บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติไดอิเล็กทริกที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิและความถี่ และอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดี่ยวต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกระบบ PMN-PT, PIN-PT และ PZT-PZN สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 สารเซรามิก PMN-PT

1) สารเซรามิก PMN-PT ที่เตรียมได้ด้วยวิธีผสมออกไซด์มีโครงสร้างเป็นแบบเพอรอฟสไกต์ โดยค่าความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนองค์ประกอบระหว่างเฟส PMN และ PT
2) การเพิ่มปริมาณของ PT เข้าไปในระบบมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิคูรีของเซรามิก PMN-PT มีค่าสูงขึ้น และสมบัติไดอิเล็กทริกจะเปลี่ยนแปลงจากพฤติกรรมแบบรีแลกเซอร์(relaxor) ไปเป็นพิโซอิเล็กทริกแบบอ่อน (soft piezoelectric) ตามปริมาณ PT ที่เพิ่มขึ้น
3) เซรามิก PMN-PT จะมีค่าจุดสูงสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ε_{max}) เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโดยโมลของ PMN จนถึง 0.8PMN-0.2PT และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ PMN เพิ่มขึ้นเป็น 0.9PMN-0.1PT ค่า ε_{max} จะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าเซรามิก PMN-PT ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ PMN มากกว่าจะแสดงพฤติกรรมเป็นแบบรีแลกเซอร์มากกว่า กล่าวคือจะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างที่ขึ้นอยู่กับความถี่มากขึ้น ทำให้จุดสูงสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีการครอบคลุมช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าเซรามิก PMN-PT ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ PMN น้อยกว่า
4) ที่อุณหภูมิห้องพบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PMN โดยที่เซรามิก 0.9PMN-0.1PT มีอุณหภูมิคูรีใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ทำให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ε_r) สูงมาก ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 13388 ที่อุณหภูมิ 45°ซ และความถี่ 1 kHz
5) ในเซรามิก PMN-PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้วพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดี่ยวที่สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกคือกลุ่มที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ได้แก่ เซรามิก 0.5PMN-0.5PT และ 0.9PMN-0.1PT กลุ่มที่สองคือกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแบบไม่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

แน่นอน โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แล้วลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ได้แก่ เซรามิก 0.6PMN-0.4PT, 0.7PMN-0.3PT และ 0.8PMN-0.2PT

6) ในเซรามิก PMN-PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้วพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดี่ยวที่สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกคือกลุ่มที่มีค่าคงที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแบบไม่แน่นอน โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกแล้วลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นได้แก่ เซรามิก 0.5PMN-0.5PT, 0.6PMN-0.4PT, 0.7PMN-0.3PT และ 0.8PMN-0.2PT กลุ่มที่สองคือกลุ่มที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ได้แก่ เซรามิก 0.9PMN-0.1PT

7) ทั้งในเซรามิกที่ผ่านการทำขั้วและไม่ผ่านการทำขั้ว พบว่าสมบัติไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดี่ยวมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในช่วงเพิ่มและลดความเค้นมีค่าแตกต่างกันมาก ลักษณะที่เกิดขึ้นเช่นนี้แสดงให้เห็นว่าการให้ความเค้นในระดับนี้ (0-230 MPa) ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรต่อโดเมนหรือโครงสร้างภายใน ซึ่งตรงกับผลการทดลองในงานวิจัยอื่นๆ[5,18,20,23,24]

5.1.2 สารเซรามิก PIN-PT

1) สารเซรามิก PIN-PT ที่เตรียมได้ด้วยวิธีวูล์ฟราไมต์มีโครงสร้างเป็นแบบเพอรอฟสไกต์ โดยค่าความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นนอน โดยไม่ไปตามสัดส่วนองค์ประกอบระหว่างเฟส PIN และ PT

2) การเพิ่มปริมาณของ PT (ซึ่งมีอุณหภูมิคูรีที่ 495°ซ เมื่อเทียบกับ 66°ซ สำหรับ PIN) เข้าไปในระบบมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิคูรีของเซรามิก PIN-PT มีค่าสูงขึ้น และมีสมบัติไดอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงจากพฤติกรรมแบบรีแลกเซอร์ไปเป็นพิโซอิเล็กทริกแบบอ่อน

3) เซรามิก PIN-PT มีการเปลี่ยนแปลงค่าจุดสูงสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ε_{rmax}) ไม่แน่นอน ซึ่ง 0.5PIN-0.5PT จะมีค่า ε_{rmax} มากที่สุด อย่างไรก็ตามพบว่าเซรามิก PIN-PT ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ PIN มากกว่าจะแสดงพฤติกรรมเป็นแบบรีแลกเซอร์มากกว่า โดยมีอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างที่ขึ้นอยู่กับความถี่มากกว่า ทำให้จุดสูงสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีการครอบคลุมช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า เซรามิก PIN-PT ที่มีอัตราส่วนโดย โมลของ PIN น้อยกว่า

4) ที่อุณหภูมิห้องพบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PIN โดยยกเว้นที่เซรามิก 0.6PMN-0.4PT ซึ่งมีค่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมากที่สุดเนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่อยู่ในช่วงบริเวณของรอยต่อเฟสของเซรามิกระบบนี้

5) ในเซรามิก PIN-PT ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้วพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดี่ยวที่สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกคือกลุ่มที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ได้แก่ เซรามิก 0.6PIN-0.4PT และ 0.9PIN-0.1PT กลุ่มที่สองคือกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแบบไม่แน่นอน โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แล้วลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ได้แก่ เซรามิก 0.5PIN-0.5PT, 0.7PIN-0.3PT และ 0.8PIN-0.2PT

6) ในเซรามิก PIN-PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้วพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดี่ยวที่สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกคือกลุ่มที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ได้แก่ 0.9PIN-0.1PT กลุ่มที่สองคือกลุ่มที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ได้แก่ 0.5PIN-0.5PT และกลุ่มสุดท้ายคือกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแบบไม่แน่นอน โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แล้วลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ซึ่งได้แก่ 0.6PIN-0.4PT ,0.7PIN-0.3PT และ 0.8PIN-0.2PT

7) ทั้งในเซรามิกที่ผ่านการทำขั้วและไม่ผ่านการทำขั้ว พบว่าโดยส่วนใหญ่สมบัติไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดี่ยว มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงความเค้น 0-400 MPa ยกเว้น 0.6PIN-0.4PT และ 0.9PIN-0.1PT ที่มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในช่วงเพิ่มและลดความเค้นมีค่าแตกต่างกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการให้ความเค้นในระดับ 0-400 MPa ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรต่อโดเมนหรือโครงสร้างภายใน ซึ่งตรงกับผลการทดลองในงานวิจัยอื่นๆ[6,7,18,20,23,24]

5.1.3 สารเซรามิก PZT-PZN

1) สารเซรามิก PZT-PZN ที่เตรียมได้ด้วยวิธีผสมออกไซด์มีโครงสร้างเป็นแบบเพอรอพสไกต์โดยมีสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนองค์ประกอบระหว่างเฟส PZT และ PZN

2) การเพิ่มปริมาณของ PZN (ซึ่งมีอุณหภูมิคูรีที่ 140°ซ เมื่อเทียบกับ 390°ซ สำหรับ PZT) เข้าไปในระบบมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิคูรีของเซรามิก PZT-PZN มีค่าต่ำลง และมีสมบัติไดอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงจากพิโซอิเล็กทริกแบบอ่อนไปเป็นพฤติกรรมแบบรีแลกเซอร์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3) เซรามิก PZT-PZN จะมีค่าจุดสูงสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ε_{rmax}) เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโดยโมลของ PZN จนถึง 0.7PZT-0.3PZN ค่าจุดสูงสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนเฟส และค่าจุดสูงสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งตามปริมาณของ PZN นอกจากนี้ยังพบว่าเซรามิก PZT-PZN ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ PZN มากกว่า จะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างที่แตกต่างกันมากขึ้นและขึ้นอยู่กับความถี่ ทำให้จุดสูงสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีการครอบคลุมช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าเซรามิก PZT-PZN ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ PZN น้อยกว่า
4) ที่อุณหภูมิห้องพบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PZN ที่เพิ่มขึ้น
5) ในเซรามิก PZT-PZN ที่ยังไม่ผ่านการทำขั้วพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดี่ยวที่สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกคือกลุ่มที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ได้แก่ เซรามิก 0.8PZT-0.2PZN กลุ่มที่สองคือกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแบบไม่แน่นอน โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แล้วลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ได้แก่ เซรามิก 0.5PZT-0.5PZN, 0.6PZT-0.4PZN, 0.7PZT-0.3PZN และ 0.9PZT-0.1PZN
6) ในเซรามิก PMN-PT ที่ผ่านการทำขั้วแล้วพบว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดี่ยวลดลงโดยที่เซรามิก 0.9PZT-0.1PZN จะแสดงการลดลงอย่างชัดเจนที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอย่างทันทีทันใดเมื่อวัดที่ความถี่ 100 Hz
7) ทั้งในเซรามิกที่ผ่านการทำขั้วและไม่ผ่านการทำขั้ว พบว่าสมบัติไดอิเล็กทริกภายใต้ความเค้นแบบแกนเดี่ยวมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในช่วงเพิ่มและลดความเค้นมีค่าแตกต่างกันมาก ลักษณะที่เกิดขึ้นเช่นนี้แสดงให้เห็นว่าการให้ความเค้นในระดับนี้ (0-230 MPa) ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรต่อโดเมนหรือโครงสร้างภายใน ซึ่งตรงกับผลการทดลองในงานวิจัยอื่นๆ[8,18,20,23,24]

จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมานั้น สามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ว่า สมบัติต่างๆ ของสารเฟร์โรอิเล็กทริกจะเกิดจากกลไกที่มีภายใน (intrinsic contribution) ซึ่งเกิดจากโดเมนเดี่ยว (single domain) และเกิดจากผลจากภายนอก (extrinsic contribution) คือการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน (domain wall motions) โดยเมื่อให้ความเค้นเชิงกลภายนอกเข้าไปแล้ว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

โครงสร้างของโดเมนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้พลังงานโดเมนมีค่าน้อยที่สุด สำหรับภายใต้ความเค้นแบบแกนเดี่ยว โครงสร้างของโดเมนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของโดเมน (domain switching) การจับกันของโดเมน (clamping of domain walls) การลดการเสื่อมสภาพ (de-aging) และการทำให้หมดสภาพความเป็นขั้ว (de-poling) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติไดอิเล็กทริก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรทำการตรวจสอบตรวจวิเคราะห์ชนิดของเฟสที่ปรากฏในเซรามิก PMN-PT, PIN-PT และ PZT-PZN ที่ค่าอัตราส่วนต่างๆ โดยละเอียดด้วยเทคนิค EDX และตรวจสอบโครงสร้างเชิงจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อนำข้อมูลมาประกอบการอภิปรายผลที่ได้
2) ควรจะมีการศึกษาถึงสมบัติอื่นๆ เช่น สมบัติพิโซอิเล็กทริก สมบัติฮีสเทอรีซีส เป็นต้น ภายใต้ความเค้นของเซรามิกในระบบ PMN-PT, PIN-PT และ PZT-PZN
3) ควรทำการศึกษาสารเซรามิก PZT-PZN ที่ผ่านการทำขั้วแล้วเพิ่มเติมว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ความถี่ 100 Hz เกิดขึ้นจากอะไร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved