

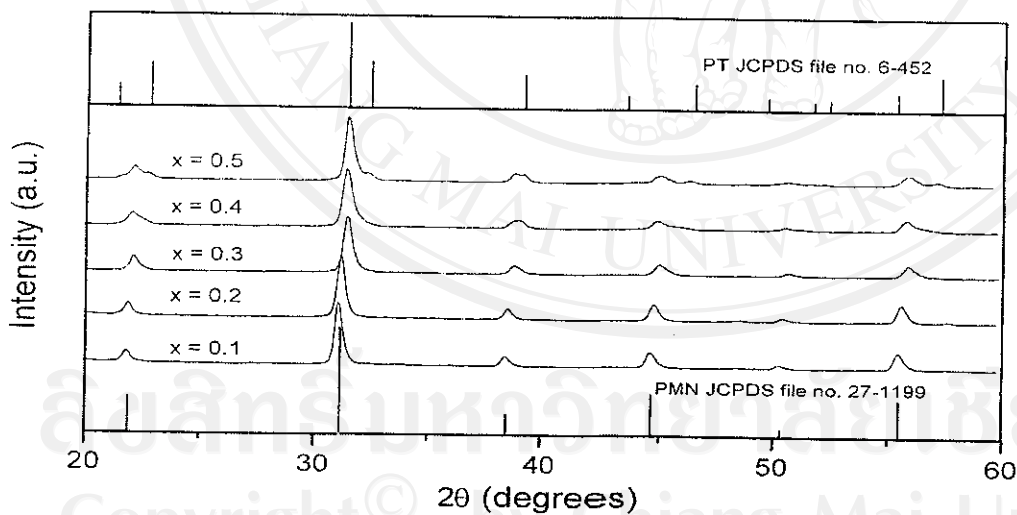
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองการเตรียมสารเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{PMN}-(x)\text{PT}$, $(1-x)\text{PIN}-(x)\text{PT}$ และ $(1-x)\text{PZT}-(x)\text{PZN}$ การตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD สมบัติทางกายภาพ ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความถี่ที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริก และสมบัติไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดียวของเซรามิกในระบบ PMN-PT, PIN-PT และ PZT-PZN โดยใช้เครื่องมืออัดแรงแบบแกนเดียวที่ได้กล่าวในบทที่ 3 รวมทั้งอภิปรายผลตามลำดับ ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการตรวจสอบและวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

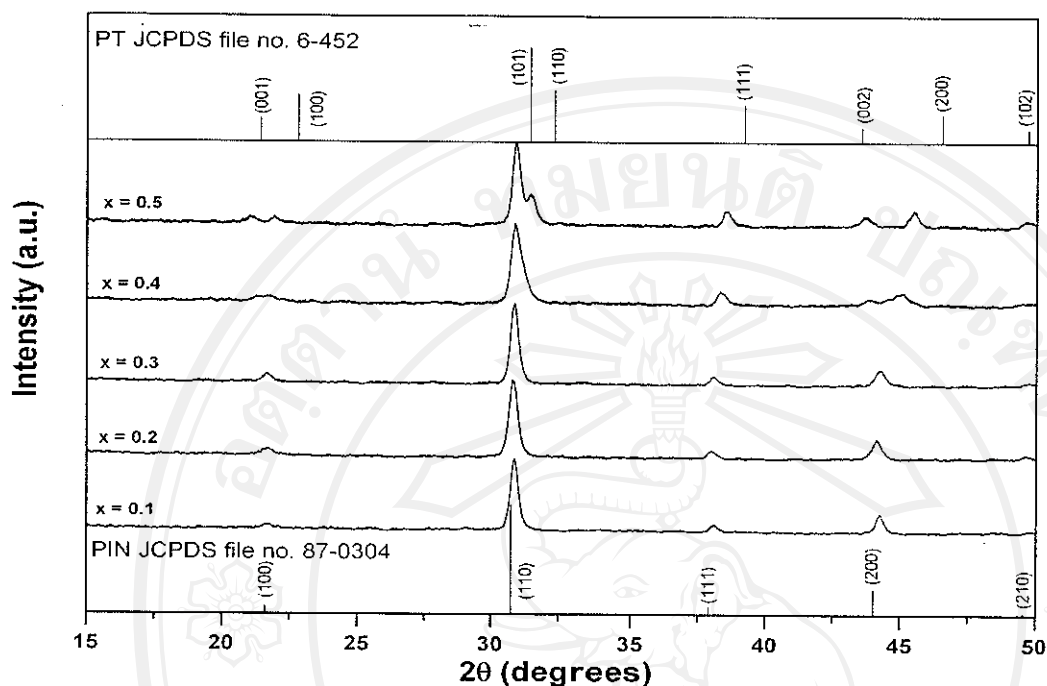
จากการตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเทคนิค XRD ของสารเซรามิกในระบบ $(1-x)\text{PMN}-(x)\text{PT}$, $(1-x)\text{PIN}-(x)\text{PT}$ และ $(1-x)\text{PZT}-(x)\text{PZN}$ ที่เตรียมได้ในแต่ละอัตราส่วนโดยโมล พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก PMN-PT, PIN-PT และ PZT-PZN เป็นดังรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูป 4.1 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก

$(1-x)\text{PMN}-(x)\text{PT}$ ที่อัตราส่วนโดยโมลต่างกัน

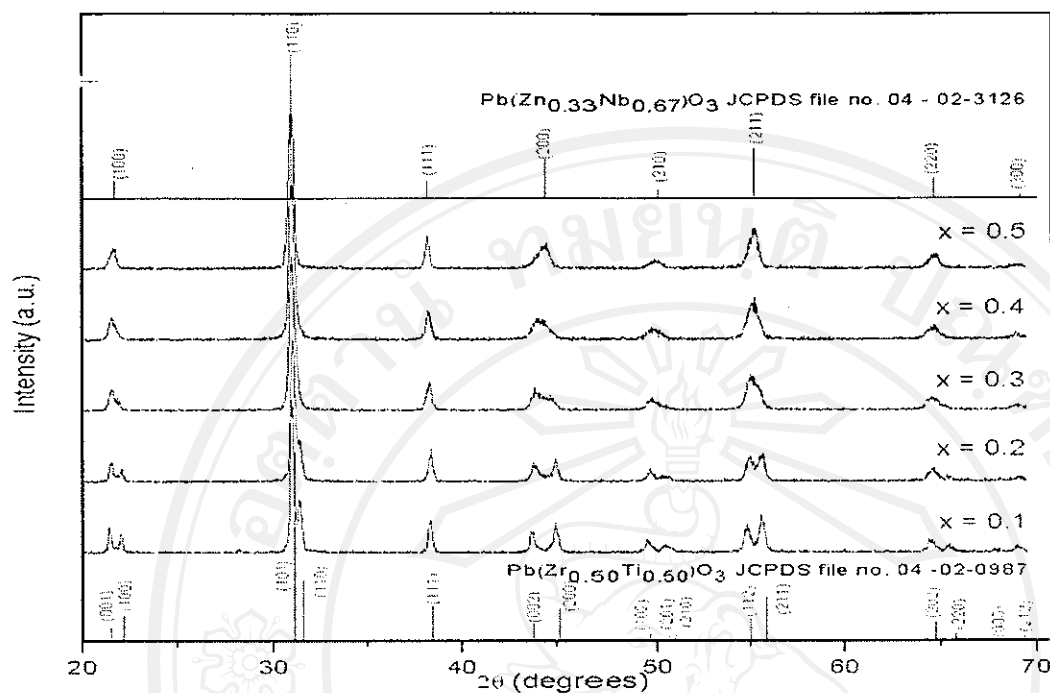
รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สำหรับสารเซรามิกในระบบ PMN-PT จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนผสมกันระหว่างสาร PMN (JCPDS file no. 27-1199) และ สาร PT (JCPDS file no. 6-452) ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยโมล โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เล็กน้อยจาก PMN ไปเป็น PT เมื่อปริมาณของ PT เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ



รูป 4.2 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก
(1-x)PIN-(x)PT ที่อัตราส่วนโดยโมลต่างกัน

สารเซรามิกในระบบ PIN-PT จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของทั้งสาร PIN (JCPDS file no. 87-0304) และ สาร PT (JCPDS file no. 6-452) โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยโมลของสาร PT ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะค่อยๆเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสาร PMN ไปเป็น PT เมื่อปริมาณของ PT เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

สำหรับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในสารเซรามิกระบบ PZN-PZT พบว่าสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสาร PZT (JCPDS file no. 04-02-0987) และ สาร PZN (JCPDS file no. 04-02-3126) โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยโมลของสาร PZN และรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะเปลี่ยนแปลงทีละเล็กทีละน้อยจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสาร PZT ไปเป็น PZN เมื่อเพิ่มปริมาณของ PZN ขึ้น



รูป 4.3 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเซรามิก
(1-x)PZT-(x)PZN ที่อัตราส่วนโดยโมลต่างกัน

4.2 ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของเซรามิก

เมื่อนำเซรามิก PMN-PT, PIN-PT และ PZT-PZN ที่เตรียมได้มาหาค่าความหนาแน่น ผลที่ได้แสดงดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ค่าความหนาแน่นของสารเซรามิก PMN-PT, PIN-PT และ PZT-PZN ที่เตรียมได้

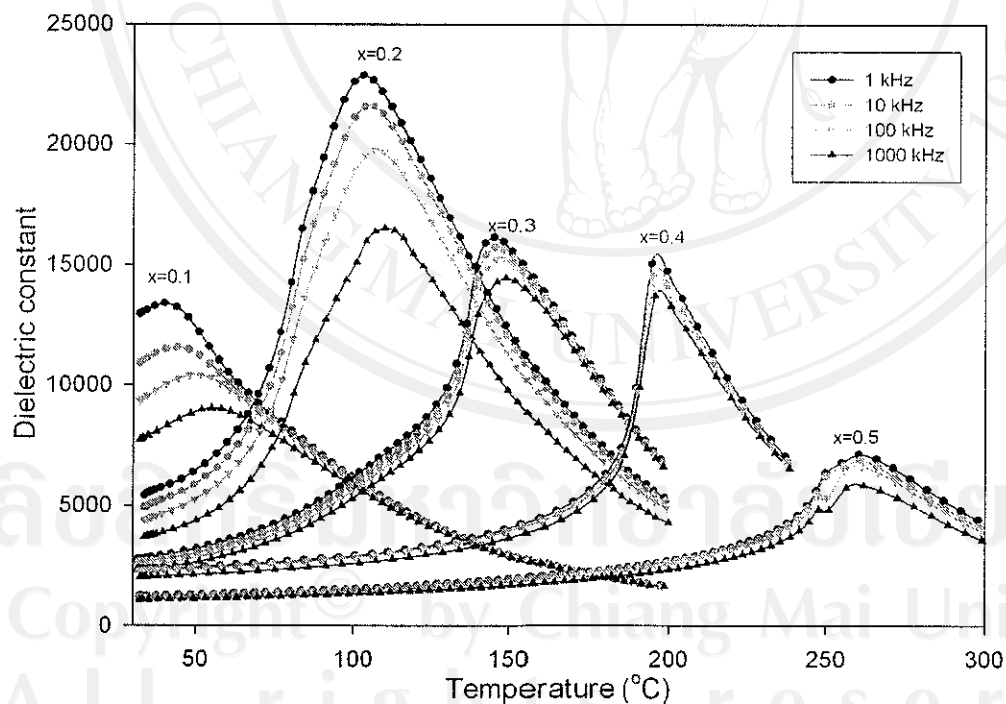
อัตราส่วน	(1-x)PMN-(x)PT	(1-x)PIN-(x)PT	(1-x)PZT-(x)PZN
	ค่าความหนาแน่น (g/cm ³)	ค่าความหนาแน่น (g/cm ³)	ค่าความหนาแน่น (g/cm ³)
X = 0.1	7.98	7.78	6.95
X = 0.2	7.94	7.85	6.34
X = 0.3	7.86	7.81	7.45
X = 0.4	7.80	7.85	7.54
X = 0.5	7.77	7.8	7.75

การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของสารเซรามิก PMN-PT ขึ้นอยู่กับการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอัตราส่วนโดยโมล โดยค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มจาก 7.77 g/cm³ ใน 0.5PMN-0.5PT ไปเป็น 7.98 g/cm³ ใน 0.9PMN-0.1PT ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของ

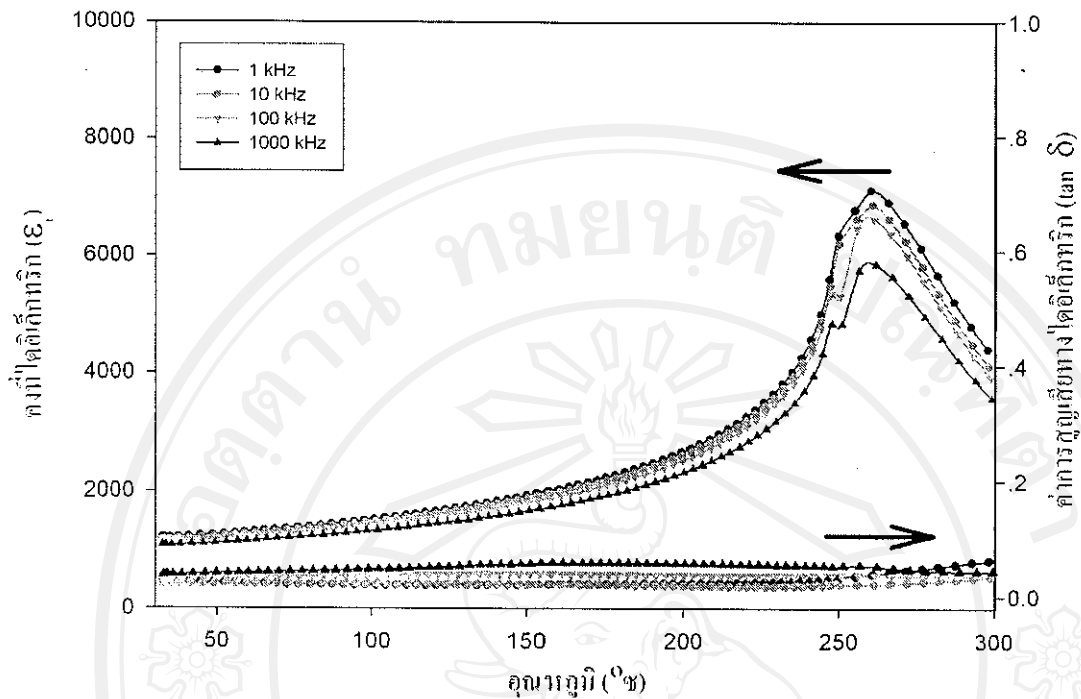
สาร PMN (8.13 g/cm^3) และสาร PT (7.97 g/cm^3) ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของสารเซรามิก PIN-PT ที่เตรียมได้นั้นไม่แน่นอน โดยไม่มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของสาร PIN (8.588 g/cm^3) และสาร PT สำหรับสารเซรามิก PZT-PZN มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นลดลงจาก 7.75 g/cm^3 ใน 0.5PZT-0.5PZN ไปเป็น 6.95 g/cm^3 ใน 0.9PZT-0.1PZN ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของสาร PZT (8.13 g/cm^3) และสาร PZN (7.97 g/cm^3) ยกเว้น 0.8PZT-0.2PZN ซึ่งมีค่าความหนาแน่น 6.34 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุด

4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิและความถี่ของสารเซรามิก PMN-PT

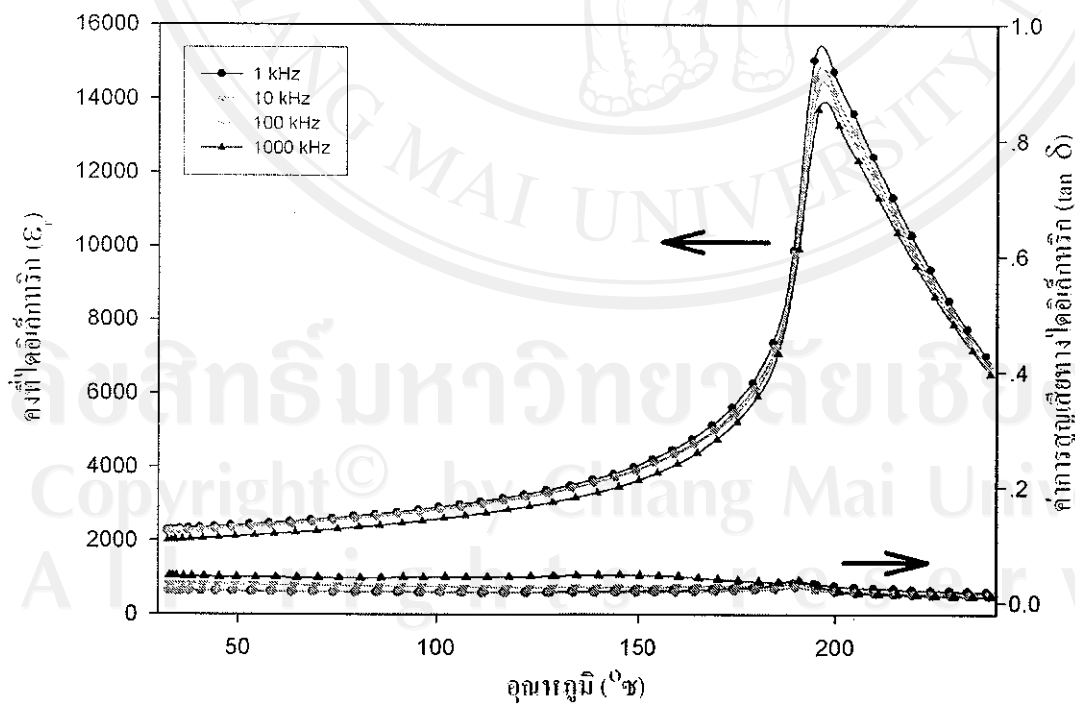
เมื่อนำสารเซรามิก PMN-PT ที่เตรียมได้มาศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิและความถี่ โดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 3 ได้ผลการทดลองดังรูป 4.4 - 4.9



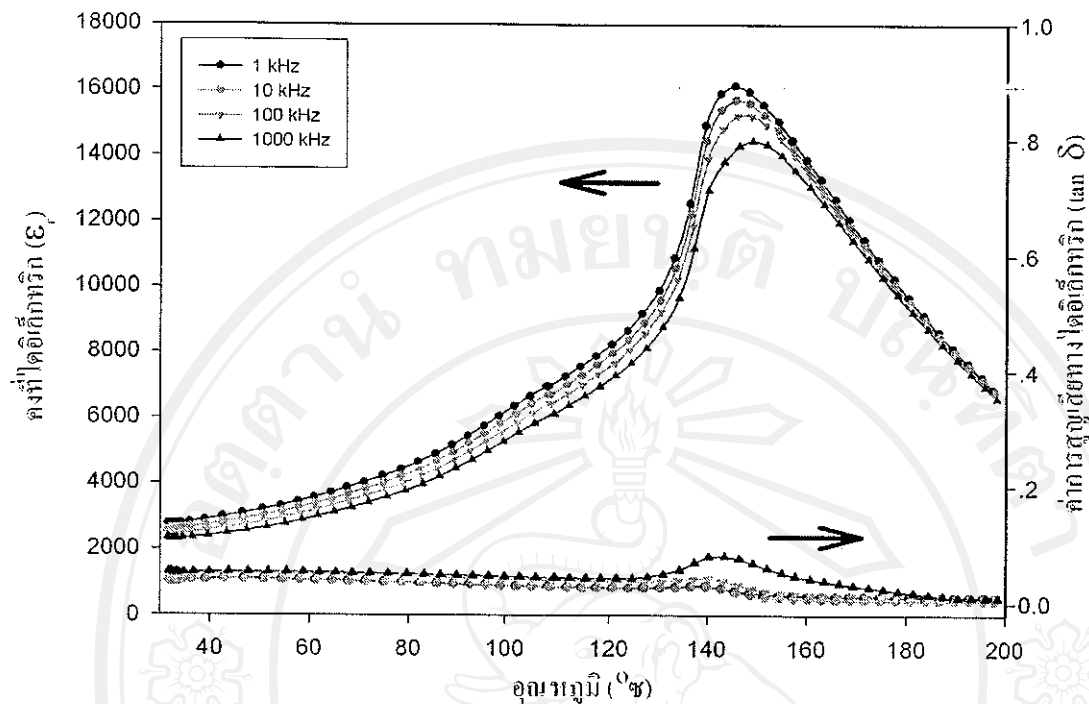
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิและความถี่ของสารเซรามิกในระบบ PMN-PT



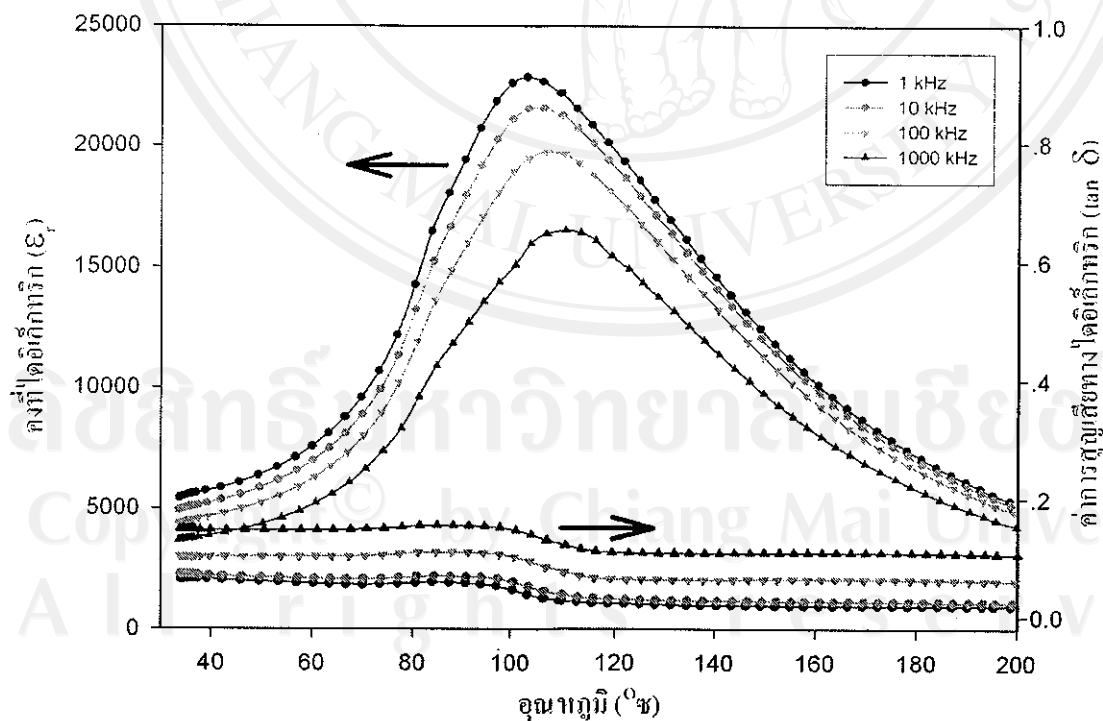
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
กับอุณหภูมิและความถี่ของเซรามิก 0.5PMN-0.5PT



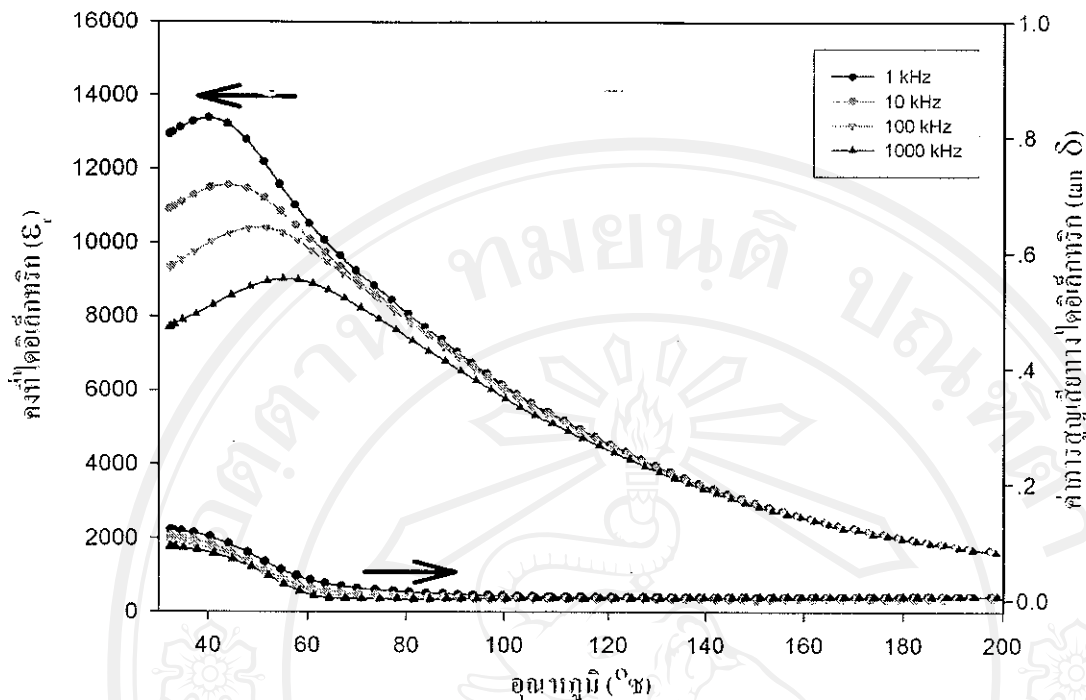
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
กับอุณหภูมิและความถี่ของเซรามิก 0.6PMN-0.4PT



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
กับอุณหภูมิและความถี่ของเซรามิก 0.7PMN-0.3PT



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
กับอุณหภูมิและความถี่ของเซรามิก 0.8PMN-0.2PT



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิและความถี่ของเซรามิก 0.9PMN-0.1PT

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c) จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณของ PT มากขึ้นเนื่องจาก PT มีอุณหภูมิคูรีสูงกว่า (PMN-PT มีอุณหภูมิคูรี 495°C ในขณะที่ PMN มีอุณหภูมิคูรี -10°C) ทั้งนี้การเพิ่มปริมาณของ PT เข้าไปในระบบมากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิคูรีของเซรามิก PMN-PT มีค่าสูงขึ้นโดยที่ T_c (1 kHz) ของ (1-x)PMN-xPT จะมีค่าเป็น 40, 103, 145, 195 และ 260°C เมื่อ $x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ และ 0.5 ตามลำดับ และจะเห็นว่าสมบัติไดอิเล็กทริกของระบบจะเปลี่ยนแปลงจากพฤติกรรมแบบรีแลกเซอร์ใน 0.9PMN-0.1PT ไปเป็นแบบเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบอ่อน (soft ferroelectric)[14] ส่วนค่าจุดสูงสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_{max}) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโดยโมลของ PMN จนถึง 0.8PMN-0.2PT และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ PMN เพิ่มขึ้นเป็น 0.9PMN-0.1PT ค่า ϵ_{max} จะลดลงดังแสดงในตารางที่ 4.2 นอกจากนี้ยังพบว่าเซรามิก PMN-PT ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ PMN มากกว่าจะแสดงลักษณะของสารประเภทรีแลกเซอร์อย่างชัดเจน กล่าวคือมีอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างที่แตกต่างกันมากขึ้นและมีสมบัติไดอิเล็กทริกที่ขึ้นอยู่กับความถี่[14] ทำให้จุดสูงสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีการครอบคลุมช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า (broader peak) เซรามิก PMN-PT ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ PMN น้อยกว่า และที่อุณหภูมิห้องพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PMN โดยที่เซรามิก 0.9PMN-0.1PT มีอุณหภูมิคูรีใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องทำให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

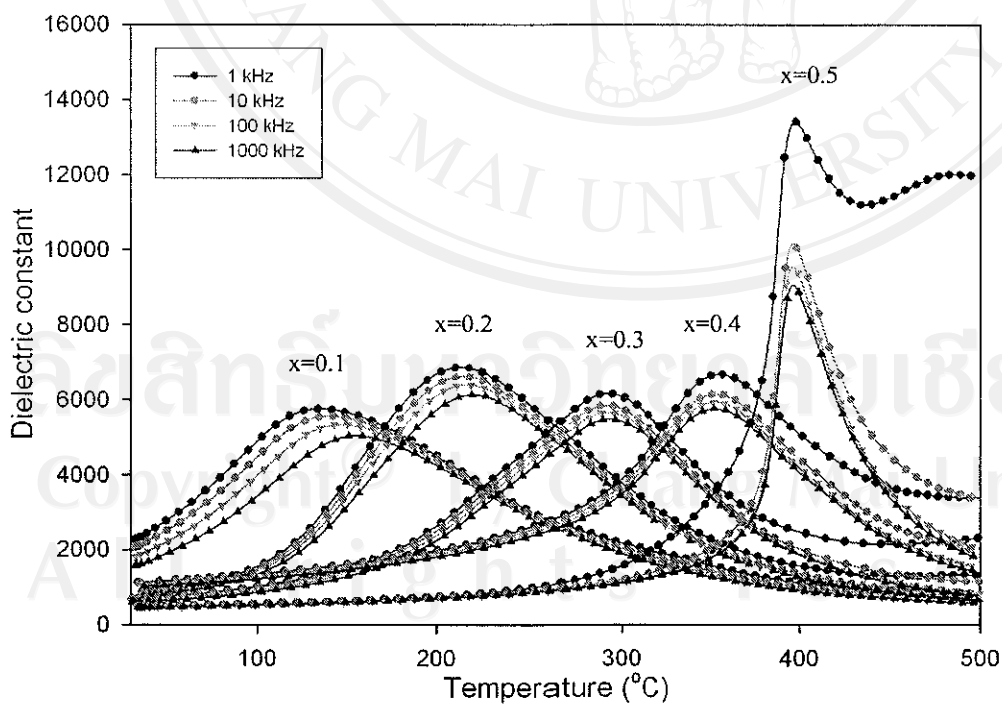
ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) สูงมากซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 13388 ที่อุณหภูมิ 45°C และความถี่ 1 kHz

ตาราง 4.2 สรุปค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารเซรามิก (1-x)PMN-(x)PT ที่ความถี่ 1 kHz

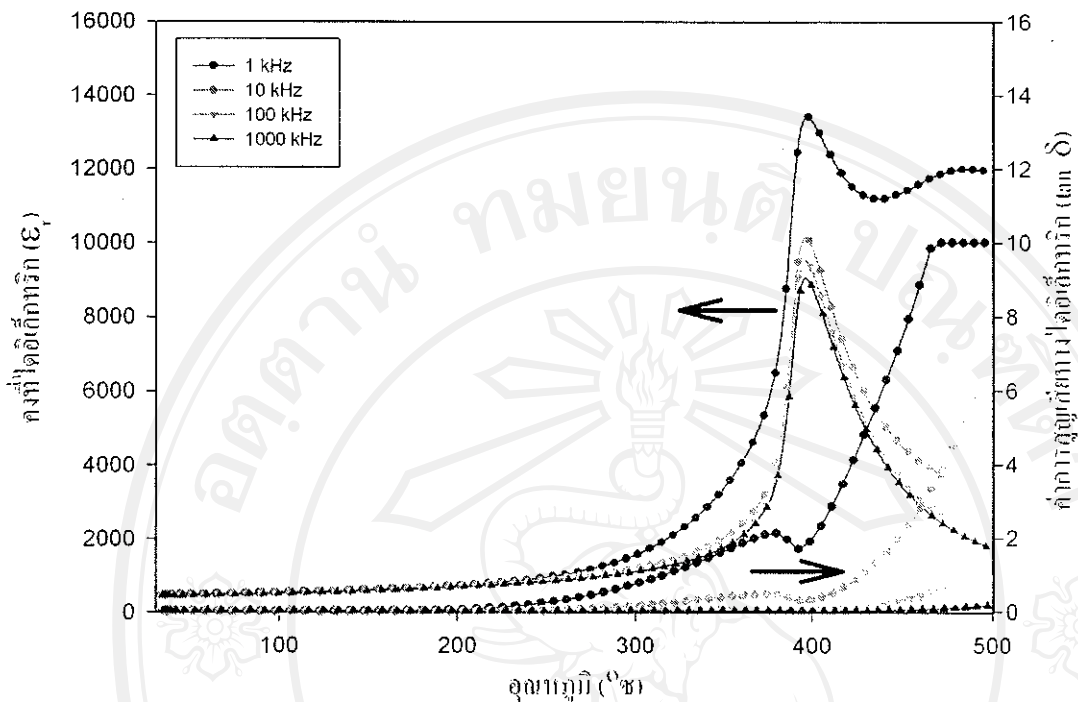
x	T_c	ϵ_{max}	ϵ_{room}
0.1	40	13388	12946
0.2	103	22864	5417
0.3	145	16132	2771
0.4	195	15203	2284
0.5	260	7128	1204

4.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิและความถี่ของสารเซรามิก PIN-PT

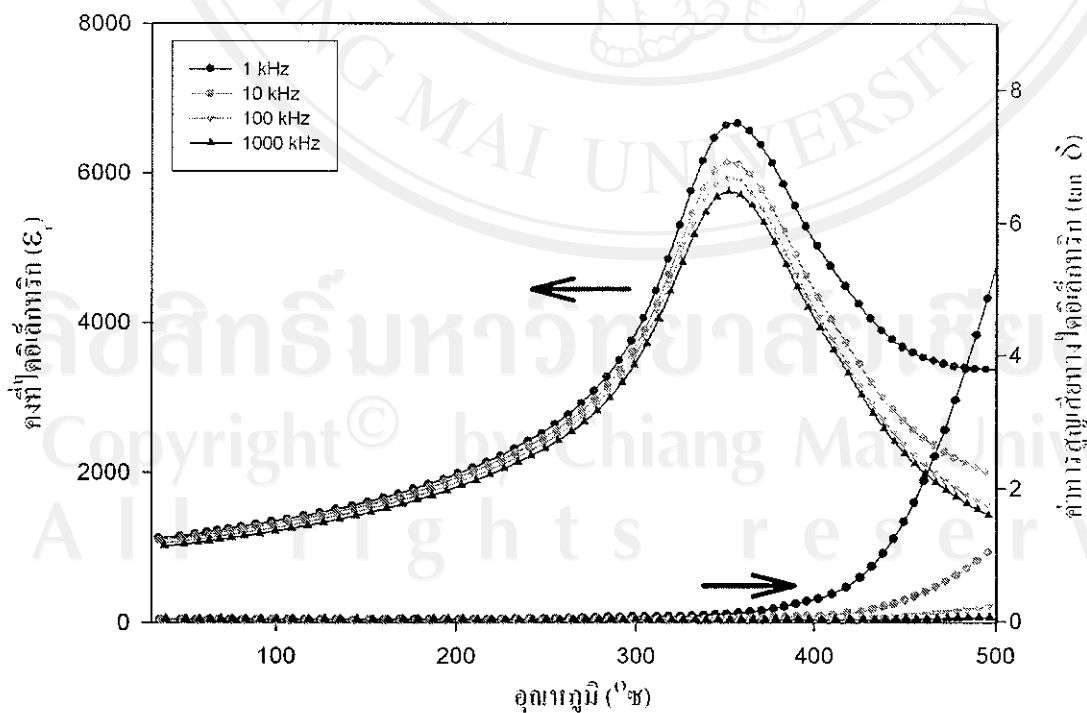
เมื่อนำสารเซรามิก PIN-PT ที่เตรียมได้มาศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กทริก กับ อุณหภูมิและความถี่ ได้ผลการทดลองดังรูป 4.10 - 4.15



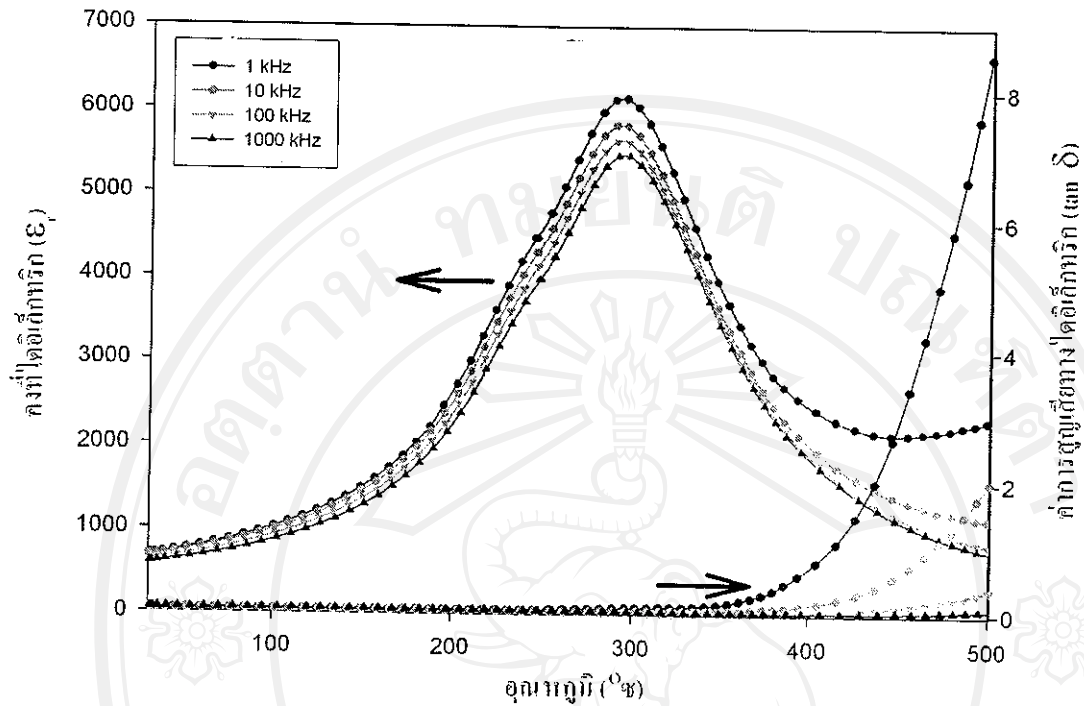
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิและความถี่ของสารเซรามิกในระบบ PIN-PT



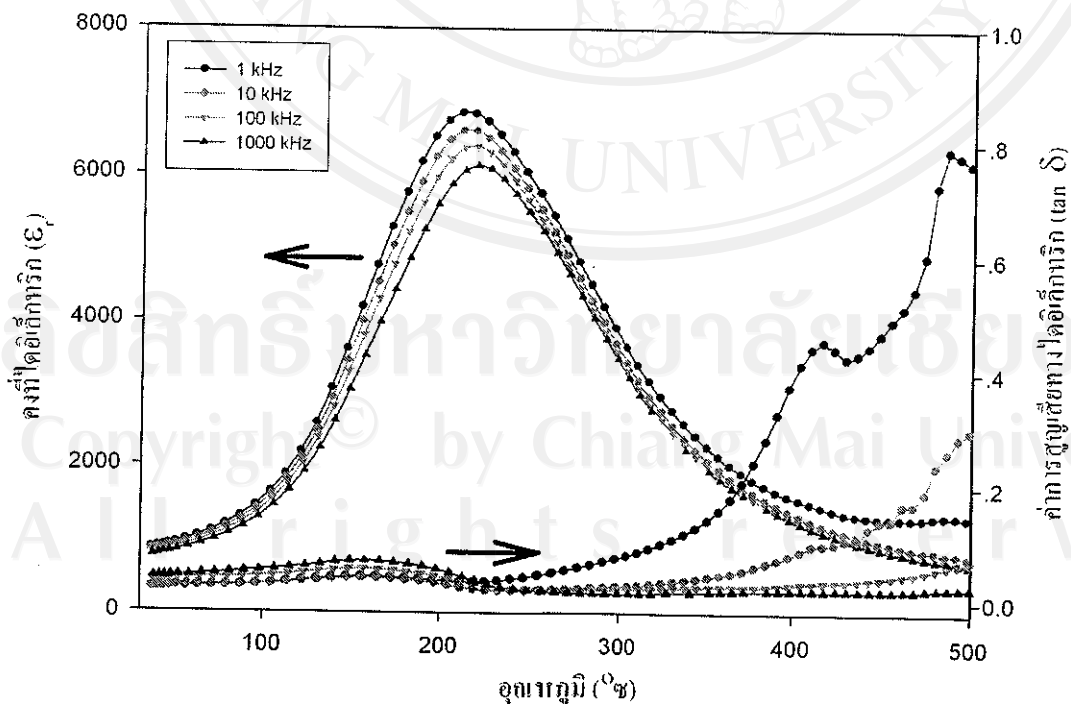
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก
กับอุณหภูมิและความถี่ของเซรามิก 0.5PIN-0.5PT



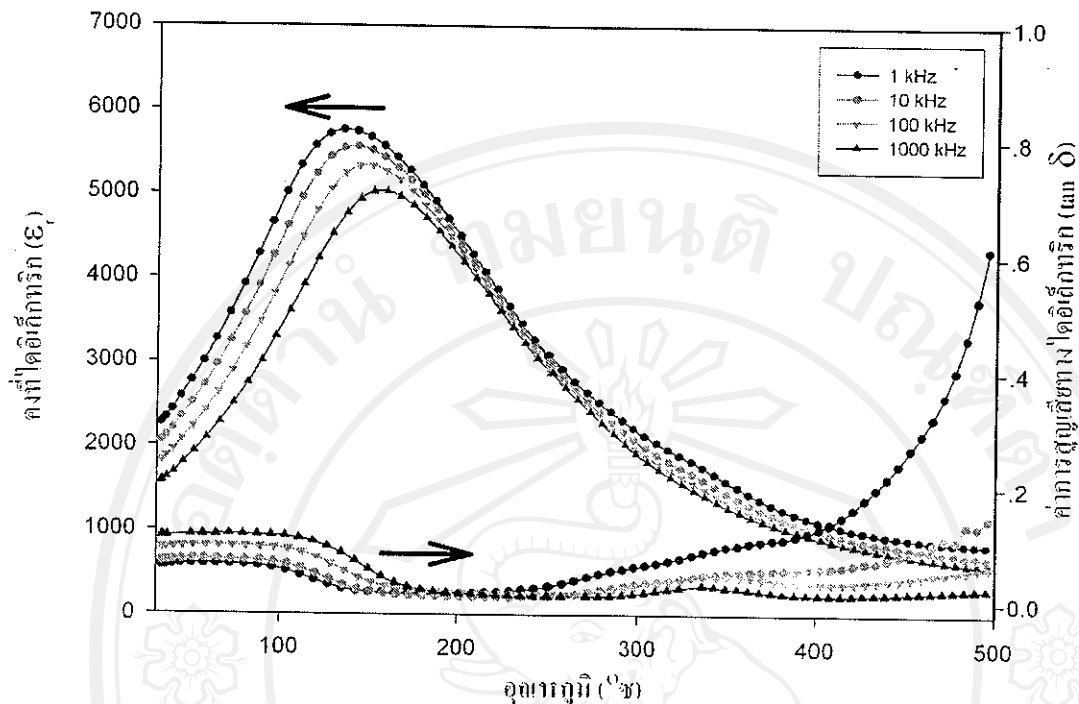
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก
กับอุณหภูมิและความถี่ของเซรามิก 0.6PIN-0.4PT



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
กับอุณหภูมิและความถี่ของเซรามิก 0.7PIN-0.3PT



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
กับอุณหภูมิและความถี่ของเซรามิก 0.8PIN-0.2PT



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก กับอุณหภูมิและความถี่ของเซรามิก 0.9PIN-0.1PT

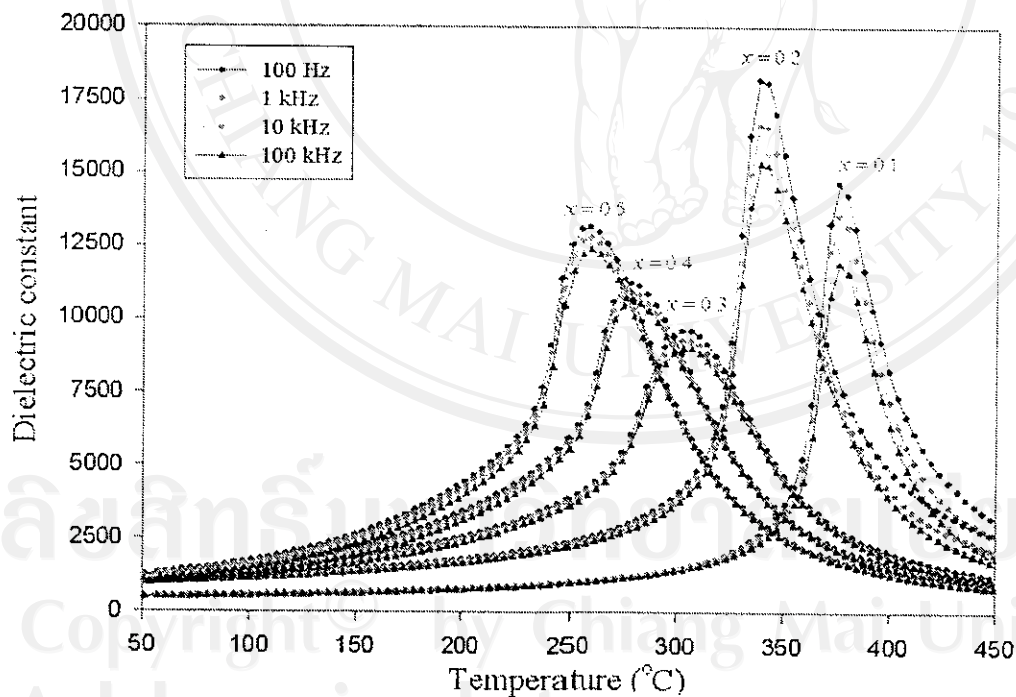
จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีปริมาณของ PT มากขึ้น อุณหภูมิคูรีจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก PT มีอุณหภูมิคูรีสูงกว่า PIN (PT มีอุณหภูมิคูรี 495°C ในขณะที่ PIN มีอุณหภูมิคูรี 66°C) โดยการเพิ่มปริมาณของ PT เข้าไปในระบบมากขึ้น จะทำให้ T_c (1 kHz) ของ (1-x)PIN-xPT มีค่าเป็น 134, 213, 292, 355 และ 397°C เมื่อ $x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ และ 0.5 ตามลำดับ และจะเห็นว่าสมบัติไดอิเล็กตริกของระบบจะแสดงพฤติกรรมแบบรีแลกเซอร์อย่างชัดเจนใน 0.9PIN-0.1PT, 0.8PIN-0.2PT และ 0.7PIN-0.3PT กล่าวคือมีอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างที่แตกต่างกันมากขึ้น และมีสมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นอยู่กับความถี่[14] ซึ่งจุดสูงสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีการครอบคลุมช่วงอุณหภูมิที่กว้าง (broader peak) และเปลี่ยนจะไปแสดงพฤติกรรมเป็นแบบฟิโซอิเล็กตริกเมื่อมีปริมาณของ PT มากขึ้นใน 0.6PIN-0.4PT และ 0.5PIN-0.5PT และที่อุณหภูมิห้องพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกจะลดลงตามปริมาณของ PT ที่เพิ่มขึ้น และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อปริมาณของ PT เพิ่มขึ้นเป็น 0.6PIN-0.4PT ซึ่งเป็นเพราะว่า 0.6PIN-0.4PT อยู่ในช่วงบริเวณของรอยต่อเฟส (MPB)

ตาราง 4.3 สรุปค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารเซรามิก (1-x)PIN-(x)PT ที่ความถี่ 1 kHz

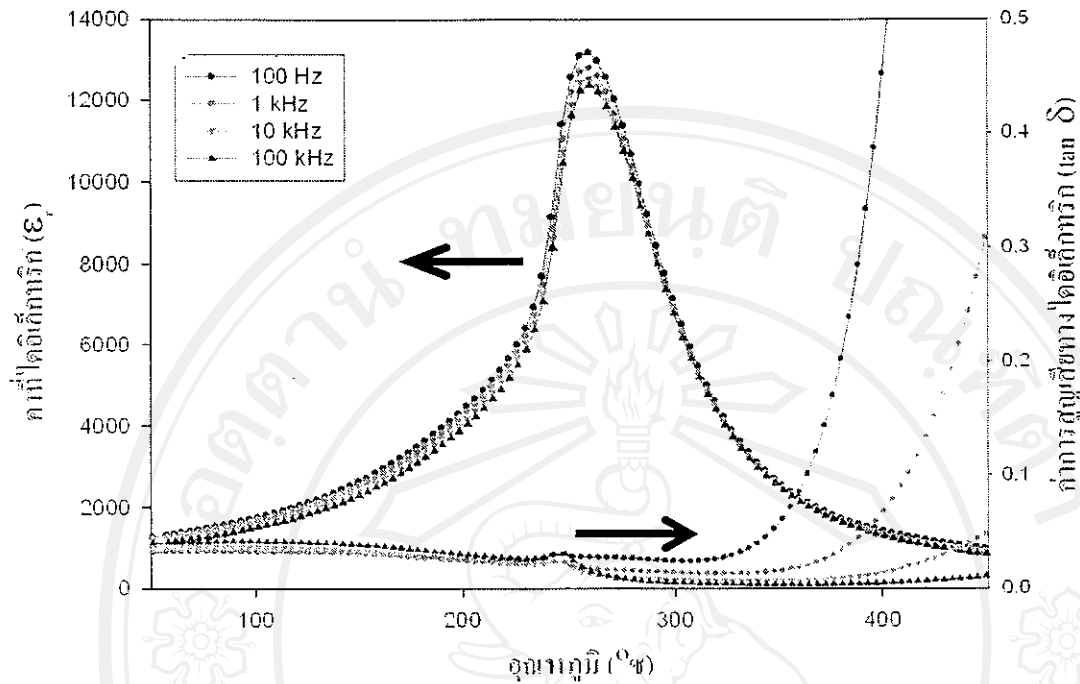
X	T_c	$\epsilon_{r_{max}}$	$\epsilon_{r_{room}}$
0.1	134	5756	2276
0.2	213	6863	863
0.3	292	6154	689
0.4	355	6674	1132
0.5	398	13423	482

4.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิและความถี่ของสารเซรามิก PZT-PZN

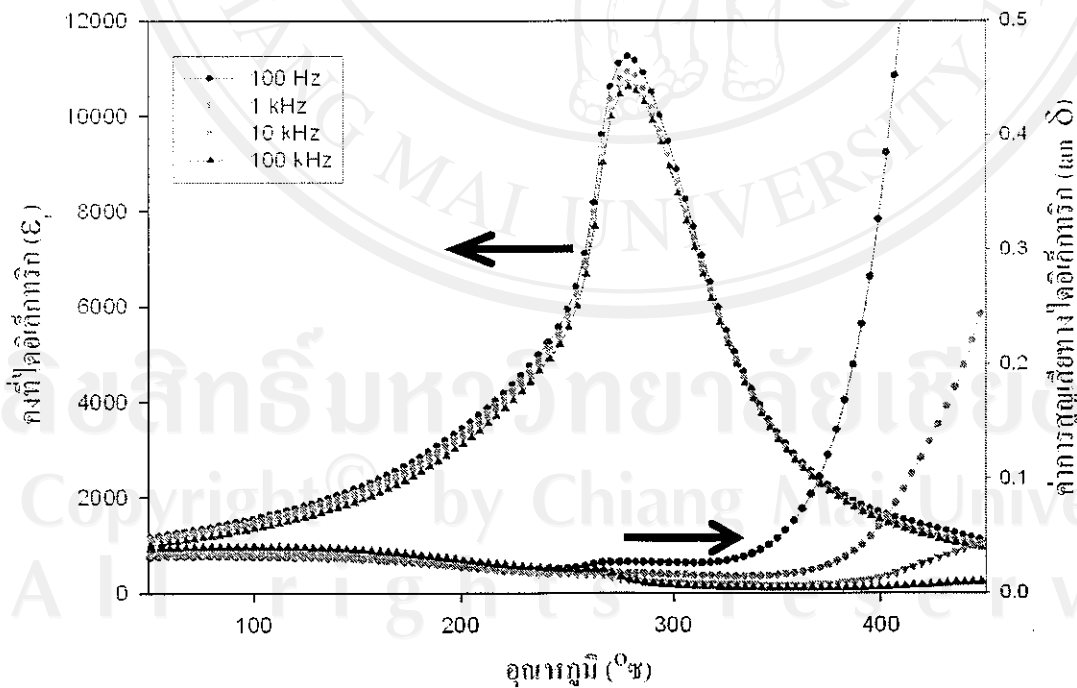
เมื่อนำสารเซรามิก PZT-PZN ที่เตรียมได้มาศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิและความถี่ ได้ผลการทดลองดังรูป 4.16 - 4.21



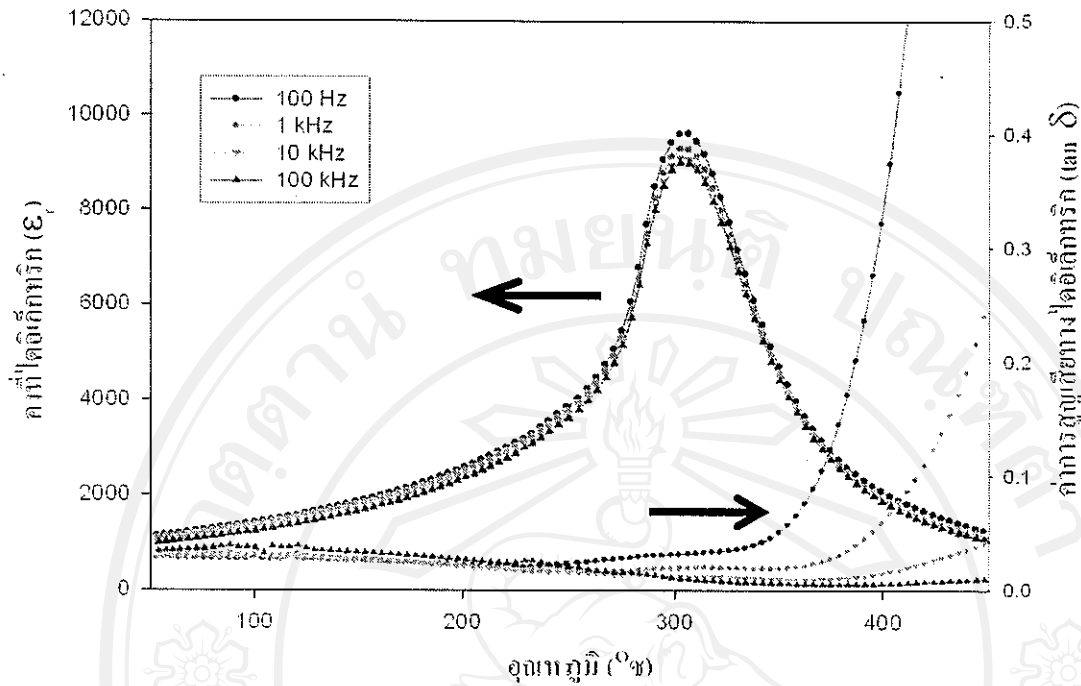
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิและความถี่ของสารเซรามิกในระบบ PZT-PZN



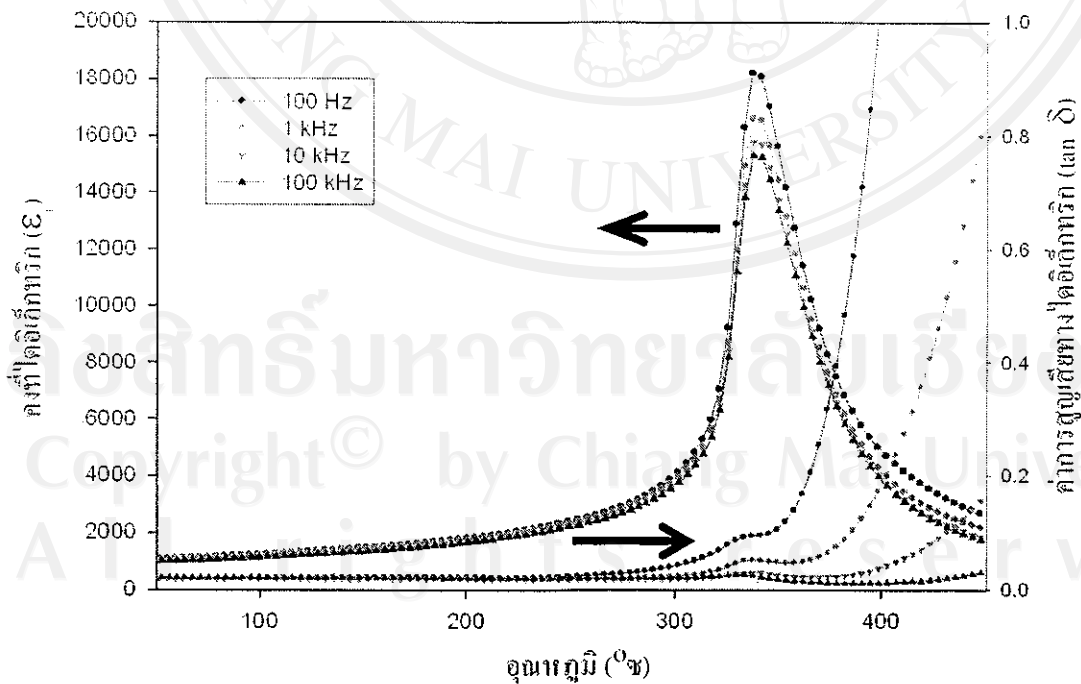
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
กับอุณหภูมิและความถี่ของเซรามิก 0.5PZT-0.5PZN



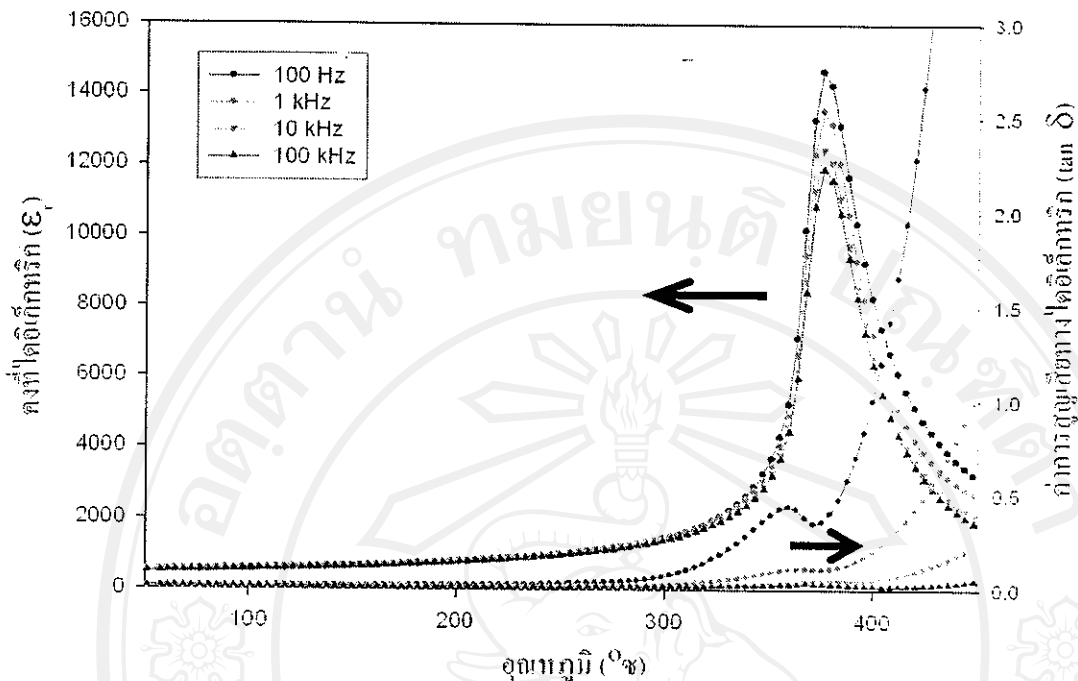
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
กับอุณหภูมิและความถี่ของเซรามิก 0.6PZT-0.4PZN



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิและความถี่ของเซรามิก 0.7PZT-0.3PZN



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิและความถี่ของเซรามิก 0.8PZT-0.2PZN

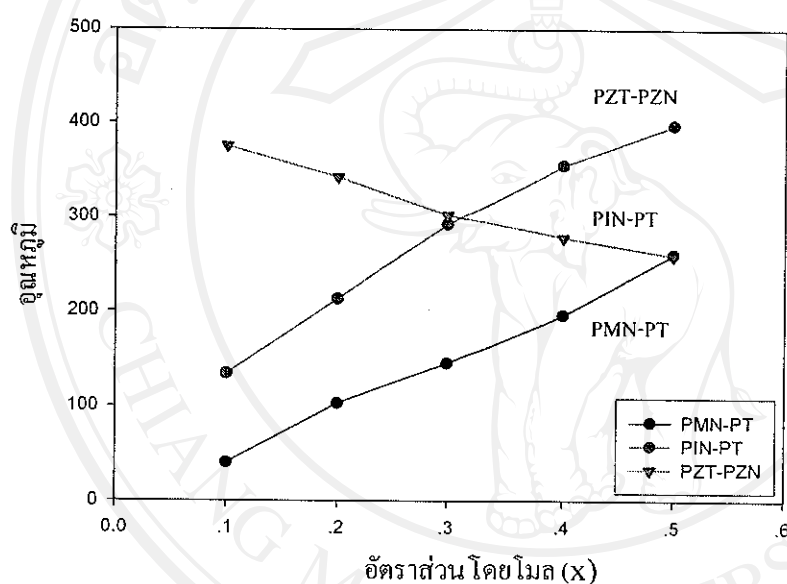


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก กับอุณหภูมิและความถี่ของเซรามิก 0.9PZT-0.1PZN

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิคูรีจะมีค่าต่ำลงเมื่อมีปริมาณของ PZN มากขึ้นเนื่องจาก PZN มีอุณหภูมิคูรีต่ำกว่า PZT (PZN มีอุณหภูมิคูรี 140°ซ ในขณะที่ PZT มีอุณหภูมิคูรี 390°ซ) โดยที่ T_c (1 kHz) ของ (1-x)PZT-xPZN จะมีค่าเป็น 375, 342, 302, 278 และ 259°ซ เมื่อ $x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ และ 0.5 ตามลำดับ และจะเห็นว่าสมบัติไดอิเล็กทริกของระบบแสดงพฤติกรรมแบบเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบอ่อน (soft ferroelectric) ในสารเซรามิก (1-x)PZT-(x)PZN เมื่อ $x = 0.1$ และ 0.2 และเปลี่ยนไปแสดงพฤติกรรมแบบบริลแลกเซอร์เมื่อ $x = 0.3, 0.4$ และ 0.5 ในขณะที่ระบบสารเซรามิกแสดงพฤติกรรมแบบเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบอ่อนนั้น ค่าจุดสูงสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_{max}) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโดยโมลของ PZN จนถึง 0.8PZT-0.2PZN และจะมีค่าลดลงเมื่อมีอัตราส่วนโดยโมลเป็น 0.7PZT-0.3PZN เนื่องจากเป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเตตระโกนอลไปเป็นรอมโบฮีดรอล และเปลี่ยนพฤติกรรมจากแบบเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบอ่อนไปแสดงพฤติกรรมแบบบริลแลกเซอร์ และหลังจากนั้นค่าจุดสูงสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ PZN เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าที่อุณหภูมิห้องค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PZN

ตาราง 4.4 สรุปค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารเซรามิก (1-x)PZT-(x)PZN ที่ความถี่ 1 kHz

X	T_c	$\epsilon_{r_{max}}$	$\epsilon_{r_{room}}$
0.1	375	14676	1011
0.2	342	18210	1153
0.3	302	9610	1265
0.4	278	11241	1349
0.5	259	13181	1561



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิคูรี (T_c) กับอัตราส่วนโดยโมลต่างๆของสารเซรามิกในระบบ (1-x)PMN-(x)PT, (1-x)PIN-(x)PT และ (1-x)PZT-(x)PZN ที่ความถี่ 1 kHz

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิคูรี (T_c) กับอัตราส่วนโดยโมลต่างๆของสารเซรามิกในระบบ (1-x)PMN-(x)PT, (1-x)PIN-(x)PT และ (1-x)PZT-(x)PZN เมื่อ $x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$, และ 0.5 แสดงดังรูปที่ 4.22 พบว่าสารเซรามิกทั้งสามระบบมีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิคูรี (T_c) กับอัตราส่วนโดยโมลต่างๆเป็นเชิงเส้นซึ่งสอดคล้องกับแผนผังเฟสของสารเซรามิกทั้งสามระบบซึ่งได้แสดงในบทที่ 2 โดยความสัมพันธ์ในสารเซรามิก PMN-PT และ PIN-PT มีลักษณะเหมือนกันคือ อุณหภูมิคูรีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PT เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PT มีอุณหภูมิสูงกว่า PMN และ PIN แต่สำหรับสารเซรามิก PZT-PZN นั้นพบว่า อุณหภูมิคูรีมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณของ PZN มากขึ้น ทั้งนี้เพราะว่า อุณหภูมิคูรีของ PZT มีค่าสูงกว่า PZN นั่นเอง

4.6 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกเลดแมกนีเซียมในโอเบต-เลดไทเทเนต (PMN-PT)

4.6.1 สารเซรามิก PMN-PT ที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำ

เมื่อนำสารเซรามิกในระบบ PMN-PT ที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำมาทำการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกภายใต้สภาวะความเค้น (0-230 MPa) พบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วในช่วงของการเพิ่มความเค้นนั้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มที่จะลดลง (รูป 4.23-4.32) โดยจากผลการทดลองพบว่าในเซรามิก 0.5PMN-0.5PT และ 0.9PMN-0.1PT มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงอย่างชัดเจนในช่วงความเค้น 0-230 MPa (รูป 4.23-4.24 และ 4.31-4.32) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้คล้ายกับผลการทดลองในเซรามิก 0.9PMN-0.1PT โดย Zhao และคณะ[16] ที่พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น (0-150 MPa) ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่ผนังโดเมนเกิดการยึดจับกัน ผนังโดเมนจึงมีการเคลื่อนที่น้อยลง ดังนั้นจึงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลง ส่วนในเซรามิกองค์ประกอบอื่นๆจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ไม่แน่นอน โดยพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วง 0-75 MPa สำหรับเซรามิก 0.6PMN-0.4PT และ 0.7PMN-0.3PT (รูป 4.25-4.28) และในช่วง 0-100 MPa สำหรับเซรามิก 0.8PMN-0.2PT (รูป 4.29 และ 4.30) หลังจากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็จะลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าอาจจะเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของโดเมนที่เป็นแบบสุ่มในสารเซรามิกที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำ ซึ่งโดเมนบางส่วนอาจจะอยู่ในแนวที่ทำมุมกัน 180° และบางส่วนอาจจะอยู่ในแนวอื่น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโดเมนของทั้งสองกลุ่มทำให้มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้คล้ายกับในการทดลองในเซรามิก PZT-5H (Soft PZT) โดย Zhao และคณะ[16] ที่พบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วง ความเค้น 0-40 MPa แต่หลังจากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็จะลดลงเมื่อความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 40 ถึง 150 MPa ซึ่งใน Soft PZT จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนกว่าใน Hard PZT เนื่องจากใน Soft PZT จะมีการเปลี่ยนแปลงของโดเมนได้ง่ายกว่าใน Hard PZT อย่างไรก็ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่พบในเซรามิก PMN-PT ทั้งสามองค์ประกอบที่กล่าวมานั้น จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงในแนวโน้มที่ลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่ความเค้นที่ใส่เข้าไปนั้นไปยับยั้งการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน[16] ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง

และเมื่อลดความเค้นลงพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในสารเซรามิกคือ สำหรับเซรามิก 0.5PMN-0.5PT และ 0.8PMN-0.2PT พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อความเค้นลดลง สำหรับเซรามิก 0.7PMN-0.3PT พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นลดลงในช่วงแรก และจากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเมื่อความเค้นลดลง สำหรับเซรามิก 0.6PMN-0.4PT และ 0.9PMN-0.1PT นั้นพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

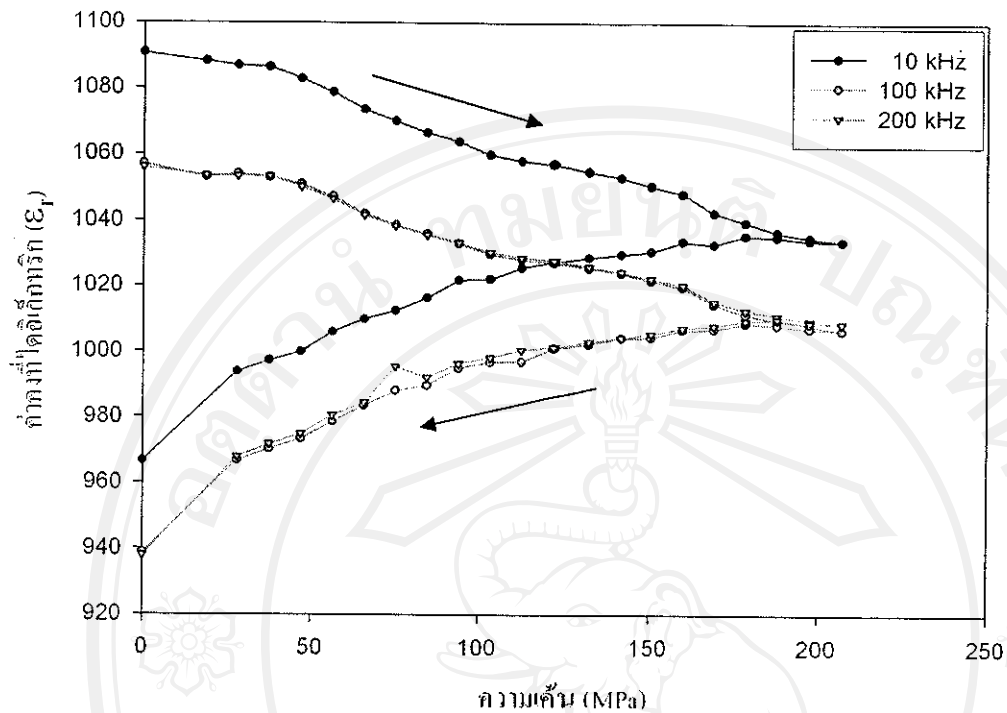
มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเค้นลดลง ซึ่งในเซรามิก PMN-PT ทุกองค์ประกอบจะพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วงลดความเค้นของจะมีค่าที่แตกต่างกับในช่วงที่เพิ่มความเค้นมาก ซึ่งสถานะที่เกิดขึ้นเช่นนี้แสดงว่าการให้ความเค้นในระดับนี้ (0-230 MPa) ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรต่อโดเมนหรือโครงสร้างภายใน ทำให้เมื่อลดความเค้นลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าแตกต่างจากค่าเดิมมาก



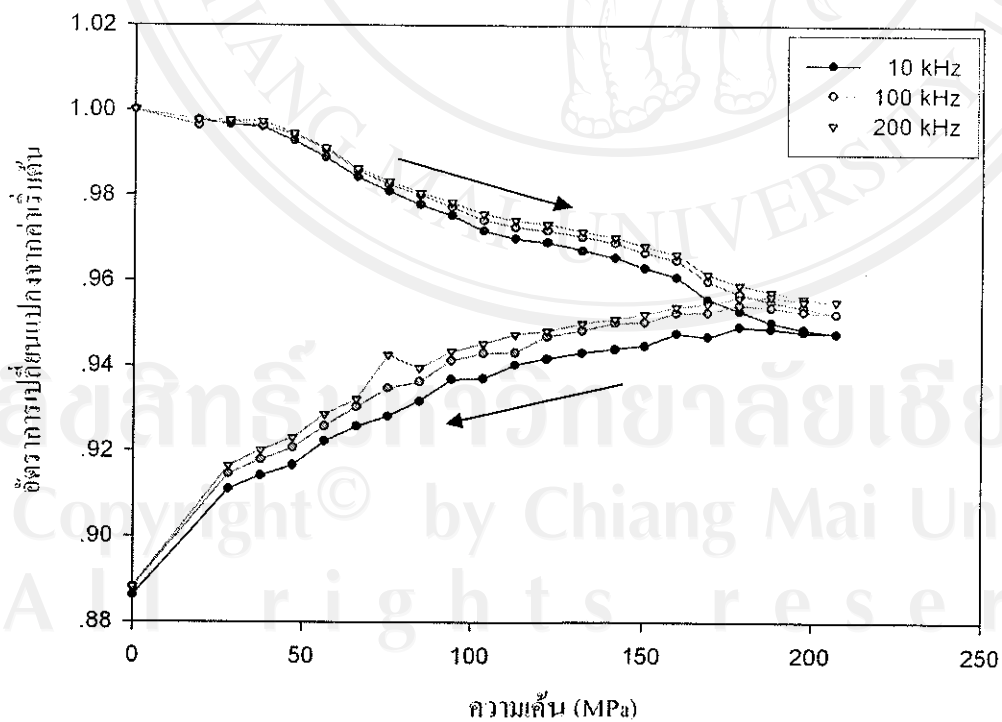
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

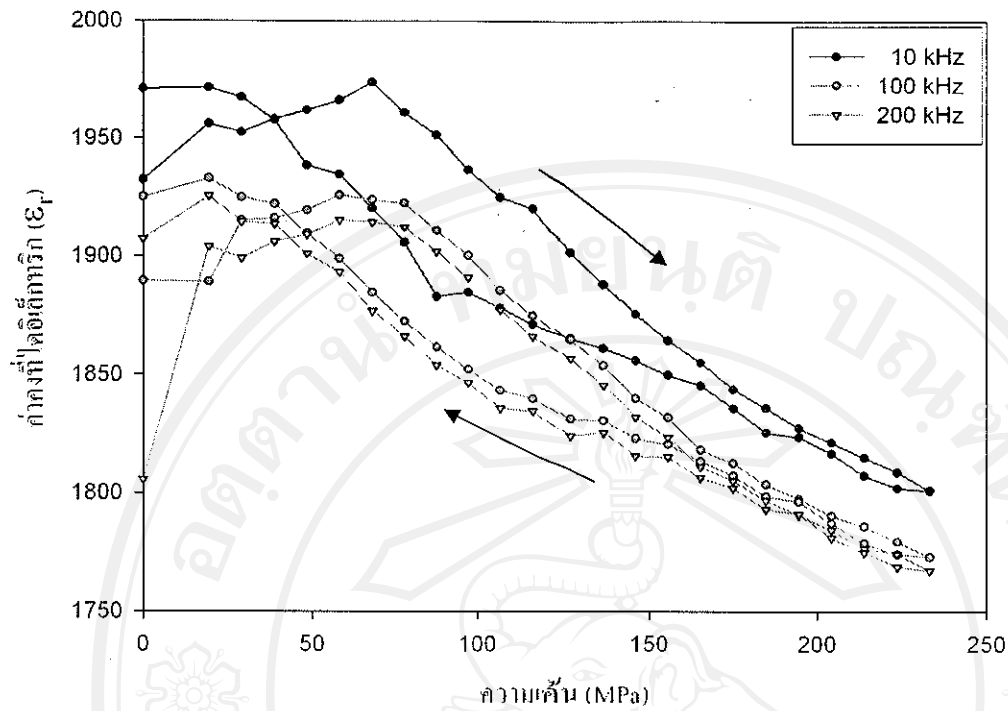
All rights reserved



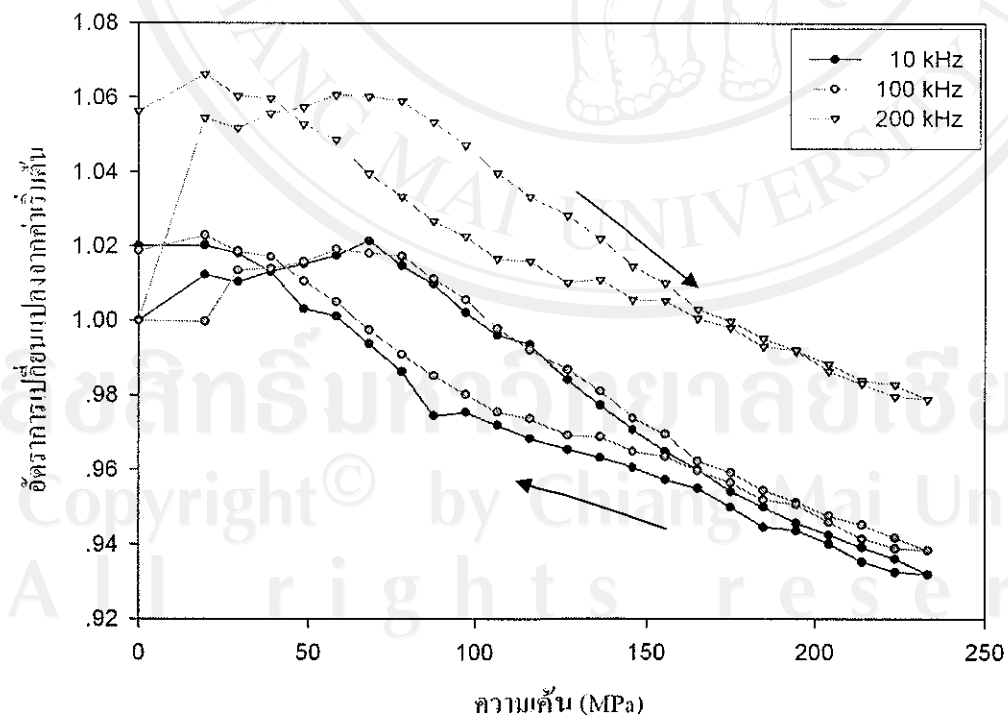
รูป 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PMN-0.5PT ที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำ



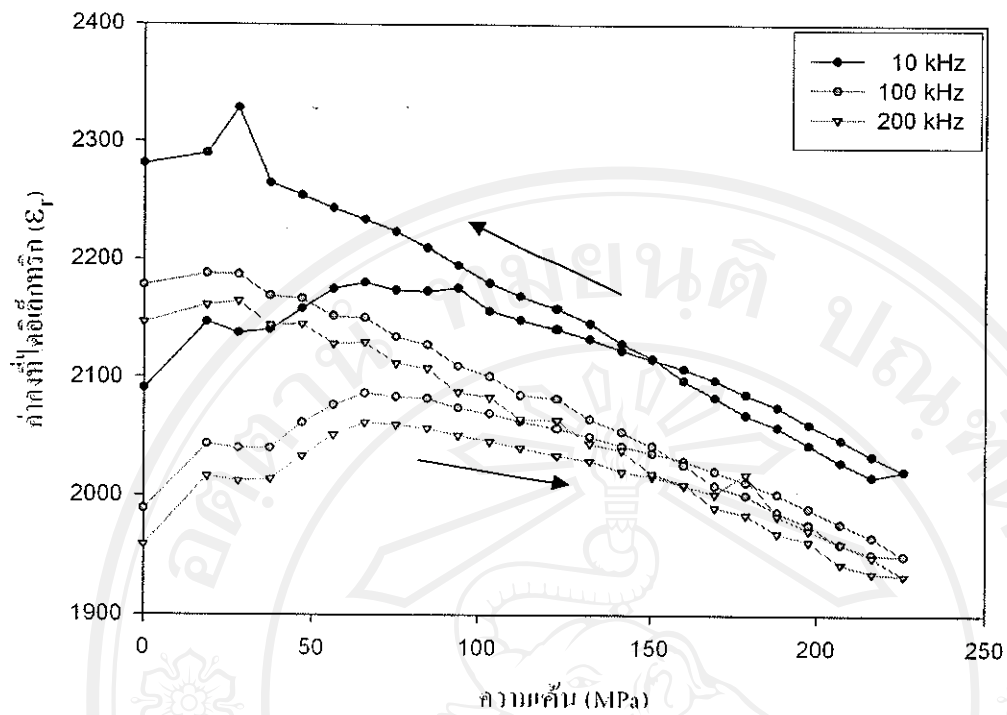
รูป 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PMN-0.5PT ที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำ



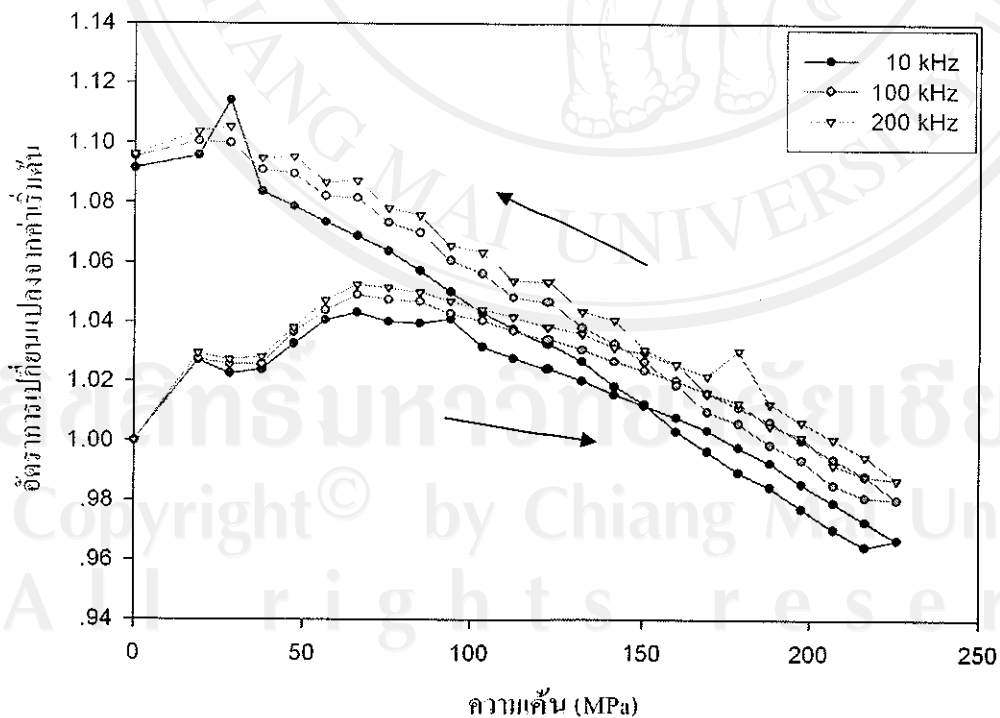
รูป 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PMN-0.4PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



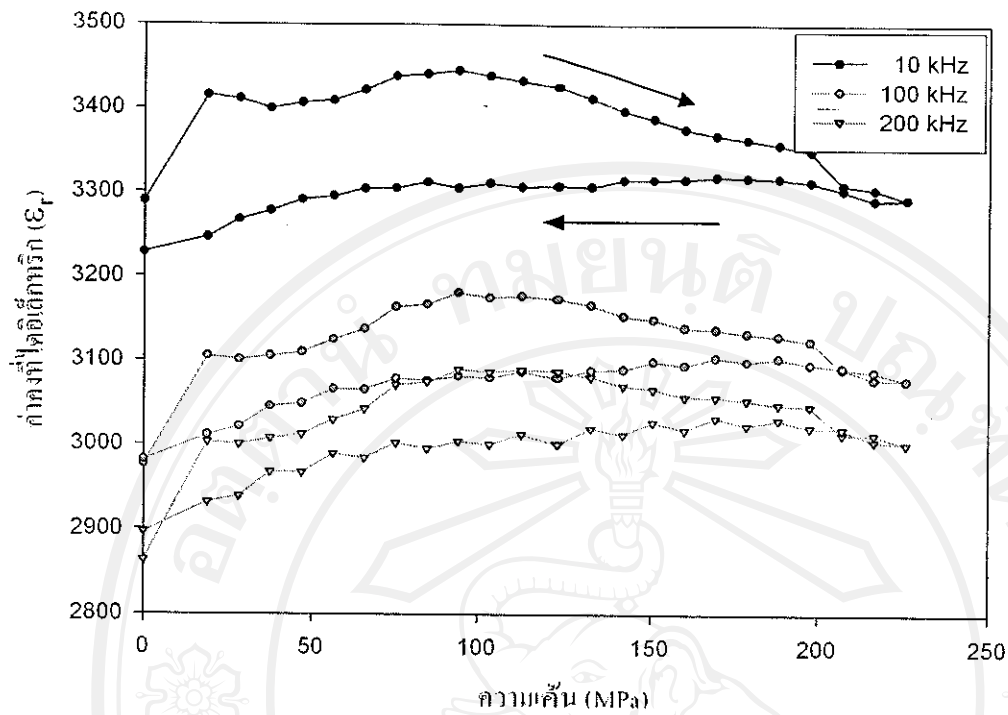
รูป 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้เปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PMN-0.4PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



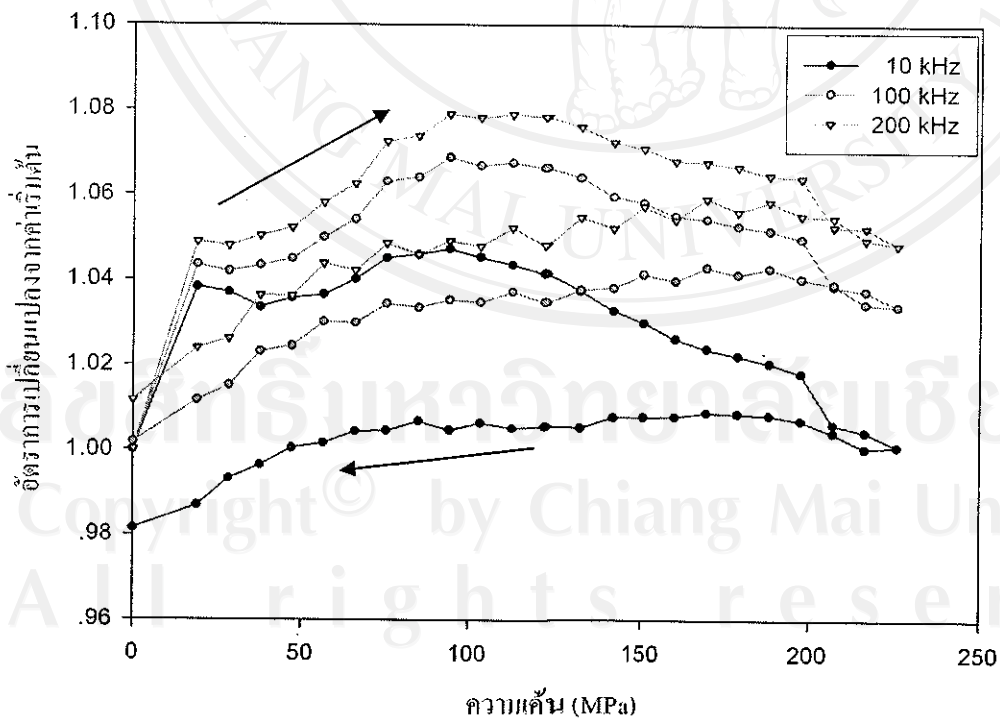
รูป 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PMN-0.3PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



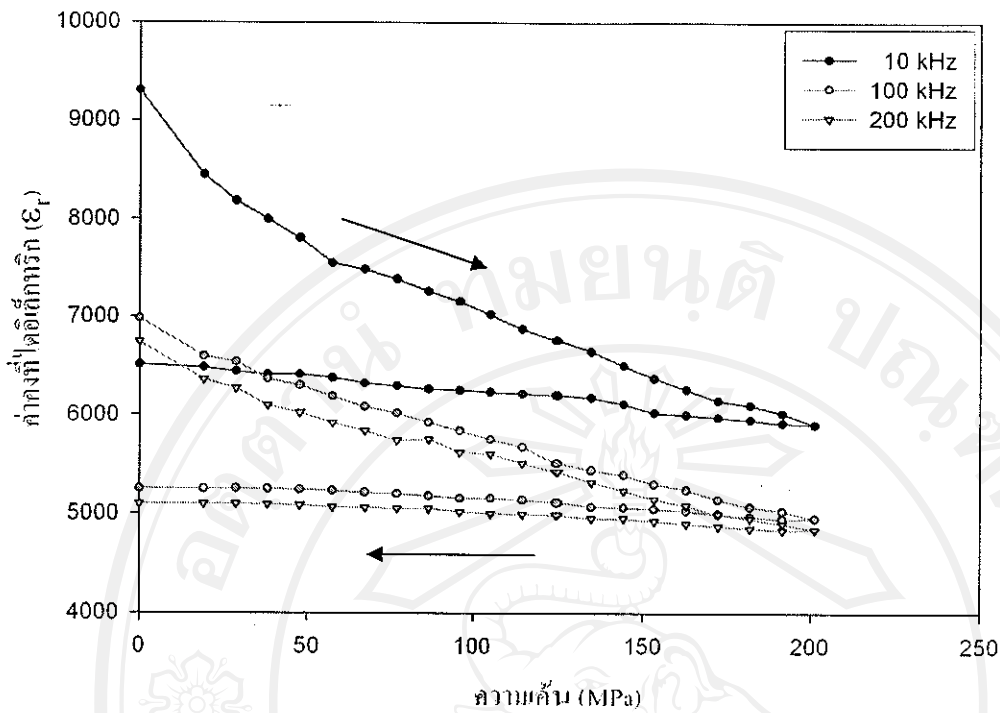
รูป 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PMN-0.3PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



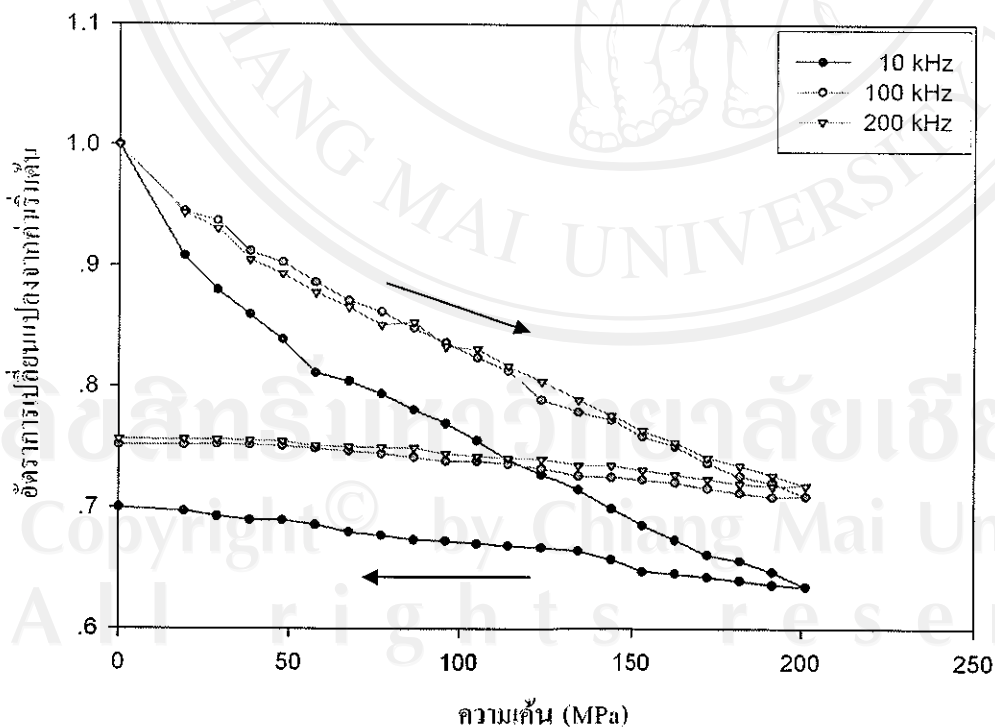
รูป 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PMN-0.2PT ที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำ



รูป 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PMN-0.2PT ที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำ

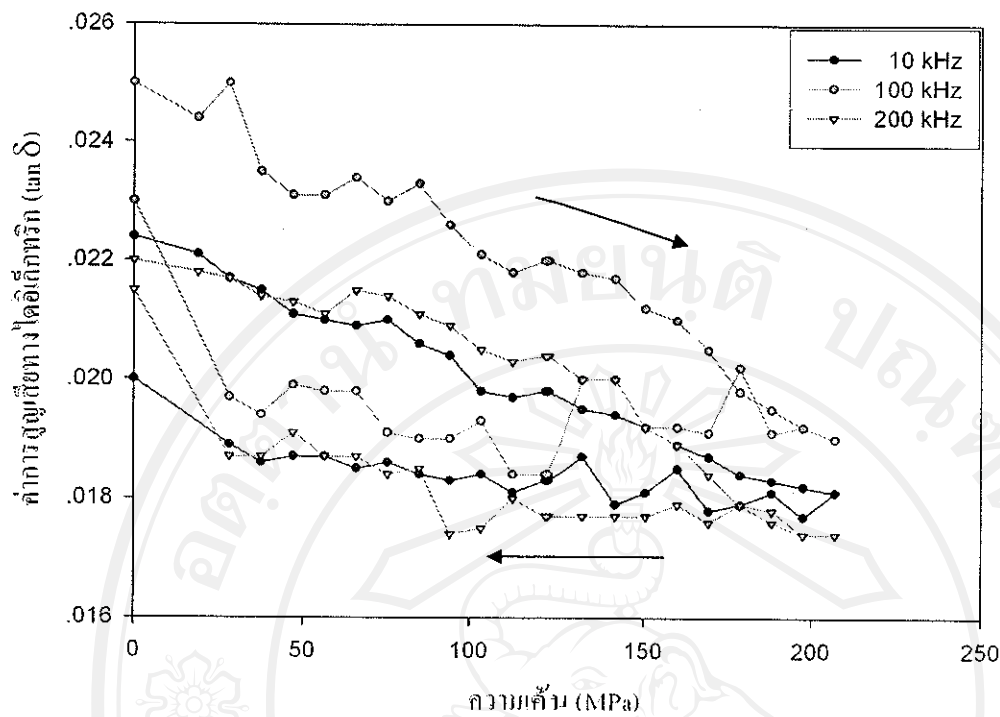


รูป 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PMN-0.1PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว

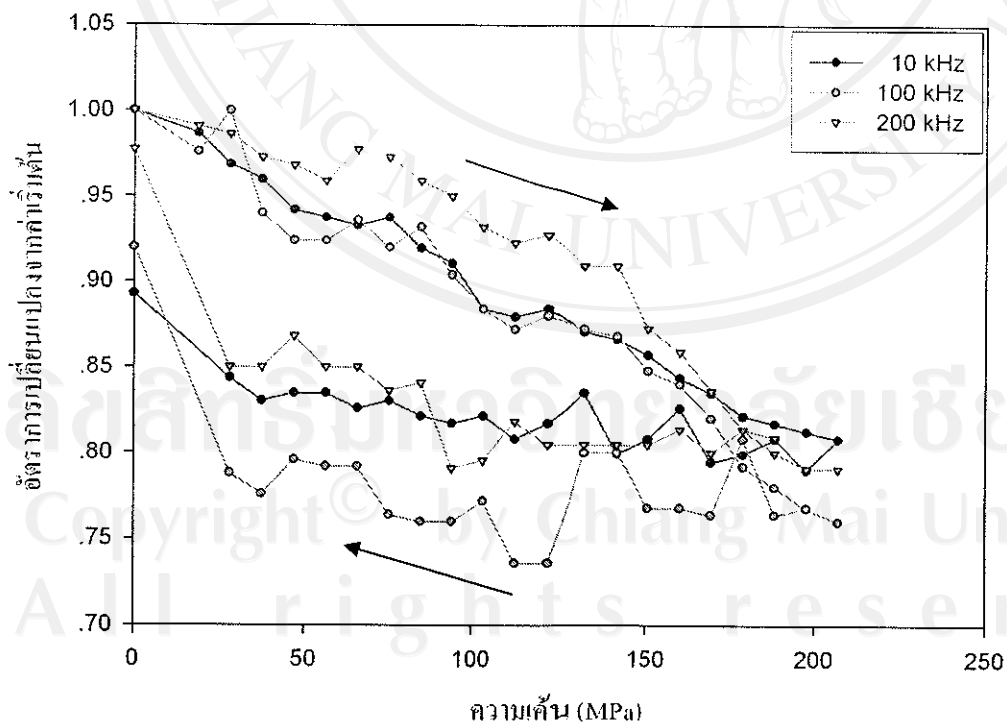


รูป 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเรียนรู้จากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PMN-0.1PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว

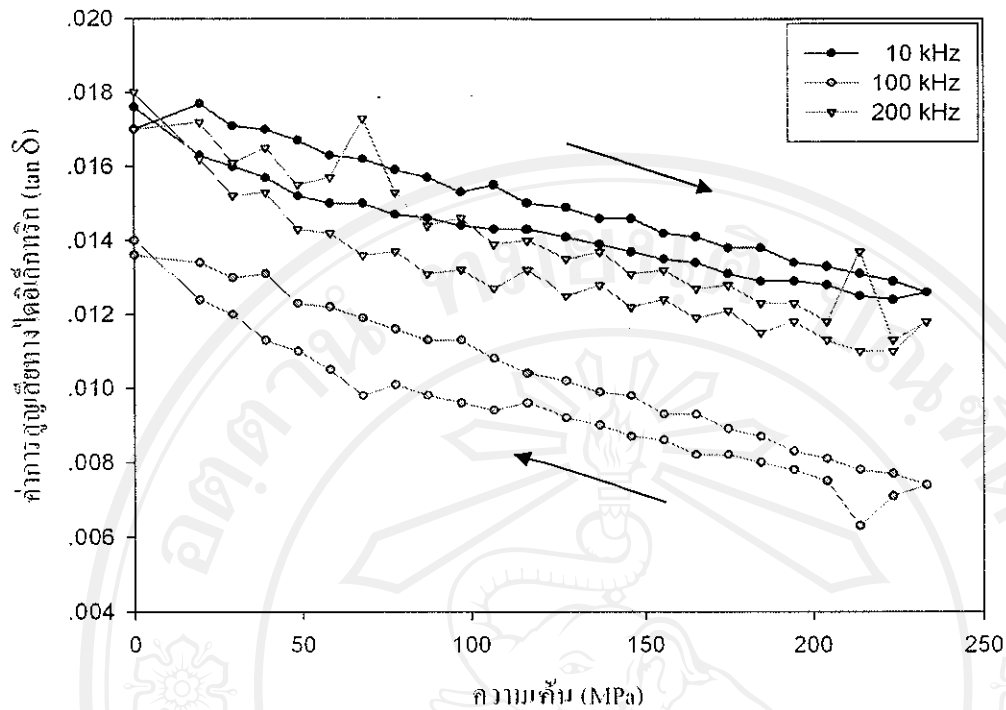
สำหรับในส่วนของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก พบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ดังรูป 4.33-4.42 ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นผลจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโดเมน[15] หรือการยับยั้งการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนไม่ให้เคลื่อนที่[16] ในระหว่างการลดความถี่ลงนั้นพบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบคือ สำหรับเซรามิก 0.5PMN-0.5PT, 0.6PMN-0.4PT และ 0.7PMN-0.3PT ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ลดลง สำหรับเซรามิก 0.8PMN-0.2PT พบว่าในช่วงแรกค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ลดลงจนถึงประมาณ 70 MPa ซึ่งค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงนี้จะมีค่ามากกว่าช่วงเพิ่มความถี่ จากนั้นค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะลดลงเมื่อความถี่ลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความถี่ที่ให้เข้าไปมีบทบาททำให้ผนังโดเมนมีการเคลื่อนที่ผ่านจุดบกพร่องต่างๆ ทำให้เมื่อเอาความถี่ออกแล้ว จะทำให้ผนังโดเมนเคลื่อนที่ได้มากขึ้นจึงทำให้ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าสูงกว่าค่าเริ่มต้น[15] สำหรับเซรามิก 0.9PMN-0.1PT พบว่าเมื่อลดความถี่ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งในเซรามิก PMN-PT ทุกองค์ประกอบจะพบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงของการลดความถี่ของเซรามิก PMN-PT จะมีค่าแตกต่างจากค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงของการเพิ่มความถี่มาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการให้ความถี่ในระดับนี้ ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรต่อโดเมนหรือโครงสร้างภายใน ดังนั้นเมื่อลดความถี่ลงแล้วค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจึงมีค่าแตกต่างจากค่าเดิมมาก



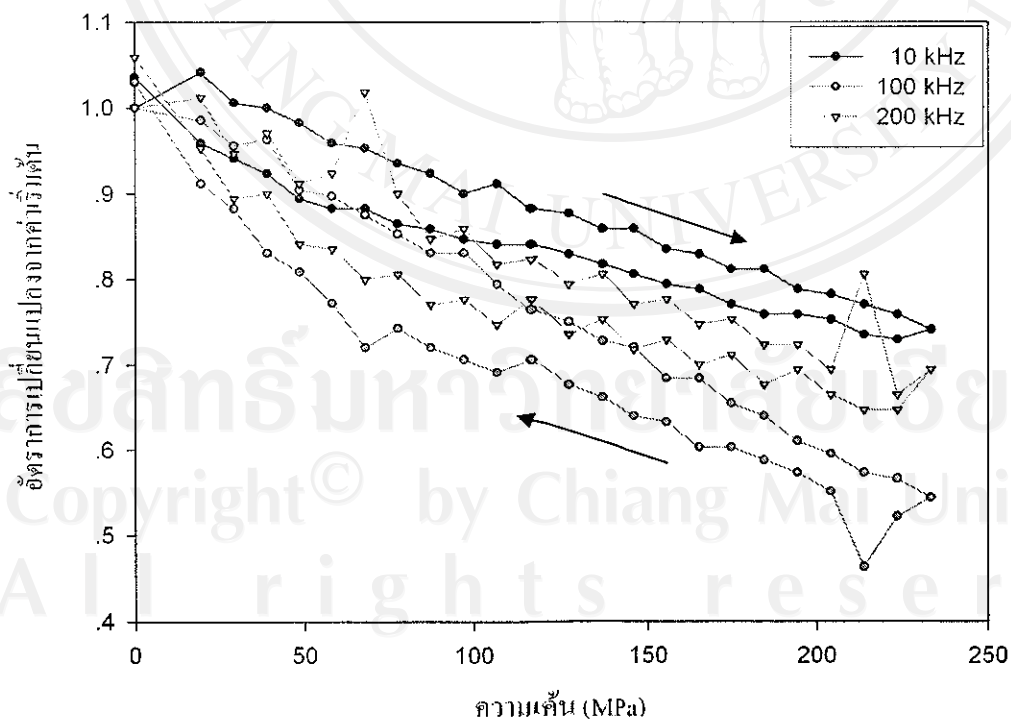
รูป 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PMN-0.5PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



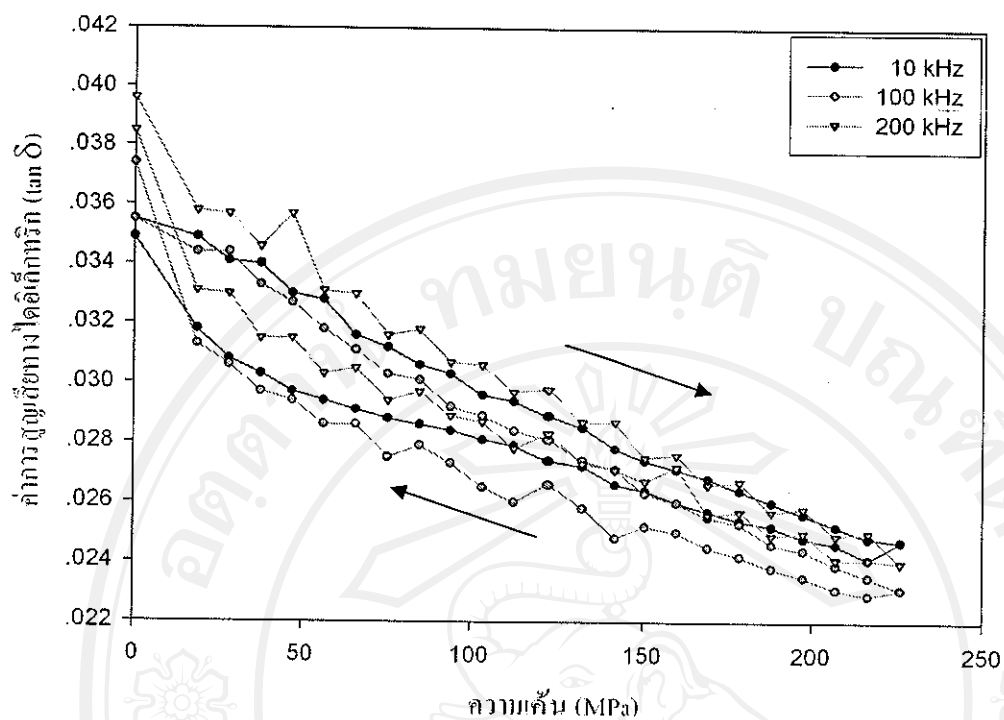
รูป 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PMN-0.5PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



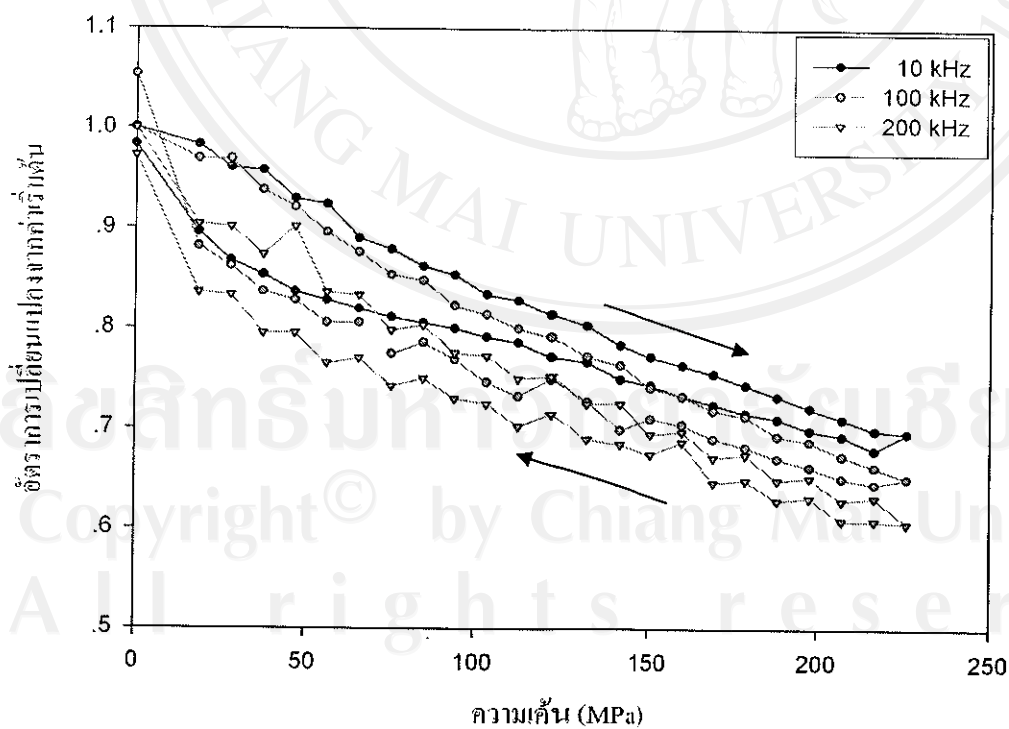
รูป 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PMN-0.4PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



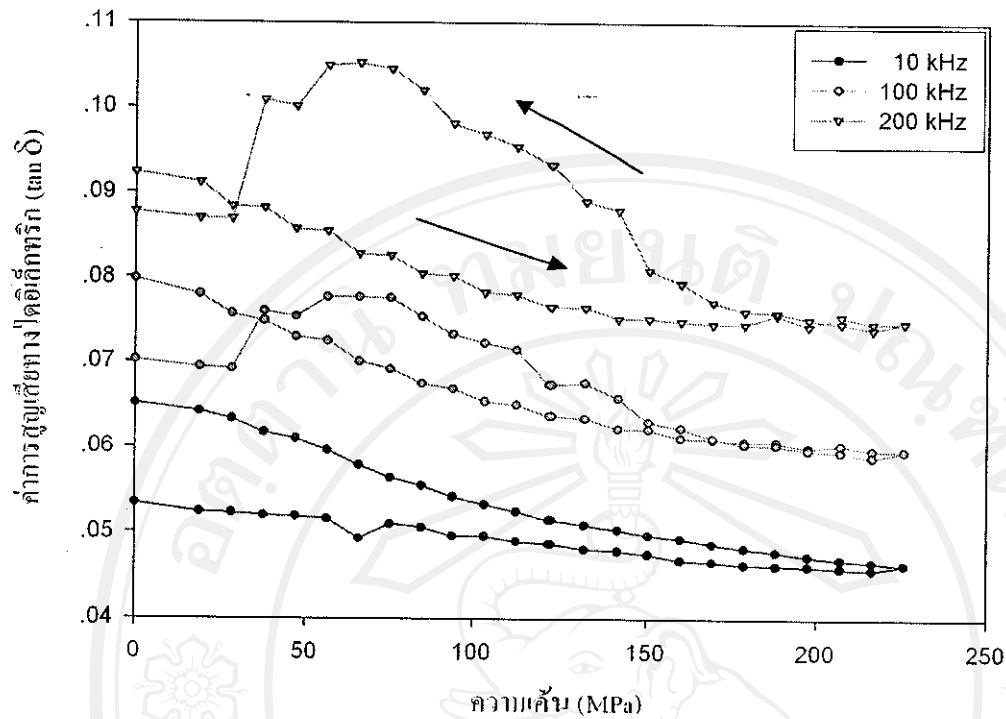
รูป 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PMN-0.4PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



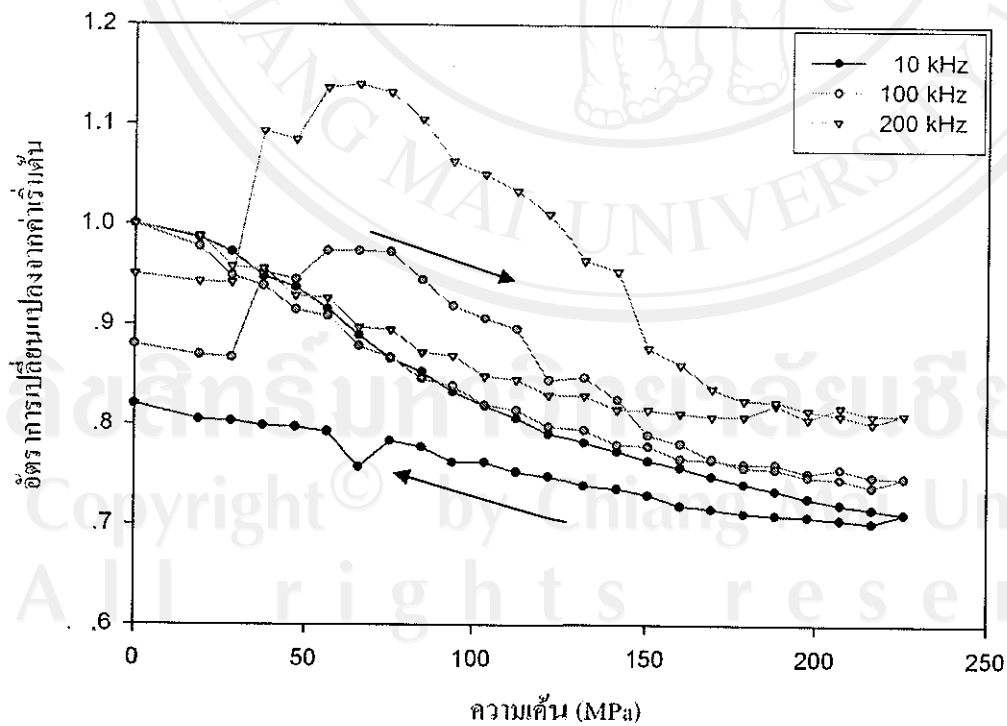
รูป 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PMN-0.3PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



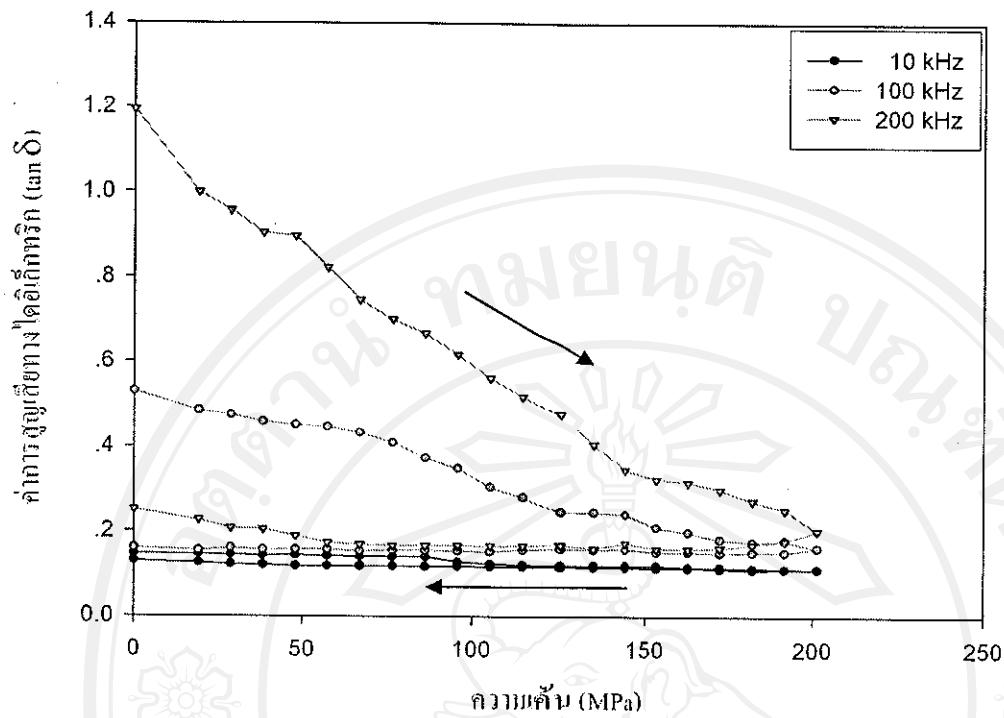
รูป 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PMN-0.3PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



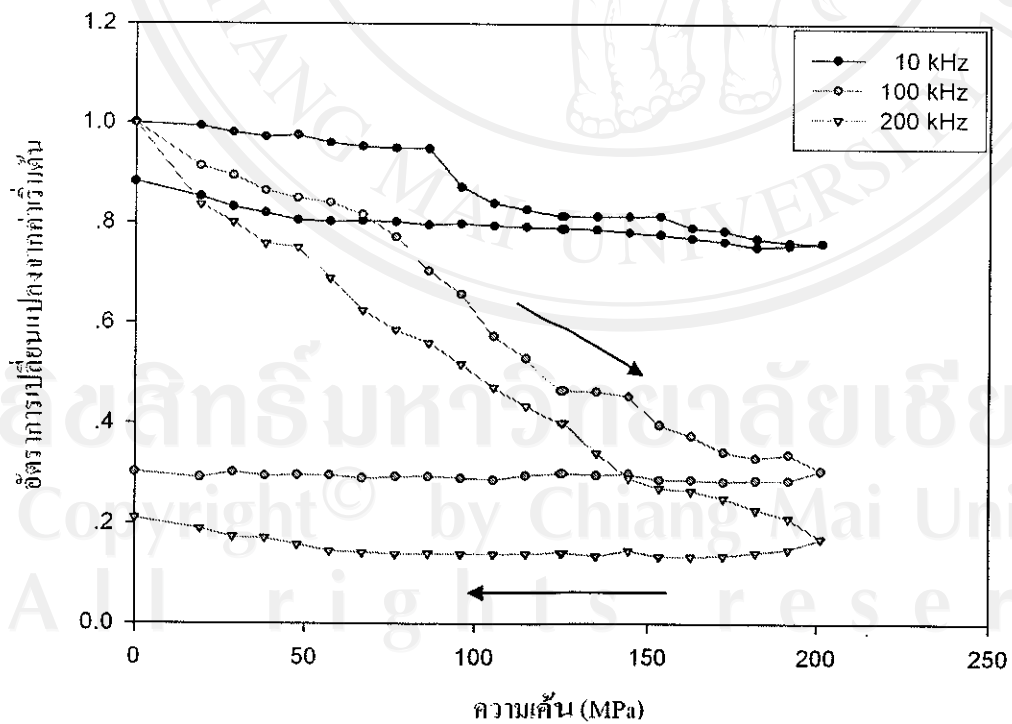
รูป 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PMN-0.2PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



รูป 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PMN-0.2PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



รูป 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PMN-0.1PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



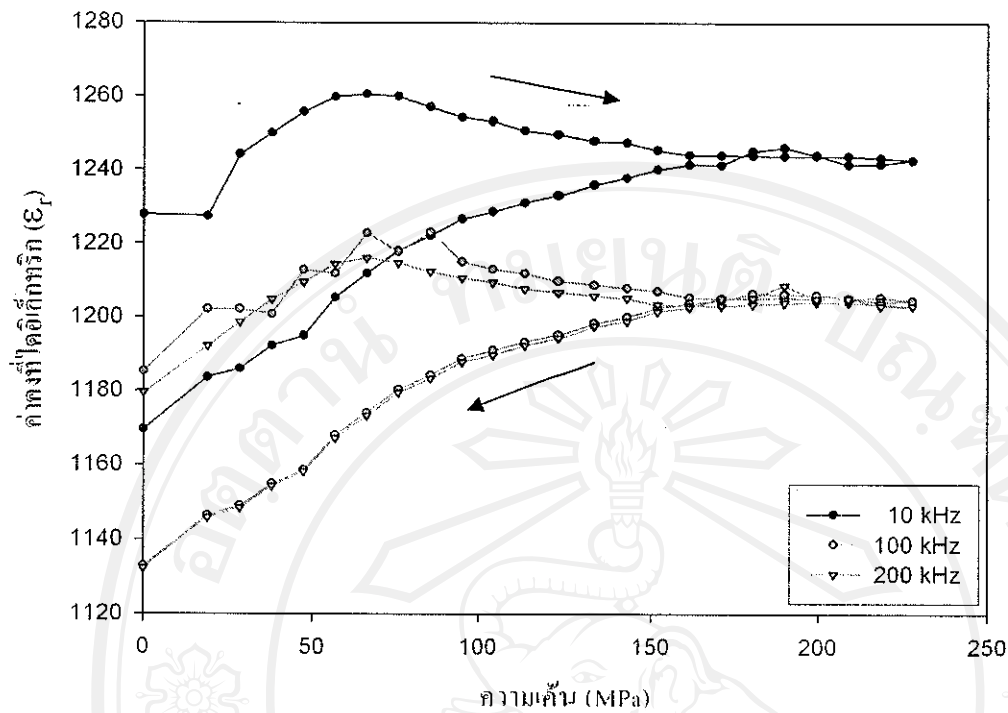
รูป 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PMN-0.1PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว

4.4.2 กรณีสารเซรามิก PMN-PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว

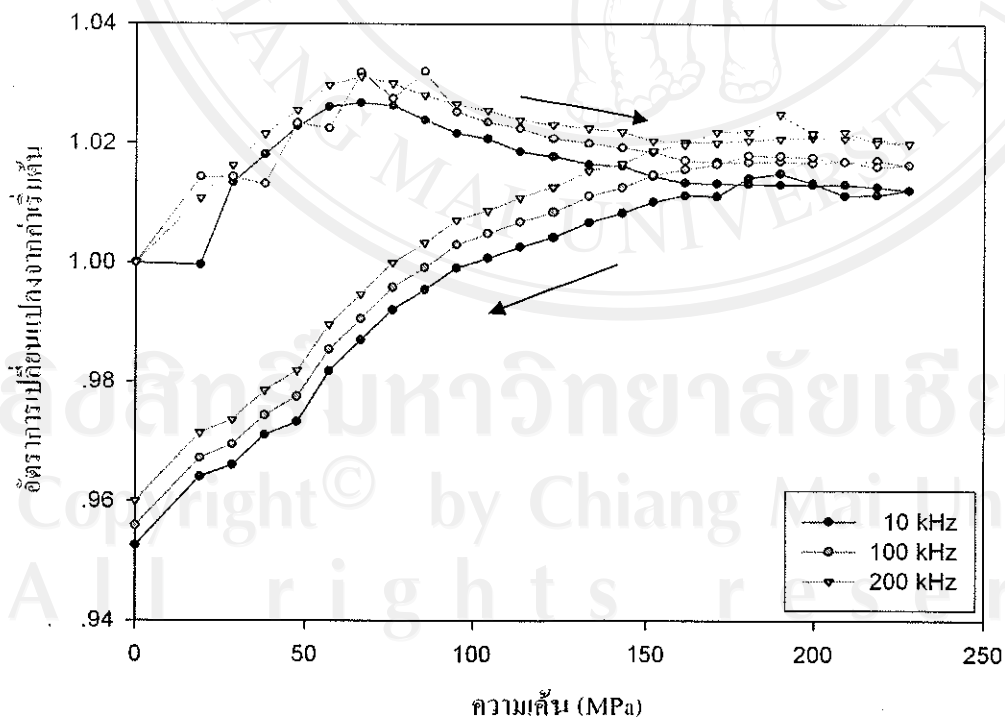
เมื่อนำเซรามิกในระบบ PMN-PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้วมาศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้น (0-230 MPa) พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ดังรูป 4.43-4.52 โดยจะพบว่าเซรามิก 0.5PMN-0.5PT, 0.6PMN-0.4PT, 0.7PMN-0.3PT และ 0.8PMN-0.2PT จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ไม่แน่นอน โดยในช่วงที่เริ่มให้ความเค้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ซึ่งในกรณีนี้เซรามิก PMN-PT ได้ผ่านการทำขั้วแล้วและเมื่อให้ความเค้นแบบแกนเดียวในทิศทางที่ขนานกับทิศทางในการทำขั้ว ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงนี้จึงเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโดเมน เนื่องจากความเค้นที่ให้เข้าไปจะไปทำให้มีความหนาแน่นของผนังโดเมนที่ไม่ได้ทำมุมกัน 180° เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น[21] และเมื่อเพิ่มความเค้นขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่ง ความเค้นจากภายนอกจะทำให้โครงสร้างของโดเมนเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งโดเมนบางอันอาจจะถูกรวมกับโดเมนอื่นหรืออาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปเพื่อที่จะทำให้พลังงานของโดเมนภายในเซรามิกมีค่าน้อยที่สุด สำหรับภายใต้ความเค้นแบบแกนเดียวโครงสร้างของโดเมนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของโดเมน (domain switching) และการทำให้หมดสภาพความเป็นขั้ว (dc-poling)[17,24] ซึ่งในกรณีที่เกิดการหมดสภาพความเป็นขั้วนั้น เซรามิกที่ผ่านการทำขั้วแล้วจะมีสมบัติไดอิเล็กทริกที่ไม่แตกต่างไปจากเซรามิกที่ยังไม่ผ่านการทำขั้วมากนัก ดังนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจึงลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากทิศทางของโพลาริเซชันบางส่วนชี้ไปในทิศทางที่ทำมุมกัน 180° ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเช่นเดียวกับเซรามิกที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว สำหรับเซรามิก 0.9PMN-0.1PT นั้นพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเมื่อความเค้นลดลง โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกับในกรณีที่เซรามิกยังไม่ผ่านการทำขั้ว อาจจะเนื่องมาจากเซรามิก 0.9PMN-0.1PT มีอุณหภูมิคูรีอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ซึ่งในช่วงนี้โครงสร้างจะไม่เสถียรนักและสามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่าย ดังนั้นการทำขั้วอาจจะสามารถบังคับทิศทางของโพลาริเซชันให้ชี้ไปในทิศทางเดียวกันได้เฉพาะขณะที่กำลังให้สนามไฟฟ้าเข้าไปเท่านั้น แต่เมื่อนำสนามไฟฟ้าออกอาจจะทำให้ทิศทางของโพลาริเซชันเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ทำให้สมบัติไดอิเล็กทริกคล้ายคลึงกับกรณีที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว

ในกรณีของการลดความเค้นพบว่าในเซรามิกที่มีองค์ประกอบต่างกัน จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน สำหรับเซรามิก 0.5PMN-0.5PT นั้นพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเมื่อความเค้นลดลง สำหรับเซรามิก 0.6PMN-0.4PT, 0.7PMN-0.3PT และ 0.8PMN-0.2PT นั้นพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน โดยในช่วงแรกค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเมื่อความเค้นลดลง สำหรับ

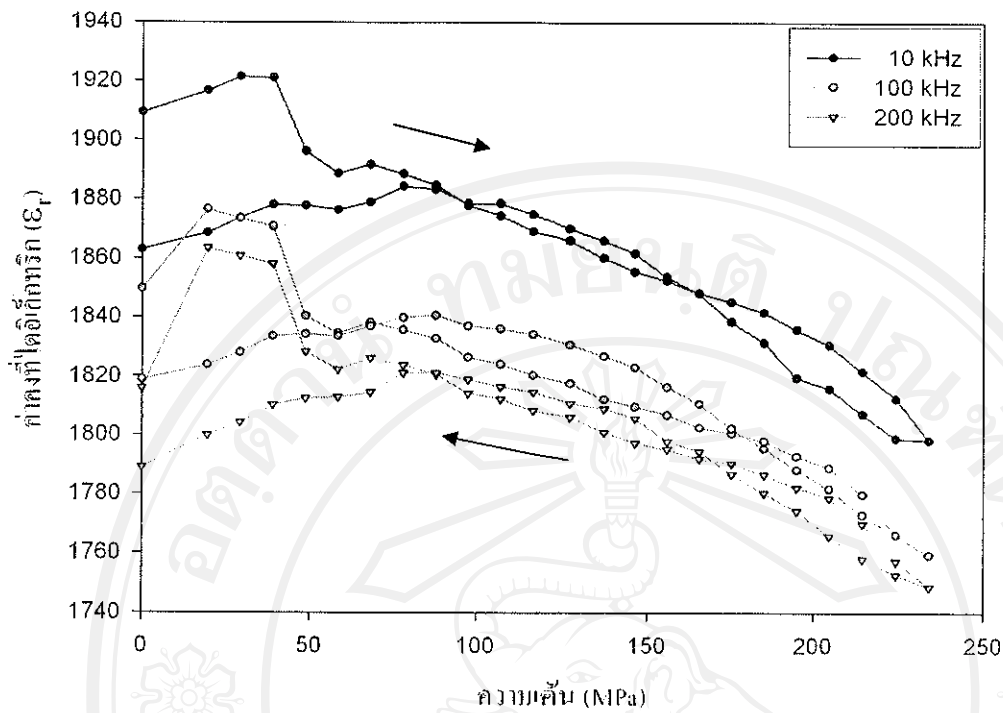
เซรามิก 0.9PMN-0.1PT นั้นพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PT ทุกองค์ประกอบในกรณีการลดความเค้นลงนั้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีความแตกต่างจากช่วงที่เพิ่มความเค้นมาก ซึ่งสภาวะที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้แสดงให้เห็นว่าการให้ความเค้นในระดับนี้ (0-230 MPa) ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรต่อโดเมนหรือโครงสร้างภายในของเซรามิกที่ผ่านการทำซ้ำแล้ว ทำให้เมื่อลดความเค้นลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจึงมีค่าแตกต่างจากค่าเดิมมาก และพบว่าเซรามิก 0.5PMN-0.5PT และ 0.9PMN-0.1PT มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วงลดความเค้นมีค่าต่ำกว่าในช่วงเพิ่มความเค้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจจะเกิดจากการยึดจับกันบางส่วน of โดเมน[25]



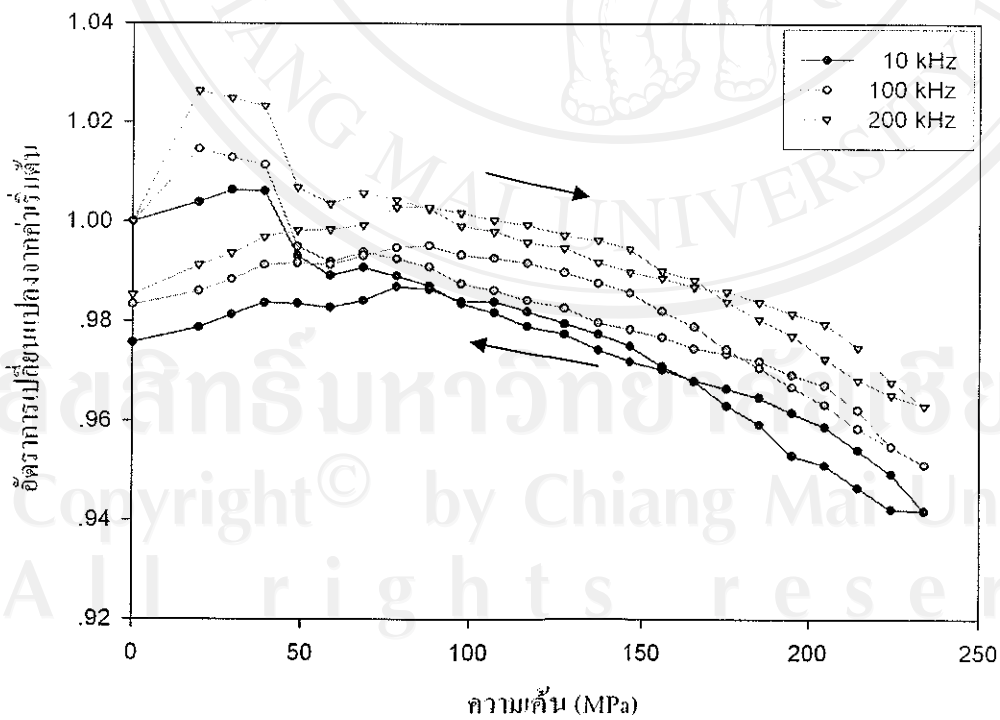
รูป 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก 0.5PMN-0.5PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



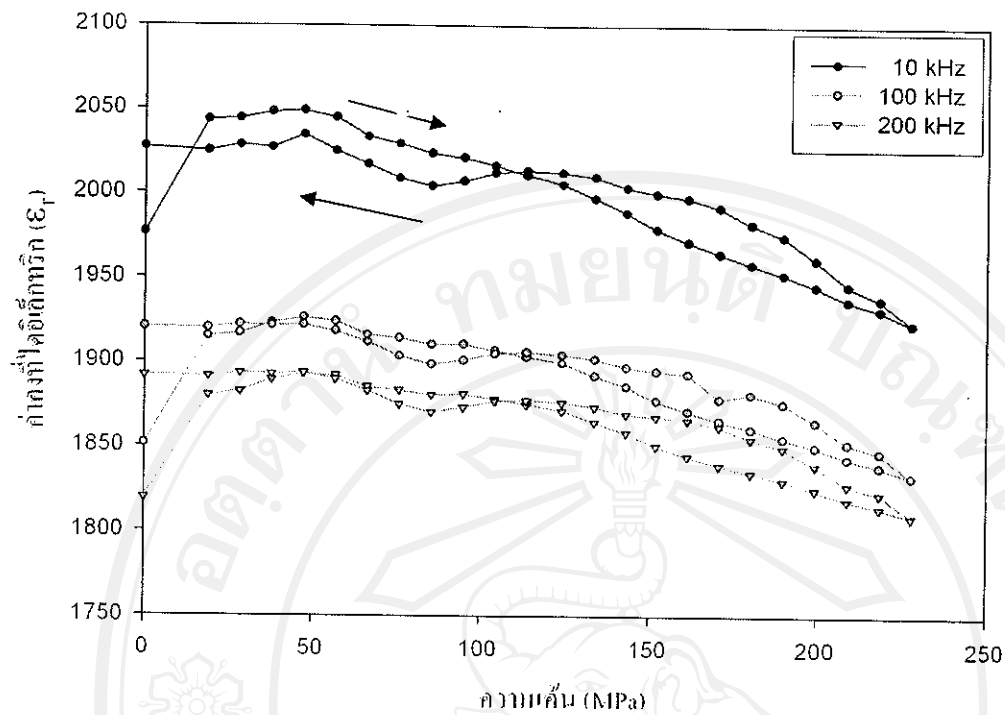
รูป 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก 0.5PMN-0.5PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



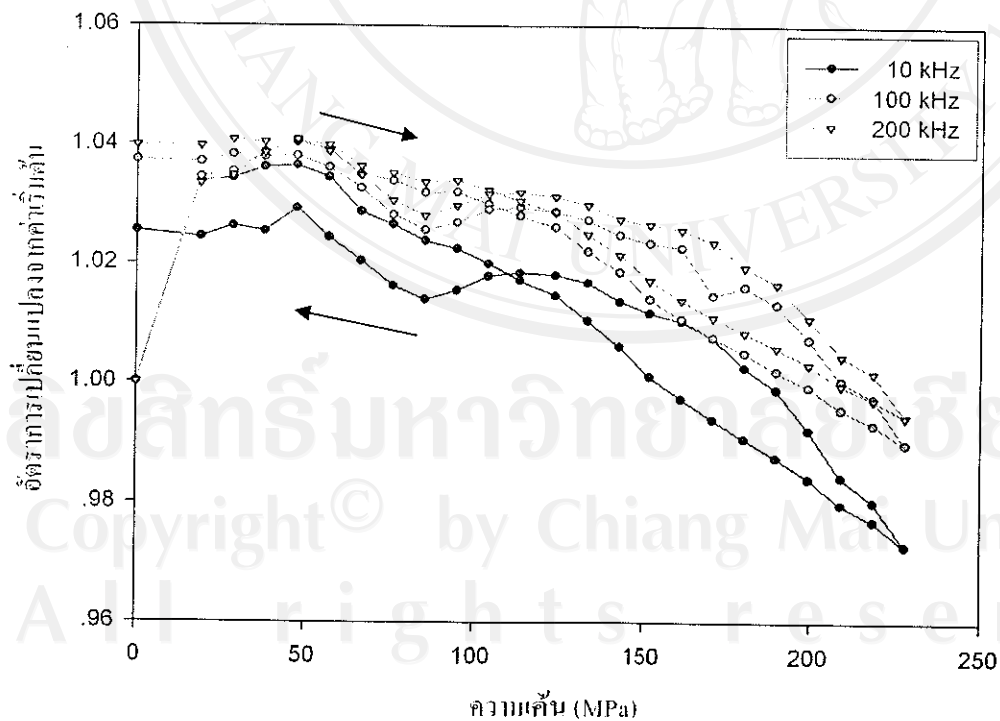
รูป 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความดันของเซรามิก 0.6PMN-0.4PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



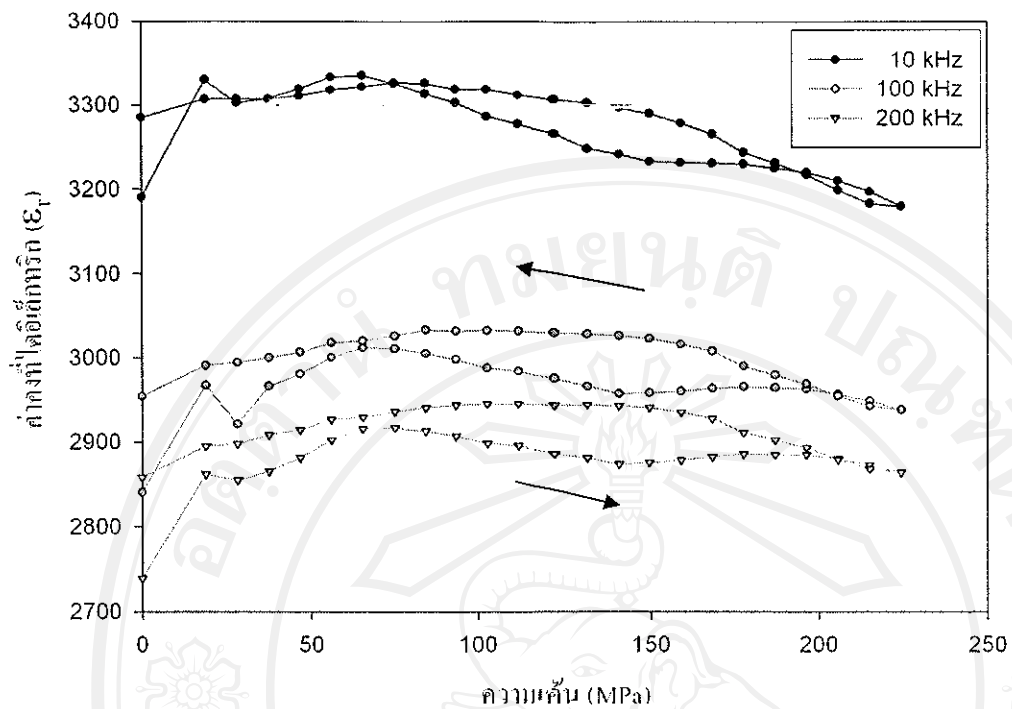
รูป 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรกับความดันของเซรามิก 0.6PMN-0.4PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



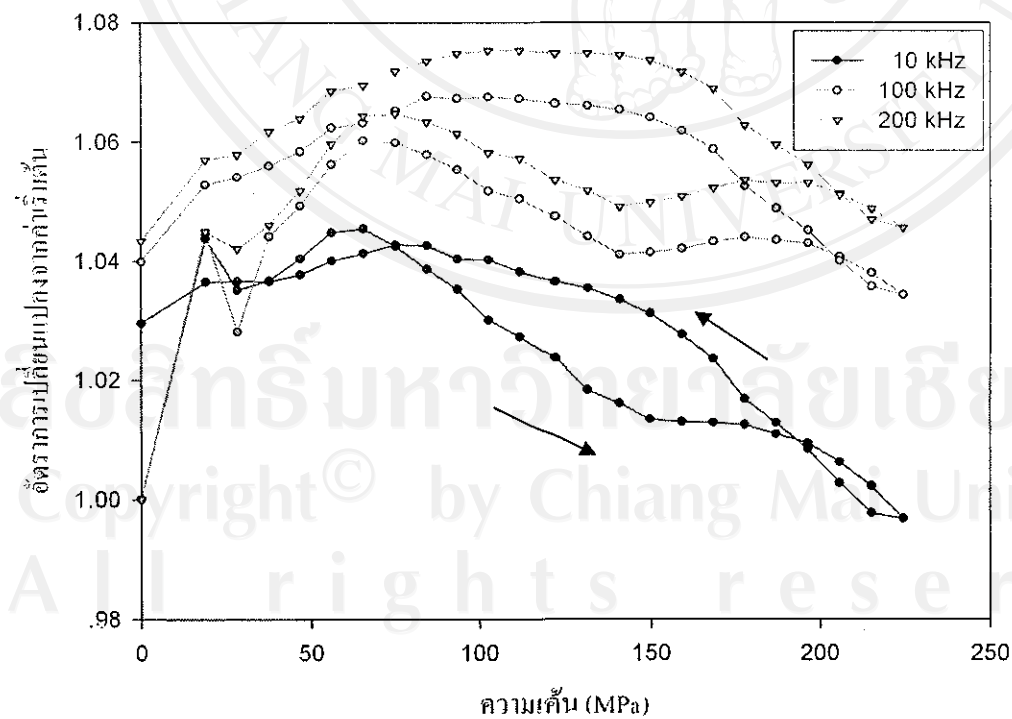
รูป 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PMN-0.3PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



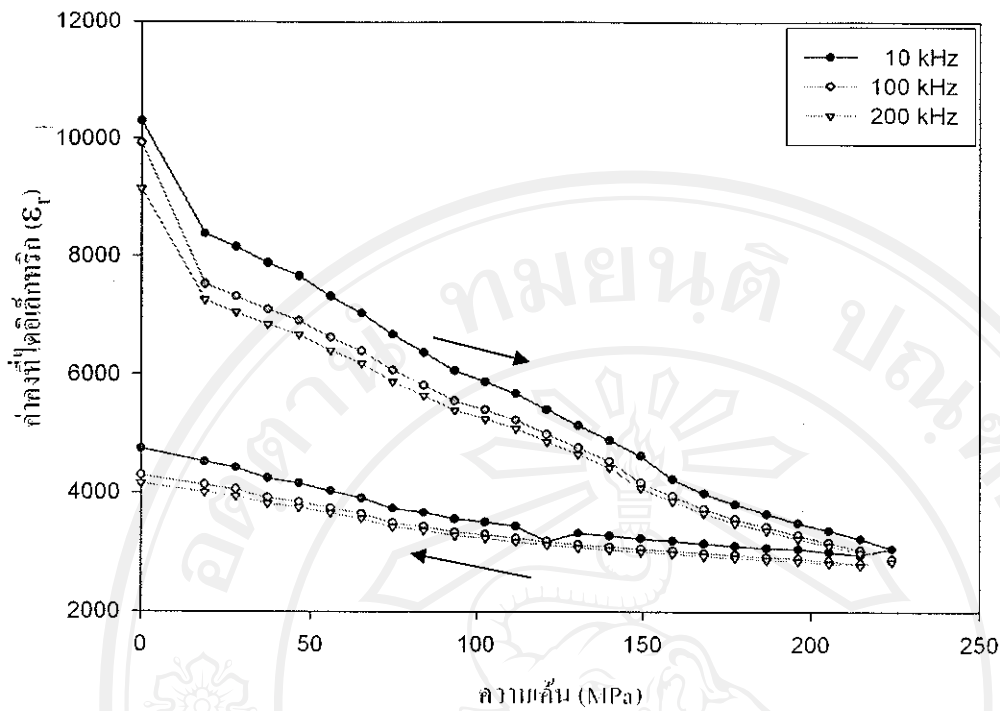
รูป 4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PMN-0.3PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



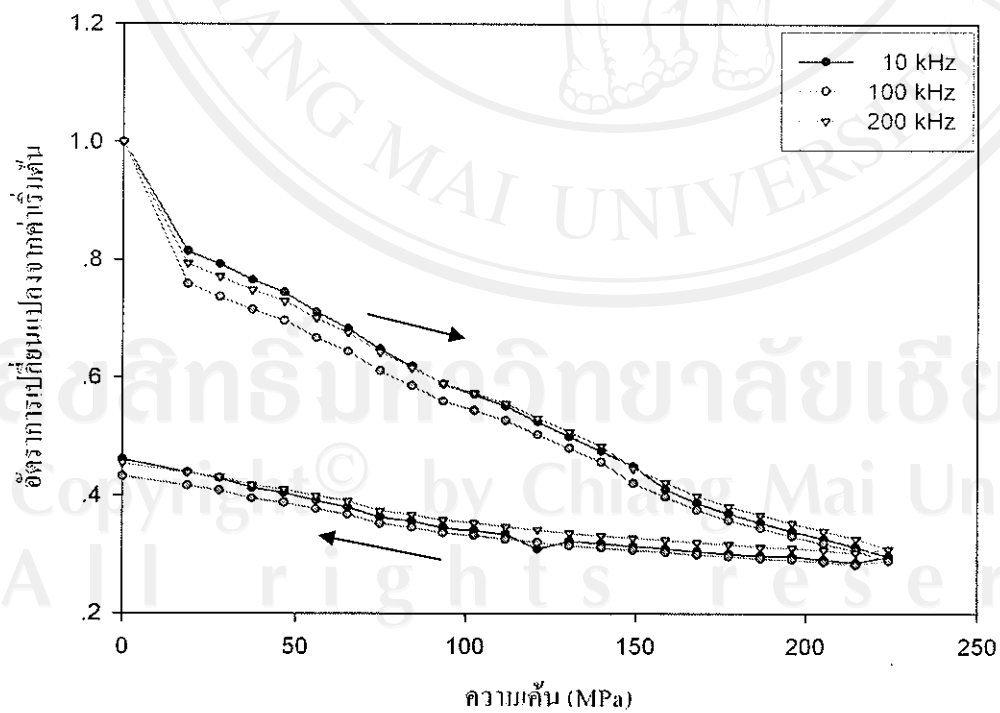
รูป 4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PMN-0.2PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



รูป 4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PMN-0.2PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว

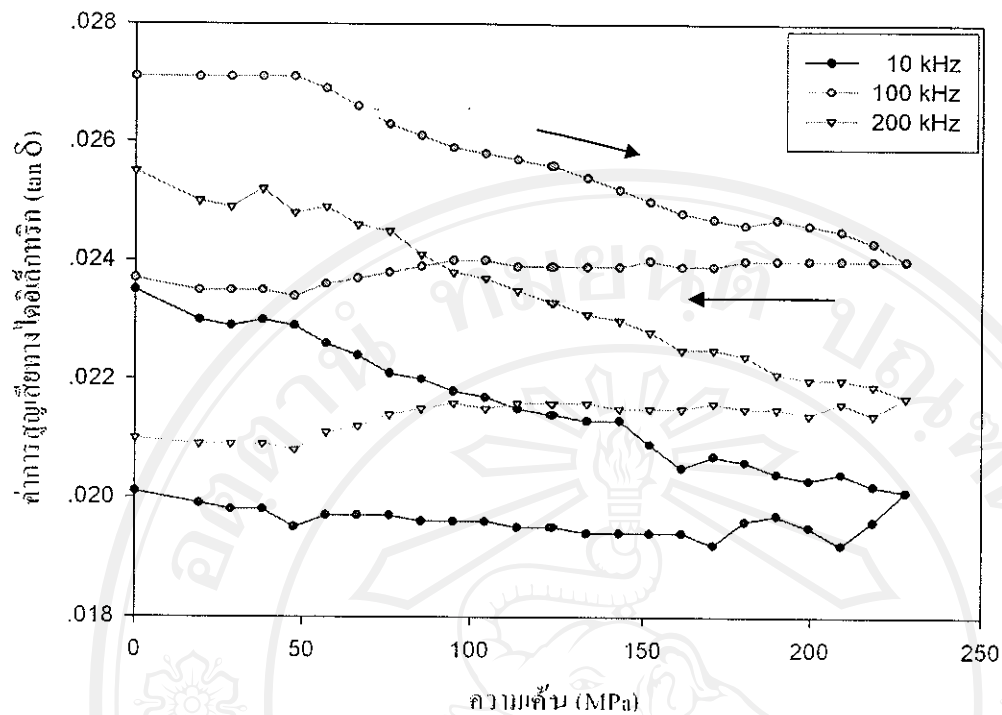


รูป 4.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PMN-0.1PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว

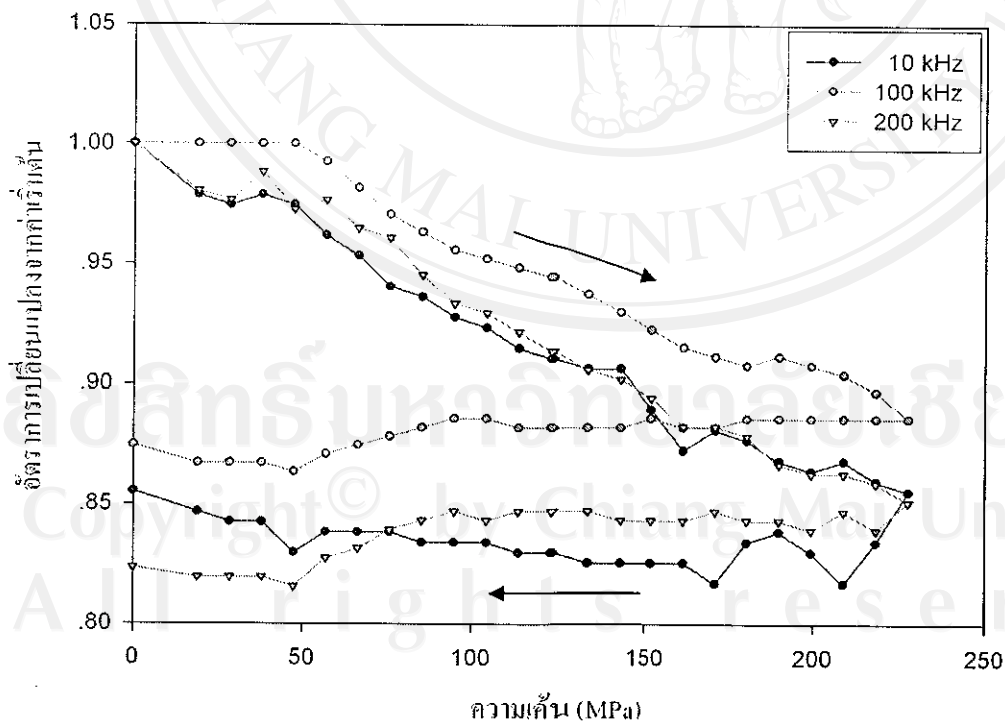


รูป 4.52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PMN-0.1PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว

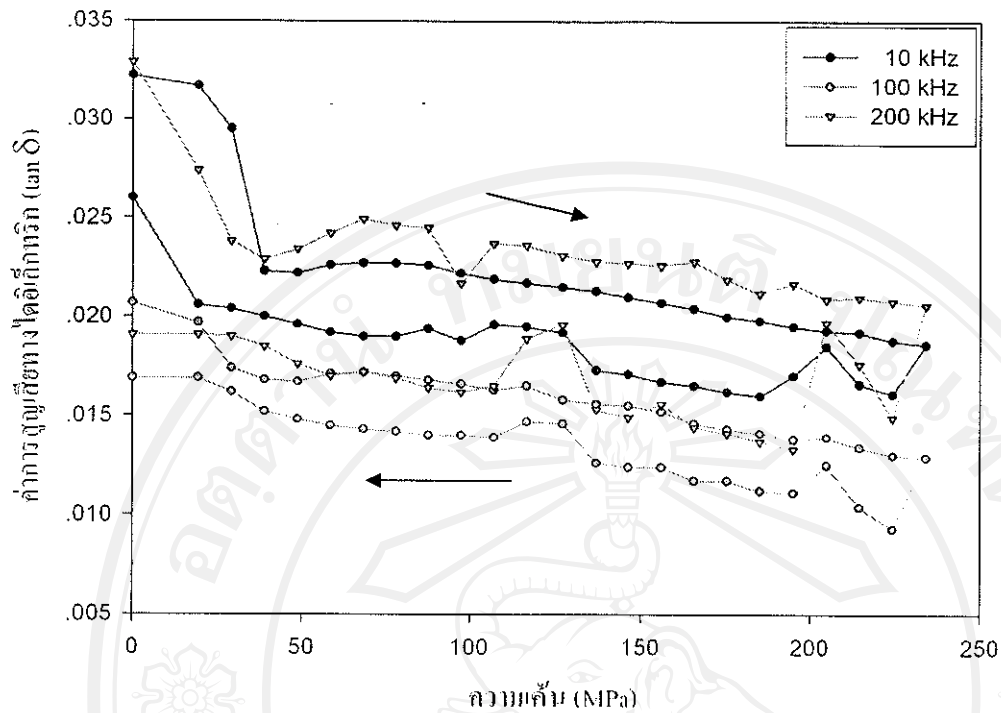
สำหรับในส่วนของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก พบว่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงค่อนข้างชัดเจนเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้คล้ายกับผลการทดลองจากงานวิจัยของสุพัตราในเซรามิก 0.7PMN-0.3PZT และ 0.9PMN-0.1PZT[18] (รูป 4.53-4.62) ซึ่งคาดว่าจะเป็นผลจากการจัดเรียงตัวใหม่ของทิศทางโพลาริเซชันของโดเมน[15] หรือการยับยั้งการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน และในระหว่างการลดความถี่ลงนั้นพบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากโดเมนที่ถูกบีบบังคับเริ่มสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้นเรื่อยๆตามความถี่ที่ลดลง อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่แล้วค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงลดความถี่มีค่าต่ำกว่าในช่วงเพิ่มความถี่ และจะมีค่าที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความถี่ในระดับนี้ (0-230 MPa) ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรต่อโดเมนหรือโครงสร้างภายในของสาร PMN-PT แล้ว จึงทำให้ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าที่เหมือนเดิมนั่นเอง



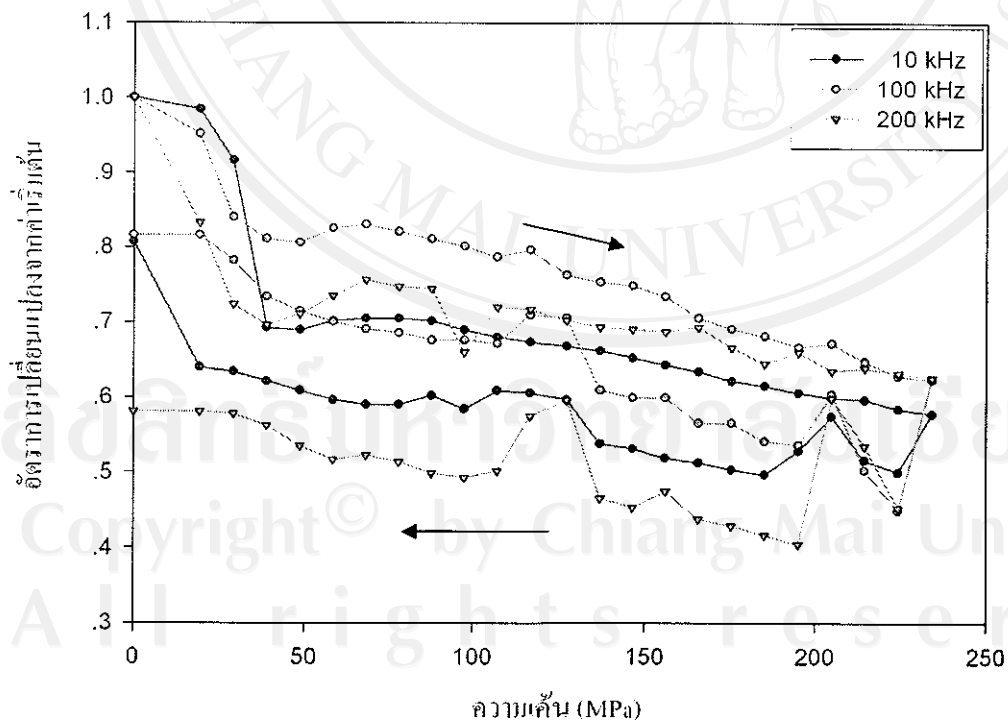
รูป 4.53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PMN-0.5PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



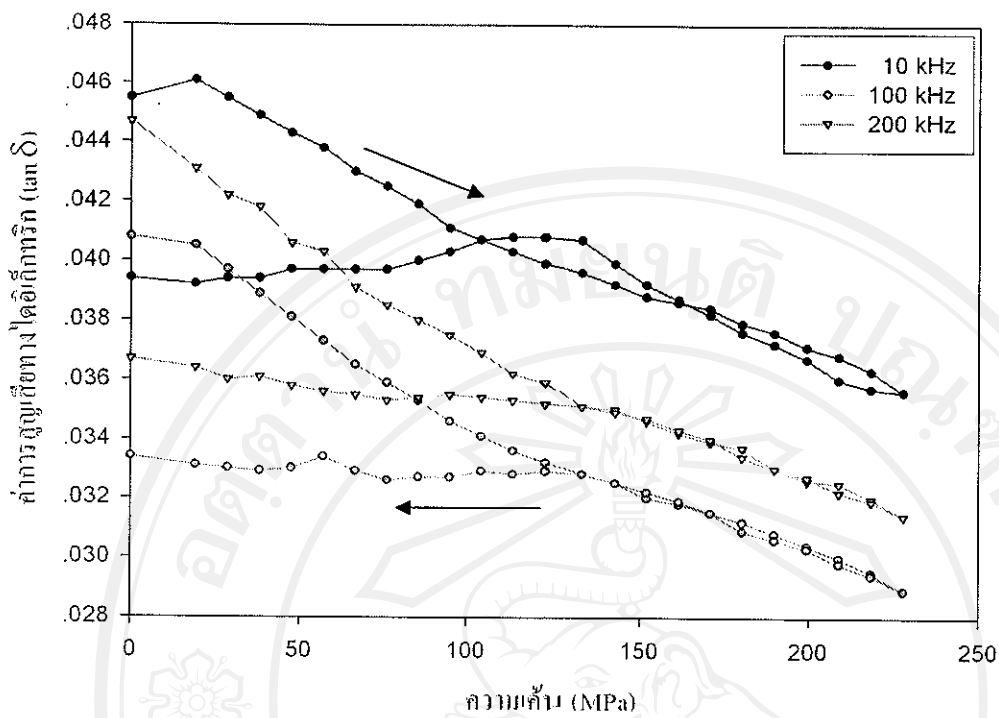
รูป 4.54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PMN-0.5PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



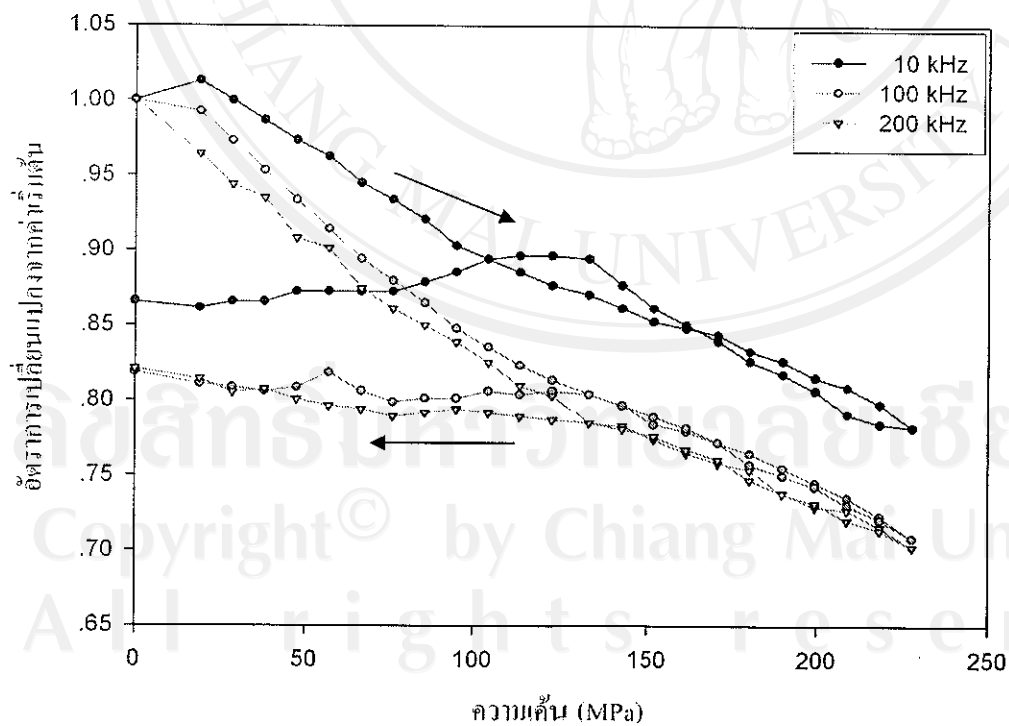
รูป 4.55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PMN-0.4PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



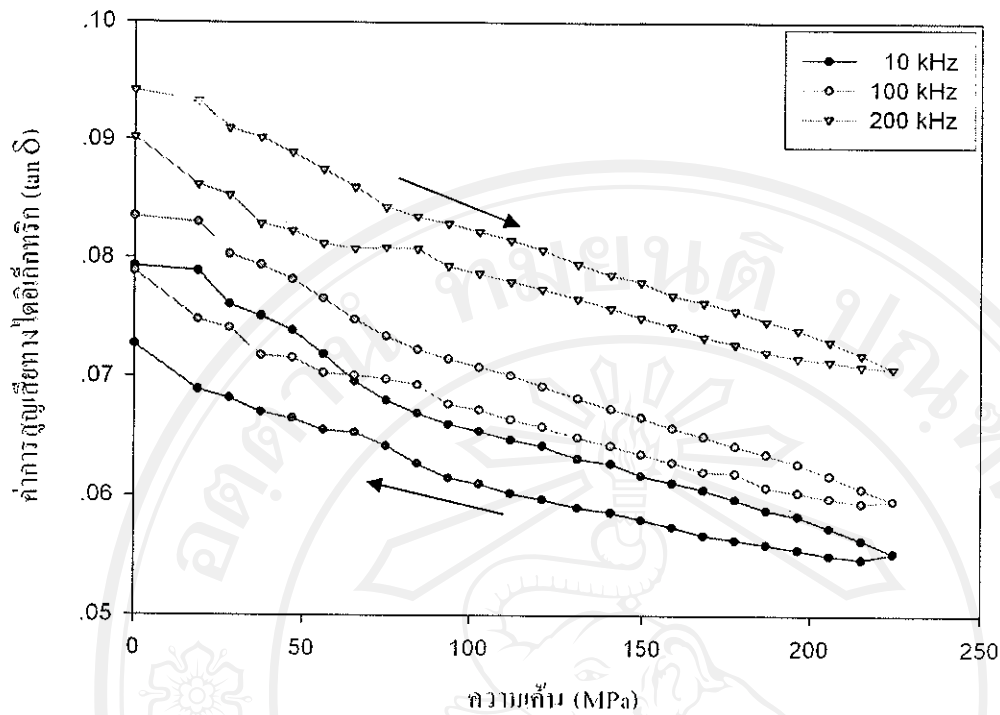
รูป 4.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PMN-0.4PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



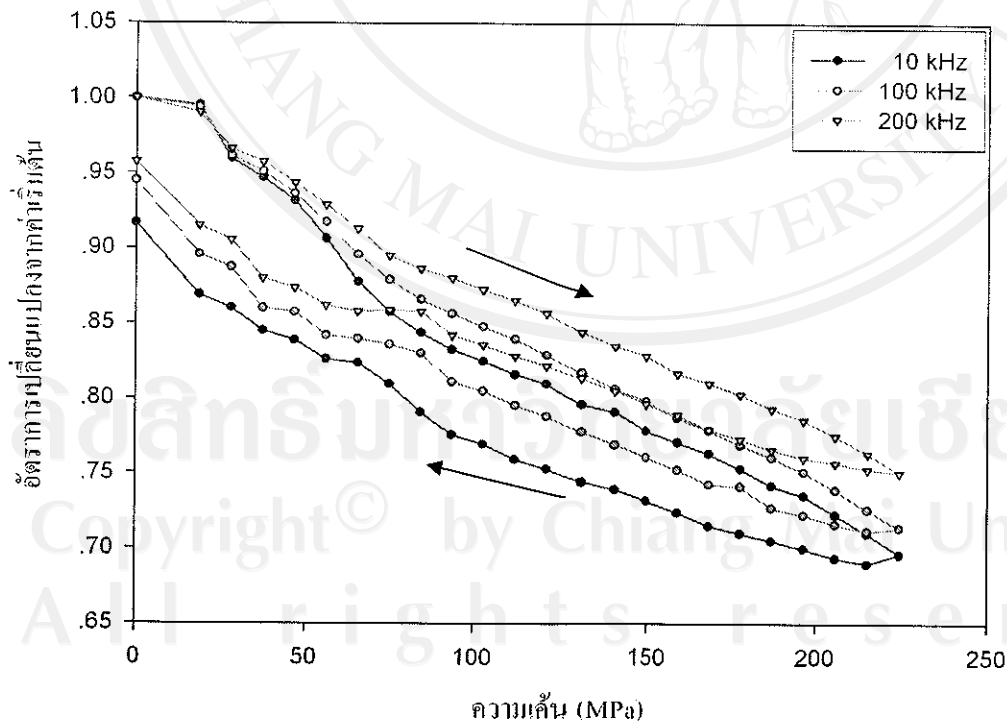
รูป 4.57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PMN-0.3PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



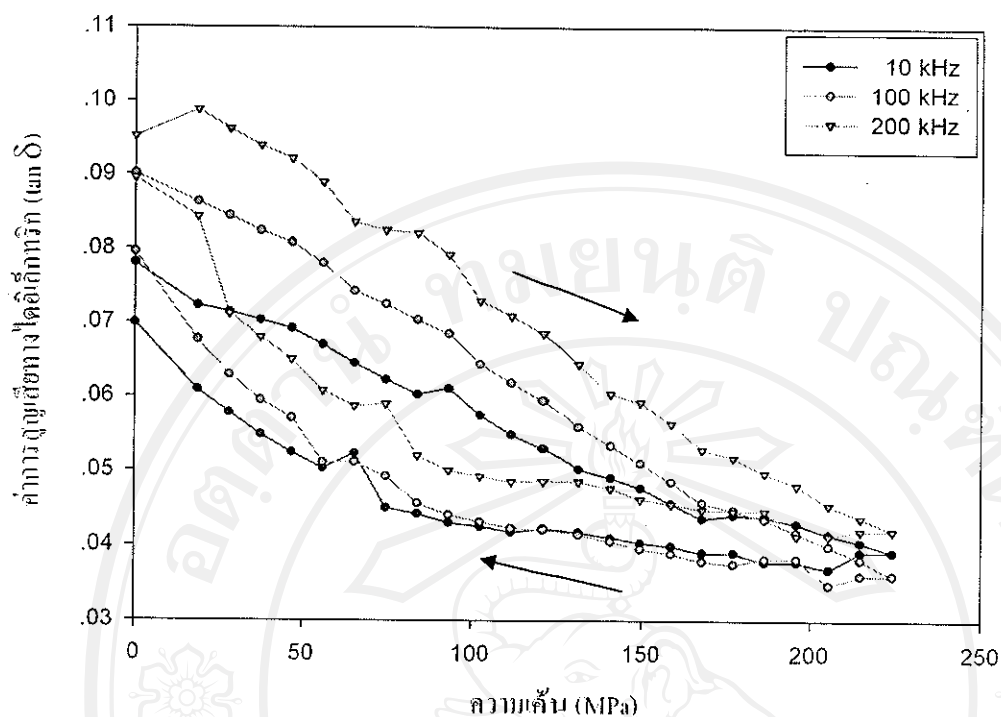
รูป 4.58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PMN-0.3PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



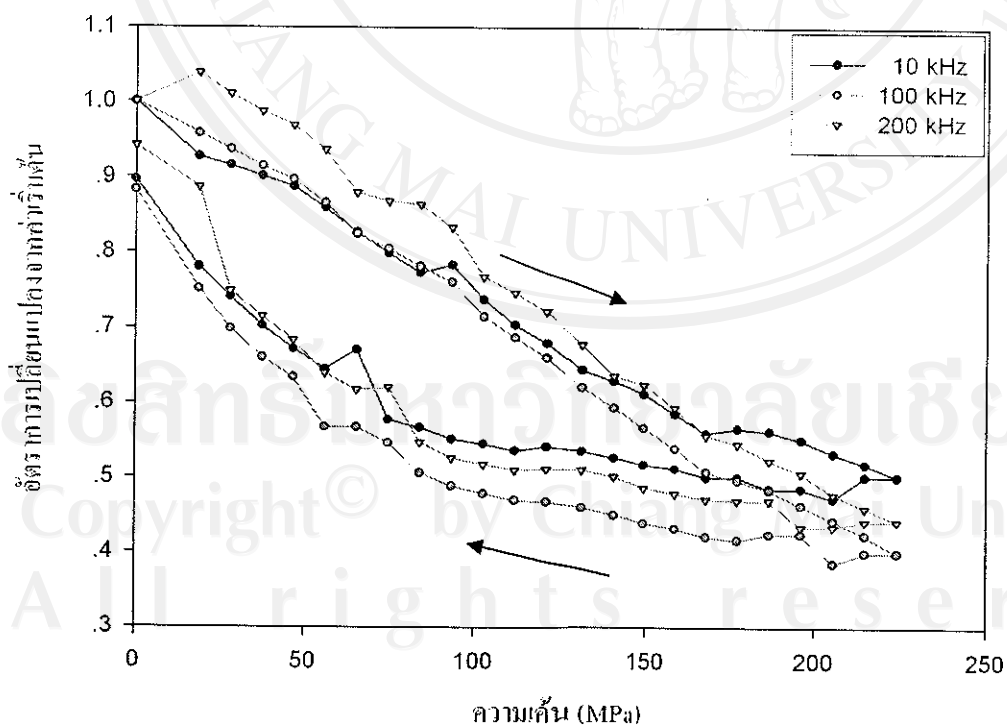
รูป 4.59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความดันของเซรามิก 0.8PMN-0.2PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



รูป 4.60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความดันของเซรามิก 0.8PMN-0.2PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



รูป 4.61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PMN-0.1PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



รูป 4.62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PMN-0.1PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว

4.7 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกเลดอินเดียมไนโอเบต-เลดไทเทเนต (PIN-PT)

4.7.1 สารเซรามิก PIN-PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว

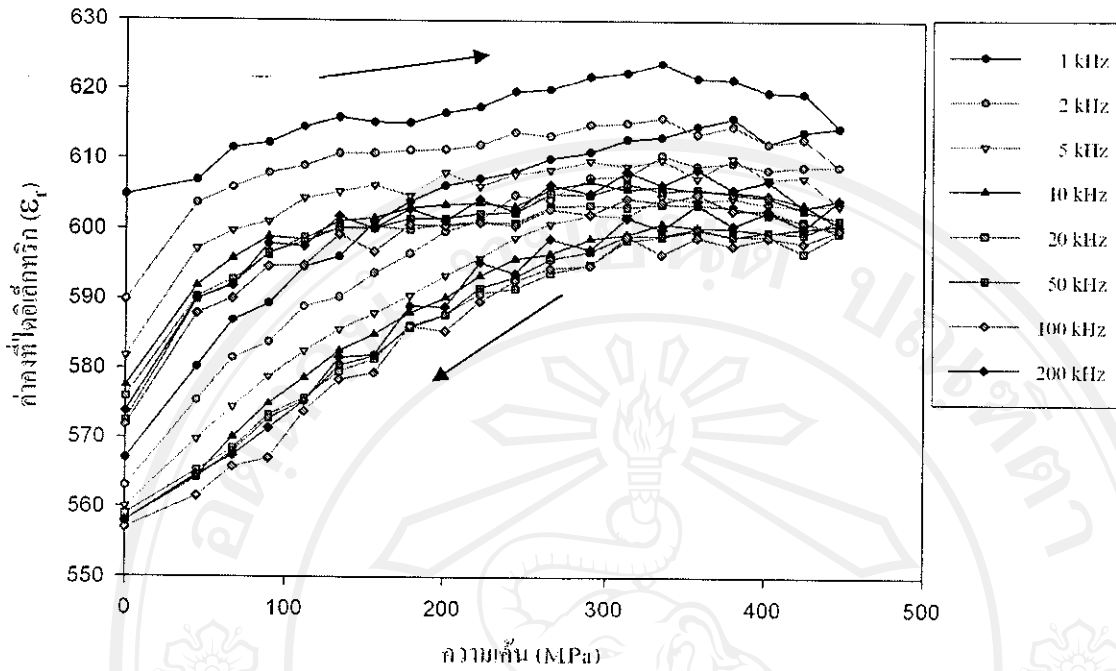
สำหรับเซรามิกในระบบ PIN-PT ที่เตรียมได้และยังไม่ผ่านการทำขั้ว เมื่อนำมาทำการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกภายใต้สภาวะความเค้น (0-400 MPa) พบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วในช่วงของการเพิ่มความเค้นนั้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน (รูป 4.63-4.72) ซึ่งคล้ายกับผลการทดลองในเซรามิก 0.6PMN-0.4PT และ 0.7PMN-0.3PT ซึ่งเป็นสารเซรามิกที่มีระบบที่คล้ายกันกล่าวคือ เป็นสารเซรามิกที่ผสมกันระหว่างสารเซรามิกรีแลกเซอร์กับ PT โดยจากผลการทดลองพบว่าในเซรามิก 0.6PIN-0.4PT และ 0.9PIN-0.1PT จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงอย่างชัดเจนในช่วงความเค้น 0-400 MPa (รูป 4.65-4.66 และ 4.71-4.72) ส่วนในเซรามิกองค์ประกอบอื่นๆจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ไม่แน่นอน โดยพบว่าสำหรับเซรามิก 0.5PIN-0.5PT ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วง 0-370 MPa แล้วจึงเริ่มลดลงเมื่อความเค้นยังคงเพิ่มขึ้น ในขณะที่เซรามิก 0.7PIN-0.3PT ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วง 0-100 MPa แล้วจึงเริ่มลดลง และสำหรับเซรามิก 0.8PIN-0.2PT ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วง 0-200 MPa หลังจากนั้นจึงเริ่มลดลงเมื่อยังคงเพิ่มความเค้น (รูป 4.63-4.70) โดยที่ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่พบในเซรามิก PIN-PT ทั้งสามองค์ประกอบที่กล่าวมานั้นมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงในแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่ความเค้นที่ใส่เข้าไปนั้น เข้าไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโดเมนซึ่งจัดเรียงตัวกันอย่างสุ่ม[16] ให้เกิดการหันทิศทางของโดเมนใหม่ และทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น

หลังจากที่เพิ่มความเค้นจนถึงประมาณ 400 MPa จึงได้เริ่มลดความเค้นลง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่คล้ายกันในทุกองค์ประกอบในสารเซรามิก PIN-PT กล่าวคือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการให้ความเค้น หลังจากนั้นจึงมีค่าลดลงจนกระทั่งความเค้นลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากโดเมนพยายามที่จะจัดเรียงตัวให้มีโครงสร้างเหมือนเดิมก่อนที่จะให้ความเค้นเพื่อทำให้มีพลังงานในตัวเองที่น้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามในเซรามิก PIN-PT ทุกองค์ประกอบจะพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วงลดความเค้นของจะมีค่าที่แตกต่างกับในช่วงที่เพิ่มความเค้นมาก นั่นหมายความว่าโครงสร้างของโดเมนไม่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างให้กลับมาเหมือนเดิมได้ ซึ่งสภาวะที่เกิดขึ้นเช่นนี้แสดงว่าการให้ความเค้นในระดับนี้ (0-400 MPa) ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรต่อโดเมนหรือโครงสร้างภายใน ทำให้เมื่อลดความเค้นลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าแตกต่างจากค่าเดิมมาก สำหรับเซรามิก 0.5PIN-0.5PT พบว่าค่าคงที่ไดอิ

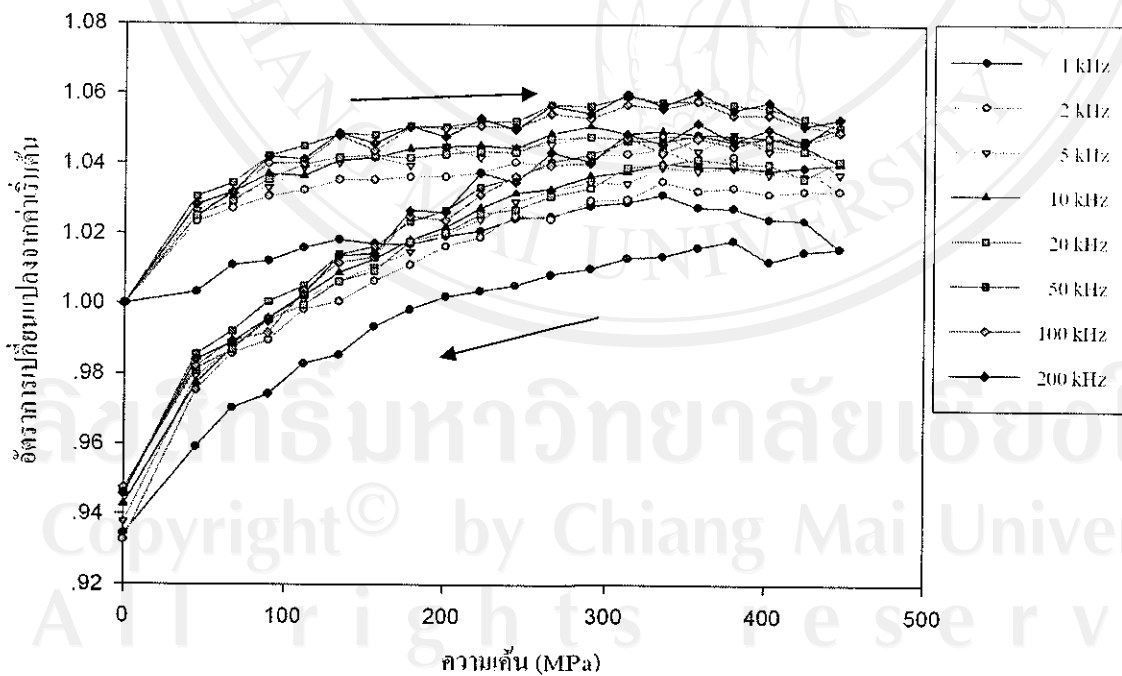
เหล็กทริกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเค้นลดลงจนถึง 390 MPa แล้วจึงเริ่มลดลง สำหรับเซรามิก 0.6PIN-0.4PT พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นลดลงในช่วงแรกจนถึงค่าความเค้นประมาณ 140 MPa จากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเมื่อความเค้นลดลง สำหรับเซรามิก 0.7PIN-0.3PT ,0.8PIN-0.2PT และ 0.9PIN-0.1PT นั้นพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นลดลงจนถึงประมาณ 400 MPa และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อลดความเค้นลง



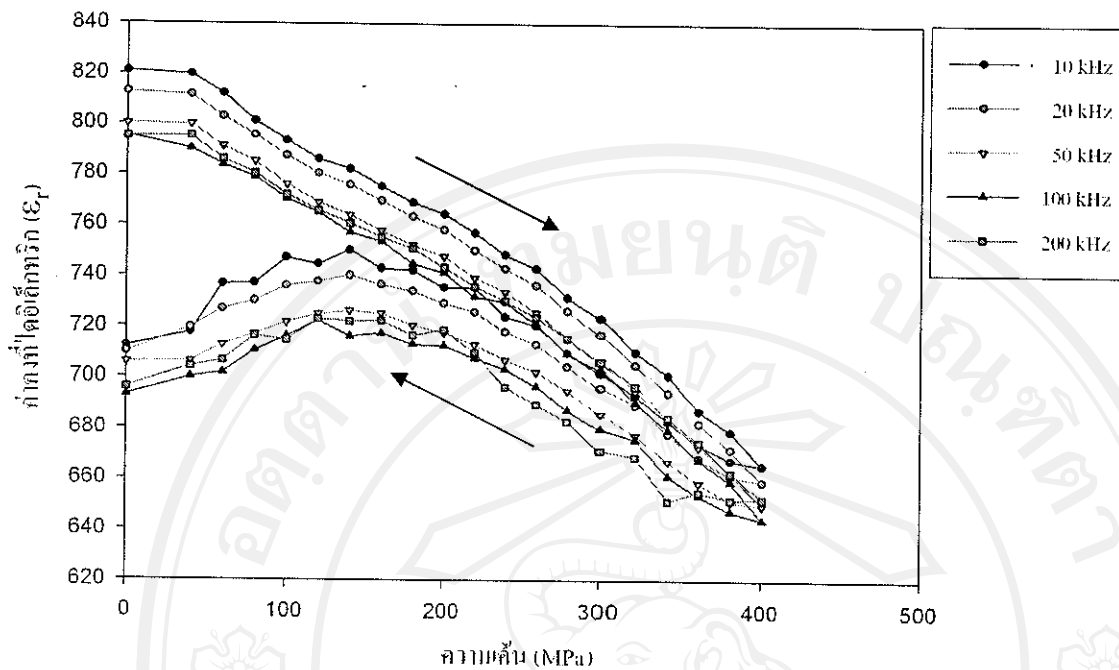
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved



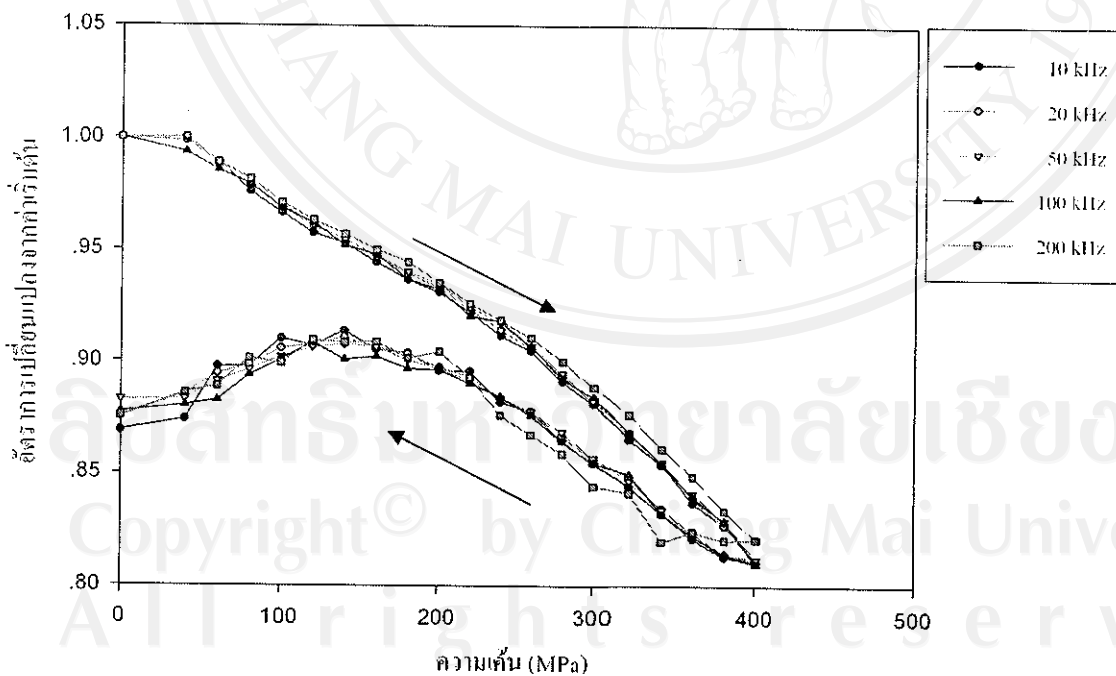
รูป 4.63 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PIN-0.5PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



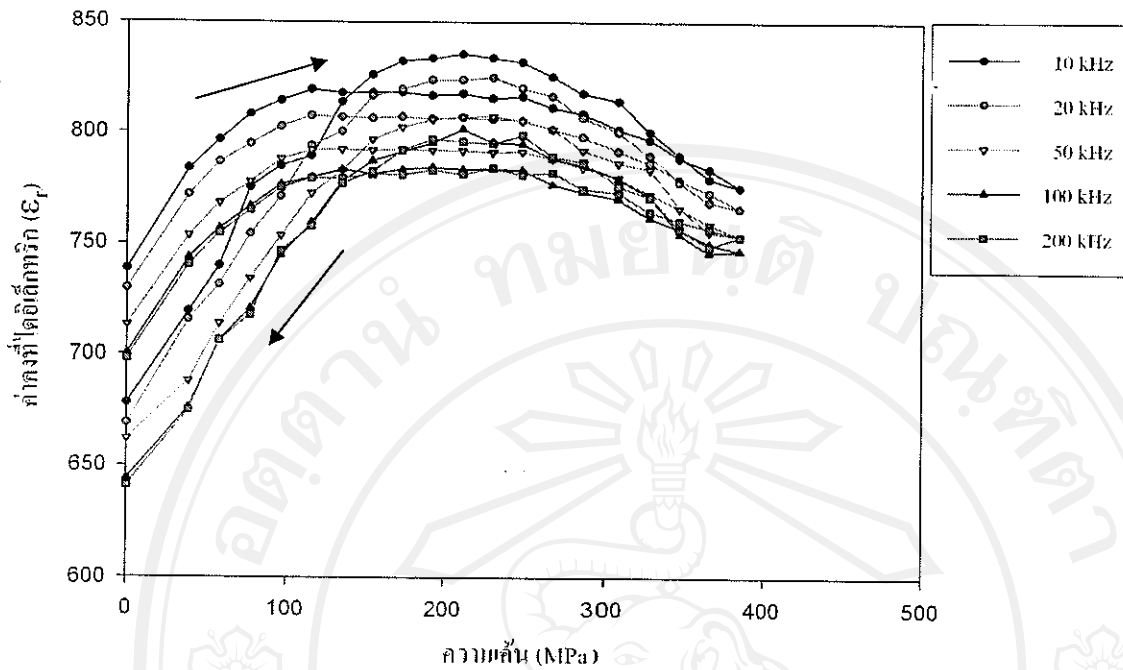
รูป 4.64 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PIN-0.5PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



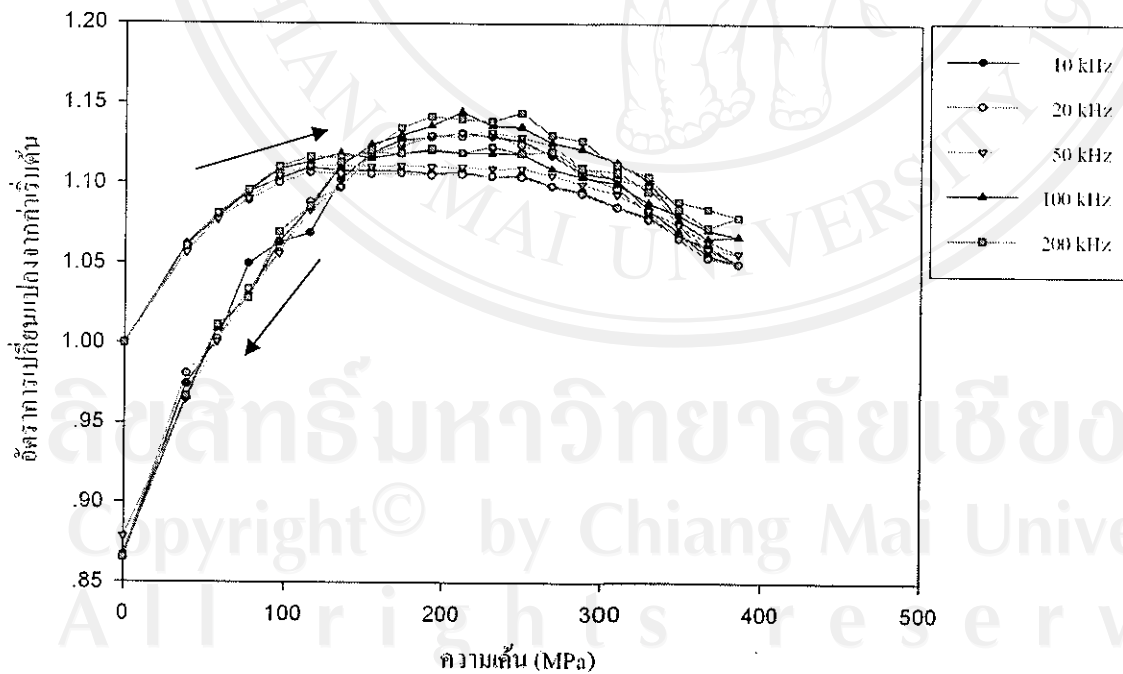
รูป 4.65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PIN-0.4PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



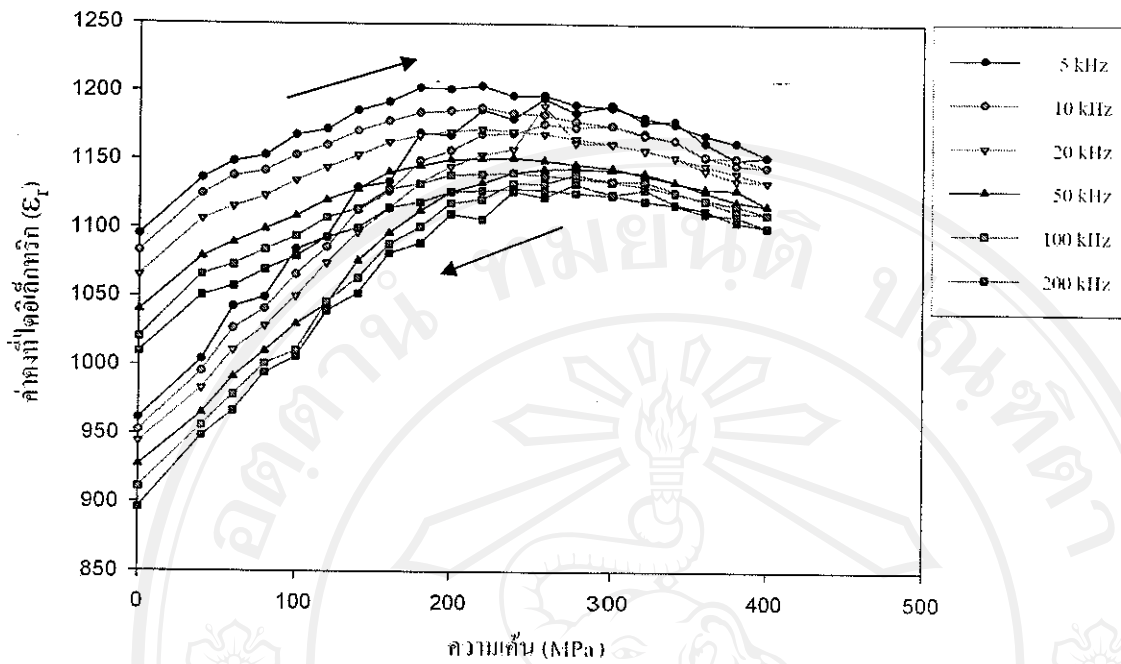
รูป 4.66 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PIN-0.4PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



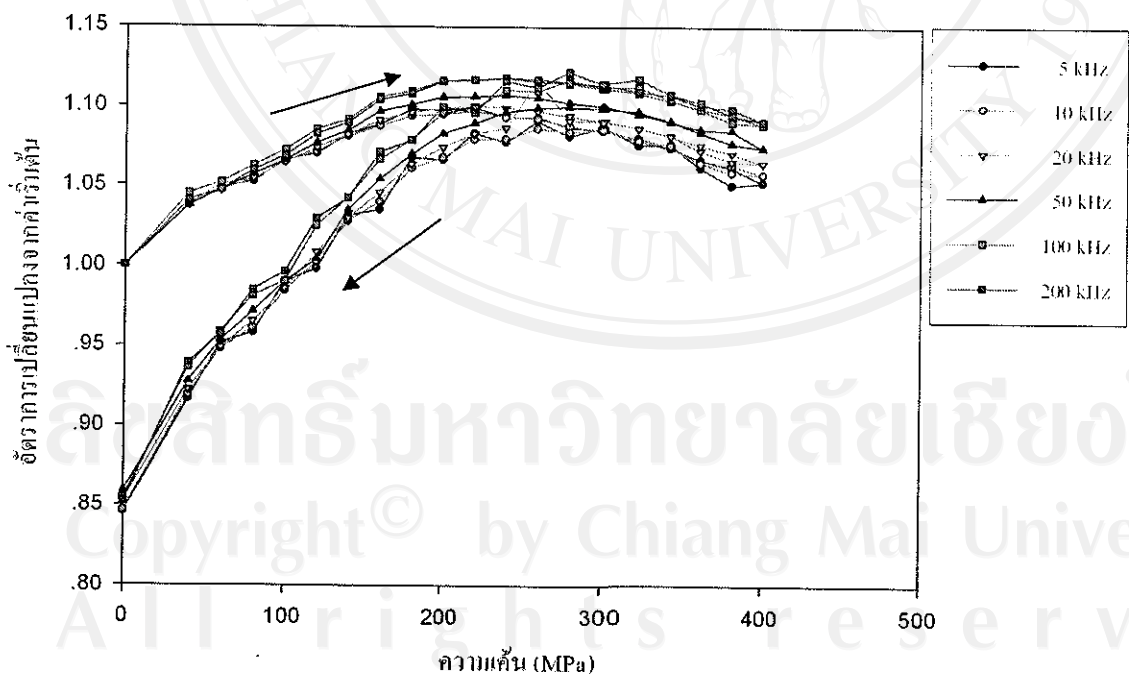
รูป 4.67 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PIN-0.3PT ที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำ



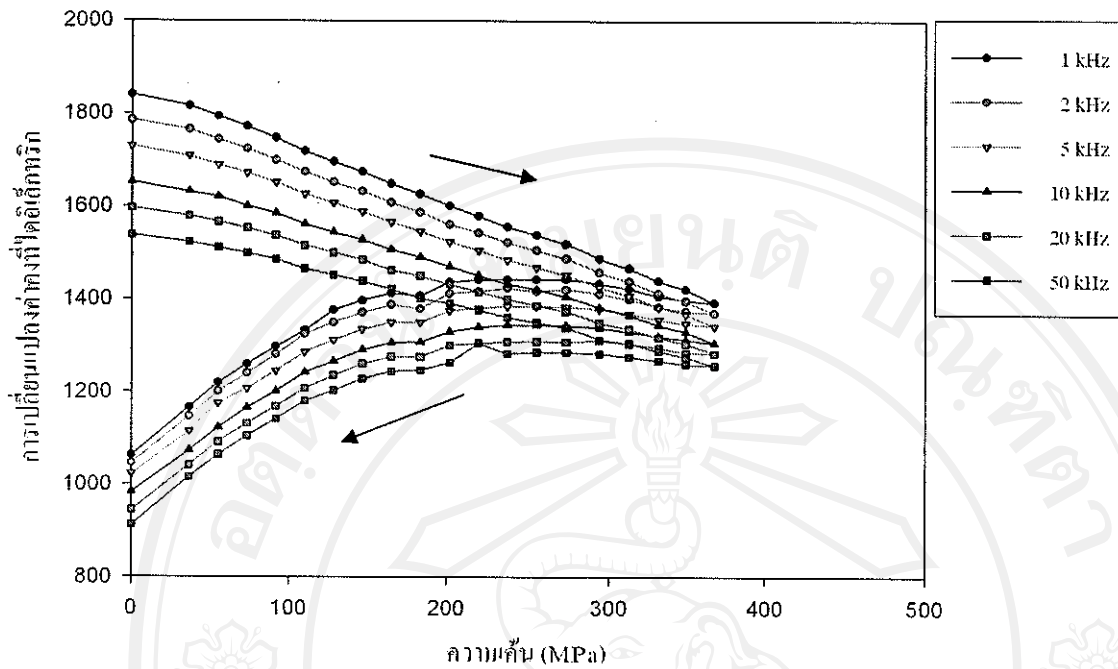
รูป 4.68 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PIN-0.3PT ที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำ



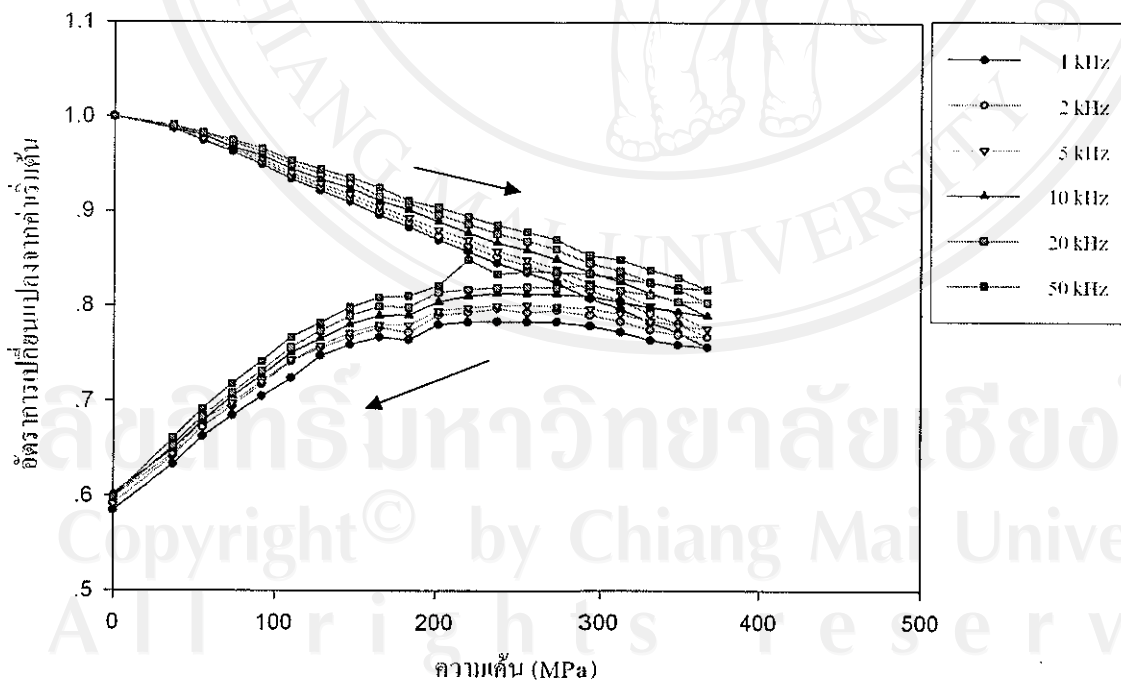
รูป 4.69 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PIN-0.2PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



รูป 4.70 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PIN-0.2PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว

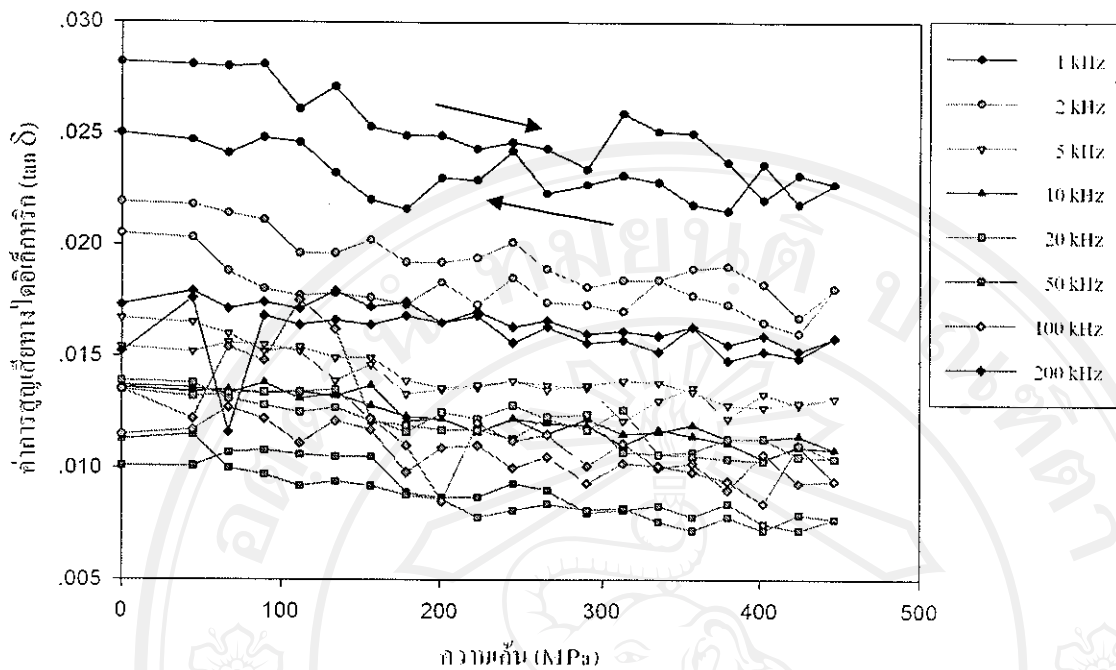


รูป 4.71 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PIN-0.1PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว

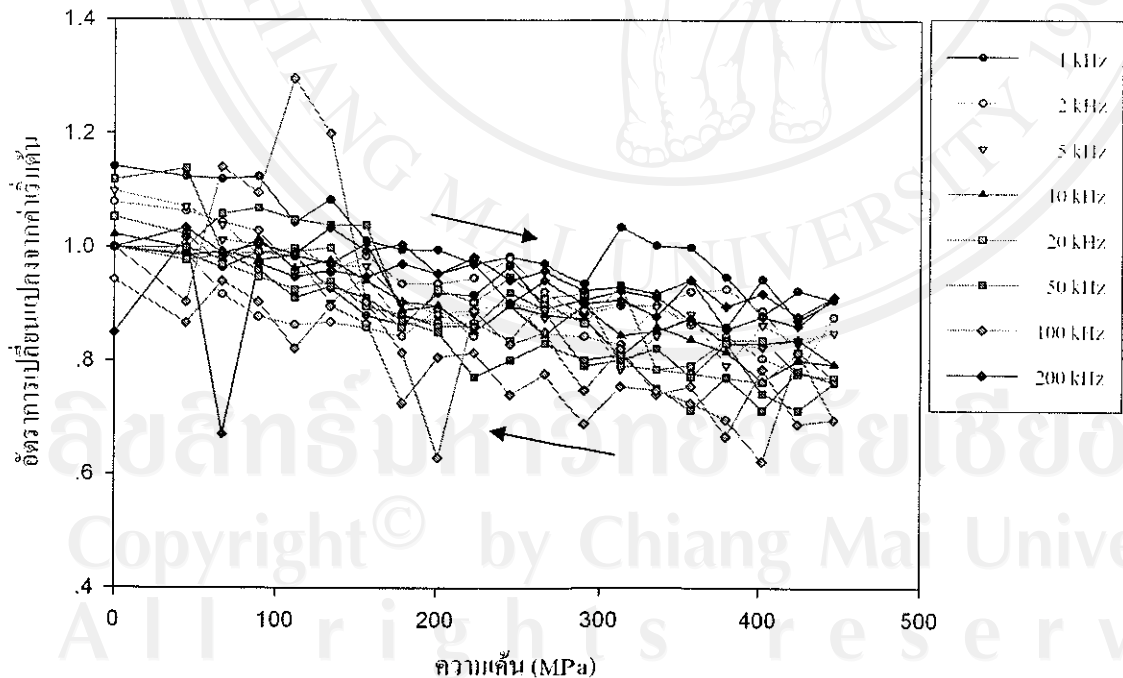


รูป 4.72 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PIN-0.1PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว

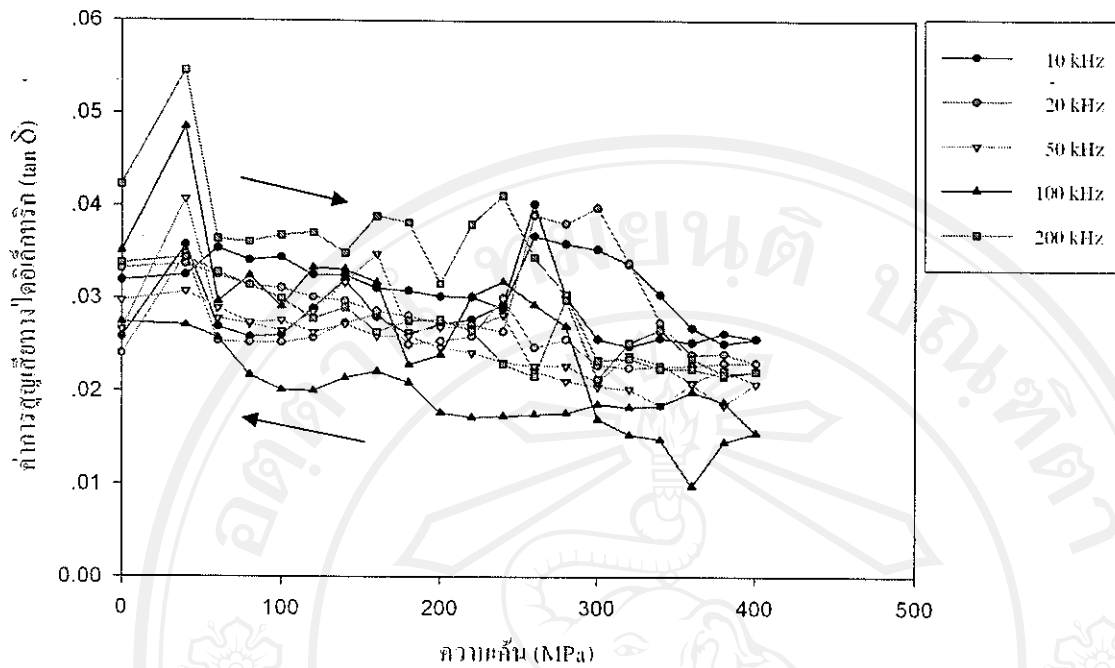
สำหรับในส่วนของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก พบว่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนในเซรามิก PIN-PT ทุกองค์ประกอบ แต่อย่างไรก็ดีพบว่า การเปลี่ยนแปลงโดยรวมมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งคล้ายกับผลการทดลองในสารเซรามิก 0.8PMN-0.2PT ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นผลจากการที่ความถี่ไปบีบบังคับให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโดเมน[16] หรืออาจไปยับยั้งเพื่อไม่ให้ผนังโดเมนเกิดการเคลื่อนที่[15] และในระหว่างการลดความถี่ลงนั้นพบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังรูป 4.73-4.82 เนื่องจากโครงสร้างของโดเมนเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อพยายามให้มีโครงสร้างเหมือนเดิมก่อนที่จะให้ความถี่ และพยายามจะรักษาพลังงานภายในตัวเองให้มีค่าน้อยที่สุดนั่นเอง



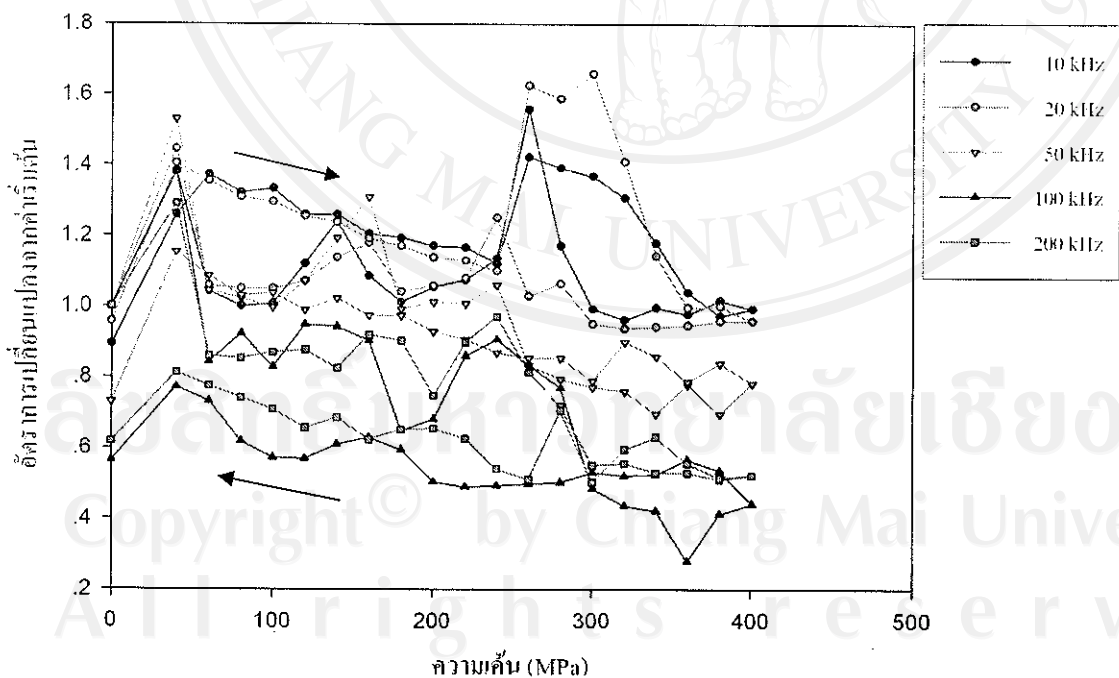
รูป 4.73 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PIN-0.5PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



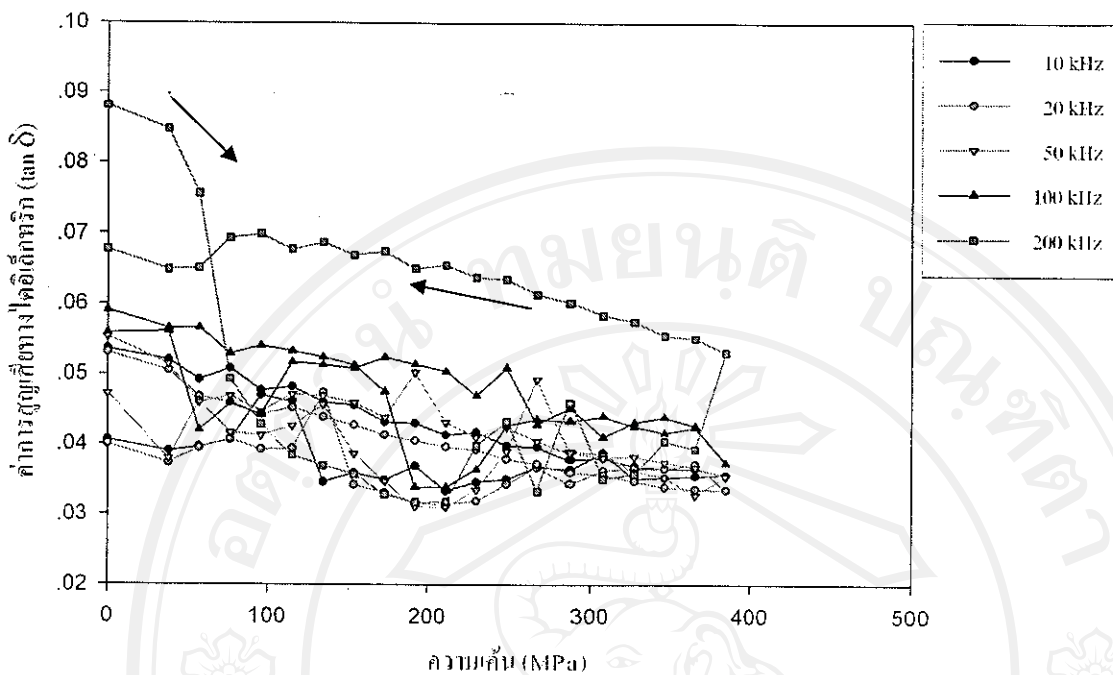
รูป 4.74 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PIN-0.5PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



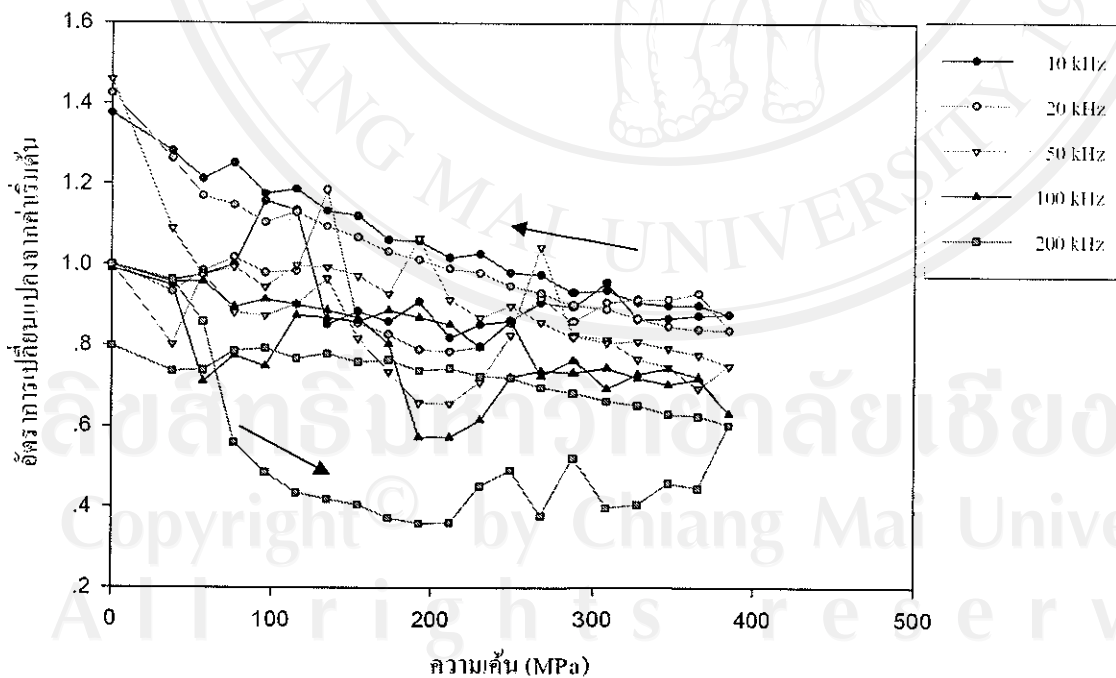
รูป 4.75 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PIN-0.4PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



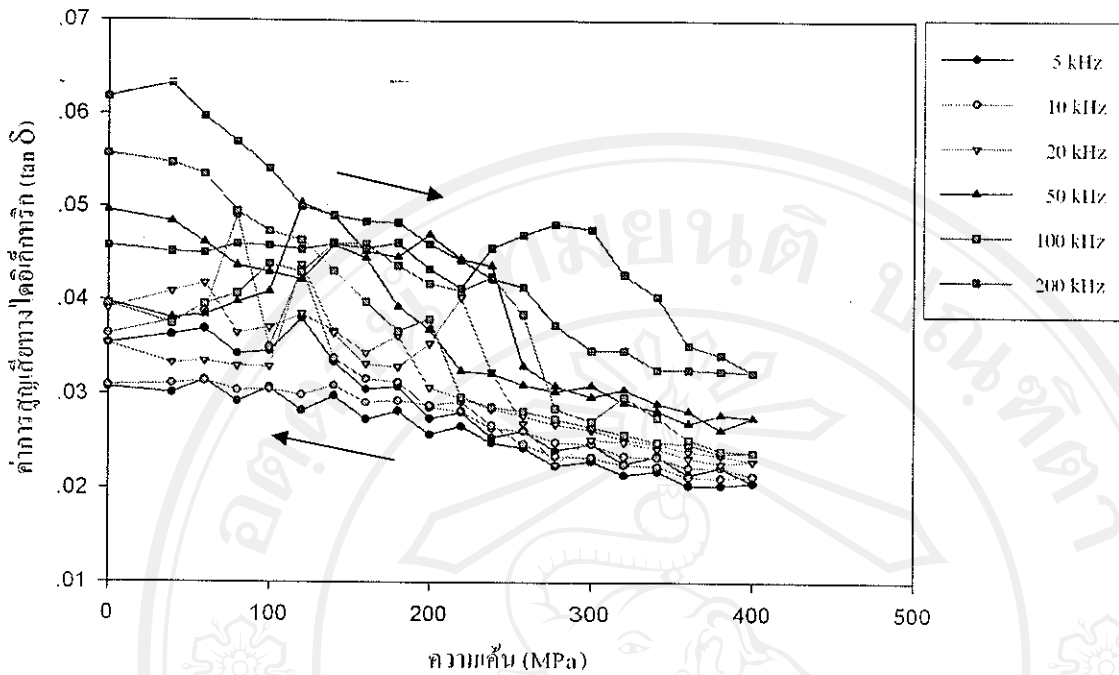
รูป 4.76 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PIN-0.4PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



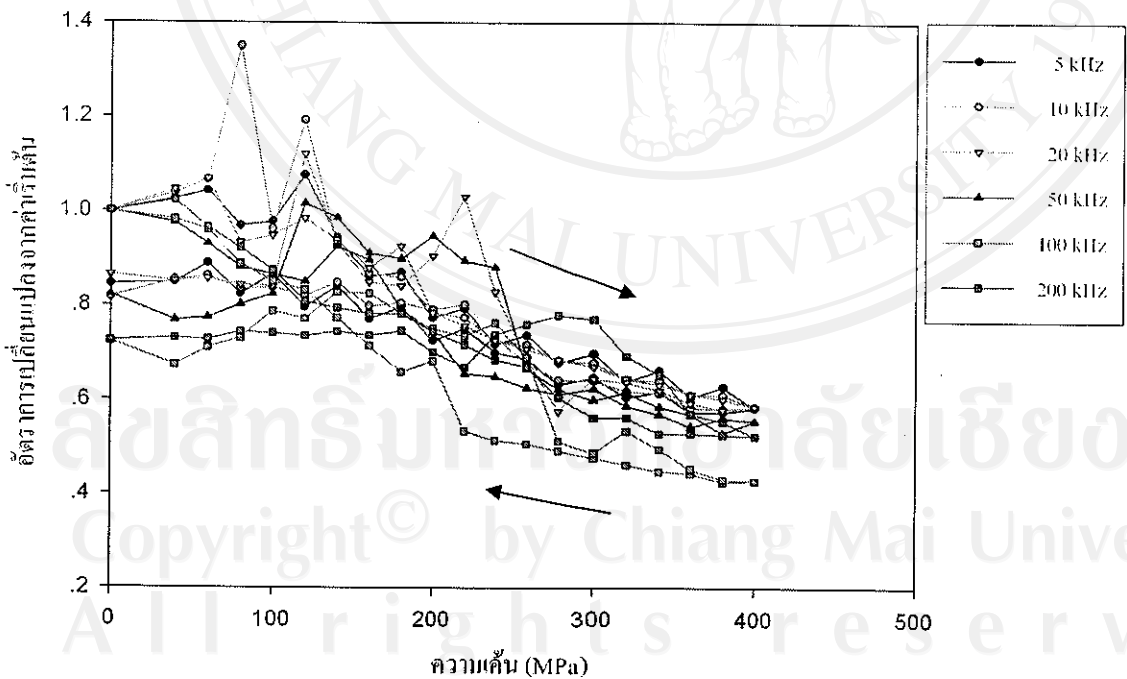
รูป 4.77 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PIN-0.3PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



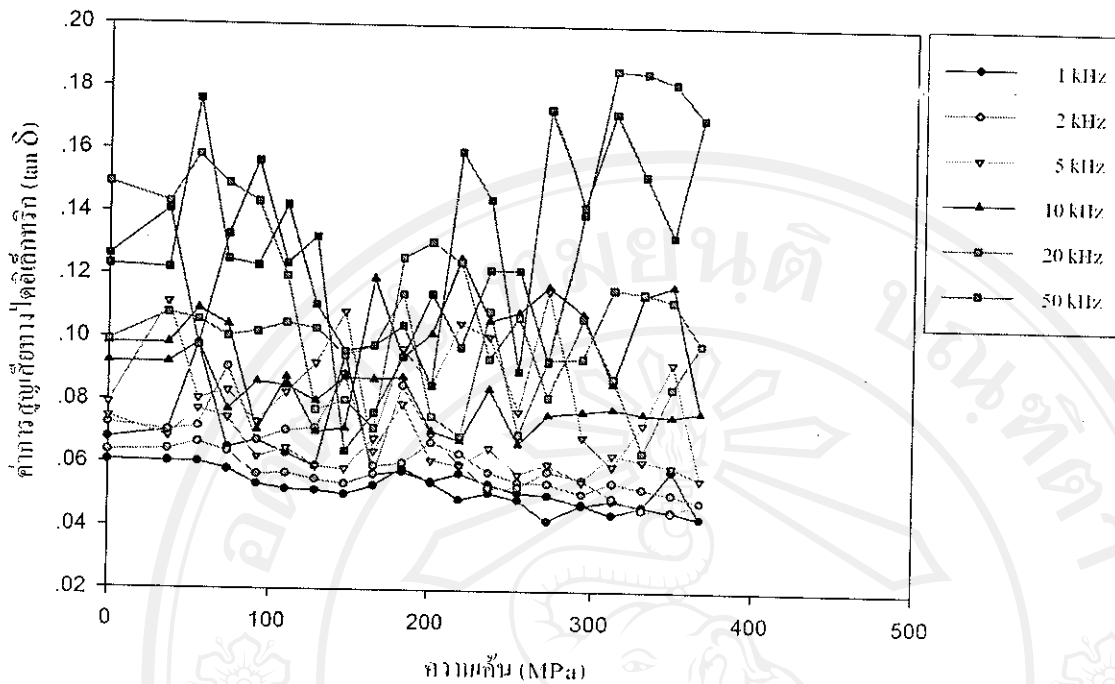
รูป 4.78 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PIN-0.3PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



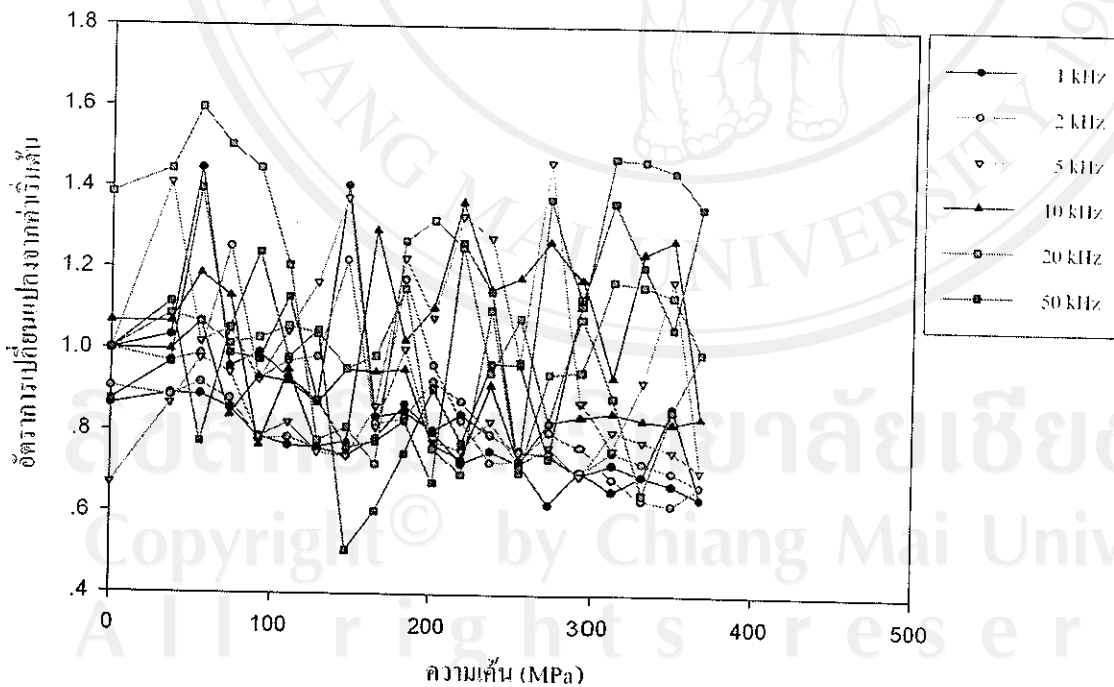
รูป 4.79 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PIN-0.2PT ที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำ



รูป 4.80 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PIN-0.2PT ที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำ



รูป 4.81 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PIN-0.1PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว

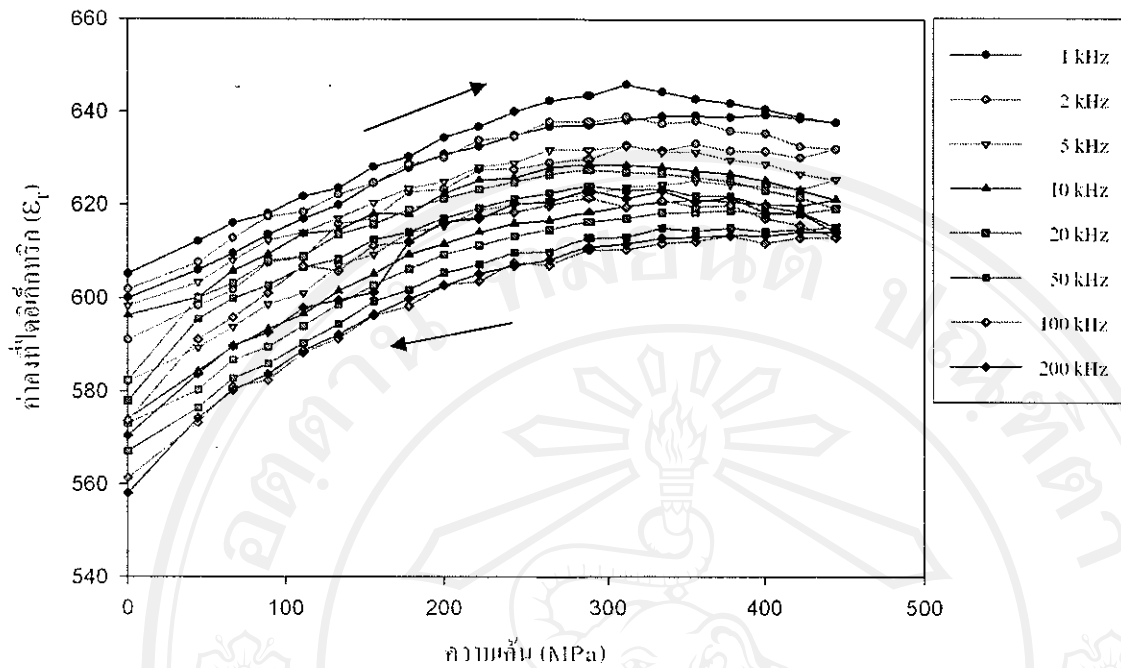


รูป 4.82 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PIN-0.1PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว

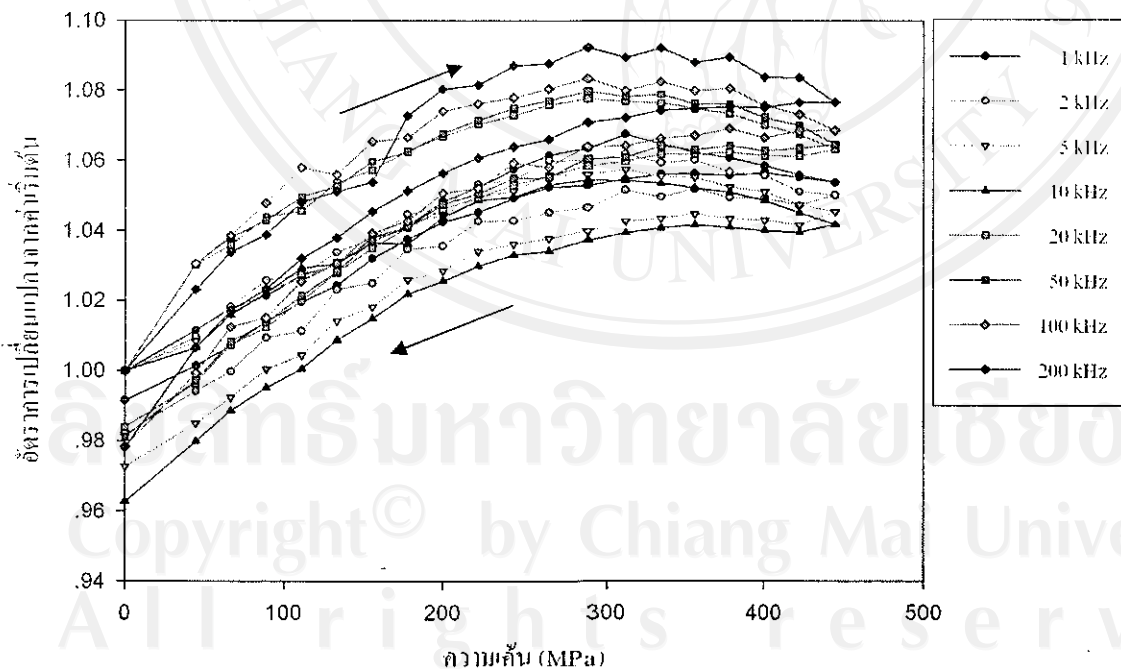
4.7.2 กรณีสารเซรามิก PIN-PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว

เมื่อนำเซรามิกในระบบ PIN-PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้วมาศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้น (0-400 MPa) พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ต่างกันเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ดังรูป 4.83-4.92 โดยจะพบว่าสำหรับเซรามิก 0.5PIN-0.5PT พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งคล้ายกับการทดลองในเซรามิก PZT 552 (soft PZT) PZT 406 (hard PZT) ของสุพัตรา[18] และสำหรับเซรามิก 0.9PIN-0.1PT นั้นพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ซึ่งคล้ายกับผลการทดลองในสารเซรามิก 0.9PMN-0.1PT ส่วนในเซรามิก 0.6PIN-0.4PT ,0.7PIN-0.3PT และ 0.8PIN-0.2PT จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ไม่แน่นอน โดยในช่วงที่เริ่มให้ความเค้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น(0.6PIN-0.4PT เริ่มลดลงที่ความเค้น 180 MPa และใน 0.7PIN-0.3PT และ 0.8PIN-0.2PT จะเริ่มลดลงที่ความเค้น 190 MPa) ซึ่งในกรณีนี้ความเค้นแบบแกนเดียวที่ใส่เข้าไปในเซรามิกมีทิศทางที่ขนานกับทิศทางในการทำขั้วเซรามิก PIN-PT ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงนี้จึงเป็นผลจากความเค้นที่ใส่เข้าไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโดเมนซึ่งประกอบไปด้วยโดเมนที่มีทิศทางที่ทำมุมกัน 180° และโดเมนที่มีทิศทางแบบสุ่ม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้มีความหนาแน่นของผนังโดเมนที่ไม่ได้ทำมุมกัน 180° เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น[21] และเมื่อเพิ่มความเค้นขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่งการเปลี่ยนแปลงภายในโดเมนก็ยังคงเกิดขึ้น แต่เกิดในลักษณะที่โดเมนบางอันอาจจะถูกรวมกับโดเมนอื่นหรืออาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปเพื่อที่จะทำให้พลังงานของโดเมนภายในเซรามิกมีค่าน้อยที่สุด

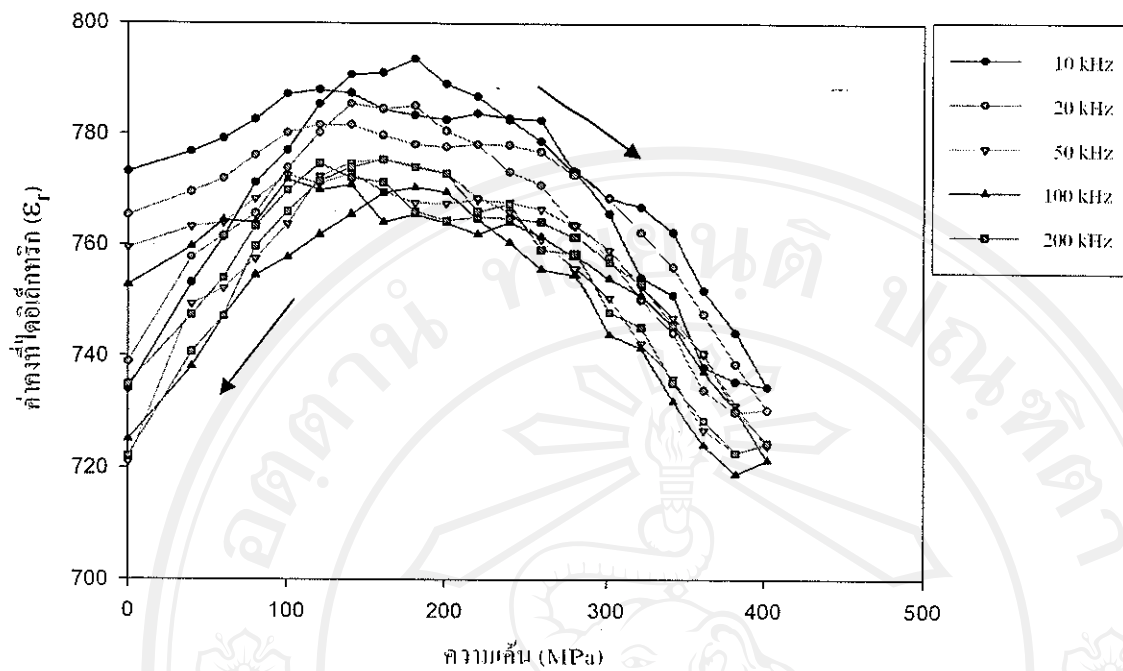
ในกรณีของการลดความเค้นพบว่าในเซรามิกที่มีองค์ประกอบต่างกัน จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน สำหรับเซรามิก 0.5PIN-0.5PT และ 0.8PIN-0.2PT นั้นพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเมื่อความเค้นลดลง สำหรับเซรามิก 0.6PIN-0.4PT และ 0.7PIN-0.3PT และ 0.9PIN-0.1PT นั้นพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน โดยในช่วงแรกค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเมื่อความเค้นลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PIN-PT ทุกองค์ประกอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีความแตกต่างจากช่วงที่เพิ่มความเค้นมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการให้ความเค้นในระดับนี้ 0-400 MPa แก่เซรามิก PIN-PT ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรต่อโดเมนหรือโครงสร้างภายในของเซรามิกที่ผ่านการทำขั้วแล้ว ทำให้เมื่อลดความเค้นลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจึงมีค่าแตกต่างจากค่าเดิมมาก



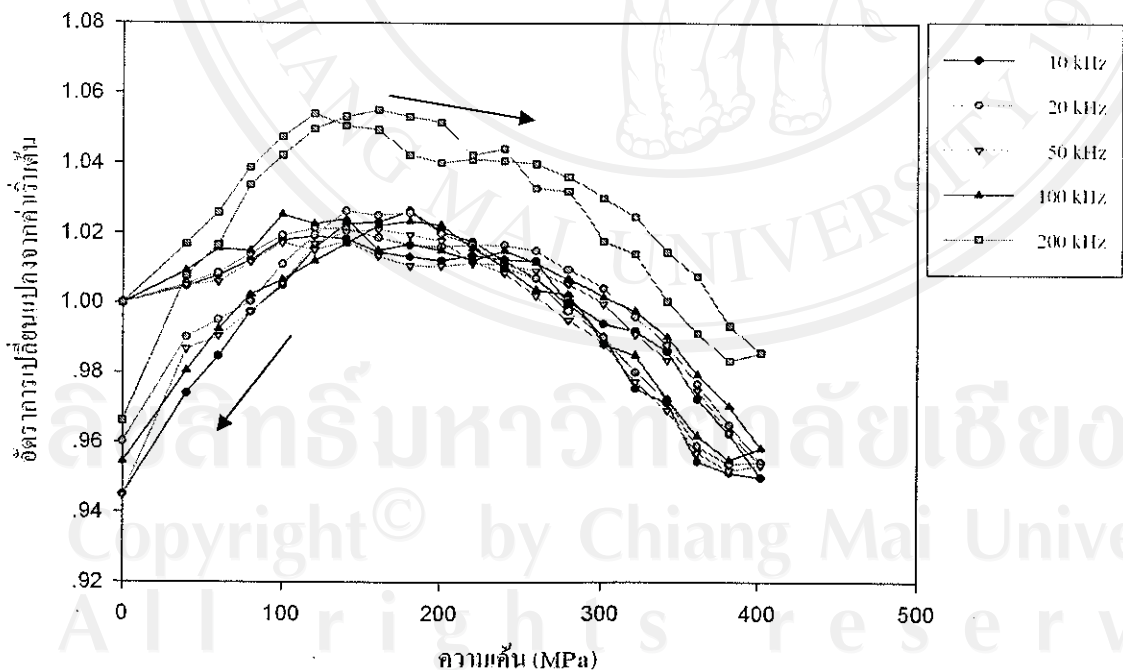
รูป 4.83 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PIN-0.5PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



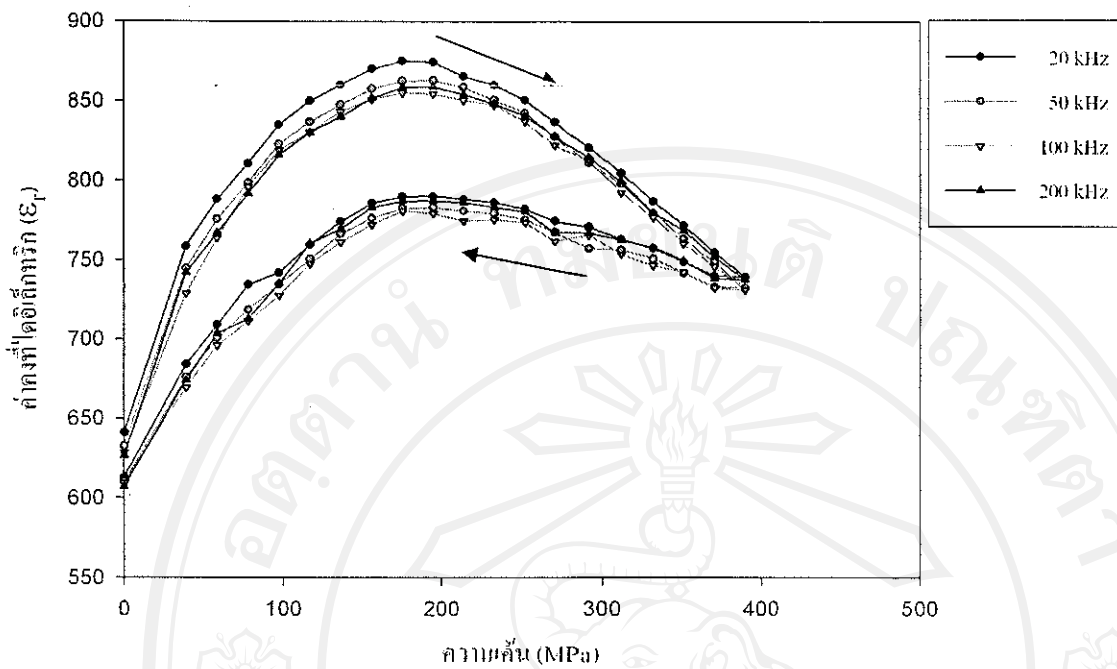
รูป 4.84 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PIN-0.5PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



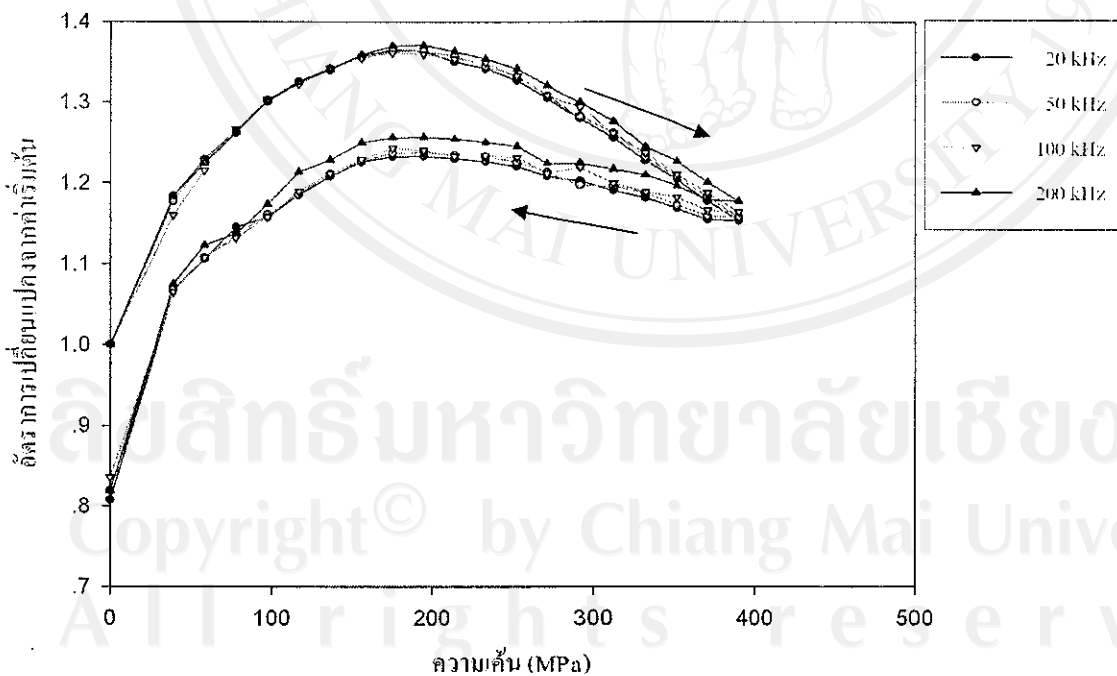
รูป 4.85 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PIN-0.4PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



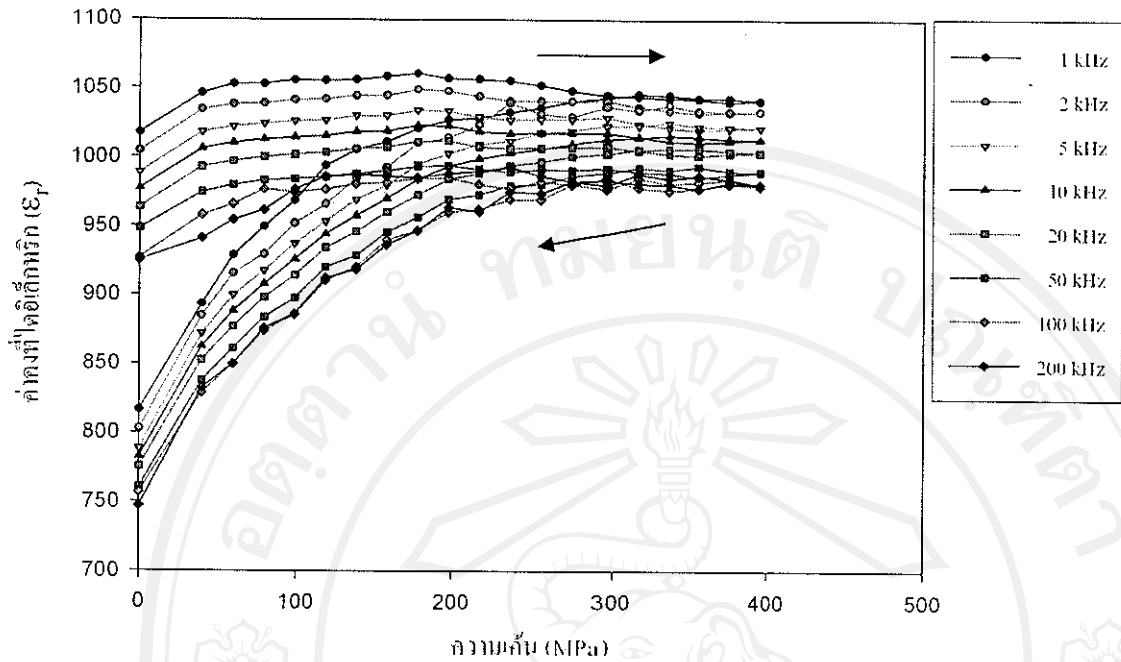
รูป 4.86 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PIN-0.4PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



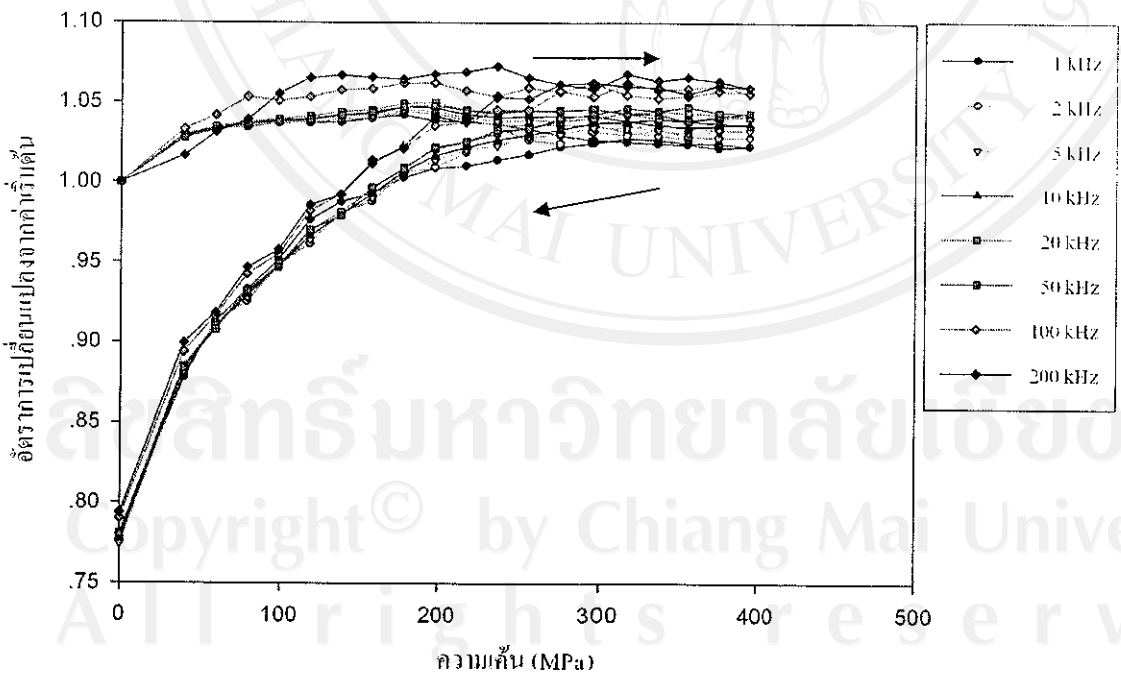
รูป 4.87 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PIN-0.3PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



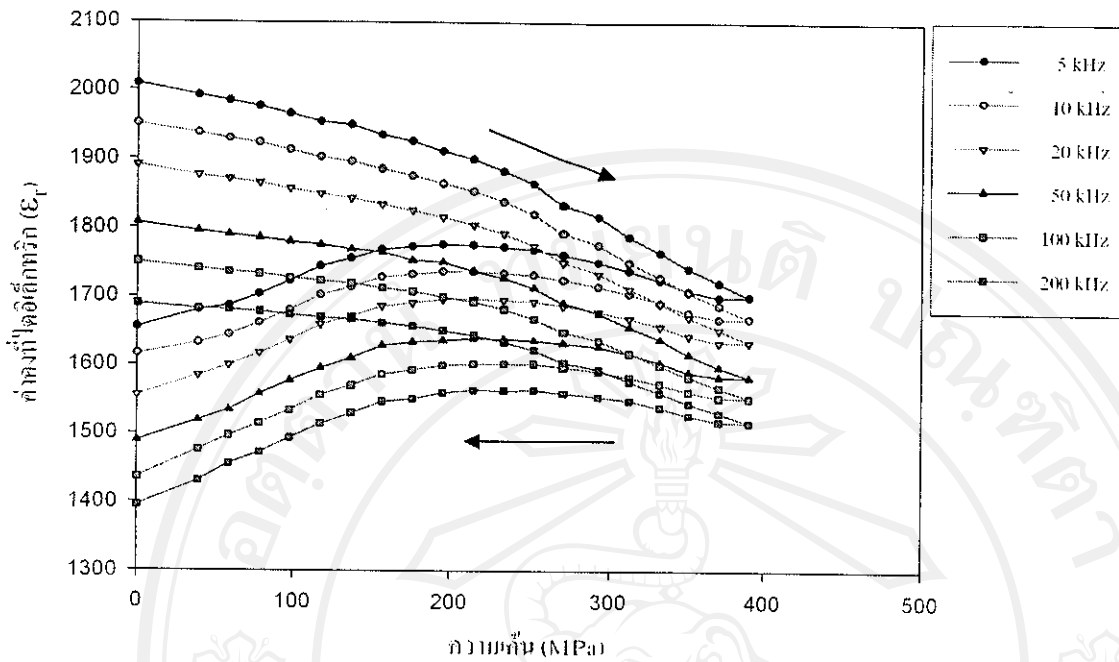
รูป 4.88 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PIN-0.3PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



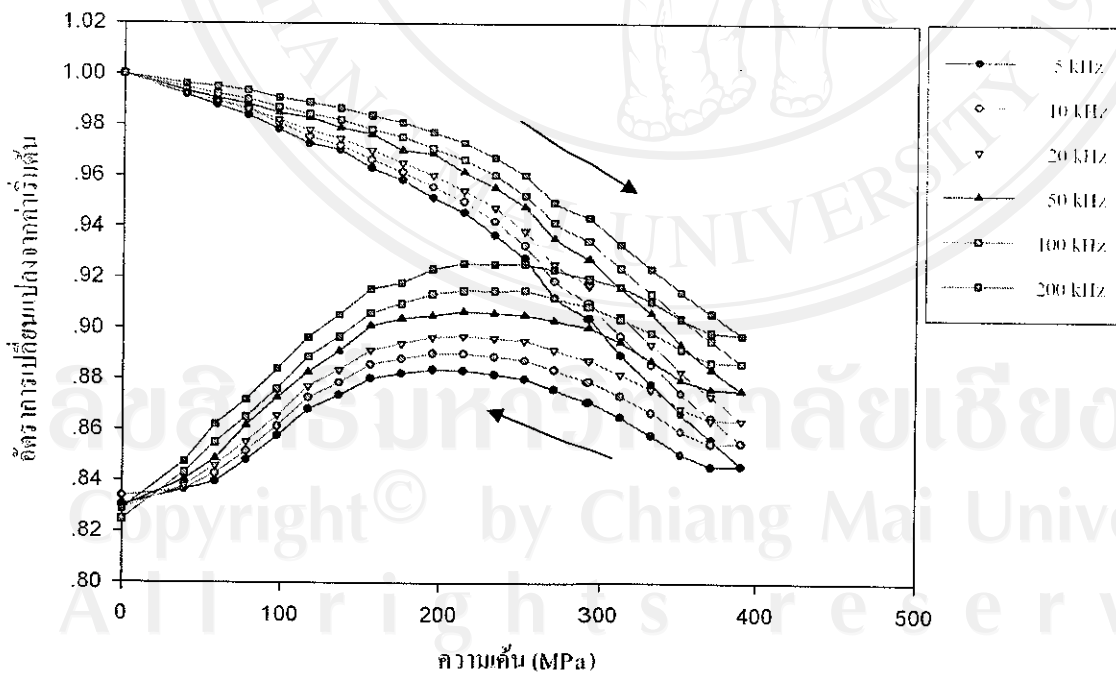
รูป 4.89 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PIN-0.2PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



รูป 4.90 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PIN-0.2PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว

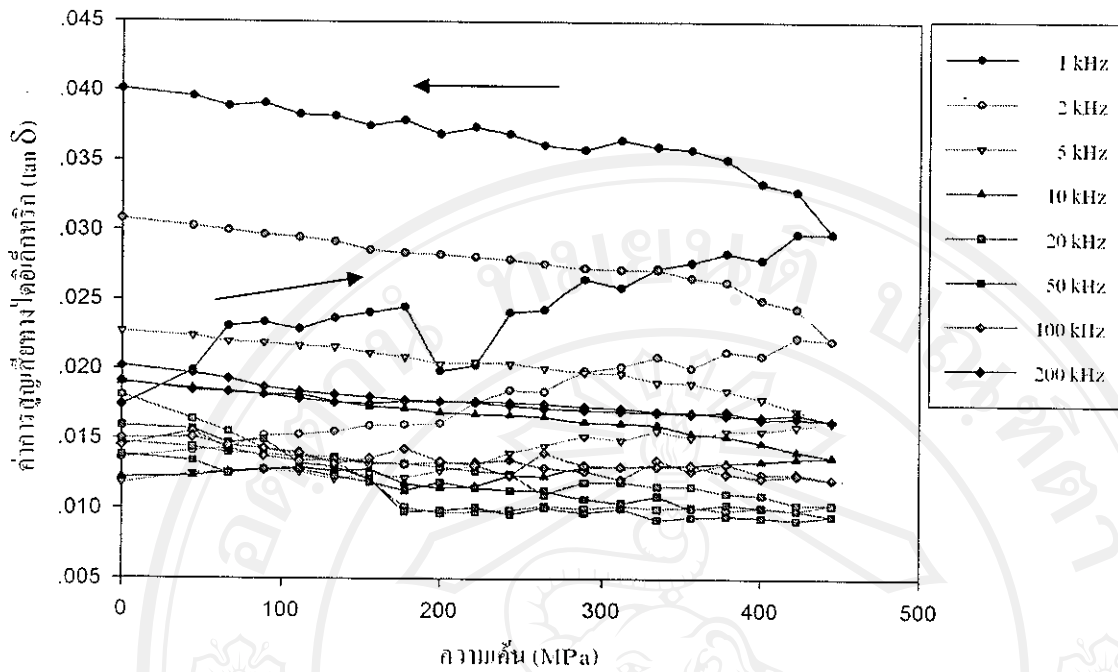


รูป 4.91 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความดันของเซรามิก 0.9PIN-0.1PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว

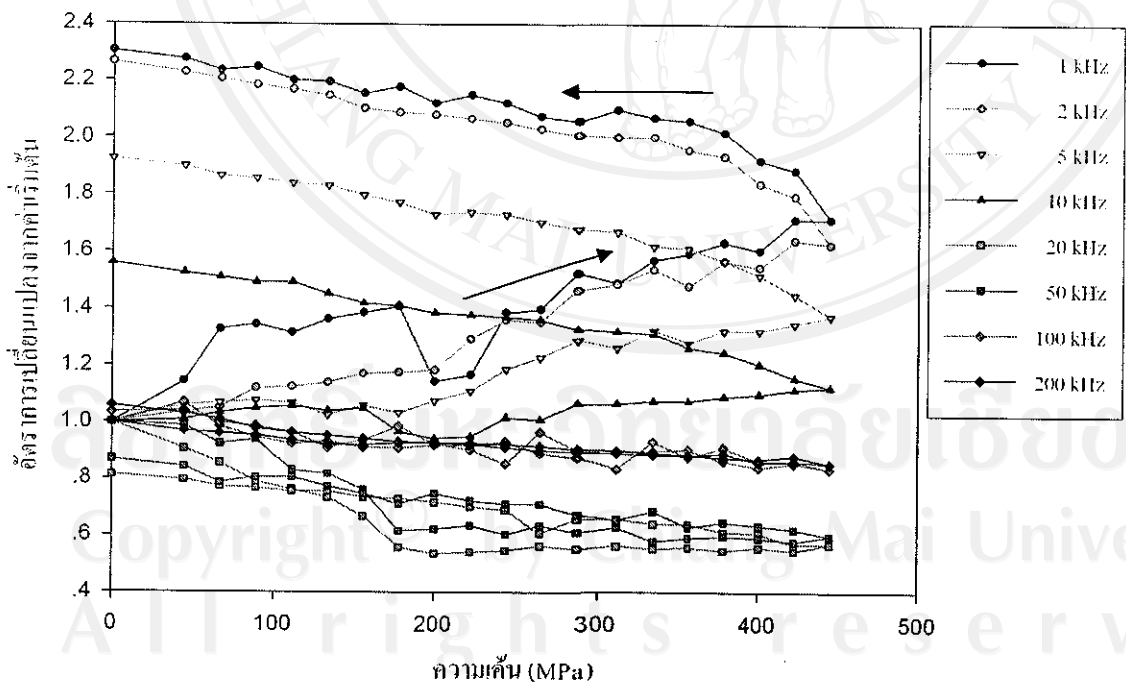


รูป 4.92 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความดันของเซรามิก 0.9PIN-0.1PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว

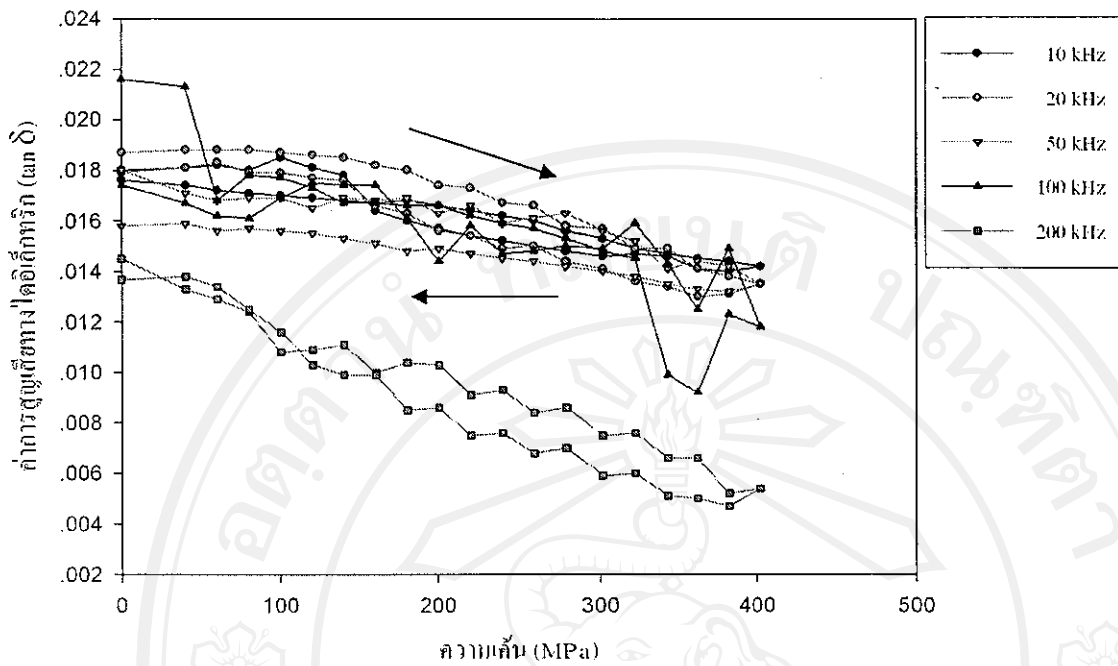
สำหรับในส่วนของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PIN-PT ที่ผ่านการทำซ้ำแล้ว พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มที่ลดลงก่อนข้างชัดเจนเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น (รูป 4.93-4.102) ซึ่งคล้ายกับการทดลองในสารเซรามิก PMN-PT ที่ผ่านการทำซ้ำแล้ว การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นคาดว่าจะเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของทิศทางโพลาไรซ์เซชันของโดเมน[16] หรือการยับยั้งการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน[15] และในระหว่างการลดความเค้นลงนั้นพบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งโดยบางส่วนมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงลดความเค้นต่ำกว่าในช่วงเพิ่มความเค้น(เห็นได้ชัดเจนใน 0.9PIN-0.1PT) และบางส่วนมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงลดความเค้นสูงกว่าในช่วงเพิ่มความเค้น อาจเป็นเพราะความเค้นที่ให้กับสารเซรามิกไปทำให้ผนังของโดเมนเคลื่อนที่ผ่านจุดบกพร่องไปแล้ว ผนังโดเมนจึงเกิดการเคลื่อนที่ได้มากขึ้นเมื่อลดความเค้นลง โดยที่ความแตกต่างของค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกระหว่างที่เพิ่มความเค้นและลดความเค้นมีค่าที่ค่อนข้างมาก ซึ่งแสดงว่าความเค้นในระดับนี้ (0-400 MPa) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรต่อโดเมนหรือโครงสร้างภายในของสาร PIN-PT ได้



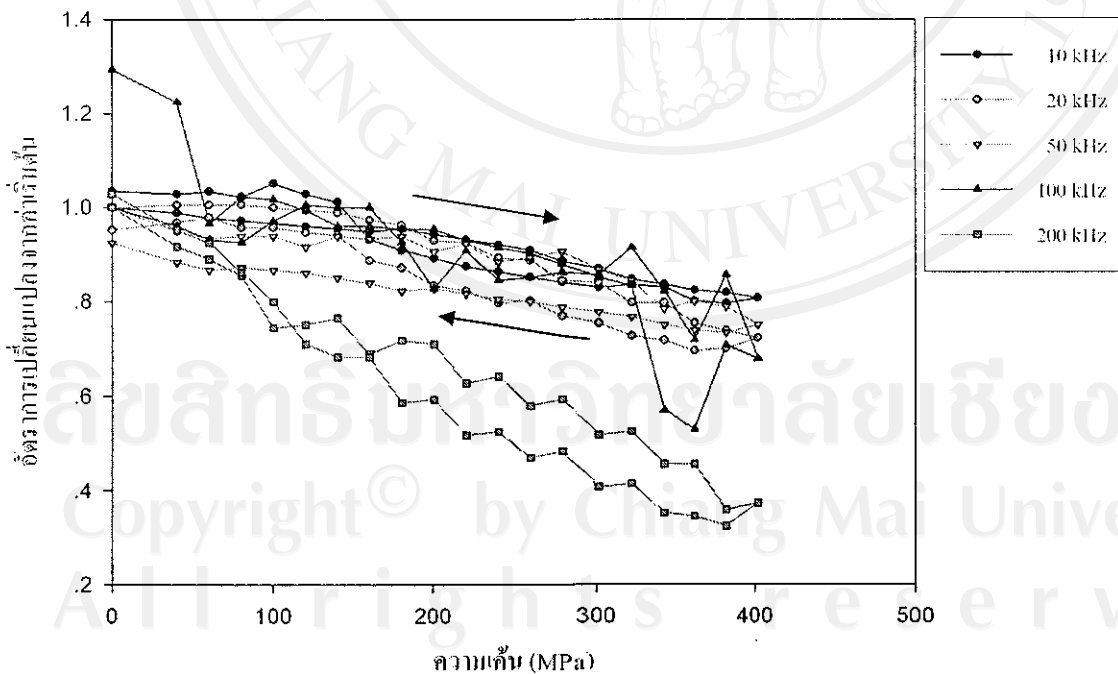
รูป 4.93 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PIN-0.5PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



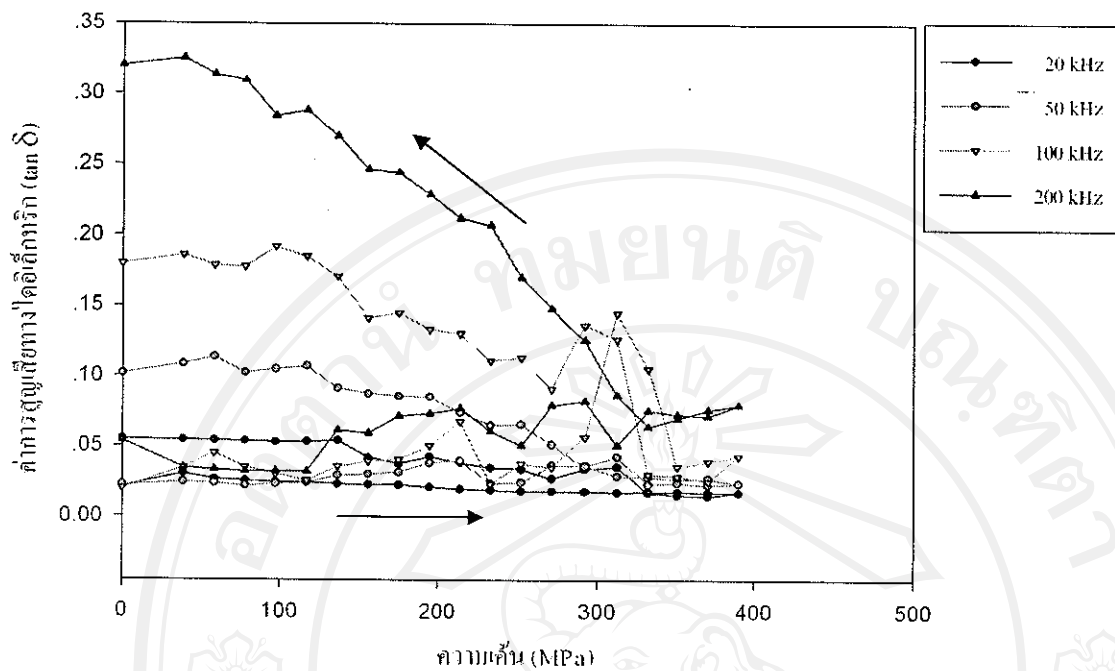
รูป 4.94 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้เปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PIN-0.5PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



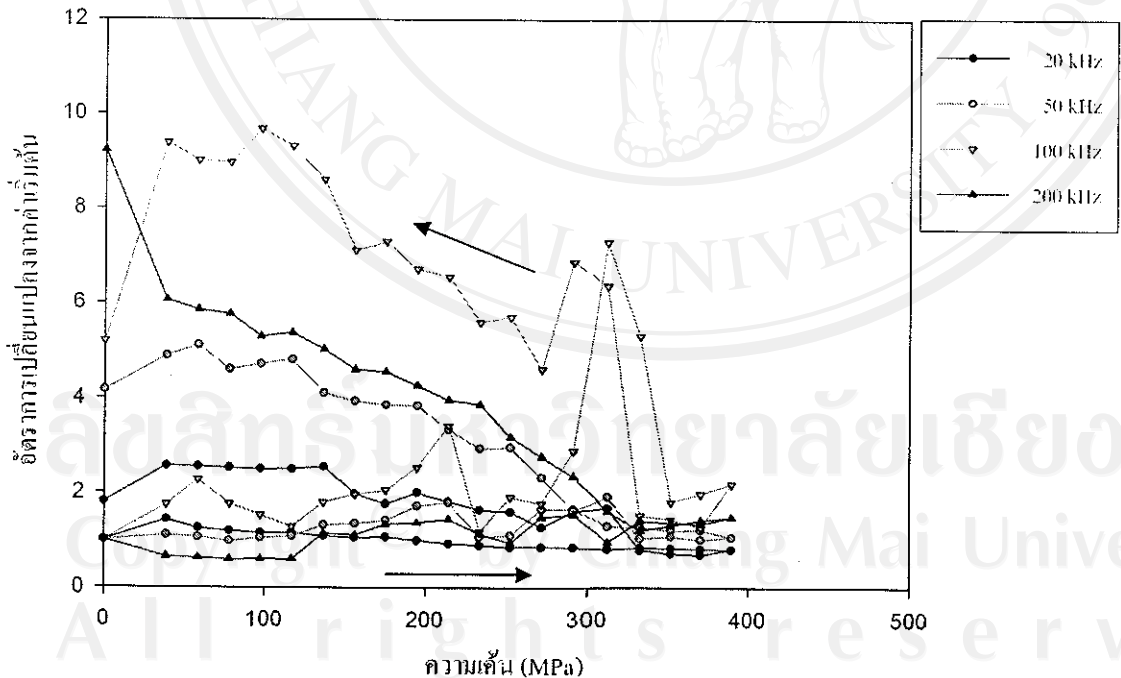
รูป 4.95 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PIN-0.4PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



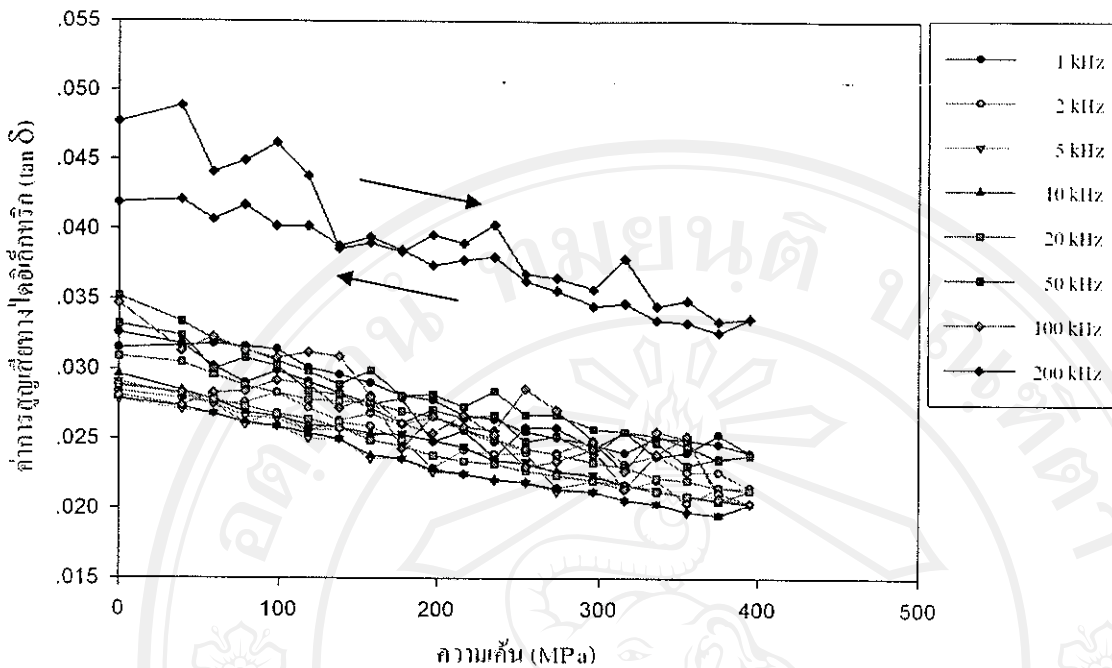
รูป 4.96 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PIN-0.4PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



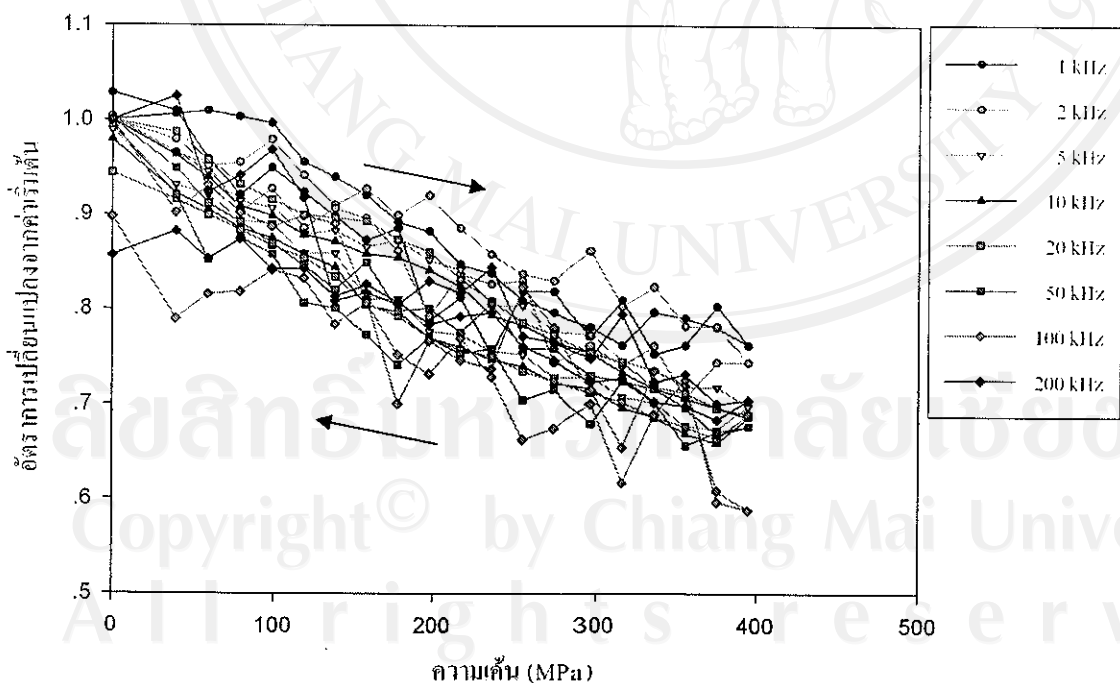
รูป 4.97 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PIN-0.3PT ที่ผ่านการทำหั่วแล้ว



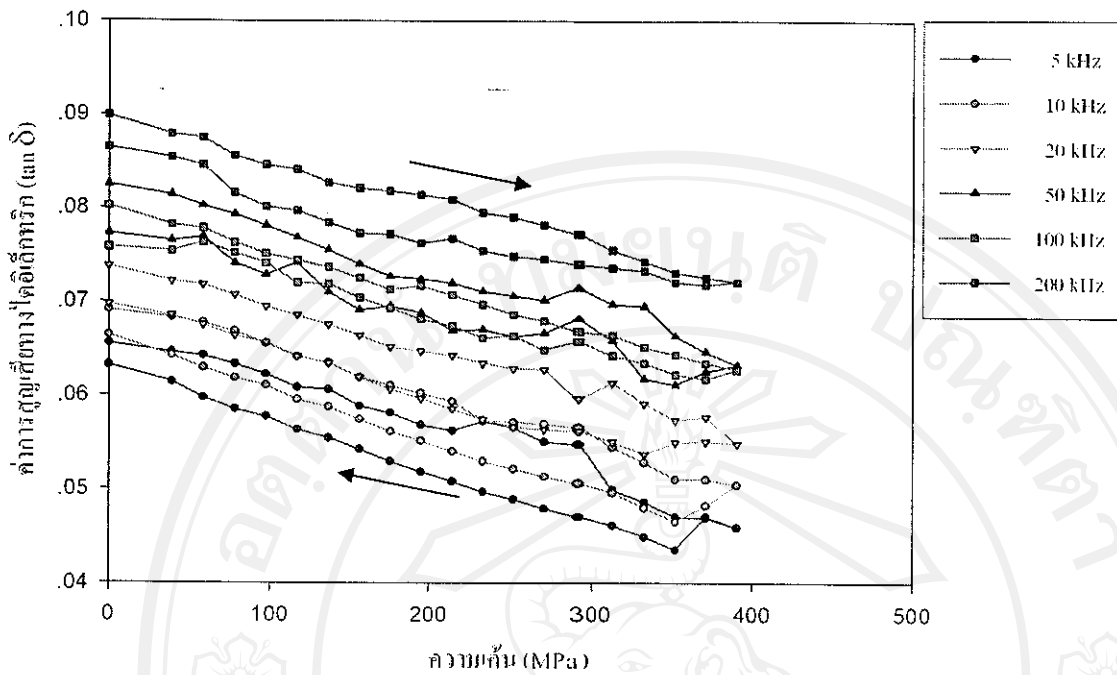
รูป 4.98 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PIN-0.3PT ที่ผ่านการทำหั่วแล้ว



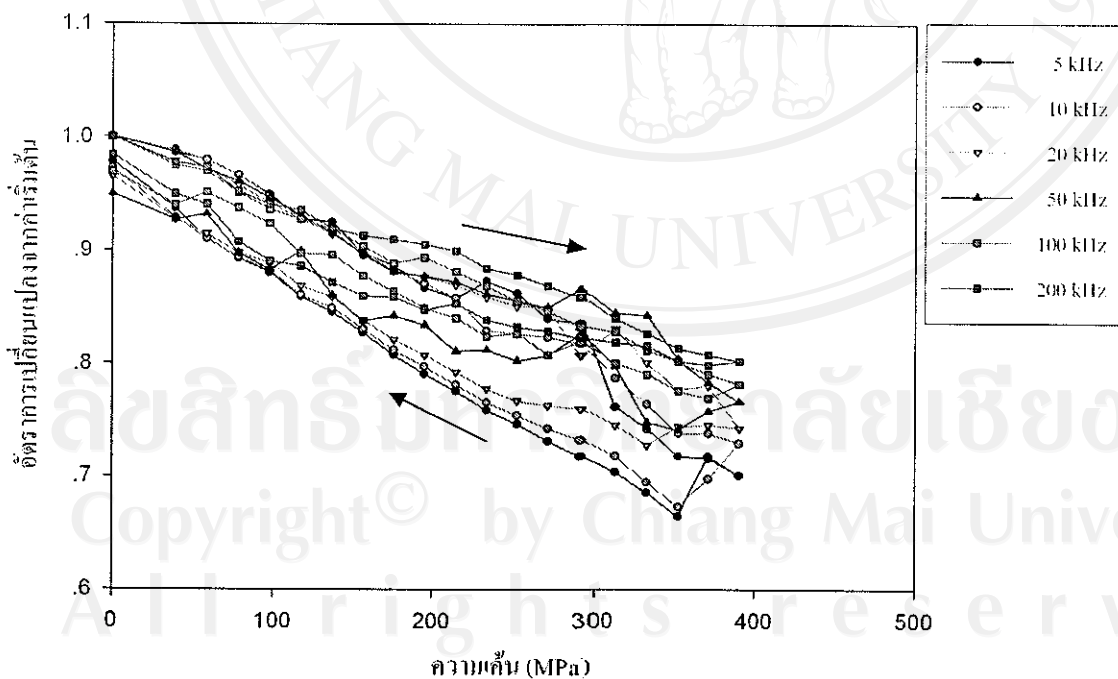
รูป 4.99 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PIN-0.2PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



รูป 4.100 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PIN-0.2PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



รูป 4.101 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PIN-0.1PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



รูป 4.102 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PIN-0.1PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว

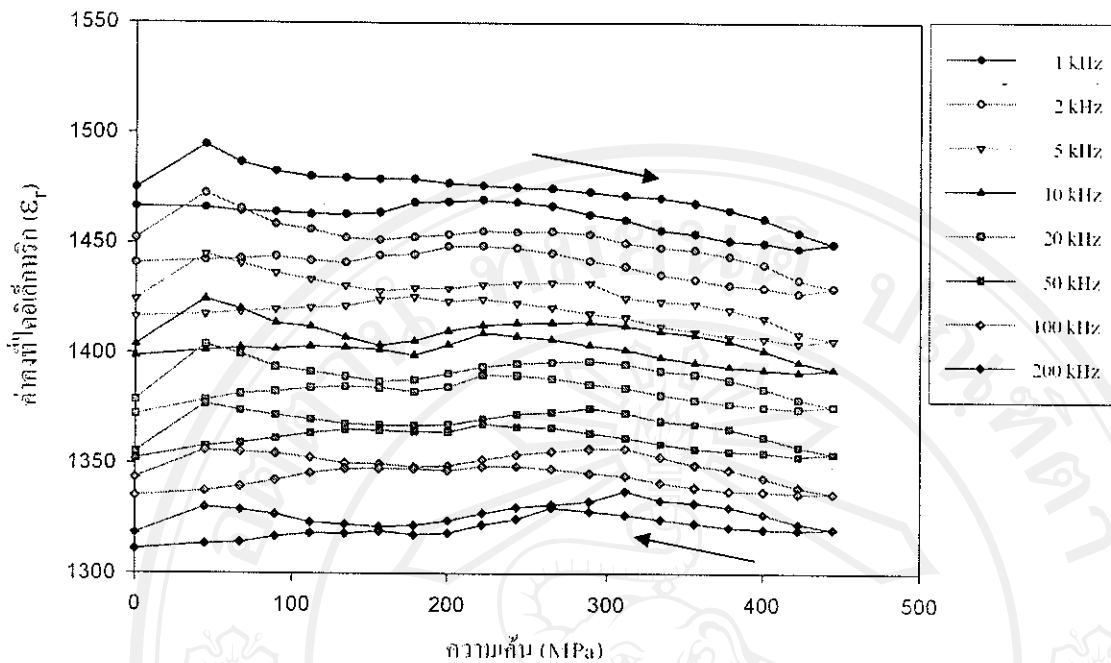
4.8 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดี่ยวต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกเลดอินเดียมไนโอเบต-เลดไทเทเนต (PZT-PZN)

4.8.1 สารเซรามิก PZT-PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว

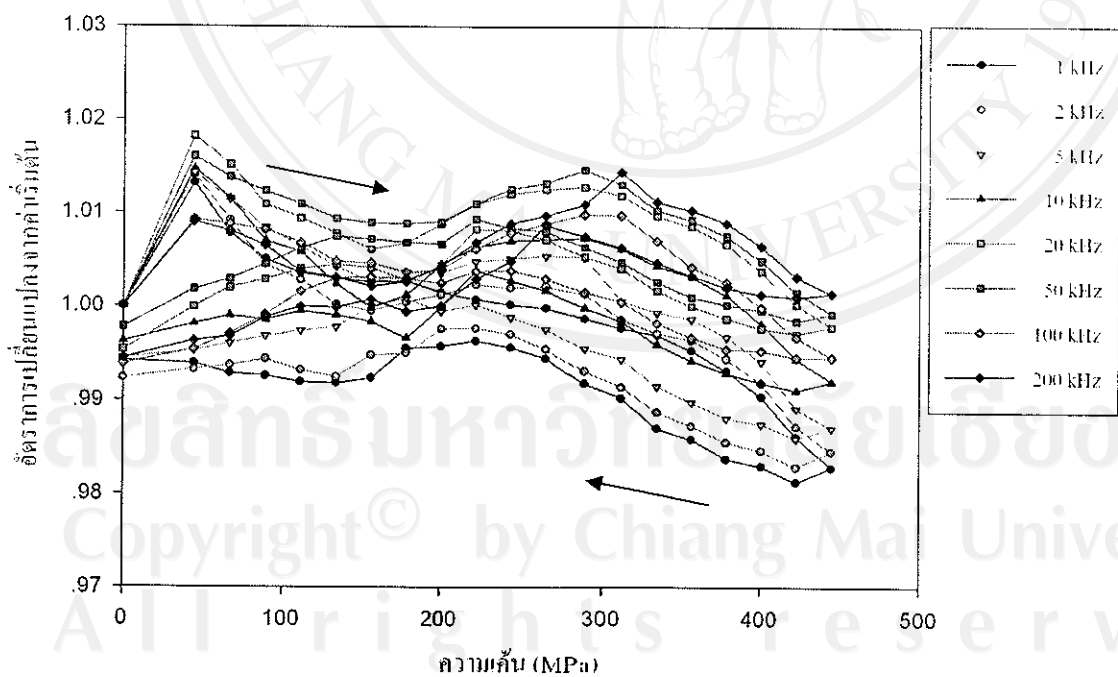
สำหรับเซรามิกในระบบ PZT-PZN ที่เตรียมได้และยังไม่ผ่านการทำขั้ว เมื่อนำมาทำการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกภายใต้สภาวะความเค้น (0-450 MPa) พบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วในช่วงของการเพิ่มความเค้นนั้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอนซึ่งคล้ายกับผลการทดลองในสารเซรามิก PMN-PT และ PIN-PT เนื่องจากสมบัติต่างๆ ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากผลของ โครงสร้างของโดเมนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของโดเมน (domain switching) การจับกันของโดเมน (clamping of domain walls) การลดการเสื่อมสภาพ (de-aging) และการทำให้หมดสภาพความเป็นขั้ว (de-poling) และการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน (domain wall motions)[5,18,21,24] เพื่อให้โครงสร้างของโดเมนมีพลังงานโดเมนที่ต่ำน้อยที่สุด โดยยกเว้นในเซรามิก 0.8PZT-0.2PZN ซึ่งมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ลดลงอย่างชัดเจน (รูป 4.103-4.112) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้คล้ายกับผลการทดลองในเซรามิก 0.9PMN-0.1PT โดย Zhao และคณะ[16] ที่พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น (0-150 MPa) ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่ผนังโดเมนเกิดการยึดจับกัน ผนังโดเมนจึงมีการเคลื่อนที่น้อยลง ดังนั้นจึงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลง โดยจากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนในเซรามิก 0.5PZT-0.5PZN จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเริ่มให้ความเค้นจนถึงค่าประมาณ 50 MPa และจะค่อยๆ ลดลงในช่วงความเค้น 50-190 MPa หลังจากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงความเค้น 190-300 MPa แล้วจึงมีค่าลดลงอีกครั้ง โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกโดยรวมมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยในช่วงความเค้น 0-450 MPa (รูป 4.103-4.104) ส่วนในเซรามิก 0.6PZT-0.4PZN ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วง 0-150 MPa แล้วจึงเริ่มค่อยๆ ลดลงเมื่อความเค้นยังคงเพิ่มขึ้น ในขณะที่เซรามิก 0.7PZT-0.3PZN การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะขึ้นอยู่กับความถี่ โดยที่ในความถี่สูงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเล็กน้อยในช่วง 0-200 MPa แล้วจึงเริ่มลดลงโดยยังคงมีแนวโน้มโดยรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ความถี่ต่ำๆ มีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ไม่แน่นอน ดังรูปที่ 4.107-4.108 และสำหรับเซรามิก 0.9PZT-0.1PZN ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วง 0-110 MPa หลังจากนั้นจึงเริ่มลดลงเมื่อยังคงเพิ่มความเค้น (รูป 4.111-4.112)

หลังจากที่เพิ่มความเค้นให้กับเซรามิก PZT-PZN จนถึงประมาณ 450 MPa จึงได้เริ่มลดความเค้นลง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกันในแต่ละองค์ประกอบของสารเซรามิก PZT-PZN โดยในเซรามิก 0.5PZT-0.5PZN, 0.6PZT-0.4PZN และ 0.7PZT-0.3PZN

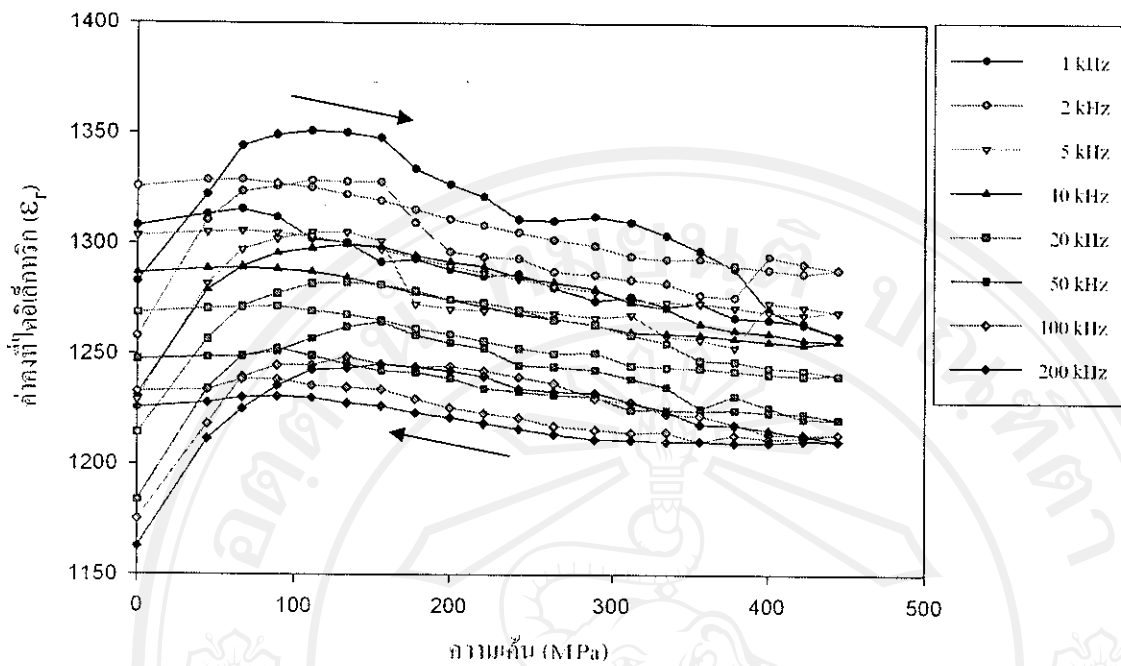
(เมื่อวัดที่ความถี่ต่ำๆ) พบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นลดลง สำหรับเซรามิก 0.7PZT-0.3PZN(เฉพาะที่ความถี่สูงๆ) ,0.8PZT-0.2PZN และ 0.9PZT-0.1PZN ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการให้ความเค้น หลังจากนั้นจึงมีค่าลดลงโดยจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงความเค้นประมาณ 200 MPa อย่างไรก็ตามค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วงลดความเค้นของเซรามิก PZT-PZN ทุกองค์ประกอบจะมีค่าที่แตกต่างกับในช่วงที่เพิ่มความเค้นมาก ซึ่งแสดงว่าการให้ความเค้นในระดับ 0-450 MPa จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉาววต่อโดเมนหรือโครงสร้างภายในของเซรามิก PZT-PZN



รูป 4.103 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความดันของเซรามิก 0.5PZT-0.5PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว

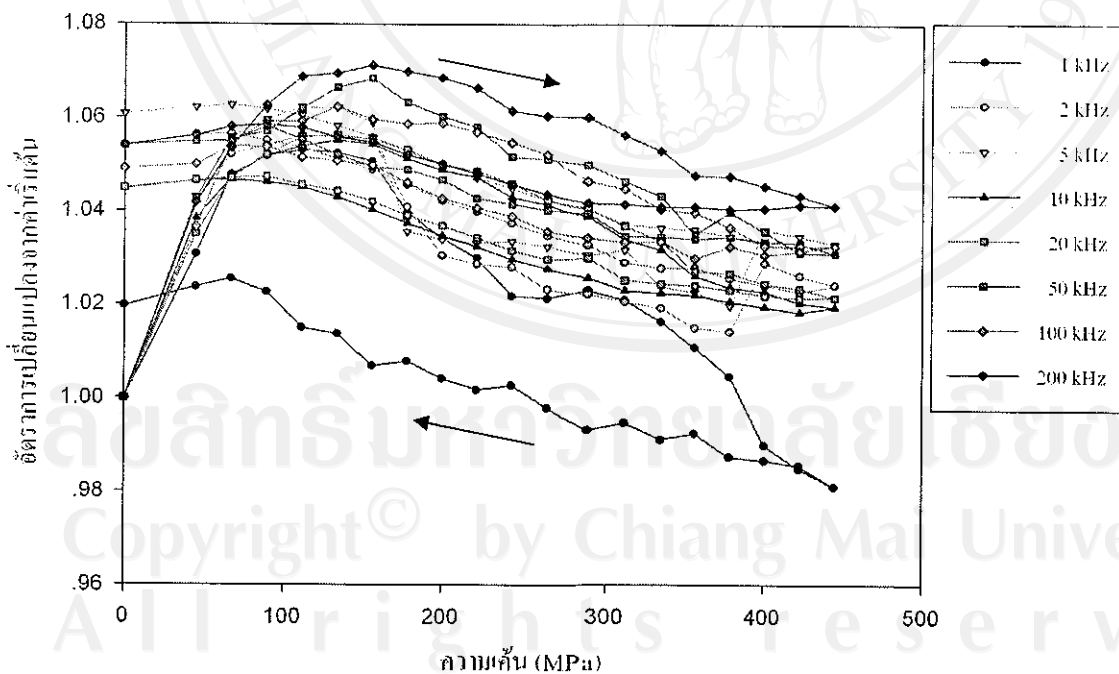


รูป 4.104 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความดันของเซรามิก 0.5PZT-0.5PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



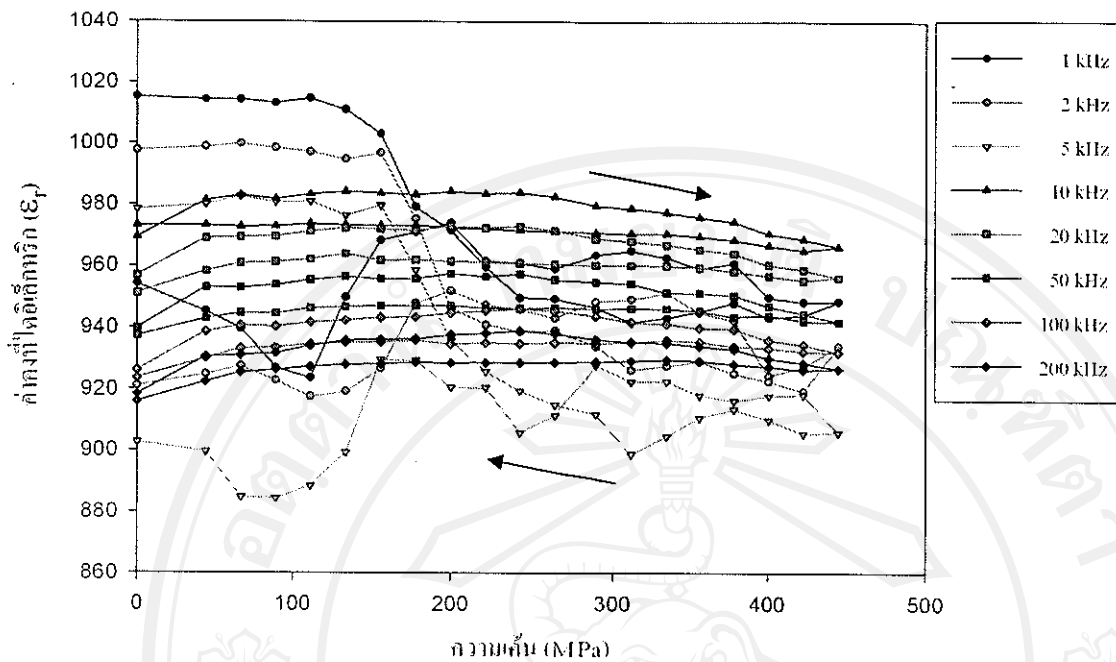
รูป 4.105 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความดันของเซรามิก

0.6PZT-0.4PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว

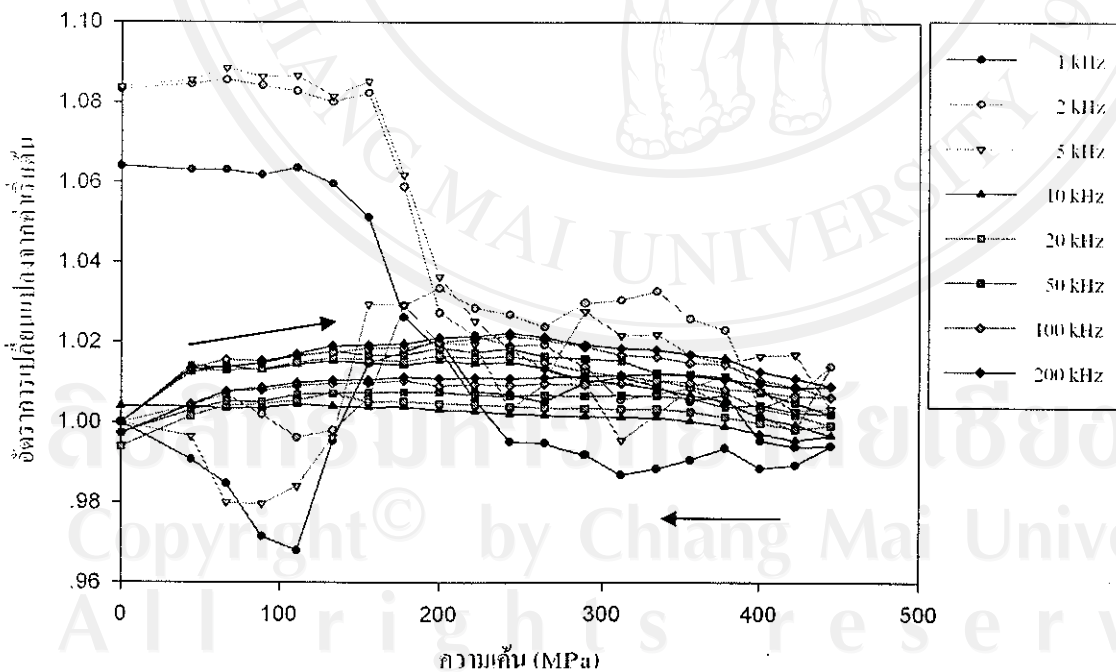


รูป 4.106 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ได

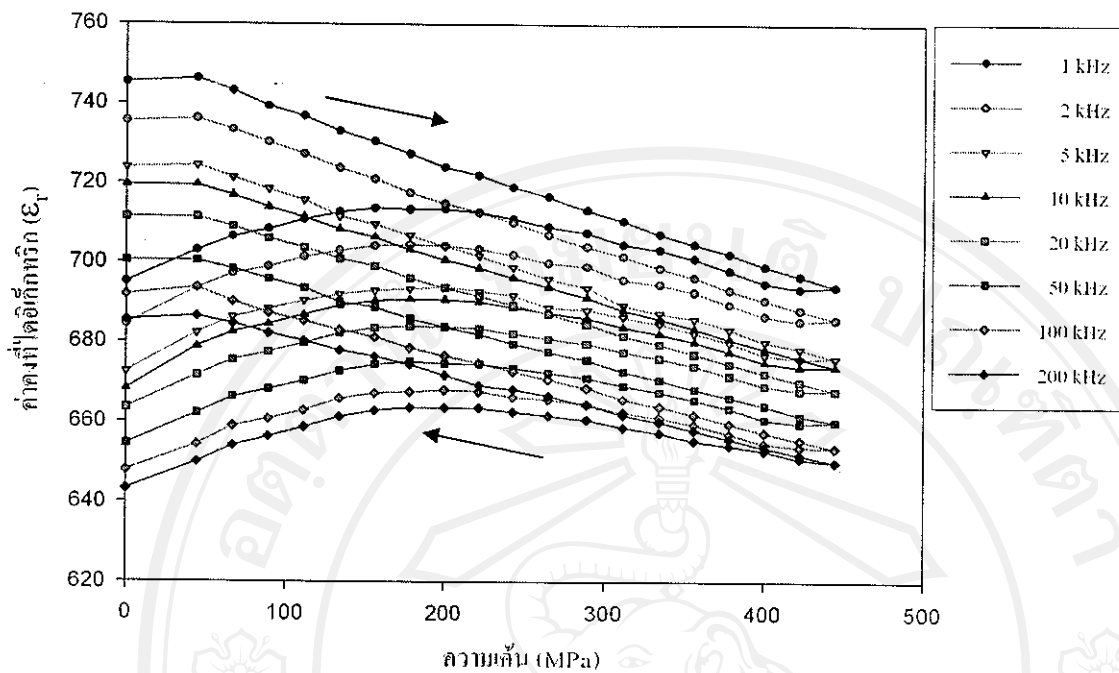
อิเล็กตริกกับความดันของเซรามิก 0.6PZT-0.4PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



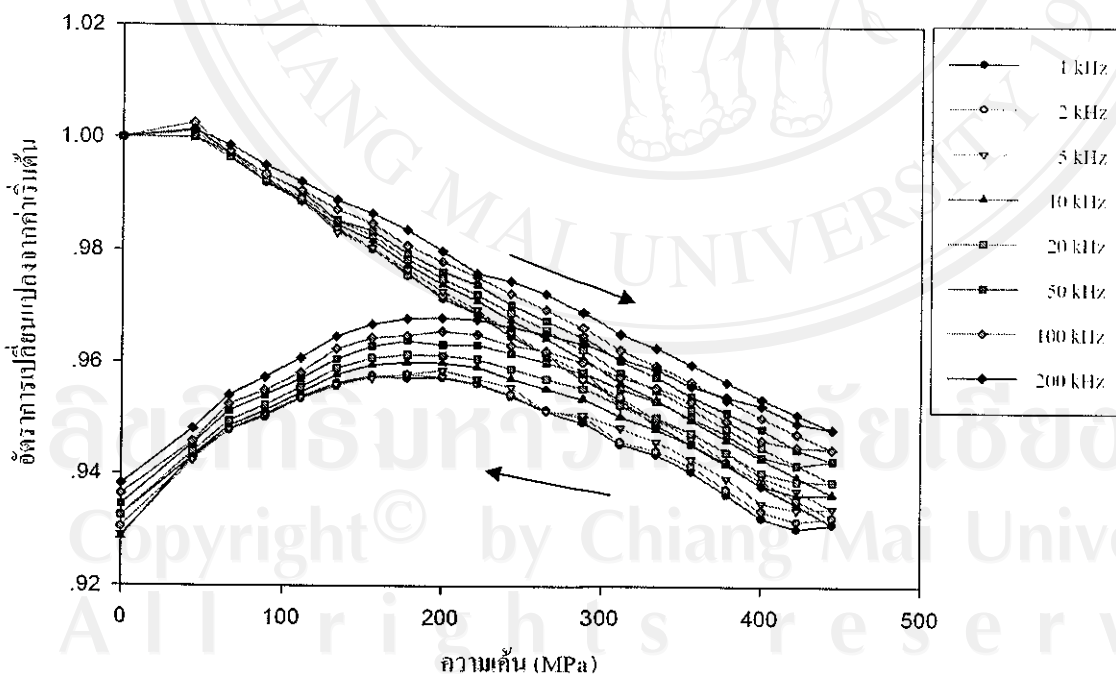
รูป 4.107 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PZT-0.3PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



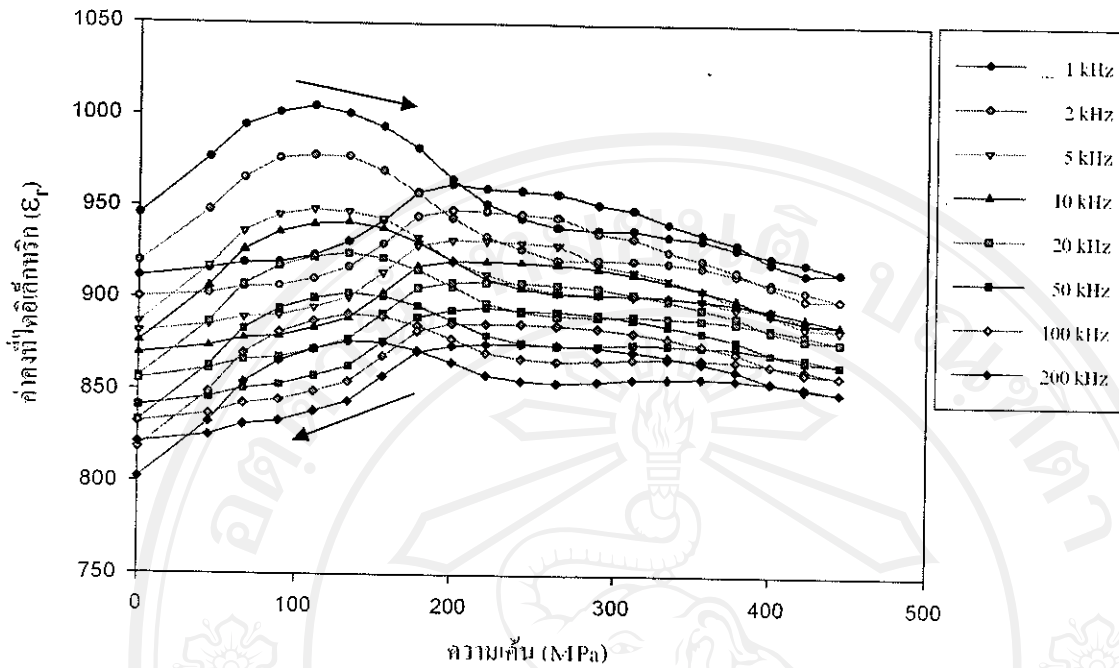
รูป 4.108 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PZT-0.3PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



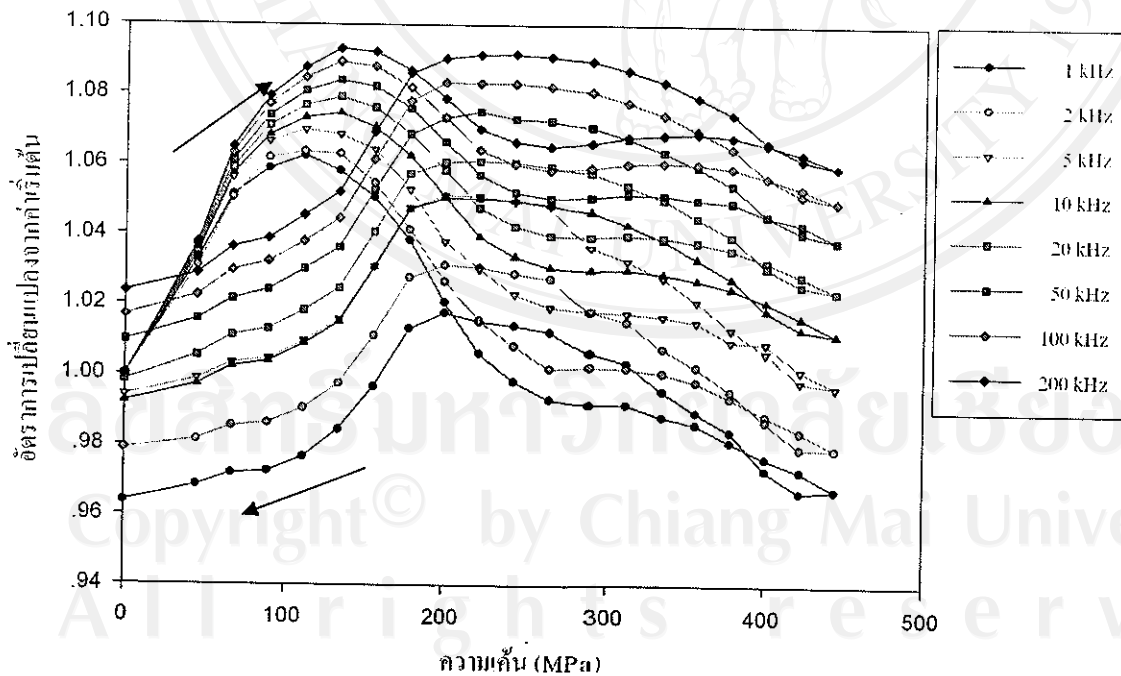
รูป 4.109 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PZT-0.2PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำ



รูป 4.110 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PZT-0.2PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำ

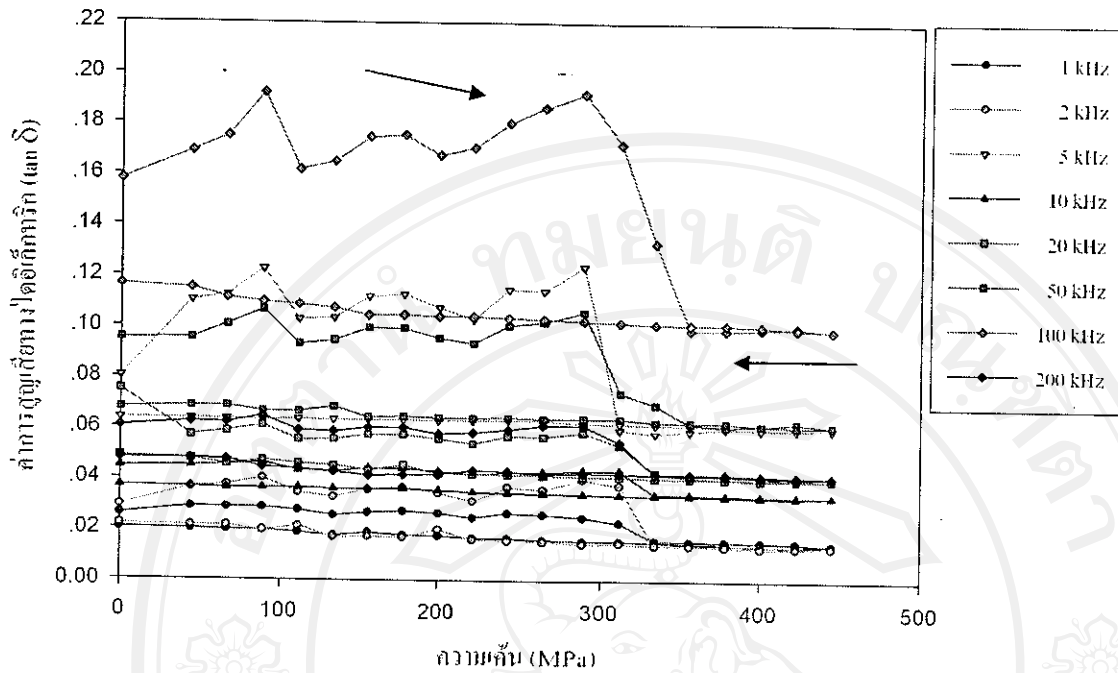


รูป 4.111 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PZT-0.1PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว

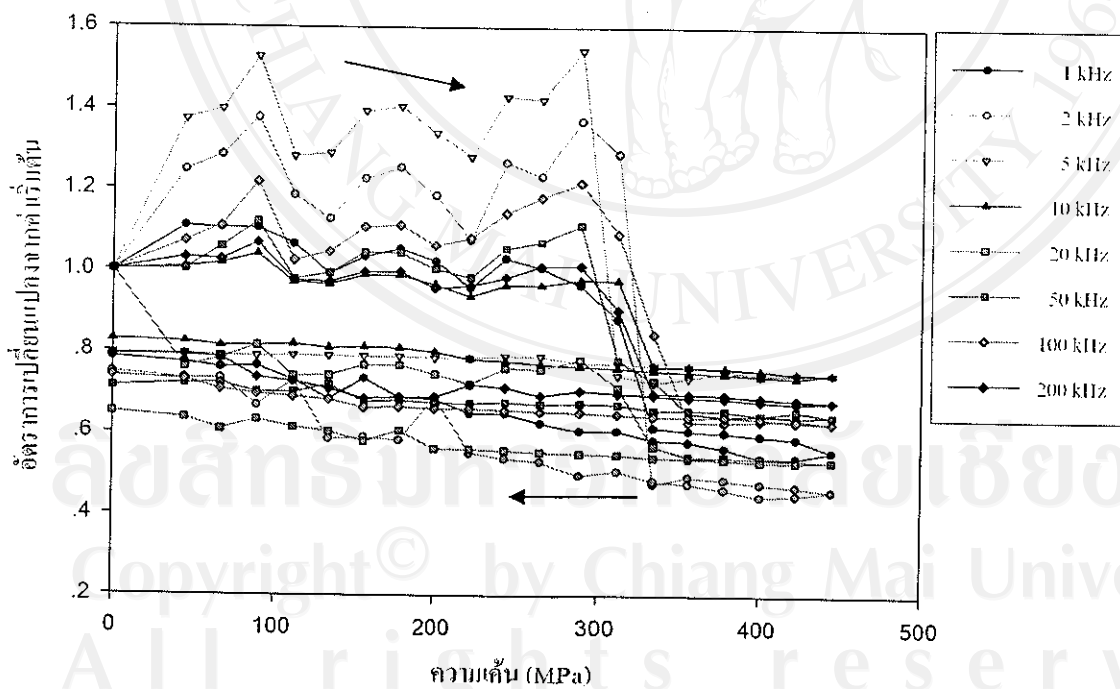


รูป 4.112 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PZT-0.1PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว

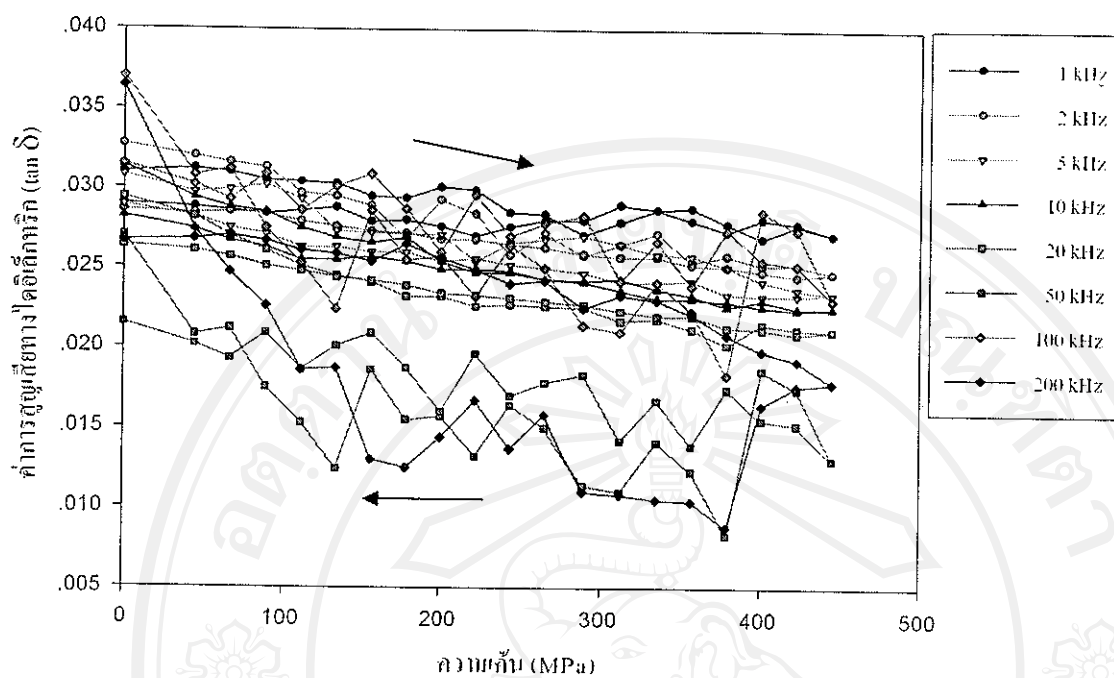
สำหรับในส่วนของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกภายใต้อิทธิพลของความเค้น พบว่าในเซรามิก PZT-PZN ทุกองค์ประกอบจะมีการเปลี่ยนแปลงของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ไม่แน่นอน แต่อย่างไรก็ตามการรวมของการเปลี่ยนแปลงค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มโดยรวมลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นซึ่งคล้ายกับผลการทดลองในสารเซรามิก PMN-PT และ PIN-PT และในระหว่างการลดความเค้นลงนั้นพบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังรูป 4.113-4.122 ซึ่งคาดว่าจะเป็นผลจากการที่ความเค้นไปบีบบังคับให้เกิดการจัดเรียงทิศทางใหม่ของโดเมน หรืออาจไปยับยั้งเพื่อไม่ให้ผนังโดเมนเกิดการเคลื่อนที่ เพื่อให้มีพลังงานภายในที่น้อยที่สุด[15,16]



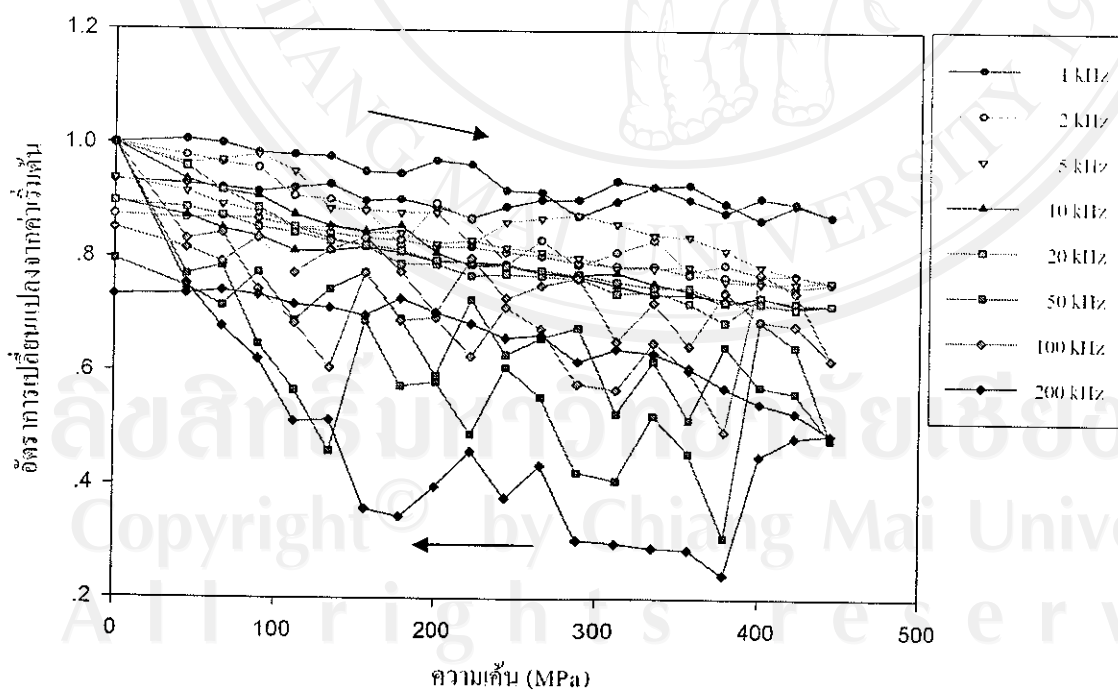
รูป 4.113 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก



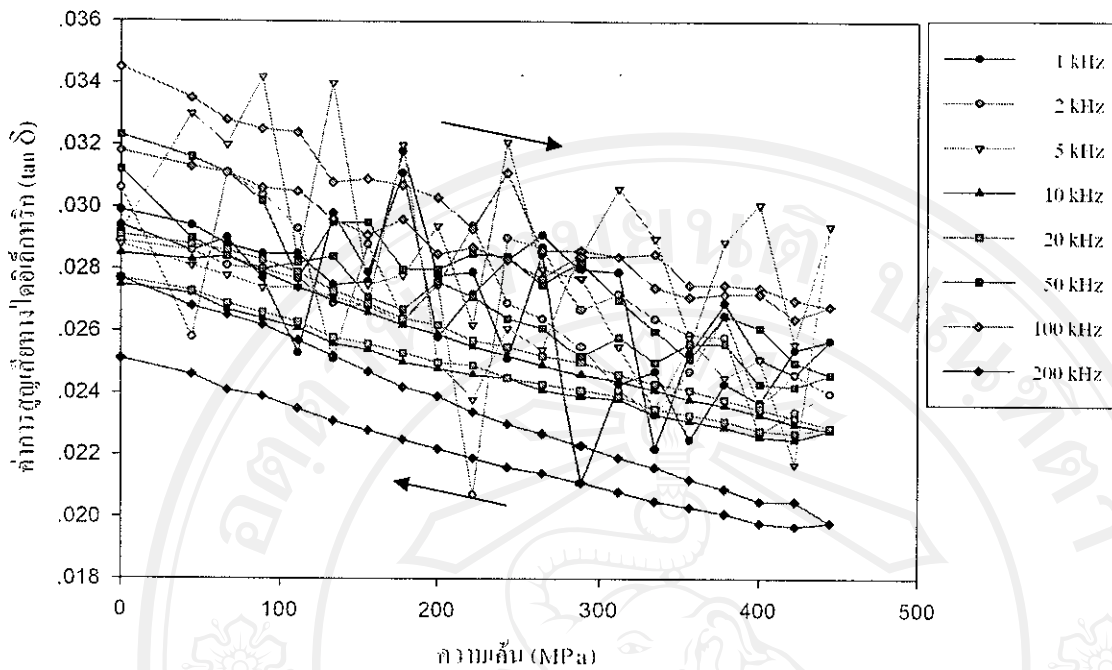
รูป 4.114 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PZT-0.5PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำ



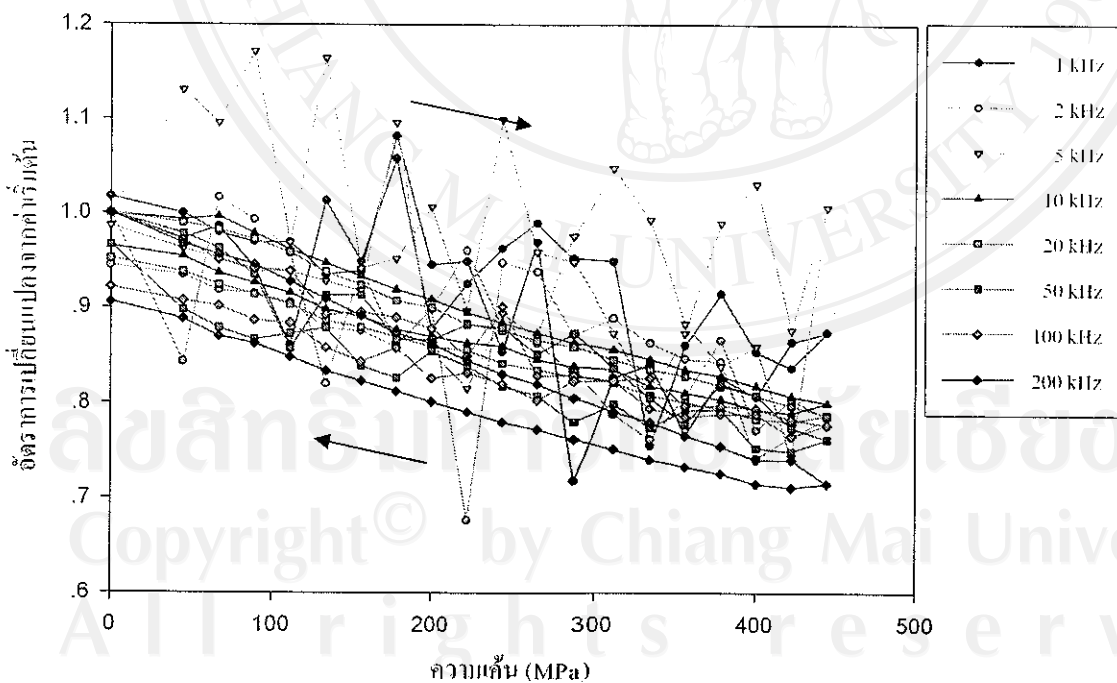
รูป 4.115 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PZT-0.4PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



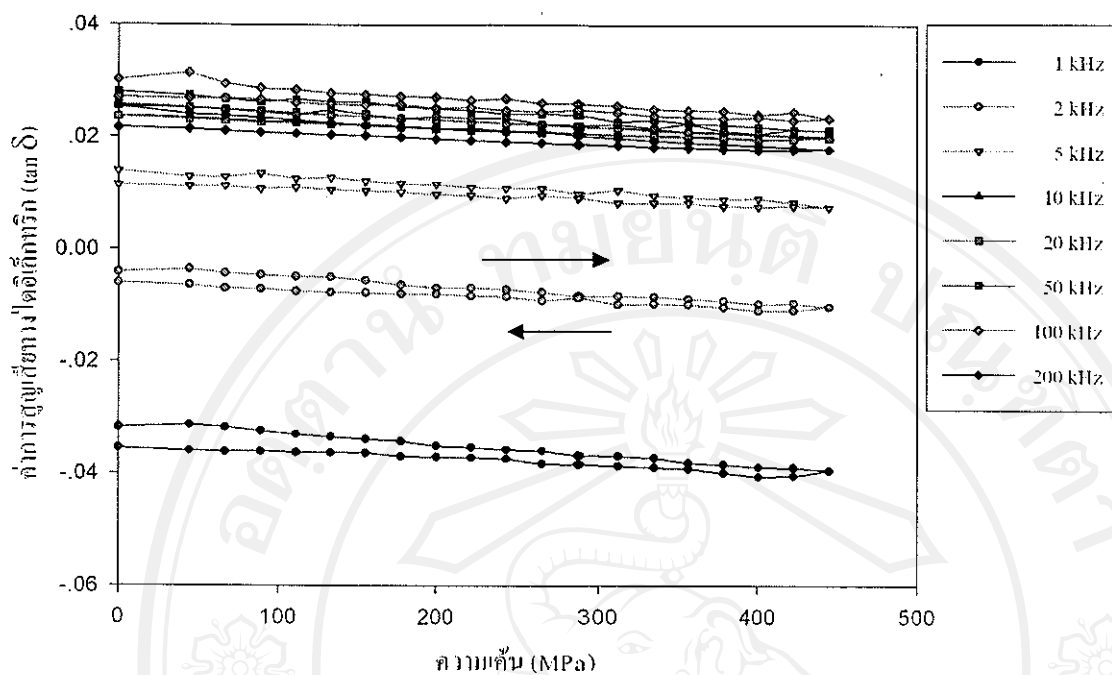
รูป 4.116 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PZT-0.4PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



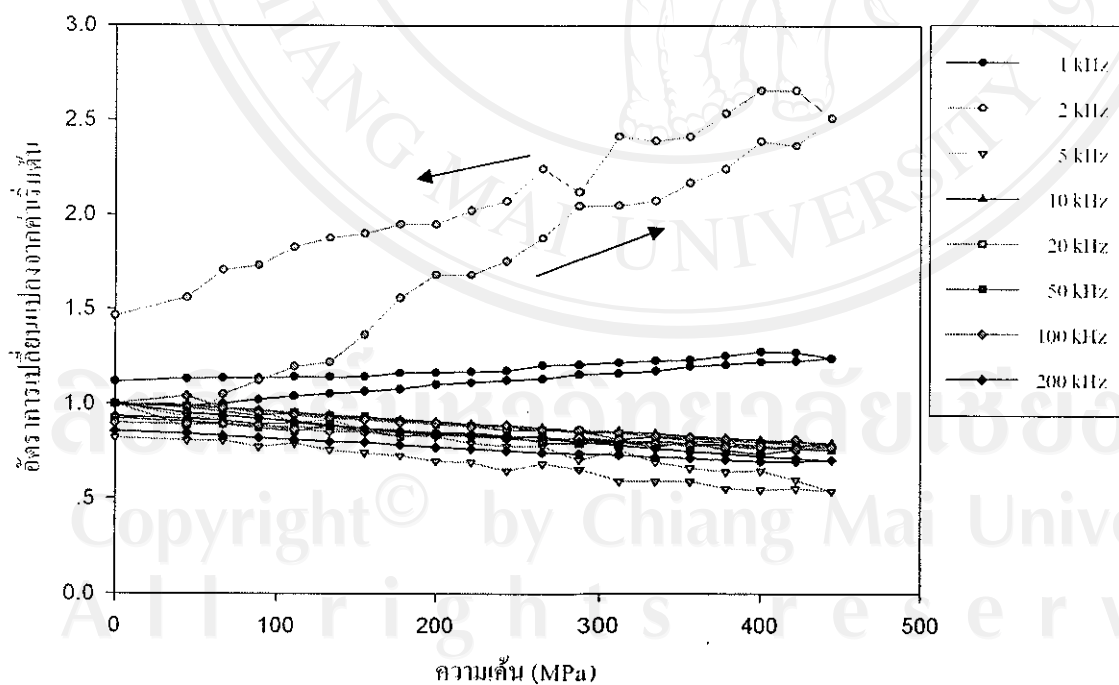
รูป 4.117 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PZT-0.3PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



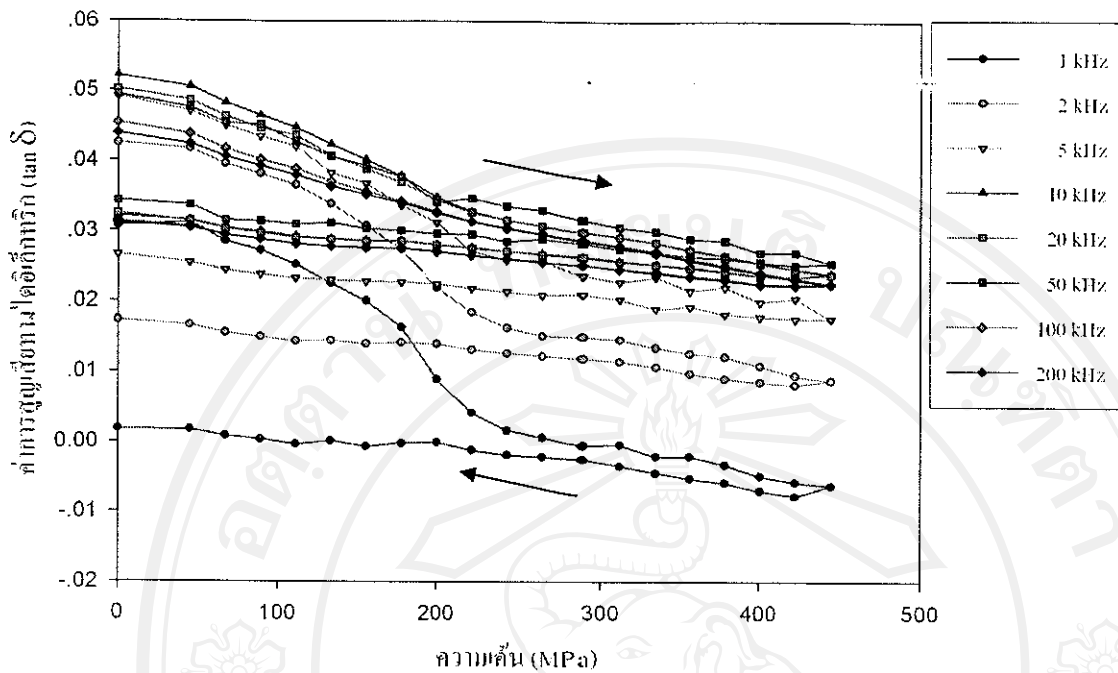
รูป 4.118 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PZT-0.3PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



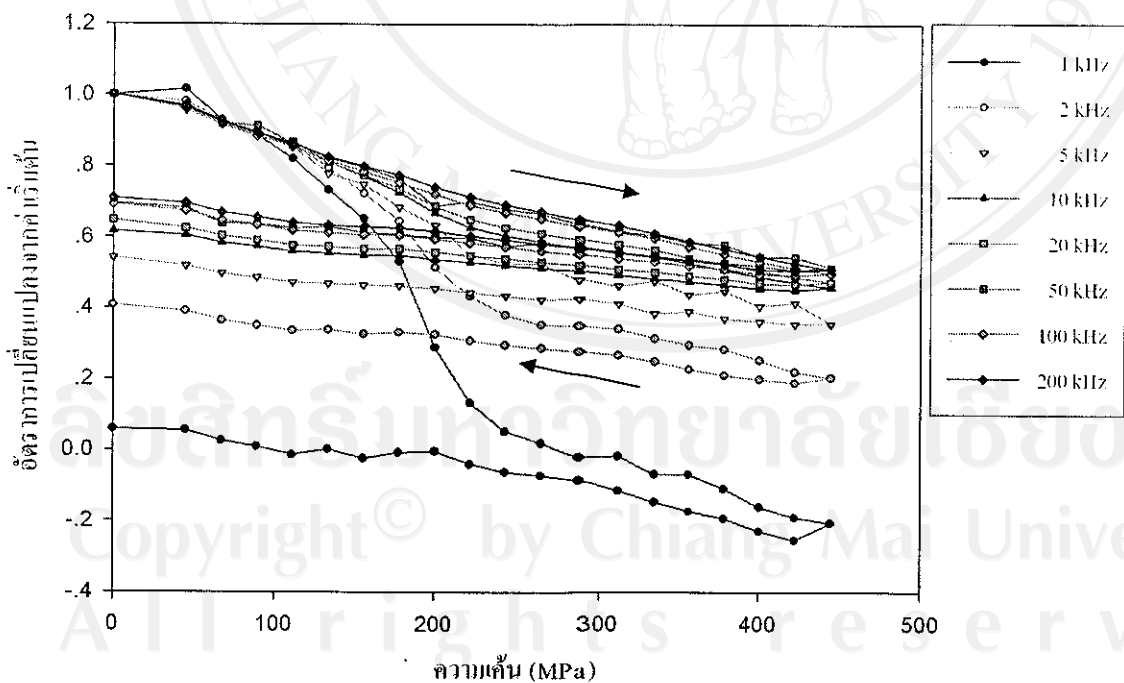
รูป 4.119 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PZT-0.2PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



รูป 4.120 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PZT-0.2PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว



รูป 4.121 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PZT-0.1PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำ



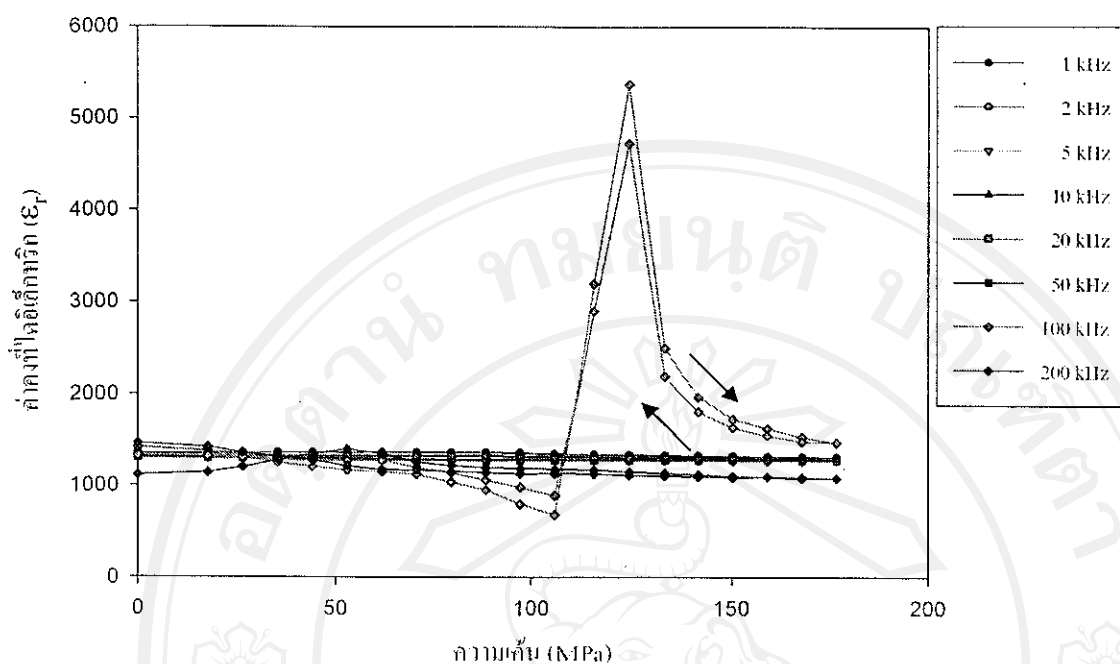
รูป 4.122 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.9PZT-0.1PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำซ้ำ

4.8.2 กรณีสารเซรามิก PZT-PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว

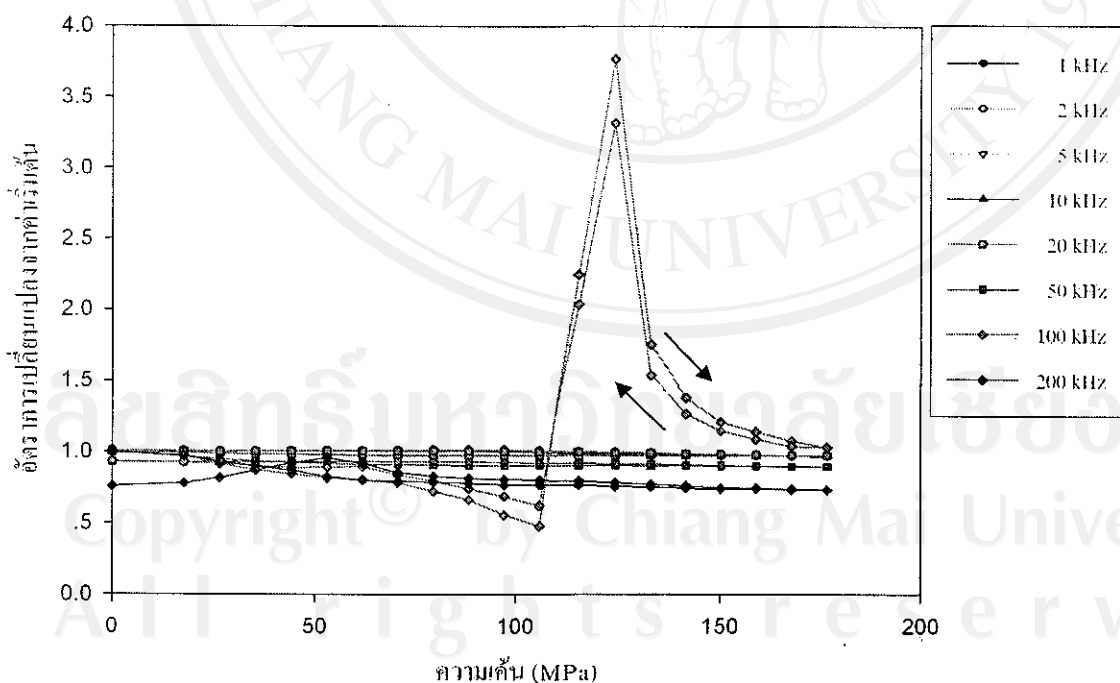
เมื่อนำเซรามิกในระบบ PZT-PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้วมาศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้น (0-450 MPa) พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นในทุกองค์ประกอบ ดังรูป 4.123-4.132 โดยจะพบว่าสำหรับเซรามิก 0.9PZT-0.1PZN แสดงการลดลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอย่างมากและชัดเจนที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความถี่ 100 Hz ในเซรามิก 0.5PZT-0.5PZN, 0.6PZT-0.4PZN และ 0.8PZT-0.2PZN จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ไม่แน่นอน โดยมีการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอย่างรวดเร็วมากเมื่อเพิ่มความเค้นจนถึงค่าหนึ่งคล้ายกับเกิดการสั่นพ้องของโพลาไรซ์เซชันขึ้นภายในเซรามิกซึ่งไม่เคยพบผลการทดลองในลักษณะนี้มาก่อน โดยที่ 0.5PZT-0.5PZN เริ่มเกิดปรากฏการณ์นี้ที่ความเค้น 130 MPa ในขณะที่ 0.6PZT-0.4PZN เริ่มเกิดขึ้นที่ความเค้น 110 MPa และ 0.8PZT-0.2PZN จะเริ่มเกิดขึ้นที่ความเค้น 100 MPa ซึ่งการที่ส่วนใหญ่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อให้ความเค้นแบบแกนเดียวเข้าไปในเซรามิกโดยมีทิศทางที่ขนานกับทิศทางในการทำขั้วเซรามิก PZT-PZN นั้น อาจจะเป็นผลจากการที่ความเค้นที่ให้เข้าไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโดเมน และบีบบังคับไม่ให้ผนังโดเมนเกิดการเคลื่อนที่ จึงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น [21] ส่วนในกรณีที่มีความถี่ 100 Hz นั้นคงต้องมีการศึกษาต่อไปเกิดอะไรขึ้นภายในเซรามิก PZT-PZN ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะในช่วงความเค้นที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ข้างต้นขึ้น อาจจะไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของโดเมนและมีการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน บางโดเมนอาจมีขนาดใหญ่มากขึ้น และบางโดเมนอาจมีขนาดเล็กลง ซึ่งคาดว่า การเคลื่อนที่ของผนังโดเมนนี้อาจทำให้โดเมนมีขนาดที่พอดีกับการสั่นพ้องที่ความถี่ 100 Hz ก็เป็นไปได้ โพลาไรซ์เซชันภายในจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางและสั่นพร้อมกัน จึงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างกระตือรือร้นได้

ในกรณีของการลดความเค้นพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นในทุกองค์ประกอบ โดยเฉพาะในเซรามิก 0.9PZT-0.1PZN ที่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความถี่ 100 Hz ในเซรามิก 0.5PZT-0.5PZN และ 0.6PZT-0.4PZN จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ไม่แน่นอนเช่นเดียวกับการเพิ่มความเค้น กล่าวคือมีการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอย่างรวดเร็วมากคล้ายกับเกิดการสั่นพ้อง ซึ่งน่าจะมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดโดเมนจนพอดีกับการสั่นพ้องที่ความถี่ 100 Hz ในเซรามิกที่มีองค์ประกอบต่างกัน จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความเค้นแตกต่างกัน สำหรับเซรามิก 0.5PZT-0.5PZN นั้นพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเกิดการเปลี่ยนแปลงนี้เมื่อความเค้นลดลงถึง 130 MPa และสำหรับเซรามิก 0.6PZT-0.4PZN นั้นพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีการ

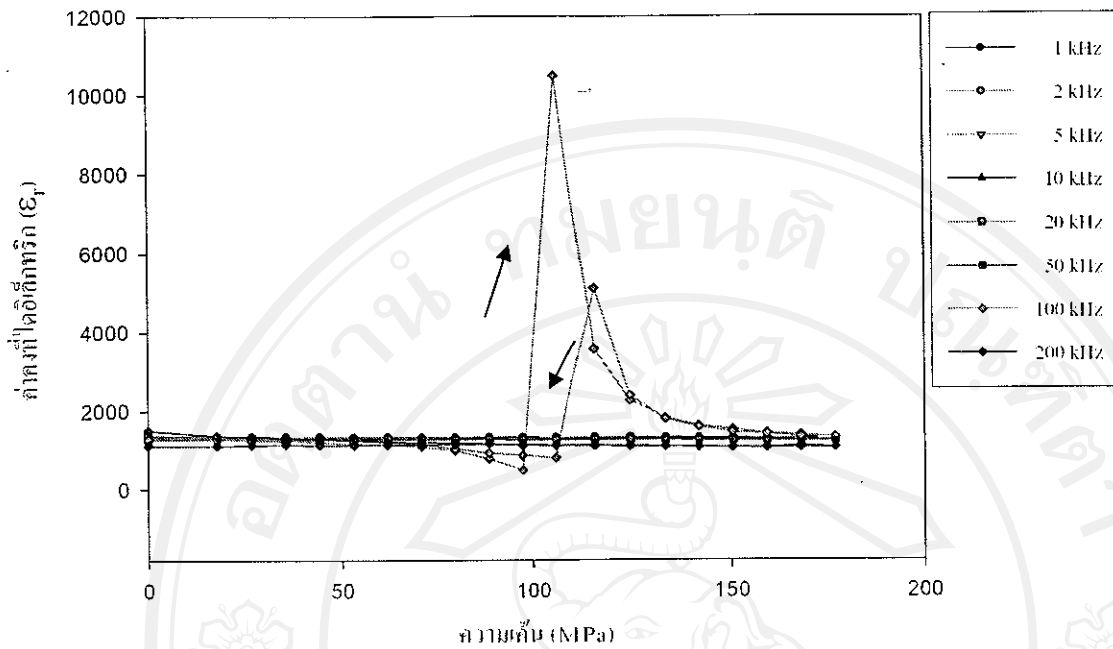
เปลี่ยนแปลงที่ความเค้น 125 MPa ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT-PZN ทุกองค์ประกอบในกรณีการลดความเค้นลงนั้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีความแตกต่างจากช่วงที่เพิ่มความเค้นมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการให้ความเค้นในระดับนี้ (0-200 MPa) แก่เซรามิก PZT-PZN ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรต่อโดเมน หรือโครงสร้างภายในของเซรามิกที่ผ่านการทำซ้ำแล้ว ทำให้เมื่อลดความเค้นลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจึงมีค่าแตกต่างจากค่าเริ่มต้นก่อนการเพิ่มความเค้นมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเซรามิก 0.9PZT-0.1PZN ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงอย่างชัดเจน



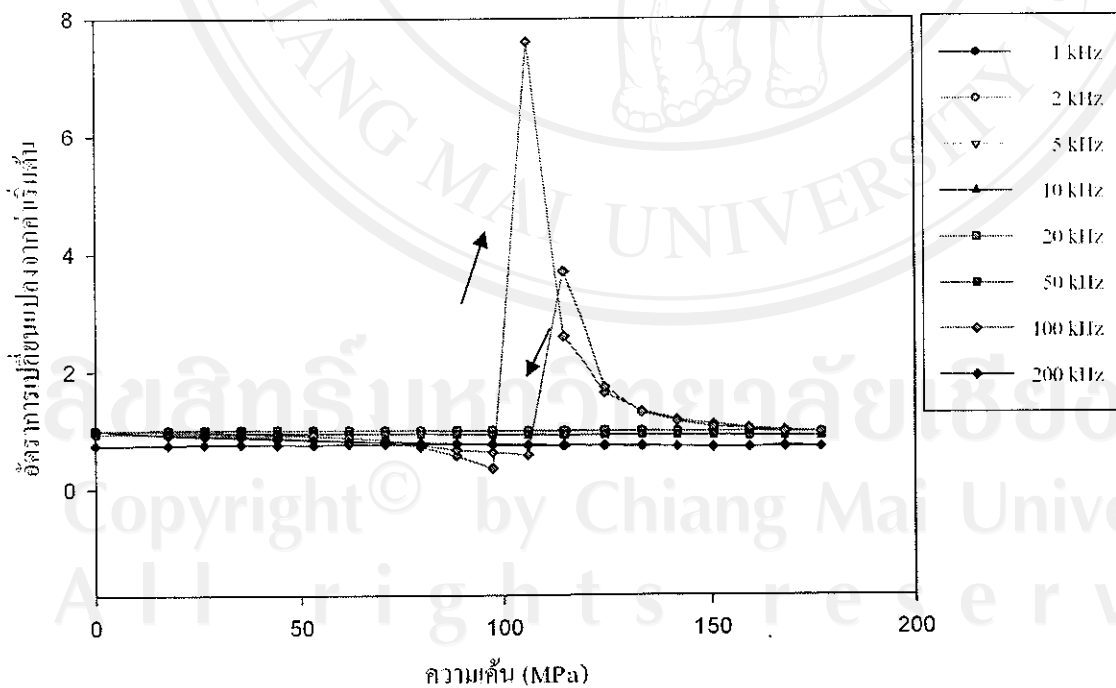
รูป 4.123 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความดันของเซรามิก 0.5PZT-0.5PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



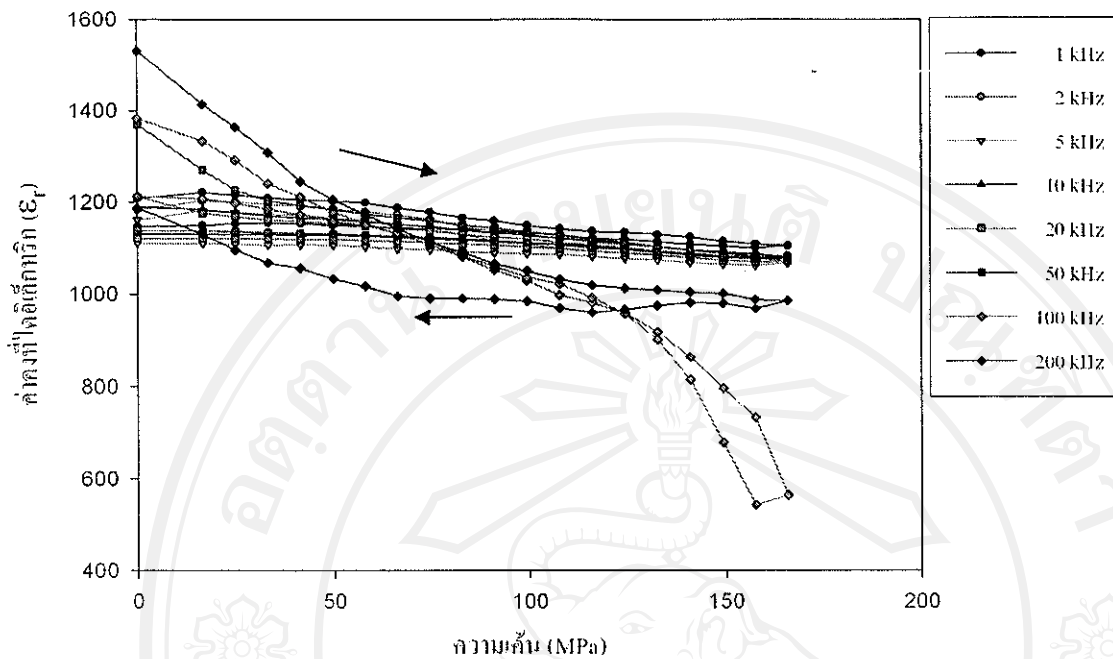
รูป 4.124 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความดันของเซรามิก 0.5PZT-0.5PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



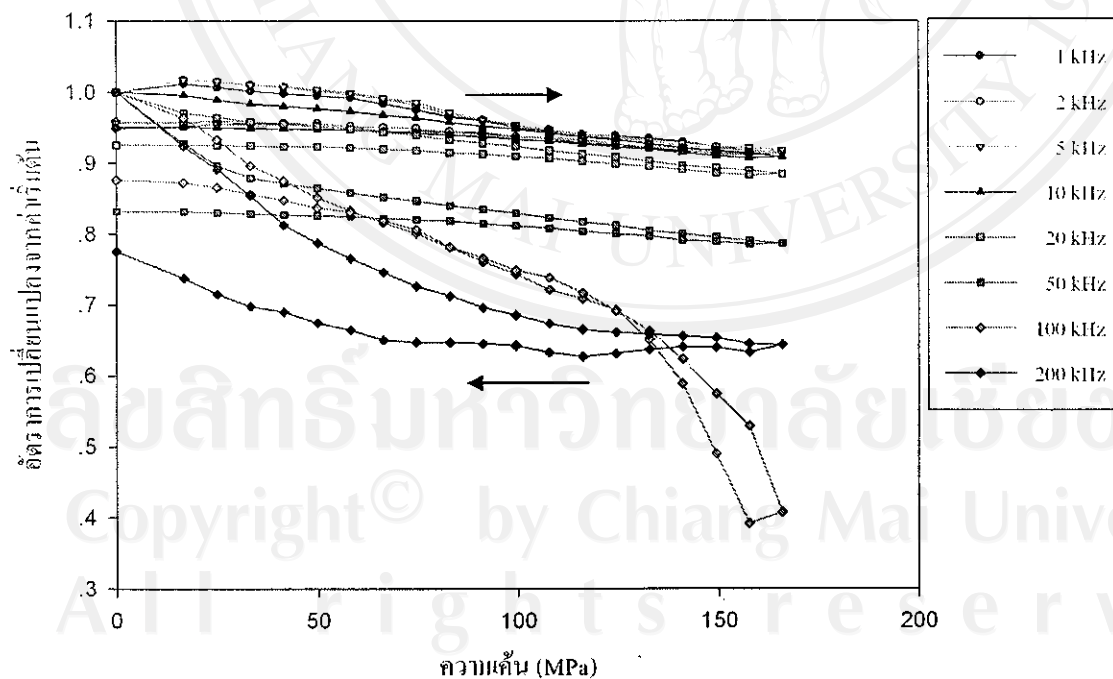
รูป 4.125 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PZT-0.4PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



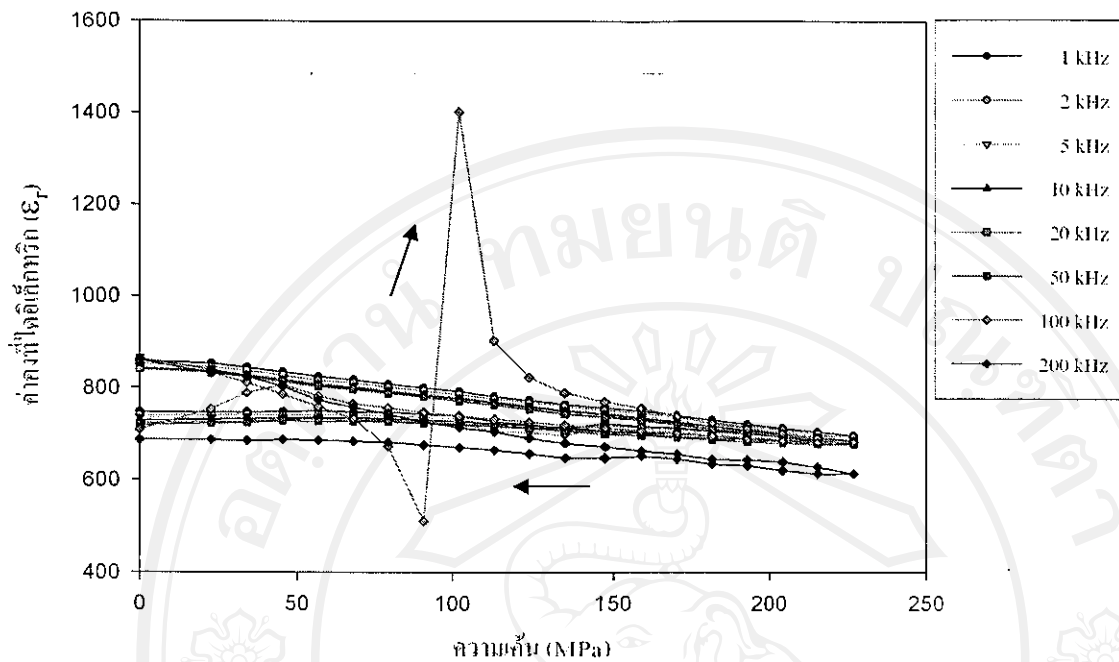
รูป 4.126 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PZT-0.4PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



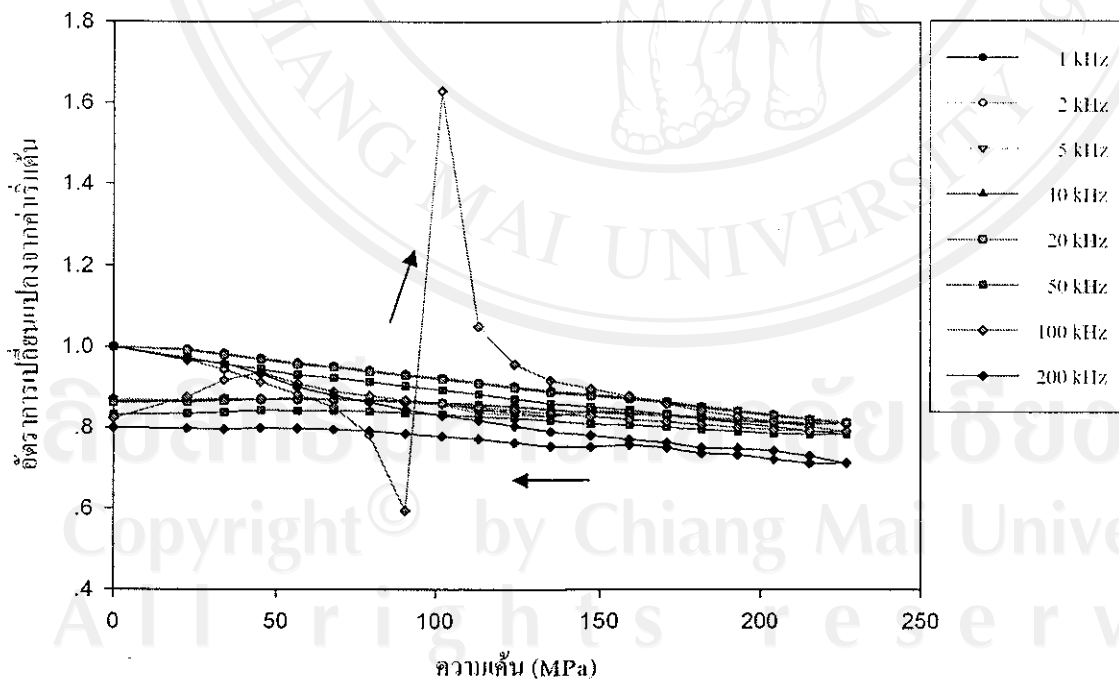
รูป 4.127 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PZT-0.3PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



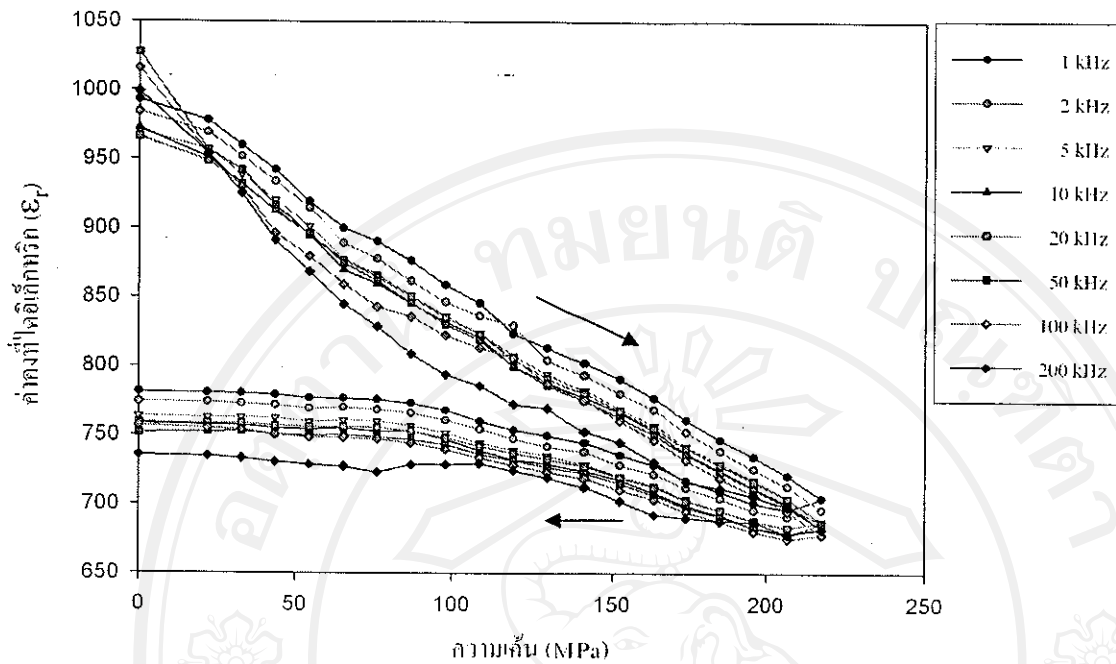
รูป 4.128 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PZT-0.3PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



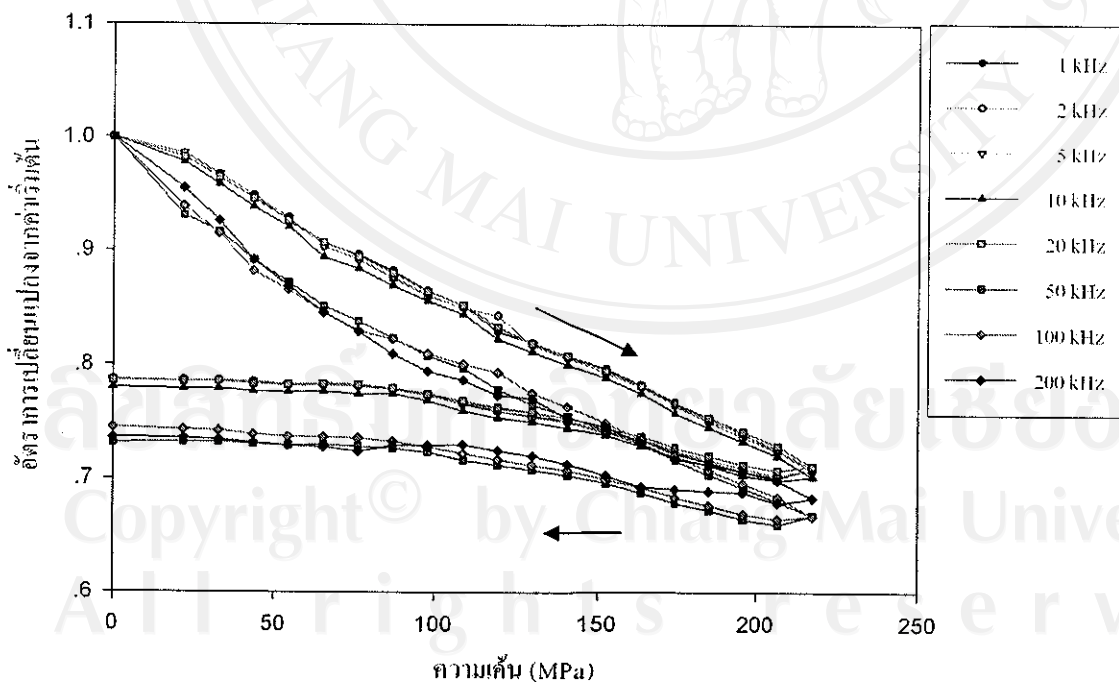
รูป 4.129 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PZT-0.2PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



รูป 4.130 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PZT-0.2PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว

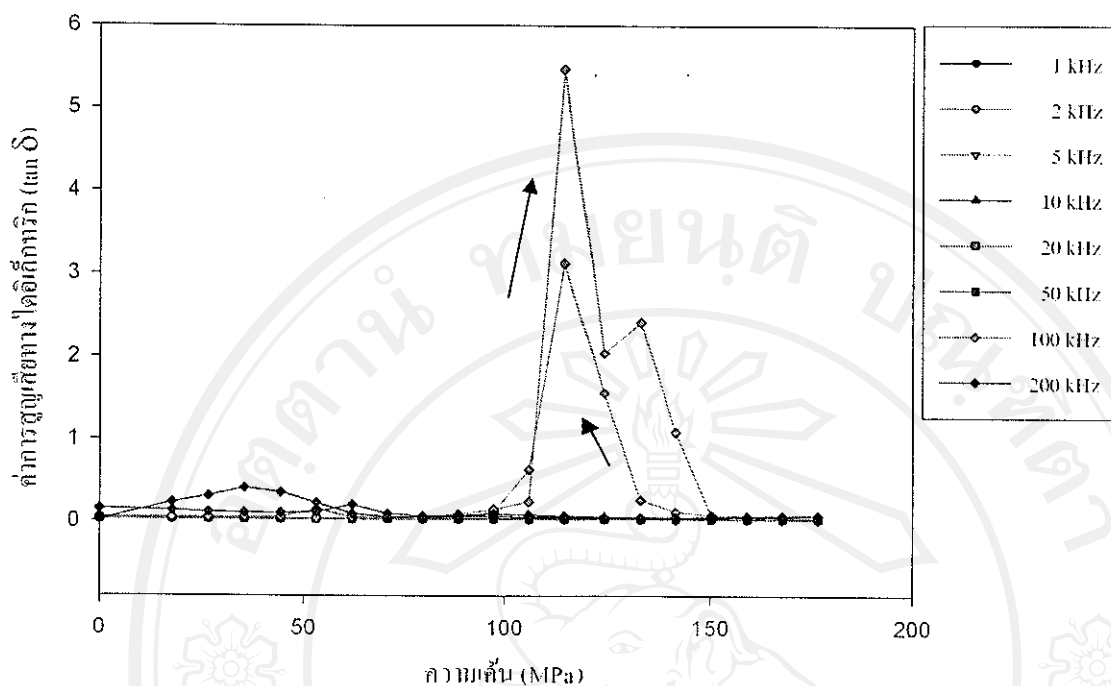


รูป 4.131 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความดันของเซรามิก 0.9PZT-0.1PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว

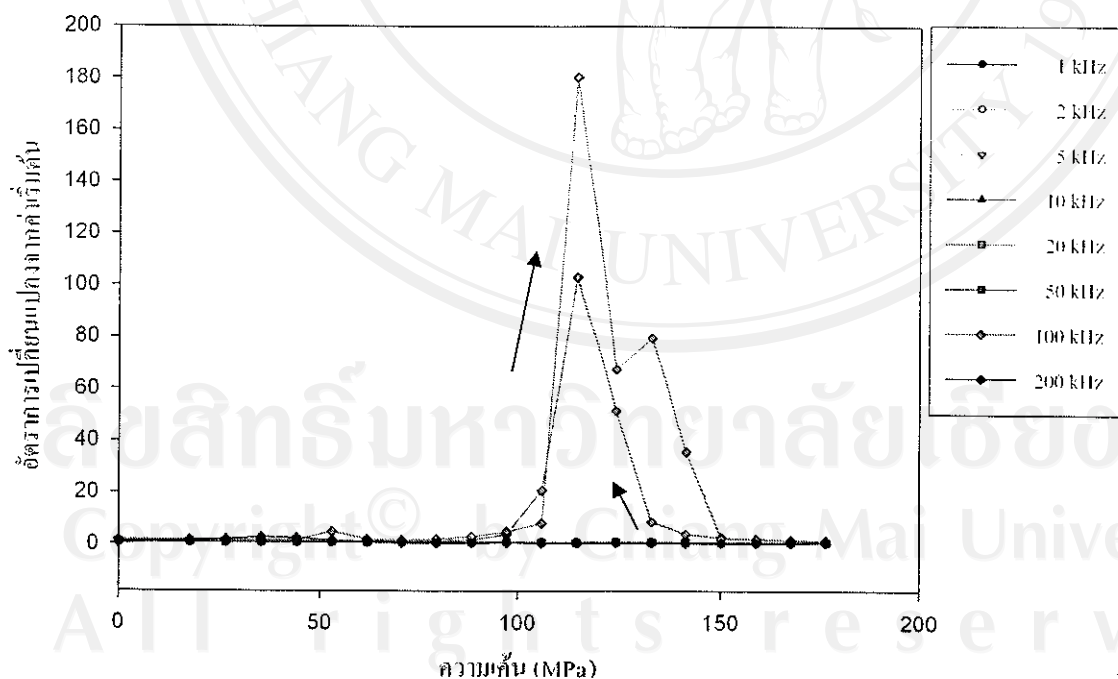


รูป 4.132 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความดันของเซรามิก 0.9PZT-0.1PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว

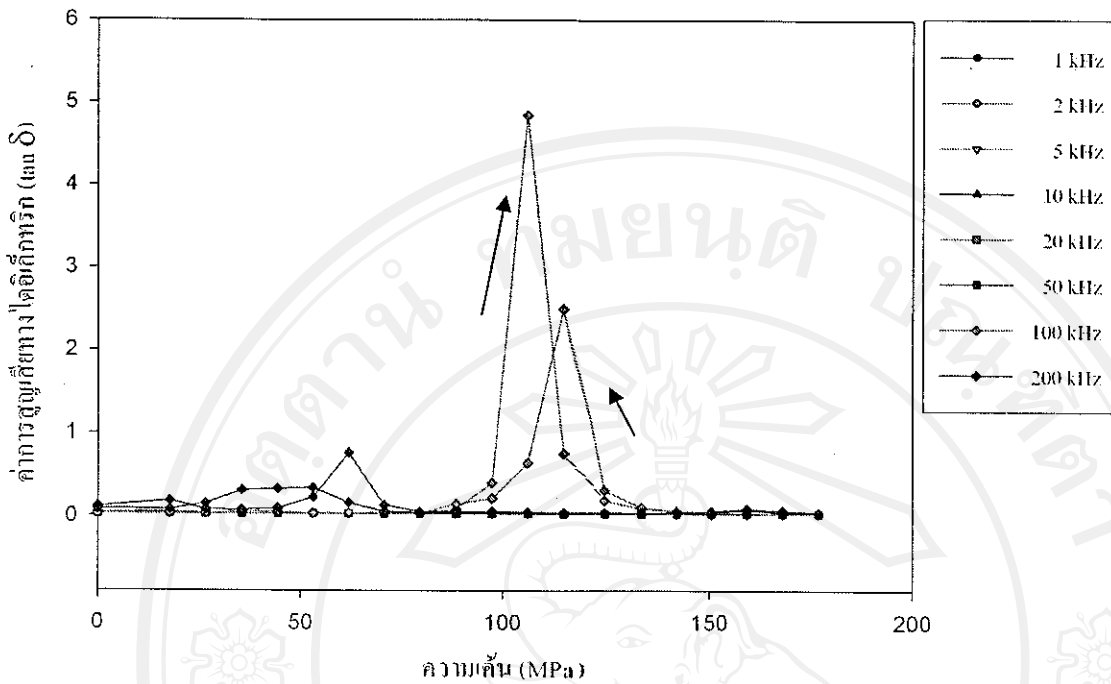
สำหรับในส่วนของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT-PZN ที่ผ่านการทำซ้ำแล้ว พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน แต่มีแนวโน้มส่วนใหญ่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในเซรามิก 0.8PZT-0.2PZN ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น (รูป 4.133-4.142) แต่ในเซรามิก 0.9PZT-0.1PZN มีแนวโน้มของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง อย่างไรก็ตาม พบว่าที่ความถี่ 100 Hz มีการเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกด้วย คือมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความเค้นที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเกิดการเปลี่ยนแปลง และในระหว่างการลดความเค้นลงนั้นพบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลงโดยส่วนใหญ่ ยกเว้นในเซรามิก 0.9PZT-0.1PZN ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่ความแตกต่างของค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกระหว่างที่เพิ่มความเค้นและลดความเค้นมีค่าที่ค่อนข้างมาก ซึ่งแสดงว่าความเค้นในระดับ 0-200 MPa สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรต่อโดเมนหรือโครงสร้างภายในของสาร PZT-PZN ได้



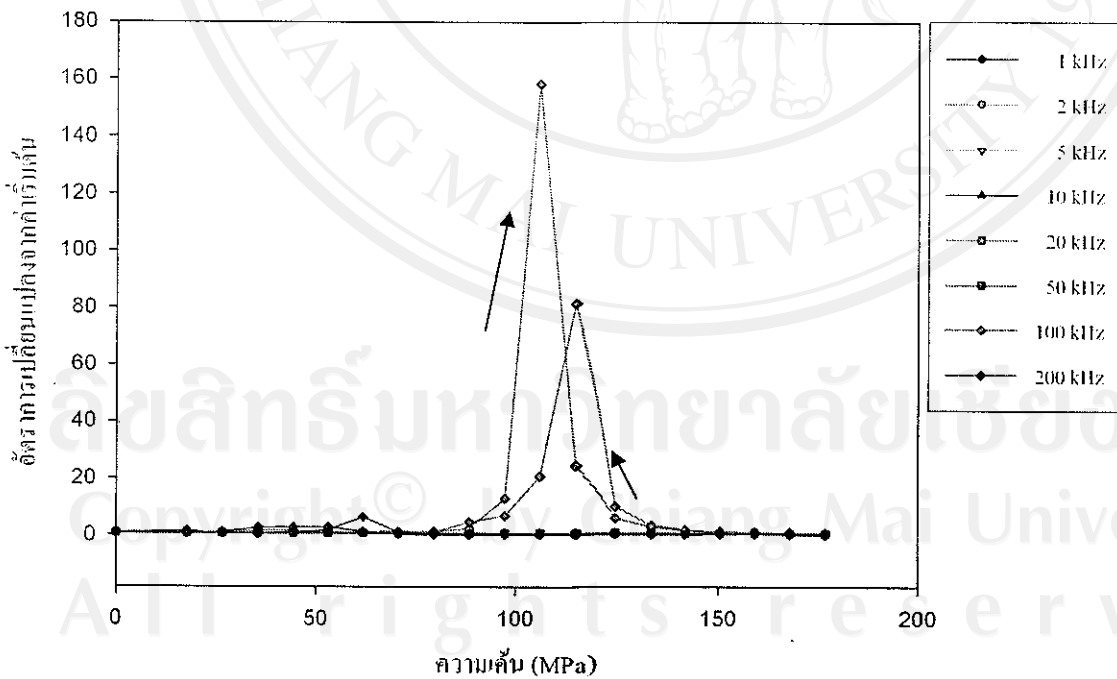
รูป 4.133 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PZT-0.5PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



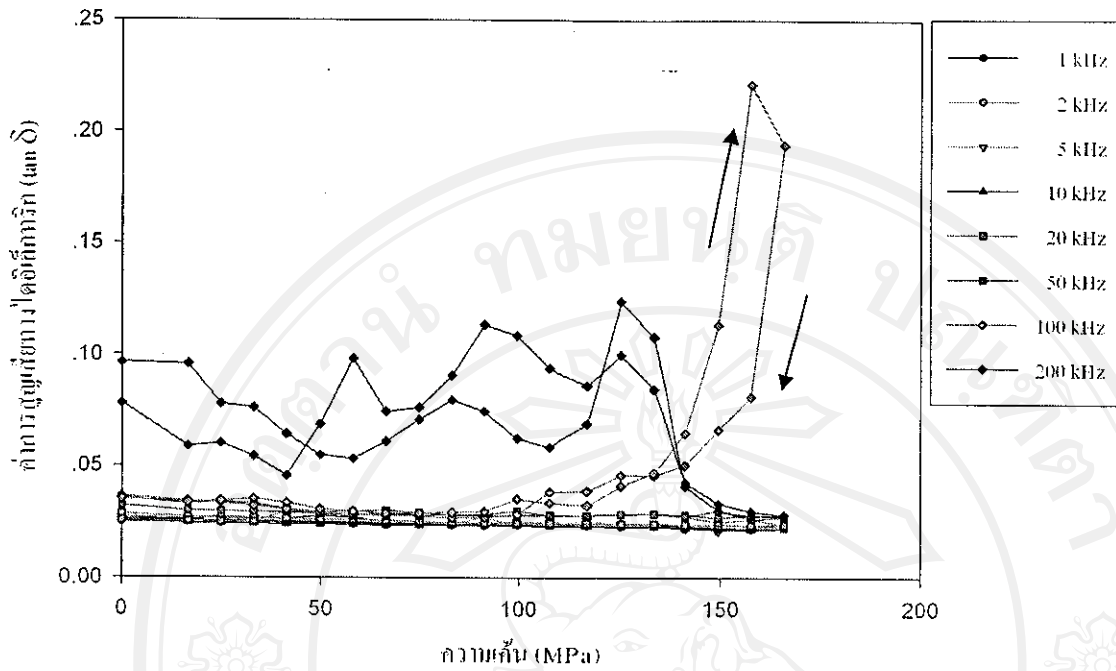
รูป 4.134 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.5PZT-0.5PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



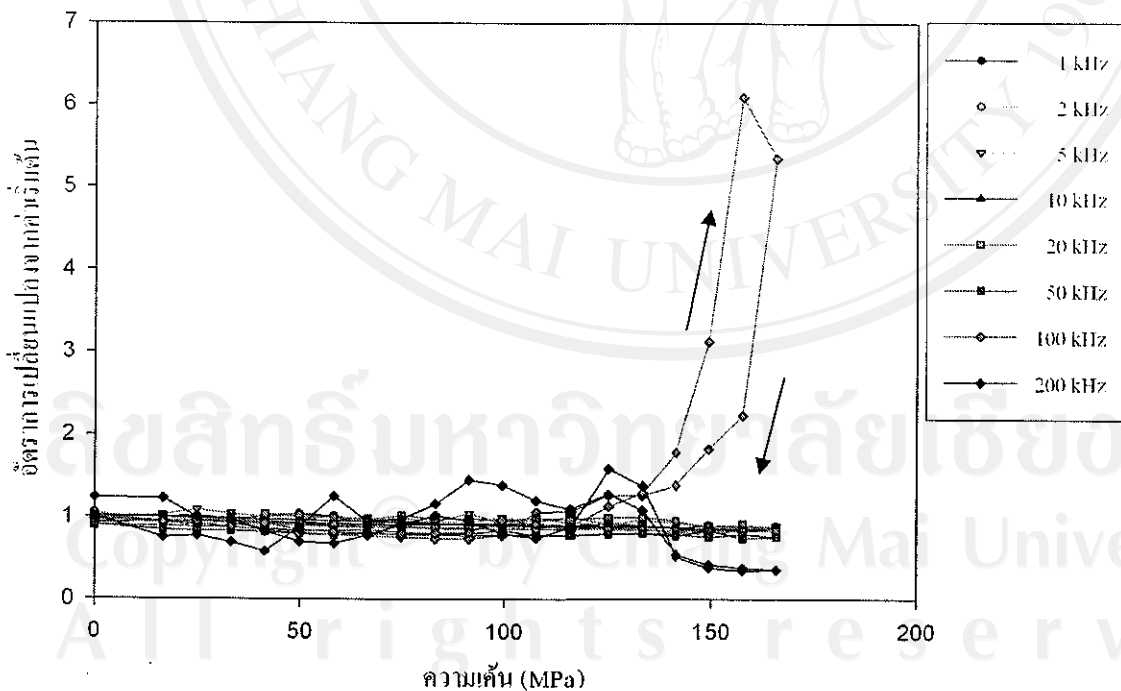
รูป 4.135 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PZT-0.4PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



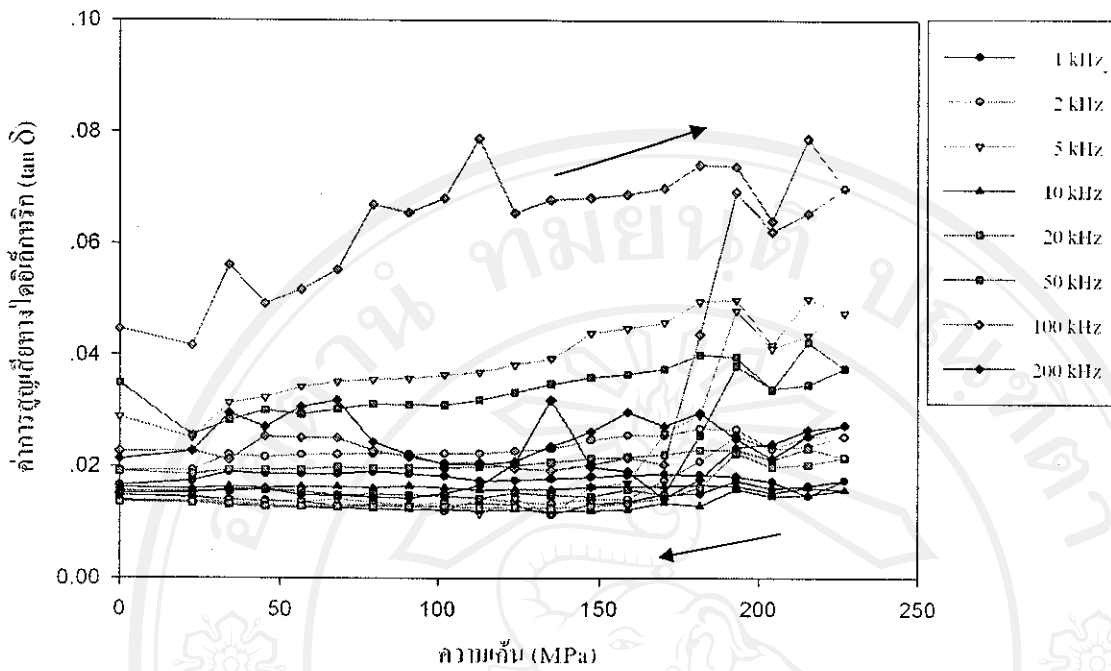
รูป 4.136 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.6PZT-0.4PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



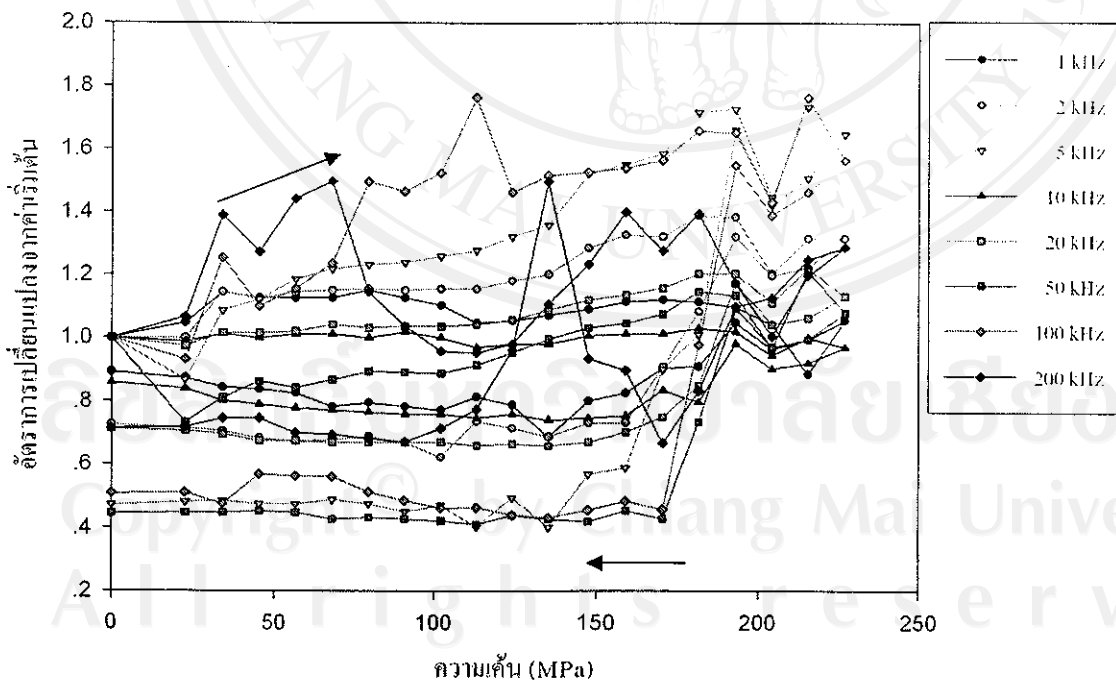
รูป 4.137 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PZT-0.3PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



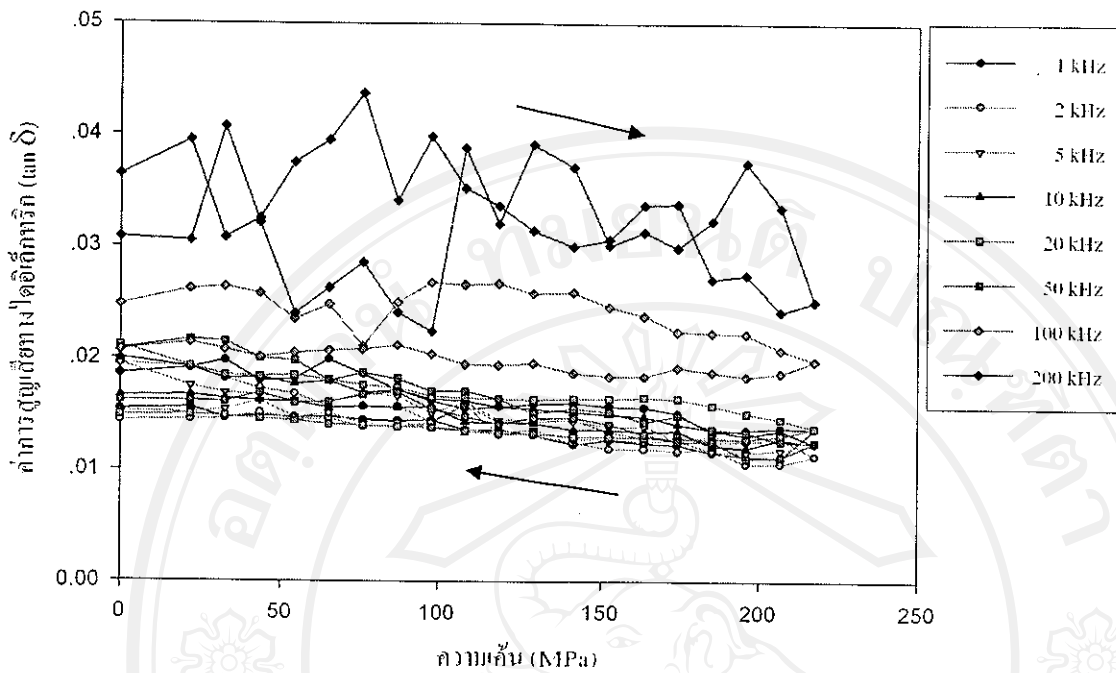
รูป 4.138 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.7PZT-0.3PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



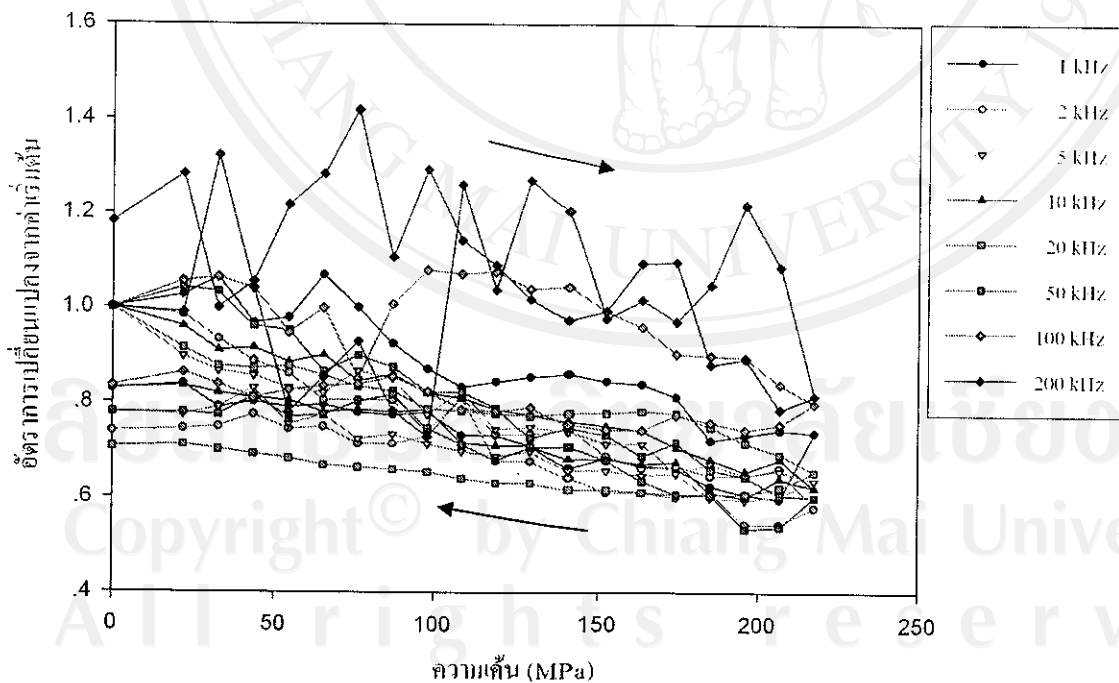
รูป 4.139 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PZT-0.2PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



รูป 4.140 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก 0.8PZT-0.2PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



รูป 4.141 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความถี่ของเซรามิก 0.9PZT-0.1PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว



รูป 4.142 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความถี่ของเซรามิก 0.9PZT-0.1PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้ว

โดยสรุปแล้วจากผลการทดลองจะพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นของเซรามิก PMN-PT ,PIN-PT และ PZT-PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้วนั้น สามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ซึ่งได้แก่ 0.5PMN-0.5PT ,0.9PMN-0.1PT ,0.6PIN-0.4PT ,0.9PIN-0.1PT และ 0.8PZT-0.2PZN และกลุ่มที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกไม่แน่นอนเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ซึ่งได้แก่ 0.6PMN-0.4PT ,0.7PMN-0.3PT ,0.8PMN-0.2PT ,0.5PIN-0.5PT ,0.7PIN-0.3PT ,0.8PIN-0.2PT ,0.5PZT-0.5PZN 0.6PZT-0.4PZN ,0.7PZT-0.3PZN และ 0.9PZT-0.1PZN โดยการเปลี่ยนแปลงที่พบในกลุ่มแรกนั้น น่าจะเป็นผลมาจากการที่ผนังโดเมน เกิดการยึดจับกันเมื่อให้ความเค้นเข้าไปทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงในแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในกลุ่มนี้มีลักษณะคล้ายกับผลการทดลองในงานวิจัยของ Zhao และคณะ[16] ที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก 0.9PMN-0.1PT มีค่าลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงในกลุ่มหลังนั้นอาจจะเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของโดเมนที่เป็นแบบสุ่ม ซึ่งโดเมนบางส่วนอาจจะอยู่ในแนวที่ทำมุมกัน 180° แต่บางส่วนอาจจะไม่ จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สารยังไม่ได้ผ่านการทำขั้ว โดยการเปลี่ยนแปลงในกลุ่มนี้มีลักษณะคล้ายกับการทดลองจากงานวิจัยของ Zhou และคณะ[20] ที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ไม่แน่นอนคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรก (0 ถึง -35 MPa) จากนั้นก็จะมีค่าลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นอีก (-35 ถึง -400 MPa)

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดียวของเซรามิก PMN-PT ,PIN-PT และ PZT-PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้วนั้น ถึงแม้จะมีค่าที่ไม่แน่นอนแต่โดยรวมแล้วค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น และในกรณีของการลดความเค้นนั้นพบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นลดลง

จากผลการทดลอง ทั้งการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทาง ไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้น พบว่าสมบัติไดอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันมากในช่วงเพิ่มและลดความเค้น แสดงให้เห็นว่าความเค้นในระดับนี้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรต่อโดเมนหรือโครงสร้างภายใน

สำหรับผลการทดลองของเซรามิก PMN-PT ,PIN-PT และ PZT-PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้วนั้นทั้งการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดียว สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกคือกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ซึ่งได้แก่ เซรามิก 0.9PMN-0.1PT ,0.9PIN-0.1PT และ PZT-PZN ทุกองค์ประกอบโดยยกเว้นที่ความถี่ 100 Hz ในบางองค์ประกอบ ซึ่งผลการทดลองนี้คล้ายกับ

ผลการทดลองที่พบในงานวิจัยของ Zhao และคณะ[16] กลุ่มที่สองคือ กลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแบบไม่แน่นอน โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรก จากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ซึ่งได้แก่ เซรามิก 0.5PMN-0.5PT ,0.6PMN-0.4PT ,0.7PMN-0.3PT ,0.8PMN-0.2PT , 0.6PIN-0.4PT ,0.7PIN-0.3PT และ 0.8PIN-0.2PT และกลุ่มสุดท้ายคือกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ซึ่งได้แก่ 0.5PIN-0.5PT นอกจากนี้จากผลการทดลองพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT-PZN เมื่อวัดที่ความถี่ 100 Hz มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน คือมีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วคล้ายกับเกิดการสั่นพ้องขึ้นภายในเซรามิก ซึ่งควรที่จะศึกษาต่อไปถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ขึ้น

จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมานั้น สามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ว่าสมบัติต่างๆ ของสารเฟอร์โรอิเล็กทริกจะเกิดจากกลไกที่มีภายใน (intrinsic contribution) ซึ่งเกิดจากโดเมนเดี่ยว (single domain) และเกิดจากผลจากภายนอก (extrinsic contribution) คือการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน (domain wall motions)[5,17,24] โดยเมื่อให้ความเค้นเชิงกลภายนอกเข้าไปแล้ว โครงสร้างของโดเมนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้พลังงานโดเมนมีค่าน้อยที่สุด ระหว่างที่เกิดกระบวนการนี้โดเมนบางอันจะถูกรวมเข้ากับโดเมนอื่น หรืออาจจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปสำหรับภายใต้ความเค้นแบบแกนเดี่ยว โครงสร้างของโดเมนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของโดเมน (domain switching) การจับกันของผนังโดเมน (clamping of domain walls) การลดการเสื่อมสภาพ (de-aging) และการทำให้หมดสภาพความเป็นขั้ว (de-poling)[17,24] ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ในกรณีของเซรามิกที่ผ่านการทำขั้วแล้ว เมื่อให้ความเค้นแบบแกนเดี่ยวในทิศทางที่ขนานกับทิศทางในการทำขั้ว ซึ่งความเค้นที่ให้เข้าไปจะไปเปลี่ยนแปลงทิศทางของโพลาริเซชันให้เคลื่อนที่ออกจากทิศทางที่ทำขั้ว โดยที่การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโดเมน ทำให้มีความหนาแน่นของผนังโดเมนที่ไม่ได้ทำมุมกัน 180° เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น แต่จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นเฉพาะช่วงแรกที่มีการให้ความเค้น และต่อจากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มมากขึ้น อาจจะเนื่องมาจากเกิดการหมดสภาพความเป็นขั้ว (de-poling) เนื่องจากความเค้นที่ให้เข้าไปก็เกินไปได้ จึงทำให้สมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก PMN-PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้วมีลักษณะคล้ายคลึงกับเซรามิก PMN-PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้ว สำหรับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกนั้น พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีที่เซรามิกผ่านการทำขั้วและ

ไม่ผ่านการทำซ้ำ โดยที่การลดลงของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกอาจจะเนื่องมาจากการลดการเสื่อมสภาพของวัสดุก็เป็นได้[13,17,24]



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved