สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ค
คำอุทิศ		จ
กิตติกรรมประกาศ		ฉ
สารบัญตาราง		ฌ
สารบัญภาพ		ญ
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 หลักการและเหตุผล	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
	1.4 สถานที่ทำวิจัย	2
	1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
	1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2	วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
	2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโครงสร้างและสมบัติทางไดอิเล็กทริกของ $BaTiO_3$	5
	2.2 การพัฒนาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ $BaTiO_3$	12
	2.3 การประยุกต์ใช้งานวัสดุเซรามิกไดอิเล็กทริก	29
บทที่ 3	ทฤษฎีพื้นฐาน	33
	3.1 ทฤษฎีไดอิเล็กทริก	33
	3.2 โดเมนเฟร์โรอิเล็กทริก	48
	3.3 ผลของขนาดเกรน	50
	3.4 ผลของความเค้น	51
บทที่ 4	วิธีการวิจัย	53
	4.1 การสังเคราะห์วัสดุผง $BaTiO_3$ และ $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \le x \le 0.05)$) โดยใช้สารละลายเจลว่านหางจระเข้เป็นตัวทำละลาย	53
	4.2 การเตรียมวัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ และ วัสดุเซรามิก $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \le x \le 0.05)$)	57
	4.3 การศึกษาคุณลักษณะของวัสดุผง $BaTiO_3$, วัสดุผง $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \le x \le 0.05)$, วัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ และ วัสดุเซรามิก $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \le x \le 0.05)$)	59
	4.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิและความถี่ต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ และ วัสดุเซรามิก $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \le x \le 0.05)$	64
	4.5 การศึกษาอิทธิพลของความเค้นแบบแกนเดี่ยวต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ และวัสดุเซรามิก $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \le x \le 0.05)$	69

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
บทที่ 5	ผลการวิจัยและอภิปรายผล	71
5.1	ผลการศึกษาวัสดุผงและวัสดุ $BaTiO_3$ โดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:5	71
5.2	ผลการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:5	88
5.3	ผลการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุผง $BaTiO_3$ ซ้ำ	102
5.4	ผลการศึกษาวัสดุผงและวัสดุ $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \leq x \leq 0.05)$ โดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:10	105
5.5	ผลการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \leq x \leq 0.05)$ เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:10	136
บทที่ 6	สรุปและข้อเสนอแนะ	167
6.1	การศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของวัสดุผง และ วัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:5	167
6.2	การศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก $BaTiO_3$	168
6.3	การศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของวัสดุผง และ วัสดุเซรามิก $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \leq x \leq 0.05)$ เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:10	169
6.4	การศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \leq x \leq 0.05)$	172
6.5	ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อไป	173
เอกสารอ้างอิง		175
ภาคผนวก		179
ประวัติผู้เขียน		187

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	แสดงข้อดี-ข้อเสียของวิธีการสังเคราะห์วัสดุผง $BaTiO_3$ โดยวิธีการสังเคราะห์แบบต่าง ๆ	14
ตารางที่ 2.2	รายละเอียดและเงื่อนไขของการเตรียมวัสดุผง และ วัสดุ $BaTiO_3$ ที่เจือด้วย Nb_2O_5	19
ตารางที่ 2.3	ลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุ $BaTiO_3$ เจือด้วย Nb_2O_5 ที่ตรวจพบ	19
ตารางที่ 2.4	รหัสของตัวเก็บประจุกลุ่มที่ 2 และ 3 สำหรับการเลือกใช้งานในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าต่าง ๆ	31
ตารางที่ 4.1	เงื่อนไขการเตรียมวัสดุผงทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้	56
ตารางที่ 4.2	เงื่อนไขการเตรียมวัสดุเซรามิกทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้	58
ตารางที่ 5.1	แสดงข้อมูลอ้างอิงตำแหน่งของเลขคลื่น (wavenumber) ที่มีการส่งผ่านแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ จากกลุ่มวิจัยอื่น	73
ตารางที่ 5.2	ข้อมูลพื้นฐานของวัสดุผง $BaTiO_3$ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ทำการศึกษาโดยเทคนิค XRD	77
ตารางที่ 5.3	ผลการคำนวณระยะห่างระหว่างระนาบเพื่อระบุโครงสร้างของวัสดุผง$BaTiO_3$ ที่ผ่านการแคลไซน์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ (อ้างอิงจาก JCPDS No 89-2263)	81
ตารางที่ 5.4	ขนาดเกรนของวัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการศึกษาโดยเทคนิค SEM	87
ตารางที่ 5.5	แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ จากกลุ่มวิจัยอื่นและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ได้จากจากการทดลอง	91
ตารางที่ 5.6	แสดงเปอร์เซ็นต์การสลายตัวโดยน้ำหนักของเจลแห้ง (วัสดุผงตั้งต้น) $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \le x \le 0.05)$ ในอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C /นาที ในช่วงอุณหภูมิ 600 °C ถึง 1000 °C	110
ตารางที่ 5.7	ข้อมูลพื้นฐานของวัสดุผง $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \le x \le 0.05)$ ที่มีเฟสเป็นแบบลูกบาศก์และ เททระโกนัล ทำการศึกษาโดยเทคนิค XRD	124
ตารางที่ 5.8	เงื่อนไขการเตรียมวัสดุผง $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \le x \le 0.05)$ ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และวัสดุเซรามิก $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \le x \le 0.05)$ ที่ผ่านการเผาผนึกที่ อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	125
ตารางที่ 5.9	ข้อมูลพื้นฐานของวัสดุเซรามิก $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \le x \le 0.05)$ ที่มีเฟสเป็นเฮกซะกอนอลเฟส ทำการศึกษาโดยเทคนิค XRD	131
ตารางที่ 5.10	แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 100 kHz ของวัสดุเซรามิก $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ ที่ได้จากการทดลอง	138
ตารางที่ 5.11	แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ศึกษาในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ที่ช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C ของวัสดุเซรามิก $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \le x \le 0.05)$	146

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	แสดงหน่วยเซลของ $BaTiO_3$ ที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์	5
ภาพที่ 2.2	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ $BaTiO_3$ เทียบกับอุณหภูมิ	6
ภาพที่ 2.3	แสดงการเลื่อนตำแหน่งของอะตอมในผลึก $BaTiO_3$	7
ภาพที่ 2.4	แสดงโพลาไรเซชันได้เองโดยไม่มีสนามไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องภายในผลึก (ก) เมื่อให้สนามไฟฟ้าE_d เข้าไปในผลึก (ข) หลังจากให้สนามไฟฟ้า E_d เข้าไปในผลึกจะถูกแบ่งให้มีการโพลาไรซ์ในทิศตรงข้ามกัน	7
ภาพที่ 2.5	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุผง $BaTiO_3$ ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 260 °C เป็นเวลา1 ชั่วโมง โดยมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแบบคิวบิค	8
ภาพที่ 2.6	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุ BaTiO3 (ก) ก่อนผ่านการ anneal ที่อุณหภูมิ 1000 °C มีเฟสเป็นลูกบาศก์ (ข) หลังผ่านการ anneal ที่อุณหภูมิ 1000 °C มีเฟสเป็นเททระโกนัล (ค) ภาพแทรกขยายยอดกราฟ รูป (ข) ที่มีระนาบเลี้ยวเบนที่แตกต่างจากรูป (ก)	9
ภาพที่ 2.7	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ $BaTiO_3$ ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1250 °C เป็นเวลา (ก) 10 ชั่วโมง (ข) 20 ชั่วโมง โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 150 °C	10
ภาพที่ 2.8	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ $BaTiO_3$ โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 150 °C	11
ภาพที่ 2.9	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO3 โดยทำการศึกษาในช่วงความถี่ 0.1 kHz ถึง 100 kHz และทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 20 °C ถึง 150 °C	12
ภาพที่ 2.10	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO3 ที่มีขนาดของเกรนที่แตกต่างกันโดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 180 °C ที่ความถี่ 1 kHz	13
ภาพที่ 2.11	แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบภายในเจลว่านหางจระเข้ (ก) โครงสร้างทางเคมีของสารอะโลอีน (ข) โครงสร้างทางเคมีของสารอะโลซีน (ค) โครงสร้างหลักของว่านหางจระเข้	15
ภาพที่ 2.12	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ $Ba(Ti_{1-y}Ce_y)O_3$ โดยที่ $0 \le y \le 0.3$) โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 500 K ที่ความถี่ 10 kHz	18
ภาพที่ 2.13	ภาพถ่ายพื้นผิวของวัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ ที่เจือด้วย Nb_2O_5 ที่ผ่านการเผาผนึกที่ 1,350°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ก) วัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ ที่เจือด้วย Nb_2O_5 โดยบริษัทผู้ผลิต TiO_2 คือ Degussa 25 ใช้เวลาในการบดย่อย $BaCO_3$ 4 ชั่วโมง (ข) วัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ ที่เจือด้วย Nb_2O_5 โดยบริษัทผู้ผลิต TiO_2 คือ Degussa P25 ใช้เวลาในการบดย่อย $BaCO_3$ 10 ชั่วโมง (ค) วัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ ที่เจือด้วย Nb_2O_5 โดยบริษัทผู้ผลิต TiO_2 คือ Baker Chem. Co., ใช้เวลาในบดย่อย $BaCO_3$ 4 ชั่วโมง	20

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 2.14	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ $BaTiO_3$ ที่ความถี่ 1 kHz เจือด้วย (ก) วัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ ที่เจือด้วย Nb_2O_5 โดยบริษัทผู้ผลิต TiO_2 คือ Degussa P25 ใช้เวลาในการบดย่อย $BaCO_3$ 4 ชั่วโมง (ข) วัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ ที่เจือด้วย Nb_2O_5 โดยบริษัทผู้ผลิต TiO_2 คือ Degussa P25 ใช้เวลา ในการบดย่อย $BaCO_3$ 10 ชั่วโมง	21
ภาพที่ 2.15	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ $BaTiO_3$ ที่เจือด้วย Nb_2O_5 โดยบริษัทผู้ผลิต TiO_2 คือ Baker Chem. Co., ใช้เวลาในบดย่อย $BaCO_3$ 4 ชั่วโมง	21
ภาพที่ 2.16	แสดงค่าการเกิดเฟสของวัสดุ $BaTi_{1-x}Fe_xO_{3-\delta}$ เมื่อ (x = 0, 0.003, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 และ 0.06) เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 °C ถึง 1,400 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	22
ภาพที่ 2.17	แสดงค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของวัสดุ $BaTi_{1-x}Fe_xO_{3-\delta}$ เมื่อ x = 0, 0.003, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 และ 0.06 เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1,000 ถึง 1,400 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	23
ภาพที่ 2.18	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ $BaTi_{1-x}Fe_xO_{3-\delta}$ เมื่อ $0 < x < 0.1$ (x = 0, 0.003, 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04) เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำการศึกษาที่ความถี่ 100 kHz ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25 ถึง 325 °C	23
ภาพที่ 2.19	แสดงค่าอุณหภูมิคูรีของวัสดุ $BaTi_{1-x}Fe_xO_{3-\delta}$ เมื่อ $0 < x < 0.1$ (x = 0, 0.003, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06 และ 0.07) เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	24
ภาพที่ 2.20	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุผง $BaTiO_3$ ที่เจือด้วย Sb_2O_3 ด้วยเงื่อนไขการเจือโดย ใช้ Sb_2O_3 เท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 wt.% ที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	25
ภาพที่ 2.21	ภาพถ่ายพื้นผิวของวัสดุผง $BaTiO_3$ ที่เจือด้วย Sb_2O_3 ผ่านการแคลไซน์ที่ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ก) วัสดุผง $BaTiO_3$ ที่ไม่เจือ Sb_2O_3 (ข) วัสดุผง $BaTiO_3$ ที่เจือ Sb_2O_3 เท่ากับ 1 wt.% (ค) วัสดุผง $BaTiO_3$ ที่เจือ Sb_2O_3 เท่ากับ 3 wt.%	26
ภาพที่ 2.22	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ $BaTiO_3$ ที่เจือด้วย Sb_2O_3 ด้วยเงื่อนไขการเจือ Sb_2O_3 เท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 wt.% ในช่วงอุณหภูมิ -12.5 °C ถึง 225 °C ที่ความถี่ 10 kHz	27
ภาพที่ 2.23	ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ $BaTiO_3$ ที่เจือด้วย Sb_2O_3 ด้วยเงื่อนไขการเจือ Sb_2O_3 เท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 wt.% ในช่วงอุณหภูมิ -12.5 °C ถึง 225 °C ที่ช่วงความถี่ 1 kHz ถึง 10 MHz	27
ภาพที่ 2.24	การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเค้นของวัสดุเมื่อเทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก่อนให้ความเค้น $((1-x)Pb(Zr_{0.05)2}Ti_{0.48})O_3-(x)BaTiO_3$ ในช่วงความเค้น 0 ถึง 15 MPa	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 2.25	การเปลี่ยนแปลงค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเค้นของวัสดุเมื่อเทียบกับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกก่อนให้ความเค้น $((1-x)Pb(Zr_{0.05)2}Ti_{0.48})O_3-(x)BaTiO_3$ ในช่วงความเค้น 0 ถึง 15 MPa	29
ภาพที่ 2.26	วัสดุไดอิเล็กทริกที่สามารถนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์พื้นฐานทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญ (ก) ตัวเก็บประจุหลายชั้น (ข) ทรานสดิวเซอร์ (ค) อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์	30
ภาพที่ 2.27	ตัวเก็บประจุแบบเซรามิกกลุ่มต่าง ๆ	31
ภาพที่ 3.1	ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานระหว่างแผ่นเป็นสุญญากาศ เมื่อ $\bar{E}$ และ $\bar{P}$ คือ สนามไฟฟ้า และ สนามโพลาไรเซชันทางฟ้า ตามลำดับ	34
ภาพที่ 3.2	ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานระหว่างแผ่นเป็นสารไดอิเล็กทริก เมื่อ $\bar{E}$ และ $\bar{P}$ คือ สนามไฟฟ้า และสนามโพลาไรเซชันทางฟ้า ตามลำดับ	35
ภาพที่ 3.3	แผนภาพแสดงการเกิดโพลาไรเซชันที่ความถี่ต่าง ๆ	41
ภาพที่ 3.4	แผนภาพแสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (tanδ) ของสารไดอิเล็กทริกประเภทมีขั้ว (ก) ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเนื่องจากเกิดการผ่อนคลายไดโพล (ข) ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเนื่องจากการนำไฟฟ้า	43
ภาพที่ 3.5	แผนภาพวงจรไฟฟ้าของการวัดสมบัติทางไดอิเล็กทริก	46
ภาพที่ 3.6	(ก) วงจรไฟฟ้าแบบขนานของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริก (ข) เฟสเซอร์ของกระแสในวงจร (เมื่อ R_p และ C_p คือความต้านทานและความจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ต่อกันแบบขนาน ตามลำดับ	47
ภาพที่ 3.7	การเกิดผนังโดเมน 180° ในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กริกเพอรอฟส์ไกต์ที่มีโครงสร้างแบบเททระโกนัล	48
ภาพที่ 3.8	การเกิดผนังโดเมน 90° ในวัสดุเฟอร์โรอิเล็กริกเพอรอฟส์ไกต์ที่มีโครงสร้างแบบเททระโกนัล	49
ภาพที่ 4.1	แผนภาพการสังเคราะห์วัสดุผง BaTiO3 และ $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ $(0 \le x \le 0.05)$ เตรียมแบบใหม่โดยใช้อัตราส่วนสารละลายตั้งต้นของโลหะไนเตรตต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:5 และ 1:10 ตามลำดับ	55
ภาพที่ 4.2	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเผาผนึก	57
ภาพที่ 4.3	ลักษณะการจัดวางตัวอย่าง เมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ และอุปกรณ์ตรวจวัด	60
ภาพที่ 4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Brcosθ และ sinθ ที่แสดงกรณีต่าง ๆ ที่ทำให้ยอดกราฟมีความกว้างเพิ่มขึ้น (ก) การขยายความกว้างของยอดกราฟเป็นผลมาจากขนาดอนุภาค (ข) การขยายความกว้างของยอดกราฟเป็นผลมาจากความเครียด (ค) การขยายความกว้างของยอดกราฟเป็นผลจากขนาดอนุภาคและความเครียด	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 4.5	การเตรียมวัสดุตัวอย่างสำหรับทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริก (ก) ภาคตัวขวาง (ข) ผิวหน้าอิเล็กโทรดด้านบน	65
ภาพที่ 4.6	หลักการทำงานของเครื่องทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า Impedance/Gain-Phase Analyzer (HP 4194 A)	66
ภาพที่ 4.7	ระบบทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิก	66
ภาพที่ 4.8	หลักการวัดและการเก็บข้อมูลในการทดสอบสมบัติทางไดอิเล็กทริกในงานวิจัยนี้	68
ภาพที่ 4.9	ภาพระบบการวัดสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่สภาวะความเค้นต่าง ๆ	70
ภาพที่ 5.1	การสลายตัวทางความร้อนของเจลแห้งโดยเทคนิค TG/DTA ของสารตั้งต้น $BaTiO_3$เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:5	72
ภาพที่ 5.2	สเปกตรัม FTIR ของของวัสดุผง $BaTiO_3$ เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1: 5 ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ก) เจลแห้ง (ข) วัสดุผง BTP_1 (ค) วัสดุผง BTP_2 (ง) วัสดุผง BTP_3	74
ภาพที่ 5.3	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุผง $BaTiO_3$ ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ก) เจลแห้ง (ข) วัสดุผง BTP_1 (ค) วัสดุผง BTP_2 (ง) วัสดุผง BTP_3	76
ภาพที่ 5.4	แสดงพื้นผิวของของวัสดุผง $BaTiO_3$ ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ก) วัสดุผง BTP_1 (ข) วัสดุผง BTP_2 (ค) วัสดุผง BTP_3	78
ภาพที่ 5.5	ภาพถ่าย TEM และรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของวัสดุผง $BaTiO_3$ ที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิ ต่าง ๆโดยใช้เวลาในการแคลไซน์ 2 ชั่วโมง (ก) วัสดุผง BTP_1 (ข) วัสดุผง BTP_2 (ค) วัสดุผง BTP_3 (ภาพแทรกแสดงภาพถ่าย TEM ของแท่งขนาดเล็ก)	80
ภาพที่ 5.6	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ก) วัสดุเซรามิก BTS_0 (ข) วัสดุเซรามิก BTS_1 (ค) วัสดุเซรามิก BTS_2 (ง) วัสดุเซรามิก BTS_3	83
ภาพที่ 5.7	แสดงพื้นผิวของของวัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ก) วัสดุเซรามิก BTS_0 (ข) วัสดุเซรามิก BTS_1 (ค) วัสดุเซรามิก BTS_2 (ง) วัสดุเซรามิก BTS_3	85
ภาพที่ 5.8	แสดงรามานสเปกตรัมของวัสดุเซรามิก $BaTiO_3$ ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยที่ (ก) วัสดุเซรามิก BTS_0 (ข) วัสดุเซรามิก BTS_2 (ง) วัสดุเซรามิก BTS_3	88

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 5.9	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ก) วัสดุเซรามิก BTS_0	92
ภาพที่ 5.10	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ข) วัสดุเซรามิก BTS_2	93
ภาพที่ 5.11	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ค) วัสดุเซรามิก BTS_3	94
ภาพที่ 5.12	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในช่วงความถี่ 100 kHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ก) วัสดุเซรามิก BTS_0 (ข) วัสดุเซรามิก BTS_2 (ค) วัสดุเซรามิก BTS_3	95
ภาพที่ 5.13	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -20 °C ถึง 180 °C และ 180 °C ถึง -20 °C ของ (ก) วัสดุเซรามิก BTS_0 (ข) วัสดุเซรามิก BTS_2 (ค) วัสดุเซรามิก BTS_3	96
ภาพที่ 5.14	การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ก) วัสดุเซรามิก BTS_0	98
ภาพที่ 5.15	การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ข) วัสดุเซรามิก BTS_2	99
ภาพที่ 5.16	การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ค) วัสดุเซรามิก BTS_3	100
ภาพที่ 5.17	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุผง $BaTiO_3$ ที่เตรียมซ้ำ โดยใช้อัตราส่วนสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:5 โดยผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) เจลแห้ง (ข) 700 °C (ค) 800 °C (ง) 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	103
ภาพที่ 5.18	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุผง $BaTiO_3$ ที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:10 โดยผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) เจลแห้ง (ข) 700 °C (ค) 800 °C (ง) 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	104

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 5.19	การสลายตัวทางความร้อนของเจลแห้งโดยเทคนิค TG/DTA ของสารตั้งต้น $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:10 (ก) x = 0 (ข) x = 0.01	107
ภาพที่ 5.20	การสลายตัวทางความร้อนของเจลแห้งโดยเทคนิค TG/DTA ของสารตั้งต้น $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:10 (ค) x = 0.02 (ง) x = 0.03	108
ภาพที่ 5.21	การสลายตัวทางความร้อนของเจลแห้งโดยเทคนิค TG/DTA ของสารตั้งต้น $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:10 (จ) x = 0.04 (ฉ) x = 0.05	109
ภาพที่ 5.22	แสดงเปอร์เซ็นต์การสลายตัวของเจลแห้ง (วัสดุผลตั้งต้น) $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ เมื่อ ($0 \leq x \leq 0.05$) ในอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C /นาที ในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 1000 °C	110
ภาพที่ 5.23	สเปกตรัม FTIR ของของวัสดุผง $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:10 (ก) x = 0 (ข) x = 0.01	112
ภาพที่ 5.24	สเปกตรัม FTIR ของของวัสดุผง $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:10 (ค) x = 0.02 (ง) x = 0.03	113
ภาพที่ 5.25	สเปกตรัม FTIR ของของวัสดุผง $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ เตรียมโดยใช้อัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นของโลหะต่อสารละลายเจลว่านหางจระเข้เท่ากับ 1:10 (จ) x = 0.04 (ฉ) x = 0.05	114
ภาพที่ 5.26	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุผง $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ เมื่อ x = 0 ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) เจลแห้ง (ข) แคลไซน์ 700 °C (ค) แคลไซน์ 800 °C (ง) แคลไซน์ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	117
ภาพที่ 5.27	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุผง $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ เมื่อ x = 0.01 ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) เจลแห้ง (ข) แคลไซน์ 700 °C (ค) แคลไซน์ 800 °C (ง) แคลไซน์ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	118
ภาพที่ 5.28	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุผง $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ เมื่อ x = 0.02 ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) เจลแห้ง (ข) แคลไซน์ 700 °C (ค) แคลไซน์ 800 °C (ง) แคลไซน์ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	119
ภาพที่ 5.29	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุผง $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ เมื่อ x = 0.03 ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) เจลแห้ง (ข) แคลไซน์ 700 °C (ค) แคลไซน์ 800 °C (ง) แคลไซน์ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	120

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 5.30	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุผง $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ เมื่อ x = 0.04 ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) เจลแห้ง (ข) แคลไซน์ 700 °C (ค) แคลไซน์ 800 °C (ง) แคลไซน์ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	121
ภาพที่ 5.31	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุผง $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ เมื่อ x = 0.05 ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (ก) เจลแห้ง (ข) แคลไซน์ 700 °C (ค) แคลไซน์ 800 °C (ง) แคลไซน์ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	122
ภาพที่ 5.32	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุผง $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเงื่อนไข (ก) BFP_0 (ข) BFP_1 (ค) BFP_2 (ง) BFP_3 (จ) BFP_4 (ฉ) BFP_5	123
ภาพที่ 5.33	แสดงพื้นผิวของของวัสดุผง $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเงื่อนไข (ก) BFP_0 (ข) BFP_1 (ค) BFP_2 (ง) BFP_3 (จ) BFP_4 (ฉ) BFP_5	126
ภาพที่ 5.34	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุเซรามิก $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยเงื่อนไข (ก) BFS_0 (ข) BFS_1 (ค) BFS_2 (ง) BFS_3 (จ) BFS_4 (ฉ) BFS_5	130
ภาพที่ 5.35	แสดงพื้นผิวของของวัสดุเซรามิก $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยเงื่อนไข (ก) BFS_0 (ข) BFS_1	133
ภาพที่ 5.36	แสดงพื้นผิวของของวัสดุเซรามิก $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยเงื่อนไข (ค) BFS_2 (ง) BFS_3	134
ภาพที่ 5.37	แสดงพื้นผิวของของวัสดุเซรามิก $Ba_{1-x}Fe_xTiO_3$ ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยเงื่อนไข (จ) BFS_4 (ฉ) BFS_5	135
ภาพที่ 5.38	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 200 °C (ก) วัสดุเซรามิก BFS_0	139
ภาพที่ 5.39	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ข) วัสดุเซรามิก BFS_1	140
ภาพที่ 5.40	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ค) วัสดุเซรามิก BFS_2	141
ภาพที่ 5.41	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ง) วัสดุเซรามิก BFS_3	142

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 5.42	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (จ) วัสดุเซรามิก BFS_4	143
ภาพที่ 5.43	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ฉ) วัสดุเซรามิก BFS_5	144
ภาพที่ 5.44	การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 100 kHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C วัสดุเซรามิก BFS_0, BFS_1, BFS_2, BFS_3, BFS_4 และ BFS_5	145
ภาพที่ 5.45	การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ก) วัสดุเซรามิก BFS_0	147
ภาพที่ 5.46	การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ข) วัสดุเซรามิก BFS_1	148
ภาพที่ 5.47	การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ค) วัสดุเซรามิก BFS_2	149
ภาพที่ 5.48	การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ง) วัสดุเซรามิก BFS_3	150
ภาพที่ 5.49	การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ง) วัสดุเซรามิก BFS_4	151
ภาพที่ 5.50	การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิ -50 °C ถึง 200 °C (ฉ) วัสดุเซรามิก BFS_5	152
ภาพที่ 5.51	การเปลี่ยนแปลงกับความเค้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 5 kHz ถึง 200 kHz ที่อุณหภูมิห้อง (ก) วัสดุเซรามิก BFS_0	155
ภาพที่ 5.52	การเปลี่ยนแปลงกับความเค้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 5 kHz ถึง 200 kHz ที่อุณหภูมิห้อง (ข) วัสดุเซรามิก BFS_1	156
ภาพที่ 5.53	การเปลี่ยนแปลงกับความเค้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 5 kHz ถึง 200 kHz ที่อุณหภูมิห้อง (ค) วัสดุเซรามิก BFS_2	157

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 5.54	การเปลี่ยนแปลงกับความเค้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในช่วงความถี่ 5 kHz ถึง 200 kHz ที่อุณหภูมิห้อง (ง) วัสดุเซรามิก BFS_3	158
ภาพที่ 5.55	การเปลี่ยนแปลงกับความเค้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในช่วงความถี่ 5 kHz ถึง 200 kHz ที่อุณหภูมิห้อง (จ) วัสดุเซรามิก BFS_4	159
ภาพที่ 5.56	การเปลี่ยนแปลงกับความเค้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ในช่วงความถี่ 5 kHz ถึง 200 kHz ที่อุณหภูมิห้อง (ฉ) วัสดุเซรามิก BFS_5	160
ภาพที่ 5.57	ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกขณะที่ให้ความเค้นต่าง ๆ เทียบกับขณะที่วัสดุเซรามิกไม่ได้รับ ความเค้น ในช่วงของการเพิ่มความเค้นที่ช่วงความถี่ 5 kHz ถึง 200 kHz ที่อุณหภูมิห้อง (ก) วัสดุเซรามิก BFS_0	161
ภาพที่ 5.58	ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกขณะที่ให้ความเค้นต่าง ๆเทียบกับขณะที่วัสดุเซรามิกไม่ได้รับความเค้น ในช่วงของการเพิ่มความเค้นที่ช่วงความถี่ 5 kHz ถึง 200 kHz ที่อุณหภูมิห้อง (ข) วัสดุเซรามิก BFS_1	162
ภาพที่ 5.59	ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกขณะที่ให้ความเค้นต่าง ๆเทียบกับขณะที่วัสดุเซรามิกไม่ได้รับความเค้น ในช่วงของการเพิ่มความเค้นที่ช่วงความถี่ 5 kHz ถึง 200 kHz ที่อุณหภูมิห้อง (ค) วัสดุเซรามิก BFS_2	163
ภาพที่ 5.60	ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกขณะที่ให้ความเค้นต่าง ๆเทียบกับขณะที่วัสดุเซรามิกไม่ได้รับความเค้น ในช่วงของการเพิ่มความเค้นที่ช่วงความถี่ 5 kHz ถึง 200 kHz ที่อุณหภูมิห้อง (ง) วัสดุเซรามิก BFS_3	164
ภาพที่ 5.61	ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกขณะที่ให้ความเค้นต่าง ๆเทียบกับขณะที่วัสดุเซรามิกไม่ได้รับความเค้น ในช่วงของการเพิ่มความเค้นที่ช่วงความถี่ 5 kHz ถึง 200 kHz ที่อุณหภูมิห้อง (จ) วัสดุเซรามิก BFS_4	165
ภาพที่ 5.62	ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกขณะที่ให้ความเค้นต่าง ๆเทียบกับขณะที่วัสดุเซรามิกไม่ได้รับความเค้น ในช่วงของการเพิ่มความเค้นที่ช่วงความถี่ 5 kHz ถึง 200 kHz ที่อุณหภูมิห้อง (ฉ) วัสดุเซรามิก BFS_5	166