

การซินเทอร์สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก PMnN - PZT ที่อุณหภูมิต่ำด้วยสารช่วยซินเทอร์



นายสุทัศน์ จันบัวลา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3600-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LOW TEMPERATURE SINTERING OF  $\text{PMnN} - \text{PZT}$  PIEZOELECTRIC CERAMIC WITH  
SINTERING AID

Mr.Sutas Janbuala

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

481793

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การซินเทอร์สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก PMnN - PZT ที่อุณหภูมิต่ำ  
ด้วยสารช่วยซินเทอร์

โดย

นายสุทัศน์ จันบัวลา

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเซรามิก

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.ศิริชนวี เจียมศิริเลิศ

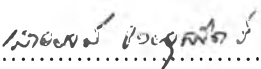
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม


ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล

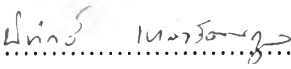
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวด)

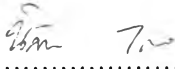
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.ศิริชนวี เจียมศิริเลิศ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา จินาวัฒน์)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.นีสานา ไตรผล)

สุทัศน์ จันบัวลา : การซินเทอร์สารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก PMnN – PZT ที่อุณหภูมิต่ำด้วยสารช่วยซินเทอร์. (LOW TEMPERATURE SINTERING OF PMnN – PZT PIEZOELECTRIC CERAMIC WITH SINTERING AID.) อาจารย์ที่ปรึกษา: อาจารย์ ดร. ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล. 87 หน้า. ISBN 974-17-3600-2

$Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $PbTiO_3$ - $PbZrO_3$  (PMnN-PZT) เป็นสารประกอบเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่น่าสนใจ เพราะมีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่ต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูง เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า เนื่องจากเป็นกลุ่มสารที่มีสมบัติเด่น คือ มีค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล -ไฟฟ้า ที่สูง อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์สาร PMnN – PZT ก็คืออุณหภูมิในการซินเทอร์ที่สูง (1200 – 1300 องศาเซลเซียส) ทำให้เกิดการระเหยของออกไซด์ตะกั่วซึ่งเป็นสาเหตุทำให้อัตราส่วนของสารประกอบเปลี่ยนแปลง และเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในการลดอุณหภูมิซินเทอร์สาร PMnN – PZT สามารถทำได้โดยการเติมออกไซด์ของโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ หรือมีไอออนที่ขนาดรัศมีใกล้เคียงกับสารในกลุ่มนี้ลงไป แต่ปัญหาที่ตามมาคือออกไซด์ที่เติมลงไปจะส่งผลให้สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงไป

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของการเติมซิงค์ออกไซด์ต่ออุณหภูมิในการเผาของสารประกอบ PMnN – PZT รวมทั้งสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก โดยการศึกษาจะเติมซิงค์ออกไซด์ ตั้งแต่ 0 - 1 % โดยน้ำหนัก และใช้อุณหภูมิเผาที่ 900, 950, 1000, และ 1050 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าเมื่อเติมซิงค์ออกไซด์ 0.25 % โดยน้ำหนัก สามารถลดอุณหภูมิซินเทอร์สาร PMnN – PZT จาก 1250 องศาเซลเซียส ลงมาได้ที่ 1000 องศาเซลเซียส โดยที่สมบัติของชิ้นงานที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมซิงค์ออกไซด์ และซินเทอร์ที่ 1250 องศาเซลเซียส คือ มีความหนาแน่นเท่ากับ  $7.74 \text{ g/cm}^3$  ค่า  $d_{33}$  เท่ากับ  $260 \text{ pC/N}$  ค่า  $Q_m$  เท่ากับ 1,195 และค่า  $k_p$  เท่ากับ 0.55

ภาควิชาวัสดุศาสตร์  
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก  
ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล

## 4572653223 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEY WORD: PIEZOELECTRIC CERAMIC / LOW TEMPERATURE SINTERING / HIGH POWER  
PIEZOELECTRIC MATERIAL

SUTAS JANBUALA : LOW TEMPERATURE SINTERING OF PMnN – PZT  
PIEZOELECTRIC CERAMIC WITH SINTERING AID. THESIS ADVISOR : SIRITHAN  
JIEMSIRILERS PhD., THESIS COADVISOR : PITAK LAORATANAKUL PhD., 87 pp.  
ISBN: 974-17-3600-2.


$Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3-PbTiO_3-PbZrO_3$  (PMnN-PZT) has been widely used in high power devices, ie transformer, ultrasonic motor because of its high mechanical quality factor as well as electromechanical coupling coefficient. In manufacturing process, however, it involves serious problems, such as compositional change and environmental pollution due to the volatility of lead oxide during sintering process (1200 – 1300 °C). The low temperature fabrication of PMnN – PZT ceramic using a low melting point additive or ions having radius similar to piezoelectric ceramic as sintering aids can solve these problems. However there have been some reports on the drawback of sintering aids that they alter the piezoelectric properties of the based composition

In this study, the effects of ZnO content on firing temperature and piezoelectric properties of the low temperature sintered PMnN – PZT was investigated. ZnO was added in a range of 0 – 1 Wt% and the samples were fired at 900, 950 1000, and 1050 °C. Physical and piezoelectric properties of the samples were examined and compared to those of PMnN – PZT ceramic without additive. From the study PMnN – PZT ceramic sintered at 1000 °C with 0.25 Wt% ZnO showed good piezoelectric properties nearly close to the pure PMnN – PZT which was sintered at 1250 °C. The density,  $Q_m$ ,  $d_{33}$  and  $k_p$  of this sample were 7.74 g/cm<sup>3</sup>, 1195, 260 pC/N, 0.55. respectively

Department Materials science

Field of study Ceramic technology

Academic year 2005

Student's signature..... 

Advisor's signature..... 

Co-advisor's signature..... 

### กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปด้วยดีไม่ได้หากขาดบุคคลที่มีพระคุณต่อไปนี้  
 ดังนั้นผู้เขียนจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ อาจารย์ดร.ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ สำหรับการดูแลเป็นอย่างดีนับตั้งแต่เรียนจนกระทั่งถึงการทำวิจัย ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล สำหรับการดูแล  
 และให้แนวคิดที่ดีตลอดเวลาในการทำวิจัยที่ผ่านมา อาจารย์ และนักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรม  
 ศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้แนะนำกระบวนการเริ่มต้นในการทำวิจัย วิทย  
 เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย เพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท สาขา  
 เซรามิกทุกคนสำหรับคำแนะนำที่ดี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิตที่ให้โอกาสในการลาศึกษาต่อ  
 และสุดท้ายขอขอบพระคุณ คุณพ่อ และพี่ ที่ให้โอกาสและเป็นกำลังใจที่ดีในการศึกษาตลอดมา

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
อักษรย่อและสัญลักษณ์.....	ฑ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีอิเล็กทรอนิกส์.....	3
2.1.1 ทฤษฎีเฟอร์โรอิเล็กทริก.....	3
2.1.2 ทฤษฎีเพียโซอิเล็กทริก.....	5
2.2 ความสัมพันธ์พื้นฐานของสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก.....	8
2.3 สารประกอบเพียโซอิเล็กทริก.....	11
2.3.1 สารแบเรียมไททานेट.....	12
2.3.2 สารเลดเซอร์โคเนตไททานेट.....	13
2.3.3 สาร PMnN – PZT.....	15
2.4 การเตรียมชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริก.....	18
2.4.1 การเตรียมผงเซรามิก.....	18
2.4.2 การขึ้นรูปและเผา.....	19
2.4.3 กระบวนการในการทำให้เกิดการเรียงตัวของไดโพลในทิศทางเดียวกัน.....	19
2.5 การประยุกต์และการใช้งานสารเพียโซอิเล็กทริก.....	20
2.6 การลดอุณหภูมิในการซินเทอร์สารเพียโซอิเล็กทริก.....	21
2.7 สารช่วยลดอุณหภูมิในการซินเทอร์สารเพียโซอิเล็กทริก.....	23
2.7.1 ซิงค์ออกไซด์.....	22
2.7.2 ลิเทียมออกไซด์.....	23
2.8 การซินเทอร์.....	24
2.8.1 การเกิดเฟสของเหลวขณะซินเทอร์.....	25
2.8.2 การเกิดเฟสของแข็งขณะซินเทอร์.....	26

	หน้า
2.8.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการซินเทอร์.....	28
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	36
3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	36
3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์สาร.....	39
3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมสาร PMnN – PZT.....	39
3.2.2 การเติมสารช่วยลดอุณหภูมิซินเทอร์.....	42
3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ.....	45
3.3.1 การวิเคราะห์เฟส.....	45
3.3.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่น.....	45
3.3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	46
3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก.....	47
3.4.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก.....	47
3.4.2 การวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก.....	47
3.4.3 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล – ไฟฟ้า.....	47
3.4.4 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล.....	48
3.4.5 การวิเคราะห์ค่าวงจรมีสเทอร์รี่ชีส.....	48
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์.....	49
4.1 ผลการวิเคราะห์เฟส.....	49
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	52
4.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น.....	58
4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก.....	61
4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล.....	63
4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล - ไฟฟ้า.....	66
4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก.....	68
4.8 ผลการวิเคราะห์วงจรมีสเทอร์รี่ชีส.....	69
บทที่ 5 สรุปอภิปราย และข้อเสนอแนะในการวิจัย.....	71
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	71



5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	72
5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัย.....	73
รายการอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก การคำนวณค่าเลขดัชนีพารามิเตอร์.....	79
ภาคผนวก ข ปริมาณที่ใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่น.....	81
ภาคผนวก ค Peak ID report.....	82
ภาคผนวก ง PDF Card.....	83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	87

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกแบบแข็งกับแบบอ่อน.....	11
ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของสาร PMnN – PZT.....	17
ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของสาร PMnN – PZT ที่มีการเติมสารเติมแต่ง.....	18
ตารางที่ 2.4 แสดงสารที่ใช้ลดอุณหภูมิในการซินเทอร์ และอุณหภูมิที่ซินเทอร์ได้โดยที่สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกไม่เปลี่ยนแปลง.....	24
ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบลักษณะการซินเทอร์แบบเกิดเฟสของแข็งและเฟสของเหลวในขณะซินเทอร์.....	28
ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงาน PZT ที่เติมสารช่วยลดอุณหภูมิ.....	30
ตารางที่ 3.1 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	36
ตารางที่ 3.2 แสดงถึงปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้.....	40
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดเกรนของชิ้นงาน PMnN – PZT ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์และอุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน.....	57
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าปริมาณที่ใช้คำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงานที่ส่วนผสมของ ZnO และอุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน.....	58
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงาน PMnN –PZT ที่ส่วนผสมของ ZnO และอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่แตกต่างกัน.....	61
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลของชิ้นงานที่ส่วนผสมของ ZnO และอุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน.....	63
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล - ไฟฟ้าของชิ้นงาน PMnN – PZT.....	66
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงาน PMnN – PZT ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์และอุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน.....	68
ตารางที่ 5.1 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบสมบัติของ PMnN – PZT ที่อุณหภูมิซินเทอร์และปริมาณ ZnO ที่แตกต่างกัน.....	72

## สารบัญรูปภาพ

รูปภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการแบ่งกลุ่มโครงสร้างของผลึกสารเพียโซอิเล็กทริก.....	3
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะวงจรรีซีซของสารที่มีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก.....	4
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) ( $ABO_3$ ) ของสารเพียโซอิเล็กทริก.....	6
รูปที่ 2.4 แสดงพีคจาก XRD ของสารเพียโซอิเล็กทริก.....	6
รูปที่ 2.5 แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกของสารเพียโซอิเล็กทริก.....	7
รูปที่ 2.6 แสดงทิศทางการโพลาริเซชัน.....	9
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ของสารของแบเรียมไททานเนต.....	12
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ของสาร PZT.....	14
รูปที่ 2.9 แสดงบริเวณที่มีลักษณะของเฟสสองเฟสอยู่ร่วมกัน.....	15
รูปที่ 2.10 แสดงค่า $Q_m$ ของ $PMnN - PZT$ ที่อุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน.....	16
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงค่า $Q_m$ และค่า $\tan \delta$ ของ $PMnN - PZT$ ที่อุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน.....	16
รูปที่ 2.12 กราฟแสดงค่าวงจรรีซีซของ $PMnN - PZT$ ที่อุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน.....	17
รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะทิศทางการเรียงตัวไดโพลของชิ้นงาน.....	22
รูปที่ 2.14 แสดงเฟสไดอะแกรมของตะกั่วกับซิงค์ออกไซด์.....	23
รูปที่ 2.15 แสดงขั้นตอนในการเกิดกระบวนการซินเทอร์.....	25
รูปที่ 2.16 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการซินเทอร์แบบ liquid phase sintering กับ Solid state sintering.....	26
รูปที่ 2.17 แสดงขั้นตอนการเกิด Solid state sintering.....	27
รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ $V_2O_5$ กับค่า $Q_m$ ของชิ้นงาน PNS- PZT.....	31
รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k_p$ กับอุณหภูมิซินเทอร์ของชิ้นงาน PZT.....	32
รูปที่ 2.20 กราฟแสดงค่า $Q_m$ ของชิ้นงาน $Pb(Co_{1/2}W_{1/2})O_3-Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3-Pb(Zr_{0.48}Ti_{0.52})O_3$ ที่อุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน.....	33
รูปที่ 2.21 กราฟแสดงค่า $k_p$ ของชิ้นงาน $Pb(Co_{1/2}W_{1/2})O_3-Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3-Pb(Zr_{0.48}Ti_{0.52})O_3$ ที่อุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน.....	33
รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ Zr ใน PZT กับค่า $d_{31}$ ของชิ้นงาน PZT.....	34
รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ Zr ใน PZT กับค่า $k_p$ ของชิ้นงาน PZT.....	35
รูปที่ 2.24 แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงาน $Pb(ZrTi)O_3 - Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3 -$ $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ เมื่อเติม $MnO_2$ 0.5%, $CuO$ 0.2% และ $Al_2O_3$ , Z.....	35

รูปภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.1 แสดงภาพของเครื่องอิมพีแดนซ์อานาไลเซอร์.....	37
รูปที่ 3.2 แสดงภาพของเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก .....	38
รูปที่ 3.3 แสดงภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการโพลขึ้นงาน.....	38
รูปที่ 3.4 แสดงแผนผังในการเคลือบสารเพียโซอิเล็กทริก.....	41
รูปที่ 3.5 แสดงแผนผังที่ใช้ในการซินเทอร์สารเพียโซอิเล็กทริก.....	43
รูปที่ 3.6 แสดงแผนผังการวิจัย.....	44
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะเฟสของขึ้นงาน PMnN – PZT.....	50
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะเฟสของสารประกอบ PMnN – PZT ที่ปริมาณ ZnO ที่ต่างกัน.....	51
รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของขึ้นงานที่มีการเติมสารช่วยลดอุณหภูมิ ในการซินเทอร์ ZnO ในปริมาณที่แตกต่างกันเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 900 °C.....	53
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของขึ้นงานที่มีการเติมสารช่วยลดอุณหภูมิ ในการซินเทอร์ ZnO ในปริมาณที่แตกต่างกันเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 950 °C.....	44
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของขึ้นงานที่มีการเติมสารช่วยลดอุณหภูมิ ในการซินเทอร์ ZnO ในปริมาณที่แตกต่างกันเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1000 °C.....	55
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของขึ้นงานที่มีการเติมสารช่วยลดอุณหภูมิ ในการซินเทอร์ ZnO ในปริมาณที่แตกต่างกันเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1050 °C.....	56
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนของขึ้นงานกับปริมาณ ซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน.....	57
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการแทนที่ในตำแหน่ง B ของโครงสร้าง ABO <sub>3</sub> .....	57
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของขึ้นงานกับปริมาณ ซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไป และอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่แตกต่างกัน .....	59
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความหนาแน่นของขึ้นงานสัมพันธ์กับ ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไป และอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่แตกต่างกัน.....	59
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของขึ้นงานกับปริมาณ ซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไป และอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่แตกต่างกัน .....	62
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลของขึ้นงานกับปริมาณ ซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไปและอุณหภูมิในการซินเทอร์ที่แตกต่างกัน.....	64
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลง พลังงานกล – ไฟฟ้า ของขึ้นงานกับปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไป.....	67
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ทางเพียโซอิเล็กทริกของขึ้นงาน กับปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไป ในอุณหภูมิซินเทอร์ที่แตกต่างกัน.....	68

รูปภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ 4.15 กราฟแสดงวงจรรีโซแนนซ์ของชิ้นงาน PMnN – PZT ซึ่งซินเทอร์ที่อุณหภูมิ

1000 °C ที่มีการเติมปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณที่แตกต่างกัน.....70

### อักษรย่อและสัญลักษณ์

PZT	เลดเซอร์โคเนตไทเทเนตออกไซด์
PMN	เลดแมงกานีสไนโอเบตออกไซด์
PMnN	เลดแมงกานีสไนโอเบียมออกไซด์
PMnN – PZT	เลดแมงกานีสไนโอเบียมออกไซด์- เลดเซอร์โคเนตไทเทเนตออกไซด์
ZnO	ซิงค์ออกไซด์
XRD	X – ray diffraction
SEM	Scanning electron microscope
$k_p$	สัมประสิทธิ์คู่ควบการแปลงพลังงานกล – ไฟฟ้า
$d_{33}$	สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก
$g$	สัมประสิทธิ์วงจรเปิด
$Q_m$	สัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล
$\rho$	ความหนาแน่น
$f_r$	ความถี่เรโซแนนซ์
$f_u$	ความถี่แอนติเรโซแนนซ์
$Z_r$	ความต้านทานที่ความถี่เรโซแนนซ์
$K$	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
$S$	ความเครียด
$T$	ความเค้น
$E$	สนามไฟฟ้า
$D$	ค่าการกระจัดทางไฟฟ้า