

ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของสารบิส്മัทเฟอร์ไรท์  
-แบบเรียบไมโทเทเนต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2556

**EFFECT OF TEMPERATURE ON FERROELECTRIC  
PROPERTIES OF BISMUTH FERRITE-BARIUM  
TITANATE**



**Yuthapong Sratta**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2013**

## ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของสารบีสมัทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

\_\_\_\_\_

(รศ. ดร.กิตติ อัครกิจมงคล)

ประธานกรรมการ

\_\_\_\_\_

(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

\_\_\_\_\_

(ผศ. ดร.สุเขตต์ พจน์ประไพ)

กรรมการ

\_\_\_\_\_

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไฉย)

กรรมการ

\_\_\_\_\_

(รศ. ดร.รัตติกกร ยี่มนิรัฐ)

กรรมการ

\_\_\_\_\_

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิ๋จำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

\_\_\_\_\_

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ยุทธพงษ์ ศรีทธา : ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของสารบิสมัทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต (EFFECT OF TEMPERATURE ON FERROELECTRIC PROPERTIES OF BISMUTH FERRITE-BARIUM TITANATE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี, 142 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมัทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต (BF-BT) โดยทำการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับวัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูง เซรามิก BF-BT ถูกทดสอบภายใต้สนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 200 °C โดยจ่ายสนามไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงานเซรามิกรูปคลื่นไซน์ขนาด 52 kV/cm ความถี่ 50 Hz สำหรับการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสและ 50 mHz สำหรับการวัดวงวนรูปปีกผีเสื้อ ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิส วงวนรูปปีกผีเสื้อและสมบัติไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่าง ๆ ผลการทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT ซึ่งประกอบด้วยค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทั้งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงประจุอิสระและอิเล็กตรอนภายในเซรามิก BF-BT ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นทำให้สามารถเคลื่อนที่และตอบสนองต่อค่าความถี่ได้ดีขึ้น ส่งผลให้ทั้งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้น สำหรับผลการวัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกซึ่งประกอบด้วยการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสและวงวนรูปปีกผีเสื้อ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทั้งค่าโพลาริเซชันและค่าความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

YUTHAPONG SRATTA : EFFECT OF TEMPERATURE ON  
FERROELECTRIC PROPERTIES OF BISMUTH FERRITE-BARIUM  
TITANATE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. BOONRUANG MARUNGSRI,  
D.ENG., 142 PP.

FERROELECTRIC PROPERTIES/ BISMUTH FERRITE-BARIUM TITANATE/  
TEMPERATURE

In this thesis, the effect of temperature on ferroelectric properties of bismuth ferrite-barium titanate (BF-BT) ceramic has been studied. The custom-built ferroelectric testing machine was used to measure the ferroelectric properties at high temperature. The ferroelectric properties of BF-BT ceramic were investigated under an electric field at various temperatures from room temperature to 200°C. The electric field (sine wave) of 52 kV/cm at 50 Hz was applied to the ceramic sample. The effect of temperature on these properties was represented as the change of polarization hysteresis loop, butterfly loop and dielectric properties with different temperatures. It was found that the permittivity and dielectric loss of the sample increased with increasing temperature. Free charge and mobile ions within BF-BT ceramic had sufficient energy leading to easily move at high temperature. Moreover, it was found that polarization and strain increased with an increase of temperature.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

Co Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างยิ่ง และให้ความรู้ด้านวิชาการมาโดยตลอด รวมถึงการเป็นแบบอย่างที่ดีในทุก ๆ ด้านให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา อีกทั้งยังได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุตเชตต์ พจน์ประไพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางอันมีประโยชน์ให้แก่ผู้วิจัย และช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา อีกทั้งยังได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกง ยี่มนิรัฐ อาจารย์สาขาวิชาฟิสิกส์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณ คุณ ประพันธ์ คัทวี และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานของข้าพเจ้า และขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ยุทธพงษ์ ศรีทธา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ณ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b> .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น .....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
1.6 การจัดรูปแบบรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์ .....	3
<b>2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.3 สรุป .....	16
<b>3 ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง</b> .....	17
3.1 บทนำ.....	18
3.2 การนำวัสดุเม็ดโพลีโพรพิลีนไปใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่มีความจุสูง.....	18
3.3 วัสดุเม็ดโพลีโพรพิลีนและปรากฏการณ์ไดอิเล็กทริก.....	21
3.4 ประวัติของวัสดุเม็ดโพลีโพรพิลีน.....	23
3.5 เซรามิกบิสแมทเทอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต .....	26
3.6 สมบัติไดอิเล็กทริก .....	29

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6.1	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ .....	29
3.6.2	ความคงทนได้อิเล็กทริก.....	32
3.6.3	ค่าการสูญเสียได้อิเล็กทริก .....	32
3.7	เฟอร์โรแมกเนติก.....	33
3.7.1	โดเมนแม่เหล็ก.....	35
3.7.2	วงวนฮีสเทอรีซิส B-H.....	37
3.8	เฟอร์โรอิเล็กทริก .....	39
3.8.1	การสลับทิศทางของโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก.....	40
3.8.2	วงวนโพลาริเซชันฮีสเทอรีซิส.....	40
3.8.2.1	วงวนโพลาริเซชันฮีสเทอรีซิส.....	42
3.8.2.2	วงจร Sawyer-Tower .....	43
3.8.3	วงวนความเครียดฮีสเทอรีซิสหรือวงวนรูปปีกผีเสื้อ .....	47
3.8.3.1	การวัดวงวนความเครียดฮีสเทอรีซิสหรือวงวนรูปปีกผีเสื้อ .....	48
3.8.3.2	หม้อแปลงผลต่างแบบแปรเชิงเส้น .....	52
3.8.3.3	หม้อแปลงผลต่างแบบแปรเชิงเส้น .....	55
3.8.3.4	ข้อดีของ LVDT .....	55
3.9	สมมติฐาน.....	56
3.10	สรุป .....	56
4	วิธีดำเนินการวิจัย.....	58
4.1	บทนำ.....	58
4.2	การสังเคราะห์เซรามิก BF-BT .....	58
4.2.1	สารเคมี.....	58
4.2.2	อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	59
4.2.3	การเตรียมสาร .....	61
4.2.4	การบดผสม .....	61
4.2.5	การเผาแคลไซน์ .....	62
4.2.6	การอัดขึ้นรูป .....	63



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.7	การเผาซินเตอร์ .....	64
4.3	การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบ.....	65
4.3.1	อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	66
4.3.2	การขัดผิว.....	67
4.3.3	การล้างทำความสะอาด .....	68
4.3.4	การอบอ่อน .....	69
4.3.5	การทำขั้วไฟฟ้า .....	69
4.4	การสร้างชุดทดสอบเพื่อวัดวงวนฮิสเทอรีซิสและวงวนรูปปิกฟีลล์ของชิ้นงาน เซรามิกที่อุณหภูมิสูง .....	70
4.4.1	ชุดจ่ายสนามไฟฟ้าและแสดงผล .....	73
4.4.2	ตัวจับยึดชิ้นงาน .....	73
4.4.3	เครื่องควบคุมอุณหภูมิ.....	75
4.5	การทดสอบ .....	77
4.5.1	การตรวจสอบเฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน ของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	77
4.5.2	การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก.....	78
4.5.3	การวัดวงวนฮิสเทอรีซิสเทียบกับอุณหภูมิ.....	79
4.5.4	การวัดวงวนรูปปิกฟีลล์เทียบกับอุณหภูมิ.....	81
4.6	สรุป .....	83
5	ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	84
5.1	บทนำ.....	84
5.2	ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมาทเฟอร์ไรท์- แบเรียมไทเทเนตเทียบกับอุณหภูมิ.....	84
5.2.1	เปรียบเทียบผลการวัดฮิสเทอรีซิส .....	85
5.2.2	เปรียบเทียบผลการวัดวงวนรูปปิกฟีลล์ .....	87
5.3	ศึกษาสมบัติของเซรามิกบิสมาทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต .....	89

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.1	การตรวจสอบเฟสองค์ประกอบของเซรามิก BF-BT ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	89
5.3.1.1	เฟสองค์ประกอบของเซรามิก BF-BT หลังจากการแคลไซน์ .....	89
5.3.1.2	เฟสองค์ประกอบของเซรามิก BF-BT หลังจากเผาซินเตอร์.....	90
5.3.2	สมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT .....	91
5.3.2.1	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ .....	92
5.3.2.2	ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก .....	94
5.4	ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกบิสเมทเพอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต.....	96
5.4.1	สมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ .....	97
5.4.2	วงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ .....	99
5.4.3	วงวนรูปปีกผีเสื้อของเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ .....	104
5.5	สรุป .....	112
6	สรุปและข้อเสนอแนะ .....	114
6.1	สรุป .....	114
6.2	ข้อเสนอแนะ .....	116
	รายการอ้างอิง .....	117
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. การคำนวณหาส่วนผสมของเซรามิก BF-BT .....	121
	ภาคผนวก ข. ภาพแบบร่างตัวจับยึดชิ้นงานและฐาน .....	124
	ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	134
	ประวัติผู้เขียน .....	142

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
3.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของสารบางชนิด .....	32
4.1 ปริมาณสารเคมี.....	61
5.1 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงวนฮีสเทอรีซิส.....	86
5.2 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงวนรูปปีกผีเสื้อ.....	88
5.3 ผลของความถี่ต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก .....	96
5.4 การเปรียบเทียบค่าโพลาริเซชันคงค้างจากการทดลองและการคำนวณ .....	102
5.5 การเปรียบเทียบค่าความเครียดคงค้างจากการทดลองและการคำนวณ .....	108
5.6 การเปรียบเทียบค่าความเครียดสูงสุดจากการทดลองและการคำนวณ .....	110
5.7 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริกจากการทดลองและการคำนวณ .....	112
ก.1 ปริมาณสารเคมี.....	124

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ค่า $E_c^{2/3}$ และ $P_r$ เทียบกับอุณหภูมิ ..... 11
2.2	ผลของอุณหภูมิต่อวงวนรูปปีกผีเสื้อตัวของ PZT แบบฟิล์มบาง ..... 12
2.3	ผลของอุณหภูมิต่อวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิกบิสมาท์ไทเทเนตที่ถูกเจือด้วยนีโอไดเมียม (BNdT:0.75)..... 13
2.4	ผลของอุณหภูมิต่อโพลาริเซชันตกค้างและสนามไฟฟ้าลบค้าง ..... 14
2.5	วงวนเฟอร์โรอิเล็กทริกฮีสเทอรีซิสของสารบิสมาท์เฟโรไทต์แบบฟิล์มบาง วัดที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 90 K ..... 15
3.1	หัวอ่านแบบแมกนีโตอิเล็กทริก ..... 19
3.2	รูปคลื่นแรงดันขาออกต่าง ๆ (เส้นโค้งบน) ของแผ่นฟิล์มบางที่เกิดจากฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันที่ความถี่ 1 kHz เป็นการจำลองสัญญาณแรงดันขาออกจากส่วนของแถบบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็กเมื่อใช้หัวอ่านแบบแมกนีโตอิเล็กทริก บิต $b_k$ ที่ถูกเขียนโดยกระแส $I_w$ ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กบนหัวอ่าน รวมถึงการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าในรูปแบบเดียวกันกับบิต..... 20
3.3	ชนิดของสมบัติเฟอร์โรอิก การถูกกระตุ้นโดยสนามภายนอกและการตอบสนอง ..... 22
3.4	รูปแบบการเชื่อมต่อของวัสดุผสม (ก) 0-3 อนุภาคในพอลิเมอร์ (ข) 2-2 คอมโพสิตแบบแผ่น และ (ค) 1-3 คอมโพสิตแบบแท่ง ..... 25
3.5	วงวนโพลาริเซชันฮีสเทอรีซิสของเซรามิก BF บริสุทธิ์ ..... 27
3.6	(ก) วงวนฮีสเทอรีซิส $B-H$ (ข) วงวนฮีสเทอรีซิส $P-E$ ของเซรามิก $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{BaTiO}_3$ โดยที่ $x = 0.1-0.5$ ..... 28
3.7	ตัวเก็บประจุแผ่นขนานเมื่อไม่มีสาร ไดอิเล็กทริก ..... 30
3.8	สภาวะเฟอร์โรแมกเนติก ..... 34
3.9	โดเมนและผนังโดเมนแม่เหล็ก ..... 35
3.10	ลักษณะของโดเมนแม่เหล็กในอุดมคติ (ก) โดเมนที่มีการจัดวางตัวในทิศทางตรงข้ามกัน และ (ข) การจัดวางตัวของบรรดาโดเมนจนครบรอบ ..... 36
3.11	การเปลี่ยนแปลงทิศทางของสปินภายในบริเวณผนังพลังงาน ..... 36

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12	วงวนฮีสเทอรีซิส $B-H$ ของสารแม่เหล็ก..... 37
3.13	การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของค่า $B$ ในช่วงเริ่มต้นซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน ..... 38
3.14	การเคลื่อนที่ของผนังโดเมนขณะเกิดวงวนฮีสเทอรีซิส..... 39
3.15	เมื่อให้สนามไฟฟ้าทำให้เกิด (ก) การจัดเรียงตัวของโพลาริเซชันแบบเกิดขึ้นเอง $P_s$ ใน ยูนิทเซลล์ไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า (ข) ผลรวมของการจัดเรียงตัวของโพลาริ เซชันส่งผลต่อขนาดโดยรวมของเซรามิก ..... 41
3.16	วงวนโพลาริเซชันฮีสเทอรีซิส การจัดเรียงทิศทางของโดเมนแสดงดังทิศทางลูกศร..... 42
3.17	วงจร Sawyer-Tower ..... 43
3.18	การจัดเครื่องมือเพื่อใช้วัดวงวนโพลาริเซชันฮีสเทอรีซิสของเซรามิก เฟร์โรอิเล็กทริก ..... 44
3.19	วงวนโพลาริเซชันฮีสเทอรีซิสที่แสดงได้โดยตรงจากออสซิลโลสโคป ..... 45
3.20	วงวนโพลาริเซชันฮีสเทอรีซิสหลังจากผ่านการคำนวณค่าโพลาริเซชันและ สนามไฟฟ้า ..... 46
3.21	วงวนรูปปีกผีเสื้อ เส้นประแสดงการเริ่มของกระบวนการเกิดโพลาริเซชันของเซรามิก ที่ไม่ได้ทำซ้ำ การจัดเรียงของโดเมนแสดงดังทิศทางของลูกศร ..... 48
3.22	การจัดอุปกรณ์สำหรับวัดวงวนรูปปีกผีเสื้อ..... 49
3.23	วงวนโพลาริเซชันฮีสเทอรีซิสที่แสดงได้โดยตรงจากออสซิลโลสโคป ..... 50
3.24	วงวนรูปปีกผีเสื้อหลังผ่านการคำนวณค่าความเครียดและสนามไฟฟ้าและการหาค่า $d_{33}^*$ .... 51
3.25	โครงสร้างและหลักการทำงานของ LVDT..... 52
3.26	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับตำแหน่งของแกนเหล็ก ..... 53
3.27	การนำไดโอดมาต่อร่วมกับ LVDT..... 54
3.28	วงจรรอง ..... 54
4.1	สารเคมีตั้งต้น ..... 59
4.2	ขั้นตอนการสังเคราะห์สารด้วยวิธี Solid-state reaction..... 60
4.3	การชั่งและเตรียมผสมสาร (a) ชั่งสารด้วยเครื่องชั่งที่ตั้งตำแหน่ง (b) เทสารลงขวดพลาสติก .. 61

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 การบดผสมสาร (a) ขวดพลาสติกในกระป๋องสำหรับบดผสมสาร (b) เครื่องบดผสมสารแบบหมุนวน .....	62
4.5 (a) การกรองและ (b) การนำสารที่กรองได้มาทำให้ระเหยโดยการให้ความร้อนและกวน ...	62
4.6 การแคลไซน์ .....	63
4.7 (a) ผสมสารที่บดละเอียดกับ PVA (b) อัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก .....	64
4.8 การวางเรียงชิ้นงานในถ้วยอะลูมินาสำหรับเผาซินเตอร์ .....	64
4.9 การเผาซินเตอร์ .....	65
4.10 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน .....	66
4.11 เครื่องขัดสาร .....	67
4.12 ผิวชิ้นงาน BF-BT (a) หลังขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 800 (b) หลังขัดด้วยผ้าสักหลาด .....	68
4.13 เครื่องล้างทำความสะอาดระบบอัลตราโซนิค .....	68
4.14 การอบอ่อน .....	69
4.15 เครื่องสเปคเตอร์ .....	70
4.16 การเชื่อมต่อชุดทดสอบเพื่อใช้วัดวงวนฮิสเทอรีซิสและวงวนรูปปีกผีเสื้อของชิ้นงานเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ .....	72
4.17 ชุดทดสอบวงวนฮิสเทอรีซิสและวงวนรูปปีกผีเสื้อของเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ ..	72
4.18 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับจ่ายสนามไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงานเซรามิก .....	73
4.19 ตัวจับยึดชิ้นงานเซรามิกสำหรับทดสอบที่อุณหภูมิสูง .....	74
4.20 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น NESLAB RTE 740) .....	75
4.21 ฐานสำหรับวางตัวจับยึดชิ้นงาน .....	76
4.22 การติดตั้งฐานและตัวจับยึดชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	77
4.23 เครื่อง X-ray diffractometer .....	78
4.24 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับวัดสมบัติไดอิเล็กทริก .....	79
4.25 การจัดเครื่องมือเพื่อใช้วัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสของชิ้นงานเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ .....	80

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 การจัดเครื่องมือเพื่อใช้วัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสของชิ้นงานเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ .....	81
4.27 การจัดเครื่องมือเพื่อใช้วัดวงวนรูปปึกผีเสื้อของชิ้นงานเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ .....	82
4.28 การจัดเครื่องมือเพื่อใช้วัดวงวนรูปปึกผีเสื้อของชิ้นงานเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ .....	83
5.1 วงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิก PZT (ก) วัดด้วยเครื่องมือ TF Analyzer 2000 system; aixACCT Systems GmbH, Aachen, Germany (ข) ผลการทดสอบเครื่องมือ .....	85
5.2 วงวนรูปปึกผีเสื้อของเซรามิก PZT (ก) วัดด้วยเครื่องมือ TF Analyzer 2000 system; aixACCT Systems GmbH, Aachen, Germany (ข) ผลการทดสอบเครื่องมือ .....	87
5.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผง BF-BT ที่ผ่านการแคลไซน์ .....	90
5.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผง BF-BT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ .....	91
5.5 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก BF-BT ที่ค่าความถี่ต่าง ๆ .....	92
5.6 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่อความถี่ .....	93
5.7 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT ที่ค่าความถี่ต่าง ๆ .....	95
5.8 ผลของอุณหภูมิต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก BF-BT .....	98
5.9 ผลของอุณหภูมิต่อค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT .....	99
5.10 วงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสของเซรามิก BF-BT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	100
5.11 ผลของอุณหภูมิต่อค่าโพลาริเซชันคงค้างของเซรามิก BF-BT เส้นทึบได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่ 5.2 .....	101
5.12 วงวนรูปปึกผีเสื้อของเซรามิก BF-BT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	105
5.13 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความเครียดตกค้างของเซรามิก BF-BT เส้นทึบได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่ 5.7 .....	107
5.14 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความเครียดสูงสุดของเซรามิก BF-BT เส้นทึบได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการที่ 5.8 .....	109

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 5.15 ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT เส้นที่บได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 5.10..... 111





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิก (multiferroic material) เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกมาประยุกต์ใช้ได้แก่อุปกรณ์ที่เป็นแม่เหล็กชั้นและอุปกรณ์ทางด้านแม่เหล็ก เช่น ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีความไวสูง ตัวขับเร็ว ตัวแปลงสัญญาณและการใช้งานในส่วนของอุปกรณ์แม่เหล็ก เช่น ตัวตรวจจับบอกระดับและตำแหน่งของของเหลว เป็นต้น (Julliere, 2002; Nan et al., 2008) นอกจากนี้แล้ววัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกยังถูกพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์โครที่ที่มีความจุสูงอีกด้วย (Vopsaroiu et al., 2007; Vopsaroiu et al., 2008; Zhang et al., 2008)

วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกเป็นวัสดุที่น่าสนใจมากเนื่องจากสามารถเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กไปเป็นพลังงานไฟฟ้าและเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานแม่เหล็กได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่าปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก (magnetoelectric effect) ด้วยเหตุนี้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะหัวอ่านฮาร์ดดิสก์โครที่ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนสัญญาณแม่เหล็กจากแผ่นบันทึกข้อมูลให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า

วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกมีอยู่หลายชนิดในการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สนใจศึกษาเซรามิกบิสมาทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต (BF-BT) (Chandararak et al., 2009) ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกที่แสดงปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องและมีสมบัติทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็กที่ดี อย่างไรก็ตามเซรามิกชนิดนี้ยังมีข้อด้อยเนื่องจากระบบประกอบด้วยธาตุเหล็ก (Fe) ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงหรือใช้งานต่อเนื่องไปนาน ๆ จะเกิดความร้อนสะสมและทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายได้ สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมาทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต ซึ่งผลการศึกษาจะเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงสมบัติของเซรามิกดังกล่าว รวมทั้งความเข้าใจในกลไกที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์โครที่ที่มีความจุสูงและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อื่น ๆ ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 ออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์วัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมาทเฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนตเทียบกับอุณหภูมิ

1.2.2 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกบิสมาทเฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต

1.2.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมาทเฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 เซรามิกบิสมาทเฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนตที่ใช้ในงานวิจัยได้มาจากการเตรียมขึ้นเอง

1.3.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิและตัวจับยึดชิ้นงานที่สร้างขึ้นใช้สำหรับวัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกในช่วงอุณหภูมิ 30 °C ถึง 200 °C

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 สร้างชุดอุปกรณ์วัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมาทเฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต

1.4.2 ออกแบบและสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิและอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเซรามิกเพื่อใช้ร่วมกับระบบวัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมาทเฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนตในช่วงอุณหภูมิ 30 °C ถึง 200 °C

1.4.3 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกบิสมาทเฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต

1.4.4 อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมาทเฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ชุดอุปกรณ์สำหรับวัดวงวนรูปปีกผีเสื้อของชิ้นงานเซรามิก

1.5.2 ได้ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและตัวจับยึดชิ้นงานเพื่อใช้ร่วมกับระบบการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสและวงวนรูปปีกผีเสื้อโดยใช้วงจร Sawyer-Tower และชุดอุปกรณ์วัดวงวนรูปปีกผีเสื้อ

1.5.3 ความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกบิสมาทเฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต

1.5.4 ความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมาทเฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต

1.5.5 นำความรู้ที่ได้ไปต่อยอดในงานวิจัยขั้นสูงเพื่อรองรับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

## 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสั่งเขบที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 กล่าวถึงการนำวัสดุแม่เหล็กโรติกไปประยุกต์ใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ทดแทนวัสดุชนิดเดิม ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวัสดุแม่เหล็กโรติกซึ่งเป็นเซรามิกที่มีการรวมกันของสมบัติแม่เหล็กอย่างน้อย 2 ชนิด ต่อมาจะเป็นการกล่าวถึงสมบัติที่สำคัญของวัสดุแม่เหล็กโรติก เช่น สมบัติแมกนีโตอิเล็กทริกซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุแม่เหล็กโรติก ประวัติของวัสดุแม่เหล็กโรติกและเซรามิกบีสมัทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนตซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กโรติกที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงสมบัติที่สำคัญของวัสดุแม่เหล็กโรติกได้แก่ สมบัติไดอิเล็กทริก สมบัติเฟอร์โรแมกเนติกและสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกซึ่งเป็นสมบัติทางไฟฟ้าที่สนใจทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ และในส่วนสุดท้ายกล่าวถึงการเกิดและวิธีการวัดวงวนฮีสเทอรีซิสและวงวนรูปปิกฟีลด์พร้อมทั้งอธิบายถึงวงจร Sawyer-Tower และ LVDT ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดวงวนฮีสเทอรีซิสและวงวนรูปปิกฟีลด์ตามลำดับ

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการสังเคราะห์เซรามิก BF-BT ด้วยวิธี Solid-state reaction การเตรียมชิ้นงานสำหรับทำการทดสอบ การออกแบบและสร้างชุดทดสอบและวิธีการทดสอบซึ่งประกอบไปด้วย การตรวจสอบเฟสองค์ประกอบและโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของชิ้นงานเซรามิก BF-BT การวัดวงวนฮีสเทอรีซิสโดยใช้วงจร Sawyer-Tower และการวัดวงวนรูปปิกฟีลด์ของชิ้นงานเซรามิก BF-BT เปรียบเทียบกับอุณหภูมิตามลำดับ

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยวิเคราะห์ได้จากการเปลี่ยนแปลงของวงวนฮีสเทอรีซิส ค่าโพลาไรเซชันคงค้าง ค่าสนามไฟฟ้าลบล้าง วงวนรูปปิกฟีลด์และคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก เป็นต้น

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัยวิทยานิพนธ์และข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของสารบีสมัทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของวงวนโพลาริเซชันอีสเทอร์ซิสและวงวนรูปปึกผีเสื้อ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถตรวจสอบได้โดยใช้วงจร Sawyer-Tower และชุดอุปกรณ์วัดวงวนรูปปึกผีเสื้อ ด้วยเหตุนี้ในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการวิจัย วิธีการทดลองและเทคนิคที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณະนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อันได้แก่ฐานข้อมูลจาก ScienceDirect และ IEEE เป็นต้น ซึ่งในแต่ละงานวิจัยผู้วิจัยวิทยานิพนธ์จะนำเสนอเรียงตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป นอกจากนี้ยังได้นำเสนอรายละเอียดของงานวิจัยหลัก ๆ ที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก สมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเซรามิกตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการค้นคว้าวิจัย และสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัยได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณະผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2002	X. J. Meng, J. L. Sun, X. G. Wang, T. Lin, J. H. Ma,	ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและไดอิเล็กทริกของเซรามิกเลดเซอโครเนตไทเทเนต ( $\text{PbZr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$ ) แบบฟิล์มบาง โดยทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 300 K ผลการวิจัยพบว่า

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
	S. L. Guo, and J. H. Chu	หึ่งค่าโพลาริเซชันอ้อมตัว ( $P_s$ ) และโพลาริเซชันตกค้าง ( $P_r$ ) ได้รับผลจากอุณหภูมิคล้ายกันคือเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 300 ถึง 50 K และมีค่าสูงสุดที่ 40 K อย่างไรก็ตามทั้ง $P_s$ และ $P_r$ ลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 40 K และสนามไฟฟ้าลบ ( $E_c$ ) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากอุณหภูมิ 300 ถึง 60 K และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 60 K
2003	Hiroshi Maiwa, Seung-Hyun Kim, and Noboru Ichinose	ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติไฟฟ้าเชิงกลของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) แบบฟิล์มบาง โดยวัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสในช่วงอุณหภูมิ $-250^{\circ}\text{C}$ ถึง $150^{\circ}\text{C}$ และวัดวงวนรูปปีกผีเสื้อในช่วงอุณหภูมิ $-100^{\circ}\text{C}$ ถึง $150^{\circ}\text{C}$ ผลของอุณหภูมิต่อวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าโพลาริเซชันตกค้างและสนามไฟฟ้าลบมีค่าลดลง สำหรับวงวนรูปปีกผีเสื้อเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแรงดันด้านบวกและด้านลบของสนามไฟฟ้าลบมีขนาดลดลงและวงวนรูปปีกผีเสื้อมีขนาดเล็กลง
2004	Hao Yang, Jun Miao, Bin Chen, Li Zhao, Bo Xu, Xiaoli Dong, Lixin Cao, Xianggang Qiu, and Bairu Zhao	ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$ แบบฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 20 ถึง 250 K โดยพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 250 ถึง 150 K และเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่องถึง 20 K และค่าโพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 250 K และมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 150 K แต่จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 20 K
2006	Jin Soo Kim, and Ill Won Kim	ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมัทไทเทเนต

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		<p>(<math>\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}</math>) และบิสมาทไทเทเนตที่เจือด้วยนีโอโดเบียม (<math>\text{Bi}_{4-x}\text{Nd}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}</math>) วัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสด้วยวงจร Sawyer-Tower ที่อุณหภูมิ <math>30^\circ\text{C}</math> ถึง <math>600^\circ\text{C}</math> ผลปรากฏว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าโพลาริเซชันมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการอิมตัวของวงวนฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิ <math>110^\circ\text{C}</math> อย่างไรก็ตามวงวนฮิสเทอรีซิสแสดงพฤติกรรมกระแสรั่วไหลที่อุณหภูมิสูงกว่า <math>110^\circ\text{C}</math> ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของสภาพการนำไฟฟ้า หลังจากนั้นกระแสรั่วไหลมีการเพิ่มขึ้นอย่างมากและทำให้เกิดการไดอิเล็กทริกเบรกดาวน์</p>
2007	Hiroshi Naganuma, Yosuke Inoue, and Soichiro Okamura	<p>ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและสมบัติแม่เหล็กของเซรามิกบิสมาทเฟอร์ไรท์ (<math>\text{BiFeO}_3</math>) แบบฟิล์มบางโดยวัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิห้องและ <math>90\text{ K}</math> ผลปรากฏว่าวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสที่วัดที่อุณหภูมิห้องจะไม่อิมตัวและเกิดการเสีรูป ที่เป็นเช่นนี้เพราะความหนาแน่นของกระแสรั่วไหลสูง เมื่อลดอุณหภูมิในการวัดทำการเกิดกระแสรั่วไหลลดลง ความหนาแน่นของกระแสรั่วไหลลดลงอย่างมาก วงวนฮิสเทอรีซิสที่วัดที่อุณหภูมิ <math>90\text{ K}</math> จึงแสดงรูปร่างที่อิมตัวอย่างดี</p>
2007	James F. Carroll III, David A. Payne, Yuji Noguchi, and Masaru Miyayama	<p>ศึกษาพฤติกรรมของความเครียดภายใต้อุณหภูมิของเซรามิกโพแทสเซียมไซเดียมบิสมาทไทเทเนต และได้วัดสมบัติไดอิเล็กทริกภายใต้อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง <math>500^\circ\text{C}</math> โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องและมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องมากกว่า <math>300^\circ\text{C}</math></p>

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ส่วนค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และทำการวัดค่าความเครียดที่อุณหภูมิ 100°C และ 200°C โดยค่าความเครียดค่อมตัวที่อุณหภูมิ 100°C มีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 200°C
2008	Hiroshi Maiwa, and Seung-Hyun Kim	ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติไฟฟ้าเชิงกลของเซรามิก $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $Pb(ZrTi)O_3$ แบบฟิล์มบางวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิ -250°C ถึง 200°C และวัดสมบัติไฟฟ้าเชิงกลในช่วงอุณหภูมิ -60°C ถึง 150°C พบว่าวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -200°C ถึง 150°C และวงวนมีลักษณะกลมเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 150°C เนื่องจากกระแสรั่วไหลที่เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความชันของวงวนรูปปีศาจมีค่าลดลง
2008	Hiroshi Naganuma, Yosuke Inoue, and Soichiro Okamura	ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและสมบัติทางแม่เหล็กของเซรามิกบิสเมทเฟอร์ไรท์ ( $BiFeO_3$ ) แบบฟิล์มบางโดยให้สนามไฟฟ้าแบบพัลส์รูปคลื่นสามเหลี่ยมความถี่ 1 kHz แก่ชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิ 90 K ถึง 203 K ผลปรากฏว่าวงวนฮิสเทอรีซิสค่อมตัวที่อุณหภูมิ 150 K และเริ่มขยายตัวที่อุณหภูมิมากกว่า 165 K เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลและเกิดการเบรกดาวน์ที่อุณหภูมิ 203 K
2009	Alp Sehirlioglu, Ali Sayir, and Fred Dynys	ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและสมบัติทางไฟฟ้าเชิงกลของเซรามิก $BiScO_3$ - $PbTiO_3$ โดยทำการวัดค่าโพลาริเซชันที่อุณหภูมิ 30°C 100 °C และ 180°C ตามลำดับและวัด

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ความเครียด (strain) ที่อุณหภูมิ 20°C และ 100°C ผลปรากฏว่าค่าโพลาไรเซชันที่อุณหภูมิ 30°C มีค่าน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิ 180°C มีค่ามากที่สุดและวงวนฮีสเทอรีซิสมีพลังงานสูญเสียเกิดขึ้น และค่าความเครียดที่อุณหภูมิ 100°C มีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 20°C
2010	Fang Fu, Jiwei Zhai, Zhengkui Xu, Chenggen Ye, and Xi Yao	ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของ NBT-BT-KNN2 แบบฟิล์มบาง โดยวัดวงวนโพลาไรเซชันฮีสเทอรีซิสที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วงอุณหภูมิจาก 50°C ถึง 300°C พบว่าที่อุณหภูมิห้องวงวนฮีสเทอรีซิสมีการแสดงลักษณะเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นวงวนฮีสเทอรีซิสมีลักษณะเป็นหยักซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนจากเฟอร์โรอิเล็กทริกเฟสไปเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกเฟส และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากกว่า 150 °C วงวนฮีสเทอรีซิสมีรูปร่างบิดเบี้ยวไม่สมมาตร พื้นที่ของวงวนฮีสเทอรีซิสจะไม่สอดคล้องกับปริมาณพลังงานที่กระจายอยู่ในรูปแบบของความร้อน เป็นผลมาจากการเกิดสภาวะสูญเสียอย่างมากที่อุณหภูมิสูง
2011	D. Hitchen, and S. Ghosh	ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติทางไฟฟ้าของสารมัลติเฟอร์โรอิก BiFeO <sub>3</sub> แบบฟิล์มบาง ศึกษาวงวนฮีสเทอรีซิสและลักษณะของกระแสรั่วไหลในช่วงอุณหภูมิ 80-300 K โดยเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 10 K ผลปรากฏว่าวงวนฮีสเทอรีซิสมีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าโพลาไรเซชันคงค้างมีค่ามากขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 200 K



ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	Soodkhet Pojprapai, Hugh Simons, Andrew J. Studer, Zhenhua Luo, and Mark Hoffman	ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการกลับตัวของโดเมนของเซรามิกเลดเซอโครเนตไทเทเนต (PZT) ภายใต้โหลดทางไฟฟ้าโดยจ่ายโหลดทางไฟฟ้าแก่ชิ้นงาน 1kV/mm ที่อุณหภูมิ 30°C 125°C และ 175°C พบว่าอัตราการกลับตัวของโดเมนหรือเวลาที่ใช้ในการกลับตัวขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ชิ้นงาน สนามไฟฟ้าลบสูง ความหนาของชิ้นงานและอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดเมนจะมีการเคลื่อนที่มากขึ้นและสนามไฟฟ้าลบสูงจะลดลงจึงทำให้อัตราการกลับตัวของโดเมนเพิ่มมากขึ้นและเวลาที่ใช้ในการกลับตัวน้อยลง การลดลงของสนามไฟฟ้าลบสูงส่งผลให้พลังงานที่ต้องใช้ในการกลับตัวของโดเมนลดลงจึงทำให้อัตราการกลับตัวของโดเมนเพิ่มมากขึ้น
2012	Baohua Wen, Yong Zhang, Xiaolin Liu, Liang Ma, and Xiangrong Wang	ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกเลดเซอโครเนตไทเทเนตที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติ $(\text{Pb}_{0.96}\text{Sr}_{0.04}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.275}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.1}\text{Ti}_{0.375}\text{Zr}_{0.25}\text{O}_3)$ ทำการวัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสโดยใช้วงจร Sawyer-Tower ในช่วงอุณหภูมิ 300-433 K และให้สนามไฟฟ้า 2 และ 0.5 kV/mm ผลปรากฏว่าทั้งค่าโพลาริเซชันอิมิตัว ( $P_s$ ) และโพลาริเซชันตกค้าง ( $P_r$ ) ที่ค่าสนามไฟฟ้าเท่ากับ 2 kV/mm มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และค่า $P_s$ และ $P_r$ ที่ค่าสนามไฟฟ้า 0.5 kV/mm มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ได้รับ

จากผลการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ายังมีการศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกอยู่น้อยมาก จากผลการสืบค้นสามารถช่วยให้ผู้วิจัยได้เห็นภาพอย่างกว้างของงานวิจัยดังกล่าว สำหรับเนื้อหาในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของงานวิจัยหลัก ๆ ที่สำคัญ และเกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ในปี ค.ศ.2003 Maiwa et al. ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติไฟฟ้าเชิงกลของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) แบบฟิล์มบาง โดยวัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสในช่วงอุณหภูมิ  $-250^{\circ}\text{C}$  ถึง  $150^{\circ}\text{C}$  ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Radiant Technology ferroelectric tester, RT66A) และวัดวงวนรูปปีกผีเสื้อของ PZT ในช่วงอุณหภูมิจาก  $-100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $150^{\circ}\text{C}$  ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric tester, ACCTTF2000) ใช้แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสามเหลี่ยมค่ายอด 20 V ความถี่ 2 Hz ผลของอุณหภูมิต่อวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสสำหรับ PZT แบบฟิล์มบางพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการวัด ค่าโพลาริเซชันตกค้าง ( $P_r$ ) และสนามไฟฟ้าลบล้าง ( $E_c$ ) จะมีค่าลดลง ค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง ( $P_s$ ) และสนามไฟฟ้าลบล้างมีการเปลี่ยนแปลงตามสมการอันดับสองดังสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2

$$P_s^2 = (1/Cb)/(T - T_c) \quad (2.1)$$

$$E_c^{2/3} = [(4/27bC^3)]^{1/3} (T - T_c) \quad (2.2)$$

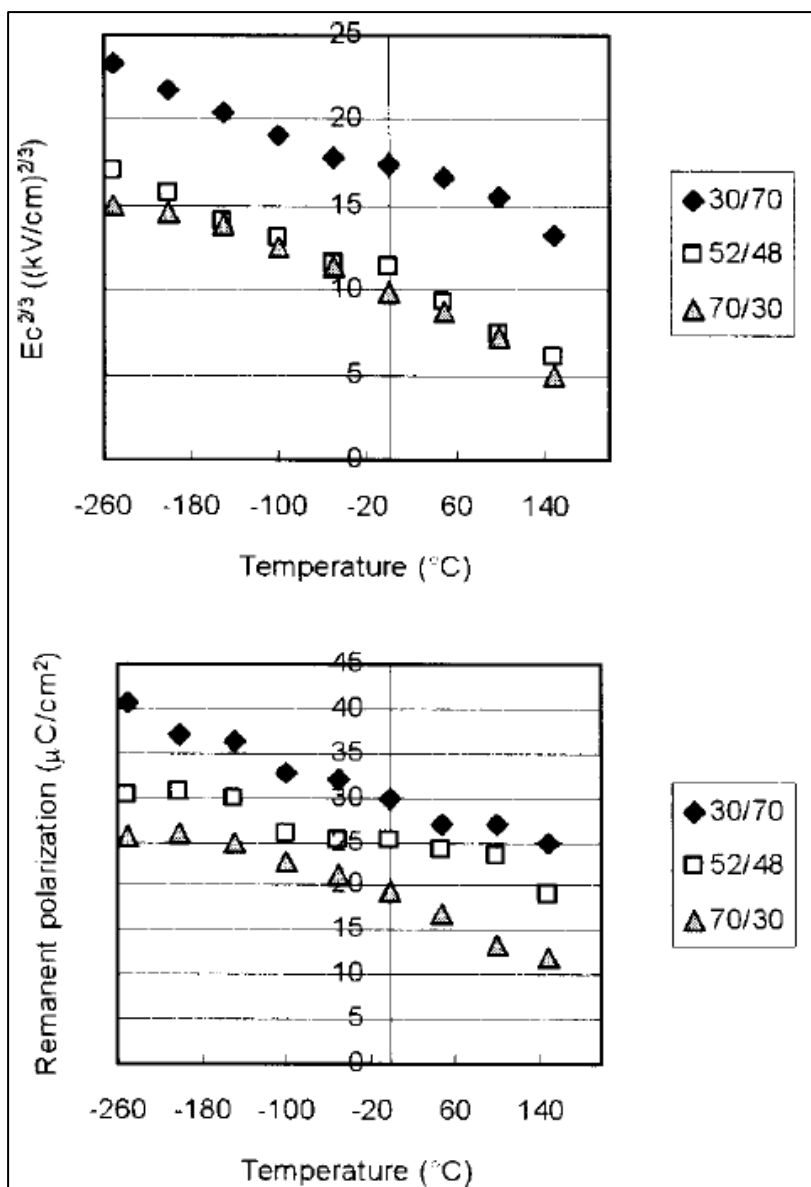
โดยที่  $T_c$  คือ อุณหภูมิคูรี

$C$  คือ ค่าคงที่คูรี

$b$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์อันดับสองของแรงยึดหยุ่นระหว่างอะตอมข้างเคียง

$E_c^{2/3}$  และ  $P_r$  วดเทียบกับอุณหภูมิแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ค่า  $E_c$  และ  $P_r$  คำนวณจากค่าเฉลี่ยของค่าบวกและค่าลบ จะเห็นได้ว่า  $E_c^{2/3}$  ลดลงสัมพันธ์กับอุณหภูมิเกือบจะเป็นเส้นตรง

รูปที่ 2.2 แสดงผลของอุณหภูมิต่อวงวนรูปปีกผีเสื้อของ PZT แบบฟิล์มบางเรียกว่าวงวนรูปปีกผีเสื้อซึ่งเป็นสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก วัดในช่วงอุณหภูมิจาก  $-100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $150^{\circ}\text{C}$  เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแรงดันด้านบวกและด้านลบของสนามไฟฟ้าลบล้างมีค่าลดลงและวงวนรูปปีกผีเสื้อมีขนาดเล็กลงค่าการขยายตัวคำนวณจากความชันของการเคลื่อนที่พล็อตเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการขยายตัวที่เกิดจากสนามไฟฟ้าโดยทั่วไปมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของโดเมน



รูปที่ 2.1 ค่า  $E_c^{2/3}$  และ  $P_r$  เทียบกับอุณหภูมิ (Maiwa et al., 2003)

ผลของอุณหภูมิต่อการยืดหดของ PZT สามารถอธิบายด้วยสัมประสิทธิ์ไพโซโซลิตริกภายในได้ดังสมการที่ 2.3

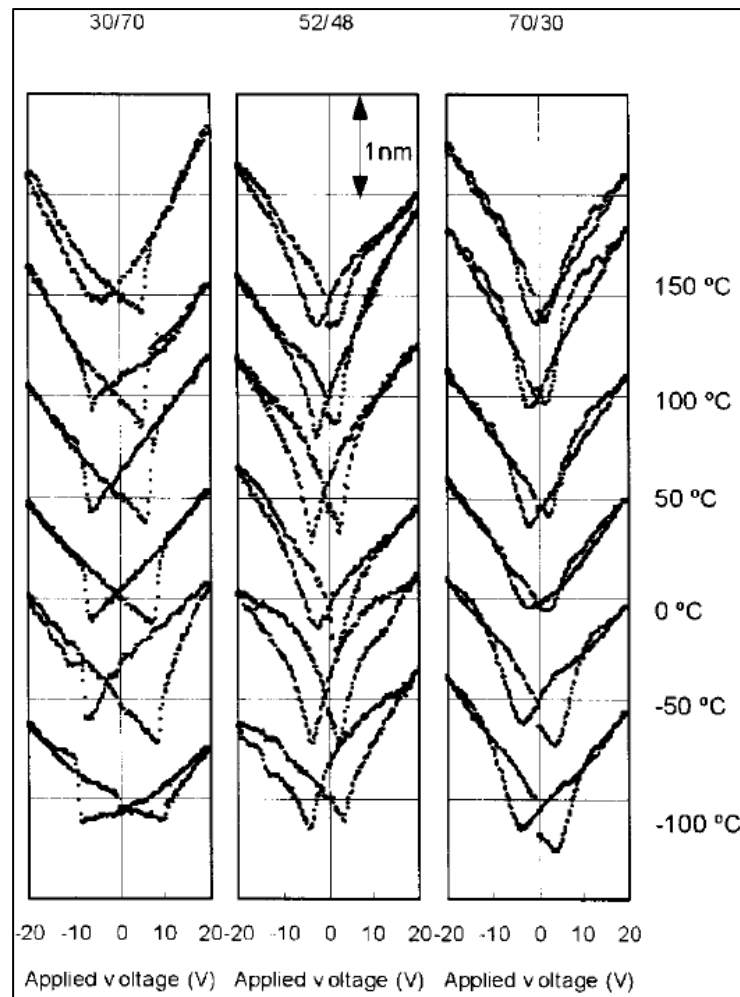
$$d_{int} = 2Q \varepsilon_0 \varepsilon P_s \quad (2.3)$$

โดยที่  $Q$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์อิเล็กโตรสตริกทีฟ

$\epsilon_0$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ

$\epsilon$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์

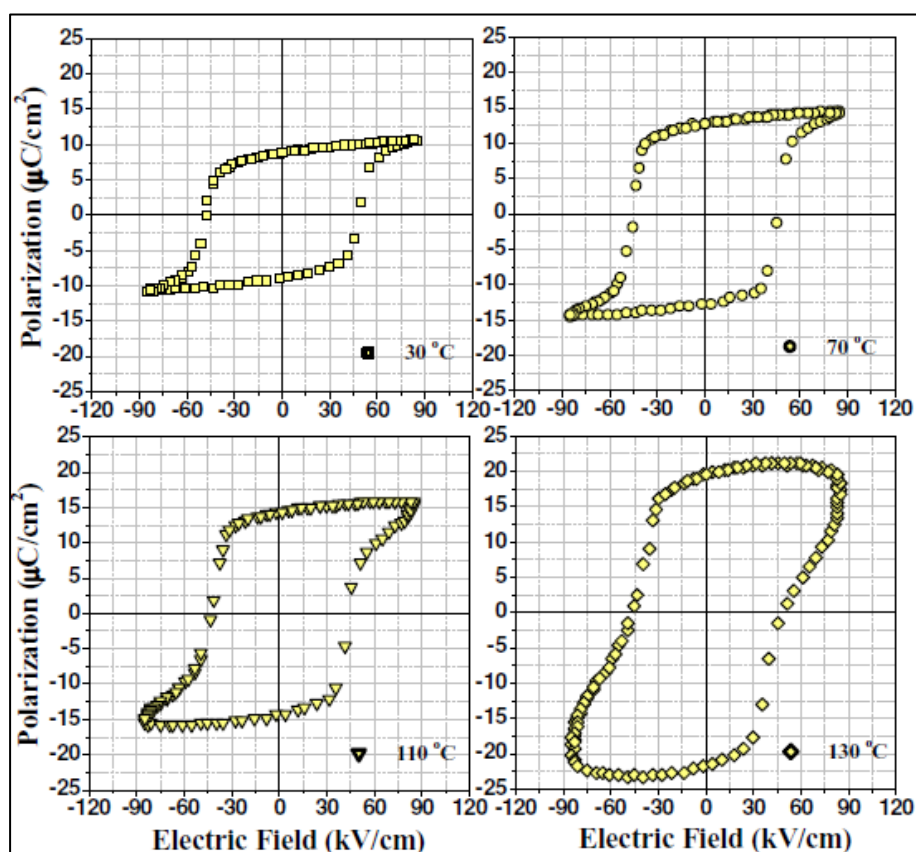
$P_s$  คือ ค่าโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเอง



รูปที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิต่อวงวนรูปปีกผีเสื้อตัวของ PZT แบบฟิล์มบาง (Maiwa et al., 2003)

ในปี ค.ศ.2006 Kim and W. Kim ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมาทไทเทเนต ( $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ) และบิสมาทไทเทเนตที่ถูกเจือด้วยนีโอไดเมียม ( $\text{Bi}_{4-x}\text{Nd}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ) ได้วัดวงวนโพลาไรเซชันฮิสเทอรีซิสโดยใช้วงจร Sawyer-Tower โดยวัดที่อุณหภูมิจาก  $30^\circ\text{C}$  ถึง  $600^\circ\text{C}$  ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกดูได้จาก วงวนโพลาไรเซชันฮิสเทอรีซิสของเซรามิกบิสมาทไทเทเนตที่ถูกเจือด้วยนีโอไดเมียม (BNdT:0.75) ดังแสดงใน

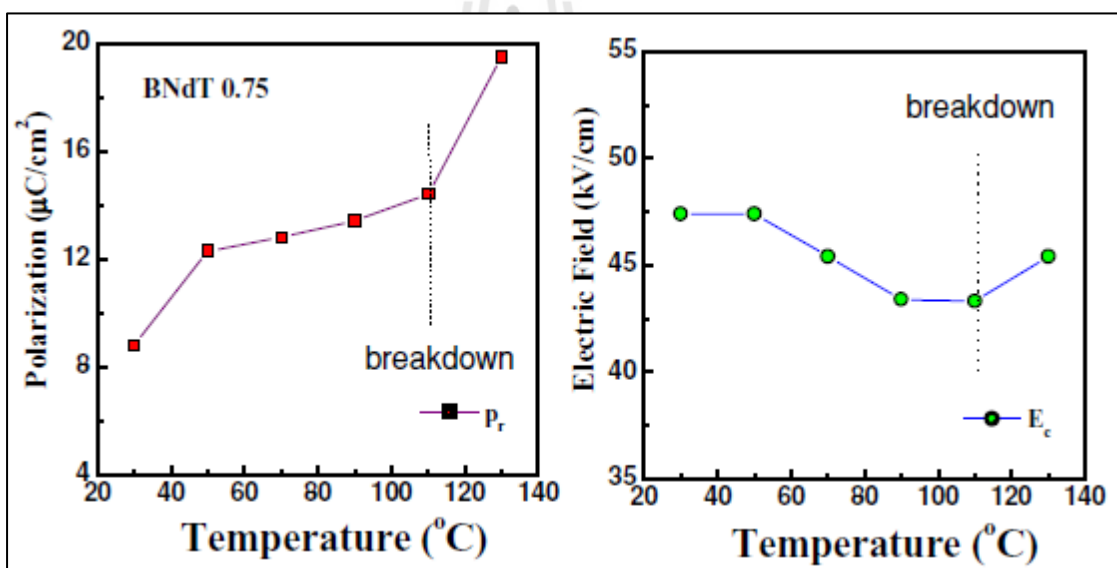
รูปที่ 2.3 วัดโดยใช้สนามไฟฟ้า 60 kV/cm ที่อุณหภูมิห้องโพลาริเซชันตกค้างของเซรามิกบิสมาท์ไทเทเนตที่ถูกเจือด้วยนีโอไดเมียมมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่  $8.0 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  ซึ่งสูงกว่าเซรามิกบิสมาท์ไทเทเนตที่ไม่ได้เจือซึ่งมีค่าเท่ากับ  $4.20 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเจือนีโอไดเมียมช่วยปรับปรุงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก



รูปที่ 2.3 ผลของอุณหภูมิต่อวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิกบิสมาท์ไทเทเนตที่ถูกเจือด้วยนีโอไดเมียม (BNdT:0.75) (Kim and Kim, 2006)

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการอ้อมตัวของโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสสังเกตเห็นได้ที่อุณหภูมิ  $110^{\circ}\text{C}$  อย่างไรก็ตามวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสแสดงพฤติกรรมกระแสรั่วไหลที่อุณหภูมิสูงกว่า  $110^{\circ}\text{C}$  มีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของสภาพการนำไฟฟ้า หลังจากนั้นกระแสรั่วไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างมากและทำให้เกิดไดอิเล็กทริกเบรกดาวน์

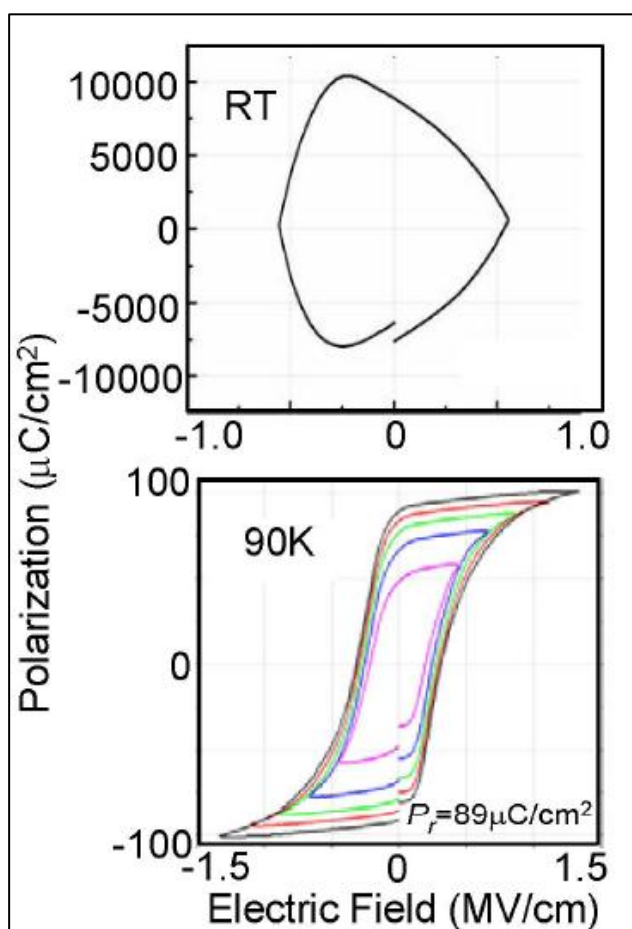
ผลของอุณหภูมิต่อค่าโพลาริเซชันตกค้างและสนามไฟฟ้าลบล้างดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสนามไฟฟ้าลบล้างมีค่าลดลงและโพลาริเซชันตกค้างมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของโพลาริเซชันตกค้างแตกต่างไปจากสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของสารเซรามิกทั่วไป เช่น แบเรียมไทเทเนตและไกลโคลินซัลเฟต โดยโพลาริเซชันของเซรามิกปกติลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ การเพิ่มขึ้นของโพลาริเซชันตกค้างอธิบายได้โดยการเกิดโพลาริเซชันที่ความถี่ต่ำ ประจุค้างและการเคลื่อนที่ของไอออนเนื่องจากการกระจายตัวของไดอิเล็กทริกและสภาพการนำไฟฟ้า นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของประจุค้างและไอออนดังกล่าวที่เกิดจากโพลาริเซชัน ยังทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพลังงานความร้อน ทำให้พลังงานสะสมในเซรามิกมีค่ามากขนาดของวงวนจึงเพิ่มขึ้นและทำให้ค่าโพลาริเซชันเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2.4 ผลของอุณหภูมิต่อโพลาริเซชันตกค้างและสนามไฟฟ้าลบล้าง (Kim and Kim, 2006)

ในปี ค.ศ.2007 Naganuma et al. ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและสมบัติแม่เหล็กของสารบิสมัทเฟอร์ไรท์ ( $\text{BiFeO}_3$ ) แบบฟิล์มบาง วัดวงวนเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิห้องและ 90 K ด้วยเครื่องทดสอบเฟอร์โรอิเล็กทริก (aixACCT TF-2000) จ่ายแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสามเหลี่ยมความถี่ 1 kHz ให้แก่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองด้านของสารบิสมัทเฟอร์ไรท์ วงวนเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอรีซิสของสารบิสมัทเฟอร์ไรท์วัดที่อุณหภูมิห้องและ 90 K ดังแสดงในรูปที่ 2.5

วงวนเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิห้องไม่อ้อมตัวและเกิดการเสีรูป ที่เป็นเช่นนี้เพราะความหนาแน่นของกระแสรั่วไหลสูง เมื่อลดอุณหภูมิในการวัดทำให้การเกิดกระแสรั่วไหลลดลง ความหนาแน่นของกระแสรั่วไหลลดลงอย่างมาก วงวนเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอรีซิสวัดที่ 90 K แสดงรูปร่างที่อ้อมตัวอย่างเด่นชัดซึ่งให้โพลาริเซชันตกค้างที่สูงถึง  $89 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  และสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าลบที่ต่ำ  $380 \text{ kV}/\text{cm}$



รูปที่ 2.5 วงวนเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอรีซิสของสารบิสมัทเฟอร์ไรต์แบบฟิล์มบาง วัดที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 90 K (Naganuma et al., 2007)

### 2.3 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้นำเสนอวรรณกรรมและการวิจัยในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ โดยค้นคว้าจากฐานข้อมูลของ (i) IEEE (ii) American institute of physics (iii) letters Science Direct และอื่น ๆ ทำให้ทราบถึงผลการดำเนินงานวิจัย จุดประสงค์ แนวทางการวิจัยของผู้วิจัยอื่น ๆ ซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป จากการสืบค้นปริทัศน์ และวรรณกรรมเห็นได้ชัดว่าที่ผ่านมาการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกมีผู้สนใจศึกษาอยู่น้อยมาก และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเซรามิกบิสมาทเฟร์ไรท์ แบเรียมไทเทเนตซึ่งเป็นสารใหม่ยังไม่เคยมีผู้ใดเคยศึกษามาก่อน ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เริ่มทำการวิจัยเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของสารบิสมาทเฟร์ไรท์ แบเรียมไทเทเนต โดยจะอธิบายในรายละเอียดต่าง ๆ ในบทต่อไป





## บทที่ 3

### ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 บทนำ

วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิก (multiferroic material) เป็นวัสดุที่น่าสนใจมากมีศักยภาพในการพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุสูง (Vopsaroiu et al., 2007; Vopsaroiu et al., 2008; Zhang et al., 2008) เนื่องจากวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกแสดงปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกที่โดดเด่น โดยสามารถเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กไปเป็นพลังงานไฟฟ้าและเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากลับไปเป็นพลังงานแม่เหล็กได้ทำให้มีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานดังกล่าว นอกจากนี้ที่กล่าวมาแล้ววัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกยังถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ (Julliere, 2002; Nan et al., 2008) ได้แก่ อุปกรณ์ที่เป็นวัสดุฟังก์ชันและอุปกรณ์ทางด้านแม่เหล็ก เช่น ตัวตรวจวัดสนามแม่เหล็กที่มีความไวสูง ตัวขับเร็ว ตัวแปลงสัญญาณและการใช้งานในส่วนของอุปกรณ์แม่เหล็ก เช่น ตัวตรวจวัดบอกระดับและตำแหน่งของของเหลว เป็นต้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกที่นำมาศึกษาคือบิสมาทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต (BF-BT) (Chandarak et al., 2009) ซึ่งเป็นสารที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็กที่ดี อย่างไรก็ตามสารชนิดนี้ยังมีข้อด้อยคือเมื่อนำไปใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูงหรือใช้งานต่อเนื่องไปนาน ๆ จะเกิดความร้อนสะสมและทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของสารบิสมาทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต ซึ่งผลการศึกษาคือจะเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงสมบัติของสารดังกล่าวรวมทั้งความเข้าใจในกลไกที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุสูงและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ต่อไป

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกมาใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุสูง ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิก ประวัติความเป็นมา การค้นพบและคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิก อาทิเช่น สมบัติไดอิเล็กทริก เฟอร์โรอิเล็กทริกและเฟอร์โรแมกเนติก กล่าวถึงระบบของวัสดุบิสมาทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้ รวมทั้งการวัดคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกเช่น วงวนฮีสเทอรีซิส วงวนรูปปีกผีเสื้อ หลักการทำงานของวงจรวางจอร์ Sawyer-Tower และหลักการทำงานของ LVDT ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติดังกล่าว ทั้งนี้เพื่อให้มีความเข้าใจในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกและสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกได้ดียิ่งขึ้น

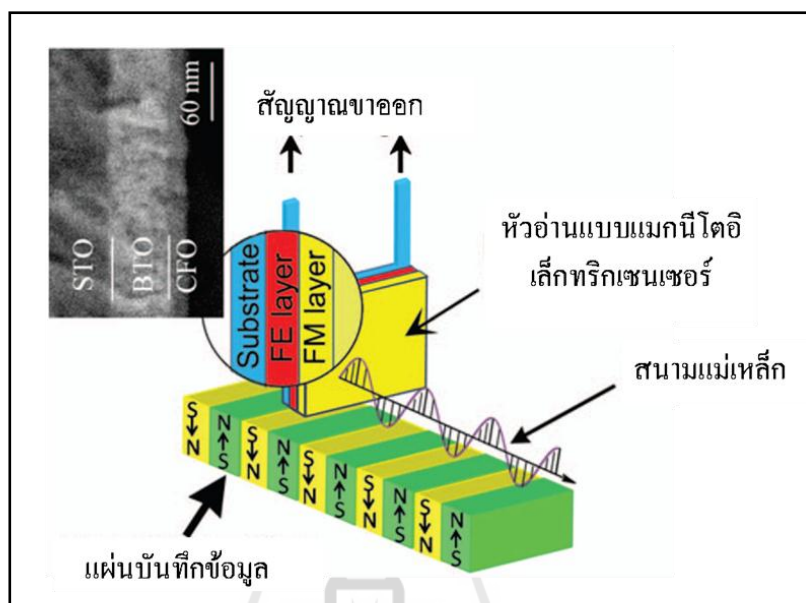
### 3.2 การนำวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกไปใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์โครฟที่มีความจุสูง

มีงานวิจัยอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสทีฟ (magnetoresistive effect: MR) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน ไปเป็นพลังงานแม่เหล็ก (Zhang et al., 2008; Vopsaroiu et al., 2008; Vopsaroiu et al., 2007) ได้นำไปสู่ความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วทางเทคโนโลยีในฮาร์ดดิสก์โครฟสำหรับการบันทึกข้อมูลด้วยสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าหลายพันล้านบาทและกำลังเจริญเติบโต ในฮาร์ดดิสก์โครฟหัวอ่านแมกนีโตรีซิสทีฟจะเคลื่อนที่ด้วยความสูงคงที่เหนือโดเมนแม่เหล็กซึ่งเรียกว่า “บิต” ในแผ่นบันทึกข้อมูล และรับรู้ถึงทิศทางของการหันของโดเมนแม่เหล็กโดยอ่านสัญญาณจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดัน  $\Delta V = I \times \Delta R$  ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $\Delta R$  ของแมกนีโตรีซิสทีฟ เซ็นเซอร์ ดังนั้นการทำงานของแมกนีโตรีซิสทีฟเซ็นเซอร์จะต้องให้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดคงที่ไหลผ่านตัวมันเองเพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงขนาดของความต้านทาน ในทางกลับกันหัวอ่านแมกนีโตรีซิสทีฟจะมีโครงสร้างและการเรียงชั้นแบบพิเศษเพื่อให้เหมาะสมกับกระแสไบแอสและการป้องกันของเซ็นเซอร์ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการสร้างตัวบันทึกข้อมูลที่มีความหนาแน่นสูง

ปัจจุบันนักวิจัยได้พยายามหาวิธีการใหม่ ๆ เพื่อปรับปรุงเทคโนโลยีตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแมกนีโตรีซิสทีฟเซ็นเซอร์เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูล ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบใหม่ที่ไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งก็คือวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิก ปัจจุบันวัสดุดังกล่าวได้รับความนิยมอย่างมาก สารประกอบแม่เหล็กเฟอร์โรอิกเป็นการรวมกันทั้งเฟสของเฟอร์โรอิเล็กทริกและเฟสของแม่เหล็ก โดยทั่วไปผลของการเปลี่ยนแปลงของเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกและเฟสของแม่เหล็กจะเกิดความเครียดซึ่งส่งผ่านไปยังเฟสของกันและกันทำให้เกิดการแปลงผันไปมาได้ระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานแม่เหล็ก เหมาะสมสำหรับการใช้งานในเทคโนโลยีทางด้านนี้ ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบหัวอ่านและบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็กแบบใหม่บนพื้นฐานของปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกแทนที่ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสทีฟ หัวอ่านแบบแมกนีโตอิเล็กทริกมีความสำคัญ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านตัวเซ็นเซอร์เพื่อตรวจจับค่าความต้านทานเหมือนกับหัวอ่านแบบแมกนีโตรีซิสทีฟ เพราะข้อมูลจะถูกอ่านกลับได้โดยตรงจากแรงดันขาออกของปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ที่ชัดเจนเกี่ยวกับการลดความร้อนที่เกิดจากความต้านทานที่สูงของแมกนีโตรีซิสทีฟเซ็นเซอร์และยังช่วยลดการใช้พลังงานอีกด้วย

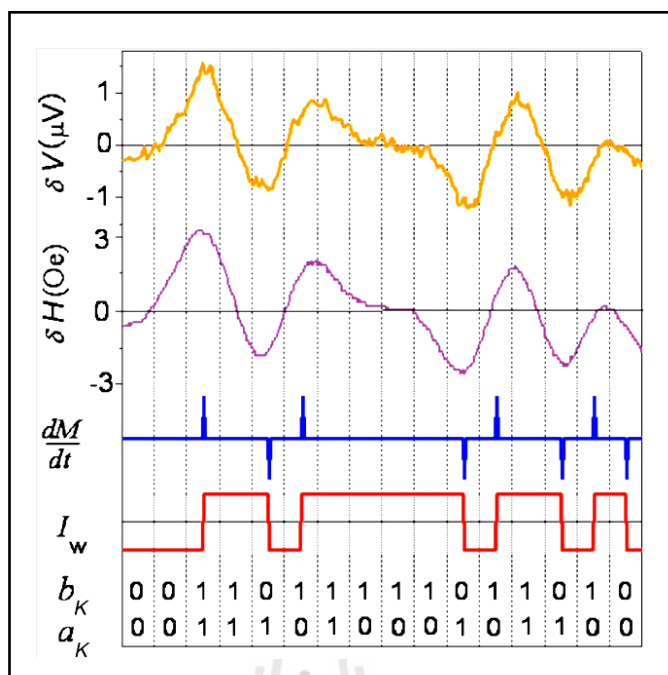
การตอบสนองที่ชัดเจนของปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก แสดงให้เห็นถึงความพร้อมในการนำมาใช้เป็นหัวอ่านแบบใหม่ โดยมีลักษณะเป็นแผ่นดังแสดงในรูปที่ 3.1 หัวอ่านแบบแมกนีโตอิเล็กทริกจะยังคงเคลื่อนที่เหนือแผ่นบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็กเหมือนกับหัวอ่านแบบแมกนีโต

รีซีสทิฟ แต่การรับรู้บิตจากแผ่นบันทึกข้อมูลโดยการอ่านสัญญาณที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าแตกต่างไปจากหัวอ่านแบบแมกนีโทรีซีสทิฟที่ต้องการไฟฟ้ากระแสตรงขนาดคงที่ไหลผ่านตัวมันเอง โดยทั่วไปมีหลายขั้นตอนในกระบวนการเขียนและอ่านข้อมูลบนแผ่นบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็ก



รูปที่ 3.1 หัวอ่านแบบแมกนีโทรีซีสทิฟ เล็กทริก (Zhang et al., 2008)

เพื่อประกอบการอธิบายยกตัวอย่างสัญญาณขาเข้า 16 บิตแรก  $a_k$  แสดงดังรูปที่ 3.2 สัญญาณจะถูกเขียนบนแถบข้อมูลบนแผ่นด้วยกระแส  $I_w$  และไม่กลับไปเป็นศูนย์หลังจากถูกเข้ารหัสเป็นสัญญาณใหม่  $b_k$  บิต  $b_k$  ที่ถูกเขียนเหล่านี้เป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กในแผ่นบันทึกข้อมูล หลังจากหัวอ่านรับรู้ถึงสัญญาณทำให้เกิดรูปคลื่นแรงดันแบบต่อเนื่อง ตัวแบ่งสัญญาณจะแบ่งลำดับเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องซึ่งจะเกิดช่องว่างเวลาห่างจากกันจากรูปคลื่นแรงดัน สุดท้ายสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องเหล่านี้จะถูกถอดรหัสไปเป็นสัญญาณเริ่มแรก  $a_k$  ผ่านตัวตรวจจับสัญญาณ ในกระบวนการเหล่านี้หัวอ่านจะแปลงสัญญาณสนามแม่เหล็กจากแผ่นบันทึกไปเป็นรูปคลื่นแรงดันขาออก รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากับรูปแบบของสัญญาณสนามแม่เหล็กคือจุดสำคัญของกระบวนการอ่าน



รูปที่ 3.2 รูปคลื่นแรงดันขาออกต่าง ๆ (เส้นโค้งบน) ของแผ่นฟิล์มบางที่เกิดจากฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันที่ความถี่ 1 kHz เป็นการจำลองสัญญาณแรงดันขาออกจากส่วนของแถบบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็กเมื่อใช้หัวอ่านแบบแมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์ บิต  $b_k$  ที่ถูกเขียนโดยกระแส  $I_w$  ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กบนหัวอ่าน รวมถึงการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าในรูปแบบเดียวกันกับบิต (Zhang et al., 2008)

นอกจากสมรรถนะทางความร้อนที่ดีขึ้นและลดการใช้พลังงานโดยไม่จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้า กระแสตรงไหลผ่านเซ็นเซอร์แล้ว อีกหนึ่งข้อดีที่มีความสำคัญมากที่สุดคือหัวอ่านแบบแมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กและปราศจากแม่เหล็กถาวรหรือโครงสร้างแบบพิเศษของเซ็นเซอร์สำหรับกระแสไบแอส มีความเป็นไปได้ในการเพิ่มความหนาแน่นในการบันทึกข้อมูลเมื่อเปรียบเทียบกับหัวอ่านแบบแมกนีโตรซิสทีฟ แรงดันขาออกของหัวอ่านแบบแมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกและไม่ได้ขึ้นอยู่กับความกว้างหรือความหนาของเซ็นเซอร์ ดังนั้นข้อจำกัดเกี่ยวกับความละเอียดในการอ่านส่วนใหญ่ถูกควบคุมโดยความหนาของชั้นเฟอร์โรแมกเนติก เนื่องจากชั้นเฟอร์โรแมกเนติกรับรู้สนามแม่เหล็กจากบิต ซึ่งประมาณแบบหยาบได้ประมาณ 20 nm ความหนาของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกเล็กกว่าขนาดของบิตประมาณ  $75 \times 30 \text{ nm}^2$  ในแผ่นบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็กซึ่งมีความหนาแน่นของการจัดเก็บ 200 Gb/in<sup>2</sup> และ

ลดความหนาของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกลง 10 nm ในอนาคตความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูลแบบแม่เหล็กอาจจะเพิ่มสูงขึ้นถึง 1Tb/in<sup>2</sup>

### 3.3 วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกและปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก

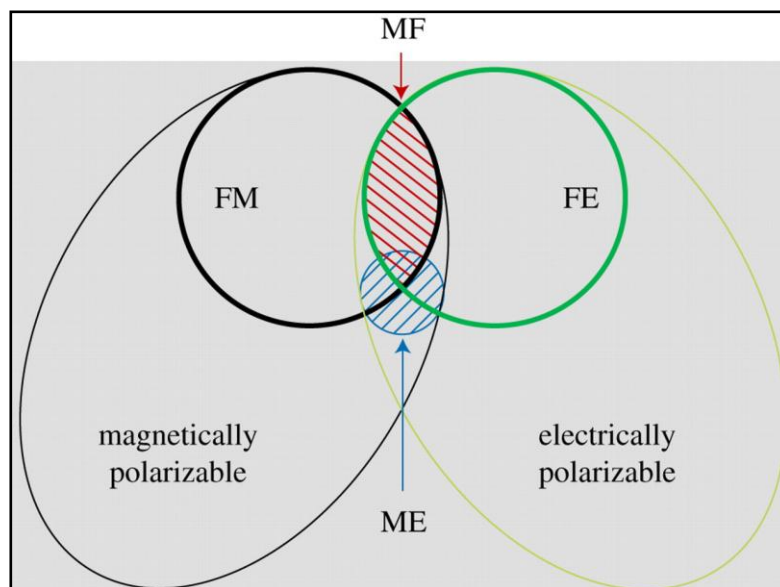
วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิก คือวัสดุที่มีสมบัติรวมกันอย่างน้อย 2 ชนิด ได้แก่สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก สมบัติเฟอร์โรแมกเนติกหรือสมบัติเฟอร์โรอิลาสติก (Eerenstein et al., 2006; Ederer et al., 2006) ตัวอย่างของสมบัติเฟอร์โรอิกชนิดต่าง ๆ ที่รวมกันภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกดังแสดงในรูปที่ 3.3 เนื่องจากสมบัติของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกเกิดจากการรวมกันระหว่างสมบัติที่แตกต่างกันจึงทำให้เกิดสมบัติใหม่ เช่น ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก (magnetolectric effect : ME) ปรากฏการณ์ไพโซโซแมกเนติก (piezomagnetism effect) และปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) แต่ปรากฏการณ์ที่ได้รับความสนใจและมีการศึกษาอย่างกว้างขวางคือ ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริก ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกเป็นผลมาจากการรวมกันของสองปรากฏการณ์คือ ปรากฏการณ์แมกนีโตสตริกทีฟ (magnetostrictive effect) คือการเปลี่ยนจากพลังงานแม่เหล็กไปเป็นพลังงานกล ในส่วนของเฟสที่เป็นแม่เหล็กและปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) คือการเปลี่ยนจากพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าในส่วนของเฟสที่เป็นไพโซอิเล็กทริก ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานแม่เหล็กแสดงได้ดังสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2

$$\text{ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกทางตรง} = \frac{\text{พลังงานแม่เหล็ก}}{\text{พลังงานกล}} \times \frac{\text{พลังงานกล}}{\text{พลังงานไฟฟ้า}} \quad (3.1)$$

$$\text{ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกย้อนกลับ} = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้า}}{\text{พลังงานกล}} \times \frac{\text{พลังงานกล}}{\text{พลังงานแม่เหล็ก}} \quad (3.2)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกเกิดขึ้นได้ทั้งปรากฏการณ์ทางตรงและปรากฏการณ์ย้อนกลับ ซึ่งปรากฏการณ์ทางตรงอธิบายได้โดยเมื่อให้สนามแม่เหล็กแก่วัสดุส่วนที่เป็นเฟสของแม่เหล็กจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งจะไปตามปรากฏการณ์แมกนีโตสตริกทีฟ ความเครียดที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ดังกล่าว จะส่งผ่านไปยังเฟสของไพโซอิเล็กทริกจึงเป็นผลทำให้เกิดโวลตาโรเซชันทางไฟฟ้าซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก และในทางกลับกันการเกิดปรากฏการณ์ย้อนกลับอธิบายได้โดยเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุ ส่วนที่เป็นเฟสของไพโซอิเล็กทริกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบย้อนกลับ คือการเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าไปเป็น

พลังงานกลความเครียดที่เกิดจากปรากฏการณ์ดังกล่าว จะส่งผ่านไปยังเฟสของแม่เหล็กทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์แมกนีโตสตริกทีฟ



รูปที่ 3.3 ชนิดของสมบัติเฟอร์โรอิก การถูกกระตุ้นโดยสนามภายนอกและการตอบสนอง (Velev et al., 2011)

สมการสำหรับอธิบายการรวมกันของพลังงานกล พลังงานไฟฟ้าและแม่เหล็ก ในปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกเขียนโดยประมาณได้เป็น (Bichurin and Petrov, 2010)

$$\sigma = cS - e^T E - q^T H \quad (3.3)$$

$$D = eS + \varepsilon E + \alpha H \quad (3.4)$$

$$B = qS + \alpha^T E + \mu H \quad (3.5)$$

โดยที่  $\sigma$  คือ ความเครียด

$S$  คือ ความเค้น

$D$  คือ ความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า

$c$  คือ ความแข็งตึง

$\varepsilon$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า

$\mu$  คือ ค่าสภาพซึมซาบได้

$E$	คือ สนามไฟฟ้า	$e$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ไพโอโซอิเล็กทริก
$B$	คือ ความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก	$q$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ไพโอโซแมกเนติก
$H$	คือ สนามแม่เหล็ก	$\alpha$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์แมกนีโตอิเล็กทริก

ตัวยกกำลัง T หมายถึงทรานสโพสของเมตริก เมื่อเมตริก  $c, e, q, \varepsilon, \mu$  และ  $\alpha$  เป็นเมตริก  $(6 \times 6)$ ,  $(3 \times 6)$ ,  $(3 \times 6)$ ,  $(3 \times 3)$ ,  $(3 \times 3)$  และ  $(3 \times 3)$  ตามลำดับ

### 3.4 ประวัติของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิก

Van Suchtelen ได้นำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุผสมสองเฟสในปี 1972 โดยเกิดจากการรวมกันระหว่างเฟสสองเฟสของวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน (Suchtelen, 1972) ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกในวัสดุผสมมีทั้งเฟสของแมกนีโตสตริกทีฟและเฟสของไพโอโซอิเล็กทริกรวมกันอยู่ในตัววัสดุ ซึ่งอธิบายได้ตามสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 ด้านบน ในกรณีนี้กลไกการแปลงผันพลังงานเป็นไปตามสมการที่ 3.6 และสมการที่ 3.7 ถ้าจ่ายสนามแม่เหล็กให้กับวัสดุผสมแล้วจะได้

$$\frac{\partial S}{\partial H} = e^m \quad (3.6)$$

สำหรับเฟสแม่เหล็ก และ

$$\frac{\partial P}{\partial S} = e \quad (3.7)$$

สำหรับเฟสไพโอโซอิเล็กทริก เมื่อ  $S$  คือความเครียด และ  $e^m$  และ  $e$  คือสัมประสิทธิ์ไพโอโซแมกเนติกและสัมประสิทธิ์ไพโอโซอิเล็กทริก ตามลำดับ จากผลดังกล่าววัสดุผสมสองเฟสสามารถอธิบายได้โดย

$$\frac{\partial P}{\partial H} = \alpha = k_c e^m e \quad (3.8)$$

เมื่อ  $k_c$  บังคับคู่ควมระหว่างสองเฟส ( $0 \leq |k_c| \leq 1$ ) และ  $\alpha$  คือสัมประสิทธิ์แมกนีโตอิเล็กทริกของวัสดุผสม ดังนั้นคุณสมบัติใหม่ที่เกิดขึ้นในวัสดุผสมประกอบด้วยเฟสของแม่เหล็กและเฟสของไพโอโซอิเล็กทริก คุณสมบัติแมกนีโตอิเล็กทริกเป็นผลมาจากการรวมกันขององค์ประกอบสองเฟส

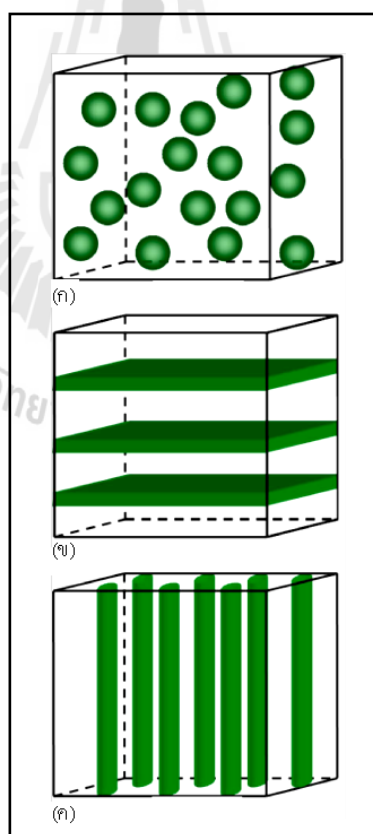
เมื่อสัมประสิทธิ์โพโซแมกเนติกและสัมประสิทธิ์โพโซอิเล็กทรอนิกส์มีค่าสูงจะทำให้สัมประสิทธิ์แมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์มีค่าสูงตามไปด้วย

หลังจากวัสดุที่แสดงปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเกิดจากการรวมกันระหว่างเฟสของแมกนีโตสตรีกทิฟและโพโซอิเล็กทรอนิกส์ถูกนำเสนอ นักวิทยาศาสตร์ในห้องแล็บฟิลลิปส์ (Phillips Laboratory) ได้ทำการศึกษาและวิจัยทำให้ได้ค่าคงที่ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์ที่มีค่าสูงและได้นำเสนอวัสดุผสมชนิดอื่น ๆ (Boomgard et al., 1974; Run et al., 1976; Boomgard et al., 1976; Boomgard et al., 1978) พวกเขาได้ทำการเตรียมวัสดุผสมของ  $\text{BaTiO}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_4$  โดยใช้วิธีการแข็งตัวแบบทิศทางเดียวขององค์ประกอบยูเทคติก (unidirectional solidification of eutectic) ในระบบซึ่งประกอบไปด้วย Fe-Co-Ti-Ba-O และได้ค่าสัมประสิทธิ์แมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สูงที่สุดเท่าที่เคยได้มีการนำเสนอมาคือ  $= 0.13 \text{ V/cm Oe}$  ที่อุณหภูมิห้อง ค่าปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์ได้รับการค้นคว้าโดยใช้วิธีการนี้อีกประมาณหนึ่งร้อยครั้งซึ่งมากกว่าวิธีการผลิตวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกแบบเฟสเดียว แต่การเตรียมวัสดุโดยใช้วิธีการแข็งตัวแบบทิศทางเดียวเป็นวิธีที่ซับซ้อนและต้องการการควบคุมเป็นพิเศษทั้งส่วนผสมและกระบวนการเตรียม ทำให้ในเวลานั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกไม่เป็นที่ดึงดูดความสนใจและงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกได้หยุดนิ่งเป็นเวลากว่า 20 ปี ในต้นปี 1990 กลุ่มของ Newnham (Newnham's group) (Harshe et al., 1993) และนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย (Lopatin et al., 1994; Lupieko et al., 1995; Bichurin et al., 1997) ได้เตรียมเซรามิกผสมของเฟอร์ไรท์และแบเรียมไทเทเนต ( $\text{BaTiO}_3$ ) หรือ  $\text{Pb(ZrTi)O}_3$  (PZT) โดยใช้กระบวนการเผาผนึกแบบปรกติ เซรามิกผสมที่เตรียมด้วยกระบวนการเผาผนึกสามารถทำได้ง่ายและมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการเตรียมแบบยูเทคติกรวมทั้งสามารถเพิ่มเฟสอื่น ๆ เข้าไปในโครงสร้างได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามวัสดุเซรามิกที่เตรียมโดยใช้วิธีเผาผนึกนี้ให้ค่าสัมประสิทธิ์แมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ต่ำกว่าวัสดุผสมที่เตรียมโดยใช้วิธียูเทคติกก่อนหน้านี้จากแล็บฟิลลิปส์ ถึงแม้ว่าการศึกษาทดลองเกี่ยวกับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกในปี 1990 จะไม่มีความก้าวหน้ามากนัก มีโมเดลใหม่ออกมาน้อยแต่ได้มีการศึกษาและพัฒนาจนเข้าใจการผสมกันระหว่างสองเฟสของเฟอร์โรอิกและสามารถทำนายผลของการตอบสนองของเมตริกซ์แมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์ในเซรามิกผสมแบบก้อนได้ งานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกปรากฏอีกครั้งเมื่อต้นปี 2000 ในระยะเวลาไม่กี่ปีได้มีการนำเสนอรูปแบบการเชื่อมต่อของวัสดุผสมแบบต่าง ๆ มากมาย รวมถึงประเภท 0-3 อนุภาคคอมโพสิตและประเภท 2-2 คอมโพสิตแบบแผ่นได้ถูกนำเสนอ ค่าสัมประสิทธิ์แมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สูงที่สุดของวัสดุผสมแบบแผ่นประเภท 2-2 มีค่าหลายร้อย  $\text{mV/cm Oe}$  ที่อุณหภูมิห้อง (Simivasan et al., 2002)

เหตุการณ์สำคัญในการพัฒนาวัสดุผสมแมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์คือการเกิดขึ้นของไอแอนท์แมกนีโตสตรีกทิฟของโลหะผสมของธาตุหายาก  $\text{Tb}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_2$  (Terfenol-D) ในปี 2001 (Ryu et al.,



2001; Ryu et al., 2001; Dong and Viehland, 2003) โดยการพัฒนาด้วยเทคนิคฟังก์ชันของกรีน (Green's function technique) (Nan and Haung, 2001; Nan et al., 2001) โดยการนำวัสดุผสมของ Terfenol-D ไปยึดติดกับไพโซโซอิเล็กทริกพอลิเมอร์ เช่น poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) co-polymer [P(VDF-TrFE)] หรือวัสดุไพโซโซอิเล็กทริก เช่น PZT และวัสดุผสมแบบแผ่นของ Terfenol-D/P(VDF-TrFE) หรือ Terfenol-D/PZT ทำให้สามารถแสดงปรากฏการณ์ไจแอนท์แมกนีโตอิเล็กทริก (GME) ได้ ต่อมาวัสดุผสมแบบแผ่น Terfenol-D/PZT (Ryu et al., 2001; Ryu et al., 2001; Dong and Viehland, 2003) และวัสดุผสม Terfenol-D/PVDF (Mori and Wuttig, 2002) ได้มีการทดลองทำให้พบว่าสามารถแสดงปรากฏการณ์ไจแอนท์แมกนีโตอิเล็กทริกได้อีกด้วย ในปี 2003 Dong และเพื่อนร่วมงาน (Dong et al., 2003; Zhai et al., 2006) ได้นำเสนอวัสดุผสมแบบแผ่นของ Terfenol-D และวัสดุไพโซอิเล็กทริกและได้พัฒนาตัวอย่างของอุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกในการทำงานอีกหลายชนิดที่ทำมาจากชั้นเซรามิกแบบก้อน



รูปที่ 3.4 รูปแบบการเชื่อมต่อของวัสดุผสม (ก) 0-3 อนุภาคในพอลิเมอร์ (ข) 2-2 คอมโพสิตแบบแผ่น และ (ค) 1-3 คอมโพสิตแบบแท่ง (Nan et al., 2008)

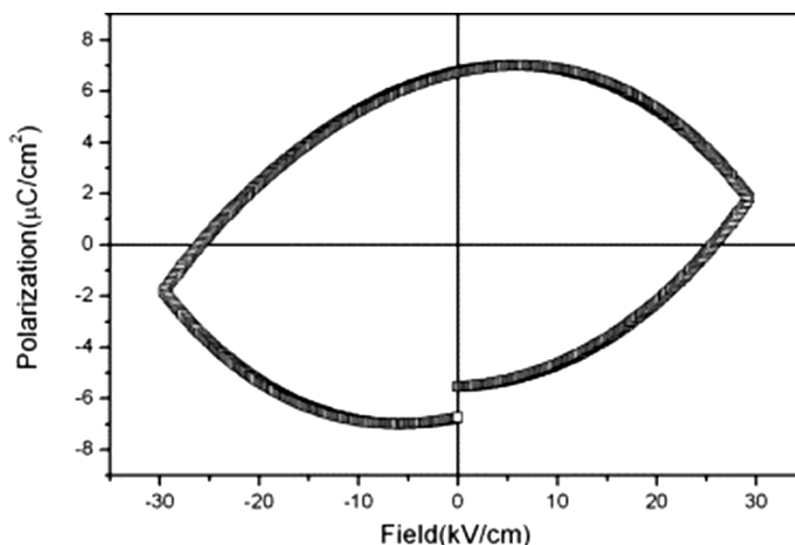
เมื่อไม่นานมานี้เพื่อที่จะเอาชนะความเปราะและพลังงานสูญเสียที่สูงของ Terfenol-D แบบแผ่นที่ใช้ในวัสดุผสมสองเฟสของ Terfenol-D/PZT จึงได้มีการพัฒนาวัสดุผสมสามเฟสของ Terfenol-D/PZT/พอลิเมอร์ขึ้น (Nan et al., 2002; Wan et al., 2003) วัสดุผสมมีรูปแบบการเชื่อมต่อหลายแบบรวมถึงประเภท 0-3, 1-3 และ 2-2 ได้ถูกนำเสนอ (Nan et al., 2002; Lin et al., 2005; Shi et al., 2007) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ค่าสูงสุดของสัมประสิทธิ์แมกนีโตอิเล็กทริกในวัสดุผสมแบบสามเฟสคือ 0.1 V/cm Oe ที่อุณหภูมิห้อง และมากกว่า 1 V/cm Oe ที่เรโซแนนซ์

ในปัจจุบันโครงสร้างแบบนาโนของวัสดุผสมแบบฟิล์มบางของเฟสแม่เหล็กและเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ถูกพัฒนามากขึ้น ในปี 2004 Zheng และคณะ (Zheng et al., 2004) ได้นำเสนอการริเริ่มทดลองโครงสร้างแบบนาโนของระบบ  $\text{BaTiO}_3/\text{CoFe}_2\text{O}_4$  ด้วยการเชื่อมต่อแบบ 1-3 และ 2-2 ในสองปีล่าสุดได้มีการนำเสนอการทดลองและทฤษฎีของวัสดุผสมมัลติเฟอร์โรอิกแบบฟิล์มบางมากมาย ทำให้วัสดุมัลติเฟอร์โรอิกกลายเป็นหัวข้อที่น่าสนใจอีกครั้งในปัจจุบัน

### 3.5 เซรามิกบิสมาทเฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต

มีวัสดุมัลติเฟอร์โรอิกเพียงแค่นี้ไม่กี่ชนิดที่สามารถแสดงทั้งสมบัติแม่เหล็กและสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ (Erenstein et al., 2006; Velez et al., 2011) ปัจจุบันการพัฒนาและวิจัยเกี่ยวกับวัสดุมัลติเฟอร์โรอิกได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง แต่มีเพียงบิสมาทเฟร์ไรท์ ( $\text{BiFeO}_3$ ; BF) เท่านั้นที่ได้รับการศึกษาค้นคว้าอย่างกว้างขวางที่สุด เพราะเป็นวัสดุมัลติเฟอร์โรอิกที่แสดงสมบัติแมกนีโตอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องและถูกใช้ในอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Kubler and Schmid, 1990; Ismailzade et al., 1980; Fujii et al., 1986; Sunder et al., 1995; Wada et al., 1997; Yun et al., 2004; Li et al., 2004; Vopsariou et al., 2008) โครงสร้างของ BF เป็นโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ (perovskite) แบบรวมโบฮีเดรล (rhombohedral) กลุ่ม R3c  $a = 5.634 \text{ \AA}$  และมุม  $\alpha = 59.348^\circ$  อย่างไรก็ตาม BF มีความต้านทานต่ำเนื่องจากสถานะออกซิเดชันของการเปลี่ยนแปลงประจุของเหล็กจาก  $\text{Fe}^{3+}$  เป็น  $\text{Fe}^{2+}$  ทำให้เกิดการสร้างช่องว่างออกซิเจนและมีปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกที่ต่ำ (Wang et al., 2006) ทิศทางโมเมนต์แม่เหล็กของโครงสร้างแบบซูโดคิวบิกของ BF การเปลี่ยนแปลงของเฟอร์โรแมกเนติกจะเกิดในทิศทาง  $\langle 111 \rangle$  และการเปลี่ยนแปลงของแอนไทเฟอร์โรแมกเนติกจะเกิดระหว่างระนาบที่อยู่ติดกัน อย่างไรก็ตามการเตรียมเซรามิก BF บริสุทธิ์ให้มีความเสถียรสูงนั้นทำได้ยาก (Yoneda et al., 2008; Chandarak et al., 2009) ดังนั้นระบบของเซรามิก BF จึงจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการในการเพิ่มความเสถียรของโครงสร้าง นอกจากนี้ปัญหาอื่น ๆ ที่สำคัญของเซรามิก BF คือมีความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำดังที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกดังแสดงในรูปที่ 3.5 และสมบัติไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมินั้น ๆ เซรามิกที่มีโครงสร้าง

แบบเพอโรฟสไกต์ เช่น  $\text{BaTiO}_3$  (BT),  $\text{PbTiO}_3$  (PT) และ  $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$  (PZT) เป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง วัสดุแมลติเฟอร์โรอิก BF ถูกผสมด้วยวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก PT และพบว่ามันสามารถแสดงสมบัติแมลติเฟอร์โรอิกที่สูงขึ้นกว่าเดิม ค่าโพลาไรเซชันและแมกนีไตเซชันสูงกว่า BF บริสุทธิ์

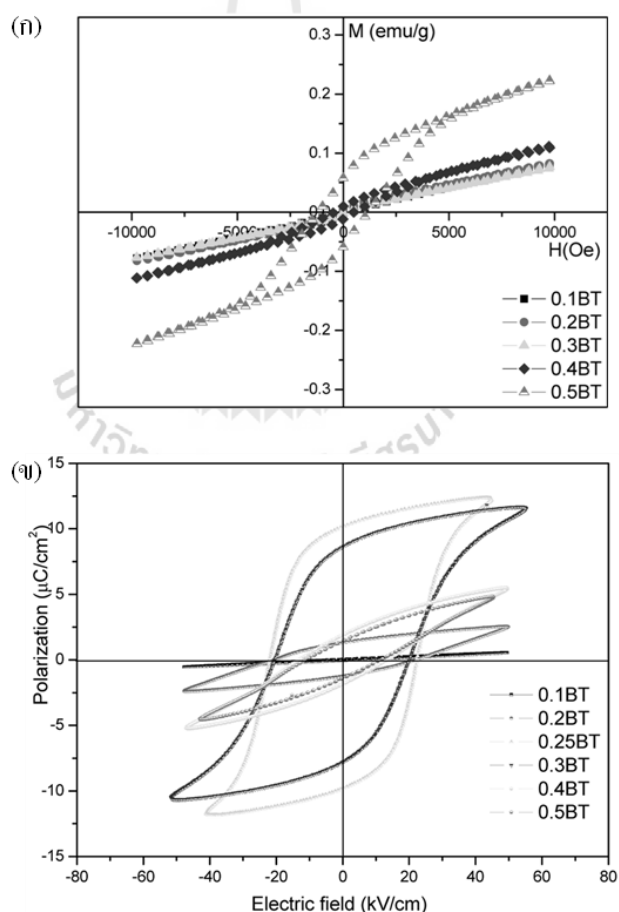


รูปที่ 3.5 ววงนโพลาไรเซชันฮิสเทอรีซิสของเซรามิก BF บริสุทธิ์ (Mazumder and Sen, 2009)

เป็นที่ทราบกันดีว่าตะกั่ว (Pb) เป็นธาตุที่มีพิษ ดังนั้นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ปราศจากตะกั่ว จึงได้ถูกศึกษาสำหรับผสมกับ BF และยังคงแสดงสมบัติที่เหมือนกับตะกั่ว แบเรียมไทเทเนต (BT) เป็นตัวอย่างของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีมาก (สำหรับผลึกเดี่ยว  $T_c = 121\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_s = 26\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$  และ  $\epsilon_r = 2000$  และสำหรับชิ้นเซรามิก  $T_c = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_s = 14.6\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$  และ  $\epsilon_r = 1400\text{-}2100$ ) (Jaffe et al., 1971) ซึ่งคล้ายกับ PT

วิธีการจะได้วัสดุที่มีสมบัติแมลติเฟอร์โรอิกคือการผสมกันของวัสดุที่มีสมบัติเฟอร์โรอิกที่ต่างชนิดกันอย่างเหมาะสม พิจารณาจากมุมมองของโครงสร้างแบเรียมไทเทเนต ( $\text{BaTiO}_3$  หรือ BT) เป็นเซรามิกที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากและถูกศึกษาอย่างกว้างขวาง เป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ซึ่งมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีมาก ดังนั้นการผสมระหว่างวัสดุสองชนิดที่มีสมบัติเฟอร์โรอิกที่ดีเยี่ยมและมีโครงสร้างแบบเดียวกัน (โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ :  $\text{ABO}_3$ ) BT และ BF เป็นการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าและเพิ่มความเสถียรให้กับ BF ใน โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Chandarak, 2008; Chandarak et al., 2009; Itoh et al., 2007)

BF-BT เป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกที่แสดงทั้งสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและสมบัติแม่เหล็กในเวลาเดียวกัน โดยอาศัยประโยชน์ของการแปลงผันของสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกสองชนิดบนพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของอะตอมกลางของผลึกและการหมุนของอิเล็กตรอน ได้มีการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง BF และ BT ในระบบของเซรามิก BF-BT ที่แสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและสมบัติแม่เหล็กได้ดีที่สุด โดยการเพิ่มปริมาณ BT เข้าไปในระบบของ BF ในสัดส่วน  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{BaTiO}_3$  จากการศึกษาพบว่าที่ส่วนผสม 0.75BF-0.25BT เป็นองค์ประกอบบริเวณมีชื่อเรียกว่า “รอยต่อสถานะที่มีสัณฐานเหมือนกัน” (morphotropic phase boundary: MPB) ซึ่งที่สัดส่วนนี้จะแสดงสมบัติแม่เหล็กและสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ดีที่สุดดังแสดงในรูปที่ 3.6 ถึงกระนั้นเซรามิก 0.75BF-0.25BT ยังคงมีค่าโพลาริเซชันตกค้าง ( $P_r$ ) ที่ต่ำ โดยมีค่าประมาณ  $12 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  และค่าสนามไฟฟ้าลบล้าง ( $E_c$ ) เท่ากับ  $22 \text{ kV}/\text{cm}^2$  (Chandarak et al., 2009)



รูปที่ 3.6 (ก) วงวนฮีสเทอรีซิส  $B-H$  (ข) วงวนฮีสเทอรีซิส  $P-E$  ของเซรามิก  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{BaTiO}_3$  โดยที่  $x = 0.1-0.5$  (Chandarak et al., 2009)

### 3.6 สมบัติไดอิเล็กทริก

วัสดุไดอิเล็กทริก ถือได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในทางอุตสาหกรรม โดยทั่วไปแล้ววัสดุไดอิเล็กทริกมีสมบัติเป็นฉนวนไม่นำไฟฟ้า แต่มีความแตกต่างจากฉนวนไฟฟ้า โดยทั่วไป คือ การมีสมบัติของการเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริกนี้เรียกว่า ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้วัสดุไดอิเล็กทริก ก็ทำให้เกิดโพลาไรเซชันขึ้น ซึ่งจะมีค่าเท่ากับผลรวมของโพลาไรเซชันต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (net polarization/unit volume) ถ้ามีค่าโพลาไรเซชันสูงก็ส่งผลให้วัสดุไดอิเล็กทริกมีค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยสมบัติทางไดอิเล็กทริกนี้มีพารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งเกี่ยวข้องกับอยู่ 3 ตัวคือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity;  $\epsilon_r$ ) ความคงทนไดอิเล็กทริก (dielectric strength) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss;  $\tan \delta$ )

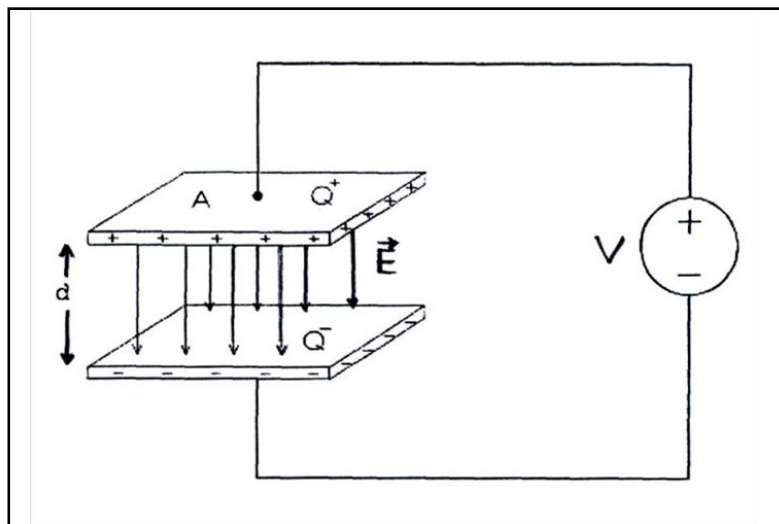
#### 3.6.1 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

พิจารณาตัวเก็บประจุอย่างง่ายคือ เป็นแผ่นขนานที่ทำด้วยโลหะโดยมีระยะห่างเท่ากับ  $d$  พื้นที่หน้าตัดของแผ่นขนานเท่ากับ  $A$  ดังรูปที่ 3.7 ระหว่างแผ่นขนานเป็นสุญญากาศ เมื่อมีศักย์ไฟฟ้า  $V$  ตกคร่อมแผ่นขนาน โดยที่แผ่นโลหะแผ่นหนึ่งจะเป็นแผ่นประจุ  $+Q$  และอีกแผ่นหนึ่งจะเป็นประจุ  $-Q$  ค่าประจุนี้จะเป็นสัดส่วนกับ  $V$  ดังสมการที่ 3.9 และสมการที่ 3.10

$$Q = CV \quad (3.9)$$

$$\text{หรือ} \quad C = \frac{Q}{V} \quad (3.10)$$

โดยที่  $C$  คือค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น C/V หรือ F



รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุแผ่นขนานเมื่อไม่มีสารไดอิเล็กทริก (ฉัฐพล, 2009)

วัสดุไดอิเล็กทริกเป็นฉนวนที่ใช้ทำหน้าที่คั่นระหว่างตัวนำของตัวเก็บประจุเพื่อเพิ่มความหนาแน่นประจุสูงขึ้นกว่าแก๊สรวมของทั้งอากาศ โดยมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เป็นตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้วัสดุไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นเป็นกี่เท่าของตัวเก็บประจุอากาศ ดังสมการที่ 3.11

$$C = \epsilon C_0 \quad (3.11)$$

โดยที่  $C_0$  คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุสุญญากาศ

$C$  คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริก

$\epsilon$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า

โดยปกติค่าสภาพยอมจะแสดงเป็นค่าสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) เทียบกับค่าสภาพยอมของสุญญากาศ ( $\epsilon_0$ ) คือ

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (3.12)$$

โดยที่  $\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศมีค่า  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m

$\epsilon_r$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

และจากความสัมพันธ์  $C = \frac{Q}{V}$  สำหรับกรณีที่ไม่มีวัสดุไดอิเล็กทริกคั่นอยู่ระหว่างแผ่นขนานจะได้ว่า

$$C = C_0 \frac{\epsilon_0 A}{d_0} \quad (3.13)$$

โดยที่  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก

$d_0$  คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนานที่ไม่มีวัสดุไดอิเล็กทริก

ในกรณีที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกวางคั่นอยู่ระหว่างแผ่นขนาน ค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าซึ่งเท่ากับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์หรือเรียกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก ดังสมการที่ 3.14

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (3.14)$$

โดยที่  $\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสุญญากาศมีค่า  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m

$\epsilon_r$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

$C$  คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริก

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก

$d$  คือ ความหนาของสารไดอิเล็กทริก

ค่าความจุไฟฟ้าบ่งบอกถึงความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของสารไดอิเล็กทริกนั้น ๆ ว่ามีค่าเป็นกี่เท่าของสุญญากาศ ซึ่งตัวอย่างของค่า  $\epsilon_r$  ของสารบางชนิดแสดงดังตารางที่ 3.1 ยิ่งมีความจุไฟฟ้ามากเท่าใดยิ่งเก็บประจุได้มากเท่านั้น ถ้าหากตัวเก็บประจุมีขนาดพื้นที่หน้าตัดมากกว่าระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน จะได้ว่าความจุไฟฟ้ามีค่าดังสมการที่ 3.14 การมีสารไดอิเล็กทริกอยู่ในตัวเก็บประจุจะช่วยเพิ่มพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุให้สามารถสร้างตัวเก็บประจุขนาดเล็กแต่ความจุไฟฟ้าสูงได้

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของสารบางชนิด

Ceramic	$\epsilon_r$	$\tan \delta$
BaTiO <sub>3</sub>	1700	0.5
Pb(Zr <sub>0.52</sub> Ti <sub>0.48</sub> )O <sub>3</sub>	1060	0.08
65Pb(Mg <sub>1/3</sub> Nb <sub>2/3</sub> )O <sub>3</sub> -35PbTiO <sub>3</sub>	3640	-
Bi <sub>4</sub> Ti <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	120	0.04
PbNb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	225	1.0

### 3.6.2 ความคงทนไดอิเล็กทริก

ความคงทนไดอิเล็กทริกคือปริมาณพลังงานที่วัสดุสามารถเก็บไว้ได้ที่ความต่างศักย์สูง ๆ หรือค่าของปริมาณสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วัสดุยังคงรักษาความเป็นฉนวนไว้ได้ มีหน่วยเป็น kV/mm กรณีวัสดุไดอิเล็กทริกได้รับความต่างศักย์ที่สูงมากเกินไปค่าความคงทนไดอิเล็กทริกวัสดุจะถูกทำลายและมีการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น การพังทลายของวัสดุไดอิเล็กทริกเกิดขึ้นได้ดังต่อไปนี้

เบรกดาวน์ปริสุทธิ เริ่มจากอิเล็กตรอนจำนวนน้อยในแถบการนำอาจทำให้เกิดไอออนได้ สิ่งตามมาคือจำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นมากจนแผ่นเซรามิกเสียหาย อาจมากถึง 100 MV/m นอกจากนี้ยังมี

เบรกดาวน์ทางความร้อน เพราะมีการสูญเสียความร้อนและถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมไม่ทันเกิดอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้สมบัติทางไฟฟ้าพังทลายไป การเกิดการพังทลายด้วยความร้อนจะนำไปสู่การพังทลายด้วยไฟฟ้า นอกจากนี้การเกิดการรั่วของประจุอาจเกิดในรูพรุนในเซรามิก การพังทลายของเซรามิกจะขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุนหรืออีกนัยหนึ่ง หากรูพรุนใหญ่จะเกิดการพังทลายได้ง่ายขึ้น

### 3.6.3 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก

เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ พฤติกรรมวัสดุจะแตกต่างออกไปจากเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้ากระแสสลับสนามไฟฟ้าจะสลับตามรูปแบบของคลื่นไซน์ ดังนั้นเมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับแก่วัสดุไดอิเล็กทริกไดโพลภายในวัสดุไดอิเล็กทริกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลับไปมาตามความถี่ของสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่ให้ โดยที่ความถี่สูงไดโพลจะกลับตัวไม่ทันกับสนามไฟฟ้าที่ให้ ส่งผลให้เกิดการคลายตัวขึ้นหรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุไดอิเล็กทริก ไดโพลในวัสดุไดอิเล็กทริก



จะใช้พลังงานที่ให้ในการกลับตัวไปมาแต่เมื่อความถี่สูงโคโพลกลับไม่ทันจึงทำให้ไม่กลับตัว แต่ยังคงรับพลังงานจากสนามไฟฟ้าอยู่ พลังงานที่สารได้รับจะค่อย ๆ สะสมเกิดเป็นความร้อนขึ้นเกิดเป็นการสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กทริก

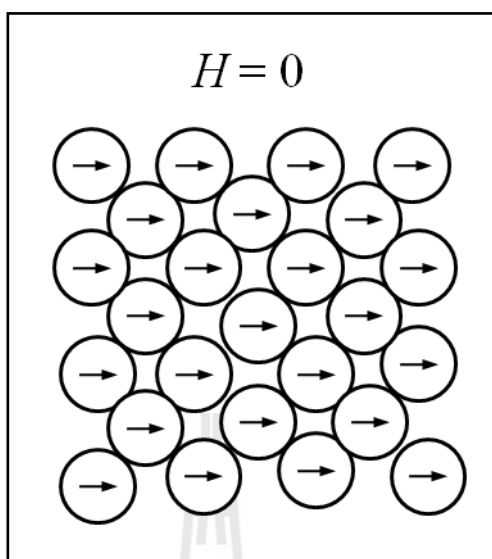
เมื่อพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิต่อค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก โดยทั่วไปแล้วค่านี้ควรจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งการที่เพิ่มขึ้นของค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกนี้มีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่ว นั่นคือเกิดการลดของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของสารไดอิเล็กทริก แต่ยังมีสาเหตุอื่น ๆ อีกที่ต้องนำมาพิจารณาด้วยกันคือ

- 1) การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไม่ถึงอนันต์
- 2) การสูญเสียเนื่องจากการคลายตัวของขั้วไฟฟ้า
- 3) การสูญเสียเนื่องจากอิเล็กตรอน โพลาริเซชัน
- 4) การสูญเสียเนื่องจากการสั่นของไอออน

สาเหตุในข้อ 3) และ 4) นั้นจะเกิดในย่านความถี่สูง ๆ เท่านั้น และสาเหตุสำคัญที่ เกิดความสูญเสียในช่วงความถี่ต่าง ๆ มักมาจากสาเหตุในข้อ 1) และ 2) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิจะขึ้นกับประเภทของวัสดุไดอิเล็กทริก ในวัสดุประเภทมีขั้วนั้นจะมีการสูญเสียเนื่องจากการคลายตัวของขั้วไฟฟ้า และการนำไฟฟ้าซึ่งจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งตัวอย่างของค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของสารบางชนิดแสดงดังตารางที่ 3.1

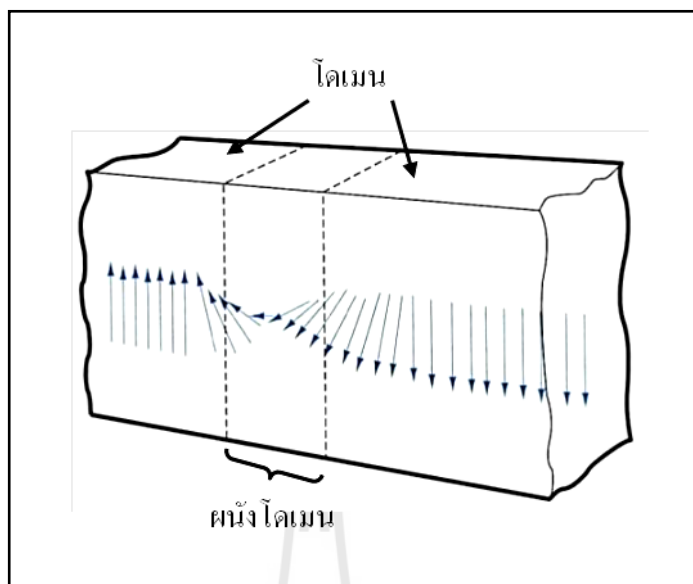
### 3.7 เฟอร์โรแมกเนติก

เฟอร์โรแมกเนติกเป็นปรากฏการณ์ในการเป็นแม่เหล็กแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous magnetization) ของวัสดุแม่เหล็กที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี สภาพเฟอร์โรแมกเนติกของวัสดุที่ยังไม่ได้ผ่านการให้สนามแม่เหล็กจากภายนอกจะไม่ชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 3.8 เนื่องจากบริเวณเล็ก ๆ ภายในวัสดุหรือที่เรียกว่าโดเมน (domain) นั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.9 จะมีทิศทางของการเป็นแม่เหล็กแบบเกิดขึ้นเองจัดเรียงกัน ในลักษณะที่ทำให้อำนาจแม่เหล็กเกิดการหักล้างกันจนหมด ในสถานะพลังงานที่มีค่าต่ำสุด แต่ถ้ามีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ บรรดาโดเมนที่มีทิศทางของการเป็นแม่เหล็กแบบเกิดขึ้นเองเกือบจะขนานไปกับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่มีกระทำก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะที่เดียวกันพวกโดเมนที่มีทิศทางของการเป็นแม่เหล็กแบบเกิดขึ้นเองอยู่ในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามก็จะมีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ เนื่องจากสภาพแม่เหล็กแบบเกิดขึ้นเองนั้นอาจจะมีอำนาจมากกว่าอำนาจของสนามแม่เหล็กจากภายนอกที่ให้เข้ามาอยู่หลายเท่าตัว จึงทำให้วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีสภาพซึมซาบได้สูงมาก และเมื่อหยุดให้สนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.8 สภาวะเฟอร์โรแมกเนติก (Shackelford, 2005)

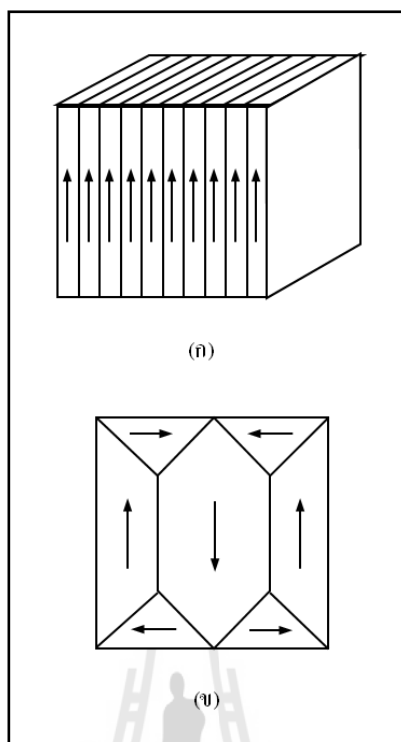
จากภายนอกก็อาจยังคงมีบางส่วนของ โดเมนที่เกิดการจัดเรียงจัดเรียงทิศทางการใหม่แล้วไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปอยู่ในทิศทางแบบเดิมได้เหลืออยู่ จึงทำให้วัสดุนั้นมีอำนาจแม่เหล็กอยู่เพียงแค่ว่าที่ตรวจวัดได้ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนามภายนอก ( $H$ ) กับสภาพการเป็นแม่เหล็ก ( $M$ ) จะทำให้เกิดลักษณะที่เรียกว่า วงวนฮีสเทอรีซิส ดังในรูปที่ 3.12 อย่างไรก็ตามสภาพเฟอร์โรแมกเนติกแท้ ๆ นั้นเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ค่อนข้างยากมาก และมักจะพบเฉพาะในธาตุกลุ่มเหล็ก (Fe) โคบอลต์ (Co) นิกเกิล (Ni) แกโดลิเนียม (Gd) และโลหะผสมเพียงบางกลุ่มเท่านั้น ส่วนพวกสารออกไซด์ที่มีสภาพเฟอร์โรแมกเนติกนั้น จะมีเพียงแค่นึ่งหรือสองชนิดเท่านั้น อย่างเช่น โครเมียมออกไซด์ ( $\text{CrO}_2$ ) ที่นิยมนำไปใช้กันในเทปบันทึกเสียงและภาพ เป็นต้น



รูปที่ 3.9 โดเมนและผนังโดเมนแม่เหล็ก (Shackelford, 2005)

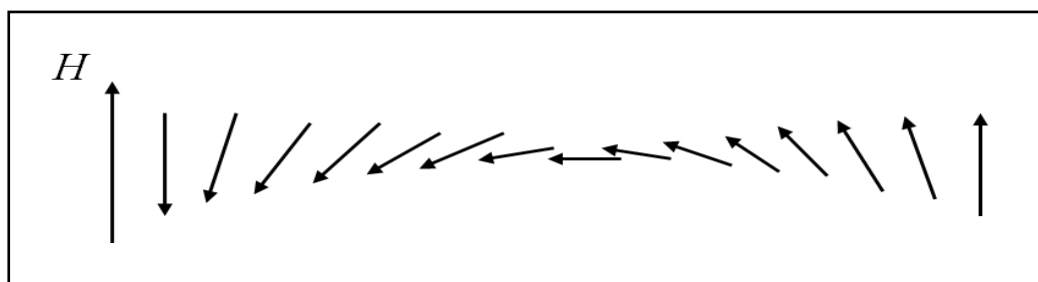
### 3.7.1 โดเมนแม่เหล็ก

สาเหตุที่วัสดุแม่เหล็กซึ่งมีอำนาจแม่เหล็กแบบเกิดขึ้นเองอยู่แต่กลับมีผลรวมของอำนาจแม่เหล็กเป็นศูนย์นั้นสามารถอธิบายได้ด้วยการพิจารณาจากโดเมน เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจุดคูรี วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกจะประกอบด้วยโดเมนขนาดเล็ก ๆ เป็นจำนวนมากซึ่งต่างก็มีความเป็นแม่เหล็กแบบเกิดขึ้นเองอยู่ แต่ละเกรนหรือผลึกที่อยู่ภายในผลึกเชิงซ้อนของสารเซรามิกแม่เหล็กอาจจะประกอบไปด้วยโดเมนเป็นจำนวนมากมายมหาศาลแต่ก็มีเฉพาะทิศทางของความเป็นแม่เหล็กเท่านั้นที่แตกต่างกัน ถ้าหากทำการแบ่งผลึกออกเป็นโดเมนย่อย ๆ โดยมีการวางตัวในทิศทางตรงข้ามกันในลักษณะที่ขนานกัน ดังในรูปที่ 3.10(ก) พลังงานของระบบก็จะลดลงอย่างมาก เนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กสามารถไหลผ่านจากโดเมนหนึ่งไปยังอีกโดเมนหนึ่งที่อยู่ติดกันได้ อย่างเช่น ในกรณีของพวกสปิเนล หรือ การ์เนตนั้น พลังงานแม่เหล็กสถิตจะกลายเป็นศูนย์โดยอาศัยกลไกการจัดวางตัวของบรรดาโดเมนจนครบรอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.10(ข)



รูปที่ 3.10 ลักษณะของโดเมนแม่เหล็กในอุดมคติ (ก) โดเมนที่มีการจัดวางตัวในทิศทางตรงข้ามกัน และ (ข) การจัดวางตัวของบรรดาโดเมนจนครบรอบ (รัตติกกร ยิ้มนิรัญ, 2001)

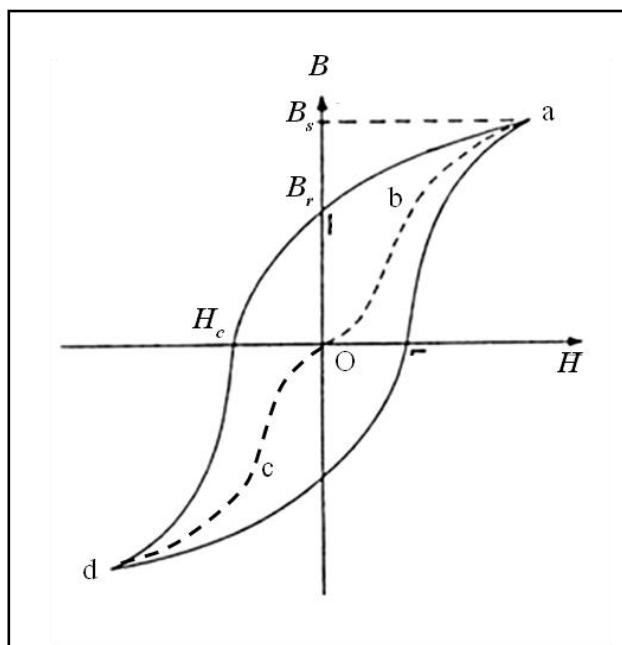
บริเวณรอยต่อระหว่างโดเมนที่อยู่ติดกันจะเรียกว่า ผนังโดเมนหรือผนังของบลอช (Bloch wall) ซึ่งเป็นบริเวณที่สปินมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางวางตัวอย่างค่อยเป็นค่อยไป ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยจะมีขนาดความกว้างของผนังอยู่ในช่วงประมาณ 10-100 nm นอกจากนี้ผนังโดเมนยังสามารถเกิดการเคลื่อนที่ไปมาได้ อย่างเช่นถ้ามีการให้สนามแม่เหล็กเข้าไปก็จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะที่คล้ายกับว่าผนังโดเมนนั้นเคลื่อนตัวมาทางด้านซ้าย เป็นต้น



รูปที่ 3.11 การเปลี่ยนแปลงทิศทางของสปินภายในบริเวณผนังพลังงาน (รัตติกกร ยิ้มนิรัญ, 2001)

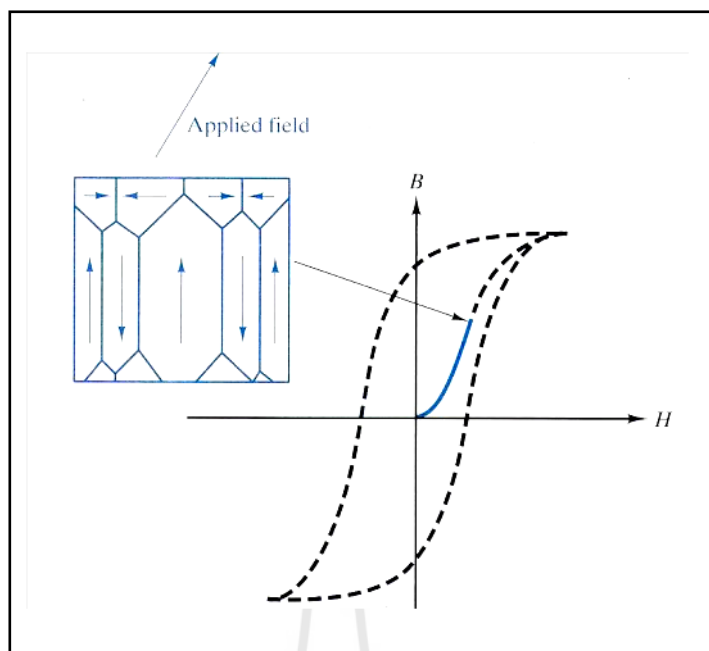
### 3.7.2 วงวนฮีสเทอรีซิส $B-H$

ลักษณะเด่นที่สำคัญของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกก็คือ ความสัมพันธ์ระหว่าง  $B$  และ  $H$  ที่เรียกว่า วงวนฮีสเทอรีซิส ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งสามารถนำมาพิจารณาได้ในทอมของการเปลี่ยนกระบวนการทำให้เป็นแม่เหล็กภายในผลึกเชิงเดี่ยวชนิดที่ประกอบด้วยหลายโดเมน



รูปที่ 3.12 วงวนฮีสเทอรีซิส  $B-H$  ของสารแม่เหล็ก (รัตติกร ยี่มนิรัญ, 2001)

เส้นที่ลากตามแนว dcOba หรือ เส้นโค้งบริสุทธิ์ (virgin curve) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ที่สามารถหาได้จากการทดลองทำให้วัสดุหมดสภาพการเป็นแม่เหล็ก ก่อนที่จะทำการทดลองด้วยการเหนี่ยวนำที่ค่าสนามใด ๆ การเปลี่ยนแปลงของค่า  $B$  ในช่วงใกล้จุดเริ่มต้น (O) จะแสดงถึงสภาพแม่เหล็กที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนแบบผันกลับได้ และเส้นสัมผัส Oc ของเส้นโค้งจะแสดงถึงสภาพแม่เหล็กในช่วงเริ่มต้นที่เรียกว่า สภาพซึมซาบได้เริ่มต้น (initial permeability) หรือ  $\mu_i$  ส่วนการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของค่า  $B$  ในช่วงต่อมานั้น จะเกิดจากการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนแบบผันกลับไม่ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และบริเวณแนวเส้น ba จะแสดงถึงสภาพแม่เหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของโดเมนไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กให้ได้มากที่สุดโดยสามารถหาค่า  $\mu_a$  ได้จากความชันของเส้นกราฟ Oa

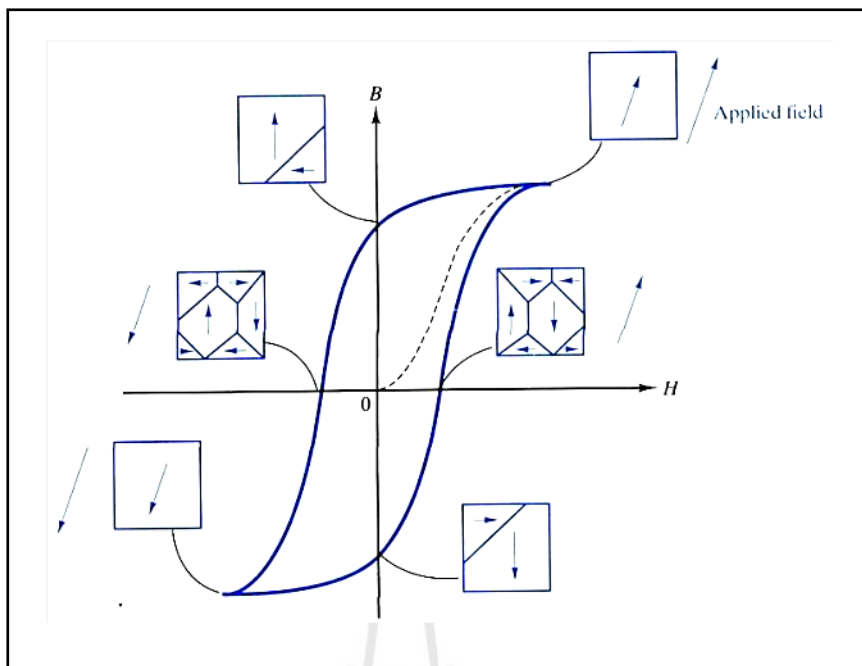


รูปที่ 3.13 การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของค่า  $B$  ในช่วงเริ่มต้นซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน (Shackelford, 2005)

หลังจากที่วัสดุเกิดความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว  $B_s$  แล้วถึงแม้ว่าจะมีการลดสนามแม่เหล็กภายนอกจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์ แต่สภาพการเป็นแม่เหล็กของวัสดุก็ไม่ลดลงจนเป็นศูนย์เนื่องจากการเหนี่ยวนำส่วนที่เหลือ (remanent induction)  $B_r$  อยู่ในตัววัสดุ ดังนั้นการปลดการเหนี่ยวนำทั้งหมดให้กลับมาเป็นศูนย์เหมือนเดิมจึงจำเป็นต้องมีการให้สนามแม่เหล็กเข้าไปในทิศทางที่ตรงกันข้ามขนาด  $H_c$  หรือที่เรียกว่า สนามลบล้างแม่เหล็ก (coercive field) หรือสภาพลบล้างแม่เหล็ก (coercivity) ระหว่างการ เกิดฮิสเทอรีซิสในวัสดุแม่เหล็กจะนำไปสู่การสูญเสียพลังงานเป็นความร้อน โดยมีปริมาณของการสูญเสียพลังงาน  $W_h$  ต่อหน่วยปริมาตรเป็นดังสมการที่ 3.15

$$W_h = \oint BdH \quad (3.15)$$

แถบลูกศรแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงทิศทางของโดเมนแม่เหล็กและผนังโดเมนหรือผนังของบลอซในขณะที่ทำให้สนามแม่เหล็ก โดเมนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นผนังโดเมนจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็กภายนอก การเคลื่อนที่ของผนังโดเมนในขณะเกิดวงวนฮิสเทอรีซิสแสดงดังในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การเคลื่อนที่ของผนังโดเมนขณะเกิดวงวนฮิสเทอรีซิส (Shackelford, 2005)

### 3.8 เฟร์โรอิเล็กทริก

วัสดุเฟร์โรอิเล็กทริก คือ วัสดุที่มีขั้วซึ่งในสถานะที่ไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกแล้วมีทิศทางการจัดเรียงตัวในสถานะสมดุลของเวกเตอร์สภาพการมีขั้วขึ้นเอง (spontaneous polarization) อย่างน้อย 2 ทิศทางและเวกเตอร์สภาพการมีขั้วขึ้นเองทั้งสองนี้สามารถสลับทิศทางกันได้โดยการใส่สนามไฟฟ้า ผลึกของวัสดุเฟร์โรอิเล็กทริกเป็นผลึกที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลางและเกิดไดโพลโมเมนต์ได้ด้วยตัวเองแม้ไม่ได้รับสนามไฟฟ้ากระทำซึ่งเรียกว่าโพลาริเซชันแบบเกิดขึ้นเอง

ผลึกเฟร์โรอิเล็กทริกสามารถแสดงสมบัติโมเมนต์คู่ควบ (dipole moment) ถึงแม้ว่าไม่มีสนามไฟฟ้าแล้วก็ตาม จากเหตุผลที่จุดศูนย์กลางประจุบวกของผลึกไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกับประจุลบมีผลทำให้เกิดโมเมนต์คู่ควบถาวรอยู่ในผลึกในสถานะเฟร์โรอิเล็กทริก และเมื่อนำสารเฟร์โรอิเล็กทริกมาอยู่ในสนามไฟฟ้าพร้อมทั้งลดสนามไฟฟ้าลงจนเป็นศูนย์ พบว่าโพลาริเซชันในวัสดุเฟร์โรอิเล็กทริกไม่เป็นศูนย์แต่ยังเป็นศูนย์เมื่อ  $E = E_c$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารนี้มีโมเมนต์คู่ควบถาวรอยู่แล้ว หรือแสดงให้เห็นว่าสารนั้นแสดงสภาพเป็นเฟร์โรอิเล็กทริกโดยไม่ต้องใช้สนามไฟฟ้าเลย

การเปลี่ยนแปลงของเฟสในวัสดุเฟร์โรอิเล็กทริกสอดคล้องกับการเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและโพลาริเซชันทางไฟฟ้าของ

วัสดุ อุณหภูมิคูรี (Curie temperature,  $T_c$ ) เป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเฟสจาก พาราอิเล็กทริกเฟส (paraelectric phase) ที่อุณหภูมิ  $T > T_c$  วัสดุไม่แสดงสมบัติความเป็นโพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเอง ไปยังเฟอร์โรอิเล็กทริกเฟส (ferroelectric phase) ที่อุณหภูมิ  $T < T_c$  วัสดุแสดงสมบัติโพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเอง อีกทั้งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงและมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิคูรีด้วย ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างเฟสมีโครงสร้างเป็นพาราอิเล็กทริกและไม่มีการแสดงสมบัติความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกใด ๆ ออกมา ซึ่งโครงสร้างเฟอร์โรอิเล็กทริกจะเกิดขึ้นจากการบิดเบี้ยวหรือเสียรูปร่างไปของโครงสร้างพาราอิเล็กทริก โดยที่โครงสร้างเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีความสมมาตรของโครงสร้างที่น้อยกว่าโครงสร้างพาราอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี ไอออนจะมีการเคลื่อนในตำแหน่งสมมูล ซึ่งทำให้เกิดโพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเองเกิดขึ้น

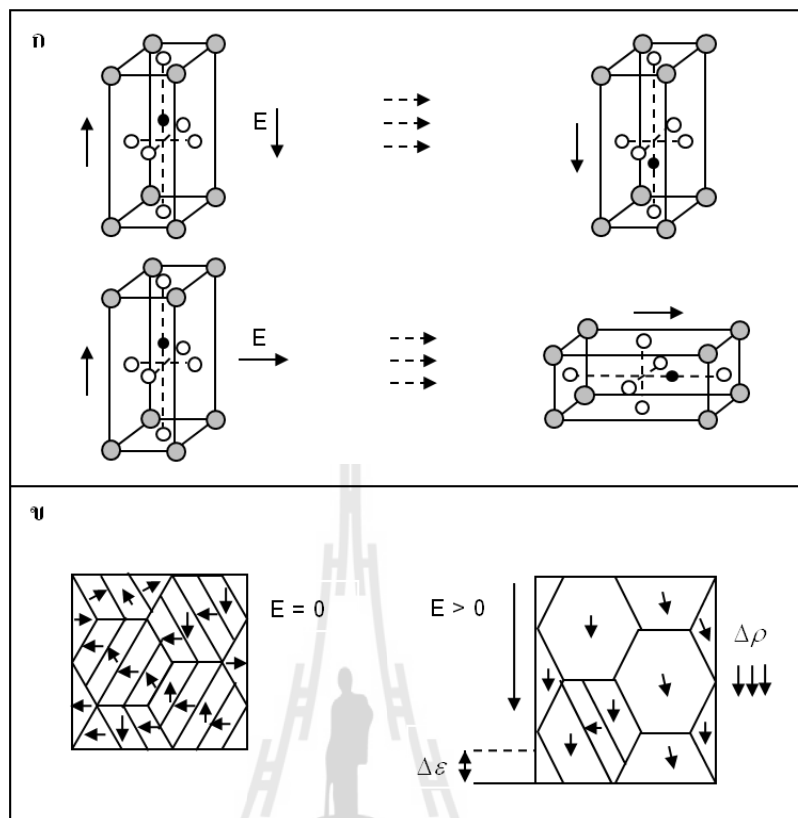
### 3.8.1 การสลับทิศทางของโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก

สำหรับวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก เมื่อให้สนามไฟฟ้าที่มีขนาดมากกว่าค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าสนามไฟฟ้าลบด้าง (coercive field,  $E_c$ ) จะทำให้โพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเองของแต่ละยูนิตเซลล์จัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้านั้น ผลรวมของการจัดเรียงของโพลาไรเซชันในแต่ละยูนิตเซลล์จะทำให้มีการสลับทิศทางของโดเมนและเกิดการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนในแต่ละเกรนของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก ดังรูปที่ 3.15 หลังจากหยุดให้สนามไฟฟ้า โดเมนส่วนใหญ่จะยังคงมีทิศทางเดียวกับทิศทางของสนามไฟฟ้า กระบวนการที่ทำให้เกิดการจัดเรียงของโดเมนนี้เรียกว่ากระบวนการโพลหรือการทำซ้ำ

### 3.8.2 วงวนโพลาไรเซชันฮิสเทอรีซิส

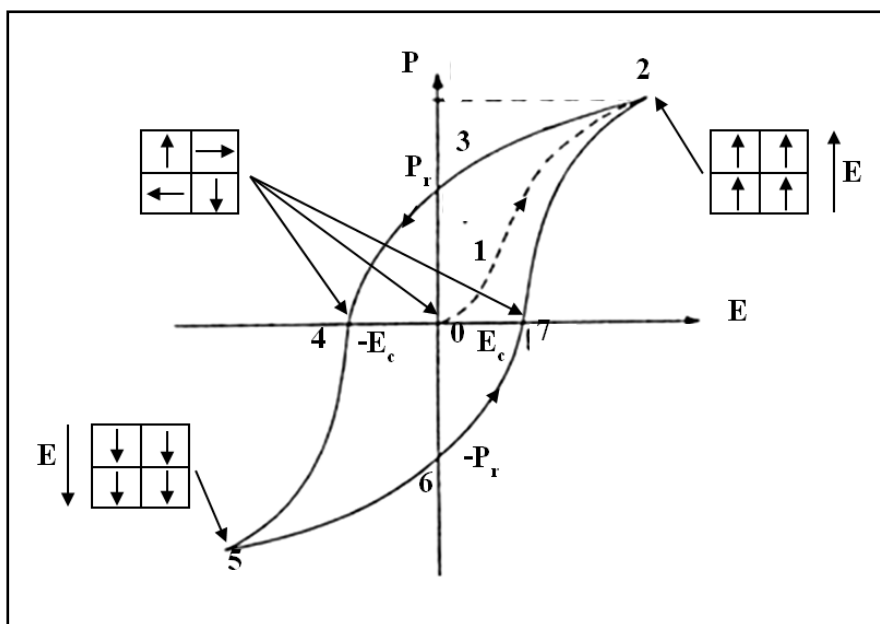
โดยทั่วไปพฤติกรรมของการสลับทิศทางโดเมนของเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกภายใต้สนามไฟฟ้าสามารถแสดงได้ด้วยวงวนโพลาไรเซชันฮิสเทอรีซิส ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโพลาไรเซชันกับสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ที่ค่าสนามไฟฟ้าต่ำๆ (แนวเส้น 0-1) สัดส่วนโดยประมาณของโดเมนที่จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้ายังมีน้อยอยู่ โดเมนส่วนมากยังคงมีทิศทางแบบสุ่ม เมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น (แนวเส้น 1-2) ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของโพลาไรเซชัน ที่บริเวณนี้โดเมนส่วนใหญ่จะจัดเรียงตัวในแนวเดียวกันกับทิศทางของสนามไฟฟ้า ขั้นตอนนี้แสดงถึงการจัดเรียงของโดเมนหรือการสลับทิศทาง เมื่อให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องไปจนกระทั่งโดเมนเริ่มอึดตัว กล่าวได้ว่าโดเมนเกือบทั้งหมดจะเปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า (ที่จุด 2) ในทางตรงกันข้ามเมื่อลดสนามไฟฟ้าลงโพลาไรเซชันก็จะลดลง





รูปที่ 3.15 เมื่อให้สนามไฟฟ้าทำให้เกิด (ก) การจัดเรียงตัวของโพลาริเซชันแบบเกิดขึ้นเอง  $P_s$  ในยูนิทเซลล์ไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า (ข) ผลรวมของการจัดเรียงตัวของโพลาริเซชันส่งผลต่อขนาดโดยรวมของเซรามิก (ดัดแปลงจาก APC International, 2002)

อย่างไรก็ตามพฤติกรรมของโพลาริเซชันจะไม่ถอยกลับตามเส้นโค้งเดิม (ตามแนวเส้น 2-1-0) เมื่อลดสนามไฟฟ้าลงจนมีค่าเป็นศูนย์ โพลาริเซชันจะไม่ลดลงเป็นศูนย์แต่จะลดลงเป็นเส้นตรงไปที่ค่าหนึ่งเรียกว่าโพลาริเซชันตกค้าง (remnant polarization,  $P_r$ ) (จุดที่ 3) เพื่อลดโพลาริเซชันให้เป็นศูนย์ต้องทำการจ่ายสนามไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากับสนามไฟฟ้าลบค้างในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าเดิม รูปที่ 3.16 แสดงให้เห็นว่าเมื่อสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามมีค่าใกล้เคียงกับค่าสนามไฟฟ้าลบค้างที่  $-E_c$  โพลาริเซชันมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามมีค่าเพิ่มขึ้นและผ่านจุด  $-E_c$  โพลาริเซชันจะลดลงอย่างรวดเร็วและผ่านจุดศูนย์ โดเมนมีการจัดเรียงตัวเกือบจะเหมือนกับทิศทางของสนามไฟฟ้า แล้วโพลาริเซชันจะอ้อมตัวอีกครั้ง (ที่จุด 5) พฤติกรรมของโพลาริเซชันในแนวเส้น 5-6 จะซ้ำกับในแนวเส้น 2-3 เมื่อสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามลดลงเป็นศูนย์และวงวนฮิสเทอรีซิสสิ้นสุดที่จุด 2 ตามแนวเส้น 5-6-



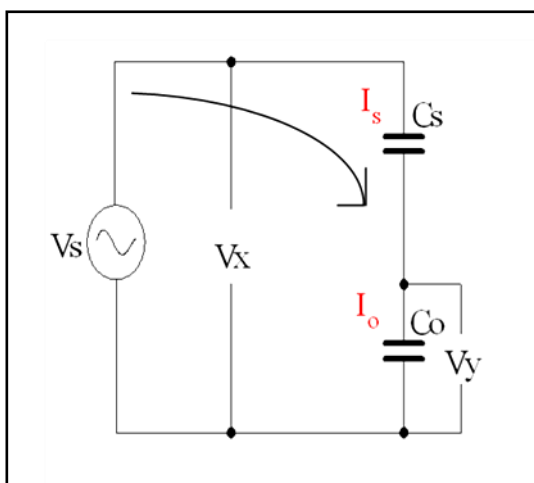
รูปที่ 3.16 วงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิส การจัดเรียงทิศทางของโดเมนแสดงดังทิศทางลูกศร (คัดแปลงจาก APC International, 2002)

### 3.8.2.1 การวัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิส

การวัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสนั้นเป็นการวัดค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่เกิดเนื่องจากการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนให้กับชิ้นงานเซรามิกที่นำมาวัด โดยทั่วไปแล้วการวัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสสามารถทำได้โดยใช้วงจรไฟฟ้าอย่างง่ายที่มีชื่อว่า วงจร Sawyer-Tower

### 3.8.2.2 วงจร Sawyer-Tower

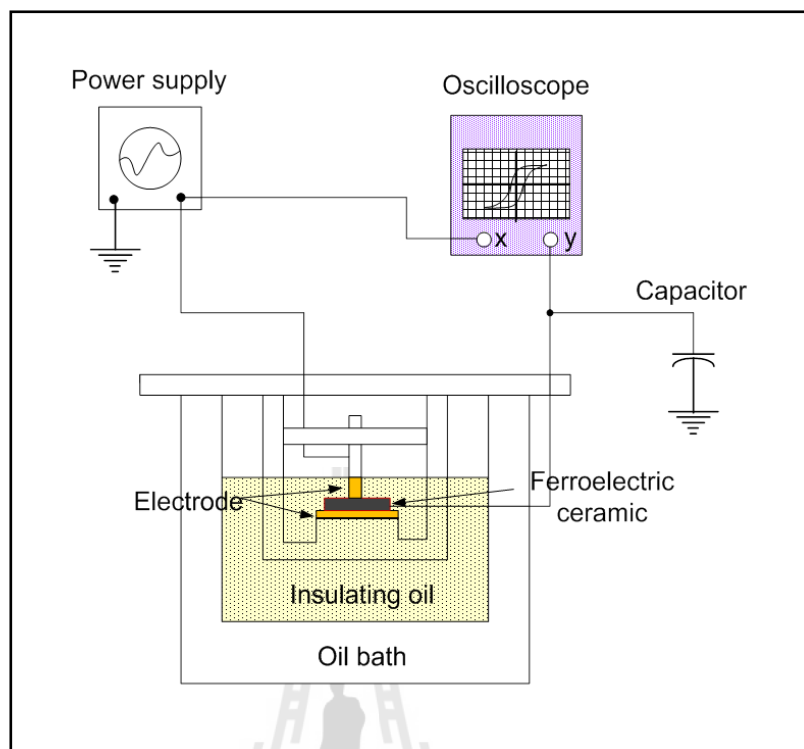
วงจร Sawyer-Tower ใช้สำหรับวัดวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก วงจร Sawyer-Tower ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ตัวเก็บประจุมาตรฐาน ชิ้นงานเซรามิกที่ต้องการวัด ดังแสดงในรูปที่ 3.17



- โดยที่  $V_s$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย  
 $V_x$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแหล่งจ่าย  
 $V_y$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  
 $C_s$  คือ ค่าความจุของวัสดุเซรามิก  
 $C_o$  คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุมาตรฐาน

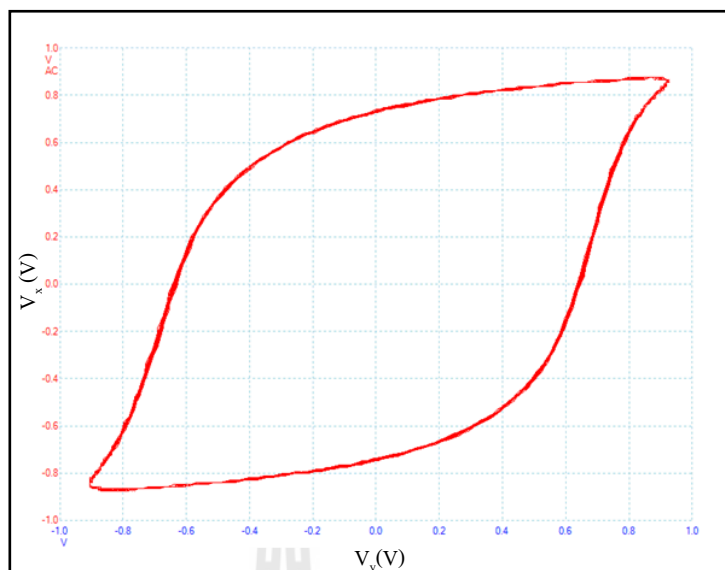
รูปที่ 3.17 วงจร Sawyer-Tower

หลักการที่สำคัญของวงจรนี้คือการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ป้อนจากแหล่งจ่าย ( $V_s$ ) และประจุที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดบนพื้นผิวของชิ้นงานเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก เนื่องจากแรงดัน  $V_x$  สำหรับการวัดประจุบนพื้นผิวของเซรามิกนั้นจะอาศัยความสัมพันธ์  $Q = CV$  โดยทั่วไปการวัดค่าประจุดังกล่าวจะไม่ทำการวัดโดยตรงจากตัวชิ้นงานเซรามิกแต่จะทำการวัดจากตัวเก็บประจุมาตรฐานซึ่งเราทราบค่าความเก็บประจุแล้ว และจากหลักการที่ว่าประจุบนพื้นผิวของตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับเมื่อตัวเก็บประจุต่อกันแบบอนุกรมในวงจรไฟฟ้า ( $Q_{\text{เซรามิก}} = Q_{\text{ตัวเก็บประจุมาตรฐาน}}$ ) ดังนั้นค่าประจุบนชิ้นงานเซรามิกจึงหาได้จาก  $Q_{\text{เซรามิก}} = Q_{\text{ตัวเก็บประจุมาตรฐาน}} = C_o V_y$  แต่อย่างไรก็ตามเงื่อนไขที่สำคัญสำหรับวงจร Sawyer-Tower คือ  $C_o \gg C_s$  ซึ่งจะทำให้แรงดันส่วนใหญ่ตกคร่อมบนชิ้นงานเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกซึ่งทำให้ได้ลักษณะของวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสที่มีความถูกต้องมากขึ้น แผนภาพการจับเครื่องมือเพื่อใช้ในการวัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสแสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แผนภาพการจัดเครื่องมือเพื่อใช้วัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสของเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก

ในทางปฏิบัติแล้วค่า  $V_s$  และ  $V_y$  จะถูกบันทึกโดยออสซิลโลสโคปและจะแสดงลักษณะของกราฟวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิส ข้อควรระวังในการวัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสคือถ้าแรงดันจากแหล่งจ่าย ( $V_x$ ) มีค่ามากเกินไปที่พิกัดของออสซิลโลสโคปจะอ่านค่าได้ ผู้วัดจะต้องสร้างวงจรแบ่งแรงดันหรือใช้โพรบของออสซิลโลสโคปที่ใช้สำหรับไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อทำการอ่านค่าแรงดัน หลังจากที่ทำกรต่อวงจรตามรูปที่ 3.18 แล้วออสซิลโลสโคปจะแสดงวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 วงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสที่แสดงได้โดยตรงจากออสซิลโลสโคป

จากรูปที่ 3.19 แกนนอนของวงวนฮิสเทอรีซิสบนหน้าจอแทนค่าแรงดันที่ตกคร่อมแหล่งจ่าย ( $V_x$ ) และแกนตั้งของวงวนฮิสเทอรีซิสบนหน้าจอแทนค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมาตรฐาน ( $V_y$ ) ซึ่งแปรผันโดยตรงกับประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก เนื่องจากค่าโพลาริเซชันคือค่าประจุต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_{sample} = \frac{Q_s}{A} \quad (3.16)$$

โดยที่  $P_{sample}$  คือ การเกิดสภาพการมีขั้วของเซรามิก

$Q_s$  คือ จำนวนประจุสะสมบนพื้นผิวของเซรามิก

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเซรามิก

เนื่องจาก  $Q_{เซรามิก} = Q_{ตัวเก็บประจุมาตรฐาน} = C_0 V_y$  ดังนั้นค่าโพลาริเซชันสามารถคำนวณได้จาก

$$P_{sample} = \frac{C_0 V_y}{A} \quad (3.17)$$

โดยที่  $V_y$  คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมาตรฐาน

$C_0$  คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุมาตรฐาน

ค่าสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเซรามิก สามารถหาได้จากสมการ

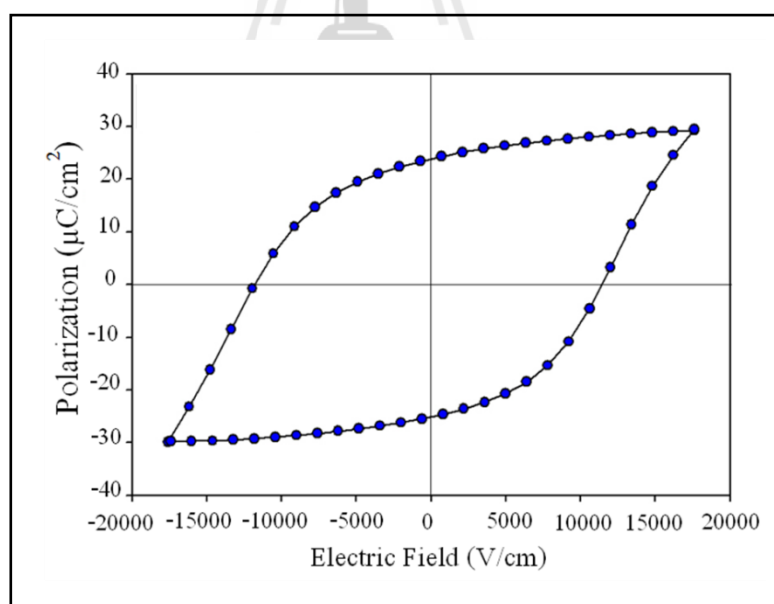
$$E = \frac{V_x}{d} \quad (3.18)$$

โดยที่  $E$  คือ สนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเซรามิก

$V_x$  คือ แรงดันที่ตกคร่อมแหล่งจ่าย

$d$  คือ ความหนาของชิ้นเซรามิก

หลังจากการคำนวณโดยใช้สมการข้างต้นทำให้ได้กราฟวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสซึ่งแนวแกนตั้งจะแสดงค่าโพลาริเซชัน  $C/m$  และแกนนอนจะแสดงค่าของสนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่ผ่านชิ้นเซรามิก  $V/m$  ลักษณะกราฟวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสดังแสดงไว้ดังรูปที่ 3.20

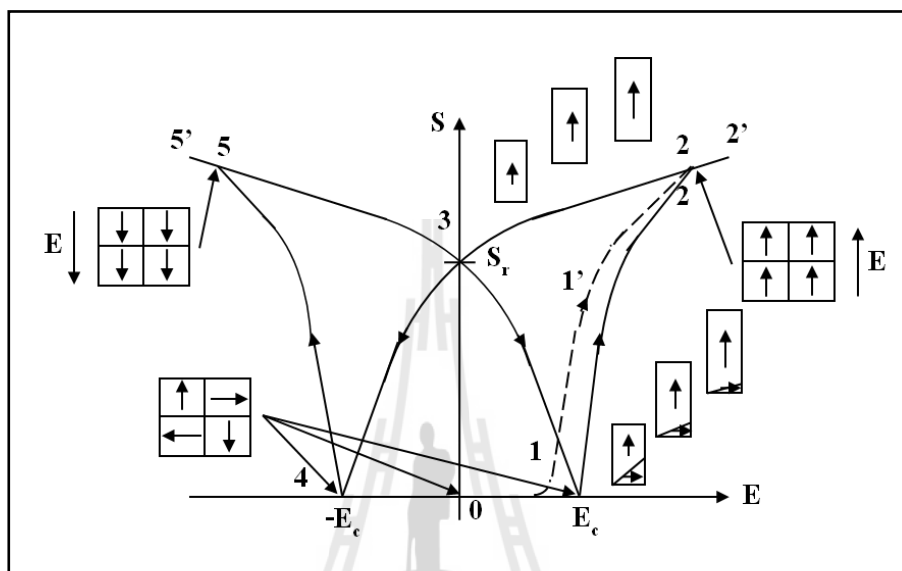


รูปที่ 3.20 วงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสหลังจากผ่านการคำนวณค่าโพลาริเซชันและสนามไฟฟ้า

### 3.8.3 ววงวนความเครียดฮีสเทอริซิสหรือววงวนรูปปีกผีเสื้อ

นอกจากโพลาริเซชันฮีสเทอริซิสแล้ว การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ความเครียด) ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกยังสามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการสลับทิศทางของโดเมนภายใต้สนามไฟฟ้าได้ด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีลักษณะเป็นววงวนรูปปีกผีเสื้อดังแสดงในรูปที่ 3.21 ซึ่งววงวนดังกล่าวได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นกับสนามไฟฟ้า และววงวนรูปปีกผีเสื้อที่แสดงดังรูปที่ 3.21 วัดจากเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ไม่ถูกจับยึดส่วนแกนที่ทำให้สนามไฟฟ้าเอาไว้ เพื่อให้เซรามิกขยายตัวได้อย่างอิสระตามแนวแกนของสนามไฟฟ้า (ที่จุด 0) การจัดเรียงโพลาริเซชันของโดเมนจะกระจายแบบสุ่มที่จุดนี้ยังไม่เกิดการสลับเปลี่ยนทิศทางของโดเมนดังนั้นในช่วงเริ่มต้นความเครียดจึงเป็นศูนย์ กระบวนการสลับทิศทางของโดเมน (เช่น บางโดเมนเริ่มเปลี่ยนไปในแนวเดียวกับทิศทางของสนามไฟฟ้า) เริ่มเมื่อสนามไฟฟ้าเริ่มมีค่าเท่ากับสนามไฟฟ้าลบล้าง (ที่จุด 1) เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าสนามไฟฟ้าลบล้าง โดเมนส่วนใหญ่จะจัดเรียงไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของสนามไฟฟ้า (แนวเส้น 1-2-2') ปรากฏการณ์นี้แสดงโดยแผนภาพของยูนิตเซลล์ซึ่งอยู่ด้านล่างแนวเส้น 1-1'-2 ด้วยเหตุนี้แนวเส้น 1-1'-2 แสดงถึงการขยายตัวที่เกิดจากการสลับทิศทางของโดเมน ความเครียดในส่วนนี้อาจจะเรียกว่าการสลับของความเครียด หลังจากโดเมนสลับทิศทางเสร็จสมบูรณ์แล้วบริเวณจุดที่ 2 จะยังคงมีการเปลี่ยนแปลงในระดับมหภาคของความเครียด (เรียกว่าความเครียดไพโซอิเล็กทริก) ซึ่งเกิดขึ้นที่แนวเส้น 2-2' มีสาเหตุมาจากระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของประจุเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเลื่อนของอะตอมภายใต้สนามไฟฟ้า หลังจากลดสนามไฟฟ้าลงความเครียดไพโซอิเล็กทริกจะลดลงไปที่จุด 3 และการสลับทิศทางของความเครียดเกิดจากการสลับของโดเมนตกค้าง ความเครียดที่จุด 3 เรียกว่าความเครียดตกค้าง การเปลี่ยนแปลงของความเครียดไพโซอิเล็กทริกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าอธิบายอย่างง่ายโดยแผนภาพของยูนิตเซลล์เหนือววงวนรูปปีกผีเสื้อ (แนวเส้น 2'-2-3) ในรูปที่ 3.21 สภาวะขั้วแบบนี้มีความสำคัญสำหรับการใช้งานเพราะชิ้นงานสามารถแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงระหว่างสนามไฟฟ้ากับความเครียดได้ในลักษณะที่เป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (เช่น พฤติกรรมไพโซอิเล็กทริก) สำหรับสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ ถ้าสนามไฟฟ้าที่ง่ายให้มีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้าเดิมโดเมนจะเริ่มสลับทิศทางกลับมาและการจัดเรียงของโดเมนจะเริ่มกลับกลายมาเป็นแบบสุ่ม ซึ่งนำไปสู่การหักล้างของปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบย้อนกลับไปตามแนวเส้น 3-4 ที่จุด 4 เมื่อขนาดของสนามไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับค่าของสนามไฟฟ้าลบล้าง การจัดเรียงของโดเมนจะเป็นแบบสุ่มเหมือนกับเมื่อเริ่มต้นและความเครียดจะกลับมามีค่าน้อยที่สุด (ใกล้ศูนย์) ที่บริเวณนี้เรียกว่าการทำให้สูญเสียสภาพการมีขั้ว ถ้าขนาดของสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นโดเมนจะจัดเรียงในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การสลับ

ของความเครียดและความเครียดพิโซอิเล็กทริกเริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้ง (แนวเส้น 4-5) การสลับทิศทางของโดเมนจะอิมิตัวที่จุด 5 ถ้าขนาดของสนามไฟฟ้ายังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ความเครียดพิโซอิเล็กทริกแสดงได้ดังแนวเส้น 5-5'



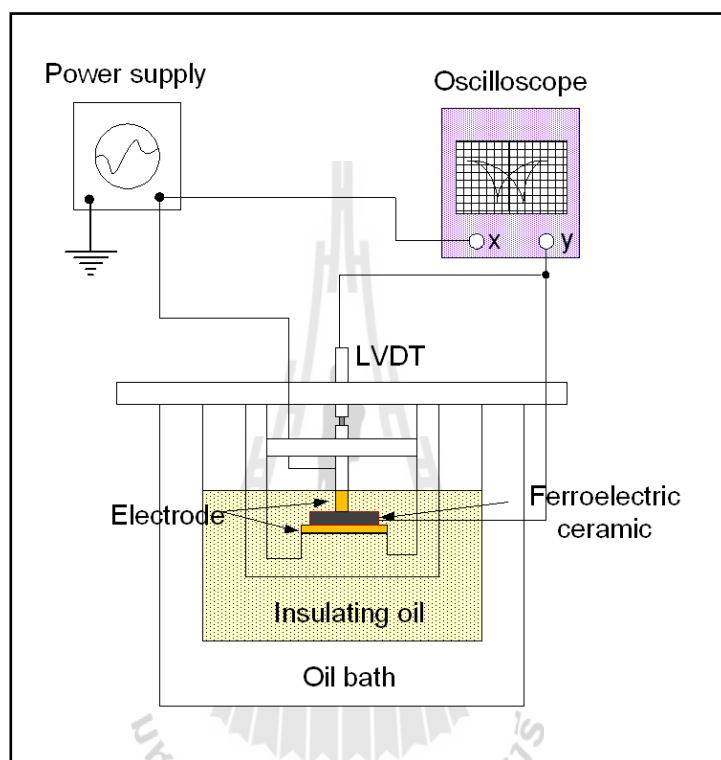
รูปที่ 3.21 แผนภาพของวงวนรูปปึกผีเสื้อ เส้นประแสดงการเริ่มของกระบวนการเกิดโพลาริเซชันของเซรามิกที่ไม่ได้ทำขั้ว การจัดเรียงของโดเมนแสดงดังทิศทางของลูกศร (ดัดแปลงจาก APC International, 2002)

### 3.8.3.1 การวัดวงวนความเครียดฮิสเทอรีซิสหรือวงวนรูปปึกผีเสื้อ

การวัดวงวนรูปปึกผีเสื้อเป็นการวัดความเครียดซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของเซรามิกเพ็โรอิเล็กทริกเนื่องจากปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกแบบย้อนกลับ (converse piezoelectric effect) ทำได้โดยการจ่ายสนามไฟฟ้าให้กับตัวชิ้นงานเซรามิกและทำการวัดการยืดหรือการหดตัวของเซรามิก การวัดดังกล่าวอาจทำโดยใช้เซ็นเซอร์ชนิดแสงเลเซอร์ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานในกรณีนี้จะทำให้ค่าที่วัดได้ค่อนข้างแม่นยำและมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดได้เร็ว เช่นในกรณีที่จ่ายสนามไฟฟ้ากระแสสลับให้แก่ชิ้นงานเซรามิกที่ความถี่สูง แต่อย่างไรก็ตามการเตรียมอุปกรณ์สำหรับวิธีนี้ค่อนข้างยุ่งยากและมีราคาแพง ดังนั้นเพื่อให้การวัดวงวนรูปปึกผีเสื้อทำได้ง่ายจึงใช้ LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์วัดระยะที่เป็นที่นิยมใช้ทั่วไปในการวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดเชิงกล ความละเอียดของการวัดสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงได้ถึงระดับ  $0.1 \mu\text{m}$  และมีราคาต่ำกว่าเซ็นเซอร์ชนิดแสงเลเซอร์

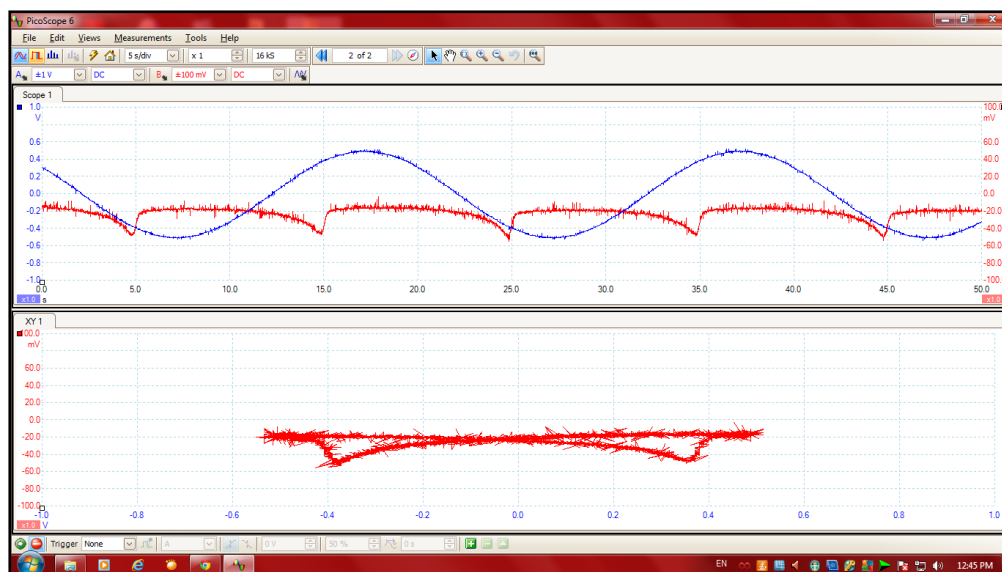


เป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามการวัดโดยใช้ LVDT จุดปลายสัมผัสของ LVDT จะต้องแตะกับชิ้นงานในขณะที่วัด ดังนั้นการวัดโดยวิธีนี้จะต้องออกแบบจุดปลายสัมผัสของ LVDT ให้เป็นฉนวนเพื่อไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปยังอุปกรณ์ LVDT ซึ่งจะทำให้เกิดอันตรายต่อผู้วัดและเครื่องมือได้ การจัดเครื่องมือสำหรับการวัดวงจรรูปปิกมีเสื่อแสดงไว้ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การจัดอุปกรณ์สำหรับวัดวงจรรูปปิกมีเสื่อ

ในทางปฏิบัติแล้วค่า  $V_x$  และ  $V_y$  จะถูกบันทึกโดยออสซิลโลสโคปและจะแสดงลักษณะของกราฟวงจรรูปปิกมีเสื่อ หลังจากที่ทำกรต่อวงจรตามรูปที่ 3.22 และจ่ายไฟให้กับชิ้นงานเซรามิก ออสซิลโลสโคปจะแสดงวงจรรูปปิกมีเสื่อดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 วงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสที่แสดงได้โดยตรงจากออสซิลโลสโคป

จากรูปที่ 3.23 แกนนอนของวงวนฮิสเทอรีซิสบนหน้าจอแทนค่าแรงดันที่ตกคร่อมแหล่งจ่าย ( $V_x$ ) และแกนตั้งของวงวนฮิสเทอรีซิสบนหน้าจอแทนค่าแรงดันเอาต์พุตจาก LVDT ( $V_y$ ) ซึ่งแปรผันโดยตรงกับระยะการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานเซรามิกเฟรโรอิเล็กทริก การคำนวณหาค่าความเครียดทำได้โดยนำค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_y$  มาเปลี่ยนเป็นค่าระยะการเปลี่ยนแปลง โดยค่าแรงดันไฟฟ้า  $1 \text{ mV} = 0.1258 \text{ } \mu\text{m}$  ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการปรับเทียบค่า หลังจากนั้นนำมาคำนวณหาค่าความเครียดตามสมการ 3.19

$$\sigma = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.19)$$

โดยที่  $\sigma$  คือ ค่าความเครียด

$\Delta L$  คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานเซรามิกเทียบกับค่าขนาดเริ่มต้น

$L_0$  คือ ขนาดเริ่มต้นของชิ้นงานเซรามิก

ค่าสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเซรามิก สามารถหาได้จากสมการ

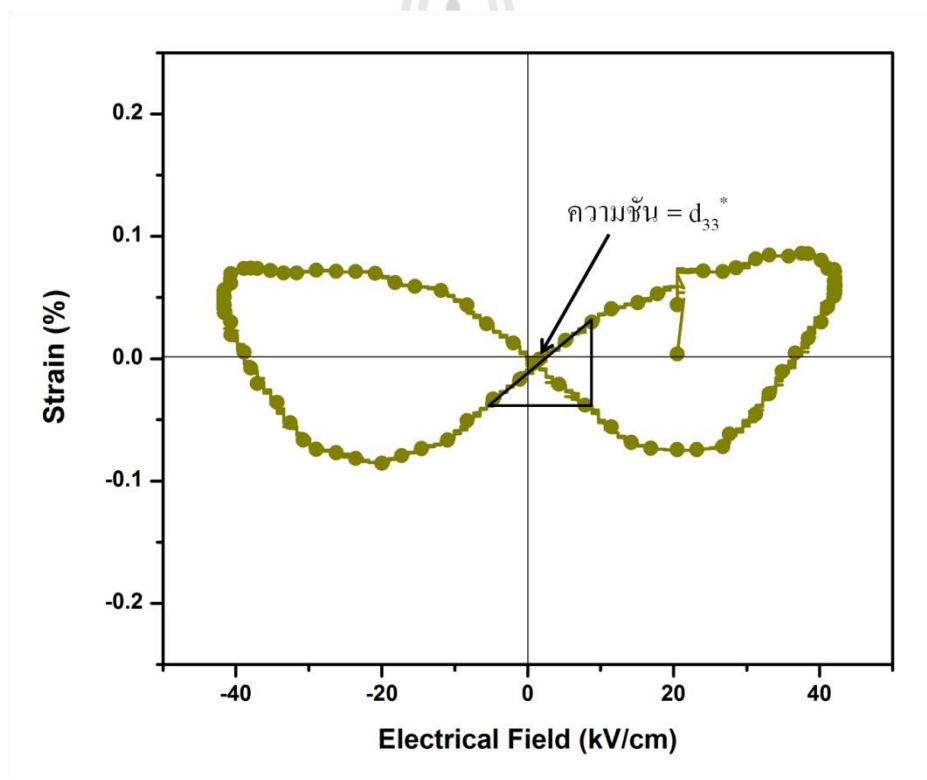
$$E = \frac{V_x}{d} \quad (3.20)$$

โดยที่  $E$  คือ สนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเซรามิก

$V_x$  คือ แรงดันที่ตกคร่อมแหล่งจ่าย

$d$  คือ ความหนาของชิ้นเซรามิก

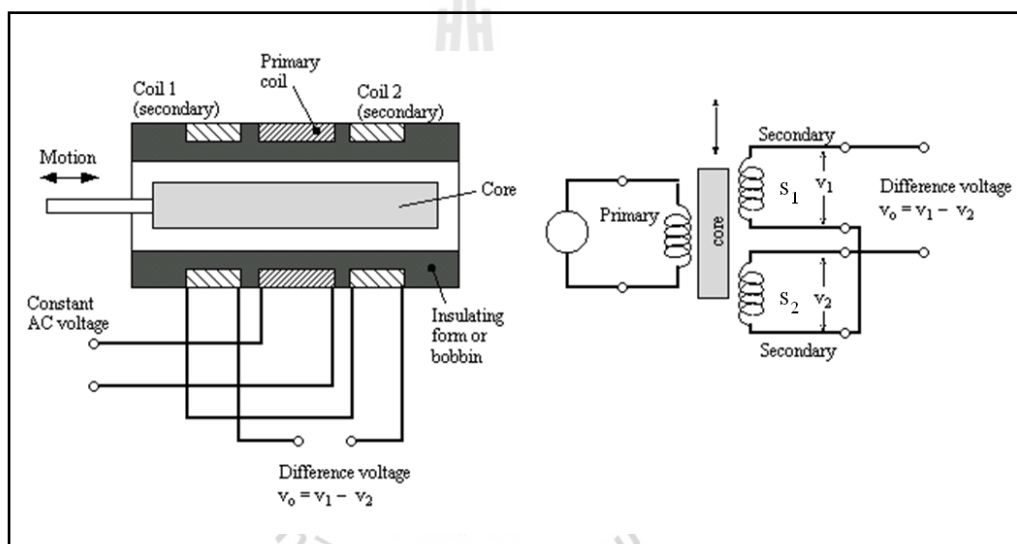
หลังจากการคำนวณโดยใช้สมการข้างต้นจะทำให้ได้กราฟวงวนรูปปีกผีเสื้อซึ่งแนวแกนตั้งจะแสดงค่าความเครียดมีหน่วยเป็น % และแกนนอนจะแสดงค่าของสนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่ผ่านชิ้นเซรามิกมีหน่วยเป็น V/cm ลักษณะกราฟวงวนรูปปีกผีเสื้อดังแสดงไว้ดังรูปที่ 3.24 การวัดวงวนรูปปีกผีเสื้อนอกจากจะทำให้ทราบถึงคุณสมบัติความเป็นโพธิโซอิเล็กทริกแล้วยังสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริก (piezoelectric constant,  $d_{33}$ ) ได้เช่นกัน โดยการหาค่าความชันของกราฟในช่วงที่กราฟตัดผ่านแกน Y และมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริกนี้เรียกว่าค่า  $d_{33}^*$  (อ่านว่า  $d_{33}$  star) ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 วงวนรูปปีกผีเสื้อหลังผ่านการคำนวณค่าความเครียดและสนามไฟฟ้าและการหาค่า  $d_{33}^*$

### 3.8.3.2 หม้อแปลงผลต่างแบบแปรเชิงเส้น

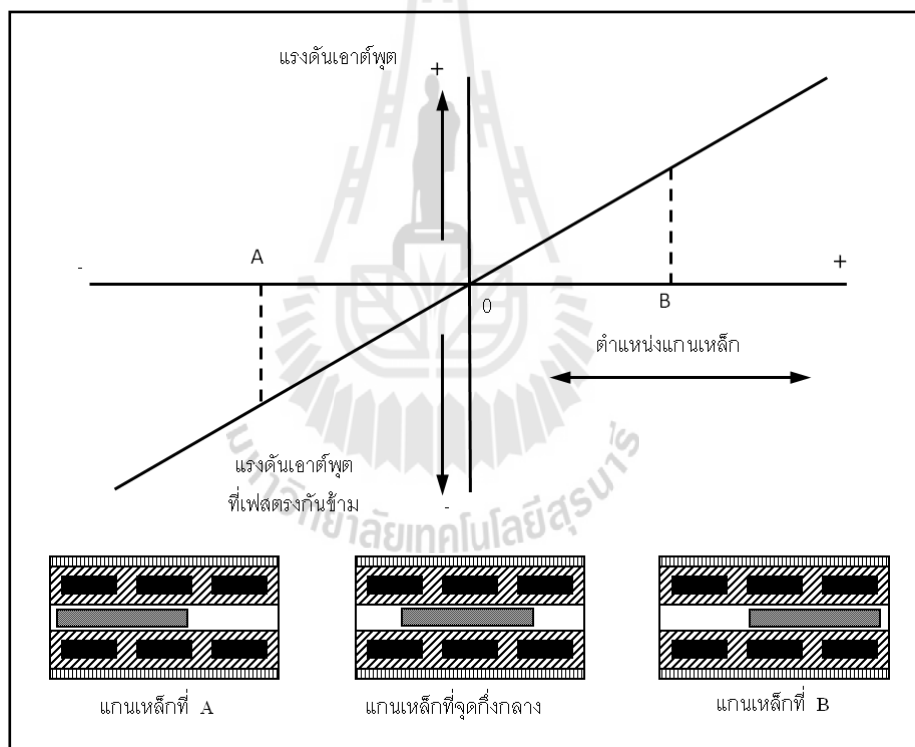
LVDT เป็นตัวแปลงแบบเหนี่ยวนำเถียงงานที่ต้องต่อใช้ร่วมกับแหล่งจ่ายพลังงาน จากภายนอก LVDT เป็นตัวแปลงที่สามารถใช้ตรวจวัดแรงดัน แรง ตำแหน่ง และการแทนที่ โดยใช้หลักการคือ การเคลื่อนที่ของแกนเหล็กของหม้อแปลงเพื่อเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างขดลวด โครงสร้างพื้นฐานของ LVDT ประกอบด้วยขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิสองขด ซึ่งขดลวดทุติยภูมิทั้งสองขดนี้มีจำนวนรอบเท่ากันและต่ออนุกรมกัน แต่ทิศทางของการพันขดลวดทั้งสองจะตรงข้ามกัน ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในขดลวดทั้งสองจะมีศักย์ไฟฟ้าที่ตรงข้ามกัน ดังแสดงในรูป 3.25



รูปที่ 3.25 โครงสร้างและหลักการทำงานของ LVDT (Figliola, 2000)

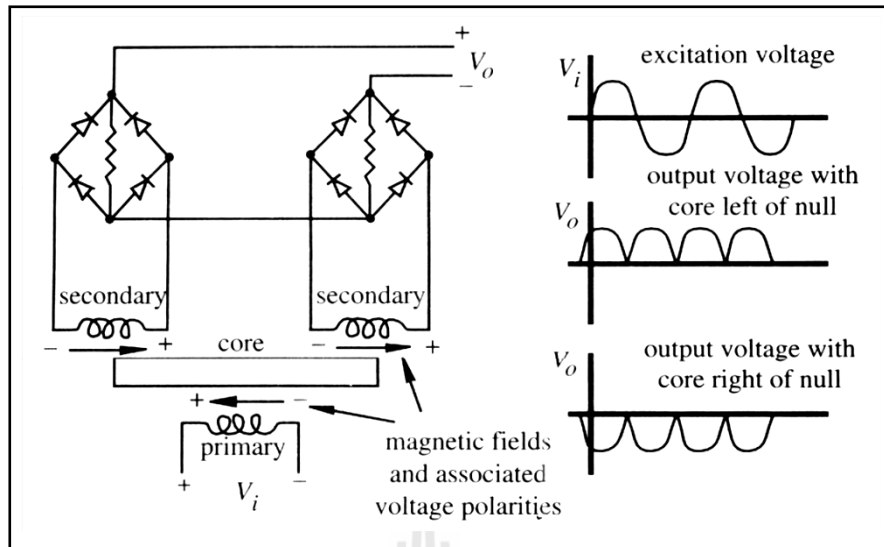
พิจารณาจากรูปที่ 3.25 เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงซึ่งจะมีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิทั้งสองขด ถ้าตำแหน่งแกนเหล็กของหม้อแปลงอยู่ตรงกึ่งกลางพอดี แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิทั้งสองขดนี้จะมีค่าเท่ากัน ( $V_1 = V_2$ ) แต่เนื่องจากขดลวดทุติยภูมิทั้งสองขดนี้พันไว้ในทิศทางที่ตรงข้ามกัน ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทางเอาต์พุตของ LVDT จะมีค่าเท่ากับ 0 V เมื่อมีแรงจากภายนอกกระทำให้แกนเหล็กของหม้อแปลงเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งกึ่งกลางทางขดลวดทุติยภูมิทางด้านบน ( $S_1$ ) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เชื่อมกับขดลวดทุติยภูมิทางด้านบน ( $S_1$ ) จะมีจำนวนมากกว่าขดลวดทุติยภูมิทางด้านล่าง ( $S_2$ ) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิทางด้านบน ( $S_1$ ) จะมี

จำนวนมากกว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิทางด้านล่าง ( $S_2$ ) ซึ่งขนาดแรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) ของ LVDT จึงมีค่าเท่ากับผลต่างของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิทั้งสองขดนี้และจะมีเฟสเช่นเดียวกับเฟสของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิทางด้านบน ( $S_1$ ) ในทำนองเดียวกันถ้ามีแรงจากภายนอกมากระทำทำให้แกนเหล็กของหม้อแปลงเคลื่อนที่ไปทางขดลวดทุติยภูมิทางด้านล่าง ( $S_2$ ) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิทางด้านล่าง ( $S_2$ ) จะมีจำนวนมากกว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิด้านบน ( $S_1$ ) แรงดันเอาต์พุตของ LVDT จะมีค่าเท่ากับผลต่างของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดทั้งสองขด และมีเฟสเช่นเดียวกับเฟสของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิด้านล่าง ( $S_2$ ) ซึ่งค่าแอมพลิจูดของแรงดันเอาต์พุต LVDT ในแต่ละกรณีที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3.26



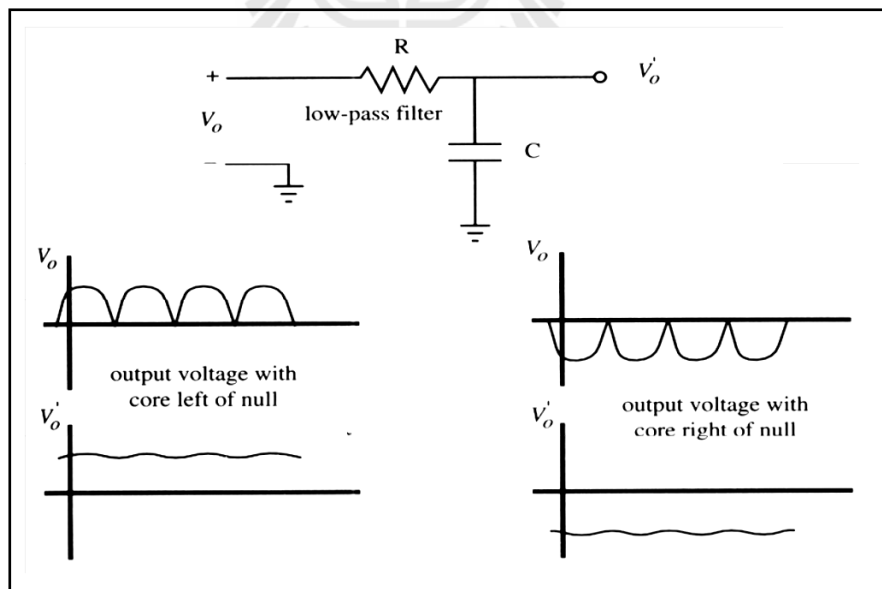
รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับตำแหน่งของแกนเหล็ก (อิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม)

แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากขดลวดทุติยภูมิเป็นไฟฟ้า AC การนำไปใช้งานต้องเปลี่ยนเป็นไฟฟ้า DC โดยการนำไดโอดมาต่อร่วมกับ LVDT ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 การนำไดโอดมาต่อร่วมกับ LVDT (อิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม)

เมื่อนำไดโอดมาต่อร่วมแล้วสัญญาณที่ได้เป็นดังรูปที่ 3.27 แต่เนื่องจากสัญญาณมีค่ากระเพื่อม (ripple) แก้ไขโดยต่อวงจรกรองร่วมเข้าไป สัญญาณที่ได้มีความราบเรียบดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 วงจรกรอง (อิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม)

### 3.8.3.3. คุณลักษณะจำเพาะ

ความเป็นเชิงเส้น ในการผลิต LVDT ที่มีคุณภาพดี จะสามารถทำให้ค่าความเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วง  $\pm 0.25\%$  จากตำแหน่งที่เคลื่อนที่ได้พร้อมกับมีความละเอียดที่สูงมากๆ ค่าที่กล่าวมานี้จะเป็นตัวจำกัดความสามารถในการทำงานเบื้องต้นของ LVDT ต่อการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนที่ที่สามารถวัดได้ ระยะเวลาใช้งานของ LVDT ในช่วงที่เป็นเชิงเส้นจะมีค่าน้อยอาจอยู่ในช่วงจาก  $\pm 25$  cm และต่ำสุดถึง  $\pm 1$  mm แล้วแต่รุ่นและยี่ห้อ

ความไวในการตรวจจับ ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันสถิตหรือฟังก์ชันถ่ายโอนสถิต กำหนดเป็นการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนต่อการเปลี่ยนแปลงระยะที่ตรวจจับมีหน่วยเป็น mV/mm

ความต่างศักย์ที่จุดศูนย์ แรงดันไฟฟ้าเมื่อแกน LVDT อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลาง (ในทางอุดมคติแรงดันจะเป็นศูนย์)

การแยกชัดหรือความละเอียด การเปลี่ยนระยะทางที่น้อยที่สุดที่ยังสามารถแยกความแตกต่างของเอาต์พุตได้ โดยที่ LVDT จะสามารถวัดระยะทางได้ละเอียดมากในระดับไมโครเมตร

การปรับสภาพสัญญาณ การปรับสภาพสัญญาณของ LVDT สามารถทำได้โดยการตรวจจับความไวเฟสของแรงเคลื่อนที่แตกต่างในขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งจะได้เอาต์พุตที่เป็นไฟ DC และมีขนาดสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ ส่วนขั้วของแรงเคลื่อนที่จะเป็นตัวบอกทิศทางในการเคลื่อนที่

ความซ้ำได้ การที่ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าคงเดิมตลอดทุกครั้งเมื่อมีการเคลื่อนที่ซ้ำในระยะเวลาทางอินพุตเดิม

### 3.8.3.4 ข้อดีของ LVDT

1. ไม่มีการสัมผัสกันทางกายภาพระหว่างแกนเหล็กที่เคลื่อนที่และ โครงสร้างของคอยล์จึงมีความฝืดน้อยทำให้สามารถใช้กับการวัดที่มีลักษณะวิกฤตได้ และยังสามารถจะลดค่าดั่งกล่าวลงได้อีกโดยใช้แกนเหล็กที่มีมวลต่ำแต่ก็ไม่สามารถลดผลจากไหลลได้

2. การที่ไม่เกิดความฝืดและไม่สัมผัสกันระหว่างขดลวดและแกนเหล็กของ LVDT ทำให้เกิดการชำรุดน้อย LVDT จึงมีอายุการใช้งานทางกลสูง ดังนั้นจึงเหมาะกับการทดสอบช่วงอายุความล้าของวัสดุและ โครงสร้างอายุใช้งานที่ยาวนานในส่วนทางกลนี้ทำให้ความน่าเชื่อถือทางกลสูงไปด้วยเป็นอุปกรณ์ในทางอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญ

3. ระยะห่างของแกน LVDT และขดลวดอาจจะมี ความดัน เกิดสนิม หรือของไหลไหลผ่านได้จึงต้องมีการฉลส่วนประกอบของคอยล์และจำกัดการใช้งานของซิลพลว้ตรบนส่วนที่เคลื่อนที่ ตัวอย่างการใช้งานของ LVDT คือ การวัดการเปลี่ยนแปลงของระยะทางแบบพลวัตร การ

ทดสอบการสั้นของวัสดุและการทดสอบแรงดึงบนไฟเบอร์หรือวัสดุอื่นที่มีความยืดหยุ่นสูงเป็นต้น เนื่องจาก LVDT เป็นหม้อแปลงจึงแยกเอาต์พุตที่กระตุ้นทางด้านปฐมภูมิและเอาต์พุตด้านทุติยภูมิออกจากกัน ทำให้ LVDT มีผลเป็นระบบทางแอนะล็อก คือเป็นอุปกรณ์ที่สามารถคำนวณได้โดยไม่ต้องใช้ตัวขยายที่มีบัฟเฟอร์ นอกจากนี้ LVDT ยังเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแยกสัญญาณกราวด์ที่ใช้สำหรับกระตุ้นในงานการวัดและดูผลการควบคุมขั้นสูงได้

### 3.9 สมมติฐาน

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับผลการวิจัยได้ว่า

1. เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมาท์เฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนตจะมีค่าลดลง
2. เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมาท์เฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนตจะมีค่าสูงขึ้น
3. เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าโพลาไรเซชันของเซรามิกบิสมาท์เฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น
4. เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความเครียดของเซรามิกบิสมาท์เฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น
5. เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความเครียดสูงสุดของเซรามิกบิสมาท์เฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนตจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

### 3.10 สรุป

ในบทที่ 3 กล่าวถึงการนำวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกไปใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้หลักการของปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกแทนที่ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสทีฟ และเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่ทำงานโดยอาศัยปรากฏการณ์ทั้งสอง กล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิก ปรากฏการณ์ภายใน กลไกการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว และประวัติการค้นพบวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิก รวมถึงการพัฒนาจนถึงปัจจุบัน ระบบของเซรามิกบิสมาท์เฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนตซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้ และได้กล่าวถึงสมบัติของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิก ซึ่งได้แก่ สมบัติไดอิเล็กทริก สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและสมบัติเฟอร์โรแมกเนติก และได้กล่าวถึงรายละเอียดของสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งเป็นสมบัติที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้และวิธีการวัดสมบัติดังกล่าว โดยดูจากวงวนโพลาไรเซชันฮิสเทอรีซิสและวงวน



รูปปิกซีเสื้อโดยใช้วงจร Sawyer-Tower และ LVDT เป็นเครื่องมือในการวัด ได้มีการกล่าวถึงหลักการทำงานของวงจร Sawyer-Tower และหลักการทำงานของ LVDT ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญในการวัดการเปลี่ยนแปลงระยะของชิ้นงานเซรามิก รวมถึงการจัดอุปกรณ์สำหรับทดสอบวงวนฮีสเทอรีซิสและวงวนรูปปิกซีเสื้อ โดยจะกล่าวรายละเอียดต่อไปในบทที่ 4



## บทที่ 4

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 4.1 บทนำ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 เซรามิกบิส്മัทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต (BF-BT) เป็นสารที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็กที่ดีมากแต่อย่างไรก็ตามสารชนิดนี้ยังมีข้อด้อยคือ เมื่อนำไปใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูงหรือใช้งานต่อเนื่องไปนาน ๆ จะเกิดความร้อนสะสมทำให้ชิ้นงานมีสมบัติและประสิทธิภาพลดลงหรือบางทีอาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่ชิ้นงานเซรามิก ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT ซึ่งผลการศึกษจะเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงสมบัติของสารดังกล่าว รวมทั้งความเข้าใจในกลไกที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ต่อไป

ในบทนี้จะทำการอธิบายขั้นตอนและวิธีการในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT ซึ่งวิธีการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อหลัก คือ การสังเคราะห์เซรามิก BF-BT เพื่อนำมาใช้ในการทดสอบ การเตรียมชิ้นงานเซรามิกสำหรับทดสอบ การออกแบบและสร้างชุดทดสอบและการทดสอบชิ้นงาน ซึ่งประกอบด้วย การตรวจสอบเฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การวัดสมบัติไดอิเล็กทริก การวัดวงวนฮิสเทอรีซิสและวงวนรูปปึกผีเสื้อเทียบกับอุณหภูมิ

#### 4.2 การสังเคราะห์เซรามิก BF-BT

##### 4.2.1 สารเคมี

1. แบเรียมคาร์บอเนต ( $\text{BaCO}_3$ ) ความบริสุทธิ์  $\geq 98.5\%$
2. ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ความบริสุทธิ์  $\geq 99\%$
3. บิสมาทออกไซด์ ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) ความบริสุทธิ์  $\geq 99.9\%$
4. เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ความบริสุทธิ์  $\geq 99\%$
5. แมงกานีสไดออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ) ความบริสุทธิ์  $\geq 99.99\%$
6. เอทานอล
7. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก
8. ผงอะลูมินา

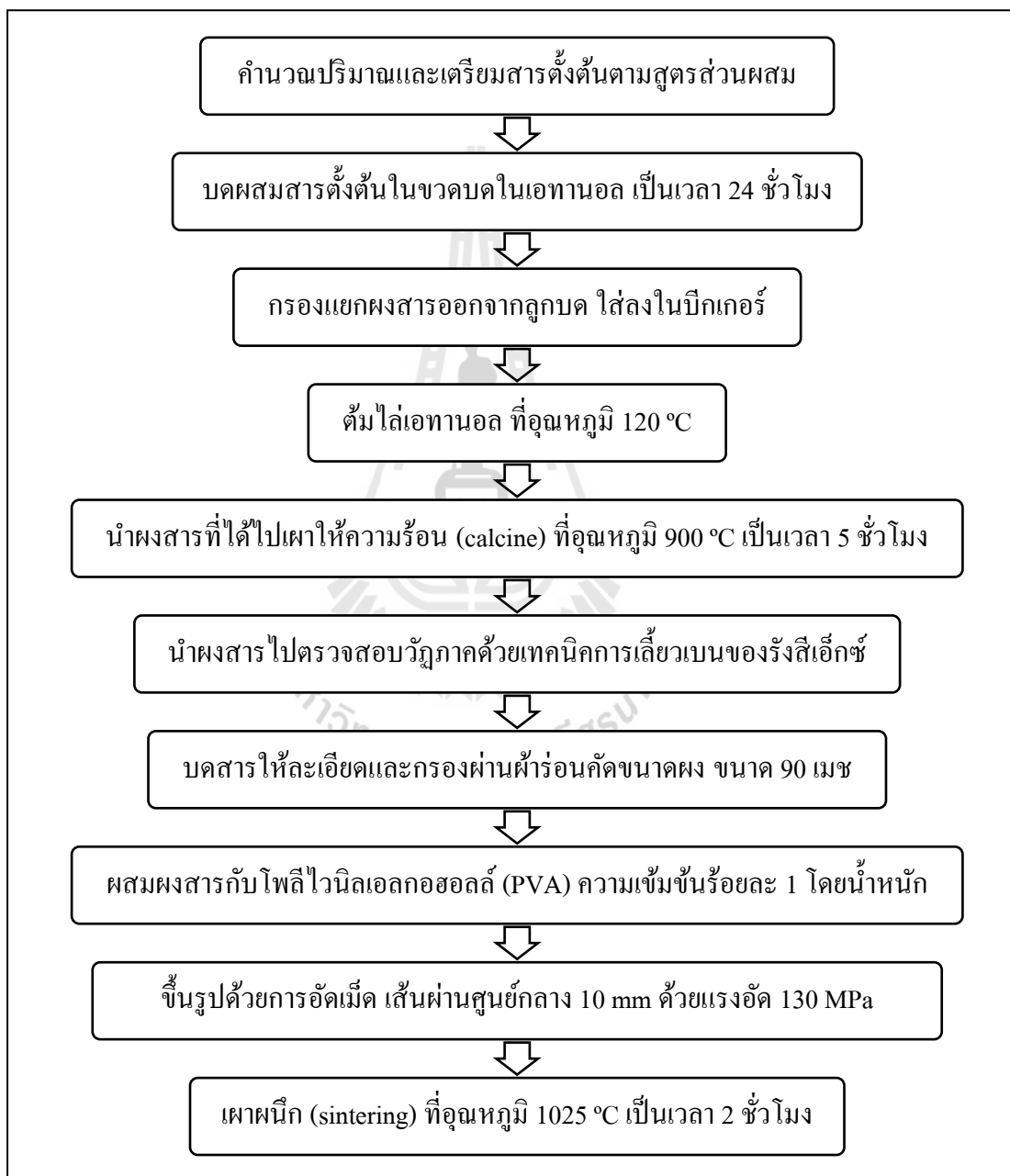


รูปที่ 4.1 สารเคมีตั้งต้น

#### 4.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องชั่งระบบดิจิทัล (ความละเอียด 0.0001 กรัม)
2. แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ (aluminium foil)
3. ช้อนตักสาร
4. ลูกบดเซอร์โคเนีย (zirconia balls) ทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.45 มิลลิเมตร
5. กระจับพลาสติกพร้อมฝาปิดสำหรับบดผสม
6. ขวดพลาสติกสำหรับบดผสม
7. เทปกาว
8. เครื่องบดผสมสารแบบหมุนวน (ball-milling)
9. ตะแกรงพลาสติก
10. บีกเกอร์
11. เครื่องผสมสารแบบแม่เหล็ก (magnetic stirrer) พร้อมตัวให้ความร้อน (hot plate)
12. แท่งแม่เหล็กสำหรับผสมสาร (magnetic bar)
13. เตาเผาไฟฟ้า
14. ถ้วยอะลูมินา (alumina crucible) พร้อมฝาปิด
15. โกร่งบดสาร

16. ฝาร่อนคัดขนาดผง ขนาด 90 เมช
17. แม่พิมพ์ใช้ในการอัดเม็ด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร
18. เครื่องอัดขึ้นรูประบบไฮดรอลิก
19. เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffractometer) ยี่ห้อ JEOL รุ่น DVIII



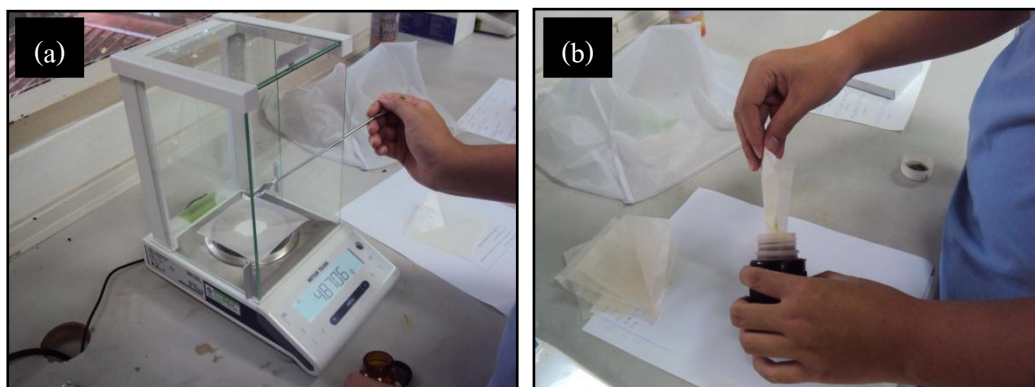
รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารด้วยวิธี Solid-state reaction

### 4.2.3 การเตรียมสาร

เตรียมผงของสารประกอบบิสมัทเฟร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต ตามสูตร  $\text{Bi}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}(\text{Fe,Ti})_{0.99}\text{Mn}_{0.01}\text{O}_3$  ด้วยวิธี solid state reaction ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเริ่มทำจากสารตั้งต้น ซึ่งได้แก่ แบเรียมคาร์บอเนต ( $\text{BaCO}_3$ ) ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) บิสมัทออกไซด์ ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แมงกานีสไดออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ) นำมาชั่งด้วยเครื่องชั่งสี่ตำแหน่งตามปริมาณที่คำนวณได้ดังตารางที่ 4.1 โดยเตรียมสารประกอบปริมาณ 20 g หลังจากนั้นนำสารทั้ง 5 ชนิดบรรจุลงขวดพลาสติกสำหรับบดผสม

ตารางที่ 4.1 ปริมาณสารเคมี

สูตรทางเคมี	ปริมาณ 20 กรัม				
	$\text{Bi}_2\text{O}_3(\text{g})$	$\text{BaCO}_3(\text{g})$	$\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{g})$	$\text{TiO}_2(\text{g})$	$\text{MnO}_2(\text{g})$
$\text{Bi}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}(\text{Fe,Ti})_{0.99}\text{Mn}_{0.01}\text{O}_3$	11.4962	3.2458	3.9136	1.2873	0.0572

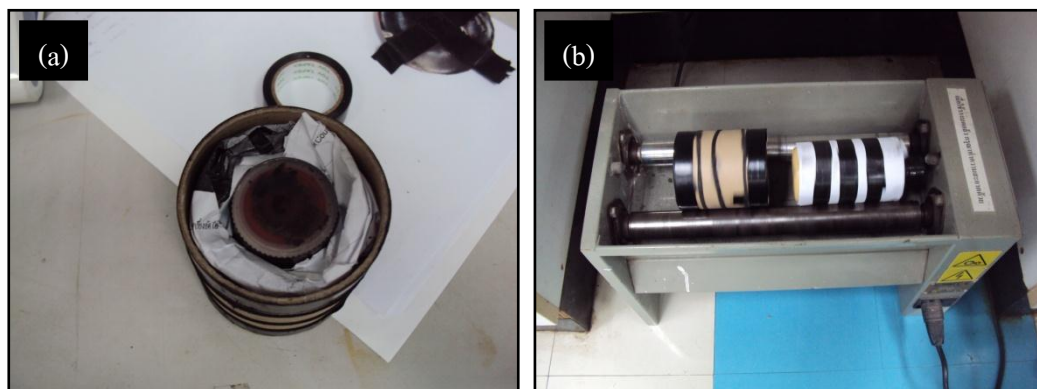


รูปที่ 4.3 การชั่งและเตรียมผสมสาร (a) ชั่งสารด้วยเครื่องชั่งสี่ตำแหน่ง (b) เทสารลงขวดพลาสติก

### 4.2.4 การบดผสม

สำหรับวิธีการบดผสมได้ใช้วิธีการบดย่อยด้วยลูกบอลแบบเปียก (ball milling) นำสารทั้ง 5 ชนิดบรรจุลงขวดพลาสติกสำหรับบดผสมพร้อมกับลูกบอลเซอโรโคเนียปริมาณหนึ่งในสามของปริมาตรขวด หลังจากนั้นเติมเอทานอลโดยใส่ลงไปเกือบเต็มขวดเพื่อเป็นตัวกลางช่วยให้สารคลุกเคล้ากันได้ดี ปิดฝาขวดให้สนิทใช้เทปกาวปิดทับอีกหนึ่งชั้นเพื่อป้องกันสารรั่วไหลและนำขวดพลาสติกใส่ในกระป๋องสำหรับบดผสม หลังจากนั้นนำกระป๋องสำหรับบดผสมใส่ลงในเครื่อง

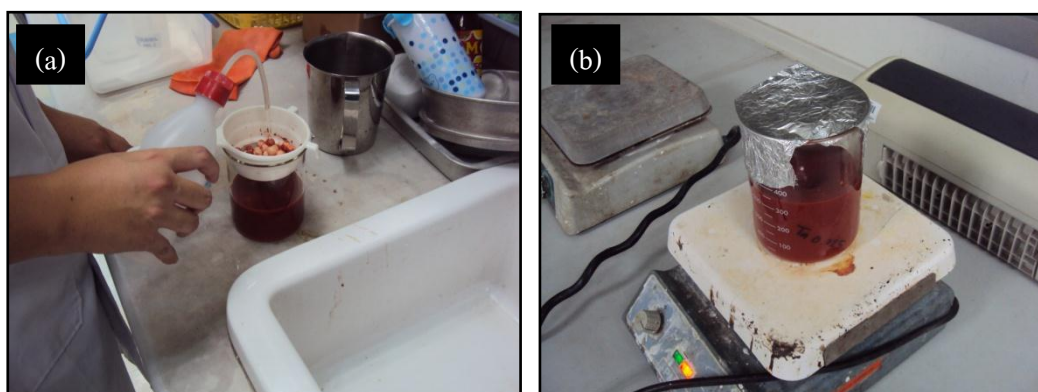
บดผสมสารแบบหมุนวนเพื่อทำให้ลูกบอลหมุนบดและผสมอนุภาคผง สำหรับการบดผสมจะใช้ เวลาบด 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.4 การบดผสมสาร (a) ขวดพลาสติกในกระป๋องสำหรับบดผสมสาร (b) เครื่องบดผสมสาร แบบหมุนวน

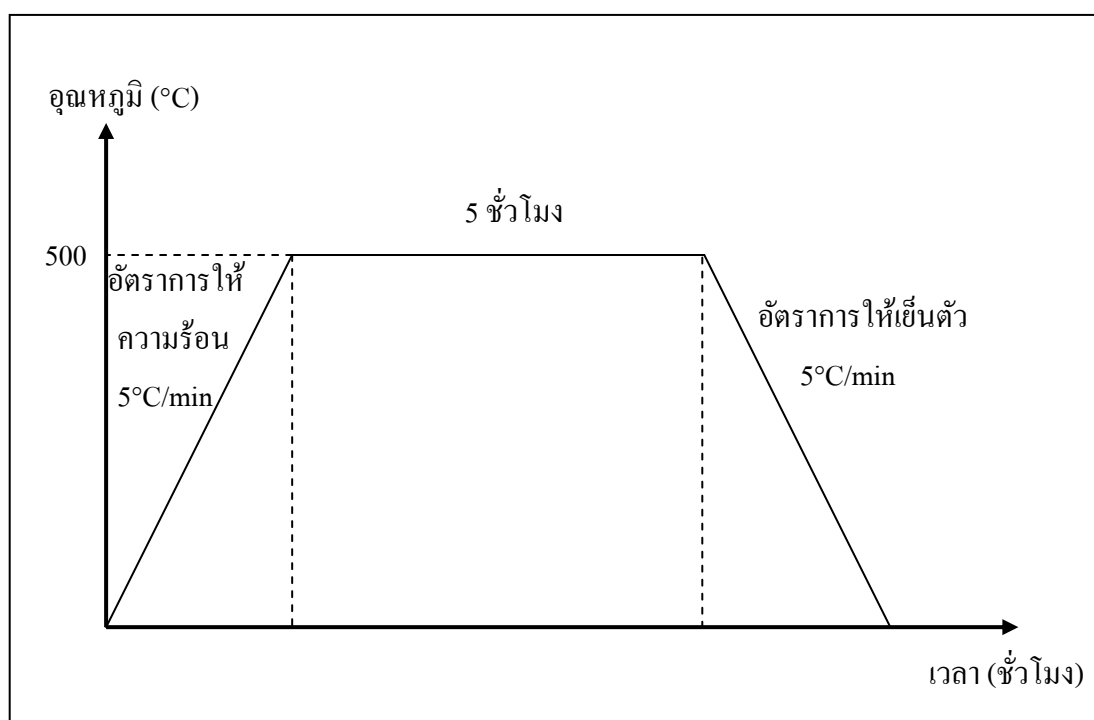
#### 4.2.5 การเผาแคลไซน์

หลังจากบดผสมสารเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้ว นำสารที่ได้มากรองลงในบีกเกอร์ แล้วนำสารผสมดังกล่าวมาทำให้แห้งโดยการกวน (stir) ด้วยแท่งแม่เหล็กพร้อมกับให้ความร้อน ด้วยเครื่องหมุนผสมสารแบบแม่เหล็กประมาณ 1-2 ชั่วโมง จนกระทั่งสารเริ่มแห้งหมดหลังจาก นั้นนำเข้าตู้อบเพื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 (a) การกรองและ (b) การนำสารที่กรองได้มาทำให้ระเหยโดยการให้ความร้อนและกวน

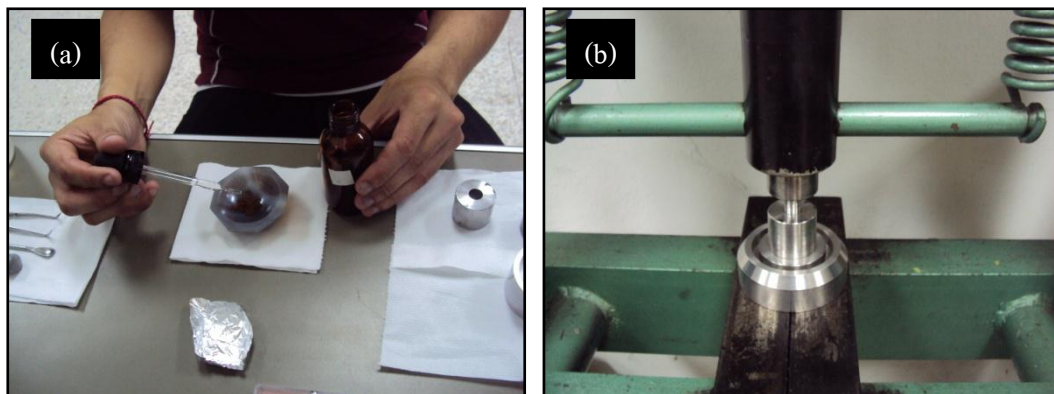
ภายหลังจากอบแห้งแล้วนำผงที่แห้งสนิทออกจากบีกเกอร์เพื่ออบแล้วนำมาย่อยผ่านตะแกรงกรองเพื่อให้แน่ใจว่าละเอียดทั่วถึงกันทั้งหมด หลังจากบดย่อยเสร็จแล้วบรรจุผงลงในถ้วยเผาอะลูมินา (alumina crucible) นำไปเผาแคลไซน์ในเตาเผาที่อุณหภูมิ  $900^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ระยะเวลาในการเผาแช่นาน 5 ชั่วโมงและอัตราขึ้นลงของอุณหภูมิที่  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  แสดงดังแผนภูมิการแคลไซน์ในรูปที่ 4.6 ซึ่งจะทำให้ได้ผงอนุภาคที่พร้อมสำหรับการขึ้นรูป



รูปที่ 4.6 แผนภูมิการแคลไซน์

#### 4.2.6 การอัดขึ้นรูป

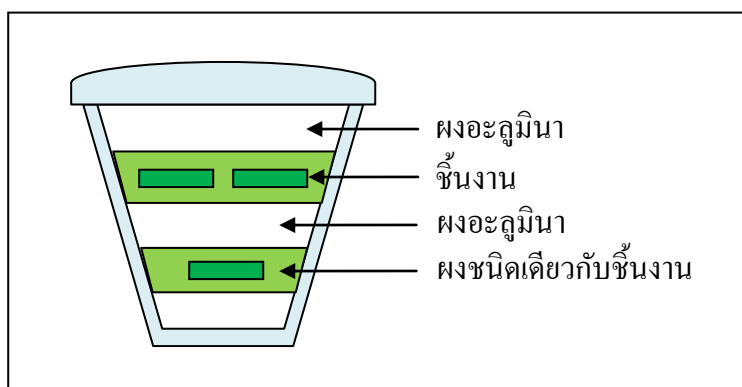
หลังจากที่เผาแคลไซน์แล้วนำผงที่ได้มาบดให้ละเอียดด้วยโกร่งและกรองผ่านผ้าร่อนคัดขนาดผง ขนาด 90 เมช หลังจากนั้นนำผงสารที่บดละเอียดแล้วไปชั่งน้ำหนัก 0.9 g มาบดผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักประมาณ 1 หยด บดให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันเพื่อให้อนุภาคของผงสารยึดเกาะกันได้ดีไม่แตกเมื่อนำไปอัดเม็ด แล้วนำผงที่ได้ใส่ในแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm เพื่ออัดขึ้นรูป ในการเตรียมครั้งนี้ได้ทำการเตรียมชิ้นงานเป็นแผ่นกลมแบน (disk) อัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกแบบทิศทางเดียว (uniaxial pressing) ด้วยแรงดัน 130 MPa เป็นเวลา 1 นาที ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 (a) ผสมสารที่บดละเอียดกับ PVA (b) อัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก

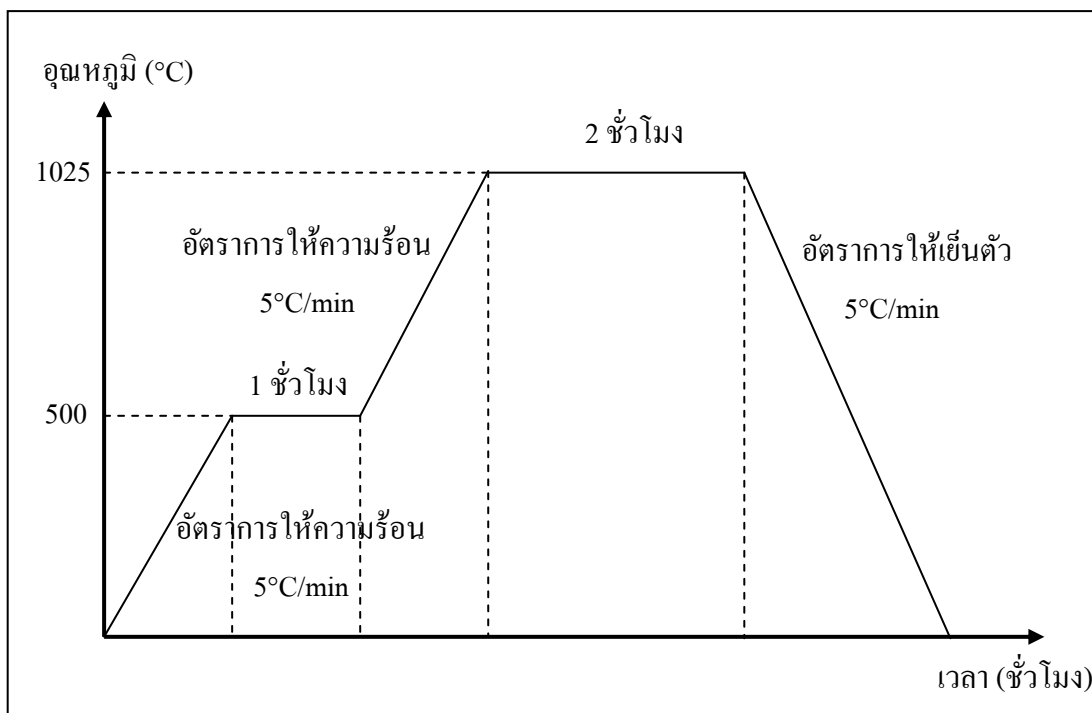
#### 4.2.7 การเผาซินเตอร์

นำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปแล้วมาเรียงลงในถ้วยอะลูมินา ที่รองด้วยผงอะลูมินา และรองทับอีกชั้นด้วยผงของตัวมันเอง หลังจากนั้นกลบชิ้นงานด้วยผงของตัวมันเองอีกครั้งและกลบด้วยผงอะลูมินาทับชั้นบนวางชิ้นงานสลับกับชั้นของผงอะลูมินาแบบนี้ไปเรื่อย ๆ ดังรูปที่ 4.8 เพื่อช่วยให้มีการส่งถ่ายความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเท่ากันทุกทิศทางและยังช่วยลดการสูญเสียของอัตราส่วนของสารประกอบ หลังจากนั้นปิดฝาด้วยอะลูมินาเพื่อป้องกันสิ่งปนเปื้อนตกลงไปในถ้วย แล้วนำไปทำการเผาซินเตอร์ (sintering) ด้วยเตาเผาไฟฟ้าโดยเผาแช่ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ระเหยออกไป หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1025 °C โดยใช้ระยะเวลาในการเผาแช่ 2 ชั่วโมงโดยที่อัตราขึ้นลงของอุณหภูมิที่ 5 °C/min แสดงผังแผนภูมิการเผาซินเตอร์ในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 การวางเรียงชิ้นงานในถ้วยอะลูมินาสำหรับเผาซินเตอร์

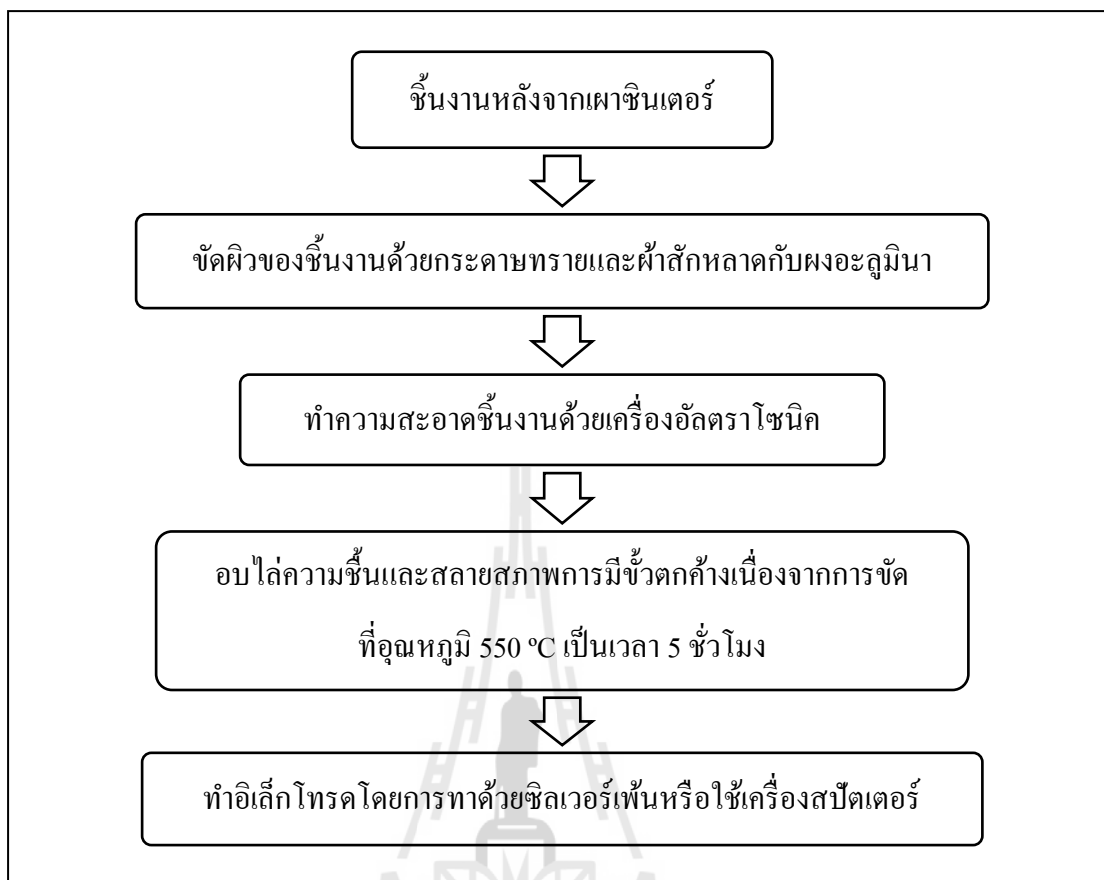




รูปที่ 4.9 แผนภูมิการเผาซินเตอร์

#### 4.3 การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบ

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดสอบและทำการวัดค่าต่าง ๆ เช่น การวัดค่าไดอิเล็กทริก การวัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิส การวัดวงวนรูปปีกผีเสื้อ การทดสอบความล้า เป็นต้น และมีการตรวจสอบหลายวิธี โดยใช้เครื่องมือชนิดต่าง ๆ เช่น การตรวจสอบเฟสองค์ประกอบและโครงสร้างด้วยเครื่อง X-ray diffractometer และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพราะฉะนั้นการเตรียมชิ้นงานจึงต้องเตรียมให้เหมาะสมกับวิธีทดสอบและเครื่องมือแต่ละชนิดที่ใช้ในการวิเคราะห์ ทั้งขนาดและความหนาหรือความเรียบของพื้นผิวและการทำซ้ำโดยใช้โลหะชนิดต่าง ๆ เป็นต้น ดังนั้นการเตรียมชิ้นงานจึงมีความสำคัญมากเพื่อให้การวิเคราะห์และการทดสอบได้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำ จึงต้องเตรียมอย่างพิถีพิถันและให้ความสำคัญในแต่ละขั้นตอนของการเตรียมชิ้นงาน การเตรียมชิ้นงานมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

#### 4.3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. กระดาษทรายเบอร์ 320, 600, 800, 1000, 1500, 2000 และ 4000
2. ผ้าสักหลาด
3. ผงอะลูมินา ขนาด 0.03  $\mu\text{m}$
4. ขวดพลาสติก
5. เครื่องขัดสาร
6. กาวแท่ง
7. แผ่นเหล็กสำหรับยึดติดชิ้นงาน
8. แผ่นให้ความร้อน (hot plate)
9. ปีกเกอร์
10. เครื่องล้างระบบอัลตราโซนิค
11. เต้าเผาไฟฟ้า

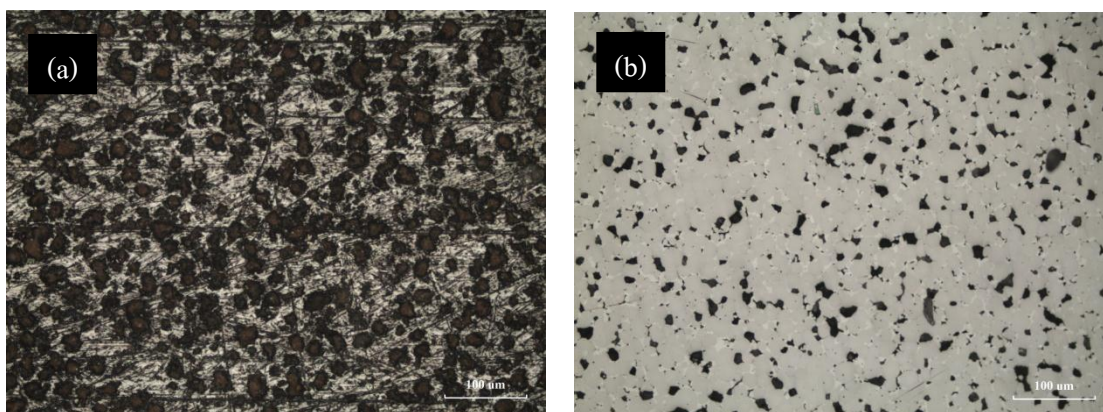
12. งานอะลูมินา
13. อะซิโตน
14. กาวเงิน (silver paint)
15. แคปตอนเทป (kapton tape)
16. เครื่องสเปคเตอร์ (sputtering)

#### 4.3.2 การขัดผิว

การขัดผิวชิ้นงานเซรามิก BF-BT นำชิ้นงานตัวอย่างมาขัดผิวหน้าทั้งสองให้เรียบเนียนสม่ำเสมอ (grinding) เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอ รอยร้าว สิ่งปนเปื้อน และความพร่องอื่น ๆ ด้วยเครื่องขัดสาร (ยี่ห้อ Buehler รุ่น Phoenix Beta) ดังรูปที่ 4.11 ให้มีความหนา 0.85 mm โดยใช้น้ำเป็นตัวหล่อลื่นในระหว่างการขัด ในการเตรียมชิ้นงานสำหรับวัดค่าไดอิเล็กทริก ทริก วงวนฮิสเทอรีซิสและวงวนรูปปีกผีเสื้อนั้น จะใช้ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลมแบน (disk) ในการทดสอบ จึงทำการขัดเพียงสองด้านด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 600 และ 800 ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้นต้องการชิ้นงานที่มีผิวเรียบใสและเป็นมัน และการวิเคราะห์จะส่องที่บริเวณผิวด้านข้างของชิ้นงานดังนั้นจึงต้องทำการขัดผิวชิ้นงานให้มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมทั้งสี่ด้าน ทำการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 600, 800, 1000, 1500, 2000 และ 4000 หลังจากนั้นทำการขัดใสโดยใช้ผ้าสักหลาดและใช้น้ำผสมผงอะลูมินาขนาด 0.03  $\mu\text{m}$  เป็นตัวหล่อลื่นในการขัด ลักษณะผิวของชิ้นงานที่เตรียมแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 เครื่องขัดสาร



รูปที่ 4.12 ผิวจีงาน BF-BT (a) หลังขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 800 (b) หลังขัดด้วยผ้าสักหลาด

#### 4.3.3 การล้างทำความสะอาด

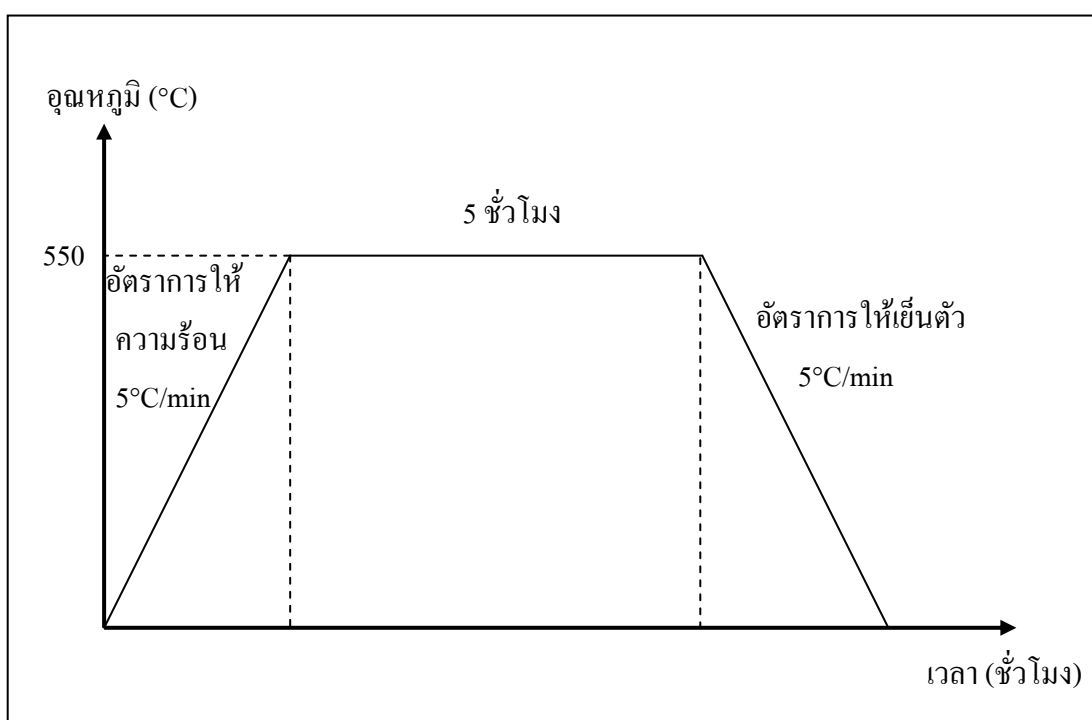
นำชิ้นงานเซรามิก BF-BT ที่ทำการขัดผิวเสร็จเรียบร้อยแล้วมาล้างทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิก (NEY, 28H Ultrasonik) โดยนำชิ้นงานใส่ในบีกเกอร์ที่มีน้ำอยู่ครึ่งบีกเกอร์แล้วนำบีกเกอร์ใส่ในเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิกที่ใส่น้ำสูงประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงของบีกเกอร์ จากนั้นเปิดเครื่องทำความสะอาดชิ้นงานเป็นเวลา 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งการล้างทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิกจะทำให้ฝุ่นละอองและสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ที่ติดอยู่กับชิ้นงานเนื่องจากกระบวนการขัดผิวหลุดออกมาโดยที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงาน



รูปที่ 4.13 เครื่องล้างทำความสะอาดระบบอัลตราโซนิก

#### 4.3.4 การอบอ่อน

การอบอ่อน (annealing) เป็นการอบไล่ความชื้นจากน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อของชิ้นงานเซรามิกทั้งในกระบวนการขัดผิวและกระบวนการล้างทำความสะอาดและยังเป็นการลดความเค้นตกค้างเนื่องจากการขัดผิวอีกด้วย โดยนำชิ้นงานวางเรียงบนจานอะลูมินาแล้วนำไปใส่ในเตาเผาเผาที่อุณหภูมิ 550 °C ระยะเวลาในการเผา 5 ชั่วโมงโดยที่อัตราขึ้นลงของอุณหภูมิที่ 5 °C/min ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แผนภูมิการอบอ่อน

#### 4.3.5 การทำขั้วไฟฟ้า

ในการทดสอบและการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานได้มีการจ่ายสนามไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงาน ดังนั้นชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบจึงต้องมีการทำขั้วไฟฟ้า (electrode) ก่อนนำมาทดสอบ โดยการนำชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนแล้วมาเซ็ดทำความสะอาดด้วยอะซิโตน สำหรับชิ้นงานที่จะใช้ในการวัดค่าไดอิเล็กทริก วนวนฮีสเทอรีซิสและวงวนรูปปีกผีเสื้อจะทำขั้วไฟฟ้าโดยการใส่กาวเงิน (silver paint) ทาบนผิวหน้าทั้งสองของชิ้นงาน ทิ้งไว้ให้กาวเงินแห้งแล้วเซ็ดทำความสะอาดขอบของชิ้นงานด้วยอะซิโตน หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปปิ้งบนแผ่นให้ความร้อน (hot plate)

ที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้กาวเงินแห้งสนิทและติดกับผิวของชิ้นงานได้ดียิ่งขึ้น สำหรับชิ้นงานที่ใช้ในการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-ray diffractometer และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้นจะทำผิวไฟฟ้าโดยการเคลือบผิวด้วยทองโดยใช้วิธีสปัตเตอริง (sputtering) ด้วยเครื่องสปัตเตอริง (ยี่ห้อ JEOL รุ่น JFC-1100E) เริ่มจากนำแคปตอนเทป (kapton tape) มาติดที่ผิวด้านข้างของชิ้นงานทั้งสี่ด้านซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ต้องการทำผิวไฟฟ้า หลังจากนั้นนำชิ้นงานใส่ในเครื่องสปัตเตอริงดังแสดงในรูปที่ 4.15 การสปัตเตอริงใช้กระแสไฟฟ้า 10 mA ใช้เวลา 5 นาที



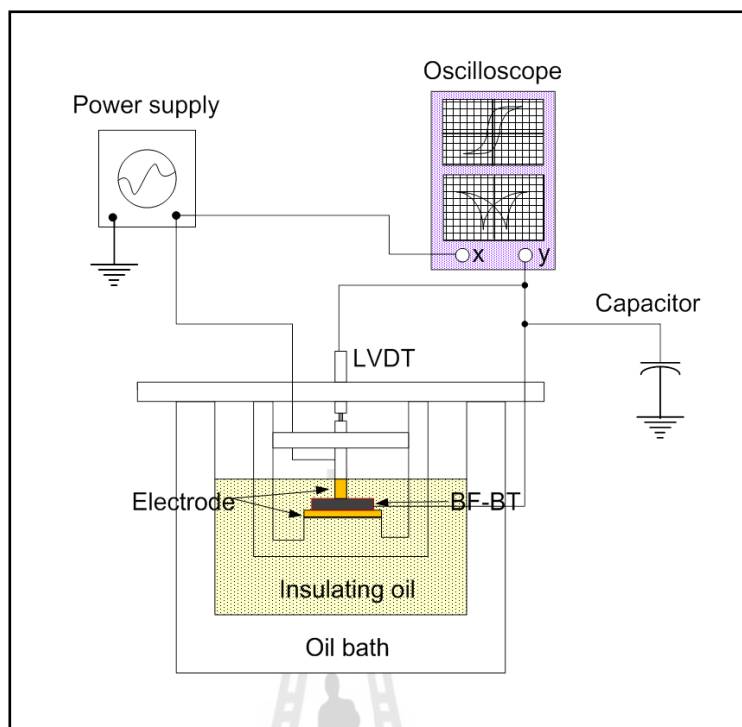
รูปที่ 4.15 เครื่องสปัตเตอริง

#### 4.4 การสร้างชุดทดสอบเพื่อวัดวงวนฮีสเทอรีซิสและวงวนรูปปีกผีเสื้อของชิ้นงาน เซรามิกที่อุณหภูมิสูง

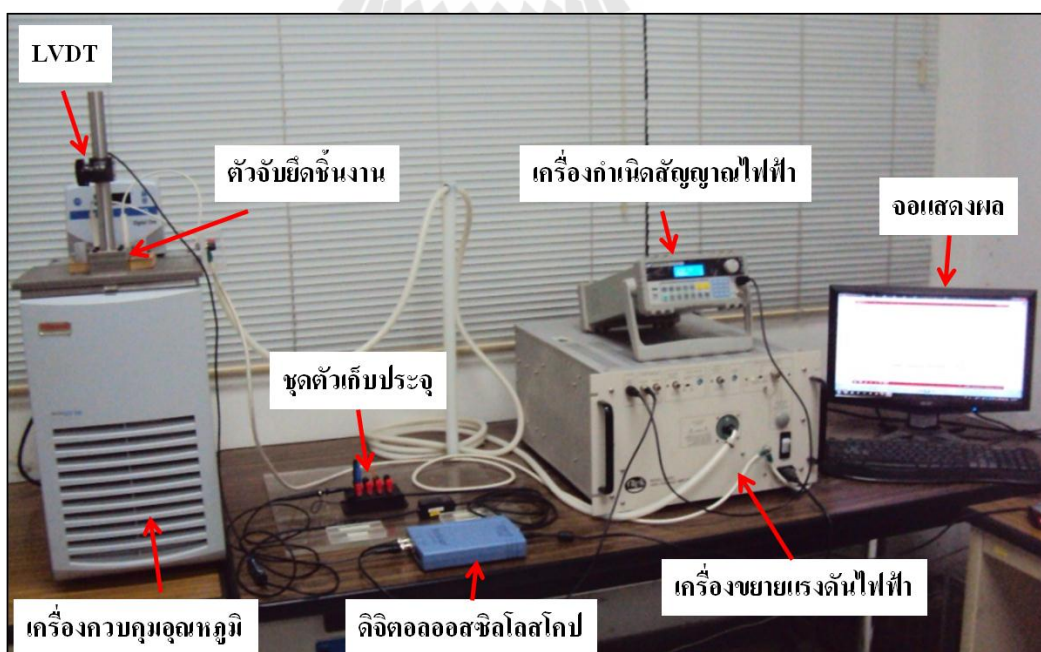
เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT ซึ่งดูได้จากการวัดวงวนฮีสเทอรีซิสและวงวนรูปปีกผีเสื้อที่อุณหภูมิสูง จึงต้องมีการออกแบบและสร้างอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (sample holder) เพื่อให้มีความเหมาะสมในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้แล้วยังได้ออกแบบและสร้างฐานสำหรับใช้วางอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานและสำหรับติดตั้ง LVDT ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดวงวนรูปปีกผีเสื้อ เพื่อใช้ร่วมกับเครื่องควบคุมอุณหภูมิสำหรับวัดวงวนฮีสเทอรีซิสและวงวนรูปปีกผีเสื้อที่อุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับชุดทดสอบจะประกอบด้วยเครื่องขยายแรงดันไฟฟ้า

(TREK Model 20/20C High Voltage Amplifier) ซึ่งทำหน้าที่จ่ายสนามไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงานเซรามิก โดยใช้ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (TG550 Function Generator) ในการกำหนดรูปคลื่นสัญญาณ ขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่จ่ายให้กับชิ้นงาน ชุดตัวเก็บประจุทำหน้าที่แบ่งแรงดันไฟฟ้าในการวัดวงวนฮิสเทอรีซิส ชุดตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุหลายขนาดเพื่อให้สามารถเลือกใช้ที่มีความเหมาะสมกับสารเซรามิกแต่ละชนิดที่ใช้ในการทดสอบ นอกจากนี้แล้วยังมี LVDT ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดระยะที่มีความละเอียดสูงใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานเซรามิกเพื่อทำมาพล็อตกราฟวงวนรูปปีกผีเสื้อ อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานใช้ในการบรรจุชิ้นงานระหว่างจ่ายสนามไฟฟ้าในขณะที่มีการทดสอบ อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานจะมีขั้วอิเล็กโทรดสองด้านเพื่อใช้จ่ายสนามไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงานและมีจุดเชื่อมต่อสายไฟเพื่อต่อเข้ากับสายไฟจากเครื่องขยายแรงดันไฟฟ้า และยังมีจุดสำหรับยึดติดกับ LVDT เพื่อใช้ในการวัดวงวนรูปปีกผีเสื้อ ตัวจับยึดชิ้นงานจะถูกใส่ลงไปในการควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น NESLAB RTE 740) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมและปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ และสุดท้ายประกอบด้วยเครื่องออสซิลโลสโคปที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ (PC Oscilloscope) (ยี่ห้อ Pico รุ่น 2205MSO) ใช้สำหรับบันทึกแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชิ้นงานเซรามิกและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุสำหรับการวัดวงวนฮิสเทอรีซิส และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก LVDT สำหรับการวัดวงวนรูปปีกผีเสื้อ ซึ่งรายละเอียดของชุดทดสอบและการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 ซึ่งการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์สามารถแบ่งออกเป็นสามส่วนหลักได้แก่

1. ชุดจ่ายสนามไฟฟ้าและแสดงผล
2. อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 4.16 แผนภาพการเชื่อมต่อชุดทดสอบเพื่อใช้วัดวงวนฮิสเทอรีซิสและวงวนรูปปิกพีเสื่อของ  
ชิ้นงานเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ

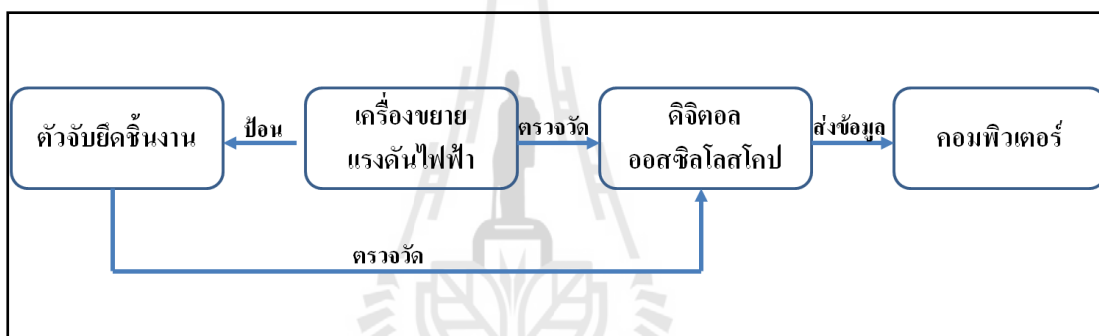


รูปที่ 4.17 ชุดทดสอบวงวนฮิสเทอรีซิสและวงวนรูปปิกพีเสื่อของเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ



#### 4.4.1 ชุดจ่ายสนามไฟฟ้าและแสดงผล

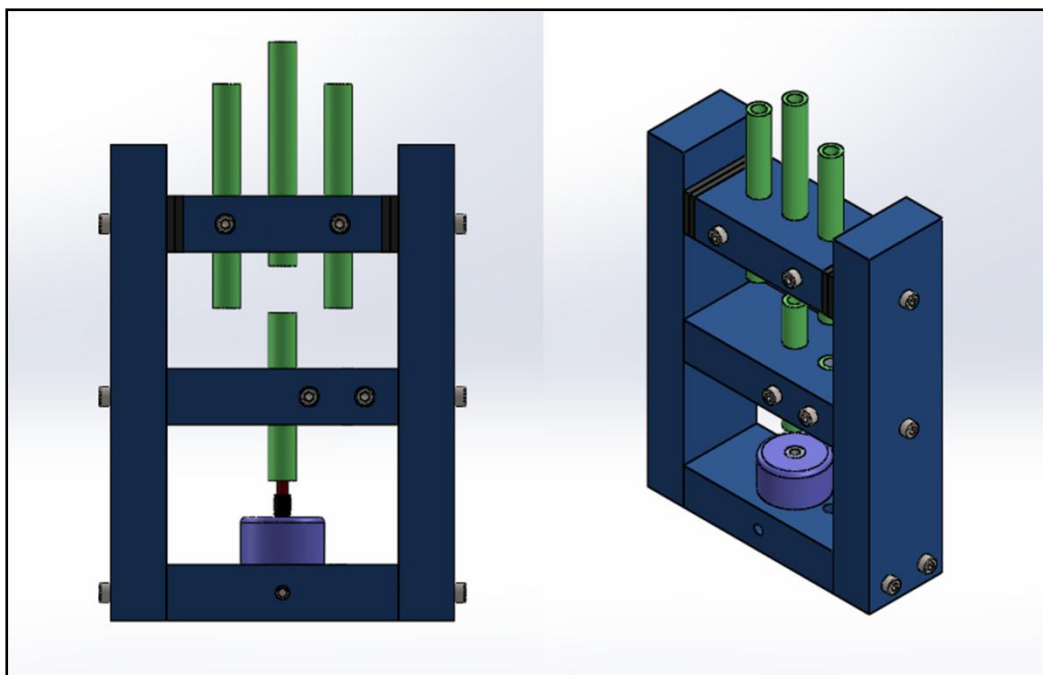
การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับจ่ายสนามไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงานเซรามิกแสดงดังรูปที่ 4.18 ประกอบด้วยเครื่องขยายแรงดันไฟฟ้า (TREK Model 20/20C High Voltage Amplifier) ทำหน้าที่ขยายแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับชิ้นงานเซรามิก โดยเครื่องขยายแรงดันไฟฟ้ามีอัตราส่วน 1 ต่อ 2,000 V แรงดันไฟฟ้าที่คำนวณเทียบกับความหนาของชิ้นงานเซรามิกแล้วจะถูกจ่ายให้กับชิ้นงาน โดยเชื่อมต่อผ่านตัวจับยึดชิ้นงาน แรงดันไฟฟ้าจากเครื่องขยายแรงดันที่จ่ายให้กับชิ้นงานเซรามิกและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมาตรฐาน ในกรณีวัดวงวนฮิสเทอรีซิสและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก LVDT ในกรณีวัดวงวนรูปปิกฟีลล์จะถูกบันทึกโดยเครื่องออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัลและแสดงผลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.18 แผนแสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับจ่ายสนามไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงานเซรามิก

#### 4.4.2 ตัวจับยึดชิ้นงาน

ในการวิจัยนี้ได้ทำการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสและวงวนรูปปิกฟีลล์ที่อุณหภูมิห้องถึง 200 °C ดังนั้นตัวจับยึดชิ้นงานสำหรับทดสอบจึงต้องมีการออกแบบให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ โดยยึดหลักของความสวยงาม กงทนและความปลอดภัยในการใช้งาน สำหรับตัวจับยึดชิ้นงานที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ตัวจับยึดชิ้นงานเซรามิกสำหรับทดสอบที่อุณหภูมิสูง

โครงของตัวจับยึดชิ้นงานทำจากสแตนเลสเพื่อป้องกันการเกิดสนิมและการเลือกใช้สแตนเลสแทนอะคริลิกหรือไม้เพราะว่าเมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงอะคริลิกจะเกิดการอ่อนตัวทำให้ไม่สามารถใช้งานได้และการที่ไม่ทำโครงของตัวจับยึดชิ้นงานจากไม้เนื่องจาก เมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงไม้จะเกิดการขยายตัวซึ่งในการวัดวงวนรูปปึกผีเสื้อนั้นจะใช้ LVDT วัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงาน โดยชิ้นงานเซรามิกในระหว่างทดสอบจะเกิดการขยายและหดตัวในระดับไมโครเมตร ดังนั้นถ้าเลือกใช้ไม้เป็นวัสดุในการทำตัวจับยึดชิ้นงานจะทำให้การขยายตัวของไม้ส่งผลให้การวัดการขยายตัวของชิ้นงานเซรามิกเกิดความผิดพลาด ฐานของหัวอิเล็กโทรดสำหรับวางชิ้นงานทำจากแผ่นทองแดงเพื่อเชื่อมต่อแรงดันไฟฟ้าจากตัวจับยึดชิ้นงานไปยังชิ้นงานเซรามิก และแผ่นฐานทองแดงวางอยู่บนด้วยเซรามิกเพื่อเป็นฉนวนป้องกันไม่ให้แรงดันไฟฟ้าเชื่อมต่อไปยังโครงของตัวจับยึดชิ้นงานทั้งหมด สำหรับหัวอิเล็กโทรดอีกชั้นจะติดอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของตัวจับยึดชิ้นงานและตรงกับหัวอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นฐานเพื่อทำหน้าที่เชื่อมต่อแรงดันไฟฟ้าไปยังชิ้นงานเซรามิก โดยแกนทองแดงที่ใช้เป็นหัวอิเล็กโทรดนั้นจะอยู่ในท่อเซรามิกซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันไม่ให้สนามไฟฟ้าไหลเข้าสู่โครงทั้งหมด และการที่หัวอิเล็กโทรดอยู่ในท่อเซรามิกนั้นจะทำให้สามารถเคลื่อนในแนวแกนตั้งที่ได้อย่างอิสระเพราะเมื่อชิ้นงานเซรามิกได้รับสนามไฟฟ้าจะเกิดการขยายตัวทำให้ไม่เกิดการกดหรือยึดชิ้นงาน บริเวณส่วนบนของตัวจับยึด

ชิ้นงานซึ่งตรงกับขั้วอิเล็กทรอนิกส์จะติดตั้งท่อเซรามิกเพื่อทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของท่อเซรามิกขนาดเล็กข้างใน โดยที่ท่อเซรามิกขนาดเล็กเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างขั้วทองแดงที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชิ้นงานซึ่งเชื่อมต่อกับชิ้นงานโดยตรงกับ LVDT เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานเซรามิกระหว่างทดสอบ การใช้ท่อเซรามิกเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อนั้นเนื่องจากการทดสอบที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ LVDT เกิดความเสียหายเนื่องจากความร้อนได้จึงใช้ท่อเซรามิกเป็นตัวกลางเพื่อป้องกันไม่ให้ LVDT สัมผัสกับความร้อนโดยตรง

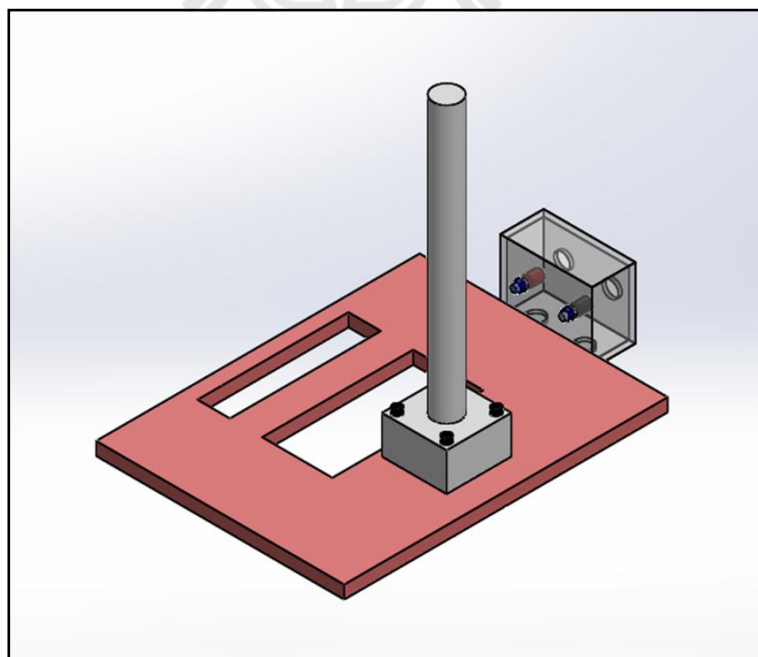
#### 4.4.3 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

ในการทดสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมินั้นได้มีการใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น NESLAB RTE 740) แสดงดังรูปที่ 4.20 ซึ่งสามารถทำอุณหภูมิต่ำสุดได้  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  และทำอุณหภูมิได้สูงสุดถึง  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิที่ให้แก่ระบบทดสอบ

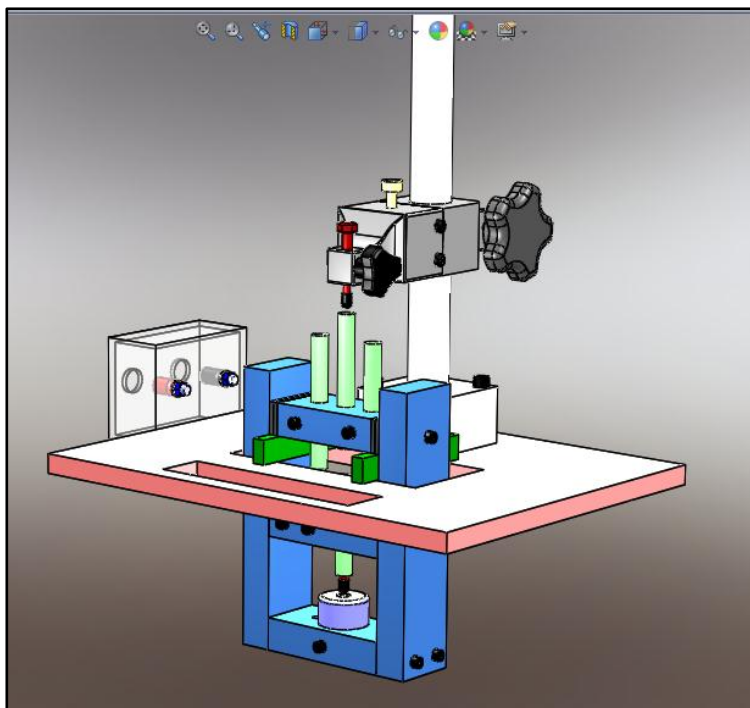


รูปที่ 4.20 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น NESLAB RTE 740)

สำหรับฐานวางตัวจับยึดชิ้นงานเพื่อใช้งานร่วมกับเครื่องควบคุมอุณหภูมิได้ออกแบบและสร้างดังรูปที่ 4.21 โดยวัสดุที่ใช้ทำทั้งหมดเป็นสแตนเลสเพื่อป้องกันการเกิดสนิมและทนต่อความร้อนทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ และเหตุผลสำคัญอีกอย่างที่เลือกใช้สแตนเลสเป็นวัสดุที่ใช้ทำฐานวางตัวจับยึดชิ้นงานคือการทนต่อความร้อนมีการขยายตัวน้อยเมื่อได้รับความร้อนเพราะว่าการวัดวงวนรูปปีกผีเสื้อจะใช้ LVDT เป็นเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานเซรามิกเมื่อได้รับสนามไฟฟ้าหรือความร้อน ชิ้นงานเซรามิก BF-BT นั้นเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าหรืออุณหภูมิจะขยายตัวในระดับไมโครเมตรดังนั้นถ้าฐานสำหรับวางชิ้นงานเซรามิกมีการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงที่ LVDT วัดได้เกิดความคลาดเคลื่อนและทำให้การวัดผิดพลาด ฐานของตัวจับยึดชิ้นงานจะมีขนาดใหญ่กว่าความกว้างของขนาดอ่างของเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ฐานวางตัวจับยึดชิ้นงานสามารถวางอยู่บนเครื่องควบคุมอุณหภูมิได้ บริเวณกึ่งกลางของฐานจะมีช่องว่างสำหรับใส่ตัวจับยึดชิ้นงานลงไปในอ่างของเครื่องควบคุมอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.22 และมีช่องขนาดเล็กเพื่อใช้ในการระบายความร้อนและให้อิฐร้อนของน้ำมันซิลิโคนสามารถระเหยขึ้นมาได้ และยังมีเสาเหล็กสำหรับเป็นแกนติดตั้ง LVDT บริเวณขอบของฐานวางตัวจับยึดชิ้นงานจะมีจุดเชื่อมต่อสายไฟจากเครื่องขยายแรงดันเพื่อจ่ายให้กับชิ้นงานเซรามิกและมีกล่องอะคริลิกครอบบริเวณจุดเชื่อมต่อเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน



รูปที่ 4.21 ฐานสำหรับวางตัวจับยึดชิ้นงาน



รูปที่ 4.22 การติดตั้งฐานและตัวจับยึดชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

## 4.5 การทดสอบ

### 4.5.1 การตรวจสอบเฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบและโครงสร้างโดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer (ยี่ห้อ Bruker รุ่น DII) ดังรูปที่ 4.23 โดยจะทำการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบของตัวอย่างแบบผง (powder) ที่บดละเอียดหลังจากการเผาแคลไซน์เปรียบเทียบกับชิ้นงานตัวอย่างแบบแผ่นกลมแบน (disk) หลังจากการเผาซินเตอร์ เริ่มจากนำตัวอย่างแบบผงและชิ้นงานแบบแผ่นที่เตรียมได้มาใส่ในภาชนะบรรจุตัวอย่าง (holder) หลังจากนั้นนำไปวางที่ช่องสำหรับวางชิ้นงานในเครื่อง X-ray diffractometer แล้วจึงเปิดเครื่องทดสอบโดยใช้เป้าทองแดง (Cu-K $\alpha$ ) ที่ให้รังสีเอ็กซ์ค่าความยาวคลื่นประมาณ 1.54 Å สำหรับการวิเคราะห์เฟสและโครงสร้างเริ่มตั้งแต่  $2\theta$  ที่  $20^{\circ}$ - $70^{\circ}$  ใช้ scan step เท่ากับ  $0.02^{\circ}$  ต่อ step และ scan speed เท่ากับ 0.2 วินาทีต่อ step โดย Rotation เท่ากับ 15 รอบต่อนาที แล้วใช้โปรแกรม Diffra<sup>puls</sup> EVA ในการวิเคราะห์ จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในแฟ้ม JCPDS เพื่อตรวจสอบเฟสและความบริสุทธิ์ของตัวอย่างที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.23 เครื่อง X-ray diffractometer

#### 4.5.2 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss)

นำชิ้นงานเซรามิก BF-BT ที่ผ่านการทำขั้วไฟฟ้าแล้วใส่ลงในตัวจับยึดชิ้นงานซึ่งมีขั้วไฟฟ้าและอยู่กับผิวของชิ้นงานทั้งสองด้านและมีสายไฟจากตัวจับยึดชิ้นงานเชื่อมต่อกับเครื่อง LCR meter (ยี่ห้อ Instek รุ่น LCR-821) การตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าที่เครื่อง LCR meter ใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1 V ในแต่ละชิ้นงานจะทำการวัดที่ค่าความถี่เท่ากับ 1, 2, 5, 10, 20, 50 และ 100 kHz และในแต่ละความถี่จะทำการวัด 3 ครั้งแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย สำหรับค่าที่วัดได้จากเครื่อง LCR meter จะเป็นค่า C และ D ซึ่งค่า D ที่ได้จะเป็นค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกส่วนค่า C ที่ได้จะนำไปคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกตามสมการ 4.1

$$\varepsilon_r = \frac{Cd}{\varepsilon_0 A} \quad (4.1)$$

โดยที่  $\varepsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

$\varepsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศมีค่า  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m

C คือ ค่าความจุของชิ้นงานเซรามิก

- A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเซรามิก  
d คือ ความหนาของชิ้นงานเซรามิก

สำหรับการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ นั้นทำได้โดยนำตัวจับยึดชิ้นงานไปใส่ลงในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น NESLAB RTE 740) การเชื่อมต่ออุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 4.24 การตั้งค่าเครื่องมือและวิธีการวัดค่า ไดอิเล็กทริกดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นและทำการวัดที่อุณหภูมิเริ่มจาก 30 °C และเพิ่มขึ้น ครั้งละ 10 °C จนถึงอุณหภูมิ 200 °C

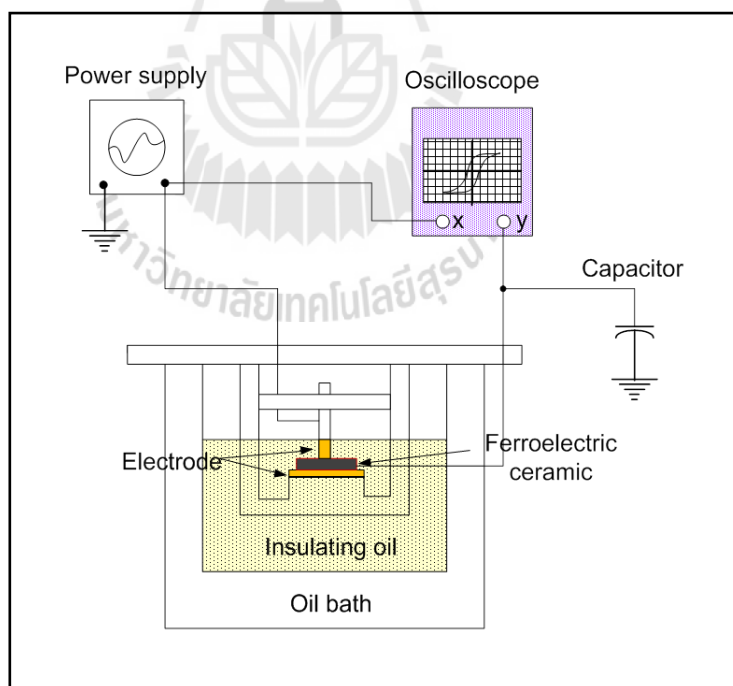


รูปที่ 4.24 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับวัดสมบัติไดอิเล็กทริก

#### 4.5.3 การวัดวงวนฮิสเทอรีซิสเทียบกับอุณหภูมิ

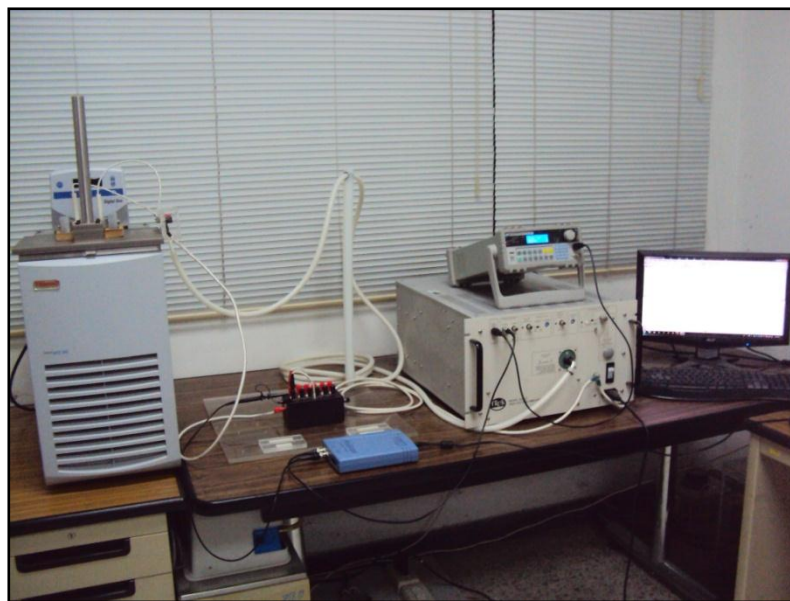
นำชิ้นงานเซรามิก BF-BT ที่ทำขั้วไฟฟ้าแล้วใส่ในตัวจับยึดชิ้นงาน โดยมีขั้วไฟฟ้า สัมผัสกับผิวของชิ้นงานทั้งสองด้าน สายไฟจากเครื่องขยายแรงดันไฟฟ้า (TREK Model 20/20C High Voltage Amplifier) จะถูกต่อกับปลายด้านหนึ่งของขั้วไฟฟ้า สำหรับขั้วไฟฟ้าอีกข้างที่เหลือ จะต่อกับตัวเก็บประจุซึ่งใช้เป็นตัวเก็บประจุมาตรฐานในการวัดแรงดันไฟฟ้าแบบวงจรมองแรงดัน โดยตัวเก็บประจุมาตรฐานจะมีค่า 1 $\mu$ F แล้วต่อผ่านไปยังกราวด์ของเครื่องขยายแรงดันไฟฟ้า ใช้ ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (TG550 Function Generator) ในการกำหนดรูปคลื่นสัญญาณ ขนาด แรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่จ่ายให้กับชิ้นงาน โดยต่อฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์เข้ากับเครื่องขยาย แรงดันไฟฟ้า ตัวจับยึดชิ้นงานจะถูกใส่ลงในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น

NESLAB RTE 740) ซึ่งทำหน้าที่ปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์และการติดตั้งเครื่องมือสำหรับวัดค่าวงวนฮิสเทอรีซิสเทียบกับอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ภายในเครื่องควบคุมอุณหภูมิจะใส่น้ำมันซิลิโคนให้ท่วมชิ้นงานเพื่อป้องกันการเกิดดีสชาร์จบนพื้นของชิ้นงานและในอากาศและนอกจากนั้นน้ำมันซิลิโคนยังเป็นตัวนำความร้อนจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิไปสู่ชิ้นงาน เริ่มการวัดค่าวงวนฮิสเทอรีซิสโดยจ่ายสนามไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ขนาด 52 kV/cm ความถี่ 50 Hz ให้กับชิ้นงาน ปรับอุณหภูมิของระบบการวัดเริ่มจากอุณหภูมิ 30 °C และเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 °C จนถึงอุณหภูมิ 200 °C สำหรับการวัดแต่ละครั้ง ค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_x$  จากแหล่งจ่ายและ  $V_y$  ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมาตรฐานจะถูกบันทึกโดยเครื่องออสซิลโลสโคปที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ (PC Oscilloscope) (ยี่ห้อ Pico รุ่น 2205MSO) หลังจากนั้นนำค่า  $V_x$  และ  $V_y$  ที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและค่าโพลาริเซชันตามลำดับ แล้วนำไปพล็อตกราฟระหว่างค่าสนามไฟฟ้าและค่าโพลาริเซชันจะทำให้ได้วงวนฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับวิธีการคำนวณค่าโพลาริเซชันและค่าสนามไฟฟ้าและวิธีการพล็อตกราฟฮิสเทอรีซิสได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.8.2.2



รูปที่ 4.25 การจัดเครื่องมือเพื่อใช้วัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสของชิ้นงานเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ





รูปที่ 4.26 การจัดเครื่องมือเพื่อใช้วัดวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสของชิ้นงานเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ

#### 4.5.4 การวัดวงวนรูปปึกผีเสื้อเทียบกับอุณหภูมิ

สำหรับการวัดวงวนรูปปึกผีเสื้อเทียบกับอุณหภูมิจะมีการติดตั้งอุปกรณ์และขั้นตอนวิธีการวัดคล้ายกับการวัดวงวนฮิสเทอรีซิส จะแตกต่างกันเพียงแค่เล็กน้อยเท่านั้น โดยสายกราวด์จากเครื่องขยายแรงดันไฟฟ้าจะต่อโดยตรงกับขั้วไฟฟ้าอีกด้านของที่จับยึดชิ้นงานโดยไม่ต้องผ่านตัวเก็บประจุและจะใช้ LVDT (ยี่ห้อ Omron รุ่น ZX-TDA11) ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์วัดระยะที่มีความละเอียดสูงใช้สำหรับวัดระยะการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานเนื่องจากสนามไฟฟ้า โดย LVDT จะสัมผัสกับแท่งเซรามิกซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิที่จะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ตัวของ LVDT โดยแท่งเซรามิกจะสัมผัสกับผิวของชิ้นงาน BF-BT อีกทั้งแผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์และการติดตั้งเครื่องมือสำหรับวัดวงวนรูปปึกผีเสื้อเทียบกับอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 สำหรับสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชิ้นงานในการวัดวงวนรูปปึกผีเสื้อนั้นใช้สนามไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ ขนาด 52 kV/cm เท่ากับการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสแต่จะแตกต่างกันตรงที่การวัดวงวนรูปปึกผีเสื้อนั้นจะใช้ความถี่ 50 mHz เนื่องจากข้อจำกัดของความไวในการรับรู้ของ LVDT ที่ความถี่สูง ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชิ้นงาน ( $V_x$ ) และค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก LVDT ( $V_y$ ) จะถูกบันทึกโดยเครื่องออสซิลโลสโคปที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_x$  และ  $V_y$  ที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและค่าความเครียดตามลำดับ

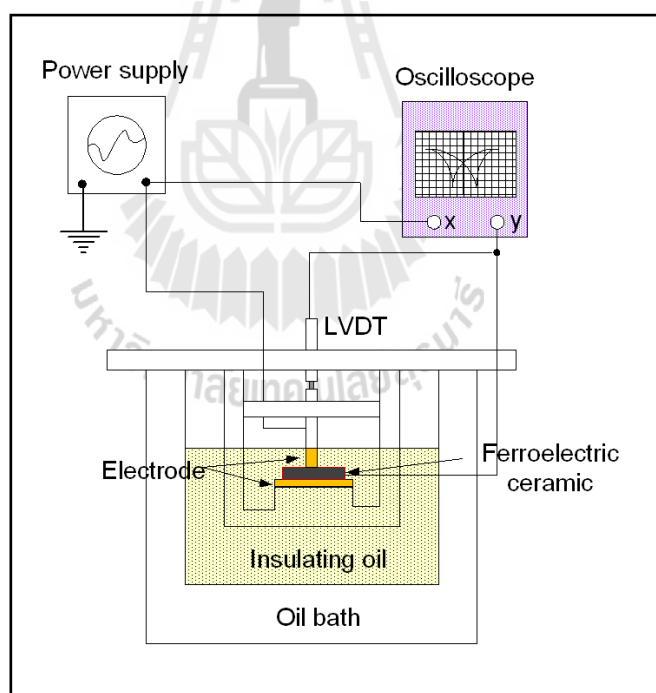
แล้วนำไปพล็อตกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าสนามไฟฟ้าและค่าความเครียดจะทำให้ได้วงวนรูปปีกผีเสื้อ สำหรับวิธีการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชิ้นงานได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 หัวข้อ 3.8.2.2 ส่วนการคำนวณหาค่าความเครียดทำได้โดยนำค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_y$  มาเปลี่ยนเป็นค่าระยะการเปลี่ยนแปลง โดยค่าแรงดันไฟฟ้า  $1 \text{ mV} = 0.1258 \text{ } \mu\text{m}$  ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการปรับเทียบค่า หลังจากนั้นนำมาคำนวณหาค่าความเครียดตามสมการ 4.2

$$\sigma = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.2)$$

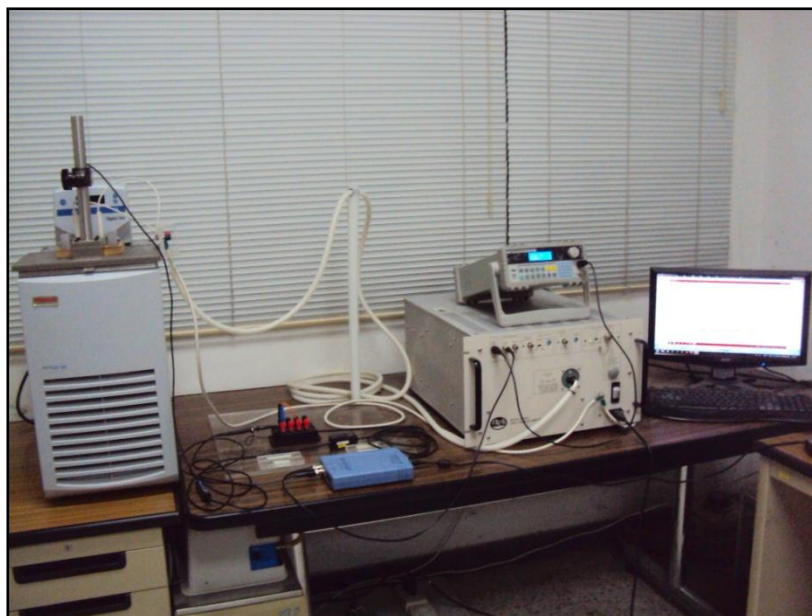
โดยที่  $\sigma$  คือ ค่าความเครียด

$\Delta L$  คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานเซรามิกเทียบกับค่าขนาดเริ่มต้น

$L_0$  คือ ขนาดเริ่มต้นของชิ้นงานเซรามิก



รูปที่ 4.27 การจัดเครื่องมือเพื่อใช้วัดวงวนรูปปีกผีเสื้อของชิ้นงานเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ



รูปที่ 4.28 การจัดเครื่องมือเพื่อใช้วัดวงวนรูปปิกผีเสื้อของชิ้นงานเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ

#### 4.6 สรุป

ในบทที่ 4 ในส่วนแรกได้ทำการอธิบายถึงขั้นตอนและวิธีการสังเคราะห์เซรามิก BF-BT ด้วยวิธี Solid-state reaction ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการเตรียมสาร การบดผสม การเผาแคลไซน์ การอัดขึ้นรูปและขั้นตอนสุดท้ายการเผาซินเตอร์ สำหรับในส่วนที่สองได้อธิบายถึงขั้นตอนและวิธีการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อผลการทดลองที่ได้ โดยประกอบไปด้วยขั้นตอนการขัดผิวชิ้นงาน การล้างทำความสะอาด การอบอ่อนและการทำขั้วไฟฟ้า นอกจากนี้การอธิบายถึงขั้นตอนวิธีการสังเคราะห์สารและการเตรียมชิ้นงาน ส่วนที่สามได้อธิบายถึงการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับวัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่าง ๆ การออกแบบและสร้างตัวจับยึดชิ้นงานและฐานสำหรับวางตัวจับยึดชิ้นงาน และในที่สุดท้ายได้อธิบายถึงขั้นตอนและวิธีการทดสอบ ซึ่งได้แก่การใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบและโครงสร้างโดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก การวัดวงวนฮิสเทอรีซิสเทียบกับอุณหภูมิและการวัดวงวนรูปปิกผีเสื้อเทียบกับอุณหภูมิ ซึ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จะอธิบายในบทถัดไป

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 5.1 บทนำ

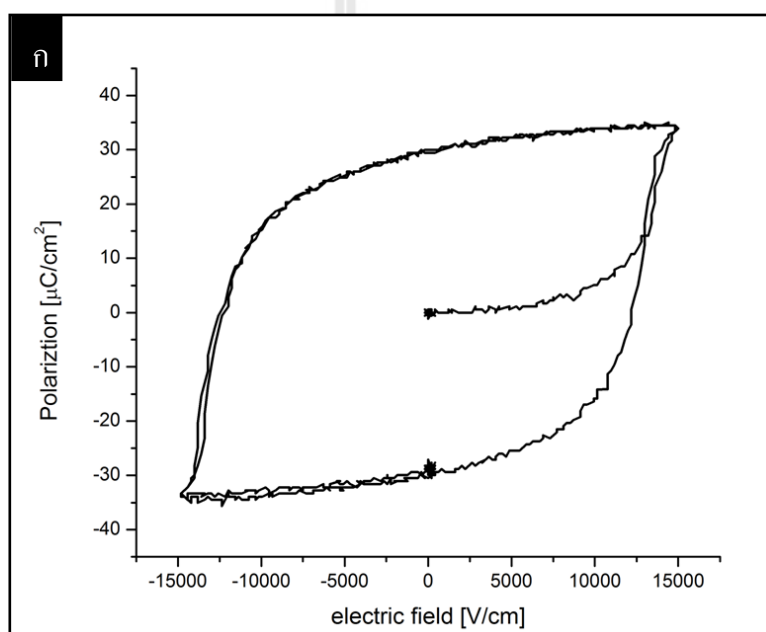
บทนี้นำเสนอผลการศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของชุดอุปกรณ์วัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น โดยวัดวงวนฮีสเทอรีซิสและวงวนรูปปีกผีเสื้อของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานेट (PZT) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางเปรียบเทียบกับผลการศึกษาจากแหล่งอื่น รวมถึงผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกบิสมาทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต (BF-BT) ซึ่งเป็นวัสดุที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่การวิเคราะห์ห้วงภาคก่อนและหลังทำการเผาผนึก ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าพลังงานสูญเสีย สุดท้ายนำเสนอผลการศึกษความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมาทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต โดยวัดวงวนฮีสเทอรีซิส วงวนรูปปีกผีเสื้อและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากอุณหภูมิห้องแล้วเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 องศาเซลเซียส ซึ่งรายละเอียดของผลการศึกษา มีดังต่อไปนี้

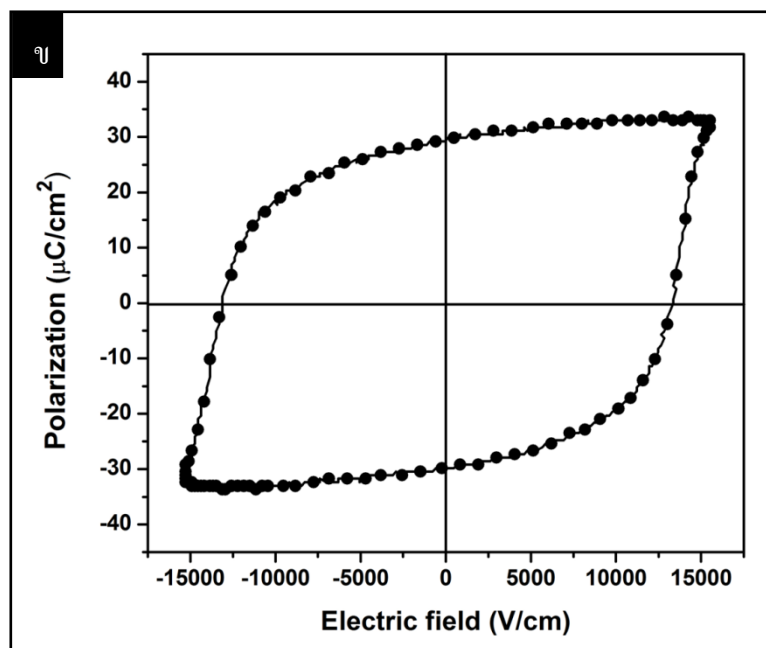
#### 5.2 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมาทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนตเทียบกับอุณหภูมิ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT ซึ่งชุดอุปกรณ์ในการวัดสมบัติดังกล่าวได้มีการออกแบบและสร้างขึ้นจึงต้องมีการทดสอบความแม่นยำและความถูกต้องของชุดอุปกรณ์ที่ออกแบบ โดยการเปรียบเทียบผลการทดสอบของชุดอุปกรณ์ดังกล่าวกับผลการทดสอบที่ได้จากแหล่งอื่น ซึ่งในการเปรียบเทียบจะทำการศึกษาผลของเซรามิก PZT ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการศึกษาอย่างกว้างขวางทำให้สามารถเปรียบเทียบผลการวัดได้ง่ายเพราะมีผลการวัดค่าต่าง ๆ ของเซรามิก PZT อยู่มากมาย นอกจากนี้เซรามิก PZT ยังเป็นวัสดุที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ดีมากสามารถทำการวัดและศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกได้โดยง่าย ผลการวัดที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ได้แก่ การวัดวงวนฮีสเทอรีซิส วงวนรูปปีกผีเสื้อ

### 5.2.1 เปรียบเทียบผลการวัดวงวนฮีสเทอรีซิส

เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดวงวนฮีสเทอรีซิสจากเครื่องมือที่ออกแบบและสร้างขึ้นกับผลการทดสอบด้วยเครื่อง TF Analyzer 2000 system; aixACCT Systems GmbH, Aachen, Germany (Pojprapai et al.,2012) แสดงดังรูปที่ 5.1 วงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิก PZT วัดที่อุณหภูมิห้อง พบว่าผลการวัดจากเครื่อง TF Analyzer 2000 system; aixACCT Systems GmbH, Aachen, Germany มีขนาดใกล้เคียงกับผลการวัดที่ได้จากอุปกรณ์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงวนฮีสเทอรีซิสแสดงดังตารางที่ 5.1





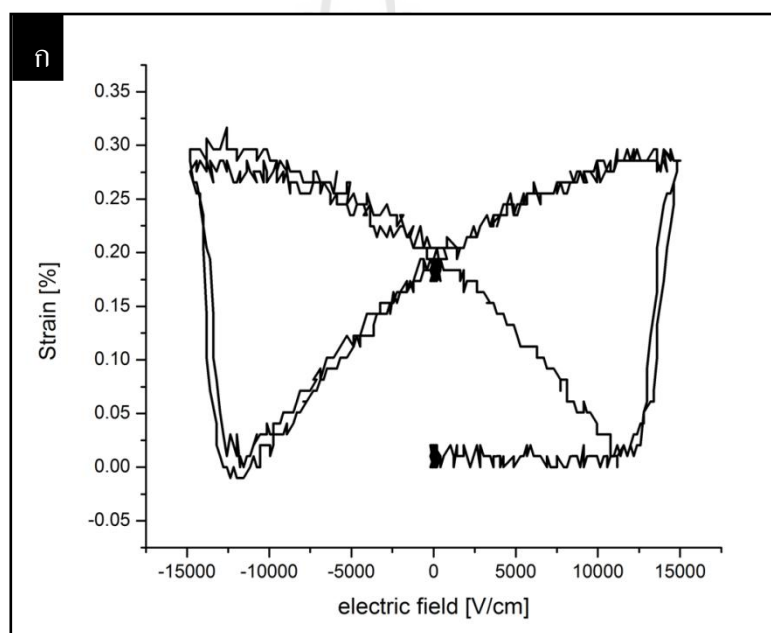
รูปที่ 5.1 วงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิก PZT (ก) วัดด้วยเครื่องมือ TF Analyzer 2000 system; aixACCT Systems GmbH, Aachen, Germany (ข) ผลการทดสอบเครื่องมือ

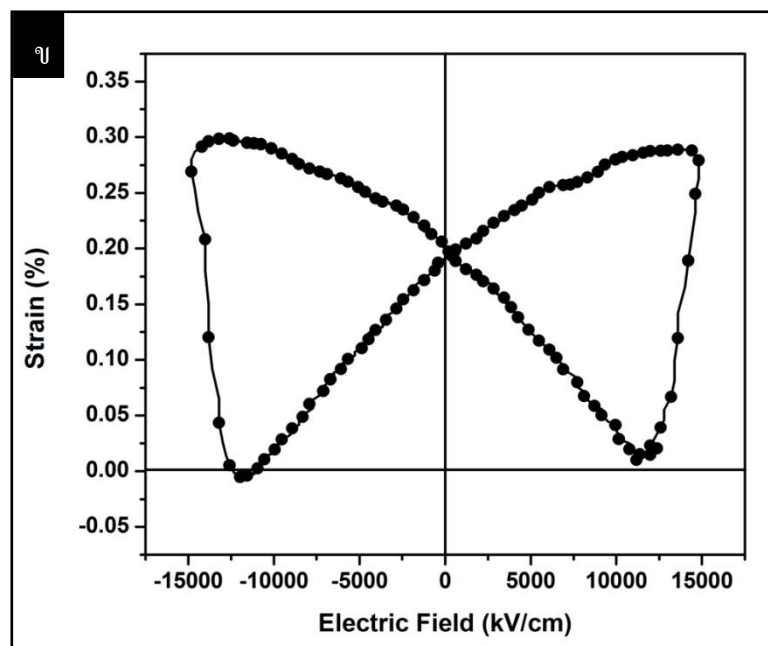
ตารางที่ 5.1 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงวนฮีสเทอรีซิส

ค่าเปรียบเทียบ	ค่าอ้างอิง (Pojprapai et al., 2012)	ผลการวัดจากเครื่องมือที่สร้างขึ้น	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
$P_r^+$ ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )	29.502	29.8	1.01
$P_r^-$ ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )	-29.451	-30	1.864
$P_{\text{max}}^+$ ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )	34.769	34.263	1.455
$P_{\text{max}}^-$ ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )	-33.705	-34.212	1.504
$E_c^+$ (kV/cm)	11.925	12.461	4.495
$E_c^-$ (kV/cm)	-12.106	-12.782	5.584

### 5.2.2 เปรียบเทียบผลการวัดวงวนรูปปีกผีเสื้อ

สำหรับผลการเปรียบเทียบผลการวัดวงวนรูปปีกผีเสื้อจากเครื่องมือที่ออกแบบและสร้างขึ้นกับผลการทดสอบด้วยเครื่อง TF Analyzer 2000 system; aixACCT Systems GmbH, Aachen, Germany (Pojprapai et al., 2012) แสดงดังรูปที่ 5.2 วงวนรูปปีกผีเสื้อของเซรามิก PZT วัดที่อุณหภูมิห้อง พบว่าวัดจากเครื่อง TF Analyzer 2000 system; aixACCT Systems GmbH, Aachen, Germany มีขนาดใกล้เคียงกับผลการวัดที่ได้จากอุปกรณ์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น วงวนรูปปีกผีเสื้อที่วัดได้จากเครื่องมือที่สร้างขึ้นจะมีลักษณะของปีกที่โค้งมนกว่าเนื่องจากได้ผ่านโปรแกรมปรับแต่งกราฟให้เรียบเพราะว่าข้อมูลดิบที่วัดได้จากเครื่องมือในห้องแลปมีสัญญาณรบกวนมาก จึงต้องทำการปรับแต่งโดยการลบสัญญาณรบกวนออกก่อน ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงวนรูปปีกผีเสื้อแสดงดังตารางที่ 5.2





รูปที่ 5.2 วงวนรูปปีกผีเสื้อของเซรามิก PZT (ก) วัดด้วยเครื่องมือ TF Analyzer 2000 system; aixACCT Systems GmbH, Aachen, Germany (ข) ผลการทดสอบเครื่องมือ

ตารางที่ 5.2 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงวนรูปปีกผีเสื้อ

ค่าเปรียบเทียบ	ค่าอ้างอิง (Pojprapai et al., 2012)	ผลการวัดจากเครื่องมือที่สร้างขึ้น	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
$S_r$ (%)	0.193	0.196	1.554
$S_{max+}$ (%)	0.291	0.288	1.031
$S_{max-}$ (%)	0.299	0.288	3.678
$d_{33}^*$ (pm/V)	1.071	1.154	7.749
$E_{c+}$ (kV/cm)	11.331	11.842	4.509
$E_{c-}$ (kV/cm)	-11.677	-11.842	1.413



### 5.3 ศึกษาสมบัติของเซรามิกบิส്മัทเฟอไรต์-แบเรียมไทเทเนต

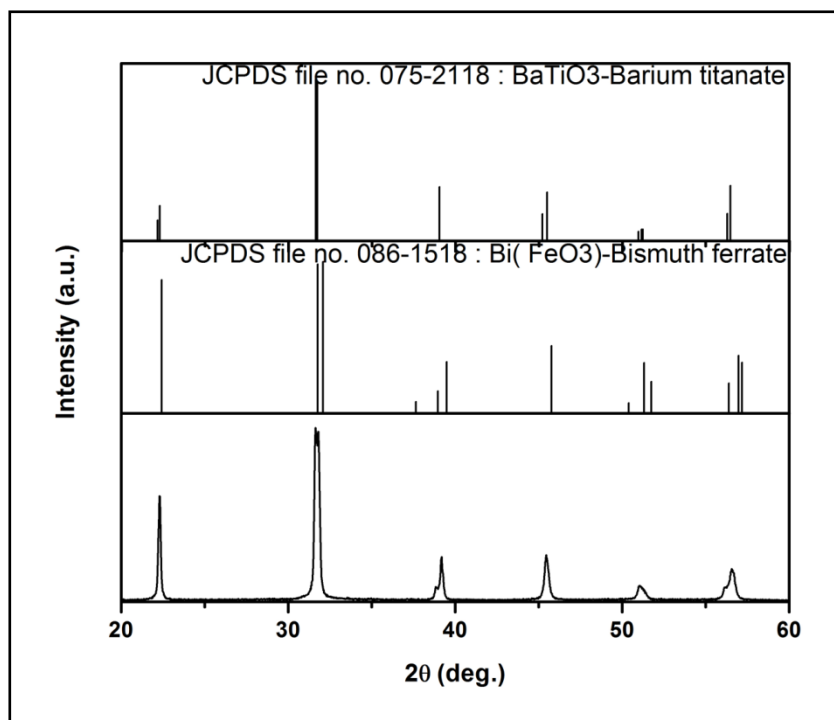
การศึกษาสมบัติของเซรามิก BF-BT ประกอบด้วยการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อให้แน่ใจว่าเซรามิก BF-BT ที่สังเคราะห์ขึ้นมีเฟสและองค์ประกอบตามที่ต้องการไม่มีเฟสแปลกปลอมเกิดขึ้นหรือว่ามี การปนเปื้อนจากสารอื่นในระหว่างการสังเคราะห์ นอกจากนี้การวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แล้วยังทำการวัดสมบัติไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้เข้าใจถึงพื้นฐานของสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT เพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปประกอบการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

#### 5.3.1 ตรวจสอบเฟสองค์ประกอบของเซรามิก BF-BT ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

หลังจากการสังเคราะห์เซรามิก BF-BT ด้วยวิธี Solid state reaction แล้วนำสารตัวอย่างมาวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) โดยการนำสารเซรามิกที่เตรียมได้มาตรวจสอบผลการสังเคราะห์สารจากกราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันที่  $2\theta = 20-70^\circ$  โดยที่เซรามิกที่ใช้วิเคราะห์ได้จากขั้นตอนหลังจากแคลไซน์ (calcination) และหลังจากขั้นตอนการเผาซินเตอร์ (sintering)

##### 5.3.1.1 เฟสองค์ประกอบของเซรามิก BF-BT หลังจากการแคลไซน์

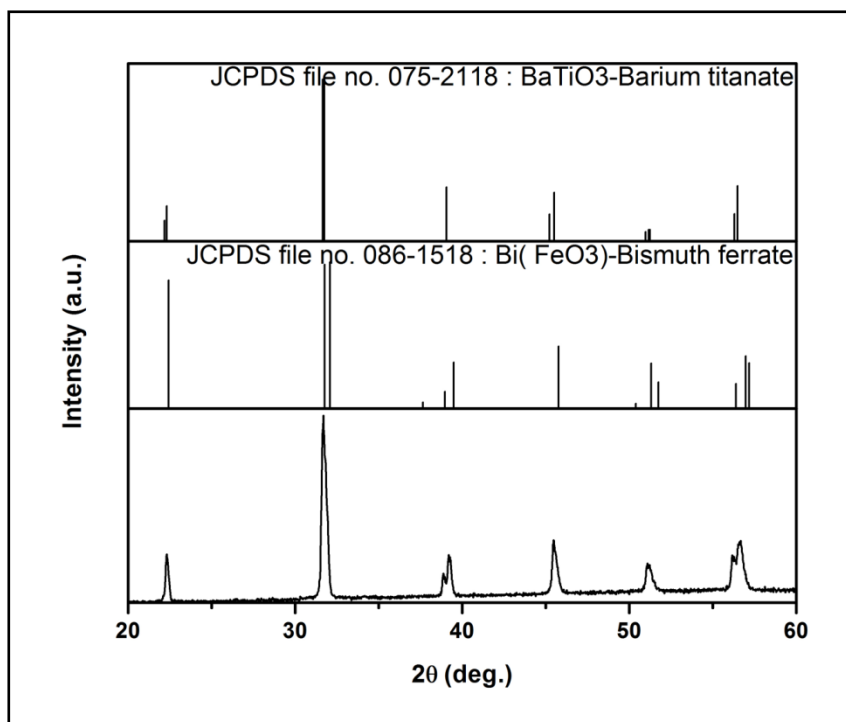
จากการตรวจสอบผลของเซรามิก BF-BT ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงดังรูปที่ 5.3 ซึ่งจะเห็นว่าผลของเซรามิก BF-BT ที่ผ่านการแคลไซน์จะมีเฟสสอดคล้องกับเฟสของบิส്മัทเฟอไรต์ ( $\text{BiFeO}_3$ ) ซึ่งเป็นส่วนผสมหลักและตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 86-1518 ผลของเซรามิก BF-BT ที่สังเคราะห์ได้ไม่มีเฟสแปลกปลอมและมีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite) และรูปแบบการเลี้ยวเบนตรงกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ (Chandarak et al., 2008; Chandarak et al., 2009)



รูปที่ 5.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผง BF-BT ที่ผ่านการแคลไซน์

### 5.3.1.2 เฟสองค์ประกอบของเซรามิก BF-BT หลังจากเผาซินเตอร์

จากการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบของชิ้นงานเซรามิก BF-BT หลังจากเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,025 °C ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงดังรูปที่ 5.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเซรามิก BF-BT ที่สังเคราะห์ได้เป็นสารละลายของแข็ง (solid solution) อย่างสมบูรณ์ไม่มีเฟสอื่นเจือปน แบเรียมไทเทเนตสามารถแพร่กระจายภายในบิสมัทเฟอร์ไรท์ได้อย่างสมบูรณ์ทำให้เซรามิกที่สังเคราะห์ได้มีเฟสสอดคล้องกับเฟสของบิสมัทเฟอร์ไรท์ ( $\text{BiFeO}_3$ ) และตรงกับข้อมูล JCPDS หมายเลข 86-1518 มีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite) และรูปแบบการเลี้ยวเบนตรงกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ (Chandarak et al., 2008; Chandarak et al., 2009)



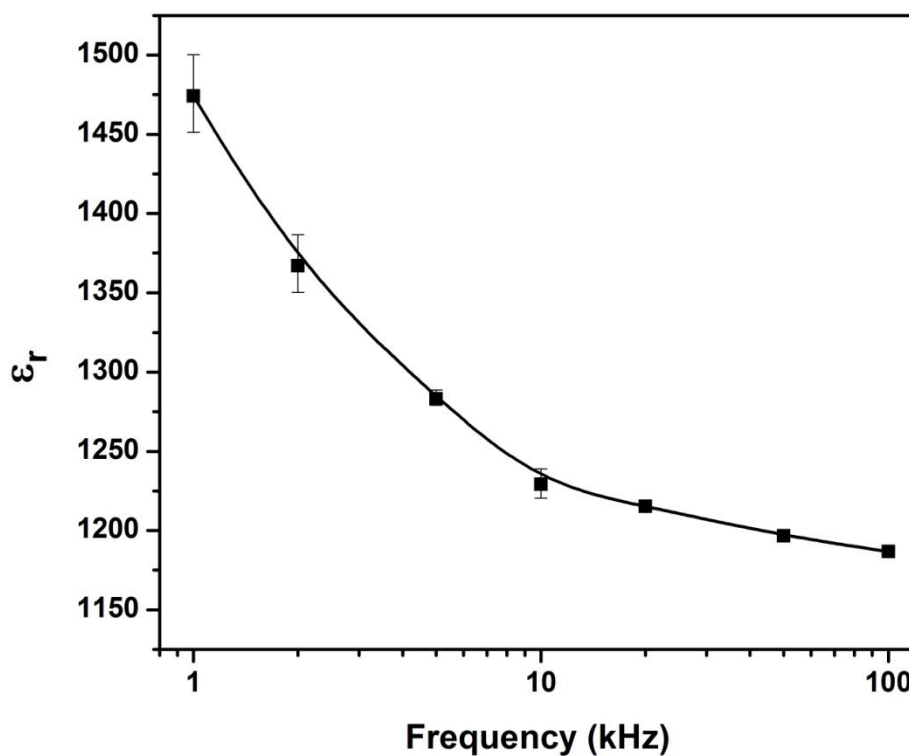
รูปที่ 5.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผง BF-BT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์

### 5.3.2 สมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT

สมบัติไดอิเล็กทริก ถือได้ว่าเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก เพราะว่าสมบัติไดอิเล็กทริกจะเป็นตัวบ่งบอกว่าวัสดุชนิดนั้นเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกหรือไม่ โดยทั่วไปแล้ววัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์หนึ่งของสมบัติทางไดอิเล็กทริกสูงกว่าวัสดุชนิดอื่น วัสดุไดอิเล็กทริกมีสมบัติเป็นฉนวนไม่นำไฟฟ้าแต่มีความแตกต่างจากฉนวนไฟฟ้าโดยทั่วไปคือการมีสมบัติของการเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริกนี้เรียกว่า ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้วัสดุไดอิเล็กทริกก็จะทำให้เกิดโพลาไรเซชันขึ้น ซึ่งจะมีค่าเท่ากับผลรวมของโพลาไรเซชันต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (net polarization/unit volume) ถ้าวัสดุไดอิเล็กทริกมีค่าความจุไฟฟ้าสูงก็ส่งผลให้ค่าโพลาไรเซชันสูงขึ้นไปด้วย โดยสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT มีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้อยู่ 2 ตัวคือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity;  $\epsilon_r$ ) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss;  $\tan \delta$ )

### 5.3.2.1 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

ผลการศึกษาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก BF-BT ด้วยเครื่อง LCR (ยี่ห้อ Instek รุ่น LCR-821) ใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1 V ในแต่ละชิ้นงานทำการวัดที่ค่าความถี่เท่ากับ 1, 2, 5, 10, 20, 50 และ 100 kHz ตามลำดับและในแต่ละความถี่จะทำการวัด 3 ครั้งแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 5.5 พบว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจาก 1 kHz ไปจนถึง 100 kHz ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะมีค่าลดลงแปรผกผันกับค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความถี่ 1 kHz ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะมีค่าสูงสุดคือ 1474.186 และที่ค่าความถี่ 100 kHz ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะมีค่าน้อยที่สุดคือ 1186.604 และจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงความถี่ 1 kHz ถึง 10 kHz และเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นหลังจาก 10 kHz จนถึง 100 kHz ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงและมีค่าใกล้เคียงกัน

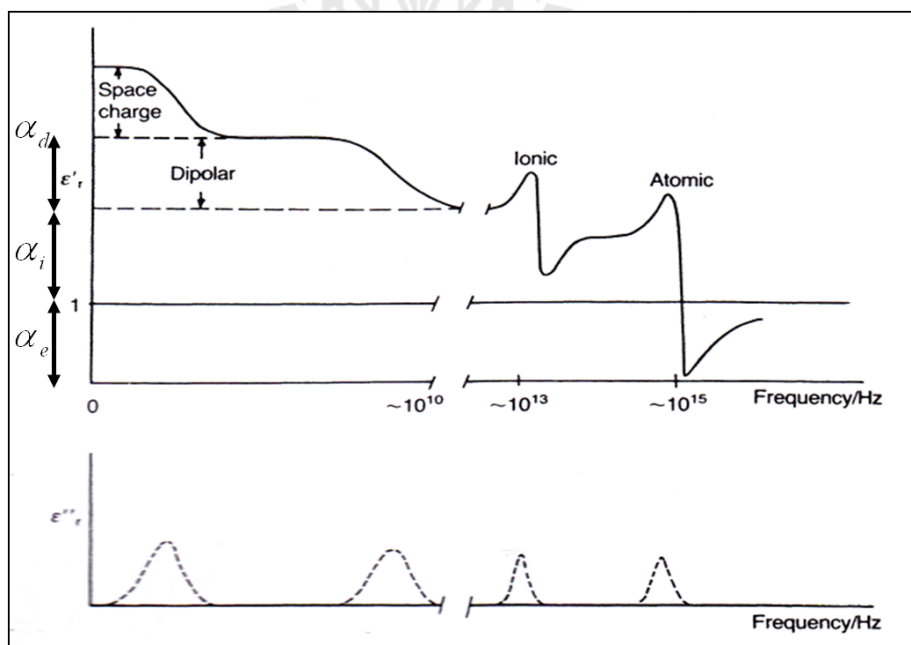


รูปที่ 5.5 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก BF-BT ที่ค่าความถี่ต่าง ๆ

การลดลงของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้นเกิดจากในวัสดุไดอิเล็กทริกค่าสภาพยอมสัมพัทธ์คือค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณประจุภายในตัวเก็บประจุที่ใช้สารไดอิเล็กทริกชนิดนั้นเทียบกับสุญญากาศ เมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าให้แก่สารไดอิเล็กทริกจะเกิดการเคลื่อนที่ของประจุเรียกว่าไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้า (electric dipole moment) หรือโพลาริเซชันทางไฟฟ้า (electrical polarization) โดยพื้นฐานการเกิดไดโพลโมเมนต์มีอยู่ 5 แบบ (กรกฎ วัฒนวิเชียร, 2007; สุดเขตต์ พจน์ประไพ, 2011) ได้แก่

1. อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน (Electric polarization)
2. อะตอมมิก หรือ ไอออนิกโพลาริเซชัน ( Atomic or ionic polarizatoion)
3. ไดโพล หรือ ออเรียนเตชันนอลโพลาริเซชัน (Dipolar or orientation polarization)
4. โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง (Spontaneous polarization)
5. โพลาริเซชันแบบประจุวากาศ (Space charge polarization)

ไดโพลโมเมนต์แต่ละแบบตอบสนองต่อค่าความถี่ที่ต่างกัน ได้แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่อความถี่ (กรกฎ วัฒนวิเชียร, 2007)

การเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถของโพลาริเซชันรวม  $\alpha$  ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ โดยที่  $\alpha = \alpha_d + \alpha_i + \alpha_e$  จะเห็นว่าในช่วงความถี่ต่ำจนถึงย่านไมโครเวฟ ค่า  $\alpha$  ประกอบด้วย  $\alpha_d + \alpha_i + \alpha_e$  ในช่วงความถี่ย่านไมโครเวฟจนถึงย่านความถี่ไมโครเวฟจนถึงย่านความถี่อินฟราเรด ค่า  $\alpha$  จะประกอบด้วย  $\alpha_i + \alpha_e$  และจากย่านอินฟราเรดจนถึงย่านอัลตราไวโอเล็ต ค่า  $\alpha$  จะมีแค่ค่า  $\alpha_e$  เท่านั้น การที่โพลาริเซชันตอบสนองต่อค่าความถี่ได้แตกต่างกัน ที่ความถี่สูงโพลาริเซชันบางชนิดไม่สามารถตอบสนองต่อค่าความถี่ได้ทำให้ผลรวมของโพลาริเซชันมีค่าลดลงและส่งผลให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

หรืออธิบายในรูปแบบของสมการจะได้ว่า ผลตอบสนองของโพลาริเซชันต่อสนามไฟฟ้าแบบสลับ จะขึ้นกับตัวความหนืดของตัวกลางซึ่งแสดงในพจน์ของเวลาผ่อนคลาย (relaxation time,  $\tau$ ) คือเวลาที่น้อยที่สุดที่ไดโพลสามารถใช้ในการปรับทิศทางตามสนามไฟฟ้า หรือแสดงในพจน์  $\omega_0 = \frac{1}{\tau}$  คือความถี่เชิงมุม (กรกฎ วัฒนวิเชียร, 2007) สำหรับกลไกโพลาริเซชันที่มีเวลาผ่อนคลาย  $\tau$  ค่าเดียว สมการเดบายจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ  $\epsilon_r$  ที่เป็นฟังก์ชันของ  $\omega$  ดังสมการที่ 5.1 (Kasap, S. O., 2002)

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (5.1)$$

โดยที่  $\epsilon_r$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์  
 $\epsilon_\infty$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่ความถี่สูง (ช่วงที่มีเฉพาะโพลาริเซชันแบบอิเล็กทรอนิกส์และแบบไอออนิก)

$\epsilon_s$  คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ที่ความถี่ต่ำ

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม

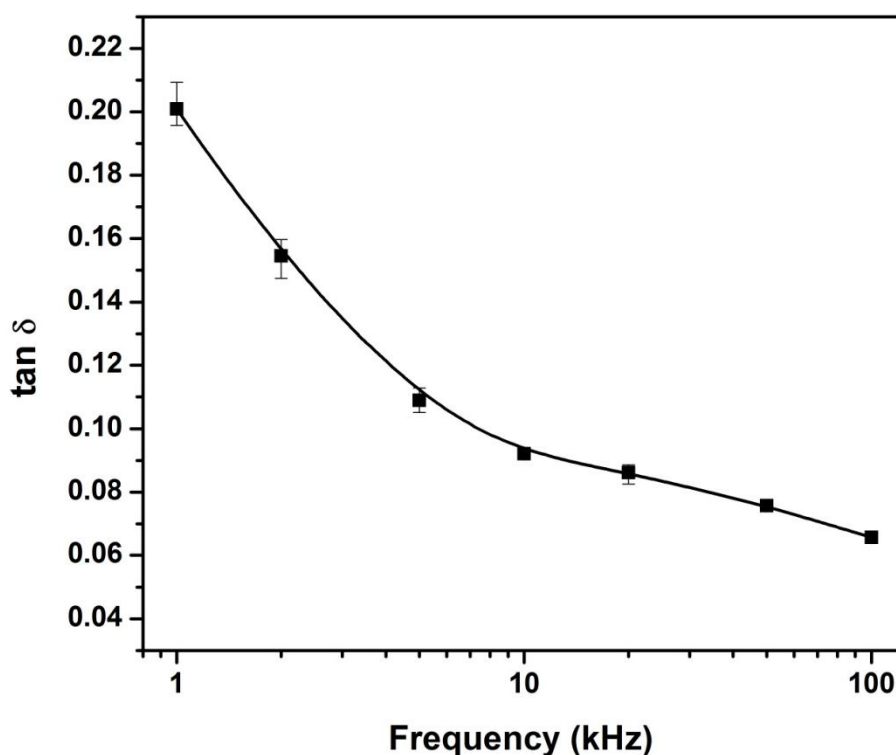
$\tau$  คือ เวลาผ่อนคลาย

จากสมการที่ 5.1 พบว่าค่าสภาพยอมสัมพัทธ์แปรผกผันกับค่าความถี่ ดังนั้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จึงมีค่าลดลง

### 5.3.2.2 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก

ผลการศึกษาค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT ด้วยเครื่อง LCR (ยี่ห้อ Instek รุ่น LCR-821) ใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1 V ในแต่ละชิ้นงานทำการวัดที่ค่าความถี่เท่ากับ 1, 2,

5, 10, 20, 50 และ 100 kHz ตามลำดับและในแต่ละความถี่จะทำการวัด 3 ครั้งแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 5.7 พบว่าเมื่อเพิ่มความถี่ให้กับเซรามิก BF-BT ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่วัดได้จะมีค่าลดลงซึ่งค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกนั้นแปรผกผันกับค่าความถี่ โดยที่ความถี่ 1 kHz ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.2008 และที่ความถี่ 100 kHz ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะมีค่าต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0657 นอกจากนี้ในช่วงความถี่ต่ำ 1 kHz ถึง 10 kHz ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะลดลงอย่างรวดเร็วแต่เมื่อเพิ่มความถี่ให้กับเซรามิก BF-BT ในช่วงความถี่มากกว่า 10 kHz จนถึง 100 kHz ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะลดลงน้อยกว่าในช่วงความถี่ต่ำและมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากในเซรามิก BF-BT จะมีประจุอิสระซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น อิเล็กตรอนและประจุบนผิว ที่ความถี่ต่ำประจุและอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ระหว่างผิวด้านหนึ่งไปยังผิวด้านหนึ่งของชิ้นงานทำให้เกิดการนำไฟฟ้าและทำให้ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าสูง เมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นประจุอิสระจะเริ่มตอบสนองต่อค่าความถี่ได้ไม่เต็มที่ มีการเคลื่อนที่ไม่สอดคล้องกับค่าความถี่ที่จ่ายให้แก่ชิ้นงานทำให้ผลรวมของค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ค่าความถี่สูงมีค่าลดลง (Kasap, S. O., 2002)



รูปที่ 5.7 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT ที่ค่าความถี่ต่าง ๆ

จากตารางที่ 5.3 สรุปผลการเปรียบเทียบผลของความถี่ต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก พบว่าค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีการตอบสนองต่อค่าความถี่ที่เหมือนกันคือค่าทั้งสองแปรผกผันกับค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เกี่ยวข้องกับระดับการเกิดโพลาไรเซชัน ซึ่งโพลาไรเซชันแต่ละระดับตอบสนองต่อความถี่ได้แตกต่างกันทำให้ความถี่มีผลต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเกี่ยวข้องกับประจุอิสระภายในสารไดอิเล็กทริก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ทำให้ค่าประจุเหล่านี้ตอบสนองต่อค่าความถี่ได้แตกต่างกันหรือในกรณีที่ความถี่มีค่าสูงประจุเหล่านี้จะตอบสนองต่อค่าความถี่ได้น้อยลง ส่งผลให้ผลรวมของค่าประจุดังกล่าวมีค่าน้อยลงไปด้วยจึงทำให้ทั้งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าลดลง

ตารางที่ 5.3 ผลของความถี่ต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก

ความถี่ (kHz)	สมบัติไดอิเล็กทริก	
	$\epsilon_r$	$\tan \delta$
1	1474.186	0.2008
2	1367.052	0.1544
5	1283.031	0.1089
10	1229.236	0.0921
20	1215.299	0.0862
50	1196.527	0.0757
100	1186.604	0.0657

#### 5.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก บิสมัทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต

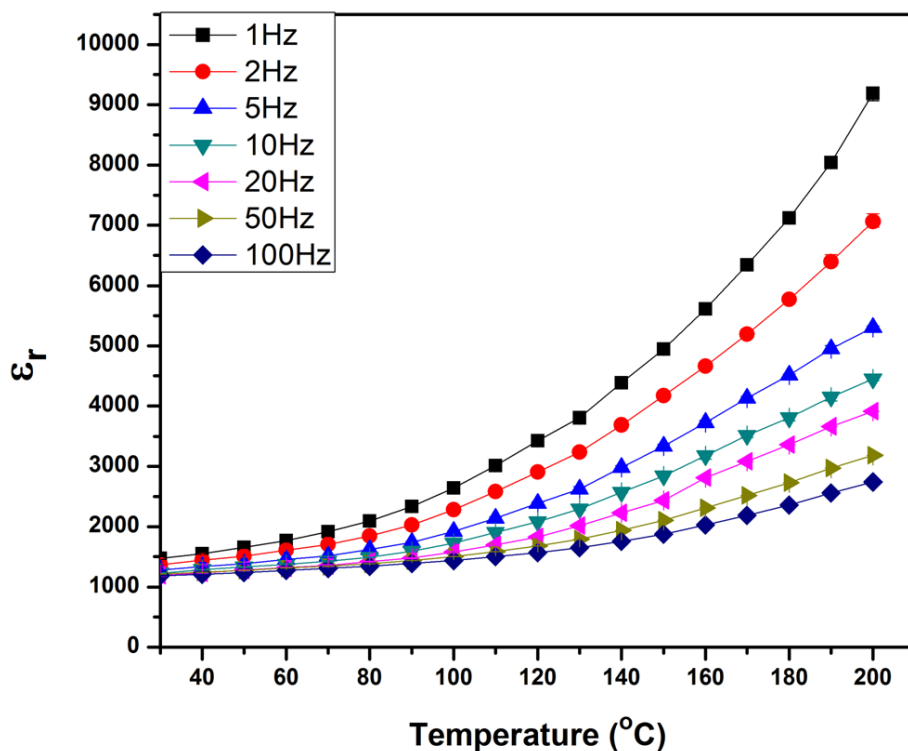
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งในที่นี้จะทำการศึกษาอยู่สองชนิดคือ วงวนโพลาไรเซชันฮิสเทอรีซิสเทียบกับอุณหภูมิซึ่งจะบ่งบอกถึงผลของอุณหภูมิต่อค่าโพลาไรเซชันของเซรามิก BF-BT และอีกอย่างที่ทำการศึกษาคือวงวนรูปปีกผีเสื้อซึ่งจะบ่งบอกถึงผลของอุณหภูมิต่อค่าความเครียด (strain) ของชิ้นงาน นอกจากนี้แล้วยังได้



ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติไดอิเล็กทริกซึ่งประกอบไปด้วย ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก เพื่อใช้ประกอบการอธิบายผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

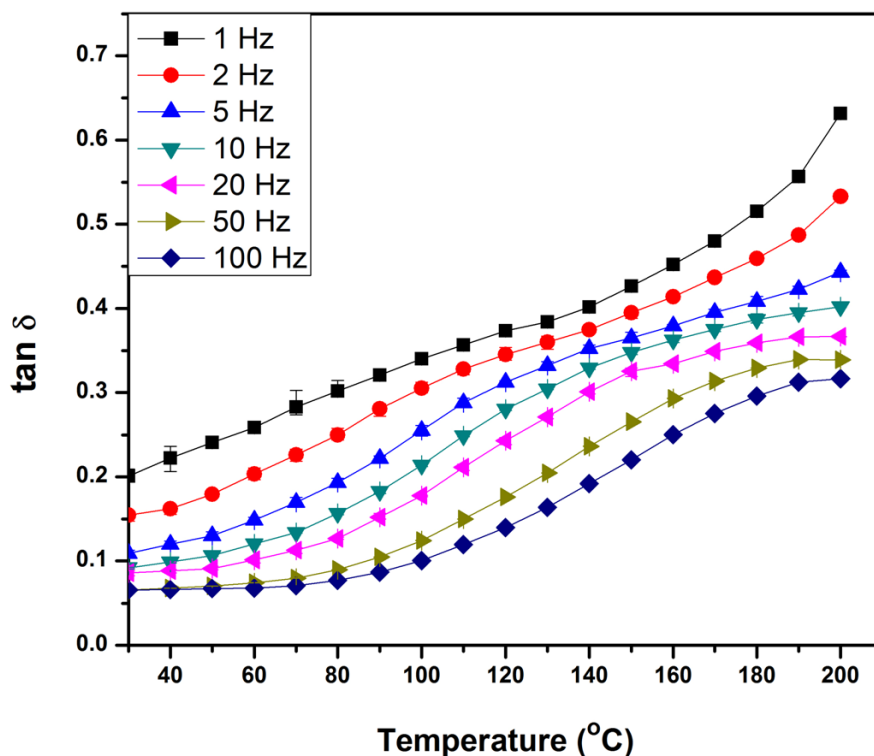
#### 5.4.1 สมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ

ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ทำการวัดค่าเก็บประจุ (C) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก BF-BT ด้วยเครื่อง LCR (ยี่ห้อ Instek รุ่น LCR-821) วัดที่อุณหภูมิห้องและเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ  $10^{\circ}\text{C}$  จนถึงอุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$  ใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ  $1\text{ V}$  ในแต่ละอุณหภูมิทำการวัดที่ค่าความถี่เท่ากับ 1, 2, 5, 10, 20, 50 และ  $100\text{ kHz}$  ตามลำดับและในแต่ละความถี่จะทำการวัด 3 ครั้งแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย พบว่าที่ทุกอุณหภูมิเมื่อค่าความถี่เพิ่มมากขึ้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.8 เนื่องมาจากความสามารถในการตอบสนองต่อความถี่ที่แตกต่างกันของโพลาริเซชันแต่ละระดับภายในชิ้นงานเซรามิกทำให้ผลรวมของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นดังได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 5.3.2.1 นอกจากนี้แล้วยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่ทุกค่าความถี่ เนื่องจากที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้แล้วว่าค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เกิดจากผลรวมของค่าโพลาริเซชันภายในชิ้นงาน ซึ่งโพลาริเซชันแต่ละระดับจะตอบสนองต่อความถี่ได้แตกต่างกัน ที่ความถี่สูงโพลาริเซชันบางชนิดไม่สามารถตอบสนองต่อความถี่ได้จึงทำให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ชิ้นงานเซรามิกทำให้อะตอม อิเล็กตรอน มีพลังงานเพิ่มขึ้นสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดสภาพการมีขั้วได้ง่ายขึ้นส่งผลให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำจาก  $30^{\circ}\text{C}$  ถึง  $80^{\circ}\text{C}$  ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นอย่างช้าแต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากกว่า  $80^{\circ}\text{C}$  คือในช่วงอุณหภูมิ  $90^{\circ}\text{C}$  จนถึง  $200^{\circ}\text{C}$  ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $80^{\circ}\text{C}$  โดโพลโมเม้นท์ภายในชิ้นงานยังมีพลังงานไม่มากพอต่อการตอบสนองต่อความถี่จึงมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยและเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากกว่า  $80^{\circ}\text{C}$  ประจุชนิดต่าง ๆ จึงมีพลังงานมากขึ้นในการเคลื่อนที่ตอบสนองต่อความถี่ทำให้ในช่วงนี้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 5.8 ผลของอุณหภูมิต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก BF-BT

สำหรับผลการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก ทำการวัดค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT ด้วยเครื่อง LCR (ยี่ห้อ Instek รุ่น LCR-821) วัดที่อุณหภูมิห้องและเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 10 °C จนถึงอุณหภูมิ 200 °C ใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1 V ในแต่ละอุณหภูมิทำการวัดที่ค่าความถี่เท่ากับ 1, 2, 5, 10, 20, 50 และ 100 kHz ตามลำดับและในแต่ละความถี่จะทำการวัด 3 ครั้งแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย พบว่าที่ทุกอุณหภูมิเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงแสดงดังรูปที่ 5.9 เนื่องจากภายในชิ้นงานเซรามิก BF-BT ประกอบด้วยประจุอิสระซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก เมื่อความถี่มีค่ามากขึ้นประจุอิสระจะเคลื่อนที่และตอบสนองต่อค่าความถี่ได้น้อยลงจึงทำให้ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงดังได้อธิบายรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 5.3.2.2 นอกจากนี้แล้วยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับอุณหภูมิ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ประจุอิสระภายในชิ้นงานมีพลังงานเพิ่มมากขึ้นทำให้การเคลื่อนที่ตอบสนองต่อความถี่ทำได้ดีขึ้นจึงเป็นผลให้ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ที่ความถี่ต่าง ๆ (Kim, J. S., 2007; Verma, K. C., 2009; Wei, Y., 2010)

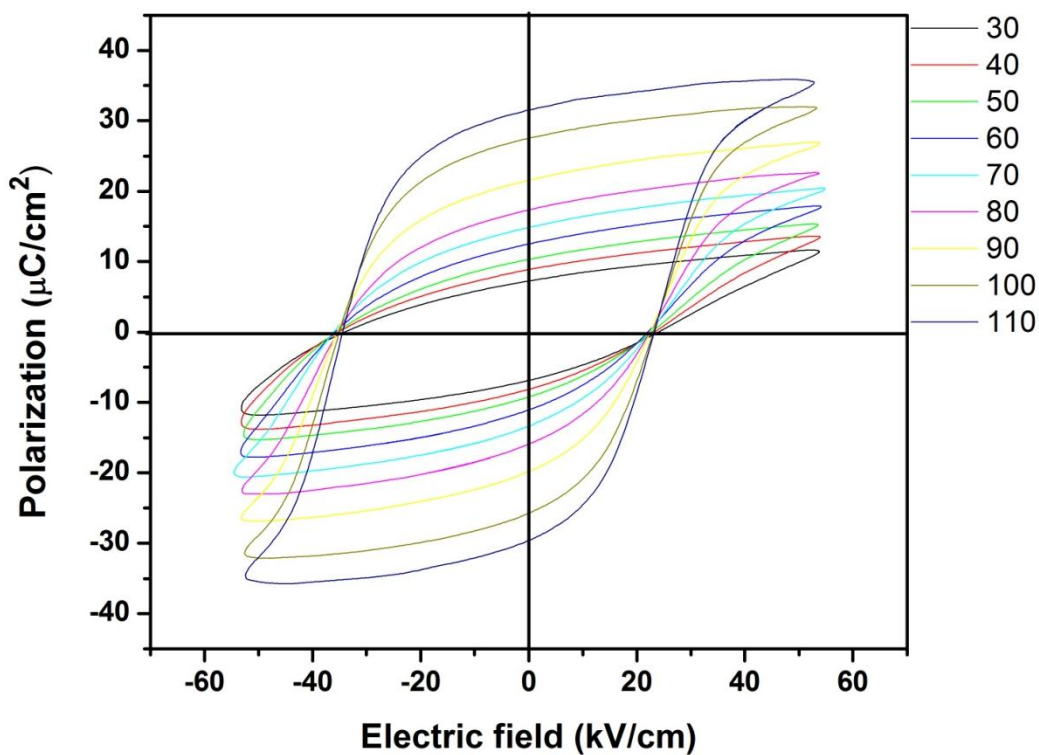


รูปที่ 5.9 ผลของอุณหภูมิต่อค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกของเซรามิก BF-BT

#### 5.4.2 วงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ

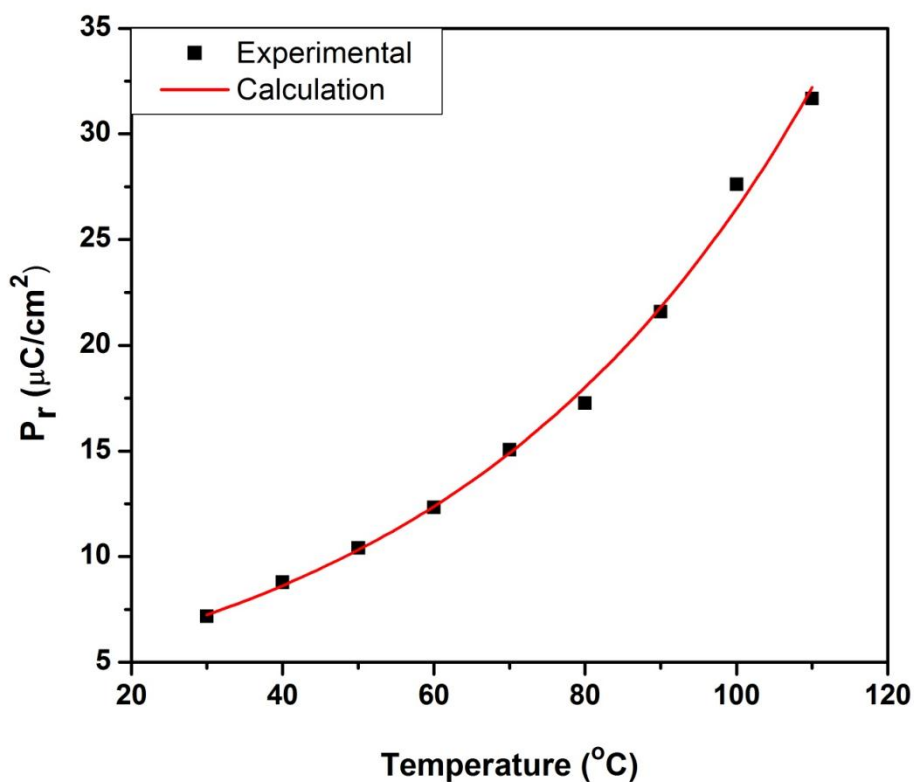
โดยทั่วไปพฤติกรรมสลับทิศทางโดเมนของเฟอร์โรอิเล็กตริกเซรามิกภายใต้สนามไฟฟ้าสามารถแสดงได้ด้วยวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิส ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้ ทำให้ทราบถึงค่าโพลาริเซชันตกค้าง ( $P_r$ ) ซึ่งก็คือค่าโพลาริเซชันเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าและนอกจากนี้แล้วยังทำให้ทราบถึงค่าสนามไฟฟ้าลบด้าง ( $E_c$ ) ซึ่งก็คือค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดการสลับทิศทางของโดเมนเฟอร์โรอิเล็กตริก ผลการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อวงวนฮิสเทอรีซิส โดยจ่ายสนามไฟฟ้าขนาด 52 kV/cm ความถี่ 50 Hz ที่อุณหภูมิ 30 °C ถึง 200 °C โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นครั้งละ 10 °C ดังแสดงในรูปที่ 5.10 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อวงวนฮิสเทอรีซิสจะอึดตัวเพิ่มมากขึ้น โดยเริ่มจากอุณหภูมิ 80 °C และอึดตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 110 °C เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากกว่า 110 °C ซึ่งานจะเกิดการเบรกคาว์นทำให้ไม่สามารถวัดวงวนฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิสูงกว่า 110 °C ได้ การเกิดเบรกคาว์นของซึ่งานเซรามิกที่อุณหภูมิสูงนั้นเป็นการเกิดเบรกคาว์นเนื่องจากความร้อน เกิดจากเมื่อมีความร้อนเกิดขึ้นมาในสารไดอิเล็กตริกเร็วกว่าการระบายความร้อนออกไปสู่สิ่งแวดล้อม อุณหภูมิในสารไดอิเล็กตริกก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และส่งผลทำ

ให้มีทั้งสภาพนำและการสูญเสียความร้อนเพิ่มขึ้น สิ่งเหล่านี้ล้วนแต่เป็นสาเหตุที่นำไปสู่การเกิดการเบรกดาวน์ของวัสดุในที่สุด (รัตติกร ยี่มนิรัญ, 2545)



รูปที่ 5.10 วงวนโพลาริเซชันไอสเทอร์ซิสของเซรามิก BF-BT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ผลของอุณหภูมิต่อค่าโพลาริเซชันคงค้างที่อุณหภูมิ 30 40 50 60 70 80 90 100 และ 110 °C ดังแสดงในรูปที่ 5.11 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าโพลาริเซชันคงค้างจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30 °C ค่าโพลาริเซชันคงค้างมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 7.17  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  และที่อุณหภูมิ 200 °C ค่าโพลาริเซชันคงค้างจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 31.68 ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 80 °C ค่าโพลาริเซชันคงค้างเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนใกล้เคียงกันจนกราฟในช่วงนี้มีลักษณะเป็นเส้นตรงและหลังจากอุณหภูมิ 80 °C ค่าโพลาริเซชันคงค้างจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 5.11 ผลของอุณหภูมิต่อค่าโพลาริเซชันคงค้างของเซรามิก BF-BT เส้นทึบได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 5.2

การเพิ่มขึ้นของค่าโพลาริเซชันคงค้างตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสามารถหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้โดยใช้สมการเอกซ์โพเนนเชียล แสดงดังสมการที่ 5.2

$$P_r = P_{r0} + A \exp(R_0 T) \quad (5.2)$$

โดยที่  $P_r$  คือ ค่าโพลาริเซชันคงค้าง

$P_{r0}$  คือ ค่าโพลาริเซชันคงค้างเริ่มต้น (มีค่าเท่ากับ 1.187)

$A$  คือ ค่าคงที่ (มีค่าเท่ากับ 3.289)

$R_0$  คือ ค่าคงที่ (มีค่าเท่ากับ 0.020)

$T$  คือ อุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันคงค้างและอุณหภูมิจากผลการทดลองและค่าที่คำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์จะได้ว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบค่าโพลาไรเซชันคงค้างจากการทดลองและการคำนวณ

T (°C)	P <sub>r</sub> (μC/cm <sup>2</sup> )	
	ผลการทดลอง	ผลการคำนวณ
30	7.17	7.25
40	8.79	8.62
50	10.41	10.31
60	12.33	12.37
70	15.07	14.89
80	17.25	17.99
90	21.60	21.79
100	27.63	26.46
110	31.68	32.18

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าโพลาไรเซชันคงค้างมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 5.4.1 ชั้นงานเซรามิก BF-BT เป็นฉนวนไม่นำไฟฟ้าในการทดสอบมีการจ่ายสนามไฟฟ้าให้แก่ชั้นงานจึงได้เคลือบผิวของชั้นงานเซรามิกทั้งสองด้านด้วยโลหะเพื่อให้เป็นขั้วนำไฟฟ้าที่ผิวทั้งสองด้าน ดังนั้นชั้นงานเซรามิก BF-BT จึงมีลักษณะเป็นเหมือนตัวเก็บประจุคือมีวัสดุไดอิเล็กทริกคั่นอยู่ระหว่างแผ่นขนาน ดังนั้นจากสมการที่ 5.3 จะได้ว่า

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (5.3)$$

โดยที่  $\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสุญญากาศมีค่า  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m

- $\epsilon_r$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์  
 $C$  คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริก  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก  
 $d$  คือ ความหนาของสาร ไดอิเล็กทริก

ดังนั้นในระหว่างป้อนแรงดันไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงานเซรามิก BF-BT ขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเซรามิกมีค่าเท่าเดิม  $\epsilon_0$  คือค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสุญญากาศซึ่งมีค่าคงที่ ขนาดความหนาของชิ้นงานเซรามิกมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเนื่องจ่ายไฟกระแสสลับทำให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงขนาดตามรูปคลื่นไซน์ แต่ค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากที่สุดคือค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จึงเป็นผลทำให้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าเก็บประจุจึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อค่าความเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้จำนวนประจุสะสมบนพื้นผิวของชิ้นงานเซรามิกมีค่าเพิ่มขึ้น จากสมการที่ 5.4

$$Q = CV \quad (5.4)$$

- โดยที่  $Q$  คือ จำนวนประจุสะสมบนพื้นผิวของชิ้นงานเซรามิก  
 $C$  คือ ค่าความเก็บประจุของชิ้นงานเซรามิก  
 $V$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นงานเซรามิก

และเมื่อจำนวนประจุสะสมบนพื้นผิวของชิ้นงานเซรามิกมีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าโวลตาไรเซชันหรือค่าการเกิดสภาพการมีขั้วของชิ้นงานเซรามิกมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยจากสมการ 5.5

$$P = \frac{Q}{A} \quad (5.5)$$

- โดยที่  $P$  คือ ค่าโวลตาไรเซชันหรือค่าการเกิดสภาพการมีขั้วของเซรามิก  
 $Q$  คือ จำนวนประจุสะสมบนพื้นผิวของชิ้นงานเซรามิก  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเซรามิก

ปรากฏการณ์แมกนีโตอิเล็กทริกซึ่งเป็นสมบัติที่โดดเด่นของเซรามิก BF-BT เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดการแปลงผันกลับไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานแม่เหล็กซึ่งเกิดจากการรวมกันของสองปรากฏการณ์คือ ปรากฏการณ์แมกนีโตสตริกทีฟและปรากฏการณ์ไพโซอิเล็ก

ทริก ดังนั้นจึงสามารถอธิบายผลของอุณหภูมิต่อค่าโพลาริเซชันโดยอาศัยปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกทางตรง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ดังสมการที่ 5.6 (รัตติกร ยี่มนิรัญ, 2006; สุธเขตต์ พจน์ประไพ, 2011)

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (5.6)$$

- โดยที่  $D$  คือ ค่าโพลาริเซชัน  
 $\varepsilon^T$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์, ด้วย  $T$  หมายถึง ความเค้นมีค่าคงที่หรือเซรามิกไม่ถูกจำกัดเชิงกล  
 $E$  คือ ค่าสนามไฟฟ้า  
 $T$  คือ ความเค้น  
 $d$  คือ ค่าคงที่หรือสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก

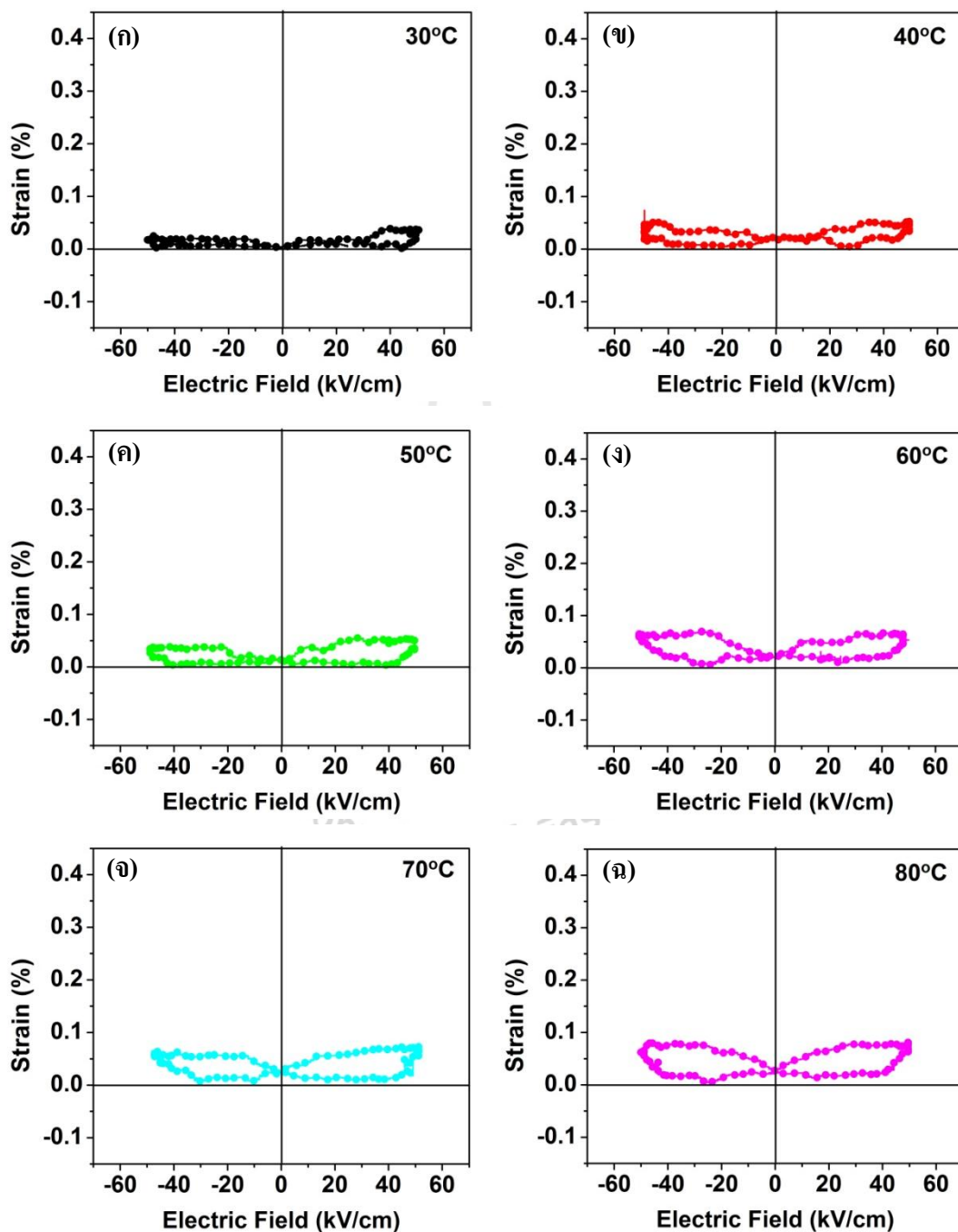
จากสมการที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าค่าโพลาริเซชันแปรผันตรงกับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.4.1 จึงส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วย

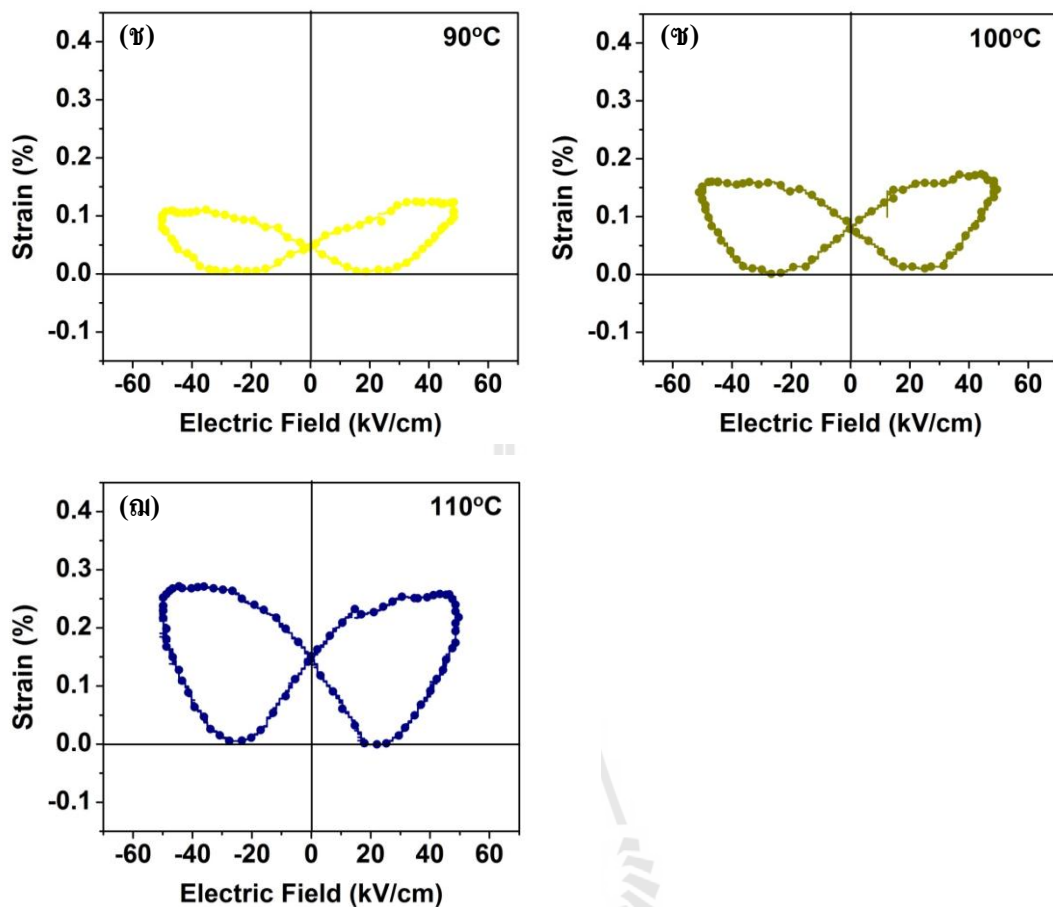
### 5.4.3 วงวนรูปปีกผีเสื้อของเซรามิก BF-BT เทียบกับอุณหภูมิ

นอกจากโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสแล้ว การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ความเครียด) ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกยังสามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการสลับทิศทางของโดเมนภายใต้สนามไฟฟ้าได้ด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีลักษณะเป็นวงวนรูปปีกผีเสื้อ ซึ่งวงวนดังกล่าวได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นกับสนามไฟฟ้า ผลการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อวงวนรูปปีกผีเสื้อ โดยจ่ายสนามไฟฟ้าขนาด 50 kV/cm ความถี่ 50 mHz ที่อุณหภูมิ 30 °C ถึง 200 °C โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นครั้งละ 10 °C ดังแสดงในรูปที่ 5.12 พบว่าที่อุณหภูมิ 30 °C วงวนรูปปีกผีเสื้อมีขนาดเล็กที่สุดมีการเปลี่ยนแปลงของความเครียดน้อยมาก ที่อุณหภูมิ 110 °C วงวนรูปปีกผีเสื้อมีขนาดใหญ่ที่สุดมีการเปลี่ยนแปลงของความเครียดมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นขนาดของวงวนรูปปีกผีเสื้อก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เป็นเพราะว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นจากที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 5.4.1 ทำให้มีประจุบนพื้นผิวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดโพลาริเซชันเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการตอบสนองต่อสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ดี



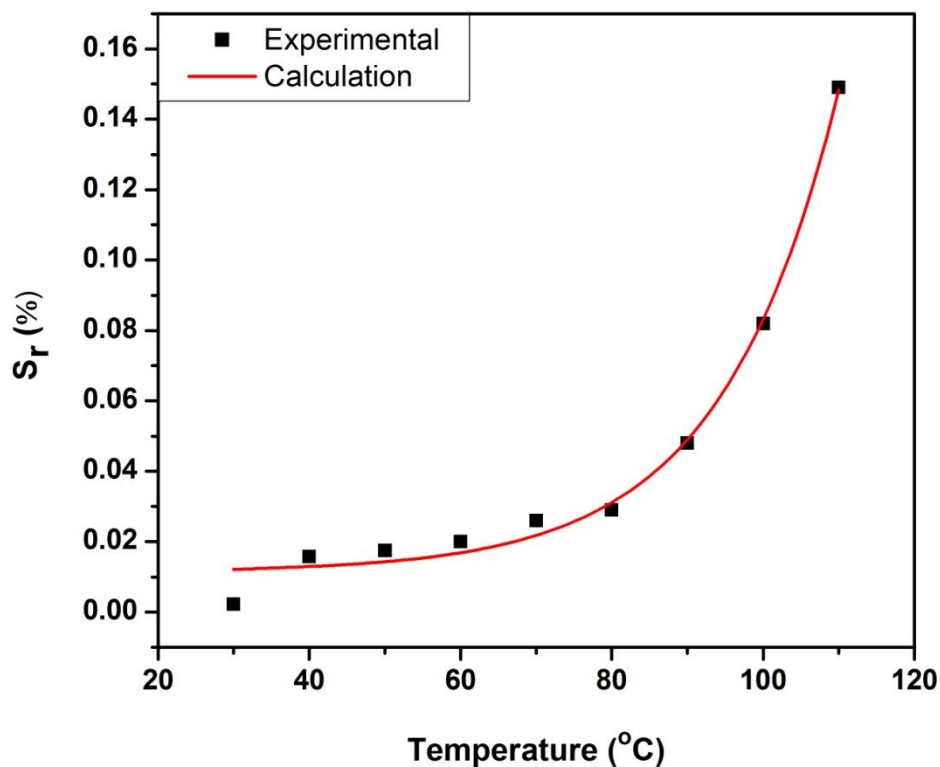
ขึ้นทำให้ค่าความเครียดเพิ่มขึ้น วงวนรูปปีกผีเสื้อสามารถวัดได้ถึงอุณหภูมิ 110 °C เช่นเดียวกับวงวน ฮีสเทอรีซิสเนื่องจากเกิดเบรกดาวน์จากความร้อน





รูปที่ 5.12 วงวนรูปปีกผีเสื้อของเซรามิก BF-BT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ผลของค่าความเครียดคงค้างแสดงดังรูปที่ 5.13 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความเครียดคงค้างจะมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์โพอิโซอิลเล็กทริกซึ่งมีความสัมพันธ์กันระหว่างค่าโพลาไรเซชันกับค่าความเครียด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่าโพลาไรเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 5.13 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความเครียดค้ำของเซรามิก BF-BT เส้นทึบได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 5.7

การเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดค้ำตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสามารถหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้โดยใช้สมการเอกซ์โพเนนเชียล แสดงดังสมการที่ 5.7

$$S_r = S_{r,0} + A \exp(R_0 T) \quad (5.7)$$

โดยที่  $S_r$  คือ ค่าความเครียดค้ำ

$S_{r,0}$  คือ ค่าความเครียดค้ำเริ่มต้น (มีค่าเท่ากับ 0.0114)

$A$  คือ ค่าคงที่ (มีค่าเท่ากับ  $1.1221 \times 10^{-4}$ )

$R_0$  คือ ค่าคงที่ (มีค่าเท่ากับ 0.0646)

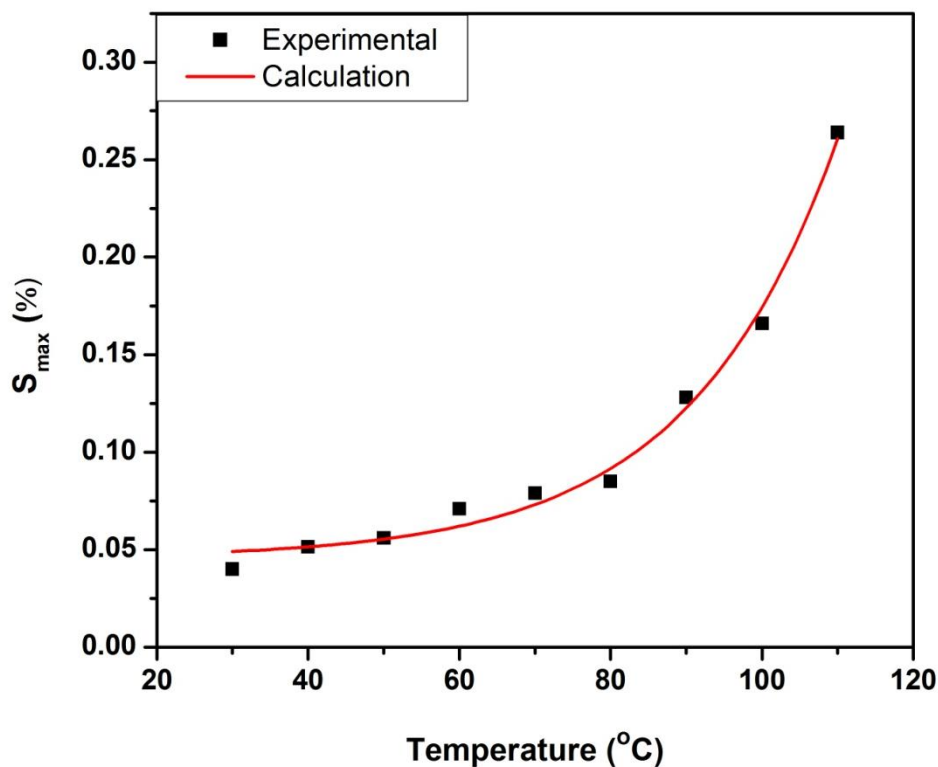
$T$  คือ อุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดคงค้างและอุณหภูมิจากผลการทดลองและค่าที่คำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์จะได้ว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่าความเครียดคงค้างจากการทดลองและการคำนวณ

T (°C)	S <sub>r</sub> (%)	
	ผลการทดลอง	ผลการคำนวณ
30	0.0023	0.012
40	0.157	0.013
50	0.175	0.014
60	0.020	0.016
70	0.026	0.022
80	0.029	0.031
90	0.048	0.048
100	0.082	0.083
110	0.149	0.148

ผลของอุณหภูมิต่อค่าความเครียดสูงสุดแสดงดังรูปที่ 5.14 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความเครียดสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์โพอิโซอิเล็กทริกซึ่งมีความสัมพันธ์กันระหว่างค่าโพลาไรเซชันกับค่าความเครียด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่าโพลาไรเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 5.14 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความเครียดสูงสุดของเซรามิก BF-BT เส้นทึบได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 5.8

การเพิ่มขึ้นของค่าความเครียดสูงสุดตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสามารถหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้โดยใช้สมการเอกซ์โพเนนเชียล แสดงดังสมการที่ 5.8

$$S_{\max} = S_{\max 0} + A \exp(R_0 T) \quad (5.8)$$

โดยที่  $S_{\max}$  คือ ค่าความเครียดสูงสุด

$S_{\max 0}$  คือ ค่าความเครียดสูงสุดเริ่มต้น (มีค่าเท่ากับ 0.0455)

$A$  คือ ค่าคงที่ (มีค่าเท่ากับ  $7.6216 \times 10^{-4}$ )

$R_0$  คือ ค่าคงที่ (มีค่าเท่ากับ 0.0513)

$T$  คือ อุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสูงสุดและอุณหภูมิจากผลการทดลองและค่าที่คำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์จะได้ว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบค่าความเครียดสูงสุดจากการทดลองและการคำนวณ

T (°C)	S <sub>max</sub> (%)	
	ผลการทดลอง	ผลการคำนวณ
30	0.040	0.049
40	0.052	0.051
50	0.056	0.055
60	0.071	0.062
70	0.079	0.073
80	0.085	0.092
90	0.128	0.123
100	0.166	0.174
110	0.264	0.261

ค่า  $d_{33}^*$  คือค่าสัมประสิทธิ์ไพโซโซอิเล็กทริกที่แสดงถึงความสัมพันธ์ในการเกิดโพลาไรเซชันในแนวตั้งฉากกับขั้วไฟฟ้าในทิศทาง 3 หรือในแนวตั้งของชิ้นงาน ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์ไพโซโซอิเล็กทริกแสดงได้ยังรูปที่ 5.15 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ไพโซโซอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้โดยใช้ปรากฏการณ์ไพโซโซอิเล็กทริกแบบย้อนกลับ ดังสมการที่ 5.9

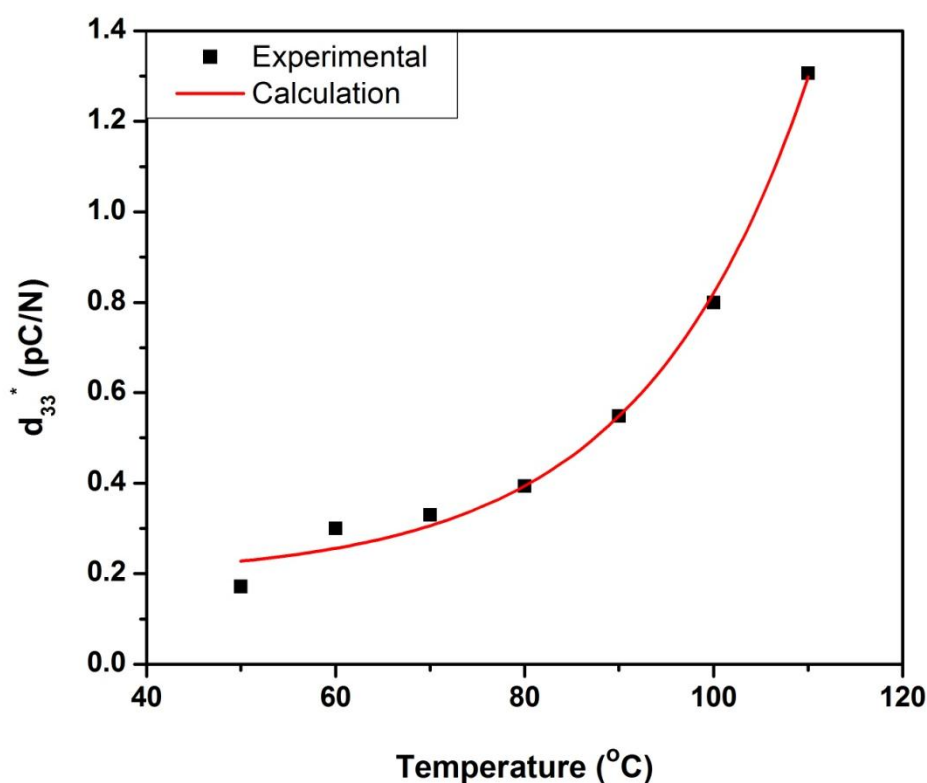
$$S = d_{33}^* E_3 \quad (5.9)$$

โดยที่  $S$  คือ ความเครียด (strain)

$d_{33}^*$  คือ สัมประสิทธิ์ไพโซโซอิเล็กทริกในทิศทาง 3

$E_3$  คือ สนามไฟฟ้า

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้นดังได้อธิบายมาแล้วข้างต้น จากสมการ 5.9 ค่าความเครียดจะแปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์ไพโซโซอิดีเลกทริก คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความเครียดเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซโซอิดีเลกทริกเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิไปด้วย ซึ่งหมายความว่าที่อุณหภูมิสูงวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกจะสามารถเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลและเปลี่ยนจากพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดีขึ้น



รูปที่ 5.15 ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์ไพโซโซอิดีเลกทริกของเซรามิก BF-BT เส้นทึบได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ 5.10

การเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์ไพโซโซอิดีเลกทริกตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสามารถหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้โดยใช้สมการเอกซ์โพเนนเชียล แสดงดังสมการที่ 5.10

$$d_{33}^* = d_{330}^* + A \exp(R_0 T) \quad (5.10)$$

โดยที่  $d_{33}^*$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก

$d_{330}^*$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกเริ่มต้น (มีค่าเท่ากับ 0.1900)

$A$  คือ ค่าคงที่ (มีค่าเท่ากับ 0.0022)

$R_0$  คือ ค่าคงที่ (มีค่าเท่ากับ 0.0564)

$T$  คือ อุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกและอุณหภูมิจากการทดลองและค่าที่คำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์จะได้ว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 5.7 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกจากการทดลองและการคำนวณ

T (°C)	$d_{33}^*$ ( $\mu\text{C/N}$ )	
	ผลการทดลอง	ผลการคำนวณ
50	0.172	0.227
60	0.300	0.256
70	0.330	0.306
80	0.394	0.394
90	0.548	0.549
100	0.800	0.821
110	1.306	1.298

## 5.5 สรุป

ในบทนี้จะเป็นส่วนของการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT โดยทำการทดสอบเซรามิก BF-BT ภายใต้สนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่อุณหภูมิห้อง ถึง 200 °C จ่ายสนามไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ขนาด 52 kV/cm ความถี่ 50 Hz ให้แก่ชิ้นงานเซรามิก ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT คว้าได้จากการเปลี่ยนแปลงของวงวน



อีทีเออร์ซีส วงวนรูปปีกผีเสื้อและสมบัติไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่าง ๆ ผลการทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT ซึ่งประกอบด้วยค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากภายในชิ้นงานเซรามิก BF-BT ประกอบด้วยการเกิดโพลาริเซชันหลายระดับ ซึ่งโพลาริเซชันแต่ละระดับมีความสามารถในการตอบสนองต่อค่าความถี่ที่แตกต่างกัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอะตอมหรืออิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสลับทิศทางของโดเมนได้ดีขึ้นส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกเกิดจากการที่มีประจุอิสระและช่องว่างออกซิเจนภายในเซรามิก จำนวนมากซึ่งทั้งประจุอิสระและช่องว่างออกซิเจนทำให้เกิดการนำไฟฟ้าเมื่อมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เกิดการเบรกดาวน์ในที่สุด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประจุอิสระและช่องว่างออกซิเจนจะสามารถเคลื่อนที่และตอบสนองต่อค่าความถี่ได้ดีขึ้นจึงส่งผลให้ที่อุณหภูมิสูงค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกจึงเพิ่มขึ้นและทำให้ชิ้นงานเซรามิกจะเกิดการเบรกดาวน์ได้ง่าย ผลของอุณหภูมิต่อค่าโพลาริเซชันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าโพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าโพลาริเซชันมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ในลักษณะแปรผันตรงกันตามสมการของปรากฏการไพโซอิเล็กทริกทางตรง ทำให้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับค่าความเครียดหรือค่าการยืดหดขยายตัวของเซรามิกซึ่งดูได้จากวงวนรูปปีกผีเสื้อจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าความเครียดจากปรากฏการไพโซอิเล็กทริก ทำให้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าโพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้การเปลี่ยนจากค่าโพลาริเซชันไปเป็นค่าความเครียดทำได้ง่ายขึ้น

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT โดยทำการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับวัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูง เซรามิก BF-BT ถูกทดสอบภายใต้สนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 200 °C จ่ายสนามไฟฟ้ารูปลิ้นไซน์ขนาด 52 kV/cm ความถี่ 50 Hz ให้แก่ชิ้นงานเซรามิก ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT ดูได้จากการเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิส วงวนรูปปีกผีเสื้อและสมบัติไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก BF-BT เป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้คือเมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะมีค่าลดลง เนื่องจากความสามารถในการตอบสนองต่อความถี่ที่แตกต่างกันของโพลาริเซชันแต่ละระดับภายในชิ้นงานเซรามิกทำให้ผลรวมของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่ทุกค่าความถี่ เนื่องจากภายในชิ้นงานเซรามิก BF-BT ประกอบด้วยการเกิดโพลาริเซชันหลายระดับ ซึ่งโพลาริเซชันแต่ละระดับมีความสามารถในการตอบสนองต่อค่าความถี่ที่แตกต่างกัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอะตอมหรืออิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสลับทิศทางของไดโพลได้ดียิ่งขึ้นส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

สำหรับผลการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้คือเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าลดลง เนื่องจากภายในชิ้นงานเซรามิก BF-BT ประกอบด้วยประจุอิสระซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก เมื่อความถี่มีค่ามากขึ้นประจุอิสระจะเคลื่อนที่และตอบสนองต่อค่าความถี่ได้น้อยลงจึงทำให้ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าลดลง นอกจากนี้แล้วยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกจะมีค่า

เพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับอุณหภูมิ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ประจุอิสระภายในชิ้นงานมีพลังงานเพิ่มมากขึ้นทำให้การเคลื่อนที่ตอบสนองต่อความถี่ทำได้ดีขึ้นจึงเป็นผลให้ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ที่ความถี่ต่าง ๆ การเพิ่มขึ้นของค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกในแต่ละอุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ยแล้วมีค่าใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าผลของอุณหภูมิและความถี่มีผลต่อค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกในสัดส่วนใกล้เคียงกัน

ผลของอุณหภูมิต่อวงวนฮีสเทอรีซิสเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นวงวนฮีสเทอรีซิสมีขนาดเพิ่มขึ้นและเกิดการอ้อมตัวของอุณหภูมิต่อค่าโพลาริเซชันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าโพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าโพลาริเซชันมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ในลักษณะแปรผันตรงกันตามสมการของปรากฏการเพียโซอิเล็กทริกทางตรง ทำให้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยและหลังจากนั้นชิ้นงานเซรามิกจะเกิดการเบรกดาวน์ การเกิดเบรกดาวน์ของชิ้นงานเซรามิกที่อุณหภูมิสูงนั้นเป็นการเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากความร้อน เกิดจากเมื่อมีความร้อนเกิดขึ้นมาในสารไดอิเล็กทริกเร็วกว่าการระบายความร้อนออกไปสู่สิ่งแวดล้อม อุณหภูมิในสารไดอิเล็กทริกก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และส่งผลทำให้มีทั้งสภาพนำและการสูญเสียความร้อนเพิ่มขึ้น สิ่งเหล่านี้ล้วนแต่เป็นเงื่อนไขที่นำไปสู่การเกิดการเบรกดาวน์ของวัสดุในที่สุด

ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของวงวนรูปปีกผีเสื้อเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นขนาดของวงวนรูปปีกผีเสื้อก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เป็นเพราะว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้มีประจุบนพื้นผิวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดโพลาริเซชันเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการตอบสนองต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกได้ดีขึ้นทำให้ค่าความเครียดเพิ่มขึ้น และจากปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางตรงสามารถอธิบายการเพิ่มขึ้นของวงวนรูปปีกผีเสื้อได้ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นไปตามปรากฏการเพียโซอิเล็กทริกซึ่งมีความสัมพันธ์กันระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าความเครียด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่าโพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา มีข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังนี้

1. ในการทดสอบมีการจ่ายสนามไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงานเซรามิก ถ้าชิ้นงานเซรามิก BF-BT ที่ใช้มีความหนามากเกินไปจะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงมาก ดังนั้นการลดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้การทดสอบมีความปลอดภัยมากขึ้น ทั้งนี้จึงใช้วิธีลดความหนาของชิ้นงานเซรามิก BF-BT เพื่อลดขนาดของแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ
2. ในการวัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิชิ้นงานเซรามิกที่มีขนาดบางจะสามารถระบายความร้อนได้ดีกว่าชิ้นงานที่มีขนาดหนา ถ้าชิ้นงานเซรามิก BF-BT ที่ใช้ทดสอบมีความหนาเกินไปจะระบายความร้อนได้ไม่ดีทำให้เกิดการเบรคดาวน์เนื่องจากความร้อนได้ง่าย ทำให้ไม่สามารถทดสอบที่อุณหภูมิสูงได้จึงควรใช้ชิ้นงานเซรามิกที่มีความหนาน้อย ๆ ในการทดสอบ
3. ในการวัดวงวนรูปปีกผีเสื้อของเซรามิก BF-BT ชิ้นงานที่มีขนาดบางเกินไปเมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงานจะเกิดการขยายตัวของชิ้นงานได้น้อยทำให้เซนเซอร์ไม่สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้ จึงต้องหาขนาดชิ้นงานเซรามิกที่เหมาะสมในการทดสอบมีความสมดุลทั้งเรื่องอันตรายจากสนามไฟฟ้าที่สูง การระบายความร้อนและการขยายตัวของชิ้นงานเซรามิก BF-BT เพื่อให้เซนเซอร์สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย
4. ในการวัดวงวนรูปปีกผีเสื้อของความถี่ของสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชิ้นงานควรมีความเหมาะสมกับความเร็วในการรับรู้ของเซนเซอร์หรือเครื่องมือที่ใช้วัด เพราะเซนเซอร์แต่ละชนิดมีความเร็วในการรับรู้ที่ต่างกัน ถ้าจ่ายสนามไฟฟ้าที่มีความถี่สูงเกินความสามารถในการรับรู้ของเซนเซอร์จะทำให้ค่าที่วัดได้เกิดความผิดพลาด
5. ควรทำการทดสอบในห้องที่ไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิภายนอก เช่น ห้องแอร์ เป็นต้น เนื่องจากการทดสอบทุกครั้งจำเป็นต้องวัดค่าความชื้นจากอากาศ หากมีความชื้นมากเกินไปจะไม่สามารถทำการทดสอบได้เพราะอาจทำให้เกิดการเบรคดาวน์เร็วขึ้น และทำให้ข้อมูลที่ได้อาจเกิดการทดสอบเกิดการผิดพลาด ดังนั้นจึงไม่ควรทำการทดสอบในวันที่อากาศมีความชื้นสูง

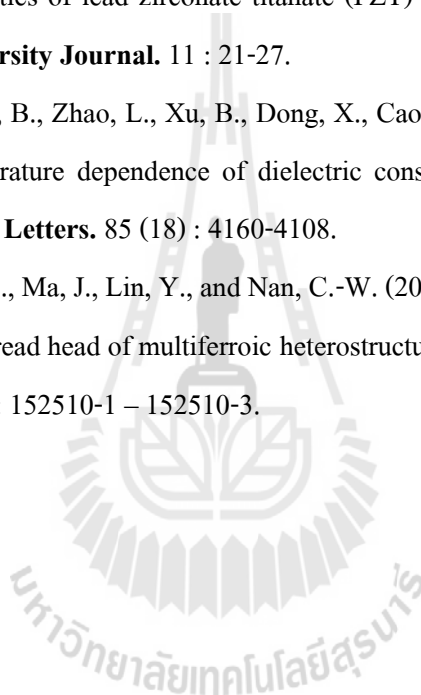
## รายการอ้างอิง

- กรกฏ วัฒนวิเชียร. (2550). วัสดุทางวิศวกรรมไฟฟ้า.
- รัตติกร ยิ้มนิรันดร์. (2549). สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- รัตติกร ยิ้มนิรันดร์ และ สุปถ อนันตา. (2545). อิเล็กทริกเซรามิก. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สุดเขตต์ พจน์ประไพ. (2554). **ประมวลสาระรายวิชาวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกและอุปกรณ์เบื้องต้น (Introuction to Ferroelectric Materials and Devices) รหัสวิชา 426415.** สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุธรรม ศรีหล่มสัก. (2551). เอกสารประกอบการสอนรายวิชา **Characterization in Materials Engineering: Microscopic Characterization Part.** สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Bichurin, M. I., Kornev, I. A., Petrov, V. M., and Lisnevskaya, I. V. (1997) Investigation of magnetoelectric interaction in composite. **Ferroelectrics**. 204 (1–4): 289–297.
- Bichurin, M. I., and Petrov, V. M. (2010). Magnetoelectric effect in magnetostriction-piezoelectric multiferroics. **Applied Physics Letters**. 36: 680-687.
- Boomgaard, J. V. D., Terrell, D. R., Born, R. A. J., and Giller, H. F. J. I. (1974). An insitu grown eutecticmagnetoelectric composite material. Part I: composition and unidirectional solidification. **Journal of Materials Science**. 9 (10): 1705–1709.
- Boomgaard, J. V. D., Run, A. M. J. G. V, and Suchtelen, J. V. (1976). Magnetoelectricity in Piezoelectric-Magnetostrictive Composites. **Ferroelectrics**. 10: 295–298.
- Boomgaard, J. V. D., and Born, R. A. J. (1978). A sintered magnetoelectric composite material BaTiO<sub>3</sub>–Ni(Co,Mn)Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. **Journal of Materials Science**. 13 (7): 1538–1548.
- Chandarak, S. (2008). Fabrication and Characterization of (1-x)BiFeO<sub>3</sub>-xBaTiO<sub>3</sub> ceramics. **BS thesis, Chiang Mai University, Thailand.**
- Chandarak, S., Unruan, M., Sareein, T., Ngamjarujana, A., Maensiri, S., Laoratanakul, P., Ananta, S., and Yimnirun, R. (2009). Fabrication and characterization of (1-x)BiFeO<sub>3</sub>-

- $x\text{BaTiO}_3$  ceramics prepared by a solid state reaction method. **Journal of Magnetism**. 14 (3): 120-123.
- Chaudé, E., and Spaldin, N. A. (2006). Recent progress in first-principles studies of magnetoelectric multiferroics. **Solid State and Materials Science**. 9: 128-139.
- Eerenstein, W., Mathur, N. D., and Scott, J. F. (2006). Multiferroic and magnetoelectric materials. **Nature**. 442: 759-765.
- Fu, F., Zhai, J., Xu, Z., Ye, C., and Yao, X. (2010). Temperature dependence of ferroelectric and dielectric properties of textured  $0.98(0.94\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3-0.06\text{BaTiO}_3)-0.02\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$  thick film. **Journal of Materials Science**. 46: 1053-1057.
- James, F., Carroll, III., David, A. P., Yuji, N. and Masaru, M. (2007). Field-induced strain behavior for potassium sodium bismuth titanate ceramics. **IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**. 47 (12): 2516-2522.
- Julliere, M. (2002). Tunneling between ferromagnetic films. **Physics Letters**. 54 (3): 225-226.
- Kasap, S. O. (2002). Principles of Electronic Materials and Devices. 2nd ed. The McGraw-Hill Companies, Inc., for manufacture and export.
- Kim, J. S., and Kim, I. W. (2006). Temperature dependence of the dielectric dispersion and ferroelectric properties of neodymium doped bismuth titanate ceramics. **Electroceramics**. 16 (4): 373-377.
- Kim, J. S., Cheon, C. I., Kang, H. J., and Jang, P. W. (2007). High temperature properties of multiferroic  $\text{BiFeO}_3\text{-DyFeO}_3\text{-BaTiO}_3$  solid solutions. **Journal of the European Ceramic Society**. 27 : 3951–3954.
- Maiwa, H., Kim, S-H., and Ichinose, N. (2003). Temperature dependence of the electrical and electromechanical properties of lead zirconate titanate thin films. **Applied Physics Letters**. 83: 4396-4398.
- Meng, X. J., Sun, J. L., Wang, X. G., Lin, T., Ma, J. H., Guo, S. L., and Chu, J. H. (2002). Temperature dependence of ferroelectric and dielectric properties of  $\text{PbZr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$  thin film based capacitors. **Applied Physics Letters**. 81: 4035-4037.
- Naganuma, H., Inoue, Y., and Okamura, S. (2007). Temperature dependence of ferroelectric and magnetic properties in polycrystalline  $\text{BiFeO}_3$  films. **IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**. 55: 431-433.

- Nan, C.-W., Bichurin, M. I., Dong, S., Viehland, D., and Srinivasan, G. (2008). Multiferroic magnetoelectric composite: Historical perspective status, and future directions. **Applied Physics Letters**. 103: 031101-1 – 031101-35.
- Pojprapai, S., Simons, H., Studer, A., Luo, Z., and Hoffman, M. (2011) Temperature dependence on domain switching behavior in lead zirconate titanate under electric load via in situ neutron diffraction. **Journal of the American Ceramic Society**. 94 (10): 3202-3205.
- Pojprapai, S., Luo, Z., and Yimmirun, R. (2012) Frequency effect on electrical fatigue behavior of lead zirconate titanate ceramics. **Electronic Letters**. 48 (17).
- Run, A. M. J. G. V., Terrell, D. R., and Scholing, J. H. (1974). An insitu grown eutectic magnetoelectric composite material, Part 2: physical properties. **Journal of Materials Science**. 9 (10): 1710–1714.
- Ryu, J., Carazo, A. V., Uchino, K., and Kim, H. E. (2001). Magnetolectric properties in piezoelectric and magnetostrictive laminate composites. **Japanese Journal of Applied Physics** 1. 40 (8): 4948–4951.
- Sawyer, C.B., and Tower, C.H. (1930). Rochelle salt as a dielectric. **Physical Review**. 3: 269-273.
- Sehirlioglu, A., Sayir, A., and Dyuys, F. (2009). High temperature properties of BaScO<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub> piezoelectric ceramics. **Journal of Applied Physics**. 106: 014102-1-014102-7.
- Suchtlein, J. V. (1972). Product properties a new application of composite material. **Philips Research Reports**. 27: 28-37.
- Verma, K. C., and Kotnala, R. K. (2009). Multiferroic magnetoelectric coupling and relaxor ferroelectric behavior in 0.7BiFeO<sub>3</sub>-0.3BaTiO<sub>3</sub> nanocrystals. **Solid State Communications**. 151 : 920–923.
- Vopsaroiu, M., Blackburn, J., and Cain, M. G. (2007). A new magnetic recording read head technology based on the magneto-electric effect. **Applied Physics Letters**. 40 (17): 5027-5033.
- Vopsaroiu, M., Blackburn, J., Muniz-Piniella, A., and Cain, M. G. (2008). Multiferroic magnetic recording read head technology for 1 Tbit/in.<sup>2</sup> and beyond. **Applied Physics Letters**. 103 (7): 07F506-1 - 07F506-3.

- Wei, Y., Wang, X., Jia, J., and Wang, X. (2010). Multiferroic and piezoelectric properties of 0.65BiFeO<sub>3</sub>–0.35BaTiO<sub>3</sub> ceramic with pseudo-cubic symmetry. **Ceramics International**. 38 : 3499–3502.
- Wen, B., Zhang, Y., Lin, X., Ma, L., Wang, X. (2012). Temperature dependent ferroelectric hysteresis properties of modified lead zirconate titanate ceramic. **Jounal Master Scienc**. 47 : 4299-4304.
- Wongsaenmai, S., Moonrat, P., Silawongsawat, T., Ananta, S., and Yimnirun, R. (2003). Study of hysteresis properties of lead zirconate titanate (PZT) ceramic by Sawyer-Tower circuit. **Naresuan University Journal**. 11 : 21-27.
- Yang, H., Miao, J., Chen, B., Zhao, L., Xu, B., Dong, X., Cao, L., Qiu, X., and Zhao, B. (2004). Abnormal temperature dependence of dielectric constant in (Ba<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>)TiO<sub>3</sub> thin films. **Applied Physics Letters**. 85 (18) : 4160-4108.
- Zhang, Y., Li Z., Deng, C., Ma, J., Lin, Y., and Nan, C.-W. (2008). Demonstration of magnetoelectric read head of multiferroic heterostructures. **Applied Physics Letters**. 92 (15): 152510-1 – 152510-3.





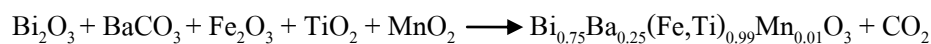


ภาคผนวก ก

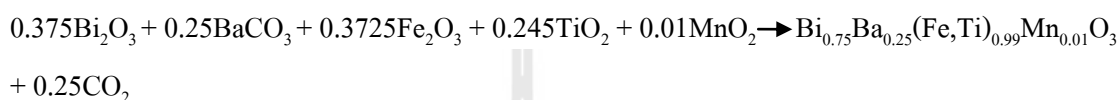
การคำนวณหาส่วนผสมของเซรามิก BF-BT

คำนวณส่วนผสมของสารประกอบบิสมัทเฟรโรไทท์-แบเรียมไทเทเนต โดยใช้วิธี

Conventional Mixed – Oxide



ดุลสมการจะได้ดังนี้



หาน้ำหนักของแต่ละตัวได้ดังนี้

โดยกำหนดให้ Bi = 208.980, Ba = 137.327, Fe = 55.847, Ti = 47.867, Mn = 54.938, C = 12.011, O = 15.999

$$0.375\text{Bi}_2\text{O}_3 = 0.375((2 \times 208.980) + (3 \times 15.999)) = 174.733$$

$$0.25\text{BaCO}_3 = 0.25(137.327 + 12.011 + (3 \times 15.999)) = 49.333$$

$$0.3725\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.3725((2 \times 55.847) + (3 \times 15.999)) = 59.484$$

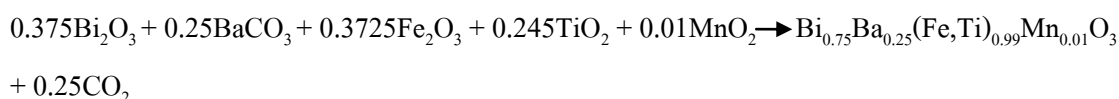
$$0.245\text{TiO}_2 = 0.245(47.867 + (2 \times 15.999)) = 19.566$$

$$0.01\text{MnO}_2 = 0.01(54.938 + (2 \times 15.999)) = 0.869$$

$$\text{Bi}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}(\text{Fe,Ti})_{0.99}\text{Mn}_{0.01}\text{O}_3 = (0.75 \times 208.980) + (0.25 \times 137.327) + (0.745 \times 55.847) + (0.245 \times 47.867) + (0.01 \times 54.938) + (3 \times 15.999) = 292.946$$

$$0.25\text{CO}_2 = 0.25(12.011 + (2 \times 15.999)) = 11.002$$

จากนั้นเทียบสมการทั้งสองด้าน



(303.985)

(303.985)

ต้องการ BF-BT 20 กรัม

จึงทำการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ได้ดังนี้

	BF-BT	303.985 กรัม	ต้องใช้ $\text{Bi}_2\text{O}_3$	= 174.733 กรัม
ต้องการ	BF-BT	20 กรัม	ต้องใช้ $\text{Bi}_2\text{O}_3$	= 11.4962 กรัม
	BF-BT	303.985 กรัม	ต้องใช้ $\text{BaCO}_3$	= 49.333 กรัม
ต้องการ	BF-BT	20 กรัม	ต้องใช้ $\text{BaCO}_3$	= 3.2458 กรัม
	BF-BT	303.985 กรัม	ต้องใช้ $\text{Fe}_2\text{O}_3$	= 59.484 กรัม
ต้องการ	BF-BT	20 กรัม	ต้องใช้ $\text{Fe}_2\text{O}_3$	= 3.9136 กรัม
	BF-BT	303.985 กรัม	ต้องใช้ $\text{TiO}_2$	= 19.566 กรัม
ต้องการ	BF-BT	20 กรัม	ต้องใช้ $\text{TiO}_2$	= 1.2873 กรัม
	BF-BT	303.985 กรัม	ต้องใช้ $\text{MnO}_2$	= 0.869 กรัม
ต้องการ	BF-BT	20 กรัม	ต้องใช้ $\text{MnO}_2$	= 0.0572 กรัม
	BF-BT	303.985 กรัม	ต้องใช้ $\text{CO}_2$	= 11.002 กรัม
ต้องการ	BF-BT	20 กรัม	ต้องใช้ $\text{CO}_2$	= 0.7238 กรัม

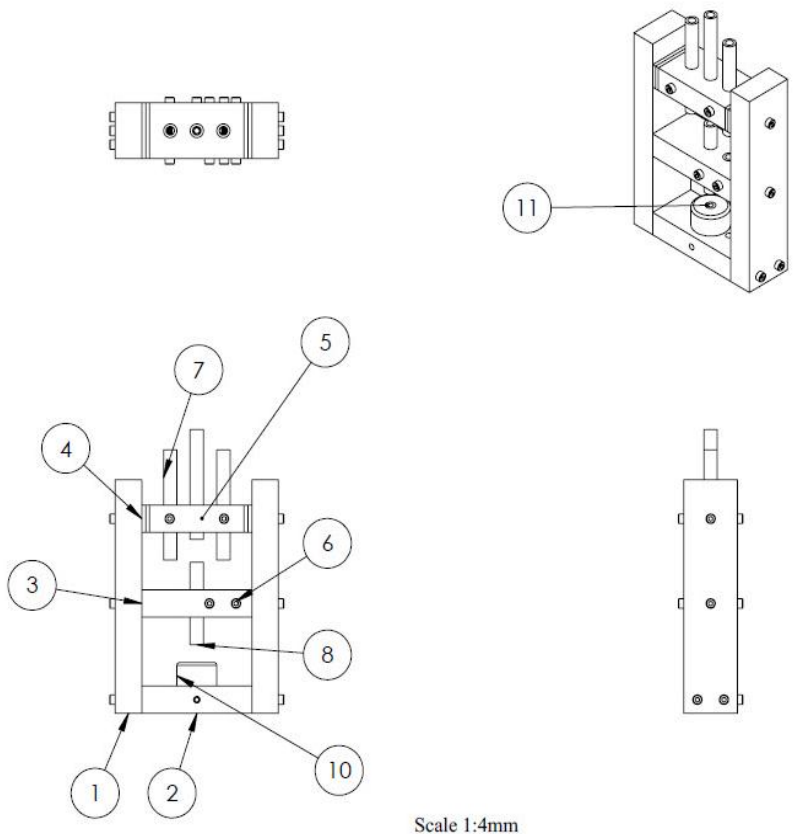
ตารางที่ ก.1 ปริมาณสารเคมี

สูตรทางเคมี	ปริมาณ 20 กรัม				
	$\text{Bi}_2\text{O}_3(\text{g})$	$\text{BaCO}_3(\text{g})$	$\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{g})$	$\text{TiO}_2(\text{g})$	$\text{MnO}_2(\text{g})$
$\text{Bi}_{0.75}\text{Ba}_{0.25}(\text{Fe},\text{Ti})_{0.99}\text{Mn}_{0.01}\text{O}_3$	11.4962	3.2458	3.9136	1.2873	0.0572



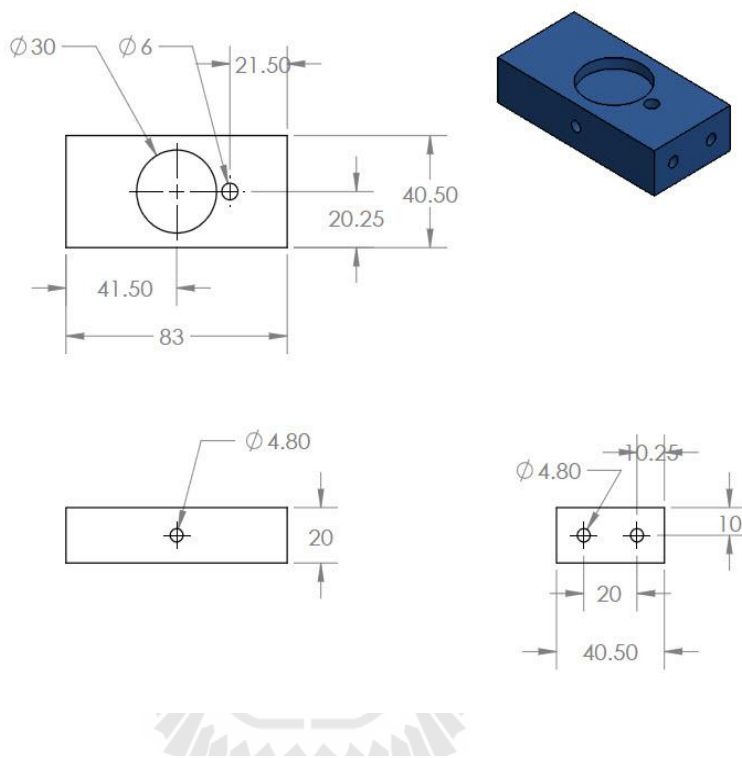
ภาคผนวก ข

ภาพ Drawing ตัวจับยึดชิ้นงานและฐาน



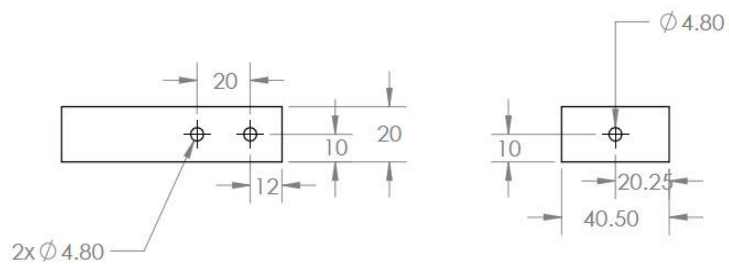
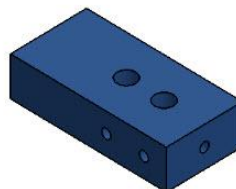
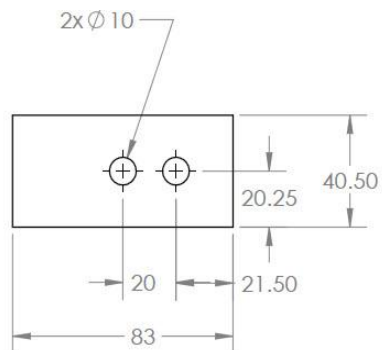
Scale 1:4mm

ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Left		2
2	Buttom		1
3	Center		1
4	Chim-Plate		4
5	Top		1
6	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 20 Hex SHCS -- 20SHX		17
7	Sluk-01-80		3
8	Sluk-01-60		1
9	Sluk-01-20		1
10	Buch		1
11	Buch-02		1



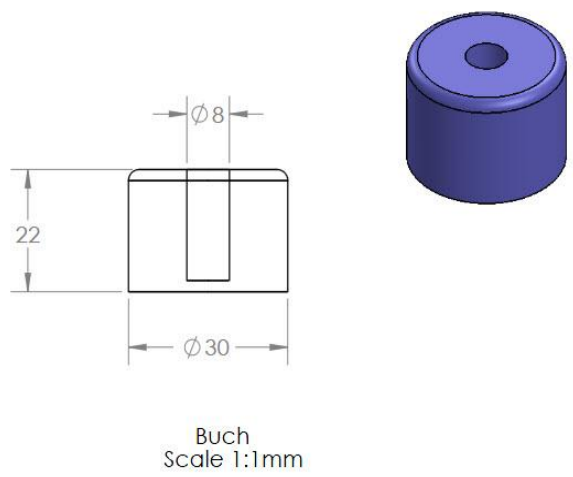
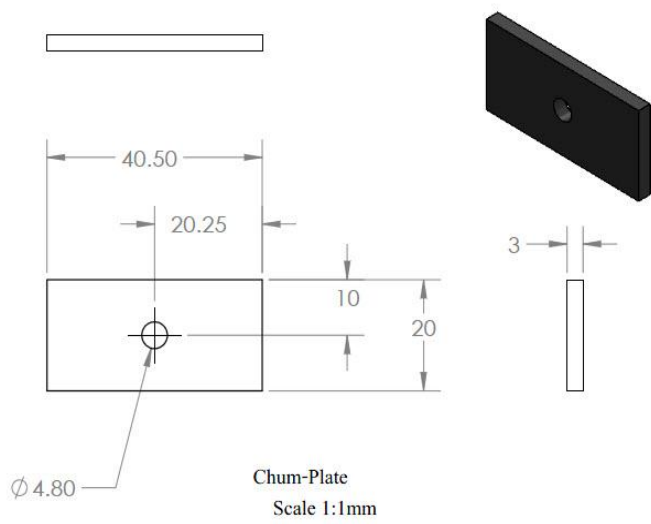
Scale 1:2mm

ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Buttom		1



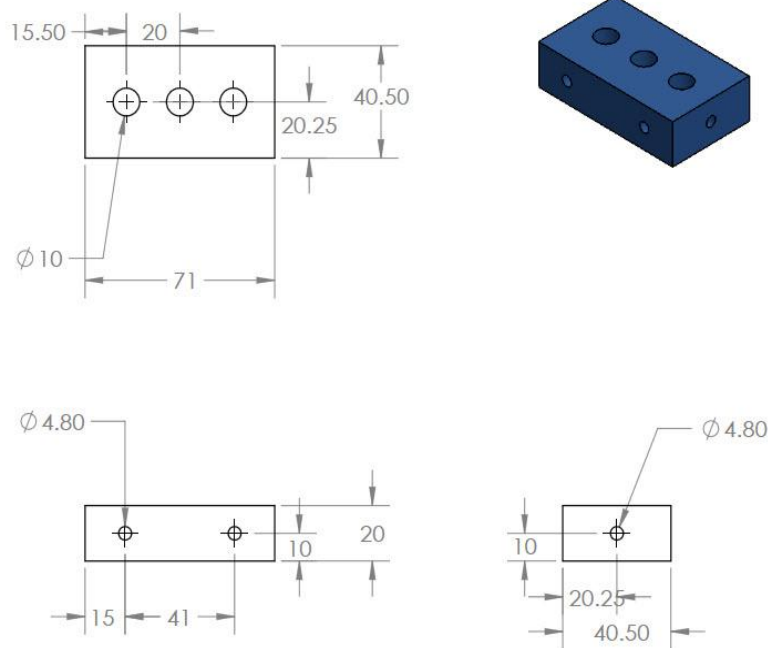
Scale 1:2

ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Center		1



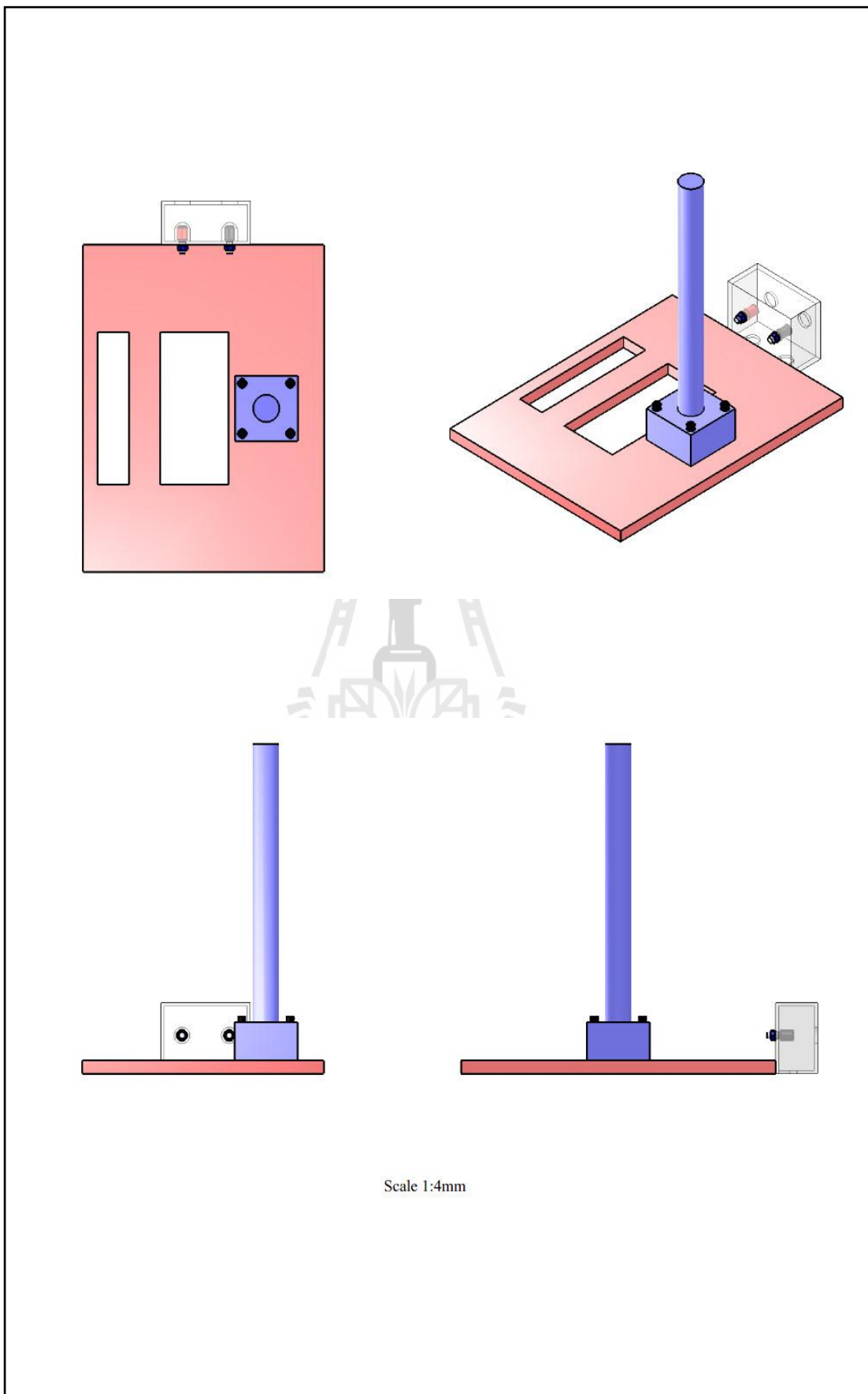
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Chim-Plate		1
	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
2	Buch		1



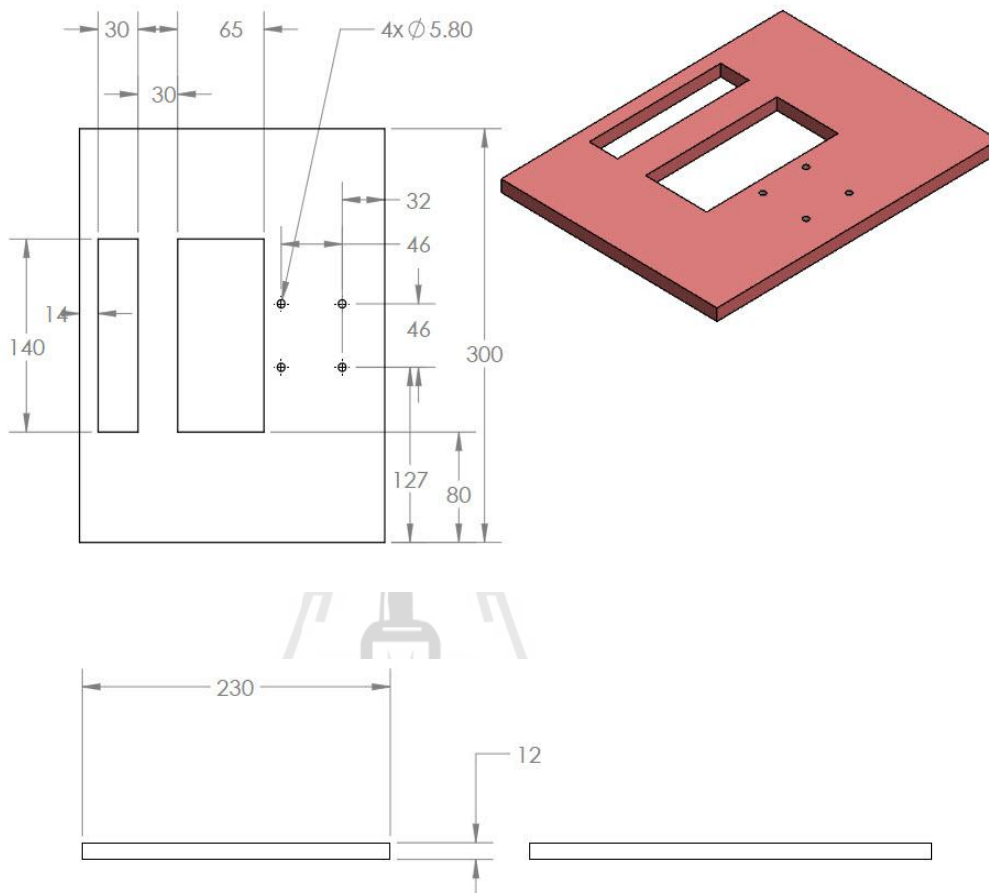


Scalr 1:2mm

ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Top		1

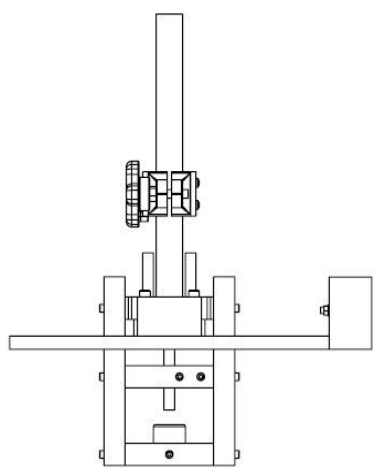
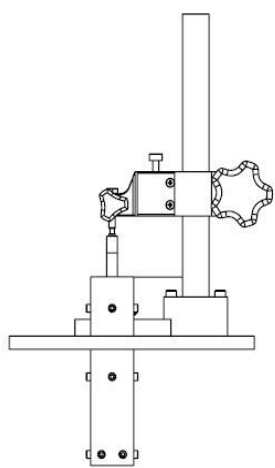
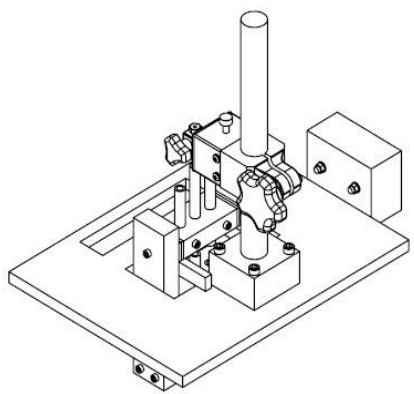
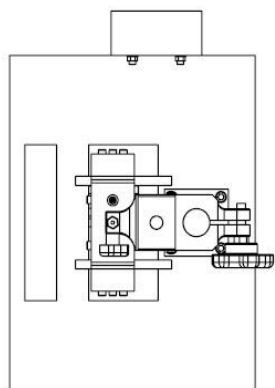


Scale 1:4mm

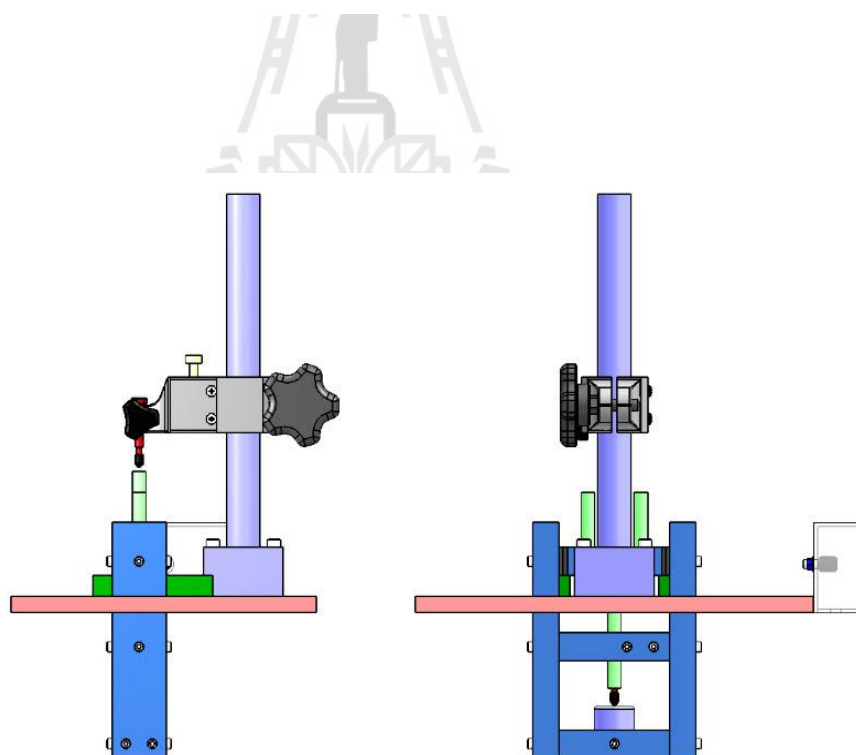
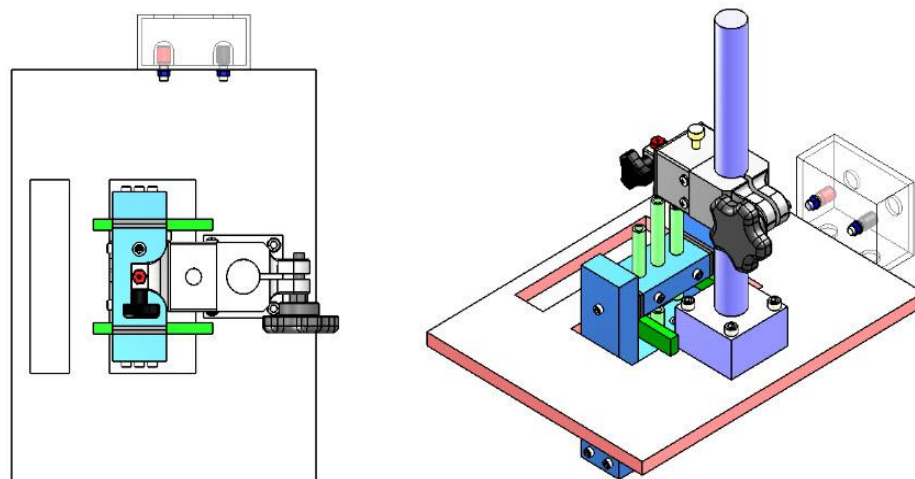


Scale 1:4mm


ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Part1-01		1



Scale 1:5mm



Scale 1:4mm

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. At the top, it features a stylized tower or spire. Below this, a central figure of a person stands on a platform. The emblem is surrounded by a decorative border. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in Thai script along the bottom curve of the emblem.

ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Yuthapong Sratta, Sujitra Chandarak, Muangjai Unruan, Puripat Kantha, Boonruang Marungsri, Rattikorn Yimnirun and Soodkhet Pojprapai, “**Effect of Temperature on Ferroelectric Properties of Bismuth Ferrite-Barium Titanate**”, *Integrated Ferroelectrics*, 2013, Vol:148, pp. 67–72.



## Effect of Temperature on Ferroelectric Properties of Bismuth Ferrite-Barium Titanate

YUTHAPONG SRATTA,<sup>1,5</sup> SUJITTRA CHANDARAK,<sup>2,5</sup>  
 MUANGJAI UNRUAN,<sup>3,5</sup> PURIPAT KANTHA,<sup>2,5</sup>  
 BOONRUANG MARUNGSRI,<sup>1,5</sup> RATTIKORN YIMNIRUN,<sup>4,5</sup>  
 AND SOODKHET POJPRAPAI<sup>2,5,\*</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

<sup>2</sup>School of Ceramic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

<sup>3</sup>Department of Applied Physics, Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 3000, Thailand

<sup>4</sup>School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology and NANOTECH-SUT Center of Excellence on Advanced Functional Nanomaterials, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

<sup>5</sup>Smart Materials and Intelligent System Research Unit, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

*The effect of temperature on ferroelectric properties of the 1 mol% Mn-doped 0.75BF-0.25BT ceramic was investigated under an electric field at various temperatures (–20 to 200°C). An electric field (sine wave) of 52 kV/cm at 50 Hz was applied to the sample. The effect of temperature was represented as the changed of polarization hysteresis loop and dielectric properties with various temperatures. The results show that the polarization hysteresis loops increase with increasing temperature because of greater domain switchability at higher temperature. Dielectric loss and dielectric constant increase with increase temperature and tend to decrease with increasing frequency. The samples break down at higher temperature due to the strong leakage current density, which may be caused by an increase in the activity of the free carries.*

**Keywords** Ferroelectric; magnetoelectric; dielectric; 1 mol% Mn-doped 0.75BF-0.25BT

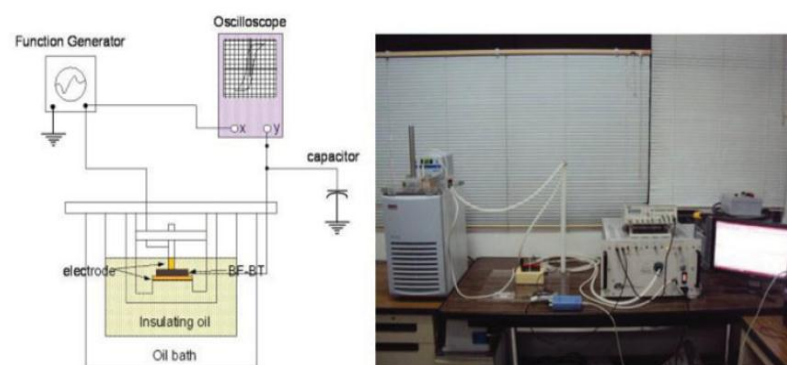
### 1. Introduction

Bismuth ferrite (BiFeO<sub>3</sub>) is of interest for memory storage applications such as hard disk drives (HDD) because it possesses magnetoelectric properties. A ferroelectric Curie temperature ( $T_C$ ) of BiFeO<sub>3</sub> is 830°C and an antiferromagnetic neel temperature ( $T_N$ ) is 370°C [1]. The drawback of this material is its poor electric property. Moreover, it is difficult to prepare the pure single phase BiFeO<sub>3</sub>. To improve the electrical performance of BiFeO<sub>3</sub>, the BaTiO<sub>3</sub> (BT) was added into BiFeO<sub>3</sub>. Such dopant enhances the electric properties and stabilizes

Received December 9, 2012; in final form August 25, 2013.

\*Corresponding author. E-mail: soodkhet@g.sut.ac.th





**Figure 1.** Experimental set up for measuring  $P$ - $E$  hysteresis loop at various temperatures. (Color figure available online.)

the perovskite structure [2–4]. Recently, Sujittra *et al.* have prepared  $(1-x)\text{BiFeO}_3$ - $x\text{BaTiO}_3$  ceramics and reported that the  $\text{BiFeO}_3$  ceramics with 25 mol% BT exhibits the highest value of ferroelectric properties [5]. In addition, Sujittra *et al.* reported that the electrical properties of 0.75BF-0.25BT ceramics can be improved by Cu and Mn doping [6]. Cu doped BF-BT ceramics show high magnetic properties and low ferroelectric properties while the great ferroelectric properties and poor magnetic properties were found in Mn doped ceramics. When considering the magnetoelectric property, Mn-doped ceramics provide a greater magnetoelectric property than that of Cu-doped ceramics. If such magnetoelectric materials are applied for HDD read head application, ferroelectric and magnetoelectric properties of the material have to be considered because the performance of reading process depends on the effect of transferring magnetic signal to electric signal [7–9]. Furthermore, it is known that ferroelectric and magnetoelectric properties can be affected by the change of operating temperature. During the reading process, read heads normally fly above a media disk about a few nanometers which causes traction between head and media. This could generate heat on the head and media in range of 40–60°C. For some applications, HDDs may be tested under some extreme conditions. For instance, HDDs may be tested in the temperature range of –50 to 150°C. The performance of magnetoelectric devices may reduce if they are operated in such extreme condition. Therefore, the aim of this work is to study affects of temperature on ferroelectric property of Mn-doped 0.75BF-0.25BT ceramic.

## 2. Experimental

1 mol% Mn-doped 0.75BF-0.25BT ceramics were prepared by the solid-state reaction method. The reagent powders were mixed by a conventional ball-milling method for 30 min in ethanol. The mixtures were dried and then calcined at 900°C for 5 h with heating/cooling rate of 5°C/min. The calcined powders were ground and uniaxial pressed into pellets, using polyvinyl alcohol as a binder. The pellets were then sintered at 1025°C for 2 h with heating/cooling rate of 5°C/min [6]. Temperature dependence of dielectric constant and loss were measured at various frequencies 1, 2, 5, 10, 20, 50 and 100 kHz, using a high-precision LCR meter (Instek, LCR-821). Experimental set up is presented in Fig. 1. Dielectric loss and dielectric constant were measured at temperature range of –20 to 200°C with an increment of 10°C by using a heater/refrigerator (Thermo scientific, RTE

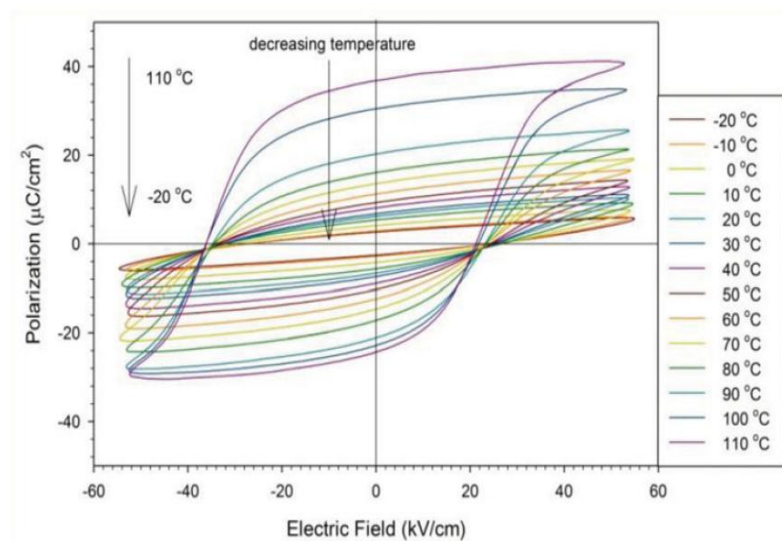


Figure 2.  $P$ - $E$  hysteresis loop of 1 mol% Mn-doped 0.75BF-0.25BT ceramic at various temperatures.

740). Polarization-electric field ( $P$ - $E$ ) hysteresis loop at different temperature range of  $-20$  to  $200^\circ\text{C}$  was examined by using a Sawyer-Tower circuit. An electric field of  $52\text{ kV/cm}$  at  $50\text{ Hz}$  was applied to the sample by using a function generator (MCP lab electronics, MPF 2010) and high voltage amplifier (Trek, model 20/20C). The output signals were processed by using PC oscilloscope (Pico, PicoScope 2205).

### 3. Results and Discussion

The  $P$ - $E$  hysteresis loops of 1 mol% Mn-doped  $0.75\text{BiFeO}_3\text{-}0.25\text{BaTiO}_3$  ceramics measured at electric field of  $52\text{ kV/cm}$  with frequency of  $50\text{ Hz}$  are presented in Fig. 2. Unsaturated  $P$ - $E$  hysteresis loop was found at  $-20^\circ\text{C}$  and  $-10^\circ\text{C}$ . Remanent polarization ( $P_r$ ) increased with increasing temperature. During  $-20$  to  $40^\circ\text{C}$ , the  $P_r$  slightly increased while during  $50$  to  $80^\circ\text{C}$   $P$ - $E$  hysteresis loop became well saturated. This is because of the greater domain switchability at higher temperature. During  $90^\circ$  to  $110^\circ\text{C}$ , ceramic exhibits great saturated hysteresis loop. The highest remanent polarization ( $37\ \mu\text{C/cm}^2$ ) was found at  $110^\circ\text{C}$ . At temperatures above  $110^\circ\text{C}$ , the hysteresis loop was deformed and the sample electrically broke down eventually. This may be due to the degradation of  $\text{Fe}^{3+}$  to  $\text{Fe}^{2+}$  species on crystallographic sites of  $\text{BiFeO}_3$  ceramics which results in oxygen vacancies for charge compensation when temperature increases [1]. Temperature dependence of the remanent polarization ( $P_r$ ) and coercive field ( $E_c$ ) are presented in Fig. 3. This result shows that the  $P_r$  increases with increasing temperature. However, the  $E_c$  of the ceramics decreases when temperature increases. The phenomenon is different from the behavior of normal ferroelectrics such as  $\text{BaTiO}_3$ , since the ferroelectric polarization of normal ferroelectrics decrease with increasing temperature. The increase of  $P_r$  with increasing temperature could be attributed to Fe, which is transition metal at higher temperature. At high temperature, Fe

70

Y. Sratta et al.

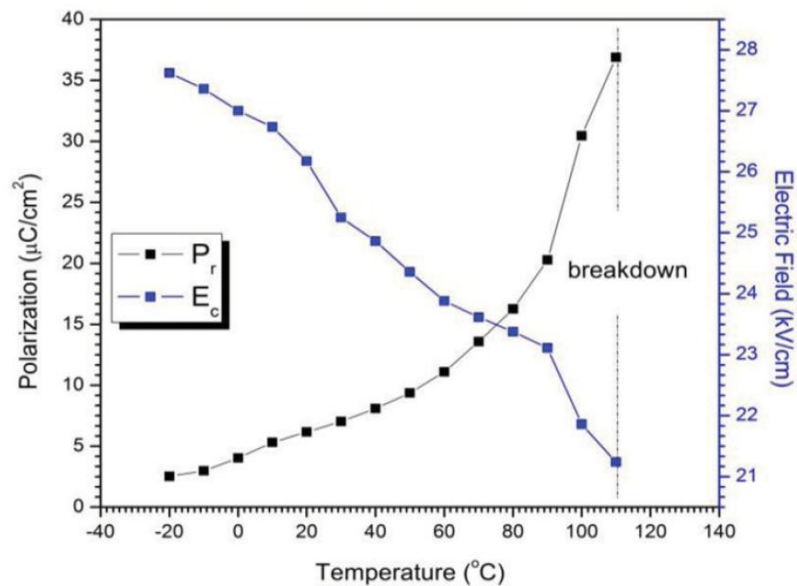


Figure 3. Temperature dependences of the remnant polarization and coercive field.

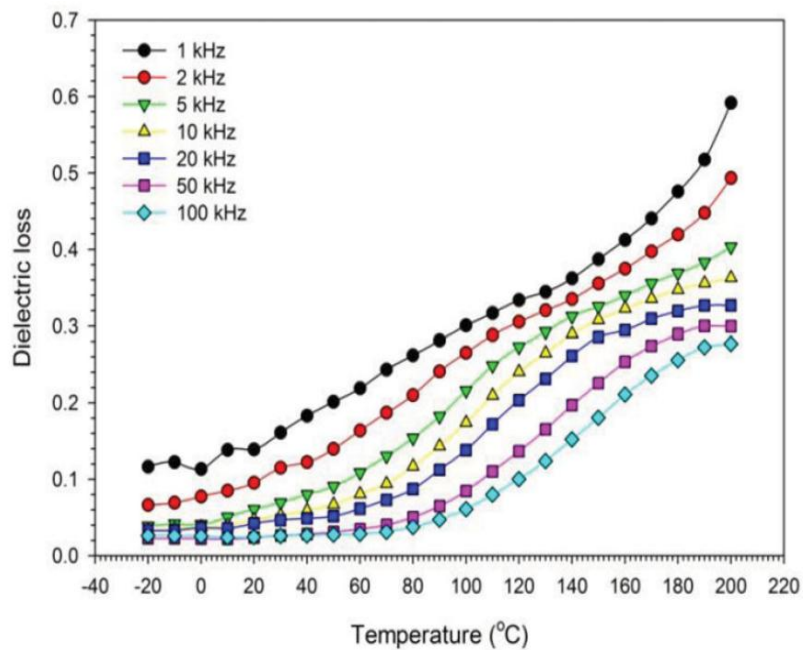
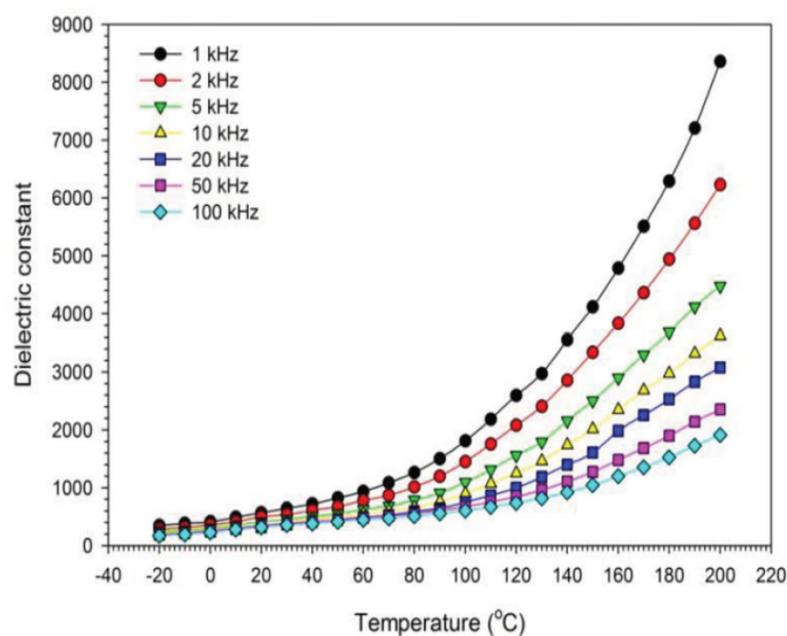


Figure 4. Temperature dependence of dielectric loss on temperature for 1 mol% Mn-doped 0.75BF-0.25BT ceramics. (Color figure available online.)

releases electron which results in an increase of  $P_r$ . However, the  $P$ - $E$  hysteresis loops illustrates the leaky behavior above 110 °C, which may be caused by the increase of electrical conductivity. Finally, this leads to electrical breakdown.

Figure 4 shows the dielectric loss of 1 mol% Mn-doped 0.75BF-0.25BT with various temperatures. The lowest dielectric loss of 0.0261 was observed at temperature  $-20^{\circ}\text{C}$  and frequency 100 kHz while the highest value of 0.5914 was found at  $200^{\circ}\text{C}$ , 1 kHz. For the temperature range of  $-20$  to  $60^{\circ}\text{C}$ , dielectric loss at low frequencies increases sharply while at high frequencies, it slightly increases when temperature increases. Moreover, the dielectric loss decreased with increasing frequency. This result is consistent with the previous works [10–12]. Higher dielectric loss at low frequency (1 kHz) could be a result of free space charge. A decrease of the dielectric properties with increasing frequency could be caused by the decrease of domain/polarization switchability under the applied electric field. Consequently, this leads to the decrease of dielectric loss at higher frequency. It is also found that the dielectric loss increases with increasing temperature which is consistent with the previous works [10–12]. The dielectric loss preserves the low value in the temperature range of  $-20$  to  $60^{\circ}\text{C}$ , and exhibits good temperature stability. However, dielectric loss increased sharply at temperature above  $60^{\circ}\text{C}$ , indicating an obvious increase in DC conductivity at high temperature. Temperature dependences of dielectric constant at various frequencies and temperatures for 1 mol% Mn-doped 0.75BF-0.25BT ceramics are shown in Fig. 5. The lowest value of dielectric constant is 171.73 at  $-20^{\circ}\text{C}$  (100 kHz) while the greatest value of that is 8363.90 at  $200^{\circ}\text{C}$  (1 kHz). However, the dielectric constant enhanced with increasing temperature which is overall in agreement with the other works [10–12].



**Figure 5.** Temperature dependence of dielectric constant on temperature for 1 mol% Mn-doped 0.75BF-0.25BT ceramics. (Color figure available online.)

#### 4. Conclusion

The effect of temperature on ferroelectric and dielectric properties of 1 mol% Mn-doped BF-BT ceramics was investigated with increasing temperature from  $-20$  to  $200^\circ\text{C}$ .  $P$ - $E$  hysteresis loops and  $P_r$  values increases with increasing temperature because of greater domain switchability and less coercive field at higher temperature. The sample breaks down at higher temperature due to the strong leakage current density, which may be caused by an increase in the activity of the free carries. Dielectric loss and dielectric constant increase with increasing temperature and tend to decrease with increasing frequency.

#### Acknowledgments

The authors would like to acknowledge Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), Nakhon Ratchasima, Thailand, and Thai Research Fund (TRF5680095). S. Pojprapai would like to thank Assoc. Prof. Dr. Jurassri and Dr. Veerayuth Lorprayoon for their kind support.

#### References

1. A. Z. Simoes, A. H. M. Gonzalez, L. S. Cavalcante, C. S. Riccardi, E. Lingo, and J. A. Varela, Ferroelectric characteristics of  $\text{BiFeO}_3$  thin films prepared via a simple chemical solution deposition. *J Appl Phys.* **101**, 074108-1-6 (2007).
2. R. Rai, I. Bdikin, M. A. Valente, and A. L. Kholkin, Ferroelectric and ferroelectric properties of Gd doped  $\text{BiFeO}_3$ - $\text{BaTiO}_3$  solid solution. *Mater Chem Phys.* **119**, 539-545 (2010).
3. R. A. M Gotardo, I. A. Santos, L. F Cotica, E. R. Botero, D. Garcia, and J. A. Eiras, Improved ferroelectric and magnetic properties of monoclinic structured  $0.8\text{BiFeO}_3$ - $0.2\text{BaTiO}_3$  magnetoelectric ceramics. *Scr Mater.* **61**, 508-511 (2009).
4. S. O. Leontsev, and R. E. Eitel, Dielectric and piezoelectric properties in Mn-modified  $(1-x)\text{BiFeO}_3$ - $x\text{BaTiO}_3$  ceramics. *J Am Ceram Soc.* **92**, 2957-2961 (2009).
5. S. Chandarak, M. Unruan, T. Sareein, A. Ngamjarurojana, S. Maensiri, P. Laoratanakul, S. Ananta, and R. Yimnirun, Fabrication and characterization of  $(1-x)\text{BiFeO}_3$ - $x\text{BaTiO}_3$  ceramics prepared by a solid state reaction method. *J magnetics.* **14**(3), 120-123 (2009).
6. S. Chandarak, J. Jutimoosik, A. Bootchanont, M. Unruan, P. Jantaratana, S. Priya, S. Srilomsak, S. Rujirawat, and R. Yimnirun, Local structure of magnetoelectric  $\text{BiFeO}_3$ - $\text{BaTiO}_3$  ceramics probed by synchrotron x-ray absorption spectroscopy. *J Supercond Nov Magn.* **26**, 455-461 (2013).
7. Z. Li, J. Wang, Y. Lin, and C. W. Nan, A magnetoelectric memory cell with coercivity state as writing data bit. *Appl Phys Lett.* **96**, 162505-1-3 (2010).
8. M. Vopsaroiu, J. Blackburn, and M. G. Cain, A new magnetic recording read head technology based on the magneto-electric effect. *J Phys D: Appl Phys.* **40**, 5027-5033 (2007).
9. Y. Zhang, Z. Li, C. Deng, J. Ma, Y. Lin, and C. W. Nan, Demonstration of magnetoelectric read head of multiferroic heterostructures. *Appl Phys Lett.* **92**, 152510-1-3 (2008).
10. Y. Wei, X. Wang, J. Jia, and X. Wang, Multiferroic and piezoelectric properties of  $0.65\text{BiFeO}_3$ - $0.35\text{BaTiO}_3$  ceramic with pseudo-cubic symmetry. *Ceram Int.* **38**, 3499-3502 (2010).
11. K. C. Verma, and R. K. Kotnala, Multiferroic magnetoelectric coupling and relaxor ferroelectric behavior in  $0.7\text{BiFeO}_3$ - $0.3\text{BaTiO}_3$  nanocrystals. *Solid State Commun.* **151**, 920-923 (2009).
12. J. S. Kim, C. I. Cheon, H. J. Kang, and P. W. Jang, High temperature properties of multiferroic  $\text{BiFeO}_3$ - $\text{DyFeO}_3$ - $\text{BaTiO}_3$  solid solutions. *J Eur Ceram Soc.* **27**, 3951-3954 (2007).
13. C. Zhou, Z. Cen, H. Yang, Q. Zhou, W. Li, C. Yuan, and H. Wang, Structure, electrical properties of  $\text{Bi}(\text{Fe}, \text{Co})\text{O}_3$ - $\text{BaTiO}_3$  piezoelectric ceramics with improved curie temperature. *Physica B.* **410**, 13-16 (2013).

## ประวัติผู้เขียน

นายยุทธพงษ์ ศรีธา เกิดเมื่อวันที่ 15 กันยายน พ.ศ. 2530 ที่อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา เริ่มศึกษาระดับอนุบาลถึงมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนป่าไม้อุทิศ ๒ ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนปักธงชัยประชานิรมิต อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับสอง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2552 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

ปี พ.ศ.2553 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ในกลุ่มวิจัย Smart Materials and Intelligent System สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ทำหน้าที่เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 และปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเซรามิก ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยได้นำประสบการณ์และความรู้ที่ได้จากการเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี จากการทำวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้และความเข้าใจทางด้านผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของสารบีสมัทเฟอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต มีผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างทำการวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยมีรายละเอียดปรากฏในภาคผนวก ค.