

อิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กตริก ของสารเซรามิกในระบบ PMN-PZT

สุพัตรา วงศ์แสนใหม่¹ สุพล อนันตา² และ รัตติกร ยิ้มนิรัญ³

Abstract

Wongsaenmai, S., Ananta, S. and Yimniran, R.

Effects of uniaxial stress on dielectric properties of ceramics in PMN-PZT system

Songklanakar J. Sci. Technol., 2003, 25(5) : 629-636

In this study, effects of uniaxial stress on the dielectric properties of ceramics in PMN-PZT system were investigated. The ceramics with a formula $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-(x)\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ or $(1-x)\text{PMN-(x)PZT}$ when $x = 0.0, 0.3, 0.5, 0.7$ and 1.0 were prepared by a conventional mixed-oxide method. Phase formation behavior of these ceramics was studied by an X-ray diffraction (XRD) method. In addition, other physical properties, e.g. firing shrinkage and density, were measured. The dielectric properties under the uniaxial stress of the poled PMN-PZT ceramics were observed at low and high-stress levels using a uniaxial compressometer. It was found that at low stress level (0-800 kPa) there was no significant change in the dielectric constant and the dielectric loss tangent with the applied stress. As the stress level was raised higher (0-5 MPa), changes of the dielectric constant with the applied stress were dependent on the ceramic compositions. On the other hand, changes of the dielectric loss tangent with the applied stress were independent of the ceramic compositions.

Key words : uniaxial stress, dielectric properties, PMN-PZT

Advanced Ceramics Research Laboratory, Department of Physics, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200 Thailand.

¹นักศึกษาระดับปริญญาโทสาขาวัสดุศาสตร์ ²Ph.D.(Materials Science), ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ³Ph.D.(Materials Science & Engineering) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Corresponding e-mail: spnuy@hotmail.com

รับต้นฉบับ 25 มีนาคม 2546 รับลงพิมพ์ 22 พฤษภาคม 2546

บทคัดย่อ

สุพัตรา วงศ์แสนใหม่ สุพล อนันตา และ รัตติกร ยี่มนิรัญ
อิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของสารเซรามิก
ในระบบ PMN-PZT

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2546 25(5) : 629-636

ในการวิจัยนี้กล่าวถึงอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของสารเซรามิกในระบบ PMN-PZT ที่มีสูตรเป็น $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - (x)\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ เมื่อ $x = 0.0, 0.3, 0.5, 0.7$ และ 1.0 ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการผสมออกไซด์แบบดั้งเดิม โดยได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมการเกิดเฟสด้วยเทคนิค XRD และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ เช่น ค่าการหดตัวหลังการเผาและความหนาแน่น และได้ศึกษาอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของสารเซรามิกที่ถูกทำแล้ว โดยแบ่งเป็นความเค้นต่ำและความเค้นสูง พบว่าในช่วงความเค้นต่ำ (0-800 kPa) ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (dielectric loss tangent) กับความเค้นอย่างชัดเจน ในช่วงความเค้นสูงขึ้น (0-5 MPa) จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับความเค้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเซรามิก ในทางตรงกันข้ามค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับความเค้นมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ขึ้นกับองค์ประกอบหลัก

ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานสารเซรามิกเพโรอิเล็กตริกอย่างมาก โดยเฉพาะสารเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบต ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ หรือ PMN) และสารเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต ($\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ หรือ PZT) การสร้างตัวขับเคลื่อน (actuator) และตัวแปลง (transducer) โดยที่สารเซรามิก PMN และ PZT ต่างมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน สารเซรามิก PMN มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง มีการสูญเสียพลังงานต่ำ (Zhao *et al.*, 1999) แต่มีข้อเสียคือ มีอุณหภูมิคูรีต่ำ (Curie Temperature : T_c) (Ouchi, 1968) ในขณะที่สารเซรามิก PZT มีค่าสัมประสิทธิ์ไฟฟ้าเชิงกลคู่ควบสูงกว่าสารเซรามิก PMN (Abe *et al.*, 2000) แต่มีการสูญเสียพลังงานค่อนข้างสูง (มีสมบัติฮิสเทอรีซิส) จากข้อดีและข้อเสียของสารเซรามิกทั้งสองประเภท จึงเป็นที่น่าสนใจว่าระบบรวมของสารทั้งสอง (PMN-PZT) จะสามารถรวมข้อดีและลดข้อเสียของสารในระบบเพื่อให้ได้สารเซรามิกที่มีสมบัติเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้ดียิ่งขึ้น แต่ในการประยุกต์ใช้ใช้งานจริงโดยเฉพาะในการสร้างตัวขับเคลื่อนและตัวแปลงนั้น สารเซรามิกมักถูกนำไปใช้ภายใต้สภาวะความเค้น ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบอุปกรณ์และเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานนั้นๆ แต่โดยทั่วไปแล้วสมบัติต่างๆ มักถูกวัดในสภาวะที่ไม่มีความเค้น ซึ่งไม่ตรง

กับสภาพการใช้งานจริงจึงทำให้การคำนวณและออกแบบอุปกรณ์ผิดพลาดได้ ซึ่งได้มีงานวิจัยที่ให้ความสนใจถึงอิทธิพลของความเค้นต่อสมบัติต่างๆ ของสารเซรามิกในระบบอื่น ๆ เช่น PZT และ PMN-PT เป็นต้น (Zhao and Zhang, 1996) แต่งานวิจัยเกี่ยวกับ PMN-PZT ยังไม่เป็นที่ปรากฏ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาถึงอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของสารเซรามิกในระบบ PMN-PZT เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

1. สารตัวอย่าง

การเตรียมสารเซรามิก PMN-PZT เริ่มจากการเตรียมผงด้วยวิธีผสมออกไซด์แบบดั้งเดิม (conventional mixed-oxide method) ผง PZT มีสารตั้งต้นคือ เลดออกไซด์ (PbO) เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) ด้วยอัตราส่วนของ Zr:Ti เป็น 0.52:0.48 โดยเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850°C นาน 2 ชั่วโมงด้วยอัตราการขึ้น/ลง $5^\circ\text{C}/\text{นาที}$ ส่วนผง PMN เตรียมด้วยวิธีโคลัมไบต์ (columbite method) (Tandon, 1991) ซึ่งเป็น

วิธีการเตรียมแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมผงแมกนีเซียมไนโอเบต ($MgNb_2O_6$) โดยใช้สารตั้งต้น MgO และ Nb_2O_5 เเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $1100^\circ C$ นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลง $5^\circ C$ /นาที่ จากนั้นนำผงแมกนีเซียมไนโอเบตที่เตรียมได้รวมกับเลดออกไซด์แล้วเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $900^\circ C$ นาน 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลง $5^\circ C$ /นาที่เช่นกัน จะได้ผง PMN จากนั้นนำผง PMN และผง PZT มาผสมกันด้วยอัตราส่วนโดยโมลต่างๆ กัน จะได้ผง PMN-PZT แล้วทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดระบบไฮดรอลิก (Riken Seiki CO., LTD 137609) เพื่อให้ได้สารตัวอย่างเป็นรูปแผ่นกลม (disk) แล้วจึงนำไปเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิซินเตอร์นาน 2 ชั่วโมงด้วยอัตราการขึ้น/ลง $5^\circ C$ /นาที่ อุณหภูมิซินเตอร์จะแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของสารคือ สาร PZT ใช้อุณหภูมิ $1250^\circ C$ สาร PMN ใช้อุณหภูมิ $1150^\circ C$ และสาร PMN-PZT ใช้ อุณหภูมิ $1200^\circ C$ ซึ่งสารเซรามิกที่เตรียมได้จะถูกตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD ซึ่งพบว่าสารเซรามิก PZT มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สอดคล้องกับแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 33-0784 โดยมีโครงสร้างผลึกเป็น

แบบเตตระกอนอล ส่วนสารเซรามิก PMN มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สอดคล้องกับแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 81-0861 เป็นโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก และรูปแบบการเลี้ยวเบนของเซรามิก PMN-PZT นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับองค์ประกอบของเซรามิก ดังแสดงใน Figure 1.

จากนั้นนำเซรามิกที่ได้มาตรวจสอบสมบัติทางกายภาพโดยคำนวณค่าร้อยละการหดตัวหลังการเผาและค่าความหนาแน่น ซึ่งแสดงใน Table 1 จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นและร้อยละการหดตัวหลังการเผาของสารเซรามิก PMN-PZT มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ขึ้นกับอัตราส่วนโดยโมล

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการศึกษาอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของเลดเซอร์โคเนต ไทเทเนต-เลด-แมกนีเซียมไนโอเบต ได้ออกแบบและสร้างเครื่องมืออัดแรงเค้นแบบแกนเดียว (uniaxial compressometer) ดังแสดงใน Figure 2 ซึ่งสมบัติไดอิเล็กตริกของเซรามิกจะถูก

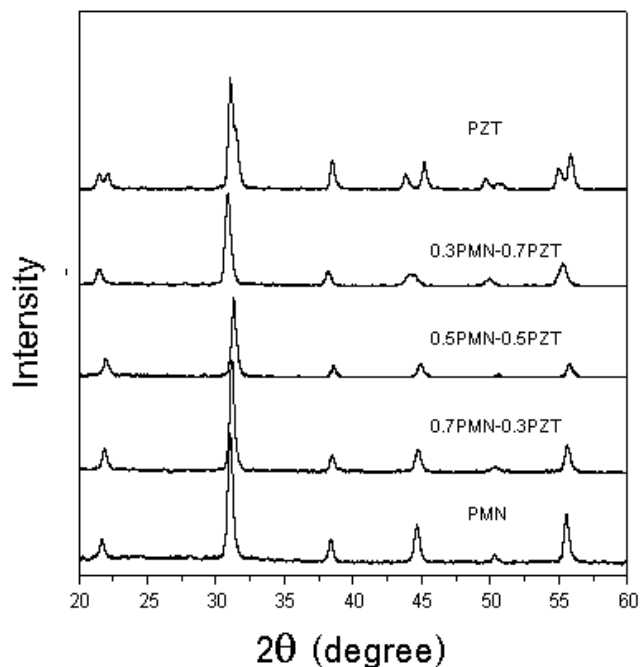


Figure 1. XRD diffraction patterns of PMN-PZT ceramics.

Table 1. Physics properties of PMN-PZT ceramics

สารเซรามิก	ค่าความหนาแน่น (กรัม/ซม ³)	ร้อยละของค่าความหนาแน่น เชิงทฤษฎี	ร้อยละการหดตัว โดยปริมาตร
PZT	7.66±0.05	95.67±0.62	39.58±0.04
0.3PMN-0.7PZT	7.56±0.12	93.87±1.48	39.06±0.11
0.5PMN-0.5PZT	7.18±0.05	88.79±0.61	38.83±0.12
0.7PMN-0.3PZT	6.10±0.17	75.14±2.09	35.97±0.35
PMN	6.54±0.07	80.09±0.86	37.60±0.20

วัดจากหัววัด (spring-loaded cell) ซึ่งถูกต้องกับ LCZ-meter (Hewlett Packard 4276A) และสามารถวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุ (capacitance) และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (dielectric loss tangent) ได้แล้วนำค่าความจุของตัวเก็บประจุมาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ดังสมการต่อไปนี้

$$\epsilon_r = \frac{Cd}{\epsilon_0 A} \tag{1}$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ, d และ A คือ ความหนาและพื้นที่หน้าตัดของสารเซรามิก ตามลำดับ

และ ϵ_0 คือ สภาพยอมของสุญญากาศมีค่า 8.854×10^{-12} F/m

ในการทดลองจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน กล่าวคือ สภาวะความเค้นต่ำและสภาวะความเค้นสูงซึ่งในการทดลองภายใต้สภาวะความเค้นต่ำจะใช้อุปกรณ์ในการทดลองดังแสดงใน Figure 3 โดยใช้มวลอยู่ในช่วง 0-3500 กรัม ในการให้แรงอัดกับระบบโดยสามารถให้ความเค้นในช่วง 0-800 กิโลปาสคาล (kPa) และในการทดลองภายใต้สภาวะความเค้นสูงจะมีการใช้เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก (Riken Seiki CO., LTD 137609) ซึ่งต่อกับอุปกรณ์ดังแสดงใน Figure 4 ซึ่งให้ความเค้นในช่วง 0-5 เมกะปาสคาล (Mpa)

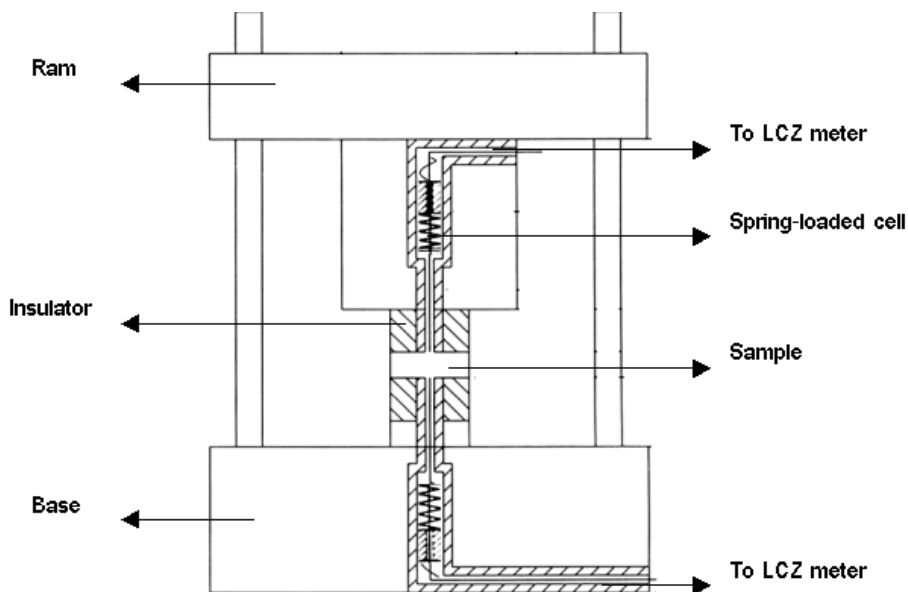


Figure 2. Schematic drawing of uniaxial compressometer.

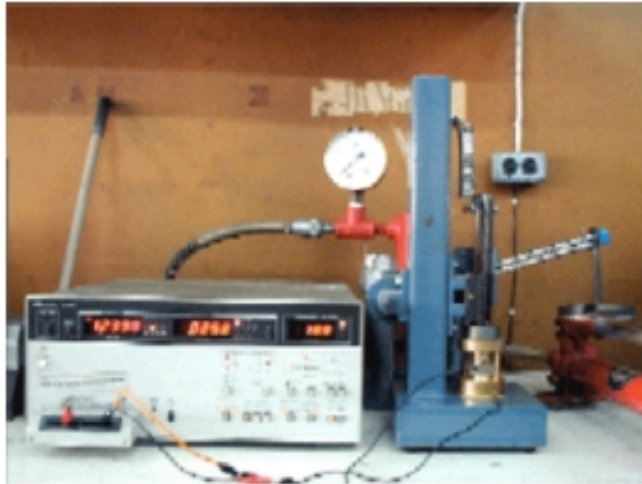


Figure 3. Experimental set up for studying the effect of low stress on dielectric properties of PMN-PZT.



Figure 4. Experimental set up for studying the effect of high stress on dielectric properties of PMN-PZT.

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการทดลองภายใต้สภาวะความเค้นต่ำดังแสดงใน Figure 5 และ Figure 6 นั้น จะเห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกตามความเค้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในความเค้นระดับนี้ยังไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ

ในระดับจุลภาคในขณะที่ผลการทดลองภายใต้สภาวะความเค้นสูงแสดงใน Figure 7 และ Figure 8 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับความเค้นอย่างเห็นได้ชัด โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสามารถแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีสารเซรามิก PMN-PZT ที่มีสาร PMN เป็นองค์ประกอบหลัก (0.9PMN-0.1PZT และ 0.7PMN-0.3PZT)

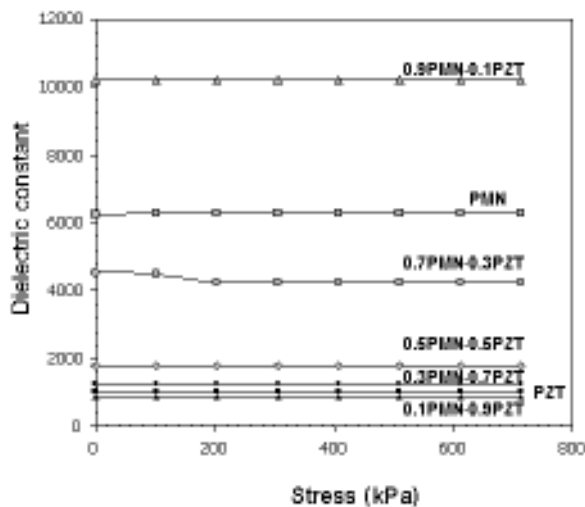


Figure 5. The stress dependence of dielectric constant on low stress (0-800 kPa).

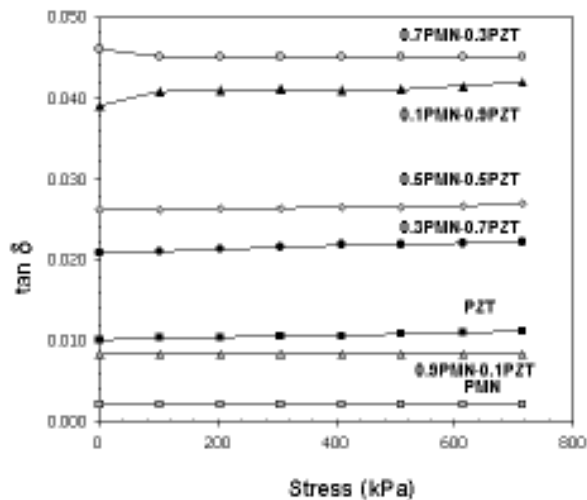


Figure 6. The stress dependence of dielectric loss tangent on low stress (0-800 kPa).

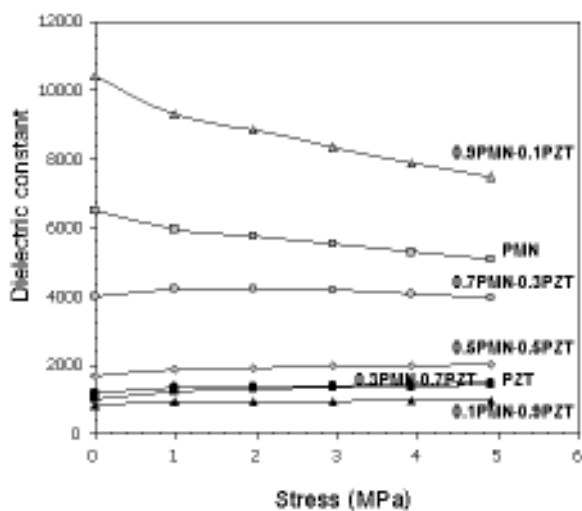


Figure 7. The stress dependence of dielectric constant on high stress (0-5 MPa).

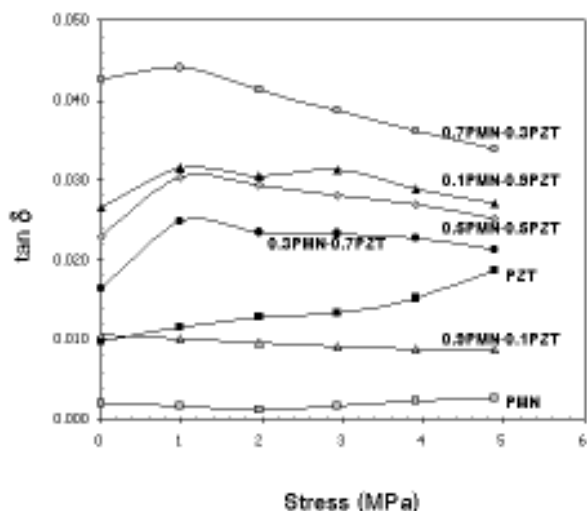


Figure 8. The stress dependence of dielectric loss tangent on high stress (0-5 MPa).

จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงเมื่อความเค้นสูงขึ้น และในกรณีสารเซรามิก PMN-PZT ที่มีสาร PZT เป็นองค์ประกอบหลัก (0.3PMN-0.7PZT 0.5PMN-0.5PZT และ 0.1PMN-0.9PZT) พบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมา ซึ่งพบว่าสาร PZT มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงเมื่อความเค้น

เพิ่มขึ้น ขณะที่สาร PMN มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น (Zhao and Zhang, 1996) แต่สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับความเค้นมีการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน

ในการที่จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสมบัติไดอิเล็กตริกกับความเค้นนั้น จะต้องเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของโดเมนภายใต้ความเค้น ซึ่งอาจจะ

เกิดในรูปการสลับทิศทางของโดเมน (domain switching) และการย้อนกลับของการเสื่อมอายุของโดเมน (de-aging) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์สำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกภายใต้ความเค้นในสารเซรามิก PMN-PZT ที่มี PZT เป็นองค์ประกอบหลัก (Zhang *et al.*, 1997 และ Yang *et al.*, 2000-a) ส่วนในกรณีของสารที่มี PMN เป็นองค์ประกอบหลักนั้น ในการอธิบายจะมีความแตกต่างกันออกไป เนื่องจาก PMN เป็นสารที่มีสมบัติเป็นรีแลกเซอร์ (relaxor) ซึ่งภายในสารจะประกอบด้วยบริเวณที่เป็นสารไม่มีขั้ว (non-polar region) และบริเวณที่เป็นสารมีขั้วในระดับไมโคร (micro-polar region) ซึ่งในกรณีที่ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องทำให้บริเวณที่เป็นสารมีขั้วในระดับไมโครมีบทบาทมากกว่า ทำให้สามารถสังเกตได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเค้นในสารที่มี PMN เป็นองค์ประกอบหลัก (Yang *et al.*, 2000-b และ Zhao *et al.*, 1998) ส่วนในกรณีของการเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับความเค้นนั้นสามารถอธิบายได้ง่ายกว่า โดยที่การเพิ่มขึ้นของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับความเค้นในบางสารนั้นเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน (domain wall mobility) ในทางตรงกันข้ามกระบวนการย้อนกลับของการเสื่อมอายุ (de-aging) จะทำให้ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นบางสาร (Yang *et al.*, 2000 และ Zhao *et al.*, 1998)

อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าสารเซรามิก 0.1 PMN-0.9PZT มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับความเค้นที่แตกต่างจากสารเซรามิก PMN-PZT อัตราส่วนอื่น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าสารเซรามิกอัตราส่วนนี้ถูกเผาซินเตอร์ในช่วงอุณหภูมิไม่เหมาะสมจึงทำให้สามารถแน่นตัวได้น้อยกว่าสารเซรามิกอัตราส่วนอื่นหรือมีรูพรุนมาก จึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกภายใต้ความเค้นที่แตกต่างไป

สรุปผลการทดลอง

สารเซรามิก PMN-PZT ที่เตรียมได้มีสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนองค์ประกอบระหว่างเฟส PMN และ PZT ซึ่งเมื่อนำมาศึกษาอิทธิพลของความ

เค้นแบบแกนเดี่ยวต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของสารเซรามิก PMN-PZT ที่ถูกทำขั้วแล้วพบว่าภายใต้สภาวะความเค้นต่ำจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกตามความเค้นที่เพิ่มขึ้น แต่ภายใต้สภาวะความเค้นสูงสำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกพบว่าสารเซรามิก PMN-PZT ที่มีสาร PMN เป็นองค์ประกอบหลักพบว่าจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่สารเซรามิก PMN-PZT ที่มีสาร PZT เป็นองค์ประกอบหลักจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น แต่ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ขึ้นกับองค์ประกอบหลัก ซึ่งการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าความเค้นมีบทบาทต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของสารเซรามิก PMN-PZT อย่างชัดเจน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประจำปี 2544 และทุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่ ปี 2545 จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สวก.)

เอกสารอ้างอิง

- Abe, Y., Yanagisawa, Y., Kakagawa, K. and Sasaki, Y. 2000. Piezoelectric and Dielectric Properties of Solid Solution of PbZrO_3 - PbTiO_3 - $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ System Prepared by Wet-Dry Combination Method, *Solid State Comm.*, 113: 331-334.
- Ouchi, H. 1968. Piezoelectric Properties and Phase Relation of $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3 - PbZrO_3 Ceramics with Barium or Strontium Substitutions. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 51: 169-176.
- Tandon, R.P., and Phar, A. 1991. Influence of the Processing Parameters on Dielectric Properties of PMN Relaxor Ceramics, *Proc. IEEE 7th Int'l Symp. Applications of Ferroelectrics*, 573-576.
- Yang, G., Liu, S-F., Ren, W. and Mukherjee, B.K. 2000. Uniaxial Stress Dependence of the Piezoelectric Properties of Lead Zirconate Titanate Ceramics, *Proc. of SPIE Symposium on Smart Structure and Material* 3992, 103

- Yang, G., Ren, W., Lui, S-F., Masys, A.J. and Mukherjee, B.K. 2000. Effect of Uniaxial Stress and DC Bias Field on the Piezoelectric, Dielectric, and Elastic Properties of Piezoelectric Ceramics, Proc. Of the IEEE Ultrasonic Symposium 1005.
- Zhang, Q.M., Zhao, J., Uchino, K. and Zheng, J. 1997. Change of the Weak-Field Properties of Pb(Zr, Ti)O₃ Piezoceramics with Compressive Uniaxial Stress and Its Links to the Effect of Dopants on the Stability of the Polarizations in the Material, J. Mater. Res., 12: 226
- Zhao, J. and Zhang, Q.M. 1996. Effect of Mechanical Stress on the Electromechanical Performance of PZT and PMN-PT Ceramics, Proc. IEEE 10th Int'l Symp. Applications of Ferroelectrics, 2: 971-974.
- Zhao, J., Zhang, Q.M. and Mueller, V. 1998. Uniaxial Stress Dependence of Electromechanical and Dielectric Properties of 0.9PMN-0.1PZT Electroceramics, Proc. of the IEEE International Symposium on Application of Ferroelectrics, 361
- Zhao, J., Glazounov, A.E. and Zhang, Q.M. 1999. Change in Electromechanical Properties of 0.9 PMN-0.1PZT Relaxor Ferroelectrics Induced by Uniaxial Compressive Stress Director Perpendicular to the Electric Field, Appl. Phys. Lett., 74: 436-438.