



การปรับปรุงคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของ $0.93(\text{Bi}_{0.5-x}/0.93\text{Sm}_{x/0.93}\text{Na}_{0.5})$
 $\text{TiO}_3-0.07\text{BaTiO}_3$ สำหรับเป็นแหล่งกักเก็บพลังงาน
Improvement in Ferroelectric Properties of $0.93(\text{Bi}_{0.5-x}/0.93\text{Sm}_{x/0.93}\text{Na}_{0.5})$
 $\text{TiO}_3-0.07\text{BaTiO}_3$ for Energy Storage

นางสาว ธนาภรณ์ อิมเขียว
นางสาว ลักษณา มั่นสามมุข

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ได้รับทุนอุดหนุนงบประมาณจากโครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



การปรับปรุงคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของ $0.93(\text{Bi}_{0.5-x}/0.93\text{Sm}_{x/0.93}\text{Na}_{0.5})$

$\text{TiO}_3-0.07\text{BaTiO}_3$ สำหรับเป็นแหล่งกักเก็บพลังงาน

Improvement in Ferroelectric Properties of $0.93(\text{Bi}_{0.5-x}/0.93\text{Sm}_{x/0.93}\text{Na}_{0.5})$

$\text{TiO}_3-0.07\text{BaTiO}_3$ for Energy Storage

นางสาว ธนาภรณ์ อิมเขียว

นางสาว ลักษณา มั่นสามมุข

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ได้รับทุนอุดหนุนงบประมาณจากโครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อปริญญาโท การปรับปรุงคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของ $0.93(\text{Bi}_{0.5-x}/0.93\text{Sm}_{x/0.93}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3-0.07\text{BaTiO}_3$ สำหรับเป็นแหล่งกักเก็บพลังงาน

ชื่อ นามสกุล นางสาว ธนาภรณ์ อิ่มเขียว
นางสาว ลักษณา มั่นสามุข

ชื่อปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา วัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม

คณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนพงศ์ สารอินทร์, ปร.ด.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ญัฐพงศ์ วงศ์ดำเนิน, ปร.ด.

คณะกรรมการสอบได้ให้ความเห็นชอบปริญญาโทฉบับนี้แล้ว

..... **วิไลวรรณ สِنَّะกุล** ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิไลวรรณ สِنَّะกุล, วท.ด.)

..... **จิระศักดิ์** กรรมการ
(จิระศักดิ์ ธาระจักร์, ปร.ด.)

..... **ธนพงศ์** กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนพงศ์ สารอินทร์, ปร.ด.)

..... **ญัฐพงศ์ วงศ์ดำเนิน** กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ญัฐพงศ์ วงศ์ดำเนิน, ปร.ด.)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อนุมัติให้นับปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม
วันที่ 5 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2563

| | |
|----------------|--|
| ชื่อปริญญาบัตร | การปรับปรุงคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของ $0.93(\text{Bi}_{0.5-x}/0.93\text{Sm}_x/0.93\text{Na}0.5)\text{TiO}_3 - 0.07\text{BaTiO}_3$ สำหรับเป็นแหล่งกักเก็บพลังงาน |
| ชื่อ นามสกุล | นางสาว ธนาภรณ์ อิ่มเขียว นางสาว ลักษณ์า มั่นสามมุข |
| ชื่อปริญญา | วิทยาศาสตรบัณฑิต (วัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม) |
| สาขาวิชา | วัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม |
| คณะ | วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี |
| ปีการศึกษา | 2562 |

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้ได้ตรวจสอบผลกระทบของการเติม Sm_2O_3 ในเซรามิก $0.93(\text{Bi}_{0.5-x}/0.93\text{Sm}_x/0.93\text{Na}0.5)\text{TiO}_3-0.07\text{BaTiO}_3$ โดยสารละลายของแข็งออกไซด์ผสม สมบัติความเป็นผลึกได้ใช้เทคนิค X-ray diffraction และสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกศึกษาจากวงวนพี-อี คุณสมบัติทางกายภาพพบว่าความหนาแน่นเซรามิก BSNT-BT เพิ่มขึ้นและเปอร์เซ็นต์การหดตัวลดลงจากการเพิ่มปริมาณการโด๊ป Sm_2O_3 นอกจากนี้ยังพบว่าผลการทดลองสอดคล้องกันกับการศึกษาโครงสร้างสำหรับตัวอย่างเผาที่อุณหภูมิ $950\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 7 hr. สามารถระบุได้ว่าเซรามิก BSNT-BT มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ ซึ่งเหมือนโครงสร้างหลักของเซรามิกแบบ BNT สมบัติทางไดอิเล็กทริกและการสูญเสียอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Sm_2O_3 ในเซรามิก BSNT-BT ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นและการสูญเสียอิเล็กทริกที่ต่ำซึ่งสอดคล้องกับความต้านทานของวัสดุที่ลดลง นอกจากนี้การทดสอบเฟอร์โรอิเล็กทริกพบว่าเซรามิก BSNT-BT ได้ปรับปรุงคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกเมื่อเพิ่มปริมาณ Sm_2O_3 ในเซรามิก BSNT-BT

สำคัญ : บิสมัทโซเดียมไททานต, เฟอร์โรอิเล็กทริก, เพียโซอิเล็กทริก, วัสดุเก็บพลังงาน

| | |
|----------------------|---|
| Project title | Improvement in Ferroelectric Properties of $0.93(\text{Bi}_{0.5-x}/0.93\text{Sm}_x/0.93\text{Na}0.5)\text{TiO}_3 - 0.07\text{BaTiO}_3$ for Energy Storage |
| Author | Miss Thanapohm Imkheaw Miss Luksana Munsamook |
| Degree | Bachelor of Science (Industrial Materials Science) |
| Major program | Industrial Materials Science Faculty of science and technology |
| Academic Year | 2019 |

ABSTRACT

In this study, we investigated the effects of Sm_2O_3 addition in ceramics $0.93(\text{Bi}_{0.5-x}/0.93\text{Sm}_x/0.93\text{Na}0.5)\text{TiO}_3 - 0.07\text{BaTiO}_3$ by mixing solid oxide solutions. The crystalline properties of the X-ray diffraction and ferroelectric properties were studied from the P - E loop. The physical properties showed that BSNT-BT ceramic density increased and the percentage of shrinkage decreased due to the increase of the amount of Sm_2O_3 . Moreover, it was found that the results were consistent with the structural study for sintered samples at a temperature of $950\text{ }^\circ\text{C}$ for 7 hours. It can be determined that the BSNT-BT ceramics have a perovskite structure, which is like the main structure of ceramic type BNT. Dielectric properties and dielectric losses at room temperature showed that when increasing the amount of Sm_2O_3 in BSNT-BT ceramics, the dielectric and low dielectric loss were consistent with reduced material resistance. Further, the ferroelectric test found that BSNT-BT ceramics improved the ferroelectric properties when increasing the amount of Sm_2O_3 in the BSNT-BT ceramics.

Keywords: Bismuth sodium titanate, Ferroelectric, Piezoelectric, Energy storage material

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร. ธนพงศ์ สารอินทร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย รวมถึง ผศ.ดร. วิไลวรรณ ลีชะกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร. จิระศักดิ์ ธาระจักร์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและเสนอแนะสิ่งที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย ส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของทุกท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ รศ.ดร. จักรพงษ์ แก้วขาว ผู้เสนอแนะแนวทางการดำเนินงาน ให้คำปรึกษา รวมถึงความกรุณาในการอนุญาตในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ที่มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.กิติพันธ์ บุญอินทร์ ผู้ให้คำปรึกษา คำแนะนำแนวทางในการดำเนินงาน วิจัย และสอนการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในการดำเนินงาน ที่มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จนทำให้สามารถแก้ปัญหาต่าง ๆ ไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ดร. รัชพงศ์ วงษ์ดำเนิน ผู้เสนอแนะแนวทางในการวิเคราะห์งานวิจัย ให้คำปรึกษา คำแนะนำในการปัญหาต่าง ๆ รวมถึงความกรุณาอนุญาตในการใช้เครื่องมือ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จนทำให้วิจัยมีความก้าวหน้ามากยิ่งขึ้น และสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณนายพีระพงษ์ แยมชุมพร และรุ่นพี่ที่ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยี แก้วและวัสดุศาสตร์ ที่มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐมทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ปรึกษาปัญหาต่าง ๆ และประสบการณ์ใหม่ ๆ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัย

ขอขอบคุณคณาจารย์ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ทุกท่านที่เคยสั่งสอนและให้ความรู้ จนก่อให้เกิดความรู้และสามารถนำมาช่วยในการวิจัยครั้งนี้ได้เป็นอย่างมาก

ธนาภรณ์ อิ่มเขียว

ลักษณา มั่นสามุข

สารบัญ

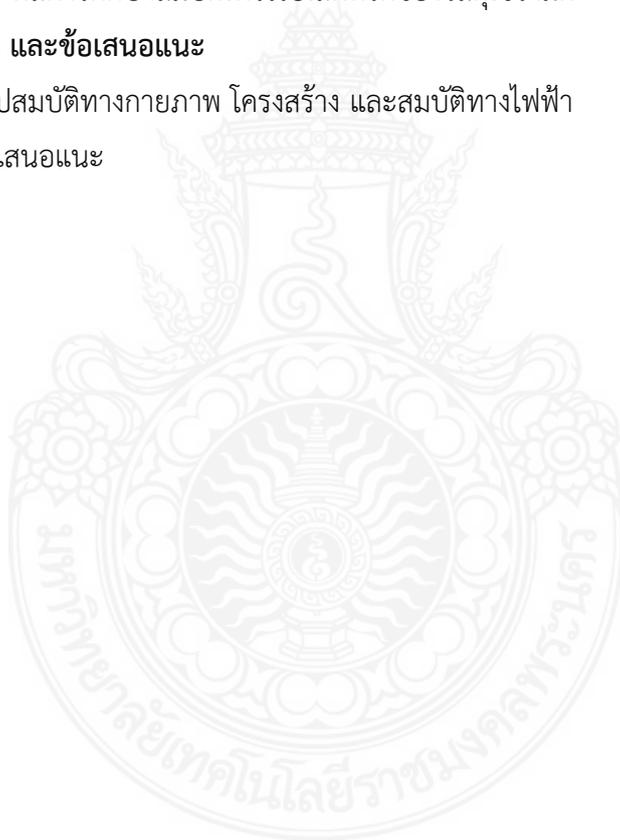
| เรื่อง | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ | ก |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญภาพ | ช |
| สารบัญตาราง | ณ |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์โครงการ | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการ | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| 1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน | 3 |
| บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | |
| 2.1 ทฤษฎี โครงสร้างพื้นฐาน | 4 |
| 2.1.1 เครื่องเอกซเรย์ดีฟแฟรกโตมิเตอร์ | 4 |
| 2.1.2 อิเล็กโทรเซรามิก | 6 |
| 2.1.3 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ไพโรไลติกและอิเล็กโทรสตรักทิว | 8 |
| 2.1.4 เฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก | 10 |
| 2.1.5 สมบัติไดอิเล็กทริก | 15 |
| 2.1.6 การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี | 17 |
| 2.1.7 โครงสร้างของเพอร์อฟสไกต์ | 20 |
| 2.2 กระบวนการเตรียม | 22 |
| 2.2.1 การบดผสมสาร | 24 |
| 2.2.2 การทดสอบการหดตัวจากการเผา | 26 |
| 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 27 |

สารบัญ (ต่อ)

| เรื่อง | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน | |
| 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย | 30 |
| 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร | 30 |
| 3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการบดผสมสาร | 30 |
| 3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเผาแคลไซน์และซินเตอร์ | 30 |
| 3.1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเซรามิก | 31 |
| 3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์ | 31 |
| 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย | 31 |
| 3.3 ขั้นตอนการวิจัย | 32 |
| 3.3.1 การออกแบบสูตรทางเคมีของเซรามิก | 32 |
| 3.3.2 กระบวนการบดผสมสาร | 32 |
| 3.3.3 การเผาแคลไซน์ | 33 |
| 3.3.4 การอัดขึ้นรูปเซรามิก | 33 |
| 3.3.5 การเผาซินเตอร์ | 34 |
| 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลวิจัย | 35 |
| 3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น | 35 |
| 3.4.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ | 36 |
| 3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก | 36 |
| 3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก | 37 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผล | |
| 4.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิกบิสมัทโซเดียมไททาเนต | 38 |
| 4.1.1 ลักษณะของเซรามิกที่เตรียม | 38 |
| 4.1.2 ความหนาแน่น | 39 |
| 4.1.3 ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นกับปริมาณความเข้มข้น | 40 |

สารบัญ (ต่อ2)

| เรื่อง | หน้า |
|--|------|
| 4.2 การศึกษาโครงสร้างของเซรามิกบิสมัทโซเดียมไททานต | 41 |
| 4.2.1 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์หลังจากแคลไซน์ | 41 |
| 4.2.2 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์หลังจากซินเตอร์ | 42 |
| 4.3 การศึกษาโครงสร้างสมบัติทางไฟฟ้า | 43 |
| 4.3.1 ผลการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BSNT-BT | 43 |
| 4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติอิมพีแดนซ์ของวัสดุเซรามิก BSNT-BT | 45 |
| 4.3.3 ผลการศึกษาสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก | 47 |
| บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ | |
| 5.1 สรุปสมบัติทางกายภาพ โครงสร้าง และสมบัติทางไฟฟ้า | 48 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 49 |
| บรรณานุกรม | 50 |
| ภาคผนวก | 56 |
| ประวัตินักศึกษา | 62 |



สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| ภาพที่ 2.1 พิสูจน์กฎของแบรกก์ | 5 |
| ภาพที่ 2.2 การแบ่งกลุ่มผลึกของวัสดุใน 32 กลุ่ม | 7 |
| ภาพที่ 2.3 ปรัชญาการณเพียโซอิเล็กทริก | 9 |
| ภาพที่ 2.4 โดเมนของเฟอร์โรอิเล็กทริกและผนังโดเมน | 11 |
| ภาพที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของผนังโดเมนในแต่ละเกรนภายในวัสดุ | 12 |
| ภาพที่ 2.6 ภาพแสดงวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิส | 13 |
| ภาพที่ 2.7 ลักษณะเป็นแบบวงวนภาพผีเสื้อ | 14 |
| ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า – ศักย์ไฟฟ้า | 18 |
| ภาพที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงกับส่วนจินตภาพ | 19 |
| ภาพที่ 2.10 เซลล์หน่วยของโครงสร้าง perovskite ที่ไม่ได้เรียงกัน | 21 |
| ภาพที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงผลึกโครงสร้างของแบเรียมไททาเนตที่อุณหภูมิต่าง ๆ | 22 |
| ภาพที่ 2.12 การแปรผันของผลึก BaTiO ₃ กับอุณหภูมิ | 22 |
| ภาพที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคและเวลาที่ใช้ในการบดย่อย | 25 |
| ภาพที่ 2.14 ลักษณะการหมุนของหม้อบด และการเคลื่อนที่ของลูกบด | 26 |
| ภาพที่ 2.15 กราฟฮิสเทอรีซิสลูปBNBT-xKN | 28 |
| ภาพที่ 3.1 เครื่องบดผสมสารแบบหมุนวน (ก) | 32 |
| ภาพที่ 3.1 กวนสาร (ข) | 32 |
| ภาพที่ 3.1 อบแห้งสาร (ค) | 32 |
| ภาพที่ 3.2 เตาเผา (ก) | 33 |
| ภาพที่ 3.2 อุณหภูมิที่ใช้เผาแคลไซน์ (ข) | 33 |
| ภาพที่ 3.3 เบ้าอัดชิ้นงาน (ก) | 34 |
| ภาพที่ 3.3 ชิ้นงาน (ข) | 34 |
| ภาพที่ 3.4 เตาเผา (ก) | 34 |
| ภาพที่ 3.4 อุณหภูมิที่ใช้เผาซินเตอร์ (ข) | 34 |
| ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดความหนาแน่น | 35 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| ภาพที่ 3.6 เตรียมชิ้นงาน (ก) | 36 |
| ภาพที่ 3.6 วัดค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (ข) | 36 |
| ภาพที่ 3.7 วัดค่าไดอิเล็กทริก (ก) | 37 |
| ภาพที่ 3.7 วัดค่าไดอิเล็กทริก (ข) | 37 |
| ภาพที่ 3.8 ทำให้ชิ้นงานแห้ง (ก) | 37 |
| ภาพที่ 3.8 วัดค่าสมบัติทางไฟฟ้า (ข) | 37 |
| ภาพที่ 4.1 ลักษณะของเซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ | 38 |
| ภาพที่ 4.2 แสดงความหนาแน่นของเซรามิก | 39 |
| ภาพที่ 4.3 ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นกับปริมาณความเข้มข้น | 40 |
| ภาพที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) หลังจากแคลไซน์ | 41 |
| ภาพที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) หลังจากซินเตอร์ | 42 |
| ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) | 43 |
| ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (ข) | 43 |
| ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงส่วนจริง (ก) ไดอิเล็กทริก | 44 |
| ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงส่วนจินตภาพ (ข) ไดอิเล็กทริก | 44 |
| ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงค่าส่วนจริง (ก) และความถี่ของอิมพีแดนซ์ของเซรามิก | 45 |
| ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงค่าส่วนจินตภาพ (ข) และความถี่ของอิมพีแดนซ์ของเซรามิก | 45 |
| ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริง (Z') และส่วนจินตภาพ (Z'') ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z^*) ของเซรามิก | 46 |
| ภาพที่ 4.10 P-E Hysteresis Loop ของเซรามิกที่เจือ Sm_2O_3 ที่ $x = 0.04$ (ก) | 47 |
| ภาพที่ 4.10 P-E Hysteresis Loop ของเซรามิก ที่เจือ Sm_2O_3 ที่ $x = 0.05$ (ข) | 47 |

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

ตารางที่ 1. 1 แผนการดำเนินงาน

3



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

วัสดุอิเล็กทรอนิกส์เซรามิกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษทางไฟฟ้า สมบัติทางแม่เหล็ก หรือสมบัติทางแสง โดยวัสดุในกลุ่มเซรามิกมีการนำไปประยุกต์ใช้หลายประเภท ได้แก่ การนำวัสดุไปพัฒนาให้มีสมบัติเชิงแสงสำหรับใช้ในทางการแพทย์ การใช้วัสดุทางการแพทย์ การประยุกต์ใช้วัสดุในการบังคับแสงให้มีการเคลื่อนที่ไปทางเดียว ตัวรับ-ส่งสัญญาณคลื่นความถี่ แสงเลเซอร์สำหรับการทำความสะอาดผิวชิ้นงาน การประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีโทรคมนาคมและการพัฒนาเป็นแหล่งกักเก็บพลังงาน แต่เนื่องจากในปัจจุบันเทคโนโลยีวัสดุมีบทบาทความสำคัญมากในอุตสาหกรรม และมีความก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้เทคโนโลยีในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ต้องพัฒนาวัสดุให้มีความก้าวหน้า เพื่อยกระดับและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมวัสดุให้เข้ากับเทคโนโลยี 4.0 ให้สามารถตอบสนองเทคโนโลยีในปัจจุบันได้อย่างมีประสิทธิภาพมาก และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายด้านมากขึ้น

ปัจจุบันเลเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) มีคุณสมบัติเพโรอิเล็กทริกที่โดดเด่น แต่มีความพิษสูง สามารถถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย ซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์และธรรมชาติได้ [1] ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวัสดุเซรามิกบิสมาต์โซเดียมไททาเนต ($\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$) หรือ BNT มาพัฒนาเพื่อใช้ทดแทนวัสดุ PZT เนื่องจากมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี เป็นมิตรกับมนุษย์และสิ่งแวดล้อม [2] ซึ่งมีแนวโน้มที่จะนำมาพัฒนาได้ เช่น อัลตราซาวด์ความถี่สูง [3] เครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิก [4] และความเข้มสูงทรานสดิวเซอร์โฟกัส [5] และในส่วนของซามอเรียียม (Samarium oxide) เป็นธาตุหายากชนิดหนึ่งในกลุ่มแลนทาไนด์ (lanthanide) มีคุณสมบัติในการเกิดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่มีความเข้มสูง นำมาใช้ในงานในด้านการประยุกต์ใช้ในการเป็นฉนวนทางเลือก เซมิคอนดักเตอร์ [6] การใช้งานการแสดงผลเซ็นเซอร์และแสงไฟฟ้า [7] ซึ่งเป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญในการนำไปพัฒนาให้สามารถใช้งานได้หลากหลายด้านมากขึ้น

โครงการนี้จึงเล็งเห็นความสำคัญของการพัฒนาวัสดุเซรามิกไร้สารตะกั่วที่มีความสามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงาน โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเพโรอิเล็กทริก และคุณสมบัติใน

การนำไฟฟ้า เพื่อศึกษาแนวทางและองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วให้มีคุณสมบัติที่หลากหลาย สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกักเก็บพลังงาน และการพัฒนาทางเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าในยุคปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์โครงการ

1.2.1 เพื่อปรับปรุงสมบัติ Ferroelectric ของ $0.93(\text{Bi}_{0.5-x}/0.93\text{Sm}_{x/0.93}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3 - 0.07\text{BaTiO}_3$ สำหรับแหล่งเก็บพลังงาน

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก และสมบัติการนำไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ไม่เกิน $1,400\text{ }^{\circ}\text{C}$

1.3.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก และสมบัติการนำไฟฟ้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

8.1 ได้เรียนรู้กระบวนการเตรียมเซรามิก และกระบวนการเผาเซรามิก

8.2 ได้ทราบถึงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก

$0.93(\text{Bi}_{0.5-x}/0.93\text{Sm}_{x/0.93}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3 - 0.07\text{BaTiO}_3$

8.3 เซรามิกที่ได้ออกมาสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเก็บกักพลังงาน

8.4 ได้เทคนิคในการใช้เครื่องมือในการวัดค่าสมบัติต่าง ๆ ของเซรามิก

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

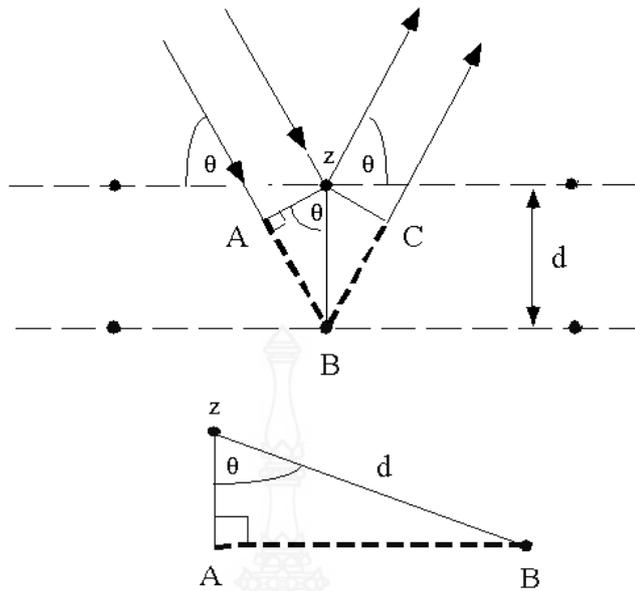
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี โครงสร้างพื้นฐานกลไกของการเกิดโพลาริเซชัน การสลับเปลี่ยนทิศ ของโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวัสดุเพอโรอิเล็กทริก วิธีการสังเคราะห์สารประกอบ BSNT-BT และได้อธิบายถึงการเติมสารเจือเพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้าง และการเติมเพื่อปรับเปลี่ยนพฤติกรรมกรรมการเผาผนึก

2.1 ทฤษฎี โครงสร้างพื้นฐาน

2.1.1 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD)

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่างหรือชิ้นงาน (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ และความรู้เกี่ยวกับวิจาาระบบโครงสร้างผลึก [8] เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพการผลิต ใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตตามขั้นตอนต่าง ๆ

ในปี ค.ศ.1912 W.L. Bragg ได้เสนอกฎของแบรกก์ (Bragg's law) อธิบายการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีผ่านชั้นอิเล็กตรอนในผลึก โดยเสนอแนวคิดบนพื้นฐานของการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ว่า ผลึกประกอบไปด้วยชั้นหรือระนาบของอะตอมซึ่งสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน หากความแตกต่างระหว่างทางเดินคลื่น (Path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ [9] คลื่นจะสะท้อนออกไปดังภาพที่ 2.1 รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบผิวหน้าของผลึกทำมุม θ โดยเรียกว่า ความแตกต่างระหว่างทางเดินคลื่นเป็นไปตามสมการ (2.1)



ภาพที่ 2.1 พิสูจน์กฎของแบรกก์ [10]

กฎของแบรกก์สามารถพิสูจน์ได้จากภาพที่ 2.1 โดยให้รังสีตกกระทบทั้ง 2 ลำ มีเฟสตรงกัน ทำมุม θ กับระนาบรังสีที่หนึ่งตกกระทบเข้ากับระนาบบน และสะท้อนออกมาทำมุม θ กับระนาบ ส่วนรังสีที่สองกระทบเข้ากับระนาบถัดไปและสะท้อนออกมาทำมุม θ กับระนาบที่สองโดยรังสีที่สอง จะเคลื่อนที่เป็นระยะทางเพิ่มขึ้น $AB + BC$ แทรกสอดกับคลื่นลำที่หนึ่งซึ่งคลื่นอาจจะแทรกสอดแบบเสริม หักล้าง หรือ แทรกสอดกันแบบไม่ตรงเฟสกันได้ แต่ถ้าจะให้มีการแทรกสอดแบบเสริมกัน ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ขึ้นมานั้นจะต้องเท่ากับจำนวนเต็ม (n) คูณกับความยาวคลื่น ดังนี้

$$n\lambda = AB + BC \quad (2.1)$$

พิจารณาสัมเหลี่ยมมุมฉาก ABz จะได้

$$AB = d \sin \theta \quad (2.2)$$

เพราะว่า $AB = BC$ ดังนั้นสมการที่ (2.1) จะเปลี่ยนเป็น

$$n\lambda = 2AB \quad (2.3)$$

แทนค่าจากสมการที่ (2.2) ลงในสมการที่ (2.3) จะได้

$$n\lambda = 2 d \sin \theta \quad (2.4)$$

โดยที่ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ (hkl)

θ คือ มุมตกกระทบ

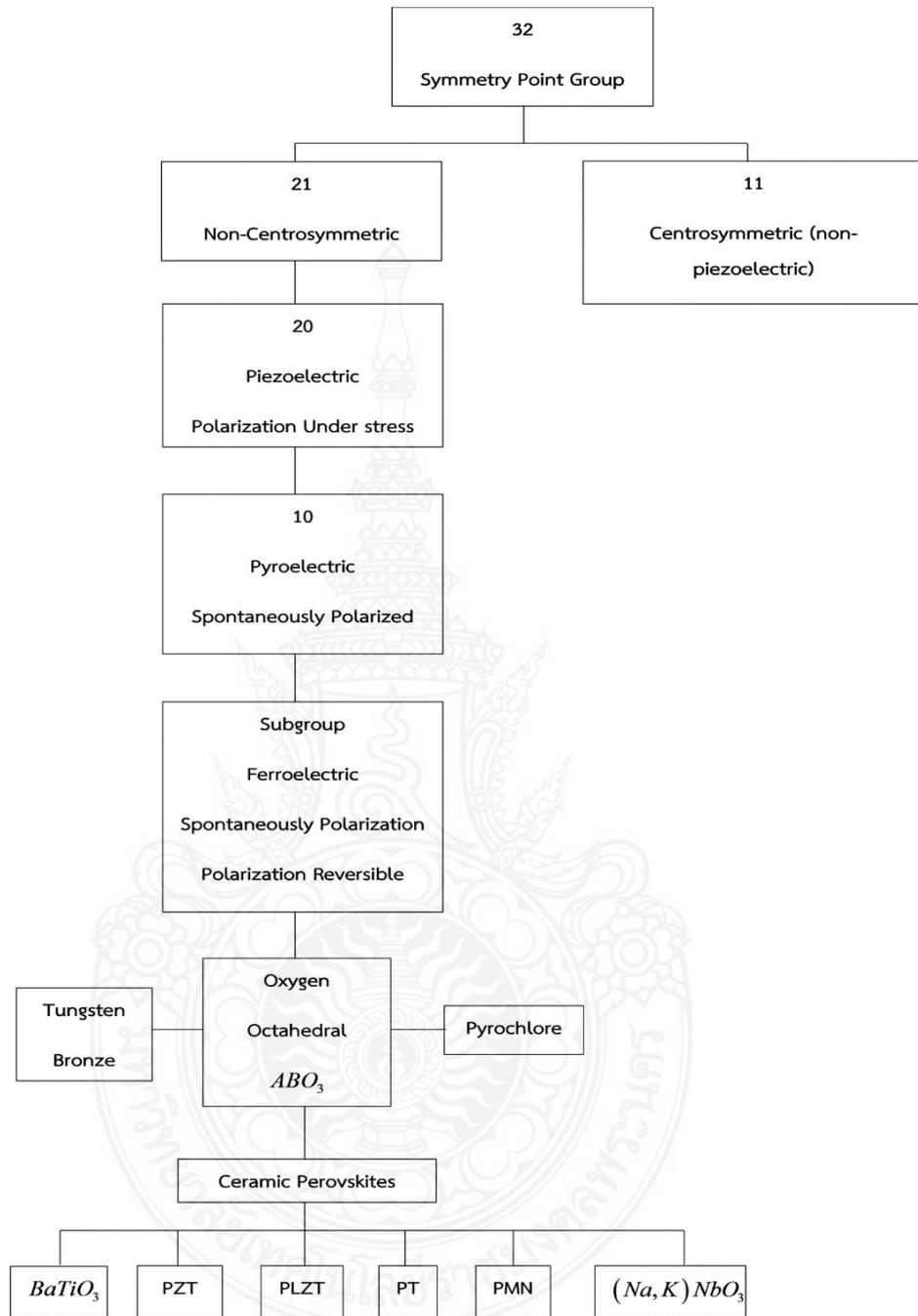
λ คือ ความยาวคลื่น

n คือ จำนวนเต็ม

2.1.2 อิเล็กโทรเซรามิก (electro ceramics)

อิเล็กโทรเซรามิก (electro ceramics) จัดเป็นเซรามิกชั้นสูงในกลุ่มที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ แม่เหล็ก และคุณสมบัติทางแสง โดยจะนิยมนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นหลัก เมื่อได้ศึกษาในทางทฤษฎีซึ่งจะได้อธิบายอย่างละเอียด พบว่าสมบัติเหล่านี้เป็นผลจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสิ่งรบกวนภายนอก ซึ่งเป็นที่มาของชื่อ “อิเล็กโทรเซรามิก” ซึ่งเป็นกลุ่มเซรามิกที่มีมากมายหลายชนิดและ ครอบคลุมสมบัติด้านต่าง ๆ หลายอย่าง ได้แก่ ไฟฟ้า แม่เหล็ก แสง และความร้อน ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น ตัวอย่างเช่นเซรามิกไดอิเล็กทริก (dielectric ceramics) เช่น แบเรียมไทเทเนต (barium titanate, BaTiO_3) สำหรับใช้ทำตัวเก็บประจุไฟฟ้า เซรามิกเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric ceramics) ซึ่งเป็นเซรามิกที่สามารถเปลี่ยนภาพพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้ากลับไปได้ ตัวอย่างเช่น เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (lead zirconate titanate, $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$) สำหรับใช้ทำทรานสดิวเซอร์ (transducer) ตัวจุดเตาแก๊ส (gas ignitor) มอเตอร์อัลตราโซนิค (ultrasonic motor) และเซรามิกแม่เหล็ก (magnetic ceramics) เช่น เฟอร์ไรต์ (ferrite, Fe_3O_4) ซึ่งใช้เป็นวัสดุบันทึกข้อมูล อิเล็กโทรเซรามิกอาจมีภาพร่างได้หลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เช่น ชิ้นส่วนต้น (bulk) เคลือบบนผิววัสดุชนิดอื่น (coating) ฟิล์มหนา (thick film) และฟิล์มบาง (thin film)

การที่จะศึกษาสมบัติอิเล็กโทรเซรามิกนั้นจะต้องเข้าใจถึงระบบผลึกซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่กล่าวมา ซึ่งผลึกของวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พวกที่มีศูนย์กลางของลักษณะสมมาตร (Centro-symmetric) และพวกที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง (Non Centro-symmetric) ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 32 กลุ่ม โดยมี 21 กลุ่มเป็นพวกไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง ใน 21 กลุ่มนี้จะพบว่า มี 20 กลุ่มเป็นพวกเพียโซอิเล็กทริกและมี 10 กลุ่มจาก 20 กลุ่มนี้เป็นพวกไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric) ซึ่งวัสดุจะเกิดโพลาริเซชันแบบถาวรในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง โดยพบว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นเป็นกลุ่มย่อยของสารไพโรอิเล็กทริก ดังภาพที่ 2.2 เนื่องจากการไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง เป็นสถานะสำคัญทำให้เกิดเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากแรงกลที่ให้กับวัสดุเป็นแบบไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง และไม่สามารถทำให้เกิดการโพลาริเซชัน เช่น การเกิดโพลาริเซชันแบบเวกเตอร์ (Vector-quality-like-polarization) นอกจากวัสดุนั้นจะไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง ซึ่งทำให้ผลรวมของการเคลื่อนที่ของประจุบวกและลบสามารถสร้างไดโพลไฟฟ้า (electric dipole) หรือที่เรียกว่าเกิดโพลาริเซชัน (polarization)



ภาพที่ 2.2 การแบ่งกลุ่มผลึกของวัสดุใน 32 กลุ่ม [11]

วัสดุไพโรอิเล็กทริกพัฒนาการเกิดโพลาริเซชันด้วยตัวเอง และทำให้เกิดสภาพมีขั้วถาวรในโครงสร้าง การเกิดโพลาริเซชันนี้มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เรียกว่าสภาพไพโรอิเล็กทริกหมายถึง

สภาพที่มีแกนขั้วแบบเฉพาะภายในระบบพลีกค่าไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) ทั้งหมดแปรผันกับอุณหภูมิ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเครื่องหมายของกระแสที่ได้จากผลึก

ส่วนวัสดุชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้นจะคล้ายกับวัสดุโพโรอิเล็กทริกในด้านที่สามารถเกิดขั้วตัวเองได้ คือ ขั้วเหล่านี้มีการสลับได้ด้วยกระแสไฟฟ้าค่าใดค่าหนึ่งที่น้อยกว่าค่า dielectric breakdown ของวัสดุเอง ในขณะที่สารโพโรอิเล็กทริกทำไม่ได้ ดังนั้นในการแยกวัสดุโพโรอิเล็กทริกออกจากสารอื่นคือ สามารถเกิดโพลาไรเซชันเองได้ และโพลาไรเซชันสามารถสลับทิศทางได้ ส่วนความแตกต่างของวัสดุที่เป็นเพียโซอิเล็กทริกกับเฟอร์โรอิเล็กทริก จึงไม่สามารถเกิดโพลาไรเซชันด้วยตัวเอง แต่จะเกิดเมื่อได้รับแรงทางกลต่อผลึกเท่านั้น ซึ่งสภาพเพียโซอิเล็กทริกเกิดได้ 2 แบบ ได้แก่แบบที่เป็นเส้นตรง และเครื่องหมายประจุที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับว่าแรงที่ให้เป็นแรงดึงหรือแรงกด

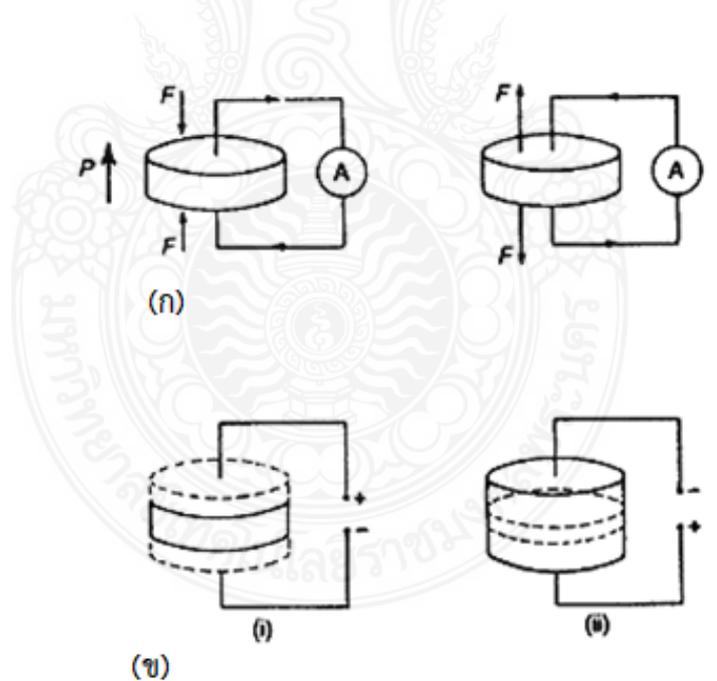
ในช่วงสงครามโลกครั้งที่สองได้ค้นพบตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงได้ถูกนำมาใช้กันจนกระทั่งปัจจุบัน เช่น เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) และเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต (PLZT) ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงเพราะมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก ต่อมามีการพบว่าทำให้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกสามารถจัดเรียงโดเมนในเกรน ทำให้ได้เซรามิกที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและเพียโซอิเล็กทริกได้ การจัดเรียงตัวด้วยกระแสไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าการสร้างขั้ว (poling) ซึ่งเปลี่ยนเซรามิกที่เฉื่อยไปเป็นวัสดุที่ตอบสนองต่อกลไฟฟ้า (electromechanical) งานวิจัยเหล่านี้ทำให้เปลี่ยนแนวความคิดที่ว่าสารเซรามิกไม่มีทางเป็นเพียโซอิเล็กทริกเนื่องจากผลึกที่ผ่านการเผาซินเตอร์ จะมีการจัดเรียงตัวแบบไม่มีทิศทางและมีผลให้โพลาไรเซชันโดยรวมมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ามีเหตุการณ์พื้นฐานสามขั้นตอนที่ทำให้เกิดความรู้ ซึ่งส่งผลให้เกิดความเข้าใจปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกและเฟอร์โรอิเล็กทริก

2.1.3 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกและอิเล็กโตรสตริกทีฟ

ปรากฏการณ์ไฟฟ้าพลังดันหรือปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้ถูกค้นพบในระหว่างที่ทำการศึกษเกี่ยวกับผลของแรงดันที่มีต่อการเกิดประจุไฟฟ้าของผลึกซึ่งคำว่า “เพียโซ” เป็นภาษากรีก หมายถึง แรงดันหรือแรงกด ดังนั้นปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกจึงเป็นปรากฏการณ์ที่แสดงถึงการสร้างประจุไฟฟ้าให้เกิดขึ้นอันเป็นผลมาจากแรงกดอัดเชิงกล (mechanical force) หรืออีกนัยหนึ่งคือเป็นปรากฏการณ์ที่ใช้เรียกการเกิดกระบวนการแยกขั้วไฟฟ้า (electric polarization) ขึ้นในวัสดุเมื่อได้รับความเครียดเชิงกล (mechanical strain) ซึ่งการแยกขั้วไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นสัดส่วนกับความเครียดที่วัสดุนั้นได้รับ

วัสดุทุกตัวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กน้อยเมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าถ้าความเครียด (strain) ที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้ากำลังสองเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์อิเล็กโตรสตริกทีฟ (electrostrictive effect) ในขณะที่วัสดุบางตัวจะแสดงปรากฏการณ์

ในทางตรงกันข้ามคือมีการเกิดโพลาริเซชันทางไฟฟ้า (electrical polarization) ขึ้นเมื่อเกิดความเครียดในวัสดุเนื่องจากความเค้น (stress) ที่ให้เข้าไปปรากฏการณ์ลักษณะนี้เรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric effects) โดยการประมาณอย่างคร่าว ๆ ถ้าการเกิดโพลาริเซชัน (polarization) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้นจะเรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง (direct piezoelectric effect) และในทางกลับกันวัสดุเพียโซอิเล็กทริกยังสามารถที่จะมีการเกิดขึ้นของความเครียด ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม (converse piezoelectric effect) ถ้าแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ดังภาพที่ 2.3 ซึ่งจะมีขั้วในทิศทางแสดงด้วย P ที่มีขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรดบนผิวหน้าทั้งสองดั่งนั้นแรงเค้นอัด (compressive stress) จะทำให้เกิดกระแสชั่วคราวไหลผ่านวงจรข้างนอกโดยที่แรงเค้นดึง (tensile stress) จะมีผลทำให้กระแสไหลในทิศทางตรงกันข้าม ดังภาพที่ 2.3 (ก) แต่ในทางกลับกันสนามไฟฟ้าที่ให้กับแผ่นวัสดุทำให้เกิดความเครียดในผลึกไม่ว่าจะเป็นในลักษณะความเครียดอัด (compressive strain) หรือถ้าสนามไฟฟ้าถูกกลับตัวจะทำให้เกิดความเครียดดึง (tensile strain) ดังภาพที่ 2.3 (ข) การเปลี่ยนแปลงสภาพการมีขั้วซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรงจะนำไปสู่การเกิดของประจุพื้นผิวผลึกและการเกิดกระแสถ้าในกรณีที่เป็นวนจรปิด (closed circuit)

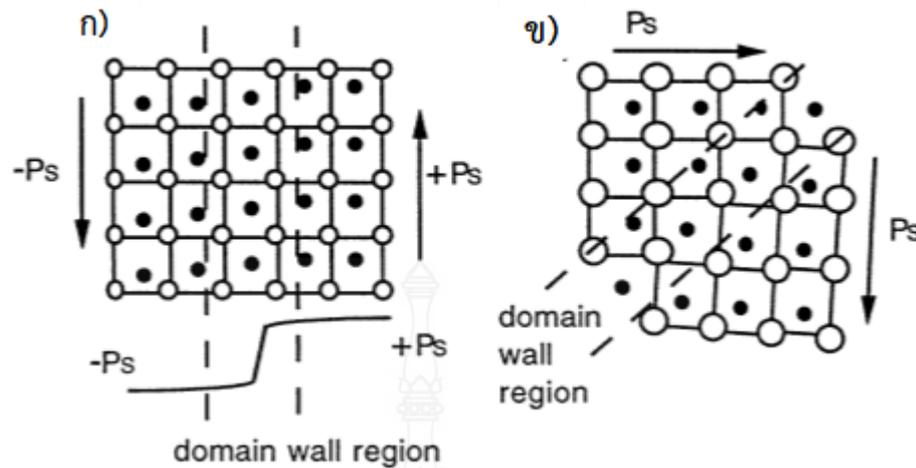


ภาพที่ 2.3 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (ก) โดยตรง และ (ข) โดยอ้อม เมื่อ (i) จะแสดงการหดตัว และ (ii) แสดงจะการขยายตัว (เส้นประจะแสดงขนาดของวัสดุในตอนเริ่มต้น) [11]

2.1.4 เฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก

สารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectrics) เป็นวัสดุที่มีแกนเชิงขั้วเอกภูมิ (unique polar axis) ที่สามารถจะปรับเปลี่ยนทิศทางการวางตัวได้โดยอาศัยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ซึ่งขอบเขตของความสามารถในการปรับแนวแกนเชิงขั้วของผลึกภายในเซรามิกนั้น ถูกกำหนดโดยแนวการวางตัวแบบสุ่มของตัวผลึกเอง แต่ก็เพียงพอที่จะทำให้ผลึกเชิงซ้อนแบบไอโซทรอปิก (isotropic) เปลี่ยนสภาพไปเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) ที่มีขั้วได้ สภาพขั้วนี้จะส่งผลทำให้เกิดพฤติกรรมแบบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric) และไฟฟ้าเชิงแสง (electrooptic) ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น โซนาร์ (sonars) เครื่องทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิค (ultrasonic cleaners) เครื่องตรวจจับด้วยรังสีอินฟราเรด (infrared detectors) และตัวประมวลผลด้วยแสง (light processors) ซึ่งการประดิษฐ์วัสดุเหล่านี้ให้อยู่ในรูของผลึกเชิงเดี่ยว

จากการศึกษาพฤติกรรมเฟอร์โรอิเล็กทริก นอกจากจะศึกษาเรื่องของโครงสร้างหน่วยเซลล์หรือระดับจุลภาค (microscopic) การใช้งานจริง การศึกษาสมบัติของหน่วยเซลล์โดยรวมหรือในระดับมหภาค (microscopic properties) มีความสำคัญเนื่องจากหน่วยเซลล์เดี่ยวและหน่วยเซลล์โดยรวมมีความสัมพันธ์กันที่จะส่งผลถึงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก เช่น ในผลึกเดี่ยวเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีจะมีการจัดเรียงทิศทางของขั้วด้วยตัวเองภายในผลึกในแต่ละหน่วยเซลล์ (unit cell) ที่บริเวณผลึกเดี่ยวประกอบไปด้วยการจัดเรียงขั้วไปในทิศทางเดียวกันจำนวนมากเรียกว่าโดเมน (domain) หรืออาจกล่าวได้ว่าบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง (P_s) ในช่วงอุณหภูมิที่แน่นอนเรียกว่าโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric domains) ขอบรอยต่อของแต่ละโดเมนที่เรียงตัวต่างกันเรียกว่าผนังโดเมน (domain wall) [12] โดยธรรมชาติแล้วขนาดของโดเมนจะถูกจำกัดด้วยพลังงานไฟฟ้าสถิต (electrostatic energy) ของระบบเพราะพลังงานของระบบมีมาก และไม่เสถียรถ้าการจัดเรียงขั้วจัดเรียงไปในทิศทางเดียวกันดังนั้นโดเมนส่วนใหญ่จึงจัดเรียงตัวไปคนละทิศทางจนหักล้างกันหมดเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตาม อาจมีเพียงโดเมนเดียวเมื่อให้สนามไฟฟ้ามาก ๆ เพราะโดเมนทั้งหมดจะจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามไฟฟ้าทำมีวัสดุพหุผลึก (polycrystalline) ภาพแบบการจัดเรียงขั้วต่างออกไปจากผลึกเดี่ยวเนื่องจากโดเมนแต่ละเกรนถูกจำกัดไว้ด้วยโดเมนรอบข้างในขณะที่ผลึกเดี่ยวไม่ได้ถูกจำกัดไว้ [13] นอกจากนี้โดเมนเพียงอันเดียวไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุพหุผลึก เพราะมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของผลึกในแต่ละเกรน และไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้จากสนามไฟฟ้า ถ้าในหนึ่งเกรนมีโดเมนมากกว่าหนึ่ง โดยผนังโดเมนเหล่านี้จะแตกต่างกันตามวัฏภาคของผลึก (crystal phase) ดังภาพที่ 2.4 ตัวอย่างเช่น วัฏภาคเตตระโกนอล การจัดเรียงตัวเป็นไปตามทิศทางของแกน C ซึ่งมีผนังโดเมนสองประเภท คือ ผนังโดเมนที่มีแยกจากกันแบบไม่ขนานกันเรียกว่า ผนังโดเมน 180° (180° domain wall) และผนังโดเมนแต่ละอันที่จัดเรียงแบบ 90° เรียกว่า ผนังโดเมน 90° (90° domain wall) [13] ดังภาพที่ 2.4



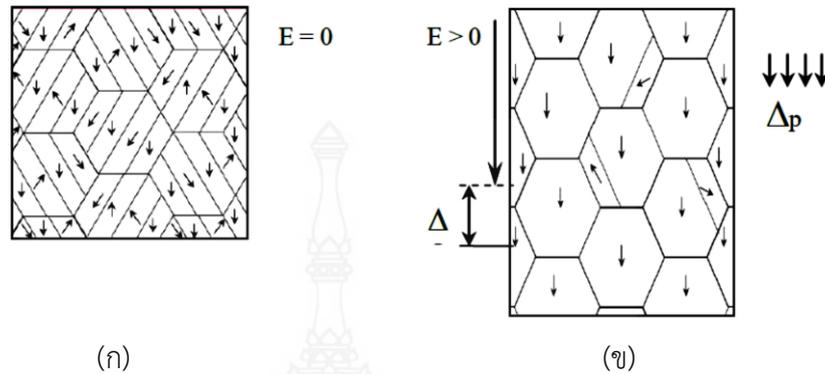
ภาพที่ 2.4 แสดงภาพ (ก) 180° และ (ข) โดเมนของเฟอร์โรอิเล็กทริกและผนังโดเมน ภายในโครงสร้างเตตระโกนอล [14]

ในกรณีวัฏภาคอโรมโบฮีดรอล (rhombohedral) การจัดเรียงตัวเป็นไปแบบเส้นทแยงมุมตามโครงสร้าง ดังนั้นมุมระหว่างโดเมนที่ติดกันจะทำมุม 70.5° และ 110° เรียกว่า ผนังโดเมน 70.5° ผนังโดเมน 110° ตามลำดับ ความกว้างของขนาดผนังโดเมนอยู่ที่ 10 nm แต่จะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิและความบริสุทธิ์ของผลึก

ตามทฤษฎีแล้วสถานะของโดเมน หรือการเรียงตัวของโดเมนในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกสามารถปรับหรือจัดเรียงใหม่ได้โดยการให้สนามไฟฟ้าหรือความเค้นจากแรงทางกลการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของโดเมนที่ถูกกระทำจากสนามไฟฟ้าจากภายนอก เรียกว่าการเปลี่ยนทิศทางของโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric domain switching) ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของโดเมนที่ถูกกระทำจากความเค้นจากแรงทางกลเรียกว่า การเปลี่ยนทิศทางของโดเมนเฟอร์โรอีลาสติก (ferroelastic domain switching)

การเปลี่ยนทิศทางของโดเมนเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric domain switching) สำหรับวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกของสนามไฟฟ้าที่มีมากกว่าค่าของตัววัสดุ เรียกว่า สนามไฟฟ้าลบข้าง (coercive field : E_c) ซึ่งทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของแต่ละหน่วยเซลล์ที่มีตามธรรมชาติใหม่อีกครั้ง โดยเรียงตัวตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ซึ่งการจัดเรียงตัวของขั้วในแต่ละหน่วยเซลล์นี้ไปสู่การเปลี่ยนทิศทางของโดเมน (domain switching) และการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนในแต่ละเกรนภายในวัสดุ ดังภาพที่ 2.5 หลังจากการนำสนามไฟฟ้าออก โดเมนส่วนใหญ่ยังจะเรียงตัวในทิศทางใกล้เคียงทิศทางสนามไฟฟ้า กระบวนการนี้เป็นการทำให้โดเมนเรียงตัวตามทิศทางที่ต้องการซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า

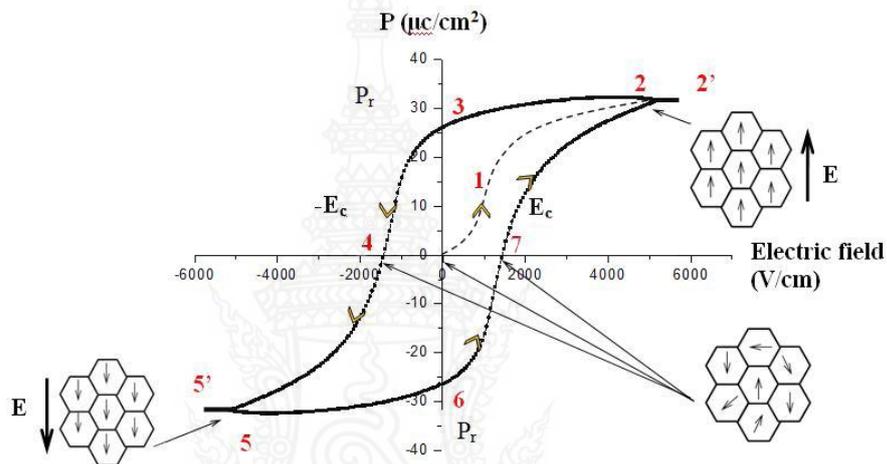
การเหนี่ยวนำขั้ว (poling process) หลังจากกระบวนการนี้แล้ววัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีสมบัติไพโซอิเล็กทริก (macroscopic piezoelectricity) เรียกวัสดุเหล่านี้ว่า “piezoelectric ceramics”



ภาพที่ 2.5 (ก) และ (ข) การเคลื่อนที่ของผนังโดเมนในแต่ละเกรนภายในวัสดุ [15]

โดยปกติแล้วพฤติกรรมการกลับขั้วของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก เซรามิกภายใต้สนามไฟฟ้าแสดงให้เห็นได้โดยวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสลูป (polarization hysteresis loop) หรือ dielectric hysteresis เช่น การวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชัน (polarization) กับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ดังภาพที่ 2.6 แสดงให้เห็นวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสลูป สภาวะในอุดมคติของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ไม่มีการจับยึดส่วนแกนที่ให้สนามไฟฟ้าเอาไว้ บริเวณที่สนามไฟฟ้าอ่อน ๆ แสดงหมายเลข 0-1 สัดส่วนโดยประมาณของการจัดเรียงโดเมนกับสนามไฟฟ้า ยังมีการเรียงตัวแบบสุ่มเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าขึ้นแสดงตามหมายเลข 1-2 ทำให้เกิดการการจัดเรียงโดเมนที่มากขึ้น ที่บริเวณนี้โดเมนส่วนใหญ่เรียงตัวใกล้เคียงทิศทางของสนามไฟฟ้า กระบวนการที่เกิดขึ้นคือการทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางของโดเมน หรือ domain switching เมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าขึ้นอีกอย่างต่อเนื่องพบว่าที่บริเวณนี้โดเมนเกิดการอิ่มตัว (saturation) และโดเมนทั้งหมดจะจัดเรียงตัวในทิศทางของสนามไฟฟ้าแสดงตามหมายเลข 2 ที่บริเวณก่อนหมายเลขสอง ความสัมพันธ์ระหว่าง สนามไฟฟ้าและการจัดเรียงตัวของโดเมนเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งสังเกตได้จากหมายเลข 2-2' ความสัมพันธ์นี้แสดงให้เห็นการเหนี่ยวนำให้เกิดการจัดเรียงตัวโดเมนไม่ได้ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโดเมน [16] ในทางกลับกันเมื่อนำสนามไฟฟ้าออก การจัดเรียงตัวโดเมนก็จะลดลง อย่างไรก็ตามพฤติกรรมการจัดเรียงตัวนี้ไม่ได้เป็นไปตามเส้นเดิม (หมายเลข 2-1-0) ที่สนามไฟฟ้าลดลงเหลือศูนย์ การจัดเรียงตัวไม่ได้ลดลงเหลือศูนย์แต่ลดลงแบบเชิงเส้นเรียกค่าในตำแหน่งนี้ว่าค่าสภาพขั้วตกค้าง (remnant polarization, P_r) (หมายเลข 3) การทำให้การจัดเรียงตัวโดเมนลดลงเหลือศูนย์ได้นั้นจะต้องให้สนามไฟฟ้า (E_c) ในทิศตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้าเริ่มต้น (หมายเลข 4) ดังภาพที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าในทิศตรงข้ามที่สนามไฟฟ้าเป็นลบ ($-E_c$) การจัดเรียงตัวโดเมนเปลี่ยนแปลงลงอย่างรวดเร็ว เมื่อสนามไฟฟ้าใน

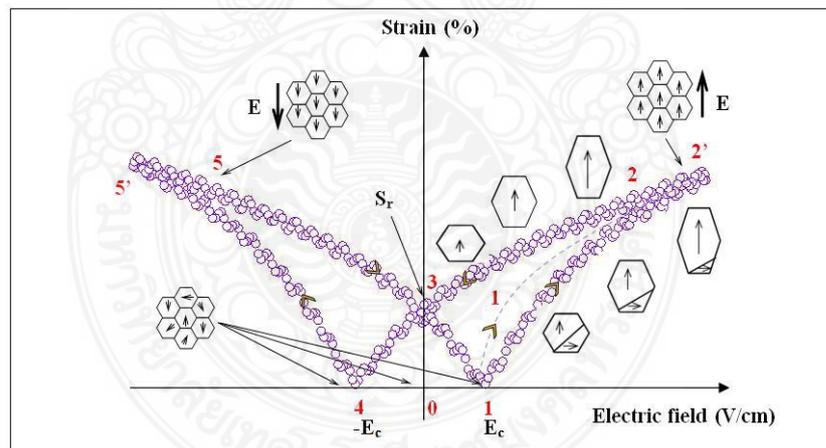
ทิศตรงข้ามเพิ่มขึ้นและผ่านจุดหมายเลข 4 การจัดเรียงตัวโดเมนลดลงอย่างรวดเร็วสังเกตได้จากเส้นกราฟที่ชันมากผ่านลงไปถึงศูนย์ และจัดเรียงตัวโดเมนในทิศทางใกล้เคียงทิศของสนามไฟฟ้า (หมายเลข 5) เมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าขึ้นอีกอย่างต่อเนื่องพบว่าที่บริเวณนี้การจัดเรียงตัวโดเมนทั้งหมดเกิดการอิ่มตัว (saturation) (หมายเลข 5-5') อีกครั้งพฤติกรรมในส่วนหมายเลข 5-6 จะซ้ำกับส่วนหมายเลข 2-3 เมื่อสนามไฟฟ้าทิศตรงข้ามลดลงถึงศูนย์และวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสบรรจบที่หมายเลข 2 จากหมายเลข 5-6-2



ภาพที่ 2.6 ภาพแสดงวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิส [15]

นอกจากวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิส (polarization hysteresis loop) การเปลี่ยนแปลงภาพร่าง (strain) ของวัสดุสะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนทิศทางของโดเมน (domain switching) ภายใต้สนามไฟฟ้า มีลักษณะเป็นแบบวงวนความเครียดฮิสเทอรีซิส (strain hysteresis) หรือภาพผีเสื้อ (butterfly hysteresis loop) แสดงในภาพที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ของความเครียดกับสนามไฟฟ้า ในวัสดุเพโรอิเล็กทริกที่ไม่มีการจับยึดส่วนแกนที่ให้สนามไฟฟ้า บริเวณหมายเลข 0 ทิศทางการจัดเรียงตัวเป็นแบบสุ่มจะหักล้างกันหมด ความเครียดในวัสดุจึงเป็นศูนย์กระบวนการเปลี่ยนแปลงทิศของโดเมน (domain switching) จะเริ่มขึ้นเมื่อมีสนามไฟฟ้าเข้าไปที่หมายเลข 1 สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากกว่า E_c โดเมนส่วนมากเรียงตัวในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า (หมายเลข 1-1'-2) จากภาพที่ 2.7 นี้เป็นภาพแบบของหน่วยเซลล์เตตระโกนอลที่ส่วนนี้วัสดุมีการยึดตัวออก อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนทิศของโดเมนเรียกว่า การเปลี่ยนแปลงความเครียด (switching strain) หลังจากการเปลี่ยนทิศเสร็จสมบูรณ์ลักษณะเส้นกราฟเป็นดังหมายเลข 2 การเปลี่ยนแปลงต่อไปของความเครียดโดยรวม (macroscopic strain) หรือเรียกว่า piezoelectric strain เกิดขึ้นบริเวณ 2-2'

เพราะระยะระหว่างจุดศูนย์กลางประจุเพิ่มขึ้นในระหว่างที่อะตอมขยับตัวภายใต้สนามไฟฟ้า หลังจากนำสนามไฟฟ้าออกความเครียดไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric strain) จะหมดไปที่หมายเลข 3 และการเปลี่ยนแปลงความเครียดจะถูกเหนี่ยวนำจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของโดเมนที่ยังคงเหลืออยู่ ความเครียดที่หมายเลข 3 นี้เรียกว่า ความเครียดตกค้าง (remnant strain) การเปลี่ยนแปลงของความเครียดไพโซอิเล็กทริกในระหว่างการเปลี่ยนสนามไฟฟ้า สามารถอธิบายให้เข้าใจง่ายที่บริเวณหมายเลข 3 ได้จากภาพที่ 2.7 ที่สภาวะขั้วมีความสำคัญต่อการนำไปใช้งานอย่างมาก เพราะวัสดุสามารถแสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าเป็นเชิงเส้นในการใช้เหนี่ยวนำให้ความเครียดในวัสดุเปลี่ยนแปลง เช่น พฤติกรรมไพโซอิเล็กทริกสำหรับสนามไฟฟ้าน้อย ๆ ถ้าสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปมีทิศตรงข้ามจากเริ่มแรกโดเมนจะเปลี่ยนทิศกลับมา และเรียงตัวเป็นแบบสุ่มอีกครั้งนำไปสู่การสูญเสียสมบัติไพโซอิเล็กทริกแบบผันกลับ (converse piezoelectric effect) ที่หมายเลข 4 สนามไฟฟ้าต่ำกว่าที่โดเมนจะสามารถทำเรียงตัวได้ค่าความเครียดจะลดลงเข้าใกล้ศูนย์เรียกว่าสภาวะไม่มีโพลาริเซชันทางไฟฟ้า (electric depolarization) และเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกการจัดเรียงตัวก็จะเกิดขึ้นอีกครั้งในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า ดังนั้นความเครียดไพโซอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นอีกครั้ง และจะอิมตัวอีกครั้งที่หมายเลข 5 เมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง piezoelectric strain จะเป็นดังส่วนหมายเลข 5 ถึง 5'



ภาพที่ 2.7 ลักษณะเป็นแบบวงวนภาพผีเสื้อ (butterfly hysteresis) [15]

2.1.5 สมบัติไดอิเล็กทริก

สารทุกชนิดประกอบด้วยส่วนย่อย คือ โมเลกุลซึ่งโมเลกุลโดยปกติประกอบด้วยกลุ่มโปรตอน อิเล็กตรอนมีจุดศูนย์กลางมวลรวมกันอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล และแรงยึดเหนี่ยวของอะตอม เมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้ามากระทำกับโมเลกุลจะทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศทางของสนาม และกลุ่มประจุลบจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นโมเลกุลทุกโมเลกุลของสารต่างก็ก่อตัวเป็นโมเลกุลขั้วคู่ (dipole moment) โดยมีขั้วเล็ก ๆ เรียงต่อกันในทิศทางเดียวกันตามทิศสนามไฟฟ้า อย่างไรก็ตามสารไดอิเล็กทริกประเภทนี้เป็นสารประเภทโมเลกุลไม่มีขั้ว (non-polar molecule) สารไดอิเล็กทริกบางชนิดที่โมเลกุลก่อตัวเป็นขั้วคู่ไฟฟ้า (dielectric dipole) ซึ่งในทิศทางไม่เป็นระเบียบ และเมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกมากระทำต่อมันจะทำให้ขั้วคู่เล็ก ๆ เหล่านี้เรียงตัวในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเรียกโมเลกุลประเภทนี้ว่าขั้วคู่ถาวร (permanent dipole) มีสารบางอย่างที่มีโมเลกุลเรียงตัวกันตัวเอง โดยไม่ต้องใช้สนามไฟฟ้าจากภายนอก เรียกสารชนิดนี้ว่าสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric materials) เช่น เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) เป็นต้นลักษณะของการที่โมเลกุลขั้วคู่ของสารไดอิเล็กทริกก่อตัวเป็นขั้วเล็ก ๆ แล้วจัดเรียงตัวกันในสนามไฟฟ้าเรียกว่าโพลาไรเซชัน (polarization) โดยกำหนดให้โพลาไรเซชันเป็นจำนวนโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ต่อหน่วยปริมาตร ถ้า N เป็นโมเลกุลต่อหน่วยปริมาตรและทุก ๆ โมเลกุลมีขั้วโมเลกุลคู่เป็น P ดังนั้นจะได้โพลาไรเซชันเป็นดังสมการ 2.5

$$P = Np \quad (2.5)$$

และเมื่อสารไดอิเล็กทริกถูกโพลาไรซ์ สมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปโดยพิจารณาจากสมการ 2.2

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.6)$$

โดยที่ D คือ Electric displacement vector E คือ สนามไฟฟ้าในตัวกลาง และ ϵ_0 คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ของสุญญากาศมีค่า $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

สมบัติอีกอย่างหนึ่งของสารไดอิเล็กทริก คือ มีสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้าหรือความซึมซาบทางไฟฟ้า χ (electric susceptibility) ซึ่งกำหนดได้ด้วยสมการ 2.7

$$P = \epsilon_0 \chi E \quad (2.7)$$

ในสุญญากาศไม่เกิดโพลาไรเซชัน ($P = 0$) ดังนั้น χ เป็นศูนย์ด้วย เพราะฉะนั้น D จะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าภายนอกเท่านั้น ถ้าสนามไฟฟ้าภายนอกเป็น E_0 ดังนั้นสนามไดอิเล็กทริกจะเป็น

$$D = \epsilon_0 E_0 \quad (2.8)$$

จากสมการ 2.2 และสมการ 2.3 จะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} D &= \epsilon_0 E_0 + \epsilon_0 \chi E \\ D &= \epsilon_0 (1 + \chi) E \\ D &= \epsilon_0 \epsilon_r E \end{aligned} \quad (2.9)$$

โดยจะเรียกเทอม $(1 + \chi)$ หรือ ϵ_r ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant) อาจเขียนสมการ 2.5 ได้ดังนี้

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (2.10)$$

โดยที่ ϵ เรียกว่า สภาพยอมสัมพัทธ์ของสารไดอิเล็กทริก สารไดอิเล็กทริกมักจะใช้เป็นฉนวนที่ทำหน้าที่คั่นระหว่างตัวนำของตัวเก็บประจุเพื่อกัน หรือให้แรงดันสูงขึ้นกว่าแก๊สรวมทั้งอากาศด้วย โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็นตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าคุณสมบัติของตัวเก็บประจุที่สารไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นเป็นกี่เท่าของตัวเก็บประจุอากาศ [17] ดังสมการ

$$C = \epsilon C_0 \quad (2.11)$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุสุญญากาศ C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็น ϵ_r ซึ่งโดยปกติค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะแสดงเป็นค่าสัมพัทธ์ (ϵ_r) เทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ ϵ_0 คือ

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.12)$$

และจากความสัมพันธ์ $C = Q/V$ สำหรับกรณีที่ไม่มีการไดอิเล็กทริกจะได้ว่า

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.13)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก และ d คือ ความหนาของสารไดอิเล็กทริก สำหรับตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกที่มีค่าที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ ϵ_r จะได้ว่า

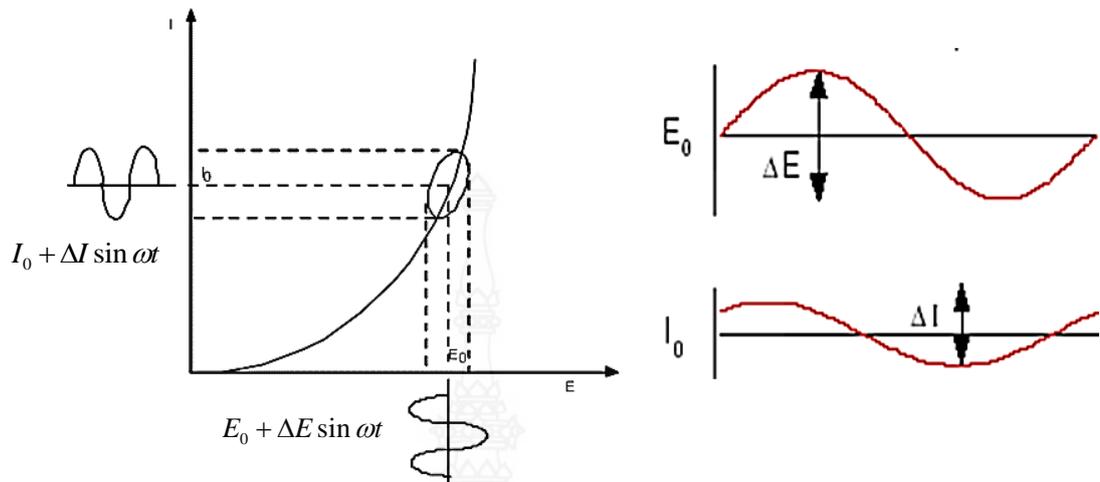
$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2.14)$$

ถ้าป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้กับตัวเก็บประจุ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟส นำหน้าความต่างศักย์เป็นมุม 90° แต่ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียเนื่องจากการที่ไดอิเล็กทริกมีความต้านทานไม่ถึงอนันต์ ทำให้เกิดเฟสของกระแสไฟฟ้านำหน้าความต่างศักย์น้อยกว่า 90° เรียกว่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss tangent) [18]

2.1.6 การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี

อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า หรือเรียกว่าอิเล็กโตรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) มีชื่อย่อเรียกว่าเทคนิค AC Impedance เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์ลักษณะของระบบเซลล์เคมีไฟฟ้า ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านวัสดุศาสตร์ เช่น ใน การศึกษาลักษณะการเคลือบแบตเตอรี่ หรือเซลล์เชื้อเพลิง รวมไปถึงการวิเคราะห์การแพร่ของไอออนผ่านเยื่อ และการศึกษารอยต่อของสารกึ่งตัวนำหลักการของ AC Impedance คือ การให้ทางกระแสไฟฟ้าสลับในรูปฟังก์ชันไซน์ (Sine wave) โดยการควบคุมศักย์ไฟฟ้า ที่มีค่าแอมพลิจูดของศักย์ไฟฟ้า (Amplitude) ค่าในระดับ $10 - 50$ mV และปรับเปลี่ยนความถี่ได้ในช่วงระหว่าง $10^{-3} - 10^5$ Hz เมื่อกำหนดศักย์ไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่งแล้วเพิ่มศักย์ไฟฟ้าในรูปกระแสสลับป้อนให้แก่ระบบแล้ววัดค่ากระแส จากค่ากระแสที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเซลล์เคมีไฟฟ้านั้น ๆ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์สามารถใช้บ่งบอกคุณลักษณะการตอบสนองของกระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า หรือสัญญาณอื่น ๆ ทางไฟฟ้าของวัสดุที่สนใจได้

โดยหลักการของวิธีการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้ามีหลักการคล้ายกับวิธีวัดอิมพีแดนซ์ทั่วไป ซึ่งจะให้สัญญาณกระตุ้นในรูปฟังก์ชันไซน์ที่มีค่าแอมพลิจูดไปยังระบบภายใต้การวิเคราะห์ และวัดการตอบสนองในรูปของกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าหรือสัญญาณอื่น ๆ จากรูปที่ 2.8 จะแสดงกราฟเส้นโค้งของกระแสไฟฟ้าของระบบเคมีไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี โดยที่ I_0 คือ กระแสไฟฟ้ากระแสตรง E_0 คือศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง ω คือความถี่เชิงมุม t คือเวลา และ ϕ คือการเลื่อนเฟส (phase shift)



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า - ศักย์ไฟฟ้าของระบบเคมีไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี [17]

คลื่นรูปไซน์ที่มีแอมพลิจูดต่ำ ของ $\Delta E \sin \omega t$ ณ ความถี่ค่าหนึ่งได้เป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้าไปในค่าศักย์ไฟฟ้า E_0 ส่งผลให้เกิดการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเป็นคลื่นรูปไซน์ $\Delta I \sin(\omega t + \phi)$ เพิ่มเติมเข้าไปในค่า I_0 การตอบสนองของค่ากระแสไฟฟ้าจะเลื่อนไปตามศักย์ไฟฟ้าที่ให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสามารถคำนวณได้จากกฎของโอห์ม (Ohm's Law) ดังสมการ (2.15)

$$Z(\omega) = \frac{\Delta E(\omega)}{\Delta I(\omega)} \quad (2.15)$$

ค่าอิมพีแดนซ์เป็นปริมาณเชิงซ้อนกับขนาดและการเลื่อนเฟสซึ่งขึ้นกับความถี่ของสัญญาณ โดยทั่วไปในระบบเคมีไฟฟ้าจะใช้ช่วงความถี่ประมาณ 100 kHz ไปจนถึง 0.1 Hz ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า $Z(\omega)$ เป็นปริมาณเชิงซ้อนจึงสามารถแสดงได้ในพิกัดเชิงขั้วอิมพีแดนซ์ของข้อมูลโดยสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.16)

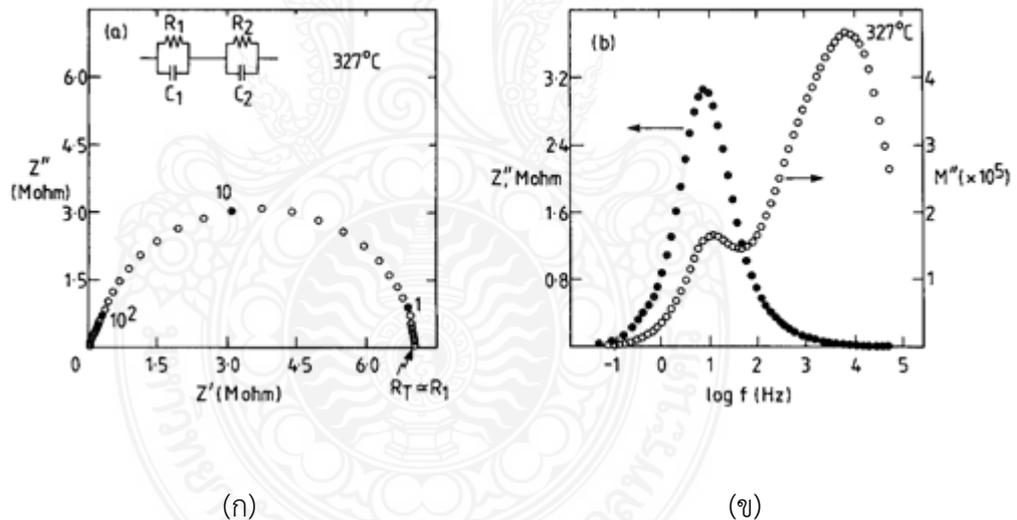
$$Z(\omega) = |Z(\omega)| e^{j\phi(\omega)} \quad (2.16)$$

เมื่อ $|Z(\omega)|$ คือขนาด ของอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ ω และ $\phi(\omega)$ คือการเลื่อนเฟสที่ความถี่ ω ในพิกัดคาร์ทีเซียนอิมพีแดนซ์เขียนได้ดังสมการ (2.17)

$$Z(\omega) = Z_r(\omega) + jZ_j(\omega) \quad (2.17)$$

เมื่อ $Z_r(\omega)$ คือส่วนจริง (real part) ของอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ ω และ $Z_j(\omega)$ คือส่วนจินตภาพ (imaginary part) ที่ความถี่ ω และ $j = \sqrt{-1}$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงกับส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ เรียกว่า Nyquist plot ดังในภาพที่ 2.9 (ก) ข้อดีของ Nyquist plot คือสามารถแสดงภาพรวมของข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว และยังสามารถอธิบายได้ในเชิงคุณภาพ โดยที่แกนของส่วนจริงจะมีค่าเท่ากับแกนของส่วนจินตภาพ เพื่อจะไม่ไปบิดเบือนรูปร่างของเส้นกราฟ สำคัญในการอธิบายเชิงคุณภาพของข้อมูลข้อเสียของ Nyquist plot คือการไม่ได้แสดงมิติของความถี่ ทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยระบุค่าความถี่ไปบนกราฟ และภาพที่ 2.9 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์และการเลื่อนเฟสในรูปของฟังก์ชันความถี่ของ Bode plot [19]



ภาพที่ 2.9 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริงกับส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ (Nyquist plot) (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์และการเลื่อนเฟสในรูปของฟังก์ชันความถี่ (Bode plot) [20]

ความสัมพันธ์ระหว่างการแสดงผลของข้อมูลในรูปของ Nyquist plot และ Bode plot เป็นไปตามสมการดังนี้

$$|Z|^2 = (Z_r)^2 + (Z_j)^2 \quad (2.18)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{Z_j}{Z_r} \quad (2.19)$$

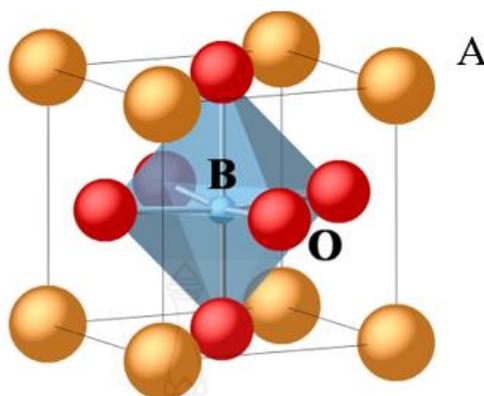
$$Z_r = |Z| \cos \phi \quad (2.20)$$

$$Z_j = |Z| \sin \phi \quad (2.21)$$

2.1.7 โครงสร้างของเพอโรฟสไกต์

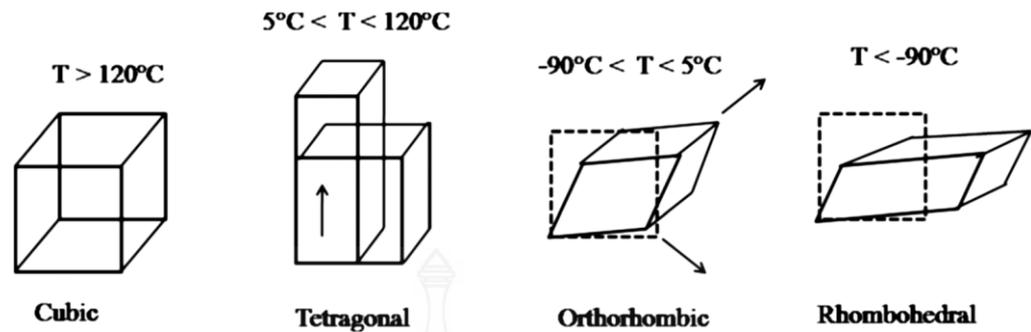
วัสดุแบบเพียโซอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์มักจะแสดงผลแบบเพียโซอิเล็กทริกที่ใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ดังนั้นโครงสร้างของวัสดุ perovskite จึงเป็นที่สนใจของนักวิจัยเป็นอย่างมาก

ในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์มีอะตอมที่การกระจายตัวสูงแบบสมมาตร ช่วยให้หน่วยเซลล์เปลี่ยนภาพได้ง่ายและการทำงานของเพโรอิเล็กทริกทำให้เกิดเฟสที่หลากหลายที่ไม่ใช่เฟสสมมาตรเช่น rhombohedral (R), orthorhombic (O), tetragonal (T) และ monoclinic (M) สูตรทางเคมีทั่วไปสำหรับโครงสร้างเพอโรฟสไกต์คือ ABO_3 อธิบายไว้ในภาพที่ 2.10 โดยที่ A และ B มีสองขนาดแตกต่างกันมากและอะตอม A มักจะมีขนาดใหญ่กว่า อะตอม B ในโครงสร้างนี้ไอออน A-site ที่มุมของโครงร่างตาข่ายมักจะเป็นธาตุหายาก หรือธาตุดินอัลคาไลน์ ไอออนของ B-site ที่อยู่ตรงกลางของโครงตาข่ายสามารถเป็นองค์ประกอบของโลหะทรานซิชัน 3d, 4d และ 5d โครงสร้าง ABO_3 เป็นเครือข่ายของ octahedra ออกซิเจนที่เชื่อมโยงมุมด้วยไอออนบวกขนาดเล็กที่บรรจุหลุมแปดด้านและไอออนบวกขนาดใหญ่ที่บรรจุหลุมสมบัติสี่เหลี่ยม การปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ ABO_3 เป็นแบบไม่สมมาตรเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับวัสดุเพอโรฟสไกต์ เพื่อแสดงพฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริก และการปรับเปลี่ยนเหล่านี้ อาจเป็นการเปลี่ยนแปลงในแกนของเซลล์ในทิศทางเดียวหรือมากกว่า (เฟส T และ เฟส O ตามลำดับ) การเบี่ยงเบนจากมุมขวาของมุม (เฟส R) หรือการรวมกันของทั้งสอง (M เฟส) [21]

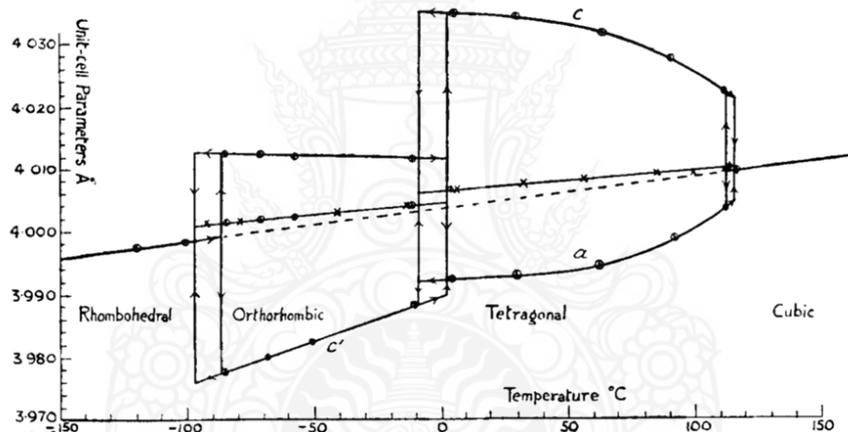


ภาพที่ 2.10 เซลล์หน่วยของโครงสร้าง perovskite ที่ไม่ได้เรียงกัน
(A และ B เป็นแคตไอออนและ O คือออกซิเจนไอออน) [22]

แบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) เซรามิกเป็นวัสดุที่มีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิใกล้กับอุณหภูมิคูรีของวัสดุ แบเรียมไททาเนตมีโครงสร้างผลึกแบบ perovskite ซึ่งเป็นโครงสร้างที่พบมากในสารประกอบที่มีสูตรทางเคมีแบบ ABO_3 ที่มี Ba อะตอมอยู่ตรงตำแหน่ง A มุมของรูปลูกบาศก์ มี Ti อะตอมอยู่ตรงตำแหน่ง B กึ่งกลางของรูปลูกบาศก์ และมี O อะตอมอยู่ตรงตำแหน่งกลางหน้าของรูปลูกบาศก์ [54] แสดงดังภาพที่ 2.10 ถ้าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรีแบเรียมไททาเนตจะมีโครงสร้างเป็นแบบลูกบาศก์และเป็นวัสดุที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นที่อุณหภูมินี้จึงเป็นพาราอิเล็กทริกแต่เมื่อลดอุณหภูมิลงมาในช่วงระหว่าง 0 ถึง 120 °C จะมีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอลเกิดจากการยืดตัวไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งของลูกบาศก์และการหดตัวในอีก 2 ทิศทางที่เหลือจึงมีทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ต่างกันในกลุ่ม $\langle 100 \rangle$ อยู่ทั้งหมด 6 ทิศทางเพราะฉะนั้นที่อุณหภูมินี้จึงมีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเอง (spontaneous polarization) ทั้งหมด 6 ทิศทาง และเมื่อลดอุณหภูมิลงมาในช่วงระหว่าง -90 ถึง 0 °C จะมีโครงสร้างเป็นแบบออร์โธโรมบิกเกิดจากการยืดตัวในทิศกึ่งมุมของด้านหน้าด้านหนึ่งของลูกบาศก์ และการหดตัวของด้านหน้าด้านหนึ่งในทิศกึ่งมุมของลูกบาศก์ จึงมีทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ที่ต่างกันในกลุ่ม $\langle 110 \rangle$ อยู่ทั้งหมด 12 ทิศทาง เพราะฉะนั้นที่อุณหภูมินี้จึงมีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองทั้งหมด 12 ทิศทาง และเมื่อลดอุณหภูมิลงมาในช่วงที่ต่ำกว่า -90 °C จะมีโครงสร้างเป็นแบบบรอมโบฮีดรอลเกิดจากการยืดตัวในทิศกึ่งมุมของลูกบาศก์ [55] และการหดตัวในทิศกึ่งมุมของลูกบาศก์จึงมีทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ที่ต่างกันในกลุ่ม $\langle 111 \rangle$ อยู่ทั้งหมด 8 ทิศทาง เพราะฉะนั้นที่อุณหภูมินี้จึงมีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองทั้งหมด 8 ทิศทาง แสดงดังภาพที่ 2.11 และภาพที่ 2.12 จะเป็นการแสดงการแปรผันของผลึก BaTiO_3 กับอุณหภูมิ



ภาพที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงผลึกโครงสร้างของแบเรียมไททานเนตที่อุณหภูมิต่าง ๆ [55]



ภาพที่ 2.12 การแปรผันของผลึก BaTiO₃ กับอุณหภูมิเส้นหา สอดคล้องกับลูกบาศก์ของปริมาตรของเซลล์ [56]

2.2 กระบวนการเตรียม

การประดิษฐ์เซรามิกที่มีคุณสมบัติเฉพาะเพื่อนำไปใช้งานในเทคโนโลยีขั้นสูงนั้น จำเป็นจะต้อง มีความเข้าใจองค์ประกอบของเซรามิกนั้นเป็นอย่างดี โดยทั่วไปแล้วไม่ว่าเซรามิกจะเป็นแบบที่ใช้ งานแบบดั้งเดิม (conventional ceramics) เช่น ถ้วย โถ จาน ชาม ฯลฯ และเซรามิกขั้นสูง (advanced ceramics) เช่น เซรามิกที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง ทางกลที่ดีนั้น มักจะผลิตจากสารตั้งต้นที่มี ลักษณะเป็นผงละเอียดมากมาก (ultrafine powder) เป็นหลัก ดังนั้นการเข้าใจลักษณะของอนุภาค ผงเบื้องต้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบเซรามิกที่มีคุณสมบัติและ

ลักษณะเฉพาะตามที่ต้องการได้ ลักษณะเฉพาะที่สำคัญของอนุภาคผง ได้แก่ ภาพร่าง (morphology) ขนาดอนุภาค (size) การกระจายขนาดของอนุภาค (particles size distribution) ลักษณะการเกาะกลุ่มเป็นกระจุก (agglomeration characteristic) องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) และองค์ประกอบของเฟส (phase composition) เป็นต้น นอกจากนี้โครงสร้างและสมบัติทางเคมีของผิว (structure and chemistry of surface) ก็มีความสำคัญอีกด้วย

ดังนั้นขั้นตอนเริ่มแรกสุดของการผลิตเซรามิกจะต้องเกี่ยวข้องกับการเตรียมผงละเอียดให้มีคุณลักษณะตามต้องการ การเลือกเทคนิคในการเตรียมผงจะคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการผลิตและความสามารถของเทคนิคที่จะผลิตผงที่ต้องการได้ เพื่อง่ายต่อความเข้าใจจะทำการแบ่งเทคนิคการเตรียมผงออกเป็น 2 วิธีการหลัก อย่างแรกคือการเตรียมผงด้วยวิธีทางกล และอย่างที่สองคือการเตรียมผงด้วยวิธีทางเคมี โดยเฉพาะผงละเอียดที่เตรียมด้วยวิธีที่ 2 นั้นกำลังเป็นที่สนใจในวงการผลิตเซรามิกเป็นอย่างมาก

โดยที่ทั่วไปแล้วเซรามิกชั้นสูงจะมีความสม่ำเสมอทางเคมี (chemical homogeneity) และโครงสร้างทางจุลภาค (microstructure) ที่ถูกควบคุมเป็นอย่างดี จึงส่งผลให้ได้เซรามิกที่ดีไปด้วย ส่วนภาพร่าง ขนาด การกระจายขนาดของอนุภาค และลักษณะการเกาะกลุ่มจะมีผลต่อขั้นตอนการขึ้นภาพผง (consolidation) และขั้นตอนการเผาซินเตอร์ (sinter) เป็นชิ้นงานเซรามิก ถ้าขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 1 ไมครอน ไม่จำเป็นจะต้องใช้วิธีขึ้นภาพแบบคอลลอยด์ (colloid) เนื่องจากผงจะใช้เวลาในการอัดแน่นตัวน้อยมาก เพราะยิ่งลดขนาดอนุภาคผงจะยิ่งทำให้เซรามิกมีความหนาแน่นสูง ซึ่งถ้าไม่มีอิทธิพลจากปัจจัยอื่น ๆ มาทำให้การเผาซินเตอร์ยุ่งยากขึ้น ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 ไมครอนจะทำให้เซรามิกมีความหนาแน่นสูงในระยะเวลาการเผาที่เหมาะสมประมาณ 2-3 ชั่วโมง ในขณะที่ผงจะมีการกระจายของขนาดอนุภาคกว้าง หรือที่เรียกว่าผงแบบกระจายเป็นกลุ่ม (polydisperse powder) จะให้อัตราการแน่นตัวของเซรามิกก่อนเผาสูงเช่นกัน แต่ก็ทำให้ได้เซรามิกหลังเผาที่มีโครงสร้างทางจุลภาคไม่สม่ำเสมอ โดยที่เกรน (grain) ขนาดใหญ่ในเซรามิกจะโตอย่างรวดเร็วและกลืนเกรนขนาดเล็กไปด้วย ทำให้การควบคุมเซรามิกมีความหนาแน่นสูง มีขนาดเกรนตามต้องการนั้นเป็นไปได้ยาก ดังนั้นอนุภาคผงแบบกระจายเดี่ยว (monodisperse powder) มีการกระจายของขนาดอนุภาคน้อย จึงสามารถจะควบคุมโครงสร้างทางจุลภาคเซรามิกหลังเผาได้ดี สำหรับอนุภาคที่มีลักษณะทรงกลม (spherical shape) และผงที่มีภาพร่างใกล้เคียงกัน (equiaxed shape) จะส่งผลให้การขึ้นภาพมีความสม่ำเสมอยิ่งขึ้น

ผงที่เป็นกลุ่ม (agglomeration) จะทำให้การขึ้นภาพผงมีความไม่สม่ำเสมอ และทำให้เกิดการซินเตอร์ ในชิ้นงานอย่างไม่ทั่วถึงและด้วยอัตราการซินเตอร์ที่แตกต่างกันไปในแต่ละบริเวณ ซึ่งทำให้เกิดตำหนิที่ไม่ต้องการในเซรามิก เช่น การพัฒนารูพรุนที่มีขนาดใหญ่ช่องว่างที่เหมือนรอยร้าว ขนาดของเกรนที่หยาบขึ้น เป็นต้น ลักษณะการเกาะกลุ่มของผงสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการเกิดได้ 2

ชนิดคือ การเกาะกลุ่มของขนาดอนุภาคผงแบบอ่อน (soft agglomeration) ซึ่งอนุภาคจะเกาะกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) ที่ไม่มากนัก ส่วนการเกาะกลุ่มของอนุภาคผงแบบแข็ง (hard agglomeration) ซึ่งอนุภาคจะเกาะกันด้วยพันธะทางเคมีที่ค่อนข้างแรงในทางอุทกคิตแล้วจะไม่ต้องการให้เกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคผงเลย ไม่ว่าจะ เป็นแบบใดก็ตามแต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ ดังนั้นจึงต้องการผงที่เกาะกลุ่มแบบอ่อนมากกว่าแบบแข็งเนื่องจากสามารถบดผงนี้ให้เล็กลงและทำให้แยกจากกันได้ง่าย หรือสามารถทำให้เกิดกระจายตัวของผงในของเหลวได้ดีกว่าอนุภาคผงที่มีการเกาะกลุ่ม

ในปัจจุบันมีเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมผงละเอียดของเซรามิกหลากหลายเทคนิค ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีการหลัก คือวิธีทางกล และวิธีทางเคมีโดยการเตรียมผงทางกลนั้นมักจะนิยมใช้การเตรียมผงสำหรับเซรามิกแบบดั้งเดิม จากวัสดุตั้งต้นที่มีในธรรมชาติ ในอดีตการเตรียมผงด้วยวิธีนี้ได้นำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเซรามิก ที่ไม่ได้พัฒนากระบวนการเตรียมมากมายนัก แต่อย่างไรก็ตามการเตรียมผงละเอียดสำหรับงานเซรามิกชั้นสูงได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน ดังนั้นการเตรียมผงโดยการบดทางกลด้วยความเร็วสูงจึงได้รับความสำคัญน้อยลงมาก และส่วนใหญ่จะถูกจำกัดเฉพาะในงานผลิตเซรามิกแบบดั้งเดิมการเตรียมผงด้วยวิธีทางเคมีเท่านั้น

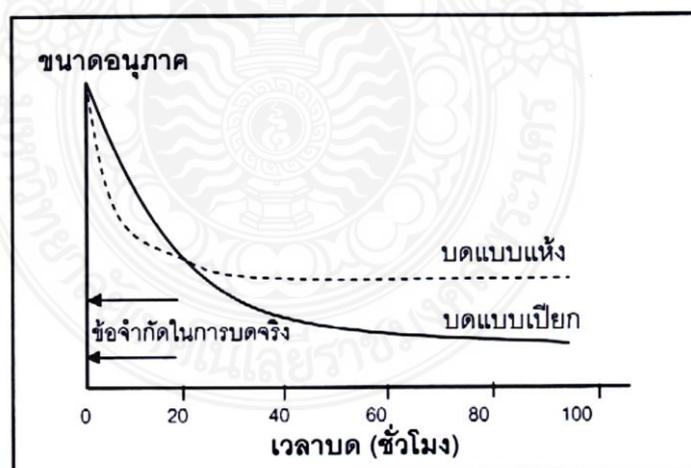
2.2.1 การบดผสมสาร

กระบวนการเตรียมผงละเอียดด้วยการลดขนาดทางกลอนุภาคขนาดใหญ่จะเรียกว่าการบด (comminution) โดยในส่วนี้จะขอกล่าวถึงการบดย่อยด้วยเทคนิคการบดย่อยแบบลูกบอล เทคนิคการบดย่อยแบบลูกบอลนี้จะต้องใช้ตัวกลางในการบดหรือเม็ดบอลในการทำให้อนุภาคเล็กลง ซึ่งกระบวนการหลักที่ทำให้อนุภาคแตกได้ คือ การกดอัด การกระทบ และแรงเฉือน (แรงเสียดทาน) ระหว่างเม็ดบดและอนุภาคผง นอกจากนี้จะใช้เม็ดบอล (ball) แล้วยังอาจจะใช้เม็ดบดภาพร่างเป็นแท่งได้ แต่อาจจะไม่เหมาะสมในการบดเพื่อให้ได้อนุภาคที่ละเอียดมาก ในขณะที่เม็ดบอลสามารถบดอนุภาคผงได้ละเอียดน้อยกว่า 10 μm เทคนิคการบดย่อยแบบนี้ยังไม่เหมาะสมที่จะใช้บดทั้งในสภาวะเปียกและแห้ง

กระบวนการบดย่อย อัตราการบดจะขึ้นกับหลายปัจจัยรวมทั้งตัวแปรในการบด เช่น ขนาด ความเร็ว และจำนวนของเม็ดบดขึ้นกับสมบัติของเม็ดบด เช่น ขนาด ความแข็ง และภาพร่าง สุดท้ายจะขึ้นกับสมบัติของอนุภาคที่ถูกบดด้วยโดยทั่วไปการบดด้วยเม็ดบอลที่ใช้ความเร็วต่ำ เนื่องมาจากการใช้เม็ดบดขนาดใหญ่ ทั้งนี้เพราะพลังงานกลที่ให้กับอนุภาคจะอยู่ในภาพของพลังงานศักย์ (potential energy) ในขณะที่การบดที่กระทำที่ความเร็วสูงมาก เนื่องจากเม็ดบอลขนาดเล็กพลังงานที่ให้กับอนุภาคของการบดแบบนี้จะอยู่ในภาพของพลังงานจลน์ (kinetic energy) สำหรับขนาดของเม็ดบด

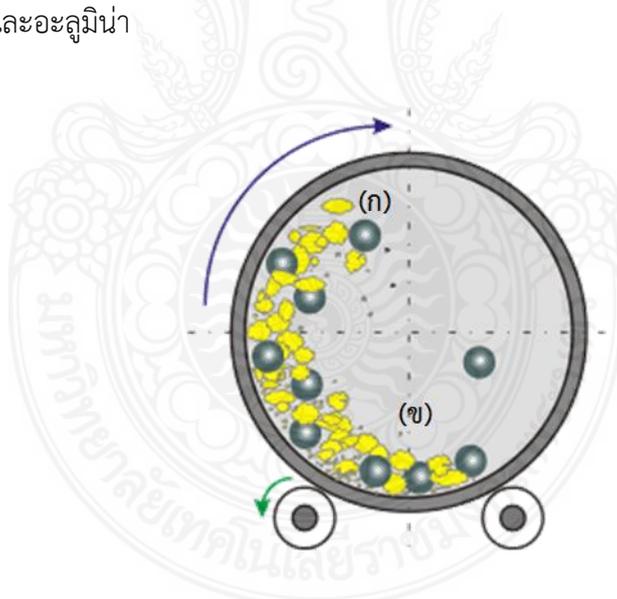
เฉพาะขนาดหนึ่งที่มีมวลเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่น เม็ดบดที่ใช้ควรจะทำมาจากวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ในทางปฏิบัติการเลือกใช้เม็ดบดนั้นมักจะถูกจำกัดด้วยราคาที่สูง

นอกจากนี้โดยปกติแล้วเม็ดบดที่มีขนาดเล็กจะดีกว่าเม็ดบดขนาดใหญ่ เนื่องจากที่ปริมาตรเดียวกันจะได้จำนวนเม็ดบดมากกว่าถ้าเม็ดบดยังมีขนาดเล็กลง ถ้าให้อัตราการบดขึ้นกับจำนวนจุดสัมผัสระหว่างเม็ดบดกับอนุภาคผง และในขณะที่จำนวนจุดสัมผัสขึ้นกับพื้นที่ผิวของเม็ดบด ดังนั้นอัตราการบดจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น คือขนาดของเม็ดบดเล็กลงแต่เม็ดบดไม่ควรจะมีขนาดเล็กจนเกินไป ทั้งนี้อาจทำให้เม็ดบดไม่มีแรงมากเพียงพอที่จะทำให้อนุภาคผงแตกได้ ยิ่งไปกว่านี้อัตราการบดยังขึ้นกับขนาดของอนุภาคผงด้วย อัตราการบดนี้จะลดลงถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กลงยิ่งถ้าทำการบดไปเรื่อย ๆ และอนุภาคยิ่งละเอียดมากจนมีขนาดประมาณ $1 \mu\text{m}$ จะทำให้การบดเป็นไปได้ยากยิ่งขึ้น ได้มีการวิจัยถึงขีดจำกัดในการบดแสดงดังภาพที่ 2.11 พบว่าขีดจำกัดนี้จะขึ้นกับหลายปัจจัยโดยปัจจัยที่สำคัญ คือ แนวนุ่มเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคที่สัมพันธ์กับขนาดอนุภาค การบดจะลดลงเมื่อขนาดของอนุภาคลดลง ต่ำหึในอนุภาคมีขนาดเล็กลงและปริมาณลดลงเมื่ออนุภาคเล็กลง ซึ่งจะทำให้อนุภาคมีความแข็งแรงมากขึ้น เพื่อลดข้อจำกัดของขนาดอนุภาคต่อการบดควรใช้การบดแบบเปียก แทนการบดแบบแห้ง โดยการใส่สารช่วยกระจาย (dispersing agent) ในระหว่างการบด เมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงระดับหนึ่งอาจจะทำการเปลี่ยนเทคนิคการบดย่อย เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคเล็กลงถึงขนาดที่ต้องการได้



ภาพที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคและเวลาที่ใช้ในการบดย่อยแบบลูกบอล [15]

ภาพที่ 2.12 แสดงลักษณะการหมุนของหม้ออบ ซึ่งหม้ออบจะบรรจุเม็ดบด วัสดุที่ต้องการจะลดขนาด และของเหลวที่ช่วยในการกระจายอนุภาคจะถูกปิดอย่างแน่นหนาและหมุนในแนวนอนบนสายพานที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ภายในหม้ออบจะถูกบดด้วยยางเพื่อช่วยป้องกันการสึกหรอเนื่องจากการกระทบของเม็ดบดกับผนัง คือเม็ดบดจะมีการเคลื่อนที่คล้ายอักษรภาพตัว D โดยจะเคลื่อนที่เลื่อนไล่ไปจากตำแหน่ง ข ไปตำแหน่ง ก แล้วตกลงมากระทบกับวัสดุด้านล่าง และหมุนเวียนด้วยลักษณะนี้ไปเรื่อย ๆ จนขนาดอนุภาคเล็กลงจนไม่สามารถบดให้ละเอียดลงไปได้อีก จะเห็นได้ว่าอัตราเร็วการหมุนหม้ออบจะส่งผลต่อแนวการเคลื่อนที่ของเม็ดบด และพลังงานกลที่ให้กับอนุภาคผง โดยต้องการทำให้เม็ดบดเคลื่อนไปยังตำแหน่งบนสุดของเส้นทางการเคลื่อนที่ดังภาพ 2.12 ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบการบดแบบเปียก กับการบดแบบแห้ง พบว่าการบดแบบเปียกจะมีข้อดีเหนือกว่าตรงที่พลังงานที่ใช้ในการบดจะมากกว่าประมาณประมาณร้อยละ 10-20 แต่ก็มียข้อเสียตรงที่การบดแบบเปียกนี้จะทำให้เกิดการสึกหรอของเม็ดบดได้มากกว่า แต่การบดทั้งสองนี้จะมีข้อเสียหลัก คือการเจือปนของเศษเม็ดบดที่เกิดการสึกหรอหรือแตกในระหว่างการบด จึงจำเป็นต้องแก้ไขโดยอาจจะเลือกใช้เม็ดบดเซรามิกที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิเผาซินเตอร์ หรือใช้เม็ดบดเหล็กที่สามารถทำการล้างหรือใช้สนามแม่เหล็กดูดออกจากผงได้ รวมถึงหลีกเลี่ยงการการใช้เม็ดบดที่มีความหนาแน่นต่ำ เช่น พอร์ซเลน และอะลูมินา



ภาพที่ 2.14 ลักษณะการหมุนของหม้ออบ และการเคลื่อนที่ของลูกบด [15]

2.2.2 การทดสอบการหลุดตัวจากการเผา

การเผาเป็นกระบวนการสุดท้ายของกระบวนการผลิตที่มีผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกมามีคุณภาพหรือเสียหายได้จากการเผา และการเผาเซรามิกที่ใช้อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1,200 °C มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ เช่น ไม้ ไฟฟ้าแก๊ส ถ่านหิน เป็นต้น กระบวนการนี้จึงมีต้นทุนสูง และเป็น

ขั้นตอนที่มีความสำคัญ ต้องมีการควบคุม อุณหภูมิเวลา และบรรยากาศ ให้ผลิตภัณฑ์ที่เผาได้รับ heat work และบรรยากาศที่เหมาะสมเกิดความแข็งแรงและสวยงาม heat work เป็นผลของทั้งอุณหภูมิและเวลา [23]

การทดสอบการหดตัวเมื่อเผาโดยเปรียบเทียบขนาดก่อนและหลังเผาตามวิธีของ ASTM C326 – 09 Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays จำนวนครั้งที่วัดตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ 7-10 ครั้ง/ตัวอย่าง ขึ้นกับขนาดตัวอย่างที่สามารถบรรจุได้ในจำนวนร่องของการหดตัวเมื่อเผา [24] จากสมการที่ (2.22)

$$S_d = \frac{L_p - L_d}{L_p} \times 100 \quad (2.22)$$

เมื่อ S_d คือ ร้อยละการหดตัว

L_d คือ ความยาวของตัวอย่างก่อนการเผา

L_p คือ ความยาวของตัวอย่างหลังการเผา

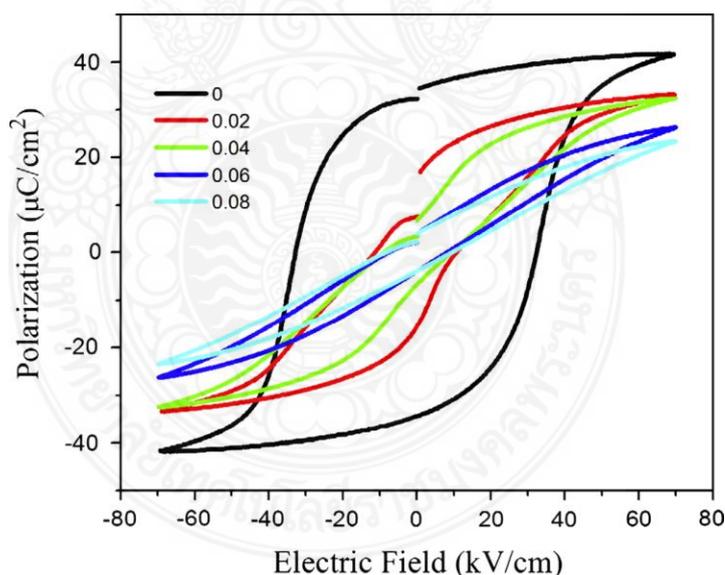
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงแนวคิด บทความเชิงวิชาการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหัวข้องานวิจัยนี้ วัสดุเซรามิกประเภทเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric ceramic) ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในด้านต่าง ๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลและไฟฟ้าที่ดี [25] จึงนิยมนำมาใช้ในกระบวนการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่สมบัติที่โดดเด่นกว่าเซรามิกชนิดอื่น ๆ และยังสามารถพัฒนาให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ง่ายอีกด้วย [26] แต่อย่างไรก็ตามเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกชนิดนี้มีข้อเสีย คือ มีส่วนประกอบของตะกั่ว (Pb) อยู่ในระดับสูง ซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม [27] ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะวิจัยเซรามิกไร้ตะกั่วสำหรับกักเก็บพลังงาน

จากการศึกษาลักษณะทั่วไปของสารเพียโซอิเล็กทริกที่มีโครงสร้าง perovskite ที่ซับซ้อน บิสมัทโซเดียมไททาเนต (bismuth sodium titanate, $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$) หรือ BNT เป็นสารที่มีความสามารถสูง มีความแข็งแรงการดัดเชิงกลสูง คุณสมบัติทางไฟฟ้า และค่าไดอิเล็กทริกที่ดี ซึ่งมีแนวโน้มที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกอื่น ๆ ได้ โดยสารประกอบมีโครงสร้างเป็น perovskite มีสูตรเคมีเป็น ABO_3 ซึ่งโครงสร้างมีความยืดหยุ่นสูงสามารถให้ออออนประจุบวกขนาดต่าง ๆ เข้าไปอยู่ในโครงสร้างโดยไม่ทำลายโครงสร้างเดิม แต่จะเกิดเป็นโครงสร้าง perovskite แบบใหม่ที่ซับซ้อนขึ้น [28-29] ตัวอย่างเช่น Chi ManLau, Xiao WuXu, K.W.Kwok. (2015). ได้ศึกษาสมบัติทางแสง เพรโรอิเล็กทริก ไดอิเล็กทริก และสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของเซรามิก BNT-BT ที่เจือด้วย Er^{3+} โดยเตรียมเซรามิกด้วยวิธีการเตรียมแบบสารละลายของแข็ง โดยนำสาร ball mill ด้วยเม็ดบดเซอร์โคเนียร์ เป็นเวลา 8 hr. จากนั้นทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850°C 2 hr. และทำการ ball

mill ในเอทานอลผสม polyvinyl 5 wt% ทำให้แห้ง และอัดขึ้นภาพขึ้นงาน จากนั้นทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,200 °C 2 hr. ผลการวิจัยพบว่าเซรามิก BNT-BT ที่มีการเจือด้วย Er^{3+} มีการแสดงแสงขึ้นลงภายใต้การกระตุ้นด้วยเลเซอร์ที่ 980 nm. พบว่าการเติม Er^{3+} ส่งผลให้ความเข้มข้นแสงโฟโตลูมิเนสของแถบการเปล่งแสงสีแดงและอินฟราเรดเพิ่มขึ้น [30]

ต่อมา Julio Cesar Camilo Albornoz Diaz และคณะ. (2018). ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงขั้วและคุณสมบัติเชิงแสงของเซรามิก $Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO_3$ และ $(Bi_{0.5}Na_{0.5})_{0.94}Ba_{0.06}TiO_3$ ที่เจือด้วย Sm^{3+} ด้วยวิธีการผสมออกไซด์แบบดั้งเดิม ผลการวิจัยพบว่าความหนาแน่นของเซรามิกมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของการเจือ Sm^{3+} ที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 5.794 - 5.876 g/cm³ และจากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าการเติม Sm^{3+} ทำให้ผลึกมีโครงสร้างแบบ tetragonal ร่วมกับเฟส rhombohedral และคุณสมบัติเชิงแสง PL spectra แสดงผลการปล่อยสีแดงส้มที่เกิดจากการเจือ Sm^{3+} [31] นอกจากนี้การเติม Sm^{3+} ยังช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริกอีกด้วย [32] จากการศึกษาวิจัยผู้วิจัยมีความสนใจที่จะนำเซรามิกไร้สารตะกั่ว BNT มาประยุกต์หรือพัฒนาให้มีคุณสมบัติเชิงแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้าให้เหมาะสมสำหรับเป็นเซรามิกไร้สารตะกั่วสำหรับกักเก็บพลังงาน



ภาพที่ 2.15 กราฟฮิสเทอรีซิสลูปBNBT-xKN ($x = 0.0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08$) ที่อุณหภูมิห้อง

ส่วน Baoyin Wang, Laihui Luo และคณะ (2013, September 18) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติการเก็บพลังงานของ $(1-x)Bi_{0.47}Na_{0.47}Ba_{0.06}TiO_3 - xKNbO_3$ โดยที่ x เท่ากับ 0.0, 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.08 เซรามิกไร้สารตะกั่ว โดยวัดฮิสเทอรีซิสลูปของภาพที่ 2.13 โดยจะวันที่

อุณหภูมิห้องและให้กระแสไฟฟ้าไปเรื่อย ๆ จนพบว่าลูปเริ่มแสดงค่าที่ E_c เท่ากับ 32.8 kv/cm และ P_r เท่ากับ $34.2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ จากภาพที่ 2.13 [23] และยังพบว่ายิ่งความเข้มข้นของปริมาณสารเจือมีผลทำให้ลูปฮิสเทอรีซิสเล็กลงดังนั้นอาจสามารถสรุปได้ว่าปริมาณการเจือสารอาจส่งผลกับการเกิดโพลาริเซชันเซรามิกไร้สารตะกั่ว



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัย ซึ่งประกอบด้วย อุปกรณ์ สารเคมี กระบวนการเตรียมเซรามิก เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ และกระบวนการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร

- ถังมือสำหรับชั่งสารเคมี
- หน้ากากอนามัย
- ช้อนตักสารเคมี
- เบ้าอะลูมิน่า
- เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
- โถดูดความชื้น
- แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการบดผสมสาร

- ขวดพลาสติก PET 135 ml
- เม็ดบดเซอร์โคเนียร์
- เครื่องบดผสมสารแบบหมุนวน
- ช้อนตักสาร
- ถุงซิปลิส
- ฟองน้ำ

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเผาแคลไซน์และซินเตอร์

- เตาสำหรับเผาแคลไซน์และเผาซินเตอร์
- หน้ากากป้องกันการสารเคมี
- ถังมือกันความร้อน
- คีมคีบด้านสั้น/ยาว

3.1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเซรามิก

- แผ่นอัดไฮดรอลิก 10 ตัน
- แท่งแกนกดอัดสแตนเลส
- โมลสแตนเลส
- ฐานสแตนเลส
- สำลีเช็ดทำความสะอาด
- คัตตอนบัด

3.1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์

- เครื่องขัดเซรามิก
- กระดาษทราย เบอร์ 1,000 1,200 1,500
- ที่คืบชิ้นงานเหล็กสแตนเลส
- กล้องใสเก็บชิ้นงาน
- ฟองน้ำรองชิ้นงาน
- เวอร์เนีย (Vernier Caliper)

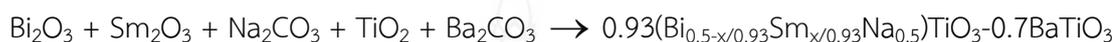
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- บิสมัทออกไซด์ (Bismuth oxide : Bi_2O_3) ความบริสุทธิ์ 98%
บริษัท Sigma Aldrich Chemie : GmbH
- แบเรียมคาร์บอเนต (Barium carbonate : BaCO_3) ความบริสุทธิ์ 99%
บริษัท Sigma Aldrich Chemie : GmbH
- ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) ความบริสุทธิ์ 99%
บริษัท Sigma Aldrich Chemie : GmbH
- ซามอร์เรียมออกไซด์ (Samarium oxide : Sm_2O_3) ความบริสุทธิ์ 99.999%
บริษัท Sigma Aldrich Chemie : GmbH
- โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate : Na_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99.995%
บริษัท Sigma Aldrich Chemie : GmbH
- ซิลิโคนออย (Silicone oil)
บริษัท VR Bioscience co.,Ltd

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1 การออกแบบสูตรทางเคมีของเซรามิก

สำหรับเซรามิก BSNT-BT อัตราส่วนที่ใช้มีดังนี้ $0.93(\text{Bi}_{0.5-x}/0.93\text{Sm}_x/0.93\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3-0.7\text{BaTiO}_3$ ร้อยละโดยโมล โดยส่วนของ Sm_2O_3 ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ โดย x มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.03, 0.04, 0.05 โดยโมล โดยจะอาศัยปฏิกิริยาการสลายตัว (Decomposition reaction) โดยสารตั้งต้นได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการแตกตัว ดังนี้



3.3.2 กระบวนการบดผสมสาร

- นำสารใส่ขวด PE และใส่เม็ดบดเซอร์โคเนียร์ลงในขวด จากนั้นใส่เอทานอลให้ปริมาณเอทานอลอยู่บริเวณขอบขวด
- ทำการปิดฝาจุกให้เรียบร้อย จากนั้นใช้เทปพันเกลียวพันรอบ ๆ ปิดฝาขวดให้สนิท และพันเทปขวด 3M รอบ ๆ ขวดอีกครั้งเพื่อไม่ให้เอทานอลไหลออกมาด้านนอก
- เมื่อเตรียมขวดบอลมิลเรียบร้อยแล้ว นำขวดไปวางบนแท่นหมุนเพื่อทำการบอลมิล ใช้เวลาในการบอลมิลเป็นเวลา 24 hr.
- เมื่อครบ 24 hr. แล้วนำสารที่ได้มาเทใส่ตะแกรงรองด้วยปิกเกอร์ เพื่อร่อนสารและทำความสะอาดเม็ดบดเซอร์โคเนียร์ด้วยเอทานอล จากนั้นนำสารไปกวนเพื่อสลายเอทานอล
- นำปิกเกอร์ที่ใส่สารไปอบสารให้แห้งสนิท จากนั้นชูดสารใส่เบ้าอะลูมิน่า และปิดฟอยด์ให้สนิท เพื่อร่อนนำไปเผาแคลไซน์



ภาพที่ 3.1 เครื่องบดผสมสารแบบหมุนวน (ก) ภาพที่ 3.1 กวนสาร (ข) ภาพที่ 3.1 อบแห้งสาร (ค)

3.3.3 การเผาแคลไซน์

1. เทสารลงในแม่พิมพ์เพื่ออัดขึ้นรูปชิ้นงาน จากนั้นอัดย่อนเพื่อนำชิ้นงานไปแคลไซน์
2. ทำความสะอาดเบ้าอะลูมิน่า จากนั้นนำสารชิ้นงานใส่ลงในเบ้าอะลูมิน่า
3. นำสารมาเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 2 hr. โดยอัตราการขึ้นของอุณหภูมิอยู่ที่ 5°C/s
4. เมื่อครบ 2 hr. หลังการเผาต้องรอให้สารเคมีและเบ้าอะลูมิน่าเย็นตัวลง ก่อนจึงจะนำออกจากเตา เพื่อลดการแตกของเบ้าอะลูมิน่าลง
5. นำฟอยด์ปิดเบ้าอะลูมิน่า เพื่อป้องกันฝุ่นละอองต่าง ๆ และนำสารไปไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอการอัดขึ้นรูป



ภาพที่ 3.2 เตาเผา (ก)



ภาพที่ 3.2 อุณหภูมิที่ใช้เผาแคลไซน์ (ข)

3.3.4 การอัดขึ้นรูปเซรามิก

1. เตรียม PVA 5wt% ทำการผสมกับสารและโถรงบดสารละเอียด
2. เช็ดทำความสะอาดแม่พิมพ์ด้วยเอทานอล เพื่อล้างสิ่งสกปรกหรือสารที่ตกค้างอยู่
3. เทสารลงในแม่พิมพ์ และอัดขึ้นงานโดยใช้ความดันในการอัดที่ 300 MPa
4. อัดย่อนเพื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์
5. เช็ดทำความสะอาดแม่พิมพ์ด้วยเอทานอล
6. เก็บชิ้นงานไว้ในกล่องเก็บชิ้นงาน



ภาพที่ 3.3 เ้าอัดชิ้นงาน (ก)



ภาพที่ 3.3 ชิ้นงาน (ข)

3.3.5 การเผาซินเตอร์

1. ทำความสะอาดเบ้าอะลูมินาด้วยเอทานอล
2. เตรียมชิ้นงานใส่ลงในเบ้าอะลูมินา นำเบ้าใส่เข้าไปในตู้เผาซินเตอร์
3. เผาชิ้นงานโดยเผาไล่ PVA ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 2 hr. โดยอัตราการขึ้นของอุณหภูมิอยู่ที่ 5 °C/s
4. จากนั้นเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 hr. โดยอัตราการขึ้นของอุณหภูมิอยู่ที่ 2 °C/s จากนั้นรอให้อุณหภูมิเตาลดจนถึง 100 °C จึงจะนำสารออกจากเตาเผา เพื่อลดการแตกของเบ้าอะลูมินา
5. ขัดปรับหน้าชิ้นงานด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 1,000 1,200 1,500 ให้เรียบเสมอ จากนั้นนำเซรามิกที่ได้ไปวิเคราะห์ผลด้วยเครื่องทางวิทยาศาสตร์ต่อไป



ภาพที่ 3.4 เตาเผา (ก)



ภาพที่ 3.4 อุณหภูมิที่ใช้เผาซินเตอร์ (ข)

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลวิจัย

3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น

1. นำเซรามิกตัวอย่างที่ได้มาชั่งน้ำหนักในอากาศด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง โดยค่าที่ได้จะเป็นน้ำหนักของเซรามิกในอากาศ

2. นำเซรามิกตัวอย่างที่ได้ลงในน้ำเพื่อชั่งน้ำหนักแขวนลอยของเซรามิก โดยค่าที่ได้จะเป็นน้ำหนักของเซรามิกในน้ำ

3. นำค่าที่วัดได้ทั้งหมดมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของเซรามิกตัวอย่าง โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$\rho = \frac{W_{Air}}{W_{Air} - W_{Water}} \times \rho_{Water} \quad (1)$$

เมื่อ W_{Air} คือ น้ำหนักของเซรามิกตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ (g)

W_{Water} คือ น้ำหนักของเซรามิกตัวอย่างที่ชั่งในน้ำ (g)

ρ คือ ความหนาแน่นของเซรามิกตัวอย่าง (g/cm^3)

และ ρ_{Water} คือ ความหนาแน่นของน้ำ ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1.0000 g/cm^3



ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดความหนาแน่น

3.4.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

สำหรับการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกตัวอย่างด้วยเครื่อง (X-Ray Diffractometer (ดังภาพที่ 3.7) เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของเซรามิก BSNT-BT มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารใส่ลงในแผ่นสไลด์ และนำเซรามิกตัวอย่างวางลงในเครื่อง ณ ตำแหน่งที่วางวัสดุ
2. ทำการวัดค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของเซรามิกที่องศา 2θ ความยาวคลื่นที่ $20\lambda - 80\lambda$
3. นำข้อมูลที่ได้จากการเครื่องมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นที่ทำการวัด



ภาพที่ 3.6 เตรียมชิ้นงาน (ก)



ภาพที่ 3.6 วัดค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ข)

3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก

1. ชัดปรับผิวหน้าชิ้นงานด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 1,200 1,500 จนได้ระนาบที่เรียบเสมอ
2. นำชิ้นงานไปทำให้แห้ง จากนั้นตากาวเงินที่ชิ้นงานให้เรียบเสมอทั่วชิ้นงานทั้งสองด้าน
3. อบแห้งอุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 20-30 s
4. นำเซรามิกตัวอย่างวางลงในเครื่อง ณ ตำแหน่งที่วางวัสดุตัวอย่าง
5. ทำการวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้า และนำข้อมูลที่ได้จากการเครื่องมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 3.7 วัดค่าไดโอดีเล็กทริก (ก)



ภาพที่ 3.7 วัดค่าไดโอดีเล็กทริก (ข)

3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก

1. นำชิ้นงานไปทำให้แห้ง จากนั้นตากาวเงินที่ชิ้นงานให้เรียบเสมอกับชิ้นงานทั้งสองด้าน
2. อบแห้งอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 20-30 s
3. นำเซรามิกตัวอย่างวางลงในเครื่อง ณ ตำแหน่งที่วางวัสดุตัวอย่าง
4. ใส่ซิลิโคนออย เพื่อลดการเกิดการสปาร์คของชิ้นงาน
5. ทำการวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้า และนำข้อมูลที่ได้จากการเครื่องมาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 3.8 ทำให้ชิ้นงานแห้ง (ก)



ภาพที่ 3.8 วัดค่าสมบัติทางไฟฟ้า (ข)

บทที่ 4

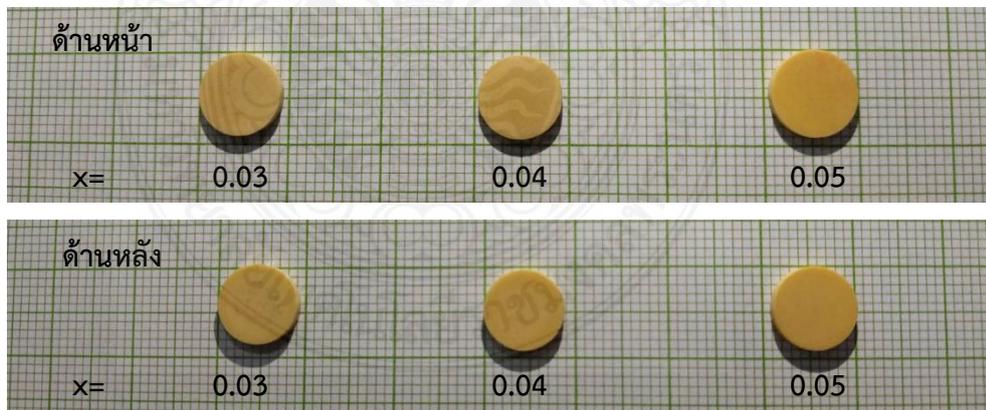
ผลการทดลอง และอภิปรายผล

บทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ การศึกษาโครงสร้าง และสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกบิสมาต์โซเดียมไททานेटที่เจือด้วย Sm_2O_3 โดยมีการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของเซรามิกตัว อย่าง ได้แก่ ความหนาแน่น ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นกับปริมาณความเข้มข้นของ Sm_2O_3 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ผลการวัดสมบัติไดอิเล็กทริก ค่าอิมพีแดนซ์ และเฟอร์โรอิเล็กทริก

4.1 สมบัติทางกายภาพของเซรามิกบิสมาต์โซเดียมไททานेट

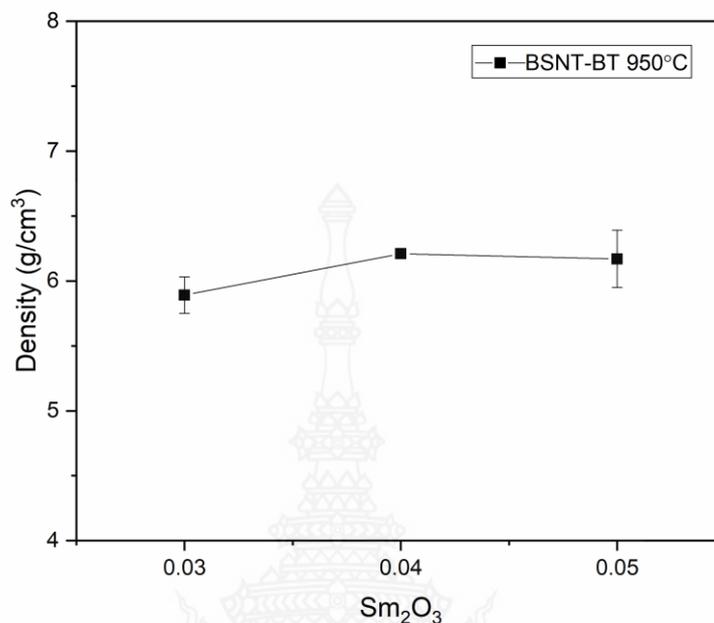
4.1.1 ลักษณะของเซรามิกที่เตรียม

จากการเตรียมเซรามิก $0.93(\text{Bi}_{0.5-x/0.93}\text{Sm}_{x/0.93}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3-0.7\text{BaTiO}_3$ ซึ่ง x คือค่าความเข้มข้นของซามอร์เรียมที่เจือในเซรามิก โดยความเข้มข้นของ Sm_2O_3 ที่ใช้ในการเจือ คือ ร้อยละ 0.03, 0.04 และ 0.05 โดยโมล จากภาพที่ 4.1 พบว่าเซรามิกตัวอย่างที่เตรียมสีของเซรามิกจะเข้มข้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Sm_2O_3 และมีรูพรุนเล็กน้อย



ภาพที่ 4.1 ลักษณะของเซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm_2O_3 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

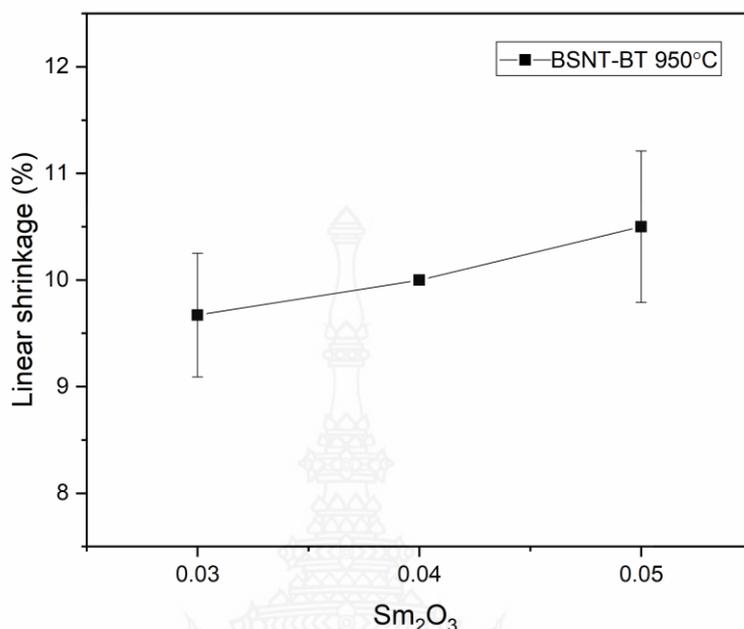
4.1.2 ความหนาแน่น



ภาพที่ 4.2 แสดงความหนาแน่นของเซรามิก BSNT-BT ที่เจือ Sm₂O₃ ที่ $x = 0.03, 0.04$ และ 0.05 โดยโมล

ผลการศึกษาความหนาแน่นของเซรามิกบิสมาทโซเดียมไททานเตที่เจือด้วย Sm₂O₃ ที่ 0.03, 0.04 และ 0.05 โดยโมล จากภาพที่ 4.2 ของชิ้นงานที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 950 °C 7 hr. พบว่ามีค่าความหนาแน่นของเซรามิกที่เจือ Sm₂O₃ ที่ความเข้มข้น $x=0.03$ มีค่าความหนาแน่น 5.8945 g/cm³, $x=0.04$ มีค่าความหนาแน่น 6.2150 g/cm³ และ $x=0.05$ มีค่าความหนาแน่น 6.1743 g/cm³ ซึ่งจะเห็นว่าเซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm₂O₃ ที่ $x=0.04$ มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด และจะเห็นว่าเซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm₂O₃ ที่ $x= 0.03, 0.04$ และ 0.05 มีค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ระหว่าง 0.1406 - 0.2152 g/cm³ ดังนั้นผลของการเติม Sm₂O₃ ส่งผลให้เซรามิกมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอีกด้วย

4.1.3 ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นกับปริมาณความเข้มข้นของ Sm_2O_3

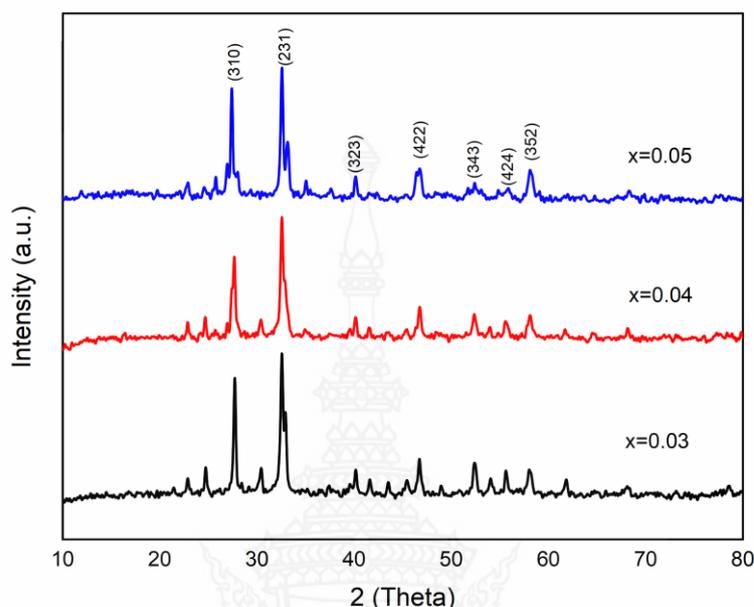


ภาพที่ 4.3 ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นกับปริมาณความเข้มข้นของเซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm_2O_3 ที่ $x = 0.03, 0.04, 0.05$ โดยโมล

เมื่อนำสาร $0.93(\text{Bi}_{0.5-x/0.93}\text{Sm}_{x/0.93}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3 - 0.07\text{BaTiO}_3$ ที่ $x = 0.03, 0.04$ และ 0.05 โดยโมล นำมาตรวจสอบค่าร้อยละของการหดตัวเชิงเส้น และนำผลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการหดตัวเชิงเส้นกับปริมาณความเข้มข้นของ Sm_2O_3 ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.3 จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นที่ $x = 0.03$ ค่าร้อยละการหดตัวเชิงเส้นอยู่ 9.67% ที่ความเข้มข้นที่ $x = 0.04$ ค่าร้อยละการหดตัวเชิงเส้นอยู่ 10.00% และที่ความเข้มข้นที่ $x = 0.05$ ค่าร้อยละการหดตัวเชิงเส้นอยู่ 10.50% ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการหดตัวเชิงเส้นในแต่ละความเข้มข้นมีค่าที่ไม่สม่ำเสมอ อาจเป็นผลมาจากปริมาณการเจือ Sm_2O_3 ที่เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ยังพบว่าความเข้มข้นที่ $x = 0.05$ ค่าร้อยละการหดตัวเชิงเส้นที่สูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องดังภาพที่ 4.2 เมื่อเจือ Sm_2O_3 พบว่ามีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เซรามิก BSNT-BT มีค่าร้อยละการหดตัวเชิงเส้นกับปริมาณความเข้มข้นของ Sm_2O_3 ที่ลดลง

4.2 การศึกษาโครงสร้างของเซรามิกบิสมาต์โซเดียมไททานเนต

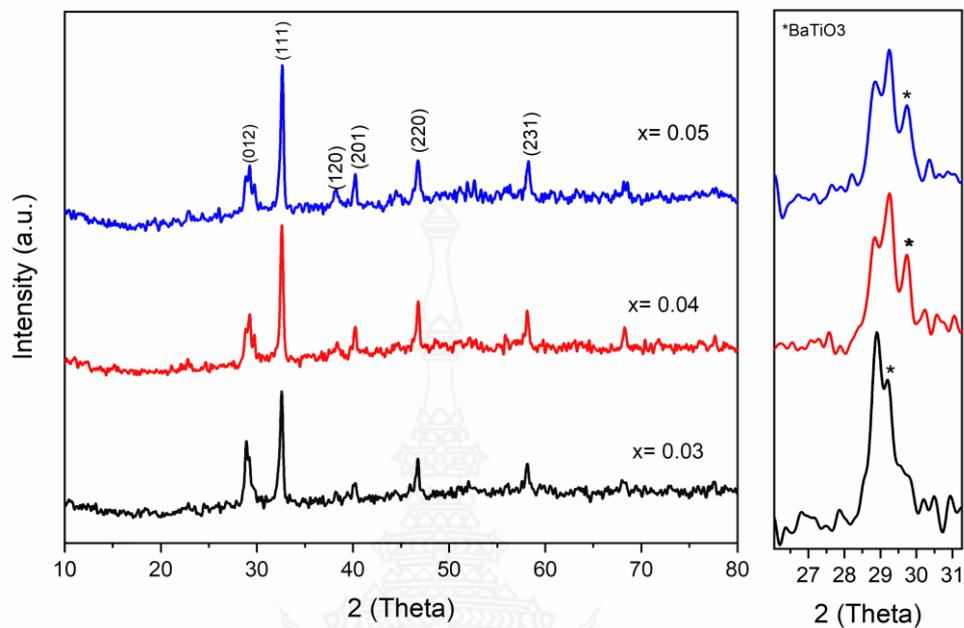
4.2.1 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) หลังจากแคลไซน์



ภาพที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) หลังจากแคลไซน์ เซรามิก BSNT-BT ที่เจือ Sm_2O_3 ที่ $x = 0.03, 0.04$ และ 0.05 โดยโมล

หลังจากการเตรียมสารตัวอย่างด้วยวิธี Solid stat โดยเผาแคลไซน์ที่ 850°C เป็นเวลา 2 hr. แล้วนำสารตัวอย่างมาวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) โดยการนำสารตัวอย่างที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างกันมาทดสอบคือ $0.93(\text{Bi}_{0.5x/0.93}\text{Sm}_{x/0.93}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3-0.07\text{BaTiO}_3$ ที่เติมสารเจือ Sm_2O_3 ที่ $x = 0.03, 0.04$ และ 0.05 เพื่อทดสอบผลการเตรียมสารจากกราฟเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันที่ 2θ เท่ากับ $10^\circ-80^\circ$ พบว่าสารตัวอย่างมีโครงสร้างผลึกคล้ายแบบเพอรอฟสไกต์ (perovskite) จากภาพที่ 4.4 เมื่อพิจารณาโครงสร้างจากกราฟเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันพบว่าพีคที่สูงที่สุดจะอยู่ที่ 2θ เท่ากับ $25^\circ-30^\circ$ พบว่าเป็นโครงสร้างของสาร Bi_2O_3 และมีโครงสร้างผลึกเป็น cubic พบว่าพีคที่ขึ้นที่ 2θ เท่ากับ $31^\circ-32^\circ$ เป็นโครงสร้างของสาร BaTiO_3 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็น cubic [33] และยังพบโครงสร้างเดียวกันที่ 2θ เท่ากับ 40° และช่วงที่ 46° จึงคาดได้ว่าสารตัวอย่างมีโครงสร้างผลึกเป็น cubic [57]

4.2.2 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) หลังจากซินเตอร์

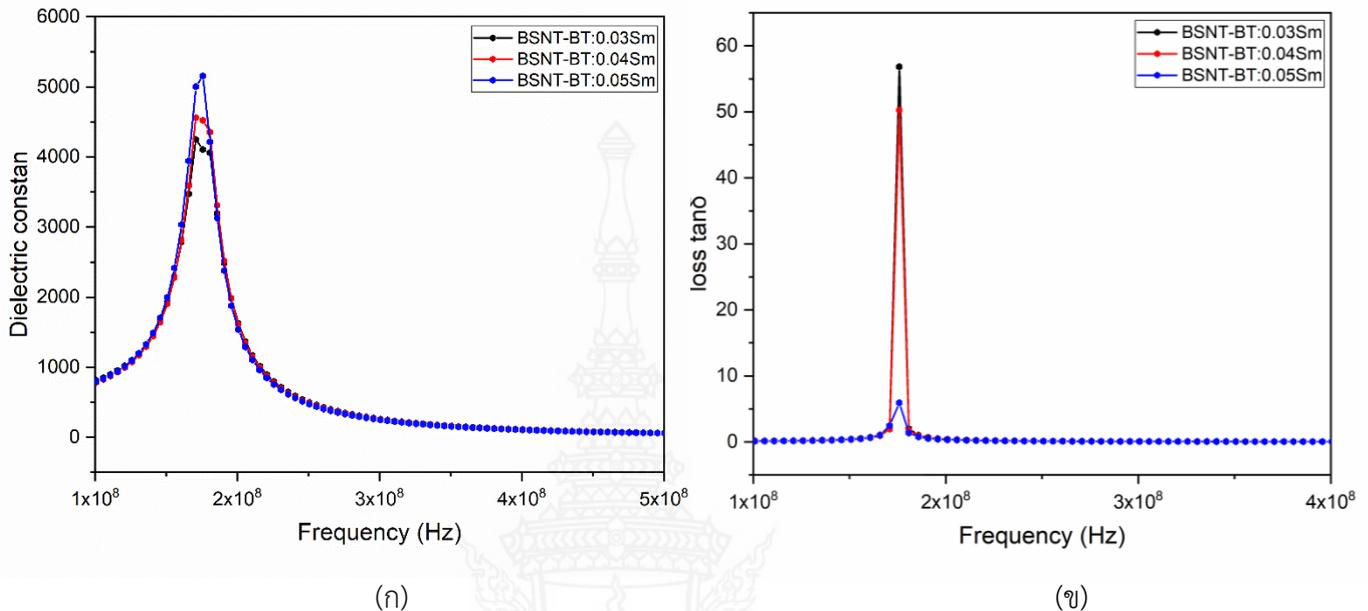


ภาพที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) หลังจากซินเตอร์ของเซรามิก BSNT-BT ที่เจือ Sm_2O_3 ที่ $x = 0.03, 0.04$ และ 0.05 โดยโมล

จากภาพที่ 4.5 การตรวจสอบเฟสองค์ประกอบของเซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm_2O_3 ที่ $x=0.03, 0.04$ และ 0.05 หลังจากการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 7 hr. ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ในช่วงความยาวคลื่น 2θ เท่ากับ $10\text{-}80^{\circ}$ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการเตรียมแบบสารละลายของแข็งเซรามิก BSNT-BT ผลการวิเคราะห์พบว่าสารตัวอย่างทั้งหมดมีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite) เมื่อพิจารณาโครงสร้างจากกราฟเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันจะพบพีคที่สูงที่สุดอยู่ที่ 2θ เท่ากับ 32.5° พบว่าเป็นโครงสร้างของสาร $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ และมีโครงสร้างผลึกที่คล้ายกับ tetragonal [35] พีครองลงมาคือ 2θ เท่ากับ 27.5° พบว่าเป็นโครงสร้างของสาร BaTiO_3 และมีโครงสร้างผลึกคล้ายกับ cubic [36] จากกราฟสามารถระบุได้ว่าเซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm_2O_3 ที่ $x = 0.03, 0.04, 0.05$ จะมีลักษณะโครงสร้างผลึกที่คล้ายกับ tetragonal เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ของโครงสร้างของสาร $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ สูงที่สุด และสำหรับเซรามิก BSNT-BT จุดพีคที่พบสามารถระบุถึงการมีของโครงสร้างผลึกที่คล้ายกับ tetragonal ซึ่งตามหลักทฤษฎีแล้วโครงสร้างผลึกเหล่านี้ย่อมมีผลต่อการตอบสนองกับอิเล็กตรอน [38]

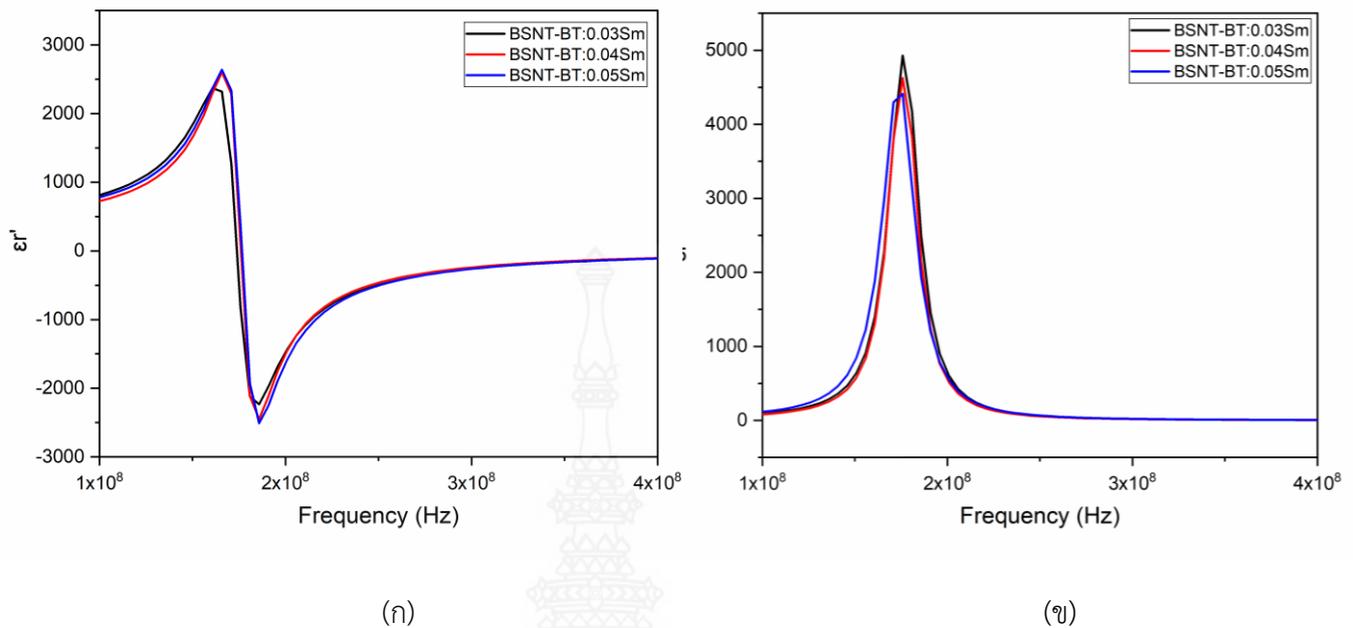
4.3 การศึกษาโครงสร้างสมบัติทางไฟฟ้า

4.3.1 ผลการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BSNT-BT



ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ก) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (ข) กับความถี่ของเซรามิก BSNT-BT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 950 °C

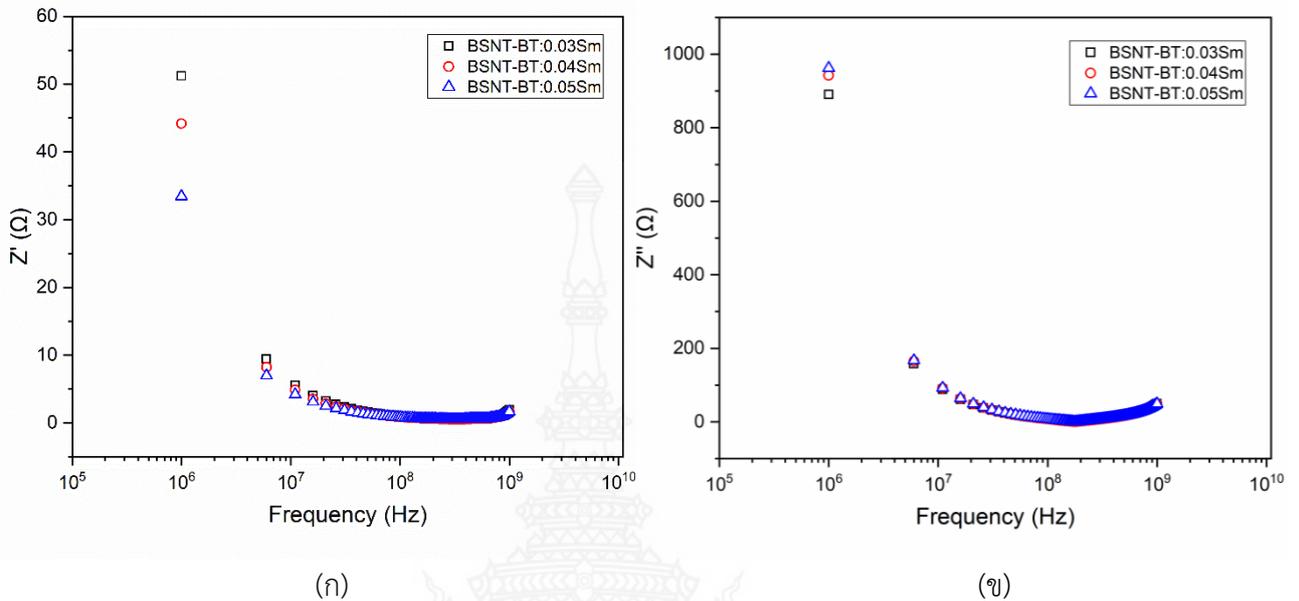
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิก BSNT-BT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 hr. โดยจะเริ่มวัดที่ความถี่ในช่วง 10^6 - 10^9 Hz ที่อุณหภูมิห้องแสดงดังภาพที่ 4.6 (ก) โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารตัวอย่างที่เจือ Sm_2O_3 ที่ $x=0.03, 0.04$ และ 0.05 ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่พบคือ 4249.552 F/m ที่ความถี่ 170 MHz, 4559.600 F/m ที่ความถี่ 170 MHz, 5156.345 F/m ที่ความถี่ 175 MHz ตามลำดับ พีคที่สูงที่สุดคือพีคของสารตัวอย่างที่เจือ Sm_2O_3 ที่ $x=0.05$ และ 0.04 โดยพบอยู่ในช่วงความถี่ที่ 170-175 MHz ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ 5156.345 และ 4559.600 F/m จากกราฟจะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงเนื่องจากความหนาแน่นของสารที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเจือ Sm_2O_3 ที่แสดงดังภาพที่ 4.2 [39] โดยเมื่อเทียบกับภาพที่ 4.6 (ข) จะพบว่ามีความสัมพันธ์กัน เมื่อสารตัวอย่างมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะส่งผลให้มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำ และสารตัวอย่างที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำจะมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูง จึงสามารถกล่าวได้ว่าสารตัวอย่างที่เจือ Sm_2O_3 เท่ากับ 0.05 จะมีความเป็นไดอิเล็กทริกสูง [40] และจะมีความสามารถในการเก็บประจุได้ดีในช่วงความถี่นั้น ๆ [41]



ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงส่วนจริง (ก) ส่วนจินตภาพ (ข) ไดอิเล็กทริกกับความถี่ของเซรามิก BSNT-BT ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 950 °C

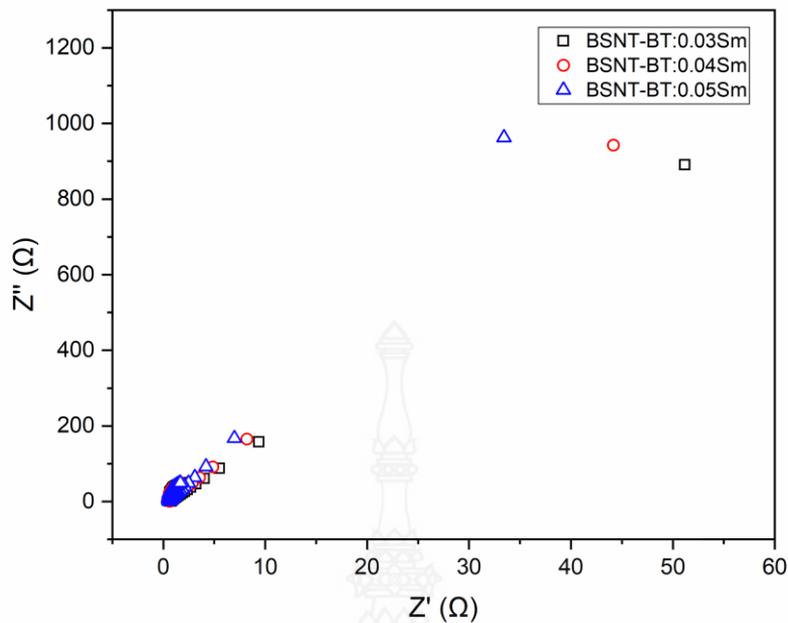
ϵ_r' คือส่วนจริงของสภาพยอมสัมพัทธ์เชิงซ้อนหรือเรียกว่าค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (dielectric constant) เป็นค่าที่แสดงพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในวัสดุ อันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าภายนอก [42] การเปรียบเทียบค่าส่วนจริงของไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของเซรามิก BSNT-BT ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 hr. แสดงดังภาพที่ 4.7 (ก.) โดยเซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm₂O₃ ที่ x = 0.03, 0.04 และ 0.05 มีลักษณะกราฟที่สูงที่สุดในช่วงความถี่ที่ 165 MHz ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าในช่วงความถี่ที่ 165 MHz เซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm₂O₃ ที่ x = 0.03, 0.04 และ 0.05 สามารถเป็นตัวเก็บประจุได้ดี [43] หลังจากนั้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นที่ 175 MHz ค่าไดอิเล็กทริกของเซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm₂O₃ ที่ x = 0.03, 0.04 และ 0.05 ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นดังแสดงที่ภาพที่ 4.7 (ข) ซึ่งเกิดการผ่อนคลายหรือเกิดการสูญเสียของไดอิเล็กทริก [44] ซึ่งจากภาพที่ 4.7 (ข) จึงกล่าวได้ว่าช่วงความถี่ที่ 165 MHz ถึง 175 MHz เซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm₂O₃ ที่ x = 0.03, 0.04 และ 0.05 สามารถเป็นตัวเก็บประจุได้ดีจากนั้น แต่หลังจากช่วงความถี่ 175 MHz ค่าความสามารถในการเก็บประจุจะลดลง

4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติอิมพีแดนซ์ของวัสดุเซรามิก BSNT-BT



ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงค่าส่วนจริง (ก) กราฟแสดงค่าส่วนจินตภาพ (ข) และความถี่ของอิมพีแดนซ์ เซรามิก BSNT-BT ที่เจือ Sm_2O_3 ที่ $x = 0.03, 0.04$ และ 0.05

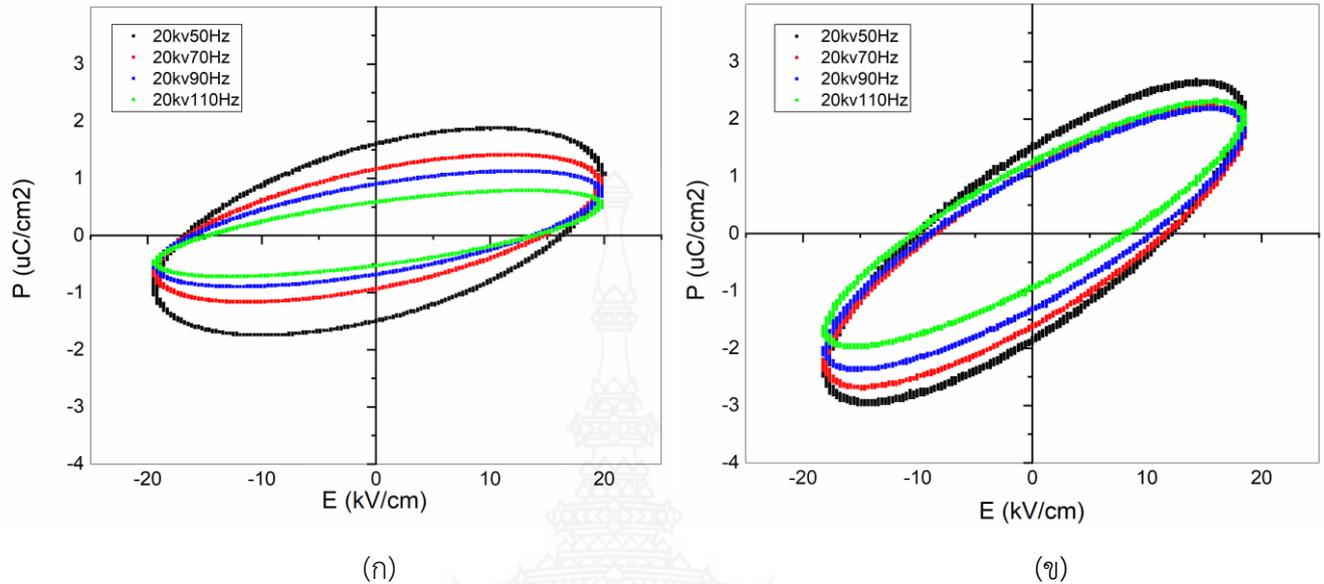
จากภาพที่ 4.8 (ก) จะเห็นว่าค่าความต้านทานของเซรามิก BSNT-BT ที่เจือ Sm_2O_3 ที่ $x = 0.03, 0.04$ และ 0.05 ความถี่ที่ 10^6 Hz มีค่าความต้านทานสูงที่สุดอยู่ในช่วง 51.19, 44.16, 33.44 Ω ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากภาพจะเห็นว่าเซรามิก BSNT-BT ที่เจือ Sm_2O_3 ที่ $x=0.03$ ความถี่ที่ 10^6 Hz มีความค่าความต้านทานสูงที่สุด และเมื่อเจือ Sm_2O_3 ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้เซรามิก BSNT-BT มีค่าความต้านทานต่ำลง [45] เนื่องจากมีค่าไดอิเล็กทริกที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.5 ที่มีความสอดคล้องกัน จากผลของความหนาแน่นจากภาพที่ 4.2 และค่าร้อยละการหดตัวของเซรามิกจากภาพที่ 4.3 BSNT-BT ส่งผลให้มีค่าความต้านทานที่ต่ำ [1] นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลให้เซรามิก BSNT-BT มีค่าความต้านทานที่ต่ำลงอีกด้วย จากภาพที่ 4.8 (ข) จะเห็นว่าเซรามิก BSNT-BT ที่ $x = 0.03, 0.04$ และ 0.05 มีลักษณะพุ่งขึ้นเข้าหาแกนจินตภาพ ที่มีความสอดคล้องค่าไดอิเล็กทริกที่แสดงดังภาพที่ 4.6 (ก) ส่งผลเซรามิก BSNT-BT มีพฤติกรรมคล้ายกับตัวเก็บประจุ



ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริง (Z') และส่วนจินตภาพ (Z'') ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z^*) ของเซรามิก BSNT-BT ที่เจือ Sm_2O_3 ที่ $x = 0.03, 0.04$ และ 0.05

จากผลศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก BSNT-BT ที่เจือ Sm_2O_3 ที่ $x = 0.03, 0.04$ และ 0.05 โดยเทคนิค Impedance spectroscopy เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริง (Z') และส่วนจินตภาพ (Z'') กราฟรูปครึ่งวงกลมอิมพีแดนซ์ดังภาพที่ 4.9 จะเห็นว่าเซรามิก BSNT-BT ที่เจือ Sm_2O_3 ที่ $x = 0.03$ โค้งเข้าหาแกนส่วนของค่าจริงมากที่สุด และเซรามิก BSNT-BT ที่เจือ Sm_2O_3 ที่ $x = 0.05$ มีลักษณะโค้งเข้าหาแกนส่วนของค่าจินตภาพมากที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาจะเห็นว่าเซรามิกที่เจือด้วย Sm_2O_3 ที่ $x = 0.03, 0.04, 0.05$ มีลักษณะของอิมพีแดนซ์ของวงจรมีพฤติกรรมคล้ายความเหนียวหรือความจุไฟฟ้า ซึ่งชี้ว่าโวลเตจและกระแสในวงจรมีเฟสต่างกัน เนื่องจากกราฟรูปครึ่งวงกลมอิมพีแดนซ์ส่วนของจินตภาพไม่เป็นศูนย์ [47] แต่จะเห็นว่าที่เซรามิกที่เจือด้วย Sm_2O_3 $x=0.03$ มีลักษณะโค้งเข้าหาแกนค่าจริงจึงคาดว่าพฤติกรรมการเหนียวหรือความจุไฟฟ้าจะมีไม่ดีเท่าเซรามิกที่เจือด้วย Sm_2O_3 ที่ $x = 0.04$ และ 0.05 ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือ Sm_2O_3 ส่งผลให้พฤติกรรมของเซรามิก BSNT-BT มีแนวโน้มที่จะมีพฤติกรรมการเหนียวหรือความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าไดอิเล็กทริกที่แสดงดังภาพที่ 4.6 (ก) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่แสดงดังภาพที่ 4.6 (ข)

4.3.3 ผลการศึกษาสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BSNT-BT



ภาพที่ 4.10 P-E Hysteresis Loop ที่เปลี่ยนแปลงตามสนามไฟฟ้าภายนอกที่ต่างกัน ของเซรามิก BSNT-BT ที่เจือ Sm_2O_3 ที่ $x=0.04$ (ก) และ 0.05 (ข) ที่ $E_0 = 20 \text{ kV/cm}$

จากภาพที่ 4.10 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าความเข้ม $E_0 = 20 \text{ kV/cm}$ และเพิ่มความถี่ $f = 50, 70, 90$ และ 110 ให้กับเซรามิกที่มีความถี่ต่าง ๆ จากพฤติกรรมการเกิดโพลาริเซชัน พบว่าเมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอกเข้าไป ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ วงวนฮิสเทอรีซิสจะมีค่าสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าเข้าไป [49] ทำให้โดเมนเกิดการ switching [48] และค่าโพลาริเซชันคงเหลือ P_r และสนามไฟฟ้าลบล้าง E_c ลดลง เมื่อเพิ่มความถี่ให้กับเซรามิก BSNT-BT [50] เกิดจากโดเมนมีการตอบสนองช้า จึงส่งผลให้ขนาดของวงวนฮิสเทอรีซิสมีลักษณะแคบลง [51] เมื่อเปรียบเทียบภาพที่ 4.10 (ก) และภาพที่ 4.10 (ข) จะเห็นว่าเซรามิกที่มีการเจือ Sm_2O_3 ที่ $x = 0.04$ มีลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิสที่เอียงมากกว่าเซรามิกที่มีการเจือ Sm_2O_3 ที่ $x = 0.05$ เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะตอมของเซรามิกมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ [53] ซึ่งที่ $x = 0.05$ มีค่าการโพลาริเซชันสูงกว่า ดังนั้นเซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm_2O_3 ที่ $x=0.05$ มีความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าได้ดีกว่าเซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm_2O_3 ที่ $x=0.04$ ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าไดอิเล็กทริกที่แสดงดังภาพที่ 4.6 (ก) และมีความสอดคล้องกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำที่สอดคล้องดังภาพที่ 4.8 (ก) ดังนั้นจึงทำให้เซรามิก BSNT-BT ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติ ferroelectric ที่ดี [52]

บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลสมบัติทางกายภาพ โครงสร้าง และสมบัติทางไฟฟ้า

จากการศึกษาเซรามิก $0.93(\text{Bi}_{0.5-x}/0.93\text{Sm}_x/0.93\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3-0.7\text{BaTiO}_3$ ที่เจือ Sm_2O_3 ที่ $x=0.03$ 0.04 และ 0.05 ที่สามารถเตรียมได้ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid State Reaction) ผลการทดลองพบว่าเซรามิก BSNT-BT มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง $5.8945-6.2150 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งเซรามิก BSNT-BT ที่มีความหนาแน่นมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าร้อยละการหดตัวเชิงเส้นกับปริมาณความเข้มข้นของ Sm_2O_3 มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณการเจือ Sm_2O_3 ที่มากขึ้นมีความสอดคล้องกัน อีกทั้งยังพบว่าผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ในช่วงความยาวคลื่น 2θ เท่ากับ $10-80^\circ$ การวิเคราะห์พบว่าสารตัวอย่างทั้งหมดมีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite) ซึ่งสามารถระบุได้ว่าเซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm_2O_3 ที่ $x = 0.03, 0.04, 0.05$ มีลักษณะโครงสร้างผลึกที่คล้ายกับ tetragonal เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ของโครงสร้างของสาร $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ สูงที่สุด และสำหรับเซรามิก BSNT-BT ซึ่งตามหลักทฤษฎีแล้วโครงสร้างผลึกเหล่านี้ อาจมีผลต่อการตอบสนองกับอิเล็กตรอนด้วย [38] สำหรับผลการทดสอบค่าไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกพบว่าเซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm_2O_3 ที่ $x = 0.05$ มีความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้ามากที่สุด เนื่องจากมีค่าไดอิเล็กทริกที่สูงและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ต่ำที่สุด ซึ่งมีความสอดคล้องกันค่าอิมพีแดนซ์ที่บ่งบอกถึงค่าความต้านทานของวัสดุที่มีค่าต่ำที่สุด และผลการทดสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกยังพบว่าเซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm_2O_3 ที่ $x = 0.03$ มีสมบัติการนำไฟฟ้าฟ้าได้ไม่ดีเนื่องจากเมื่อทำการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุมีผลทำให้เกิดการเบรกดาวน์ของชิ้นงาน จึงทำการทดสอบสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของชิ้นงานที่มีการเจือ Sm_2O_3 ที่ $x = 0.04$ และ 0.05 พบว่าที่ $x = 0.05$ มีค่าการโพลาไรเซชันสูงกว่าที่ $x = 0.04$ จึงมีความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าได้ดีกว่า ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าไดอิเล็กทริก และมีความสอดคล้องกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นจึงทำให้เซรามิก BSNT-BT ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ดีเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือ Sm_2O_3 ในเซรามิก BSNT-BT จึงกล่าวได้ว่าวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงตั้งแต่ 1000 ขึ้นไปและสามารถนำไปพัฒนางานด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพสูงได้ ซึ่งในปัจจุบันวัสดุไดอิเล็กทริกที่นำมาใช้งานเป็นตัวเก็บประจุได้จริงนั้นส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่มี BaTiO_3 เป็นองค์ประกอบ [46]

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการสังเคราะห์สารประกอบ $0.93(\text{Bi}_{0.5-x}/0.93\text{Sm}_x/0.93\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3-0.7\text{BaTiO}_3$ จะต้องหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดสารประกอบ หรือเกิด Single Phase
2. จากการศึกษาการสังเคราะห์เซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm_2O_3 โดยพบว่าปริมาณในการเจือมีผลต่อค่าความหนาแน่น ค่าไดอิเล็กทริก และค่าเพอร์โรอิเล็กทริกในทิศทางที่ดีขึ้นตามปริมาณในการเจือ Sm_2O_3 หากเพิ่มปริมาณการเจือใน Sm_2O_3 ที่มากขึ้นอาจส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น
3. ในการสังเคราะห์สารประกอบควรหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาผนึก เพื่อลดรูพรุนของชิ้นงาน
4. ในการอัดขึ้นรูปควรหาแรงอัดที่เหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานสามารถฟอร์มตัวได้ง่าย และมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น
5. ในขั้นตอนการเตรียมทดสอบชิ้นงาน การทำขั้วควรใช้อุณหภูมิในการอบชิ้นงานให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการหลุดของกาวเงิน และการพองของกาวเงิน ซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า
6. ในการสังเคราะห์สารประกอบ $0.93(\text{Bi}_{0.5-x}/0.93\text{Sm}_x/0.93\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3-0.7\text{BaTiO}_3$ จะต้องหากระบวนการบดผสมที่เหมาะสมในการเกิดสารประกอบ
7. ในการศึกษาโครงสร้างของสารประกอบควรบดสารให้มีความละเอียด และร่อนสารประกอบทุกครั้งในการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำของสารประกอบนั้น ๆ

บรรณานุกรม

- [1] Elaheh Taghaddos, Harry Charalambous, Thomas Tsakalakos, Ahmed Safari. (2019, August). “Electromechanical properties of flash sintered BNT-based piezoelectric ceramic”. *Journal of the European Ceramic Society*. Vol 39, Issue 9, pp. 2882-2888
- [2] Xin-Yu Kang , Zhi-Hao Zhao , Yu-Kai Lv, Yejing Dai. (2019, January 15). “BNT-based multi-layer ceramic actuator with enhanced temperature stability”. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol 771, pp. 541-546
- [3] Wook Jo, Silke Schaab, Eva Sapper, Ljubomira A. Schmitt, Hans-Joachim Kleebe et al. (2011, August). “On the phase identity and its thermal evolution of lead free $(\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2})\text{TiO}_3$ -6mol% BaTiO_3 ”. *Journal of Applied Physics*. Vol 110, Issue 7
- [4] Ruzhong Zuo, He Qi, Jian Fu. (2016, July). “Morphotropic NaNbO_3 - BaTiO_3 - CaZrO_3 lead-free ceramics with temperature-insensitive piezoelectric properties”. *Physics Letters*. Vol 109, Issue 2
- [5] Giuseppe Viola, Ruth McKinnon, Vladimir Koval, Arturas Adomkevicius, Steve Dunn, Haixue Yan. “Lithium-induced phase transitions in lead-free $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ based ceramics”. *The Journal of Physical Chemistry*. Vol 118, Issue 16, pp. 8564-8570.
- [6] Jun-Gill Kang, Bong-Ki Min, Youngku Sohn. (2015, February). “Synthesis and characterization of $\text{Sm}(\text{OH})_3$ and Sm_2O_3 nanoroll sticks”. *Journal of Materials Science*. Vol 50, Issue 4, pp. 1958–1964.
- [7] Chunlin Ma, Xingyu Wang, Zhixing Gan, Weishi Tan, Xiaoxiong Wang, Jia Zhang, Weiping Zhou. (2019, January) “Photoluminescence and optical temperature sensing in Sm^{3+} -doped $\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15}\text{Ti}_{0.90}\text{Zr}_{0.10}\text{O}_3$ lead-free ceramics”. *Ceramics International*. Vol 45, Issue 1, pp. 588-594
- [8] ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ. (2558, มกราคม). “ประโยชน์จากเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ในงานทดสอบวัสดุดิบและผลิตภัณฑ์”. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*. ฉบับที่ 197, หน้า 38-40
- [9] ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ. (2557, มกราคม). “การวัดขนาดอนุภาคนาโนเมตรด้วยเทคนิค X-ray Diffraction”. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*. ฉบับที่ 194, หน้า 34-35.
- [10] Cullity, B.D. ; Stock, S.R. (1956, March). “Elements of X-ray Diffraction”. *Third Edition*. New York: Prentice-Hall.

- [11] Haertling, Gene H. (1999, April). "Ferroelectric ceramics: history and technology". *Journal of the American Ceramic Society, Vol 82, pp. 797-818*
- [12] Damjanovic, D. (1998, May). "Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics". *Reports on Progress in Physics. Vol 61, pp. 1267- 1324.*
- [13] Moulson, A. J. and Herbert., J. M. (2003, June). "Electroceramics Materials Properties Application". *2nd Edition. London: Wiley*
- [14] G. Arlt, D. Hennings, G. de With (1985., August). "Dielectric properties of fine-grained barium titanate ceramics". *Journal of Applied Physics. Vol 58, Issue 4, pp. 1619-1625.*
- [15] นางสาวชื่นมนัส อุทัยสาร. (2556). "อิทธิพลของสารเจือแทนทาลัมที่มีผลต่อพฤติกรรมความต้านทานไฟฟ้าของเซรามิกเพอร์โรอิเล็กทริกปลอดสารตะกั่ว $(K_{0.50}Na_{0.46}Li_{0.04})(Nd_{(0.96-x)}Sd_{0.04}Ta_x)O_3$ ". *มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.*
- [16] Shujun Zhang, Ru Xia, Thomas R. Shrout (2007, December). "Lead-free piezoelectric ceramics vs. PZT". *Journal of Electroceramics. Vol 19, pp. 251-257.*
- [17] Wood D.L., Yi J.S., Nguyen T.V. (1998). "Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells". *Electrochimica Acta. Vol 43, pp. 3795-3809.*
- [18] นายอัศวิน พิษทองกลาง. (2556). "ผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนต่อการเสื่อมอายุของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานต". *มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุรนารี.*
- [19] นายนราธิป กัลยากาญจน์. (2555). "การเตรียมเมมเบรนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงประกอบที่ทนคาร์บอนมอนอกไซด์โดยพิมพ์อินก์เจ็ตสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ล". *มหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.*
- [20] John T. S. Irvine, Derek C. Sinclair, and Anthony R. West. (1990). "Electroceramics: Characterization by Impedance Spectroscopy." *Advanced Materials. Vol 3, pp.133-138.*
- [21] Gusakova, LG, Ishchuk, VM, Kisel, NG, Kuzenko, DV, and Spiridonov, NA. (2010, July). "Modified potassium sodium niobate based lead free piezoceramics". *Functional Materials, Vol 17, pp. 528-532*

- [22] Jigong Hao, Wei Li, Jiwei Zhai, Haydn Chen. (2018 July). “Progress in high-strain perovskite piezoelectric ceramics”. *Materials Science & Engineering R. Vol 135, pp. 1-57*
- [23] Baoyin Wang, Laihui Luo, Xijie Jiang, Weiping Li, Hongbing Chen. (2013, September 18) “Energy-storage properties of $(1-x)\text{Bi}_{0.47}\text{Na}_{0.47}\text{Ba}_{0.06}\text{TiO}_3-x\text{KNbO}_3$ lead-free ceramics”. *Journal of Alloys and Compounds. Vol 585, pp. 14-18*
- [24] ลดา พันธุ์สุขุมธนา, จันทรัตน์ วรสรรพวิทย์, ศิริวรรณ แซ่ภู, ฉัตรชัย บาลศรี. (2557, สิงหาคม). การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติการหดตัวเมื่อเผาของอุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิแบบวงกลม. *Bulletin of Applied Sciences. ฉบับที่ 3, หน้า 15-23.*
- [25] Yanjie Zhanga, Ruiqing Chu, Zhijun Xu, Jigong Hao , Qian Chena, Fu Peng, Wei Li , Guorong Li, Qingrui Yin. (2010, July). “Piezoelectric and dielectric properties of Sm_2O_3 -doped $_{0.82}\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3-_{0.18}\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{TiO}_3$ ceramics”. *Journal of Alloys and Compounds. Vol 502, Issue 2, pp. 341-345*
- [26] Wangfeng Bai, Daqin Chen, Yanwei Huang, Peng Zheng, Jiasong Zhong, Mingye Ding, Yongjun Yuan, Bo Shen, Jiwei Zhai, Zhenguo Ji. (2016, May 1). “Temperature-insensitive large strain response with a low hysteresis behavior in BNT-based ceramics”. *Ceramics International. Vol 42, Issue 6, pp. 7669-7680*
- [27] Kriti Batra, Nidhi Sinha, Binay Kumar. (2020, March 25). “Lead-free $_{0.95}(\text{K}_{0.6}\text{Na}_{0.4})\text{NbO}_3-_{0.05}(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{ZrO}_3$ ceramic for high temperature dielectric, ferroelectric and piezoelectric applications”. *Journal of Alloys and Compounds. Vol 818, Issue 15, pp.2874*
- [28] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2540, ตุลาคม-ธันวาคม). “เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกไร้สาร (ตะกั่ว) บิสมัทโซเดียมไททาเนต” *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, ฉบับ 9, หน้า 37-42*
- [29] P. Jaita, A. Watcharapasorn, S. Jiansirisomboon. (2011, May). “Effects BNT compound incorporated on structure and electrical properties of PZT ceramic”. *Current Applied Physics. Vol 11, Issue 3, pp. 77-81*
- [30] Chi ManLau, Xiao WuXu, K.W.Kwok. (2015, May 1). “Photoluminescence, ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of Er-doped BNT–BT multifunctional ceramics”. *Applied Surface Science. Vol 336, pp 314-320*
- [31] Julio Cesar Camilo Alborno Diaz, Michel Venet, Francesco Cordero, Paulo Sergio da Silva, Jr. (2018, May 25). “Anelastic and optical properties of $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ and $(\text{Bi}_{0.5}$

$\text{Na}_{0.5} \text{Ba}_{0.06} \text{TiO}_3$ lead-free ceramic systems doped with donor Sm^{3+} ". *Journal of Alloys and Compounds*. Vol 746, Issue 1, pp. 648–652.

[32] Junyu He, Jingji Zhang, Hongjie Xing, Haoli Pan, Xuanrui Jia, Jiangying Wang, Peng Zheng. "Thermally stable ferroelectricity and photoluminescence in Sm-doped $0.8 (\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3-0.2\text{SrTiO}_3$ ferroelectric ceramics". *Ceramics International*. Vol 43, Issue 1, pp. 250-255

[33] Natheer B. Mahmood, Emad K. Al-Shakarchi. (2011) "Three Techniques Used to Produce BaTiO_3 Fine Powder". *Journal of Modern Physics*. Vol 2, pp. 1420-1428

[34] Jones G. O., Thomas P. A. (2001, December 4) "Investigation of the structure and phase transitions in the novel A-site substituted distorted perovskite compound $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ ". *Acta Crystallographica Section B*. Vol 58, Issue 2, pp.168-178.

[35] Malmros G. (1970). "The crystal structure of alpha- Bi_2O_3 ". *Acta Chemica Scandinavica*. Vol 24, pp. 384-396

[36] Wenzhong Lu, Ying Wang, Guifen Fan, Xiaohong Wang, Fei Liang. (2011, October 10). "The structural and electric properties of Li- and K-substituted $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ ferroelectric ceramics," *Journal of Alloys and Compounds*. Vol 50, pp. 2738–2744

[37] Shoufu Shao, Jialiang Zhang, Zong Zhang¹, Peng Zhen¹, Minglei Zhao, Jichao Li¹ and Chunlei Wang. (2008, May 29). "High piezoelectric properties and domain configuration in BaTiO_3 ceramics obtained through the solid-state reaction route." *Journal of Physics D: Applied Physics*. Vol 41, pp1-5.

[38] Xiao Liu, Chang-Lai Yuan, Xin-Yu Liu, Feng-hua Luo, Qin Feng, Jiwen Xu, Guo-Hua Chen, Chang-Rong Zhou. (2016, June 25) "Microstructures, electrical behavior and energy-storage properties of $\text{Ba}_{0.06}\text{Na}_{0.47}\text{Bi}_{0.47}\text{TiO}_3-\text{Ln}_{1/3}\text{NbO}_3$ (Ln = La, Nd, Sm) ceramics." *Materials Chemistry and Physics*. pp. 1-8.

[39] ชมพูนุช พิษมากร. (2554). สมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก PZT แปรค่า ZT. *NU Science Journal*. ฉบับที่ 7, หน้า 114-122

[40] M. Sharif, Jolly Jacob, Muhammad Javed, Alina Manzoor, Khalid Mahmood, Muhammad Azhar Khan. (2019, May 11). "Impact of Co and Mn substitution on structural and dielectric properties of lithium soft ferrites." *Physica B: Condensed Matter*. Vol 567, pp. 45-50

- [41] ธาณินทร์ ปัจจุโส. (2555). วัสดุโพลีเมอร์ที่ไดอิเล็กตริก. *วารสารวิทยาศาสตร์ มข. ฉบับที่ 40, ครั้งที่ 1, หน้า 54-65*
- [42] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ, สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย และ สุขนัม ปิยโชติ. (2547, ตุลาคม 18). การวิเคราะห์กระบวนการให้ความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย. ฉบับที่ 18*
- [43] นวรัตน์ พิลาดง, นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์. (2562, กุมภาพันธ์ 20) เทคนิคการวัดสภาพยอมสัมพัทธ์เชิงซ้อน. *J Sci Technol MSU. ฉบับที่ 38, ครั้งที่ 3, หน้า 233-244.*
- [44] G. Power, Mamatha Nagaraj, J. K. Vij, and G. P. Johari. (2011, January 28) “Debye process and dielectric state of an alcohol in a nonpolar solvent” *Journal of Chemical Physics. Vol 134, pp. 1-9*
- [45] Sahu, T., & Behera, B. (2019). “Dielectric, electrical and magnetic study of rare-earth-doped bismuth ferrite lead titanate”. *Applied Physics A. Vol 125, Issue 6*
- [46] ประสิทธิ์ ทองใบ. (2556). “CaCu₃Ti₄O₁₂: วัสดุแห่งอนาคตเพื่อการประดิษฐ์เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาดจิ๋ว” *วารสารวิทยาศาสตร์ มข. ฉบับที่ 41, ครั้งที่ 1, หน้า 67-79*
- [47] ภัศราพร ก่องตีบ. “ความต้านทานเชิงซ้อน”. (2555, กุมภาพันธ์). *ADLAI E. STEVENSON HIGH SCHOOL Thcnology Education*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://sites.google.com/site/physicsbydreammy/system/app/pages/recentChanges>
- [48] Wongdamnern N, Ngamjarrojana A, Ananta, S, Laosiritaworn Y, Yimnirun R. (2008, august). “Scaling Behavior of Dynamic Hysteresis in Hard PZT Bulk Ceramics under Influence of Compressive Stress”. *Advanced Materials Research. Vol 55-57, pp.281–284*
- [49] ณัฐพงศ์ วงษ์ดำเนิน. (2557). “สมบัติเพอร์โรอิเล็กตริกในวัสดุเทอร์โมอิเล็กตริกออกไซด์”. สวพ. มทร.สุวรรณภูมิ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://research.rmutsb.ac.th/fullpaper/2558/2558240240269.pdf>
- [50] Wongdamnern N, Kanchiang K, Ngamjarrojana A, Ananta S, Laosiritaworn Y, Charoenphakdee A, Yimnirun R. (2014). “Crystal-structure dependent domain-switching behavior in BaTiO₃ ceramic”. *Smart Materials and Structures. Vol 23, Issue 8*

- [51] Maurya D, Wongdamnern N, Yimnirun R, Priya S. (2010, December). “Dielectric and ferroelectric response of compositionally graded bilayer and trilayer composites of BaTiO₃ and 0.975BaTiO₃-0.025Ba(Cu_{1/3}Nb_{2/3})O₃”. *Journal of Applied Physics*. Vol 108, 124111.
- [52] Wang, F. L., Li, Y., Wang, N., Zhu, L., Jain, A., Wang, Y. G., & Chen, F. G. (2019, November). “Enhanced magnetic, ferroelectric and optical properties of Sr and Co co-doped BiFeO₃ powders”. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol 810, 151941
- [53] อาทิตย์ เหล่าวาณีวัฒนา อีระชัย บางการณ. (2558). “การประดิษฐ์เซรามิกพีโซอิเล็กทริกบีเอ็มทีโซเดียมไททาเนต-บิสมัทแบบเรียงไททาเนตระบบที่เตรียมด้วยเทคนิคการเผาไหม้”. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://nuir.lib.nu.ac.th/dspace/handle/123456789/685>
- [54] นายอ่อนลมี กมลอินทร์. (2009) “การศึกษาการเติมสารเจือใน PTCR BaTiO₃ โดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีการดูดกลืนรังสีเอกซ์”. *มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*.
- [55] Suryakanta Nayak, Banalata Sahoo, Tapan Kumar Chaki and Dipak Khastgir. (2013, November 14). “Facile preparation of uniform barium titanate (BaTiO₃) multipods with high permittivity: impedance and temperature dependent dielectric behavior”. *RSC Advances*. Vol. 4, pp. 1212–1224
- [56] H. F. Kay and P. Vousden. (1949, Jul 26) “XCV. Symmetry Changes in Barium Titanate at Low Temperatures and their Relation to its Ferroelectric Properties.” *Journal of Science*. Vol.40, Issue 309, pp.1019-1040
- [57] Lars Gunnar Sillén (1937) “X-Ray Studies on Bismuth Trioxide”, *Arkiv foer Kemi, Mineralogi och Geologi*. Vol 12, Issue 18, pp. 1-15

ภาคผนวก



ตารางภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของเซรามิก BSNT-BT ที่เจือด้วย Sm_2O_3

| ความเข้มข้นของ Sm_2O_3 | ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm^3) | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|--|---------------------------------------|----------------------|
| 0.03 | 5.8945 | 0.1406 |
| 0.04 | 6.2150 | 0.0000 |
| 0.05 | 6.1743 | 0.2152 |



ตารางภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นกับปริมาณความเข้มข้นของ Sm_2O_3

| ความเข้มข้นของ Sm_2O_3 | ร้อยละการหดตัวเชิงเส้นกับปริมาณความเข้มข้น | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|--|--|----------------------|
| 0.03 | 9.67% | 0.58 |
| 0.04 | 10.00% | 0.00 |
| 0.05 | 10.50% | 0.71 |



ตารางภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและความถี่ของเซรามิก BSNT-BT ที่เจือ Sm_2O_3

| ความเข้มข้นของ Sm_2O_3 | ความถี่ (MHz) | ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงสุด (F/m) |
|--|---------------|-----------------------------------|
| 0.03 | 170 | 4249.552 |
| 0.04 | 170 | 4559.600 |
| 0.05 | 170 | 5156.345 |



ตารางภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกและความถี่ของเซรามิก BSNT-BT ที่เจือ Sm_2O_3

| ความเข้มของ Sm_2O_3 | ความถี่ (MHz) | ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกสูงสุด (F/m) |
|-------------------------------------|---------------|--|
| 0.03 | 175 | 56.83002 |
| 0.04 | 175 | 50.25902 |
| 0.05 | 175 | 5.94044 |



ตารางภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ค่าส่วนจริงและค่าส่วนจินตภาพความต้านทานที่ความถี่ 10^6 ของอิมพีแดนซ์เซรามิก BSNT-BT ที่เจือ Sm_2O_3

| ความเข้มของ Sm_2O_3 | ความถี่ (MHz) | ความต้านทาน (Ω) |
|-------------------------------------|---------------|--------------------------|
| 0.03 | 10^6 | 51.19 |
| 0.04 | 10^6 | 44.16 |
| 0.05 | 10^6 | 33.44 |



ประวัตินักศึกษา



ชื่อ นามสกุล ธนาภรณ์ อิ่มเขียว
 วัน เดือน ปีเกิด 7 ธันวาคม 2540
 ภูมิลำเนา 26/1 หมู่ 11 ต.บางแพ อ.บางแพ จ.ราชบุรี
 ประวัติการศึกษา
 วุฒิมัธยมศึกษา ชื่อสถาบัน
 มัธยมศึกษา โรงเรียนบางแพปฐมพิทยา
 ประถมศึกษา โรงเรียนวัดดอนซ่ง

ปีสำเร็จการศึกษา
 2559
 2553

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ thanaporn-i@rmutp.ac.th



ประวัตินักศึกษา



ชื่อ นามสกุล ลักษณา มั่นสามุข
 วัน เดือน ปีเกิด 11 พฤศจิกายน 2540
 ภูมิลำเนา 125/79 หมู่ 3 ต.บึงสนั่น อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี

ประวัติการศึกษา

| | | |
|--------------|-------------------|---------------------|
| วุฒิการศึกษา | ชื่อสถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
| มัธยมศึกษา | โรงเรียนธัญรัตน์ | 2559 |
| ประถมศึกษา | โรงเรียนวัดในกลาง | 2553 |

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ luksana-m@rmutp.ac.th

