

สมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต
ที่เติมบิสมัทไดสโพรเซียมไทเทเนต

**FERROELECTRIC PROPERTIES OF LEAD ZIRCONATE TITANATE
CERAMICS BY BISMUTH DYSPROSIUM TITANATE ADDITION**

นววรรณ ทองมี* และธัชพร ยี่เต็ง

Navavan Thongmee* and Thanachporn Yeeteng

Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok 65000

*corresponding author e-mail: navavan_new@hotmail.com

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต ที่เติมบิสมัทไดสโพรเซียมไทเทเนต (1-x)PZT-xBDT เมื่อ x มีค่าเท่ากับ 0.03, 0.05, 0.07, 0.15 และ 0.20 เศษส่วน โดยน้ำหนัก ทำการเตรียมโดยวิธีผสมออกไซด์ และทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเซรามิกที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์เฟส และตรวจสอบสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริก พบว่า ผลของการวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมปริมาณ BDT ไปเล็กน้อยที่อัตราส่วน $x = 0.03-0.05$ รูปแบบการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นแสดงเฟสเด-ตระโกนอลของ PZT แต่เมื่อปริมาณ $x = 0.15$ พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนเริ่มปรากฏพีคของ BDT ขึ้น จากการศึกษสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกที่เตรียมได้ พบว่าเมื่อเติมปริมาณ BDT เข้าไปใน PZT เพียงเล็กน้อย คือที่อัตราส่วน 0.97PZT-0.03BDT ทำให้เซรามิกที่ได้มีค่าสนามลบล้างไฟฟ้าเท่ากับ 0.738 กิโลโวลต์ต่อตารางเซนติเมตร และค่าสภาพคงเหลือของโพลาริเซชันประมาณ 18.7 ไมโครคูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเซรามิก PZT บริสุทธิ์ และ BDT บริสุทธิ์

คำสำคัญ: เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต บิสมัทไดสโพรเซียมไทเทเนต สมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริก

Abstract

In this research, lead zirconate titanate ceramics with bismuth dysprosium titanate addition (1-x)PZT-xBDT when $x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.15$ and 0.20 wt% were prepared by solid-state mixed oxide method. All of the samples were sintered at 1000°C . The ceramics

were characterized of phase analysis and ferroelectric properties. Phase analysis was characterized by x-ray diffractometer. The pattern of ceramic with x are between 0.03 and 0.05 shows the single phase tetragonal of PZT. When increased of bismuth up to 0.15, the BDT peak was appeared. Ferroelectric properties of ceramics showed the remanent polarization $\sim 18.7 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ and coercive field $\sim 0.738 \text{ kV}/\text{cm}$ can be improved with addition small amount 0.03 wt% of BDT.

Keywords: Lead zirconate titanate, Bismuth dysprosium titanate, Ferroelectric properties

บทนำ

สารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric materials) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ ตัวแปลงไฟฟ้าแรงดัน (piezoelectric transducers) ตัวเก็บประจุ (capacitors) เครื่องตรวจจับ (sensors) และหน่วยความจำที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลในคอมพิวเตอร์ (ferroelectric random access memories; FeRAM) เป็นต้น (Haertling, 1999) สารประกอบเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (lead zirconatetitanate; PZT) เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นแบบเพอร์รอฟสไกต์ (perovskite) เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กทริกชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้งานอย่างมาก เนื่องจากเป็นสารที่แสดงสมบัติทางด้านเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) และเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับสารอื่นๆ กล่าวคือ มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant; ϵ_r) สูง และมีค่าโพลาริเซชันคงเหลือ (remanent polarization; P_r) สูง (Haertling, 1999; Scott, 2005) สารเฟอร์โรอิเล็กทริกอีกกลุ่มหนึ่งที่เป็นที่นิยมในการนำมาประยุกต์ใช้ ได้แก่ สารที่มีโครงสร้างแบบชั้นบิสมัท (bismuth layered structure) หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า โครงสร้างเออริวิลเลียส (aurivillius structure) (Aurivillius, 1949a, 1949b, 1950c) สารบิสมัทไทเทเนต (bismuth titanate; BT) เป็นสารในกลุ่มนี้ที่มีการนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีค่าโพลาริเซชันอัตโนมัติ (spontaneous polarization; P_s) สูง คุณสมบัติที่ใช้ในระบบการผลิตคอนข้างต่ำ มีอุณหภูมิคูรี (curie temperature; T_c) สูง และมีค่าความทนทานต่อความล้าสูง (Azurmendi & Caro, 2006) แต่อย่างไรก็ตามสารประกอบในกลุ่มนี้ก็มีข้อด้อยอยู่มาก ได้แก่ มีค่าโพลาริเซชันคงเหลือต่ำและค่าสนามลบล้างไฟฟ้า (coercive field; E_c) สูง (Tang et al., 2006) นอกจากนั้นสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss; $\tan\delta$) ของสารบิสมัทไทเทเนตยังมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสารเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า และเฟอร์โรอิเล็กทริกของสารบิสมัทไทเทเนต โดยการเจือไอออนด้วยตัวให้ (donor doping) ได้แก่ แลนทานัม (La) (Simoes et al.,

2004) ซาแมเรียม (Sm) (Chon et al., 2001) หรือ ไดสโพรเซียม (Dy) (Kim et al., 2004) ในโครงสร้างของบิสมาทไทเทเนตที่ตำแหน่งบิสมาท (bi-site) พบว่าสารบิสมาทไทเทเนตที่ถูกเจือเหล่านี้มีค่าทางไฟฟ้า และเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับสารเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต ถือว่ามีค่าน้อยมาก (Thongmee et al., 2008a, 2012b) ได้ทำการศึกษาเซรามิกเลดเซอร์โคเนต-ไทเทเนตที่เติมบิสมาทแลนทานัมไทเทเนต เซรามิกที่เตรียมได้มีการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า และเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตบริสุทธิ์ และมีบิสมาทแลนทานัมไทเทเนตบริสุทธิ์ได้ ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการเตรียมเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนตและบิสมาทไดสโพรเซียมไทเทเนต ที่มีสูตรทั่วไปเป็น $(1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3-x\text{Bi}_{3.75}\text{Dy}_{0.75}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ หรือ $(1-x)\text{PZT-xBDT}$ (เมื่อ x เท่ากับ 0.03, 0.05, 0.07, 0.15 และ 0.20) และทำการวิเคราะห์เฟสความหนาแน่น และสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกที่เตรียมได้

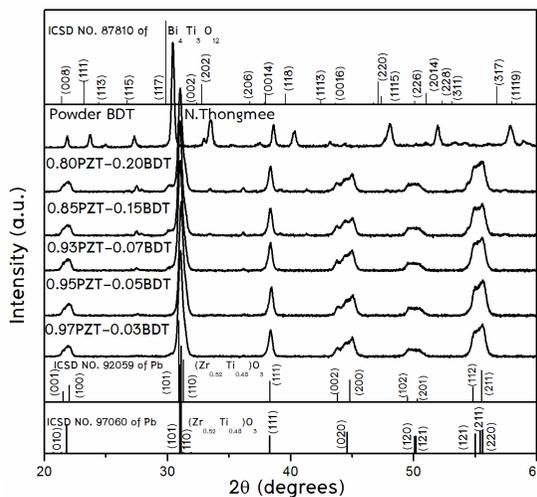
วิธีดำเนินการวิจัย

เตรียมผงของสารประกอบเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต และผงสารประกอบบิสมาทไดสโพรเซียมไทเทเนต ด้วยวิธีผสมออกไซด์ โดยทำการชั่งสารตั้งต้น ได้แก่ PbO , ZrO_2 , TiO_2 , Bi_2O_3 และ Dy_2O_3 แล้วนำมาผสมกันตามสมการเคมี คือ $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ (PZT) และ $\text{Bi}_{3.25}\text{Dy}_{0.75}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BDT) จากนั้นนำสารที่ชั่งได้มาบดผสมให้เข้ากันด้วยกระบวนการบดย่อย เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำให้แห้งด้วยกระบวนการอบแห้ง จากนั้นนำผงผสมที่ได้ไปทำการแคลไซน์ด้วยเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที สำหรับผง PZT บริสุทธิ์ และที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที สำหรับผง BDT บริสุทธิ์ จากนั้นนำผงสาร PZT และ BDT บริสุทธิ์ที่เตรียมได้มาผสมกันด้วยอัตราส่วน $(1-x)\text{PZT-xBDT}$ เมื่อ x มีค่าเท่ากับ 0.03, 0.05, 0.07, 0.15 และ 0.20 ร้อยละโดยน้ำหนัก นำผงมาบดผสมกันด้วยวิธีบอลมิลล์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำให้แห้งด้วยกระบวนการอบแห้ง นำผงผสม $(1-x)\text{PZT-xBDT}$ ที่เตรียมได้มาผสมกับสารยึดเหนี่ยว คือ สารโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นกลม (disc) ด้วยเครื่องอัดระบบไฮดรอลิกแบบทิศทางเดียว (uniaxial pressing) จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปไปเผาซินเตอร์โดยเรียงในถ้วยอะลูมินา แล้วใช้ผงของตัวมันเองกลบชิ้นงาน จากนั้นนำเข้าเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง โดยทำการเผาไล่สารยึดเหนี่ยวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที นำเม็ดเซรามิกที่ผ่านการซินเตอร์ไปวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

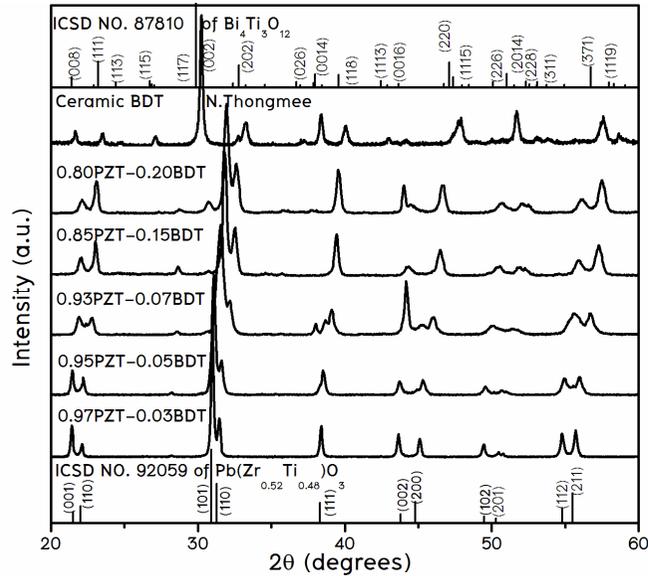
ตรวจสอบค่าความหนาแน่นด้วยหลักการของอาร์คิมิดีส และวัดสมบัติทางเพโรอิเล็กทริก ได้แก่ ค่าสนามไฟฟ้าลบล้าง (coercive field) และ ค่าโพลาริเซชันคงเหลือ (remanent polarization)

ผลการวิจัย

เมื่อนำผง PZT ที่เตรียมได้จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที และผง BDT ที่เตรียมได้จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที มาผสมกันด้วยเทคนิคผสมออกไซด์ ด้วยอัตราส่วนการผสมเป็น (1-x)PZT-xBDT เมื่อ x มีค่าเท่ากับ 0.03, 0.05, 0.07, 0.15 และ 0.20 เศษส่วนโดยน้ำหนัก ตามลำดับ ไปทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction analysis) รูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้ พบว่าเฟสที่เกิดขึ้นเป็นเฟสผสมระหว่างเตตระโกนอลของสาร PZT ซึ่งสอดคล้องกับแฟ้มข้อมูลมาตรฐาน ICSD หมายเลข 92059 และออร์โทโรมบิกของสารบิสมีทโดลโพรเซียมไทเทเนต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thongmee et al., 2009 ซึ่งปรากฏพิคของปริมาณ BDT เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของผง BDT ที่เติมเพิ่มขึ้น รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงดังภาพที่ 1 จากนั้นนำผงผสมที่ได้ มาทำการอัดขึ้นรูป และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที นำเม็ดเซรามิกที่ได้มาตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 2 และทำการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของเซรามิก ด้วยหลักการของอาร์คิมิดีส พบว่าเมื่อปริมาณ BDT เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลง ซึ่งเซรามิกที่มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด คือ เซรามิกที่อัตราส่วน 0.97PZT-0.03BDT มีค่าเท่ากับ 7.28 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงผสม (1-x)PZT-xBDT

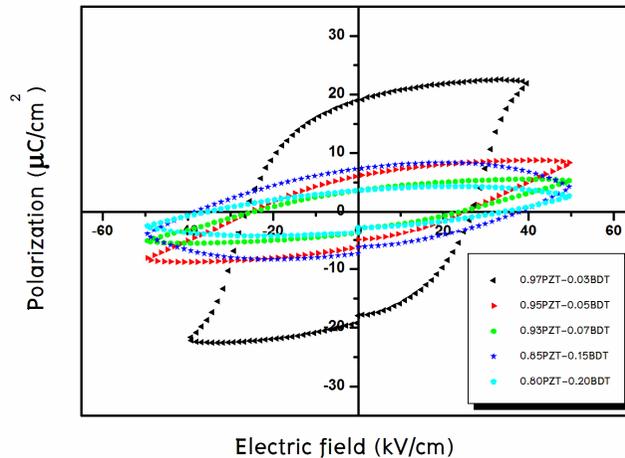


ภาพที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซรามิกระบบ (1-x)PZT-xBDT

ตารางที่ 1 แสดงค่าความหนาแน่นของเซรามิกระบบ (1-x)PZT-xBDT

(1-x)PZT-xBDT	ค่าความหนาแน่น (g/cm ³)
0.97PZT-0.03BDT	7.28 ± 0.06
0.95PZT-0.05BDT	5.97 ± 0.06
0.93PZT-0.07BDT	5.51 ± 0.04
0.85PZT-0.15BDT	5.17 ± 0.02
0.80PZT-0.20BDT	4.54 ± 0.01

เซรามิกระบบ (1-x)PZT-xBDT ทุกอัตราส่วน ถูกนำมาตรวจสอบสมบัติทางเพโรอิเล็กทริก โดยศึกษาจากลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิส ค่าสนามไฟฟ้าลบล้าง และค่าโพลาริเซชันคงเหลือของเซรามิก ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิก (1-x)PZT-xBDT แสดงดังภาพที่ 3 จากผลที่ได้จะเห็นว่า เซรามิกที่อัตราส่วน 0.97PZT-0.03BDT มีค่าโพลาริเซชันคงเหลือสูงที่สุดในระบบ คือมีค่าประมาณ 18.72 ไมโครคูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร แต่เมื่อปริมาณ BDT เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าโพลาริเซชันคงเหลือของเซรามิกมีค่าลดลง เนื่องจากสาร BDT บริสุทธิ์มีสมบัติทางเพโรอิเล็กทริกที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อใส่ไปในปริมาณเพิ่มขึ้นจึงไปมีผลให้ค่าโพลาริเซชันของเซรามิกลดลง



ภาพที่ 3 ลักษณะวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิกระบบ $(1-x)\text{PZT}-x\text{BDT}$

อภิปรายผล

จากการวิเคราะห์เฟสของเซรามิกระบบ $(1-x)\text{PZT}-x\text{BDT}$ เมื่อ x มีค่าเท่ากับ 0.03, 0.05, 0.07, 0.15 และ 0.20 ร้อยละโดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อทำการเติม BDT ลงไปในโครงสร้าง PZT ในอัตราส่วน 0.03 และ 0.05 โดยน้ำหนัก รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไม่ปรากฏพีคของโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอลที่ตรงกับแฟ้มข้อมูล ICSD หมายเลข 97060 แต่เหลืออยู่เฉพาะพีคของโครงสร้างแบบเตตระโกนอลที่สอดคล้องกับแฟ้มข้อมูล ICSD หมายเลข 92059 เท่านั้น และพีคมีการเลื่อนไปทางขวาเล็กน้อยจากพีคของแฟ้มมาตรฐาน PZT บริสุทธิ์ เนื่องมาจากการละลายของ BDT เข้าไปในโครงสร้าง PZT ในระหว่างกระบวนการเผาซินเตอร์น่าจะมีการละลายอย่างสมบูรณ์ เพราะไม่ปรากฏพีคของ BDT ขึ้นในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต่างจากในอัตราส่วน 0.07, 0.15 และ 0.20 ที่ปรากฏพีคแปลกปลอมขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกระบบ $(1-x)\text{PZT}-x\text{BDT}$ พบว่า เซรามิกที่มีสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกสูงที่สุด คือ เซรามิก 0.97PZT-0.03BDT มีค่าโพลาริเซชันคงเหลือ เท่ากับ 18.72 ไมโครคูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของเซรามิกระบบนี้ ที่มีค่าความหนาแน่นมากที่สุดที่อัตราส่วนเดียวกัน นอกจากนี้พบว่าค่าโพลาริเซชันคงเหลือของ 0.97PZT-0.03BDT ที่ได้มีค่าสูงกว่าของสาร PZT บริสุทธิ์ (~11 ไมโครคูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร) (Thongmee et al., 2012) กล่าวคือ การเติมบิสฟัทไดสโพรเซียมไทเทเนต (BDT) เข้าไปในสารเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) ในปริมาณ 0.03 สามารถปรับปรุงสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกได้

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้สามารถเตรียมเซรามิกระบบ $(1-x)\text{PZT}-x\text{BDT}$ เมื่อ $x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.15$ และ 0.20 ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยวิธีผสมออกไซด์ เซรามิกระบบนี้มีค่าความหนาแน่นที่ดีที่สุดที่อัตราส่วน $x = 0.03$ ($0.97\text{PZT}-0.03\text{BDT}$) อาจเนื่องมาจากปริมาณอะตอมของ BDT ที่เติมลงไปมีปริมาณเหมาะสม สามารถกระจายตัวได้ดี และสม่ำเสมอ เมื่อตรวจสอบสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกระบบ $(1-x)\text{PZT}-x\text{BDT}$ พบว่า ที่อัตราส่วน $x = 0.03$ ($0.97\text{PZT}-0.03\text{BDT}$) มีสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ดีที่สุด กล่าวคือ มีค่าโพลาริเซชันคงเหลือ ประมาณ 18.7 ไมโครคูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าโพลาริเซชันสูงสุด ประมาณ 21.92 ไมโครคูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร และค่าสนามลบล้างไฟฟ้า ประมาณ 0.738 กิโลโวลต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งกล่าวได้ว่าเซรามิกระบบที่เตรียมได้มีการปรับปรุงสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิก PZT บริสุทธิ์ และเซรามิก BDT บริสุทธิ์ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนและส่งเสริมการวิจัยของมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย ขอขอบคุณภาคีวิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเตรียมเซรามิกและเครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- Aurivillius, B. (1949). Mixed bismuth oxide with layer lattices, I. The structure type of $\text{CaNb}_2\text{Bi}_2\text{O}_9$. **Arkiv Kemi**, 1, 463-480.
- Aurivillius, B. (1949). Mixed bismuth oxide with layer lattices, II. Structure of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$. **Arkiv Kemi**, 1, 499-512.
- Aurivillius, B. (1950). Mixed bismuth oxide with layer lattices, III. Structure of $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{12}$. **Arkiv Kemi**, 2, 519-527.
- Azurmendi, N. & Caro, I. (2006). Microwave-assisted reaction sintering of bismuth titanate-based ceramics. **Journal of American Ceramic Society**, 89, 1232-1236.
- Chon, U., Kim, K.-B., Jang, H.M., & Yi, G.-C. (2001). Fatigue-free samarium modified bismuth titanate ($\text{Bi}_{4-x}\text{Sm}_x\text{Ti}_3\text{O}_{12}$) film capacitors having large spontaneous polarizations. **Applied Physics Letters**, 79, 3137-3139.
- Haertling, G.H. (1999). Ferroelectric ceramics: history and technology. **Journal of American Ceramic Society**, 82, 797-818.

- Kim, S.S., Song, J.S., & Kwon, S-C. (2004). Ferroelectric $(\text{Bi,Dy})_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films deposited on Pt (111) $/\text{Ti/SiO}_2/\text{Si}$ and p-type Si (100) substrates. **Journal of Crystal Growth**, 271, 90-98.
- Scott, J.F. (2005). New developments on FRAMs: [3D] structures and all-perovskite FETs. **Journal of Materials Science and Engineering B**, 120, 6-12.
- Simoes, A.Z., Riccardi, C.S., Moura, F., Ries, A., Junior, N.L.A., Zaghete, M.A., Stojanovic, B.D. Longo, E., & Varela, J.A. (2004). Characterization of lanthanum-doped bismuth titanate thin films prepared by polymeric precursor method. **Materials Letter**, 58, 2842-2847.
- Tang, Q.-Y., Kan, Y-G., Li, Zhang, G-J., & Wang, P-L. (2006). Effect of vanadium doping on fabrication and property of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ceramics. **Scripta Materialia**, 54, 2075-2080.
- Thongmee, N., Watcharapasorn, A. & Jiansirisomboon, S. (2008). Structure-property relations of ferroelectric $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3-(\text{Bi}_{3.25}\text{La}_{0.75})\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ceramics. **Current Applied Physics**, 8, 367-371.
- Thongmee, N., Watcharapasorn, A. & Jiansirisomboon, S. (2009). Phase evolution and microstructure of complexed-structured (1-x)PZT-xBDT ceramics. **Modern Physics Letters B**, 23, 3801-3807.
- Thongmee, N., Watcharapasorn, A., Hoffman, M. & Jiansirisomboon, S. (2012). Ferroelectric properties of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3-(\text{Bi}_{3.25}\text{La}_{0.75})\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ceramics. **Ceramics International**, 38S, S205-S209.