

ผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนต่อการเสื่อมอายุของเซรามิก
เลดเซอร์โคเนตไททาเนต



นายอัศวิน พิษทองกลาง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

**THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON AGING
OF LEAD ZIRCONATE TITANATE CERAMIC**

Asawin Phuetthonglang



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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2013

ผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนต่อการเสื่อมอายุของเซรามิก
เลดเซอร์โคเนตไททานเนต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.สุดเขตต์ พจน์ประไพ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.รัตติกกร ยี่มนิรัฐ)

กรรมการ

(อ. ดร.นิมิต ชมนาวัง)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อัศวิน พืชทองกลาง : ผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนต่อการเสื่อมอายุของ
เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (THE EFFECT OF HEAT TREATMENT
ON AGING OF LEAD ZIRCONATE TITANATE CERAMIC) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี, 178 หน้า

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนต่อการเสื่อมอายุของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) โดยทำการทดสอบการเสื่อมอายุเซรามิก PZT 2 ชนิด คือเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard โดยการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30% 40% 50% 60% 70% และ 80% ของอุณหภูมิคูรี (T_C) นาน 10 นาที ในแต่ละอุณหภูมิ ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) และค่าปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้า (k) โดยพฤติกรรมการเสื่อมอายุสามารถแสดงให้เห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่า d_{33} และ k ของเซรามิก PZT จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อทำการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่า d_{33} และ k ลดลงมากขึ้นส่งผลให้เกิดการเสื่อมอายุมากขึ้นตามไปด้วย การลดลงของค่า d_{33} และ k ที่ส่งผลต่อการเสื่อมอายุจะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อทำการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50% ของ T_C ขึ้นไป และการอบความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าเซรามิก PZT แบบ Soft มีอัตราการเสื่อมอายุเร็วกว่าแบบ Hard ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้หาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์มาอธิบายการเสื่อมอายุ จากผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีเซรามิก PZT เป็นส่วนประกอบได้

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

ASAWIN PHUETTHONGLANG : THE EFFECT OF HEAT TREATMENT
ON AGING OF LEAD ZIRCONATE TITANATE CERAMIC.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. BOONRUANG MARUNGSRI, D.Eng.,
178 PP.

AGING/ HEAT TREATMENT TEMPERATURE/CURIE TEMPERATURE

This thesis reports the effect of heat treatment on the aging of lead zirconate titanate (PZT). Two types of PZT specimens (soft PZT and hard PZT) were heated at 30% 40% 50% 60% 70% and 80% of Curie temperature (T_C) of the samples for 10 minute. After heating, the piezoelectric coefficient (d_{33}) and the coupling factor (k) were measured. The aging behavior was indicated by the decrease of d_{33} and k . The results show that the degree of aging of piezoelectric properties increased with increasing heat treatment temperature. The aging was more pronounced when the heat treatment temperature was greater than 50% of T_C . It was found that at the same heat treatment temperature, the aging rate of soft PZT specimens increased faster than that of hard PZT specimens. This work also proposes a mathematical model to explain the relationship between heat treatment temperature and aging behavior of PZT. These results could be applied to predict the aging rate of PZT components in electronic devices.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

Co-Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย และให้ความรู้ด้านวิชาการมาโดยตลอด รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งเป็นแบบอย่างที่ดีในทุก ๆ ด้านให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดเขตต์ พจน์ประไพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และช่วยเหลือผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกร ยัมนิรัญ อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความรู้ทางด้านการวิจัยอย่างดียิ่ง

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า อย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน และขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ได้ให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณนายประสิทธิ์ พิษทองกลาง ผู้เป็นบิดา และนางปรานอม พิษทองกลาง ผู้เป็นมารดา ที่ให้ความรัก ความห่วงใย เป็นกำลังใจ อบรมเลี้ยงดู และให้การส่งเสริมสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

อัศวิน พิษทองกลาง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	จ
บทที่	

1	บทนำ	1
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
1.3	ข้อตกลงเบื้องต้น	2
1.4	ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6	การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	3
2	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1	วัสดุอิเล็กทรอนิกส์เซรามิก.....	6
2.2	เพียโซอิเล็กทรอนิกส์.....	6
2.3	วัสดุเซรามิกเฟอร์ไรต์อิเล็กทรอนิกส์	9
2.3.1	อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟสในวัสดุเซรามิกเฟอร์ไรต์อิเล็กทรอนิกส์	10
2.3.2	โพลาไรเซชัน.....	10
2.3.3	โดเมนเฟอร์ไรต์อิเล็กทรอนิกส์	13
2.3.4	วัสดุเซรามิกเฟอร์ไรต์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดเลดเซอร์โคเนตไททานเต.....	15
2.3.5	การทำให้เกิดสภาพขั้วหรือการโพด	22
2.3.6	ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทรอนิกส์ในวัสดุเซรามิกเฟอร์ไรต์อิเล็กทรอนิกส์.....	23
2.3.7	สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทรอนิกส์.....	27

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.8	ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้า	29
2.3.9	ปัจจัยคุณภาพทางกล	33
2.3.10	ปัจจัยคุณภาพทางไดอิเล็กทริก	33
2.3.11	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์	33
2.3.12	ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก	36
2.3.13	การเสื่อมอายุ	36
2.3.14	การนำวัสดุเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานเตใช้เป็นตัวจับร้าวแบบไมโคร ในหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	36
2.4	ปริทัศน์วรรณกรรม	38
3	วิธีดำเนินการวิจัย	42
3.1	การติดตั้งระบบการวัดค่าอิมพีแดนซ์	42
3.1.1	ตัวจับยึดชิ้นงาน	43
3.1.2	ชุดกล่องเชื่อมต่อสัญญาณ	44
3.1.3	เครื่อง Impedance/gain-phase analyzer และ โปรแกรม ZPlot-Impedance ZView-Impedance	45
3.1.4	คอมพิวเตอร์และจอแสดงผล	47
3.2	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและวิธีการทดสอบ	48
3.2.1	ชิ้นงานที่ใช้สำหรับทดสอบ	49
3.2.2	การขัดชิ้นงาน	49
3.2.3	การล้างชิ้นงาน	50
3.2.4	การเผาไล่ความชื้นและสลายสภาพการมีขั้วตกค้าง	51
3.2.5	การทำอิเล็กโทรด	52
3.2.6	การเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วไฟฟ้า	53
3.2.7	การตรวจสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริก	54
3.2.7.1	การตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก	54
3.2.7.2	การวัดค่าความถี่ประจุและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์	55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.7.3	การตรวจสอบค่าปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้า.....	55
3.2.7.4	การอบด้วยความร้อนเพื่อศึกษาผลกระทบทางความร้อน.....	57
3.9	สรุป	58
4	ผลการทดลองและอภิปรายผล	60
4.1	ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของ วัสดุเซรามิก PZT ก่อนและหลังการอบความร้อน	61
4.1.1	วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft.....	61
4.1.2	วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard	66
4.2	ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและเวลาหลังอบ ด้วยความร้อนแต่ละอุณหภูมิ	71
4.2.1	วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft.....	71
4.2.1.1	สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก	71
4.2.1.2	ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบ	73
4.2.1.3	ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนา.....	76
4.2.2	วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard	78
4.2.2.1	สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก	78
4.2.2.2	ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบ	80
4.2.2.3	ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนา.....	82
4.3	แบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างสมบัติเพียโซอิเล็กทริก และเวลาหลังการอบด้วยความร้อนแต่ละอุณหภูมิ	84
4.3.1	วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft.....	85
4.3.1.1	สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก	85
4.3.1.2	ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบ	90
4.3.1.3	ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนา.....	96
4.3.1.4	การทำนายพฤติกรรมการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์ เพียโซอิเล็กทริก	102

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1.5 การทำนายพฤติกรรมการเสื่อมอายุของปียัจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบ	105
4.3.1.6 การทำนายพฤติกรรมการเสื่อมอายุของปียัจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนา.....	107
4.3.2 วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard	109
4.3.2.1 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก	109
4.3.2.2 ปียัจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบ	115
4.3.2.3 ปียัจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนา.....	121
4.3.2.4 การทำนายพฤติกรรมการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก	127
4.3.2.5 การทำนายพฤติกรรมการเสื่อมอายุของปียัจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบ	130
4.3.2.6 การทำนายพฤติกรรมการเสื่อมอายุของปียัจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนา.....	132
4.4 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard หลังการอบด้วยความร้อนแต่ละอุณหภูมิ	134
4.5 สรุป	142
5 สรุปและข้อเสนอแนะ	143
5.1 สรุป	143
5.1 ข้อเสนอแนะ	145
รายการอ้างอิง	146
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เมื่ออบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน	148
ภาคผนวก ข. สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard เมื่ออบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน	158

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	168
ประวัติผู้เขียน	178



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard 20
2.2	ลักษณะสมบัติของวัสดุเซรามิก PZT ที่ใช้ในอุตสาหกรรม 21
2.3	สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของเฟอร์โรอิเล็กทริกวัสดุเซรามิกบางชนิด 28
4.1	อัตราการลดลงของสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft 61
4.2	อัตราการลดลงของสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard 66
4.3	พารามิเตอร์ของสมการการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบ สัมพัทธ์ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ 72
4.4	พารามิเตอร์ของสมการการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบ สัมพัทธ์ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ 75
4.5	พารามิเตอร์ของสมการการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบ สัมพัทธ์ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ 77
4.6	พารามิเตอร์ของสมการการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบ สัมพัทธ์ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ 80
4.7	พารามิเตอร์ของสมการการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบ สัมพัทธ์ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ 82
4.8	พารามิเตอร์ของสมการการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบ สัมพัทธ์ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ 84
4.9	พารามิเตอร์ของสมการสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ 88
4.10	สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ 89
4.11	พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ 94

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ	95
4.13 พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาในเชิงเวลาของ วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ	100
4.14 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ	101
4.15 พารามิเตอร์ของสมการสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง	103
4.16 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง	103
4.17 พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง	105
4.18 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง	106
4.19 พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาในเชิงเวลาของ วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง	107
4.20 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง	108
4.21 พารามิเตอร์ของสมการสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ	113
4.22 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ	114
4.23 พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ	119
4.24 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ	120

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.25 พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาในเชิงเวลาของ วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ.....	125
4.26 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ	126
4.27 พารามิเตอร์ของสมการสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง	128
4.28 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง	128
4.29 พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง	130
4.30 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง	131
4.31 พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาในเชิงเวลาของ วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง	132
4.32 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง	133
ก.1 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 108 °C.....	149
ก.2 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 144 °C.....	149
ก.3 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C.....	150
ก.4 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 216 °C.....	150
ก.5 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 252 °C.....	151
ก.6 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 288 °C.....	151
ก.7 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 108 °C.....	152
ก.8 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 144 °C.....	152
ก.9 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C.....	153
ก.10 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 216 °C.....	153

สารบัญตาราง (ต่อ)

[illegible]

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

2.1	การจำแนกกลุ่มของวัสดุจำพวกอิเล็กทรอนิกส์เซรามิกโดยใช้สมมาตรของผลึก	8
2.2	ไดโพลโมเมนต์เนื่องจากคู่ของประจุบวก (+ q) และลบ (- q) ที่มีระยะห่างเท่ากับ a	10
2.3	การเกิดไดโพลโมเมนต์ทั้ง 5 แบบ (a) อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชัน (b) อะตอมมิก หรือ ไอออนิกโพลาไรเซชัน (c) ไดโพล หรือ ออเรียนเตชันนอลโพลาไรเซชัน (d) โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเอง (e) อินเตอร์เฟส หรือ โพลาไรเซชันจากประจุค้าง	12
2.4	โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ ABO_3 สำหรับ $PbTiO_3$	14
2.5	การเกิดของผนังโดเมน เฟร์โรอิเล็กทริก แบบ 90° และ 180°	15
2.6	โครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ของเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต.....	16
2.7	เฟสไดอะแกรมของระบบ $PbZrO_3 - PbTiO_3$	17
2.8	ค่าปัจจัยคู่ควบเพียโซอิเล็กทริกและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก บริเวณ Morphotropic Phase Boundary	17
2.9	การเจือสารตัวให้ในโครงสร้างผลึกของวัสดุเซรามิก PZT	19
2.10	การเจือสารตัวรับในโครงสร้างผลึกของวัสดุเซรามิก PZT	20
2.11	(a) ทิศทางการจัดเรียงตัวของโดเมนก่อนทำให้เกิดสภาพขั้ว (b) ทิศทางการจัดเรียงตัวของโดเมนขณะการทำให้เกิดสภาพขั้ว (c) ทิศทางการจัดเรียงตัวของโดเมนหลังการทำให้เกิดสภาพขั้ว	22
2.12	ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (a) ปรากฏการณ์ตรง และ (b) ปรากฏการณ์ย้อนกลับ	24
2.13	(a) วงวนฮิสเทอรีซิส (b) วงวนคล้ายปีกผีเสื้อ	25
2.14	ทิศทางของแรงกระทำที่มีผลต่อวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก	28
2.15	โครงข่ายที่มีการกำหนดค่าของ f_m และ f_n ของเครื่องสั่นเพียโซอิเล็กทริกวัสดุเซรามิก..	29
2.16	วงจรสมมูลการสั่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	30
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ ($ Z $) ความต้านทาน (R_e) รีแอคแตนซ์ (X_e) และ Series arm reactance (X_i) กับความถี่การสั่นตัวของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	31
2.18	ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ในการสั่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19	ตัวเก็บประจุแผ่นขนานเมื่อไม่มีสารไดอิเล็กทริก 34
2.20	การปรับปรุงตัวกระตุ้นแบบไมโครของ HGA (a) แชนอ่าน/เขียน (b) หัวสไลเดอร์ และวัสดุเซรามิก PZT แบบฟิล์มบาง 37
3.1	ไดอะแกรมการติดตั้งชุดอุปกรณ์การวัดค่าอิมพีแดนซ์ 43
3.2	ชุดอุปกรณ์วัดค่าอิมพีแดนซ์ 43
3.3	ตัวจับยึดชิ้นงาน 44
3.4	ชุดกล่องเชื่อมต่อสัญญาณ 45
3.5	เครื่อง Impedance/gain-phase analyzer 46
3.6	หน้าต่างของโปรแกรม ZPlot-Impedance 46
3.7	หน้าต่างของโปรแกรม ZView-Impedance 47
3.8	คอมพิวเตอร์และจอแสดงผล 47
3.9	ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ 48
3.10	วัสดุเซรามิก PZT แบบชนิดอ่อน 49
3.11	วัสดุเซรามิก PZT แบบชนิดแข็ง 49
3.12	เครื่องขัดชิ้นงาน (Buehler, Phoenix Beta) 50
3.13	พื้นผิวชิ้นงานเซรามิก PZT (a) ก่อนขัด และ (b) หลังขัด 50
3.14	เครื่องล้างชิ้นงานระบบอัลตราโซนิก 51
3.15	ขั้นตอนการเผาไล่ความชื้นและสลายสภาพการมีขั้วตกค้างของชิ้นงาน 51
3.16	ชิ้นงานเซรามิก PZT หลังทำอิเล็กโทรด (a) แบบ Soft (b) แบบ Hard 52
3.17	เครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง 53
3.18	ภาชนะที่ใช้สำหรับจับชิ้นงานเซรามิก PZT 54
3.19	เครื่องวัดค่า d_{33} (d_{33} Meter) 54
3.20	เครื่อง Precision LCR Meter 55
3.21	ตัวอย่างผลที่ได้จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์บนจอแสดงผล a) วัดค่าอิมพีแดนซ์ของ วัสดุเซรามิก PZT ที่ย่านความถี่ช่วงกว้าง b) ย่านความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์และ แอนติเรโซแนนซ์ลำดับที่หนึ่ง 57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22	เตาเผาสำหรับการอบความร้อน (Nabertherm) 58
4.1	สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ก่อนและหลังการ อบความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_C 63
4.2	ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ก่อนและหลังการ อบความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_C 64
4.3	ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ก่อนและหลังการ อบความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_C 65
4.4	สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ก่อนและหลังการ อบความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_C 68
4.5	ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ก่อนและหลังการ อบความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_C 69
4.6	ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ก่อนและหลังการ อบความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_C 70
4.7	สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อน 71
4.8	อัตราการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกต่ออุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft 73
4.9	ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อน 74
4.10	อัตราการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบต่ออุณหภูมิการอบด้วย ความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft 75
4.11	ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อน 76
4.12	อัตราการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาต่ออุณหภูมิการอบด้วย ความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft 78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อน	79
4.14 อัตราการลดลงของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกต่ออุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของ วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard	80
4.15 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อน	81
4.16 อัตราการลดลงของปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบต่ออุณหภูมิการอบด้วย ความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard.....	82
4.17 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อน	83
4.18 อัตราการลดลงของปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาต่ออุณหภูมิการอบด้วย ความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard.....	84
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า d_{33} กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft.....	85
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า d_{33} กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft.....	86
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft.....	86
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ν กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft.....	87
4.23 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลอง และการคำนวณของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อน.....	90
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k_{p\infty}$ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft.....	91
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_{p1} กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft.....	91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft.....	92
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ν กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft.....	92
4.28 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสในเชิงเวลาเปรียบเทียบกับระหว่าง ผลการทดลองและการคำนวณของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อน	96
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k_{t_{\infty}}$ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft.....	97
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_t กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft.....	97
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft.....	98
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ν กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft.....	98
4.33 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมผัสในเชิงเวลาเปรียบเทียบกับระหว่าง ผลการทดลองและการคำนวณของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อน	102
4.34 ผลการทำนายพฤติกรรมการณ์เสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมผัส ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง.....	104
4.35 ผลการทำนายพฤติกรรมการณ์เสื่อมอายุของปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบ สัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง.....	107
4.36 ผลการทำนายพฤติกรรมการณ์เสื่อมอายุของปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบ สัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง.....	109
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $d_{33_{\infty}}$ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard.....	110
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า d_{33_t} กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard.....	110

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard.....	111
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ν กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard.....	111
4.41 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลอง และการคำนวณของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อน	115
4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k_{p_{\infty}}$ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard.....	116
4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_{p_1} กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard.....	116
4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard.....	117
4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ν กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard.....	117
4.46 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาเปรียบเทียบระหว่าง ผลการทดลองและการคำนวณของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อน...	121
4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k_{t_{\infty}}$ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard.....	122
4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_t กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard.....	122
4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard.....	123
4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ν กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard.....	123
4.51 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาเปรียบเทียบระหว่าง ผลการทดลองและการคำนวณของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อน...	127

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.52 ผลการทำนายพฤติกรรม การเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง	129
4.53 ผลการทำนายพฤติกรรม การเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบ สัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง	132
4.54 ผลการทำนายพฤติกรรม การเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบ สัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง	134
4.55 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เทียบกับแบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_C	135
4.56 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เทียบกับแบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_C	136
4.57 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เทียบกับแบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_C	137
4.58 แบบจำลองโครงสร้างผลึกมีการบกพร่องของกลุ่มข้อว่างออกซิเจน ของวัสดุเซรามิก PZT	138
4.59 แบบจำลองโครงสร้างผลึกมีการบกพร่องของกลุ่มข้อเมื่อเติมสารเจือจำพวกตัวให้ ของวัสดุเซรามิก PZT	139
4.60 แบบจำลองโครงสร้างผลึกมีการบกพร่องของกลุ่มข้อเมื่อเติมสารเจือจำพวกตัวรับ ของวัสดุเซรามิก PZT	139
4.61 การเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีข้อ (a) วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft (b) วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard.....	140
4.62 แบบจำลองการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และเทียบกับแบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ	141

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.63	แบบจำลองการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และเทียบกับแบบ Hard	
	หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูง	141



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric material) เป็นวัสดุที่กำลังถูกนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ในอุปกรณ์อัลตราโซนิกทางการแพทย์ หัวตรวจวัดอัลตราซาวด์ บัชเชอร์ในลำโพง ตัวเก็บประจุไฟฟ้า อุปกรณ์จุดแก๊สในเตาเครื่องทำความร้อน ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจจับความดัน เซนเซอร์ตรวจจับความชื้น ใช้เป็นแอคชูเอเตอร์ อุปกรณ์ประกอบของเครื่องพิมพ์ ชัตเตอร์ในกล้องถ่ายรูป วาล์วไฮดรอลิก และนำมาประยุกต์ใช้ในส่วน of ตัวขับเคลื่อนการเคลื่อนที่ของแขนหัวอ่าน/เขียน (Suspension) ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ฯลฯ (Niu et al., 2000)

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกกำลังได้รับความนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในเชิงทางด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน คือวัสดุเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (Lead Zirconate Titanate: PZT) เนื่องจากวัสดุเซรามิก PZT เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ นั่นคือสามารถเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และในทางกลับกันก็สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากลับเป็นพลังงานกลได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) ด้วยเหตุที่วัสดุเซรามิก PZT มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่โดดเด่น มีความแข็งแรงทนทาน และมีค่าปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าสูงมาก จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Moulson and Herbert, 2003) แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของวัสดุเซรามิก PZT วัสดุเซรามิก PZT นอกจากนี้นี้ยังมีข้อด้อย คือมีพลังงานสูญเสียค่อนข้างสูงและเสื่อมอายุ

ที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยหลายกลุ่มศึกษาการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT ที่สภาวะโหลดต่าง ๆ ทั้งทางกล ทางไฟฟ้า และความร้อน (Jones et al., 2001; Dominick et al., 2006; Srilomsak et al., 2009) พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เกิดการเสื่อมตามอายุได้เร็วขึ้น แม้กระนั้นก็ตามผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบด้วยความร้อนแก่ชิ้นงานในขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วนต่อการเสื่อมอายุยังมีไม่พอ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ โดยงานวิจัยนี้ศึกษาการเสื่อมอายุจากการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งผลการศึกษาจะ

เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงกระบวนการดังกล่าว รวมทั้งเข้าใจในกลไกทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ และการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลของกระบวนการอบด้วยความร้อนที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่าง ๆ ที่ส่งผลให้เกิดการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT
- 1.2.2 เพื่อหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างอุณหภูมิกับคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ส่งผลให้เกิดการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีพิกัดคือ
 - วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard
 - เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm
 - มีความหนา 1 mm
 - มีอุณหภูมิคูรีที่ 360 °C และ 325 °C
- 1.3.2 การทดสอบมีพิกัดคือ
 - การเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วใช้สนามไฟฟ้า 3kV/mm ที่อุณหภูมิ 100 °C
 - การอบด้วยความร้อนตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 30% ถึง 80% ของอุณหภูมิคูรี
 - การอบด้วยความร้อนแต่ละอุณหภูมิใช้เวลา 10 นาที

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาการอบด้วยความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ส่งผลให้เกิดการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT
- 1.4.2 วิเคราะห์ผลการอบด้วยความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่าง ๆ ที่ส่งผลให้เกิดการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT
- 1.4.3 หาสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างอุณหภูมิกับการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับเครื่องมือการวัดค่าสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเซรามิก PZT
- 1.5.2 เข้าใจผลของความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่าง ๆ ที่ส่งผลให้เกิดการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT
- 1.5.3 ได้สมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างอุณหภูมิกับการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT
- 1.5.4 ได้องค์ความรู้สำหรับนำไปปรับปรุงกระบวนการประกอบชิ้นงานในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์หรือในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงการทำนายลักษณะการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT หลังจากการอบด้วยความร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วย 5 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมติฐาน ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสั่งเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงปรัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ โดยกล่าวถึงวัสดุอิเล็กทรอนิกส์เซรามิก ประกอบด้วย วัสดุเพียโซอิเล็กทริก วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก และวัสดุไพโรอิเล็กทริก ต่อมาจะเป็นส่วนของประวัติเพียโซอิเล็กทริก และประวัติของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก รวมไปถึงคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟสในวัสดุเซรามิกชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริก การทำให้เกิดโพลาไรเซชัน โดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก คุณลักษณะของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิด PZT การทำให้เกิดสภาพขั้ว ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในเฟอร์โรอิเล็กทริก สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ปัจจัยคู่ความเค้นกลไฟฟ้า การเสื่อมอายุ และลักษณะการนำวัสดุเซรามิก PZT ไปใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งการอบความร้อนในขั้นตอนการประกอบชิ้นงานเป็นสาเหตุของการเสื่อมอายุที่เร็วขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่าง ๆ ในวัสดุเซรามิก PZT

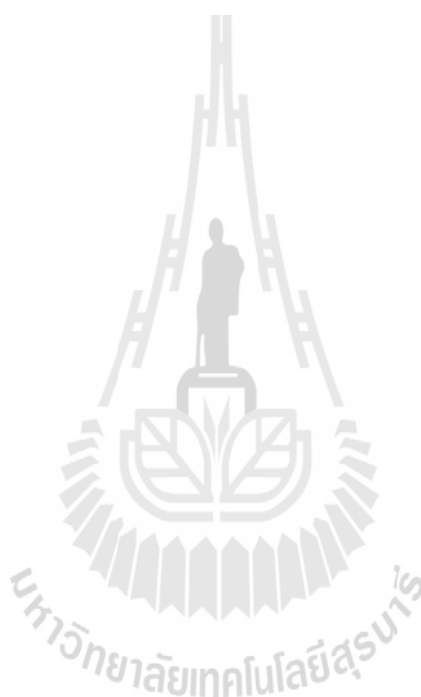
บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีดำเนินการวิจัย อันได้แก่ วัสดุอุปกรณ์ในการทำวิจัย วิธีการทดสอบ โดยเริ่มตั้งแต่การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบ การสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับเครื่องมือทดสอบ และการทดสอบการเสื่อมอายุเนื่องจากการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT เนื่องจากการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่าง ๆ ในวัสดุเซรามิก PZT เช่น ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ค่าปัจจัยคู่

ควมเชิงกลไฟฟ้า รวมไปถึงการหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อแสดงข้อมูลของการเสื่อมอายุที่ถูกต้องที่ได้จากการทดสอบ

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมี 3 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงค่าสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ทำการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน ภาคผนวก ข. แสดงค่าสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ทำการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน และภาคผนวก ค. แสดงรายการบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการทำวิจัยวิทยานิพนธ์



บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของกระบวนการอบด้วยความร้อนต่อการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งนิยมนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่าง ๆ เช่น ทรานสดิวเซอร์ เซนเซอร์ และแอคชูเอเตอร์ เป็นต้น วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้คือวัสดุเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต หรือวัสดุเซรามิก PZT ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) สูง มีสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ที่ดีและมีค่าปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้า (k) สูงมาก สำหรับการประยุกต์ใช้งานในกระบวนการของการประกอบชิ้นส่วนของวัสดุเซรามิก PZT ลงไปบนแกนของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่าง ๆ ตามลักษณะการใช้งาน กระบวนการประกอบชิ้นงานดังกล่าวจำเป็นต้องมีตัวประสานหรือกาวเป็นตัวเชื่อมประสานชิ้นวัสดุเซรามิก PZT กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และการทำให้ตัวประสานหรือกาวนั้นแห้งจำเป็นต้องมีการอบด้วยความร้อนเพื่อให้ตัวประสานนั้นแห้งสนิท ซึ่งในขั้นตอนการอบด้วยความร้อนนี้เองอาจทำให้วัสดุเซรามิก PZT เกิดความเสียหายหรือเสื่อมอายุได้ มีงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้รายงานเกี่ยวกับพฤติกรรมการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT ที่สภาวะโหลดต่าง ๆ (Dominick et al., 2006; Silke et al., 2010) ผลงานวิจัยเหล่านั้นพบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการเสื่อมอายุเร็วขึ้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเสื่อมอายุในกระบวนการอบความร้อน เมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานยังมีอยู่เป็นจำนวนน้อย ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงสนใจศึกษาการเสื่อมอายุจากกระบวนการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับการวัดคุณสมบัติของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นสามารถพิจารณาจากสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและค่าปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าที่วัดได้จากวัสดุเซรามิก PZT

ในบทนี้จะกล่าวถึงอิเล็กทโรเซรามิก นั่นคือวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งเป็นวัสดุเซรามิกในกลุ่มที่มีสมบัติพิเศษทางไฟฟ้า รวมไปถึงการค้นพบ และสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก ได้แก่ การค้นพบวัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟสในวัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก การเกิดโพลาไรเซชัน โดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก โครงสร้างของวัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดเลดเซอร์โคเนตไททาเนต การเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก การเสื่อมอายุ และสาเหตุของการเสื่อมอายุใน

วัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกในกระบวนการประยุกต์ใช้งาน เพื่อให้มีความเข้าใจในวัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ดียิ่งขึ้น รวมทั้งสามารถทดสอบการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่เหมาะสมกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

2.1 วัสดุอิเล็กทรอเซรามิก

วัสดุอิเล็กทรอเซรามิกเป็นวัสดุเซรามิกที่มีความพิเศษด้านสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติแม่เหล็ก หรือสมบัติทางแสง (Moulson and Herbert, 2003) ตัวอย่างวัสดุเซรามิกกลุ่มนี้ ได้แก่ วัสดุเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric ceramics) วัสดุเซรามิกไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric ceramics) วัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric ceramics) วัสดุเซรามิกไดอิเล็กทริก (Dielectric ceramics) วัสดุเซรามิกตัวนำ (Conductor ceramics) และวัสดุเซรามิกแม่เหล็ก (Magnetic ceramics) เป็นต้น วัสดุอิเล็กทรอเซรามิกที่กล่าวมานี้ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในอุปกรณ์ที่ใช้ในงานเฉพาะทางต้องทำหน้าที่ได้หลายอย่างภายในตัว เช่น ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เครื่องโซนาร์ (Sonar) ตัวประมวลผลด้วยแสง (Light processors) และอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensors) เป็นต้น วัสดุในกลุ่มนี้จึงต้องมีสมบัติและสมรรถนะการใช้งานได้ดี จึงจำเป็นที่จะต้องมีความเข้าใจในหลักการพื้นฐานของวัสดุเซรามิก อันได้แก่ โครงสร้าง สมบัติต่าง ๆ การประยุกต์ใช้งานรวมทั้งสถานะแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อวัสดุเซรามิกเหล่านี้

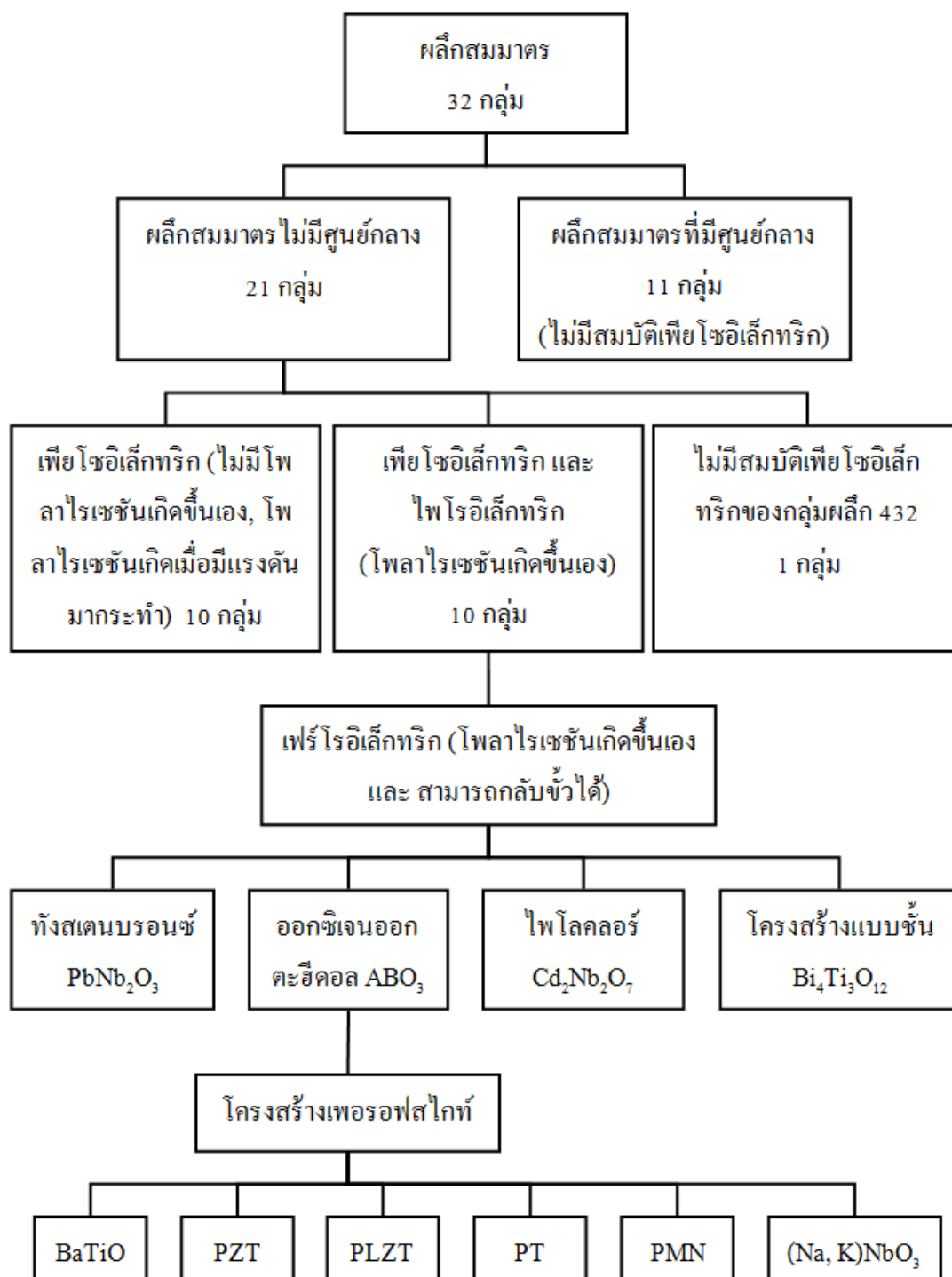
วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่จัดให้อยู่ในกลุ่มของวัสดุจำพวกอิเล็กทรอเซรามิก เป็นวัสดุที่มีสมบัติพิเศษทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าสภาพยอมสูง ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำ และมีค่าทางเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ดี เป็นต้น จึงมีการนำวัสดุกลุ่มนี้ไปประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.2 เพียโซอิเล็กทริก

เพียโซอิเล็กทริกถูกค้นพบเป็นครั้งแรกโดย ซองส์ และ ปีแอร์ คูรี ในระหว่างทำการศึกษาทดลองผลของแรงดันที่มีต่อการเกิดประจุไฟฟ้าของผลึกในสารประกอบเชิงเดี่ยว (Single Crystal Compound) บางประเภท เช่น ควอตซ์ (Quartz) ซิงค์เบลนด์ (Zincblende) และ ทัวร์มาลีน (Tourmaline) และได้พบว่าสมบัติบางอย่างเกิดขึ้น คือประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวผลึกจะแปรผันกับแรงที่ได้รับ สมบัตินี้เรียกว่าภายหลังได้ถูกเรียกว่า สมบัติเพียโซอิเล็กทริก คำว่า “เพียโซ” (Piezo) มาจากภาษากรีกมีความหมายว่า “กด” (Press) ดังนั้นสภาพเพียโซอิเล็กทริก จึงเป็นการเกิดขึ้นของสภาพทางไฟฟ้าจากแรงกดที่ไปเข้าปฏิกิริยากับผลึกซึ่งเป็นแรงทางกล ทำให้เกิด ความเครียด (Strain) ในผลึก ซึ่งเกิดการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันเรียกว่าการโพลาไรเซชัน (Polarization) และให้

กระแสไฟฟ้าออกมา ปริมาณและเครื่องหมายของการโพลาริเซชันจะแปรผันตามความเครียดที่ได้รับ

สภาพความเป็นเพียโซอิเล็กทริกพิจารณาได้จากระดับโครงสร้างอะตอมของผลึกและหลักการการแพร่กระจายของอะตอมภายในโครงสร้างผลึก การจัดกลุ่มของอะตอมถูกจำกัดด้วยตำแหน่งที่มีพลังงานสูงสุด ผลึกมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วยอะตอมที่เรียงตัวกันซ้ำ ๆ ต่อกันเป็นโครงข่ายเกิดเป็นระบบผลึก (Lattice) หน่วยที่เล็กที่สุดที่สมมาตรเรียกว่า หน่วยเซลล์ (Unit cell) และบอกความเป็นไปได้ของการมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกในผลึก นักฟิสิกส์ศาสตร์ทำการแบ่งกลุ่มของระบบผลึก โดยพิจารณาจากผลึกสมมาตรสามารถแบ่งออกเป็น 7 ระบบพื้นฐานของผลึก และแบ่งออกเป็น 32 กลุ่มผลึก ใน 32 กลุ่มแบ่งเป็นผลึก 11 กลุ่มเป็นผลึกสมมาตรที่มีศูนย์กลางจึงไม่มีขั้วไฟฟ้า (Non-polar) และผลึก 21 กลุ่มเป็นผลึกสมมาตรที่ไม่มีศูนย์กลาง จากผลึก 21 กลุ่มแบ่งเป็น 20 กลุ่มที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก และ 1 กลุ่มไม่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากเมื่อวัสดุอยู่ในความเครียด ทำให้วัสดุเป็นผลึกสมมาตรที่มีศูนย์กลาง (โพลาริเซชันรวมหักล้างกันหมด) ส่งผลให้ไม่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และในผลึกสมมาตร 20 กลุ่ม มี 10 กลุ่มเท่านั้นที่มีสภาพการเกิดขั้วขึ้นเอง (Spontaneous polarization: P_s) คือเกิดโพลาริเซชันได้ด้วยตัวเองโดยไม่ต้องป้อนสนามไฟฟ้า นอกจากนี้ว่าวัสดุมีผลึกสมมาตรไม่มีศูนย์กลางอยู่เอง ซึ่งทำให้ผลรวมของการเคลื่อนที่ของประจุบวกและลบสามารถสร้างไดโพลหรือเกิดโพลาริเซชันได้



รูปที่ 2.1 การจำแนกกลุ่มของวัสดุจำพวกอิเล็กทริกวัสดุเซรามิกโดยใช้ผลึกสมมาตร
[ดัดแปลงมาจาก (Haertling, 1999; Kao, 2004)]

2.3 วัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก

จากผลึกสมมาตรไม่มีศูนย์กลางทั้ง 20 กลุ่มสามารถแสดงลักษณะสมบัติเพียโซอิเล็กทริกได้ แต่มีเพียง 10 กลุ่มเท่านั้นที่โพลาริเซชันสามารถเกิดขึ้นได้ด้วยตัวเอง หรือเกิดคู่ขั้วถาวรในโครงสร้างผลึก สภาพไฟโรอิเล็กทริก (Pyroelectricity) เป็นการเกิดโพลาริเซชันของวัสดุเซรามิกไฟโรอิเล็กทริกที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในช่วงหนึ่ง มีสภาพแกนขั้วแบบเฉพาะภายในโครงสร้างผลึกค่าไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) แปรผกผันกับอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างผลึก วัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นกลุ่มย่อยของวัสดุเซรามิกไฟโรอิเล็กทริก ซึ่งสามารถเกิดโพลาริเซชันได้ด้วยตัวเองและสามารถกลับทิศทางได้ วัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกแบ่งออกได้ 4 กลุ่ม แต่กลุ่มที่นิยมนำมาใช้งาน ได้แก่กลุ่มออกซิเจนออกตะฮีดรอล (Oxygen octahedral) ซึ่งกลุ่มนี้มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ วัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกที่นิยมใช้ที่สุดในปัจจุบันคือ วัสดุเซรามิก PZT วัสดุเซรามิกแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) วัสดุเซรามิกเลดไททาเนต (PT) วัสดุเซรามิกเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต (PLZT) วัสดุเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบต (PMN) และวัสดุเซรามิกโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต ($(\text{Na}, \text{K})\text{NbO}_3$) โครงสร้างผลึกของวัสดุเหล่านี้เป็นแบบมีขั้วและมีสภาพเป็นเพียโซอิเล็กทริกที่ดี ถ้าป้อนสนามไฟฟ้าแรงพอก็สามารถทำให้ทิศทางของเวกเตอร์โพลาริเซชันเปลี่ยนแปลงได้ จึงกล่าวได้ว่าวัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกทุกชนิดมีสภาพเป็นเพียโซอิเล็กทริก แต่ในทางกลับกันวัสดุเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกไม่จำเป็นต้องมีสภาพเฟอร์โรอิเล็กทริก

วัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกส่วนมากเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างทางกายภาพจากสภาพไม่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก (หรือพาราอิเล็กทริก) ที่อุณหภูมิสูงไปสู่สภาพเฟอร์โรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้สมมาตรของโครงสร้างในสถานะเฟอร์โรอิเล็กทริกจะต่ำกว่า สมมาตรของโครงสร้างในสถานะพาราอิเล็กทริกเสมอ อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสถานะจากพาราอิเล็กทริกมาเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกในทางกลับกันอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสถานะจากเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริก เรียกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature: T_C) ทั้งนี้เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า T_C สภาพยอมสัมพัทธ์จะมีค่าลดลง ซึ่งเป็นไปตามกฎคูรี-ไวสส์ (Curie-Weiss law)

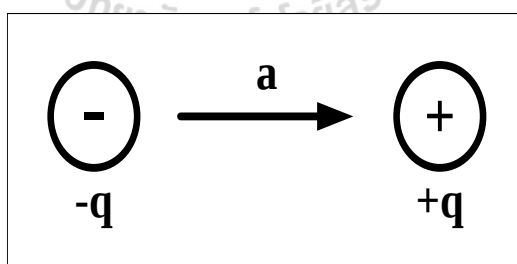
วัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกบางชนิดเช่น BaTiO_3 สามารถเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างได้หลายครั้ง โดยยังคงสภาพเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกอยู่ ทั้งนี้เฉพาะอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสถานะเข้าสู่สภาพเฟอร์โรอิเล็กทริกครั้งแรกเท่านั้นที่เรียกว่าอุณหภูมิคูรี การเปลี่ยนสถานะเพื่อเข้าสู่สภาพเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกมักตามมาด้วยการเปลี่ยนแปลงอย่างผิดปกติในสมบัติไดอิเล็กทริก ความยืดหยุ่น ความร้อน และอื่น ๆ (รัตติกร ยี่มนิธิ, 2001)

2.3.1 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟสในวัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก

การเปลี่ยนเฟสในวัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและการโพลาไรเซชันทางไฟฟ้าของวัสดุ ถึงแม้ว่า T_C เป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเฟสจากพาราอิเล็กทริก แต่ที่อุณหภูมิ $T > T_C$ วัสดุจะแสดงสมบัติในเฟสพาราอิเล็กทริก ส่วนที่อุณหภูมิ $T < T_C$ วัสดุจะแสดงสมบัติในเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริก นอกจากนี้ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงและมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิ T_C ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า T_C โครงสร้างเฟสจะเป็นพาราอิเล็กทริกและไม่มีการแสดงสมบัติความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกใด ๆ ออกมา เนื่องจากโครงสร้างเฟอร์โรอิเล็กทริกเกิดขึ้นจากการบิดเบี้ยว หรือเสียรูปร่างไปของโครงสร้างพาราอิเล็กทริก ส่งผลให้โครงสร้างเฟอร์โรอิเล็กทริกมีสมมาตรของโครงสร้างที่น้อยกว่าโครงสร้างพาราอิเล็กทริก ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_C ทำให้ประจุมีการเคลื่อนในตำแหน่งสมดุล จึงเกิดโพลาไรเซชันขึ้นเองได้

2.3.2 โพลาไรเซชัน

การที่ผลึกสามารถแสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้นั้นเกิดจากผลึกมีการเปลี่ยนแปลงค่าโพลาไรเซชันเนื่องจากแรงเค้นเชิงกลภายนอกกระทำ ก่อนที่จะกล่าวถึงการเกิดโพลาไรเซชัน จำเป็นต้องมีความเข้าใจการเกิดไดโพลโมเมนต์ ซึ่งไดโพลโมเมนต์เป็นค่าเวกเตอร์ที่บอกลักษณะของขั้วทางไฟฟ้า (Polarity) เกิดขึ้นจากคู่ของประจุบวก (ขนาด q) และลบ (ขนาด q) ที่ถูกแยกออกจากกันดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ไดโพลโมเมนต์เนื่องจากคู่ของประจุบวก (+q) และลบ (-q) ที่มีระยะห่างเท่ากับ a

ค่าไดโพลโมเมนต์ของคู่ประจุบวก (+q) และลบ (-q) ที่มีระยะห่างเท่ากับ a สามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$P = qa \quad (2.1)$$

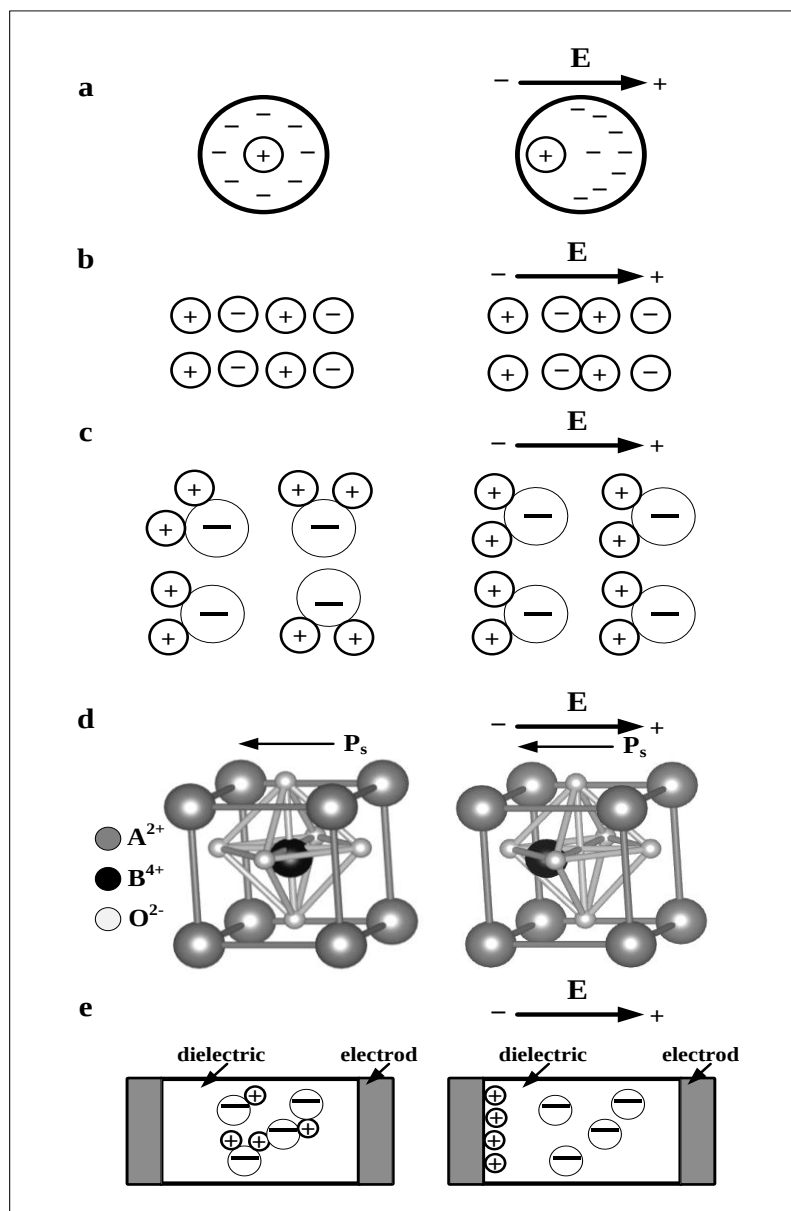
โดยที่	P	คือ ค่าเวกเตอร์ของไดโพลโมเมนต์ (D)
	q	คือ ขนาดของประจุ (C)
	a	คือ ระยะห่างระหว่างประจุ (m)

การเกิดโพลาไรเซชันโดยพื้นฐานมีอยู่ 5 แบบดังแสดงในรูปที่ 2.3 ได้แก่

1. อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชัน (Electronic polarization)
2. อะตอมิก หรือ ไอออนิกโพลาไรเซชัน (Atomic or ionic polarization)
3. ไดโพล หรือ ออเรียนเทชันนอลโพลาไรเซชัน (Dipolar or orientational polarization)
4. โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเอง (Spontaneous polarization)
5. อินเตอร์เฟซ หรือ โพลาไรเซชันจากประจุค้ำ (Interface or space charge polarization)

โดยธรรมชาติแล้วอะตอมใด ๆ จะมีค่าไดโพลโมเมนต์เป็นศูนย์ เนื่องจากจุดศูนย์กลางของประจุบวกและลบอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน จึงหักล้างกันหมดทำให้ค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้านำอะตอมตัวนี้ไปวางไว้ในสนามไฟฟ้าจะทำให้จุดศูนย์กลางของประจุบวกและลบแยกออกจากกัน ส่งผลให้เกิดไดโพลโมเมนต์ ลักษณะของการเกิดไดโพลโมเมนต์ในอะตอมเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกเรียกว่า อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชันดังแสดงในรูปที่ 2.3(a) โพลาไรเซชันชนิดนี้เกิดขึ้นกับทุกสารเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชันระดับอะตอมและเกิดขึ้นเมื่อป้อนสนามไฟฟ้ากับสารเท่านั้น ค่าโพลาไรเซชันดังกล่าวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าโพลาไรเซชันชนิดอื่น ๆ โพลาไรเซชันชนิดต่อมาคืออะตอมิก หรือ ไอออนิกโพลาไรเซชันดังแสดงในรูปที่ 2.3(b) เกิดขึ้นเฉพาะสารที่มีพันธะไอออนิก เช่น NaCl KCl และ LiBr เป็นต้น และเกิดขึ้นเมื่อจุดศูนย์กลางของประจุบวกกับประจุลบแยกจากกันเมื่อป้อนสนามไฟฟ้า ไอออนิกโพลาไรเซชันจะหมดไปเมื่อสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ลดลงเป็นศูนย์ ส่วนการเกิดไดโพล หรือออเรียนเทชันนอลโพลาไรเซชันเป็นโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นในโมเลกุลของสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลไม่สมมาตร เช่น H_2O และ HCl ดังแสดงในรูป 2.3(c) ซึ่งแสดงตัวอย่างของโมเลกุลของน้ำที่เวกเตอร์รวมของโพลาไรเซชันจาก H^+ (2 อะตอม) และ O^{2-} (1 อะตอม) มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ถึงแม้ว่าไม่มีสนามไฟฟ้าเวกเตอร์รวมของโพลาไรเซชันเหล่านี้ยังมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นออเรียนเทชันนอลโพลาไรเซชันจึงเป็นโพลาไรเซชันชนิดถาวร แต่อย่างไรก็ตามเมื่อโมเลกุลเหล่านี้มารวมตัวกันเป็นสาร เช่น น้ำ (H_2O) ออเรียนเทชันนอลโพลาไรเซชันของ

แต่ละโมเลกุลจะเรียงตัวกันอย่างสุ่ม (Random orientation) ดังนั้นจึงไม่มีค่าโพลาไรเซชันรวม แต่เมื่อใดก็ตามที่สารเหล่านี้ถูกวางไว้ภายใต้สนามไฟฟ้าจะทำให้มีการเรียงตัวของโพลาไรเซชันของ

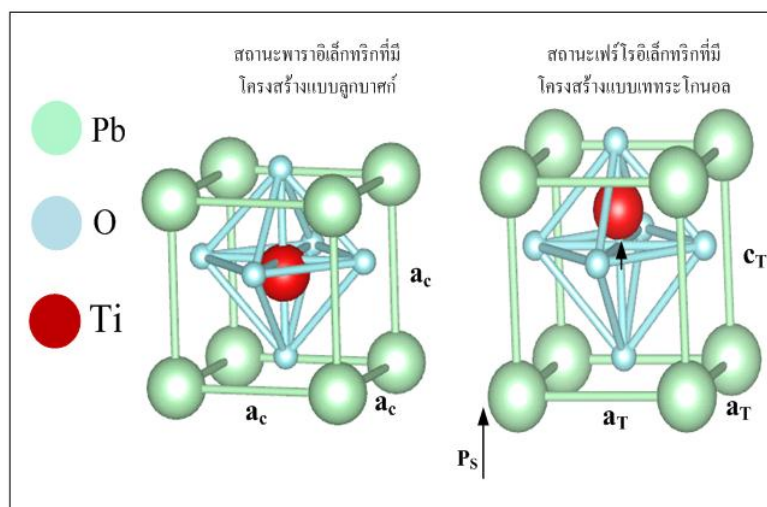


รูปที่ 2.3 การเกิดไดโพลโมเมนต์ทั้ง 5 แบบ (a) อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชัน (b) อะตอมมิกหรือไอออนิกโพลาไรเซชัน (c) ไดโพล หรือ ออเรียนเตชันนอลโพลาไรเซชัน (d) โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเอง (e) อินเตอร์เฟซ หรือ โพลาไรเซชันจากประจุค้าง

แต่ละโมเลกุลให้มีทิศทางในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดโพลาริเซชันรวม โพลาริเซชันตัวต่อมามีความสำคัญมากต่อวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก คือ โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง แสดงในรูปที่ 2.3(d) โพลาริเซชันดังกล่าวนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเฟสของผลึก เมื่ออุณหภูมิลดลงผ่านอุณหภูมิคูรีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองนี้จะมีเฉพาะในผลึกที่มีสมมาตรบางประเภทเท่านั้นดังที่กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้ โพลาริเซชันดังกล่าวนี้มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเป็นอย่างมาก เช่น ทำให้มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงมาก ในผลึกของแข็งโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองจะเกิดขึ้นในแต่ละเซลล์ และเมื่อเซลล์รวมกันเป็นผลึกโพลาริเซชันเหล่านี้จะมีทิศทางแบบสุ่ม จึงทำให้โพลาริเซชันหักล้างกันเป็นศูนย์ แต่เมื่อใดที่มีการป้อนสนามไฟฟ้าให้แก่ผลึกเหล่านี้ส่งผลให้เกิดการเรียงตัวของโพลาริเซชันของแต่ละเซลล์ให้มีทิศทางไปในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดโพลาริเซชันรวมมีค่าไม่เป็นศูนย์ สิ่งที่น่าสนใจของโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง คือเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้สูงถึงค่า ๆ หนึ่งแล้วลดสนามไฟฟ้าที่ป้อนเป็นศูนย์ โพลาริเซชันรวมจะไม่ลดลงจนเป็นศูนย์เนื่องจากมีโพลาริเซชันคงค้าง (Remanent polarization) ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้วัสดุเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก วัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก (ทั้งที่เป็นผลึกเชิงเดี่ยว และพหุผลึก) สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ โพลาริเซชันชนิดสุดท้ายคือ อินเตอร์เฟส หรือ โพลาริเซชันจากประจุค้าง แสดงในรูปที่ 2.3(e) โพลาริเซชันชนิดนี้มีค่าค่อนข้างน้อย เกิดจากประจุบวกและประจุลบที่สะสมกันที่ตำแหน่งบริเวณรอยต่อของสารต่างชนิดในวัสดุ หรือเกิดขึ้นบริเวณขอบเกรน

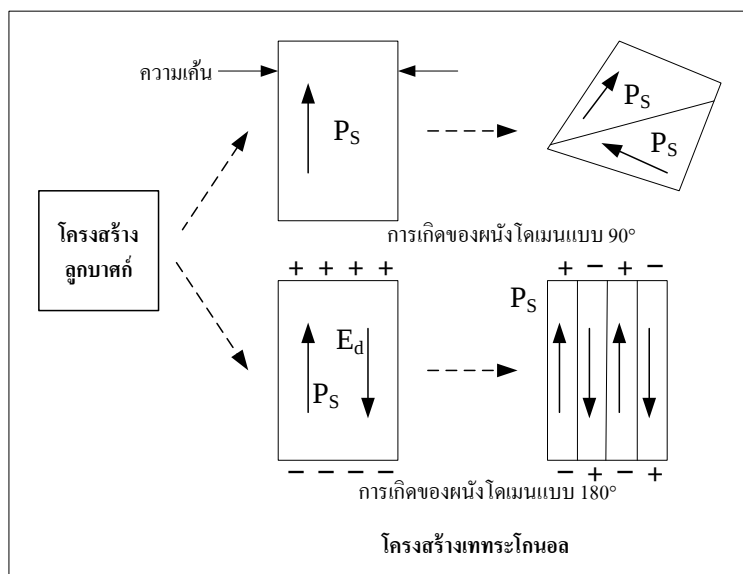
2.3.3 โดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก

คุณสมบัติของเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีความสำคัญมีอยู่สองประการได้แก่ สภาพการเกิดโพลาริเซชันขึ้นเอง และโพลาริเซชันสามารถกลับทิศทางได้ภายใต้สนามไฟฟ้า สภาพการเกิดโพลาริเซชันขึ้นเองในผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริก ส่วนใหญ่จะมีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นไปในทางเดียวกันตลอดทั้งผลึก ตัวอย่างเช่นเลดไททาเนต (PbTiO_3) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์เป็นแบบ ABO_3 โดยที่อะตอมในตำแหน่ง A-site มีจำนวนเวเลนซ์ได้จาก +1 ถึง +3 และอะตอมในตำแหน่ง B-site มีจำนวนเวเลนซ์ได้จาก +3 ถึง +6 โดยที่ PbTiO_3 เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากแบบลูกบาศก์ที่มีสภาพเป็นพาราอิเล็กทริก หรือสภาพที่ไม่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก เข้าสู่โครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอลซึ่งมีสภาพเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก ที่อุณหภูมิประมาณ 500°C ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การเกิดสภาพโพลาริเซชันขึ้นเองใน PbTiO_3 จะเกิดในทิศทางของแนวแกน c_r ในโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างผลึกสามารถอธิบายในลักษณะการเลื่อนของอะตอม O และอะตอม Ti เมื่อเทียบกับ อะตอม Pb ในสถานะที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก



รูปที่ 2.4 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ ABO_3 สำหรับ $PbTiO_3$ [ดัดแปลงมาจาก (รัตติกร ชัยนิรันดร์, 2001)]

โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติสามารถเกิดขึ้นขณะเปลี่ยนสถานะจากพาราอิเล็กทริกไปสู่สถานะเฟอร์โรอิเล็กทริก โพลาริเซชันที่อยู่ในบริเวณเดียวกันมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน บริเวณดังกล่าว เรียกว่า โดเมน (Domain) โพลาริเซชันของแต่ละโดเมนจะมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ดังนั้นจึงทำให้ค่าโพลาริเซชันรวมมีค่าเป็นศูนย์ สำหรับกรณีที่มีมากกว่าหนึ่งโดเมนขอบเขตที่กั้นระหว่างโดเมนมีทิศทางการจัดเรียงตัวต่างกัน เรียกว่า ผนังโดเมน (Domain wall) ผนังโดเมนที่กั้นระหว่างโดเมนที่จัดเรียงตัวที่ตรงข้ามกันเรียกว่า ผนังโดเมนแบบ 180° และผนังโดเมนที่กั้นระหว่างโดเมนที่จัดเรียงตัวตั้งฉากกันหรือโดเมนทำมุมประมาณ 90° เรียกว่า ผนังโดเมนแบบ 90° โครงสร้างโดเมนที่ซับซ้อนอันประกอบไปด้วยผนังโดเมนแบบ 180° และผนังโดเมนแบบ 90° เป็นผลเนื่องมาจากขอบเขตเงื่อนไขทางไฟฟ้าและทางกลที่เกิดขึ้นกับผลึกในระหว่างการลดอุณหภูมิผ่านอุณหภูมิคูรี ดังแสดงในรูปที่ 2.5

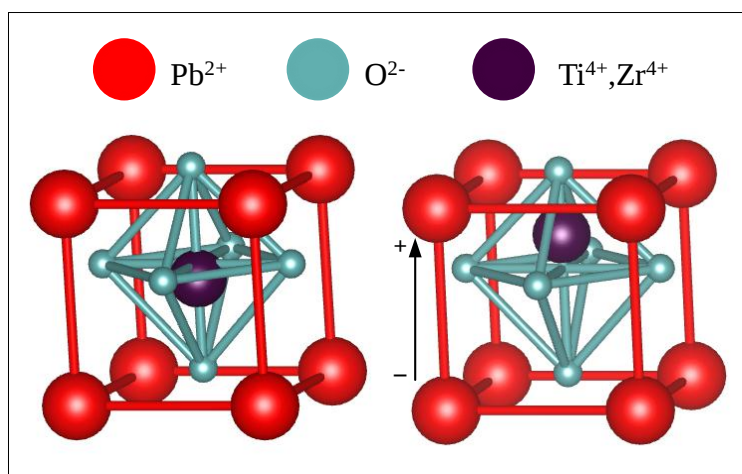


รูปที่ 2.5 การเกิดของผนังโดเมน เฟอร์โรอิเล็กทริก แบบ 90° และ 180° [ดัดแปลงมาจาก (รัตติกร ยี่มนิรันดร์, 2001)]

2.3.4 วัสดุเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดเลดเซอร์โคเนตไททานเนต

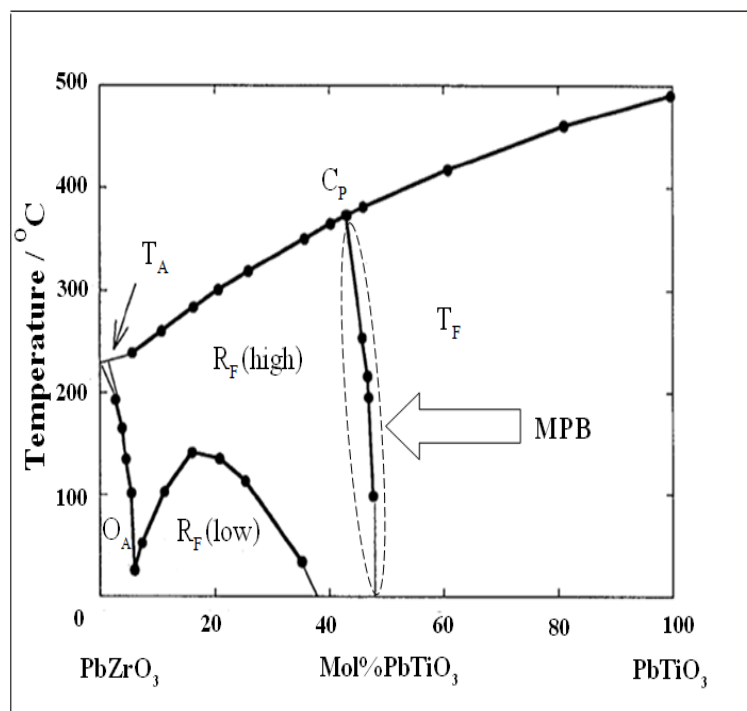
จัดเป็นวัสดุของแข็งที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเกิดจากการผสมระหว่าง PbZrO_3 และ PbTiO_3 ที่อุณหภูมิห้อง PbZrO_3 บริสุทธิ์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic) และเทตระโกนอล มีสมบัติแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Antiferroelectric orthorhombic structure: A_0) และ Antiferroelectric tetragonal structure: A_T) กล่าวคือ แต่ละเซลล์มีโพลาริเซชันเรียงตัวในทิศตรงข้ามกันเป็นผลให้โพลาริเซชันสุทธิในวัสดุแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริกมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่ PbTiO_3 บริสุทธิ์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเทตระโกนอล และมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric tetragonal structures: F_T) มีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองตามทิศ (001) และมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพอรอฟสไกต์ โดยมีสูตรเคมีทั่วไป คือ ABO_3 ซึ่งเป็นวัสดุที่แสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก การจัดเรียงตัวของอะตอม A และอะตอม B เป็นแบบออกไซด์เชิงซ้อน นั่นคือการรวมกันระหว่างประจุบวก (Cation) และประจุลบ (Anion) เป็นโครงสร้างลูกบาศก์แบบชิดสุด (Cubic close pack) ซึ่งไอออนของ Ti^{4+} และ Zr^{4+} จะแบ่งกันอยู่ที่ ตำแหน่ง B-site ในโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ โดยที่ B-site อยู่ตรงกลาง A-site เป็นอะตอมที่อยู่ออกตะฮีดรอลของ B-site คือ มีอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้ง 8 ของลูกบาศก์ มีอะตอมของออกซิเจนอยู่กึ่งกลางของแต่ละหน้าทั้ง 6 ด้านและมีอะตอมของไทเทเนียมและเซอร์โคเนียมอยู่กลางลูกบาศก์ โดยเกาะกันกับอะตอม

ออกซิเจนรอบ ๆ แบบจำลองโครงสร้างอะตอมออกไซด์คริสตัลของ TiO_6 หรือ ZrO_6 ดังแสดงในรูปที่ 2.6

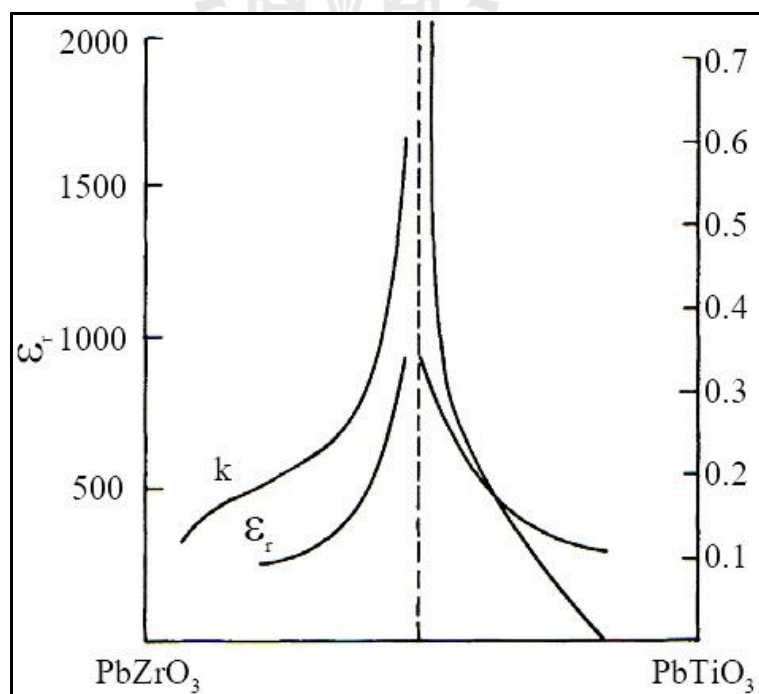


รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ของเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต [ดัดแปลงมาจาก (APC International, 2002)]

การที่วัสดุเซรามิก PZT มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์แบบลูกบาศก์ส่งผลให้แสดงสมบัติพาราอิเล็กทริกเมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี และโครงสร้างแบบลูกบาศก์จะเปลี่ยนไปเป็นเทตระโกนอลหรือรอมโบฮีดรอล (Rhombohedral) เมื่อมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี ซึ่งทำให้สมบัติพาราอิเล็กทริกเปลี่ยนเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกด้วย เมื่อพิจารณาทิศทางการเกิดเฟสเทตระโกนอลจะมีโพลาริเซชันแบบต่อเนื่องไปในทิศ (100) และสำหรับเฟสรอมโบฮีดรอลจะมีโพลาริเซชันไปในทิศ (111) จากเฟสไดอะแกรมรูปที่ 2.7 เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน Zr:Ti เท่ากับ 52:48 พบว่าอยู่บนเส้น Morphotropic Phase Boundary (MPB) อัตราส่วนดังกล่าวมีอุณหภูมิคูรีประมาณ $390\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งที่บริเวณนี้วัสดุมีสมบัติของเฟอร์โรอิเล็กทริกที่เด่นชัดที่สุด เนื่องจากมีโครงสร้าง 2 ชนิด คือโครงสร้างเทตระโกนอลและโครงสร้างรอมโบฮีดรอล ที่อุณหภูมิห้อง ณ บริเวณขอบเขต MPB จะมีการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริก รอมโบฮีดรอลที่อุณหภูมิสูง (Ferroelectric rhombohedral structure: $F_{R(HT)}$) ไปเป็นเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริก รอมโบฮีดรอลที่อุณหภูมิต่ำ (Ferroelectric rhombohedral structure: $F_{R(LT)}$) โดยทั้ง 2 เฟสนี้มีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองตามทิศ (111) ส่งผลให้วัสดุเซรามิก PZT ที่มีสัดส่วนดังกล่าวบริเวณ MPB แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ดีที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 เฟสไดอะแกรมของระบบ PbZrO_3 – PbTiO_3 (Jaffe et al., 1971)



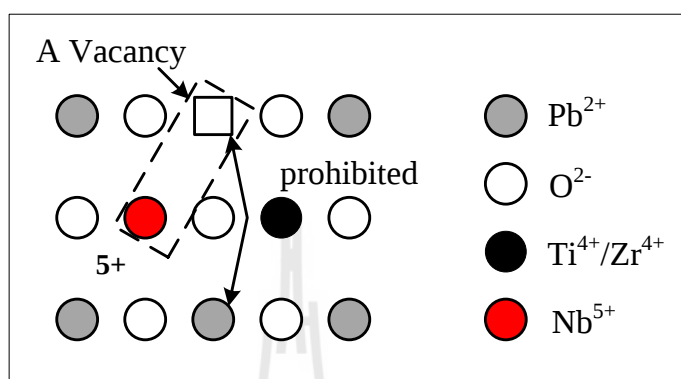
รูปที่ 2.8 ค่าปัจจัยคู่ความเพียโซอิเล็กทริกและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก
บริเวณ Morphotropic phase Boundary (Moulson and Herbert, 2003)

การนำวัสดุเซรามิก PZT ไปประยุกต์ใช้นั้น จำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกให้เหมาะสมกับความต้องการสำหรับอุปกรณ์นั้น ๆ วิธีการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเซรามิก PZT ให้เหมาะสมกับการใช้งาน คือการเจือด้วยสารต่าง ๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กทริก สมบัติไฟฟ้าเชิงกลและสมบัติไฟฟ้าเชิงแสงของวัสดุเซรามิก

สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT ที่ใกล้เคียงกับเซรามิกเพโรสไกต์และเฟสโรด สามารถปรับปรุงให้เหมาะสมกับลักษณะการประยุกต์ใช้ในแต่ละประเภทของเพียโซอิเล็กทริก โดยการปรับปรุงส่วนผสมวัสดุเซรามิก PZT ด้วยการเติมสารเจือ ซึ่งการเติมสารเจือส่งผลให้สมบัติของวัสดุเซรามิก PZT แตกต่างกันไป โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ Soft และ Hard เซรามิก โดยกลุ่ม Soft เซรามิกเกิดจากการแทนที่อะตอมบางอะตอมในวัสดุเซรามิกเพโรสไกต์ด้วยอะตอมจำพวกตัวให้ (Donor) ส่วนกลุ่ม Hard เซรามิกเกิดจากการแทนที่อะตอมบางอะตอมในวัสดุเซรามิกเพโรสไกต์ด้วยอะตอมจำพวกตัวรับ (Acceptor)

วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เกิดจากการแทนที่บางอะตอมในโครงสร้างผลึกด้วยอะตอมของตัวให้ หรือสารเจือที่มีจำนวนประจุของอะตอมมากกว่าประจุของอะตอมของสารที่ถูกแทนที่ จึงต้องมีการชดเชยด้วยตำแหน่งว่างของประจุบวก สารเจือตัวให้ที่เติมลงไปในโครงสร้างผลึกต้องมีจำนวนประจุมากกว่า Pb^{2+} , Ti^{4+} หรือ Zr^{4+} ตัวอย่างเช่นการเจือ La^{3+} , Nd^{3+} , Sb^{3+} หรือ Th^{4+} เพื่อแทนที่ในตำแหน่ง A-site ของอะตอม Pb^{2+} หรือการเจือ Nb^{5+} , Sb^{5+} หรือ W^{6+} เพื่อแทนที่ในตำแหน่ง B-site ของอะตอม Ti^{4+} หรือ Zr^{4+} ตัวอย่างเช่นการเจือ Nb^{5+} เข้าไปในโครงสร้างผลึกแบบเพโรสไกต์ของวัสดุเซรามิก PZT ประจุของอะตอม Nb^{5+} เข้าไปยึดครองตำแหน่ง B-site โดยเข้าไปแทนที่ประจุของอะตอม Ti^{4+} หรือ Zr^{4+} เนื่องจากประจุของอะตอมของสารเจือมีจำนวนเวเลนซ์ที่มากกว่า 4+ จึงทำให้เกิดสภาวะที่มีประจุบวกเกิน ส่งผลให้เกิดช่องว่างของอะตอม Pb ดังแสดงในรูปที่ 2.9 การเจือสารตัวให้ส่งผลไม่มากในการเกิดไดโพลที่สามารถเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากประจุของอะตอมของ Pb ไม่สามารถกระโดด (Hop) ไปในช่องว่างที่ตำแหน่ง A-site ข้างเคียงได้ เพราะว่ามีอะตอมของออกซิเจนล้อมรอบอะตอมของ Pb ไว้โดยรอบ ดังนั้นวัสดุจึงมักเกิดสมมูลประจุโดยการเกิดไอออนบวกส่งผลให้ผนังโดเมนเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น โดเมนเกิดการจัดเรียงตัวได้ดียิ่งขึ้นเมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ดังนั้นวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft จึงมักมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ค่าปัจจัยการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric dissipation factor : $\tan \delta$) ค่าความยืดหยุ่น และค่าปัจจัยการคู่ควบเชิงกลไฟฟ้า (Electromechanical coupling coefficient: k) มีค่าสูง ทำให้เหมาะที่นำไปใช้ในการแปลงการสั่นทางกลไปเป็นไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 2.1 แต่วัสดุพวกนี้มักจะถูกทำลายด้วยไฟฟ้าได้ง่าย มีการนำไฟฟ้า และค่าปัจจัยคุณภาพ (Quality factors : Q_c) ที่ต่ำ เนื่องจากวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft มีตัวแปรการสูญเสีย

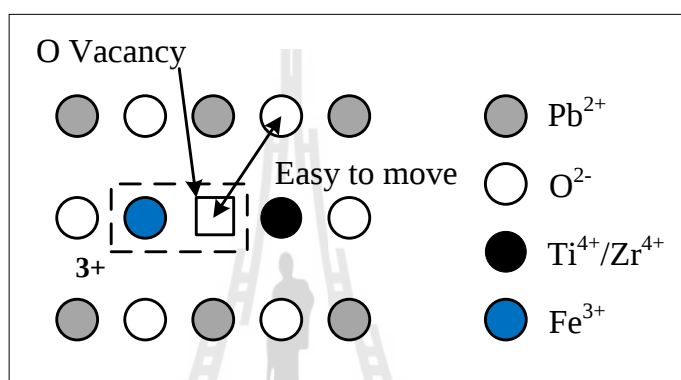
มากกว่า (วนวนอีสเตอร์ซีส์ใหญ่) จึงไม่ค่อยถูกนำไปใช้งานที่ต้องใช้ความถี่ และสนามไฟฟ้าค่าสูง ตัวอย่างเช่น ตัวกรองคลื่น (Wave filters) เพราะจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน และมีความร้อนสูง ดังนั้นวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft จึงมักนำไปใช้งานเป็นเซนเซอร์



รูปที่ 2.9 การเจือสารตัวให้อิออนในโครงสร้างผลึกของวัสดุเซรามิก PZT

วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard เกิดจากการแทนที่บางอะตอมในโครงสร้างผลึกด้วยอะตอมของตัวรับ (Acceptor) หรือสารเจือที่มีจำนวนประจุของอะตอมน้อยกว่าประจุของอะตอมของสารที่ถูกแทนที่ จึงต้องมีการชดเชยด้วยช่องว่างออกซิเจน สารเจือตัวรับที่เติมลงไป โครงสร้างผลึกต้องมีจำนวนประจุน้อยกว่า Pb^{2+} , Ti^{4+} หรือ Zr^{4+} ตัวอย่างเช่นเจือ K^{+} หรือ Na^{+} เพื่อแทนที่ในตำแหน่ง A-site ของอะตอม Pb^{2+} หรือการเจือ Fe^{2+} , Fe^{3+} , Co^{2+} , Co^{3+} , Mn^{2+} , Mn^{3+} , Ni^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} เพื่อแทนที่ในตำแหน่ง B-site ของอะตอม Ti^{4+} หรือ Zr^{4+} ตัวอย่างเช่นการเจือ Fe^{3+} เข้าไปในโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ของวัสดุเซรามิก PZT ประจุของอะตอม Fe^{3+} เข้าไปยึดครองตำแหน่ง B-site โดยเข้าไปแทนที่ประจุของอะตอม Ti^{4+} หรือ Zr^{4+} เนื่องจากประจุของอะตอมของสารเจือมีจำนวนเวเลนซ์ที่น้อยกว่า 4+ จึงทำให้เกิดสภาวะที่ขาดประจุบวก ส่งผลให้เกิดช่องว่างของออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 การเจือสารตัวรับทำให้เกิดไดโพลได้อย่างง่าย ซึ่งเกิดขึ้นจากประจุของอะตอมของ Fe^{3+} (ประจุบวก) กับตำแหน่งช่องว่างของออกซิเจน (ประจุลบ) โดยทั่วไปแล้วตำแหน่งช่องว่างของประจุบวกเคลื่อนที่ได้ยากกว่าตำแหน่งช่องว่างของออกซิเจน ทั้งนี้เนื่องจากประจุของออกซิเจนมีตำแหน่งในโครงผลึกที่ต่อเนื่อง จึงทำให้การเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างประจุกับตำแหน่งช่องว่างง่ายขึ้น เสมือนว่าตำแหน่งช่องว่างของออกซิเจนนั้นเคลื่อนที่ได้ง่าย (สุธรรม ศรีหล่มสัก, 2008) ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของผนังโดเมนถูกจำกัด นอกจากนี้การเจือสารตัวรับมีผลต่อการตรึงของโดเมนผ่านการจัดเรียงตัวใหม่ของไดโพล จึงทำให้ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า ค่าการ

สูญเสียทางไฟฟ้าและทางกลลดลง ส่วนค่าสนามไฟฟ้าลบถ่วง (Coercive field: E_c) และค่าปัจจัยคุณภาพเชิงกล (Mechanical Quality Factors: Q_m) มีค่าเพิ่มขึ้น การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard แสดงในตารางที่ 2.1 การเจือด้วยตัวรับมีผลทำให้การนำไฟฟ้าของวัสดุเซรามิก PZT เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การทำให้มีขั้ว และทำลายขั้ว (Depoling) ทำได้ยากกว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ส่วนใหญ่แล้ววัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ถูกนำไปใช้ในงานที่ใช้แรงดันไฟฟ้าและแรงทางกลที่สูง (Xu, 1991)



รูปที่ 2.10 การเจือสารตัวรับในโครงสร้างผลึกของวัสดุเซรามิก PZT

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard

(APC International, 2002)

ลักษณะสมบัติ	แบบ Soft	แบบ Hard
ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (d_{33})	สูง	ต่ำ
ค่าสภาพยอม (ϵ')	สูง	ต่ำ
ค่าสภาพยอม (K')	สูง	ต่ำ
ค่าสูญเสียไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$)	สูง	ต่ำ
ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้า (k_p)	สูง	ต่ำ
สภาพต้านทานทางไฟฟ้า (ρ)	สูงมาก	ต่ำ
ปัจจัยคุณภาพทางกล (Q_m)	ต่ำ	สูง
สนามไฟฟ้าลบถ่วง (E_c)	ต่ำ	สูง
โพลาริเซชัน/สลายโพลาริเซชัน	ง่าย	ยากมาก

จากรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วข้างต้นวัสดุเซรามิก PZT ทั้งแบบ Soft และแบบ Hard จึงถูกปรับปรุงเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการเพื่อใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ วัสดุเซรามิก PZT ที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายประกอบด้วย

วัสดุเซรามิก PZT-5A เป็นวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เจือด้วย Nb มีสูตรทางเคมีว่า $(\text{Pb}_{0.988}(\text{Ti}_{0.48}\text{Zr}_{0.52})_{0.976}\text{Nb}_{0.024})\text{O}_3$ วัสดุชนิดนี้มีเสถียรภาพเชิงเวลาสูง (High time stability) สภาพไวสูง (High sensitivity) และมีสภาพต้านทานทางไฟฟ้าดี จึงนิยมนำไปใช้เป็นไฮโดรโฟน

วัสดุเซรามิก PZT-5H มีสภาพไว และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงกว่าวัสดุเซรามิก PZT-5A แต่มี T_C ต่ำจึงถูกใช้ในงานที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก

วัสดุเซรามิก PZT-4 เป็นวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard เจือด้วย Sr มีสูตรเคมีว่า $(\text{Pb}_{0.94}\text{Sr}_{0.06})(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ วัสดุชนิดนี้มีค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริกต่ำ และทนทานต่อการทำลายขั้วได้สูง ถึงแม้จะถูกกระทำด้วยแรงทางกลที่สูง ดังนั้นจึงมักจะนำไปใช้ทำทรานสดิวเซอร์สำหรับเรือดำน้ำที่อยู่ใต้น้ำลึก ๆ และใช้ทำเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้า

วัสดุเซรามิก PZT-8 มีคุณสมบัติคล้ายกับ PZT-4 แต่วัสดุนี้มีค่าตัวประกอบการสูญเสียไดอิเล็กตริก ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ค่าสัมประสิทธิ์การคู่ควบที่ต่ำกว่า และทนทานต่อการทำลายขั้วมากกว่าวัสดุเซรามิก PZT-4

คุณสมบัติของวัสดุเซรามิก PZT ทั้งแบบ Soft และแบบ Hard สามารถเปรียบเทียบกันได้ดังแสดงในตารางที่ 2.2

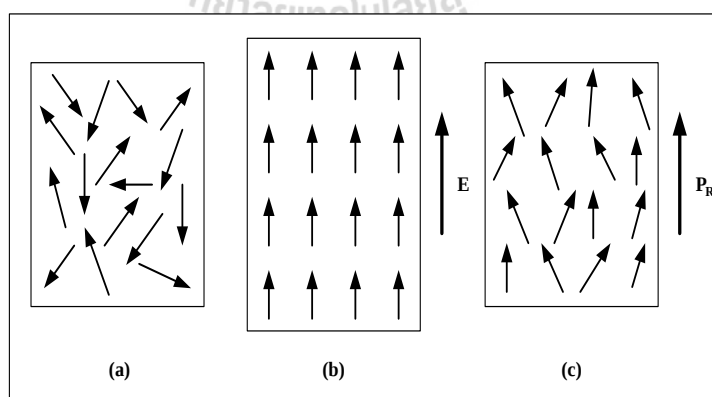
ตารางที่ 2.2 ลักษณะสมบัติของวัสดุเซรามิก PZT ที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Piezo Technologies, 2010)

ลักษณะสมบัติ	PZT-5A	PZT-5H	PZT-4	PZT-8
อุณหภูมิคูรี (T_C), ($^{\circ}\text{C}$)	360	220	325	300
ค่าสภาพยอม (K')	1750	3200	1260	1100
ค่าสูญเสียไดอิเล็กตริก ($\tan \delta$)	2.0	2.0	0.8	0.4
ค่าคงที่เพียโซอิเล็กตริก (d_{33}), (pC/N)	390	650	320	300
ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้า				
(k_p)	0.61	0.65	0.57	0.51
(k_t)	0.50	0.54	0.48	0.46

2.3.5 การทำให้เกิดสภาพขั้วหรือการโพล

เนื่องด้วยความซับซ้อนของเงื่อนไขขอบเขตความยืดหยุ่นและไฟฟ้าในแต่ละเกรน ทำให้เกรนเฟอร์โรอิเล็กทริกพหุผลึกต้องประกอบไปด้วยหลาย ๆ โดเมนเสมอ ถ้าทิศทางของสภาพการมีขั้วขึ้นเองทั่วทั้งวัสดุมีการกระจายตัวอย่างสุ่ม หรือกระจายตัวในลักษณะที่นำไปสู่สภาพการมีขั้วรวมเป็นศูนย์แล้วปรากฏการณ์โพโรอิเล็กทริกและเพียโซอิเล็กทริกในแต่ละโดเมนจะหักล้างกันจนไม่แสดงสมบัติดังกล่าวออกมา วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกพหุผลึกอาจจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วได้ โดยการใช้สนามไฟฟ้าสูง ๆ (10-100 kV/cm) และที่อุณหภูมิสูงพร้อมกัน แต่อุณหภูมิต้องต่ำกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิคูรี โดยเรียกกระบวนการเช่นนี้ว่า “การทำให้เกิดสภาพขั้ว” หรือ “การโพล (Poling)” ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนทิศทางของเกรนได้ แต่เปลี่ยนทิศทางของโดเมนในแต่ละเกรนให้อยู่ในทิศทางใกล้เคียงกับสนามไฟฟ้าได้ ทั้งนี้วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกพหุผลึกที่ถูกทำให้เกิดสภาพการมีขั้วแล้วจะแสดงสมบัติโพโรอิเล็กทริกและเพียโซอิเล็กทริก ถึงแม้ว่าจะยังคงมีผนังโดเมนจำนวนมากผลึกเชิงเดี่ยวเฟอร์โรอิเล็กทริก และเพียโซอิเล็กทริกที่ปลูกได้ มักจะประกอบไปด้วยโดเมนจำนวนน้อยและอาจจะแสดงสมบัติโพโรอิเล็กทริกรวมทั้งเพียโซอิเล็กทริกอย่างอ่อน ๆ ผลึกเชิงเดี่ยวที่ไม่มีโดเมนจะถูกเรียกว่าอยู่ใน “สถานะโดเมนเดี่ยว (Monodomain)” ซึ่งลักษณะเช่นนี้อาจทำให้เกิดขึ้นได้ในผลึกเชิงเดี่ยวโดยกระบวนการทำให้เกิดสภาพขั้ว

อย่างไรก็ตาม การทำให้เกิดสภาพการมีขั้ว (หรือการกลับทิศของสภาพการมีขั้ว (Polarization reversal)) โดยสนามไฟฟ้านั้นจะเป็นไปได้เฉพาะวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก สภาพการมีขั้วหลังจากสนามไฟฟ้าถูกนำออกไปแล้ว เรียกว่า สภาพการมีขั้วตกค้าง

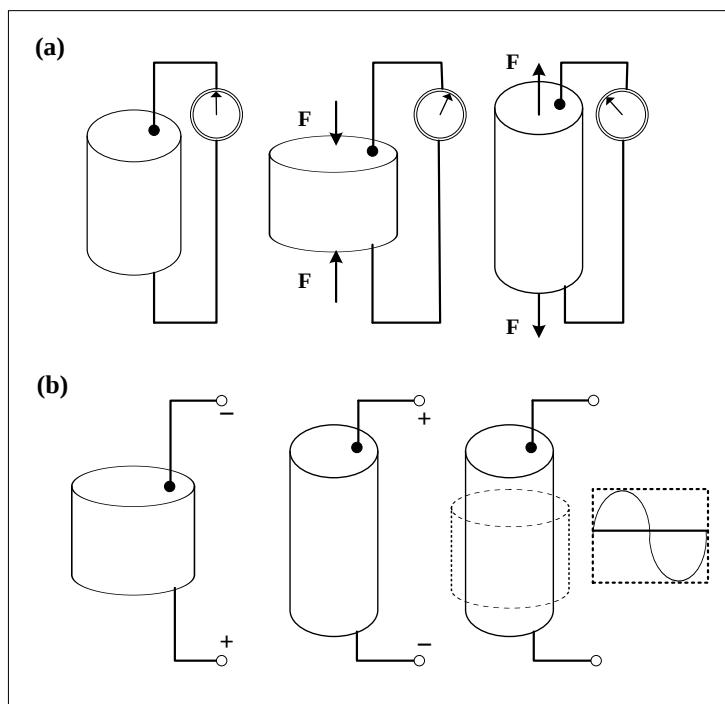


รูปที่ 2.11 (a) ทิศทางการจัดเรียงตัวของโดเมนก่อนทำให้เกิดสภาพขั้ว (b) ทิศทางการจัดเรียงตัวของโดเมนขณะทำให้เกิดสภาพขั้ว (c) ทิศทางการจัดเรียงตัวของโดเมนหลังการทำให้เกิดสภาพขั้ว

2.3.6 ปฏิกิริยาเพียโซอิเล็กทริกในวัสดุเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก

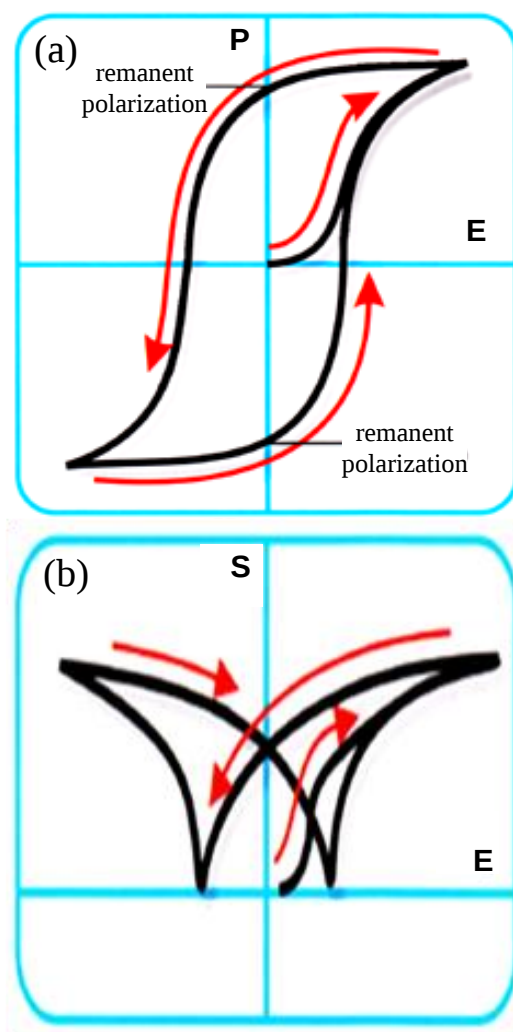
ปฏิกิริยาเพียโซอิเล็กทริกในวัสดุเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อวัสดุเซรามิกผ่านกระบวนการทำให้เกิดสภาพชั่วคราวนำมาใช้งาน การให้กระแสไฟฟ้าเพื่อทำการโพลวัสดุเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก ทำให้เกิดการจัดเรียงไดโพลของผลึกหรือโดเมนภายในวัสดุเซรามิก และทำให้มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับผลึกเชิงเดี่ยว ดังนั้นกระบวนการทำให้เกิดสภาพชั่วคราวจึงเป็นกระบวนการสำคัญที่ทำให้เกิดสภาพเพียโซอิเล็กทริกในวัสดุเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก หากไม่มีการทำให้เกิดสภาพชั่วคราววัสดุเซรามิกก็ไม่สามารถเปลี่ยนสภาพแม้ว่าแต่ละผลึกเป็นเพียโซอิเล็กทริกอยู่แล้วก็ตาม เนื่องจากโพลาริเซชันมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแบบสุ่ม ซึ่งทำให้โพลาริเซชันรวมมีค่าเป็นศูนย์ การทำให้เกิดสภาพชั่วคราวสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวัสดุเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกต้องมากกว่าค่าสนามไฟฟ้าลบด้าง (Coercive field) ซึ่งเป็นค่าสนามไฟฟ้าที่ทำให้โพลาริเซชันมีการเปลี่ยนทิศทาง

วัสดุเซรามิก PZT จัดได้ว่าเป็นวัสดุที่สามารถแสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกได้ดี กล่าวคือ เมื่อวัสดุเซรามิก PZT นั้นถูกแรงกลมากระทำให้เกิดความเค้น (Stress) ขึ้น เช่น ถูกกดหรือ ถูกกระแทก จะส่งผลให้เกิดการแยกขั้วไฟฟ้า และเกิดประจุไฟฟ้าขึ้นมาบนผิวของวัสดุดังกล่าว โดยเรียกปรากฏการณ์แบบนี้ว่า ปรากฏการณ์ตรง (Direct effect) หรือปรากฏการณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator action) ดังแสดงในรูปที่ 2.12(a) ในทำนองกลับกัน เมื่อสารได้รับสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการยืดหดตัว คือ ปรากฏการณ์ย้อนกลับ (Converse effect) หรือ ปรากฏการณ์มอเตอร์ (Motor effect) ดังแสดงในรูปที่ 2.12(b) จากปรากฏการณ์ข้างต้นนี้ พบว่า ปริมาณของการเกิดโพลาริเซชันขึ้นกับขนาดของความเค้นที่ให้กับวัสดุ และประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของแรงที่กระทำ เช่น เป็นแรงกด หรือแรงดึง เป็นต้น



รูปที่ 2.12 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (a) ปรากฏการณ์ตรง และ (b) ปรากฏการณ์ย้อนกลับ

ในการป้อนสนามไฟฟ้ากระแสสลับค่าสูง ๆ ให้กับวัสดุเซรามิก PZT ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของโพลาไรเซชันและขนาด หากนำการเปลี่ยนแปลงไปแสดงในลักษณะรูปของกราฟจะได้วงวนฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loops) ดังรูปที่ 3.13(a) และในขณะเดียวกันการป้อนสนามไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในทิศเดียวกับการเกิดโพลาไรเซชัน ซึ่งแปรผันตรงกับสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 2.13(b)



รูปที่ 2.13 (a) วงวนฮิสเทอรีซิส (b) วงวนคล้ายปีกผีเสื้อ (APC International, 2002)

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทั้งแบบปรากฏการณ์ตรง และย้อนกลับนี้ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติยืดหยุ่น (Elastic property) ของวัสดุดังต่อไปนี้

$$D = \epsilon^T E + dT \quad (\text{ปรากฏการณ์การตรง}) \quad (2.2)$$

$$S = s^E T + dE \quad (\text{ปรากฏการณ์การย้อนกลับ}) \quad (2.3)$$

โดยที่ D คือ ค่าการขจัดทางไดอิเล็กทริก (Dielectric displacement)

T	คือ ความเค้น
E	คือ สนามไฟฟ้า
S	คือ ความเครียด
d	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ทางเพียโซอิเล็กทริก
s	คือ ค่าการยอมตาม (Compliance) ซึ่งเป็นส่วนกลับของค่ายังมอดูลัส
ε	คือ ค่าสภาพยอม

โดยตัวอักษรที่เป็นตัวก้นจะเป็นสัญลักษณ์ที่บอกถึงเงื่อนไขที่ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ เช่น ในกรณีของ ε^T จะหมายถึง ค่าสภาพยอมของวัสดุเมื่อแรงเค้นมีค่าคงที่ นั่นคือ เมื่อไม่มีแรงเค้นมากระทำต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั่นเอง ส่วนในกรณีของ s^E จะหมายถึง ค่าการยอมตามของวัสดุเมื่อค่าสนามนั้นคงที่ แต่เนื่องจากสมบัติความเป็นเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุนี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางที่ให้แรงหรือสนามไฟฟ้า จึงได้มีการเขียนตัวเลขซึ่งเป็นตัวห้อยเพื่อบอกทิศทางซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการอย่างง่ายได้ดังนี้

$$D_3 = d_{33}T_3 \quad (\text{ปรากฏการณ์ตรง}); \text{เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าป้อนให้กับวัสดุ} \quad (2.4)$$

$$S_3 = d_{33}E_3 \quad (\text{ปรากฏการณ์ย้อนกลับ}); \text{เมื่อไม่มีแรงเชิงกลกระทำต่อวัสดุ} \quad (2.5)$$

โดยค่า d มีค่าอยู่ในช่วง $\times 10^{-12}$ C/N สำหรับปรากฏการณ์ตรง และมีค่าอยู่ในช่วง $\times 10^{-12}$ m/V สำหรับปรากฏการณ์ย้อนกลับ ซึ่งวัสดุที่มีค่า d สูง มักนิยมนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการสั่น หรือ เคลื่อนที่ เช่น โซนาร์ และเครื่องบันทึกเสียง เป็นต้น

สำหรับกรณีของวงจรเปิดนั้นต้องพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แรงดัน (Voltage coefficient: g) โดยค่า g (มีหน่วยเป็น mV/N) บอกถึงความสามารถของวัสดุในการสร้างศักย์ไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความเค้นที่ให้แก่วัสดุ สัมประสิทธิ์ g และ d มีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 2.6

$$g = \frac{d}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \quad (2.6)$$

โดยที่ ε_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุ

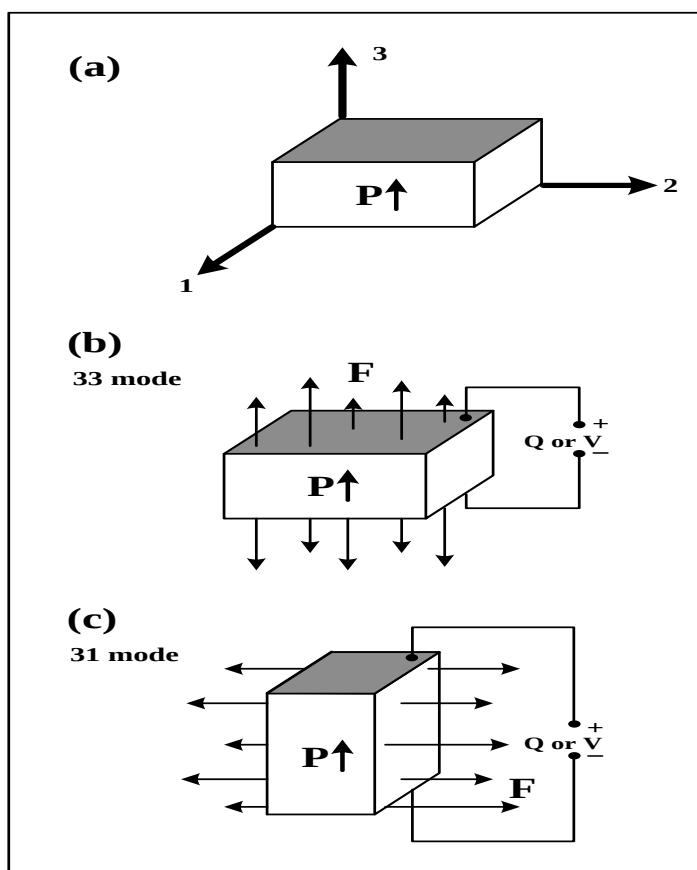
ε_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่า 8.854×10^{-12} F/m

2.3.7 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก

สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient) เป็นการวัดค่าของการเกิดโพลาไรเซชันเมื่อให้แรงเชิงกลแก่วัสดุเซรามิกหนึ่งหน่วย หรือการวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวเมื่อให้แรงทางไฟฟ้าหนึ่งหน่วยแก่วัสดุเซรามิก โดยตัวเลขที่ห้อยตัวหน้าบอกทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนเข้าไปในวัสดุหรือที่วัสดุจ่ายออกมาเมื่อถูกแรงทางกลกระทำ ส่วนตัวเลขห้อยตัวหลังแสดงทิศทางที่วัสดุเกิดการยืดหรือหดเมื่อถูกสนามไฟฟ้าภายนอกกระทำหรือทิศทางที่ให้แรงทางกลกระทำต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริก หมายเลขถูกกำหนดโดยอ้างอิงกับทิศทางที่เกิดโพลาไรเซชัน จากรูปจะเห็นว่าทิศทางหมายเลข 3 เป็นแกน z ของผลึกซึ่งขนานกับทิศที่เหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้าในวัสดุ แกนของผลึกที่เหลือคือ x และแกน y แทนด้วยทิศหมายเลข 1 และ 2 ตามลำดับดังรูปที่ 2.14(a) ตารางที่ 2.3 เป็นค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของเพียโซอิเล็กทริกวัสดุเซรามิกบางชนิด

d_{33} คือสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่เกิดจากการวัดการเกิดโพลาไรเซชันในทิศของการทำขั้วของวัสดุเซรามิก เมื่อมีการให้ความเค้นแก่วัสดุเซรามิกในทิศเดียวกับทิศของการทำขั้วของวัสดุเซรามิก ดังแสดงในรูปที่ 2.14(b)

d_{31} คือสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่เกิดจากการวัดการเกิดโพลาไรเซชันในทิศของการทำขั้วของวัสดุเซรามิก เมื่อมีการให้ความเค้นแก่วัสดุเซรามิกในทิศตั้งฉากกับทิศของการทำขั้วของวัสดุเซรามิก ดังแสดงในรูปที่ 2.14(c)



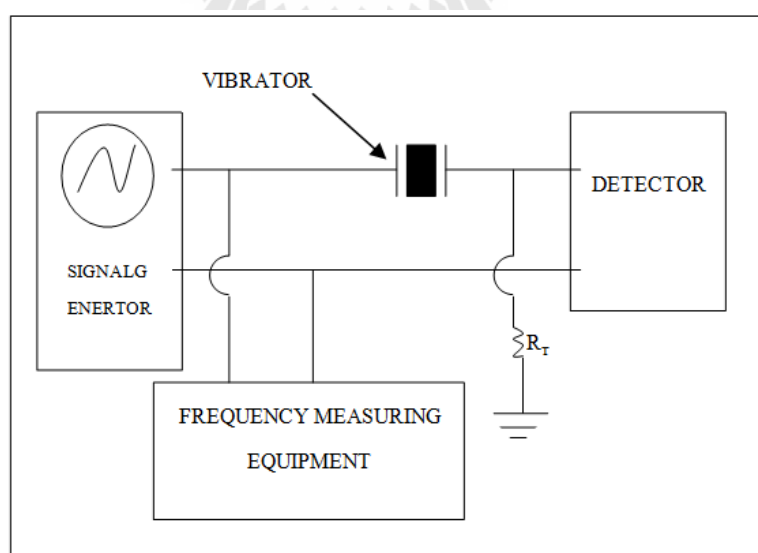
รูปที่ 2.14 ทิศทางของแรงกระทำที่มีผลต่อวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

ตารางที่ 2.3 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของเฟอร์โรอิเล็กทริกวัสดุเซรามิกบางชนิด (ขั้นตอน
ทรงศิริ, 2008)

ชนิดของวัสดุเซรามิก	d_{33} (pC/N)	d_{31} (pC/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)

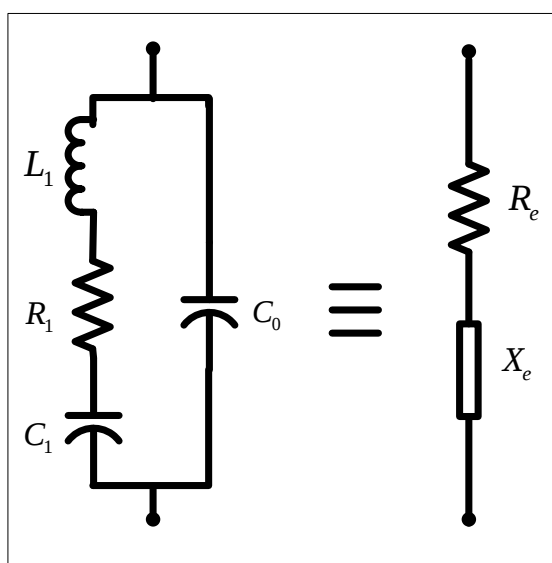
2.3.8 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้า

ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถ หรือความสามารถได้เปรียบที่เกิดขึ้นกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยจะเป็นตัวบอกความสามารถในการเปลี่ยนรูปของพลังงาน ไม่ใช่เป็นบ่งบอกประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงาน โดยที่ความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลหรือในทางกลับกันความสามารถที่เปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าบอกได้ด้วยค่า k ซึ่งวัดจากทิศทางของการให้สนามไฟฟ้า และทิศทางของการวัดพลังงานกลที่ให้ออกมา โดยค่า k ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ไม่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก พบว่ามีค่าน้อยกว่า 0.1 ส่วนในวัสดุเซรามิกบางชนิดที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีค่าค่อนข้างสูง ($0.4 \leq k \leq 0.7$) สำหรับผลึกเชิงเดี่ยวของเฟอร์โรอิเล็กทริกบางชนิดอาจจะมีค่าสูงมาก ($k \leq 0.9$) อย่างไรก็ตามค่า k จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปพลังงานไม่สมบูรณ์ สามารถหาค่า k โดยอาศัยพฤติกรรมทางไฟฟ้ากระแสสลับของผลึกของสารเพียโซอิเล็กทริก ทำการวัดค่ารีแอคแตนซ์ (Reactance) หรือค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) เทียบกับความถี่ นั่นคือการวัดโดยใช้วิธีการเรโซแนนซ์ โดยวิธีการเรโซแนนซ์ได้อธิบายไว้ในมาตรฐาน IRE เกี่ยวกับเพียโซอิเล็กทริก คริสตอล (IRE standards, 1957) และมีงานวิจัยอื่น ๆ อีก ส่วนหลักการจะกำหนดให้ f_m เป็นความถี่ที่อิมพีแดนซ์ต่ำสุดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และกำหนดให้ f_n เป็นความถี่ที่อิมพีแดนซ์สูงสุดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก



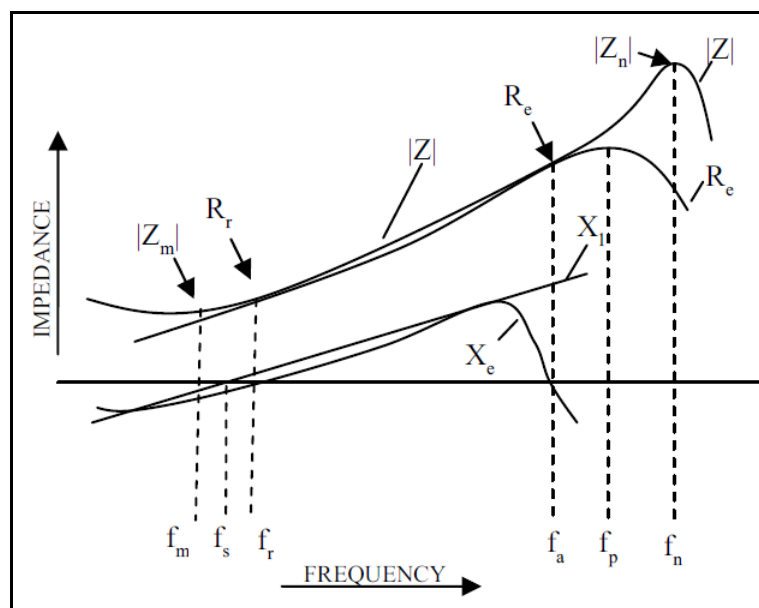
รูปที่ 2.15 โครงข่ายที่มีการกำหนดค่าของ f_m และ f_n ของเครื่องสั่นเพียโซอิเล็กทริก วัสดุเซรามิก [ดัดแปลงมาจาก ((IRE standards, 1961))]

จากการร่วมคู่พลังงานระหว่างการกระตุ้นทางไฟฟ้ากับการสั่นทางกลโดยผ่านผลทางเพียโซอิเล็กทริก ดังนั้นการสั่นทางกลจึงเสมือนว่ามีวงจรอนุกรม LCR ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะได้วงจรสมมูลโดยที่ L_1 แทนมวลของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก C_1 แทนความหนืดทางกล R_1 แทนการสูญเสียต่าง ๆ และ C_0 แทนค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นเพลทขนานที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ดังแสดงในรูปที่ 2.16



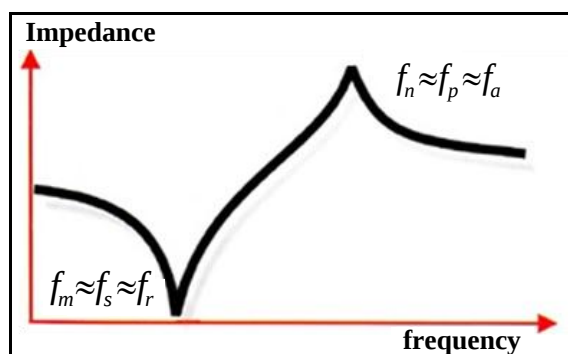
รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลการสั่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (IRE standards, 1957)

สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุสามารถหาได้จากลักษณะพฤติกรรมการสั่นของวัสดุ เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับไฟฟ้ากระแสสลับ วัสดุจะยืดและหดตัวไปตามความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำให้วัสดุยืดและหดตัวได้ดีที่สุดเรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance frequency) ที่ความถี่นี้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปเป็นพลังงานกลได้สูงสุด นั่นคือที่ความถี่นี้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะมีพฤติกรรมการสั่นตัวรุนแรงสูงสุดและสูญเสียการสั่นสะท้อนน้อยที่สุด ความถี่เรโซแนนซ์ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะแปรตามองค์ประกอบทางเคมีและรูปทรงของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยทั่วไปวัสดุที่มีความหนามากจะมีความถี่เรโซแนนซ์ต่ำกว่าวัสดุแบบบาง



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ ($|Z|$) ความต้านทาน (R_e) รีแอกแตนซ์ (X_e) และ Series arm reactance (X_i) กับความถี่การสั่นตัวของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (IRE standards, 1957)

รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ต่อความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก พบว่าความถี่ f_m คือความถี่ที่ความนำเชิงซ้อนสูงสุด หรือที่ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด f_s คือความถี่เรโซแนนซ์อนุกรม f_r คือความถี่เรโซแนนซ์ f_a คือความถี่ต้านเรโซแนนซ์ f_p คือความถี่เรโซแนนซ์ขนาน f_n คือความถี่ที่ความนำเชิงซ้อนต่ำสุดหรือที่ค่าอิมพีแดนซ์สูงสุด (IRE standards, 1957)



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ในการสั่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (APC International, 2002)

จากรูปที่ 2.18 พบว่า f_m มีค่าใกล้เคียง f_s และ f_r เนื่องจาก f_m เป็นความถี่ที่อิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลมีค่าต่ำสุดและความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียเชิงกลมีค่าน้อยมาก เมื่อมีการเพิ่มความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับที่ทำการจ่ายให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะทำให้อิมพีแดนซ์ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ f_n ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ f_p และ f_a

จากรูปที่ 2.18 สามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ ได้โดยใช้ค่าที่ได้จากการประมาณคือ $(f_m \approx f_s \approx f_r)$ และ $(f_n \approx f_p \approx f_a)$ ทำให้สามารถหาค่าปัจจัยคู่ควบทางกลไฟฟ้าหรือค่า k (APC International, 2002) ได้ดังนี้

สำหรับวัสดุเซรามิกที่เป็นแบบดิสก์

$$k_p \approx \sqrt{[(2.51(f_n - f_m)/f_n) - ((f_n - f_m)/f_n)^2]} \quad (2.7)$$

สำหรับวัสดุเซรามิกที่เป็นแบบแท่ง (ที่ขึ้นกับความหนา)

$$k_t^2 = k_{33}^2 = (\pi/2)(f_n/f_m)\tan[(\pi/2)((f_n - f_m)/f_n)] \quad (2.8)$$

สำหรับวัสดุเซรามิกที่เป็นแบบระนาบ

$$k_{31}^2 = \frac{(\pi/2)(f_n/f_m)\tan[(\pi/2)((f_n - f_m)/f_m)]}{1 + (\pi/2)(f_n/f_m)\tan[(\pi/2)((f_n - f_m)/f_m)]} \quad (2.9)$$

สำหรับวัสดุเซรามิกที่เป็นแบบรูปทรงอื่นๆ

$$k_{eff}^2 = (f_n^2 - f_m^2)/f_n^2 \quad (2.10)$$

โดยที่ f_n คือ ความถี่ที่อิมพีแดนซ์สูงสุด (Hz)
 f_m คือ ความถี่ที่อิมพีแดนซ์ต่ำสุด (Hz)

2.3.9 ปัจจัยคุณภาพทางกล

ปัจจัยคุณภาพทางกล (Q_m) เป็นค่าที่บอถึงประสิทธิภาพในการแปลงผันพลังงานทางกลของวัสดุเซรามิก PZT ซึ่งถ้าปัจจัย Q_m มีค่าสูง แสดงว่ามีการสูญเสียพลังงานทางกลต่ำ คือเมื่อให้พลังงานทางกลเข้าไปสามารถเปลี่ยนไปเป็นความเครียดได้เกือบทั้งหมดมีการดูดซับเรงน้อย ดังแสดงในสมการที่ 2.11

$$Q_m = f_n^2 / ((2\pi f_m C_0 Z_m)(f_n^2 - f_m^2)) \quad (2.11)$$

โดยที่	Q_m	คือ ปัจจัยคุณภาพทางกล
	f_n	คือ ความถี่ที่อิมพีแดนซ์สูงสุด
	f_m	คือ ความถี่ที่อิมพีแดนซ์ต่ำสุด
	C_0	คือ ค่าความเก็บประจุของวัสดุเซรามิกที่ความถี่ต่ำ
	Z_m	คือ ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด

2.3.10 ปัจจัยคุณภาพทางไดอิเล็กทริก

ปัจจัยคุณภาพทางไดอิเล็กทริก (Q_e) เป็นค่าที่บอถึงประสิทธิภาพในการแปลงผันพลังงานทางไฟฟ้าของวัสดุเซรามิก PZT ซึ่งถ้าปัจจัย Q_e มีค่าสูง แสดงว่ามีการสูญเสียพลังงานทางไฟฟ้าต่ำ เกิดความร้อนน้อย คือเมื่อป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้าไปสามารถทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโพลาริเซชันได้เกือบทั้งหมด ส่งผลให้มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูง ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$Q_e = 1/D = 1/\tan \delta \quad (2.12)$$

โดยที่	Q_e	คือ ปัจจัยคุณภาพทางไดอิเล็กทริก
	D	คือ ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกซึ่งได้จากปัจจัยการกระจายไดอิเล็กทริก
	$\tan \delta$	คือ ปัจจัยการกระจายไดอิเล็กทริก

2.3.11 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

วัสดุไดอิเล็กทริก ถือได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในทางอุตสาหกรรม โดยทั่วไปแล้ววัสดุไดอิเล็กทริกจะมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าซึ่งไม่นำไฟฟ้า แต่จะมีความแตกต่างจากฉนวนไฟฟ้าโดยทั่วไปคือการมีสมบัติของการเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งค่า

ความสามารถในการกักเก็บประจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริกนี้จะเรียกว่า ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) เมื่อทำการให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุไดอิเล็กทริก วัสดุไดอิเล็กทริกจะเกิดโพลาไรเซชันขึ้น ซึ่งจะมีค่าเท่ากับผลรวมของโพลาไรเซชันต่อหนึ่งหน่วย ซึ่งถ้ามีค่าโพลาไรเซชันสูงจะส่งผลให้วัสดุไดอิเล็กทริกมีค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย

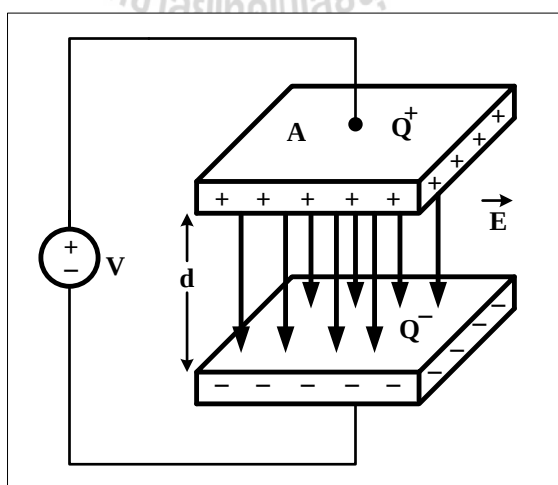
จากรูปที่ 2.19 เป็นตัวเก็บประจุอย่างง่ายคือ เป็นแผ่นขนานที่ทำด้วยโลหะโดยมีระยะห่างเท่ากับ d พื้นที่ของแผ่นเท่ากับ A ระหว่างแผ่นขนานเป็นสุญญากาศ เมื่อมีศักย์ไฟฟ้า V ครอบคลุมแผ่นขนานโดยที่แผ่นโลหะแผ่นหนึ่งจะเป็นแผ่นประจุ $+Q$ และอีกแผ่นหนึ่งจะเป็นแผ่นประจุ $-Q$ ค่าประจุนี้จะเป็นสัดส่วนกับ V ดังสมการที่ 2.13

$$Q = CV \quad (2.13)$$

หรือ

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.14)$$

โดยที่ C คือ ค่าความจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อโวลต์ (C/V) หรือ ฟารัด (F)
 Q คือ ประจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็น คูลอมบ์ (C)
 V คือ ศักย์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (V)



รูปที่ 2.19 ตัวเก็บประจุแผ่นขนานเมื่อไม่มีสารไดอิเล็กทริก

สารไดอิเล็กทริกเป็นฉนวนที่ใช้ทำหน้าที่คั่นระหว่างตัวนำของตัวเก็บประจุเพื่อทำให้ความหนาแน่นประจุสูงขึ้นกว่าแก๊สรวมของทั้งอากาศ โดยมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เป็นตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้สาร ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นเป็นกี่เท่าของตัวเก็บประจุอากาศดังสมการที่ 2.15

$$C = \epsilon C_0 \quad (2.15)$$

โดยที่ C_0 คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุสุญญากาศ
 C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริก
 ϵ คือ ค่าสภาพยอม

โดยปกติค่าสภาพยอมจะแสดงเป็นค่าสัมพัทธ์ (ϵ_r) เทียบกับค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (ϵ_0) คือ

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.16)$$

โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศมีค่า 8.854×10^{-12} F/m
 ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

และจากความสัมพันธ์ $C = Q/V$ สำหรับที่ไม่มีสารไดอิเล็กทริกจะได้ว่า

$$C = C_0 \frac{\epsilon_0 A}{d_0} \quad (2.17)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก
 d_0 คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนานที่ไม่มีสารไดอิเล็กทริก

สำหรับตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ϵ_r ได้ว่า

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2.18)$$

โดยที่ ϵ_0	คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศมีค่า 8.854×10^{-12} F/m
ϵ_r	คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์
C	คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริก
A	คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก
d	คือ ความหนาของสารไดอิเล็กทริก

ความจุไฟฟ้าบอกถึงความสามารถในการเก็บประจุ ยังมีความจุไฟฟ้ามากเท่าใดยิ่งเก็บประจุได้มากเท่านั้น ถ้าหากตัวเก็บประจุมีขนาดพื้นที่หน้าตัดมากกว่าระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนานจะได้ว่าความจุไฟฟ้ามีค่าดังสมการที่ 2.18 การมีไดอิเล็กทริกอยู่ในตัวเก็บประจุ จะช่วยเพิ่มพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุให้สามารถสร้างตัวเก็บประจุขนาดเล็กแต่ความจุไฟฟ้าสูงได้

2.3.12 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก

ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss: $\tan \delta$) สำหรับวัสดุเซรามิกนั้นเป็นค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการให้พลังงานไฟฟ้าแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปเป็นรูปแบบอื่น ๆ เช่น เปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อน เป็นต้น ซึ่งสามารถประมาณได้จากสัดส่วนของความได้เปรียบทางพลังงานของวงจรแผ่นตัวนำคู่ขนาน และสามารถวัดได้จากวงจรอิมพีแดนซ์ ซึ่งปริมาณของค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกนั้นสามารถประมาณได้ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์

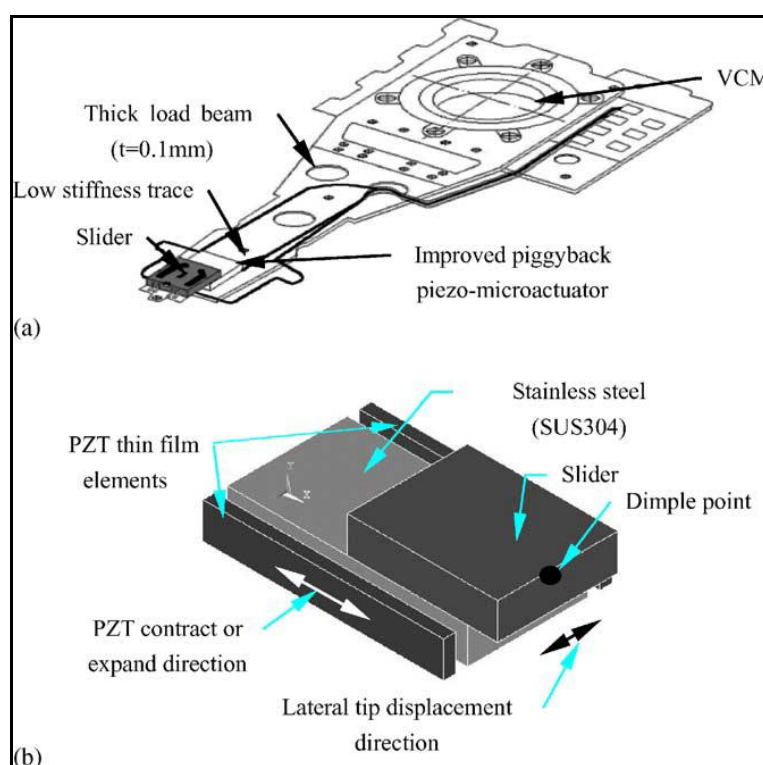
2.3.13 การเสื่อมอายุ

การเสื่อมอายุ (Aging) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งการเสื่อมอายุถูกกระตุ้นได้โดยการทำงานภายใต้อุณหภูมิสูง หรือการทำงานภายใต้สภาวะโหลดทางกล หรือการทำงานภายใต้สภาวะโหลดทางไฟฟ้า การเสื่อมอายุของสมบัติต่าง ๆ เช่น ค่าสภาพยอม สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและความยืดหยุ่นกับเวลา อาจสามารถอธิบายได้ในช่วงเวลาที่กว้างมาก จึงอาศัยความสัมพันธ์ที่ขึ้นกับลอการิทึมของเวลา

2.3.14 การนำวัสดุเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนแบบไมโครินหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเป็นอย่างมาก โดยที่งานเก็บข้อมูลสามารถจุข้อมูลได้มากขึ้น แต่หัวอ่าน/เขียนของฮาร์ดดิสก์ยังมีความสามารถในการอ่าน/เขียนค่อนข้างต่ำ ดังนั้นเพื่อให้หัวอ่าน/เขียนสามารถอ่าน/เขียนตำแหน่งบนจานบันทึกข้อมูลได้ละเอียด

มากยิ่งขึ้น จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นในการพัฒนาหัวอ่าน/เขียนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จากเดิมที่ใช้ Voice Coil Motor (VCM) เป็นตัวขับเคลื่อนเพียงอย่างเดียว จึงมีการพัฒนาตัวขับเคลื่อนที่ใช้แบบสองตัวขับเคลื่อนร่วมกัน โดยที่จะใช้ VCM เป็นตัวขับเคลื่อนหลักควบคู่กับตัวขับเคลื่อนแบบไมโครให้เป็นตัวขับเคลื่อนรอง การพัฒนากระบวนการผลิตแบบใหม่ของตัวขับเคลื่อนแบบไมโคร โดยใช้วัสดุเซรามิก PZT แบบฟิล์มบางสำหรับใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยที่วัสดุเซรามิก PZT แบบฟิล์มบางต้องปราศจากความเครียดและติดกาวลงบนแผ่นสแตนเลสรวมถึงการอบให้กาวแห้ง



รูปที่ 2.20 การปรับปรุงตัวกระตุ้นแบบไมโครของ HGA (a) แขนอ่าน/เขียน (b) หัวสไลเดอร์ และวัสดุเซรามิก PZTแบบฟิล์มบาง (Jing et al., 2004)

รูปที่ 2.20(a) แสดงให้เห็นถึงการออกแบบวัสดุเซรามิก PZT แบบฟิล์มบางให้เป็นตัวขับเคลื่อนแบบไมโคร (Microactuator) สำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ตัวขับเคลื่อนแบบสองตัวขับเคลื่อน ตัวขับเคลื่อนแบบไมโครจะประกอบด้วยวัสดุเซรามิก PZT แบบฟิล์มบางสองแผ่น โดยนำไปติดลงบนพื้นผิวของแผ่นสแตนเลสทั้งสองด้าน วัสดุเซรามิก PZT แบบฟิล์มบางที่ใช้จะมีความหนา $0.6 \mu\text{m}$ ความยาว 1.2 mm และมีความกว้าง 0.6 mm รูปที่ 2.20(b) โครงสร้างของตัวขับเคลื่อนแบบไมโครที่ประกอบด้วยลงบนแผ่นสแตนเลสของหัวสไลเดอร์ แล้วทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ตรงข้ามกันให้กับวัสดุเซรามิก

PZT แบบฟิล์มบางของแต่ละข้าง ดังนั้นจึงจะสามารถทำให้แกนอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์เคลื่อนที่ได้ (Jing et al., 2004)

2.4 ปรัชสน์วรรณกรรม

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ ทำการศึกษาการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT ที่มีผลมาจากการให้ความร้อนแก่วัสดุ โดยจะทำการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเซรามิก PZT สภาพการเสื่อมอายุสามารถวัดได้จากพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น d_{33} ε k_p Q_m และ Q_e โดยใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น เครื่อง Piezo d_{33} Test System เครื่อง Precision LCR Meter เครื่อง Impedance/gain-phase Analyzer และชุดอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับเครื่องมือการวัดค่าอิมพีแดนซ์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปรัชสน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัย วิธีการทดลองและเทคนิคที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณณักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อันได้แก่ฐานข้อมูลจาก ScienceDirect และ IEEE เป็นต้น ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

Medeiros et al. (1994) นำเสนอเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิในการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วที่มีผลต่อการเสื่อมอายุและเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT โดยทำการศึกษาวัสดุเซรามิก PZT ทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ วัสดุเซรามิก PZT ที่ไม่มีการเจือ วัสดุเซรามิก PZT ที่เจือด้วย Nb วัสดุเซรามิก PZT ที่เจือด้วย La และ วัสดุเซรามิก PZT ที่เจือด้วย Fe ซึ่งทั้งหมดมีลักษณะเป็นดิสก์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm และหนา 2 mm โดยทำให้เกิดสภาพการมีขั้วที่อุณหภูมิห้อง 80 °C และ 120 °C โดยให้สนามไฟฟ้าในการทำให้เกิดสภาพขั้วที่ 30 kV/cm เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการวัดค่าข้อมูลการเสื่อมอายุของค่าคงที่ความถี่ประมาณ 1,000 นาที ในขณะที่การวัดค่าข้อมูลของค่าคงที่ความถี่นั้นก็จะทำการให้ความร้อนกับวัสดุเซรามิก PZT ทั้ง 4 ชนิด ไปพร้อมกับการวัดค่าข้อมูล โดยเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิที่ -40 °C ถึง 60 °C และทำการวิเคราะห์ผลของการเสื่อมอายุเริ่มตั้งแต่ 0.1 ชั่วโมงเป็นต้นไป พบว่าวัสดุเซรามิก PZT ทั้ง 4 ชนิด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้ว ทำให้อัตราการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT ลดลง

Lee et al. (2004) นำเสนอเกี่ยวกับความร้อนที่มีผลต่อการเสื่อมอายุที่อุณหภูมิเสถียรภาพของวัสดุเซรามิก $\text{Pb}(\text{Zr}_y\text{Ti}_{1-y})\text{O}_3 + x(\text{wt.}\%)\text{Cr}_2\text{O}_3$ โดยทำการผลิตขึ้นวัสดุเซรามิก PZT ที่มีความยาว 12 mm กว้าง 3 mm และหนา 1 mm และตากาาเงินเพื่อทำเป็นอิเล็กโทรดให้กับชิ้นวัสดุเซรามิก PZT และนำไปเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วในน้ำมันซิลิโคนที่อุณหภูมิ 80 °C โดยจ่าย

สนามไฟฟ้ากระแสตรง 35 kV/cm จากนั้นนำสนามไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทำให้เกิดสภาพการมีขั้วออกหลังจากน้ำมันซิลิโคลนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง กระบวนการเสื่อมอายุทางความร้อนจะดำเนินการให้ความร้อนหลังจากการทำให้เกิดสภาพการมีขั้ว โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในขณะที่การให้ความร้อนนั้นจะต้องทำการเชื่อมอิเล็กโทรดทั้งสองด้านถึงกัน การทำให้เกิดสภาพขั้วหรือการเสื่อมอายุทางความร้อนจะทำการวัดค่าคงที่ทางไดอิเล็กทริกและวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์หลังจาก 24 ชั่วโมง โดยการวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์จะทำการวัดโดยใช้เครื่องควบคุมความร้อนที่มีการเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 10 °C เริ่มตั้งแต่ -20 °C ไปจนถึง 80 °C โดยความเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิจะอยู่ที่ 2-3 °C จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการเพิ่ม Cr_2O_3 จะส่งผลให้ค่าคงที่ทางไดอิเล็กทริกและความถี่เรโซแนนซ์ลดลงเนื่องมาจากการเสื่อมอายุทางความร้อน

Srilomsak et al. (2004) นำเสนอเกี่ยวกับการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT ที่มีผลต่อลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิส โดยทำการวิเคราะห์จากฮาร์มอนิกส์ลำดับต่าง ๆ เริ่มจากผลิตชิ้นงานวัสดุเซรามิก PZT ตามกระบวนการของการผลิตชิ้นวัสดุเซรามิก PZT จากนั้นนำชิ้นงานวัสดุเซรามิก PZT ที่ได้มาตากาาเงินเพื่อทำอิเล็กโทรด ต่อมาจะนำชิ้นงานวัสดุเซรามิก PZT มาทำการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้ว โดยจ่ายสนามไฟฟ้ากระแสตรงให้กับชิ้นวัสดุเซรามิก PZT ที่ 3 MV/m ในน้ำมันซิลิโคลนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำไปทำการทดสอบการเสื่อมอายุ โดยจ่ายสนามไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวัสดุเซรามิก PZT 0.5 MV/m ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลาประมาณ ตั้งแต่ 20, 60, 120, 240, 480, 960 และ 1440 นาที และทำการวัดผลวงวนฮิสเทอรีซิสโดยใช้วงจร Sawyer-Tower จากนั้นนำข้อมูลดิบมาทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์โดยใช้โปรแกรมอัดโนมิตีทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 1-6 ผลปรากฏว่าฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 2-6 ส่งผลให้วงวนฮิสเทอรีซิสเกิดการเสื่อมอายุมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิสที่แตกต่างกันนี้สามารถใช้เป็นตัววัดของการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT ได้

Koh et al. (2004) นำเสนอเกี่ยวกับการเสื่อมอายุของสมบัติเพียโซอิเล็กทริกในวัสดุเซรามิก PMN-PZT เป็นแบบมัลติเลเยอร์ที่ใช้เป็นแอคทูเอเตอร์ โดยทำการศึกษาวัสดุเซรามิกที่เป็นแบบ 0.2(PMN)-0.8(PZT) ซึ่งวัสดุเซรามิกมีลักษณะเป็นแผ่นขนาดความกว้าง 5 mm ความยาว 5 mm และความหนา 5 mm โดยการนำ $\text{Ag}_{70}\text{-Pd}_{30}$ ทำเป็นอิเล็กโทรดให้ความหนา 10 μm จากนั้นทำการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วโดยให้สนามไฟฟ้าที่ 2 kV/mm อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการจ่ายสนามไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวัสดุเซรามิกที่ 2 kV/mm เป็นจำนวน 1.18×10^9 รอบ และทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 1 kHz ไปจนถึง 1 MHz จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์พบว่าเมื่อทำการจ่ายสนามไฟฟ้าให้กับชิ้นวัสดุเซรามิก PMN-PZT เป็นจำนวน 1.18×10^9 รอบ จะทำให้เห็นว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์และความถี่แอนติเรโซแนนซ์จะมีช่วงความถี่ที่ลดลง และเมื่อทำการนำ

ค่าความถี่เรโซแนนซ์และความถี่แอนติเรโซแนนซ์มาคำนวณหาค่าปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าจะเห็นว่าค่ามีการลดลงแสดงให้เห็นว่าวัสดุเซรามิก PMN-PZT มีการเสื่อมอายุ

Dominick et al. (2006) นำเสนอเกี่ยวกับผลของการเสื่อมอายุของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT-8 ต่อเรโซแนนซ์ทางกลและทางไฟฟ้าที่ใช้ทำเป็นตัวทรานสดิวเซอร์อัลตราโซนิก โดยทำการนำชิ้นวัสดุเซรามิก PZT-8 ที่ผ่านการทำอิเล็กโทรดและเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วแล้วมาผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อสายของสารกึ่งตัวนำบนชิ้นวัสดุเซรามิก PZT-8 จากนั้นทำการวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อวัสดุเซรามิก PZT-8 ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อสายของสารกึ่งตัวนำ จะส่งผลให้ช่วงของค่าเรโซแนนซ์ลดลงเป็นเหตุให้เกิดการเสื่อมอายุ จึงทำการชดเชยด้วย L ขนาด 1 mH ที่ทำการเชื่อมต่อเข้ากับส่วนที่เป็นอิเล็กโทรดของชิ้นวัสดุเซรามิก PZT-8 ที่เป็นตัวทรานสดิวเซอร์ ผลปรากฏว่าช่วงของค่าเรโซแนนซ์เพิ่มขึ้นส่งผลให้การเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT-8 ลดลง

Srilomsak et al. (2009) นำเสนอเกี่ยวกับวงวนฮิสเทอรีซิสของวัสดุเซรามิก PZT ที่กำลังเสื่อม โดยจะทำการศึกษาวงวนฮิสเทอรีซิสของวัสดุเซรามิก PZT 4 ชนิด คือ วัสดุเซรามิก PZT ที่ไม่มีการเจือ วัสดุเซรามิก PZT ที่เจือด้วย Sr วัสดุเซรามิก PZT ที่เจือด้วย Mn และวัสดุเซรามิก PZT ที่เจือด้วย Nb จากการเตรียมวัสดุตัวอย่างที่ต้องการจะศึกษาเสร็จแล้ว นำวัสดุตัวอย่างที่ได้ไปตากแห้งเพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรด จากนั้นนำไปเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้ว โดยการป้อนสนามไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวัสดุตัวอย่าง 2.5 MV/m ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที เมื่อได้วัสดุตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เกิดสภาพการมีขั้วแล้ว ศึกษาการเสื่อมอายุของวัสดุตัวอย่างจากวงวนฮิสเทอรีซิส โดยจ่ายสนามไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวัสดุตัวอย่าง 0.63-0.72 MV/m อุณหภูมิ 37 °C ที่ความถี่ 50 Hz เป็นเวลาประมาณตั้งแต่ 10 นาที 1 ชั่วโมง 3 วัน 7 วัน 15 วัน และ 29 วัน และจะทำการใช้วงจร Sawyer-Tower ในการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสของวัสดุตัวอย่าง จากการศึกษาพบว่าวัสดุตัวอย่างเกิดการเสื่อมอายุ โดยที่วงวนฮิสเทอรีซิสเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งวัสดุเซรามิก PZT ที่เจือด้วย Nb จะมีอัตราการเสื่อมอายุที่ต่ำกว่าวัสดุเซรามิก PZT ตัวอื่น ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

ผลการสืบค้นวรรณกรรมและงานวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ จากฐานข้อมูล ScienceDirect และ IEEE ทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง วิธีการและเทคนิคที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณະนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ไม่เคยปรากฏงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับผลของกระบวนการทางความร้อนต่อการเสื่อมอายุของการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเซรามิก PZT โดยใช้เครื่อง Piezo d_{33} Test System เครื่อง Precision LCR Meter เครื่อง Impedance/gain-phase Analyzer และชุดอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับเครื่องมือการวัดค่าอิมพีแดนซ์

มาก่อน และสามารถตั้งสมมติฐานได้ดังนี้ 1) วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อบด้วยอุณหภูมิสูงจะเสื่อมอายุเร็วกว่าที่อบด้วยอุณหภูมิต่ำ 2) วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อบด้วยอุณหภูมิสูงจะเสื่อมอายุเร็วกว่าที่อบด้วยอุณหภูมิต่ำ และ 3) วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft จะเสื่อมอายุเร็วกว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อบด้วยอุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากมีจำนวนช่องว่างออกซิเจนต่างกัน

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่ใช้ร่วมกับการวัดค่าอิมพีแดนซ์เพื่อทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ เพื่อนำผลที่ได้มาทำการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการประกอบชิ้นงาน รวมทั้งสามารถทำนายอายุการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีวัสดุเซรามิก PZT เป็นส่วนประกอบ



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

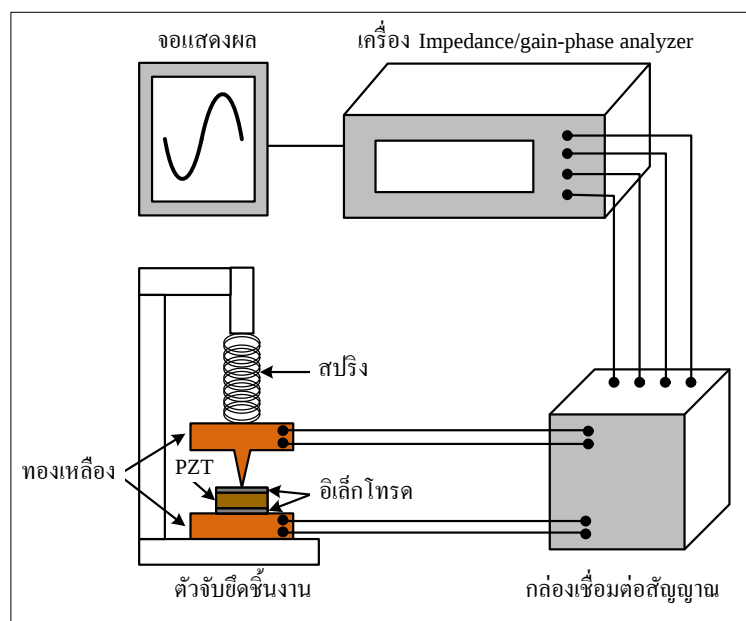
เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของกระบวนการอบด้วยความร้อนต่อการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT เมื่อวัสดุเซรามิก PZT ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่าง ๆ ในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ จำเป็นต้องมีตัวประสานหรือกาวสำหรับติดชิ้นวัสดุ ซึ่งในกระบวนการนี้ต้องมีการอบด้วยความร้อนเพื่อให้ตัวประสานหรือกาวนั้นแห้ง การอบด้วยความร้อนอาจสาเหตุทำให้วัสดุเซรามิก PZT เกิดความเสียหายหรือเกิดการเสื่อมอายุได้ นั่นคือเกิดการการเสื่อมสภาพ ชำรุด เสียหาย หรือสมบัติบางประการมีการเปลี่ยนแปลงไปในด้านที่ด้อยลง ส่งผลให้อายุการใช้งานของวัสดุหรือชิ้นงานนั้นลดลง ปัจจัยที่ส่งผลทำให้วัสดุเซรามิก PZT เกิดการเสื่อมอายุ ได้แก่

- การทำงานภายใต้สภาวะโหลดทางกล
- การทำงานภายใต้ในสภาวะโหลดทางไฟฟ้า
- การทำงานภายใต้อุณหภูมิสูง

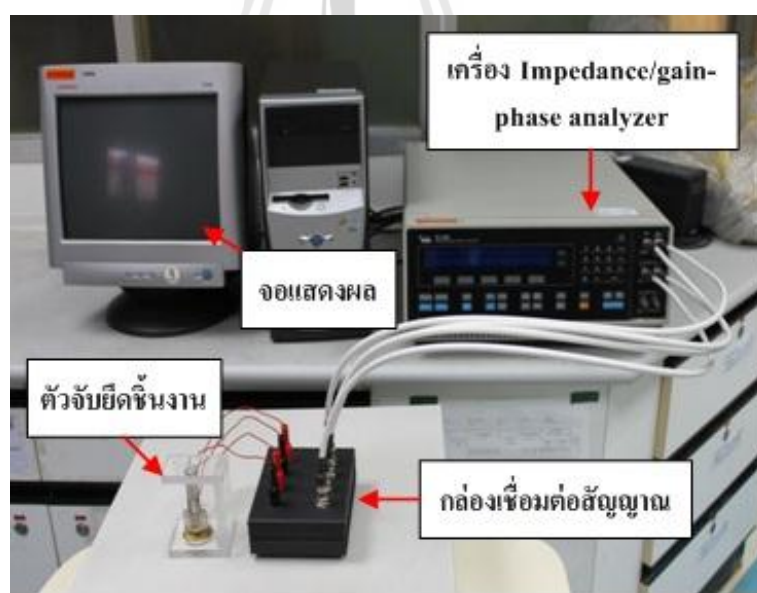
การทดสอบผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนต่อการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT ในงานวิจัยนี้ ทำโดยการอบด้วยความร้อนให้กับวัสดุเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีวิธีดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็นหัวข้อหลัก ๆ ดังนี้ วัสดุอุปกรณ์ในการวิจัย การติดตั้งระบบวัดค่าอิมพีแดนซ์ และขั้นตอนวิธีการทดสอบรวมทั้งการวัดสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเซรามิก PZT

3.1 การติดตั้งระบบวัดค่าอิมพีแดนซ์

ระบบวัดค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงานเซรามิก PZT สร้างขึ้นเพื่อวัดค่าอิมพีแดนซ์ในย่านความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์ลำดับที่หนึ่ง เพื่อนำค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าสมบัติเพียโซอิเล็กทริก และเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเพียโซอิเล็กทริกหลังจากการอบด้วยความร้อนที่ส่งผลถึงการเสื่อมอายุ ระบบวัดค่าอิมพีแดนซ์แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 โดยระบบดังกล่าวมีส่วนประกอบคือ ตัวจับยึดชิ้นงาน ชุดกล่องเชื่อมต่อสัญญาณ เครื่อง Impedance/gain-phase analyzer โปรแกรม ZPlot-Impedance โปรแกรม ZView-Impedance คอมพิวเตอร์และจอแสดงผล อุปกรณ์จริงที่ใช้แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมการติดตั้งชุดอุปกรณ์การวัดค่าอิมพีแดนซ์

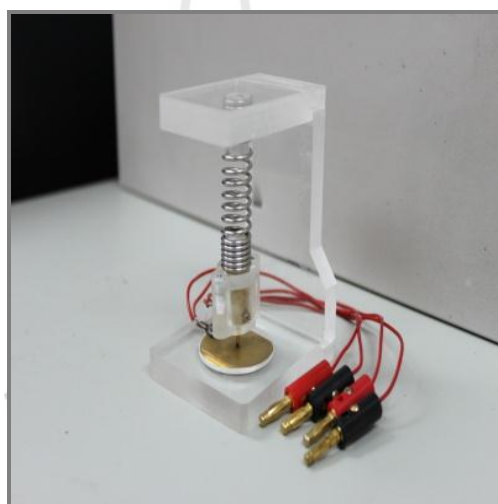


รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์วัดค่าอิมพีแดนซ์

3.1.1 ตัวจับยึดชิ้นงาน

ตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบทำจากแผ่นอะคริลิกที่ตัดเป็นชิ้นส่วนแล้วนำมาประกอบกันโดยใช้น้ำยาประสานอะคริลิกเป็นตัวประสานชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน ตัวจับยึดชิ้นงานมีแท่นสำหรับ

วางชิ้นงานทดสอบ โดยด้านล่างเป็นแผ่นทองเหลืองกลมมีลักษณะเหมือนกับเหรียญแล้วเชื่อมต่อสายไฟ 1 คู่ เพื่อใช้สำหรับต่อเข้ากับชุดกล่องต่อสัญญาณ ด้านบนเป็นแท่งทองเหลืองมีปลายแหลม เนื่องจากในการวัดค่าสมบัติของชิ้นงานต้องวัดที่ตำแหน่งศูนย์กลางและวัดหลายครั้ง จึงต้องวัดให้ตรงตำแหน่งเดิมทุกครั้งเพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากเกินไป และเชื่อมต่อสายไฟ 1 คู่ เพื่อใช้สำหรับการเชื่อมต่อกับชุดกล่องเชื่อมต่อสัญญาณ แต่แท่งทองเหลืองปลายแหลมนี้ถูกหุ้มด้วยแผ่นอะคริลิกเพื่อไม่ให้ทองเหลืองไปสัมผัสกับสปริงที่อยู่ด้านบน เนื่องจากสปริงทำจากวัสดุที่เป็นโลหะซึ่งอาจส่งผลต่อการวัดค่าสมบัติของชิ้นงานได้ สปริงที่อยู่ด้านบนจะเป็นตัวช่วยในการยึดหกดของชิ้นงาน เนื่องจากในระหว่างการวัดค่าสมบัติของชิ้นงานเซรามิก PZT ต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับชิ้นงานจึงทำให้ชิ้นงานเกิดการยืดหดรวมทั้งเกิดการสั่น สปริงจึงเป็นตัวช่วยในการขยับชิ้นงานได้และกดไม่ให้ชิ้นงานหลุดออกจากตำแหน่งที่วางชิ้นงานทดสอบ แสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตัวจับยึดชิ้นงาน

3.1.2 ชุดกล่องเชื่อมต่อสัญญาณ

ชุดกล่องเชื่อมต่อสัญญาณเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อสัญญาณที่เกิดจากชิ้นงานเซรามิก PZT ส่งผ่านไปยังเครื่อง Impedance/gain-phase analyzer และในทางกลับกันก็เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อสัญญาณที่ส่งมาจากเครื่อง Impedance/gain-phase analyzer ส่งผ่านตัวจับยึดชิ้นงานไปยังชิ้นงานเซรามิก PZT ซึ่งชุดกล่องเชื่อมต่อสัญญาณนี้จะมีอยู่ 2 ส่วนคือ กล่องเชื่อมต่อสัญญาณและสายเชื่อมต่อ BNC ซึ่งกล่องเชื่อมต่อสัญญาณทำจากกล่องพลาสติกที่ทำการเจาะรูทางด้านซ้ายมือเพื่อติดตั้งเต้ารับของแจ็กกล้วยทั้งหมด 2 คู่ เพื่อใช้เป็นที่เชื่อมต่อกับเต้าเสียบแจ็กกล้วยที่ตัว

จับยึดชิ้นงาน และทางด้านขวามือจะทำการเจาะรูเพื่อติดตั้งเต้ารับแจ็ค BNC ทั้งหมด 2 คู่ เช่นกัน เพื่อใช้ส่วนนี้สำหรับการเชื่อมต่อกับสายเชื่อมต่อ BNC เพื่อที่จะเชื่อมต่อกับเครื่อง Impedance/gain-phase analyzer โดยที่เต้ารับแจ็ค BNC ทางขวามือนั้นจะเชื่อมต่อกับเต้ารับของแจ็คด้วยทางซ้ายมือ ที่อยู่ตรงกันของในแต่ละตัว แสดงได้ดังรูปที่ 3.4



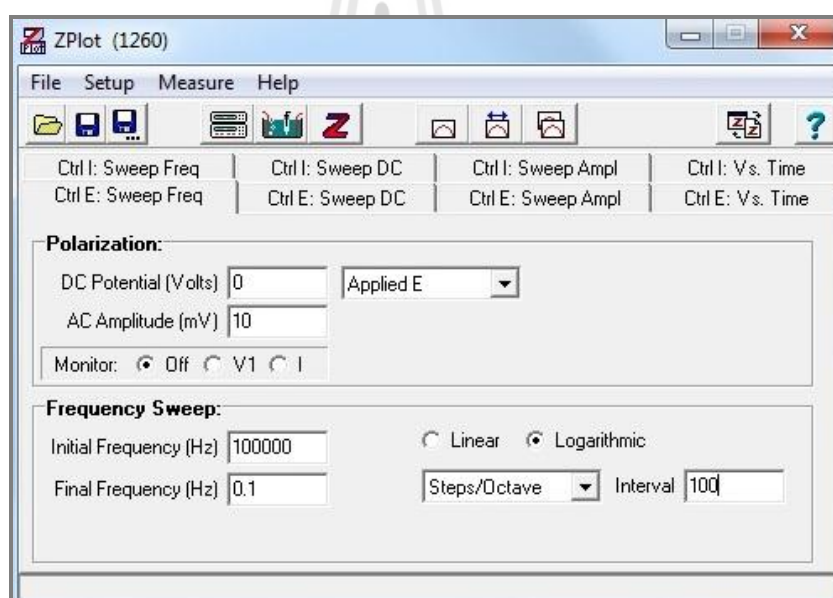
รูปที่ 3.4 ชุดกล่องเชื่อมต่อสัญญาณ

3.1.3 เครื่อง Impedance/gain-phase analyzer และโปรแกรม ZPlot-Impedance ZView-Impedance

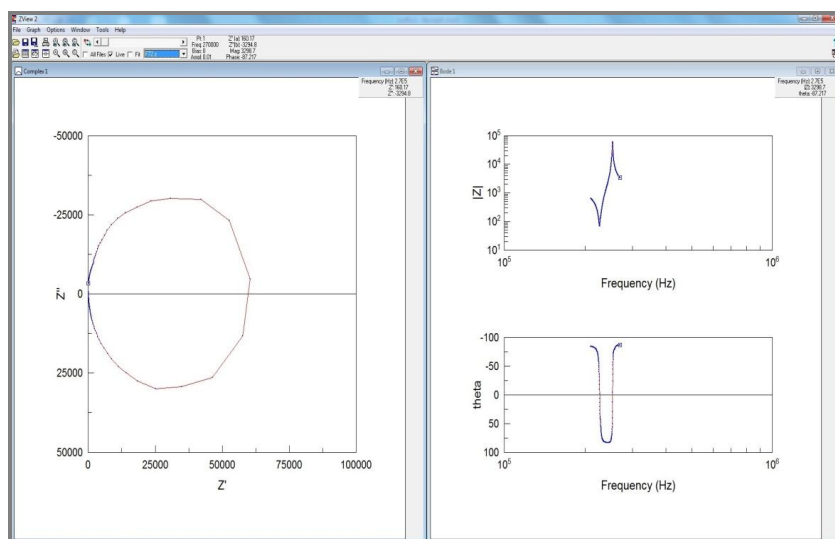
เครื่อง Impedance/gain-phase analyzer เป็นเครื่องที่ใช้วัดอิมพีแดนซ์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 โดยใช้โปรแกรม ZPlot-Impedance และ ZView-Impedance แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ เพื่อช่วยในการหาและวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งเครื่อง Impedance/gain-phase analyzer สามารถวัดได้ในย่านความถี่ตั้งแต่ $10\ \mu\text{Hz}$ ถึง $32\ \text{MHz}$ โปรแกรม ZPlot-Impedance เป็นส่วนของการคำสั่งในการพล็อต และเป็นส่วนในการป้อนข้อมูลในการวัด ได้แก่ ช่วงของย่านความถี่ที่ต้องการวัด ค่าสนามไฟฟ้าที่ต้องการจ่าย เลือกลักษณะของการพล็อต และความละเอียดในการพล็อต ส่วนโปรแกรม ZView-Impedance เป็นตัวแสดงข้อมูลการพล็อตที่ได้คำสั่งมาจากโปรแกรม ZPlot-Impedance ซึ่งแสดงหน้าต่างในการพล็อต ได้แก่ ส่วนจริงอิมพีแดนซ์กับส่วนจินตภาพอิมพีแดนซ์ ค่าสมบรูณ์อิมพีแดนซ์กับความถี่ และมุมกับความถี่ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากส่วนของการพล็อตระหว่างค่าสมบรูณ์อิมพีแดนซ์กับความถี่นำไปหาค่าสมบัติเพียโซอิเล็กทริกต่าง ๆ ของชิ้นงานเซรามิก PZT



รูปที่ 3.5 เครื่อง Impedance/gain-phase analyzer



รูปที่ 3.6 หน้าต่างของโปรแกรม ZPlot-Impedance



รูปที่ 3.7 หน้าต่างของโปรแกรม ZView-Impedance

3.1.4 คอมพิวเตอร์และจอแสดงผล

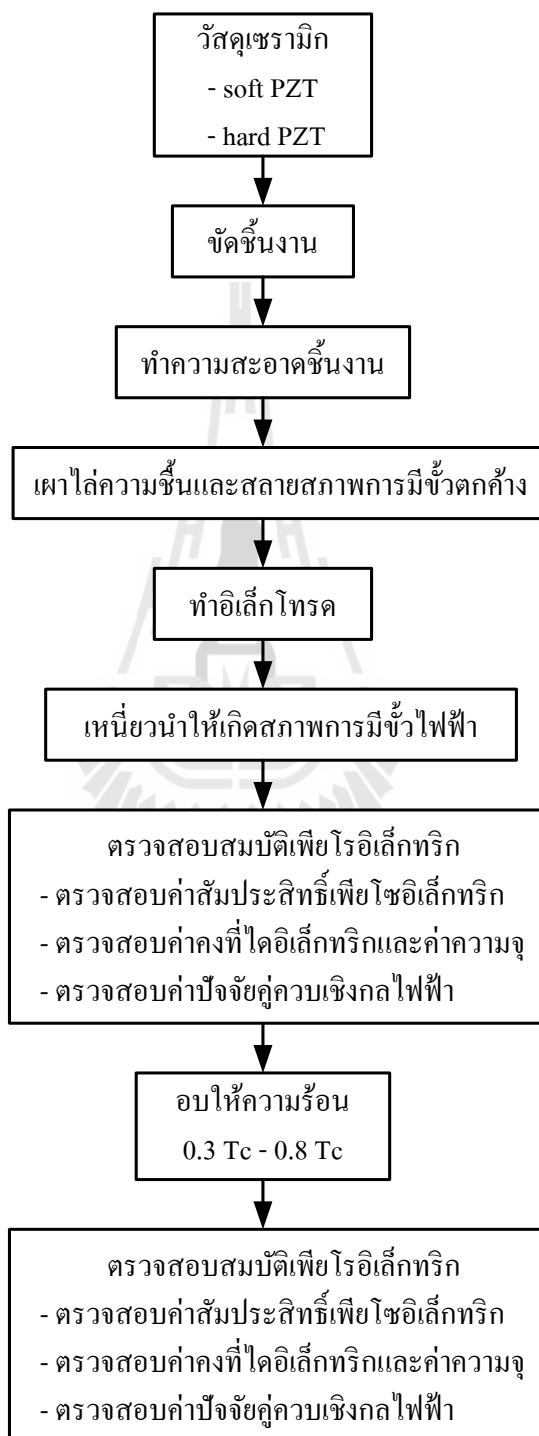
คอมพิวเตอร์และจอแสดงผลแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 ใช้สำหรับแสดงผลและป้อนข้อมูลรวมทั้งใช้บันทึกข้อมูลการวัดที่ได้จากโปรแกรม ZPlot-Impedance ZView-Impedance



รูปที่ 3.8 คอมพิวเตอร์และจอแสดงผล

3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและวิธีการทดสอบ

ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและวิธีการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.9 โดยมีรายละเอียดดังแสดงในหัวข้อที่ 3.2.1 ถึง 3.2.7



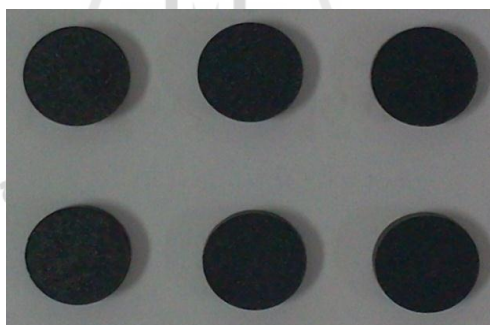
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

3.2.1 ชิ้นงานที่ใช้สำหรับทดสอบ

วัสดุเซรามิก PZT ที่ใช้ในการวิจัยมี 2 แบบ คือแบบชนิดอ่อน (Soft) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และแบบชนิดแข็ง (Hard) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ทั้งคู่เป็นวัสดุเซรามิก PZT ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตจากบริษัท Piezo Technologies ประเทศไทย จำกัด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm และหนา 1.2 mm



รูปที่ 3.10 วัสดุเซรามิก PZT แบบชนิดอ่อน

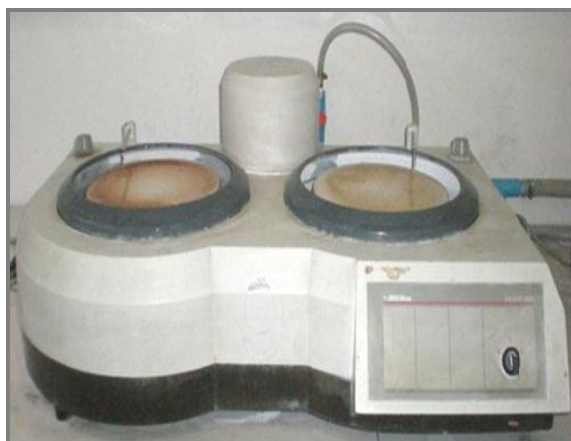


รูปที่ 3.11 วัสดุเซรามิก PZT แบบชนิดแข็ง

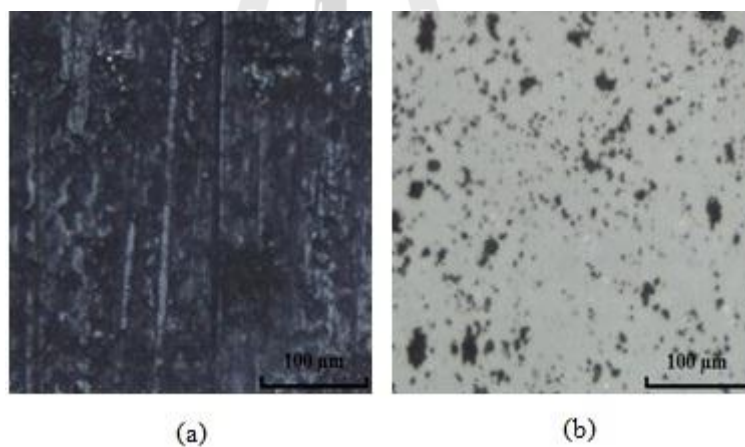
3.2.2 การขัดชิ้นงาน

ชิ้นงานวัสดุเซรามิก PZT ที่ใช้ในการทดสอบต้องขัดผิวด้านระนาบทั้ง 2 ด้านให้เรียบสม่ำเสมอด้วยเครื่องขัดชิ้นงาน (Buehler, Phoenix Beta) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 600 800 และ 1,000 ตามลำดับ ในระหว่างการขัดผิวใช้น้ำกลั่นเป็นตัวหล่อลื่น ขัดผิวจนได้ชิ้นงานวัสดุเซรามิก PZT มีความหนา 1 mm เหตุผลก็เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนในระหว่างการทดสอบที่เกิดจากความหนาและผิวระนาบไม่เรียบเสมอกัน รวมทั้งรอยร้าวสิ่งปนเปื้อน และ

ความบกพร่องอื่น ๆ รูปที่ 3.12 เป็นการเปรียบเทียบพื้นผิวระนาบของชิ้นงานเซรามิก PZT ก่อนและหลังขัด



รูปที่ 3.12 เครื่องขัดชิ้นงาน (Buehler, Phoenix Beta)



รูปที่ 3.13 พื้นผิวชิ้นงานเซรามิก PZT (a) ก่อนขัด และ (b) หลังขัด

3.2.3 การล้างชิ้นงาน

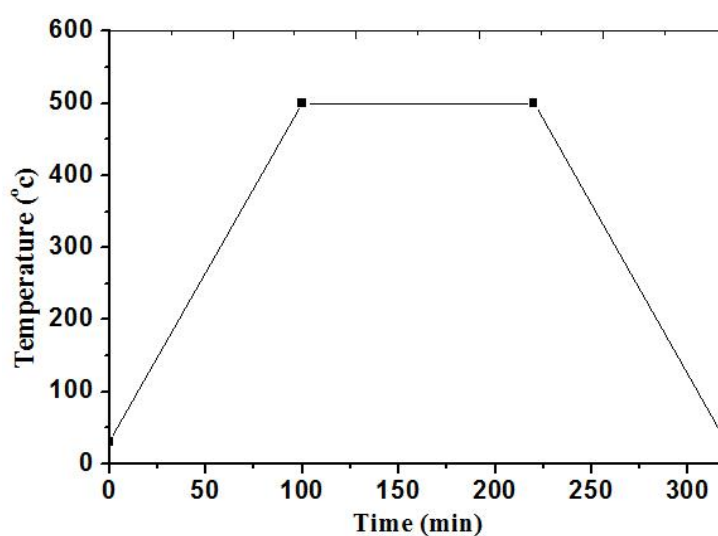
นำชิ้นงานเซรามิก PZT ที่ผ่านการขัดผิวระนาบทั้ง 2 ด้านจนเรียบสม่ำเสมอมาล้างด้วยเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิก (NEY, 28H Ultrasonik) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งการล้างด้วยเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิกสามารถทำให้ฝุ่นละอองต่าง ๆ ที่เกาะติดกับชิ้นงานเซรามิก PZT หลุดออกมา โดยที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงานเซรามิก PZT



รูปที่ 3.14 เครื่องล้างชิ้นงานระบบอัลตราโซนิก

3.2.4 การเผาไล่ความชื้นและสลายสภาพการมีขั้วตกค้าง

นำชิ้นงานเซรามิก PZT ที่ผ่านการล้างด้วยเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิก มาเผาไล่ความชื้นจากน้ำที่ซึมเข้าเนื้อชิ้นงานเซรามิก PZT และสลายสภาพการมีขั้วตกค้าง โดยเผาที่อุณหภูมิร้อน $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ แซ่ทั้งไว้ 120 นาที ใช้อัตราการให้ความร้อน $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ และอัตราการเย็นตัว $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 เพื่อทำให้น้ำที่ซึมเข้าชิ้นงานเซรามิก PZT ระเหยออกจนหมดและไม่มีสภาพขั้วตกค้าง



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการเผาไล่ความชื้นและสลายสภาพการมีขั้วตกค้างของชิ้นงาน

3.2.5 การทำอิเล็กโทรด

นำชิ้นงานเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาไล่ความชื้นและสลายสภาพการมีขั้วตกค้าง มาทำความสะอาดด้วยอะซิโตน ทากาวเงิน (Silver paste) บนผิวระนาบของชิ้นเซรามิก PZT ทั้ง 2 ด้าน เพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 3.16 จากนั้นทำความสะอาดผิวด้านข้างด้วยอะซิโตนอีกครั้ง แล้วนำไปเผาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้อัตราการให้ความร้อน $5^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ และอัตราการเย็นตัว $5^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ เพื่อให้กาวเงินที่ใช้เป็นอิเล็กโทรดแห้งสนิทกับผิวหน้าทั้งสองด้านของชิ้นงานเซรามิก PZT ขั้นตอนต่อมา นำชิ้นงานหลังจากอบมาลบออกไซด์ที่ผิวหน้าออก โดยใช้ยางลบหมึกที่ผิวชิ้นงานจนขาวสะอาด และขัดผิวด้านข้างของชิ้นงานเซรามิก PZT เพื่อลบกาวเงินที่ยังเหลือติดอยู่ด้านข้างด้วยกระดาษทรายอีกครั้งเพื่อป้องกันการลัดวงจร ในขณะเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วไฟฟ้า



(a) ชิ้นงานเซรามิก PZT แบบ Soft



(b) ชิ้นงานเซรามิก PZT แบบ Hard

รูปที่ 3.16 ชิ้นเซรามิก PZT หลังทำอิเล็กโทรด (a) แบบ Soft (b) แบบ Hard

3.2.6 การเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วไฟฟ้า

นำชิ้นเซรามิก PZT ที่ทำอิเล็กโทรดแล้วไปเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง (Matsusada, AU-30*40) ดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยนำชิ้นเซรามิก PZT ใส่ลงในตัวจับชิ้นงานในภาชนะที่ใช้สำหรับทำให้เกิดสภาพการมีขั้วไฟฟ้า ภายในภาชนะมีตัวจับชิ้นงานที่เป็นแท่งทองเหลืองทั้งด้านบนและด้านล่าง แท่งทองเหลืองด้านบนเชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้าขั้วบวกส่วนแท่งทองเหลืองด้านล่างเชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้าขั้วลบของเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง ซึ่งในภาชนะมีน้ำมันซิลิโคนทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า เพราะในขณะการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วไฟฟ้าต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูง นอกจากนี้แล้วภาชนะดังกล่าวมีการติดตั้งฮีตเตอร์และเทอร์โมคัปเปิล เพื่อใช้ในการเพิ่มและควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันซิลิโคนภายในภาชนะ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ขั้นตอนการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วไฟฟ้าเริ่มจากใส่ชิ้นเซรามิก PZT ลงในตัวจับชิ้นงาน จากนั้นปรับเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันซิลิโคนไปที่ 100 °C เพื่อป้องกันอันตรายจากการลัดวงจรขณะทำการเหนี่ยวนำเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง จึงถูกตั้งค่าจำกัดกระแสไฟฟ้าไว้ไม่เกิน 0.4 mA จากนั้นจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแก่ชิ้นเซรามิก PZT โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 3 kV ต่อความหนา 1 mm ต่อเนื่องเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวของโพลาริเซชันภายในชิ้นเซรามิก PZT ไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของสนามไฟฟ้า เมื่อครบเวลาดังกล่าวจึงลดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าลงตามลำดับ ปิดชุดควบคุมอุณหภูมิ รอจนกระทั่งสนามไฟฟ้าตกค้างมีค่าเป็นศูนย์ จึงนำชิ้นเซรามิก PZT ออกมาจากภาชนะที่เป็นตัวจับชิ้นงาน และทำความสะอาดชิ้นงานเซรามิก PZT ที่เปื้อนคราบน้ำมันซิลิโคนด้วยอะซิโตน



รูปที่ 3.17 เครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง (Matsusada, AU-30*40)



รูปที่ 3.18 ภาพที่ใช้สำหรับจับชิ้นงานเซรามิก PZT

3.2.7 การตรวจสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริก

3.2.7.1 การวัดค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก

วัดค่า d_{33} ของชิ้นเซรามิก PZT ที่ผ่านการทำให้เกิดสภาพการมีขั้วแล้ว โดยนำชิ้นเซรามิก PZT ไปใส่ลงในที่หนีบของเครื่อง Piezo d_{33} Test System (International Ltd., APC 90-2030) ดังแสดงในรูปที่ 3.19 จากนั้นให้แรงกดลงบนชิ้นเซรามิก PZT ประมาณ $(250 \pm 10) \times 10^{-3}$ N แล้วอ่านค่า d_{33} จากเครื่องวัด



รูปที่ 3.19 เครื่องวัดค่า d_{33} (International Ltd., APC 90-2030)

3.2.7.2 การวัดค่าความเก็บประจุและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์

นำชิ้นเซรามิก PZT ที่ผ่านการทำให้เกิดสภาพการมีขั้วแล้ว ใส่ลงในตัวจับยึดชิ้นงานแล้วเชื่อมต่อกับเครื่อง Precision LCR Meter ดังแสดงในรูปที่ 3.20 เพื่อวัดค่าความเก็บประจุ นำค่าความเก็บประจุที่วัดได้มาคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของชิ้นเซรามิก PZT โดยใช้สมการที่ 3.1

$$\epsilon_r = \frac{Cd}{\epsilon_0 A} \quad (3.1)$$

โดยที่	C	คือ ค่าความเก็บประจุ (F)
	d	คือ ความหนาของสารไดอิเล็กทริก (m)
	ϵ_0	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศมีค่า 8.854×10^{-12} (F/m)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก (m^2)



รูปที่ 3.20 เครื่อง Precision LCR Meter

3.2.7.3 การตรวจสอบค่าปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้า

การหาค่าปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าของชิ้นเซรามิก PZT ทำได้โดยวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่อุณหภูมิห้องในย่านความถี่ช่วงกว้างอย่างคร่าว ๆ เพื่อหาย่านความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์หรือความถี่อิมพีแดนซ์ต่ำสุด (f_m) และแอนติเรโซแนนซ์หรือความถี่อิมพีแดนซ์สูงสุด (f_n) จากนั้นทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของเซรามิก PZT อีกครั้งอย่างละเอียด แต่การวัดค่าอิมพีแดนซ์รอบนี้เลือกวัดเฉพาะย่านความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์ลำดับที่หนึ่งตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ผลที่ได้ให้นำมาคำนวณหาค่าปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าหรือค่า k ดังนี้ (APC International, 2002)

สำหรับเซรามิกลักษณะแบบดิสก์

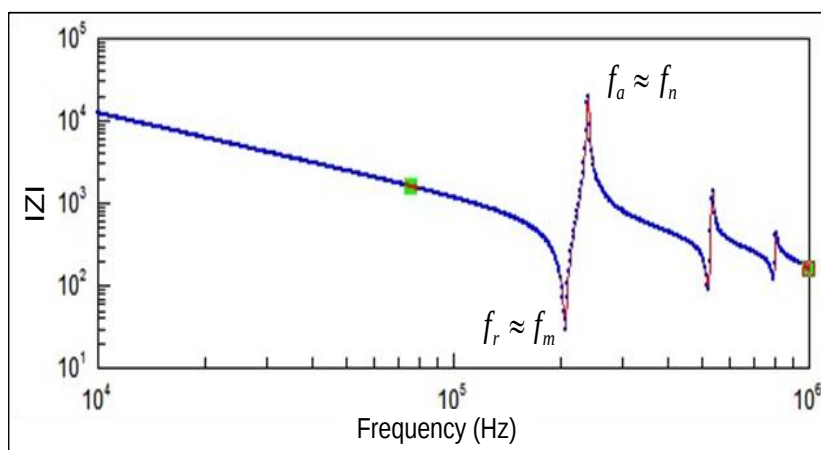
$$k_p \cong \sqrt{[(2.51(f_n - f_m)/f_n) - ((f_n - f_m)/f_n)^2]} \quad (3.2)$$

สำหรับเซรามิกลักษณะแบบแท่ง(ขึ้นกับความหนา)

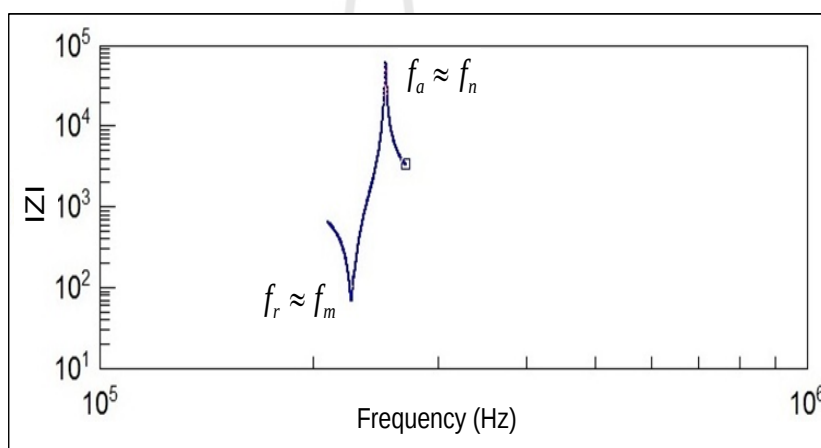
$$k_t^2 = k_{33}^2 = (\pi/2)(f_n/f_m)\tan[(\pi/2)((f_n - f_m)/f_n)] \quad (3.3)$$

โดยที่ f_n คือ ความถี่ที่อิมพีแดนซ์สูงสุด (ความถี่แอนติเรโซแนนซ์) (Hz)
 f_m คือ ความถี่ที่อิมพีแดนซ์ต่ำสุด (ความถี่เรโซแนนซ์) (Hz)





(a) วัดค่าอิมพีแดนซ์ของเซรามิก PZT ที่ย่านความถี่ช่วงกว้าง



(b) ย่านความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์ลำดับที่หนึ่ง

รูปที่ 3.21 ตัวอย่างผลที่ได้จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์บนจอแสดงผล a) วัดค่าอิมพีแดนซ์ของเซรามิก PZT ที่ย่านความถี่ช่วงกว้าง b) ย่านความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์ลำดับที่หนึ่ง

3.2.7.4 การอบด้วยความร้อนเพื่อศึกษาผลกระทบทางความร้อน

นำชิ้นเซรามิก PZT ที่ผ่านการทำให้เกิดสภาพการมีขั้วแล้ว และทำการตรวจสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแล้วไปทำการอบให้ความร้อน โดยทำการใส่ชิ้นเซรามิก PZT ลงในเตาอบดังแสดงในรูปที่ 3.22 เพื่อให้ความร้อน ใช้อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนต่าง ๆ กัน คือ

30% 40% 50% 60% 70% และ 80% ของ T_c ใช้เวลาในการอบความร้อนแต่ละอุณหภูมิ ๆ ละ 10 นาที หลังจากการอบให้ความร้อนต้องทำการตรวจสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริกอีกครั้ง

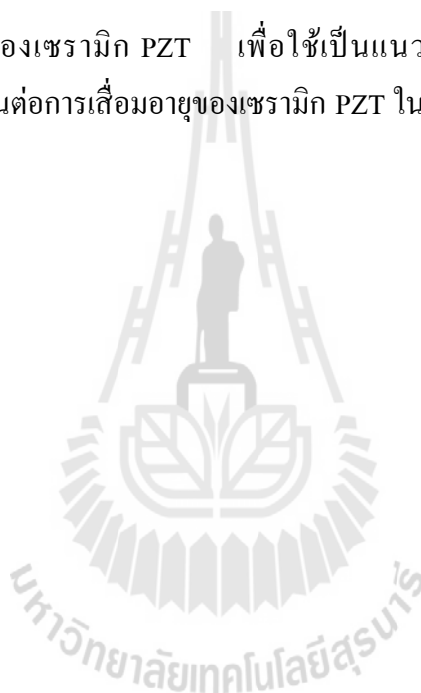


รูปที่ 3.22 เตาเผาสำหรับการอบความร้อน (Nabertherm)

3.3 สรุป

บทที่ 3 อธิบายถึงวิธีการดำเนินการวิจัยของการศึกษาผลกระทบของกระบวนการอบด้วยความร้อนต่อการเสื่อมอายุของเซรามิก PZT ได้แก่ วัสดุอุปกรณ์ในการวิจัย การติดตั้งระบบการวัดค่าอิมพีแดนซ์ และขั้นตอนวิธีการทดสอบ โดยในส่วนแรกเป็นส่วนของวัสดุอุปกรณ์ในการวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุอุปกรณ์ที่จำเป็นในการทดสอบ ในส่วนต่อมาเป็นการติดตั้งระบบการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงานเซรามิก PZT ระบบประกอบไปด้วยตัวจับยึดชิ้นงาน ชุดกล่องเชื่อมต่อสัญญาณ เครื่อง Impedance/gain-phase analyzer โปรแกรม ZPlot-Impedance ZView-Impedance คอมพิวเตอร์และจอแสดงผล โดยทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงานเซรามิก PZT ในช่วงของย่านความถี่ที่ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์ลำดับที่หนึ่ง เพื่อใช้ค่าในย่านความถี่ดังกล่าวนี้ไปคำนวณหาค่าสมบัติเพียโซอิเล็กทริกต่าง ๆ ของชิ้นงานเซรามิก PZT สำหรับในส่วนสุดท้ายเป็นขั้นตอนและวิธีการทดสอบ โดยเริ่มจากการนำชิ้นงานเซรามิก PZT ทั้งชนิดอ่อนและชนิดแข็ง มาทำการขัดผิวด้านระนาบให้เรียบเสมอกันให้ชิ้นงานเซรามิก PZT มีความหนา 1 mm จากนั้นนำชิ้นงานเซรามิก PZT ไปล้างทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างชิ้นงานระบบอัลตราโซนิก เมื่อ

เสร็จแล้วนำชิ้นงานเซรามิก PZT ไปเผาไล่ความชื้นและสลายสภาพชั่วคราวที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำชิ้นงานเซรามิก PZT ไปตากวางเงินในด้านระนาบทั้ง 2 ด้าน เพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรดทางไฟฟ้า ต่อมานำชิ้นงานเซรามิก PZT ไปเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วไฟฟ้า โดยใช้แรงดัน 3 kV ต่อความหนาของชิ้นงาน 1 mm ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำชิ้นงานเซรามิก PZT ไปตรวจสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริกต่าง ๆ ต่อก็นำชิ้นงานไปทำการอบความร้อนที่อุณหภูมิ 30% ถึง 80% ของ T_c เป็นเวลา 10 นาที นำชิ้นงานเซรามิก PZT หลังการอบด้วยความร้อนไปตรวจสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริกอีกครั้ง เพื่อนำผลที่ได้ทั้งก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนมาเปรียบเทียบกัน โดยศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเพียโซอิเล็กทริกต่าง ๆ ที่ส่งผลถึงการเสื่อมอายุของเซรามิก PZT เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนต่อการเสื่อมอายุของเซรามิก PZT ในบทถัดไป



บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้เป็นส่วนของผลการทดลอง วิเคราะห์ และอภิปรายผลของการเปลี่ยนแปลงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ส่งผลให้การเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT จากกระบวนการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30% 40% 50% 60% 70% และ 80% ของ T_C ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard เนื่องจากของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft มี T_C ที่ 360 °C จึงต้องอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 108 °C 144 °C 180 °C 216 °C 252 °C และ 280 °C ส่วนวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard มี T_C ที่ 325 °C จึงต้องอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 97.5 °C 130 °C 162.5 °C 195 °C 227.5 °C และ 260 °C หลังจากการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ เหล่านี้แล้วจึงวัดค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ที่วัดด้วยเครื่องวัด d_{33} (Piezo d_{33} Test System) วัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ Impedance/Gain-Phase Analyzer เพื่อคำนวณค่าปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบ (k_p) และค่าปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนา (k_t) ที่ได้จากค่าความถี่เรโซแนนซ์และความถี่แอนติเรโซแนนซ์ที่หนึ่ง หลังจากนั้นนำวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft 6 ชิ้น และแบบ Hard 6 ชิ้น ไปเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้ว โดยป้อนสนามไฟฟ้ากระแสตรง 3 kV/mm ที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 10 นาที วัดค่าสัมประสิทธิ์ d_{33} และวัดค่าอิมพีแดนซ์ทุก ๆ 24 ชั่วโมงเป็นเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อคำนวณปัจจัย k_p และปัจจัย k_t จากนั้นนำวัสดุเซรามิก PZT ไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30% 40% 50% 60% 70% และ 80% ของ T_C นาน 10 นาทีในแต่ละอุณหภูมิ แล้ววัดค่าสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ทุก ๆ 24 ชั่วโมงเป็นเวลา 7 สัปดาห์ ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ในเชิงเวลาที่อุณหภูมิต่าง ๆ นำมาใช้วิเคราะห์ผลกระทบของกระบวนการอบด้วยความร้อนต่อการเสื่อมอายุและหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน

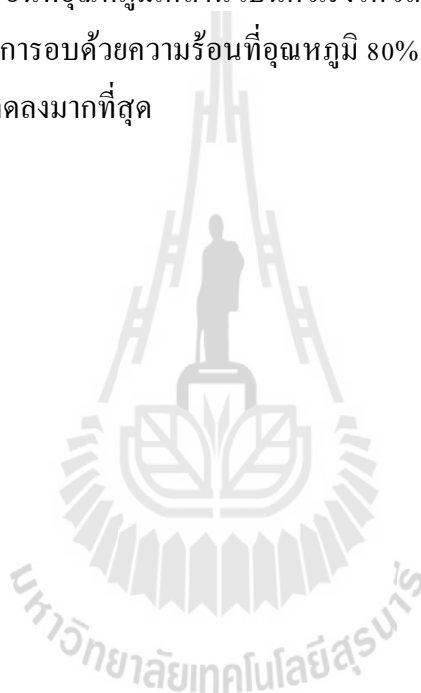
4.1.1 วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft

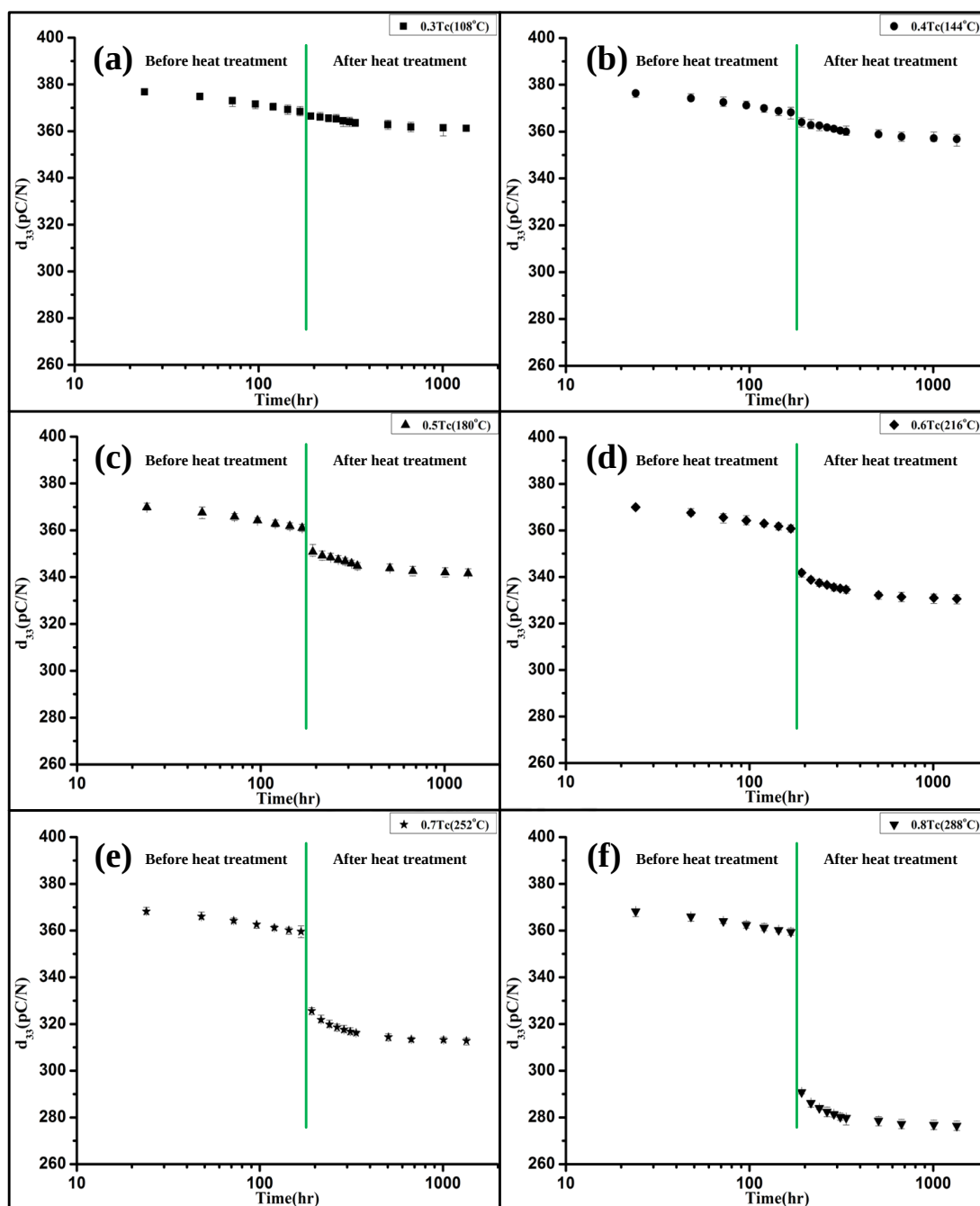
อัตราการลดลงของสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft แสดงในตารางที่ 4.1 ส่วนรูปที่ 4.1 แสดงสัมประสิทธิ์ d_{33} ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน รูปที่ 4.2 แสดงปัจจัย k_p ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน และรูปที่ 4.3 แสดงปัจจัย k_t ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน

ตารางที่ 4.1 อัตราการลดลงของสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft

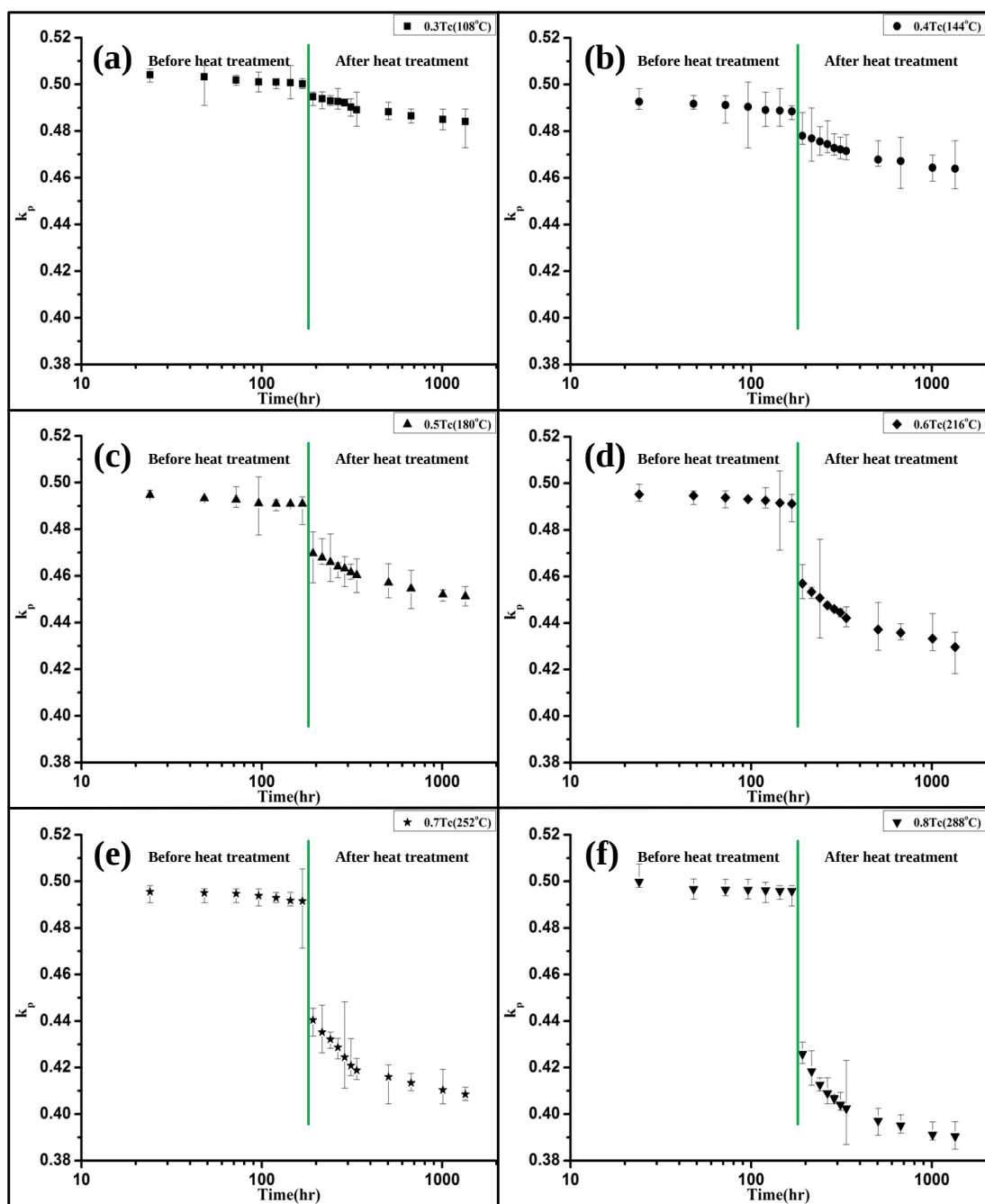
สมบัติ	อุณหภูมิ	หลังการเหนี่ยวนำให้เกิด สภาพขั้ว 168 ชั่วโมง (%)	หลังการอบด้วยความ ร้อน 24 ชั่วโมง (%)	หลังการอบด้วยความ ร้อน 1176 ชั่วโมง (%)
d_{33}	0.3T _C	2.23	0.54	1.42
	0.4T _C	2.18	1.14	1.98
	0.5T _C	2.38	2.83	2.62
	0.6T _C	2.49	5.27	3.28
	0.7T _C	2.34	9.45	3.93
	0.8T _C	2.39	19.09	4.95
k_p	0.3T _C	0.78	1.09	2.15
	0.4T _C	0.84	2.15	2.95
	0.5T _C	0.76	4.33	3.93
	0.6T _C	0.82	6.96	5.98
	0.7T _C	0.80	10.41	7.24
	0.8T _C	0.80	14.13	8.30
k_t	0.3T _C	0.93	1.29	2.52
	0.4T _C	0.98	2.51	3.40
	0.5T _C	0.90	5.03	4.51
	0.6T _C	0.96	8.04	6.78
	0.7T _C	0.92	11.94	8.08
	0.8T _C	0.99	16.15	9.21

จากข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 4.1 รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 พบว่าก่อนอบด้วยความร้อนสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ลดลงอย่างช้า ๆ ตามเวลา ซึ่งเป็นลักษณะการเสื่อมอายุตามธรรมชาติ หลังจากอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30% และ 40% ของ T_C พบว่าสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ลดลงอย่างช้า ๆ แต่ไม่เห็นความแตกต่าง เมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ก่อนอบด้วยความร้อน จึงถือว่าการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมินี้ ยังคงทำให้วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft มีลักษณะการเสื่อมอายุตามเวลาเป็นไปตามธรรมชาติ ในส่วนการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50% 60% 70% และ 80% ของ T_C พบว่าสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิเหล่านี้ เป็นตัวเร่งให้วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เสื่อมอายุเร็วขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80% ของ T_C ส่งผลให้สัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ลดลงมากที่สุด

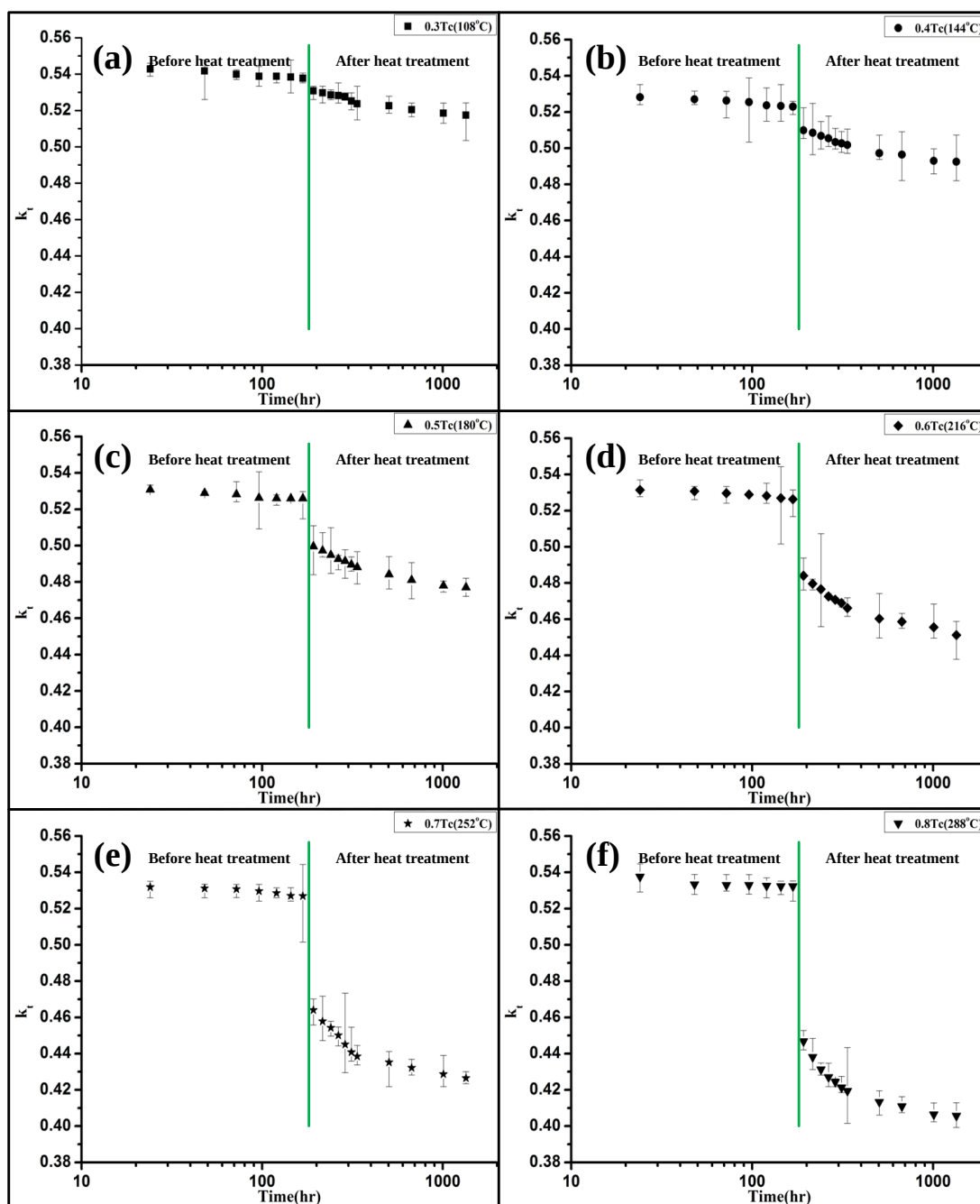




รูปที่ 4.1 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ก่อนและหลังการอบ ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_c



รูปที่ 4.2 ปัจจัยค่าความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_C



รูปที่ 4.3 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_C

4.1.2 วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard

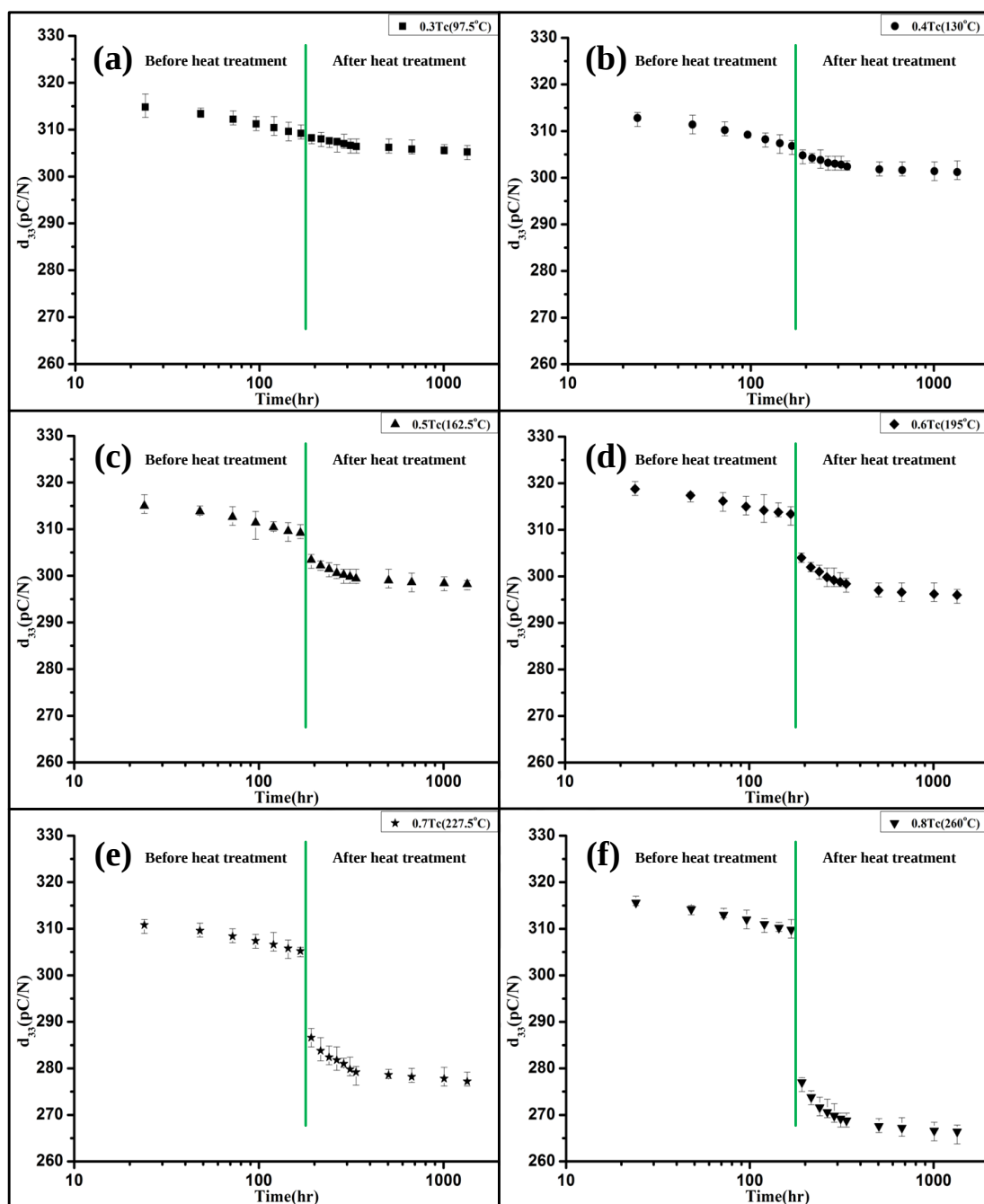
อัตราการลดลงของสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard แสดงในตารางที่ 4.2 ส่วนรูปที่ 4.4 แสดงสัมประสิทธิ์ d_{33} ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน รูปที่ 4.5 แสดงปัจจัย k_p ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน และรูปที่ 4.6 แสดงปัจจัย k_t ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน

ตารางที่ 4.2 อัตราการลดลงของสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard

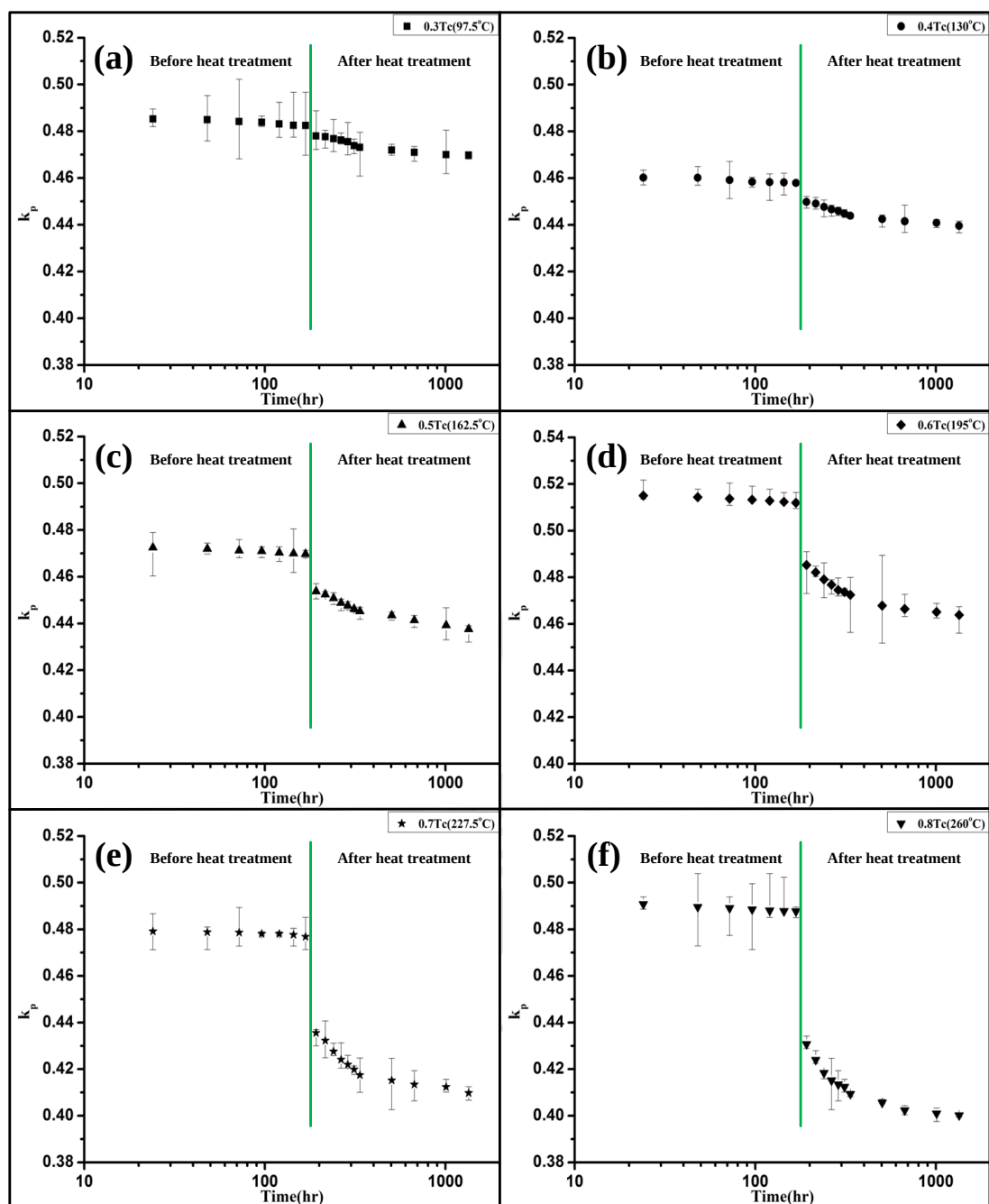
สมบัติ	อุณหภูมิ	หลังการเหนี่ยวนำให้เกิด สภาพขั้ว 168 ชั่วโมง (%)	หลังการอบด้วยความ ร้อน 24 ชั่วโมง (%)	หลังการอบด้วยความ ร้อน 1176 ชั่วโมง (%)
d_{33}	0.3T _C	1.78	0.32	0.97
	0.4T _C	1.92	0.65	1.18
	0.5T _C	1.84	1.88	1.71
	0.6T _C	1.69	3.00	2.63
	0.7T _C	1.80	6.09	3.28
	0.8T _C	1.84	10.59	3.83
k_p	0.3T _C	0.58	0.92	1.73
	0.4T _C	0.49	1.78	2.28
	0.5T _C	0.58	3.40	3.57
	0.6T _C	0.60	5.21	4.42
	0.7T _C	0.49	8.65	5.92
	0.8T _C	0.62	11.68	7.09
k_t	0.3T _C	0.67	1.08	2.01
	0.4T _C	0.56	2.03	2.50
	0.5T _C	0.68	3.90	4.05
	0.6T _C	0.67	6.14	5.11
	0.7T _C	0.58	9.86	6.34
	0.8T _C	0.68	13.32	7.84

จากข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 4.4 รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 พบว่าก่อนอบด้วยความร้อนสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ลดลงอย่างช้า ๆ ตามเวลา ซึ่งเป็นลักษณะการเสื่อมอายุตามธรรมชาติในรูปแบบเดียวกันกับวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังจากวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ผ่านการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30% และ 40% ของ T_C สัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ลดลงอย่างช้า ๆ แทบไม่เห็นความแตกต่าง เมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ก่อนอบด้วยความร้อน จึงถือว่าการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมินี้ ยังคงทำให้วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard มีลักษณะการเสื่อมอายุตามเวลาตามธรรมชาติ ส่วนการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50% 60% 70% และ 80% ของ T_C พบว่าสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิเหล่านี้ เป็นตัวเร่งให้วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard เสื่อมอายุเร็วขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80% ของ T_C ส่งผลให้สัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ลดลงมากที่สุด

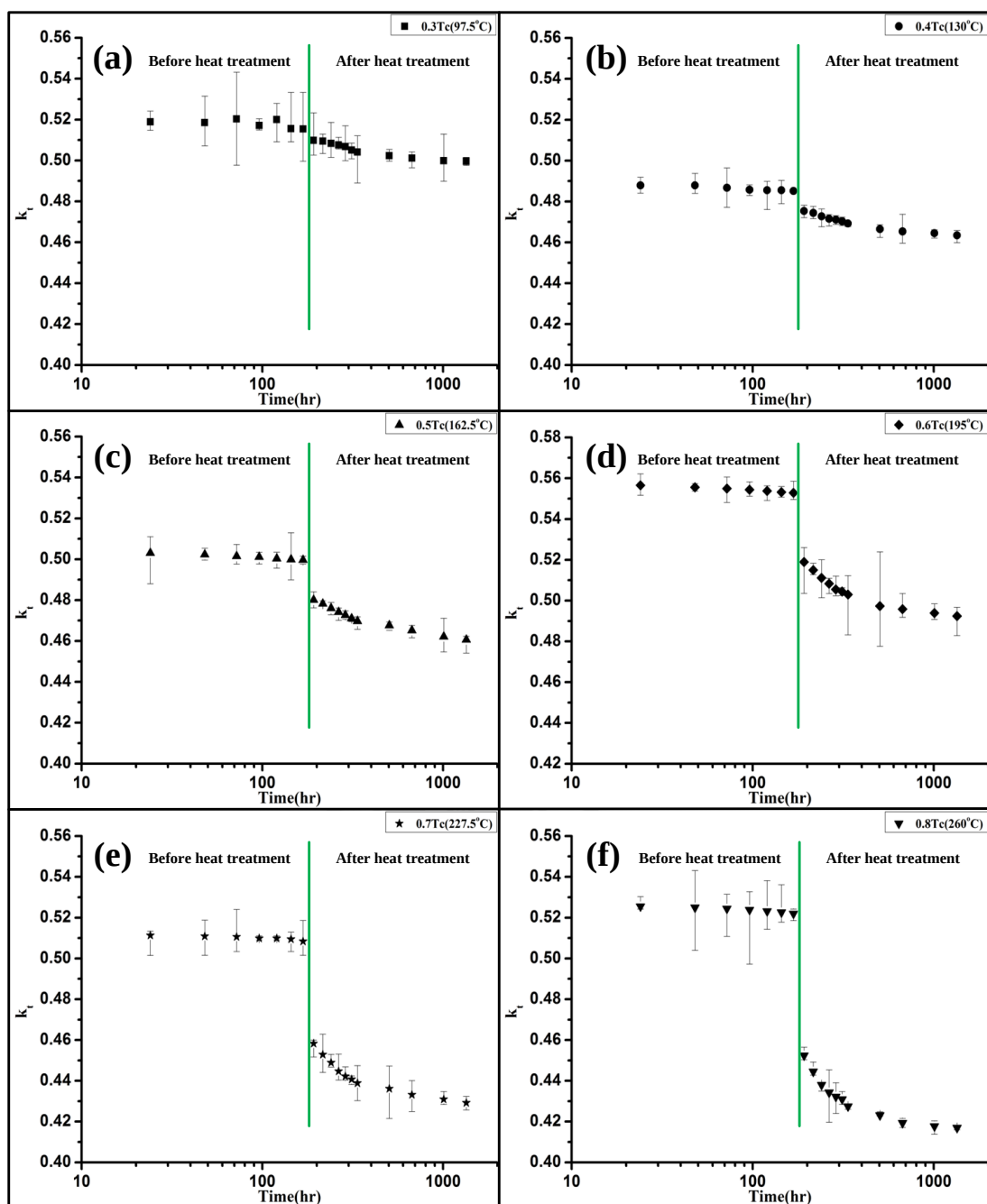




รูปที่ 4.4 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ก่อนและหลังการอบ ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_c



รูปที่ 4.5 ปัจจัยค่าความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_c



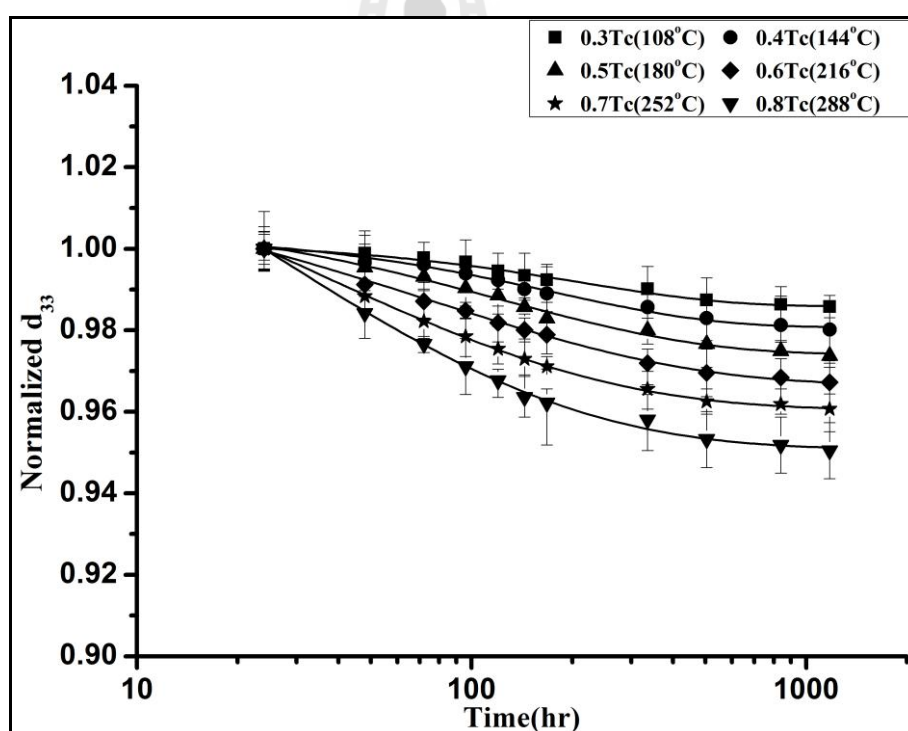
รูปที่ 4.6 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_c

4.2 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและเวลาหลังอบด้วยความร้อนแต่ละอุณหภูมิ

4.2.1 วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft

4.2.1.1 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก

สัมประสิทธิ์ d_{33} แบบสัมพัทธ์ (Normalized) หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.7 ข้อมูลแบบสัมพัทธ์สามารถใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของสัมประสิทธิ์ d_{33} ในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 การอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30% และ 40% ของ T_C สัมประสิทธิ์ d_{33} ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับจุดเริ่มต้นก่อนนำไปอบด้วยความร้อน ส่วนการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50% 60% 70% และ 80% ของ T_C สัมประสิทธิ์ d_{33} มีอัตราการลดลงอย่างเห็นได้ชัดตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อน [เส้นทึบได้จากสมการที่ 4.1]

สัมประสิทธิ์ d_{33} แบบสัมพัทธ์ที่มีอัตราการลดลงตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้น สามารถหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอย (Zhang et al., 1996) เป็นสมการการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์ d_{33} ดังสมการที่ 4.1

$$d_{33}(t) = d_{33_0} + d_{33_1} \exp[-(t/\tau)^{\nu}] \quad (4.1)$$

โดยที่ $d_{33}(t)$ คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์แปรตามเวลา

d_{33_0} คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ย่อยคงที่ไม่แปรตามเวลา

d_{33_1} คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ย่อยแปรตามเวลา

t คือ เวลาการเสื่อมอายุ

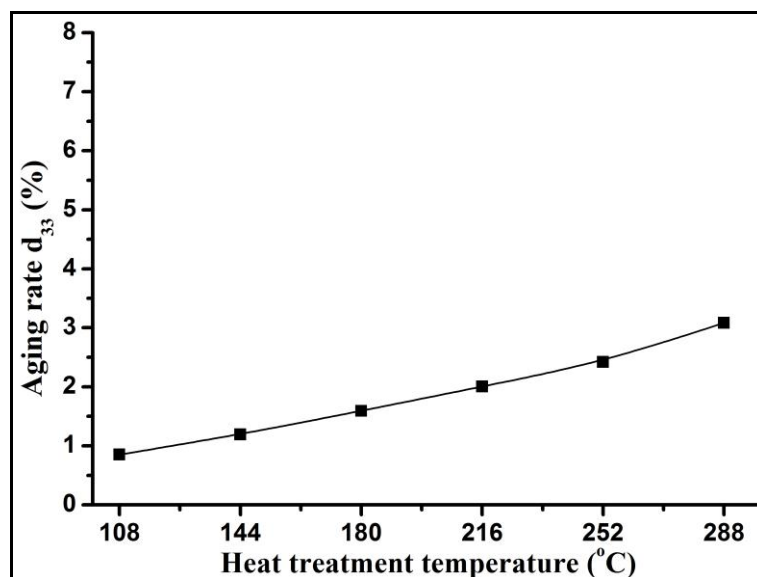
τ คือ ค่าคงที่ทางเวลาการเสื่อมอายุ

ν คือ เลขชี้กำลังของสมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอย

จากผลการทดลองและหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จะค่าได้พารามิเตอร์ของสมการคือ d_{33_0} d_{33_1} τ ν และ R^2 ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาคำนวณอัตราการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์ d_{33} จากสมการ $((p_2 - p_1)/p_1)(1/(\log t_2 - \log t_1))$ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าอัตราการเสื่อมอายุที่อุณหภูมิ 30%(108 °C) ของ T_C คือ 0.85% ที่อุณหภูมิ 40%(144 °C) ของ T_C คือ 1.19% ที่อุณหภูมิ 50%(180 °C) ของ T_C คือ 1.59% ที่อุณหภูมิ 60%(216 °C) ของ T_C คือ 2.00% ที่อุณหภูมิ 70%(252 °C) ของ T_C คือ 2.42% และที่อุณหภูมิ 80%(288 °C) ของ T_C คือ 3.08% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ของสมการการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังจากอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

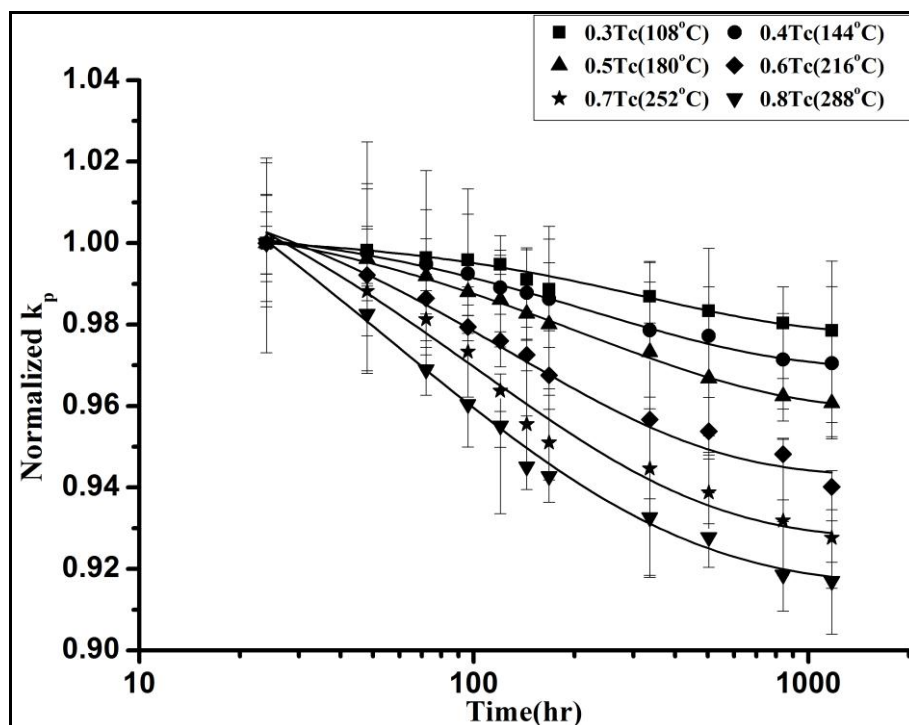
อุณหภูมิ (°C)	d_{33_0}	d_{33_1}	τ	ν	R^2
108 (0.3 T_C)	0.9858	0.0161	212.7834	0.9729	0.9931
144 (0.4 T_C)	0.9807	0.0234	176.3129	0.9000	0.9818
180 (0.5 T_C)	0.9740	0.0360	126.0103	0.7166	0.9775
216 (0.6 T_C)	0.9666	0.0561	76.2119	0.5469	0.9953
252 (0.7 T_C)	0.9605	0.0954	31.4654	0.4655	0.9989
288 (0.8 T_C)	0.9508	0.1399	21.7025	0.4400	0.9966



รูปที่ 4.8 อัตราการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกต่ออุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft

4.2.1.2 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบ

ปัจจัย k_p แบบสัมพัทธ์หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.9 ข้อมูลแบบสัมพัทธ์สามารถใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของปัจจัย k_p ในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 การอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30% และ 40% ของ T_c ปัจจัย k_p ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับจุดเริ่มต้นก่อนนำไปการอบด้วยความร้อน ส่วนการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50% 60% 70% และ 80% ของ T_c ปัจจัย k_p มีอัตราการลดลงอย่างเห็นได้ชัดตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีรูปแบบเดียวกันกับการลดลงของสัมประสิทธิ์ d_{33} ที่ได้กล่าวมาในข้างต้น



รูปที่ 4.9 ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อน [เส้นทึบได้จากสมการที่ 4.2]

ปัจจัย k_p แบบสัมผัสที่มีอัตราการลดลงตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้น สามารถหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอย (Zhang et al., 1996) เป็นสมการการเสื่อมอายุของปัจจัย k_p ดังสมการที่ 4.2

$$k_p(t) = k_{p_\infty} + k_{p_1} \exp[-(t/\tau)^\nu] \quad (4.2)$$

โดยที่ $k_p(t)$ คือ ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสแปรตามเวลา

k_{p_∞} คือ ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสย่อยคงที่ไม่แปรตามเวลา

k_{p_1} คือ ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสย่อยแปรตามเวลา

t คือ เวลาการเสื่อมอายุ

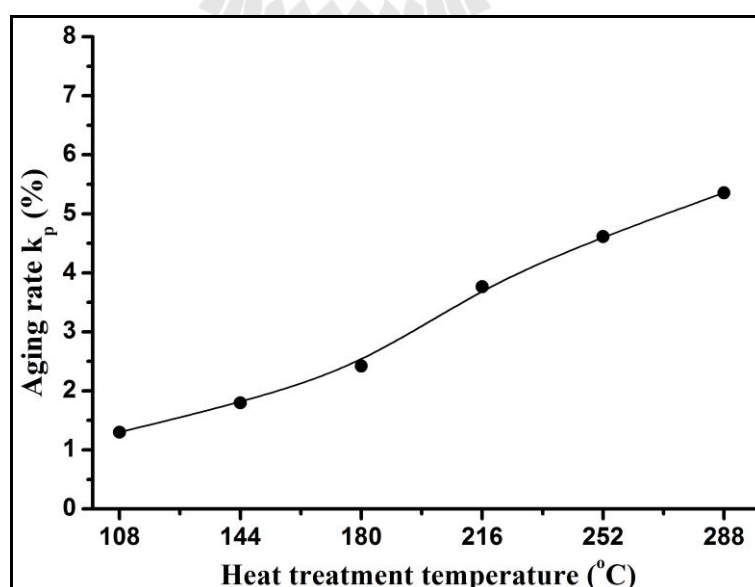
τ คือ ค่าคงที่ทางเวลาการเสื่อมอายุ

ν คือ เลขชี้กำลังของสมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอย

จากผลการทดลองและหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จะค่าได้ พารามิเตอร์ของสมการคือ $k_{p\infty}$, k_{p1} , τ , ν และ R^2 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 จากผลการทดลองที่ได้ สามารถนำมาคำนวณอัตราการเสื่อมอายุของปัจจัย k_p ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าอัตราการเสื่อมอายุที่อุณหภูมิ 30%(108 °C) ของ T_C คือ 1.30% ที่อุณหภูมิ 40%(144 °C) ของ T_C คือ 1.80% ที่อุณหภูมิ 50%(180 °C) ของ T_C คือ 2.42% ที่อุณหภูมิ 60%(216 °C) ของ T_C คือ 3.77% ที่อุณหภูมิ 70%(252 °C) ของ T_C คือ 4.62% และที่อุณหภูมิ 80%(288 °C) ของ T_C คือ 5.36% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ของสมการการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบ สัมพัทธ์ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังจากอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

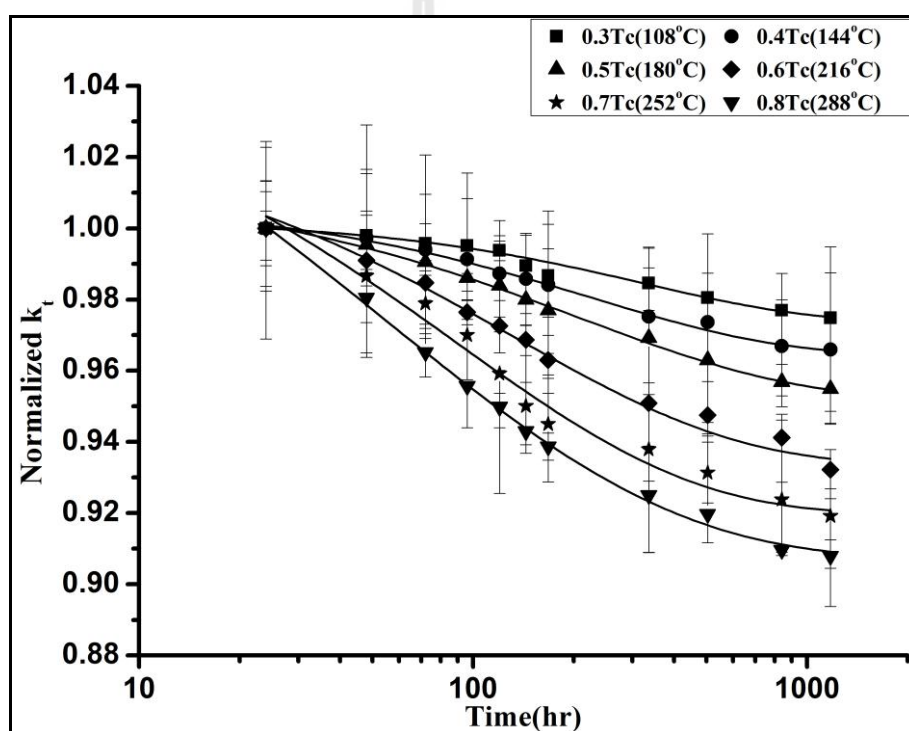
อุณหภูมิ (°C)	$k_{p\infty}$	k_{p1}	τ	ν	R^2
108 (0.3 T_C)	0.9776	0.0246	331.0928	0.8909	0.9806
144 (0.4 T_C)	0.9692	0.0376	230.8192	0.7688	0.9930
180 (0.5 T_C)	0.9588	0.0519	211.7375	0.7050	0.9989
216 (0.6 T_C)	0.9428	0.0821	129.6354	0.6846	0.9768
252 (0.7 T_C)	0.9274	0.1148	100.1048	0.6004	0.9761
288 (0.8 T_C)	0.9159	0.1666	54.2071	0.4787	0.9875



รูปที่ 4.10 อัตราการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบต่ออุณหภูมิการอบ ด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft

4.2.1.3 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนา

ปัจจัย k_t แบบสัมพัทธ์หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.11 ข้อมูลแบบสัมพัทธ์สามารถใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของปัจจัย k_t ในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 การอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30% และ 40% ของ T_C ปัจจัย k_t ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับจุดเริ่มต้นก่อนนำไปการอบด้วยความร้อน ส่วนการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50% 60% 70% และ 80% ของ T_C ปัจจัย k_t มีอัตราการลดลงอย่างเห็นได้ชัดตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีรูปแบบเดียวกันกับการลดลงของปัจจัย k_p



รูปที่ 4.11 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อน [เส้นทึบได้จากสมการที่ 4.3]

ปัจจัย k_t แบบสัมพัทธ์ที่มีอัตราการลดลงตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้น สามารถหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอย (Zhang et al., 1996) เป็นสมการการเสื่อมอายุของปัจจัย k_t ดังสมการที่ 4.3

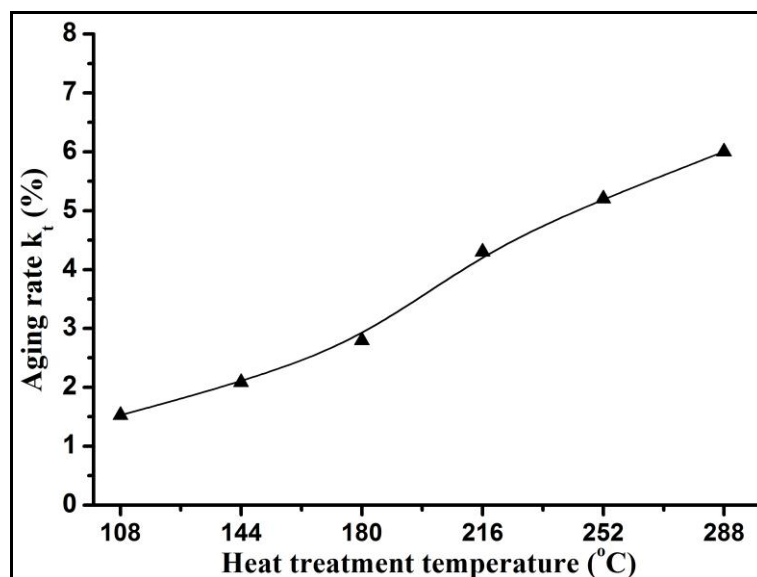
$$k_t(t) = k_{t_\infty} + k_{t_i} \exp[-(t/\tau)^\nu] \quad (4.3)$$

- โดยที่ $k_t(t)$ คือ ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์แปรตามเวลา
 k_{t_∞} คือ ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ย่อยคงที่ไม่แปรตามเวลา
 k_{t_1} คือ ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ย่อยแปรตามเวลา
 t คือ เวลาการเสื่อมอายุ
 τ คือ ค่าคงที่ทางเวลาการเสื่อมอายุ
 ν คือ เลขชี้กำลังของสมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอย

จากผลการทดลองและหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จะค่าได้ พารามิเตอร์ของสมการคือ k_{t_∞} k_{t_1} τ ν และ R^2 ดังแสดงในตารางที่ 4.5 จากผลการทดลองที่ได้ สามารถนำมาคำนวณอัตราการเสื่อมอายุของปัจจัย k_t ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าอัตราการเสื่อมอายุที่อุณหภูมิ 30%(108 °C) ของ T_C คือ 1.53% ที่อุณหภูมิ 40%(144 °C) ของ T_C คือ 2.09% ที่อุณหภูมิ 50%(180 °C) ของ T_C คือ 2.80% ที่อุณหภูมิ 60%(216 °C) ของ T_C คือ 4.30% ที่อุณหภูมิ 70%(252 °C) ของ T_C คือ 5.20% และที่อุณหภูมิ 80%(288 °C) ของ T_C คือ 6.00% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ของสมการการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังจากอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	k_{t_∞}	k_{t_1}	τ	ν	R^2
108 (0.3 T_C)	0.9739	0.0288	328.7031	0.8920	0.9808
144 (0.4 T_C)	0.9644	0.0436	228.4983	0.7655	0.9929
180 (0.5 T_C)	0.9521	0.0614	210.9759	0.6714	0.9989
216 (0.6 T_C)	0.9336	0.0980	132.0639	0.6372	0.9819
252 (0.7 T_C)	0.9196	0.1325	87.8773	0.5996	0.9735
288 (0.8 T_C)	0.9070	0.1837	54.0224	0.4852	0.9946

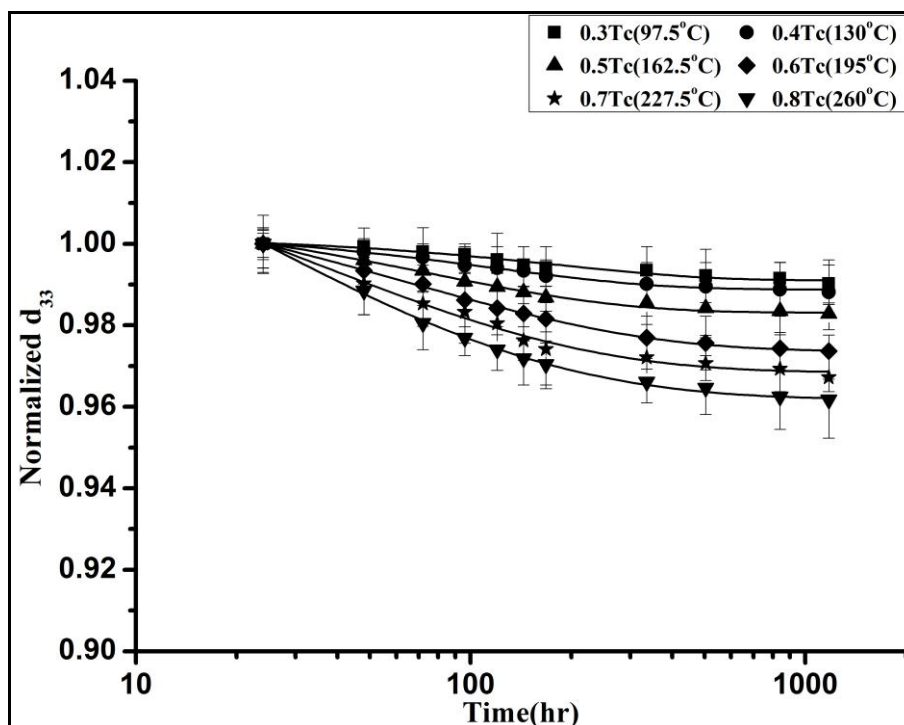


รูปที่ 4.12 อัตราการเสื่อมอายุของบั้งจัญควมเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาต่ออุณหภูมิ การอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft

4.2.2 วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard

4.2.2.1 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก

ด้วยวิธีการเดียวกันกับที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft สัมประสิทธิ์ d_{33} แบบสัมพัทธ์หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.13 ข้อมูลแบบสัมพัทธ์สามารถใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของสัมประสิทธิ์ d_{33} ในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 การอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30% และ 40% ของ T_C สัมประสิทธิ์ d_{33} ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับจุดเริ่มต้นก่อนนำไปอบด้วยความร้อน ส่วนการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50% 60% 70% และ 80% ของ T_C สัมประสิทธิ์ d_{33} มีอัตราการลดลงอย่างเห็นได้ชัดตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้น



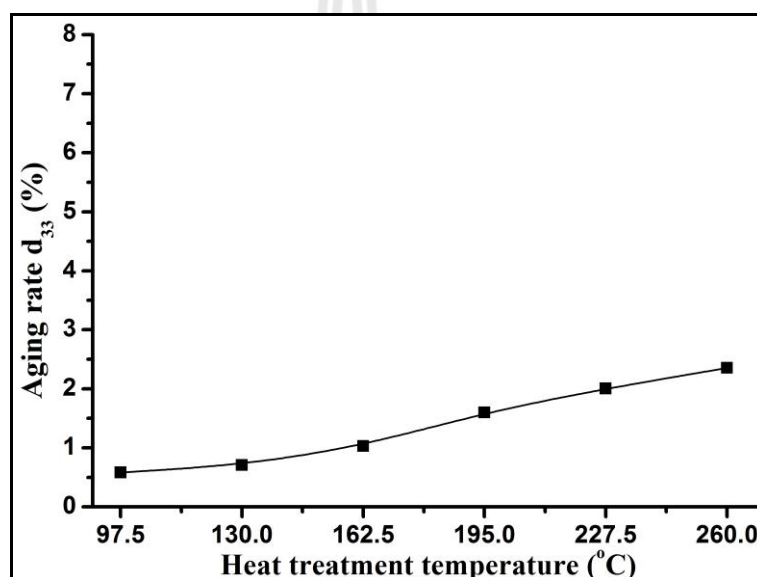
รูปที่ 4.13 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อน [เส้นทึบได้จากสมการที่ 4.1]

สัมประสิทธิ์ d_{33} แบบสัมพัทธ์ที่มีอัตราการลดลงตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้น สามารถหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอยเป็นสมการการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์ d_{33} ดังสมการที่ 4.1

จากผลการทดลองและหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จะค่าได้พารามิเตอร์ของสมการคือ d_{33_0} , d_{33} , τ , ν และ R^2 ดังแสดงในตารางที่ 4.6 จากผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาคำนวณอัตราการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์ d_{33} ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าอัตราการเสื่อมอายุที่อุณหภูมิ 30%(97.5 °C) ของ T_c คือ 0.58% ที่อุณหภูมิ 40%(130 °C) ของ T_c คือ 0.71% ที่อุณหภูมิ 50%(162.5 °C) ของ T_c คือ 1.03% ที่อุณหภูมิ 60%(195 °C) ของ T_c คือ 1.60% ที่อุณหภูมิ 70%(227.5 °C) ของ T_c คือ 2.01% และที่อุณหภูมิ 80%(260 °C) ของ T_c คือ 2.35% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ของสมการการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังจากอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	d_{33_0}	d_{33_1}	τ	ν	R^2
97.5 ($0.3T_c$)	0.9910	0.0107	178.3147	0.9390	0.9683
130 ($0.4T_c$)	0.9888	0.0148	114.8299	0.8545	0.9938
162.5 ($0.5T_c$)	0.9831	0.0263	75.6066	0.7327	0.9957
195 ($0.6T_c$)	0.9736	0.0466	63.6648	0.5799	0.9989
227.5 ($0.7T_c$)	0.9684	0.0733	33.9160	0.5108	0.9715
260 ($0.8T_c$)	0.9618	0.1191	17.8556	0.4281	0.9985

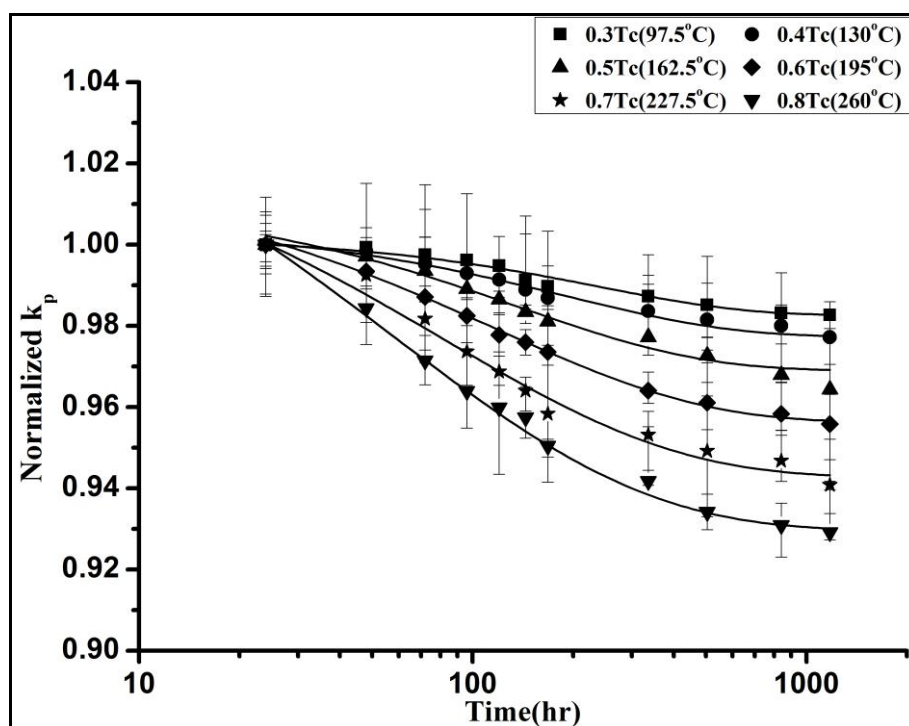


รูปที่ 4.14 อัตราการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกต่ออุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard

4.2.2.2 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบ

ด้วยวิธีการเดียวกันกับที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุเซรามิก PZT แบบ soft ปัจจัย k_p แบบสัมพัทธ์หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.15 ข้อมูลแบบสัมพัทธ์สามารถใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของปัจจัย k_p ในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 การอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30% และ 40% ของ T_c ปัจจัย k_p ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับจุดเริ่มต้นก่อนนำไปการอบด้วยความร้อน ส่วนการอบด้วยความ

ร้อนที่อุณหภูมิ 50% 60% 70% และ 80% ของ T_C ปัจจัย k_p มีอัตราการลดลงอย่างเห็นได้ชัดตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้น



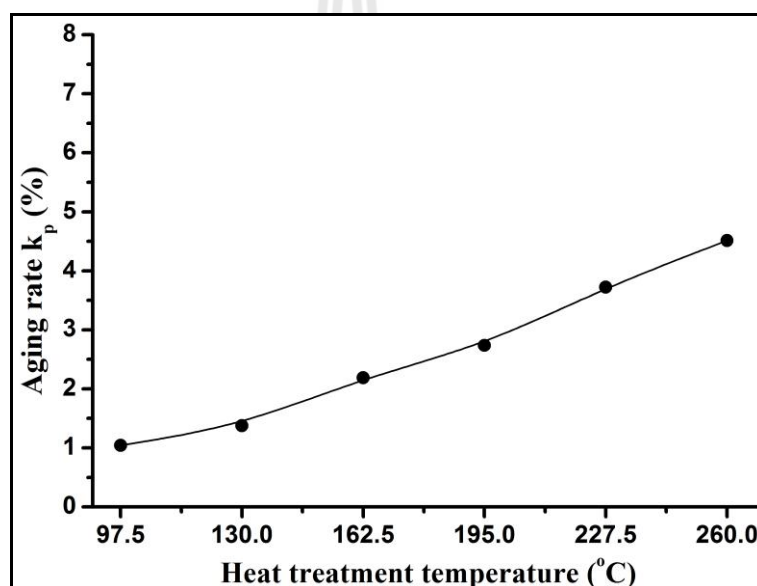
รูปที่ 4.15 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อน [เส้นทึบได้จากสมการที่ 4.2]

ปัจจัย k_p แบบสัมผัสที่มีอัตราการลดลงตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้น สามารถหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอยเป็นสมการการเสื่อมอายุของปัจจัย k_p ดังสมการที่ 4.2

จากผลการทดลองและหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จะค่าได้พารามิเตอร์ของสมการคือ k_{p_∞} , k_{p_1} , τ , ν และ R^2 ดังแสดงในตารางที่ 4.7 จากผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาคำนวณอัตราการเสื่อมอายุของปัจจัย k_p ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าอัตราการเสื่อมอายุที่อุณหภูมิ 30%(97.5 °C) ของ T_C คือ 1.04% ที่อุณหภูมิ 40%(130 °C) ของ T_C คือ 1.38% ที่อุณหภูมิ 50%(162.5 °C) ของ T_C คือ 2.19% ที่อุณหภูมิ 60%(195 °C) ของ T_C คือ 2.74% ที่อุณหภูมิ 70%(227.5 °C) ของ T_C คือ 3.72% และที่อุณหภูมิ 80%(260 °C) ของ T_C คือ 4.51% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ของสมการการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบ
สัมผัสของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังจากอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	$k_{p_{\infty}}$	k_{p_1}	τ	ν	R^2
97.5 ($0.3T_c$)	0.9826	0.0194	237.0193	0.9771	0.9973
130 ($0.4T_c$)	0.9773	0.0273	190.5327	0.8665	0.9898
162.5 ($0.5T_c$)	0.9690	0.0428	136.9784	0.7861	0.9806
195 ($0.6T_c$)	0.9562	0.0629	117.2696	0.6922	0.9976
227.5 ($0.7T_c$)	0.9427	0.0921	82.5694	0.6154	0.9897
260 ($0.8T_c$)	0.9295	0.1314	57.0120	0.5583	0.9963

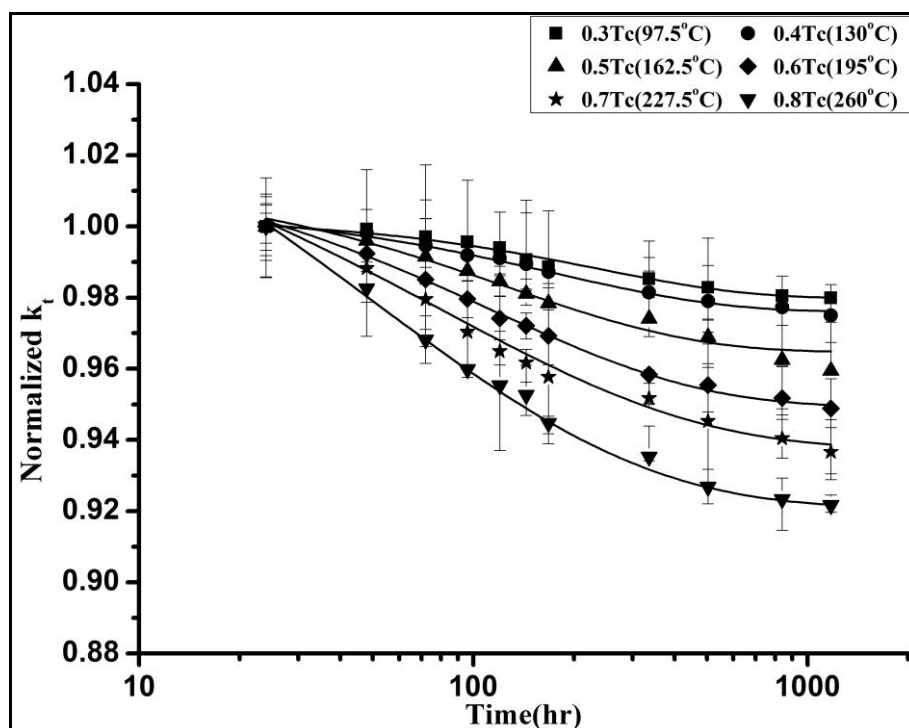


รูปที่ 4.16 อัตราการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบต่ออุณหภูมิการ
อบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard

4.2.2.3 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนา

ด้วยวิธีการเดียวกันกับที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุเซรามิก PZT แบบ soft ปัจจัย k_t แบบสัมผัสหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.17 ข้อมูลแบบสัมผัสสามารถใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของปัจจัย k_t ในแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.17 การอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30% และ 40% ของ T_c ปัจจัย k_t ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับจุดเริ่มต้นก่อนนำไปการอบด้วยความร้อน ส่วนการอบด้วยความ

ร้อนที่อุณหภูมิ 50% 60% 70% และ 80% ของ T_c ปัจจัย k_t มีอัตราการลดลงอย่างเห็นได้ชัดตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้น



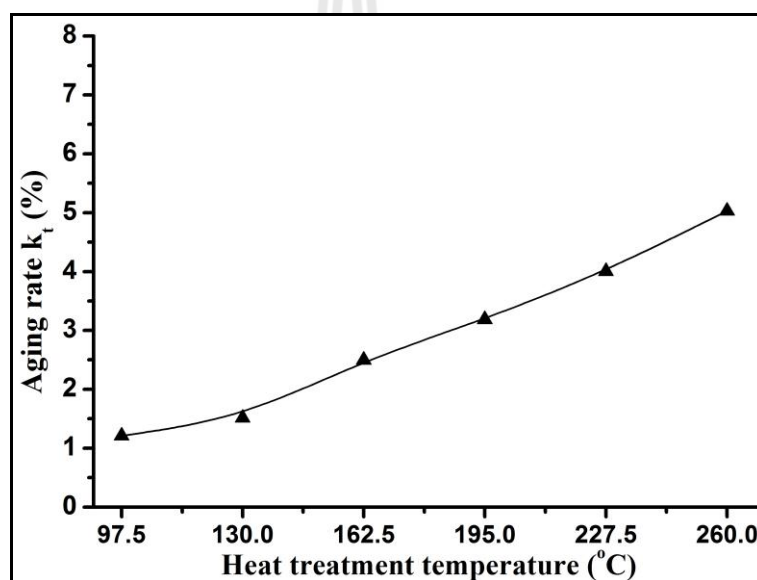
รูปที่ 4.17 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อน[เส้นที่บได้จากสมการที่ 4.3]

ปัจจัย k_t แบบสัมพัทธ์ที่มีอัตราการลดลงตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้น สามารถหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอยเป็นสมการการเสื่อมอายุของปัจจัย k_t ดังสมการที่ 4.3

จากผลการทดลองและหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จะค่าได้พารามิเตอร์ของสมการคือ $k_{t\infty}$, k_t , τ , ν และ R^2 ดังแสดงในตารางที่ 4.8 จากผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาคำนวณอัตราการเสื่อมอายุของปัจจัย k_t ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าอัตราการเสื่อมอายุที่อุณหภูมิ 30%(97.5 °C) ของ T_c คือ 1.21% ที่อุณหภูมิ 40%(130 °C) ของ T_c คือ 1.52% ที่อุณหภูมิ 50%(162.5 °C) ของ T_c คือ 2.50% ที่อุณหภูมิ 60%(195 °C) ของ T_c คือ 3.19% ที่อุณหภูมิ 70%(227.5 °C) ของ T_c คือ 4.00% และที่อุณหภูมิ 80%(260 °C) ของ T_c คือ 5.03% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ของสมการการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบ
สัมพัทธ์ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	$k_{t_{\infty}}$	k_{t_1}	τ	ν	R^2
97.5 ($0.3T_c$)	0.9798	0.0228	235.1236	0.9639	0.9944
130 ($0.4T_c$)	0.9760	0.0295	175.7525	0.8557	0.9907
162.5 ($0.5T_c$)	0.9646	0.0497	127.3384	0.7676	0.9810
195 ($0.6T_c$)	0.9493	0.0737	114.5129	0.6838	0.9984
227.5 ($0.7T_c$)	0.9375	0.1066	80.0004	0.5538	0.9898
260 ($0.8T_c$)	0.9209	0.1600	48.9299	0.5140	0.9967



รูปที่ 4.18 อัตราการเสื่อมอายุของค่าปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาต่ออุณหภูมิ
การอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard

4.3 แบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและ เวลาหลังการอบด้วยความร้อนแต่ละอุณหภูมิ

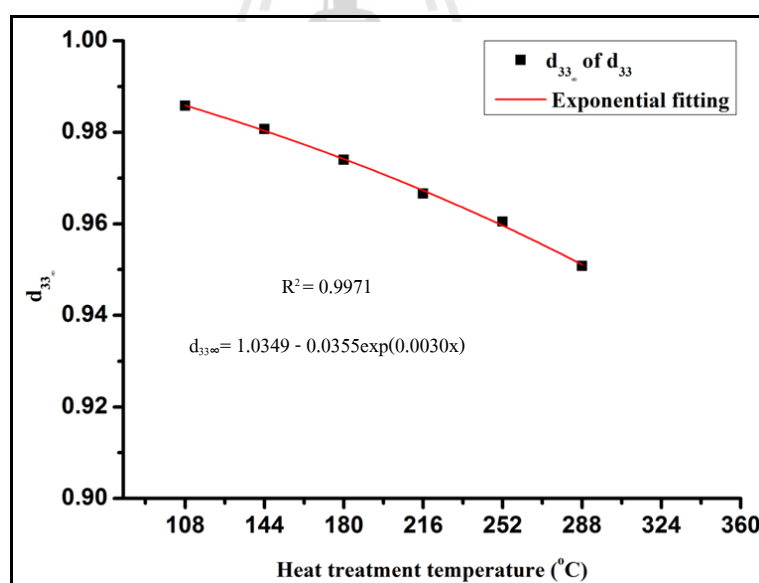
ส่วนนี้เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง โดยนำพารามิเตอร์ของสมการ
สัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t มาพล็อตในฟังก์ชันของอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน
เพื่อหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการ Curve fitting ทำให้ได้แบบจำลองความสัมพันธ์
ทางคณิตศาสตร์ระหว่างสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t กับอุณหภูมิ และสามารถ

คำนวณสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ในฟังก์ชันของอุณหภูมิได้ จึงทำให้สามารถหาแบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอยและคำนวณสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ในเชิงเวลาได้ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต้องสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับทุก ๆ อุณหภูมิ (30% ถึง 80% ของ T_C) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องจึงต้องตรวจสอบกับอุณหภูมิตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

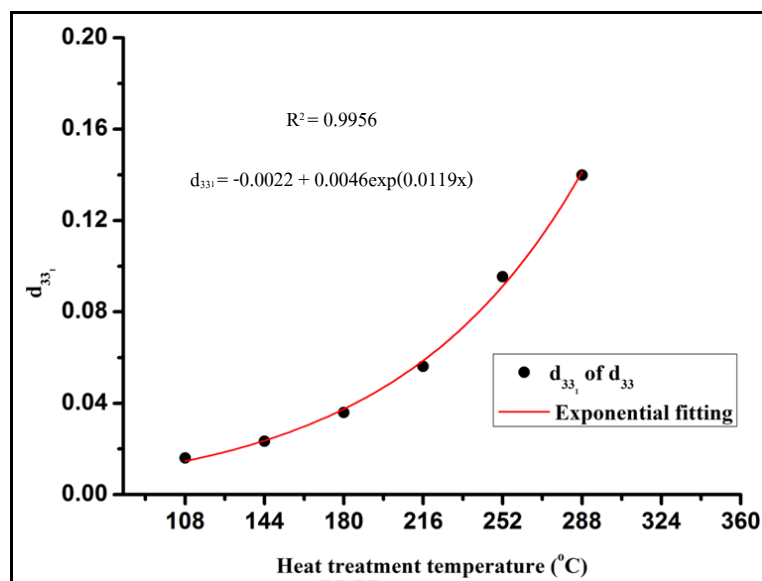
4.3.1 วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft

4.3.1.1 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก

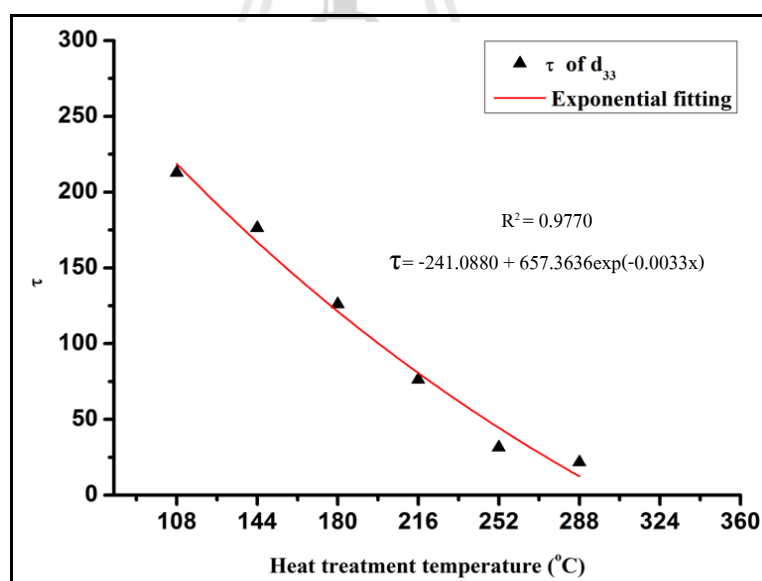
จากพารามิเตอร์ของสมการสัมประสิทธิ์ d_{33} ในเชิงเวลาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ 4 ค่า คือ d_{33_0} , d_{33_1} , τ และ ν โดยแต่ละพารามิเตอร์มีค่าแตกต่างกันตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน เมื่อนำพารามิเตอร์แต่ละตัวไปพล็อตในฟังก์ชันของอุณหภูมิ เพื่อหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการ Curve fitting ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.22



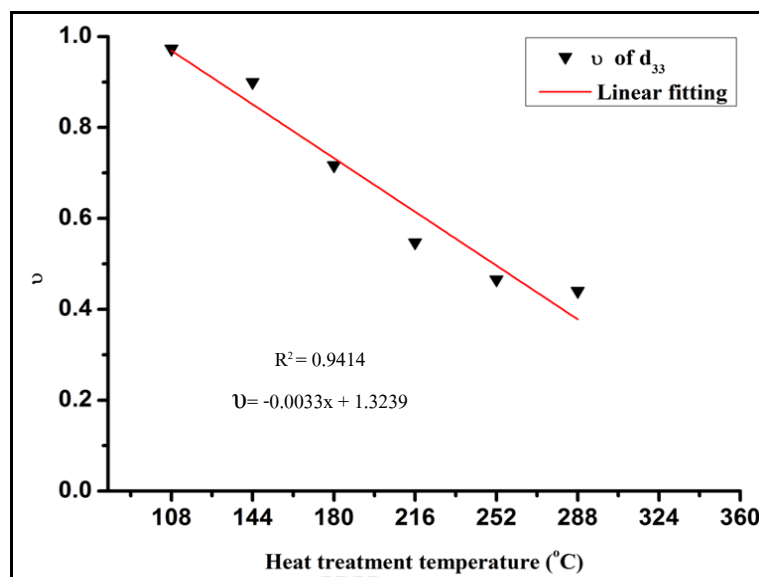
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า d_{33_0} กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZTแบบ Soft



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า d_{33} กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุ เซรามิก PZT แบบ Soft



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุ เซรามิก PZT แบบ Soft



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ν กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุ เซรามิก PZT แบบ Soft

จากรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.22 เมื่อใช้หลักการ Curve fitting ได้สมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $d_{33\infty}$, d_{33i} , τ และ ν กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ดังสมการที่ 4.4 ถึงสมการที่ 4.7

$$d_{33\infty(cal)} = 1.0349 - 0.0355 \exp(0.0030x) \quad (4.4)$$

$$d_{33i(cal)} = -0.0022 + 0.0046 \exp(0.0119x) \quad (4.5)$$

$$\tau_{(cal)} = -241.0880 + 657.3636 \exp(-0.0033x) \quad (4.6)$$

$$\nu_{(cal)} = -0.0033x + 1.3239 \quad (4.7)$$

โดยที่ $d_{33\infty(cal)}$ คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ย่อยคงที่ไม่แปรตามเวลาจากการคำนวณ

$d_{33i(cal)}$ คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ย่อยแปรตามเวลาจากการคำนวณ

$\tau_{(cal)}$	คือ ค่าคงที่ทางเวลาการเสื่อมอายุจากการคำนวณ
$\nu_{(cal)}$	คือ เลขชี้กำลังของสมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอยจากการคำนวณ
x	คือ อุณหภูมิการอบด้วยความร้อน

เมื่อนำสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปคำนวณ ได้ผลการคำนวณที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ใช้ในการอบด้วยความร้อนดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ของสมการสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ

$x (^{\circ}\text{C})$	$d_{33x(cal)}$	$d_{33l(cal)}$	$\tau_{(cal)}$	$\nu_{(cal)}$
108 (0.3T _C)	0.9859	0.0146	218.6962	0.9696
144 (0.4T _C)	0.9804	0.0236	167.0467	0.8515
180 (0.5T _C)	0.9742	0.0374	121.1992	0.7335
216 (0.6T _C)	0.9673	0.0586	80.5020	0.6154
252 (0.7T _C)	0.9597	0.0912	44.3764	0.4973
288 (0.8T _C)	0.9512	0.1411	12.3090	0.3792

นำพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ที่คำนวณได้ประกอบด้วย $d_{33x(cal)}$ $d_{33l(cal)}$ $\tau_{(cal)}$ และ $\nu_{(cal)}$ แทนในสมการที่ 4.1 เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์ $d_{33(cal)}$ ในเชิงเวลาของแต่ละอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน

ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์ $d_{33(cal)}$ จากสมการที่ 4.8 ถึงสมการที่ 4.13 แสดงในตารางที่ 4.10 นำผลการคำนวณที่ได้พล็อตกราฟ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.23

$$d_{33(cal)}(t) = 0.9859 + 0.0146 \exp[-(t/218.6962)^{0.9696}] \quad (4.8)$$

$$d_{33(cal)}(t) = 0.9804 + 0.0236 \exp[-(t/167.0467)^{0.8515}] \quad (4.9)$$

$$d_{33(cal)}(t) = 0.9742 + 0.0374 \exp[-(t/121.1992)^{0.7335}] \quad (4.10)$$

$$d_{33(cal)}(t) = 0.9673 + 0.0586 \exp[-(t/80.5020)^{0.6154}] \quad (4.11)$$

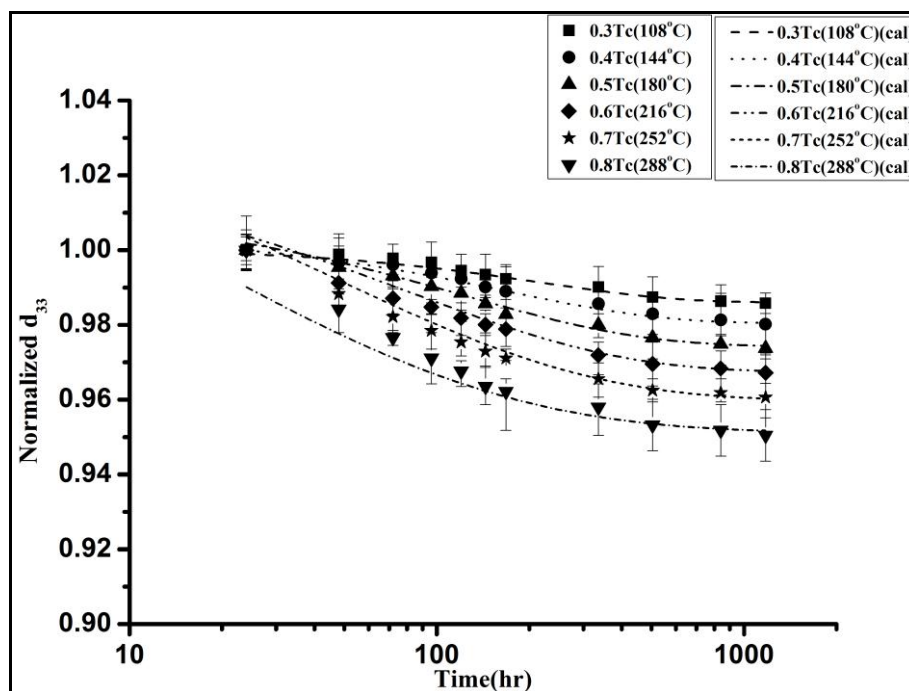
$$d_{33(cal)}(t) = 0.9597 + 0.0912 \exp[-(t/44.3762)^{0.4973}] \quad (4.12)$$

$$d_{33(cal)}(t) = 0.9512 + 0.1411 \exp[-(t/12.3090)^{0.3792}] \quad (4.13)$$

โดยที่ $d_{33(cal)}(t)$ คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์แปรตามเวลาจากการ
 คำนวณ
 t คือ เวลาการเสื่อมอายุ

ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft
 หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ

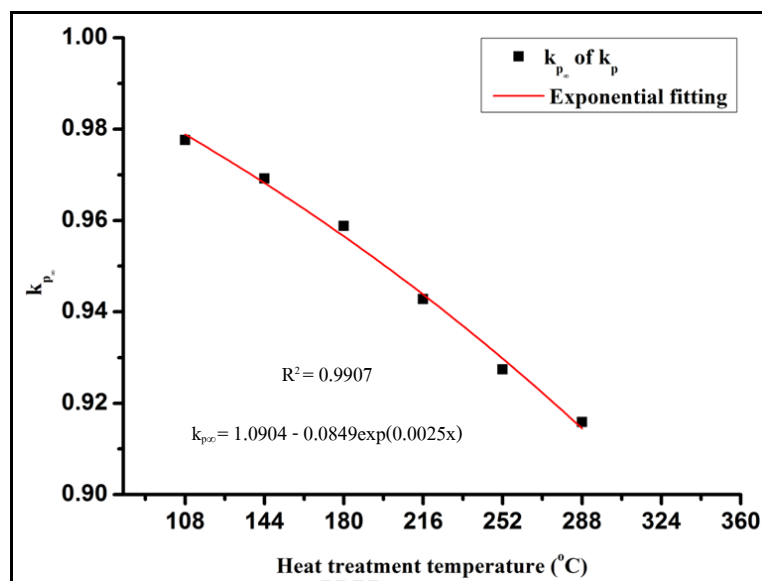
เวลา	อุณหภูมิการอบด้วยความร้อน					
t (hr)	108 °C	144 °C	180 °C	216 °C	252 °C	288 °C
24	0.9989	0.9999	1.0018	1.0038	1.0033	0.9901
48	0.9975	0.9971	0.9967	0.9957	0.9919	0.9776
72	0.9963	0.9949	0.9931	0.9904	0.9852	0.9712
96	0.9952	0.9930	0.9903	0.9866	0.9807	0.9671
120	0.9943	0.9915	0.9881	0.9837	0.9774	0.9643
144	0.9934	0.9902	0.9862	0.9814	0.9748	0.9623
168	0.9927	0.9890	0.9847	0.9795	0.9728	0.9607
336	0.9891	0.9842	0.9787	0.9726	0.9656	0.9554
504	0.9875	0.9822	0.9764	0.9700	0.9629	0.9535
840	0.9863	0.9808	0.9748	0.9682	0.9609	0.9522
1176	0.9860	0.9805	0.9744	0.9676	0.9602	0.9517



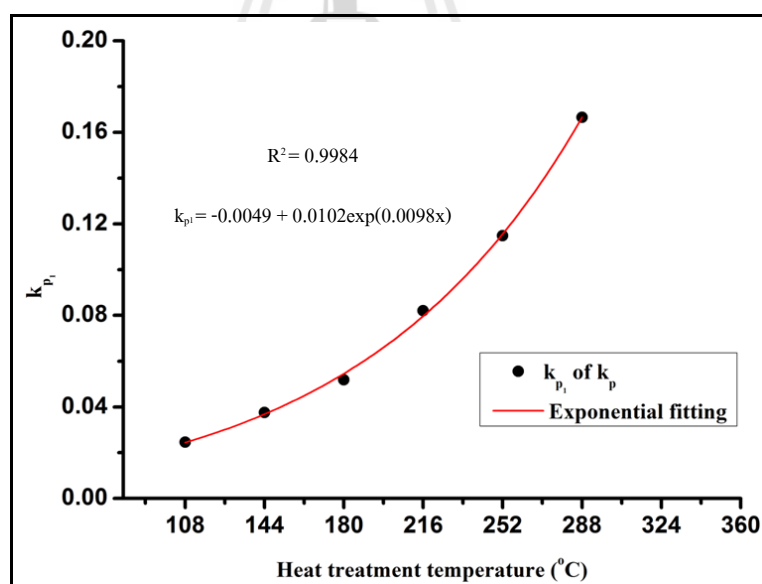
รูปที่ 4.23 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลอง และการคำนวณของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อน

4.3.1.2 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบ

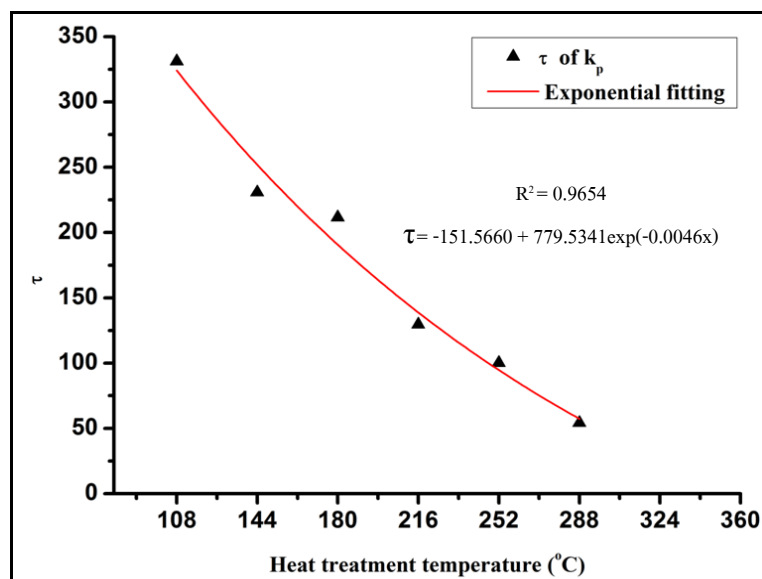
จากพารามิเตอร์ของสมการปัจจัย k_p ในเชิงเวลาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ 4 ค่า คือ k_{p_∞} , k_{p_1} , τ และ ν โดยแต่ละค่าพารามิเตอร์มีค่าแตกต่างกันตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน เมื่อนำพารามิเตอร์แต่ละตัวไปพล็อตในฟังก์ชันของอุณหภูมิ เพื่อหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการ Curve fitting ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.27



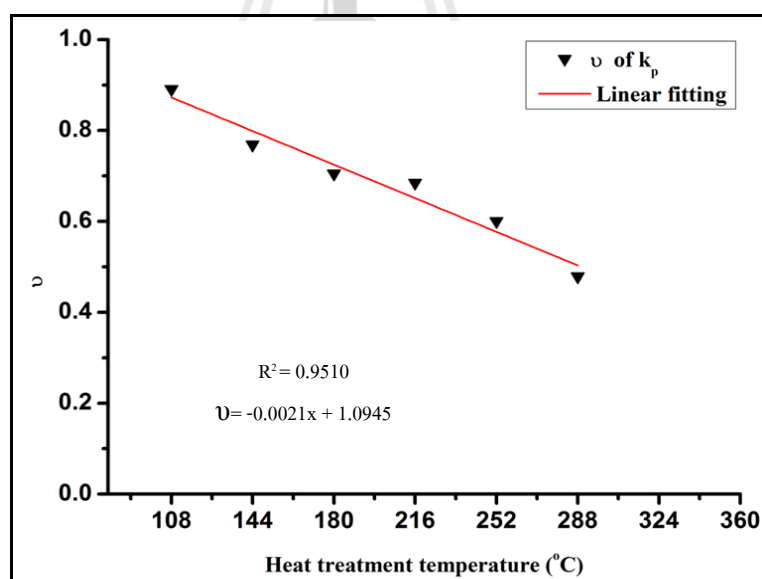
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k_{p_{\infty}}$ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_{p_1} กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุ เซรามิก PZT แบบ Soft



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุ เซรามิก PZT แบบ Soft

จากรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.27 เมื่อใช้หลักการ Curve fitting ได้สมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_{p_∞} k_{p_1} τ และ ν กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ดังสมการที่ 4.14 ถึงสมการที่ 4.17

$$k_{p_\infty(cal)} = 1.0904 - 0.0849 \exp(0.0025x) \quad (4.14)$$

$$k_{p_1(cal)} = -0.0049 + 0.0102 \exp(0.0098x) \quad (4.15)$$

$$\tau_{(cal)} = -151.5660 + 779.5241 \exp(-0.0046x) \quad (4.16)$$

$$\nu_{(cal)} = -0.0021x + 1.0945 \quad (4.17)$$

โดยที่ $k_{p_\infty(cal)}$	คือ ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมพัทธ์ย่อยคงที่ไม่แปรตามเวลาจากการคำนวณ
$k_{p_1(cal)}$	คือ ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมพัทธ์ย่อยแปรตามเวลาจากการคำนวณ
$\tau_{(cal)}$	คือ ค่าคงที่ทางเวลาการเสื่อมอายุจากการคำนวณ
$\nu_{(cal)}$	คือ เลขชี้กำลังของสมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอยจากการคำนวณ
x	คือ อุณหภูมิการอบด้วยความร้อน

เมื่อนำสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปคำนวณ ได้ผลการคำนวณที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ใช้ในการอบด้วยความร้อนดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบในเชิงเวลาของวัสดุ
เซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ

$x (^{\circ}\text{C})$	$k_{p_{\infty}(cal)}$	$k_{p_1(cal)}$	$\tau_{(cal)}$	$\nu_{(cal)}$
108 (0.3T _C)	0.9789	0.0244	324.2939	0.8731
144 (0.4T _C)	0.9682	0.0369	252.1063	0.7993
180 (0.5T _C)	0.9566	0.0546	190.8696	0.7255
216 (0.6T _C)	0.9438	0.0798	138.9224	0.6517
252 (0.7T _C)	0.9299	0.1157	94.8555	0.5779
288 (0.8T _C)	0.9145	0.1668	57.4736	0.5041

นำพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ที่คำนวณได้ประกอบด้วย $k_{p_{\infty}(cal)}$ $k_{p_1(cal)}$ $\tau_{(cal)}$ และ $\nu_{(cal)}$ แทนในสมการที่ 4.2 เพื่อคำนวณปัจจัย $k_{p(cal)}$ ในเชิงเวลาของแต่ละอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน

ผลการคำนวณปัจจัย $k_{p(cal)}$ จากสมการที่ 4.18 ถึงสมการที่ 4.23 แสดงในตารางที่ 4.12 นำผลการคำนวณที่ได้พล็อตกราฟ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองจริงดังแสดงได้ในรูปที่ 4.28

$$k_{p(cal)}(t) = 0.9789 + 0.0244 \exp[-(t/324.2939)^{0.8731}] \quad (4.18)$$

$$k_{p(cal)}(t) = 0.9682 + 0.0369 \exp[-(t/252.1063)^{0.7993}] \quad (4.19)$$

$$k_{p(cal)}(t) = 0.9566 + 0.0546 \exp[-(t/190.8696)^{0.7255}] \quad (4.20)$$

$$k_{p(cal)}(t) = 0.9438 + 0.0798 \exp[-(t/138.9224)^{0.6517}] \quad (4.21)$$

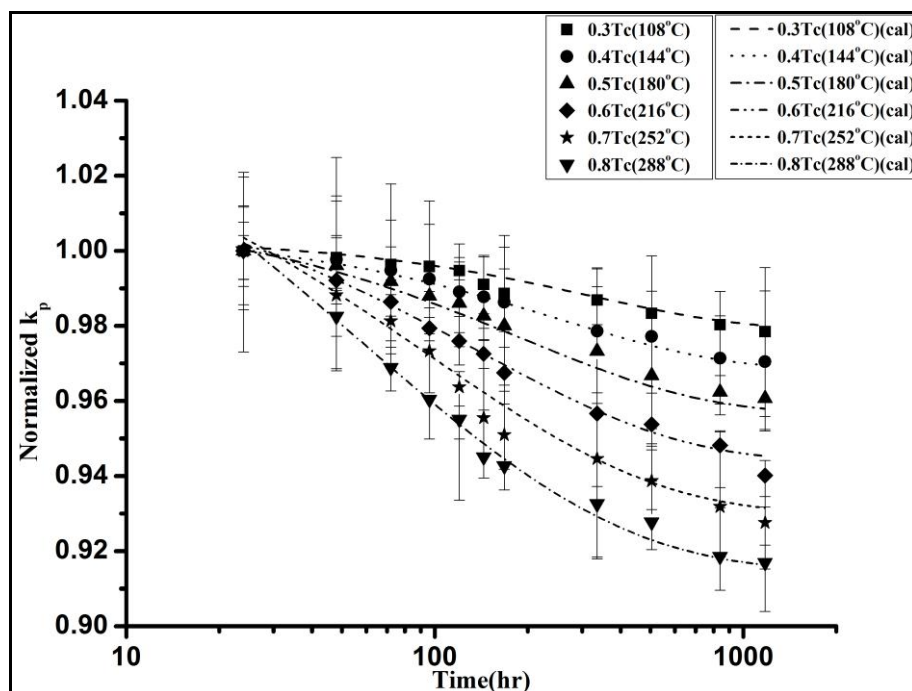
$$k_{p(cal)}(t) = 0.9299 + 0.1157 \exp[-(t/94.8555)^{0.5779}] \quad (4.22)$$

$$k_{p(cal)}(t) = 0.9145 + 0.1668 \exp[-(t/57.4736)^{0.5041}] \quad (4.23)$$

โดยที่ $k_{p(cal)}(t)$ คือ ปัจจัยค่าคงที่เชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสแปรตามเวลาจากการคำนวณ
 t คือ เวลาการเสื่อมอายุ

ตารางที่ 4.12 ปัจจัยค่าคงที่เชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ

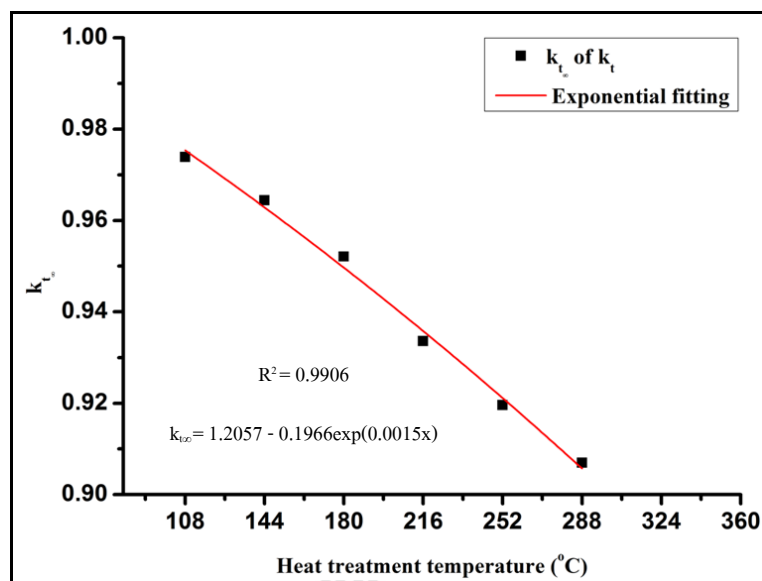
เวลา	อุณหภูมิการอบด้วยความร้อน					
t (hr)	108 °C	144 °C	180 °C	216 °C	252 °C	288 °C
24	1.0009	0.9999	1.0003	1.0019	1.0035	1.0021
48	0.9991	0.9965	0.9944	0.9922	0.9888	0.9815
72	0.9976	0.9938	0.9899	0.9854	0.9792	0.9689
96	0.9962	0.9915	0.9863	0.9802	0.9721	0.9602
120	0.9949	0.9895	0.9833	0.9760	0.9666	0.9537
144	0.9938	0.9877	0.9808	0.9725	0.9622	0.9486
168	0.9928	0.9861	0.9785	0.9696	0.9586	0.9445
336	0.9876	0.9787	0.9687	0.9573	0.9444	0.9291
504	0.9845	0.9747	0.9638	0.9517	0.9382	0.9229
840	0.9813	0.9709	0.9595	0.9470	0.9333	0.9180
1176	0.9800	0.9694	0.9579	0.9453	0.9315	0.9163



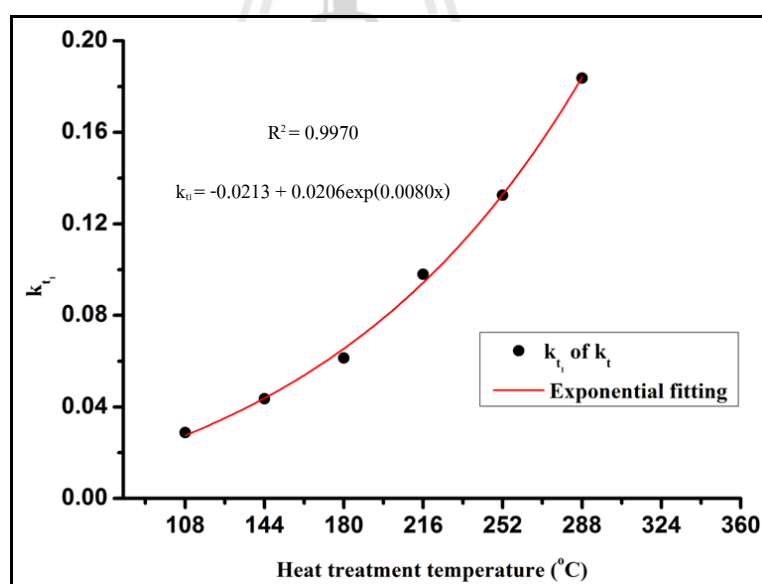
รูปที่ 4.28 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสในเชิงเวลาเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการคำนวณของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อน

4.3.1.3 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนา

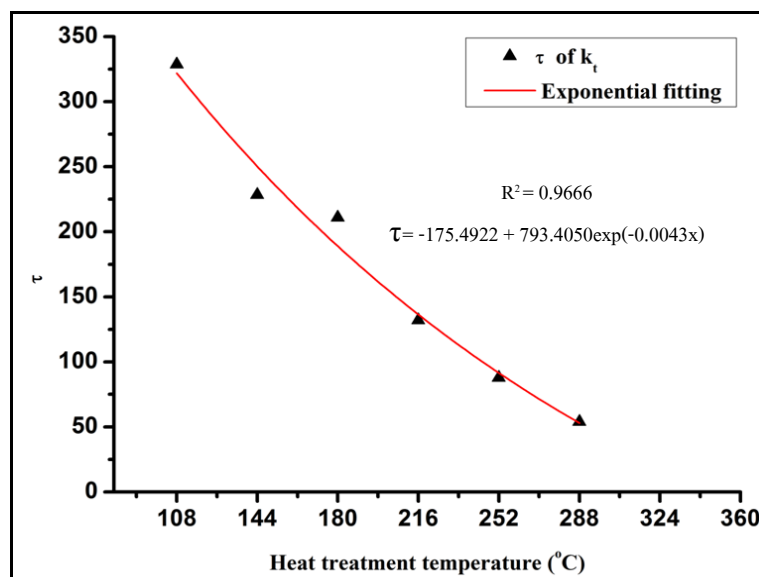
จากพารามิเตอร์ของสมการปัจจัย k_p ในเชิงเวลาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ 4 ค่า คือ k_{∞} , k_{t_1} , τ และ ν โดยแต่ละค่าพารามิเตอร์มีค่าแตกต่างกันตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน เมื่อนำพารามิเตอร์แต่ละตัวไปพล็อตในฟังก์ชันของอุณหภูมิ เพื่อหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการ Curve fitting ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.29 ถึงรูปที่ 4.32



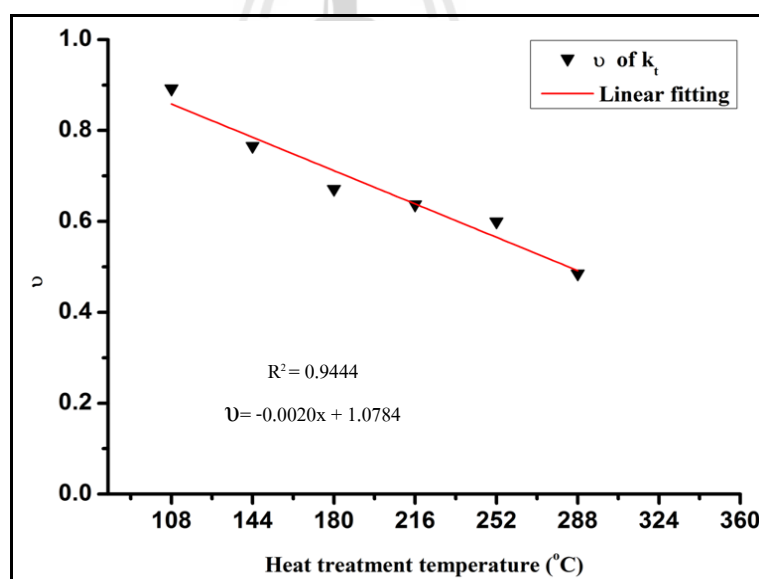
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k_{t_{\infty}}$ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k_{t_{\infty}}$ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft

จากรูปที่ 4.29 ถึงรูปที่ 4.32 เมื่อให้หลักการ Curve fitting ได้สมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{t_{\infty}}$, k_{t_1} , τ และ ν กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ดังสมการที่ 4.24 ถึงสมการที่ 4.27

$$k_{t_{\infty}(cal)} = 1.2057 - 0.1966 \exp(0.0015x) \quad (4.24)$$

$$k_{t_1(cal)} = -0.0213 + 0.0206 \exp(0.0080x) \quad (4.25)$$

$$\tau_{(cal)} = -175.4922 + 793.4050 \exp(-0.0043x) \quad (4.26)$$

$$\nu_{(cal)} = -0.0020x + 1.0784 \quad (4.27)$$

โดยที่	$k_{t_{\infty}(cal)}$	คือ ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ย่อยคงที่ไม่แปรตามเวลาจากการคำนวณ
	$k_{t_1(cal)}$	คือ ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ย่อยแปรตามเวลาจากการคำนวณ
	$\tau_{(cal)}$	คือ ค่าคงที่ทางเวลาการเสื่อมอายุจากการคำนวณ
	$\nu_{(cal)}$	คือ เลขชี้กำลังของสมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอยจากการคำนวณ
	x	คือ อุณหภูมิการอบด้วยความร้อน

เมื่อนำสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปคำนวณ ได้ผลการคำนวณที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ใช้ในการอบด้วยความร้อนดังแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาในเชิงเวลาของวัสดุ
เซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ

$x (^{\circ}\text{C})$	$k_{t_{\infty}(cal)}$	$k_{t_1(cal)}$	$\tau_{(cal)}$	$\nu_{(cal)}$
108 (0.3T _C)	0.9753	0.0275	322.0965	0.8580
144 (0.4T _C)	0.9628	0.0438	250.4288	0.7846
180 (0.5T _C)	0.9496	0.0654	189.0833	0.7112
216 (0.6T _C)	0.9357	0.0943	136.5735	0.6377
252 (0.7T _C)	0.9210	0.1328	91.6267	0.5643
288 (0.8T _C)	0.9055	0.1840	53.1535	0.4908

นำพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ที่คำนวณได้ประกอบด้วย $k_{t_{\infty}(cal)}$ $k_{t_1(cal)}$ $\tau_{(cal)}$ และ $\nu_{(cal)}$ แทนในสมการที่ 4.3 เพื่อคำนวณปัจจัย $k_{t(cal)}$ ในเชิงเวลาของแต่ละอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน

ผลการคำนวณปัจจัย $k_{t(cal)}$ จากสมการที่ 4.28 ถึงสมการที่ 4.33 แสดงในตารางที่ 4.14 นำผลของการคำนวณที่ได้พล็อตกราฟ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองจริงดังแสดงในรูปที่ 4.33

$$k_{t(cal)}(t) = 0.9753 + 0.0275 \exp[-(t/322.0965)^{0.8580}] \quad (4.28)$$

$$k_{t(cal)}(t) = 0.9628 + 0.0438 \exp[-(t/250.4288)^{0.7846}] \quad (4.29)$$

$$k_{t(cal)}(t) = 0.9496 + 0.0654 \exp[-(t/189.0833)^{0.7112}] \quad (4.30)$$

$$k_{t(cal)}(t) = 0.9357 + 0.0943 \exp[-(t/136.5735)^{0.6377}] \quad (4.31)$$

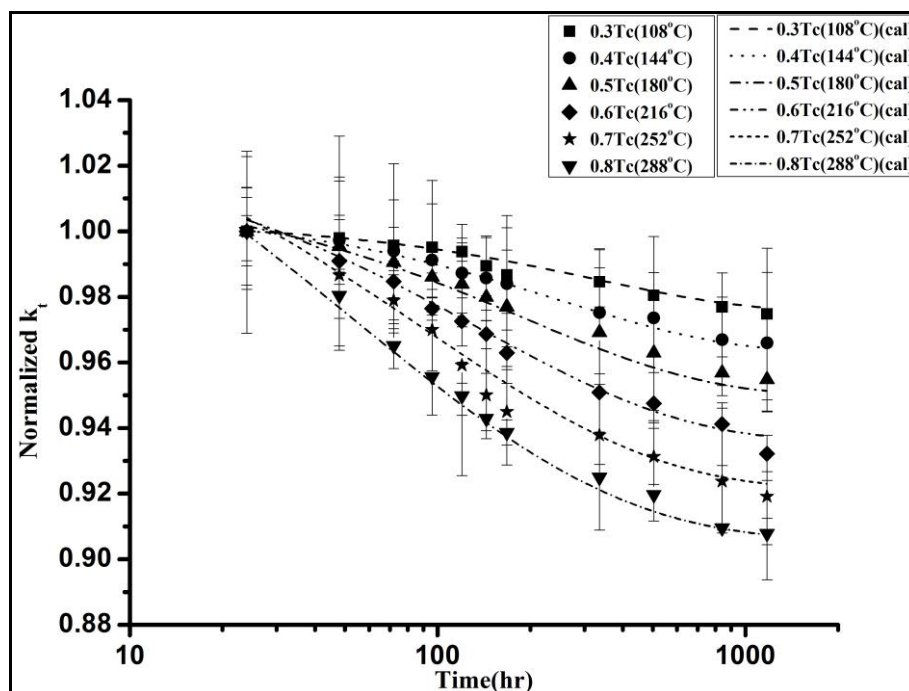
$$k_{t(cal)}(t) = 0.9210 + 0.1328 \exp[-(t/91.6267)^{0.5643}] \quad (4.32)$$

$$k_{t(cal)}(t) = 0.9055 + 0.1840 \exp[-(t/53.1535)^{0.4908}] \quad (4.33)$$

โดยที่ $k_{t(cal)}(t)$ คือ ปัจจัยควบคุมเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์แปรตามเวลาจากการคำนวณ
 t คือ เวลาการเสื่อมอายุ

ตารางที่ 4.14 ปัจจัยควบคุมเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ

เวลา	อุณหภูมิการอบด้วยความร้อน					
t (hr)	108 °C	144 °C	180 °C	216 °C	252 °C	288 °C
24	1.0001	1.0002	1.0016	1.0035	1.0040	0.9991
48	0.9980	0.9961	0.9945	0.9921	0.9873	0.9766
72	0.9962	0.9929	0.9892	0.9842	0.9765	0.9632
96	0.9947	0.9901	0.9849	0.9781	0.9686	0.9539
120	0.9933	0.9878	0.9813	0.9732	0.9625	0.9470
144	0.9920	0.9857	0.9783	0.9692	0.9575	0.9416
168	0.9909	0.9839	0.9757	0.9658	0.9535	0.9372
336	0.9851	0.9752	0.9641	0.9517	0.9376	0.9211
504	0.9817	0.9706	0.9584	0.9451	0.9307	0.9146
840	0.9782	0.9661	0.9533	0.9396	0.9251	0.9094
1176	0.9766	0.9643	0.9513	0.9375	0.9230	0.9074



รูปที่ 4.33 ปัจจัยคู่ความแข็งกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการคำนวณของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft หลังอบด้วยความร้อน

สัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t จากผลการคำนวณมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง นั่นหมายความว่าแบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการคำนวณสามารถใช้ทำนายการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ที่อุณหภูมิใด ๆ (30% ถึง 80% ของ T_C) ได้ เพื่อให้ได้ผลการทำนายที่ถูกต้อง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ต้องอยู่ในช่วงของอุณหภูมิที่ทำการทดลอง (108 °C – 280 °C) โดยในที่นี้จะทำการแสดงผลของการทำนายโดยเลือกอุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 150 °C 200 °C และ 250 °C ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.3.1.4 ถึง 4.3.1.6

4.3.1.4 การทำนายพฤติกรรมการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก

เมื่อนำสมการที่ 4.4 ถึงสมการที่ 4.7 มาคำนวณที่อุณหภูมิตัวอย่าง 150 °C 200 °C และ 250 °C ได้ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 พารามิเตอร์ของสมการสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

$x (^{\circ}\text{C})$	$d_{33_{\infty}(Ex)}^*$	$d_{33_{\tau}(Ex)}$	$\tau_{(Ex)}$	$\nu_{(Ex)}$
150	0.9794	0.0255	159.0211	0.8319
200	0.9705	0.0481	97.9924	0.6679
250	0.9601	0.0890	46.2725	0.5039

* ตัวห้อย Ex หมายถึง พารามิเตอร์ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

นำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ในตารางที่ 4.15 แทนในสมการที่ 4.1 เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์ $d_{33(Ex)}$ ในเชิงเวลาของแต่ละอุณหภูมิตัวอย่าง

ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์ $d_{33(Ex)}$ ด้วยสมการที่ 4.34 ถึงสมการที่ 4.36 แสดงในตารางที่ 4.16 นำผลการคำนวณที่ได้พล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.34

$$d_{33(Ex)}(t) = 0.9794 + 0.0255 \exp[-(t/159.0211)^{0.8319}] \quad (4.34)$$

$$d_{33(Ex)}(t) = 0.9705 + 0.0481 \exp[-(t/97.9924)^{0.6679}] \quad (4.35)$$

$$d_{33(Ex)}(t) = 0.9601 + 0.0890 \exp[-(t/46.2725)^{0.5039}] \quad (4.36)$$

โดยที่ $d_{33(Ex)}(t)$ คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์แปรตามเวลาที่อุณหภูมิตัวอย่าง

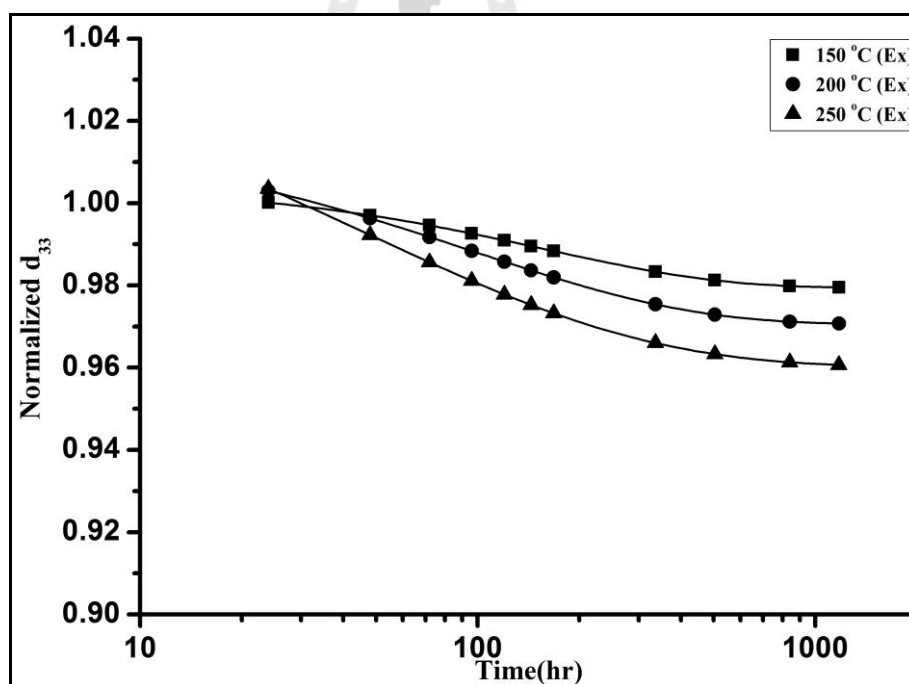
t คือ เวลาการเสื่อมอายุ

ตารางที่ 4.16 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

เวลา	อุณหภูมิตัวอย่าง		
t (hr)	150 $^{\circ}\text{C}$	200 $^{\circ}\text{C}$	250 $^{\circ}\text{C}$
24	1.0001	1.0030	1.0035
48	0.9970	0.9963	0.9923
72	0.9946	0.9918	0.9856

ตารางที่ 4.16 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิตัวอย่าง		
t (hr)	150 °C	200 °C	250 °C
96	0.9926	0.9884	0.9811
120	0.9910	0.9858	0.9778
144	0.9896	0.9837	0.9753
168	0.9883	0.9819	0.9732
336	0.9833	0.9754	0.9660
504	0.9813	0.9729	0.9633
840	0.9798	0.9712	0.9613
1176	0.9795	0.9707	0.9607



รูปที่ 4.34 ผลการทำนายพฤติกรรมการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

4.3.1.5 การทำนายพฤติกรรมการณ์เสื่อมอายุของปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้าน ระนาบ

เมื่อนำสมการที่ 4.14 ถึงสมการที่ 4.17 มาคำนวณที่อุณหภูมิตัวอย่าง 150 °C 200 °C และ 250 °C ได้ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบในเชิงของวัสดุเซรามิก
PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

x (°C)	$k_{p_{\infty}(Ex)}$	$k_{p_1(Ex)}$	$\tau_{(Ex)}$	$\nu_{(Ex)}$
150	0.9664	0.0394	241.1880	0.7870
200	0.9497	0.0675	160.9587	0.6845
250	0.9307	0.1133	97.1181	0.5820

นำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ในตารางที่ 4.17 แทนในสมการที่ 4.2 เพื่อ
คำนวณปัจจัย $k_{p(Ex)}$ ในเชิงเวลาของแต่ละอุณหภูมิตัวอย่าง

ผลการคำนวณปัจจัย $k_{p(Ex)}$ ด้วยสมการที่ 4.37 ถึงสมการที่ 4.39 แสดงใน
ตารางที่ 4.18 นำผลการคำนวณที่ได้พล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.35

$$k_{p(Ex)}(t) = 0.9664 + 0.0394 \exp[-(t/241.1880)^{0.7870}] \quad (4.37)$$

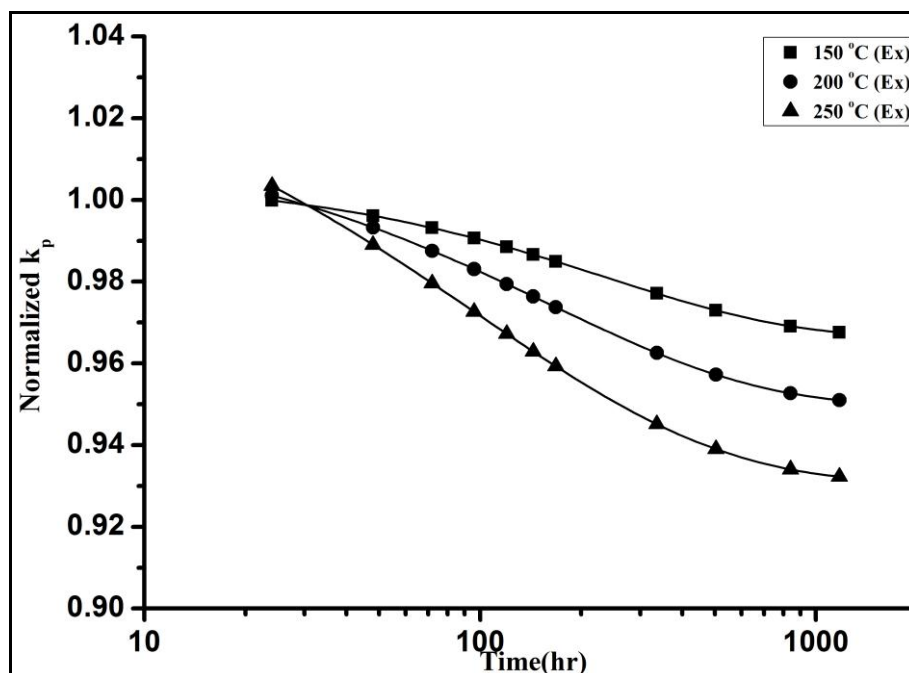
$$k_{p(Ex)}(t) = 0.9497 + 0.0675 \exp[-(t/160.9587)^{0.6845}] \quad (4.38)$$

$$k_{p(Ex)}(t) = 0.9307 + 0.1133 \exp[-(t/97.1181)^{0.5820}] \quad (4.39)$$

โดยที่ $k_{p(Ex)}(t)$ คือ ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบบบสัมพันธ์แปรตามเวลาที่
อุณหภูมิตัวอย่าง
 t คือ เวลาการเสื่อมอายุ

ตารางที่ 4.18 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT
แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

เวลา	อุณหภูมิตัวอย่าง		
t (hr)	150 °C	200 °C	250 °C
24	0.9999	1.0011	1.0034
48	0.9961	0.9932	0.9890
72	0.9932	0.9876	0.9796
96	0.9907	0.9831	0.9726
120	0.9885	0.9794	0.9672
144	0.9866	0.9764	0.9629
168	0.9849	0.9737	0.9593
336	0.9771	0.9625	0.9451
504	0.9730	0.9572	0.9390
840	0.9691	0.9527	0.9341
1176	0.9676	0.9510	0.9323



รูปที่ 4.35 ผลการทำนายพฤติกรรมการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

4.3.1.6 การทำนายพฤติกรรมการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนา

เมื่อนำสมการที่ 4.24 ถึงสมการที่ 4.27 มาคำนวณที่อุณหภูมิตัวอย่าง 150 °C 200 °C และ 250 °C ได้ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

x (°C)	$k_{t_{\infty}}(Ex)$	$k_{t_1}(Ex)$	$\tau_{(Ex)}$	$\nu_{(Ex)}$
150	0.9607	0.0470	239.5307	0.7724
200	0.9420	0.0805	158.9064	0.6704
250	0.9218	0.1303	93.9446	0.5684

นำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ในตารางที่ 4.19 แทนในสมการที่ 4.3 เพื่อคำนวณปัจจัย $k_{t(Ex)}$ ในเชิงเวลาของแต่ละอุณหภูมิตัวอย่าง

ผลการคำนวณปัจจัย $k_{t(Ex)}$ ด้วยสมการที่ 4.40 ถึงสมการที่ 4.42 แสดงในตารางที่ 4.20 นำผลการคำนวณที่ได้พล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.36

$$k_{t(Ex)}(t) = 0.9607 + 0.0470 \exp[-(t/239.5307)^{0.7724}] \quad (4.40)$$

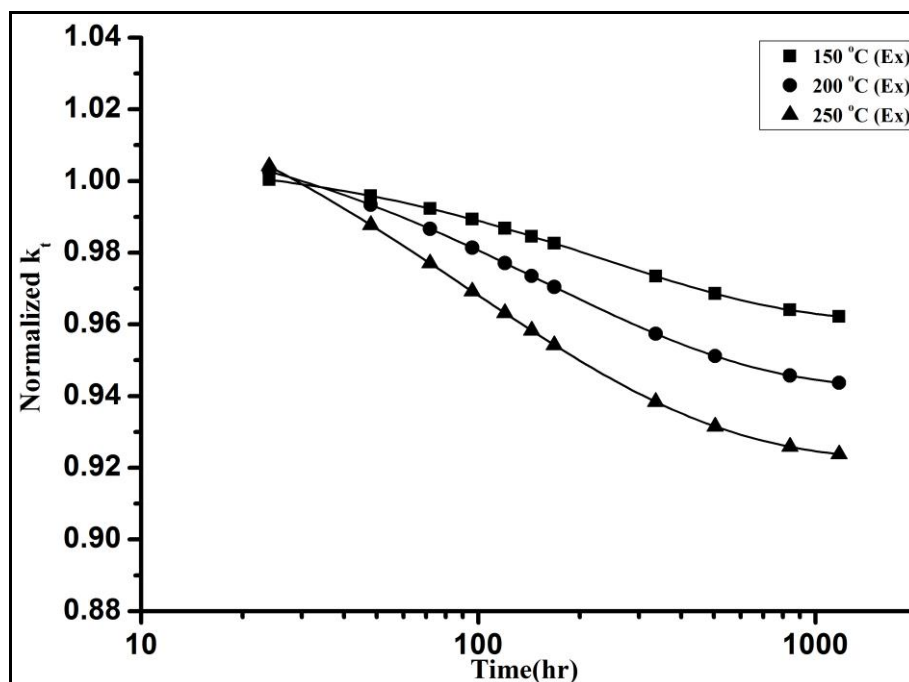
$$k_{t(Ex)}(t) = 0.9420 + 0.0805 \exp[-(t/158.9064)^{0.6704}] \quad (4.41)$$

$$k_{t(Ex)}(t) = 0.9218 + 0.1303 \exp[-(t/93.9446)^{0.5684}] \quad (4.42)$$

โดยที่ $k_{t(Ex)}(t)$ คือ ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์แปรตามเวลาที่อุณหภูมิตัวอย่าง
 t คือ เวลาการเสื่อมอายุ

ตารางที่ 4.20 ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

เวลา	อุณหภูมิตัวอย่าง		
t (hr)	150 °C	200 °C	250 °C
24	1.0003	1.0027	1.0041
48	0.9959	0.9934	0.9877
72	0.9923	0.9866	0.9770
96	0.9893	0.9814	0.9692
120	0.9868	0.9771	0.9631
144	0.9846	0.9735	0.9583
168	0.9826	0.9705	0.9543
336	0.9735	0.9574	0.9384
504	0.9686	0.9512	0.9315
840	0.9640	0.9458	0.9259
1176	0.9622	0.9437	0.9238

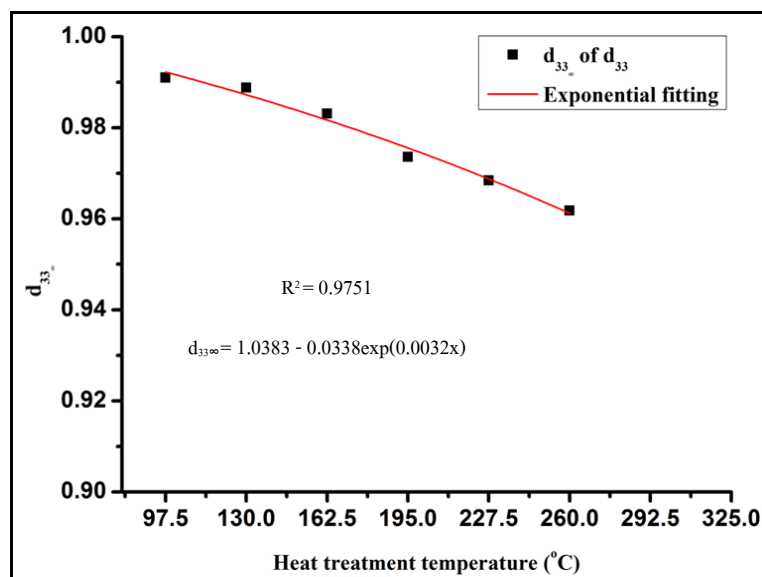


รูปที่ 4.36 ผลการทำนายพฤติกรรมการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

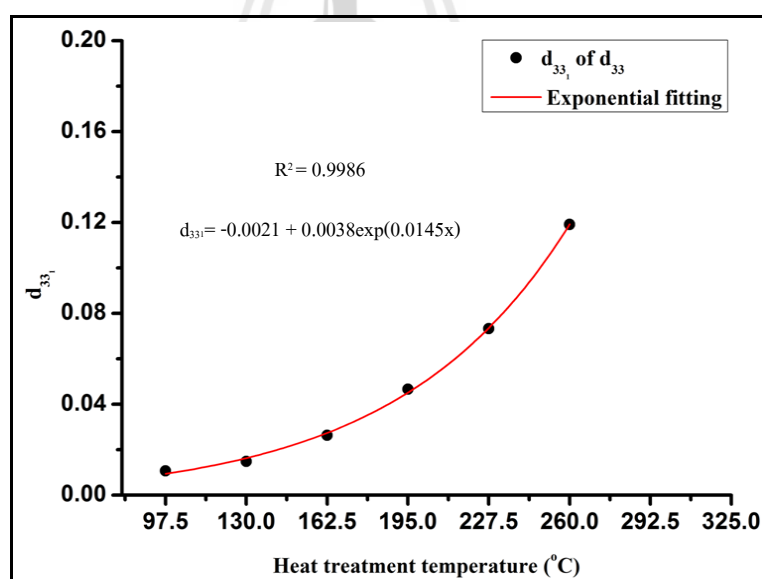
4.3.2 วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard

4.3.2.1 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก

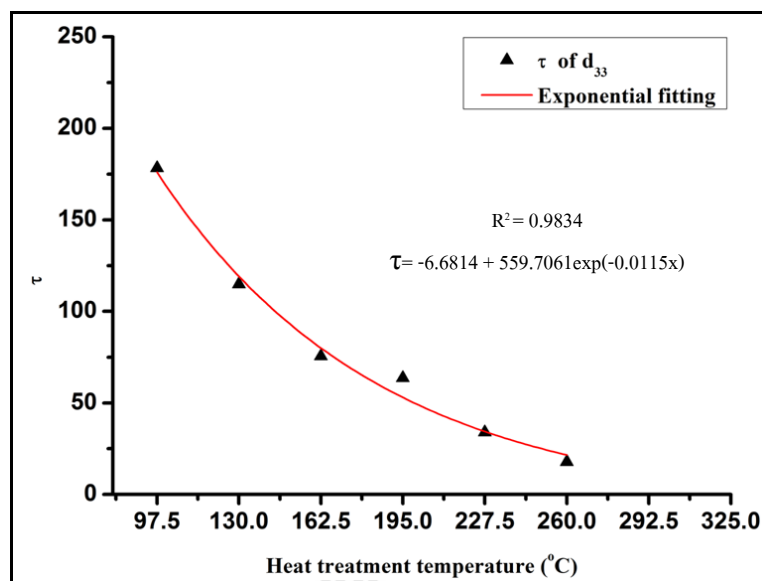
จากพารามิเตอร์ของสมการสัมประสิทธิ์ d_{33} ในเชิงเวลาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ 4 ค่า คือ d_{33_0} , d_{33_1} , τ และ ν โดยแต่ละพารามิเตอร์มีค่าแตกต่างกันตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน เมื่อนำพารามิเตอร์แต่ละตัวไปพล็อตในฟังก์ชันของอุณหภูมิ เพื่อหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการ Curve fitting ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.37 ถึงรูปที่ 4.40



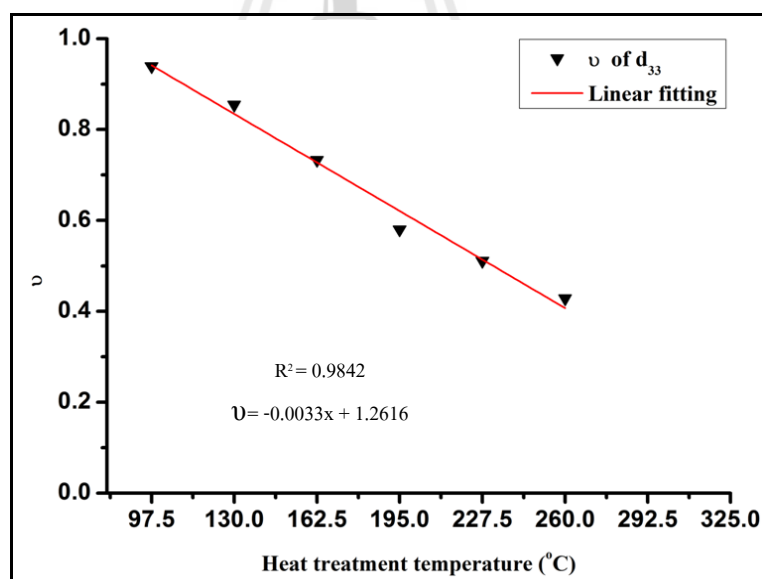
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า d_{33} กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า d_{33} กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุ เซรามิก PZT แบบ Hard



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ν กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุ เซรามิก PZT แบบ Hard

จากรูปที่ 4.37 ถึงรูปที่ 4.40 เมื่อใช้หลักการ Curve fitting ได้สมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $d_{33\infty}$ d_{33i} τ และ ν กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ดังสมการที่ 4.43 ถึงสมการที่ 4.46

$$d_{33\infty(cal)} = 1.0383 - 0.0338 \exp(0.0032x) \quad (4.43)$$

$$d_{33i(cal)} = -0.0021 + 0.0028 \exp(0.0145x) \quad (4.44)$$

$$\tau_{(cal)} = -6.6814 + 559.7061 \exp(-0.0115x) \quad (4.45)$$

$$\nu_{(cal)} = -0.0033x + 1.2616 \quad (4.46)$$

โดยที่	$d_{33\infty(cal)}$	คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ย่อยคงที่ไม่แปรตามเวลาจากการคำนวณ
	$d_{33i(cal)}$	คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ย่อยแปรตามเวลาจากการคำนวณ
	$\tau_{(cal)}$	คือ ค่าคงที่ทางเวลาการเสื่อมอายุจากการคำนวณ
	$\nu_{(cal)}$	คือ เลขชี้กำลังของสมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอยจากการคำนวณ
	x	คือ อุณหภูมิการอบด้วยความร้อน

เมื่อนำสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปคำนวณ ได้ผลการคำนวณที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ใช้ในการอบด้วยความร้อนดังแสดงในตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 พารามิเตอร์ของสมการสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT
แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ

$x (^{\circ}\text{C})$	$d_{33_{\infty}(cal)}$	$d_{33(cal)}$	$\tau_{(cal)}$	$\nu_{(cal)}$
97.5 (0.3T _C)	0.9922	0.0094	176.0673	0.9409
130 (0.4T _C)	0.9872	0.0163	119.1587	0.8339
162.5 (0.5T _C)	0.9817	0.0274	79.9716	0.7270
195 (0.6T _C)	0.9756	0.0452	52.9875	0.6201
227.5 (0.7T _C)	0.9687	0.0737	34.4064	0.5132
260 (0.8T _C)	0.9612	0.1195	21.6115	0.4062

นำพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ที่คำนวณได้ประกอบด้วย $d_{33_{\infty}(cal)}$ $d_{33(cal)}$ $\tau_{(cal)}$ และ $\nu_{(cal)}$ แทนในสมการที่ 4.1 เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์ $d_{33(cal)}$ ในเชิงเวลาของแต่ละอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน

ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์ $d_{33(cal)}$ จากสมการที่ 4.47 ถึงสมการที่ 4.52 แสดงในตารางที่ 4.22 นำผลการคำนวณที่ได้พล็อตกราฟ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.41

$$d_{33(cal)} = 0.9922 + 0.0094 \exp[-(t/176.0673)^{0.9409}] \quad (4.47)$$

$$d_{33(cal)} = 0.9872 + 0.0163 \exp[-(t/119.1587)^{0.8339}] \quad (4.48)$$

$$d_{33(cal)} = 0.9817 + 0.0274 \exp[-(t/79.9716)^{0.7270}] \quad (4.49)$$

$$d_{33(cal)} = 0.9756 + 0.0452 \exp[-(t/52.9875)^{0.6201}] \quad (4.50)$$

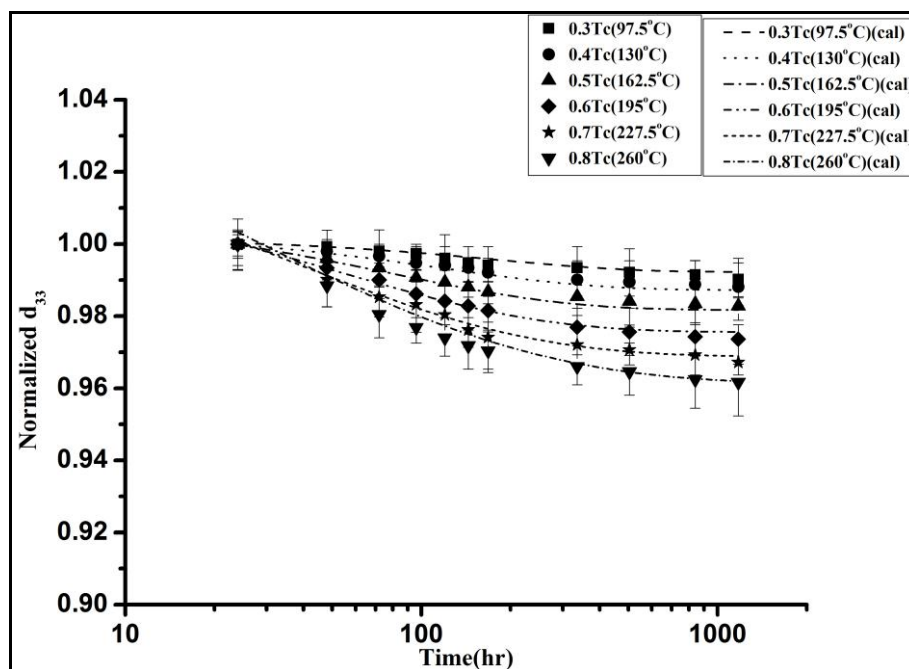
$$d_{33(cal)} = 0.9687 + 0.0737 \exp[-(t/34.4064)^{0.5132}] \quad (4.51)$$

$$d_{33(cal)} = 0.9612 + 0.1195 \exp[-(t/21.6115)^{0.4062}] \quad (4.52)$$

โดยที่ $d_{33(cal)}(t)$ คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์แปรตามเวลาจากการ
 คำนวณ
 t คือ เวลาการเสื่อมอายุ

ตารางที่ 4.22 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ
 Hard หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ

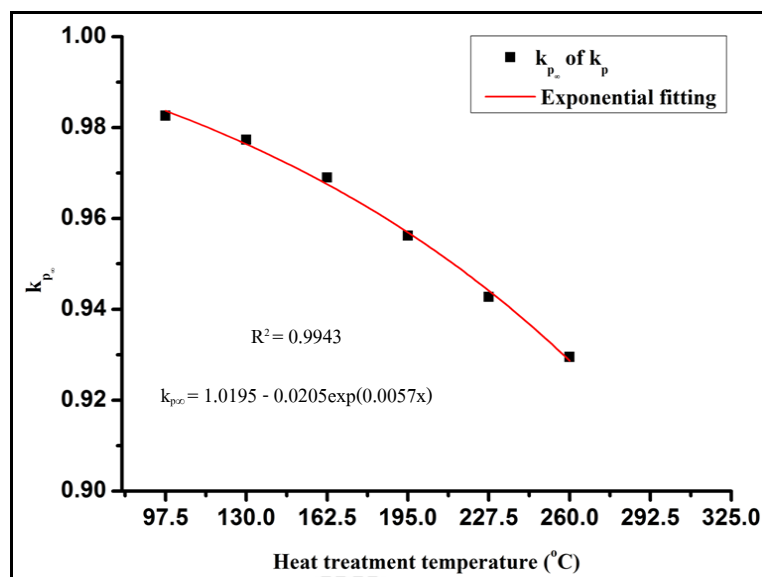
เวลา	อุณหภูมิการอบด้วยความร้อน					
t (hr)	97.5 °C	130 °C	162.5 °C	195 °C	227.5 °C	260 °C
24	1.0003	0.9998	0.9998	1.0001	1.0009	1.0033
48	0.9992	0.9974	0.9954	0.9932	0.9913	0.9912
72	0.9983	0.9957	0.9925	0.9890	0.9859	0.9846
96	0.9976	0.9943	0.9904	0.9862	0.9823	0.9803
120	0.9969	0.9932	0.9888	0.9841	0.9798	0.9773
144	0.9963	0.9923	0.9876	0.9826	0.9779	0.9750
168	0.9958	0.9915	0.9866	0.9814	0.9765	0.9732
336	0.9937	0.9888	0.9833	0.9775	0.9717	0.9669
504	0.9929	0.9878	0.9823	0.9763	0.9701	0.9645
840	0.9924	0.9873	0.9818	0.9757	0.9692	0.9626
1176	0.9923	0.9873	0.9817	0.9756	0.9689	0.9620



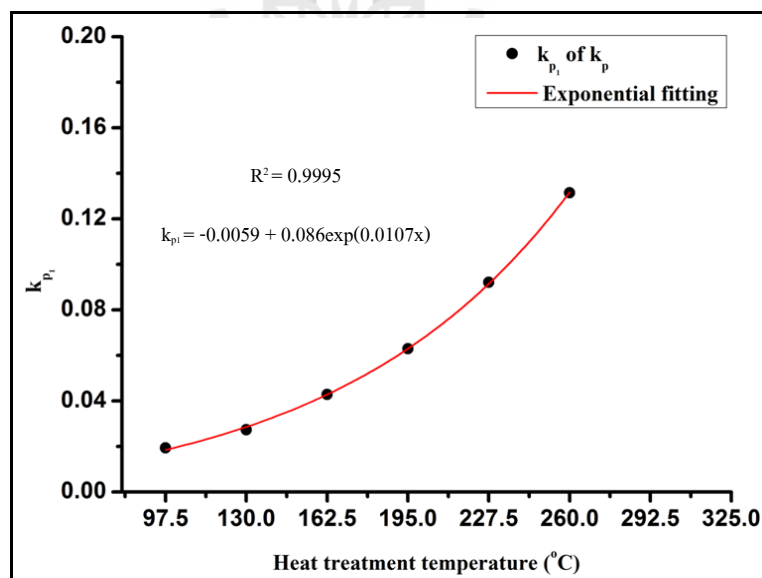
รูปที่ 4.41 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการคำนวณของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อน

4.3.2.2 ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบ

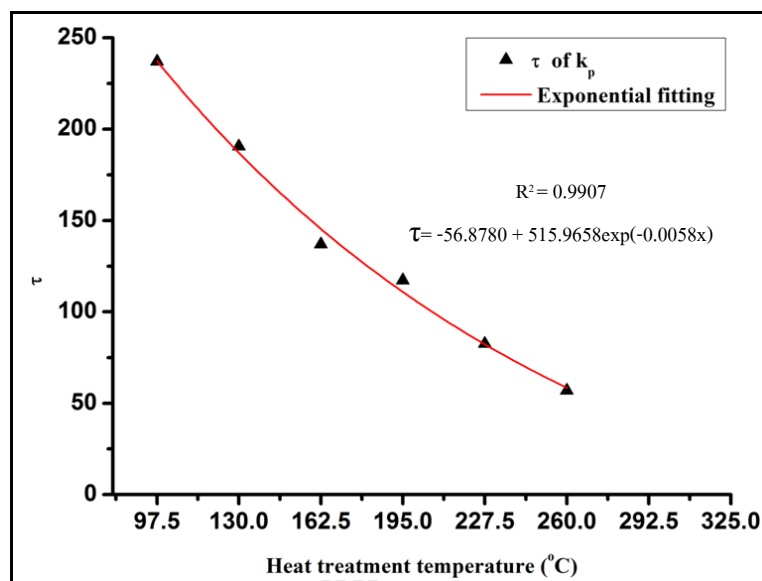
จากพารามิเตอร์ของสมการปัจจัย k_p ในเชิงเวลาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ 4 ค่า คือ k_{p_∞} , k_{p_1} , τ และ ν โดยแต่ละค่าพารามิเตอร์มีค่าแตกต่างกันตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน เมื่อนำพารามิเตอร์แต่ละตัวไปพล็อตในฟังก์ชันของอุณหภูมิ เพื่อหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการ Curve fitting ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.42 ถึงรูปที่ 4.45



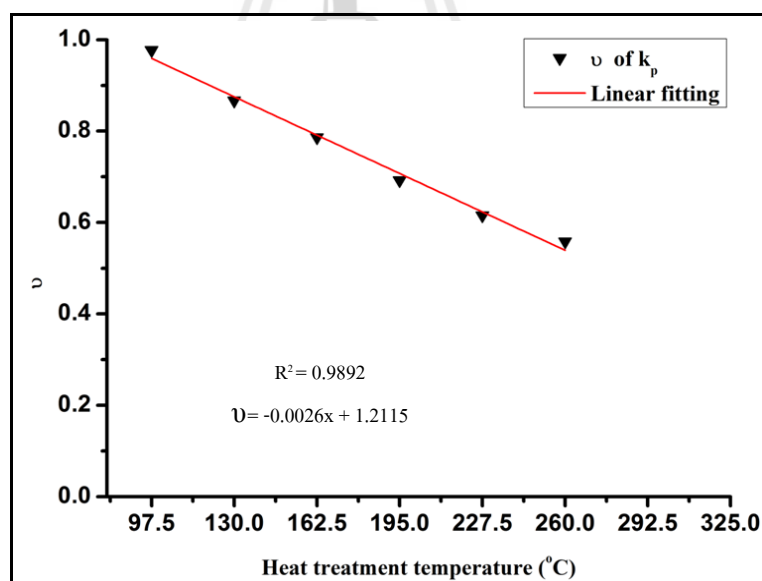
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_{p_z} กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_{p_t} กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุ เซรามิก PZT แบบ Hard



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ν กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุ เซรามิก PZT แบบ Hard

จากรูปที่ 4.42 ถึงรูปที่ 4.45 เมื่อใช้หลักการ Curve fitting ได้สมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_{p_∞} k_{p_1} τ และ ν กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ดังสมการที่ 4.53 ถึงสมการที่ 4.56

$$k_{p_\infty(cal)} = 1.0195 - 0.0205 \exp(0.0057x) \quad (4.53)$$

$$k_{p_1(cal)} = -0.0059 + 0.0086 \exp(0.0107x) \quad (4.54)$$

$$\tau_{(cal)} = -56.8780 + 515.9658 \exp(-0.0058x) \quad (4.55)$$

$$\nu_{(cal)} = -0.0026x + 1.2115 \quad (4.56)$$

โดยที่ $k_{p_\infty(cal)}$	คือ ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมพัทธ์ย่อยคงที่ไม่แปรตามเวลาจากการคำนวณ
$k_{p_1(cal)}$	คือ ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมพัทธ์ย่อยแปรตามเวลาจากการคำนวณ
$\tau_{(cal)}$	คือ ค่าคงที่ทางเวลาการเสื่อมอายุจากการคำนวณ
$\nu_{(cal)}$	คือ เลขชี้กำลังของสมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอยจากการคำนวณ
x	คือ อุณหภูมิการอบด้วยความร้อน

เมื่อนำสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปคำนวณ ได้ผลการคำนวณที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ใช้ในการอบด้วยความร้อนดังแสดงในตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบในเชิงเวลาของวัสดุ
เซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ

$x (^{\circ}\text{C})$	$k_{p_{\infty}(cal)}$	$k_{p_1(cal)}$	$\tau_{(cal)}$	$\nu_{(cal)}$
97.5 (0.3T _C)	0.9837	0.0185	237.3752	0.9589
130 (0.4T _C)	0.9763	0.0286	187.1397	0.8748
162.5 (0.5T _C)	0.9675	0.0428	145.4805	0.7906
195 (0.6T _C)	0.9569	0.0630	110.9334	0.7064
227.5 (0.7T _C)	0.9440	0.0915	82.2843	0.6222
260 (0.8T _C)	0.9286	0.1318	58.5262	0.5381

นำพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ที่คำนวณได้ประกอบด้วย $k_{p_{\infty}(cal)}$ $k_{p_1(cal)}$ $\tau_{(cal)}$ และ $\nu_{(cal)}$ แทนในสมการที่ 4.2 เพื่อคำนวณปัจจัย $k_{p(cal)}$ ในเชิงเวลาของแต่ละอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน

ผลการคำนวณปัจจัย $k_{p(cal)}$ จากสมการที่ 4.57 ถึงสมการที่ 4.62 แสดงในตารางที่ 4.24 นำผลการคำนวณที่ได้พล็อตกราฟ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองจริงดังแสดงได้ในรูปที่ 4.46

$$k_{p(cal)}(t) = 0.9837 + 0.0185 \exp[-(t/237.3752)^{0.9589}] \quad (4.57)$$

$$k_{p(cal)}(t) = 0.9763 + 0.0286 \exp[-(t/187.1397)^{0.8748}] \quad (4.58)$$

$$k_{p(cal)}(t) = 0.9675 + 0.0428 \exp[-(t/145.4805)^{0.7906}] \quad (4.59)$$

$$k_{p(cal)}(t) = 0.9569 + 0.0630 \exp[-(t/110.9334)^{0.7064}] \quad (4.60)$$

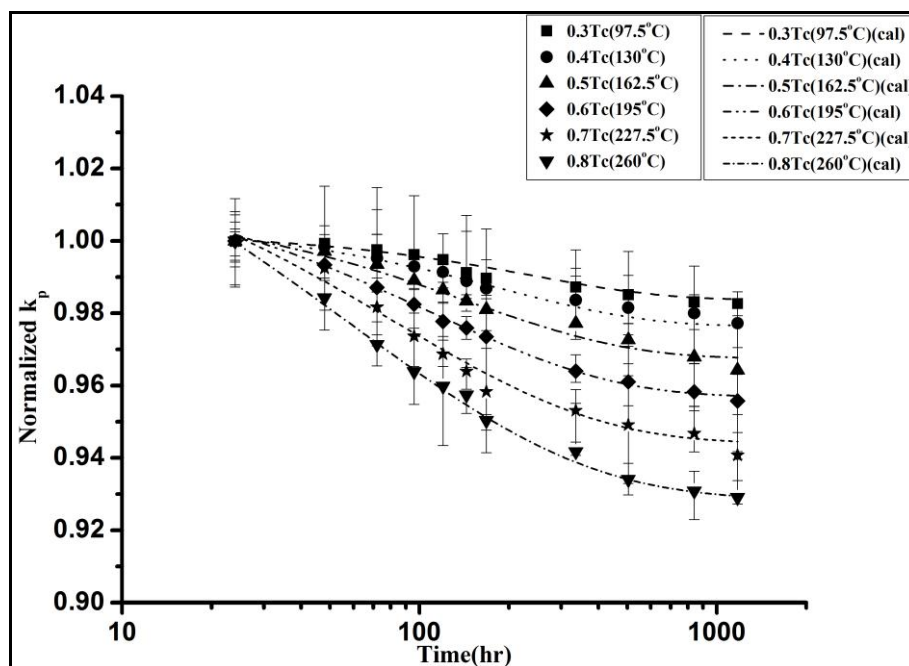
$$k_{p(cal)}(t) = 0.9440 + 0.0915 \exp[-(t/82.2843)^{0.6222}] \quad (4.61)$$

$$k_{p(cal)}(t) = 0.9286 + 0.1318 \exp[-(t/58.5262)^{0.5381}] \quad (4.62)$$

โดยที่ $k_{p(cal)}(t)$ คือ ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสแปรตามเวลาจากการคำนวณ
 t คือ เวลาการเสื่อมอายุ

ตารางที่ 4.24 ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ

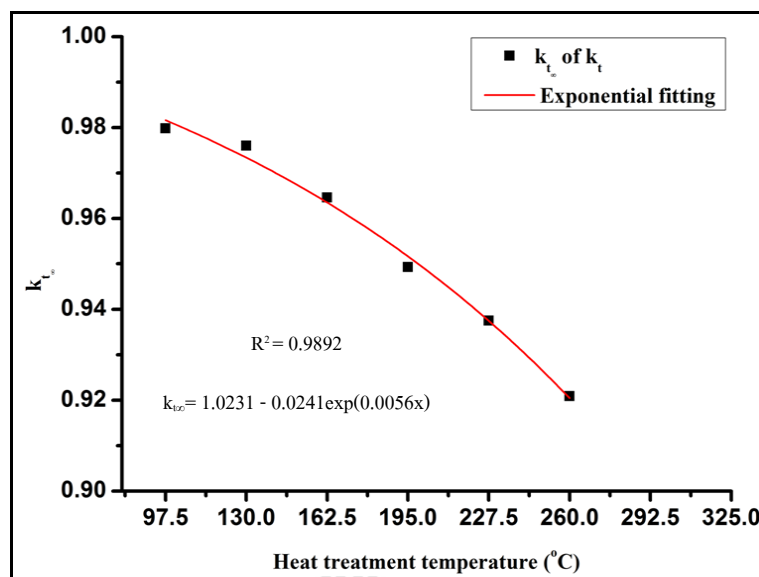
เวลา	อุณหภูมิการอบด้วยความร้อน					
t (hr)	97.5 °C	130 °C	162.5 °C	195 °C	227.5 °C	260 °C
24	1.0002	1.0005	1.0012	1.0017	1.0015	0.9995
48	0.9986	0.9974	0.9957	0.9931	0.9888	0.9822
72	0.9971	0.9948	0.9916	0.9870	0.9805	0.9717
96	0.9958	0.9927	0.9883	0.9824	0.9745	0.9643
120	0.9947	0.9908	0.9856	0.9787	0.9699	0.9588
144	0.9936	0.9892	0.9834	0.9758	0.9662	0.9546
168	0.9927	0.9878	0.9815	0.9733	0.9633	0.9512
336	0.9882	0.9817	0.9737	0.9639	0.9523	0.9388
504	0.9860	0.9790	0.9705	0.9603	0.9482	0.9340
840	0.9843	0.9770	0.9683	0.9578	0.9453	0.9306
1176	0.9838	0.9765	0.9677	0.9572	0.9445	0.9295



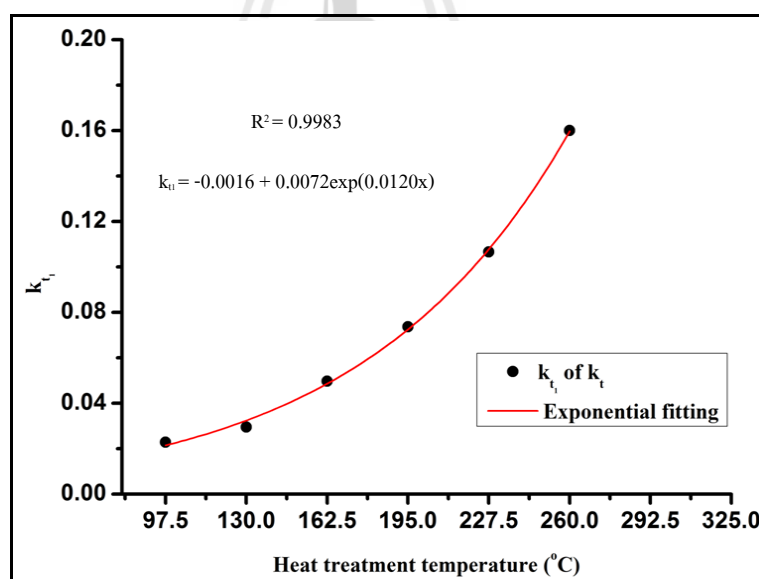
รูปที่ 4.46 ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสในเชิงเวลาเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการคำนวณของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อน

4.3.2.3 ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนา

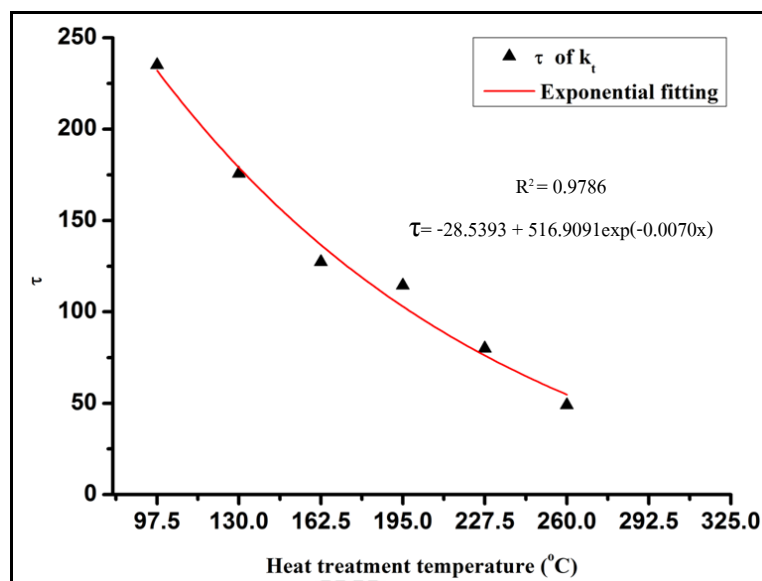
จากพารามิเตอร์ของสมการปัจจัย k_t ในเชิงเวลาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ 4 ค่า คือ $k_{t_{\infty}}$, k_{t_1} , τ และ ν โดยแต่ละค่าพารามิเตอร์มีค่าแตกต่างกันตามอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน เมื่อนำพารามิเตอร์แต่ละตัวไปพล็อตในฟังก์ชันของอุณหภูมิ เพื่อหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการ Curve fitting ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.47 ถึงรูปที่ 4.50



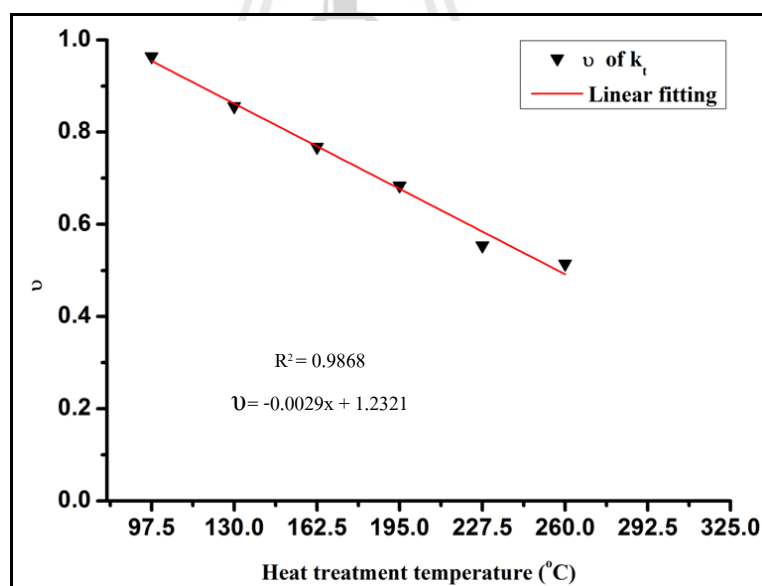
รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k_{t_{\infty}}$ กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard



รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_{t_1} กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard



รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard



รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard

จากรูปที่ 4.47 ถึงรูปที่ 4.50 เมื่อให้หลักการ Curve fitting ได้สมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $k_{t_{\infty}}$, k_{t_1} , τ และ ν กับอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ดังสมการที่ 4.63 ถึงสมการที่ 4.66

$$k_{t_{\infty}(cal)} = 1.0231 - 0.0241 \exp(0.0056x) \quad (4.63)$$

$$k_{t_1(cal)} = -0.0016 + 0.0072 \exp(0.0120x) \quad (4.64)$$

$$\tau_{(cal)} = -28.5393 + 516.9091 \exp(-0.0070x) \quad (4.65)$$

$$\nu_{(cal)} = -0.0029x + 1.2321 \quad (4.66)$$

โดยที่	$k_{t_{\infty}(cal)}$	คือ ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ย่อยคงที่ไม่แปรตามเวลาจากการคำนวณ
	$k_{t_1(cal)}$	คือ ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ย่อยแปรตามเวลาจากการคำนวณ
	$\tau_{(cal)}$	คือ ค่าคงที่ทางเวลาการเสื่อมอายุจากการคำนวณ
	$\nu_{(cal)}$	คือ เลขชี้กำลังของสมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอยจากการคำนวณ
	x	คือ อุณหภูมิการอบด้วยความร้อน

เมื่อนำสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปคำนวณ ได้ผลการคำนวณที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ใช้ในการอบด้วยความร้อนดังแสดงในตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาในเชิงเวลาของวัสดุ
เซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ

$x (^{\circ}\text{C})$	$k_{t_{\infty}(cal)}$	$k_{t_1(cal)}$	$\tau_{(cal)}$	$\nu_{(cal)}$
97.5 (0.3T _C)	0.9816	0.0214	232.1729	0.9542
130 (0.4T _C)	0.9734	0.0324	178.9889	0.8616
162.5 (0.5T _C)	0.9635	0.0486	136.6541	0.7690
195 (0.6T _C)	0.9516	0.0724	102.9555	0.6764
227.5 (0.7T _C)	0.9374	0.1077	76.1312	0.5837
260 (0.8T _C)	0.9204	0.1597	54.7789	0.4911

นำพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ที่คำนวณได้ประกอบด้วย $k_{t_{\infty}(cal)}$ $k_{t_1(cal)}$ $\tau_{(cal)}$ และ $\nu_{(cal)}$ แทนในสมการที่ 4.3 เพื่อคำนวณปัจจัย $k_{t(cal)}$ ในเชิงเวลาของแต่ละอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน

ผลการคำนวณปัจจัย $k_{t(cal)}$ จากสมการที่ 4.67 ถึงสมการที่ 4.72 แสดงในตารางที่ 4.26 นำผลการคำนวณที่ได้พล็อตกราฟ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองจริงดังแสดงในรูปที่ 4.51

$$k_{t(cal)}(t) = 0.9816 + 0.0214 \exp[-(t/232.1729)^{0.9542}] \quad (4.67)$$

$$k_{t(cal)}(t) = 0.9734 + 0.0324 \exp[-(t/178.9889)^{0.8616}] \quad (4.68)$$

$$k_{t(cal)}(t) = 0.9635 + 0.0486 \exp[-(t/136.6541)^{0.7690}] \quad (4.69)$$

$$k_{t(cal)}(t) = 0.9516 + 0.0724 \exp[-(t/102.9555)^{0.6764}] \quad (4.70)$$

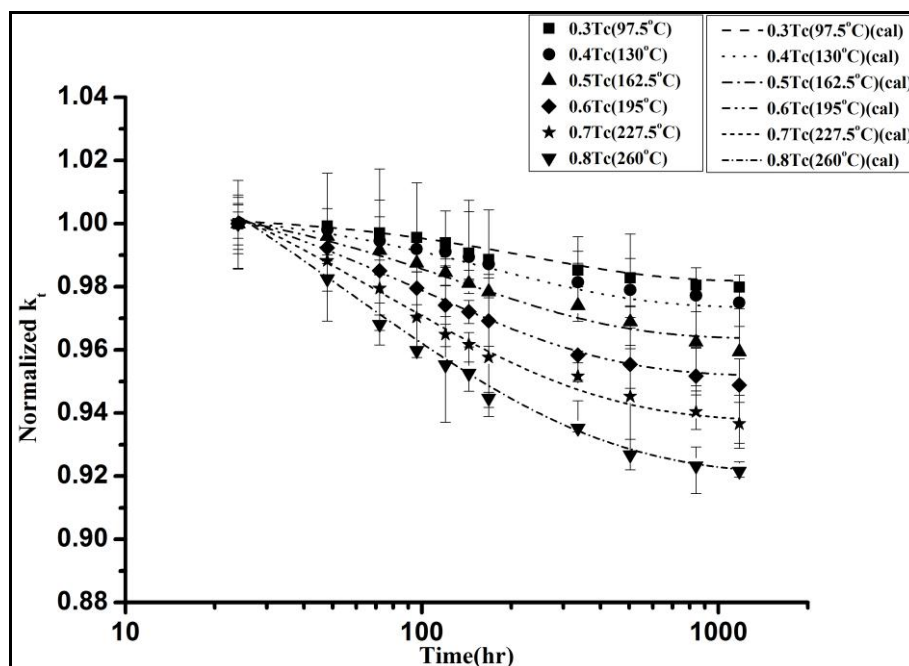
$$k_{t(cal)}(t) = 0.9374 + 0.1077 \exp[-(t/76.1312)^{0.5837}] \quad (4.71)$$

$$k_{t(cal)}(t) = 0.9204 + 0.1597 \exp[-(t/54.7789)^{0.4911}] \quad (4.72)$$

โดยที่ $k_{t(cal)}(t)$ คือ ปัจจัยค่าคงที่เชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์แปรตามเวลาจากการคำนวณ
 t คือ เวลาการเสื่อมอายุ

ตารางที่ 4.26 ปัจจัยค่าคงที่เชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนจากการคำนวณ

เวลา	อุณหภูมิการอบด้วยความร้อน					
t (hr)	97.5 °C	130 °C	162.5 °C	195 °C	227.5 °C	260 °C
24	1.0007	1.0005	1.0008	1.0015	1.0021	1.0024
48	0.9988	0.9968	0.9945	0.9915	0.9876	0.9829
72	0.9971	0.9939	0.9898	0.9847	0.9783	0.9713
96	0.9956	0.9914	0.9861	0.9795	0.9717	0.9632
120	0.9942	0.9893	0.9831	0.9755	0.9666	0.9571
144	0.9930	0.9875	0.9806	0.9723	0.9627	0.9524
168	0.9919	0.9859	0.9785	0.9696	0.9594	0.9486
336	0.9868	0.9792	0.9701	0.9594	0.9474	0.9343
504	0.9843	0.9762	0.9667	0.9555	0.9427	0.9285
840	0.9823	0.9741	0.9643	0.9528	0.9393	0.9239
1176	0.9818	0.9736	0.9637	0.9520	0.9382	0.9221



รูปที่ 4.51 ปัจจัยควบคุมเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการคำนวณของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard หลังอบด้วยความร้อน

สัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t จากผลการคำนวณมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง นั่นหมายความว่าแบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการคำนวณสามารถใช้ทำนายการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ที่อุณหภูมิใด ๆ (30% ถึง 80% ของ T_c) ได้ เพื่อให้ได้ผลการทำนายที่ถูกต้อง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ต้องอยู่ในช่วงของอุณหภูมิที่ทำการทดลอง ($108^\circ\text{C} - 280^\circ\text{C}$) โดยในที่นี้จะทำการแสดงผลของการทำนายโดยเลือกอุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 150°C 200°C และ 250°C ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.3.2.4 ถึง 4.3.2.6

4.3.2.4 การทำนายพฤติกรรมการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก

เมื่อนำสมการที่ 4.43 ถึงสมการที่ 4.46 มาคำนวณที่อุณหภูมิตัวอย่าง 150°C 200°C และ 250°C ได้ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.27 พารามิเตอร์ของสมการสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

$x (^{\circ}\text{C})$	$d_{33_{\infty}(Ex)}$	$d_{33_1(Ex)}$	$\tau_{(Ex)}$	$\nu_{(Ex)}$
150	0.9839	0.0225	93.3427	0.7681
200	0.9746	0.0487	49.6590	0.6036
250	0.9636	0.1030	25.0533	0.4391

นำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ในตารางที่ 4.27 แทนในสมการที่ 4.1 เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์ $d_{33(Ex)}$ ในเชิงเวลาของแต่ละอุณหภูมิตัวอย่าง

ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์ $d_{33(Ex)}$ ด้วยสมการที่ 4.73 ถึงสมการที่ 4.75 แสดงในตารางที่ 4.28 นำผลการคำนวณที่ได้พล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.52

$$d_{33(Ex)}(t) = 0.9839 + 0.0225 \exp[-(t/93.3427)^{0.7681}] \quad (4.73)$$

$$d_{33(Ex)}(t) = 0.9746 + 0.0487 \exp[-(t/49.6590)^{0.6036}] \quad (4.74)$$

$$d_{33(Ex)}(t) = 0.9636 + 0.1030 \exp[-(t/25.0533)^{0.4391}] \quad (4.75)$$

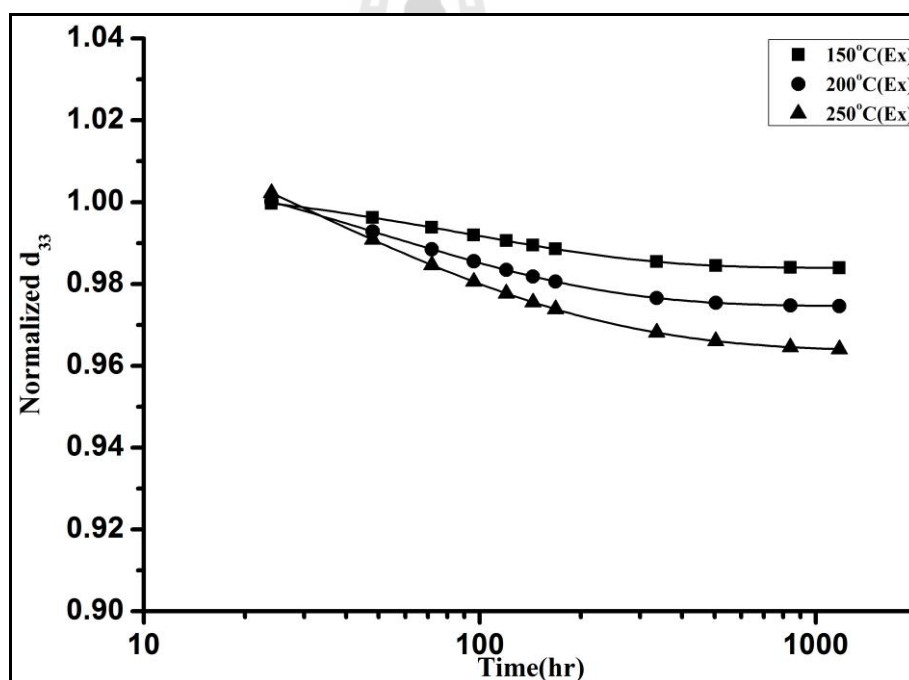
โดยที่ $d_{33(Ex)}(t)$ คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์แปรตามเวลาที่อุณหภูมิตัวอย่าง
 t คือ เวลาการเสื่อมอายุ

ตารางที่ 4.28 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

เวลา	อุณหภูมิตัวอย่าง		
t (hr)	150 $^{\circ}\text{C}$	200 $^{\circ}\text{C}$	250 $^{\circ}\text{C}$
24	0.9997	1.0001	1.0022
48	0.9962	0.9929	0.9908
72	0.9938	0.9885	0.9846
96	0.9920	0.9856	0.9806

ตารางที่ 4.28 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิตัวอย่าง		
t (hr)	150 °C	200 °C	250 °C
120	0.9906	0.9834	0.9777
144	0.9895	0.9818	0.9755
168	0.9886	0.9806	0.9739
336	0.9854	0.9766	0.9681
504	0.9845	0.9754	0.9661
840	0.9840	0.9748	0.9646
1176	0.9839	0.9746	0.9641



รูปที่ 4.52 ผลการทำนายพฤติกรรมการเสื่อมอายุของสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

4.3.2.5 การทำนายพฤติกรรมการณ์เสื่อมอายุของปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้าน ระนาบ

เมื่อนำสมการที่ 4.53 ถึงสมการที่ 4.56 มาคำนวณที่อุณหภูมิตัวอย่าง 150 °C 200 °C และ 250 °C ได้ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 4.29

ตารางที่ 4.29 พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบในเชิงของวัสดุเซรามิก
PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

x (°C)	$k_{p_{\infty}(Ex)}$	$k_{p_1(Ex)}$	$\tau_{(Ex)}$	$\nu_{(Ex)}$
150	0.9711	0.0367	160.5876	0.8230
200	0.9550	0.0667	106.1694	0.6935
250	0.9337	0.1178	65.3687	0.5640

นำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ในตารางที่ 4.29 แทนในสมการที่ 4.2 เพื่อ
คำนวณปัจจัย $k_{p(Ex)}$ ในเชิงเวลาของแต่ละอุณหภูมิตัวอย่าง

ผลการคำนวณปัจจัย $k_{p(Ex)}$ ด้วยสมการที่ 4.76 ถึงสมการที่ 4.78 แสดงใน
ตารางที่ 4.30 นำผลการคำนวณที่ได้พล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.53

$$k_{p(Ex)}(t) = 0.9711 + 0.0367 \exp[-(t/160.5876)^{0.8230}] \quad (4.76)$$

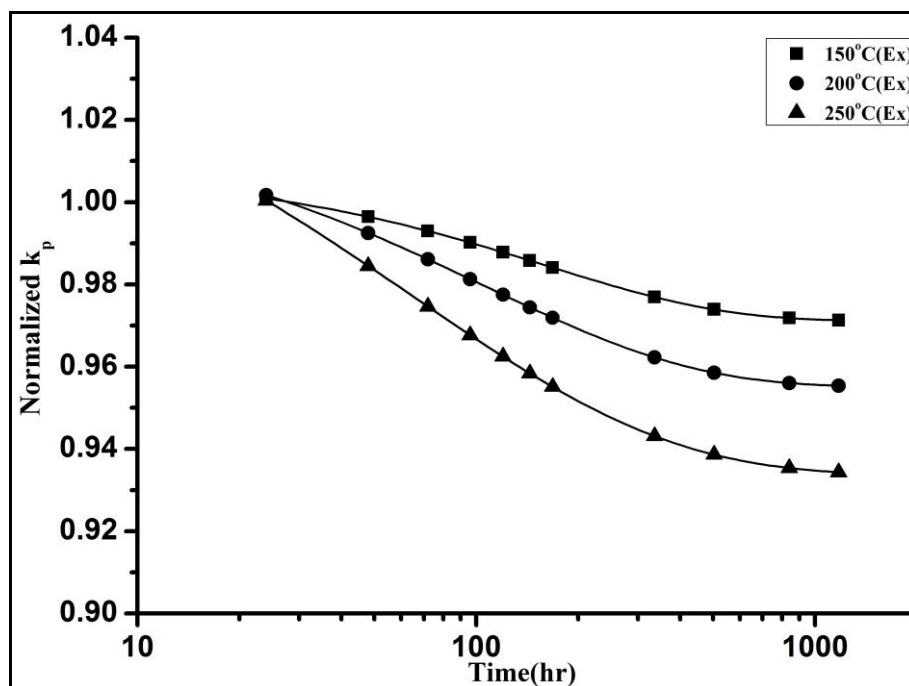
$$k_{p(Ex)}(t) = 0.9550 + 0.0667 \exp[-(t/106.1694)^{0.6935}] \quad (4.77)$$

$$k_{p(Ex)}(t) = 0.9337 + 0.1178 \exp[-(t/65.3687)^{0.5640}] \quad (4.78)$$

โดยที่ $k_{p(Ex)}(t)$ คือ ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบบบสัมพันธ์แปรตามเวลาที่
อุณหภูมิตัวอย่าง
 t คือ เวลาการเสื่อมอายุ

ตารางที่ 4.30 ปัจจัยการควบแน่นไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT
แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

เวลา	อุณหภูมิตัวอย่าง		
t (hr)	150 °C	200 °C	250 °C
24	1.0009	1.0017	1.0004
48	0.9965	0.9925	0.9845
72	0.9930	0.9861	0.9746
96	0.9902	0.9813	0.9677
120	0.9878	0.9775	0.9625
144	0.9858	0.9744	0.9584
168	0.9841	0.9719	0.9551
336	0.9770	0.9623	0.9432
504	0.9739	0.9585	0.9386
840	0.9718	0.9560	0.9354
1176	0.9713	0.9554	0.9344



รูปที่ 4.53 ผลการทำนายพฤติกรรมการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

4.3.2.6 การทำนายพฤติกรรมการเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้าน

ความหนา

เมื่อนำสมการที่ 4.63 ถึงสมการที่ 4.66 มาคำนวณที่อุณหภูมิตัวอย่าง 150 °C 200 °C และ 250 °C ได้ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.31 พารามิเตอร์ของสมการปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

x (°C)	$k_{t_{\infty}(Ex)}$	$k_{t_1(Ex)}$	$\tau_{(Ex)}$	$\nu_{(Ex)}$
150	0.9675	0.0416	151.8049	0.8046
200	0.9496	0.0770	98.4201	0.6621
250	0.9259	0.1415	60.8380	0.5196

นำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ในตารางที่ 4.31 แทนในสมการที่ 4.3 เพื่อคำนวณปัจจัย $k_{t(Ex)}$ ในเชิงเวลาของแต่ละอุณหภูมิตัวอย่าง

ผลการคำนวณปัจจัย $k_{t(Ex)}$ ด้วยสมการที่ 4.79 ถึงสมการที่ 4.81 แสดงในตารางที่ 4.32 นำผลการคำนวณที่ได้พล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.54

$$k_{t(Ex)}(t) = 0.9675 + 0.0416 \exp[-(t/151.8049)^{0.8046}] \quad (4.79)$$

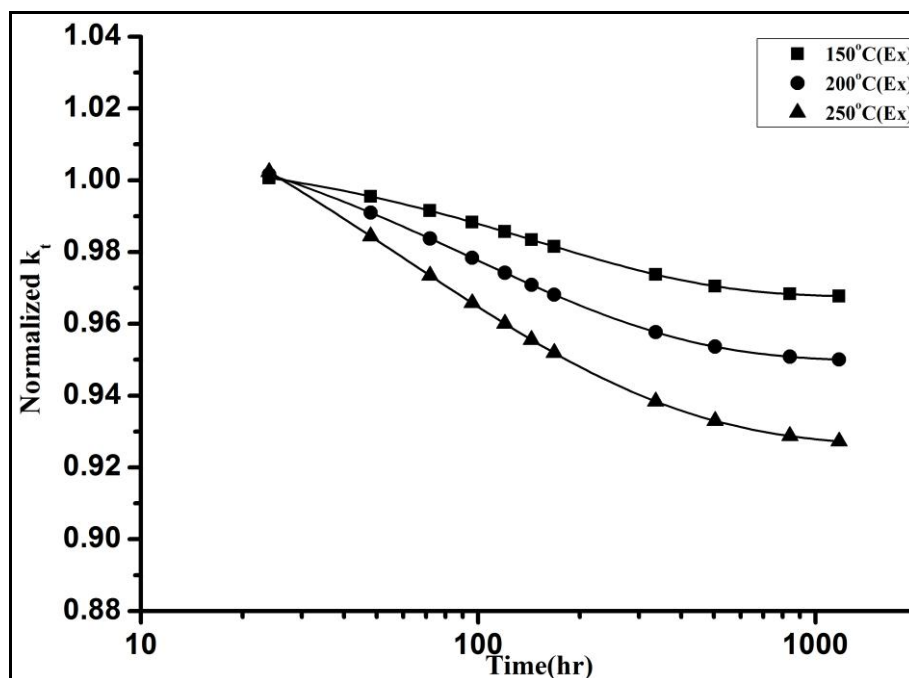
$$k_{t(Ex)}(t) = 0.9496 + 0.0770 \exp[-(t/98.4201)^{0.6621}] \quad (4.80)$$

$$k_{t(Ex)}(t) = 0.9259 + 0.1415 \exp[-(t/60.8380)^{0.5196}] \quad (4.81)$$

โดยที่ $k_{t(Ex)}(t)$ คือ ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์แปรตามเวลาที่อุณหภูมิตัวอย่าง
 t คือ เวลาการเสื่อมอายุ

ตารางที่ 4.32 ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

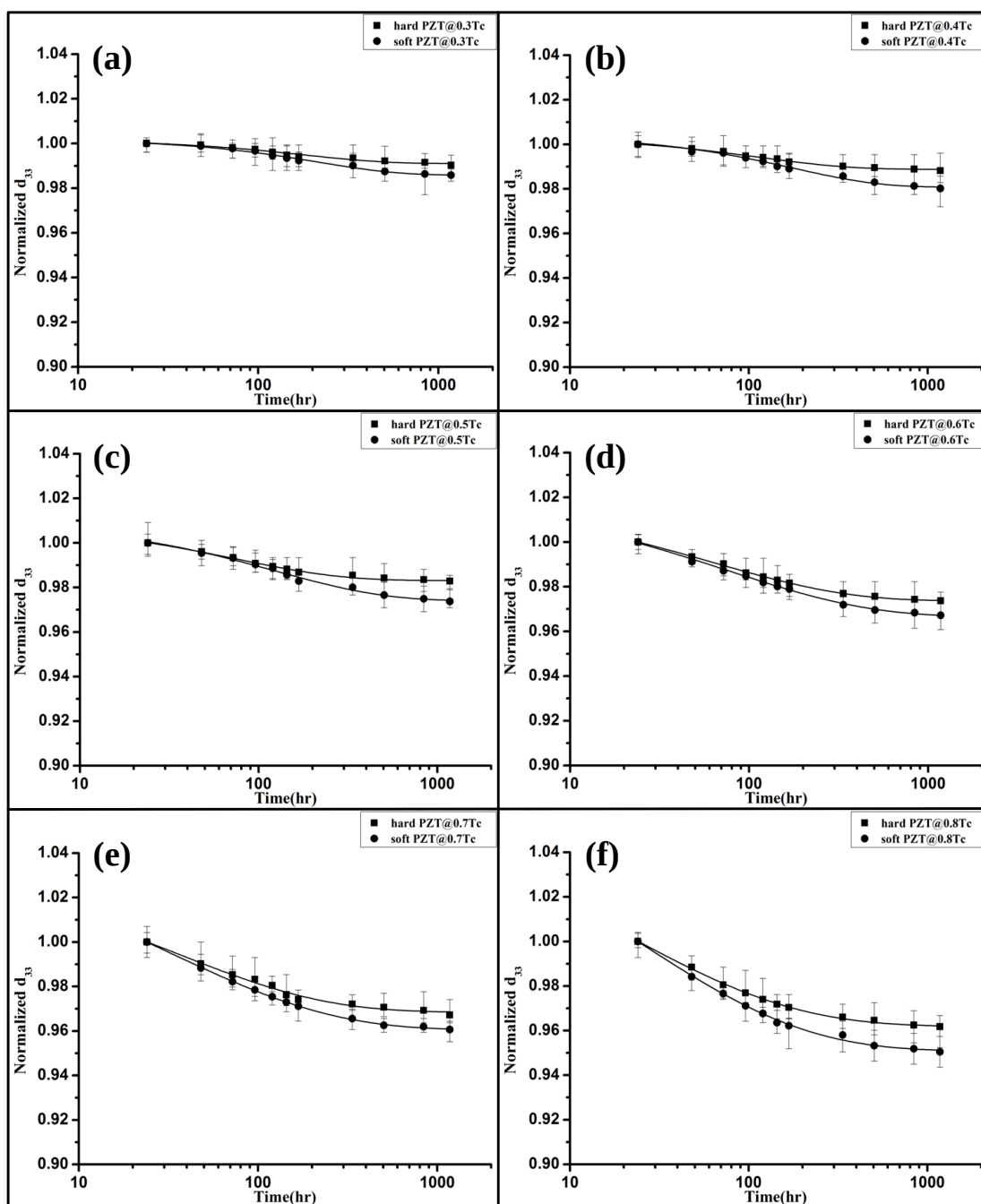
เวลา	อุณหภูมิตัวอย่าง		
t (hr)	150 °C	200 °C	250 °C
24	1.0006	1.0016	1.0023
48	0.9955	0.9910	0.9844
72	0.9915	0.9838	0.9735
96	0.9883	0.9784	0.9658
120	0.9857	0.9742	0.9600
144	0.9834	0.9709	0.9555
168	0.9816	0.9681	0.9519
336	0.9737	0.9577	0.9384
504	0.9705	0.9536	0.9330
840	0.9683	0.9508	0.9288
1176	0.9677	0.9500	0.9273



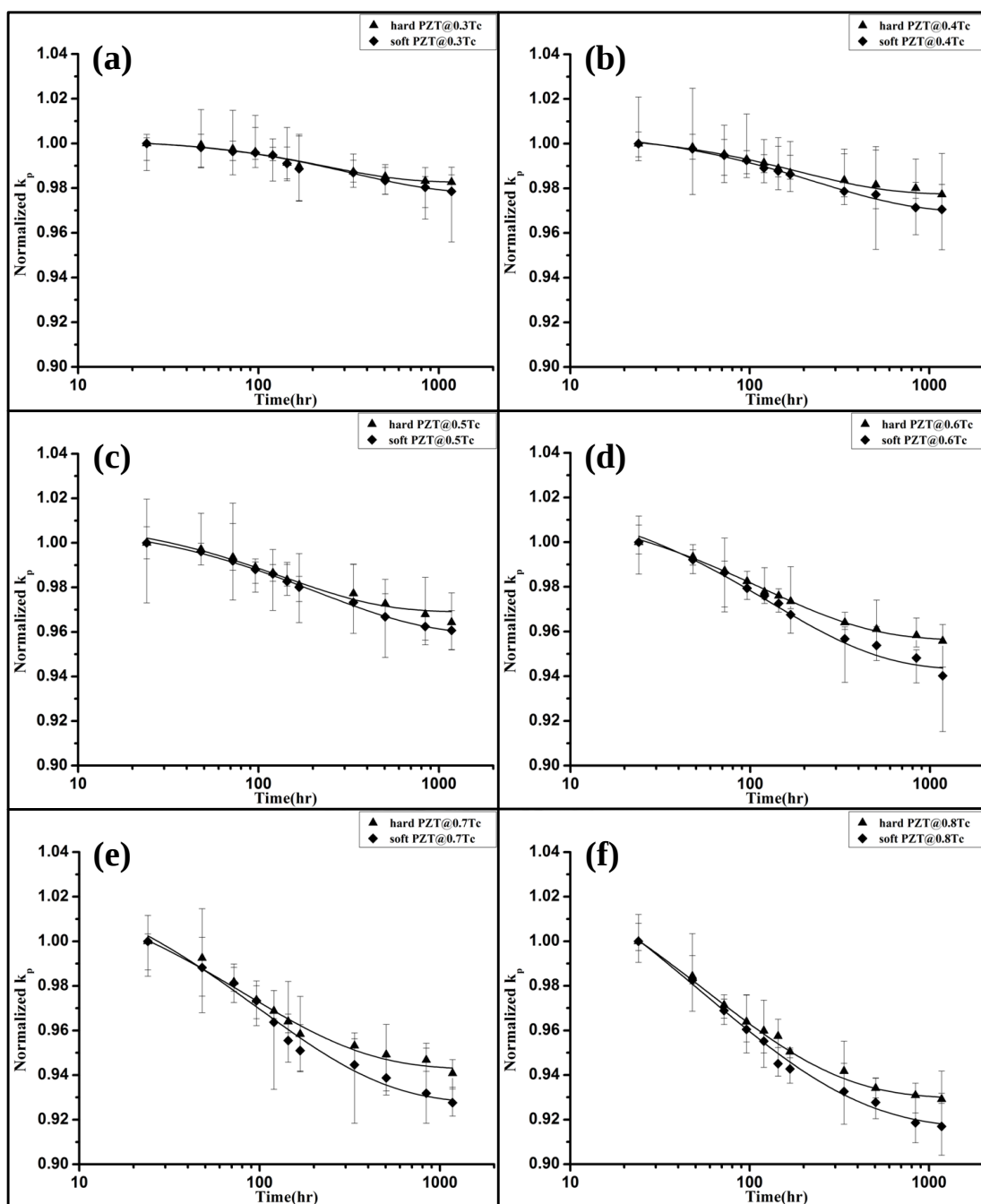
รูปที่ 4.54 ผลการทำนายพฤติกรรมเสื่อมอายุของปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่อุณหภูมิตัวอย่าง

4.4 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนแต่ละอุณหภูมิ

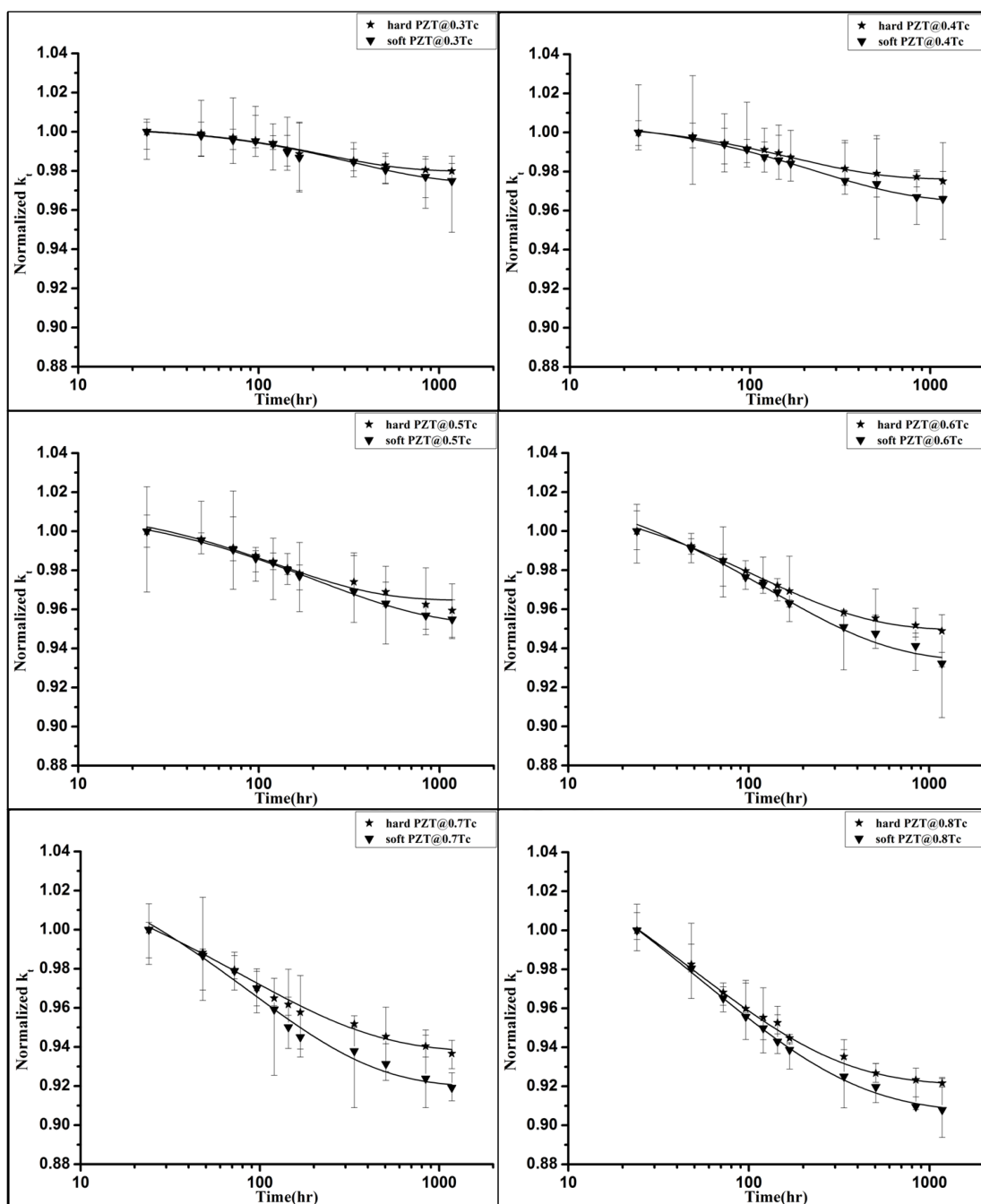
รูปที่ 4.55 แสดงสัมประสิทธิ์ d_{33} แบบสัมพัทธ์ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard ที่ผ่านการอบด้วยความร้อน รูปที่ 4.56 แสดงปัจจัย k_p แบบสัมพัทธ์ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard ที่ผ่านการอบด้วยความร้อน และรูปที่ 4.57 แสดงปัจจัย k_t แบบสัมพัทธ์ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard ที่ผ่านการอบด้วยความร้อน จากรูปที่ 4.55 รูปที่ 4.56 และรูปที่ 4.57 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft กับแบบ Hard ที่ผ่านการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard มี T_C ไม่เท่ากัน แต่สามารถเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากกำหนด T_C เป็นอุณหภูมิอ้างอิงของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard จากผลการทดสอบพบว่าสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ลดลงมากกว่าแบบ Hard ในแต่ละอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน แสดงว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft มีการเสื่อมอายุเร็วกว่าแบบ Hard ที่อุณหภูมิเดียวกัน



รูปที่ 4.55 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เทียบกับแบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_c [เส้นทึบได้จากสมการที่ 4.1]

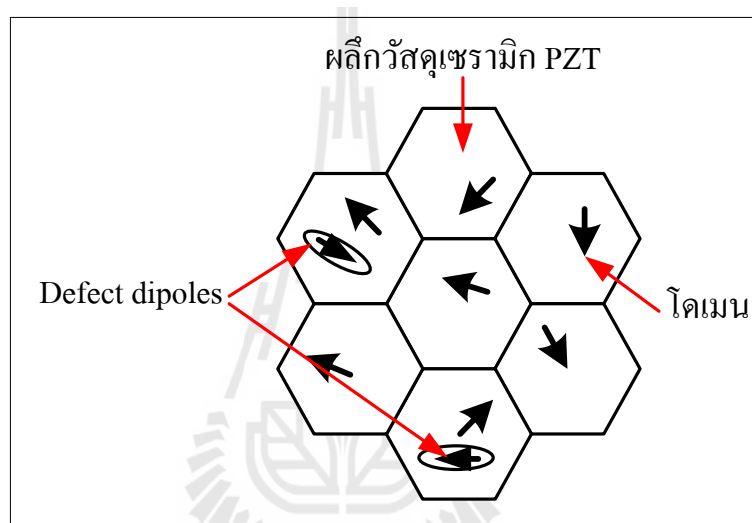


รูปที่ 4.56 ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบแบบสัมผัสในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบSoft เทียบกับแบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_c [เส้นทึบได้จากสมการที่ 4.2]



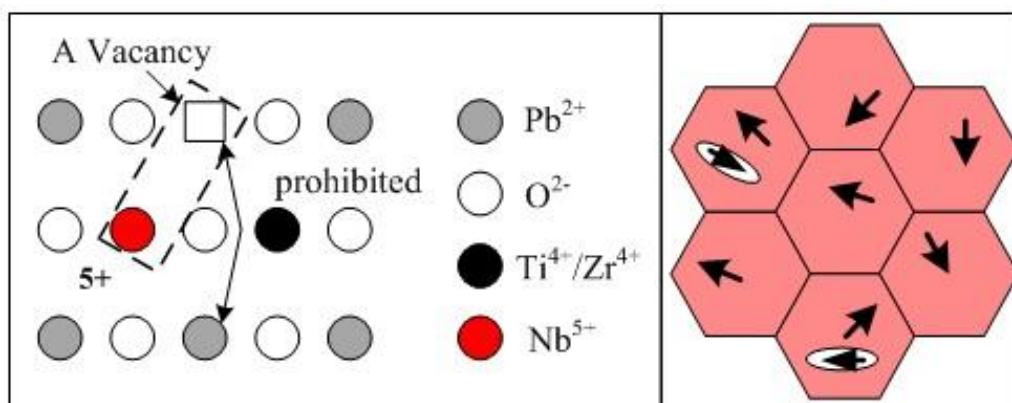
รูปที่ 4.57 ปัจจัยคู่ควมเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาแบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เทียบกับแบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (a) 30% (b) 40% (c) 50% (d) 60% (e) 70% (f) 80% ของ T_c [เส้นทึบได้จากสมการที่ 4.3]

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างผลึกของวัสดุเซรามิก PZT มักมีความบกพร่องในโครงสร้างผลึกเกิดขึ้น เรียกว่า ช่องว่างออกซิเจน (Oxygen vacancy) แต่มีจำนวนไม่มากนัก ช่องว่างออกซิเจนดังกล่าวส่งผลให้เกิดการบกพร่องของคู่ขั้ว (Defect dipoles) ซึ่งการบกพร่องของคู่ขั้วนี้ส่งผลให้โดเมนเรียงตัวได้ยาก นั่นคือในการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วจำเป็นต้องใช้สนามไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สูงขึ้น รวมทั้งการสลายการมีขั้วก็จำเป็นต้องใช้สนามไฟฟ้าและอุณหภูมิที่สูงด้วยเช่นกัน รูปที่ 4.58 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างผลึกมีการบกพร่องของคู่ขั้ว ซึ่งเป็นผลจากช่องว่างออกซิเจนของวัสดุเซรามิก PZT (Baoshan et al., 2005)

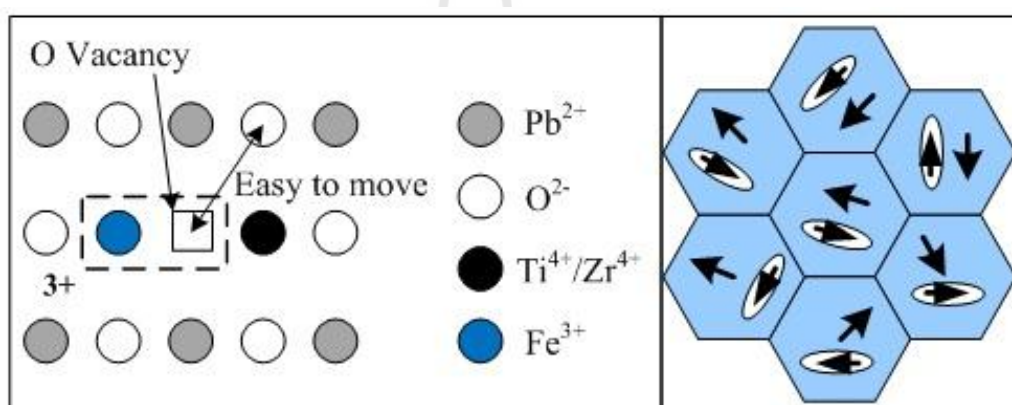


รูปที่ 4.58 แบบจำลองโครงสร้างผลึกมีการบกพร่องของคู่ขั้วจากช่องว่างออกซิเจนของวัสดุเซรามิก PZT [ดัดแปลงมาจาก (Baoshan et al., 2005)]

การเติมสารเจือจําพวกตัวให้เช่น Nb^{5+} ลงในโครงสร้างอะตอมของวัสดุเซรามิก PZT ส่งผลให้เกิดเป็นวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ทำให้เกิดช่องว่างในตำแหน่ง A-site หรือช่องว่างของตะกั่ว โดยไม่ได้ทำให้เกิดช่องว่างของออกซิเจนเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.59 ส่วนการเติมสารเจือจําพวกตัวรับเช่น Fe^{3+} ลงในโครงสร้างอะตอมของวัสดุเซรามิก PZT ส่งผลให้เกิดเป็นวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ทำให้เกิดช่องว่างออกซิเจนเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.60 นั้นแสดงว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard มีจำนวนความบกพร่องของคู่ขั้วเพิ่มขึ้นส่งผลให้การจัดเรียงตัวของโดเมนในวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ทำได้ยากกว่าในวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft (Mestric et al., 2005)

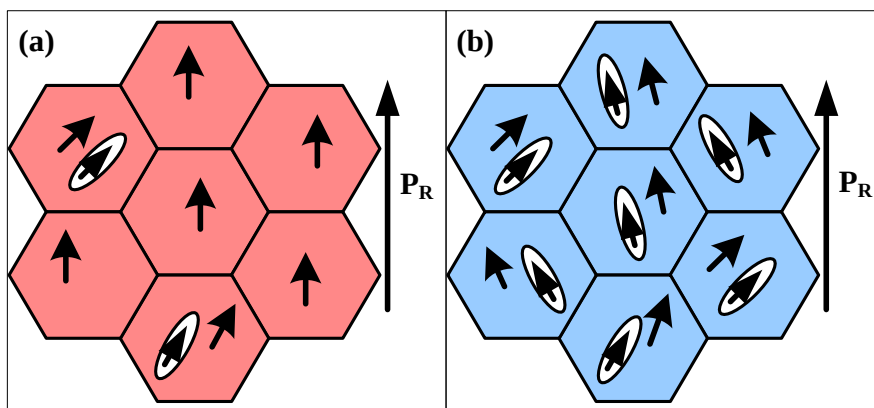


รูปที่ 4.59 แบบจำลองโครงสร้างผลึกที่มีการบกพร่องของกลุ่มไอออนเมื่อเติมสารเจือจำพวกตัวให้ของวัสดุเซรามิก PZT [ดัดแปลงมาจาก (Baoshan et al., 2005)]



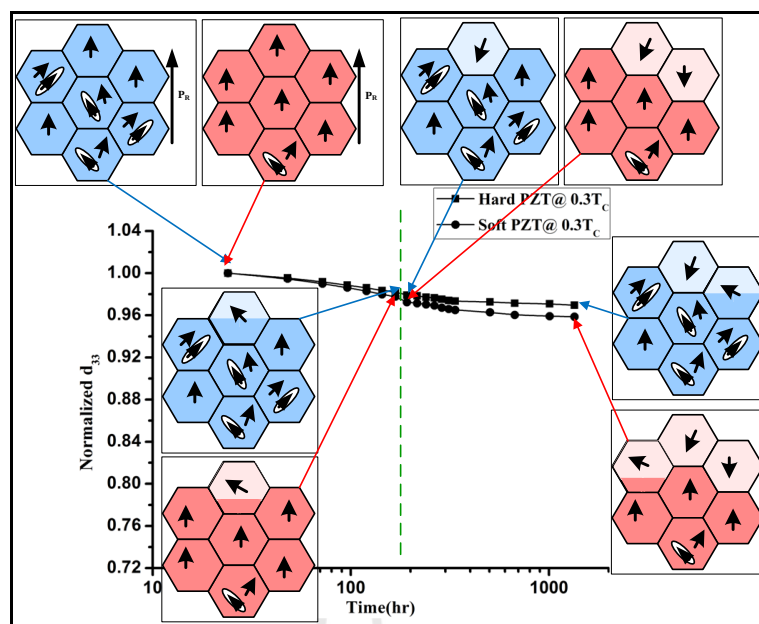
รูปที่ 4.60 แบบจำลองโครงสร้างผลึกที่มีการบกพร่องของกลุ่มไอออนเมื่อเติมสารเจือจำพวกตัวรับของวัสดุเซรามิก PZT [ดัดแปลงมาจาก (Baoshan et al., 2005)]

การเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วด้วยสนามของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.61(a) และ 4.61(b) ตามลำดับ สังเกตเห็นได้ว่าในวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft มีการจัดเรียงตัวของโดเมนไปแนวทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าที่จ่ายได้ง่ายกว่าในวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard เนื่องจากวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard มีจำนวนช่องว่างออกซิเจนหรือมีจำนวนความบกพร่องของกลุ่มไอออนมากกว่าในวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft

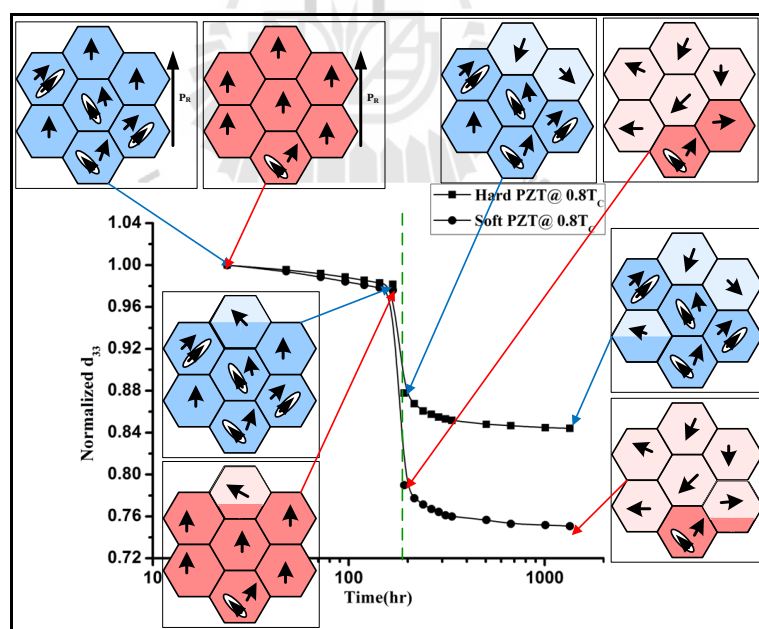


รูปที่ 4.61 การเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้ว (a) วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft (b) วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard [ดัดแปลงมาจาก (Baoshan et al., 2005)]

หลังจากเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพการมีขั้วของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard ต่างก็พยายามจัดเรียงตัวของโดเมนให้เข้าสู่สภาวะสมดุลตามเวลาที่เปลี่ยนไป นั่นคือสภาพการมีขั้วคงค้างลดลง หรือเรียกว่าการเสื่อมอายุตามเวลา แต่เมื่อวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ได้รับการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งเป็นการเร่งการเสื่อมอายุ รูปที่ 4.62 แสดงแบบจำลองการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่ทำการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (30% และ 40% ของ T_c) สังเกตเห็นว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และ PZT แบบ Hard มีการเสื่อมอายุอย่างช้า ๆ แต่วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft มีการเสื่อมอายุเร็วกว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard รูปที่ 4.63 แสดงแบบจำลองการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard ที่ทำการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูง (50% 60% 70% และ 80% ของ T_c) สังเกตเห็นว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และ PZT แบบ Hard มีการเสื่อมอายุอย่างรวดเร็ว และวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft มีการเสื่อมอายุเร็วกว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard เช่นเดียวกัน การอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้เกิดการเสื่อมอายุน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำส่งผลกระทบต่อการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของโดเมนเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูงและในวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard มีการเสื่อมอายุช้ากว่าในวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เนื่องจากวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard มีจำนวนช่องว่างออกซิเจนมากกว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เมื่อมีจำนวนช่องว่างออกซิเจนมากก็ทำให้มีจำนวนความบกพร่องคู่ขั้วมาก ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของโดเมนเป็นไปได้ยาก จึงส่งผลให้วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เสื่อมอายุเร็วกว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard



รูปที่ 4.62 แบบจำลองการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และเทียบกับแบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 4.63 แบบจำลองการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และเทียบกับแบบ Hard หลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูง

4.5 สรุป

ผลการทดสอบ วิเคราะห์ และอภิปรายผลการทดสอบของลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ส่งผลให้เกิดการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT ทั้งแบบ Soft และแบบ Hard จำกัดความหนาของชิ้นงานที่ 1 mm และอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30% 40% 50% 60% 70% และ 80% ของ T_C นาน 10 นาทีของแต่ละอุณหภูมิ สามารถวิเคราะห์ได้จากการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ในแต่ละอุณหภูมิการอบด้วยความร้อนของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard ที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าเหล่านี้ สามารถบอกถึงการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT ได้ และจากผลการทดสอบการอบด้วยความร้อนให้แก่วัสดุเซรามิก PZT ที่อุณหภูมิต่าง ๆ สัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t มีการเปลี่ยนแปลงดังนี้ เมื่ออบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50% ของ T_C สัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard ลดลงเพียงเล็กน้อย สังเกตเห็นว่าแทบไม่มีความแตกต่างจากก่อนการอบด้วยความร้อน นั้นแสดงว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard มีการเสื่อมอายุตามเวลาโดยธรรมชาติ และเมื่ออบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 50% ของ T_C ขึ้นไป พบว่าสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ลดลงอย่างเห็นได้ชัด นั้นแสดงว่าเมื่ออบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 50% ของ T_C ขึ้นไป ส่งผลให้เป็นการเร่งการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT และการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ระหว่างวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft กับแบบ Hard สังเกตเห็นว่าสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ลดลงมากกว่าแบบ Hard ที่อุณหภูมิเดียวกัน นั่นคือวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เกิดการเสื่อมอายุจากการเร่งของการอบด้วยความร้อนเร็วกว่าแบบ Hard เนื่องจากวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard มีจำนวนช่องว่างออกซิเจนมากกว่าแบบ Soft ส่งผลให้เกิดความบกพร่องของคู่ขั้วมากกว่า ความบกพร่องของคู่ขั้วนี้ส่งผลให้การจัดเรียงตัวแบบสุ่มของโดเมนหลังอบด้วยความร้อนเป็นไปได้ยาก จึงทำให้วัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เสื่อมอายุเร็วกว่าแบบ Hard การเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard สามารถหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอย ซึ่งความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์นี้สามารถทำนายการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT ที่ผ่านการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วง 30% ถึง 80% ของ T_C ได้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของกระบวนการอบด้วยความร้อนต่อการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT ทั้งแบบ Soft และแบบ Hard โดยอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30% 40% 50% 60% 70% และ 80% ของ T_c การเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT สามารถวิเคราะห์ได้จาก การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเหล่านี้สามารถบอกถึงการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT ได้ ซึ่งการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT ก่อนและ หลังการอบด้วยความร้อนของแต่ละอุณหภูมิ ซึ่งก่อนอบด้วยความร้อนสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ลดลงอย่างช้า ๆ ตามเวลา เป็นลักษณะการเสื่อมอายุตามธรรมชาติ และหลังจากอบ ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 30% และ 40% ของ T_c สัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ลดลง อย่างช้า ๆ มีลักษณะการเสื่อมอายุตามเวลาเป็นไปตามธรรมชาติเช่นเดียวกัน ในส่วนการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50% 60% 70% และ 80% ของ T_c สัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ลดลงอย่างเห็นได้ชัดทำให้วัสดุเซรามิก PZT เสื่อมอายุเร็วขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80% ของ T_c ทำให้สัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ลดลงมากที่สุด

สัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t แบบสัมพัทธ์ในเชิงเวลาเมื่ออัตราการลดลงตาม อุณหภูมิการอบด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้นได้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์แบบสมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอย เพื่อความถูกต้องของผลการทดลองต้องทำการตรวจสอบ โดยนำพารามิเตอร์ของ สมการเอกซ์โพเนนเชียลแบบถดถอยของสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t มาพล็อตใน ฟังก์ชันของอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน ได้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการ Curve fitting ทำให้ได้แบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และ ปัจจัย k_t กับอุณหภูมิ และสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ในฟังก์ชัน ของอุณหภูมิได้ จึงทำให้ได้แบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ จากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์นำไปประยุกต์ใช้กับอุณหภูมิตัวอย่างเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง สรุปได้ว่า

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นำไปประยุกต์ใช้กับอุณหภูมิตัวอย่าง ได้ว่าความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้อง และแบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการคำนวณสามารถใช้ทำนายการลดลงของสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ที่อุณหภูมิใด ๆ (30% ถึง 80% ของ T_c) ได้

การเปรียบเทียบระหว่างสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft กับแบบ Hard ที่ผ่านการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard มี T_c ไม่เท่ากัน แต่สามารถเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากกำหนด T_c เป็นอุณหภูมิอ้างอิงของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard พบว่าสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ลดลงมากกว่าแบบ Hard ในแต่ละอุณหภูมิการอบด้วยความร้อน แสดงว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft มีการเสื่อมอายุเร็วกว่าแบบ Hard ที่อุณหภูมิเดียวกัน

ซึ่งจากผลการทดลองสามารถตอบข้อสงสัยสมมติฐานที่ว่า การอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้เกิดการเสื่อมอายุน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิต่ำส่งผลกระทบต่อการจัดเรียงตัวของสัณฐานของโดเมนเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง และวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เสื่อมอายุเร็วกว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard เนื่องจากมีจำนวนช่องว่างออกซิเจนที่ต่างกัน โดยวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard มีจำนวนช่องว่างออกซิเจนมากกว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft ซึ่งช่องว่างออกซิเจนส่งผลให้เกิดการบกพร่องของคู่ข้อ การบกพร่องของคู่ข้อทำให้การจัดเรียงตัวของโดเมนเป็นไปได้ยาก ซึ่งการอบด้วยความร้อนส่งผลให้โดเมนภายในพยายามจัดเรียงตัวแบบสัณฐานเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล แต่วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard มีจำนวนช่องว่างออกซิเจนมากกว่า จึงทำให้การจัดเรียงตัวใหม่ของโดเมนในวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard เป็นไปได้ยาก ส่งผลให้วัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard เสื่อมอายุช้ากว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft

สรุปได้ว่าเมื่ออบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50% ของ T_c สัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard ลดลงเพียงเล็กน้อย แทบไม่มีความแตกต่างจากก่อนการอบด้วยความร้อน นั้นแสดงว่าวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft และแบบ Hard มีการเสื่อมอายุตามเวลาโดยธรรมชาติ และเมื่ออบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 50% ของ T_c ขึ้นไป พบว่าสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ลดลงอย่างเห็นได้ชัด นั่นคือเมื่ออบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 50% ของ T_c ขึ้นไป ส่งผลให้เป็นการเร่งการเสื่อมอายุของวัสดุเซรามิก PZT การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ระหว่างวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft กับแบบ Hard สัมประสิทธิ์ d_{33} ปัจจัย k_p และปัจจัย k_t ของวัสดุเซรามิก PZT แบบ

Soft ลดลงมากกว่าแบบ Hard ที่อุณหภูมิเดียวกัน นั่นคือวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เกิดการเสื่อมอายุจากการเร่งของการอบด้วยความร้อนเร็วกว่าแบบ Hard

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา มีข้อเสนอแนะในการดำเนินวิจัยวิทยานิพนธ์ดังนี้

5.2.1 วัสดุเซรามิก PZT ทุกชิ้นที่จัดเรียบร้อยแล้วต้องนำไปวัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ เพื่อตรวจสอบให้มีความหนาเท่ากันทุกชิ้นสำหรับการทดสอบ เพื่อป้องกันผลกระทบจากความหนาที่ไม่เท่ากัน ซึ่งอาจนำไปสู่ผลการทดลองที่ผิดเพี้ยน

5.2.2 การทดสอบควรทำในห้องหรือสถานที่ที่ไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิภายนอก เช่น ห้องแอร์ เป็นต้น เนื่องจากเป็นการทดสอบเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิ ซึ่งอาจทำให้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเกิดการผิดเพี้ยน



รายการอ้างอิง

- จันทร์ทอง ทรงศิริ (2008). การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกผสมเลดแมงกานีสในโอเบต-เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วัสดุศาสตร์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 4-39.
- รัตติกร ยี่มนิรัฐ (2001). สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สุธรรม ศรีหล่มสัก (2008). เอกสารประกอบการสอนรายวิชา **Characterization in Materials Engineering: Microscopic Characterization Part**. ภาควิชาเซรามิก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- APC International . (2002). **Piezoelectric ceramic: Principles and applications**, APC. International, Ltd.
- BaoShan, L., GuoRonr, L., QingRui Y., ZhiGang Zh., AiLi, D. and WenWu, C., (2005). Pinning and depinning mechanism of defect dipoles in PMnN-PNT ceramics. **Journal of Applied Physics**. 38: 1107-1111.
- Dominick, A. D., and David, C. S. (2006). The Effect of PZT8 Piezoelectric Crystal Aging on Mechanical and Electrical Resonances in Ultrasonic Transducers. **IEEE Ultrasonic Symposium**. 06: 1935-1938.
- Haertling, G.H. (1999). Ferroelectric ceramics history and technology. **Journal of the American Ceramic Society**. 82: 797 – 818.
- IRE Standard (1957). IRE standards on piezoelectric crystals-The piezoelectric vibrator: Definition and methods of measurement. **Proceeding of the IRE**. 353-358.
- Jaffe, B., Cook, W. R., and Jaffe, H. (1971). Piezoelectric ceramics. **Academic Press**: London New York.
- Jing, Y., Luo, J., Yi, X., and Gu, X. (2004). Design and evaluation of PZT thin-film micro-actuator for hard disk drives. **Sensors and Actuators A**. 116: 329-335.
- Kao, K. C. (2004). Dielectric Phenomena in Solids.

- Koh, J. H., Jeong, S. J., Ha, M. S., and Song, J.S. (2004). Aging of piezoelectric properties in $\text{Pb}(\text{MgNb})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ multilayer ceramic actuators. **Journal of Applied Physics**. 96 (1): 544-548.
- Lee, G. M., and Kim, B. H. (2005). Effect of thermal aging on temperature stability of $\text{Pb}(\text{Zr}_y\text{Ti}_{1-y})\text{O}_3 + x(\text{wt.}\%)\text{Cr}_2\text{O}_3$ ceramics. **Materials Chemistry and Physics**. 91: 233-236.
- Medeiros, J. P., Lente, M. H., and Eiras, J. A. (1994). Influence of poling temperature on aging and thermal stability of PZT ceramics. **IEEE Ultrasonic Symposium**. 94: 955-958.
- Moulson, A. J., and Herbert, J. M. (2003). Electroceramics: Materials, Properties, Applications. **John Wiley & Sons, Ltd**. 2: 492 – 494.
- Mestric, H., Eichel, R. A., Kloss, T., Dinse, K.-P., Laubach, S., and Schmidt, P. C. (2005). Iron-oxygen vacancy defect centers in PbTiO_3 : Newman superposition model analysis and density function calculations. **The American Physical Society**. 71: 1341091-10.
- Niu, y., Guo, G., Ong, E. H., Sivadasan, K. K., and Huang, T. (2000). A PZT Micro-Actuated Suspension for High TPI Hard Disk Servo System. **IEEE Transaction on Magnetic**. 36: 2241-3.
- Srilomsak, S., Schulze, W., and Pilgrim, S. (2004). Harmonic analysis of the polarization hysteresis loop for aged PZT. **IEEE International Ultrasonics**. 50: 213-216.
- Srilomsak, S. (2009). Hysteresis loops of aging PZTs. **Journal of the National Research Council of Thailand**. 41(1): 11-21.
- Xu, Y. (1991). Ferroelectric materials and their applications. **Elsevier Science Publishers B.V.**, 1000 AE Amsterdam, The Netherlands.
- Zhang, Q. M., Zhao, J., and Cross, L.E. (1996). Aging of the dielectric and piezoelectric properties of relaxor ferroelectric lead magnesium niobate-lead titanate in the electric field biased state. **Journal of Applied Physics**. 79 (6): 3181-3187.

ภาคผนวก ก

สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Soft เมื่ออบด้วยความร้อน
ที่อุณหภูมิต่างกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 108 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	สูงสุด	ต่ำสุด
24	365	366	367	367	367	366.4	0.6	1.4
48	368	365	367	365	365	366.0	2.0	1.0
72	364	364	367	366	367	365.6	1.4	1.6
96	366	364	365	366	365	365.2	0.8	1.2
120	365	362	363	366	366	364.4	1.6	2.4
144	363	366	362	364	365	364.0	2.0	2.0
168	363	365	365	363	362	363.6	1.4	1.6
336	361	363	365	363	362	362.8	2.2	1.8
504	361	360	363	363	362	361.8	1.2	1.8
840	358	363	361	362	363	361.4	1.6	3.4
1176	360	362	360	362	362	361.2	0.8	1.2

ตารางที่ ก.2 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 144 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	สูงสุด	ต่ำสุด
24	362	365	366	364	363	364.0	2.0	2.0
48	362	362	362	363	365	362.8	2.2	0.8
72	363	362	363	363	362	362.6	0.4	0.6
96	362	362	363	361	361	361.8	1.2	0.8
120	361	360	363	362	360	361.2	1.8	1.2
144	361	361	360	360	360	360.4	0.6	0.4
168	358	359	360	361	362	360.0	2.0	2.0
336	358	359	358	359	360	358.8	1.2	0.8
504	360	357	356	357	359	357.8	2.2	1.8
840	357	358	356	359	356	357.2	1.8	1.2
1176	358	357	356	354	359	356.8	2.2	2.8

ตารางที่ ก.3 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	สูงสุด	ต่ำสุด
24	352	351	351	350	350	350.8	1.2	0.8
48	347	349	349	350	351	349.2	1.8	2.2
72	348	347	349	347	350	348.2	1.8	1.2
96	346	347	348	347	349	347.4	1.6	1.4
120	346	345	348	348	347	346.8	1.2	1.8
144	346	345	346	345	347	345.8	1.2	0.8
168	345	343	346	346	344	344.8	1.2	1.8
336	342	344	345	343	345	343.8	1.2	1.8
504	344	343	344	341	341	342.6	1.4	1.6
840	341	342	344	340	343	342.0	2.0	2.0
1176	342	343	342	341	340	341.6	1.4	1.6

ตารางที่ ก.4 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 216 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	สูงสุด	ต่ำสุด
24	343	340	341	342	343	341.8	1.2	1.8
48	339	339	338	340	338	338.8	1.2	0.8
72	339	337	338	337	336	337.4	1.6	1.4
96	337	336	337	337	336	336.6	0.4	0.6
120	336	336	334	335	337	335.6	1.4	1.6
144	334	335	336	336	334	335.0	1.0	1.0
168	334	333	334	336	336	334.6	1.4	1.6
336	332	332	334	333	330	332.2	1.8	2.2
504	330	331	331	333	332	331.4	1.6	1.4
840	332	332	330	330	331	331.0	1.0	1.0
1176	332	331	330	331	329	330.6	1.4	1.6

ตารางที่ ก.5 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 252 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	สูงสุด	ต่ำสุด
24	324	326	326	327	325	325.6	1.4	1.6
48	323	321	324	321	320	321.8	2.2	1.8
72	321	318	320	321	319	319.8	1.2	1.8
96	318	317	320	320	318	318.6	1.4	1.6
120	317	319	317	318	317	317.6	1.4	0.6
144	317	316	316	317	318	316.8	1.2	0.8
168	316	316	316	316	317	316.2	0.8	0.2
336	313	314	314	316	315	314.4	1.6	1.4
504	316	314	313	314	315	314.4	1.6	1.4
840	314	312	313	313	314	313.2	0.8	1.2
1176	312	312	314	312	314	312.8	1.2	0.8

ตารางที่ ก.6 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 288 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	สูงสุด	ต่ำสุด
24	290	290	292	292	290	290.8	1.2	0.8
48	286	286	288	287	284	286.2	1.8	2.2
72	285	283	285	285	282	284.0	1.0	2.0
96	283	282	281	283	283	282.4	0.6	1.4
120	281	282	281	281	282	281.4	0.6	0.4
144	280	279	281	281	280	280.2	0.8	1.2
168	281	280	278	281	279	279.8	1.2	1.8
336	277	280	278	279	279	278.6	1.4	1.6
504	276	277	278	279	276	277.2	1.8	1.2
840	276	278	275	277	278	276.8	1.2	1.8
1176	275	275	277	278	277	276.4	1.6	1.4

ตารางที่ ก.7 ปัจจัยคู่ความแข็งกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 108 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4939	0.4910	0.4953	0.4967	0.4967	0.4947	0.0020	0.0037
48	0.4895	0.4938	0.4968	0.4953	0.4938	0.4938	0.0030	0.0043
72	0.4909	0.4952	0.4923	0.4938	0.4923	0.4929	0.0023	0.0020
96	0.4982	0.4894	0.4909	0.4909	0.4939	0.4927	0.0055	0.0033
120	0.4909	0.4909	0.4924	0.4924	0.4939	0.4921	0.0018	0.0012
144	0.4909	0.4923	0.4939	0.4879	0.4864	0.4903	0.0036	0.0039
168	0.4880	0.4967	0.4967	0.4820	0.4820	0.4891	0.0076	0.0071
336	0.4850	0.4865	0.4880	0.4894	0.4924	0.4883	0.0041	0.0033
504	0.4835	0.4850	0.4865	0.4894	0.4880	0.4865	0.0029	0.0030
840	0.4851	0.4850	0.4805	0.4850	0.4894	0.4850	0.0044	0.0045
1176	0.4835	0.4865	0.4895	0.4880	0.4729	0.4841	0.0054	0.0112

ตารางที่ ก.8 ปัจจัยคู่ความแข็งกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 144 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4778	0.4792	0.4716	0.4793	0.4823	0.4780	0.0043	0.0064
48	0.4778	0.4899	0.4749	0.4672	0.4749	0.4770	0.0130	0.0097
72	0.4713	0.4820	0.4759	0.4790	0.4697	0.4756	0.0064	0.0059
96	0.4724	0.4723	0.4844	0.4708	0.4724	0.4745	0.0099	0.0037
120	0.4713	0.4789	0.4713	0.4729	0.4697	0.4728	0.0061	0.0031
144	0.4729	0.4743	0.4775	0.4682	0.4682	0.4722	0.0053	0.0040
168	0.4693	0.4785	0.4693	0.4678	0.4725	0.4715	0.0070	0.0037
336	0.4650	0.4666	0.4666	0.4759	0.4651	0.4678	0.0081	0.0028
504	0.4554	0.4774	0.4650	0.4681	0.4698	0.4671	0.0103	0.0117
840	0.4650	0.4698	0.4586	0.4634	0.4650	0.4644	0.0054	0.0058
1176	0.4759	0.4650	0.4553	0.4569	0.4665	0.4639	0.0120	0.0086

ตารางที่ ก.9 ปัจจัยคู่ความแข็งกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4783	0.4675	0.4736	0.4643	0.4643	0.4696	0.0087	0.0053
48	0.4650	0.4666	0.4666	0.4759	0.4651	0.4678	0.0081	0.0028
72	0.4640	0.4576	0.4703	0.4780	0.4593	0.4658	0.0122	0.0082
96	0.4592	0.4640	0.4656	0.4656	0.4656	0.4640	0.0016	0.0048
120	0.4619	0.4651	0.4554	0.4651	0.4682	0.4631	0.0051	0.0077
144	0.4651	0.4650	0.4587	0.4586	0.4602	0.4615	0.0036	0.0029
168	0.4529	0.4578	0.4674	0.4657	0.4578	0.4603	0.0071	0.0074
336	0.4537	0.4571	0.4505	0.4586	0.4651	0.4570	0.0081	0.0065
504	0.4460	0.4527	0.4624	0.4624	0.4492	0.4546	0.0079	0.0085
840	0.4491	0.4540	0.4521	0.4523	0.4523	0.4520	0.0020	0.0029
1176	0.4471	0.4471	0.4543	0.4554	0.4521	0.4512	0.0042	0.0041

ตารางที่ ก.10 ปัจจัยคู่ความแข็งกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 216 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4537	0.4571	0.4505	0.4586	0.4651	0.4570	0.0081	0.0065
48	0.4505	0.4554	0.4535	0.4537	0.4537	0.4534	0.0020	0.0029
72	0.4603	0.4387	0.4454	0.4336	0.4760	0.4508	0.0252	0.0172
96	0.4472	0.4474	0.4472	0.4489	0.4472	0.4476	0.0013	0.0004
120	0.4470	0.4453	0.4453	0.4470	0.4453	0.4460	0.0010	0.0007
144	0.4427	0.4461	0.4427	0.4447	0.4461	0.4445	0.0016	0.0018
168	0.4401	0.4400	0.4383	0.4452	0.4469	0.4421	0.0048	0.0038
336	0.4283	0.4300	0.4300	0.4488	0.4488	0.4372	0.0116	0.0089
504	0.4328	0.4345	0.4362	0.4362	0.4397	0.4359	0.0038	0.0031
840	0.4441	0.4282	0.4285	0.4303	0.4354	0.4333	0.0108	0.0051
1176	0.4182	0.429	0.4307	0.4342	0.4360	0.4296	0.0064	0.0114

ตารางที่ ก.11 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 252 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4455	0.4404	0.4335	0.4438	0.4387	0.4404	0.0051	0.0069
48	0.4263	0.4280	0.4280	0.4468	0.4468	0.4352	0.0116	0.0089
72	0.4336	0.4318	0.4318	0.4352	0.4283	0.4321	0.0031	0.0038
96	0.4237	0.4326	0.4255	0.4308	0.4307	0.4287	0.0039	0.0050
120	0.4111	0.4166	0.4203	0.4257	0.4483	0.4244	0.0239	0.0133
144	0.4165	0.4325	0.4184	0.4183	0.4184	0.4208	0.0117	0.0043
168	0.4239	0.4185	0.4203	0.4166	0.4148	0.4188	0.0051	0.0040
336	0.4157	0.4194	0.4211	0.4045	0.4193	0.4160	0.0051	0.0115
504	0.4100	0.4100	0.4157	0.4175	0.4138	0.4134	0.0041	0.0034
840	0.4193	0.4193	0.4045	0.4045	0.4045	0.4104	0.0089	0.0059
1176	0.4059	0.4116	0.4096	0.4076	0.4081	0.4085	0.0030	0.0027

ตารางที่ ก.12 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 288 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4309	0.4255	0.4273	0.4236	0.4218	0.4258	0.0051	0.0040
48	0.4273	0.4273	0.4125	0.4125	0.4125	0.4184	0.0089	0.0059
72	0.4099	0.4156	0.4136	0.4116	0.4121	0.4126	0.0030	0.0027
96	0.4100	0.4083	0.4045	0.4064	0.4156	0.4090	0.0066	0.0045
120	0.4064	0.4045	0.4082	0.4063	0.4082	0.4067	0.0015	0.0022
144	0.4017	0.4094	0.4037	0.4037	0.4018	0.4041	0.0053	0.0024
168	0.4231	0.4065	0.3869	0.3949	0.4007	0.4024	0.0207	0.0155
336	0.4025	0.3909	0.3948	0.3987	0.3987	0.3971	0.0054	0.0062
504	0.3959	0.3997	0.3919	0.3939	0.3939	0.3951	0.0046	0.0032
840	0.3928	0.3947	0.3967	0.3788	0.3927	0.3911	0.0056	0.0123
1176	0.3849	0.3968	0.3869	0.3909	0.3929	0.3905	0.0063	0.0056

ตารางที่ ก.13 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 108 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.5297	0.5260	0.5315	0.5333	0.5333	0.5308	0.0025	0.0048
48	0.5242	0.5296	0.5334	0.5315	0.5296	0.5297	0.0037	0.0055
72	0.5260	0.5315	0.5278	0.5296	0.5278	0.5285	0.0030	0.0025
96	0.5352	0.5241	0.5259	0.5259	0.5298	0.5282	0.0070	0.0041
120	0.5260	0.5260	0.5279	0.5279	0.5297	0.5275	0.0022	0.0015
144	0.5260	0.5277	0.5297	0.5222	0.5203	0.5252	0.0045	0.0049
168	0.5223	0.5333	0.5333	0.5148	0.5148	0.5237	0.0096	0.0089
336	0.5185	0.5204	0.5223	0.5241	0.5278	0.5226	0.0052	0.0041
504	0.5167	0.5186	0.5205	0.5241	0.5223	0.5204	0.0037	0.0037
840	0.5186	0.5185	0.5130	0.5185	0.5241	0.5185	0.0056	0.0055
1176	0.5167	0.5205	0.5241	0.5223	0.5035	0.5174	0.0067	0.0139

ตารางที่ ก.14 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 144 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.5095	0.5113	0.5019	0.5114	0.5151	0.5099	0.0053	0.0079
48	0.5095	0.5247	0.5060	0.4964	0.5059	0.5085	0.0162	0.0121
72	0.5015	0.5148	0.5072	0.5110	0.4996	0.5068	0.0080	0.0072
96	0.5029	0.5028	0.5178	0.5009	0.5029	0.5054	0.0123	0.0046
120	0.5015	0.5110	0.5015	0.5034	0.4996	0.5034	0.0076	0.0038
144	0.5034	0.5052	0.5092	0.4977	0.4977	0.5026	0.0066	0.0049
168	0.4991	0.5105	0.4991	0.4972	0.5030	0.5018	0.0087	0.0046
336	0.4938	0.4957	0.4957	0.5072	0.4939	0.4973	0.0099	0.0035
504	0.4821	0.5091	0.4938	0.4976	0.4996	0.4964	0.0127	0.0143
840	0.4938	0.4997	0.4859	0.4919	0.4938	0.4930	0.0067	0.0071
1176	0.5072	0.4938	0.4820	0.4839	0.4957	0.4925	0.0147	0.0105

ตารางที่ ก.15 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.5102	0.4969	0.5044	0.4930	0.4930	0.4995	0.0107	0.0065
48	0.4938	0.4957	0.4957	0.5072	0.4939	0.4973	0.0099	0.0035
72	0.4925	0.4847	0.5002	0.5098	0.4867	0.4948	0.0150	0.0101
96	0.4868	0.4926	0.4945	0.4945	0.4945	0.4926	0.0019	0.0058
120	0.4899	0.4938	0.4821	0.4939	0.4978	0.4915	0.0063	0.0094
144	0.4939	0.4938	0.4861	0.4859	0.4879	0.4895	0.0044	0.0036
168	0.4790	0.4850	0.4967	0.4947	0.4850	0.4880	0.0086	0.0091
336	0.4801	0.4842	0.4762	0.4861	0.4940	0.4841	0.0099	0.0079
504	0.4707	0.4788	0.4906	0.4906	0.4746	0.4810	0.0095	0.0104
840	0.4745	0.4804	0.4781	0.4783	0.4783	0.4780	0.0025	0.0034
1176	0.4721	0.4721	0.4807	0.4820	0.4780	0.4770	0.0050	0.0049

ตารางที่ ก.16 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 216 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4800	0.4841	0.4761	0.4860	0.4939	0.4840	0.0099	0.0079
48	0.4762	0.4821	0.4798	0.4800	0.4800	0.4796	0.0025	0.0034
72	0.4880	0.4620	0.4700	0.4559	0.5073	0.4766	0.0307	0.0207
96	0.4721	0.4724	0.4722	0.4742	0.4722	0.4726	0.0016	0.0005
120	0.4719	0.4699	0.4699	0.4719	0.4699	0.4707	0.0012	0.0008
144	0.4667	0.4708	0.4667	0.4691	0.4708	0.4689	0.0020	0.0021
168	0.4638	0.4636	0.4616	0.4698	0.4719	0.4661	0.0058	0.0045
336	0.4496	0.4517	0.4517	0.4741	0.4741	0.4602	0.0139	0.0106
504	0.4549	0.4569	0.4590	0.4590	0.4631	0.4586	0.0045	0.0037
840	0.4684	0.4495	0.4499	0.4520	0.4581	0.4556	0.0128	0.0061
1176	0.4378	0.4505	0.4524	0.4565	0.4588	0.4512	0.0076	0.0134

ตารางที่ ก.17 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 252 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4702	0.4640	0.4558	0.4681	0.4620	0.4640	0.0062	0.0082
48	0.4472	0.4493	0.4493	0.4717	0.4717	0.4578	0.0139	0.0106
72	0.4559	0.4538	0.4538	0.4579	0.4496	0.4542	0.0037	0.0046
96	0.4443	0.4548	0.4464	0.4526	0.4526	0.4501	0.0047	0.0058
120	0.4294	0.4358	0.4402	0.4465	0.4733	0.4451	0.0283	0.0156
144	0.4358	0.4546	0.4380	0.4380	0.4380	0.4409	0.0137	0.0051
168	0.4445	0.4381	0.4402	0.4359	0.4338	0.4385	0.0060	0.0047
336	0.4348	0.4391	0.4412	0.4218	0.4391	0.4352	0.0060	0.0134
504	0.4282	0.4282	0.4348	0.4369	0.4326	0.4321	0.0048	0.0039
840	0.4390	0.4390	0.4218	0.4218	0.4218	0.4287	0.0103	0.0069
1176	0.4234	0.4300	0.4277	0.4254	0.4259	0.4265	0.0035	0.0031

ตารางที่ ก.18 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 288 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4528	0.4464	0.4485	0.4442	0.4421	0.4468	0.0060	0.0047
48	0.4484	0.4484	0.4312	0.4312	0.4312	0.4381	0.0103	0.0069
72	0.4282	0.4348	0.4325	0.4302	0.4307	0.4312	0.0035	0.0031
96	0.4282	0.4262	0.4218	0.4240	0.4347	0.4270	0.0077	0.0052
120	0.4239	0.4218	0.4261	0.4239	0.4261	0.4244	0.0017	0.0026
144	0.4186	0.4275	0.4209	0.4209	0.4187	0.4213	0.0062	0.0027
168	0.4435	0.4240	0.4016	0.4107	0.4175	0.4194	0.0240	0.0179
336	0.4195	0.4061	0.4106	0.4151	0.4151	0.4133	0.0062	0.0072
504	0.4119	0.4163	0.4074	0.4096	0.4096	0.4109	0.0053	0.0036
840	0.4083	0.4105	0.4128	0.3923	0.4082	0.4064	0.0064	0.0141
1176	0.3993	0.4129	0.4015	0.4061	0.4084	0.4056	0.0073	0.0063

ภาคผนวก ข

สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก PZT แบบ Hard เมื่ออบด้วยความร้อน
ที่อุณหภูมิต่างกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 97.5 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	สูงสุด	ต่ำสุด
24	306	309	309	310	307	308.2	1.8	2.2
48	308	307	309	307	309	308.0	1.0	1.0
72	307	306	309	308	308	307.6	1.4	1.6
96	305	309	306	308	309	307.4	1.6	2.4
120	306	306	309	306	308	307.0	2.0	1.0
144	306	305	308	307	307	306.6	1.4	1.6
168	306	305	309	305	307	306.4	2.6	1.4
336	303	308	305	307	308	306.2	1.8	3.2
504	307	305	306	305	306	305.8	1.2	0.8
840	305	307	306	304	306	305.6	1.4	1.6
1176	305	304	305	306	306	305.2	0.8	1.2

ตารางที่ ข.2 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	สูงสุด	ต่ำสุด
24	303	306	304	305	306	304.8	1.2	1.8
48	304	305	304	305	303	304.2	0.8	1.2
72	303	302	306	304	304	303.8	2.2	1.8
96	304	303	304	302	303	303.2	0.8	1.2
120	303	302	304	303	303	303.0	1.0	1.0
144	303	302	304	302	303	302.8	1.2	0.8
168	302	303	302	304	301	302.4	1.6	1.4
336	302	301	301	302	303	301.8	1.2	0.8
504	301	301	301	302	303	301.6	1.4	0.6
840	303	302	301	301	300	301.4	1.6	1.4
1176	300	302	300	303	301	301.2	1.8	1.2

ตารางที่ ข.3 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 162.5 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	สูงสุด	ต่ำสุด
24	304	303	304	304	302	303.4	0.6	1.4
48	302	303	301	303	302	302.2	0.8	1.2
72	301	300	302	303	301	301.4	1.6	1.4
96	301	300	302	300	300	300.6	1.4	0.6
120	302	299	299	301	300	300.2	1.8	1.2
144	301	300	299	299	300	299.8	1.2	0.8
168	298	299	301	300	299	299.4	1.6	1.4
336	298	299	300	299	299	299.0	1.0	1.0
504	297	298	299	300	299	298.6	1.4	1.6
840	299	298	298	297	300	298.4	1.6	1.4
1176	297	300	297	298	299	298.2	1.8	1.2

ตารางที่ ข.4 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 195 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	สูงสุด	ต่ำสุด
24	304	304	305	303	304	304.0	1.0	1.0
48	302	301	303	301	303	302.0	1.0	1.0
72	300	300	302	301	302	301.0	1.0	1.0
96	301	302	299	300	302	300.8	1.2	1.8
120	301	298	299	300	298	299.2	1.8	1.2
144	300	298	300	297	299	298.8	1.2	1.8
168	300	298	299	297	298	298.4	1.6	1.4
336	298	296	298	295	298	297.0	1.0	2.0
504	297	295	295	298	298	296.6	1.4	1.6
840	296	297	297	296	295	296.2	0.8	1.2
1176	297	295	296	298	294	296.0	2.0	2.0

ตารางที่ ข.5 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 227.5 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	สูงสุด	ต่ำสุด
24	288	285	287	286	287	286.6	1.4	1.6
48	285	284	282	285	283	283.8	1.2	1.8
72	282	282	284	283	281	282.4	1.6	1.4
96	282	281	280	283	283	281.8	1.2	1.8
120	282	281	282	279	281	281.0	1.0	2.0
144	279	281	281	278	280	279.8	1.2	1.8
168	280	278	279	279	280	279.2	0.8	1.2
336	278	277	280	279	279	278.6	1.4	1.6
504	279	277	278	278	279	278.2	0.8	1.2
840	279	276	277	278	279	277.8	1.2	1.8
1176	277	279	276	276	278	277.2	1.8	1.2

ตารางที่ ข.6 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 260 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	d_{33} (pC/N)	สูงสุด	ต่ำสุด
24	278	275	278	276	278	277.0	1.0	2.0
48	275	272	275	273	274	273.8	1.2	1.8
72	272	271	270	273	272	271.6	1.4	1.6
96	271	272	270	269	271	270.6	1.4	1.6
120	269	271	270	268	271	269.8	1.2	1.8
144	268	268	270	269	271	269.2	1.8	1.2
168	268	270	268	269	269	268.8	1.2	0.8
336	267	268	269	268	266	267.6	1.4	1.6
504	268	268	267	268	265	267.2	0.8	2.2
840	268	267	265	268	265	266.6	1.4	1.6
1176	268	265	267	266	266	266.4	1.6	1.4

ตารางที่ ข.7 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 97.5 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4722	0.4784	0.4888	0.4769	0.4738	0.4780	0.0108	0.0058
48	0.4728	0.4774	0.4789	0.4789	0.4805	0.4777	0.0028	0.0049
72	0.4851	0.4760	0.4759	0.4713	0.4759	0.4768	0.0083	0.0055
96	0.4746	0.4747	0.4762	0.4762	0.4792	0.4762	0.0030	0.0016
120	0.4715	0.4762	0.4700	0.4762	0.4838	0.4755	0.0083	0.0055
144	0.4704	0.4766	0.4720	0.4766	0.4735	0.4738	0.0028	0.0034
168	0.4750	0.4735	0.4766	0.4796	0.4609	0.4731	0.0065	0.0122
336	0.4714	0.4729	0.4713	0.4698	0.4744	0.4720	0.0024	0.0022
504	0.4735	0.4734	0.4704	0.4703	0.4671	0.4709	0.0026	0.0038
840	0.4697	0.4618	0.4665	0.4713	0.4805	0.4700	0.0105	0.0082
1176	0.4681	0.4713	0.4698	0.4713	0.4682	0.4697	0.0016	0.0016

ตารางที่ ข.8 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4447	0.4499	0.4547	0.4547	0.4450	0.4498	0.0049	0.0051
48	0.4468	0.4501	0.4501	0.4517	0.4467	0.4491	0.0026	0.0024
72	0.4504	0.4435	0.4507	0.4454	0.4485	0.4477	0.0030	0.0042
96	0.4438	0.4468	0.4469	0.4484	0.4473	0.4467	0.0018	0.0028
120	0.4440	0.4476	0.4461	0.4461	0.4461	0.4460	0.0016	0.0020
144	0.4431	0.4465	0.4465	0.4448	0.4432	0.4448	0.0017	0.0017
168	0.4443	0.4443	0.4442	0.4442	0.4427	0.4439	0.0004	0.0012
336	0.4391	0.4442	0.4425	0.4424	0.4441	0.4425	0.0017	0.0034
504	0.4402	0.4485	0.4402	0.4419	0.4367	0.4415	0.0070	0.0048
840	0.4388	0.4405	0.4422	0.4405	0.4422	0.4408	0.0014	0.0020
1176	0.4399	0.4399	0.4399	0.4416	0.4366	0.4396	0.0020	0.0030

ตารางที่ ข.9 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 162.5 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4511	0.4544	0.4576	0.4544	0.4511	0.4538	0.0039	0.0026
48	0.4521	0.4521	0.4537	0.4522	0.4522	0.4525	0.0012	0.0004
72	0.4482	0.4497	0.4515	0.4515	0.4532	0.4508	0.0024	0.0026
96	0.4472	0.4505	0.4505	0.4455	0.4504	0.4488	0.0017	0.0033
120	0.4459	0.4493	0.4493	0.4476	0.4460	0.4476	0.0017	0.0017
144	0.4466	0.4466	0.4465	0.4465	0.4450	0.4462	0.0004	0.0012
168	0.4418	0.4469	0.4452	0.4451	0.4468	0.4452	0.0017	0.0034
336	0.4414	0.4431	0.4448	0.4431	0.4448	0.4434	0.0014	0.0020
504	0.4417	0.4417	0.4417	0.4434	0.4384	0.4414	0.0020	0.0030
840	0.4467	0.4330	0.4382	0.4365	0.4416	0.4392	0.0075	0.0062
1176	0.4320	0.4390	0.4390	0.4390	0.4389	0.4376	0.0014	0.0056

ตารางที่ ข.10 ปัจจัยคู่ความเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 195 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4895	0.4924	0.4910	0.4895	0.4641	0.4853	0.0071	0.0212
48	0.4818	0.4804	0.4819	0.4848	0.4818	0.4821	0.0027	0.0017
72	0.4862	0.4834	0.4712	0.4758	0.4788	0.4791	0.0071	0.0079
96	0.4789	0.4729	0.4759	0.4774	0.4790	0.4768	0.0022	0.0039
120	0.4736	0.4798	0.4736	0.4736	0.4720	0.4745	0.0053	0.0025
144	0.4722	0.4721	0.4752	0.4737	0.4752	0.4737	0.0015	0.0016
168	0.4563	0.4738	0.4800	0.4769	0.4753	0.4725	0.0075	0.0162
336	0.4895	0.4895	0.4534	0.4552	0.4518	0.4679	0.0216	0.0161
504	0.4664	0.4665	0.4727	0.4632	0.4633	0.4664	0.0063	0.0032
840	0.4654	0.4645	0.4642	0.4688	0.4625	0.4651	0.0037	0.0026
1176	0.4560	0.4642	0.4658	0.4658	0.4674	0.4639	0.0036	0.0078

ตารางที่ ข.11 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 227.5 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4300	0.4370	0.4370	0.4370	0.4369	0.4356	0.0014	0.0056
48	0.4407	0.4356	0.4249	0.4249	0.4355	0.4323	0.0084	0.0074
72	0.4258	0.4259	0.4311	0.4277	0.4276	0.4276	0.0035	0.0018
96	0.4313	0.4241	0.4223	0.4205	0.4224	0.4241	0.0072	0.0036
120	0.4205	0.4205	0.4224	0.4260	0.4205	0.4220	0.0040	0.0015
144	0.4195	0.4195	0.4177	0.4214	0.4213	0.4199	0.0015	0.0022
168	0.4248	0.4101	0.4156	0.4211	0.4157	0.4175	0.0073	0.0074
336	0.4026	0.4045	0.4211	0.4247	0.4229	0.4152	0.0095	0.0126
504	0.4101	0.4157	0.4193	0.4064	0.4157	0.4134	0.0059	0.0070
840	0.412	0.4102	0.4121	0.4157	0.4120	0.4124	0.0033	0.0022
1176	0.4125	0.4106	0.4086	0.4067	0.4105	0.4098	0.0027	0.0031

ตารางที่ ข.12 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านระนาบหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 260 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	k_p	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4289	0.4290	0.4342	0.4308	0.4307	0.4307	0.0035	0.0018
48	0.4225	0.4225	0.4244	0.4280	0.4225	0.4240	0.0040	0.0015
72	0.4195	0.4195	0.4176	0.4195	0.4159	0.4184	0.0011	0.0025
96	0.4026	0.4045	0.4211	0.4247	0.4229	0.4152	0.0095	0.0126
120	0.4101	0.4157	0.4193	0.4064	0.4157	0.4134	0.0059	0.0070
144	0.4120	0.4102	0.4121	0.4157	0.4120	0.4124	0.0033	0.0022
168	0.4083	0.4101	0.4082	0.4101	0.4101	0.4094	0.0007	0.0012
336	0.4052	0.4052	0.4071	0.4053	0.4053	0.4056	0.0015	0.0004
504	0.4005	0.4043	0.4023	0.4023	0.4023	0.4023	0.0020	0.0018
840	0.4033	0.4013	0.4013	0.4013	0.3976	0.4010	0.0023	0.0034
1176	0.4013	0.3995	0.4013	0.3994	0.3994	0.4002	0.0011	0.0008

ตารางที่ ข.13 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 97.5 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.5026	0.5102	0.5233	0.5084	0.5046	0.5098	0.0135	0.0072
48	0.5034	0.5090	0.5109	0.5110	0.5129	0.5094	0.0035	0.0060
72	0.5186	0.5073	0.5072	0.5015	0.5072	0.5084	0.0102	0.0069
96	0.5057	0.5057	0.5076	0.5077	0.5114	0.5076	0.0038	0.0019
120	0.5018	0.5076	0.4999	0.5076	0.5169	0.5068	0.0101	0.0069
144	0.5009	0.5085	0.5029	0.5085	0.5046	0.5051	0.0034	0.0042
168	0.5063	0.5045	0.5083	0.5120	0.4890	0.5041	0.0080	0.0150
336	0.5016	0.5035	0.5015	0.4996	0.5054	0.5023	0.0031	0.0027
504	0.5042	0.5040	0.5003	0.5003	0.4964	0.5011	0.0032	0.0046
840	0.4995	0.4899	0.4957	0.5015	0.5129	0.4999	0.0130	0.0100
1176	0.4976	0.5015	0.4996	0.5015	0.4977	0.4996	0.0019	0.0020

ตารางที่ ข.14 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 130 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4691	0.4755	0.4812	0.4812	0.4695	0.4753	0.0059	0.0062
48	0.4716	0.4756	0.4756	0.4776	0.4716	0.4744	0.0032	0.0028
72	0.4760	0.4677	0.4763	0.4700	0.4737	0.4728	0.0036	0.0050
96	0.4680	0.4717	0.4718	0.4736	0.4723	0.4715	0.0021	0.0035
120	0.4687	0.4730	0.4712	0.4712	0.4712	0.4711	0.0019	0.0024
144	0.4683	0.4724	0.4723	0.4703	0.4683	0.4703	0.0021	0.0020
168	0.4696	0.4696	0.4696	0.4696	0.4676	0.4692	0.0004	0.0016
336	0.4625	0.4686	0.4665	0.4665	0.4685	0.4665	0.0021	0.0040
504	0.4638	0.4738	0.4638	0.4658	0.4596	0.4654	0.0084	0.0058
840	0.4621	0.4641	0.4662	0.4641	0.4662	0.4645	0.0017	0.0024
1176	0.4638	0.4639	0.4639	0.4659	0.4599	0.4634	0.0024	0.0036

ตารางที่ ข.15 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 162.5 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4770	0.4809	0.4848	0.4809	0.4769	0.4801	0.0047	0.0032
48	0.4778	0.4778	0.4797	0.4779	0.4779	0.4782	0.0015	0.0004
72	0.4728	0.4747	0.4769	0.4768	0.4789	0.4760	0.0029	0.0032
96	0.4721	0.4761	0.4761	0.4702	0.4761	0.4741	0.0020	0.0039
120	0.4707	0.4748	0.4747	0.4727	0.4707	0.4727	0.0021	0.0020
144	0.4714	0.4714	0.4714	0.4714	0.4694	0.4710	0.0004	0.0016
168	0.4657	0.4718	0.4697	0.4697	0.4717	0.4697	0.0021	0.0040
336	0.4652	0.4672	0.4693	0.4672	0.4693	0.4676	0.0017	0.0024
504	0.4655	0.4656	0.4656	0.4676	0.4616	0.4652	0.0024	0.0036
840	0.4711	0.4547	0.4608	0.4589	0.4650	0.4621	0.0090	0.0074
1176	0.4541	0.4623	0.4624	0.4623	0.4622	0.4606	0.0017	0.0066

ตารางที่ ข.16 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 195 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.5242	0.5279	0.5261	0.5242	0.4924	0.5189	0.0089	0.0266
48	0.5145	0.5128	0.5147	0.5183	0.5145	0.5150	0.0033	0.0022
72	0.5201	0.5165	0.5014	0.5071	0.5109	0.5112	0.0089	0.0098
96	0.5110	0.5035	0.5072	0.5091	0.5110	0.5084	0.0026	0.0049
120	0.5044	0.5120	0.5044	0.5044	0.5024	0.5055	0.0065	0.0031
144	0.5026	0.5026	0.5063	0.5044	0.5063	0.5044	0.0019	0.0018
168	0.4832	0.5046	0.5122	0.5084	0.5064	0.5030	0.0092	0.0198
336	0.5239	0.5239	0.4795	0.4817	0.4776	0.4973	0.0266	0.0197
504	0.4958	0.4958	0.5035	0.4918	0.4919	0.4958	0.0077	0.0040
840	0.4942	0.4932	0.4928	0.4984	0.4908	0.4939	0.0045	0.0031
1176	0.4828	0.4928	0.4948	0.4947	0.4967	0.4924	0.0043	0.0096

ตารางที่ ข.17 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 227.5 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4517	0.4599	0.4600	0.4599	0.4598	0.4583	0.0017	0.0066
48	0.4629	0.4568	0.4441	0.4441	0.4567	0.4529	0.0100	0.0088
72	0.4468	0.4468	0.4530	0.4489	0.4489	0.4489	0.0041	0.0021
96	0.4531	0.4447	0.4425	0.4404	0.4426	0.4447	0.0084	0.0043
120	0.4404	0.4404	0.4426	0.4468	0.4405	0.4422	0.0047	0.0017
144	0.4403	0.4402	0.4381	0.4424	0.4424	0.4407	0.0017	0.0026
168	0.4475	0.4303	0.4367	0.4431	0.4368	0.4389	0.0086	0.0086
336	0.4216	0.4237	0.4431	0.4472	0.4452	0.4362	0.0110	0.0146
504	0.4292	0.4358	0.4401	0.4250	0.4358	0.4332	0.0069	0.0082
840	0.4305	0.4284	0.4306	0.4348	0.4306	0.4310	0.0038	0.0026
1176	0.4324	0.4302	0.4279	0.4257	0.4301	0.4292	0.0031	0.0036

ตารางที่ ข.18 ปัจจัยคู่ควบเชิงกลไฟฟ้าด้านความหนาหลังอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 260 °C

ครั้งที่	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน	
เวลา (hr)	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	k_t	สูงสุด	ต่ำสุด
24	0.4503	0.4503	0.4565	0.4524	0.4524	0.4524	0.0041	0.0021
48	0.4428	0.4428	0.4450	0.4492	0.4429	0.4445	0.0047	0.0017
72	0.4393	0.4394	0.4371	0.4393	0.4351	0.4380	0.0014	0.0029
96	0.4197	0.4218	0.4412	0.4453	0.4433	0.4343	0.0110	0.0146
120	0.4282	0.4348	0.4391	0.4240	0.4348	0.4322	0.0069	0.0082
144	0.4305	0.4284	0.4306	0.4348	0.4306	0.4310	0.0038	0.0026
168	0.4262	0.4283	0.4261	0.4283	0.4283	0.4274	0.0009	0.0013
336	0.4226	0.4226	0.4248	0.4228	0.4227	0.4231	0.0017	0.0005
504	0.4171	0.4215	0.4192	0.4192	0.4192	0.4193	0.0023	0.0021
840	0.4204	0.4181	0.4181	0.4181	0.4137	0.4177	0.0027	0.0040
1176	0.4183	0.4161	0.4183	0.4161	0.4161	0.4170	0.0013	0.0009

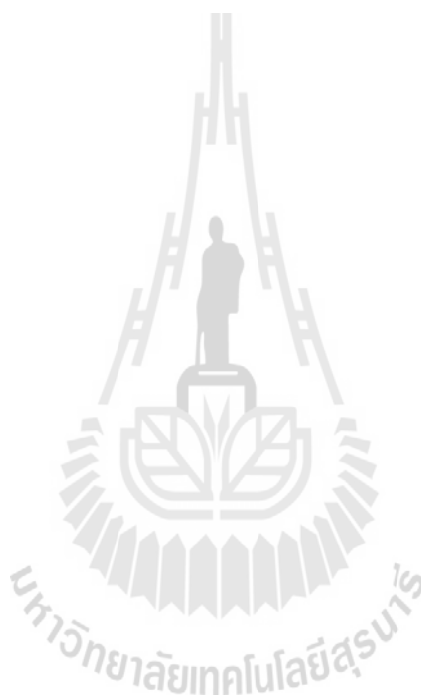
ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Asawin Phuetthonglang, Boonruang Marungsri, Anant Oonsivilai, Puripat Kantha, Soodkhet Pojprapai and Rattikorn Yimnirun, Effect of Heat Treatment on Aging Degradation of the Piezoelectric Properties of Lead Zirconate Titanate., **Integrated Ferroelectrics**, 2013, 149:75-82.



Effect of Heat Treatment on Aging Degradation of the Piezoelectric Properties of Lead Zirconate Titanate

ASAWIN PHUETTHONGLANG,^{1,4}
 BOONRUANG MARUNGSRI,^{1,4} ANANT OONSIVILAI,^{1,4}
 PURIPAT KANTHA,^{2,4} RATTIKORN YIMNIRUN,^{3,4}
 AND SOODKHET POJPRAPAI^{2,4,*}

¹School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

²School of Ceramic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

³School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology and NANOTECH-SUT Center of Excellence on Advanced Functional Nanomaterials, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

⁴Smart Materials and Intelligent System Research Unit, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

The aging degradation of the piezoelectric properties of lead zirconate titanate (PZT) was investigated at different heat treatment temperatures (30 to 80% of Curie temperature (T_C)). The aging degradation behavior was represented by the decrease of piezoelectric charge coefficient (d_{33}) and electromechanical coupling factor (k). The results showed that the degree of aging degradation of piezoelectric properties increased with increasing heat treatment temperature. The aging degradation was more pronounced when the heat treatment temperature was greater than 50% of T_C . These results can be applied to predict the aging rate of electronic devices containing a PZT component.

Keywords PZT; piezoelectric ceramic; aging degradation; temperature effect

1. Introduction

PZT demonstrates the piezoelectric effect by transforming mechanical energy to electrical energy and vice versa. PZT ceramic is an attractive material for applications such as actuators, transducers and sensors. In the assembly process, PZT ceramics and electronics device are fabricated together. This process, which requires heat, causes aging degradation of the piezoelectric properties and affects performance of the material [1–3].

Piezoelectric aging is a phenomenon that describes the degradation of piezoelectric properties as a function of time represented by exponential decay function. As for other

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

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

characteristic of piezoelectric materials, aging depends on material type, processing, poling conditions and heat treatment [4–5]. Many works have been conducted to elucidate the aging phenomena in PZT ceramics. In applications, operating PZT devices such as soft PZT at temperatures near the Curie temperature is not recommended because this can affect the properties of the material due to thermal aging. The aging behavior can be observed by introducing time-dependent curve of stretched exponential decay type [6–9].

This paper presents an investigation of the heat treatment degradation of soft PZT ceramics. The selected temperatures are 30, 40, 50, 60, 70 and 80% of the Curie temperature of the sample which has the Curie temperature of 360°C [10]. The piezoelectric properties of the PZT ceramics such as d_{33} and k , measured after accelerated aging by heat treatment, are compared with the initial data.

II. Experiment

The material used in this work is a soft PZT ceramic (PZT-5A type). The diameter of the ceramic is 10 mm with the thickness of 1 mm. Both surfaces of the disk samples were coated with silver paste as electrodes. Samples were poled at 100°C and the DC electric field was kept constant over the whole poling process at 3kV/mm. The sample was heated up to the desired temperature in a silicone oil bath under application of the electric field. The DC electric field was increased at a constant rate of about 10 V/s until it reached 3 kV/mm. Then the sample was held under these conditions for 10 min. During the last minute, the sample was cooled down, with the DC electric field still applied, to room temperature and the DC electric field then removed. The heat treatment temperatures were 30, 40, 50, 60, 70 and 80% of the Curie temperature of the samples with a dwell of 10 min at each desired temperature.

The piezoelectric properties of the samples such as d_{33} , k_p , k_{31} and aging rate were measured 24 hours at room temperatures after heat treatment. After that, the measurement was repeated every 1,000 hours. The d_{33} of the samples was measured by a d_{33} -meter (APC product inc. S5865). The resonance and anti-resonance frequency of the samples was measured by using an Impedance/Gain-Phase Analyzer. ZPolt-Impedance software was used to calculate resonance frequency and anti-resonance frequency of the samples. To detect f_m and f_n , the range of scanning frequency of 1 kHz to 1 MHz was selected as rough measurement for the samples [6]. After first scanning, it was found that the first order resonance and anti-resonance was in the range of 1.5 kHz to 3 kHz. Second scanning was performed at the frequency range of .5 kHz to 3 kHz. Then the first order resonance and anti-resonance frequency were recorded. The resonance and anti-resonance frequencies are approximately equal frequencies at the minimum (f_m) and maximum impedance (f_n), respectively as shown in Figure 1 [11].

III. Results and Discussion

Twenty-four hours after heat treatment, the d_{33} was measured at room temperature and the data of d_{33} were normalized so that the initial value of the ratio had a value of one. Figure 2 illustrates the dependence of normalized d_{33} on the time of PZT samples heat treatment at different temperatures. As shown in the figure, the normalized d_{33} decreased with increasing heat treatment temperature. A linear-logarithmic time law of normalized d_{33} was observed. The form of the linear-logarithmic time-dependent curve of stretched

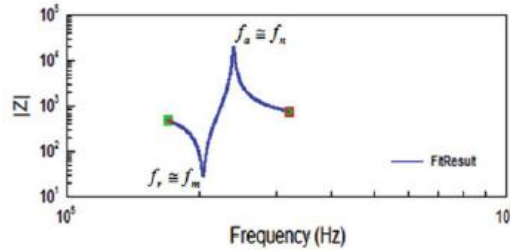


Figure 1. The first order resonance and anti-resonance frequencies. (Color figure available online.)

exponential law can be expressed as: [6–7]

$$d = d_{\infty} + d_1 \exp \left[- (t/\tau)^{\nu} \right] \quad (1)$$

where d_{∞} is the normalized value constant, d_1 is the part of the sample constant varying with time, t is the aging time, τ is the characteristic relaxation time and ν is a stretching exponent.

The electromechanical coupling factors (k_p and k_{31}) were determined from the values of resonance and anti-resonance frequencies, according to [11], k_p and k_{31} can be calculated by using the following equation:

$$k_p \cong \sqrt{\left[(2.51(f_n - f_m)/f_n) - ((f_n - f_m)/f_n)^2 \right]} \quad (2)$$

$$k_{31}^2 = \frac{(\pi/2) (f_n/f_m) \tan [(\pi/2) ((f_n - f_m)/f_m)]}{1 + (\pi/2) (f_n/f_m) \tan [(\pi/2) ((f_n - f_m)/f_m)]} \quad (3)$$

where k_p is the planar electromechanical coupling factor, k_{31} is the transverse electromechanical coupling factor, f_m is the frequency at the impedance minimum; also called

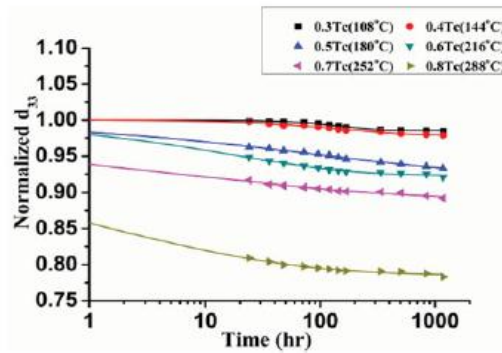


Figure 2. Dependence of normalized d_{33} (at room temperature) on the time of PZT ceramic samples heat treatment at different temperatures. (Color figure available online.)

78/[262]

A. Phuethonglang et al.

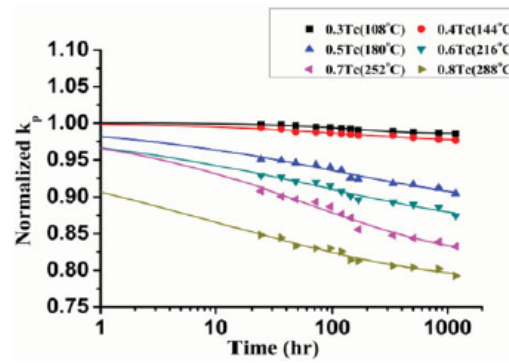


Figure 3. Dependence of normalized k_p (at room temperature) on the time of PZT ceramic samples heat treatment at different temperatures. (Color figure available online.)

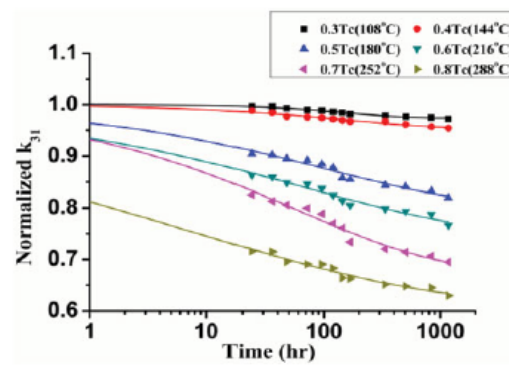


Figure 4. Dependence of normalized k_{31} (at room temperature) on the time of PZT ceramic samples heat treatment at different temperatures. (Color figure available online.)

Table 1
Fitting parameters of normalized d_{33} of PZT ceramic samples heat treatment at different temperatures

Temp. (°C)	%T _C	d_{∞}	d_1	d_1/d_{∞}	τ (hr)	ν
108	0.3	0.9845	0.0159	0.0161	232.07	0.9846
144	0.4	0.9791	0.0213	0.0217	167.99	0.7922
180	0.5	0.9238	0.0761	0.0824	98.81	0.3001
216	0.6	0.9231	0.0768	0.0832	17.86	0.4128
252	0.7	0.8883	0.1130	0.1273	3.09	0.1824
288	0.8	0.7851	0.2162	0.2753	0.67	0.2253

Table 2
Fitting parameters of normalized k_p of PZT ceramic samples heat treatment at different temperatures

Temp. (°C)	%T _C	d_{∞}	d_1	d_1/d_{∞}	τ (hr)	ν
108	0.3	0.9865	0.0138	0.0141	168.63	0.8789
144	0.4	0.9761	0.0241	0.0247	146.80	0.5195
180	0.5	0.8959	0.1039	0.1159	110.22	0.3515
216	0.6	0.8623	0.1376	0.1596	82.33	0.2897
252	0.7	0.8213	0.1783	0.2171	70.97	0.3675
288	0.8	0.7853	0.2151	0.2739	10.56	0.2378

resonance frequency and f_n is the frequency at the impedance maximum; also called anti-resonance frequency.

The data of k_p and k_{31} were normalized so that the initial value of the ratio is equal to 1. Figures 3 and 4 illustrate the dependence of normalized k_p and k_{31} as a function of time at different temperature. As shown in the figures, the normalized k_p and k_{31} decreased with increasing heat treatment temperature.

Figures 2, 3 and 4 show the experimental results of the normalized d_{33} , k_p and k_{31} (at room temperature) with respect to the aging time of PZT ceramic samples after heat treatment at different temperature. The fitting equation 1 is presented as solid lines. As shown in the figure, the calculations fit very well with the experimental data. The fitting parameters in Figures 2, 3 and 4 are listed in Table 1, 2 and 3, respectively. The τ reflects the aging rate and ν is the fitting parameter of the linear logarithmic function. As the different temperature ν varies in the range from 0.1 to 1. Evidently, as the temperature increase, the τ is reduced while the ratio of (d_1/d_{∞}) increases significantly, reflecting an increase in aging rate.

The aging rate of a PZT ceramic is represented by the change of certain sample constants with time. The aging of samples can be expressed by a logarithmic function with time, as following equation [4]:

$$\text{aging rate} = \frac{1}{\log(t_2) - \log(t_1)} \left(\frac{p_2 - p_1}{p_1} \right) \quad (4)$$

Table 3
Fitting parameters of normalized k_{31} of PZT ceramic samples heat treatment at different temperatures

Temp. (°C)	%T _C	d_{∞}	d_1	d_1/d_{∞}	τ (hr)	ν
108	0.3	0.9734	0.0273	0.0280	166.51	0.8809
144	0.4	0.9532	0.0473	0.0496	143.77	0.5201
180	0.5	0.8036	0.1961	0.2441	101.20	0.3463
216	0.6	0.7465	0.2535	0.3396	67.68	0.2870
252	0.7	0.6763	0.3232	0.4779	59.79	0.3555
288	0.8	0.6111	0.3911	0.6399	7.18	0.2057

80/[264]

A. Phuethonglang et al.

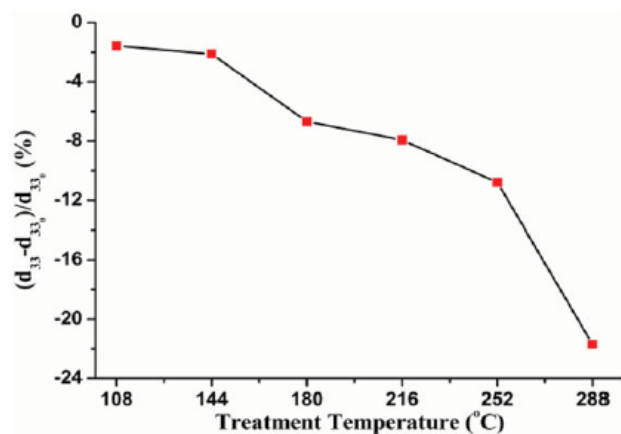


Figure 5. Relative differences of d_{33} as a function of heat treatment temperature. (Color figure available online.)

where, t_1 and t_2 are the time period after heat treatment, p_1 and p_2 are the measured parameters, such as the piezoelectric coefficients, at times t_1 and t_2 respectively.

Figures 5, 6 and 7 show the variation of aging rates of d_{33} , k_p and k_{31} of PZT ceramic samples, respectively. The aging degradation was more pronounced when the heat treatment temperature was higher than a half of the Curie temperature where d_{33} , k_p and k_{31} of the ceramic samples significantly decreased more than that of samples treated at low temperature (less than half of the Curie temperature).

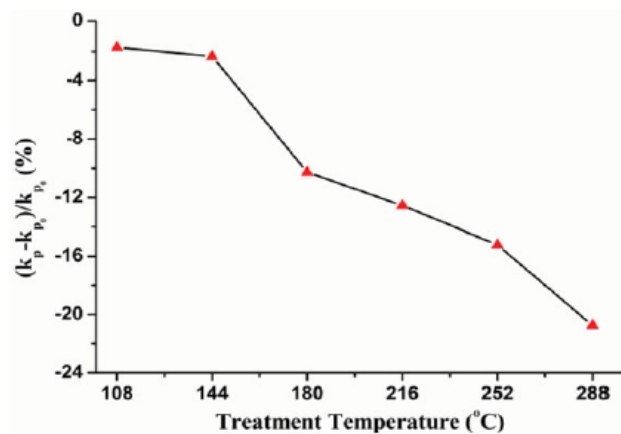


Figure 6. Relative differences of k_p as a function of heat treatment temperature. (Color figure available online.)

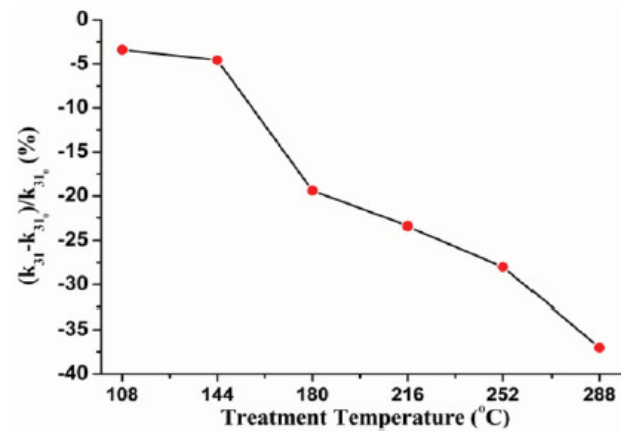


Figure 7. Relative differences of k_{31} as a function of heat treatment temperature. (Color figure available online.)

IV. Conclusion

The aging degradation of the piezoelectric properties of soft PZT ceramics at different temperatures was carried out with increasing heat treatment temperature (30, 40, 50, 60, 70 and 80% of the Curie temperature). Very weak aging in the d_{33} and k occurred for temperature of heat treatment less than 50% T_C . Above this, the aging in piezoelectric properties becomes increasingly severe. The aging rate increased with increasing heat treatment temperature. It was found that the aging curve is following the linear logarithmic time law.

Acknowledgments

This project is supported by Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), Nakhon Ratchasima, Thailand. S. Pojprapai would like to thank Assoc. Prof. Dr. Jurassri and Dr. Veerayuth Lorprayoon for their kind support.

References

1. G. Xu, X. Wang, D. Yang, Z. Duan, and C. Feng, Peculiar temperature aging effects on the piezoelectric constant of $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{PbTiO}_3$ single crystal near the morphotropic phase boundary. *Appl. Phys. Lett.* **86**, 032902–1–032902–3 (2005).
2. D. A. DeAngelis and D. C. Schalcosky, The effect of PZT8 piezoelectric crystal aging on mechanical and electrical resonances in ultrasonic transducers. *IEEE Ultrason Symp.* 1935–1938 (2006).
3. M. Alguero, F. Guiu, and M. J. Reece, Degradation of PZT-4D hard piezoceramics under moderate heating. *J. Eur. Ceram. Soc.* **20**, 2705–2711 (2000).
4. A. Barzegar, R. Bagheri, and A. K. Taheri, Aging of piezoelectric composite transducers. *J. Appl. Phys.* **89**, 2322–2326 (2001).
5. J. P. deMedeiros, M. H. Lente, and J. A. Eiras, Influence of poling temperature on aging and thermal stability of PZT ceramics. *IEEE Ultrason Symp.* **2**, 955–958 (1994).

6. J. H. Koh, S. J. Jeong, M. S. Ha, and J. S. Song, Aging of piezoelectric properties in Pb(MgNb)O₃-Pb(ZrTi)O₃ multilayer ceramic actuators. *J. Appl. Phys.* **96**, 544–548 (2004).
7. Q. M. Zhang, J. Zhao, and L. E. Cross, Aging of the dielectric and piezoelectric properties of relaxor ferroelectric lead magnesium niobate-lead titanate in the electric field biased state. *J. Appl. Phys.* **79**, 3181–3187 (1996).
8. S. Priya, J. Ryu, K. Uchino, and D. Viehland, Mechanical aging behavior of oriented Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃ and Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃ single crystals. *Appl. Phys. Lett.* **79**, 2624–2626 (2001).
9. D. Xue, J. Gao, L. Zhang, H. Bao, W. Liu, C. Zhou, and X. Ren, Aging effect in paraelectric state of ferroelectrics: Implication for a microscopic explanation of ferroelectric deaging. *Appl. Phys. Lett.* **94**, 082902–1–082902–3 (2009).
10. <http://www.piezotechnologies.com/Ceramics/quick-selection-chart.aspx>
11. APC International Ltd., *Piezoelectric Ceramics : Principles and Applications*. USA: Mackeyville; 1900.

ประวัติผู้เขียน

นายอัศวิน พืชทองกลาง เกิดเมื่อวันที่ 10 กันยายน พ.ศ. 2530 ที่อำเภอจักราช จังหวัดนครราชสีมา เริ่มศึกษาระดับอนุบาลถึงประถมศึกษาที่โรงเรียนวัดเหมสูง อำเภอจักราช จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนจักราชวิทยา อำเภอจักราช จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2548 ในภายหลังได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2552 จากนั้นจึงได้ศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตในกลุ่มวิจัยไฟฟ้ากำลังและพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยระหว่างศึกษาระดับปริญญาโทมีประสบการณ์สอนเป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 2 (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 (4) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง และวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยได้นำประสบการณ์ และความรู้ที่ได้จากการเป็นผู้ช่วยสอน และวิจัยมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี จากการทำวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และความเข้าใจทางด้านการเสื่อมอายุเนื่องจากผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนต่อการเสื่อมอายุของเซรามิก PZT มีผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษาดังรายละเอียดในภาคผนวก ค.