



การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสารละลายของแข็ง
แบเรียมเซอร์โคเนตไททานเตและแบเรียมไอรอนไนโอเบต

A STUDY OF ELECTRICAL PROPERTIES OF
BARIUM ZIRCONATE TITANATE - BARIUM IRON NIOBATE
SOLID SOLUTION

หัตวิภา หมายมั่น

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

2552

©ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสารละลายของแข็ง
แบเรียมเซอร์โคเนตไททานเตและแบเรียมไอรอนไนโอเบต

A STUDY OF ELECTRICAL PROPERTIES OF
BARIUM ZIRCONATE TITANATE - BARIUM IRON NIOBATE
SOLID SOLUTION

หัตวิภา หมายมั่น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

2552

©ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสารละลายของแข็ง
แบบเรียมเซอร์โคเนตไททานตและแบบเรียมไอรอนไนโอเบต

หัตถวิภา หมายมั่น

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

2552

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กมลพรรณ เพ็งพัค)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ครุณี วัฒนศิริเวช)

.....กรรมการ

(ศาสตราจารย์ เกียรติคุณ ดร. ทวี ต้นมศิริ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ กัลณกา สาริตธาดา)

.....กรรมการ

(ดร. สุขุม อิศเสงี่ยม)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ เกียรติคุณ ดร. ทวี ต้นหมศิริ ภาควิชาฟิสิกส์และ
วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่กรุณาถ่ายทอดองค์ความรู้ รวมถึงให้
คำปรึกษาแนะนำ ตั้งแต่เริ่มต้นงานวิจัย ทำให้การศึกษานี้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ กัลณกา สาริตธาดา ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะความรู้
ความเข้าใจเกี่ยวกับงานวิจัย และแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ ทำให้ได้งานวิจัยที่มี
ความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ตลอดจนสละเวลาตรวจทานต้นฉบับการเขียนรายงานให้ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร. สุชุม อีสเสียม ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องมือ และสถานที่ในการทดลอง รวมถึงให้คำปรึกษา
แนะนำ แนวทางการวิจัย ทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ได้อย่างถูกต้อง

ขอขอบพระคุณ ดร. อุไรวรรณ อินตะธา ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ แนวทางการวิจัย ทำให้
สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ได้อย่างถูกต้อง รวมถึงการแก้ไขข้อผิดพลาดทั้งในรูปแบบ
การเขียนรายงานและงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านและเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งในการวิเคราะห์ และทดสอบตัวอย่าง
งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณกำลังใจอันยิ่งใหญ่ของ บิดา มารดา และทุกคนใน
ครอบครัว ที่คอยเคียงข้างตลอดมา ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

หัตถวิภา หamayม่น

ลำดับที่สอง พงของสารละลายของแข็งระบบ $(1-x)\text{BZT} - x\text{BFN}$ โดย $x = 0.2, 0.4, 0.6$ และ 0.8 เตรียมได้จากการบดผสมของผงแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนต และผงแบเรียมไอรอนไนโอเบต หลังจากนั้นทำการอัดขึ้นรูป และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1350 ถึง 1450 องศาเซลเซียส จากเซรามิกที่ได้ทั้งหมดพบว่าเซรามิกที่มีค่าความหนาแน่นสูงสุดที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1450 องศาเซลเซียส ในทุกเงื่อนไขการบดผสม โดยเซรามิกแสดงการเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกเป็นเตตระโกนอล และแลตทิซพารามิเตอร์เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของผงแบเรียมไอรอนไนโอเบต ในส่วนของการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกระบบ $(1-x)\text{BZT} - x\text{BFN}$ พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และช่วงความกว้างของพีคไดอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มสัดส่วนผสมของผงแบเรียมไอรอนไนโอเบต โดยค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าต่ำกว่า 2.00 จากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ นอกจากนั้นแล้วสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ศึกษาได้จากวงฮิสเตอร์ิซิสยังพบว่าเซรามิกผสม $0.2\text{BZT} - 0.8\text{BFN}$ แสดงพฤติกรรมความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกของเซรามิกผสม

คำสำคัญ: แบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนต / แบเรียมไอรอนไนโอเบต / เฟอร์โรอิเล็กทริก / ปฏิกริยา
สถานะของแข็ง / ไดอิเล็กทริก

Thesis Title	A Study of Electrical Properties of Barium Zirconate Titanate - Barium Iron Niobate Solid Solution
Author	Haswipa Maimon
Degree	Master of Science (Materials Science)
Supervisory Committee	Assoc. Prof. Gannaga Satittada Prof. Dr. Tawee Tunkasiri Dr. Sukum Eitssayeam

ABSTRACT

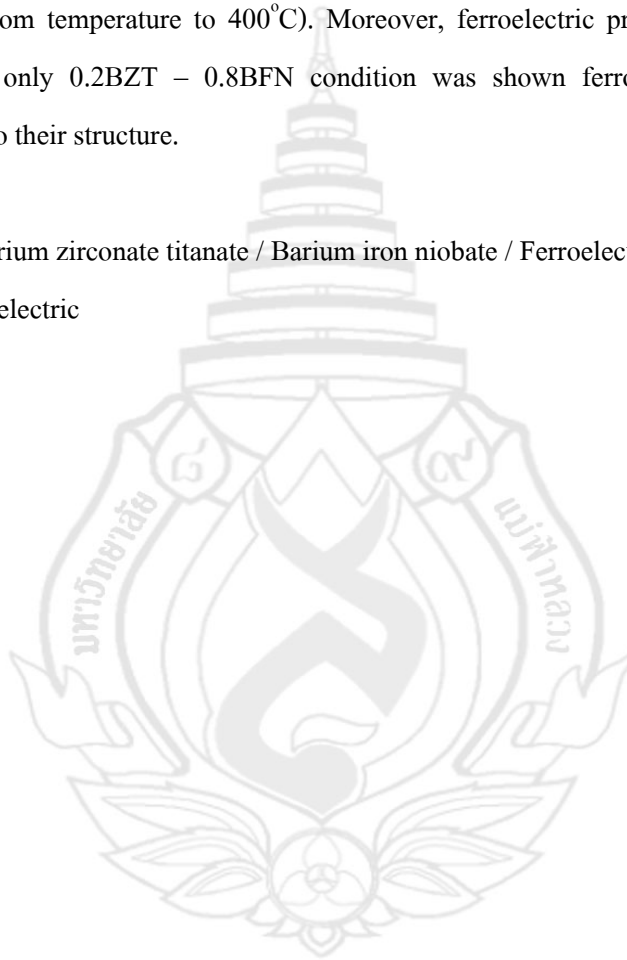
In this work, the major aspects have been carried out to establish the relationships between preparation conditions and the ceramic properties in Barium Zirconate Titanate ($\text{BaTi}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}\text{O}_3$: BZT) – Barium Iron Niobate ($\text{BaFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$: BFN) system.

Firstly, perovskite powders of BZT and BFN have been prepared separately by a solid state reaction technique via ball milling. Particle size and thermal properties of the BZT precursor mixture have been investigated in order to estimate calcination temperature. The BZT powder was calcined between 900 - 1200 °C. Phase formation and morphologies of calcined powders have been investigated. It has been found that the presence of the major BaTiO_3 phase with tetragonal symmetry and some wt% of cubic BaCO_3 obtained at a calcination temperature of 1200 °C. After that, the BFN powder was also prepared with the same technique. From literature survey, BFN powder having pure cubic perovskite, can be formed at calcination temperature of 1200 °C.

Secondly, the solid solution of (1-x)BZT – xBFN powders ($x = 0.2, 0.4, 0.6$ and 0.8) were prepared from the BFN and BZT powders via ball milling and then pressed and sintered

between 1350 - 1450 °C. Maximum density of the ceramic was obtained at 1450 °C for every mixing conditions. The evolution of the tetragonal phase, indicating phase transition from cubic to tetragonal with increasing with BFN ratio. Lattice parameter increases depending on the BFN content. The dielectric properties of (1-x)BZT – xBFN ceramics were studied. Dielectric constant and broadness of dielectric constant peak of this ceramic system were increased with increasing BFN content, with the dielectric loss measured at 1 kHz was show lower than 2.00 at working temperature (room temperature to 400°C). Moreover, ferroelectric properties were studied via hysteresis loop, only 0.2BZT – 0.8BFN condition was shown ferroelectric behavior that is correspondent to their structure.

Keywords: Barium zirconate titanate / Barium iron niobate / Ferroelectric / Solid-state reaction / Dielectric



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	(3)
บทคัดย่อภาษาไทย	(4)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(6)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญภาพ	(12)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย/ศึกษาค้นคว้า	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 หลักการพื้นฐานของตัวเก็บประจุ	4
2.2 วัสดุฉนวนหรือไดอิเล็กทริก	4
2.3 การเกิดโพลาไรเซชัน	5
2.4 โครงสร้างแบบเพอร์อฟสไกต์	8
2.5 สมบัติของวัสดุ	12
2.6 สมบัติพาราไดอิเล็กทริก	15
2.7 การศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริก	16
2.8 การเก็บประจุของตัวเก็บประจุ	17
2.9 ความทนทานของไดอิเล็กทริก	20

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2.10 สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกเทียบกับอุนทงูมิ	21
2.11 การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก	22
2.12 ความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก	23
2.13 การศึกษาผลของขนาดเกรนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กทริก	26
2.14 การพัฒนาปรับปรุงสมบัติทางไดอิเล็กทริก	29
3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	34
3.1 ขั้นตอนการเตรียม และศึกษาสมบัติของผงเซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไททานต	34
3.2 ขั้นตอนการเตรียมและศึกษาสมบัติของผงเซรามิกระบบ (1-x)BZT – xBFN	36
3.3 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติของเซรามิกระบบ (1-x)BZT – xBFN	40
4 ผลการทดลอง	57
4.1 ผลการเตรียมและศึกษาสมบัติของผงเซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไททานต	57
4.2 ผลการเตรียมและศึกษาสมบัติของผงเซรามิกระบบ (1-x)BZT – xBFN	60
4.3 ผลการศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของเซรามิกระบบ (1-x)BZT – xBFN	65
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	98
5.1 การศึกษาการเตรียมผงแบเรียมเซอร์โคเนตไททานต	98
5.2 การศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของเซรามิกระบบ (1-x)BZT – xBFN	98
5.3 ข้อเสนอแนะ	99
รายการอ้างอิง	101

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก	107
ภาคผนวก ก สมบัติเพียโซอิเล็กทริก	107
ภาคผนวก ข หลักการวิเคราะห์ทดสอบด้วยเครื่องมือขั้นสูง	110
ภาคผนวก ค การศึกษาเพิ่มเติมในงานวิจัย	125
ประวัติผู้เขียน	132



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารไดอิเล็กทริก	19
2.2 แสดงค่าความหนาแน่นของไดอิเล็กทริก	21
2.3 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{BaZr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$	28
3.1 แสดงสมบัติของสารเริ่มต้นที่ใช้ในงานวิจัย	37
3.2 แสดงสัดส่วนการผสมระหว่าง BZT และ BFN โดยเปอร์เซ็นต์โมล	41
4.1 แสดงขนาดอนุภาคของสารตั้งต้น	58
4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุในสารประกอบ	62
4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุในชิ้นงานเซรามิกหลังการเผาซินเตอร์	65
4.4 แสดงค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี	66
4.5 แสดงค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองและค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์	67
4.6 แสดงค่าแลตทิซพารามิเตอร์ ขนาดของผลึก และค่าความเครียดของเซรามิก	70
4.7 แสดงขนาดเกรนของเซรามิก	77
4.8 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส	83
4.9 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	84
4.10 แสดงค่าสภาพความต้านทานของเซรามิก	93

สารบัญภาพประกอบ

ภาพ	หน้า
2.1 แสดงการเกิดโพลาริเซชันในรูปแบบต่างๆ	7
2.2 แสดงรูปแบบพื้นฐานของโครงสร้างเพอรอฟสไกต์	8
2.3 แสดงโครงสร้างของ BaTiO_3	9
2.4 แสดงการเปลี่ยนโครงสร้างของ BaTiO_3	10
2.5 แสดงโครงสร้างของ BaTiO_3 ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ	11
2.6 แสดงการกระจายตัวของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในวัสดุรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กตริก	14
2.7 แสดงการเปลี่ยนโครงสร้างของสาร BaTiO_3	15
2.8 แสดงโครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบที่บรรจุวัสดุไดอิเล็กตริก	17
2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P และ E ของผลึก	22
2.10 แสดงขนาด Hysteresis loop เทียบกับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก	23
2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกส่วนจริงและส่วนจินตภาพ	24
2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานส่วนจริงและส่วนจินตภาพของเซรามิก	25
2.13 แสดงผลของขนาดเกรน 1 – 50 ไมโครเมตร เทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	26
2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับขนาดของเกรน	27
3.1 แสดงลักษณะการทำงานของเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค	35
3.2 แสดงเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักเชิงความร้อน	38
3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาแคลไซน์	39
3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคในระหว่างการเผาซินเตอร์	42
3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาซินเตอร์	43
3.6 แสดงหลักการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบด้วยวิธีการวิเคราะห์พลังงาน	44
3.7 แสดงเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์	44
3.8 แสดงลักษณะของขดลวดจุ่มน้ำ	45
3.9 แสดงเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	48

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
3.10 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	50
3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานส่วนจริงและส่วนจินตภาพของเซรามิก	53
3.12 แสดงเครื่องวัดความต้านทาน	54
3.13 แสดงทิศทางโพลาริเซชันของเซรามิกภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับจากภายนอก	55
3.14 แสดงขั้นตอนการเตรียมสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานต	55
3.15 แสดงขั้นตอนการศึกษาสมบัติของเซรามิกระบบ $(1-x)\text{BZT} - x\text{BFN}$	56
4.1 แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสารตั้งต้น	58
4.2 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคสารตั้งต้น	60
4.3 แสดงผล DTA และ TGA ของผงผสม BZT	61
4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของผงแคลไซต์ BZT	63
4.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของผงแคลไซต์ BZT และ BFN	64
4.6 แสดงค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลอง	68
4.7 แสดงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์	68
4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก $0.2\text{BZT} - 0.8\text{BFN}$	71
4.9 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก $0.4\text{BZT} - 0.6\text{BFN}$	72
4.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก $0.6\text{BZT} - 0.4\text{BFN}$	73
4.11 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก $0.8\text{BZT} - 0.2\text{BFN}$	74
4.12 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกหลังการเผาซินเตอร์ 1450 องศาเซลเซียส	75
4.13 แสดงขนาดเกรนของเซรามิก	77
4.14 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของเซรามิก $0.2\text{BZT}-0.8\text{BFN}$	78
4.15 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของเซรามิก $0.4\text{BZT}-0.6\text{BFN}$	79
4.16 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของเซรามิก $0.6\text{BZT}-0.4\text{BFN}$	80
4.17 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของเซรามิก $0.8\text{BZT}-0.2\text{BFN}$	81

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.18 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก 0.2BZT-0.8BFN เพาซินเตอร์ 1450 องศาเซลเซียส	85
4.19 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก 0.4BZT-0.6BFN เพาซินเตอร์ 1450 องศาเซลเซียส	86
4.20 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก 0.6BZT-0.4BFN เพาซินเตอร์ 1450 องศาเซลเซียส	87
4.21 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก 0.8BZT-0.2BFN เพาซินเตอร์ 1450 องศาเซลเซียส	88
4.22 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก ที่ความถี่ 100 เฮิร์ตซ์	89
4.23 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์	90
4.24 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์	91
4.25 แสดงวงฮิสเตอร์ิซิสของเซรามิกผสม 0.2BZT - 0.8BFN	94
4.26 แสดงวงฮิสเตอร์ิซิสของเซรามิกผสม 0.4BZT - 0.6BFN	95
4.27 แสดงวงฮิสเตอร์ิซิสของเซรามิกผสม 0.6BZT - 0.4BFN	95
4.28 แสดงวงฮิสเตอร์ิซิสของเซรามิกผสม 0.8BZT - 0.2BFN	96
4.29 แสดงวงฮิสเตอร์ิซิสของเซรามิกผสมที่วัดด้วยความต่างศักย์ 250 โวลต์	96
4.30 แสดงวงฮิสเตอร์ิซิสของเซรามิกผสมที่วัดด้วยความต่างศักย์ 2 กิโลโวลต์	97

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันการแข่งขันทางอุตสาหกรรมต่างๆมีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งทางด้านอุปกรณ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์และยานยนต์ ส่งผลให้ผู้ผลิตต้องพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อที่จะสามารถแข่งขันได้ในตลาดเสรี ผู้ผลิตจำเป็นต้องคำนึงถึงองค์ประกอบพื้นฐานหลายด้านเช่น ความต้องการของตลาด ประสิทธิภาพ ความปลอดภัย อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ต้นทุนการผลิต กฎระเบียบภายในประเทศ และข้อกำหนดเฉพาะของประเทศคู่ค้า เป็นต้น ในยุคของการรณรงค์เพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เช่นปัจจุบัน นอกเหนือจากมาตรฐานคุณภาพสินค้า และมาตรฐานความปลอดภัยแล้ว ประเทศต่างๆ ได้เริ่มให้ความสนใจกับปัญหาของสินค้า และการใช้วัตถุดิบที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น รวมถึงการใช้สารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมของประเทศคู่ค้า ก็มีความเข้มงวดเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ประกอบกับแนวโน้มในการบริโภคสินค้าที่อนุรักษ์สิ่งแวดล้อมของผู้บริโภคที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ผู้ผลิตต้องหันมาปรับปรุงภาพลักษณ์ของสินค้าให้เป็น "ผลิตภัณฑ์สะอาด" เพื่อให้สามารถแข่งขันในตลาดเสรีได้

กระแสการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สะอาด : Green Electronics ได้เกิดขึ้นมานาน โดยผู้นำด้าน Green Electronics ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มผู้ผลิตในประเทศญี่ปุ่นและยุโรป ที่ใช้ Green Electronics เป็นกลยุทธ์ในการเพิ่มยอดขาย ทำให้เทคโนโลยีสินค้ารักษ์สิ่งแวดล้อมในประเทศญี่ปุ่นพัฒนาอย่างรวดเร็วร่นำหน้าประเทศอื่น

สำหรับอุตสาหกรรมวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric material) ที่ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วเช่นกัน ซึ่งส่วนใหญ่ได้ใช้สารประกอบ PZT (Lead Zirconate Titanate) รวมถึงสารอื่นๆที่มีสารตะกั่วเป็นสารพื้นฐาน (Lead Based Piezoelectric Material) การเลือกสารตะกั่วเป็นสารพื้นฐาน เนื่องจากค่าคงที่ในการเปลี่ยนพลังงานกลและพลังงานไฟฟ้าสูงทำให้มีความไวสูง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) มีค่าสูงในช่วง

อุณหภูมิกว้าง นอกจากนี้ยังมีความเสถียรสูง ทำให้ PZT เป็นวัสดุที่มีการศึกษาพัฒนามาโดยตลอด แต่เนื่องจากสารตะกั่วเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีหลายหน่วยงานพยายามพัฒนาหาสารอื่นเพื่อทดแทนสารตะกั่วในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และวัสดุไดอิเล็กทริก

หลายหน่วยงานเริ่มทำการวิจัยเพื่อหาสารทดแทนตะกั่วในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และวัสดุไดอิเล็กทริก ซึ่งสามารถแบ่งงานวิจัยออกเป็น กลุ่มที่ลดปริมาณสารตะกั่วลง และกลุ่มที่ศึกษาหาสารประกอบใหม่ที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบอยู่เลย ซึ่งสารประกอบที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนผสมนี้ ได้มีกลุ่มนักวิจัยเลือกศึกษาสารแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) เป็นสารประกอบพื้นฐาน เนื่องจากเป็นสารที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ที่อุณหภูมิห้อง (Tura, *et al.*, 1998) และได้ศึกษาการเจือสารอื่นๆ ลงไปเพื่อที่จะพัฒนาสมบัติไดอิเล็กทริก ตัวอย่างเช่น สารประกอบ BZT, STO/BZO, La/BZT, BNT/BZT, BZT-BFT-FT โดยจากงานวิจัยของ Ciomaga และคณะ (2006) ที่ทำการศึกษาศึกษาการเตรียมสารเซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนต (BZT) พบว่าเซรามิกดังกล่าวให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก 3900 ที่อุณหภูมิห้อง และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำกว่า 0.02 ซึ่งเป็นจุดเด่นของสารเซรามิกชนิดนี้ แต่เนื่องจากในปัจจุบันเทคโนโลยีต่างๆ มีความต้องการใช้วัสดุไดอิเล็กทริกในงานความถี่สูง ความถี่สูง จึงจำเป็นต้องมีงานวิจัยและพัฒนาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุให้สูงขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุให้อยู่ในช่วงการสูญเสียที่ต่ำด้วย โดยจากการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม พบว่ามีงานวิจัยของอุไรวรรณ และคณะ (2007) ที่ทำงานวิจัยเกี่ยวกับสารแบเรียมไอรอนไนโอเบต (BFN) ซึ่งเป็นสารในกลุ่มที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง (Giant dielectric) ในช่วงอุณหภูมิกว้าง โดยจากงานวิจัยพบว่า วัสดุไดอิเล็กทริกแบเรียมไอรอนไนโอเบตให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก 5023 ที่อุณหภูมิห้อง แต่เนื่องจากมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงถึง 4.29 ดังนั้นจากสารไดอิเล็กทริกทั้งสองชนิดที่ได้จากการศึกษาค้นคว้า ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาสมบัติของสารผสมระหว่างสารประกอบแบเรียมไอรอนไนโอเบตและแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนต โดยคาดหวังว่าเซรามิกที่ได้จะพัฒนาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนตและลดค่าการสูญเสียของสารแบเรียมไอรอนไนโอเบต จึงเลือกทำการศึกษาวิจัยระบบนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ศึกษาการเตรียมสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนต
- 1.2.2 ศึกษาการเตรียม และการหาลักษณะเฉพาะ ของสารในระบบ $(1-x)\text{BZT}-x\text{BFN}$
- 1.2.3 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสารในระบบ $(1-x)\text{BZT}-x\text{BFN}$

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

- 1.3.1 เข้าใจหลักการ และสมบัติความเป็นไดอิเล็กทริกที่ดี
- 1.3.2 สามารถปรับปรุงส่วนผสมของสารในระบบ (1-x)BZT-xBFN เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และสมบัติความเป็นไดอิเล็กทริกของสารเซรามิก
- 1.3.3 หาวัสดุทดแทนการใช้สารตะกั่วสำหรับสารเซรามิกไดอิเล็กทริก ซึ่งเป็นการลด ปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อม
- 1.3.4 พัฒนางานวิจัยสมบัติความเป็นไดอิเล็กทริกของวัสดุให้เหมาะสมกับการนำไป ประยุกต์ใช้งาน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย/ศึกษาค้นคว้า

- 1.4.1 ศึกษาลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น เพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมของอนุภาค เริ่มต้นที่จะส่งผลกระทบต่อ การอัด การเผาซินเตอร์ และ โครงสร้างของเซรามิก โดยทำการศึกษา ขนาดอนุภาค และลักษณะรูปร่างของอนุภาค รวมถึงการสลายตัวของโครงสร้างในรูปของพลังงาน ความร้อนในสารตั้งต้น
- 1.4.2 ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ผงแบเรียมเซอร์โคเนตไททานेटด้วยวิธีปฏิกิริยา สถานะของแข็ง รวมถึงลักษณะของผงแบเรียมเซอร์โคเนตไททานेट และผงแบเรียมไอรอนไนโอเบต
- 1.4.3 ศึกษากระบวนการผลิตเซรามิกผสมระหว่างแบเรียมเซอร์โคเนตไททานेट และ แบเรียมไอรอนไนโอเบต ในอัตราส่วนผสม 20 40 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์โดยโมล
- 1.4.4 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกที่ผลิตได้ ตามเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสม และอุณหภูมิเผาซินเตอร์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการพื้นฐานของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถเก็บสะสมประจุ และคายประจุได้ ถูกนำมาใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์อย่างกว้างขวาง ซึ่งมีสมบัติเหมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ต่อภายในวงจรเพื่อใช้งานในช่วงที่วงจรมีระดับแรงดันไฟฟ้าไม่เพียงพอ หรือใช้ในการกรองกระแสไฟฟ้า

ตัวเก็บประจุประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว แต่ละขั้วจะเก็บสะสมประจุชนิดตรงข้ามกันโดยมีปริมาณเท่ากัน และมีวัสดุที่เป็นฉนวนหรือไดอิเล็กทริกคั่นกลาง ดังนั้นประจุสุทธิในตัวเก็บประจุจึงมีค่าเท่ากับศูนย์เสมอ (Moulson & Herbert, 2003)

2.2 วัสดุฉนวนหรือไดอิเล็กทริก

วัสดุไดอิเล็กทริก คือวัสดุฉนวนซึ่งมีความต้านทานสูง มีโมเลกุลเป็นไดโพลทางไฟฟ้า (Electric dipole) เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าไดโพลจะหมุนตัวตามแรงกระทำของสนามไฟฟ้า เกิดสนามไฟฟ้าของไดโพล ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าจากภายนอก ส่งผลให้สนามไฟฟ้ารวมมีค่าลดลง เมื่อโมเลกุลจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้าจะเกิดโพลาไรเซชันขึ้น (Buchanan, 2004) โดยสารไดอิเล็กทริกแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ สารไดอิเล็กทริกชนิดมีขั้วและชนิดไม่มีขั้ว

สารไดอิเล็กทริกชนิดมีขั้ว คือ สารไดอิเล็กทริกซึ่งมีไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าถาวรตามธรรมชาติ โดยไม่ต้องอาศัยสนามไฟฟ้าจากภายนอก แต่มีทิศทางที่ไม่เป็นระเบียบ การให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกจะทำให้ไดโพลโมเมนต์จัดเรียงตัวใหม่ ในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า เช่น PZT และ BZT ซึ่งเป็นวัสดุในกลุ่มเฟอร์โรอิเล็กทริก

สารไดอิเล็กทริกชนิดไม่มีขั้ว คือ สารไดอิเล็กทริกที่ไม่ปรากฏไดโพลโมเมนต์โดยธรรมชาติ แต่จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าได้ เช่น แก้วมีเทน

ในส่วนการประยุกต์ใช้งานจะพิจารณาสมบัติสารไดอิเล็กทริกดังนี้ คือ มีความต้านทานสูง อุณหภูมิคูรีต่ำ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำ ค่าความแข็งแรงไดอิเล็กทริกสูง ง่ายต่อการกลับขั้ว เกรนเล็กและสม่ำเสมอ ช่วงอุณหภูมิการใช้งานกว้าง ต้นทุนต่ำ (Yamashita, 1990)

สำหรับการพัฒนาการผลิตตัวเก็บประจุส่วนใหญ่จะพิจารณาตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก เนื่องจากมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพสูง ง่ายต่อการผลิต ราคาถูก สามารถทำให้บางและเล็กได้ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กทริกให้สูงขึ้นได้ โดยการปรับปรุงส่วนประกอบของเซรามิก จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าแบเรียมไททานเต (BaTiO₃) เป็นสารประกอบที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง (Tura, *et al.*, 1998) เนื่องจากแบเรียมไททานเตเป็นสารประกอบเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) ซึ่งสามารถเกิดขั้วขึ้นได้เอง และมีโครงสร้างเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) ซึ่งสามารถเกิดโพลาริเซชันแบบไอออนิกได้สูง

2.3 การเกิดโพลาริเซชัน

การเกิดโพลาริเซชันคือ การเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของประจุ อาจเกิดจากการให้สนามไฟฟ้าจากภายนอก โดยประจุบวกและประจุลบจะแสดงลักษณะเป็นไดโพลซึ่งสามารถเกิดได้ทั้งในอะตอมและกลุ่มของอะตอม โดยไดโพล คือ ผลคูณของประจุไฟฟ้าและระยะทางระหว่างคู่ประจุ (ประจุบวกและประจุลบ) (กอบวุฒิ รุจิณากุล, 2549)

$$P = Zqd \quad (2.1)$$

เมื่อ	Z	คือ	ค่าจำนวนประจุไฟฟ้าต่อปริมาตร (อิเล็กตรอน/ลูกบาศก์เมตร)
	q	คือ	ค่าประจุไฟฟ้า (คูลอมบ์/อิเล็กตรอน)
	d	คือ	ระยะห่างประจุบวกและลบ (เมตร)
	P	คือ	ค่าโพลาริเซชัน (คูลอมบ์/ตารางเมตร)

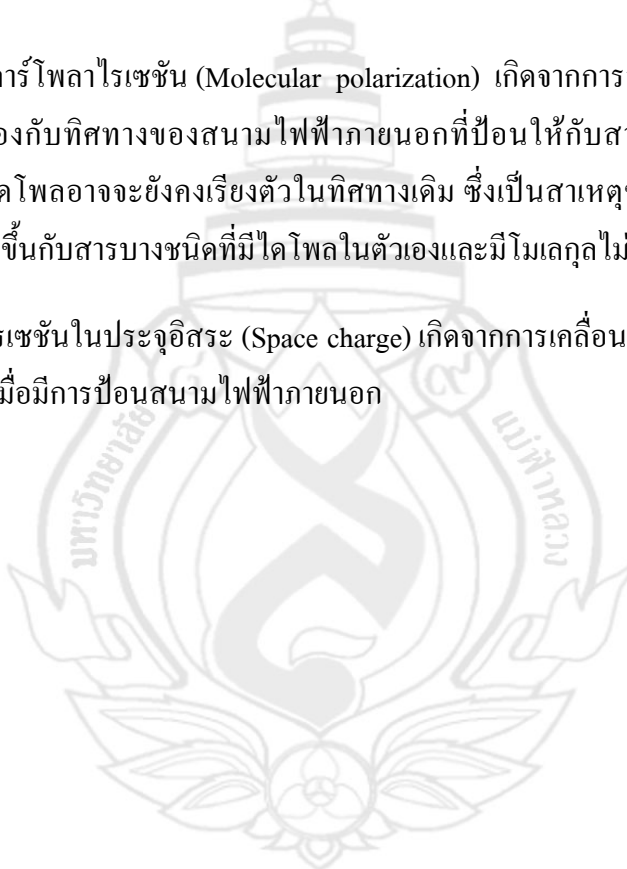
การเกิดโพลาไรเซชันอาจแบ่งได้เป็น อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชัน ไอออนิกโพลาไรเซชัน โมเลกูลาร์โพลาไรเซชัน และประจุอิสระ แสดงดังภาพที่ 2.1

อิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชัน (Electronic polarization) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของประจุระหว่างกลุ่มอิเล็กตรอนกับนิวเคลียส

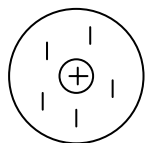
ไอออนิกโพลาไรเซชัน (Ionic polarization) เกิดจากการเปลี่ยนรูปของพันธะไอออน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของประจุในสาร ซึ่งไอออนบวกและไอออนลบอาจเกิดการเคลื่อนที่เข้าหากัน หรือเคลื่อนที่ออกจากกัน ทำให้เกิดไอออนิกโพลาไรเซชันขึ้น

โมเลกูลาร์โพลาไรเซชัน (Molecular polarization) เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของไดโพลเพื่อให้สอดคล้องกับทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนให้กับสาร แต่เมื่อเอาสนามไฟฟ้าภายนอกออก ไดโพลอาจจะยังคงเรียงตัวในทิศทางเดิม ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโพลาไรเซชันถาวร โดยจะเกิดขึ้นกับสารบางชนิดที่มีไดโพลในตัวเองและมีโมเมนต์ไม่สมมาตร

โพลาไรเซชันในประจุอิสระ (Space charge) เกิดจากการเคลื่อนตัวของประจุบนผิวรอยต่อระหว่างชิ้นงานเมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้าภายนอก



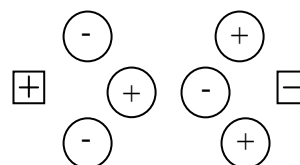
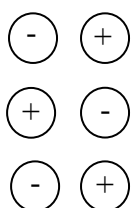
สภาพปกติ



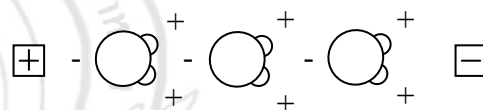
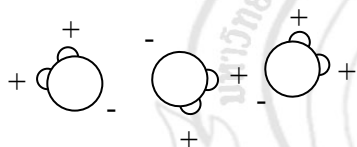
สภาพเมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอก



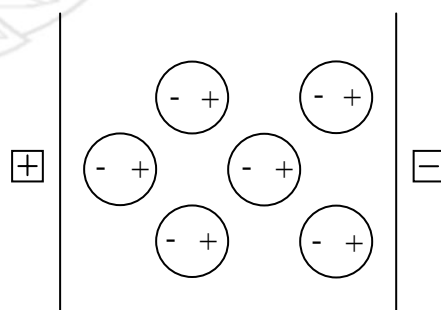
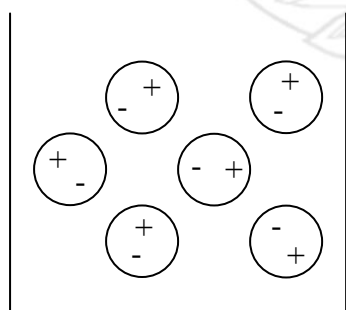
อิเล็กตรอนิกส์โพลาริเซชัน



ไอออนิกโพลาริเซชัน



โมเลกุลาร์โพลาริเซชัน

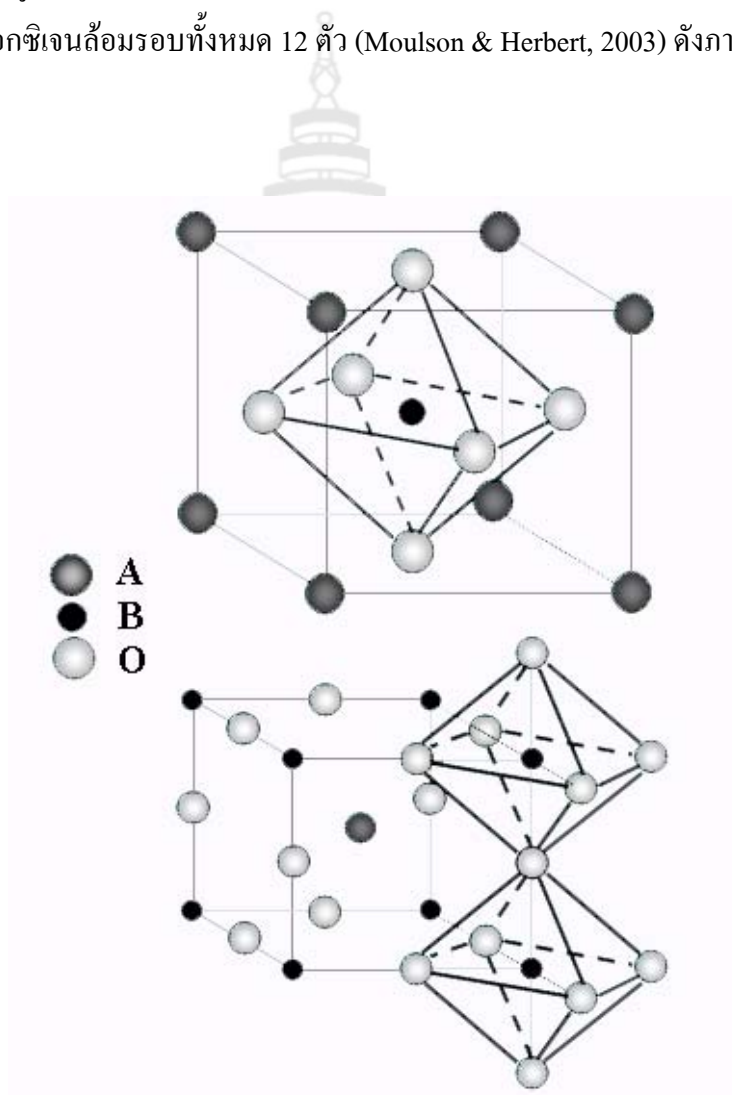


โพลาริเซชันในประจุอิสระ

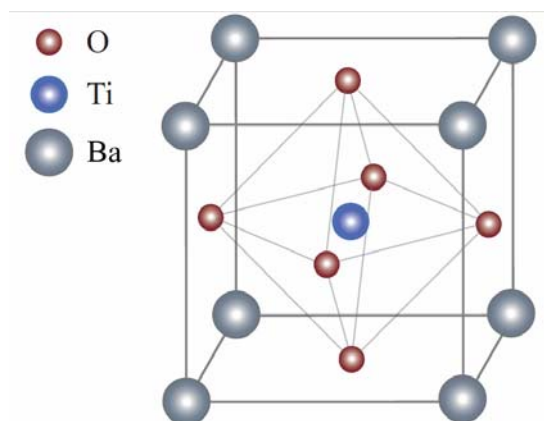
ภาพที่ 2.1 แสดงการเกิดโพลาริเซชันในรูปแบบต่างๆ

2.4 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์

โครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) เป็นโครงสร้างที่มีสมการทางเคมีแบบ ABO_3 มีรูปแบบพื้นฐานเป็นคิวบิก โดย AO_3 จะจับกันอย่างหนาแน่น ซึ่งไอออนในตำแหน่ง B เป็นไอออนที่มีขนาดเล็ก แต่มีประจุบวกแทรกอยู่ในช่องว่างออกตะฮีดรอลของออกซิเจน โดยไอออนของออกซิเจนจะถูกล้อมรอบด้วยไอออนในตำแหน่ง A ทั้งหมด 4 ตัว และไอออนในตำแหน่ง A จะมีไอออนของออกซิเจนล้อมรอบทั้งหมด 12 ตัว (Moulson & Herbert, 2003) ดังภาพที่ 2.2

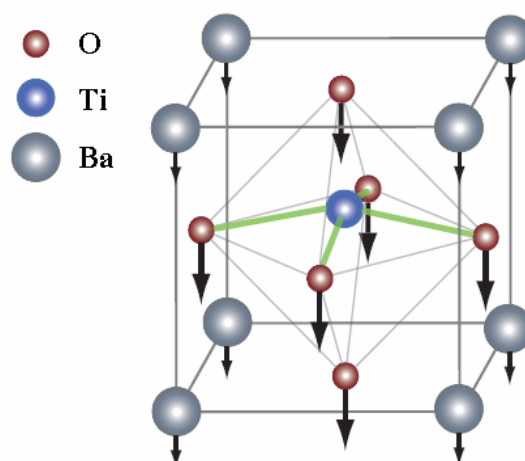


ภาพที่ 2.2 แสดงรูปแบบพื้นฐานของโครงสร้างเพอโรฟสไกต์
(Wikimedia, 2009, ระบบออนไลน์)



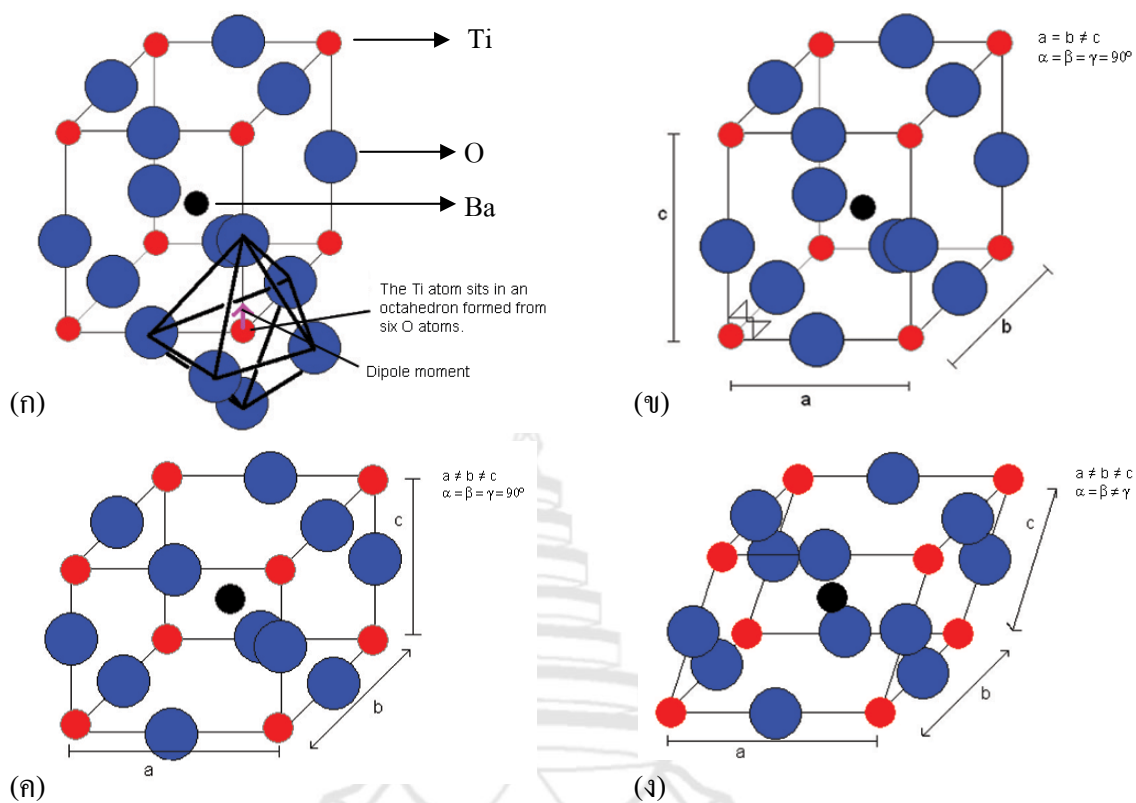
ภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของ BaTiO₃ (Piskunovs, 2003)

จากภาพที่ 2.3 เป็นตัวอย่างสารประกอบแบเรียมไททาเนต แสดงให้เห็นว่าไอออน Ba²⁺ และ O²⁻ จะจับพันธะกันและเกิด Lattice แบบ Primitive cell นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างผลึกชนิดอื่นที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ เช่น CaTiO₃, SrTiO₃, PbTiO₃ เป็นต้น (กอบวุฒิ รุจิณากุล, 2549) ในกรณีของ BaTiO₃ พบว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจะขึ้นกับอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิคูรี (อุณหภูมิคูรีของ BaTiO₃ มีค่าประมาณ 130 องศาเซลเซียส) จะมีโครงสร้างแบบคิวบิก แต่เมื่อลดอุณหภูมิลงจนต่ำกว่า 130 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างแบบเตตระโกนัล โดยไอออนของไทเทเนียมกับไอออนของออกซิเจนจะใกล้ชิดกัน 1 คู่ และจะห่างมากกับไอออนของออกซิเจนที่อยู่ในทิศทางตรงข้าม ทำให้โครงสร้างผลึกไม่สมมาตร เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางตรงในแนวตั้งเป็นสาเหตุให้เกิดโพลาไรเซชันถาวรขึ้น (Moulson & Herbert, 2003) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ในกรณีของผลึก BaTiO₃ มักเป็นผลึกที่ใช้ในการศึกษาสมบัติพื้นฐานของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก และเป็นสารเพียโซอิเล็กทริกชนิดหนึ่ง



ภาพที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยน โครงสร้างของ BaTiO_3 (Piskunovs, 2003)

เมื่อพิจารณาลักษณะ โครงสร้าง BaTiO_3 ที่อุณหภูมิต่างๆพบว่าโครงสร้างของ BaTiO_3 จะเปลี่ยนจากเตตระโกนัล (Tetragonal) ไปเป็นออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) โดยมีแกนโพลาไรซ์ขนานกับระนาบหน้าของแนวทแยงที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และจะเปลี่ยนเป็นรอมโบฮีดรอล (Rhombohedral) โดยมีแกนโพลาไรซ์แยงตามเซลล์ ที่อุณหภูมิ -90 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 2.5



ก. โครงสร้างคิวบิกเปลี่ยนเป็นเตตระโกนัล ข. โครงสร้างเตตระโกนัล
ค. โครงสร้างออร์โทโรมบิก ง. โครงสร้างรอมโบอีดรอล

ภาพที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของ BaTiO_3 ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ
(University of Cambridge, ระบบออนไลน์)

2.5 สมบัติของวัสดุ

การจัดแบ่งผลึก (Crystal class) เป็น 32 กลุ่มตามลักษณะสมมาตรแบบจุด จากผลึก 32 กลุ่มดังกล่าวมี 21 กลุ่ม ที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง (Non-centrosymmetric) ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกใน 20 กลุ่ม อีกหนึ่งกลุ่มไม่มีสภาพเป็นเพียโซอิเล็กทริกแม้จะอยู่ในกลุ่มที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลาง (ณรงค์ศักดิ์ ชัยชิต, 2545)

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกโดยทั่วไปนั้นจะมีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ ซึ่งที่อุณหภูมิสูงวัสดุจะแสดงโครงสร้างแบบคิวบิกและมีสถานะเป็นพาราอิเล็กทริก แต่ที่อุณหภูมิต่ำจะแสดงโครงสร้างแบบเตตระโกนัลและมีสถานะเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยในกลุ่มวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือวัสดุไพโรอิเล็กทริก และวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก

วัสดุไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric) เป็นกลุ่มวัสดุที่มีโครงสร้างในรูปแบบจุดที่ไม่มีสมมาตรศูนย์กลาง 10 แบบ โดยจะแสดงลักษณะการมีขั้ว (Polar) หรือที่เรียกว่า ไดโพลไฟฟ้า (Electric dipole) แม้จะไม่มีสนามไฟฟ้าจากภายนอกมากระทำ เรียกว่า การเกิดโพลาไรเซชันขึ้นเอง (Spontaneous polarization ; P_s) จึงเรียกได้ว่าวัสดุไพโรอิเล็กทริกทั้งหมดเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (รัตติกร ยัมนิริญ, 2549)

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก คือ วัสดุที่มีขั้วซึ่งในสถานะที่มีสนามไฟฟ้าจากภายนอก จะมีทิศทาง การเรียงตัวของสภาพการมีขั้วขึ้นเอง (Spontaneous polarization) อย่างน้อย 2 ทิศทาง และทิศทาง ของสภาพการมีขั้วขึ้นเองทั้งสองนี้สามารถสลับทิศทางกันได้ โดยการใช้สนามไฟฟ้าจากภายนอก ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกทั้งหมดเป็นวัสดุไพโรอิเล็กทริก แต่วัสดุไพโรอิเล็กทริก บางตัว เฉพาะวัสดุที่มีการมีขั้วขึ้นเองสามารถกลับทิศทางได้ด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอกเท่านั้นที่เป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกส่วนมากจะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากสภาพ พาราอิเล็กทริก ที่อุณหภูมิสูงไปสู่สภาพเฟอร์โรอิเล็กทริก ที่อุณหภูมิต่ำ (Ciomaga, et al., 2006) ซึ่ง ในสถานะพาราอิเล็กทริกวัสดุดังกล่าวอาจจะมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกหรือไม่ก็ได้ และมักจะไม่เป็น วัสดุมีขั้ว ทั้งนี้สมมาตรของโครงสร้างในสถานะเฟอร์โรอิเล็กทริก จะมีต่ำกว่าสมมาตรของสถานะ พาราอิเล็กทริกเสมอ อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสถานะจากพาราอิเล็กทริกมาเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก (และในทางกลับกัน) นั้นเรียกว่า “อุณหภูมิคูรี” (Curie temperature: T_c) ทั้งนี้เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า T_c ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลง (Puri & Babbar, 1997) โดยเป็นไปตามกฎคูรี-ไวสส์ (Curie-Weiss law)

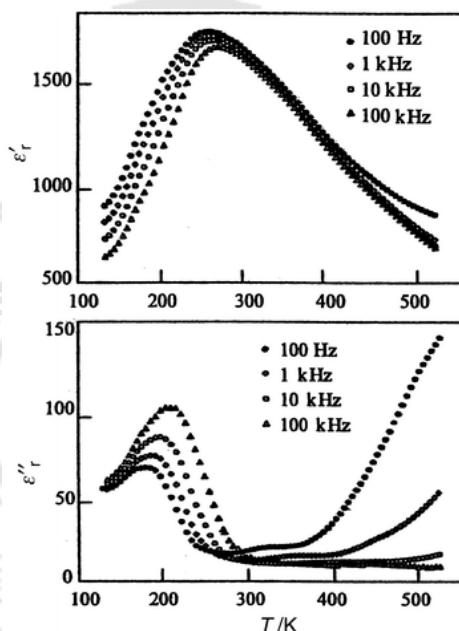
$$\varepsilon_r = \frac{C}{T - T_0} \quad (2.2)$$

โดย	ε_r	คือ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
	C	คือ	ค่าคงที่คูรี (Curie constant)
	T	คือ	อุณหภูมิใดๆ
	$T_0 (T_0 < T_c)$	คือ	อุณหภูมิคูรี-ไวสส์ (Curie-Weiss temperature)

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก บางชนิด เช่น แบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) นั้นสามารถเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างได้หลายครั้งในสภาพที่ยังคงเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกอยู่ ทั้งนี้เฉพาะอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเข้าสู่สภาพเฟอร์โรอิเล็กทริก ครั้งแรกเท่านั้นที่เรียกว่า “อุณหภูมิคูรี” การเปลี่ยนสถานะเข้าสู่สภาพเฟอร์โรอิเล็กทริก มักจะตามมาด้วย การเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กทริก ความยืดหยุ่น ความร้อน และสมบัติอื่นๆ ในวัสดุ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของโครงสร้างของผลึก ซึ่งจะมีความเครียดเกิดขึ้นเรียกว่า “ความเครียดที่เกิดขึ้นเอง” (Spontaneous strain) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการเปลี่ยนแปลงสถานะจากพาราอิเล็กทริกเข้าสู่สถานะเฟอร์โรอิเล็กทริก (รัตติกร ยัมนิรัญ, 2549)

นักวิจัยหลายท่าน ได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนผสมสารเซอร์โคเนียม ในเซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนตต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคูรี จากสารตั้งต้นแบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) ที่มีอุณหภูมิคูรี 130 องศาเซลเซียส ซึ่งหลายท่านได้ให้ข้อสรุปไปในทางเดียวกันคือ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของเซอร์โคเนียมจะส่งผลให้อุณหภูมิคูรีลดลง ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Stephen M. Neirman (1988) ที่ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนผสมสารเซอร์โคเนียมต่ออุณหภูมิคูรีในเซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนต ($\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$) เมื่อ $x = 0, 0.05, 0.10$ และ 0.20 พบว่าค่าอุณหภูมิคูรีที่ได้จากการวิจัยเป็น 126 105 85 และ 31 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Kobune, Yamakawa และ Yazawa (2005) อีกทั้งงานวิจัยของ Liang และคณะ (2007) ยังพบว่าเมื่อเพิ่มเซอร์โคเนียมมากกว่า 0.20 จะได้ค่าอุณหภูมิคูรีต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส

จากงานวิจัยที่พัฒนาสมบัติของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก ทำให้มีการค้นพบวัสดุใหม่ที่เรียกว่า วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกรีแลกเซอร์ (Relaxor ferroelectrics หรือ Relaxor) ซึ่งเป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก ชนิดใหม่ ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะแบบกระจาย (Diffusion phase transition) โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงในช่วงอุณหภูมิกว้าง (Broad maximum) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่มาก ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด และที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิดังกล่าววัสดุรีแลกเซอร์จะไม่แสดงพฤติกรรมแบบคูรี-ไวสส์ (Curie-Weiss behavior) (Moulson & Herbert, 2003) ดังตัวอย่างวัสดุรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก $\text{Pb}_2\text{K}(\text{Nb}_{0.1}\text{Ta}_{0.9})_5\text{O}_{15}$ ในภาพที่ 2.6

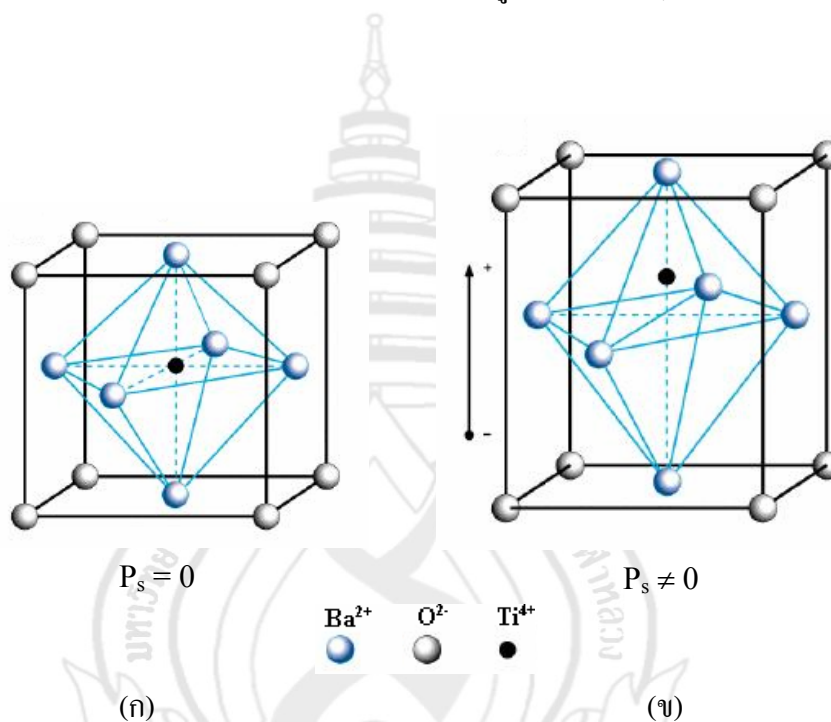


ภาพที่ 2.6 แสดงการกระจายตัวของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในวัสดุรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก

(Elissald & Ravez, 2001)

2.6 สมบัติพาราอิเล็กทริก

สภาพพาราอิเล็กทริกหรือเรียกอีกอย่างว่า สถานะที่มีสภาพไม่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดสภาพเฟอร์โรอิเล็กทริก เป็นสถานะที่มีสมมาตรมากกว่า สถานะเฟอร์โรอิเล็กทริก มีโครงสร้างแบบคิวบิก ซึ่งมีทิศทางการแกว่งทั้ง 6 ทิศมีความสมมูลกัน (Equivalent) ทำให้การเกิดโพลาไรเซชันขึ้นเองมีค่าเป็นศูนย์ (Barsoum, 2003)



- ก. สถานะพาราอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์
- ข. สถานะเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล

ภาพที่ 2.7 แสดงการเปลี่ยนโครงสร้างของสาร BaTiO_3

(Northwestern University, 2002-2007, ระบบออนไลน์)

2.7 การศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริก

การเกิดขั้วหรือการโพลาไรเซชัน (Polarization) จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในวัสดุฉนวนที่เกิดขั้วได้ หรือที่เรียกว่าวัสดุไดอิเล็กทริก ด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก โดยสมบัติไดอิเล็กทริกนี้เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งจะเป็นสมบัติที่บ่งบอกค่าความสามารถในการเก็บสะสมประจุของตัวเก็บประจุชนิดต่างๆ (Puri & Babbar, 1997) โดยจากการทบทวนเอกสาร สามารถสรุปสมบัติที่ดีของวัสดุไดอิเล็กทริกได้ โดยแบ่งออกเป็น 2 ด้าน (Yamashita, 1990) ดังนี้

สมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่

1. การให้ค่าความต้านทานที่สูง
2. สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของความต้านทานมีค่าน้อย
3. ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าสูง
4. การสูญเสียพลังงานต่ำ
5. ง่ายต่อการกลับขั้วของโพลาไรเซชัน
6. อัตราการเสื่อมสภาพน้อย

สมบัติทางกายภาพ

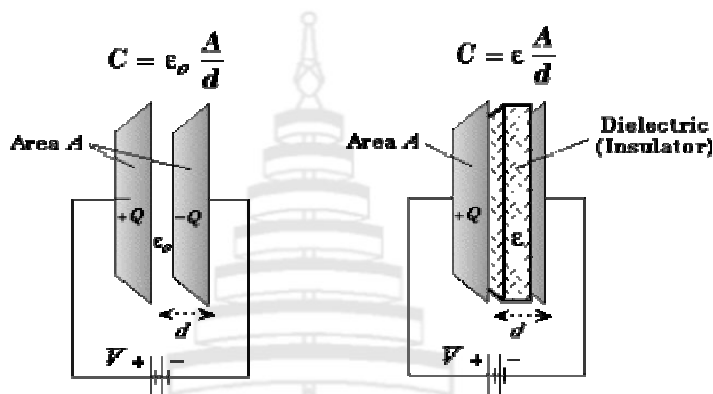
1. มีความสม่ำเสมอของสารผสมและมีเกรนขนาดเล็ก
2. มีความแข็งผิวสูง
3. ไม่ดูดซึมน้ำ

สมบัติอื่นๆที่สำคัญ

1. เข้ากันได้ดีกับขั้วแผ่นตัวนำ
2. ช่วงอุณหภูมิการใช้งานกว้าง
3. ยากต่อการเสียหาย
4. ต้นทุนต่ำ

2.8 การเก็บประจุของตัวเก็บประจุ

โดยทั่วไปตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยแผ่นตัวนำสองแผ่นที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกคั่นกลาง ซึ่งตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีความสามารถในการเก็บสะสมประจุของตัวเก็บประจุไม่เท่ากัน (Moulson & Herbert, 2003) ที่เรียกว่า ความจุ (Capacity)



ภาพที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบที่บรรจุวัสดุไดอิเล็กทริก
(Western Washington University, 2009, ระบบออนไลน์)

จากภาพที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของตัวเก็บประจุ เมื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้ากับแผ่นตัวนำทั้งสองข้างของตัวเก็บประจุที่มีวัสดุฉนวนหรือไดอิเล็กทริกคั่นกลาง จะไม่มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น แต่จะมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวของแผ่นตัวนำและแผ่นไดอิเล็กทริกทั้งสองข้าง โดยมีจำนวนของประจุไฟฟ้าที่แผ่นตัวนำแต่ละแผ่นเท่ากันแต่เป็นประจุไฟฟ้าคนละชนิด และประจุไฟฟ้าที่แผ่นตัวนำทั้งสองจะไม่มีการถ่ายเทผ่านสารไดอิเล็กทริก ซึ่งจำนวนประจุไฟฟ้า (Q) ที่เก็บสะสมในแผ่นตัวนำจะมีค่าแปรผันตรงกับค่าความต่างศักย์ (V) ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง (Kasap, 2006) ดังสมการ 2.3

$$Q = cV \quad (2.3)$$

โดย C เป็นค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการดังนี้

1. พื้นที่ผิวของแผ่นตัวนำ เป็นตัวกำหนดขนาดความจุ (Capacitance) ซึ่งแผ่นตัวนำที่มีพื้นที่ผิวมากจะสามารถรับจำนวนอิเล็กตรอนได้มากกว่าแผ่นตัวนำที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า

2. ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ จะมีผลต่อการกำหนดความจุ โดยถ้าวางแผ่นตัวนำที่ระยะทางใกล้กัน จะทำให้ค่าความจุระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองเพิ่มขึ้น ถ้าเลื่อนให้แผ่นตัวนำทั้งสองห่างออกจะทำให้ค่าความจุระหว่างแผ่นตัวนำลดลง เนื่องจากเมื่อแผ่นตัวนำอยู่ใกล้กันประจุไฟฟ้าบนแผ่นตัวนำที่รับอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น จะส่งแรงผลักดันให้อิเล็กตรอนที่อยู่บนแผ่นตัวนำด้านตรงข้ามหลุดออกไปทำให้เกิดประจุบวกที่แผ่นตัวนำนั้น ขณะเดียวกันแผ่นตัวนำที่มีประจุบวก ก็จะเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนไหลเข้ามาที่แผ่นตัวนำด้านตรงข้ามเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน จึงทำให้ค่าความจุสูงขึ้น

3. ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำไดอิเล็กทริก ถ้ามีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงก็จะทำให้ค่าความจุของตัวเก็บประจุมีค่าสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้ในการเลือกใช้งานยังต้องคำนึงถึงค่าความแกร่งของไดอิเล็กทริกที่ส่งผลต่ออัตราทนกำลังไฟของตัวเก็บประจุด้วย

จากปัจจัยทั้งสามประการสามารถแสดงสมการหาค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุได้ดังสมการ

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.4)$$

โดยที่	C	คือ	ค่าความจุมีหน่วยเป็นฟารัด (F)
	ϵ_0	คือ	สภาพยอมทางไฟฟ้า (Electrical permittivity) ที่สุญญากาศ (8.854×10^{-12} F/m)
	ϵ_r	คือ	สภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) หรือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)
	A	คือ	พื้นที่ผิวของแผ่นตัวนำ มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)
	d	คือ	ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง มีหน่วยเป็นเมตร (m)

$$\text{เมื่อ } \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.5)$$

ϵ คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของตัวกลางไดอิเล็กทริก

โดย ϵ_r เป็นค่าเฉพาะของสารไดอิเล็กทริก ซึ่งสารบางตัวอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิหรือความถี่ ดังตารางที่ 2.1 จะแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารต่างๆ ที่ความถี่ 10^6 เฮิรตซ์

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารไดอิเล็กทริก (กอบวูฒิ รุจิฉินากุล, 2549)

สาร	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 10^6 เฮิรตซ์ (ϵ_r)
โพลีเอททิลีน (Polyethylene)	2.3
เทฟลอน (Teflon)	2.1
อีพอกซี (Epoxy)	3.6
แก้วโซดา	7
แก้วไฟเรกซ์	4
Al_2O_3	6.5
ไมกา	7
TiO_2	ระหว่าง 14 ถึง 110
น้ำ	78.3
สุญญากาศ	1

ในสารจำพวกเฟอร์โรอิเล็กทริกมักมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง เนื่องจากสารเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นสารที่มีโครงสร้างโมเลกุล ทำให้เกิดโพลาริเซชันถาวรในโครงสร้างได้ ดังนั้นจึงมีค่าสูงกว่าสารไดอิเล็กทริกทั่วไป (Barsoum, 2003)

2.9 ความทนทานของไดอิเล็กทริก

ในการใช้งานตัวเก็บประจุ นอกจากจะพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแล้ว จำเป็นต้องพิจารณาค่าความทนทานของไดอิเล็กทริกด้วย ซึ่งถ้าตัวเก็บประจุมีขนาดเล็กหรือบาง หากอยู่ภายใต้ความต่างศักย์สูง จะทำให้เกิดการพังทลาย (Breakdown) ของตัวเก็บประจุได้ โดยอาจกล่าวได้ว่าค่าความทนทานของไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) คือสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ป้อนให้สารไดอิเล็กทริกที่อยู่ระหว่างโลหะคู่ขนาน แล้วสารไดอิเล็กทริกยังคงรักษาสภาพความเป็นฉนวนไว้ได้ แต่เมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าสูงกว่าค่าความทนทานของไดอิเล็กทริก สมบัติความเป็นฉนวนของไดอิเล็กทริกนั้นจะหมดไปและเริ่มเป็นตัวนำ ทำให้ประจุสามารถกระโดดข้ามผ่านสารไดอิเล็กทริกได้ (Buchanan, 2004) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้กับตัวเก็บประจุแต่ละชนิด จะต้องไม่เกินค่าความทนทานของไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุนั้นๆ แสดงดังสมการที่ 2.6

$$E_c = \frac{V_c}{d} \quad (2.6)$$

เมื่อ	E_c	คือ	ค่าความทนทานของไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) ที่ป้อนได้สูงสุดก่อนสารจะมีการพังทลาย มีหน่วยเป็นกิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร
	V_c	คือ	ความต่างศักย์ระหว่างโลหะคู่ขนาน (ค่าสูงสุด) มีหน่วยเป็นกิโลโวลต์
	d	คือ	ระยะระหว่างโลหะคู่ขนานมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

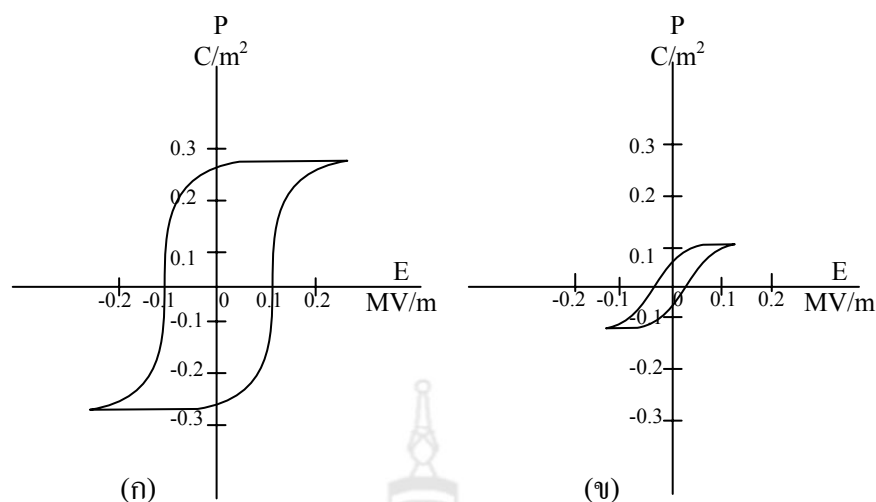
สำหรับค่าความทนทานของไดอิเล็กทริกนี้ขึ้นกับชนิดของสาร และโครงสร้างทางจุลภาค เช่น ขนาดเกรน ข้อบกพร่องที่ผิว เป็นต้น นอกจากนั้นอาจขึ้นกับความพรุนของสารอีกด้วย โดยค่าความทนทานของไดอิเล็กทริกของสารบางชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความทนทานของไดอิเล็กทริก (กอบวุฒิ รุจิณากุล, 2549)

สาร	E_c (10^6 kV/mm)
โพลีเอทิลีน (Polyethylene)	20
โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride)	40
แก้วโซดา (Soda glass)	10
แก้วไพเรกซ์ (Pyrex)	14
Al_2O_3	6
$BaTiO_3$	12
TiO_2	8
ไมกา	40

2.10 สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ

จากการป้อนสนามไฟฟ้าให้สาร $BaTiO_3$ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของโพลาริเซชัน และรูปร่างของโดเมน โดยเมื่อมีการเพิ่มสนามไฟฟ้าจะทำให้โดเมนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าให้มากที่สุด และเมื่อลดสนามไฟฟ้าลงโดเมนจะไม่กลับตัวลดลงตาม โดยจะสังเกตได้ว่าเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ ค่าโพลาริเซชันจะยังคงไม่เป็นศูนย์ แต่หากมีการเพิ่มค่าสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้าม จะทำให้ค่าโพลาริเซชันลดต่ำลงจนถึงศูนย์ได้ จากปรากฏการณ์นี้ ทำให้มีงานวิจัยศึกษาสมบัติของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยการให้สนามไฟฟ้ากับสารเฟอร์โรอิเล็กทริก และวัดค่าโพลาริเซชันที่เปลี่ยนไป โดยความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่ให้และค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้น แสดงในกราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) โดยพื้นที่ภายในของวงฮิสเทอรีซิสคือค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (Moulson & Herbert, 2003) ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 2.9



ก. ผลึกเชิงเดี่ยว BaTiO₃ ข. เซรามิก BaTiO₃

ภาพที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P และ E ของผลึก

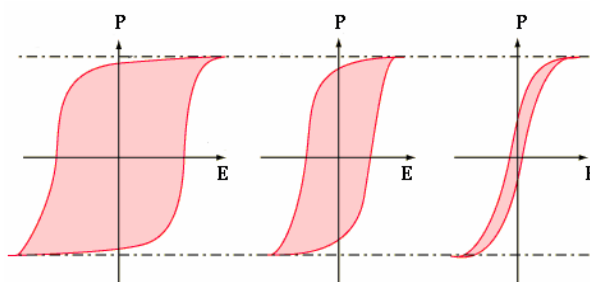
2.11 การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) คือ พลังงานที่สูญเสียในรูปพลังงานความร้อนของตัวเก็บประจุในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับวัสดุไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุ (Kasap, 2006) หาได้จากสมการ

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (2.7)$$

โดย $\tan \delta$ คือ ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
 ϵ_r'' คือ ค่าไดอิเล็กทริกจินตภาพ
 ϵ_r' คือ ค่าไดอิเล็กทริกจริง

เมื่อพิจารณารูปของพลังงานไฟฟ้าเกี่ยวกับการจัดเรียงตัวของโพลาริเซชัน หรือที่เรียกว่าวงฮิสเทอรีซิสนั้น พื้นที่ภายในของวงฮิสเทอรีซิสจะเป็นค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก ดังแสดงในภาพที่ 2.10 ซึ่งมีค่าแปรผันตามขนาดพื้นที่ฮิสเทอรีซิส โดยเรียงจากมากไปน้อย



ภาพที่ 2.10 แสดงขนาด Hysteresis loop เทียบกับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก
(Georgia State University, 2005, ระบบออนไลน์)

2.12 ความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กตริก

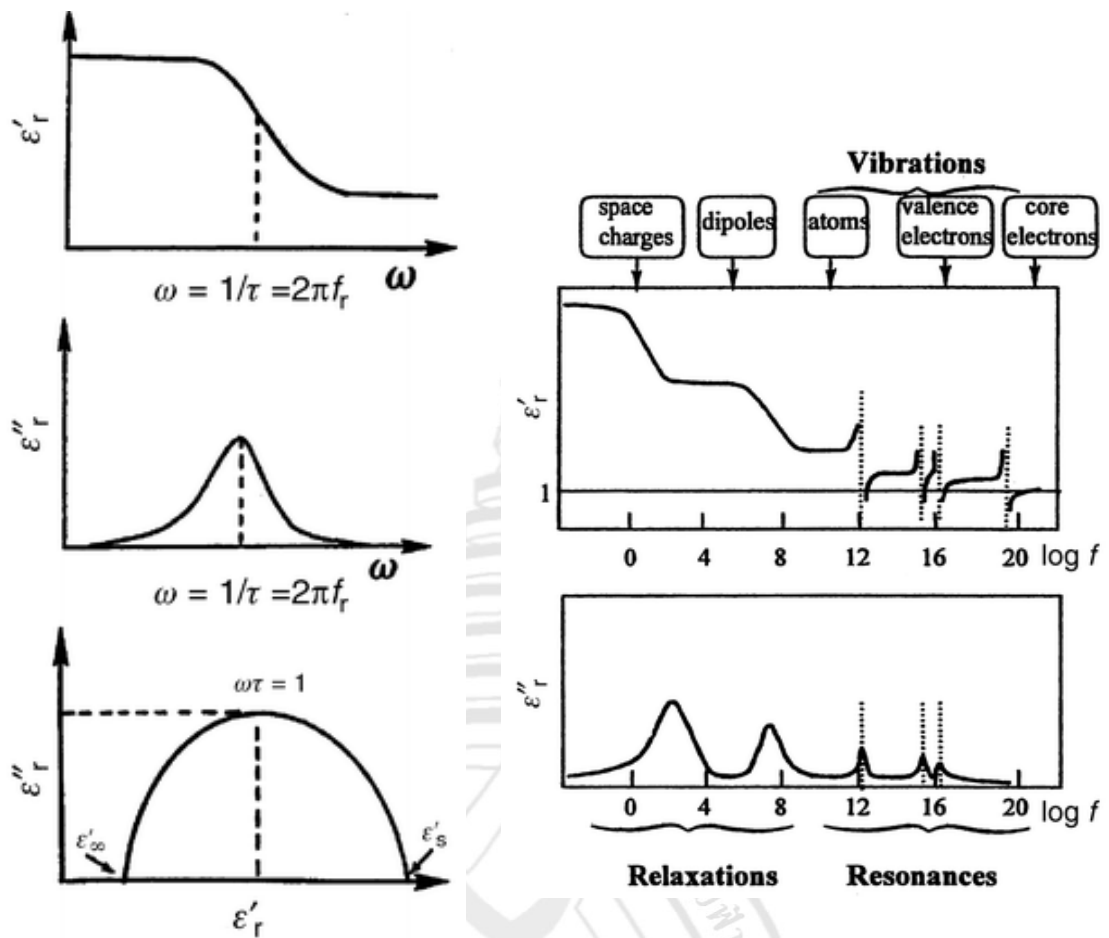
กระบวนการเกิดโพลาริเซชันของเซรามิกในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถเกิดได้ทั้งในโครงสร้างของไอออน (Ionic crystals) ไอออนที่ล้อมรอบ (Involve ionic migration) และประจุที่มีการจัดเรียงตัวกัน (Moulson & Herbert, 2003) ซึ่งจะต้องคำนึงถึงพลังงานศักย์ไฟฟ้า ความถี่เชิงมุมและเวลา ดังสมการของเดอบาย โดยจากสมการของค่าจริงไดอิเล็กตริก (Real part) และค่าทางจินตภาพของไดอิเล็กตริก (Imaginary part) แสดงได้ในสมการ 2.8 และ 2.9

$$\text{ค่าจริงไดอิเล็กตริก} \quad \epsilon'_r - \epsilon'_{r\infty} = \frac{\epsilon'_{rs} - \epsilon'_{r\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.8)$$

$$\text{ค่าจินตภาพไดอิเล็กตริก} \quad \epsilon''_r = (\epsilon'_{rs} - \epsilon'_{r\infty}) \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.9)$$

$$\{\epsilon'_r(\omega) - \frac{1}{2}(\epsilon'_{rs} + \epsilon'_{r\infty})\}^2 + \epsilon''_r(\omega)^2 = \frac{1}{4}(\epsilon'_{rs} - \epsilon'_{r\infty})^2 \quad (2.10)$$

จากสมการจะได้ความสัมพันธ์ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกส่วนจริงและส่วนจินตภาพ

(Elissald & Ravez, 2001)

เมื่อจ่ายพลังงานศักย์ไฟฟ้าให้แบบจำลองวงจร RC แบบขนาน จะส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าลดลงจนถึงศูนย์ โดยเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งค่าความต้านทานของวงจรแสดงได้ดังสมการ

$$Z^* = \frac{R(1 - j\omega RC)}{(1 + \omega^2 R^2 C^2)} \quad (2.11)$$

ในส่วนค่าจริงและค่าจินตภาพจะแสดงได้ดังสมการ

$$Z' = \frac{R}{(1 + \omega^2 R^2 C^2)} \quad (2.12)$$

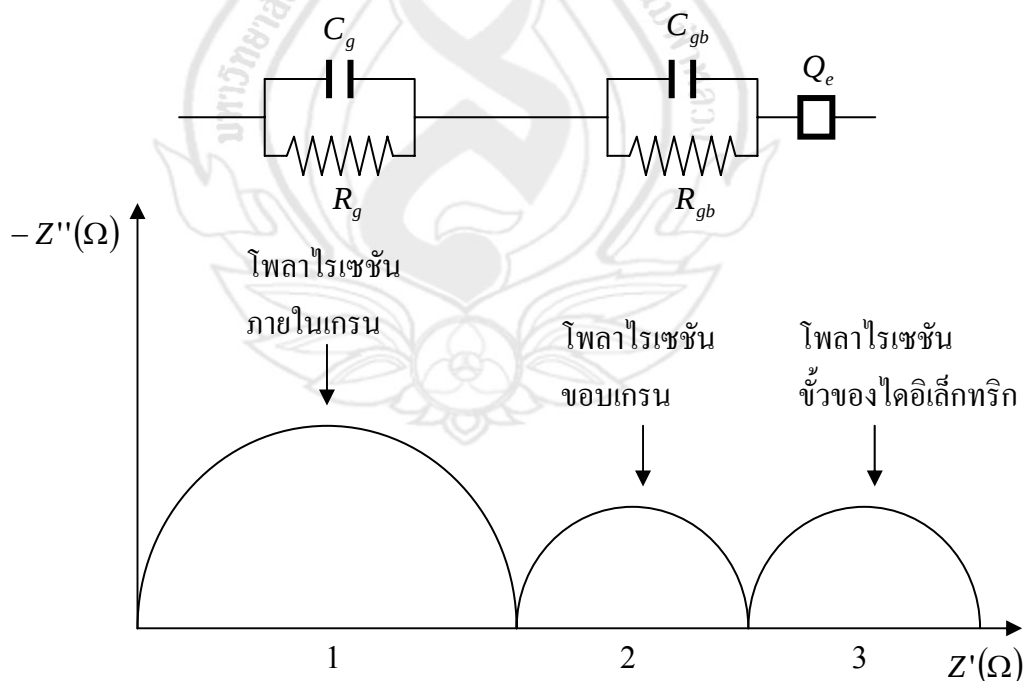
$$-Z'' = \frac{\omega R^2 C}{(1 + \omega^2 R^2 C^2)} \quad (2.13)$$

เมื่อ $\tau = RC$

$$Z' = \frac{R}{(1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (2.14)$$

$$-Z'' = \frac{R\omega\tau}{(1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (2.15)$$

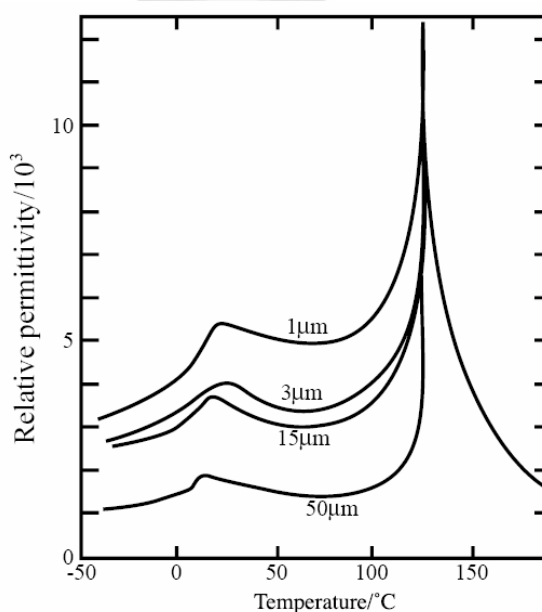
และเมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่างส่วนจริง และส่วนจินตภาพจะมีลักษณะเหมือนสมการของเดอบาย โดยค่าความต้านทานของสารไดอิเล็กทริกแบบเซรามิก จะแสดงในรูปครึ่งวงกลม ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ความต้านทานภายในเกรน ขอบเกรน และส่วนที่เป็นหัวของไดอิเล็กทริก ดังภาพที่ 2.12



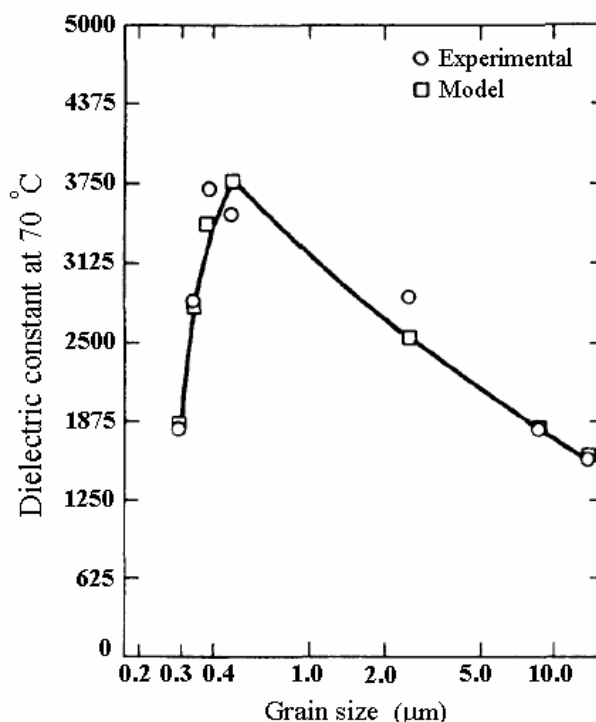
ภาพที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทางส่วนจริงและส่วนจินตภาพของเซรามิก (Moulson & Herbert, 2003)

2.13 การศึกษาผลของขนาดเกรนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กทริก

ขนาดเกรนเป็นสมบัติทางจุลภาคที่สำคัญมาก โดยสัมพันธ์กับสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งแรง การเปลี่ยนวัฏภาค และค่าทางไฟฟ้า เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก จากภาพที่ 2.13 เป็นการศึกษาผลกระทบบของขนาดเกรนในช่วง 1 ถึง 50 ไมโครเมตร กับการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก พบว่าในเกรนขนาดเล็กจะส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้นมากที่อุณหภูมิคูรี และจะมีค่าลดลงเมื่อทำการลดอุณหภูมิ จนเมื่อถึงจุดที่มีการเปลี่ยนโครงสร้างจากเตตระโกนอลเป็นรอมโบฮีดรอลค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มอีกครั้งแต่จะไม่มากเท่าที่อุณหภูมิคูรี (Moulson & Herbert, 2003)



ภาพที่ 2.13 แสดงผลของขนาดเกรน 1 – 50 ไมโครเมตร เทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
(Barsoum, 2003)



ภาพที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับขนาดของเกรน

(Shaikh, Vest & Vest, 1986)

ความสัมพันธ์ของขนาดเกรนและการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก สนับสนุนงานวิจัยของ Shaikh และคณะ (1986) ที่ได้ทำการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกแบเรียมไททานตขนาดเกรนเล็ก โดยเลือกใช้ผงแบเรียมไททานตขนาดเล็กละเอียดเส้นที่ 850 องศาเซลเซียส ได้ขนาดอนุภาคเป็น 0.045 ไมโครเมตร หลังจากนั้นนำผงแคลไซต์อัดขึ้นรูปและเผาซินเตอร์ในช่วง 1050 – 1300 องศาเซลเซียส ทำให้ได้เซรามิกขนาดเกรน 0.3 – 15.5 ไมโครเมตร ปริมาณรูพรุนอยู่ในช่วง 56 – 80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการวิเคราะห์อุณหภูมิพบว่าเมื่อขนาดเกรนลดลง ตำแหน่งการเกิดอุณหภูมิคูรีจะลดลง 2 – 4 องศาเซลเซียส สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเกรนลดลง และจะมีค่าสูงสุดเมื่อขนาดเกรนเท่ากับ 0.4 ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อขนาดเกรนลดลงต่ำกว่า 0.4 ไมโครเมตร พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าลดลงด้วยดังภาพที่ 2.14 ส่วนการเกิดโพลาไรเซชันขึ้นเอง (Spontaneous polarization) มีค่าลดลงเมื่อขนาดเกรนลดลง

ในส่วนของการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก (Dielectric properties) เทียบกับอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ พบว่าที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์สูงขึ้นจะทำให้ขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นขนาดของรูพรุนเล็กลง ทำให้ค่าความหนาแน่นสูงขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้นและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำลง แต่จะค่าอุณหภูมิคูรีเพิ่มมากขึ้นและช่วงการเกิดไดอิเล็กทริก

สูงสุดแคบลง ดังตัวอย่างการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนต ($\text{BaZr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$) ของ Ciomaga และคณะ (2006) โดยแสดงตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก $\text{BaZr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$ (Ciomaga, *et al.*, 2006)

สมบัติไดอิเล็กทริก	เซรามิก BZT	
อุณหภูมิการเผาซินเตอร์	1350 °C	1450 °C
ความหนาแน่น	90%	96%
ขนาดเกรน	0.75 μm	2.60 μm
อุณหภูมิคูรี ที่ความถี่ 79 กิโลเฮิร์ตซ์	80 °C	91 °C
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง	4000 – 5000	3000 – 4000
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด	5000	14000
ค่าการสูญเสียพลังงาน ที่อุณหภูมิ 40 – 110 °C	<15%	<7%
ช่วงอุณหภูมิการเกิดไดอิเล็กทริกสูงสุด	กว้าง	แคบ

จากรายงานที่ผ่านมาพบว่ารูปร่างและขนาดของรูพรุนส่งผลกระทบต่อสมบัติไดอิเล็กทริก ความยืดหยุ่น และสมบัติเชิงกลของเซรามิก ดังนั้น Kyeong Ho Cho และ Hee Young Lee (1995) จึงทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณรูพรุนต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกแบเรียมไททานเนต เพื่อสนับสนุนเงื่อนไขการลดลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก โดยใช้สารแบเรียมไททานเนตที่มีขนาด 1.3 ไมโครเมตร ทำการควบคุมขนาดและปริมาณของรูพรุน โดยการผสมอนุภาคโพลีเมอร์ขนาด 25 และ 80 ไมโครเมตร กับอนุภาคของสารแบเรียมไททานเนต ในอัตรา 0–20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยมีค่า 35 ไมโครเมตร และปริมาณรูพรุนจาก 5 % ถึง 37 % ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และอุณหภูมิคูรีมีค่าลดลงเมื่อปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น โดยรูพรุนขนาดเล็กจะส่งผลกระทบต่อ การลดลงของอุณหภูมิคูรีมากกว่ารูพรุนขนาดใหญ่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในเซรามิกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก จะมีค่าน้อยกว่าเซรามิกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ในปริมาณรูพรุนเท่ากัน ความต้านทานของเซรามิกทั้ง ขอบเกรนและภายในเกรนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น

2.14 การพัฒนาปรับปรุงสมบัติทางไดอิเล็กทริก

การปรับปรุงสมบัติของสารไดอิเล็กทริกมีแนวทางปฏิบัติหลายทาง เช่น การเจือสาร (Dopants) การผสมสาร (Mixed) หรือแม้แต่การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเผาซินเตอร์ เพื่อลดค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก และเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กทริกให้กับสารไดอิเล็กทริกเหล่านั้น ยกตัวอย่างงานวิจัยที่มีหลายท่านทำกับปรับปรุงสมบัติทางไดอิเล็กทริกของสารไดอิเล็กทริกด้วยเทคนิคต่างๆ

สำหรับเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของสารเซอร์โคเนียม ในเซรามิกผสมแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเต ($\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$) มีนักวิจัยทำการศึกษาจำนวนมาก ซึ่งจากการทบทวนเอกสารพบว่า เซรามิกดังกล่าวแสดงโครงสร้างแบบคิวบิกเมื่อ $x \geq 0.20$ และจะแสดงโครงสร้างแบบรอมโบอีดรอนเมื่อ $x < 0.20$ อีกทั้งยังพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของเซอร์โคเนียม $x \geq 0.15$ ทำให้ค่าความหนาแน่นของเซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเตจะลดต่ำลงด้วย (Kobune, M., Yamakawa, K. & Yazawa, T., 2005)

Stephen M. Neirman (1988) ทำการศึกษาคูณภูมิคูรี ในสารแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเต โดยใช้แบเรียมไททานเตเป็นสารตั้งต้น โดยทำการศึกษาสารผสมแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเต ($\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$) เมื่อ $x = 0, 0.05, 0.10$ และ 0.2 ซึ่งเตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล จากผลการทดลองพบว่าสารละลายของแข็ง แสดงโครงสร้างแบบคิวบิกและเข้าสู่โครงสร้างแบบเตตระโกนอลเมื่อให้ความร้อน 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1250 ถึง 1400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิคูรีมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ โดยสารละลายของแข็งที่เป็นสารผสมสม้าเสมอ $\text{BaZr}_{0.80}\text{Ti}_{0.20}\text{O}_3$ ได้ อุณหภูมิคูรี 34 และ 30 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 1250 และ 1400 องศาเซลเซียส อีกทั้งยังพบว่าในสารผสมที่มีความสม้าเสมอของส่วนผสมจะให้อุณหภูมิคูรีที่ต่ำกว่าสารผสมที่ไม่สม้าเสมอ สำหรับสารละลายของแข็งที่เป็นสารผสมสม้าเสมอ $\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ จะได้อุณหภูมิคูรี 105, 85 และ 31 เมื่อ $x = 0.05, 0.10$ และ 0.20 จากผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้ค่าสูงสุด 40000 ในสารผสม $\text{BaZr}_{0.80}\text{Ti}_{0.20}\text{O}_3$

M. Kobune, K. Yamakawa และ T. Yazawa (2005) มีความสนใจศึกษาการปรับเปลี่ยนสารผสมในเซรามิกแบเรียมไททานเต โดยเพิ่มส่วนผสมในเซรามิกแบเรียมไททานเตเพื่อลดอุณหภูมิคูรี ให้เข้าใกล้อุณหภูมิห้อง จึงทำการศึกษาวิจัยโดยการผสมสารแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเต ($\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$: BZT) แบเรียมไอรอนแทนทาลัม ($\text{Ba}(\text{Fe}_{0.5}\text{Ta}_{0.5})\text{O}_3$: BFT) และ ไอรอนแทนทาลัม

(FeTaO₄ : FT) โดยใช้แบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนตเป็นสารพื้นฐาน เพื่อพัฒนาสมบัติไดอิเล็กทริก ในขั้นแรกของงานวิจัยได้ทำการศึกษาอัตราส่วนผสมของเซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนต (BaZr_xTi_{1-x}O₃) เมื่อ $x = 0.05 - 0.30$ เพลเคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากผลการทดลองที่ได้ พบว่าทุกอัตราส่วนผสมให้เซรามิกที่มีโครงสร้างแบบเพรอฟสไกต์บริสุทธิ์ โดยค่าความหนาแน่นของแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนตจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารเซอร์โคเนียม แต่เมื่อ $x \geq 0.15$ ความหนาแน่นจะลดต่ำลง เมื่อทำการหาค่าอุณหภูมิคูรี พบว่าอุณหภูมิคูรีลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณส่วนผสมเซอร์โคเนียม และที่อัตราส่วนผสม $x = 0.2$ เซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนตให้ค่าอุณหภูมิคูรีที่เข้าใกล้อุณหภูมิห้องมากที่สุดคือ 30 องศาเซลเซียส สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณส่วนผสมของเซอร์โคเนียมในช่วง $x = 0.05 - 0.20$ และจะลดต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณเซอร์โคเนียมในช่วง $x = 0.20 - 0.30$ โดยพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดที่อัตราส่วนผสม $x = 0.20$ โดยมีค่า 5190 ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก 0.6% ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ หลังจากนั้นทำการศึกษากการผสมสารแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนตกับแบเรียมไอรอนแทนทาลัมในอัตราส่วนผสม (1-y)BZT - yBFT เมื่อ $y = 0.01 - 0.05$ พบว่าในทุกอัตราส่วนผสมแสดงโครงสร้างแบบเพรอฟสไกต์ ค่าความหนาแน่นของเซรามิกมีค่าประมาณ 5.72 ถึง $5.82 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ โดยที่อัตราส่วน $y = 0.03$ จะให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมแบเรียมไอรอนแทนทาลัม โดยที่ $y = 0.03$ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่า 2230 และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก 0.10% ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ท้ายสุดของการวิจัยทำการเพิ่มส่วนผสมไอรอนแทนทาลัม 0.2 ถึง 2.0 เปอร์เซ็นต์มวล ได้ค่าความหนาแน่นในช่วง 5.74 ถึง $6.00 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ โดยความหนาแน่นสูงสุดที่ปริมาณไอรอนแทนทาลัม 0.5 เปอร์เซ็นต์มวล ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าสูงสุด 3080 และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกต่ำสุด 0.05% ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ณ อุณหภูมิห้อง

Rui-hong Liang และคณะ (2007) ทำการศึกษาผลของสนามไฟฟ้ากระแสตรงต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนต (BaZr_xTi_{1-x}O₃ : BZT) เนื่องจากมีหลายงานวิจัยพบว่าเซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนต แสดงการแทนที่ของไอออนในตำแหน่งของไอออน Ti⁴⁺ ด้วยไอออน Zr⁴⁺ ทำให้ได้เซรามิกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง รวมถึงทำให้ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกต่ำที่อุณหภูมิห้อง อีกทั้งยังพบว่าการกระจายของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงในช่วงอุณหภูมิกว้าง แต่โดยส่วนใหญ่แล้วนักวิจัยศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาดสูง ไม่ค่อยให้ความสนใจศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของเซรามิกไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นทางทีมวิจัยจึงมีความสนใจศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกในเซรามิกผสม

แบเรียมเซอร์โคเนตไททานต ภายใต้เงื่อนไขของสนามไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการเตรียมเซรามิกผสมแบเรียมเซอร์โคเนตไททานต ($\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$: BZT) ในอัตราส่วนผสม $x = 0.25, 0.30, 0.35$ และ 0.40 โดยมีสารตั้งต้นเป็นสารแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) และไททานเนียมออกไซด์ (TiO_2) ทำการเผาแคลไซน์สารผสมด้วยอุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าเซรามิกแสดงโครงสร้างเพอรอฟสไกต์แบบสมบูรณ์ในทุกชิ้นงาน โดยเมื่อ $x = 0.25$ และ 0.30 ขนาดเกรนของชิ้นงานมีขนาดโตขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเซอร์โคเนียมเป็น $x = 0.35$ และ 0.4 ขนาดเกรนของชิ้นงานลดลงอย่างรวดเร็ว ตำแหน่งอุณหภูมิที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงสุดจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารเซอร์โคเนียม (Zr) อีกทั้งค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังมีค่าลดลงด้วย โดยพบว่าที่อุณหภูมิห้องค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของทุกชิ้นงานมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้ากระแสตรงและปริมาณสารเซอร์โคเนียม ในทางกลับกันค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารเซอร์โคเนียม แต่จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้ากระแสตรง

สุชุม อิศเสงี่ยม และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาวิจัยสมบัติของเซรามิกผสมระหว่างแบเรียมไอรอนไนโอเบต และเลดเซอร์โคเนตไททานต เนื่องจากเลดเซอร์โคเนตไททานตเป็นสารเพียโซอิเล็กตริกและสารเพียโรอิเล็กตริก ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 1200 ที่อุณหภูมิห้อง ในทางกลับกันสารแบเรียมไอรอนไนโอเบตมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง (Giant dielectric) ดังนั้นเพื่อปรับปรุงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของเลดเซอร์โคเนตไททานต จึงทำการศึกษาวิจัยสารผสมในระบบ $(1-x)\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3 - x\text{BaFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ เมื่อ $x = 0.1$ ถึง 0.5 ซึ่งเตรียมได้ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาของแข็ง โดยทำการเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ $800 - 1100$ องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า สารผสมเริ่มมีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ เมื่อทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และมีเฟสบริสุทธิ์ของเพอรอฟสไกต์ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส หลังจากทำการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิ $1150 - 1300$ องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากเซรามิกที่ผลิตได้แสดงค่าความหนาแน่นสูงสุดเมื่อ $x = 0.1$ ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1250 องศาเซลเซียส โดยมีค่า 7.68 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนโครงสร้างพบว่า เซรามิกแสดงสมบัติเพียโรอิเล็กตริกแบบเตตระโกนอลเมื่อ $x = 0.1$ แล้วเริ่มมีเฟสผสมระหว่างเตตระโกนอลและคิวบิกเมื่อ $x = 0.2$ หลังจากนั้นจะแสดงสมบัติพาราอิเล็กตริกในโครงสร้างแบบคิวบิกเมื่อ $x \geq 0.3$ และจากการศึกษาอัตราส่วนของแลตทิซพารามิเตอร์ (c/a) พบว่ามีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารแบเรียมไอรอนไนโอเบต โดยได้ค่าอยู่ในช่วง $1.02 - 1.00$ เมื่อ $x = 0.1 - 0.3$ สำหรับลักษณะของเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นใน $x = 0.1$ และ 0.2 โดยมีขนาดใหญ่สุดเมื่อ $x = 0.2$ มีขนาดเฉลี่ย 15 ไมโครเมตร แต่จะมีขนาดลดลงเมื่อ $x = 0.3$ ในส่วนของสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกผสมพบว่า

ความกว้างของช่วงอุณหภูมิที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดจะมีค่ามากขึ้น เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารแบเรียมไอรอนไนโอเบต

สุชุม อิศแสงี่ยม และคณะ (2006) ได้ศึกษาการเตรียมเซรามิกแบเรียมไอรอนไนโอเบต ($\text{BaFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$) ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาของแข็ง และทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิระหว่าง 800-1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์เฟสของผงที่ผ่านการเผาแคลไซน์ จะได้เฟสที่บริสุทธิ์ของ BFN ในโครงสร้างคิวบิกที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส หลังจากทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250-1400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ โดยมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 6.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร คิดเป็น 94% กับความหนาแน่นทางทฤษฎี ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1400 องศาเซลเซียส เมื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพพบว่าขนาดของเกรดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ สำหรับสมบัติทางไฟฟ้าของ $\text{BaFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิและเริ่มแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงในช่วงกว้างตั้งแต่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป โดยที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีค่า 50,000 และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าประมาณ 1.00 ที่อุณหภูมิห้องถึง 150 องศาเซลเซียส

C. E. Ciomaga และคณะ (2006) ได้ทำการเตรียมสารเซรามิกรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริก BZT โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมใน $\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ เริ่มต้นจาก $x = 0$ ซึ่งเป็นเซรามิกที่มีช่วงอุณหภูมิ การเปลี่ยนสถานะเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นพาราอิเล็กทริกที่แคบ ไปจนเปลี่ยนเป็นเซรามิกรีแลกเซอร์เฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีช่วงอุณหภูมิ การเปลี่ยนสถานะเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นพาราอิเล็กทริกในช่วงกว้างอย่างสมบูรณ์เมื่อ $0.1 \leq x \leq 0.35$ โดยเตรียมสารด้วยเทคนิคปฏิกิริยาของแข็ง ทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าผงแคลไซน์แสดงเฟสของแบเรียมไททานเตและแบเรียมเซอร์โคเนต และหลังจากทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350 1400 และ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าสารเซรามิก $\text{BaZr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$ แสดงเฟสบริสุทธิ์ของเพอร์อฟสไกต์อย่างสมบูรณ์ เมื่อทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส และมีความสม่ำเสมอของสารผสม มีขนาดเกรนอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ไมโครเมตร ค่าความหนาแน่นประมาณ 90% ของความหนาแน่นทางทฤษฎี ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ 3900 และมีค่าสูงสุดถึง 5900 ที่อุณหภูมิ 89.3 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ จาก 7.2 เฮิรตซ์ ถึง 569 กิโลเฮิรตซ์ พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความถี่และตำแหน่งอุณหภูมิที่ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดมีค่าลดลง 1-2 องศาเซลเซียส สำหรับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 130 องศาเซลเซียสมีค่าต่ำกว่า 30% และมีค่าต่ำกว่า 2% ที่อุณหภูมิห้อง

Vesna Paunovic และคณะ (2004) มีความสนใจศึกษาการปรับเปลี่ยนสารผสม BaTiO_3 ด้วย ไนโอเบต (Nb_2O_5) แคลเซียมเซอร์โคเนต (CaZrO_3) และแมงกานีสคาร์บอเนต (MnCO_3) โดยเติมสารผสม 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการเผาซินเตอร์ที่ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มส่วนผสม Nb_2O_5 ใน BaTiO_3 ได้ขนาดเกรน 1 ถึง 2 ไมโครเมตร การเพิ่ม MnCO_3 ใน BaTiO_3 ได้ขนาดเกรน 0.5 ถึง 2.0 ไมโครเมตร สำหรับการเพิ่ม CaZrO_3 ใน BaTiO_3 ได้ขนาดเกรน 3.0 ไมโครเมตร จากผลการทดลองสมบัติทางไฟฟ้า ได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้องใน $\text{MnCO}_3 / \text{BaTiO}_3$ มีค่าสูงสุด 1750 ส่วน $\text{CaZrO}_3 / \text{BaTiO}_3$ มีค่า 1470 และ $\text{Nb}_2\text{O}_5 / \text{BaTiO}_3$ มีค่า 1330 ในส่วนของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิคูรี $\text{MnCO}_3 / \text{BaTiO}_3$ มีค่า 4500 ส่วน $\text{CaZrO}_3 / \text{BaTiO}_3$ มีค่า 4300 และ $\text{Nb}_2\text{O}_5 / \text{BaTiO}_3$ มีค่า 1500 สำหรับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกที่ความถี่มากกว่า 10 กิโลเฮิรตซ์ $\text{Nb}_2\text{O}_5 / \text{BaTiO}_3$ มีค่า 0.035, $\text{MnCO}_3 / \text{BaTiO}_3$ มีค่า 0.25 เมื่อทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเทียบกับอุณหภูมิพบว่า เซรามิกที่ได้แสดงช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะเฟอร์โรอิเล็กตริกเป็นพาราอิเล็กตริกในช่วงแคบ ส่วนอุณหภูมิคูรีของเซรามิกผสม $\text{MnCO}_3 / \text{BaTiO}_3$ มีค่า 123 ส่วน $\text{CaZrO}_3 / \text{BaTiO}_3$ มีค่า 122 และ $\text{Nb}_2\text{O}_5 / \text{BaTiO}_3$ มีค่า 125

อุไรวรรณ อินตะธา และคณะ (2007) ทำการศึกษาวิจัยการเติมสารประกอบลิเทียมฟลูออไรด์ในสารผสมแบเรียมไอรอนไนโอเบต เพื่อช่วยลดอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ เนื่องจากในการเตรียมเซรามิกแบเรียมไอรอนไนโอเบต จะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงในการเผาซินเตอร์เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นสูง จึงทำการศึกษาวิจัยโดยเตรียมสารแบบปฏิกิริยาของแข็ง เฝ้าแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการเติมสารลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) 1-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และทำการเผาซินเตอร์ 900 – 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากผลการทดลองความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารลิเทียมฟลูออไรด์เพิ่มขึ้น แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาซินเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีค่าระหว่าง $5.082 - 6.118 \text{ g/cm}^3$ โดยค่าความหนาแน่นสูงสุดที่ปริมาณลิเทียมฟลูออไรด์ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการเผาซินเตอร์ด้วย 1100 องศาเซลเซียส ในส่วนของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกมีค่าลดลงเมื่อปริมาณลิเทียมฟลูออไรด์เพิ่มขึ้น ในเซรามิกที่ผสมลิเทียมฟลูออไรด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้องสูงสุด 9852 ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก 0.99 และเซรามิกแบเรียมไอรอนไนโอเบตที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1350 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้อง 5023 และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก 4.29

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย การเตรียม รวมถึงการศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของเซรามิก ระบบ $(1-x)\text{BZT} - x\text{BFN}$ โดยแปรค่า x ตั้งแต่ 0.8 0.6 0.4 และ 0.2 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการวิจัยออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมและศึกษาสมบัติของผงเซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไททานेट (BZT)

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมและศึกษาสมบัติของผงเซรามิกระบบ $(1-x)\text{BZT} - x\text{BFN}$

ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาสมบัติของเซรามิกระบบ $(1-x)\text{BZT} - x\text{BFN}$

3.1 ขั้นตอนการเตรียม และศึกษาสมบัติของผงเซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไททานेट

3.1.1 การศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสารเริ่มต้น

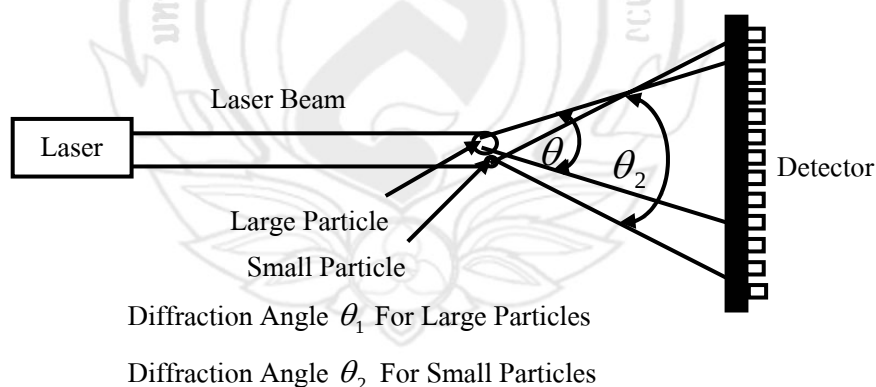
ในกระบวนการผลิตและพัฒนาสมบัติของวัสดุนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพิจารณาสมบัติของสารเริ่มต้น เช่น ขนาดอนุภาค ความพรุน และรูปร่างของอนุภาค ในกรณีของขนาดอนุภาค ซึ่งโดยธรรมชาติอนุภาคส่วนใหญ่จะไม่อยู่เป็นอนุภาคเดี่ยว โดยจะรวมตัวเป็นอนุภาคกลุ่ม (Agglomerate) อาจเกาะตัวกันจากแรงไฟฟ้าสถิต แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือแรงจากสนามแม่เหล็ก (Rahaman, 2003) พบว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการผลิต และสมบัติของวัสดุ เช่น การขึ้นรูป อณูภูมิการเผาซินเตอร์ และยังส่งผลกระทบต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ เนื่องจากในกระบวนการเผาซินเตอร์ เป็นกลไกการลดพลังงานพื้นผิว (Surface energy) มีการสร้างพันธะระหว่างอนุภาค ส่งผลต่อความหนาแน่นของวัสดุ

จากการทบทวนเอกสารพบว่า ตำแหน่งอณูภูมิการเปลี่ยนสถานะจากเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นพาราอิเล็กทริกของเซรามิก BaTiO_3 ยังขึ้นกับขนาดของอนุภาค (กอบวูฒิ รุจิณากุล, 2549) อีกทั้งขนาดอนุภาคยังมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก โดยขนาดอนุภาคเล็กจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตที่ได้

ขนาดเกรนเล็กทำให้ได้เซรามิกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้น

ในการศึกษาขนาดอนุภาคสารเริ่มต้นแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) (ความบริสุทธิ์ ≥ 98.50 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Fluka) ไททานเนียมออกไซด์ (TiO_2) (ความบริสุทธิ์ 99 – 100.5 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Riedel-de Haen) และเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) (ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Riedel-de Haen) โดยศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวขนาดอนุภาค (Particulatesize distribution analyzer ยี่ห้อ Malvern รุ่น Mastersize 2000)

ด้วยวิธีการนำผงของสารเริ่มต้นจำนวน 1 กรัม มากระจายตัวในน้ำ RO (Reverse osmosis) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร เพื่อให้ผงของสารเริ่มต้นกระจายตัวในน้ำ RO แล้วนำไปวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค โดยหยดสารผสมที่เตรียมไว้ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำ RO ปริมาตร 800 มิลลิลิตร ที่ผ่านการวัดค่าเบคกราวด์เรียบร้อยแล้ว ซึ่งภายในบีกเกอร์มีใบพัดหมุนเพื่อช่วยกระจายอนุภาค ก่อนปั๊มดูดผ่านช่องกระจกใส ซึ่งเป็นบริเวณที่มีแสงเลเซอร์สีแดงและสีน้ำเงินเคลื่อนที่ผ่าน (แสงสีแดงมีความยาวคลื่น 632.82 นาโนเมตร ใช้วัดอนุภาคขนาดใหญ่ และแสงสีน้ำเงินมีความยาวคลื่น 473.00 นาโนเมตร ใช้วัดอนุภาคขนาดเล็ก) และมีดีเทคเตอร์รับแสงการเลี้ยวเบนของเลเซอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคและบันทึกค่าเฉลี่ยการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ด้วยการประมวลผลของเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค



ภาพที่ 3.1 แสดงลักษณะการทำงานของเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Reed, 1994)

โดยมุมของการเลี้ยวเบนจะขึ้นกับขนาดอนุภาค ซึ่งความสัมพันธ์ดังนี้ (Rahaman, 2003)

$$\sin \theta = \frac{1.22\lambda}{t} \quad (3.1)$$

โดย θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน
 t คือ ขนาดอนุภาค
 λ คือ ความยาวคลื่นแสงที่กระทบอนุภาค

และหาก θ มีขนาดเล็กๆจะได้ว่า

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{t} \quad (3.2)$$

3.1.2 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคสารเริ่มต้น

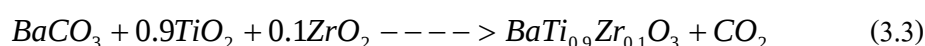
การวิเคราะห์รูปร่างลักษณะของอนุภาค เพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมของสารเริ่มต้นที่จะส่งผลกระทบต่อ การอัด การเผาซินเตอร์ และโครงสร้างของเซรามิก (Rahaman, 2003) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope : SEM ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO1450VP) ทำการวิเคราะห์ด้วยการโรยอนุภาคของสารเริ่มต้นลงบนเทปกาออลูมิเนียมนำไฟฟ้า แล้วนำไปเคลือบผิวด้วยทอง โดยใช้เทคนิคสปัตเตอริง (Sputtering) ด้วยเครื่องสปัตเตอริง (Sputter coater ยี่ห้อ Polaron รุ่น SC7620) จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปวิเคราะห์ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ด้วยหัววัดสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (SE detector)

3.2 ขั้นตอนการเตรียมและศึกษาสมบัติของผงเซรามิกระบบ (1-x)BZT – xBFN

3.2.1 การบดผสมสาร

การเตรียมสารก่อนทำการเผาแคลไซน์ โดยนำผงแบเรียมคาร์บอเนต ไททาเนียมออกไซด์ และเซอร์โคเนียมออกไซด์ ผสมกันในอัตราส่วน $\text{BaCO}_3 : \text{TiO}_2 : \text{ZrO}_2$ เป็น 1 : 0.9 : 0.1 โดยเปอร์เซ็นต์โมล ทำการบดผสมแบบเปียกโดยเทคนิคการบดย่อยด้วยลูกบอล (Ball milling) ในสารละลายเอทานอล (Ethanol 99.9% (by volume), Mw = 46.07 กรัม/โมล, บริษัท J.T. Baker Analyzed) ซึ่งเป็นตัวกลางการบดในขวดพลาสติกที่บรรจุลูกบอลเซอร์โคเนียปริมาณ 70 เปอร์เซ็นต์

ของขวด โดยบดด้วยเครื่องบดธรรมดาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารผสมที่ได้หลังการบดมาทำการระเหยตัวกลางออกที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยใช้เตาความร้อนและแท่งแม่เหล็กคนสาร เพื่อป้องกันการตกตะกอนและการแยกชั้นของสารประกอบ



ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติของสารเริ่มต้นที่ใช้ในงานวิจัย

สารเริ่มต้น	ความบริสุทธิ์	น้ำหนักตามสูตร	บริษัทผู้ผลิต
Barium carbonate (BaCO_3)	≥ 98.50	197.37	Fluka*
Zirconium dioxide (ZrO_2)	99.00	123.33	RdH**
Titanium dioxide (TiO_2)	99 – 100.5	79.898	RdH**

หมายเหตุ. * Fluka Chemical GmbH, Switzerland

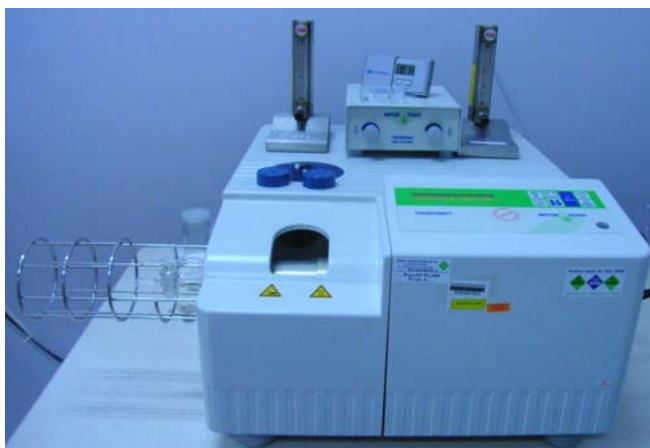
** RdH Laborchemikalin GmbH&Co. KG, France

3.2.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของผงผสมแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนต

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเชิงความร้อน เป็นเทคนิควัดการเปลี่ยนแปลงมวลสาร เมื่อได้รับพลังงานความร้อนเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา โดยทั่วไปมวลที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อน อาจเกิดการระเหยของสารละลายและการระเหยของน้ำในสารประกอบ การสลายตัวของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ หรืออาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารกับอากาศ

นำสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนตที่ได้จากการบดผสม มาทำการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric/Differential Analysis: TGA บริษัท METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA STAR 851^๑) โดยใส่สารผสม 23 - 24 มิลลิกรัม ในถ้วยอลูมิเนียม ทำการวิเคราะห์ทดสอบภายใต้สภาวะที่เป็นอากาศบริสุทธิ์ ด้วยอัตราการไหล 20 ml/min ในช่วงอุณหภูมิ 25 - 1500 องศาเซลเซียส โดยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในสารประกอบเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ เพื่อศึกษาการสลายตัวของสารต่างๆ การหลอมละลายของสารประกอบ การระเหิดของสาร การเปลี่ยนสถานะ และศึกษาช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึก เพื่อใช้ประกอบการทำนายพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาของสารประกอบ รวมถึงช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก

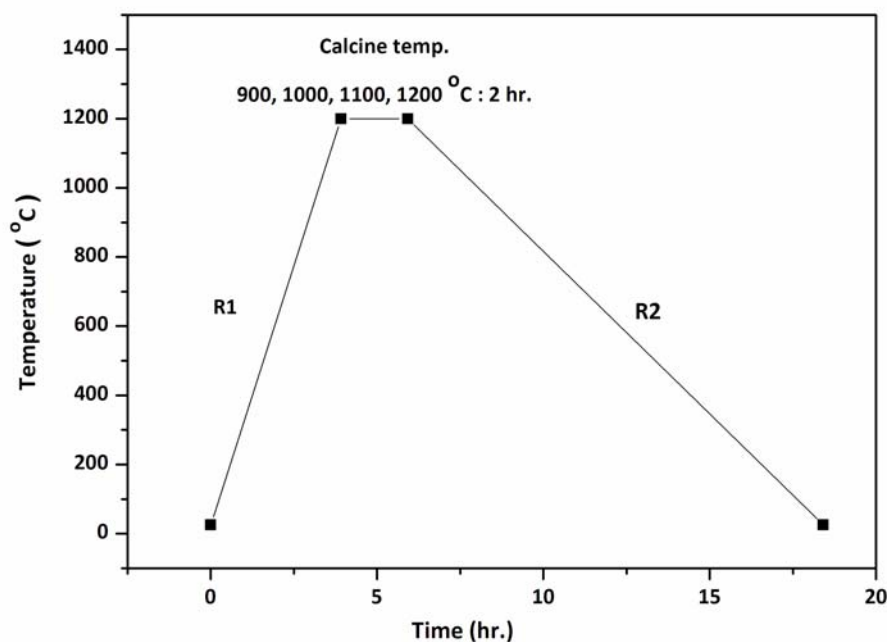
เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกช่วงการเผาแคลไซน์ การเผาซินเตอร์ รวมถึงการสร้างแผนผังวิศวกรรม (Reed, 1994)



ภาพที่ 3.2 แสดงเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักเชิงความร้อน

3.2.3 การเผาแคลไซน์สารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานต

นำสารผสมแบเรียมเซอร์โคเนตไททานตที่ได้จากการบดผสม มาทำการเผาแคลไซน์ เพื่อสังเคราะห์สมบัติของสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานต ก่อนนำไปบดผสมกับสารประกอบแบเรียมไอรอนไนโอเบตที่เตรียมด้วยวิธีเดียวกัน โดยทำการเผาแคลไซน์ด้วยเตาเผาไฟฟ้าที่สามารถทนอุณหภูมิสูง (High temperature chamber furnaces ยี่ห้อ Lenton รุ่น UAF 16/10) ภายใต้สภาวะที่เป็นอากาศบริสุทธิ์ และบรรจุสารผสมในถ้วยอะลูมินา (Alumina crucible) มีฝาปิดเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารประกอบอื่น ที่อาจเกิดขึ้นภายในเตาระหว่างทำการเผาแคลไซน์ หลังจากนั้นทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (Heating rate : R1) เป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และทำการเผาแช่ไว้ ณ อุณหภูมิการเผาแคลไซน์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยอุณหภูมิให้ลดลงเอง (R2)



ภาพที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาแคลไซน์

3.2.4 การศึกษาองค์ประกอบของธาตุในสารประกอบหลังการเผาแคลไซน์

การศึกษาองค์ประกอบของธาตุในสารประกอบภายหลังการเผาแคลไซน์ เพื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุที่รวมตัวเป็นผงแคลไซน์ ใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซรามิกในขั้นตอนต่อไป

เทคนิคการวิเคราะห์นี้ใช้หาชนิดและปริมาณของธาตุ โดยเมื่อรังสีเอกซ์กระทำต่อธาตุแต่ละชนิดจะปลดปล่อยรังสีเอกซ์ที่พลังงานแตกต่างกัน ทำให้สามารถจำแนกชนิดพร้อมทั้งบอกปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบได้ (กอบวุฒิ รุจิณากุล, 2549)

ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบด้วยวิธีการวิเคราะห์พลังงาน (Energy dispersive analysis) ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Analyzer : XRF ยี่ห้อ Horiba รุ่น MESA – 500W) ใช้ระบบการวิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multichannel analyzer : MCA) โดยมีกระบวนการดังนี้คือ นำสารประกอบที่ได้หลังการเผาแคลไซน์ในแต่ละอัตราส่วนผสมมาทำการบดให้ละเอียดด้วยครกบดสารที่ทำจากอาร์เกต จากนั้นทำการอัดขึ้นรูปแบบเหรียญขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร จากนั้นทำการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์ในช่วงพลังงาน 0 – 50 KeV เป็นเวลา 300 วินาที

3.2.5 การศึกษาเฟสและโครงสร้างจุลภาคของสารประกอบ

นำผงของสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานेटที่ได้จากการเผาแคลไซน์ในแต่ละอุณหภูมิ มาทำการวิเคราะห์ทดสอบโครงสร้างของสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer : XRD ยี่ห้อ PANalytical รุ่น X'Pert Pro MPD) โดยทำการวิเคราะห์ที่ความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ 40 มิลลิแอมแปร์ มีต้นกำเนิดรังสีเอกซ์จากแผ่นทองแดง (Cu) และใช้นิเกิลหนา 0.02 มิลลิเมตร เป็นวัสดุกรองรังสีเพื่อให้ได้รังสีเอกซ์ชนิดลำแสงเดี่ยว ($K\alpha$) ที่มีความยาวคลื่น 1.54 อังสตรอม เป็นต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยวางแผ่นสลิตไว้ระหว่างทางเดินรังสีต้นกำเนิด ก่อนตกกระทบตัวอย่าง และระหว่างทางเดินของรังสีที่เลี้ยวเบนจากตัวอย่าง ก่อนเข้าสู่ดีเทคเตอร์ เพื่อจำกัดปริมาณรังสีที่ใช้ในการวิเคราะห์ และกรองรังสีลดสัญญาณรบกวนของแบ็คกราวด์ โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้คือ ทำการบดสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานेटในครกบดสารเอเกตให้ละเอียด แล้วทำการอัดสารประกอบในช่องเตรียมตัวอย่างแบบวงกลม (Circular holder) ทำการวิเคราะห์ทดสอบโดยให้ต้นกำเนิดรังสี และดีเทคเตอร์หมุนพร้อมกันที่มุม 2 Theta เท่ากับ 10 – 90 องศา โดยอัตราการเพิ่มมุมของการวิเคราะห์ (Step size) เป็น 0.0167 และช่วงเวลาในการรับสัญญาณในแต่ละมุม (Time/step) เป็น 10 วินาที ผลการวิเคราะห์แสดงกราฟระหว่างความเข้มแสงและมุมการเลี้ยวเบน โดยใช้ฐานข้อมูลในการวิเคราะห์ผลเป็น ICDD PDF2 รุ่น 2005 ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.3 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติของเซรามิกระบบ (1-x)BZT – xBFN

3.3.1 การบดผสมสาร

จากการแยกเตรียมของสารตั้งต้น หลังการเผาแคลไซน์จะได้สารประกอบ 2 ชนิดคือ แบเรียมเซอร์โคเนตไททานेट และ แบเรียมไอรอนไนโอเบต ในขั้นตอนนี้ นำสารประกอบทั้งสองมาบดผสมกันด้วยอัตราส่วนต่างๆ ตามตารางที่ 3.2 โดยเปอร์เซ็นต์โมล ในลักษณะการบดผสมแบบเปียกใช้เอทานอลเป็นตัวกลางของการบด ในขวดพลาสติกที่บรรจุลูกบดเซอร์โคเนียปริมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของขวด โดยบดด้วยเครื่องบดธรรมดาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารผสมหลังการบดมาทำการระเหยตัวกลางออกที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยใช้เตาความร้อน ร่วมกับแท่งแม่เหล็กคนสาร เพื่อป้องกันการตกตะกอนและการแยกชั้นของสารประกอบ

ตารางที่ 3.2 แสดงสัดส่วนการผสมระหว่าง BZT และ BFN โดยเปอร์เซ็นต์โมล

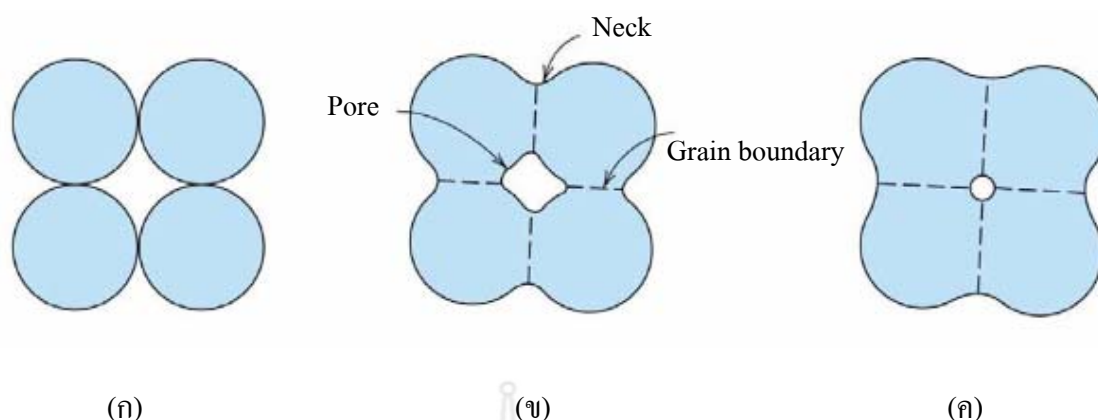
Samples	BaTi _{0.9} Zr _{0.1} O ₃ : BZT	BaFe _{0.5} Nb _{0.5} O ₃ : BFN
0.8BZT-0.2BFN	0.8	0.2
0.6BZT-0.4BFN	0.6	0.4
0.4BZT-0.6BFN	0.4	0.6
0.2BZT-0.8BFN	0.2	0.8

3.3.2 การอัดขึ้นรูปแบบเหรียญ

นำผงของสารประกอบที่ผ่านการบดผสมระหว่าง แบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนตและ แบเรียมไอรอนไนโอเบตด้วยอัตราส่วนผสมต่างๆ ปริมาณ 2 กรัม สำหรับการอัดขึ้นรูปเป็นเซรามิก 1 เม็ด โดยบดผสมในครกอาร์เกตร่วมกับสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Polyvinyl alcohol, $[-CH_2CH(OH)-]_n$, Mw = (44.05)n กรัม/โมล) ปริมาณ 4 หยด เพื่อเป็นตัวประสานช่วยให้ผงของสารประกอบสามารถยึดเกาะกันได้ดีในขั้นตอนการอัดขึ้นรูป จากนั้นนำสารผสมที่ได้ไปอัดขึ้นรูปในแบบพิมพ์ทรงกระบอก ที่ทำจากเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดระบบไฮดรอลิกชนิดแรงอัดด้านเดียว (เครื่องอัด HYDRAULIC บริษัท KAYABA Industry Co., Ltd) ที่กำลังการอัด 270 MPa เป็นเวลา 15 วินาที โดยขึ้นงานหลังการอัดขึ้นรูปมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมคล้ายเหรียญสีน้ำตาลอ่อน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร

3.3.3 การเผาซินเตอร์

การเผาซินเตอร์ (Sintering) เป็นการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว เพื่อหลอมละลายสารประกอบเป็นเฟสเดียว เกิดการประสานกันของอนุภาคสารประกอบ โดยกระบวนการแพร่ของอะตอมในสภาพของแข็ง (Diffusion in solid stage) ลดขนาดของรูพรุน (Pore size) มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงสูงขึ้น เป็นกระบวนการที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงในสภาพของแข็ง ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของสารประกอบลดลง รวมทั้งช่องว่างที่เกิดจากการสลายตัวออกไปของวัสดุประสานภายหลังการเผาไล่ตัวประสานเกิดการเชื่อมติดกัน (Reed, 1994) ดังภาพที่ 3.4

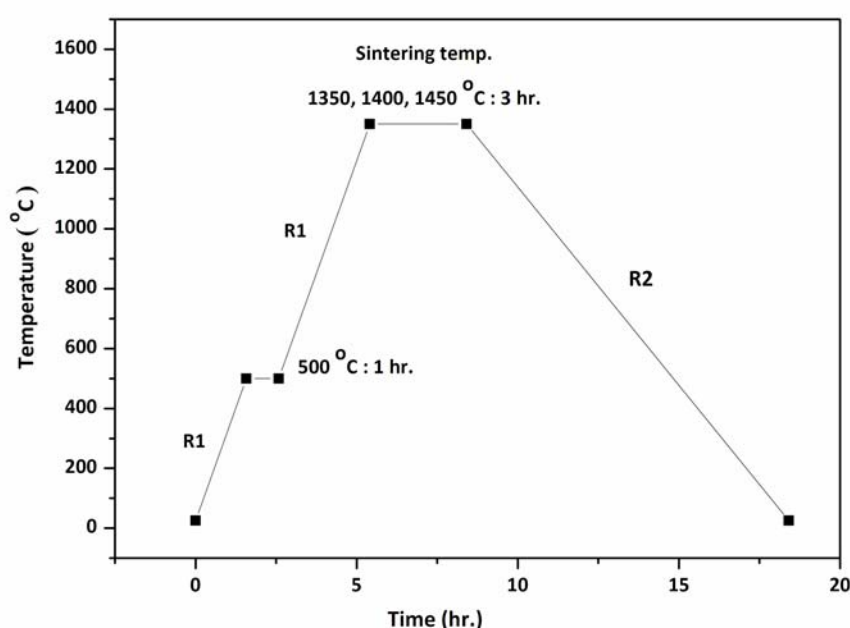


ก. ลักษณะของอนุภาคหลังการอัดขึ้นรูป
 ข. การรวมตัวกันของอนุภาคทำให้เกิดรูพรุนในช่วงเริ่มต้นการเผาซินเตอร์
 ค. หลังการเผาซินเตอร์จะทำให้ขนาดและรูปร่างของรูพรุนเปลี่ยนไป
ภาพที่ 3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคในระหว่างการเผาซินเตอร์
 (Chulalongkorn University, 2008, ระบบออนไลน์)

โดยทั่วไปกระบวนการเผาซินเตอร์จะแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ดังนี้ (Rahaman, 2003)

1. การซินเตอร์ระยะเริ่มต้น (Initial stage) เป็นช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคที่อยู่ติดกันเกิดการสร้างพันธะให้เชื่อมติดกัน หรือเรียกว่า คอ (neck) โดยเกิดการแพร่และการไหลของอนุภาค เริ่มเกิดขอบเกรน ทำให้เกิดการหดตัวทำให้ความพรุนลดลง (โดยประมาณ <12%)
2. การซินเตอร์ระยะกลาง (Intermediate stage) เริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีการแพร่ที่บริเวณรูพรุน เกิดความเครียดที่บริเวณผิวสัมผัสของอนุภาค (neck) โดยรอบ พื้นที่การเกิดคอกว้างมากขึ้น ทำให้อนุภาคเชื่อมติดกันมากขึ้น เกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ความพรุนลดลง และขนาดเกรนโตขึ้น
3. การซินเตอร์ช่วงสุดท้าย (Final stage) เริ่มเกิดขึ้นเมื่อรูพรุนเริ่มปิด ทำให้สังเกตเห็นบริเวณมุมของการเกิดเกรนได้ชัดเจน ขนาดรูพรุนลดลงและค่อยๆหายไป ทำให้ความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น และขนาดเกรนโตขึ้น

สำหรับงานวิจัยนี้ทำการเผาซินเตอร์ด้วยเตาเผาไฟฟ้าที่สามารถทนอุณหภูมิสูง โดยวางชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปแบบเหรียญบนแผ่นทนไฟที่รองพื้นด้วยผงอะลูมินา หลังจากนั้นโรยผงอะลูมินากลับชิ้นงานอีกครั้ง เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารประกอบอื่นภายในเตาเผา ซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างการเผาซินเตอร์ หลังจากนั้นทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างกัน 3 จุด (โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์เป็น 1350 1400 และ 1450 องศาเซลเซียส) ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (Heating rate : R1) เป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยเผาแช่ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อสลายวัสดุประสานออกจากเซรามิก แล้วเพิ่มอุณหภูมิไปที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเป็น R1 และทำการเผาแช่ไว้ ณ อุณหภูมิการเผาซินเตอร์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิลดลงเองจนถึงอุณหภูมิห้อง (R2) กราฟแสดงอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ดังภาพที่ 3.5

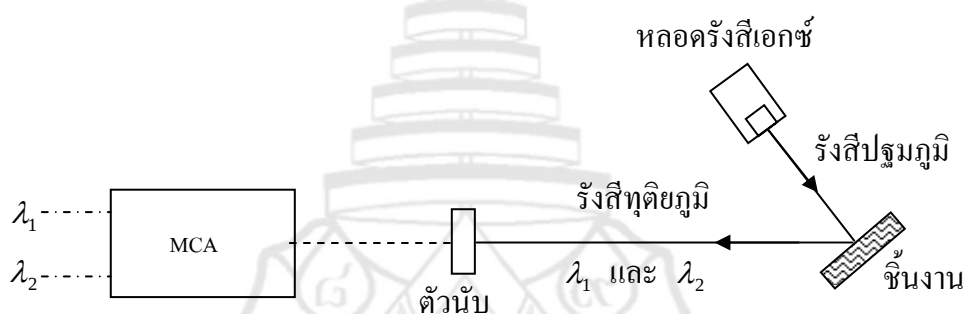


ภาพที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาซินเตอร์

3.3.4 การศึกษาองค์ประกอบของธาตุในเซรามิกผสมหลังการเผาซินเตอร์

การศึกษาคู่ประกอบของธาตุในเซรามิกผสมภายหลังการเผาซินเตอร์ เพื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุที่รวมตัวกันเป็นเซรามิก ใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซรามิกในขั้นตอนต่อไป

ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์พลังงาน โดยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ มีระบบการวิเคราะห์แบบหลายช่อง โดยมีกระบวนการดังนี้คือ นำชิ้นงานเซรามิกหลังการเผาซินเตอร์ในแต่ละชุดการทดลอง มาขัดให้ผิวหน้าเรียบได้ระนาบ ด้วยงานขัด เริ่มจากงานขัดหยาบไปจนถึงงานขัดละเอียด (Coarse grind, Fine grind, Rough polish และ Medium polish) ตามด้วยผงขัดเพชรขนาด 6 3 และ 1 ไมโครเมตร โดยขัดร่วมกับผ้าสักหลาดจนผิวหน้าเกิดความเรียบเป็นมันวาว ด้วยเครื่องขัด (Grinder/polisher ยี่ห้อ LECO รุ่น SS 1000) จากนั้นทำการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์ ในช่วงพลังงาน 0 – 50 KeV เป็นเวลา 300 วินาที โดยระบบการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แสดงหลักการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบด้วยวิธีการวิเคราะห์พลังงาน



ภาพที่ 3.7 แสดงเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

3.3.5 การศึกษาความหนาแน่นของเซรามิกผสม

การศึกษาความหนาแน่นเป็นปัจจัยพื้นฐานของวัสดุ โดยค่าความหนาแน่นของวัสดุมีทั้งความหนาแน่นเชิงทฤษฎี และความหนาแน่นที่หาได้จากการทดลอง ซึ่งความหนาแน่นทางทฤษฎีนั้นหาได้จากค่าแลตทิซพารามิเตอร์จากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตรในหนึ่งหน่วยเซลล์ ส่วนความหนาแน่นจากการทดลองสำหรับงานวิจัยนิยมหาได้จากวิธีอาคิมิดิส หรือการแทนที่น้ำโดยใช้ขวดถ่วงจำเพาะ (Pycnometer) (Reed, 1994) มีลักษณะดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 แสดงลักษณะของขวดถ่วงจำเพาะ

การหาค่าความหนาแน่นแบบแทนที่น้ำจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าอุณหภูมิของน้ำขณะทำการทดลอง เนื่องจากความหนาแน่นของน้ำจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ (กอบวุฒิ รุจิณากุล, 2549) โดยมีวิธีการทดลองดังนี้ ทำการหามวลขวดถ่วงจำเพาะพร้อมจุก (M_1) จากนั้นหามวลสารรวมขวด (M_2) และมวลของน้ำรวมสารและขวด (M_3) สุดท้ายคือมวลของขวดและน้ำที่ไม่มีสาร (M_4) จากการทดลองสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นได้ตามสมการ

$$\text{มวลของสาร} = M_2 - M_1 = M_p \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \text{มวลของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของสารที่ถูกแทนที่} \\ = (M_4 - M_1) - (M_3 - M_2) \end{aligned} \quad (3.5)$$

เนื่องจาก
$$S = \frac{\rho}{\rho_{st}} \quad (3.6)$$

S คือ ความถ่วงจำเพาะ
 ρ คือ ความหนาแน่นของสาร
 ρ_{st} คือ ความหนาแน่นของน้ำ

จากนิยามความหนาแน่นจะได้ว่า

$$S = \frac{\frac{M}{V}}{\frac{M_{st}}{V_{st}}} \quad (3.7)$$

M คือ มวลของสาร
 M_{st} คือ มวลของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของสารที่ถูกแทนที่
 V คือ ปริมาตรของสารที่พิจารณา
 V_{st} คือ ปริมาตรของน้ำ

เนื่องจากการหาความหนาแน่นแบบแทนที่น้ำหมายถึงการที่สารเข้าแทนที่น้ำในขวดถ่วงจำเพาะ ดังนั้นจะได้ว่า $V = V_{st}$

ดังนั้น
$$S = \frac{M}{M_{st}} \quad (3.8)$$

จะได้
$$S = \frac{M_2 - M_1}{(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)} = \frac{\rho}{\rho_{st}}$$

$$\rho = \frac{M_2 - M_1}{(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)} \rho_{st} \quad (3.9)$$

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นความหนาแน่นเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นในทางทฤษฎี ซึ่งความหนาแน่นทางทฤษฎีนั้นได้จากการคำนวณโดยใช้จำนวนอะตอมต่อปริมาตรของหน่วยเซลล์ ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

$$\rho_r(\%) = \left[\frac{\rho_m}{\rho_{th}} \right] \times 100 \quad (3.10)$$

เมื่อ	ρ_r	คือ	ความหนาแน่นสัมพัทธ์
	ρ_m	คือ	ความหนาแน่นที่ได้จากการวิเคราะห์
	ρ_{th}	คือ	ความหนาแน่นที่ในทางทฤษฎี

3.3.6 การศึกษาเฟสและโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกผสม

สำหรับการวิเคราะห์ผลึกหลังการเผาซินเตอร์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อศึกษาโครงสร้างการจัดเรียงตัวของผลึกภายในชิ้นงานเซรามิก ใช้ทำนายพฤติกรรมกรรมการแทรกตัวของอะตอมอันเกิดจากการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ รวมถึงระบบผลึกที่ได้หลังการเผาซินเตอร์ เพื่อใช้ประกอบผลการวิเคราะห์ทดสอบด้วยเทคนิคอื่น โดยเริ่มจากการบดชิ้นงานเซรามิกในครกบดสารที่ทำจากเอเกตาให้ละเอียดแล้วทำการอัดสารประกอบลงในช่องเตรียมตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ทดสอบที่มุม 2 Theta (2θ) เท่ากับ 10 – 90 องศา โดยอัตราการเพิ่มมุมของการวิเคราะห์ (Step size) เป็น 0.0167 และช่วงเวลาในการรับสัญญาณในแต่ละมุม (Time/step) เป็น 10 วินาที ทำการวิเคราะห์ที่ความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ 40 มิลลิแอมแปร์ ผลการวิเคราะห์แสดงดังกราฟระหว่างความเข้มแสงและมุมการเลี้ยวเบน โดยใช้ฐานข้อมูลในการวิเคราะห์ผลด้วย ICDD PDF2 รุ่น 2005



ภาพที่ 3.9 แสดงเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เมื่อพิจารณาการจัดเรียงตัวของผลึก พบว่ามีลักษณะเฉพาะของพารามิเตอร์ต่างๆ ไม่เหมือนกัน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดระบบผลึกมีทั้งหมด 6 ชนิด คือ a , b , c (Unit cell edges) และ α , β , γ (Interaxial angles) และสำหรับการกำหนดระนาบของผลึกจะกำหนดได้ด้วยเลขจำนวนเต็มที่เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) แทนค่าด้วย h , k , l (Suryanarayana & Norton, 1998) โดยเมื่อพิจารณาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึกคิวบิก ($a = b = c$ และ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) พบว่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d) มีความสัมพันธ์กับแกนต่างๆของผลึกดังนี้

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (3.11)$$

เมื่อกฎของแบรกก์คือ $\lambda = 2d \sin \theta$

$$\sin^2 \theta = \left(\frac{\lambda^2}{4a^2} \right) (h^2 + k^2 + l^2) \quad (3.12)$$

เมื่อ $\lambda^2/4a^2$ เป็นค่าคงที่ ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง $\sin^2\theta$ และ $h^2+k^2+l^2$ เพื่อวิเคราะห์หาระนาบของผลึกได้ โดยเมื่อพิจารณาค่า $h^2 + k^2 + l^2$ ในระนาบผลึกของระบบคิวบิก จะมีค่าดังนี้

Primitive 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16,...

Body-centered 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16,...

Face-centered 3, 4, 8, 11, 12, 16, 19, 20, 14, 27, 32,...

$$\text{เมื่อกำหนดให้ } A = \frac{\lambda^2}{4a^2} \quad \text{or} \quad a = \frac{\lambda}{2\sqrt{A}} \quad (3.13)$$

$$\frac{\sin^2 \theta}{A} = (h^2 + k^2 + l^2) \quad (3.14)$$

จากการวิเคราะห์พีคที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามสมการที่ 3.12 และ 3.14 จะสามารถหาพารามิเตอร์ a ของผลึกในระบบคิวบิกได้ ส่วนการคำนวณหาพารามิเตอร์ของผลึกในระบบเตตระโกนอล ($a = b \neq c$ และ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.15

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (3.15)$$

3.3.7 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเซรามิกผสม

การวิเคราะห์รูปร่างลักษณะสัณฐานของชิ้นงานเซรามิก ภายหลังจากการเผาซินเตอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด เพื่อศึกษาลักษณะผลึกที่เกิดจากการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิต่างๆ รวมถึงรูพรุนที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการศึกษาสมบัติของชิ้นงานเซรามิกด้วยเทคนิคอื่น เช่น ค่าความหนาแน่น ค่าความแข็งผิว ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ฯลฯ ทำได้โดยนำชิ้นงานเซรามิกที่ได้จากการเผาซินเตอร์มาทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner) ในเอทานอลเพื่อทำการชะล้างสิ่งสกปรกที่เกาะตามผิวหน้าของชิ้นงานออก จากนั้นนำชิ้นงานเซรามิกไปเคลือบผิวด้วยทอง โดยใช้เทคนิคสเปคโตริง จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ด้วยหัววัดสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ



ภาพที่ 3.10 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

3.3.8 การทำขั้ว

การทำขั้วเป็นการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยกาวเงิน เพื่อให้ผิวหน้าชิ้นงานสามารถนำไฟฟ้าได้ โดยนำชิ้นงานเซรามิกหลังการเผาขึ้นเตอร์ มาขัดเพื่อทำให้ผิวหน้าเรียบได้ระนาบจนเป็นมันวาว แล้วทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาของชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์ นำชิ้นงานมาทำขั้วด้วยกาวเงิน โดยเช็ดทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยอะซิโตน ทำการผสมกาวเงินกับอะซิโตน เพื่อทำละลายกาวเงินในกระป๋อง คนจนละลายเข้ากันทั้งหมด หลังจากนั้นทำการสเปรย์ลงบนผิวหน้า รอจนแห้งแล้วสเปรย์อีกข้างหนึ่งของชิ้นงาน หลังจากนั้นทำการเผาอบชิ้นงานเซรามิกด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อ นาที เพื่อให้ขั้วกาวเงินแห้งและแนบสนิทกับผิวเซรามิก จากนั้นใช้กระดาษทรายเบอร์ละเอียดขัดกาวเงินออกจากผิวขอบของชิ้นงาน เพื่อป้องกันอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านขั้วกาวเงินจากผิวหน้าด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่งของชิ้นงานเซรามิก ขณะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้า

3.3.9 การศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกผสม

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานเซรามิกเทียบกับอุณหภูมิ โดยวิธีวัดค่าการเก็บประจุ ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เทียบกับอุณหภูมิ (Kasap, 2006) ซึ่งวัดได้จากเครื่องวัดความต้านทาน (Precision Impedance Analyzer ; Agilent 4294A) ทำได้โดยนำชิ้นงานเซรามิกที่ได้จากการทำขั้วด้วยกาวเงินแล้ว มาต่อขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้างของเครื่องวัดความต้านทาน แล้วทำการวิเคราะห์ที่ความถี่ระหว่าง 100 Hz ถึง 1 MHz ในช่วงอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องถึง 450

องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียสต่อวินาที ภายใต้สภาวะที่เป็นอากาศบริสุทธิ์

สามารถคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกทำได้จากสมการ

$$\varepsilon_r = \frac{Cd}{\varepsilon_0 A} \quad (3.16)$$

เมื่อ	ε_r	คือ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
	ε_0	คือ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในสุญญากาศ (8.854×10^{-12} F/m)
	C	คือ	ค่าความจุมีหน่วยเป็นฟารัด (F)
	A	คือ	ค่าพื้นที่ผิวหน้าของชิ้นงานมีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)
	d	คือ	ความหนาของชิ้นงานมีหน่วยเป็นเมตร (m)

3.3.10 การศึกษาความต้านทานของเซรามิกผสม

การศึกษสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือความต้านทานซึ่งจะบอกถึง สภาพความต้านทานของชิ้นงานที่ขนาดต่างๆ ดังสมการที่ 3.17

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (3.17)$$

เมื่อ	ρ	คือ	สภาพความต้านทาน มีหน่วยเป็น โอห์ม-เมตร ($\Omega - m$)
	R	คือ	ความต้านทาน มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)
	l	คือ	ความยาวของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

ในการวิเคราะห์ทดสอบความต้านทานด้วยเครื่องวัดความต้านทาน (Impedance Spectroscopy: ยี่ห้อ Solartron รุ่น SI 1260) เพื่อศึกษาความต้านทานทางไฟฟ้า (Z) ของเซรามิก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณความถี่ (Moulson & Herbert, 2003) ดังสมการที่ 3.18

$$Z^* = Z' + jZ'' = \frac{\frac{1}{R}}{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C)^2} + j \frac{\omega C}{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C)^2} = \frac{1}{jC_0 \varepsilon^* \omega} \quad (3.18)$$

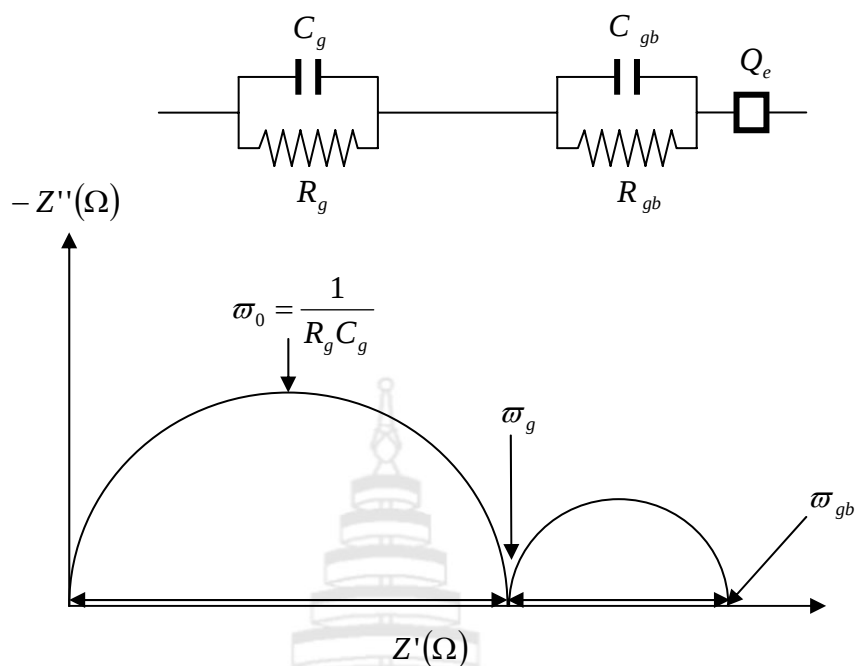
เมื่อ	Z^*	คือ	ความต้านทานที่ได้จากการวิเคราะห์
	ω	คือ	ความถี่เชิงมุม ($2\pi f$)
	C	คือ	ความจุจากการเก็บประจุ
	C_0	คือ	ความจุของตัวกลางสุญญากาศ
	ε^*	คือ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
	R	คือ	ความต้านทาน

ในทางทฤษฎีสำหรับการวิเคราะห์ความต้านทานของวัสดุเซรามิก เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง Z' และ Z'' จะแสดงผลในรูปแบบครึ่งวงกลม โดยครึ่งวงกลมแรกแสดงความต้านทานภายในเกรน ครึ่งวงกลมวงที่สองแสดงความต้านทานบริเวณขอบเกรน และในครึ่งวงกลมที่สามแสดงความต้านทานของอิเล็กโทรด โดยแบบจำลองผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 3.11 แบ่งเป็น 2 ส่วนระหว่างบริเวณภายในเกรนและบริเวณขอบเกรน สอดคล้องกับวงจรไฟฟ้าแบบขนานระหว่างตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน

โดยค่าคงที่เวลาเมื่อพิจารณาในเทอมของความต้านทานจะพบว่า

$$\tau_0 = RC = \frac{1}{\omega_0} \quad (3.19)$$

เมื่อ	τ_0	คือ	ค่าคงที่ของช่วงเวลาการเก็บประจุ
-------	----------	-----	---------------------------------



ภาพที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานส่วนจริงและส่วนจินตภาพของเซรามิก (Intatha, 2008)

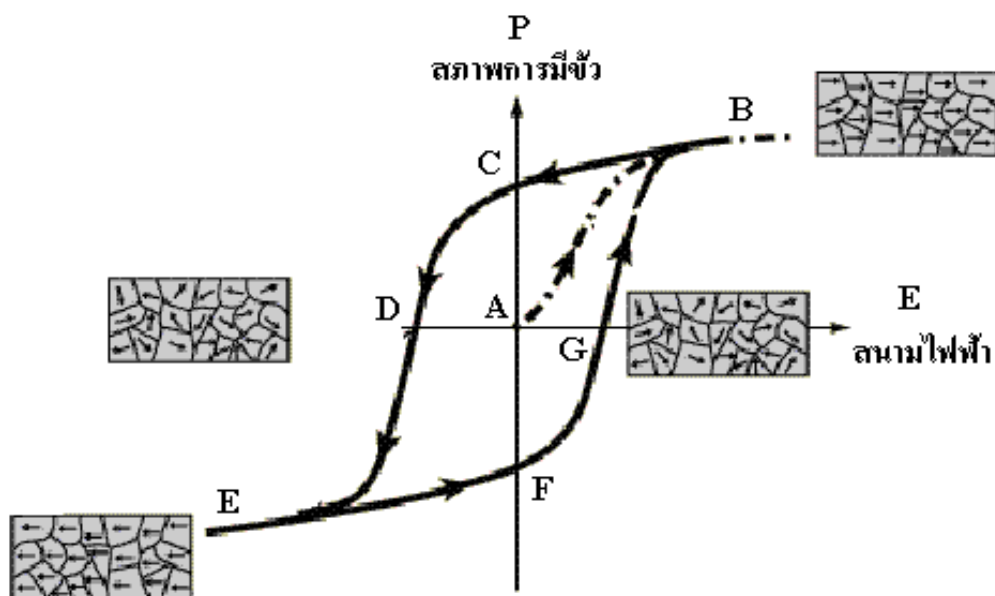
สำหรับการวิเคราะห์ความต้านทานทำได้โดย นำชิ้นงานที่ได้จากการทำขั้วด้วยกาวเงินวางในท่อที่ต่อเข้าในเตาไฟฟ้า แล้วปิดหัวและท้ายของชิ้นงานด้วยเส้นลวดแพลทินัม เพื่อต่อสัญญาณเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ ทำการวิเคราะห์ทดสอบด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า 100 mV ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 20 MHz ที่อุณหภูมิห้อง 100 200 และ 300 องศาเซลเซียส โดยในการเปลี่ยนอุณหภูมิแต่ละครั้งต้องรอจนกว่าอุณหภูมิคงที่ แล้วจึงเริ่มทำการวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์แต่ละครั้งจะทำการวิเคราะห์ครั้งละ 3 รอบ เพื่อให้ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงคงที่ ณ อุณหภูมิการวิเคราะห์ แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าต่างๆเทียบกับการเปลี่ยนแปลงความถี่ของชิ้นงานเซรามิก



ภาพที่ 3.12 แสดงเครื่องวัดความต้านทาน

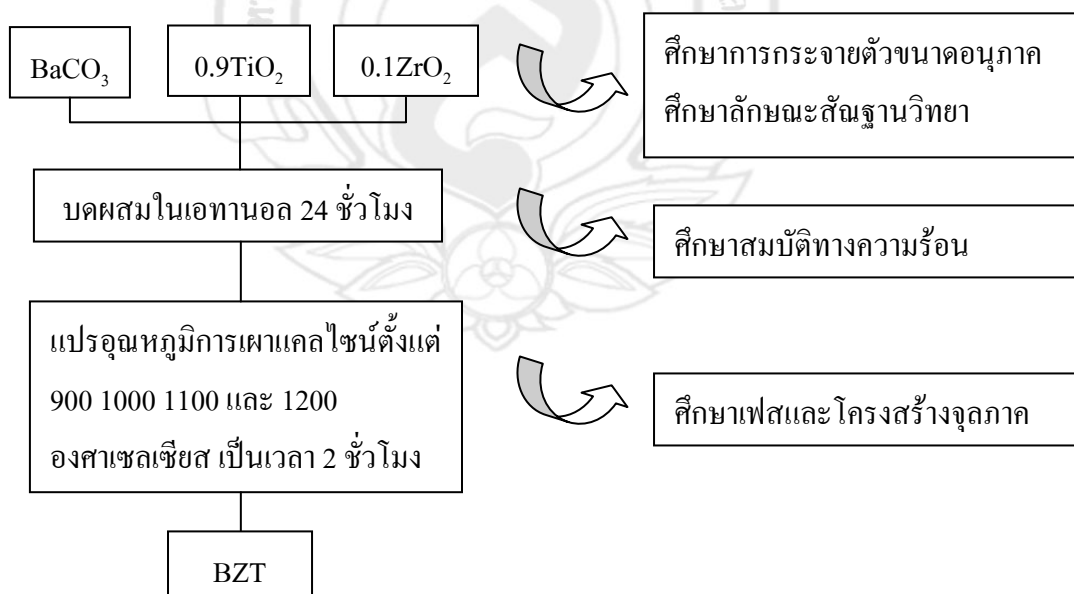
3.3.11 การศึกษาวงฮิสเทอรีซิสของเซรามิกผสม

สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบวงฮิสเทอรีซิสด้วยเครื่องวัดวงฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loop Tester รุ่น Precision Hysteresis บริษัท RADIANT TECHNOLOGIES, INC.) โดยใช้ร่วมกับเครื่องจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (High voltage รุ่น 609B) ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้คือ นำชิ้นงานเซรามิกที่ได้จากการทำขึ้นด้วยกาวยาง วางบนแท่นจ่ายไฟฟ้าศักย์สูง ภายในบรรจุกลีเซอรินเพื่อหล่อเย็นให้กับชิ้นงาน หลังจากนั้นจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับชิ้นงาน โดยค่าความต่างศักย์ที่ใช้มีค่าระหว่าง 250 ถึง 2000 โวลต์ ทำการประมวลผลการวิเคราะห์ทดสอบด้วยระบบคอมพิวเตอร์ เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสภาพการเกิดขั้ว (Polarization $\mu\text{C}/\text{cm}^2$) กับการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า (Voltage (kV/cm)) ที่จ่ายให้กับชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.13

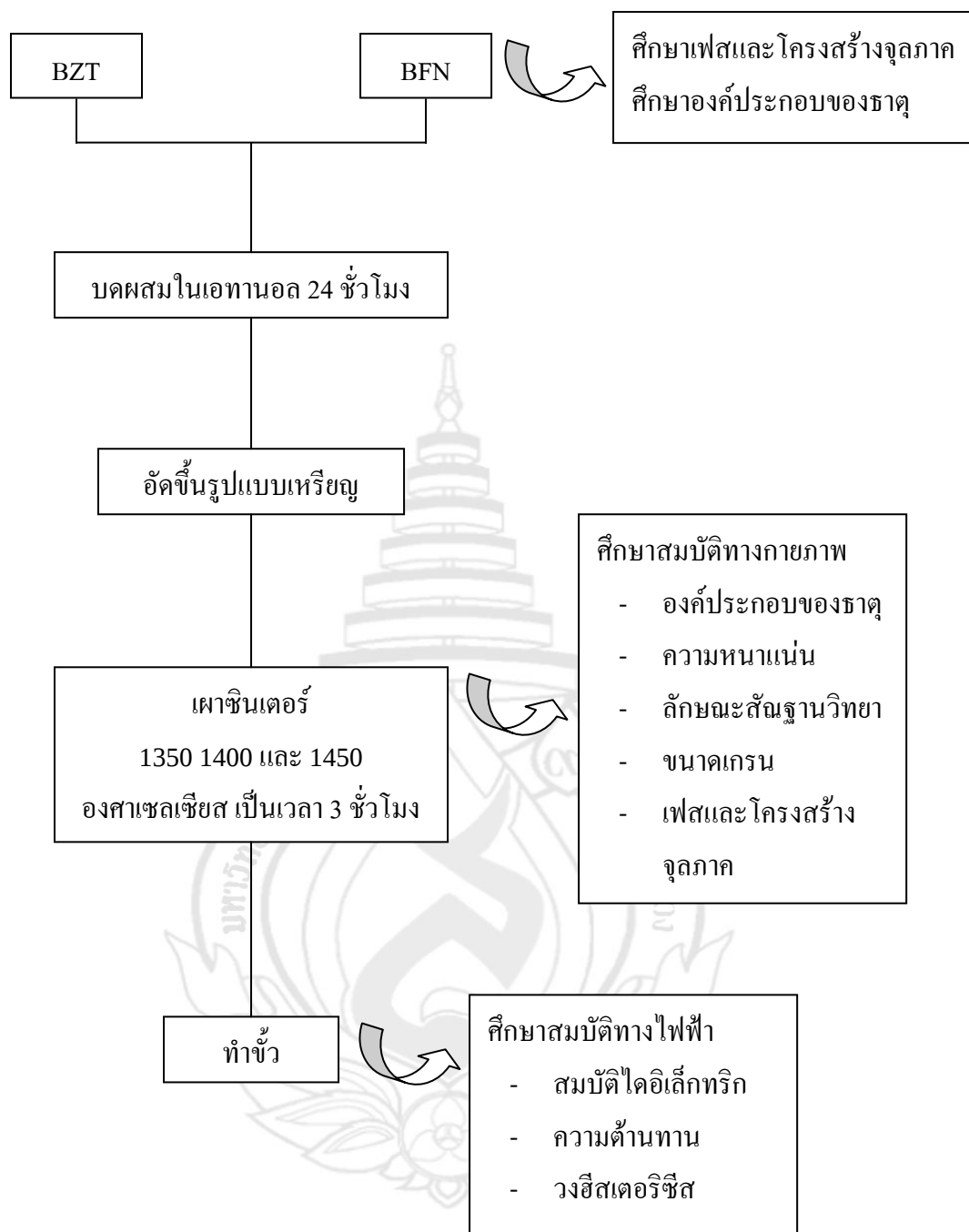


ภาพที่ 3.13 แสดงทิศทางโพลาริเซชันของเซรามิกภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับจากภายนอก
(Georgia State University, 2005, ระบบออนไลน์)

จากข้อมูลขั้นตอนการทดลองทั้งหมด แสดงผังผังขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเซรามิกไดอิเล็กทริก ด้วยเทคนิคการทำปฏิกิริยาของของแข็ง ดังภาพที่ 3.14 และ 3.15



ภาพที่ 3.14 แสดงขั้นตอนการเตรียมสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานต



ภาพที่ 3.15 แสดงขั้นตอนการศึกษาสมบัติของเซรามิกระบบ $(1-x)\text{BZT} - x\text{BFN}$

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อให้สอดคล้องกับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย จึงแบ่งผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 ผลการเตรียมและศึกษาสมบัติของผงเซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไททานต (BZT)

ส่วนที่ 2 ผลการเตรียมและศึกษาสมบัติของผงเซรามิกระบบ $(1-x)\text{BZT} - x\text{BFN}$

ส่วนที่ 3 ผลการศึกษาสมบัติของเซรามิกระบบ $(1-x)\text{BZT} - x\text{BFN}$

จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการเตรียมกับสมบัติของเซรามิกต่อไป

4.1 ผลการเตรียมและศึกษาสมบัติของผงเซรามิกแบเรียมเซอร์โคเนตไททานต

4.1.1 ผลการวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสารตั้งต้น

จากการทดลองวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในสารตั้งต้น เพื่อใช้ในการเตรียมผงแบเรียมเซอร์โคเนตไททานต ซึ่งได้แก่ สารประกอบแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) สารประกอบไททานเนียมออกไซด์ (TiO_2) และสารประกอบเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) ด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution analyzer) ได้กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคดังภาพที่ 4.1 โดยผลการทดลองแสดงค่า $D(0.1)$, $D(0.5)$, $D(0.9)$ และ $D[4,3]$ ซึ่งจะแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยที่ปริมาตรเปอร์เซ็นต์ไทน์ 10 50 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรในสารตั้งต้นทั้งหมดที่ใช้วัดการกระจายตัว และค่า $D[4,3]$ แสดงค่าขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของสารตั้งต้นที่นำมาทำการทดสอบวัดการกระจายตัว ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยวิธีทางปริมาตร จากผลการทดลองพบว่า

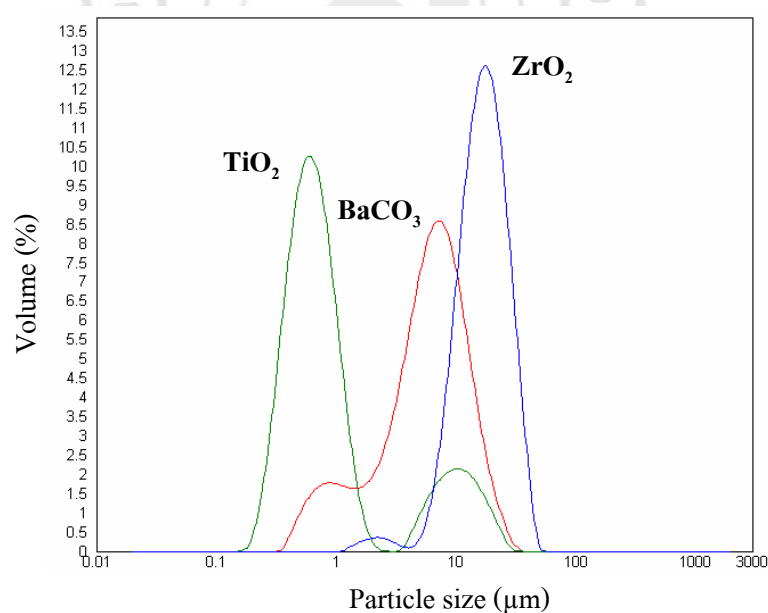
ผงแบเรียมคาร์บอเนต เป็นผงที่มีขนาดอนุภาค 2 กลุ่มใหญ่คือ กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 0.32 - 1.26 ไมโครเมตร และ กลุ่มอนุภาคที่มีขนาด 1.44 - 34.67 ไมโครเมตร โดยอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดในช่วง 1.44 - 34.67 ไมโครเมตร

ผงไททาเนียมออกไซด์ เป็นผงที่มีขนาดอนุภาค 2 กลุ่มใหญ่คือ กลุ่มที่มีขนาดอนุภาค ในช่วง 0.16 - 2.88 ไมโครเมตร และ กลุ่มอนุภาคที่มีขนาด 3.31 - 34.67 ไมโครเมตร โดยอนุภาค ส่วนใหญ่มีขนาดในช่วง 0.16 - 2.88 ไมโครเมตร

ผงเซอร์โคเนียมออกไซด์ เป็นผงที่มีขนาดอนุภาค 2 กลุ่มใหญ่คือ กลุ่มที่มีขนาดอนุภาค ในช่วง 1.10 - 3.80 ไมโครเมตร และ กลุ่มอนุภาคที่มีขนาด 4.36 - 52.48 ไมโครเมตร โดยอนุภาค ส่วนใหญ่มีขนาดในช่วง 4.36 - 52.48 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดอนุภาคของสารตั้งต้น

สารตั้งต้น	D(0.1) (μm)	D(0.5) (μm)	D(0.9) (μm)	D[4,3] (μm)
BaCO ₂	1.18	6.06	13.85	7.04
TiO ₂	0.35	0.70	9.57	2.60
ZrO ₂	8.91	16.98	30.07	18.35



ภาพที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสารตั้งต้น

ซึ่งจากผลของการหาขนาดอนุภาคจะเห็นได้ว่าสารตั้งต้นมีขนาดอนุภาคแตกต่างกันออกไป เพื่อให้เกิดการผสม และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ดีในขั้นตอนการเผาแคลไซน์ ควรที่จะทำการลดขนาดอนุภาคด้วยการบดผสมด้วยลูกบอลเซอร์โคเนีย หรือที่เรียกว่าเทคนิค Ball milling

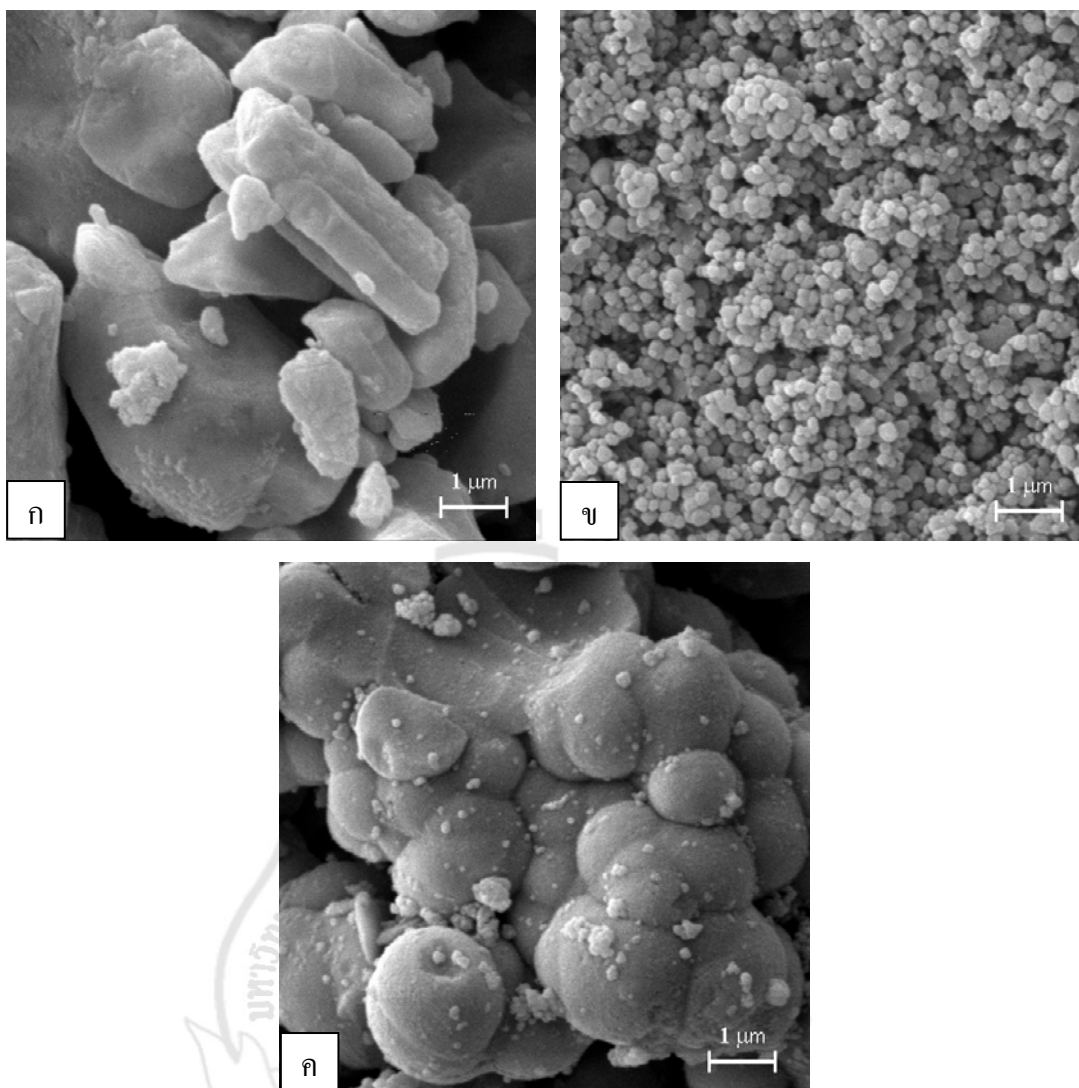
4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคสารตั้งต้น

จากผลการศึกษาลักษณะสัณฐาน (Morphology) ของผงสารตั้งต้น ซึ่งประกอบด้วย สารแบเรียมคาร์บอเนต สารไททาเนียมไดออกไซด์ และสารเซอร์โคเนียไดออกไซด์ พบว่าลักษณะอนุภาคของสารประกอบมีลักษณะดังภาพที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับขนาดอนุภาคที่วิเคราะห์ได้โดยวิธีการกระจายขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particlesize distribution analyzer

อนุภาคของผงแบเรียมคาร์บอเนต มีลักษณะรูปร่างของอนุภาคที่ไม่แน่นอนทั้งแบบ ทรงกระบอก ทรงกลมที่บิดเบี้ยวไป และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ โดยมีขนาดตั้งแต่ น้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ไปจนถึง ขนาดมากกว่า 20 ไมโครเมตร

อนุภาคของผงไททาเนียมไดออกไซด์ มีลักษณะรูปร่างแบบทรงกลมขนาดเล็กประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และมีบางส่วนที่เกาะกันเป็นกลุ่ม เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีพลังงานพื้นผิวมาก จึงเป็นสาเหตุให้อนุภาคเกาะกันได้ง่ายกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถอธิบายผลการวัดค่าการกระจายขนาดอนุภาคของผงไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เกิดพีค 2 พีค ได้ว่าอนุภาคที่พบในช่วง 0.16 ถึง 2.51 ไมโครเมตร เป็นขนาดอนุภาคของผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เกิดการเกาะกันของอนุภาค แต่อุณหภูมิที่มีขนาดในช่วง 3.31 ถึง 30.20 ไมโครเมตร เกิดจากการเกาะกันของอนุภาคขนาดเล็ก

อนุภาคของผงเซอร์โคเนียไดออกไซด์ มีลักษณะอนุภาคเป็นรูปร่างทรงกลมขนาดเล็กที่เกาะกันอย่างหนาแน่นจนเป็นก้อนขนาดใหญ่ประมาณ 1 ไมโครเมตร ไปจนถึง มากกว่า 20 ไมโครเมตร



ก. แบเรียมคาร์บอเนต ข. ไททานเนียมไดออกไซด์ ค. เซอร์โคเนียมไดออกไซด์

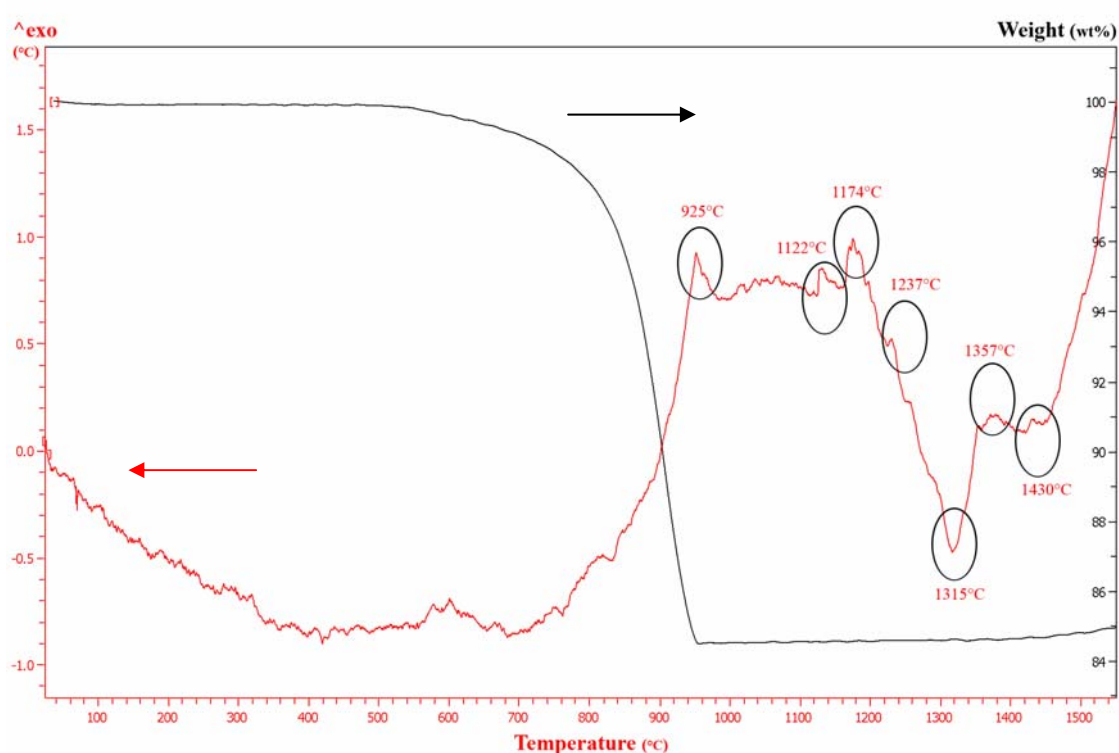
ภาพที่ 4.2 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคสารตั้งต้น

4.2 ผลการเตรียมและศึกษาสมบัติของผงเซรามิกระบบ $(1-x)\text{BZT} - x\text{BFN}$

4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของผงผสมแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเตต

จากผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของสารผสมแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเตต(BZT) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ทดสอบน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric/Differential Analysis) พบว่า สารผสมที่ได้แสดงการสูญเสียน้ำหนักหนึ่งครั้ง เริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 540 องศาเซลเซียส และมีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส โดยช่วงแรกของ

การสูญเสียน้ำหนักเกิดจากการสลายตัวของสารจำพวกออกไซด์ (พลาสติกจากกระป๋องที่ใช้ในการบดผสม) ที่ใช้ในกระบวนการ Ball milling และจากกราฟ DTA แสดงให้เห็นว่ามีการคายพลังงานเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 925 1122 และ 1174 องศาเซลเซียส แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบ ซึ่งอาจเป็นการสร้างพันธะภายหลังการสลายตัวของ CO_2 แต่เป็นการเกิดปฏิกิริยาที่ยังไม่สมบูรณ์ เนื่องจากยังคงมีการคายพลังงานเกิดขึ้นหลายครั้ง และมีการดูดพลังงานอย่างมากเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1315 องศาเซลเซียส ซึ่งคาดว่าจะในช่วงอุณหภูมิการเกิด Solid solution ของสารประกอบ BZT



ภาพที่ 4.3 แสดงผล DTA และ TGA ของผงผสม BZT

จากช่วงกระบวนการคายพลังงานตั้งแต่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส จนถึงประมาณ 1174 องศาเซลเซียส ทำให้สามารถประมาณช่วงอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบแบเรียมคาร์บอเนต เซอร์โคเนียมออกไซด์ และไททาเนียมออกไซด์ ได้ว่าอยู่ในช่วงดังกล่าว ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงเลือกศึกษาการแปรอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ตั้งแต่ 900 – 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงการเกิดปฏิกิริยาของสารผสมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DTA

4.2.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบของธาตุในสารประกอบหลังการเผาแคลไซน์

จากผลการศึกษาองค์ประกอบของธาตุในสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานต (BZT) และสารประกอบแบเรียมไอรอนไนโอเบต (BFN) หลังการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์พลังงานเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ พบว่าสารประกอบทั้งสองแสดงองค์ประกอบของธาตุที่บริสุทธิ์ของสารแบเรียม เซอร์โคเนียม ไททานเนียม ไอรอน และไนโอเบียม ไม่มีสารอื่นปนเปื้อนทั้งในสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานตและสารประกอบแบเรียมไอรอนไนโอเบต รวมทั้งหลังการผสมสารประกอบทั้งสองในอัตราส่วนต่างๆทุกอัตราส่วนผสมหลังการบดผสมในเอทานอลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุในสารประกอบ

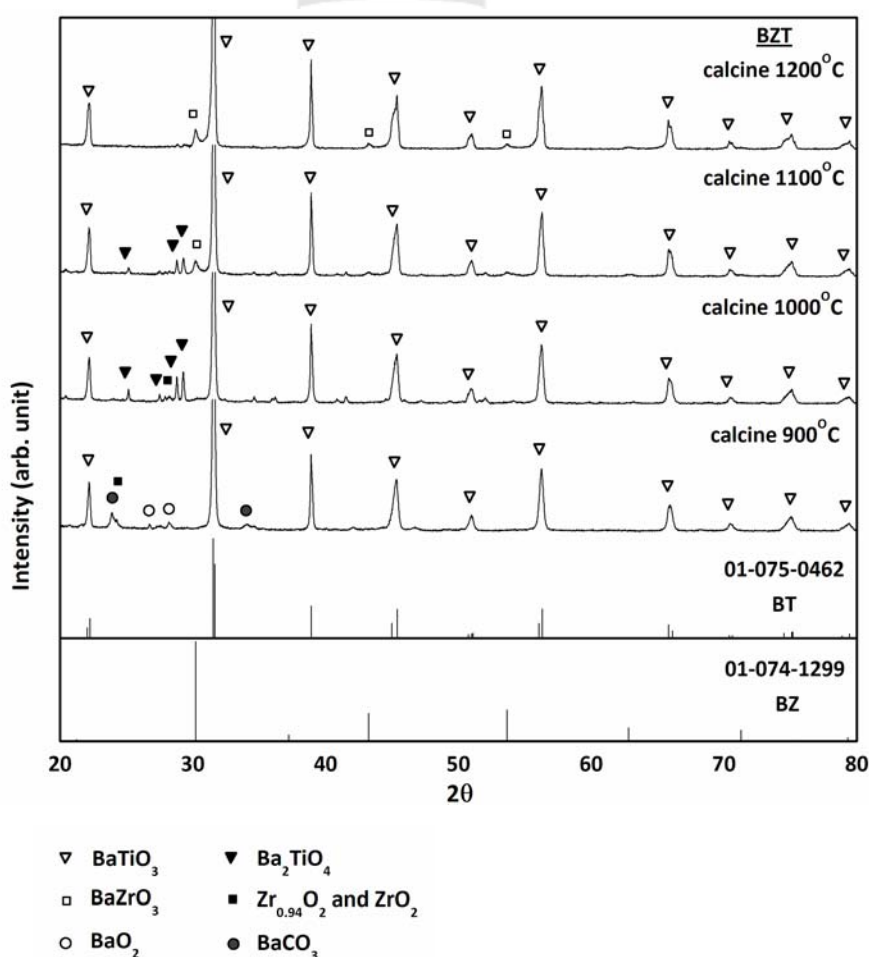
สารประกอบ	ปริมาณสารประกอบ (เปอร์เซ็นต์มวล)				
	แบเรียม	เซอร์โคเนียม	ไททานเนียม	ไอรอน	ไนโอเบียม
BZT แคลไซน์	59.57	6.37	34.05	-	-
BFN แคลไซน์	51.24	-	-	15.70	33.07
0.2BZT - 0.8BFN	49.26	1.47	9.97	12.98	26.32
0.4BZT - 0.6BFN	52.49	2.63	15.33	10.01	19.54
0.6BZT - 0.4BFN	54.05	3.90	22.21	6.84	13.01
0.8BZT - 0.2BFN	56.41	5.18	28.37	3.53	6.52

จากผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในสารประกอบ เมื่อนำไปคำนวณกลับตามสูตรทางเคมีของแต่ละองค์ประกอบแล้วพบว่าอัตราส่วนที่สอดคล้องกับสูตรทางเคมี

4.2.3 ผลการศึกษาเฟสและโครงสร้างจุลภาคของสารประกอบ

จากผลการศึกษาเฟสและโครงสร้างจุลภาคของสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานต ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 900 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.4 จากการทดลองที่ได้พบว่าที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ 900 องศาเซลเซียส สารผสมที่ได้เกิดปฏิกิริยาการแพร่เป็นสารประกอบแบเรียมไททานต (BaTiO_3) แต่เป็นการเกิดปฏิกิริยาที่ยังไม่สมบูรณ์ โดยยังคงมีสารประกอบแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) เซอร์โคเนียมออกไซด์ ($\text{Zr}_{0.94}\text{O}_2$) และแบเรียมออกไซด์ (BaO_2) อยู่ในสารประกอบ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาแคลไซน์เป็น

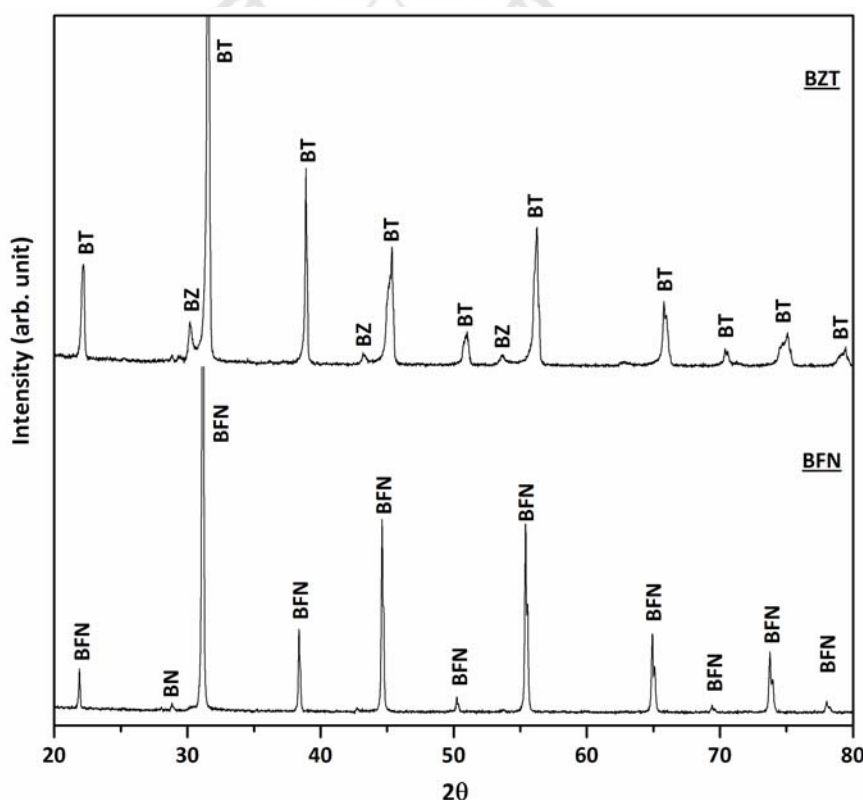
1000 องศาเซลเซียส พบว่าสารประกอบแบเรียมคาร์บอเนต เกิดการสลายตัวหมด เกิดเป็นสารประกอบแบเรียมไททานิอออกไซด์ (Ba_2TiO_4) และยังคงมีสารประกอบเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) อยู่ แต่หลังจากเพิ่มอุณหภูมิการเผาแคลไซน์เป็น 1100 องศาเซลเซียส พบว่าสารประกอบเซอร์โคเนียมออกไซด์สลายตัวหมดเกิดเป็นสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนต (BaZrO_3) และที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ 1200 องศาเซลเซียส พบว่าสารประกอบแบเรียมไททานิอออกไซด์สลายตัวไปได้ทั้งหมดเกิดเป็นสารประกอบแบเรียมไททานตแบบเตตระโกนอล (ICSD หมายเลข 01-075-0462) และแบเรียมเซอร์โคเนตแบบคิวบิก (ICSD หมายเลข 01-074-1299) โดยผลการเผาแคลไซน์ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ C.E. CIOMAGA (2006) ที่ทำการเตรียมสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานตด้วยวิธีการผสมสารแบเรียมไททานตและแบเรียมเซอร์โคเนต และทำการเผาแคลไซน์ที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของผงแคลไซน์ BZT

จากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเต พบว่ายังไม่เกิดเฟสบริสุทธิ์ของสารละลายของแข็ง ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผล DTA ที่แสดงการดูดพลังงานอย่างมากที่อุณหภูมิประมาณ 1315 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงควรทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ เพื่อให้ได้เฟสบริสุทธิ์

ในส่วนของสารประกอบแบเรียมไอรอนไนโอเบตนั้น ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยเตรียมด้วยวิธีการเดียวกันและทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นสารประกอบแบเรียมไอรอนไนโอเบตแบบคิวบิก (ICSD หมายเลข 01-089-2967) โดยมีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (a) 4.06 อังสตรอม ในสเปซกรุ๊ป Pm-3m และยังมีบางส่วนแสดงโครงสร้างเป็นสารประกอบแบเรียมไนโอเบียมออกไซด์แบบคิวบิก (ICSD หมายเลข 01-082-1896) ที่ตำแหน่งพิก 2 θ เป็น 28.82 องศา



ภาพที่ 4.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของผงแคลไซน์ BZT และ BFN

4.3 ผลการศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของเซรามิกระบบ (1-x)BZT – xBFN

4.3.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบของธาตุในเซรามิกผสมหลังการเผาซินเตอร์

จากผลการศึกษาองค์ประกอบของธาตุในเซรามิกผสมแบบเรียบเซอร์โคเนตไททานต และแบบเรียบไอรอนไนโอเบตในอัตราส่วนต่างๆหลังการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350 1400 และ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าเซรามิกทุกชิ้นงานแสดงองค์ประกอบของธาตุที่บริสุทธิ์ของสารแบบเรียบ เซอร์โคเนียม ไททานเนียม ไอรอน และไนโอเบียม โดยไม่มีสารอื่นปนเปื้อนภายในเซรามิกทุกอัตราส่วนผสมและทุกอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยเมื่อนำปริมาณสารประกอบไปคำนวณแล้วจะเห็นได้ว่ามีเปอร์เซ็นต์มวลที่สอดคล้องกับสูตรทางเคมี

ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุในชิ้นงานเซรามิกหลังการเผาซินเตอร์

รหัสตัวอย่าง	อุณหภูมิ	ปริมาณสารประกอบ (เปอร์เซ็นต์มวล)				
		แบบเรียบ	เซอร์โคเนียม	ไททานเนียม	ไอรอน	ไนโอเบียม
0.2BZT - 0.8BFN	1350	51.85	1.39	9.19	12.32	25.25
	1400	49.28	1.48	8.69	13.28	27.27
	1450	48.01	1.50	9.02	13.57	27.90
0.4BZT - 0.6BFN	1350	52.43	2.71	14.40	10.05	20.40
	1400	50.47	2.79	15.01	10.75	20.97
	1450	53.91	2.56	14.29	9.96	19.29
0.6BZT - 0.4BFN	1350	54.39	4.04	20.98	7.13	13.47
	1400	53.47	4.13	21.45	7.23	13.71
	1450	53.35	4.23	20.97	7.41	14.05
0.8BZT - 0.2BFN	1350	56.41	5.53	27.45	3.69	6.91
	1400	56.23	5.50	27.74	3.66	6.87
	1450	57.22	5.38	26.98	3.65	6.76

4.3.2 ผลการศึกษาความหนาแน่นของเซรามิกผสม

จากผลการศึกษาความหนาแน่นรวม (Bulk density) และความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ของชิ้นงานในอัตราส่วนผสมต่างๆ หลังการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350 1400 และ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แสดงในตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.6 และ 4.7 สามารถอธิบายผลการทดลองได้ว่า ชิ้นงานที่มีอัตราส่วนผสมของสารแบเรียมไอรอนไนโอเบตเพิ่มขึ้นในทุกอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ แสดงแนวโน้มของค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น รวมถึงกระบวนการเพิ่มอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ในทุกอัตราส่วนผสมยังส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วย

จากกราฟที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน 0.4BZT - 0.6BFN และ 0.6BZT - 0.4BFN มีค่าใกล้เคียงกันมากในทุกอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ แต่ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน 0.2BZT - 0.8BFN และ 0.8BZT - 0.2BFN แสดงความแตกต่างอย่างชัดเจน ในทุกอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณสารผสม BZT และ BFN มีความแตกต่างกันมาก จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ในทุกอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ โดยมีค่าความหนาแน่นสูงสุด 6.24 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในชิ้นงาน 0.2BZT - 0.8BFN ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1450 องศาเซลเซียส และเซรามิกแสดงความหนาแน่นต่ำสุด 5.76 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในชิ้นงาน 0.8BZT - 0.2BFN ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1350 องศาเซลเซียส

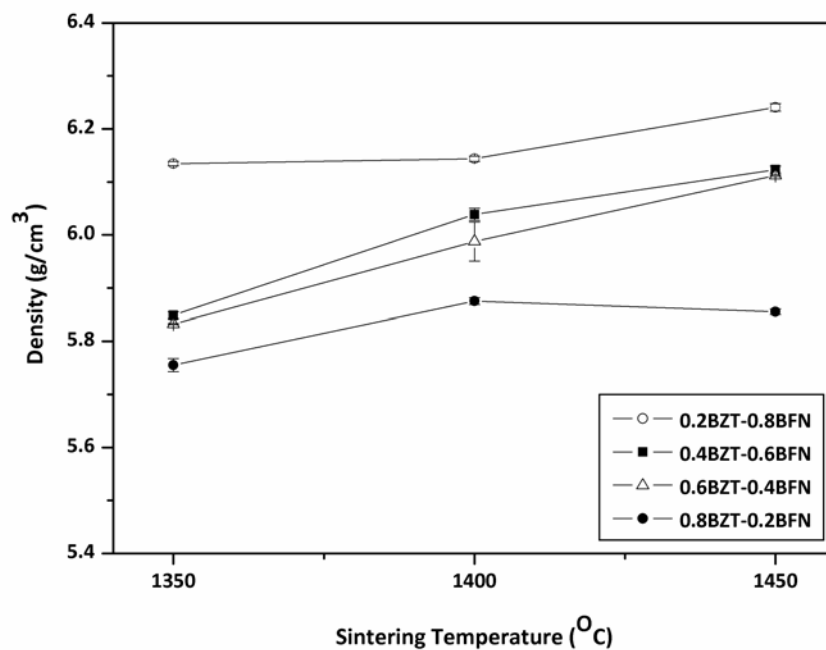
จากกราฟที่ 4.7 แสดงความหนาแน่นสัมพัทธ์เปรียบเทียบกับอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ โดยพบว่าที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1400 องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทุกชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแตกต่างจากชุดเซรามิกที่เผาซินเตอร์ 1350 และ 1450 องศาเซลเซียส ที่มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุด 97.99 เปอร์เซ็นต์ ในชิ้นงาน 0.6BZT - 0.4BFN ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1450 องศาเซลเซียส และความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำสุด 92.43 เปอร์เซ็นต์ ในชิ้นงาน 0.4BZT-0.6BFN ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1350 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี

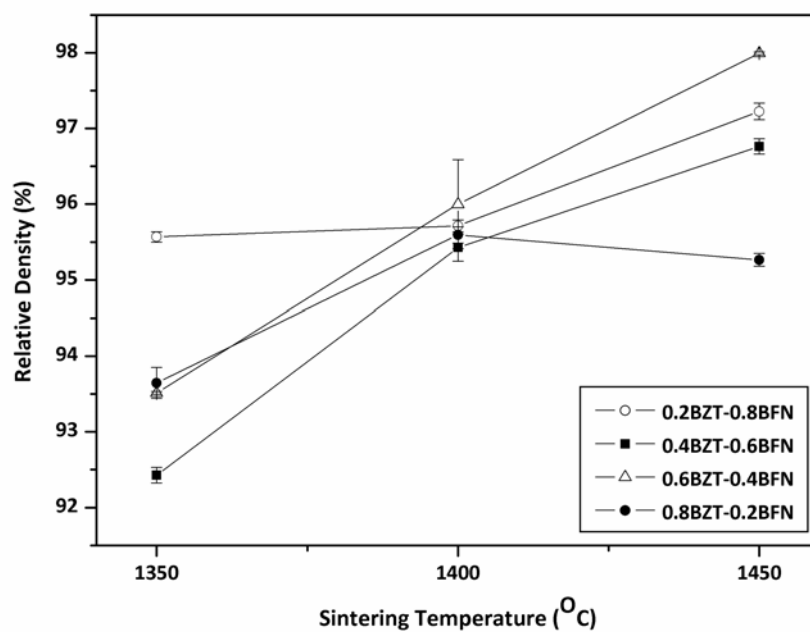
ชื่อสารประกอบ	ความหนาแน่นทางทฤษฎี (g/cm ³)
BaFe _{0.5} Nb _{0.5} O ₃	6.51
BaZrO ₃	6.28
BaTiO ₃	6.03
BaZr _{0.1} Ti _{0.9} O ₃	6.06

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองและค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์

รหัสตัวอย่าง	อุณหภูมิเผาซินเตอร์					
	1350 °C		1400 °C		1450 °C	
	ความหนาแน่นรวม	ความหนาแน่น	ความหนาแน่นรวม	ความหนาแน่น	ความหนาแน่นรวม	ความหนาแน่น
	(g/cm ³)	สัมพัทธ์ (%)	(g/cm ³)	สัมพัทธ์ (%)	(g/cm ³)	สัมพัทธ์ (%)
0.2BZT - 0.8BFN	6.13	95.57	6.14	95.71	6.24	97.22
0.4BZT - 0.6BFN	5.85	92.43	6.04	95.43	6.12	96.76
0.6BZT - 0.4BFN	5.83	93.51	5.99	96.00	6.11	97.99
0.8BZT - 0.2BFN	5.76	93.65	5.88	95.59	5.85	95.26



ภาพที่ 4.6 แสดงค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 4.7 แสดงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์

4.3.3 ผลการศึกษาเฟสและโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกผสม

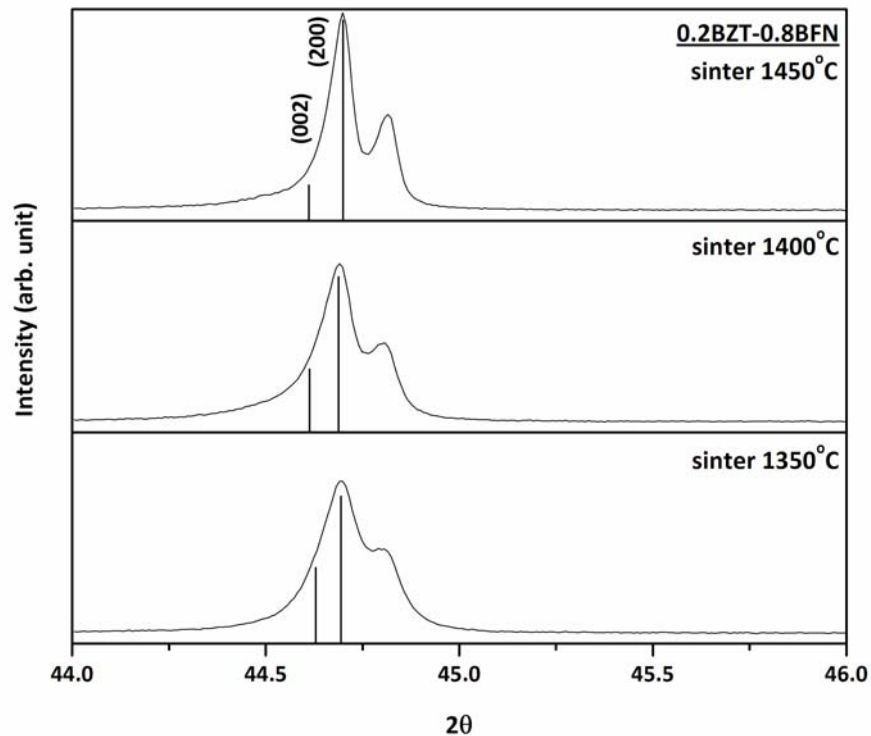
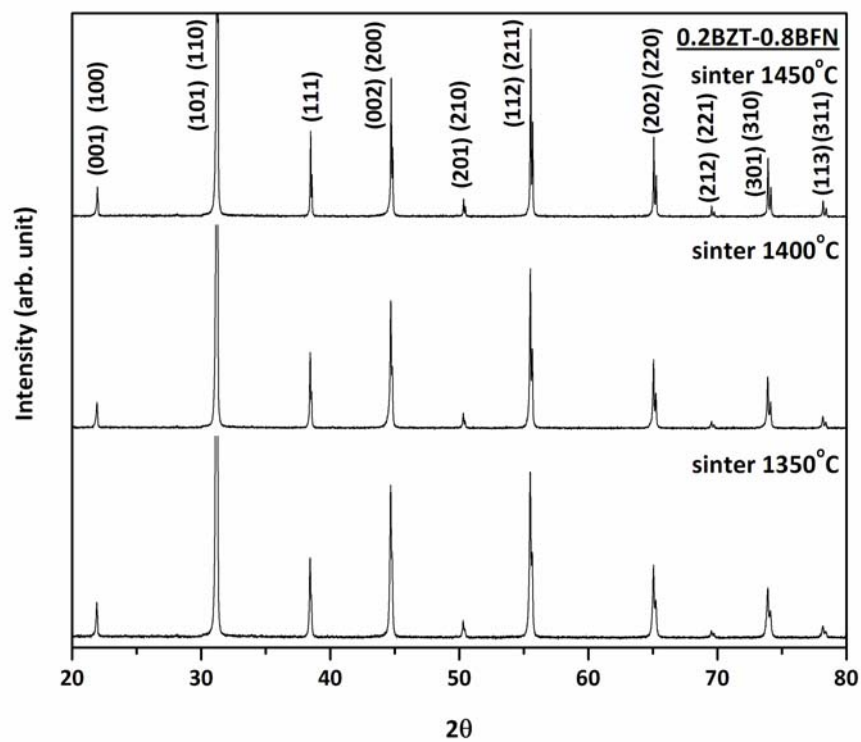
จากผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกผสมระหว่างแบเรียมเซอร์โคเนียมไททาเนต และแบเรียมไอรอนไนโอเบต ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350 1400 และ 1450 องศาเซลเซียส โดยทำการเผาแซ้ไว้ ณ อุณหภูมิการเผาซินเตอร์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าเซรามิกผสมที่ได้แสดงโครงสร้างพาราอเล็กทริกแบบคิวบิกในเซรามิกผสม $0.8\text{BZT} - 0.2\text{BFN}$ และแสดงการเปลี่ยนเฟสเป็นโครงสร้างเฟอร์โรอเล็กทริกแบบเตตระโกนอล เมื่อเพิ่มปริมาณสารแบเรียมไอรอนไนโอเบต โดยสังเกตได้จากพิกัดตำแหน่ง (200) หลังจากทำการสแกนพิกแบบละเอียดที่ตำแหน่งมุม 2θ ระหว่าง $44 - 46$ องศา และทำการหาพื้นที่ใต้กราฟในตำแหน่ง K_{α_1} และ K_{α_2} ของทุกชิ้นงาน พบว่าในตำแหน่งพิก (200) มีลักษณะแยกออกเป็น 2 พิก เมื่อเพิ่มปริมาณสารแบเรียมไอรอนไนโอเบต โดยแยกออกเป็นพิก (002) และ (200) แต่เนื่องจากมีมุมไม่แตกต่างกันมากนัก จึงทำให้ไม่สังเกตเห็นพิกที่แยกกันออกอย่างชัดเจน โดยจากอัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง $K_{\alpha_1} / K_{\alpha_2}$ ในพิกเดี่ยวที่มีค่าเท่ากับ 2.00 แต่จากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในเซรามิกผสม พบว่าอัตราส่วนของ $K_{\alpha_1} / K_{\alpha_2}$ มีค่ามากกว่า 2.00 ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ภายใต้ตำแหน่งของพิก K_{α_1} แสดงลักษณะของพิกที่ซ้อนกันอยู่ 2 พิก ดังแสดงในตารางที่ 4.6 อีกทั้งยังพบว่าขนาดแลตทิซพารามิเตอร์มีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของแบเรียมไอรอนไนโอเบต โดยสังเกตได้จากตำแหน่งของพิกทุกพิกเลื่อนไปด้านที่มุม 2θ น้อยกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sanjeeb Kumar Rout (2006) ที่ทำการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกและการเปลี่ยนเฟสของสารพื้นฐานเพอโรฟสไกต์ $\text{BaO}_2\text{-TiO}_2\text{-ZrO}_2$ ที่กล่าวถึงการเลื่อนของพิกอันเกิดจากการเข้าแทนที่ของธาตุที่มีอะตอมไม่เท่ากันในตำแหน่งต่างๆ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการที่พิกมีลักษณะเลื่อนไปด้านที่มุมน้อยกว่า สืบเนื่องมาจากธาตุที่มีอะตอมใหญ่กว่าเข้าแทนที่ในตำแหน่งของธาตุที่มีอะตอมเล็กกว่า จึงส่งผลให้แลตทิซพารามิเตอร์เพิ่มขึ้น

จากผลการคำนวณอัตราส่วน c/a พบว่ามีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0000 ถึง 1.0018 อีกทั้งยังพบว่าแลตทิซพารามิเตอร์มีค่ามากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณแบเรียมไอรอนไนโอเบต โดยแลตทิซพารามิเตอร์ (a) มีค่าประมาณ 4.030 – 4.052 อังสตรอม และแลตทิซพารามิเตอร์ (c) มีค่าประมาณ 4.030 – 4.059 อังสตรอม ดังแสดงในตารางที่ 4.6

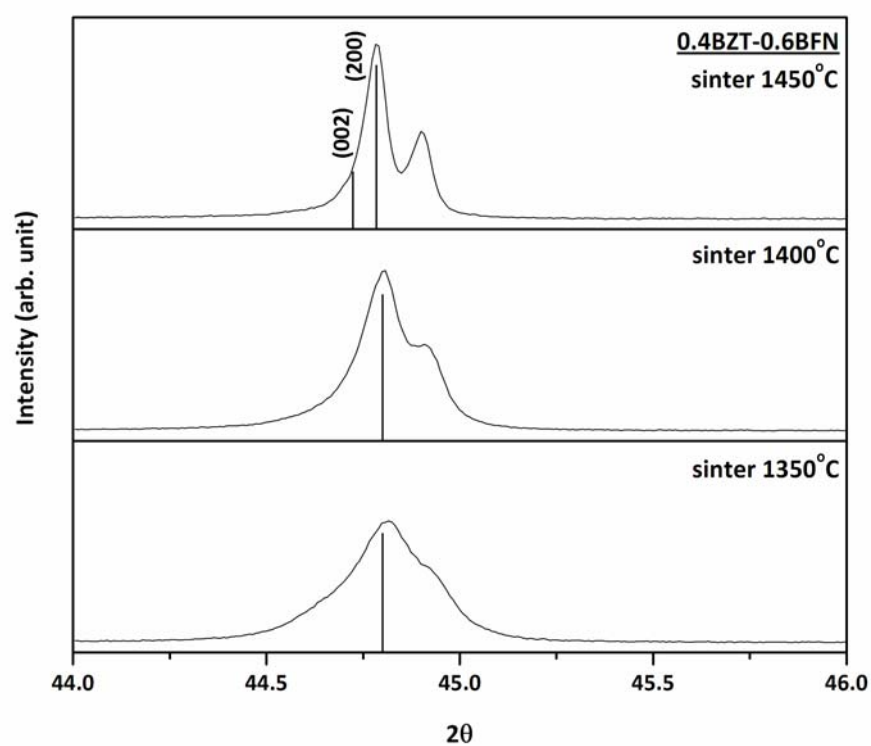
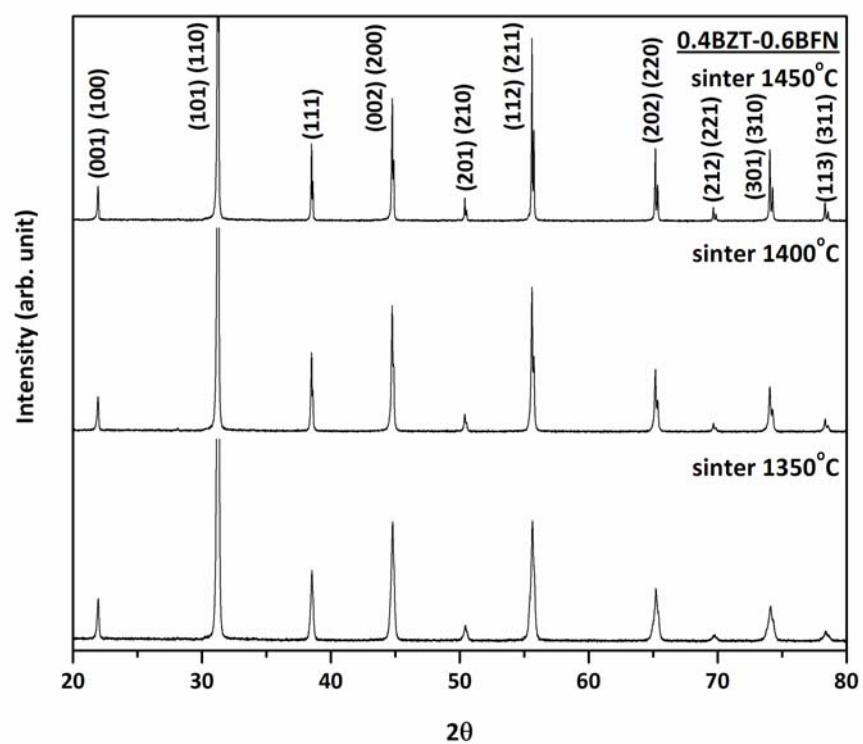
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าแลตทิซพารามิเตอร์ ขนาดของผลึก และค่าความเครียดของเซรามิก

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิ เผาซินเตอร์ (องศาเซลเซียส)	แลตทิซพารามิเตอร์ (อังสตรอม)	อัตราส่วน แลตทิซพารามิเตอร์ (c/a)	อัตราส่วน พื้นที่ได้กราฟ ($K_{\alpha_1} / K_{\alpha_2}$)
0.2BZT - 0.8BFN	1350	a = 4.052, c = 4.057	1.0014	2.910
	1400	a = 4.052, c = 4.059	1.0016	3.263
	1450	a = 4.052, c = 4.059	1.0018	2.498
0.4BZT - 0.6BFN	1350	a = 4.044, c = 4.044	1.0000	2.000
	1400	a = 4.044, c = 4.044	1.0000	2.000
	1450	a = 4.044, c = 4.049	1.0013	2.485
0.6BZT - 0.4BFN	1350	a = 4.036, c = 4.036	1.0000	2.000
	1400	a = 4.037, c = 4.037	1.0000	2.000
	1450	a = 4.037, c = 4.042	1.0013	3.629
0.8BZT - 0.2BFN	1350	a = 4.030, c = 4.030	1.0000	2.000
	1400	a = 4.030, c = 4.030	1.0000	2.000
	1450	a = 4.031, c = 4.031	1.0000	2.000

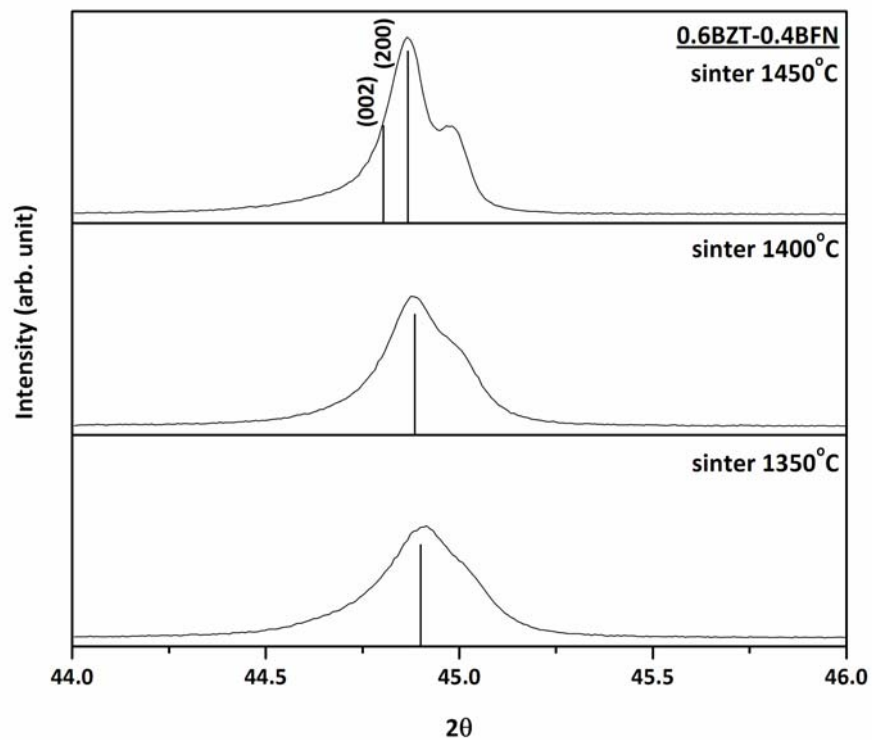
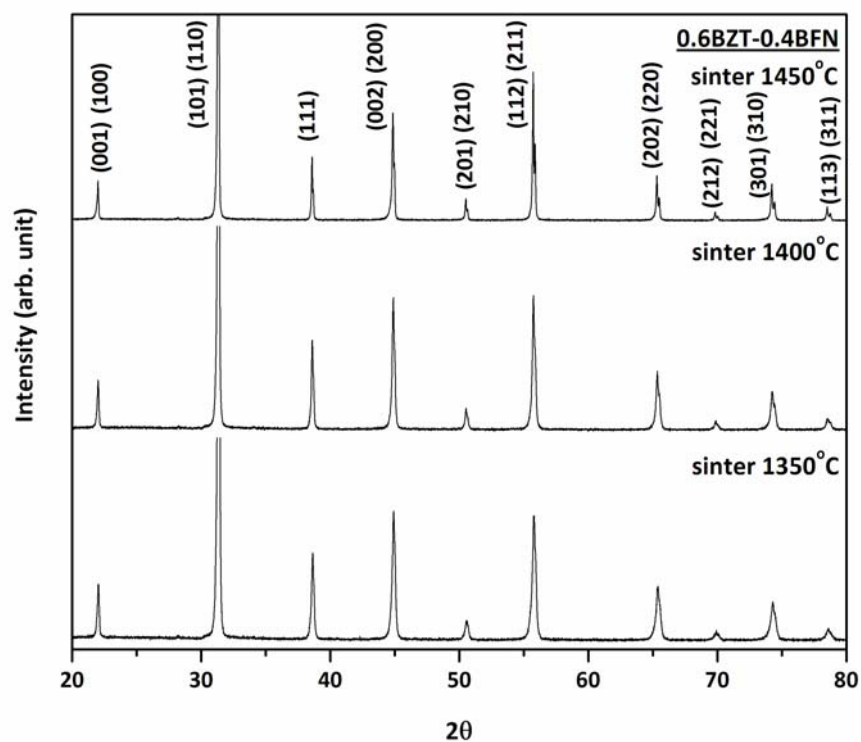
หมายเหตุ. อัตราส่วนพื้นที่ได้กราฟระหว่าง K_{α_1} และ K_{α_2} ในตำแหน่งพิกัดเดียวกันมีค่าเท่ากับ 2.00



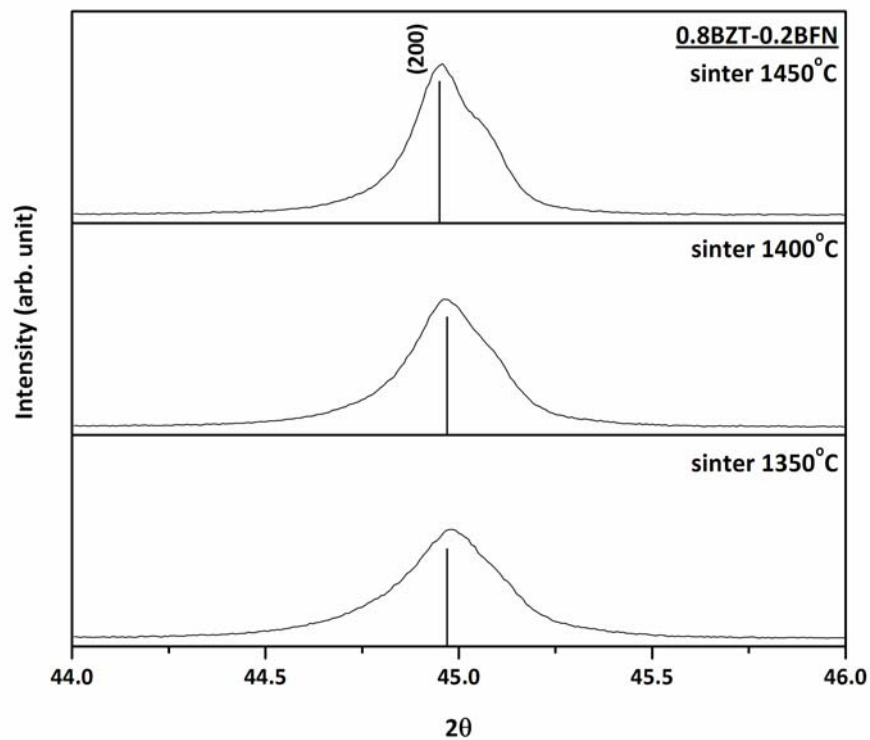
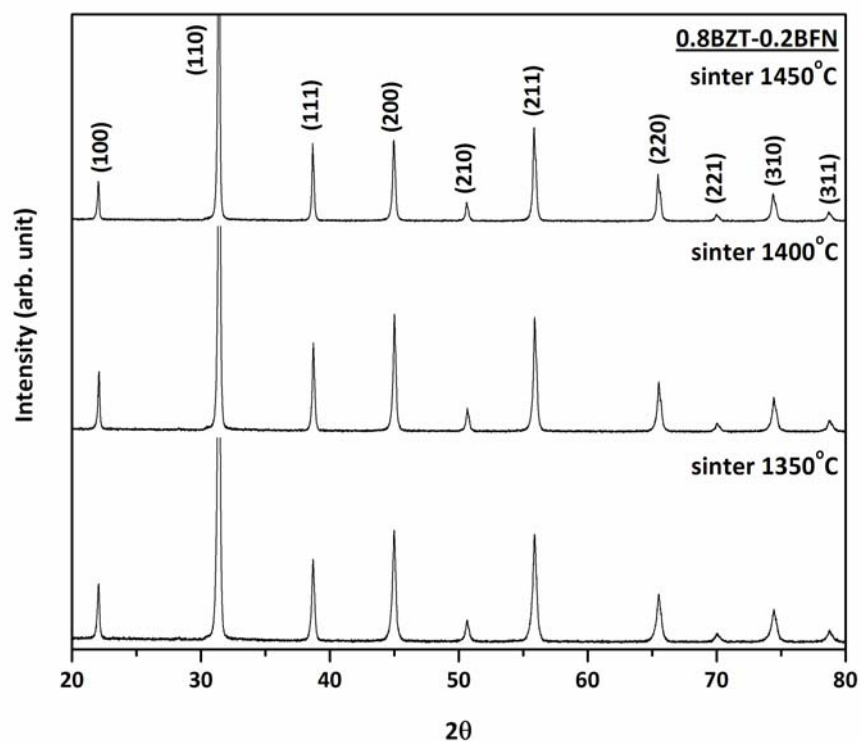
ภาพที่ 4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก 0.2BZT - 0.8BFN



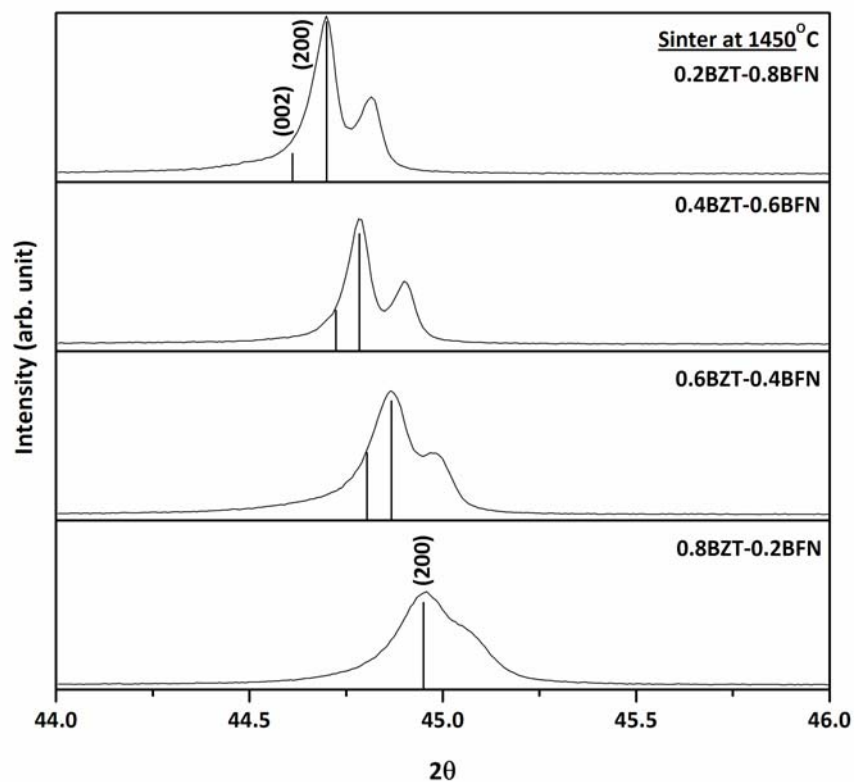
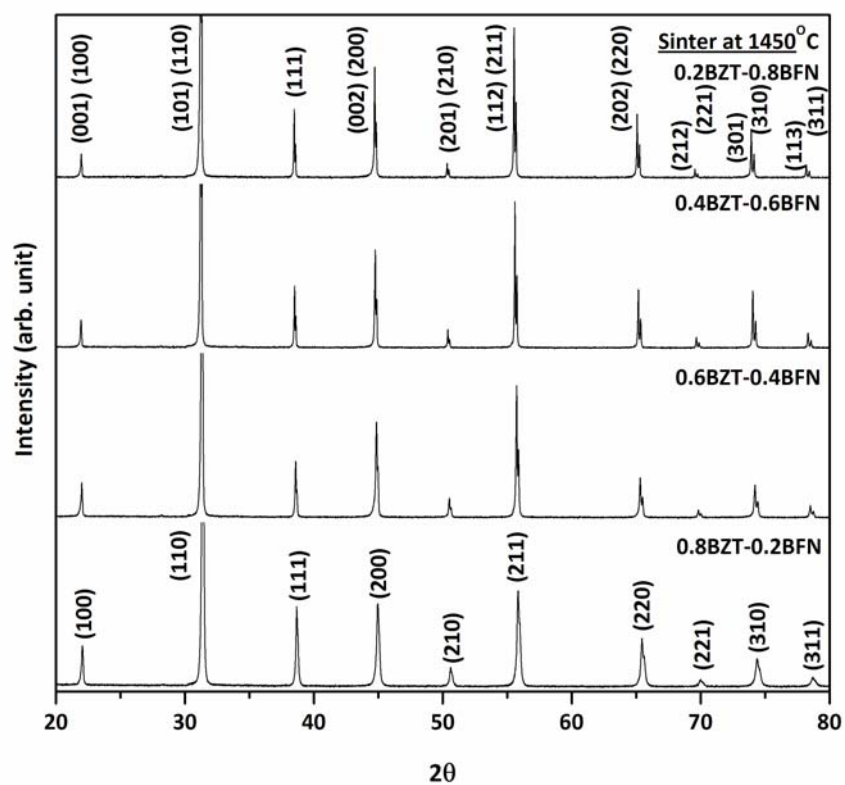
ภาพที่ 4.9 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก 0.4BZT - 0.6BFN



ภาพที่ 4.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก 0.6BZT - 0.4BFN



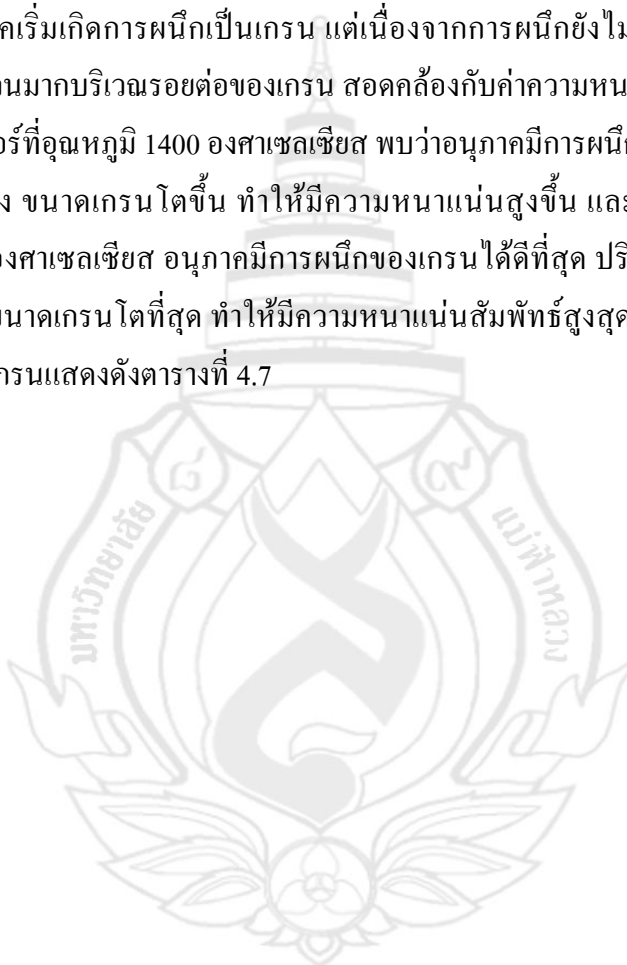
ภาพที่ 4.11 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก 0.8BZT - 0.2BFN



ภาพที่ 4.12 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเซรามิกหลังการเผาขึ้นเตออร์ 1450 องศาเซลเซียส

4.3.4 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเซรามิกผสม

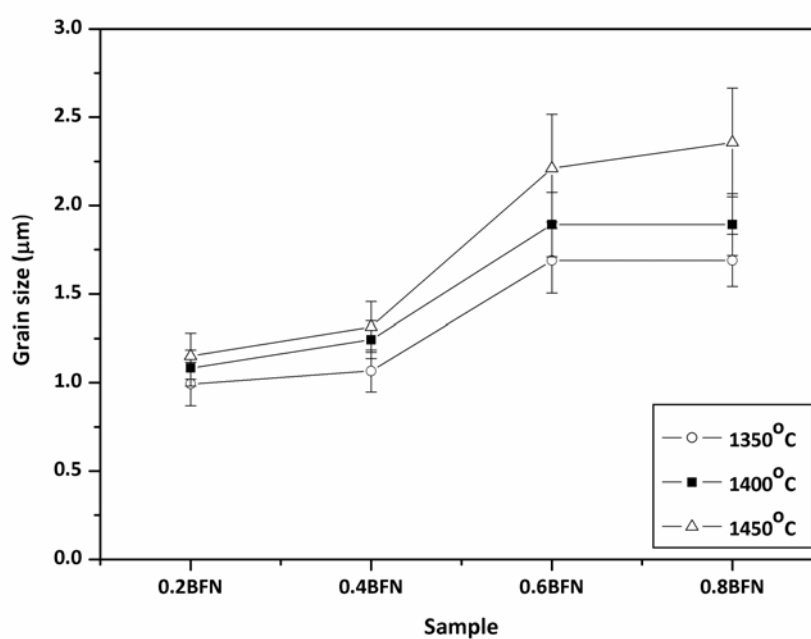
จากผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเซรามิกผสมระหว่างแบเรียมไททาเนียมเซอร์โคเนต และแบเรียมไอรอนไนโอเบตหลังการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350 1400 และ 1450 องศาเซลเซียส โดยทำการเผาแช่ไว้ ณ อุณหภูมิการเผาซินเตอร์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้ชิ้นงานเซรามิกเกิดการผุกร่อนเป็นเกรนได้ดีขึ้น และยังส่งผลให้ขนาดเกรนใหญ่ขึ้น ปริมาณรูพรุนลดลงในทุกอัตราส่วนผสม โดยจากการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าอนุภาคเริ่มเกิดการผุกร่อนเป็นเกรน แต่เนื่องจากการผุกร่อนยังไม่สมบูรณ์จึงพบว่ามีรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากบริเวณรอยต่อของเกรน สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ต่ำสุด เมื่อทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส พบว่าอนุภาคมีการผุกร่อนของเกรนมากขึ้น ปริมาณรูพรุนลดน้อยลง ขนาดเกรนโตขึ้น ทำให้มีความหนาแน่นสูงขึ้น และเมื่อทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส อนุภาคมีการผุกร่อนของเกรนได้ดีที่สุด ปริมาณรูพรุนลดน้อยลงมาก และส่งผลให้มีขนาดเกรนโตที่สุด ทำให้มีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุด แสดงดังภาพที่ 4.14 ถึง 4.17 ขนาดของเกรนแสดงดังตารางที่ 4.7



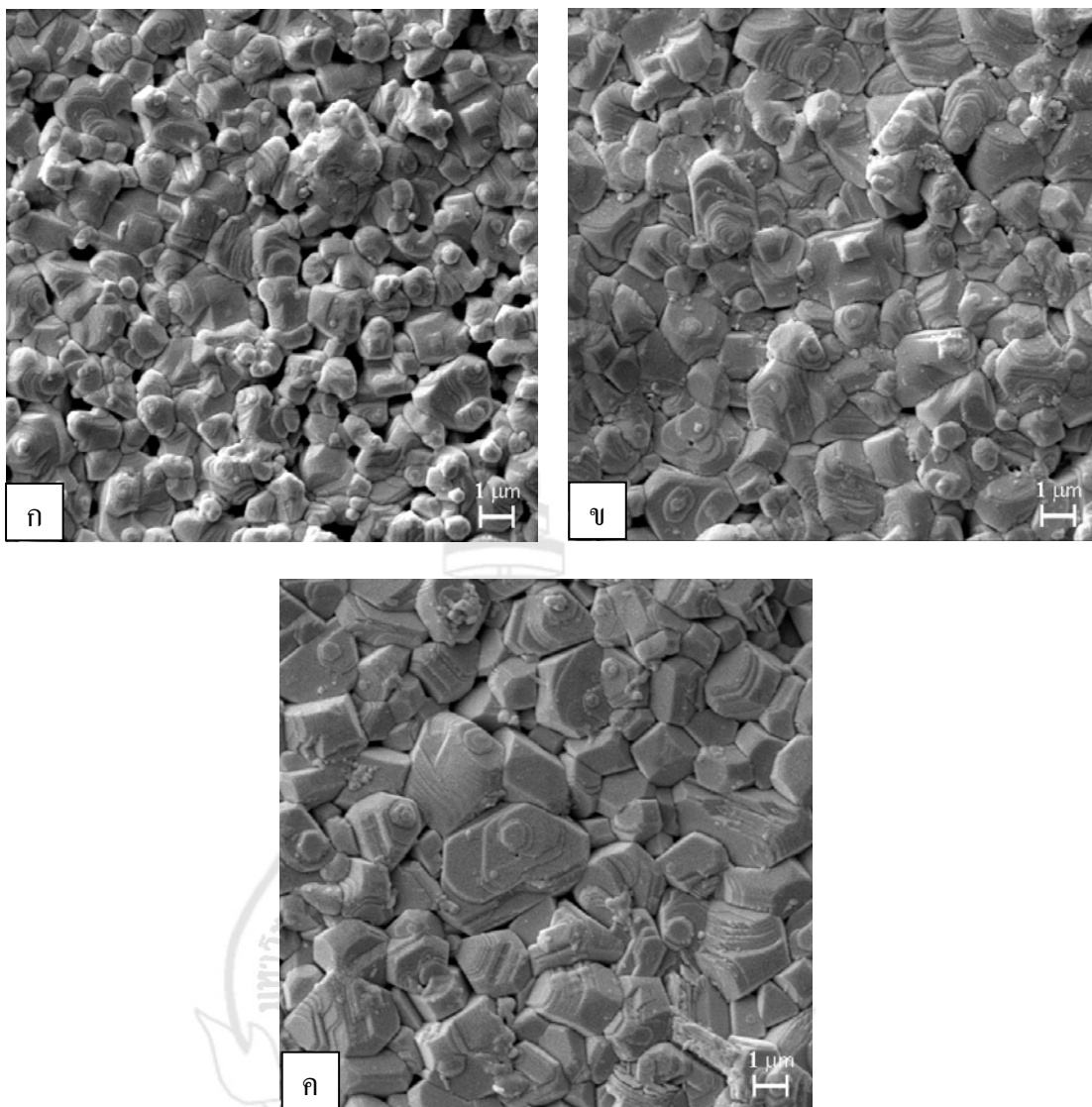
ตารางที่ 4.7 แสดงขนาดเกรนของเซรามิก

รหัสตัวอย่าง	ขนาดเกรน (ไมโครเมตร)		
	1350 องศาเซลเซียส	1400 องศาเซลเซียส	1450 องศาเซลเซียส
0.2BZT - 0.8BFN	1.69	1.89	2.36
0.4BZT - 0.6BFN	1.69	1.89	2.21
0.6BZT - 0.4BFN	1.07	1.24	1.32
0.8BZT - 0.2BFN	0.99	1.08	1.15

หมายเหตุ. * การคำนวณหาขนาดเกรนโดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



ภาพที่ 4.13 แสดงขนาดเกรนของเซรามิก

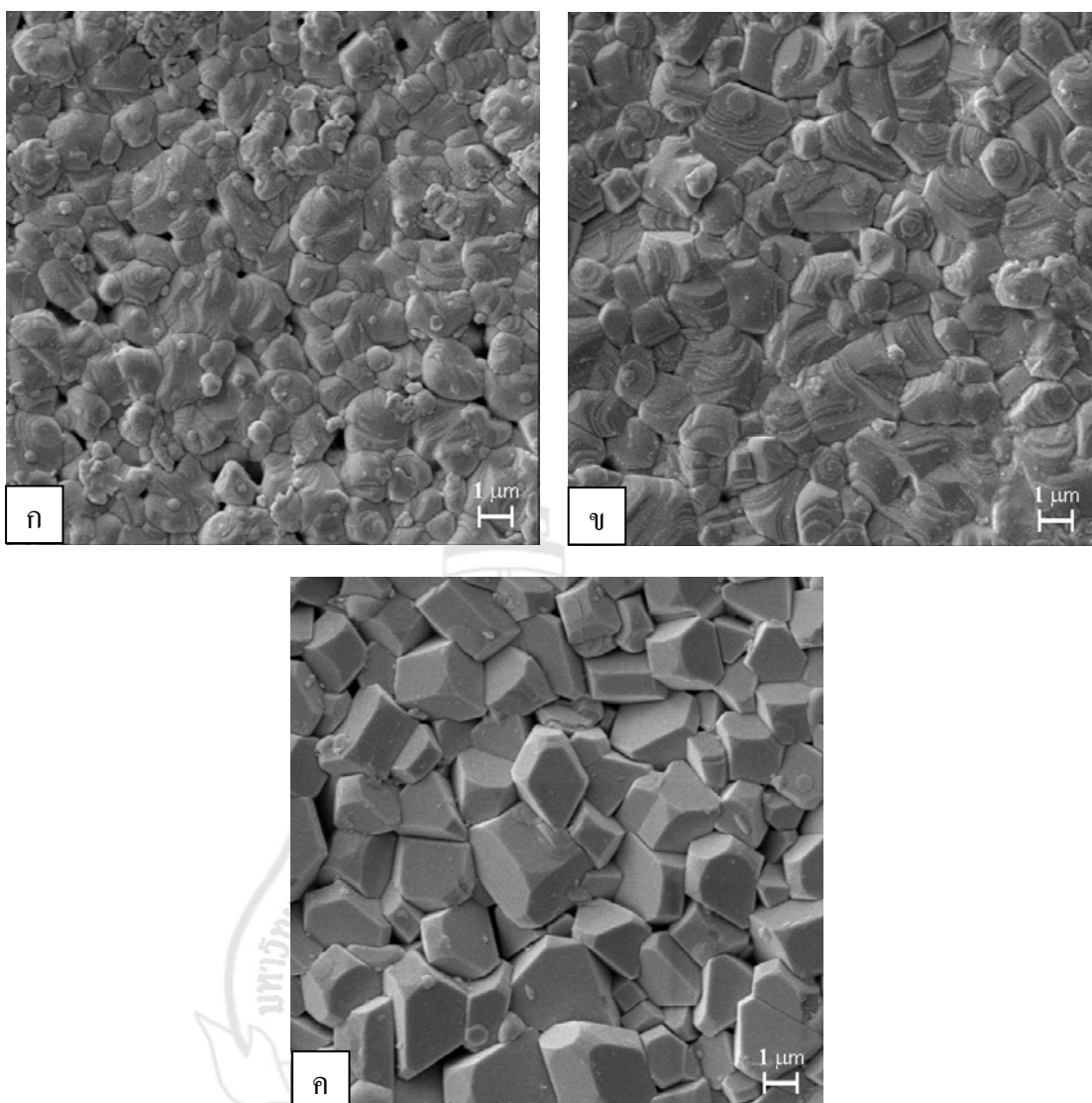


ก. 1350 องศาเซลเซียส

ข. 1400 องศาเซลเซียส

ค. 1450 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.14 แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของเซรามิก 0.2BZT-0.8BFN

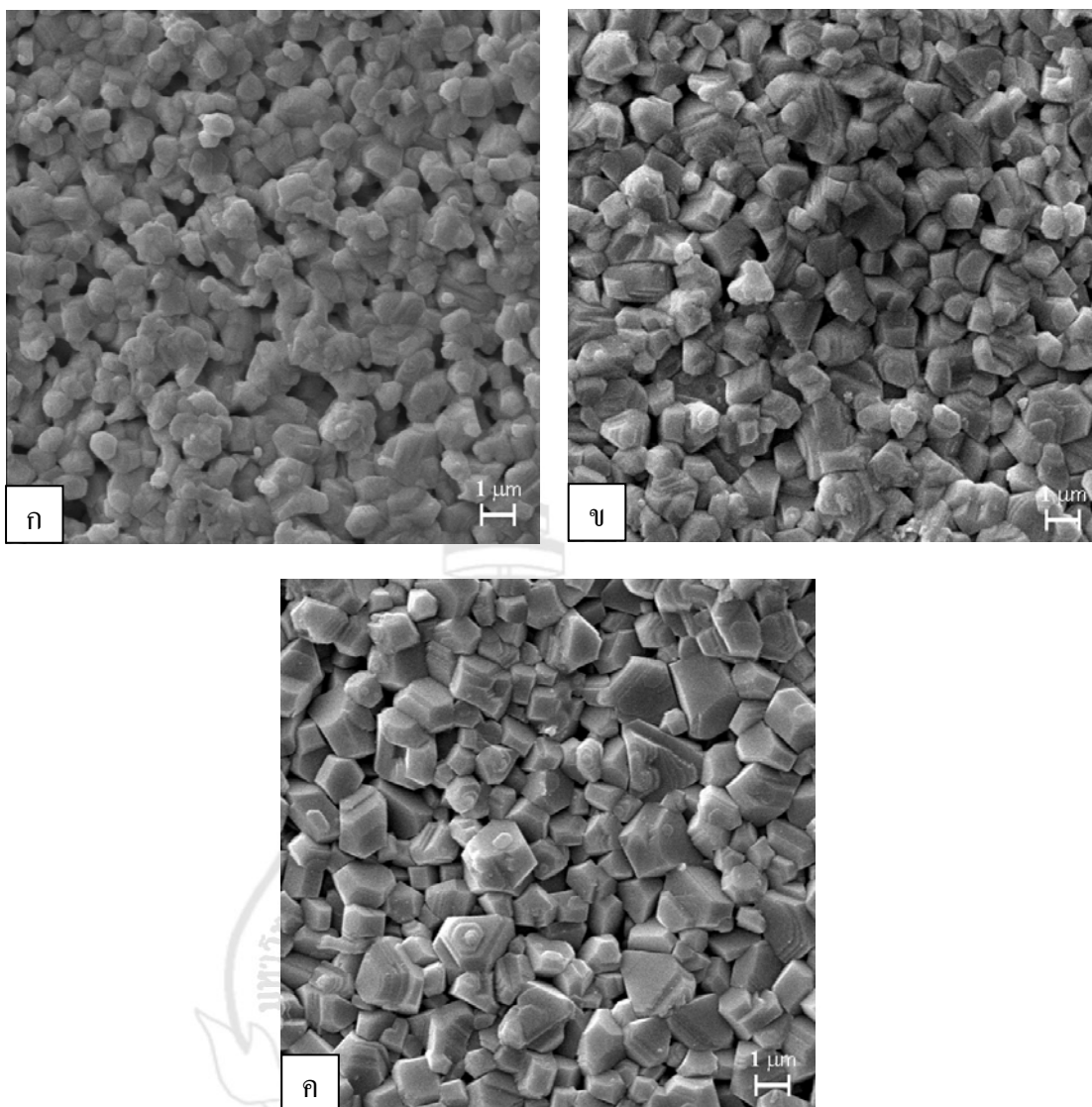


ก. 1350 องศาเซลเซียส

ข. 1400 องศาเซลเซียส

ค. 1450 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.15 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของเซรามิก 0.4BZT-0.6BFN

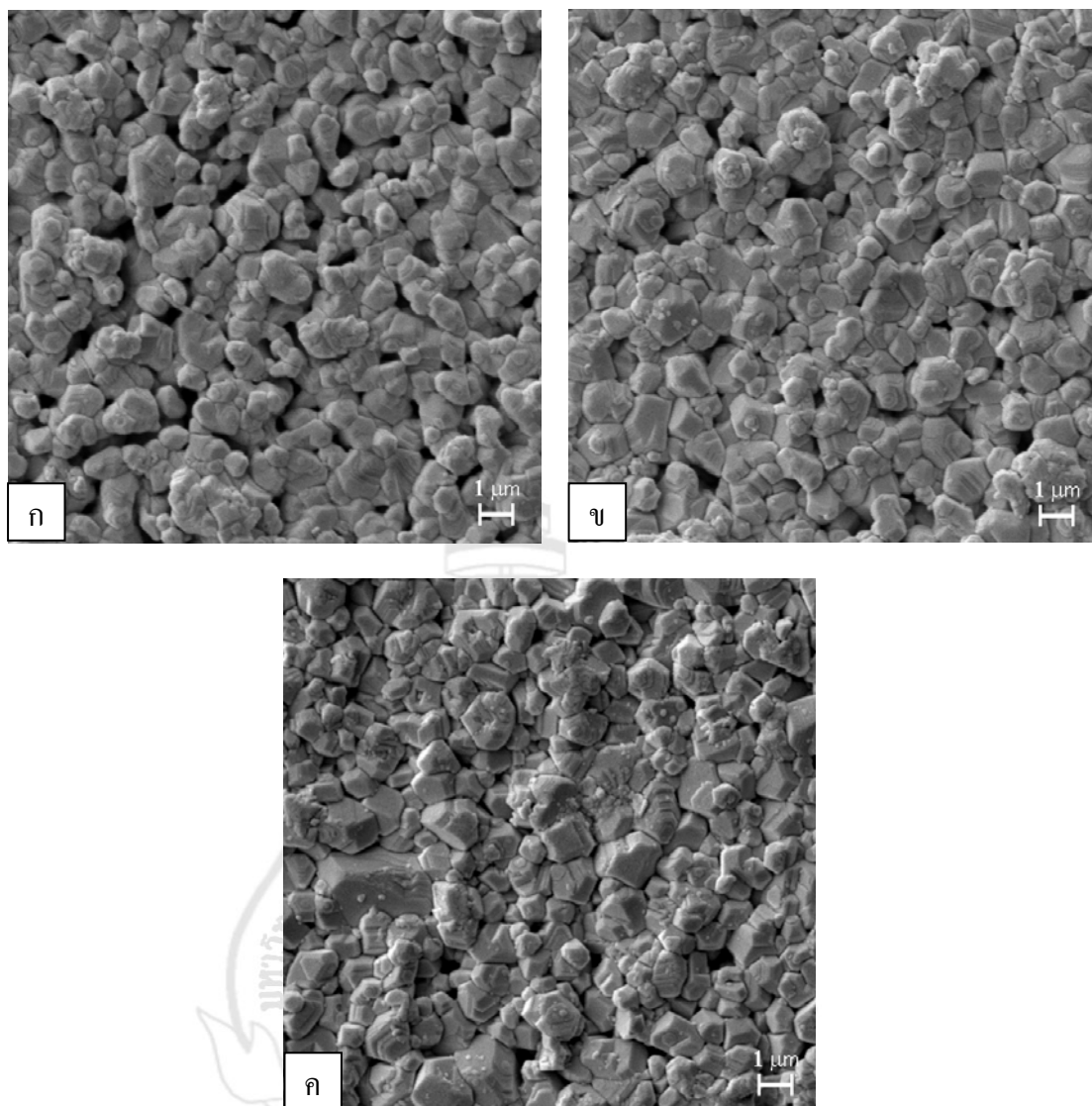


ก. 1350 องศาเซลเซียส

ข. 1400 องศาเซลเซียส

ค. 1450 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.16 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของเซรามิก 0.6BZT-0.4BFN



ก. 1350 องศาเซลเซียส

ข. 1400 องศาเซลเซียส

ค. 1450 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.17 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของเซรามิก 0.8BZT-0.2BFN

4.3.5 ผลการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิกผสม

จากผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของเซรามิกผสมระหว่างแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเตและแบเรียมไอรอนไนโอเบต พบว่าเมื่อปริมาณสารผสมแบเรียมไอรอนไนโอเบตเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิการเผาขึ้นเตอรืสูงขึ้น ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้น ในช่วงอุณหภูมิกว้าง ส่วนค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารแบเรียมไอรอนไนโอเบต แต่จะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาขึ้นเตอรื เนื่องจากความหนาแน่นที่มากขึ้นและปริมาณรูพรุนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kyeong Ho Cho และ Hee Young Lee (1995) ที่ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณรูพรุนต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกแบเรียมไททานเต โดยพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเมื่อปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าต่ำกว่า 2.00 จากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 400 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9

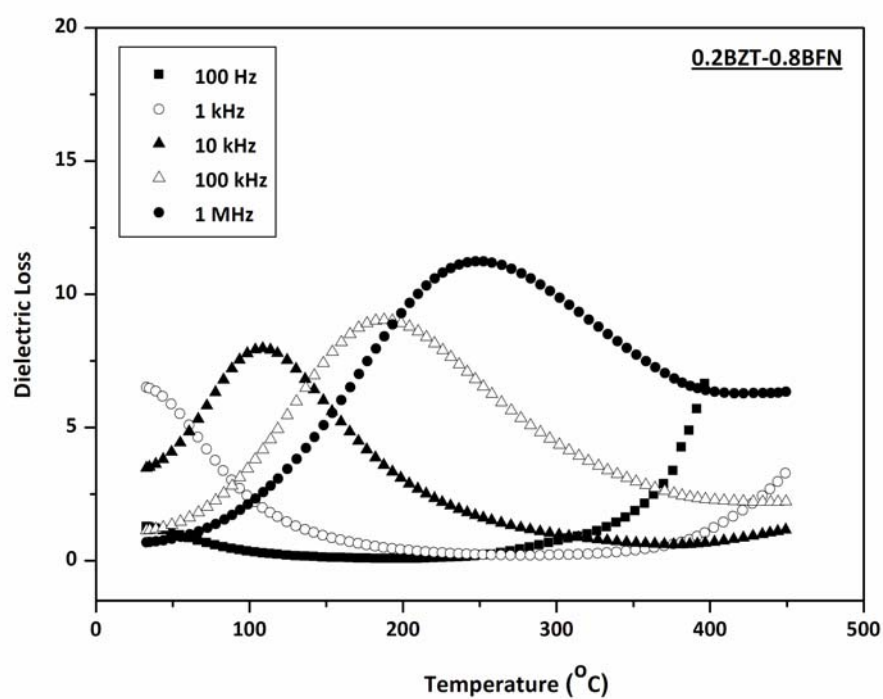
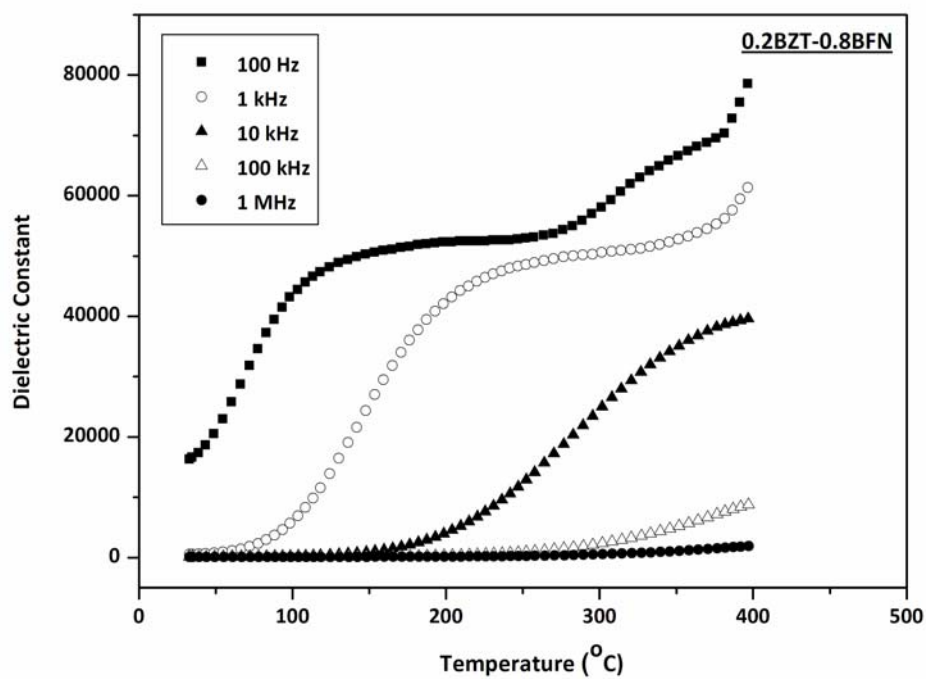
สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าลดลงในทุกชิ้นงานเมื่อเพิ่มความถี่ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 4.8 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

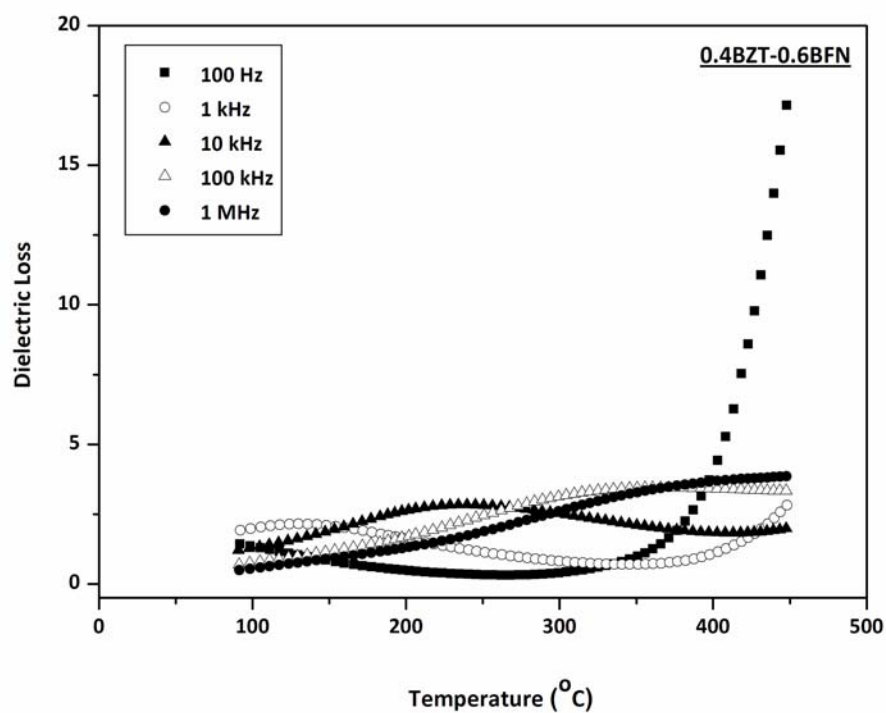
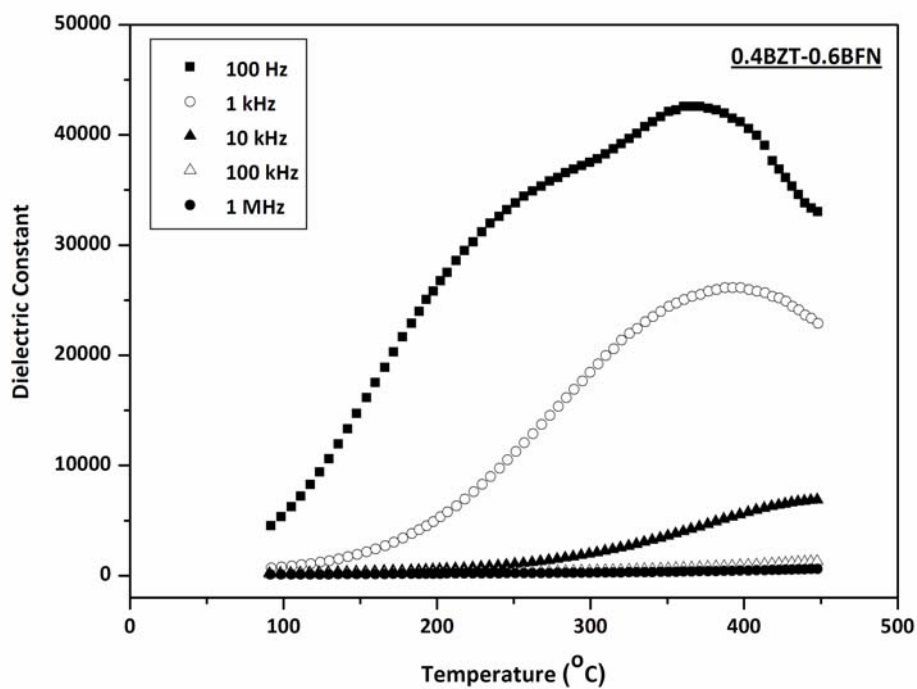
	Sample sintered at	Capacitance (F)	Loss	ϵ_r
0.2BZT - 0.8BFN	1350°C	8.14E-10	0.74	1048.53
	1400°C	1.36E-9	1.62	2050.32
	1450°C	1.62E-8	0.92	25159.71
0.4BZT - 0.6BFN	1350°C	4.69E-10	0.64	544.98
	1400°C	5.18E-10	0.81	666.49
	1450°C	1.30E-9	2.08	1997.88
0.6BZT - 0.4BFN	1350°C	2.99E-10	0.57	278.30
	1400°C	2.89E-10	0.62	363.54
	1450°C	6.06E-10	0.96	783.27
0.8BZT - 0.2BFN	1350°C	2.22E-10	0.14	228.82
	1400°C	2.27E-10	0.14	307.71
	1450°C	3.65E-10	0.30	536.56

ตารางที่ 4.9 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

	Sample sintered at	Capacitance (F)	Loss	ϵ_r
0.2BZT - 0.8BFN	1350°C	1.88E-8	1.30	24216.58
	1400°C	1.50E-8	1.46	22613.87
	1450°C	9.68E-8	1.18	150337.03
0.4BZT - 0.6BFN	1350°C	5.84E-9	2.28	6786.13
	1400°C	8.69E-9	1.69	11181.04
	1450°C	1.70E-8	1.08	26126.06
0.6BZT - 0.4BFN	1350°C	1.73E-9	2.18	1610.25
	1400°C	1.69E-9	2.12	2125.89
	1450°C	7.53E-9	1.31	9732.70
0.8BZT - 0.2BFN	1350°C	9.42E-10	0.78	970.93
	1400°C	1.05E-9	0.68	1423.33
	1450°C	1.30E-9	0.92	1911.03

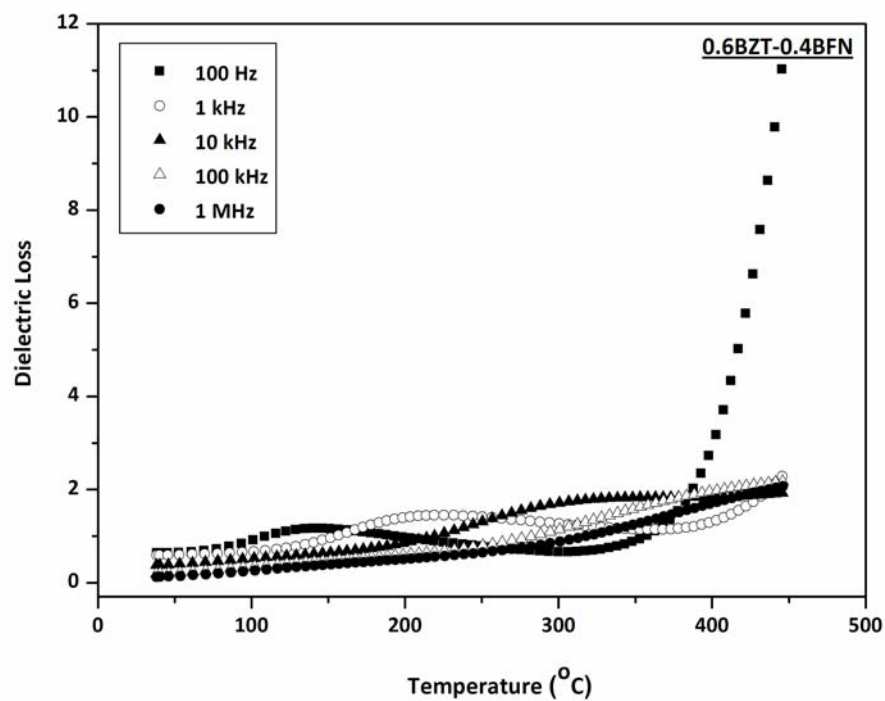
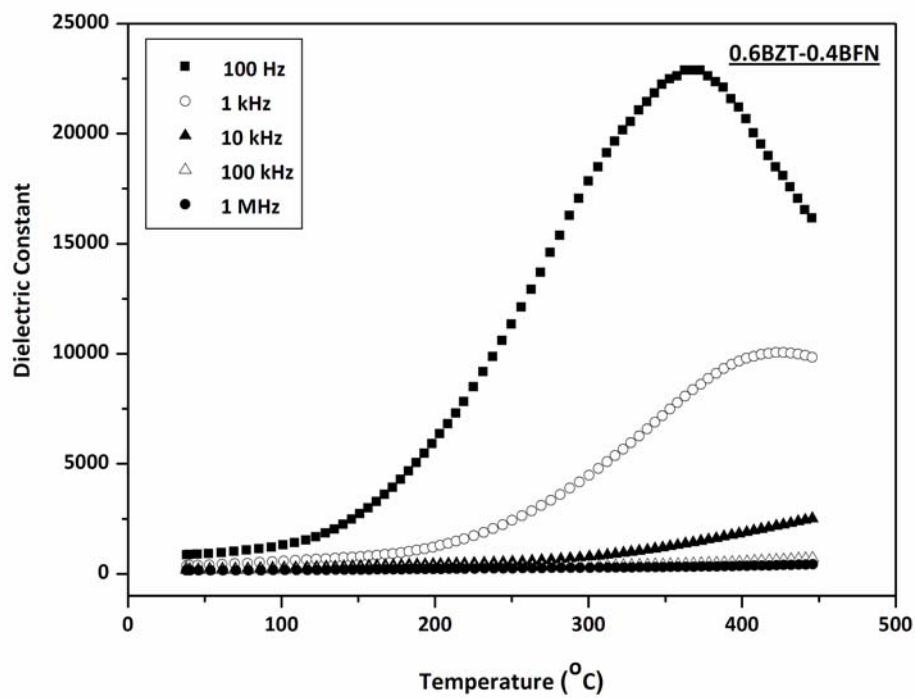


ภาพที่ 4.18 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก 0.2BZT-0.8BFN
เผาขึ้นเตอร์ 1450 องศาเซลเซียส



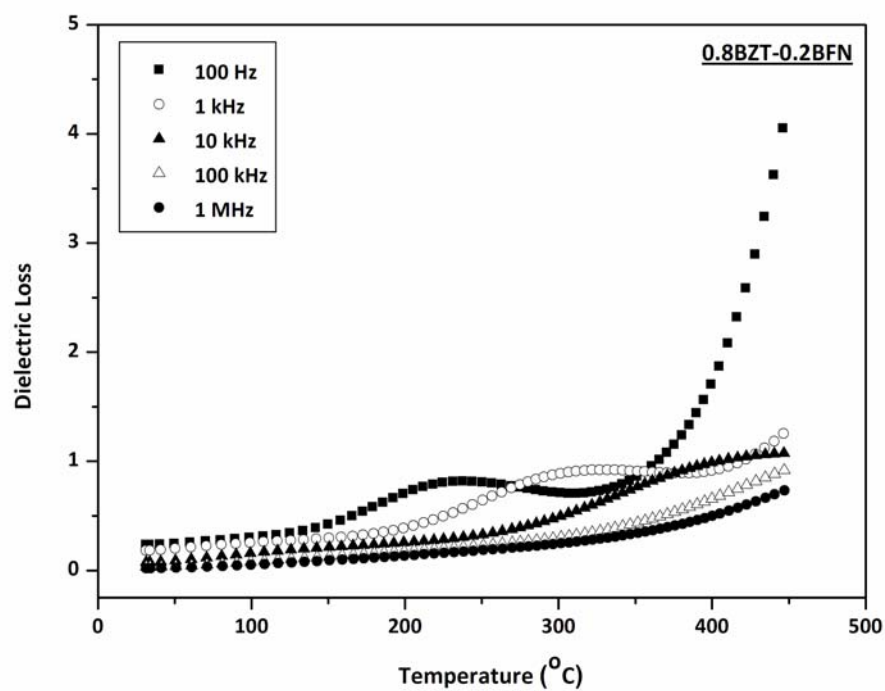
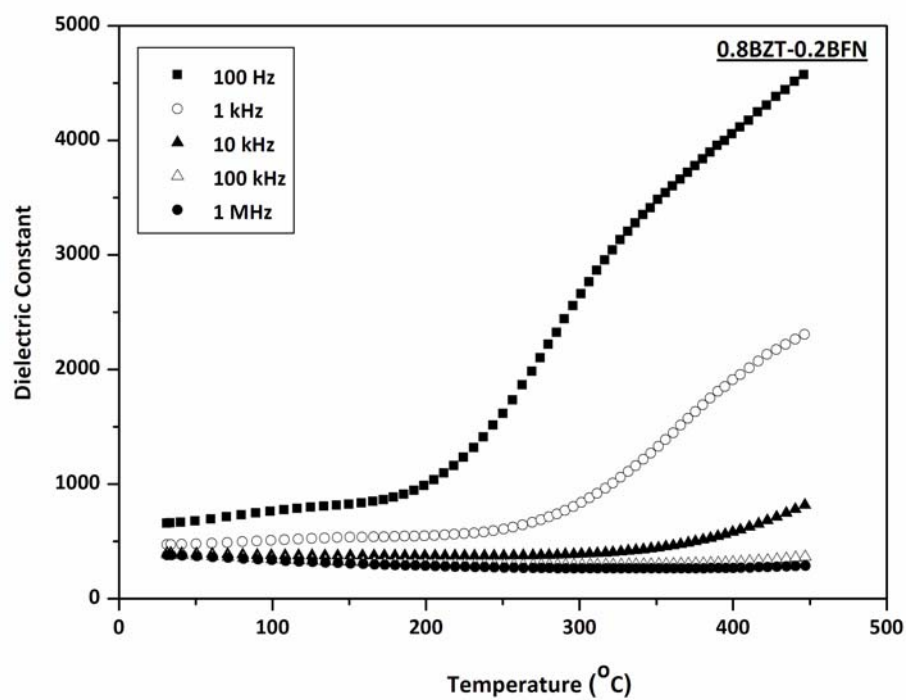
ภาพที่ 4.19 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก 0.4BZT-0.6BFN

เฟซซินเตอร์ 1450 องศาเซลเซียส



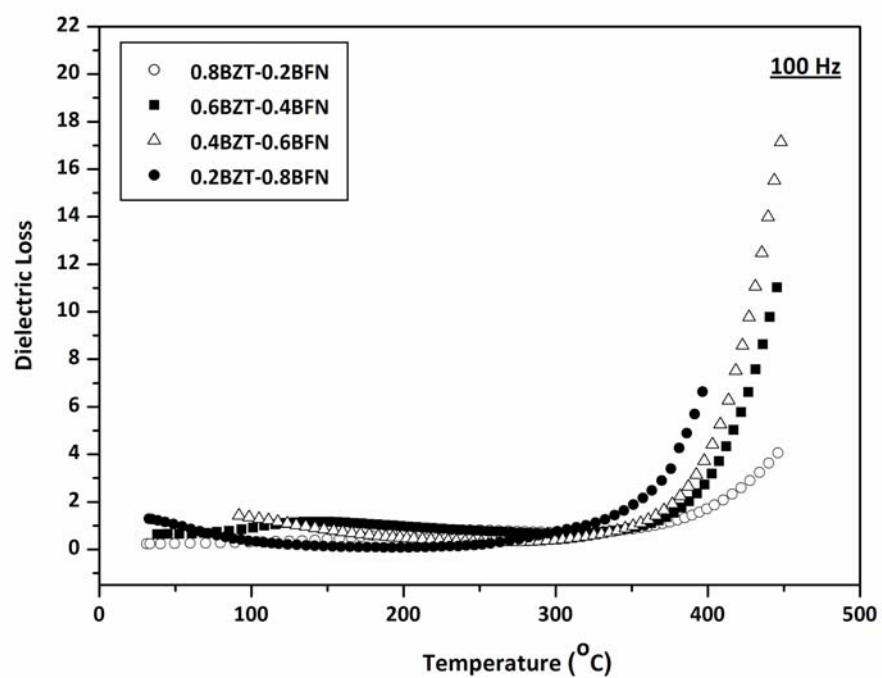
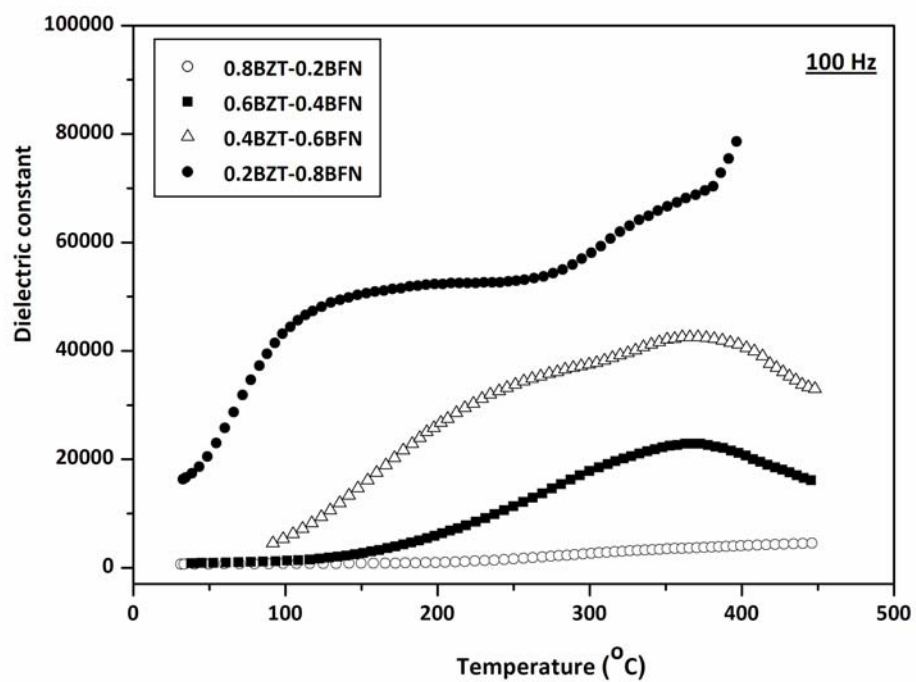
ภาพที่ 4.20 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก 0.6BZT-0.4BFN

เฟาซินเตอร์ 1450 องศาเซลเซียส

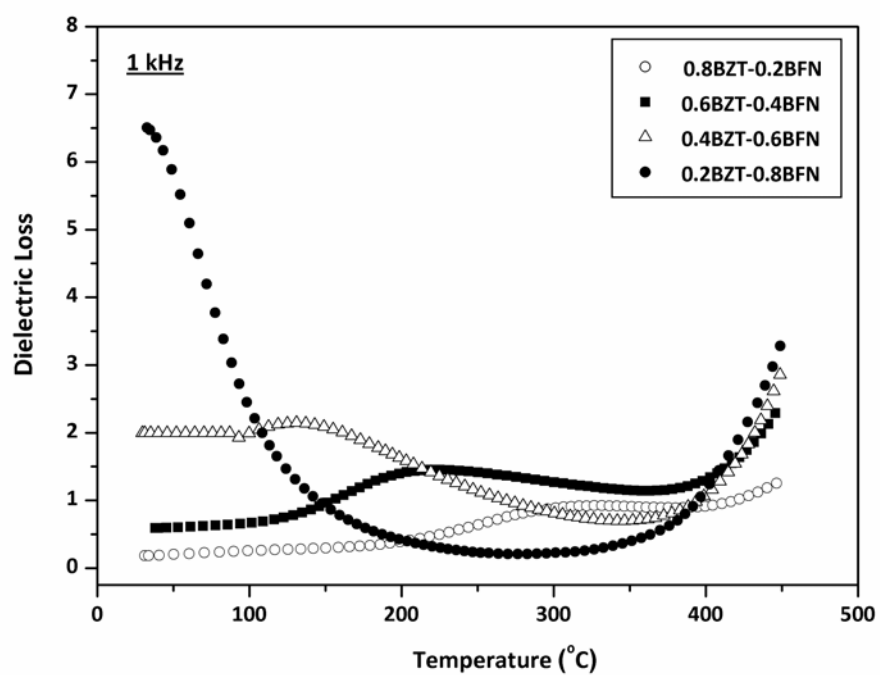
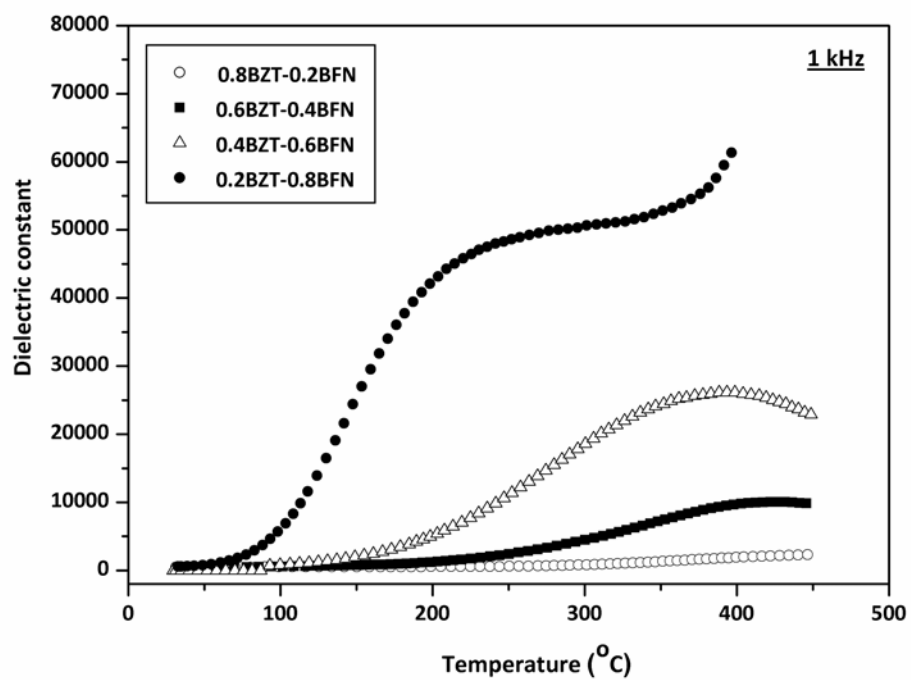


ภาพที่ 4.21 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก 0.8BZT-0.2BFN

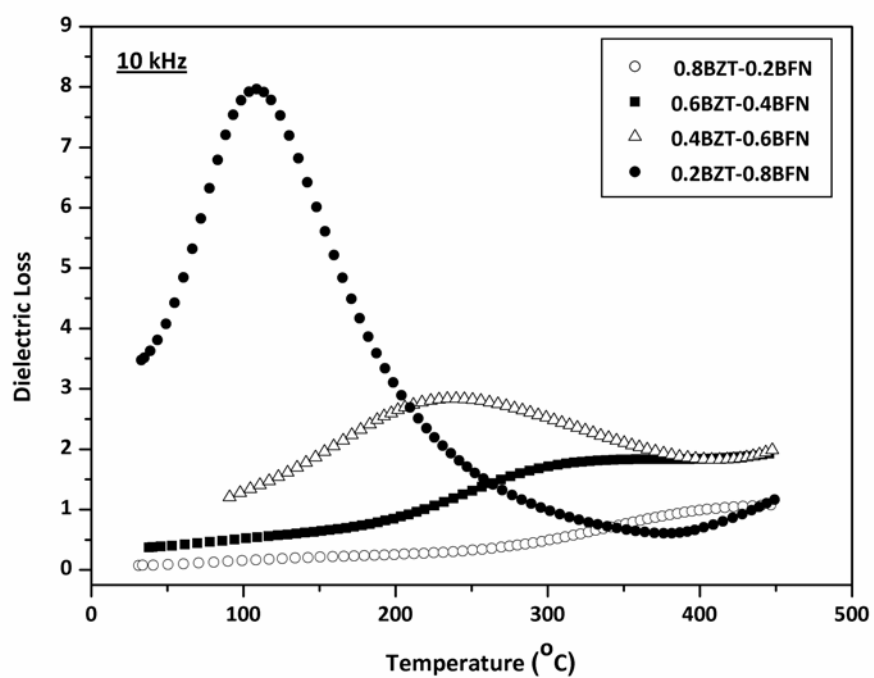
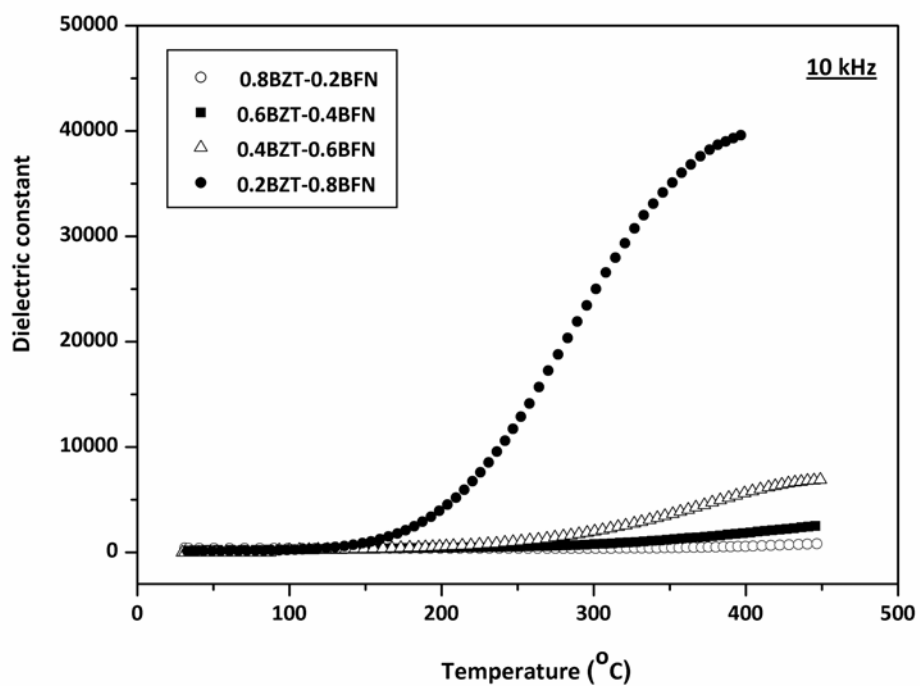
เฟาซินเตอร์ 1450 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.22 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก ที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์



ภาพที่ 4.23 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 4.24 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกของเซรามิก ที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์

4.3.6 ผลการศึกษาความต้านทานของเซรามิกผสม

จากผลการวัดความต้านทานบริเวณขอบเกรน และบริเวณภายในเกรนที่อุณหภูมิห้อง 100 200 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่าสภาพความต้านทานทั้งบริเวณขอบเกรนและบริเวณภายในเกรน มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาซินเตอร์และปริมาณส่วนผสมของสารแบเรียมไอรอนไนโอเบต ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิการเผาซินเตอร์และปริมาณส่วนผสมของสารแบเรียมไอรอนไนโอเบตนี้ทำให้เซรามิกมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและปริมาณรูพรุนลดลง จึงส่งผลให้สภาพความต้านทานมีค่าลดลงในทุกชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.10 อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kyeong Ho Cho และ Hee Young Lee (1995) ที่ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณรูพรุนต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกแบเรียมไททาเนต โดยพบว่าสภาพความต้านทานของเซรามิกทั้งขอบเกรนและภายในเกรนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น

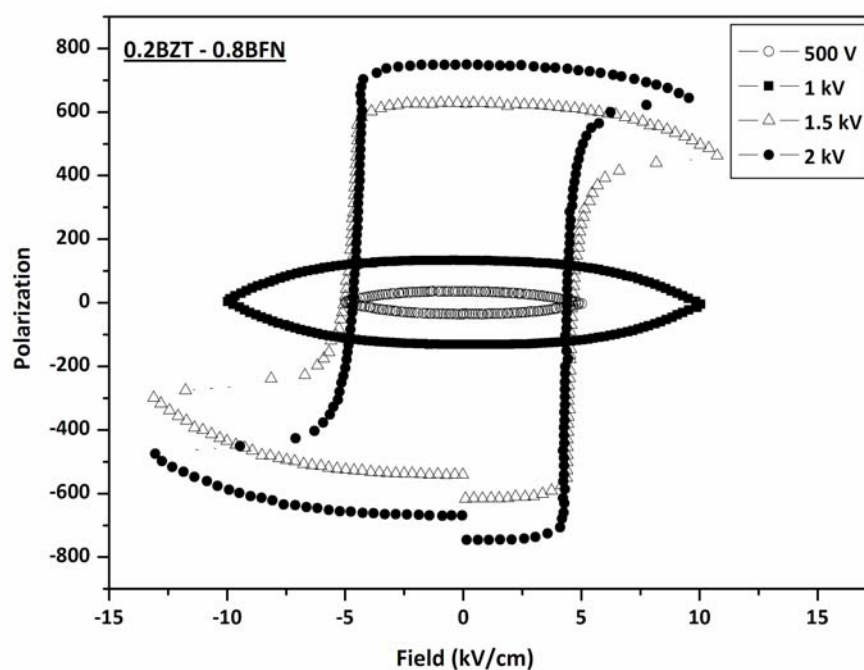


ตารางที่ 4.10 แสดงค่าสภาพความต้านทานของเซรามิก

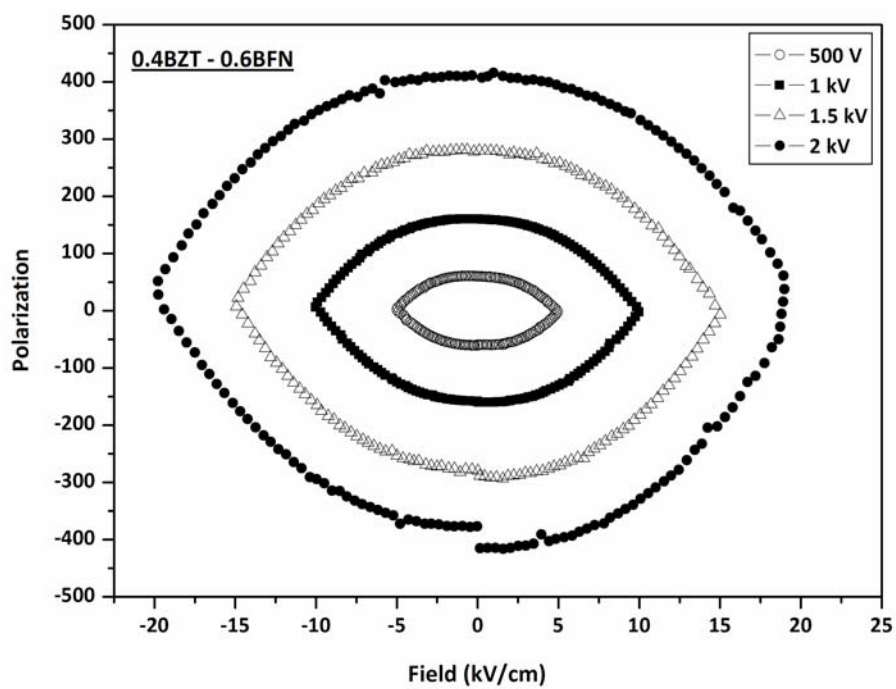
รหัสตัวอย่าง	อุณหภูมิ ซินเตอร์ °C	สภาพความต้านทาน (Ω m)							
		25 °C		100 °C		200 °C		300 °C	
		R g	R gb	R g	R gb	R g	R gb	R g	R gb
0.2BZT - 0.8BFN	1350	996.86	22606.73	867.94	3516.47	158.54	3396.48	64.88	266.39
	1400	802.95	4823.96	519.49	905.19	102.21	522.94	31.06	256.09
	1450	445.77	596.93	87.16	85.93	12.10	194.96	0.26	807.06
0.4BZT - 0.6BFN	1350	2508.72	35838.65	2163.71	9787.63	839.19	4454.96	274.82	3896.94
	1400	1767.11	19704.81	1034.70	7250.90	389.64	2287.62	91.61	937.24
	1450	829.69	2097.91	317.22	1087.84	97.70	224.56	40.16	164.17
0.6BZT - 0.4BFN	1350	3835.17	49270.61	3380.35	84107.53	1757.98	6745.72	663.27	5551.57
	1400	1879.41	31830.44	1394.95	26270.14	1174.67	3692.81	369.53	1243.37
	1450	1246.58	5361.71	538.39	4940.10	341.35	2182.98	173.74	308.48
0.8BZT - 0.2BFN	1350	4540.11	169239.30	3417.50	768631.00	2238.15	117076.20	1550.65	6460.00
	1400	2891.13	30066.36	1900.00	26077.19	1440.25	16649.37	640.38	4161.37
	1450	2331.54	18839.41	1270.34	16297.33	716.76	13156.52	460.71	3803.10

4.3.7 ผลการศึกษาวงฮิสเทอรีซิสของเซรามิกผสม

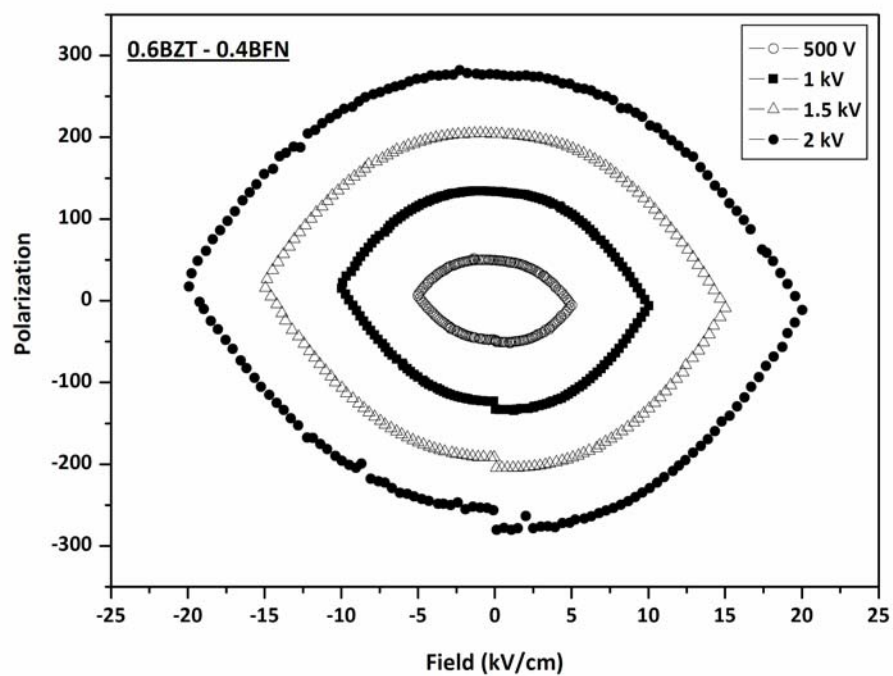
จากผลการวัดค่าโพลาไรเซชันเทียบกับสนามไฟฟ้า โดยแสดงเป็นวงฮิสเทอรีซิส สำหรับเซรามิกผสมแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนต และแบเรียมไอรอนไนโอเบตที่ผ่านการเผาซินเตอร์ ณ อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส ด้วยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 250 โวลต์ ถึง 2 กิโลโวลต์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เซรามิกที่ผลิตจากเงื่อนไขดังกล่าว แสดงสมบัติความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกในเซรามิกผสม 0.2BZT - 0.8BFN ดังภาพที่ 4.25 ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคที่แสดงการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบเตตระโกนอลที่เซรามิกผสมดังกล่าว



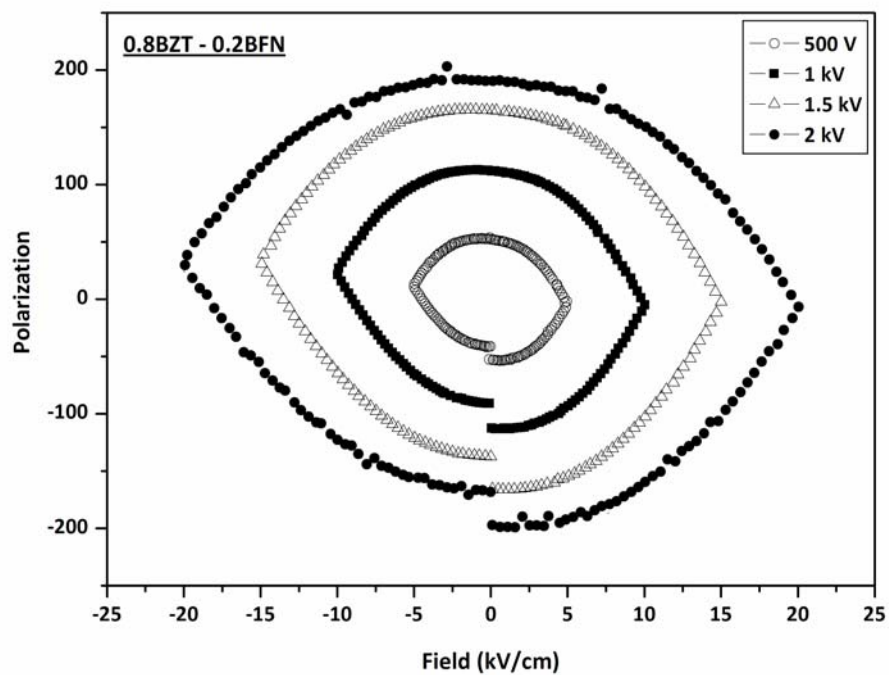
ภาพที่ 4.25 แสดงวงฮิสเทอรีซิสของเซรามิกผสม 0.2BZT - 0.8BFN



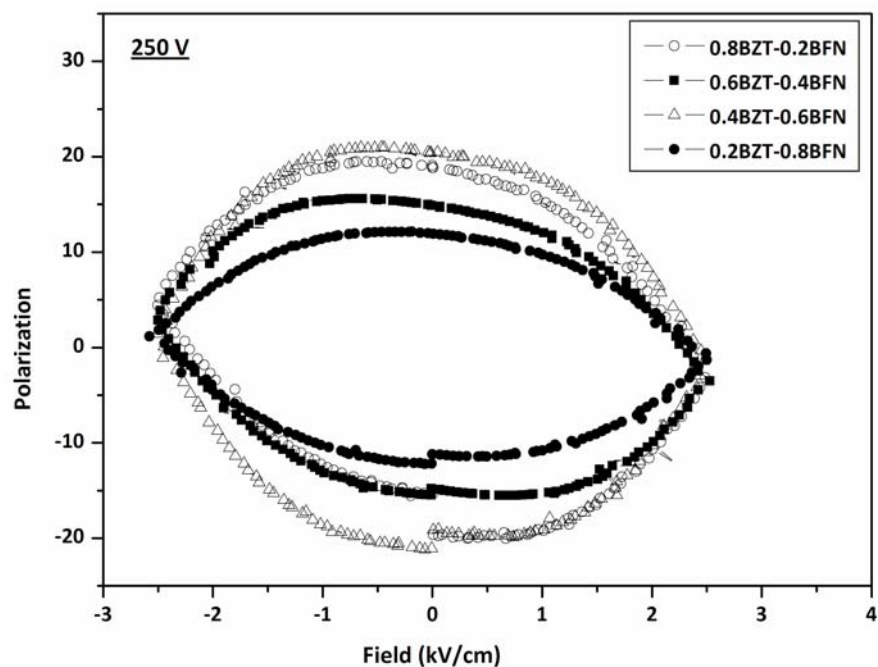
ภาพที่ 4.26 แสดงวงฮิสเทอรีซิสของเซรามิกผสม 0.4BZT - 0.6BFN



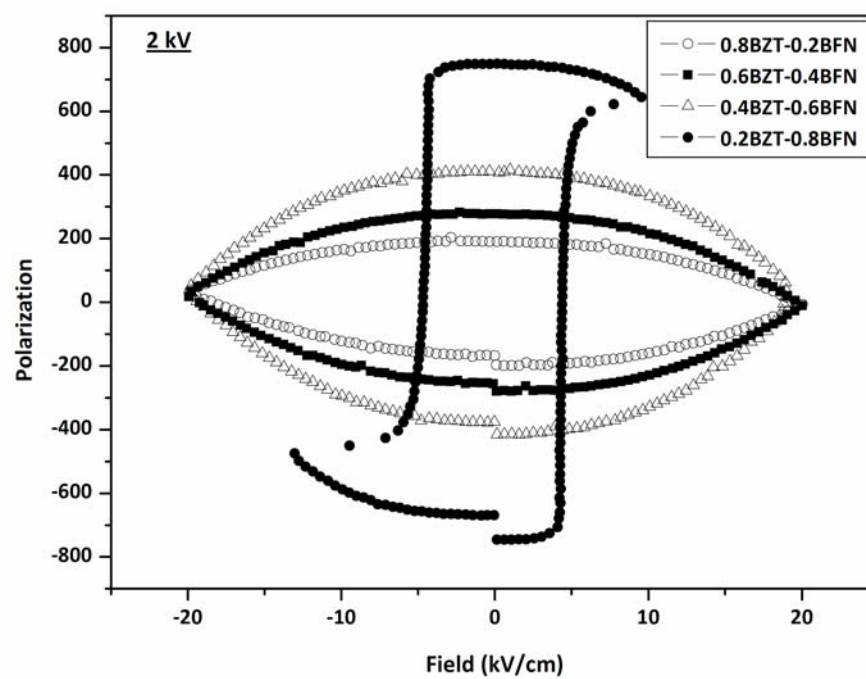
ภาพที่ 4.27 แสดงวงฮิสเทอรีซิสของเซรามิกผสม 0.6BZT - 0.4BFN



ภาพที่ 4.28 แสดงวงฮิสเตอร์ิซิสของเซรามิกผสม 0.8BZT - 0.2BFN



ภาพที่ 4.29 แสดงวงฮิสเตอร์ิซิสของเซรามิกผสมที่วัดด้วยความต่างศักย์ 250 โวลต์



ภาพที่ 4.30 แสดงวงฮิสเทอรีซิสของเซรามิกผสมที่วัดด้วยความต่างศักย์ 2 กิโลโวลต์



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษาผลการผสมสารแบเรียมไอรอนไนโอเบตและแบเรียมเซอร์โคเนียมไททาเนต เพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางไฟฟ้า สำหรับใช้เป็นวัสดุไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 การศึกษาการเตรียมผงแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนต

จากผลการสังเคราะห์ผงของแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนต ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง พบว่าสารประกอบที่ผ่านการเผาแคลไซน์ 1200 องศาเซลเซียส แสดงลักษณะของสารประกอบ 2 ชนิด คือ สารประกอบแบเรียมไททาเนตแบบเตตระโกนอล และสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตแบบคิวบิก

5.2 การศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของเซรามิกระบบ $(1-x)\text{BZT} - x\text{BFN}$

จากผลการผลิตเซรามิกผสมแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนตและแบเรียมไอรอนไนโอเบต ในอัตราส่วน 20 40 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง โดยทำการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1350 1400 และ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าเซรามิกที่ผลิตได้ แสดงการเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกเป็นเตตระโกนอล เมื่อเพิ่มสัดส่วนของผงแบเรียมไอรอนไนโอเบต จากผลการคำนวณหาอัตราส่วน c/a พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1.0000 - 1.0018 แลตทิซพารามิเตอร์ (a) อยู่ระหว่าง 4.030 - 4.052 อังสตรอม และแลตทิซพารามิเตอร์ (c) มีค่า 4.030 - 4.059 อังสตรอม ขนาดเกรนอยู่ในช่วง 0.99 - 2.36 ไมโครเมตร จากผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้นตามเงื่อนไขการเพิ่มอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ และการเพิ่มปริมาณสารแบเรียมไอรอนไนโอเบต สืบเนื่องมาจากความสามารถในการแพร่เข้าหากันของสารประกอบ รวมถึงการที่เกรนเกิดการผนึก

กันได้มากขึ้น โดยค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์มีค่าในช่วงร้อยละ 92.43 - 97.99 เมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี

ในส่วนของสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกผสมระหว่างแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเตและแบเรียมไอรอนไนโอเบต แสดงให้เห็นว่าเซรามิกที่ผลิตได้ให้ค่าไดอิเล็กทริกสูงในช่วงอุณหภูมิกว้าง ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าต่ำกว่า 2.00 จากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 400 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ และจากผลการทดลองยังพบว่า ทั้งเงื่อนไขการเพิ่มอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ และการเพิ่มปริมาณสารแบเรียมไอรอนไนโอเบต ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้น สำหรับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารแบเรียมไอรอนไนโอเบต เป็นผลมาจากค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของสารแบเรียมไอรอนไนโอเบตมีค่าสูง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ พบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกลดลง สืบเนื่องมาจากค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น และปริมาณรูพรุนที่ลดลง สอดคล้องกับค่าความต้านทานทั้งบริเวณภายในเกรนและบริเวณขอบเกรนที่มีค่าลดลง โดยจากผลการทดลองในเซรามิกที่ผลิตได้ทุกเงื่อนไข เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด 25159.71 โดยมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก 0.92 ในเซรามิก 0.2BZT - 0.8BFN ที่ทำการเผาซินเตอร์ 1450 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 97.22 % ขนาดเกรน 2.36 ไมโครเมตร และจากผลการวัดวงวงฮิสเตอร์ิซิสของเซรามิกตัวอย่างดังกล่าว สามารถยืนยันได้ว่าเซรามิกผสม 0.2BZT - 0.8BFN มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก โดยสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกที่มีการเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกเป็นเตตระโกนอลเมื่อเพิ่มสัดส่วนของผงแบเรียมไอรอนไนโอเบต

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาสมบัติของสารไดอิเล็กทริก เพื่อใช้เป็นวัสดุไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุ ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้งานอย่างกว้างขวางและมีค่าความจุที่หลากหลาย ดังนั้นหากมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในงานวิจัยนี้เพื่อให้เป็นประโยชน์เฉพาะทางในแต่ละค่าความจุนั้นๆแล้ว เชื่อว่าจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง จากงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.3.1 เนื่องจากขนาดเกรน และความหนาแน่นมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมาก ดังนั้นหากต้องการเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและลดค่าการสูญเสีย จึงมีความจำเป็นต้องลดขนาดเกรนและเพิ่มความหนาแน่น ในการลดขนาดเกรนและเพิ่มความหนาแน่นของเซรามิกมีหลายวิธี ดังนี้

1 การเลือกใช้สารตั้งต้นที่มีขนาดอนุภาคเล็ก จะส่งผลให้ขนาดเกรนของเซรามิกลดลงและเพิ่มความหนาแน่นขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณรูพรุนน้อยลงด้วย อีกทั้งยังอาจลดค่าอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ แต่ในกรณีนี้อาจต้องเพิ่มต้นทุนการผลิต

2 การบดผสมแบบ High speed อาจช่วยลดขนาดอนุภาคของสารประกอบได้ ซึ่งจะส่งผลให้ขนาดเกรนของเซรามิกลดลงได้เช่นกัน ในกรณีนี้จะเกิดความร้อนจากการบดผสม ซึ่งจำเป็นต้องใช้หม้อบดและลูกบดที่มีความแข็งแรงสูงไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนในสารประกอบ

3 การซินเตอร์แบบ 2 ขั้นตอน โดยทำการเผาซินเตอร์ที่ 2 อุณหภูมิ เป็นอีกวิธีที่ช่วยลดขนาดเกรน ช่วยให้ได้เซรามิกที่มีขนาดเกรนเล็กและสม่ำเสมอ เป็นกระบวนการซินเตอร์ที่ช่วยให้พลังงานความร้อนสามารถแพร่กระจาย ภายในเซรามิกได้อย่างทั่วถึง และไม่แตกต่างกันมากในแต่ละบริเวณ แต่ในกรณีนี้ยังไม่มียานวิจัยที่ใช้กับสารไดอิเล็กทริก ซึ่งอาจก่อให้เกิดการผิดรูปแบบหรือโครงสร้างของสารประกอบได้

5.3.2 การพัฒนาวัสดุไดอิเล็กทริกเพื่อการใช้งานนั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ได้วัสดุที่เหมาะสมกับการใช้งาน

- 1 การศึกษาและพัฒนาเพื่อลดค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุไดอิเล็กทริก
- 2 การศึกษาเรื่องวัสดุที่ใช้ในการผลิตขั้วไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการใช้งาน
- 3 การศึกษาความทนทานต่อการใช้งานในรูปแบบการเสื่อมสภาพของวัสดุหลังการผลิตในรูปแบบของตัวเก็บประจุ
- 4 การศึกษาความสามารถของวัสดุไดอิเล็กทริกหลังการผลิตในรูปแบบของตัวเก็บประจุกับการใช้งานร่วมกันอุปกรณ์อื่นๆในวงจรอิเล็กทรอนิกส์



รายการอ้างอิง

รายการอ้างอิง

- กอบวุฒิ รุจิณากุล. (2549). **การวิเคราะห์ของแข็งเชิงฟิสิกส์**. เชียงใหม่: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- รัตติกร ยี่มนิรันด. (2549). **สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก**. เชียงใหม่: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ณรงค์ศักดิ์ ชัยจิต. (2545). **เอกซเรย์คริสตัลโลกราฟีเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- Allen, T. (1997). **Particle size measurement volume 1** (5th ed). London: Chapman&Hall.
- APC International Ltd. (1998-2005). **Piezoelectricity**. Retrieved June 23,2009,from http://www.americanpiezo.com/piezo_theory/.
- Barsoum, M. W. (2003) **Fundamentals of ceramics**. New York: Taylor & Francis Group, Llc.
- Big Chem, Honors Physics. (2007). **Chemistry on-line assignments**. Retrieved June 23,2009,from <http://boomeria.org/chemlectures/textass2/firstsemass.html>.
- Brandon, D. & Kaplan, W. D. (1999). **Microstructural characterization of materials**. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Buchanan, R. C. (2004). **Ceramic materials for electronics** (3rd ed). New York: Marcel Dekker, Inc.
- Chulalongkorn University. (2008) **Engineering materials**. Retrieved June 23,2009,from <http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~psuvanch/101-49-1-9cerc.pdf>.
- Cho, K. H. & Lee, H. Y. (1994). Pore-dependent dielectric and electrical properties of barium titanate ceramic. **IEEE Intenational Symposium on Applications of Ferroelectrics**, **9**, 566-571.

- Ciomaga, C. E., et al. (2006). Relaxor properties of Ba(Zr,Ti)O₃ ceramics. **Optoelectronics and Advanced Materials**, 8(3), 944-948.
- Ciomaga, C. E., et al. (2006). Preparation and dielectric properties of BaZr_{0.1}Ti_{0.9}O₃ ceramics with different grain sizes. **Phase Transitions**, 79(6-7), 389-397.
- Cullity, B. D. (1956). **Elements of x-ray diffraction**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Eitssayeam, S., et al. (2006). Preparation and characterization of barium iron niobate (BaFe_{0.5}Nb_{0.5}O₃) ceramics. **Current Applied Physics**, 6, 316-318.
- Eitssayeam, S., et al. (2006). Structural and electrical properties characterization of (1-x)PbZr_{0.52}Ti_{0.48}O₃-xBaFe_{0.5}Nb_{0.5}O₃ system. **Applied Physics A**, 83, 295-299.
- Elissalde, C. & Ravez, J. (2001). Ferroelectric ceramics: defects and dielectric relaxations. **Journal of Materials Chemistry**, 11, 1957-1967.
- Geneva-Switzerland. (2009). **PZT basic information**. Retrieved June 23,2009,from http://www.phasis.ch/index.php?option=com_content&view=article&id=59&Itemid=67.
- Georgia State University. (2005). **Hysteresis loop**. Retrieved June 23,2009,from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/solids/hyst.html>.
- Georgia State University. (2005). **Variations in hysteresis curves**. Retrieved June 23,2009,from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/hyst.html>.
- Georgia State University. (2005). **X-ray transitions**. Retrieved June 23,2009,from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/xterm.html>.
- Goldstein, J. I., et al. (2003). **Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis** (3rd ed). New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Intatha, U., et al. (2007). Dielectric properties of low temperature sintered LiF doped BaFe_{0.5}Nb_{0.5}O₃. **Materials Letters**, 61, 196-200.

Intatha, U. (2008). **Dielectricity of barium iron niobate based materials.**

Doctoral dissertation. Materials science, Chiang Mai University, Chiang Mai.

Kobune, M., Yamakawa, K. & Yazawa, T. (2005). A barium zirconate titanate-based inorganic dielectric material with high permittivity as a lead-free insulator for semiconductor applications. **Integrated Ferroelectrics**, **74**(1), 155-164.

Kasap, S. O. (2006). **Principles of electronic materials and devices** (3rd ed). New York: McGraw-Hill.

Liang, R. H., et al. (2007). Dielectric properties and tenability of $\text{Ba}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ ceramics under high DC electric field. **Ceramics International**, **33**, 957-961.

Malvern Instruments Ltd. (2004-2009). **Laser diffraction particle sizing.** Retrieved June 23,2009,from http://www.malvern.co.kr/LabKor/technology/laser_diffraction/particle_sizing.htm.

McSwiggen & Associates. (2005). **How does a wavelength dispersive spectrometer work.** Retrieved June 23,2009,from http://www.mcswiggen.com/FAQs/FAQ_EF-6.htm.

Moulson, A. J. & Herbert, J. M. (2003). **Electroceramics** (2nd ed). West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.

Neirman, S. M. (1988). The curie point temperature of $\text{Ba}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ solid solutions. **Journal of Materials Science**, **23**, 3973-3980.

Northwestern University. (2002-2007). **What is perovskite structure.** Retrieved June 23,2009,from <http://vpd.ms.northwestern.edu/memberpages.asp?url=members/Zixiao/Project%20Q%20and%20A.htm>.

Paunovic, V., et al. (2004). The effects of additive on microstructure and electrical properties of BaTiO_3 ceramics. **Serbian Journal of Electrical Engineering**, **1**(3), 89-98.

Pecharsky, V. K. & Zavalij, P. Y. (2005). **Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials.** New York: Springer Science+Business Media, Llc.

Piskunovs, S. (2003). **The electronic structure of perfect and defective perovskite crystals:**

Ab initio hybrid functional calculations. Doctoral dissertation. Physics,
University of Osnabruck, Osnabruck.

Puri, R. K. & Babbar, V. K. (1997). **Solid state physics and electronics.** New Delhi:
S. Chand & Company Ltd.

QA International. (2008). **Cross section of an electron microscope.** Retrieved
June 23, 2009, from [http://visual.merriam-webster.com/science/physics-optics/
magnifying-glass-microscopes/cross-section-an-electron-microscope.php](http://visual.merriam-webster.com/science/physics-optics/magnifying-glass-microscopes/cross-section-an-electron-microscope.php).

Rahaman, M. N. (2003). **Ceramic processing and sintering** (2nd ed). New York:
Marcel Dekker, Inc.

Reed, J. S. (1994). **Principles of ceramics processing** (2nd ed). New York:
John Wiley & Sons, Inc.

Rout, S. K. (2006). **Phase formation and dielectric studies of some BaO-TiO₂-ZrO₂ based
perovskite system.** Doctoral dissertation. Physics (Materials Science),
National Institute of Technology, Rourkela (A Deemed University), Orissa.

Shaikh, A. S., Vest, B. W. & Vest, G. M. (1986). Dielectric properties of ultra fine grained
BaTiO₃, **IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics**,
6, 126-129.

Strukov, B. A. & Levanyuk, A. P. (1998). **Ferroelectric phenomena in crystals.**
New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Suryanarayana, C. & Norton, M. G. (1998). **X-ray diffraction a practical approach.**
New York: A Division of Plenum Publishing Corporation.

Tura, V., et al. (1998). Ferroelectric-to-paraelectric phase transition in barium titanate ceramics
investigated by pyrocharge measurements. **Journal of Electroceramics**,
2(3), 163-169.

TWI Ltd. (2005). **Vickers hardness test**. Retrieved June 23,2009,from
<http://www.inspecttest.com/hardness-test.html>.

University of Cambridge. **Ferroelectric materials**. Retrieved June 23,2009,from
<http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/ferroelectrics/printall.php>.

University of Cambridge. **X-ray diffraction techniques**. Retrieved June 23,2009,from
<http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/xray-diffraction/printall.php>.

Western Washington University. (2009). **Parallel-plate capacitors**. Retrieved
 June 23,2009,from <http://www.ac.wvu.edu/~vawter/PhysicsNet/Topics/Capacitors/ParallCap.html>.

Wikimedia. (2009). **Perovskite**. Retrieved June 23,2009,from
<http://vi.wikipedia.org/wiki/Perovskite>.

Wittke, J. H. (2008). **Detection of signals**. Retrieved June 23,2009,from
<http://www4.nau.edu/microanalysis/Microprobe-SEM/Signals.html>.

Yamashita, Y. (1990). Relaxor ceramic dielectric materials for multilayer ceramic
 Capacitors. **IEEE Intenational Symposium on Applications of Ferroelectrics**,
 7, 241-245.

Yimnirun, R., Ananta, S. & Laoratakul, P. (2004). Dielectric properties of ceramics in lead
 zirconate titanate – lead magnesium niobate system. **Songklanakarin J. Sci. Technol.**,
 26(4), 529-536.



ภาคผนวก ก

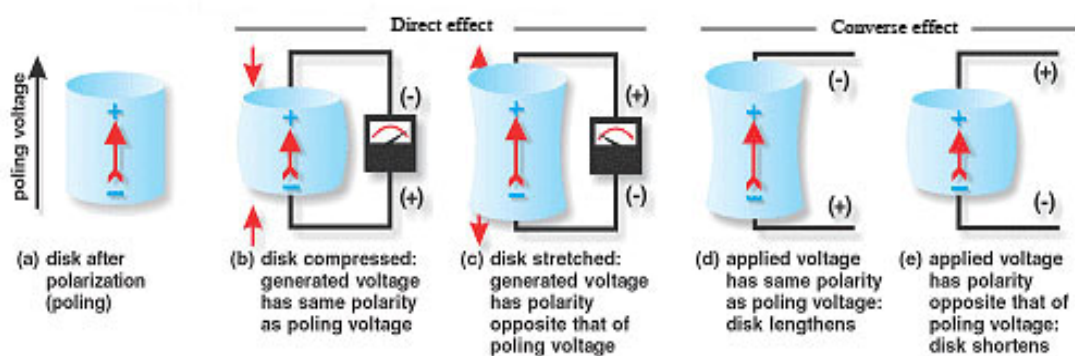
สมบัติเพียโซอิเล็กทริก

ภาคผนวก ก

สมบัติเพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectricity)

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectricity) หมายถึงการเกิดประจุไฟฟ้าจากการได้รับแรงกด ซึ่งเป็นแรงทางกลทำให้เกิดความเครียด (Strain) ขึ้นในผลึก สามารถจำแนกได้ 2 ประเภท คือ ปรากฏการณ์แบบตรง (Direct effect) และปรากฏการณ์แบบผกผัน (Converse effect) โดยที่ปรากฏการณ์แบบตรงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชัน เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงทางกลมากระทำหรือเกิดความเค้น (Stress) ขึ้น ในขณะที่ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบผกผันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดและปริมาตรหรือมีความเครียดเกิดขึ้น (Strain) เมื่อให้สนามไฟฟ้ากับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (กอบวุฒิ รุจิณากุล, 2549)

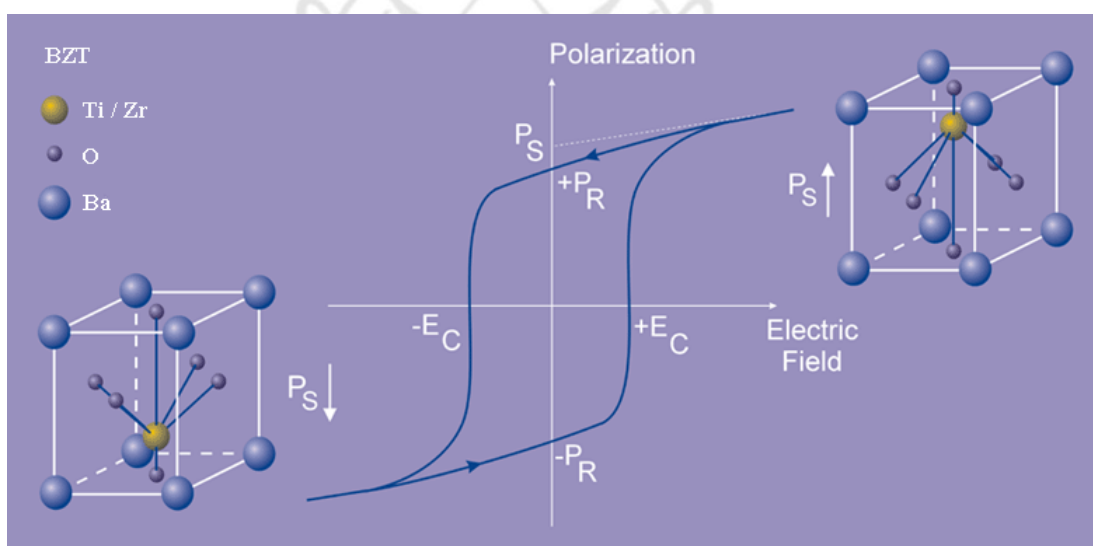


ภาพที่ ก.1 แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

(APC International Ltd., 1998-2005, ระบบออนไลน์)

วงฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop)

การศึกษาวงฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) คือการศึกษาความสามารถในการกลับทิศของสภาพการมีขั้ว (Polarization reversal) ของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก เมื่อให้สนามไฟฟ้าจากภายนอก โดยเมื่อทำการเพิ่มสนามไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงาน ทิศทางของโดเมนจะพยายามกลับทิศให้อยู่ในทิศเดียวกับสนามไฟฟ้าจากภายนอกจนถึงจุดที่โดเมนสามารถกลับทิศได้มากที่สุด ค่าความสามารถการกลับทิศของสภาพการมีขั้วจะคงที่ และเมื่อเริ่มลดสนามไฟฟ้าลง โดเมนบางส่วนจะกลับไปสู่ทิศทางเดิม แต่เมื่อสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์สภาพการมีขั้วจะยังไม่เป็นศูนย์ เมื่อกลับทิศสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชิ้นงานและเพิ่มสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงข้าม จะทำให้เกิดการจัดเรียงทิศทางโดเมนใหม่จนสามารถกลับทิศทางได้มากที่สุด ในทิศทางตรงข้าม เมื่อมีการลดสนามไฟฟ้าจนเป็นศูนย์โดเมนจะพยายามกลับทิศทางอีกครั้ง และเมื่อกลับทิศทางสนามไฟฟ้าอีกครั้ง ก็จะทำให้การเปลี่ยนแปลงทิศทางของโดเมนครบรอบ ซึ่งจะเรียกว่า วงฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) (Barsoum, 2003)



ภาพที่ ก.2 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงทิศทางโพลาริเซชันของเซรามิกภายใต้สนามไฟฟ้า กระแสสลับจากภายนอก (Geneva-Switzerland, 2009, ระบบออนไลน์)

ภาคผนวก ข

หลักการวิเคราะห์ทดสอบด้วยเครื่องมือชั้นสูง

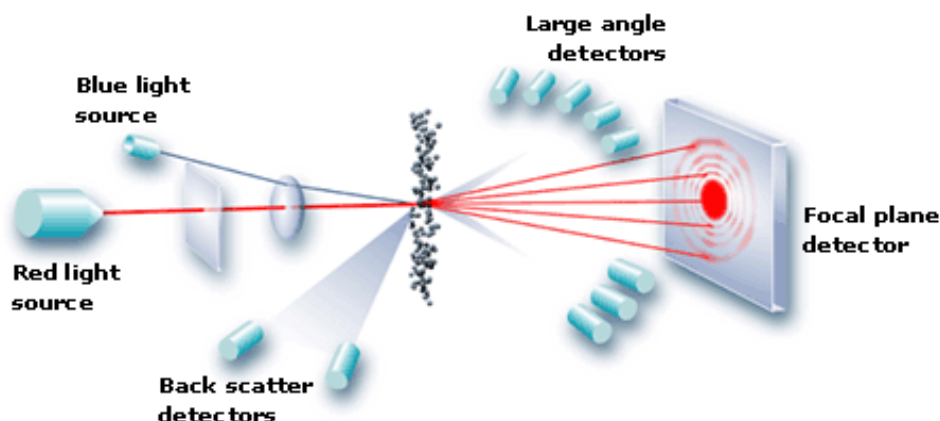


ภาคผนวก ข

หลักการวิเคราะห์ทดสอบด้วยเครื่องมือขั้นสูง

การศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

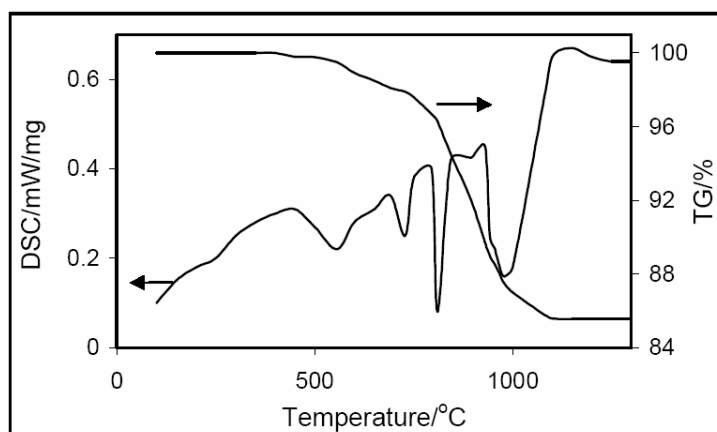
การวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค ด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution analyzer ยี่ห้อ Malvern รุ่น Mastersize 2000) เป็นการหาขนาดอนุภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของเลเซอร์ (LASER Diffraction) เป็นเทคนิคที่ศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิด แก๊สฮีเลียม-นีออน (He-Ne Laser) ซึ่งเป็นแสงสีแดงมีความยาวคลื่น 632.816 nm ลำแสงจะถูกขยายขนาดโดย Beam expander แล้วส่องผ่านไปยังอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอย (Emulsion) อยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวที่มีความโปร่งใสและมีค่าดัชนีหักเหแตกต่างจากอนุภาค จนเกิดการกระเจิงของแสงที่บริเวณผิวของอนุภาคได้และไม่ทำปฏิกิริยากับอนุภาคของสารที่ต้องการวิเคราะห์ นอกจากนี้ปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคจะต้องสูงพอที่จะได้ข้อมูลเชิงสถิติที่ดี (โดยจากเครื่อง Mastersize 2000 กำหนดไว้ที่ความเข้มข้น 10–20 เปอร์เซ็นต์) แต่ต้องไม่เข้มข้นเกินไปจนเกิดการกระเจิงซ้ำกันหลายครั้ง (Multiple scattering) เมื่อแสงเลเซอร์เดินทางผ่านอนุภาคที่เป็นสารแขวนลอย จะเกิดปรากฏการณ์กระเจิงของแสง โดยแสงที่กระเจิงจากอนุภาคจะมีรูปแบบของความเข้มที่มุมต่างกันขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค แต่ละมุมของการกระเจิงจะมีสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค ซึ่งสมบัติการกระเจิงของแสงจากอนุภาคนี้สามารถใช้ในการคำนวณหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้ โดยลำแสงที่กระเจิงจากอนุภาคจะถูกส่งผ่านไปยังเลนส์รวมแสง (Condenser lens) ทำให้เกิดภาพปรากฏเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนแบบฟาร์ฟิลด์ (Far field diffraction pattern) ที่ Photocell detector ซึ่งวางอยู่บนระยะที่ห่างจากกับเส้นทางเดินของแสงเลเซอร์ ที่จุดโฟกัสของการเลี้ยวเบนจะมีลักษณะเป็นวงมืด-สว่างสลับพันกับการกระจายตัวของขนาดอนุภาค เลนส์รวมแสงได้ถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติพิเศษคือ ไม่ว่าอนุภาคจะก่อให้เกิดการกระเจิงที่บริเวณใดในลำแสงเลเซอร์ก็ตาม รูปแบบการเลี้ยวเบนจะไม่เคลื่อนไหวและมีจุดศูนย์กลางอยู่บนแกนออฟติกของเลนส์เสมอ (Allen, 1997) จากการกระเจิงของแสงที่ได้สามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคได้ตามทฤษฎีของมี (Mie theory) โดยใช้ค่าดัชนีหักเห (Refractive index) และค่าการดูดซับแสง (Absorption index) ของอนุภาคและตัวกลางร่วมด้วย



ภาพที่ ข.1 แสดงลักษณะการทำงานของเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค
(Malvern Instruments Ltd., 2004-2009, ระบบออนไลน์)

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของสารประกอบ

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของสารประกอบ ด้วยเครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermogravimetric/Differential Analysis: TGA) ในลักษณะการวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ (Differential Thermal Analysis) เป็นการวิเคราะห์โดยการวัดอุณหภูมิสารตัวอย่าง (T_s) เทียบกับ อุณหภูมิของสารอ้างอิง (T_r) โดยสารอ้างอิงนั้นจะมีลักษณะที่ไม่เปลี่ยนแปลงสภาพไปกับอุณหภูมิหรือ สภาพแวดล้อม เช่น ไม่ทำปฏิกิริยากับอากาศ ไม่เปลี่ยนโครงสร้างเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง จากนั้น นำค่าอุณหภูมิที่วัดได้มาหาความแตกต่าง ($T_s - T_r$) เพื่อวิเคราะห์กระบวนการเปลี่ยนแปลงทาง ความร้อน โดยแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบคายความร้อน (Exothermic) และแบบดูดความร้อน (Endothermic) การศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคนี้จะสามารถศึกษาถึงการหลอมเหลว การทำปฏิกิริยา การระเหย และการเปลี่ยนโครงสร้างของสาร ซึ่งจะสังเกตได้จากพีคการดูดกลืน ความร้อนและพีคการคายความร้อน (กอบวุฒิ รุจิณากุล, 2549) ยกตัวอย่างตามภาพที่ ข.2

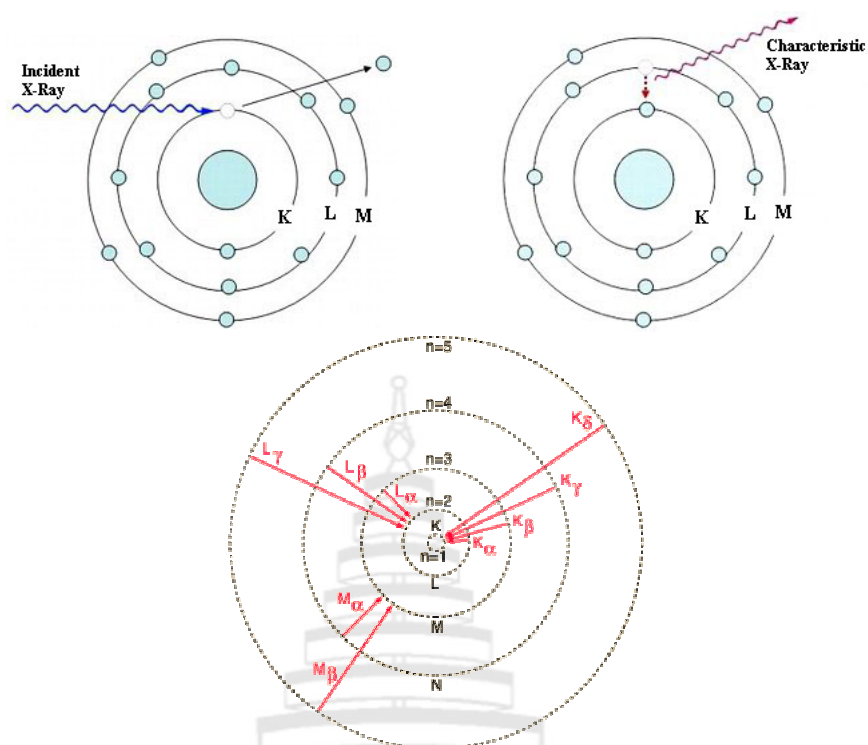


ภาพที่ ข.2 แสดงลักษณะการดูดและคายพลังงานความร้อน
ของสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานेट (BZT)
(Rout, 2006)

จากภาพที่ ข.2 กราฟแสดงการสูญเสียน้ำหนักเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ไปจนถึงอุณหภูมิประมาณ 1100 องศาเซลเซียส ส่วนในกราฟของ DSC จะเกิดพีคเล็กๆที่อุณหภูมิ 556 และ 728 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับการสูญเสียน้ำหนัก 1.4 และ 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเกิดพีคที่ชัดเจนอีกครั้งที่อุณหภูมิ 810 และ 979 องศาเซลเซียส การเกิดพีคแสดงการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาภายในสารผสม โดยที่อุณหภูมิ 1187 องศาเซลเซียส เกิดการแยกสลายพันธะของสารประกอบ BaCO_3 (Rout, 2006) สอดคล้องกับงานวิจัยของ C.E. Ciomaga (2006) ที่กล่าวว่า สารแบเรียมไททานेट (BaTiO_3) จะเกิดการฟอร์มตัวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ในขณะที่ สารแบเรียมเซอร์โคเนต (BaZrO_3) จะเกิดการฟอร์มตัวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และ สารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานेटจะเกิดการฟอร์มตัวอย่างสมบูรณ์หลังอุณหภูมิซินเตอร์ที่มากกว่า 1350 องศาเซลเซียส (Ciomaga, *et al.*, 2006)

การศึกษาองค์ประกอบของธาตุ

การศึกษาองค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Analyzer : XRF) ต้องอาศัยความเข้าใจทางโครงสร้างของอะตอม โดยจากความรู้เรื่องโครงสร้างอะตอมพบว่า อิเล็กตรอนที่อยู่รอบนิวเคลียสจะอยู่เป็นระดับชั้นพลังงาน K, L, M และ N ตามลำดับ โดยมีจำนวนอิเล็กตรอนในแต่ละชั้นพลังงานไม่เท่ากัน และเมื่อมีพลังงานมากพอจากภายนอกมากระทำ จะทำให้อิเล็กตรอนอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) โดยจะไม่อยู่ที่ระดับชั้นพลังงานเดิมจึงเกิดเป็นช่องว่าง (Hold) ในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานที่สูงกว่าจะเปลี่ยนระดับพลังงานเข้ามาแทนที่ช่องว่างที่เกิดขึ้น ซึ่งการเข้าแทนที่ช่องว่างอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานที่ต่ำกว่า อะตอมจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ เรียกว่า ฟลูออกรสเซนซ์ หรือการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (X-Ray Fluorescence : XRF) โดยการเรียกชื่อพลังงานรังสีเอกซ์นี้จะเรียกตามระดับชั้นพลังงานที่เข้าแทนที่และระดับชั้นพลังงานที่อิเล็กตรอนเกิดสภาวะกระตุ้น (Brandon & Kaplan, 1999) เทคนิคการวิเคราะห์นี้ใช้หาชนิดและปริมาณธาตุ โดยอาศัยหลักการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ที่ระดับพลังงานแตกต่างกันของธาตุแต่ละชนิด ทำให้สามารถจำแนกชนิดพร้อมทั้งบอกปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบได้ โดยในการวิเคราะห์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบการวิเคราะห์ความยาวคลื่น (Wavelength dispersive analysis) และระบบการวิเคราะห์พลังงาน (Energy dispersive analysis) (กอบวุฒิ รุจิจินากุล, 2549)



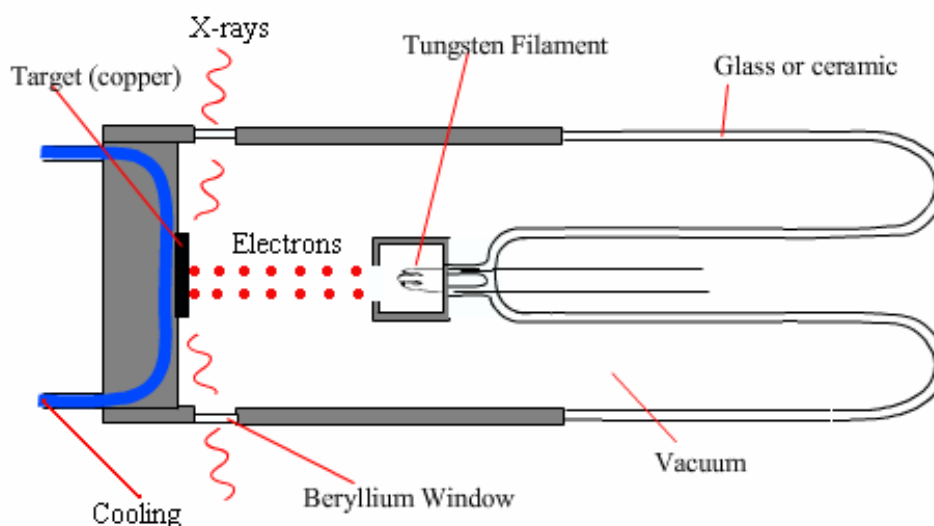
ภาพที่ ข.3 แสดงการเกิด XRF และการเรียกชื่อพลังงานรังสีเอกซ์ในแต่ละระดับชั้นพลังงาน
(Georgia State University, 2005, ระบบออนไลน์)

ตารางที่ ข.1 แสดงขนาดรัศมีของอะตอมและไอออนของธาตุ
(Big Chem Honors Physics, 2007, ระบบออนไลน์)

ธาตุ	ขนาดรัศมี (นาโนเมตร)	
	อะตอม	ไอออน
แบเรียม	Ba = 0.217	Ba ²⁺ = 0.135
ออกซิเจน	O = 0.066	O ²⁻ = 0.140
เซอร์โคเนียม	Zr = 0.160	Zr ⁴⁺ = 0.079
ไททาเนียม	Ti = 0.145	Ti ⁴⁺ = 0.068
ไนโอเบียม	Nb = 0.143	Nb ⁵⁺ = 0.070
ไอรอน	Fe = 0.124	Fe ³⁺ = 0.064

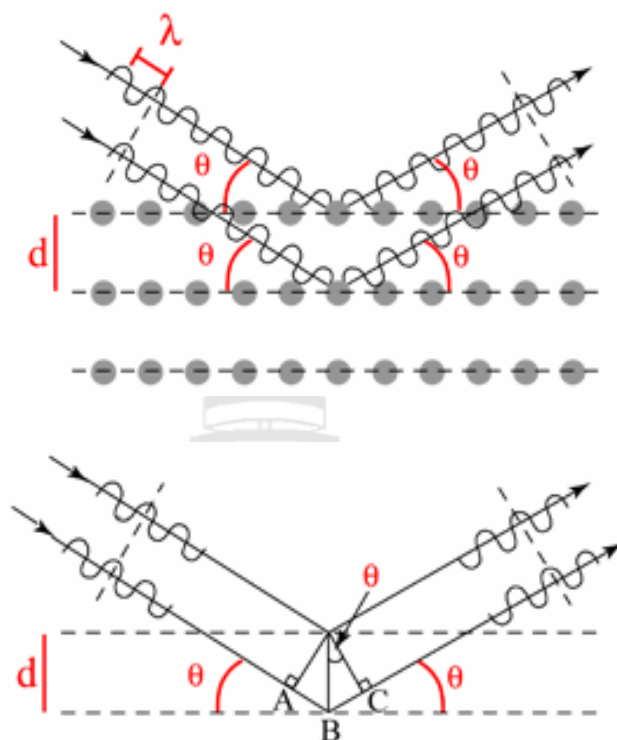
การศึกษาโครงสร้างของสารประกอบ

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer : XRD) จากการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบและมีโครงสร้างที่แน่นอนจะก่อให้เกิดเป็นผลึก การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคเป็นพื้นฐานสำคัญ ซึ่งจะเชื่อมโยงไปถึงการวิเคราะห์สมบัติอื่นๆ เช่น สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของเอกซ์เรย์มีหลักการทำงานดังนี้คือ ภายในหลอดรังสีเอกซ์มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงไหลผ่านขดลวดที่เป็นไส้หลอดทำจากทังสเตน และเร่งอิเล็กตรอนโดยต่อศักย์ไฟฟ้าสูงเข้าสู่เป้าที่ทำจากทองแดง (Cu) ซึ่งเป็นขั้วบวกเมื่อเทียบกับไส้หลอด ดังนั้นเมื่อไส้หลอดร้อนอิเล็กตรอนจะถูกดึงให้หลุดจากไส้หลอดแล้ววิ่งเข้าชนเป้าทันที การที่อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนเป้านี้จะถูกหน่วงอย่างกะทันหัน ซึ่งส่งผลให้อิเล็กตรอนปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในย่านรังสีเอกซ์ออกมา 2 แบบ คือ สเปกตรัมแบบต่อเนื่อง และสเปกตรัมแบบเฉพาะ (Pecharsky & Zavalij, 2005)



ภาพที่ ข.4 แสดงโครงสร้างของหลอดเอกซ์เรย์ (University of Cambridge, ระบบออนไลน์)

เมื่อรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางมากระทบผลึก จะเกิดการเลี้ยวเบนและแทรกสอดได้ โดยสามารถพิจารณาระนาบผลึกที่มีรังสีเอกซ์มากระทบดังภาพที่ ข.5



ภาพที่ ข.5 แสดงลักษณะการตกกระทบและเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึก
(McSwiggen & Associates, 2005, ระบบออนไลน์)

เมื่อรังสีเอกซ์มากระทบกับระนาบผลึกเป็นมุม θ จะเลี้ยวเบนออกเป็นมุม θ จากภาพที่ ข.5 พบว่า

$$\Delta x = AB + BC \quad (1)$$

และ
$$\Delta x = 2d \sin \theta \quad (2)$$

เมื่อ d คือ ค่า d-spacing หรือระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก
 Δx คือ ระยะทางที่คลื่น 2 ลูก เดินทางแตกต่างกัน

ในกรณีการแทรกสอดแบบเสริม $\Delta\phi = 2n\pi$

เมื่อ n คือ ตัวเลขจำนวนเต็ม เท่ากับ 0, 1, 2, 3
 $\Delta\phi$ คือ ความต่างเฟส

และจาก
$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \quad (3)$$

$$2n\pi = \frac{2\pi}{\lambda} 2d \sin \theta$$

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (4)$$

เรียกสมการนี้ว่าสมการของแบร็กก์หรือ กฎของแบร็กก์ (Bragg's law) เป็นสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลึก (Cullity, 1956)

จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ทำให้สามารถวิเคราะห์หาขนาดของผลึกและเลดทึชได้จากสมการ Scherrer

$$t = \frac{0.89\lambda}{B \cos \theta} \quad (5)$$

เมื่อ t คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลึก
 B คือ ความกว้างของพีค (ในหน่วย เรเดียน)
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์
 θ คือ มุมที่เกิดพีคหลัก (ความเข้มสูงสุด)

การวิเคราะห์ระนาบของผลึกตามสมการ (5) และ (6)

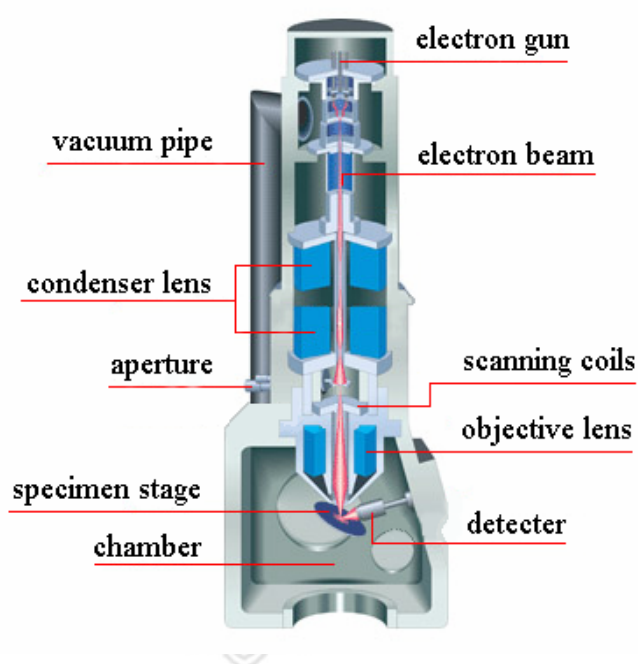
$$\sin^2 \theta = \left(\frac{\lambda^2}{4a^2} \right) (h^2 + k^2 + l^2) \quad (6)$$

และ

$$\frac{\sin^2 \theta}{A} = (h^2 + k^2 + l^2) \quad (7)$$

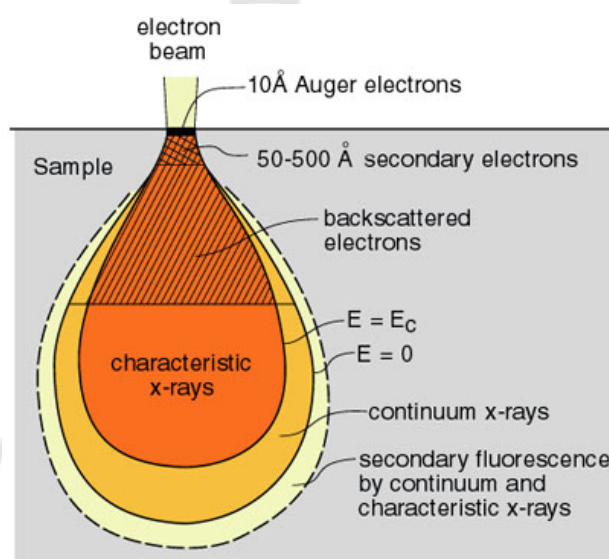
การศึกษาลักษณะพื้นฐาน

การศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากความยาวคลื่นแสงมีขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำ จึงไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของชิ้นงานเซรามิก เช่นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด โดยมีหลักการทำงานดังนี้



ภาพที่ ข.6 แสดงโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด
(QA International, 2008, ระบบออนไลน์)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาวมีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนแทนแสง โดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอนถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตนด์ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก หรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็ก ทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) วิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน (Goldstein, *et al.*, 2003) แบ่งได้เป็น



ภาพที่ ข.7 แสดงลักษณะการเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนที่มีต่อชิ้นงานเซรามิก (Wittke, 2008, ระบบออนไลน์)

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง 50 อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาว (SEM)

อิเล็กตรอนแบบย้อนกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน แล้วเกิดการเดินทางย้อนกลับออกมาจากชิ้นงาน โดย

พลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆที่ย้อนกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมานี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ โดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ ซึ่งจะใช้ห้วงวัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

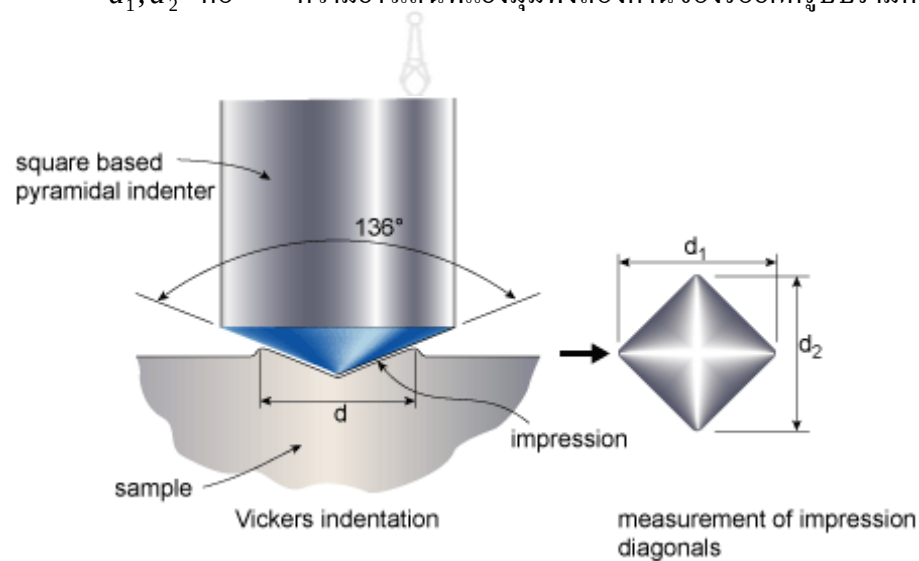
การศึกษาความแข็งเซรามิกผสม

การวัดความแข็งผิวของชิ้นงานเซรามิกเพื่อศึกษาความต้านทานการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานเซรามิก เมื่อมีแรงกระทำจากภายนอก ซึ่งทำการวิเคราะห์ทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งห้วกดแบบวิกเกอร์ (Microhardness : ยี่ห้อ Matuzawa รุ่น MMT-3) โดยนำเซรามิกหลังการเผาซินเตอร์มาขัดทำให้ผิวหน้าเรียบได้ระนาบมีลักษณะเป็นมันวาวเพื่อทำการวัดความแข็งผิว หลังจากนั้นทำการวัดความแข็งผิวของชิ้นงานเซรามิกด้วยแรง 50 กรัม จำนวน 20 ตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งที่กดอยู่ห่างกันอย่างน้อย 3 เท่าของรอยกด เนื่องจากแรงกดอาจส่งผลกระทบให้เกิดการแตกร้าวตามบริเวณรอบข้างของรอยกด อีกทั้งอาจทำให้เกรนถูกบีบอัด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลื่อนตำแหน่งกดให้ห่างจากรอยกดเดิม เพื่อหลีกเลี่ยงบริเวณที่เกิดจากผลกระทบเหล่านั้น จากนั้นทำการวัดเส้นทแยงมุมทั้ง 2 เส้น ของรอยกด เพื่อกำหนดค่าความแข็งผิวด้วยการประมวลผลของเครื่องวัดความแข็ง ซึ่งสามารถอธิบายการคำนวณได้ตามสมการ 8

$$HV = \frac{2F \sin(136^\circ / 2)}{d^2} \quad (8)$$

โดย
$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (9)$$

เมื่อ HV คือ ค่าความแข็งผิว (MPa)
 F คือ แรงที่ใช้ในการกด (N)
 d คือ ความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมของรอยกดรูปปิรามิด (μm)
 d_1, d_2 คือ ความยาวเส้นทแยงมุมทั้งสองด้านของรอยกดรูปปิรามิด (μm)



ภาพที่ ข.8 แสดงลักษณะรอยกดของหัววัดแบบวิกเกอร์ (TWI Ltd., 2005, ระบบออนไลน์)



ภาพที่ ข.9 แสดงเครื่องวัดความแข็งหัวกดแบบวิกเกอร์

การศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างของเซรามิก

การศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างของเซรามิก โดยเมื่อสารได้รับพลังงานความร้อน จะเปลี่ยนแปลงสถานะ เช่น การเปลี่ยนสถานะ โดยจะมีความร้อนไหลเข้าหรือออกจากสารตัวอย่าง ซึ่งความร้อนที่ไหลเข้าออกจากสารตัวอย่างนี้ จะขึ้นกับชนิดของกระบวนการทางความร้อนว่าเป็นแบบคายความร้อนหรือดูดความร้อน ตัวอย่างเช่น กรณีของแข็งละลายเป็นของเหลวจำเป็นต้องให้ความร้อน โดยความร้อนจะไหลเข้าสู่สารตัวอย่าง ซึ่งกระบวนการแบบนี้เป็นกระบวนการดูดความร้อนของสารขณะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว จากการวัดค่าความร้อนที่ไหลเข้าออกจากสารนี้ ทำให้สามารถวัดพลังงานที่ดูดเข้าหรือคายออก เพื่อศึกษาการเปลี่ยนสถานะ เช่น การเปลี่ยนโครงสร้าง การหาอุณหภูมิคูรีของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก เป็นต้น (Strukov & Levanyuk, 1998)

การวัดปริมาณความร้อนอนุพันธ์กราฟวิเคราะห์ เป็นการวัดปริมาณความร้อนที่ไหลเข้าออกสารตัวอย่างเทียบกับสารมาตรฐาน ซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์ในกราฟอัตราความร้อนเทียบกับอุณหภูมิ (Reed, 1994)

โดยมีกระบวนการดังนี้ คือนำเซรามิกผสมระหว่างแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเต และแบเรียมไฮดรอกไซด์ในโอเบต ที่ได้จากการเผาซินเตอร์ในแต่ละอุณหภูมิ และในแต่ละอัตราส่วนการผสม มาทำการบดให้ละเอียด เพื่อทำการวัดปริมาณความร้อนอนุพันธ์กราฟวิเคราะห์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์วัดปริมาณความร้อนเชิงอนุพันธ์ (Differential Scanning Calorimeter: DSC บริษัท METTLER TOLEDO รุ่น DSC 822) โดยใส่สารผสมที่ได้จากการบด 15 ถึง 20 กรัม ในถ้วยอะลูมิเนียม (Aluminium) ปิดฝาและเจาะรูเพื่อระบายแก๊สที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการให้ความร้อน แล้ววางไว้ตรงตำแหน่งของตัวอย่างวิเคราะห์ และวางถ้วยเปล่าปิดฝาเจาะรูไว้ในตำแหน่งของสารอ้างอิง ทำการวิเคราะห์ทดสอบภายใต้สภาวะที่เป็นอากาศบริสุทธิ์ ด้วยอัตราการไหล 20ml/min ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 500 องศาเซลเซียส โดยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความร้อนของสารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิง ซึ่งถ้วยทั้งสองจะได้รับความร้อนและทำให้เย็นลงอย่างสม่ำเสมอเท่าๆกัน



ภาพที่ ข.10 แสดงเครื่องวิเคราะห์วัดปริมาณความร้อนเชิงอนุพันธ์





ภาคผนวก ค

การศึกษาเพิ่มเติมในงานวิจัย

ภาคผนวก ค

การศึกษาเพิ่มเติมในงานวิจัย

ผลการวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารประกอบหลังการเผาแคลไซน์

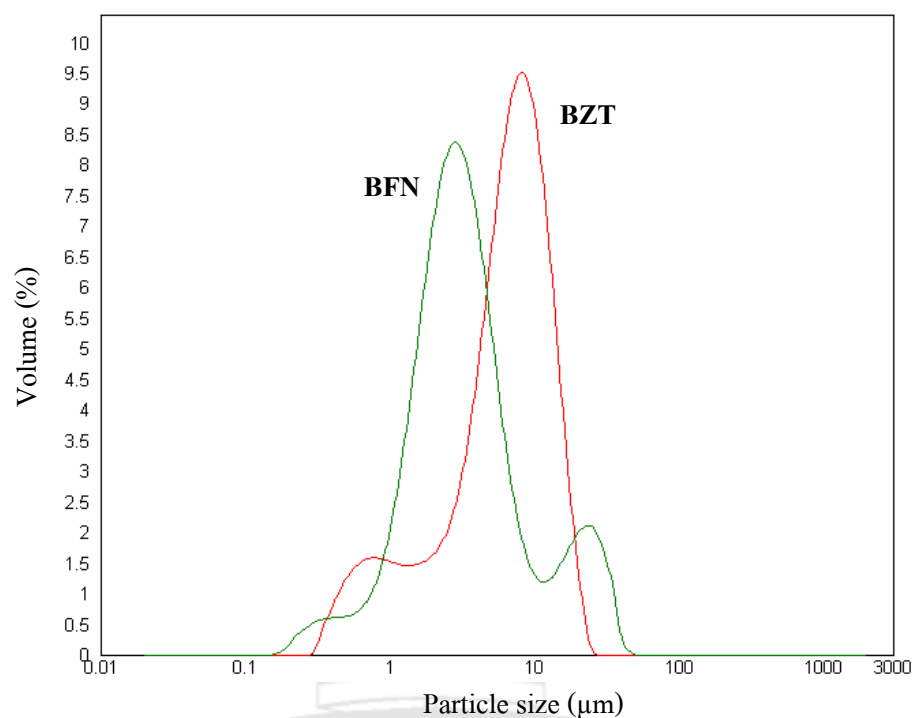
จากการทดลองวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเตและแบเรียมไอรอนไนโอเบตก่อนการบดผสม โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการกระจายของขนาดอนุภาค (Particle size distribution analyzer) ได้กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคดังภาพที่ ค.1 โดยผลการทดลองแสดงค่า $D(0.1)$, $D(0.5)$, $D(0.9)$ และ $D[4,3]$ ซึ่งจะแสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยที่ปริมาตรเปอร์เซ็นต์ไทน์ 10 50 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรในสารทั้งหมดที่ใช้วัดการกระจายตัว และค่า $D[4,3]$ แสดงค่าขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของสารที่นำมาทำการทดสอบวัดการกระจายตัว ซึ่งเป็นการหาขนาดอนุภาคโดยวิธีทางปริมาตร จากผลการทดลองพบว่า

อนุภาคของผงแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเตหลังการเผาแคลไซน์ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในอากาศ เป็นผงที่มีขนาดอนุภาค 2 กลุ่มใหญ่คือ กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 0.28 ถึง 1.26 ไมโครเมตร และ กลุ่มอนุภาคที่มีขนาด 1.44 ถึง 26.30 ไมโครเมตร โดยอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดในช่วง 1.44 ถึง 26.30 ไมโครเมตร

อนุภาคของผงแบเรียมไอรอนไนโอเบตหลังการเผาแคลไซน์ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในอากาศ เป็นผงที่มีขนาดอนุภาค 2 กลุ่มใหญ่คือ กลุ่มที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 0.16 ถึง 11.48 ไมโครเมตร และ กลุ่มอนุภาคที่มีขนาด 13.18 ถึง 45.71 ไมโครเมตร โดยอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดในช่วง 0.16 ถึง 11.48 ไมโครเมตร

ตารางที่ ค.1 แสดงขนาดอนุภาคของสารประกอบต่างๆ

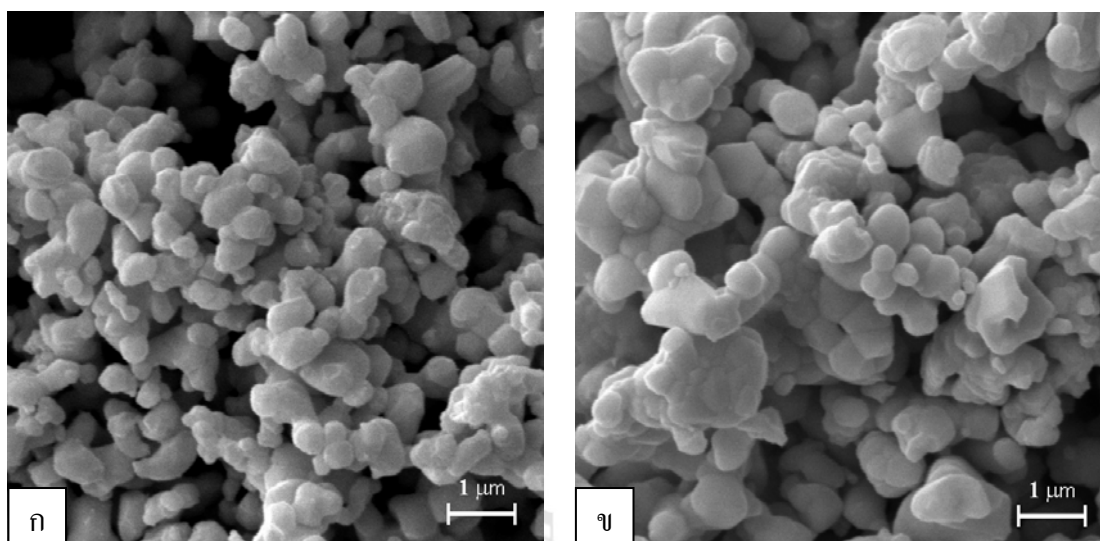
สารประกอบ	$D(0.1)$ (μm)	$D(0.5)$ (μm)	$D(0.9)$ (μm)	$D[4,3]$ (μm)
$\text{BaZr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$ calcine at 1200°C	1.09	6.59	13.46	7.10
$\text{BaFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$ calcine at 1200°C	1.15	3.06	16.08	5.67



ภาพที่ ค.1 แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของ
ผงแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเตและแบเรียมไอรอนไนโอเบต
หลังการเผาแคลไซน์

ผลการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของสารประกอบหลังการเผาแคลไซน์

จากผลการศึกษาลักษณะพื้นฐานของสารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเต และสารประกอบแบเรียมไอรอนไนโอเบต หลังการเผาแคลไซน์ พบว่าลักษณะอนุภาคของสารประกอบทั้ง 2 ชนิด เริ่มมีการเชื่อมติดกันของสารผสมในบริเวณผิวหน้าของอนุภาคของสารผสมทั้ง 2 ชนิด แสดงดังภาพที่ ค.2



ก. สารประกอบแบเรียมเซอร์โคเนตไททานต

ข. สารประกอบแบเรียมไอรอนไนโอเบต

ภาพที่ ค.2 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบ หลังการเผาแคลไซน์

ผลการศึกษาความแข็งของเซรามิกผสม

จากผลการศึกษาความแข็งผิวของเซรามิกผสมสารแบเรียมเซอร์โคเนตไททานตและแบเรียมไอรอนไนโอเบต ดังแสดงในตารางที่ ค.2 และภาพที่ ค.3 สามารถอธิบายผลการทดลองได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารแบเรียมไอรอนไนโอเบต ส่งผลให้เซรามิกมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันยังพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ก็ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นด้วย

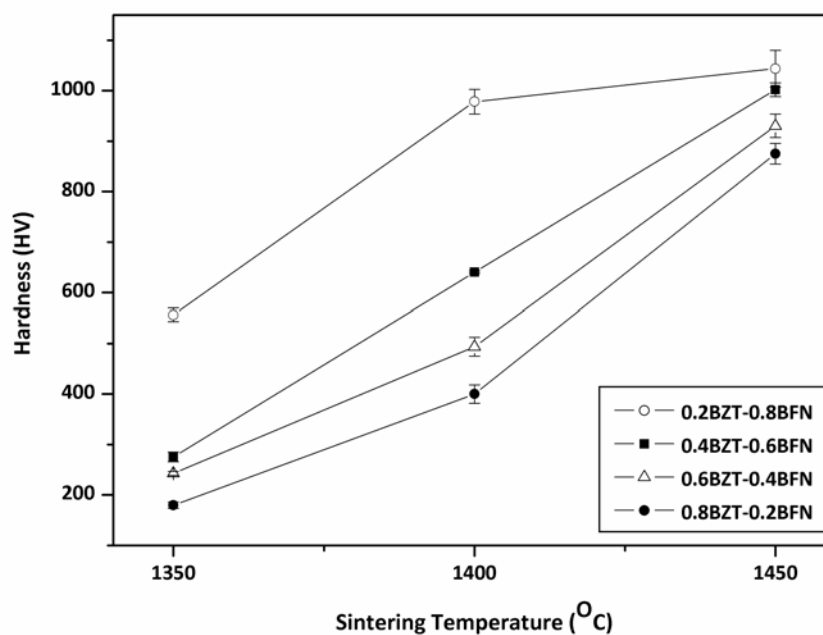
จากกราฟสามารถอธิบายผลของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ได้ว่า ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1350 องศาเซลเซียส ทำให้อนุภาคเกิดคอ(Neck) ขึ้นระหว่างกันมากกว่าอนุภาคหลังการเผาแคลไซน์ แต่จะยังปรากฏช่องว่างและโพรงขนาดใหญ่อยู่มาก ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมีค่าน้อยและปริมาณรูพรุนมาก จึงทำให้ค่าความแข็งผิวมีค่าน้อยและใกล้เคียงกันในเกือบทุกชิ้นงาน แต่ที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 1400 องศาเซลเซียส จะสังเกตได้ว่าค่าความแข็งผิวมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากที่อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1400 องศาเซลเซียส อนุภาคของส่วนผสมเริ่มมีการหลอมรวมเข้าหากันได้มากขึ้น โดยชิ้นงานที่มีอัตราส่วนผสมของสารแบเรียมไอรอนไนโอเบตมากกว่าจะมีการหลอมรวมกันของอนุภาคเข้าในช่องว่างได้มากกว่า จึงทำให้ค่าความหนาแน่นมากและรูพรุนน้อย ส่งผลให้มีความแข็งผิวมากกว่า อีกทั้งยังแสดงความแตกต่างของความแข็งผิวในทุก

อัตราส่วนอย่างชัดเจน ส่วนในอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่ 1450 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิการหลอมรวมกันดีที่สุดในทุกอัตราส่วนผสม ทำให้ความหนาแน่นสูง และปริมาณรูพรุนน้อยลงในทุกชิ้นงาน ทำให้ค่าความแข็งผิวมีค่าใกล้เคียงกันในทุกชิ้นงาน

โดยจากผลการทดสอบในทุกเงื่อนไข พบว่าค่าความแข็งผิวมีค่ามากที่สุด 1043.52 HV ในชิ้นงาน 0.2BZT-0.8BFN โดยอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1450 องศาเซลเซียส และค่าความแข็งผิวมีค่าน้อยสุด 179.58 HV ในชิ้นงาน 0.8BZT - 0.2BFN โดยอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ 1350 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานเซรามิกที่ได้จากการทดลอง

รหัสตัวอย่าง	ความแข็ง (HV)		
	1350 °C	1400 °C	1450 °C
0.2BZT - 0.8BFN	556.26	978.25	1043.52
0.4BZT - 0.6BFN	275.32	640.09	1001.97
0.6BZT - 0.4BFN	242.72	493.74	930.35
0.8BZT - 0.2BFN	179.58	399.86	875.11



ภาพที่ ค.3 กราฟแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานเซรามิกที่ได้จากการทดลอง

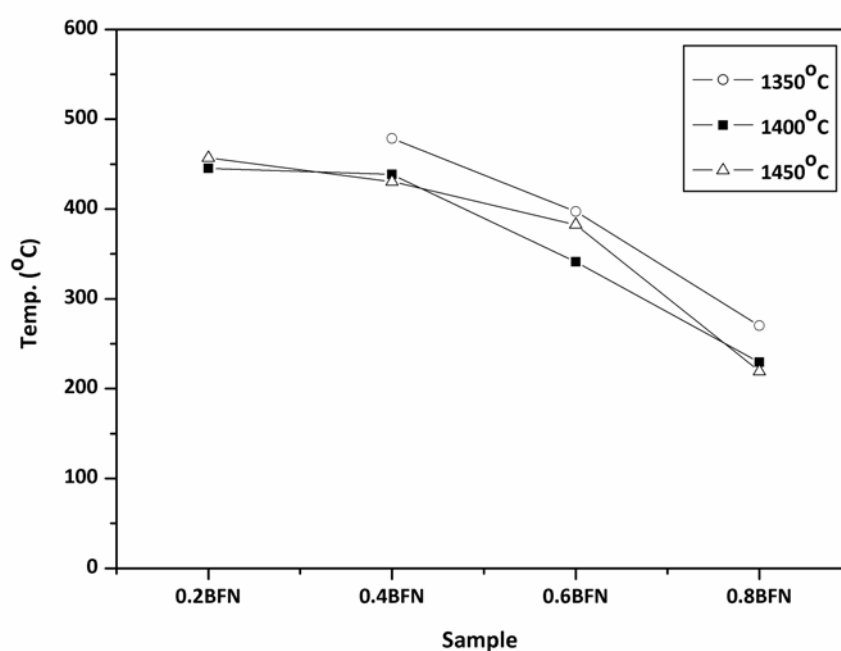
ผลการศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของเซรามิก

จากผลการศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณความร้อนเชิงอนุพันธ์ (Differential Scanning Calorimeter: DSC) พบว่าเมื่อปริมาณสารแบเรียมไอรอนไนโอเบตเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิการเผาขึ้นเตอรสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสมีค่าต่ำลงโดยจากผลการศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสแสดงดังตารางที่ ค.3 และภาพที่ ค.4

ตารางที่ ค.3 แสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของเซรามิกผสมระหว่างแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนต และแบเรียมไอรอนไนโอเบต

Sample	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)		
	at sinter 1350	at sinter 1400	at sinter 1450
0.2BZT + 0.8BFN	270.08	229.42	219.25
0.4BZT + 0.6BFN	397.35	341.17	382.58
0.6BZT + 0.4BFN	478.45	438.47	430.58
0.8BZT + 0.2BFN	-*	445.25	457.00

หมายเหตุ.* ไม่สามารถหาค่าได้ เนื่องจากอุณหภูมิสูงเกินขีดจำกัดของเครื่องวัด



ภาพที่ ค.4 แสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของเซรามิกผสมระหว่างแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเนต และแบเรียมไอรอนไนโอเบต ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ด้วยอุณหภูมิต่างๆ



ประวัติผู้เขียน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวหัตติกา หมายมั่น
วัน เดือน ปี เกิด	21 พฤษภาคม 2524
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง 333 ม.1 ต.ท่าสูด อ.เมือง จ.เชียงราย
ประวัติการศึกษา	2545 ปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต วิทยาศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2546 - ปัจจุบัน นักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย พ.ศ. 2545 – 2546 ผู้ช่วยวิจัย มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี
ผลงานทางวิชาการ	Maimon, H., Eitssayeam, S., Intatha, U., Satitada, G. & Tunkasira, T. (2008). Fabrication and characterization of (1-x)BZT – xBFN ceramic system. In International Conference on Smart Materials Smart/Intelligent Materials and Nanotechnology and 2nd International Workshop on Functional Materials and Nanomaterials (pp. 5). April 22-25, Imperial Mae Ping Hotel, Chiang Mai: (SmartMat-'08) & (IWOFM-2) Maimon, H., Eitssayeam, S., Intatha, U., Tunkasira, T. & Satitada, G. (2008). Phase evolution and physical properties of (1-x)BZT – xBFN ceramic system. Advanced Materials Research, 55-57 , 53-56.