

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



208888



สมบัติทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็กของเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$
ELECTRICAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF MULTIFERROIC
 $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ CERAMICS

นายสิทธิชัย หิ้นประทีป

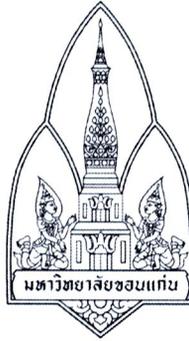
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2553



208888



สมบัติทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็กของมัลติเฟอร์โรอิกเซรามิก $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$
ELECTRICAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF MULTIFERROIC
 $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ CERAMICS



นายสิทธิชัย หันประทับ

วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
พ.ศ. 2553

สมบัติทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็กของมัลติเฟอร์โรอิกเซรามิก $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$

นายสิทธิ์ชัย หันประทับ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2553

**ELECTRICAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF MULTIFERROIC
 $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ CERAMICS**

MR. SITCHAI HUNPRATUB

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN PHYSICS
GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY
2010**

สิทธิ์ชัย หันประทับ. 2553. *สมบัติทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็กของมัลติเฟอร์โรอิกเซรามิก*

BiFe_{1-x}Mn_xO₃. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: รศ. ดร. สันติ แม้นศิริ

บทคัดย่อ

208888

ในรายงานการวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโน BiFeO₃ และ BiFe_{1-x}Mn_xO₃ (เมื่อ 0.05 ≤ x ≤ 0.4) ด้วยวิธีตกตะกอน โดยใช้กรดไนตริกและสารละลาย PEG เป็นตัวทำละลายและสารละลายแอมโมเนียเป็นตัวตกตะกอน แล้วนำสารตั้งต้นไปทำการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนโดยอาศัยเทคนิค TG-DTA เพื่อประมาณอุณหภูมิของการสลายตัวและการเปลี่ยนแปลงเฟส ซึ่งได้เลือกนำสารตั้งต้นไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 และ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ได้อนุภาคนาโน BiFeO₃ และ BiFe_{1-x}Mn_xO₃ ตามที่ต้องการ แล้วนำได้อนุภาคนาโน BiFeO₃ และ BiFe_{1-x}Mn_xO₃ ไปศึกษาลักษณะเฉพาะโดยใช้เทคนิค XRD, FT-IR, UV-Vis, SEM, XANES และ VSM และเมื่อพิจารณาผลจากเทคนิค XRD พบว่าอนุภาคนาโน BiFeO₃ และ BiFe_{1-x}Mn_xO₃ มีเฟสบริสุทธิ์ที่ปริมาณการเจือ 0 ถึง 0.2 โมล และผลจากเทคนิค SEM พบว่า อนุภาคมีลักษณะค่อนข้างกลมมีขนาดน้อยกว่า 300 nm และจากผลการศึกษาการดูดกลืนแสง พบว่าอนุภาคนาโนสามารถดูดกลืนแสงในย่านที่ตามองเห็นได้อย่างดีเยี่ยม และผลการศึกษาการสถานะออกซิเดชันของ Fe ของอนุภาคนาโน BiFeO₃ พบว่ามีสถานะออกซิเดชันเป็น Fe³⁺ ขณะที่สถานะออกซิเดชันของ Fe ของอนุภาคนาโน BiFe_{1-x}Mn_xO₃ มีแนวโน้มเป็น Fe²⁺ มากขึ้นเมื่อเจือ Mn ในปริมาณที่สูงขึ้น ขณะที่สถานะออกซิเดชันของ Mn ของอนุภาคนาโน BiFe_{1-x}Mn_xO₃ มีแนวโน้มเป็น Mn⁴⁺ มากขึ้นเมื่อเจือ Mn ในปริมาณที่สูงขึ้น ผลการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กพบว่า อนุภาคนาโน BiFeO₃ และ BiFe_{1-x}Mn_xO₃ แสดงพฤติกรรมแบบแอนติเฟอร์โรแมกเนติกในทุก ๆ ตัวอย่าง และการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกในกรณีของวัสดุเซรามิก BiFeO₃ และวัสดุเซรามิก BiFe_{1-x}Mn_xO₃ (เฉพานึกที่อุณหภูมิ 600, 700, 800 และ 880 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง) ที่ได้ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 200 °C ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz พบว่า วัสดุเซรามิก BiFeO₃ เฉพานึกที่อุณหภูมิ 600°C มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง ($\epsilon' \approx 600$) ในช่วงความถี่ (100 Hz) ที่อุณหภูมิห้อง ในทางตรงกันข้ามวัสดุเซรามิก BiFeO₃ ที่อุณหภูมิเฉพานึก 700, 800 และ 880 °C พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงมาก ($\epsilon' \approx 10^4$) ในช่วงความถี่ (100 Hz) ที่อุณหภูมิห้อง และยังพบว่ามี การรีแลกเซชันของค่าคงที่ทางไดอิเล็กทริกซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ช่วงด้วยกันคือ ช่วงอุณหภูมิต่ำ (low-temperature dielectric relaxation, LTDR) ระหว่าง -50 และ 20 °C ช่วงอุณหภูมิมะดับกลาง (middle-temperature dielectric relaxation, MTDR) ระหว่าง 30 และ 130 °C และ ช่วง

อุณหภูมิสูง (high-temperature dielectric relaxation, HTDR) ระหว่าง 140 และ 200 °C ซึ่งพฤติกรรมทางไดอิเล็กทริกช่วงอุณหภูมิต่ำนั้น มีพฤติกรรมรีแลกเซชันแบบเดอบาย (Debye-type dielectric relaxation) ซึ่งเกิดเนื่องจากการกระโดด (hopping) ของประจุไฟฟ้าระหว่างคู่อิออนของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ซึ่งเกิดขึ้นภายในเกรน ส่วนช่วงอุณหภูมิมะดับกลางและช่วงอุณหภูมิสูง เป็นผลเนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุระหว่างเกรนและขอบเกรนและความบกพร่องของวัสดุ หรือ ความนำไฟฟ้าของวัสดุ ตามลำดับ ในกรณีของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ พบว่า การเจือไอออนของ Mn ส่งผลอย่างมากต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและพฤติกรรมการรีแลกเซชันทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 กล่าวคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ในช่วงความถี่ 100 Hz ที่อุณหภูมิห้อง) ของวัสดุ BiFeO_3 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงจาก 600 ไปเป็น 100 เมื่อ Mn ที่ปริมาณการเจือ 0.05 โมล และพบว่าชุดของการรีแลกเซชันของ BiFeO_3 ที่เกิดในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ (สามช่วงอุณหภูมิ) ถูกลดลงเหลือเพียงชุดเดียวและเกิดที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น ผลการทดลองดังกล่าวนี้บ่งชี้ได้อย่างชัดเจนว่า การเจือไอออนของ Mn มีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมการรีแลกเซชันทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BiFeO_3

Sitchai Hunpratub. 2010. *Electrical and Magnetic Properties of Multiferroic*

BiFe_{1-x}Mn_xO₃ ceramics. Master of Science Thesis in Physics, Graduate School,
Khon Kaen University.

Thesis Advisors: Assoc. Prof. Dr. Santi Maensiri

ABSTRACT

208888

In this study, nanoparticles of BiFeO₃ and BiFe_{1-x}Mn_xO₃ (with 0.05 ≤ x ≤ 0.4) are prepared by precipitation route using nitric acid and PEG solution as solvent and precipitated by using ammonia solution agent. The precursors are characterized by TG-DTA to estimate the temperature of decomposition and phase change. Then, the precursors are calcined at various temperatures of 400, 500, 600, 700 and 800 °C for 3 h to obtain BiFeO₃ and BiFe_{1-x}Mn_xO₃ nanoparticles. The obtained BiFeO₃ and BiFe_{1-x}Mn_xO₃ nanoparticles are characterized by XRD, FT-IR, UV-Vis, SEM, XANES and VSM. The XRD results show that the obtained BiFeO₃ and BiFe_{1-x}Mn_xO₃ nanoparticles are single phase with the Mn doping concentrations varied from 0 to 0.2 mol. The morphology of the nanoparticles are spherical having particle sizes of less than 300 nm, as revealed by SEM. All the samples exhibit a strong absorption at UV region with a well defined absorbance at Visible-light region. The oxidation state of the Fe K-X-ray absorption spectra shows that Fe in the calcined BiFe_{1-x}Mn_xO₃ samples closes to Fe²⁺ with increasing Mn content, while the oxidation state of the Mn K-X-ray absorption spectra shows that Mn in the calcined BiFe_{1-x}Mn_xO₃ closes to Mn⁴⁺ with increasing Mn content. The magnetic properties of all the samples exhibit antiferromagnetic behavior. Dielectric properties of the bulk BiFeO₃ and BiFe_{1-x}Mn_xO₃ samples (sintered at 600, 700, 800 and 880 °C for 3 h) are measured in the temperature range of -50 – 200 °C within the frequency range of 100 Hz – 1 MHz. The BiFeO₃ sample sintered at 600 °C show a low-frequency high-dielectric constant, having ε' ≈ 600 at room temperature. On the other hand, the BiFeO₃ samples sintered at 700, 800 and 880 °C show a low-frequency high-dielectric constant, having ε' ≈ 10⁴ at room temperature. Three dielectric relaxations are observed for these three samples: i) Low-temperature dielectric relaxation, LTDR, ii) Mid-temperature dielectric relaxation, MTDR; and iii) High-temperature dielectric relaxation, HTDR. A Debye-type dielectric relaxation at low temperatures (-50 – 20 °C) is attributed to the carrier hopping process between Fe²⁺ and Fe³⁺. The other two dielectric relaxations at the temperature ranges 30–

130 °C and 140–200 °C are possibly due to the grain boundary effect and the defect ordering and/or the conductivity, respectively. In the case of the $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ceramics, it is found that Mn doping has the remarkable influences on both of the dielectric properties and relaxation behavior of the BiFeO_3 ceramic. The dielectric constant of the BiFeO_3 ceramic is suppressed by doping with Mn ions. For example, the dielectric constant at room temperature and frequency 100 Hz of the BiFeO_3 ceramic decreases from 600 to 100 by Mn doping with 0.05 mol. It is interesting that the dielectric constant of the $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ increases with increasing concentration of Mn doping. Surprisingly, three sets of dielectric relaxations observed in the BiFeO_3 ceramic are concealed to a single set of dielectric relaxation in the $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ ceramics. As a result, it is suitably concluded that Mn doping has a great effect on the dielectric relaxation behavior of the BiFeO_3 ceramic.

ขอขอบคุณในงานวิทยานิพนธ์นี้แต่
บิดา มารดา ครอบครัว และคณาจารย์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ แม้นศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ รวมถึงการหาข้อมูลเอกสาร หนังสือ ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งยังเป็นแบบอย่างที่ดีในการเป็นนักวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง อาจารย์ ดร.ชีวลรัตน์ มาสิงบุญ และอาจารย์ ดร.สุปรีย์ พินิจสุนทร ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นทุกท่านที่ให้ความรู้ อบรมสั่งสอนและประสบการณ์อันมีค่า

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความสะดวกในด้านวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ TG/DTA, UV-Vis และ VSM

ขอขอบคุณภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ XRD

ขอขอบคุณศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ระบบลำเลียงแสงทางด้าน X-ray absorption fine structure spectroscopy (XAFS)

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก และประสบการณ์การทำวิจัย

ขอขอบคุณนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยเฉพาะสมาชิกในกลุ่มวิจัย Small & Strong Materials Group (SSMG) ที่ได้ให้กำลังใจ และช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อวิไล คุณแม่ผมทอง หันประทับ ทุกคนในครอบครัวญาติพี่น้องทุกคน ที่คอยอบรมสั่งสอนให้เป็นคนดีและให้กำลังใจตลอดมา

สิทธิ์ชัย หันประทับ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
คำอุทิศ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดของการวิจัย	2
1.4 สถานที่ทำการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิกและวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิก BiFeO_3	5
2.2 การศึกษาการเตรียมวัสดุ BiFeO_3	9
2.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแม่เหล็กวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรอิก BiFeO_3	15
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน	27
3.1 ทฤษฎีไดอิเล็กทริก	27
3.2 ทฤษฎีแม่เหล็ก	35
บทที่ 4 วิธีการวิจัย	57
4.1 การเตรียมวัสดุตัวอย่าง	57
4.2 เทคนิคในการศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุตัวอย่าง	62
4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิและความถี่ต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 และ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	75
5.1 ผลการศึกษาวัสดุผงของ BiFeO_3 และ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$	75
5.2 ผลการศึกษาวัสดุเซรามิกของ BiFeO_3 และ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$	96
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	139
6.1 การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุผง BiFeO_3 และ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$	139
6.2 การเตรียม ศึกษาสมบัติพื้นฐานและสมบัติทางไดอิเล็กทริกของ วัสดุเซรามิก BiFeO_3 และ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$	142
6.3 ข้อเสนอแนะและงานที่ทำในอนาคต	144
เอกสารอ้างอิง	147
ภาคผนวก	153
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์	167
ประวัติผู้เขียน	169

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ตัวอย่างวัสดุที่สามารถแสดงพฤติกรรมแบบมัลติเฟอร์โรอิก	7
ตารางที่ 3.1	การแบ่งชนิดของวัสดุตามสมบัติความเป็นแม่เหล็กของสาร	51
ตารางที่ 4.1	สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุ BiFeO_3 และ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$	57
ตารางที่ 5.1	ขนาดผลึกของวัสดุผง BiFeO_3 และ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400–800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	80
ตารางที่ 5.2	ตัวแปรต่างๆที่ได้จากการปรับเทียบแบบจำลองกับข้อมูลการทดลองของวัสดุเซรามิกที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 880 °C	119
ตารางที่ 5.3	ค่าความต้านทานคำนวณโดยใช้เทคนิคอิมพีแดนซ์ในวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$	134
ตารางที่ 5.4	ค่าพลังงานกระตุ้นของการรีแลกเซชันคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอดูลัสในวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$	136

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุเฟอร์ไรต์เล็กทริกและเฟอร์โรแมกเนติก	5
ภาพที่ 2.2	โครงสร้างผลึกของ BiFeO_3	8
ภาพที่ 2.3	(ก) แผนภาพเฟสของระบบ Bi_2O_3 กับ Fe_2O_3 (ข) กราฟ DTA ของ BiFeO_3	9
ภาพที่ 2.4	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิก BiFeO_3 เผาผนึกที่อุณหภูมิ $855\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 5 นาที	10
ภาพที่ 2.5	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง BiFeO_3 (ก) ที่ความเข้มข้นของ KOH ต่างๆ ที่อุณหภูมิ $220\text{ }^\circ\text{C}$ และ (ข) ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความเข้มข้นของ KOH เท่ากับ 4M	11
ภาพที่ 2.6	ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคนาโน BiFeO_3 ที่เตรียมโดย (ก) ไม่เติมโพแทสเซียมไนเตรต (ข) เติมโพแทสเซียมไนเตรต	12
ภาพที่ 2.7	(ก) รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง BiFeO_3 ที่อุณหภูมิ $200\text{--}450\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ข) ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคนาโน BiFeO_3 แคลไซน์ที่ อุณหภูมิ $450\text{ }^\circ\text{C}$ (จุดวงกลมคือ เฟสปลอมปน) (Xu et al., 2008)	13
ภาพที่ 2.8	(ก) รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผง BiFeO_3 ที่อุณหภูมิ $250\text{--}550\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในอากาศ (ข) ภาพถ่าย SEM ของอนุภาค BiFeO_3 แคลไซน์ที่อุณหภูมิ $500\text{ }^\circ\text{C}$	14
ภาพที่ 2.9	(ก) แสดงวงวนฮีสเทอรีซิสของ BiFeO_3 ที่อุณหภูมิต่างๆ (ข) แสดงสเปกตรัม ของการเปลี่ยนสถานะประจุในวัสดุเซรามิก BiFeO_3 โดยเทคนิค XPS (1) $800\text{ }^\circ\text{C}$ (RPLS) (2) $820\text{ }^\circ\text{C}$ (RPLS) (3) $880\text{ }^\circ\text{C}$ (SSR)	16
ภาพที่ 2.10	(ก) สมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุ BiFeO_3 (ข) ลักษณะและขนาดเกรนของฟิล์ม (ค) แสดงวงวนฮีสเทอรีซิสของ BiFeO_3 เจือด้วย Mn ที่อุณหภูมิห้อง	17
ภาพที่ 2.11	(ก) สมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุ BiFeO_3 (ข) แสดงวงวนฮีสเทอรีซิสของ BiFeO_3 เจือด้วย Ni^{2+} และ Ti^{4+} ที่อุณหภูมิห้อง	18

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 2.12	การเปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็กของค่าแมกนีโตเซชันที่อุณหภูมิห้องของวัสดุ (ก) แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โรแมกนีติกของวัสดุ BiFeO_3 (ข) แสดงพฤติกรรมทางแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โรแมกนีติกอย่างอ่อนของวัสดุ $\text{Bi}_{1-x}\text{A}_x\text{FeO}_3$ ภาพแทรกแสดงค่าแมกนีโตเซชันมีค่าสูงขึ้นเมื่อ รัศมีไอออน ใหญ่ขึ้น	19
ภาพที่ 2.13	(ก) การเปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็กของค่าแมกนีโตเซชันที่อุณหภูมิห้องของวัสดุ $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_3-0.55\text{PbTiO}_3$ (ข) แสดงวงวนฮีสเทอรีซิสของ BiFeO_3 เจือ Ni^{+2} และ Ti^{+4} ที่อุณหภูมิห้อง	20
ภาพที่ 2.14	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของ (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของ $\text{Ba}(\text{Fe}_{1/2}\text{Ta}_{1/2})\text{O}_3$ ในช่วงอุณหภูมิ 123 K ถึง 623 K ที่ความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(f/\text{Hz})$ กับ $1000/T$	22
ภาพที่ 2.15	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของ LuFe_2O_4 ในช่วงอุณหภูมิ 123 K ถึง 623 K ที่ความถี่ 1 kHz และ 1 MHz	23
ภาพที่ 2.16	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของ $\text{Sr}(\text{Fe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$ ในช่วงอุณหภูมิ 123 K ถึง 623 K ที่ความถี่ 1 kHz และ 1 MHz	24
ภาพที่ 2.17	การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของ (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ YFeO_3 ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ที่อุณหภูมิ 139 K ถึง 246 K และ(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log_{10}(\tau)$ กับ $1000/T$	25
ภาพที่ 2.18	แสดงสเปกตรัมของการเปลี่ยนสถานะประจุในวัสดุเซรามิก YFeO_3 โดยเทคนิค XPS	26
ภาพที่ 3.1	ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน (ก) ระหว่างแผ่นเป็นสุญญากาศ และ (ข) ระหว่างแผ่นเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้า E	27
ภาพที่ 3.2	การเกิดโพลาริเซชันแบบต่างๆ	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
ภาพที่ 3.3	การเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการโพลาไรซ์ตามความถี่ในย่านต่างๆ	33
ภาพที่ 3.4	ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ตามแบบจำลองต่างๆ	34
ภาพที่ 3.5	แผนภาพวงจรไฟฟ้าของการวัดสมบัติทางไดอิเล็กทริก	35
ภาพที่ 3.6	(ก) วงจรไฟฟ้าแบบขนานของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริก (ข) เฟสเซอร์ของกระแสในวงจร (เมื่อ R_p และ C_p คือความต้านทานและความจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก ที่ต่อกันแบบขนาน ตามลำดับ)	36
ภาพที่ 3.7	อิทธิพลของการนำไฟฟ้ากระแสตรง (DC conductivity) ต่อการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ความถี่ต่างๆ	38
ภาพที่ 3.8	แผนภาพจำลองแสดงโครงสร้างแบบ BLC	39
ภาพที่ 3.9	วงจรไฟฟ้าที่ใช้แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเซรามิกตัวอย่างที่แสดงทั้งแกน (R_g, C_g) และขอบเขตระหว่างแกน (R_{gb}, C_{gb})	41
ภาพที่ 3.10	(ก) เส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กถาวร (ข) เส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน และ (ค) เส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์	43
ภาพที่ 3.11	(ก) เส้นแรงไฟฟ้าจากประจุบวกไปยังประจุลบ (ข) เส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กถาวร	44
ภาพที่ 3.12	โมเมนต์แม่เหล็กซึ่งเกิดจาก (ก) การโคจร (Orbiting) และ (ข) การสปินรอบตัวเองของอิเล็กตรอน	45
ภาพที่ 3.13	แสดงสนามแม่เหล็กรอบๆ กระแสไฟฟ้าที่ไหลวนเป็นวงกับแท่งแม่เหล็ก	47
ภาพที่ 3.14	การเปลี่ยนแปลงของโดเมนแม่เหล็กเมื่อถูกแมกนีโตซ์	52
ภาพที่ 3.15	ตัวอย่างกราฟฮีสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร	53
ภาพที่ 3.16	กลไกการเกิดอันตรกิริยาต่างๆ ของสารออกไซด์ (ก) กลไกการเกิด superexchange (ข) กลไกการเกิด double exchange	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.1	ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาค BiFeO_3 โดยกระบวนการตกตะกอน	59
ภาพที่ 4.2	ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาค $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ โดยกระบวนการตกตะกอน	60
ภาพที่ 4.3	ลักษณะของการขึ้นรูปของอนุภาค BiFeO_3 และ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$	61
ภาพที่ 4.4	อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิการเผาผนึก	61
ภาพที่ 4.5	โครงสร้างหลักของ SEM (Scanning Electron Microscope)	66
ภาพที่ 4.6	โครงสร้างหลักของ VSM (Vibrating Sample magnetometer)	67
ภาพที่ 4.7	(ก) แผนผังการย้ายพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมที่ถูกกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ โครงสร้างที่เป็นยอดสูงในสเปกตรัม XANES หรือที่เรียกว่า white line เกิดจากการ ย้ายอิเล็กตรอนไปยังสถานะที่ว่างในชั้นวาเลนซ์ สำหรับโครงสร้างถัดมา (ข) เป็นการ ย้ายอิเล็กตรอนไปยังสถานะพลังงาน Rydberg และสถานะพลังงานต่อเนื่องในภาพ แสดงตำแหน่งของพลังงานเริ่มต้น (ionization energy, E_0) ของคลื่นโฟโตอิเล็กตรอน	69
ภาพที่ 4.8	(ก) สเปกตรัม XANES ที่บริเวณขอบการดูดกลืน K-edge และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างเลขออกซิชันกับขอบการดูดกลืน ของอะตอมโครเมต ($\text{Ca}_3\text{Cr}_2\text{O}_8$, $\text{Ca}_{10}\text{Cr}_6\text{O}_{25}$ และ $\text{Ca}_5\text{Cr}_3\text{O}_{12}$) และสารมาตรฐาน (Cr Metal, Cr_2O_3 และ CaCrO_4) ข้อมูลจากระบบลำเลียงแสง EXAFS ที่ห้องปฏิบัติการ HASYLAB	71
ภาพที่ 4.9	ลักษณะของเซรามิกที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไดอิเล็กทริก	72
ภาพที่ 4.10	ระบบการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของเครื่อง Impedance/Gain-Phase Analyzer (HP -4194A)	74
ภาพที่ 5.1	กราฟ TG-DTA แสดงอุณหภูมิการสลายตัวและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารตั้งต้นของ BiFeO_3 ที่เตรียมโดยวิธีการตกตะกอน	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
ภาพที่ 5.2	กราฟ FT-IR แสดงตำแหน่งการสั่นของโมเลกุลของวัสดุผง BiFeO ₃ (ก) สารตั้งต้น, และที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ (ข) 400 °C, (ค) 500 °C, (ง) 600 °C, (จ) 700 °C และ (ฉ) 800 °C	78
ภาพที่ 5.3	กราฟ FT-IR แสดงตำแหน่งการสั่นของโมเลกุลของวัสดุผง BiFe _{1-x} Mn _x O ₃ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ก) x = 0.05, (ข) x = 0.1, (ค) x = 0.2, (ง) x = 0.3, และ (จ) x = 0.4	78
ภาพที่ 5.4	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของวัสดุผง BiFeO ₃ เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400-800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	81
ภาพที่ 5.5	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุผง BiFe _{1-x} Mn _x O ₃ เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	81
ภาพที่ 5.6	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของวัสดุผง BiFe _{1-x} Mn _x O ₃ เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	82
ภาพที่ 5.7	ขนาดผลึกของวัสดุผง BiFe _{1-x} Mn _x O ₃ ที่ค่าปริมาณการเจือ Mn ต่างๆ กัน เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	82
ภาพที่ 5.8	ภาพถ่าย SEM ของอนุภาค BiFeO ₃ เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) 400 °C, (ข) 500 °C, (ค) 600 °C, (ง) 700 °C, และ (จ) 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	84
ภาพที่ 5.9	ภาพถ่าย SEM ของอนุภาค BiFe _{1-x} Mn _x O ₃ เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ก) x = 0.05, (ข) x = 0.1, (ค) x = 0.2, (ง) x = 0.3, และ (จ) x = 0.4	85
ภาพที่ 5.10	ค่าแมกนีไทเซชันกับสนามแม่เหล็กภายนอกที่อุณหภูมิห้องของอนุภาค BiFeO ₃ เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500-800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	88
ภาพที่ 5.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแมกนีไทเซชันที่ 10 kOe กับอุณหภูมิการแคลไซน์ของอนุภาค BiFeO ₃	88

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
ภาพที่ 5.12	ค่าแมกนีโตเซชันกับสนามแม่เหล็กภายนอกที่อุณหภูมิห้อง ที่ได้จากการวัดโดยเทคนิค VSM ของอนุภาค BiFeO_3 เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	89
ภาพที่ 5.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแมกนีโตเซชันที่ 10 kOe กับอุณหภูมิการแคลไซน์ของอนุภาค BiFeO_3	89
ภาพที่ 5.14	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงจากเทคนิค Uv-Vis ของอนุภาค BiFeO_3 เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $400-800^\circ\text{C}$	91
ภาพที่ 5.15	ช่องว่างแถบพลังงานของอนุภาค BiFeO_3 เมื่อแคลไซน์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ก) 400, (ข) 500, (ค) 600, (ง) 700 และ (จ) 800°C	91
ภาพที่ 5.16	สเปกตรัมการดูดกลืนแสง Uv-Vis ของอนุภาค $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	92
ภาพที่ 5.17	ช่องว่างแถบพลังงานของอนุภาค $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C (ก) $x=0.05$, (ข) $x=0.1$, (ค) $x=0.2$, (ง) $x=0.3$ และ (จ) $x=0.4$	92
ภาพที่ 5.18	(ก) สเปกตรัมของการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่ K-edge ของ Fe และ (ข) สถานะออกซิเดชันของ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	94
ภาพที่ 5.19	(ก) สเปกตรัมของการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่ K-edge ของ Mn และ (ข) สถานะออกซิเดชันของ $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	95
ภาพที่ 5.20	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 เมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิ (ก) 600°C , (ข) 700°C , (ค) 800°C และ (ง) 880°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	97
ภาพที่ 5.21	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{O}_3$ เมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิ (ก) 600°C , (ข) 700°C , (ค) 800°C และ (ง) 880°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	97

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
ภาพที่ 5.22	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_3$ เมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิ (ก) 600 °C, (ข) 700 °C, (ค) 800 °C และ (ง) 880 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	98
ภาพที่ 5.23	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_3$ เมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิ (ก) 600 °C, (ข) 700 °C, (ค) 800 °C และ (ง) 880 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	98
ภาพที่ 5.24	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$ เมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิ (ก) 600 °C, (ข) 700 °C, (ค) 800 °C และ (ง) 880 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	99
ภาพที่ 5.25	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{O}_3$ เมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิ (ก) 600 °C, (ข) 700 °C, (ค) 800 °C และ (ง) 880 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	99
ภาพที่ 5.26	ภาพถ่าย SEM ของเซรามิก BiFeO_3 เผาผนึกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ก) 600 °C, (ข) 700 °C, (ค) 800 °C และ (ง) 880 °C	101
ภาพที่ 5.27	ภาพถ่าย SEM ของเซรามิก $\text{BiFe}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{O}_3$ เผาผนึกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ก) 600 °C, (ข) 700 °C, (ค) 800 °C และ (ง) 880 °C	102
ภาพที่ 5.28	ภาพถ่าย SEM ของเซรามิก $\text{BiFe}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_3$ เผาผนึกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ก) 600 °C, (ข) 700 °C, (ค) 800 °C และ (ง) 880 °C	103
ภาพที่ 5.29	ภาพถ่าย SEM ของเซรามิก $\text{BiFe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_3$ เผาผนึกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ก) 600 °C, (ข) 700 °C, (ค) 800 °C และ (ง) 880 °C	104
ภาพที่ 5.30	ภาพถ่าย SEM ของเซรามิก $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$ เผาผนึกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ก) 600 °C (ข) 700 °C (ค) 800 °C และ (ง) 880 °C	105
ภาพที่ 5.31	ภาพถ่าย SEM ของเซรามิก $\text{BiFe}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{O}_3$ เผาผนึกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ก) 600 °C, (ข) 700 °C, (ค) 800 °C และ (ง) 880 °C	106

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 5.32	การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของ (ก) ค่า Dielectric constant และ (ข) ค่า $\tan \delta$ ของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 เผาผนังที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงในช่วงความถี่ 100 Hz – 10 MHz	109
ภาพที่ 5.33	การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของ (ก) ค่า Dielectric constant และ (ข) ค่า $\tan \delta$ ของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 เผาผนังที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในช่วงความถี่ 100 Hz – 10 MHz	110
ภาพที่ 5.34	การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของ (ก) ค่า Dielectric constant และ (ข) ค่า $\tan \delta$ ของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 เผาผนังที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงในช่วงความถี่ 100 Hz – 10 MHz	111
ภาพที่ 5.35	การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของ (ก) ค่า Dielectric constant และ (ข) ค่า $\tan \delta$ ของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 เผาผนังที่อุณหภูมิ 880 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในช่วงความถี่ 100 Hz – 10 MHz	112
ภาพที่ 5.36	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของ (ก) ค่า Dielectric constant และ (ข) ค่า $\tan \delta$ ของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 เผาผนังที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในช่วงอุณหภูมิ -50 – 100 °C	113
ภาพที่ 5.37	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของ (ก) ค่า Dielectric constant และ (ข) ค่า $\tan \delta$ ของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 เผาผนังที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในช่วงอุณหภูมิ -50 – 100 °C	114
ภาพที่ 5.38	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของ (ก) ค่า Dielectric constant และ (ข) ค่า $\tan \delta$ ของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 เผาผนังที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในช่วงอุณหภูมิ -50 – 100 °C	115
ภาพที่ 5.39	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของ (ก) ค่า Dielectric constant และ (ข) ค่า $\tan \delta$ ของวัสดุเซรามิก BiFeO_3 เผาผนังที่อุณหภูมิ 880 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในช่วงอุณหภูมิ -50 – 100 °C	116
ภาพที่ 5.40	(ก) การเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกที่เผาผนังที่อุณหภูมิ 700 °C จากการทดลองกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตาม สมการที่ 5.3 และ (ข) การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสภาพนำไฟฟ้าของการรีแลกเซชัน	120

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 5.41	121
<p>(ก) การเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 800 °C จากการทดลองกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 5.3 และ (ข) การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสภาพนำไฟฟ้าของการรีแลกเซชัน</p>	
ภาพที่ 5.42	122
<p>(ก) การเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 880 °C จากการทดลองกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 5.3 และ (ข) การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสภาพนำไฟฟ้าของการรีแลกเซชัน</p>	
ภาพที่ 5.43	124
<p>(ก) การเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 700 °C จากการทดลองกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 5.4 และ (ข) การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสภาพนำไฟฟ้าของการรีแลกเซชัน</p>	
ภาพที่ 5.44	125
<p>(ก) การเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 800 °C จากการทดลองกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 5.4 และ (ข) การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสภาพนำไฟฟ้าของการรีแลกเซชัน</p>	
ภาพที่ 5.45	126
<p>(ก) การเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 880 °C จากการทดลองกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตาม สมการที่ 5.4 และ (ข) การเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสภาพนำไฟฟ้าของ การรีแลกเซชัน</p>	
ภาพที่ 5.46	129
<p>การเปลี่ยนแปลงค่าคงไดอิเล็กทริกกับความถี่ของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ (ก) $x=0$, (ข) $x=0.05$, (ค) $x=0.1$, (ง) $x=0.2$, (จ) $x=0.3$ และ (ฉ) $x=0.4$ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในช่วงความถี่ 100 Hz – 10 MHz</p>	
ภาพที่ 5.47	130
<p>การเปลี่ยนแปลงค่า $\tan \delta$ กับความถี่ของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ (ก) $x=0$, (ข) $x=0.05$, (ค) $x=0.1$, (ง) $x=0.2$, (จ) $x=0.3$ และ (ฉ) $x=0.4$ เผาผนึกที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในช่วงความถี่ 100 Hz – 10 MHz</p>	

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 5.48	131
<p>การเปลี่ยนแปลงค่าคงไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ (ก) $x=0$, (ข) $x=0.05$, (ค) $x=0.1$, (ง) $x=0.2$, (จ) $x=0.3$ และ (ฉ) $x=0.4$ เผาผนังที่อุณหภูมิ $800\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในช่วงความถี่ $100\text{ Hz} - 10\text{ MHz}$</p>	
ภาพที่ 5.49	132
<p>การเปลี่ยนแปลงค่า $\tan \delta$ กับอุณหภูมิของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ (ก) $x=0.05$, (ข) $x=0.1$, (ค) $x=0.2$, (ง) $x=0.2$, (จ) $x=0.3$ และ (ฉ) $x=0.4$ เผาผนังที่อุณหภูมิ $800\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในช่วงความถี่ $100\text{ Hz} - 10\text{ MHz}$</p>	
ภาพที่ 5.50	133
<p>การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความถี่ของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ เผาผนังที่อุณหภูมิ $800\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในช่วงความถี่ $100\text{ Hz} - 10\text{ MHz}$ ที่อุณหภูมิห้อง และ $100\text{ }^\circ\text{C}$</p>	
ภาพที่ 5.51	135
<p>การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ (ก) $x=0$, (ข) $x=0.05$, (ค) $x=0.1$, (ง) $x=0.2$, (จ) $x=0.3$ และ (ฉ) $x=0.4$ เผาผนังที่อุณหภูมิ $800\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง วัดที่อุณหภูมิ $100\text{ }^\circ\text{C}$</p>	
ภาพที่ 5.52	137
<p>การเปรียบเทียบค่ามอดูลัส ของวัสดุเซรามิก $\text{BiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$ (ก) $x=0$, (ข) $x=0.05$, (ค) $x=0.1$, (ง) $x=0.2$, (จ) $x=0.3$ และ (ฉ) $x=0.4$ เผาผนังที่อุณหภูมิ $800\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง</p>	