

๑๕๓๑

**สมบัติเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 ระหว่าง  
เดคเซอร์โคเนตไททานนคเซรามิกกับพอลิเมอร์**



**วิบูลย์ หวานวารี**

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-639-590-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- 8 ธ.ค. 2545

I18266216

**PIEZOELECTRIC PROPERTIES OF 1-3 MODIFIED-LEAD ZIRCONATE TITANATE  
CERAMIC-POLYMER COMPOSITES**



**VIBOON WANVARIE**

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

**Department of Material Science**

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**


**Academic Year 1998**

**ISBN 974-639-590-4**

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติเพื่อประโยชน์ของวัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 ระหว่าง  
เลดเซอร์โคเนตไททานเนตเซรามิกกับพอลิเมอร์  
โดย นายวิบูลย์ หวานวาริ  
ภาควิชา วัสดุศาสตร์  
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม คร.สุทธิพร ชิวสารณ์

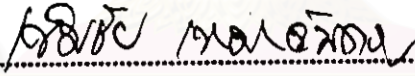
---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
.....  
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เข็มชัย เหมะจันทร)

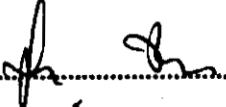
ประธานกรรมการ

  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา)

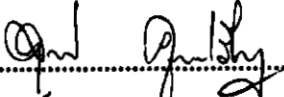
อาจารย์ที่ปรึกษา

  
.....  
(อาจารย์ ดร.สุทธิพร ชิวสารณ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุทัตตรา จินาวัฒน์)

กรรมการ

  
.....  
(อาจารย์ ดร.สุทิน อุหาเรืองรอง)

กรรมการ

วิบูลย์ หวานวาริ : สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3  
ระหว่างแลคซอร์ โคนคโททานคเซรามิกกับพอลิเมอร์

(PIEZOELECTRIC PROPERTIES OF 1-3 MODIFIED-LEAD ZIRCONATE  
TITANATE CERAMIC-POLYMER COMPOSITES) อ. ที่ปรึกษา :  
รศ.ดร.วิระศักดิ์ อุคมกิจเดชา, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.สุทธิพร จิวสารณ, 146 หน้า, ISBN 974-639-590-4

วัสดุเชิงประกอบเพียโซอิเล็กทริกแบบ 1-3 เป็นแบบที่ได้รับความสนใจอย่าง  
แพร่หลายสำหรับงานความถี่สูงเช่น การใช้เป็นทรานสดิวเซอร์สำหรับการวินิจฉัยโรคทาง  
การแพทย์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 ระหว่างเซรามิกกับ  
อีพอกซีเรซิน เซรามิกที่โพลีเอทิลีนออกไซด์ ( $Pb_{0.94} Sr_{0.06}(Zr_{0.52} Ti_{0.48})O_3$ ) โดยเติมบิสฟีนอลเอ  
อีพอกซีเรซิน โดยน้ำหนัก ความหนาแน่นหลังเผาขึ้นที่อุณหภูมิ  $1040^{\circ}C$  มีค่าเท่ากับ  
 $7.72 \text{ g/cm}^3$  และค่า  $d_{33}$ ,  $\epsilon_{33}$ ,  $K$ ,  $Q_m$  เท่ากับ  $275 \text{ pC/N}$ ,  $25 \cdot 10^{-3} \text{ Vm/N}$ , 1342, 47 ตาม  
ลำดับ เซรามิกถูกอัดขึ้นรูปแท่งโดยการอัดผ่านหัวอัด (Piston extruder) แท่งเซรามิกขนาด  
เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.83 มม. ผึงอยู่ในอีพอกซีเรซินประกอบเป็นวัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 ที่  
มีสัดส่วนปริมาตรเซรามิกร้อยละ 10, 20, 40 และ 45

วัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 มีค่าความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในช่วง 1500-1700 kHz โดย  
วัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 ที่มีสัดส่วนปริมาตรเซรามิกร้อยละ 10 มีค่า  $d_{33}$ ,  $\epsilon_{33}$ ,  $K$ , และ  
 $Q_m$  เท่ากับ  $84 \text{ pC/N}$ ,  $55 \cdot 10^{-3} \text{ Vm/N}$ , 174, และ 7 ตามลำดับ

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์.....  
สาขาวิชา.....เทคโนโลยีเซรามิก.....  
ปีการศึกษา.....2541.....

ลายมือชื่อนิสิต.....วิบูลย์ หวานวาริ.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## : MAJOR  
KEY WORD:

## C82B344 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEY WORD : PIEZOELECTRIC / COMPOSITE / CERAMIC /  
LEAD ZIRCONATE TITANATE

VIBOON WANVARIE : PIEZOELECTRIC PROPERTIES OF 1-3  
MODIFIED-LEAD ZIRCONATE TITANATE CERAMIC-POLYMER COMPOSITES.  
THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. WERASAK UDOMKICHDECHA, Ph.D.  
THESIS CO-ADVISOR : SUTIPORN CHEWASATN, Ph.D. 148 pp.  
ISBN 974-839-590-4

There has been wide spread interest of 1-3 piezoelectric composite development for high frequency applications such as ultrasonic transducer for medical diagnosis. In this study, 1-3 piezoelectric ceramic/polymer resin composites were fabricated. Ceramic composition of  $(Pb_{0.94} Sr_{0.06})(Zr_{0.52} Ti_{0.48})O_3$  with 1.5 weight% of  $Bi_2O_3$ , sintered at  $1040^\circ C$  giving density of  $7.72 g/cm^3$  with  $d_{33}$ ,  $g_{33}$ ,  $K$  and  $Q_m$  equal to  $275 pC/N$ ,  $25 \cdot 10^{-3} Vm/N$ , 1342, and 47 respectively was prepared for forming ceramic rod by piston extruder technique. Ceramic rods of 0.83 mm in diameter were obtained after sintering and fabricated to 1-3 composites with ceramic volume fraction of 10, 20, 40, and 45%.

The 1-3 composites responded to resonance frequency in the range of 1500-1700 kHz. The 1-3 composite with ceramic volume fraction of 10% gave values of  $d_{33}$ ,  $g_{33}$ ,  $K$  and  $Q_m$  equal to  $84 pC/N$ ,  $55 \cdot 10^{-3} Vm/N$ , 174, and 7 respectively.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....  
สาขาวิชา.....  
ปีการศึกษา.....

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างสูงต่อ รศ.ดร.วิระศักดิ์ อุดมกิจเขตรา และ ดร.สุทธิพร ชิวธารณ์ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณามอบโอกาสอันดีสำหรับการทำวิจัย การมอบความสนับสนุนและคำแนะนำต่างๆตลอดจนการตรวจอ่านวิทยานิพนธ์และแก้ไขจนเป็นเล่มสำเร็จ นับเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้การทำวิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จดังได้

ขอขอบคุณ ดร.นงฉัตร ปานเกิดดี ผู้เปิดโอกาสและแนะนำข้าพเจ้าสู่การวิจัยนี้ ขอแสดงความขอบคุณต่อสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยที่ได้อนุเคราะห์สารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือวิเคราะห์ และสถานที่ดำเนินการวิจัย ขอขอบคุณบุคคลต่างๆ ได้แก่ คุณนพฤทธิ แซ่อึ้ง และคุณแสงเดือน ดวงดาว สำหรับความดูแลและความช่วยเหลือต่างๆ คุณประสงค์ เจริญพรพิทักษ์ และคุณเฉลิมชัย จิระพันธุ์ สำหรับความช่วยเหลือในการทำวิจัยและความคิดต่างๆ คุณชนินทร์ สุหราชอาณาจักร สำหรับความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ชุดโครงสร้าง และพนักงานในสาขาวิจัยอุตสาหกรรมโลหะและเซรามิก (สวช.) ทุกท่าน

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ที่ได้มอบความรู้แก่ข้าพเจ้า เพื่อนและพี่น้องภาควิชาวัสดุศาสตร์สำหรับความช่วยเหลือในการทำวิจัยและกำลังใจที่มีให้

ขอขอบคุณสมาชิกในครอบครัวและญาติๆสำหรับความห่วงใยและกำลังใจที่มีให้  
อย่างสม่ำเสมอ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนด้านการเงินค่าทุนสนับสนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย

# สารบัญ

| เรื่อง  | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....                         | ๔    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....                      | ๖    |
| กิตติกรรมประกาศ .....                         | ๗    |
| สารบัญ .....                                  | ๙    |
| สารบัญรูป .....                               | ๑๑   |
| สารบัญตาราง .....                             | ๑๓   |
| บทที่ 1 บทนำ .....                            | 1    |
| 1.1 ปรีทรรศน์วรรณกรรม .....                   | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย .....    | 3    |
| 1.3 วิธีการวิจัยโดยย่อ .....                  | 3    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....           | 3    |
| บทที่ 2 ความรู้ทางทฤษฎี .....                 | 4    |
| 2.1 ความรู้พื้นฐาน .....                      | 4    |
| 2.1.1 ปรีทรรศน์เพียโซอิเล็กทริก .....         | 4    |
| 2.1.2 ลักษณะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก .....    | 6    |
| 2.1.3 สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก ..... | 8    |
| 2.2 เซรามิกเลคเซอร์โคเนคไททาเนค .....         | 13   |
| 2.2.1 ลักษณะของเซรามิก .....                  | 12   |
| 2.2.2 การเตรียมสาร PZT .....                  | 18   |
| 2.2.3 การปรับปรุงสมบัติของสาร PZT .....       | 20   |
| 2.2.5 การลดอุณหภูมิเผาซินเทอร์สาร PZT .....   | 23   |
| 2.3 การประยุกต์ใช้งานวัสดุเชิงประกอบ .....    | 25   |



|  |    |
|--|----|
| บทที่ 3 วิธีการวิจัย .....   | 33 |
| 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ .....  | 33 |
| 3.2 การเตรียมสารเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก .....                      | 36 |
| 3.2.1 การเตรียมสารเลดเซอร์โคเนตไททานเนต (PZT) .....                | 36 |
| 3.2.2 การเตรียมสาร PZT ที่มีตัวเติม Sr และ Bi .....                | 42 |
| 3.3 การเตรียมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกประเภท .....                   | 45 |
| 3.4 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 .....                          | 49 |
| 3.5 การวิเคราะห์และตรวจวัดสมบัติของวัสดุ .....                     | 50 |
| 3.5.1 การกระจายขนาดอนุภาค .....                                    | 50 |
| 3.5.2 การวิเคราะห์เฟส .....  | 51 |
| 3.5.3 ความหนาแน่น .....  | 52 |
| 3.5.4 จุดโครงสร้าง .....   | 55 |
| 3.5.5 เปอร์เซนต์น้ำหนักสูญหายและเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงขนาด ..... | 56 |
| 3.5.6 สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก .....                      | 57 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัย .....   | 61 |
| 4.1 สารตั้งต้น .....   | 61 |
| 4.1.1 การกระจายขนาดอนุภาค .....                                    | 61 |
| 4.1.2 การวิเคราะห์เฟส .....  | 67 |
| 4.2 การเผาแคลไซน์เพื่อเตรียมสาร PZT .....                          | 69 |
| 4.2.1 การกระจายขนาดอนุภาค .....                                    | 69 |
| 4.2.2 การวิเคราะห์เฟส .....  | 74 |
| 4.2.3 ความหนาแน่น .....  | 76 |
| 4.2.4 เปอร์เซนต์น้ำหนักสูญหาย .....                                | 77 |
| 4.3 การเผาซินเทอร์สาร PZT .....                                    | 78 |
| 4.3.1 การวิเคราะห์เฟส .....  | 78 |
| 4.3.2 ความหนาแน่น .....  | 80 |
| 4.3.3 เปอร์เซนต์น้ำหนักสูญหายและการเปลี่ยนแปลงขนาด .....           | 81 |
| 4.3.4 จุดโครงสร้าง .....   | 83 |
| 4.3.5 สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก .....                      | 85 |



|  |     |
|--|-----|
| 4.4 การเติมสตรอนเชียม .....  | 87  |
| 4.4.1 การวิเคราะห์เฟส .....  | 87  |
| 4.4.2 ความหนาแน่น .....  | 91  |
| 4.4.3 จุดโครงสร้าง .....   | 92  |
| 4.4.4 สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก .....                                    | 95  |
| 4.5 การเติมบิสมัทออกไซด์ .....   | 97  |
| 4.5.1 การวิเคราะห์เฟส .....  | 97  |
| 4.5.2 ความหนาแน่น .....  | 101 |
| 4.5.3 เปอร์เซนต์น้ำหนักสูญหายและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงขนาด ..                 | 103 |
| 4.5.4 จุดโครงสร้าง .....   | 105 |
| 4.5.5 สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก .....                                    | 109 |
| 4.6 การเตรียมเซรามิกรูปแท่ง .....  | 111 |
| 4.6.1 การกระจายขนาดอนุภาค .....  | 111 |
| 4.6.2 ความหนาแน่น .....  | 111 |
| 4.6.3 จุดโครงสร้าง .....   | 113 |
| 4.7 วัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 .....   | 118 |
| 4.7.1 จุดโครงสร้าง .....   | 118 |
| 4.7.2 สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก .....                                    | 121 |
| 4.8 อภิปรายผลการวิจัย .....  | 124 |
| บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....  | 127 |
| 5.1 บทสรุป .....   | 127 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ .....   | 128 |
| รายการอ้างอิง .....  | 129 |
| ภาคผนวก .....  | 133 |
| ภาคผนวก ก. วงจรการไหล .....  | 133 |
| ภาคผนวก ข. การคำนวณมาตรฐานและข้อมูลผลวิเคราะห์ XRD .....                         | 134 |
| ภาคผนวก ค. ข้อมูลและการคำนวณ lattice parameters และความหนาแน่น<br>ทางทฤษฎี ..... | 144 |
| ประวัติผู้วิจัย .....  | 146 |

# สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก <sup>(1)</sup>   |    |
|      | 1) ผลทางตรง ผลของแรงอัดทำให้เกิดกระแสไหลเข้าวงจร (ซ้ายมือ) และผลของแรงดึงทำให้เกิดกระแสไหลออกจากวงจร (ขวามือ)   |    |
|      | 2) ผลทางอ้อม สนามไฟฟ้าในทิศเดียวกับทิศการโพลาไรซ์ทำให้วัสดุหดตัว (ซ้ายมือ) และสนามไฟฟ้าในทิศตรงข้ามกับทิศการโพลาไรซ์ทำให้วัสดุขยายตัว (ขวามือ) .....                                  | 5  |
| 2.2  | ระบบผลึกแบ่งได้เป็น 32 กลุ่ม .....  | 6  |
| 2.3  | การระบุแกนและระนาบของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก <sup>(1)</sup> .....   | 10 |
| 2.4  | โครงสร้างผลึกของสารแบเรียมไททานेट <sup>(4)</sup> .....  | 13 |
| 2.5  | แผนภาพเฟสของสาร PZT <sup>(1)</sup> .....  | 14 |
| 2.6  | สัดส่วนค่า c/a ของสาร PZT <sup>(5)</sup> .....  | 15 |
| 2.7  | สมบัติของสาร PZT ที่สัดส่วนโมล Zr ต่างๆ <sup>(5)</sup> .....  | 16 |
| 2.8  | เฟสของสาร PZT ที่มีสัดส่วนโมล Zr = 0.52-0.54<br>แสดงโครงสร้างเตตระโกนอลเมื่อ Zr < 0.53 และโครงสร้างรอมโบฮีดรอลเมื่อ Zr > 0.54 <sup>(6)</sup> .....                                    | 17 |
| 2.9  | การแบ่งประเภทตัวเติมในระบบ PZT ตามขนาดรัศมีไอออนและประจุของไอออน <sup>(23)</sup> .....  | 20 |
| 2.10 | รูปแบบความต่อเนื่องของวัสดุเชิงประกอบกรณี 2 เฟส <sup>(28)</sup> .....   | 26 |
| 2.11 | การเตรียมวัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 บางวิธี (Rod placement method, Dice-and-fill method, Tape lamination method, Lost-mold method และ Injection molding method) <sup>(29, 37)</sup> ..... | 29 |
| 3.1  | การเตรียมสารประกอบ $Pb(Zr_{0.52}, Ti_{0.48})O_3$ .....  | 37 |
| 3.2  | แผนภูมิอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ (Calcination profile) .....  | 40 |
| 3.3  | แผนภูมิอุณหภูมิการเผาซินเทอร์ (Sintering profile) .....   | 40 |
| 3.4  | การเตรียมสารประกอบ $(Pb_{1-x}, Sr_x)(Zr_{0.52}, Ti_{0.48})O_3$ หรือ PSZT(X) .....   | 43 |
| 3.5  | การเตรียมแท่งเซรามิก .....  | 46 |

|  |    |
|--|----|
| 3.6 อุปกรณ์ piston extruder สำหรับอัดเซรามิกรูปแท่ง .....  | 47 |
| 3.7 การอัดและการรองรับแท่งเซรามิก .....  | 48 |
| 3.8 แท่งเซรามิกก่อนเผาซินเทอร์ .....   | 48 |
| 3.9 หลักในการวัดค่า $d_{33}$ .....   | 59 |
| 3.10 อุปกรณ์สำหรับวัดค่า $d_{33}$ .....  | 59 |
| 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของสาร PbO .....  | 62 |
| 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของสาร ZrO <sub>2</sub> .....   | 63 |
| 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคของสาร TiO <sub>2</sub> .....   | 64 |
| 4.4 การกระจายขนาดอนุภาคของสาร SrCO <sub>3</sub> .....  | 65 |
| 4.5 การกระจายขนาดอนุภาคของสาร Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....   | 66 |
| 4.6 XRD pattern ของสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมเซรามิก<br>(PbO, ZrO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , SrCO <sub>3</sub> และ Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ..... | 68 |
| 4.7 การกระจายขนาดอนุภาคของสารผสมที่บดนาน 24 ชม. ....   | 70 |
| 4.8 การกระจายขนาดอนุภาคของสารผสมที่บดนาน 26 ชม. ....   | 71 |
| 4.9 การกระจายขนาดอนุภาคของสารผสมที่บดนาน 28 ชม. ....   | 72 |
| 4.10 การกระจายขนาดอนุภาคของสารผสมที่บดนาน 30 ชม. ....  | 73 |
| 4.11 XRD pattern ของสารผสมหลังเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ .....   | 75 |
| 4.12 ความหนาแน่นของสารผสมหลังเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ .....  | 76 |
| 4.13 เปอร์เซนต์น้ำหนักสูญหายของสารผสมหลังเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ...  | 77 |
| 4.14 XRD pattern ของสาร PZT หลังเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ .....  | 79 |
| 4.15 เปอร์เซนต์น้ำหนักสูญหายของสาร PZT หลังเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ..  | 81 |
| 4.16 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงขนาดของสาร PZT หลังเผาซินเทอร์<br>ที่อุณหภูมิต่างๆ .....  | 82 |
| 4.17 จุดโครงสร้างของสาร PZT หลังเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ<br>(1) 1120 °C, 2) 1200 °C และ 3) 1280 °C) .....   | 84 |
| 4.18 ขนาดเกรนของสาร PZT กับอุณหภูมิเผาซินเทอร์ .....   | 85 |
| 4.19 XRD pattern ของสาร PSZT(2), PSZT(6) และ PSZT(10)<br>หลังเผาแคลไซน์ .....  | 88 |
| 4.20 XRD pattern ของสาร PSZT สูตรต่างๆหลังเผาซินเทอร์ .....  | 89 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.21 ค่าสัดส่วน c/a ของสาร PSZT กับปริมาณตัวเติม Sr .....  | 90  |
| 4.22 จุดโครงสร้างของสาร PSZT เมาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1280 °C<br>(1) PZT, 2) PSZT(2), 3) PSZT(4), 4) PSZT(6), 5) PSZT(8) และ<br>6) PSZT(10)) ..... | 93  |
| 4.23 ขนาดเกรนของสาร PSZT ที่มีตัวเติม Sr ในปริมาณต่างๆ .....   | 94  |
| 4.24 XRD pattern ของสาร PSZT(6) หลังเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ .....  | 98  |
| 4.25 XRD pattern ของสาร PSZT(6)/B1 หลังเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ .....   | 99  |
| 4.26 XRD pattern ของสาร PSZT(6)/B2 หลังเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ .....   | 100 |
| 4.27 ความหนาแน่นของสาร PSZT(6) ที่มีตัวเติมบิสมีทออกไซด์ .....   | 102 |
| 4.28 เปอร์เซนต์น้ำหนักสูญหายของสาร PSZT(6) ที่มีตัวเติมบิสมีทออกไซด์ .....   | 103 |
| 4.29 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงขนาดของสาร PSZT(6) ที่มีตัวเติม<br>บิสมีทออกไซด์ .....  | 104 |
| 4.30 จุดโครงสร้างสาร PSZT(6) หลังเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ<br>(1) 960 °C, 2) 1040 °C, 3) 1120 °C และ 4) 1280 °C) .....                         | 106 |
| 4.31 จุดโครงสร้างสาร PSZT(6)/B1 หลังเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ<br>(1) 960 °C, 2) 1040 °C, 3) 1120 °C และ 4) 1280 °C) .....                      | 107 |
| 4.32 จุดโครงสร้างสาร PSZT(6)/B2 หลังเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ<br>(1) 960 °C, 2) 1040 °C, 3) 1120 °C และ 4) 1280 °C) .....                      | 108 |
| 4.33 การกระจายขนาดอนุภาคของสารสำหรับอัดขึ้นรูปแท่ง .....   | 112 |
| 4.34 จุดโครงสร้างของแท่งเซรามิกอัดในช่วงความชื้นร้อยละ 12-16<br>(ไม่ดูดอากาศ) 1) ศิวค่านข้าง และ 2) ศิวหน้าตัด .....                             | 114 |
| 4.35 จุดโครงสร้างของแท่งเซรามิกอัดในช่วงความชื้นร้อยละ 12-16<br>(ดูดอากาศ) 1) ศิวค่านข้าง และ 2) ศิวหน้าตัด .....                                | 115 |
| 4.36 จุดโครงสร้างบริเวณศิวหน้าตัดของแท่งเซรามิกอัดที่ความชื้นอื่นๆ<br>1) ความชื้นร้อยละ 9 และ 2) ความชื้นร้อยละ 19 .....                         | 116 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.37 จุดโครงสร้างบริเวณผิวภายนอกแท่งเซรามิก .....                      | 117 |
| 4.38 วัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 ที่ถูกเตรียมขึ้น                           |     |
| 1) ขนาดเปรียบเทียบกับไม้บรรทัด และ 2) วัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3           |     |
| ที่มีสัดส่วนปริมาตรเซรามิกต่างๆ .....                                  | 119 |
| 4.39 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุเชิงประกอบ .....                              | 120 |
| 4.40 ผลของสัดส่วนปริมาตรเซรามิกต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบแบบ 1-3 .... | 123 |



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 สมบัติของสาร PZT และการปรับปรุงด้วยตัวเติม .....  | 22   |
| 2.2 สูตร PZT ทางการค้าของบริษัท Veritron <sup>(24)</sup> .....  | 22   |
| 3.1 สารเคมี .....   | 34   |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ .....  | 35   |
| 3.3 สูตรของสารประกอบเซรามิกและปริมาณสารตั้งต้นที่ต้องใช้<br>ในการเตรียมสารประกอบ .....  | 38   |
| 3.4 สูตร $(\text{Pb}_{0.94}, \text{Sr}_{0.06})(\text{Zr}_{0.52}, \text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ที่มีตัวเติมบิสมัทออกไซด์ ..... | 44   |
| 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของสารตั้งต้นที่ใช่เตรียมเซรามิก .....   | 61   |
| 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของสารผสมในเวลาต่างๆ .....   | 69   |
| 4.3 Lattice parameters ของสาร PZT กับอุณหภูมิเผาซินเทอร์ .....  | 78   |
| 4.4 ความหนาแน่นของสาร PZT หลังเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ .....   | 80   |
| 4.5 ช่วงความถี่ $f_r$ และ $f_s$ ของสาร PZT .....  | 85   |
| 4.6 สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริกของสาร PZT .....   | 86   |
| 4.7 Lattice parameters ของสาร PSZT สูตรต่างๆ .....  | 87   |
| 4.8 ความหนาแน่นของสาร PSZT หลังเผาซินเทอร์ .....  | 91   |
| 4.9 ช่วงความถี่ $f_r$ และ $f_s$ ของสาร PSZT .....   | 95   |
| 4.10 สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริกของสาร PSZT .....   | 96   |
| 4.11 ความหนาแน่นของสาร PSZT(6) ที่มีตัวเติมบิสมัทออกไซด์ .....  | 101  |
| 4.12 ช่วงความถี่ $f_r$ และ $f_s$ ของสาร PSZT(6) ที่มีตัวเติมบิสมัทออกไซด์ .....   | 109  |
| 4.13 สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก .....  | 110  |
| 4.14 การกระจายขนาดอนุภาคที่ใช่ในการขึ้นรูปแท่ง .....  | 111  |
| 4.15 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งเซรามิก .....  | 111  |
| 4.16 ช่วงความถี่ $f_r$ และ $f_s$ ของวัสดุเชิงประกอบ .....   | 121  |
| 4.17 สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบ .....  | 122  |