สมบัติทางไดอิเล็กตริกของวัสดุเซรามิก $Na_{0.5}Y_{0.5}Cu_3Ti_4O_{12}$ ที่เจือด้วย Sr^{2+}

Dielectric properties of Sr^{2+} doped $Na_{0.5}Y_{0.5}Cu_3Ti_4O_{12}$ ceramics

ปริวรรต แสงวงศ์ (Pariwat Saengvong)* ดร.ประสิทธิ์ ทองใบ (Dr.Prasit Thongbai)**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้สังเคราะห์วัสดุเซรามิก $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ (x=0.00, 0.1, 0.2 และ 0.33) โดยใช้วิธีปฏิกิริยาของแข็งและเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ผงที่ผ่านการเผาแคลไซน์ถูกนำมาขึ้นรูปและเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1070 °C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าการเจือไอออนของ Sr^{2+} สามารถยับยั้งการเติบโตของเกรน โดยเกรนจะมีขนาดลดลงจาก 42.7 ถึง 6.8 ไมโครเมตร ((μm) ตามการเพิ่มของปริมาณการเจือ Sr^{2+} ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ε') ของทุกวัสดุตัวอย่างมีค่าประมาณ 10^4 ในช่วงความถี่ 10^2-10^6 Hz และ โดยค่า ε' ที่ความถี่ 1 kHz และที่อุณหภูมิห้องของวัสดุ $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ (x=0.00, 0.1, 0.2 และ 0.33) มีค่าเท่ากับ 38,659, 25,781, 23,317 และ 21,394 ตามลำดับ ส่วนค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (tanδ) มีค่า 0.83, 0.07, 0.08 และ 0.47 ตามลำดับ การเจือไอออนของ Sr^{2+} ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถลดค่า tanδ ของวัสดุเซรามิก $(Na_{0.5}Y_{0.5})Cu_3Ti_4O_{12}$ ได้ จากการศึกษาด้วยใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงอิมพีแดนซ์สามารถยืนยันได้ว่าขอบเกรนของวัสดุมีสมบัติทางไฟฟ้าเป็นฉนวนและภายในเกรนของวัสดุเป็นสารกึ่งตัวนำ

ABSTRACT

In this research work, $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ (x = 0.00, 0.1, 0.2, and 0.33) ceramics were prepared by a solid state reaction method and calcined at 1000 °C for 10 h. The calcined powders were pressed into pellets and then sintered at 1070 °C for 18 h. It is found that substitution of Sr^{2+} ions can inhibit the grain growth. A grain size decreases with increasing Sr^{2+} doping ions from 42.7 to 6.8 μm. The dielectric permittivity (ε') values of all ceramic compositions are on the order of 10^4 in the frequency range of 10^2-10^6 Hz. The ε' values at 1 kHz and room temperature of the $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ ceramics with x = 0.00, 0.1, 0.2, and 0.33 are, respectively, of about 38,659, 25,781, 23,317 and 21,394, while the dielectric loss tangent (tanδ) are 0.83, 0.07, 0.08 and 0.47, respectively. Interestingly, doping $(Na_{0.5}Y_{0.5})Cu_3Ti_4O_{12}$ with a suitable concentration can cause a decrease in tanδ. According to the impedance spectroscopy analysis, it is confirmed that the electrical properties of the grain and grain boundary are semiconductor and insulator, respectively.

คำสำคัญ: สมบัติทางไดอิเล็กตริก ค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก เซรามิก

Keywords: Dielectric properties, dielectric loss tangent, ceramics

** นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*

*** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*

บทนำ

ในปัจจุบันนั้นได้มีการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กตริกอย่างกว้างขวางและวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง (High dielectric constant materials) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์และพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกได้เป็นจำนวนมากอย่างเช่น ตัวเก็บประจุ (Capacitor) และสิ่งประดิษฐ์ความจำ (memory devices) วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงนั้นจึงมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมากโดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิต (static dielectric constant, ε_s) ของวัสดุจะเป็นปัจจัยหลักในการลดขนาดและคงประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ได้ (Homes et al., 2001)

โดยทั่วไปแล้วว่าวัสดุที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟส์ไกต์ (perovskites) นั้นจัดเป็นกลุ่มที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant, ε') ที่สูง และมีการนำมาผลิตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน วัสดุเพอรอฟส์ไกต์ที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูงสามารถแบ่งออกเป็นได้สองกลุ่ม โดยกลุ่มแรกคือ วัสดุเฟอโรอิเล็กตริกแบบปกติ (normal-ferroelectric) เช่น $BaTiO_3$ และ $Pb(Zr,Ti)O_3$ (PZT) และกลุ่มที่สองคือ วัสดุเฟอร์โรอิเล็กตริกแบบรีแลกเซอร์ (relaxor-ferroelectric) ซึ่งได้แก่ $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ (PZN), $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ (PMN) และ $(Bi, Sr)TiO_3$ แต่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุทั้งสองกลุ่มนี้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเป็นอย่างมาก ทำให้เกิดผลเสียและเป็นข้อจำกัดในการทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก (Wu et al., 2003) เช่น ในการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุที่ต้องการความเสถียรหากวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากแล้วจะทำให้สิ่งประดิษฐ์เสียหายได้ นองจากนี้แล้ววัสดุกลุ่มเพอรอฟส์ไกต์โดยส่วนใหญ่มีตะกั่ว (lead) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าตะกั่วนั้นเป็นสารพิษ ดังนั้นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงและไม่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบจึงได้รับการสนใจและมีการศึกษาอย่างกว้างขวาง

ได้มีรายงานการค้นพบออกไซน์เพอรอฟส์ไกต์ $CaCu_3Ti_4O_{12}$ (CCTO) ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กติกสูงมาก โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 10^5 (ที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 1 KHz) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ CCTO นั้นมีค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิ -173 ถึง 327 ^oC (Ramirez et al., 2000; Subramanian et al., 2000) นอกจากนี้แล้ว CCTO นั้นยังไม่มีองค์ประกอบของตะกั่ว (lead) จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ CCTO เป็นวัสดุที่น่าสนใจและได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง (Wu et al., 2003)

CCTO นั้นเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบ IBLC (Internal Barrier Layer Capacitance) ซึ่งมีเกรนเป็นสารกึ่งตัวนำและขอบเกรนเป็นฉนวนทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ CCTO มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูง(Sinclair et al., 2002)นอกจาก CCTO แล้วยังมีวัสดุที่มีพฤติกรรมคล้ายๆกับ CCTO มาก โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงประมาณ 10^3-10^4 (ที่อุณหภูมิห้องและที่ความถี่ 1 KHz) วัสดุที่กล่าวมาคือ $Na_{0.5}Y_{0.5}Cu_3Ti_4O_{12}$ (NYCTO) วัสดุ NYCTO นั้นนอกจากจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงแล้วยังมีค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (Dielectric loss tangent, $\tan\delta$) ต่ำ จึงทำให้ NYCTO เป็นอีกวัสดุที่น่าสนใจ (Jumpatam J et al., 2016)

เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีของ NYCTO ดังนั้น NYCTO จึงได้รับความสนใจและได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง โดยงานวิจัยส่วนมากจะมุ่งประเด็นในการศึกษาสาเหตุของการมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนั้น ในส่วนของการพัฒนาคุณสมบัติคือต้องการเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและการลดค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของวัสดุดังกล่าวเพื่อที่จะสามารถนำวัสดุที่ศึกษาไปใช้ทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และใช้งานได้จริง

ในปัจจุบันวัสดุเซรามิก NYCTO นั้นเป็นวัสดุที่น่าสนใจและได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นที่การปรับปรุงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกให้ดียิ่งขึ้น นั่นคือการลดค่าการ

สูญเสียทางไดอิเล็กตริก (tanδ) ของวัสดุโดยหนึ่งในวิธีการในการปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวคือการเจือไอออนโลหะต่างๆ เพื่อแทนที่ตำแหน่งของไอออนบวกในโครงสร้างของวัสดุ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นเพื่อทำสารสังเคราะห์และศึกษากระบวนการเตรียมวัสดุเซรามิก NYCTO ที่เจือด้วยไอออนโลหะ Sr^{2+} เพื่อเข้าไปแทนที่ตำแหน่งไอออนบวกในโครงสร้างด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง (Solid state reaction) โดยคาดหวังว่าการเจือด้วยไอออนโลหะ Sr^{2+} เข้าไปในวัสดุเซรามิก NYCTO นั้นจะสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกของวัสดุเซรามิกโดยสามารถเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ε') และสามารถลดค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (tanδ) ของวัสดุ และสามารถนำความรู้ไปใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์เพื่อเป็นประโยชน์ในอนาคต

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์วัสดุเซรามิก NYCTO ที่เจือไอออนโลหะ Sr^{2+}
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกและโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเซรามิกที่สังเคราะห์ได้
3. เพื่อปรับปรุงสมบัติทางไดอิเล็กตริกของวัสดุเซรามิก NYCTO
4. เพื่อศึกษาผลของการเจือไอออนโลหะ Sr^{2+}ลงไปในวัสดุ NYCTO ในอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางไดอิเล็กตริกและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ NYCTO

วิธีการวิจัย

การสังเคราะห์วัสดุเซรามิก $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ (x=0.00, 0.1, 0.2, และ 0.33) ที่เตรียมโดยใช้วิธีปฏิกิริยาของแข็ง (Solid state reaction) ในขั้นตอนแรกเริ่มต้นจาการเตรียมผสมสารตั้งต้น Y_2O_3, Na_2CO_3, CuO, TiO_2 และ $SrCO_3$ ในอัตราส่วนต่างๆ หลังจากนั้นผสมสารตั้งต้นโดยเทคนิคการบดด้วยลูกบอลเปียก(wet ball milling)โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย เป็นเวลา 24 h หลังจากนั้นนำไปอบจนแห้ง นำผงที่แห้งถูกนำมาบดให้ละเอียด แล้วนำไปเผาแคลไซน์ (calcination) ที่อุณหภูมิ 1000 ^{o}C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงกรองที่มีขนาด 150 ไมโครเมตร จากนั้นนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 ^{o}C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง อีก 1 รอบและนำมาบดร่อนผ่านตะแกรงกรองอีกครั้ง สุดท้ายนำวัสดุผงที่ละเอียดไปขึ้นรูปโดยการอัดแรงดันแบบทิศทางเดียวแล้วนำวัสดุที่ขึ้นรูปแล้วไปเผาผนึก (sintering) ที่อุณหภูมิ 1070 ^{o}C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

ในการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุในการวิจัยนี้นั้นใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD) ซึ่งเทคนิคนี้นั้นเป็นการศึกษาเฟสองค์ประกอบโครงสร้างผลึกของวัสดุที่สังเคราะห์ได้ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ โดยข้อมูลที่ได้นั้นจะบ่งบอกถึงสารที่เป็นองค์ประกอบในวัสดุที่สังเคราะห์ได้ และอีกเทคนิคหนึ่งในการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคคือ เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) ซึ่งข้อมูลที่ได้จะบ่งบอกถึงลักษณะพื้นผิวของโครงสร้างขนาดและรูปร่างของเกรน

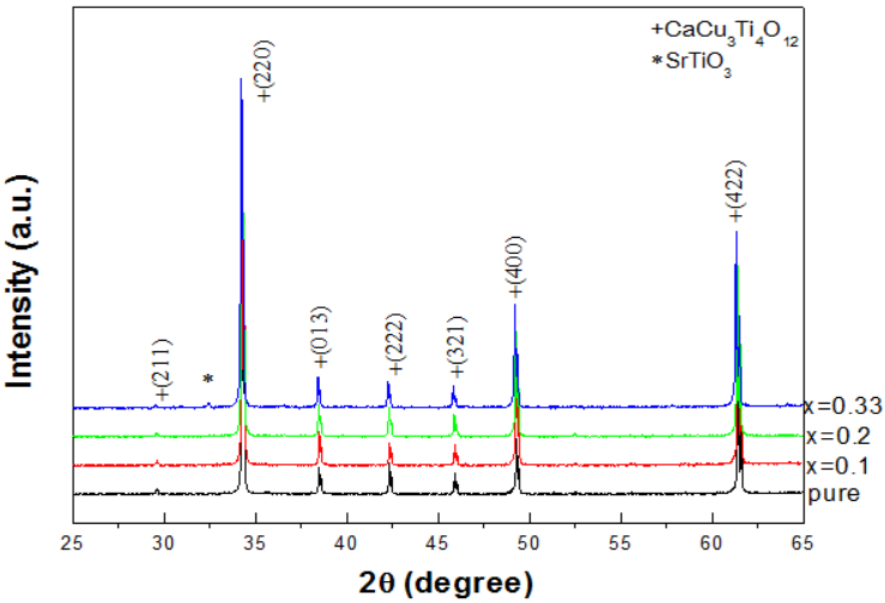
การเตรียมวัสดุศึกษาด้วย SEM เตรียมโดยขัดผิวหน้าของวัสดุแล้วเคลือบทองลงบนผิวของวัสดุเพื่อให้วัสดุนำไฟฟ้าได้ ซึ่งเครื่องเคลือบทอง (sputter coater) ตั้งอยู่ ณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผลิตโดยบริษัท FISONS รุ่น POLARON SC500 โดยใช้กระแส 30 mA เวลาที่เคลือบนาน 3 นาที และใช้เครื่อง SEM ตั้งอยู่ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผลิตโดยบริษัท LEO ประเทศอังกฤษ รุ่น 1450VP

วัสดุที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วถูกนำมาศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กตริกโดยใช้เทคนิคตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนาน ทดสอบโดยใช้เครื่องมือ Impedance/Agilent 4194A Precision Impedance Analyzer ที่ตั้งอยู่ ณ ภาคฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งค่าที่วัดได้นั้นจะอยู่ในรูปของค่าความจุไฟฟ้า (capacitance, C) และค่าแทนเจนต์ของการสูญเสีย (tanδ) โดยในงานวิจัยนี้จะวัดค่าในช่วงความถี่ 10^2-10^7 Hz ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 190 °C ซึ่งค่าที่ได้นี้สามารถนำไปคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุได้

ผลการวิจัย

ผลการศึกษาการเกิดเฟสและโครงสร้างของวัสดุเซรามิก $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$

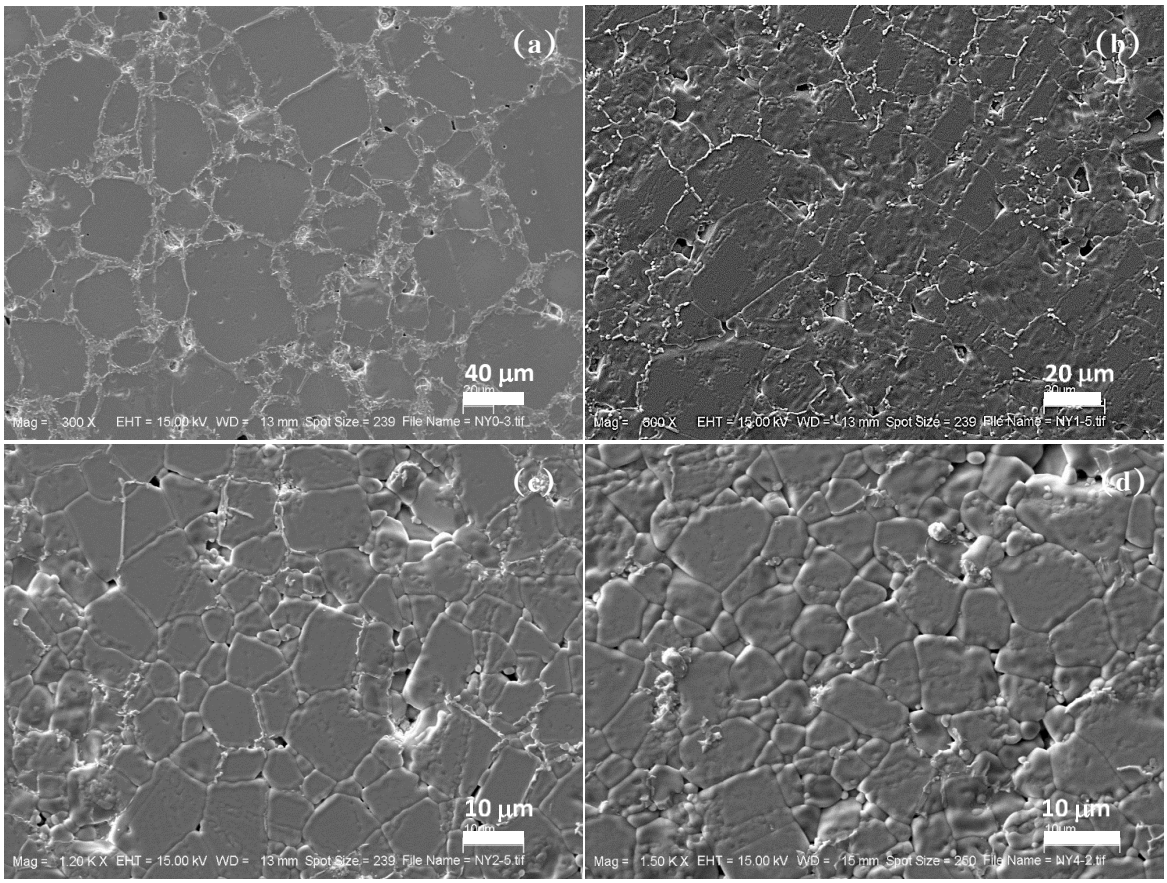
รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุเซรามิก $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ (เมื่อ x=0.0, 0.1, 0.2 และ 0.33) ที่เผาผนึก (sintering) ที่อุณหภูมิ 1070 °C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง โดยใช้เทคนิค XRD ผลการศึกษาแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของรูปแบบการเลี้ยวเบน กับ มุมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ โดยใช้มุม 2θ เริ่มต้นและสิ้นสุดที่ 25 องศา และ 65 องศา ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 1 จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในวัสดุเซรามิกในทุกๆสารตัวอย่างบ่งชี้ว่าเกิดเฟสของ $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_x Cu_3Ti_4O_{12}$ โดยเป็นเฟสที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ลูกบาศก์ (Somphan W et al., 2012) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนโลหะ Sr^{2+} ในปริมาณที่มากปรากฏว่าตรวจพบเฟสของ $SrTiO_3$ในปริมาณที่เล็กน้อย (น้อยมาก) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นสารตั้งต้น



ภาพที่ 1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุเซรามิก $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ ที่ผ่านการเผาผนึก (sintering) ที่อุณหภูมิ 1070 °C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุเซรามิก $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ โดยเทคนิค SEM

การศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุเซรามิก $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ (เมื่อ x=0.00, 0.1, 0.2 และ 0.33) เพื่อศึกษาการอัดแน่นของวัสดุโดยดูจากการเกิดรูพรุนและขนาดของเกรน ในวัสดุที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1070 ^oC เป็นเวลา 18 ชั่วโมง การหาขนาดของเกรนเฉลี่ยจากภาพถ่ายโดยใช้เทคนิค SEM โดยการวิเคราะห์จากภาพถ่ายเกรนเฉลี่ยมีขนาด 42.7, 18.4 , 9.6, และ 6.8 μm ตามลำดับ จะเห็นว่าเกรนมีขนาดเล็กลงเมื่อเพิ่มไอออนโลหะ Sr^{2+} มากขึ้น เนื่องจาก Sr^{2+} นั้นเข้าไปยับยั้งการเจริญเติบโตของเกรนและส่งผลให้บริเวณขอบเกรนมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น

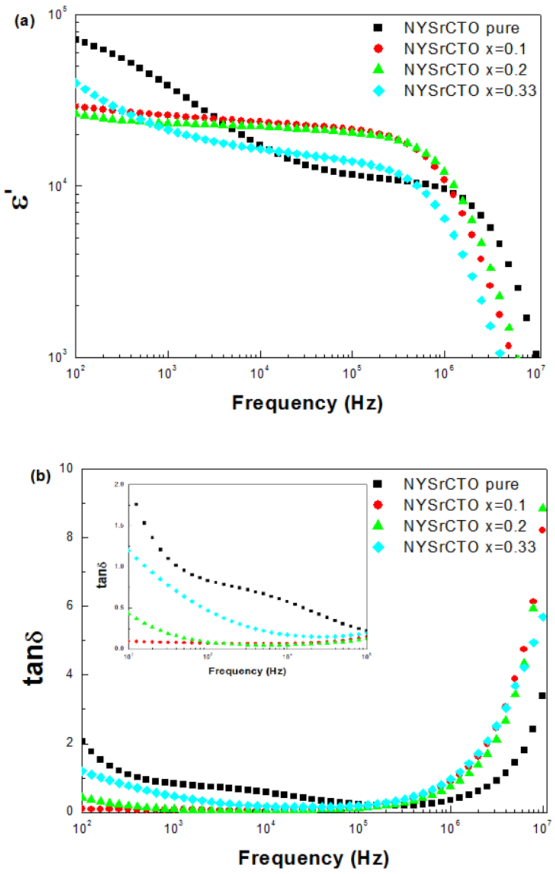


ภาพที่ 2 ภาพถ่ายพื้นผิวโดยเทคนิค SEM ของวัดุเซรามิก $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ (a) x=0.00, (b) x=0.1, (c) x=0.2, (d) x=0.33, ที่ผ่านการเผาผนึก (sintering) ที่อุณหภูมิ 1070 ^oC เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

ผลการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กตริกของวัสดุเซรามิก ($Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_x$ $Cu_3Ti_4O_{12}$ ที่เปลี่ยนตามความถี่

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุเซรามิก $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ ผ่านการเผาผนึก (sintering) อุณหภูมิ 1070 ^oC เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่วัดตามความถี่ในช่วง 10^2-10^7 Hz ณ อุณหภูมิห้องแสดงดังภาพที่ 3(a) โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของทุกสารตัวอย่างมีค่าที่สูงมาก โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของทุกสารตัวอย่างที่ความถี่ 1 kHz มีค่า 38659, 25781, 23317, และ 21394 ตามลำดับ เมื่อเจือไอออนโลหะ Sr^{2+} มากขึ้นจะทำให้เกรนมีขนาดที่ลดลงและส่งผลให้ขอบเกรนมีความหนาที่มากขึ้นทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าลดลงซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีโครงสร้างแบบ IBLC และที่น่าสนใจค่าคงที่ไดอิ

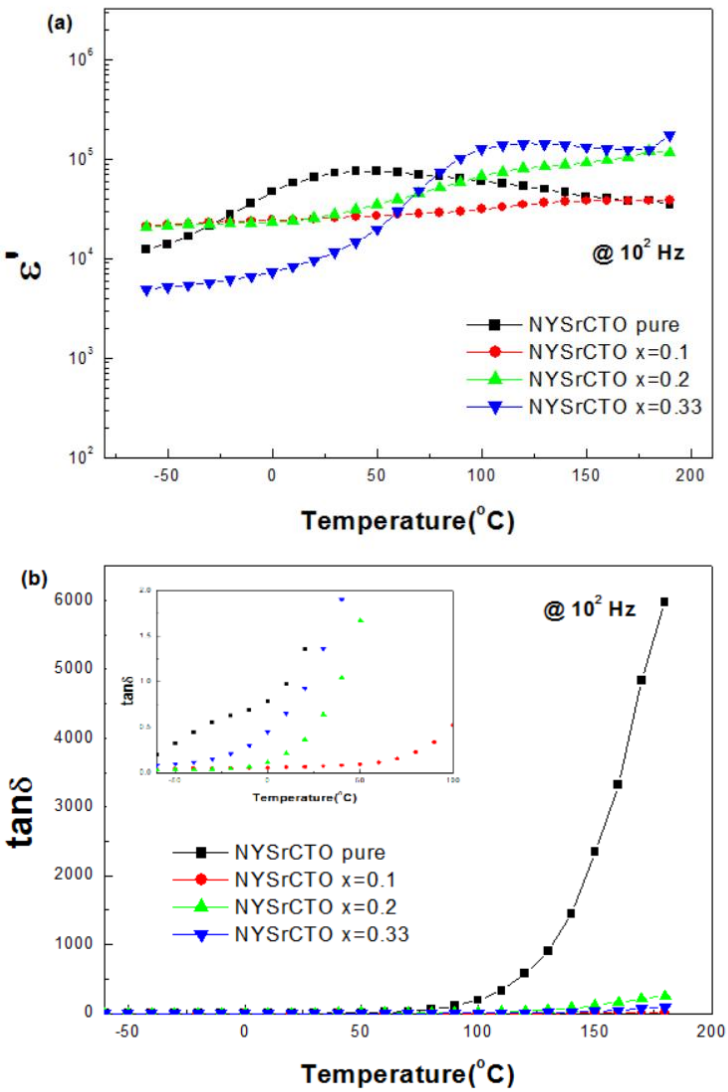
เล็กตริกของสารตัวอย่างที่ x=0.1 และ 0.2 มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงความถี่ 10^2-10^5 Hz นอกจากนี้ค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกแสดงในภาพที่ 3(b) โดยที่ค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของทุกสารตัวอย่างที่วัดที่ความถี่ 1 kHz มีค่า 0.83, 0.07, 0.08, และ 0.47 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าของสารที่เงื่อนไข x=0.1 และ x=0.2 มีค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกที่ต่ำ จากภาพที่ 3 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการรีแลกเซชันและกระบวนการโพลาไรเซชันที่เกิดจากการตอบสนองทางไฟฟ้าขององค์ประกอบต่างๆในวัสดุไดอิเล็กตริก และมีค่าลดลงอย่างฉับพลันที่ความถี่ 10^6 Hz พฤติกรรมดังกล่าวนี้ เรียกว่าพฤติกรรมการผ่อนคลายทางไดอิเล็กตริก โดยที่ความถี่ต่ำ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าที่สูงเนื่องจากไดโพลไฟฟ้ามีการตอบสนองทางไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ หรือกล่าวได้ว่าไดโพลไฟฟ้ามีเวลามากพอในการกลับทิศ แต่เมื่อความถี่มากขึ้นการกลับทิศของไดโพลไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์หรือกล่าวได้ว่าการกลับทิศตามสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ยากส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าลดลง ซึ่งก็สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (Thongbai P et al., 2007)



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (a) และค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (b) ของวัตถุเซรามิก $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ ที่ผ่านการเผาผนึก (sintering) ที่อุณหภูมิ 1070 °C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 10 MHz

ผลการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กตริกของวัสดุเซรามิก $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ ที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิ

ภาพที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 100 Hz ของวัสดุเซรามิก $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ (เมื่อ x=0.00, 0.1, 0.2 และ 0.33) โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าค่อนข้างเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิยกเว้นวัสดุไดอิเล็กตริก $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ ที่เงื่อนไข x=0.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 190 °C และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงมากขึ้นซึ่งค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกก็จะสูงขึ้นเช่นเดียวกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (a) และค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (b) ของวัดุเซรามิก $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_xCu_3Ti_4O_{12}$ ที่ผ่านการเผาผนึก (sintering) ที่อุณหภูมิ 1070 °C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 190 °C ที่ความถี่ 100 Hz

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การเจือไอออนโลหะ Sr^{2+} เข้าไปใน $(Na_{0.5}Y_{0.5})_{1-x}Sr_x Cu_3Ti_4O_{12}$ ในปริมาณที่เหมาะสมนั้นจะสามารถลดค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกของวัสดุลงได้ โดยปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้สำหรับการเจือการไอออนโลหะ Sr^{2+} คือ x=0.01 โดยจะให้ค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกอยู่ที่ 0.07 (ที่ความถี่ 1 kHz) นอกจากจะให้ค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกที่ต่ำแล้วยังทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงความถี่ 10^2-10^5 Hz และยังมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 190 ^oC ด้วย โดยมีสาเหตุเนื่องจากการเจือไอออนของ Sr^{2+} สามารถส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าที่ขอบเกรน

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาครั้งนี้ขอขอบคุณทุนเรียนดีแห่งประเทศไทยที่สนับสนุนทุนวิจัย ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนการใช้เครื่องมือในการทำงานวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ ผศ.ดร. ประสิทธิ์ ทองใบ ที่ให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Homes CC, Vogt T, Shapiro SM, Wakimoto S, Ramirez AP. Optical response of high-dielectric-constant perovskite-related oxide. Science 2001; 293: 673.

Ramirez AP, Subramanian MA, Gardel M, Blumberg G, Li D, Shapiro SM, et al. Giant dielectric constant response in a copper-titanate. Solid State Communications 2000; 115: 217-220.

Wu JB, Nan J, Nan CW, Lin Y, Deng Y, Zhao S. Analysis of AC electrical properties of (Li and Ti)-doped NiO. Materials Science and Engineering 2003; 99: 294–297.

Sinclair DC, Adams TB, Morrison FD, West AR. $CaCu_3Ti_4O_{12}$: One step internal barrier layer capacitor. Journal of Apply Physics Letter 2002; 80: 2153.

Subramanian MA, Li Dong, Duan N, Reisner BA, Sleight AW. High Dielectric constant in $ACu_3Ti_4O_{12}$ and $ACu_3Ti_3FeO_{12}$ Phases. Journal of Solid State Chemistry 2000; 151: 323-325.

Jumpatam J, Mooltang A, Putasaeng B, Kidkhunthod P, Chanlek N, Thongbai P, et al. Effects of Mg_2^{2+} doping ions on giant dielectric properties and electrical responses of $Na_{1/2}Y_{1/2}Cu_3Ti_4O_{12}$ ceramics. Ceramics International 2016; 42(14): 16287–16295.

Somphan W, Sangwong N, Yamwong T, Thongbai P. Giant and electrical properties of sodium yttrium copper titanate: $Na_{1/2}Y_{1/2}Cu_3Ti_4O_{12}$. J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 2012; 23: 1229-1234.

Thongbai P, Masingboon C, Maensiri S, Yamwong T, Wongsaenmai S, Yimnirun R. Giant dielectric behavior of $CaCu_3Ti_4O_{12}$ subjected to post-sintering annealing and uniaxial stress. J. Phys.: Condens Matter. 2007; 19: 236208.