

การสังเคราะห์และสมบัติของแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินนาโนคอมโพสิต
สำหรับใช้งานเป็นตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูง

FABRICATION AND PROPERTIES OF BARIUM TITANATE/EPOXY RESIN
NANOCOMPOSITES FOR HIGH ENERGY DENSITY CAPACITORS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FABRICATION AND PROPERTIES OF BARIUM TITANATE/ EPOXY RESIN
NANOCOMPOSITES FOR HIGH ENERGY DENSITY CAPACITORS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์และสมบัติของแบเรียมไททานेट/อีพอกซีเรซิน
นาโนคอมโพสิต สำหรับใช้งานเป็นตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูง

Special Project Title Fabrication and Properties of Barium Titanate/Epoxy Resin
Nanocomposites For High Energy Density Capacitors

นักศึกษา นางสาวสุวิมล คงสบาย
รหัสประจำตัว 57110049
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วรรณวิทย์ วิทยากร

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วินิตดา วงศ์วิริยะพันธ์	
ผศ.ดร.ทศพล เมลืองนนท์	
รศ.ดร.วรรณวิทย์ วิทยากร	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่ 15 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานวิจัย	การสังเคราะห์และสมบัติของแบเรียมไททาเนต/อ๊พอกซีเรซิน นาโนคอมโพสิต สำหรับใช้งานเป็นตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูง
นักศึกษา	นางสาวสุภัทร คงสบาย
รหัสประจำตัว	57110049
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วรรณวิไล วิทยาการ

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อ๊พอกซีเรซินที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆกันโดยใช้เทคนิควิธีการหล่อแบบดั้งเดิม จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก และค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริก นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิสเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นพลังงานของวัสดุ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสมบัติทางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของแบเรียมไททาเนต และจะขึ้นกับความเป็นรูพรุนและการกระจายตัวของเฟสแบเรียมไททาเนต จากนั้นจึงเลือกสัดส่วนองค์ประกอบที่เหมาะสมเพื่อทำการปรับปรุงการกระจายตัวของอนุภาคแบเรียมไททาเนตด้วยเทคนิคการรีฟลักซ์และการใช้สารสอดแรงดึงผิว (Span80) พบว่าอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่ถูกรีฟลักซ์แล้วจะมีการกระจายตัวในโครงสร้างจุลภาคที่ดีขึ้นและเกิดการรวมตัวกันน้อยลง เนื่องจากพื้นผิวของอนุภาคถูกล้อมรอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล ดังนั้นจึงทำให้อนุภาคของแบเรียมไททาเนตมีการกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้นในเมทริกซ์อ๊พอกซีเรซินและมีการรวมตัวกันลดลงอย่างชัดเจน ส่งผลให้ชั้นงานนาโนคอมโพสิตมีแนวโน้มที่จะมีความหนาแน่นสูง แต่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

คำสำคัญ : แบเรียมไททาเนต, นาโนคอมโพสิต, เทคนิคการหล่อแบบดั้งเดิม, วัสดุไดอิเล็กทริกสำหรับตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูง

Project Title	Fabrication and Properties of Barium Titanate/Epoxy Resin Nanocomposites for High Energy Density Capacitors
Student	Miss Suwapat Kongsabay
Student ID	57110049
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2017
Project Advisor	Assoc.Prof.Dr.Wanwilai Vittayakorn

ABSTRACT

In this work, the barium titanate/epoxy resin nanocomposites were prepared by the conventional casting method in various ratios. The physical properties, microstructure and electrical properties such as dielectric constant, dielectric loss and dielectric breakdown strength were investigated for all samples. The polarization hysteresis loops were also investigated in order to calculate the energy density of materials. From the results, it was found that the electrical properties changed with barium titanate content and strongly depended on porosity and the distribution of secondary phase. Therefore, optimum compositions were selected to improve the distribution of barium titanate particle by using reflux technique and dispersant (Span80). It was found that the distribution of refluxed particle showed a better microstructure and less agglomeration since the particle surface was surrounded by hydroxyl group (-OH). This made barium titanate more dispersible in epoxy resin matrix and the agglomeration was clearly reduced. As a result, the developed nanocomposites tended to have higher densification, but the dielectric constant and dielectric loss showed just slightly different.

Keyword : barium titanate, nanocomposites, conventional casting method, dielectric material for high energy density capacitors

กิตติกรรมประกาศ

การที่โครงการวิจัยเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วรรณวิทย์ วิทยากร ที่คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางแก้ปัญหา ตลอดจนความช่วยเหลือ ความรู้ และประสบการณ์อันดีแก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วินิตดา วงศ์วิริยะพันธ์ และ ผศ.ดร.ทศพล เมลืองนนท์ ประธานและกรรมการในการสอบหัวข้อและโครงร่างโครงการวิจัย ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะสำหรับโครงการชิ้นนี้ รวมไปถึงการชี้แนะให้เห็นถึงข้อบกพร่องต่างๆ ที่เมื่อข้าพเจ้าได้นำไปปรับปรุงแก้ไขแล้วจะทำให้โครงการวิจัยเล่มนี้สำเร็จและมีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ทุกท่านที่เป็นสมาชิกในหน่วยวิจัยวัสดุขั้นสูงของคณะวิทยาศาสตร์ ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางแก้ปัญหา ตลอดจนการช่วยเหลือในการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ และขอขอบคุณ สมาชิกทุกท่านในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์และเพื่อนผู้ที่อยู่เคียงข้างข้าพเจ้าที่วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีฯแห่งนี้ ที่เป็นกำลังใจสำคัญในการก้าวผ่านทุกอุปสรรคของข้าพเจ้า รวมไปถึงการให้ความช่วยเหลือและคอยช่วยแก้ไขปัญหามากมายที่เกิดขึ้น ตลอดจนมิตรภาพที่ดีที่ข้าพเจ้าได้รับตลอดการศึกษาในระดับปริญญาตรีนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ สมาชิกในครอบครัวทุกท่านที่คอยส่งเสริม ผลักดัน และเป็นกำลังใจหลักให้ข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

สุวภัทร คงสบาย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญภาพ	vii
สารบัญตาราง.....	xiii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 กลไกทางไดอิเล็กทริก.....	6
2.1.1 โพลาริซเอชันไดอิเล็กทริกและโพลาริซเอชันต่อม.....	7
2.1.2 โพลาริซเอชันไดอิเล็กทริก.....	7
2.1.3 โพลาริซเอชันไดอิเล็กทริกหรือโพลาริซเอชันขั้วคู่.....	8
2.1.4 โพลาริซเอชันไดอิเล็กทริก.....	9
2.2 สมบัติไดอิเล็กทริก.....	9
2.2.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก.....	9
2.2.2 ค่าความคงทนไดอิเล็กทริก.....	12
2.2.3 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก.....	12
2.2.4 ตัวประกอบการสูญเสีย.....	13
2.3 ประเภทของวัสดุไดอิเล็กทริก	14
2.3.1 วัสดุไดอิเล็กทริกเชิงเส้น	14
2.3.2 วัสดุไดอิเล็กทริกไม่เชิงเส้น.....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูง.....	16
2.4.1 การเก็บพลังงานในตัวเก็บประจุ.....	16
2.4.2 วัสดุไดอิเล็กทริกที่ใช้ในตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูง.....	16
2.5 แบเรียมไททาเนตและการใช้งานเป็นตัวเก็บประจุ.....	19
2.5.1 ข้อมูลทั่วไปของแบเรียมไททาเนต.....	19
2.5.2 การใช้งานเป็นตัวเก็บประจุ.....	22
2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
2.6 วัสดุคอมโพสิตที่มีแบเรียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบหลัก.....	26
2.6.1 วัสดุคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตทั่วไป.....	26
2.6.2 วัสดุคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิเมอร์.....	27
2.6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
2.7 การเตรียมชิ้นงาน.....	31
2.7.1 การเตรียมเซรามิก.....	31
2.7.2 การเตรียมวัสดุคอมโพสิต.....	35
2.7.3 การรีฟลักซ์.....	40
2.8 อีพอกซีเรซิน.....	45
2.8.1 การสังเคราะห์อีพอกซีเรซิน.....	45
2.8.2 การนำไปใช้งาน.....	50
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	51
3.1 สารเคมีที่ใช้.....	51
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้.....	51
3.3 กระบวนการเตรียมวัสดุแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซิน นาโนคอมโพสิต.....	53
3.4 กระบวนการเตรียมเซรามิกแบเรียมไททาเนต.....	55
3.4.1 การเตรียมผงแบเรียมไททาเนตก่อนการอัดเม็ด.....	55
3.4.2 กระบวนการอัดเม็ด.....	55
3.4.3 กระบวนการเผาพูนึกอนภาค.....	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 กระบวนการรีฟลักซ์แบเรียมไททาเนตด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	57
3.6 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ	59
3.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	60
3.8 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	63
3.8.1 การเตรียมชิ้นงาน	63
3.8.2 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก	64
3.8.3 การวัดค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริก	64
3.8.4 การวัดค่าวงวนฮิสเทอรีซิส	65
บทที่ 4 ผลการทดลอง	67
4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงาน นาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อพอกซีเรซิน	67
4.1.1 สมบัติทางกายภาพ	67
4.1.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค	69
4.1.3 สมบัติทางไฟฟ้า	74
4.2 การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงาน นาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อพอกซีเรซิน	80
4.1.1 สมบัติทางกายภาพ	80
4.1.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค	82
4.1.3 สมบัติทางไฟฟ้า	86
บทที่ 5 สรุปผลทดลองและข้อเสนอแนะ	95
5.1 สรุปผลทดลอง	95
5.2 ข้อเสนอแนะ	96
บรรณานุกรม	97
ประวัติผู้เขียน	102

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นพลังงานของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน	1
2.1 การเกิดปรากฏการณ์โพลาริซ์ที่ความถี่ต่างๆกัน	6
2.2 โพลาริซ์อเล็กทริกและโพลาริซ์อะตอม	7
2.3 โพลาริซ์ไอออนิก.....	8
2.4 การหมุนของขั้วคู่ไฟฟ้าในสนามไฟฟ้า.....	8
2.5 โพลาริซ์ปลดประจุ.....	9
2.6 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน เมื่อไม่มีสารไดอิเล็กทริก	10
2.7 การเกิดเฟสของกระแสไฟฟ้าสลับที่ไม่สามารถรักษาจังหวะร่วมกับแรงดันไฟฟ้าขึ้น ระหว่างโพลาริซ์ขั้วคู่กับสนามไฟฟ้า	14
2.8 การจัดแบ่งประเภทของวัสดุอิเล็กทริก	15
2.9 การจัดแบ่งกลุ่มของผลึกโดยการใช้พื้นฐานสมมาตรของผลึก.....	20
2.10 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์.....	20
2.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงผลึกของแบเรียมไททานเตต.....	21
2.12 (ก) โครงสร้างผลึกของแบเรียมไททานเตต, (ข) ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี, (ค) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี.....	21
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของแบเรียมไททานเตต.....	24
2.14 โครงสร้างจุลภาคของแบเรียมไททานเตตที่เผาผลาญที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ด้วยการใส่ตัวช่วยในการเผาผลาญ $x\%$, (a) $x = 0\%$, (b) $x = 3\%$, (c) $x = 5\%$	25
2.15 กราฟแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ตัวเก็บประจุคอมโพสิต ที่เตรียมจากแบเรียมไททานเตตและโซเดียมไนโอเบต.....	26
2.16 ทรานสดิวเซอร์ (transducer) แบบแมกนีโตอิเล็กทริกซึ่งผลิตจากคอมโพสิตระหว่าง แบเรียมไททานเตตและโคบอลต์-ไททานเนียม-เฟอร์ไรต์.....	27
2.17 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุแบเรียมไททานเตต/พอลิไวนิลิลิดีนฟลูออไรด์คอมโพสิต ที่ความถี่ (a) 100 ถึง 100k เฮิรซ์, (b) 100k ถึง 10M เฮิรซ์.....	28
2.18 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุแบเรียมไททานเตต/พอลิไวนิลิลิดีนฟลูออไรด์ คอมโพสิต ที่ความถี่ (a) 100 ถึง 100k เฮิรซ์, (b) 100k ถึง 10M เฮิรซ์	29

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.19 วงวนฮิสเทอริสิสของวัสดุแบบเรียบมโททานेत/พอลิไวนิลอิติดีนฟลูออไรด์คอมโพสิตที่มีอนุภาคแบบเรียบมโททานेतเป็นองค์ประกอบขนาดต่างๆกัน.....	29
2.20 ค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของวัสดุแบบเรียบมโททานेत/อีพอกซีเรซินนาโนคอมโพสิตที่มีปริมาณแบบเรียบมโททานेतต่างๆกัน.....	30
2.21 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุแบบเรียบมโททานेत/อีพอกซีเรซินนาโนคอมโพสิต.....	31
2.22 กระบวนการหล่อแบบ	32
2.23 การอัดรีด	32
2.24 การอัดแห้ง, (ซ้าย) การอัดในทิศทางเดียว, (ขวา) การอัดทุกทิศทาง.....	32
2.25 การเปลี่ยนแปลงของอนุภาคเมื่อทำการเผาผนึก.....	34
2.26 แบบจำลองโครงสร้างจุลภาคในกระบวนการเผาผนึก, (a) ก่อนการเผาผนึกอนุภาคจะอยู่กันแบบหลวมๆ, (b) การประสานกันของอนุภาคในระยะแรก, (c) การประสานกันของอนุภาคในระยะกลางและ (d) การหดรัดของรูพรุนและการเกิดขอบเกรนในระยะสุดท้าย.....	34
2.27 การจำแนกประเภทของวัสดุคอมโพสิตตามลักษณะของสารเสริมแรง.....	36
2.28 วัสดุคอมโพสิตที่มีสารเสริมแรงเป็น (ก) เส้นใยสั้นและ (ข) เส้นใยยาว	36
2.29 รูปแบบการเชื่อมต่อเฟสแบบต่างๆของวัสดุผสมที่มี 2 เฟส.....	40
2.30 แผนภาพอุปกรณ์การรีฟลักซ์.....	41
2.31 สเปกตรัม FTIR ของ (a) อนุภาคนาโนแบบเรียบมโททานेतเริ่มต้น และอนุภาคนาโนแบบเรียบมโททานेतที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้เวลา (b) 1, (c) 2, (d) 3, (e) 4, (f) 5 และ (g) 6 ชั่วโมง.....	43
2.32 สมการในการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	44
2.33 สเปกตรัม FTIR ของ (a) อนุภาคนาโนแบบเรียบมโททานेतเริ่มต้น, (b) อนุภาคนาโนแบบเรียบมโททานेतที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ (c) อนุภาคนาโนแบบเรียบมโททานेतที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดไฮโดรคลอริก.....	44
2.34 ปฏิกิริยาระหว่างบิสฟีนอลเอกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาขั้นแรกในการสังเคราะห์อีพอกซี.....	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.35 ปฏิกริยาระหว่างอิพิคโลโรไฮดรินกับอัลคอกไซด์ไอออน	46
2.36 ปฏิกริยาระหว่างอิพิคโลโรไฮดรินกับอัลคอกไซด์ไอออนที่ปลายอีกด้านหนึ่งของโมเลกุล	46
2.37 ปฏิกริยาระหว่างอัลคอกไซด์ไอออนกับโคเมอร์	47
2.38 ปฏิกริยาระหว่างประจุลบของอิพอกซีกับโมเลกุลของน้ำ	47
2.39 เมื่อ n มีค่าประมาณ 20-30 พรีพอลิเมอร์ที่ได้จะเริ่มมีลักษณะเป็นของแข็ง	48
2.40 ตัวอย่างโครงสร้างเคมีของสารประกอบเอมีนที่มีหลายหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล	48
2.41 กลไกการเกิดปฏิกริยาระหว่างสารประกอบเอมีนที่มีหลายหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล กับพรีพอลิเมอร์	49
2.42 โครงสร้างแบบร่างแหของอิพอกซี	50
3.1 แผนผังขั้นตอนการทดลอง	53
3.2 แผนผังขั้นตอนการเตรียมวัสดุแบบเรียมไททานเตต/อิพอกซีเรซินนาโนคอมโพสิต	54
3.3 เครื่องอัดแบบแกนเดี่ยวด้วยระบบไฮดรอลิก	56
3.4 แม่พิมพ์โลหะสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน	56
3.5 แผนภาพแสดงการจัดเรียงชิ้นงานในถ้วยอะลูมินาสำหรับการเผาผนึกอนุภาค	57
3.6 แผนภาพแสดงการให้อุณหภูมิในกระบวนการเผาผนึกอนุภาค	57
3.7 การรีฟลักซ์แบบเรียมไททานเตตในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	58
3.8 ระบบการกรองสารละลายแบบลดความดัน	59
3.9 ลักษณะการเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนที่มีต่อชิ้นงานเซรามิก	61
3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	62
3.11 การติดชิ้นงานลงบนแท่นทองเหลือง	62
3.12 เครื่องที่ใช้เคลื่อนผิวหน้าด้วยทองคำ	63
3.13 เครื่อง LCR meter	64
3.14 แผนภาพแสดงการทดสอบวัดค่าความคงทนไดอิเล็กทริก	65
3.15 ระบบทดสอบวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก	66
3.16 การหาความหนาแน่นพลังงานจากกราฟวงฮิสเทอรีซิส	66
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแบบเรียมไททานเตตกับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของ ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียมไททานเตต/อิพอกซีเรซิน	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4.2	ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียบไททานิต/อิมพอกซีเรซินที่เตรียมได้ โดยที่ (A) BT 10 wt%, (B) BT 20 wt%, (C) BT 30 wt%, (D) BT 40 wt%, (E) BT 50 wt%, (F) BT 55 wt%, (G) BT 60 wt% และ (H) BT 65 wt% ตามลำดับ.....	70
4.3	ผิวแตกของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียบไททานิต/อิมพอกซีเรซินที่กำลังขยาย 45 เท่า โดยที่ (A) BT 0 wt%, (B) BT 10 wt%, (C) BT 10 wt%, (D) BT 30 wt%, (E) BT 40 wt%, (F) BT 50 wt%, (G) BT 55 wt% และ (H) BT 60 wt% ตามลำดับ.....	71
4.4	ผิวแตกของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียบไททานิต/อิมพอกซีเรซินที่กำลังขยาย 200 เท่า โดยที่ (A) BT 0 wt%, (B) BT 10 wt%, (C) BT 10 wt%, (D) BT 30 wt%, (E) BT 40 wt%, (F) BT 50 wt%, (G) BT 55 wt% และ (H) BT 60 wt% ตามลำดับ.....	72
4.5	ผิวหน้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียบไททานิต/อิมพอกซีเรซินที่กำลังขยาย 1,000 เท่า โดยที่ (A) BT 0 wt%, (B) BT 10 wt%, (C) BT 10 wt%, (D) BT 30 wt%, (E) BT 40 wt%, (F) BT 50 wt%, (G) BT 55 wt% และ (H) BT 60 wt% ตามลำดับ.....	73
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความถี่ของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียบไททานิต/อิมพอกซีเรซินที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ.....	75
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกและความถี่ของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียบไททานิต/อิมพอกซีเรซินที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ.....	75
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ปริมาณแบบเรียบไททานิตโดยน้ำหนักในชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียบไททานิต/อิมพอกซีเรซินต่างๆกันที่ความถี่ 1,000 เฮิรตซ์	76
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกและปริมาณแบบเรียบไททานิตโดยน้ำหนักในชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียบไททานิต/อิมพอกซีเรซิน	77
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันและค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ	78
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นพลังงานและปริมาณของแบบเรียบไททานิตโดยน้ำหนักในชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียบไททานิต/อิมพอกซีเรซิน	79
4.12	ภาพจำลองการเกาะของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ผิวของอนุภาคแบบเรียบไททานิต	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแบเรียมไททาเนตกับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของ ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์, แบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 82	82
4.14 ผิวแตกของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่มีแบเรียมไททาเนต เป็นองค์ประกอบ 50 wt% ที่กำลังขยาย 45 เท่า โดยที่ (A) ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียม ไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์, (B) ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และ (C) ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 ด้วย 83	83
4.15 ผิวแตกของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่มีแบเรียมไททาเนต เป็นองค์ประกอบ 50 wt% ที่กำลังขยาย 200 เท่า โดยที่ (A) ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียม ไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์, (B) ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และ (C) ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 ด้วย 84	84
4.16 ผิวหน้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่มีแบเรียมไททาเนต เป็นองค์ประกอบ 50 wt% ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า โดยที่ (A) ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียม ไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์, (B) ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และ (C) ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 ด้วย 85	85
4.17 แบบจำลองแบบหลายแกนสำหรับรอยต่อระหว่างอนุภาคนาโนและพอลิเมอร์ 87	87
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความถี่ของชิ้นงานที่ทำจาก แบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์, แบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และแบเรียม ไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 โดยที่ (A) BT 50 wt%, (B) BT 55 wt% และ (C) BT 60 wt% ตามลำดับ 88	88
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับความถี่ของชิ้นงานที่ทำจาก แบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์, แบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และแบเรียม ไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 โดยที่ (A) BT 50 wt%, (B) BT 55 wt% และ (C) BT 60 wt% ตามลำดับ 89	89
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับปริมาณแบเรียมไททาเนตโดย น้ำหนักในชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่มีความถี่ 1,000 เฮิรซ์..... 90	90

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
4.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับปริมาณแบเรียมไททาเนตโดย น้ำหนักในชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่ความถี่ 1,000 เฮิรซ์.....	90
4.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกและปริมาณแบเรียม ไททาเนตโดยน้ำหนักในชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซิน.....	91
4.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันและค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์, แบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 โดยที่ (A) BT 50 wt%, (B) BT 55 wt% และ (C) BT 60 wt% ตามลำดับ	93
4.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นพลังงานและปริมาณของแบเรียม ไททาเนตโดยน้ำหนักในชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่ทำจาก แบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์, แบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และแบเรียม ไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80.....	94

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	5
2.1 วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีแบเรียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบสำหรับใช้ในตัวเก็บประจุ แบบหลายชั้น.....	23
4.1 ค่าความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง และน้ำหนักของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/ อิพอกซีเรซินที่วัดค่าได้.....	68
4.2 ค่าปริมาตร ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นทางทฤษฎี และความหนาแน่นสัมพัทธ์ของ ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อิพอกซีเรซินที่คำนวณได้	68
4.3 ค่า P_s , P_r , E_c และพื้นที่ของวงวนฮิสเทอรีซิสของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต	79
4.4 ค่าความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง และน้ำหนักของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/ อิพอกซีเรซินของชิ้นงานที่ปรับปรุงแล้ว	81
4.5 ค่าปริมาตร ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นทางทฤษฎี และความหนาแน่นสัมพัทธ์ของ ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อิพอกซีเรซินที่ปรับปรุงแล้วที่คำนวณได้	81
4.6 ค่า P_s , P_r , E_c และพื้นที่ของวงวนฮิสเทอรีซิสของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตที่ปรับปรุงแล้ว	94

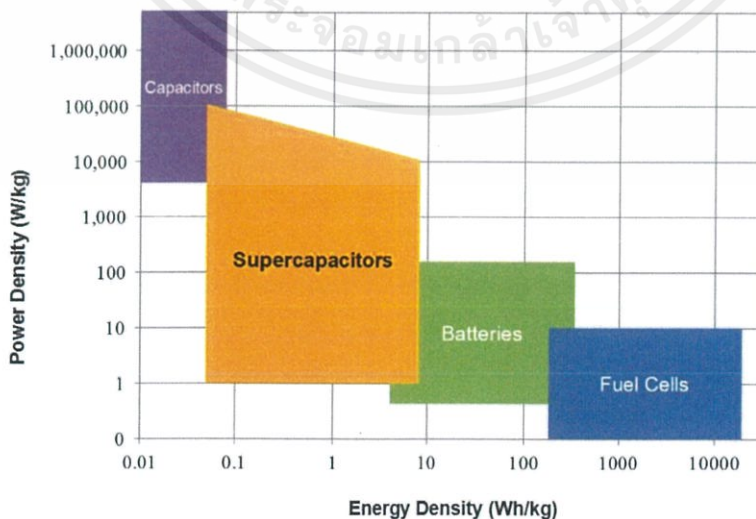
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ความต้องการใช้พลังงานและความตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มีมากขึ้น จึงทำให้พลังงานทดแทนเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ เนื่องจากส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าพลังงานหลักที่ใช้ในปัจจุบัน การใช้พลังงานทดแทนจึงเป็นการนำพลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานจากชีวมวล พลังงานลม และพลังงานความร้อนใต้พิภพ แต่เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานจากธรรมชาติ จึงทำให้การใช้งานมีข้อจำกัดในเรื่องของความไม่แน่นอนและไม่คงที่ของพลังงานที่ได้ โดยขึ้นกับสภาพภูมิอากาศและภูมิประเทศในแต่ละช่วงเวลา ทำให้ปริมาณความต้องการพลังงานและช่วงเวลาในการใช้งานไม่สอดคล้องกับพลังงานที่ได้ ระบบที่ใช้กักเก็บพลังงานจึงมีความจำเป็นอย่างมากในการใช้พลังงานทดแทนให้เกิดประโยชน์สูงสุด เนื่องจากสามารถแก้ปัญหาในเรื่องความไม่แน่นอนและไม่คงที่ของพลังงานที่ได้

การเก็บพลังงาน (energy storage) เป็นสิ่งที่ทำให้สามารถบริหารและจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการเก็บพลังงานต้องอาศัยอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (energy storage device) ที่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานในรูปแบบอื่นเพื่อให้สามารถกักเก็บและนำมาใช้งานในเวลาที่ต้องการได้ อุปกรณ์กักเก็บพลังงานมีอยู่หลายรูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบจะมีเทคโนโลยีที่ใช้ในการกักเก็บพลังงานที่แตกต่างกัน มีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 1.1 อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ ตัวเก็บประจุ (capacitors) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitors) แบตเตอรี่ (batteries) และเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cells)



ภาพที่ 1.1 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นพลังงานของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาพที่ 1.1 เป็นแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (power density) ซึ่งหมายถึงปริมาณของกำลังงาน (อัตราการถ่ายเทพลังงาน) ในหนึ่งหน่วยปริมาตร กับความหนาแน่นพลังงาน (energy density) ซึ่งหมายถึงปริมาณของพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในหนึ่งหน่วยปริมาตร โดยที่แบตเตอรี่และเซลล์เชื้อเพลิงใช้หลักการแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า ตัวเก็บประจุจะใช้การแยกประจุไฟฟ้าออกจากตัวกลางอิเล็กทริก เช่น พอลิเมอร์หรือชั้นออกไซด์ ส่วนตัวเก็บประจูงยิ่งยวดจะใช้การแยกตัวของประจุไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอุปกรณ์แต่ละชนิดที่กล่าวมาข้างต้นจะมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นของพลังงานที่แตกต่างกัน แบตเตอรี่และเซลล์เชื้อเพลิงมีความหนาแน่นของพลังงานสูง และความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าต่ำ ทำให้สามารถเก็บพลังงานได้ปริมาณมาก และใช้เวลาในการเก็บและคายประจุไฟฟ้ามากเช่นเดียวกัน แต่สำหรับตัวเก็บประจุและตัวเก็บประจูงยิ่งยวดพบว่าความหนาแน่นพลังงานมีค่าต่ำมาก แต่ความหนาแน่นของกำลังงานมีค่าสูงมาก แสดงให้เห็นว่าสามารถเก็บหรือคายประจุไฟฟ้าได้มาก ในขณะที่ใช้เวลาสั้นกว่าแบตเตอรี่และเซลล์เชื้อเพลิงมาก

อย่างไรก็ตามตัวเก็บประจูงยิ่งยวดส่วนใหญ่จะเป็นตัวเก็บประจุแบบเปียก ซึ่งจะขึ้นกับการทำขั้วไฟฟ้าที่อยู่ในฉนวนที่เป็นของเหลว ที่มักมีปัญหาเกี่ยวกับความซับซ้อนในการสร้าง การกัดกร่อนทางเคมี การหาชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมได้ยาก และอันตรายเกี่ยวกับการรั่วไหลของของเหลว ดังนั้นตัวเก็บประจุแบบดั้งเดิมยังคงอยู่ในความสนใจ และต้องการการพัฒนาประสิทธิภาพทางด้านความหนาแน่นของพลังงานให้มีค่าที่สูงขึ้น

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่เก็บสะสมประจุไฟฟ้า เพื่อจ่ายให้แก่วงจร สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น ใช้เป็นฟิลเตอร์ (filter) กรองไฟฟ้ากระแสตรง ถ่ายทอดหรือเชื่อมโยงสัญญาณ (coupling) เข้าด้วยกัน กรองผ่านความถี่ (bypass) และกั้นการไหลย้อนกลับ (blocking) ของไฟฟ้ากระแสตรง เป็นต้น ปริมาณประจุที่ตัวเก็บประจุสามารถเก็บได้ขึ้นกับค่าความจุไฟฟ้า (capacitance; C) ของวัสดุไดอิเล็กทริก และค่าความจุไฟฟ้านั้นขึ้นกับ 3 ตัวแปร คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ (A) ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำหรือความหนาของวัสดุไดอิเล็กทริก (d) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ) ซึ่งถ้าต้องการให้ตัวเก็บประจุมีความจุไฟฟ้าสูงจะต้องทำให้แผ่นตัวนำมีพื้นที่หน้าตัดมาก ใช้วัสดุที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูง และมีความหนาต่ำหรือทำให้บางนั่นเอง ดังนั้นวัสดุไดอิเล็กทริกที่เลือกใช้ควรมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง โดยส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุประเภทสารประกอบเซรามิกที่มีสมบัติทางไฟฟ้าที่เรียกว่า อิเล็กโทรเซรามิก (electro-ceramics) เนื่องจากมีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite) และสูตรโครงสร้างสามารถเป็นผลึกได้หลายรูปแบบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตามอุณหภูมิ ตัวอย่างวัสดุที่นิยมใช้ได้แก่ เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate; PZT) เลดแมกนีเซียมไนโอเบต (lead magnesium niobate; PMN) แบเรียมไททาเนต (barium titanate; BT) เป็นต้น แต่ปัจจุบันในหลากหลายประเทศได้มีการห้ามใช้สารที่มีองค์ประกอบของตะกั่ว เนื่องจากมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้แบเรียมไททาเนตเป็นวัสดุที่กำลังได้รับความสนใจและถูกใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เนื่องจากการมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เมื่อนำแบเรียมไททาเนตมาใช้งานในแง่ของการเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกหรือฉนวนในตัวเก็บประจุ นั้น นอกจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต้องพิจารณาแล้ว ยังต้องคำนึงถึงค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (dielectric strength) หรือค่าความต่างศักย์สูงสุดที่วัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าจะสามารถทนได้ก่อนที่จะเกิดการเสียหาย (failure) และกลายเป็นตัวนำในที่สุด เนื่องจากแบเรียมไททาเนตเป็นวัสดุประเภท เซรามิกจึงมีความแข็ง แต่เปราะแตกง่าย ทำให้มีค่าความคงทนไดอิเล็กทริกที่ต่ำ ดังนั้นเมื่อใช้งานที่ ความต่างศักย์สูงๆจึงอาจทำให้เกิดความเสียหายในเนื้อวัสดุที่สามารถส่งผลให้ระบบอิเล็กทรอนิกส์เกิดการลัดวงจรได้ในที่สุด ดังนั้นจึงได้แนวคิดที่จะแก้ไขปัญหานี้โดยการนำแบเรียมไททาเนตมาเป็น วัสดุคอมโพสิต (composite) กับพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นและมีค่าความคงทนไดอิเล็กทริกสูง เพื่อที่จะสามารถรวมทั้งจุดเด่นของแบเรียมไททาเนตที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง และพอลิเมอร์ที่มีค่า ความคงทนไดอิเล็กทริกสูงเข้าด้วยกัน ซึ่งพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ อีพอกซีเรซิน (epoxy resin) เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย มีราคาถูก สามารถเตรียมเป็นรูปทรงที่หลากหลายได้ และที่สำคัญที่สุด คือสามารถปรับปรุงค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของแบเรียมไททาเนตได้ โดยคาดว่าเมื่อทำการเตรียม วัสดุคอมโพสิตระหว่างแบเรียมไททาเนตและอีพอกซีเรซินแล้ว จะได้วัสดุที่มีสมบัติที่ดี และสามารถ นำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่มีศักยภาพสูงได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่มีคุณภาพสูง โดย กระบวนการหล่อแบบดั้งเดิม (conventional casting method)
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนองค์ประกอบที่แตกต่างกันต่อสมบัติทางกายภาพ โครงสร้าง จุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซิน
- 1.2.3 เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุนาโน คอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซิน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซิน โดย กระบวนการหล่อแบบดั้งเดิม (conventional casting method) โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ อัตราส่วนระหว่างแบเรียมไททาเนตและอีพอกซีเรซิน และมีตัวแปรในระหว่างการเตรียมชิ้นงาน ซึ่ง ได้แก่ ระยะเวลาในการเตรียม แรงที่ใช้ในการอัดเม็ดแบเรียมไททาเนต รวมไปถึงความแม่นยำในการ ชั่งส่วนผสมและวัดขนาดของชิ้นงานด้วย จากนั้นจึงนำชิ้นงานมาตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของ ชิ้นงาน สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้า หลังจากนั้นจึงทำการปรับปรุงสมบัติของวัสดุนาโน คอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินให้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติของแบเรียมไททาเนต อีพอกซีเรซิน และวัสดุนาโน คอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินเพิ่มมากขึ้น
- 1.4.2 มีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม
- 1.4.3 ทราบถึงกระบวนการวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้า โดยใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์
- 1.4.4 สามารถนำความรู้ที่ได้รับเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุชนิดอื่นได้
- 1.4.5 ทราบถึงปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติของวัสดุ สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการวิจัยและพัฒนาต่อไป



1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ปีพ.ศ. 2560					ปีพ.ศ. 2561			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. วางแผนในการทำโครงการวิจัยให้เหมาะสม	↔								
2. หาข้อมูลเพิ่มเติมและศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้อง	↔								
3. ออกแบบการทดลอง	↔								
4. จัดหาอุปกรณ์และสารเคมีที่ต้องใช้	↔								
5. ทำการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการหล่ออ็อกซีเรซินในแม่พิมพ์	↔								
6. ทำการทดลองเพื่อทำวัสดุคอมโพสิตรหว่าง BT และอ็อกซีเรซินในอัตราส่วนต่างๆกัน	↔								
7. เตรียมเม็ดเซรามิกของแบเรียมไททาเนต		↔							
8. วัดสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้า และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน		↔							
9. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองและวางแผนการทดลองขั้นต่อไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพชิ้นงาน		↔							
10. เขียนเล่มโครงการวิจัย	↔								
11. ทำการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพของวัสดุคอมโพสิตรหว่าง BT และอ็อกซีเรซิน						↔			
12. วัดสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้า และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานใหม่							↔		
13. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง นำมาเปรียบเทียบกับผลในขั้นแรก และสรุปผลการทดลอง							↔		
14. จัดทำรูปเล่มโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์									↔

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

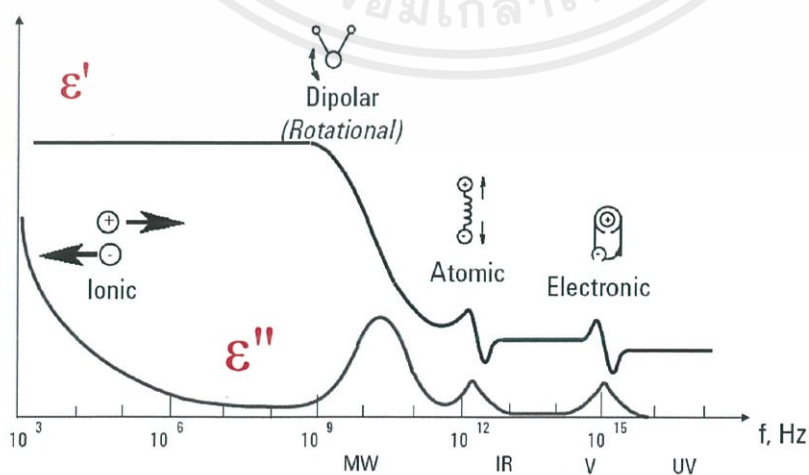
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในทำวัสดุไดอิเล็กทริกที่ใช้ในตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูง ดังนั้น ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบไปด้วยกลไกและสมบัติทางไดอิเล็กทริก การทำวัสดุคอมโพสิต กระบวนการขึ้นรูป ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับวัสดุ ตลอดจนเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติต่างๆของวัสดุ

2.1 กลไกทางไดอิเล็กทริก (dielectric mechanism) [1]

วัสดุอาจมีกลไกทางไดอิเล็กทริกที่หลากหลายหรือปรากฏการณ์โพลาไรซ์ที่ส่งผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ภาพที่ 2.1) วัสดุไดอิเล็กทริกมีการจัดเรียงของพาหะประจุไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยสนามไฟฟ้า ประจุจะกลายเป็นขั้วเพื่อชดเชยสนามไฟฟ้า เช่น ประจุบวกและประจุลบจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม ในระดับจุลภาค กลไกทางไดอิเล็กทริกสามารถนำไปสู่พฤติกรรมการเป็นไดอิเล็กทริก และกลไกแต่ละชนิดมีลักษณะเป็นความถี่ตัด (cutoff frequency) เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น กลไกการทำงานช้าจะหลุดออกไป ในทางกลับกันจะทำให้กลไกที่เร็วกว่ามีผลในการสูญเสียไดอิเล็กทริก จะแสดงให้เห็นถึงจุดยอดที่สอดคล้องกันในแต่ละความถี่ที่สำคัญ ขนาดและความถี่ตัดของแต่ละกลไกมีลักษณะเฉพาะในวัสดุที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปกลไกทางไดอิเล็กทริกสามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการรีแลกเซชัน (relaxation) และการเรโซแนนซ์ ผลจากการเรโซแนนซ์มักเกี่ยวข้องกับโพลาไรซ์อิเล็กทรอนิก (electronic polarization) หรือโพลาไรซ์อะตอม (atomic polarization) ในขณะที่ผลจากการรีแลกเซชันมักเกี่ยวข้องกับโพลาไรซ์ทิศทาง (orientation polarization)

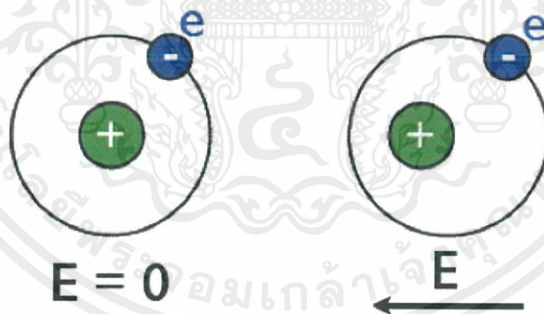


ภาพที่ 2.1 การเกิดปรากฏการณ์โพลาไรซ์ที่มีความถี่ต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 โพลาริซเอชันอิเล็กทรอนิกส์ (electronic polarization) และโพลาริซเอชันอะตอม (atomic polarization)

โพลาริซเอชันอิเล็กทรอนิกส์เกิดขึ้นในอะตอมที่เป็นกลาง (neutral atoms) เมื่อสนามไฟฟ้าทำให้นิวเคลียสเคลื่อนที่ด้วยผลจากอิเล็กตรอนที่อยู่รอบๆ ส่วนโพลาริซเอชันอะตอมเกิดขึ้นเมื่อไอออนบวกและลบเชิงลบที่อยู่ติดกันเกิดการยืดออก (stretch) ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป สำหรับของแข็งส่วนใหญ่ กลไกเหล่านี้จะเป็นการโพลาริซเอชันที่สำคัญในช่วงความถี่ไมโครเวฟ แม้ว่าการเกิดเรโซแนนซ์ที่แท้จริงจะเกิดขึ้นในความถี่ที่สูงกว่าก็ตาม ที่ความถี่ในช่วงอินฟราเรดและแสงที่มองเห็น (visible light) ต้องคำนึงถึงความเฉื่อยของอิเล็กตรอนที่โคจรอยู่ด้วย อะตอมสามารถจำลองเป็นสิ่งที่แกว่งไปมา (oscillator) ด้วยผลจากการลดลงของขนาดของการสั่น (damping effect) ซึ่งคล้ายกับในระบบสปริงและมวลเชิงกล (ภาพที่ 2.1, 2.2) ขนาดของการสั่น (amplitude) จะต่ำในทุกๆความถี่ที่นอกเหนือ จากความถี่เรโซแนนซ์ กลไกของโพลาริซเอชันอิเล็กทรอนิกส์และอะตอมที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์จะมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกน้อยมาก และสามารถระบุความถี่เรโซแนนซ์จากการตอบสนองที่สอดคล้องกันในค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการดูดกลืนสูงสุดในการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก และที่ความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์จะไม่ได้รับผลกระทบจากกลไกเหล่านี้ ดังนั้น จึงคาดว่า จะไม่มีความล่าช้า (lag) และไม่มีการสูญเสียใดๆเกิดขึ้น ยกเว้นที่ความถี่ที่ตอบสนองต่อพลังงานการเปลี่ยนผ่านของอิเล็กตรอน (electron transition energy)

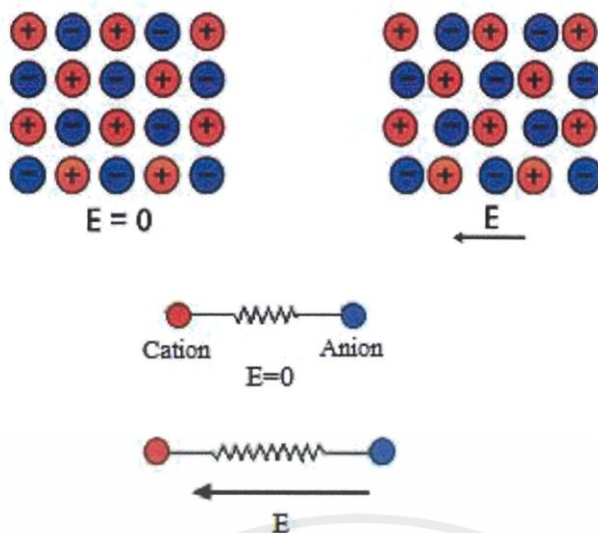


ภาพที่ 2.2 โพลาริซเอชันอิเล็กทรอนิกส์และโพลาริซเอชันอะตอม

2.1.2 โพลาริซเอชันไอออนิก (ionic polarization)

ไอออนบวกของของแข็งสามารถจำลองได้เป็นมวลที่มีประจุไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกันกับมวลที่อยู่ใกล้ที่สุดโดยสปริงที่มีความแข็งแรงแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.3 สนามไฟฟ้าจะทำให้ไอออนและขั้วของของแข็งเกิดการเคลื่อนที่ ในกรณีนี้คาดว่าความถี่จะขึ้นอยู่กับความล่าช้าตามประจุ มวล และค่าคงที่ของสปริง ซึ่งในกรณีนี้คือแรงระหว่างอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

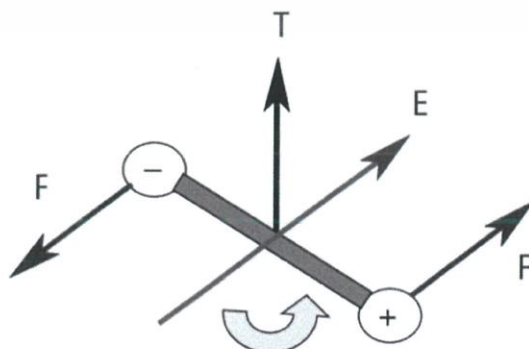


ภาพที่ 2.3 โพลาริเซชันไอออนิก

2.1.3 โพลาริเซชันทิศทาง (orientation polarization) หรือโพลาริเซชันขั้วคู่ (dipolar polarization)

โมเลกุลเกิดขึ้นเมื่ออะตอมรวมตัวกันเพื่อใช้อิเล็กตรอนร่วมกันอย่างน้อยหนึ่งตัว ซึ่งการจัดเรียงตัวใหม่ของอิเล็กตรอนนี้อาจทำให้เกิดความไม่สมดุลในการกระจายประจุที่จะทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ถาวร จึงทำให้ไดโพลโมเมนต์เรียงตัวในลักษณะสุ่ม กรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้า ดังนั้นจึงไม่เกิดการโพลาริเซชัน

สนามไฟฟ้า (E) จะใช้แรงบิด (T) บนขั้วคู่ไฟฟ้า (electric dipole) และขั้วคู่ไฟฟ้าจะหมุนให้อยู่ในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้า เป็นผลทำให้มีโพลาริเซชันทิศทางเกิดขึ้น (ภาพที่ 2.4) ถ้าสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนทิศทาง ก็จะทำให้แรงบิดเปลี่ยนไปด้วย แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนทิศทางของขั้วคู่ไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก การหมุนของขั้วคู่ไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ความถี่ผ่อนคลาย (relaxation frequency) ซึ่งมักเกิดขึ้นในช่วงความถี่ไมโครเวฟ

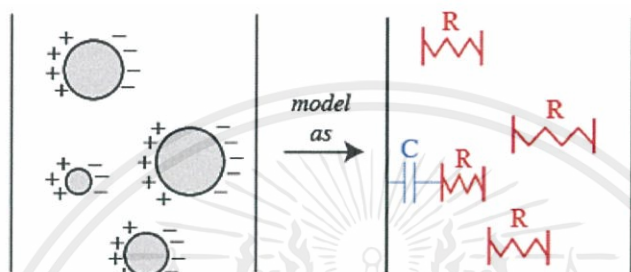


ภาพที่ 2.4 การหมุนของขั้วคู่ไฟฟ้าในสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 โพลาริซึ่ปโหลดประจุ (space charge polarization)

ในของแข็งหลายเฟสที่มีเฟสหนึ่งมีความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าเฟสอื่นๆ จึงทำให้ประจุสะสมอยู่ที่รอยต่อระหว่างเฟสนั้นๆ ซึ่งวัสดุจะประพฤติตัวเป็นเหมือนการรวมทั้งตัวต้านทานและตัวเก็บประจุเข้าด้วยกันในขนาดที่ละเอียดมาก ผลกระทบทั้งหมดจึงทำให้เป็นของแข็งที่มีการโพลาริซึ่ (ภาพที่ 2.5) ความถี่ที่ซับซ้อนคาดว่าจะเป็ผลมาจากช่วงของความจุไฟฟ้าและความต้านทานที่ถูกรวมกัน ซึ่งขึ้นกับขนาดของเกรนและความต้านทานของแต่ละเฟส โพลาริซึ่ชนิดนี้สามารถพบได้ในเหล็กเพอร์ไรท์ สารกึ่งตัวนำ และวัสดุผสมพอลิเมอร์



ภาพที่ 2.5 แสดงโพลาริซึ่ปโหลดประจุ

2.2 สมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) [2]

วัสดุไดอิเล็กทริก เป็นวัสดุที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากทางด้านอุตสาหกรรมเกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปแล้ววัสดุไดอิเล็กทริกมีสมบัติเป็นฉนวน คือไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ แต่จะมีความแตกต่างจากฉนวนไฟฟ้าทั่วไป คือ การมีสมบัติของการเก็บประจุไฟฟ้าได้ ซึ่งค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริกนี้ เรียกว่า ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าภายนอกให้แก่วัสดุ จะทำให้มีโพลาริเซชันเกิดขึ้น ซึ่งจะมีค่าเท่ากับผลรวมของค่าโพลาริเซชันต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (net polarization/unit volume) ถ้ามีค่าโพลาริเซชันสูงก็จะส่งผลให้วัสดุไดอิเล็กทริกมีค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยสมบัติทางไดอิเล็กทริกนี้มีตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.2.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant)

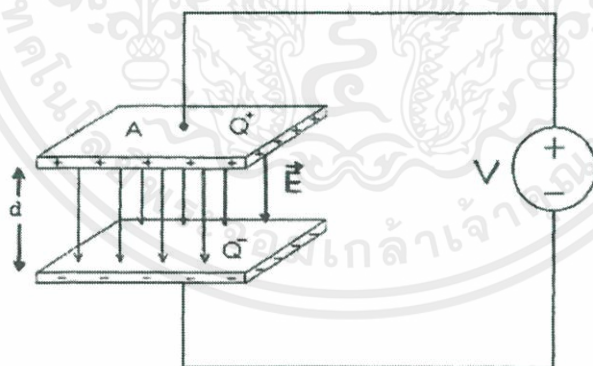
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีที่มาจากกรณีที่โมเลกุลมีขั้ว เมื่อถูกวางในสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเรียงตัวของโมเลกุล เกิดเป็นสนามไฟฟ้าภายใน (internal electric field) ขึ้น เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า โพลาริซึ่ขั้วคู่ (dipole polarization) และปริมาณของประจุไฟฟ้า (electric charge) ที่สะสมอยู่ในสนามไฟฟ้าภายใน เรียกว่า ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาทำเป็นฉนวน หรืออาจกล่าวง่าย ๆ ได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก หมายถึงความสามารถของฉนวนในการเก็บรักษาพลังงานไฟฟ้าเอาไว้ (electrical energy storage) ค่าคงที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดอิเล็กทริกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ในแง่ที่ว่าของเหลวจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าของแข็งนั้น เนื่องจากการเรียงตัวของขั้วคู่ (dipole) ในของเหลวเกิดได้ง่ายกว่า หลังจากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นโดยเนื่องมาจากการที่โมเลกุลมีความสามารถในการเคลื่อนไหวได้สูง จึงทำให้เกิดการชนกันได้มากและเป็นการทำลายการเรียงตัวของขั้วคู่ สังเกตว่าในกรณีของพอลิเมอร์แบบอสัณฐาน ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสของแก้ว (glass transition temperature) แต่การเปลี่ยนแปลงจะค่อนข้างกว้างและไม่ฉับพลันเหมือนในกรณีพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึก (crystalline polymers) ดังภาพที่ 2.6 เมื่อพิจารณาตัวเก็บประจุอย่างง่ายคือเป็นแผ่นขนานที่ทำด้วยโลหะ โดยมีระยะห่างระหว่างแผ่นเท่ากับ d และมีพื้นที่หน้าตัดของแผ่นขนานเท่ากับ A ระหว่างแผ่นขนานเป็นสุญญากาศ เมื่อมีศักย์ไฟฟ้า (V) ตกคร่อมแผ่นขนาน โดยที่แผ่นโลหะแผ่นหนึ่งจะเป็นแผ่นประจุบวก (+Q) และอีกแผ่นหนึ่งเป็นประจุลบ (-Q) ค่าประจุนี้เป็นสัดส่วนกับศักย์ไฟฟ้า ตัวเก็บประจุจะเก็บสะสมประจุไว้ เรียกว่าการประจุ (charge) ซึ่งจำนวนของประจุ (Q) ที่สะสมไว้ที่แผ่นโลหะจะขึ้นกับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ ดังสมการ

$$Q = CV \quad (2.1)$$

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.2)$$

โดยที่ C คือ ค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น C/V หรือ F



ภาพที่ 2.6 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน เมื่อไม่มีสารไดอิเล็กทริก

วัสดุไดอิเล็กทริกทำหน้าที่เป็นฉนวนที่ใช้คั่นระหว่างแผ่นตัวนำในตัวเก็บประจุ เพื่อกันให้ความหนาแน่นของประจุสูงกว่าประจุรวมของทั้งอากาศ โดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เป็นตัวเลขบ่งบอกให้ทราบว่าค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีการใช้วัสดุไดอิเล็กทริกนั้น มีค่ามากกว่าตัวเก็บประจุอากาศเป็นกี่เท่า ดังสมการ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \epsilon C_0 \quad (2.3)$$

โดยที่ C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุสุญญากาศ

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริก

ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

โดยปกติแล้วค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะแสดงเป็นค่าสัมพัทธ์ (ϵ_r) เทียบกับค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (ϵ_0) คือ

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.4)$$

โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ มีค่า 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ

และจากความสัมพันธ์ $C = Q/V$ ในกรณีที่ไม่มีวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำ จะได้ว่า

$$C = C_0 \epsilon_0 A/d_0 \quad (2.5)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ของแผ่นไดอิเล็กทริก

d_0 คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ

ในกรณีที่มีวัสดุไดอิเล็กทริก ค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่า ซึ่งเท่ากับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ หรือที่เรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ ดังสมการ 2.6

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 A/d \quad (2.6)$$

โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ มีค่า 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่มีวัสดุไดอิเล็กทริก

A คือ พื้นที่ของแผ่นไดอิเล็กทริก

d คือ ความหนาของแผ่นไดอิเล็กทริก

ค่าความจุไฟฟ้าเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริก นั้นๆว่ามีค่าเป็นกี่เท่าของความสามารถในการเก็บประจุของสุญญากาศ ดังนั้น การใช้วัสดุไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุ จึงเป็นสิ่งที่ช่วยเพิ่มพลังงานสะสมในตัวเก็บประจุให้สามารถสร้างตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็กแต่ความจุไฟฟ้าสูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (dielectric strength)

ค่าความคงทนไดอิเล็กทริก หมายถึง ค่าความต่างศักย์สูงสุดที่วัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าจะสามารถทนได้ก่อนที่จะเกิดการเสียหาย (failure) หรือยังคงรักษาสภาพความเป็นฉนวนไว้ได้ ดังนั้นค่าความคงทนไดอิเล็กทริกจึงมีหน่วยเป็นโวลต์ต่อมิลลิเมตร โดยเมื่อวัสดุที่เป็นฉนวนได้รับกระแสไฟฟ้า จะเกิดการหลุดรั่ว (leakage) ของกระแส ไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความบกพร่อง (defects) ต่างๆที่อยู่ในวัสดุ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าความคงทนไดอิเล็กทริก ก็คือ ความคงทน (strength) ของวัสดุฉนวนในการใช้งานทางไฟฟ้า และยิ่งวัสดุที่มีค่าความคงทนไดอิเล็กทริกสูง ก็จะเป็นฉนวนที่มีคุณภาพดี

เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกได้รับความต่างศักย์ที่สูงมากเกินไปกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กทริก วัสดุจะถูกทำลายและมีการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น การเสียหายของวัสดุไดอิเล็กทริกที่สามารถเกิดขึ้นได้ มีดังต่อไปนี้

2.2.2.1 เบรกดาวน์ทางความร้อน เนื่องจากการสูญเสียทางความร้อนและถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมไม่ทัน อุณหภูมิจึงเกิดการสูงขึ้น และส่งผลทำให้สมบัติทางไฟฟ้าพังทลายไป ซึ่งการเกิดการพังทลายด้วยความร้อนนี้จะนำไปสู่การพังทลายทางไฟฟ้าตามมาได้

2.2.2.2 เบรกดาวน์บริสุทธิ์ เริ่มจากอิเล็กตรอนบางส่วนไปยังแถบการนำที่อาจทำให้เกิดไอออนได้ ดังนั้นจึงอาจทำให้จำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้นจนแผ่นเซรามิกเสียหาย ซึ่งอาจมากถึง 100 กิโลโวลต์ต่อมิลลิเมตร

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าความคงทนไดอิเล็กทริก คือ ความหนาของชิ้นงาน โดยทั่วไปจะอนุมานว่าค่าความคงทนไดอิเล็กทริก แปรผกผันกับความหนายกกำลัง 0.4 โดยที่ชิ้นงานที่หนาจะมีความบกพร่องมากกว่า (เช่น ช่องว่างภายใน รอยร้าว ความชื้น หรือความไม่สม่ำเสมอของชิ้นงาน) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อค่าความคงทนไดอิเล็กทริก ได้แก่ รูปทรง (geometry) ของอิเล็กโทรด อุณหภูมิ และกระบวนการขึ้นรูปของชิ้นงานที่ทดสอบที่อาจจะทำให้เกิดตำหนิ เช่น จุดเชื่อมต่อ (weld-line) ช่องว่าง ฟองอากาศ เป็นต้น

2.2.3 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss)

เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำให้วัสดุมีพฤติกรรมแตกต่างออกไปจากเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้ากระแสสลับพบว่าสนามไฟฟ้าจะสลับตามรูปแบบของคลื่นไซน์ ดังนั้นเมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับแก่วัสดุไดอิเล็กทริกจะทำให้ไดโพลภายในวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาตามความถี่ของสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่ให้ โดยเมื่อให้ความถี่สูงจะทำให้แต่ละไดโพลไม่สามารถกลับตัวได้ทันกับสนามไฟฟ้าที่ให้ จึงทำให้เกิดการคลายตัวขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุไดอิเล็กทริก ไดโพลในวัสดุจะใช้พลังงานที่ให้ในการกลับตัวไปมา แต่เมื่อให้ความถี่สูงไดโพลจะไม่สามารถกลับตัวได้ทันจึงทำให้ไม่เกิดการกลับตัว แต่ยังคงรับพลังงานจากสนามไฟฟ้าอยู่ จึงทำให้พลังงานเหล่านั้นค่อยๆสะสมเกิดเป็นความร้อนขึ้นในวัสดุ และส่งผลให้เกิดการสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กทริกในที่สุด ซึ่งค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกจะขึ้นอยู่กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายปัจจัย ดังสมการ 2.7

$$\omega \propto E^2 f \epsilon \tan \delta \quad (2.7)$$

โดยที่ ω คือ ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก
 E^2 คือ strength ของสนามไฟฟ้า
 f คือ ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ
 ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฉนวน
 $\tan \delta$ คือ ตัวประกอบการสูญเสีย

เมื่อพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิต่อค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกนั้น โดยทั่วไปแล้วค่านี้ควร จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งการที่ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นนี้ มีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้น ของกระแสที่เกิดการรั่ว ซึ่งทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กทริกลดลง และมีปัจจัยอื่นๆที่ ต้องนำมาพิจารณาร่วมด้วย คือ

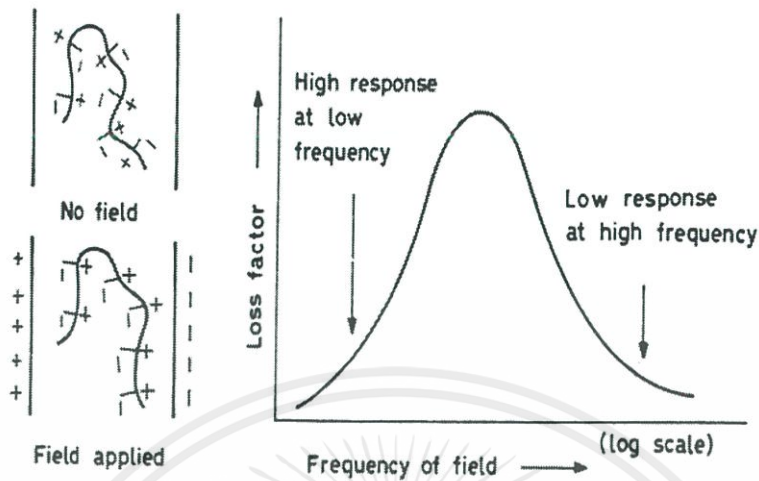
- 1) การสูญเสียเนื่องจากการเกิดการคลายตัวของขั้วไฟฟ้า
- 2) การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไม่ถึงอนันต์
- 3) การสูญเสียเนื่องจากอิเล็กตรอนโพลาริเซชัน
- 4) การสูญเสียเนื่องจากการสั้นของไอออน

สาเหตุหลักที่มีทำให้เกิดความสูญเสียในช่วงความถี่ต่างๆนั้น มาจากสาเหตุในข้อ 1) และ 2) เป็นส่วนใหญ่ ส่วนสาเหตุในข้อ 3) และ 4) นั้นจะเกิดในช่วงที่ความถี่สูงเท่านั้น นอกจากนี้การ เปลี่ยนแปลงของค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับประเภทของ วัสดุไดอิเล็กทริก ในวัสดุที่มีขั้วนั้นจะมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการคลายตัวของขั้วไฟฟ้าและการนำ ไฟฟ้าได้ ซึ่งจะมีค่ามากขึ้นเมื่อวัสดุมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น

2.2.4 ตัวประกอบการสูญเสีย (loss factors; $\tan \delta$)

ตัวประกอบการสูญเสียจะบอกถึงระดับของเฟสของกระแสไฟฟ้าสลับที่ไม่สามารถรักษา จังหวะร่วมกับแรงดันไฟฟ้า (phase lag) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์หรือฉนวนไม่ สามารถปรับตัวให้มีทิศทางการเรียงตัวสอดคล้องตามความถี่ของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปอย่างรวดเร็ว โดยถ้าความถี่สนามไฟฟ้าต่ำโมเลกุลก็จะมีเวลานานพอในการปรับทิศทางการเรียงตัวให้สอดคล้องกับ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและเปลี่ยนแปลงไปมาอยู่ตลอดเวลา แต่ถ้าสนามไฟฟ้ามีความถี่สูงมากขึ้น จะทำ ให้โมเลกุลไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางการเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยน แปลงไปได้ทัน ซึ่งทำ ให้เกิดเฟสของกระแสไฟฟ้าสลับที่ไม่สามารถรักษาจังหวะร่วมกับแรงดันไฟฟ้าขึ้นระหว่างโพรไรซ์ขั้ว คู่กับสนามไฟฟ้า ซึ่งค่าตัวประกอบการสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโมเลกุลและความถี่ของสนามไฟฟ้า และจะมีค่าสูงสุดในช่วงการเปลี่ยนเฟส (transition) ที่ซึ่งพอลิเมอร์ผ่านการตอบสนองได้เร็ว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงความถี่ต่ำไปยังช่วงที่ตอบสนอง หรือเรียงตัวได้เข้าในช่วงที่ความถี่สูง (จุดสูงสุด คือ จุดที่ความถี่ของการเคลื่อนไหวของโมเลกุลเท่ากับความถี่ของสนามไฟฟ้ากระแสสลับ) ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การเกิดเฟสของกระแสไฟฟ้าสลับที่ไม่สามารถรักษาจังหวะร่วมกับแรงดันไฟฟ้าขึ้นระหว่างโพลาริซชันคู่กับสนามไฟฟ้า

2.3 ประเภทของวัสดุไดอิเล็กทริก (classification of dielectric materials) [1]

2.3.1 วัสดุไดอิเล็กทริกเชิงเส้น (linear dielectric materials)

คือ วัสดุที่แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างโพลาริซชันและสนามไฟฟ้า วัสดุประเภทนี้จะเกิดการโพลาริซชันเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า และการโพลาริซชันจะหายไปเมื่อนำสนามไฟฟ้าออก สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิดขึ้นกับลักษณะของกลไกการโพลาริซชัน

2.3.1.1 วัสดุที่ไม่มีขั้ว (non polar materials)

ในวัสดุประเภทนี้ สนามไฟฟ้าสามารถทำให้กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนเกิดการกระจายตัวแบบยืดหยุ่น (elastic displacement) เพียงอย่างเดียวเท่านั้น และส่วนใหญ่จะเป็นกับอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุด ดังนั้นจึงมีแค่โพลาริซชันอิเล็กทรอนิกส์ (electronic polarization) เท่านั้น ดังนั้น วัสดุชนิดนี้สามารถเรียกโดยทั่วไปว่าเป็น วัสดุธาตุ (element material) และทำหน้าที่เป็นฉนวน

2.3.1.2 วัสดุมีขั้ว (polar materials)

ในวัสดุประเภทนี้ สนามไฟฟ้าสามารถทำให้เกิดการกระจายตัวแบบยืดหยุ่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนรวมทั้งตำแหน่งสัมพัทธ์ของไอออน วัสดุเหล่านี้จึงมีทั้งโพลาริซชันไอออนิก (ionic polarization) และโพลาริซชันอิเล็กทรอนิกส์ (electronic polarization) วัสดุอาจประกอบด้วยโมเลกุลและแต่ละโมเลกุลเกิดจากอะตอมมากกว่าหนึ่งชนิดที่ไม่มีไดโพลโมเมนต์ถาวร ตัวอย่างของวัสดุนี้คือ ผลึกไอออนิก

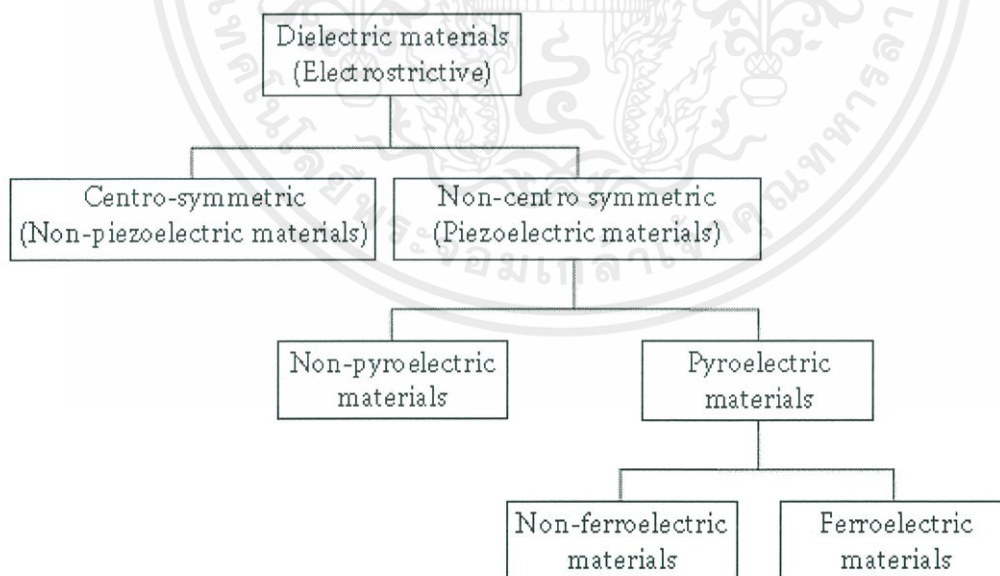
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.3 วัสดุสองขั้ว (dipolar materials)

ในวัสดุประเภทนี้จะมีโมเลกุลที่มีไดโพลโมเมนต์ถาวร ทำให้โพลาไรซ์พื้นฐานสามแบบ ได้แก่ โพลาไรซ์ไอออนิก (ionic polarization) โพลาไรซ์อิเล็กทรอนิกส์ (electronic polarization) และ โพลาไรซ์ตำแหน่ง (orientation polarization) ตัวอย่างของวัสดุนี้ คือ น้ำและเมธิลแอลกอฮอล์

2.3.2 วัสดุไดอิเล็กทริกไม่เชิงเส้น (non linear dielectric materials)

คือ วัสดุที่เกิดโพลาไรซ์ได้เอง (spontaneous polarization) แม้ในกรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกมากระตุ้น จึงจัดกลุ่มวัสดุนี้เป็นประเภทวัสดุไดอิเล็กทริกไม่เชิงเส้น ในวัสดุประเภทนี้สามารถเกิดโพลาไรซ์ได้เองเนื่องจากโครงสร้างผลึกของวัสดุ เงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับของแข็งที่วัสดุประเภทนี้ คือ การไม่มีศูนย์กลางสมมาตร (non-center symmetric) ในบรรดาผลึกคริสตัลจำนวน 32 ชนิด มี 11 ชนิดที่มีศูนย์กลางสมมาตร (center symmetric) และด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถเกิดโพลาไรซ์เองได้ และจาก 21 ชนิดที่เหลือของโครงสร้างผลึกที่ไม่มีศูนย์กลางสมมาตร จะมี 20 ชนิดที่เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) กล่าวคือโครงสร้างผลึกเหล่านี้สามารถถูกโพลาไรซ์ภายใต้อิทธิพลของความเค้นภายนอกได้ ใน 10 จาก 20 ชนิดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถเกิดปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric) ได้ เช่น การโพลาไรซ์ของวัสดุเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric) เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุไพโรอิเล็กทริกที่เกิดโพลาไรซ์ได้เอง ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การจัดแบ่งประเภทของวัสดุไดอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูง (high energy density capacitor) [3]

2.4.1 การเก็บพลังงานในตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยคู่ของตัวนำไฟฟ้าที่ถูกคั่นด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก เมื่อมีความต่างศักย์ (แรงดันไฟฟ้า) ระหว่างตัวนำทั้งสองจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในวัสดุไดอิเล็กทริกและพลังงานจะถูกเก็บไว้ภายใน [4] ตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูงเป็นตัวเก็บประจุที่สามารถเก็บพลังงานได้มากขึ้นในปริมาตรและ/หรือน้ำหนักที่น้อยลงเมื่อเทียบกับตัวเก็บประจุแบบดั้งเดิม (conventional capacitor) โดยปกติต้องมีความหนาแน่นพลังงานมากกว่า 1 จูลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (J/cm^3)

2.4.2 วัสดุไดอิเล็กทริกที่ใช้ในตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูง

ตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูง ควรจะเป็นแหล่งพลังงานที่เหมาะสมในระบบพัลส์ (pulse power) สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางทหาร เช่น ระบบเปิดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นไมโครเวฟพลังงานสูง เกราะไฟฟ้า เลเซอร์ ฯลฯ นอกจากนี้จำเป็นต้องใช้ตัวเก็บประจุแบบพัลส์เพื่อใช้งานอื่น ๆ เช่น อุปกรณ์เอ็กซเรย์, แสงที่เป็นจิงหวะ และอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน เป็นต้น

สำหรับวัสดุไดอิเล็กทริกเชิงเส้นจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ไม่ขึ้นกับจากสนามไฟฟ้าสามารถเป็นโมดูล [5] เนื่องจากตัวเก็บประจุมีปริมาตรมากกว่า 30% ของปริมาตรทั้งหมดในตัวแปลงพลังงานแบบเดิมและระบบพัลส์ทาวเวอร์ ดังนั้นจึงเป็นที่ต้องพัฒนาตัวเก็บประจุที่มีปริมาตรและน้ำหนักลดลง [6] ซึ่งการลดปริมาตรของตัวเก็บประจุกลายเป็นสิ่งสำคัญยิ่งขึ้นเมื่ออุปกรณ์เหล่านี้จำเป็นต้องอยู่บนบอร์ดของระบบที่เคลื่อนที่ได้ เช่น เครื่องบิน เรือ หรือยานพาหนะอื่นๆ เป็นต้น

เพื่อตอบสนองต่อความต้องการทางการด้านการตอบสนองที่รวดเร็วของตัวเก็บประจุ (ระยะเวลาการคายประจุอยู่ในช่วงไมโครวินาทีถึงมิลลิวินาที) ด้วยการลดปริมาตรลง ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีความก้าวหน้าที่สำคัญเกิดขึ้นโดยการพัฒนาวัสดุไดอิเล็กทริก อย่างไรก็ตามการพัฒนาตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูงนั้น ยังคงมีวิวัฒนาการแทนการปฏิวัติ ข้อกำหนดเฉพาะสำหรับตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูงนั้น มีความหลากหลายโดยเฉพาะการใช้งาน โดยทั่วไปตัวเก็บประจุแบบนี้ควรมีความสามารถในการคายประจุอยู่ในช่วงไมโครวินาทีถึงมิลลิวินาทีโดยมีแรงดันไฟฟ้าในการทำงานถึงหลายร้อยกิโลโวลต์ และมีความหนาแน่นของพลังงานสูงกว่า 1 จูลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (J/cm^3) สำหรับการใช้งานพิเศษบางประเภท ต้องใช้คุณสมบัติในการทำงานสูงถึง 250 องศาเซลเซียส ข้อกำหนดเหล่านี้กำหนดความต้องการที่เข้มงวดในวัสดุที่เป็นฉนวน ภาพรวมคร่าวๆของวัสดุประเภทต่างๆที่ใช้กันทั่วไป มีดังนี้

2.4.2.1 ไดอิเล็กทริกกระดาษ (paper dielectrics)

ตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูงประเภทนี้มักทำจากกระดาษคาร์พที่มีมีความหนาแน่นสูงเป็นพิเศษซึ่งชุบน้ำมันละหุ่ง มีความหนาแน่นของพลังงานได้ถึง 0.66 จูลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถใช้ได้สำหรับอายุการใช้งานของวัฏจักรการเก็บและคายประจุนับพันครั้ง ตัวเก็บประจุเหล่านี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูง (สูงสุด 100 กิโลโวลต์), กระแสไฟฟ้าสูง (สูงสุด 1 เมกะแอมแปร์), การผันกลับของแรงดันไฟฟ้าสูง (มากกว่า 20%) หรือการรวมกันของปัจจัยเหล่านี้ [5] ข้อเสียของตัวเก็บประจุชนิดนี้คือความหนาแน่นของพลังงานต่ำและเกิดโหมดความล้มเหลว (failure mode)

2.4.2.2 ไดอิเล็กทริกพอลิเมอร์ (polymer dielectrics)

สำหรับตัวเก็บประจุชนิดนี้ ชั้นบางๆของฟิล์มโลหะที่เป็นขั้วไฟฟ้าจะระเหยอยู่ในโพลิเมอร์ (โพลีโพรพิลีนโพลีเอสเตอร์โพลีคาร์บอนเนต ฯลฯ) [7] ค่าความคงทนไดอิเล็กทริกที่สูงถึง 8 เมกะโวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญของตัวเก็บประจุชนิดนี้ อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเก็บประจุแบบพอลิเมอร์มีจำกัด คือ อุณหภูมิการทำงานต่ำ (ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส), กระแสสูงสุดต่ำ (low peak current) และความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้าต่ำ [8]

2.4.2.3 ไดอิเล็กทริกเซรามิก (ceramic dielectrics)

ตัวเก็บประจุเซรามิกโดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวเก็บประจุเซรามิกชนิดหลายชั้นนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆเนื่องจากมีความหนาแน่นของประจุสูง อย่างไรก็ตาม ไดอิเล็กทริกเซรามิกก็อาจจะไม่ใช่ทางเลือกที่ดีมากนัก เนื่องจากค่าความคงทนไดอิเล็กทริกต่ำ (โดยทั่วไปจะอยู่ในระดับหลายร้อยกิโลโวลต์ต่อเซนติเมตรหรือต่ำกว่า) ที่มักเกิดจากข้อบกพร่องทางโครงสร้างจุลภาค แต่สามารถทำการปรับปรุงให้มีค่าสูงขึ้นได้ (มากกว่า 1 เมกะโวลต์ต่อเซนติเมตร) ซึ่งจะส่งผลให้ความหนาแน่นของพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างมาก และอาจสูงได้ถึง 4 จูลต่อเซนติเมตร เมื่อทำเป็นตัวเก็บประจุชนิดหลายชั้น [9] ดังนั้น การปรับปรุงความคงทนทางไดอิเล็กทริกของเซรามิกจะทำให้เซรามิกมีแนวโน้มที่จะสามารถทำเป็นตัวเก็บประจุที่มีความหนาแน่นพลังงานสูงได้ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง (มากกว่า 1000 สำหรับเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิก)

2.4.2.4 วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์-เซรามิก (polymer-ceramic composites)

เนื่องจากไม่มีวัสดุเฟสเดียวที่สามารถตอบสนองความต้องการที่จำเป็นสำหรับการใช้งานตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูงได้ จึงทำให้ไดอิเล็กทริกแบบคอมโพสิตได้รับความสนใจมากขึ้น โดยใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติที่ดีของแต่ละองค์ประกอบ วิธีที่น่าสนใจอย่างหนึ่งก็คือการรวมค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของพอลิเมอร์และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซรามิกที่มีค่าสูงไว้ในวัสดุคอมโพสิตนี้ [10]

ในบรรดาพอลิเมอร์เซรามิกคอมโพสิตระบบที่ใช้กันมากที่สุด ได้แก่ เมทริกซ์พอลิเมอร์ และสารตัวเติมเซรามิกที่จะช่วยเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของระบบคอมโพสิต โดยไม่กระทบกับค่าความคงทนไดอิเล็กทริกที่สูงและการสูญเสียที่ต่ำของพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามเป้าหมายที่จะทำให้วัสดุมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ค่าความคงทนไดอิเล็กทริกสูง และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำ อาจจะไม่สามารถเกิดขึ้นพร้อมกันได้ทั้งหมด [11] เพื่อเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของคอมโพสิตสามารถทำได้โดยใช้สารตัวเติมเซรามิกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง เช่น แบเรียมไททาเนต, เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate; PZT) และเลดแมกนีเซียมไนโอเบต-เลดไททาเตน (lead magnesium niobate-titanate; PMN-PT) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

niobate-lead titanate ; PMN-PT) ก็เป็นเซรามิกที่ได้รับความนิยม [12]

ความแตกต่างอย่างมากของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกระหว่างพอลิเมอร์กับเซรามิก ทำให้เกิดการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าในวัสดุคอมโพสิต ซึ่งเชื่อว่าเป็นสาเหตุของการลดลงอย่างมากของค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกในระบบคอมโพสิตดังกล่าว [13]

นอกจากนี้เมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคของสารตัวเติมจะทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อของสารเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกในวัสดุคอมโพสิตลดลง [14] อีกปัจจัยหนึ่งที่จำกัดความสามารถในการปรับปรุงการกักเก็บพลังงานของวัสดุนี้ คือผลจากการที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เพิ่มขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าเฉลี่ยในพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มีพลังงานน้อยมากที่เก็บอยู่ในสารตัวเติมเซรามิก [15] เมื่อสนามไฟฟ้าขึ้นกับวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ เพื่อแก้ปัญหาจึงมีการนำผงนาโนไททานเตที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ (ประมาณ 100) มาใช้แทนตัวเติมอื่นๆที่ใช้ทั่วไปที่มีค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกสูงมาก

ความหนาแน่นของพลังงานที่เพิ่มขึ้นในนาโนคอมโพสิตเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์ เป็นผลมาจากการกระจายตัวของอนุภาคนาโนที่เป็นเนื้อเดียวกันและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกระหว่างอนุภาคนาโนและพอลิเมอร์ที่มีค่าใกล้เคียงกัน [12] วัสดุพอลิเมอร์-เซรามิกคอมโพสิตเป็นวัสดุที่น่าสนใจสำหรับการทำเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน ซึ่งสามารถมีความหนาแน่นพลังงานสูงสุดได้ใกล้เคียงกับ 10 จูลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ให้เห็นได้ในหลายระบบจนถึงปัจจุบัน [12, 16, 17]

2.4.2.5 แก้ว-เซรามิก (glass-ceramics)

สร้างขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้ในตัวเก็บประจุไฟฟ้า เนื่องจากวัสดุเหล่านี้ทำขึ้นโดยกระบวนการหล่อ-หลอม (melt-casting process) ตามมาด้วยการใช้ความร้อนเพื่อตกตะกอนเฟสของผลึกเซรามิกจากเมทริกซ์ที่เป็นแก้ว ซึ่งมีข้อได้เปรียบที่ต่างจากวัสดุชนิดอื่น คือ เป็นวัสดุที่ปราศจากรูพรุนที่สามารถควบคุมขนาดของผลึกเพื่อให้ได้มีความคงทนไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เฟสที่เป็นผลึกอาจนำไปสู่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงขึ้นด้วย

ในการศึกษาระบบ $\text{Na}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{Nb}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$ [18] มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงถึง 650-850 (ที่ 1 กิโลเฮิร์ตซ) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกประมาณ 2% (ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 150 องศาเซลเซียส) อุปสรรคหนึ่งที่พบในการศึกษาเกี่ยวกับระบบแก้ว-เซรามิก เกิดจากโพลาริเซชันที่เกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างแก้วและเซรามิก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สนามไฟฟ้าสูง ส่งผลให้ความหนาแน่นของพลังงานค่อนข้างต่ำ (สูงสุด 0.9 จูลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ถึงแม้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกของวัสดุจะสามารถเพิ่มความหนาแน่นของพลังงานที่สูงขึ้นมากในทางทฤษฎีก็ตาม (ประมาณ 3.5 จูลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในกรณีที่มีพฤติกรรมทางไดอิเล็กทริกเชิงเส้นในอุดมคติ) [19]

2.4.2.6 แก้วไดอิเล็กทริก (glass dielectric)

มีการรายงานเกี่ยวกับค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกของแก้วที่ไม่มีส่วนผสมของโลหะอัลคาไล (alkali-free glass) ที่มีขายในท้องตลาดทั่วไปว่ามีค่าสูงถึง 12 เมกะโวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งแสดงให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นถึงความหนาแน่นของพลังงานที่สูงถึง 35 จูลต่อลูกบาศก์เซนติเมตรมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในระดับต่ำ (ประมาณ 0.5%, ที่ความถี่ 100 กิโลเฮิรซ์, อุณหภูมิ 25 ถึง 190 องศาเซลเซียส) และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง (ประมาณ 6) ส่วนประกอบจากแก้วที่มีคุณภาพสูง มีข้อบกพร่องน้อย และส่วนที่ปราศจากโลหะอัลคาไลทำให้เป็นสาเหตุการมีค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกที่สูง [20]

2.5 แบเรียมไททาเนต และการใช้งานเป็นตัวเก็บประจุ

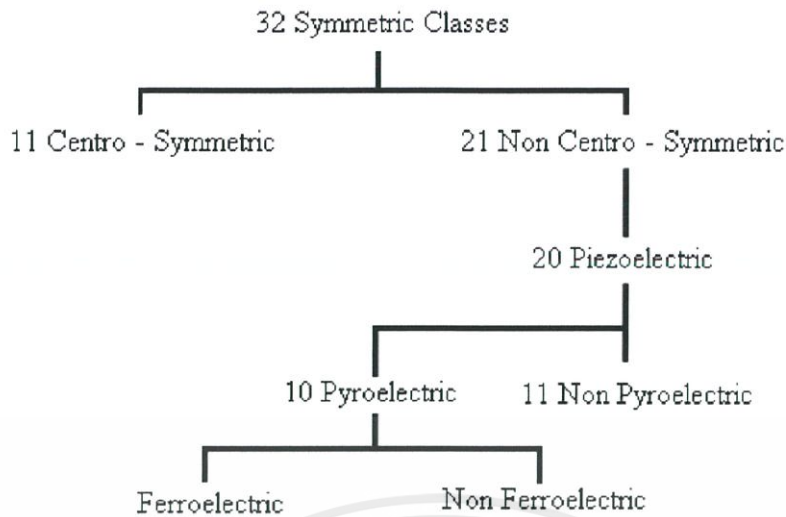
2.5.1 ข้อมูลทั่วไปของแบเรียมไททาเนต

แบเรียมไททาเนต (barium titanate; BaTiO_3) มีการค้นพบมาแล้วมากกว่า 60 ปีที่ผ่านมา โดยแบเรียมไททาเนตนั้นเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในนามวัสดุเซรามิกที่มีสมบัติไดอิเล็กทริกหรือวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric material) ซึ่งจะมีผลึกที่สามารถเกิดการโพลาไรเซชันได้เอง (spontaneous polarization) โดยที่ไม่มีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก ซึ่งการโพลาไรเซชันนี้สามารถที่จะสลับเข้าไปในทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้เข้าไปได้ เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าภายนอกที่เหมาะสม [21]

โดยทั่วไปผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 32 กลุ่ม ตามความสมมาตร และในจำนวนนี้สามารถแบ่งเป็นผลึกที่มีลักษณะสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง (centro-symmetry) 11 กลุ่ม และที่มีลักษณะสมมาตรไม่ผ่านจุดศูนย์กลาง (non-centrosymmetry) อีก 21 กลุ่ม ซึ่งในกลุ่มนี้สามารถแสดงสมบัติที่เป็นเพียโซอิเล็กทริก 20 กลุ่ม และใน 20 กลุ่มนี้มีเพียง 10 กลุ่มเท่านั้นที่สามารถแสดงสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ [22] (ดังภาพที่ 2.9)

โดยผลึกที่มีกลุ่มสมมาตรนี้จะมีแกนหมุนเดียวแต่ไม่มีระนาบสะท้อนที่ตั้งฉากกับแกนนี้ตามแนวแกนหมุนนี้การจัดเรียงอะตอมที่ปลายหนึ่งจะต่างจากปลายตรงข้าม โดยจะเรียกผลึกนี้ว่าผลึกขั้ว (polar crystal) ซึ่งแสดงการเกิดโพลาไรเซชันได้เองที่คือค่าของโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร หรือค่าของประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนพื้นผิวที่ตั้งฉากกับแกนโพลาไรเซชัน โดยส่วนใหญ่แกนของโพลาไรเซชันมักจะอยู่ในแนวเดียวกับแกนผลึก

ถึงแม้ว่าผลึกที่มีแกนขั้วจะแสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก แต่ไม่จำเป็นต้องมีเวกเตอร์ของการเกิดโพลาไรเซชันได้เอง เนื่องจากผลของโมเมนต์ไฟฟ้าตามแกนขั้วทั้งหมดอาจเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงมีเพียงผลึกที่มีแกนขั้วเดียวที่แสดงเวกเตอร์การเกิดโพลาไรเซชันได้เอง โดยทั่วไปการเกิดโพลาไรเซชันได้เองนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากประจุบนพื้นผิวของผลึก เนื่องจากประจุนี้ถูกชดเชยด้วยตัวนำภายในหรือภายนอกที่นำกระแสไฟฟ้าหรือโดยประจุนรอยต่อของผลึกแฝด (twins)

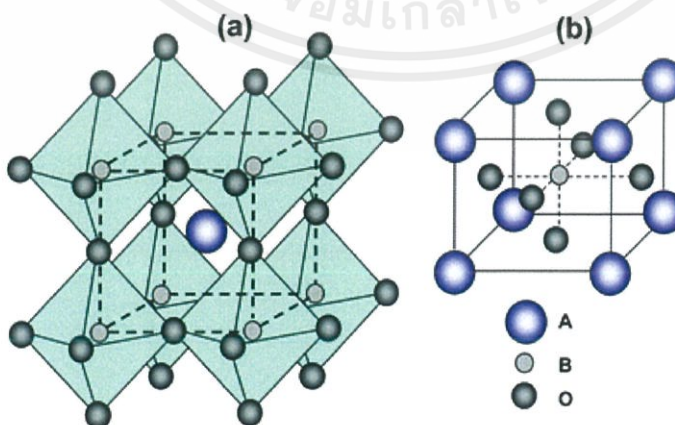


ภาพที่ 2.9 การจัดแบ่งกลุ่มของผลึกโดยการใช้พื้นฐานสมมาตรของผลึก

แบเรียมไททานเนต มีโครงสร้างผลึกพื้นฐานอยู่ 2 รูปแบบ คือ

2.5.1.1 โครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์

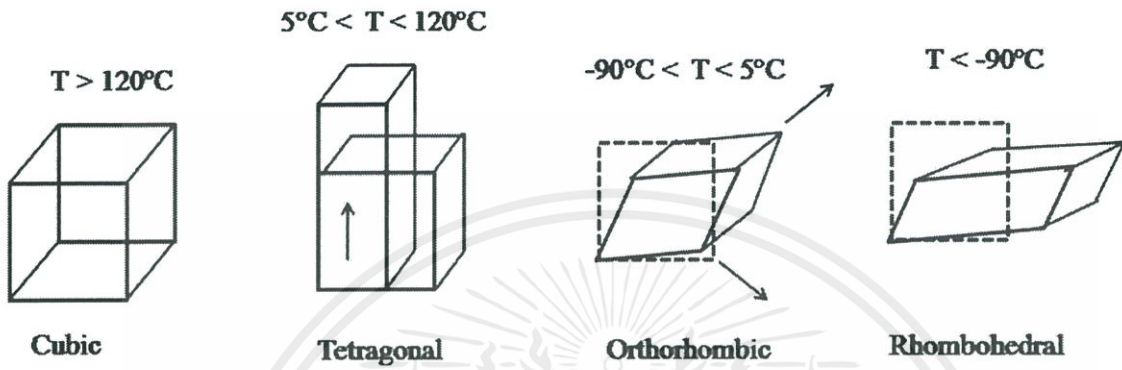
โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ จะมีสูตรโครงสร้างทั่วไปเป็น ABO_3 เมื่อ O คือ ออกซิเจน, A คือ ไอออนบวกที่มีรัศมีไอออนขนาดใหญ่ และ B คือ ไอออนบวกที่มีรัศมีไอออนขนาดเล็ก แสดงดังภาพที่ 2.10 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์นี้มีพื้นฐานมาจากการเชื่อมต่อกันในสามมิติของทรงแปดหน้า (octahedral) ที่เกิดจาก BO_6 ซึ่งไอออนบวก A และไอออนลบของออกซิเจนจะจัดเรียงตัวแบบบรรจุชิดรูปลูกบาศก์ (cubic closed packed) โดยไอออนบวก A จะอยู่ที่มุมของหน่วยเซลล์ ออกซิเจนจะอยู่ที่หน้าของหน่วยเซลล์ และไอออนบวก B จะแทรกอยู่ในช่องว่างกลางทรงแปดหน้า (octahedral side)



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์

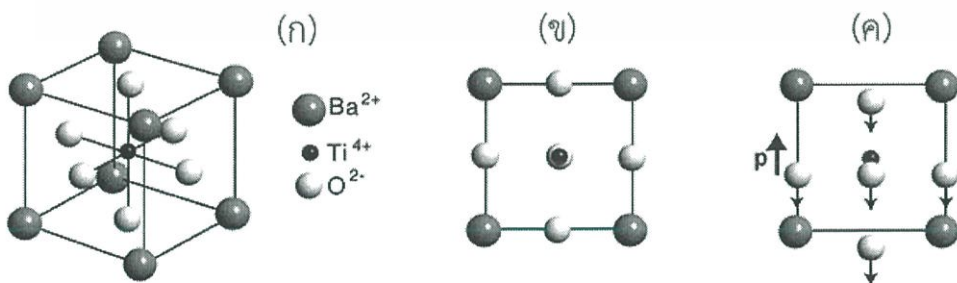
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบเรียมไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์จะมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสที่ขึ้นกับอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากช่วง -90 องศาเซลเซียสไปถึงอุณหภูมิสูงกว่า 120 องศาเซลเซียส จะทำให้เฟสของแบเรียมไททาเนตเปลี่ยนแปลงจากรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) ไปเป็นออร์โธรอมบิก (orthorhombic) เตตระโกนอล (tetragonal) และคิวบิก (cubic) ตามลำดับ ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงผลึกของแบเรียมไททาเนต [23]

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (T_c) แบเรียมไททาเนตจะมีลักษณะของหน่วยเซลล์เป็นแบบคิวบิกโดยมีไอออนของแบเรียม (Ba^{2+}) อยู่ที่มุมทั้งแปด มีไอออนของออกซิเจน (O^{2-}) อยู่ที่จุดกึ่งกลางผิวหน้าทั้งหก และมีไอออนของไททาเนียม (Ti^{4+}) อยู่ที่จุดศูนย์กลางของลูกบาศก์ ซึ่งมีความสมดุลของประจุไฟฟ้า จึงไม่เกิดปรากฏการณ์โพลาไรเซชันขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างผลึกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยที่ไอออนของแบเรียมไททาเนตและไอออนของไททาเนียมจะเกิดการเลื่อนขึ้นไปจากตำแหน่งสมดุลเล็กน้อย เสมือนว่าไอออนของออกซิเจนเกิดการเลื่อนลงมา ทำให้เกิดความไม่สมดุลทางไฟฟ้าขึ้นในหน่วยเซลล์ และเรียกกระบวนการดังกล่าวนี้ว่าปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 (ก) โครงสร้างผลึกของแบเรียมไททาเนต, (ข) ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี และ (ค) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล

โครงสร้างแบบนี้จะไม่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (non-ferroelectric hexagonal) ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเสถียรที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 1460.5 องศาเซลเซียส และยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิห้องได้ดีอีกด้วย

2.5.2 การนำมาใช้งานเป็นตัวเก็บประจุ

2.5.2.1 ประวัติการนำมาใช้งาน

ระหว่างยุคของเอ็ดิสัน ในปีค.ศ. 1875-1892 วัสดุไดอิเล็กทริกเซรามิกได้แสดงบทบาทสำคัญในการเป็นฉนวนสำหรับการใช้งานในช่วงตั้งแต่ศักย์ไฟฟ้าสูงจนถึงศักย์ไฟฟ้าต่ำ ทั้งในระดับอุตสาหกรรมและตามบ้านเรือน โดยวัสดุที่นิยมใช้ ได้แก่ เฟลด์สปาทิกพอร์ซเลน (feldspatic porcelain) ซึ่งคล้ายกับสุขภัณฑ์ในปัจจุบัน

เมื่อมาถึงยุคของอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุใหม่ที่มีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกต่ำ จำเป็นต้องได้รับการพัฒนาเพื่อให้เหมาะสมกับวงจรไฟฟ้าที่มีค่าความถี่สูงรวมถึงค่าความต่างศักย์สูง ซึ่งสารประกอบสเดียมไทด์ (magnesium aluminium silicate) เข้ามาแทนที่พอร์ซเลนสำหรับการใช้เป็นฉนวน วัสดุอีกชนิดหนึ่งที่เหมาะสมแก่การใช้เป็นตัวเก็บประจุ คือ โทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปทรงแบบแผ่นกลมและแบบท่อ หลังจากนั้นหลายปีมีความต้องการใช้สารที่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ดังนั้นแบเรียมไททานเตนนับเป็นคู่แข่งที่ดี เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าโทเทเนียมไดออกไซด์ แต่ยังคงอยู่ช่วงอุณหภูมิและความต่างศักย์ที่แคบ

การนำแบเรียมไททานเตนมาใช้งานครั้งแรกเกิดในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง เพื่อการใช้เป็นโซนาร์ทรานสดิวเซอร์ใต้น้ำเพื่อระบุตำแหน่งของเรือดำน้ำ เมื่อมาถึงยุคที่สงครามสงบลงมีการนำมาใช้งานเป็นอุปกรณ์กำเนิดอัลตราซาวด์ (ultrasonic sound generator) และเครื่องอัลตราโซนิกสำหรับการทำความสะอาด (ultrasonic cleaner)

2.5.2.2 การใช้งานในปัจจุบัน

แบเรียมไททานเตนเป็นสารที่ต้องสังเคราะห์ขึ้น เนื่องจากไม่พบในธรรมชาติ การเตรียมทำได้หลายวิธี วิธีการเตรียมที่ง่ายที่สุดคือทำปฏิกิริยาระหว่างแบเรียมคาร์บอเนตและโทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการเผาที่อุณหภูมิสูง อีกวิธีการหนึ่ง คือ กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมในระบบสารละลายของสารประกอบแบเรียมและโทเทเนียมโดยการตกตะกอนลงมาแล้วนำไปเผา

ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันแบเรียมไททานเตนส่วนใหญ่ใช้เป็นตัวเก็บประจุ เนื่องจากมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงประมาณ 1,200–1,500 และถ้าเติมสารบางชนิดเข้าเพิ่มเข้าไปจะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนี้สูงขึ้นอีกมาก โดยมีปริมาณการใช้ถึง 14 ล้านปอนด์ต่อปี ซึ่งเท่ากับตัวเก็บประจุประมาณ 30 พันล้านตัว ทั้งในรูปแบบของตัวเก็บประจุแบบแผ่นกลมและตัวเก็บประจุเซรามิกแบบหลายชั้น (multilayer ceramic capacitor; MLCC) ซึ่งมีจำนวนชั้นของแบเรียมไททานเตนอยู่ถึง 250 ชั้น โดยแต่ละชั้นหนาประมาณ 4-7 ไมโครเมตร และเคลือบด้วยโลหะเป็นขั้วไฟฟ้า [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีแบเรียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบ สำหรับใช้ในตัวเก็บประจุแบบหลายชั้น [25]

DESIGNATION	CLASS	TEMPERATURE RANGE °C	TEMP-CAP CHANGE	DIELECTRIC CONSTANTS UP TO	BaTiO ₃ CONTENT %	OTHER INGREDIENTS	GRAIN SIZE
"Temperature Compensation"	1	-55 to +125					
NPO			±30 ppm	75	10 to 50	CaTiO ₃ :TiO ₂ rare earth oxides, etc.	~1 µm
Intermediate K							
BX, X7R	2	-55 to +125	±15%	3000	90 to 98	Donor dopants, Sintering aids	~1 µm
High K							
Z5U	2	+10 50 +85	+22% 56%	8000	80 to 94	Curie Point Shifters, Electrical Dopants, Sintering aids	3-20 µm
Z5V			+22% 82%	18000	80 to 94		

ในปัจจุบันได้มีการนำแบเรียมไททาเนตมาใช้เป็นองค์ประกอบในวัสดุไดอิเล็กทริกสำหรับทำเป็นตัวเก็บประจุแบบหลายชั้นได้หลากหลาย ชนิดที่นิยมใช้แสดงในตารางที่ 2.1 ดังนี้

- NPO : เป็นตัวเก็บประจุเซรามิกประเภท 1 (class 1) สำหรับการชดเชยอุณหภูมิ (temperature-compensating) มีการใช้แบเรียมไททาเนตเป็นส่วนประกอบอยู่ 15 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (temperature coefficient) อยู่ในช่วงตั้งแต่ +150 ถึง -2200 ส่วนในล้านส่วนต่อองศาเซลเซียส (ppm/°C)

- X7R : เป็นตัวเก็บประจุประเภท 2 (class 2) ใช้วัสดุไดอิเล็กทริกที่ทำจากการปรับปรุง (modified) แบเรียมไททาเนตโดยการเผาฟลัก เพื่อให้มีขนาดเกรนเล็ก (ต่ำกว่า 2 ไมโครเมตร) ซึ่งมีความเสถียรต่ออุณหภูมิมากกว่าแบเรียมไททาเนตที่มีเกรนขนาดใหญ่ บางครั้งจึงเรียกว่า เซรามิกเสถียรต่ออุณหภูมิ (temperature-stable ceramic) โดยจะมีแคลเซียมเซอร์โคเนตเป็นส่วนประกอบเพิ่มเติม มีความแปรผันของอุณหภูมิของตัวเก็บประจุอยู่ที่ 15% จาก -55 ถึง +125 องศาเซลเซียส

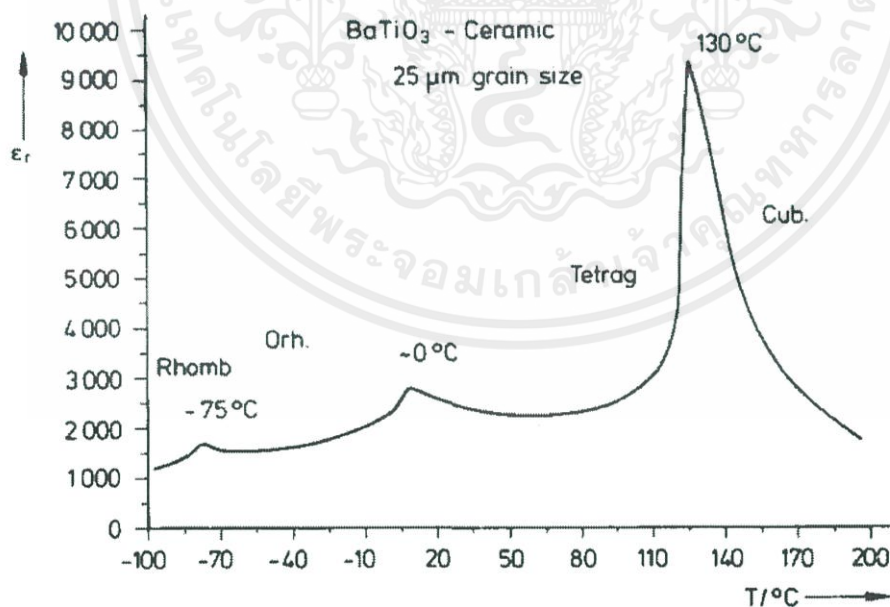
- Z5U : เป็นตัวเก็บประจุประเภท 2 ที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง และมีขนาดเกรนใหญ่กว่า 3 ไมโครเมตร นิยมใส่แคลเซียมเพิ่มเข้ามาในรูปของแคลเซียมเซอร์โคเนต เพื่อให้มีการกระจายตัวของลักษณะการเป็นฉนวน (dielectric characteristic) หรือใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่างๆมากขึ้น และยังสามารถควบคุมการสูญเสียความจุไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 85 องศาเซลเซียส ส่วนที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากกว่า 8000 นิยมใช้งานทั่วไปในเครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พลังงานต่ำในเชิงพาณิชย์ที่ใช้ช่วงอุณหภูมิที่จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Z5V : เป็นตัวเก็บประจุในเชิงพาณิชย์ชนิดที่ใช้วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง หรือ high-K จะประกอบด้วยวัสดุที่ใช้เลื่อนอุณหภูมิคูรี (curie-point shifters), ตัวให้อิเล็กตรอน (donors) และตัวรับอิเล็กตรอน (acceptors) ซึ่งจะใช้สำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพทางไดอิเล็กทริก เมื่อมีการเผาผลาญในบรรยากาศที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำ ทำให้จำเป็นต้องมีตัวรับที่เพียงพอเพื่อทำให้มีความเป็นกลางเมื่อมีตำแหน่งว่างของออกซิเจนเกิดขึ้น ในทางกลับกันก็มักจะทำให้เกิดการยับยั้งการโตของเกรน ซึ่งจะส่งผลต่อวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมักจะแปรผันตรงกับขนาดของเกรน [26]

2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปีค.ศ. 1987 Detlev Hennings [27] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพ และขีดจำกัดสูงสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุแบบดั้งเดิมที่มีแบเรียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบหลัก โดยเมื่อทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของแบเรียมไททาเนตบริสุทธิ์ที่มีเกรนหยาบ (coarse-grained) (ขนาด 25 ไมโครเมตร) พบว่ามีจุดสูงสุดของกราฟ 3 จุด ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของแบเรียมไททาเนต โดยจุดที่สูงที่สุดที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เรียกว่า จุดคูรี ซึ่งจะช่วยให้วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอลเกิดการบิดเบี้ยว และกลายเป็นโครงสร้างแบบคิวบิกที่จะมีสมบัติเป็นพาราอิเล็กทริกแทน (ภาพที่ 2.13)

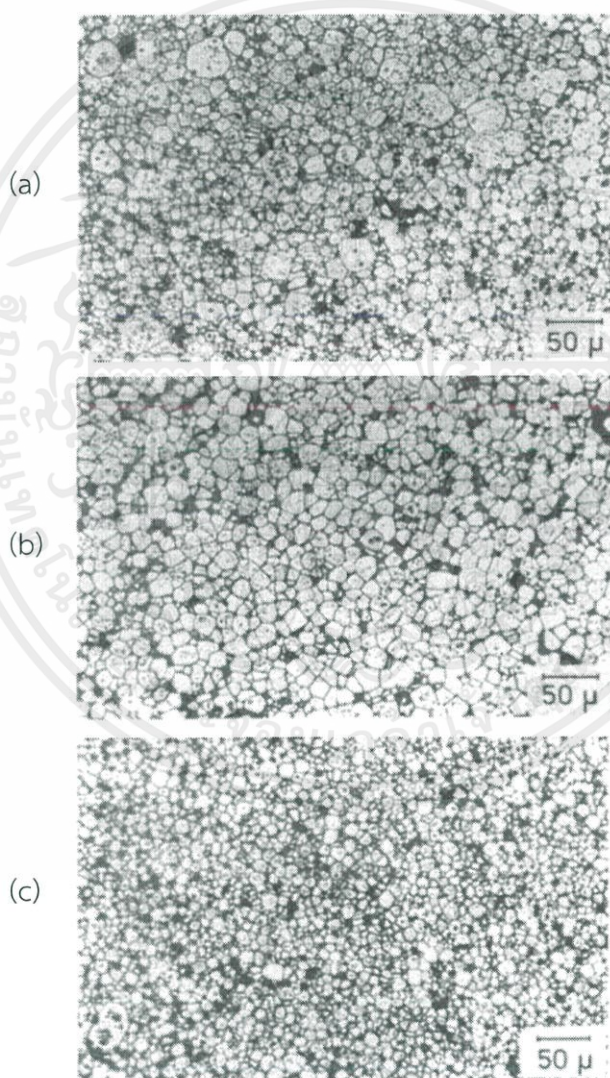


ภาพที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของแบเรียมไททาเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิคูรีจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุด ซึ่งจะนิยมนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุที่มีค่าความจุไฟฟ้าสูง หรือวัสดุค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง (high-K material) สำหรับการทำตัวเก็บประจุชนิด Y5V ส่วนช่วงต่ำกว่าจุดคูรีที่แสดงสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้น จะใช้ประโยชน์โดยการทำเป็นวัสดุที่มีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ ที่มีความเสถียรต่ออุณหภูมิมากกว่า โดยการทำเป็นตัวเก็บประจุชนิด X7R

แบบเรียบมโหทาเนตบริสุทธิ์ไม่เหมาะแก่การทำเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก สำหรับตัวเก็บประจุประเภทวัสดุค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง เนื่องจากการมีอุณหภูมิที่กว้างและเกิดการเลื่อนของพีคที่อุณหภูมิห้อง ส่วนตัวเก็บประจุประเภทที่เสถียรต่ออุณหภูมินั้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้น และโดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะเฉพาะที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (temperature characteristic) ต้องทำการปรับปรุงเมื่ออยู่ที่อุณหภูมิต่ำ



ภาพที่ 2.14 แสดงโครงสร้างจุลภาคของแบบเรียบมโหทาเนตที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ด้วยการใส่ตัวช่วยในการเผาผนึก x%, (a) x = 0%, (b) x = 3%, (c) x = 5%

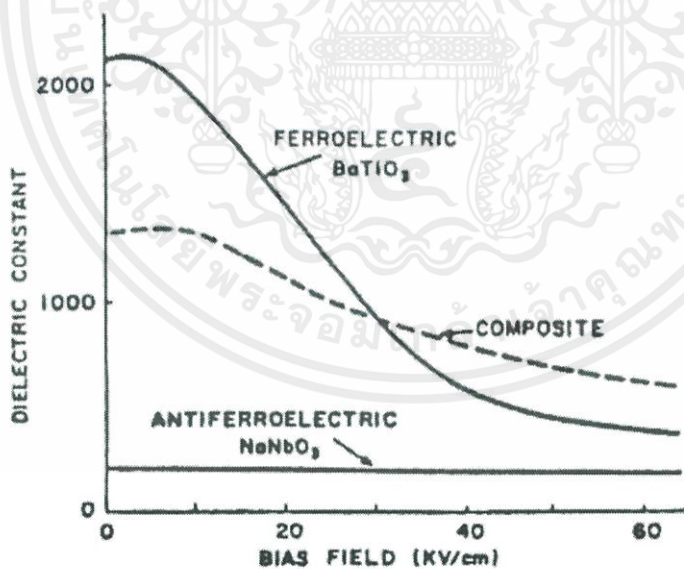
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่แบเรียมไททานเตมีโครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะเป็นเกรนหยาบ จะสัมพันธ์กับการเป็นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ซึ่งเกรนจะเกิดขึ้นระหว่างการเกิดผลึกใหม่ครั้งที่สอง (secondary recrystallization) ของเมทริกซ์ ที่ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการใส่ตัวช่วยในการเผาผนึก (seed grain) ลงไปในผงเซรามิก ที่จะช่วยให้เกิดการจับตัวกันแน่นและยังทำให้เกรนที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลงอีกด้วย จากภาพ 2.14 แสดงให้เห็นว่าการใส่ตัวช่วยในการเผาผนึกมาก ก็จะทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง และมีขนาดที่สม่ำเสมอมากขึ้น

2.6 วัสดุคอมโพสิตที่มีแบเรียมไททานเตเป็นองค์ประกอบ (barium titanate based composite)

2.6.1 วัสดุคอมโพสิตแบเรียมไททานเตทั่วไป

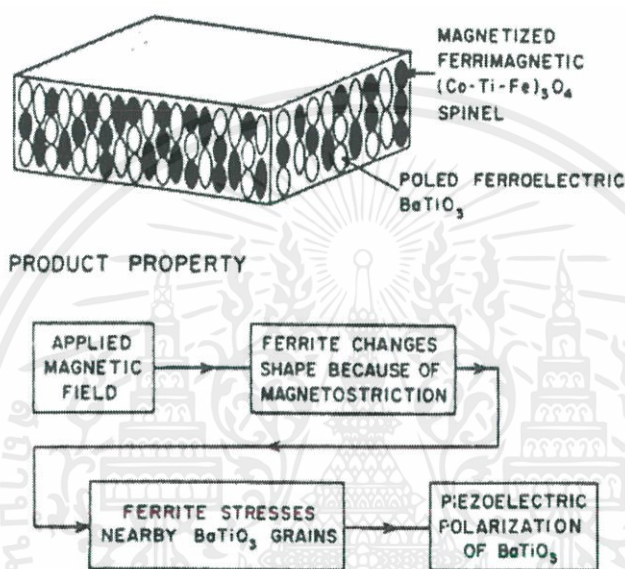
แบเรียมไททานเตจัดเป็นวัสดุอิเล็กโทรเซรามิกที่แสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก จึงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุที่มีองค์ประกอบของแบเรียมไททานเตมีค่าลดลงภายใต้ศักย์ไฟฟ้าสูง แต่สำหรับวัสดุแอนไทเฟอร์โรอิเล็กทริก เช่น โซเดียมไนโอเบต (sodium niobate; NaNbO_3) จะมีพฤติกรรมตรงกันข้าม คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกไม่มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้ศักย์ไฟฟ้าสูง ดังนั้นเมื่อนำวัสดุทั้งสองมาผสมกันในอัตราส่วนที่กำหนดและสภาวะการเผาที่เหมาะสม จะสามารถผลิตวัสดุคอมโพสิตซึ่งมีสมบัติไดอิเล็กทริกสอดคล้องกับการใช้งานที่ศักย์ไฟฟ้าสูงได้ (ภาพที่ 2.15) [28]



ภาพที่ 2.15 กราฟแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับสนามไฟฟ้าที่ให้แกตัวเก็บประจุคอมโพสิตที่เตรียมจากแบเรียมไททานเตและโซเดียมไนโอเบต

ตัวอย่างคอมโพสิตที่มีสมบัติเฉพาะผลิตภัณฑ์ ได้แก่ คอมโพสิตแมกนีโตอิเล็กทริก (magnetoelectric) ซึ่งประกอบไปด้วยแบเรียมไททานเตที่เป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก และโคบอลต์-เอกซารีนเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไททาเนียม-เฟอร์ไรต์ ($(\text{Co-Ti-Fe})_3\text{O}_4$) ที่เป็นวัสดุเฟอร์ริแมกเนติก ซึ่งมีโครงสร้างแบบสปินเนล (spinel) (ภาพที่ 2.16) เมื่อใช้สนามแม่เหล็กกระทำต่อวัสดุคอมโพสิต จะทำให้เกรนของเฟอร์ไรต์เปลี่ยนแปลงรูปร่าง อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์แมกนีโตสทริกชัน (magnetostriction) โดยความเครียดที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของวัสดุนี้ จะทำให้เกิดแรงกระทำต่อเกรนเพียโซอิเล็กทริกภายในโครงสร้างวัสดุ และนำไปสู่การเกิดโพลาริเซชันทางไฟฟ้า (electrical polarization) ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อเป็นหัวตรวจสอบสนามแม่เหล็กแบบบรอดแบนด์ (broadband magnetic field probe) ที่สามารถตอบสนองต่อคลื่นความถี่ต่ำถึง 650 กิโลเฮิรซ์ ได้ [28]



ภาพที่ 2.16 ทรานสดิวเซอร์ (transducer) แบบแมกนีโตอิเล็กทริก ซึ่งผลิตจากคอมโพสิตระหว่างแบเรียมไททาเนตและโคบอลต์-ไททาเนียม-เฟอร์ไรต์

2.6.2 วัสดุคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิเมอร์

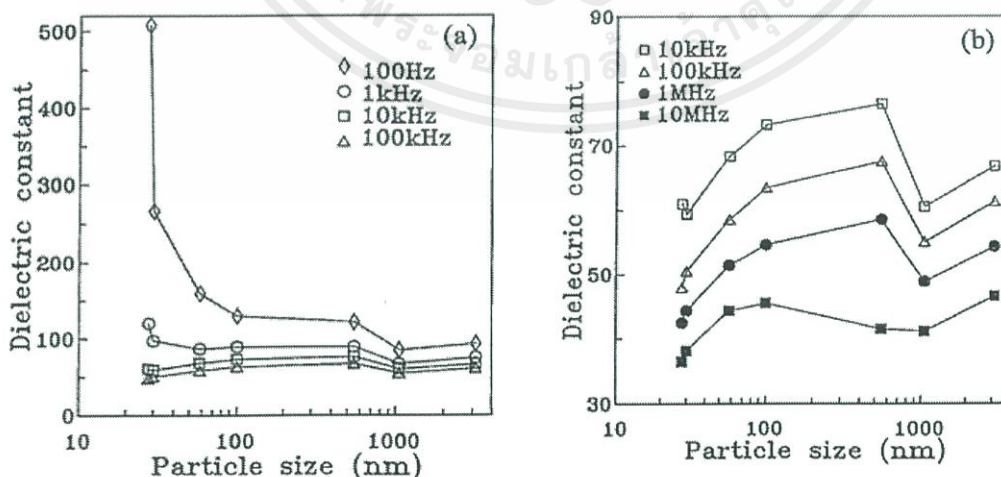
แบเรียมไททาเนตเป็นวัสดุเซรามิกที่มีความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ไม่นำความร้อนทนทานต่อสารเคมี และอัตราการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำมาก จึงนิยมนำมาใช้งานในที่ต้องการความทนทานต่ออุณหภูมิสูงและในสภาวะที่มีการกัดกร่อนสูง แต่ข้อด้อยของเซรามิก คือ มีความเปราะและสามารถแตกหักได้ง่าย การใส่สารเสริมแรงให้กับเมทริกซ์เซรามิกเป็นการปรับปรุงสมบัติให้วัสดุคอมโพสิตที่ได้ มีความทนทานและความเหนียวเหนียวมากยิ่งขึ้น สารเสริมแรงจะทำหน้าที่ป้องกันการแพร่ของรอยแตกร้าวที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน จะทำให้ขณะที่วัสดุคอมโพสิตได้รับแรงจะไม่เกิดการเปราะแตกในทันที เนื่องจากรอยแยกจะถูกขัดขวางด้วยสารเสริมแรง จากสมบัติที่เรียกว่า ความเหนียวแบบเทียม (pseudo ductile) สำหรับเมทริกซ์เซรามิกที่ไม่เสริมแรงจะแสดงสมบัติที่เปราะและแตกทันทีเมื่อได้รับแรงกระทำจนถึงจุดหนึ่ง ดังนั้นการใส่สารเสริมแรงเข้าไปจะทำให้วัสดุเซรามิกคอมโพสิตที่ได้มีความเหนียวทนทานมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเสริมแรงที่นิยมนำมาทำเป็นวัสดุคอมโพสิตกับแบเรียมไททาเนต คือ พอลิเมอร์ เนื่องจากเมื่อนำแบเรียมไททาเนตมาใช้ในงานในแง่ของการเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุ นั้น นอกจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต้องพิจารณาแล้ว ยังต้องคำนึงถึงค่าความคงทนไดอิเล็กทริกด้วย เนื่องจากเมื่อมีการใช้งานที่ความต่างศักย์สูงๆ อาจทำให้เกิดความเสียหายในเนื้อวัสดุที่สามารถส่งผลให้ระบบอิเล็กทรอนิกส์เกิดการลัดวงจรได้ ดังนั้นจึงควรนำแบเรียมไททาเนตมาทำเป็นวัสดุคอมโพสิตกับพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นและมีค่าความคงทนไดอิเล็กทริกสูง เพื่อที่จะสามารถรวมทั้งจุดเด่นของแบเรียมไททาเนตที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงและพอลิเมอร์ที่มีค่าความคงทนไดอิเล็กทริกสูงไว้ด้วยกัน

2.6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

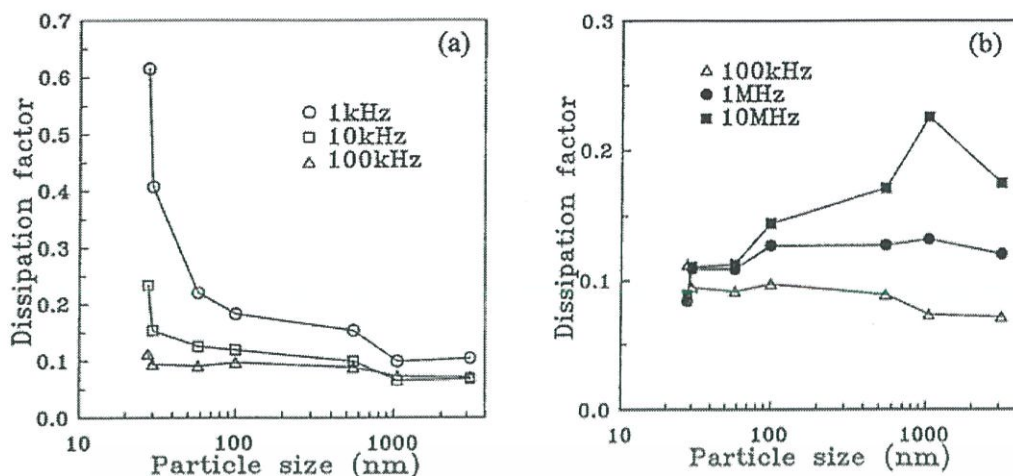
ในปีค.ศ. 2001 Hsing-I Hsiang และคณะ [29] ได้ศึกษาผลของขนาดอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุแบเรียมไททาเนต/พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride) คอมโพสิต ($\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$ composites) ที่เตรียมโดยวิธีการผสมผงแบเรียมไททาเนตกับพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์และอีพ็อกซี เพื่อให้ทุกเกรนของแบเรียมไททาเนตสัมผัสกับพอลิเมอร์หลังจากที่ของผสมแห้งและแข็งตัว พบว่าที่ความถี่ต่ำกว่า 100 กิโลเฮิรซ์ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุจะลดลง เมื่อขนาดอนุภาคของแบเรียมไททาเนตเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มความถี่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบตรงกันข้าม (ภาพที่ 2.17 และ 2.18) นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มขนาดของอนุภาคแบเรียมไททาเนต จะส่งผลทำให้พื้นที่ภายในวงวนฮิสเทอรีซิสมีค่าลดลงด้วย (ภาพที่ 2.19) ซึ่งสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่ขึ้นกับขนาดของอนุภาคสามารถอธิบายได้โดยใช้ปรากฏการณ์ปลดปล่อยประจุ (space charge effect) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคแบเรียมไททาเนตและพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ รวมถึงการจัดเรียงตัวของโดเมน (โดเมนเดี่ยวหรือหลายโดเมน) แบเรียมไททาเนต



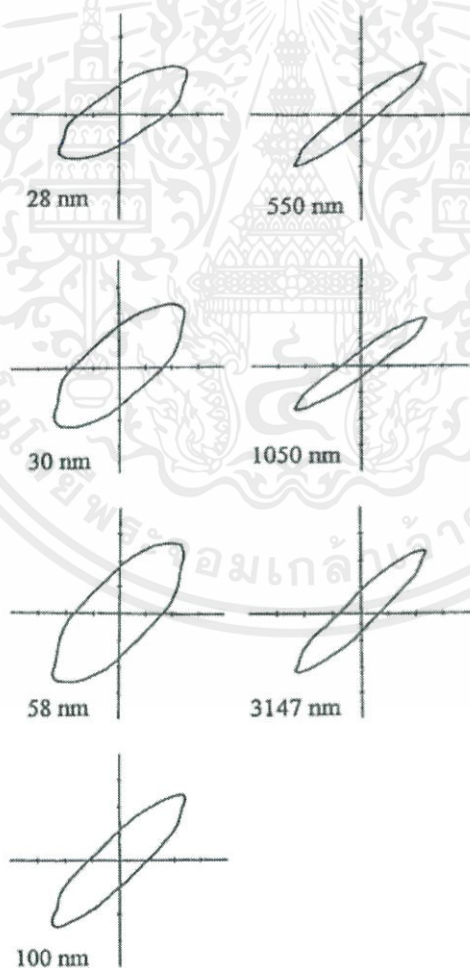
ภาพที่ 2.17 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุแบเรียมไททาเนต/พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์คอมโพสิต

ที่ความถี่ (a) 100 ถึง 100k เฮิรซ์, (b) 100k ถึง 10M เฮิรซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.18 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุแบเรียมไททาเนต/พอลิไวนิลิลิดีนฟลูออไรด์คอมโพสิต ที่ความถี่ (a) 100 ถึง 100k เฮิรตซ์, (b) 100k ถึง 10M เฮิรตซ์

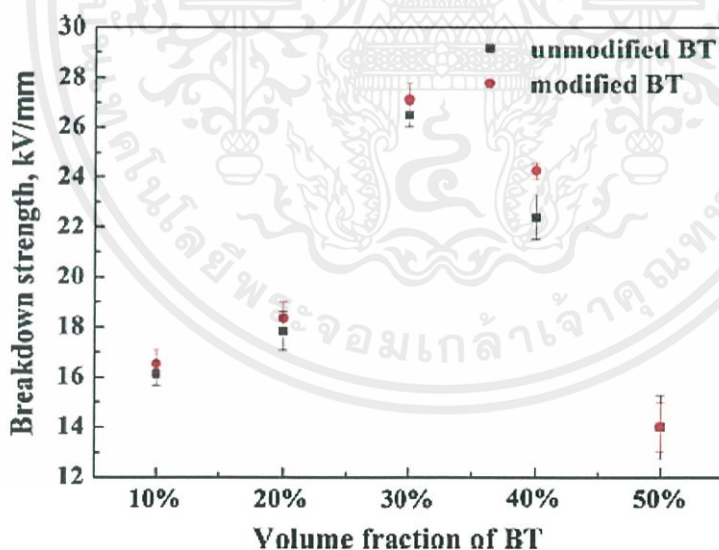


ภาพที่ 2.19 วงวนฮิสเทอรีสิสของวัสดุแบเรียมไททาเนต/พอลิไวนิลิลิดีนฟลูออไรด์คอมโพสิต ที่มีอนุภาคแบเรียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบขนาดต่างๆกัน

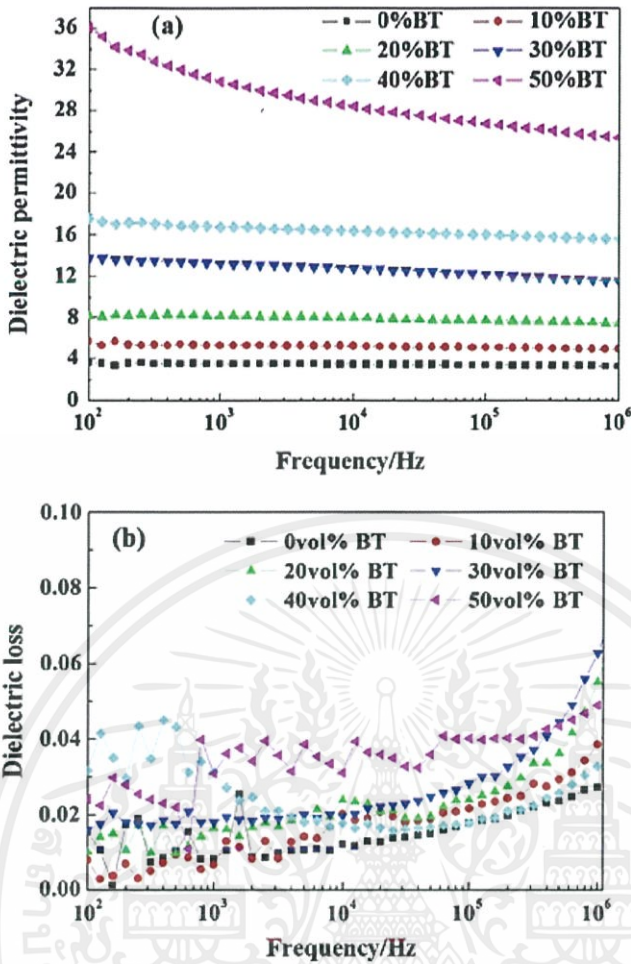
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อมาในปีค.ศ. 2013 Zhong-Feng Zhang และคณะ [30] ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของวัสดุแบบเรียมไททานต/อีพอกซีเรซินนาโนคอมโพสิต สำหรับการประยุกต์ใช้ฝังในตัวเก็บประจุ (embedded capacitor application) ซึ่งสามารถเตรียมวัสดุได้โดยการปรับปรุง (treat) ผิวของแบเรียมไททานต ด้วยสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกัน (coupling agent) ที่มีชื่อว่า γ -aminopropyltriethoxy silane (KH550) เพื่อที่จะทำให้อนุภาคของแบเรียมไททานตกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ที่เป็นอีพอกซี จากนั้นนำแบเรียมไททานตที่ทำการปรับปรุงผิวแล้วใส่ลงในเอทานอล และใส่ลงในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง เพื่อให้อนุภาคแบเรียมไททานตกระจายตัวได้ดีและไม่จับตัวกันเป็นก้อนและใส่อีพอกซีเรซินลงไปพร้อมกับคนและให้ความร้อนจนกระทั่งสารละลายระเหยออกหมด จากนั้นจึงใส่สารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลลงไป ผสมและเทใส่แม่แบบ

เมื่อทำการตรวจสอบสมบัติของตัวเก็บประจุที่สร้างเป็นโครงสร้างแบบ 3 ชั้น ที่ทำการปรับปรุงผิวของอนุภาคแบเรียมไททานตด้วยสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกัน พบว่าวัสดุแบบเรียมไททานต/อีพอกซีเรซินนาโนคอมโพสิตที่ประกอบไปด้วยแบเรียมไททานตปริมาณ 30% โดยปริมาตร มีความคงทนทางไดอิเล็กทริกสูงที่สุด (ภาพที่ 2.20) ในขณะที่วัสดุแบบเรียมไททานต/อีพอกซีเรซินนาโนคอมโพสิตที่ฝังอยู่ในตัวเก็บประจุจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง และมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแบเรียมไททานตที่เพิ่มขึ้น ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำ (ภาพที่ 2.21) และมีสมบัติไดอิเล็กทริกที่เสถียรต่ออุณหภูมิในช่วง -30 ถึง 100 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2.20 ค่าความคงทนไดอิเล็กทริกของวัสดุแบบเรียมไททานต/อีพอกซีเรซินนาโนคอมโพสิต ที่มีปริมาณแบเรียมไททานตต่างๆกัน



ภาพที่ 2.21 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกของวัสดุแบบเรซินไททานเนต/อีพอกซีเรซินนาโนคอมโพสิต

2.7 การเตรียมชิ้นงาน

2.7.1 การเตรียมเซรามิก

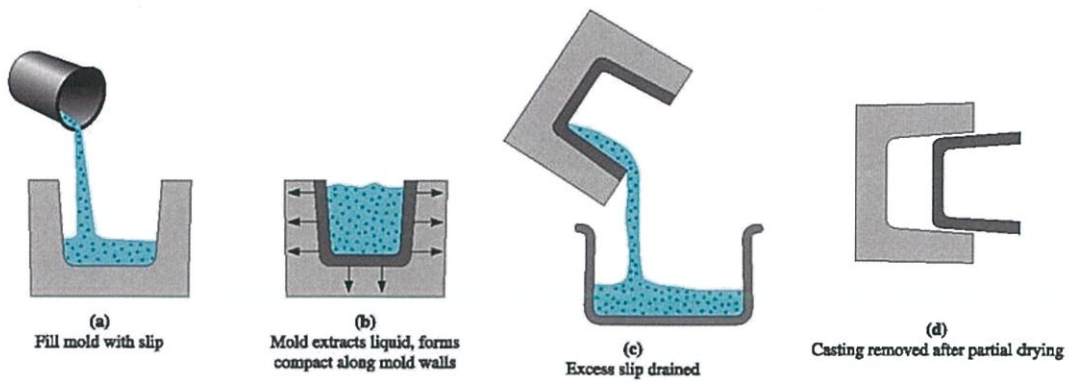
การเตรียมเซรามิก ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ

2.7.1.1 การขึ้นรูป

การขึ้นรูป คือ การทำให้วัสดุเซรามิกจับตัวกันเป็นก้อนโดยชิ้นงานที่ได้มีลักษณะ ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่สำเร็จ มีวิธีที่สำคัญ 3 วิธี ดังนี้

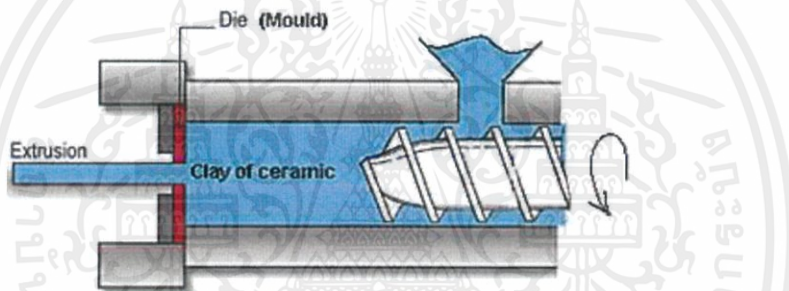
- การหล่อแบบ (slip casting) วิธีนี้จะเตรียมเนื้อดินปั้นให้อยู่ในรูปน้ำดินข้นๆ (slip) ที่ไหลตัวได้ดี จากนั้นจึงเทลงในแบบปูนพลาสติก ปูนจะดูดน้ำและทำให้เนื้อดินเกาะติดกับผนังแบบ ได้เป็นผลิตภัณฑ์ตามต้องการ วิธีนี้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายรูปทรง แต่ต้องใช้น้ำในการขึ้นรูปมาก ทำให้การหดตัวหลังอบแห้งสูง ซึ่งอาจเกิดการแตกหรือบิดเบี้ยวได้ง่าย (ภาพที่ 2.22)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

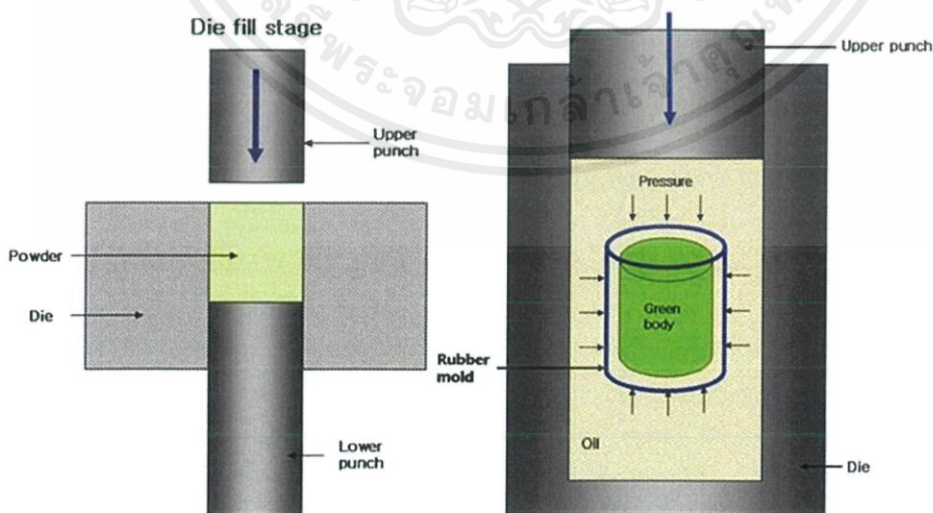


ภาพที่ 2.22 กระบวนการหล่อแบบ [31]

- การอัดรีด (extrusion) นำดินมาผ่านเข้าเครื่องรีดให้ออกมาเป็นแท่งยาวๆ ซึ่งมีรูปหน้าตัดตามที่ต้องการแบบใด มักใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปเป็นแท่งยาวๆ เช่น ท่อ (tube) เป็นต้น (ภาพที่ 2.23)



ภาพที่ 2.23 การอัดรีด [32]



ภาพที่ 2.24 การอัดแห้ง, (ซ้าย) การอัดในทิศทางเดียว, (ขวา) การอัดทุกทิศทาง [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การอัดแห้ง (pressing) จะต้องทำให้ผงเซรามิกอัดตัวอย่างสม่ำเสมอทุกบริเวณและไม่มีจุดบกพร่อง (defect) หรือรอยแตกร้าว (crack) อยู่ภายในชิ้นงาน สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบตามลักษณะของความดันที่ให้ (ภาพที่ 2.24) คือ

(1) Uniaxial press คือ การใช้แรงอัดในทิศทางเดียว เป็นการขึ้นรูปแบบง่าย มีอัตราการผลิตสูง แต่ไม่เหมาะสำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่และรูปร่างซับซ้อน

(2) Isostatic press คือ การใช้แรงอัดในทุกทิศทางเท่าๆกัน มีอัตราการผลิตต่ำกว่าแบบ uniaxial press เครื่องมือมีราคาแพง และเหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน

การอัดเป็นวิธีประหยัดในการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างอย่างง่ายและไม่ซับซ้อน ถ้าหากต้องการผลิตในปริมาณมากควรใช้วิธีการอัดรีดจะเหมาะสมกว่า และถ้าหากชิ้นงานที่ต้องการผลิตมีขนาดใหญ่ควรใช้วิธีการหล่อแบบจะได้ผลดีที่สุด เนื่องจากค่าใช้จ่ายและเครื่องมือที่ใช้มีราคาต่ำกว่าวิธีการอัดรีดและอัดแห้ง

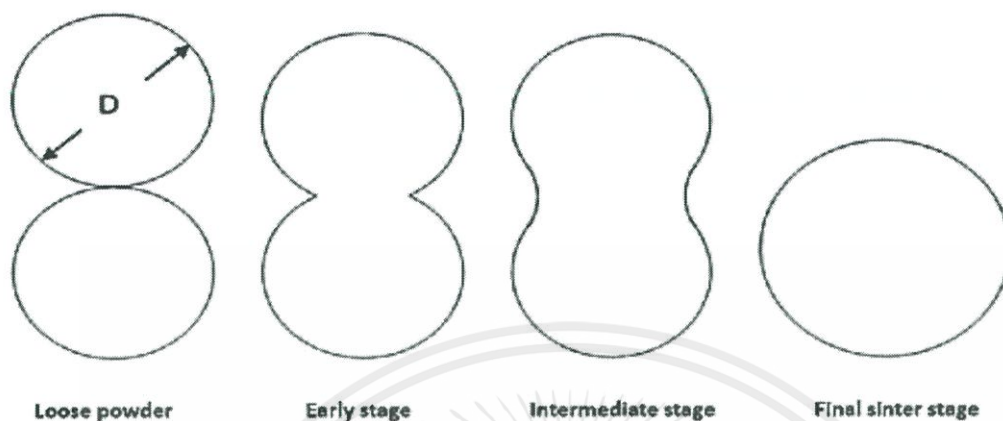
2.7.1.2 การเผาผนึก (sintering)

การเผาผนึก คือ การประสานเข้าด้วยกันระหว่างอนุภาคที่ระดับอุณหภูมิสูง (ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว) และเมื่ออุณหภูมิมียุคสูงขึ้นการประสานกันก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น อนุภาคแต่ละอนุภาคจะประสานกันโดยการเคลื่อนย้ายของอะตอม ซึ่งเป็นการขจัดพลังงานพื้นผิว (surface energy) ที่มีค่าสูง อันเนื่องมาจากขนาดเล็กมากของอนุภาค พลังงานพื้นผิวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรจะแปรผกผันตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถประมาณพลังงานพื้นผิวได้ด้วยพื้นที่ผิว (surface area) นั่นหมายความว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific area) มากกว่า ทำให้มีพลังงานพื้นผิวมากกว่า เป็นผลให้เกิดการผนึกกันของอนุภาคได้รวดเร็วกว่า

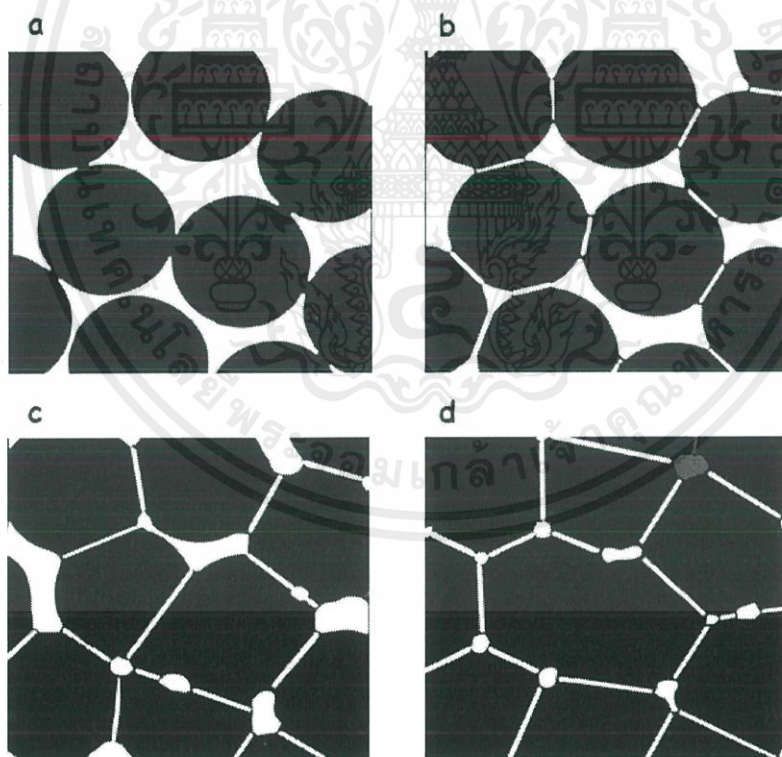
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจะเปลี่ยนไปตามคอคอดที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาผนึก ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกการเคลื่อนที่ (transport mechanism) ที่ส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการแพร่ผ่านที่เป็นกระบวนการกระตุ้นด้วยความร้อน (thermal activation) ซึ่งคือพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอะตอมที่ขึ้นกับว่าอะตอมจะมีพลังงานมากเพียงพอหรือเท่ากับพลังงานกระตุ้นในการที่จะทำให้อะตอมแยกตัวออกมาเป็นอิสระจากตำแหน่งปัจจุบันและเคลื่อนเข้าไปยังตำแหน่งที่ว่าง (vacant site) ในขณะที่เผาผนึกจะพบว่าพื้นที่ผิวของอนุภาคนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วจากพื้นที่ผิวเริ่มต้น เมื่อคอคอดมีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้ขนาดของชิ้นงานหลังการเผาผนึกหดตัวลง มีความหนาแน่นและความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มของขนาดคอคอดระหว่างอนุภาคจะทำให้พื้นที่ผิวของอนุภาคลดลง และในชิ้นงานเองอาจจะปราศจากการหดตัวที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคในขณะที่สมบัติด้านต่างๆดีขึ้น

เมื่อพิจารณาจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคทรงกลมสองอนุภาค โดยทั่วไปหลังจากการขจัดตัวประสานแล้ว ในแต่ละอนุภาคจะมีบริเวณที่สัมผัสกับอนุภาคอื่นๆหลายบริเวณ พันธะระหว่างอนุภาคที่บริเวณผิวสัมผัสจะขยายตัวขึ้นและรวมกัน (merge) เมื่อดำเนินการเผาผนึกไปอย่างต่อเนื่อง ที่แต่ละจุดสัมผัสของอนุภาคจะเกิดขึ้นเป็นขอบเกรนโตขึ้นมาแทนที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของแข็งและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอ (solid-vapor interface) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 2.25 การเผาผนึกเป็นเวลานานจะทำให้อนุภาคสองอนุภาคประสานรวมกันและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 1.26 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มแรกของอนุภาค [34]



ภาพที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงของอนุภาคเมื่อทำการเผาผนึก [35]



ภาพที่ 2.26 แบบจำลองโครงสร้างจุลภาคในกระบวนการเผาผนึก, (a) ก่อนการเผาผนึก, (b) การประสานกันของอนุภาคในระยะแรก (initial stage bonding), (c) การประสานกันของอนุภาคในระยะกลางและ (d) การหดกลมของรูพรุนและการเกิดขอบเกรนในระยะสุดท้าย [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการเผาผนึก สามารถแบ่งระยะในการประสานกันระหว่างอนุภาคได้ 3 ระยะ ดังนี้

ในระยะแรก (initial stage) ของการเผาผนึก ดังภาพที่ 2.26 (b) อนุภาคแต่ละอนุภาคจะเกิดพันธะระหว่างกันที่บริเวณผิวโค้ง ซึ่งทำให้เกิดจุดสัมผัสเป็นคอคอดขึ้นในแต่ละอนุภาค (inter-particle neck growth) และผิวสัมผัสจะเพิ่มมากขึ้น ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างเปิด (open pores) เป็นผลให้รูที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคเพิ่มความเรียบมากขึ้น

ในระยะกลาง (intermediate stage) ดังภาพที่ 2.26 (c) รูพรุนจะยิ่งเพิ่มความเรียบมากขึ้น และจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างปิดอย่างต่อเนื่อง (close pores) การขยายตัวของเกรน (grain growth) จะเริ่มเกิดขึ้น หลังจากนั้นค่าของความหนาแน่นในระยะนี้จะมีค่าประมาณ 70% - 92% ของความหนาแน่นทางทฤษฎี

ในระยะสุดท้าย (final stage) ดังภาพที่ 2.26 (d) ของการเผาผนึก รูพรุนจะปิดกลมและหดตัวลงอย่างช้าๆ เนื่องจากมีการแพร่ไปตามช่องว่าง (vacancy) และตามขอบเกรน (grain boundaries) ที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคที่ประสานรวมกัน

2.7.2 การเตรียมวัสดุคอมโพสิต

2.7.2.1 ประเภทของวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ เมทริกซ์และสารเสริมแรง ดังนั้น ถ้าจำแนกวัสดุคอมโพสิตตามชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นเมทริกซ์ จะสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต (polymer matrix composite, PMC) วัสดุโลหะคอมโพสิต (metal matrix composite, MMC) และวัสดุเซรามิกคอมโพสิต (ceramic matrix composite, CMC)

สารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตสามารถจำแนกตามลักษณะได้เป็นเส้นใย อนุภาคและวิสเกอร์ (whisker) อนุภาคเสริมแรงจะมีลักษณะเป็นผงหรือเม็ด เช่น อนุภาคแบเรียมไททาเนต ผงถ่านดำ เป็นต้น เมื่อพิจารณา aspect ratio หรืออัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสารเสริมแรงนั้นๆ ถ้ามีค่าสูงกว่า 100 จะเรียกสารเสริมแรงชนิดนั้นว่าเส้นใย ซึ่งสามารถจำแนกตามความยาวอีกได้เป็นเส้นใยต่อเนื่องและเส้นใยไม่ต่อเนื่อง ดังภาพที่ 2.27 และอาจจำแนกเส้นใยไม่ต่อเนื่องได้เป็นเส้นใยสั้นที่มีอัตราส่วนต่ำกว่า 1,000 และเส้นใยยาวที่มีอัตราส่วนมากกว่า 1,000 ดังภาพที่ 2.28 [37]

เส้นใยมีทั้งที่เป็นเส้นใยอินทรีย์ เช่น เส้นใยเซลลูโลส เส้นใยอะรามิด เป็นต้น และเส้นใยที่เป็นอนินทรีย์ที่อาจเป็นเส้นใยคาร์บอน โลหะ แก้ว ดิน ส่วนลักษณะของวิสเกอร์จะเป็นเส้นใยที่มีขนาดเล็กมาก โดยมีความยาวเพียงไม่กี่มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยไมโครเมตร ซึ่งเป็นผลึกเดี่ยวที่เกิดจากการก่อตัวทางยาวจึงมีแนวโน้มที่จะเป็นผลึกสมบูรณ์และส่งผลให้วิสเกอร์มีความแข็งแรงที่สูงมาก [38]

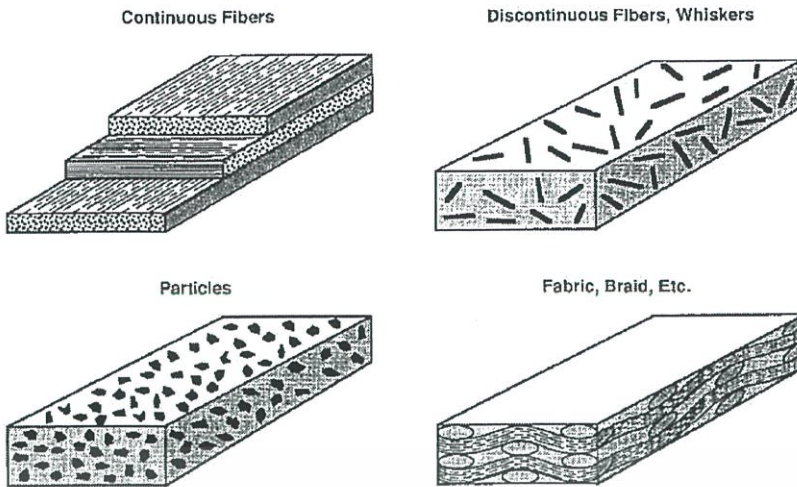
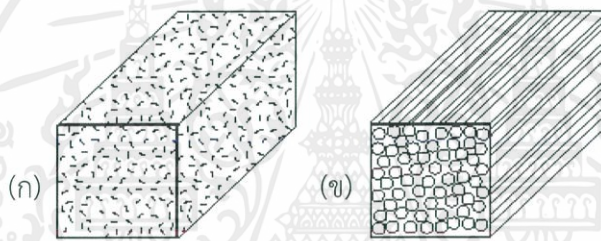


Figure 1 Reinforcement forms.

ภาพที่ 2.27 การจำแนกประเภทของวัสดุคอมโพสิตตามลักษณะของสารเสริมแรง



ภาพที่ 2.28 วัสดุคอมโพสิตที่มีสารเสริมแรงเป็น (ก) เส้นใยสั้น และ (ข) เส้นใยยาว

(1) วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต

โดยธรรมชาติแล้วพอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ ที่โครงสร้างเกิดจากการประกอบกันของหน่วยซ้ำที่เชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่สูงนัก ความหนาแน่นต่ำและทนทานต่อการกัดกร่อน การเสริมความแข็งแรงให้พอลิเมอร์ทำได้โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยทั่วไปแล้ว เส้นใยที่ใช้เสริมแรงสำหรับวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตมักเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง เพื่อทำหน้าที่ในการรับและกระจายแรงกระทำ โดยวัสดุคอมโพสิตจะมีความแข็งแรงมากที่สุดเมื่อได้รับแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง การเสริมแรงนี้ทำให้เมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง ซึ่งเป็นสมบัติร่วมที่เกิดจากสมบัติของพอลิเมอร์และเส้นใยเสริมแรงประกอบกัน ทำให้วัสดุคอมโพสิตที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงทำหน้าที่รับแรงกระทำ แต่วัสดุคอมโพสิตจะมีความสามารถในการยืดสูงสุดได้ไม่เกินระยะยืดสูงสุดของเส้นใยเสริมแรง สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์ควรมีความเหนียวและความทนทานมากพอที่จะห่อหุ้มเส้นใยเสริมแรงไว้ [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเสริมแรงแบบอนุภาคมีส่วนเสริมความแข็งแรงได้ไม่ตีเท่ากับแบบเส้นใย เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของอนุภาคจะส่งผลต่อการกระจายแรง จึงนิยมเรียกว่าเป็น สารตัวเติม (filler) วัสดุคอมโพสิตชนิดนี้เมื่อมีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจะส่งผลให้มีความแข็งแรงมากขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงทำให้มีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อความหนาแน่นของวัสดุ หรือความแข็งแรงจำเพาะ (specific strength) มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จึงทำให้วัสดุคอมโพสิตเหมาะสำหรับงานบางชนิดที่ต้องรับแรงกระทำที่ไม่สูงมากนักได้ เช่น เครื่องใช้ในบ้านต่างๆ สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถแบ่งย่อยออกเป็นเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic matrix) และเมทริกซ์เทอร์โมเซต (thermosetting matrix) ที่มีพฤติกรรมเชิงความร้อนของพอลิเมอร์แตกต่างกันใน โดยเมทริกซ์เทอร์โมเซตจะมีโครงสร้างเป็นแบบร่างแห มีความแข็งแต่เปราะหักง่าย ดังนั้นเมื่อทำให้เกิดการคงรูปแล้ว จะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ส่วนเทอร์โมพลาสติกจะมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งหรือแบบเส้น มีความเหนียวและทนทานต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อได้รับความร้อนเหนือจุดหลอมเหลวแล้วจะสามารถเกิดการหลอมเหลวได้อีก ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตจะแตกต่างกันตามพฤติกรรมเชิงความร้อนนี้ สำหรับการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตเมทริกซ์เทอร์โมเซตจะเป็นการผสมสารเสริมแรงให้เข้ากับมอนอเมอร์ในแม่พิมพ์ก่อนที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างแบบร่างแหและหลังจากที่ปฏิกิริยาลิ้นสุดวัสดุคอมโพสิตจะเกิดการคงรูปซึ่งจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ในขณะที่การขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตที่เมทริกซ์เป็นเทอร์โมพลาสติกนั้นจะต้องให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวและทำการขึ้นรูปขณะที่ยังไม่แข็งตัว

ในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุคอมโพสิต วัตถุดิบอาจอยู่ในรูปของชิ้นงานกึ่งสำเร็จหรือพรีเพรก (prepreg) เพื่อให้สามารถขึ้นรูปได้อย่างสะดวก ถ้าเป็นพรีเพรกของวัสดุคอมโพสิตเมทริกซ์เทอร์โมเซตจะใส่เป็นเส้นใยอยู่ภายใน และทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลเพียงบางส่วนเท่านั้น และเมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นรูปร่างที่ต้องการแล้วจึงจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลที่สมบูรณ์ ซึ่งอาจมาในลักษณะที่เป็นแผ่น เรียกว่า พรีเพรกผสมเสร็จแบบหนา (bulk molding compound, BMC) จะใช้สำหรับการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีรูปทรง และพรีเพรกผสมเสร็จแบบแผ่น (sheet molding compound, SMC) สำหรับการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีลักษณะแผ่น ซึ่งพรีเพรกทั้งสองชนิดจะมีความแตกต่างกันอยู่ที่ความหนืดของเมทริกซ์และความยาวของเส้นใยเสริมแรง พรีเพรกแบบหนามักจะทำจากเส้นใยสั้นและมีความสามารถในการไหลสูง เพื่อให้เหมาะสำหรับการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน ส่วนพรีเพรกแบบแผ่นมักจะทำจากเส้นใยยาวและมีความสามารถในการไหลของเมทริกซ์น้อยกว่า สำหรับพรีเพรกของวัสดุคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกนั้นจะเรียกว่า พรีเพรกผืนแก้วเทอร์โมพลาสติก (glass mat thermoplastic, GMT) ซึ่งอยู่ในรูปแบบแผ่นที่เป็นเส้นใยแก้วสั้นๆในเมทริกซ์พอลิโอสเตนหรือ โดยพรีเพรกเมื่อได้รับความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลวของเมทริกซ์ และทำให้เป็นรูปร่างที่ต้องการก่อนที่จะถูกทำให้เย็นตัวลงและคงรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) วัสดุโลหะคอมโพสิต [37, 39, 40]

วัสดุโลหะคอมโพสิตถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาของโลหะให้สามารถทนทานต่อความล้าได้ดีมากขึ้น สารเสริมแรงที่ใช้อาจอยู่ในลักษณะของเส้นใย อนุภาค หรือวิสเกอร์ก็ได้ ซึ่งสารเสริมแรงที่ใช้ต้องสามารถทนความร้อนสูงได้และมีความแข็งแรงสูง เนื่องจากโลหะจะต้องใช้ความร้อนสูงมากในการขึ้นรูป และสารเสริมแรงเหล่านั้นต้องไม่ทำให้เมทริกซ์โลหะเกิดการกัดกร่อน จากข้อจำกัดเหล่านี้จึงทำให้สารเสริมแรงอนินทรีย์และเส้นใยแก้วไม่สามารถใช้เสริมแรงให้กับเมทริกซ์โลหะได้ ดังนั้นสารเสริมแรงที่สามารถใช้ได้จึงต้องเป็นจำพวกโลหะหรือเซรามิกแทน เช่น เส้นใยโบรอน อะลูมินา ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น โดยการเสริมแรงเป็นการทำให้เมทริกซ์โลหะมีความทนทานต่อความล้าสูงขึ้นและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น แต่จะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (coefficient temperature expansion) ลดลง เนื่องจากสารเสริมแรงเซรามิกมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนน้อยกว่าโลหะ และเนื่องจากสารเสริมแรงมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าโลหะ จึงส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นลดลงด้วย

โดยทั่วไปวัสดุโลหะคอมโพสิตจะนำไปใช้งานในลักษณะเดียวกับโลหะ เพราะสารเสริมแรงที่เติมเข้าไปนั้นเป็นแค่การปรับปรุงสมบัติของโลหะให้ดียิ่งขึ้น และมีอายุการใช้งานนานขึ้น อย่างไรก็ตามการนำไปใช้ งานยังจำกัดเนื่องจากต้นทุนในการผลิตที่สูงมาก

(3) วัสดุเซรามิกคอมโพสิต [37, 41]

เซรามิกเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ไม่นำความร้อน ทนทานต่อสารเคมีและอัตราการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำมาก จึงนิยมนำมาใช้ในงานที่ต้องการความทนทานต่ออุณหภูมิสูงและในสภาวะที่มีการกัดกร่อนสูง แต่ข้อด้อยของเซรามิก คือ มีความเปราะและสามารถแตกหักได้ง่าย ดังนั้นการเสริมแรงให้กับเมทริกซ์เซรามิกจึงต้องสามารถปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้มีความเหนียวและความทนทานมากยิ่งขึ้น โดยจะส่งผลให้ในขณะที่วัสดุคอมโพสิตได้รับแรงจะไม่เกิดการเปราะแตกในทันที เนื่องจากรอยแยกเหล่านั้นจะถูกขัดขวางการแพร่กระจายด้วยสารเสริมแรงที่ใส่เข้าไป ทำให้เกิดเป็นความเหนียวแบบเทียม หรือ pseudo ductile สำหรับเมทริกซ์เซรามิกที่ไม่เสริมแรงจะแสดงสมบัติที่เปราะและแตกทันทีเมื่อได้รับแรงกระทำจนถึงจุดจุดหนึ่ง ดังนั้นการใส่สารเสริมแรงเข้าไปจะทำให้วัสดุเซรามิกคอมโพสิตที่ได้มีความเหนียวทนทานมากขึ้น

วัสดุคอมโพสิตได้นำมาใช้งานเป็นเวลานานโดยเฉพาะการใช้เป็นวัสดุโครงสร้างที่ใช้เส้นโลหะและหินกรวดทรายต่างๆเป็นสารเสริมแรงให้แก่เมทริกซ์คอนกรีตหรือซีเมนต์ สำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีคอนกรีต อาจทำได้โดยการใช้เส้นใยเสริมแรง เช่น เส้นใยคาร์บอนหรือเส้นแก้วแทนการใช้เส้นโลหะ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาด้านกัดกร่อนเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน

สำหรับวัสดุประเภทเซรามิกคอมโพสิตขั้นสูงที่สามารถทนทานต่อการกัดกร่อน มีความเหนียวสูง และสามารถประยุกต์ใช้ในงานที่อุณหภูมิสูงได้นั้น มีต้นทุนในการผลิตที่สูงมาก จึงทำให้ยังมีการใช้งานอย่างจำกัด

2.7.2.2 การจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสในวัสดุคอมโพสิต [42]

ในการเลือกเฟสของวัสดุคอมโพสิตแต่ละเฟสเพื่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับปริมาณและรูปแบบการเรียงติดกันของแต่ละเฟส แนวความคิดของการเรียงติดกันถูกนำมาใช้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิตโดย Newnham การเรียงติดกันอธิบายรูปแบบของแต่ละเฟสในวัสดุคอมโพสิต หากพิจารณาการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสที่มีการเรียงตัวติดกันใน 3 มิติ สำหรับวัสดุคอมโพสิตที่มี 2 เฟสนั้น สามารถจัดเรียงติดกันได้ 10 แบบ คือ 0-0, 0-1, 0-2, 0-3, 1-1, 1-2, 2-2, 1-3, 2-3 และ 3-3 ดังภาพที่ 2.29 โดยตัวเลขตัวแรกจะบอกถึงลักษณะการเชื่อมต่อกัน (connectivity) ของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ ส่วนเลขตัวหลังจะบอกถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่เป็นเมทริกซ์

การเตรียมวัสดุคอมโพสิตที่นิยมมี 2 แบบ คือ แบบ 0-3 และแบบ 1-3 สำหรับแบบ 0-3 คือ คอมโพสิตที่มีอนุภาคเซรามิกเป็นเฟสที่ใช้งาน (active phase) มีลักษณะการเชื่อมต่อแบบ 0 ทิศทาง และพอลิเมอร์เป็นเฟสที่ไม่ใช้งาน (passive phase) มีลักษณะการเชื่อมต่อแบบ 3 ทิศทาง ส่วนแบบ 1-3 จะเป็นคอมโพสิตที่เซรามิกเป็นเฟสที่ใช้งาน มีลักษณะการเชื่อมต่อแบบ 1 ทิศทางและพอลิเมอร์ที่เป็นเฟสที่ไม่ใช้งาน มีลักษณะการเชื่อมต่อแบบ 3 ทิศทาง

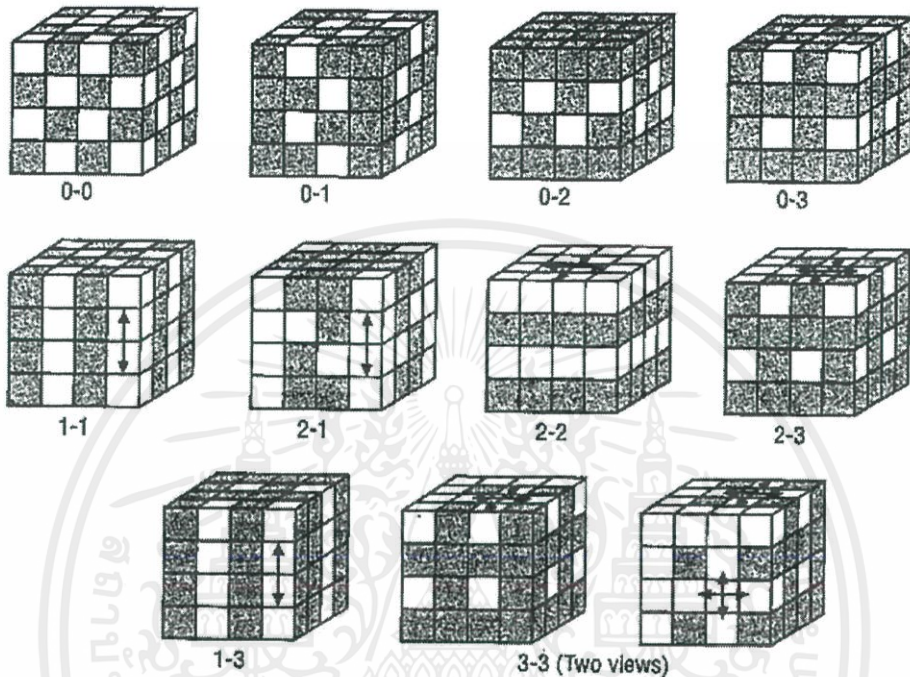
วัสดุคอมโพสิตที่มีรูปแบบงายที่สุดคือ 0-3 ซึ่งประกอบด้วยผงเซรามิกกระจายอยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ การเรียงติดกันแบบ 0-3 คือ เซรามิกจะไม่เชื่อมต่อกันทั้ง 3 มิติ และมีพอลิเมอร์ที่เชื่อมต่อกันแบบ 3 มิติ ล้อมรอบผงเซรามิกนั้นๆอยู่ อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะมีการเรียงติดกันแบบใดแบบหนึ่งล้วนๆ ทั้งนี้ขึ้นกับขั้นตอนวิธีการเตรียม พอลิเมอร์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (amorphous structure) ส่วนเซรามิกมีโครงสร้างผลึก ทำให้วัสดุคอมโพสิตแบบ 0-3 มีเฟสที่ผลึกกระจายอยู่ในเมทริกซ์อสัณฐาน ข้อเด่นที่สำคัญมากของวัสดุคอมโพสิตนี้ คือ การขึ้นรูปเป็นรูปร่างแบบต่างๆได้ง่าย เช่น การทำเป็นแผ่นบาง การทำเป็นแบบเส้นใย ซึ่งเหมาะแก่การประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ

2.7.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิต

- สมบัติของสารที่เป็นเมทริกซ์
- สมบัติของสารเสริมแรง
- สัดส่วนของสารเสริมแรง เนื่องจากวัสดุที่เป็นเส้นใยเสริมแรงมักมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าพอลิเมอร์ ดังนั้นหากวัสดุคอมโพสิตมีสารเสริมแรงมากขึ้นจะทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น แต่การผสมสารเสริมแรงกับเมทริกซ์ก็มีขีดจำกัด เนื่องจากสารเสริมแรงควรมีเมทริกซ์ห่อหุ้มอยู่โดยรอบ

โดยทั่วไปการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอมโพสิต เช่น เรือไฟเบอร์กลาสจะนิยมขึ้นรูปด้วยวิธีที่เรียกว่าแฮนด์เลย์อัป (hand lay-up) ซึ่งจะมีสัดส่วนของเส้นใยเสริมแรงประมาณ 30-40% แตกต่างจากชิ้นงานที่ใช้ในอุตสาหกรรมอวกาศและการบินที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีขั้นสูง ที่มักมีสัดส่วนของเส้นใยเสริมแรงประมาณ 70%

เส้นใยเสริมแรงจะให้ค่าสมบัติเชิงกลในแนวยาวมากกว่าแนวขวาง ดังนั้นหากมีการจัดเรียงตัวของเส้นใยในวัสดุคอมโพสิตเป็นไปในทิศทางเดียวกัน จะส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลที่แสดงออกมาแตกต่างกันตามทิศทางของแนวแรงที่กระทำ ดังนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาดังแต่การออกแบบคือ ขนาดและลักษณะแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน



ภาพที่ 2.29 รูปแบบการเชื่อมต่อเฟสแบบต่างๆของวัสดุสมที่มี 2 เฟส

2.7.3 การรีฟลักซ์ [43]

ในการทำปฏิกิริยาของสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดจะต้องใช้เวลาานจึงจะทำปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้นจึงจำเป็นต้องให้ความร้อนแก่ปฏิกิริยา แต่สารประกอบส่วนมากจะมีจุดเดือดต่ำและระเหยได้ดีเนื่องจากมีความไอสูง เมื่อให้ความร้อนสูงเกินไปอาจทำให้เกิดเปลวไฟและระเบิดได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการให้ความร้อนแก่ระบบด้วยเทคนิคเฉพาะเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาตัวทำละลายระเหยออกไปมากเกินไปและทำให้ภาชนะที่บรรจุสารทำปฏิกิริยาแห้งได้

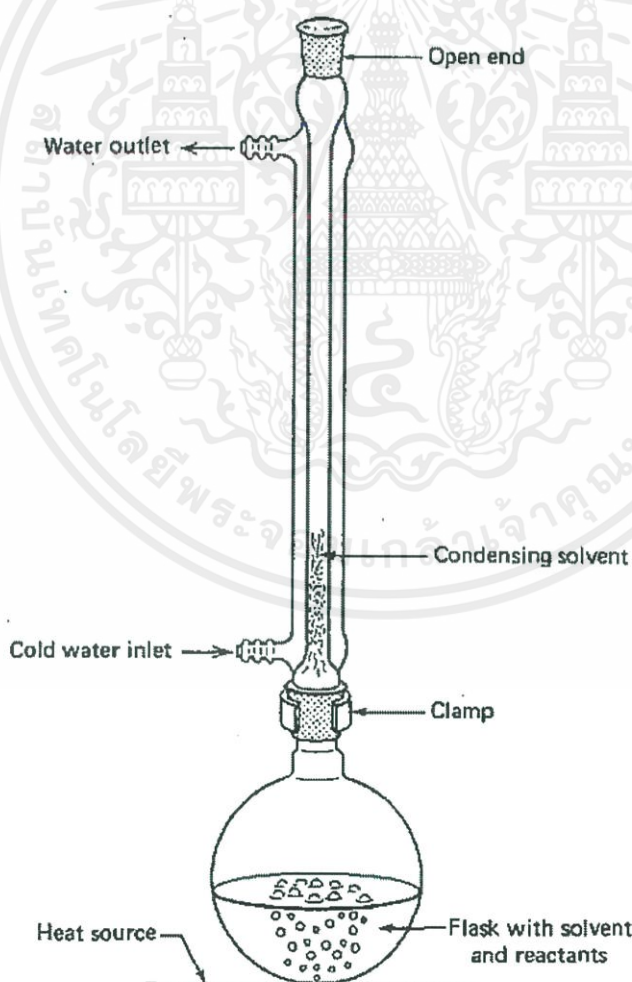
การรีฟลักซ์ คือ วิธีการให้ความร้อนแก่ปฏิกิริยาเคมีในระยะเวลาที่ต่อเนื่องยาวนาน โดยตัวทำละลายในขวดกลั่นจะระเหยกลายเป็นไอและควบแน่นในคอนเดนเซอร์ไหลกลับลงมาในขวดกลั่นหมุนเวียนต่อเนื่องตลอดเวลา ทำให้อุณหภูมิของปฏิกิริยาคงที่อยู่เสมอ

สารที่ทำปฏิกิริยาในระบบจะเป็นของแข็งกับของเหลว หรือเป็นของเหลวกับของเหลวก็ได้ อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ขึ้นอยู่กับจุดเดือดของตัวทำละลายและช่วงอุณหภูมิที่ทำให้จุดที่สารควบแน่น (reflux ring) ในคอนเดนเซอร์ อยู่สูงขึ้นไปจากปลายคอนเดนเซอร์ด้านล่างประมาณ 1 ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 ของความยาวของคอนเดนเซอร์ ซึ่ง reflux ring คือ ช่วงรอยต่อระหว่างช่วงที่ไอระเหยของสารยังไม่ควบแน่นและช่วงที่ไอระเหยควบแน่นเป็นของเหลว สังเกตได้คือ เป็นจุดรอยต่อระหว่างทั้งส่วนแห้งและส่วนเปียกในคอนเดนเซอร์ อุณหภูมิที่ควรใช้ในการรีฟลักซ์จะต้องอยู่ในช่วงที่ทำให้ reflux ring อยู่สูงขึ้นไปประมาณ 1 ใน 3 ของคอนเดนเซอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้ไอระเหยของสารแพร่ขึ้นไป คอนเดนเซอร์สูงเกินไปและรั่วไหลออกทางปลายด้านบนของคอนเดนเซอร์

ถ้าบรรจุสารที่ทำปฏิกิริยาในขวดก้นกลม จะต้องใส่ boiling chip ลงไปในสารละลายด้วยเพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรง อุปกรณ์ให้ความร้อนที่เหมาะสม ได้แก่ เตาให้ความร้อนแบบหลุมที่สามารถกวนด้วยแม่เหล็กได้ (heating mantle and magnetic stirrer) หรืออ่างน้ำร้อนที่วางบนเตาให้ความร้อนแบบกวนด้วยแม่เหล็ก (hotplate and magnetic stirrer) ซึ่งจะทำให้ทั้งให้ความร้อนและกวนได้ต่อเนื่องในเวลาเดียวกัน ส่วนที่คอนเดนเซอร์จะต่อน้ำเข้า-น้ำออก เพื่อหล่อให้เย็นอยู่ตลอดเวลา เมื่อไอของสารที่ทำปฏิกิริยาระเหยเข้าสู่คอนเดนเซอร์จะถ่ายเทความร้อนให้กับผนังคอนเดนเซอร์ที่เย็นจึงควบแน่นกลับเป็นของเหลวไหลลงสู่ขวดก้นกลมอีกครั้ง ดังภาพที่ 2.30



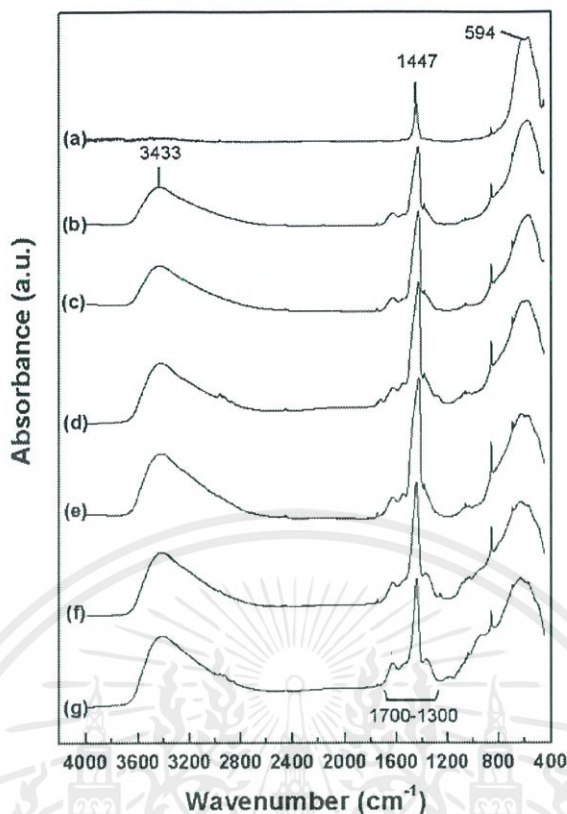
ภาพที่ 2.30 แผนภาพอุปกรณ์การรีฟลักซ์ [44]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อถึงจุดเดือดจะเกิดฟองแก๊สเกิดขึ้นในตัวทำละลาย และเมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของสารจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่อัตราการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากของเหลวได้รับพลังงานความร้อนเพื่อนำไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ จุดเดือดของสารผสมจะอยู่ที่จุดใด (อุณหภูมิใด) ขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนโมลของสารที่นำมาผสมกัน ของเหลวผสมที่รวมเป็นเนื้อเดียวกันจะเดือดที่อุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิที่จุดเดือดของของเหลวผสมแต่ละชนิด ยกตัวอย่างเมื่อนำของเหลวผสมมาให้ความร้อน สารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ดีกว่าจะมีปริมาณไอที่ระเหยขึ้นมาได้มากกว่า เช่น เมื่อนำของเหลวผสมระหว่างไซโคลเฮกเซน (cyclohexane) ที่มีจุดเดือดที่ 80.74 องศาเซลเซียส และโทลูอิน (toluene) ที่มีจุดเดือด 110.6 องศาเซลเซียส ในสัดส่วน 50:50 มาให้ความร้อน ไซโคลเฮกเซนจะระเหยกลายเป็นไอได้ดีกว่าและของเหลวจะเดือดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จะได้ไอของไซโคลเฮกเซน 70% และไอของโทลูอิน 30%

โดยทั่วไป อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ขายเชิงพาณิชย์จะเกิดการรวมกันและมีความสามารถในการกระจายตัวที่ไม่ดีในตัวกลางที่เป็นพอลิเมอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เป็นสารอินทรีย์ ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงการกระจายตัวในเมทริกซ์พอลิเมอร์สำหรับการทำเป็นพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต [45] จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคแบเรียมไททาเนตเป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้น Shinn-Jen Chang และคณะ [46] จึงทำการศึกษาโดยการนำอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตไปรีฟลักซ์กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เพื่อทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และตรวจสอบโดยใช้การแปลงฟูเรียร์อินฟราเรด (FTIR) พบว่าอนุภาคแบเรียมไททาเนตก่อนการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะแสดงเพียงพีคสูงสุดที่ 1447 และ 594 cm^{-1} เท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.31 โดยพีคที่ 1447 cm^{-1} จะสอดคล้องกับการยืดหด (stretching vibration) ของหมู่ $-CO_3^{2-}$ ที่มาจากส่วนที่เหลือของแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) ที่เป็นสารตั้งต้นสำหรับการทำแบเรียมไททาเนต [47] และพีคที่ 594 cm^{-1} จะสอดคล้องกับการสั่น (vibration) ของ Ti-O ในแบเรียมไททาเนต และอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการทำรีฟลักซ์กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วจะแสดงพีคใหม่ที่ 3433 cm^{-1} ที่สอดคล้องกับโหมดการยืดหด (stretching mode) ของ O-H และพีคที่ 1300-1700 cm^{-1} จะสอดคล้องกับโหมดการงอ (bending mode) ของ H-O-H [48] ที่เกิดจากการดูดซึมทางกายภาพของน้ำ ซึ่งผลเหล่านี้จะเป็นสิ่งที่ระบุว่าการปรับปรุงพื้นผิวของแบเรียมไททาเนตด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นมีเป็นวิธีที่ประสิทธิภาพสำหรับการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวของอนุภาคด้วย

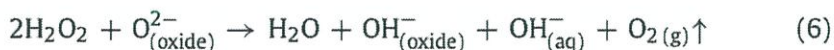
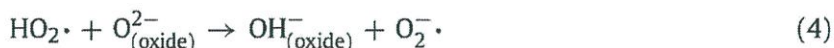
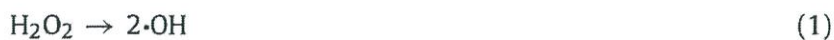
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



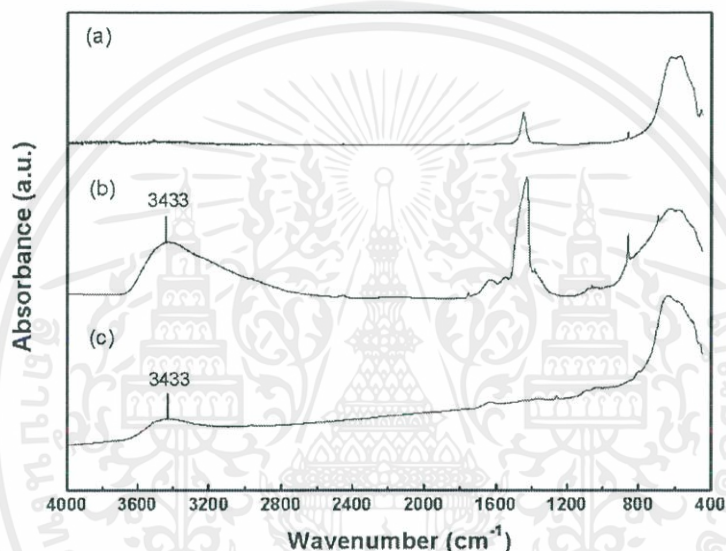
ภาพที่ 2.31 สเปกตรัม FTIR ของ (a) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเริ่มต้น และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้เวลา (b) 1, (c) 2, (d) 3, (e) 4, (f) 5 และ (g) 6 ชั่วโมง

ในงานวิจัยของ A. Hiroki และคณะ [49] ได้รายงานว่า H_2O_2 สามารถถูกทำให้สลายตัวได้บนพื้นผิวของโลหะออกไซด์ โดยในขั้นต้น H_2O_2 แตกตัวเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical; $\cdot OH$) ดังภาพที่ 2.32 แสดงในสมการ (1) จากนั้น $\cdot OH$ จะทำปฏิกิริยากับ H_2O_2 เพื่อสร้างเป็นอนุมูลไฮโดรเปอร์ออกซิล (hydroperoxyl radical; $\cdot OOH$) (สมการ (2)) หรือทำปฏิกิริยากับ $\cdot OOH$ เพื่อสร้างน้ำและก๊าซออกซิเจน (สมการ (3)) ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคแบเรียมไททาเนต จากนั้น $\cdot OOH$ ที่มีความเป็นกรดสูงจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนไอออน (O^{2-}) ของโลหะออกไซด์ ดังแสดงในสมการ (4), เพื่อให้เกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) (ออกไซด์) บนพื้นผิวของอนุภาค นอกจากนี้คู่เบส (conjugated base) หรือ O^{2-} ของ $\cdot OOH$ ที่เกิดจากสมการ (4) ยังคงทำปฏิกิริยากับน้ำเพื่อผลิตไฮดรอกซิลแอนไอออนในสารละลายในน้ำ (OH^- (สารละลาย)) และ $\cdot OOH$ (สมการ (5)) ซึ่งนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาที่ (2) ถึง (5) และสมการ (6) จะแสดงปฏิกิริยาโดยรวมของ สมการ (1) ถึง (5) และสามารถสรุปได้ว่าจะเกิดไปพร้อมๆกับการเกิดหมู่ $-OH$ บนพื้นผิวออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.32 สมการในการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



ภาพที่ 2.33 สเปกตรัม FTIR ของ (a) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเริ่มต้น, (b) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ (c) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดไฮโดรคลอริก

ค่า pH ของสารแขวนลอยของอนุภาคจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความเป็นกรดและมีค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 3.4 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องชี้แจงถึงอิทธิพลของความเป็นกรดที่อาจเกี่ยวข้องกับการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคแบเรียมไททาเนต โดยการนำแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์กับ H_2O_2 และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีค่า pH เริ่มต้นที่ 3.4 เท่ากัน มาเปรียบเทียบกับสเปกตรัม FTIR ดังภาพที่ 2.33 (b) และ (c) ตามลำดับ พบว่าพีคการสั่นของ O-H ที่ 3433 cm^{-1} ของการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกจะต่ำกว่าของแบเรียมไททาเนตที่ปรับปรุงผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าที่มาของหมู่ OH โดยการรักษาด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะขึ้นกับกลไกการแตกตัวดังที่แสดงไว้ในสมการ (1) ถึง (5) และไม่ใช่ผลจากความเป็นกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

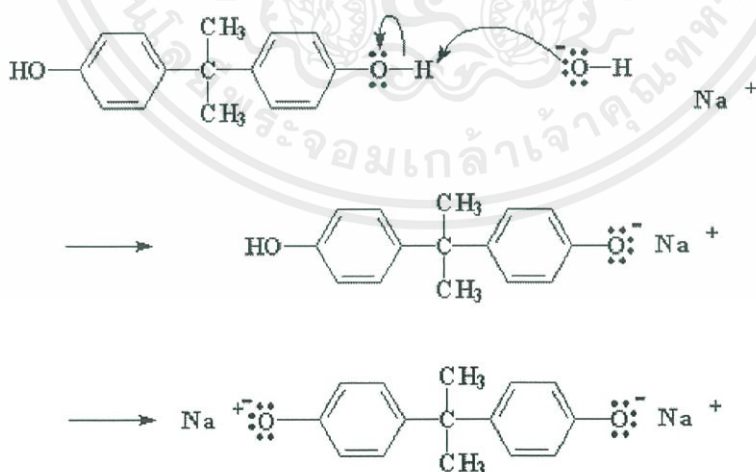
2.8 อีพอกซีเรซิน (epoxy resins)

อีพอกซีเรซินเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต (thermosetting) มีสมบัติโดดเด่นทางด้านความแข็งแรงและการทนต่อการยึดตัว ซึ่งเมื่อผ่านการเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslink) หรือการบ่ม (curing) แล้วจะไม่สามารถเปลี่ยนกลับรูปเดิมได้แม้จะเพิ่มอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องก็ไม่สามารถอ่อนตัวได้อีกการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นเนื่องจากพอลิเมอร์เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหแบบถาวรขึ้น โดยทั่วไปการบ่มนี้ทำได้โดยอาศัยความร้อนและความดัน แต่ในอีพอกซีเรซินบางกลุ่มก็สามารถบ่มได้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องอาศัยความดัน การเกิดโครงสร้างที่เป็นร่างแหของเทอร์โมเซตทำให้โมเลกุลเคลื่อนไหวได้น้อยหรือไม่สามารถเคลื่อนไหวได้เลย จึงทำให้เกิดสมบัติที่ดีในเรื่องความแข็งแรงและทนทานต่อความร้อนและสารเคมี

2.8.1 การสังเคราะห์อีพอกซีเรซิน [50]

2.8.1.1 การสังเคราะห์พรีพอลิเมอร์ (pre-polymer)

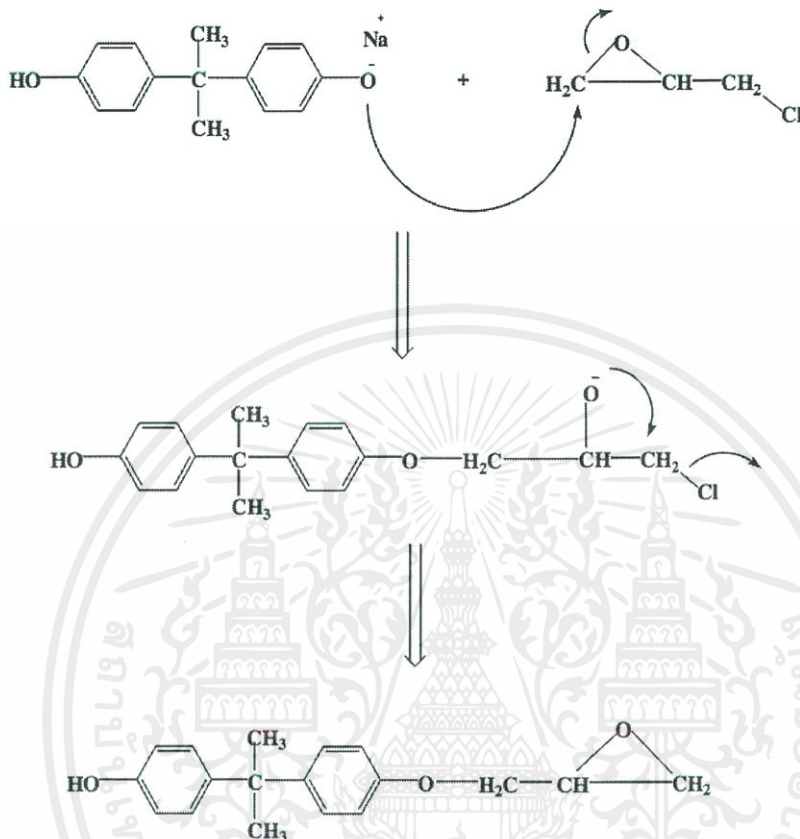
โดยทฤษฎีแล้วอีพอกซีเรซินจะได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซี 2 หมู่ (di-hydroxy compound) กับสารประกอบที่มีหมู่อีพอกซี 2 หมู่ (di-epoxide) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ พบว่าจะนิยมใช้สารประเภทเอพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ในลักษณะเดียว กันกับสารประกอบที่มีหมู่อีพอกซี 2 หมู่ โดยในการทำปฏิกิริยาจะมีการใช้สารที่มีฤทธิ์เป็นเบสเติมลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น การใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งจะแตกตัวให้หมู่ OH⁻ มาทำปฏิกิริยากับสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซี 2 หมู่ เกิดเป็นอัลคอกไซด์ไอออน (alkoxide ion) ดังสมการเคมีที่แสดงในภาพที่ 2.34



ภาพที่ 2.34 ปฏิกิริยาระหว่างบิสฟีนอลเอ (bis-phenol A) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาขั้นแรกในการสังเคราะห์อีพอกซี

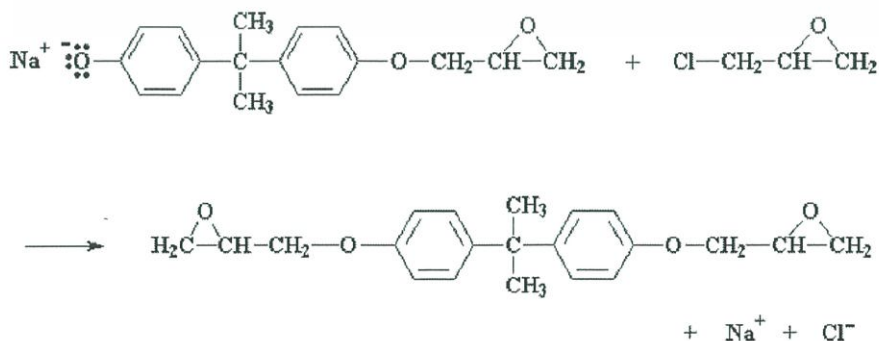
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นอัลคอกไซด์ไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับอีพิกลอโรไฮดรินตรงบริเวณตำแหน่งของอะตอมคาร์บอนที่มีความเกะกะน้อยที่สุด ตามด้วยการปฏิกิริยาการปิดวงแหวนอีพอกซีอีกครั้งหนึ่ง โดยอะตอมของคลอรีนจะออกจากโมเลกุล ในรูปของไอออนลบของคลอไรด์ (ภาพที่ 2.35)



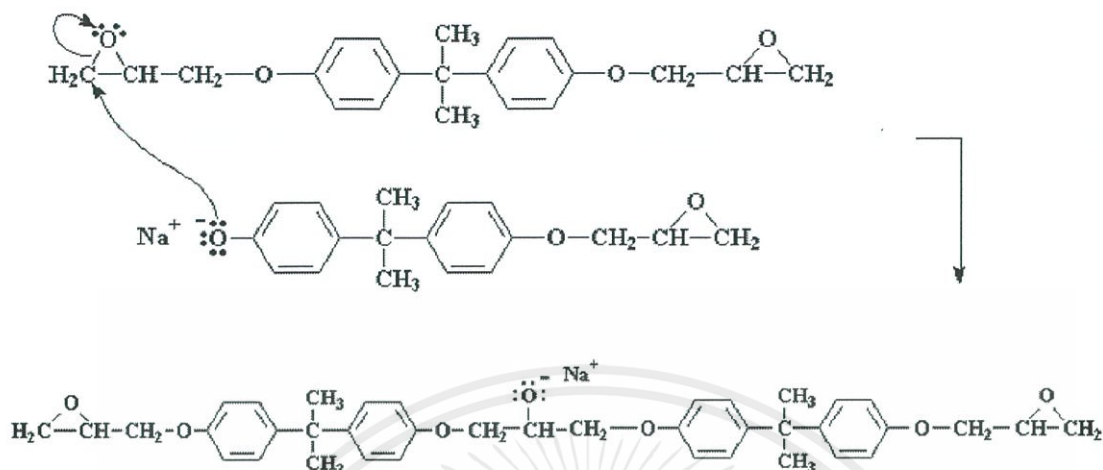
ภาพที่ 2.35 ปฏิกิริยาระหว่างอีพิกลอโรไฮดรินกับอัลคอกไซด์ไอออน

ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่งของโมเลกุลสามารถเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้ในลักษณะเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.36



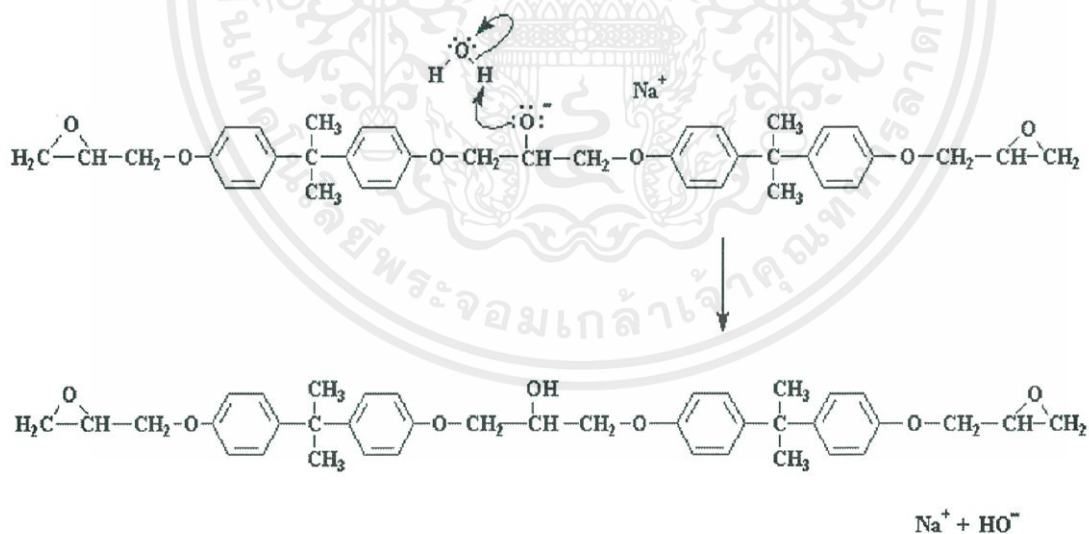
ภาพที่ 2.36 ปฏิกิริยาระหว่างอีพิกลอโรไฮดรินกับอัลคอกไซด์ไอออนที่ปลายอีกด้านหนึ่งของโมเลกุล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีหมู่ไอพอกซิอยู่ที่ปลายโมเลกุล ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายอิพิคลอโรไฮดริน ดังนั้น จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อกับอัลคอกไซด์ไอออน ดังภาพที่ 2.37



ภาพที่ 2.37 แสดงปฏิกิริยาระหว่างอัลคอกไซด์ไอออนกับไดเอปอกไซด์

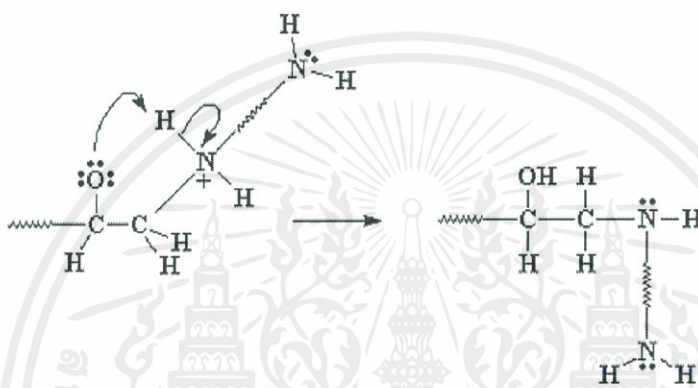
และเนื่องจากในการทำปฏิกิริยาจะมีน้ำปนอยู่ด้วย ประจุลบที่อยู่ในโมเลกุลพรีโพลิเมอร์ของอิพอกซีจึงเกิดปฏิกิริยาต่อกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซีตรงกลางโมเลกุล (ภาพที่ 2.38)



ภาพที่ 2.38 แสดงปฏิกิริยาระหว่างประจุลบของอิพอกซีกับโมเลกุลของน้ำ

ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไอพอกไซด์ที่ปลายโมเลกุลของสารข้างต้นกับหมู่ไฮดรอกซีของสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซี 2 หมู่ในลักษณะคล้ายกับการเกิดปฏิกิริยาควบแน่น ทำให้ได้โมเลกุลที่ยาวขึ้นจนกระทั่งสารตัวใดตัวหนึ่งถูกใช้หมดไปทำให้ปฏิกิริยาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

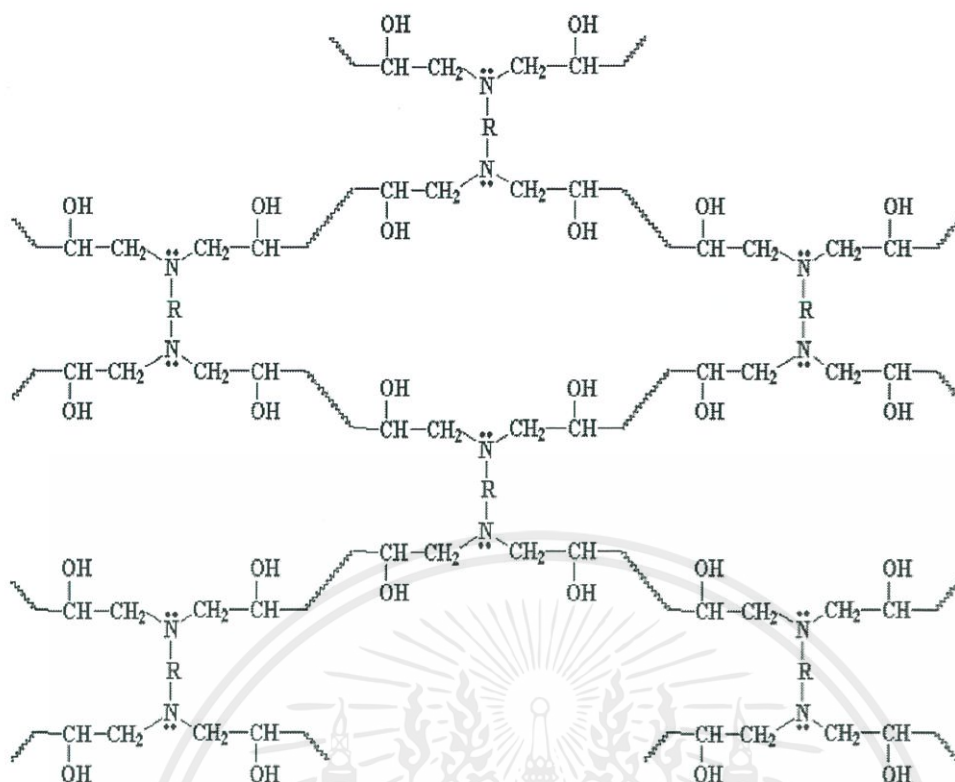
โดยที่สารประกอบเอมีนที่มีหลายหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลที่ใช้ อาจจะเป็นได้ทั้งสารประกอบเอมีนแบบปฐมภูมิ (primary amine) และสารประกอบเอมีนแบบทุติยภูมิ (secondary amine) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสารประกอบเอมีนแบบปฐมภูมิจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า ตัวอย่างเช่น การใช้สารประกอบเอมีนประเภทไดเอริสไตรเอมีน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสามารถทำปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าต้องการให้ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเกิดได้ช้าลงเพื่อที่จะได้มีเวลาในการทำงาน (pot life) นานขึ้น อาจจะใช้สารประกอบเอมีนที่มีสัดส่วนของเอมีนแบบปฐมภูมิลดลง ซึ่งจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง สำหรับกลไกการทำปฏิกิริยาในกรณีที่ใช้สารประกอบเอมีนประเภทสารประกอบเอมีนที่มีหลายหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.41



ภาพที่ 2.41 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบเอมีนที่มีหลายหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลกับพริพอลิเมอร์

มีข้อสังเกตว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาในภาพที่ 2.41 จะแสดงเฉพาะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับหมู่เอมีนที่ปลายโมเลกุลของสารประกอบเอมีน แต่ในความเป็นจริงแล้วกลไกการเกิดปฏิกิริยาอาจซับซ้อนมากกว่านี้ เนื่องจากหมู่เอมีนที่อยู่ตรงกลางของโมเลกุลของสารประกอบเอมีนดังกล่าวอาจเกิดปฏิกิริยาได้เช่นกัน ซึ่งในที่สุดแล้วจะได้โมเลกุลของอีพอกซีที่มีโครงสร้างเป็นแบบร่างแห โดยมีโครงสร้างอย่างง่ายแสดงดังภาพที่ 2.42

นอกจากนั้นสารอีพอกซีเรซินอาจเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลโดยผ่านกลไกแบบเปิดวง (ring opening polymerization) ที่หมู่อีพอกซี โดยใช้กรดลิวอิสหรือสารเอมีนแบบทุติยภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้



ภาพที่ 2.42 แสดงโครงสร้างแบบร่างแหของอีพอกซี

2.8.2 การนำไปใช้งาน

2.8.2.1 กาวและสารยึดติด สามารถใช้ในการยึดติดกับวัสดุได้หลากหลายประเภท เช่น ไม้ เหล็ก แก้ว พลาสติก คอนกรีต รวมถึงเครื่องสุญญากาศต่างๆ เป็นต้น

2.8.2.2 สารเคลือบพื้นผิว นิยมใช้ในการเคลือบผิวของอาคาร พื้นอาคาร พื้นโรงงาน เนื่องจากมีคุณสมบัติในการทนต่อแรงกระแทก การขีดข่วน การเสียดสี ทนต่อสารเคมีทั้งกรดและเบส และทนต่อความร้อนได้ดี แต่เนื่องจากไม่สามารถทนต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ จึงทำให้นิยมใช้ภายในอาคาร หรือในที่ร่มเท่านั้น

2.8.3.3 ด้านอื่นๆ เช่น ใช้เป็นสารเคลือบในถังบรรจุสารเคมี ใช้เป็นแม่แบบสำหรับหล่อผลิตภัณฑ์หรือเครื่องมือต่างๆในทางอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังถูกใช้ในระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าต่างๆ ใช้ในการผลิตมอเตอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตแบบเรียมไททาเนต/อ็อกซีเรซิน ด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม (conventional casting method) กระบวนการเตรียมเซรามิกแบบเรียมไททาเนต รวมไปถึงเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้า โดยขั้นตอนการทดลองทั้งหมดได้แสดงไว้เป็นแผนผังดังภาพที่ 3.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้

- 3.1.1 ผงแบบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) ความบริสุทธิ์ 99.95% ผลิตโดยบริษัท Advance Material มีขนาดอนุภาคประมาณ 50 นาโนเมตร
- 3.1.2 อ็อกซีเรซิน ผลิตโดยบริษัท Buehler ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3 สารที่ทำให้อ็อกซีเรซินแข็งตัว (hardener) ผลิตโดยบริษัท Buehler ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.4 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ผลิตโดยบริษัท Sigma Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.5 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) ความเข้มข้น 40% m/m ในน้ำ ผลิตโดยบริษัท CARLO ERBA Reagents ประเทศฝรั่งเศส
- 3.1.6 สารลดแรงตึงผิวชนิด Span80 ผลิตโดยบริษัท Merck Schuchardt ประเทศเยอรมนี
- 3.1.7 เอทานอล (C_2H_6O) ความบริสุทธิ์ 95%
- 3.1.8 ผงอะลูมินา (Al_2O_3)
- 3.1.9 กาวเงิน
- 3.1.10 น้ำกลั่น

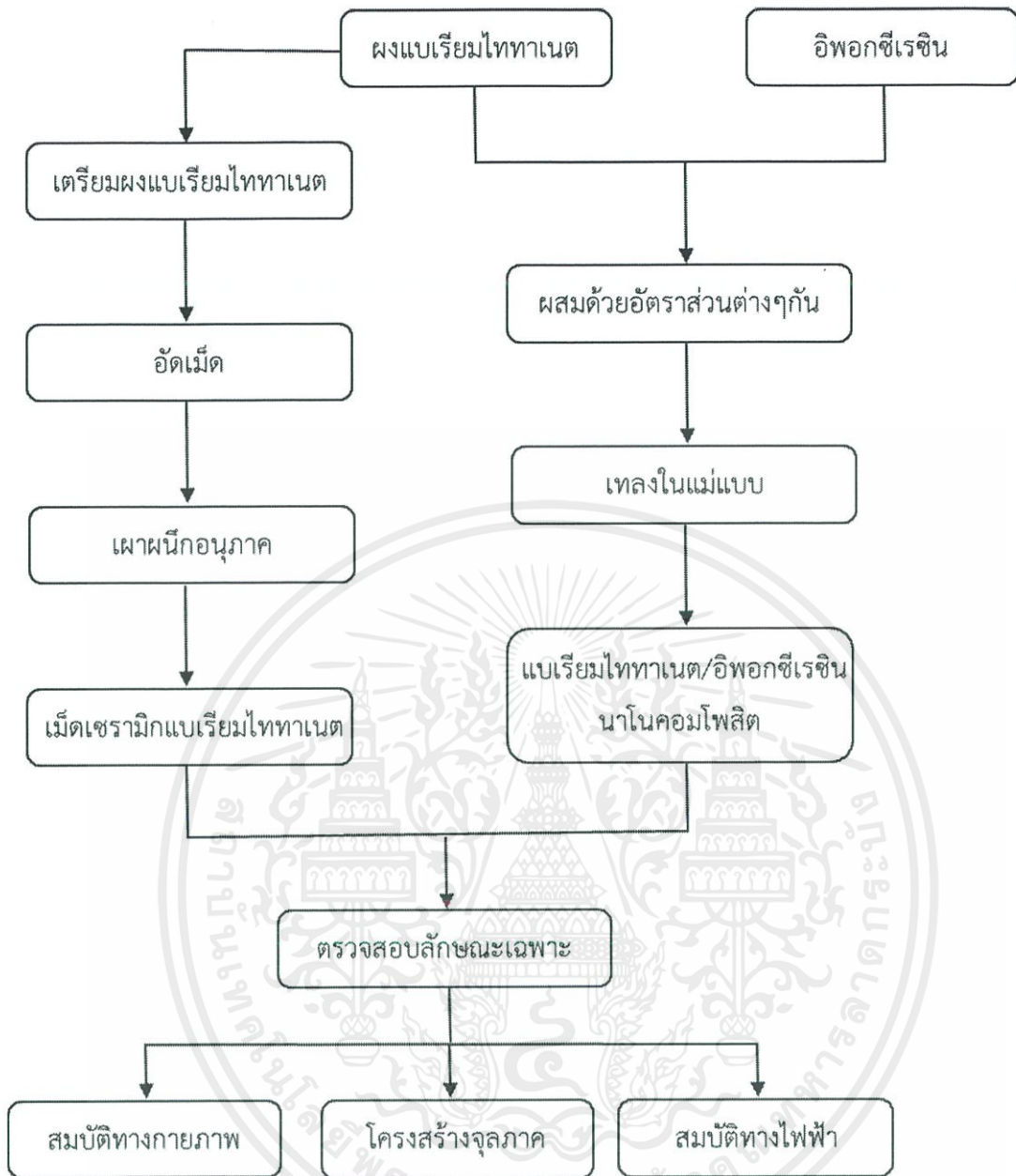
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

- 3.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น EVO MA 10 ผลิตโดยบริษัท ZEISS ประเทศเยอรมัน
- 3.2.2 เครื่องเคลือบผิวอัตโนมัติโดยใช้ทองคำ (automatic sputter coater) รุ่น 108 auto ผลิตโดยบริษัท Cressington Scientific Instrument ประเทศอังกฤษ
- 3.2.3 เครื่องอัดแบบแกนเดียวด้วยระบบไฮดรอลิก (hydraulic uniaxial pressing) ผลิตโดยบริษัท KC hydraulic ประเทศไทย
- 3.2.4 เครื่องชั่งดิจิตอล รุ่น GR-200 ผลิตโดยบริษัท A&D Company ประเทศญี่ปุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.5 เครื่อง LCR Meter รุ่น HP-4284 ผลิตโดยบริษัท Hewletten Packard ประเทศมาเลเซีย
- 3.2.6 ระบบทดสอบวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก รุ่น RT66B ผลิตโดยบริษัท Radiant Technologies ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.7 เต้าไฟฟ้าสำหรับเผาสาร ผลิตโดยบริษัทชวโชติ ประเทศไทย
- 3.2.8 แม่แบบที่ใช้สำหรับหล่อแบบ (castable mounting mold) เส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร รุ่น SamplKup 1in ผลิตโดยบริษัท Buehler ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.9 เต้าให้ความร้อนแบบกวนด้วยแม่เหล็ก (hotplate and Magnetic stirrer) รุ่น C-MAG HS 7 ผลิตโดยบริษัท IKA ประเทศมาเลเซีย
- 3.2.10 เครื่องดูดอากาศแบบหมุนเวียน (circulating aspirator) รุ่น WJ-20 ผลิตโดยบริษัท SIBATA ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.11 เครื่องอัลตราโซนิคส์
- 3.2.12 แม่พิมพ์โลหะสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร
- 3.2.13 ครกหยกสำหรับบดสาร (mortar)
- 3.2.14 สายยางซิลิโคนสำหรับดูดอากาศ
- 3.2.15 ถ้วยอะลูมินาสำหรับเผาสาร (alumina crucible)
- 3.2.16 ชุดขาตั้งและแคลมป์จับ (stand and clamp)
- 3.2.17 กรวยกรองบุชเนอร์ (buchner funnel) พร้อมแหวนรองกรวย
- 3.2.18 ขวดลดความดัน (suction flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 3.2.19 ขวดกลั่น ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 3.2.20 คอนเดนเซอร์ไส้ตรง พร้อมสายยางน้ำเข้า-น้ำออก
- 3.2.21 กระจกบอทวง ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 3.2.22 แท่งแม่เหล็ก (magnetic bar)
- 3.2.23 เวอร์เนียคาร์ลิเปอร์ (electric digital calipers)
- 3.2.24 กระจกตาชทราย เบอร์ 400 600 และ 1,000
- 3.2.25 กระจกตาชกรอง เบอร์ 1
- 3.2.26 กระจกตาชพอยล์
- 3.2.27 ซ้อนตักสาร
- 3.2.28 หลอดหยดสาร (dropper)
- 3.2.29 คีมคีบ (forceps)
- 3.2.30 ขวดสำหรับฉีดเอทานอล
- 3.2.31 แก้วกระจกตาช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



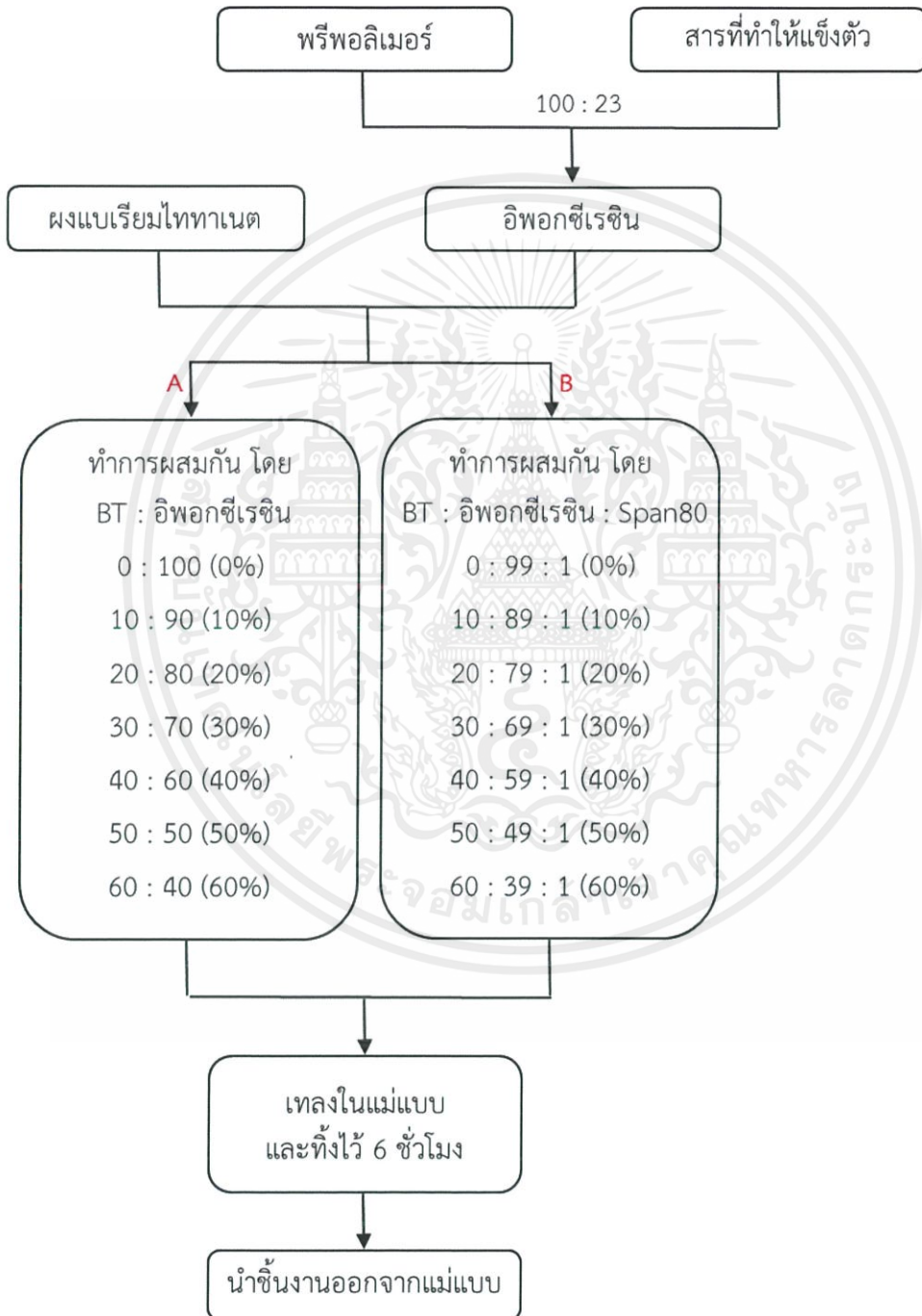
ภาพที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

3.3 กระบวนการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซิน

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของสัดส่วนองค์ประกอบที่แตกต่างกันที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซิน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเตรียมชิ้นงานตัวอย่างที่มีอัตราส่วนระหว่างแบเรียมไททาเนตต่ออีพอกซีเรซิน ที่ต่างกัน ดังนี้ 0 : 100 (0%), 10 : 90 (10%), 20 : 80 (20%), 30 : 70 (30%), 40 : 60 (40%), 50 : 50 (50%) และ 60 : 40 (60%) ซึ่งการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินสำหรับนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ ขั้นตอนแรกสามารถทำได้โดยการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พรีพอลิเมอร์สำหรับอีพอกซีเรซินกับสารที่ทำให้เกิดการแข็งตัว ในอัตราส่วน 100 : 23 โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงชั่งแบบเตรียมไททานิตและอีพอกซีเรซินที่เตรียมไว้ตามอัตราส่วนที่ต้องการมาผสมกันในแก้วกระดาษ คนเป็นเวลา 3 นาที และเทของผสมที่ได้ลงในแม่แบบที่เตรียมไว้ ทั้งไว้เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะทำให้ของผสมเกิดการแข็งตัว จากนั้นจึงสามารถนำออกจากแม่แบบได้ และได้เป็นชิ้นงานตัวอย่างที่เสร็จสมบูรณ์ ดังภาพที่ 3.2 (ส่วน A) ดังนี้



ภาพที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการเตรียมวัสดุแบบเตรียมไททานิต/อีพอกซีเรซินนาโนคอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้วนั้น จะมีขั้นตอนในการเตรียมเป็นวัสดุคอมโพสิตที่เหมือนกัน เพียงแต่ใช้แบเรียมไททาเนตที่ถูกรีฟลักซ์แทนแบเรียมไททาเนตแบบธรรมดาที่ใช้ในขั้นตอนแรก (สามารถดูกระบวนการรีฟลักซ์แบเรียมไททาเนตได้ในหัวข้อที่ 3.5) ส่วนชิ้นงานที่มีการใส่สารลดแรงตึงผิวหรือ Span80 นั้นจะใส่ในอัตราส่วน 1% ต่อน้ำหนักรวมของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งจะเป็นการใส่เข้ามาแทนที่อิพอกซีเรซิน กล่าวคือ จะต้องลดปริมาณของอิพอกซีเรซินลง 1% นั้นเอง ดังแสดงในภาพที่ 3.2 (ส่วน B)

3.4 กระบวนการเตรียมเซรามิกแบเรียมไททาเนต

ในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องมีสารตัวอย่างที่เป็นแบเรียมไททาเนตล้วนสำหรับใช้ในการเปรียบเทียบผลการทดลองกับวัสดุแบเรียมไททาเนต/อิพอกซีเรซินนาโนคอมโพสิต ที่มีสัดส่วนองค์ประกอบต่างกันที่จะมีผลต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งแบเรียมไททาเนตเป็นสารประเภทเซรามิก จึงมีวิธีการเตรียมตัวอย่างที่แตกต่างจากการทำวัสดุคอมโพสิต ซึ่งสามารถเตรียมได้ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

3.4.1 การเตรียมผงแบเรียมไททาเนตก่อนการอัดเม็ด

ผงแบเรียมไททาเนตไม่สามารถนำไปอัดเป็นเม็ดได้ เนื่องจากจะไม่เกิดการจับตัวกันแน่นจึงไม่เกิดเป็นเม็ดตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำผงแบเรียมไททาเนตมาผสมกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ก่อนเพื่อเพิ่มการยึดเกาะ โดยผสมในอัตราส่วนแบเรียมไททาเนต 1 กรัม ต่อโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ 1 หยด จากนั้นจึงนำไปบดในครกบดสารเพื่อทำให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และพร้อมต่อการนำไปอัดเม็ด

3.4.2 กระบวนการอัดเม็ดแบเรียมไททาเนต

นำผงผสมแบเรียมไททาเนตและโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่เตรียมไว้ใส่ลงในแม่พิมพ์อัดสารที่ทำจากโลหะดังภาพที่ 3.4 และทำการอัดโดยใช้เครื่องอัดแบบแกนเดี่ยวด้วยระบบไฮดรอลิก (ภาพที่ 3.3) ด้วยแรง 20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 1 นาที จะทำให้ได้เม็ดแบเรียมไททาเนตอัดที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลม (disk) เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร

3.4.3 กระบวนการเผาผนึกอนุภาค

นำเม็ดแบเรียมไททาเนตที่ได้มาจัดเรียงในถ้วยอะลูมินาและกลบชิ้นงานด้วยผงอะลูมินาเพื่อสร้างบรรยากาศของสารและป้องกันการระเหยระหว่างกระบวนการเผาผนึกอนุภาค ดังภาพที่ 3.5 จากนั้นทำการเผาโดยใช้เตาเผาไฟฟ้าสำหรับเผาสาร ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อเผากำจัดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่เติมลงไปในช่วงการขึ้นรูปอัดสาร และที่ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิ (heating-cooling rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อเผาผนึกอนุภาคแบเรียมไททาเนต ซึ่งขั้นตอนการให้อุณหภูมิจะเป็นไปตามภาพที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

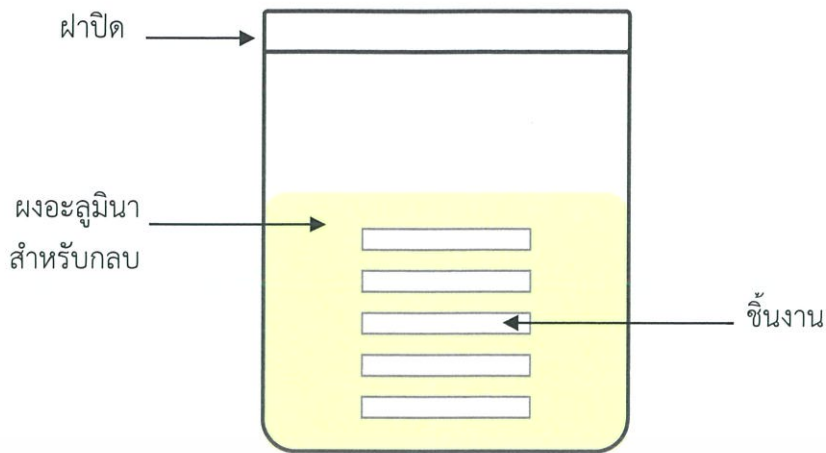


ภาพที่ 3.3 เครื่องอัดแบบแกนเดี่ยวด้วยระบบไฮดรอลิก

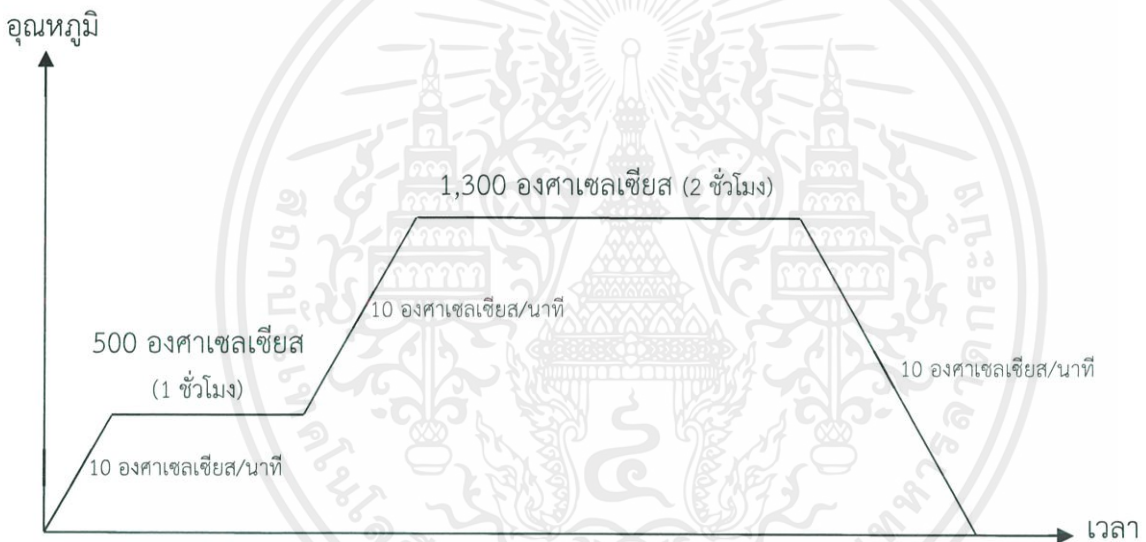


ภาพที่ 3.4 แม่พิมพ์โลหะสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 แผนภาพแสดงการจัดเรียงชิ้นงานในด้วยอะลูมินาสำหรับการเผาผนึกอนุภาค



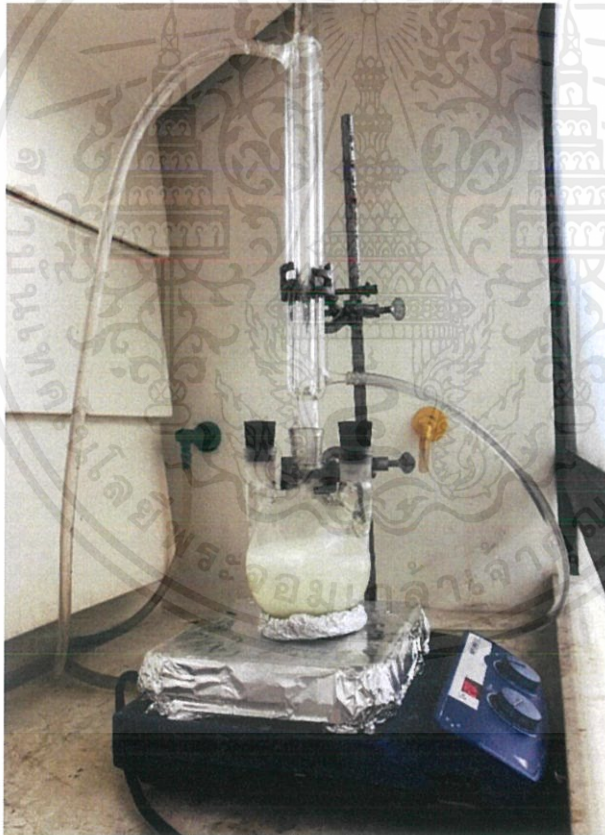
ภาพที่ 3.6 แผนภาพแสดงการให้อุณหภูมิในกระบวนการเผาผนึกอนุภาค

3.5 กระบวนการรีฟลักซ์แบเรียมไททาเนตด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ในการปรับปรุงการกระจายตัวของแบเรียมไททาเนตในเมทริกซ์อีพอกซีเรซินสามารถทำได้โดยการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคแบเรียมไททาเนตให้มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) มาเกาะบริเวณพื้นผิว ซึ่งสามารถทำได้โดยการนำแบเรียมไททาเนตไปรีฟลักซ์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังภาพที่ 3.7 และมีขั้นตอนดังนี้

1. ใส่แบเรียมไททาเนต 15 กรัม ลงในขวดกลั่นขนาด 500 มิลลิลิตร (ขนาดของขวดกลั่นควรเหมาะสมสำหรับบรรจุสารทั้งสองชนิดได้ โดยปริมาตรรวมของสารผสมไม่เกินครึ่งขวด)
2. ใส่สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 30% ปริมาตร 350 มิลลิลิตร ลงไปในขวดกลั่น ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับการปั่นกวนลงไป และวางขวดลงบนเตาให้ความร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้แคลมป์จับที่คอขวดให้มั่นคงและต่อคอนเดนเซอร์กับคอขวดกลับ แล้วจึงต่อขวดกับสายยางน้ำเข้า น้ำออก
4. ให้ความร้อนแก่ระบบที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
5. เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาแล้วจึงปิดเครื่องให้ความร้อน และวางทิ้งไว้ให้สารละลายเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
6. นำสารละลายที่ได้มากรองแบบลดความดัน โดยการเทลงบนกระดาษกรองที่อยู่ในกรวยบุษเซอร์ที่วางอยู่บนขวดลดความดัน เพื่อให้สามารถกรองอนุภาคขนาดเล็กได้อย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 3.8
7. นำแบเรียมไททาเนตที่ได้ไปทำการอบให้แห้งที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน
8. นำแบเรียมไททาเนตที่แห้งแล้วมาบดในครกหยกให้ละเอียด จะได้เป็นผงแบเรียมไททาเนตที่พร้อมใช้งาน



ภาพที่ 3.7 การรีฟลักซ์แบเรียมไททาเนตในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.8 ระบบการกรองสารละลายแบบลดความดัน

3.6 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

ในการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุคอมโพสิตสามารถทำได้โดยการหาความหนาแน่นโดยรวม (bulk density) ซึ่งหมายถึง น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุนั้น และเป็นการคำนวณโดยรวมค่ารูพรุนเปิดและรูพรุนปิดที่มีอยู่ในโครงสร้างของวัสดุด้วย เมื่อทำการใส่สารเติมแต่ง (additive) หรือสารตัวเติม (filler) ลงไปในพอลิเมอร์จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นโดยรวมเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีผลต่อสมบัติของวัสดุ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการหาความหนาแน่นโดยรวมของวัสดุคอมโพสิตนี้ โดยการชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของชิ้นงานนั้นๆ เพื่อนำมาใช้คำนวณความหนาแน่นจริง ตามสมการที่ 3.1 และ 3.2 คือ

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.1)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 m คือ น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)
 v คือ ปริมาตรของชิ้นงาน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

และปริมาตรของชิ้นงานสามารถหาได้จากสมการที่ 3.2 คือ

$$v = \pi r^2 h \quad (3.2)$$

โดย v คือ ปริมาตรของชิ้นงาน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 r คือ รัศมีของชิ้นงาน (เซนติเมตร)
 h คือ ความหนาของชิ้นงาน (เซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการคำนวณความหนาแน่นทางทฤษฎีของวัสดุคอมโพสิตจากกฎของการผสม (rule of mixture) ตามสมการที่ 3.3 และนำค่าความหนาแน่นจริงและความหนาแน่นทางทฤษฎีมาคำนวณเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นของชิ้นงาน ตามสมการที่ 3.4 ดังนี้

$$\rho_t = \rho_m V_m + \rho_f V_f \quad (3.3)$$

โดย	ρ_t	คือ	ความหนาแน่นทางทฤษฎี (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
	ρ_m	คือ	ความหนาแน่นของเมทริกซ์ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
	ρ_f	คือ	ความหนาแน่นของสารตัวเติม (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
	V_m	คือ	สัดส่วนปริมาตร (volume fraction) ของเมทริกซ์
	V_f	คือ	สัดส่วนปริมาตร (volume fraction) ของสารตัวเติม

$$\%density = \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho_t} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

โดย	ρ_t	คือ	ความหนาแน่นทางทฤษฎี (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

3.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

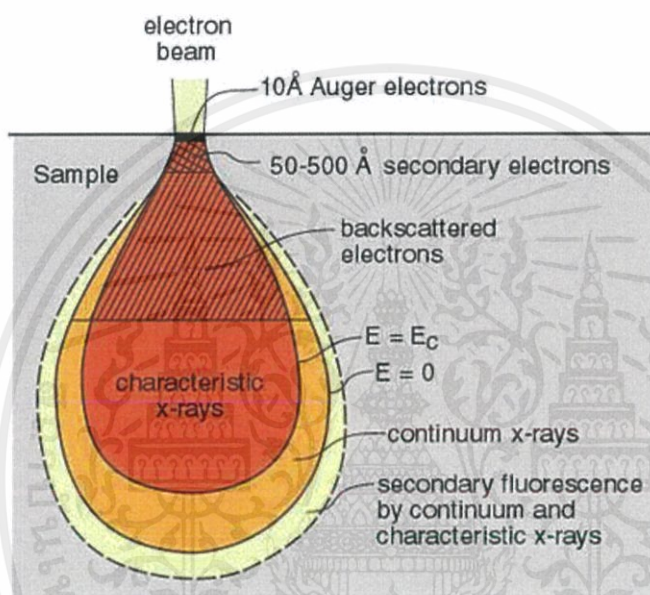
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีต้นกำเนิดของอิเล็กตรอนมาจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าแรงสูงให้แก่ขดลวดทั้งสแตน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก อาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก ทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิจำลองเข้ามากระทบกับชิ้นงาน และเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อพื้นผิวชิ้นงานหลากหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานสามารถมีได้หลายระดับพลังงาน ดังภาพที่ 3.9 แบ่งได้เป็น

- อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากแถบเวเลนซ์ (valance band) หรือแถบการนำ (conduction band) ซึ่งสามารถหลุดออกและกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ง่ายโดยไม่ต้องใช้พลังงานมากนัก มีพลังงานในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 50 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะใช้อิเล็กตรอนชนิดนี้ในการสร้างภาพ

- อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (back scattered electron) เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนที่เข้าชนกับชิ้นงาน และเกิดการสูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับอะตอมในชิ้นงาน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าของพลังงานตั้งแต่อิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และมีค่าขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นจึงทำให้สามารถใช้อิเล็กตรอนชนิดนี้ในการสร้างเป็นภาพที่แสดงถึงความแตกต่างของแต่ละธาตุได้ โดยจะมีความสว่างและความเข้มของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณที่แตกต่างกันตามชนิดของธาตุนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง มีความยาวคลื่นสั้น เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่างๆที่ได้รับพลังงานมากเพียงพอจะเกิดการหลุดออกจากวงโคจร แล้วทำให้อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานใกล้เคียงเข้าไปแทนที่และคายรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมานี้จะแสดงเป็นสเปกตรัมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ เนื่องจากค่าพลังงานเหล่านี้จะแตกต่างกันตามเลขอะตอมของธาตุ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้โดยใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ประกอบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [52]



ภาพที่ 3.9 ลักษณะการเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนที่มีต่อชิ้นงานเซรามิก

การตรวจสอบสามารถทำได้โดยการนำชิ้นงานคอมโพสิตที่เตรียมได้ทั้งหมด มาทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ภาพที่ 3.10) เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ประกอบการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนขององค์ประกอบ โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมขึ้น

การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคนั้นจะทำการตรวจสอบทั้งผิวหน้าและผิวแตก เพื่อให้ได้ข้อมูลทั้งพื้นผิวด้านบนและโครงสร้างด้านในของชิ้นงาน โดยการเตรียมผิวหน้าของชิ้นงานสามารถทำได้โดยการนำชิ้นงานมาตัดแบ่งออกเป็นชิ้นเล็กๆ และผิวแตกของชิ้นงานสามารถเตรียมได้โดยการนำชิ้นงานมาหักออกให้กลายเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นจึงทำความสะอาดผิวของชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบให้ปราศจากฝุ่นละออง และนำชิ้นงานแต่ละชิ้นไปติดลงบนแท่นทองเหลือง (stub) ด้วยเทปคาร์บอนสองหน้า โดยจัดให้ผิวของชิ้นงานด้านที่ต้องการตรวจสอบอยู่ด้านบน และวางตัวอยู่ในแนวที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ (ภาพที่ 3.11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากนั้นนำแท่นทองเหลืองที่มีชิ้นงานติดอยู่ด้านบนไปทำการเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำ (Au coat) โดยใช้เทคนิคสปัตเตอร์ริง (sputtering) (ภาพที่ 3.12) เป็นเวลา 90 วินาที เพื่อให้พื้นผิวของชิ้นงานสามารถนำไฟฟ้าได้ จากนั้นจึงนำไปทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานต่อไป



ภาพที่ 3.11 การติดชิ้นงานลงบนแท่นทองเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.12 เครื่องที่ใช้เคลือบผิวหน้าด้วยทองคำ

3.8 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้จะทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้ทั้งหมด ซึ่งประกอบไปด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ค่าความคงทนไดอิเล็กทริก และวงวนฮิสเทอรีซิส โดยจะศึกษาความสัมพันธ์กับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปที่อุณหภูมิคงที่

3.8.1 การเตรียมชิ้นงาน

เนื่องจากชิ้นงานที่เป็นวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้จะมีลักษณะโค้งเว้าบริเวณผิวหน้าจากผลของแรงดึงผิวของสารขณะมีสถานะเป็นของเหลว เมื่อกลายเป็นของแข็งแล้วจึงทำให้การโค้งเว้าที่ผิวหน้ายังคงอยู่ จึงจำเป็นต้องมีการ เตรียมชิ้นงานก่อนการนำไปตรวจวัด ซึ่งสามารถทำได้โดยการนำชิ้นงานที่ต้องการทดสอบมาขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 600 และ 1,000 ตามลำดับ เพื่อให้ผิวหน้าด้านบนและด้านล่างมีความขนานกัน อีกทั้งยังทำให้สามารถควบคุมความหนาให้อยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง 3 มิลลิเมตรได้

ส่วนชิ้นงานที่เป็นเซรามิกนั้น เนื่องจากทำการเผาอบพ่นิกอนภาคโดยใช้ผงอะลูมินาเคลือบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทำความสะอาดผิวชิ้นงานเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของผงอะลูมินากับชิ้นงาน ซึ่งสามารถทำได้โดยการขัดผิวหน้าของชิ้นงานโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 400 600 และ 1,000 ตามลำดับ เพื่อทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงาน และควบคุมความหนาให้อยู่ประมาณ 1 มิลลิเมตร จากนั้นจึงนำมาทำความสะอาดอีกครั้งด้วยเครื่องอัลตราโซนิคส์ เป็นเวลา 30 นาที และอบเพื่อไล่ความชื้นในตู้อบอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นำชิ้นงานทั้งหมดมาวัดความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลาง แล้วจึงนำมาทำขั้วไฟฟ้า (electrode) โดยใช้กาวเงินชนิดไม่ต้องเผามาทาที่ผิวหน้าทั้งสองด้านของชิ้นงาน และวางทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้กาวเงินแห้งสนิทและติดกับพื้นผิวของชิ้นงานได้ดีขึ้น

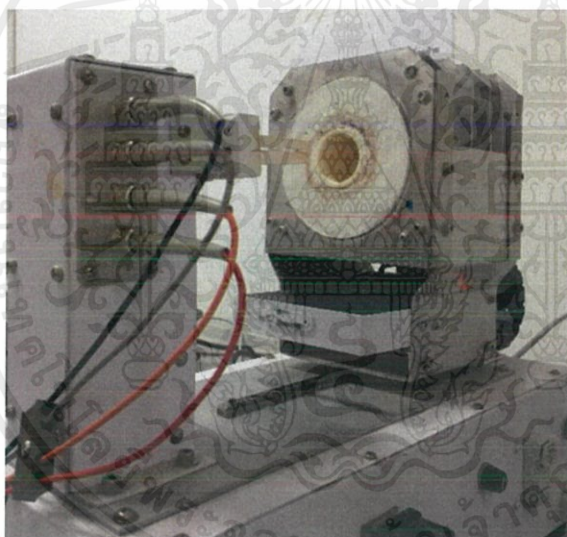
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.2 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

สามารถทำได้โดยการวางชิ้นงานที่จะทดสอบระหว่างขั้วไฟฟ้าของเครื่อง LCR meter (ดังภาพ 3.13) โดยเครื่องจะทำการวัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ ซึ่งวัดที่ความถี่ในช่วง 10^2 ถึง 10^6 เฮิรตซ์ และจะสามารถคำนวณออกมาเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุได้ จากสมการที่ 3.7 ดังนี้

$$\epsilon_r = \frac{dC}{\epsilon_0 A} \quad (3.7)$$

โดย	ϵ_r	คือ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงาน
	ϵ_0	คือ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ
	C	คือ	ค่าความจุไฟฟ้าของชิ้นงาน (ฟารัด)
	d	คือ	ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)
	A	คือ	พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าบนชิ้นงาน (มิลลิเมตร)



ภาพที่ 3.13 เครื่อง LCR meter

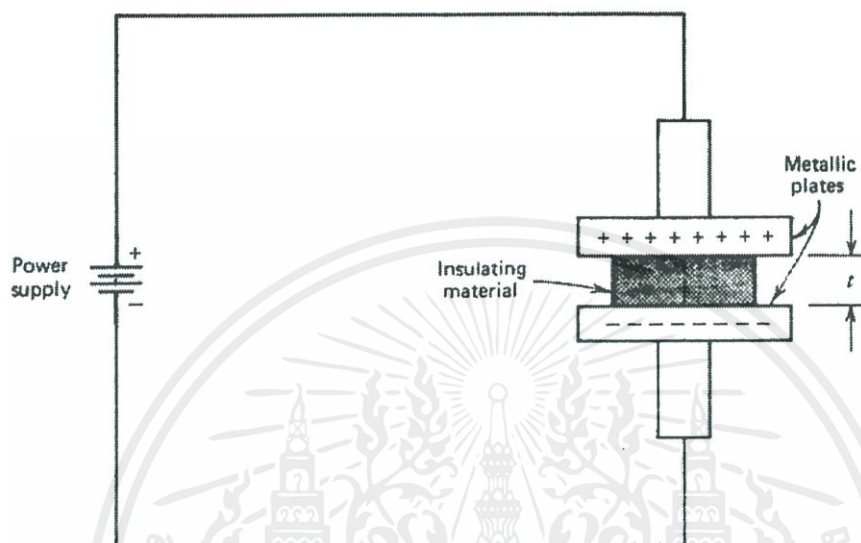
3.8.3 การวัดค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริก

สามารถทำได้โดยวิธีการที่เรียกว่า short-times-method โดยชิ้นงานที่มีตามต้องการจะถูกประกบด้วยขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน ดังภาพที่ 3.14 จากนั้นเริ่มการทดสอบโดยการเพิ่มความต่างศักย์ให้กับชิ้นงานด้วยอัตราคงที่ 100 โวลต์ต่อวินาที และเริ่มจาก 0 โวลต์ ไปจนกระทั่งชิ้นงานแตกหรือเกิดความเสียหาย (failure) ซึ่งสังเกตได้จากการเกิดการฉีกขาด (rupture) หรือการสูญเสียองค์ประกอบของชิ้นงาน ซึ่งเครื่อง จะทำการบันทึกค่าความต่างศักย์สูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้ก่อนเกิดความเสียหาย (breakdown voltage) และนำมาคำนวณเป็นค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริก ตามสมการที่ 3.8 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Dielectric strength} = \frac{V}{d} \quad (3.8)$$

โดย V คือ ความต่างศักย์สูงสุดที่วัสดุสามารถทนได้ก่อนเกิดความเสียหาย (โวลต์)
 d คือ ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)



ภาพที่ 3.14 แผนภาพแสดงการทดสอบวัดค่าความคงทนไดอิเล็กทริก

3.8.4 การวัดค่าวงวนฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop)

ความแตกต่างระหว่างผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกและผลึกไพโรอิเล็กทริก คือ ผลึกเฟอร์โรอิเล็กทริกนั้น สามารถสลับขั้วโพลาริเซชันตามทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้เข้าไปได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถตรวจสอบได้โดยการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสของโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้า เรียกว่า P-E loop โดยการนำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยระบบทดสอบวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (ภาพที่ 3.15) เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงานจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้า และสามารถนำมาคำนวณหาค่าโพลาริเซชันได้จากสมการที่ 3.9 ดังนี้

$$P = \frac{Q}{A} \quad (3.9)$$

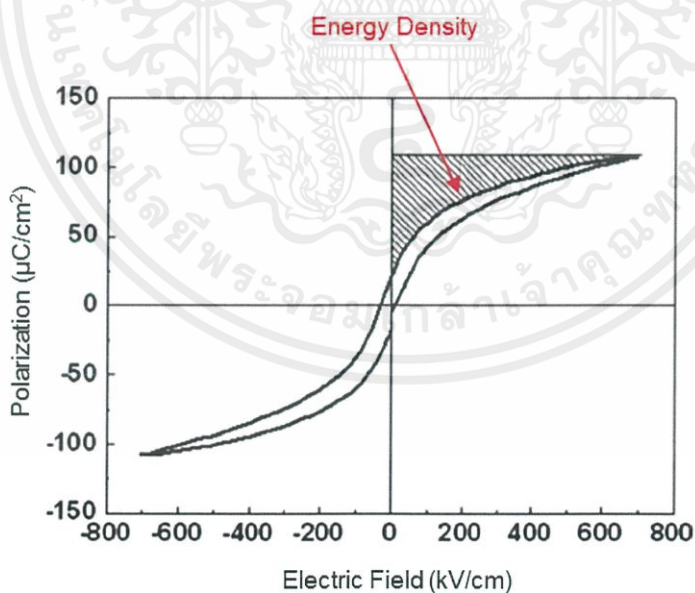
โดย P คือ ค่าโพลาริเซชัน (ไมโครคูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร)
 Q คือ ประจุไฟฟ้า (ไมโครคูลอมบ์)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (ตารางเซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสของโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้าแล้ว จะทำให้ได้วงวนฮิสเทอรีซิสของชั้นงานแต่ละชั้น ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาความหนาแน่นของพลังงาน (energy density) ได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟส่วนบนระหว่างค่าโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้า ดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.15 ระบบทดสอบวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก



ภาพที่ 3.16 การหาความหนาแน่นพลังงานจากกราฟวงวนฮิสเทอรีซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองที่ได้จากการเตรียมชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียมไททาเนต/อิพอกซีเรซิน (barium titanate/epoxy resin) ที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม โดยผลการทดลองประกอบไปด้วยสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงาน ซึ่งรายละเอียดของผลการทดลองดังกล่าวจะทำการอภิปรายไว้ดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียมไททาเนต/อิพอกซีเรซิน

ในเบื้องต้นจะทำการเตรียมชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียมไททาเนต/อิพอกซีเรซินให้มีสัดส่วนปริมาตร (volume fraction) ของแบบเรียมไททาเนตที่เป็นองค์ประกอบตั้งแต่ 0 ถึง 0.65 จากนั้นจึงนำมาตรวจวัดสมบัติต่างๆ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสำหรับการใช้เลือกหาสัดส่วนองค์ประกอบ 3 สัดส่วนที่ดีที่สุดเพื่อที่จะนำไปปรับปรุงสมบัติในขั้นตอนต่อไป

4.1.1 สมบัติทางกายภาพ

ความหนาแน่นโดยรวม (bulk density) คือ น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของชิ้นงาน โดยรวมค่ารูพรุนเปิดและรูพรุนปิดที่มีอยู่ในโครงสร้างของวัสดุด้วย เมื่อทำการใส่สารเติมแต่ง (additive) หรือสารตัวเติม (filler) ลงไปในพอลิเมอร์ จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นโดยรวมเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีผลต่อสมบัติของวัสดุ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการหาความหนาแน่นโดยรวมของวัสดุคอมโพสิตนี้ และนำมาเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีเพื่อให้ได้เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นหรือความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงาน

เมื่อนำค่าความหนาแน่น ผ่านศูนย์กลาง และน้ำหนักของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียมไททาเนต/อิพอกซีเรซินที่วัดค่าได้ดังตารางที่ 4.1 มาคำนวณหาค่าปริมาตร ความหนาแน่นโดยรวม ความหนาแน่นทางทฤษฎี และความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานได้ดังตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อใส่ปริมาณแบบเรียมไททาเนตเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตมีค่าลดลงตามปริมาณแบบเรียมไททาเนตที่เพิ่มขึ้น ตามลำดับ ดังแสดงความสัมพันธ์กันดังภาพที่ 4.1 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสารเฟสเดียวทั้งสอง (แบบเรียมไททาเนตและอิพอกซีเรซินบริสุทธิ์) มีความหนาแน่นสูงสุด 93.33 และ 99.30% ตามลำดับ ในขณะที่สารผสมมีค่าน้อยกว่า และที่สัดส่วนแบบเรียมไททาเนต 60 wt% จะมีค่าความหนาแน่นต่ำสุดเป็น 47.37% ซึ่งคาดว่าเกิดเป็นผลมาจากความไม่เข้ากันของเนื้อสารในระหว่างผสม ซึ่งทำให้เกิดเป็นรูพรุนจำนวนมากในชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

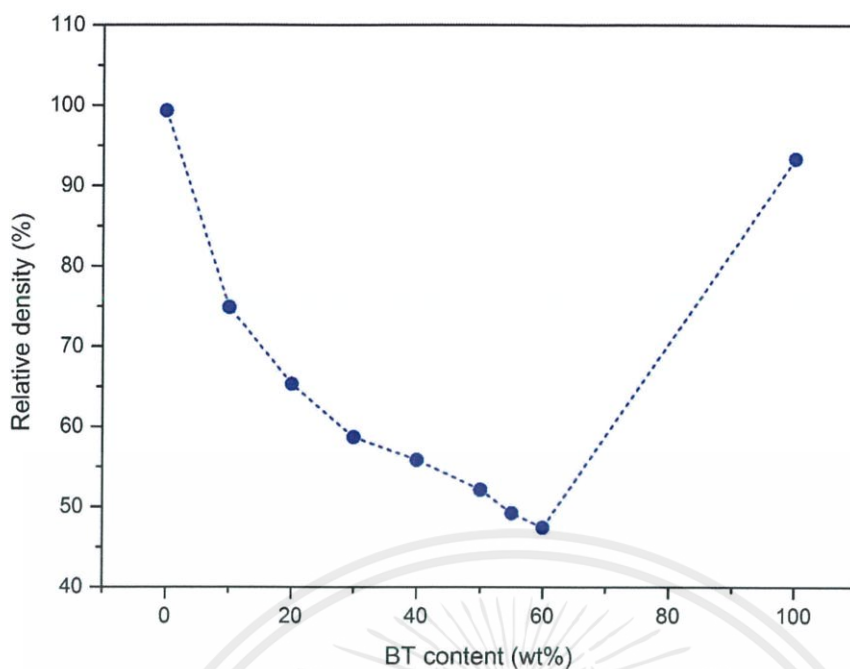
ตารางที่ 4.1 ค่าความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง และน้ำหนักของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่วัดค่าได้

ปริมาณ BT (wt%)	ความหนา (มม.)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	น้ำหนัก (กรัม)
0	1.85	25.20	1.0191
10	2.32	25.20	1.3708
20	2.39	25.20	1.6000
30	2.02	25.20	1.4979
40	1.81	25.20	1.5162
50	1.57	25.20	1.4205
55	1.45	25.20	1.3224
60	1.27	25.20	1.1817
100	1.00	10.54	0.4740

ตารางที่ 4.2 ค่าปริมาตร ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นทางทฤษฎี และความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่คำนวณได้

ปริมาณ BT (wt%)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นโดยรวม (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นทางทฤษฎี (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%)
0	0.92	1.10	1.11	99.30
10	1.16	1.19	1.59	74.85
20	1.19	1.35	2.06	65.30
30	1.01	1.49	2.53	58.67
40	0.90	1.68	3.01	55.83
50	0.78	1.81	3.48	52.11
55	0.72	1.83	3.72	49.18
60	0.63	1.87	3.95	47.37
100	0.09	5.46	5.85	93.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



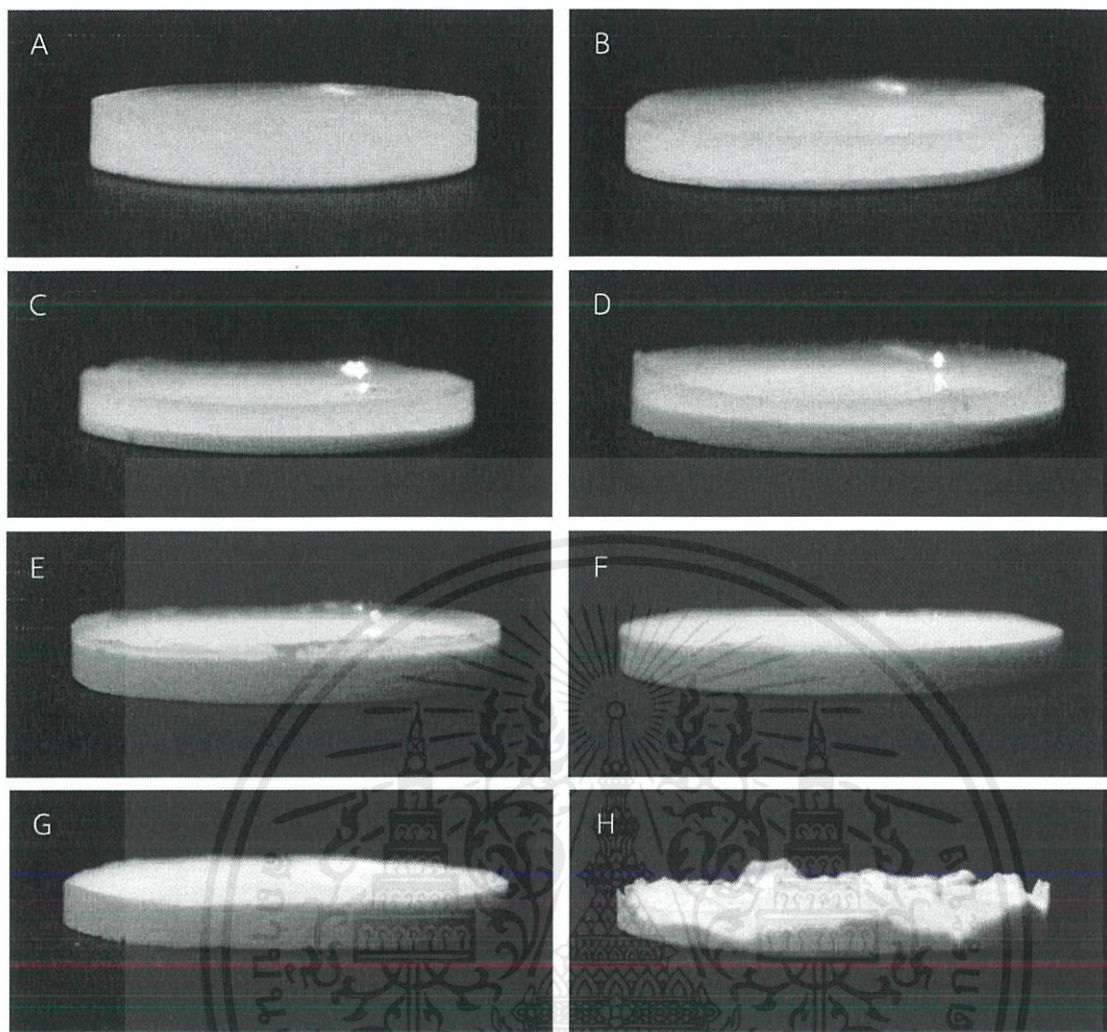
ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแบเรียมไททาเนตกับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชั้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซิน

4.1.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคนั้นจะทำการตรวจสอบทั้งผิวหน้าและผิวแตก เพื่อให้ได้ข้อมูลทั้งพื้นผิวด้านบนและโครงสร้างด้านในของชิ้นงาน และนำข้อมูลที่ได้มาใช้ประกอบการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนองค์ประกอบ โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมขึ้น

เมื่อทำการเตรียมนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆกันเรียบร้อยแล้ว จะได้เป็นชิ้นงานดังภาพที่ 4.2 (A-H) ที่มีปริมาณแบเรียมไททาเนต 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 55%, 60% และ 65% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากภาพแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบทั้งสองของวัสดุนาโนคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นเกิดการแยกชั้นกันอย่างเห็นได้ชัด โดยชั้นด้านล่างจะมีความหนาเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแบเรียมไททาเนตที่ใส่เข้าไปมากขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่าชั้นด้านล่างของชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นสีขาวที่บนนั้นเป็นชั้นของแบเรียมไททาเนต และชั้นด้านบนที่มีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นนั้นเป็นชั้นของอีพอกซีเรซิน นอกจากนี้เมื่อใส่แบเรียมไททาเนตในปริมาณ 65% โดยน้ำหนัก จะพบว่าชิ้นงานไม่สามารถคงรูปร่างอย่างที่ต้องการได้ เนื่องจากมีปริมาณของเฟสของแข็งของแบเรียมไททาเนตในอีพอกซีเรซินมากเกินไป จึงทำให้ชิ้นงานมีลักษณะดังภาพที่ 4.2 (H) ดังนั้นในโครงการชิ้นนี้จึงได้เลือกทำในเงื่อนไขที่ใส่ปริมาณของแบเรียมไททาเนตมากที่สุดเพียง 60% โดยน้ำหนักเท่านั้น

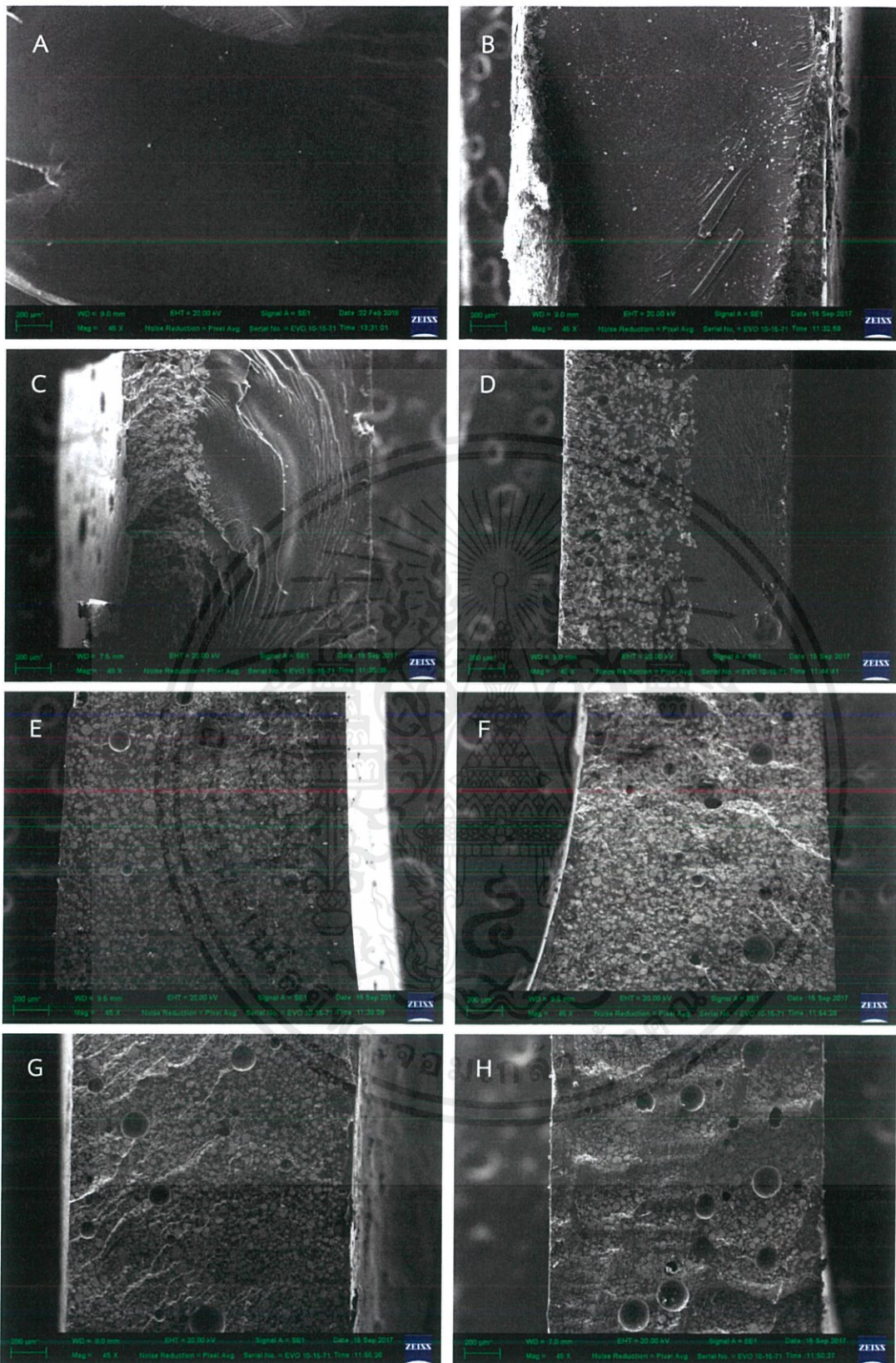
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียบมีไททานิต/อ็อกซีเรซินที่เตรียมได้ โดยที่ (A) BT 10 wt%, (B) BT 20 wt%, (C) BT 30 wt%, (D) BT 40 wt%, (E) BT 50 wt%, (F) BT 55 wt%, (G) BT 60 wt% และ (H) BT 65 wt% ตามลำดับ

จากนั้นได้นำชิ้นงานไปเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำโดยวิธีการสปัตเตอร์ริง (sputtering) เพื่อให้พื้นผิวเกิดการนำไฟฟ้าได้ และนำมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยภาพที่ 4.3 (A-H) เป็นภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผิวแตกของชิ้นงานที่มีปริมาณแบเรียมไททานิต 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 55% และ 60% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 45 เท่า เมื่อพิจารณาโดยรวมจะเห็นลักษณะของรอยฉีกของชิ้นงานที่เกิดจากอ็อกซีเรซิน และแบเรียมไททานิตที่มีลักษณะเป็นสีขาวทึบมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเล็กๆจำนวนมาก ภายในชิ้นงานมีฟองอากาศกระจายตัวอยู่ภายใน และมีแนวโน้มที่จะมีจำนวนเพิ่มขึ้นเมื่อใส่แบเรียมไททานิตในปริมาณมากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นที่น้อยลง ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองในภาพที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

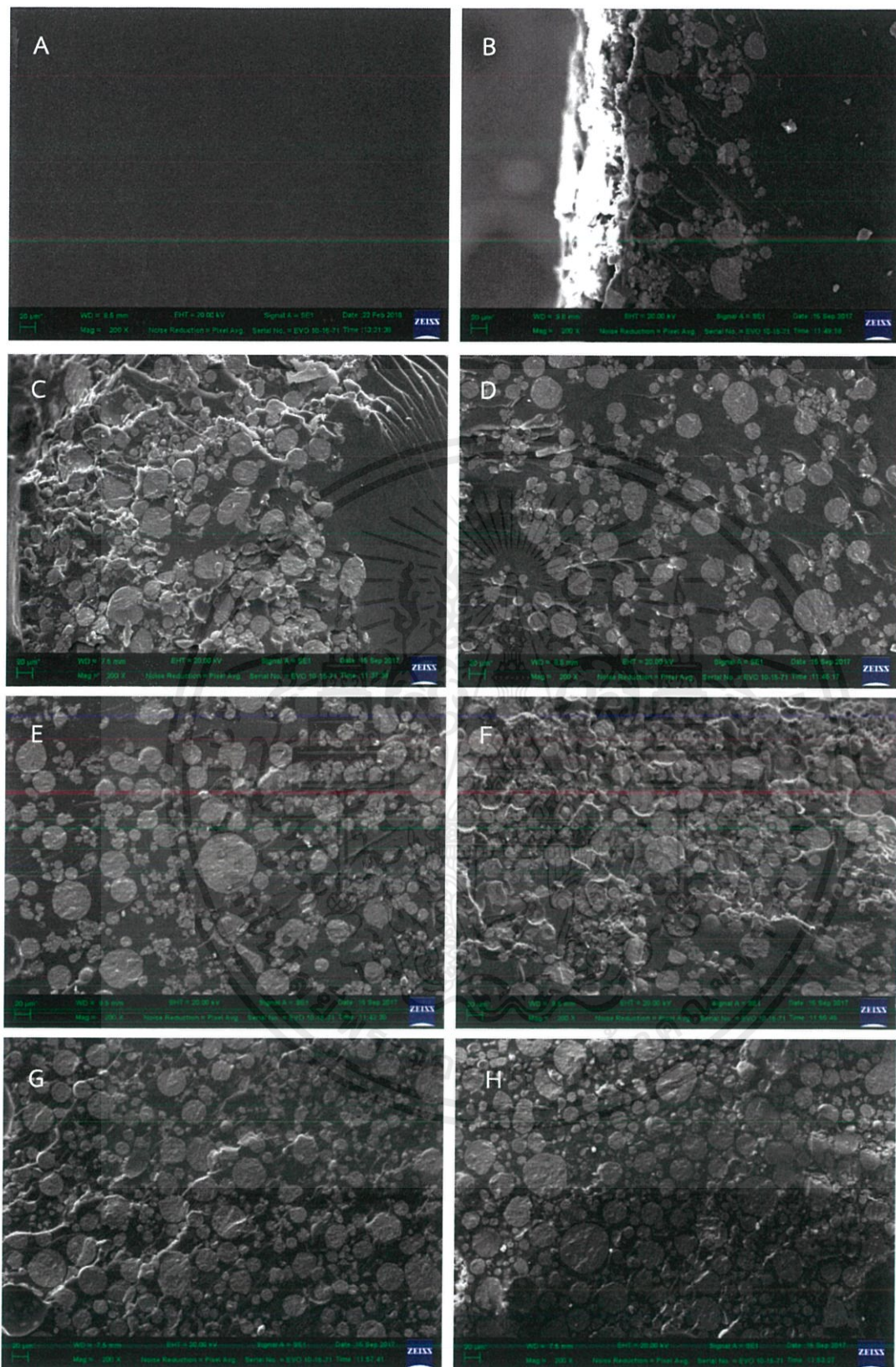


ภาพที่ 4.3 ผิวด้านของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียบมีไททานเดต/อิพอกซีเรซินที่กำลั้งขยาย 45 เท่า

โดยที่ (A) BT 0 wt%, (B) BT 10 wt%, (C) BT 10 wt%, (D) BT 30 wt%, (E) BT 40 wt%,

(F) BT 50 wt%, (G) BT 55 wt% และ (H) BT 60 wt% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

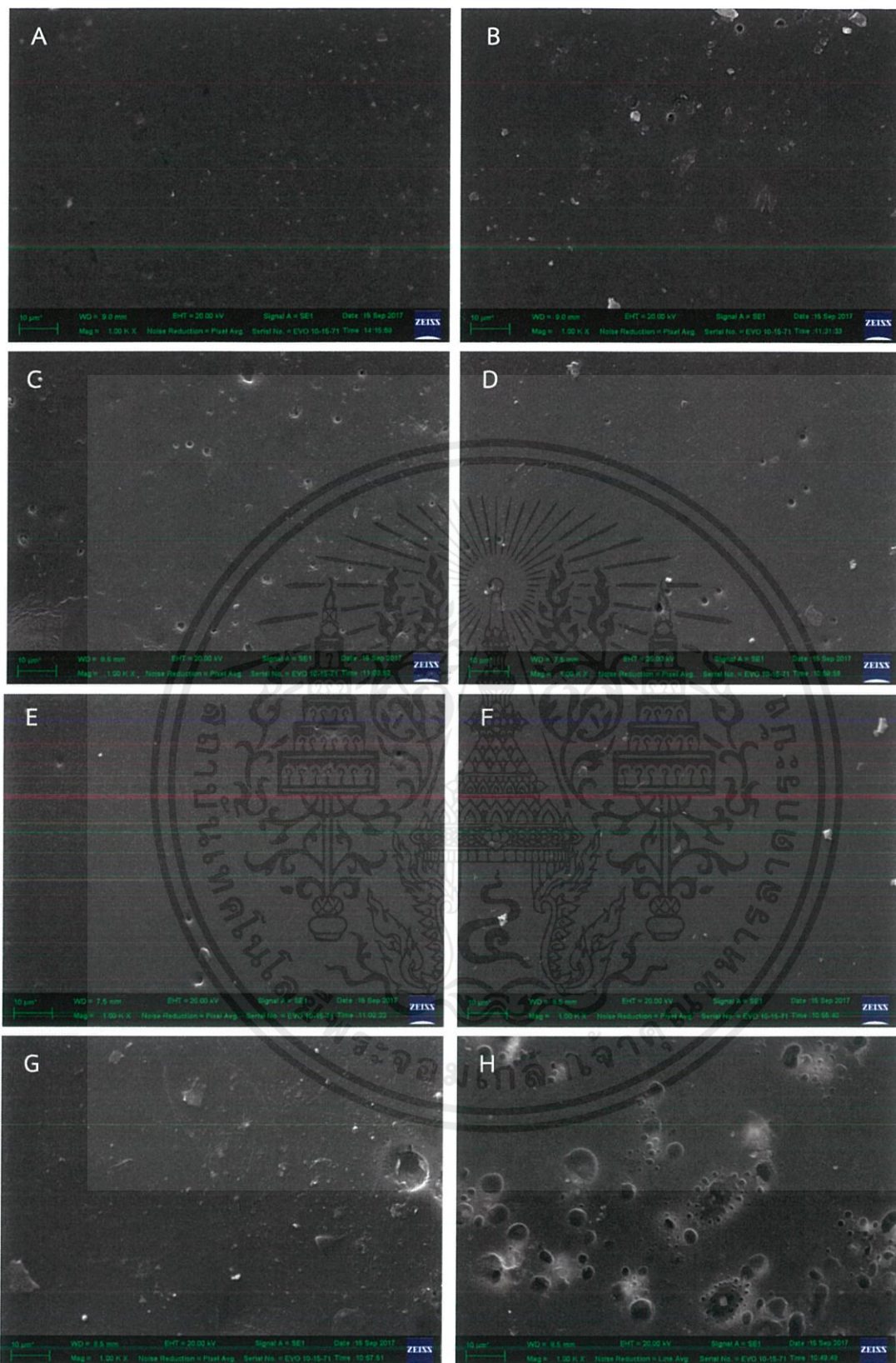


ภาพที่ 4.4 ผิวแตกของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อพอกซีเรซินที่กำลังขยาย 200 เท่า

โดยที่ (A) BT 0 wt%, (B) BT 10 wt%, (C) BT 10 wt%, (D) BT 30 wt%, (E) BT 40 wt%,

(F) BT 50 wt%, (G) BT 55 wt% และ (H) BT 60 wt% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 ผิวหน้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททานेट/อิพอกซีเรซินที่กำลังขยาย 1,000 เท่า โดยที่ (A) BT 0 wt%, (B) BT 10 wt%, (C) BT 10 wt%, (D) BT 30 wt%, (E) BT 40 wt%, (F) BT 50 wt%, (G) BT 55 wt% และ (H) BT 60 wt% ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่กำลังขยายเพิ่มขึ้นเป็น 200 เท่า ดังภาพที่ 4.4 (A-H) เป็นภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผิวแตกของชิ้นงานที่มีปริมาณแบเรียมไททาเนต 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 55% และ 60% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแบเรียมไททาเนตเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเล็กๆหลากหลายขนาดที่มีลักษณะค่อนข้างกลมกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์อีพอกซีเรซิน แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของแบเรียมไททาเนตมีการกระจายตัวไม่ดีและมักจะรวมกลุ่มกันมากกว่าที่จะกระจายอยู่เป็นอนุภาคเดี่ยวๆ

เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของชิ้นงานที่กำลังขยาย 1,000 เท่า จะได้ดังภาพที่ 4.5 (A-H) ที่เป็นภาพถ่ายผิวหน้าของชิ้นงานที่มีปริมาณแบเรียมไททาเนต 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 55% และ 60% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่มีปริมาณแบเรียมไททาเนตต่ำ จะไม่มีฟองอากาศหรือรูพรุนที่พื้นผิว แต่เมื่อใส่แบเรียมไททาเนตในปริมาณที่สูงขึ้น ชิ้นงานจะมีฟองอากาศที่ผิวหน้าเล็กน้อย และมีจำนวนมากอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใส่แบเรียมไททาเนตในปริมาณ 60% โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 4.5 (H)

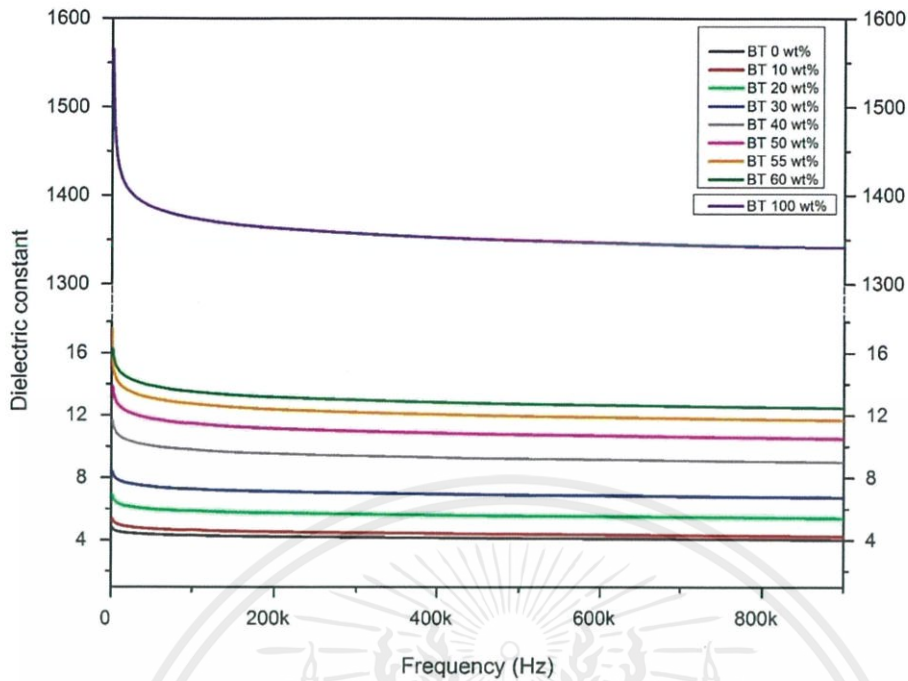
ฟองอากาศที่เกิดขึ้นเหล่านี้สอดคล้องกับข้อมูลเรื่องความหนาแน่นที่ลดลง ดังผลการทดลองในภาพที่ 4.1 และ 4.3 คาดว่าเป็นผลมาจากแบเรียมไททาเนตที่ใส่ลงไป เนื่องจากมีลักษณะเป็นผงสีขาวที่ระเหวี่ยงอนุภาคของผงเหล่านั้นจะมีอากาศแทรกอยู่ ทำให้เมื่อยิ่งใส่ในปริมาณมาก ก็จะทำให้มีอากาศอยู่ในระบบมากยิ่งขึ้น และเมื่อนำแบเรียมไททาเนตไปผสมกับอีพอกซีเรซิน จะทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างอนุภาคถูกแทนที่ด้วยอีพอกซีเรซินที่เป็นของเหลว อากาศเหล่านี้จึงเกิดการรวมตัวกันเป็นฟองอากาศในชิ้นงาน และเมื่อของผสมแข็งตัวอย่างช้าๆก็จะทำให้อากาศกลายเป็นรูพรุนในที่สุด

4.1.3 สมบัติทางไฟฟ้า

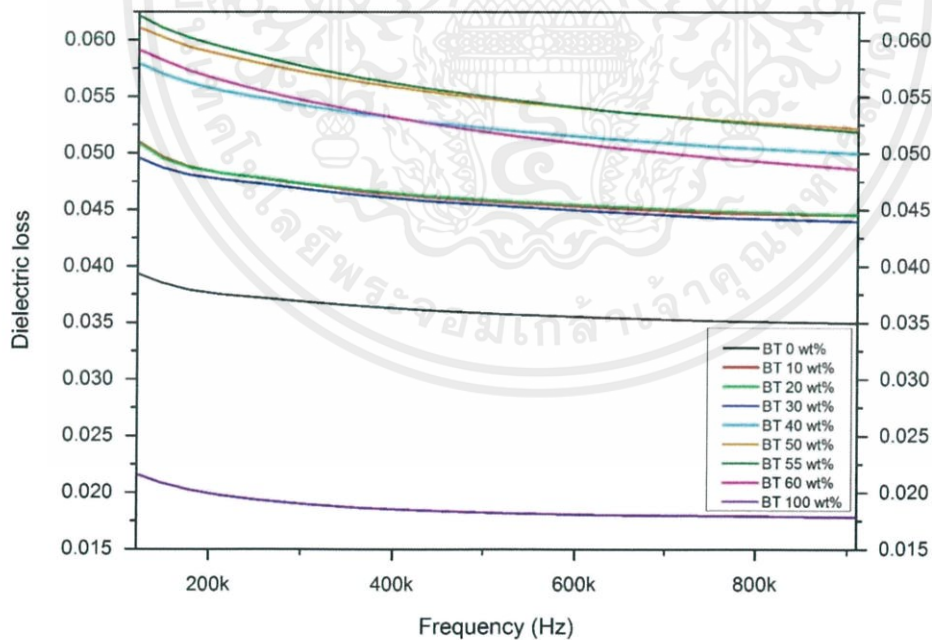
4.1.3.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

สามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่อง LCR meter โดยเครื่องจะทำการวัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุที่ความถี่ตั้งแต่ 10^2 ถึง 10^6 เฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้อง และนำมาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความถี่ของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆกัน แสดงในภาพที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เป็นเซรามิกแบเรียมไททาเนต ที่ความถี่ต่ำจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกขึ้นกับความถี่เล็กน้อย ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการลดลงของโพลาริซชันขั้วคู่ (dipolar polarization) ของเมทริกซ์อีพอกซีเรซิน และการสะสมของประจุบริเวณรูพรุนที่เกิดขึ้นตรงรอยต่อระหว่างเฟส (interface) แบเรียมไททาเนตและอีพอกซีเรซิน ส่งผลให้มีการบิดเบือนของสนาม (field distortion) อย่างมาก วัสดุจึงมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง แต่จะเริ่มมีค่าที่คงที่เมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น ส่วนชิ้นงานคอมโพสิตที่มีสัดส่วนองค์ประกอบต่างๆกันก็จะมีแนวโน้มของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเป็นไปในทิศทางเดียวกันด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

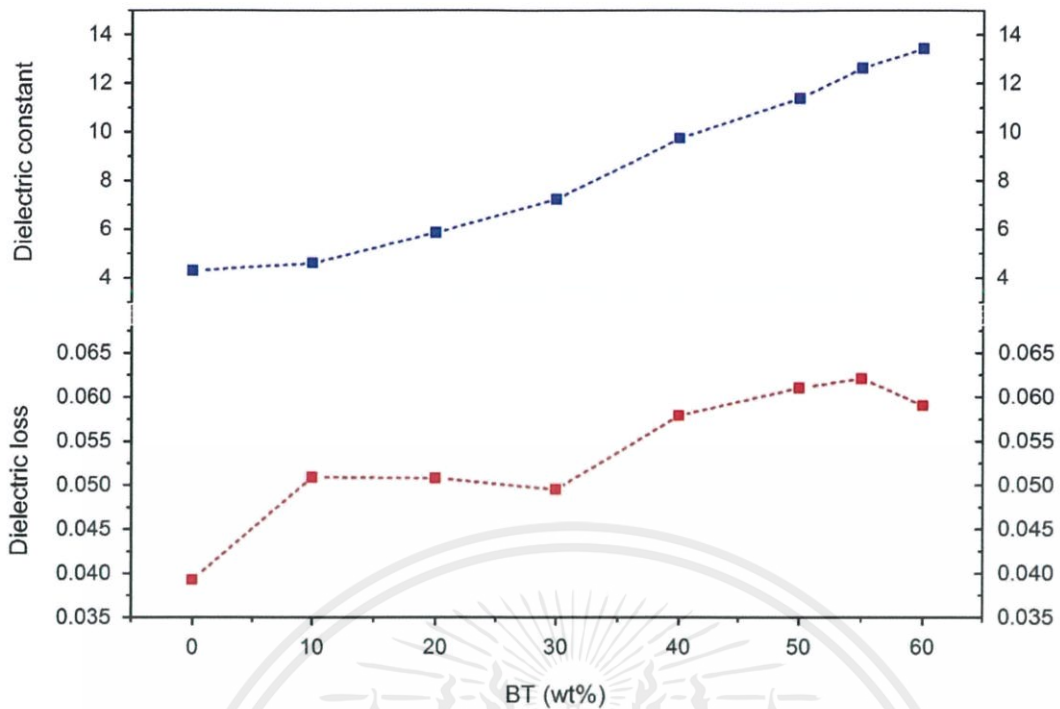


ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกกับความถี่ของชั้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ



ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกและความถี่ของชั้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่มีปริมาณแบเรียมไททาเนตโดยน้ำหนักในชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซิน ต่างๆกัน ที่ความถี่ 1,000 เฮิรซ์

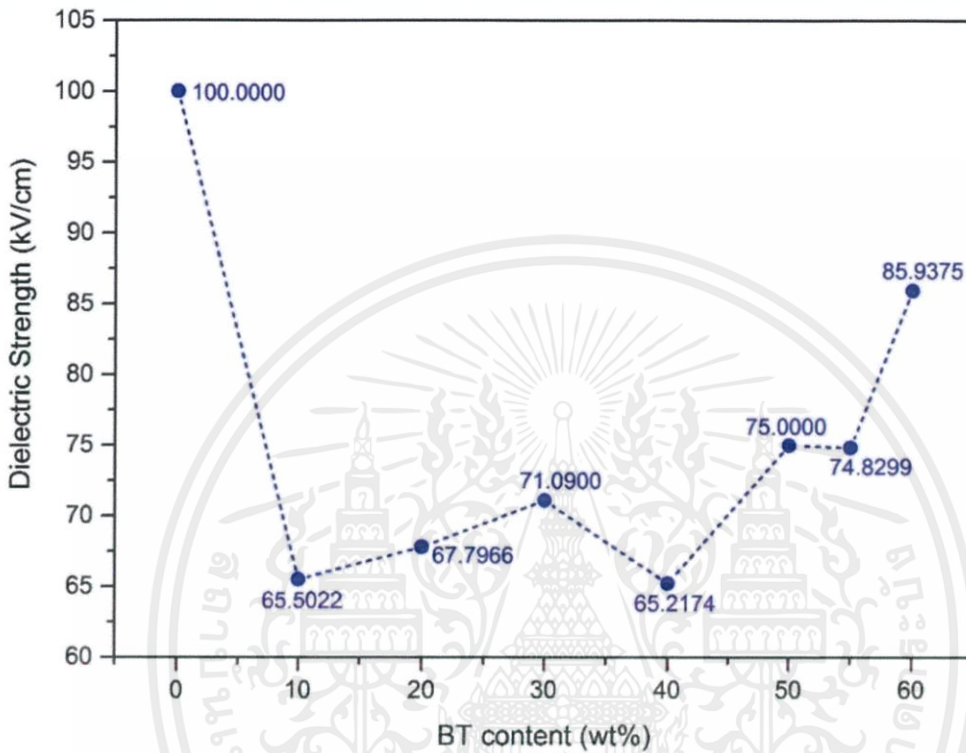
จากภาพที่ 4.8 พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณแบเรียมไททาเนตที่เพิ่มขึ้นอย่างเป็นลำดับ เนื่องจากแบเรียมไททาเนตเป็นสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงมาก แต่อีพอกซีเรซินเป็นสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ ทำให้เมื่อนำมาผสมกันเป็นวัสดุคอมโพสิตแล้วจะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกรวมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแบเรียมไททาเนตนั่นเอง นอกจากนี้พบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของชิ้นงานมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแบเรียมไททาเนตที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อใส่แบเรียมไททาเนตในปริมาณมาก จะทำให้มีฟองอากาศเกิดขึ้นในชิ้นงานเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นน้อยลง ดังผลจากภาพที่ 4.1, 4.3 และ 4.5 ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้เป็นสิ่งที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของประจุในเนื้อวัสดุ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสีย (loss) ในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีปริมาณแบเรียมไททาเนตที่มากขึ้น

4.1.3.2 ค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริก

เมื่อทำการตรวจวัดค่าความต่างศักย์สูงสุดที่ชิ้นงานสามารถทนได้ก่อนเกิดความเสียหาย (breakdown voltage) และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซิน แสดงความสัมพันธ์กันดังภาพที่ 4.9 พบว่าค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณแบเรียมไททาเนตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลมาจากการแยกชั้นของแบเรียมไททาเนตและอพิออกซีเรซิน เมื่อใส่แบเรียมไททาเนตในปริมาณน้อยๆ จะทำให้ชิ้นงานไม่สามารถทนทานความต่างศักย์ได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน จึงทำให้เกิดความเสียหายได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ใส่แบเรียมไททาเนตในปริมาณมากที่จะไม่มีการแยกชั้นเกิดขึ้น จึงสามารถทนทานต่อความต่างศักย์ได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน



ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกและปริมาณแบเรียมไททาเนตโดยน้ำหนัก ในชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อพิออกซีเรซิน

4.1.3.3 วงวนฮิสเทอรีซิสและความหนาแน่นพลังงาน

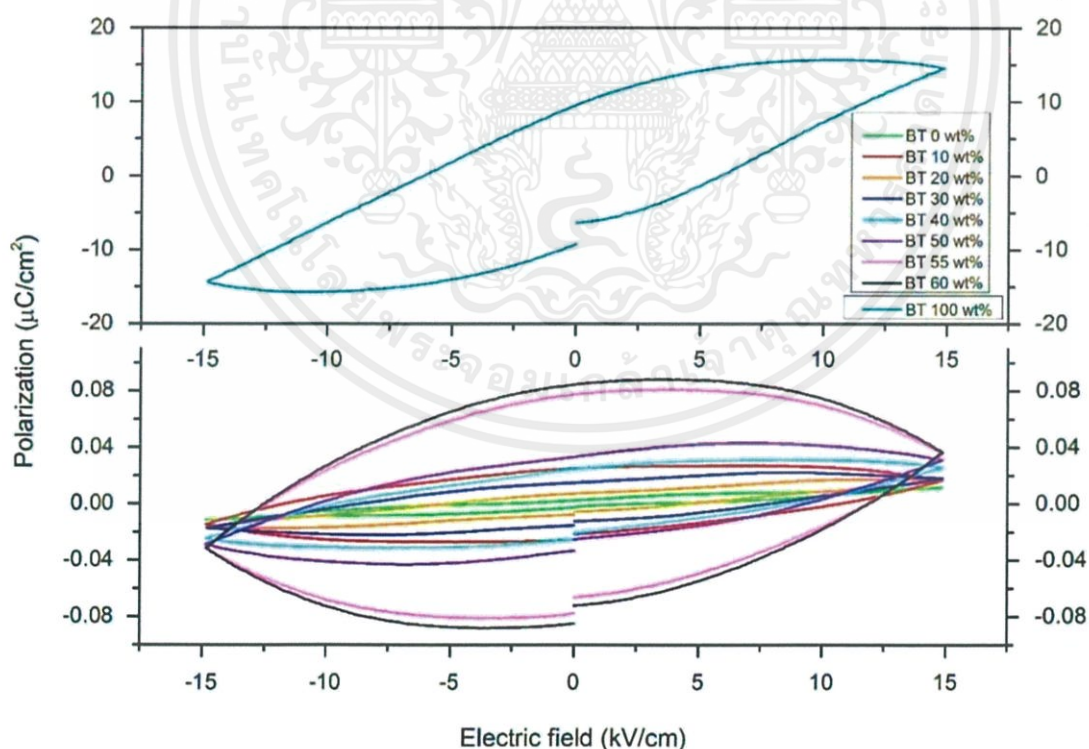
เมื่อให้สนามไฟฟ้ามากกว่าค่าของตัววัสดุ เรียกว่า สนามไฟฟ้าลบล้าง จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของแต่ละยูนิตเซลล์ที่มีตามธรรมชาติใหม่อีกครั้ง โดยจะเรียงตัวตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ซึ่งการจัดเรียงตัวของขั้วในแต่ละยูนิตเซลล์นี้ นำไปสู่การเปลี่ยนทิศทางของโดเมน (domain switching) และการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนในแต่ละเกรนภายในวัสดุ

โดยปกติแล้ว พฤติกรรมการกลับขั้วของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกส์ภายใต้สนามไฟฟ้าจะแสดงให้เห็นได้โดยวงวนโพลาริเซชันฮิสเทอรีซิส (polarization hysteresis loop) หรือ dielectric hysteresis คือ การวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชัน (polarization) กับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ดังภาพที่ 4.10 แสดงวงวนฮิสเทอรีซิสของชิ้นงานที่จะเห็นได้ว่าแต่ละชิ้นงานจะมีขนาดของวงวนฮิสเทอรีซิสที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถวัดพื้นที่ของวงวนฮิสเทอรีซิส, ค่าโพลาริเซชันได้เอง (spontaneous polarization; P_s), โพลาริเซชันตกค้าง (remanent polarization; P_r) และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าลบล้าง (coercive field; E_c) ของแต่ละชั้นงานได้ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าต่างๆมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณแบเรียมไททาเนตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากแบเรียมไททาเนตเป็นสารหลักที่ทำให้เกิดการโพลาไรเซชันในวัสดุ

จากนั้นจึงคำนวณหาค่าความหนาแน่นพลังงานของชั้นงานจากวงวนฮิสเทอรีซิส จะได้ความสัมพันธ์กันดังภาพที่ 4.11 ซึ่งพบว่าเม็ดเซรามิกแบเรียมไททาเนตมีค่าความหนาแน่นพลังงานเป็น 21.944 mJ/cm^3 และชั้นงานที่เป็นอีพอกซีเรซินบริสุทธิ์มีค่า 0.06 mJ/cm^3 ส่วนชั้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินจะมีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 0.026 ถึง 0.182 mJ/cm^3 และที่แบเรียมไททาเนตปริมาณ 55% และ 60% โดยน้ำหนักจะมีค่าความหนาแน่นพลังงานสูงกว่าชั้นงานอื่นๆอย่างชัดเจน โดยน่าจะเป็นผลมาจากแบเรียมไททาเนตที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ทำให้สามารถกักเก็บพลังงานไว้ได้มากหรือทำให้มีค่าความหนาแน่นของพลังงานที่สูงขึ้นด้วย

จากผลการทดลองในเรื่องของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริก และความหนาแน่นของพลังงาน ชั้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่มีแนวโน้มให้ค่าดีที่สุดคือ ชั้นงานที่มีปริมาณแบเรียมไททาเนต 60% 55% และ 50% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ 3 สัดส่วนนี้ในการทำการทดลองตอนถัดไป ซึ่งถึงแม้ว่าจะมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าสัดส่วนอื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาแล้วพบว่ามีความต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงเลือกใช้สัดส่วนนี้ได้

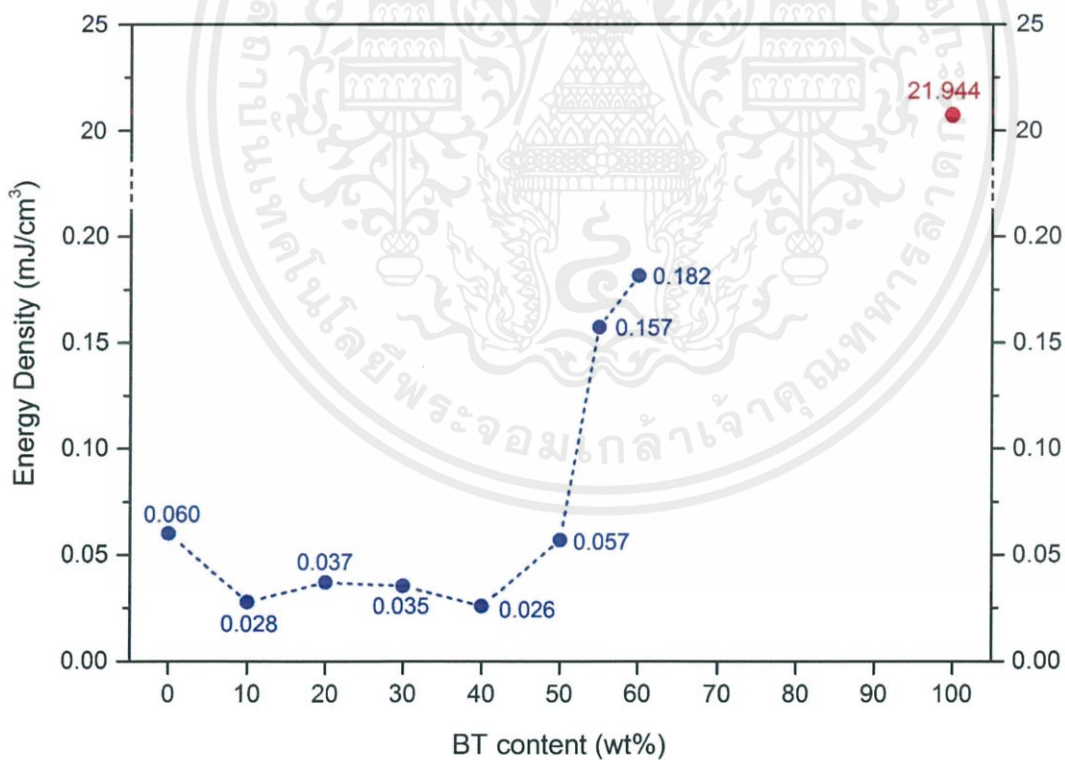


ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันและค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่า P_s , P_r , E_c และพื้นที่ของวงวนฮิสเทอรีซิสของชั้นงานนาโนคอมโพสิต

BT (wt%)	P_s ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	P_r ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	E_c (kV/cm)	Loop area ($\mu\text{C}/\text{cm}^2 \cdot \text{V}$)
0	0.01165	0.00252	2.88572	22.04928
10	0.01664	0.02520	11.19045	227.21559
20	0.01706	0.00732	4.80652	65.46525
30	0.01817	0.01517	8.22977	117.58628
40	0.02589	0.02474	9.21842	172.24847
50	0.03099	0.03332	9.84582	210.79249
55	0.03498	0.07766	12.09890	438.63385
60	0.03645	0.08472	12.17655	417.95642
100	14.56410	9.38300	3.14510	33989.35414



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นพลังงานและปริมาณของแบเรียมไททาเนตโดยน้ำหนักในชั้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

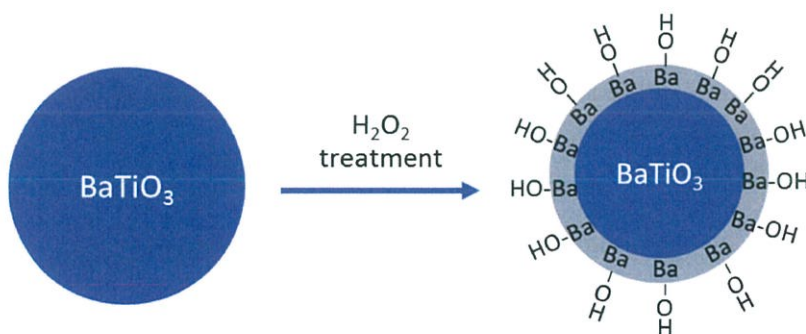
4.2 การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของ ชีงงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อ็อกซีเรซิน

เมื่อทำการวัดสมบัติต่างๆของชีงงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อ็อกซีเรซินที่มีปริมาณแบเรียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบตั้งแต่ 0% - 60% โดยน้ำหนัก พบว่าชีงงานที่มีปริมาณแบเรียมไททาเนต 50% 55% และ 60% จะมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีที่สุด ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้จึงได้เลือกสัดส่วนเหล่านี้มาทำการปรับปรุงสมบัติให้ดียิ่งขึ้น โดยการนำแบเรียมไททาเนตไปทำรีฟลักซ์ และการเติมสารลดแรงตึงผิวหรือ Span80 ลงไป เพื่อให้แบเรียมไททาเนตสามารถกระจายตัวในอ็อกซีเรซินที่เป็นเมทริกซ์ได้ดียิ่งขึ้น และนำมาซึ่งสมบัติต่างๆที่ดียิ่งขึ้น

4.2.1 สมบัติทางกายภาพ

เมื่อนำค่าความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง และน้ำหนักของชีงงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อ็อกซีเรซินที่วัดค่าได้ดังตารางที่ 4.4 มาคำนวณหาค่าปริมาตร ความหนาแน่นโดยรวม ความหนาแน่นทางทฤษฎี และความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชีงงานได้ดังตารางที่ 4.5

เมื่อนำค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชีงงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อ็อกซีเรซินที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์ แบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์ และแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และผสมกับ Span80 มาเปรียบเทียบกับดังภาพที่ 4.13 พบว่าชีงงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้ทำการรีฟลักซ์จะมีแนวโน้มของค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ลดลง เมื่อใส่แบเรียมไททาเนตในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากเหตุผลในเรื่องของอากาศที่แทรกอยู่ระหว่างแต่ละอนุภาคของแบเรียมไททาเนตดังที่เคยกล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ในขณะที่ชีงงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว ทั้งที่ใส่และไม่ใส่ Span80 มีแนวโน้มที่จะมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการที่เมื่ออนุภาคแบเรียมไททาเนตผ่านการรีฟลักซ์แล้ว จะทำให้มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็น -OH จาก H_2O_2 ที่ใช้ในการรีฟลักซ์มาเกาะอยู่ที่พื้นผิวของอนุภาคแบเรียมไททาเนต ดังแสดงในภาพจำลองที่ 4.12 และเมื่อนำมาผสมกับอ็อกซีเรซินจึงทำให้มีความเข้ากันได้ดี และมีการกระจายตัวของอนุภาคมากขึ้น เนื่องจากจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนได้ยากยิ่งขึ้น เนื่องจากผลของพื้นผิวของอนุภาคที่มีความเปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง



ภาพที่ 4.12 ภาพจำลองการเกาะของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ผิวของอนุภาคแบเรียมไททาเนต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

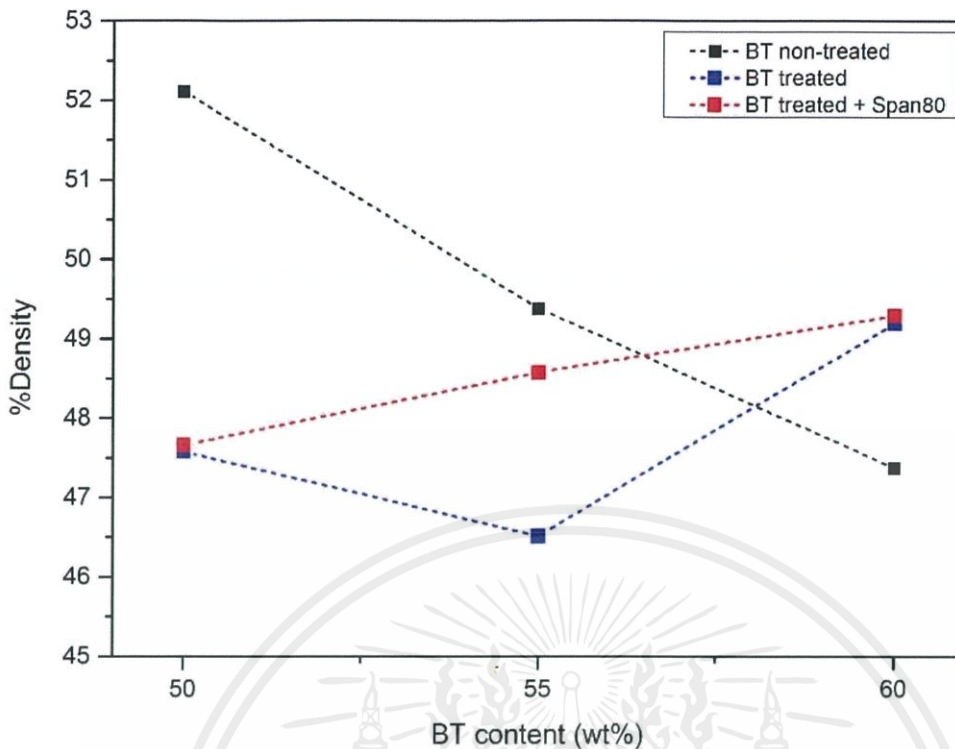
ตารางที่ 4.4 ค่าความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง และน้ำหนักของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/ อีพอกซีเรซินที่วัดค่าได้

ปริมาณ BT (wt%)	เงื่อนไข					ความหนา (มม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	น้ำหนัก (กรัม)
	BT non- treated	BT treated	BT treated	BT treated +Span80				
50	✓					1.57	25.20	1.4205
			✓			1.59	25.20	1.3135
				✓		1.665	25.20	1.3777
55	✓					1.45	25.20	1.3224
			✓			1.33	25.20	1.1472
				✓		1.52	25.20	1.3692
60	✓					1.27	25.20	1.1817
		✓				1.25	25.20	1.213
				✓		1.37	25.20	1.33205

ตารางที่ 4.5 ค่าปริมาตร ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นทางทฤษฎี และความหนาแน่นสัมพัทธ์ของ ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่คำนวณได้

ปริมาณ BT (wt%)	เงื่อนไข					ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น โดยรวม (กรัม/ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น ทางทฤษฎี (กรัม/ลบ.ซม.)	ความ หนาแน่น สัมพัทธ์ (%)
	BT non- treated	BT treated	BT treated	BT treated +Span80					
50	✓				0.78	1.81	3.48	52.11	
			✓		0.79	1.66	3.48	47.58	
				✓	0.83	1.66	3.48	47.66	
55	✓				0.72	1.83	3.72	49.18	
			✓		0.66	1.73	3.72	46.51	
				✓	0.76	1.81	3.72	48.58	
60	✓				0.63	1.87	3.95	47.37	
			✓		0.62	1.95	3.95	49.19	
				✓	0.68	1.95	3.95	49.29	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแบเรียมไททาเนตกับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์ (BT non - treated), แบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว (BT treated) และแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 (BT treated + Span80)

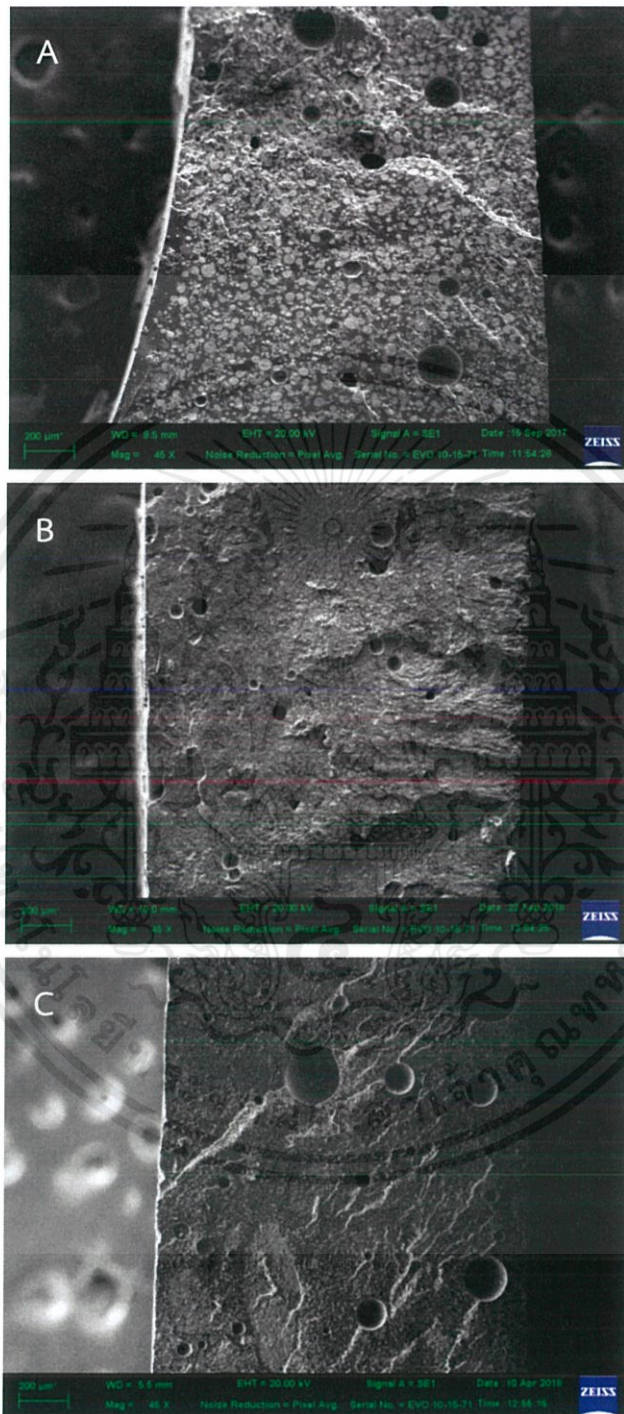
4.2.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์ที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และแบบที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 ด้วยนั้น จะนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงในระดับจุลภาคของชิ้นงาน และสามารถนำไปใช้ประกอบการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการปรับปรุงสมบัติกับโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานต่างๆที่เตรียมขึ้น

เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวแตกของชิ้นงานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะได้ผลดังภาพที่ 4.14 (A-C) เมื่อพิจารณาโดยรวมจะเห็นว่าชิ้นงานมีรูพรุนภายใน แต่ไม่แตกต่างกันมากนัก และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 200 เท่า ดังภาพที่ 4.15 (A-C) พบว่าชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้ผ่านการรีฟลักซ์ (ภาพ 4.15 (A)) จะมีการรวมตัวกันของอนุภาคแบเรียมไททาเนตในลักษณะที่เป็นกลุ่มก้อนค่อนข้างกลม กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งเมทริกซ์อีพอกซีเรซิน ในขณะที่ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว (ภาพ 4.15 (B) และ (C)) จะมีการกระจายตัวของอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และถึงแม้ว่าจะไม่ได้อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

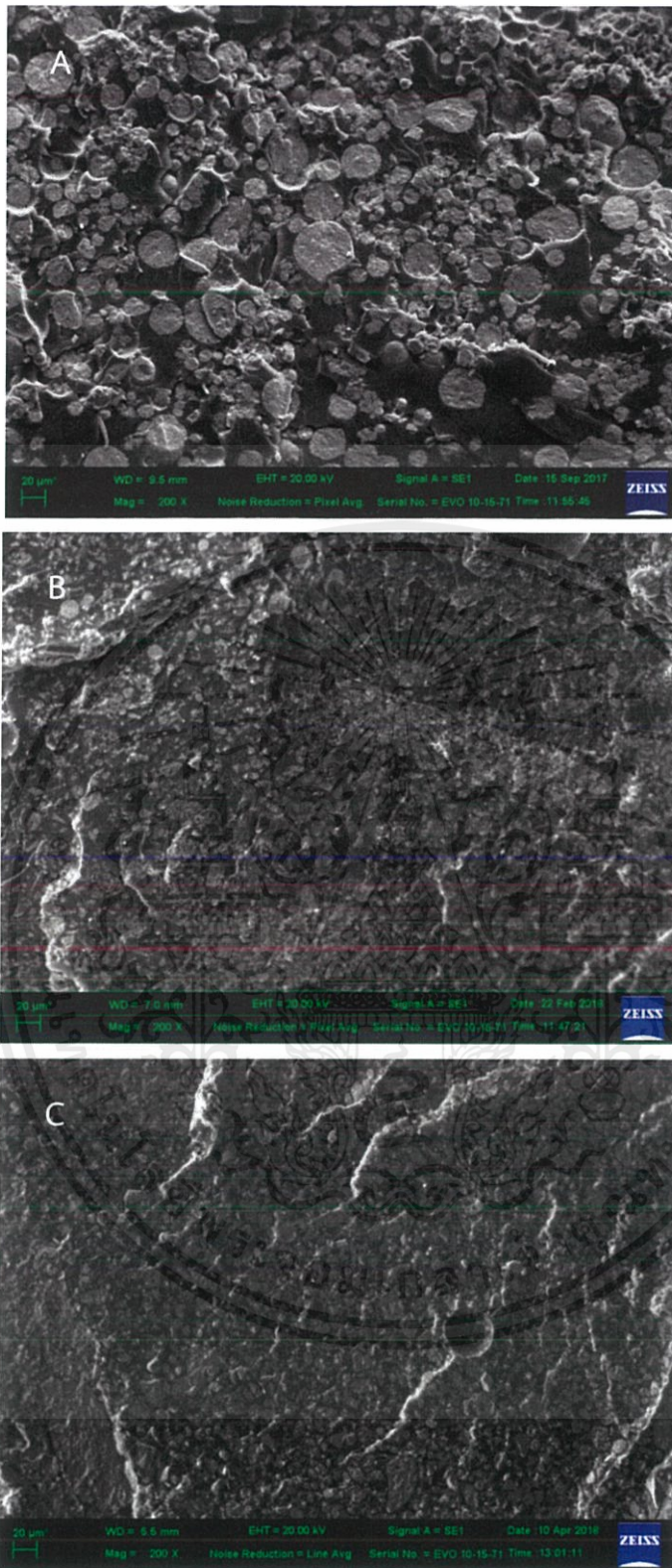
เป็นอนุภาคเดี่ยว แต่ก็มีการรวมกลุ่มกันโดยมีขนาดที่เล็กลงมาก และสำหรับการใส่และไม่ใช่ Span80 ลงไปนั้น การกระจายตัวของอนุภาคจะยังไม่เห็นถึงความแตกต่างที่ชัดเจน



ภาพที่ 4.14 ผิวแตกของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททานเนต/อีพอกซีเรซินที่มีแบเรียมไททานเนตเป็นองค์ประกอบ 50 wt% ที่กำลังขยาย 45 เท่า โดยที่ (A) ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททานเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์ , (B) ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททานเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และ (C) ชิ้นงานที่ทำจาก

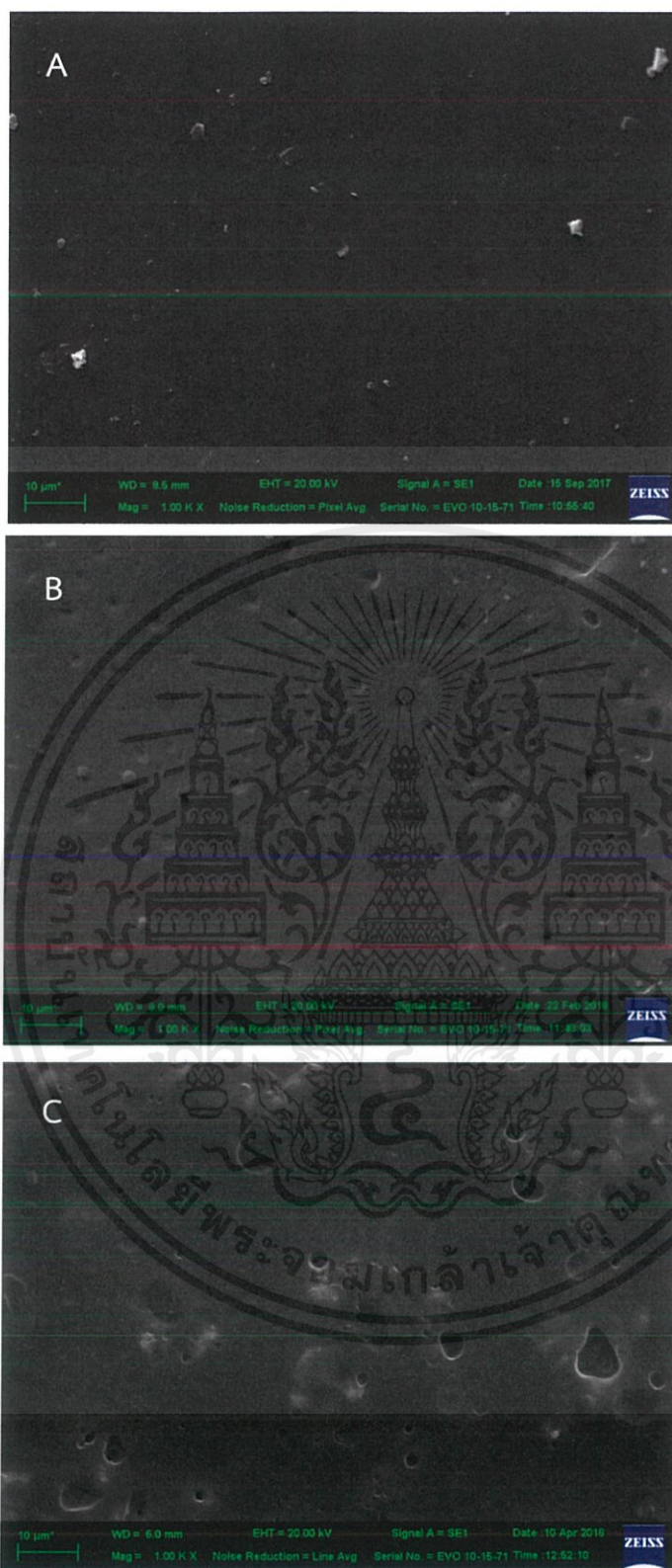
แบเรียมไททานเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.15 ผิวแตกของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อิพอกซีเรซินที่มีแบเรียมไททาเนต

เป็นองค์ประกอบ 50 wt% ที่กำลังขยาย 200 เท่า โดยที่ (A) ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนต
ที่ไม่ได้รีฟลักซ์ , (B) ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และ (C) ชิ้นงานที่ทำ
จากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 ด้วย
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.16 ผิวหน้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อิมพอกซีเรซินที่มีแบเรียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบ 50 wt% ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า โดยที่ (A) ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์ , (B) ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และ (C) ชิ้นงานที่ทำจาก

แบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของชิ้นงานที่กำลังขยาย 1,000 เท่า จะได้ดั่งภาพที่ 4.16 (A-C) ที่เป็นภาพถ่ายผิวหน้าของชิ้นงานที่มีปริมาณแบเรียมไททาเนต 50% โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้ผ่านการรีฟลักซ์ (ภาพ 4.16 (A)) จะมีผิวหน้าของชิ้นงานที่ค่อนข้างเรียบ ในขณะที่ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว (ภาพ 4.16 (B)) จะมีรูขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งผิวหน้าของชิ้นงาน และสำหรับชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 ลงไปด้วย พบว่ามีรูขนาดเล็กและขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วทั้งผิวหน้าของชิ้นงานเช่นเดียวกัน (ภาพ 4.16 (C))

4.2.3 สมบัติทางไฟฟ้า

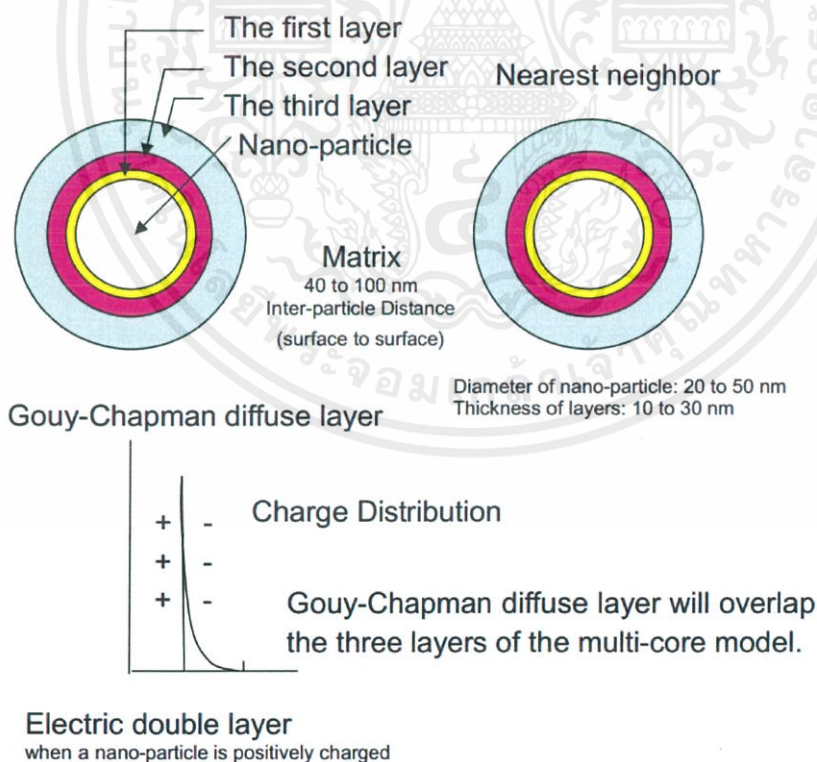
4.2.3.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

สามารถทำได้โดยการวัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุที่ความถี่ตั้งแต่ 10^2 ถึง 10^6 เฮิรซ์ ที่อุณหภูมิห้อง และนำมาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความถี่ของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่สัดส่วนองค์ประกอบต่างๆกัน แสดงในภาพที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ และเปรียบเทียบให้เห็นได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นที่ความถี่ 1,000 เฮิรซ์ ดังภาพที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ

พบว่าที่ความถี่ต่ำ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าขึ้นกับความถี่เล็กน้อย และเริ่มมีค่าที่คงที่เมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น โดยมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.1.3 ที่จะเป็นผลมาจากรูพรุนภายในชิ้นงาน และจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว มีทั้งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์ เนื่องจากเมื่ออนุภาคของแบเรียมไททาเนตกระจายตัวในเมทริกซ์อีพอกซีเรซินได้ดียิ่งขึ้น จะเป็นเหมือนการใส่อนุภาคของสารตัวเติมที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งส่งผลให้มีรอยต่อระหว่างสองเฟสของแบเรียมไททาเนตและอีพอกซีเรซินเพิ่มมากขึ้น จึงมีการสะสมของประจุบริเวณรอยต่อเพิ่มมากขึ้นด้วย และทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง แต่เนื่องจากว่าชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้วจะมีความเข้ากันได้ระหว่างสองเฟสเพิ่มมากขึ้นและรูพรุนในชิ้นงานลดลง ดังนั้นจึงส่งผลให้มีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ลดลงด้วย แต่ในความเป็นจริงแล้วแบเรียมไททาเนตมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอยู่ในหลัก 1,000 ขึ้นไป แต่ในที่นี่ชิ้นงานมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงแค่เพียง 3-6 เท่านั้น จึงเสมือนว่าเป็นการลดลงที่น้อยมาก ในขณะที่มีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ลดลงค่อนข้างมาก คือประมาณ 0.02-0.03 เพราะโดยทั่วไปแล้วค่าการสูญเสียของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ดีไม่ควรเกิน 0.1

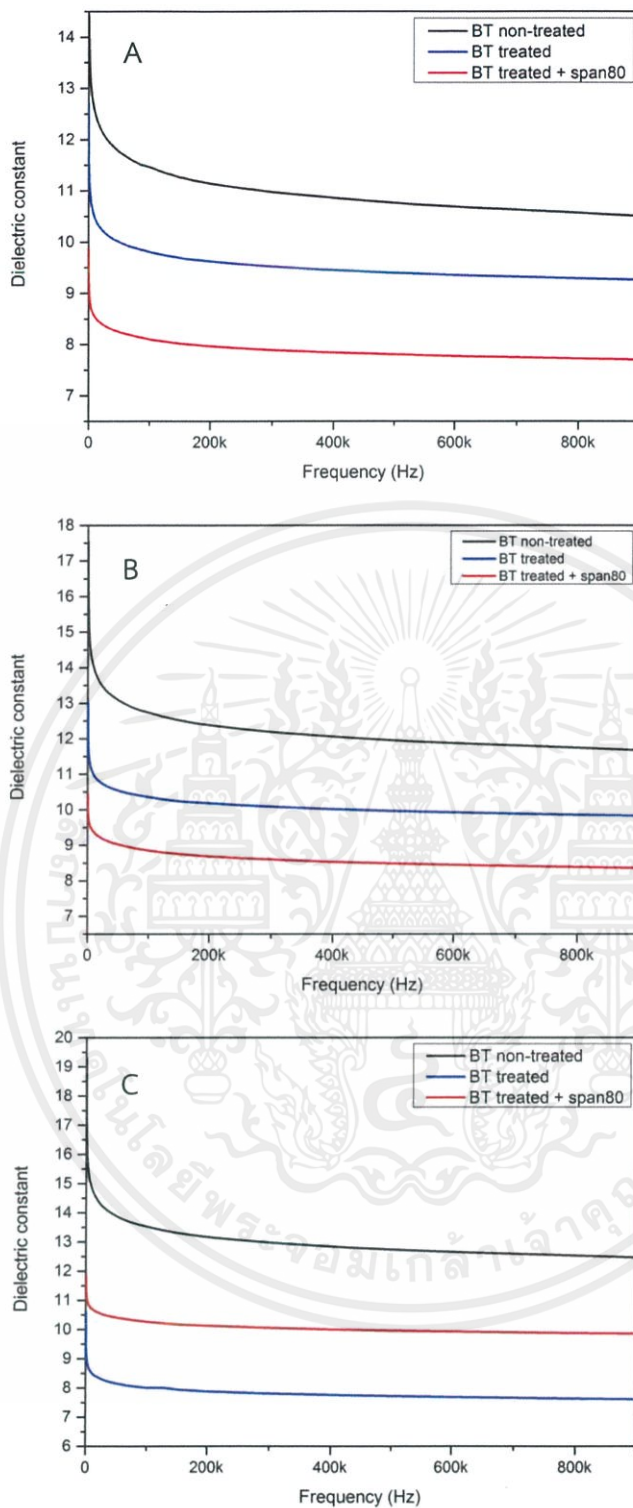
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อขนาดของอนุภาคของสารตัวเติมลดลงไปยังขนาดนาโนเมตร สมบัติของส่วนที่เป็นรอยต่อของพอลิเมอร์กับสารตัวเติมจะกลายเป็นสมบัติเด่นแทนสมบัติรวม (bulk property) ที่เป็นขององค์ประกอบต่างๆ ดังนั้นจึงได้มีแบบจำลองทางทฤษฎีขึ้นเพื่อใช้พิจารณาผลของรอยต่อหรืออินเตอร์เฟซ (interface) ของวัสดุนาโนคอมโพสิต Tanaka และคณะ [53] ได้เสนอแบบจำลองแบบหลายแกน (multi-core model) (ภาพที่ 4.17) เพื่อให้เข้าใจถึงสมบัติความเป็นฉนวนของวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต โดยได้เสนอว่ารอยต่อของอนุภาคทรงกลมที่อยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์จะประกอบด้วยสามส่วนที่แตกต่างกัน โดยชั้นแรก คือ ชั้นที่เกิดพันธะ (bonded layer) พื้นผิวของสารตัวเติมจะสัมผัสกับพอลิเมอร์, ชั้นที่สอง คือ ชั้นผูกติด (bound layer) เป็นบริเวณที่เชื่อมต่อกันหรือรอยต่อระหว่างกัน และชั้นที่สาม คือ ชั้นหลวม (loose layer) เป็นชั้นที่จะมีสมบัติของพอลิเมอร์ทั้งหมด (bulk polymer) โดยมีชั้นคู่ทางไฟฟ้า (electrical double layer) ซ้อนทับทั้งสามชั้น ซึ่งชั้นที่สองจะทำให้เกิดการลดลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก โดยจะไปรบกวนการเคลื่อนไหวของไดโพล พอลิเมอร์ส่วนใหญ่ในคอมโพสิตจะเกี่ยวข้องกับชั้นที่สาม ซึ่งทำให้เกิดการลดลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเช่นกัน แม้ว่าชั้นแรกอนุภาคจะสัมผัสกับพอลิเมอร์โดยตรงและสร้างการติดต่อโดยตรง แต่ชั้นที่สองและชั้นที่สามจะมีอิทธิพลมากที่สุดต่อสมบัติการเป็นฉนวนของวัสดุนาโนคอมโพสิต โดยจะมีผลต่อความเป็นขั้ว (polarizability) และความคล่องตัว (mobility) ของพาหะประจุในวัสดุ



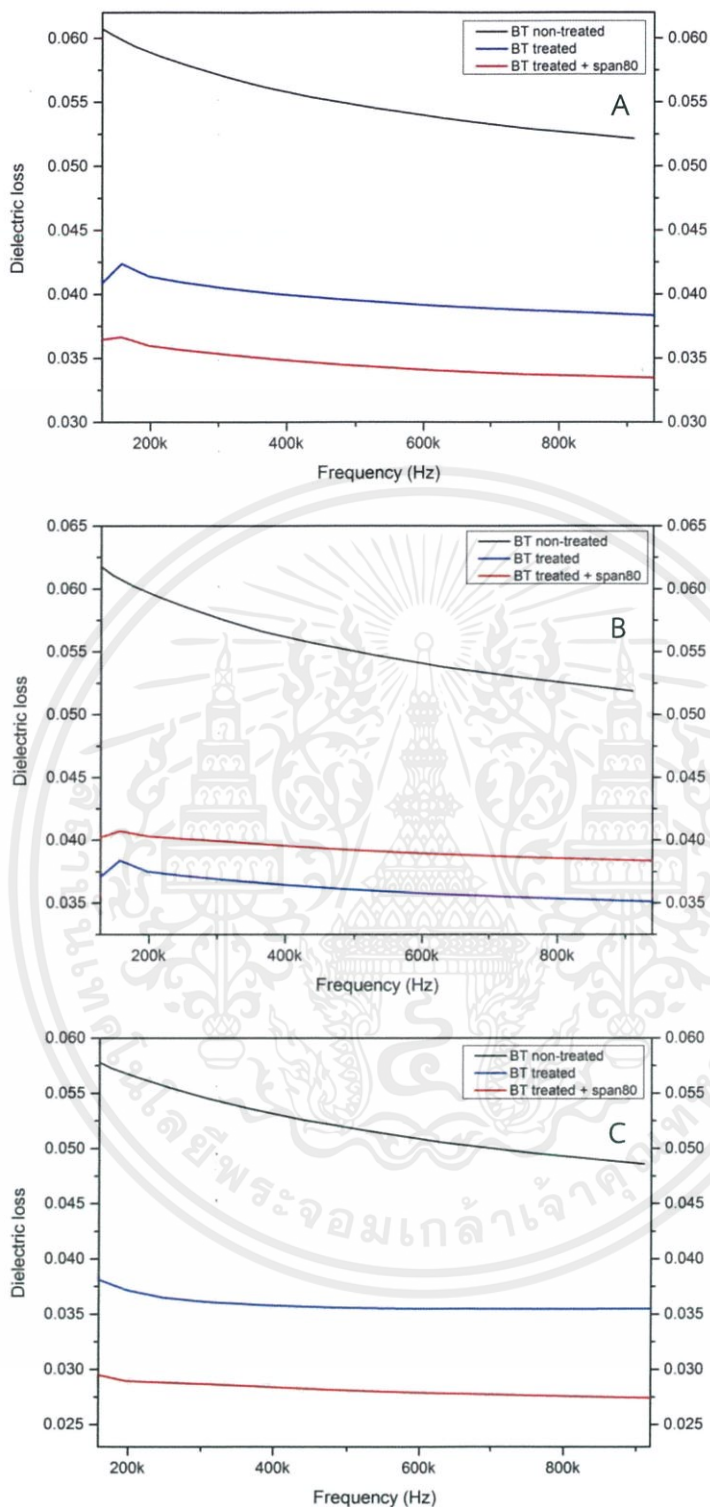
ภาพที่ 4.17 แบบจำลองแบบหลายแกน สำหรับรอยต่อระหว่างอนุภาคนาโนและพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



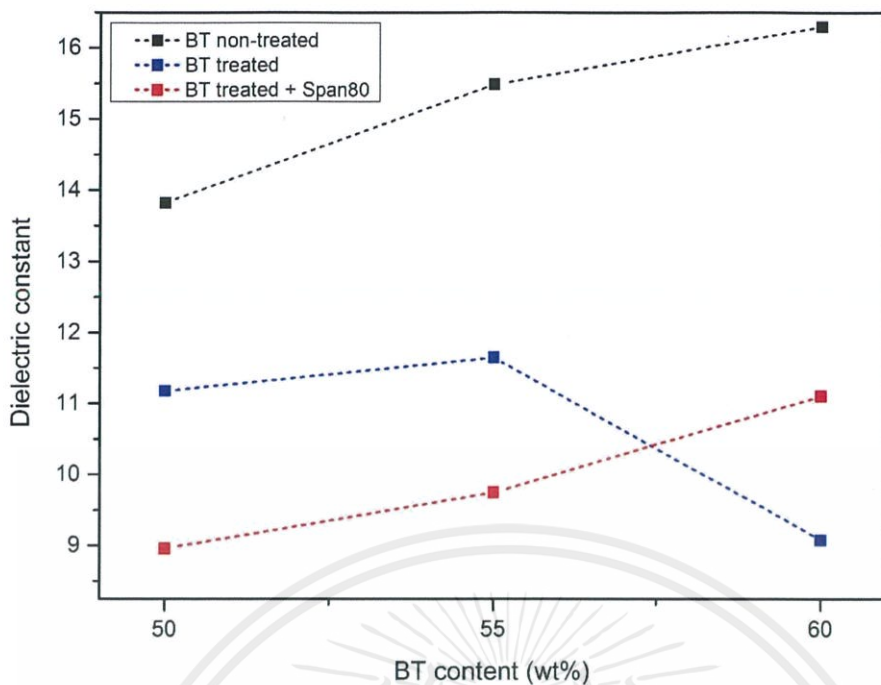
ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับความถี่ของชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์, แบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 โดยที่ (A) BT 50 wt%, (B) BT 55 wt% และ (C) BT 60 wt% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

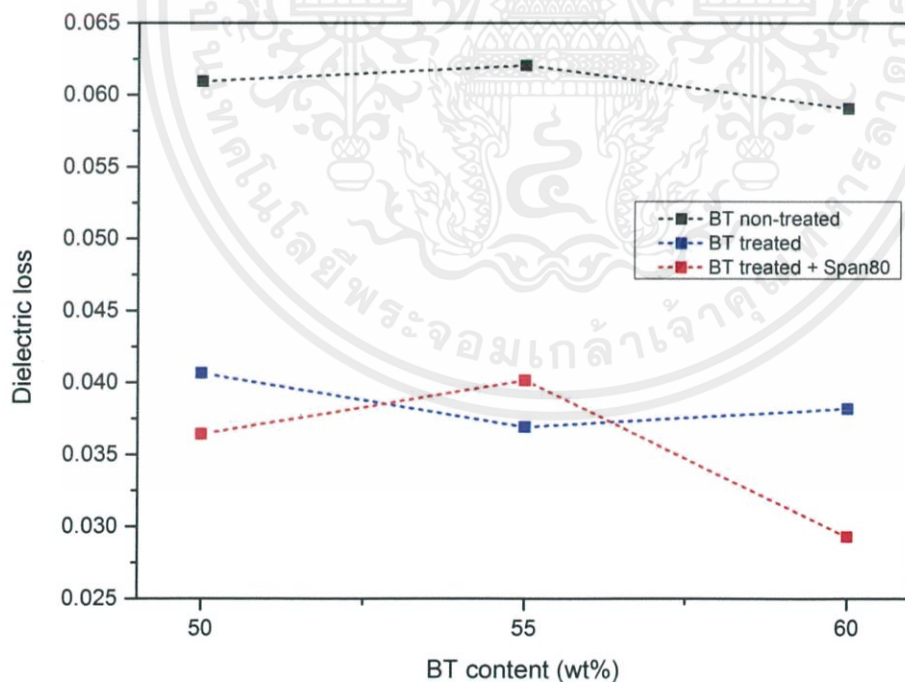


ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับความถี่ของชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์, แบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 โดยที่ (A) BT 50 wt%, (B) BT 55 wt% และ (C) BT 60 wt% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับปริมาณแบเรียมไททาเนต โดยน้ำหนัก ในชั้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซิน ที่ความถี่ 1,000 เฮิรซ์



ภาพที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับปริมาณแบเรียมไททาเนต โดยน้ำหนัก ในชั้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซิน ที่ความถี่ 1,000 เฮิรซ์

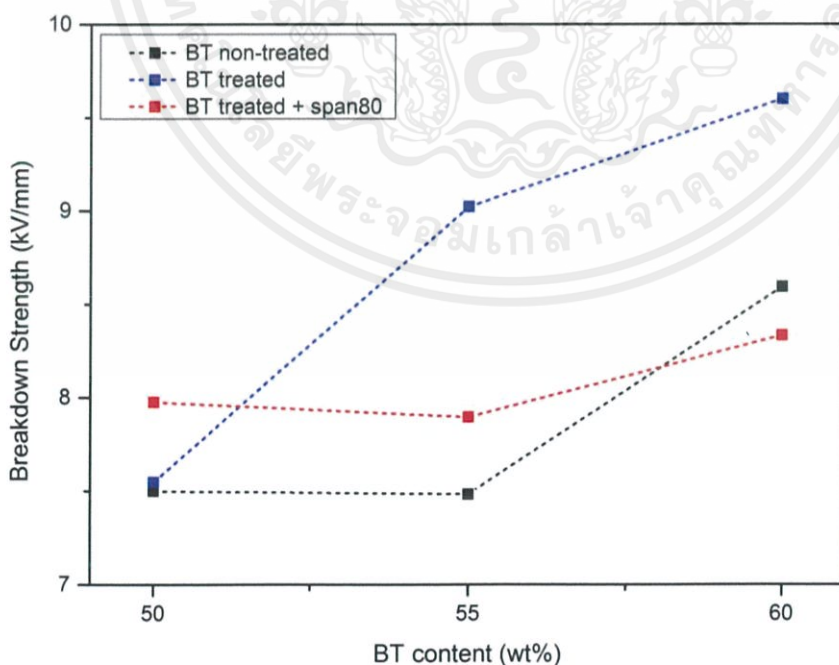
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.2 ค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริก

เมื่อทำการตรวจวัดค่าความต่างศักย์สูงสุดที่ชิ้นงานสามารถทนได้ก่อนเกิดความเสียหาย (breakdown voltage) และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียบมโททานेत/อีพอกซีเรซิน แสดงความสัมพันธ์กันดังภาพที่ 4.22 พบว่าค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณแบบเรียบมโททานेतที่เพิ่มขึ้น

เมื่อนำแบบเรียบมโททานेतที่ไม่ได้ทำการรีฟลักซ์มาใช้ในการทำชิ้นงาน จะทำให้อนุภาคของแบบเรียบมโททานेतเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่จนถึงระดับไมโครเมตร ซึ่งเป็นผลทำให้สมบัติของชิ้นงานนั้นไม่ใช่สมบัติของนาโนคอมโพสิตที่แท้จริง แต่อาจเป็นสมบัติของไมโครคอมโพสิตแทน โดยปกติแล้วเมื่อทำการเติมสารตัวเติมที่มีขนาดไมครอนมักมีผลเสียต่อความคงทนทางไดอิเล็กทริกที่อาจเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคฟิลเลอร์ ซึ่งคิดว่าจะนำไปสู่ข้อบกพร่อง (defect) ที่เกิดจากการบิดเบือนสนามไฟฟ้า (field distortion) ที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิลเลอร์และพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งส่งผลให้วัสดุมีค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกที่ต่ำ

เมื่อนำแบบเรียบมโททานेतที่ผ่านการทำรีฟลักซ์มาใช้ในการทำชิ้นงาน พบว่าอนุภาคของแบบเรียบมโททานेतจะกระจายตัวในเมทริกซ์อีพอกซีเรซินได้ดียิ่งขึ้น และทำให้ชิ้นงานนั้นสามารถแสดงสมบัติของนาโนคอมโพสิตได้มากขึ้น โดยเมื่ออนุภาคของสารตัวเติมมีขนาดเล็ก จะทำให้มีสนามไฟฟ้าภายในลดลง และเกิดการบิดเบือนของสนามไฟฟ้าลดลงด้วย นอกจากนี้อนุภาคนาโนจะไปขัดขวางความต่อเนื่องของเส้นทางของพาหะประจุ ซึ่งเป็นผลทำให้มีค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกที่สูงขึ้น



ภาพที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกและปริมาณ

แบบเรียบมโททานेतโดยนำหนักในชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบบเรียบมโททานेत/อีพอกซีเรซิน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

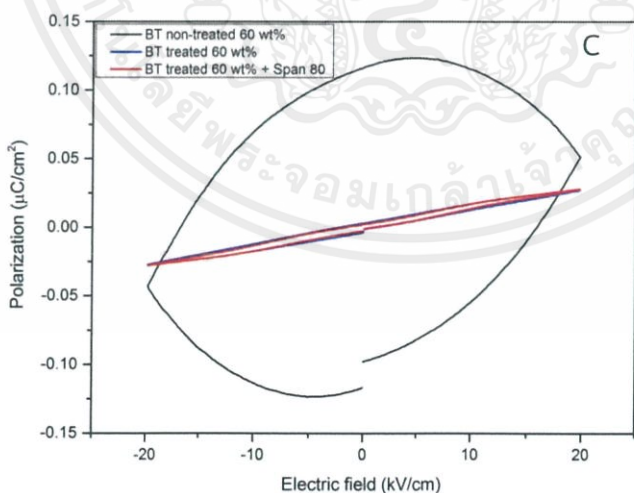
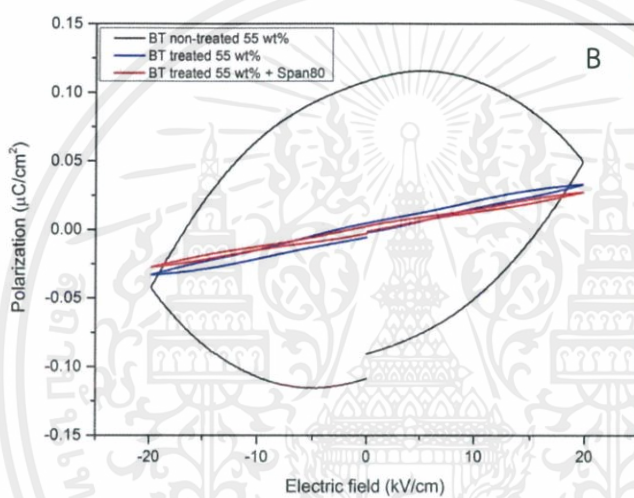
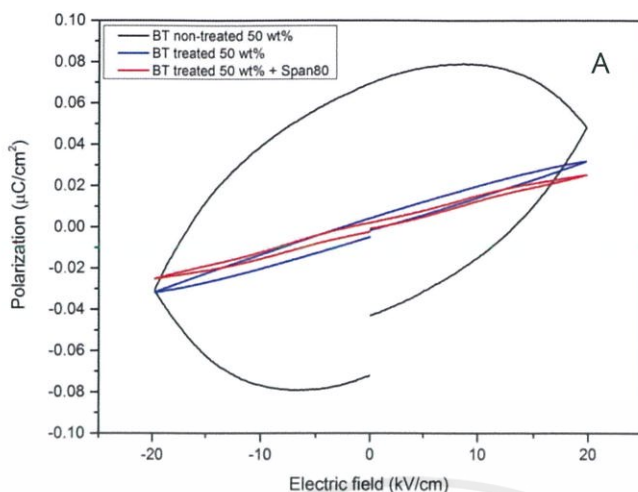
4.2.3.3 วงวนฮิสเทอรีซิสและความหนาแน่นพลังงาน

เมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่ชิ้นงานจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้น และสามารถนำมาคำนวณหาค่าโพลาริเซชันได้ ซึ่งความสัมพันธ์จะมีลักษณะเป็นวงวนฮิสเทอรีซิสดังภาพที่ 4.23 ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิสของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์จะมีขนาดของวงวนเล็กมากและมีรูปร่างที่ไม่ชัดเจน เพราะไม่สามารถทำการตรวจวัดที่สนามไฟฟ้าที่สูงกว่า 20 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ได้ เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องรูปร่างของชิ้นงานและขีดความสามารถของเครื่องมือวัดที่ให้สนามไฟฟ้าแก่ชิ้นงานไม่มากเพียงพอที่จะทำให้การจัดเรียงตัวของแต่ละยูนิตเซลล์เป็นตามทิศทางของสนามไฟฟ้าทั้งหมด ส่งผลให้การเกิดโพลาริเซชันของวัสดุเกิดได้ไม่มากเท่าที่ควร จึงเกิดวงวนฮิสเทอรีซิสที่ยังมีลักษณะไม่สมบูรณ์ด้วย

จากผลการทดลองข้างต้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อแบเรียมไททาเนตสามารถกระจายตัวในเมทริกซ์อีพอกซีเรซินได้ดีขึ้น ก็จะทำให้ต้องใช้สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นในการทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของแบเรียมไททาเนตทั้งหมด ด้วย เนื่องจากเมื่อเกิดการกระจายตัวได้ดี จะทำให้มีอนุภาคที่สามารถเกิดความเป็นขั้วได้เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้ทำการรีฟลักซ์ที่จะมีการรวมตัวกันของอนุภาคแบเรียมไททาเนตกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้สามารถจัดเรียงขั้วไปตามสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้เข้าไปได้ง่ายกว่า กล่าวคือ ใช้สนามไฟฟ้าภายนอกน้อยกว่าในการทำให้เกิดการจัดเรียงของขั้วนั่นเอง

ดังนั้นจึงทำให้การวัดพื้นที่ของวงวนฮิสเทอรีซิส, ค่าโพลาริเซชันได้เอง (spontaneous polarization; P_s), โพลาริเซชันตกค้าง (remanent polarization; P_r) และสนามไฟฟ้าลบล้าง (coercive field; E_c) ของแต่ละชิ้นงานดังตารางที่ 4.6 ที่แสดงให้เห็นว่าค่าต่างๆมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณแบเรียมไททาเนตที่เพิ่มขึ้นนั้น แท้จริงแล้วจะไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากวงวนฮิสเทอรีซิสที่ยังไม่สมบูรณ์ แต่ถ้าต้องการวัดเพื่อการเปรียบเทียบจะได้ผลดังที่แสดงไว้ ซึ่งอาจจะยังไม่ถูกต้องเท่าที่ควร

จากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นพลังงานของชิ้นงานจากวงวนฮิสเทอรีซิส จะได้ความสัมพันธ์กันดังภาพที่ 4.24 ซึ่งพบว่าชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้วที่มีปริมาณ 50% โดยน้ำหนัก จะมีค่าความหนาแน่นพลังงานสูงกว่าชิ้นงานชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ยังไม่ได้ทำการรีฟลักซ์ แต่เมื่อแบเรียมไททาเนตที่ใส่ลงไปมีปริมาณเป็น 55% และ 60% โดยน้ำหนัก จะพบว่ามีความหนาแน่นของพลังงานที่สูงกว่าชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว แต่เนื่องจากความหนาแน่นของพลังงานเป็นการคำนวณมาจากวงวนฮิสเทอรีซิส จึงทำให้การเปรียบเทียบที่ได้ข้างต้นนั้น น่าจะยังไม่ถูกต้องเท่าที่ควร

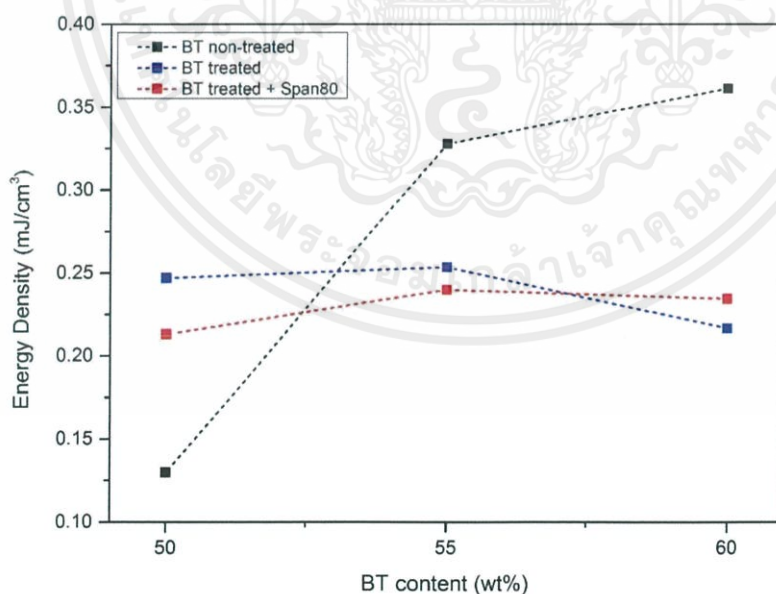


ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาไรเซชันและค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ
 ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททานเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์, แบเรียมไททานเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และ
 แบเรียมไททานเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80 โดยที่ (A) BT 50 wt%, (B) BT 55 wt% และ
 (C) BT 60 wt% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่า P_s , P_r , E_c และพื้นที่ของวงวนฮิสเทอรีซิสของชั้นงานนาโนคอมโพสิต

ปริมาณ BT (wt%)	เงื่อนไข			P_s ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	P_r ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	E_c (kV/cm)	Loop area ($\mu\text{C}/\text{cm}^2 \cdot \text{V}$)
	BT non-treated	BT treated	BT treated+Span80				
50	✓			0.04795	0.07076	14.90126	560.16110
		✓		0.03171	0.00455	1.83058	31.57295
			✓	0.02518	0.00221	1.34893	17.97652
55	✓			0.04918	0.10843	16.17930	824.23836
		✓		0.03296	0.00519	2.18470	37.94005
			✓	0.02725	0.00273	1.25902	18.35262
60	✓			0.05141	0.11679	16.31417	771.23181
		✓		0.02729	0.00344	1.72519	26.65027
			✓	0.02790	0.00237	1.27500	17.11806



ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นพลังงานและปริมาณของแบเรียมไททาเนตโดยน้ำหนักในชั้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์, แบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์และใส่ Span80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานแบเรียมไททาเนต/อพิออกซีเรซินนาโนคอมโพสิตที่เตรียมจากแบเรียมไททาเนตที่ยังไม่ได้ทำการรีฟลักซ์ แบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้ว และที่ใส่สารลดแรงดึงผิวหรือ Span80 ลงไปด้วย เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของชิ้นงานที่เตรียมขึ้นทั้ง 3 แบบได้ ทั้งนี้ข้อสรุปและข้อเสนอแนะที่ได้จากผลการทดลองทั้งหมด มีดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

1) สามารถเตรียมชิ้นงานแบเรียมไททาเนต/อพิออกซีเรซินนาโนคอมโพสิตที่มีสัดส่วนปริมาตร (volume fraction) ของแบเรียมไททาเนตเป็น 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 โดยใช้วิธีการหล่อแบบดั้งเดิม ภายใต้การบ่ม (curing) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และสามารถเตรียมเม็ดเซรามิกแบเรียมไททาเนตโดยใช้การอัดด้วยแรงในทิศทางเดียว (uniaxial press) ร่วมกับการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อเผากำจัดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่เติมลงไปในช่วงการขึ้นรูปอัดสาร และที่ 1,300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิ (heating-cooling rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อเผาผนึกอนุภาค

2) ชิ้นงานแบเรียมไททาเนต/อพิออกซีเรซินนาโนคอมโพสิตที่เตรียมจากแบเรียมไททาเนตที่ยังไม่ได้ผ่านการรีฟลักซ์จะมีการรวมกลุ่ม (agglomerate) กันของอนุภาคแบเรียมไททาเนตอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจส่งผลให้มีสมบัติทางไฟฟ้าได้ไม่ดีเท่าที่ควร นอกจากนี้ยังมีรูพรุนในชิ้นงานที่เกิดจากอากาศที่อยู่ระหว่างอนุภาคแบเรียมไททาเนต ดังนั้นจึงส่งผลให้ชิ้นงานแบเรียมไททาเนต/อพิออกซีเรซินนาโนคอมโพสิตนี้มีความหนาแน่นที่ลดลงตามปริมาณของแบเรียมไททาเนตที่เพิ่มขึ้น หรือตามปริมาณอากาศที่แทรกอยู่ระหว่างอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง ซึ่งส่งผลให้มีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่สูงขึ้นด้วย โดยอยู่ในช่วง 0.0375-0.060 แต่จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงขึ้น โดยอยู่ในช่วงประมาณ 4-14 เนื่องจากแบเรียมไททาเนตเป็นสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง เมื่อยิ่งใส่ในปริมาณมากก็จะยิ่งทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยเพราะเป็นสมบัติรวมของวัสดุคอมโพสิต

3) เมื่อทำการปรับปรุงโครงสร้างของอนุภาคแบเรียมไททาเนตด้วยการนำไปรีฟลักซ์กับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 40% ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะทำให้บริเวณพื้นผิวของแบเรียมไททาเนตมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) มาเกาะ ซึ่งจะส่งผลให้พื้นผิวของ แบเรียมไททาเนตสามารถเกิดปฏิกิริยาต่างๆได้ดีขึ้น และเมื่อนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค จะพบว่า แบเรียมไททาเนตสามารถกระจายตัวในเมทริกซ์อีพอกซีเรซินได้ดีและเกิดการรวมกลุ่มกัน ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เตรียมจากแบเรียมไททาเนตที่ยังไม่ได้ผ่านการรีฟลักซ์ และส่งผลให้ชิ้นงานมีแนวโน้มของความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณแบเรียมไททาเนตที่ เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้จะพบว่าที่ความถี่ต่ำ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะ มีค่าขึ้นกับความถี่เล็กน้อยและเริ่มมีค่าที่คงที่เมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการรีฟลักซ์แล้วจะมีทั้งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่ต่ำกว่า ชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้รีฟลักซ์ นอกจากนี้พบว่าค่าความคงทนทางไดอิเล็กทริกมี แนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณแบเรียมไททาเนตที่เพิ่มขึ้นด้วย ลักษณะของวงวนฮิสเทอรีซิส ของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/อีพอกซีเรซินที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการ รีฟลักซ์จะมีขนาดของวงวนเล็กมากและมีรูปร่างที่ไม่ชัดเจน เพราะไม่สามารถทำการตรวจวัดที่ สนามไฟฟ้าที่สูงกว่า 20 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ได้ เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องรูปร่างของชิ้นงานและ ซิตความสามารถของเครื่องมือวัดที่ให้สนามไฟฟ้าแก่ชิ้นงานไม่มากเพียงพอ จึงทำให้การวัดพื้นที่ของ วงวนฮิสเทอรีซิส, ค่าโพลาริเซชันตัวเอง (spontaneous polarization; P_s), โพลาริเซชันตกค้าง (remanent polarization; P_r) สนามไฟฟ้าสลับล้าง (coercive field; E_c) และการคำนวณหาความ หนาแน่นพลังงานของแต่ละชิ้นงานไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากวงวนฮิสเทอรีซิสที่ยังไม่สมบูรณ์ แต่ถ้า ต้องการวัดเพื่อการเปรียบเทียบจะได้ผลดังที่แสดงไว้ อาจจะไม่ถูกต้องเท่าที่ควร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) สำหรับเทคนิคการเตรียมชิ้นงานด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม (conventional casting method) นั้น ในโครงงานวิจัยนี้จะเตรียมที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งอาจเป็นผลให้เกิดรูพรุนในเนื้อวัสดุและ ทำให้สมบัติต่างๆไม่ดีเท่าที่ควร ทั้งนี้จะสามารถปรับปรุงชิ้นงานให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นได้โดย การออกแบบการให้ความร้อนที่เหมาะสมแก่วัสดุขณะที่ยังไม่แข็งตัว เพื่อให้อากาศที่อยู่ภายในเกิดการ ขยายตัวและเคลื่อนที่ออกทางผิวหน้าของวัสดุ ทำให้มีอากาศที่หลงเหลืออยู่ในวัสดุน้อยลงและเพื่อ หลีกเลี่ยงผลของรูพรุนในชิ้นงานที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ

2) การวัดค่าโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปแก่ชิ้นงานเพื่อศึกษาลักษณะของวงวน โพลาริเซชันฮิสเทอรีซิส (polarization hysteresis loop) ของชิ้นงานที่ทำจากแบเรียมไททาเนตที่ ผ่านการรีฟลักซ์นั้น ไม่สามารถวัดที่สนามไฟฟ้าที่มากเพียงพอได้ ดังนั้นจึงอาจต้องทำการเปลี่ยนแปลง ขนาดของชิ้นงานให้เหมาะสมกับเครื่องมือวัด เพื่อให้สามารถตรวจวัดได้อย่างถูกต้องมากที่สุดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Azza A. Ward, "Dielectric materials for advance applications," National Research Center (2016).
- [2] ยุทธพงศ์ ศรีธธา, "ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของสารบิสเมทเพอร์ไรท์-แบเรียมไทเทเนต," สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (2013).
- [3] Chao, Sheng, "Ceramic dielectrics for high energy density capacity application," Doctoral Dissertations. 2066. (2010).
- [4] C. J. Kaiser, "The Capacitor Handbook," CJ Publishing (1995).
- [5] "High Energy Capacitors Overview," General Atomics Energy Products Engineering Bulletin (2002).
- [6] C. A. Randall, et. al., "High Temperature and High Energy Density Dielectric Materials," Pulsed Power Conference, PPC '09. IEEE 346-351 (2009).
- [7] R. Kerrigan, "New Polymer Film Type Capacitor for High Frequency High Voltage Applications," Electronic Components and Technology Conference, Proceedings 44th, 1-4 248-254 (1994).
- [8] B. Chu, et. al., "A Dielectric Polymer with High Electric Energy Density and Fast Discharge Speed," Science, 313 334-336 (2006).
- [9] G. R. Love, "Energy Storage in Ceramic Dielectrics," J. Am. Ceram. Soc., 73 323328 (2005).
- [10] T. Hu, et. al., "Dielectric properties of BST/polymer composite," J. Eur.Ceram. Soc., 27 3997-4001 (2007).
- [11] P. Barber, et. al., "Polymer Composite and Nanocomposite Dielectric Materials for Pulse Power Energy Storage," Materials 2 1697-1733 (2009).
- [12] J. Li, et. al., "Nanocomposites of Ferroelectric Polymers with TiO₂ Nanoparticles Exhibiting Significantly Enhanced Electrical Energy Density," Advance Materials, 21, 217-221 (2009).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] J. Y. Li, L. Zhang and S. Ducharme, "Electric Energy Density of Dielectric Nanocomposites," *Appl. Phys. Lett.*, 90, 132901 (2007).
- [14] Y. Shen, et. al., "High Dielectric Performance of Polymer Composite Films Induced by a Percolating Interparticle Barrier Layer," *Advance Materials*, 19, 1418-1422 (2007).
- [15] L. An, S. A. Boggs and J. P. Calame, "Energy Storage in Polymer Films with High Dielectric Constant," *IEEE Electr. Insul. M.* 24 5-10 (2008).
- [16] P. Kim, et. al., "High Energy Density Nanocomposites Based on Surface Modified BaTiO₃ and a Ferroelectric Polymer," *AcsNano*. 3 2581-2592 (2009).
- [17] S. L. Jiang, Y. Yu and Y. K. Zeng, "Novel Ag-BaTiO₃/PVDF three-component nanocomposites with high energy density and the influence of nano-Ag on the dielectric properties," *Curr. Appl. Phys.* 9 956-959 (2009).
- [18] J. Du, B. Jones and M. Lanagan, "Preparation and Characterization of Dielectric Glass-Ceramics in Na₂O-PbO-Nb₂O₅-SiO₂ system," *Material Letters*, 59, 2821-2826 (2005).
- [19] E. P. Gorzkowski, et. al., "Glass-Ceramics of Barium Strontium Titanate for High Energy Density Capacitors," *J. Electroceramics*, 18 269-276 (2007).
- [20] N. J. Smith, et. al., "Alkali-free glass as a high energy density dielectric material," *Material Letters*, 63, 1245-1248 (2009).
- [21] M. M. Vijatovic, J. D. Bobic and B. D. Stojanovi, "History and Challenges of Barium Titanate: Part II," *Science of Sintering. Volume 40*, 155-165 (2008).
- [22] A. Safari, R. K. Panda and V. F. Janas, "Ferroelectric Ceramics : Processing, Properties and Applications". *Key Engineering Material. Volume 122-124*, 35-70 (1996).
- [23] G. H. Haertling, "Ferroelectric ceramics : History and technology," *Journal of American Ceramic Society. Volume 82*, 797-818 (1999).
- [24] M.G. Bader, "The Composites Market," *Comprehensive Composite Materials*, A Kelly and C. Zweben, Eds. Amsterdam : Elsevier, 1-13 (2000).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] Manfred Kahn AVX Corporation Myrtle Beach, “MULTILAYER CERAMIC CAPACITORS– MATERIALS AND MANUFACTURE,” SC (2010)
- [26] R.A. Bolton, “Temperature Compensating Ceramic Capacitors,” Ph.D. Thesis, University of Illinois (1968).
- [27] Barium Titanate Based Ceramic Materials for Dielectric use,” Int. J. High Technology Ceramics 3, 91-111 (1987).
- [28] Thurnauer H., John, B and Watchman, Jr. ed., “Barium Titanate. In Ceramic Innovation in the 20th Century,” The American Ceramic Society, USA, 149-151 (1999).
- [29] Hsing-I Hsiang, “Effects of Particle Size of BaTiO₃ powder on the Dielectric Properties of BaTiO₃/Polyvinylidene Fluoride Composites,” Journal of Materials Science 36, 3809– 3815 (2001).
- [30] Zhong-Feng Zhang, et. al., “Preparation and Dielectric Properties of BaTiO₃/Epoxy Nanocomposites for Embedded Capacitor Application,” Composites Science and Technology 97, 100-105 (2014).
- [31] D.W. Richerson, “Slip casting,” Modern Ceramic Engineering, 462 (1992)
- [32] M. Jafaarnia, R. M. Punekar, “Design Course Ceramics An Exploration of Form through Ceramics,” IIT Guwahati (2002).
- [33] Yoon-Jeong Seo, et. al., “Adaptability of zirconia core fabricated by cold isostatic pressing,” The Korean Academy of Prosthodontics, 48(2), 143-150 (2010).
- [34] German R.M., “Powder Metallurgy Science”, 2nd edition, MPIF, New Jersey, 1994.
- [35] Zäh, et. al., “Processability of an amorphous metal alloy powder by electron beam melting,” Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien, München: Hanse (2006)
- [36] Corey, “Sintering,” page 11 [Online].
Available : <http://slideplayer.com/slide/10453626/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [37] D. Hull, T.W. Clyne, "An introduction to composite materials," Cambridge University Press, Cambridge (1996).
- [38] A. Beukers, et. al., "Polymer Matrix Composites : Application," Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Eds. Amsterdam: Elsevier, 7384-7388 (2001).
- [39] W. H. Hunt, et. al., "Metal Matrix Composites: Applications," Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Eds. Amsterdam: Elsevier, 5442-5447 (2001).
- [40] W. H. Hunt, et. al., "Metal Matrix Composites," Comprehensive Composite Materials, Eds. Amsterdam: Elsevier, 57-66 (2000).
- [41] K. M. Prewo, et. al., "Ceramic Matrix Composites: Application," Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Eds. Amsterdam: Elsevier, 1056-1060 (2001).
- [42] A. Kelly, A. Mortensen, "Composite Materials: Overview", Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Eds. Amsterdam : Elsevier, 1361-1371 (2001).
- [43] "เทคนิคการรีฟลักซ์" [Online].
Available : <http://elife-news.blogspot.com/2017/12/blog-post.html>
- [44] James W. Zubrick, "Reflux (Laboratory Manual)," [Online].
Available : <http://what-when-how.com/organic-chemistry-laboratory-survival/manual/reflux-laboratory-manual/>
- [45] S. Komarneni, J.C. Parker, G.J. Thomas, "Nanophase and Nanocomposite Materials," Pittsburgh, PA, Materials Research Society (1993).
- [46] Shinn-Jen Chang, et. al., "An Efficient Approach to Derive Hydroxyl Groups on the Surface of Barium Titanate Nanoparticles to Improve its Chemical Modification Ability," J. Mol. Catal. A: Chem, 228, 47 (2005).
- [47] Y. Shen, P. Wu, "Physical Chemistry," A 107, 4224 (2003).
- [48] A. Hiroki, J.A. LaVerne, "Physical Chemistry," B 109, 3364 (2005).

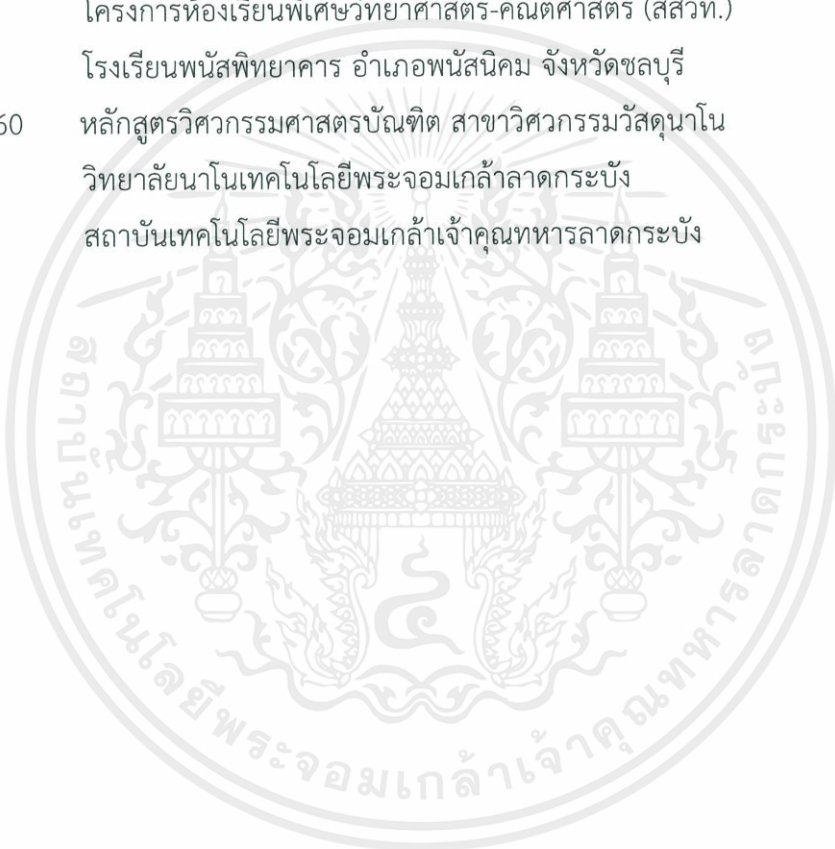
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [49] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์, “การสังเคราะห์เทอร์โมเซต”, คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 129-134 (2009).
- [50] G.Odian, “Principle of Polymerization, 3rd edition,” John Wiley & Sons, New York, (1991).
- [51] “Making Epoxy Monomers and Polymers”, Polymer Science Learning Center [Online]. Available : <http://www.pslc.ws/macrog/eposyn.htm>
- [52] “แนะนำกล้องจุลทรรศน์”, จดหมายข่าวศูนย์เครื่องมือวิจัย, ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 ประจำเดือน กันยายน, มหาวิทยาลัยขอนแก่น (2014).
- [53] T. Tanaka, et. al., “Proposal of a Multi-core Model for Polymer Nanocomposite Dielectrics,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 12, 4 (2005).



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวสุวิภัทร คงสบาย
วันเกิด	31 มีนาคม 2539
ภูมิลำเนา	จังหวัดสมุทรปราการ
ที่อยู่ปัจจุบัน	31/71 หมู่ 2 ตำบลหนองกะขะ อำเภอพานทอง จังหวัดชลบุรี 20160
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2556	แผนการเรียนวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ โครงการห้องเรียนพิเศษวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ (สสวท.) โรงเรียนพนัสพิทยาคาร อำเภอพนสนิมคม จังหวัดชลบุรี
พ.ศ. 2560	หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้