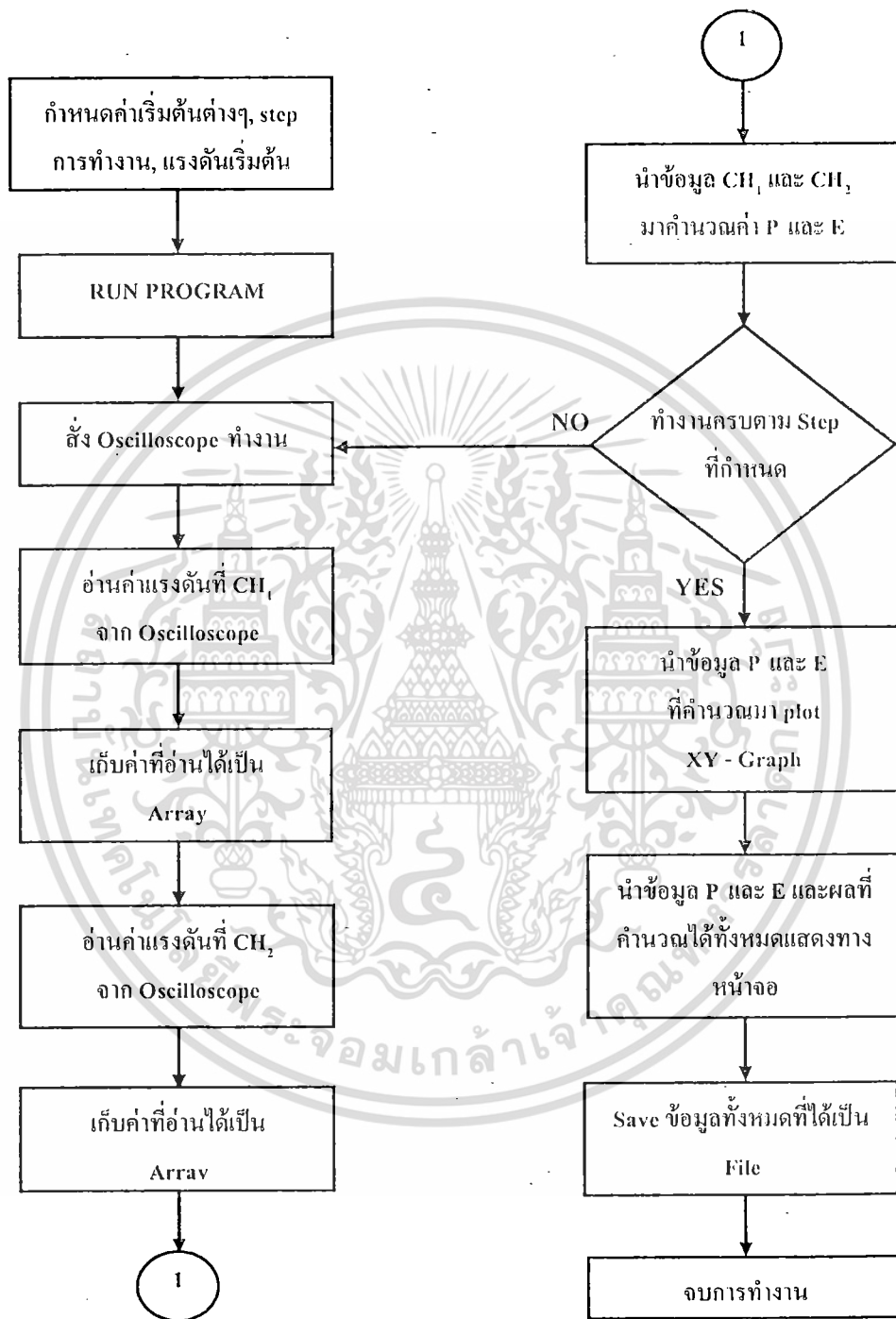
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แผนภาพการคำนวณหาค่าโพลาไรเซชัน และสนามไฟฟ้า เพื่อให้เครื่องคอมพิวเตอร์แสดงผล และเก็บข้อมูลของวงวนฮิสเทอรีซิส

ในรูปที่ 4.6 เป็นแผนภาพแสดงการคำนวณหาค่าโพลาไรเซชัน และสนามไฟฟ้า โดยใช้สมการที่ 2.13 - 2.17 (ในหัวข้อที่ 2.4.2 ของบทที่ 2) เพื่อแสดงผลของวงวนฮิสเทอรีซิส ในเทอมของโพลาไรเซชัน (แกน X) และสนามไฟฟ้า (แกน Y)

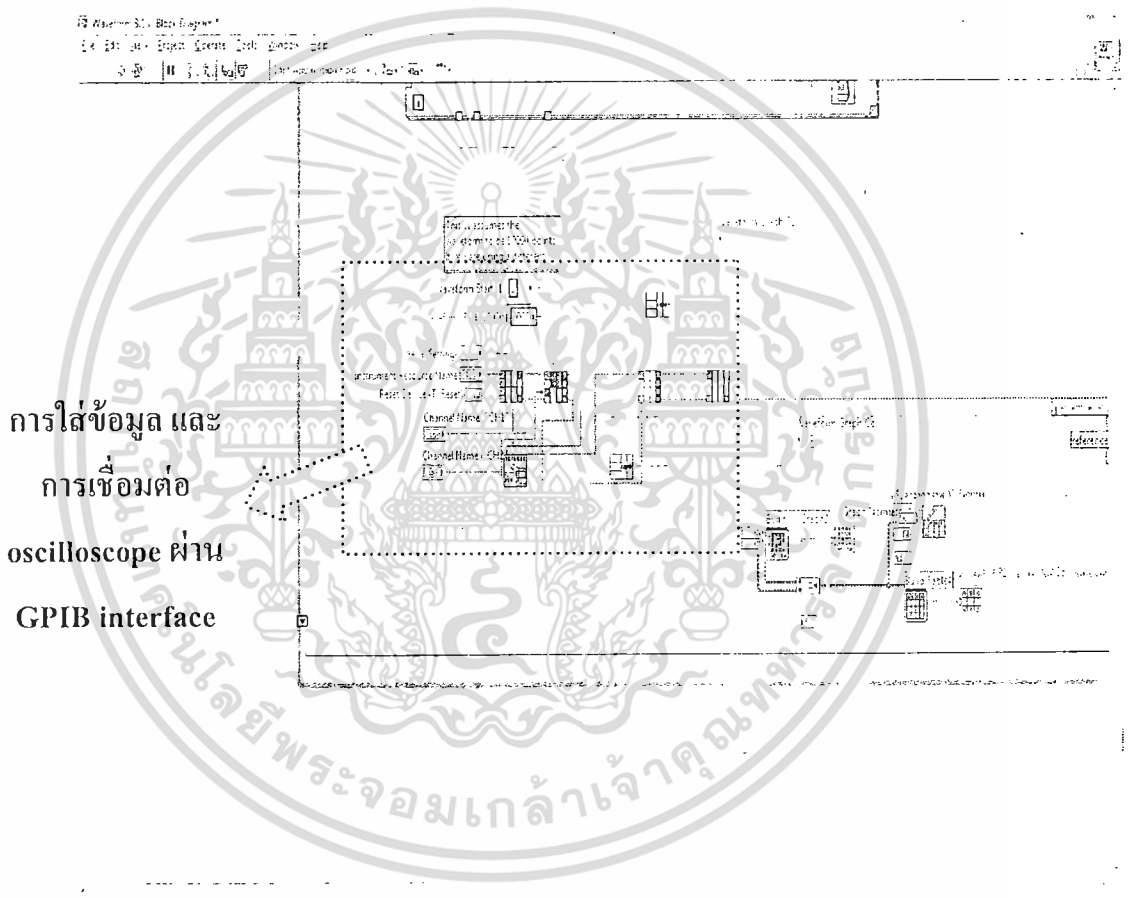
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 โฟลชาร์ทการทำงานทั้งหมดของโปรแกรมสำหรับวัดวงวนฮิสเทอรีซิส

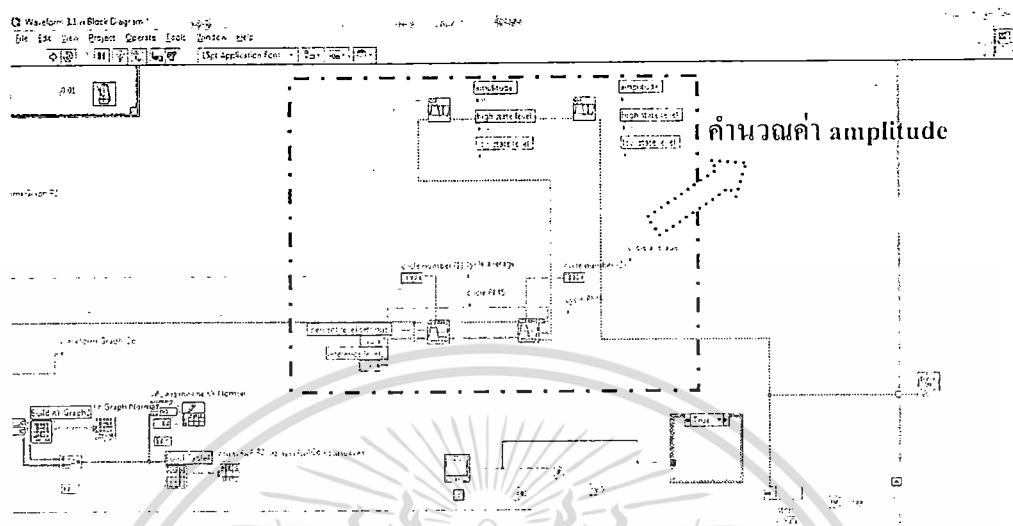
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.7 เป็นโฟลชาร์ทแสดงการทำงานทั้งหมดของโปรแกรมสำหรับวัดวงวนฮีสเทอรีซิส สำหรับรูปที่ 4.8-11 เป็นรายละเอียดในส่วนของ block diagram และในรูปที่ 2.12 แสดงส่วนของ front panel เพื่อใส่ข้อมูลที่ต้องการ และแสดงผลการวัดจากเครื่อง digital oscilloscope ของ V_{R2} และ V_{C0} รวมทั้งผลการวัดในโหมด XY เพื่อแสดงรูปกราฟวงวนฮีสเทอรีซิส

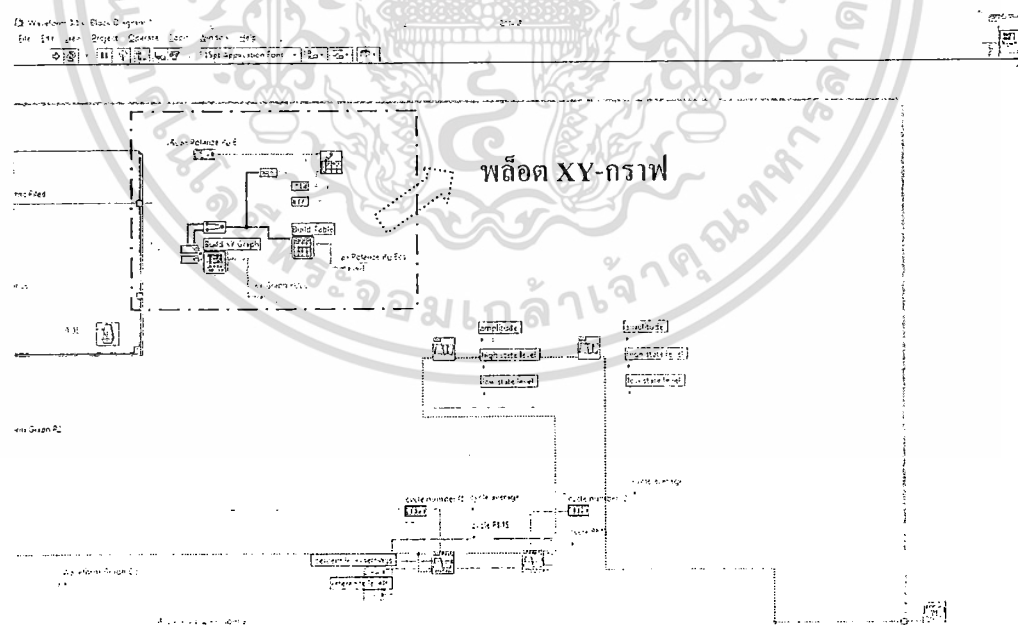


รูปที่ 4.8 ส่วนประกอบภายใน block diagram ที่แสดงการใส่ข้อมูลและการเชื่อมต่อกับ digital oscilloscope ผ่าน GPIB interface

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ส่วนประกอบภายใน block diagram ที่แสดงส่วนการคำนวณ amplitude



รูปที่ 4.10 ส่วนประกอบภายใน block diagram ที่แสดงส่วนการพล็อต XY-กราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

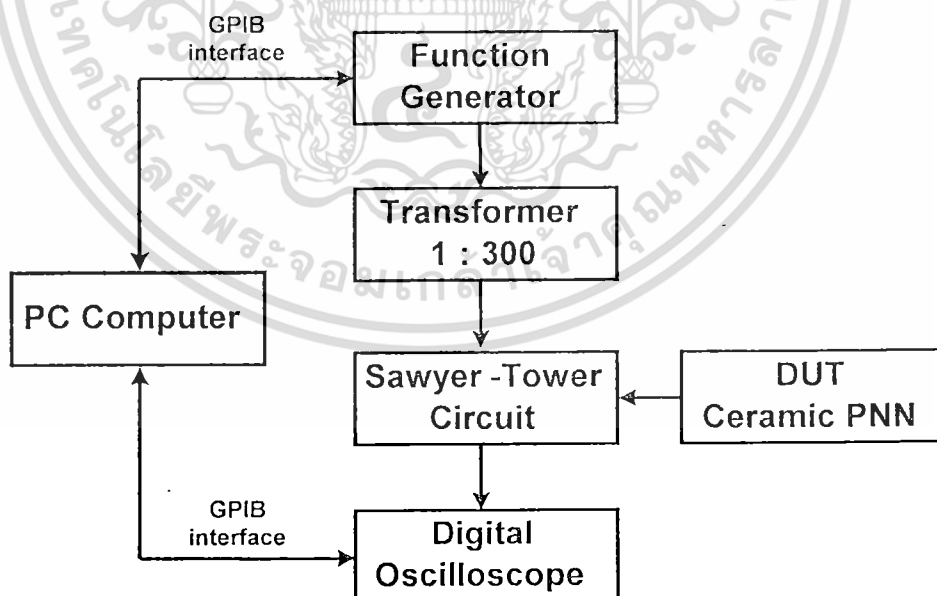
บทที่ 5

ผลการทดลอง

การวัดวงวนฮีสเทอรีซิสในบทนี้ เครื่องมือวัดจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) รุ่น 8.5 จะช่วยให้การวัดสะดวกและง่ายขึ้น นอกจากนี้โปรแกรมยังช่วยคำนวณและตรวจสอบความถูกต้องของผลการวัดที่ได้ด้วยอย่างไรก็ตามการวัดวงวนฮีสเทอรีซิสในเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก $(1-x)\text{PZ}-(x)\text{PNN}$ ในรายงานนี้ได้ใช้แรงดันไฟฟ้าสูงมากกว่า 1,000 V ดังนั้นจึงต้องเพิ่มความระมัดระวังเป็นพิเศษทั้งอุปกรณ์ที่ใช้งานและผู้ทำการทดลองวัดด้วย หลังจากทำการวัดแล้วข้อมูลจะถูกเก็บในไฟล์ข้อมูลของ Microsoft Excel จากนั้นจะนำไปหาคำนวนหาค่าโพลาริเซชัน และค่าสนามไฟฟ้าของเฟอร์โรอิเล็กทริกสารเซรามิก $(1-x)\text{PZ}-(x)\text{PNN}$ ต่อไป

5.1 ระบบเครื่องมือวัด

ระบบเครื่องมือวัดที่ใช้วัดวงวนฮีสเทอรีซิส อธิบายได้ดังแผนภาพการทำงานของระบบเครื่องมือวัดที่แสดงในรูปที่ 5.1



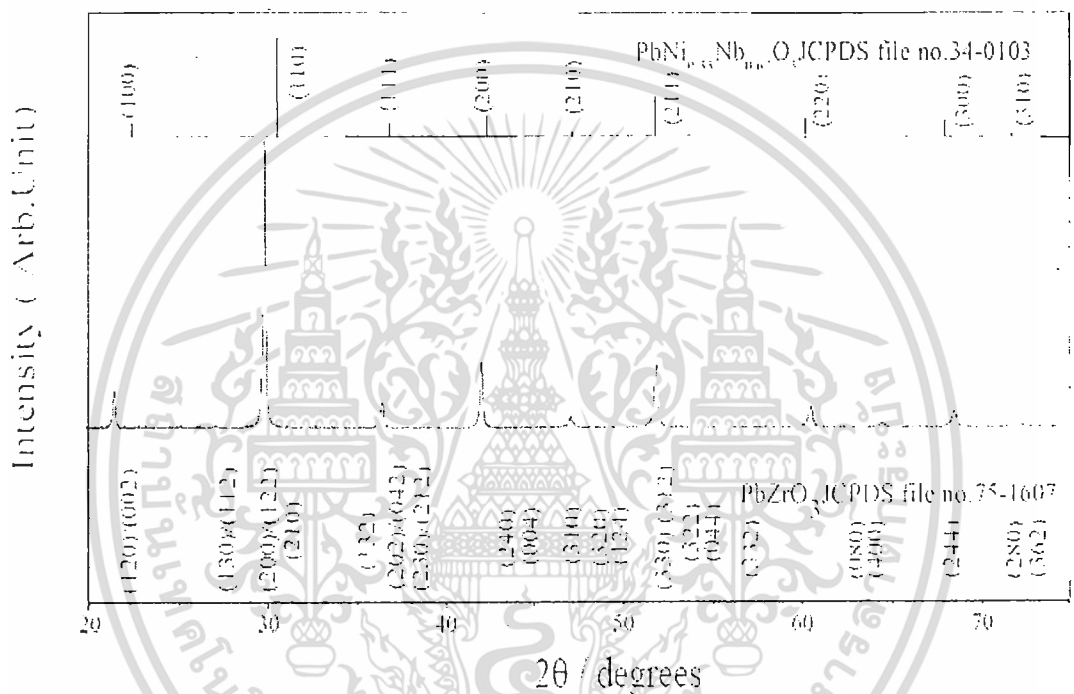
รูปที่ 5.1 แผนภาพการทำงานของระบบเครื่องมือวัดวงวนฮีสเทอรีซิส โดยใช้วงจรรซอว์-ทาวเวอร์

DUT คือ device under test หรือตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของผง PC-ZNN

เมื่อทำการเตรียมเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{PZ}-x\text{PNN}$ ที่ 0.5 นำมาตรวจสอบ โครงผลึกที่เกิดขึ้น ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงรูปการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงในระบบ $(1-x)\text{PZ}-x\text{PNN}$

จากรูปที่ 5.2 พบว่าลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{PZ}-x\text{PNN}$ ที่ $x = 0.5$ นั้นสังเกตว่าพีคที่ระนาบ (111) และ (220) นั้นมีการรวมตัวขึ้นซึ่งได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกจากรอมโบฮีดรอล ไปเป็นคิวบิกเสมือนเรียบร้อยแล้ว (โดยมีด้าน a, b และ c เท่ากันระยะห่างระหว่างระนาบมีค่าเท่ากันทำให้เมื่อตรวจวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะปรากฏเพียงพีคเดียว) สอดคล้องกับข้อมูลของสารประกอบเลดเซอร์โคเนต(PZ) ที่มีสูตรโมเลกุลเป็น PbZrO_3 ในแฟ้มข้อมูล JCPDS file no.75 – 1607 ซึ่งมีโครงสร้างแบบออร์โทโรอมบิก

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระนาบ (1-x)PZ-xPNN จะใกล้เคียงกับข้อมูลของสารประกอบเลตนิคเกิลไนโอเบต (PNN) ที่มีโมเลกุลเป็น $Pb(Ni_{0.33}Nb_{0.67})O_3$ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS file no.34 – 0103 ซึ่งมีโครงสร้างแบบคิวบิกเสมือนเป็นไปตามที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว

5.3 ผลการตรวจสอบหม้อแปลง

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองวัดความสามารถของหม้อแปลงไฟฟ้าอัตราขยาย 1 : 300 เท่า ในการขยายแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ความถี่ค่าต่างๆ โดยทำการทดลองวัดที่ความถี่ 5 , 10 , 20 , 30 , 40 และ 50 Hz

วิธีการทดลอง

1. ต่อกำหนดค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 ที่ฝั่งขาออกของหม้อแปลงเพื่อแบ่งแรงดันไม่ให้เกินความสามารถที่เครื่องออสซิลโลสโคปจะวัดได้ โดยในที่นี้เราใช้ค่า $R_1 = 6.65 \text{ M}\Omega$ และ $R_2 = 9.97 \text{ k}\Omega$
2. ต่อกำหนดเครื่องกำเนิดสัญญาณเข้าที่ฝั่งขาเข้าของหม้อแปลง และ นำสายโพรบจากช่องสัญญาณที่ 1 ของเครื่องออสซิลโลสโคป วัดสัญญาณที่ฝั่งขาเข้าของหม้อแปลง และ นำสายโพรบจากช่องสัญญาณที่ 2 ไปวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_2
3. ป้อนสัญญาณคลื่นรูปไซน์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยกำหนดความถี่ไว้ที่ 5 Hz และใช้แรงดันค่าต่างๆตั้งแต่ 1 – 10 โวลต์
4. บันทึกค่าแรงดันที่ฝั่งขาเข้าและขาออกของหม้อแปลง โดยแรงดันที่ฝั่งขาออกเราจะวัดแรงดันที่ตกคร่อม R_2 แทน และนำมาคำนวณหาแรงดันที่ฝั่งขาออก โดยใช้สมการที่ (5.1)

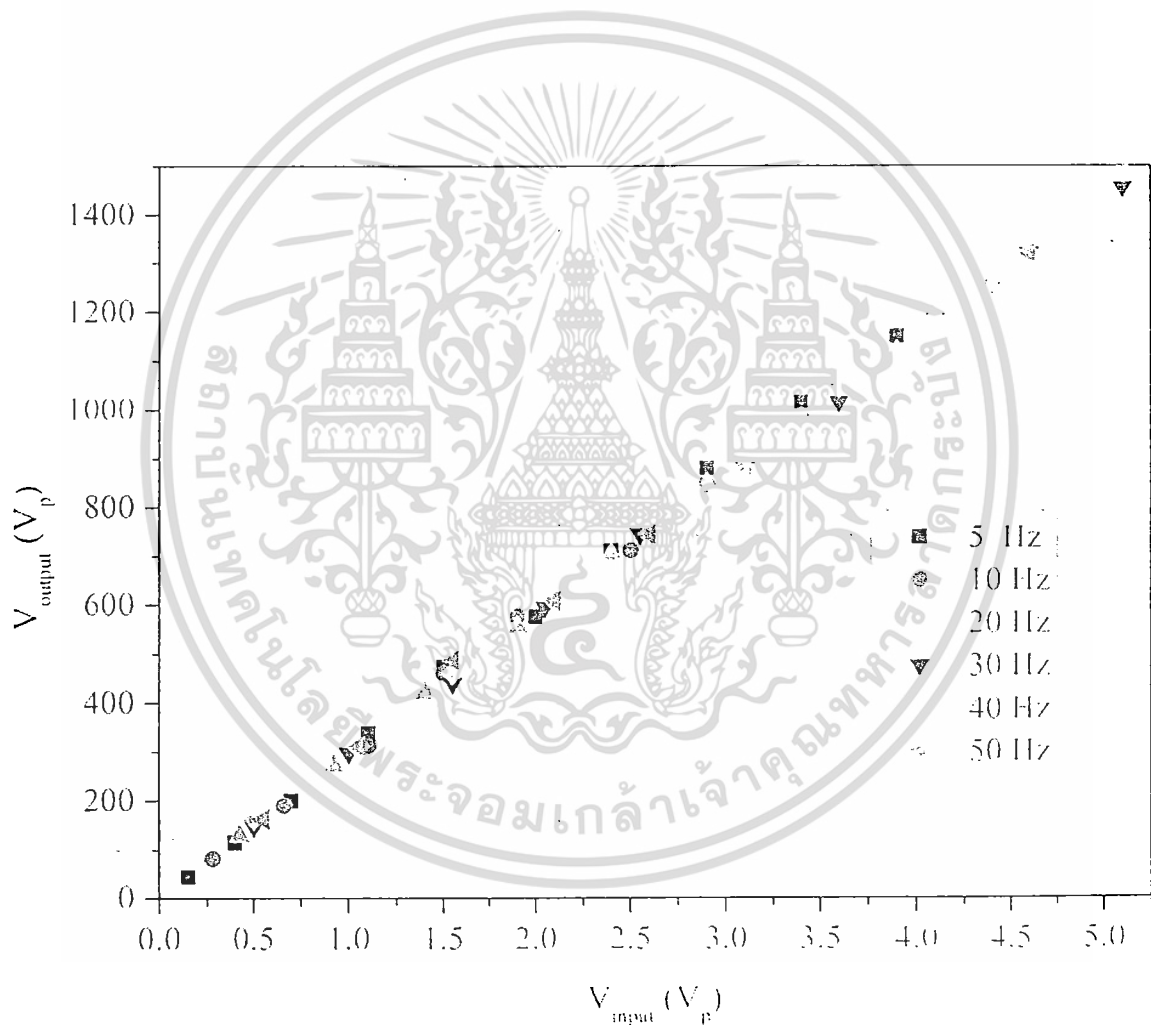
$$\begin{aligned}
 V_{\text{output}} &= I \times R_{111} \\
 &= I \times (R_1 + R_2) \\
 &= \frac{V_2}{R_2} \times (R_1 + R_2) \\
 &= \frac{(R_1 + R_2)}{R_2} \times V_2 \\
 &= \frac{(6.65 \text{ M}\Omega + 9.97 \text{ k}\Omega)}{9.97 \text{ k}\Omega} \times V_2 \\
 &= 677.031 \times V_2
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

5. ทำการทดลองเหมือนตอนแรก แต่เปลี่ยนความถี่เป็นค่าต่างๆ ได้แก่ 10 , 20 , 30 , 40 และ 50 Hz และบันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้า และ แรงดันขาออกของหม้อแปลง เพื่อสังเกตความแตกต่างจากกราฟ ของแต่ละความถี่ และเพื่อจะได้หาค่าอัตราขยายของหม้อแปลง จากสมการที่ (5.2)

$$\text{อัตราขยาย} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (5.2)$$



รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลง

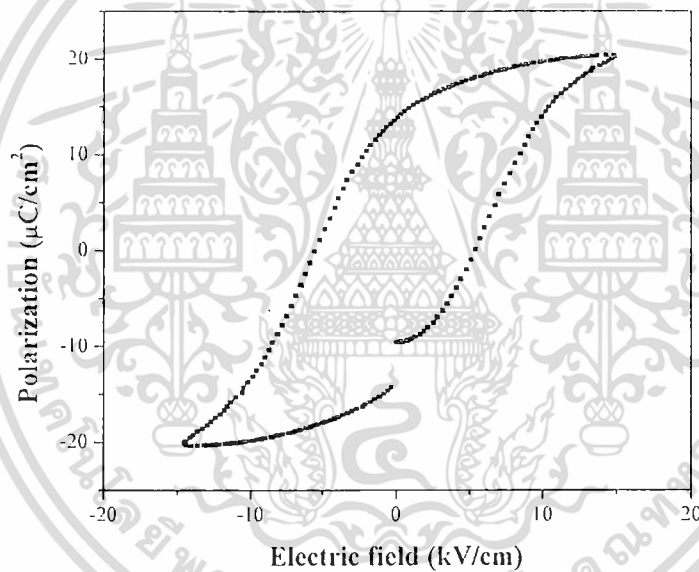
ในรูปที่ 5.3 เป็นการนำแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและแรงดันไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงที่ความถี่ค่าต่าง ๆ มาพล็อตลงในกราฟ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ เห็นได้ว่าแม้จะทดลองเปลี่ยนความถี่ค่าต่างๆแต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงจะค่อนข้างคงที่ ซึ่งเมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงได้ประมาณ 290 เท่า ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าเราสามารถให้หม้อแปลงนี้ขยายแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ได้จริง จึงนำมาใช้ร่วมกับวงจรชอว์เยอร์-ทาวเวอร์

5.4 ผลการทดสอบวงวนฮีสเทอรีซิสจากเครื่อง Trek 609E-6

การวัดค่าฮีสเทอรีซิสในการทดลองนี้เป็นกรวัดจากเครื่องที่ได้มาตรฐานโดยใช้ชุดวัดสมบัติของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยประกอบไปด้วยเครื่อง High Voltage Amplifier, RT 66 B, Computer

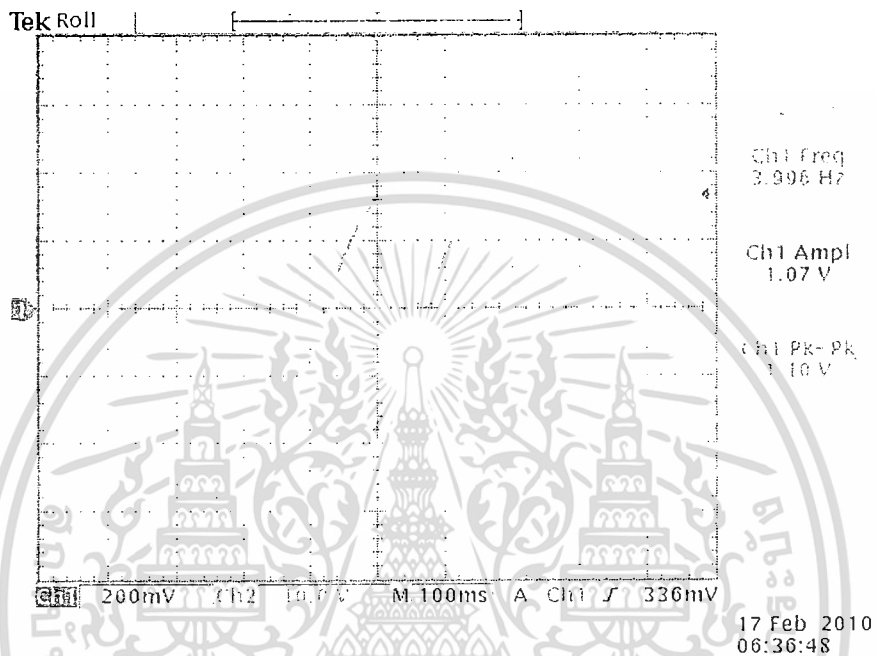


รูปที่ 5.4 วงวนฮีสเทอรีซิสที่วัดได้จากเครื่อง Trek 609E-6

จากรูปที่ 5.4 เป็นรูปวงวนฮีสเทอรีซิสที่วัดได้จากชุดวัดสมบัติของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยวัดที่ค่าแรงดัน 360 Volt หรือ ใช้สนามไฟฟ้าที่ 15 KV/cm โดยวัดค่า P_s ได้ที่ $20.23 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และค่า P_r ได้ที่ $13.76 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ และค่า E_p ได้ที่ $536.92 \text{ V}/\text{cm}$ โดยในรายงานนี้จะใช้ข้อมูลนี้ในการเปรียบเทียบเครื่องต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยก่อนการทดลองได้มีการทดสอบระบบการวัดที่ได้จัดทำขึ้นมา โดยการวัดค่า สนามไฟฟ้า และค่าโพลาริเซชัน โดยให้สนามไฟฟ้าค่าๆหนึ่ง



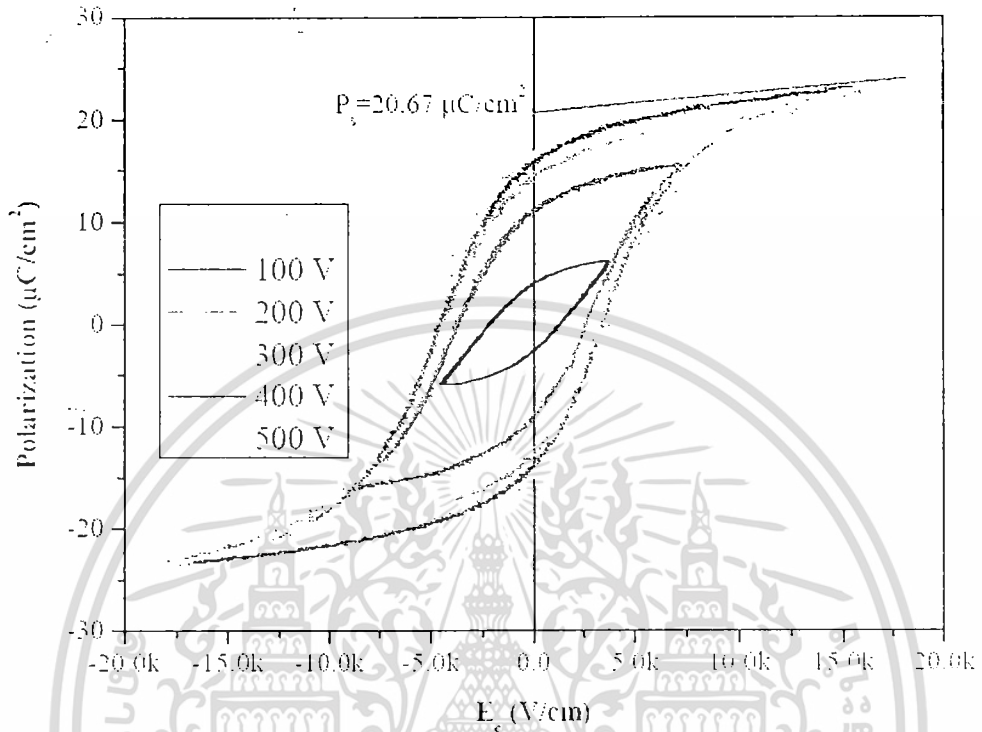
รูปที่ 5.5 กราฟวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้จาก Oscilloscope

จากรูปที่ 5. 5 เป็นรูปที่ได้จากการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสที่วัดได้จาก Oscilloscope โดยใช้วงจร ฮอว์เยอร์-ทาวเวอร์ ซึ่งลักษณะวงวนที่ได้นั้น เป็นที่น่าพอใจและตรงตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น โดยหลังจากนั้นจะทำการวัดโดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์เข้ามามีส่วนร่วมด้วย เพื่อความสะดวกและ รวดเร็ว ซึ่งการทดลองต่างๆที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์เข้าไปช่วยนั้น จะมีลักษณะและการทดลอง ดังต่อไปนี้

5.5 ผลการทดสอบแรงดันต่อวงวนฮิสเทอรีซิส

การทดลองในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาในส่วนของแรงดันที่มีผลต่อวงวนฮิสเทอรีซิส โดยใช้ ค่าตัวเก็บประจุที่ $0.1 \mu\text{F}$ และที่ความถี่ 4 Hz โดยใช้แรงดันตั้งแต่ 100 V ถึง 500 V ซึ่งเป็นแรงดันที่ทำให้ได้วงวนฮิสเทอรีซิสที่อิ่มตัวแล้ว จากนั้นดูการเปลี่ยนแปลงของลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 กราฟลักษณะวงวนที่เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

จากการทดลองจะพบว่าเมื่อป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นทำสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าสนามไฟฟ้า และค่าโพลาริเซชันมีค่าเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ทั้งค่าสนามไฟฟ้า และค่าโพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกันเมื่อลดค่าสนามไฟฟ้าลง ก็ส่งผลให้ ค่าสนามไฟฟ้าและ ค่าโพลาริเซชันนั้นมีค่าลดลงตามด้วย

หลังจากที่ได้รูป วงวนฮิสเทอรีซิสเบื้องต้นแล้วนั้น ได้ทำการวัดที่แรงดันต่างๆ แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตซ้อนกัน โดยเป็นการพล็อตที่ค่า โพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าตามที่ได้กล่าวข้างต้น ซึ่งผลที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 5.6

โดยค่าโพลาริเซชันสามารถคำนวณได้จาก $P = \frac{QV}{A}$ และสนามไฟฟ้าหาได้จาก $E = \frac{V}{D}$

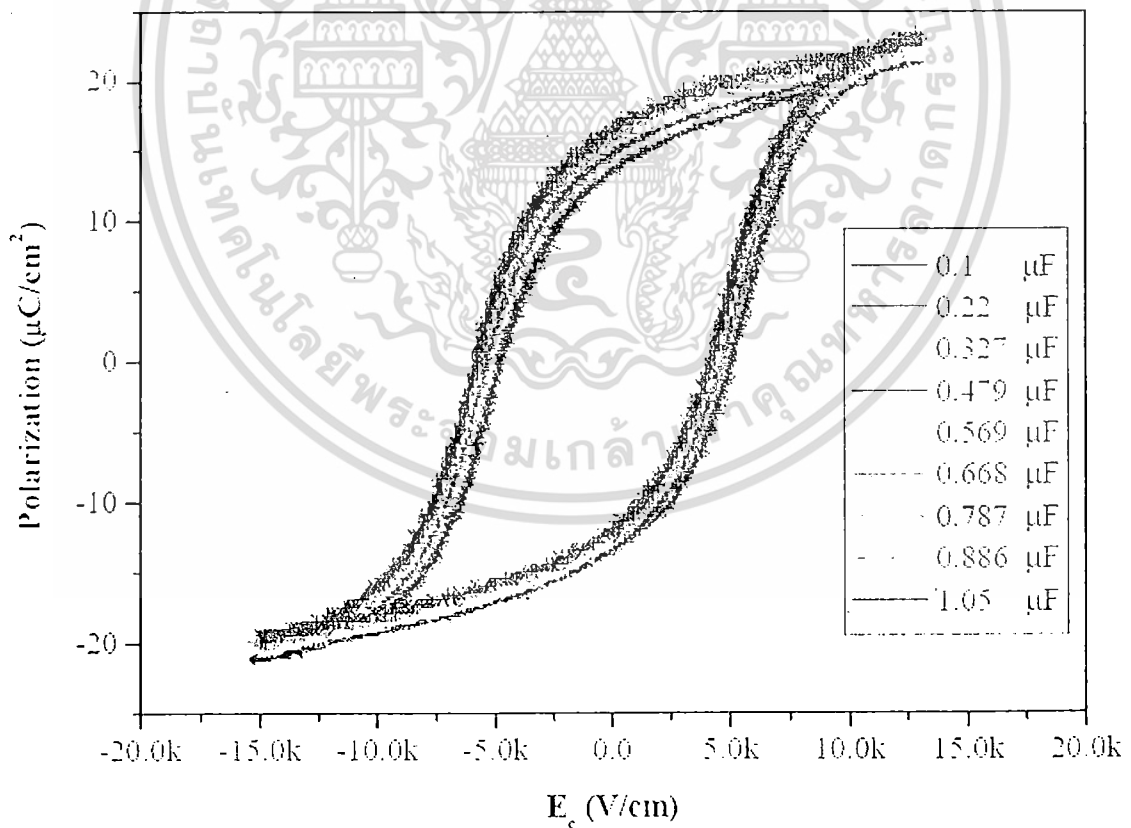
จากกราฟในรูปที่ 5.6 พบว่าค่าโพลาริเซชันมีค่าเท่ากับ $20.67 \mu\text{C}/\text{cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 ผลการทดสอบค่าตัวเก็บประจุต่อลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิส

การศึกษาในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาเพื่อดูผลกระทบของค่าตัวเก็บประจุต่อลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิส และกำหนดค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้ได้วงวนฮิสเทอรีซิสที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่นำมาเปรียบเทียบ

จากรูป 5.7 เป็นการวัดค่าตัวเก็บประจุในค่าต่างๆเพื่อดูถึงผลกระทบของลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสที่จะได้จากการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุ โดยการทดลองจะเป็นวัดที่ค่าความถี่ 4 Hz และใช้สนามไฟฟ้าที่ 15 kV/cm โดยที่ใช้ค่านี้เพราะจะนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ใช้ในการเปรียบเทียบ และจะใช้ค่าตัวเก็บประจุในการทดลองเช่นที่ 0.1, 0.22, 0.327, 0.479, 0.569, 0.668, 0.787, 0.886, และ 1.05 μF ตามลำดับ โดยผลที่ได้จะเป็นไปตามกราฟในรูปที่ 5.7 ซึ่งจากการทดลองพบว่า ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้นั้นมีลักษณะใกล้เคียงกันแต่จะไม่เท่ากัน ซึ่งกราฟนั้นจะมีลักษณะที่เลื่อนขึ้นทำให้ค่าโพลาริเซชันเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าค่าตัวเก็บประจุนั้นมีผลต่อ ค่าโพลาริเซชันและค่าสนามไฟฟ้าด้วย



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าตัวเก็บประจุต่อลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยได้มีการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง เพื่อจะทำการหาค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้ได้ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสที่ใกล้เคียงกับกราฟที่วัดได้จากชุดทดลอง Trek 609E - 6 ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 5.4 และให้มีเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งจากการคำนวณพบว่าค่าตัวเก็บประจุที่ทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างน้อยที่สุดที่ $0.668 \mu\text{F}$ โดยได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าโพลาริเซชันอยู่ที่ 2.32% จึงได้ใช้ค่าตัวเก็บประจุนั้นเป็นค่ามาตรฐานในการทดลองอื่นๆต่อไป

ตารางที่ 1 เปอร์เซนต์ความแตกต่างของค่าโพลาริเซชันเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟที่วัดได้จากชุดทดลอง Trek 609E-6 ที่สนามไฟฟ้า 15 kV/cm

ตัวเก็บประจุ (μF)	P_s (ที่ $E = 15 \text{ kV/cm}$)	% ความแตกต่างจากกราฟที่วัดได้จากเครื่อง Trek609E-6
0.1	19.63	2.97
0.22	21.13	4.48
0.327	21.10	4.30
0.479	20.91	3.25
0.569	20.95	3.56
0.668	20.70	2.32
0.787	20.75	2.57
0.886	21.10	4.3
1.05	21.10	4.3

5.7 ผลการทดสอบค่าความถี่ที่มีผลต่อวงวนฮิสเทอรีซิส

การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลกระทบจากความถี่ที่มีผลต่อค่าสนามไฟฟ้า (E_c) และค่าโพลาริเซชัน (P_s) และลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

สามารถเตรียมสารเซรามิก $(1-x)\text{PZ}-x\text{PNN}$ ที่สัดส่วน $x = 5$ และเมื่อนำมาตรวจสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ของเซรามิก PZ-PNN ที่ $x=5$ สังเกตว่าพีคที่ระนาบ (111) และ (220) นั้นมีการรวมตัวขึ้นซึ่งได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึกจากรวมโมโนคริสตัล ไปเป็นคิวบิกเสมือนเรียบร้อยสอดคล้องกับข้อมูลของสารประกอบเลดเซอร์โคเนต (PZ) ซึ่งมีโครงสร้างแบบออร์โทโรอมบิก รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{PZ}-x\text{PNN}$ จะใกล้เคียงกับข้อมูลของสารประกอบเลดนิเกิลไนโอเบต (PNN) ซึ่งมีโครงสร้างแบบคิวบิกเสมือนเป็นไปตามที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว

สามารถแบ่งทดสอบแรงดันที่มีผลต่อววนฮิสเทอรีซิสได้ คือเมื่อกำหนดค่าตัวเก็บประจุที่ $0.1 \mu\text{F}$ และที่ความถี่ 4 Hz โดยเปรียบเทียบแรงดัน จาก 100V ถึง 500V ซึ่งแรงดันสูงววนฮิสเทอรีซิสก็ยิ่งมีความสมบูรณ์มากขึ้น จะสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของววนฮิสเทอรีซิสเมื่อถึงจุดอิ่มตัวได้อย่างชัดเจน

สำหรับปัจจัยในเรื่องของค่าตัวเก็บประจุที่มีผลต่อววนฮิสเทอรีซิสนั้น แสดงให้เห็นว่า รูปววนฮิสเทอรีซิสมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยค่าตัวเก็บประจุมีผลต่อววนฮิสเทอรีซิส ซึ่งจะเกิดการเลื่อนขึ้นทำให้ค่าโพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่อเลือกค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมและมีความใกล้เคียงกับกราฟที่ทำการเปรียบเทียบ ซึ่งมีค่าตัวเก็บประจุที่ค่า $0.668 \mu\text{F}$ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 2.32%

สำหรับความถี่ที่มีผลต่อววนฮิสเทอรีซิสเมื่อทำการป้อนแรงดันที่มีค่าคงที่ และตัวเก็บประจุ $0.668 \mu\text{F}$ โดยปรับความถี่ 2Hz ถึง 5Hz จะเห็นว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นววนฮิสเทอรีซิสนั้นจะมีลักษณะที่แคบ และใกล้เคียงกับ Trek 609E-6 ที่สุด

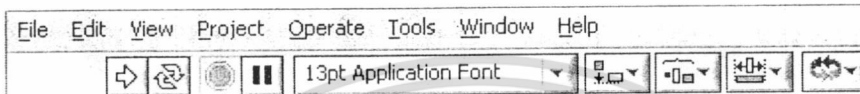
สำหรับการทดสอบลักษณะของสัญญาณที่มีผลต่อลักษณะววนฮิสเทอรีซิส ซึ่งได้ทำการป้อนสัญญาณอินพุตลักษณะ สัญญาณรูปไซน์, สัญญาณรูปแรมป์, สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม, โดยกำหนดแรงดันให้มีค่าคงที่ ตัวเก็บประจุที่ $0.668 \mu\text{F}$ และความถี่ 4Hz จะเห็นว่าสัญญาณที่ป้อนเข้าไปก็มีผลทำให้ค่าโพลาริเซชันและค่าสนามไฟฟ้าบังคับเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งสัญญาณอินพุตที่เหมาะสมคือ สัญญาณไซน์

บรรณานุกรม

- พุทธิพงษ์ เกียรติสูงชาติ และ ศุภวัฒน์ โอฬารวัฒน์กุล, กระบวนการสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์, ปริญญานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2550
- สุพัตรา วงศ์แสนใหม่, พิศณย์ มุลรัตน์, ธีระพงษ์ ศิวาวงศ์สวัสดิ์, สุพล อนันตา และ รัตติกอร์ ยิมนิรัญ, “การศึกษาสมบัติฮิสเทอรีซิสในสารเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไพเทเนต (PZT) ด้วยวงจร Sawyer-Tower”, วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร, ฉบับที่ 11(3), 2546, หน้า 21-27
- Athipong Ngamjarrojana, Supattra Wongsanmai, Rungnapa Tipakontitukul, Supon Ananta, and Rattikom Yimnirun, “Effect of Uniaxial Stress on Hysteresis Properties of 0.1PMN-0.9PZT Ceramic”, Chiang Mai University Journal, Vol. 4(2), 2005, pp. 129-135
- R. Bouregba, B. Vilquin, G. Le Rhun and G. Poullain, “Sawyer-Tower Hysteresis Measurements on Micro Sized Pb(Zr,Ti)O₃ Capacitors”, Review of Scientific Instruments, Vol. 74, No. 10, 2003, pp.4429-4435
- Larry E. Mosley and Jason S. Schrader, “Hysteresis Measurements of Multi-Layer Ceramic Capacitors Using a Sawyer-Tower Circuit”, http://ecadigitallibrary.com/pdf/CARTRUSA07/5_3309.pdf, pp.309-319
- Joe T Evans, JR., **Measuring Ferroelectric Hysteresis Using a Sawyer-Tower Circuit**, Application Note AN0701-RTI, Radiant Technology, Inc., 2007, pp. 1-13

ภาคผนวก

การใช้โปรแกรม LabVIEW ในการวัดวงวนฮีสเทอรีซิส

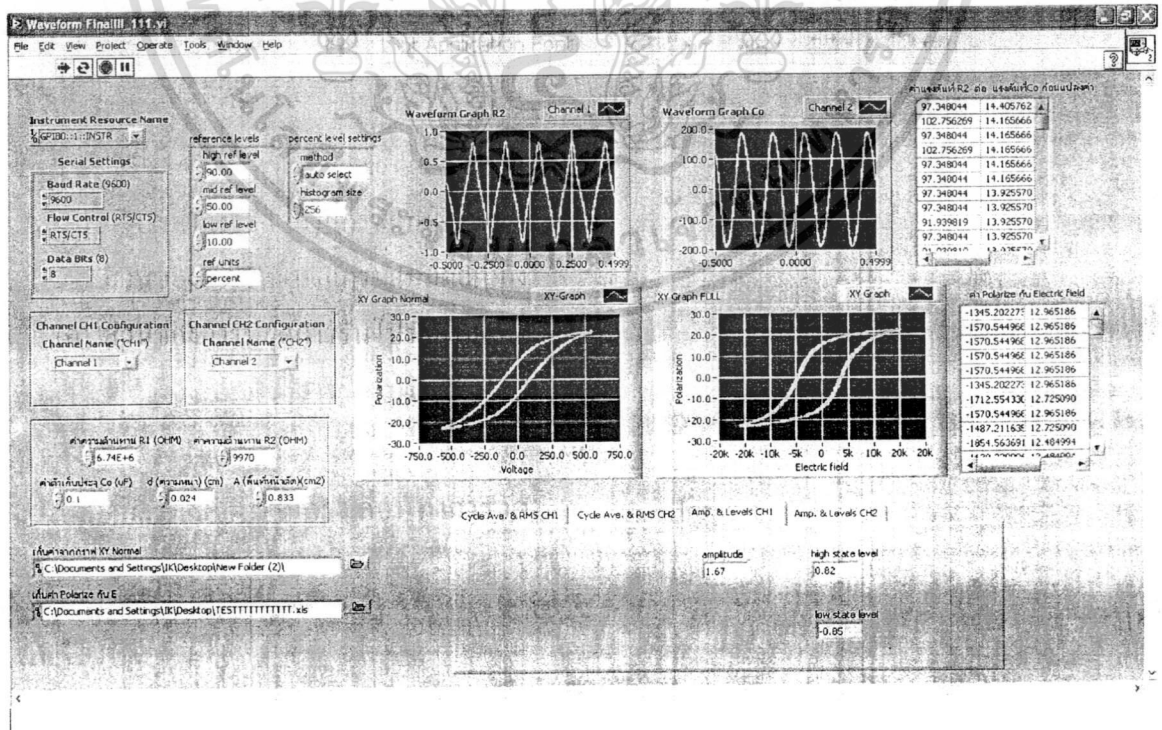


(ก) (ข) (ค) (ง)

ส่วนของ panel ของโปรแกรม LabVIEW

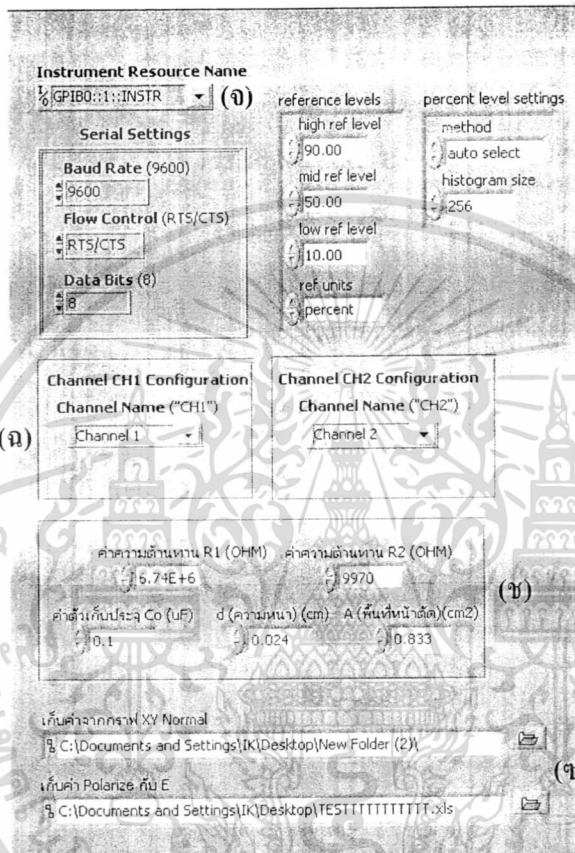
- (ก) ส่วนของการรันโปรแกรมแบบครั้งเดียว
- (ข) ส่วนของการรันโปรแกรมแบบต่อเนื่อง
- (ค) ส่วนของการหยุดการรันโปรแกรม
- (ง) ส่วนของการหยุดการรันโปรแกรมชั่วคราว

ส่วนของการตั้งค่าโปรแกรมก่อนทำการวัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

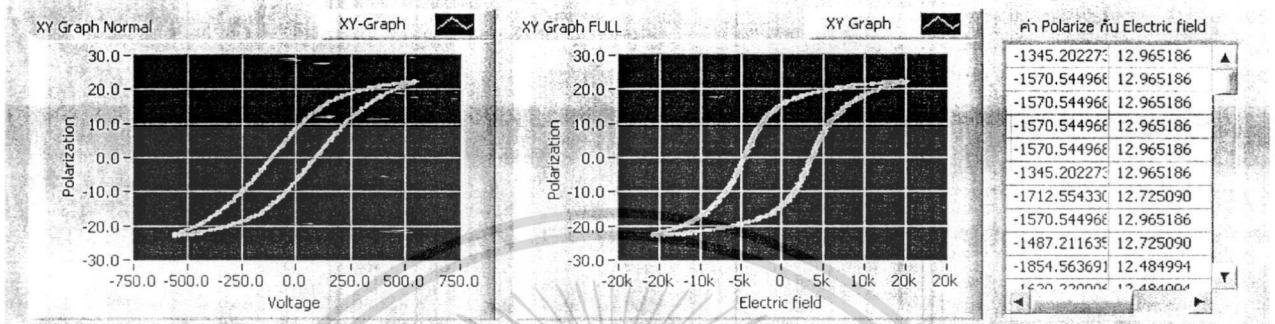
ส่วนของ pannel ของการตั้งค่า



- (๑) ส่วนของการตั้งค่า GPIB ให้เครื่องคอมพิวเตอร์ติดต่อกับอุปกรณ์วัดได้
- (๒) ส่วนของการตั้งค่าเพื่อรับค่าจาก oscilloscope
- (๓) ส่วนของการตั้งค่าของสารเซรามิกที่ใช้วัดค่าต่างๆ
- (๔) ส่วนของการบันทึกค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของค่าที่ได้จากโปรแกรม



(ณ)

(ญ)

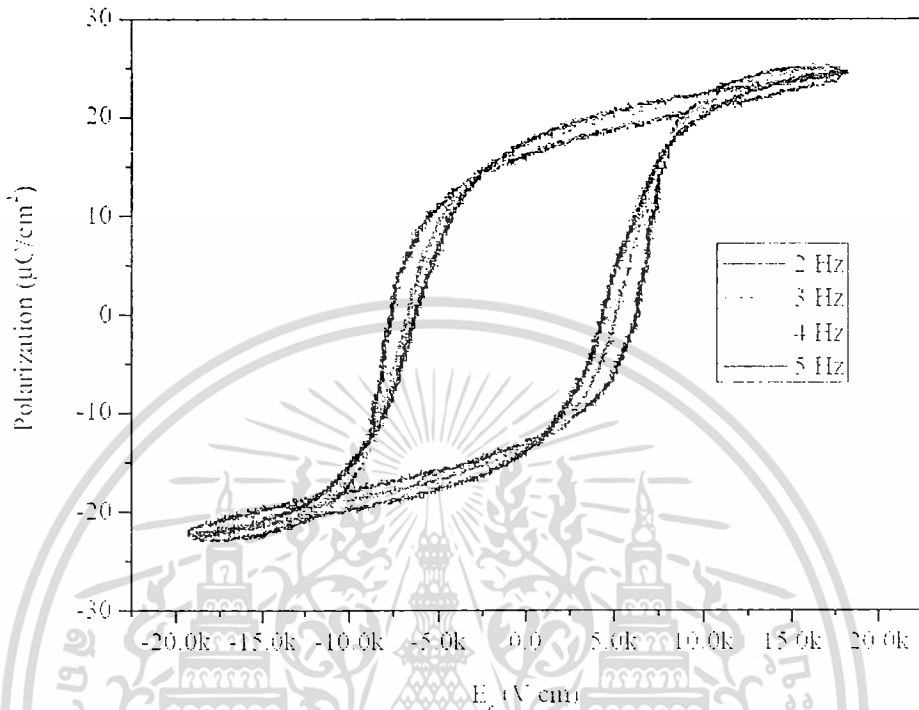
- (ณ) ส่วนของกราฟโพลาริเซชันที่ได้
- (ญ) ส่วนของค่าโพลาริเซชันและค่าสนามไฟฟ้าที่ได้
- (ฎ) ส่วนของค่าโพลาริเซชันและค่าสนามไฟฟ้าที่บันทึกค่าได้ในโปรแกรม MS Excel

The screenshot shows a Microsoft Excel window with a data table. The table has two columns: 'ค่าสนามไฟฟ้า' (Electric field) in column A and 'ค่าโพลาริเซชัน' (Polarization) in column B. The data rows are as follows:

	A	B
1	ค่าสนามไฟฟ้า	ค่าโพลาริเซชัน
2	6571.515	7.443
3	6371.515	7.923
4	6571.515	7.443
5	6371.515	7.923
6	6371.515	7.923
7	6171.515	8.403
8	7038.516	7.923
9	6371.515	7.923
10	6838.516	8.403
11	6838.516	8.403
12	6838.516	8.403

(ฎ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

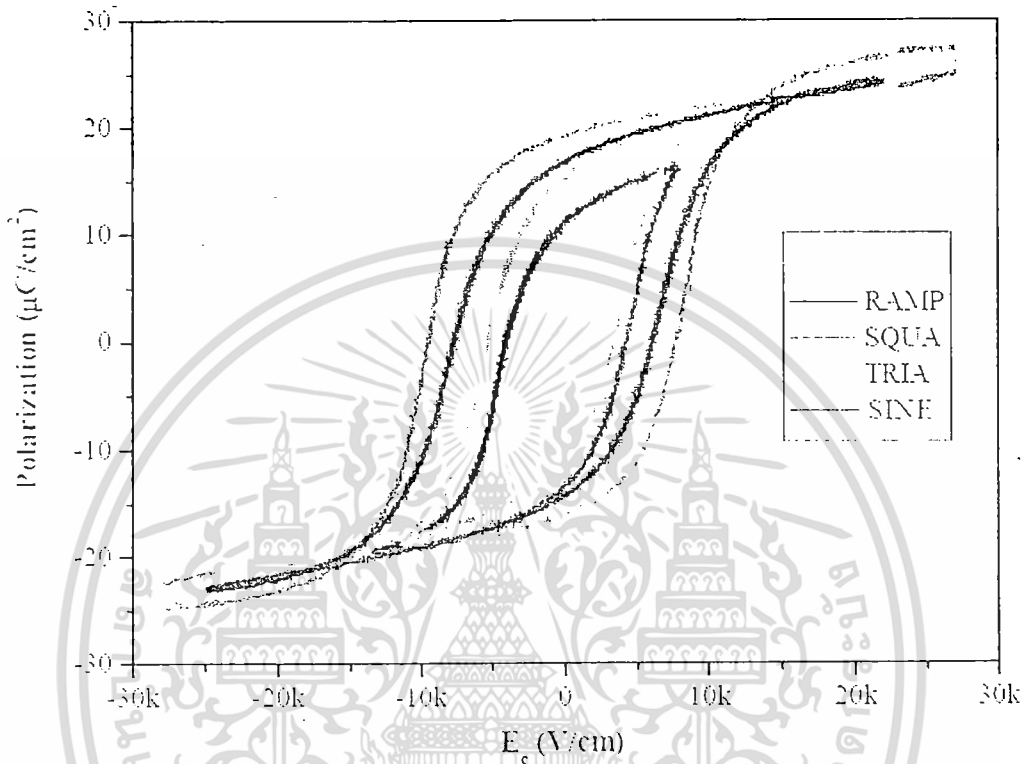


รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบผลของความถี่ต่อลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิส

จากรูป 5.8 เป็นการวัดค่าความถี่ (f) เพื่อศึกษาผลของความถี่ที่มีผลต่อวงวนฮิสเทอรีซิส โดยเป็นการใช้แรงดันคงที่ และใช้ค่าตัวเก็บประจุที่ $0.668 \mu\text{F}$ จากนั้นปรับค่าความถี่จาก 2 Hz เพิ่มขึ้นถึง 5 Hz เนื่องจากเกิดปัญหาที่หม้อแปลงทำให้สามารถใช้ความถี่ได้แค่ 5 Hz ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความถี่ค่าสนามไฟฟ้า (E_0) ค่าโพลาริเซชัน (P) จะมีค่าลดลง และเกิดข้อสังเกตขึ้นเนื่องจากเมื่อทำการทดลองลดความถี่ที่ป้อนเข้าสู่สาร จะสังเกตเห็นได้ว่าวงวนฮิสเทอรีซิส มีการขยายตัวมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสารเกิดการกลับขั้วของโดเมนได้ดีขึ้น

5.8 ผลการทดสอบลักษณะของสัญญาณที่มีผลต่อวงวนฮิสเทอรีซิส

ในส่วนสุดท้ายนี้ จะเป็นการทดลองเพื่อดูว่าลักษณะสัญญาณของแหล่งจ่ายนั้นจะมีผลอย่างไรต่อลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสบ้าง โดยในการทดลองจะเป็นการเปลี่ยนสัญญาณอินพุตจากคลื่นรูปไซน์ (sine wave) เป็นลักษณะอื่นๆ เช่น คลื่นรูปแรมป์ (ramp wave), คลื่นรูปสี่เหลี่ยม (square wave) เป็นต้น โดยเป็นการใช้ค่าแรงดันคงที่ และใช้ค่าตัวเก็บประจุที่ $0.668 \mu\text{F}$ และใช้ความถี่ที่ 4 Hz



รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบผลของลักษณะสัญญาณต่อลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิส

จากการทดลองพบว่า เมื่อเปลี่ยนสัญญาณจากคลื่นรูปไซน์ เป็นคลื่นสัญญาณรูปอื่น ๆ นั้น ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้ นั้น มีความแตกต่างกันออกไปมาก โดยค่าโพลาริเซชัน และค่าสนามไฟฟ้าที่ได้ นั้น มีค่าแตกต่างกันมาก จึงอาจกล่าวได้ว่าไม่สามารถที่จะใช้สัญญาณอินพุตเป็นอะไรก็ได้ เนื่องจากค่าที่ได้ นั้น ไม่ใกล้เคียงกันเลย ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์