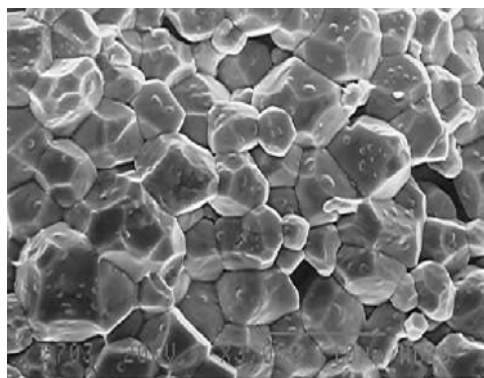
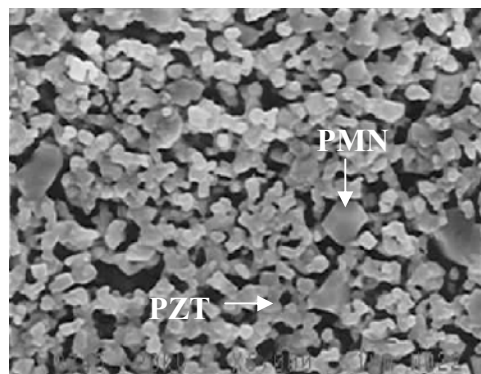
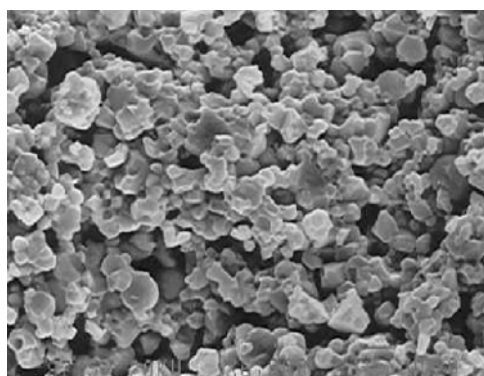




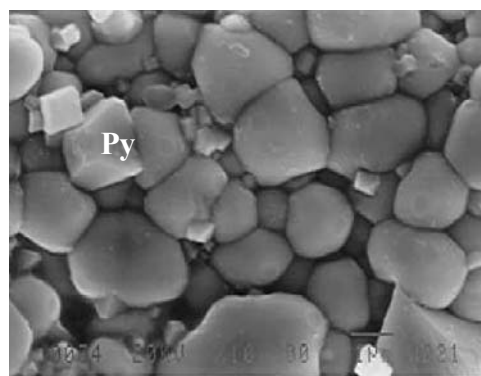
(ก)



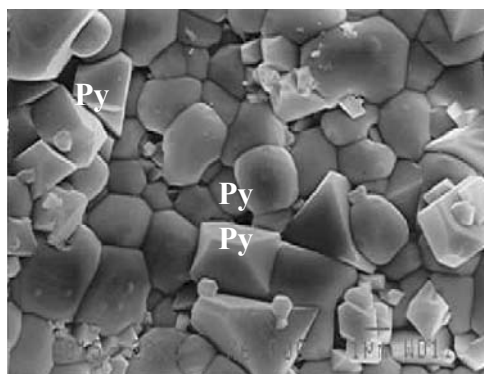
(ข)



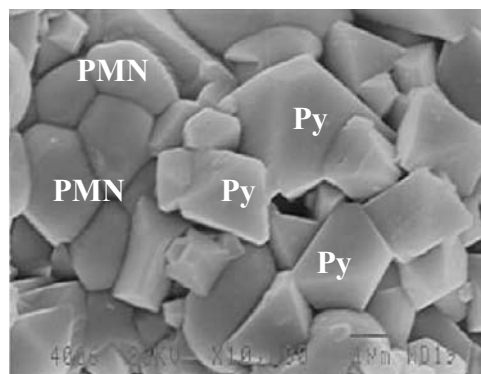
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูป 3.5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก PMN-PZT (ก) PZT; (ข) 0.1PMN-0.9PZT; (ค) 0.3PMN-0.7PZT; (ง) 0.7PMN-0.3PZT; (จ) 0.9PMN-0.1PZT; and (ฉ) PMN (Py แสดง เฟส Pyrochlore)

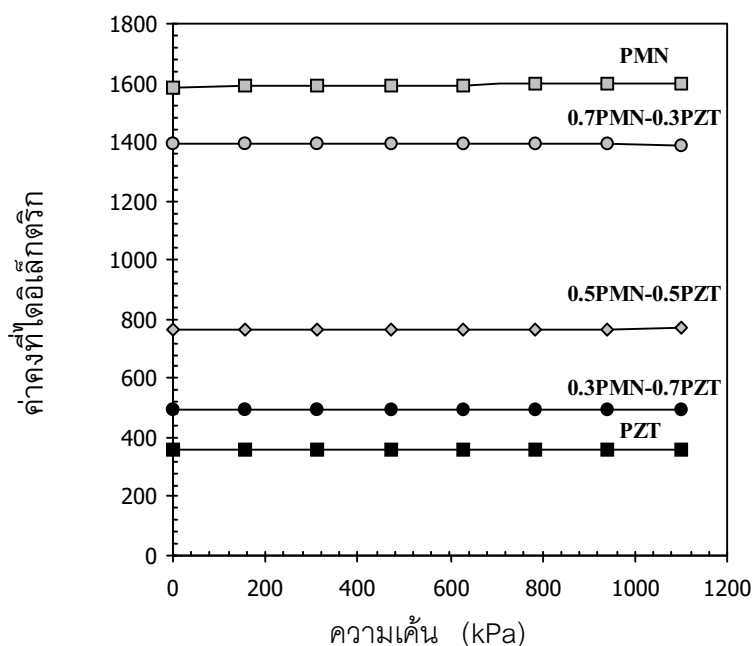
3.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กตริก

3.4.1 กรณีที่สารเซรามิกยังไม่ผ่านการทำขั้ว (unpoled)

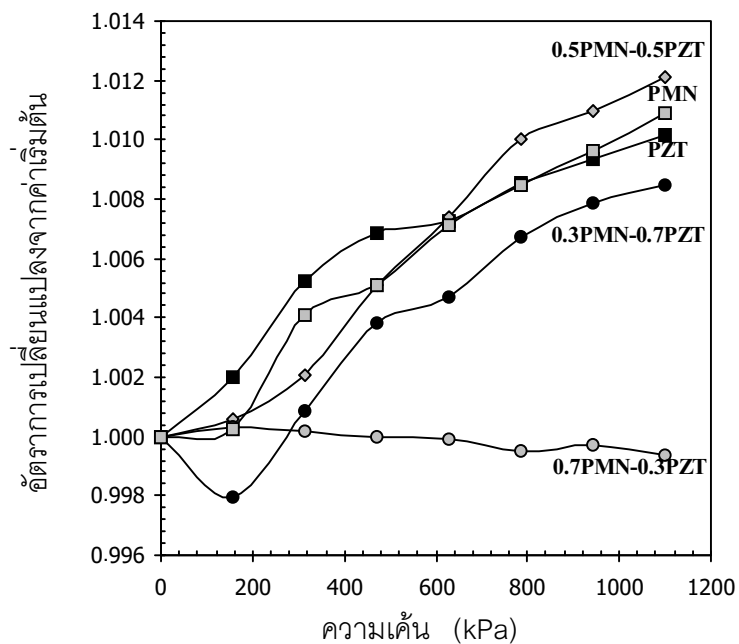
3.4.1.1 ผลของอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

เมื่อสารเซรามิก PMN-PZT อยู่ภายใต้สภาวะความเค้นต่ำ (0-1100 kPa) ดังรูป 3.6 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นน้อยมากซึ่งมีค่าไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยโมล (รูป 3.7)

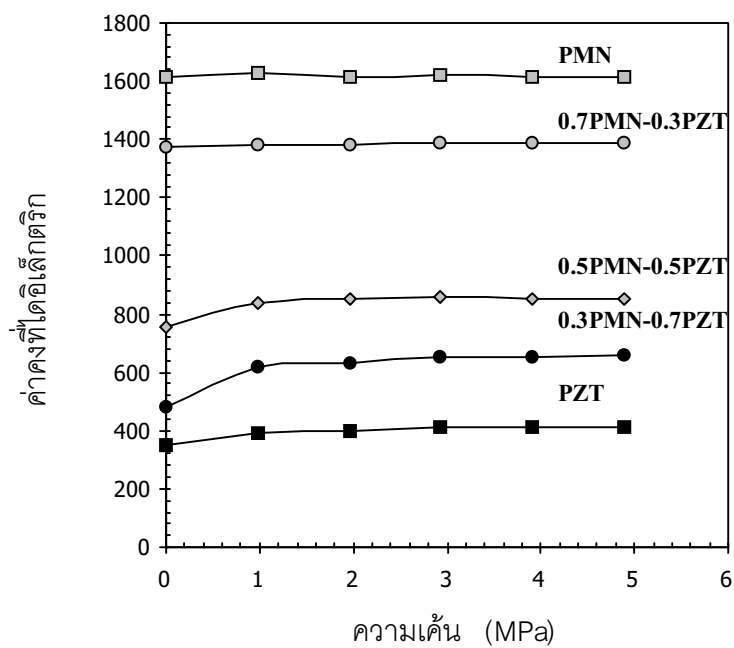
เมื่อทำการทดลองภายใต้สภาวะความเค้นสูง (0-5 MPa) ดังรูป 3.8 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเริ่มต้น แต่จะมีค่าคงที่เมื่อความเค้นสูงขึ้น (รูป 3.9) (รายละเอียดในภาคผนวก ข และ ฎ)



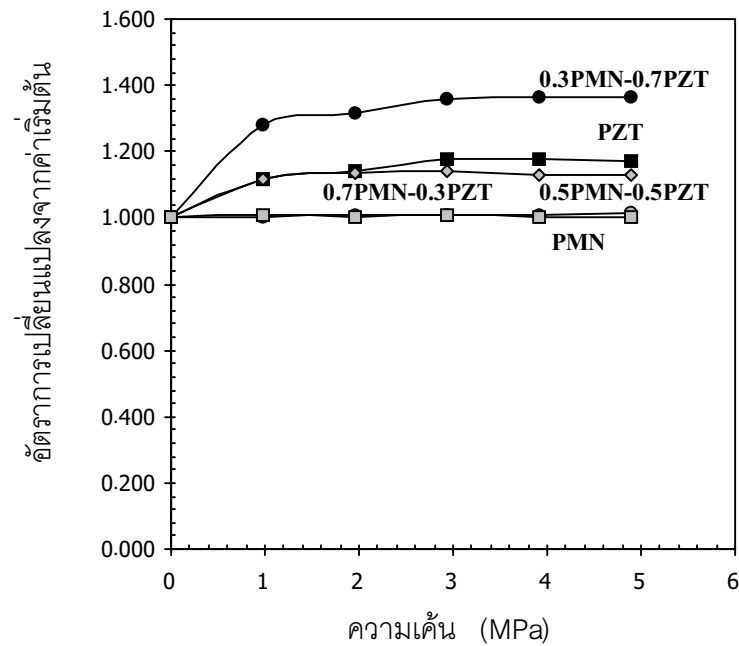
รูป 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความเค้นของเซรามิก PMN-PZT ภายใต้สภาวะความเค้นต่ำ



รูป 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราค่าเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ได้อิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก PMN-PZT ภายใต้สภาวะความเค้นต่ำ



รูป 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ได้อิเล็กทริกกับความเค้นของเซรามิก PMN-PZT ภายใต้สภาวะความเค้นสูง

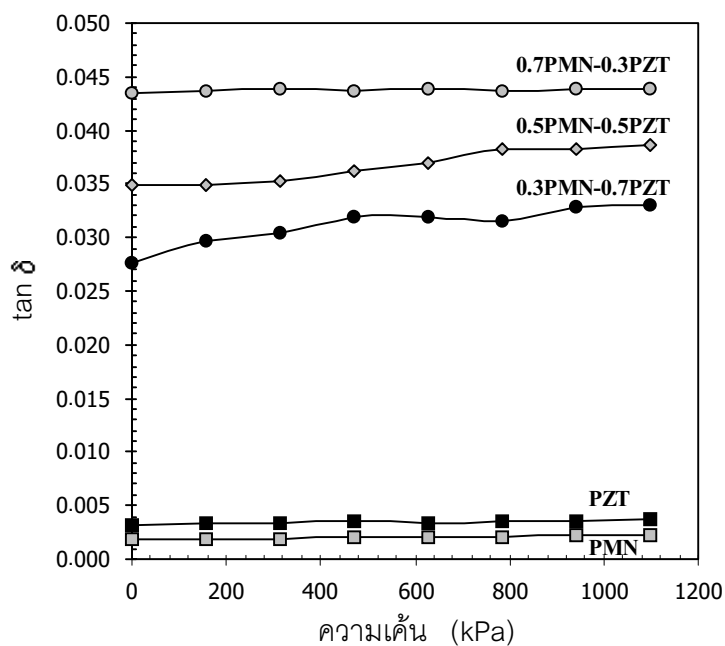


รูป 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้พลังงานต่อหน่วยความเค้นของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความเค้นของเซรามิก PMN-PZT ภายใต้สภาวะความเค้นสูง

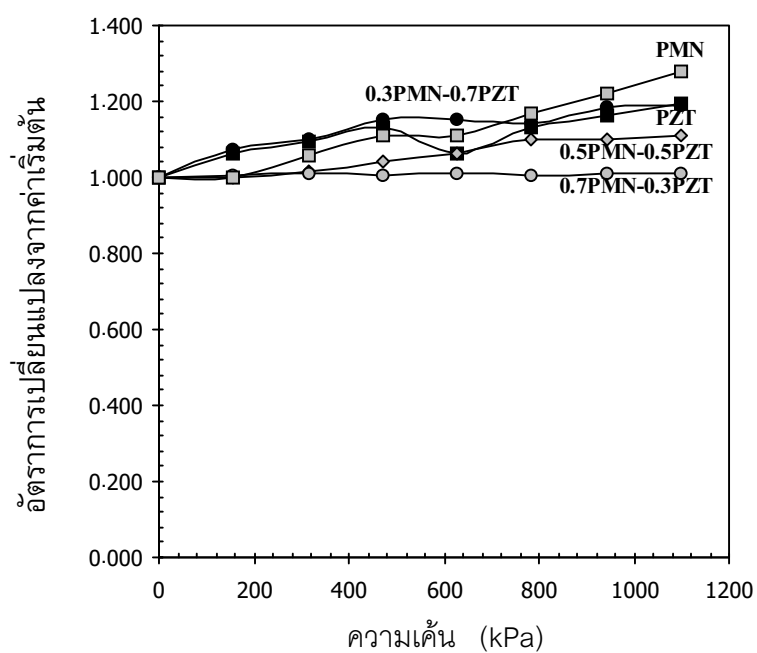
3.4.1.2 ผลของอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก

ในสภาวะความเค้นต่ำ (0-1100 kPa) ดังรูป 3.10 จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกที่ชัดเจนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเค้น ส่วนอัตราการใช้พลังงานต่อหน่วยความเค้นแสดงว่ามีค่าเพิ่มขึ้นแต่น้อยมาก (รูป 3.11)

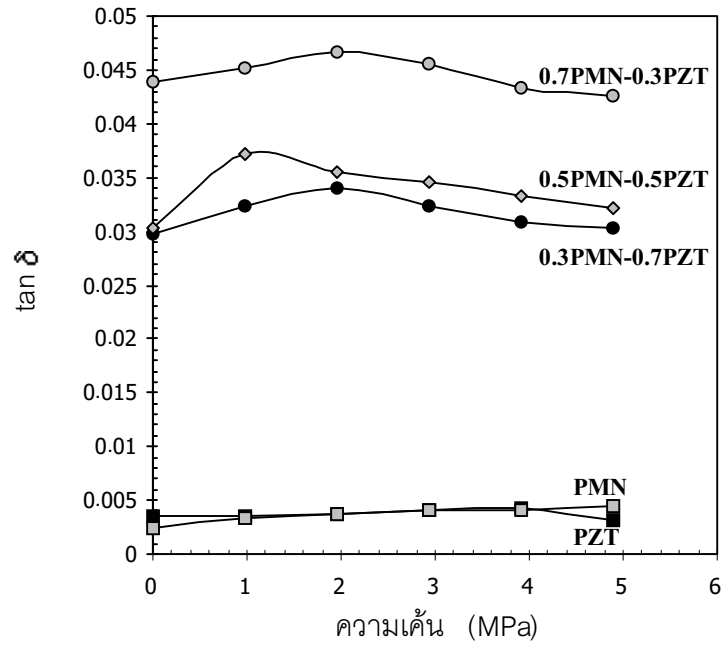
เมื่ออยู่ในสภาวะความเค้นสูงขึ้น (0-5 MPa) ดังรูป 3.12 ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกแล้วมีการลดลงเมื่อความเค้นสูงขึ้น อัตราการใช้พลังงานต่อหน่วยความเค้นจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แล้วลดลงเช่นกัน (รูป 3.13) อย่างไรก็ตาม PMN และ PZT จะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันไป โดยที่ PMN จะมีการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเค้นสูงขึ้น ในขณะที่ PZT จะมีการลดลงของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกอย่างมากเมื่อความเค้นมีค่าสูงเกิน 4 MPa



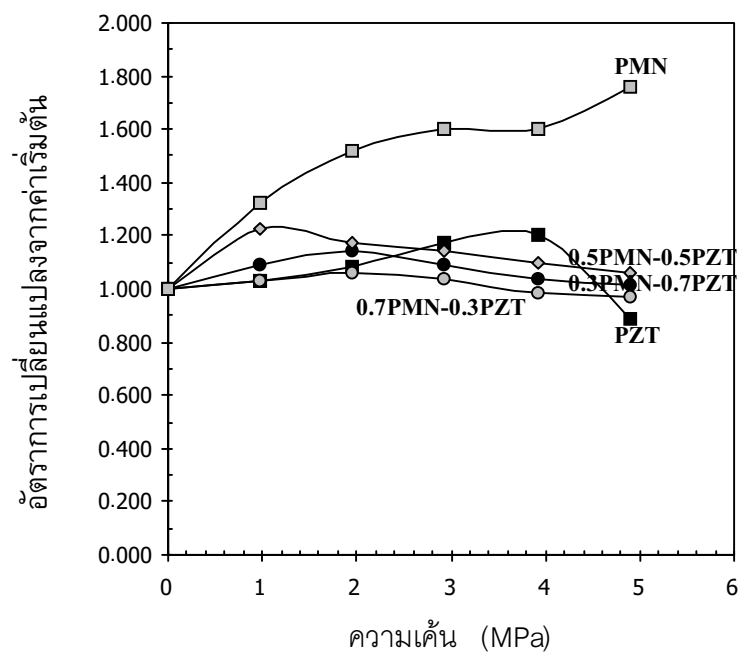
รูป 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับ ความเค้นของเซรามิก PMN-PZT ภายใต้สภาวะความเค้นต่ำ



รูป 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นของ การสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับความเค้นของเซรามิก PMN-PZT ภายใต้ สภาวะความเค้นต่ำ



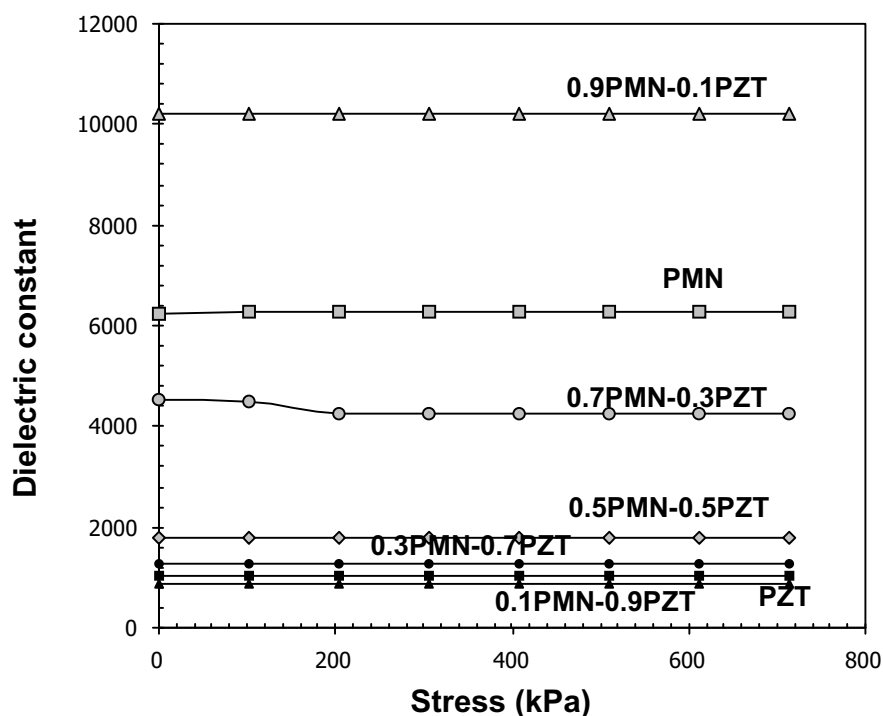
รูป 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับ
ความเค้นของเซรามิก PMN-PZT ภายใต้สภาวะความเค้นสูง



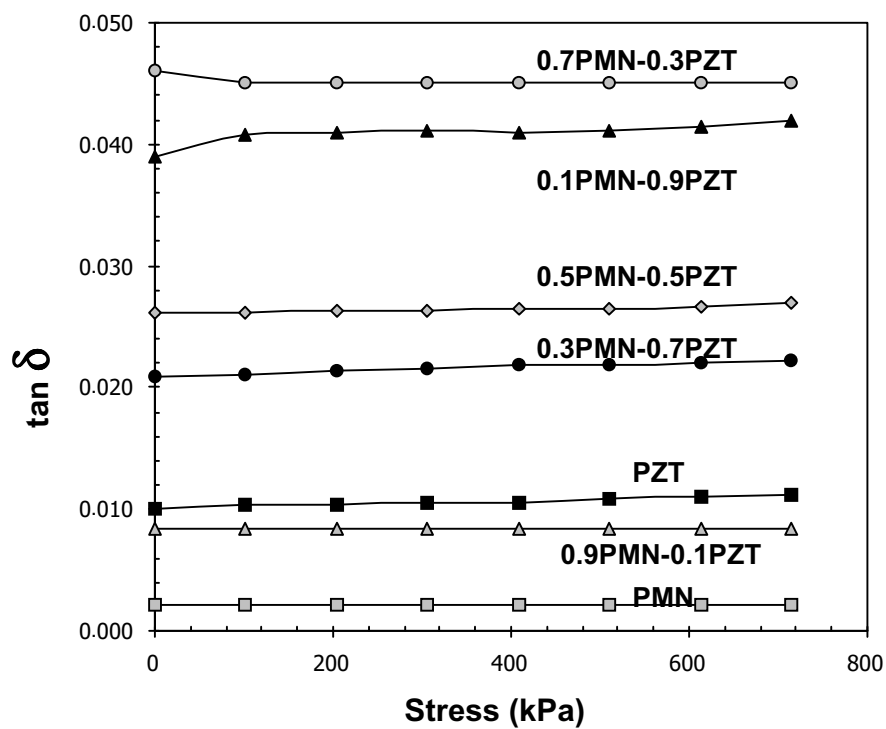
รูป 3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้น
ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับความเค้นของเซรามิก PMN-PZT
ภายใต้สภาวะความเค้นสูง

3.4.2 กรณีที่สารเซรามิกยังผ่านการทำขั้วแล้ว (poled)

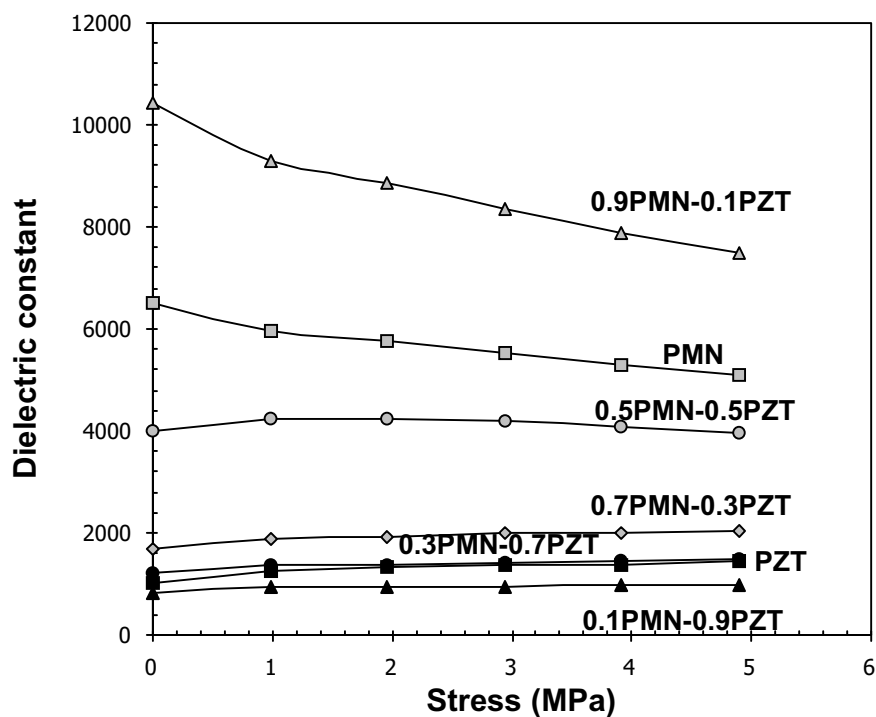
จากการทดลองภายใต้สภาวะความเค้นต่ำดังแสดงในรูปที่ 3.14 และ 3.15 นั้นจะเห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกตามความเค้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในความเค้นระดับนี้ยังไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในระดับจุลภาค ในขณะที่ผลการทดลองภายใต้สภาวะความเค้นสูงแสดงในรูปที่ 3.16 และ 3.17 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลง ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับความเค้นอย่างเห็นได้ชัด โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสามารถแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีสารเซรามิก PMN-PZT ที่มีสาร PMN เป็นองค์ประกอบหลัก (0.9PMN-0.1PZT และ 0.7PMN-0.3PZT) จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงเมื่อความเค้นสูงขึ้น และในกรณีสารเซรามิก PMN-PZT ที่มีสาร PZT เป็นองค์ประกอบหลัก (0.3PMN-0.7PZT 0.5PMN-0.5PZT และ 0.1PMN-0.9PZT) พบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น เมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมาซึ่งพบว่าสาร PZT มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นขณะที่สาร PMN มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น¹³ แต่สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับความเค้นมีการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน (รายละเอียดในภาคผนวก ก ข และ ค)



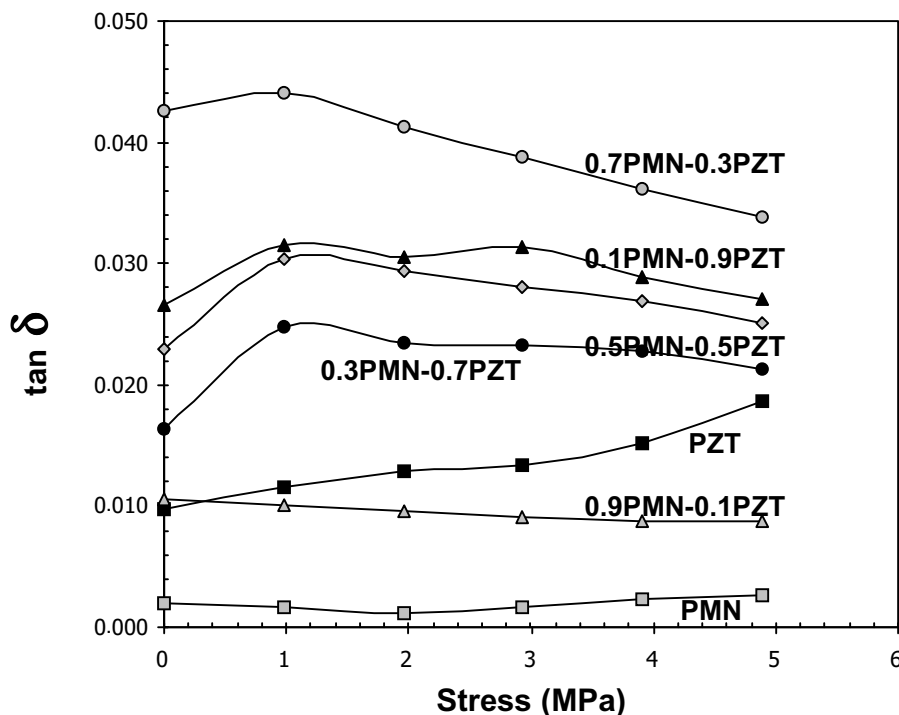
รูป 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความเค้นของเซรามิก PMN-PZT ภายใต้สภาวะความเค้นต่ำ



รูป 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับความเค้นของเซรามิก PMN-PZT ภายใต้สภาวะความเค้นต่ำ



รูป 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความเค้นของเซรามิก PMN-PZT ภายใต้สภาวะความเค้นสูง



รูป 3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับความเค้นของเซรามิก PMN-PZT ภายใต้สภาวะความเค้นสูง

ในการที่จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสมบัติไดอิเล็กตริกกับความเค้นนั้น จะต้องเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของโดเมนภายใต้ความเค้น ซึ่งอาจจะเกิดในรูปการสลับทิศทางของโดเมน (domain switching) และการย้อนกลับของการเสื่อมอายุของโดเมน (de-aging) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์สำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกภายใต้ความเค้นในสารเซรามิก PMN-PZT ที่มี PZT เป็นองค์ประกอบหลัก^{18,19} ส่วนในกรณีของสารที่มี PMN เป็นองค์ประกอบหลักนั้น ในการอธิบายจะมีความแตกต่างกันออกไป เนื่องจาก PMN เป็นสารที่มีสมบัติเป็นรีแลกเซอร์ (relaxor) ซึ่งภายในสารจะประกอบด้วยบริเวณที่เป็นสารไม่มีขั้ว (non-polar region) และบริเวณที่เป็นสารมีขั้วในระดับไมโคร (micro-polar region) ซึ่งในกรณีที่ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องทำให้บริเวณที่เป็นสารมีขั้วในระดับไมโครมีบทบาทมากกว่า ทำให้สามารถสังเกตได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเค้น ในสารที่มี PMN เป็นองค์ประกอบหลัก^{15,20} ส่วนในกรณีของการเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับความเค้นนั้นสามารถอธิบายได้ง่ายกว่า โดยที่การเพิ่มขึ้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับความเค้นในบางสารนั้นเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน (domain wall mobility) ในทางตรงกันข้ามกระบวนการย้อนกลับของการเสื่อมอายุ (de-aging) จะทำให้ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นบางสาร^{15,20} (รายละเอียดในภาคผนวก ก จ ข และ ฎ)

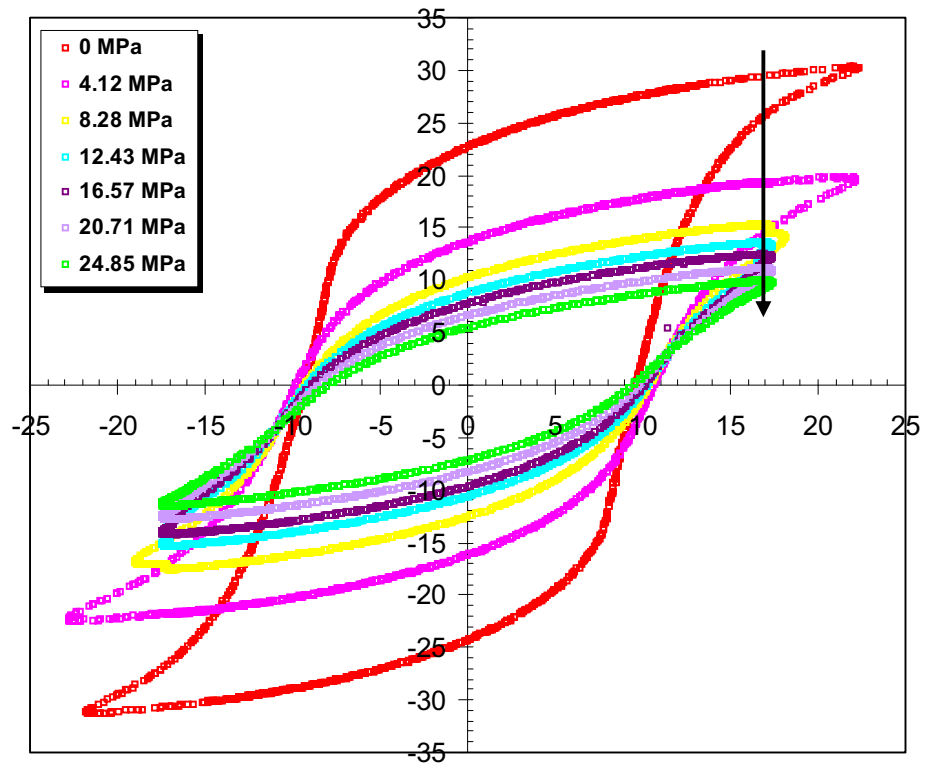
อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าสารเซรามิก 0.1PMN-0.9PZT มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับความเค้นที่แตกต่างจากสารเซรามิก PMN-PZT อัตราส่วนอื่นทั้งนี้เป็นเพราะว่าสารเซรามิกอัตราส่วนนี้ถูกเผาขึ้นเตอรืในช่วงอุณหภูมิไม่เหมาะสมจึงทำให้สามารถแน่นตัวได้น้อยกว่าสารเซรามิกอัตราส่วนอื่นหรือมีรูพรุนมาก จึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกภายใต้ความเค้นที่แตกต่างไป

3.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติฮิสเทอรีซิส

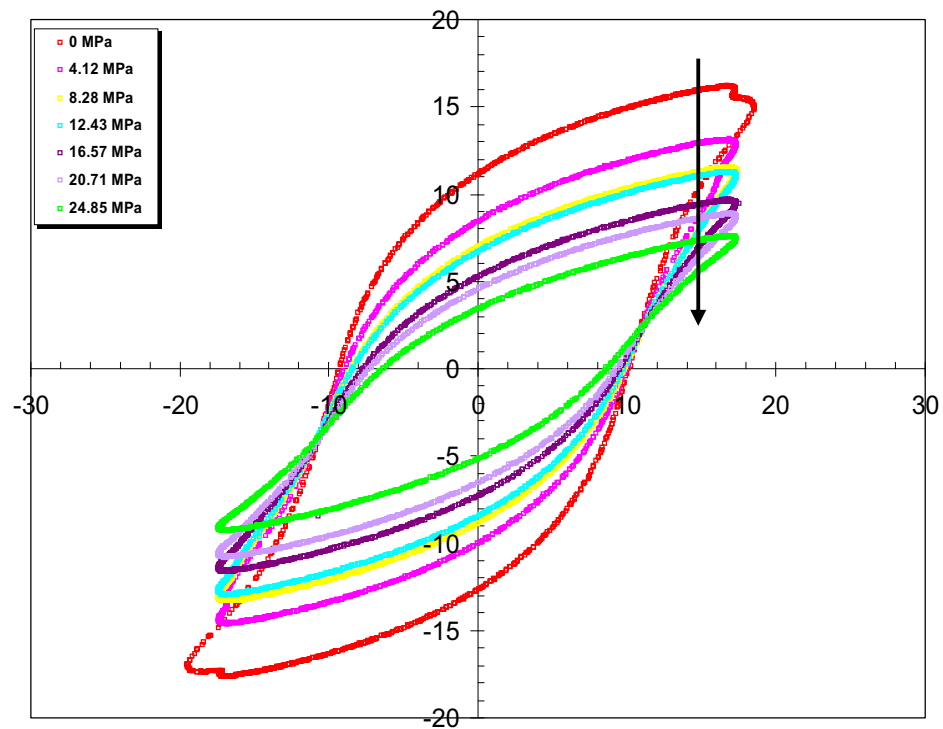
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการศึกษาฮิสเทอรีซิสของสารเซรามิก PMN-PZT เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเค้นที่กระทำบนสารตัวอย่าง ในการทดลองส่วนนี้นั้นจะทำการทดสอบบนสารเซรามิกที่ได้ผ่านการทำขั้วแล้ว ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบสารเซรามิกทุกองค์ประกอบจะผ่านกระบวนการทำขั้วภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน กล่าวคือ การให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงระดับ 4 kV/mm ที่อุณหภูมิ 120 °ซ เป็นระยะเวลา 30 นาที แล้วค่อยๆลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้องโดยที่ยังคงมีการให้สนามไฟฟ้าอยู่อย่างต่อเนื่อง และเนื่องจากการทดลองเบื้องต้นพบว่า การให้ความเค้นในระดับต่ำกว่า 1 MPa นั้น ไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงทำการทดลองเฉพาะกรณีที่ความเค้นอยู่ในระดับที่สูงกว่า 1 MPa เท่านั้น

นอกจากนี้ ในการทดลองนั้น ได้มีการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสทั้งในกรณีที่อยู่ระหว่างการเพิ่มขึ้นของระดับความเค้นจากศูนย์ไปจนถึงระดับความเค้นสูงสุด (ขึ้นกับแต่ละสารตัวอย่าง) ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.18 สำหรับสาร PZT และในกรณีที่อยู่ระหว่างการลดลงของระดับความเค้นจากสูงสุดกลับมายังระดับศูนย์ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.19 สำหรับสาร PZT เพื่อศึกษาถึงผลของความเค้นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรของสมบัติฮิสเทอรีซิสของสารเซรามิกที่ทำการทดลอง ทั้งนี้เพื่อลดความซ้ำซ้อน ในรายงานการวิจัยนี้จะนำเสนอเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของสมบัติฮิสเทอรีซิสระหว่างการลดลงของระดับความเค้นจากสูงสุดกลับมายังระดับศูนย์ของสารเซรามิก PZT และ PMN ดังแสดงในรูปที่ 3.19 และ 3.32 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ได้มีการนำเสนอผลการเปลี่ยนแปลงของสมบัติฮิสเทอรีซิส (ค่า P_s , P_r และ E_c) ระหว่างการเพิ่มขึ้นและลดลงของความเค้นของทุกๆสารเซรามิกที่ทำการศึกษา

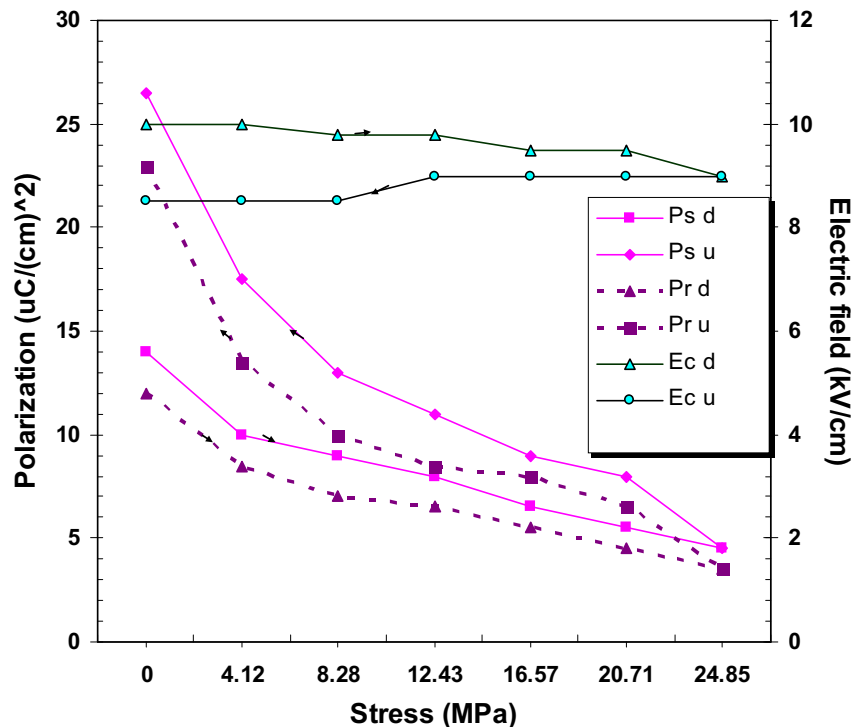
จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบของวงวนฮิสเทอรีซิส (P-E) ของสารเซรามิก PMN-PZT ในกรณีที่ความเค้นเป็นศูนย์นั้น ชี้ให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะจากแบบสารพิโซอิเล็กทริกในสารเซรามิก PZT ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิสที่มีการเปิดของวงวนมาก และขนาดของวงวนที่ใหญ่ อันแสดงถึงการสูญเสียของพลังงานที่มีมาก ไปเป็นแบบสารอิเล็กโทรสติกที่ฟในสาร PMN ซึ่งมีลักษณะของวงวนที่มีการเปิดเพียงเล็กน้อย และมีการสูญเสียพลังงานที่น้อยกว่าในสาร PZT อันเป็นข้อดีข้อหนึ่งของสาร PMN ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น²⁻⁴ (รายละเอียดในภาคผนวก ง ข และ ฉ))



รูป 3.18 การเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสกับความดันสำหรับสารเซรามิก PZT ระหว่างที่มี การเพิ่มความดันที่ให้กับสารเซรามิก

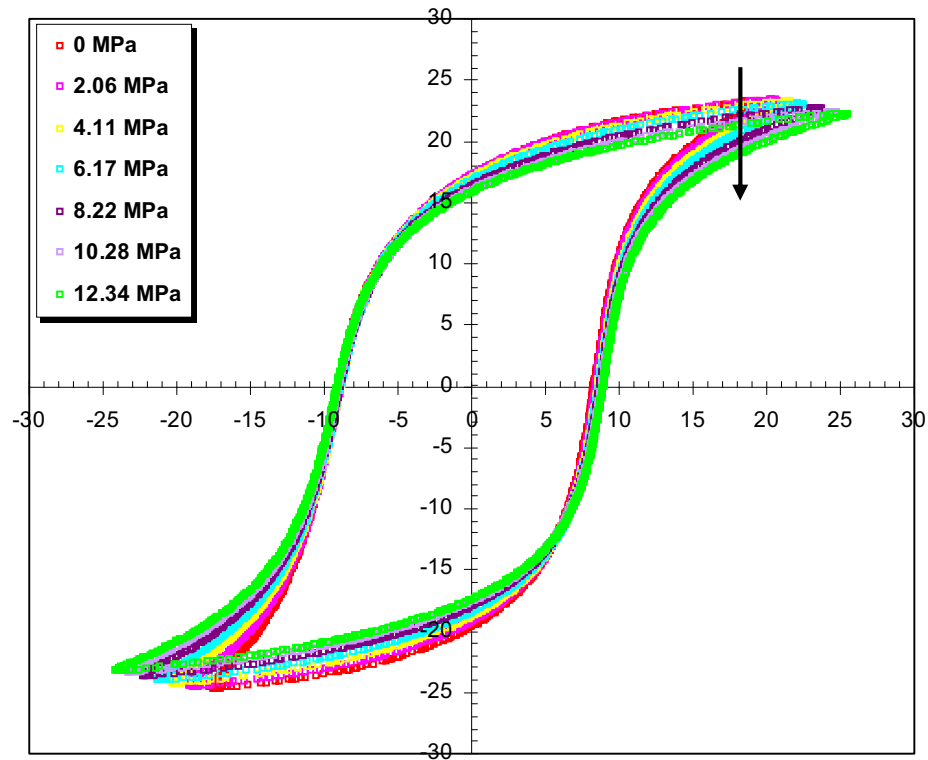


รูป 3.19 การเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสกับความดันสำหรับสารเซรามิก PZT ระหว่างที่มี การลดความดันที่ให้กับสารเซรามิก

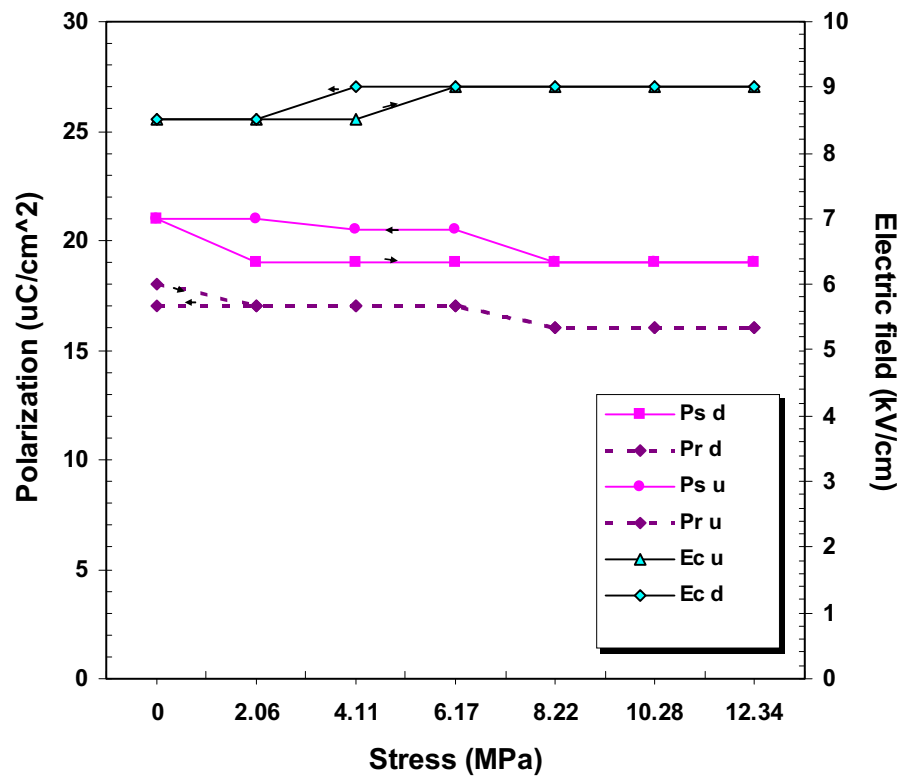


รูป 3.20 การเปลี่ยนแปลงค่า P_s , P_r และ E_c ตามความเค้นสำหรับสารเซรามิก PZT ระหว่างการทดลองเพิ่มและลดความเค้นที่ให้กับสารเซรามิก

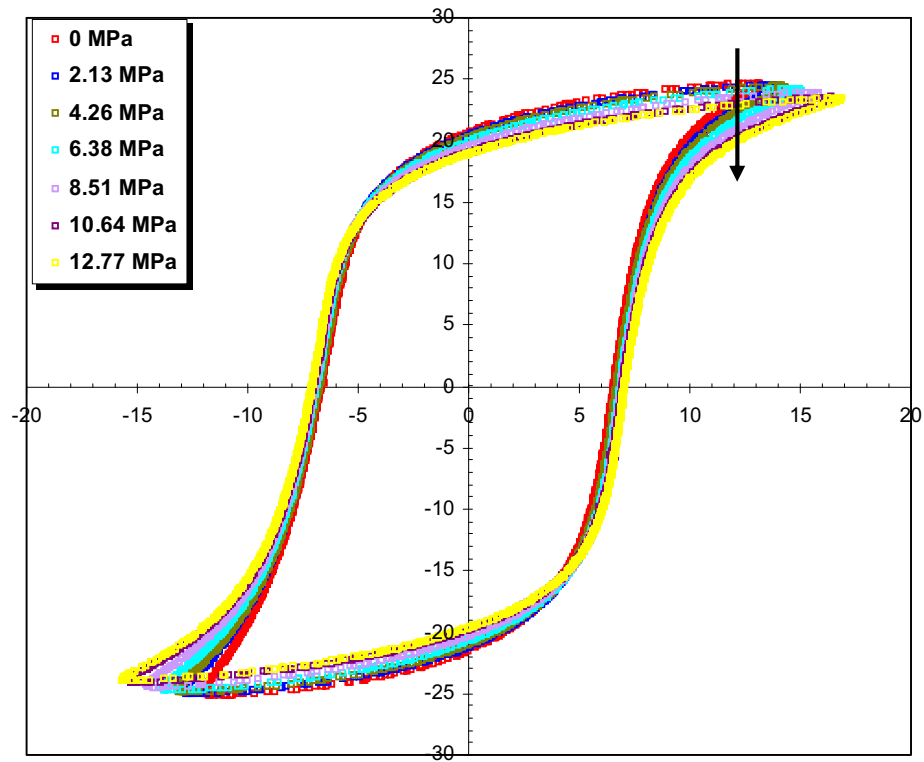
เมื่อพิจารณาผลของความเค้นต่อการเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสสำหรับสารเซรามิก PZT ระหว่างที่มีการเพิ่มความเค้นนั้น จะเห็นได้ชัดว่าขนาดของวงวนนั้นเล็กลงอย่างมากเมื่อความเค้นมากขึ้น (ดังรูป 3.18) โดยที่เมื่อพิจารณาค่า P_r , P_s และ E_c ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญของวงวนฮิสเทอรีซิส จากรูป 3.20 นั้น พบว่า เมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ค่า P_r และ P_s จะมีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ ค่า E_c จะมีการลดลงเพียงเล็กน้อย สาเหตุของการลดลงพื้นที่ของวงวนเมื่อมีการให้ความเค้นนั้น อาจเนื่องมาจากการที่ความเค้นที่ให้นั้น มีผลในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน (domain wall motion)^{13,18,19} ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ให้ระหว่างการวัดวงวนฮิสเทอรีซิส ซึ่งเมื่อผนังโดเมนมีการเคลื่อนที่จำกัดขึ้น ก็จะทำให้ไปสู่การลดลงของค่าตัวแปร P_r , P_s และ E_c และเนื่องจากการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนนั้นเป็นส่วนสำคัญในการที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน (hysteresis loss) ทำให้เมื่อมีการขัดขวางการเคลื่อนที่ดังกล่าว จึงทำให้นำไปสู่การลดลงของขนาดของวงวนฮิสเทอรีซิส ซึ่งหมายถึงการสูญเสียพลังงานที่ลดลงภายใต้อิทธิพลของความเค้น^{11,19,20} เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสระหว่างที่มีการลดความเค้นนั้น (ดังรูป 3.19) จะเห็นว่าเกิดลักษณะของฮิสเทอรีซิส (การไม่ทับซ้อนรอยเดิม) ของค่า P_r , P_s และ E_c โดยที่เมื่อผ่านการให้ความเค้นแล้ว ค่า P_r และ P_s มีค่าลดลงกว่า 50% ในขณะที่ ค่า E_c มีการลดลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่เมื่ออยู่ภายใต้ความเค้นระดับ 25 MPa นั้น ค่า P_r และ P_s นั้นมีค่าเพียง 25% ของค่าเริ่มต้น (เมื่อความเค้นเป็นศูนย์) ทั้งนี้แสดงให้เห็นถึงการเสื่อม (degradation) และการหมดสภาพชั่วคราว (depoled) ภายใต้อิทธิพลของความเค้น²¹⁻²⁴



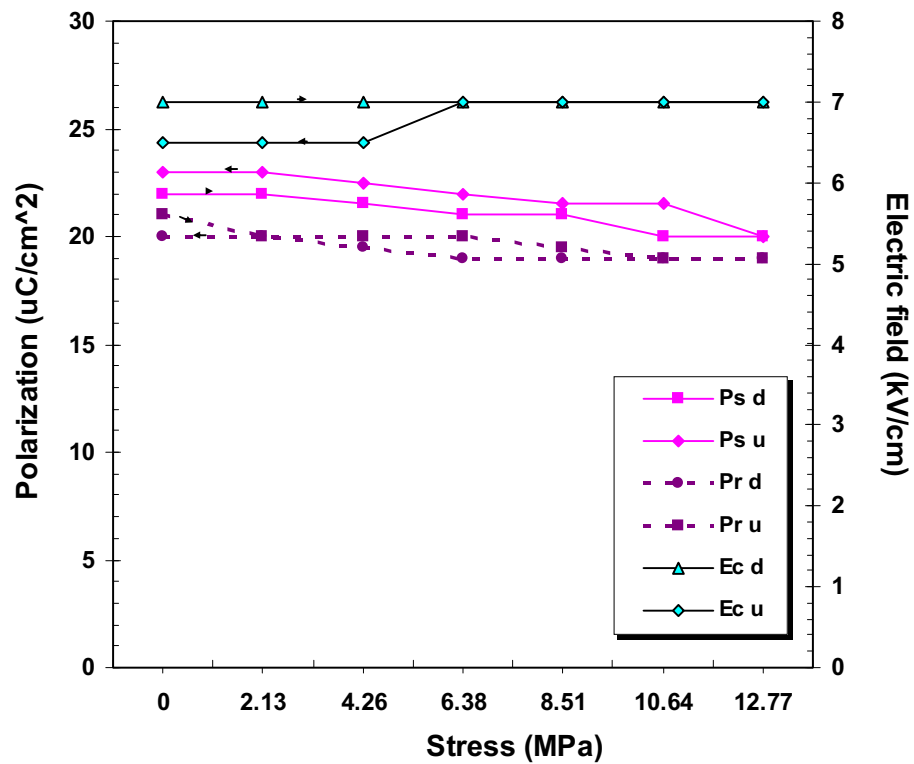
รูป 3.21 การเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสกับความเค้นสำหรับสารเซรามิก 0.1PMN-0.9PZT ระหว่างที่มีการเพิ่มความเค้นที่ให้กับสารเซรามิก



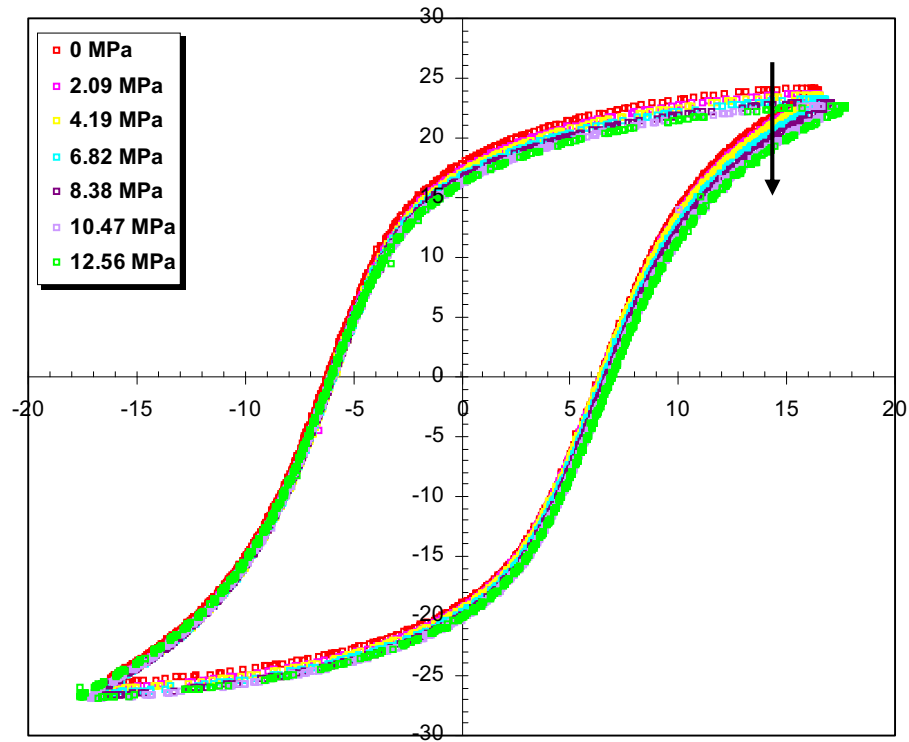
รูป 3.22 การเปลี่ยนแปลงค่า P_s , P_r และ E_c ตามความเค้นสำหรับสารเซรามิก 0.1PMN-0.9PZT ระหว่างการทดลองเพิ่มและลดความเค้นที่ให้กับสารเซรามิก



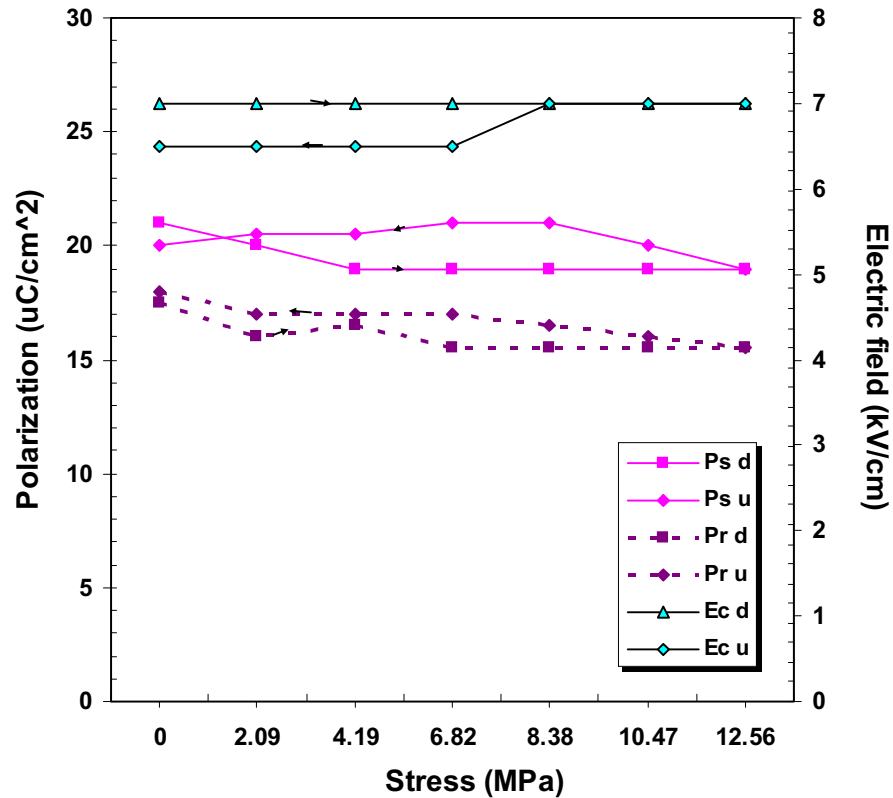
รูป 3.23 การเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสกับความเค้นสำหรับสารเซรามิก 0.3PMN-0.7PZT ระหว่างที่มีการเพิ่มความเค้นที่ให้กับสารเซรามิก



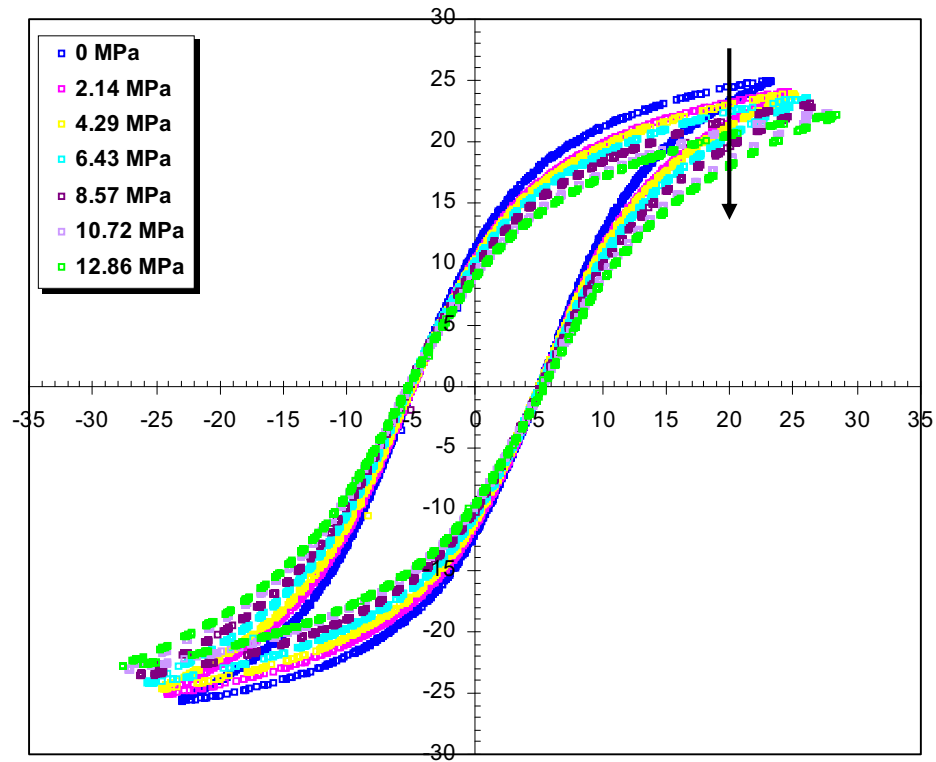
รูป 3.24 การเปลี่ยนแปลงค่า P_s , P_r และ E_c ตามความเค้นสำหรับสารเซรามิก 0.3PMN-0.7PZT ระหว่างการทดลองเพิ่มและลดความเค้นที่ให้กับสารเซรามิก



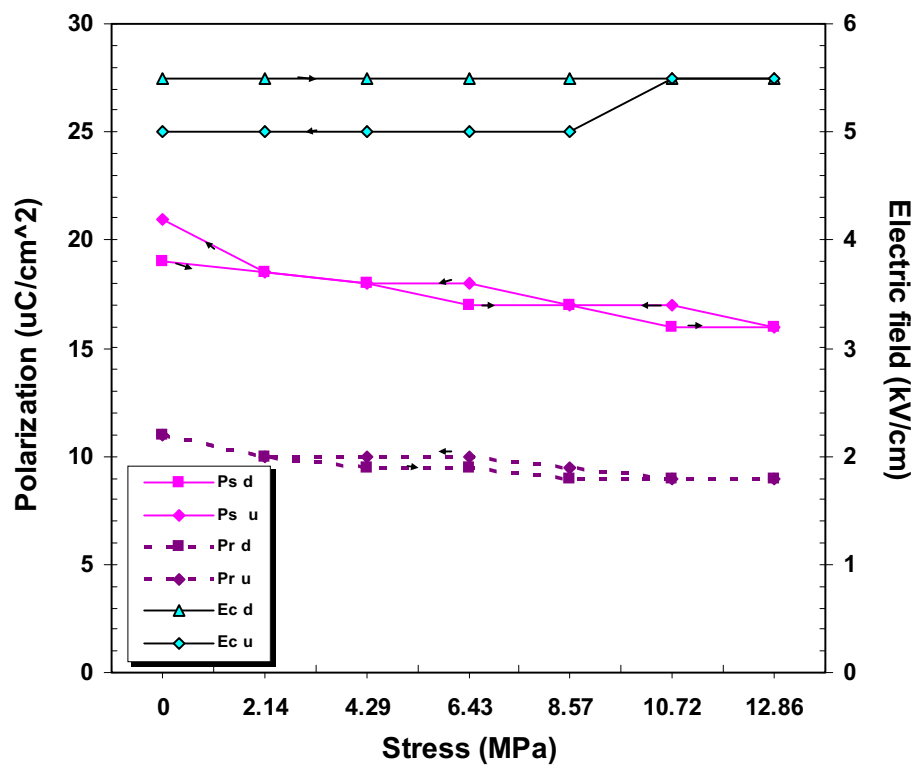
รูป 3.25 การเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสกับความเค้นสำหรับสารเซรามิก 0.5PMN-0.5PZT ระหว่างที่มีการเพิ่มความเค้นที่ให้กับสารเซรามิก



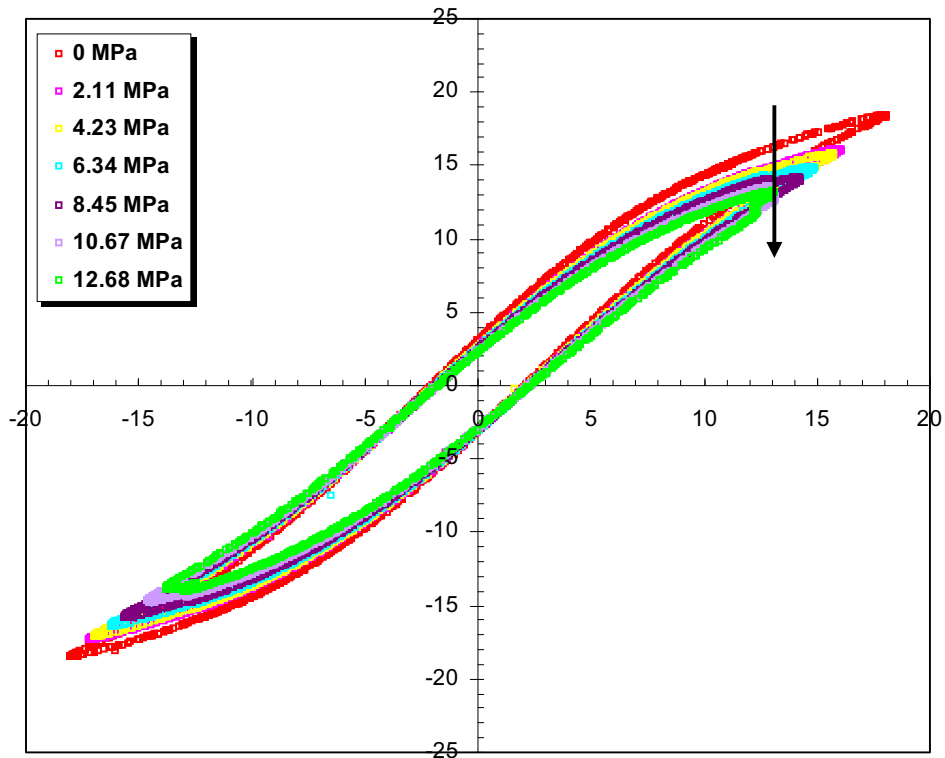
รูป 3.26 การเปลี่ยนแปลงค่า P_s , P_r และ E_c ตามความเค้นสำหรับสารเซรามิก 0.5PMN-0.5PZT ระหว่างการทดลองเพิ่มความเค้นและลดความเค้นที่ให้กับสารเซรามิก



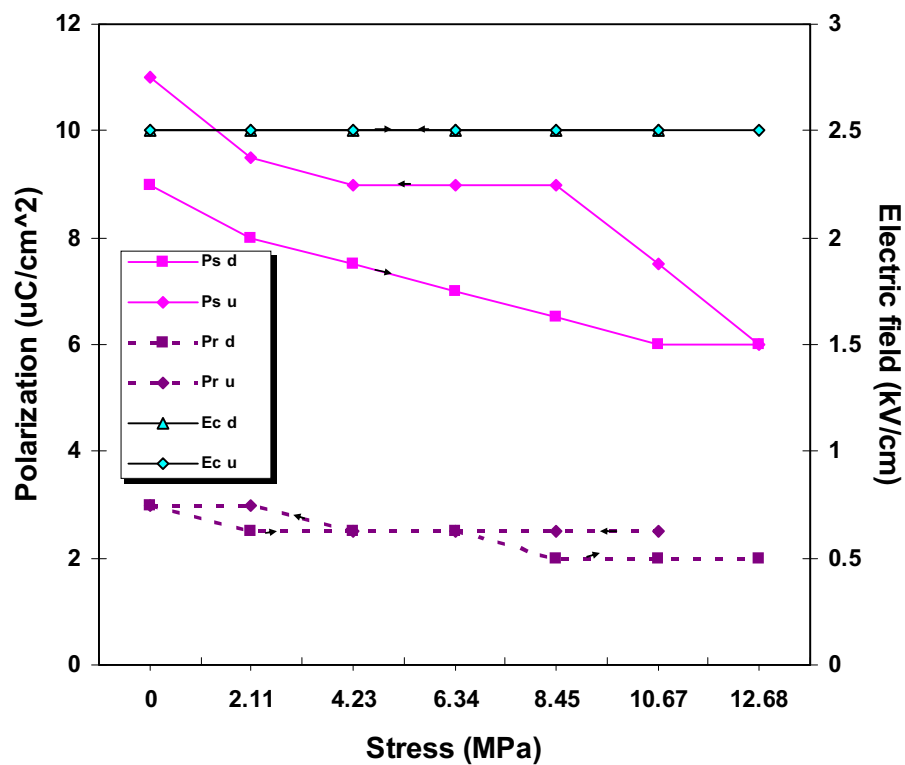
รูป 3.27 การเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสกับความเค้นสำหรับสารเซรามิก 0.7PMN-0.3PZT ระหว่างที่มีการเพิ่มความเค้นที่ให้กับสารเซรามิก



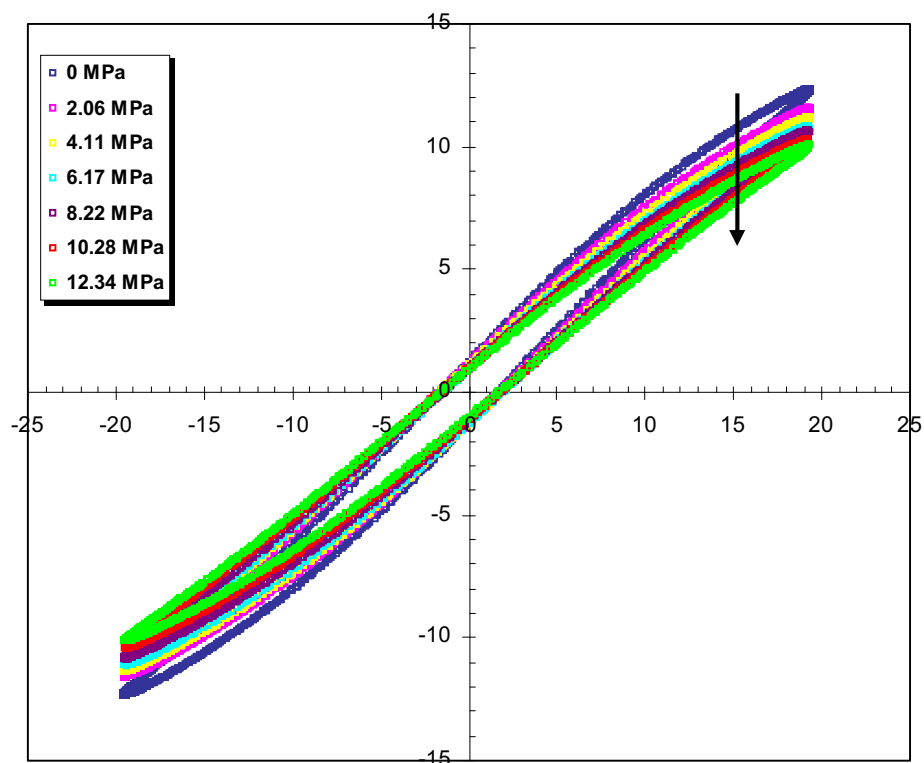
รูป 3.28 การเปลี่ยนแปลงค่า P_s , P_r และ E_c ตามความเค้นสำหรับสารเซรามิก 0.7PMN-0.3PZT ระหว่างการทดลองเพิ่มและลดความเค้นที่ให้กับสารเซรามิก



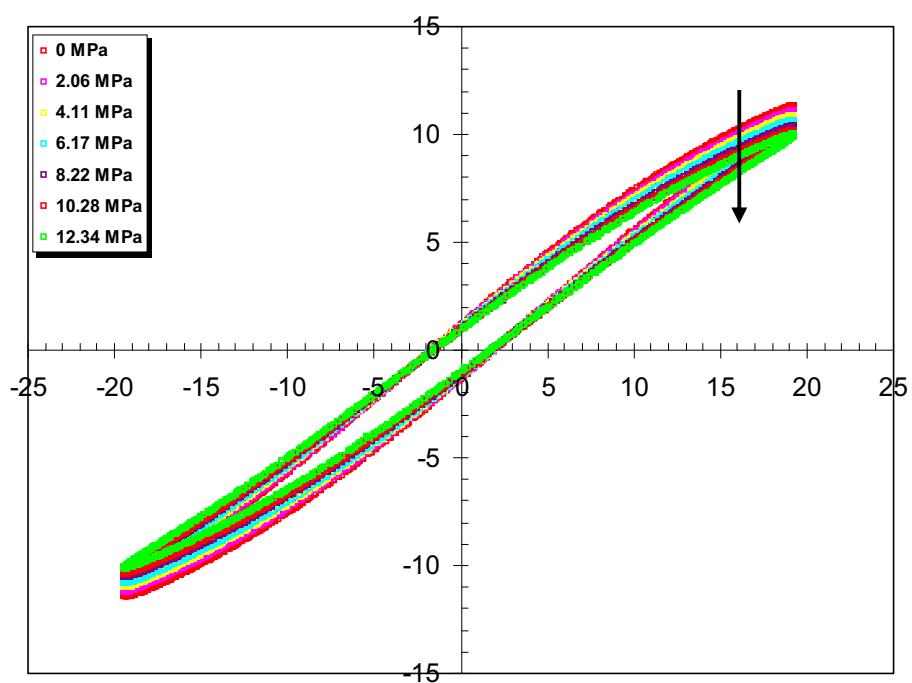
รูป 3.29 การเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสกับความเค้นสำหรับสารเซรามิก 0.9PMN-0.1PZT ระหว่างที่มีการเพิ่มความเค้นที่ให้กับสารเซรามิก



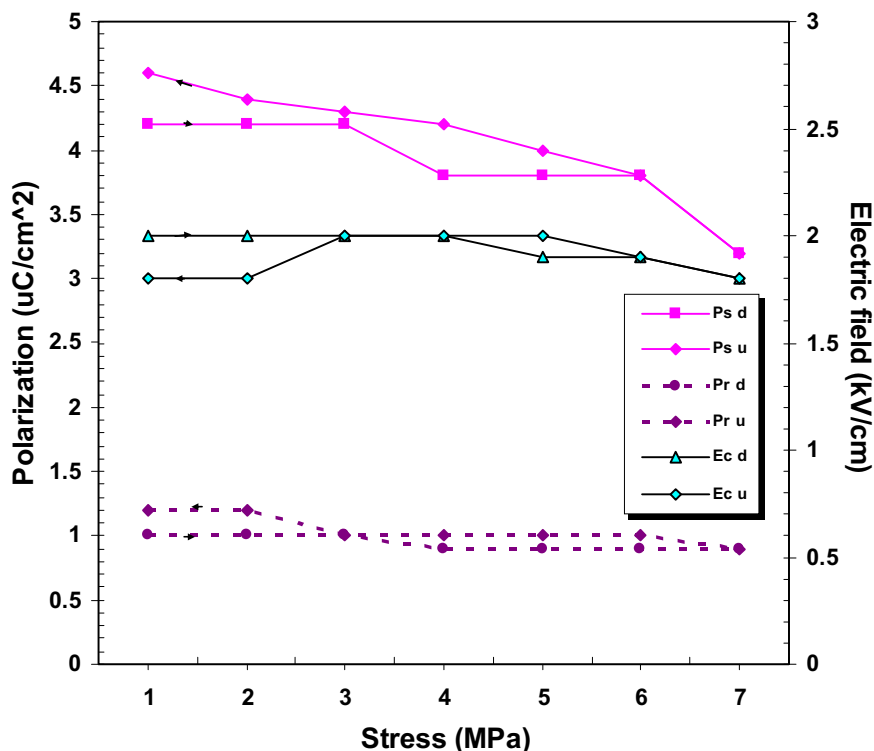
รูป 3.30 การเปลี่ยนแปลงค่า P_s , P_r และ E_c ตามความเค้นสำหรับสารเซรามิก 0.9PMN-0.1PZT ระหว่างการทดลองเพิ่มความเค้นและลดความเค้นที่ให้กับสารเซรามิก



รูป 3.31 การเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสกับความดันสำหรับสารเซรามิก PMN ระหว่างที่มีการเพิ่มความดันที่ให้กับสารเซรามิก



รูป 3.32 การเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสกับความดันสำหรับสารเซรามิก PMN ระหว่างที่มีการลดความดันที่ให้กับสารเซรามิก



รูป 3.33 การเปลี่ยนแปลงค่า P_s , P_r และ E_c ตามความเค้นสำหรับสารเซรามิก PMN ระหว่างการทดลองเพิ่มและลดความเค้นที่ให้กับสารเซรามิก

เมื่อพิจารณาผลการทดลองแสดงในรูป 3.21-3.33 นั้น จะเห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสารเซรามิก PZT แล้วนั้น สารเซรามิก PMN-PZT นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า P_r และ E_c กับความเค้นในระดับที่ค่อนข้างน้อย ในขณะที่ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเค้น ค่า P_s (ซึ่งในที่นี้ควรพิจารณาในลักษณะที่เป็นค่าสูงสุดของค่าโพลาไรเซชัน (maximum polarization)) มีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในกรณีของสารเซรามิกที่มีปริมาณ PMN มาก คือ PMN 0.9PMN-0.1PZT และ 0.7PMN-0.3PZT อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวก็ยังคงต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับในสารเซรามิก PZT นอกจากนี้ สามารถสังเกตได้ถึงลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิสที่ไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงกับความเค้นที่เพิ่มขึ้น แต่จะมีการลดลงของค่าสูงสุดของค่าโพลาไรเซชัน ซึ่งลักษณะเช่นนี้แสดงให้เห็นถึงการที่อัตราการสูญเสียพลังงาน (จากพื้นที่ของวงวนฮิสเทอรีซิส) ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับความเค้นมากนัก ซึ่งแตกต่างจากกรณีของสารเซรามิก PZT ที่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่า P_s , P_r และ E_c กับความเค้นในระดับที่ค่อนข้างน้อย (แต่มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อความเค้นมากขึ้น) นั้น แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความเค้นต่อการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนที่มีไม่มากนัก และเมื่อสังเกตว่าค่า P_s , P_r และ E_c นั้นมีค่าลดลงค่อนข้างน้อยหลังจากผ่านการทดลองเพิ่มและลดความเค้นกลับมาที่ศูนย์ แสดงให้เห็นถึงการเสื่อมและการหมดสภาพชั่วคราวที่เกิดขึ้นน้อยในสารเซรามิกเหล่านี้ ซึ่งเชื่อว่าเป็นการที่โดเมนในระดับนาโนของสาร PMN มีส่วนในการยับยั้งการเคลื่อนที่ของโดเมนที่เกิดขึ้นในสาร PMN-PZT^{20,22-24}

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผล

1. สารเซรามิก PMN-PZT ที่เตรียมด้วยวิธีผสมออกไซด์โดยสารเซรามิกที่เตรียมได้เป็นสารเซรามิกที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพอรอฟสไกต์ โดยมีโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนองค์ประกอบระหว่างเฟส PMN และ PZT
2. ได้ออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือแรงอัดแบบแกนเดียว (Uniaxial Stress Compressometer) ขนาดเล็กเพื่อใช้ประกอบการศึกษาสมบัติต่างๆ ของวัสดุภายใต้อิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียว ซึ่งสามารถใช้งานได้ทั้งในสภาวะความเค้นต่ำ (< 1 MPa) และในสภาวะความเค้นสูง (0-25 MPa)
3. ได้ออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์วงจร Sawyer-Tower เพื่อใช้ประกอบการศึกษาสมบัติฮิสเทอรีซิสในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กตริก เพื่อการศึกษาสมบัติฮิสเทอรีซิสของสารเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PMN-PZT)
4. การศึกษาอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของสารเซรามิก PMN-PZT ที่ยังไม่ถูกทำซ้ำ ในสภาวะความเค้นต่ำพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารเซรามิกไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับความเค้นมากนัก แต่ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของสารเซรามิกมีการเปลี่ยนแปลงกับความเค้นที่ชัดเจนกว่า แต่ในสภาวะความเค้นสูงพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารเซรามิก PMN-PZT กับความเค้นอย่างเห็นได้ชัด โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสาร ในขณะที่อิทธิพลของความเค้นต่อค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกนั้นมีความไม่แน่นอน
5. การศึกษาอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของสารเซรามิก PMN-PZT ที่ถูกทำซ้ำแล้ว พบว่าภายใต้สภาวะความเค้นต่ำจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกตามความเค้นที่เพิ่มขึ้น แต่ภายใต้สภาวะความเค้นสูง สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนั้น พบว่าสารเซรามิก PMN-PZT ที่มีสาร PMN เป็นองค์ประกอบหลักพบว่าจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงเมื่อมีความเค้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่สารเซรามิก PMN-PZT ที่มีสาร PZT เป็นองค์ประกอบหลักจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น แต่ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ขึ้นกับองค์ประกอบหลัก
6. การเปรียบเทียบของวงวนฮิสเทอรีซิส (P-E) ของสารเซรามิก PMN-PZT ซึ่งให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะจากแบบสารพิโซอิเล็กตริกในสารเซรามิก PZT ไปเป็นแบบสารอิเล็กโตรสทริกทีฟในสาร PMN

7. การศึกษาผลของความเค้นต่อการเปลี่ยนแปลงของวงวนฮิสเทอรีซิสสำหรับสารเซรามิก PZT ระหว่างที่มีการเพิ่มความเค้น พบว่าขนาดของวงวนนั้นเล็กลงอย่างมากเมื่อความเค้นมากขึ้น โดยที่เมื่อพิจารณาค่า P_r , P_s และ E_c พบว่า เมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ค่า P_r และ P_s จะมีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ ค่า E_c จะมีการลดลงเพียงเล็กน้อย
8. เมื่อเปรียบเทียบกับสารเซรามิก PZT แล้วนั้น สารเซรามิก PMN-PZT นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่า P_r และ E_c กับความเค้นในระดับที่ค่อนข้างน้อย
9. สำหรับสารเซรามิกที่มีปริมาณ PMN มาก คือ PMN 0.9PMN-0.1PZT และ 0.7PMN-0.3PZT นั้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเค้น ค่า P_s มีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวก็ยังคงต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับในสารเซรามิก PZT
10. การเคลื่อนที่ของผนังโดเมน การเสื่อมและการหมดสภาพชั่วคราวมีผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติฮิสเทอรีซิสของสารเซรามิก PMN-PZT ภายใต้อิทธิพลของความเค้น

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการตรวจสอบตรวจวิเคราะห์ชนิดของเฟสที่ปรากฏในสารเซรามิก PMN-PZT ที่ค่าอัตราส่วนต่างๆโดยละเอียดด้วยเทคนิค EDX เพื่อนำข้อมูลมาประกอบการอภิปรายผลที่ได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
2. เครื่องอัดแรงแบบแกนเดี่ยว ควรใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่าสารเซรามิกมาทำจนวนเพื่อป้องกันการยุบตัวของผิวหน้าจนวน เมื่อมีการใช้งานภายใต้แรงเค้น
3. ควรมีการหุ้มแผ่นพลาสติกหรือวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงที่ผิวหน้าจนวนในเครื่องอัดแรงแบบแกนเดี่ยว เพื่อให้ผิวเซรามิกสัมผัสมากที่สุดเพื่อกระจายแรงได้ทั่ว ซึ่งจะช่วยลดการแตกของสารเซรามิกได้
4. ควรที่จะมีการพัฒนาให้เครื่องอัดแรงแบบแกนเดี่ยวสามารถที่จะใช้งานในระดับแรงดันที่มากกว่า 25 MPa
5. ควรได้มีการพัฒนาให้ชุดวงจร Sawyer-Tower มีการเชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อการเก็บข้อมูลที่รวดเร็วและถูกต้องมากขึ้น
6. ควรที่จะมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการชดเชยการสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างการวัด ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาให้ระบบให้ทำงานได้ถูกต้องมากขึ้น
7. ควรมีการพัฒนาให้ระบบสามารถใช้ในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อสมบัติฮิสเทอรีซิส ซึ่งจะนำไปสู่องค์ความรู้ใหม่ต่อไป
8. ควรมีการศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขในการทำขั้ว (poling) ต่อสมบัติฮิสเทอรีซิสและไฟฟ้าเชิงกลของสารเซรามิก PMN-PZT

หนังสืออ้างอิง

- (1) McColm, I. J., *Dictionary of Ceramic Science and Engineering*, 2nd Ed., Plenum Press (1994)
- (2) Moulson, A.J. and Herbert, J.M., *Electroceramics: Materials Properties and Applications*, Chapman&Hall (1993)
- (3) Haerlting, G.H., *J. Am. Ceram. Soc.*, **84**, 797-818 (1999).
- (4) Xu, Y. H., *Ferroelectric Materials and Their Applications*, 1st Ed., University of California Los Angeles, North Holland (1991).
- (5) Swartz, S. L. and Shrout T. R., *Mater. Res. Bull.*, **17**, pp. 1245 (1982).
- (6) Abbattista, F., Rolando, P. and Grassi, G.B., *Ann. Chim.(ROME)*, **60**, pp. 426-435 (1970).
- (7) Cross, L. E., *Ferroelectrics*, **76**, pp. 241-267 (1982).
- (8) Viehland, D. and Powers, J., *J. Appl Phys.*, **89(3)**, pp 1820-1825 (2001).
- (9) Cross, L.E., *Mater. Chem. Phys.*, **43**, pp.108-115 (1996).
- (10) Burcsu, E.; Ravichandran, G., and Bhattacharya, K., *Appl. Phys. Lett.*, **77(11)**, pp. 1697-1700 (2000).
- (11) Viehland, D., Ewart, L. Powers, J., and Li, J.F., *J. Appl. Phys.*, **90(5)**, pp. 2479-2483 (2001).
- (12) Fritz, I.J., *J. Appl. Phys.*, **49(9)**, pp.4922-4928 (1978).
- (13) Zhao, J. and Zhang, Q.M., *IEEE Proc. (ISAF1996)*, pp. 971-974 (1996).
- (14) Yang, G., Liu, S.F., Ren, W., and Mukherjee, B.K., *IEEE Proc. (ISAF 2000)*, pp. 431-434 (2001).
- (15) Zhao, J., Zhang, Q.M. and Mueller, V., *IEEE Proc. (ISAF98)*, pp. 361-364 (1999).
- (16) Zhao, J., Glazounov, A.E. and Zhang, Q. M., V., *Appl. Phys. Lett.*, **74(3)**, pp. 436-438 (1999).
- (17) Sawyer, V. B. and Tower, C.H., *Phys. Rev.*, **35**, pp. 269-275 (1930).
- (18) Zhang, Q. M., Zhao, J., Uchino, K., and Zheng, J., *J. Mater. Res.*, **12(1)**, pp. 226-234 (1997).
- (19) Yang, G., Liu, S. F., Ren, W., and Mukherjee, B. K., *Proc.SPIE Symposium on Smart Structures and Materials*, **3992**, pp. 103-113 (2000).
- (20) Yang, G., Ren, W. Lui, S. F., Masys, A. J., and Mukherjee, B. K., *IEEE Proc. Ultrasonic Symposium*, pp. 1005-1008 (2000).

- (21) Pan, M. J., Pertsch, P., Yoshikawa, S., Shrout, T. R., and Vedula, V., *Proc.SPIE 5th Symposium on Smart Structures and Materials*, **3990**, pp. 205-214 (1998).
- (22) Viehland, D. and Powers, J., *J. Appl. Phys.*, **89(3)**, pp. 1820-1825 (2001).
- (23) Viehland, D., Tito, F., McLaughlin, E., Robinson, H., Janus, R., Ewart, L., and Powers, J., *J. Appl. Phys.*, **90(3)**, pp. 1496-1500 (2001).
- (24) Viehland, D., Li, J. F., McLaughlin, E., Powers, J., Janus, R., and Robinson, H., *J. Appl. Phys.*, **95(4)**, pp. 1969-1972 (2004).

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ จำนวนทั้งสิ้น 5 เรื่องได้แก่

1.1 ผลงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์แล้ว 2 เรื่อง

Yimnirun R, Ananta S, Meechoowas E, Wongsanmai S. Effects of uniaxial stress on dielectric properties of lead magnesium niobate-lead zirconate titanate ceramics. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003; **36**: 1615-1619.

(ภาคผนวก ก)

Yimnirun R, Ananta S, Laoratanakul P. Effects of $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ mixed-oxide modification on dielectric properties of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ceramics. *Mater. Sci. Eng. B*, in press.

(ภาคผนวก ข)

1.2 ผลงานวิจัยที่อยู่ระหว่างการส่งไปเพื่อตีพิมพ์ 2 เรื่อง

Yimnirun R, Meechoowas E, Ananta S, Tunkasiri T. Synthesis and mechanical properties of PMN-PZT ceramics. Submitted to *Materials Letters*.

(ภาคผนวก ค)

Yimnirun R, Ananta S, Laoratanakul P. Dielectric and ferroelectric properties of lead magnesium niobate-lead zirconate titanate ceramics prepared by mixed-oxide method. Submitted to *Journal of the European Ceramic Society*.

(ภาคผนวก ง)

1.3 ผลงานวิจัยที่อยู่ระหว่างการเขียนเพื่อส่งตีพิมพ์ 1 เรื่อง

Yimnirun R, Ananta S, Wongsanmai S, Tunkasiri T. Effects of uniaxial stress on electromechanical properties of lead magnesium niobate-lead zirconate titanate ceramics. (in preparation)

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

2.1 เชิงพาณิชย์

ในการวิจัยนี้ถึงแม้ไม่ได้มุ่งหวังในด้านการนำผลงานไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ แต่มุ่งเน้นในการสร้างองค์ความรู้ใหม่ การพัฒนาอุปกรณ์ขึ้นมาใช้ประกอบการศึกษา ซึ่งได้แก่ ชุดอุปกรณ์ในการวัดสมบัติไดอิเล็กตริกและไฟฟ้าเชิงกลภายใต้ความเค้นนั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดสมบัติดังกล่าวทั้งในกรณีที่ไม่

ความเด่นและกรณีที่มีความเด่นในวัสดุตัวอื่นๆได้ ซึ่งสามารถที่จะลดการสั่งซื้ออุปกรณ์ที่มีความคล้ายคลึงจากต่างประเทศได้

2.2 เชิงนโยบาย

ผลการวิจัยที่ได้จากโครงการนี้ได้ถูกนำไปใช้ในการกำหนดแผนและทิศทางการวิจัยของผู้วิจัยที่ชัดเจนขึ้น ดังจะเห็นได้จากการเสนอหัวข้อวิจัยเพื่อขอรับทุนพัฒนานักวิจัย (เมธีวิจัย) ประจำปี 2547 จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ซึ่งเป็นการวิจัยต่อเนื่องจากโครงการวิจัยนี้ เพื่อเป็นการส่งเสริมให้เกิดการวิจัยแบบมีทิศทางมากขึ้น

2.3 เชิงสาธารณะ

โครงการวิจัยนี้ได้ก่อให้เกิดเครือข่ายความร่วมมือในการวิจัยมากขึ้นระหว่างนักวิจัยรุ่นใหม่ทั้งในและต่างประเทศ เช่นความร่วมมืออย่างใกล้ชิดในการวิจัยกับ ผศ. ดร. สุพล อนันตา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งเน้นการวิจัยด้านกระบวนการผลิตเซรามิก ในขณะที่ผู้วิจัยได้มีส่วนร่วมในการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกที่ผลิตขึ้น นอกจากนี้ยังได้มีการสร้างความร่วมมือด้านการวิจัยกับนักวิจัยรุ่นใหม่ในต่างประเทศคือ Prof. David Cann และ Prof. Xiaoli Tan แห่ง Iowa State University สหรัฐอเมริกา และที่สำคัญที่สุดผู้วิจัยได้รับความรู้ในการวิจัยจากนักวิจัยอาวุโสจากทั้งในประเทศและต่างประเทศคือ ศ. ดร. ทวี ตันขศิริ แห่งภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (นักวิจัยที่ปรึกษาของโครงการ) และ Prof. Kenji Uchino แห่ง The Pennsylvania State University สหรัฐอเมริกา

2.4 เชิงวิชาการ (พัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่)

ผลงานที่ได้จากการวิจัยนี้ได้ถูกนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนในหลายๆ กระบวนวิชาของสาขาวิชาวัสดุศาสตร์ ทั้งในระดับปริญญาตรีและระดับบัณฑิตศึกษา เช่น MATS 404 Applications of Electromaterials MATS 703 Fabrication Processes of Materials และ MATS 723 Ferroelectric Materials และในส่วนของการสร้างนักวิจัยใหม่นั้น นอกจากประโยชน์โดยตรงที่เกิดกับผู้วิจัยเองแล้ว โครงการวิจัยนี้ได้มีส่วนในการฝึกฝนทักษะการวิจัยและการเผยแพร่ผลงานให้กับนักศึกษาทั้งในระดับปริญญาตรีและระดับบัณฑิตศึกษาในฐานะผู้ช่วยวิจัยร่วมกับหัวหน้าโครงการ และผลงานวิจัยที่ได้สามารถนำไปตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการทั้งในและต่างประเทศ รวมทั้งการนำเสนอผลงานในที่ประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ (ดังแสดงใน output และผลงานอื่นๆ) ซึ่งมีผลให้เกิดการพัฒนา นักวิจัยรุ่นใหม่ขึ้น

3. อื่น ๆ (ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการและการเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ)

3.1 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศจำนวนทั้งสิ้น 10 เรื่องได้แก่

Wongsaenmai S, Ananta S, Meechoowas E, **Yimnirun R**. Uniaxial stress dependence of dielectric properties of “poled” ceramics in lead magnesium niobate-lead zirconate titanate system. *Chiang Mai Journal of Science*. 2003; 30: 81-93.

(ภาคผนวก จ)

Wongsaenmai S, Ananta S, **Yimnirun R**. Microstructural study of ceramics in PMN-PZT system. *Journal of Electron Microscopy of Thailand*. 2003;17(1):53-54.

(ภาคผนวก ฉ)

Yimnirun R, Ananta S, Wongsaenmai S. Dielectric properties of “unpoled” ceramics in lead magnesium niobate-lead zirconate titanate ceramics under uniaxial stress. *Chiang Mai Journal of Science*. 2004; **31**: 11-15.

(ภาคผนวก ช)

Yimnirun R, Ananta S, Loaratanakul P. Dielectric properties of ceramics in lead zirconate titanate-lead magnesium niobate system, *Songklanakarin Journal of Science and Technology* in press

(ภาคผนวก ซ)

Yimnirun R, Meechoowas E, Ananta S, Tunkasiri T. Mechanical properties of xPMN-(1-x)PZT ceramic systems, *Chiang Mai University Journal* in press

(ภาคผนวก ฌ)

Yimnirun R, Ananta S, Laoratanakul P. Ferroelectric properties of ceramics in lead zirconate titanate - lead magnesium niobate systems, *Chiang Mai University Journal* in press

(ภาคผนวก ญ)

สุพัตรว วงศ์แสนใหม่, สุพล อนันตา และ รัตติกร ยิ้มนิรัญ, “อิทธิพลของความถี่แบบแกนเดี่ยวต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของสารเซรามิกในระบบ PMN-PZT ที่ผ่านการทำซ้ำ” วารสารสงขลานครินทร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 25 ฉบับที่ 5 (กันยายน-ตุลาคม 2546) หน้า 629-636

(ภาคผนวก ณ)

สุพัตรา วงศ์แสนใหม่, สุพล อนันตา และ รัตติกร ยิ้มนิรัญ, “อิทธิพลของความถี่แบบแกนเดี่ยวต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของสารเซรามิกในระบบ PMN-PZT ที่ไม่ผ่านการทำซ้ำ” วารสารวิทยาศาสตร์ มช ปีที่ 31 ฉบับที่ 2 (เมษายน-มิถุนายน 2546) หน้า 73-84

(ภาคผนวก ฎ)

สุพัตรา วงศ์แสนใหม่, สุพล อนันตา และ รัตติกร ยิ้มนิรัญ, “อิทธิพลของความถี่แบบแกนเดี่ยวต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของสารเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต” วารสารเทคโนโลยีสุรนารี ปีที่ 10 ฉบับที่ 3 (กรกฎาคม-กันยายน 2546) หน้า 206-209

(ภาคผนวก ฐ)

สุพัตรา วงศ์แสนใหม่, พิศัลย์ มุลรัตน์, ชีระพงษ์ ศิลาวงศ์สวัสดิ์, สุพล อนันตา และ รัตติกร ยิ้มนิรัญ, “การศึกษาสมบัติฮิสเทอรีซิสในสารเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กตริกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (พีแซดที) ด้วยวงจร Sawyer-Tower” วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร ปีที่ 11 ฉบับที่ 3 (กันยายน-ธันวาคม 2546) หน้า 21-28

(ภาคผนวก ท)

3.2 การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการนานาชาติจำนวนทั้งสิ้น 5 เรื่องได้แก่

Rattikorn Yimnirun, Supon Ananta, and Ekarat Meechoowas, Processing and Mechanical Properties of PMN-PZT Ceramic Composites, presented at the 8th International Conference on Ceramic Processing Science (8th ICCPS), September 2-5, Hamburg, Germany

Supattra Wongsanmai, Supon Ananta, and **Rattikorn Yimnirun**, Microstructural Study of Ceramics in Lead Magnesium Niobate – Lead Zirconate Titanate System, presented at the *Electron Microscopy Society of Thailand Annual Conference*, January 30-February 1, 2003, Bangkok, Thailand

Rattikorn Yimnirun, Pitak Laorattanakul, and Supon Ananta, Synthesis and Dielectric Properties of Lead Magnesium Niobate-Lead Zirconate Titanate Solid Solutions, presented at the 2nd International Conference on Materials for Advanced Technologies 2003 (ICMAT-2003), December 7-12, 2003, Singapore

Supattra Wongsanmai, Supon Ananta, and **Rattikorn Yimnirun**, Effect of Uniaxial Stress on Dielectric Properties of Lead Zirconate Titanate - Lead Magnesium Niobate Ceramics, presented at the 2nd International Conference

on Materials for Advanced Technologies 2003 (ICMAT-2003), December 7-12, 2003, Singapore

Athipong Ngamjarujana, Supattra Wongsanmai, Supon Ananta, David Cann, Xiaoli Tan and **Rattikorn Yimnirun**, Dielectric Properties of Lead Zirconate Titanate - Lead Magnesium Niobate Ceramics Under Uniaxial Stress, presented at *the 106th Annual Meeting of the American Ceramics Society (ACERS-2004)*, April 18-21, 2004, Indianapolis, USA

ภาคผนวก ก**Reprint**

Yimnirun R, Ananta S, Meechoowas E, Wongsanmai S. Effects of uniaxial stress on dielectric properties of lead magnesium niobate-lead zirconate titanate ceramics. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003; **36**: 1615-1619.

ภาคผนวก ข

Accepted Manuscript

Yimnirun R, Ananta S, Laoratanakul P. Effects of $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ mixed-oxide modification on dielectric properties of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ceramics. *Mater. Sci. Eng. B*, in press.

ภาคผนวก ค**Submitted Manuscript**

Yimnirun R, Meechoowas E, Ananta S, Tunkasiri T. Synthesis and mechanical properties of PMN-PZT ceramics. Submitted to *Materials Letters*.

ภาคผนวก ง

Submitted Manuscript

Yimnirun R, Ananta S, Laoratanakul P. Dielectric and ferroelectric properties of lead magnesium niobate-lead zirconate titanate ceramics prepared by mixed-oxide method. Submitted to *Journal of the European Ceramic Society*.

ภาคผนวก จ

Reprint

Wongsaenmai S, Ananta S, Meechoowas E, **Yimnirun R**. Uniaxial stress dependence of dielectric properties of “poled” ceramics in lead magnesium niobate-lead zirconate titanate system. *Chiang Mai Journal of Science*. 2003; 30: 81-93.

ภาคผนวก จ**Reprint**

Wongsaenmai S, Ananta S, **Yimnirun R**. Microstructural study of ceramics in PMN-PZT system. *Journal of Electron Microscopy of Thailand*. 2003;**17(1)**:53-54.

ภาคผนวก ข

Reprint

Yimnirun R, Ananta S, Wongsanenmai S. Dielectric properties of “unpoled” ceramics in lead magnesium niobate-lead zirconate titanate ceramics under uniaxial stress. *Chiang Mai Journal of Science*. 2004; **31**: 11-15.

ภาคผนวก ข**Accepted Manuscript**

Yimnirun R, Ananta S, Loaratanakul P. Dielectric properties of ceramics in lead zirconate titanate-lead magnesium niobate system, *Songklanakarin Journal of Science and Technology* in press

ภาคผนวก ฅ

Accepted Manuscript

Yimnirun R, Meechoowas E, Ananta S, Tunkasiri T. Mechanical properties of xPMN-(1-x)PZT ceramic systems, *Chiang Mai University Journal* in press

ภาคผนวก ญ

Accepted Manuscript

Yimnirun R, Ananta S, Laoratanakul P. Ferroelectric properties of ceramics in lead zirconate titanate - lead magnesium niobate systems, *Chiang Mai University Journal* in press

ภาคผนวก ก

Reprint

สุพัตรา วงศ์แสนใหม่, สุพล อนันตา และ รัตติกร ยัมหนีรัมย์, “อิทธิพลของความเค้นแบบ
แกนเดี่ยวต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของสารเซรามิกในระบบ PMN-PZT ที่ผ่านการทำซ้ำ”
วารสารสงขลานครินทร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 25 ฉบับที่ 5 (กันยายน-ตุลาคม
2546) หน้า 629-636

ภาคผนวก ก

Reprint

สุพัตรา วงศ์แสนใหม่, สุพล อนันตา และ รัตติกร ยิ้มนิรัญ, “อิทธิพลของความเค้นแบบ
แกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของสารเซรามิกในระบบ PMN-PZT ที่ไม่ผ่านการทำซ้ำ”
วารสารวิทยาศาสตร์ มช ปีที่ 31 ฉบับที่ 2 (เมษายน-มิถุนายน 2546) หน้า 73-84

ภาคผนวก ฐ

Reprint

สุพัตรา วงศ์แสนใหม่, สุพล อนันดา และ รัตติกร ยิ้มนิรัญ, “อิทธิพลของความคั่นแบบ
แกนเดี่ยวต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของสารเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต” วารสาร
เทคโนโลยีสุรนารี ปีที่ 10 ฉบับที่ 3 (กรกฎาคม-กันยายน 2546) หน้า 206-209

ภาคผนวก ท

Reprint

สุพัตรา วงศ์แสนใหม่, พิศัลย์ มุลรัตน์, ชีระพงษ์ ศีลาวงศ์สวัสดิ์, สุพล อนันตา และ รัตติกร ยิ้มนิรันดร์, “การศึกษาสมบัติอีสเทอร์ซีสในสารเซรามิกเพอร์ไรต์อิเล็กทริกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (พีแซดที) ด้วยวงจรวอร์ Sawyer-Tower” วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร ปีที่ 11 ฉบับที่ 3 (กันยายน-ธันวาคม 2546) หน้า 21-28