

ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมความต้านทานไฟฟ้าของเซรามิก
เลดเซอร์โคเนตไททาเนต

นางสาวศิริรัตน์ กำภูศิริ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**EFFECTS OF TEMPERATURE ON ELECTRICAL
FATIGUE BEHAVIOR OF LEAD ZIRCONATE
TITANATE CERAMIC**

Siriratn Kampoosiri

**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 2012**

ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.สุดเขตต์ พจน์ประไพ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.รัตติกกร ยิ้มนิรัญ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศิริรัตน์ กำภูศิริ : ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิกเลดเซอร์โค
เนตไททาเนต (EFFECTS OF TEMPERATURE ON ELECTRICAL FATIGUE
BEHAVIOR OF LEAD ZIRCONATE TITANATE CERAMIC) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี, 128 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความล้าทางไฟฟ้าของเซรา
มิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) โดยทำการสร้างระบบทดสอบการเกิดความล้าของเซรามิก PZT
จากนั้นชิ้นงานเซรามิก PZT ได้ถูกนำไปทดสอบความล้าของที่อุณหภูมิห้อง, 50°C, 100°C, 150°C
และ 200 °C ที่สนามไฟฟ้า ± 1.50 kV/mm ความถี่ 10 Hz เป็นจำนวน 1,000,000 รอบ โดยพฤติกรรม
ความล้าสามารถเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิส จากผลการทดสอบพบว่าวงวน
ฮิสเทอรีซิสจะมีขนาดลดลงตามจำนวนรอบของสนามไฟฟ้าที่ให้ และปรากฏการณ์ความล้านี้แสดง
ให้เห็นอย่างเด่นชัดเมื่ออุณหภูมิลดลงใกล้อุณหภูมิห้อง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความล้ามีค่าลดลงเมื่อ
อุณหภูมิเพิ่ม ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดความล้าโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบน
ของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning
Electron Microscope, SEM) จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเกิดความล้าอาจเกิดได้จากสาเหตุหลัก
2 ประการ คือ เกิดจากผลการตรึงของผนังโดเมน (Domain pinning effect) และ เกิดจากความ
เสียหายบนผิวอิเล็กทรอนิกส์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

SIRIRATN KAMPOOSIRI : EFFECTS OF TEMPERATURE ON
ELECTRICAL FATIGUE BEHAVIOR OF LEAD ZIRCONATE TITANATE
CERAMIC. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. BOONRUANG
MARUNGSRI, D. Eng., 128 PP.

REMANENT POLARIZATION/ FATIGUE/ DOMAIN PINNING

In this thesis, the fatigue testing system was built to measure fatigue behavior of lead zirconate titanate (PZT). The PZT specimens were fatigued at room temperature, 50 °C, 100 °C, 150 °C and 200 °C under $\pm 1.50\text{kV/mm}$, 10 Hz. The specimens were cycled up to 1,000,000 cycles. Fatigue behavior is indicated by the change of hysteresis loops. It was found that the size of a hysteresis loop decreased with an increasing of cycle numbers. This fatigue phenomenon is more pronounced when the temperature decreases to room temperature. In this research, X-ray Diffraction (XRD) technique and Scanning Electron Microscope (SEM) were used for data analysis. It was found that the fatigue phenomenon could be contributed to 2 major effects which are domain pinning effect and electrode damage effect.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

Co Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างดี และให้ความรู้ด้านวิชาการมาโดยตลอด รวมถึงการเป็นแบบอย่างที่ดีในทุก ๆ ด้านให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา อีกทั้งยังได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไข วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อาจารย์ ดร.สุทธเขตต์ พจน์ประไพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางอันมีประโยชน์ให้แก่ผู้วิจัย และช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตติกร์ ยี่มนิรัญ อาจารย์สาขาวิชาฟิสิกส์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความรู้ทางด้าน วิชาการอย่างดียิ่ง

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณา ให้คำปรึกษา แนะนำและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า อย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณอนุชิต เรืองวิทยานนท์ คุณยุธิกา สร้อยระย้า และบุคลากรศูนย์เครื่องมือ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการ ทำงานของข้าพเจ้า และขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งใน อดีตและปัจจุบันที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณนายพฤตส์ กำภูศิริ ผู้เป็นบิดา และนางกลิ่น กำภูศิริ ผู้เป็น มารดา ที่ให้ความรัก เป็นกำลังใจ การดูแล ความห่วงใย และการส่งเสริมทางการศึกษาอย่าง เปี่ยมล้นตลอดมา จนทำให้ผู้วิจัยไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้นตลอดมา

ศิริรัตน์ กำภูศิริ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ

บทที่

1	บทนำ.....	1
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2	วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3	ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.4	ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6	การจัดรูปแบบวิทยานิพนธ์.....	3
2	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1	กล่าวนำ.....	5
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.3	สรุป.....	15
3	ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง.....	16
3.1	อิเล็กทรอนิกส์.....	17
3.2	วัสดุเฟอร์ไรต์อิเล็กทรอนิกส์.....	18
3.2.1	การค้นพบเซรามิกชนิดเฟอร์ไรต์อิเล็กทรอนิกส์.....	19
3.2.2	ประวัติโดยสังเขปของวัสดุชนิดเฟอร์ไรต์อิเล็กทรอนิกส์.....	20
3.2.3	คุณลักษณะของวัสดุเฟอร์ไรต์อิเล็กทรอนิกส์.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.4	คุณลักษณะของวัสดุเฟอร์ไรต์เล็กทรอนิกส์ชนิดเลเซอร์โคเนตไทเทเนต.....	21
3.2.5	การเกิดโพลาริเซชัน.....	26
3.2.6	โดเมนเฟอร์ไรต์เล็กทรอนิกส์.....	29
3.2.7	ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกในเฟอร์ไรต์เล็กทรอนิกส์.....	31
3.2.8	สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก.....	37
3.2.8	วงวนฮิสเทอรีซิสเฟอร์ไรต์เล็กทรอนิกส์.....	38
3.2.10	วงจร Sawyer-Tower.....	41
3.3	ความล้าเฟอร์ไรต์เล็กทรอนิกส์.....	43
3.3.1	ปัจจัยที่มีผลต่อความล้าจากการเปลี่ยนขั้วในวัสดุเซรามิก PZT.....	45
3.4	สรุป.....	45
4	การสร้างระบบทดสอบความล้าเฟอร์ไรต์เล็กทรอนิกส์ของเซรามิก PZT และ การทดสอบ	
	ระบบเบื้องต้น.....	46
4.1	การสร้างระบบทดสอบความล้าเฟอร์ไรต์เล็กทรอนิกส์ของเซรามิก PZT.....	46
4.1.1	ชุดทดสอบการเกิดความล้าเฟอร์ไรต์เล็กทรอนิกส์ของเซรามิก PZT.....	47
4.1.1.1	ลักษณะบรรจุชิ้นงานทดสอบ.....	48
4.1.1.2	วงจรควบคุมอุณหภูมิ.....	50
4.2	การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทำการทดสอบ.....	56
4.2.1	การตัดชิ้นวัสดุเซรามิก PZT สำหรับการทดสอบ.....	56
4.2.2	การจัดชิ้นงาน.....	58
4.2.3	การทำขั้วไฟฟ้า.....	58
4.2.4	การเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้า.....	59
4.2.5	การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า.....	60
4.2.5.1	การหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์.....	60
4.2.5.2	การหาค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (d_{33}).....	61
4.3	การทดสอบการทำงานของชุดทดสอบความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT	
	เบื้องต้น.....	61

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1	ผลการศึกษาวงวนฮีสเทอรีซิสที่สภาวะโหลดต่าง ๆ.....	62
4.3.1.1	ผลการศึกษาวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิก PZT ที่สนามไฟฟ้าต่าง ๆ.....	62
4.3.1.2	ผลการศึกษาวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิก PZT ที่ความถี่ต่าง ๆ.....	63
4.3.1.3	ผลการศึกษาวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	64
4.4	สรุป.....	64
5	ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	66
5.1	ผลของอุณหภูมิต่อขนาดของวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิก PZT.....	66
5.2	ผลของอุณหภูมิต่อค่าโพลาริเซชันคงค้าง และค่า Coercive field ของวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิก PZT.....	69
5.3	ผลการศึกษาการเปลี่ยนทิศทางของโดเมนด้วยวิธีการ XRD.....	77
5.4	ผลการศึกษาโครงสร้างกายภาพของเซรามิก PZT.....	81
5.5	ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT.....	90
5.6	สรุป.....	90
6	สรุป และข้อเสนอแนะ.....	92
6.1	สรุป.....	92
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	94
	รายการอ้างอิง.....	96
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ตารางแสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	99
	ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	121
	ประวัติผู้เขียน.....	128

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
3.1 เปรียบเทียบสมบัติของวัสดุแบบ Soft เซรามิก และวัสดุแบบ Hard เซรามิก.....	25
3.2 สมบัติของเซรามิก PZT ที่ขายในท้องตลาด.....	26
3.3 ค่า k^2 ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ.....	36
3.4 สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกของเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกบางชนิด.....	38
5.1 ผลของอุณหภูมิต่อโพลาริเซชันคงค้างจากการทดสอบความล้า.....	70
5.2 ผลของอุณหภูมิต่อค่า Coercive field เมื่อทดสอบความล้า.....	72
5.3 ผลของอุณหภูมิต่อค่าพารามิเตอร์การลดลงของโพลาริเซชันคงค้าง.....	77
5.4 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT ก่อน และ หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า 1,000,000 cycles.....	90
ก.1 แสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง.....	100
ก.2 แสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 50 °C.....	104
ก.3 แสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100 °C.....	108
ก.4 แสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 150 °C.....	112
ก.5 แสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 200 °C.....	117

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ค่าโพลาริเซชันคงค้างของเซรามิก PZT ที่จำนวนรอบของสนามไฟฟ้าค่าต่าง ๆ.....	9
2.2 สัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกที่จำนวนรอบต่าง ๆ.....	10
2.3 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่จำนวนรอบต่าง ๆ.....	10
2.4 โพลาริเซชันคงค้างที่ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ต่าง ๆ.....	11
2.5 โพลาริเซชันคงค้าง และสนามไฟฟ้าในการกลับทิศของเซรามิก PZT ที่จำนวนรอบต่าง ๆ.....	12
2.6 โพลาริเซชันคงค้างของเซรามิก PZT กับ PNZT ที่จำนวนรอบต่าง ๆ.....	12
2.7 โพลาริเซชันคงค้างของเซรามิก PZT ที่จำนวนรอบต่าง ๆ.....	13
2.8 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของสาร PbTiO_3 โดย (a) วัสดุใหม่ และ (b) วัสดุที่ทิ้งไว้ 1 ปี.....	14
2.9 โพลาริเซชันคงค้างของวัสดุ PbTiO_3 (a) 480°C , $E = 70 \text{ kV/cm}$; (b) 480°C , $E = 140 \text{ kV/cm}$; (c) 490°C , $E = 70 \text{ kV/cm}$	15
3.1 อิเล็กโตรเซรามิกส์ทางการค้าในรูปลักษณะต่าง ๆ.....	17
3.2 การจัดแบ่งกลุ่มของวัสดุพวกอิเล็กโตรเซรามิกส์ด้วยการใช้สมมาตรของวัสดุ.....	18
3.3 หน่วยเซลล์ (Unit cell) โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ ABO_3	22
3.4 เฟสไดอะแกรมของระบบ $\text{PbZrO}_3\text{--PbTiO}_3$	23
3.5 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกบริเวณ Morphotropic phase boundary.....	23
3.6 ไดโพลโมเมนต์ ($P = qa$) เนื่องจากคู่ของประจุบวก (+q) และลบ (-q) ที่มีระยะห่างเท่ากับ a	27
3.7 การเกิดไดโพลโมเมนต์ทั้ง 5 แบบ (a) อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน (b) อะตอมมิก หรือ ไอออนิกโพลาริเซชัน (c) ไดโพล หรือ ออเรียนเตชันนอลโพลาริเซชัน (d) โพลาริเซชัน ที่เกิดขึ้นเอง (e) อินเตอร์เฟส หรือ โพลาริเซชันจากประจุค้าง.....	29
3.8 การเกิดของผนังโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบ 90° และ 180°	30
3.9 วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีทิศทางการจัดเรียงตัวของโพลาริเซชันก่อน และหลังการโพล.....	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10	ปรากฏการณ์โพโซอิเล็กทริก (a) ปรากฏการณ์ตรง และ (b) ปรากฏการณ์ย้อนกลับ.....32
3.11	(a) วงวนฮิสเทอรีซิส (b) ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาด ของวัสดุในทิศการเกิดโพลาไรเซชัน.....33
3.12	การสั่นตัวในแนวรัศมีของแผ่นโพโซอิเล็กทริก.....36
3.13	ทิศทางของแรงกระทำที่มีผลต่อวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก.....37
3.14	วงวนฮิสเทอรีซิสเฟอร์โรอิเล็กทริกวงกลมที่มีลูกศรแสดงให้เห็น ถึงทิศทางการเกิดโพลาไรเซชันของเซรามิก PZT.....39
3.15	ลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิสในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ โดย (a) ตัวเก็บประจุ BaTiO ₃ (b) วัสดุ PLZT แบบอ่อน (สามารถสวิตช์ตัวได้ง่าย) (c) รีแลกเซอร์ PLZT (d) วัสดุแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก PLZT.....40
3.16	วงวนฮิสเทอรีซิส และความเครียดตามยาวของวัสดุ (a) เซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก (b) เซรามิกรีแลกเซอร์ SFE ชนิดนอนเมมโมรี (Nonmemory).....41
3.17	วงจร Sawyer – Tower ($C_0 = 1 \mu F$, $C_s = C_{sample}$, $C_0 \gg C_s$).....42
3.18	ตัวอย่างของความล่าช้าจากการจากการเปลี่ยนขั้วในฟิล์ม Pb(Zr, Ti)O ₃44
4.1	ระบบทดสอบความล้าเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZT.....47
4.2	ชุดทดสอบการเกิดความล้าเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZT.....47
4.3	ไดอะแกรมภาชนะบรรจุชิ้นงานทดสอบ.....48
4.4	ภาชนะบรรจุชิ้นงานทดสอบ (a) ด้านใน และ (b) ด้านนอก.....49
4.5	วงจรควบคุมอุณหภูมิ.....50
4.6	ฮีตเตอร์.....51
4.7	เทอร์โมคัปเปิล.....51
4.8	ชุดควบคุมอุณหภูมิ.....52
4.9	แผนผังวงจร Sawyer-Tower.....53
4.10	ชุดตัวเก็บประจุ.....53
4.11	ตัวอย่างวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้จากดิจิตอลอสซิลโลสโคป.....54
4.12	วงวนฮิสเทอรีซิสเมื่อคำนวณสนามไฟฟ้า และค่าโพลาไรเซชัน.....54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	วงวนฮิสเทอรีซิสที่ค่าตัวเก็บต่าง ๆ.....55
4.14	วงวนฮิสเทอรีซิสที่สนามไฟฟ้า และความถี่ค่าต่าง ๆ.....56
4.15	ชิ้นวัสดุเซรามิก PZT ที่นำมาทดสอบ.....57
4.16	เครื่องตัดชิ้นงาน (Precision-Saw).....57
4.17	เครื่องขัดชิ้นงาน (Grinder-Polisher).....58
4.18	พื้นผิวเซรามิก PZT (a) ก่อน และ (b) หลังขัด.....58
4.19	ชิ้นเซรามิก PZT หลังทำขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรด.....59
4.20	เครื่องเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้า.....60
4.21	เครื่องวัดค่า d_{33} (d_{33} Meter).....61
4.22	วงวนฮิสเทอรีซิสที่สนามไฟฟ้าต่าง ๆ.....63
4.23	วงวนฮิสเทอรีซิสที่ความถี่ต่าง ๆ.....63
4.24	วงวนฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....64
5.1	ผลของจำนวนรอบสนามไฟฟ้าที่ป้อนต่อลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิสที่ อุณหภูมิ (a) อุณหภูมิห้อง (b) 50 °C (c) 100 °C (d) 150 °C (e) 200 °C.....67
5.2	ผลของอุณหภูมิต่อ (a) โพลาริเซชันคงค้าง (b) โพลาริเซชันคงค้างแบบสัมพัทธ์ โดยกราฟแบบจุดคือค่าที่ได้จากการทดลองจริงส่วนกราฟ แบบเส้นคือค่าที่ได้จากสมการที่ 5.1.....70
5.3	ผลของอุณหภูมิต่อ (a) ค่า Coercive field (b) ค่า Coercive field แบบสัมพัทธ์.....72
5.4	แบบจำลองกำแพงศักย์ (Potential barrier well) ในการเปลี่ยนสถานะ หรือทิศทางของโดเมนที่อุณหภูมิต่างกัน ณ สนามไฟฟ้า และความถี่เดียวกัน.....75
5.5	แบบจำลองสัดส่วนของโดเมนที่ไม่สามารถกลับทิศได้เนื่องจากผลของ การตรึงของโดเมน (Domain pinning effect) และอัตราการลดลง ของโพลาริเซชันคงค้างที่อุณหภูมิห้อง และ 50 °C.....76
5.6	แบบจำลองสัดส่วนของโดเมนที่ไม่สามารถกลับทิศได้เนื่องจากผลของ การตรึงของโดเมน (Domain pinning effect) และอัตราการลดลง ของโพลาริเซชันคงค้างที่อุณหภูมิ 100 °C 150 °C และ 200 °C.....76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิห้อง78
5.8	Pole density ที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิห้อง.....79
5.9	สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิ 150 °C.....80
5.10	Pole density ที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิ 150 °C.....80
5.11	รูปแบบการเลี้ยวเบนของนิวตรอนภายใต้ความเครียดเชิงกล.....81
5.12	โครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิห้องหลังการทดสอบ (a) Virgin (b) 20,000 cycles (c) 100,000 cycles (d) 1,000,000 cycles (e) 3,500,000 cycles.....82
5.12	โครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิ 150 °C หลังการทดสอบ (a) Virgin (b) 20,000 cycles (c) 100,000 cycles (d) 1,000,000 cycles (e) 3,500,000 cycles.....85
5.14	แบบจำลองความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวอิเล็กโทรดก่อน และ หลังการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 150 °C.....88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric material) ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์เชิงอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น ตัวเก็บประจุไฟฟ้า และตัวต้านทานที่ใช้ในวงจรควบคุมในรถยนต์ เทอร์มิสเตอร์ที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิในรถยนต์ เซนเซอร์ที่สามารถใช้ตรวจวัดความชื้นในอาหารหรือผลไม้ หรือเซนเซอร์ที่ใช้ควบคุมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในรถยนต์ แอ็กทิวเอเตอร์ที่ใช้ในการผลิตทางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความละเอียดสูง ทรานสดิวเซอร์ที่สามารถใช้ในการตรวจหาฝูงปลาในทะเล และในอุปกรณ์ตรวจสอบคำหับหรือรอยร้าวในวัสดุแบบไม่ทำลาย หม้อแปลงไฟฟ้า แบตเตอรี่ในลำโพง ตัวบังคับการสั่นของหัวเข็มในเครื่องมือชุดหินปูน อุปกรณ์ทำความสะอาดเครื่องมือทางการแพทย์ด้วยอัลตราโซนิคส์ หัวตรวจวัดอัลตราซาวด์ และหุ่นยนต์ขนาดจิ๋วสำหรับการใช้ในการตรวจอวัยวะภายในแบบไร้สาย เป็นต้น (Haertling, 1999) วัสดุที่เป็นพื้นฐานในการผลิตอุปกรณ์ที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นคือวัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกแทบทั้งสิ้น วัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่นิยมนำมาใช้อย่างมากได้แก่ เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (Lead Zirconate Titanate: PZT) เนื่องจากเซรามิก PZT เป็นวัสดุที่แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกที่โดดเด่น โดยสามารถเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ในอัตราสูงถึงร้อยละ 45-55 ขึ้นกับสารที่เจือปน มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มากที่สุดประมาณ 1,300 และมีอุณหภูมิคูรีประมาณ 390°C อีกทั้งเซรามิก PZT ยังมีความแข็งแรงทนทานในอุณหภูมิสูงและมีสัมประสิทธิ์ไฟฟ้าเชิงกลคู่ควบสูงมาก นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เกิดขั้ว (Pole) ขึ้นได้ง่าย ประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเซรามิก PZT ด้วย เนื่องจากการนำเซรามิก PZT ไปประยุกต์ใช้งานจริงนั้น สมบัติของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงตามสนามไฟฟ้า ความถี่ รวมทั้งอุณหภูมิที่ใช้งาน การประยุกต์ใช้งานเซรามิก PZT ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับเป็นเวลานานติดต่อกันอาจส่งผลทำให้เกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้ว (Polarization fatigue) หรือ ความล้าทางไฟฟ้า (Electrical fatigue) โดยคุณสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกที่เสื่อมลงเนื่องจากความล้าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไม่สามารถย้อนกลับมาได้เมื่อถึงเวลาหนึ่ง คุณสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพ และอายุการใช้งานของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

มีงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นถึงการเกิดความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT ที่สภาวะโหลดต่าง ๆ (Wang et al., 2002; Pojprapai et al., 2007; Lou et al., 2010) ผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดของโหลดเชิงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดความล้าได้เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความล้ายังมีไม่พอ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT โดยมีอุณหภูมิมาเกี่ยวข้องด้วย สำหรับการวัดคุณสมบัติของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นโดยทั่วไปแล้วสามารถพิจารณาได้จากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสที่วัดได้จากเซรามิก PZT

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมความล้าเนื่องจากการเปลี่ยนขั้วทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT โดยทำการสร้างระบบทดสอบคุณสมบัติความล้าทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง จากนั้นทำการตรวจวัดความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT ภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ แต่ไม่เกิน 200°C

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อออกแบบ และสร้างชุดทดสอบ สำหรับศึกษาพฤติกรรมความล้าทางไฟฟ้าจากการเปลี่ยนขั้วในเซรามิก PZT
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ที่มีผลกระทบต่อความล้าจากการเปลี่ยนขั้วในเซรามิก PZT เมื่อมีโหลดทางไฟฟ้า

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ในการทดสอบจะใช้น้ำมันซิลิโคน เป็นสารฉนวนทางไฟฟ้า
2. ชุดทดสอบที่สร้างขึ้นมีพิกัดคือ
 - แรงดันทดสอบ 0-10 kV/mm
 - ความถี่ในการทดสอบ 0-100 Hz
 - อุณหภูมิในการทดสอบไม่เกิน 200°C

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบ และสร้างชุดทดสอบสำหรับศึกษาพฤติกรรมความล้าทางไฟฟ้าภายใต้อุณหภูมิสูงของเซรามิก PZT ด้วยหลักการของวงจร Sawyer-Tower
2. ทำการตรวจวัดความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT ภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ แต่ไม่เกิน 200°C

3. วิเคราะห์ผลความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT ด้วยการศึกษาวงวนสมบัติฮิสเทอรีซิสที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ชุดทดสอบสมบัติความล้าทางไฟฟ้าของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกภายใต้อุณหภูมิสูง
2. สามารถทำการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการเกิดความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT ภายใต้อุณหภูมิสูง
3. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการเกิดความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT ที่สภาวะโหลดทางไฟฟ้าภายใต้อุณหภูมิสูง
4. สามารถทำนายอายุการใช้งานของเซรามิก PZT ที่ใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น แอคชูเอเตอร์ (actuator) ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) เป็นต้น

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสังเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปรัทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 กล่าวถึงอิเล็กโตรเซรามิกส์ซึ่งเป็นเซรามิกที่สามารถแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแม่เหล็ก แสง และความร้อน ซึ่งได้แก่ วัสดุไพโซอิเล็กทริก ไพโรอิเล็กทริก และเฟอร์โรอิเล็กทริก ต่อมาจะเป็นส่วนของประวัติความเป็นมา รวมไปถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก เช่น การค้นพบเซรามิกชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก ประวัติโดยสังเขปของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก คุณสมบัติของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดเคดเซอร์โคเนตไทเทเนต การทำให้เกิดโพลาไรเซชัน โดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก วงวนฮิสเทอรีซิสเฟอร์โรอิเล็กทริก วงจร Sawyer-Tower ความล้า และสาเหตุการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

บทที่ 4 กล่าวถึงการสร้างระบบทดสอบความล้าเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZT อันได้แก่ การสร้างชุดทดสอบความล้าทางไฟฟ้า การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบ และการทดสอบการทำงานของชุดทดสอบความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT เบื้องต้น

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากการศึกษาขนาดของวงวนฮิสเทอ

วิธีส ค่าโพลาไรเซชันคงค้าง ค่า **Coercive field** และคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น C , d_{33} และ ϵ_r รวมไปถึงการตรวจสอบสมมติฐานที่ว่า การเกิดความล้าของค่าโพลาไรเซชันมีความเป็นไปได้ที่จะมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ (1) เกิดจากการตรึงของผนังโดเมนซึ่งอาจสามารถวิเคราะห์ได้จากผลของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (2) เกิดจากความเสียหายบนผิวอิเล็กโทรดซึ่งอาจสามารถบ่งบอกได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดเพื่อยืนยัน และพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุป และข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่าความเสื่อมสภาพของคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกเนื่องจากการล้าทางไฟฟ้า หรือ ความล้าจากการเปลี่ยนขั้วนั้น ไม่สามารถย้อนกลับได้เมื่อถึงเวลาหนึ่ง การเกิดความล้าดังกล่าวมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพ และอายุการใช้งานของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก ในการศึกษาความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT นั้นสามารถศึกษาจากงานวิจัยของ Sawyier-Tower ซึ่งงานวิจัยนี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณณนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัย และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีอื่นได้แก่ฐานข้อมูลจาก (i) IEEE (ii) American institute of physics และ (iii) Science Direct เป็นต้น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปรัทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการศึกษาความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกจากงานวิจัยของ Sawyier-Tower ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการค้นคว้าวิจัย และสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัยได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1991	W.Y. Pan, C. F. Yue, and B. A. Tuttle	เสนอหลักฐานของการเกิดของชั้นที่ขาดออกซิเจนที่รอยต่อแผ่นฟิล์มและอิเล็กโทรดในแผ่นฟิล์ม $Pb(Zr_{0.45}Ti_{0.55})O_3$ ที่ทำให้เกิดความล้าด้วยสนามไฟฟ้า ผลการทดลองดังกล่าวบ่งชี้ว่าความล้านั้นเกิดจากการตรึงของผนังโดเมนด้วยช่องว่างออกซิเจน

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1994	W. L. Warren, D. Dimos, B.A. Tuttle, and G.E. Pike	ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT โดยพบว่าความล้ามักจะย้อนกลับได้ กล่าวคือ การให้สนามไฟฟ้า การฉายด้วยแสง UV การอบด้วยอุณหภูมิที่สูง (สูงกว่า T_c) หรือ การรวมกันของทั้งสามอย่างนั้นสามารถทำให้โพลาริเซชันกลับไปที่เกือบเท่ากับสภาวะเริ่มต้น
1994	Q. Jiang E. C. Cross, and C. Wenwu	ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PLZT โดยพบว่า การกลับทิศของโพลาริเซชันจะติดตามมาด้วยการเปลี่ยนสถานะที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้า ความล้าในองค์ประกอบเหล่านี้จะไม่สามารถย้อนกลับได้ และพบรอยแตกจุลภาคในเซรามิกที่ล้า
1996	E. N. Paton, S.A. Mansour, and A. Bement	ศึกษาการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของแผ่นฟิล์มบาง แล้วเปรียบเทียบโพลาริเซชันคงค้างที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ (i) 22°C (ii) 100°C และ (iii) 120°C ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการลดลงของโพลาริเซชันคงค้างจะมีค่าลดลง ส่งผลให้ความล้าที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง
1999	H. Weitzing , G.A. Schneider, J. Steffens, and M. J. Hoffmann	อธิบายถึงลักษณะความล้าทางกลของสารกลุ่มเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยทดสอบให้สนามไฟฟ้าที่ (i) 0.9 (ii) 1.0 และ (iii) 1.5 เท่าของค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้โพลาริเซชันเกิดการกลับทิศทางซึ่งสรุปได้ว่าลักษณะของความล้าที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากปัจจัยสำคัญคือ ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ และสนามไฟฟ้าที่ป้อน
2000	R. Qian, S. Lukasiewicz, and Q. Gao	ศึกษาเกี่ยวกับความล้าจากการเกิดข้อบกพร่องไฟฟ้าของเซรามิก PZT-5 ภายใต้สภาวะโหลดทางไฟฟ้าโดยใช้วงจร Sawyer-Tower โดยในการทดสอบจะใช้สนามไฟฟ้า (i) $431\sin(100\pi t)$ kV/m (ii) $647\sin(100\pi t)$ kV/m และ (iii) $862\sin(100\pi t)$ kV/m พบว่าเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นความล้าจากการเปลี่ยนขั้วจะมีค่าลดลง

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

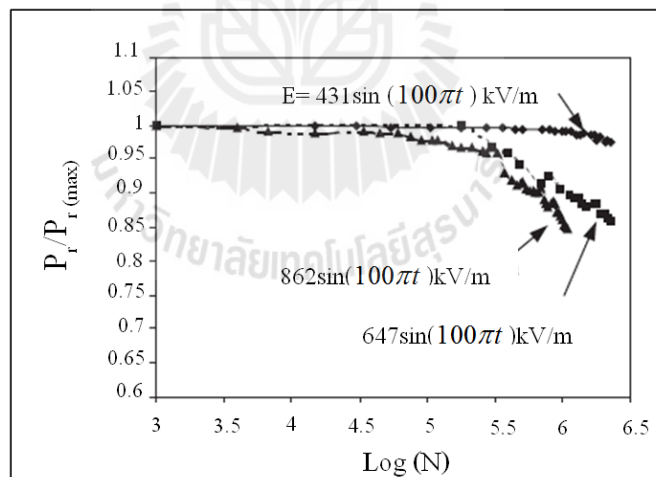
ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2001	B. Wang, K. W. Kwok, C.L. Choy, and K. Y. Tong	ศึกษาการเกิดความล้าของเซรามิก $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ โดยทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ก่อน และหลังการทดสอบแล้วนำมาผลเปรียบเทียบกับระหว่างการใช้ RuO_2 กับ Pt เป็นอิเล็กโทรด พบว่าอิเล็กโทรดแบบออกไซด์ทำหน้าที่เป็นอ่างพักสำหรับช่องว่างออกซิเจน และป้องกันการสะสมของช่องว่างออกซิเจนที่รอยต่อของเซรามิก PZT กับอิเล็กโทรด
2002	J. Chen, M. P. Harmer, and D. M. Smyth	ทำการเปรียบเทียบการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT และ PNZT โดยใช้วงจร Sawyer-Tower ซึ่งในการทดสอบจะใช้สนามไฟฟ้า 430 kV/m ความถี่ 100 Hz พบว่าเซรามิก PZT ที่ถูกเจือด้วยตัวให้คือ Nb จะทำให้ความล้าเกิดขึ้นน้อยกว่าเซรามิก PZT ที่ไม่ถูกเจือ
2002	Y. Wang, K. H. Wong, and C. L. Choy	ศึกษาเกี่ยวกับความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT ที่จำนวนรอบต่าง ๆ โดยในการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบระหว่างความถี่ในช่วง 10 kHz - 20 MHz และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วง 1000 - 8000 พบว่าเมื่อความถี่ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากขึ้นความล้าจะเกิดขึ้นน้อยลง
2006	L. Pintilie, I. Vrejoiu, D. Hesse, and M. Alexe	ศึกษาการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT (20/80) ที่ความถี่ต่าง ๆ ในช่วง 1kHz - 1MHz แรงดัน 5 V โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ Pt และ SrRuO_3 เป็นอิเล็กโทรด พบว่า เมื่อใช้ Pt และ SRO เป็นอิเล็กโทรดส่วนบน ค่าโพลาไรเซชันจะมีการลดลง 60 % และ 10 % จากค่าเริ่มต้นตามลำดับ และจะไม่ปรากฏความล้าเมื่อใช้ SRO เป็นอิเล็กโทรดทั้งบน และล่าง
2009	S. Pojprapai, J. Russell, H. Man, J. Jones, and M. Hoffman	ศึกษาผลของความถี่ที่มีต่อการเกิดความล้าทางไฟฟ้า และการเกิดรอยแตกของเซรามิก PZT โดยจะทดสอบที่ความถี่ (i) 10 Hz (ii) 50 Hz และ (iii) 100 Hz พบว่าเมื่อความถี่มีค่ามากขึ้นความล้าจะเกิดขึ้นน้อยลง และยังพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของรอยแตกจะมีค่าน้อยกว่าความถี่ที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2010	H. C. Nie, X.F. Chen, N.B. Feng, and Y. Gu	ศึกษา และเปรียบเทียบการกลับทิศของโดเมนที่อุณหภูมิ และสนามไฟฟ้าค่าต่าง ๆ พบว่าสนามไฟฟ้านั้นเป็นตัวแปรสำคัญมากกว่าอุณหภูมิ โดยเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอัตราการกลับทิศของโดเมนจะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของกระแสจะทำลายรอยต่อระหว่างเนื้อเซรามิก PZT กับอิเล็กโทรด
2010	A. Sidorkin, L. Nesterenko, G. Bulavina, and S. Ryabtsev	ศึกษาการเสื่อมสภาพ และความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PbTiO_3 และ เซรามิก PZT การศึกษาการเสื่อมสภาพจะวัดค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่ความถี่ในช่วง 1 kHz - 30 MHz และอุณหภูมิในช่วง $20^\circ\text{C} - 650^\circ\text{C}$ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์หุ้มพีแดนซ์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะมีค่ามากขึ้น ส่วนการวัดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วจะใช้ความถี่ 100 kHz โดยเปลี่ยนสนามไฟฟ้า และอุณหภูมิที่ค่าต่าง ๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการลดลงของโพลาริเซชันคงค้างจะมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ในทางตรงกันข้ามเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นอัตราการลดลงของโพลาริเซชันคงค้างจะมีค่ามากขึ้น
2011	S. Pojprapai, H. Simons, A.J. Studer, Z. Luo, and M. Hoffman	ศึกษา และเปรียบเทียบการกลับทิศของโดเมนของฟิล์มบาง $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่อุณหภูมิ (i) 30°C (ii) 125°C และ (iii) 175°C ที่สนามไฟฟ้า 1 kV/mm โดยการใช้เทคนิคนิวตรอน ดิฟแฟรกชัน in situ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดเมนจะสามารถกลับทิศไปตามทิศของสนามไฟฟ้ามากขึ้น และเมื่อศึกษาวงวนฮิสเทอรีซิส พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่า Coercive field จะมีการลดลง ส่วนการอิมตัวของวงวนฮิสเทอรีซิสจะมีค่ามากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ
2011	J. Glaum, T. Granzow, J. Rodel, H. Y. Kleebe and L.A. Schmitt	ศึกษาการเสื่อมสภาพของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ เนื่องจากผลของอุณหภูมิ (i) 50°C (ii) 100°C (iii) 150°C และ (iv) 175°C และสนามไฟฟ้าที่ค่า (i) 2 kV/mm (ii) 3 kV/mm และ (iii) 3.5 kV/mm โดยสนามไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบขั้วเดียว พบว่าความล้า นั้นเกิดจากการรวมกลุ่มกันของประจุที่บริเวณขอบเกรน

จากผลการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ายังมีการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมที่เกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูงอยู่น้อยมาก จากผลการสืบค้นสามารถช่วยให้ผู้วิจัยได้เห็นภาพอย่างกว้างของงานวิจัยดังกล่าว สำหรับเนื้อหาในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของงานวิจัยหลัก ๆ ที่สำคัญ และเกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

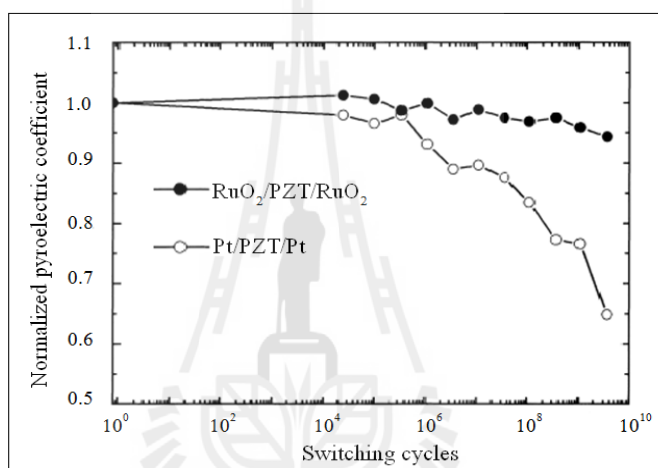
Qian et al. (2000) ได้ศึกษาเกี่ยวกับความล้าจากการเปลี่ยนขั้วทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT ภายใต้สภาวะโหลดทางไฟฟ้าโดยการใช้อุปกรณ์ Sawyer-Tower ศึกษาวงวนฮิสเทอรีซิสที่เปลี่ยนแปลงไป ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชันคงค้าง (P_r) แสดงถึงการสูญเสียสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT ซึ่งในการศึกษาดังกล่าวใช้สนามไฟฟ้า (i) $431\sin(100\pi t)$ kV/m (ii) $647\sin(100\pi t)$ kV/m และ (iii) $862\sin(100\pi t)$ kV/m พบว่าโพลาริเซชันคงค้างจะมีค่าลดลงตามจำนวนรอบของสนามไฟฟ้า โดยเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดความล้าในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกมากขึ้นด้วย และที่สนามไฟฟ้าค่าสูงจะทำให้โพลาริเซชันคงค้างลดลงมากกว่าที่สนามไฟฟ้าค่าต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นความเสียหายจากการกลับทิศของโดเมนจะมีค่ามากขึ้นด้วย โดยผลการศึกษาดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.1



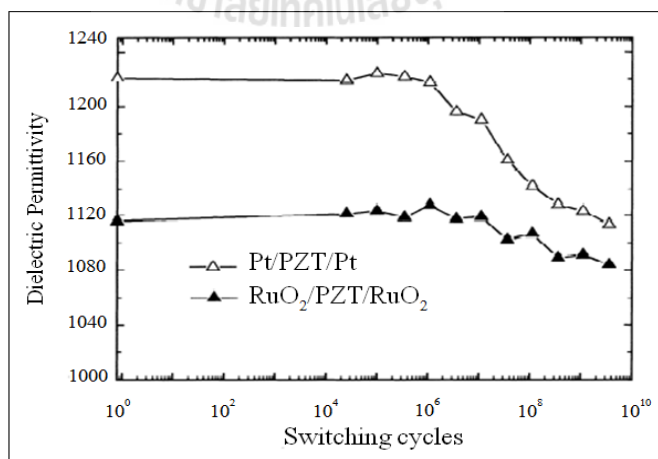
รูปที่ 2.1 ค่าโพลาริเซชันคงค้างของเซรามิก PZT ที่จำนวนรอบของสนามไฟฟ้าค่าต่าง ๆ (Qian et al., 2000)

Wang et al. (2001) ศึกษาการเกิดความล้าของเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ โดยทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ก่อน และหลังการทดสอบแล้วนำมา

เปรียบเทียบกันระหว่างการใช้ RuO_2 กับ Pt เป็นอิเล็กโทรด ผลการศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกจะมิต่ำลงเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น โดย $\text{RuO}_2/\text{PZT}/\text{RuO}_2$ มีค่าลดลงน้อยกว่า $\text{Pt}/\text{PZT}/\text{Pt}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ส่วนค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่ $\text{RuO}_2/\text{PZT}/\text{RuO}_2$ ในช่วงแรกมีค่าน้อยกว่า $\text{Pt}/\text{PZT}/\text{Pt}$ 10 % เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น $\text{Pt}/\text{PZT}/\text{Pt}$ มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับ $\text{RuO}_2/\text{PZT}/\text{RuO}_2$ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งพบว่าอิเล็กโทรดแบบออกไซด์ทำหน้าที่เป็นอ่างพักสำหรับช่องว่างออกซิเจน และป้องกันการสะสมของช่องว่างออกซิเจนที่รอยต่อของเซรามิก PZT กับอิเล็กโทรด

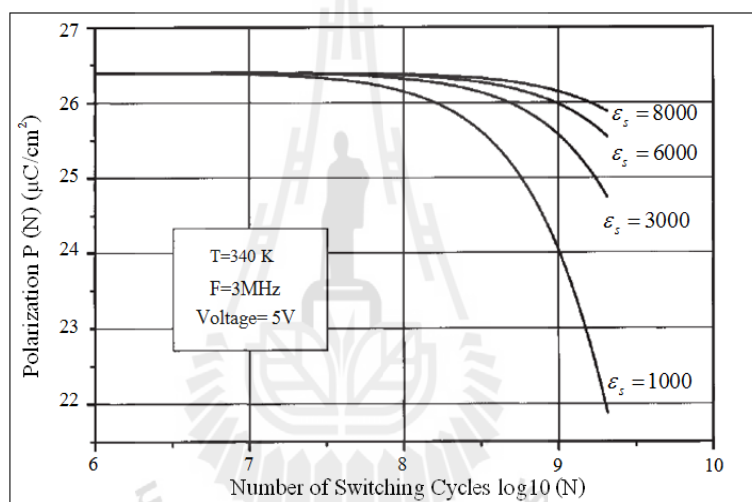


รูปที่ 2.2 สัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกที่จำนวนรอบต่าง ๆ (Wang et al., 2001)



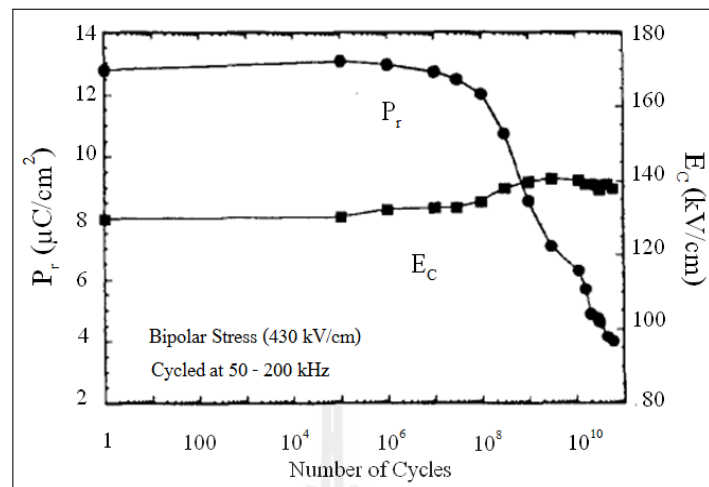
รูปที่ 2.3 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่จำนวนรอบต่าง ๆ (Wang et al., 2001)

Wang et al. (2002) ศึกษาเกี่ยวกับความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT โดยในการทดสอบจะเปรียบเทียบระหว่างความถี่ในช่วง 10 kHz - 20 MHz โดยให้แรงดัน 5 V ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ 2000 อุณหภูมิ 310 K พบว่าที่ความถี่ 10 kHz ความล้ามีค่ามากที่สุด ส่วนในการทดสอบความล้าที่ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ 1000 – 8000 โดยให้แรงดัน 5 V ความถี่ 3 MHz อุณหภูมิ 340 K พบว่าค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น และที่ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ 1000 จะมีความล้าเกิดขึ้นมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความถี่ และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าน้อยลงการเคลื่อนที่ของโดเมนจะมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันคงค้างมีการลดลงตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.4

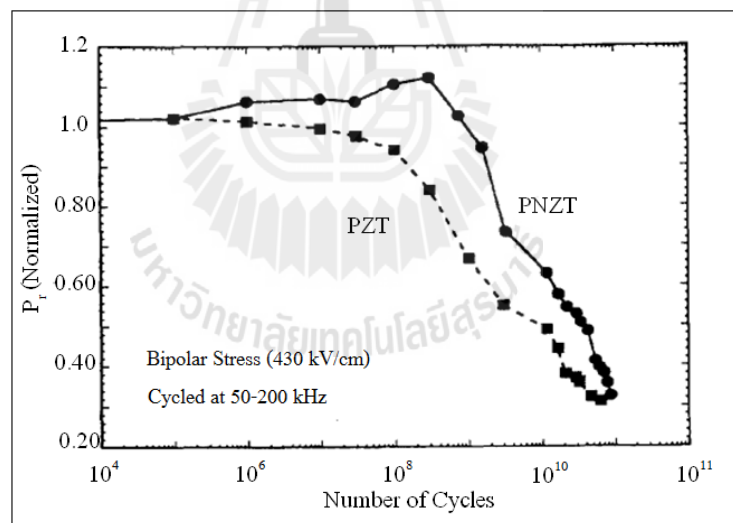


รูปที่ 2.4 โพลาริเซชันคงค้างที่ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ต่าง ๆ (Wang et al., 2002)

Chen et al. (2002) ทำการเปรียบเทียบการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT และ PNZT โดยใช้วงจร Sawyer-Tower ในการทดสอบใช้สนามไฟฟ้า 430 kV/cm ความถี่ 100 Hz จากผลการศึกษาในรูปที่ 2.5 พบว่าโพลาริเซชันคงค้างมีค่าน้อยลงเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นในขณะที่สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการกลับทิศมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพบว่าความล้า นั้นเกิดจากการยึดจับของผนังโดเมน โดยความบกพร่องที่จับกลุ่มกันบริเวณผนังโดเมน และการถูกตรึงของการกลับทิศของโพลาริเซชันจากช่องว่างออกซิเจน และจากผลการศึกษาในรูปที่ 2.6 พบว่าเซรามิก PZT ที่ถูกเจือด้วยตัวให้คือ Nb จะทำให้ความล้าเกิดขึ้นน้อยกว่าเซรามิก PZT ที่ไม่ถูกเจือ เนื่องจากลดการยึดจับของผนังโดเมนโดยความบกพร่องที่จับกลุ่มกันบริเวณผนังโดเมน



รูปที่ 2.5 โพลาริเซชันคงค้าง และสนามไฟฟ้าในการกลับทิศของเซรามิก PZT ที่จำนวนรอบต่างๆ (Chen et al., 2002)



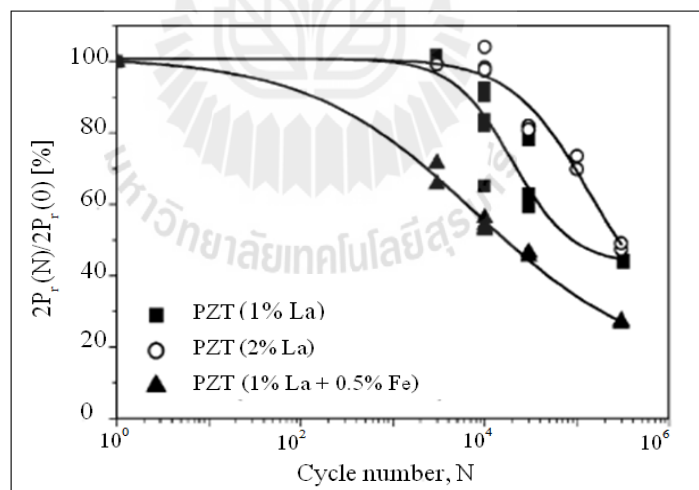
รูปที่ 2.6 โพลาริเซชันคงค้างของเซรามิก PZT กับ PNZT ที่จำนวนรอบต่าง ๆ (Chen et al., 2002)

Wongsanmai et al. (2003) ได้ศึกษาเกี่ยวกับวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิก PZT ด้วยการใช้วงจร Sawyer-Tower เพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของการเกิดโพลาริเซชันคงค้างตามค่าสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ผลการทดลองพบว่าเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้โพลาริเซชันมีค่าเพิ่มขึ้น และยังพบว่าค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจร Sawyer-Tower มีอิทธิพลต่อการ

เปลี่ยนแปลงของการเกิดโพลาไรเซชันด้วย โดยค่าโพลาไรเซชันจะลดลงเมื่อค่าความจุของตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าสนามไฟฟ้า และค่าความจุของตัวเก็บประจุต่างมีความสำคัญต่อสมบัติของวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิก PZT

Pintilie et al. (2006) ศึกษาการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT (20/80) ที่ความถี่ต่าง ๆ ในช่วง 1 kHz – 1 MHz แรงดัน 5 V โดยเปรียบเทียบระหว่างการใส่ Pt และ SRO เป็นอิเล็กโทรด จะเห็นได้ว่าเซรามิก PZT ที่ใส่ Pt เป็นอิเล็กโทรดส่วนบน เมื่อทดสอบความล้าแล้วพบว่าค่าโพลาไรเซชันลดลง 60 % จากค่าเริ่มต้น ส่วนเมื่อใช้ SRO เป็นอิเล็กโทรดค่าโพลาไรเซชันลดลง 10 % จากค่าเริ่มต้น และจะไม่ปรากฏความล้าเมื่อใช้ SRO เป็นอิเล็กโทรดทั้งบน และล่าง

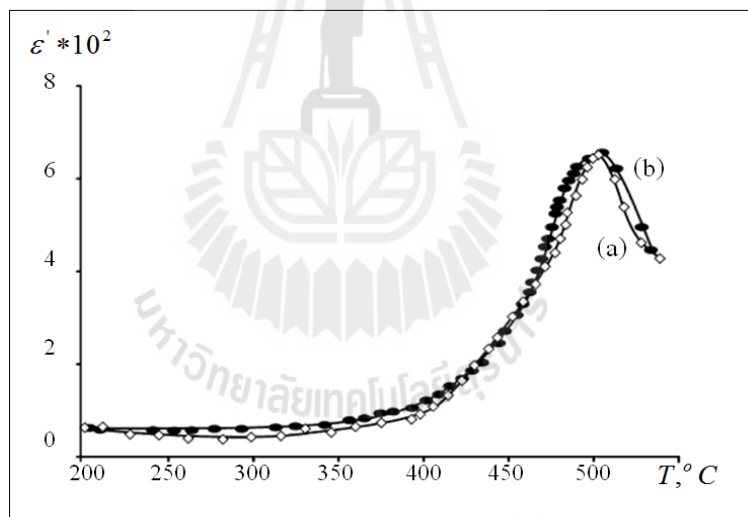
Balke et al. (2007) ศึกษาการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของ (i) เซรามิก PZT (1% La) (ii) เซรามิก PZT (2% La) และ (iii) เซรามิก PZT (1% La+0.5% Fe) ในการศึกษาจะใช้สนามไฟฟ้า 1.05 kV/mm 1.2 kV/mm และ 2 kV/mm ผลการศึกษาพบว่าเซรามิก PZT (1% La + 0.5% Fe) เกิดความล้ามากที่สุด ดังผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 2.7 พบความเสียหายที่รอยต่อของเซรามิก PZT กับอิเล็กโทรดระหว่างการให้สนามไฟฟ้านำไปสู่การสูญเสียโพลาไรเซชันซึ่งปัจจัยสำคัญของความล้าเกิดจากชนิด และปริมาณของสารที่เจือ



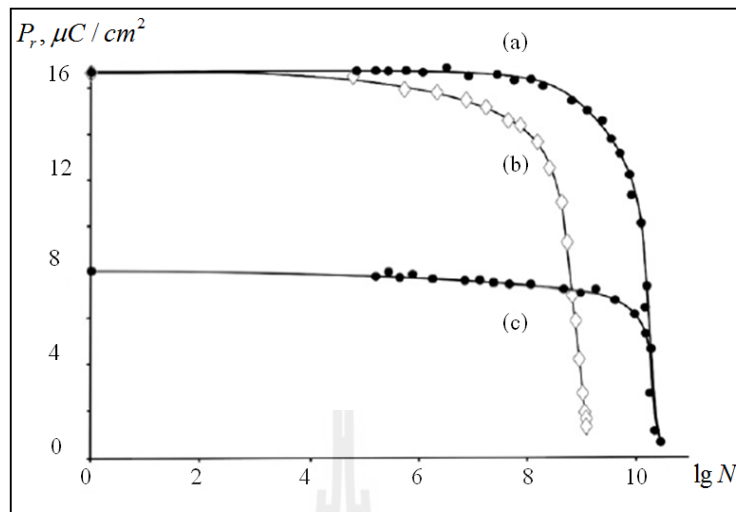
รูปที่ 2.7 โพลาไรเซชันคงค้างของเซรามิก PZT ที่จำนวนรอบต่าง ๆ (Balke et al., 2007)

Sidorkin et al. (2010) ศึกษาการเสื่อมสภาพ และความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PbTiO₃ และ เซรามิก PZT โดยในการศึกษาการเสื่อมสภาพจะวัดค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่ความถี่ในช่วง 1 kHz - 30 MHz และอุณหภูมิในช่วง 20 °C – 650 °C ด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้อมพีแดนซ์ ส่วน

การวัดความถี่จากการเปลี่ยนขั้วจะใช้ความถี่ 100 kHz โดยเปลี่ยนสนามไฟฟ้า และอุณหภูมิที่ค่าต่าง ๆ จากผลการศึกษาในรูปที่ 2.8 พบว่าค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก PbTiO_3 เมื่อเวลาผ่านไป 1 ปีมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่อุณหภูมิ 500°C ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่ามากที่สุด เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนเฟส ผลการศึกษาในรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงค่าโพลาริเซชันคงค้างที่อุณหภูมิ และสนามไฟฟ้าที่ค่าต่าง ๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการลดลงของโพลาริเซชันคงค้างจะมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากสนามไฟฟ้า และอุณหภูมิที่ให้อาจส่งผลให้การตรึงของผนังโดเมนมีค่าลดลง ส่วนเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นอัตราการลดลงของโพลาริเซชันคงค้างจะมีค่ามากกว่าสนามไฟฟ้าที่ต่ำกว่า เนื่องจากเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นความเสียหายจากการกลับทิศของโดเมนจะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากโดเมนบางส่วนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยในเซรามิก PZT ผลการทดลองมีลักษณะเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.8 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของวัสดุ PbTiO_3 โดย (a) วัสดุใหม่ และ (b) วัสดุที่ทิ้งไว้ 1 ปี (Sidorkin et al., 2010)



รูปที่ 2.9 โพลาริเซชันคงค้างของวัสดุ PbTiO_3 (a) 480°C , $E = 70 \text{ kV/cm}$; (b) 480°C , $E = 140 \text{ kV/cm}$; (c) 490°C , $E = 70 \text{ kV/cm}$ (Sidorkin et al., 2010)

2.3 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้นำเสนอวรรณกรรม และการวิจัยในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ โดยค้นคว้าจากฐานข้อมูลของ (i) IEEE (ii) American institute of physics (iii) letters Science Direct และอื่น ๆ ทำให้ทราบถึงผลการดำเนินงานวิจัย จุดประสงค์ แนวทางการวิจัยของผู้วิจัยอื่น ๆ ซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป จากการสืบค้นปริทัศน์ และวรรณกรรมเห็นได้ชัดว่าเซรามิก PZT กำลังเป็นที่สนใจในงานวิจัยเกี่ยวกับการเกิดความล้มจากการเปลี่ยนขั้วที่สภาวะโหลดต่าง ๆ ทางไฟฟ้า เพราะปัจจุบันเซรามิก PZT ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากในการนำเซรามิก PZT ไปประยุกต์ใช้งานจริงนั้นสมบัติของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงตามสภาวะที่ค่าสนามไฟฟ้า ความถี่ รวมทั้งอุณหภูมิที่สูงนำไปสู่การเกิดความล้มจากการเปลี่ยนขั้ว ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังมีการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการเกิดความล้มจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิสูงอยู่น้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เริ่มทำการวิจัยขึ้นเพื่อทำการทดสอบการเกิดความล้มจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิสูง โดยจะอธิบายในรายละเอียดต่าง ๆ ในบทต่อไป

บทที่ 3

ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ให้ความสนใจกับวัสดุเซรามิกไพโซอิเล็กทริกที่นำไปประยุกต์ใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น เซนเซอร์ แอคชูเอเตอร์ และทรานสดิวเซอร์ เป็นต้น ตัวอย่างของวัสดุเซรามิกที่นำมาใช้ในการทดลองนี้คือเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต หรือ เซรามิก PZT ซึ่งเป็นสารที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูง (ϵ_r) และสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (d) ที่ดี สำหรับการประยุกต์ใช้งานในรูปแบบของเซนเซอร์ และแอคชูเอเตอร์นั้น เซรามิก PZT มักถูกนำไปใช้งานภายใต้สภาวะโหลดเชิงกล และทางไฟฟ้าแบบเป็นรอบ และอาจถูกใช้งานในสภาวะอุณหภูมิต่าง ๆ ภายใต้การทำงานในสภาวะดังกล่าวเป็นเวลายาวนานอาจนำไปสู่การเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบอุปกรณ์ และเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน มีงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นถึงการเกิดความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT ที่สภาวะโหลดต่าง ๆ (Wang et al., 2002; Pojprapai et al., 2007; Lou et al., 2010) ซึ่งผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดของโหลดเชิงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดความล้าได้เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความล้ายังมีอยู่เป็นจำนวนน้อย ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงสนใจศึกษาการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT ที่สภาวะโหลด ต่าง ๆ ทางไฟฟ้าโดยมีอุณหภูมิมาเกี่ยวข้องด้วย สำหรับการวัดคุณสมบัติของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้น โดยทั่วไปแล้วสามารถพิจารณาได้จากลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิสที่วัดได้จากเซรามิก PZT

ในบทนี้จะกล่าวถึงอิเล็กโตรเซรามิกส์ซึ่งเป็นเซรามิกในกลุ่มที่ใช้สมบัติทางไฟฟ้าซึ่งก็คือเซรามิกชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก รวมไปถึงประวัติความเป็นมา และคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก อาทิเช่น การค้นพบเซรามิกชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก ประวัติโดยสังเขปของวัสดุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก คุณสมบัติของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต การทำให้เกิดโพลาไรเซชัน โดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก วงวนฮิสเทอรีซิสเฟอร์โรอิเล็กทริก วงจร Sawyer-Tower ความล้าและสาเหตุการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจถึงวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต ได้ดียิ่งขึ้น รวมทั้งสามารถสร้างระบบทดสอบการเกิดความล้า และการทดสอบเบื้องต้นที่เหมาะสมกับงานวิจัยมากที่สุด

3.1 อิเล็กโทรเซรามิกส์

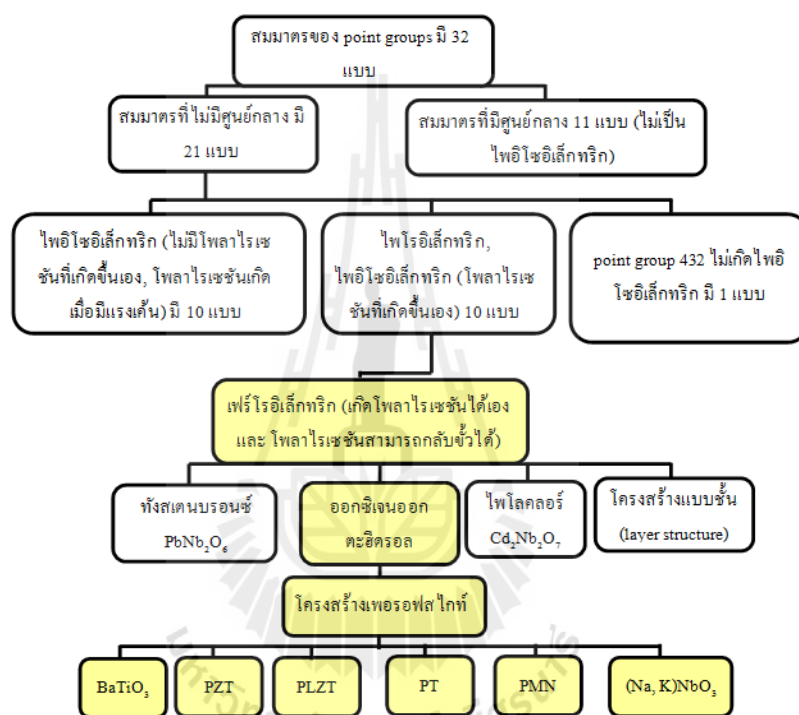
อิเล็กโทรเซรามิกส์ (Electroceramics) เป็นเซรามิกในกลุ่มที่ใช้สมบัติทางไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ แม่เหล็ก และแสงในการประยุกต์ใช้งานเป็นหลัก ตัวอย่างเช่น เซรามิกไดอิเล็กทริก (Dielectric ceramics) เช่น แบเรียมไทเทเนต (Barium titanate : BaTiO_3) สำหรับใช้ทำตัวเก็บประจุไฟฟ้า เซรามิกพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric ceramics) เป็นเซรามิกที่สามารถเปลี่ยนรูปพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เช่น เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (Lead zirconate titanate : $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$) ใช้ทำทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ตัวจุดเตาแก๊ส (Gas ignitor) มอเตอร์อัลตราโซนิค (Ultrasonic motor) และเซรามิกแม่เหล็ก (Magnetic ceramics) เช่น เฟอร์ไรต์ (Ferrite: Fe_3O_4) ใช้เป็นวัสดุบันทึกข้อมูล เป็นต้น อิเล็กโทรเซรามิกส์อาจมีรูปร่างได้หลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เช่น ใช้ในลักษณะเป็นชิ้นส่วนตัน (Bulk) ใช้เคลือบบนผิววัสดุชนิดอื่น (Coating) ฟิล์มหนา (Thick film) และฟิล์มบาง (Thin film) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 อิเล็กโทรเซรามิกส์ทางการค้าในรูปลักษณะต่าง ๆ (Haertling, 1999)

การศึกษาสมบัติอิเล็กโทรเซรามิกส์นั้นก่อนอื่นต้องเข้าใจระบบผลึก ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่กล่าวมาแล้ว จากรูปที่ 3.2 ผลึกของวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พวกที่มีสมมาตรศูนย์กลาง (Centro-symmetric) และพวกที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง (Non Centro-symmetric) จะเห็นได้ว่าสมมาตรของผลึกที่มีสมมาตรที่ไม่มีศูนย์กลางมีอยู่ทั้งหมด 21 สมมาตร จาก 32 สมมาตร ถึงแม้ว่า 21 สมมาตรดังกล่าวอยู่ในเงื่อนไขที่สามารถแสดงคุณสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ แต่มีอยู่หนึ่งสมมาตรคือ point group 432 ที่ไม่สามารถแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ ดังนั้นจึงเหลือสมมาตรที่ไม่มีศูนย์กลางอยู่เพียง 20 แบบ เท่านั้นที่สามารถแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ และภายใน 20 แบบนี้มี 10 แบบ ไม่มีโพลาริเซชันแบบถาวรหรือโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง (Spontaneous polarization) ที่เหลืออีก 10 แบบ เป็นสมมาตรที่มีโพลาริเซชันแบบ

ถาวรหรือโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง (Spontaneous polarization) โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเฟสของผลึก เมื่ออุณหภูมิลดลงผ่านอุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) ดังนั้นผลึกที่มีสมมาตรในกลุ่มนี้สามารถแสดงคุณสมบัติไพโซอิเล็กทริก ไพโรอิเล็กทริก นอกจากนั้นโพลาริเซชันของผลึกบางตัวในกลุ่มนี้สามารถกลับทิศทางได้โดยป้อนสนามไฟฟ้าให้กับผลึก ผลึกที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้เรียกว่า ผลึกที่มีคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric crystal)



รูป 3.2 การจัดแบ่งกลุ่มของวัสดุพอลิอิเล็กโตรเซรามิกส์ด้วยการใช้สมมาตรของวัสดุ
[ดัดแปลงมาจาก (Haertling, 1999; Kao, 2004)]

3.2 วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

หลังจากมีการค้นพบเซรามิกชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริกขึ้นเป็นครั้งแรกในวัสดุผลึกเดี่ยวที่เรียกว่า Rochelle salt ในปี ค.ศ. 1920 ทำให้นักวิทยาศาสตร์จำนวนมากหันมาศึกษาค้นคว้า และทำการวิจัยเกี่ยวกับสารตัวนี้เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม Rochelle salt ก็มีข้อเสียอยู่ที่เป็นวัสดุที่ละลายน้ำได้ง่ายทำให้ไม่นิยมนำมาใช้ทดลองในงานวิจัย จนกระทั่งราวปี ค.ศ. 1940 ได้มีการค้นพบเซรามิกที่สามารถแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกได้เป็นครั้งแรก นั่นคือ แบเรียมไทเทเนต (BaTiO₃) ในเวลาต่อมาเนื่องจากมีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีใหม่ ๆ อย่างต่อเนื่อง ทำให้มีอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

กับวัสดุที่มีสมบัติทางเพอร์โรอิเล็กทริกเกิดขึ้นมากมาย เช่น ตัวเก็บประจุที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงสูง ทรานสดิวเซอร์ของอัลตราโซนิก โซนาร์ที่ใช้ไพโซอิเล็กทริก และตัวกรองสัญญาณ ต่อมาแบเรียมไทเทเนต (BaTiO_3) เริ่มถูกแทนที่ด้วยสารประกอบเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) สำหรับการใช้งานด้านทรานสดิวเตอร์เนื่องจาก

- มีค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อพลังงานกล-ไฟฟ้ามากกว่า BaTiO_3
- มีค่าอุณหภูมิคูรีสูงกว่า ทำให้ใช้งานหรือทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าเดิม
- สามารถทำการเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้าง่าย
- ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงมีช่วงกว้าง
- ช่วงอุณหภูมิการเผาอบผิวกต่ำกว่า BaTiO_3
- รูปแบบของระบบสารละลายของแข็ง (Solid solution) มีมากมายจึงทำให้มีสมบัติที่หลากหลาย

หลากหลาย

3.2.1 การค้นพบเซรามิกชนิดเพอร์โรอิเล็กทริก

ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 (กลางทศวรรษ 1940) มีความต้องการใช้งานตัวเก็บประจุที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงมากขึ้นจากที่มีใช้กันอยู่ในขณะนั้น ซึ่งเป็นวัสดุประเภทสเตียไทต์ (Steatite) ไมก้า (Mica) ไททาเนีย (TiO_2) แมกนีเซียมไทเทเนต (MgTiO_3) และแคลเซียมไทเทเนต (CaTiO_3) ซึ่งมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงเท่ากับ 100 หรือน้อยกว่านั้น จากการศึกษาของ Thurnauer Wainer และ Solomon (Coffeen, 1975) มีผลยืนยันว่าแบเรียมไทเทเนต (BaTiO_3) มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงมากกว่า 1100 ในช่วงปลายสงครามโลกครั้งที่ 2 เริ่มมีการตีพิมพ์การวิจัยในเรื่องเหล่านี้ ออกสู่สาธารณะมากขึ้น และหลายหน่วยงานในประเทศต่าง ๆ ให้ความสนใจศึกษา เช่น ในสหรัฐอเมริกา อังกฤษ รัสเซีย และญี่ปุ่น

จากนั้นไม่นานมีรายงานการศึกษาของ Wul จากรัสเซีย (Wul and Goldman, 1945) และกลุ่มของ Hipple (Chesley et al., 1946) จาก Massachusetts Institute of Technology (MIT) พบว่าแบเรียมไทเทเนตมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูง เพราะมีคุณสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก ส่วน Gray (Gray, 1949) พบว่าการให้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกสามารถจัดเรียงโดเมนในเกรนทำให้ได้เซรามิกที่มีสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก และไพโซอิเล็กทริกได้ การจัดเรียงตัวด้วยกระแสไฟฟ้าหรือเรียกว่าการทำขั้ว (Poling) เป็นกุญแจสำคัญที่เปลี่ยนเซรามิกที่เฉื่อยไปเป็นวัสดุที่ตอบสนองต่อไฟฟ้าเชิงกล (Electromechanical) งานวิจัยเหล่านี้เป็นการค้นพบที่มีคุณค่ามาก เพราะเปลี่ยนแนวความคิดที่ว่าเซรามิกไม่สามารถเป็นไพโซอิเล็กทริกเนื่องจากผลึกที่ผ่านการเผาอบผลึกมักมีการจัดเรียงตัวแบบไม่มีทิศทาง และมีผลให้เกิดโพลาไรเซชันโดยรวมมีค่าเป็นศูนย์ เพราะหากเป็นวัสดุที่เป็นเพอร์

โรอีเล็กทริกแล้วสามารถเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับการจัดเรียงตัวของแม่เหล็กในวัสดุแม่เหล็กถาวร

อาจกล่าวได้ว่ามีเหตุการณ์พื้นฐานสามขั้นตอนที่ทำให้เกิดความรู้ และความเข้าใจปรากฏการณ์ไพโซอีเล็กทริก และเฟร์โรอีเล็กทริกคือ

- การค้นพบว่าแบเรียมไทเทเนตมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูง
- การค้นพบว่าแบเรียมไทเทเนตมีคุณสมบัติเฟร์โรอีเล็กทริกซึ่งทำให้มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูง
- การค้นพบการให้กระแสไฟฟ้าในการโพลทำให้สามารถจัดเรียงไดโพลของผลึกหรือ โดเมนภายในเซรามิก และทำให้มีคุณสมบัติคล้ายผลึกเดี่ยว

3.2.2 ประวัติโดยสังเขปของวัสดุชนิดเฟร์โรอีเล็กทริก

- ช่วงเวลาตั้งแต่ต้นปี ค.ศ. 1800 ถึง 1999 มีลำดับเหตุการณ์ที่สำคัญในประวัติศาสตร์การค้นพบปรากฏการณ์เฟร์โรอีเล็กทริกดังนี้
- กำเนิดของเซรามิกชนิดเฟร์โรอีเล็กทริกในปี ค.ศ. 1940
- การพัฒนาเซรามิกชนิดไพโซอีเล็กทริกชนิดเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตกลางปี ค.ศ. 1950
- การวิจัย และพัฒนาเซรามิกโปรงแสงชนิดเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไทเทเนตปลายปี ค.ศ. 1960
- การใช้เฟร์โรอีเล็กทริกคอมโพสิท (Ferroelectric composite) ปลายปี ค.ศ. 1970
- การพัฒนาเซรามิกรีแลกเซอร์ (Relaxor) ชนิดเลดแมกนีเซียมไนโอเบต (Lead magnesium niobate) และการใช้เทคนิคโซล-เจล (Sol-gel process) ในการทำฟิล์มเฟร์โรอีเล็กทริกในปี ค.ศ. 1980
- มีการนำไปประยุกต์ใช้ใน strain-amplified actuator ต้นปี ค.ศ. 1990
- การขึ้นรูปฟิล์มเฟร์โรอีเล็กทริกบนแผ่นซิลิโคน กลางปี ค.ศ. 1990

3.2.3 คุณลักษณะของวัสดุเฟร์โรอีเล็กทริก

วัสดุเฟร์โรอีเล็กทริกเป็นวัสดุที่มีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองในช่วงเวลาของการเปลี่ยนเฟสทำให้วัสดุมีขั้วอยู่ในตัวเอง โดยโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองนี้สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้ตามทิศของสนามไฟฟ้าที่ให้แก่วัสดุได้ เรียกการเปลี่ยนทิศทางของโพลาริเซชันว่าการสลับเปลี่ยนขั้ว (Switching) วัสดุเฟร์โรอีเล็กทริกเป็นกลุ่มย่อยของวัสดุกลุ่มไพโซอีเล็กทริก ซึ่งเป็น

วัสดุที่ให้กระแสไฟฟ้าออกมาเมื่อได้รับแรงเชิงกล หรือ สามารถเปลี่ยนขนาดเมื่อได้รับสนามไฟฟ้าจากภายนอก ตัวอย่างวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก เช่น แบเรียมไทเทเนต เลดแมกนีเซียมไนโอเบต เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไทเทเนต เป็นต้น (Xu,1991) วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกส่วนมากจะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากสภาพไม่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก (หรือพาราอิเล็กทริก) ซึ่งก็คือสมบัติของสารไดอิเล็กทริกแบบปกติที่อุณหภูมิสูงไปสู่สภาพเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้ สมมาตรของโครงสร้างในสถานะเฟอร์โรอิเล็กทริกจะต่ำกว่าสมมาตรของสถานะพาราอิเล็กทริกเสมอ อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสถานะจากพาราอิเล็กทริกมาเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก (และในทางกลับกัน) นั้นเรียกว่า อุณหภูมิคูรี (Curie point: T_c)

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นมีความค่าสภาพยอมที่สูงมาก โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของอุณหภูมิ และความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป สภาพยอมสัมพัทธ์จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดคูรี และจากนั้นจะลดลงมาเรื่อย ๆ เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นไปอีก โดยเป็นไปตามกฎคูรี-ไวสส์ (Curie-weiss law)

$$\epsilon_r = \frac{A}{T - \theta_c} \quad (3.1)$$

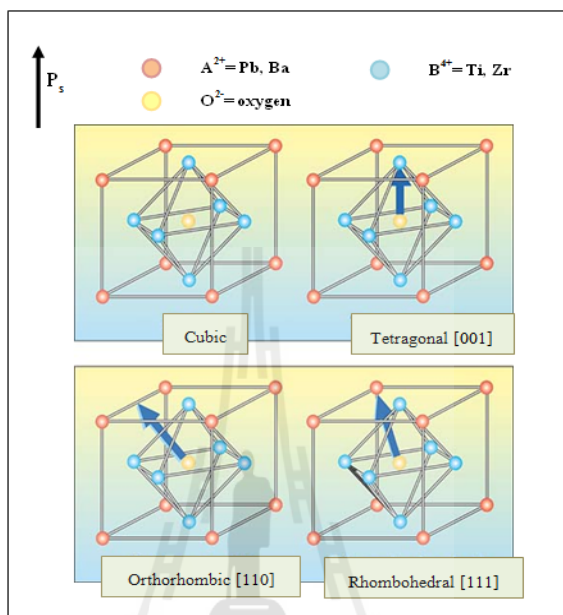
โดยที่ A คือ ค่าคงตัวของวัสดุที่พิจารณา

θ_c คือ เป็นอุณหภูมิที่อยู่ใกล้ ๆ กับจุดคูรี T_c

3.2.4 คุณสมบัติของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต เป็นสารละลายของแข็งของ PbZrO_3 - PbTiO_3 เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต ($\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$) โดยเป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติ (Normal ferroelectric) หรือที่เรียกอย่างย่อว่า PZT ในกรณีที่ $\text{Zr}:\text{Ti} = 0.52:0.48$ จะมีอุณหภูมิคูรีประมาณ 390°C มีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite structure) มีสูตรทั่วไปคือ ABO_3 เป็นวัสดุที่แสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอม A และอะตอม B แบบออกไซด์ที่ซับซ้อน (Complex oxides) โดยเป็นการรวมกันระหว่างแคตไอออน (Cation) และแอนไอออน (Anion) มีโครงสร้างลูกบาศก์ (Cubic) ซึ่งไอออน Ti^{4+} และ Zr^{4+} จะแบ่งกันอยู่ ณ ตำแหน่ง B-site ของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ โดยที่ B-site อยู่ตรงกลางหน่วยเซลล์ A-site เป็นตำแหน่งที่อยู่มุมของหน่วยเซลล์ดังรูปที่ 3.3 เซรามิก PZT จะมีอะตอมของตะกั่วอยู่ที่มุมทั้ง 8 ของลูกบาศก์ อะตอมของออกซิเจนอยู่กึ่งกลางของแต่ละหน้าทั้ง 6 ด้าน และมีอะตอมของไทเทเนียม และ

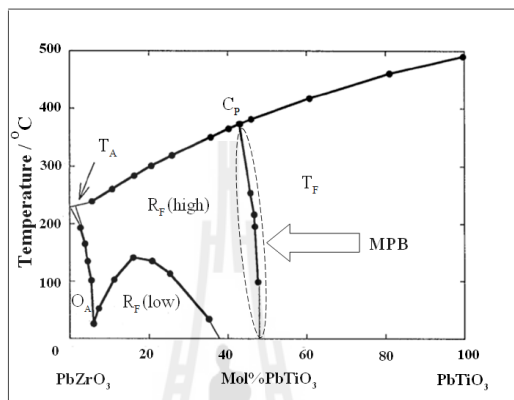
เซอร์โคเนียมอยู่กลางลูกบาศก์โดยเกาะกันกับออกซิเจนรอบ ๆ แบบออกตะฮีดรอลของ TiO_6 หรือ ZrO_6



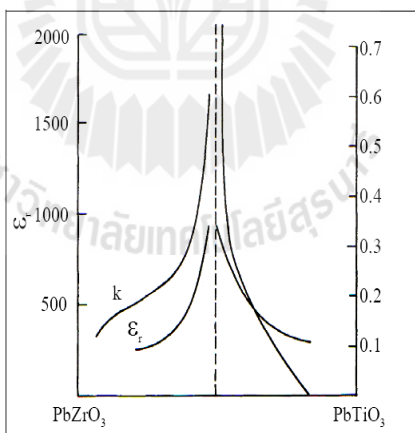
รูปที่ 3.3 หน่วยเซลล์ (Unit cell) โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ ABO_3 (APC International, 2002)

ณ อุณหภูมิสูงเซรามิก PZT มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์แบบคิวบิก (Cubic) เป็นเฟสพาราอิเล็กทริก โดยเฟสดังกล่าวนี้อาจไม่มีคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก และเมื่อมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า อุณหภูมิคูรี โครงสร้างคิวบิกจะเปลี่ยนไปเป็นเทตระโกนอลหรือออร์ทอโรมบิก ซึ่งส่งผลทำให้พาราอิเล็กทริกเฟสเปลี่ยนเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกเฟส เมื่อพิจารณาทิศทางของโพลาริเซชันในหน่วยเซลล์ เทตระโกนอลจะมีการเกิดโพลาริเซชันในทิศทาง $[100]$ และสำหรับหน่วยเซลล์รอมโบฮีดรอลจะมีการเกิดโพลาริเซชันไปในทิศ $[111]$ จากเฟสไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.4 เมื่อพิจารณา ณ อัตราส่วน Zr/Ti เท่ากับ 52/48 จะเกิดขึ้นใกล้กับบริเวณ Morphotropic phase boundary (MPB) ซึ่งสารที่บริเวณนี้จะแสดงสมบัติของเฟอร์โรอิเล็กทริกที่เด่นชัดที่สุด เนื่องจากมีโครงสร้าง 2 ชนิดในสารคือเทตระโกนอล และรอมโบฮีดรอลที่ตำแหน่งอุณหภูมิห้อง ณ บริเวณขอบเขต MPB มีการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริก รอมโบฮีดรอลที่อุณหภูมิสูง (Ferroelectric rhombohedral structure, FR(HT)) ไปเป็นเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริก รอมโบฮีดรอลที่อุณหภูมิต่ำ (Ferroelectric rhombohedral structure, FR(LT)) โดยทั้ง 2 เฟสนี้มีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองตามทิศ $[111]$ ส่งผลให้วัสดุเซรามิก PZT ณ ส่วนผสม MPB จะแสดงสมบัติโพโซอิเล็กทริกและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

ที่ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยอาจเนื่องมาจาก (1) การเกิดส่วนผสมของสองเฟส (2) ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าสูงสุดตรง MPB (3) ทิศทางของโพลาริเซชันที่มีปริมาณมากในบริเวณ MPB (4) ค่าอนุโมททางกล (Mechanical compliance) สูงสุดตรงบริเวณขอบจึงมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของโดเมนได้มากที่สุดโดยไม่เกิดการแตก (Crack) (Cao and Cross, 1993)



รูปที่ 3.4 เฟสไดอะแกรมของระบบ PbZrO_3 - PbTiO_3 (Jaffe et al., 1971)



รูปที่ 3.5 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกบริเวณ Morphotropic phase Boundary (Moulson and Herbert, 2003)

เนื่องจากเซรามิก PZT เป็นวัสดุที่สามารถแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ดี มีค่าสัมประสิทธิ์ทางไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant: d_{33}) ที่สูง และมีอุณหภูมิคูรีที่สูงจึงสามารถนำมาใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถจัดเรียงขั้วทางไฟฟ้า (Poling) ได้ง่าย

และมีโพลาไรเซชันคงค้าง (Remanent polarization, P_r) สูงอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity: ϵ) ที่สูงในช่วงอุณหภูมิที่กว้างจึงทำให้เซรามิก PZT นี้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในการนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ

สมบัติโพธิ์โซอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่ใกล้ชิดขอบเขตเฟสเทอร์โกเนล/รอมโบอีดรอล สามารถทำให้เหมาะสมในการประยุกต์ในแต่ละประเภทของโพธิ์โซอิเล็กทริก โดยการปรับปรุงส่วนผสม เซรามิก PZT สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แบบ Soft และ แบบ Hard เซรามิก โดยแบบ Soft เซรามิกเกิดจากการแทนที่อะตอมบางอะตอมในสารเฟอร์โรอิเล็กทริกด้วยอะตอมจำพวกที่ให้อิออน (Donor) หรือ สารเจือที่มีจำนวนประจุมากกว่าไอออนที่ถูกแทนที่ซึ่งจะต้องมีการชดเชยด้วยตำแหน่งว่างของแคตไอออน ส่วนแบบ Hard เซรามิกเกิดจากการแทนที่อะตอมในสารตั้งต้นด้วยอะตอมจำพวกที่รับ (Acceptor) หรือ การแทนที่ด้วยสารเจือที่มีประจุน้อยกว่าไอออนที่ถูกแทนที่ และการชดเชยประจุด้วยการใช้ช่องว่างออกซิเจน เช่น การแทนที่อะตอมของ Zr^{4+} หรือ Ti^{4+} ใน $Pb(Zr^{4+}Ti^{4+})O_3$ ด้วย Nb^{5+} จะได้แบบ Soft เซรามิก หรือ การแทนที่อะตอม Zr^{4+} หรือ Ti^{4+} ใน $Pb(Zr^{4+}Ti^{4+})O_3$ ด้วย Mn^{2+} จะได้แบบ Hard เซรามิก โดยทั่วไปแล้วตำแหน่งว่างของแคตไอออนจะเคลื่อนที่ได้ยากกว่าตำแหน่งว่างของออกซิเจน ทั้งนี้เนื่องจากไอออนของออกซิเจนจะมีตำแหน่งในแลตทิซที่ต่อเนื่องทำให้การเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างไอออนกับตำแหน่งว่างง่ายขึ้นซึ่งเปรียบเสมือนว่าตำแหน่งว่างของออกซิเจนนั้นเคลื่อนที่ได้ง่าย (สุธรรม ศรีหล่มสัก, 2551)

การเติมสารเจือตัวให้ลงในเซรามิก PZT ทำให้เกิดสถานะที่มีประจุบวกเกินวัสดุ มักจะเกิดสมดุลประจุโดยการเกิดแคตไอออนส่งผลให้ผนังโดเมนเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น โดเมนเกิดการจัดเรียงตัวได้ดียิ่งขึ้นเมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ดังนั้นเซรามิกแบบ Soft PZT จึงมักจะมีค่าสัมประสิทธิ์โพธิ์โซอิเล็กทริก ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric dissipation factor : $\tan \delta$) ค่าความยืดหยุ่น และค่าสัมประสิทธิ์การคู่ควบ (Coefficient coupling factor: k) ที่มีค่าสูง ทำให้เหมาะสมที่จะใช้ในการแปลงการสั่นทางกลไปเป็นการสั่นทางไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 3.1 แต่วัสดุพวกนี้มักจะถูกทำลายด้วยไฟฟ้าได้ง่าย มีการนำไฟฟ้า และค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality factors : Q_e) ที่ต่ำ เนื่องจากเซรามิก Soft PZT มีตัวแปรการสูญเสียมากกว่า (วงวนฮิสเทอรีซิสใหญ่) จึงไม่ค่อยถูกนำไปใช้งานที่ต้องใช้ความถี่ และสนามไฟฟ้าสูง เช่น ตัวกรองคลื่น (Wave filters) เพราะจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน และมีความร้อนสูง ดังนั้นเซรามิกแบบ Soft PZT จึงมักนำไปใช้งานเป็นเซนเซอร์

การเติมสารเจือตัวรับเข้าไปในเนื้อของเซรามิก PZT จะทำให้เกิดสภาพขาดบวก ดังนั้นจึงต้องสมดุลประจุโดยเกิดช่องว่างออกซิเจนส่งผลให้การเคลื่อนที่ของผนังโดเมนจะถูกจำกัด ทำให้ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ค่าการสูญเสียทางไฟฟ้า และทางกลลดลง ส่วนค่าสนามไฟฟ้าลบถ่วง

(Coercive field: E_c) และค่าตัวประกอบคุณภาพเชิงกล (Mechanical Quality Factors: Q_m) จะมีค่าสูงขึ้น การเจือด้วยตัวรับนั้นส่งผลทำให้การนำไฟฟ้าของเซรามิก PZT เพิ่มขึ้น การทำให้มีขั้ว และทำลายขั้ว (Depoling) ทำได้ยากกว่าเซรามิกแบบ Soft PZT ส่วนใหญ่แล้วพวกเซรามิกแบบ Hard PZT ถูกนำไปใช้งานในด้านที่ต้องใช้แรงดันไฟฟ้า และแรงทางกลที่สูง (Xu, 1991)

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบสมบัติของวัสดุแบบ Soft เซรามิก และ วัสดุแบบ Hard เซรามิก (APC International, 2002)

คุณสมบัติ	วัสดุ Soft เซรามิก	วัสดุ Hard เซรามิก
ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (d_{33})	ใหญ่	เล็ก
ค่าสภาพยอม (ϵ)	สูง	ต่ำ
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูง (ϵ_r)	สูง	ต่ำ
ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$)	สูง	ต่ำ
แฟกเตอร์คู่ควบเชิงกลไฟฟ้า (k_p)	ใหญ่	เล็ก
สภาพต้านทานทางไฟฟ้า (ρ)	สูงมาก	ต่ำ
แฟกเตอร์คุณภาพเชิงกล (Q_m)	ต่ำ	สูง
สนามไฟฟ้าลบกลับ (E_c)	ต่ำ	สูง
โพลาไรเซชัน / ดีโพลาไรเซชัน	ง่าย	ยากมาก

โครงสร้างจุลภาคของเซรามิกทั้งแบบ Soft เซรามิก และ แบบ Hard เซรามิกได้ถูกค้นคว้าปรับปรุงอย่างมากเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการโดยวัสดุแบบ Hard เซรามิกมีขนาดเกรนประมาณ $2 \mu m$ ขณะที่วัสดุแบบ Soft เซรามิกมีขนาดเกรนประมาณ $5 \mu m$ ปัจจุบันวัสดุเซรามิก PZT ที่นิยมใช้ในเชิงการค้าและอุตสาหกรรมมีดังนี้

1. PZT-4 มีชื่อเรียกอีกอย่างว่าเซรามิกแบบ Hard PZT ซึ่งทำขึ้นโดยการเติมสารเจือปนเซรามิก PZT ด้วย Sr มีสูตรเคมีว่า $(Pb_{0.94}Sr_{0.06})(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O_3$ เซรามิก PZT ชนิดนี้มีค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำ และทนทานต่อการทำลายขั้วได้สูง ถึงแม้จะถูกกระทำด้วยแรงทางกลที่สูง ดังนั้นจึงมักจะนำเซรามิก PZT ชนิดนี้ไปใช้ทำทรานสดิวเซอร์สำหรับเรือดำน้ำที่อยู่ใต้น้ำลึก ๆ และใช้ทำเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า เช่น ที่จุดเตาแก๊ส

2. PZT-5A เป็นเซรามิกแบบ Soft PZT มีสูตรทางเคมี $(Pb_{0.988}(Ti_{0.48}Zr_{0.52})_{0.976}Nb_{0.024})O_3$ วัสดุชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ดี คือ

- สภาพไวสูง (High sensitivity)

- คุณสมบัติไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามเวลา (High time stability)

- มีสภาพต้านทานทางไฟฟ้าดี ดังนั้นจึงมักถูกใช้ทำไฮโดรโฟน

3. PZT-5H มีสภาพไว และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงกว่า PZT-5A มี T_c ต่ำจึงถูกใช้งานที่อุณหภูมิไม่สูง และไม่ค่อยทนอุณหภูมิสูง

4. PZT-8 มีคุณสมบัติคล้าย ๆ PZT-4 แต่มีค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำกว่ามาก และทนทานต่อการทำลายซ้ำมากกว่า นอกจากนี้ PZT-8 ยังมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูง และค่าสัมประสิทธิ์การคู่ควบที่ต่ำกว่า PZT-4

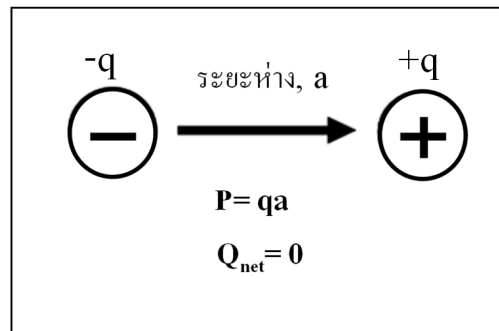
สมบัติของเซรามิก PZT ทั้งแบบ Soft และ แบบ Hard ถูกเปรียบเทียบกันในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของเซรามิก PZT ที่ขายในท้องตลาด (เชดส์คัลล์ แซลลี่, 2007)

คุณสมบัติ	PZT-5H (Soft)	PZT-4 (Hard)
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r)	3400	1300
ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$)	0.02	0.004
อุณหภูมิคูรี (T_c)	193	328
ค่าคงที่ไพโซอิเล็กตริก (pC / N)		
d_{33}	593	289
d_{31}	-274	-123
แฟกเตอร์คู่ควบเชิงกลไฟฟ้า (k_p)		
k_{33}	0.752	0.70
k_{31}	-0.388	-0.334

3.2.5 การทำให้เกิดโพลาริเซชัน

การที่ผลึกสามารถแสดงปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กตริกได้นั้นเนื่องจากผลึกเหล่านั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าโพลาริเซชันเนื่องจากแรงเค้นเชิงภายนอกมากระทำ ก่อนที่จะทำความเข้าใจถึงการเกิดโพลาริเซชันเราควรมีความเข้าใจการเกิดไดโพลโมเมนต์ ไดโพลโมเมนต์เป็นค่าเวกเตอร์ที่บ่งบอกถึงขนาดของขั้วทางไฟฟ้า (Polarity) ที่เกิดขึ้นจากคู่ของประจุบวก (ขนาด q) และลบ (ขนาด q) ที่ถูกแยกออกจากกันดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ไดโพลโมเมนต์ ($P = qa$) เนื่องจากคู่ของประจุบวก ($+q$) และลบ ($-q$) ที่มีระยะห่างเท่ากับ a

ค่าไดโพลโมเมนต์ของคู่ของประจุบวก ($+q$) และลบ ($-q$) ที่มีระยะห่างเท่ากับ a สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

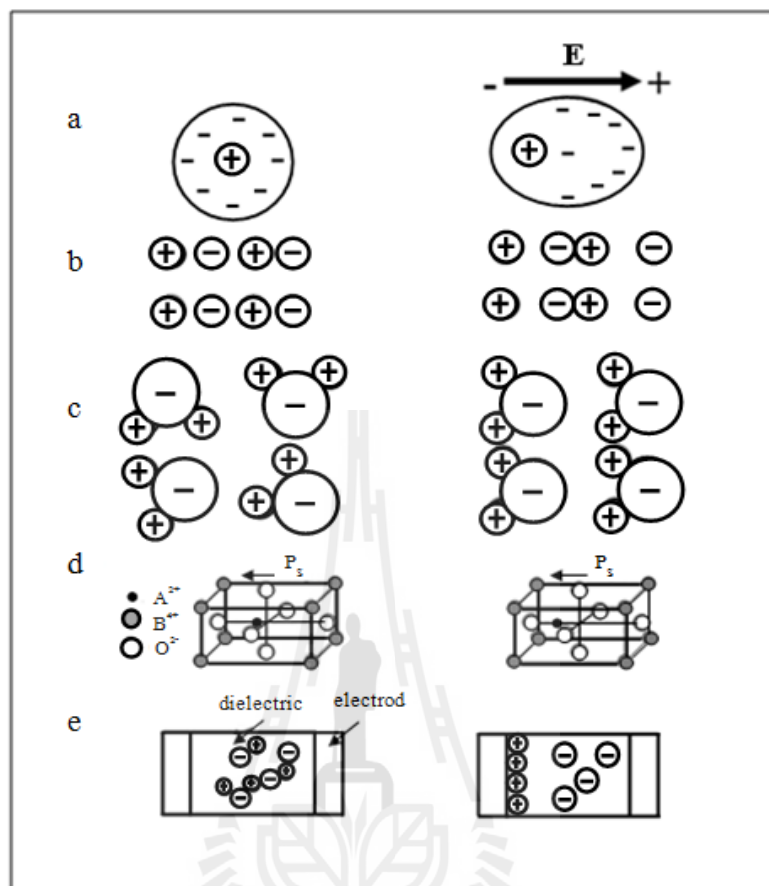
$$P = qa \quad (3.2)$$

โดยที่ P คือ ค่าเวกเตอร์ของไดโพลโมเมนต์ q คือขนาดของประจุ และ a คือ ระยะห่างระหว่างประจุ โดยพื้นฐานการเกิดโพลาริเซชันมีอยู่ 5 แบบได้แก่

1. อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน (Electronic polarization)
2. อะตอมิก หรือ ไอออนิก โพลาริเซชัน (Atomic or ionic polarization)
3. ไดโพล หรือ ออเรียนเตชันนอลโพลาริเซชัน (Dipolar or orientational polarization)
4. โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง (Spontaneous polarization)
5. อินเตอร์เฟซ หรือ โพลาริเซชันจากประจุค้าง (Interface or space charge polarization)

รูปแบบของโพลาริเซชันแบบต่าง ๆ แสดงได้ในรูปที่ 3.7 โดยธรรมชาติแล้วอะตอมหนึ่งอะตอมจะมีค่าไดโพลโมเมนต์เป็นศูนย์ เนื่องจากจุดศูนย์กลางของประจุบวก และลบอยู่ตำแหน่งเดียวกัน และจะหักล้างกันเป็นศูนย์ แต่ถ้าอะตอมตัวนี้ถูกวางไว้ในสนามไฟฟ้าจะทำให้จุดศูนย์กลางของประจุบวก และลบแยกออกจากกันและทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ ลักษณะการเกิดไดโพลโมเมนต์ภายในอะตอมเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกนี้เรียกว่า อิเล็กทรอนิกส์โพลาริเซชัน แสดงในรูปที่ 3.7(a) โพลาริเซชันชนิดนี้เกิดขึ้นกับทุกสารเนื่องจากเป็นโพลาริเซชันระดับอะตอมและ

จะเกิดขึ้นต่อเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้ากับสารเท่านั้น ค่าโพลาไรเซชันชนิดดังกล่าวนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับโพลาไรเซชันชนิดอื่น โพลาไรเซชันชนิดต่อมาคืออะตอมมิก หรือ ไอออนิกโพลาไรเซชัน แสดงในรูปที่ 3.7(b) เกิดขึ้นเฉพาะสารที่มีพันธะไอออนิก (เช่น NaCl KCl และ LiBr) และจะเกิดขึ้นเมื่อจุดศูนย์กลางของไอออนบวกกับไอออนลบแยกจากกันเมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้า เมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้ลดลงจนเป็นศูนย์ไอออนิกโพลาไรเซชันก็จะหายไป สำหรับไดโพล หรือ ออเรียนเตชันนอลโพลาไรเซชันเป็นโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นในโมเลกุลของสารที่มีโครงสร้างของโมเลกุลที่ไม่สมมาตร เช่น H_2O และ HCl ในรูปที่ 3.7(c) แสดงตัวอย่างของโมเลกุลของน้ำซึ่งเวกเตอร์รวมของโพลาไรเซชันที่เกิดจาก H^+ (2 ตัว) และ O^{2-} (1 ตัว) มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามไฟฟ้าแต่ค่าเวกเตอร์รวมของโพลาไรเซชันเหล่านี้ยังมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นออเรียนเตชันนอลโพลาไรเซชันจึงเป็นโพลาไรเซชันชนิดถาวร แต่อย่างไรก็ตามเมื่อโมเลกุลเหล่านี้มารวมตัวกันเป็นสาร เช่น น้ำ (H_2O) ออเรียนเตชันนอลโพลาไรเซชันของแต่ละโมเลกุลจะเรียงตัวกันอย่างสุ่ม (Random orientation) ดังนั้นจึงไม่มีค่าโพลาไรเซชันรวม แต่เมื่อใดก็ตามที่สารเหล่านี้ถูกวางไว้ในภายใต้สนามไฟฟ้าจะทำให้มีการเรียงตัวของโพลาไรเซชันของแต่ละโมเลกุลให้มีทิศทางไปในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะทำให้เกิดโพลาไรเซชันรวม โพลาไรเซชันตัวต่อมามีความสำคัญมากต่อวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก คือ โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเอง แสดงได้ในรูปที่ 3.7(d) โพลาไรเซชันดังกล่าวนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเฟสของผลึก เมื่ออุณหภูมิลดลงผ่านอุณหภูมิคูรีโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเองจะมีเฉพาะในผลึกที่มีสมมาตรบางประเภทเท่านั้น ดังที่กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้ โพลาไรเซชันดังกล่าวนี้มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเป็นอย่างมาก เช่น ทำให้มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงมากในผลึกของแข็งโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเองจะเกิดขึ้นในแต่ละเซลล์ เมื่อแต่ละเซลล์มารวมตัวกันเป็นผลึกโพลาไรเซชันเหล่านี้จะมีทิศทางแบบสุ่มจึงทำให้โพลาไรเซชันหักล้างกันเป็นศูนย์ แต่เมื่อใดก็ตามที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าให้แก่ผลึกเหล่านี้จะทำให้เกิดการเรียงตัวของโพลาไรเซชันของแต่ละเซลล์ให้มีทิศทางไปในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะทำให้เกิดโพลาไรเซชันรวมมีค่าไม่เป็นศูนย์ สิ่งที่น่าสนใจของโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเองนี้คือเมื่อเราป้อนสนามไฟฟ้าให้สูงถึงค่า ๆ หนึ่งแล้วลดสนามไฟฟ้าจนเป็นศูนย์ โพลาไรเซชันรวมจะไม่ลดลงจนเป็นศูนย์เนื่องจากจะมีโพลาไรเซชันตกค้าง (Remanent polarization) ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้วัสดุไพโซอิเล็กทริก เฟอร์โรอิเล็กทริก (ทั้งที่เป็นผลึกเชิงเดี่ยว และ พหุผลึก) สามารถนำประยุกต์มาใช้งานได้ โพลาไรเซชันชนิดสุดท้ายที่จะกล่าวถึงในที่นี้คือ อินเตอร์เฟส หรือ โพลาไรเซชันจากประจุค้าง แสดงได้ในรูปที่ 3.7(e) โพลาไรเซชันชนิดนี้มีค่าค่อนข้างน้อย และเกิดจากประจุบวก และลบที่สะสมกัน ณ บริเวณรอยต่อของสารต่างชนิดในวัสดุ หรือ เกิดขึ้นบริเวณขอบเกรน

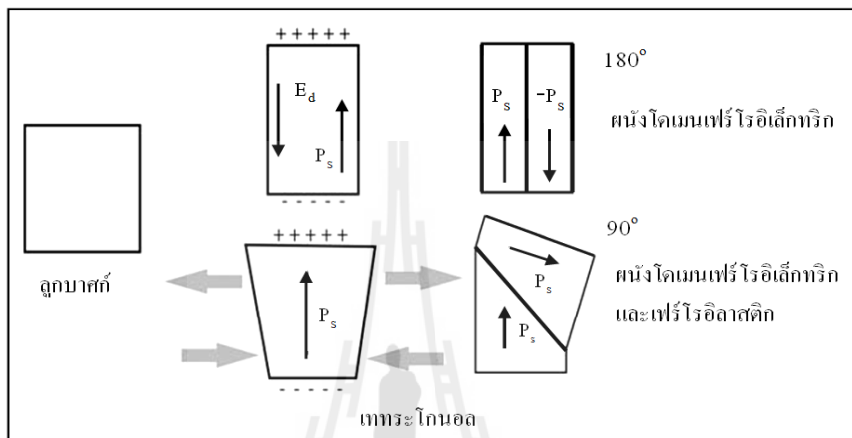


รูปที่ 3.7 การเกิดไดโพลโมเมนต์ทั้ง 5 แบบ (a) อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชัน (b) อะตอมมิก หรือ ไอออนิกโพลาไรเซชัน (c) ไดโพล หรือ ออเรียนเตชันนอลโพลาไรเซชัน (d) โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเอง (e) อินเตอร์เฟซ หรือ โพลาไรเซชันจากประจุค้าง

3.2.6 โดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก

ทิศทางของโพลาไรเซชันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขตทางกล และทางไฟฟ้าที่มีบนชิ้นงาน ทั้งนี้ บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโพลาไรเซชัน (P_s) อย่างสม่ำเสมอ เรียกว่าโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก และรอยต่อระหว่างโดเมนเรียกว่าผนังโดเมน ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ผนังที่กั้นระหว่างโดเมนที่มีทิศทางการจัดเรียงตัวของโพลาไรเซชันตรงกันข้ามกัน เรียกว่าผนัง 180° ในขณะที่ผนังที่กั้นระหว่างโดเมนที่มีทิศทางการจัดเรียงตัวของโพลาไรเซชันตั้งฉากซึ่งกันและกันเรียกว่า ผนัง 90° การเกิดโพลาไรเซชันที่อุณหภูมิเปลี่ยนเฟสจะนำไปสู่การเกิดของประจุพื้นผิว ซึ่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เรียกว่าสนามที่ทำให้เกิดการทลายข้อ (E_d) ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับ P_s ซึ่งสนาม E_d นี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของ P_s ถึงแม้ว่าทั้งผนัง 90° และ 180° นั้นอาจจะลด

ขนาดของ E_d แต่การเกิดขึ้นของผนัง 90° เท่านั้นที่ทำให้พลังงานยืดหยุ่นมีค่าต่ำที่สุดได้ ดังนั้น ผลของเงื่อนไขขอบเขตทางไฟฟ้า และทางกลที่เกิดขึ้นกับผลระหว่างการลดอุณหภูมิผ่านอุณหภูมิคูรี มักจะนำไปสู่โครงสร้างโดเมนที่ซับซ้อนอันประกอบไปด้วยผนัง 90° และ 180° จำนวนมาก (Damjanovic, 1998)



รูปที่ 3.8 การเกิดของผนังโดเมนเฟร์โรอิเล็กทริกแบบ 90° และ 180° (Damjanovic, 1998)

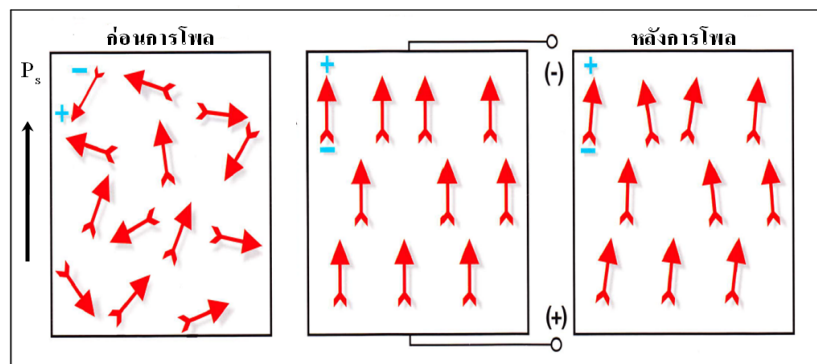
การเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยรวมของเซรามิกที่เกิดขึ้นนั้นประกอบไปด้วยการขยายตัวออกในทิศทางของสนามไฟฟ้า และการหดตัวเข้ามาในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของสนามไฟฟ้า เมื่อเอาสนามไฟฟ้าที่ให้ออกไปความเครียดภายในบางบริเวณจะทำให้เกิดการจัดวางทิศทางเชิงขั้วขึ้นมาเพื่อพยายามทำให้ระบบมีการกลับคืนไปสู่สภาพของการจัดวางทิศทางแบบเดิมให้ได้ แต่ว่าการจัดวางทิศทางใหม่ ๆ นั้นส่วนใหญ่เป็นแบบถาวร การให้ความเค้นจากภายนอกเข้าไปมีผลต่อความเครียดภายในตัวเซรามิก และโครงสร้างของโดเมนก็ตอบสนองต่อความเครียดดังกล่าวด้วย กระบวนการเช่นนี้เรียกว่าปรากฏการณ์เฟร์โรอัสติก (Ferroelastic effect) การกดอัดวัสดุทำให้มีการวางทิศทางเชิงขั้วในแนวตั้งฉากกับความเค้น ในขณะที่การดึงวัสดุจะทำให้มีการวางทิศทางเชิงขั้วที่ขนานไปกับแนวของแรงดึง ดังนั้นโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นมาจากสนามไฟฟ้าที่ผ่านการเปลี่ยนแปลงของโดเมนแบบ 90° จึงสามารถทำให้กลับคืนไปสู่สภาพเดิมด้วยการให้ความเค้นอัดเข้าไปในทิศทางของสนามไฟฟ้าแทน ซึ่งความเค้นไม่มีผลต่อการเกิดโดเมนแบบ 180° ยกเว้นเสียแต่ว่าพฤติกรรมของโดเมนเหล่านี้ย่อมมีการเชื่อมโยงต่อกันกับการเปลี่ยนแปลงของโดเมนแบบอื่น ๆ ได้ กระแสรั่วเป็นตัวจำกัดค่าอุณหภูมิ และสามารถทำให้อุณหภูมิภายในตัววัสดุเพิ่มขึ้นจนเกิดการเบรกควาน์จากความร้อนได้ ดังนั้น ค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าจึงเป็น

ตัวแปลที่จำกัดค่าของสนามไฟฟ้า ถ้าความต่างศักย์ที่ให้เข้าไบนั้นมีขนาดเกินกว่า 1 kV ขึ้นไปก็จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบเพื่อให้แน่ใจว่าพื้นผิวที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นมีความสะอาดมากพอ และต้องจุ่มตัววัสดุที่ต้องการทำขั้วนั้นลงไป ในน้ำมันฉนวนด้วย เพราะค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่พื้นผิวระหว่างขั้วทางไฟฟ้าที่อยู่บนผิวของวัสดุที่มีค่าสภาพยอมสูงนั้นสามารถจะเกิดขึ้นได้ง่ายมากเมื่อวางวัสดุไว้ในอากาศ

การทำลายขั้ว (Depoling) นั้นสามารถทำได้โดยการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามที่ใช้ในการทำให้มีขั้ว หรือในบางกรณีก็ใช้วิธีการให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับค่าสูงเข้าไปแล้วค่อย ๆ ลดลงให้กลายเป็นศูนย์ แต่ก็มีอันตรายในเรื่องของความร้อนสูง เนื่องจากที่สนามค่าสูงนั้นจะมีการสูญเสียเป็นความร้อนของไดอิเล็กทริกที่สูงเป็นผลสืบเนื่องตามมาด้วย สารเซรามิกในบางองค์ประกอบนั้นสามารถจะทำให้โพลาไรเซชันมีค่าลดลงเป็นศูนย์ได้โดยการให้ความเค้นอัดเข้าไป การทำลายขั้วอย่างสมบูรณ์นั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงจนเกินจุดคูรีของวัสดุ แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงมาโดยปราศจากสนามไฟฟ้าภายนอก

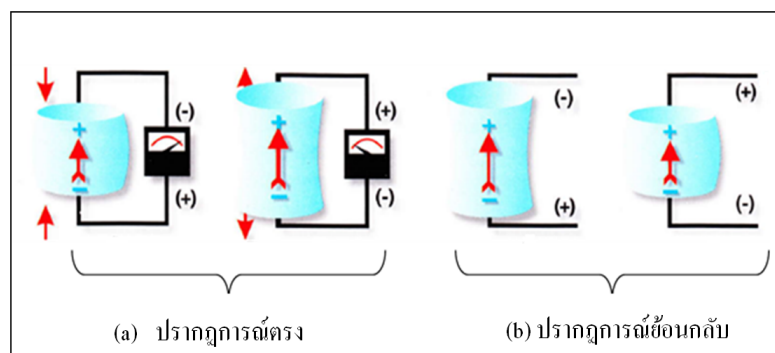
3.2.7 ปรากฏการณ์โพไอโซอิเล็กทริกในเฟอร์โรอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์โพไอโซอิเล็กทริกในเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกจะเกิดขึ้นได้นั้นวัสดุเซรามิกต้องผ่านกระบวนการโพลก่อนนำมาใช้งาน การให้กระแสไฟฟ้าเพื่อทำการโพลเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก (ที่เป็นพหุผลึก) ทำให้เกิดการจัดเรียงไดโพลของผลึกหรือโดเมนภายในเซรามิก และทำให้มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับผลึกเชิงเดี่ยว ดังนั้นกระบวนการโพลเป็นกระบวนการสำคัญที่จะทำให้เกิดสภาพโพไอโซอิเล็กทริกในเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก หากไม่มีการโพลเซรามิกจะไม่เปลี่ยนสภาพ แม้ว่าแต่ละผลึกจะเป็นโพไอโซอิเล็กทริกอยู่แล้วก็ตาม เนื่องจากโพลาไรเซชันจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแบบสุ่ม ซึ่งทำให้โพลาไรเซชันรวมมีค่าเป็นศูนย์ สำหรับการโพลสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกจะต้องมากกว่าค่าสนามไฟฟ้าลบล้าง (Coercive field) ซึ่งเป็นค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้โพลาไรเซชันมีการเปลี่ยนทิศทาง โดยปรกติการโพลจะทำภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิสูงแต่ไม่เกินอุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) เช่น โพลที่ 120 °C สำหรับเซรามิก PZT สนามไฟฟ้าจะถูกป้อนค้างไว้ที่แรงดัน และอุณหภูมิคงที่เป็นเวลาประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นจึงทำการลดอุณหภูมิจนถึงหรือใกล้เคียงอุณหภูมิห้องแล้วจึงลดค่าแรงดันไฟฟ้าจนเป็นศูนย์ หลังจากการโพลถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามแล้วก็ตามแต่โพลาไรเซชันภายในเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกส่วนใหญ่ยังคงเรียงตัวในทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ได้ทำการโพล โพลาไรเซชันเหล่านี้เรียกว่าโพลาไรเซชันคงค้าง ภาพไดอะแกรมที่แสดงทิศทางของโพลาไรเซชันกับสนามไฟฟ้าแสดงไว้ในรูปที่ 3.9



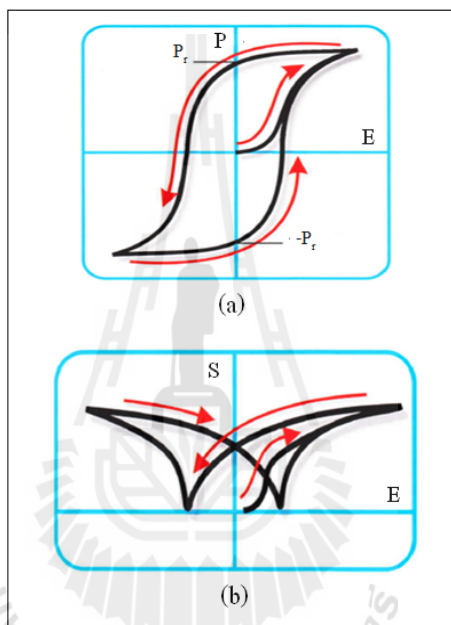
รูปที่ 3.9 วัสดุเพโรอิเล็กทริกที่มีทิศทางการจัดเรียงตัวของโพลาริเซชันก่อน และหลังการโพล (APC International, 2002)

เซรามิก PZT จัดได้ว่าเป็นวัสดุที่สามารถแสดงสมบัติทางไพโซอิเล็กทริกได้ดี กล่าวคือ เมื่อเซรามิก PZT นั้นถูกแรงกลมากระทำทำให้เกิดความเค้น (Stress) ขึ้น เช่น ถูกกด หรือ ถูกกระแทก จะส่งผลให้เกิดการแยกขั้วไฟฟ้า และเกิดประจุไฟฟ้าขึ้นมาบนผิวของวัสดุดังกล่าว โดยเรียกปรากฏการณ์แบบนี้ว่า ปรากฏการณ์ตรง (Direct effect) หรือปรากฏการณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator action) ดังแสดงในรูปที่ 3.10(a) ในทำนองกลับกัน เมื่อสารได้รับสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการยืดหดตัว คือ ปรากฏการณ์ย้อนกลับ (Converse effect) หรือ ปรากฏการณ์มอเตอร์ (Motor effect) ดังแสดงในรูปที่ 3.10(b) จากปรากฏการณ์ข้างต้นนี้ พบว่า ปริมาณของการเกิดโพลาริเซชันจะขึ้นกับขนาดของความเค้นที่ให้กับวัสดุ และประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของแรงที่กระทำ เช่น เป็นแรงกด หรือ แรงดึง เป็นต้น



รูปที่ 3.10 ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (a) ปรากฏการณ์ตรง และ (b) ปรากฏการณ์ย้อนกลับ (APC International, 2002)

ในการป้อนสนามไฟฟ้ากระแสสลับค่าสูง ๆ ให้กับเซรามิก PZT จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของการเกิดโพลาริเซชัน และขนาด หากนำการเปลี่ยนแปลงไปเขียนกราฟจะได้กราฟวงวนฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loops) ดังรูปที่ 3.11(a) โดยรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.2.9 และในขณะเดียวกันการป้อนสนามไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเพอร์โรอิเล็กทริกในทิศเดียวกับการเกิดโพลาริเซชัน ซึ่งจะแปรผันตรงกับสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 3.11(b)



รูปที่ 3.11 (a) วงวนฮิสเทอรีซิส (b) ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดวัสดุในทิศการเกิดโพลาริเซชัน (APC International, 2002)

ในการอธิบายถึงปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกทั้งแบบปรากฏการณ์ตรง และย้อนกลับนี้ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติยืดหยุ่น (Elastic property) ของวัสดุดังต่อไปนี้

$$D = \varepsilon^T E + dT \quad (\text{ปรากฏการณ์การตรง}) \quad (3.3)$$

$$S = s^E T + dE \quad (\text{ปรากฏการณ์การย้อนกลับ}) \quad (3.4)$$

โดยที่ D คือ ค่าการขจัดทางไดอิเล็กทริก (Dielectric displacement)

- T คือ ความเค้น (Stress)
 E คือ สนามไฟฟ้า
 S คือ ความเครียด (Strain)
 d คือ ค่าสัมประสิทธิ์ทางไพโซอิเล็กทริก
 s คือ ค่าการยอมตาม (Compliance) ซึ่งเป็นส่วนกลับของค่ายังมอดูลัส
 ϵ คือ ค่าสภาพยอม

โดยตัวอักษรที่เป็นตัวทึบนั้นจะเป็นสัญลักษณ์ที่บอกถึงเงื่อนไขที่ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ เช่น ในกรณีของ ϵ^T จะหมายถึง ค่าสภาพยอมของวัสดุเมื่อแรงเค้นมีค่าคงที่ นั่นคือ เมื่อไม่มีแรงเค้นมากระทำต่อวัสดุไพโซอิเล็กทริกนั่นเอง ส่วนในกรณีของ s^E จะหมายถึง ค่าการยอมตามของวัสดุเมื่อค่าสนามนั้นคงที่ แต่เนื่องจากสมบัติความเป็นไพโซอิเล็กทริกของวัสดุนี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางที่ให้แรงหรือสนามไฟฟ้า จึงได้มีการเขียนตัวเลขซึ่งเป็นตัวห้อยเพื่อบอกทิศทางซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการอย่างง่ายได้ดังนี้

$$D_3 = d_{33}T_3 \quad (\text{ปรากฏการณ์ตรง}); \text{เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าป้อนให้กับวัสดุ} \quad (3.5)$$

$$S_3 = d_{33}E_3 \quad (\text{ปรากฏการณ์ย้อนกลับ}); \text{เมื่อไม่มีแรงเชิงกลกระทำต่อวัสดุ} \quad (3.6)$$

โดยที่ค่า d ของสมการดังกล่าวนี้ จะมีค่าอยู่ในช่วง $\times 10^{-12}$ C/N ในกรณีของปรากฏการณ์ตรงและมีค่าอยู่ในช่วง $\times 10^{-12}$ m/V สำหรับในกรณีของปรากฏการณ์ย้อนกลับซึ่ง d สูง มักจะนิยมนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการสั่น หรือ เคลื่อนที่ เช่น โซนาร์ และ เครื่องบันทึกเสียง เป็นต้น

สำหรับในกรณีของวงจรเปิดนั้นจะต้องมีการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรเปิดด้วย (Voltage coefficient: g) ด้วย g โดยค่า (มีหน่วยเป็น Vm/N) นี้จะบ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการสร้างศักย์ไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความเค้นที่ให้แก่วสดุ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ g และ d นี้มีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 3.7 คือ

$$g = \frac{d}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (3.7)$$

- โดยที่ ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุ
 ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่า 8.854×10^{-12} F/m

ในเซรามิกที่มีค่าสัมประสิทธิ์ g สูงได้ ถ้าวัสดุมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ค่าที่ค่า d คงที่ค่าหนึ่ง เซรามิกที่มีค่า g สูงมักจะเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกประเภทที่เกิดโพลาไรเซชันยาก และให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ต่ำ ส่งผลให้เซรามิกพวกนี้มีค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบโพอียออิเล็กทริก (k) ที่ต่ำจึงมักถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์พวกที่จุดเตาแก๊ส และไฟแช็ก เป็นต้น ดังนั้น การนำวัสดุโพอียออิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบโพอียออิเล็กทริกซึ่งเป็นวิธีการวัดระดับของผลทางกลไฟฟ้า (Electromechanical) ได้โดยตรง และสะดวก เช่น ความสามารถของทรานสดิวเซอร์ที่จะเปลี่ยนจากพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่ง หากเป็นกลไกทางตรงจะแสดงในรูปอัตราส่วนของพลังงานที่ให้ออกมาในรูปของไฟฟ้าต่อพลังงานกลที่ให้เข้าไป หรือ หากเป็นกลไกแบบย้อนกลับจะอยู่ในรูปของอัตราส่วนของพลังงานทางกลที่ให้ออกมาต่อพลังงานไฟฟ้าที่ให้เข้าไป โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

กรณีปรากฏการณ์ตรง (ภัทรารวรรณ คหะวงศ์, 1998)

$$k^2 = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ได้}}{\text{พลังงานกลที่ให้เข้าไป}} \quad (3.8)$$

กรณีปรากฏการณ์ย้อนกลับ

$$k^2 = \frac{\text{พลังงานกลที่ได้}}{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ให้เข้าไป}} \quad (3.9)$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานของวัสดุนั้นไม่สมบูรณ์จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบโพอียออิเล็กทริกของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ (k จะมีค่าไม่เกิน 1) โดยวัสดุโพอียออิเล็กทริกที่ไม่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกมีค่าน้อย ส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า ($k < 0.1$) ส่วนในเซรามิกที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีค่าสูง ($0.4 \leq k \leq 0.7$) แต่ยิ่งกว่านั้นในผลึกที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีค่าสูงมาก ($k \leq 0.9$)

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกต่างชนิดกันมี k^2 ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.3 วัสดุที่มี k มากจะมีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานจากรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่งได้มาก แต่ค่าของ k ไม่ใช่ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน เพราะสมการคำนวณ k ไม่ได้คำนึงถึงพลังงานที่สูญเสียเมื่อเปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งเป็นอีกรูปหนึ่ง ถ้าจะหาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานต้องหาจากสมการต่อไปนี่ (Jaffe et al., 1971)

$$\text{ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงาน} = \frac{k^2}{(k^2 + D)} \quad (3.10)$$

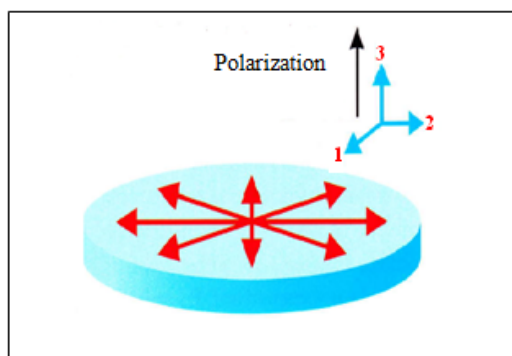
โดยที่ D คือ ค่าการกระจัดทางไดอิเล็กทริก

ค่า k ของวัสดุใด ๆ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุนั้น ๆ เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับความถี่ทำให้เกิดข้อไฟฟ้า และทิศทางของแรงเชิงกลหรือกระแสไฟฟ้าด้วย

ตารางที่ 3.3 ค่า k^2 ของวัสดุเพอร์โรอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ (Jaffe et al., 1971)

วัสดุ	k^2
Quartz	0.1
BaTiO ₃	0.4
Pb(Ti, Zr)O ₃	0.5 - 0.7
Rochelle salt	0.9 (ที่ 24°C)

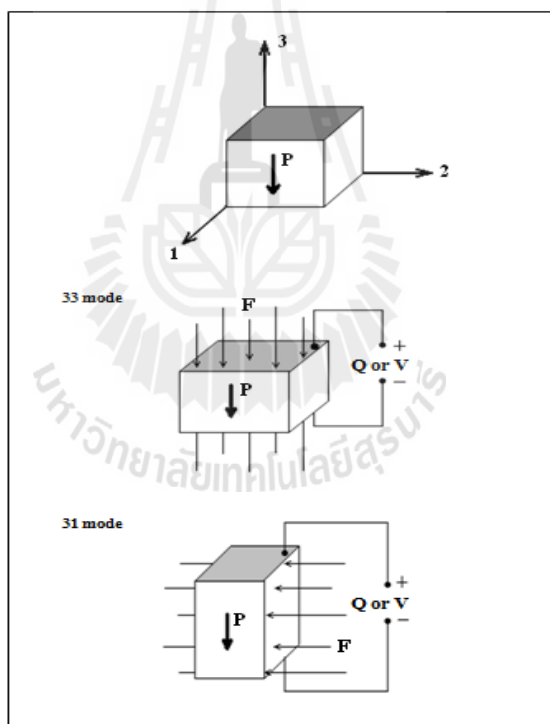
ในกรณีของวัสดุที่มีรูปทรงง่ายขึ้นนั้นจะเป็นกรณีของแผ่นจานแบนที่มีข้อไฟฟ้าอยู่บนผิวหน้าหลักทั้งสองด้าน และผ่านการทำให้มีข้ออยู่ในแนวที่ตั้งฉากกับผิวหน้า การสั่นพ้องที่น่าสนใจจะอยู่ในโหมดของแนวรัศมี (Radial mode) ที่อาศัยการกระตุ้นผ่านทางปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกที่ตัดผ่านแนวความหนาของตัวงานดังแสดงในรูปที่ 3.12 นิยมแสดง k ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การคู่ควบเชิงระนาบ (Planar coupling coefficient) หรือ k_p



รูปที่ 3.12 การสั่นตัวในแนวรัศมีของแผ่นไพโซอิเล็กทริก (APC International, 2002)

3.2.8 สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก

สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient) เป็นการวัดการเกิดโวลตาไรเซชันเมื่อให้แรงเชิงกลแก่เซรามิกหนึ่งหน่วย หรือการวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวเมื่อให้แรงทางไฟฟ้าหนึ่งหน่วยแก่เซรามิก โดยตัวเลขที่ห้อยตัวหน้าบอกทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนเข้าไปในวัสดุหรือที่วัสดุจ่ายออกมาเมื่อถูกแรงทางกลกระทำ ส่วนตัวเลขที่ห้อยตัวหลังแสดงทิศทางที่วัสดุเกิดการยืดหรือหดเมื่อถูกสนามไฟฟ้าภายนอกกระทำหรือทิศทางที่ให้แรงทางกลกระทำต่อวัสดุเพอร์โรอิเล็กทริก หมายเลขถูกกำหนดโดยอ้างอิงกับทิศทางการเกิดโวลตาไรเซชัน จากรูปจะเห็นว่าทิศทางหมายเลข 3 เป็นแกน Z ของผลึกซึ่งขนานกับทิศที่เหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้าในวัสดุ แกนของผลึกที่เหลือคือ X และแกน Y แทนด้วยทิศหมายเลข 1 และ 2 ตามลำดับดังรูปที่ 3.13(a) ตารางที่ 3.4 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกของเพอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกบางชนิด



รูปที่ 3.13 ทิศทางของแรงกระทำที่มีผลต่อวัสดุเพอร์โรอิเล็กทริก

d_{33} คือสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกที่เกิดจากการวัดการเกิดโวลตาไรเซชันในทิศของการทำขั้วของเซรามิก เมื่อมีการให้ความเค้นแก่เซรามิกในทิศเดียวกับทิศของการทำขั้วของเซรามิก ดังแสดงในรูป 3.13(b)

d_{31} คือสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกที่เกิดจากการวัดการเกิดโพลาริเซชันในทิศของการทำซ้ำของเซรามิก เมื่อมีการให้ความเค้นแก่เซรามิกในทิศตั้งฉากกับทิศของการทำซ้ำของเซรามิก ดังแสดงในรูป 3.13(c)

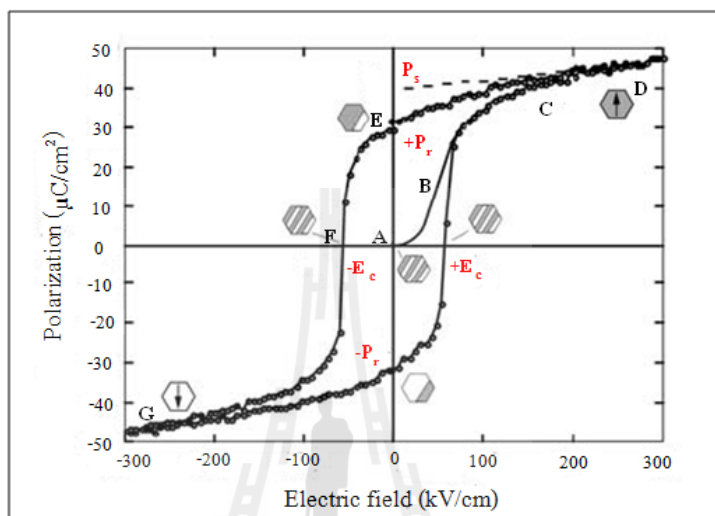
ตารางที่ 3.4 สัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกของเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกบางชนิด (จันทอง ทรงศิริ, 2008)

ชนิดของเซรามิก	d_{33} (10^{-12} C/N)	d_{31} (10^{-12} C/N)
BaTiO ₃	190	-78
PbTiO ₃	45 - 56	(-4.2) - (-6.8)
Pb(Zr _{0.53} Ti _{0.47})O ₃	220	-71
Pb(Zr _{0.52} Ti _{0.48})O ₃	175	-148
PbTiO ₃ - PbZrO ₃	71 - 590	(-27) - (-274)
Pb(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ - PbTiO ₃ - PbZiO ₃	280 - 460	(-79) - (-250)

3.2.9 วงวนฮิสเทอรีซิสเฟอร์โรอิเล็กทริก

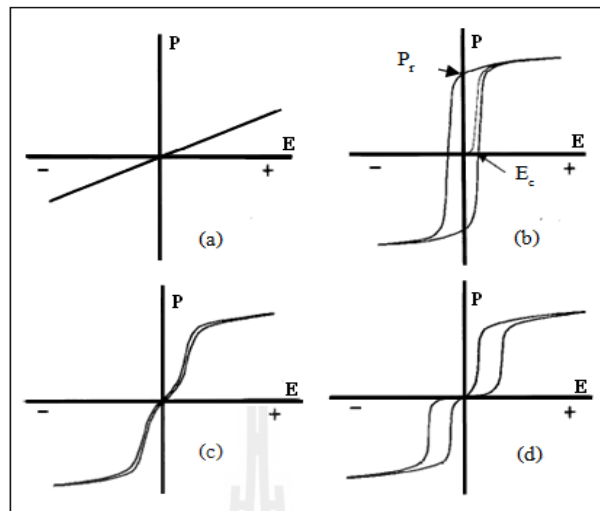
วงวนฮิสเทอรีซิส (Ferroelectric hysteresis loop) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้า ซึ่งถือว่าการวัดที่สำคัญมากแบบหนึ่งสำหรับเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก วงวนนี้มีความคล้ายคลึงกับวงวนของแม่เหล็กที่เป็นค่าระหว่างแมกนีไทเซชันและสนามแม่เหล็กในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก รูปที่ 3.14 แสดงตัวอย่างของวงวนฮิสเทอรีซิส โดยการเกิดขึ้นของวงวนฮิสเทอรีซิสสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อมีสนามไฟฟ้ากระแสสลับต่ำ ๆ โพลาริเซชันจะเพิ่มแบบเชิงเส้นกับขนาดของสนาม (ช่วง AB) และเมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โพลาริเซชันที่มีทิศทางดังกล่าวก็จะเริ่มกลับทิศไปตามสนามไฟฟ้า (ช่วง BC) การตอบสนองของโพลาริเซชันในช่วงนี้มีความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่มาก (ช่วง DC) และเมื่อโพลาริเซชันทั้งหมดถูกจัดทิศทางใหม่ (จุด C) เมื่อเริ่มลดสนามไฟฟ้าลงโพลาริเซชันบางส่วนก็จะกลับไปสู่ทิศทางเดิม แต่ที่ตำแหน่งสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ (จุด E) โพลาริเซชันจะไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นถ้าจะให้โพลาริเซชันเป็นศูนย์สนามไฟฟ้าจะต้องถูกกลับทิศ (จุด F) และเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามก็จะทำให้มีการจัดเรียงทิศของโพลาริเซชันใหม่ก่อนที่จะถึงจุด (จุด G) ต่อมาเมื่อกลับทิศของสนามอีกครั้งก็

จะครบรอบของการทดลอง โพลาริเซชันเมื่อสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ (จุด E) เรียกว่าโพลาริเซชันคงค้าง (P_r) ส่วนสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการลดโพลาริเซชันให้กลับสู่ศูนย์อีกครั้งเรียกว่าสนามไฟฟ้าลบล้าง (E_c)



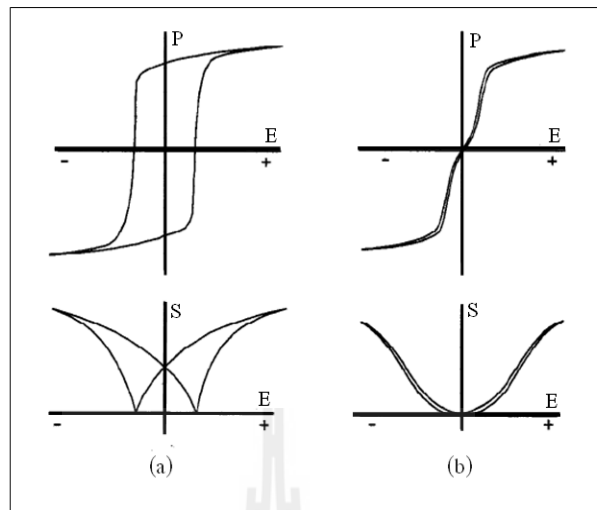
รูปที่ 3.14 วงวนฮิสเทอรีซิสเฟร์โรอิเล็กทริกวงกลมที่มีลูกศรแสดงให้เห็นถึงทิศทางการเกิดโพลาริเซชันของเซรามิก PZT (Damjanovic, 1998)

วงวนฮิสเทอรีซิสมีรูปร่าง และขนาดหลายแบบ โดยในช่วงแรกการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสจะใช้วงจร Sawyer-Tower (Sawyer and Tower, 1930) โดยทำการวัด ณ ความถี่ 60 Hz แล้วอ่านผลในออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ต่อมามีการใช้ซิงเกิลพัลส์ (Single-pulse) หรือวงจร Sawyer-Tower แบบไฟกระแสตรง (dc) ณ ความถี่ 0.1 Hz วัดออกมาในพล็อตเตอร์แกนเอกซ์ชาย หรือแสดงผลในคอมพิวเตอร์ รูปแบบของวงวนฮิสเทอรีซิสแสดงได้ในรูปที่ 3.15 โดยรูปที่ 3.15(a) เป็นวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้จากตัวเก็บประจุชนิด BaTiO_3 รูปที่ 3.15(b) เป็นวงวนฮิสเทอรีซิสของวัสดุเมมโมรีเฟร์โรอิเล็กทริก ซึ่งมักพบในสารประกอบเซรามิก PZT ที่มีโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอล ส่วนรูปที่ 3.15(c) เป็นวงวนแคบที่ได้จากวัสดุเฟร์โรอิเล็กทริกแบบสลิที่มีสภาพการคลายตัวแบบควอดราติก (Quadratic relaxor) ของระบบ PLZT และรูปที่ 3.15(d) เป็นวงวนคู่ ซึ่งได้จากวัสดุแอนติเฟร์โรอิเล็กทริกแบบนอนเมมโมรีในระบบ PLZT



รูปที่ 3.15 ลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิสในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดต่างๆ โดย
 (a) ตัวเก็บประจุ BaTiO_3 (b) วัสดุ PLZT แบบอ่อน (สามารถสวิตช์ตัวได้ง่าย)
 (c) รีแลกเซอร์ PLZT (d) วัสดุแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก PLZT (Haertling, 1999)

นอกจากวงวนฮิสเทอรีซิสของโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าแล้วการป้อนสนามไฟฟ้าให้กับเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกยังทำให้เกิดความเครียด และเกิดเป็นวงวนฮิสเทอรีซิสที่มีรูปร่างคล้ายปีกผีเสื้อ รูปแบบวงวนฮิสเทอรีซิสของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก และรีแลกเซอร์ SFE (Slim-loop ferroelectric) แสดงในรูปที่ 3.16 ในกรณีของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกผลการกลับทิศของความเครียดแสดงให้เห็นในวงวนรูปร่างแบบผีเสื้อ (Butterfly loop) ซึ่งมีสถานะของความเครียดคงค้าง (Remanent strain) เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ ความต่างศักย์ที่เป็นค่าบวกแสดงให้เห็นถึงการขยายตัวตามแนวยาว (Longitudinal expansion) ของเซรามิก และค่าความต่างศักย์ที่เป็นลบแสดงผลในการหดตัวตามแนวยาว (Longitudinal contraction) เป็นที่ทราบกันอยู่ว่าสิ่งนี้คือผลของความเครียดเชิงเส้นในวัสดุไพโซอิเล็กทริกซึ่งไม่รวมถึงผลจากการเปลี่ยนทิศทางของโดเมน ในกรณีของวัสดุรีแลกเซอร์ SFE จะไม่มีค่าความเครียดคงค้างเมื่อไม่ให้สนามไฟฟ้าเข้าไปอย่างใดก็ตาม เมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไปการเคลื่อนที่ของโพลาริเซชัน และความเครียดจะเกิดขึ้นเองซึ่งเป็นไปตามค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.16 วงวนฮีสเทอรีซิส และความเครียดตามยาวของวัสดุ (a) เซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก (b) เซรามิกรีแลกเซอร์ SFE ชนิดนอนเมมโมรี (Nonmemory) (Haertling, 1999)

3.2.10 วงจร Sawyer-Tower

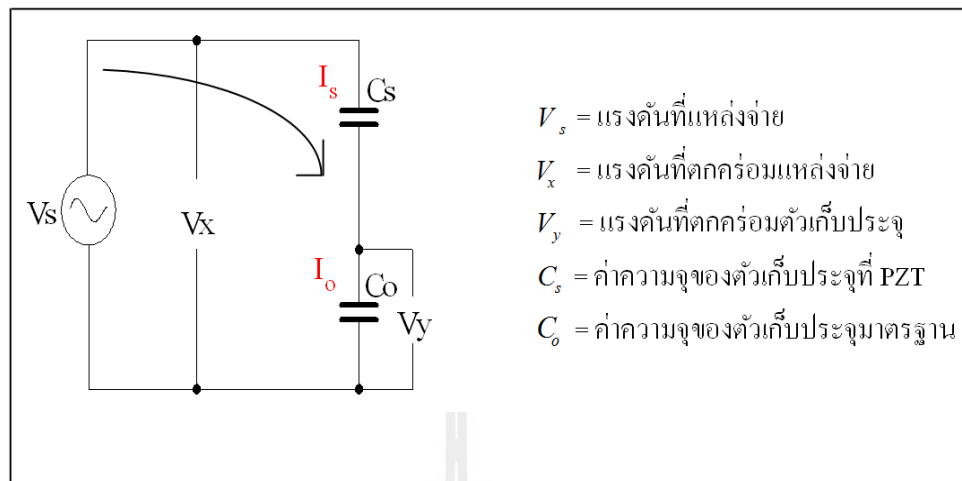
วงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิก PZT วัดได้โดยการใช้วงจร Sawyer-Tower ซึ่งแผนผังของวงจรแสดงในรูปที่ 3.17 โดยที่ V_x และ V_y คือ สัญญาณที่ป้อนเข้าดิฟเฟอเรนเชียลโคปในแนวนอน และแนวตั้ง โดยที่แกนนอนของวงวนฮีสเทอรีซิสบนหน้าจอแทนค่าแรงดันที่ตกคร่อมแหล่งจ่าย และแกนตั้งของวงวนฮีสเทอรีซิสบนหน้าจอแทนค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมาตรฐาน (C_0) ซึ่งแปรผันโดยตรงกับประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนเซรามิก PZT (Q_s) การเกิดโพลาริเซชันคือจำนวนประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยการเกิดโพลาริเซชันของเซรามิก PZT สามารถเขียนได้ดังนี้

$$P_{sample} = \frac{Q_s}{A} \quad (3.11)$$

โดยที่ P_{sample} คือ การเกิดโพลาริเซชันของเซรามิก PZT

Q_s คือ จำนวนประจุสะสมของเซรามิก PZT

A คือ เป็นพื้นที่หน้าตัดของเซรามิก PZT



รูปที่ 3.17 วงจร Sawyer -Tower ($C_o = 1 \mu F$, $C_s = \text{sample}$, $C_o \gg C_s$)

ในการทำงานเดียวกันการเกิดโพลาไรเซชันสามารถเขียนเป็น

$$P_{\text{sample}} = \frac{C_o V_y}{A} \quad (3.12)$$

โดยที่ V_y คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมาตรฐาน

C_o คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุมาตรฐาน

ค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเซรามิก PZT สามารถเขียนได้ดังนี้

$$E = \frac{V_x}{d} \quad (3.13)$$

โดยที่ E คือ สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเซรามิก PZT

V_x คือ แรงดันที่ตกคร่อมแหล่งจ่าย

d คือ ความหนาของชั้นเซรามิก PZT

ความสัมพันธ์ระหว่างประจุที่สะสมบนเซรามิก PZT กับประจุที่สะสมบนตัวเก็บประจุมาตรฐานสามารถหาได้จาก

จากรูปที่ 3.17
$$I_s = \omega C_{(total)} V_x$$

$$= \frac{\omega C_s C_o}{C_s + C_o} V_x$$

และ

$$I_o = \omega C_o V_y$$

$$= I_s$$

ดังนั้น

$$\omega C_o V_y = \frac{\omega C_s C_o}{C_s + C_o} V_x$$

จะได้

$$V_x = \frac{C_s + C_o}{C_s} V_y$$

โดยที่ $C_o \geq C_s$

$$V_x \approx \frac{C_o}{C_s} V_y$$

ดังนั้น

$$Q_s \approx Q_o \quad (3.14)$$

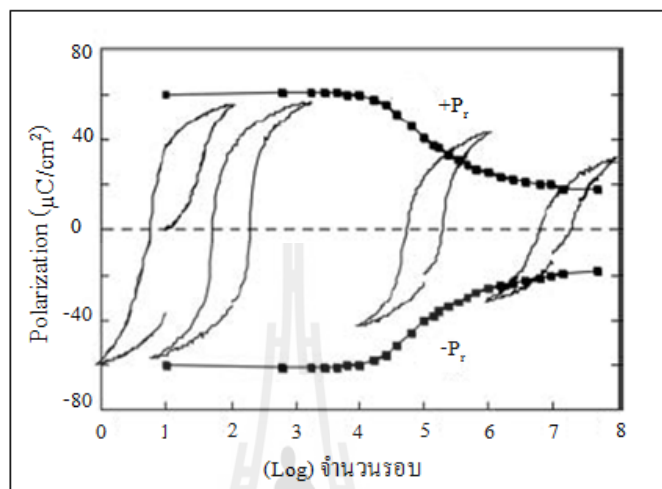
โดยที่ Q_o คือ จำนวนประจุที่สะสมบนตัวเก็บประจุมาตรฐาน

Q_s คือ จำนวนประจุที่สะสมบนเซรามิก PZT

3.3 ความล้าเฟอร์โรอิเล็กทริก

ในการศึกษาความล้าเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric fatigue) นั้นสามารถศึกษาได้จากวงวนฮิสเทอรีซิส โดยเมื่อมีความล้าเกิดขึ้นขนาดของวงวนฮิสเทอรีซิส และโพลาริเซชันคงค้างจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบของสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.18 ความรุนแรงของความล้า

ที่แตกต่างกันมีสาเหตุมาจากตัวแปรอื่น ๆ เช่น ขนาดของสนามไฟฟ้า ความถี่ และอุณหภูมิ (Wang et al., 2002; Pojprapai et al., 2007; Lou et al., 2010; Glaum et al., 2011)



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างของความล่าช้าจากการจากการเปลี่ยนขั้วในฟิล์ม $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (Damjanovic, 1998)

ปัจจุบันกลไกการเกิดความล่าช้าที่ได้รับความสนใจมีสมมติฐานว่าเกิดจากสาเหตุต่าง ๆ ต่อไปนี้

1. การตรึงของผนังโดเมน เมื่อจำนวนรอบมากขึ้นโดเมนบางส่วนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เนื่องจากถูกตรึงด้วยมลทินที่มีประจุ (Charged defects) หรือ ช่องว่างออกซิเจน (Oxygen vacancy) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ผลการตรึงของโดเมน (Domain pinning effect) ส่งผลทำให้โพลาริเซชันหรือ โดเมนภายในเซรามิก PZT ไม่สามารถเปลี่ยนทิศทางได้ตามทิศทางของสนามไฟฟ้า อาจจะทำให้วัฏจักรการเกิดความล่าช้าจากการเปลี่ยนขั้วคือการตรึงผนังโดเมนด้วยประจุที่ถูกจับไว้

2. ความเสียหายที่เกิดบนพื้นผิวอิเล็กโทรด เนื่องจากโดเมนบางส่วนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทำให้เกิดความเครียดสะสมมากขึ้นที่บริเวณดังกล่าวจนทำให้เซรามิก PZT เกิดรอยแตกขึ้น ต่อมาเมื่อมีรอยแตกแล้วเกิดขึ้นที่บริเวณดังกล่าวจะมีความเค้นสะสมเกิดขึ้นมากทำให้วัสดุถูกทำลายได้ง่าย ส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมเซรามิก PZT มีค่าลดลง โพลาริเซชันที่เกิดจากสนามไฟฟ้าดังกล่าวจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย

3.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความล้าจากการเปลี่ยนขั้วในวัสดุเซรามิก PZT

1. ขนาด และความถี่ของสนามไฟฟ้า เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความล้าที่เกิดบ่อยที่สุดในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก เนื่องมาจากความเครียดสะสมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอย่างต่อเนื่องบนตัวนำไฟฟ้า
2. ความร้อน เกิดเมื่อสถานะความร้อนทางอุณหภูมิสูงที่บนวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียความต้านทานทางไฟฟ้า หรือ ความไม่เสถียรทางเคมีของเนื้อวัสดุได้
3. แรงทางกล เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความเครียดทางกล เช่น การขยายตัวของอุณหภูมิ การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร หรือ แรงกดทางไฟฟ้า

3.4 สรุป

ในบทที่ 3 กล่าวถึงอิเล็กโตรเซรามิกส์ซึ่งเป็นเซรามิกที่สามารถแสดงสมบัติทางไฟฟ้า แม่เหล็ก แสง และความร้อน ซึ่งได้แก่ วัสดุไพโซอิเล็กทริก ไพโรอิเล็กทริก และ เฟอร์โรอิเล็กทริก ต่อมาได้กล่าวถึงประวัติความเป็นมา รวมไปถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก เช่น การค้นพบเซรามิกชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก ประวัติโดยสังเขปของวัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก คุณลักษณะของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต การทำให้เกิดโพลาริเซชันโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก วงวนฮิสเทอรีซิสเฟอร์โรอิเล็กทริก วงจร Sawyer-Tower ความล้าและสาเหตุการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยในการศึกษาความล้า นั้นสามารถศึกษาได้จากวงวนฮิสเทอรีซิสซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้า โดยเมื่อมีความล้าเกิดขึ้นขนาดของวงวนฮิสเทอรีซิส และโพลาริเซชันคงค้างจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบของสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ความรุนแรงของความล้าที่แตกต่างกันมีสาเหตุมาจากตัวแปรอื่น ๆ เช่น ขนาดของสนามไฟฟ้า ความถี่ และอุณหภูมิ และยังได้กล่าวถึงสาเหตุการเกิดความล้าของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก เช่น การตึงของผนังโดเมน ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจถึงวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต ได้ดียิ่งขึ้น รวมทั้งสามารถสร้างระบบทดสอบการเกิดความล้า และการทดสอบเบื้องต้นที่เหมาะสมกับงานวิจัยมากที่สุด โดยจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4

บทที่ 4

การสร้างระบบทดสอบความล้าแฟร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZT และการทดสอบระบบเบื้องต้น

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ความล้าแฟร์โรอิเล็กทริก หมายถึง การสูญเสียของโพลาริเซชันคงค้างที่สามารถกลับทิศได้ในวัสดุแฟร์โรอิเล็กทริกตามจำนวนรอบของสนามไฟฟ้าที่ให้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อความล้าจากการเปลี่ยนขั้ว ได้แก่

- ความถี่
- ขนาดของสนามไฟฟ้า
- อุณหภูมิ
- ระยะเวลา และจำนวนรอบในการทดสอบ

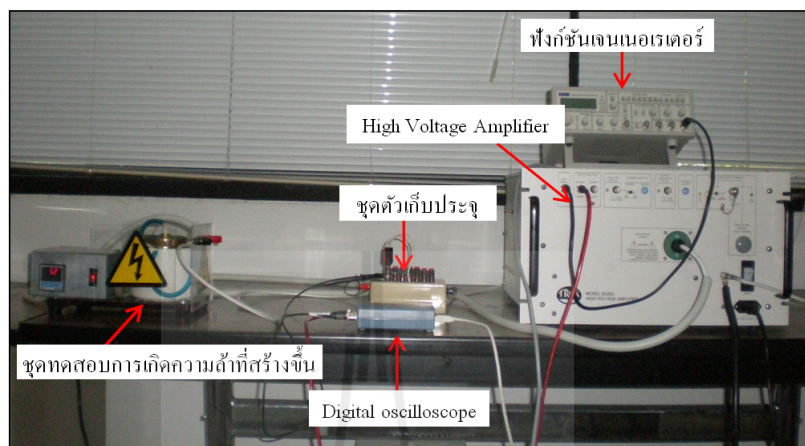
ดังนั้นในการสร้างระบบทดสอบความล้าแฟร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZT จะทำโดยการป้อนสนามไฟฟ้ากระแสสลับให้แก่ชิ้นเซรามิก PZT และทำการทดสอบความล้าที่ค่าความถี่ ขนาดของสนามไฟฟ้า และอุณหภูมิต่าง ๆ กัน เพื่อทดสอบการทำงานของระบบ และใช้เป็นแนวทางในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT

การสร้างระบบทดสอบความล้าของเซรามิก PZT แบ่งออกเป็น 3 หัวข้อหลัก คือ การสร้างชุดทดสอบความล้าแฟร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZT การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทำการทดสอบ การทดสอบการทำงานของชุดทดสอบความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT เบื้องต้น โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

4.1 การสร้างระบบทดสอบความล้าแฟร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZT

ระบบทดสอบความล้าแฟร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ถูกสร้างขึ้นเพื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับตัวอย่างชิ้นงาน และเก็บบันทึกค่าโพลาริเซชันในขณะทำการให้สนามไฟฟ้า โดยระบบทดสอบความล้ามีส่วนประกอบคือ ภาชนะบรรจุชิ้นงานทดสอบ (Sample chamber) โดยมีชุดอิเล็กโตรดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงสูง วงจรควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันซิลิโคน ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (Thurlby Thandar Instruments, TG 550) เครื่องขยายแรงดันไฟฟ้า (High Voltage

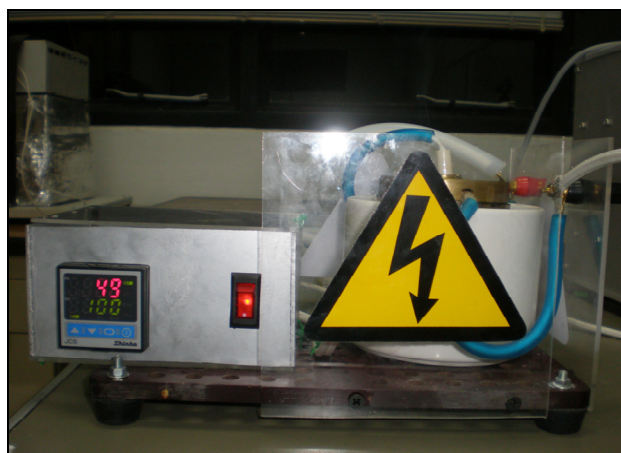
Amplifier, Trek 20/20C, Trek, Inc., USA) วงจร Sawyer-Tower และคิวิตอลอสซิลโลสโคป (Picoscope, 2203) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยแต่ละส่วนสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 ระบบทดสอบความล้าเฟร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZT

4.1.1 ชุดทดสอบการเกิดความล้าเฟร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZT

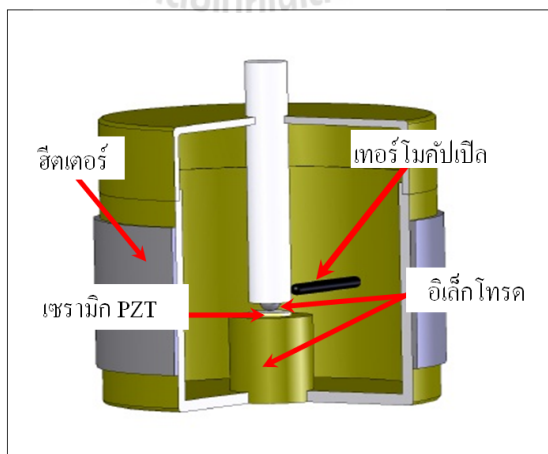
ชุดทดสอบการเกิดความล้าเฟร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZT มี 2 ส่วนหลักใหญ่ คือ 4.1.1.1 ภาชนะบรรจุชิ้นงานทดสอบ โดยมีชุดอิเล็กทรอนิกส์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงสูง และ 4.1.1.2 วงจรควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันซิลิโคน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยแต่ละส่วนสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้



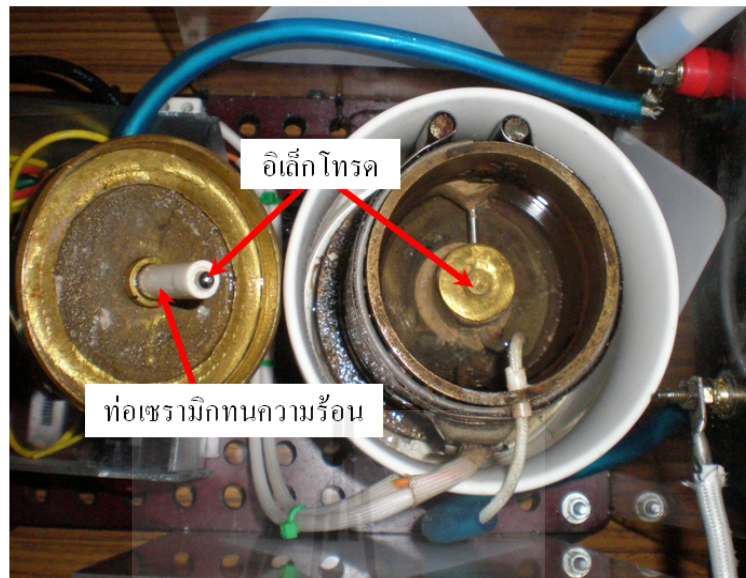
รูปที่ 4.2 ชุดทดสอบการเกิดความล้าเฟร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZT

4.1.1.1 ภาพขณะบรรจุชิ้นงานทดสอบ

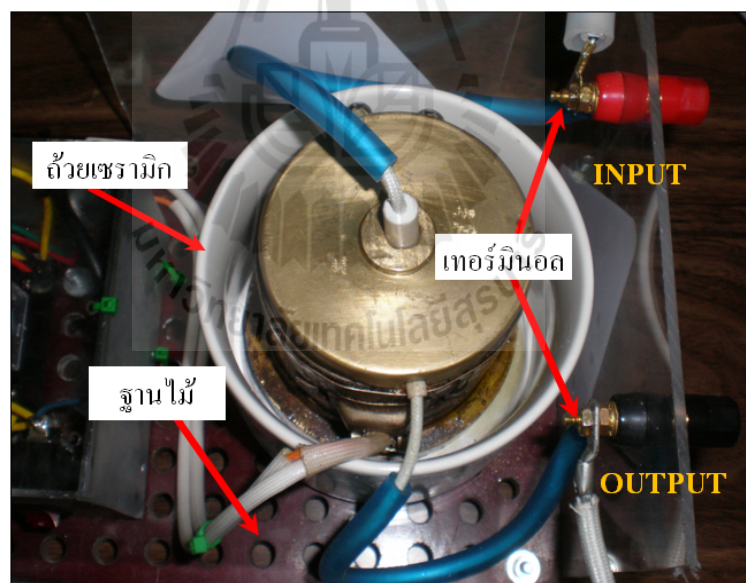
ภาพขณะบรรจุชิ้นงานทดสอบ ทำจากท่อทองเหลืองใส่ชิ้นเซรามิก PZT มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm สูง 85 mm สามารถเชื่อมต่อกับระบบแรงดันไฟฟ้าแรงสูง โดยท่อทองเหลืองนี้มีลักษณะรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 85 mm เพื่อใส่ชิ้นเซรามิก PZT และน้ำมันซิลิโคน มีระบบการตรวจวัดแรงดันเบรคดาวน์โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ในลักษณะรูปแบบของระนาบแบน - ปลายแหลม ดังไดอะแกรมในรูปที่ 4.3 เมื่อประกอบสร้างจริงได้ลักษณะของภาพขณะบรรจุชิ้นงานทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.4(a) ภายในตัวท่อทองเหลืองจะมีแท่งทองเหลืองทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm เพื่อจำลองอิเล็กทรอนิกส์ทรูประนาบแบนรวมทั้งเป็นฐานวางชิ้นเซรามิก PZT เชื่อมต่อกับเทอร์มินอลด้าน Output ส่วนด้านบนของตัวท่อมีฝาปิดทองเหลืองทำหน้าที่ป้องกันความร้อนออกขณะที่เพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบ ตลอดจนรักษาความร้อนเอาไว้เมื่อได้ความร้อนตามที่ตั้งไว้ และป้องกันสิ่งสกปรกลงไปในท่อทองเหลือง ด้วยฝาปิดที่มีการเจาะรูเพื่อใส่ท่อเซรามิกทนความร้อน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 mm สูง 50 mm ภายในท่อเซรามิกมีแท่งอลูมิเนียมปลายแหลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm และความสูง 45 mm เชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่จุดเทอร์มินอลด้าน Input เพื่อเป็นการจำลองอิเล็กทรอนิกส์ทรูปลายแหลมในการส่งผ่านค่าความเครียดทางไฟฟ้าให้แก่ตัวชิ้นเซรามิก PZT นอกจากนี้ท่อทองเหลืองยังมีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และฮีตเตอร์ (Heater) เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันซิลิโคน ท่อทองเหลืองจะถูกใส่ไว้ในถ้วยเซรามิกอีก 1 ชั้น เพื่อป้องกันความร้อนจากฮีตเตอร์ และใช้เป็นฉนวนทางไฟฟ้า โดยถ้วยเซรามิกนี้จะวางบนฐานไม้ที่เจาะรูไว้เพื่อระบายความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.4(b)



รูปที่ 4.3 ไดอะแกรมภาพขณะบรรจุชิ้นงานทดสอบ (Sample chamber)

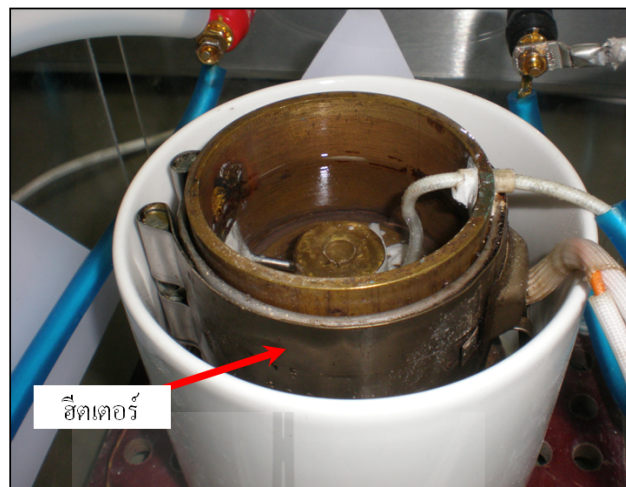


(a) ด้านใน



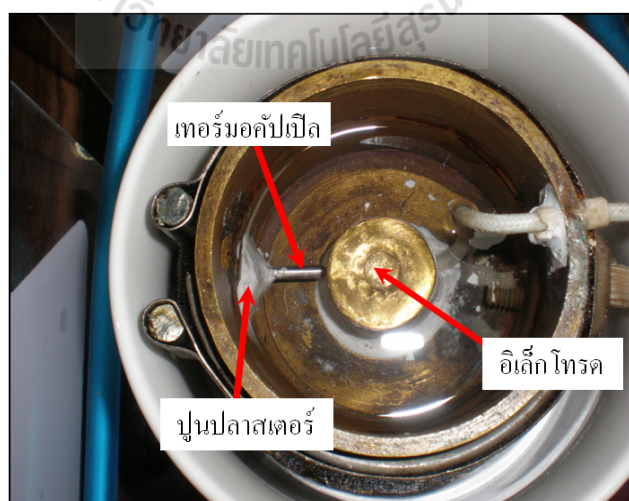
(b) ด้านนอก

รูปที่ 4.4 ภาพขณะบรรจุชิ้นงานทดสอบ (a) ด้านใน และ (b) ด้านนอก



รูปที่ 4.6 ฮีตเตอร์

- เทอร์โมคัปเปิล ทำหน้าที่วัดค่าอุณหภูมิของน้ำมันซิลิโคน และแสดงค่าของอุณหภูมิส่งไปยังกล่องควบคุมอุณหภูมิ การติดตั้งตัวเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับตัวหม้อทองเหลือง ต้องให้เทอร์โมคัปเปิลสัมผัสเพียงแค่น้ำมันซิลิโคน ห้ามให้สัมผัสกับตัวหม้อทองเหลืองเด็ดขาด เนื่องจากเมื่อเกิดแรงดันเบรกคาวนจากการทดสอบความล้าแล้วหม้อทองเหลืองจะสัมผัสโดนไฟฟ้าแรงสูงในชั่วขณะเกิดเบรกคาวน หากเทอร์โมคัปเปิลทำการสัมผัสกับหม้อทองเหลืองจะทำให้เกิดความเสียหายได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



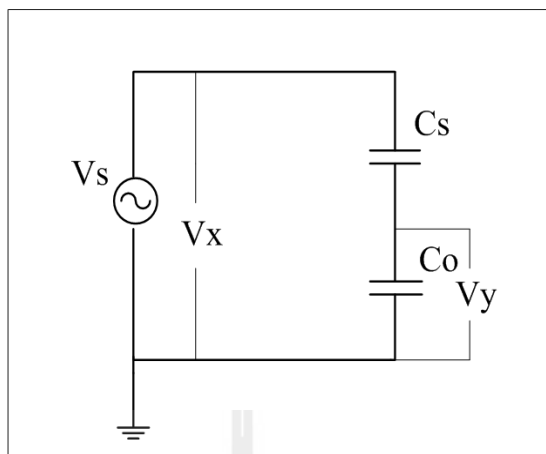
รูปที่ 4.7 เทอร์โมคัปเปิล

- ชุดควบคุมอุณหภูมิ เป็นเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล สามารถรับ อินพุตจากเทอร์โมคัปเปิลแล้วมีเอาต์พุตเป็นแบบรีเลย์ โดยเมื่ออุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ตั้งไว้รีเลย์จะตัดการทำงานของฮีตเตอร์ หากค่าที่วัดได้น้อยกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้รีเลย์จะทำการต่อวงจรของฮีตเตอร์อีกครั้งเพื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันซิลิโคนให้อยู่ในระดับความร้อนที่ต้องการ การทดสอบความล้าทางไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ มีการจำลองความเครียดทางความร้อน โดยระดับอุณหภูมิประกอบด้วย 23 °C (อุณหภูมิห้อง) 50 °C 100 °C 150 °C และ 200 °C



รูปที่ 4.8 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

ในการศึกษาความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นต้องศึกษาวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิก PZT ซึ่งวัดได้โดยใช้วงจร Sawyer-Tower ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยที่ V_x และ V_y คือ สัญญาณที่ป้อนเข้าดิจิตอลออสซิลโลสโคปในแนวนอน และแนวตั้ง เพื่อแสดงผลที่ได้จากการวัดบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยแกนนอนของวงวนฮีสเทอรีซิสแทนค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมแหล่งจ่าย โดยสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเซรามิก PZT จาก $E = V_x/d$ เมื่อ d เป็นความหนาของชั้นเซรามิก PZT และแกนตั้งของวงวนฮีสเทอรีซิสบนหน้าจอ แทนค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (C_0) ซึ่งแปรผันโดยตรงกับประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนเซรามิก PZT (C_s) โดยสามารถนำไปคำนวณหาค่าโพลาริเซชันที่เปลี่ยนแปลงไปบนเซรามิก PZT ได้จากสมการ $P = C_0 V_y / A$ เมื่อ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของเซรามิก PZT (รายละเอียดของการคำนวณแสดงไว้ในบทที่ 3)



รูปที่ 4.9 แผนผังวงจร Sawyer-Tower

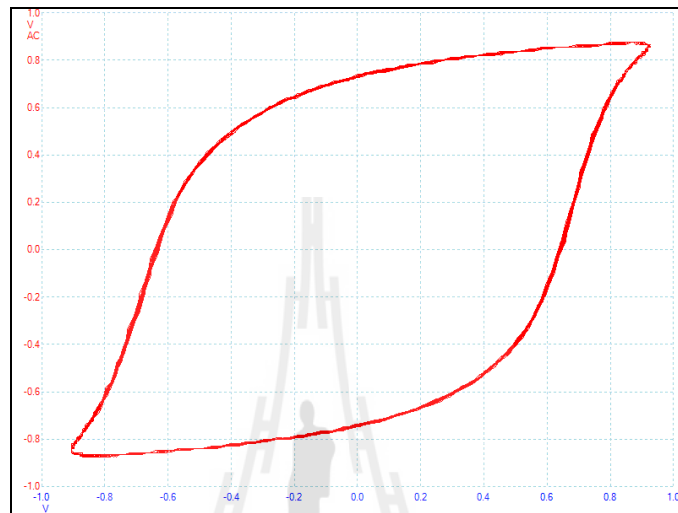
ในการวัดงานฮีสเทอรีซิสจากการทดสอบการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะต้องมีการทดสอบเกี่ยวกับค่าตัวเก็บประจุมาตรฐานที่เหมาะสมกับวงจร Sawyer-tower โดยในการทดสอบจะทำการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุที่ค่า 0.01 ถึง 1 μF ดังแสดงในรูปที่ 4.10



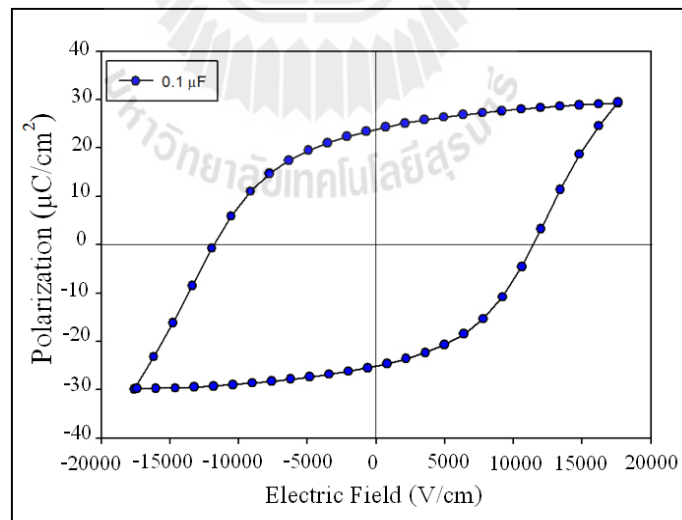
รูปที่ 4.10 ชุดตัวเก็บประจุ

งานฮีสเทอรีซิสนั้นสามารถแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยทำการบันทึกข้อมูลที่ได้จากคิิตอลอสซิลโลสโคป ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.13 ข้อมูลที่ได้จะ

นำมาคำนวณหาค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่ให้แก่วัสดุเซรามิก PZT จากรูปที่ 4.12 เป็นวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้จากการใช้ค่าตัวเก็บประจุ $0.1 \mu\text{F}$ ความถี่ 10 Hz สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ 1.75 kV/mm

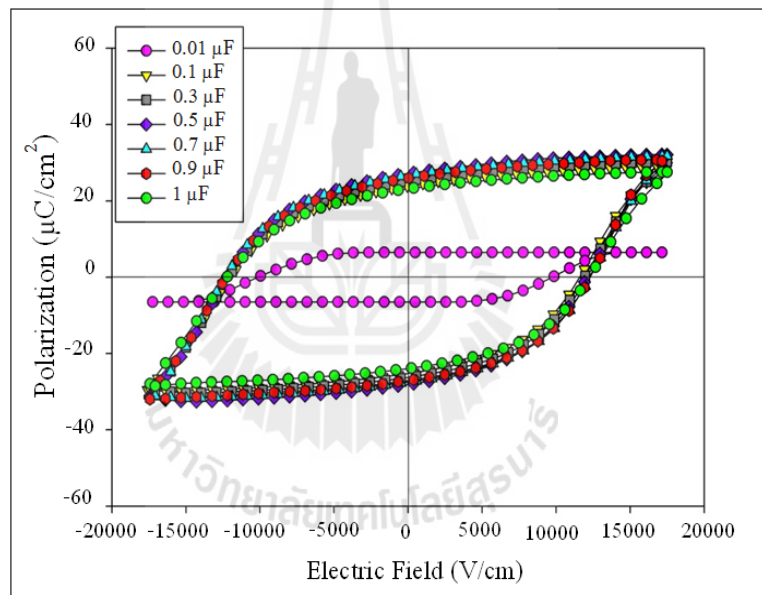


รูปที่ 4.11 ตัวอย่างวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ 4.12 วงวนฮิสเทอรีซิสเมื่อกำหนดสนามไฟฟ้า และค่าโพลาริเซชัน

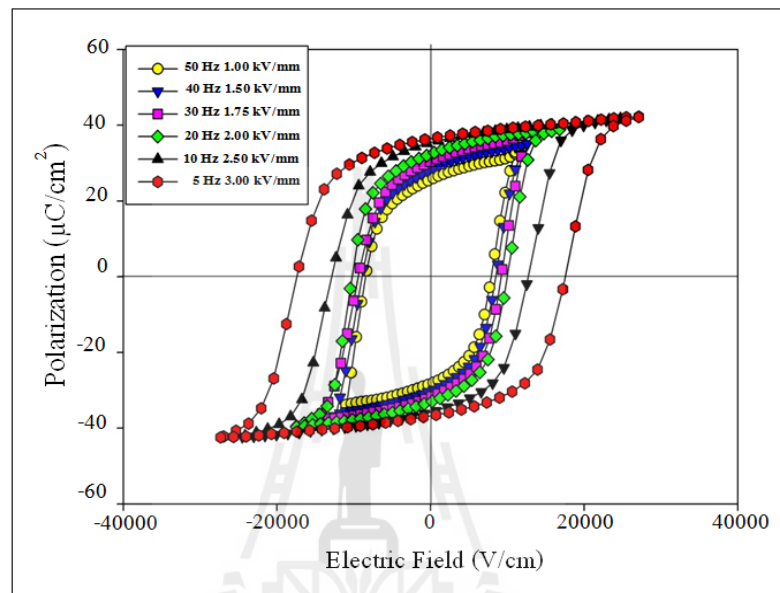
วงวนฮิสเทอรีซิสที่วัดได้จากตัวเก็บประจุค่าต่างกันจะทำให้วงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้มีรูปร่างต่างกันด้วย ทั้งนี้ เมื่อตัวเก็บประจุมีค่าเพิ่มขึ้นโพลาริเซชันจะมีค่าลดลงเนื่องจากแรงดันตกคร่อมเซรามิก PZT ลดลง ส่งผลต่อการจัดทิศทางโพลาริเซชันในเซรามิก PZT ให้ลดลงด้วยจากการศึกษาพบว่าที่ค่าตัวเก็บประจุ $1\ \mu\text{F}$ สำหรับตัวอย่างที่มีพื้นที่ผิว $0.815\ \text{cm}^2$ และความหนา $1\ \text{mm}$ จะทำให้ได้วงวนฮิสเทอรีซิสมีขนาดสมมาตร และมีการอิ่มตัวของโพลาริเซชันที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ดังนั้นในการศึกษาความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกจึงใช้ตัวเก็บประจุมาตรฐานที่ $1\ \mu\text{F}$ ซึ่งคิดเป็นประมาณ 1700 เท่าของค่าตัวเก็บประจุของชั้นเซรามิก PZT

$$\left(\frac{1 \times 10^{-6}}{588 \times 10^{-12}} \approx 1700 \right)$$


รูปที่ 4.13 วงวนฮิสเทอรีซิสที่ค่าตัวเก็บประจุต่าง ๆ

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในงานวิจัยนี้นอกจากต้องหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสที่ใช้ในการทดสอบการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT แล้ว ยังต้องตรวจสอบค่าสนามไฟฟ้า และความถี่ที่มากที่สุดที่ชั้นเซรามิก PZT จะทนได้ เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดค่าสนามไฟฟ้า และความถี่ที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้ โดยในการทดสอบจะทำการป้อนสนามไฟฟ้า และความถี่ต่าง ๆ จนกว่าชั้นเซรามิก PZT จะเกิดการเบรกดาวน จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่ายิ่งความถี่เพิ่มมากขึ้นแรงดันที่สามารถป้อนให้แก่ชิ้นงานตัวอย่าง

เพื่อให้เกิดวงวนฮิสเทอรีซิสจะมีค่าลดลง ยกตัวอย่างเช่น ที่ความถี่ 5 Hz ชิ้นเซรามิก PZT สามารถทนสนามไฟฟ้าได้มากที่สุดคือ 3.0 kV/mm ในขณะที่ความถี่ 50 Hz ชิ้นเซรามิก PZT สามารถทนสนามไฟฟ้าได้ 1 kV/mm เป็นต้น



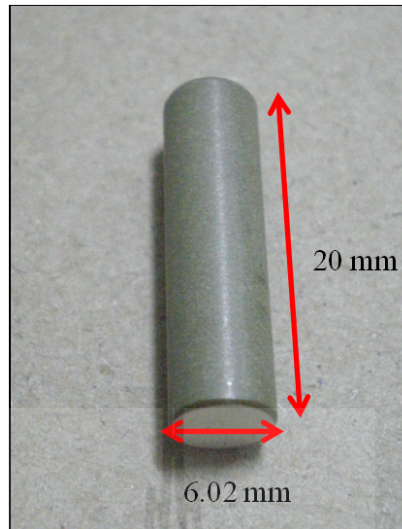
รูปที่ 4.14 วงวนฮิสเทอรีซิสที่สนามไฟฟ้า และความถี่ค่าต่าง ๆ

4.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทำการทดสอบ

4.2.1 การตัดชิ้นวัสดุเซรามิก PZT สำหรับการทดสอบ

การทดสอบการเกิดความล้าของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกในงานวิจัยนี้เป็นการเร่งการเสื่อมสภาพของเซรามิก PZT เนื่องจากความล้าจากการเปลี่ยนขั้วโพลาริเซชันของเซรามิก PZT เนื่องจากการทดสอบความล้าจะให้สนามไฟฟ้าที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าสนามไฟฟ้าลบล้าง (Coercive field) ของเซรามิก PZT ซึ่งมีค่าประมาณ 10 kV/cm ดังนั้นเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการทดลอง และไม่ทำให้เครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้าทำงานเกินพิกัดแรงดัน ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจึงถูกตัดให้มีขนาดบาง ยกตัวอย่างเช่น ขนาดชิ้นงานความหนา 1 mm จะใช้แรงดันไฟฟ้าเพียง 1 kV เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนขั้วโพลาริเซชัน

รูปที่ 4.15 เป็นชิ้นเซรามิก PZT ที่ผลิตจากบริษัท Thales ประเทศออสเตรเลียมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.2 mm หนา 20 mm



รูปที่ 4.15 ชิ้นเซรามิกPZT ที่นำมาทดสอบ

ชิ้นงานตัวอย่างจะถูกตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงาน (Buehler, Isomet 1000, รูปที่ 4.16) โดยให้มีความหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร

หลังจากนั้นทำการขัดชิ้นเซรามิกPZT โดยชิ้นสารจะถูกนำไปวัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ เพื่อตรวจสอบให้มีความหนาเท่ากันทุกชิ้นสำหรับการทดสอบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันผลกระทบจากความหนาที่ไม่เท่ากัน ซึ่งทำให้สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชิ้นงานมีค่าไม่เท่ากัน และอาจนำไปสู่ค่าผลการทดลองที่ผิดเพี้ยนได้



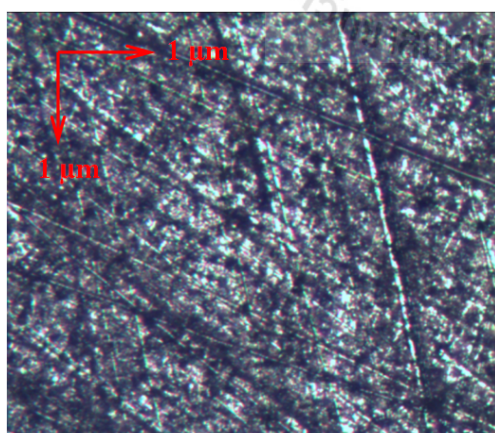
รูปที่ 4.16 เครื่องตัดชิ้นงาน (Precision-Saw)

4.2.2 การขัดชิ้นงาน

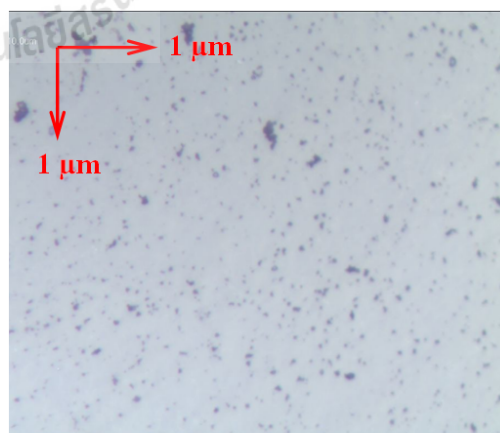
ชิ้นเซรามิก PZT ที่ถูกตัดจะนำมาขัดผิวหน้าให้เรียบเนียนสม่ำเสมอ (เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอ รอยร้าว สิ่งปนเปื้อน และความพร่องอื่น ๆ ด้วยเครื่องขัดสาร (Buehler, Phoenix Beta, รูปที่ 4.17) ให้มีความหนา 1 มิลลิเมตร รูปเปรียบเทียบพื้นผิวของชิ้นงานก่อน และหลังขัดแสดงไว้ในรูป 4.18(a) และ 4.18(b) โดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 800 1000 1500 และ 4000 ตามลำดับ โดยในระหว่างการขัดจะใช้ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) เป็นตัวหล่อลื่นแทนการใช้น้ำเพราะสามารถระเหยได้ง่าย เมื่อซึมเข้าเนื้อวัสดุก็สามารถที่จะระเหยได้ง่ายกว่า และช่วยลดฝุ่นละอองที่เกิดจากการขัดชิ้นวัสดุ



รูปที่ 4.17 เครื่องขัดชิ้นงาน (Grinder-Polisher)



(a) ก่อนขัด



(b) หลังขัด

รูปที่ 4.18 พื้นผิวเซรามิก PZT (a) ก่อนขัด และ (b) หลังขัด

4.2.3 การทำขั้วไฟฟ้า

นำชิ้นเซรามิก PZT ที่ได้ทำการขัดผิวหน้า และผิวด้านข้างให้เรียบสม่ำเสมอโดยมีความความหนา 1 mm ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตน ทากาวเงิน (Silver paste) บนผิวหน้าชิ้นงานทั้ง 2 ด้านเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้าของชิ้นงาน และทำความสะอาดผิวด้านข้างชิ้นงานด้วยอะซิโตนอีกครั้ง จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 550 °C อบแห้งไว้ 120 นาที โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 °C/นาที และอัตราการเย็นตัว 5 °C/นาที เพื่อให้กาวเงินที่เป็นขั้วไฟฟ้าแห้งสนิทกับผิวหน้าทั้งสองด้านของชิ้นเซรามิก PZT นำชิ้นงานที่ได้หลังจากอบมาลบออกไซด์ที่ผิวหน้าชิ้นงานออกโดยใช้ยางลบหมึกถูที่ผิวชิ้นงานจนขาวสะอาด และขัดผิวด้านข้างเพื่อลบอิเล็กโทรดที่ยังเหลืออยู่ด้วยกระดาษทรายอีกครั้งก่อนนำไปเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้าเพื่อป้องกันการลัดวงจร

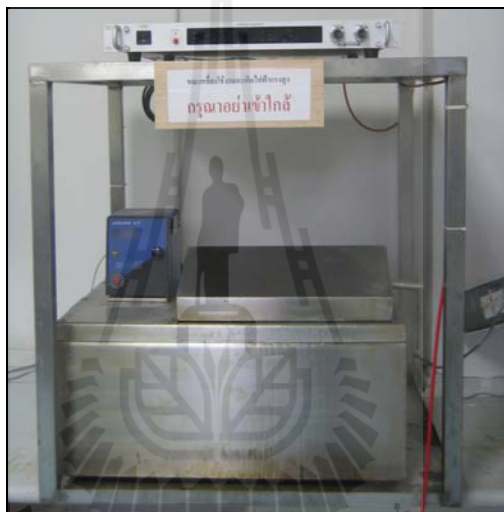


รูปที่ 4.19 ชิ้นเซรามิก PZT หลังทำขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรด

4.2.4 การเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้า

นำชิ้นงานที่ทำด้วยอิเล็กโทรดแล้วไปเหนี่ยวนำไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (Matsusada, AU-30*40, รูปที่ 4.20) ซึ่งสามารถจ่ายแรงดันได้สูงสุดถึง 30 kV โดยจะนำชิ้นเซรามิก PZT ใส่ในแท่นใส่ตัวอย่างสำหรับการทำขั้ว โดยด้านบนของแท่นใส่ตัวอย่าง (เป็นเนื้อทองเหลือง) จะต่อเข้ากับขั้วบวก ส่วนด้านล่างจะต่อเข้ากับขั้วลบของสายไฟ จากนั้นนำไปใส่ในอ่างน้ำมันพืชที่จะใช้ในการเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้าซึ่งน้ำมันพืชจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางเนื่องจากมีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าเพราะในขณะที่เหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้าต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูง จากนั้นปรับอุณหภูมิไปที่ 120 °C เพื่อป้องกันอันตรายจากการลัดวงจรขณะทำการเหนี่ยวนำเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงได้

ถูกตั้งค่าจำกัดกระแสไฟฟ้าไว้ที่ไม่เกิน 0.4 mA จากนั้นจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นตัวอย่าง โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 1.7 kV ต่อความหนา 1 mm เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตามต้องการจับเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวของโพลาริเซชันภายในชั้นเซรามิก PZT ไปในทิศทางที่ใกล้เคียงกับทิศทางของสนามไฟฟ้ามากที่สุด เมื่อครบเวลาดังกล่าวจึงลดแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ให้กับวัสดุตามลำดับ แล้วปิดชุดควบคุมอุณหภูมิ รอจนกระทั่งสนามไฟฟ้าตกค้างมีค่าเป็นศูนย์ก่อน แล้วจึงนำแท่นใส่ตัวอย่างออกจากอ่างน้ำมันแล้วล้างทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตนพร้อมทำเครื่องหมายขีดไฟฟ้าลงบนผิววัสดุ



รูปที่ 4.20 เครื่องเหนี่ยวนำไฟฟ้า

4.2.5 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

4.2.5.1 การหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

การหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของชั้นเซรามิก PZT ได้จากการวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุของชิ้นสารด้วยเครื่อง LCR Meter (HP precision, 4284A) ซึ่งในการวัดค่า นั้นจะจ่ายแรงดันไฟฟ้า 1 V ที่วัสดุ และใช้ความถี่ 1 kHz จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ได้จากความสัมพันธ์

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

โดยที่ C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ (F)

d คือ ความหนาของสารไดอิเล็กทริก (m)

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

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก (m^2)

4.2.5.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (d_{33})

ตรวจสอบค่า d_{33} ของชิ้นเซรามิก PZT โดยนำชิ้นเซรามิก PZT ที่ทำซ้ำแล้วปล่อยทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จึงนำมาวัดค่า d_{33} ด้วยเครื่อง d_{33} Meter (International Ltd., APC 90-2030, รูปที่ 4.21)



รูปที่ 4.21 เครื่องวัดค่า d_{33} (d_{33} Meter)

4.3 การทดสอบการทำงานของชุดทดสอบความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการทำงานของชุดทดสอบความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT แล้วทำการศึกษาวงจรฮีสเทรีซิสที่สนามไฟฟ้า ความถี่ และอุณหภูมิต่าง ๆ ในส่วนความความล้าทางไฟฟ้านั้นจะศึกษาที่สนามไฟฟ้า และความถี่ต่าง ๆ โดยจะทดสอบที่อุณหภูมิห้อง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เริ่มต้นด้วยการนำชิ้นเซรามิก PZT ใส่ไว้ระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลม-ระนาบแบน โดย

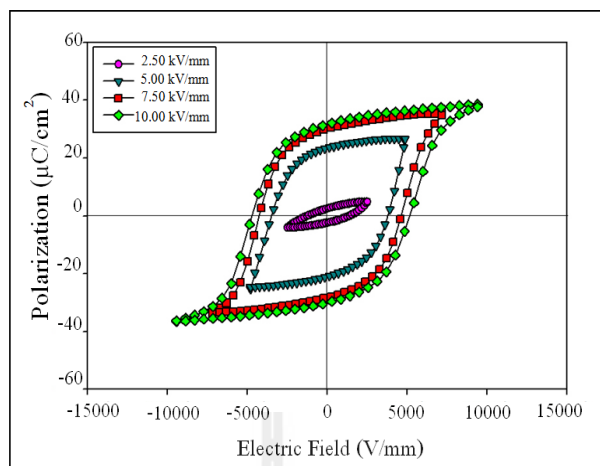
ภายในภาชนะควรวัดน้ำมันซิลิโคนให้ท่วมชิ้นเซรามิก PZT เพื่อป้องกันการเกิดดีสชาร์จบนพื้นผิวของภาชนะ และในอากาศอันเป็นสาเหตุให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบ อุณหภูมิภายในภาชนะบรรจุชิ้นวัสดุจะถูกตั้งค่า และรักษาให้คงที่สำหรับในแต่ละการทดสอบ โดยอุณหภูมิจะถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ ในการทดสอบจะใช้อุณหภูมิไม่เกิน 200°C ชิ้นเซรามิก PZT จะถูกทดสอบภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้า โดยรูปคลื่นความถี่ และขนาดของโหนดทางไฟฟ้าจะถูกกำหนดโดยฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ จากนั้นจะถูกขยายแรงดันโดยเครื่องขยายแรงดันไฟฟ้าในช่วงแรงดัน 0 - 10 kV ส่วนความถี่ที่ใช้ในการทดสอบจะอยู่ในช่วง 0 - 200 Hz โดยสามารถเขียนขั้นตอนการทดสอบได้ดังนี้

1. ใส่เซรามิก PZT ระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2
2. ป้อนสนามไฟฟ้าให้กับเซรามิก PZT จนกระทั่งได้สนามไฟฟ้าที่ต้องการโดยค่าของสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ 2.5 kV/mm 5 kV/mm 7.5 kV/mm และ 10 kV/mm ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้อง ความถี่ 50 Hz
3. ป้อนความถี่ให้กับเซรามิก PZT จนกระทั่งได้ความถี่ที่ต้องการ โดยความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ 20 Hz 40 Hz 60 Hz 80 Hz 100 Hz 120 Hz 140 Hz และ 160 Hz ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้อง โดยสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบคือ 1.75 kV/mm ที่อุณหภูมิห้อง
4. ป้อนอุณหภูมิให้กับเซรามิก PZT จนกระทั่งได้อุณหภูมิที่ต้องการโดยค่าของอุณหภูมิที่ทำการทดสอบอยู่ที่ห้อง 50°C 100°C 150°C และ 200°C ตามลำดับ โดยสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบคือ 2 kV/mm ความถี่ 50 Hz
5. บันทึกวงวนฮิสเทอรีซิส
6. คำนวณค่าสนามไฟฟ้า และโพลาริเซชันที่สภาวะโหนดต่าง ๆ ทางไฟฟ้า

4.3.1 ผลการศึกษาวงวนฮิสเทอรีซิสที่สภาวะโหนดต่าง ๆ

4.3.1.1 ผลการศึกษาวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิก PZT ที่สนามไฟฟ้าต่าง ๆ

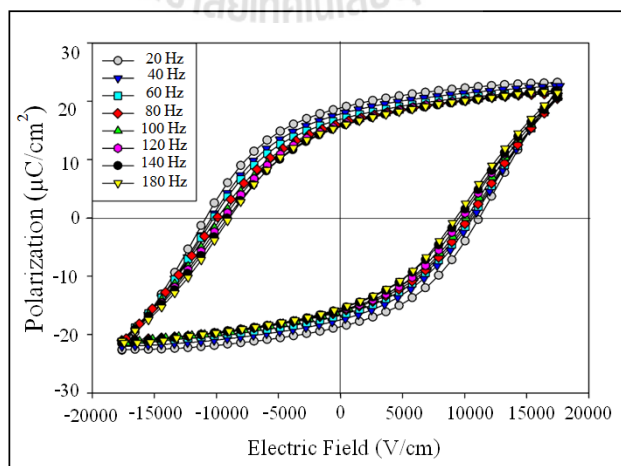
จากรูปที่ 4.22 เป็นวงวนฮิสเทอรีซิสที่ค่าสนามไฟฟ้า 2.5 kV/mm 5 kV/mm 7.5 kV/mm และ 10 kV/mm ตามลำดับ โดยการใช้ความถี่ 10 Hz ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจะทำให้โพลาริเซชันมีค่ามากขึ้นด้วย เนื่องจากโพลาริเซชันจะสามารถกลับทิศไปตามทิศของสนามไฟฟ้าได้ดีขึ้น ส่วนค่า Coercive field ที่ใช้ในการกลับทิศของโพลาริเซชันนั้นจะมีค่ามากขึ้นด้วย



รูปที่ 4.22 วงวนฮิสเทอรีซิสที่สนามไฟฟ้าต่าง ๆ

4.3.1.2 ผลการศึกษาวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิก PZT ที่ความถี่ต่าง ๆ

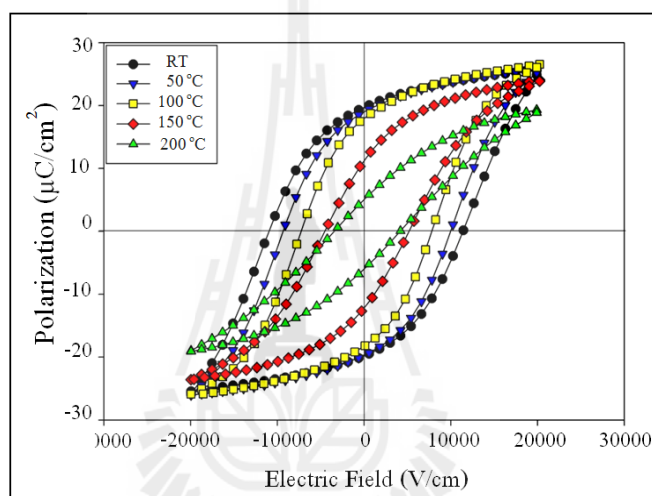
จากรูปที่ 4.23 เป็นวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้จากความถี่ต่าง ๆ ที่ 20 Hz 40 Hz 60 Hz 80 Hz 100 Hz 120 Hz 140 Hz และ 160 Hz โดยใช้สนามไฟฟ้า 1.75 kV/mm ที่อุณหภูมิห้องพบว่า เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นโพลาริเซชันจะมีค่าน้อยลง เนื่องจากโพลาริเซชันไม่สามารถกลับทิศไปตามทิศของสนามไฟฟ้าได้ทันทำให้โพลาริเซชันมีค่าลดลงตามไปด้วย ในขณะที่ค่า Coercive field เมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นค่า Coercive field จะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากโพลาริเซชันมีค่าลดลง ค่า Coercive field ที่ใช้ในการกลับทิศของโพลาริเซชันจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 4.23 วงวนฮิสเทอรีซิสที่ความถี่ต่าง ๆ

4.3.1.3 ผลการศึกษาวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.24 เป็นวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้จากอุณหภูมิต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง 50 °C 100 °C 150 °C และ 200 °C โดยใช้สนามไฟฟ้า 2 kV/mm ความถี่ 10 Hz พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโพลาริเซชันจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากโพลาริเซชันจะสามารถกลับทิศไปตามทิศของสนามไฟฟ้าได้ดี อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้เกิดการลบล้างโพลาริเซชัน (Thermal depolarization) ดังนั้นจึงทำให้โพลาริเซชันที่อุณหภูมิสูงกว่าโพลาริเซชันที่อุณหภูมิต่ำ ค่า Coercive field ที่ใช้ในการกลับทิศของโพลาริเซชันจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 4.24 วงวนฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.4 สรุป

ในบทที่ 4 ได้ทำการอธิบายถึงการสร้างระบบทดสอบความล้าแฟร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZT อันได้แก่ การสร้างชุดทดสอบความล้าทางไฟฟ้า การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบและการทดสอบการทำงานของชุดทดสอบความล้าทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT เบื้องต้น โดยในส่วนแรกจะทำการสร้างชุดทดสอบซึ่งประกอบด้วยภาชนะบรรจุชิ้นงานทดสอบ และวงจรควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันซิลิโคน จากนั้นหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในการทดสอบ พบว่าที่ตัวเก็บประจุ 1 μF ซึ่งคิดเป็น 1700 เท่าของค่าตัวเก็บประจุของชิ้นเซรามิก PZT จะทำให้ได้วงวนฮิสเทอรีซิสมีขนาดสมมาตร และมีการอ้อมตัวของโพลาริเซชันดีที่สุด จากนั้นทำการตรวจสอบค่าสนามไฟฟ้าและความถี่ที่มากที่สุดที่ชิ้นเซรามิก PZT จะทนได้ พบว่าเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นแรงดันที่สามารถป้อนให้แก่ชิ้นงานตัวอย่างเพื่อให้เกิดวงวนฮิสเทอรีซิสจะมีค่าลดลงในส่วนต่อมาเป็นการ

เตรียมชิ้นงานสำหรับการทำการทดสอบ โดยก่อนทำการทดสอบจะนำชิ้นงานทากาวเงินที่ผิวหน้า ทั้ง 2 ด้านเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้าของชิ้นงาน จากนั้นจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นงานโดยใช้แรงดันไฟฟ้า 1.7 kV ต่อความหนา 1 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 120 °C โดยใช้เวลา 30 นาที จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า สำหรับส่วนสุดท้ายเป็นการทดสอบการทำงานของชุดทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของเซรามิก PZT เบื้องต้น โดยทำการศึกษาวงวนฮิสเทอรีซิสที่สนามไฟฟ้า ความถี่ และอุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของเซรามิก PZT ในบทถัดไป



บทที่ 5

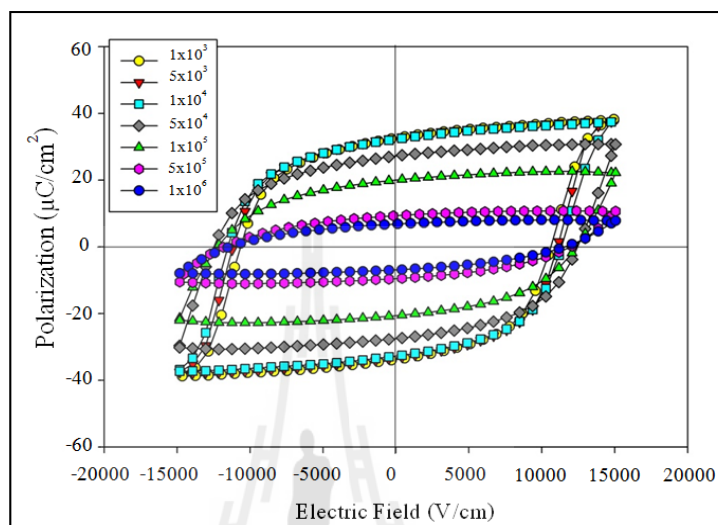
ผลการทดลอง และอภิปรายผล

ในบทนี้จะเป็นส่วนของการวิเคราะห์ และสรุปผลการเสื่อมสภาพของเซรามิก PZT ที่เกิดจากการทดสอบการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ อุณหภูมิห้อง 50°C 100°C 150°C และ 200°C ที่สนามไฟฟ้า 1.50 kV/mm ความถี่ 10 Hz โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากการศึกษาขนาดของวงวนฮิสเทอรีซิส ค่าโพลาริเซชันคงค้าง ค่า Coercive field ของวงวนฮิสเทอรีซิสที่เปลี่ยนแปลงไป จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดความล้าจะมีค่าลดลง ซึ่งการเกิดความล้าของค่าโพลาริเซชันมีความเป็นไปได้ที่จะมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ (1) ผลจากการตรึงของผนังโดเมน (Domain pinning effect) ซึ่งอาจสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) (2) เกิดจากความเสียหายบนผิวอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งอาจสามารถบ่งบอกได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

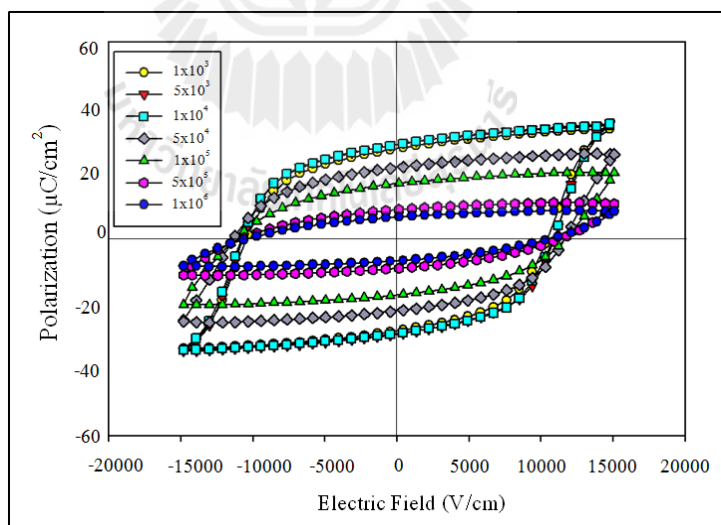
5.1 ผลของอุณหภูมิต่อขนาดของวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิก PZT

รูปที่ 5.1 (a) 5.1(b) 5.1(c) 5.1(d) และ 5.1(e) เป็นรูปของวงวนฮิสเทอรีซิสเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZT ที่ถูกป้อนสนามไฟฟ้ากระแสสลับจนถึง $1,000,000\text{ cycles}$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ อุณหภูมิห้อง 50°C 100°C 150°C และ 200°C ตามลำดับ โดยการใช้สนามไฟฟ้า 1.50 kV/mm ความถี่ 10 Hz พบว่า ที่อุณหภูมิห้อง และ 50°C ขนาดของวงวนฮิสเทอรีซิสจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยในช่วงแรกคือที่ $1,000$ ถึง $10,000\text{ cycles}$ และจะมีการลดลงมากขึ้นในช่วงที่ $10,000$ ถึง $500,000\text{ cycles}$ ต่อมาขนาดของวงวนฮิสเทอรีซิสจะมีค่าลดลงอย่างช้า ๆ อีกครั้งในช่วง $500,000$ ถึง $1,000,000\text{ cycles}$ โดยที่อุณหภูมิ 50°C ขนาดของวงวนฮิสเทอรีซิสจะมีค่าลดลงน้อยกว่าที่อุณหภูมิห้อง ส่วนที่อุณหภูมิ 100°C ขนาดของวงวนฮิสเทอรีซิสจะมีการลดลงน้อยมาก โดยในช่วง $1,000$ ถึง $100,000\text{ cycles}$ ขนาดของวงวนฮิสเทอรีซิสจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ต่อมาจะเริ่มลดลงมากขึ้นในช่วง $100,000$ ถึง $500,000\text{ cycles}$ ในช่วง $500,000$ ถึง $1,000,000\text{ cycles}$ ขนาดของวงวน

อีพ็อกซีเรซินจะมีค่าลดลงน้อยมากจนเกือบจะคงที่ ที่อุณหภูมิ 150°C และ 200°C ขนาดของวงวนอีพ็อกซีเรซินแทบจะไม่ลดลงเลยในแต่ละช่วงของการทดสอบ



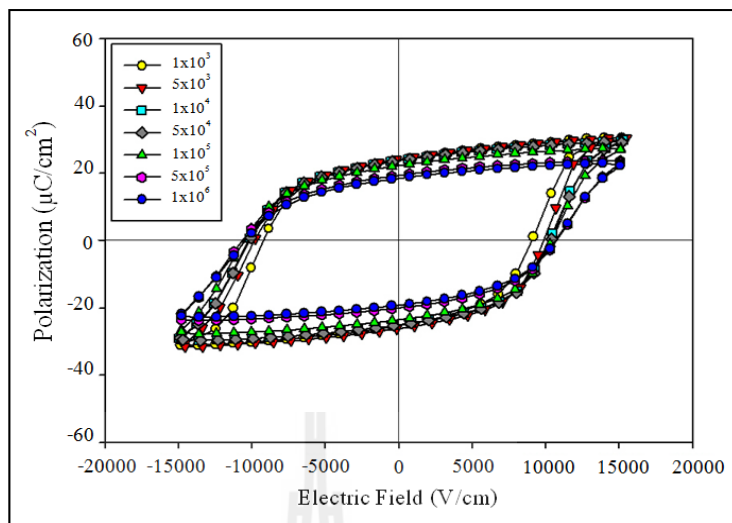
(a) วงวนอีพ็อกซีเรซินที่อุณหภูมิห้อง



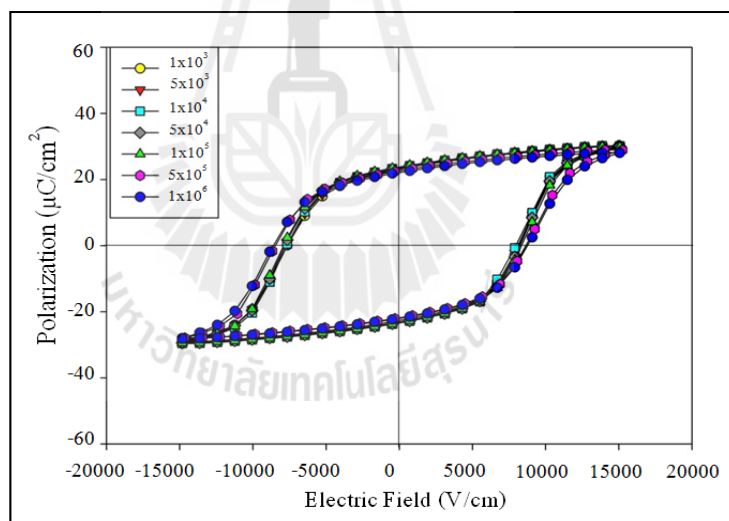
(b) วงวนอีพ็อกซีเรซินที่อุณหภูมิ 50°C

รูปที่ 5.1 ผลของจำนวนรอบสนามไฟฟ้าที่ป้อนต่อลักษณะของวงวนอีพ็อกซีเรซินที่อุณหภูมิ

(a) อุณหภูมิห้อง (b) 50°C (c) 100°C (d) 150°C (e) 200°C



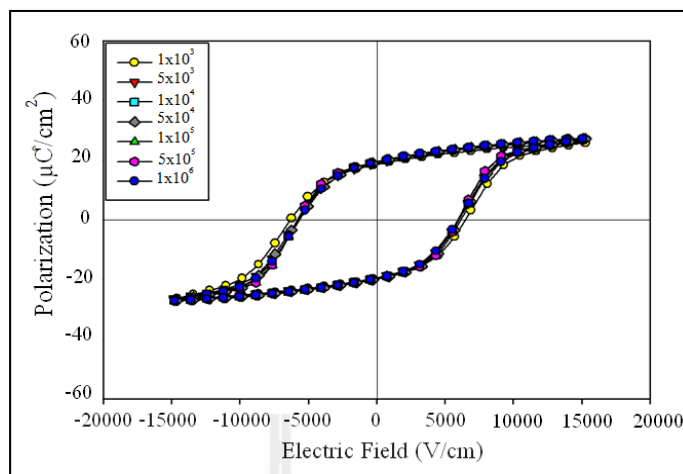
(c) วงวนฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิ 100 °C



(d) วงวนฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิ 150 °C

รูปที่ 5.1 ผลของจำนวนรอบสนามไฟฟ้าที่ป้อนต่อลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิ

(a) อุณหภูมิห้อง (b) 50 °C (c) 100 °C (d) 150 °C (e) 200 °C (ต่อ)



(e) วงวนฮีสเทอรีซิสที่อุณหภูมิ 200 °C

รูปที่ 5.1 ผลของจำนวนรอบสนามไฟฟ้าที่ป้อนต่อลักษณะของวงวนฮีสเทอรีซิสที่อุณหภูมิ
(a) อุณหภูมิห้อง (b) 50 °C (c) 100 °C (d) 150 °C (e) 200 °C (ต่อ)

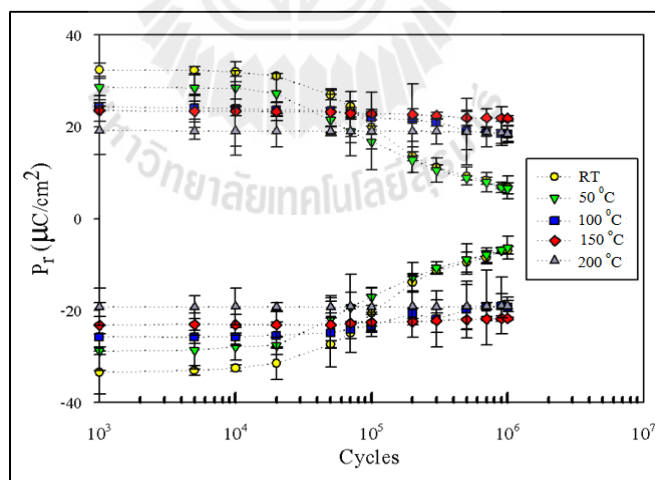
5.2 ผลของอุณหภูมิต่อค่าโพลาริเซชันคงค้าง และค่า **Coercive field** ของวงวนฮีสเทอรีซิสของเซรามิก PZT

ตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงการเกิดโพลาริเซชันคงค้างที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตามลำดับ พบว่าเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้อง และ 50 °C โพลาริเซชันคงค้างมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนที่อุณหภูมิ 100 °C โพลาริเซชันคงค้างมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ส่วนอุณหภูมิ 150 °C และ 200 °C ค่าโพลาริเซชันคงค้างมีการลดลงน้อยมากจนเกือบจะคงที่ โดยโพลาริเซชันคงค้างที่อุณหภูมิห้อง และ 50 °C จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ 100 °C 150 °C และ 200 °C ที่ลดลงน้อยมากจนเกือบคงที่ โดยที่อุณหภูมิห้อง และ 50 °C โพลาริเซชันคงค้างจะมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้น 79.057 % และ 75.781 % ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 100 °C โพลาริเซชันคงค้างจะมีค่าลดลงน้อยกว่าอุณหภูมิห้อง และ 50 °C คือ 13.24 % ส่วนที่อุณหภูมิ 150 °C และ 200 °C โพลาริเซชันคงค้างจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยจนเกือบจะคงที่คือ 2.51 % และ 1.48 % ตามลำดับ โดยจากรูปที่ 5.2(a) และ 5.2(b) แสดงให้เห็นถึงโพลาริเซชันคงค้าง และโพลาริเซชันคงค้างแบบสัณพัทธ์ (Normalized Polarization) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตามลำดับ จะเห็นว่าที่อุณหภูมิห้อง และ 50 °C ในช่วงแรกคือช่วง 1,000 ถึง 20,000 cycles ค่าโพลาริเซชันคงค้างจะมีการลดลงเพียงเล็กน้อย ต่อมาเมื่อจำนวนมากขึ้นคือช่วง 20,000 ถึง 200,000 cycles ค่าโพลาริเซชันคงค้างจะมีการลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อมาถึงจุด ๆ หนึ่งคือช่วงที่ 200,000 ถึง 1,000,000 cycles การลดลงของโพลาริเซชันคงค้างจะ

มีการลดลงอย่างช้า ๆ จนเกือบคงที่ ส่วนที่อุณหภูมิ 100 °C 150 °C และ 200 °C ในช่วงแรกนั้น โพลาริเซชันคงค้างมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิห้อง และ 50 °C ซึ่งอาจมีผลมาจากการลบล้างโพลาริเซชันเนื่องจากความร้อน (Thermal depolarization) ต่อมาเมื่อจำนวนรอบมากขึ้นโพลาริเซชันคงค้างจะมีค่าลดลงน้อยมาก โดยที่อุณหภูมิ 200 °C อัตราการลดลงของค่าโพลาริเซชันคงค้างจะมีการลดลงน้อยมาก

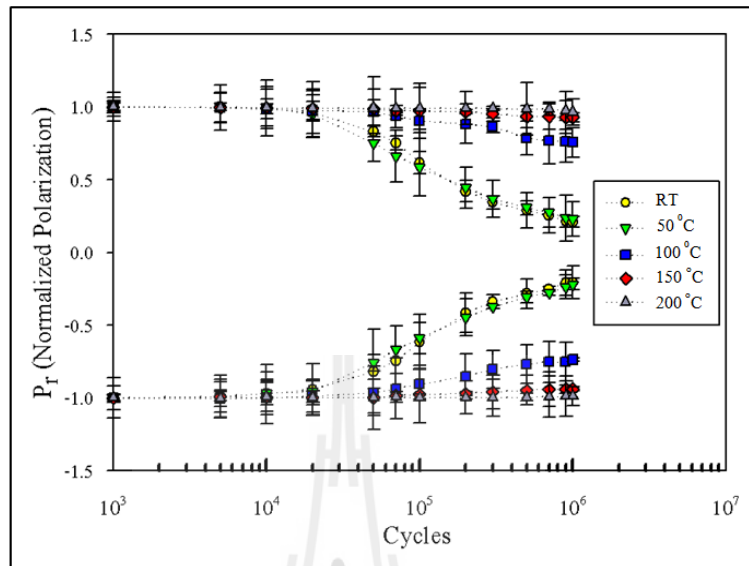
ตารางที่ 5.1 ผลของอุณหภูมิต่อโพลาริเซชันคงค้างจากการทดสอบความล้า

จำนวนรอบ แรงดัน	$\pm P_r (\mu C/cm^2)$									
	อุณหภูมิห้อง		50 °C		100 °C		150 °C		200 °C	
	+ P_r	- P_r	+ P_r	- P_r	+ P_r	- P_r	+ P_r	- P_r	+ P_r	- P_r
1000	32	-33	28	-28	24	-25	23	-23	19	-19
5000	32	-33	28	-28	24	-25	23	-23	19	-19
10000	31	-32	28	-27	23	-25	23	-23	19	-19
50000	26	-27	21	-21	23	-24	23	-23	19	-19
100000	19	-20	16	-16	21	-23	23	-22	19	-19
500000	8	-8	8	-8	19	-19	21	-21	19	-19
1000000	6	-6	6	-6	18	-18	21	-21	19	-19



(a)

รูปที่ 5.2 ผลของอุณหภูมิต่อ (a) โพลาริเซชันคงค้าง (b) โพลาริเซชันคงค้างแบบสัมพัทธ์ โดยกราฟแบบจุดคือค่าที่ได้จากการทดลองจริง ส่วนกราฟแบบเส้นคือค่าที่ได้จากสมการที่ 5.1



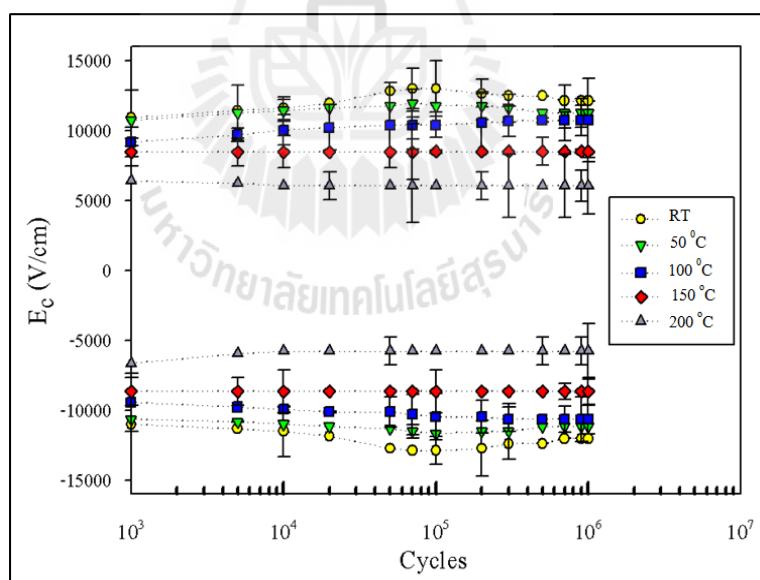
(b)

รูปที่ 5.2 ผลของอุณหภูมิต่อ (a) โพลาริเซชันคงค้าง (b) โพลาริเซชันคงค้างแบบ
สัมพันธ์โดยกราฟแบบจุดคือค่าที่ได้จากการทดลองจริงส่วนกราฟแบบ
เส้นคือค่าที่ได้จากสมการที่ 5.1 (ต่อ)

ตารางที่ 5.2 แสดงให้เห็นถึงค่า Coercive field ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่า Coercive field ที่ใช้ในการกลับทิศจะมีค่าน้อยลง โดยจากรูปที่ 5.3(a) และ 5.3(b) แสดงให้เห็นถึง ค่า Coercive field และค่า Coercive field แบบสัมพันธ์ (Normalized Coercive field) พบว่าที่ อุณหภูมิห้อง และ 50 °C ค่า Coercive field จะมีเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยจะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน ในช่วง 1,000 ถึง 100,000 cycles ต่อมาเมื่อจำนวนรอบมากขึ้นค่า Coercive field ที่ช่วง 100,000 ถึง 1,000,000 cycles ค่า Coercive field จะมีการลดลงในเวลาต่อมา ที่อุณหภูมิ 100 °C ค่า Coercive field มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และคงที่เมื่อจำนวนรอบมากขึ้น ส่วนที่อุณหภูมิ 150 °C และ 200 °C ค่า Coercive field มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และคงที่ในเวลาต่อมา

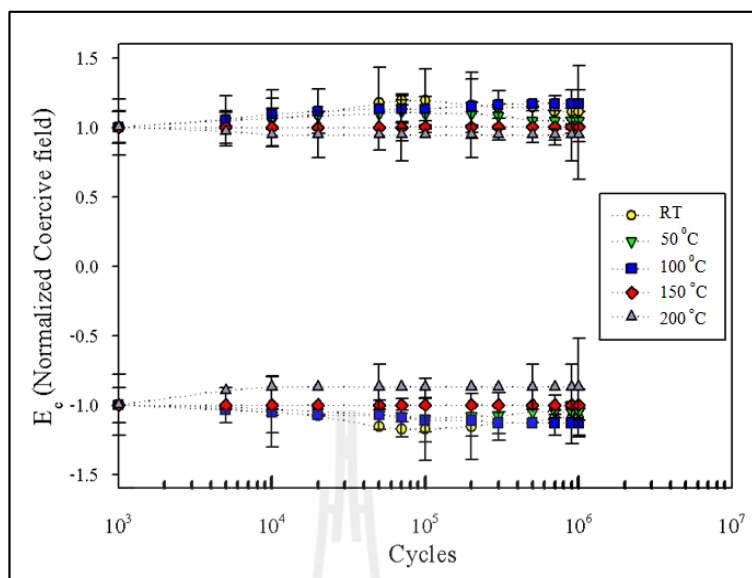
ตารางที่ 5.2 ผลของอุณหภูมิต่อค่า Coercive field เมื่อทดสอบความล้า

จำนวนรอบแรงดัน	$\pm E_c$ (V/cm)									
	อุณหภูมิห้อง		50 °C		100 °C		150 °C		200 °C	
	+ E_c	- E_c	+ E_c	- E_c	+ E_c	- E_c	+ E_c	- E_c	+ E_c	- E_c
1000	10678	-10936	10578	-10637	9257	-9474	8387	-7848	6395	-5856
5000	11176	-11235	10977	-10936	9746	-9826	8487	-7848	6395	-5856
10000	11694	-11594	11395	-11235	9685	-9836	8487	-8091	6096	-5856
50000	12670	-12729	12037	-11534	10248	-10377	8487	-8091	6096	-5856
100000	13069	-13227	12073	-11833	10610	-10620	8487	-8091	6096	-5856
500000	12670	-12430	11774	-11235	10861	-10787	8686	-8745	6096	-5856
1000000	12371	-12131	10877	-10637	10877	-10530	8686	-8745	6096	-5856



(a)

รูปที่ 5.3 ผลของอุณหภูมิต่อ (a) ค่า Coercive field (b) ค่า Coercive field แบบสัมพัทธ์



(b)

รูปที่ 5.3 ผลของอุณหภูมิต่อ (a) ค่า Coercive field (b) ค่า Coercive field แบบสัมพัทธ์ (ต่อ)

จากผลการทดลองการเกิดความล้าของค่าโพลาไรเซชันมีความเป็นไปได้ที่จะมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ (1) เกิดจากการตรึงของผนังโดเมนซึ่งอาจสามารถวิเคราะห์ได้จากผลของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) (2) เกิดจากความเสียหายบนผิวอิเล็กโทรดซึ่งอาจสามารถบ่งบอกได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ในช่วงแรกจะศึกษาถึงผลจากการตรึงของผนังโดเมนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าโพลาไรเซชันคงค้าง และค่า Coercive field โดยจะเห็นว่าในช่วงแรกนั้นที่อุณหภูมิห้อง และ 50 °C โพลาไรเซชันคงค้างจะมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 100 °C 150 °C และ 200 °C ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิห้อง และ 50 °C พลังงานในการเปลี่ยนสถานะหรือทิศทางของโดเมนภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูง ดังนั้นค่า Coercive field จึงมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 100 °C 150 °C และ 200 °C และเนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำนี้สถานะของโพลาไรเซชันมีความเสถียรมากกว่า ดังนั้นเมื่อค่าสนามไฟฟ้ามีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ โพลาไรเซชันส่วนมากยังคงเรียงตัวในทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ได้ป้อนไปแล้ว จึงทำให้ค่าโพลาไรเซชันคงค้างมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่อุณหภูมิ 100 °C 150 °C และ 200 °C พลังงานที่ใช้ในการจัดเรียงตัวของโดเมนจะมีค่าน้อย ดังนั้นโดเมนสามารถเปลี่ยนทิศทางได้ง่ายกว่าทำให้ค่า Coercive field ต่ำ และโดเมนสามารถกลับกลับคืนสู่สภาวะการเรียงตัวแบบสุ่มได้ง่าย ณ ค่าสนามไฟฟ้าที่

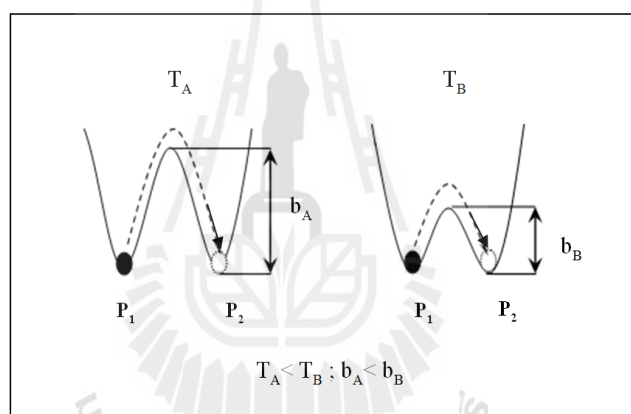
เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเนื่องจากมีความเสถียรน้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5.4 อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้เกิดการลบล้างโพลาริเซชัน (Thermal depolarization) ณ ที่ค่าสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงทำให้ค่าโพลาริเซชันคงค้างที่อุณหภูมิสูงต่ำกว่าโพลาริเซชันคงค้างที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อจำนวนรอบมากขึ้นที่อุณหภูมิห้อง และ 50°C โพลาริเซชันคงค้างกลับมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากโดเมนบางส่วนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ซึ่งอาจเกิดเนื่องมาจากถูกตรึงด้วยมลทินที่มีประจุ (Charged defects) หรือ ช่องว่างออกซิเจน (Oxygen vacancy) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ผลการตรึงของโดเมน (Domain pinning effect) ส่งผลทำให้โพลาริเซชัน หรือ โดเมนภายในเซรามิก PZT ไม่สามารถเปลี่ยนทิศทางได้ตามทิศทางของสนามไฟฟ้า และทำให้ผนังของโดเมนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ดี (Park et al., 1997 ; Brennan et al., 1998) จึงทำให้โพลาริเซชันคงค้างมีค่าลดลง รูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองการลดลงของจำนวนโดเมนที่สามารถกลับทิศทางได้ตามสนามไฟฟ้า จะเห็นว่าในช่วงแรกคือช่วง 1,000 ถึง 5,000 cycles โดเมนยังคงเคลื่อนที่ได้ดีเนื่องจากผลของการตรึงของผนังโดเมนมีน้อย โดยเมื่อจำนวนรอบมากขึ้นจนถึงช่วง 50,000 ถึง 200,000 cycles โดเมนบางส่วนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันคงค้างมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนค่า Coercive field ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงพลังงานที่ระบบใช้ในการกลับทิศของโดเมนจะมีค่ามากขึ้น ซึ่งอาจเกิดได้จากอัตราการเพิ่มขึ้นของโดเมนที่ถูกตรึงมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อมาถึงจุด ๆ หนึ่งคือช่วงที่ 200,000 ถึง 1,000,000 cycles การลดลงของโพลาริเซชันคงค้างจะมีการลดลงอย่างช้า ๆ จนเกือบจะคงที่เนื่องจากจำนวนโดเมนที่สามารถกลับทิศได้มีค่าลดลง จากแบบจำลองในรูปที่ 5.5 จะเห็นว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของโดเมนที่ถูกตรึงมีค่าลดลงซึ่งอาจส่งผลทำให้ค่า Coercive field มีการลดลงอย่างช้า ๆ จนเกือบจะคงที่ด้วย ในขณะที่อุณหภูมิ 100°C 150°C และ 200°C เมื่อจำนวนรอบมากขึ้นการตรึงของผนังโดเมนเกิดได้น้อย (เกิดยาก) โดเมนสามารถกลับทิศไปตามทิศของสนามไฟฟ้าได้ง่ายส่งผลให้อัตราการลดลงของค่าโพลาริเซชันคงค้างมีการลดลงน้อยมาก ค่า Coercive field ที่ใช้ในการเปลี่ยนทิศจึงมีค่าน้อย รูปที่ 5.6 แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองการลดลงของจำนวนโดเมนที่สามารถกลับทิศได้ตามทิศของสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100°C 150°C และ 200°C จะเห็นว่าในทุกช่วงของการทดสอบอัตราการเพิ่มขึ้นของโดเมนที่ถูกตรึงมีค่าน้อยมาก การเกิดการตรึงของโดเมนทำให้ความสามารถในการสลับเปลี่ยนทิศทางของโดเมนนั้นลดลงซึ่งสังเกตจากลักษณะสเปกตรัมของ XRD ที่เปลี่ยนไป ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.3

การลดลงของโพลาริเซชันคงค้างเนื่องจากความล้าทางไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสมการลอการิทึม (Logarithmic fatigue) ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$P_N = P_0 - \frac{A}{K} \ln(N + B) \quad [\text{ดัดแปลงมาจาก (Brennan et al., 1998)}] \quad (5.1)$$

โดย A, B คือ ค่าพารามิเตอร์ของสมการที่อุณหภูมิต่าง ๆ
 P_0 คือ โพลาริเซชันตั้งต้น
 N คือ จำนวนรอบของสนามไฟฟ้า
 K คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ (K)

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ A และ B ที่อุณหภูมิห้องต่าง ๆ สามารถแสดงได้ในตารางที่ 5.3 เมื่อใช้สมการดังกล่าวสร้างกราฟ จะพบว่ากราฟที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มเดียวกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นอย่างดี (รูปที่ 5.2)



รูปที่ 5.4 แบบจำลองกำแพงศักย์ (Potential barrier well) ในการเปลี่ยนสถานะหรือทิศทางของโดเมนที่อุณหภูมิต่างกัน ณ สนามไฟฟ้า และความถี่เดียวกัน

P_1 แทนสถานะ หรือ ทิศทางการเรียงตัวของโดเมนก่อนให้สนามไฟฟ้า
 P_2 แทนสถานะ หรือ ทิศทางการเรียงตัวของโดเมนหลังให้สนามไฟฟ้า
 b_A, b_B เป็นระดับพลังงานที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนสถานะของโดเมนจาก P_1 เป็น P_2 ภายใต้
 อุณหภูมิ T_A, T_B ตามลำดับ
 T_A, T_B อุณหภูมิในขณะที่ให้สนามไฟฟ้า โดย $T_A < T_B$ และ T_A, T_B มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิ T_C

Cycle	Field direction	Lower Temperature		
		Model	# non switchable domains	% decrease of P_r
1×10^3			-	-
1×10^4				1.38 %
$1 \times 10^4 - 5 \times 10^4$				16.85 %
$5 \times 10^4 - 2 \times 10^5$				58.00 %
$2 \times 10^5 - 1 \times 10^6$				79.09 %

รูปที่ 5.5 แบบจำลองสัดส่วนของโดเมนที่ไม่สามารถกลับทิศได้เนื่องจากผลของการตรึงของโดเมน (Domain pinning effect) และอัตราการลดลงของโพลาไรเซชันคงค้างที่อุณหภูมิห้อง และ 50°C

Cycle	Field direction	Higher Temperature		
		Model	# non switchable domains	% decrease of P_r
1×10^3			-	-
1×10^4			-	0 %
$1 \times 10^4 - 5 \times 10^4$				0.73 %
$5 \times 10^4 - 2 \times 10^5$				0.93 %
$2 \times 10^5 - 1 \times 10^6$				3.64 %

รูปที่ 5.6 แบบจำลองสัดส่วนของโดเมนที่ไม่สามารถกลับทิศได้เนื่องจากผลของการตรึงของโดเมน (Domain pinning effect) และอัตราการลดลงของโพลาไรเซชันคงค้างที่อุณหภูมิ 100°C 150°C และ 200°C

ตารางที่ 5.3 ผลของอุณหภูมิต่อค่าพารามิเตอร์การลดลงของโพลาไรเซชันคงค้าง

อุณหภูมิ (°C)	P_0		A		B	
อุณหภูมิห้อง	107	-109	2196	-2228	20046	19220
50	83	-84	1812	-1847	11504	12588
100	50	-49	865	-828	75605	37926
150	29	-29	245	-241	54065	79692
200	19	-19	32	-14	500	500

5.3 ผลการศึกษาการเปลี่ยนทิศทางของโดเมนด้วยวิธีการ XRD

การตรวจสอบการเปลี่ยนสถานะ หรือ ทิศทางของโดเมนภายในเซรามิก PZT ก่อนและหลังการทดสอบความล้าจะสะท้อนให้เห็นถึงสัดส่วนของโดเมนที่ถูกตรึง ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการจัดเรียงตัวของโดเมนตามแนวสนามไฟฟ้า และจะส่งผลทำให้เกิดความเสื่อมสภาพของวัสดุเนื่องจากความล้าในที่สุด การวิเคราะห์สัดส่วนของโดเมนที่ถูกตรึงดังกล่าวสามารถทำได้ทางอ้อมคือการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

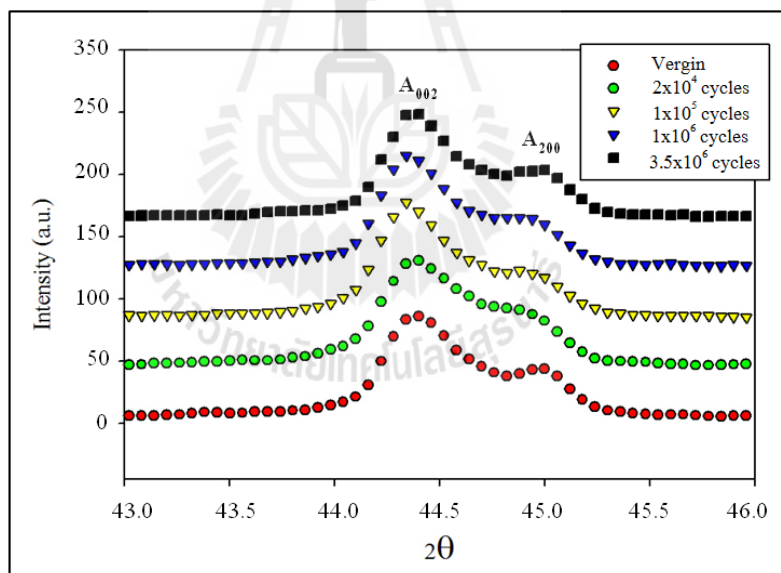
ค่าความหนาแน่นของขั้วโพลาไรเซชัน (Pole density) เป็นค่าตัวเลขเชิงปริมาณที่ใช้ในการบ่งบอกสัดส่วนของโดเมน (ทิศทางโพลาไรเซชันเรียงตัวในแนวแกน C ของหน่วยเซลล์) ที่มีทิศของโพลาไรเซชันเรียงตัวไปในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้า ค่า Pole density มีหน่วยเรียกว่า multiple of a random distribution (m.r.d) สามารถคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้ (Jones et al., 2005)

$$\text{Pole density} = 3 \frac{(A_{002}/A_{002}^R)}{(A_{002}/A_{002}^R) + 2(A_{200}/A_{200}^R)} \text{ m.r.d} \quad (5.2)$$

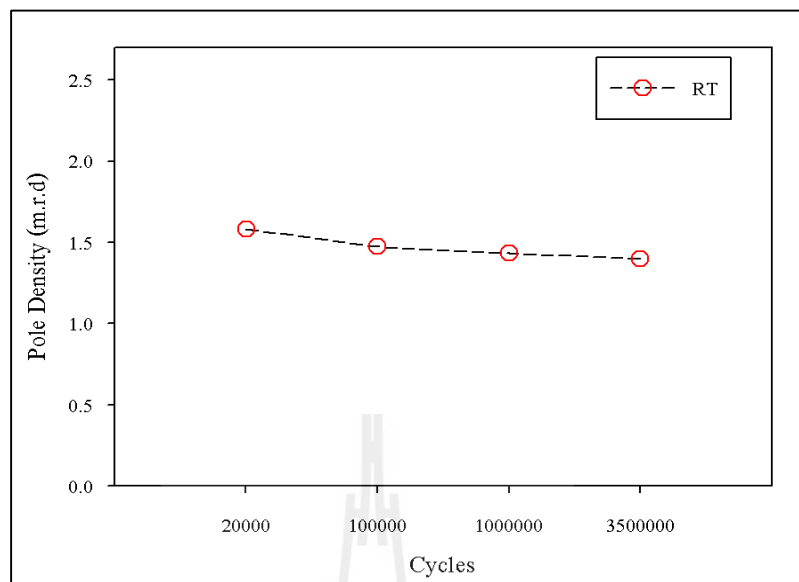
โดย A_{002} และ A_{200} คือ พื้นที่ใต้กราฟที่มีจุดยอดมุม $2\theta \cong 44.4$ และ 45.1 (สำหรับเซรามิก PZT ที่ใช้ในการทดลองนี้)

A_{002}^R และ A_{200}^R คือ พื้นที่ใต้กราฟของเซรามิก PZT ที่มีการจัดเรียงตัวของโดเมนแบบสุ่ม (หรือเซรามิก PZT ที่ใช้ในการทดลองนี้) ทำให้ค่าโพลาไรเซชันมีค่าเป็นศูนย์

จากรูปที่ 5.7 และ 5.8 แสดงให้เห็นถึงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก PZT และ Pole density ที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิห้อง ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าในช่วง 20,000 cycles ถึง 100,000 cycles Pole density จะมีการลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงโดเมนมีการกลับทิศตามทิศของสนามไฟฟ้าที่ป้อนได้ลดลง เนื่องจากในช่วงนี้ผลการตรึงของผนังโดเมนเริ่มมีค่ามาก แต่เมื่อทดสอบต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงช่วงที่ 100,000 ถึง 1,000,000 cycles การลดลงของ Pole density จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับช่วงแรก และในช่วงสุดท้ายคือช่วง 100,000 ถึง 3,500,000 cycles การลดลงของ Pole density มีค่าน้อยมากจนเกือบคงที่ การลดลงของ Pole density ในช่วง 100,000 ถึง 3,500,000 cycles นั้นแทบจะไม่พบการเปลี่ยนแปลง แต่ในความเป็นจริงความล้าจะยังคงดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นจากผลการทดสอบในรูปที่ 5.2(a) ซึ่งอาจเกิดจากความเสียหายของพื้นผิวอิเล็กโทรด โดยส่วนนี้จะแสดงให้เห็นได้โดยใช้วิธีการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 5.4

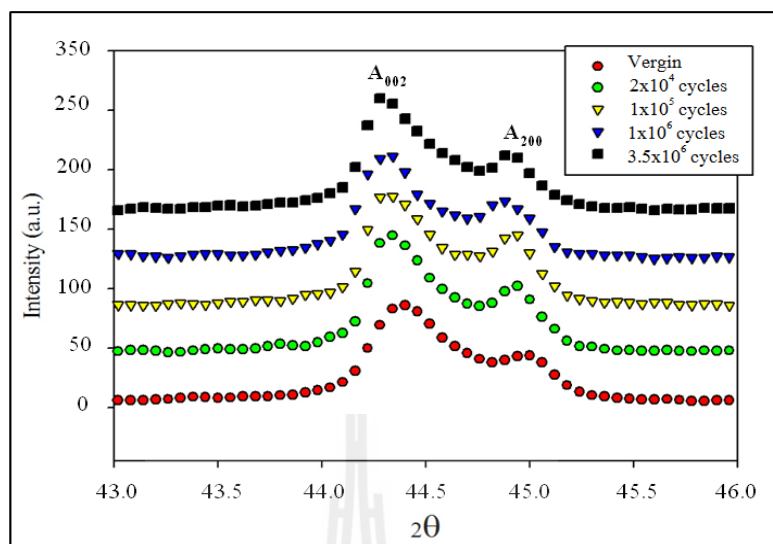


รูปที่ 5.7 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิห้อง

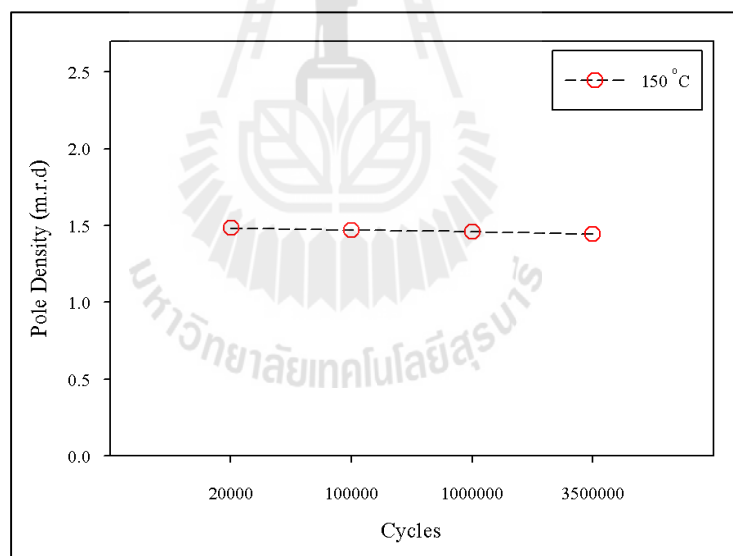


รูปที่ 5.8 Pole density ที่เกิดขึ้นในแนวตั้งจากกับพื้นผิวอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิห้อง

จากรูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงให้เห็นถึงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก PZT และ Pole density เกิดขึ้นในแนวตั้งจากกับพื้นผิวอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิ 150°C ตามลำดับ จากการทดสอบที่ช่วง 20,000 ถึง 3,500,000 cycles พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดเมนสามารถกลับคืนสู่สถานะการเรียงตัวแบบสุ่มได้ง่าย ณ ค่าสนามไฟฟ้าที่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า เนื่องจากมีความเสถียรน้อยกว่า ส่งผลให้การตรงของผนังโดเมนเกิดได้น้อย (เกิดยาก) โดเมนสามารถกลับทิศไปตามทิศของสนามไฟฟ้าได้ง่าย ค่า Pole density มีการลดลงน้อยมากตลอดช่วงของการทดสอบเมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง ส่งผลให้อัตราการเกิดความล้ามีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบในรูปที่ 5.2(b)

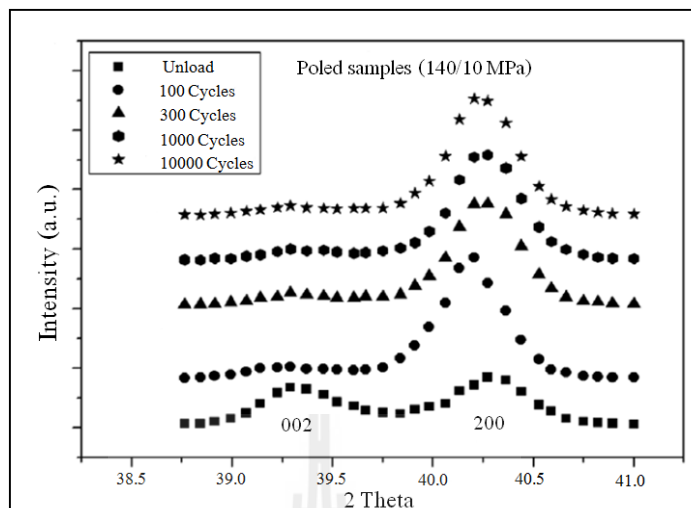


รูปที่ 5.9 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิ 150 °C



รูปที่ 5.10 Pole density ที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวอิเล็กโทรดที่อุณหภูมิ 150 °C

จากผลการศึกษาการดังกล่าวจะให้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pojprapai และคณะ (Pojprapai et al, 2007) โดยในการทดสอบจะใช้วิธีการนิวตรอนดิฟแฟรกชัน (Neutron diffraction) เพื่อศึกษาความล้าที่มีผลต่อการสลับเปลี่ยนทิศทางของโดเมน



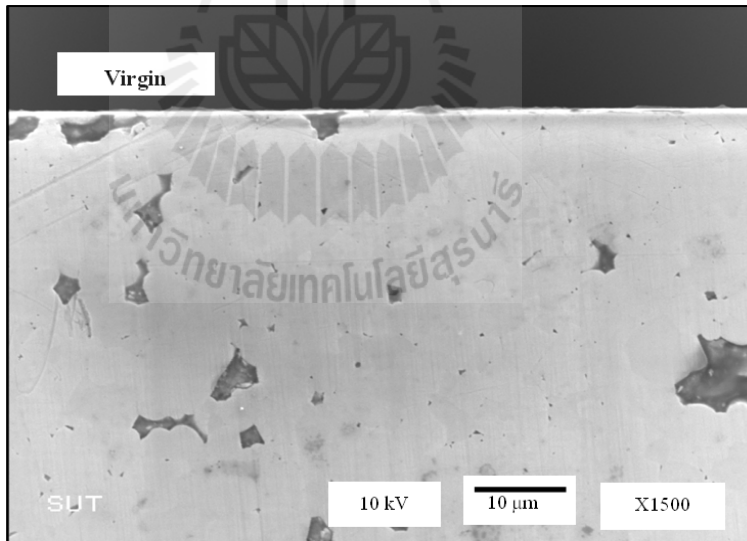
รูปที่ 5.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนของนิวตรอนภายใต้ความเครียดเชิงกล (Pojprapai et al, 2007)

5.4 ผลการศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT

นอกจากการตรึงของโดเมนแล้วความเสียหายที่เกิดบนพื้นผิวเล็กโตรคมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าโพลาไรเซชันคงค้าง และค่า Coercive field ซึ่งความเสียหายดังกล่าวอาจมีผลทำให้สนามไฟฟ้ามีผลต่อการเปลี่ยนทิศของโดเมนลดลง ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ได้นำเสนอโดยงานวิจัยของ Balke และคณะ (Balke, 2007) การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT เป็นการพิสูจน์ และยืนยันถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT ที่เกิดความล้าทางไฟฟ้า การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้าจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT ที่มีการเสื่อมสภาพจากการทดสอบความล้าทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และ 150°C ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงดังรูปที่ 5.12 รูปที่ 5.13 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.12 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิห้องพบว่าในช่วง 20,000 cycles จะไม่ปรากฏถึงความเสียหายบนพื้นผิวของเซรามิก PZT เนื่องจากในช่วงนี้โดเมนยังคงเคลื่อนที่ได้ดีเนื่องจากผลการตรึงของผนังโดเมนมีน้อยความเครียดที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อย ต่อมาที่ช่วง 100,000 cycles เริ่มเกิดรอยร้าวขึ้นที่ผิวของเซรามิก PZT ส่งผลให้ช่วงนี้โพลาไรเซชันมีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงนี้โดเมนบางส่วนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทำให้เกิดความเครียดสะสมมากขึ้นที่บริเวณดังกล่าวจนทำให้เซรามิก PZT เกิดรอยแตกขึ้น ต่อมาเมื่อมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นที่บริเวณดังกล่าวจะมีความเค้นสะสมเกิดขึ้นมากทำให้วัสดุถูกทำลายได้ง่ายโดย

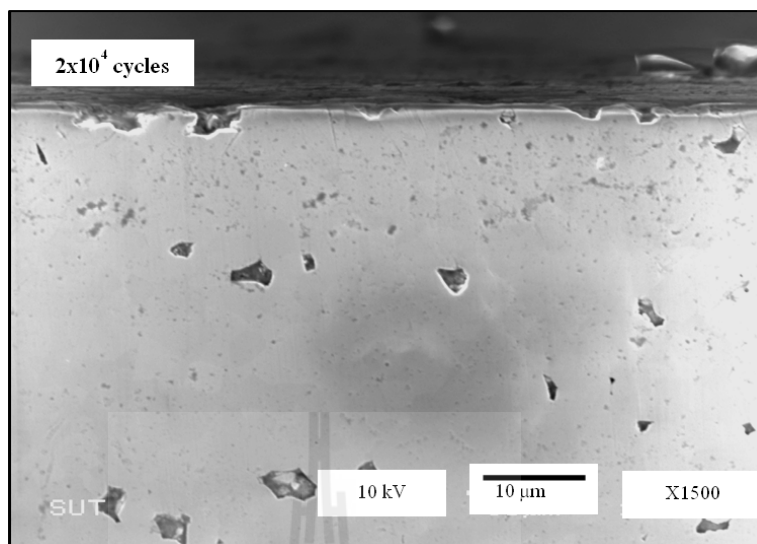
จะมีการขยายตัวของรอยร้าวกลายเป็นรอยแตกซึ่งจะเห็นได้ในช่วง 1,000,000 cycles ในช่วงนี้เซรามิก PZT ไม่มีคุณสมบัติความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยสังเกตได้จากวงวนฮิสเทอรีซิสที่มีรูปร่างคล้ายกับวงรี โดยในช่วงนี้ค่า Coercive field ไม่สามารถวัดได้เนื่องจากสนามไฟฟ้าไม่สามารถทำให้โดเมนในเซรามิก PZT สามารถกลับทิศได้ จากนั้นเมื่อทำการทดสอบความล้าต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงช่วง 3,500,000 cycles ความเครียดสะสมเนื่องจากผลการตรึงของโดเมนมีมากขึ้นจึงทำให้รอยร้าวแพร่ขยายตัวได้เร็ว และมากขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวของเซรามิก PZT เสียหายเพิ่มขึ้น และทำให้ค่าโพลาไรเซชันที่วัดได้มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยสามารถอธิบายได้ในรูปที่ 5.14(b) จากรูปพบว่าความเสียหายที่เกิดบนพื้นผิวอิเล็กโทรดทั้งสองด้านจะส่งผลให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์รวมของเซรามิก PZT ลดลง ค่าโพลาไรเซชันจึงมีการลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อมีรอยแตกหรือรอยร้าวเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้เซรามิก PZT เกิดช่องว่างอากาศ รวมไปถึงมลทินซึ่งในที่นี้คือน้ำมันซิลิโคนที่ไปแทรกตัวอยู่บริเวณรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนผิวของเซรามิก PZT ส่งผลให้สภาพยอมสัมพัทธ์รวมมีค่าลดลง ซึ่งแปรผันตรงกับค่าโพลาไรเซชันส่งผลทำให้ค่าโพลาไรเซชันมีค่าลดลง อัตราการเกิดความล้าจึงมีค่ามาก



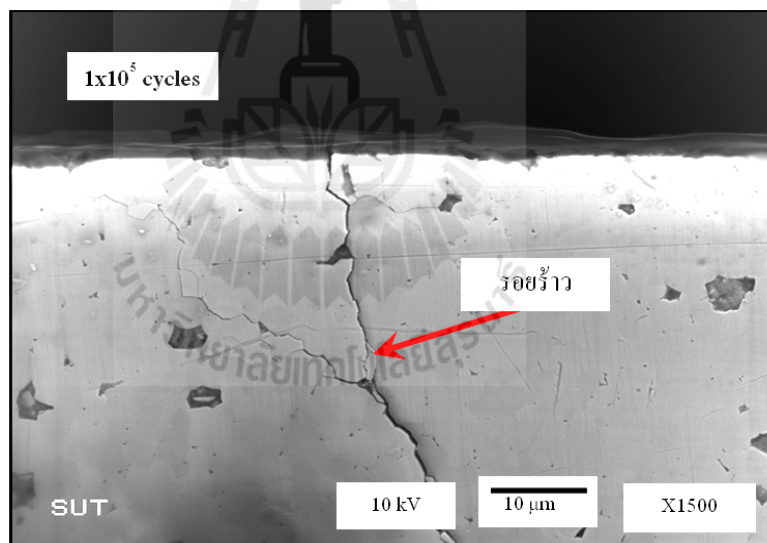
(a) พื้นผิวของเซรามิก PZT ก่อนการทดสอบความล้า

รูปที่ 5.12 โครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิห้องหลังการทดสอบ

- (a) Virgin (b) 20,000 cycles (c) 100,000 cycles (d) 1,000,000 cycles
(e) 3,500,000 cycles



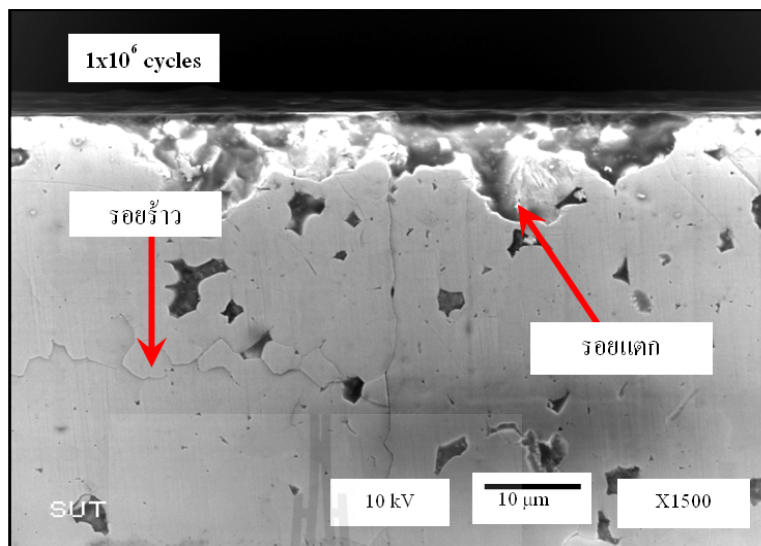
(b) พื้นผิวของเซรามิก PZT เมื่อทดสอบความล้าที่จำนวน 20,000 cycles



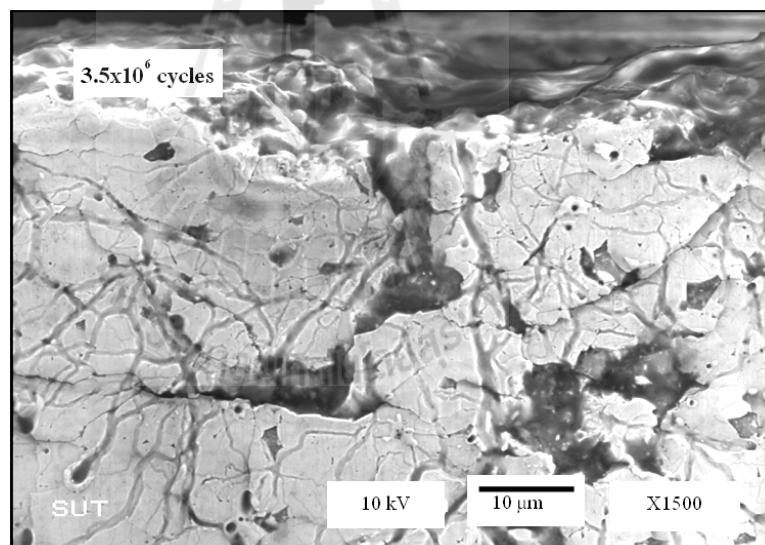
(c) พื้นผิวของเซรามิก PZT เมื่อทดสอบความล้าที่จำนวน 100,000 cycles

รูปที่ 5.12 โครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิห้องหลังการทดสอบ

- (a) Virgin (b) 20,000 cycles (c) 100,000 cycles (d) 1,000,000 cycles
(e) 3,500,000 cycles (ต่อ)



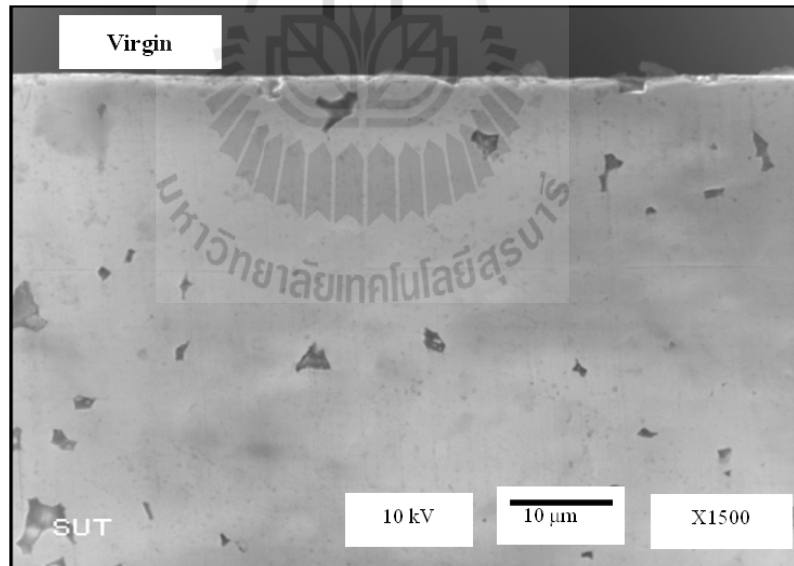
(d) พื้นผิวของเซรามิก PZT เมื่อทดสอบความล้าที่จำนวน 1,000,000 cycles



(e) พื้นผิวของเซรามิก PZT เมื่อทดสอบความล้าที่จำนวน 3,500,000 cycles

รูปที่ 5.12 โครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิห้องหลังการทดสอบ
 (a) Virgin (b) 20,000 cycles (c) 100,000 cycles (d) 1,000,000 cycles
 (e) 3,500,000 cycles (ต่อ)

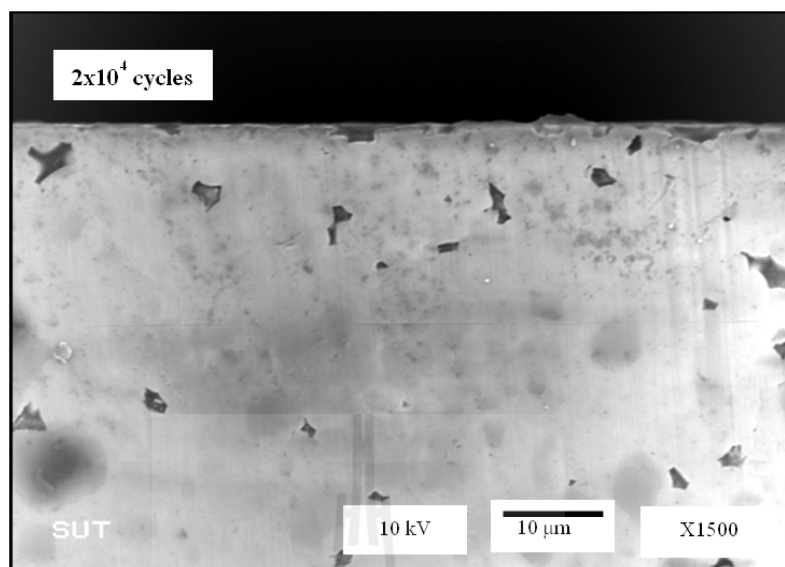
จากรูปที่ 5.13 จะสังเกตได้ว่าโครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิ 150 °C จะไม่ปรากฏความเสียหายบนเซรามิก PZT ตลอดช่วงของการทดสอบคือ 1,000 ถึง 3,500,000 cycles ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดเมนเปลี่ยนทิศได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการจัดเรียงตัวมีค่าต่ำ ส่งผลให้การตรึงของผนังโดเมนจะมีค่าลดลง (เกิดยาก) ความเครียดที่เกิดขึ้นในเซรามิก PZT จึงมีค่าลดลง ทำให้เกิดรอยร้าวหรือรอยแตกของพื้นผิวได้น้อย ส่งผลให้อัตราการลดลงของโพลาริเซชันคงค้างมีค่าน้อย ส่วนค่า Coercive field มีค่าค่อนข้างคงที่ โดยสามารถอธิบายได้ในรูปที่ 5.14(c) จากรูปเมื่อทดสอบความล้าที่จำนวน 3,500,000 cycles จะเห็นว่าแทบไม่พบความเสียหายที่เกิดขึ้นบนรอยต่อวัสดุกับอิเล็กโทรดเลย ส่งผลให้สภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก PZT ค่อนข้างที่จะคงที่ เนื่องจากเกิดช่องว่างอากาศและมลทินต่าง ๆ ที่น้อยมากเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลให้สภาพยอมสัมพัทธ์รวมของเซรามิก PZT หลังการทดสอบมีค่าลดลงน้อยมากซึ่งใกล้เคียงกับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก PZT ก่อนการทดสอบ ส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงน้อยมาก อัตราการเกิดความล้าจึงมีค่าลดลง



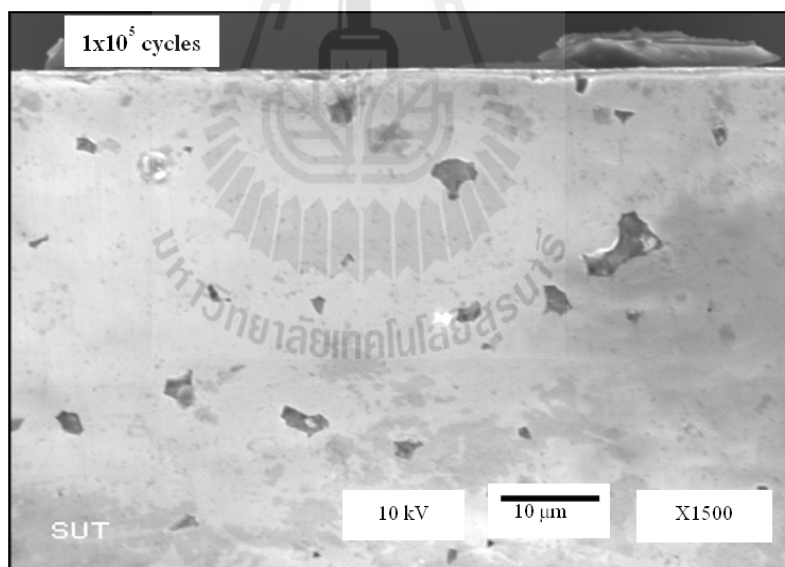
(a) พื้นผิวของเซรามิก PZT ก่อนการทดสอบความล้า

รูปที่ 5.13 โครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิ 150 °C หลังการทดสอบ

- (a) Virgin (b) 20,000 cycles (c) 100,000 cycles (d) 1,000,000 cycles
(e) 3,500,000 cycles



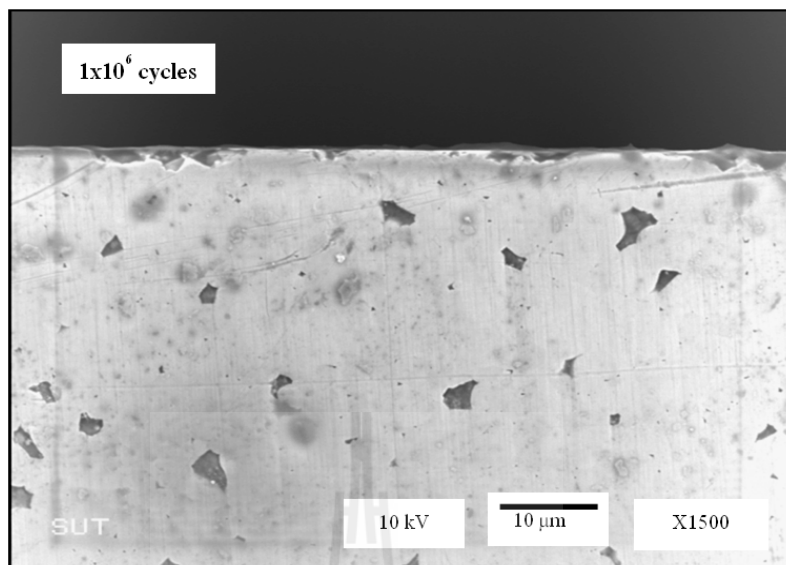
(b) พื้นผิวของเซรามิก PZT เมื่อทดสอบความล้าที่จำนวน 20,000 cycles



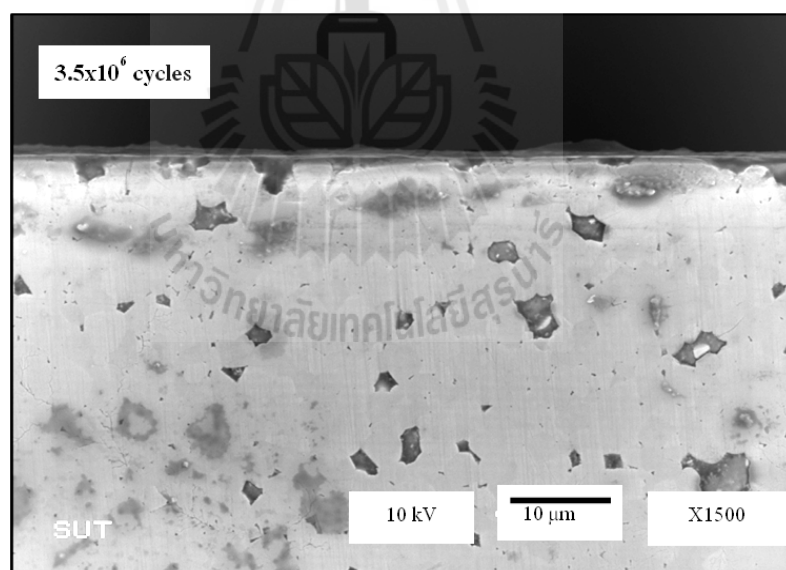
(c) พื้นผิวของเซรามิก PZT เมื่อทดสอบความล้าที่จำนวน 100,000 cycles

รูปที่ 5.13 โครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิ 150 °C หลังการทดสอบ

- (a) Virgin (b) 20,000 cycles (c) 100,000 cycles (d) 1,000,000 cycles
(e) 3,500,000 cycles (ต่อ)



(d) พื้นผิวของเซรามิก PZT เมื่อทดสอบความล้าที่จำนวน 1,000,000 cycles

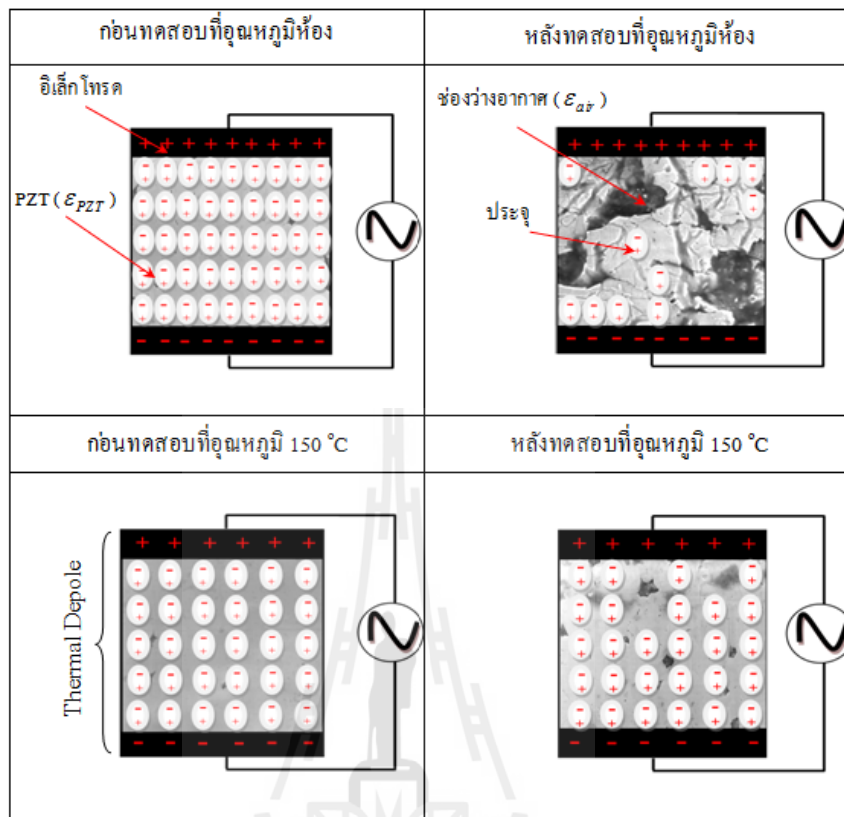


(e) พื้นผิวของเซรามิก PZT เมื่อทดสอบความล้าที่จำนวน 3,500,000 cycles

รูปที่ 5.13 โครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิ 150 °C หลังการทดสอบ

(a) Virgin (b) 20,000 cycles (c) 100,000 cycles (d) 1,000,000 cycles

(e) 3,500,000 cycles (ต่อ)



รูปที่ 5.14 แบบจำลองความเสียหายที่เกิดบนพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์ก่อน และหลังการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 150 °C

รูปที่ 5.14 เป็นแบบจำลองความเสียหายที่เกิดบนพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์ก่อน และหลังการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 150 °C แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิห้องก่อนการทดสอบนั้น ประจุบนพื้นผิวของเซรามิก PZT นั้นมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 150 °C ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิ 150 °C จะเกิดการ Thermal depolarization ส่งผลให้ประจุที่พื้นผิวของเซรามิก PZT มีค่าลดลง แต่หลังการทดสอบพบว่าความเสียหายที่เกิดบนพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์ที่อุณหภูมิห้องนั้นจะมีรอยแตกหรือรอยร้าวเกิดขึ้นเนื่องจากการทดสอบความล้า ซึ่งส่งผลให้เซรามิก PZT เกิดช่องว่างอากาศ (ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของอากาศ, $\epsilon_{air} = 1.0006$) รวมไปถึงมลทินซึ่งในที่นี้คือน้ำมันซิลิโคน (ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำมันซิลิโคน, $\epsilon_{silicon} = 2.5$) ที่ไปแทรกตัวอยู่บริเวณรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนผิวของเซรามิก PZT (ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก PZT, $\epsilon_{PZT} = 2103$) ส่งผลให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์รวมมีค่าลดลงเทียบกับอุณหภูมิ 150 °C

ค่าโพลาริเซชันเป็นค่าความหนาแน่นของไดโพลโมเมนต์ในหนึ่งหน่วยปริมาตรหรือค่าของประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยมีค่าเท่ากับค่า D ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิว โดยค่า D ยังมีค่าเท่ากับ $D = \epsilon_0 \epsilon_r E$ (D คือ ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสูญญากาศ (8.854×10^{-12} F/m) ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก PZT E คือ สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเซรามิก PZT) ดังนั้นเมื่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ลดลง ความหนาแน่นของประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จึงมีค่าลดลงด้วย ความหนาแน่นของประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่อุณหภูมิห้องจึงมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 150°C ส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันที่อุณหภูมิห้องมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 150°C อัตราการเกิดความล้าที่อุณหภูมิห้องจึงมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 150°C ด้วย โดยสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P = \frac{Qd}{V} = \frac{Q}{A} \quad (5.3)$$

$$D = \frac{Q}{A} = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (5.4)$$

จะได้

$$\therefore P = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (5.5)$$

$$P \downarrow = \epsilon_0 (\epsilon_r \downarrow) E \quad (5.6)$$

โดย Q คือ ค่าไดโพลเมนต์ หรือ ประจุบนผิวเซรามิก PZT

P คือ ค่าโพลาริเซชัน

d คือ ความหนาของเซรามิก PZT

A คือ พื้นที่ของเซรามิก PZT

V คือ ปริมาตรของเซรามิก PZT

สมการที่ 5.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า ϵ_r ลดลงส่งผลทำให้ค่า P ลดลงด้วย

5.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.5.1 ในส่วนของการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT นั้นจะทำการวัดค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) และค่าสัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริก (d_{33}) ของเซรามิก PZT ก่อน และหลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งจะแสดงไว้ในตารางที่ 5.5

จากตารางที่ 5.5 เป็นการวัดสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นสมบัติทางไฟฟ้าจะมีอัตราการลดลงน้อยที่สุด เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิมากขึ้นจะเกิดช่องว่างอากาศและมลทินต่าง ๆ ได้น้อยมากเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ค่าการเก็บประจุรวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริก หลังการทดสอบมีการลดลงน้อยมาก โดยเมื่อทำการทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิ 200°C ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) จะมีค่า 2090 ค่าตัวเก็บประจุ (C) 570 pF และ ค่าสัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริก (d_{33}) จะมีค่า $409 \times 10^{-12} \text{ C/N}$ ตามลำดับ

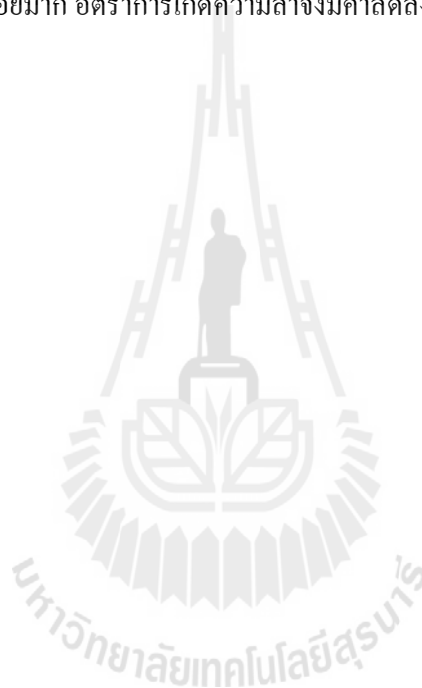
ตารางที่ 5.5 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT ก่อน และหลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้า 1,000,000 cycles

	ก่อน		ก่อน		ก่อน		ก่อน		ก่อน	
ϵ_r	2103	222	2023	942	2231	1559	2114	1853	2200	2090
$C \text{ (pF)}$	572	60	550	56	607	427	602	504	600	570
$d_{33} (\times 10^{-12} \text{ C/N})$	583	20	572	50	588	234	587	383	590	450

5.6 สรุป

ในบทนี้จะเป็นส่วนของการวิเคราะห์ และสรุปผลการเสื่อมสภาพของเซรามิก PZT ที่เกิดจากการทดสอบการเกิดความล้าจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ อุณหภูมิห้อง 50°C 100°C 150°C และ 200°C ที่สนามไฟฟ้า 1.50 kV/mm ความถี่ 10 Hz โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากการศึกษาขนาดของวงวนฮิสเทอรีซิส ค่าโพลาริเซชันคงค้าง ค่า Coercive field ของวงวนฮิสเทอรีซิสที่เปลี่ยนแปลงไป การเกิดความล้าของค่าโพลาริเซชันมีความเป็นไปได้ที่จะมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ (1) เกิดจากการตรึงของผนังโดเมนซึ่งอาจสามารถวิเคราะห์ได้จากผลของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (2) เกิดจากความเสียหายบนผิวอิเล็กโทรดซึ่งอาจสามารถบ่งบอกได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด จากผลการทดสอบพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดความล้าจะมีค่าลดลง โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการ

ครึ่งของผนังโดเมนเกิดได้น้อย (เกิดยาก) โดเมนสามารถกลับทิศไปตามทิศของสนามไฟฟ้าได้ง่าย ส่งผลให้อัตราการลดลงของค่าโพลาไรเซชันมีการลดลงน้อยมาก และไม่พบความเสียหายที่เกิดขึ้นบนรอยต่อวัสดุกับอิเล็กโทรด เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเครียดที่เกิดขึ้นในเซรามิก PZT มีค่าลดลง ทำให้เกิดรอยร้าวหรือรอยแตกของพื้นผิวได้น้อย ส่งผลให้สภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก PZT ค่อนข้างที่จะคงที่ เนื่องจากเกิดช่องว่างอากาศ และมลทินต่าง ๆ ที่น้อยมากเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์รวมของเซรามิก PZT หลังการทดสอบมีค่าลดลงน้อยมากซึ่งใกล้เคียงกับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก PZT ก่อนการทดสอบ ส่งผลให้ค่าโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงน้อยมาก อัตราการเกิดความล้าจึงมีค่าลดลง



บทที่ 6

สรุป และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาความล้มเหลวจากการเปลี่ยนขั้วทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT ด้วยวิธีการทดสอบแรงการเสื่อมสภาพของเซรามิก PZT โดยทำการสร้างระบบทดสอบการเกิดความล้มเหลวของเซรามิก PZT จากนั้นทำการศึกษาพฤติกรรมความล้มเหลวของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวสำเร็จคล่องตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

สำหรับในส่วนของการสร้างระบบทดสอบความล้มเหลวโรอิเล็กทรอนิกส์ของเซรามิก PZT ถูกสร้างขึ้นเพื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับตัวอย่างชิ้นงาน และเก็บบันทึกค่าโวลตาไรเซชันในขณะที่ทำการให้สนามไฟฟ้า โดยระบบทดสอบความล้มเหลวมีส่วนประกอบคือ ภาชนะบรรจุชิ้นงานทดสอบ โดยมีชุดอิเล็กทรอนิกส์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงสูง วงจรควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันซิลิโคน ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ เครื่องขยายแรงดันไฟฟ้า วงจร Sawyer-Tower และดิจิตอลอสซิลโลสโคป โดยในส่วนแรกจะทำการสร้างชุดทดสอบซึ่งประกอบด้วยภาชนะบรรจุชิ้นงานทดสอบและวงจรควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันซิลิโคน ในส่วนต่อมาเป็นการทดสอบระบบเบื้องต้นโดยการหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในการทดสอบ พบว่าที่ตัวเก็บประจุ $1\ \mu\text{F}$ ซึ่งคิดเป็น 1700 เท่าของค่าตัวเก็บประจุของชิ้นเซรามิก PZT ทำให้ได้วงวนฮิสเทอรีซิสมีขนาดสมมาตร และมีการอิ่มตัวของโวลตาไรเซชันดีที่สุด จากนั้นจะเป็นการหาค่าความถี่ และแรงดันที่เซรามิก PZT สามารถทนได้ก่อนการเกิดเบรกดาวน์ โดยทดสอบที่ความถี่ และสนามไฟฟ้าต่าง ๆ จากการทดสอบพบว่าเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นแรงดันที่สามารถป้อนให้แก่ชิ้นงานตัวอย่างเพื่อให้เกิดวงวนฮิสเทอรีซิสจะมีค่าลดลง ซึ่งในการทดสอบความล้มเหลวจากการเปลี่ยนขั้วในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ความถี่ที่ 10 Hz ซึ่งชิ้นงานสามารถทนแรงดันได้สูงสุด 1.50 kV โดยวงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้นั้นจะมีขนาดสมมาตร และมีการอิ่มตัวของโวลตาไรเซชันค่อนข้างดี

จากการทดสอบการเกิดความล้มเหลวจากการเปลี่ยนขั้วของเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ อุณหภูมิห้อง 50°C 100°C 150°C และ 200°C ที่สนามไฟฟ้า 1.50 kV/mm ความถี่ 10 Hz ที่จำนวน 1,000,000 cycles พบว่าผลการทดสอบสามารถตอบโจทย์สมมติฐานที่ว่า

1. เกิดจากผลการตรึงของผนังโดเมน (Domain pinning effect)
2. เกิดจากความเสียหายบนผิวอิเล็กโทรด

โดยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ความล้าจากการถูกตรึงของโดเมนจะส่งผลให้โดเมนบางส่วนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากถูกตรึงด้วยมลทินที่มีประจุ หรือ ช่องว่างออกซิเจน ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ผลการตรึงของโดเมน ส่งผลทำให้โพลาริเซชัน หรือ โดเมนภายในเซรามิก PZT ไม่สามารถเปลี่ยนทิศทางได้ตามทิศทางของสนามไฟฟ้า โดยการลดลงนี้สามารถคำนวณได้จากสมการลอการิทึมซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$P_N = P_0 - \frac{A}{K} \ln(N + B) \quad (6.1)$$

โดย A, B คือ ค่าพารามิเตอร์ของสมการที่อุณหภูมิต่าง ๆ

P_0 คือ โพลาริเซชันตั้งต้น

N คือ จำนวนรอบของสนามไฟฟ้า

K คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ (เคลวิน, K)

การตรวจสอบการเปลี่ยนสถานะหรือทิศทางของโดเมนภายในเซรามิก PZT เป็นการพิสูจน์ และยืนยันถึงอัตราการถูกตรึงของผนังโดเมนภายในเซรามิก PZT ส่งผลให้เกิดความล้า และการเสื่อมสภาพในเซรามิก PZT โดยการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของโดเมนในเซรามิก PZT หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้าจะใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่า เมื่อเกิดความล้าขึ้น การเกิดการตรึงของโดเมนทำให้ความสามารถในการสลับเปลี่ยนทิศทางของโดเมน (Domain switchability) นั้นลดลงซึ่งสังเกตจากลักษณะสเปกตรัมของ XRD ที่เปลี่ยนไป โดย Pole density จะมีค่าลดลง ซึ่ง Pole density สะท้อนให้เห็นถึงการลดลงของความสามารถในการเปลี่ยนทิศของโดเมน โดยการตรวจสอบความสามารถในการสลับเปลี่ยนของโดเมนในเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิห้อง และ 150 °C พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น Pole density มีการลดลงน้อยมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง ทั้งนี้เนื่องจากการตรึงของผนังโดเมนเกิดได้น้อย (เกิดยาก) โดเมนสามารถกลับทิศไปตามทิศของสนามไฟฟ้าได้ง่าย ส่งผลให้อัตราการเกิดความล้ามีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

ความล้าทางไฟฟ้าเกิดจากการความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวอิเล็กโทรด ส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมเซรามิก PZT มีค่าลดลง โพลาริเซชันที่เกิดจากสนามไฟฟ้างกล่าวจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT เป็นการพิสูจน์ และยืนยัน

ถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเซรามิก PZT ที่เกิดความล้าทางไฟฟ้า การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT หลังการทดสอบความล้าทางไฟฟ้าจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด โดยการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของเซรามิก PZT ที่มีการเสื่อมสภาพจากการทดสอบความล้าทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าที่อุณหภูมิต่ำเมื่อจำนวนรอบมากขึ้น โดเมนบางส่วนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทำให้เกิดความเครียดสะสมที่บริเวณดังกล่าวจนทำให้เซรามิก PZT เกิดรอยแตกขึ้น ต่อมาเมื่อมีรอยร้าวเกิดขึ้นที่บริเวณดังกล่าวจะมีความเค้นสะสมเกิดขึ้นมากทำให้วัสดุถูกทำลายได้ง่ายโดยจะมีการขยายตัวของรอยร้าวกลายเป็นรอยแตก ส่งผลให้พื้นผิวของวัสดุเซรามิก PZT เสียหาย และทำให้ค่าโพลาริเซชันที่วัดได้มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวอิเล็กโทรดทั้งสองด้านจะส่งผลให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก PZT ลดลง ค่าโพลาริเซชันจึงมีการลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อมีรอยแตกหรือรอยร้าวเกิดขึ้นเนื่องจากการทดสอบความล้า จะส่งผลให้น้ำเนื้อสารเกิดช่องว่างอากาศ และมลทินต่าง ๆ มีมากขึ้น ทำให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ในเนื้อสารเซรามิกมีค่าลดลง โดยค่าสภาพยอมสัมพัทธ์จะแปรผันตรงกับค่าโพลาริเซชันซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าโพลาริเซชันมีค่าลดลงด้วย ในขณะที่อุณหภูมิสูง โดเมนเปลี่ยนทิศได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการจัดเรียงตัวมีค่าน้อย ส่งผลให้การเรียงของผนังโดเมนจะมีค่าลดลง (เกิดยาก) ความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุเซรามิก PZT จึงมีค่าลดลง ทำให้เกิดรอยร้าวหรือรอยแตกของพื้นผิวได้น้อย ส่งผลให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก PZT ค่อนข้างที่จะคงที่ เนื่องจากเกิดช่องว่างอากาศ และมลทินต่าง ๆ ที่น้อยมากเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลให้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของเซรามิก PZT หลังการทดสอบมีการลดลงน้อยมาก ค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นจึงมีอัตราการลดลงน้อยมาก

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา มีข้อเสนอแนะในการดำเนินวิจัยวิทยานิพนธ์ดังนี้

1. ถ้าชิ้นเซรามิก PZT ที่ใช้มีความหนามากเกินไปจะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงมาก ดังนั้นการลดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการเกิดความล้าจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้การทดสอบมีความปลอดภัยมากขึ้น ทั้งนี้จึงใช้วิธีลดความหนาของชิ้นวัสดุเซรามิก PZT เพื่อลดขนาดของแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ
2. ชิ้นเซรามิก PZT ที่ตัดมาทุกชิ้นจะถูกนำไปวัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ เพื่อตรวจสอบให้มีความหนาเท่ากันทุกชิ้นสำหรับการทดสอบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกัน

ผลกระทบจากความหนาที่ไม่เท่ากันในการเกิดเบรคดาวน์ ซึ่งอาจนำไปสู่ค่าผลการทดลองที่ผิดเพี้ยนได้

3. ควรทำการทดสอบในห้องที่ไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิภายนอก เช่น ห้องแอร์ เป็นต้น เนื่องจากการทดสอบทุกครั้งจำเป็นต้องวัดค่าความชื้นจากอากาศ หากมีความชื้นมากเกินไปจะไม่สามารถทำการทดสอบได้เพราะอาจทำให้เกิดการเบรคดาวน์เร็วขึ้น และทำให้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเกิดการผิดเพี้ยน ดังนั้นจึงไม่สามารถทำการทดสอบในฤดูฝนและวันที่มีอากาศชื้นได้



รายการอ้างอิง

- จันทร์ทอง ทรงศิริ (2008). การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกผสมเลดแมกนีเซียมในโอเบต-เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วัสดุศาสตร์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 4-39.
- เชิดศักดิ์ แซ่ลี (2007). สมบัติไดอิเล็กทริกและเพียโซอิเล็กทริกในของผสมแบบ 0-3 พิเศษที่กับเทอร์มัลพลาสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 4-30.
- ภัทรารวรรณ กะหวงศ์ (1998). เซรามิกชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก ตอน 1. วารสารเคมีคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ ฉบับที่ 238.
- รัตติกร ยี่มนิรัฐ (2001). สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สุธรรม ศรีหล่มสัก (2008). เอกสารประกอบการสอนรายวิชา **Introduction to Piezoelectric Ceramics**. ภาควิชาเซรามิก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- APC International . (2002). **Piezoelectric ceramic: Principles and applications**, APC. International, Ltd.
- Brennan, C. (1998). Model of ferroelectric fatigue due to defect/domain interaction. **Department of chemistry**. 150: 199-208.
- Balke, N., Kungl, H., Granzow, T., and Lupascu, D.C. (2007). Bipolar fatigue caused by field screening in $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ ceramics. **Journal of the American Ceramic Society**. 90(12): 3869-3874.
- Cao, W., and Cross, L. E. (1993). Theoretical model for the morphotropic phase boundary in lead zirconate lead titanate solid solution. **Physical Review**. (47) 9: 4825–4830.
- Damjanovic, D. (1998). Ferroelectric dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics. **Reports on Progress in Physics**. 61: 1267-1324.
- Glaum, J., Granzow, T., Schmitt, L. A., Kleebe, H. J., and Rodel, J. (2011). Temperature and driving field dependence of fatigue processes in PZT bulk ceramics. **Acta Materialia**. 59: 6083-6092.

- Haertling, G.H. (1999). Ferroelectric ceramics history and technology. **Journal of the American Ceramic Society**. 82: 797 – 818.
- Hesse, D., Vrejoiu, I., and Alexe, M. (2006). Polarization fatigue and frequency-dependent recovery in $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ epitaxial thin films with SrRuO_3 electrodes. **Physical Review**. 88.
- Jaffe, B., Cook, W. R., and Jaffe, H. (1971). Piezoelectric ceramics. **Academic Press**: London New York.
- Jiang, Q., Cao, W., and Cross, L. E. (1994). Electric fatigue in lead zirconate titanate ceramics. **Solid State Sciences**. 77(1):211–215.
- Jiang, Q. Y., Subbarao, E. C., and Cross, L. E. (1994) .Effect of composition and temperature on electric fatigue of la-doped lead zirconate titanate ceramics. **Journal of Applied Physics**. 75 (11): 7433-7443.
- Lou, X.J., and Wang, J.(2010). Bipolar and unipolar electrical fatigue in ferroelectric lead zirconate titanate thin films: An experimental comparison study. **Physical Review**. 24: 104-108.
- Moulson, A. J., and Herbert, J. M. (2003). Electroceramics: Materials, Properties, Applications. **John Wiley & Sons, Ltd**. 2: 492 – 494.
- Nie, H. C., Chen, X.F., Feng, N.B., and Gu, Y. (2010). Effect of external fields on the switching current in PZT ferroelectric ceramics. **Solid State Communications**. 150: 101-103.
- Pan, W. Y., Yue, C. F., and Tuttle, B. A. (1991).Ferroelectric fatigue in modified bulk lead zirconate titanate ceramics and thin films. **Ceramic Transactions**. 25: 385-397.
- Park, C. H., and Chadi, D. J. (1997). Microscopic study of oxygen- vacancy defect in ferroelectric perovskites. **Physical Review**. 57(22): 13961-13964.
- Paton, E.N., Mansour, S. A., and Bement, A. (1996). Temperature dependent fatigue in ferroelectric PZT thin films. **Materials Science & Engineering**. 1: 467-470.
- Pojprapai, S., Russell, J., Daniels, J. E., and Hoffman, M. (2009). Frequency effects on fatigue crack growth and growth-tip domain switching behavior in a lead zirconate titanate ceramic. **Acta Materialia**. 57(13): 3932-3940.

- Pojprapai, S., Simons, H., Studer, A., Luo, Z., and Hoffman, M. (2011). Dependence on Domain Switching Behavior in Lead Zirconate Titanate Under Electrical Load via In Situ Neutron Diffraction. **Journal of the American Ceramic Society**. 94(10): 3202-3205.
- Qian, R., Lukasiewicz, S., and Gao, Q. (2000). Electrical fatigue response for ferroelectric ceramic under electrical cyclic load. **Solid-State Electronics**. 44: 1717-1722.
- Sawyer, C.B., and Tower, C. H. (1930). Rochelle salt as a dielectric. **Physical Review**. 35: 269 – 273.
- Sidorkin, A., Nesterenko, L., Sidorkin, A., Ryabtsev, s., and Bulavina, G. (2010). Ageing and fatigue of lead titanate and lead zirconate titanate thin ferroelectric films. **Solid State Sciences**. 12: 302–306.
- Wang, Y., Wong, K.H., and Choy, C.L. (2002) . Fatigue problems in ferroelectric thin films. **Physical Review**. 191 (2): 482-488.
- Wang, B., Chan, H. L. W., Kwok, K. W., Choy, C.L., and Tong, K.Y. (2001). Effect of fatigue on the pyroelectric and dielectric properties of PZT films. **Journal of the European Ceramic Society**. 21: 1589-1592.
- Warren, W. L., Dimos, D., Tuttle, B.A., and Pike, G.E. (1994). Electronic domain pinning in $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ thin films and its role in fatigue. **Applied Physics Letters**. 65(8): 1018-1020.
- Weitzing, H., Schneider, G.A., Steffens, J., and Hoffmann, M. J. (1999). Cyclic fatigue due to electric loading in ferroelectric ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**. 19: 1333-1337.
- Xu, Y. (1990). Ferroelectric materials and their applications. **Elsevier Science Publishers B.V.**, 1000 AE Amsterdam, The Netherlands.



ภาคผนวก ก

ตารางแสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าโวลตาไรเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
-14642	-38.28	-14821	-37.56	-14821	-36.83	-14821	-29.64	-14821	-21.41	-14821	-10.53	-14821	-7.92
-14343	-37.28	-14522	-36.68	-14522	-35.65	-14522	-25.64	-14522	-18.28	-14821	-9.17	-14821	-7.49
-14044	-36.6	-14223	-35.94	-14223	-34.91	-14223	-21.63	-14223	-15.15	-14821	-9.17	-14522	-6.74
-13746	-36.24	-13924	-35.11	-13924	-33.41	-13924	-17.63	-13924	-12.10	-14522	-8.09	-14223	-5.98
-13447	-35.08	-13626	-33.75	-13626	-31.42	-13626	-13.61	-13626	-9.45	-14223	-7.00	-13924	-5.22
-13148	-33.36	-13327	-31.89	-13327	-28.59	-13327	-9.62	-13327	-6.98	-13924	-5.92	-13626	-4.46
-12849	-31.33	-13028	-29.62	-13028	-25.75	-13028	-5.94	-13028	-5.09	-13626	-4.8	-13327	-3.74
-12550	-27.96	-12729	-25.36	-12729	-20.44	-12729	-2.49	-12729	-3.02	-13327	-3.84	-13028	-3.0
-12251	-24.55	-12430	-20.90	-12430	-15.11	-12430	0.69	-12430	-1.11	-13028	-2.98	-12729	-2.43
-11953	-20.48	-12131	-16.00	-12131	-9.69	-12131	3.53	-12131	0.63	-12729	-2.18	-12430	-1.82
-11654	-16.35	-11833	-10.81	-11833	-5.01	-11833	6.05	-11833	2.22	-12430	-1.43	-12131	-1.2
-11355	-11.5	-11534	-5.51	-11534	-0.02	-11534	8.23	-11534	3.68	-12131	-0.75	-11833	-0.72
-11056	-6.06	-11235	-0.95	-11235	4.23	-11235	10.10	-11235	5.01	-11833	-0.12	-11534	-0.23
-10757	-1.60	-10936	3.26	-10936	7.83	-10936	11.70	-10936	6.21	-11534	0.46	-11235	0.22
-10458	2.97	-10637	7.36	-10637	10.98	-10637	13.07	-10637	7.30	-11235.4	1.01	-10936	0.65
-10160	6.93	-10338	10.61	-10338	13.6	-10338	14.23	-10338	8.29	-10936	1.53	-10637	1.04
-9861	10.28	-10040	13.48	-10040	15.87	-10040	15.25	-10040	9.19	-10637	2.01	-10338	1.41
-9562	13.30	-9741	15.79	-9741	17.49	-9741	16.15	-9741	10.00	-10338	2.47	-10040	1.75
-9263	15.65	-9442	17.65	-9442	18.86	-9442	16.94	-9442	10.7	-10040	2.90	-9741	2.07
-8964	17.72	-9143	19.24	-9143	19.94	-9143	17.65	-9143	11.42	-9741	3.31	-9442	2.37
-8665	19.30	-8844.8	20.49	-8844.8	20.94	-8844.8	18.30	-8844	12.04	-9442.4	3.69	-9143	2.64
-8367	20.58	-8545	21.46	-8545	21.80	-8545	18.90	-8545	12.60	-9143.6	4.05	-8844	2.90
-8068	21.59	-8247	22.31	-8247	22.55	-8247	19.46	-8247	13.13	-8844	4.39	-8545	3.15
-7769	22.47	-7948	23.09	-7948	23.24	-7948	19.98	-7948	13.61	-8545	4.71	-8247	3.38
-7470	23.24	-7649	23.78	-7649	23.87	-7649	20.47	-7649	14.01	-8247	5.01	-7948	3.60
-7171	23.94	-7350	24.43	-7350	24.50	-7350	20.93	-7350	14.48	-7948	5.30	-7649	3.80
-6873	24.59	-7051	25.01	-7051	25.06	-7051	21.36	-7051	14.87	-7649	5.56	-7350	4.00
-6574	25.21	-6753	25.56	-6753	25.56	-6753	21.77	-6753	15.23	-7350.67	5.82	-7051	4.19
-6275	25	-6454	26.10	-6454	26.04	-6454	22.16	-6454	15.58	-7051	6.06	-6753	4.36
-5976	26.26	-6155	26.58	-6155	26.49	-6155	22.52	-6155	15.90	-6753	6.28	-6454	4.53
-5677	26.74	-5856	27.04	-5856.5	26.90	-5856	22.86	-5856	16.21	-6454.1	6.50	-6155.3	4.69
-5378	27.20	-5557	27.48	-5557.7	27.31	-5557.7	23.19	-5557.7	16.50	-6155.36	6.70	-5856.5	4.84
-5080	27.63	-5258	27.90	-5258.8	27.70	-5258.8	23.49	-5258.8	16.7	-5856.53	6.901	-5557	4.9
-4781	28.04	-4960	28.26	-4960	28.07	-4960.0	23.78	-4960	17.03	-5557	7.085	-5258.8	5.13
-4482	28.42	-4661	28.62	-4661.2	28.42	-4661.2	24.05	-4661	17.28	-5258.88	7.26	-4960	5.26
-4183	28.79	-4362.4	28.96	-4362.4	28.75	-4362	24.30	-4362	17.52	-4960.05	7.42	-4661	5.39
-3884	29.13	-4063	29.32	-4063.5	29.08	-4063.5	24.55	-4063	17.74	-4661.23	7.58	-4362.4	5.51
-3585	29.48	-3764.7	29.64	-3764.7	29.38	-3764.7	24.78	-3764	17.96	-4362.4	7.74	-4063.5	5.63
-3287	29.78	-3465.9	29.93	-3465.9	29.67	-3465.9	25.01	-3465	18.16	-4063	7.88	-3764.7	5.74
-2988	30.08	-3167	30.22	-3167	29.9	-3167	25.23	-3167	18.36	-3764.75	8.02	-3465.9	5.85
-2689	30.37	-2868.2	30.48	-2868	30.19	-2868.2	25.44	-2868.2	18.55	-3465.92	8.15	-3167	5.95
-2390	30.67	-2569.4	30.75	-2569.4	30.43	-2569.4	25.64	-2569.4	18.73	-3167.09	8.28	-2868.2	6.05
-2091	30.94	-2270.6	31.01	-2270.6	30.68	-2270.6	25.84	-2270.6	18.91	-2868.27	8.40	-2569.4	6.15
-1792	31.21	-1971	31.26	-1971.7	30.90	-1971.7	26.04	-1971	19.07	-2569	8.52	-2270	6.24
-1494	31.47	-1672	31.49	-1672.9	31.16	-1672.9	26.23	-1672.9	19.23	-2270.6	8.63	-1971.7	6.33
-1195	31.70	-1374.1	31.7	-1374.1	31.38	-1374.1	26.42	-1374.1	19.39	-1971.7	8.73	-1672.9	6.41
-896	31.93	-1075.3	31.94	-1075.3	31.53	-1075	26.60	-1075.1	19.54	-1672.96	8.84	-1374.1	6.49
-597	32.16	-776.48	32.16	-776.48	31.77	-776.48	26.78	-776.48	19.68	-1374.1	8.93	-1075.3	6.57
-298	32.38	-477.65	32.36	-477.65	31.93	-477.65	26.95	-477.6	19.82	-1075.31	9.03	-776.48	6.62
-5E-05	32.60	-178.82	32.57	-178.82	32.11	-178.82	27.12	-178.82	19.95	-776	9.12	-477.65	6.71
298.82	32.81	119.99	32.77	119.9	32.29	119.99	27.28	119.99	20.08	-477.65	9.20	-178.82	6.78
597	33.01	418.8	32.96	418.825	32.46	418.825	27.43	418.82	20.20	-178.828	9.29	119.999	6.85
896	33.21	717.65	33.15	717.65	32.64	717.652	27.57	717.65	20.3	119.9	9.37	418.82	6.91

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าโวลตาไรเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง (ต่อ)

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
1195	33.39	1016.47	33.32	1016.47	32.1	1016.47	27.71	1016.47	20.43	418.82	9.45	717.65	6.97
1494	33.56	1315.30	33.52	1315.30	32.98	1315.30	27.84	1315.3	20.543	717.6522	9.52	1016.4	7.03
1792	33.74	1614	33.68	1614.1	33.14	1614.1	27.96	1614.13	20.64	1016.479	9.59	1315.3	7.09
2091	33.91	1912	33.85	1912.95	33.28	1912.95	28.08	1912.95	20.74	1315.305	9.66	1614.13	7.14
2390	34.07	2211.78	34.02	2211.78	33.45	2211.78	28.17	2211.78	20.84	1614.132	9.73	1912.95	7.20
2689	34.22	2510.61	34.18	2510.61	33.62	2510.61	28.30	2510.61	20.94	1912.959	9.80	2211.78	7.25
2988	34.37	2809.43	34.32	2809.43	33.78	2809.43	28.41	2809.43	21.03	2211.785	9.86	2510.61	7.30
3287	34.51	3108.26	34.47	3108.26	33.90	3108.26	28.51	3108.26	21.11	2510.612	9.928	2809.43	7.348
3585	34.64	3407.09	34.59	3407.09	34.03	3407.09	28.61	3407.09	21.20	2809.438	9.9	3108.26	7.39
3884.7	34.77	3705.91	34.72	3705.91	34.16	3705.91	28.71	3705.91	21.28	3108.265	10.04	3407.09	7.43
4183.5	34.89	4004.74	34.86	4004.74	34.29	4004.74	28.81	4004.74	21.36	3407.091	10.10	3705.91	7.47
4482.3	35.01	4303.57	34.98	4303.57	34.42	4303.57	28.91	4303.57	21.44	3705.918	10.15	4004.74	7.51
4781.2	35.12	4602.39	35.08	4602.39	34.56	4602.39	29.00	4602.39	21.52	4004.745	10.20	4303.57	7.55
5080.0	35.24	4901.22	35.19	4901.22	34.70	4901.22	29.10	4901.22	21.59	4303.571	10.25	4602.39	7.595
5378.8	35.33	5200.05	35.31	5200.05	34.82	5200.05	29.19	5200.05	21.66	4602.398	10.30	4901.22	7.63
5677.7	35.44	5498.87	35.40	5498.87	34.94	5498.87	29.28	5498.87	21.73	4901.224	10.34	5200.05	7.66
5976.5	35.55	5797.70	35.49	5797.70	35.05	5797.70	29.38	5797.70	21.80	5200.051	10.39	5498.87	7.70
6275.3	35.66	6096.53	35.59	6096.53	35.15	6096.53	29.47	6096.53	21.87	5498.878	10.43	5797.70	7.73
6574.1	35.75	6395.35	35.69	6395.35	35.23	6395.35	29.56	6395.35	21.94	5797.704	10.46	6096.53	7.76
6873.0	35.83	6694.18	35.78	6694.18	35.31	6694.18	29.65	6694.18	22.00	6096.531	10.50	6395.35	7.79
7171.8	35.92	6993.01	35.86	6993.01	35.41	6993.01	29.74	6993.01	22.06	6395.357	10.53	6694.18	7.82
7470.6	36.01	7291.83	35.95	7291.83	35.48	7291.83	29.83	7291.83	22.12	6694.184	10.56	6993.01	7.85
7769.4	36.11	7590.66	36.05	7590.66	35.56	7590.66	29.91	7590.66	22.18	6993.01	10.59	7291.83	7.88
8068.3	36.23	7889.49	36.15	7889.49	35.65	7889.49	30.00	7889.49	22.24	7291.837	10.62	7590.66	7.9
8367.1	36.31	8188.31	36.25	8188.31	35.74	8188.31	30.08	8188.31	22.29	7590.664	10.64	7889.49	7.93
8665.9	36.40	8487.14	36.33	8487.14	35.84	8487.14	30.16	8487.14	22.34	7889.49	10.66	8188.31	7.95
8964.7	36.49	8785.97	36.44	8785.97	35.93	8785.97	30.23	8785.97	22.39	8188.317	10.68	8487.14	7.97
9263.6	36.59	9084.79	36.53	9084.79	36.03	9084.79	30.30	9084.79	22.43	8487.143	10.70	8785.97	7.99
9562.4	36.68	9383.62	36.61	9383.62	36.12	9383.62	30.36	9383.62	22.48	8785.97	10.71	9084.79	8.00
9861.	36.76	9682.45	36.68	9682.45	36.19	9682.45	30.41	9682.45	22.51	9084.797	10.73	9383.62	8.022
10160	36.85	9981.27	36.76	9981.27	36.25	9981.27	30.45	9981.26	22.55	9383.623	10.74	9682.45	8.03
10458	36.96	10280.1	36.84	10280.1	36.30	10280.1	30.48	10280.1	22.57	9682.45	10.76	9981.27	8.04
10757	37.07	10578.9	36.93	10578.9	36.36	10578.9	30.51	10578.9	22.60	9981.276	10.77	10280.1	8.04
11056	37.17	10877.7	37.01	10877.7	36.42	10877.7	30.54	10877.7	22.61	10280.1	10.78	10578.9	8.04
11355	37.28	11176.5	37.10	11176.5	36.49	11176.5	30.56	11176.5	22.62	10578.93	10.78	10877.7	8.04
11654	37.35	11475.4	37.18	11475.4	36.55	11475.4	30.59	11475.4	22.62	10877.76	10.79	11176.5	8.03
11953	37.42	11774.2	37.25	11774.2	36.62	11774.2	30.62	11774.2	22.62	11176.58	10.79	11475.4	8.02
12251	37.48	12073.0	37.31	12073.0	36.70	12073.0	30.66	12073.0	22.60	11475.41	10.79	11774.2	8.01
12550	37.54	12371.8	37.39	12371.8	36.76	12371.8	30.69	12371.8	22.58	11774.24	10.79	12073.0	8.00
12849	37.60	12670.7	37.46	12670.7	36.86	12670.7	30.73	12670.7	22.55	12073.06	10.79	12371.8	7.9
13148	37.63	12969.5	37.52	12969.5	36.9	12969.5	30.76	12969.5	22.52	12371.89	10.78	12670.7	7.96
13447	37.66	13268.3	37.55	13268.3	37.01	13268.3	30.79	13268.3	22.47	12670.72	10.77	12969.5	7.9
13746	37.72	13567.2	37.57	13567.2	37.06	13567.2	30.80	13567.2	22.42	12969.54	10.75	13268.3	7.92
14044	37.78	13866.0	37.57	13866.0	37.13	13866.0	30.78	13866.0	22.37	13268.37	10.74	13567.2	7.90
14343	37.85	14164.8	37.60	14164.8	37.20	14164.8	30.77	14164.8	22.31	13567.2	10.72	13866.0	7.88
14642	37.87	14463.6	37.60	14463.6	37.27	14463.6	30.77	14463.6	22.25	13866.02	10.70	14164.8	7.86
14941	37.94	14762.5	37.65	14762.5	37.41	14762.5	30.76	14762.5	22.18	14164.85	10.67	14463.6	7.84
15240	37.83	15061.3	37.59	15061.3	37.41	15061.3	30.75	15061.3	22.11	14463.68	10.65	14762.5	7.82
15240	38.79	15061.3	37.60	15061.3	38.06	15061.3	31.04	15061.3	21.94	14762.5	10.63	15061.3	7.79
14941	38.19	14762.5	37.53	14762.5	37.41	15061.3	30.75	15061.3	22.11	15061.33	10.61	15061.3	7.82
14642	37.60	14463.6	37.22	14463.6	36.01	15061.3	30.75	15061.3	22.18	15061.33	10.49	15061.3	7.79
14343	37.02	14164.8	36.79	14164.8	33.98	14762.5	27.31	14762.5	19.08	15061.33	10.61	15061.3	7.82
14044	36.44	13866.0	36.24	13866.0	31.97	14463.6	23.58	14463.6	16.22	15061.33	10.63	14762.5	7.01

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าโวลตาไรเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง (ต่อ)

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
13746	35.57	13567.2	35.14	13567.2	29.68	14164.8	19.85	14164.8	13.47	15061.33	10.60	14463.6	6.19
13447	34.28	13268.3	33.63	13268.3	26.82	13866.0	16.12	13866.0	10.94	14762.5	9.212	14164.8	5.37
13148	32.51	12969.5	30.84	12969.5	23.44	13567.2	12.49	13567.2	8.50	14463.68	7.92	13866.0	4.60
12849	30.23	12670.7	27.08	12670.7	19.56	13268.3	8.89	13268.3	6.14	14164.85	6.63	13567.2	3.89
12550	27.38	12371.8	22.07	12371.8	15.28	12969.5	5.42	12969.5	3.92	13866.02	5.53	13268.3	3.16
12251	23.98	12073.0	16.65	12073.0	10.76	12670.7	2.11	12670.7	1.85	13567.2	4.47	12969.5	2.49
11953	20.07	11774.2	11.26	11774.2	6.15	12371.8	-0.95	12371.8	-0.06	13268.37	3.43	12670.7	1.88
11654	15.74	11475.4	6.16	11475.4	1.68	12073.0	-3.80	12073.0	-1.83	12969.54	2.517	12371.8	1.3
11355	11.13	11176	1.54	11176.5	-2.52	11774.2	-6.35	11774.2	-3.46	12670.72	1.67	12073.0	0.80
11056	6.42	10877.7	-3.08	10877.7	-6.3	11475.4	-8.60	11475.4	-4.94	12371.89	0.90	11774.2	0.31
10757	1.86	10578.9	-7.52	10578.9	-9.68	11176.5	-10.56	11176.5	-6.28	12073.06	0.19	11475.4	-0.14
10458	-2.44	10280.1	-11.23	10280.1	-12.5	10877.7	-12.24	10877.7	-7.50	11774.24	-0.46	11176.5	-0.56
10160	-6.41	9981.27	-14.25	9981.27	-15.03	10578.9	-13.68	10578.9	-8.59	11475.41	-1.06	10877.7	-0.95
9861	-10.03	9682.45	-16.77	9682.45	-17.08	10280.1	-14.91	10280.1	-9.58	11176.58	-1.69	10578.9	-1.32
9562	-13.18	9383.62	-18.82	9383.62	-18.80	9981.27	-15.97	9981.27	-10.48	10877.76	-2.12	10280.1	-1.66
9263	-15.89	9084.79	-20.32	9084.79	-20.21	9682.45	-16.89	9682.45	-11.29	10578.93	-2.60	9981.27	-1.98
8964	-18.18	8785.97	-21.52	8785.97	-21.38	9383.62	-17.69	9383.62	-12.02	10280.1	-3.04	9682.45	-2.28
8665	-20.08	8487.14	-22.53	8487.14	-22.38	9084.79	-18.41	9084.79	-12.68	9981.27	-3.46	9383.62	-2.5
8367	-21.63	8188.31	-23.42	8188.31	-23.24	8785.97	-19.06	8785.97	-13.28	9682.45	-3.84	9084.79	-2.83
8068	-22.88	7889.49	-24.22	7889.49	-23.99	8487.14	-19.65	8487.13	-13.83	9383.62	-4.21	8785.97	-3.08
7769	-23.91	7590.66	-24.89	7590.66	-24.73	8188.31	-20.19	8188.31	-14.33	9084.79	-4.55	8487.14	-3.3
7470	-24.77	7291.83	-25.56	7291.83	-25.27	7889.49	-20.69	7889.49	-14.80	8785.97	-4.87	8188.31	-3.54
7171	-25.51	6993.01	-26.15	6993.01	-25.84	7590.66	-21.15	7590.66	-15.23	8487.14	-5.17	7889.49	-3.76
6873	-26.17	6694.18	-26.69	6694.18	-26.35	7291.83	-21.59	7291.83	-15.62	8188.31	-5.45	7590.66	-3.96
6574	-26.76	6395.35	-27.20	6395.35	-26.83	6993.01	-22.00	6993.01	-15.99	7889.49	-5.72	7291.83	-4.15
6275	-27.31	6096.53	-27.67	6096.53	-27.28	6694.18	-22.39	6694.18	-16.33	7590.66	-5.9	6993.01	-4.33
5976	-27.81	5797.70	-28.11	5797.70	-27.70	6395.35	-22.76	6395.35	-16.658	7291.83	-6.21	6694.18	-4.51
5677	-28.27	5498.87	-28.50	5498.87	-28.09	6096.53	-23.11	6096.53	-16.9	6993.01	-6.44	6395.35	-4.67
5378	-28.71	5200.05	-28.87	5200.05	-28.46	5797.70	-23.44	5797.70	-17.24	6694.18	-6.65	6096.53	-4.83
5080	-29.12	4901.22	-29.26	4901.22	-28.81	5498.87	-23.76	5498.87	-17.50	6395.35	-6.86	5797.70	-4.98
4781	-29.51	4602.39	-29.61	4602.39	-29.14	5200.05	-24.06	5200.05	-17.75	6096.53	-7.05	5498.87	-5.12
4482	-29.88	4303.57	-29.92	4303.57	-29.45	4901.22	-24.34	4901.22	-17.99	5797.70	-7.23	5200.05	-5.26
4183	-30.23	4004.74	-30.2	4004.74	-29.75	4602.39	-24.62	4602.39	-18.2	5498.88	-7.41	4901.22	-5.39
3884	-30.56	3705.91	-30.54	3705.91	-30.03	4303.57	-24.88	4303.57	-18.43	5200.05	-7.57	4602.39	-5.52
3585	-30.88	3407.09	-30.82	3407.09	-30.31	4004.74	-25.13	4004.74	-18.63	4901.22	-7.73	4303.57	-5.64
3287	-31.18	3108.26	-31.09	3108.26	-30.57	3705.91	-25.36	3705.91	-18.826	4602.39	-7.88	4004.74	-5.76
2988	-31.48	2809.43	-31.34	2809.43	-30.82	3407.09	-25.58	3407.09	-19.00	4303.57	-8.02	3705.91	-5.87
2689	-31.76	2510.61	-31.57	2510.61	-31.07	3108.26	-25.80	3108.26	-19.18	4004.74	-8.16	3407.09	-5.97
2390	-32.03	2211.78	-31.80	2211.78	-31.30	2809.43	-26.00	2809.43	-19.35	3705.91	-8.29	3108.26	-6.08
2091	-32.29	1912.95	-32.02	1912.95	-31.52	2510.61	-26.19	2510.61	-19.51	3407.09	-8.42	2809.43	-6.17
1792	-32.54	1614.13	-32.2	1614.13	-31.73	2211.78	-26.37	2211.78	-19.66	3108.26	-8.54	2510.61	-6.27
1494	-32.78	1315.30	-32.43	1315.30	-31.94	1912.95	-26.55	1912.95	-19.80	2809.43	-8.65	2211.78	-6.36
1195	-33.01	1016.47	-32.64	1016.47	-32.13	1614.13	-26.71	1614.13	-19.95	2510.61	-8.76	1912.95	-6.4
896.47	-33.23	717.65	-32.84	717.65	-32.32	1315.30	-26.87	1315.30	-20.08	2211.78	-8.87	1614	-6.52
597.65	-33.45	418.82	-33.04	418.82	-32.50	1016.47	-27.02	1016.47	-20.21	1912.95	-8.97	1315	-6.60
298.82	-33.65	119.99	-33.22	119.99	-32.68	717.65	-27.17	717.65	-20.34	1614.13	-9.07	1016	-6.68
-5E-05	-33.84	-178.82	-33.40	-178.82	-32.84	418.82	-27.31	418.82	-20.46	1315.30	-9.16	717.65	-6.75
-298	-34.03	-477.65	-33.59	-477.65	-33.01	119.99	-27.45	119.99	-20.57	1016.47	-9.25	418.82	-6.8
-597	-34.20	-776.48	-33.75	-776.48	-33.17	-178.82	-27.58	-178.82	-20.69	717.65	-9.34	119.9	-6.89
-896	-34.37	-1075	-33.91	-1075.3	-33.33	-477	-27.71	-477.65	-20.80	418.8256	-9.429	-178	-6.95
-1195	-34.54	-1374.1	-34.08	-1374.1	-33.49	-776.48	-27.83	-776.48	-20.90	119.999	-9.509	-477.65	-7.02
-1494	-34.70	-1672.9	-34.23	-1672.9	-33.64	-1075	-27.95	-1075.3	-21.00	-178.82	-9.586	-776.4	-7.08
-1792	-34.86	-1971.7	-34.38	-1971	-33.79	-1374.1	-28.07	-1374	-21.10	-477.65	-9.661	-1075	-7.14

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าโวลตาไรเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง (ต่อ)

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
-2091	-35.01	-2270.6	-34.53	-2270.6	-33.94	-1672.9	-28.18	-1672	-21.20	-776.481	-9.732	-1374	-7.19
-2390	-35.16	-2569	-34.67	-2569	-34.08	-1971	-28.29	-1971	-21.29	-1075.31	-9.802	-1672	-7.25
-2689	-35.30	-2868.2	-34.79	-2868.2	-34.23	-2270.6	-28.39	-2270.6	-21.38	-1374.13	-9.869	-1971.7	-7.30
-2988	-35.44	-3167.0	-34.90	-3167.0	-34.36	-2569.4	-28.50	-2569.4	-21.46	-1672.96	-9.933	-2270.6	-7.35
-3287	-35.58	-3465.9	-35.01	-3465.9	-34.50	-2868.2	-28.60	-2868.2	-21.54	-1971.79	-9.996	-2569.4	-7.40
-3585	-35.71	-3764.7	-35.15	-3764.7	-34.62	-3167	-28.70	-3167	-21.62	-2270.61	-10.05	-2868.2	-7.44
-3884	-35.84	-4063.5	-35.27	-4063.5	-34.75	-3465.9	-28.79	-3465.9	-21.70	-2569.44	-10.10	-3167.0	-7.49
-4183	-35.97	-4362.4	-35.39	-4362.4	-34.86	-3764.7	-28.89	-3764.7	-21.77	-2868.27	-10.17	-3465.9	-7.53
-4482	-36.09	-4661.2	-35.50	-4661.2	-34.98	-4063.5	-28.98	-4063.5	-21.84	-3167.09	-10.22	-3764.7	-7.58
-4781	-36.22	-4960	-35.60	-4960	-35.08	-4362.4	-29.08	-4362.4	-21.91	-3465.92	10.28	-4063	-7.62
-5080	-36.34	-5258.8	-35.71	-5258.8	-35.18	-4661.2	-29.17	-4661.2	-21.98	-3764.75	-10.33	-4362	-7.66
-5378	-36.46	-5557.7	-35.82	-5557.7	-35.27	-4960.0	-29.25	-4960.0	-22.04	-4063.57	-10.38	-4661.2	-7.70
-5677	-36.58	-5856.5	-35.91	-5856.5	-35.36	-5258.8	-29.34	-5258.8	-22.11	-4362.4	-10.43	-4960.0	-7.74
-5976	-36.69	-6155.3	-36.02	-6155.3	-35.44	-5557.7	-29.43	-5557.7	-22.17	-4661.23	-10.48	-5258.8	-7.77
-6275	-36.80	-6454.1	-36.13	-6454.1	-35.52	-5856.5	-29.51	-5856.5	-22.22	-4960.05	-10.52	-5557.7	-7.81
-6574	-36.90	-6753.0	-36.22	-6753.0	-35.60	-6155.3	-29.59	-6155.3	-22.28	-5258.88	-10.57	-5856.5	-7.84
-6873	-37.00	-7051.8	-36.34	-7051	-35.67	-6454.1	-29.67	-6454.1	-22.33	-5557.7	-10.61	-6155.3	-7.88
-7171	-37.09	-7350.6	-36.46	-7350.6	-35.74	-6753	-29.75	-6753	-22.38	-5856.53	-10.66	-6454.1	-7.91
-7470	-37.17	-7649.4	-36.59	-7649.4	-35.82	-7051.8	-29.83	-7051.8	-22.43	-6155.36	-10.7	-6753	-7.94
-7769	-37.25	-7948.3	-36.69	-7948.3	-35.90	-7350.6	-29.90	-7350.6	-22.48	-6454.1	-10.74	-7051.8	-7.97
-8068	-37.32	-8247.1	-36.76	-8247.1	-35.98	-7649.4	-29.98	-7649.4	-22.53	-6753.01	-10.77	-7350.6	-7.99
-8367	-37.39	-8545.9	-36.84	-8545.9	-36.06	-7948.3	-30.05	-7948.3	-22.57	-7051.84	-10.81	-7649.4	-8.02
-8665	-37.46	-8844.8	-36.93	-8844.8	-36.18	-8247.1	-30.12	-8247.1	-22.61	-7350.67	-10.84	-7948.3	-8.04
-8964	-37.53	-9143.6	-37.02	-9143.6	-36.23	-8545.9	-30.18	-8545.9	-22.65	-7649.49	-10.87	-8247.1	-8.07
-9263	-37.59	-9442.4	-37.11	-9442.4	-36.32	-8844.8	-30.25	-8844.8	-22.68	-7948.32	-10.90	-8545.9	-8.09
-9562	-37.66	-9741.2	-37.17	-9741.2	-36.40	-9143.6	-30.31	-9143.6	-22.71	-8247.15	-10.93	-8844.8	-8.11
-9861	-37.73	-10040	-37.25	-10040	-36.48	-9442.4	-30.37	-9442	-22.74	-8545.97	-10.96	-9143.6	-8.12
-10160	-37.80	-10338	-37.31	-10338	-36.57	-9741.2	-30.43	-9741.2	-22.76	-8844.8	-10.98	-9442.4	-8.14
-10458	-37.88	-10637	-37.37	-10637	-36.65	-10040	-30.48	-10040	-22.77	-9143.63	-11.00	-9741.2	-8.15
-10757	-37.96	-10936	-37.41	-10936	-36.72	-10338	-30.53	-10338	-22.78	-9442.45	-11.02	-10040	-8.15
-11056	-38.05	-11235	-37.50	-11235	-36.79	-10637	-30.57	-10637	-22.78	-9741.28	-11.03	-10338	-8.16
-11355	-38.13	-11534	-37.56	-11534	-36.86	-10936	-30.6	-10936	-22.78	-10040.1	-11.04	-10637	-8.16
-11654	-38.22	-11833	-37.58	-11833	-36.93	-11235	-30.64	-11235	-22.76	-10338	-11.04	-1093	-8.16
-11953	-38.31	-12131	-37.57	-12131	-36.99	-11534	-30.66	-11534	-22.74	-10637.8	-11.0	-11235	-8.15
-12251	-38.40	-12430	-37.58	-12430	-37.05	-11833	-30.68	-11833	-22.71	-10936.6	-11.03	-11534	-8.15
-12550	-38.50	-12729	-37.6	-12729	-37.12	-12131	-30.68	-12131	-22.67	-11235	-11.02	-11833	-8.13
-12849	-38.58	-13028	-37.66	-13028	-37.17	-12430	-30.67	-12430	-22.62	-11534.2	-11.00	-12131	-8.12
-13148	-38.62	-13327	-37.70	-13327	-37.20	-12729	-30.65	-12729	-22.56	-11833.1	-10.97	-12430	-8.10
-13447	-38.66	-13626	-37.73	-13626	-37.23	-13028	-30.6	-13028	-22.50	-12131.9	-10.94	-12729	-8.09
-13746	-38.70	-13924	-37.84	-13924	-37.25	-13327	-30.55	-13327	-22.43	-12430.7	-10.90	-13028	-8.07
-14044	-38.73	-14223	-38.28	-14223	-37.26	-13626	-30.48	-13626	-22.36	-12729.5	-10.85	-13327	-8.04
-14343	-38.76	-14522	-37.92	-14522	-37.28	-13924	-30.40	-13924	-22.27	-13028.4	-10.81	-13626	-8.02
-14642	-38.79	-14821	-37.59	-14821	-37.30	-14223	-30	-14223	-22.19	-13327.2	-10.76	-13924	-8.00
						-14522	-30.25	-14522	-22.11	-13626	-10.72	-14223	-7.97
						-14821	-30.17	-14821	-22.03	-13924.9	-10.67	-14522	-7.95
								-14223	-22.19	-14223.7	-10.63	-14821	-7.92
								-14522	-22.11	-14522.5	-10.58		
								-14821	-22.03	-14821.3	-10.53		

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าโวลตาไรเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 50 °C

E		P		E		P		E		P		E	
-14821	-33	-14821	-34.22	-14821	-33.95	-14821	-24.85	-14821	-20.08	-14821	-11.03	-14821.3	-8.32
-14522	-32.88	-14522	-33.9	-14522	-33.47	-14522	-22.80	-14821	-18.18	-14821	-10.45	-14821	-8.03
-14223	-31.63	-14223	-32.6	-14223	-31.91	-14223	-20.76	-14522	-16.55	-14522	-9.49	-14522	-7.28
-13924	-30.38	-13924	-31.25	-13924	-30.37	-13924	-18.73	-14223	-14.92	-14223	-8.54	-14223	-6.54
-13626	-29.15	-13626	-29.91	-13626	-28.84	-13626	-16.69	-13924	-13.28	-13924.9	-7.58	-13924.9	-5.79
-13327	-27	-13327	-28.47	-13327	-27.20	-13327	-14.62	-13626	-11.65	-13626	-6.622	-13626	-5.12
-13028	-26.0	-13028	-26.45	-13028	-25.02	-13028	-12.44	-13327	-10.02	-13327.2	-5.712	-13327.2	-4.49
-12729	-23.9	-12729	-23.97	-12729	-22.43	-12729	-10.18	-13028	-8.44	-13028.4	-4.87	-13028.4	-3.92
-12430	-21.4	-12430	-21.0	-12430	-19.45	-12430	-7.88	-12729	-6.89	-12729.5	-4.06	-12729.5	-3.37
-12131	-18.6	-12131	-17.81	-12131	-16.16	-12131	-5.58	-12430	-5.3	-12430.7	-3.30	-12430.7	-2.85
-11833	-15.5	-11833	-14.25	-11833	-12.63	-11833	-3.31	-12131	-3.952	-12131.9	-2.587	-12131.9	-2.35
-11534	-12.27	-11534	-10.49	-11534	-8.98	-11534	-1.12	-11833	-2.566	-11833.1	-1.91	-11833.1	-1.88
-11235	-8.84	-11235	-6.64	-11235	-5.28	-11235	0.94	-11534	-1.246	-11534.2	-1.27	-11534.2	-1.4
-10936	-5.39	-10936	-2.84	-10936	-1.68	-10936	2.88	-11235	7E-03	-11235.4	-0.67	-11235.4	-1.00
-10637	-2.03	-10637	0.79	-10637	1.730	-10637	4.66	-10936	1.19	-10936.6	-0.10	-10936	-0.60
-10338	1.18	-10338	4.16	-10338	4.884	-10338	6.2	-10637	2.30	-10637.8	0.4262	-10637.8	-0.21
-10040	4.15	-10040	7.19	-10040	7.711	-10040	7.6	-10338	3.34	-10338.9	0.9279	-10338	0.14
-9741	6.83	-9741.2	9.84	-9741	10.19	-9741.2	8.940	-10040	4.32	-10040.1	1.4009	-10040.1	0.50
-9442	9.208	-9442	12	-9442.4	12.32	-9442	10.04	-9741	5.22	-9741.28	1.8471	-9741.28	0.84
-9143	11.27	-9143	14.06	-9143.6	14.15	-9143.6	11.01	-9442	6.07	-9442.45	2.2686	-9442.45	1.16
-8844	13.04	-8844	15.6	-8844	15.69	-8844	11.86	-9143.6	6.85	-9143.63	2.6669	-9143.63	1.47
-8545	14.56	-8545	17.04	-8545	16.99	-8545	12.62	-8844.8	7.577	-8844.8	3.044	-8844.8	1.77
-8247	15.84	-8247	18.16	-8247	18.07	-8247	13.29	-8545.9	8.249	-8545.97	3.4012	-8545.97	2.05
-7948	16.91	-7948	19.09	-7948	18.99	-7948	13.9	-8247.1	8.871	-8247.15	3.74	-8247.15	2.32
-7649	17.83	-7649	19.89	-7649.4	19.77	-7649	14.45	-7948.3	9.44	-7948.32	4.06	-7948.32	2.58
-7350	18.62	-7350	20.57	-7350.6	20.45	-7350.6	14.95	-7649.4	9.98	-7649.49	4.3674	-7649.49	2.83
-7051	19.31	-7051	21.18	-7051.8	21.05	-7051.8	15.42	-7350.6	10.47	-7350.67	4.6583	-7350.67	3.07
-6753	19.92	-6753	21.74	-6753.0	21.60	-6753.0	15.85	-7051.8	10.94	-7051.84	4.9353	-7051.84	3.30
-6454	20.47	-6454	22.25	-6454.1	22.10	-6454.1	16.26	-6753.0	11.37	-6753.01	5.1993	-6753.01	3.52
-6155	20.99	-6155	22.72	-6155.3	22.56	-6155.3	16.65	-6454.1	11.77	-6454.19	5.4511	-6454.19	3.73
-5856	21.46	-5856	23.15	-5856.5	23.00	-5856.3	17.02	-6155.3	12.15	-6155.36	5.6915	-6155.36	3.93
-5557	21.91	-5557	23.5	-5557.7	23.42	-5557.7	17.36	-5856.5	12.51	-5856.53	5.9211	-5856.53	4.12
-5258	22.33	-5258	23.97	-5258.8	23.81	-5258.8	17.69	-5557.7	12.84	-5557.71	6.1406	-5557.71	4.31
-4960	22.74	-4960	24.34	-4960	24.19	-4960	18.01	-5258.8	13.16	-5258.88	6.3505	-5258.88	4.49
-4661	23.12	-4661	24	-4661.2	24.55	-4661.2	18.31	-4960.0	13.46	-4960.0	6.5513	-4960.05	4.66
-4362	23.48	-4362	25.04	-4362.4	24.89	-4362.4	18.60	-4661.2	13.74	-4661.2	6.7436	-4661.23	4.82
-4063	23.82	-4063	25.37	-4063.5	25.22	-4063.7	18.87	-4362.4	14.01	-4362.4	6.9278	-4362.4	4.98
-3764	24.16	-3764	25.68	-3764.7	25.53	-3764.7	19.14	-4063.5	14.27	-4063.5	7.1043	-4063.57	5.13
-3465	24.47	-3465	25.98	-3465.9	25.84	-3465.9	19.39	-3764.7	14.51	-3764.75	7.2734	-3764.75	5.27
-3167	24.78	-3167	26.27	-3167.0	26.13	-3167.0	19.63	-3465.9	14.75	-3465.92	7.4355	-3465.92	5.41
-2868	25.08	-2868	26.55	-2868.2	26.41	-2868.2	19.87	-3167.0	14.97	-3167.09	7.5909	-3167.0	5.54
-2569	25.37	-2569	26.81	-2569.4	26.68	-2569.4	20.09	-2868.2	15.18	-2868.27	7.74	-2868.2	5.66
-2270	25.65	-2270	27.07	-2270	26.95	-2270.6	20.31	-2569.4	15.39	-2569.44	7.8831	-2569.4	5.79
-1971	25.92	-1971	27.33	-1971.7	27.21	-1971.7	20.52	-2270.6	15.58	-2270.61	8.0204	-2270.6	5.90
-1672	26.18	-1672	27	-1672	27.46	-1672	20.73	-1971.7	15.77	-1971.79	8.1523	-1971.7	6.02
-1374	26.43	-1374	27.82	-1374.1	27.70	-1374.1	20.92	-1672.9	15.95	-1672.96	8.279	-1672.9	6.13
-1075	26.68	-1075	28.0	-1075.3	27.94	-1075.3	21.11	-1374.1	16.13	-1374.13	8.4007	-1374.1	6.23
-776	26.92	-776	28.29	-776.48	28.17	-776.4	21.30	-1075.3	16.29	-1075.31	8.5177	-1075.3	6.33
-477	27.15	-477	28.52	-477.65	28.40	-477	21.48	-776.48	16.45	-776.48	8.6302	-776.4	6.43
-178	27.39	-178.82	28.74	-178.8	28.62	-178.82	21.6	-477.65	16.61	-477.654	8.73	-477.65	6.53
119	27.61	119	28.95	119.9	28.84	119.99	21.82	-178.82	16.76	-178.828	8.84	-178.82	6.62
418	27.83	418.825	29.15	418.82	29.04	418.82	21.98	119.99	16.90	119.99	8.94	119.99	6.72
717.65	28.05	717.652	29.35	717.65	29	717.652	22.14	418.82	17.04	418.82	9.04	418.82	6.80

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าโวลตาไรเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 50 °C (ต่อ)

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
1016.4	28.26	1016.47	29.54	1016.47	29.43	1016.47	22.29	717.65	17.18	717.65	9.13	717.65	6.89
1315.3	28.46	1315.30	29.73	1315.30	29.62	1315.30	22.44	1016.47	17.31	1016.47	9.22	1016.47	6.97
1614.1	28.66	1614.13	29.91	1614.13	29.80	1614.13	22.58	1315.3	17.44	1315.30	9.31	1315.30	7.05
1912.9	28.85	1912.95	30.09	1912.95	29.97	1912.95	22.72	1614.13	17.56	1614.13	9.39	1614.13	7.12
2211.7	29.04	2211.78	30.26	2211.78	30.13	2211.78	22.86	1912.95	17.68	1912.95	9.47	1912.95	7.19
2510.6	29.21	2510.61	30.43	2510.61	30.29	2510.61	22.99	2211.78	17.80	2211.78	9.55	2211.78	7.26
2809.4	29.39	2809.43	30.59	2809.43	30.44	2809.43	23.12	2510.61	17.91	2510.61	9.63	2510.61	7.33
3108.2	29.55	3108.26	30.74	3108.26	30.59	3108.26	23.24	2809.43	18.02	2809.43	9.70	2809.43	7.39
3407.0	29.71	3407.09	30.89	3407.09	30.75	3407.09	23.36	3108.26	18.12	3108.26	9.78	3108.26	7.45
3705.9	29.86	3705.91	31.04	3705.91	30.88	3705.9	23.47	3407.09	18.23	3407.09	9.85	3407.09	7.51
4004.7	30.01	4004.74	31.18	4004.74	31.02	4004.74	23.59	3705.91	18.33	3705.91	9.91	3705.91	7.57
4303.5	30.15	4303.57	31.33	4303.57	31.15	4303.57	23.70	4004.74	18.43	4004.74	9.98	4004.74	7.62
4602.3	30.29	4602.39	31.47	4602.39	31.28	4602.39	23.80	4303.57	18.52	4303.57	10.05	4303.57	7.67
4901.2	30.42	4901.22	31.60	4901.22	31.41	4901.22	23.91	4602.39	18.62	4602.39	10.11	4602.39	7.73
5200.0	30.55	5200.05	31.74	5200.05	31.54	5200.05	24.01	4901.22	18.71	4901.22	10.17	4901.22	7.78
5498.8	30.67	5498.87	31.88	5498.87	31.67	5498.87	24.11	5200.05	18.80	5200	10.23	5200.05	7.83
5797.7	30.79	5797.70	32.01	5797.70	31.80	5797.70	24.21	5498.8	18.88	5498.8	10.28	5498.87	7.87
6096.5	30.91	6096.53	32.13	6096.53	31.92	6096.53	24.30	5797.70	18.97	5797.7	10.34	5797.7	7.92
6395.3	31.03	6395.35	32.26	6395.35	32.04	6395.35	24.40	6096.53	19.05	6096.53	10.39	6096.53	7.97
6694.1	31.15	6694.18	32.38	6694.18	32.16	6694.18	24.49	6395.35	19.13	6395.35	10.45	6395.35	8.01
6993.0	31.27	6993.01	32.51	6993.01	32.28	6993.01	24.57	6694.18	19.21	6694.18	10.50	6694.1	8.05
7291	31.39	7291.83	32.62	7291.83	32.39	7291.83	24.66	6993.01	19.28	6993.01	10.55	6993.01	8.10
7590.6	31.51	7590.66	32.74	7590.66	32.50	7590.66	24.74	7291.83	19.36	7291.8	10.60	7291.83	8.1
7889.4	31.63	7889.49	32.85	7889.49	32.60	7889.49	24.82	7590.6	19.43	7590.6	10.64	7590.6	8.18
8188.3	31.74	8188.31	32.97	8188.31	32.71	8188.31	24.90	7889.49	19.50	7889.49	10.69	7889.49	8.22
8487.1	31.86	8487.14	33.08	8487.14	32.82	8487.14	24.98	8188.31	19.57	8188.31	10.73	8188.31	8.26
8785.9	31.98	8785.97	33.19	8785.97	32.92	8785.97	25.05	8487.14	19.63	8487.14	10.77	8487.14	8.30
9084.7	32.09	9084.79	33.30	9084.79	33.02	9084.79	25.13	8785.97	19.70	8785.97	10.812	8785.97	8.34
9383.6	32.20	9383.62	33.40	9383.62	33.12	9383.62	25.20	9084.79	19.76	9084.79	10.84	9084.79	8.38
9682.4	32.30	9682.45	33.51	9682.45	33.22	9682.45	25.27	9383.62	19.81	9383.62	10.88	9383.62	8.41
9981.2	32.40	9981.27	33.61	9981.27	33.32	9981.27	25.34	9682.45	19.87	9682.45	10.91	9682.45	8.44
10280	32.50	10280	33.71	10280.1	33.42	10280.1	25.40	9981.27	19.92	9981.27	10.94	9981.27	8.47
10578	32.59	10578.9	33.81	10578.9	33.51	10578.9	25.47	10280.1	19.97	10280.1	10.9	10280.1	8.50
10877	32.68	10877.7	33.91	10877.7	33.61	10877.7	25.54	10578.9	20.02	10578.93	10.98	10578.93	8.52
11176	32.77	11176.5	34.01	11176.5	33.69	11176.5	25.60	10877.7	20.06	10877.76	11.00	10877.76	8.54
11475	32.86	11475.4	34.10	11475.4	33.77	11475.4	25.67	11176.5	20.09	11176.58	11.01	11176.58	8.56
11774	32.94	11774.2	34.19	11774.2	33.85	11774.2	25.73	11475.4	20.12	11475.41	11.01	11475.41	8.57
12073	33.02	12073	34.27	12073.0	33.92	12073.0	25.79	11774.2	20.15	11774.24	11.01	11774.24	8.58
12371	33.10	12371.8	34.35	12371.8	33.98	12371.8	25.85	12073.0	20.17	12073.06	11.01	12073.06	8.58
12670	33.1	12670.7	34.43	12670.7	34.05	12670.7	25.91	12371.8	20.19	12371.89	10.99	12371.89	8.57
12969	33.27	12969.5	34.50	12969.5	34.11	12969.5	25.95	12670.7	20.20	12670.72	10.97	12670.72	8.56
13268	33.36	13268.3	34.57	13268.3	34.18	13268.3	25.97	12969.5	20.20	12969.54	10.95	12969.54	8.55
13567	33.45	13567	34.65	13567.2	34.26	13567.2	25.97	13268.3	20.20	13268.37	10.92	13268.37	8.54
13866	33.56	13866	34.71	13866.0	34.32	13866.0	25.94	13567.2	20.20	13567.2	10.89	13567.2	8.52
14164	33.67	14164.8	34.82	14164.8	34.39	14164.8	25.88	13866.0	20.19	13866.02	10.85	13866.02	8.50
14463	33.77	14463.6	34.91	14463.6	34.46	14463.6	25.83	14164.8	20.19	14164.85	10.81	14164.85	8.48
14762	33.88	14762.5	34.99	14762.5	34.53	14762.5	25.77	14463.6	20.18	14463.68	10.77	14463.68	8.46
15061	33.98	15061.3	35.08	15061.3	34.61	15061.3	25.71	14762.5	20.17	14762.5	10.7334	14762.5	8.44
15061	34.35	15061.3	36.51	14762.5	35.04	15061.3	25.76	15061.3	20.1	15061.33	10.6937	15061.33	8.42
14762	33.50	14762.5	35.39	14762.5	35.04	15061.3	25.76	15061.3	19.73	15061.33	10.14	15061.33	8.42
14463	32.66	14463.6	34.28	14463.6	33.71	15061.3	25.76	15061.3	20.11	15061.33	10.63	15061.33	8.11
14164	31.83	14164.8	33.19	14164	32.39	14762.5	24.00	15061.3	20.16	15061.33	10.7	15061.33	8.42
13866	31.00	13866	32.11	13866	31.09	14463.6	22.26	14762.5	17.86	15061.33	10.7	15061.33	8.44

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าโวลตาไรเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 50 °C (ต่อ)

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
13567	29.97	13567.2	30.7	13567.2	29.46	14164.8	20.52	14463.6	15.98	14762.5	9.07	14762.5	7.37
13268	28.65	13268.3	28.82	13268.3	27.38	13866	18.52	14164.8	14.10	14463.68	8.00	14463.6	6.62
12969	26.99	12969	26.47	12969.5	24.84	13567.2	16.29	13866.0	12.23	14164.85	6.94	14164.85	5.87
12670	24.95	12670	23.61	12670.7	21.94	13268.3	14.00	13567.2	10.41	13866.02	5.94	13866.02	5.16
12371	22.51	12371.8	20.27	12371.8	18.71	12969.5	11.55	13268.3	8.65	13567.2	5.03	13567.2	4.52
12073	19.67	12073.0	16.50	12073.0	15.17	12670.7	8.971	12969.5	6.91	13268.37	4.19	13268.37	3.9
11774	16.47	11774.2	12.40	11774.2	11.44	12371.8	6.331	12670.7	5.22	12969.54	3.419	12969.54	3.36
11475	12.98	11475.4	8.125	11475.4	7.662	12073.0	3.708	12371.8	3.57	12670.72	2.7068	12670.72	2.83
11176	9.29	11176	3.87	11176.5	3.985	11774.2	1.171	12073.0	2.00	12371.89	2.037	12371.89	2.34
10877	5.55	10877	-0.15	10877.7	0.548	11475.4	-1.209	11774.2	0.49	12073.06	1.4133	12073.06	1.88
10578	1.910	10578.9	-3.83	10578.9	-2.608	11176.5	-3.386	11475.4	-0.91	11774.24	0.82	11774.24	1.45
10280	-1.51	10280	-7.09	10280.1	-5.481	10877.7	-5.331	11176.5	-2.235	11475.41	0.271	11475.41	1.04
9981	-4.667	9981.2	-9.93	9981.27	-8.098	10578.9	-7.036	10877.7	-3.45	11176.58	-0.254	11176.58	0.65
9682	-7.50	9682.4	-12.34	9682.45	-10.57	10280.1	-8.515	10578.9	-4.571	10877.76	-0.7516	10877.76	0.27
9383.6	-9.993	9383.6	-14.36	9383.62	-12.86	9981.27	-9.79	10280.1	-5.58	10578.93	-1.22	10578.93	-0.07
9084.7	-12.12	9084.7	-16.00	9084.79	-14.84	9682.45	-10.89	9981.27	-6.50	10280.1	-1.66	10280.1	-0.42
8785.9	-13.93	8785.97	-17.32	8785.97	-16.58	9383.62	-11.83	9682.45	-7.33	9981.276	-2.093	9981.27	-0.74
8487.1	-15.46	8487.14	-18.40	8487.14	-18.04	9084.79	-12.65	9383.62	-8.08	9682.45	-2.4943	9682.45	-1.06
8188.3	-16.72	8188.31	-19.29	8188.31	-19.24	8785.97	-13.37	9084.79	-8.75	9383.62	-2.87	9383.62	-1.36
7889.4	-17.78	7889.49	-20.05	7889.49	-20.21	8487.14	-14.01	8785.97	-9.36	9084.79	-3.2	9084.79	-1.66
7590.6	-18.68	7590.66	-20.73	7590.66	-20.98	8188.31	-14.59	8487.14	-9.92	8785.97	-3.57	8785.97	-1.94
7291.8	-19.47	7291.83	-21.34	7291.83	-21.57	7889.49	-15.12	8188.31	-10.43	8487.14	-3.90	8487.14	-2.21
6993.0	-20.16	6993.01	-21.89	6993.01	-22.10	7590.6	-15.61	7889.49	-10.90	8188.31	-4.2095	8188.317	-2.47
6694.1	-20.79	6694.18	-22.41	6694.18	-22.58	7291.8	-16	7590.66	-11.33	7889.4	-4.5022	7889.49	-2.72
6395.3	-21.37	6395.35	-22.90	6395.35	-23.04	6993.01	-16.48	7291.83	-11.73	7590.6	-4.7805	7590.6	-2.95
6096.5	-21.90	6096.53	-23.35	6096.53	-23.46	6694.18	-16.87	6993.01	-12.11	7291.83	-5.04	7291.83	-3.18
5797.7	-22.39	5797.70	-23.78	5797.70	-23.85	6395.3	-17.24	6694.18	-12.46	6993.01	-5.29	6993.01	-3.41
5498	-22.84	5498.87	-24.18	5498.87	-24.22	6096.53	-17.59	6395.35	-12.80	6694.184	-5.53	6694.18	-3.62
5200	-23.27	5200.05	-24.57	5200.05	-24.57	5797.70	-17.91	6096.53	-13.11	6395.357	-5.76	6395.35	-3.82
4901.2	-23.67	4901	-24.9	4901.22	-24.90	5498.87	-18.21	5797.70	-13.41	6096.531	-5.98	6096.53	-4.02
4602.3	-24.04	4602.39	-25.27	4602.39	-25.21	5200.05	-18.5	5498.87	-13.69	5797.704	-6.20	5797.70	-4.20
4303.5	-24.40	4303.57	-25.60	4303.57	-25.51	4901.2	-18.76	5200.05	-13.96	5498.87	-6.40	5498.87	-4.38
4004.7	-24.73	4004.74	-25.91	4004.74	-25.80	4602.39	-19.02	4901.22	-14.21	5200.05	-6.59	5200.05	-4.56
3705.9	-25.05	3705.91	-26.20	3705.98	-26.07	4303.57	-19.26	4602.39	-14.46	4901.22	-6.782	4901.22	-4.72
3407.0	-25.35	3407.09	-26.47	3407.09	-26.34	4004.74	-19.48	4303.57	-14.69	4602.398	-6.96	4602.39	-4.88
3108.2	-25.63	3108.26	-26.73	3108.26	-26.6	3705.91	-19.70	4004.74	-14.91	4303.57	-7.13	4303.57	-5.04
2809.4	-25.91	2809.43	-26.98	2809.43	-26.84	3407.09	-19.91	3705.91	-15.12	4004.74	-7.297	4004.74	-5.19
2510.6	-26.17	2510.61	-27.23	2510.61	-27.08	3108.26	-20.11	3407.09	-15.32	3705.9	-7.45	3705.91	-5.33
2211.7	-26.42	2211.78	-27.46	2211.78	-27.32	2809.43	-20.3	3108.26	-15.51	3407.09	-7.60	3407.09	-5.47
1912.9	-26.67	1912.95	-27.68	1912.95	-27.54	2510.61	-20.51	2809.43	-15.69	3108.26	-7.75	3108.26	-5.60
1614.1	-26.90	1614.13	-27.91	1614.1	-27.76	2211.78	-20.71	2510.61	-15.87	2809.43	-7.89	2809.43	-5.72
1315.3	-27.13	1315.30	-28.13	1315.30	-27.97	1912.95	-20.90	2211.78	-16.04	2510.61	-8.03	2510.61	-5.84
1016.4	-27.36	1016.47	-28.34	1016.47	-28.18	1614.13	-21.08	1912.95	-16.20	2211.78	-8.16	2211.78	-5.96
717.65	-27.57	717.65	-28.56	717.652	-28.38	1315.30	-21.26	1614.13	-16.36	1912.9	-8.28	1912.9	-6.07
418.82	-27.78	418.82	-28.76	418.825	-28.57	1016.4	-21.43	1315.30	-16.51	1614.13	-8.40	1614.13	-6.18
119.99	-27.99	119.9	-28.96	119.999	-28.76	717.65	-21.60	1016.47	-16.65	1315.30	-8.52	1315.30	-6.28
-178.8	-28.19	-178.8	-29.1	-178.82	-28.93	418.82	-21.76	717.65	-16.80	1016.47	-8.63	1016.47	-6.38
-477.6	-28.39	-477.65	-29.34	-477.65	-29.11	119.9	-21.9	418.82	-16.95	717.65	-8.73	717.65	-6.47
-776.	-28.58	-776	-29.52	-776.48	-29.27	-178.82	-22.07	119.99	-17.06	418.825	-8.843	418.82	-6.56
-1075	-28.7	-1075	-29.69	-1075.3	-29.43	-477.65	-22.21	-178.82	-17.19	119.99	-8.942	119.99	-6.65
-1374	-28.94	-1374	-29.86	-1374.1	-29.59	-776.48	-22.34	-477.65	-17.31	-178.82	-9.03	-178.82	-6.7
-1672	-29.11	-1672.9	-30.02	-1672.9	-29.74	-1075	-22.47	-776.48	-17.43	-477.65	-9.13	-477.65	-6.81
-1971	-29.28	-1971	-30.18	-1971.7	-29.89	-1374.1	-22.60	-1075.3	-17.54	-776.481	-9.22	-776.48	-6.89

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าโวลตาไรเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 50 °C (ต่อ)

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
-2270	-29.44	-2270.6	-30.33	-2270.6	-30.03	-1672	-22.72	-1374.1	-17.66	-1075.31	-9.30	-1075.31	-6.97
-2569	-29.60	-2569	-30.47	-2569.4	-30.17	-1971	-22.84	-1672.9	-17.76	-1374.13	-9.39	-1374.13	-7.04
-2868	-29.7	-2868	-30.61	-2868.2	-30.31	-2270.6	-22.96	-1971.7	-17.87	-1672.96	-9.47	-1672.96	-7.11
-3167	-29.90	-3167.0	-30.75	-3167	-30.44	-2569.4	-23.07	-2270.6	-17.97	-1971.79	-9.55	-1971.79	-7.18
-3465	-30.05	-3465.9	-30.88	-3465.9	-30.57	-2868.2	-23.19	-2569.4	-18.07	-2270.61	-9.62	-2270.61	-7.25
-3764	-30.19	-3764.7	-31.0	-3764	-30.69	-3167	-23.29	-2868.2	-18.16	-2569.44	-9.70	-2569.44	-7.31
-4063	-30.33	-4063.5	-31.14	-4063.5	-30.82	-3465.9	-23.40	-3167	-18.26	-2868.27	-9.77	-2868.27	-7.3
-4362	-30.47	-4362	-31.26	-4362.4	-30.95	-3764.7	-23.50	-3465.9	-18.34	-3167.09	-9.83	-3167.09	-7.43
-4661	-30.61	-4661	-31.39	-4661.2	-31.07	-4063.5	-23.5	-3764.7	-18.43	-3465.92	-9.90	-3465.92	-7.49
-4960	-30.74	-4960	-31.51	-4960	-31.19	-4362.4	-23.69	-4063.5	-18.51	-3764.75	-9.96	-3764.75	-7.5
-5258	-30.88	-5258.8	-31.63	-5258.8	-31.31	-4661.2	-23.77	-4362.4	-18.59	-4063.57	-10.03	-4063.57	-7.61
-5557	-31.01	-5557	-31.76	-5557.7	-31.42	-4960	-23.86	-4661.2	-18.67	-4362.4	-10.09	-4362.4	-7.66
-5856	-31.14	-5856	-31.8	-5856.5	-31.5	-5258.8	-23.94	-4960	-18.74	-4661.23	-10.149	-4661.23	-7.72
-6155	-31.26	-6155.3	-31.99	-6155.3	-31.65	-5557.7	-24.03	-5258.8	-18.82	-4960.05	-10.20	-4960.05	-7.77
-6454	-31.38	-6454.1	-32.1	-6454.1	-31.76	-5856.5	-24.10	-5557.7	-18.89	-5258.88	-10.26	-5258.88	-7.82
-6753	-31.50	-6753	-32.22	-6753	-31.88	-6155	-24.18	-5856.5	-18.95	-5557.71	-10.31	-5557.71	-7.87
-7051	-31.61	-7051	-32.32	-7051.8	-31.99	-6454.1	-24.26	-6155.3	-19.02	-5856.53	-10.36	-5856.53	-7.91
-7350	-31.72	-7350	-32.42	-7350.6	-32.09	-6753	-24.34	-6454.1	-19.09	-6155.36	-10.42	-6155.36	-7.96
-7649	-31.83	-7649	-32.51	-7649.4	-32.20	-7051.8	-24.42	-6753.0	-19.15	-6454.19	-10.47	-6454.19	-8.00
-7948	-31.93	-7948	-32.60	-7948.3	-32.29	-7350.6	-24.50	-7051.8	-19.28	-6753.01	-10.52	-6753.01	-8.05
-8247	-32.03	-8247	-32.68	-8247.1	-32.39	-7649.4	-24.57	-7350.6	-19.27	-7051.84	-10.56	-7051.84	-8.09
-8545	-32.1	-8545	-32	-8545.9	-32.48	-7948.3	-24.65	-7649.4	-19.33	-7350.67	-10.61	-7350.67	-8.13
-8844	-32.20	-8844.8	-32.83	-8844.8	-32.57	-8247.1	-24.72	-7948.3	-19.39	-7649.49	-10.66	-7649.49	-8.16
-9143	-32.29	-9143	-32.90	-9143.6	-32.66	-8545.9	-24.79	-8247.1	-19.45	-7948.32	-10.70	-7948.32	-8.20
-9442	-32.37	-9442	-32.97	-9442.4	-32.74	-8844.8	-24.86	-8545.9	-19.51	-8247.15	-10.75	-8247.15	-8.24
-9741	-32.4	-9741	-33.04	-9741.2	-32.81	-9143.6	-24.93	-8844.8	-19.56	-8545.97	-10.78	-8545.97	-8.27
-10040	-32.52	-10040	-33.11	-10040	-32.89	-9442.4	-24.99	-9143.6	-19.62	-8844.8	-10.82	-8844.8	-8.30
-10338	-32.59	-10338	-33.19	-10338	-32.96	-9741.2	-25.06	-9442.4	-19.67	-9143.63	-10.86	-9143.63	-8.33
-10637	-32.66	-10637	-33.27	-10637	-33.03	-10040	-25.11	-9741.2	-19.73	-9442.45	-10.90	-9442.45	-8.36
-10936	-32.73	-10936	-33.36	-10936	-33.11	-10338	-25.17	-10040	-19.78	-9741.28	-10.93	-9741.28	-8.38
-11235	-32.80	-11235	-33.45	-11235	-33.18	-10637	-25.23	-10338	-19.83	-10040.1	-10.96	-10040.1	-8.41
-11534	-32.86	-11534	-33.5	-11534	-33.25	-10936	-25.28	-10637	-19.88	-10338.9	-10.99	-10338.9	-8.4
-11833	-32.93	-11833	-33.64	-11833	-33.32	-11235	-25.33	-10936	-19.92	-10637.8	-11.01	-10637.8	-8.45
-12131	-32.99	-12131	-33.73	-12131	-33.39	-11534	-25.38	-11234	-19.96	-10936.6	-11.039	-10936.6	-8.46
-12430	-33.05	-12430	-33.82	-12430	-33.46	-11833	-25.42	-11534	-20.00	-11235.4	-11.05	-11235.4	-8.47
-12729	-33.11	-12729	-33.91	-12729	-33.53	-12131	-25.46	-11833	-20.03	-11534.2	-11.07	-11534.2	-8.48
-13028	-33.17	-13028	-33.98	-13028	-33.60	-12430	-25.49	-12131	-20.05	-11833.1	-11.08	-11833.1	-8.48
-13327	-33.22	-13327	-34.03	-13327	-33.66	-12729	-25.50	-12430	-20.07	-12131.9	-11.08	-12131.9	-8.48
-13626	-33.28	-13626	-34.07	-13626	-33.72	-13028	-25.50	-12729	-20.09	-12430.7	-11.08	-12430.7	-8.47
-13924	-33.32	-13924	-34.11	-13924	-33.78	-13327	-25.47	-13028	-20.09	-12729.5	-11.087	-12729.5	-8.46
-14223	-33.37	-14223	-34.15	-14223	-33.84	-13626	-25.42	-13327	-20.10	-13028.4	-11.08	-13028.4	-8.44
-14522	-33.42	-14522	-34.18	-14522	-33.89	-1392	-25.36	-13626	-20.10	-13327.2	-11.07	-13327.2	-8.43
-14821	-33.47	-14821	-34.2	-14821	-33.95	-14223	-25.30	-13924	-20.09	-13626	-11.06	-13626	-8.4
-14821	-33.47	-14821	-34.22			-14522	-25.24	-14223	-20.09	-13924.9	-11.05	-13924.9	-8.39
						-14821	-25.18	-14522	-20.09	-14223.7	-11	-14223.7	-8.36
								-14821	-20.08	-14522.5	-11.041	-14522.5	-8.34
								-14821	-20.08	-14821.3	-11.03	-14821.3	-8.32
										-14821.3	-11.03		

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าโวลตาไรเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100 °C

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
-14877	-31.02	-14577	-30.71	-14964	-29.00	-14892	-29.00	-14821	-26.58	-14821	-22.46	-14821	-21.83
-14577	-30.40	-14276	-30.71	-14664	-28.9	-14592	-30.59	-14522	-26.55	-14522	-22.4	-14522	-19.79
-14276	-29.88	-13976	-30.7	-14363	-28.5	-14291	-34.33	-14223	-26.55	-14223	-22.13	-14223	-17.83
-13976	-29.39	-13675	-30.73	-14063	-24.86	-13990	-24.36	-13924	-22.72	-13924	-21.41	-13924	-17.91
-13675	-28.88	-13375	-25.86	-13762	-24.76	-13690	-24.77	-13626	-21.37	-13626	-16.83	-13626	-16.70
-13375	-28.37	-13074	-24.54	-13461	-23.49	-13389	-23.48	-13327	-19.87	-13327	-15.41	-13327	-15.35
-13074	-27.74	-12773	-23.23	-13161	-21.99	-13089	-22.01	-13028	-18.19	-13028	-14.01	-13028	-13.98
-12773	-27.09	-12473	-21.52	-12860	-20.48	-12788	-20.48	-12729	-16.41	-12729	-12.30	-12729	-12.49
-12473	-26.25	-12172	-19.85	-12560	-18.71	-12488	-18.66	-12430	-14.39	-12430	-10.63	-12430	-10.96
-12172	-25.31	-11872	-17.74	-12259	-16.75	-12187	-16.73	-12131	-12.12	-12131	-8.8596	-12131	-9.36
-11872	-24.17	-11571	-15.62	-11959	-14.70	-11887	-14.65	-11833	-9.93	-11833	-7.02	-11833	-7.72
-11571	-22.24	-11271	-13.06	-11658	-12.21	-11586	-12.13	-11534	-7.61	-11534	-5.15	-11534	-6.04
-11271	-20.04	-10970	-10.29	-11357	-9.62	-11285	-9.545	-11235	-5.28	-11235	-3.279	-11235	-4.36
-10970	-17.5	-10670	-7.449	-11057	-6.96	-10985	-6.93	-10936	-2.906	-10936	-1.4941	-10936	-2.64
-10670	-14.41	-10369	-4.68	-10756	-4.26	-10684	-4.29	-10637	-0.62	-10637	0.28	-10637	-0.97
-10369	-11.25	-10068	-1.824	-10456	-1.65	-10384	-1.71	-10338	1.52	-10338	1.95	-10338	0.70
-10068	-8.1	-9768.2	0.62	-10155	0.79	-10083	0.78	-10040	3.50	-10040	3.41	-10040	2.22
-9768	-4.91	-9467	3.03	-9855	3.18	-9783	3.07	-9741.2	5.39	-9741.2	4.84	-9741.2	3.71
-9467	-2.01	-9167	5.38	-9554.5	5.42	-9482	5.325	-9442.4	7.18	-9442	6.13	-9442.4	5.05
-9167	0.80	-8866	7.424	-9253.9	7.38	-9181.9	7.27	-9143.6	8.61	-9143.6	7.269	-9143.6	6.22
-8866	3.60	-8566.0	9.37	-8953	9.22	-8881.3	9.11	-8844.8	10.00	-8844.8	8.32	-8844.8	7.33
-8566	6.225	-8265.4	11.07	-8652.8	10.78	-8580.8	10.71	-8545.9	11.20	-8545.9	9.29	-8545.9	8.31
-8265	8.481	-7964.9	12.48	-8352	12.19	-8280.2	12.05	-8247.1	12.22	-8247	10.15	-8247	9.20
-7964	10.42	-7664	13.76	-8051.7	13.34	-7979.6	13.28	-7948.3	13.15	-7948.3	10.96	-7948	10
-7664	12.13	-7363	14.83	-7751	14.36	-7679.1	14.29	-7649.4	13.92	-7649.4	11.65	-7649.4	10.70
-7363	13.42	-7063	15.74	-7450	15.21	-7378.5	15.16	-7350.6	14.62	-7350.6	12.26	-7350.6	11.33
-7063	14.53	-6762	16.47	-7150	15.97	-7077.9	15.91	-7051.8	15.22	-7051.8	12.80	-7051.8	11.88
-6762	15.48	-6462	17.13	-6849	16.60	-6777.4	16.57	-6753	15.77	-6753	13.30	-6753	12.39
-6462	16.26	-6161	17.71	-6548.9	17.18	-6476	17.16	-6454	16.25	-6454	13.76	-6454	12.85
-6161	16.93	-5860.9	18.24	-6248.3	17.71	-6176.3	17.7	-6155	16.71	-6155.3	14.19	-6155.3	13.27
-5860	17.54	-5560	18.70	-5947.7	18.19	-5875.7	18.17	-5856.5	17.12	-5856.5	14.60	-5856.5	13.68
-5560	18.11	-5259	19.13	-5647.2	18.63	-5575.1	18.62	-5557.7	17.51	-5557.7	14.97	-5557.7	14.06
-5259	18.61	-4959	19.54	-5346	19.04	-5274.6	19.03	-5258.8	17.88	-5258.8	15.32	-5258.8	14.41
-4959	19.07	-4658	19.93	-5046.1	19.42	-4974	19.42	-4960	18.23	-4960	15.66	-4960	14.75
-4658	19.49	-4358	20.31	-4745.5	19.78	-4673.4	19.78	-4661.2	18.57	-4661.2	15.98	-4661.2	15.07
-4358	19.87	-4057	20.66	-4444	20.12	-4372.9	20.12	-4362.4	18.89	-4362.4	16.27	-4362.4	15.38
-4057	20.26	-3757	21.00	-4144	20.45	-4072.3	20.44	-4063.5	19.19	-4063.5	16.56	-4063.5	15.68
-3757	20.62	-3456	21.32	-3843.8	20.77	-3771.7	20.77	-3764.7	19.48	-3764.7	16.84	-3764.7	15.9
-3456	20.97	-3155	21.63	-3543	21.07	-3471.2	21.06	-3465.9	19.76	-3465.9	17.08	-3465.9	16.22
-3155	21.30	-2855	21.93	-3242	21.36	-3170.6	21.35	-3167	20.04	-3167.0	17.34	-3167.0	16.47
-2855	21.60	-2554	22.22	-2942	21.63	-2870	21.63	-2868	20.30	-2868.2	17.57	-2868.2	16.71
-2554	21.90	-2254.2	22.50	-2641	21.90	-2569	21.90	-2569	20.55	-2569	17.81	-2569	16.94
-2254	22.18	-1953	22.76	-2341	22.16	-2268.9	22.16	-2270.6	20.79	-2270.6	18.04	-2270.6	17.16
-1953	22.45	-1653	23.00	-2040	22.40	-1968.4	22.40	-1971.7	21.03	-1971.7	18.25	-1971.7	17.38
-1653	22.73	-1352.5	23.25	-1739.9	22.65	-1667.8	22.64	-1672.9	21.25	-1672.9	18.44	-1672.9	17.60
-1352	22.97	-1051	23.48	-1439	22.87	-1367.2	22.86	-1374.1	21.47	-1374.1	18.64	-1374.1	17.80
-1051	23.21	-751	23.70	-1138	23.09	-1066.7	23.09	-1075.3	21.68	-1075.3	18.83	-1075.3	17.99
-751	23.43	-450.8	23.94	-838	23.32	-766.16	23.31	-776.48	21.88	-776.48	19.02	-776.48	18.19
-450	23.65	-150.2	24.17	-537	23.53	-465.6	23.52	-477.65	22.07	-477.65	19.20	-477.65	18.37
-150	23.89	150.2	24.3	-237	23.73	-165.04	23.73	-178.82	22.26	-178.82	19.37	-178.8	18.53
150	24.10	450.8	24.5	63	23.93	135.52	23.92	119.99	22.45	119.9	19.55	119.9	18.71
450	24.31	751.4	24.71	364	24.12	436.08	24.12	418.82	22.63	418.82	19.717	418.82	18.87
751.4	24.50	1051.97	24.88	664.59	24.31	736.64	24.31	717.65	22.80	717.65	19.88	717.65	19.02

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าโวลตาไรเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100 °C (ต่อ)

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
1051.9	24.70	1352.53	25.06	965.15	24.49	1037.21	24.49	1016.47	22.98	1016.47	20.03	1016.47	19.17
1352.5	24.88	1653.09	25.24	1265.71	24.67	1337.77	24.67	1315.30	23.14	1315.30	20.18	1315.30	19.331
1653	25.07	1953.65	25.43	1566.28	24.86	1638.33	24.85	1614.13	23.29	1614.13	20.33	1614.13	19.48
1953.6	25.26	2254.22	25.59	1866.84	25.02	1938.9	25.02	1912.95	23.45	1912.95	20.48	1912.95	19.62
2254.2	25.47	2554.78	25.76	2167.40	25.19	2239.46	25.18	2211.78	23.61	2211.78	20.63	2211.78	19.7
2554.7	25.65	2855.3	25.92	2467.96	25.35	2540.02	25.35	2510.61	23.75	2510.61	20.76	2510.61	19.91
2855	25.84	3155.9	26.08	2768.53	25.51	2840.58	25.51	2809.43	23.90	2809.43	20.91	2809.43	20.04
3155.9	26.02	3456.4	26.26	3069.09	25.66	3141.15	25.66	3108.26	24.04	3108.26	21	3108.26	20.16
3456.4	26.20	3757.03	26.42	3369.65	25.81	3441.71	25.81	3407.09	24.18	3407.09	21.18	3407.09	20.29
3757	26.38	4057.59	26.57	3670.22	25.95	3742.27	25.95	3705.91	24.32	3705.91	21.30	3705.91	20.40
4057.5	26.57	4358.16	26.73	3970.78	26.09	4042.84	26.09	4004.74	24.47	4004.74	21.41	4004.74	20.52
4358.1	26.77	4658.72	26.89	4271.34	26.23	4343.4	26.23	4303.57	24.59	4303.57	21.52	4303.57	20.63
4658.7	26.94	4959.28	27.04	4571.9	26.37	4643.96	26.36	4602.39	24.72	4602.39	21.63	4602.39	20.74
4959.2	27.09	5259.85	27.18	4872.47	26.50	4944.52	26.50	4901.22	24.85	4901.22	21.7	4901.22	20.85
5259.8	27.25	5560.41	27.33	5173.03	26.64	5245.09	26.63	5200.05	24.97	5200.05	21.84	5200.05	20.96
5560.4	27.40	5860.97	27.48	5473.59	26.77	5545.65	26.76	5498.87	25.09	5498.87	21.94	5498.87	21.06
5860.9	27.53	6161.53	27.64	5774.16	26.89	5846.21	26.89	5797.70	25.21	5797.70	22.04	5797.70	21.15
6161.5	27.69	6462.10	27.77	6074.72	27.01	6146.78	27.00	6096.53	25.32	6096.53	22.13	6096.53	21.24
6462.1	27.82	6762.66	27.89	6375.28	27.12	6447.34	27.12	6395.35	25.45	6395.35	22.22	6395.35	21.34
6762.6	27.95	7063.22	28.01	6675.84	27.23	6747.9	27.23	6694.18	25.56	6694.18	22.30	6694.18	21.42
7063.2	28.07	7363.79	28.14	6976.41	27.35	7048.46	27.34	6993.01	25.67	6993.01	22.39	6993.01	21.5
7363.7	28.20	7664.35	28.29	7276.97	27.46	7349.03	27.45	7291.83	25.77	7291.83	22.47	7291.83	21.59
7664.3	28.30	7964.91	28.41	7577.53	27.56	7649.59	27.56	7590.66	25.89	7590.66	22.55	7590.66	21.67
7964.9	28.41	8265.48	28.52	7878.10	27.68	7950.15	27.67	7889.49	25.99	7889.49	22.64	7889.49	21.75
8265.4	28.53	8566.04	28.65	8178.66	27.78	8250.72	27.78	8188.31	26.08	8188.31	22.73	8188.31	21.84
8566	28.63	8866.60	28.75	8479.22	27.88	8551.28	27.88	8487.14	26.17	8487.14	22.80	8487.14	21.92
8866.6	28.74	9167.16	28.84	8779.78	27.98	8851.84	27.98	8785.97	26.27	8785	22.87	8785	22
9167.1	28.84	9467.73	28.95	9080.35	28.08	9152.40	28.08	9084.79	26.35	9084.79	22.94	9084.79	22.08
9467.7	28.96	9768.29	29.08	9380.91	28.18	9452.97	28.17	9383.62	26.44	9383.62	23.01	9383.62	22.15
9768.2	29.09	10068.8	29.21	9681.47	28.27	9753.53	28.27	9682.45	26.51	9682.45	23.07	9682.45	22.22
10068	29.23	10369.4	29.33	9982	28.37	10054.1	28.37	9981.27	26.60	9981.2	23.14	9981.27	22.30
10369	29.34	10669.9	29.43	10282.6	28.46	10354.6	28.46	10280.1	26.66	10280.1	23.21	10280.1	22.36
10669	29.46	10970.5	29.53	10583.1	28.56	10655.2	28.55	10578.9	26.72	10578.9	23.28	10578.9	22.44
10970	29.60	11271.1	29.63	10883.7	28.65	10955.7	28.64	10877.7	26.79	10877.7	23.351	10877.7	22.51
11271	29.73	11571.6	29.69	11184.2	28.72	11256	28.72	11176.5	26.86	11176.5	23.40	11176.5	22.57
11571	29.85	11872.2	29.78	11484.8	28.80	11556.9	28.80	11475.4	26.93	11475.4	23.46	11475	22.64
11872	29.96	12172	29.89	11785.4	28.87	11857	28.87	11774.2	26.99	11774	23.51	11774	22.70
12172	30.08	12473.3	30.01	12085.9	28.95	12158	28.95	12073	27.07	12073	23.58	12073	22.75
12473	30.19	12773.9	30.12	12386.5	29.01	12458.6	29.01	12371.8	27.15	12371.8	23.64	12371.8	22.82
12773	30.29	13074.4	30.19	12687.1	29.07	12759.1	29.08	12670.7	27.21	12670.7	23.68	12670.7	22.88
13074	30.37	13375.0	30.26	12987.6	29.13	13059.7	29.14	12969.5	27.26	12969.5	23.73	12969.5	22.95
13375	30.45	13675.6	30.36	13288.2	29.19	13360.2	29.19	13268.3	27.32	13268.3	23.76	13268.3	23
13675	30.49	13976.1	30.44	13588	29.26	13660.8	29.26	13567.2	27.36	13567.2	23.78	13567.2	23.04
13976	30.5	14276.7	30.53	13889.3	29.34	13961.4	29.34	13866	27.40	13866	23.79	13866	23.08
14276	30.53	14577	30.53	14189.9	29.41	14261.9	29.40	14164	27.45	14164.8	23.81	14164.8	23.10
14577	30.53	14877	30.53	14490.4	29.47	14562.5	29.45	14463.6	27.47	14463.6	23.83	14463.6	23.06
14877	30.53	15178.4	30.53	14791	29.52	14863.1	29.50	14762.5	27.53	14762.5	23.78	14762.5	22.95
15178	30.53	15478.9	30.53	15091.6	29.57	15163.6	29.44	15061.3	27.51	15061.3	23.71	15061.3	22.66
15178	30.45	15478.9	30.51	15265.2	29.91	15163.6	29.27	15061.3	27.12	15061.3	23.71	15061.3	22.34
14877	30.01	15178.4	30.09	14964.6	28.89	14864.8	28.52	14762.5	26.33	15061.3	23.21	15061.3	22.95
14577	29.73	14877.8	29.84	14664.1	28.35	14566.0	28.10	14463.6	25.69	15061.3	23.71	15061.3	22.954
14276	29.43	14577.3	29.55	14363.5	27.90	14267.1	27.65	14164.8	25.00	15061.3	23.719	14762.5	21.32
13976	29.18	14276.7	29.28	14062.9	27.44	13968.3	27.07	13866	24.23	14762.5	21.93	14463.6	20.48

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100 °C (ต่อ)

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
13675.6	28.94	13976	28.97	13762.4	26.79	13669.5	26.38	13567.2	23.28	14463.6	20.983	14164.8	19.54
13375.0	28.65	13675.6	28.65	13461.8	26.04	13370.7	25.52	13268.3	22.20	14164.8	19.98	13866.0	18.59
13074.4	28.29	13375.0	28.27	13161.3	25.02	13071.8	24.42	12969.5	20.80	13866	18.90	13567.2	17.45
12773.9	27.89	13074.4	27.77	12860.7	23.80	12773.0	23.01	12670.7	19.23	13567.2	17.57	13268.3	16.17
12473.3	27.39	12773.9	27.17	12560.1	22.18	12474.2	21.31	12371.8	17.31	13268.3	16.14	12969.5	14.719
12172.7	26.75	12473.3	26.24	12259.6	20.22	12175.4	18.92	12073.0	15.19	12969.5	14.52	12670.7	13.08
11872.2	25.91	12172.8	24.85	11959.0	17.72	11876.5	16.23	11774.2	12.80	12670.7	12.8	12371.8	11.33
11571.6	24.81	11872.2	22.75	11658	14.76	11577.7	13.16	11475.4	10.21	12371.8	11	12073.0	9.40
11271.1	23.04	11571.6	20.15	11357	11.52	11278.9	9.87	11176.5	7.64	12073.0	8.96	11774.2	7.32
10970.5	20.20	11271.1	16.73	11057.3	8.39	10980	6.756	10877.7	4.65	11774.2	6.86	11475.4	5.19
10669.9	17.33	10970.5	13.42	10756.8	4.94	10681	3.641	10578.9	1.69	11475.4	4.81	11176.5	3.14
10369.4	14.12	10669.9	9.693	10456.2	2.02	10382.4	0.523	10280.1	-1.061	11176.5	2.73	10877.7	1.16
10068.8	10.93	10369.4	5.863	10155.6	-1.2	10083.6	-2.375	9981.27	-3.660	10877.7	0.85	10578.9	-0.76
9768.29	7.5	10068.8	2.115	9855.10	-3.88	9784.78	-5.097	9682.45	-5.954	10578.9	-1.06	10280.1	-2.37
9467.72	4.37	9768.29	-1.069	9554.54	-6.38	9485.96	-7.50	9383.62	-7.995	10280.1	-2.77	9981.27	-3.95
9167.16	1.29	9467.73	-4.310	9253.98	-8.72	9187.13	-9.68	9084.79	-9.77	9981.27	-4.42	9682.45	-5.4
8866.60	-1.87	9167.16	-7.301	8953.41	-10.74	8888.3	-11.56	8785.97	-11.28	9682.4	-5.85	9383.62	-6.75
8566.04	-4.9	8866.60	-9.956	8652.85	-12.4	8589.48	-13.15	8487.14	-12.59	9383.62	-7.19	9084.79	-7.96
8265.47	-7.4	8566.04	-12.06	8352.29	-13.88	8290.65	-14.43	8188.31	-13.71	9084.79	-8.4186	8785.97	-8.99
7964.91	-9.9	8265	-14.02	8051.73	-15.04	7991.82	-15.48	7889.49	-14.64	8785.97	-9.45	8487.14	-9.86
7664.35	-11.89	7964.91	-15.46	7751.16	-15.99	7693	-16.35	7590.6	-15.44	8487.14	-10.37	8188.31	-10.63
7363.78	-13.50	7664.35	-16.57	7450.6	-16.80	7394.17	-17.13	7291.83	-16.13	8188.31	-11.18	7889.49	-11.31
7063.22	-14.89	7363.79	-17.53	7150.04	-17.53	7095.34	-17.79	6993.01	-16.71	7889.49	-11.924	7590.66	-11.92
6762.66	-15.93	7063.22	-18.31	6849.47	-18.14	6796.52	-18.38	6694.18	-17.24	7590.66	-12.56	7291.83	-12.4
6462.1	-16.86	6762.66	-19.02	6548.91	-18.70	6497.69	-18.91	6395.35	-17.72	7291.83	-13.16	6993.01	-12.98
6161.53	-17.65	6462.10	-19.60	6248.3	-19.21	6198.86	-19.41	6096.53	-18.18	6993.01	-13.67	6694.18	-13.44
5860.97	-18.32	6161.53	-20.16	5947.79	-19.68	5900.04	-19.86	5797.70	-18.60	6694.18	-14.16	6395.35	-13.88
5560.41	-18.92	5860.97	-20.63	5647.22	-20.11	5601	-20.26	5498.87	-18.99	6395.35	-14.59	6096.53	-14.28
5259.84	-19.46	5560.41	-21.07	5346.66	-20.50	5302.38	-20.64	5200.05	-19.36	6096.53	-15.00	5797.70	-14.66
4959.28	-19.98	5259.85	-21.48	5046.10	-20.86	5003.56	-20.99	4901.22	-19.70	5797.70	-15.40	5498.87	-15.01
4658.72	-20.46	4959.28	-21.85	4745.53	-21.20	4704.73	-21.32	4602.39	-20.04	5498.87	-15.77	5200.05	-15.34
4358.16	-20.88	4658.72	-22.20	4444.97	-21.53	4405.90	-21.65	4303.57	-20.34	5200.05	-16.11	4901.22	-15.66
4057.59	-21.30	4358.16	-22.56	4144.41	-21.84	4107.08	-21.94	4004.74	-20.64	4901.22	-16.43	4602.39	-15.96
3757.03	-21.68	4057.59	-22.88	3843.85	-22.13	3808.25	-22.23	3705.91	-20.91	4602.39	-16.74	4303.57	-16.24
3456.47	-22.04	3757.03	-23.18	3543.28	-22.41	3509.42	-22.50	3407.09	-21.17	4303.57	-17.03	4004.74	-16.51
3155.90	-22.39	3456.47	-23.47	3242.72	-22.68	3210.60	-22.77	3108.26	-21.41	4004.74	-17.30	3705.91	-16.77
2855.34	-22.71	3155.91	-23.76	2942.16	-22.93	2911.77	-23.02	2809.43	-21.67	3705.91	-17.57	3407.09	-17.02
2554.78	-23.03	2855.34	-24.02	2641.59	-23.18	2612.94	-23.26	2510.61	-21.89	3407.09	-17.82	3108.26	-17.2
2254.22	-23.34	2554.78	-24.28	2341.03	-23.42	2314.12	-23.50	2211.78	-22.12	3108.26	-18.05	2809.43	-17.48
1953.65	-23.62	2254.22	-24.52	2040.47	-23.65	2015.29	-23.72	1912.95	-22.33	2809.43	-18.27	2510.61	-17.69
1653.09	-23.90	1953.65	-24.75	1739.91	-23.87	1716.47	-23.94	1614.13	-22.53	2510.61	-18.498	2211.7	-17.9
1352.53	-24.17	1653.09	-24.97	1439.34	-24.09	1417.64	-24.15	1315.30	-22.73	2211.7	-18.69	1912.95	-18.09
1051.96	-24.41	1352.53	-25.18	1138.78	-24.29	1118.8	-24.36	1016.47	-22.92	1912.95	-18.90	1614.13	-18.283
751.406	-24.66	1051.97	-25.42	838.221	-24.50	819.98	-24.58	717.65	-23.18	1614.13	-19.08	1315.3	-18.47
450.84	-24.90	751.407	-25.64	537.658	-24.70	521.163	-24.76	418.825	-23.28	1315.30	-19.27	1016.47	-18.64
150.28	-25.14	450.84	-25.83	237.09	-24.89	222.33	-24.96	119.9	-23.47	1016.47	-19.448	717.65	-18.80
-150.282	-25.34	150.28	-26.04	-63.46	-25.08	-76.48	-25.13	-178.82	-23.62	717.652	-19.61	418.825	-18.96
-450.845	-25.55	-150.28	-26.2	-364	-25.25	-375.31	-25.30	-477.65	-23.77	418.82	-19.77	119.9	-19.10
-751.40	-25.76	-450.84	-26.44	-664.59	-25.43	-674.14	-25.47	-776.48	-23.92	119.9	-19.931	-178.82	-19.25
-1051.97	-25.95	-751.4	-26.62	-965.15	-25.59	-972.97	-25.63	-1075.3	-24.08	-178.82	-20.08	-477.6	-19.39
-1352.53	-26.14	-1051.9	-26.79	-1265.7	-25.75	-1271.8	-25.80	-1374.1	-24.23	-477.65	-20.21	-776.4	-19.52
-1653.1	-26.33	-1352.5	-26.98	-1566.2	-25.92	-1570.6	-25.96	-1672.9	-24.38	-776.48	-20.362	-1075.3	-19.65
-1953.66	-26.52	-1653.1	-27.14	-1866.8	-26.08	-1869.4	-26.11	-1971.7	-24.52	-1075.3	-20.495	-1374.1	-19.78

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100 °C (ต่อ)

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
-2254.22	-26.70	-1953.6	-27.29	-2167.4	-26.22	-2168.2	-26.26	-2270.6	-24.65	-1374.1	-20.63	-1672.9	-19.9
-2554.79	-26.87	-2254.2	-27.47	-2467	-26.36	-2467.1	-26.40	-2569.4	-24.7	-1672.9	-20.759	-1971.7	-20.03
-2855.35	-27	-2554	-27.64	-2768.5	-26.51	-2765.9	-26.54	-2868.2	-24.91	-1971.7	-20.88	-2270.6	-20.15
-3155.91	-27.18	-2855.3	-27.81	-3069.1	-26.64	-3064.7	-26.67	-3167.0	-25.04	-2270.6	-21.014	-2569.4	-20.26
-3456.47	-27.36	-3155.9	-27.97	-3369.6	-26.77	-3363.5	-26.80	-3465.9	-25.17	-2569.4	-21.138	-2868.2	-20.38
-3757.04	-27.52	-3456.4	-28.14	-3670.2	-26.90	-3662.4	-26.93	-3764.7	-25.29	-2868.2	-21.244	-3167.0	-20.49
-4057.6	-27.69	-3757	-28.28	-3970.7	-27.03	-3961.2	-27.05	-4063.5	-25.39	-3167.0	-21.353	-3465.9	-20.61
-4358.16	-27.84	-4057.6	-28.43	-4271.3	-27.15	-4260	-27.18	-4362.4	-25.50	-3465	-21.465	-3764	-20.7
-4658.73	-27.99	-4358.1	-28.5	-4571.9	-27.27	-4558.8	-27.30	-4661.2	-25.60	-3764.7	-21.563	-4063.5	-20.82
-4959.29	-28.14	-4658.7	-28.67	-4872	-27.39	-4857	-27.42	-4960	-25.70	-4063.5	-21.661	-4362.4	-20.91
-5259.85	-28.25	-4959.2	-28.79	-5173	-27.51	-5156	-27.53	-5258.8	-25.80	-4362.4	-21.76	-4661	-21.01
-5560.41	-28.40	-5259.8	-28.91	-5473.6	-27.63	-5455.3	-27.65	-5557.7	-25.91	-4661.2	-21.86	-4960	-21.11
-5860.98	-28.54	-5560.4	-29.04	-5774.1	-27.74	-5754.2	-27.76	-5856.5	-26.01	-4960.0	-21.95	-5258.8	-21.21
-6161.54	-28.67	-5860.9	-29.17	-6074.7	-27.85	-6053.0	-27.86	-6155.3	-26.11	-5258.8	-22.041	-5557.7	-21.31
-6462.1	-28.79	-6161.5	-29.29	-6375.2	-27.95	-6351.8	-27.97	-6454.1	-26.20	-5557.7	-22.113	-5856.5	-21.39
-6762.67	-28.91	-6462.1	-29.42	-6675.8	-28.05	-6650.6	-28.0	-6753	-26.29	-5856.5	-22.202	-6155.3	-21.47
-7063.23	-29.06	-6762.6	-29.53	-6976.4	-28.16	-6949.5	-28.1	-7051.8	-26.38	-6155.3	-22.283	-6454.1	-21.55
-7363.79	-29.17	-7063.2	-29.65	-7276.9	-28.27	-7248.3	-28.29	-7350.6	-26.48	-6454.1	-22.35	-6753	-21.62
-7664.35	-29.30	-7363.7	-29.76	-7577.5	-28.37	-7547	-28.39	-7649.4	-26.57	-6753.0	-22.44	-7051.8	-21.69
-7964.92	-29.42	-7664.3	-29.86	-7878.1	-28.47	-7845.9	-28.48	-7948.3	-26.66	-7051.8	-22.517	-7350.6	-21.76
-8265.48	-29.53	-7964.9	-29.95	-8178	-28.57	-8144.8	-28.58	-8247.1	-26.74	-7350	-22.6	-7649.4	-21.83
-8566.04	-29.65	-8265.4	-30.04	-8479.2	-28.65	-8443.6	-28.66	-8545.9	-26.83	-7649.4	-22.68	-7948.3	-21.913
-8866.61	-29.78	-8566	-30.14	-8779.7	-28.74	-8742.4	-28.75	-8844.8	-26.91	-7948.3	-22.749	-8247.1	-21.995
-9167.17	-29.89	-8866.6	-30.23	-9080.3	-28.82	-9041.2	-28.83	-9143.6	-26.98	-8247.1	-22.821	-8545.9	-22.071
-9467.73	-29.98	-9167.1	-30.31	-9380.9	-28.90	-9340.1	-28.91	-9442.4	-27.06	-8545.9	-22.88	-8844.8	-22.142
-9768.29	-30.11	-9467.7	-30.38	-9681.4	-28.99	-9638.9	-2	-9741.2	-27.13	-8844.8	-22.95	-9143.6	-22.20
-10068.9	-30.20	-9768.2	-30.47	-9982	-29.08	-9937.7	-29.08	-10040	-27.20	-9143.6	-23.038	-9442.4	-22.26
-10369.4	-30.28	-10068	-30.56	-10282	-29.16	-10236	-29.16	-10338	-27.26	-9442.4	-23.11	-9741.2	-22.32
-10670	-30.38	-10369	-30.64	-10583	-29.24	-10535	-29.24	-10637	-27.31	-9741.2	-23.18	-10040	-22.38
-10970.5	-30.47	-10670	-30.72	-10883	-29.30	-10834	-29.31	-10936	-27.37	-10040	-23.25	-10338	-22.44
-11271.1	-30.55	-10970	-30.80	-11184	-29.37	-11133	-29.37	-11235	-27.42	-10338	-23.32	-10637	-22.49
-11571.7	-30.62	-11271	-30.88	-11484	-29.44	-11431	-29.44	-11534	-27.48	-10637	-23.38	-10936	-22.5
-11872.2	-30.70	-11571	-30.97	-11785	-29.48	-11730	-29.49	-11833	-27.54	-10936	-23.43	-11235	-22.56
-12172.8	-30.77	-11872	-31.08	-12086	-29.54	-12029	-29.54	-12131	-27.61	-11235	-23.50	-11534	-22.61
-12473.4	-30.84	-12172	-31.15	-12386	-29.57	-12328	-29.57	-12430	-27.68	-11534	-23.57	-11833	-22.64
-12773.9	-30.93	-12473	-31.25	-12687	-29.60	-12627	-29.60	-12729	-27.7	-11833	-23.61	-12131	-22.6
-13074.5	-31.02	-12773	-31.34	-12987	-29.60	-12926	-29.60	-13028	-27.76	-12131	-23.65	-12430	-22.69
-13375	-31.06	-13074	-31.43	-13288	-29.61	-13224	-29.61	-13327	-27.79	-12430	-23.68	-12729	-22.7
-13675.6	-31.11	-13375	-31.52	-13588	-29.63	-13523	-29.63	-13626	-27.82	-12729	-23.71	-13028	-22.77
-13976.2	-31.17	-13675	-31.58	-13889	-29.64	-13822	-29.66	-13924	-27.80	-13028	-23.72	-13327	-22.75
-14276.7	-31.16	-13976	-31.61	-14189	-29.66	-14121	-29.67	-14223	-27.72	-13327	-23.7	-13626	-22.72
-14577.3	-31.13	-14276	-31.60	-14490	-29.62	-14420	-29.60	-14522	-27.48	-13626	-23.70	-13924	-22.66
-14877.9	-31.07	-14577	-31.60	-14791	-29.59	-14719	-29.49	-14821	-27.24	-13924	-23.71	-14223	-22.60
						-14892	-29.00	-14821	-26.58	-14223	-23.66	-14522	-22.51
										-14522	-23.5	-14821	-22.39
										-14821	-23.47		

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 150 °C

E		P		E		P		E		P		E		P	
-14821.3	-28.94	-14821	-29.2	-14821	-29.52	-14821	-29.30	-14821	-29.29	-14642	-27.92	-14821	-27.95		
-14522.5	-28.38	-14522	-28.86	-14522	-29.13	-14522	-28.94	-14522	-28.98	-14343	-27.55	-14522	-27.58		
-14223.7	-27.90	-14223	-28.45	-14223	-28.78	-14223	-28.62	-14223	-28.6	-14044	-27.21	-14223	-27.21		
-13924.9	-27.91	-13924	-28.21	-13924	-28.55	-13924	-28.34	-13924	-28.31	-13746	-26.83	-13924	-26.76		
-13626	-27.628	-13626	-27.90	-13626	-28.28	-13626	-28.02	-13626	-28.02	-13447	-26.43	-136	-26.34		
-13327.2	-27.3	-13327	-27.60	-13327	-27.94	-13327	-27.69	-13327	-27.71	-13148	-25.98	-13327	-25.86		
-13028.4	-27.01	-13028	-27.25	-13028	-27.62	-13028	-27.33	-13028	-27.41	-12849	-25.51	-13028	-25.29		
-12729.5	-26.63	-12729	-26.87	-12729	-27.28	-12729	-26.97	-12729	-27.01	-12550	-24.9	-12729	-24.67		
-12430.7	-26.25	-12430	-26.48	-12430	-26.91	-12430	-26.54	-12430	-26.61	-12251	-24.30	-12430	-23.97		
-12131.9	-25.84	-12131	-26.00	-12131	-26.49	-12131	-26.10	-12131	-26.18	-11953	-23.60	-12131	-23.16		
-11833.1	-25.3	-11833	-25.45	-11833	-26.00	-11833	-25.53	-11833	-25.61	-11654	-22.72	-11833	-22.18		
-11534.2	-24.69	-11534	-24.85	-11534	-25.46	-11534	-24.92	-11534	-24.98	-11355	-21.70	-11534	-21.08		
-11235.4	-23.99	-11235	-24.10	-11235	-24.75	-11235	-24.19	-11235	-24.32	-11056	-20.60	-11235	-19.78		
-10936.6	-23.0	-10936	-23.16	-10936	-24.02	-10936	-23.37	-10936	-23.35	-10757	-19.50	-10936	-18.23		
-10637.8	-21.99	-10637	-22.12	-10637	-22.99	-10637	-22.41	-10637	-22.19	-10458	-16.87	-10637	-16.48		
-10338.9	-20.72	-10338	-20.87	-10338	-21.85	-10338	-21.06	-10338	-20.76	-10160	-14.40	-10338	-14.46		
-10040.1	-19.20	-10040	-19.32	-10040	-20.31	-10040	-19.59	-10040	-19.11	-9861.2	-11.83	-10040	-12.17		
-9741.28	-17.45	-9741.2	-17.54	-9741.2	-18.44	-9741.2	-17.65	-9741.2	-17	-9562.4	-9.32	-9741.2	-9.7		
-9442.45	-15.45	-9442.4	-15.41	-9442.4	-16.53	-9442.4	-15.45	-9442.4	-14.50	-9263.6	-6.6	-9442	-7.10		
-9143.63	-13.05	-9143.6	-13.02	-9143.6	-13.78	-9143.6	-12.96	-9143.6	-11.7	-8964.8	-4.30	-9143.6	-4.57		
-8844.8	-10.55	-8844.8	-10.42	-8844.8	-10.98	-8844.8	-10.07	-8844.8	-8.89	-8665.9	-1.62	-8844.8	-1.81		
-8545.97	-7.81	-8545.9	-7.67	-8545.9	-8.045	-8545.9	-7.17	-8545.9	-6.02	-8367.1	0.77	-8545.9	0.48		
-8247.15	-5.21	-8247.1	-4.97	-8247.1	-5.06	-8247.1	-4.14	-8247	-3.061	-8068.3	3.19	-8247.1	2.90		
-7948.32	-2.6	-7948.3	-2.06	-7948.3	-1.93	-7948.3	-1.13	-7948.3	-0.16	-7769.4	5.55	-7948.3	5.04		
-7649.49	0.12	-7649.4	0.48	-7649.4	0.54	-7649.4	1.75	-7649.4	2.45	-7470.6	7.79	-7649.4	7.15		
-7350.67	2.62	-7350.6	3.07	-7350.6	3.33	-7350.6	4.50	-7350.6	5.15	-7171.8	9.74	-7350.6	8.97		
-7051.84	4.85	-7051.8	5.42	-7051.8	5.69	-7051.8	6.90	-7051.8	7.56	-6878	11.41	-7051	10.56		
-6753.01	7.08	-6753	7.74	-6753	8.20	-6753.0	9.16	-6753	9.78	-6574.1	12.85	-6753	11.94		
-6454.19	9.046	-6454.1	9.785	-6454.1	10.22	-6454.1	11.26	-6454	11.69	-6275.3	14.077	-6454.1	13.14		
-6155.3	10.80	-6155.3	11.53	-6155.3	12.13	-6155.3	12.95	-6155.3	13.35	-5976.5	15.08	-6155.3	14.11		
-5856.5	12.41	-5856.5	13.17	-5856.5	13.81	-5856.5	14.45	-5856.5	14.77	-5677.7	15.87	-5856.5	14.95		
-5557.7	13.75	-5557.7	14.51	-5557.7	15.08	-5557.7	15.66	-5557.7	15.97	-5378.8	16.55	-5557.7	15.67		
-5258.8	14.99	-5258.8	15.61	-5258	16.21	-5258.8	16.74	-5258	16.93	-5080	17.13	-5258	16.30		
-4960.05	15.89	-4960	16.51	-4960	17.13	-4960	17.53	-4960	17.71	-4781.2	17.67	-4960	16.85		
-4661.23	16.68	-4661.2	17.33	-4661.2	17.87	-4661.2	18.17	-4661.2	18.35	-4482.4	18.134	-4661.2	17.3		
-4362.4	17.39	-4362.4	18.00	-4362.4	18.51	-4362.4	18.76	-4362.4	18.94	-4183.5	18.56	-4362.4	17.8		
-4063.5	18.04	-4063.5	18.57	-4063.5	19.07	-4063	19.27	-4063.5	19.45	-3884.7	18.97	-4063.5	18.25		
-3764.7	18.60	-3764	19.09	-3764.7	19.57	-3764.7	19.78	-3764.7	19.92	-3585.9	19.35	-3764.7	18.64		
-3465.9	19.11	-3465.9	19.54	-3465.9	20.04	-3465.9	20.21	-3465.9	20.35	-3287	19.70	-3465.9	19.00		
-3167.0	19.56	-3167.0	20.00	-3167	20.47	-3167	20.61	-3167	20.76	-2988.2	20.0415	-3167	19.34		
-2868.2	19.99	-2868.2	20.40	-2868.2	20.86	-2868.2	20.98	-2868.2	21.12	-2689.4	20.35	-2868.2	19.66		
-2569.4	20.40	-2569.4	20.77	-2569.4	21.22	-2569.4	21.33	-2569.4	21.47	-2390.6	20.6537	-2569.4	19.97		
-2270.6	20.77	-2270.6	21.12	-2270.6	21.56	-2270.6	21.65	-2270.6	21.80	-2091.7	20.94	-2270.6	20.27		
-1971.7	21.13	-1971.7	21.45	-1971.7	21.88	-1971.7	21.97	-1971.7	22.11	-1792.9	21.22	-1971.7	20.55		
-1672.96	21.48	-1672.9	21.78	-1672.9	22.19	-1672.9	22.26	-1672.9	22.41	-1494.1	21.47	-1672.9	20.82		
-1374.13	21.81	-1374.1	22.08	-1374	22.49	-1374.1	22.55	-1374.1	22.68	-1195	21.72	-1374.1	21.08		
-1075.31	22.13	-1075.3	22.38	-1075	22.76	-1075.3	22.83	-1075.3	22.95	-896.48	21.98	-1075.3	21.35		
-776.48	22.42	-776.48	22.66	-776.4	23.03	-776.4	23.08	-776.48	23.20	-597.65	22.22	-776.48	21.59		
-477.654	22.72	-477.65	22.92	-477.65	23.28	-477.65	23.32	-477.65	23.45	-298.82	22.46	-477.65	21.82		
-178.8	22.99	-178.82	23.18	-178.8	23.53	-178.8	23.57	-178.82	23.68	-5E-05	22.68	-178.82	22.03		
119.9	23.26	119.9	23.42	119.9	23.77	119.9	23.80	119.99	23.91	298.82	22.90	119.99	22.24		
418.82	23.51	418.82	23.67	418.82	24.01	418.82	24.03	418.82	24.13	597.65	23.11	418.8	22.44		
717.65	23.76	717.65	23.90	717.65	24.23	717.65	24.25	717.65	24.34	896.47	23.33	717.65	22.65		

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 150 °C (ต่อ)

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
1016.4	23.99	1016.47	24.12	1016.47	24.45	1016.47	24.46	1016.47	24.56	1195.30	23.53	1016.47	22.86
1315.3	24.21	1315.30	24.34	1315.30	24.65	1315.30	24.66	1315.3	24.76	1494.13	23.72	1315.30	23.05
1614.13	24.44	1614.13	24.54	1614.13	24.85	1614.13	24.86	1614.13	24.96	1792.96	23.91	1614.13	23.25
1912.9	24.65	1912.95	24.74	1912.95	25.06	1912.95	25.07	1912.95	25.16	2091.78	24.10	1912.95	23.43
2211.75	24.85	2211.78	24.95	2211.78	25.26	2211.78	25.26	2211.78	25.34	2390.61	24.284	2211.78	23.60
2510.61	25.05	2510.61	25.14	2510.61	25.45	2510.61	25.46	2510.61	25.52	2689.43	24.46	2510.61	23.78
2809.43	25.25	2809.43	25.33	2809.43	25.63	2809.43	25.63	2809.43	25.71	2988.26	24.6297	2809.43	23.94
3108.26	25.43	3108.26	25.51	3108.26	25.81	3108.26	25.80	3108.26	25.88	3287.09	24.8102	3108.26	24.10
3407.09	25.60	3407.09	25.69	3407.09	25.98	3407.09	25.97	3407.09	26.05	3585.91	24.96	3407.09	24.26
3705.91	25.78	3705.91	25.86	3705.91	26.15	3705.91	26.14	3705.91	26.22	3884.74	25.11	3705.91	24.42
4004.74	25.9	4004.74	26.03	4004.74	26.32	4004.74	26.30	4004.74	26.38	4183.57	25.26	4004.74	24.58
4303.57	26.14	4303.57	26.20	4303.57	26.48	4303.57	26.47	4303.57	26.53	4482.39	25.41	4303.57	24.73
4602.39	26.32	4602.39	26.35	4602.39	26.65	4602.39	26.63	4602.39	26.68	4781.22	25.558	4602.39	24.89
4901.22	26.48	4901.22	26.50	4901.22	26.80	4901.22	26.78	4901.22	26.84	5080.05	25.70	4901.22	25.04
5200.05	26.64	5200.05	26.66	5200.05	26.95	5200.05	26.93	5200.05	26.97	5378.87	25.83	5200.05	25.17
5498.87	26.81	5498.87	26.81	5498.87	27.11	5498.87	27.08	5498.87	27.10	5677.7	25.97	5498.87	25.30
5797.70	26.97	5797.70	26.96	5797.70	27.25	5797.70	27.22	5797.70	27.23	5976.53	26.10	5797.70	25.44
6096.53	27.13	6096.53	27.11	6096.53	27.41	6096.53	27.35	6096.53	27.36	6275.35	26.25	6096.53	25.57
6395.35	27.28	6395.35	27.25	6395.35	27.54	6395.35	27.47	6395.35	27.50	6574.18	26.38	6395.35	25.71
6694.18	27.43	6694.18	27.37	6694.18	27.67	6694.18	27.60	6694.18	27.62	6873.01	26.50	6694.18	25.84
6993.01	27.58	6993.01	27.50	6993.01	27.80	6993.01	27.73	6993.01	27.75	7171.83	26.62	6993.01	25.97
7291.83	27.71	7291.83	27.63	7291.83	27.94	7291.83	27.86	7291.83	27.89	7470.66	26.74	7291.83	26.08
7590.66	27.86	7590.66	27.76	7590.66	28.07	7590.66	27.99	7590.66	28.00	7769.49	26.86	7590.66	26.20
7889.49	28	7889	27.89	7889.49	28.20	7889.49	28.11	7889.49	28.12	8068.31	26.99	7889.49	26.31
8188.31	28.12	8188.31	28.02	8188.31	28.33	8188.31	28.24	8188.31	28.25	8367.14	27.11	8188.31	26.43
8487.14	28.26	8487.14	28.15	8487.14	28.45	8487.14	28.35	8487.14	28.37	8665.97	27.21	8487.14	26.54
8785.97	28.37	8785.97	28.29	8785.97	28.57	8785.97	28.46	8785.97	28.47	8964.79	27.32	8785.97	26.64
9084.79	28.49	9084.79	28.41	9084.79	28.69	9084.79	28.57	9084.79	28.58	9263.62	27.43	9084.79	26.74
9383.62	28.64	9383.62	28.53	9383.62	28.80	9383.62	28.68	9383.62	28.69	9562.45	27.54	9383.62	26.84
9682.45	28.72	9682.45	28.65	9682.45	28.92	9682.45	28.80	9682.45	28.79	9861.27	27.65	9682.45	26.9
9981.27	28.82	9981.27	28.76	9981.27	29.02	9981.27	28.91	9981.27	28.9	10160.1	27.761	9981.27	27.04
10280.1	28.93	10280.1	28.87	10280.1	29.13	10280.1	29.02	10280.1	28.99	10458.9	27.87	10280.1	27.13
10578.9	29.03	10578.9	28.99	10578.9	29.24	10578.9	29.12	10578.9	29.10	10757.7	27.98	10578.9	27.23
10877.7	29.14	10877.7	29.09	10877.7	29.34	10877.7	29.22	10877.7	29.18	11056.5	28.07	10877.7	27.34
11176.5	29.23	11176.5	29.19	11176.5	29.44	11176.5	29.32	11176.5	29.27	11355.4	28.16	11176.5	27.44
11475.4	29.3	11475.4	29.28	11475.4	29.53	11475.4	29.41	11475.4	29.36	11654.2	28.25	11475.4	27.53
11774.2	29.43	11774	29.36	11774.2	29.65	11774.2	29.50	11774.2	29.45	11953	28.34	11774.2	27.61
12073.0	29.53	12073	29.46	12073.0	29.74	12073.0	29.60	12073	29.54	12251.8	28.42	12073.0	27.70
12371.8	29.64	12371.8	29.55	12371.8	29.85	12371.8	29.69	12371.8	29.64	12550.7	28.52	12371.8	27.78
12670.7	29.74	12670.7	29.64	12670.7	29.92	12670.7	29.79	12670.7	29.7	12849.5	28.59	12670.7	27.85
12969.5	29.85	12969.5	29.74	12969.5	30.01	12969.5	29.87	12969.5	29.79	13148.3	28.68	12969.5	27.93
13268.3	29.93	13268.3	29.84	13268.3	30.08	13268.3	29.94	13268.3	29.87	13447.2	28.77	13268.3	27.98
13567	30.02	13567.2	29.94	13567.2	30.15	13567.2	30.02	13567.2	29.95	13746.0	28.86	13567.2	28.03
13866	30.0	13866.0	30.02	13866.0	30.20	13866	30.08	13866.0	30.02	14044.8	28.95	13866.0	28.10
14164.8	30.15	14164.8	30.08	14164.8	30.23	14164.8	30.14	14164.8	30.08	14343.6	29.00	14164.8	28.13
14463	30.18	14463.6	30.16	14463.6	30.26	14463.6	30.18	14463.6	30.13	14642.5	29.03	14463.6	28.16
14762.5	30.18	14762.5	30.18	14762.5	30.28	14762.5	30.18	14762.5	30.08	14941.3	29.04	14762	28.19
15061.3	30.18	15061.3	30.18	15061.3	30.19	15061.3	30.18	15061.3	29.93	15240.1	28.979	15061.3	28.13
15061.3	30.0327	15061.3	30.15	15061.3	30.19	14958	30.12	15061.3	29.87	15240.1	28.91	15061.3	28.11
14762.5	29.47	14762.5	29.59	14762.5	29.88	14958.6	30.12	14762.5	29.51	14941.3	28.57	14762.5	27.67
14463.6	29.12	14463.6	29.24	14463.6	29.56	14958.6	30.12	14463.6	29.17	14642.5	28.23	14463.6	27.28
14164.8	28.77	14164.8	28.92	14164.8	29.25	14958.6	30.18	14164.8	28.84	14343.6	27.89	14164.8	26.87
13866.0	28.43	13866	28.59	13866	28.93	15061.3	30.18	13866	28.51	14044	27.52	13866	26.44

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 150 °C (ต่อ)

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
13567.2	28.06	13567.2	28.27	13567.2	28.62	14762.5	29.76	13567.2	28.16	13746.0	27.07	13567.2	25.93
13268.3	27.69	13268.3	27.93	13268.3	28.29	14463.6	29.35	13268.3	27.81	13447.2	26.6	13268.3	25.35
12969.5	27.30	12969.5	27.58	12969.5	27.95	14164.8	29.06	12969.5	27.42	13148.3	26.07	12969.5	24.72
12670.7	26.87	12670.7	27.19	12670.7	27.59	13866	28.72	12670.7	26.96	12849	25.50	12670.7	24.01
12371.8	26.41	12371.8	26.74	12371.8	27.20	13567.2	28.40	12371.8	26.45	12550.7	24.83	12371.8	23.19
12073.0	25.87	12073.0	26.24	12073.0	26.74	13268.3	28.06	12073.0	25.85	12251.8	24.00	12073	22.24
11774.2	25.24	11774.2	25.69	11774.2	26.23	12969.5	27.72	11774.2	25.15	11953	23.06	11774.2	21.17
11475.4	24.513	11475.4	25.02	11475.4	25.63	12670.7	27.32	11475.4	24.28	11654.2	21.99	11475.4	19.91
11176.5	23.67	11176.5	24.24	11176.5	24.89	12371.8	26.9	11176.5	23.21	11355.4	20.73	11176.5	18.47
10877.7	22.510	10877.7	23.14	10877.7	23.94	12073.0	26.3	10877.7	21.91	11056.5	19.17	10877.7	16.81
10578.9	21.15	10578.9	22.07	10578.9	22.73	11774.2	25.78	10578.9	20.31	10757.7	17.50	10578.9	14.88
10280.1	19.31	10280.1	20.2	10280.1	20.82	11475.4	25.05	10280.1	18.27	10458.9	15.30	10280.1	12.70
9981.27	17.1	9981.27	18.05	9981.27	18.56	11176.5	24.14	9981.27	15.91	10160.1	13.00	9981	10.28
9682.45	14.37	9682.45	15.27	9682.45	16.24	10877.7	22.91	9682.45	13.15	9861.27	10.31	9682.45	7.76
9383.62	11.59	9383.62	12.42	9383.62	12.99	10578.9	21.38	9383.6	10.15	9562.4	7.68	9383	5.15
9084.7	8.72	9084.79	9.359	9084.79	9.986	10280.1	19.55	9084.79	7.13	9263.62	5.05	9084.79	2.52
8785.9	5.69	8785.97	6.461	8785.97	7.03	9981.27	17.18	8785.9	4.26	8964.79	2.50	8785.97	0.08
8487.1	2.63	8487.14	3.427	8487.14	4.41	9682.45	14.38	8487.14	1.08	8665.97	-0.03	8487.14	-2.33
8188.3	-0.08	8188.31	0.405	8188.31	1.942	9383.62	11.4	8188.31	-1.631	8367.14	-2.44	8188.31	-4.48
7889.49	-2.84	7889.49	-2.2	7889.49	-0.648	9084.79	8.52	7889.49	-4.321	8068.31	-4.61	7889.4	-6.55
7590.66	-5.51	7590.6	-4.91	7590.6	-3.15	8785.97	5.3	7590.6	-6.73	7769.49	-6.75	7590.6	-8.40
7291.83	-7.79	7291.83	-7.344	7291.83	-5.542	8487.14	2.23	7291.8	-8.927	7470.66	-8.60	7291.83	-10.05
6993.01	-9.92	6993.01	-9.57	6990	-7.86	8188.3	-0.76	6993.01	-10.87	7171.83	-10.22	6993	-11.49
6694.18	-11.68	6694.18	-11.52	6694.18	-10.19	7889.4	-3.38	6694.18	-12.67	6873.01	-11.67	6694.18	-12.70
6395.3	-13.15	6395.35	-13.18	6395.35	-12.31	7590.6	-6.13	6395.35	-14.06	6574.18	-12.91	6395.35	-13.7
6096.53	-14.3	6096.53	-14.64	6096.53	-14.20	7291.83	-8.411	6096.53	-15.12	6275.35	-13.87	6096.53	-14.62
5797.70	-15.34	5797.70	-15.65	5797.7	-16.03	6993	-10.44	5797.70	-16.11	5976.53	-14.74	5797.70	-15.32
5498.87	-16.16	5498.87	-16.47	5498.87	-16.97	6694.1	-12.2	5498.87	-16.90	5677.70	-15.41	5498.87	-15.96
5200	-16.81	5200.05	-17.15	5200	-17.55	6395.35	-13.84	5200.05	-17.54	5378.87	-16.00	5200.05	-16.53
4901.22	-17.39	4901.22	-17.72	4901.22	-18.10	6096.53	-15.13	4901.22	-18.06	5080.05	-16.539	4901.22	-17.02
4602.39	-17.90	4602.39	-18.24	4602.39	-18.63	5797.7	-16.02	4602.39	-18.56	4781.22	-17.02	4602.39	-17.48
4303.57	-18.36	4303.57	-18.71	4303.57	-19.08	5498.87	-16.82	4303.57	-19.01	4482.39	-17.45	4303.57	-17.90
4004.74	-18.8	4004.74	-19.16	4004.74	-19.51	5200	-17.50	4004.74	-19.42	4183.57	-17.87	4004.74	-18.29
3705.91	-19.17	3705.91	-19.54	3705.91	-19.90	4901	-18.07	3705.91	-19.82	3884.74	-18.244	3705.91	-18.65
3407	-19.53	3407.09	-19.92	3407.09	-20.26	4602.39	-18.5	3407.09	-20.19	3585.91	-18.59	3407.09	-19.0
3108.2	-19.89	3108.26	-20.26	3108.26	-20.59	4303.57	-19.04	3108.26	-20.53	3287.09	-18.930	3108.26	-19.32
2809.43	-20.19	2809.43	-20.58	2809.43	-20.91	4004.74	-19.47	2809.43	-20.85	2988.26	-19.24	2809.43	-19.65
2510.6	-20.48	2510.61	-20.89	2510.61	-21.22	3705.91	-19.88	2510.61	-21.15	2689.43	-19.54	2510.61	-19.94
2211.78	-20.7	2211.78	-21.19	2211.78	-21.51	3407	-20.24	2211.78	-21.44	2390.61	-19.83	2211.78	-20.23
1912.95	-21.04	1912.9	-21.49	1912.95	-21.80	3108.26	-20.58	1912.95	-21.72	2091.78	-20.11	1912.9	-20.5
1614.1	-21.3	1614.13	-21.76	1614.13	-22.06	2809.43	-20.90	1614.13	-21.99	1792.96	-20.387	1614.13	-20.77
1315.3	-21.57	1315.3	-22.03	1315.3	-22.3	2510.6	-21.21	1315.3	-22.25	1494.13	-20.64	1315.30	-21.01
1016.47	-21.8	1016.47	-22.28	1016.47	-22.57	2211.78	-21.49	1016.47	-22.49	1195.30	-20.88	1016.47	-21.25
717.6	-22.06	717.65	-22.52	717.652	-22.80	1912.95	-21.78	717.65	-22.73	896.47	-21.12	717.65	-21.48
418.8	-22.3	418.82	-22.76	418.82	-23.04	1614.1	-22.04	418.82	-22.97	597.65	-21.3	418.82	-21.70
119.9	-22.53	119.9	-23	119.9	-23	1315.30	-22.4	119.999	-23.19	298.82	-21.58	119.9	-21.92
-178.8	-22.77	-178	-23.22	-178.8	-23.50	1016.47	-22.54	-178.8	-23.49	-5E-05	-21.79	-178.8	-22.14
-477.6	-22.99	-477.65	-23.46	-477.65	-23.74	717.65	-22.74	-477.65	-23.62	-298.82	-22.013	-477.65	-22.35
-776.48	-23.22	-776.48	-23.63	-776.48	-23.94	418.825	-23.01	-776.48	-23.84	-597.65	-22.22	-776.4	-22.54
-1075.31	-23.43	-1075.3	-23.84	-1075	-24.14	119.9	-23.24	-1075.3	-24.04	-896.4	-22.41	-1075.3	-22.73
-1374.13	-23.65	-1374.1	-24.04	-1374.1	-24.34	-178.8	-23.46	-1374.1	-24.24	-1195.3	-22.61	-1374.1	-22.92
-1672.96	-23.85	-1672	-24.24	-1672.9	-24.54	-477.6	-23.67	-1672.9	-24.44	-1494.1	-22.812	-1672.9	-23.108
-1971.79	-24.039	-1971.7	-24.43	-1971.7	-24.73	-776.4	-23.89	-1971.7	-24.63	-1792.9	-23.00	-1971.7	-23.28

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 150 °C (ต่อ)

E		P		E		P		E		P		E		P	
-2270.61	-24.22	-2270	-24.62	-2270	-24.91	-1075	-24.08	-2270.6	-24.82	-2091.7	-23.18	-2270.6	-23.46		
-2569.4	-24.40	-2569.4	-24.80	-2569.4	-25.10	-1374	-24.28	-2569.4	-25.00	-2390.6	-23.35	-2569.4	-23.632		
-2868.27	-24.58	-2868.2	-24.97	-2868.2	-25.28	-1672.9	-24.48	-2868.2	-25.17	-2689.4	-23.52	-2868.2	-23.79		
-3167.09	-24.76	-3167	-25.13	-3167	-25.46	-1971	-24.67	-3167	-25.34	-2988.2	-23.69	-3167.0	-23.95		
-3465.92	-24.93	-3465.9	-25.29	-3465.9	-25.62	-2270	-24.86	-3465.9	-25.51	-3287	-23.85	-3465.9	-24.11		
-3764.75	-25.09	-3764.7	-25.46	-3764.7	-25.79	-2569.4	-25.04	-3764.7	-25.67	-3585.9	-24.01	-3764.7	-24.28		
-4063.57	-25.26	-4063.5	-25.62	-4063.5	-25.96	-2868.2	-25.2	-4063	-25.83	-3884.7	-24.171	-4063.5	-24.44		
-4362.4	-25.43	-4362.4	-25.79	-4362.4	-26.11	-3167.0	-25.37	-4362.4	-25.99	-4183.5	-24.33	-4362.4	-24.58		
-4661.23	-25.59	-4661.2	-25.94	-4661.2	-26.26	-3465.9	-25.54	-4661.2	-26.14	-4482.4	-24.48	-4661.2	-24.73		
-4960.05	-25.75	-4960	-26	-4960	-26.41	-3764.7	-25.70	-4960	-26.28	-4781.2	-24.62	-4960.0	-24.88		
-5258.8	-25.90	-5258.8	-26.24	-5258.8	-26.55	-4063.5	-25.87	-5258	-26.42	-5080	-24.76	-5258	-25.03		
-5557.71	-26.05	-5557.7	-26.39	-5557.7	-26.69	-4362.4	-26.02	-5557.7	-26.55	-5378	-24.9	-5557.7	-25.18		
-5856.53	-26.20	-5856.5	-26.53	-5856.5	-26.83	-4661.2	-26.17	-5856.5	-26.68	-5677.7	-25.03	-5856.5	-25.31		
-6155.36	-26.353	-6155.3	-26.66	-6155.3	-26.95	-4960	-26.32	-6155.3	-26.82	-5976.5	-25.16	-6155	-25.44		
-6454	-26.48	-6454.1	-26.79	-6454.1	-27.08	-5258.8	-26.46	-6454.1	-26.94	-6275.3	-25.29	-6454.1	-25.57		
-6753.01	-26.62	-6753	-26.92	-6753	-27.22	-5557	-26.59	-6753	-27.08	-6574.1	-25.42	-6753	-25.69		
-7051.84	-26.75	-7051.8	-27.04	-7051.8	-27.3	-5856	-26.72	-7051.8	-27.20	-6873	-25.56	-7051.8	-25.82		
-7350.67	-26.887	-7350.6	-27.19	-7350.6	-27.4	-6155.3	-26.86	-7350.6	-27.33	-7171.8	-25.69	-7350.6	-25.95		
-7649.49	-27.01	-7649.4	-27.32	-7649.4	-27.58	-6454.1	-26.99	-7649.4	-27.45	-7470.6	-25.815	-7649.4	-26.07		
-7948.32	-27.145	-7948.3	-27.45	-7948.3	-27.70	-6753	-27.12	-7948.3	-27.57	-7769.4	-25.94	-7948.3	-26.20		
-8247.15	-27.274	-8247.1	-27.57	-8247.1	-27.80	-7051.8	-27.26	-8247.1	-27.70	-8068.3	-26.06	-8247.1	-26.31		
-8545.97	-27.386	-8545.9	-27.69	-8545.9	-27.91	-7350.6	-27.40	-8545.9	-27.81	-8367	-26.17	-8545.9	-26.43		
-8844.8	-27.5	-8844.8	-27.80	-8844.8	-28.02	-7649.4	-27.52	-8844.8	-27.91	-8665.9	-26.29	-8844.8	-26.5		
-9143.63	-27.60	-9143.6	-27.90	-9143.6	-28.13	-7948.3	-27.65	-9143.6	-28.02	-8964.8	-26.412	-9143.6	-26.65		
-9442.45	-27.72	-9442.4	-28.01	-9442.4	-28.25	-8247.1	-27.76	-9442.4	-28.14	-9263.6	-26.53	-9442.4	-26.75		
-9741.28	-27.832	-9741.2	-28.12	-9741.2	-28.37	-8545.9	-27.86	-9741.2	-28.23	-9562.4	-26.6	-9741.2	-26.8		
-10040.1	-27.93	-10040	-28.23	-10040	-28.47	-8844	-27.97	-10040	-28.34	-9861	-26.75	-10040	-26.97		
-10338.9	-28.04	-10338	-28.34	-10338	-28.58	-9143	-28.09	-10333	-28.44	-1016	-26.86	-10338	-27.07		
-10637.8	-28.13	-10637	-28.44	-10637	-28.68	-9442.4	-28.20	-10637	-28.5	-10458	-26.96	-10637	-27.16		
-10936.6	-28.24	-10936	-28.53	-10936	-28.78	-9741.2	-28.31	-10936	-28.6	-10757	-27.07	-10936	-27.25		
-11235.4	-28.33	-11235	-28.62	-11235	-28.88	-10040	-28.41	-11235	-28.70	-11056	-27.16	-11235	-27.34		
-11534.2	-28.43	-11534	-28.71	-11534	-28.98	-10338	-28.51	-11534	-28.77	-11355	-27.26	-11534	-27.44		
-11833.1	-28.5	-11833	-28.79	-11833	-29.08	-10637	-28.60	-11833	-28.86	-11654	-27.38	-11833	-27.52		
-12131	-28.60	-12131	-28.90	-12131	-29.18	-10936	-28.68	-12131	-28.95	-11953	-27.47	-12131	-27.60		
-12430.7	-28.69	-12430	-28.99	-12430	-29.26	-11235	-28.78	-12430	-29.02	-12251	-27.58	-12430	-27.70		
-12729.5	-28.78	-12729	-29.08	-12729	-29.3	-11534	-28.86	-12729	-29.10	-12550	-27.67	-12729	-27.78		
-13028.4	-28.87	-13028	-29.14	-13028	-29.43	-11833	-28.9	-13028	-29.15	-12849	-27.76	-13028	-27.86		
-13327.2	-28.962	-13327	-29.22	-13327	-29.49	-12131	-29.04	-13327	-29.24	-13148	-27.819	-13327	-27.95		
-13626	-29.00	-13626	-29.30	-13626	-29.54	-12430	-29.13	-13626	-29.35	-13447	-27.89	-13626	-28.02		
-13924.9	-29.03	-13924	-29.36	-13924	-29.58	-12729	-29.21	-13924	-29.46	-13746	-27.89	-13924	-28.10		
-14223.7	-29.16	-14223	-29.44	-14223	-29.58	-13028	-29.28	-14223	-29.51	-14044	-27.89	-14223	-28.12		
-14522.5	-29.14	-14522	-29.39	-14522	-29.58	-13327	-29.36	-14522	-29.52	-14343	-27.89	-14522	-28.12		
-14821.3	-29.03	-14821	-29.32	-14821	-29.58	-13626	-29.43	-14821	-29.40	-14642	-27.89	-14821	-28.12		
-14821.3	-28.99	-14821	-29.23	-14821	-29.52	-13924	-29.53	-14821	-29.36	-14821	-28.44	-14821	-27.96		
-14522.5	-28.43	-14522	-28.94	-14821	-29.55	-14223	-29.62	-14522	-28.93	-14522	-28.14	-14522	-27.61		
-14223.7	-28.03	-14223	-28.54	-14522	-29.13	-14522	-29.59	-14223	-28.62	-14223	-27.71	-14223	-27.21		
-13924.9	-27.92	-13924	-28.23	-14223	-28.81	-14821	-29.42	-13924	-28.37	-13924	-27.33	-13924	-26.77		

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าโวลตาไรเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 150 °C (ต่อ)

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
-13626	-27.64	-13626	-27.89	-13924	-28.45	-14821	-29.39	-13626	-28.02	-13626	-26.96	-13626	-26.32
-13327.2	-27.33	-13327	-27.59	-13626	-28.23	-14522	-28.98	-13327	-27.7	-13327	-26.52	-13327	-25.81
-13028.4	-27.03	-13028	-27.23	-13327	-27.93	-14223	-28.63	-13028	-27.37	-13028	-26.08	-13028	-25.27
-12729.5	-26.66	-12729	-26.87	-13028	-27.61	-13924	-28.35	-12729	-27	-12729	-25.5	-12729	-24.66
-12430.7	-26.28	-12430	-26.46	-12729	-27.27	-13626	-28.06	-12430	-26.61	-12430	-24.91	-12430	-23.95
-12131.9	-25.84	-12131	-26.04	-12430	-26.91	-13327	-27.72	-12131	-26.17	-12131	-24.19	-12131	-23.16
-11833.1	-25.34	-11833	-25.47	-12131	-26.50	-13028	-27.36	-11833	-25.63	-11833	-23.33	-11833	-22.24
-11534.2	-24.71	-11534	-24.89	-11833	-26.06	-12729	-26.99	-11534	-25.04	-11534	-22.3	-11534	-21.2
-11235.4	-24.00	-11235	-24.19	-11534	-25.51	-12430	-26.57	-11235	-24.33	-11235	-21.17	-11235	-19.94
-10936.6	-23.11	-10936	-23.29	-11235	-24.81	-12131	-26.14	-10936	-23.40	-10936	-19.75	-10936	-18.41
-10637.8	-22.00	-10637	-22.25	-10936	-24.04	-11833	-25.57	-10637	-22.36	-10637	-17.92	-10637	-16.67
-10338.9	-20.71	-10338	-21.03	-10637	-23.06	-11534	-24.97	-10338	-20.96	-10338	-16.04	-10338	-14.77
-10040.1	-19.20	-10040	-19.52	-10338	-21.94	-11235	-24.32	-10040	-19.25	-10040	-13.67	-10040	-12.51
-9741.28	-17.49	-9741	-17.77	-10040	-20.52	-10936	-23.39	-9741	-17.02	-9741	-11.13	-9741	-10.05
-9442.45	-15.48	-9442	-15.68	-9741	-18.72	-10637	-22.36	-9442	-14.6	-9442	-8.37	-9442	-7.45
-9143.63	-13.13	-9143	-13.24	-9442	-16.60	-10338	-21.11	-9143	-11.86	-9143	-5.63	-9143	-4.88
-8844.8	-10.64	-8844	-10.57	-9143	-14.04	-10040	-19.47	-8844	-8.89	-8844	-2.85	-8844	-2.16
-8545.97	-7.96	-8545	-7.81	-8844	-11.25	-9741	-17.64	-8545	-5.9	-8545	-0.28	-8545	0.26
-8247.15	-5.25	-8247	-4.93	-8545	-8.37	-9442	-15.45	-8247	-2.86	-8247	2.28	-8247	2.8
-7948.32	-2.56	-7948	-2.22	-8247	-5.31	-9143	-12.88	-7948	-0.09	-7948	4.54	-7948	4.97
-7649.49	-0.09	-7649	0.57	-7948	-2.41	-8844	-10.12	-7649	2.929	-7649	6.81	-7649	6.98
-7350.67	2.477	-7350	3.23	-7649	0.597	-8545	-7.14	-7350	5.483	-7350	8.79	-7350	8.84
-7051.84	5.065	-7051	5.61	-7350	3.600	-8247	-4.15	-7051	7.882	-7051	10.52	-7051	10.5
-6753.01	7.636	-6753	7.97	-7051	6.162	-7948	-1.31	-6753	9.987	-6753	11.97	-6753	11.88
-6454.19	8.891	-6454	9.99	-6753	8.550	-7649	1.601	-6454	11.91	-6454	13.22	-6454	13.15
-6155.36	10.29	-6155	11.78	-6454	10.67	-7350	4.509	-6155	13.59	-6155	14.32	-6155	14.09
-5856.53	11.50	-5856	13.40	-6155	12.48	-7051	6.767	-5856	15.03	-5856	15.16	-5856	14.94
-5557.71	12.88	-5557	14.64	-5856	14.06	-6753	9.051	-5557	16.07	-5557	15.9	-5557	15.68
-5258.88	14.03	-5258	15.74	-5557	15.29	-6454	11.13	-5258	17.05	-5258	16.51	-5258	16.3
-4960.05	15.16	-4960	16.69	-5258	16.39	-6155	12.84	-4960	17.78	-4960	17.04	-4960	16.88
-4661.23	16.06	-4661	17.41	-4960	17.27	-5856	14.37	-4661	18.41	-4661	17.54	-4661	17.36
-4362.4	16.94	-4362	18.07	-4661	17.95	-5557	15.56	-4362	18.99	-4362	18.01	-4362	17.82
-4063.57	17.66	-4063	18.63	-4362	18.60	-5258	16.63	-4063	19.48	-4063	18.42	-4063	18.25
-3764.75	18.31	-3764	19.15	-4063	19.15	-4960	17.46	-3764	19.95	-3764	18.81	-3764	18.64
-3465.92	18.90	-3465	19.62	-3764	19.63	-4661	18.13	-3465	20.36	-3465	19.18	-3465	19.01
-3167.09	19.44	-3167	20.04	-3465	20.09	-4362	18.75	-3167	20.75	-3167	19.52	-3167	19.35
-2868.27	19.95	-2868	20.43	-3167	20.48	-4063	19.28	-2868	21.11	-2868	19.84	-2868	19.68
-2569.44	20.44	-2569	20.81	-2868	20.86	-3764	19.74	-2569	21.45	-2569	20.13	-2569	19.98
-2270.61	20.84	-2270	21.15	-2569	21.22	-3465	20.18	-2270	21.78	-2270	20.42	-2270	20.27
-1971.79	21.18	-1971	21.47	-2270	21.56	-3167	20.59	-1971	22.09	-1971	20.7	-1971	20.5
-1672.96	21.51	-1672	21.79	-1971	21.88	-2868	20.97	-1672	22.39	-1672	20.97	-1672	20.83
-1374.13	21.84	-1374	22.09	-1672	22.20	-2569	21.31	-1374	22.66	-1374	21.24	-1374	21.09
-1075.31	22.14	-1075	22.39	-1374	22.49	-2270	21.64	-1075	22.93	-1075	21.48	-1075	21.35
-776.481	22.43	-776	22.66	-1075	22.76	-1971	21.95	-776	23.17	-776	21.73	-776	21.59
-477.654	22.72	-477	22.91	-776	23.02	-1672	22.25	-477	23.42	-477	21.96	-477	21.81
-178.828	22.99	-178	23.16	-477	23.27	-1374	22.52						
119.999	23.24	119	23.40	-178	23.53	-1075	22.80						
418.825	23.50	418	23.64	119	23.77	-776	23.05						
717.652	23.74	717	23.87	418	24.00	-477	23.30						
				717	24.22	-178	23.54						
						119.999	23.76						
						418.825	23.99						
						717.652	24.20						

ตารางที่ ก.5 แสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 200 °C

E		P		E		P		E		P		E	
-14642.5	-26.1	-14850	-26.36	-14821	-26.74	-14642	-26.77	-14821	-27.13	-14821	-27.09	-14821	-26.85
-14343	-25.82	-14551	-26.13	-14522	-26.08	-14343	-26.55	-14522	-26.75	-14522	-26.73	-14522	-26.62
-14044	-25.52	-14252	-25.90	-14223	-25.40	-14044	-26.34	-14223	-26.40	-14223	-26.40	-14223	-26.39
-13746	-25.22	-13953	-25.67	-13924	-25.94	-13746	-26.12	-13924	-26.3	-13924	-26.2	-13924	-26.17
-13447.2	-24.92	-13654	-25.44	-13626	-25.75	-13447	-25.91	-13626	-26.13	-13626	-26.09	-13626	-25.94
-13148.4	-24.61	-13356	-25.20	-13327	-25.5	-13148	-25.70	-13327	-25.92	-13327	-25.89	-13327	-25.71
-12849.5	-24.30	-13057	-24.97	-13028	-25.29	-12849	-25.48	-13028	-25.71	-13028	-25.6	-13028	-25.48
-12550.7	-23.98	-12758	-24.73	-12729	-25.07	-12550	-25.26	-12729	-25.49	-12729	-25.48	-12729	-25.25
-12251.9	-23.64	-12459	-24.48	-12430	-24.81	-12251	-25.04	-12430	-25.28	-12430	-25.27	-12430	-25.00
-11953.1	-23.29	-12160	-24.22	-12131	-24.51	-11953	-24.80	-12131	-25.04	-12131	-25.03	-12131	-24.76
-11654.2	-22.92	-11861	-23.94	-11833	-24.239	-11654	-24.55	-11833	-24.77	-11833	-24.77	-11833	-24.50
-11355.4	-22.51	-11563	-23.65	-11534	-23.96	-11355	-24.29	-11534	-24.52	-11534	-24.51	-11534	-24.23
-11056.6	-22.06	-11264	-23.33	-11235	-23.66	-11056	-24.01	-11235	-24.24	-11235	-24.24	-11235	-23.9
-10757.8	-21.55	-10965	-23.01	-10936	-23.36	-10757	-23.72	-10936	-23.95	-10936	-23.96	-10936	-23.63
-10458.9	-20.96	-10666	-22.63	-10637	-23.00	-10458	-23.42	-10637	-23.65	-10637	-23.67	-10637	-23.29
-10160.1	-20.29	-10367	-22.23	-10338	-22.65	-10160	-23.10	-10338	-23.34	-10338	-23.34	-10338	-22.9
-9861.28	-19.51	-10068	-21.76	-10040	-22.31	-9861	-22.77	-10040	-22.99	-10040	-22.99	-10040	-22.45
-9562.45	-18.60	-9770.1	-21.21	-9741.2	-21.904	-9562.4	-22.07	-9741.2	-22.60	-9741.2	-22.62	-9741.2	-21.91
-9263.62	-17.54	-9471.2	-20.54	-9442.4	-21.46	-9263.6	-21.13	-9442.4	-22.15	-9442	-22.20	-9442.4	-21.25
-8964.8	-16.30	-9172.4	-19.79	-9143.6	-20.91	-8964.8	-19.96	-9143.6	-21.56	-9143.6	-21.67	-9143	-20.46
-8665.97	-14.90	-8873.6	-18.83	-8844.8	-20.23	-8665.9	-18.57	-8844.8	-20.92	-8844.8	-20.98	-8844.8	-19.50
-8367.14	-13.31	-8574.8	-17.66	-8545.9	-19.34	-8367.1	-16.98	-8545.9	-20.04	-8545.9	-19.96	-8545.9	-18.36
-8068.32	-11.58	-8275.9	-16.33	-8247.1	-18.22	-8068.3	-15.21	-8247.1	-19.01	-8247.1	-18.84	-8247.1	-17.03
-7769.49	-9.68	-7977.1	-14.82	-7948.3	-16.70	-7769	-13.34	-7948.3	-17.08	-7948.3	-17.06	-7948.3	-15.50
-7470.66	-7.67	-7678.3	-13.11	-7649.4	-14.89	-7470.6	-11.39	-7649.4	-15.14	-7649.4	-14.94	-7649.4	-13.78
-7171.84	-5.612	-7379.4	-11.16	-7350.6	-12.69	-7171.8	-9.37	-7350.6	-12.88	-7350.6	-12.71	-7350.6	-11.90
-6873.01	-3.52	-7080.6	-9.23	-7051.8	-10.33	-6873.0	-7.31	-7051.8	-10.52	-7051.8	-10.38	-7051.8	-9.86
-6574.18	-1.43	-6781.8	-7.109	-6753	-7.96	-6574.1	-5.35	-6753	-8.03	-6753	-7.53	-6753	-7.71
-6275.36	0.60	-6483	-4.94	-6454.1	-5.39	-6275.3	-3.35	-6454.1	-5.52	-6454	-5.06	-6454.1	-5.49
-5976.53	2.57	-6184.1	-2.74	-6155.3	-2.85	-5976.5	-1.34	-6155.3	-3.0	-6155.3	-2.45	-6155.3	-3.23
-5677.71	4.44	-5885.3	-0.56	-5856.5	-0.38	-5677.7	0.68	-5856.5	-0.741	-5856.5	0.10	-5856.5	-0.98
-3884.75	12.61	-4092.4	10.47	-4063.5	11.7	-3884.7	11.18	-4063.5	11.80	-4063.5	12.17	-4063.5	10.3
-3585.92	13.48	-3793.5	11.79	-3764.7	13.09	-3585	12.45	-3764.7	13.00	-3764.7	13.32	-3764.7	11.73
-3287.09	14.22	-3494.7	12.95	-3465.9	14.03	-3287	13.55	-3465.9	14.14	-3465.9	14.36	-3465.9	12.91
-2988.27	14.87	-3195.9	13.95	-3167	14.88	-2988.2	14.48	-3167	14.95	-3167	15.16	-3167	13.95
-2689.44	15.43	-2897.1	14.80	-2868.2	15.59	-2689.4	15.27	-2868.2	15.63	-2868.2	15.77	-2868.2	14.84
-2390.61	15.93	-2598.2	15.53	-2569.4	16.17	-2390.6	15.97	-2569.4	16.22	-2569.4	16.33	-2569.4	15.61
-2091.79	16.38	-2299.4	16.14	-2270.6	16.67	-2091.7	16.57	-2270.6	16.72	-2270.6	16.81	-2270.6	16.29
-1792.96	16.78	-2000.6	16.68	-1971.7	17.10	-1792.9	17.09	-1971.7	17.17	-1971.7	17.23	-1971.7	16.87
-1494.13	17.16	-1701.7	17.15	-1672.9	17.53	-1494.1	17.56	-1672.9	17.61	-1672.9	17.65	-1672.9	17.39
-1195.31	17.51	-1402.9	17.57	-1374.1	17.91	-1195.3	17.98	-1374.1	18.02	-1374.1	18.04	-1374.1	17.85
-896.48	17.83	-1104.1	17.96	-1075.3	18.27	-896.48	18.37	-1075.3	18.38	-1075.3	18.39	-1075.3	18.27
-597.653	18.14	-805.31	18.32	-776.4	18.6	-597.65	18.73	-776.48	18.72	-776.4	18.71	-776.48	18.66
-298.827	18.44	-506.48	18.66	-477.65	18.94	-298.82	19.06	-477.65	19.05	-477.65	19.04	-477.6	19.02
-5E-05	18.72	-207.6	18.98	-178.8	19.24	-5E-05	19.38	-178.82	19.36	-178.8	19.34	-178.82	19.36
298.82	18.99	91.16	19.29	119.9	19.54	298.82	19.68	119.9	19.66	119.9	19.63	119.9	19.68
597.65	19.25	389.99	19.58	418.82	19.82	597.65	19.97	418.82	19.94	418.82	19.91	418.825	19.99
896.47	19.50	688.82	19.85	717.65	20.1	896.47	20.25	717.65	20.22	717.652	20.18	717.65	20.28
1195.3	19.74	987.64	20.12	1016.47	20.35	1195.30	20.52	1016.47	20.49	1016.47	20.44	1016.47	20.55
1494.13	19.97	1286.47	20.38	1315.3	20.59	1494.13	20.77	1315.30	20.74	1315.3	20.69	1315.3	20.82
1792.96	20.20	1585.3	20.63	1614.13	20.84	1792.96	21.02	1614.13	21.00	1614.13	20.94	1614.13	21.07
2091.78	20.42	1884.12	20.87	1912.95	21.07	2091.78	21.26	1912.95	21.24	1912.95	21.18	1912.95	21.32

ตารางที่ ก.5 แสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 200 °C (ต่อ)

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
2390.61	20.63	2182.95	21.10	2211.78	21.30	2390.61	21.49	2211.78	21.47	2211.78	21.42	2211.7	21.55
2689.43	20.83	2481.78	21.32	2510.6	21.52	2689.43	21.72	2510.61	21.68	2510.61	21.64	2510.61	21.78
2988.26	21.03	2780.60	21.54	2809.43	21.74	2988.26	21.94	2809.43	21.90	2809.43	21.85	2809.43	22.00
3287.09	21.23	3079.43	21.75	3108.26	21.95	3287.09	22.15	3108.26	22.1	3108.26	22.06	3108.26	22.21
3585.91	21.41	3378.26	21.95	3407.09	22.15	3585.91	22.35	3407.09	22.30	3407.09	22.26	3407	22.41
3884.74	21.60	3677.08	22.15	3705.91	22.34	3884.7	22.55	3705.91	22.49	3705.91	22.47	3705.91	22.61
4183.57	21.77	3975.91	22.34	4004.74	22.54	4183.5	22.74	4004.74	22.68	4004.74	22.66	4004.74	22.80
4482.39	21.95	4274.74	22.52	4303.57	22.73	4482.39	22.93	4303.57	22.87	4303.57	22.85	4303.57	22.99
4781.22	22.12	4573.56	22.70	4602.39	22.91	4781.22	23.11	4602.39	23.04	4602.39	23.04	4602.39	23.18
5080.05	22.28	4872.39	22.88	4901.22	23.1	5080.05	23.28	4901.22	23.22	4901.22	23.20	4901.22	23.35
5378.87	22.44	5171.22	23.05	5200.05	23.26	5378.87	23.45	5200.05	23.38	5200.05	23.38	5200.05	23.53
5677.70	22.60	5470.04	23.21	5498.87	23.43	5677.7	23.62	5498.87	23.53	5498.87	23.55	5498.87	23.70
5976.53	22.76	5768.87	23.38	5797.70	23.60	5976.53	23.78	5797.70	23.69	5797.70	23.72	5797.70	23.87
6275.35	22.91	6067.70	23.53	6096.53	23.76	6275.35	23.94	6096.53	23.85	6096.51	23.88	6096.53	24.03
6574.18	23.05	6366.52	23.69	6395.35	23.92	6574.18	24.09	6395.35	24.00	6395.35	24.03	6395.35	24.19
6873.01	23.19	6665.35	23.84	6694.18	24.07	6873.01	24.24	6694.18	24.15	6694.18	24.18	6694.18	24.35
7171.83	23.33	6964.18	23.99	6993.01	24.20	7171.8	24.39	6993.01	24.30	6993.01	24.33	6993.01	24.510
7470.66	23.47	7263	24.14	7291.83	24.35	7470.6	24.53	7291.83	24.45	7291.83	24.49	7291.83	24.66
7769.49	23.60	7561.83	24.28	7590.66	24.49	7769.4	24.66	7590.66	24.59	7590.66	24.64	7590.66	24.80
8068.31	23.73	7860.66	24.42	7889.49	24.64	8068.31	24.80	7889.4	24.73	7889.4	24.77	7889.49	24.95
8367.14	23.86	8159.48	24.55	8188.31	24.7	8367.14	24.93	8188.31	24.87	8188.31	24.91	8188.31	25.09
8665.97	23.997	8458.31	24.69	8487.14	24.90	8665.97	25.06	8487.14	25.01	8487.14	25.05	8487.14	25.23
8964.79	24.12	8757.14	24.82	8785.97	25.02	8964.79	25.19	8785.97	25.15	8785.97	25.18	8785.97	25.36
9263.62	24.25	9055.96	24.94	9084.79	25.15	9263.62	25.31	9084.79	25.29	9084.79	25.32	9084.79	25.50
9562.45	24.37	9354.79	25.06	9383.62	25.27	9562.45	25.43	9383.6	25.43	9383.62	25.48	9383.62	25.62
9861.27	24.502	9653.62	25.18	9682.4	25.41	9861.27	25.55	9682.45	25.56	9682.45	25.58	9682.45	25.75
10160.1	24.62	9952.44	25.30	9981.27	25.53	10160.1	25.67	9981.27	25.69	9981.27	25.70	9981.27	25.87
10458.9	24.74	10251.2	25.41	10280.1	25.65	10458.9	25.79	10280.1	25.81	10280.1	25.83	10280.1	25.99
10757.7	24.85	10550.1	25.53	10578.9	25.78	10757.7	25.90	10578.9	25.94	10578.9	25.95	10578.9	26.11
11056.5	24.96	10848.9	25.64	10877.7	25.89	11056.5	26.02	10877.7	26.06	10877.7	26.08	10877.7	26.22
11355.4	25.07	11147.7	25.74	11176.5	26.0	11355.4	26.14	11176.5	26.18	11176.5	26.19	11176	26.32
11654.2	25.18	11446.5	25.85	11475.4	26.11	11654.2	26.25	11475.4	26.29	11475.4	26.31	11475.4	26.43
11953	25.28	11745.4	25.95	11774.2	26.21	11953.0	26.35	11774.2	26.40	11774.2	26.40	11774.2	26.52
12251.8	25.38	12044.2	26.05	12073	26.31	12251.8	26.46	12073.0	26.50	12073	26.50	12073.0	26.62
12550.7	25.47	12343.0	26.15	12371.8	26.41	12550.7	26.56	12371.8	26.59	12371.8	26.60	12371.8	26.71
12849.5	25.57	12641.8	26.24	12670.7	26.50	12849.5	26.66	12670.7	26.70	12670.7	26.68	12670.7	26.79
13148.3	25.66	12940.7	26.33	12969.5	26.58	13148.3	26.75	12969.5	26.79	12969.5	26.75	12969.5	26.87
13447.2	25.75	13239.5	26.40	13268.3	26.64	13447.2	26.85	13268.3	26.87	13268.3	26.83	13268.3	26.95
13746.0	25.83	13538.3	26.47	13567.2	26.70	13746	26.94	13567	26.96	13567	26.91	13567.2	27.02
14044.8	25.89	13837.1	26.53	13866	26.74	14044	27.01	13866	27.06	13866	27.00	13866	27.08
14343.6	25.96	14136	26.58	14164.8	26.78	14343.6	27.09	14164.8	27.15	14164.8	27.10	14164	27.15
14642.5	26.02	14434.8	26.64	14463.6	26.84	14642.5	27.17	14463.6	27.23	14463.6	27.19	14463.6	27.21
14941.3	26.09	14733.6	26.69	14762.5	26.93	14941.3	27.24	14762.5	27.25	14762.5	27.25	14762.5	27.28
15240.1	26.16	15032.5	26.74	15061.3	26.94	15240.1	27.32	15061	27.25	15061.3	27.25	15061.3	27.34
15240.1	25.96	15032.5	26.66	15061.3	26.83	15240.1	27.14	15061.3	27.20	15061.3	27.19	15061.3	27.18
14941	25.734	14733.6	26.42	14762.5	26.56	14941.3	26.79	14762.5	26.85	14762.5	26.79	14762.5	26.95
14642.5	25.50	14434.8	26.18	14463.6	26.35	14642.5	26.56	14463.6	26.63	14463.6	26.65	14463.6	26.71
14343.6	25.27	14136	25.94	14164.8	26.14	14343.6	26.36	14164.8	26.44	14164.8	26.47	14164.8	26.48
14044.8	25.04	13837.1	25.69	13866	25.92	14044.8	26.14	13866	26.23	13866	26.27	13866	26.25
13746	24.81	13538.3	25.45	13567.2	25.68	13746.0	25.93	13567.2	26.03	13567.2	26.04	13567.2	26.01
13447.2	24.58	13239.5	25.21	13268.3	25.45	13447.2	25.69	13268.3	25.82	13268.3	25.81	13268.3	25.78
13148.3	24.3	12940.7	24.96	12969.5	25.2	13148.3	25.47	12969.5	25.60	12969	25.58	12969.5	25.54
12849.5	24.12	12641.8	24.72	12670.7	24.9	12849.5	25.23	12670.7	25.37	12670.7	25.36	12670.7	25.29

ตารางที่ ก.5 แสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 200 °C (ต่อ)

E		P		E		P		E		P		E		P	
12550.7	23.87	12343	24.46	12371.8	24.73	12550.7	25.01	12371	25.14	12371.8	25.12	12371.8	25.04		
12251.8	23.6	12044.2	24.21	12073	24.48	12251.8	24.77	12073	24.92	12073	24.89	12073	24.78		
11953	23.35	11745.4	23.94	11774.2	24.23	11953	24.51	11774.2	24.65	11774.2	24.65	11774.2	24.50		
11654.2	23.06	11446.5	23.65	11475.4	23.95	11654.2	24.26	11475.4	24.40	11475.4	24.40	11475.4	24.21		
11355	22.76	11147.7	23.36	11176.5	23.67	11355.4	23.99	11176.5	24.13	11176.5	24.14	11176.5	23.8		
11056.5	22.42	10848.9	23.05	10877.7	23.37	11056.	23.69	10877.7	23.84	10877.7	23.86	10877.7	23.53		
10757.7	22.04	10550.1	22.70	10578.9	23.05	10757.7	23.39	10578.9	23.54	10578.9	23.56	10578.9	23.1		
10458.9	21.60	10251.2	22.31	10280.1	22.70	10458.9	23.05	10280.1	23.21	10280.1	23.23	10280.1	22.6		
10160.1	21.07	9952.44	21.86	9981.27	22.29	10160.1	22.68	9981.27	22.87	9981.27	22.88	9981.27	22.08		
9861.27	20.40	9653.62	21.25	9682.45	21.87	9861.27	22.27	9682.45	22.47	9682.45	22.49	9682.45	21.39		
9562.45	19.56	9354.79	20.56	9383.62	21.32	9562.45	21.71	9383.62	21.99	9383.62	22.04	9383.62	20.58		
9263.62	18.52	9055.96	19.77	9084.79	20.63	9263.62	21.07	9084.79	21.43	9084.7	21.51	9084.79	19.60		
8964.79	17.27	8757.14	18.71	8785.97	19.78	8964.79	20.12	8785.9	20.66	8785.97	20.77	8785.97	18.45		
8665.97	15.79	8458.31	17.40	8487.14	18.53	8665.97	19.12	8487.14	19.72	8487.14	19.78	8487.14	17.11		
8367.14	14.09	8159.48	15.90	8188.31	16.97	8367.14	17.29	8188.31	18	8188.31	18.24	8188.31	15.58		
8068.31	12.19	7860.66	14.19	7889.49	15.01	8068.31	15.55	7889.49	16.34	7889.49	16.44	7889.49	13.8		
7769.49	10.11	7561.83	12.25	7590.66	12.90	7769.49	13.34	7590.66	14.23	7590.66	14.31	7590.66	11.98		
7470.66	7.90	7263.00	10.03	7291.83	10.57	7470.66	10.99	7291.8	11.85	7291.83	11.85	7291.83	9.94		
7171.83	5.6	6964.18	7.75	6993.01	8.00	7171.83	8.585	6993.01	9.28	6993.01	9.26	6993.01	7.80		
6873.01	3.26	6665.35	5.47	6694.18	5.62	6873.01	6.238	6694.18	6.63	6694.18	6.82	6694.18	5.57		
6574.18	0.93	6366.52	2.999	6395.35	3.08	6574.18	3.73	6395.35	3.94	6395.35	3.873	6395.35	3.31		
5976.53	-3.48	5768.87	-1.679	5797.7	-1.77	5976.53	-1.366	5797.70	-1.337	5797.7	-1.470	5797.7	-1.143		
5677.70	-5.51	5470.04	-3.86	5498.87	-3.94	5677.7	-3.42	5498.8	-3.61	5498.8	-3.85	5498.8	-3.26		
5378.87	-7.37	5171.2	-5.9	5200.05	-6.09	5378.87	-5.63	5200.05	-6.06	5200.05	-6.24	5200	-5.26		
5080.05	-9.04	4872.39	-7.75	4901.22	-8.06	5080.05	-7.699	4901.22	-8.18	4901.22	-8.37	4901.2	-7.12		
4781.22	-10.53	4573.56	-9.426	4602.39	-9.84	4781.22	-9.665	4602.39	-10.08	4602.39	-10.28	4602.39	-8.83		
4482.39	-11.81	4274.7	-10.92	4303.57	-11.50	4482.39	-11.19	4303.57	-11.64	4303.57	-11.76	4303.57	-10.36		
4183.52	-12.92	3975.91	-12.21	4004.74	-12.79	4183.57	-12.78	4004.74	-13.08	4004.74	-13.16	4004.74	-11.73		
3884.74	-13.87	3677.08	-13.28	3705.91	-13.83	3884.74	-13.81	3705.91	-14.08	3705.91	-14.16	3705.91	-12.92		
3585.91	-14.67	3378.26	-14.21	3407.09	-14.66	3585.91	-14.76	3407.09	-14.87	3407.09	-14.94	3407.09	-13.96		
3287.09	-15.36	3079.43	-15.04	3108.26	-15.3	3287.09	-15.44	3108.26	-15.51	3108.26	-15.58	3108.26	-14.85		
2988.26	-15.97	2780.6	-15.67	2809.43	-15.95	2988.26	-16.06	2809.43	-16.11	2809.43	-16.14	2809.43	-15.61		
2689.43	-16.45	2481.78	-16.27	2510.61	-16.46	2689.43	-16.57	2510.61	-16.59	2510.61	-16.64	2510.61	-16.26		
2390.61	-16.90	2182.95	-16.76	2211.78	-16.91	2390.61	-17.05	2211.78	-17.04	2211.78	-17.07	2211.78	-16.82		
2091.78	-17.31	1884.12	-17.20	1912.95	-17.34	2091.78	-17.48	1912.95	-17.45	1912.95	-17.48	1912.95	-17.3		
1792.9	-17.69	1585.30	-17.60	1614.13	-17.73	1792.96	-17.87	1614.13	-17.85	1614.13	-17.86	1614.13	-17.74		
1494.13	-18.04	1286.47	-17.97	1315.30	-18.09	1494.13	-18.24	1315.3	-18.21	1315.30	-18.22	1315.3	-18.13		
1195.3	-18.37	987.64	-18.33	1016.47	-18.43	1195.3	-18.59	1016.4	-18.55	1016.47	-18.55	1016.4	-18.49		
896.479	-18.68	688.82	-18.65	717.65	-18.75	896.479	-18.93	717.652	-18.87	717.652	-18.88	717.65	-18.83		
597.65	-18.97	389.99	-18.97	418.825	-19.07	597.653	-19.24	418.825	-19.19	418.825	-19.19	418.82	-19.14		
298.82	-19.25	91.16	-19.26	119.9	-19.37	298.82	-19.54	119.9	-19.49	119.9	-19.49	119.9	-19.44		
1.7E-05	-19.52	-207.6	-19.55	-178.8	-19.65	-5E-05	-19.82	-178.8	-19.77	-178.8	-19.77	-178.8	-19.7		
-298.827	-19.78	-506.48	-19.82	-477.65	-19.93	-298.82	-20	-477.6	-20.14	-477.6	-20.15	-477.65	-19.99		
-597.653	-20.03	-805.31	-20.08	-776.4	-20.19	-597.65	-20.35	-776.48	-20.29	-776.4	-20.29	-776.4	-20.26		
-896.48	-20.26	-1104	-20.33	-1075.3	-20.44	-896.4	-20.60	-1075.3	-20.54	-1075.3	-20.55	-1075.3	-20.51		
-1195.31	-20.49	-1402.9	-20.57	-1374.1	-20.70	-1195.3	-20.85	-1374.1	-20.79	-1374.1	-20.79	-1374.1	-20.75		
-1494.13	-20.71	-1701.7	-20.81	-1672.9	-20.93	-1494.1	-21.07	-1672.9	-21.03	-1672.9	-21.02	-1672	-20.9		
-1792.96	-20.93	-2000	-21.03	-1971.7	-21.15	-1792.9	-21.30	-1971.7	-21.26	-1971.7	-21.26	-1971.7	-21.22		
-2091.79	-21.13	-2299.4	-21.25	-2270.6	-21.38	-2091.7	-21.52	-2270.6	-21.48	-2270.6	-21.48	-2270.6	-21.44		
-2390.61	-21.34	-2598	-21.46	-2569.4	-21.59	-2390.6	-21.73	-2569	-21.69	-2569.4	-21.69	-2569.4	-21.65		
-2689.44	-21.53	-2897.1	-21.66	-2868.2	-21.81	-2689.4	-21.94	-2868.2	-21.89	-2868	-21.91	-2868	-21.86		
-2988.27	-21.72	-3195.9	-21.86	-3167.0	-22.01	-2988.2	-22.14	-3167	-22.09	-3167	-22.11	-3167	-22.07		
-3287	-21.91	-3494.7	-22.04	-3465.9	-22.24	-3287.0	-22.34	-3465.9	-22.29	-3465.9	-22.31	-3465	-22.27		

ตารางที่ ก.5 แสดงค่าโพลาริเซชัน และสนามไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 200 °C (ต่อ)

E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P
-3585.92	-22.09	-3793.5	-22.22	-3764.7	-22.41	-3585.9	-22.53	-3764.7	-22.48	-3764.7	-22.5	-3764.7	-22.46
-3884.75	-22.26	-4092	-22.40	-4063.5	-22.60	-3884.7	-22.71	-4063.5	-22.66	-4063.5	-22.67	-4063.5	-22.65
-4183.57	-22.44	-4391.2	-22.57	-4362.4	-22.77	-4183.5	-22.88	-4362.4	-22.84	-4362.4	-22.84	-4362.4	-22.83
-4482.4	-22.60	-4690	-22.73	-4661.2	-22.95	-4482.4	-23.05	-4661.2	-23.00	-4661.2	-23.02	-4661.2	-23.01
-4781.23	-22.77	-4988.8	-22.90	-4960	-23.12	-4781.2	-23.22	-4960	-23.18	-4960	-23.19	-4960	-23.18
-5080.05	-22.93	-5287.7	-23.06	-5258.8	-23.28	-5080	-23.39	-5258.8	-23.35	-5258.8	-23.35	-5258.8	-23.35
-5378.88	-23.08	-5586.5	-23.21	-5557.7	-23.44	-5378.8	-23.56	-5557.7	-23.51	-5557.7	-23.51	-5557.7	-23.52
-5677.71	-23.23	-5885.3	-23.37	-5856.5	-23.59	-5677.7	-23.73	-5856.5	-23.6	-5856.5	-23.68	-5856.5	-23.68
-5976.53	-23.38	-6184.1	-23.52	-6155.3	-23.75	-5976.5	-23.88	-6155.3	-23.84	-6155.3	-23.84	-6155.3	-23.84
-6275.36	-23.53	-6483	-23.67	-6454.1	-23.90	-6275.3	-24.05	-6454.1	-24.00	-6454.1	-23.99	-6454.1	-24.00
-6574.18	-23.68	-6781.8	-23.83	-6753	-24.04	-6574.1	-24.20	-6753.0	-24.16	-6753	-24.15	-6753	-24.15
-6873.01	-23.82	-7080.6	-23.98	-7051	-24.19	-6873	-24.34	-7051.8	-24.31	-7051.8	-24.30	-7051.8	-24.30
-7171.84	-23.96	-7379.4	-24.13	-7350.6	-24.34	-7171.8	-24.49	-7350.6	-24.47	-7350.6	-24.45	-7350.6	-24.45
-7470.66	-24.09	-7678.3	-24.2	-7649.4	-24.48	-7470.6	-24.63	-7649.4	-24.62	-7649.4	-24.6	-7649.4	-24.59
-7769.49	-24.23	-7977.1	-24.42	-7948.3	-24.62	-7769.4	-24.7	-7948.3	-24.77	-7948.3	-24.74	-7948	-24.73
-8068.32	-24.36	-8275.9	-24.56	-8247.1	-24.76	-8068.3	-24.91	-8247.1	-24.92	-8247.1	-24.90	-8247.1	-24.87
-8665.97	-24.62	-8873.6	-24.83	-8844.8	-25.02	-8665	-25.18	-8844.8	-25.18	-8844.8	-25.19	-8844.8	-25.14
-8964.8	-24.74	-9172.4	-24.96	-9143.6	-25.14	-8964.8	-25.31	-9143.6	-25.30	-9143.6	-25.33	-9143.6	-25.26
-9263.62	-24.86	-9471.2	-25.08	-9442.4	-25.2	-9263.6	-25.43	-9442.4	-25.41	-9442.4	-25.46	-9442.4	-25.38
-9562.45	-24.98	-9770.1	-25.20	-9741.2	-25.41	-9562.4	-25.53	-9741.2	-25.53	-9741.2	-25.57	-9741	-25.50
-9861.28	-25.09	-10068	-25.31	-10040	-25.52	-9861.2	-25.63	-10040	-25.65	-10040	-25.68	-10040	-25.62
-10160.1	-25.20	-10367	-25.42	-10338	-25.62	-10160	-25.74	-10338	-25.76	-10338	-25.79	-10338	-25.73
-10458	-25.3	-10666	-25.52	-10637	-25.72	-10458	-25.84	-10637	-25.88	-10637	-25.9	-10637	-25.84
-10757.8	-25.4	-10965	-25.62	-10936	-25.80	-10757	-25.94	-10936	-26.00	-10936	-25.98	-10936	-25.94
-11056	-25.52	-11264	-25.71	-11235	-25.90	-11056	-26.05	-11235	-26.1	-11235	-26.09	-11235	-26.04
-11355.4	-25.62	-11563	-25.8	-11534	-25.98	-11355	-26.14	-11534	-26.21	-11534	-26.18	-11534	-26.14
-11654.2	-25.71	-11861	-25.88	-11833	-26.08	-11654	-26.24	-11833	-26.30	-11833	-26.28	-11833	-26.24
-11953.1	-25.80	-12160	-25.95	-12131	-26.17	-11953	-26.32	-12131	-26.41	-12131	-26.39	-12131	-26.33
-12251.9	-25.88	-12459	-26.04	-12430	-26.25	-12251	-26.43	-12430	-26.52	-12430	-26.47	-12430	-26.43
-12550.7	-25.95	-12758	-26.1	-12729	-26.33	-12550	-26.53	-12729	-26.63	-12729	-26.56	-12729	-26.52
-12849.5	-26.03	-13057	-26.19	-13028	-26.42	-12849	-26.65	-13028	-26.76	-13028	-26.67	-13028	-26.60
-13148.4	-26.09	-13356	-26.27	-13327	-26.53	-13148	-26.74	-13327	-26.86	-13327	-26.79	-13327	-26.69
-13447	-26.15	-13654	-26.35	-13626	-26.64	-13447	-26.83	-13626	-26.95	-13626	-26.89	-13626	-26.77
-13746	-26.21	-13953	-26.4	-13924	-26.72	-13746	-26.90	-13924	-27.09	-13924	-27.16	-13924	-26.85
-14044.8	-26.27	-14252	-26.52	-14223	-26.79	-14044	-27.12	-14223	-27.20	-14223	-27.17	-14223	-26.94
-14343	-26.34	-14551	-26.60	-14522	-26.82	-14343	-27.04	-14522	-27.17	-14522	-27.18	-14522	-27.02
-14642.5	-26.40	-14850	-26.68	-14821	-26.86	-14642	-26.95	-14821	-27.17	-14821	-27.18	-14821	-27.10

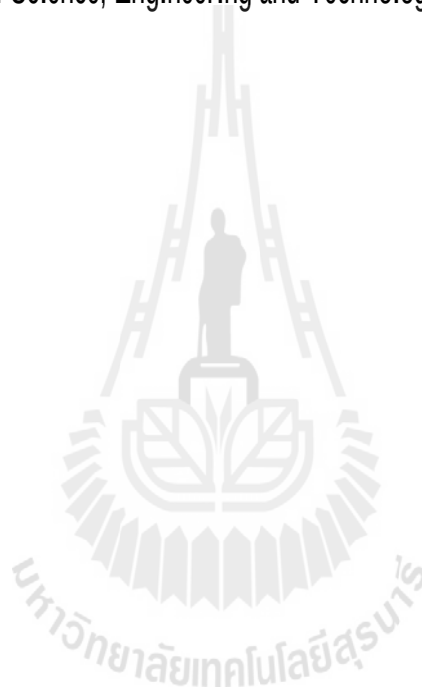


ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Kampoosiri, S., Pojprapai, S., Yimnirun, R., and Marungsri, B. (2012). **Effect of Electric Field Amplitude on Electrical Fatigue Behavior of Lead Zirconate Titanate Ceramic**. Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology. 72: 761-765.



Effect of Electric Field Amplitude on Electrical Fatigue Behavior of Lead ZirconateTitanate Ceramic

S.Kampoosiri, S. Pojprapai, R. Yimnirun and B. Marungsri*

Abstract—Fatigue behaviors of Lead ZirconateTitanate (PZT) ceramics under different amplitude of bipolar electrical loads have been investigated. Fatigue behavior is represented by the change of hysteresis loops and remnant polarization. Three levels of electrical load amplitudes (1.00, 1.25 and 1.50 kV/mm) were applied in this experimental. It was found that the remnant polarization decreased significantly with the number of loading cycles. The degree of fatigue degradation depends on the amplitude of electric field. The higher amplitude exhibits the greater fatigue degradation.

Keywords—Lead ZirconateTitanate (PZT), hysteresis loop, Sawyer-Tower circuit, fatigue, polarization

I. INTRODUCTION

Ferroelectric material has been used for widely different types of industrial electronics; for example, capacitor, and thermistor used for temperature control in car, sensor and actuator used in the manufacture of electronic devices which require high resolution, and transducer used to detect fish in the sea etc [1]. The main materials for these devices are ferroelectric ceramics with good piezoelectric properties. For instance, Lead ZirconateTitanate (PZT) that can convert mechanical energy into electrical energy (direct piezoelectric effect) and electrical energy into mechanical energy (converse piezoelectric effect). The performances of these electronic equipments are up to the performance of piezoelectric ceramic materials. In practice, PZT will take electrical or mechanical loads for many cycles (cyclic loads) which bring it to the fatigue from changing the polarity. In the event of an electrical load, this is called the electrical fatigue or polarization fatigue. The electrical fatigue endurance is important to performance and lifetime of the ferroelectric material.

A. Polarization

Basically, the dielectric material molecule composed of atoms that are held together by ionic bonds, when feed the electric field for these materials. The positive and negative ions in the unit cell separated from each other called

polarization. For PZT ceramic, polarization in unit cell of crystal structure can arrange in the direction of the external electric field polarity. As illustrated in Fig. 1, the ability to arrange of polarization under an electric field is a parameter that indicates the conditions ferroelectric. If the ability to arrange of polarization due to an external electric field is reduced, ferroelectric materials will result in deterioration. Reduction of polarization indicates that PZT ceramic unable to show the properties of piezoelectric. Generally, the ability to arrange of polarization may be indicating by the nature of hysteresis loop.

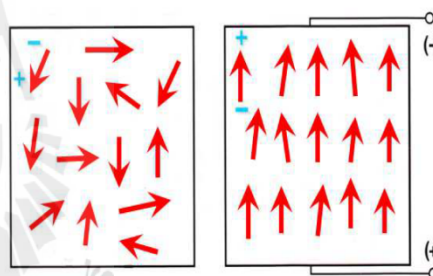


Fig. 1 Polarization direction by the electric field.

B. Hysteresis Loop

In case of ferromagnetic material, hysteresis loop shows the relationship between magnetization loop and magnetic field. For ferroelectric ceramic, hysteresis loop shows the relationship between the polarization and electric field, as illustrated in Fig. 2. The most important characteristic of ferroelectric materials is polarization reversal (or switching) by an electric field. The emergence of the hysteresis loop can be described as follows; when an alternating electric field is low, polarization will be linear increasing by size of field (range A-B). And when the electric field increases with the polarization direction, it will start reversing the electric field (range B-C) the polarization response in this range is very non-linear (range D-C). And when all polarization arranges to new direction (point C), when reduced an electric field some polarization will returns to the same direction but electric field position is zero (point E) polarization is not zero. So, if give the polarization run out the electric field must be reversing (point F). And when electric field increased to the opposite

S.Kampoosiri master degree student with Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, THAILAND

S. Pojprapai is with Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, THAILAND

R.Yimnirun is with Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, THAILAND

* B. Marungsri is with Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, THAILAND (corresponding author, phone: +66 44224366; fax: +66 4422 4601; e-mail: bmshvee@ sut.ac.th).

direction, the new polarization will arranged to new direction before point (point G). Later, when reversing the field again, it is the complete of the trial. The polarization when electric field is zero (point E) is called the remanent polarization, P_r . The electric field is used to reduce the polarization to return to the zero is called coercive field, E_c .

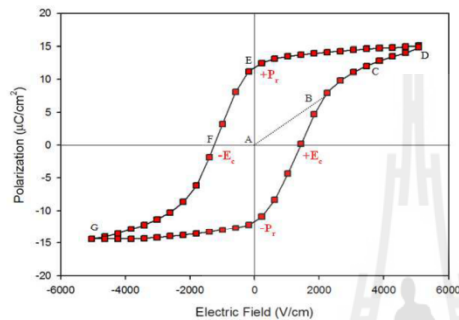


Fig. 2 Sample hysteresis loop of BaTiO₃ material.

C. Ferroelectric Fatigue

In the study, ferroelectric fatigue can be found from hysteresis loop. When a fatigue occurs, the size of the hysteresis loop and the remanent polarization will be reduced when increase cycle of electrical field, as illustrated in Fig. 3. Intensity of different fatigue caused by other variables such as electric field, frequency and temperature [2-6]. However, the trial was limited by the frequency parameter and constant temperature while changing the size of the electric field.

This research demonstrates the influence of the electric field on the fatigue behavior of the electrical polarity of the ferroelectric material, material, which tested by electrical fatigue test machine.

II. TEST METHOD

Un-polling PZT ceramic manufactured by Thales Underwater Systems (Australia) Company was used as test specimen in this study. Then, PZT ceramic was cut to disc shape with 10 mm's diameter and 1 mm's thick. Before the experimental, two silver plates were attached to two sides of specimen before polling. For polling, electric field 1.7 kV/mm was applied to specimen for 30 min. at 120 °C.

Hysteresis loop of PZT ceramic material was measured by using Sawyer-Tower circuit [7], as shown in Fig. 4(a) and Fig. 4(b).

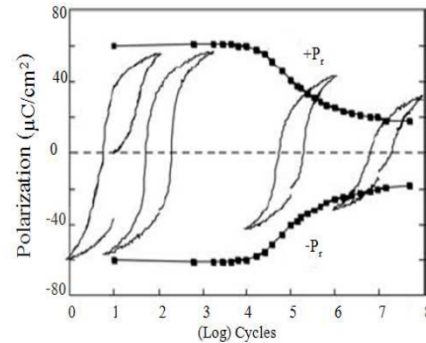
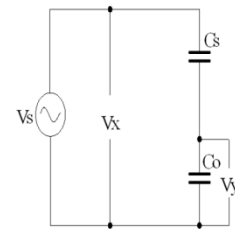
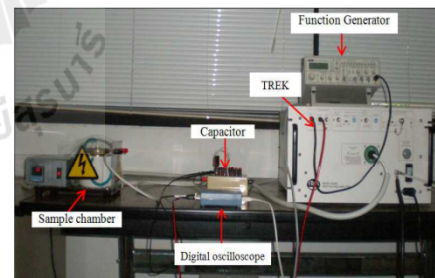


Fig. 3 Sample fatigue in PZT ceramic [8].



(a) Sawyer-Tower circuit diagram ($C_0 = 1 \mu\text{F}$, $C_s = \text{sample}$; $C_0 \gg C_s$)



(b) Sawyer-Tower circuit layout
Fig. 4 Experimental setup for this study.

As illustrated in Fig. 4(a), V_x is horizontal input signal and V_y is vertical input signal to oscilloscope. As seen from Sawyer-Tower diagram, horizontal axis of hysteresis loop on screen instead of the voltage drop across supply and vertical axis instead of voltage across capacitor (C_0) which varied with the electric charge that occurs on the ceramic PZT (C_s) by that the polarization function is the number of charge per area unit. That can be written as the following equation.

$$P_{\text{sample}} = Q_s/A \quad (1)$$

where:

P_{sample} is the polarization of PZT ceramic.
 Q_s is the cumulative of PZT ceramic charge.
 A is the cross-sectional area of PZT ceramic.

Similarly, the polarization can be written

$$P_{\text{sample}} = C_0 V_s/A \quad (2)$$

where:

C_0 is the standard capacity of the capacitor.
 V_s is voltage drop across a standard capacitor.

The electric field at the input to the PZT ceramic can be written as follows

$$E = V_s/d \quad (3)$$

where:

E is the electric field at input to PZT ceramic.
 V_s is the supply voltage drop.
 d is the thickness of PZT ceramic.

For study of fatigue from changing polarity of the PZT ceramic, specimen was placed between the electrode tip - flat plane, as shown in Fig. 5. During test, specimen was immersed in silicone oil to prevent surface discharge.

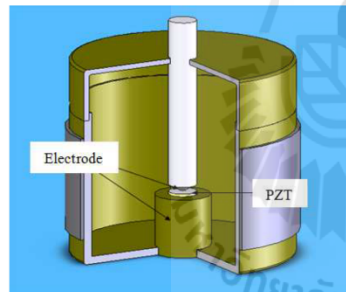


Fig. 5 Testing chamber.

The testing process can be written as follows.

- Installing specimen in testing chamber.
- Applying the electric field with frequency 10 Hz to specimen in testing chamber at room temperature. Three levels of the electric field (1, 1.25 and 1.50 kV/mm.) were used.
- In each test, the cycles of applying electric field are 1×10^3 , 5×10^3 , 1×10^4 , 5×10^4 , 1×10^5 , 5×10^5 and 1×10^6 cycles, respectively.
- Recording the hysteresis loop.
- Calculating the electric field and polarization on each of the test.

III. TEST RESULTS AND DISCUSSIONS

The effects of electric field to fatigue from changing in polarization of PZT material have been studied.

From the experimental results, hysteresis loops of each electrical load having same frequency and cycle are illustrated in Fig. 6, Fig. 7 and Fig. 8, respectively. As seen from the results, size of hysteresis loop depends on magnitude and cycle of electric field stress. Furthermore, size of hysteresis loop decreases with increasing in electric load cycle. As seen in Fig. 6, Fig. 7 and Fig. 8, rapidly decrease of hysteresis loop can be seen after 5×10^4 cycles. However, slowly decrease of hysteresis loop can be seen after 5×10^5 .

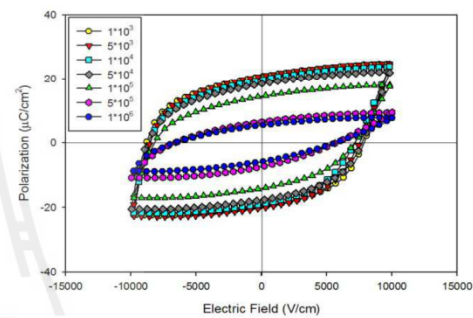


Fig. 6 Hysteresis loop with difference cycles.
(Electric field stress 1kV/mm)

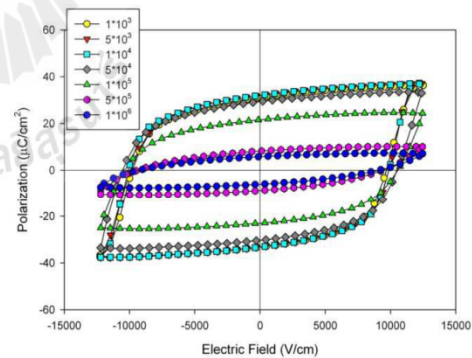


Fig. 7 Hysteresis loop with difference cycles.
(Electric field stress 1.25 kV/mm)

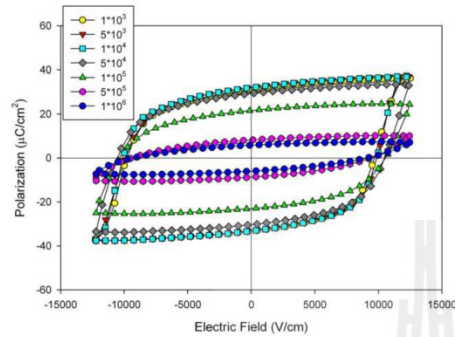


Fig. 8 Hysteresis loop with difference cycles.
(Electric field stress 1kV/mm)

As shown in Fig.9 and 10, the remnant polarization and coercive field which are derived from the hysteresis loop. As seen in Fig. 9, larger reduction in remnant polarization at 1.25 and 1.5 kV/mm can be seen when increasing electric stress cycles. In case of electric field 1.5 kV/mm, reduction in remnant polarization is 81.76 %. While reduction in remnant polarization of electric field 1 and 1.25 kV/mm are 69.85 and 78.91 %, respectively. As seen from the results, at the beginning, the remnant polarization of the electric field 1.5 kV/mm is more than the other two electric field stresses (1 and 1.25 kV/mm). However, faster reduction in remnant polarization at the electric field 1.5 kV/mm can be seen when comparing with the other two electric field stresses. In case of coercive field, as shown in Fig. 10, slightly increasing can be seen from the beginning but decreasing when increasing electric field stress cycle.

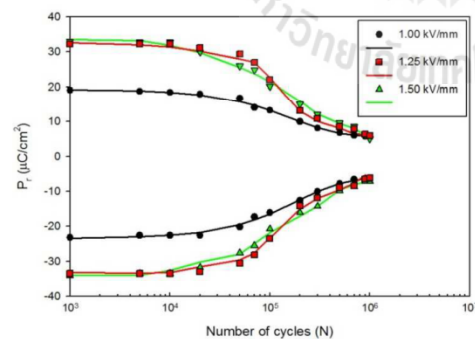


Fig. 9 Remnant polarization under different electrical field (Solid lines are the values obtained from experimental and dots are obtained from equation 4)

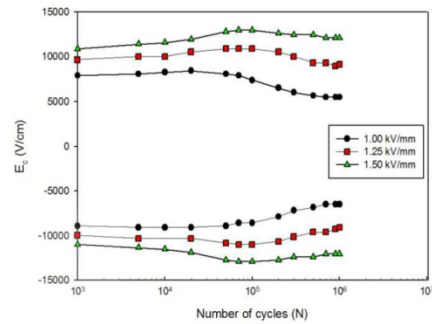


Fig. 10 Coercive field under difference electric field

This may be due in the first domain that can move as well when an electric field is increased. When numbers of cycles are increased, some domains unmovable because it was pinned by charged defects or oxygen vacancy [9-10]. This phenomenon is called domain pinning effect. Resulted polarization or domain in the PZT material unable to change direction as the same direction of the electric field and the domain wall can't move well. So, the remanent polarization is reduced.

As shown in Fig.11, the model reduced the number of domains that can reverse direction as the electric field. The first is that during period 1×10^4 to 5×10^4 domain still moving well because a result of fixation of the domain walls is minimal. When number of cycles increased to the range 5×10^4 to 2×10^5 some domains unmovable, resulting in the remnant polarization decreased rapidly. The coercive field values, which reflect the energy which system use to reversing direction of the domain are more valuable. But when it comes to the other one is cycle 2×10^5 to 1×10^6 , the reduction of the remanent polarization is reduced slowly and almost constant because the reversing domain's value is reduced. From the model in Fig.11, increasing rate of the pinned domain has gone down. This could result in the coercive field is slowly reduced and almost constant too.

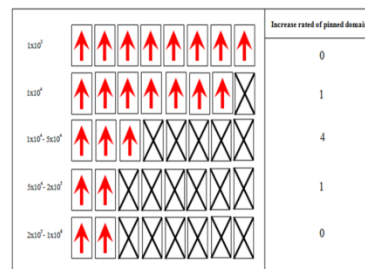


Fig. 11 Model of proportion domains that reversible direction (replaced by $\blacktriangle$) and irreversible domain effected of pinned domain (replaced by $\blacktriangle$)

The reduction of the remnant polarization is based on the form of logarithmic fatigue. It can be written as the following equation.

$$P_N = P_0 - A \ln(N+B) \quad (4)$$

Where

A, B is constant value

P_0 is the initial polarization.

N is the electric field's cycle.

The parameters A and B , at electric field values can be displayed in Table I. This study suggests that at electric field 1.50 kV/mm, the remnant polarization is rapidly decreased compared to the electric field 1 and 1.25 kV/mm. Resulting fatigue from a change in polarity is increased. Number of domains that can reverse direction can be decreased resulting in value of remanent polarization is reduced.

TABLE I
REDUCTION OF THE REMNANT POLARIZATION PARAMETER AT THE DIFFERENT
ELECTRIC FIELD

Electric Field (kV/mm)	P_0	A	B
1.00	59.707	-79.219	3.96
1.25	100.4	-98	6.81
1.50	110.08	-110.136	7.57

IV. CONCLUSION

Effects of electric field amplitude on electrical fatigue behavior of PZT Ceramic have been studied. The following conclusions are given.

(1) Larger reduction in remnant polarization can be seen in case of electric field stress 1.5 kV/mm when comparing with the other two electric field stresses (1 and 1.25 kV/mm). This may be due to the electric field is increased a result of the pinned domain wall will be more valuable as well. Number of domains that can reverse direction will be greatly reduced; resulting in the remanent polarization is reduced rapidly.

(2) The degree of fatigue degradation depends on the amplitude of electric field.

(3) The higher amplitude exhibits the greater fatigue degradation.

ACKNOWLEDGMENT

The Author would like to thank you Suranaree University of for kind financial support.

REFERENCES

- [1] G. H. Haertling, "Ferroelectric ceramics history and technology", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 82, 1999, pp. 797-818.
- [2] R. Qian, S. Lukasiewicz and Q. Gao, "Electrical fatigue response for ferroelectric ceramic under electrical cyclic load", *Solid-State Electronics*, Vol. 44, 2000, pp. 1717-1722.

- [3] X. J. Lou and J. Wang, "Bipolar and unipolar electrical fatigue in ferroelectric lead zirconate titanate thin films: An experimental comparison study", *Physical Review*, Vol. 24, 2010, pp. 104-108.
- [4] N. Balke, H. Kungl, T. Granzow and D. C. Lupascu, "Bipolar fatigue caused by field screening in $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ ceramics", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 90, No. 12, 2007, pp. 3869-3874.
- [5] Y. Wang, K. H. Wong and C. L. Choy, "Fatigue problems in ferroelectric thin films", *Physical Review*, Vol. 191, No. 2, 2002, pp. 482-488.
- [6] S. Pojprapai, J. Russell, J. E. Daniels, M. Hoffman, "Frequency effects on fatigue crack growth and growth-tip domain switching behavior in a lead zirconate titanate ceramic", *Acta Materialia*, Vol. 54, No. 11, 2007, pp. 3075-3083.
- [7] C. B. Sawyer and C. H. Tower, "Rochelle salt as a dielectric", *Physical Review*, Vol. 35, 1930, pp. 269-273.
- [8] D. Damjanovic, "Ferroelectric dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films", *Reports on Progress in Physics*, Vol. 61, 1998, pp. 1267.
- [9] C. Brennan, "Model of ferroelectric fatigue due to defect/domain interaction", *Department of chemistry*, Vol. 150, 1998, pp. 199-208.
- [10] C. H. Park and D. J. Chadi, "Microscopic study of oxygen-vacancy defect in ferroelectric perovskites", *Physical Review*, Vol. 57, No. 22, 1997, pp. 13961-13964.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวศิริรัตน์ คำภูศิริ เกิดเมื่อวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ. 2525 ที่อำเภอศรีสงคราม จังหวัดนครพนม เริ่มศึกษาระดับอนุบาลถึงประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านปากอูน (ปากอูนผดุงวิทย) อำเภอศรีสงคราม จังหวัดนครพนม และสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร ในปี พ.ศ. 2542 ในภายหลังได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2548 จากนั้นจึงได้ศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตในกลุ่มวิจัยไฟฟ้ากำลังและพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยระหว่างศึกษาระดับปริญญาโทมีประสบการณ์สอนเป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า (2) ปฏิบัติการจักรกลไฟฟ้า 1 และ (3) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง และวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยได้นำประสบการณ์ และความรู้ที่ได้จากการเป็นผู้ช่วยสอน และวิจัยมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี จากการทำวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และความเข้าใจทางด้านพฤติกรรมความล้มเนื่องจากการเปลี่ยนขั้วทางไฟฟ้าของเซรามิก PZT โดยมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ข.