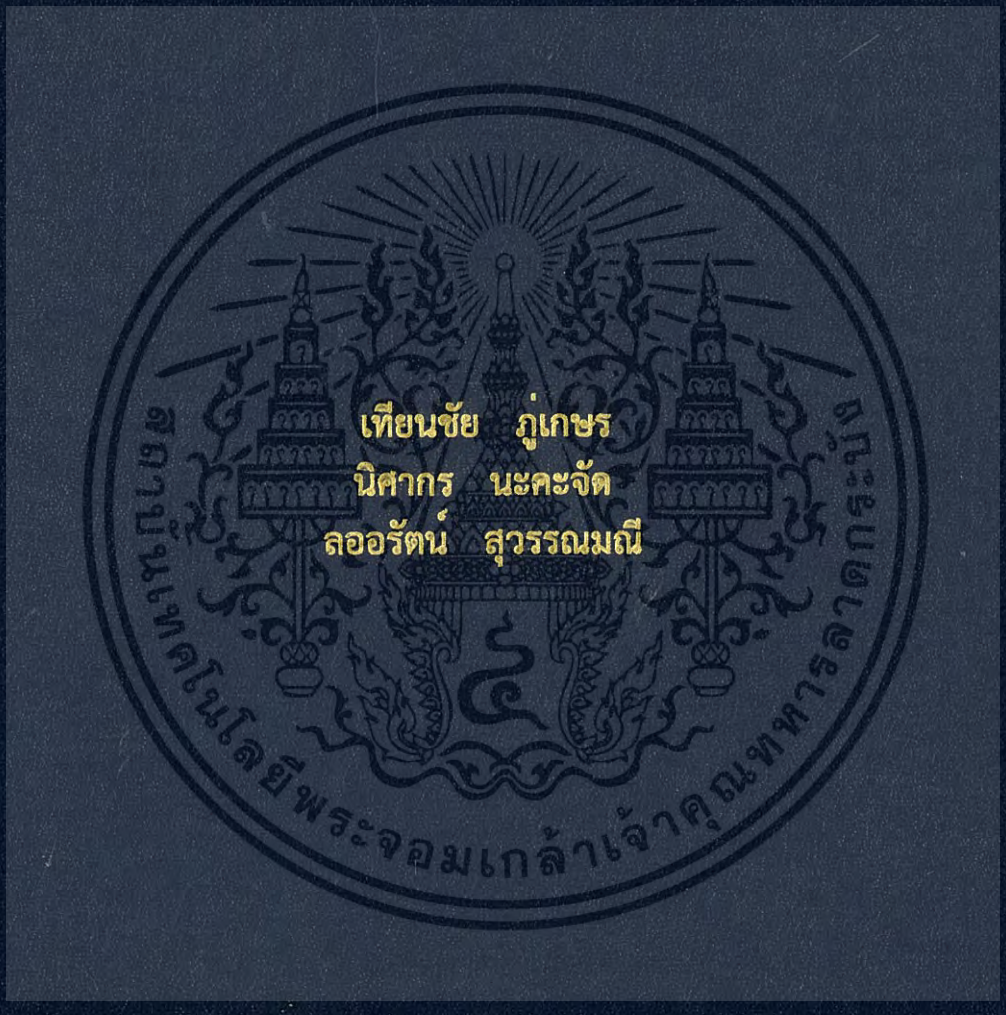
วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่ยืดหยุ่นได้สำหรับการกักเก็บพลังงานขนาดเล็ก

FLEXIBLE NANOCOMPOSITES PIEZOELECTRIC NANOGENERATOR FOR ENERGY HARVESTING



เทียนชัย ภู่เกษร
นิศากร นะคะจัด
ลออรัตน์ สุวรรณมณี

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่ยืดหยุ่นได้สำหรับการกักเก็บพลังงานขนาดเล็ก

FLEXIBLE NANOCOMPOSITES PIEZOELECTRIC NANOGENERATOR FOR ENERGY HARVESTING

T149293

เทียนชัย ภู่เกษร
นิศากร นะคะจัด
ลออรัตน์ สุวรรณมณี

ว.ป.ม.
ท ว ๓๑๑
๒๐๖๑
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....149293
วัน,เดือน,ปี.....30 สค. 2561
b.....
i.....

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FLEXIBLE NANOCOMPOSITES PIEZOELECTRIC NANOGENERATOR FOR ENERGY HARVESTING

TIANCHAI POOKASON
NISAKON NAKAJAD
LAORAT SUWANMANEE

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่ยืดหยุ่นได้สำหรับการกักเก็บพลังงานขนาดเล็ก
Flexible Nanocomposites Piezoelectric Nanogenerator for Energy Harvesting

ชื่อนักศึกษา นายเทียนชัย ภู่เกษร รหัสนักศึกษา 56050498
น.ส.นิศากร นะคะจัด รหัสนักศึกษา 56050521
น.ส.ลออรัตน์ สุวรรณมณี รหัสนักศึกษา 56050584

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. นราธิป วิทยากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ปานไพลิน สีหาราช ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ทศพล เมลืองนนท์ กรรมการ	
รศ.ดร. นราธิป วิทยากร กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่ยืดหยุ่นได้สำหรับการกักเก็บพลังงานขนาดเล็ก
ชื่อนักศึกษา นายเทียนชัย ภู่เกษร รหัสนักศึกษา 56050498
น.ส.นิศากร นะคะจัด รหัสนักศึกษา 56050521
น.ส.ลออรัตน์ สุวรรณมณี รหัสนักศึกษา 56050584
ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
คณะ วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. นราธิป วิทยากร

บทคัดย่อ

ในโครงงานพิเศษนี้ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มีความยืดหยุ่นสำหรับการกักเก็บพลังงานขนาดเล็ก ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ต่างกันของแบเรียมไททาเนตที่ส่งผลต่อการกระจายตัวและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสม โดยในงานวิจัยนี้ได้เตรียมวัสดุผสมที่มีการเชื่อมต่อของวัฏภาคในรูปแบบ 0 – 3 ซึ่งมีวัฏภาคกระจายตัวเป็น อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต และแบเรียมไททาเนตคอร์เชลล์ และมีพอลิไดเมทิลไซลอกเซนเป็นวัฏภาคเนื้อหลัก โดยทำการเจือท่อนาโนคาร์บอนและปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัวเพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุผสม จากนั้นทำการตรวจวิเคราะห์วัสดุผสม โดยนำไปตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตมีการกระจายตัวที่ดีในวัฏภาคเนื้อหลักมากกว่าวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต นอกจากนี้วัสดุผสมที่ใช้แบเรียมไททาเนตคอร์เชลล์ ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ขึ้นกับความถี่ที่ค่อนข้างสูงและคงที่และยังเสถียรต่ออุณหภูมิในช่วง 20-80 °C นอกจากนี้มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ต่ำ ซึ่งเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเก็บประจุเซรามิกได้ อย่างไรก็ตามวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตให้ค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกสูงกว่าวัสดุผสมที่ใช้แบเรียมไททาเนตในรูปแบบอื่นๆ ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้งานในด้านกักเก็บพลังงานที่ดี

คำสำคัญ: ท่อนาโนคาร์บอน แบเรียมไททาเนต พอลิไดเมทิลไซลอกเซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Flexible Nanocomposites Piezoelectric Nanogenerator for Energy Harvesting		
Students	Mr. Tianchai	Pookason	Student ID 56050498
	Miss. Nisakon	Nakajad	Student ID 56050521
	Miss. Laorat	Suwanmanee	Student ID 56050584
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2016		
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Naratip Vittayakorn		

Abstract

This research focuses on the preparation and electrical properties of flexible piezoelectric nanocomposite for energy harvesting applications. The effect of various BT shape on the particles distribution and electrical properties of the composite is considered in this work. Spherical BT nanopowder, BT nanorod, and core-shell BT are used as a dispersed phase and PDMS act as a matrix phase for 0-3 composite fabrication. The distribution of dispersed phase in the 0-3 composite was improved by modified carbon nanotube (CNT) and a surface treatment. The fabricated composite shows stretchable and flexible under the applied the mechanical force. SEM image demonstrates the poor particles distribution in the matrix phase of the spherical BT composite, while the BT-rod composite exhibits well distributed of the particles. Moreover, core-shell BT composite shows frequency independent with the permittivity and stable well with the temperature between 20-80 °C. Moreover, high relative permittivity with low loss tangent is observed in core-shell BT composite. However, the high output voltage was founded in the BT-rod composite. This work suggested that coreshell BT composite may be suitable for ceramics capacitor whereas the BT-nanorod composite can apply for energy harvesting applications.

Keywords: Barium titanate, Carbon nanotubes, Poly (dimethyl siloxsane)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆ ท่าน ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.นราธิป วิทยากร ที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดและให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงงานพิเศษและขอขอบพระคุณ กรรมการสอบโครงงานพิเศษ คือ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช และ ผศ.ดร.ทศพล เมลืองนนท์ ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงงานพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงงานพิเศษ และช่วยกรุณาแก้ไขโครงงานพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบรูณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ทศพล เมลืองนนท์ ที่กรุณาเป็นกรรมการโครงงานพิเศษ และช่วยกรุณาแก้ไขโครงงานพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบรูณ์ยิ่งขึ้น

ของขอบคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ประสิทธิประศาสน์วิชาความรู้ และให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี เจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาเคมี รวมทั้งเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ และวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในเรื่องอุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนเครื่องมือต่างๆ ในการทำโครงงานพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ น.ส.ชนิศา นวนิล และพี่ๆ หน่วยวิจัยวัสดุขั้นสูงที่ช่วยให้คำแนะนำ ปรึกษา และความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย ทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และขอบคุณน้องๆสำหรับความห่วงใย ความปรารถนาดี และทุกๆ ความช่วยเหลือในขณะทำงานวิจัย

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการทำโครงงานพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ และบุคคลอื่นๆที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงงานขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

เทียนชัย ภู่เกษร
นิศากร นะคะจัด
ลออรัตน์ สุวรรณมณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ฉ
สารบัญรูป ..... ช
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญ 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
บทที่ 2 เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric material) 3
2.1.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกทางตรง (Direct piezoelectric) 5
2.1.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกทางอ้อม (Converse piezoelectric) 5
2.2 วัสดุเฟอโรอิเล็กทริก (Ferroelectric material) 7
2.2.1 การเกิดโพลาไรเซชันได้เอง (Spontaneous polarization) 8
2.2.2 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส
(Curie temperature & phase transition) 9
2.3 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) 10
2.3.1 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity, ε_r) 11
2.3.2 ค่าความทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) 13
2.3.3 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) 13
2.4 โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ (Perovskite structure) 13
2.5 แบเรียมไททาเนต (Barium titanate, $BaTiO_3$) 14
2.6 พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) 17
2.7 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube, CNT) 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.8 คอมโพสิต (composite).....25
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....49
3.1 สารเคมี.....49
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมแบเรียมไททาเนตชนิดคอร์เชล(BT-coreshell)49
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT-nanorod).....49
3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตของแบเรียมไททาเนต กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT-PDMS) และการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT).....50
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....50
3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมแบเรียมไททาเนต ชนิดคอร์เชลล์ (BT- coreshell).....50
3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตของแบเรียมไททาเนต กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT-PDMS) และการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT).....51
3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....51
3.3 ขั้นตอนการเตรียมคอมโพสิตของแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT-PDMS) และการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT).....52
3.3.1 การปรับปรุงพื้นผิวแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) ด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2).....52
3.3.2 การปรับปรุงพื้นผิวของแท่งนาโนคาร์บอน (CNT) ด้วยสารละลายกรดไนตริก (HNO_3).....52
3.3.3 การเตรียมแบเรียมไททาเนตชนิดคอร์เชลล์ (BT-coreshell).....53
3.3.4 การเตรียมแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต.....53
3.3.5 การเตรียมคอมโพสิตแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT-PDMS) และการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT).....54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์ 55
3.4.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction Analysis; XRD)55
3.4.2 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR).....57
3.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM).....58
3.4.4 เครื่องตรวจวัดสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties).....60
3.4.5 เครื่องตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties).....61
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล 64
4.1 การศึกษาการเตรียมวัฏภาคกระจายตัวของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต (barium titanate nanoparticle; BT) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube; CNT) และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polymetylsiloxane; PDMS).....64
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของวัฏภาคกระจายตัวแบเรียมไททาเนต (BT) 64
4.1.1.1 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโน แบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 64
4.1.1.2 ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนตด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM).....66
4.1.1.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนต (BT coreshell) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)..68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.1.4 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) ด้วยเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) 73

4.1.1.5 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) 77

4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของวัฏภาคกระจายตัวท่อนาโนคาร์บอน (CNT) 79

4.1.2.1 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 79

4.1.2.2 ผลการตรวจสอบเฟสบริสุทธิ์และโครงสร้างผลึกของท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ด้วยเทคนิครามาน (Raman spectroscopy) 80

4.1.2.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) 81

4.2 การศึกษาการเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต (barium titanate nanoparticle; BT) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube; CNT) และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polymetylsiloxane; PDMS) 82

4.2.1 ผลการศึกษาเอกลักษณ์เฉพาะของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต (barium titanate nanoparticle; BT) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube; CNT) และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polymetylsiloxane; PDMS) 83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1.1 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมแบเรียมไททา-เนต (barium titanate nanoparticle; BT) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube; CNT) และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polymetylsiloxane; PDMS) 83
4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต (barium titanate nanoparticle; BT) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube; CNT) และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polymetylsiloxane; PDMS) 89
4.2.2.1 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต (barium titanate nanoparticle; BT) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube; CNT) และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polymetylsiloxane; PDMS) 89
4.2.2.2 ผลการตรวจสอบค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกของของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT – CNT - PDMS) ที่มีรูปร่างของแบเรียมไททาเนต (BT) ที่แตกต่างกัน 95
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 98
5.1 สรุปผลการทดลอง 98
5.2 ข้อเสนอแนะ 100
เอกสารอ้างอิง 101
ภาคผนวก 106
ภาคผนวก ก 107
ภาคผนวก ข 109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 แสดงการประยุกต์ใช้งานของวัสดุซิลิโคนในทางการแพทย์.....20
2.2 แสดงการเปรียบเทียบการส่งออกศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นของกระแส กับชนิดของตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกที่โหมดการดัด 33
4.1 แสดงผลของตัวแปร (parameters) ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงลึกด้วยวิธีริทเวล (Rietveld analysis method).....72
4.2 แสดงผลการตรวจวัดค่าการส่งออกไฟฟ้าของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต ท่อนาโนคาร์บอน และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT – CNT - PDMS) ที่มีรูปร่างของแบเรียมไททาเนต (BT) ที่แตกต่างกัน.....95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงการจำแนกกลุ่มของผลึกโดยการใช้พื้นฐานของสมมาตรผลึก 4

2.2 รูปแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct effect) 5

2.3 รูปแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (Reverse effect) 5

2.4 รูปแสดงทิศทางของโพลาไรเซชันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าและความเค้น
แก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริก 7

2.5 รูปแสดงผลึกของโครงสร้างแบเรียมไททาเนต (โครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์) 9

2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพะยอมสัมพัทธ์ (ε_r) กับอุณหภูมิของ
ผลึกแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) 10

2.7 แสดงโพลาไรเซชันก่อนการให้สนามไฟฟ้าและเมื่อให้สนามไฟฟ้าเกิดโพลาไรเซชัน 11

2.8 แสดงการวัดค่าไดอิเล็กทริกสุญญากาศระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุ 12

2.9 (ก) แสดงโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ (ข) แสดงโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ลักษณะทรงแปดหน้า
(Octahedral) BO^{6-} มีการเชื่อมโยงเป็นสามมิติ 14

2.10 รูปแสดงโครงสร้างของแบเรียมไททาเนต 15

2.11 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) 16

2.12 รูปแสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีของ (Polydimethylsiloxane, PDMS) 17

2.13 ความต้านทานของตัวนำยืดหยุ่น AgNW / PDMS 18

2.14 (ก) โครงสร้างตาข่ายของแผ่นกราฟีน (ข) โครงสร้างออร์บิทัลของแผ่นกราฟีน 21

2.15 แสดงลักษณะโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน ซิกแซก อาร์มแชร์ และไครอล 21

2.16 รูปแบบการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดียว (Single-walled
nanotube; SWNT) ท่อนาโนคาร์บอนผนังคู่ (Double-walled-nanotube; DWNT)
และท่อนาโนคาร์บอนหลายผนัง (Multiple-walled nanotube; MWNT) 22

2.17 แสดงการส่งออกกระแสไฟฟ้าของตัวกำเนิด (A) PVDF (B) PVDF ที่มี CNT 23

2.18 กราฟแสดงปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนเทียบกับค่าการนำไฟฟ้า 24

2.19 ค่าการนาไฟฟ้าเทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CNT 24

2.20 แสดงการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสของวัสดุ 25

2.21 แสดงรูปแบบการเชื่อมต่อเฟสแบบต่างๆ ของวัสดุผสมที่มี 2 เฟส 26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

2.22 วัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์กับเซรามิก (ก) แบบ 0-3 (ข) แบบ1-3 27

2.23 รูปแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่มีเฟสกระจายตัวเป็นอนุภาคแบเรียมไททาเนต (BT – NP) และแบเรียมไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบคอร์เชลล์ (BT-HBP) และเฟสเนื้อหลักเป็นPVDF-TrFE-CFE 27

2.24 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่มีเฟสกระจายตัวเป็นอนุภาคแบเรียมไททาเนต (BT-NP) และวัสดุผสมที่มีเฟสกระจายตัวเป็นแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT-NW) โดยมีเฟสเนื้อหลักเป็น PVDF-HFP 28

2.25 แสดงการเกิดอันตรกิริยาของ $BaTiO_3$ ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย H_2O_2 29

2.26 แสดงค่าสภาพะยอมสัมพัทธ์เทียบกับอุณหภูมิระหว่างนาโนคอมโพสิตของ c-BT / PVDF และ h-BT / PVDF ความเข้มข้นของสารต่างกัน ที่ 100 Hz 30

2.27 แสดง (ก) ค่าสภาพะยอมสัมพัทธ์ (ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ของนาโนคอมโพสิต c-BT/PVDF และ h-BT/PVDF ที่ความเข้มข้น 30 vol% $BaTiO_3$ ที่อุณหภูมิต่างกันเทียบกับความถี่ 30

2.28 แสดงค่าการสูญสียไดอิเล็กทริก (loss tangent) ของนาโนคอมโพสิต c-BT/PVDF และ h-BT/PVDF ที่ความเข้มข้น 30 vol % $BaTiO_3$ ที่ 1 kHz 31

2.29 แสดงการพล็อต Weibull ของค่าความทนไดอิเล็กทริก (dielectric strength) สำหรับ c-BT/PVDF และนาโนคอมโพสิต h-BT/PVDF ที่ความเข้มข้นของ $BaTiO_3$ ต่างกัน 31

2.30 (a) แสดงองค์ประกอบของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต (b) แสดงภาพตัดขวางจาก FE-SEM ของนาโนคอมโพสิต BTNP (40wt%) P(VDF TrFE) หนา 6 mm (c) แสดง XRD สเปกตรัมของผลึกที่ใช้ในคอมโพสิต P(VDF-TrFE) 32

2.31 แสดงการตรวจวัดตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิต ที่ความเข้มข้น 0–40 % BTNP กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มีความเป็นผลึกสูง P(VDF- TrFE) 34

2.32 (a) Voc ที่สร้างขึ้นโดยตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิต ที่ความเข้มข้น 40 wt% BTNP ระหว่างได้รับแรงกลโดยการกดที่ความดันคงที่ 0.5 N/mm^2 (b) Voc การตรวจวัดระหว่างการให้แรงเชิงกลที่คงที่โดยการกด ความถี่ 2.7 Hz ที่ความดันต่างกัน 35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

2.33 แสดงการเก็บเกี่ยวพลังงานการตรวจวัด Voc ตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิต ที่ความเข้มข้น40 wt% BTNP โดยนำตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิต มาแปะติดกับ (a) นิ้วมือ (b) ข้อมือ (c) ข้อพับ 36
2.34 Voc ที่ส่งออกจาก 40wt% ตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิตระหว่าง การทดสอบความเสถียรโดยการดัดมากกว่า 5000 รอบ (a) ขยายสัญญาณที่ส่งออกใน รูปบริเวณที่ ไฮไลต์ (b) 37
2.35 แสดงลำดับการชาร์จแบตเตอรี่ไมโคร 37
2.36 (a) กระบวนการในการผลิตตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิต 38
2.37 (a) แสดงอุปกรณ์ตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิตสภาพปกติ การดัดงอ และปล่อยการให้แรง (b) การส่งออกของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิต 39
2.38 (ก) การจำลองรูปแบบของอุปกรณ์ตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิต โครงสร้างทั้ง 6 จุด ของ $BaTiO_3$ ฝังตัวบนพอลิเมอร์เมทริกซ์ PDMS 40
2.39 (a) แสดงโครงสร้างแบบตัดขวางของอุปกรณ์ตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิตและการคำนวณ การกระจายศักย์เพียโซอิเล็กทริก 41
2.40 (a)แผนผังของอุปกรณ์ NCG ที่ใช้อนุภาค KNLN และ NRs Cu 42
2.41 (a) ภาพถ่าย SEM ของอนุภาค KNLN (b) สเปคตรัมรามา (c) ภาพ HRTEM ของอนุภาค KNLN 43
2.42 (a) ภาพการสร้างศักย์ไฟฟ้าส่งออกจากอุปกรณ์ที่ถูกสร้างขึ้น 44
2.43 (a) กราฟแสดงศักย์ไฟฟ้าเพียโซอิเล็กตริกกับปริมาณแบเรียมไททาเนต ที่ขนาดอนุภาค ต่างกัน (b) กราฟแสดงช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคูรีด้วยเทคนิค DSC (c) การวิเคราะห์ อนุภาคแบเรียมไททาเนตขนาด 700 300 100 และ 50 นาโนเมตร ด้วยเทคนิค XRD 46
2.44 (a) แสดงโครงสร้างของ $BaTiO_3$ ทีผสมกับเส้นใยพอลิไวนิลคลอไรด์บนพื้นฐาน ตัวกำเนิดนาโน (SFBNG) 47
3.1 แผนผังแสดงอุณหภูมิ ระยะเวลาและอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิในการสังเคราะห์ 54
3.2 แบบจำลองการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ 55
3.3 แสดงส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.4 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 59

3.5 แสดงลำดับการทำงานของเครื่องวัดประจุไฟฟ้า 61

3.6 แสดงส่วนประกอบสำคัญของแหล่งกำเนิดแรงกด 62

3.7 แสดงอุปกรณ์และการวางวัสดุทดสอบ 62

3.8 รูปของ Oscilloscope ที่ใช้ในการทดลอง 63

3.13 แสดงกราฟที่ได้โดยแกน x เป็นเวลาที่ผ่านไป แกน y คือความต่างศักย์ที่วัดได้ 63

4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ (ก) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า (ข) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (ค) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (ง - ฉ) อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตที่อัตราส่วนแบเรียมไททาเนตต่อแผ่นนาโนไททาเนต 50:1 1:1 และ 1:50 ตามลำดับ 65

4.2 ภาพถ่ายสัณฐานวิทยา (TEM) ของอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) ที่มีอัตราส่วนแบเรียมไททาเนตต่อแผ่นนาโนไททาเนตเป็น (ก) 50:1 (ข) 1:1 และ (ค) 1:50 โดยน้ำหนัก(ง) ลักษณะทางสัณฐานวิทยา TEM ของแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) 67

4.3 แบบจำลองแสดงขั้นตอนการเกิดอนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนต 68

4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) 69

4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หลังผ่านการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีริทเวล (Rietveld analysis method) ของ (ก) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) (ข) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) (ค) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และ (ง) อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) 71

4.6 แสดงอัตราส่วนระหว่างค่าแลตทิชพารามิเตอร์ c / a ของวัฏภาคกระจายตัวแบเรียม - ไททาเนตที่แตกต่างกัน 73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.7 รูปแบบรามานสเปกตรัม (Raman spectrum) ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนต (BT coreshell) 76
4.8 อินฟาเรดสเปกตัมของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) 78
4.9 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ (ก) ท่อนาโนคาร์บอน (ข) ท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านปรับปรุงพื้นผิว 79
4.10 รามานสเปกตรัม (Raman spectrum) ของท่อนาโนคาร์บอน (CNT) และท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($CNT_{treated}$) 80
4.11 อินฟาเรดสเปกตรัมของท่อนาโนคาร์บอน (CNT) และท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($CNT_{treated}$) 82
4.12 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุผสมที่ (ก) สภาวะปกติ และเมื่อให้แรงเชิงกลด้วยการ (ข) ดึง (ค) บิด และ (ง) โค้งงอ 83
4.13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมของ (ก-ข) วัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT-CNT-PDMS) และ (ค-ง) วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว(BTtreated-CNTtreated-PDMS) (จ) วัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว (BTnanorod – CNT - PDMS) (ฉ) วัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภา8กระจายตัว (BTcore-shell - CNT - PDMS) 85
4.14 ภาพถ่ายแสดงธาตุองค์ประกอบ EDX ของวัสดุผสมอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมทิลไซลอกเซน ($BT_{core-shell}$ – CNT - PDMS) 87
4.15 แบบจำลองการเกิดพันธะระหว่างวัฏภาคแบเรียมไททาเนตกับท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (BT_{treat}-CNT_{treat}) 88
4.16 แบบจำลองการเกิดพันธะระหว่างวัฏภาคในวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$-$CNT_{treated}$-PDMS) 88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.17 รูปแสดงการการโซโนเคมีกับ PDADMAC ของอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่มีการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{teeated}$) และอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่ไม่มีการปรุงปรุงพื้นผิว (BT) 89

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT – CNT – PDMS) วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{treated}$-$CNT_{treated}$-PDMS) วัสดุผสมวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{nanorod}$-$CNT_{treated}$-PDMS) และวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{coreshell}$-$CNT_{treated}$-PDMS).....90

4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT – CNT – PDMS) วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{treated}$-$CNT_{treated}$-PDMS) วัสดุผสมวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียม-ไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{nanorod}$-$CNT_{treated}$-PDMS) และวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต เป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{coreshell}$-$CNT_{treated}$-PDMS) 91

4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT – CNT – PDMS) วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{treated}$-$CNT_{treated}$-PDMS) วัสดุผสมวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว 98

4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT – CNT – PDMS) วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{treated}$-$CNT_{treated}$-PDMS) วัสดุผสมวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{nanorod}$-$CNT_{treated}$-PDMS) และวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต เป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{coreshell}$-$CNT_{treated}$ -PDMS) ตัว ($BT_{nanorod}$-$CNT_{treated}$-PDMS)และวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียม-ไททาเนต เป็นวัฏภาคกระจายตัว($BT_{coreshell}$-$CNT_{treated}$-PDMS).....94

4.22 ค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT – CNT - PDMS) ที่มีรูปร่างของแบเรียมไททาเนตเป็น (ก) อนุภาคนาโน (BT particle) (ข) แท่งนาโน (BT nanorod) (ค) อนุภาคคอร์เชลล์ (BT coreshell).....96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันมนุษย์มีปัญหาด้านพลังงานเนื่องจากพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่นำมาใช้ใกล้หมดไปจากโลกซึ่งพลังงานที่ได้เป็นพลังงานที่ไม่สะอาดและยังส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อธรรมชาติ ดังนั้นการหาพลังงานทดแทนเพื่อนำมาใช้เป็นสิ่งสำคัญในอนาคต ด้วยเหตุนี้พลังงานเชิงกลจึงเป็นแหล่งพลังงานที่น่าสนใจ พลังงานงานเชิงกลที่อยู่รอบตัวเราที่เกิดขึ้นตลอดเวลา เช่น พลังงานจากเชิงกลจากธรรมชาติ เช่น คลื่น ลม และน้ำตก ตลอดจนพลังงานจากการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ เช่น การเคลื่อนไหวร่างกายของมนุษย์ ซึ่งพลังงานเหล่านี้เป็นพลังงานที่สะอาด สามารถที่จะนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ โดยอุปกรณ์ที่สามารถสร้างพลังงานได้ด้วยตัวเองจากการได้รับแรงกลต่างๆ และสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้ จึงเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจ ซึ่งอุปกรณ์นี้เรียกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งวัสดุนี้เมื่อได้รับพลังงานกลจะสามารถแปลงมาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ จากการเสียรูปของวัสดุในโครงสร้างผลึก และในทางตรงกันข้าม เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับสนามไฟฟ้าก็สามารถเกิดการสั่นของโครงสร้างผลึกทำให้วัสดุยืดหดตัวในระดับนาโนเมตรได้ โดยในปัจจุบันนักวัสดุศาสตร์ได้มีการศึกษาค้นคว้าวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกอย่างกว้างขวาง โดยมีการประยุกต์ใช้นำสมบัติเด่นของเพียโซอิเล็กทริกมาทำเป็น อุปกรณ์ต่างๆ เช่น ตัวตรวจจับ (sensor) ตัวขับเร้า (actuator) และทรานสดิวเซอร์ (transducer) ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะมีสารเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectrics) เป็นองค์ประกอบหลัก เช่น สารในกลุ่มของเลดเซอร์โคเนต (PZ) และแบเรียมไททาเนต (BT) เนื่องจากสารกลุ่มนี้มีสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่น [1]

แต่เนื่องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีความเปราะ แตกหักง่าย ความยืดหยุ่นต่ำ จึงเป็นข้อจำกัดด้านการเก็บพลังงานและการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาใช้งานในระยะยาว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีแบเรียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อปรับปรุงให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้นสามารถบิดงอได้และสามารถรับแรงเชิงกลได้หลากหลาย โดยนำวัสดุเพียโซอิเล็ก-ทริกมาทำเป็นวัสดุผสมกับพอลิเมอร์ เช่น พอลิไดเมทิลไซลอกเซน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความยืดหยุ่น แต่ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานเชิงกลเป็นพลังงานไฟฟ้าส่งออกต่ำ [2] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำวัสดุผสมของอนุภาคแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน โดยแบเรียมไททาเนตที่มีลักษณะสัณฐานวิทยาที่ต่างกัน ได้แก่ อนุภาคนาโน คอร์เชลล์นาโน และแท่งนาโน และทำการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุผสมระหว่างอนุภาคแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอก-เซนที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยท่อนาโนคาร์บอน

1.2.2 เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ด้วยการปรับปรุงพื้นผิวแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลไซ-ลอกเซนที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยท่อนาโนคาร์บอน

1.2.3 เพื่อศึกษาการเตรียมลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแบเรียมไททาเนตที่เป็น อนุภาคนาโน (nanoparticle) แท่งนาโน (nanorod) และคอร์เชลล์ (core-shell)

1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผสม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 เตรียมอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออก-ไซด์

1.3.2 เตรียมแท่งนาโน (nanorod) แบเรียมไททาเนตด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว (Molten salt)

1.3.3 เตรียมคอร์เชลล์ (core-shell) นาโนแบเรียมไททาเนตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวกับไททาเนตนาโนชีทที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักแบเรียมไททาเนตต่อแผ่นนาโนไททาเนต 50:1 1:1 และ 1:50 ด้วยวิธีโซโนเคมี

1.3.4 เตรียมวัสดุผสมระหว่างอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่มีลักษณะเป็น อนุภาคนาโน แท่งนาโน และคอร์เชลล์ กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยท่อนาโนคาร์บอน

1.3.5 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า และวัฏภาคของวัสดุผสมที่เตรียมได้

1.3.6 ศึกษาอิทธิพลของลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแบเรียมไททาเนตที่เป็น อนุภาคนาโน แท่งนาโน และคอร์เชลล์ ที่ส่งผลต่อวัสดุผสมและสมบัติทางไฟฟ้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเตรียมวัสดุผสมระหว่างอนุภาคแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยท่อนาโนคาร์บอน

1.4.2 สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของแบเรียมไททาเนตด้วยการทำเป็นวัสดุผสมกับพอลิได-เมทิลไซลอกเซนที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยท่อนาโนคาร์บอน

1.4.3 สามารถเตรียมลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแบเรียมไททาเนตที่เป็น อนุภาคนาโน แท่งนาโน และคอร์เชลล์

1.4.4 ทราบถึงสมบัติทางไฟฟ้า และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

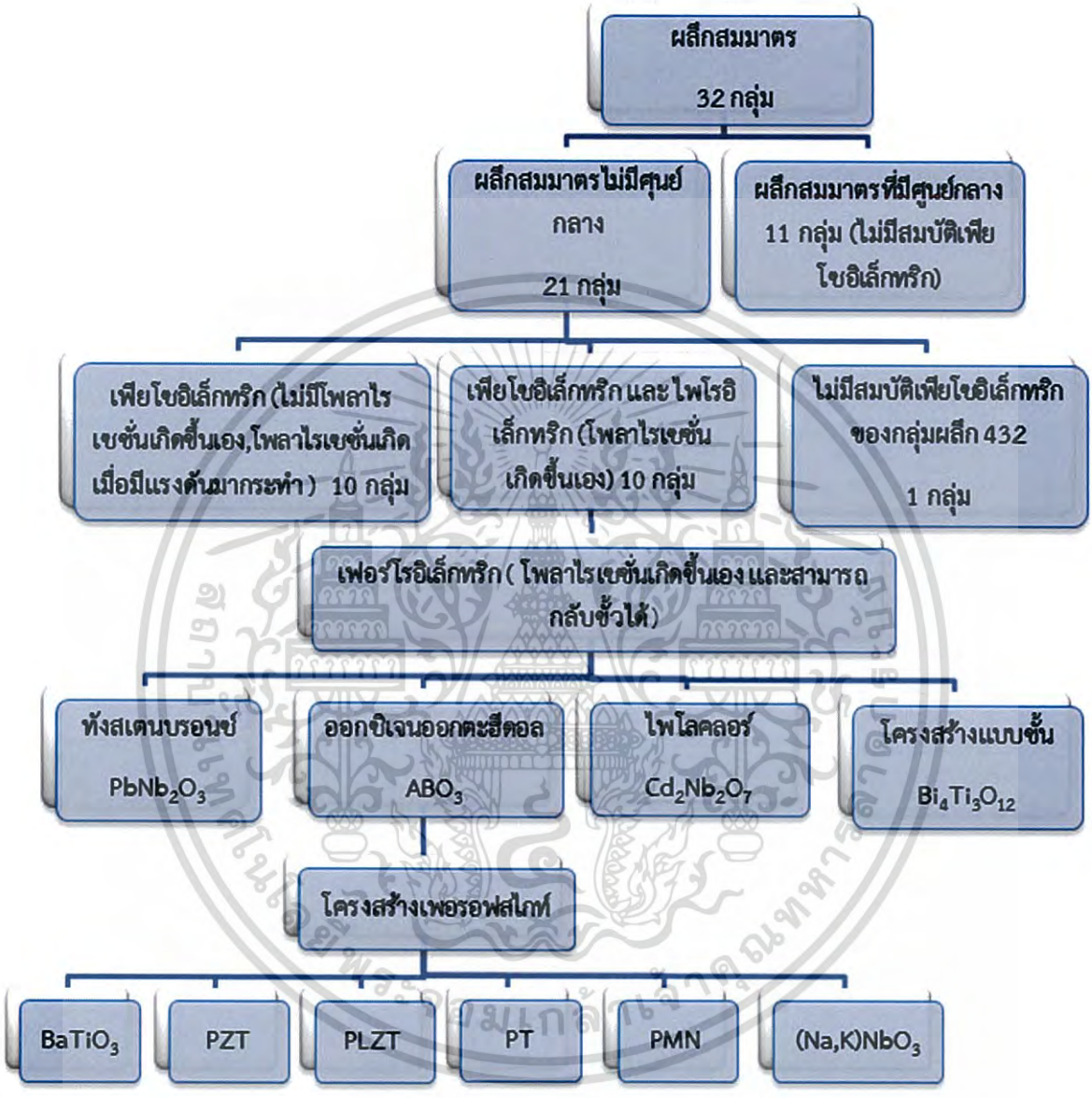
ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ.1880 โดย Pierre และ Jacques Curie โดยศึกษาอิทธิพลของแรงกดต่อประจุไฟฟ้าของผลึกในสารประกอบเชิงเดี่ยว เช่น ควอทซ์ (Quartz) ซิงค์เบลนด์ (Zinc blende) และ ทัวร์มาไลน์ (Tourmaline) และพบว่ามีสมบัติบางอย่างเกิดขึ้น คือประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวจะแปรผันโดยตรงกับแรงที่ได้รับ ซึ่งต่อมาสมบัติดังกล่าวนี้จึงถูกเรียกว่าสมบัติเพียโซอิเล็กทริก โดยชื่อ “เพียโซ” (Piezo) รากศัพท์มากภาษากรีก หมายถึง การกด ดังนั้น ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก คือ ปรากฏการที่เมื่อวัสดุได้รับแรงกดที่ให้กับผลึก ทำให้เกิดความเครียด (Strain) ภายในผลึก และภายในผลึกเกิดการจัดเรียงตัวของทิศทางของขั้ว (dipole moment) ไปในทิศทางเดียวกันเรียกว่า การโพลาไรเซชัน (Polarization) ทำให้เกิดการสร้างเป็นกระแสไฟฟ้าออกมา โดยปริมาณการ โพลาไรเซชันจะแปลผันตรงกับความเครียดที่ได้รับ [3]

สมบัติความเป็นเพียโซอิเล็กทริกจะพิจารณาจากโครงสร้างภายในของวัสดุ ซึ่งได้ได้แก่โครงสร้างอะตอมของผลึกและหลักการแพร่กระจายของอะตอมในโครงสร้างผลึก เมื่อพิจารณาผลึกเดี่ยวซึ่งเป็นผลึกที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่แน่นอนและการจัดกลุ่มของอะตอมถูกจำกัดด้วยตำแหน่งที่มีพลังงานสูงสุด ซึ่งผลึกจะเรียงตัวกันซ้ำๆ ต่อกันเกิดเป็นระบบผลึก (Lattice) หน่วยที่เล็กที่สุดที่ซ้ำๆกันของระบบผลึกเรียกว่า หน่วยเซลล์ (Unit cell) ซึ่งสมมาตรเชิงโครงสร้างของผลึกจะขึ้นกับลักษณะโครงสร้างของระบบผลึกนั้นๆ โดยสมมาตรของหน่วยเซลล์จะเป็นตัวกำหนดความเป็นไปได้ของการมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกในผลึก

นักผลึกศาสตร์ใช้องค์ประกอบของความสมมาตรเพื่อกำหนดรูปแบบสมมาตรของระบบผลึก เช่น จุดกลางของเซลล์หน่วย คือ ศูนย์กลางของสมมาตร แกนของการหมุน ระนาบสะท้อน ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ สามารถแบ่งโครงสร้างผลึกออกได้เป็น 7 กลุ่ม ซึ่งได้แก่ ไตรคลินิก (triclinic) โมโนคลินิก (monoclinic) ออร์โธรอมบิก (orthorhombic) เตตระโกนอล (tetragonal) รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) เฮกซะโกนอล (hexagonal) และคิวบิก (cubic) และแบ่งผลึกตามสมมาตรออกเป็น 32 กลุ่ม ดังรูป 2.1 โดยเป็นผลึกสมมาตรที่มีศูนย์กลางและไม่มีความเป็นขั้ว (centrosymmetry) จำนวน 11 กลุ่มซึ่งไม่มีสมบัติ เพียโซอิเล็กทริกและผลึกสมมาตรไม่มีศูนย์กลาง (noncentrosymmetry) จำนวน 21 กลุ่ม โดยผลึกกลุ่มนี้จะมีความเป็นขั้วเกิดขึ้นและมีแกนที่บ่งชี้ทิศทางของผลึกอย่างน้อยหนึ่งแกนหรือมากกว่านั้น และเมื่อนำปลายสุดของแกนมาประกบกันจะไม่สามารถซ้อนทับกันได้ โดยมี 20 กลุ่มที่สามารถแสดง ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกตามแกนบ่งชี้ทิศทางของผลึกนั้นๆ และอีก 1 กลุ่ม ไม่แสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติเพียโซอิเล็กทริกเนื่องจากเมื่อวัสดุอยู่ในความเครียดทำให้วัสดุกลายเป็นผลึกสมมาตรที่มีศูนย์กลางมีโพลาไรเซชั่นรวมหักล้างกันหมดทำให้ไม่สามารถแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก [4]



รูปที่ 2.1 แสดงการจำแนกกลุ่มของผลึกโดยการใช้พื้นฐานของสมมาตรผลึก [3]

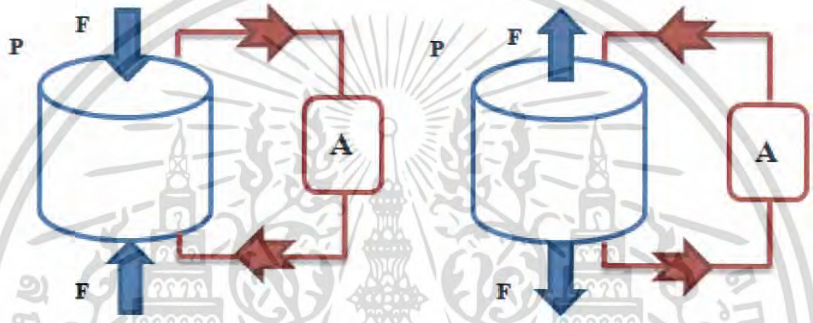
ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกจะพบได้ทั้งวัสดุที่อยู่ในธรรมชาติและวัสดุที่เกิดจากการสังเคราะห์ เช่น เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead zirconate titanate, PZT) แบเรียมไททาเนต (Barium titanate, $BaTiO_3$) ซึ่งวัสดุ 2 ชนิดนี้เป็นวัสดุที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาซึ่งมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกค่อนข้างมาก ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์ไฟฟ้ามาก และในธรรมชาติ เช่น แร่ซิลิกาควอทซ์ (Quartz) แร่ทัวร์มาไลน์ (Tourmaline) ซึ่งสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct effect) และสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (Reverse effect)

2.1.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct effect)

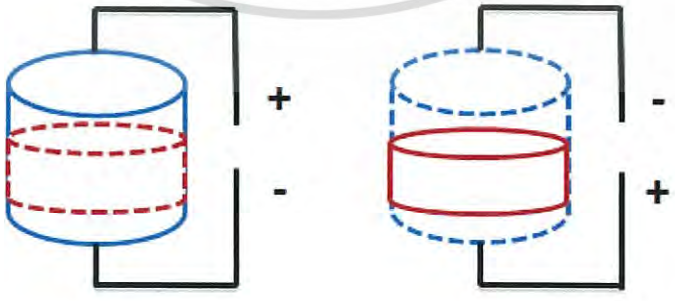
เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับความเค้น (Stress) หรือแรงเชิงกลมากระทำต่อวัสดุ เช่น การกด จะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงขั้วทางไฟฟ้าหรือเกิดโพลาไรเซชันขึ้นโดยแปรผันตรงกับความเค้นที่ได้รับทำให้วัสดุเมื่อได้รับแรงเชิงกลสามารถสร้างประจุไฟฟ้าออกมาที่ผิวหน้าได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct effect) โดยสัญลักษณ์ P แทนเวกเตอร์ของความเป็นขั้วไฟฟ้าในเนื้อสาร (Polarization) ดัดแปลงจาก [5]

2.1.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (Reverse effect)

เมื่อให้สนามไฟฟ้ากับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเกิดความเครียดขึ้นซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้ ทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเกิดการยืดหรือหดตัวได้เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รูปแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (Reverse effect) ดัดแปลงจาก [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ทั้งสองสามารถอธิบายได้จากสมการพื้นฐาน โดยพิจารณาจากสมบัติทางไฟฟ้าและความยืดหยุ่นของวัสดุ

$$D = dE + \varepsilon^T E \quad \text{(ตัวกำเนิด)} \qquad (2.1)$$

$$S = s^E T + dE \quad \text{(มอเตอร์)} \qquad (2.2)$$

เมื่อ D คือ ค่าความหนาแน่นประจุบนผิวไดอิเล็กทริก (Dielectric displacement)

E คือ สนามไฟฟ้า (Electric field) (N/C)

S คือ ความเครียด (strain)

T คือ แรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัด หรือความเค้น (Stress) (N/m^2)

d คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (C/N)

s คือ ความยืดหยุ่นของวัสดุ (ส่วนกลับของมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น)

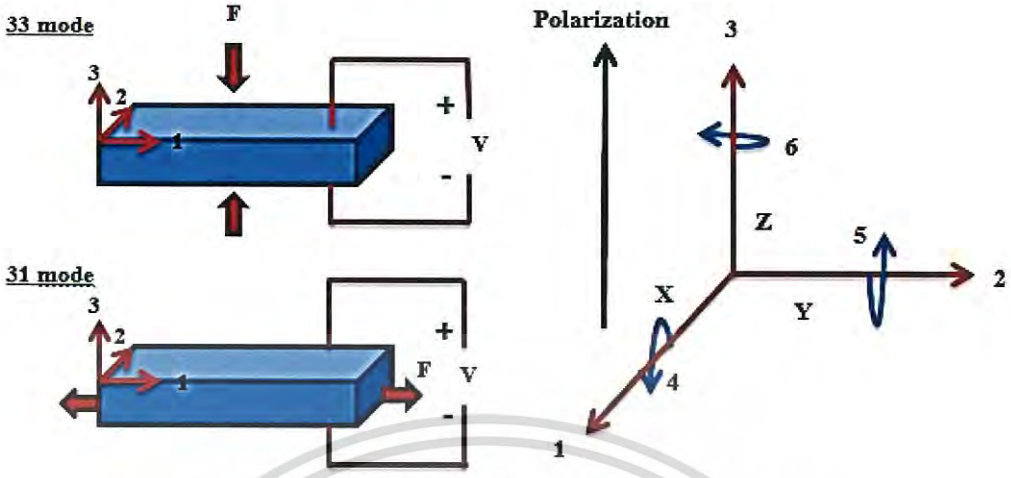
ε^T คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity)

[6, 7] โดยสัญลักษณ์ตัวยกในทั้งสองสมการแสดงถึงปริมาณที่เป็นค่าคงที่ ซึ่ง ε^T ในสมการที่ 2.1 แทนค่า สภาพยอมสัมพัทธ์ในสภาวะที่ความเค้นเป็นค่าคงที่ และ s^E ในสมการที่ 2.2 แทนสภาวะที่สนามไฟฟ้าคงที่ ซึ่งจากรูปแบบของทั้งสองสมการนี้จะแสดงถึงความแตกต่างของการจัดเรียงตัวในวัสดุซึ่งจะสัมพันธ์กับสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้นๆ นอกจากนี้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกยังมีสมบัติที่ขึ้นกับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องมีการระบุทิศทางเป็นตัวห้อยเพื่อแสดงถึงเงื่อนไขของสภาวะที่กำหนด เช่น d_{31} เป็นสัมประสิทธิ์เพียโซอิล็กทริกที่แสดงถึงความสัมพันธ์กับการเกิดโพลาไรเซชัน (ปรากฏการณ์ทางตรง) ในแนวตั้งฉากกับขั้วไฟฟ้าในทิศทาง 3 หรือในแนวตั้งฉากกับวัสดุ เมื่อมีการให้ความเค้นในทิศทาง 1 หรือด้านข้างของวัสดุ หรือ ค่า d_{33} ที่แสดงการเกิดโพลาไรเซชันในทิศทาง 3 เมื่อมีการให้ความเค้นในทิศทาง 3 ดังรูปที่ 2.4 โดยตัวอย่างของสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก คือ

$$D = d_{33}T_3 \quad \text{(ปรากฏการณ์โดยตรง)} \qquad (2.3)$$

$$S = d_{33}E_3 \quad \text{(ปรากฏการณ์โดยอ้อม)} \qquad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 รูปแสดงทิศทางของโพลาไรเซชันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าและความเค้นแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริก ดัดแปลงจาก [6, 7]

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกต้องการสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่มีค่าสูงเพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้หลากหลาย ซึ่งการนำไปใช้งานจะขึ้นกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ในกรณีเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางตรง หรือ ตัวกำเนิด (generator)ซึ่งเกิดจากการให้ความเค้นหรือแรงเชิงกลกับวัสดุแล้ววัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ที่ได้จากปรากฏการณ์นี้จะสามารถผลิตความต่างศักย์ได้ตั้งแต่มิลลิโวลต์ไปจนถึงกิโลโวลต์ เช่น ตัวจุดแก๊ส (gas igniters) ในเตาเครื่องทำความร้อน ใช้เป็นตัวรับรู้ (sensors) ใช้เป็นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy harvesting) ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator) หรือในกรณีที่เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางอ้อม หรือ มอเตอร์ (motors) คือการให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุแล้ววัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดแรงเชิงกล ซึ่งสามารถกำหนดระยะการยืดหดตัวได้ด้วยการให้สนามไฟฟ้าในทิศต่างๆ และสามารถนำมาใช้เป็นทรามสดิวเซอร์ (Transducer) อุปกรณ์อัลตราโซนิคในทางการแพทย์ (Ultrasonic) ไมโครโฟน (Microphone) และนำมาใช้เป็นตัวขับเร้า (Actuator) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในเครื่องพิมพ์ (Inkjet printer) ชัตเตอร์ในกล้องถ่ายรูป (Shutter) เป็นต้น

2.2 วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric material)

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นกลุ่มย่อยของวัสดุไพโรอิเล็กทริก สามารถเกิดโพลาไรเซชันเองได้และสามารถกลับทิศได้ (reversible) เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มดังรูป 2.1 โดยกลุ่มที่นิยมนำมาใช้งานมากที่สุด ได้แก่ กลุ่มออกซิเจนออกตะฮีดรอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Oxygen octahedral : ABO_3) ซึ่งกลุ่มนี้มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ โดยวัสดุเฟอร์โรอิเลกทริกที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบันคือ แบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) เลดไททา-เนต (PZ) เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต (PLZT) เลดแมกนีเซียมไนโอเบต (PMN) และโซเดียมโพแทสเซียมไนโอเบต (Na, K)NbO_3 ซึ่งโครงผลึกของวัสดุเหล่านี้เป็นโครงผลึกที่มีขั้วและมีสภาพเป็นเพียโซอิเล็กทริกที่ดี ถ้าให้สนามไฟฟ้าที่แรงพอสามารถทำให้ทิศของการโพลาไรเซชั่นเปลี่ยนแปลงได้ จึงกล่าวได้ว่าวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกทุกชนิดมีสภาพเป็นเพียโซอิเล็กทริก แต่ในทางกลับกันวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไม่จำเป็นต้องมีสภาพเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก [8]

2.2.1 การเกิดโพลาไรเซชันเองได้ (Spontaneous Polarization)

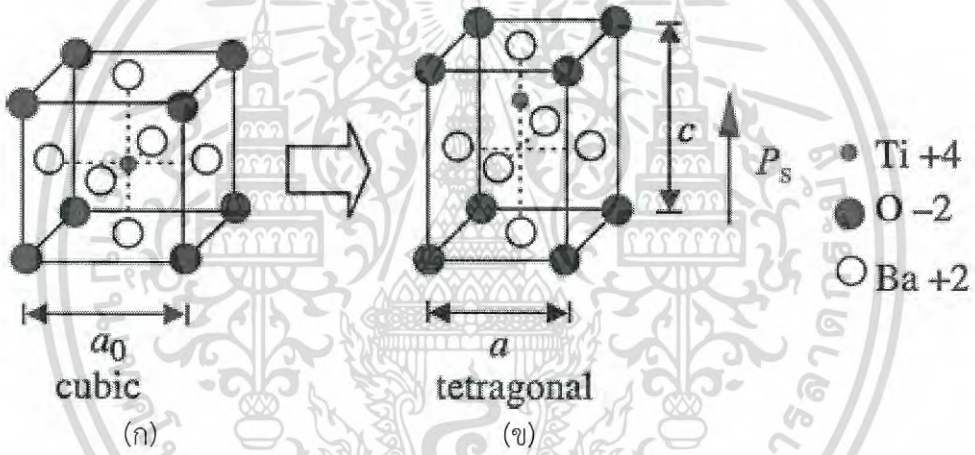
จากการแบ่งกลุ่มผลึก พบว่า มีผลึก 20 กลุ่ม ที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก และ มี 10 กลุ่มผลึกซึ่งเป็นสารไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric) ดังรูปที่ 2.1 ที่สามารถเกิดสภาพขั้วขึ้นเองได้ (Spontaneous polarization: PS) หรือ เกิดขั้วคู่ถาวรในผลึก และเรียกผลึกแบบนี้ว่าผลึกมีขั้ว (Polar crystal) ซึ่งก็คือเกิดโพลาไรเซชันได้ด้วยตัวเองโดยไม่ต้องจ่ายสนามไฟฟ้า เนื่องจากผลึกที่มีกลุ่มสมมาตรนี้จะมีแกนหมุนแกนเดียวซึ่งไม่สามารถเกิดสมมาตรแบบสะท้อนในแนวตั้งฉากกับแกนนี้ได้ เนื่องจากอะตอมที่อยู่บริเวณปลายทั้งสองด้านของแกนหมุนมีการจัดเรียงตัวไม่เหมือนกัน ทำให้เมื่อทบกันแล้วไม่สามารถทับซ้อนกันได้อย่างพอดี จึงทำให้เกิดลักษณะการหักล้างของประจุไม่หมด เกิดเป็นขั้วไฟฟ้าขึ้นมา ทำให้เกิดการโพลาไรเซชันได้เอง โดยการเกิดโพลาไรเซชั่นของสารไพโรอิเล็กทริกจะขึ้นกับอุณหภูมิช่วงหนึ่ง เรียกว่า สภาพไพโรอิเล็กทริก (pyroelectricity) ซึ่งมีสภาพแกนขั้วแบบเฉพาะภายในโครงสร้างผลึก ซึ่งค่าไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) จะแปลผันกับอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างผลึก เช่น ทัวมารีน เลดแมกนีเซียมไนโอเบส (PMN)

การเกิดโพลาไรเซชันได้เองสามารถนิยามได้จากค่าโมเมนต์ของไดโพลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร หรือค่าประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนผิวที่ตั้งฉากกับแกนของการเกิดโพลาไรเซชัน และเนื่องจากสมบัติทางไฟฟ้าสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึก ดังนั้นแกนของการเกิดโพลาไรเซชันมักอยู่แนวเดียวกับแกนของผลึก

แม้ว่าผลึกที่มีขั้วจะสามารถแสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้แต่ไม่จำเป็นจะต้องมีเวกเตอร์ของโพลาไรเซชันเองได้ เนื่องจากผลรวมของโมเมนต์ทางไฟฟ้าตามแนวขั้วทั้งหมดเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงมีเพียงผลึกที่มีแกนเดียวเท่านั้นที่มีค่าเวกเตอร์ของโพลาไรเซชันเกิดเองได้ (P_s) และมีทิศตามแนวแกนขั้นของผลึก โดยทั่วไปการเกิดโพลาไรเซชันได้เองไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากประจุบนพื้นผิวของผลึก เนื่องจากประจุเหล่านี้ได้ถ่วงดุลทางไฟฟ้ากับพาหะของกระแสไฟฟ้าทั้งที่อยู่ภายในและภายนอก รวมไปถึงประจุบริเวณรอยต่อของขอบแฝด (twin boundary)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกที่มีโพลาไรเซชั่นเกิดเองสามารถอธิบายได้ด้วยการวางตัวของไอออนบวกและลบ ในบางช่วงอุณหภูมิไอออนเหล่านี้จะวางตัวอยู่ในตำแหน่งที่สมดุลที่มีพลังงานอิสระต่ำที่สุด และจุดศูนย์กลางของประจุบวกและลบจะไม่อยู่ตำแหน่งเดียวกัน ดังรูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของผลึกแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) โดยที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (120 ℃) โครงสร้างผลึกจะเป็นแบบคิวบิก (Cubic) ที่มี Ba^{2+} อยู่ที่มุมของลูกบาศก์ ไอออน O^{2-} อยู่กึ่งกลางของลูกบาศก์ และไอออน Ti^{4+} อยู่จุดศูนย์กลางของลูกบาศก์ ดังแสดงในรูป 2.5 (ก) และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนรูปเล็กน้อยโดยไอออน Ba^{2+} และไอออน Ti^{4+} จะเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมที่สัมพันธ์กับไอออน O^{2-} ทำให้เกิดเป็นขั้วหรือไดโพล (dipole) ขึ้นดังรูปที่ 2.5 (ข) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าแต่ละคู่ของไอออนบวกและลบเป็นเสมือนขั้วทางไฟฟ้าที่ส่งผลให้มีค่าโพลาไรเซชันภายในตัวเองเกิดขึ้น โดยไดโพลเหล่านี้จะจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและมีค่าโพลาไรเซชันเท่ากับไดโพลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร



รูปที่ 2.5 รูปแสดงผลึกของโครงสร้างแบเรียมไททาเนต (โครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์) (ก) ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรีมีโครงสร้างแบบคิวบิก (ข) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีมีโครงสร้างเป็นเตตระโกนอลที่มีการเลื่อนตำแหน่งของไอออน Ba^{2+} และ Ti^{4+} ที่สัมพันธ์กับไอออนของ O^{2-} [9]

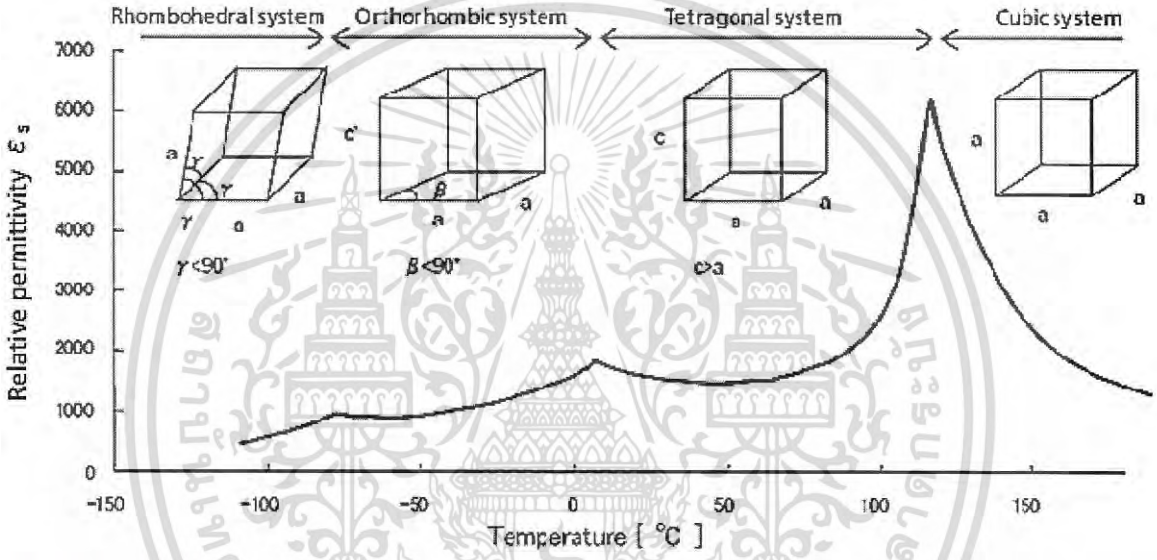
2.2.2 อุณหภูมิคูรีและการเปลี่ยนเฟส

การเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุฟอร์โรอิเล็กทริกจะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึก ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการโพลาไรเซชันทางไฟฟ้าของวัสดุ ดังรูปที่ 2.6 โดยอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสเรียกว่า อุณหภูมิคูรี (Curie temperature : T_C) เป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเฟส โดยที่อุณหภูมิ $T > T_c$ เฟสเฟอร์โรอิเล็กทริกจะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเฟสพาราอิเล็กทริก (Paraelectric phase) ซึ่งวัสดุจะไม่แสดงสมบัติความเป็นโพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเองและไม่สามารถแสดงพฤติกรรมของเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ ในขณะที่อุณหภูมิ $T < T_c$ วัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงสมบัติโพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเองและสามารถแสดงพฤติกรรมของเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ อีกทั้งค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงและมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิคูรี ซึ่งเป็นไปตามกฎคูรี – ไวสส์ (Curie – Weiss law)

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกบางชนิดเช่น $BaTiO_3$ สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้มากกว่าหนึ่งเฟส โดยที่ยังคงสภาพเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกอยู่ อุณหภูมิคูรีจะเป็นอุณหภูมิที่เปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริกเท่านั้น ส่วนอุณหภูมิที่ผลึกเปลี่ยนจากเฟอร์โรอิเล็กทริกหนึ่งไปยังเฟอร์โรอิเล็กทริกหนึ่งนั้นจะเรียกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส (transition temperature) [10]

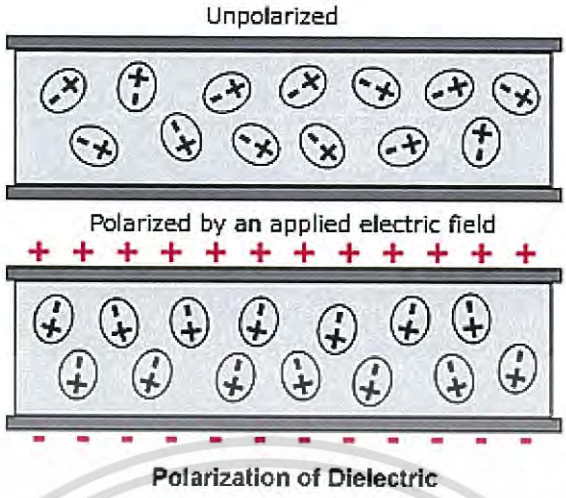


รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ε_r) กับอุณหภูมิของผลึกแบเรียม-ไททาเนต ($BaTiO_3$) [10]

2.3 สมบัติไดอิเล็กทริก

สมบัติไดอิเล็กทริกเกิดในวัสดุไดอิเล็กทริกที่แสดงความเป็นขั้ว โดยวัสดุไดอิเล็กทริกจะไม่นำไฟฟ้าเป็นฉนวน สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้า โดยเมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกยังไม่ได้มีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุโพลาไรซ์จะจัดเรียงตัวแบนสุ่มแต่ เมื่อให้สนามไฟฟ้าให้กับวัสดุ วัสดุจะเกิดการจัดเรียงตัวของโพลาไรซ์ (Poling) เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบโดยโพลาไรซ์จะหันทิศทางขั้ว (Domain) ในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามฟ้าที่ให้เข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงโพลาไรเซชันก่อนการให้สนามไฟฟ้าและเมื่อให้สนามไฟฟ้าเกิดโพลาไรเซชัน [11]

ซึ่งค่าผลรวมของโพลาไรเซชันเทียบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Net polarization/unit volume) การโพลาไรซ์แปรผันตรงกับค่าความจุในการกักเก็บประจุไฟฟ้า ถ้าเกิดโพลาไรเซชันสูงค่าความจุจะสูงตามไปด้วย ซึ่งค่าความจุ (Capacitance) เป็นค่าจำเพาะขึ้นกับวัสดุ ซึ่งสมบัติไดอิเล็กทริกจะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง 3 พารามิเตอร์ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity, ε_r) ค่าความทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss)

2.3.1 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity, ε_r)

ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เป็นสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ซึ่งเป็นค่าจำเพาะที่ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ไม่ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของวัสดุ แต่มีปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความจุ คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน d กับ พื้นที่ของแผ่นขนาน A ดังสมการที่ 2.6 เมื่อพิจารณาในตัวเก็บประจุอย่างง่าย

โดยระหว่างแผ่นขนานจะมีสภาวะเป็นสุญญากาศ เมื่อให้สนามไฟฟ้ากับแผ่นโลหะคู่ขนานจะเกิดขั้วขึ้น ที่แผ่นโลหะหนึ่ง + Q และอีกแผ่นหนึ่งเป็นประจุ – Q ดังสมการที่ 2.5 ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าความจุต่างกันไป

จากสูตร $$Q = C\Delta V$$

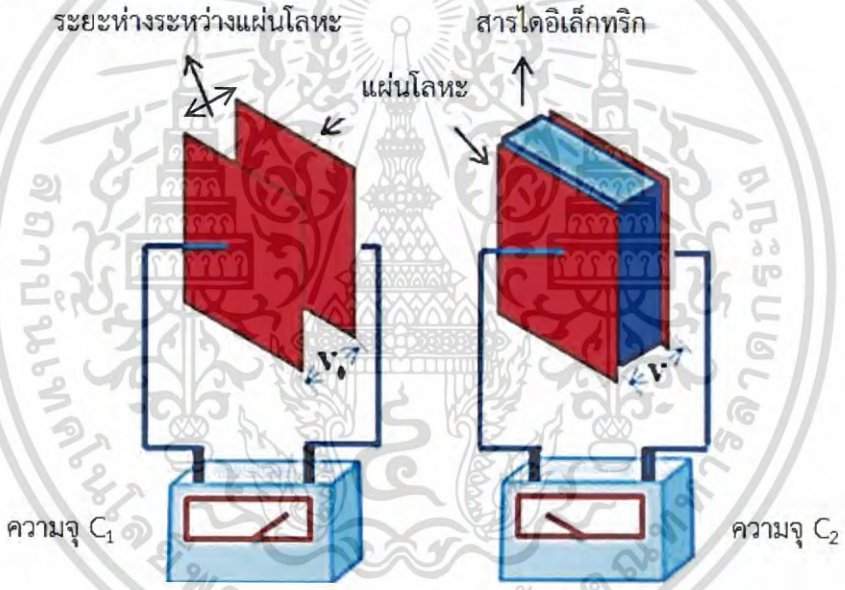
หรือ $$C = \frac{Q}{\Delta V} \qquad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อโวลต์ (C/V) หรือฟารัด (F)
Q คือ ค่าประจุมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C)
V คือ ศักย์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

จากสูตร $$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \quad (2.6)$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ต่อโวลต์ (C/V) หรือฟารัด (F)
ε_0 คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เทียบสุญญากาศมีค่า 8.854×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร (F/M)
A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)
d คือ ระยะห่างระว่างแผ่นไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็นเมตร (m)



รูปที่ 2.8 แสดงการวัดค่าไดอิเล็กทริกสุญญากาศระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุคู่ขนาน (ก)สุญญากาศ (ข) สารไดอิเล็กทริกระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุคู่ขนาน ตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกมีค่าความต่างศักย์ (V) น้อยกว่า ค่าความต่างศักย์ของสุญญากาศ (V_0) ดัดแปลงจาก [10]

ถ้าในกรณีที่มีสารไดอิเล็กทริกระหว่างแผ่นขนานจะทำให้ตัวเก็บประจุสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากในวัสดุก็จะมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity, ε_r) ซึ่งเป็นค่าจำเพาะขึ้นกับวัสดุ ดังสมการที่ 2.7

จากสูตร $$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{d} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ค่าความทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength)

ค่าความทนไดอิเล็กทริกเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการทนต่อสนามไฟฟ้าก่อนที่จะทำให้วัสดุไดอิเล็กทริกกลายเป็นตัวนำ ซึ่งถ้าวัสดุมีค่าความทนต่อสนามไฟฟ้าได้มากก็จะสามารถทนสนามไฟฟ้าสูงได้ โดยความทนของค่าไดอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ไดอิเล็กทริกยังใช้งานได้อยู่ (Breakdown voltage) โดยที่ไดอิเล็กทริกไม่เกิดความเสียหายต่อความยาวหนึ่งหน่วย แต่ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่ให้มีค่าสูงกว่าค่าความทนไดอิเล็กทริกอิเล็กตรอนหรือไอออนเกิดความเค้นสูงขึ้นเนื่องจากพยายามไหลผ่านวัสดุวัสดุก็จะเกิดการทำลายและเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า

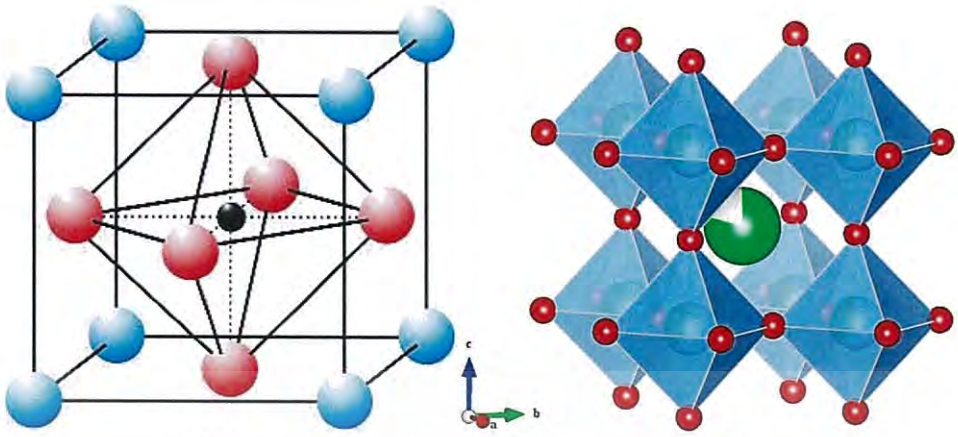
2.3.3 ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss)

ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกในวัสดุเซรามิกเป็นค่าที่เกิดจากการให้สนามไฟฟ้าแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นมากทำให้โพลาไรเซชั่นภายในวัสดุไดอิเล็กทริกเกิดการกลับตัวของทิศทางขั้วไม่ทัน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นและเกิดการสูญเสียไดอิเล็กทริก ซึ่งสามารถประมาณได้จากสัดส่วนของความได้เปรียบทางพลังงานของวงจรแผ่นตัวนำคี่ขนานและสามารถวัดได้จากอิมพีแดนซ์ซึ่งปริมาณของค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริกนั้นสามารถประมาณได้ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮริทซ์

2.4 โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ (Perovskite structure)

โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ถูกเรียกโดยอ้างอิงชื่อจากแร่แคลเซียมไททาเนต ($CaTiO_3$) มีสูตรโครงสร้างโดยทั่วไปเป็น ABO_3 ซึ่ง A และ B คือ ไอออนบวก โดย A มีรัศมีไอออนที่ใหญ่กว่า ไอออนบวกของ B และ O คือ ออกซิเจน ซึ่งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกส่วนใหญ่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ เช่น แบเรียมไททาเนต $BaTiO_3$ เลดเซอร์โคเนตไททาเนต ($PbZr_{1-x}Ti_{1-x}O_3$) โพแทสเซียมไนโอเบต ($KNbO_3$) เป็นต้น โดยในรูปที่ 2.9 (ก) แสดงโครงสร้างเพอรอฟสไกต์มีพื้นฐานมาจากหน่วยเซลล์แบบ (Face center cubic: FCC) โดยที่ตำแหน่งของไอออนบวก A จะอยู่ที่มุม ตำแหน่งไอออนบวก B จะอยู่ที่ศูนย์กลาง และตำแหน่งไอออนออกซิเจนจะอยู่ที่หน้าของหน่วยเซลล์ [11] ในรูปที่ 2.9 (ข) แสดงโครงสร้าง เพอรอฟสไกต์ลักษณะทรงแปดหน้า (Octahedral) BO^{6-} มีการเชื่อมโยงเป็นสามมิติ ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวแบบบรรจุชิดลูกบาศก์ (Cubic closed packed : CCP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

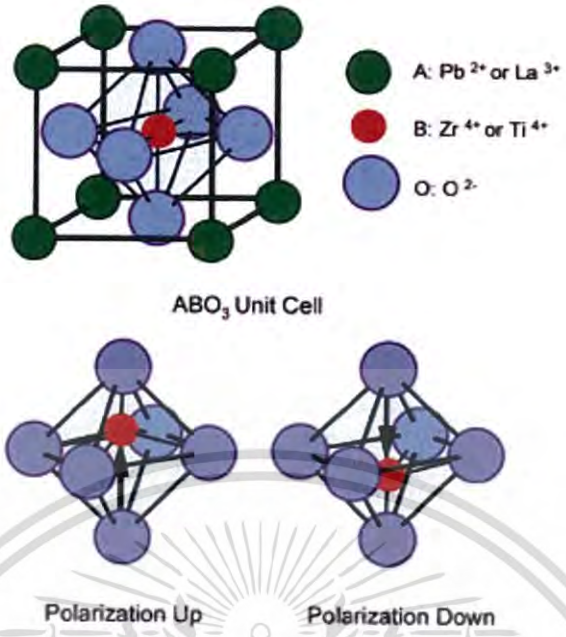
รูปที่ 2.9 (ก) แสดงโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ (ข) แสดงโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ลักษณะทรงแปดหน้า (Octahedral) BO^{6-} มีการเชื่อมโยงเป็นสามมิติ [11]

ซึ่งสารประกอบที่มีโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ยังเป็นพื้นฐานในการศึกษาวัสดุเพอรอฟสไกต์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนมากขึ้น และนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

2.5 แบเรียมไททาเนต (Barium titanate, $BaTiO_3$)

แบเรียมไททาเนตมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางซึ่งมักจะถูกนำมาใช้ในการเก็บประจุ เนื่องจากมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) การสูญเสียความเป็นเอกลักษณ์ต่ำ และมีความเป็นฉนวนสูง แม้ว่าแบเรียมไททาเนตจะมีอุณหภูมิคูรีที่ต่ำ (Curie Temperature) และคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ที่ด้อยกว่า เมื่อเทียบกับสารเพียโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ เช่น $PbZrTiO_3$ แต่แบเรียมไททาเนตปราศจากสารตะกั่วจึงได้รับความสนใจเนื่องจากมีความเป็นมิตรต่อด้านสิ่งแวดล้อม และได้กลายเป็นหนึ่งในวัสดุเซรามิกอิเล็กทรอนิกส์ที่ขาดไม่ได้

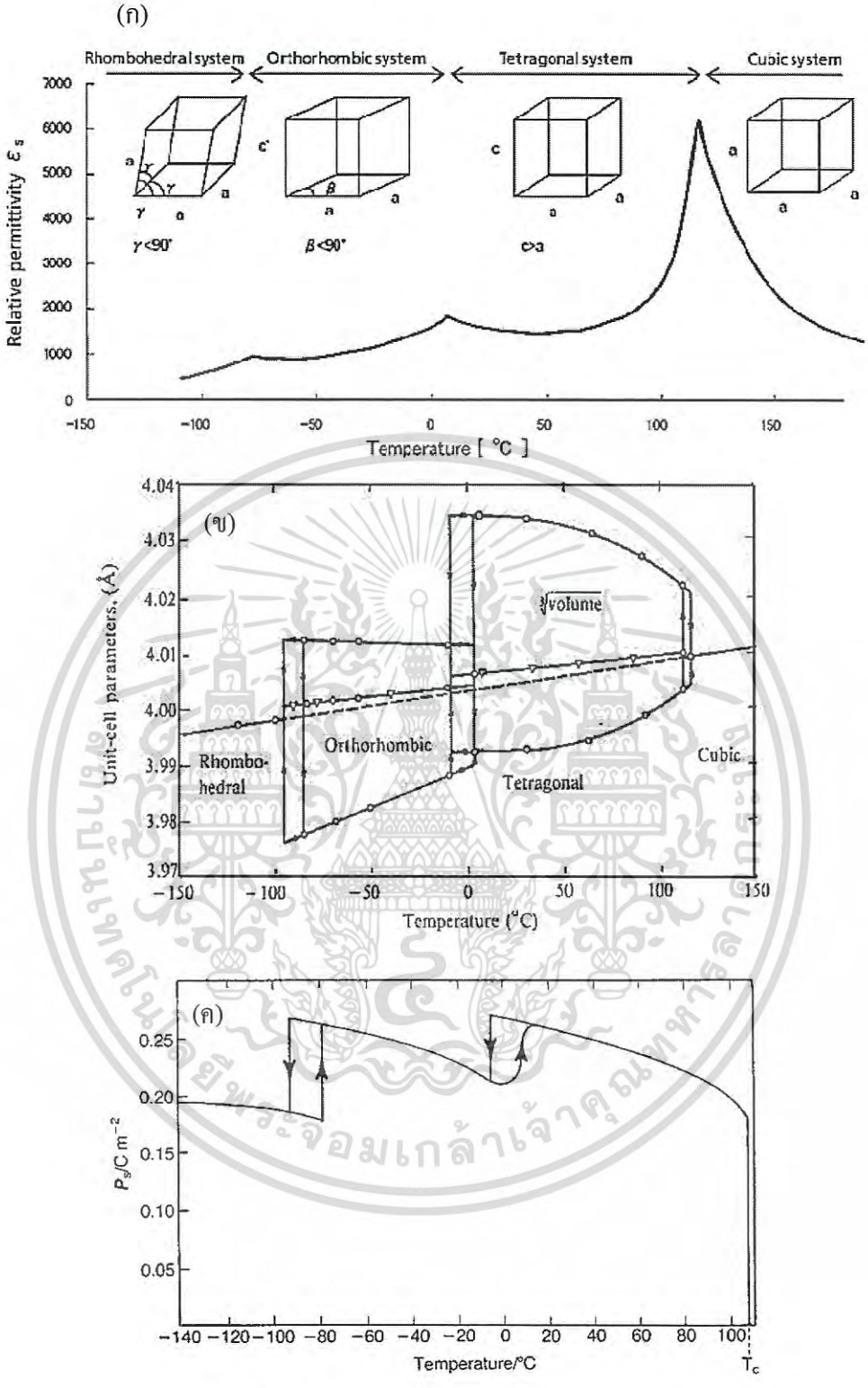
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 รูปแสดงโครงสร้างของแบเรียมไททาเนต [12]

โดยทั่วไปโครงสร้างพื้นฐานของแบเรียมไททาเนตมี 2 รูปแบบ ซึ่งรูปแบบที่นิยมใช้กันส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างผลึกแบบเพอร์รอฟสไกต์ (Perovskite) มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกซึ่งสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) จะขึ้นกับอุณหภูมิ โดยโครงผลึกของสารแบเรียมไททาเนตที่อุณหภูมิต่างกันจะมีความสัมพันธ์ กับการเปลี่ยนแปลงของค่าโพลาไรเซชั่นได้เอง (Spontaneous polarization) และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข) และ (ค) ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า -90 °C ก็จะเปลี่ยนจากเฟสรอมโบฮีดรอลไปเป็นเฟสออโทรอมบิก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมาถึงที่อุณหภูมิประมาณ 5 °C เฟสออโทรอมบิกจะเกิดการบิดเบี้ยวและเปลี่ยนไปเป็นเฟสเตตระโกนอล โดยมีโมเมนต์ขั้วคู่เกิดขึ้นมาในทิศทางตามแนวแกน c ตามลำดับ ดังแผนภาพแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงจนถึงจุดอุณหภูมิคูรีที่ 120 °C (T_c) ก็จะเกิดการเปลี่ยนเป็นเฟสคิวบิกที่เสถียร สมบัติเฟอโรอิเล็กทริกจะหายไป ในอีกรูปแบบหนึ่ง คือ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ซึ่งไม่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Non-Ferroelectric Hexagonal) ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเสถียรที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 1460 °C และยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิห้องได้ดีอีกด้วย ซึ่งการเปลี่ยนเฟสของสาร $BaTiO_3$ ตามอุณหภูมิดังที่กล่าวมานี้ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



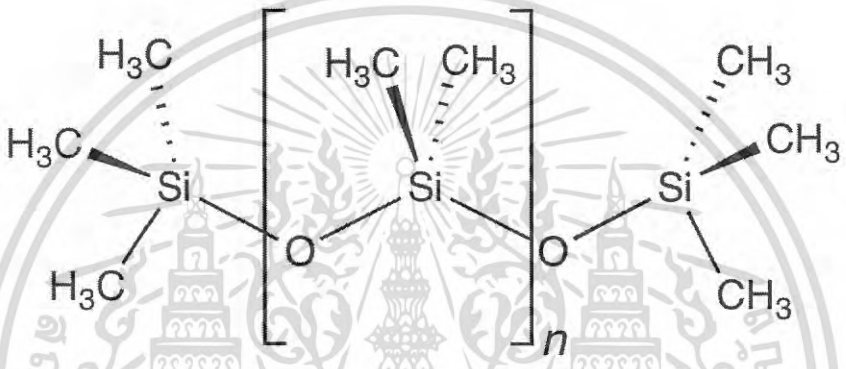
รูปที่ 2.11 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงผลึกของแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) (ข) แลตทิซพารามิเตอร์ของแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$)ในแต่ละอุณหภูมิ (ค) ค่าความยินยอมสัมพัทธ์ที่วัดตามแนวแกน a และ c ของสาร $BaTiO_3$ ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.6 พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS)

พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสารประกอบพอลิเมอร์ออแกโนซิลิคอน (Organosilicon polymer) หรือเรียกว่า ซิลิโคน (Silicones) พอลิไดเมทิลไซลอกเซนมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยพอลิไดเมทิลไซลอกเซนประกอบด้วยสารอนินทรีย์เป็นแถบกลางที่มี ซิลิกอน (Silicon) และออกซิเจน (Oxygen) สลับกับ มีหมู่เมทิล (Methyl) ซึ่งเกาะที่ตำแหน่งของอะตอมซิลิกอนซึ่งเรียงเป็นหน่วยโครงสร้างของพอลิเมอร์ซ้ำๆกัน โดยแสดงในรูปที่ 2.12 คือ สูตรโครงสร้างทางเคมีของ PDMS คือ $CH_3[Si(CH_3)_2O]_n\ Si(CH_3)_3$ [13]



รูปที่ 2.12 รูปแสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีของ (Polydimethylsiloxane, PDMS) [14]

สมบัติของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

(1) พอลิไดเมทิลไซลอกเซนโดยทั่วไปเฉื่อยต่อปฏิกิริยา ไม่ติดไฟ และระบายอากาศได้ดีโดยที่จะยอมให้ก๊าซออกซิเจน ไนโตรเจน หรือไอน้ำผ่านได้ แต่โมเลกุลของน้ำไม่สามารถผ่านได้ เนื่องจาก พอลิไดเมทิลไซลอกเซนมีสมบัติเด่นไม่ชอบน้ำ ซึ่งสมบัติความไม่ชอบน้ำได้ถูกนำมาใช้กันอย่างมาก โดยเฉพาะคุณสมบัติของการไหล

(2) พอลิไดเมทิลไซลอกเซนมีความยืดหยุ่นสูงมาก โดยเมื่อทำการการบ่มให้เกิดพันธะเชื่อมขวางกัน (PDMS Cross-linked) ของอนุภาคพอลิเมอร์ ทำให้มีความยืดหยุ่นสูงและเมื่อได้รับแรงมากระทำและปล่อยแรง พอลิเมอร์สามารถยืดและหดตัวกลับไปในสภาพเดิมได้

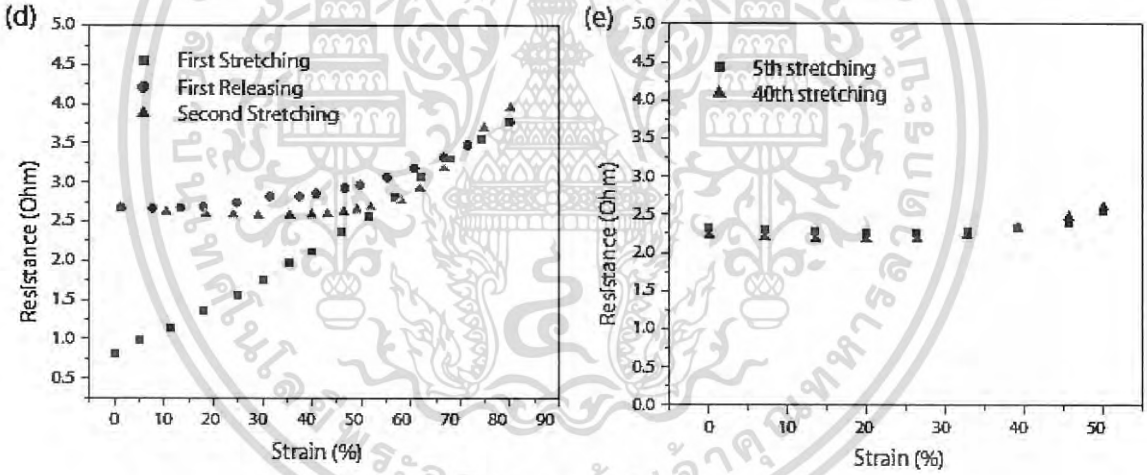
(3) พอลิไดเมทิลไซลอกเซนมีสายโซ่ที่ยาวแข็งแรงของ Si-O และมุมพันธะที่กว้าง Si-O-Si มีสิ่งกีดขวางและพลังงานในการหมุนค่อนข้างต่ำ โดยในสายโซ่หลักของพอลิเมอร์จะมีกิ่ง (CH_3) ที่เกาะอยู่ทำหน้าที่ขัดขวางไม่ให้โมเลกุลของ Si-O เข้าใกล้กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
149293

(4) พอลิไดเมทิลไซลอกเซน มีสมบัติที่แสงสามารถทะลุผ่านได้ นอกจากนี้เมื่อมีการเชื่อมขวางกันของโมเลกุล อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มพอลิไดเมทิลไซลอกเซนให้เกิดการเชื่อมขวางสามารถเป็นตัวกำหนดค่าดัชนีการหักเหแสง (refractive index) ได้

(5) พอลิไดเมทิลไซลอกเซนมีค่าความทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) ที่สภาพ ASTM D 149 ประมาณ 18.5 $kVmm^{-1}$ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ที่สภาพ ASTM D 150, ที่ 100 Hz ประมาณ 2.98 ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ [14]

นอกจากนี้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนมีช่วงอุณหภูมิในการใช้งานที่ค่อนข้างกว้าง ตั้งแต่ (-40 – 150 องศาเซลเซียส) สมบัติไม่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์พอลิเมอร์ชนิดอื่นอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติได้ นอกจากนี้การหมู่เกาะจากหมู่เมทิล (Methyl) เป็นหมู่ฟังก์ชั่นอื่นเข้ามาแทนสามารถทำให้สมบัติพอลิเมอร์เปลี่ยนไปด้วย ซึ่งทำให้พอลิไดเมทิลไซลอกเซนมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ให้กับยาง ในแชมพูที่ทำให้ผมเงางาม อาหาร กาว สารหล่อลื่น และกระเบื้องทนความร้อน [15]



รูปที่ 2.13 (d) ความต้านทานของตัวนำยืดหยุ่น AgNW / PDMS เป็นฟังก์ชันของความเครียดแรงดึง (e) ความต้านทานเป็นฟังก์ชันของความเครียดแรงดึง (0-50%) สำหรับ AgNW / PDMS ตัวนำยืดหยุ่นในรอบที่ 5 และ 40 [16]

และในปี 2012 Feng Xu and Yong Zhu [16] ได้ทำการศึกษาปรับปรุงวัสดุที่ทำให้มีทั้งสมบัติการนำกระแสไฟฟ้าและมีความยืดหยุ่นสามารถช่วยให้ การใช้งานได้หลายหลาย เช่น จอแสดงผลที่ยืดหยุ่น เสาอากาศคลื่นวิทยุยืดหยุ่น กล้ามเนื้อเทียม และมาตราส่วน เซ็นเซอร์ผิว โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำวัสดุผสมที่มีทั้งสมบัติการนำกระแสไฟฟ้าและมีความยืดหยุ่นจากซิลเวอร์เส้นลวดนาโน/พอลิไดเมทิลไซ-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลอกเซน AgNW/PDMS โดยนำ AgNW รวมบนพื้นผิวของ PDMS ทำให้มีค่าการนำถึง ~ 8,130 S c^{-1} (ความต้านทานแผ่น 0.24 Ω) ก่อนทำการดัด และหลังการดัดเป็นวงกลม ความต้านทานของตัวนำ AgNW/PDMS มีความเสถียรเมื่อได้รับแรงดึงระยะทาง 0-50% และยังมีค่าการนำที่สูงถึง 5285 S cm^{-1} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวนำที่มีความยืดหยุ่นไม่เพียงแต่สามารถเพิ่มความยืดหยุ่นแต่ยังช่วยเรื่องปริมาณของแรงที่ได้รับและจำนวนครั้งที่รับแรงซ้ำๆกันได้มากขึ้น และวัสดุก็ยังสามารถส่งออกกระแสไฟฟ้าออกมาได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13

ในงานวิจัยของ X. Thomas [17] ได้ศึกษาการนำซิลิโคนมาประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์การแพทย์ โดยถูกนำมาเริ่มใช้งานอย่างแพร่หลายในปี 1946 โดยนำซิลิโคนมาทำเป็นท่อยางสำหรับซ่อมแซมท่อถุงน้ำดี ตั้งแต่นั้นมาซิลิโคนจึงถูกนำมาใช้เป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพกับร่างกายมนุษย์ เช่น ท่อในการส่งยา เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์บรรจุยา เช่น ยาลดกรดในทางเดินอาหารหรือแม้กระทั้งการนำมาทำเครื่องกระตุ้นหัวใจ

พอลิไดเมทิลไซลอกเซนและความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ในการประยุกต์ใช้ทางอุปกรณ์การแพทย์และยา ซิลิโคนถูกนำมาใช้เพราะมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และความหลากหลายของรูปแบบกายภาพ โดยมีตั้งแต่ในรูปของสารระเหยของพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ไปจนถึงพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่มีความหนืดสูงเพื่อสร้างสารประกอบที่แตกต่างกัน ความเข้ากันได้ทางชีวภาพถูกกำหนดให้เป็นความสามารถของวัสดุที่นำมาใช้ มีการตอบสนองที่เฉพาะเจาะจงกับบริเวณที่เหมาะสม ซึ่งซิลิโคนเกรดการแพทย์โดยเฉพาะ PDMS หรือสารประกอบที่มี PDMS เป็นองค์ประกอบหลัก ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อได้ดี เหมาะสำหรับนำมาใช้บริเวณผิวหนัง และการศึกษาทางพิษวิทยาพบว่าสิ่งเจือปนที่ติดมากับตัวพอลิเมอร์นั้นสามารถกำจัดได้โดยง่าย

นอกจากนี้ PDMS ยังมีแรงตึงผิวที่ต่ำ ทำให้ PDMS แพร่กระจายได้ง่ายในรูปของฟิล์มบนบริเวณผิวหนัง ความหนืดต่ำจึงเหมาะสมมากสำหรับการติดต่อทางชีวภาพเนื้อเยื่อโดยลดความเสี่ยงของการบาดเจ็บบริเวณรอยต่อของผิวหน้าพอลิเมอร์และผิวหนัง และสามารถส่งต่อยาบริเวณผิวหนังมีผลกระทบต่ำต่อบริเวณรอยต่อ นอกจากนี้ PDMS ยังมีการซึมผ่านได้ดี โดยช่วยให้การแพร่กระจายของสาร เช่น ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ รวมถึงสารหรือตัวยาต่างได้ดีและจำเพาะต่อบริเวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงการประยุกต์ใช้งานของวัสดุซิลิโคนในทางการแพทย์ [17]

วัสดุซิลิโคน	การประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์
ของไหล - พอลิเมทิลไซลอกเซน - ออกาโนไซลอกเซน	-เข็มและกระบอกฉีดยา -สารหล่อลื่นในอุปกรณ์การแพทย์ -สารประกอบที่ใช้ป้องกันผิวหนัง อุปกรณ์นำส่งยา
สารประกอบ -ซิลิกาและพอลิเมทิลไซลอกเซน	-ยาระงับการเกิดก๊าซในกระเพาะอาหาร (Antiflatulent ; APIs)
เจล -ครอสลิงค์พอลิไดเมทิลไซลอกเซน	-วัสดุกันกระแทก -กาวสำหรับผิวหนัง อุปกรณ์นำส่งยา
วัสดุยืดหยุ่น -ครอสลิงค์พอลิไดเมทิลไซลอกเซน	-วัสดุยืดหยุ่นสำหรับเครื่องมือแพทย์ -เครื่องกระตุ้นหัวใจ กาวแพทย์ วัสดุเคลือบหลุมร่องฟัน ฟิล์ม

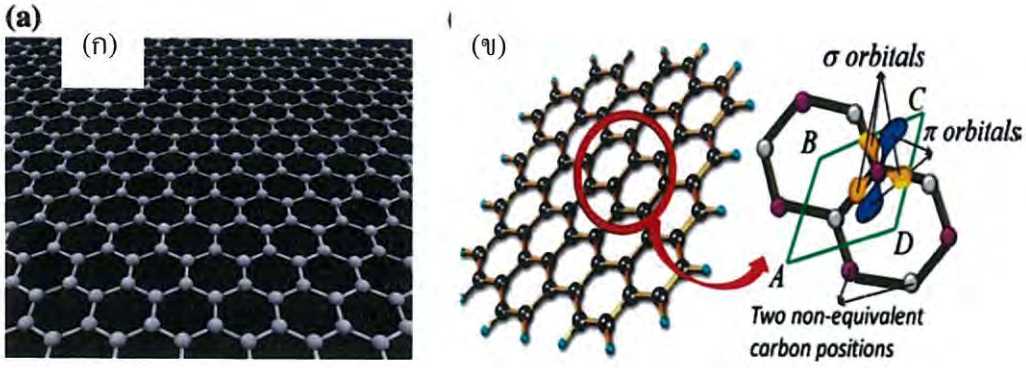
ในทุกการนำมาประยุกต์การใช้งานในเบื้องต้น ซิลิโคนถูกนำมาเป็นส่วนร่วมเนื่องจากมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ความสะดวกในการใช้งาน การรักษาที่ช่วยลดผลกระทบข้างเคียงหรือการทำแผลให้ง่ายขึ้น รวมถึงสามารถพัฒนาปรับปรุงเพื่อการใช้งานที่ดียิ่งขึ้นไป

2.7 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube; CNT)

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างรูปทรงกระบอกในระดับนาโน โดยที่อะตอมของคาร์บอนสามารถฟอร์มตัวได้หลายรูปแบบ ในโครงสร้าง 3 มิติ เช่น เพชร และกราไฟท์เป็นรูปแบบของคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีรูปแบบคาร์บอนแบบ 2 มิติ 1 มิติ หรือ 0 มิติ เป็นรูปแบบเรียกว่าวัสดุนาโนคาร์บอน ตัวอย่างเช่น วัสดุนาโนท่อนาโนคาร์บอน 1มิติ (CNTs) และฟูลเลอรีน 0 มิติ

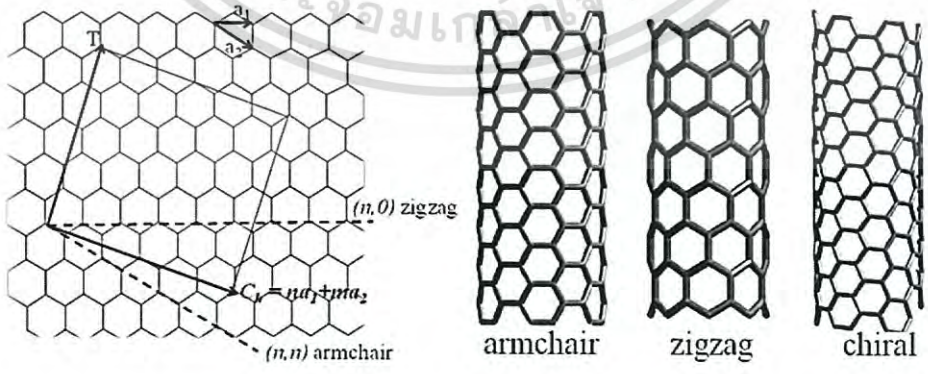
โครงสร้างตาข่ายของแกรฟีนมีการจัดเรียงตัวเป็นหกเหลี่ยมของอะตอมคาร์บอน ดังแสดงในรูป 2.14 ก ในระดับอะตอมของคาร์บอนจะมีจำนวนอิเล็กตรอน 4 ตัว ในออร์บิทัล 2s และ 2p ในขณะที่เกิดการก่อตัวเข้าไปในกราฟีน อะตอมออร์บิทัลทั้ง 3 อะตอมของคาร์บอน คือ 2s , 2px และ 2py มีการไฮบริดเข้าไปใน sp^2 3 ออร์บิทัล ซึ่งออร์บิทัล sp^2 อยู่ในระนาบเดียวกันในขณะที่ 2pz ที่เหลือจะตั้งฉากกับออร์บิทัลอื่น ๆ ตามที่แสดงในรูป (2.14) (ข) ในพันธะ σ ระหว่างอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ใกล้เคียงที่เกิดจากไฮบริดออร์บิทัล sp^2 ขณะที่ออร์บิทัล 2pz มีรูปแบบพันธะ π ที่ออกมาจากระนาบของกราฟีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



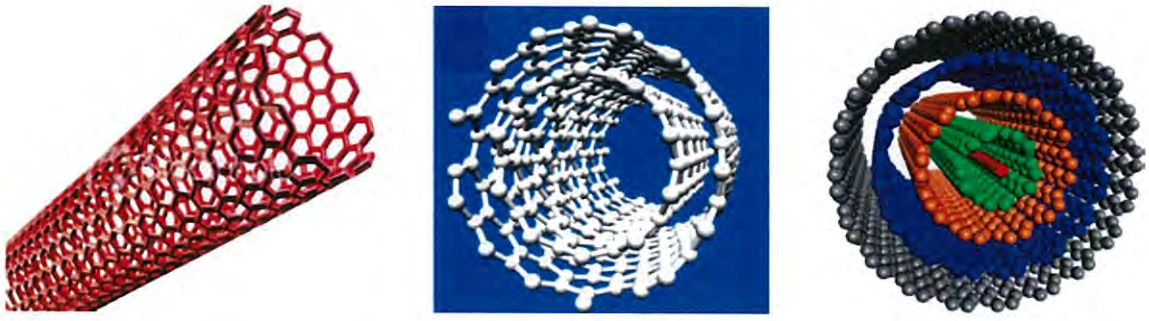
รูปที่ 2.14 (ก)โครงสร้างตาข่ายของแผ่นกราฟีน (ข) โครงสร้างออร์บิทัลของแผ่นกราฟีน [19]

โครงสร้างที่ได้มาจากแผ่นกราฟีนที่แสดงในรูป 2.14 แผ่นกราฟีนชั้นเดียวของอะตอมคาร์บอนบรรจุลงในรูปแบบรังผึ้ง 2 มิติ โดยโครงสร้างตาข่าย CNT มีขอบติดกันทุกแผ่นกันเป็นรูปทรงกระบอกที่ไร้รอยต่อ ทิศทางในรูป (2.14) (ก) (ข) แสดงเวกเตอร์เส้นรอบวงซึ่งบ่งชี้ทิศทาง CNT เวกเตอร์ถูกกำหนดให้เป็น $C = a_1n_1 + a_2n_2$ โดยที่ a_1 และ a_2 คือเวกเตอร์ตาข่ายของกราฟีนและ n_1 และ n_2 เป็นดัชนีไครอล โดยดัชนี ไครอล (n_1 , n_2) จะไม่ซ้ำกันกำหนดความสมมาตรหรือทิศทางของแผ่นกราฟีน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดัชนี ไครอล (n_1 , n_2) โดย CNTs สามารถแบ่งลักษณะโครงสร้างได้ 3 แบบ Zigzag และ Armchair และ Chiral ดังแสดงในรูป 2.15 ตามลำดับ สำหรับ CNTs ที่มีโครงสร้างแบบอามแชร์, ดัชนีไครอล n_1 และ n_2 จะเท่ากัน สำหรับ CNTs ที่มีโครงสร้างแบบซิกแซก ค่าดัชนีไครอล n_1 หรือ n_2 จะมีค่าเท่ากับ 0 และโครงสร้างแบบไครอล ค่าดัชนีไครอลที่ n_1 และ n_2 ไม่เท่ากับ 0 นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดียว (SWNT) ท่อนาโนคาร์บอนผนังคู่ (DWNT) และท่อนาโนคาร์บอนหลายผนัง (MWNT) [18] ตามที่นำเสนอในรูป 2.16



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน ซิกแซก อาร์มแชร์ และไครอล [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 รูปแบบการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดียว (Single-walled nanotube; SWNT) ท่อนาโนคาร์บอนผนังคู่ (Double-walled-nanotube; DWNT) และ ท่อนาโนคาร์บอนหลายผนัง (Multiple-walled nanotube; MWNT) [19]

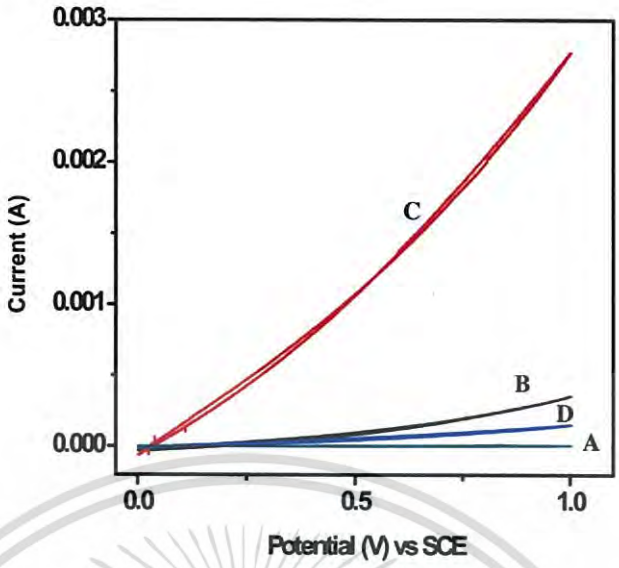
คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

1. ท่อนาโนคาร์บอนถือได้ว่าเป็นวัสดุที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าสูง ที่สมมาตร ระดับของการบิดงอของแผ่นกราฟีนเป็นตัวกำหนดความสามารถในการนำของอุปกรณ์เชื่อมต่อกันของท่อนาโนคาร์บอน ทั้งนี้ยังขึ้นกับดัชนีไครอล ท่อนาโนคาร์บอนแสดงคุณสมบัติทั้งโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ การนำไฟฟ้าของ MWNTs ค่อนข้างซับซ้อนเป็น ปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนังที่ไม่สม่ำเสมอทำให้สร้างกระแสออกมาได้มากกว่าท่อนาโนผนังเดี่ยว [19]

2. อะตอมของคาร์บอนในแผ่นเดียวของกราไฟท์เชื่อมต่อกันด้วยพันธะทางเคมีที่แข็งแรง พันธะที่เชื่อมกันสามอะตอม ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนสามารถแสดงสมบัติพื้นฐานที่แข็งแกร่ง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะสูงกว่าเหล็กเมื่อเทียบในอัตราส่วนต่อน้ำหนักเดียวกัน เนื่องจากอิเล็กตรอนที่เหลือจากการสร้างพันธะทำให้อิเล็กตรอนทั้งหมดรวมกลุ่มกันทำให้ท่อนาโนคาร์บอนยืดหยุ่นได้สูง [20]

นอกจากนี้ Soumyaranjan Mishra, et al. [21] ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของตัวกระตุ้นในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกของพอลิไวนิลไดฟลูออไรด์ (PVDF) ซึ่งสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยการผสมท่อนาโนคาร์บอน (CNT) โดยผสมความเข้มข้นที่เหมาะสมของพอลิไวนิลไดฟลูออไรด์ PVDF กับ CNT ใน N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) ทำให้สามารถเพิ่ม จากรูปที่ 2.17 เมื่อทำการทดสอบโดยเซลล์ไฟฟ้าเคมีพบว่าตัวกระตุ้นที่สังเคราะห์ขึ้นเมื่อได้ทำการผสม CNT กับ PVDF ทำให้มีการสร้างกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่า PVDF อย่างเดียว โดย PVDF อย่างเดียวให้ค่ากระแสไฟฟ้า 0.34 mA และใน PVDF กับ CNT ให้กระแสไฟฟ้าถึง 2.7 mA ดังแสดงในรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



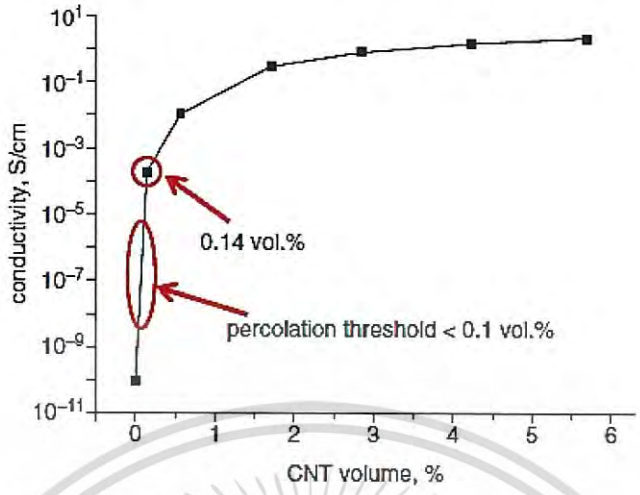
รูปที่ 2.17 แสดงการส่งออกกระแสไฟฟ้าของตัวกำเนิด (A) PVDF (B) PVDF ที่มี CNT [21]

ในงานวิจัยของ S.H. Park and K.-M. Chu [22] ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนลงในวัสดุผสมเพื่อเพิ่มค่าการนำ โดยได้ทำการเปรียบเทียบค่าความสามารถการนำของวัสดุผสมเทียบกับปริมาณของ CNT (%) แสดงในรูปที่ 2 การนำไฟฟ้าของ วัสดุผสม CNT/PDMS จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งการเพิ่มขึ้นของจำนวน CNT เป็นไปตามกฎเอกลักษณ์พลังงานของพฤติกรรมการไหลผ่าน ดังสมการที่ 2.8

$$\sigma \sim \sigma_0 (\phi_{CNT} - \phi_c)^t \qquad (2.8)$$

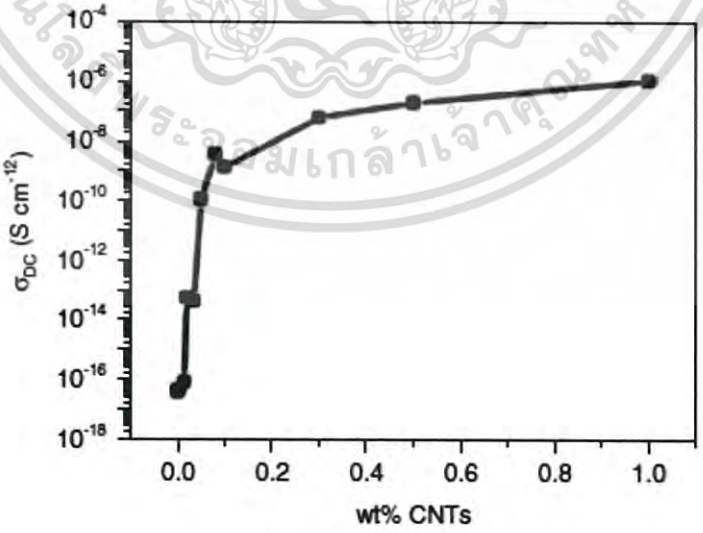
โดยที่ ϕ_{CNT} คือ ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนแบบหลายชั้น ϕ_c คือ ปริมาณการไหลผ่าน t คือ (critical exponent) และ σ_0 คือ ค่าคงที่ โดยทั่วไปการเปลี่ยนทรานซิชั่นจากฉนวนไปเป็นวัสดุผสมนำไฟฟ้า ประกอบไปด้วย ความเข้มข้นของสารกระจายตัวที่ช่วยในการไหลผ่าน และความเข้มข้นที่สูงสุดค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงมากเรียกว่า เกณฑ์การไหลผ่าน ดังแสดงในภาพที่ 2 จะพบว่าที่ความเข้มข้นที่ 0.01 v% เทียบกับ 1.5 %wt ของท่อนาโนคาร์บอนที่มีพอลิไดทิลไซลอกเซนเป็นเมทริกซ์ทั้งสองอัน เกณฑ์การไหลผ่านของกระแสจะต่างกัน โดยในวัสดุผสมจะมีการไหลผ่านค่อนข้างต่ำอย่างมีนัยสำคัญและมีค่าการนำที่สูง ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นผลมาจากอัตราส่วนของท่อนาโนคาร์บอนและการจัดเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนเทียบกับค่าการนำไฟฟ้า [22]

ในงานวิจัยของ Jeffrey Salzbrenner และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาผลกระทบสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางกลของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNT) ซึ่งทำการศึกษาร่วมกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน โดยจะนำท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นทำการตรวจสอบบนพื้นผิวของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) และพบว่าเมื่อเกิดการรวมตัวกันของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นบนพื้นผิวพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ซึ่งผลที่ได้ไม่เพียงแต่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่างเท่านั้น แต่ยังทำให้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในด้านของประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้า โดยพบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CNT เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการนาไฟฟ้าเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 2.19

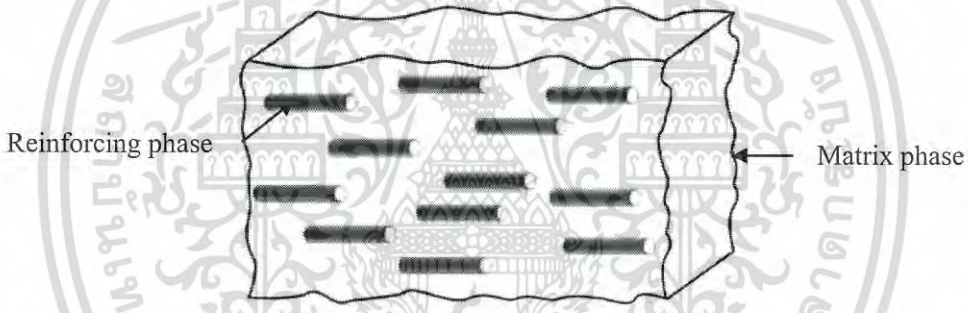


ภาพที่ 2.19 ค่าการนาไฟฟ้าเทียบกับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CNT [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 วัสดุผสม (Composites)

วัสดุผสมคือ วัสดุที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยเฟสอย่างน้อย 2 เฟส หรือมากกว่า ทั้งในระดับขนาดใหญ่และขนาดเล็ก โดยที่แต่ละเฟสจะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจจะได้จากการผสมกันหรือเกิดพันธะขึ้นระหว่างกันก็ได้ แต่จะไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน หนึ่งที่เป็นส่วนประกอบที่เรียกว่าขั้นตอนการเสริมแรงและเป็นหนึ่งในสิ่งที่มันจะถูกฝังอยู่จะเรียกว่าเมทริกซ์ วัสดุขั้นตอนการเสริมอาจจะเป็นในรูปแบบของเส้นใยอนุภาคหรือเกล็ด วัสดุเฟสเมทริกซ์โดยทั่วไปจะมีอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างของระบบคอมโพสิต ได้แก่ คอนกรีตเสริมเหล็กและอีพ็อกซี่เสริมด้วยเส้นใยกราไฟท์ ฯลฯ โดยในวัสดุผสมประกอบไปด้วยส่วนที่เป็น (Matrix phase) วัสดุเนื้อหลักทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด วัสดุเนื้อหลักอาจเป็น พอลิเมอร์ เซรามิก หรือโลหะก็ได้ และส่วนที่เป็น (Dispersed phase) กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจจะมีลักษณะเป็นเส้นใย อนุภาค ท่อ หรือเกล็ด ซึ่งวัสดุผสมที่ได้จะมีคุณสมบัติดีเป็นพิเศษ หรือทำให้มีลักษณะที่สำคัญบางอย่างแตกต่างไปจากเดิม [24]



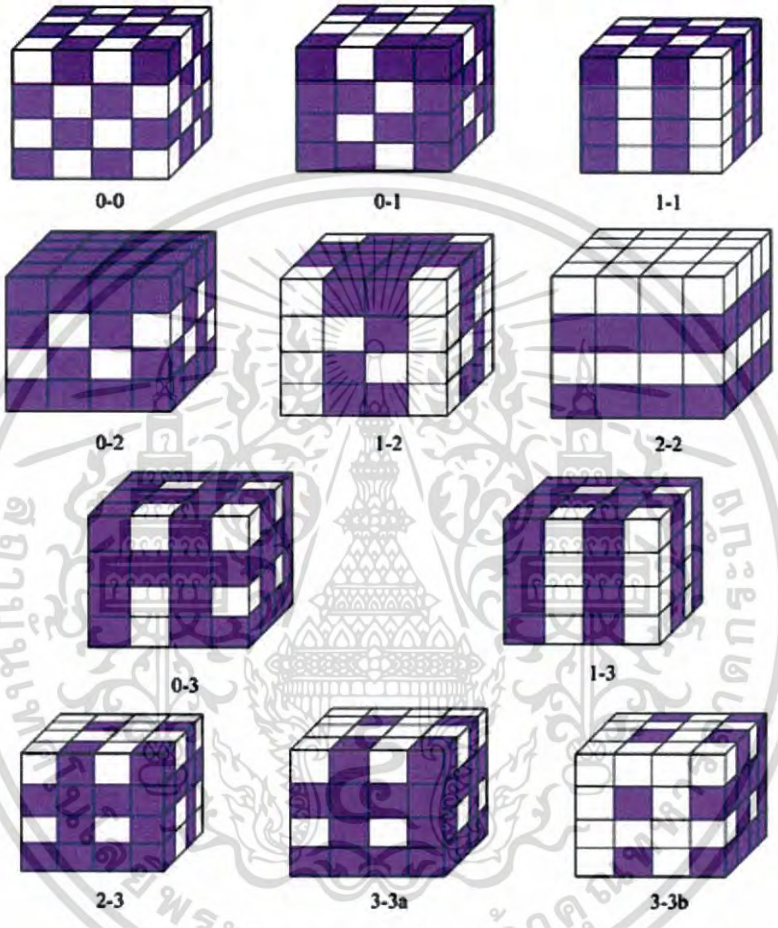
รูปที่ 2.20 แสดงการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสของวัสดุ ดัดแปลงจาก [24]

วัสดุผสมมีความซับซ้อนอย่างมากในวัสดุ จุดประสงค์หลักในการทำวัสดุผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดที่แตกต่างกันให้ผสมกันได้ ซึ่งไม่ได้มีเพียงค่าพารามิเตอร์เดียวที่มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ แต่ยังมีการออกแบบการจัดเรียงตัวของวัสดุผสมสามารถส่งผลต่อสมบัติได้ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติ เช่น รูปแบบการเชื่อมต่อซึ่งทำหน้าที่บนสนามและความเข้มข้นของแรง สมมาตรในระดับต่างๆ จากโครงสร้างผลึกของวัตถุดิบ วัสดุสมมาตรรวมของวัสดุผสม การใช้ระยะเวลาในการเจือปน ขนาดของสิ่งเจือปน ผิวหน้าสัมผัสระหว่างเมทริกซ์ และฟิลเลอร์ รูพรุน

โครงสร้างที่แตกต่างกัน และการจัดเรียงตัวที่ติดกันสามารถส่งผลกระทบอย่างมากขนาดของการตอบสนองทางกาย และการรวมกันของคุณสมบัติ โดยนิวแฮม (Newnham) [24] ได้เสนอการจัดหมวดหมู่รูปแบบการเรียงติดกันของวัสดุผสมแต่ละเฟสและได้ถูกนำมาใช้กับวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก โดยการจัดหมวดหมู่จะมีตัวเลขซึ่งเป็นตัวแทนของมิติซึ่งในระยะที่แตกต่างกันที่เรียงติดกัน ในการจัดเรียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

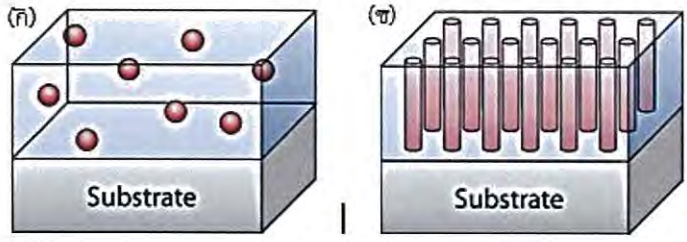
ตัวของแต่ละเฟสที่มีการเรียงตัวติดกันใน 3 มิติ สำหรับวัสดุคอมโพสิตที่มี 2 เฟสนั้น สามารถจัดเรียงติดกันได้ 10 แบบ คือ 0-0, 0-1, 0-2, 0-3, 1-1, 1-2, 2-2, 1-3, 2-3 และ 3-3 ดังรูป 2.21 โดยตัวเลขตัวแรกจะบอกถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ (active phase) ส่วนเลขตัวหลังจะบอกถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่เป็นเมทริกซ์ (passive phase)



รูปที่ 2.21 แสดงรูปแบบการเชื่อมต่อเฟสแบบต่างๆ ของวัสดุผสมที่มี 2 เฟส [24]

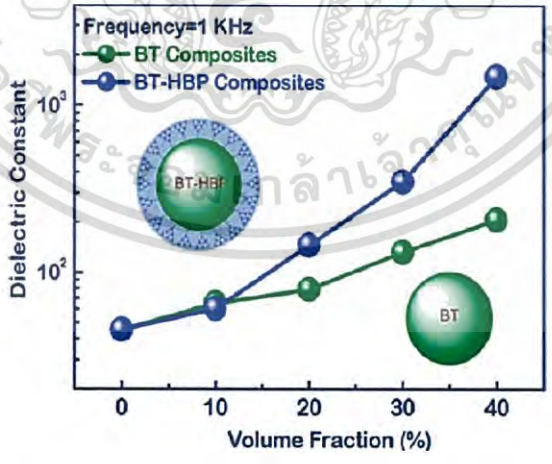
การเตรียมวัสดุผสมที่นิยมจะมี 2 แบบ คือแบบ 0-3 และแบบ 1-3 โดยวัสดุผสมแบบ 0-3 คือ วัสดุผสมที่มีเซรามิกเป็นเฟสที่เป็นเมทริกซ์มีการเชื่อมต่อ 0 ทิศทาง และพอลิเมอร์มีลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่เป็นเมทริกซ์มีการเชื่อมต่อ 3 ทิศทาง ส่วนวัสดุผสมแบบ 1-3 เป็นวัสดุผสมที่เซรามิกมีลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์มีการเชื่อมต่อ 1 ทิศทาง และพอลิเมอร์ที่เป็นเฟสที่เป็นเมทริกซ์มีการเชื่อมต่อ 3 ทิศทางดังแสดงในรูปที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 วัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์กับเซรามิก (ก) แบบ 0-3 (ข)แบบ 1-3 [25]

L. Xie et al. [26] ได้ศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมพอลิเมอร์ โดยทำการเปรียบเทียบสมบัติดังกล่าวระหว่างวัสดุผสมที่มีเฟสกระจายตัวเป็นแบเรียมไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบคอร์เชลล์ ซึ่งสร้างจาก การนำพอลิเอไมด์ที่มีโครงสร้างแบบกิ่งมาเกาะบนพื้นผิวของแบเรียมไททาเนต (hyperbranched aromatic polyamide grafted barium titanate ,BT-HBP) และอนุภาคแบเรียม-ไททาเนต (Barium titanate nanoparticle ,BT - NP) โดยมีเฟสเนื้อหลักเป็นโคพอลิเมอร์พอลิไวนิลไอ-ดีนฟลูออไรด์ เตตระฟลูออโรเอทิลีน คลอโรฟลูออโรเอทีลีน (Poly (vinylidene fluoride-trifluoroethylene - chlorofluoroethylene) ,PVDF-TrFE-CFE) ซึ่งพบว่าวัสดุผสมที่มีเฟสกระจายตัวเป็น BT - HBP ที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยปริมาตร มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงถึง 1485.5 ที่ 1000 Hz ในขณะที่วัสดุผสมที่มีเฟสกระจายตัวเป็น BT - NP มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพียง 206.3 ที่ 1000 Hz ดังรูปที่ 2.23 ดังนั้นวัสดุผสมที่มีเฟสกระจายตัวเป็น BT-HBP ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากกว่าวัสดุผสมที่มีเฟสกระจายตัวเป็น BT – NP

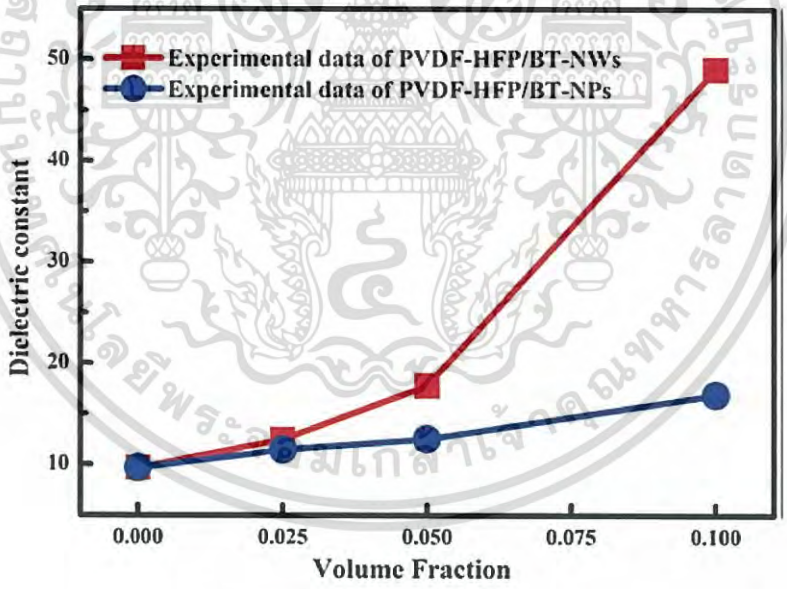


รูปที่ 2.23 รูปแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่มีเฟสกระจายตัวเป็นอนุภาคแบเรียมไททาเนต (BT – NP) และแบเรียมไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบคอร์เชลล์ (BT-HBP) และเฟสเนื้อหลักเป็น PVDF-TrFE-CFE [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Y. Feng et al. [27] ได้ศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่มีเฟสเนื้อหลักเป็น โคพอลิเมอร์พอลิไวนิลไอดีนฟลูออไรด์ เฮกซะฟลูออโรโพพิลีน (poly (vinylidene fluoride-co-hexafluuoropropylene) ,PVDF-HFP) และทำการเปรียบเทียบเฟสกระจายตัวระหว่างอนุภาคแบเรียมไททาเนต (BaTiO3 nanoparticles , BT-NP) และแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$ – nanowires ,BT-NW) โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นของแบเรียมไททาเนตของวัสดุผสมทั้งสองประเภทเพิ่มขึ้นทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมทั้งสอง พบว่าวัสดุผสมที่มีเฟสกระจายตัวเป็นแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าวัสดุผสมที่มีเฟสกระจายตัวเป็นอนุภาคแบเรียมไททาเนต ดังรูปที่ 2.24 เนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชั้นระหว่างพื้นที่สัมผัสของวัสดุผสม PVDF-HFP/ $BaTiO_3$ nanowires แข็งแรงกว่า PVDF-HFP/ $BaTiO_3$ nanopaticles ซึ่งเขาเชื่อว่าเป็นผลมาจากแท่งนาโนแบเรียมไททาเนตมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อพื้นที่หน้าตัดสูง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ PVDF-HFP/ $BaTiO_3$ nanowires มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง

จากงานวิจัยของ L. Xie และ Y. Feng ข้างต้นจะเห็นได้ว่ารูปร่างของเฟสกระจายตัวที่ต่างกันส่งผลต่อสมบัติของวัสดุผสม

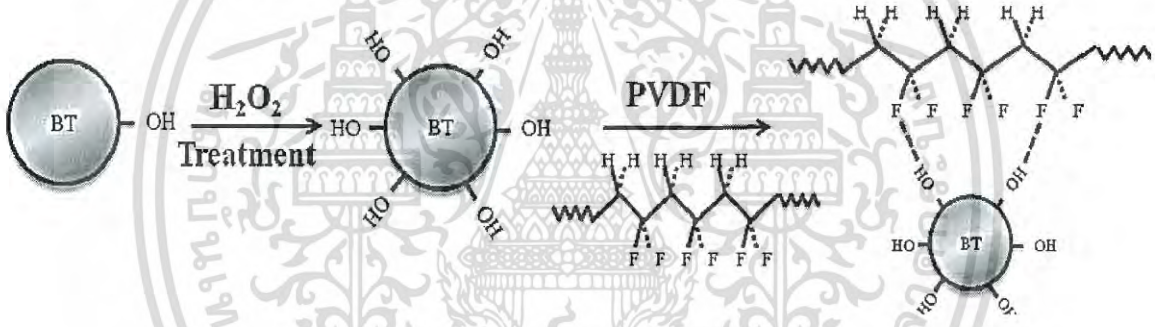


รูปที่ 2.24 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่มีเฟสกระจายตัวเป็นอนุภาคแบเรียมไททาเนต (BT-NP) และวัสดุผสมที่มีเฟสกระจายตัวเป็นแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT-NW) โดยมีเฟสเนื้อหลักเป็น PVDF-HFP [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

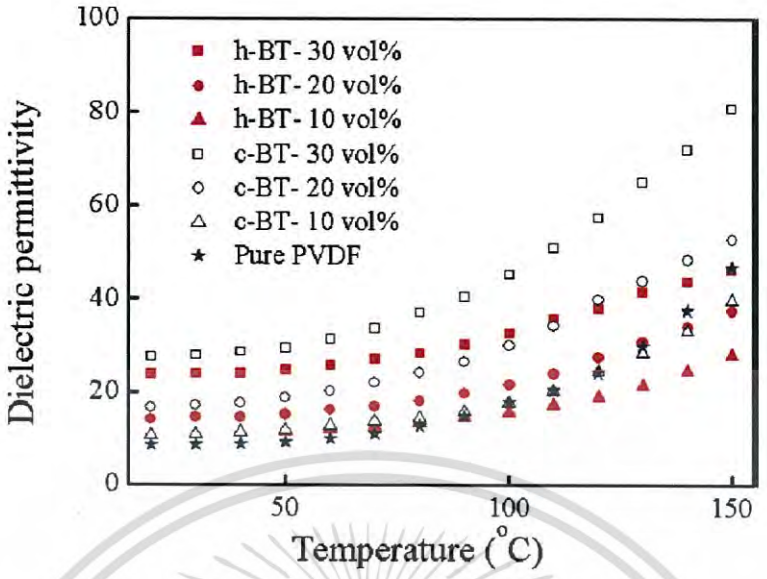
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

T. Zhou et al. [28] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุนาโนคอมโพสิตระหว่างแบเรียมไททาเนต (Barium titanate; $BaTiO_3$) กับพอลิไวนิลดีน ฟลูออไรด์ (Poly (vinylidene fluoride); PVDF) และทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2) โดยนำ $BaTiO_3$ มาทำการรีฟลักซ์กับ H_2O_2 ซึ่งจะทำให้มีหมู่ไฮดรอกซี (OH^-) ไปเกาะที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคนาโน $BaTiO_3$ (h-BT) แล้วนำมาทำเป็นคอมโพสิตกับ PVDF ซึ่ง (h-BT/PVDF) แสดงสมบัติไดอิเล็กทริกที่ขึ้นกับอุณหภูมิกับความถี่น้อยกว่าวัสดุคอมโพสิต (c-BT/PVDF) ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 2.25 และ (h-BT/PVDF) ยังแสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ต่ำลง (loss tangent) และค่าความทนไดอิเล็กทริกที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.28 และ 2.29 เนื่องจากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารเสริมแรง h-BT และพอลิเมอร์เมทริกซ์ PVDF ซึ่งช่วยปรับปรุงคุณสมบัติไดอิเล็กทริกให้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.27

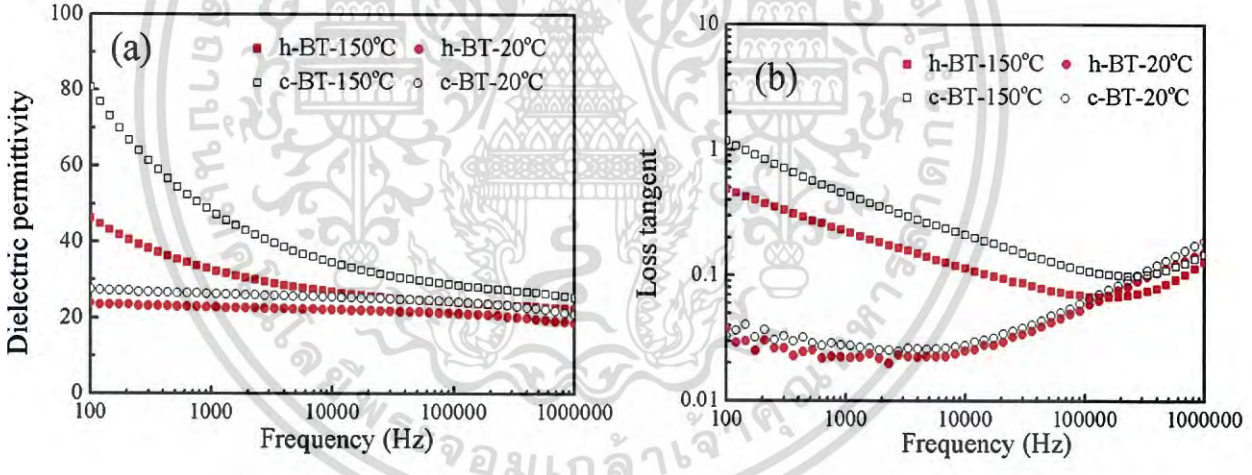


รูปที่ 2.25 แสดงการเกิดอันตรกิริยาของ $BaTiO_3$ ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย H_2O_2 การเกิดคอมโพสิตกับ PVDF และการก่อตัวของพันธะไฮโดรเจนในนาโนคอมโพสิต h-BT / PVDF [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

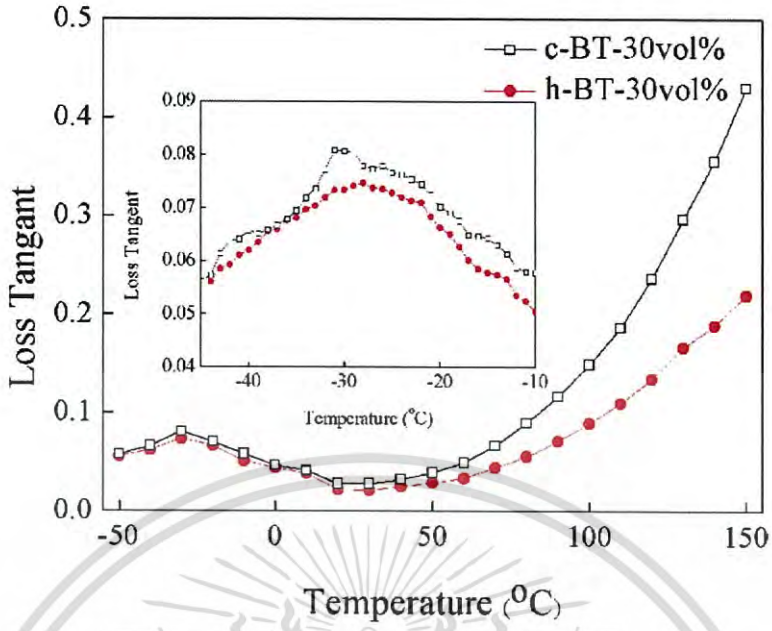


รูปที่ 2.26 แสดงค่าสภาพะยอมสัมพัทธ์เทียบกับอุณหภูมิระหว่างนาโนคอมโพสิตของ c-BT / PVDF และ h-BT / PVDF ความเข้มข้นของสารต่างกัน ที่ 100 Hz. [28]

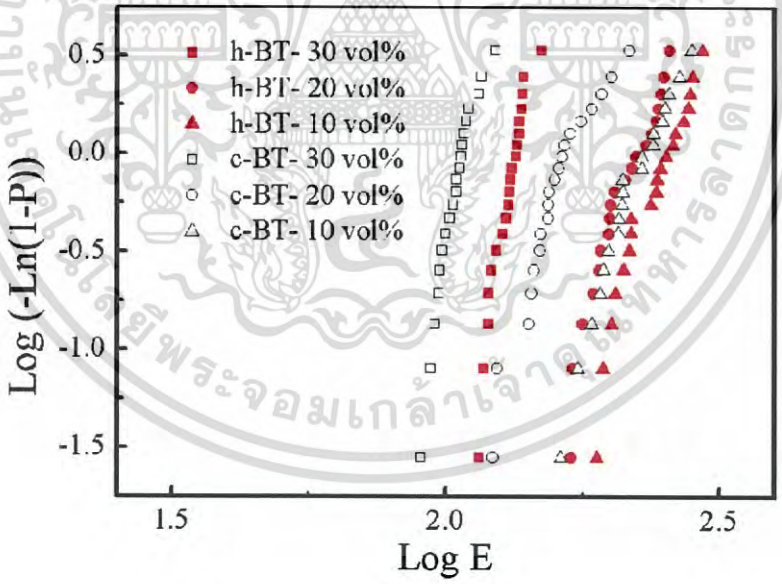


รูปที่ 2.27 แสดง (ก) ค่าสภาพะยอมสัมพัทธ์ (ข) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก ของนาโนคอมโพสิต c-BT/PVDF และ h-BT/PVDF ที่ความเข้มข้น 30 vol% $BaTiO_3$ ที่อุณหภูมิต่างกัน เทียบกับความถี่ [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



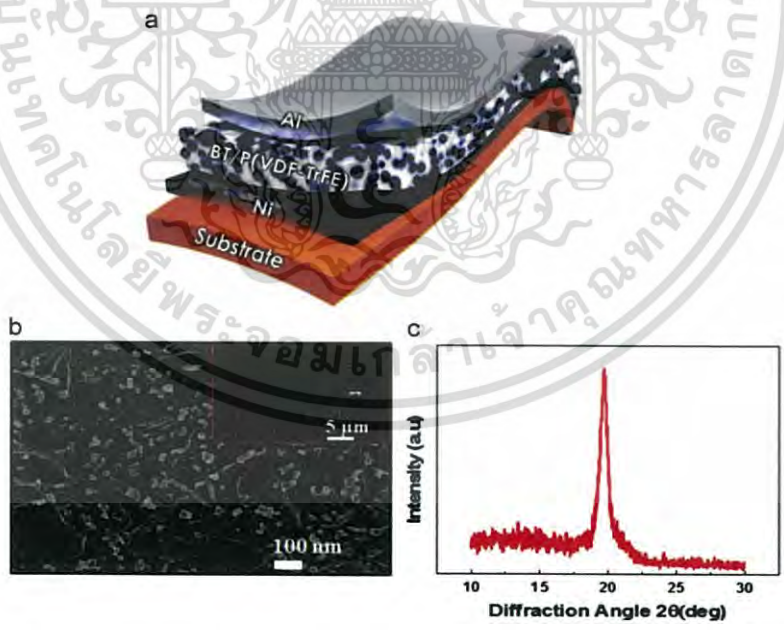
รูปที่ 2.28 แสดงค่าการสูญสียไดอิเล็กทริก (loss tangent) ของนาโนคอมโพสิต c-BT/PVDF และ h-BT/PVDF ที่ความเข้มข้น 30 vol % $BaTiO_3$ ที่ 1 kHz. [28]



รูปที่ 2.29 แสดงการพล๊อต Weibull ของค่าความทนไดอิเล็กทริก (dielectric strength) สำหรับนาโนคอมโพสิต c-BT/PVDF และนาโนคอมโพสิต h-BT/PVDF ที่ความเข้มข้นของ BaTiO3 ต่างกัน [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S. Siddiqui et al. [2] ได้ทำการศึกษากระบวนการทำตัวกำเนิดนาโนโดยวัสดุนาโนคอมโพสิตเพียโซอิเล็กทริกที่ปราศจากตะกั่วที่มีประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นสูงสำหรับเป็นตัวเก็บเกี่ยวพลังงานชีวกลและเป็นตัวเก็บพลังงาน โดยนำแบเรียมไททาเนต (barium titanate nanoparticles; BTNPs) กับ พอลิไวนิลดีน ฟลูออไรด์ ไตรฟลูออโรเอทิลีน (poly vinylidene fluoride–trifluoroethylene; P(VDF–TrFE)) มาทำเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตเพียโซอิเล็กทริกทีเป็นแผ่นฟิล์มบาง ดังแสดงในรูปที่ 2.30 (a) โดยปรับความเข้มข้นของ BTNPs ที่ค่าต่างๆ โดยที่ความเข้มข้นของ BTNPs ที่สูงกว่า 40 wt% โดยในรูปที่ 2.30 (b) แสดงภาพตัดขวางของนาโนคอมโพสิตแสดงให้เห็นว่า NPs มีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ผลึกพอลิแมอร์ของ P(VDF-TrFE) ซึ่งส่งผลให้ภายในนาโนคอมโพสิตสามารถให้ศักย์ไฟฟ้าได้สูงถึง 9.8 โวลต์ (V) และความหนาแน่นของพลังงานที่ 13.5 mW/cm^2 ภายใต้การดัดเป็นวงกลม เทียบกับตัวกำเนิดนาโนวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate; PZT) วัสดุนาโนคอมโพสิตเพียโซอิเล็กทริกทีเป็นแผ่นฟิล์มบางมีค่าเพียโซอิเล็กทริกที่สูงกว่าเนื่องมาจากความเป็นผลึกที่สูงของ P(VDF–TrFE) ซึ่งเฟสผลึกของ P(VDF-TrFE) ได้รับการยืนยันหลังจากจัดขั้วโดย X-ray สเปกตรัม ดังแสดงในภาพที่ 2.30 (c) นอกจากนี้ P(VDF–TrFE) ยังช่วย เสริมความแข็งแรงให้กับ BTNPs ให้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งนาโนคอมโพสิตยังสามารถนำมาใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลการเคลื่อนไหว และทางชีวกลศาสตร์ที่สามารถนำมาประยุกต์เป็นแหล่งเก็บพลังงานขนาดเล็ก



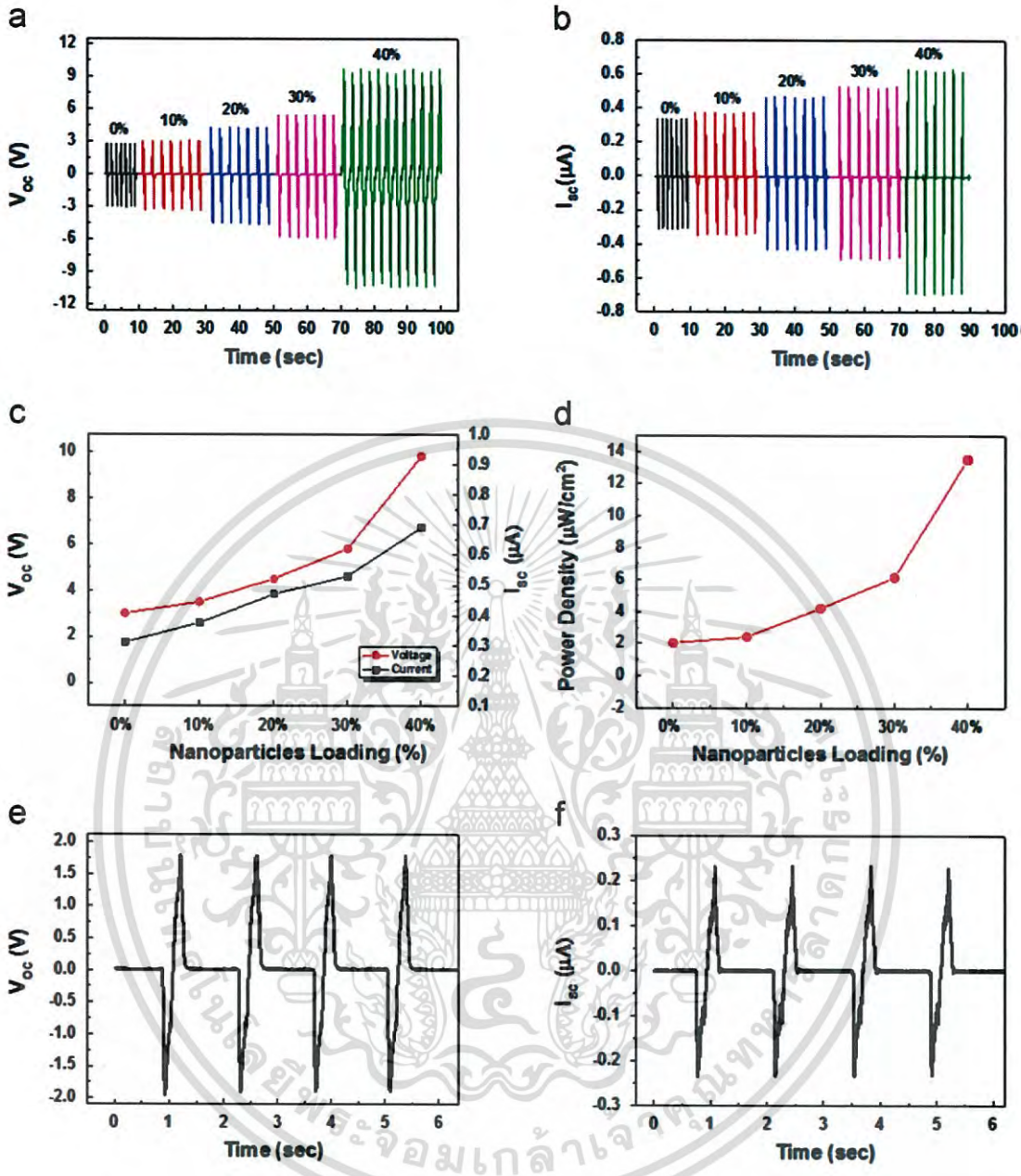
รูปที่ 2.30 (a) แสดงองค์ประกอบของเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต (b) แสดงภาพตัดขวางจาก FE-SEM ของนาโนคอมโพสิต BTNP (40wt%) P(VDF TrFE) หนา 6 mm (c) แสดง XRD สเปกตรัมของผลึกที่ใช้ในคอมโพสิต P(VDF-TrFE) [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบการส่งออกศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นของกระแสกับชนิดของตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกที่โหมดการดัด [2]

Active Material	Form	Output			Generation mode	Active area [cm^2]
		Voltage [V]	Current [μA]	Current density [$\mu A/cm^2$]		
PMN-PT	Single-crystal film	8.2	145	x	d_{31}	1.7×1.7
PZT	Crystal film	200	1.5	150	d_{31}	3.5×3.5
PZT+CNT+ PDMS	Composite	1.5	0.06	x	d_{31}	N.A.
PZT	Thin film	0.28	0.03	x	d_{31}	1 × 1
PZT	Hemisphere	3		0.05	d_{31}	1.5×1.5
PZT	Nanowires	6	0.05	x	d_{31}	20
$BaTiO_3$	Thin film	1		0.19	d_{31}	0.82
$BaTiO_3$+ PVC	Composite	0.9	0.01	x	d_{31}	N.A.
$BaTiO_3$+CNT+ PDMS	Composite	3	0.3	x	d_{31}	13×13
$BaTiO_3$+ P(VDF – HFP)	Composite	5	0.75	x	d_{31}	4
ZnO	Nanowires	0.6	0.5	x	d_{31}	x
ZnO	Nanowires	2.03	0.1	x	d_{31}	1
PVDF	Thin film	2	0.3	x	d_{31}	2×0.4
PVDF	Fibers	0.2	0.03	x	d_{31}	N.A.
P(VDF – TrFE)	With doped graphene	4		0.4	d_{31}	1 × 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

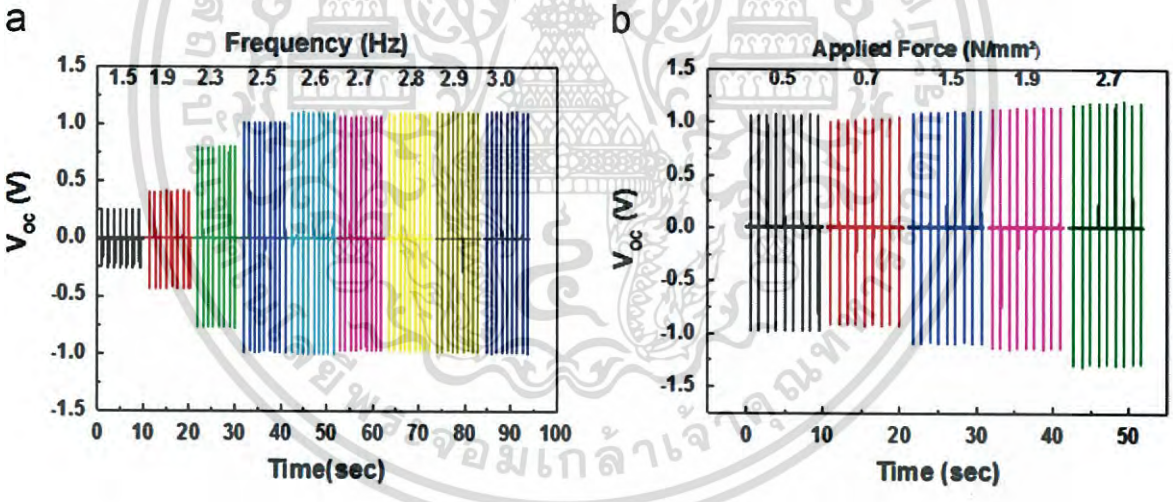


รูปที่ 2.31 เทียบกับเวลาโดย (a) Voc และ (b) Isc แสดงการตรวจวัดตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิต ที่ความเข้มข้น 0–40 % BTNP กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มีความเป็นผลึกสูง P(VDF- TrFE) (c) พีคแสดง Voc และ Isc เทียบกับความเข้มข้น BTNP สำหรับตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิต กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มีความเป็นผลึกสูง P(VDF-TrFE) (d) แสดงการส่งออกความหนาแน่นของพลังงานของตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิต กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มีความเป็นผลึกสูง P(VDF-TrFE) เทียบกับความเข้มข้นของ BTNP (e) Voc และ (f) แสดงการส่งออกของตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิตกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เป็นอสัณฐาน P(VDF-TrFE) ที่ความเข้มข้น 40 wt% BTNP [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อตรวจวัดการส่งออกพลังงานของ NC-PENGs โดยได้ทำการทดสอบการให้แรงดัดเป็นวงกลมกับ PENGs ที่มีชั้น P (VDF-TrFE) และชั้นนาโนคอมโพสิต ที่ BTNP แตกต่างกันตั้งแต่ 0-40% โดยแรงที่ถูกทดสอบภายใต้การดัดเป็นวงกลม ที่มีรัศมีการดัด 10 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับความเครียดแรงดึง ที่ 0.5% โดยแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (VOC) และกระแสลัดวงจร (ISC) อยู่ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกันและขึ้นกับเวลา โดยที่ปริมาณของ BTNP 40% มีการสร้างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าออกมาได้สูงสุด แสดงในรูปที่ 2.31 a และ b ตามลำดับ และในรูป 2.31 c และd แสดงในรูปแบบพีคโดยที่ปริมาณของ BTNP 40% มีการสร้างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าออกมาได้สูงสุด โดยที่ P(VDF-TrFE) มีความเป็นผลึกสูง และในรูปที่ 2.31 e และ d แสดงพีคเมื่อได้รับแรงโดยที่ P (VDF-TrFE) มีลักษณะเป็นอสัณฐาน

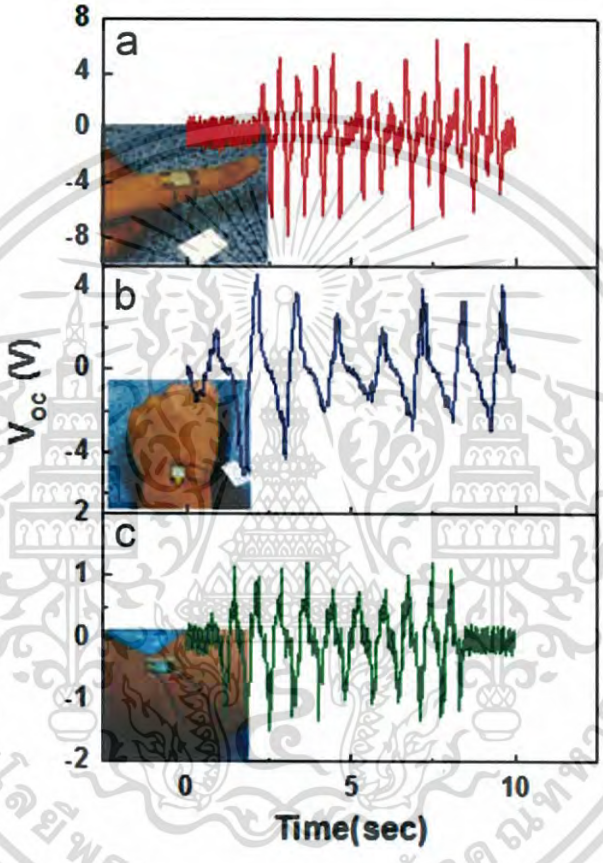
ในการทดสอบตรวจวัดความแตกต่างในการส่งออกแรงดันไฟฟ้าของ ตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิต ที่ความเข้มข้น 40 wt% BTNP โดยมีตัวแปร 2 ตัวในการทดสอบ คือความถี่ และแรงที่ให้ ขึ้นกับเวลา โดยในรูปที่ 2.32 (a) แสดงการส่งออกแรงดันไฟฟ้าโดยให้แรงคงที่เทียบกับเวลาพบว่าที่ความถี่สูงๆสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าออกมาได้สูงถึง 1.0 V ในขณะที่ให้ความถี่คงที่แต่ให้แรงที่ต่างกันพบว่าแรงดันไฟฟ้ามีความแปรผันตรงกับแรงที่ให้ ดังแสดงในภาพที่ 2.32 (b)



รูปที่ 2.32 (a) Voc ที่สร้างขึ้นโดยตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิต ที่ความเข้มข้น 40 wt% BTNP ระหว่างได้รับแรงกลโดยการกดที่ความดันคงที่ 0.5 N/mm^2 (b) Voc การตรวจวัดระหว่างการให้แรงเชิงกลที่คงที่โดยการกด ความถี่ 2.7 Hz ที่ความดันต่างกัน [2]

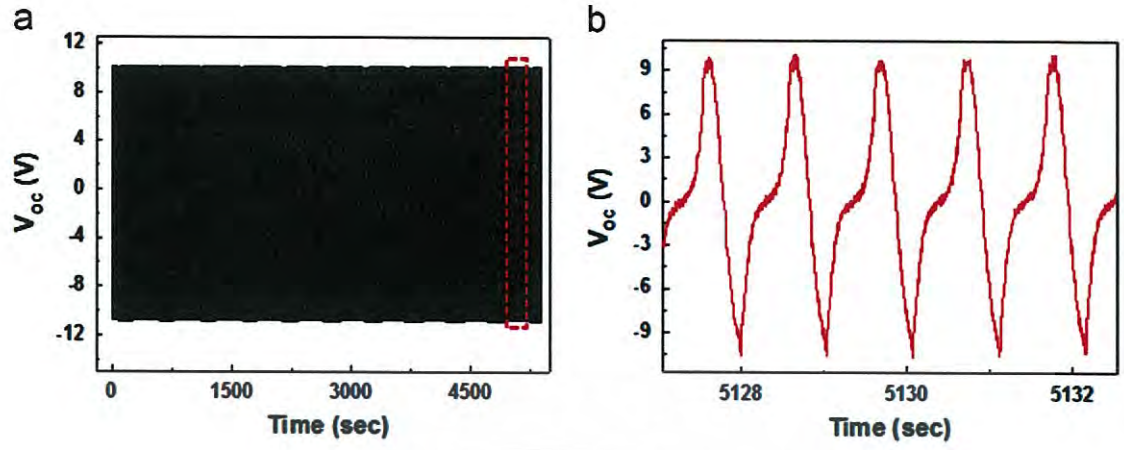
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเมื่อนำตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้มาทำการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยในนำมาติดกับ นิ้วมือ ข้อมือ และข้อพับ และตรวจวัดการสร้างแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.33 และทำการทดสอบความเสถียรภาพของวัสดุเมื่อมีการให้แรงต่อเนื่อง 5000 รอบ เป็นเวลานาน และตรวจวัดการส่งออกแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.34 (a) และรูป (b) รูปขยายแสดงการส่งออกแรงดันไฟฟ้าที่ 5000 รอบ พบว่ามีการให้แรงดันไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ ซึ่งแสดงถึงความเสถียรเมื่อได้รับแรงเป็นเวลานาน

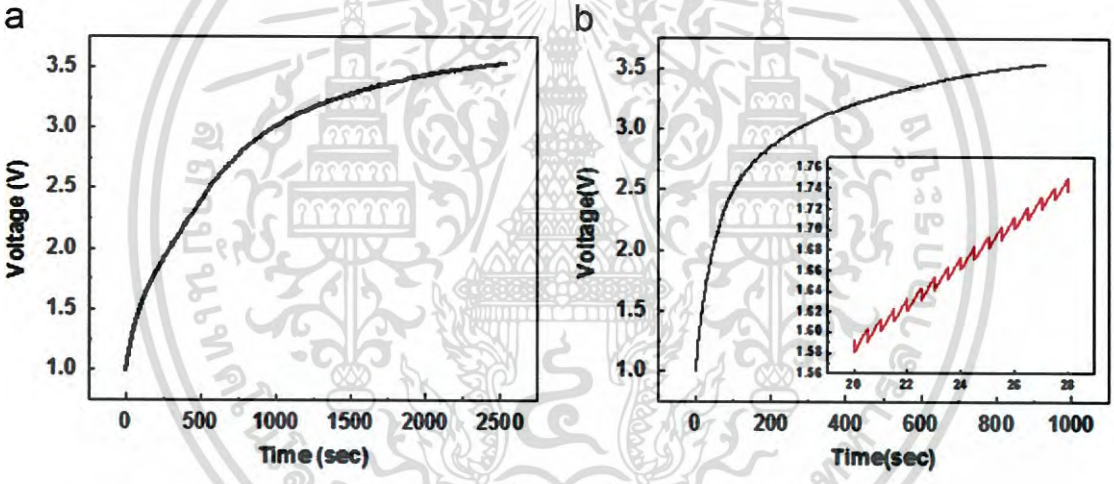


รูปที่ 2.33 แสดงการเก็บเกี่ยวพลังงานการตรวจวัด Voc ตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิต ที่ความเข้มข้น40 wt% BTNP โดยนำตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิตมาแปะติดกับ (a) นิ้วมือ (b) ข้อมือ (c) ข้อพับ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 Voc ที่ส่งออกจาก 40wt% ตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิตระหว่างการทดสอบความเสถียรโดยการดัดมากกว่า 5000 รอบ (a) ขยายสัญญาณที่ส่งออกในรูปบริเวณที่ไฮไลต์ (b) [2]

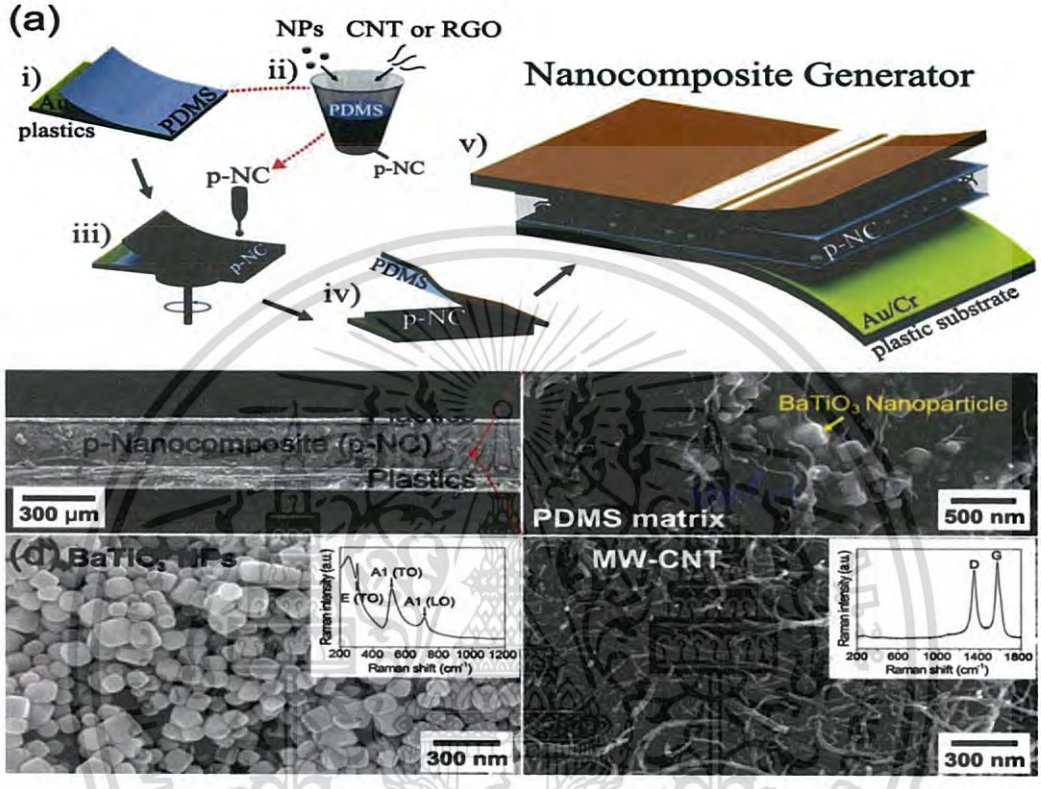


รูปที่ 2.35 แสดงลำดับการชาร์จแบตเตอรี่ไมโคร (a) จากการเคลื่อนไหวทางชีวกลศาสตร์และ (b) การเคลื่อนไหวโดยการดัดวงกลม 40 wt% ตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกนาโนคอมโพสิตเชื่อมขนาน แสดงขั้นตอนการชาร์จที่ชาญฉลาดของแบตเตอรี่ขนาดเล็ก [2]

K. Park et al. [29] ได้ศึกษาพัฒนาการทำตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิตที่ยืดหยุ่นจากอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (barium titanate; $BaTiO_3$) กับ แท่งนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube; CNT) โดยผสมอนุภาคนาโน $BaTiO_3$ กับ CNT เคลือบลงบนแผ่นพอลิเมทิลไซลอกเซน (Polidimethyl siloxsane; PDMS) แล้วประกบแผ่น PDMS เข้าด้วยกันและปิดทับด้วยแผ่นขั้วอิเล็กโทรด ดังในรูปที่ 2.36 (a) โดยเมื่อนำไปทำการตรวจวัดเพื่อดูอนุภาคพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

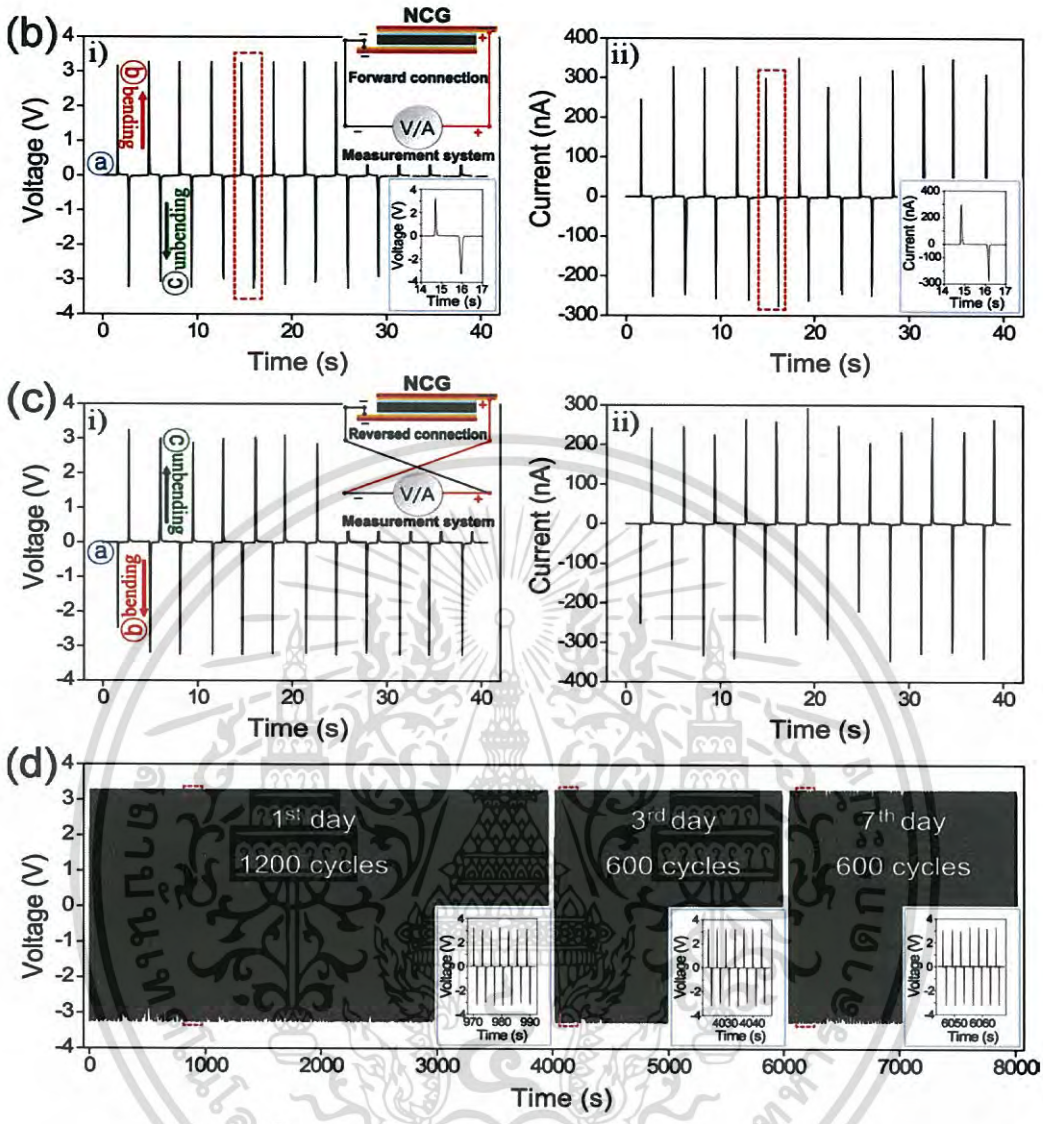
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.36 (b) แสดงชั้นของ วัสดุผสมนาโน กับพอลิเมอร์ โดยเมื่อทำการขยายบริเวณชั้นวัสดุผสมนาโนพบการกระจายตัวของแบเรียมไททาเนตในเมทริกซ์พอลิเมอร์ PDMS ที่ดี ดังรูปที่ 2.36 (c) และในรูปที่ 2.36 (d) และ (e) แสดงอนุภาคของนาโนแบเรียมไททาเนต และท่อนาโนคาร์บอนตามลำดับ



รูปที่ 2.36 (a) กระบวนการในการผลิตตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิต (b) ภาพ SEM ภาพแบบตัดขวางของตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิต (c) ภาพ SEM แบบตัดขวางที่ขยายแสดงอนุภาคของนาโนคอมโพสิต (d) ภาพ SEM ของอนุภาคนาโน $BaTiO_3$ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอมอล (hydrothermal method) กราฟแสดงสเปกตรัมรามาน ที่ได้จากอนุภาคนาโน $BaTiO_3$ (e) MW-CNTs มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 นาโนเมตรและความยาวของ 2 ไมครอน รูปประกอบแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมรามันของ MW-CNTs กับกลุ่ม D ขนาดใหญ่ (f) รูปของอนุภาคนาโนคอมโพสิตที่ใช้คีมดัดงอ รูปประกอบแสดงอุปกรณ์ตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิต 3 x 4 (cm) ใช้นิ้วมือดัด (g) ชนิดของอุปกรณ์ตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิตขนาดใหญ่ 13x13 (cm) ถูกประกอบขึ้นด้วยวิธี spin-casting หรือ Mylar bar-coating. [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



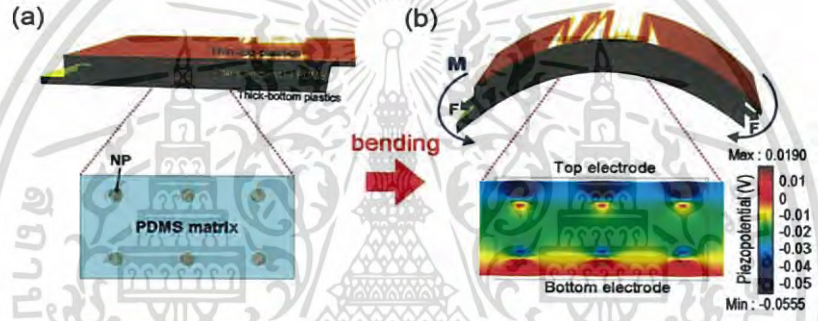
รูปที่ 2.37 (a) แสดงอุปกรณ์ตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิตสภาพปกติ การดัดงอ และปล่อยการให้แรง (b) ตรวจวัดการส่งออกของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิตในการเชื่อมต่อไปข้างหน้า ในช่วงที่มีการดัดและไม่มีการดัด (c) (open-circuit voltage) และ (short-circuit) สัญญาณกระแสสร้างขึ้นในการเชื่อมต่อแบบย้อนกลับ (d) แสดงระยะเวลาในการทดสอบความทนทานต่อการนำไฟฟ้าเพื่อยืนยันเสถียรภาพของอุปกรณ์ตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิต [29]

นอกจากนี้นาโนคอมโพสิตได้ถูกนำไปตรวจวัดการสร้างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากการให้แรงเชิงกล การดัด และทดสอบความทนทานต่อการนำไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงเชิงกลเป็นเวลานานๆ ซึ่งพบว่าการส่งออกของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิตในการเชื่อมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้างหน้า ในช่วงที่มีการดัดให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้ถึง 3 V, 300 nA และเมื่อปล่อยแรงดัดได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสใกล้เคียงกับค่าเดิมดังรูป 2.37 (b) และรูป (c) แสดงสัญญาณกระแสที่ได้จากการสร้างขึ้นในการเชื่อมต่อแบบย้อนกลับ โดย CNT มีส่วนช่วยในการส่งออกศักย์ไฟฟ้าได้สูงขึ้นและยังช่วยในการกระจายตัวของ $BaTiO_3$ นอกจากนี้ได้ทำการตรวจวัดความเสถียรของตัวกำเนิดวัสดุผสมนาโนโดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 2 ปัจจัย คือ ระยะเวลาที่ได้รับ และความถี่ของแรง ซึ่งพบว่าตัวกำเนิดวัสดุผสมนาโนมีความเสถียรสูงเนื่องจากมีการสร้างแรงดันไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ

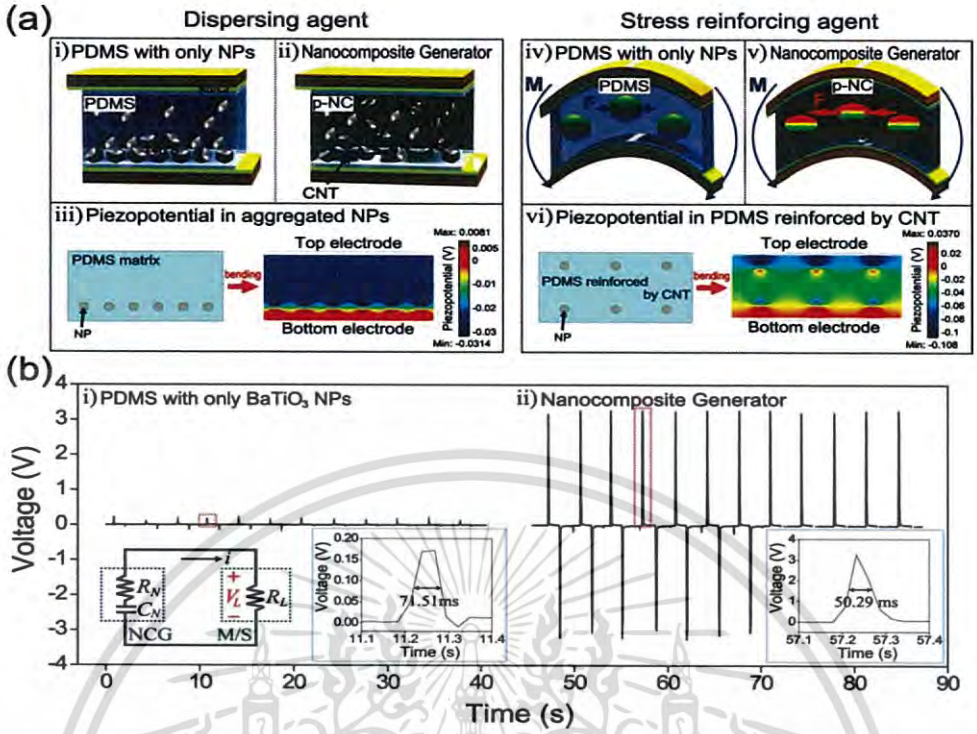
ได้ศึกษาตรวจวัดศักย์เพียโซอิเล็กทริกบนพื้นผิวขั้วด้านบนและล่างโดยเมื่อทำการให้แรงดัดกับตัวกำเนิดวัสดุผสมนาโน พื้นผิวขั้วด้านบนที่มีการยืดออกมากจะมีศักย์เพียโซอิเล็กทริกสูงกว่าขั้วด้านล่างที่มีการยืดตัวน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 (ก) การจำลองรูปแบบของอุปกรณ์ตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิต โครงสร้างทั้ง 6 จุด ของ $BaTiO_3$ ฝังตัวบนพอลิเมอร์เมทริกซ์ PDMS (ข) จำลองความแตกต่างภายใน PDMS ระหว่างด้านบนและด้านล่างขั้วไฟฟ้าส่งผลต่อค่าเพียโซอิเล็กทริก [29]

ในการศึกษาเปรียบเทียบการส่งออกแรงดันไฟฟ้าของวัสดุผสมนาโนที่มีสารช่วยกระจายตัวและไม่มีสารช่วยกระจายตัว ดังแสดงรูปที่ 2.39 (a) i, ii โดยเมื่อวัสดุผสมนาโนไม่มีสารช่วยกระจายตัวจะทำให้การสร้างกระแสไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอทั่วกันทั้งแผ่นเนื่องจากอนุภาคของแบเรียมไททาเนตรวมตัวกันบริเวณด้านล่างพอลิเมอร์อยู่ด้านบน ดังแสดงรูปที่ 2.39 (a) iii และเมื่อใส่สารช่วยกระจายตัวท่อนาโนคาร์บอนทำให้อนุภาคของแบเรียมไททาเนตมีการกระจายตัวดีขึ้นและท่อนาโนยังเป็นสื่อนำทำให้มีการส่งออกแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.39 (b) i, ii

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

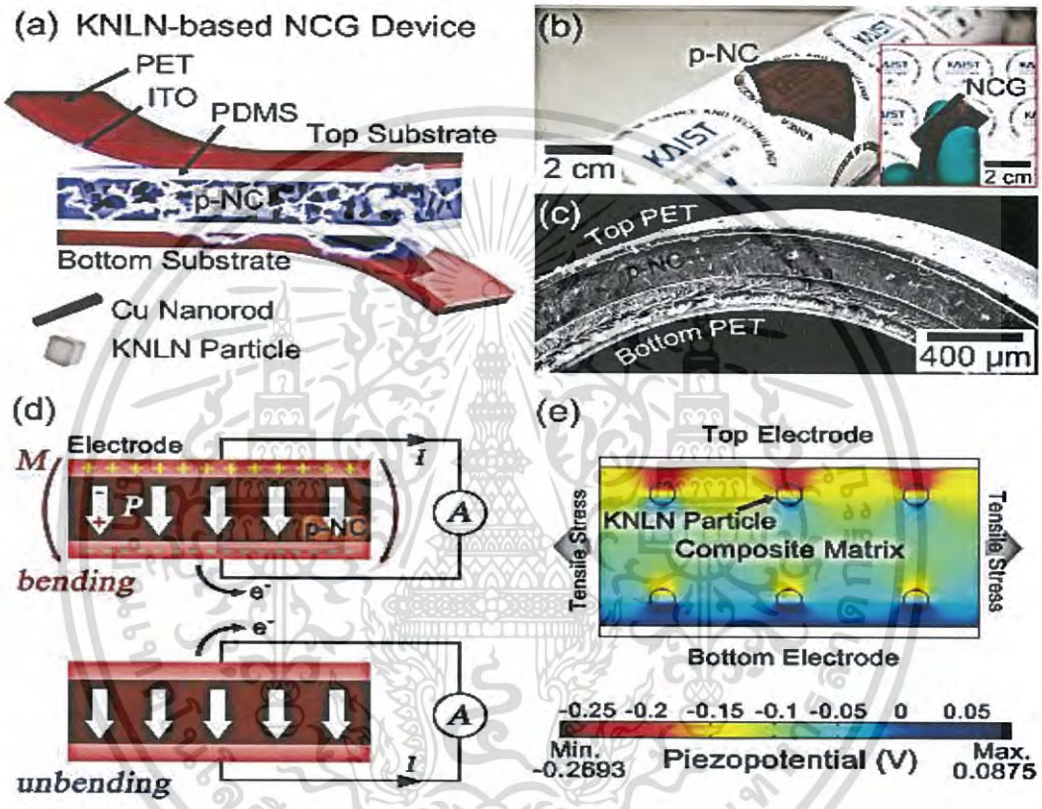


รูปที่ 2.39 (a) แสดงโครงสร้างแบบตัดขวางของอุปกรณ์ตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิตและการคำนวณการกระจายศักย์เพียโซอิเล็กทริกสำหรับอธิบายบทบาทของแท่งนาโนคาร์บอน (CNTs) CNTs ทำหน้าที่กระจายตัว (ii) และตัวเร่งความเครียด (v) ซึ่งได้รับการรองรับโดยถูกคำนวณจากความแตกต่างของศักย์เพียโซอิเล็กทริก (iii and vi) (b) การส่งออกศักย์ไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีเพียงอนุภาคนาโน $BaTiO_3$ และอุปกรณ์ตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิต อนุภาคนาโนที่มีการกระจายตัวที่ดีและเพิ่มประสิทธิภาพของความเครียดโดย CNTs ทำให้มีศักย์ไฟฟ้าส่งออกที่สูง รูปด้านล่างขวาแสดงศักย์ฟ้าส่งออก สร้างโดยการเคลื่อนไหวทางกลโดยการดัด รูปประกอบด้านล่างซ้ายแสดงวงจรสมมูลของอุปกรณ์ ตัวกำเนิดนาโนคอมโพสิต [29]

C. K. Jeong et al. [30] เครื่องกำเนิดไฟฟ้าวัสดุประกอบนาโนคอมโพสิตขาดใหญ่และยืดหยุ่นที่ไม่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบที่ใช้อนุภาคอัลคาไลน์ไนโอเบตและฟิลเลอร์แท่งนาโนโลหะ งานวิจัยนี้กล่าวถึงอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโนคอมโพสิตที่ไม่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กตริกคืออนุภาคอัลคาไลน์ไนโอเบต (KNLN) และสารเสริมแรงคือแท่งนาโนทองแดง (Cu) เพื่อสร้างวัสดุนาโนคอมโพสิตเพียโซอิเล็กตริก (p-NC) โดย KNLN ถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้กระบวนการสถานะของแข็ง (Solid State Method) และแท่งนาโนทองแดงที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) ดังแสดงในภาพที่ 2.40 (a) รูป (b) แสดงตัวกำเนิดวัสดุผสมที่มีขนาด 2 เซนติเมตรและมีความโปร่งแสงและยืดหยุ่น และ รูป (c) ตัวกำเนิดวัสดุผสมตรวจวัดด้วยเครื่องอิเล็กตรอน

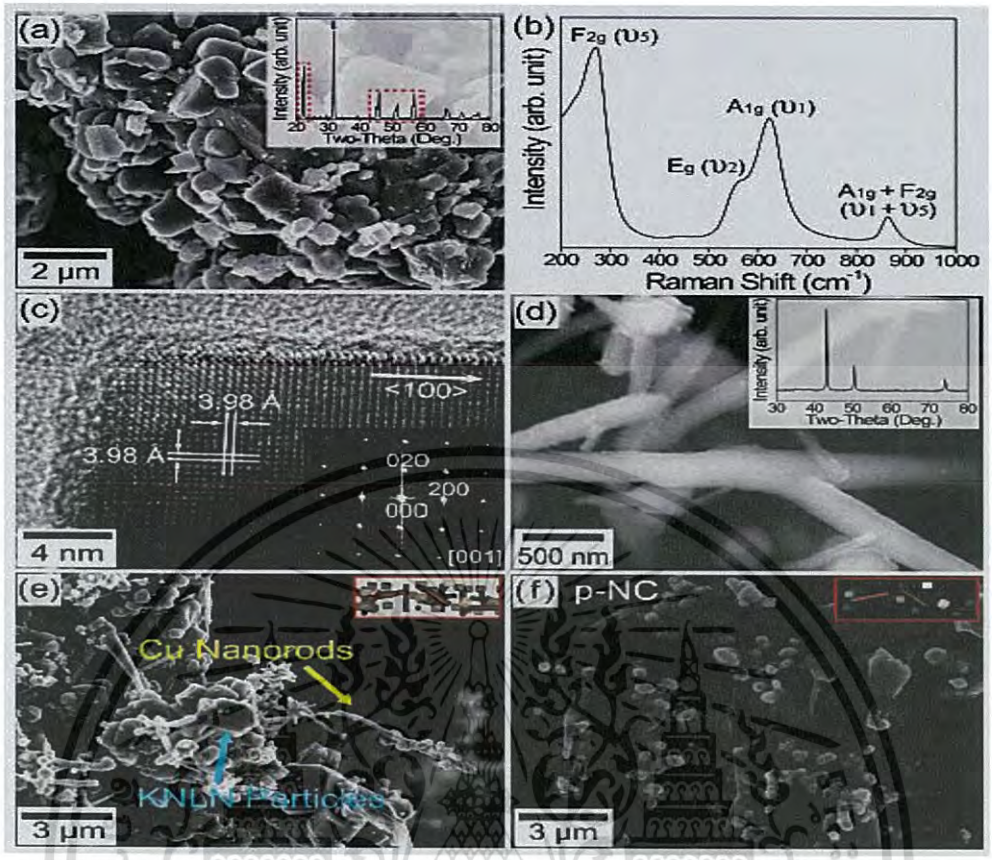
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบส่องกราดดูระหว่างชั้นของวัสดุผสม และได้ทำการศึกษากลไกการกำเนิดพลังงานของอุปกรณ์ NCG เมื่อทำการให้แรงดัด กระแสที่ไหลถูกสร้างจากด้านบนและเมื่อปล่อยแรงกระแสจะถูกสร้างจากด้านล่างของขั้วอิเล็กโทรดในเชิงบวก ในรูป (e) แสดงการกระจายการกำเนิดศักย์ไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกภายในชั้น p-NC ของอนุภาค KNLN ที่มีการกระจายตัวที่ดี เมื่อให้แรงดึง 0.33% ภายใต้การดัดงอ



รูปที่ 2.40 (a)แผนผังของอุปกรณ์ NCG ที่ใช้อนุภาค KNLN และ NRs Cu (b) ภาพถ่ายแสดงความยืดหยุ่นของ p-NC บนกระดาษทรงกระบอก (c) ภาพถ่าย SEM แสดงภาพตัดขวางของ NCG (d) แผนผังแสดงกลไกการกำเนิดพลังงานของอุปกรณ์ NCG ในสภาวะที่ถูกงอ กระแสที่ไหลถูกสร้างจากด้านบนและล่างของอิเล็กโทรดในเชิงบวก (e) ภาพจำลองการกระจายการกำเนิดศักย์ไฟฟ้าเพียโซอิเล็กตริกภายในชั้น p-NC ของอนุภาค KNLN ที่กระจายตัวได้ดี เมื่อให้แรงดึง 0.33% ภายใต้การดัดงอ [30]

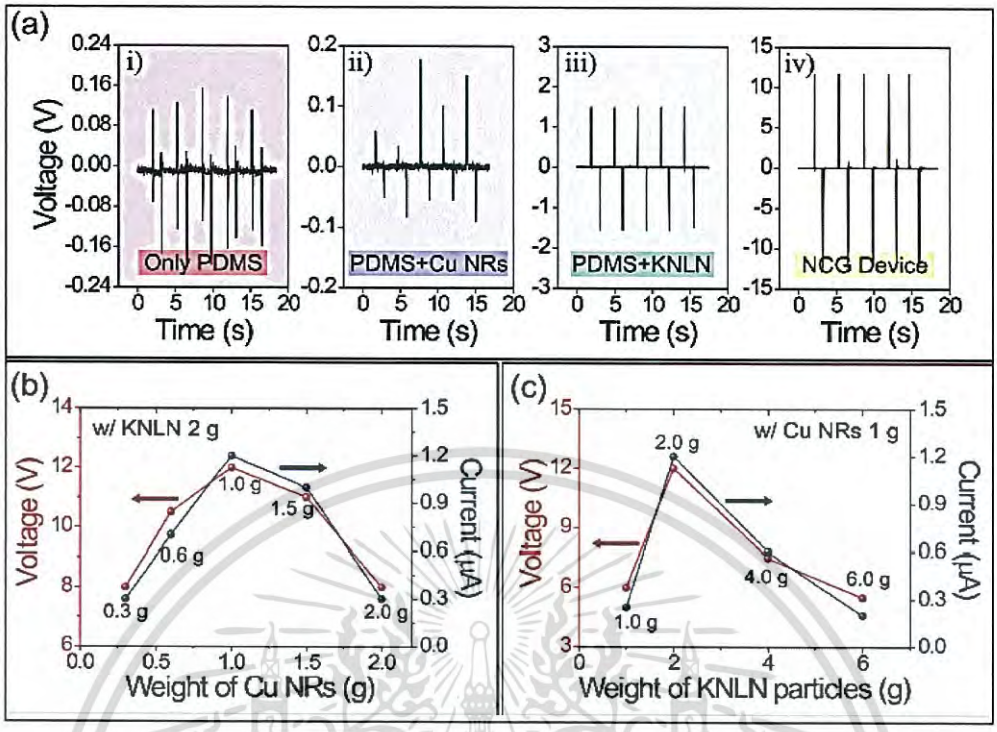
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.41 (a) ภาพถ่าย SEM ของอนุภาค KNLN ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (b) สเปคตรัมรามานของอนุภาค KNLN ที่แสดงโครงสร้างผลึกเพอรอฟสไกต์ของวัฏภาคเตตระโกนอล (c) ภาพ HRTEM ของ อนุภาค KNLN (d)ภาพแสดง SEM และกราฟ XRD ของ Cu (e) ภาพขยาย SEM ของวัสดุนาโนผสมประกอบด้วยอนุภาค KNLN และ NRs Cu ก่อนผสม PDMS (f) ภาพแสดง SEM ของภาคตัดขวาง P-NC กับวัสดุเนื้อหลัก PDMS [30]

อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโนคอมโพสิตที่ไร้สารตะกั่วแบบยืดหยุ่น (NCG) ที่สร้างโดยกระบวนการสปินอย่างง่าย (simple spin-casting method) ประสบความสำเร็จในการแปลงพลังงานเชิงกลเป็นพลังงานไฟฟ้าถึง 12 โวลต์ และ 1.2 ไมโครแอมป์ ซึ่งได้ผลสูงกว่างานวิจัยวัสดุกำเนิดไฟฟ้านาโนที่ไร้สารตะกั่วอื่นๆ ดังภาพที่ 2.42 (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



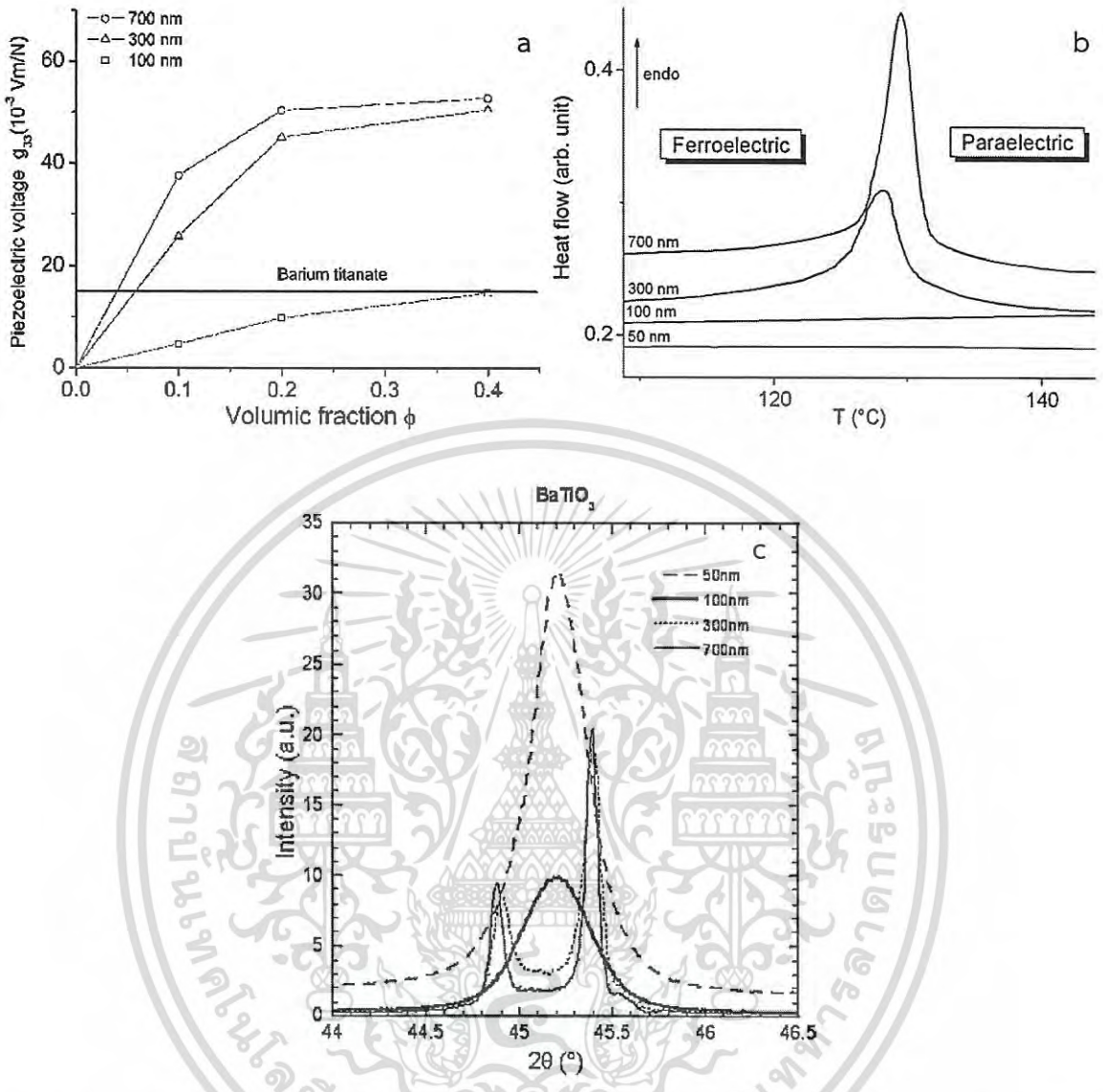
รูปที่ 2.42 (a)ภาพการสร้างศักย์ไฟฟ้าส่งออกจากอุปกรณ์ที่ถูกสร้างขึ้น (i)ใช้เพียง PDMS (ii) วัสดุผสม Cu NRs-PDMS (iii)วัสดุผสมที่มีเฉพาะอนุภาค KNLN (iv), อุปกรณ์ NCG (b) การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าส่งออกและกระแสจากอุปกรณ์ NCG ภายใต้ปริมาณ KNLN คงที่ (c) การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าส่งออกและกระแสจากอุปกรณ์ NCG ภายใต้ปริมาณ Cu NRs คงที่ [30]

การเก็บเกี่ยวพลังงานใช้ในการเปล่งแสงขาวของหลอดแอลอีดีโดยปราศจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอก อุปกรณ์ NCG มีพื้นที่ขนาดใหญ่กว้างและยาว 30 เซนติเมตร ที่ถูกสร้างขึ้นโดยวิธีบาร์โคดติ้ง (bar-coating method) ซึ่งจะได้รับผลผลิตสูงสุดถึง 14 โวลต์และ 8 ไมโครแอมป์ ดังแสดงในรูป 2.42 (b) และ (c) ข้อดีของเทคโนโลยี NCG คือสามารถผลิตได้ง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำและเหมาะสำหรับเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความยืดหยุ่นสูงเข้าได้กับร่างกายมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jean-Fabian and Dantras [31] ได้ทำการศึกษาสร้างวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกระหว่างแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) กับพอลิเอไมด์ โดยใส่ปริมาณอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ปริมาณร้อยละ 2.4 ถึง 40 โดยมีขนาดของอนุภาคแบเรียมไททาเนต 50 100 300 และ700 นาโนเมตร ได้ศึกษาการโพลาไรซ์ที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมเพียโซอิเล็กทริก ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่เหมาะสมจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อวัสดุมีวัฏภาคที่เหมาะสม ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกจะลดลงต่อเมื่อวัฏภาคเตตระโกนอลหายไป ดังรูปที่ 2.43 (ก) รายงานอิทธิพลของปริมาณแบเรียมไททาเนตที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก โดยใช้ขนาดของอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่แตกต่างกัน จากกราฟแสดงให้เห็นว่าในทุกๆขนาดอนุภาคของแบเรียมไททาเนต เมื่อเพิ่มปริมาณแบเรียมไททาเนตส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกเพิ่มสูงขึ้นและที่ปริมาณแบเรียมไททาเนตคงที่ ค่าศักย์ไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกลดลงเมื่อขนาดอนุภาคลดลงจาก 700 และ 600 นาโนเมตร และลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ 100 นาโนเมตร ซึ่งสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.43 (ข) เอนทาลปีของการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิคูรีจากเครื่อง DSC พบว่าอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่มีขนาด 50 และ 100 นาโนเมตร ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคจากเฟอโรอิเล็กทริกเป็นพาราอิเล็กทริก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคแบเรียมไททาเนตขนาดต่ำกว่า 100 นาโนเมตรไม่มีความเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก และยังสามารถยืนยันได้จากรูปที่ 2.43 (ค) จากการตรวจวิเคราะห์แบเรียมไททาเนตอนุภาค 700 500 300 100 และ 50 นาโนเมตร ด้วย เทคนิค XRD พบว่าอนุภาคแบเรียมไททาเนตขนาด 100 และ 50 นาโนเมตร มีโครงสร้างวัฏภาคแบบคิวบิก และอนุภาคแบเรียมไททาเนตขนาด 700 500 และ 300 นาโนเมตร มีโครงสร้างวัฏภาคแบบเตตระโกนอล จึงสรุปได้ว่าอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่ต่ำกว่า 300 นาโนเมตรไม่ใช่วัฏภาคแบบเตตระโกนอล ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกต่ำมากและปริมาณอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่ใส่ในวัสดุคอมโพสิตยังส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกอีกด้วย โดยปริมาณแบเรียมไททาเนตที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกมากขึ้น

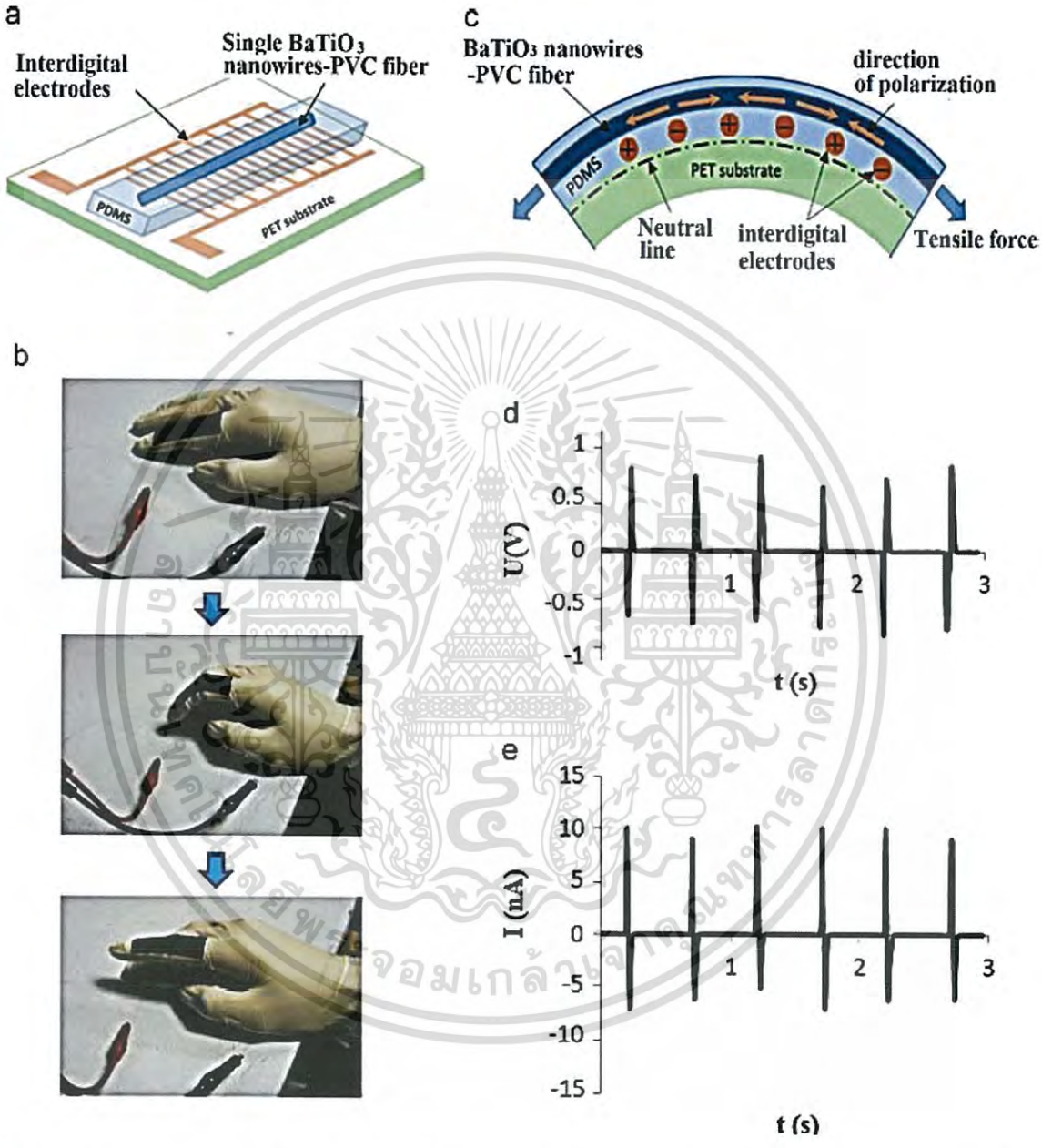
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.43 (a) กราฟแสดงศักย์ไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกกับปริมาณแบเรียมไททาเนต ที่ขนาดอนุภาคแบเรียมไททาเนต 700 300 และ 100 นาโนเมตร [31] (b) กราฟแสดงช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิคูรีของอนุภาคแบเรียมไททาเนตขนาด 700 300 100 และ 50 นาโนเมตรวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC [31] (c) การวิเคราะห์ อนุภาคแบเรียมไททาเนตขนาด 700 300 100 และ 50 นาโนเมตร ด้วยเทคนิค XRD [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Min Zhang et al. [32] ได้ทำการศึกษาตัวกำเนิดที่มีความยืดหยุ่นสูงบนพื้นฐานวัสดุผสมจากเส้นลวดแบเรียมไททาเนตกับพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride)



รูปที่ 2.44 (a) แสดงโครงสร้างของ $BaTiO_3$ ทีผสมกับเส้นใยพอลิไวนิลคลอไรด์บนพื้นฐานตัวกำเนิดนาโน (SFBNG) และการเก็บเกี่ยวพลังงานของการเคลื่อนไหวร่างกายมนุษย์องค์ประกอบของ SFBNG (b) รูปแสดงตัวกำเนิด (SFBNG) ในสภาวะที่ปกติและมีการดัด-ปล่อย ของนิ้วมือ (c) แสดงโครงสร้างหน้าตัดและกลไกการสร้างไฟฟ้าของ (SFBNG) เมื่อมีการดัดด้วยนิ้ว (d) และ (e) แสดงการสร้างแรงดันไฟฟ้าและกระแสเทียบกับเวลาต่อการตอบสนองของ (SFBNG) [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของตัวกำเนิด กระบวนการผลิตตัวกำเนิดประกอบด้วยสามขั้นตอนหลัก ในขั้นตอนแรกการจัดเรียงตัวของเส้นลวดนาโน โดยสังเคราะห์ด้วยวิธี topochemical สร้างวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับเส้นใยพอลิเมอร์โดยวิธีการปั่นและมีปริมาณเส้นลวดแบเรียมไททาเนตที่มีอัตราส่วนสูงในเส้นใยพอลิเมอร์เมทริกซ์ในรูปแบบเส้นใยคอมโพสิต เมื่อให้แรงเฉือนความเครียดระหว่างกระบวนการปั่นทำให้เส้นลวดแบเรียมไททาเนตมีการจัดเรียงตัวสม่ำเสมอสอดคล้องตามเส้นใย และวัสดุผสมเส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตกับเส้นใยพอลิเมอร์ถูกเตรียมลงบนพื้นผิวและเคลือบทับด้วยขั้วไฟฟ้าดิจิตอล ดังแสดงในภาพที่ 2.44 (a) เส้นลวดแบเรียมไททาเนตที่มีการจัดเรียงตัวในเส้นใยนาโนพอลิเมอร์บนพื้นฐานตัวกำเนิดนาโน แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสได้ถึง 0.9 V และ10.5 nA ตามลำดับ เมื่อนำตัวกำเนิดติดที่นิ้วมือและดัดนิ้วมือ ดังแสดงในภาพที่ 2.44 (b, d, e) โดยเมื่อทำการให้แรงดัดนิ้วมือตัวกำเนิดทำให้เส้นลวดแบเรียมเกิดความเครียดภายในเกิดการสร้างประจุไฟฟ้าที่บนพื้นผิวใกล้กับพอลิเอทิลีน ซึ่งการเสียรูปของเส้นลวดแบเรียมไททานเนตกับพอลิไวนิลคลอไรด์สร้างศักย์เพียโซอิเล็กทริกในตัวกำเนิดเพียโซอิเล็กทริกทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนสู่ภายนอกและผลิตส่งออกไฟฟ้า โดยเส้นลวดแบเรียมไททาเนตกับพอลิไวนิลคลอไรด์ทำงานในโหมด d_{33} ดังแสดงในภาพที่ 2.44 (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตของแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน โดยเตรียมแบเรียมไททาเนตในสามรูปแบบคือ แบเรียมไททาเนตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ แบเรียมไททาเนตคอร์เชลล์และแท่งนาโนแบเรียมไททาเนตและปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับสารเคมี วัสดุอุปกรณ์และวิธีการในการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตแสดงไว้ตามลำดับต่อไปนี้

3.1 สารเคมี

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมแบเรียมไททาเนตที่ปรับปรุงพื้นผิวชนิดคอร์เชลล์ (BT-coreshell)

1. แบเรียมไททาเนตขนาดอนุภาคนาโน (Barium Titanate Nano Powder; $BaTiO_3$) ความบริสุทธิ์ 99.95 % ผลิตโดยบริษัท Advanced Materials ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. สารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide; H_2O_2) ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ผลิตโดยบริษัท Carlo Erba Reagent ประเทศเยอรมณี
3. สารละลายพอลิไดเอลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Polydialyldimethylammonium chloride; PDADMAC) ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
4. แผ่นนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Nano Sheet; TiO_2) ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT-nanorod)

1. แบเรียมคาร์บอเนต (Barium Carbonate; $BaCO_3$) ความบริสุทธิ์ 99.9% ผลิตโดยบริษัท Advanced Materials ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium (Anatase) Oxide; TiO_2) ความบริสุทธิ์ 99.9% ผลิตโดยบริษัท Advanced Materials ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride; NaCl) ความบริสุทธิ์ 99.98% ผลิตโดยบริษัท Fisfer Chemical ประเทศเบลเยียม
4. โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium Chloride; KCl) ความบริสุทธิ์ 99.8% ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem Pty ประเทศออสเตรเลีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตของแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT-PDMS) และการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT)

1. แบเรียมไททาเนตชนิดคอร์เชลล์ที่เตรียมได้
2. ผงนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium Titanate Nano Powder; BaTiO3) ผลิตโดยบริษัท Advanced Materials ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. แท่งนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ผลิตโดย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
4. ซิลิโคนอิลาสโตเมอร์ เบส หรือ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน $(C_2H_6OSi)_n$ ผลิตโดยบริษัท DOWN-CORNING ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. ซิลิโคน อิลาสโตเมอร์ เคียวริ่ง เอเจนท์ (SILICONE ELASTOMER CURING AGENT) ผลิตโดยบริษัท DOWN-CORNING ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. (carbinol functional) Methyl-siloxane dimethylsiloxane copolymer
7. กรดไนตริก (HNO_3) ความเข้มข้นร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก ผลิตโดยบริษัท RCI Labscan Limited ประเทศไทย
8. เอทานอล (CH_3CH_2OH) Analytical Reagent A.R. ผลิตโดยบริษัท RCI Labscan Limited ประเทศไทย

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมแบเรียมไททาเนตชนิดคอร์เชลล์ (BT-coreshell)

1. บีกเกอร์ ขนาด 25 50 และ 100 มิลลิลิตร
2. ช้อนตักสาร
3. ปิเปตขนาด 5 และ 10 มิลลิลิตร
4. กระบอกวัดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร
5. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
6. กระดาษฟอยล์ (Foil)
7. หลอดหยด
8. ขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร
9. ชุดรีฟลักซ์
10. หลอดบรรจุสารละลายขนาด 50 มิลลิลิตร
11. เข็มฉีดยาเบอร์ 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific
13. เครื่องโซโนเคมี ผลิตโดยบริษัท Sonics Vibra Cell
14. เตาอบสารผลิตโดยบริษัท Fisher Scienctific

3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตของแบเรียมไททาเนตกับพอลิได-เมทิลไซลอกเซน (BT-PDMS) และการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT)

1. บีกเกอร์ ขนาด 25 มิลลิลิตร
2. เข็มฉีดยาขนาด 1 และ 10 มิลลิลิตร
3. แก้วพลาสติก
4. กล่องพลาสติก 6 ช่อง ขนาด 3 × 3 นิ้ว
5. กระบอกเอทานอล
6. ช้อนตักสาร
7. อลูมิเนียมฟอยล์ (aluminum foil)
8. แท่งแก้วคนสาร
9. แท่งแม่เหล็กคนสาร
10. หลอดหยด
11. โกร่งบดสาร
12. ขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร
13. ชุดรีฟลักซ์
14. เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.0001 กรัม ผลิตโดยบริษัท Sartorius
15. เครื่องอัลตราโซนิกส์ ผลิตโดยบริษัท NDI รุ่น136 H
16. เตาอบสาร ผลิตโดยบริษัท Fisher Scienctific

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ ZEISS รุ่น EVO MA 10
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope)
3. เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Infrared Spectrometer; IR) ผลิตโดยบริษัท PerkinElmer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เครื่องตรวจการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer: XRD) ผลิตโดยบริษัท Siemens รุ่น D8 Advance
5. เครื่อง LCZ มิเตอร์ รุ่น Agilent E4980A ใช้วัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าการสูญเสียไดอิเล็ก-ทริก (dielectric loss) ในช่วงความถี่ 20 Hz ถึง 2 MHz
6. เครื่องรามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy)
7. เครื่องวัดการส่งออกศักย์ไฟฟ้า (Tektronic digital oscilloscope)

3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตกับพอลิเมทิลไซลอกเซนที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยท่อนาโนคาร์บอน

3.3.1 การปรับปรุงพื้นผิวของแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) ด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

ในการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคแบเรียมไททาเนตให้มีหมู่ไฮดรอกไซด์ (-OH) มาเกาะบริเวณพื้นผิว เพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ โดยในขั้นตอนการเตรียมจะใช้ผงแบเรียมไททาเนตเกรดการค้านำไปชั่งมาปริมาณ 15 กรัม จากนั้นนำแบเรียมไททาเนตที่ชั่งได้มาใส่ขวดก้นกลมร่วมกับสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 350 มิลลิลิตร และทำการรีฟลักซ์ (Reflux) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้สารละลายเย็นตัวลงและนำมาหล่อเย็นในอ่างน้ำ เมื่อสารตัวอย่างที่เตรียมได้เย็นลงแล้ว จึงนำมากรองลดความดันแยกเอาอนุภาคแบเรียมไททาเนตออกมา จากนั้นนำสารตัวอย่างไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นและนำไปทำการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์

3.3.2 การปรับปรุงพื้นผิวของแท่งนาโนคาร์บอน (CNT) ด้วยสารละลายกรดไนตริก (HNO_3)

ในการปรับปรุงพื้นผิวของแท่งนาโนคาร์บอนให้มีหมู่คาร์บอกซิล (COO-) มาเกาะ เพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของแท่งนาโนคาร์บอน โดยในขั้นตอนการเตรียมจะทำการชั่งแท่งนาโนคาร์บอนปริมาณ 5 g นำมาใส่ลงในขวดก้นกลมร่วมกับสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) ความเข้มข้นร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก และทำการรีฟลักซ์เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อทำการรีฟลักซ์เสร็จแล้ว ทิ้งให้สารตัวอย่างเย็นตัวลงจากนั้นนำไปกรองลดความดันและล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) โดยทำการทดสอบด้วยกระดาษลิตมัสโดยนำหยดสุดท้ายที่ผ่านกระดาษกรองลงมาในแต่ละครั้ง มาหยดลงบนกระจกนาฬิกาที่มีกระดาษลิตมัสอยู่ ให้ทำในลักษณะเช่นนี้ในทุกรอบของการล้าง จนกว่ากระดาษลิตมัสบนกระจกนาฬิกาจะเกิดสีเหลือง จึงจะอนุมานว่าสารตัวอย่างที่ได้มีค่าพีเอชเป็นกลางจากนั้นนำเข้าเตาอบเพื่ออบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นและนำไปทำการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การเตรียมแบเรียมไททาเนตที่ปรับปรุงพื้นผิวชนิดคอร์เชลล์ (BT-coreshell)

การเตรียมแบเรียมไททาเนตที่มีลักษณะเป็นคอร์เชลล์ โดยการนำแบเรียมไททาเนตหุ้มด้วยแผ่นนาโนไททาเนียม ด้วยกระบวนการโซโนเคมี (Sonochemical) โดยนำผงแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) ที่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) มาเตรียมเป็นคอร์เชลล์กับแผ่นนาโนไททาเนตในอัตราส่วน 50:1 (BT rich), 1:1, 1:50 (TiO_2 rich) น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และ PDADMAC 0.1% wt มาทำการโซโนเคมีด้วยเครื่องโซโนเคมี (Sonochemitor) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมแผ่นนาโนไททาเนตในอัตราส่วน 50:1 (BT rich), 1:1, 1:50 (TiO_2 rich) ของแต่ละตัวอย่าง จากนั้นทำการโซโนเคมีต่อเป็นเวลา 30 นาที จะได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นแบเรียมไททาเนตคอร์เชลล์กับแผ่นนาโนไททาเนต จากนั้นนำสารตัวอย่างที่เตรียมได้ไปอบเพื่อไล่ความชื้นออกที่อุณหภูมิ 100 ^{o}C จนสารที่เตรียมได้แห้ง

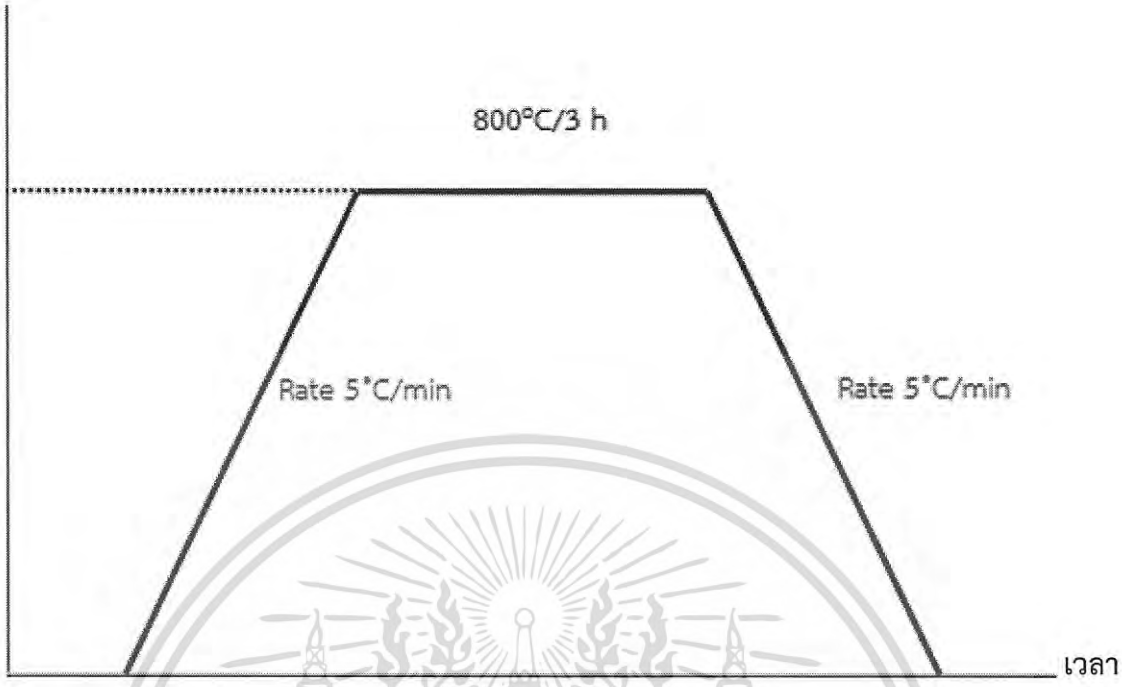
3.3.4 การเตรียมแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต

ในขั้นตอนการเตรียมแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต โดยเริ่มจากการชั่งสารตั้งต้นแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ตามสัดส่วนที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$BaCO_3\,(s) + TiO_2\,(s) \rightarrow BaTiO_3\,(s) + CO_2\,(g) \qquad (3.1)$$

จากนั้นนำสารตั้งต้นที่ชั่งได้ของแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) 4.4606 กรัม ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 1.8958 กรัม โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 33.0583 กรัม และ โพแทสเซียมคลอไรด์ 42.1564 กรัม มาทำการบดผสมกันตามสัดส่วนโดยโมลที่คำนวณได้ ภายในโกร่งบดสารเป็นเวลา 15 นาที ด้วยมือ จากนั้นนำสารผสมที่ผ่านการบดผสมแล้วเทใส่ในถ้วยอะลูมินาครูซิเบิลพร้อมปิดฝาให้สนิท แล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 ^{o}C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้นและลงของอุณหภูมิเท่ากับ 5 ^{o}C/นาที ดังแผนภาพการขึ้นและลงของอุณหภูมิขณะเผาในรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงการอุณหภูมิ ระยะเวลาและอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิในการสังเคราะห์

สารประกอบ $BaTiO_3$ โครงสร้างนาโนเส้นลวด (nanowires) ที่เตรียมจากกระบวนการเกลือหลอมเหลว เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเผา ทำการล้างผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยน้ำร้อน (~100 ^{o}C) และกรอง แล้วทำการตรวจเช็คปริมาณคลอไรด์ที่เหลือด้วยสารละลายซิลเวอร์ในเตรท (silver nitrate; $AgNO_3$) โดยนำหยดสุดท้ายที่ผ่านกระดาษกรองลงมาในแต่ละครั้ง มาหยดลงบนกระจกนาฬิกาที่มีสารละลาย $AgNO_3$ อยู่ ให้ทำในลักษณะเช่นนี้ในทุกรอบของการล้าง จนกว่าสารละลายบนกระจกนาฬิกาจะไม่เกิดตะกอนสีขาว จึงจะอนุมานว่า ผงผลึกที่ได้ไม่มีสารประกอบคลอไรด์หลงเหลืออยู่ จากนั้นนำผงผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 90 ^{o}C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปทำการตรวจสอบเอกลักษณ์

3.3.5 การเตรียมคอมโพสิตของแบเรียมไททาเนตที่ปรับปรุงพื้นผิวกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT-PDMS) และการปรับปรุงสมบัติด้วยแท่งนาโนคาร์บอน (BT-PDMS-CNT)

ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมจะทำการชั่งแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) อนุภาคนาโน ปริมาณ 50% โดยน้ำหนัก และผงของแท่งนาโนคาร์บอน (CNT) ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ใส่ในบีกเกอร์ เพื่อช่วยการกระจายตัวของวัสดุผสม จากนั้นนำไปปั่นกวนเพื่อให้ส่วนผสมกระจายตัวในตัวทำละลายเอทานอล (ethanol) เป็นเวลา 30 นาที นำไปอบที่อุณหภูมิ 90 ^{o}C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จนของผสมที่ได้แห้งสนิท จากนั้นนำมาบดด้วยมือโดยใช้โกร่งบดสารเป็นเวลา 5 นาที ของผสมที่ได้จะมีลักษณะเป็นผงละเอียด

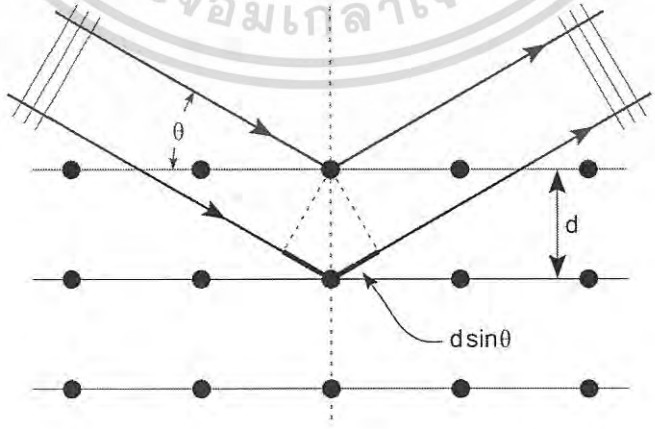
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำผงที่ได้มาทำการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิดโพลีไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) ปริมาณ 10 ml และซิลิโคน อิลาสโตเมอร์ เคียวริ่งเอเจนท์ปริมาณ 1 ml เพื่อช่วยให้วัสดุผสมแข็งตัว ทำการกวนส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเทของผสมที่ผ่านการกวนลงในแม่พิมพ์ โดยแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้นี้เป็นแม่พิมพ์สีเหลี่ยมด้านเท่ามีด้านกว้าง x ยาว เท่ากับ 3 x 3 เซนติเมตร โดยข้อควรระวังคือในระหว่างการเทของผสมลงแม่พิมพ์ ควรทำการเทอย่างช้าๆเพื่อให้ของผสมมีความหนาสม่ำเสมอกันทุกบริเวณ เมื่อเทของผสมลงแม่พิมพ์แล้ว ให้ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้วัสดุผสมแห้งตัว จากนั้นทำการลอกชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ จะได้ชิ้นงานเป็นแผ่นคอมโพสิตที่มีด้านกว้างและยาวเท่ากับ 3 x 3 เซนติเมตร และมีความหนาเท่ากับ 5 มิลลิเมตร สม่ำเสมอกันทั้งแผ่นและมีความยืดหยุ่นทำเช่นเดียวกันกับแบเรียมไททาเนตคอร์เชลล์ (BT-coreshell) และแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต

3.4 เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์

3.4.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction Analysis; XRD)

เทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชั่นเป็นเทคนิคพื้นฐานของการวิเคราะห์ทดสอบวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสี สะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบและทำการวัดค่าความเข้มของรังสี ที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ ก็แตกต่างกันไปด้วย ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิด จะมีรูปแบบเฉพาะตัวหรือก็คือ (XRD pattern)



รูปที่ 3.2 แบบจำลองการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎของแบรก (Bragg's law) จะสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบได้ โดยปกติแล้วของแข็งที่เป็นผลึกจะมีโครงสร้างที่แน่นอน โดยผลึกจะประกอบด้วยอะตอม ไอออน หรือโมเลกุล ที่เรียงตัวกับอย่างเป็นระเบียบมีการซ้ำกันเกิดขึ้นในพิกัดระยะไกลในทุกทิศทาง มีมุมและระยะห่างระหว่างอะตอมที่แน่นอนดังรูปที่ 3.2 โดยจะศึกษาในรูปแบบโครงข่าย (Lattice) ที่มีรูปร่างที่แน่นอน โดยงานวิจัยนี้จะนำผงตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมได้ ไปทำการศึกษาพฤติกรรมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractrometor หรือ XRD) เพื่อหาเฟสของโครงสร้างผลึก (Crystal phase identification) ซึ่งจะอาศัยการบังคับคลื่นเอ็กซเรย์ที่มีความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตัวอย่าง เพื่อศึกษาชั้น (Layer) หรือระนาบ (Plane) ของอะตอมในผลึกที่มุมต่างๆกัน นำผลการวิเคราะห์เทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS) เพื่อระบุวัฏภาคของสารตัวอย่างการกระเจิงของรังสีเอกซ์ โดยเป็นไปตามกฎของแบรก (Bragg's law) ซึ่งสามารถหาระยะห่างระหว่างระนาบได้ ดังสมการที่ 3.2

$$2d \sin\theta = n\lambda \qquad (3.2)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก hkl

θ คือ มุมที่เกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

n คือ เลขจำนวนเต็มใดๆ (n = 1,2,3,.....)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากเป้าทองแดงมีค่า 1.54056 Å

สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ คือ

อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
มุม 2θ เริ่มต้น – สิ้นสุด	10 – 80	องศา
Step size	0.02	องศา
Time step	1	วินาที

ซึ่งรูปแบบการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอ็กซ์ที่ได้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม 2θ และความเข้มของรังสีเอ็กซ์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เพื่อระบุวัฏภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง และสามารถคำนวณหาขนาดผลึกจากรูปแบบการเลี้ยวแบนรังสีเอ็กซ์ได้จากสมการที่ 3.3

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \qquad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ D คือ ขนาดของผลึก (Å)

k คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.89

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากเป้าทองแดงมีค่า 1.54056 Å

θ คือ มุมที่เกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Degree)

β คือ มุมที่เกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Radian)

3.4.2 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR)

โดยทั่วไปรังสีอินฟราเรดมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.7-1000 μm หรือมี Wave Number ที่ 12,500 cm^{-1} - 5 cm^{-1} ซึ่งโดยทั่วไปรังสีอินฟาเรดจะแบ่งช่วงสเปกตรัมของรังสีออกเป็น 3 ช่วง ซึ่งที่ความยาวคลื่นแต่ละช่วงเมื่อนำมาวิเคราะห์ทาง สเปกโตรสโคปี (Spectroscopy) จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ต่างกัน คือ

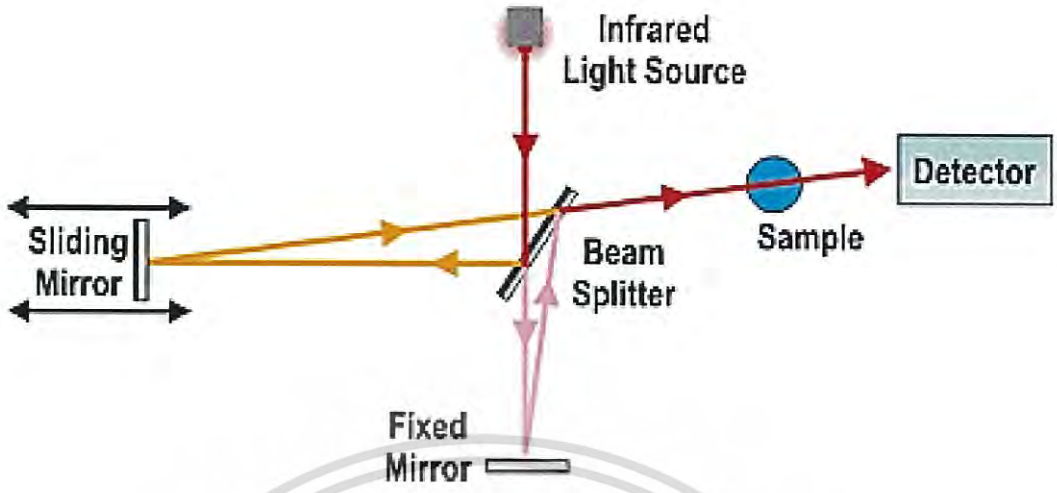
1. Near Infrared Region Wavenumber (NIR) 12,500 - 4,000 cm^{-1} เป็นสเปกตรัมที่เป็นช่วงของ โอเวอร์โทน (Overtone Band)

2. Middle Infrared Region Wavenumber (MIR) 4,000 - 400 cm^{-1} เป็นช่วงที่มีความสามารถในการวิเคราะห์และมีประสิทธิภาพที่สูงในการวิเคราะห์

3. Far Infrared Region Wavenumber (FIR) 400 - 5 cm^{-1} เป็นช่วงสเปกตรัมที่ได้จากการสั่นทั้งแกนของโครงสร้างโมเลกุลหรือ เรียกว่าช่วงที่บ่งบอกเอกลักษณ์เฉพาะตัวของสาร (Fingerprint Region) ซึ่งมีประโยชน์ในการเปรียบเทียบสาร เนื่องจากถ้าเป็นสารเดียวกันจะให้สเปกตรัมที่เหมือนกัน

Infrared (IR) spectroscopy เป็นเทคนิคที่สามารถจำแนกประเภทของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยเทคนิคนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์โดยอาศัยการส่องรังสีอินฟาเรดที่มีความยาวคลื่นหลากหลายจากแหล่งกำเนิดผ่านลงบนสารตัวอย่างและเกิดการกระจายออกของรังสีในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ด้วยโมโนโครเมเตอร์ โดยค่าความยาวคลื่นที่ได้เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวของวัสดุ หลังจากนั้นลำรังสีจะตกลงบนเครื่องตรวจวัดและแปลงสัญญาณที่ได้มาเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วบันทึกสัญญาณดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี [34]

โดยในการตรวจสอบจะเริ่มจากการนำสารตัวอย่างมาบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ที่ปราศจากความชื้น จากนั้นนำสารตัวอย่างที่ผสมนำมาเตรียมใส่ลงในแม่พิมพ์เพื่อทำการอัดขึ้นรูป แล้วจึงนำสารตัวอย่างที่ผสมได้เข้าเครื่องอัดขึ้นรูปเม็ด โดนอยู่ภายใต้สภาวะที่ความดัน 10^{-4} กิโลกรัมต่อตารางเมตร เป็นเวลา 2 นาที เมื่อครบกำหนดแล้วจึงนำสารตัวอย่างผสมที่อัดเม็ดออกจากแม่พิมพ์ จะได้เม็ดสารตัวอย่างที่มีความโปร่งแสง จากนั้นนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR)

3.4.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่มีความสามารถในการตรวจวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) โครงสร้างระดับจุลผลึก (Microstructure) และ พื้นผิวของวัสดุตัวอย่างได้ ซึ่งมีความละเอียดสูงมากและมีกำลังขยายภาพที่สูง โดยได้รับสัญญาณจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างลำอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดและอะตอมของวัสดุตัวอย่างเพื่อนำมาใช้ในการสร้างภาพ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะใช้ระบบเลนส์ที่เป็นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) ในการรวมและโฟกัสลำอิเล็กตรอนเพื่อใช้ในการสร้างภาพ ดังรูปที่ 3.4 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยลำอิเล็กตรอนมีความยาวคลื่นที่สั้นมากกว่าความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น โดยสัญญาณที่ตรวจวัดได้มีอยู่ 5 ประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

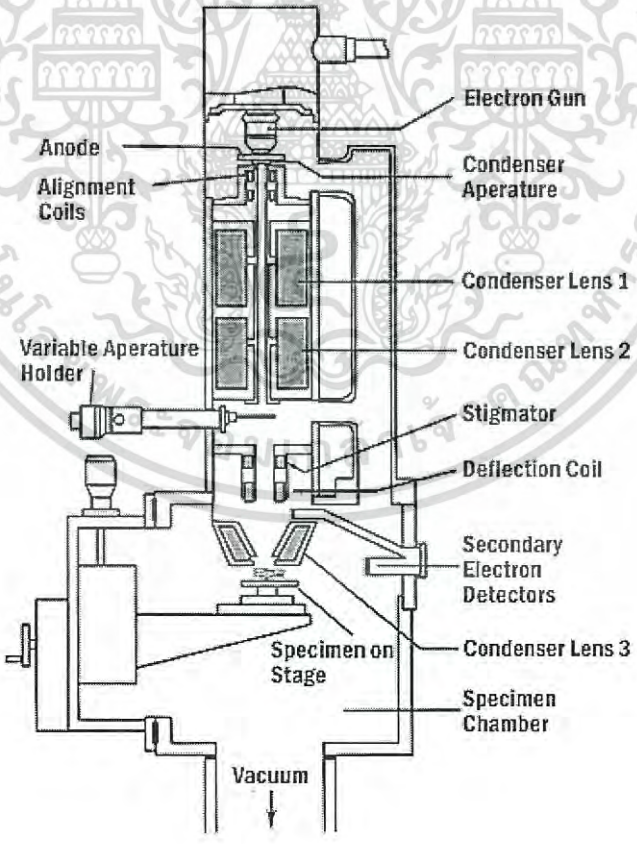
1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอม เนื่องจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electrons) มาชนทำให้เกิดการหลุดออกจากวงโคจร ซึ่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีค่าพลังงานต่ำ และเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมค่อนข้างต่ำ

2. อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattering electrons) เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิไม่ชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจร แต่เกิดการสูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับอะตอมแล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมา เกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

3. อิเล็กตรอนทะลุผ่าน (Transmitted electrons) อิเล็กตรอนปฐมภูมิที่ไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ กับอะตอมและอิเล็กตรอนในวงโคจร ทำให้อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านออกมาได้

4. รังสีเอ็กซ์ (X-rays) เกิดจากอิเล็กตรอนในวงโคจรถูกชนหลุดออกโดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิ แล้วเกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนในชั้นวงโคจรที่สูงกว่าทำให้เกิดการปลดปล่อยรังเอ็กซ์ออกมาค่านึง ซึ่งเป็นค่าจำเพาะขึ้นกับชนิดวัสดุ

5. อิเล็กตรอนที่ถูกดูดกลืนในชิ้นงานตัวอย่าง (Absorbed electrons) เป็นอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานตัวอย่างหมด



รูปที่ 3.4 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้จะทำการการตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเลือกการตรวจวัดสัญญาณ 2 ประเภท คือ 1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons) โดยสัญญาณที่ได้จากอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะให้ภาพบริเวณพื้นผิวระดับนาโนเมตร ซึ่งต่างจาก 2. อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattering electrons) โดยสัญญาณที่ได้จากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับจะได้พื้นผิวของชิ้นงานที่มีความลึกกว่าซึ่งเหมาะในการดูองค์ประกอบ และชนิดของธาตุที่ต่างกัน ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาลักษณะรูปร่างและขนาดของผงตัวอย่าง คอลลอยด์ของสารตัวอย่างและวัสดุประกอบที่เตรียมได้ นำมาอธิบายความสัมพันธ์ที่มีต่อเงื่อนไขต่างๆ เริ่มจากติดผงตัวอย่างและวัสดุประกอบลงบนคาร์บอนเทปและหยดคอลลอยด์ของสารตัวอย่างลงบนเทปทองแดงที่ให้ความร้อน แล้วจึงนำแผ่นคาร์บอนและแผ่นเทปทองแดงที่มีสารตัวอย่างติดอยู่นั้นไปติดลงบนแผ่นอะลูมิเนียม (Stub) จากนั้นเคลือบผิวหน้าชิ้นงานที่เตรียมได้ด้วยทองคำบริสุทธิ์ โดยใช้เทคนิคสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.4.4 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties)

งานวิจัยนี้ทำการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก โดยทำการตรวจวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ε_r) ของเซรามิกที่เตรียมได้เทียบกับการเปลี่ยนแปลง ความถี่และสัดส่วนองค์ประกอบ แล้วนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้จาก สมการที่ 3.4

$$\varepsilon_r = \frac{C_p d}{\varepsilon_0 A} \qquad (3.4)$$

เมื่อ ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของสารตัวอย่าง

C_p คือ ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของสารตัวอย่าง

d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง (cm)

A คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่าง (cm^2)

ε_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ มีค่า 8.85×10^{-12} ฟารัด/เมตร

ค่าความสามารถเก็บประจุของสารสามารถวัดได้ที่ความถี่ต่างๆ แต่โดยทั่วไปจะวัดที่ความถี่ 1 kHz ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าไม่คงที่ ขึ้นกับอุณหภูมิ (T) ของเนื้อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดประจุบนพื้นผิวสำหรับวัสดุผสมเพียโซอิ-เล็กทริก

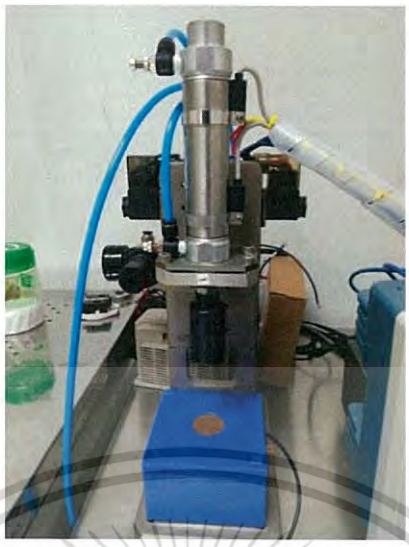
โดยในงานวิจัยจะทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสม ด้วยเครื่องวัดประจุบนพื้นผิวสำหรับวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งควบคุมด้วยโปรแกรม เมเบิลโลจิกคอนโทรลเลอร์ (programmable logic controller; PLC) โดยหลักการทำงานของเครื่องวัดประจุไฟฟ้า สำหรับส่วนประกอบการทำงานของเครื่องสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดแรงกดต่อวัสดุทดสอบ บริเวณวางอุปกรณ์วัสดุทดสอบ (Sample holder) และส่วนของเครื่องตรวจวัด (Detector) แสดงดังรูปที่ 3.5 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

รูปที่ 3.5 แสดงลำดับการทำงานของเครื่องวัดประจุไฟฟ้า

3.4.5.1 แหล่งกำเนิดแรงกด

แหล่งแรงกดที่ได้จากเครื่องนี้มาจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบในแนวดิ่ง โดยการเคลื่อนที่ของลูกสูบนั้นเกิดจากความดันลมที่ได้จากปั๊ม โดยมี PLC ควบคุมการทำงาน สามารถควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์และกำหนดจำนวนรอบและความถี่ในการทดสอบได้ โดยส่วนประกอบสำคัญแสดงรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงส่วนประกอบสำคัญของแหล่งกำเนิดแรงกด

3.4.5.2 อุปกรณ์และวัสดุทดสอบ

โดยอุปกรณ์ส่วนนี้จะประกอบด้วยแผ่นโลหะทองแดงสองแผ่นที่ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าต่อกับสายไฟเพื่อต่อเชื่อมเข้ากับเครื่องตรวจวัด แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยขณะที่วัสดุทดสอบถูกแรงกดจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นที่พื้นผิววัสดุที่มีขั้วแตกต่างกันในแต่ละด้าน จากนั้นประจุจะถูกถ่ายเทให้กับแผ่นทองแดงที่เป็นขั้วไฟฟ้าและไหลเข้าสู่เครื่องตรวจวัดในที่สุด

รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์และการวางวัสดุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5.3 เครื่องตรวจวัด

อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว หรือ ความต่างศักดิ์ที่วัสดุทดสอบสร้างขึ้นบนพื้นผิวใช้ Oscilloscope แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยจะวัดอย่างต่อเนื่อง (real time) ทำให้เห็นการเกิดพีคเกิดขึ้นจากความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นชั่วขณะที่มีการให้แรงแก่วัสดุทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.8 รูปของ Oscilloscope ที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 3.9 แสดงกราฟที่ได้โดยแกน x เป็นเวลาที่ผ่านไป แกน y คือความต่างศักย์ที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 การศึกษาการเตรียมวัฏภาคกระจายตัวของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต (barium titanate nanoparticle; BT) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube; CNT) และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polymetylsiloxane; PDMS)

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของวัฏภาคกระจายตัวแบเรียมไททาเนต (BT)

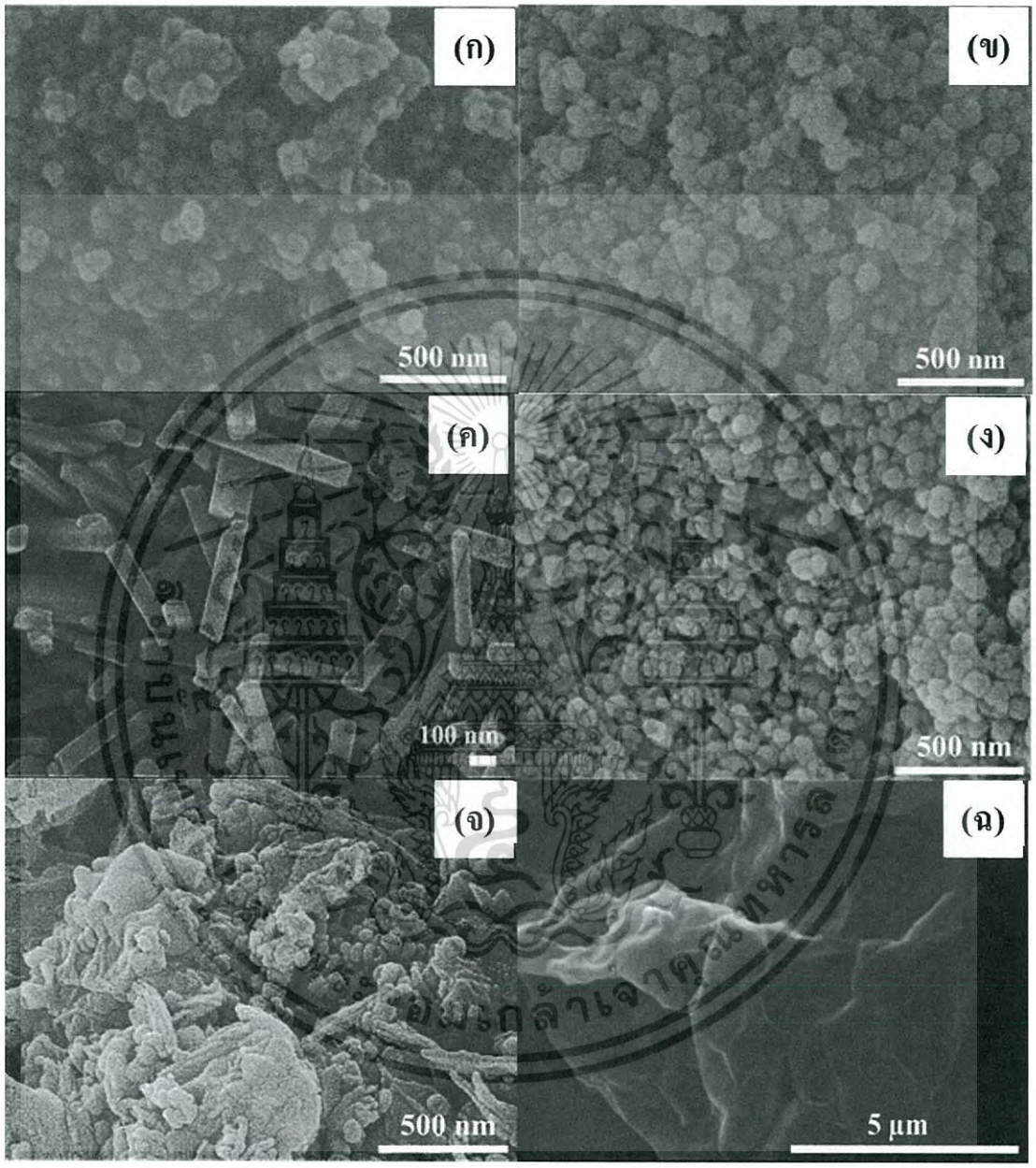
4.1.1.1 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโน แบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (BTtreated) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ-ส่องกราด (scanning electron microscope; SEM)

จากการตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของแบเรียมไททาเนตที่สัณฐานวิทยาต่างกัน โดยผลจากการศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาระหว่างแบเรียมไททาเนตเกรดการค้าและอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก-ข) จากรูปแสดงให้เห็นว่าอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว (BT) ดังแสดงในรูป (ก) มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่ดีนัก อนุภาคเกิดการเชื่อมต่อกันเกาะกลุ่มกัน โดยมีขนาดของกลุ่มอนุภาค (cluster) เฉลี่ยเท่ากับ 428.4 ± 95.4 นาโนเมตร และมีขนาดอนุภาค (particle) เฉลี่ย 80.9 ± 15.1 นาโนเมตร เมื่อทำการเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวพบว่าอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมีการกระจายตัวได้ดีกว่ามีอนุภาคที่เกิดการเกาะกลุ่มกันที่น้อยกว่าอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว โดยมีขนาดกลุ่มอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 267.9 ± 62.2 นาโนเมตร และมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยที่ 0.9 ± 15.0 นาโนเมตร ดังแสดงในรูป 4.1 (ข) ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวทำให้กลุ่มอนุภาคมีขนาดลดลงและช่วยในการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น

ผลการตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแท่งนาโนแบเรียมไททาเนตที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว (Molten salt) เพื่อยืนยันรูปร่างของสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ จากรูปที่ 4.1 (ค) โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับอนุภาคแบเรียมไททาเนต และคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต จะพบว่าสารที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นแท่งระดับนาโน โดยที่แท่งระดับนาโน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 94.0 ± 20.0 นาโนเมตร และความยาวของแท่งเฉลี่ยเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

412.9 ± 149.3 นาโนเมตร ซึ่งแท่งนาโนแบเรียมไททาเนตนี้มีขนาดและการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและมีค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (aspect ratio) เท่ากับ 4.5 ± 1.9



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ (ก) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า (ข) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (ค) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (ง - ฉ) อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตที่อัตราส่วนแบเรียมไททาเนตต่อแผ่นนาโนไททาเนต 50:1 1:1 และ 1:50 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

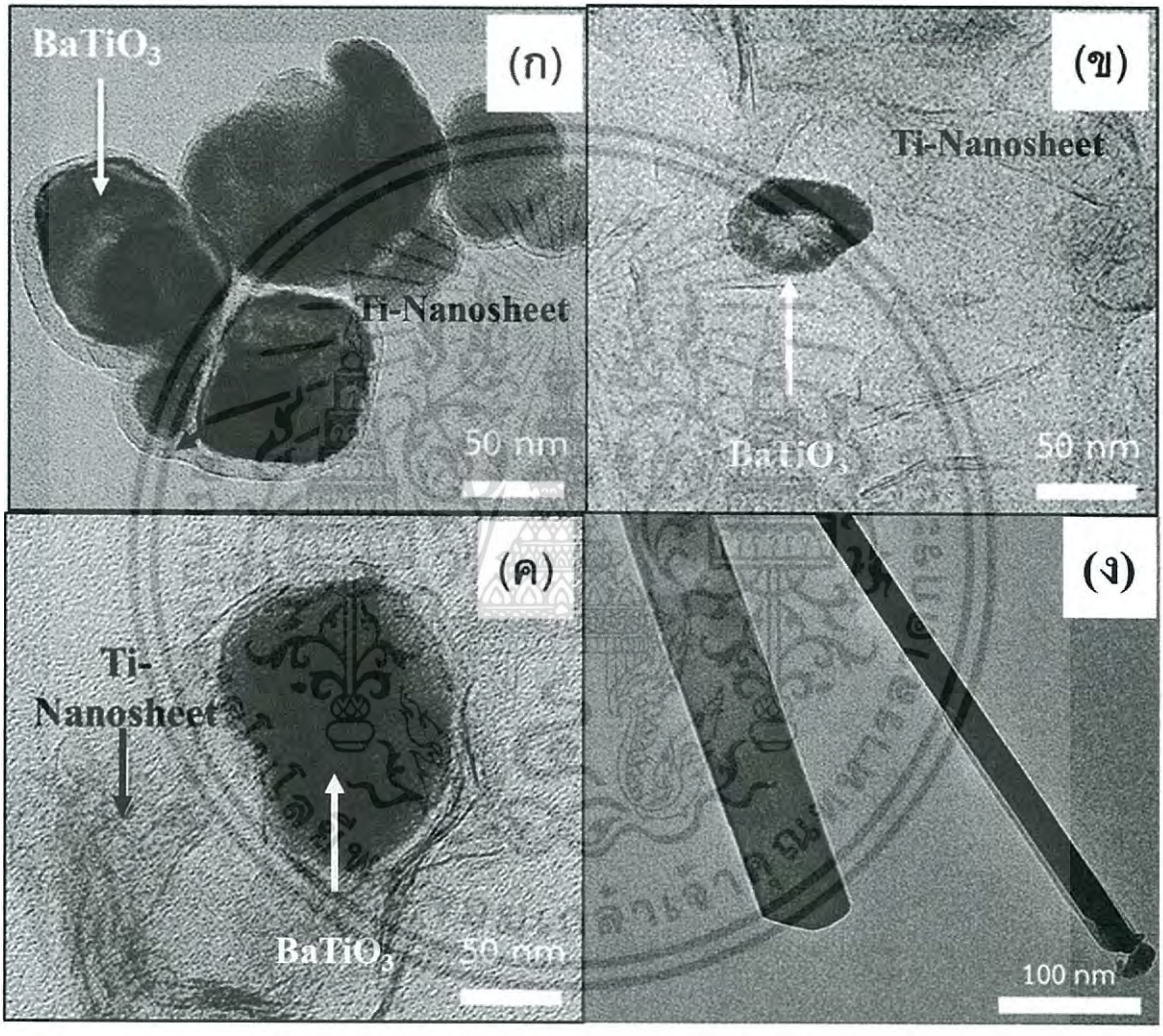
ผลการตรวจวิเคราะห์อนุภาคคอร์เชลล์ของแบเรียมไททาเนตกับแผ่นนาโนไททาเนต (TiO_2 nanosheet) ดังรูปที่ 4.1 (ง - ฉ) จากรูปจะเห็นว่าที่อัตราส่วนของแบเรียมไททาเนตกับแผ่นนาโน ไททาเนตต่างกัน ส่งผลให้ลักษณะสัณฐานวิทยาต่างกัน โดยพบว่าที่อัตราส่วน 50:1 (BT rich) แสดงให้เห็นถึงอนุภาคของแบเรียมไททาเนตที่มีการกระจายตัวที่ดีกว่าอนุภาคแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า ซึ่งเป็นผลมาจากการถูกหุ้มด้วยฟิล์มบางระดับนาโนของแผ่นนาโนไททาเนต ส่งผลให้การเกาะกลุ่มของอนุภาคแบเรียมไททาเนตลดน้อยลง โดยเมื่อนำขนาดอนุภาคของคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตมาเปรียบเทียบกับอนุภาคแบเรียม-ไททาเนต พบว่าอนุภาคเฉลี่ยของอนุภาคแบเรียมไททาเนตและอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตเท่ากับ 80.9 ± 15.0 และ 90.5 ± 11.1 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอนุภาคคอร์เชลล์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการถูกหุ้มด้วยฟิล์มของแผ่นนาโนไททาเนต เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแผ่นนาโนไททาเนตเป็น 1:1 พบว่ามีชั้นของแผ่นนาโนไททาเนตปกคลุมอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.1 (จ) และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแผ่นนาโนไททาเนตเป็น 1:50 จะพบชั้นของแผ่นนาโนไททาเนตที่ปกคลุมอนุภาคแบเรียมไททาเนตจนหมด (TiO_2 rich) ดังรูปที่ 4.1 (ฉ) ซึ่งจากภาพแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตต่อแผ่นนาโนไททาเนตที่ 50:1 (BT rich) มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่สมบูรณ์ที่สุด โดยแสดงการกระจายตัวของอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่ดี

4.1.1.2 ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนต ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM)

จากการนำอนุภาคคอร์เชลล์ของแบเรียมไททาเนตกับแผ่นนาโนไททาเนตที่เตรียมได้ไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ดังรูปที่ 4.2 พบว่าที่อัตราส่วน 50:1 (BT rich) โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นถึงอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ถูกหุ้มด้วยฟิลม์บางของแผ่นนาโนไททาเนตเกิดเป็นอนุภาคคอร์เชลที่สมบูรณ์กว่า ดังรูปที่ 4.2 (ก) เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคคอร์เชลล์ที่อัตราส่วนอื่น โดยที่อัตราส่วน 1:1 และที่อัตราส่วน 1:50 (TiO_2 rich) มีปริมาณของแผ่นนาโนไททาเนตที่มากเกินไป ส่งผลให้แบเรียมไททาเนตไม่ถูกหุ้มด้วยฟิล์มบาง เกิดเป็นรูปร่างคอร์เชลล์ที่ไม่สมบรูณ์ จากผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM และ TEM จึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตต่อแผ่นนาโนไททาเนตที่เหมาะสมคือที่ 50:1 หรือที่ปริมาณอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่มากเกินพอ (BT rich) โดยเกิดจากการนำสารละลายคอลลอยด์ที่มีแบเรียมไททาเนตส่วนคอร์ ที่ผ่านการโซโนเคมีกับแผ่นนาโนไททาเนตส่งผลให้เกิดลักษณะเป็นเชลล์ เนื่องจากพื้นผิวของแผ่นนาโนไททาเนตมีความเป็นลบสูง จึงสามารถไปยึดกับอนุภาคแบเรียมไททาเนตส่วนคอร์ได้โดยผ่านการยึดเกาะกับประจุตรงข้ามของ PDADMAC cation เกิดเป็นไททาเนตเชลล์ ดังรูปที่ 4.3 แสดงถึงแบบจำลองแสดงขั้นตอนการเกิดแบเรียมไททาเนตคอร์เชลล์ และพบว่าความหนาของ

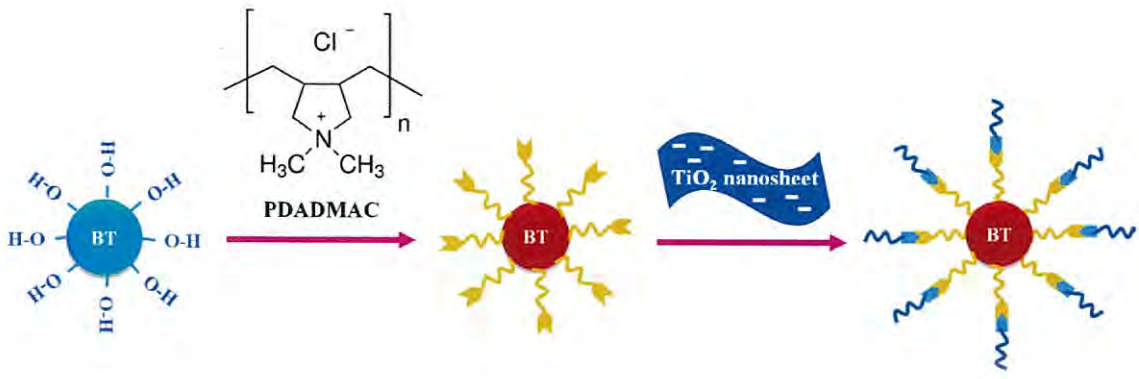
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นฟิล์มนาโนไททาเนตเฉลี่ยของอนุภาคคอร์เชลล์ของแบเรียมไททาเนตอัตราส่วน 50:1 (BT rich) โดยน้ำหนัก เท่ากับ 8.994 ± 3.056 นาโนเมตร และจากการนำแท่งนาโนแบเรียมไททาเนตที่เตรียมได้ไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ดังรูป 4.2 (ง) ที่แสดงให้เห็นถึงรูปร่างที่มีลักษณะเป็นแท่งของสารตัวอย่าง มีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโน-เมตร หรือเรียกได้ว่าเป็นแท่งนาโน



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายสัณฐานวิทยา (TEM) ของอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) ที่มีอัตราส่วนแบเรียมไททาเนตต่อแผ่นนาโนไททาเนตเป็น (ก) 50:1 (ข) 1:1 และ (ค) 1:50 โดยน้ำหนัก (ง) ลักษณะทางสัณฐานวิทยา TEM ของแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



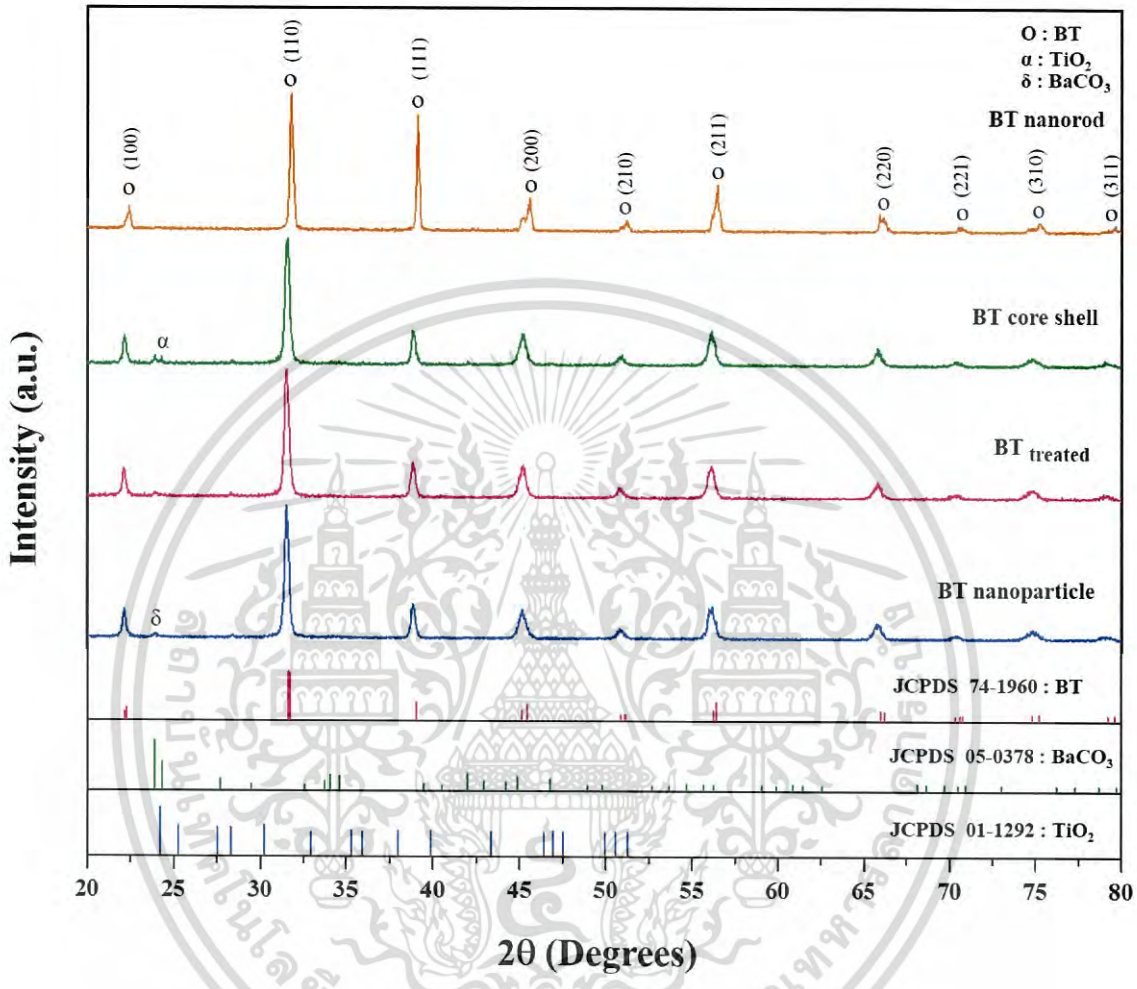
รูปที่ 4.3 แบบจำลองแสดงขั้นตอนการเกิดอนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนต

4.1.1.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนต (BT coreshell) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique; XRD)

จากการศึกษาเฟสบริสุทธิ์และโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนต (BT coreshell) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ในการวิเคราะห์เบื้องต้น ได้นำผลของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังกล่าวมาทำการเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากข้อมูลมาตรฐาน โดยในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลมาตรฐานชุด JCPDS หมายเลข 31-0174 ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานของสารประกอบเพอรอฟสไกต์แบเรียมไททาเนต ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (tetragonal) พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) ที่ได้ มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบแบเรียมไททาเนต โดยพบพีค 2θ ขึ้นที่ มุม 22.261 31.645 38.886 45.375 51.097 56.249 66.118 70.657 75.158 และ 79.466° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (100) (110) (111) (200) (210) (211) (220) (300) (310) และ (311) มีโครงสร้างเป็นเพอรอฟสไกต์แบบเตตระโกนอล โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) และอนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนต (BT coreshell) ปรากฏพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเฟสแปลกปลอมอื่น โดยพบพีค 2θ ขึ้นที่มุม 23.9 เมื่อทำการตรวจสอบพบว่า พีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ดังกล่าวสอดคล้องกับพีคเอกลักษณ์ของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (111) ซึ่งตรงกับข้อมูลมาตรฐานชุด JCPDs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 05-0378 ของสารประกอบแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) โดยคาดว่าเป็นสารประกอบแบเรียม-คาร์บอเนตที่เจือปนอยู่ในอนุภาคแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า



รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียม-ไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell)

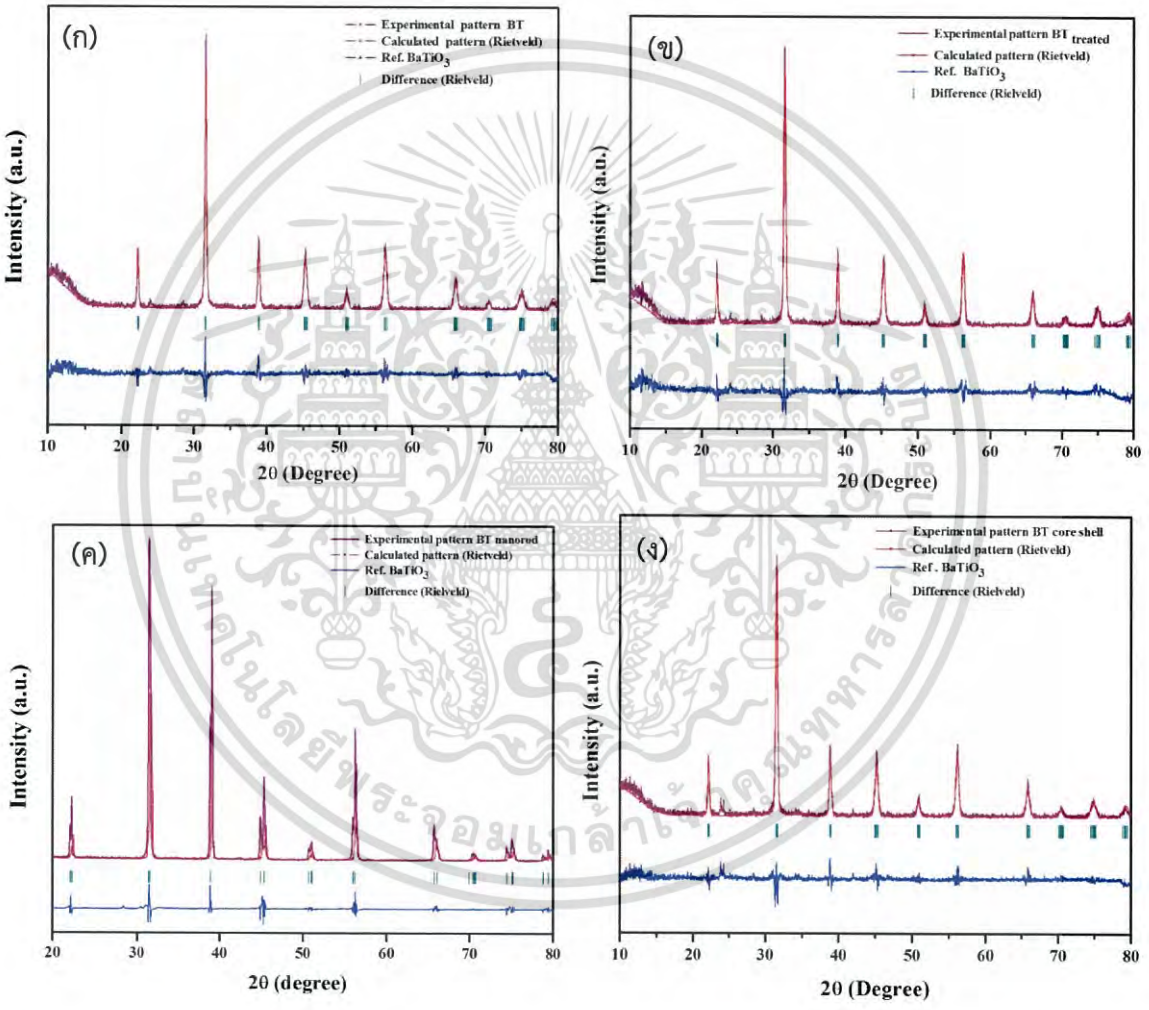
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อคำนวณหาปริมาณวัฏภาคเพอรอฟสไกต์พบว่า อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้ามีวัฏภาคเพอรอฟสไกต์ร้อยละ 96.57 และแบเรียมคาร์บอเนตร้อยละ 3.43 และพบพีค 2θ ที่มุม 24.87 โดยสอดคล้องกับระนาบ (111) ซึ่งตรงกับข้อมูลมาตรฐานชุด JCPDS หมายเลข 01-1292 ที่แสดงถึงเฟสอนาเทส (anatase) ของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นการบ่งบอกถึงการมีแผ่นนาโนไททาเนตอยู่ในอนุภาคคอร์เชลล์ นอกจากนี้พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแบเรียม-ไททาเนตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวและการเตรียมเป็นอนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนตไม่ส่งผลให้พีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดการเคลื่อน (shift) หรือมีความเข้มของพีค (intensity) เปลี่ยนแปลงไป แต่ในรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแท่งนาโนแบเรียมไททาเนตแม้ว่าจะไม่เกิดการเคลื่อน (shift) ของพีค แต่มีความเข้มของพีคเปลี่ยนแปลงไปที่ตำแหน่ง 2θ ที่มุม 31.645 โดยมีความเข้มพีคเพิ่มขึ้นร้อยละ 83.57 จึงมีความเป็นไปได้ว่า โครงสร้างแท่งนาแบเรียมไททาเนตที่สังเคราะห์ขึ้น มีความชอบในการเติบโตไปในทิศทางของระนาบ (111) แต่อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เบื้องต้น พบว่าอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) ด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอรอกไซด์ การสังเคราะห์แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) ด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว และการเตรียมอนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนต (BT coreshell) ด้วยวิธีโซโนเคมี ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือมีเฟสแปลกปลอมอื่นเกิดขึ้น

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์โดยรวมที่ได้นั้น ต่อมาได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลทางโครงสร้างเชิงลึกของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียม-ไททาเนต (BT coreshell) ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบริทเวล (Rietveld analysis method) โดยการเทียบกับข้อมูลมาตรฐานจากฐานข้อมูลมาตรฐาน Crystallographic Information หมายเลข 96-210-0860 กับข้อมูลทางโครงสร้างเชิงลึกของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$)และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) และการเทียบกับข้อมูลมาตรฐานจากฐานข้อมูลมาตรฐาน Crystallographic Information หมายเลข 73643 กับแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) ด้วยซอฟต์แวร์ชื่อ JANA เพื่อยืนยันโครงสร้างผลึกที่ได้ ดังรูปที่ 4.5 โดยเส้นสีม่วงแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้จากเครื่องมือ เส้นสีแดงแสดงถึงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ เส้นในแนวตั้งสีเขียวแสดงระนาบ (*h k l*) และเส้นสีน้ำเงินแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือและจากการคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ ผลที่ได้พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) สอดคล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบเพอรอฟสไกต์แบเรียมไททาเนต ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (tetragonal) ซึ่งตรงตามไฟล์ข้อมูลมาตรฐาน Crystallographic Information ดังกล่าว ซึ่งพบว่าผงผลึกของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียม-ไททาเนต (BT coreshell)ดังกล่าว มีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ ($a = b \neq c$) ใกล้เคียง (ภายใต้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ ± 0.001) กับค่าแลตทิซพารามิเตอร์จากข้อมูลมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์หลังผ่านการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีริทเวล (Rietveld analysis method) ของ (ก) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) (ข) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) (ค) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และ (ง) อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell)

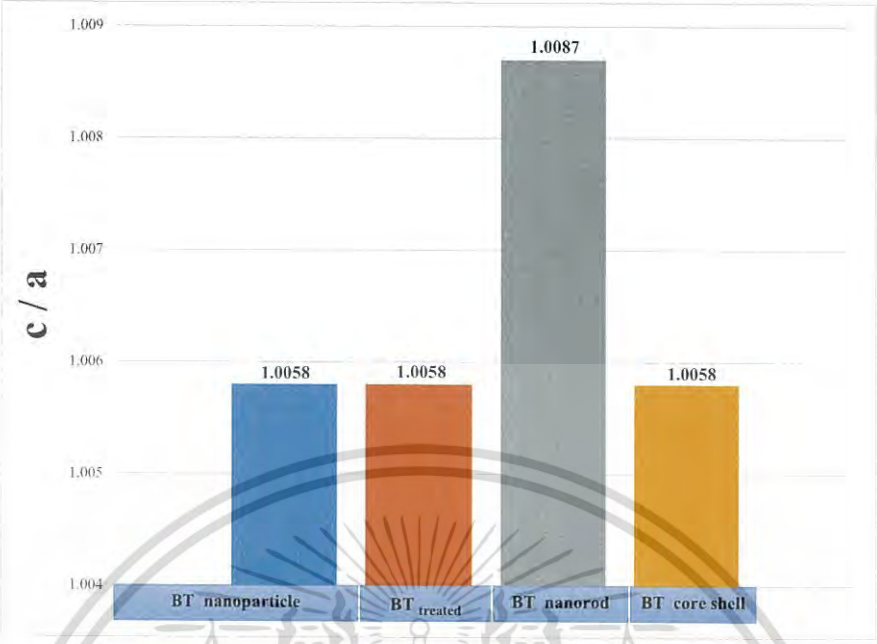
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่าความน่าเชื่อถือที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงลึกด้วยวิธี Rietveld จะแสดงด้วยค่า R (R-value; R_p, R_{wp}, R_{exp}) โดยในงานวิจัยนี้พบว่ามีค่า R ที่ค่อนข้างสูง เป็นผลมาจากความละเอียดของการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ต่ำ โดยวิเคราะห์ในช่วง 2θ เท่ากับ 10 – 80 จึงส่งผลให้ค่าความน่าเชื่อถือต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของตัวแปร (parameters) ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงลึกด้วยวิธีริทเวล (Rietveld analysis method)

	BT	$BT_{treated}$	BT nanorod	BT coreshell
Crystal structure	tetragonal	tetragonal	tetragonal	tetragonal
Space group	*P4mm*	*P4mm*	*P4mm*	*P4mm*
a (Å)	3.9902	4.0054	3.9959	4.0054
c (Å)	4.0131	4.0285	4.0305	4.0285
c/a	1.0058	1.0058	1.0087	1.0058
R_p	26.0	26.0	7.83	26.7
R_{wp}	42.7	42.7	10.60	43.0
R_{exp}	25.23	25.23	7.79	24.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงอัตราส่วนระหว่างค่าแลตทิซพารามิเตอร์ c / a ของวัฏภาคกระจายตัวแบเรียมไททาเนตที่แตกต่างกัน

4.1.1.4 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) ด้วยเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy)

จากรูปแบบรามานสเปกตรัมของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียม-ไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยการวิเคราะห์เชิงลึกจะอาศัยหลักการวิเคราะห์โดยพิจารณาจากทฤษฎีระบบสมมาตร (point group theory) ของผลึก ซึ่งสำหรับผลึกแบเรียมไททาเนตนั้น ในระบบสมมาตรของโครงสร้างแบบคิวบิก (*Pm3m*; Oh^1) จะตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยความยาวคลื่นย่านอินฟราเรด หรือเรียกว่า IR-active ($3F_{1u}$ (IR) + F_2) แต่ไม่สามารถตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยเลเซอร์ในเทคนิครามาน หรือที่เรียกว่า รามานอินแอคทีฟ (Raman inactive) ดังนั้นหากโครงสร้างผลึกของแบเรียมไททาเนต ที่สังเคราะห์ได้เป็นแบบคิวบิก ก็จะไม่ปรากฏพีครามานสเปกตรัมใดๆ แต่ในขณะที่แบเรียมไททาเนต ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (*P4mm*; $C4_v$) ซึ่งมีการเลื่อนออกจากตำแหน่งสมมาตรของอะตอม Ti ในตำแหน่งออกตระฮีดรอลของออกซิเจน (TiO_6) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพขั้ว (polarization) จึงเกิดการตอบสนองต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

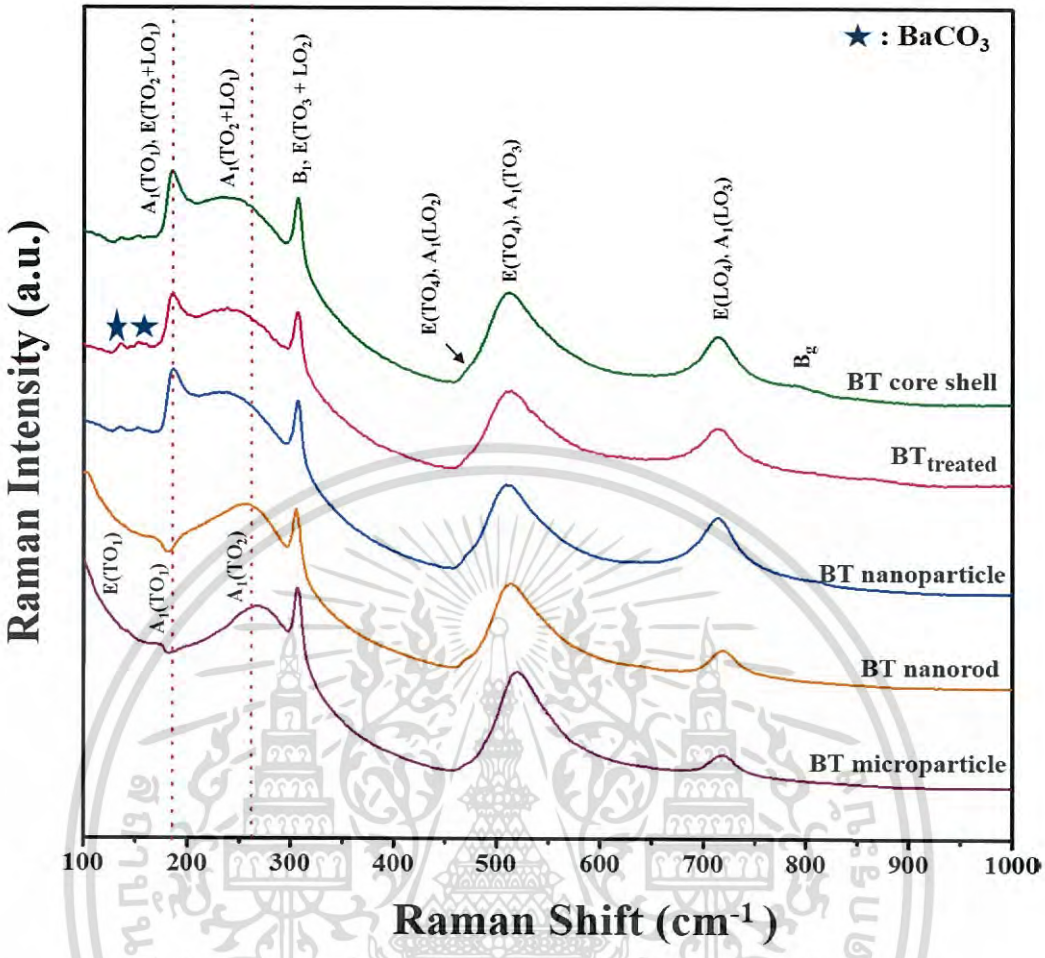
เทคนิครามานแบ่งออกเป็น 8 โหมด คือ 4[E(TO) + E(LO)] (IR & R) + 3[A_1(TO) +A_1(LO)] (IR & R) + B_1 (R) [36] ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบรามานสเปคตรัมของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียม-ไททาเนต (BT coreshell) โดยพีคที่บริเวณ 28-150 cm^{-1} สอดคล้องกับโหมดการสั่นแบบไม่แข็งแรงของโหมด $E(TO_1)$ พีคที่บริเวณ 180 cm^{-1} สอดคล้องกับโหมดการสั่น $A_1(TO_1)$ ซึ่งพีคที่ตำแหน่งนี้เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของวัสดุที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกทุกชนิด ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ anti-resonance และเมื่อเปรียบรูปแบบรามานสเปคตรัมของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) ที่ตำแหน่งพีคบริเวณ 180 cm^{-1} พบว่าของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) เกิดเป็นพีคแบบชี้ขึ้น (positive peak) แต่ในรามานสเปคตรัมของแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) กลับเป็นพีคแบบหัวทิ่ม (dip) ซึ่งมีลักษณะพีคคล้ายกับรามานสเปคตรัมของอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร

โดยมีงานวิจัยของคุณ Y. Shiratori และคณะ [37] ที่ได้ทำการศึกษาการกระเจิงรามาน (raman scattering) ของอนุภาคแบเรียมไททาเนตขนาดนาโน พบว่าอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร จะมีพีคแบบชี้ขึ้นและอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร จะมีพีคแบบหัวทิ่ม โดยอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของพีคบริเวณ 180 cm^{-1} ที่เปลี่ยนจากพีคแบบชี้ขึ้นเป็นพีคหัวทิ่มที่อาจเป็นผลมาจากหลายสาเหตุ เช่น การหดตัวของโหมด $A_1(TO_1)$ ซึ่งเกิดจากข้อบกพร่องแลคติชรวมทั้งการเกิดโครงสร้างแบบออโธรอมบิกที่ทำให้เกิดพีคบริเวณ 193 – 196 cm^{-1} หรือการเปลี่ยนแปลงความเค้นภายในอนุภาคละเอียดที่เปลี่ยนพฤติกรรมการเข้าคู่ (coupling) แต่อย่างไรก็ตามไม่พบพีคที่บริเวณ 193-196 cm^{-1} ของโครงสร้างแบบออโธรอมบิก และยังยืนยันด้วยพีคเอกลักษณ์ของโครงสร้างแบบเตตะโกนอลที่ขึ้นบริเวณ 306 cm^{-1} ดังนั้นพีคแบบหัวทิ่ม (dip) ที่ 180 cm^{-1} ของรามานสเปคตรัมแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) จึงมีสาเหตุมาจากความแตกต่างของรูปร่างและขนาดของโครงสร้างนาโนที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเค้นภายในของอนุภาค [38] เนื่องจากแท่งนาโนแบเรียมไทเนตมีขนาดของความยาวในระดับไมโครเมตร โดยมีขนาดความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 4.13±1.494 ไมโครเมตร และยังพบพีคฐานกว้าง (broad peak) ที่บริเวณช่วง 260 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบ transverse ของโหมด $A_1(TO_2)$ และพบพีคที่ตำแหน่ง 306 515 และ 715 cm^{-1} ที่สอดคล้องกับการสั่นของโหมด [B_1, $E(TO_3+LO_2)$] [$E(TO_4)$, $A_1(TO_3)$] และ[$E(LO_4)$ + $A_1(LO_3)$] ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการเป็นสารประกอบแบเรียมไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบเตเตะโกนอลที่จะพบแถบการกระเจิงของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รามานสเปคตรัมที่บริเวณประมาณ 250 520 และ 720 cm^{-1} และโดยเฉพาะพีคที่ตำแหน่ง 306 cm^{-1} ซึ่งถือเป็นพีคเอกลักษณ์เฉพาะของโครงสร้างแบบเตตระโกนอล ที่เกิดจากการสั่นในระดับอะตอมแบบไม่สมมาตร (asymmetric vibration) ของพันธะระหว่าง Ti-O ในตำแหน่งออกตระฮีดรอล (TiO_6) ซึ่งพีคเหล่านี้จะไม่ปรากฏเมื่อแบเรียมไททาเนต มีโครงสร้างเป็นคิวบิกหรือเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นแบบคิวบิกเมื่อถูกให้ความร้อนจนเกินกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature; T_c) และไม่พบโหมดการสั่นแบบ E(TO_4) บริเวณพีค 487 cm^{-1} ที่ขึ้นเฉพาะโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) และออโธรอมบิก (orthorhombic) [39] จึงยืนยันได้ว่าอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) มีโครงสร้างแบบเตตะโกนอล นอกจากนี้สเปคตรัมรามานของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) แต่พบวัฏภาคแปลกปลอมอื่น โดยพบพีคที่บริเวณ 136 และ 152 cm^{-1} ที่แสดงถึงการมีอยู่ของสารประกอบอนุภาคแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) [40] ที่คาดว่ามาจากการปนเปื้อนของแบเรียมคาร์บอเนตในกระบวนการสังเคราะห์แบเรียมไททาเนตเกรดการค้า และสามารถยืนยันได้จากการตรวจเอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และพบว่าสเปคตรัมรามานของอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) นั้นสอดคล้องกับรูปแบบ Raman active ของชั้นออกตะฮีดรอลของสารประกอบไททาเนต (TiO_6) ชนิดเลปิโดโครไซต์แบบสองมิติ ที่มีโครงสร้างแบบออโธรอมบิค ที่มีการตอบสนองต่อเทคนิครามานในโหมด $3[A_g + B_1g + B_3g]$ โดยชั้นออกตะฮีดรอลของสารประกอบไททาเนต (TiO_6) ชนิดเลปิโดโครไซต์แบบสองมิติที่มีพีคเอกลักษณ์ที่บริเวณ 270 499 และ 704 cm^{-1} แต่อาจเกิดการซ้อนทับกับพีคของแบเรียมไททาเนตที่บริเวณดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามยังพบไหล่พีคขนาดเล็กที่บริเวณ 803 cm^{-1} ที่สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ Ti-O ที่ติดอยู่ในพื้นที่ว่างระหว่างชั้นของสารประกอบไททาเนต (TiO_6) ชนิดเลปิโดโครไซต์ แบบสองมิติ ซึ่งยืนยันถึงการมีอยู่ของแผ่นนาโนไททาเทตในอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 รูปแบบรามานสเปกตรัม (Raman spectrum) ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนต (BT coreshell)

จากผลการตรวจเอกลักษณ์เฉพาะของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และเทคนิครามา สามารถยืนยันได้ว่าอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่มีการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) การเตรียมอนุภาคคอร์เชลล์ด้วยวิธีโซโนเคมี และการสังเคราะห์แท่งนาแบเรียมไททาเนตด้วยวิธีเกลือหลอมเหลว ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและมีวัฏภาคแปลงปลอมอื่นอื่น โดยมีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล

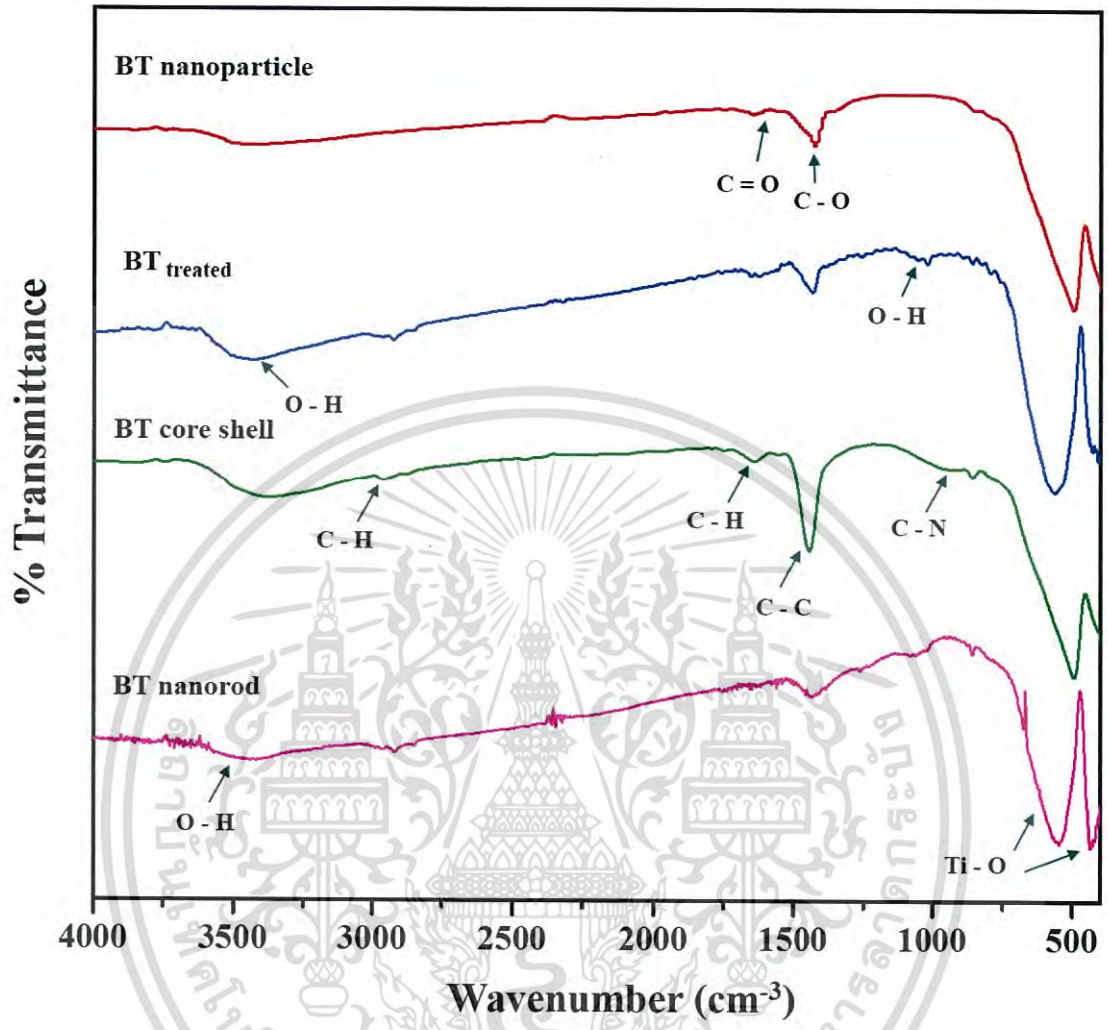
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.5 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell) ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR)

จากการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่น 500 – 4000 cm^{-1} เพื่อตรวจวิเคราะห์หาเอกลักษณ์ของแบเรียมไททาเนตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวและที่ลักษณะสัณฐานวิทยาที่ต่างกัน ดังรูปที่ 4.8 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างแบเรียมไททาเนตเกรดการค้ากับ อนุภาคแบเรียมไททาเนต แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต และคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวโดยจะพบ พีคในช่วงการดูดกลืนที่ 3200-3600 cm^{-1} ที่มีความเข้มสูงขึ้นกว่าแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า ซึ่งพีคในช่วงนี้มีความสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H (stretching vibration) และพบพีคการดูดกลืนที่ 925 cm^{-1} ที่สอดคล้องกับการสั่นแบบงอของพันธะ O-H (bending vibration) ซึ่งเป็นการยืนยันถึงการมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ไปเกาะบริเวณพื้นผิวของแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวจากการทำปฏิกิริยาการเติมหมู่ไฮโดรเจน (hydroxylation reaction) เข้าไปในอนุภาคแบเรียมไททาเนต แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต และ คอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต ด้วยสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) [42] และพบพีคการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Ti-O (stretching vibration) ที่ประมาณ 539 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของแบเรียมไททาเนต นอกจากนี้ยังพบพีคการดูดกลืนที่ 1650 และ 1450 cm^{-1} ที่แสดงถึงการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=O และ C-O ตามลำดับ ของหมู่คาร์บอกซิเลต (CO_3^-) ในสารประกอบแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) [43] ที่พบในอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า ซึ่งช่วยยืนยันการพบเฟสแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) ในผลการวิเคราะห์เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) จากผลการตรวจวิเคราะห์จะเห็นว่าแบเรียมไททาเนตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวมีการเพิ่มขึ้นของพีคซึ่งเป็นการยืนยันว่ามีหมู่ไฮดรอกซิลไปเกาะที่พื้นผิวจริงและไม่ทำให้เอกลักษณ์ของแบเรียมไททาเนตเปลี่ยนแปลงไป

ต่อมาได้ทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ของแบเรียมไททาเนตคอร์เชลล์พบพีคการดูดกลืนที่ 1650 1450 และ 1130 cm^{-1} ที่แสดงถึงการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=C C=N และ C-N ตามลำดับ โดยเป็นผลมาจากการเติมพอลิเมอร์ PDACMAC [44] ในขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนต โดยในแบเรียมไททาเนตคอร์เชลล์จะพบพีคที่มีช่วงการดูดกลืนประมาณ 1650 cm^{-1} 1450 cm^{-1} ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของแบเรียมไททาเนตที่มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาต่างกันพบว่าพีคเหล่านี้มีความเข้มสูงกว่า เป็นผลมาจากการเกิดการซ้อนทับกันของ การสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=C C=N จากการเติมพอลิเมอร์ PDACMAC กับ (COO^-) ของแบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) จึงทำให้มีความเข้มของพีคที่สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 อินฟาเรดสเปกตัมของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) และอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต (BT coreshell)

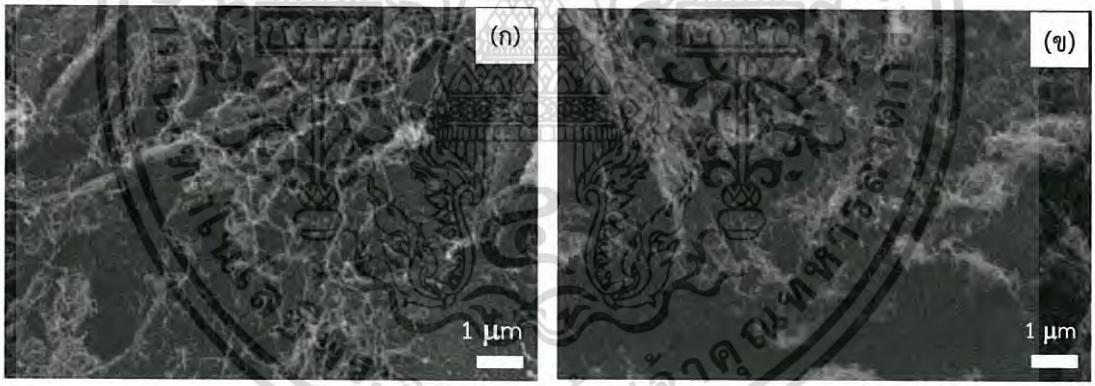
ซึ่งในงานวิจัยของ Isaac W Mwangi [44] และคณะ ได้ทำการวิจัยค้นคว้าเกี่ยวกับพอลิเมอร์ PDACMAC และได้ทำการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ PDACMAC ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี โดยผลที่ได้พบพีคการดูดกลืนที่ 1650 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-H ที่มีคอนจูเกตเป็นวง และพบพีคช่วงการดูดกลืนประมาณ 1450 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของสายโซ่คาร์บอน และ 1130 cm^{-1} ที่แสดงถึงการสั่นแบบยืดหด C-N ซึ่งมีความสอดคล้องกันกับในงานวิจัยดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของวัฏภาคกระจายตัวท่อนาโนคาร์บอน (CNT)

4.1.2.1 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

หลังจากทำการปรับปรุงพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนด้วยสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) และทำการตรวจวัดลักษณะทางสัณฐานวิทยาของท่อนาโนคาร์บอน (CNT) และท่อนาโนคาร์บอนที่มีการปรับปรุงพื้นผิว ($CNT_{treated}$) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งเส้นใยสีขาวแสดงถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของท่อนาโนคาร์บอน โดยรูป 4.9 (ก) แสดงถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของท่อนาคาร์บอนที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว โดยจะเห็นถึงการเกาะกลุ่มและการเกี่ยวพันกันของท่อนาโนคาร์บอน และรูป 4.9 (ข) แสดงถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ ท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว มีการกระจายตัวที่ไม่แตกต่างจากเดิม และท่อนาโนคาร์บอนไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะทางสัณฐานวิทยาหรือมีเฟสแปลกปลอมเกิดขึ้นภายหลังจากการปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวไม่ส่งผลให้เกิดวัฏภาคแปลกปลอมขึ้น จากที่กล่าวมาข้างต้นในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยังไม่สามารถบอกความเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและท่อนาโนคาร์บอนที่มีการปรับปรุงพื้นผิว



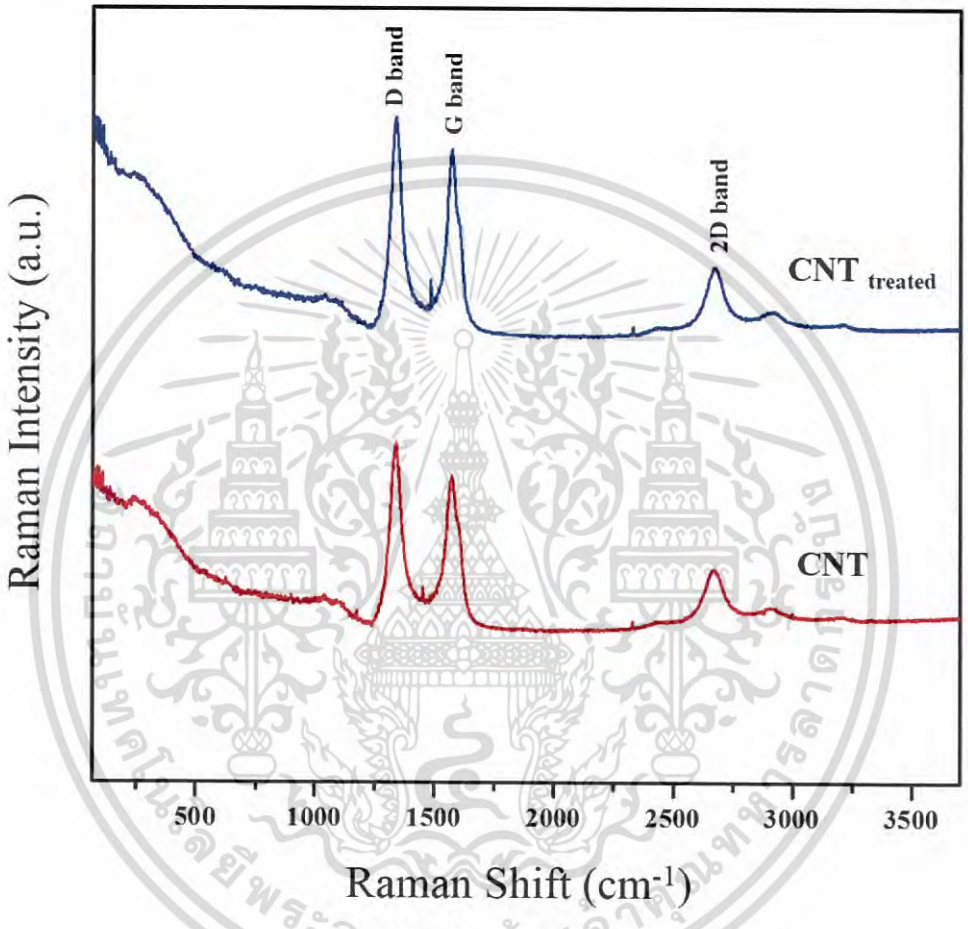
รูปที่ 4.9 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ (ก) ท่อนาโนคาร์บอน (ข) ท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านปรับปรุงพื้นผิว

4.1.2.2 ผลการตรวจสอบเฟสบริสุทธิ์และโครงสร้างผลึกของท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ด้วยเทคนิครามาน (Raman spectroscopy)

จากรูปแบบรามานสเปคตรัมของท่อนาโนคาร์บอนที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวและมีการปรับปรุงพื้นผิว ดังรูปที่ 4.10 พบว่าพีคที่ปรากฏทั้งหมดสอดคล้องกับรูปแบบรามานสเปคตรัมของ ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (MWCNT) โดยพบพีคประมาณ 1330 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับแถบ D (disorder band) และพีคที่ประมาณ 1600 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับแถบ G (graphite band) และพบพีคที่ประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2700 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับแถบ 2D โดยแถบ D เกี่ยวข้องกับพันธะของกราไฟต์ที่ไม่เป็นระเบียบหรือมีข้อบกพร่องภายในโครงสร้าง (Defect) ซึ่งแสดงถึงความเป็นอสัณฐานของคาร์บอนหรือความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกคาร์บอน ถ้าพบแถบ D band ที่มีความเข้มมากแสดงว่ามีท่อนาโนคาร์บอนมีความเป็นอสัณฐานสูงและแถบ G แสดงถึงรูปแบบ TM - tangential หรือแถบของกราไฟต์ [45]



รูปที่ 4.10 รามานสเปกตรัม (Raman spectrum) ของท่อนาโนคาร์บอน (CNT) และท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($CNT_{treated}$)

จากนั้นทำการวิเคราะห์ผล โดยพบว่าหลังจากทำการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนมีค่าการดูดกลืนของแถบ D เพิ่มขึ้นร้อยละ 16.68 ซึ่งแสดงความไม่เป็นระเบียบหรือข้อบกพร่อง (defect) ของพันธะที่เพิ่มขึ้นจากการมีหมู่คาร์บอกซิลิกเกาะบริเวณพื้นผิวของท่อนาคาร์บอน โดยที่อัตราส่วนระหว่างความเข้มของพีค G กับความเข้มของพีค D หรือ I_G/I_D จะแสดงถึงความสมบูรณ์และความบริสุทธิ์ของผลึก ถ้ามีอัตราส่วน I_G/I_D สูงแสดงว่ามีความบริสุทธิ์ของผลึกมากขึ้น นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่าง I_G/I_D ยังสามารถบอกแสดงความแตกต่างของกราฟีนกับท่อนาโนคาร์บอนได้ ซึ่งถ้าเป็นกราฟีนจะเกิดอัตราส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่าง I_G/I_D ที่กว้าง แต่ในท่อนาโนคาร์บอนจะมีอัตราส่วนระหว่าง I_G/I_D ที่แคบ และในทางเพิ่มเติมยังสามารถยืนยันความแตกต่างระหว่างกราฟีนกับท่อนาโนคาร์บอนได้จากช่วงความกว้างพีคทั้งแถบ G และ D ซึ่งจะพบว่า กราฟีนจะมีช่วงพีคที่กว้างกว่าท่อนาโนคาร์บอนอย่างมีนัยสำคัญ โดยอ้างอิงจาก R. Schönfelder และคณะ [46]

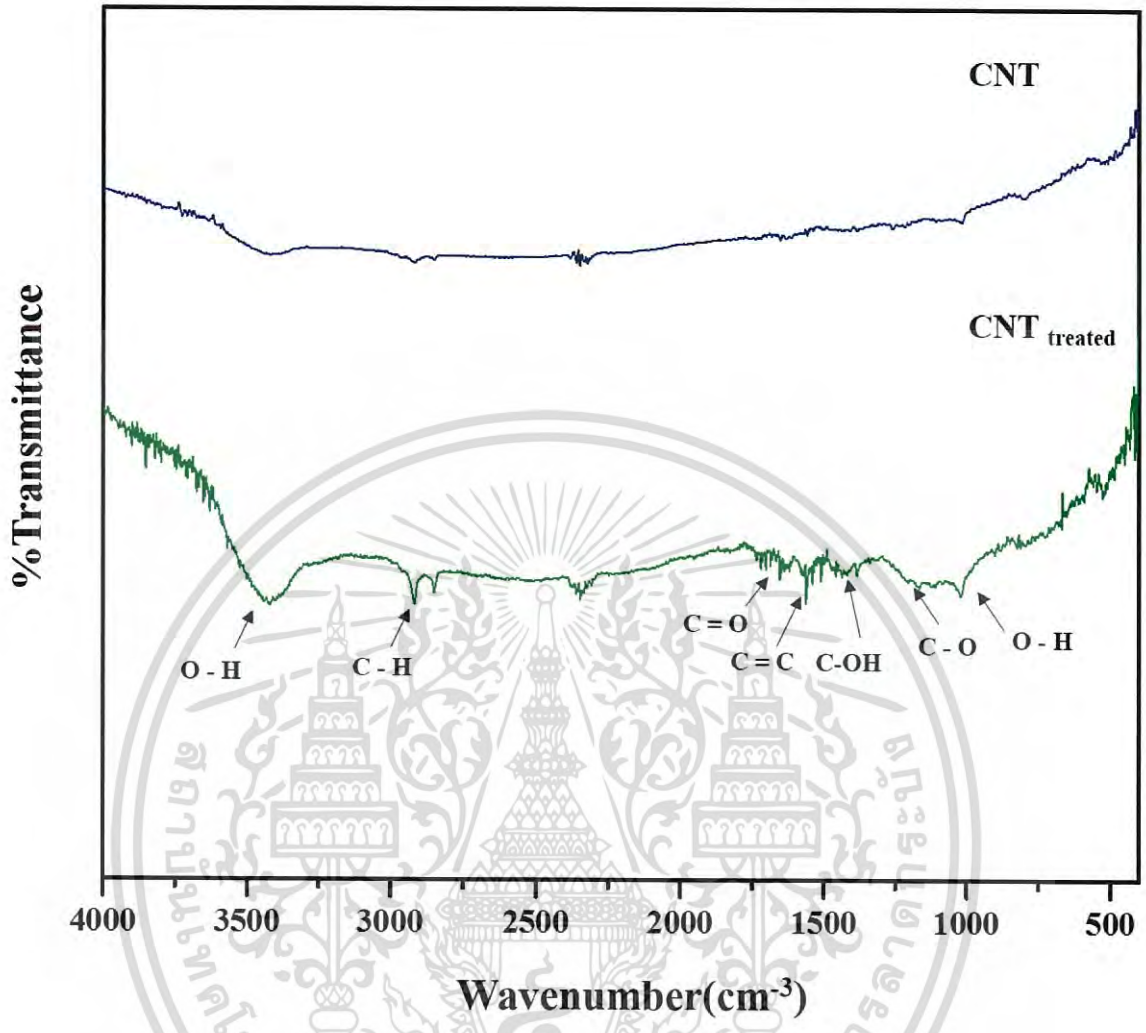
ซึ่งจากผลการตรวจสอบพบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวมีค่า I_G/I_D เท่ากับ 0.8018 และท่อนาโนคาร์บอนที่มีการปรับปรุงพื้นผิวมีค่า I_G/I_D เท่ากับ 0.8274 และไม่พบการเคลื่อนของพีค ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวทำให้เกิดหมู่คาร์บอกซิ-ลิกเกาะบริเวณพื้นผิวเท่านั้น และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของท่อนาโนคาร์บอน

4.1.2.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR)

เมื่อนำท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมาทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเครื่องอินฟาเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR) ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 500–4000 cm^{-1} เพื่อตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นหลังจากการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนด้วยกรดไนทริก จากรูปที่ 4.11 แสดง อินฟาเรดสเปกตรัมของท่อนาโนคาร์บอน (CNT) และท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($CNT_{treated}$) โดยตรวจพบช่วงการดูดกลืนที่ 3200-3600 cm^{-1} ซึ่งมีความสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (stretching vibration) ของพันธะ O-H และพีคการดูดกลืนที่ 925 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบงอ (bending vibration) ของพันธะ OH^- ซึ่งคาดว่าทั้งสองพีคแสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) ในหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) ที่เกิดจากการปรับปรุงพื้นผิว และพบพีคการดูดกลืนที่ 1650 1415 และ 1240 cm^{-1} ที่สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=O C-O-H และ C-O ที่เกิดจากพันธะระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกกับอะตอมคาร์บอนในท่อนาโนคาร์บอน [45] โดยผลอินฟาเรดสเปกตรัมได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนส่งผลให้มีหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) มาเกาะที่พื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับท่อนาโนคาร์บอนที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว จะไม่พบพีคเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว

โดยในงานวิจัยของ Un Jeong Kim และคณะ [47] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนซึ่งพบว่าข้อมูลช่วงการดูดกลืนมีความสอดคล้องกับในงานวิจัย โดยจะพบพีคช่วงการดูดกลืนที่กว้างในช่วง 3200-3500 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H นอกจากนี้ยังพบพีคการดูดกลืนขึ้นที่ 1750 และ 1650 cm^{-1} ที่สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C=C และ C=O ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



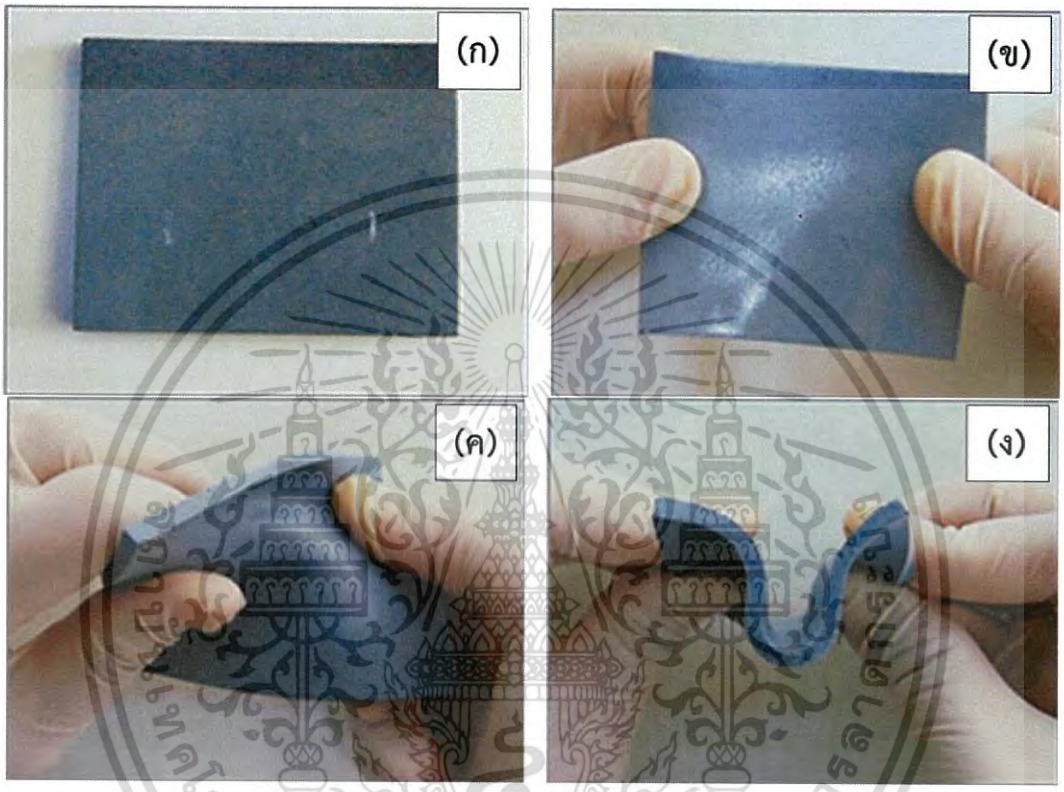
รูปที่ 4.11 อินฟาเรดสเปกตรัมของท่อนาโนคาร์บอน (CNT) และท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($CNT_{treated}$)

4.2 การศึกษาการเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต (barium titanate nanoparticle; BT) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube; CNT) และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polymetylsiloxane; PDMS)

จากการเตรียมวัสดุผสมในระบบอนุภาคแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนและปรับปรุงสมบัติด้วยท่อนาโนคาร์บอน (BT-CNT-PDMS) ดังรูปที่ 4.12 โดยมีวัฏภาคกระจายตัว ได้แก่ อนุภาคแบเรียมไททาเนต (BT) อนุภาคแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต ($BT_{nanorod}$) และอนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนตกับแผ่นนาโนซีท ($BT_{coreshell}$) จะเห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าวัสดุผสมสามารถขึ้นรูป โดยมีขนาด กว้างxยาว 3x3 เซนติเมตรได้ ต่อมาเมื่อให้แรงเชิงกล แรงดึง บิด โค้งงอ ระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งพบว่าวัสดุผสมที่เตรียมได้มีความยืดหยุ่นสูง สามารถดึงยืดและบิดงอได้ และเมื่อปล่อยแรงที่ให้กับวัสดุผสม วัสดุสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้โดยที่ไม่มีการสูญเสียรูปร่างหรือสูญเสียลักษณะทางกายภาพของวัสดุผสม



รูปที่ 4.12 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุผสมที่ (ก) สภาวะปกติ และเมื่อให้แรงเชิงกลด้วยการ (ข) ดึง (ค) บิด และ (ง) โค้งงอ

4.2.1 ผลการศึกษาเอกลักษณ์เฉพาะของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต (barium titanate nanoparticle; BT) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube; CNT) และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polymetylsiloxane; PDMS)

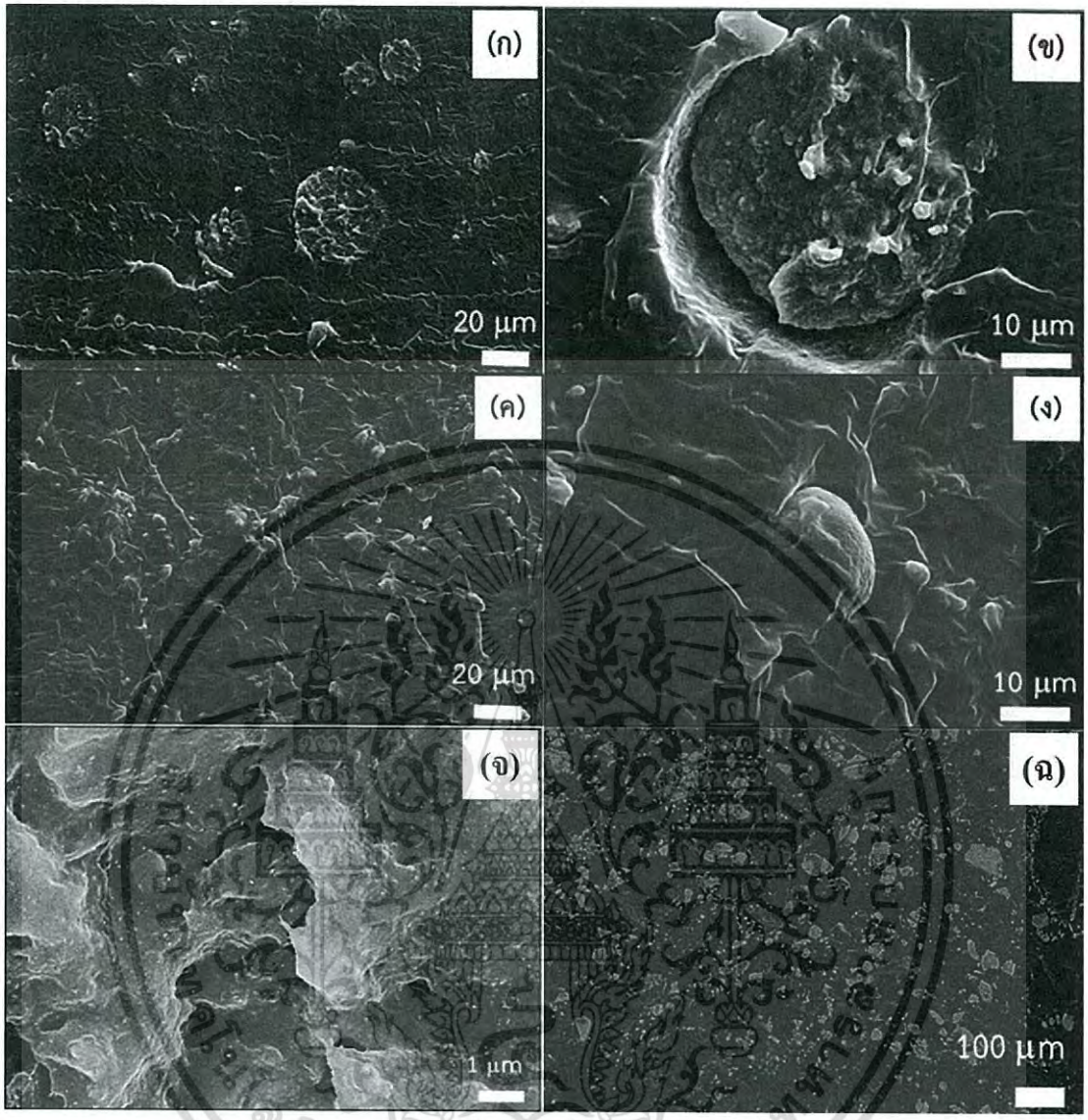
4.2.1.1 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต (barium titanate nanoparticle; BT) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube; CNT) และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polymetylsiloxane; PDMS)

หลังจากการเตรียมวัสดุผสมในระบบอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT-CNT-PDMS) จากนั้นนำวัสดุที่เตรียมได้ ได้แก่ วัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT-CNT-PDMS) วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{treated}$-$CNT_{treated}$-PDMS) วัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{nanorod}$-$CNT_{treated}$-PDMS) และวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์เป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{coreshell}$-$CNT_{treated}$-PDMS) ที่อัตราส่วนระหว่างอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตกับแผ่นนาโนไททาเนตเท่ากับ 50:1 (BT rich) โดยน้ำหนัก ไปหักในไนโตรเจนเหลวและทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณรอยหักของวัสดุผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.12 จากนั้นนำวัสดุผสมทั้งหมดที่ได้ไปทำการตรวจวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง รูป 4.13 (ก) และ (ข) แสดงการกระจายตัวของวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัวและ รูปที่ 4.13 (ค) และ (ง) แสดงการกระจายตัวของวัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว จะเห็นได้ว่าวัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของเฟสกระจายตัวมีการกระจายตัวในวัฏภาคหลักที่ดีกว่าวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของเฟสกระจายตัว ดังรูปที่ 4.13 (ก) และ (ค) ทั้งนี้เป็นผลมาจากการมีพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นระหว่างอนุภาคแบเรียมไททาเนตกับท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวส่งผลให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการเกี่ยวพันกันกับอนุภาคแบเรียม - ไททาเนตทั้งทางกายภาพ (physical bonding) และเกิดการยึดเกาะกันทางพันธะเคมี (chemical bonding) ร่วมด้วย ดังรูปที่ 4.15 นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของเฟสกระจายตัวมีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์มากกว่าวัสดุผสมที่ไม่มีการการปรับปรุงพื้นผิวของเฟสกระจายตัว จึงส่งผลให้เฟสกระจายตัวมีการกระจายตัวภายในเฟสเนื้อหลักได้ดีขึ้น สังเกตได้จากรอยต่อระหว่างกลุ่มอนุภาคของแบเรียมไททาเนตกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ดังรูปที่ 4.13 (ข) และ (ง) ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างอนุภาคแบเรียมไททาเนต ท่อนาโนคาร์บอน และ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน [29] ดังรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอก- ซิลบนพื้นผิวของแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวกับหมู่ออกซิเจนในพอลิไดเมทิลไซลอกเซน และหมู่คาร์บอกซิลิกบนพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคจากแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ (Physical bonding) ไปเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางเคมี (Chemical bonding) ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวและการเข้ากันได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมของ (ก-ข) วัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT-CNT-PDMS) และ (ค-ง) วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BTtreated-CNTtreated-PDMS) (จ) วัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเป็นวัฏภาคกระจายตัว (BTnanorod – CNT - PDMS) (ฉ) วัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว (BTcore-shell - CNT - PDMS)

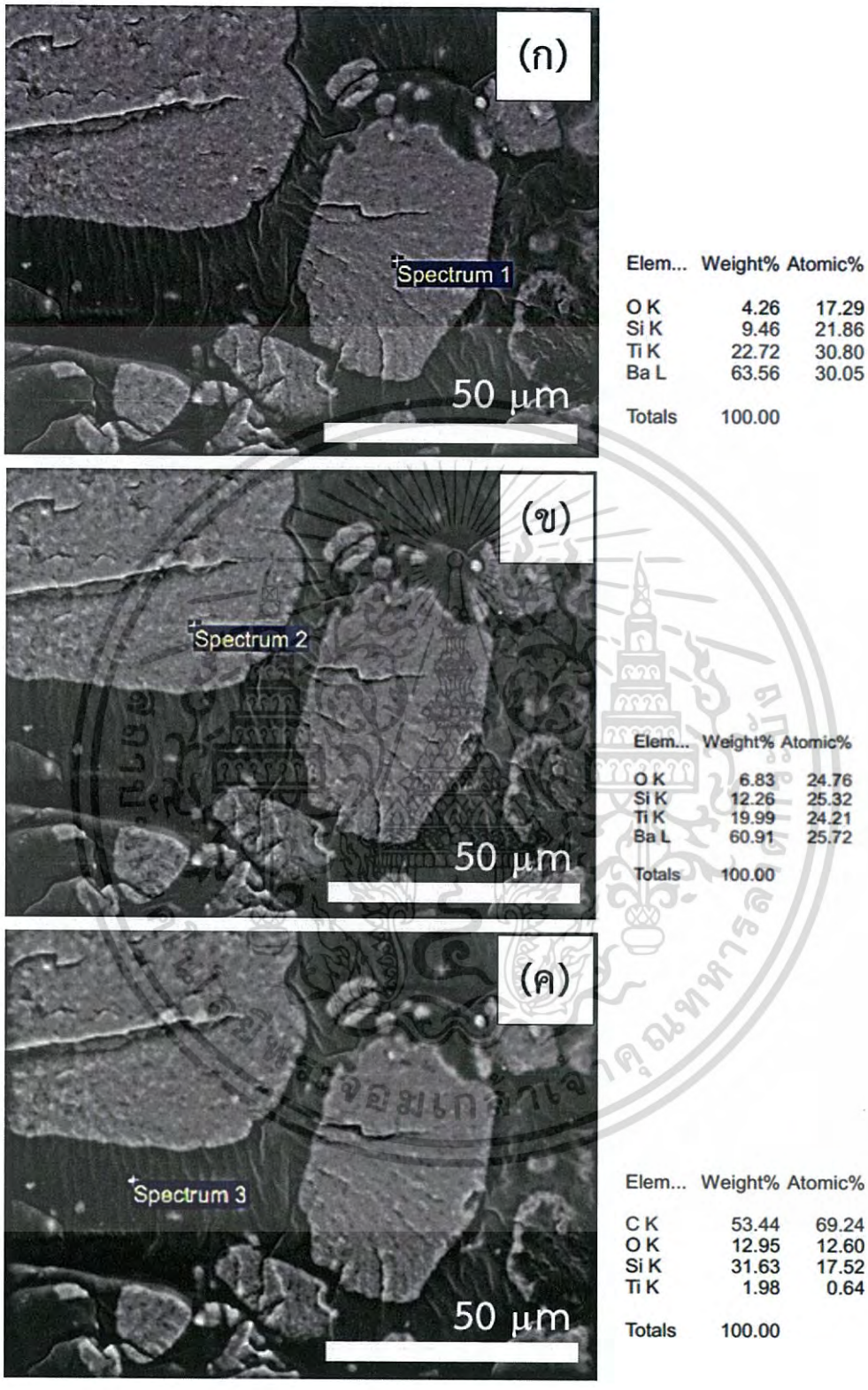
นอกจากนี้ในกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตกับแผ่นนาโนไททาเนต (titanate nanosheet) ด้วยกระบวนการโซโนเคมี โดยทำการโซโนเคมีกับพอลิไดอัลลิวไดเมทิล-แอมโมเนียมคลอไรด์ (Polydiallyldimethylammonium chloride ; PDADMAC) เพื่อให้มีสภาพเป็นสารละลายคอลลอยด์ ดังรูปที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะเห็นได้ว่าอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวจะเกิดเป็นสารละลายขุ่นซึ่งต่างกับอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นสารละลายใสและตกตะกอน เป็นผลมาจาก PDADMAC ที่ทำหน้าที่เป็น cationic เกิดการเชื่อมกับหมู่ไฮดรอกซิลที่ทำหน้าที่เป็น anionic บนพื้นผิวของอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่มีการปรับปรุงพื้นผิว โดยการเชื่อมระหว่างประจุนี้จะส่งผลให้สารละลายมีสภาพเป็นคอลลอยด์ ซึ่งช่วยยืนยันถึงการเกิดหมู่ไฮดรอกซิลที่เกาะบริเวณพื้นผิวของแบเรียมไททาเนต และต่อมาเมื่อวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM ของวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียม-ไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{nanorod}$ – CNT - PDMS) ดังรูปที่ 4.13 (จ) ที่แสดงให้เห็นถึงจุดสีสว่างขาวแสดงถึงเฟสของแท่งนาโนแบเรียม ไททาเนตและส่วนสีเทาดำแสดงเฟสของพอลิเมอร์พอลิได-เมทิลไซลอกเซน พบว่าว่าแท่งนาโนแบเรียมไททาเนตมีการกระจายตัวได้ค่อนข้างดีในเฟสเนื้อหลัก และวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{core\text{-}shell}$ – CNT – PDMS) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ฉ) จะเห็นถึงการกระจายตัวที่ดีและสม่ำเสมอของอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตในเนื้อพอลิเมอร์

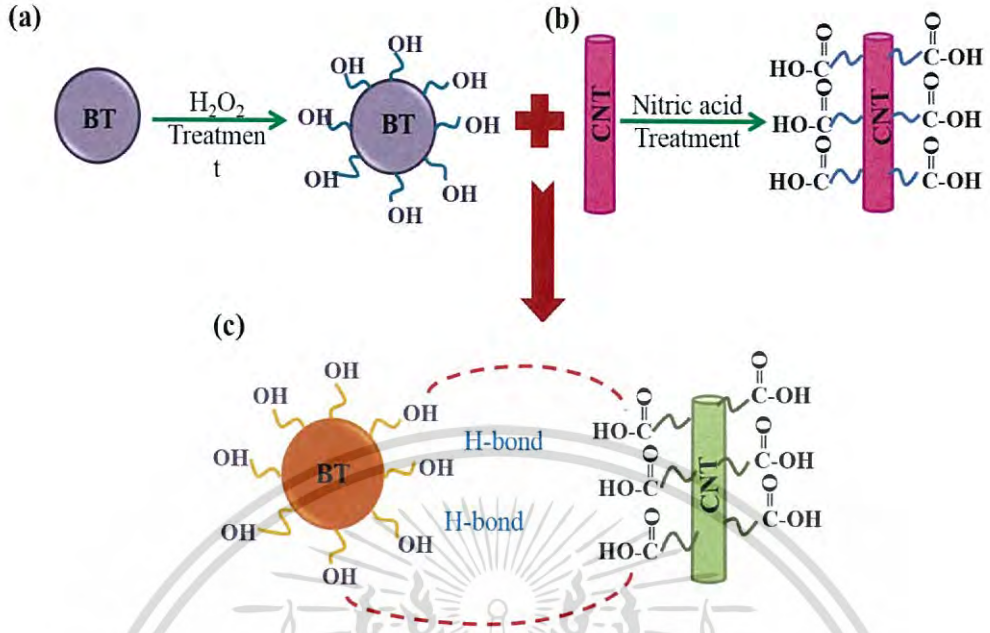
และเพื่อเป็นการยืนยันองค์ประกอบของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตคอร์เชลล์ พอลิไดเมทิลไซ-ลอกเซน ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยท่อนาโนคาร์บอน ($BT_{core\text{-}shell}$ – CNT - PDMS) จึงได้ทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDX) ในสามบริเวณ ดังรูปที่ 4.14 โดยบริเวณวัฏภาคกระจายตัวที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์ ดังรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) พบธาตุแบเรียมและไทเทเนียมซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนั้นยังพบธาตุออกซิเจนและซิลิกอนซึ่งเป็นองค์ประกอบพอลิไดเมทิลไซ-ลอกเซน (PDMS) และในบริเวณวัฏภาคเนื้อหลักคือพอลิไดเมทิลไซ-ลอกเซน ดังรูปที่ 4.14 (ค) พบธาตุคาร์บอน ซิลิกอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก และนอกจากนี้ยังพบธาตุไทเทเนียมในทุกๆบริเวณ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวได้ดีของแผ่นนาโนไททาเนตและอนุภาคแบเรียมไททาในวัสดุผสมของอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิ- เมทิลไซลอกเซน ($BT_{core\text{-}shell}$ - CNT - PDMS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

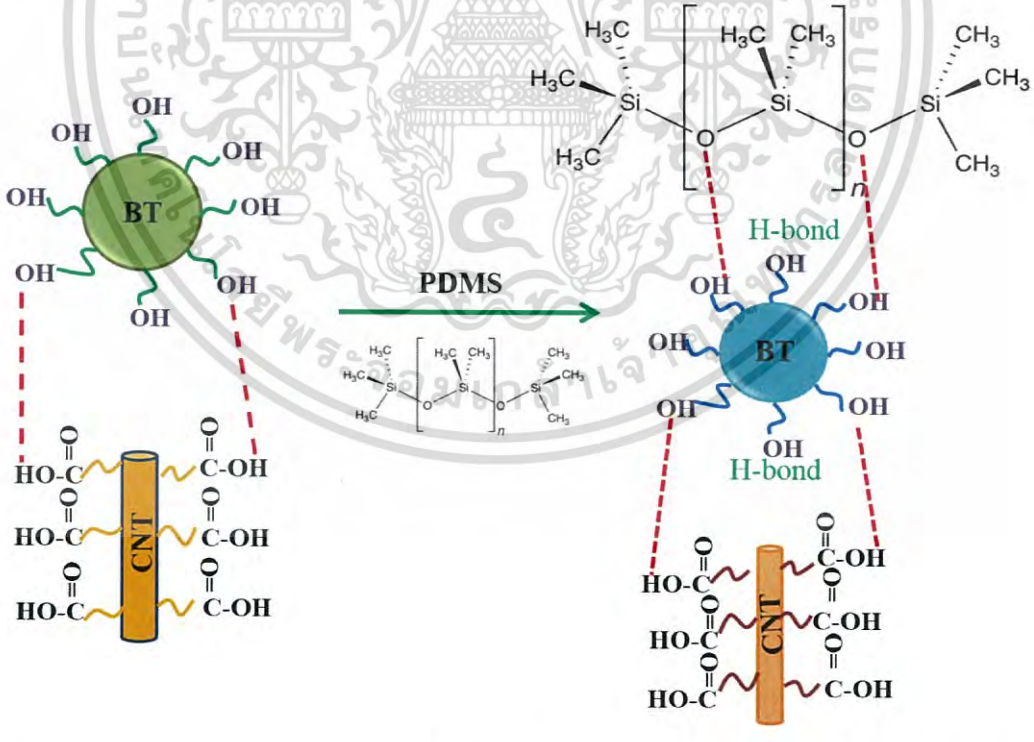


รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายแสดงธาตุองค์ประกอบ EDX ของวัสดุผสมอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมทิลไซลอกเซน ($BT_{core\text{-}shell}$ – CNT - PDMS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แบบจำลองการเกิดพันธะระหว่างวัฏภาคแบเรียมไททาเนตกับท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (BT_{treat}-CNT_{treat})



รูปที่ 4.16 แบบจำลองการเกิดพันธะระหว่างวัฏภาคในวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$-$CNT_{treated}$-PDMS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.17 รูปแสดงการการโซโนเคมีกับ PDADMAC ของอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่มีการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{teeated}$) และอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่ไม่มีการปรุงปรุงพื้นผิว (BT)

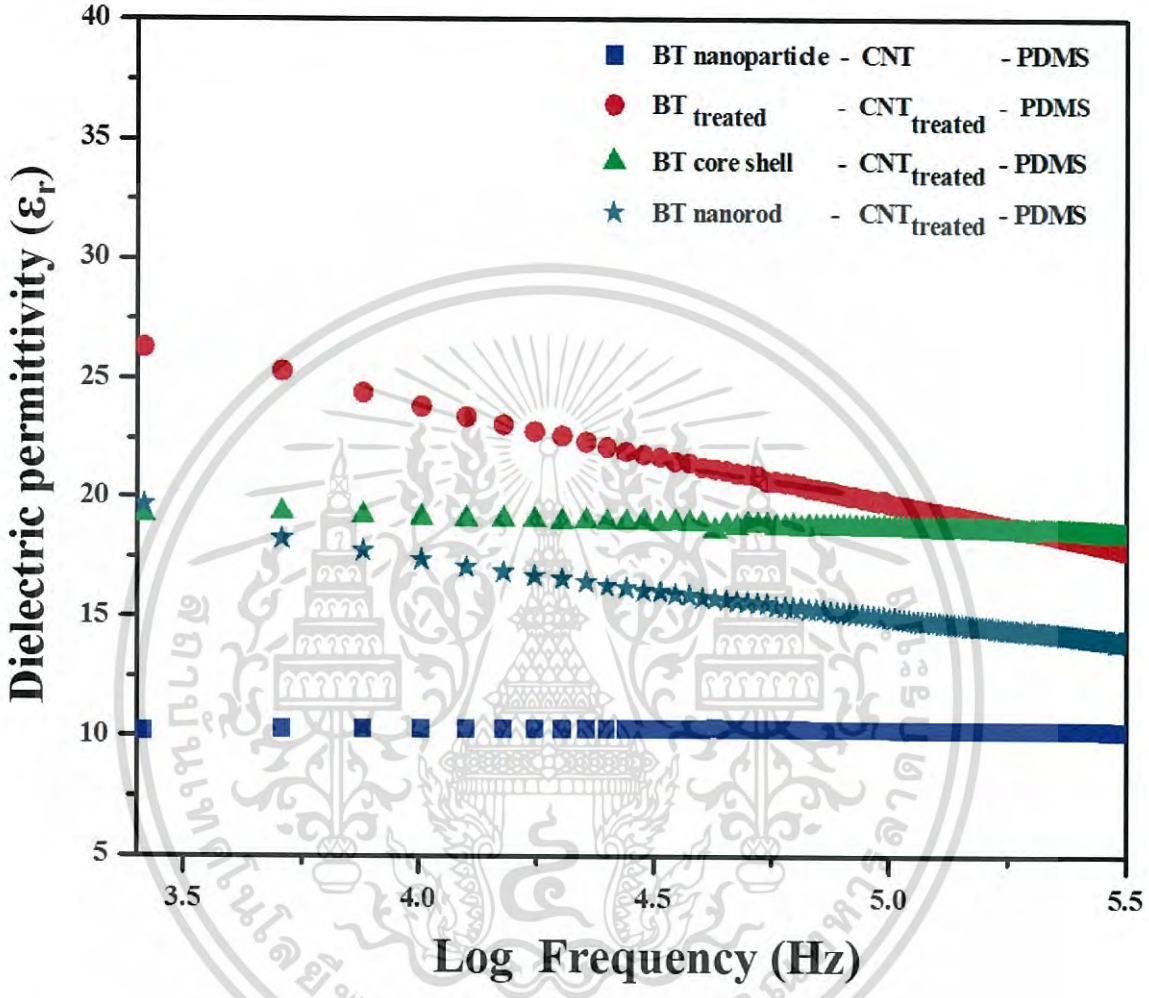
4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต (barium titanate nanoparticle; BT) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube; CNT) และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polymetylsiloxane; PDMS)

4.2.2.1 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต (barium titanate nanoparticle; BT) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube; CNT) และพอลิไดเมทิลไซ-ลอกเซน (Polymetylsiloxane; PDMS)

จากผลการตรวจสอบอิทธิพลของค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมโดยวัดที่อุณหภูมิคงที่ ดังรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าของวัสดุผสมในระบบแบเรียมไททาเนต ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT – CNT - PDMS) ในช่วงความถี่ 1 KHz – 2 MHz พบว่าวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT – CNT – PDMS) ที่มีค่าคงทีไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 10.32 - 9.64 วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{treated}$ – $CNT_{treated}$ - PDMS) มีค่าคงทีไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 26.2 - 9.64 วัสดุผสมวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว (BT nanorod – $CNT_{treated}$ - PDMS) ที่มีค่าคงทีไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 19.8 – 14.26 และวัสดุผสมที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต เป็นวัฏภาคกระจายตัว (BT coreshell – $CNT_{treated}$ - PDMS) ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 19.33 – 18.53

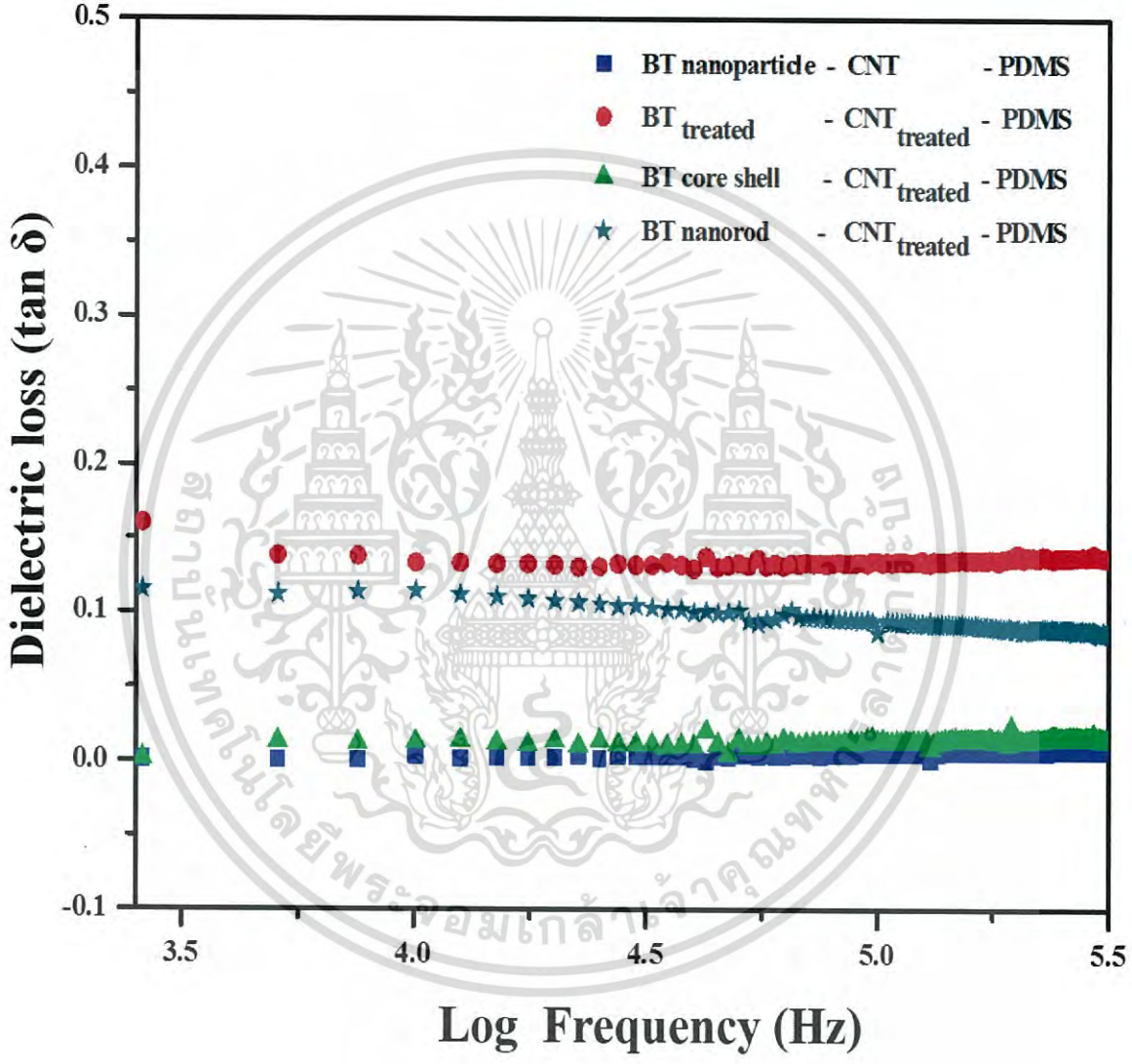


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT – CNT – PDMS) วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{treated}$-$CNT_{treated}$-PDMS) วัสดุผสมวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{nanorod}$-$CNT_{treated}$-PDMS) และวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{coreshell}$-$CNT_{treated}$-PDMS)

นอกจากนี้เมื่อทำการวัดค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss) ดังรูปที่ 4.19 พบว่าวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT – CNT – PDMS) มีค่าสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.160 – 0.088 วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{treated}$ - $CNT_{treated}$ -

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PDMS) มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.16-0.14 วัสดุผสมวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียม-ไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{nanorod}$-$CNT_{treated}$-PDMS) มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.115 - 0.044 และวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{coreshell}$-$CNT_{treated}$-PDMS) ที่มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.014 – 0.003



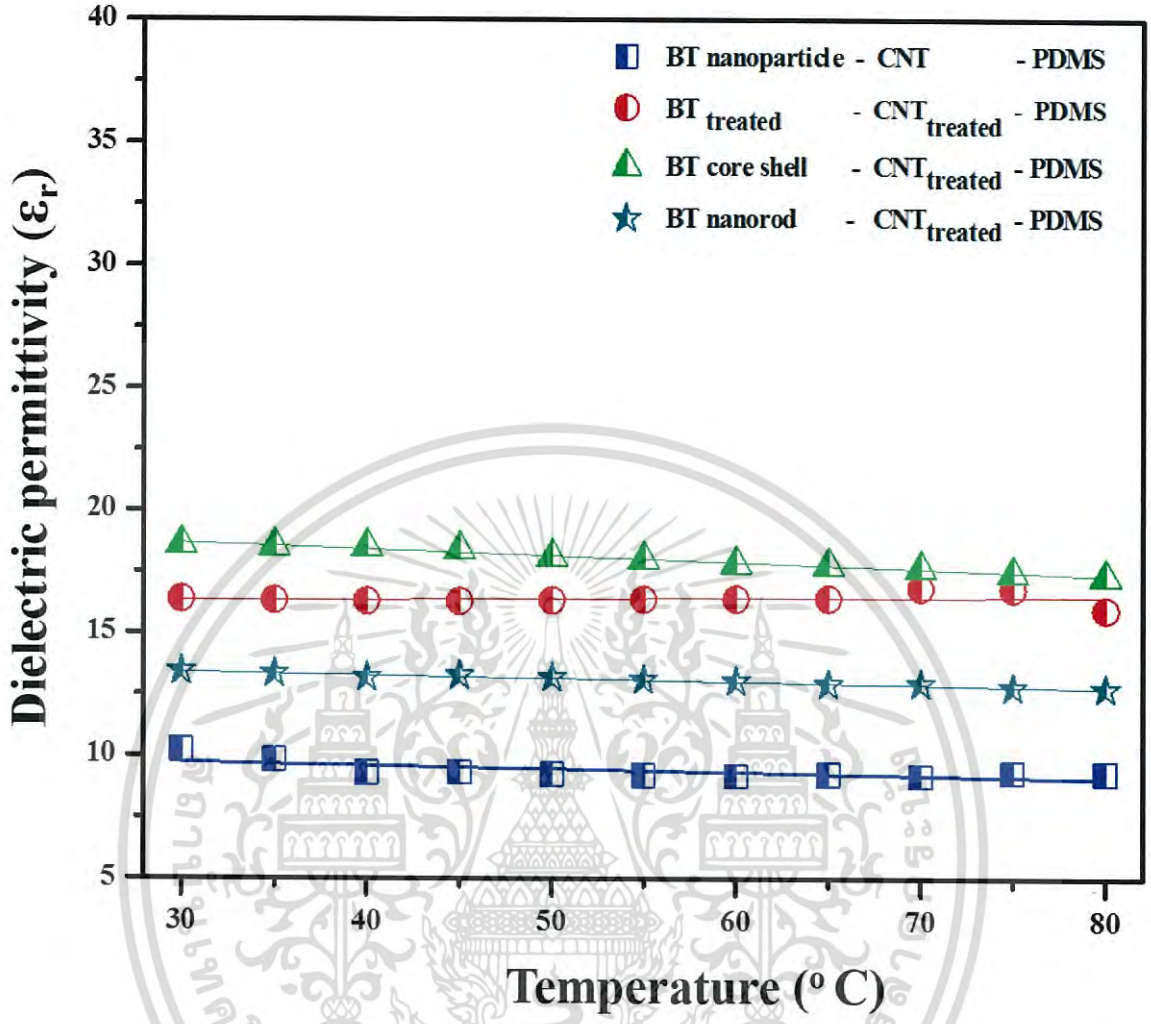
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับค่าความถี่ของวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT – CNT – PDMS) วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของ วัฏภาคกระจายตัว ($BT_{treated}$-$CNT_{treated}$-PDMS) วัสดุผสมวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{nanorod}$-$CNT_{treated}$-PDMS) และวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต เป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{coreshell}$-$CNT_{treated}$-PDMS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลที่ตรวจวัดได้โดยพบว่าวัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัวส่งผลให้มีค่าคงทีไดอิเล็กทริกสูงกว่าวัสดุผสมในระบบอื่นๆ คาดว่าเป็นผลมาจากการอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคกระจายตัวและวัฏภาคเนื้อหลักที่เปลี่ยนจากการยึดเกาะกันทางกายภาพ (physical bonding) เป็นการยึดเกาะกันทางพันธะเคมี (chemical bonding) โดยเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวแบเรียมไททาเนตและหมู่คาร์บอกซิลิกบนพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนกับอะตอมออกซิเจนของพอลิเมอร์ ส่งผลให้มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นของวัฏภาคกระจายตัวภายในวัฏภาคเนื้อหลัก แต่อย่างไรก็ตามวัสดุที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงในเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น ส่วนในวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต เป็นวัฏภาคกระจายตัวนั้น ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าระบบที่ใช้แท่งนาและอนุภาคนาโน และยังมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์เป็นวัฏภาคกระจายตัว มีการกระจายตัวในวัฏภาคเนื้อหลักได้ดีกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต ที่ใช้ PDADMAC เป็นตัวเชื่อมระหว่างอนุภาคแบเรียมไททาเนตและแผ่นนาโนไททาเนต ซึ่งพอลิเมอร์จะไปแยกอนุภาคของแบเรียมไททาเนตที่จับตัวเป็นกลุ่มก้อนให้เกิดการกระจายตัวออก เพื่อให้แผ่นไททาเนตเกิดการหุ้มเป็นฟิล์มบางเกิดเป็นรูปร่างแบบคอร์เชลล์ สังเกตได้จากภายหลังที่เติม PDADMAC ลงไปส่งผลให้อนุภาคแบเรียมไททาเนต เกิดเป็นสารคอลลอยด์จึงมีการกระจายตัวได้ดีและมีการเกาะกลุ่มที่ลดน้อยลง อนุภาคแบเรียมไททาเนตจึงมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากแผ่นนาโนไททาเนต (TiO_2 sheet) ที่เคลือบอนุภาคแบเรียมไททาเนต ยังทำให้วัสดุผสมมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้วัสดุผสมดังกล่าว มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ต่ำ

ส่วนในระบบวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัวนั้น มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต่ำกว่าระบบที่ใช้อนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนต ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการกระจายตัวที่ไม่ค่อยสม่ำเสมอ และมีบางส่วนที่ไม่เป็นแท่งนาคาร์บอน แต่อย่างไรก็ตามพบว่า วัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต เป็นวัฏภาคกระจายตัวให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าวัสดุผสมในระบบที่ใช้อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ทั้งนี้เนื่องมาจากแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต มีพื้นที่ผิวที่มากกว่าอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต อีกทั้งการใช้แบเรียมไททาเนตในรูปแบบแท่งระดับนาโนยังเหนี่ยวนำให้เกิดการเกี่ยวพันกับท่อนาโนคาร์บอน (CNT) ได้มากขึ้น ส่งผลให้วัสดุผสมมีการกระจายตัวในวัฏภาคกระจายตัวได้ดีขึ้น วัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) เป็นวัฏภาคกระจายตัวจึงมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

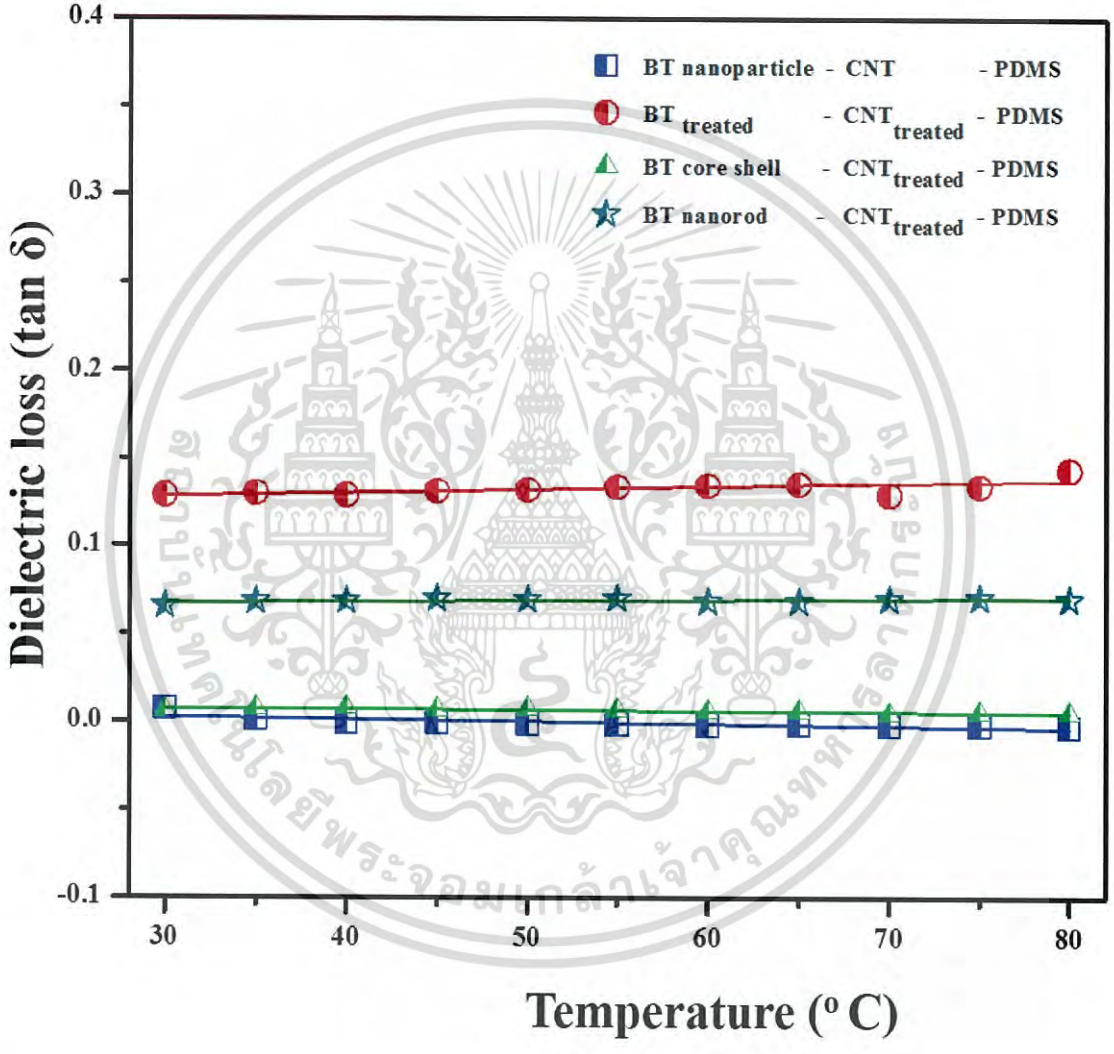


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT – CNT – PDMS) วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{treated}$-$CNT_{treated}$-PDMS) วัสดุผสมวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{nanorod}$-$CNT_{treated}$-PDMS) และวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต เป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{coreshell}$-$CNT_{treated}$-PDMS)

นอกจากนี้ผลการตรวจสอบอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม ดังรูปที่ 4.20 พบว่าที่ความถี่ 2MHz วัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต เป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{coreshell}$-$CNT_{treated}$-PDMS) ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าวัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{treated}$-$CNT_{treated}$-PDMS) วัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตเป็น วัฏภาคกระจายตัว ($BT_{nanorod}$-$CNT_{treated}$-PDMS) วัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT – CNT –

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PDMS) ตามลำดับ โดยอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต ให้ค่าไดอิเล็ก- ทริกอยู่ในช่วง 18.6 – 17.2 และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 0.16-0.14 และนอกจากนี้พบว่าวัสดุผสมทั้งสี่ระบบให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกที่ค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 35-80 °C ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวได้โดยยังคงมีเสถียรภาพและไม่มีการสูญเสียรูปร่างของวัสดุผสม



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT – CNT – PDMS) วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{treated}$-$CNT_{treated}$-PDMS) วัสดุผสมวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{nanorod}$-$CNT_{treated}$-PDMS) และวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต เป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{coreshell}$-$CNT_{treated}$-PDMS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.2 ผลการตรวจสอบค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกของของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT – CNT - PDMS) ที่มีรูปร่างของแบเรียมไททาเนต (BT) ที่แตกต่างกัน

จากการนำวัสดุผสมไปทำการตรวจวัดค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกภายใต้แรงเชิงกล ดังรูปที่ 4.22 พบว่าวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT-CNT-PDMS) มีค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยที่ 0.55 ± 0.21 โวลต์และศักย์ไฟฟ้าส่งออกสูงสุดที่ 1.1 โวลต์ วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{treated}$-$CNT_{treated}$-PDMS) มีค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยอยู่ที่ 1.02 ± 0.4 โวลต์ และค่าศัย์ไฟฟ้าส่งออกสูงสุดที่ 1.75 โวลต์ วัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{nanorod}$-$CNT_{treated}$-PDMS) ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ย 1.99 ± 0.48 โวลล์ ค่าการส่งออกไฟฟ้าสูงสุดที่ 2.56 โวลต์ และวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{coreshell}$-$CNT_{treated}$-PDMS) มีศักย์ไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ย 1.29 ± 0.58 โวลล์ และมีค่าการส่งออกไฟฟ้าสูงสุดที่ 2.28 โวลต์ ดังแสดงในตารางที่

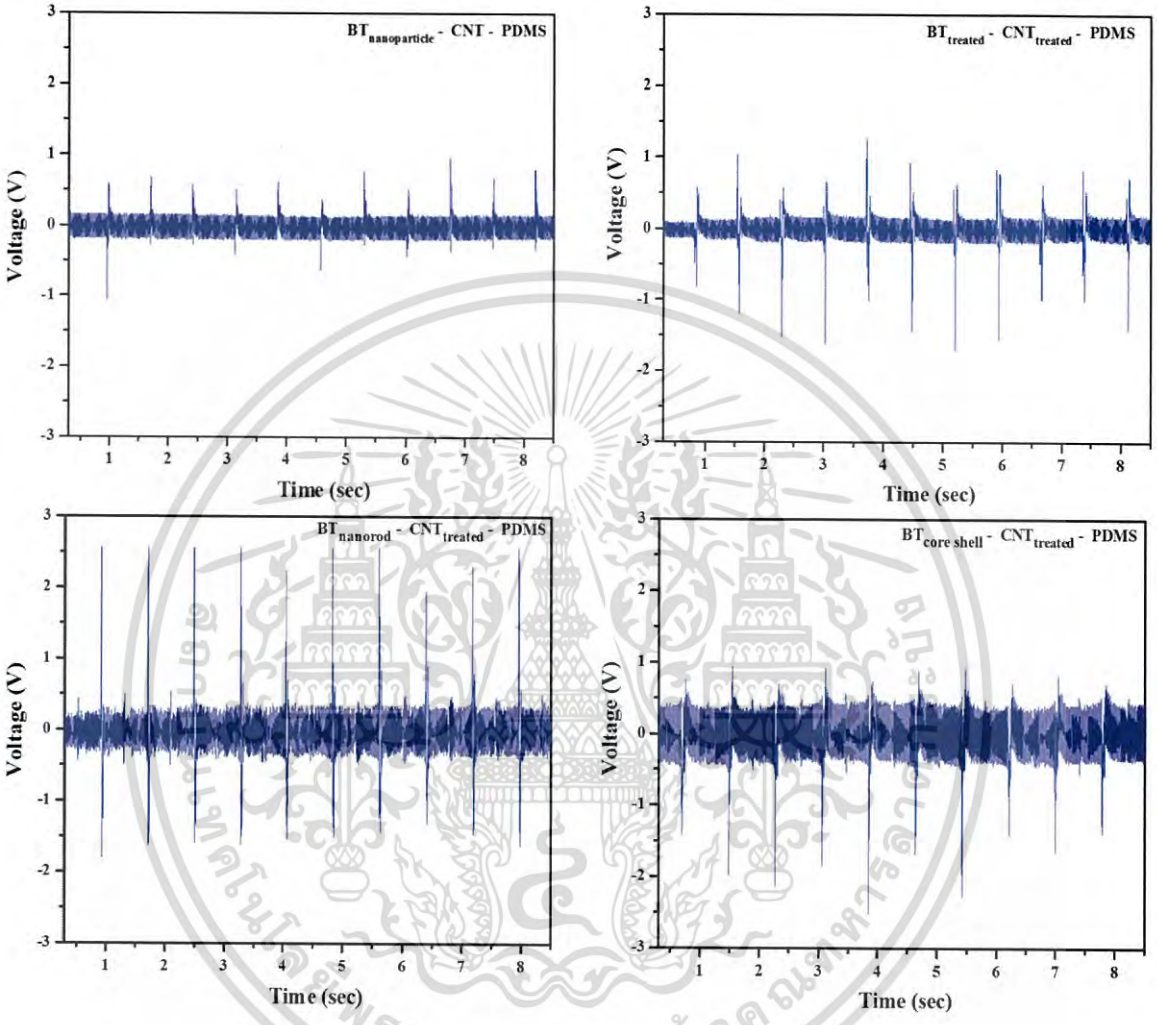
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการตรวจวัดค่าการส่งออกไฟฟ้าของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT – CNT - PDMS) ที่มีรูปร่างของแบเรียมไททาเนต (BT) ที่แตกต่างกัน

ชนิดวัสดุผสม	Average Voltage (V)	Maximum Voltage (V)
BT - CNT - PDMS	0.55 ± 0.21	1.06
$BT_{treated}$ – $CNT_{treated}$ - PDMS	1.02 ± 0.4	1.64
$BT_{nanorod}$ – $CNT_{treated}$ - PDMS	1.99 ± 0.48	2.56
$BT_{core\ shell}$ – $CNT_{treated}$ - PDMS	1.29 ± 0.58	2.28

จากผลการตรวจวัดพบว่า วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว($BT_{treated}$ – $CNT_{treated}$ - PDMS) ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกมากกว่าวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT-CNT-PDMS) เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 75 ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายตัวที่ดีและสม่ำเสมอของวัฏภาคกระจายตัวนั่นคืออนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตและท่อคาร์บอนนาโน โดยเกิดการเกี่ยวพันกันของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตกับท่อนาโนคาร์บอน [29] และการยึดเกาะกันทางพันธะเคมีของทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาค ส่งผลให้เกิดการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากแต่ละอนุภาคเพียโซอิเล็กทริกผ่านท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งเปรียบเสมือนเส้นทางเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Conduction path) ได้ดีขึ้นเมื่อรับแรงเชิงกล



รูปที่ 4.22 ค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิไดเมทิลไซ-ลอกเซน (BT – CNT - PDMS) ที่มีรูปร่างของแบเรียมไททาเนตเป็น (ก) อนุภาคนาโน (BT particle) (ข) แท่งนาโน (BT nanorod) (ค) อนุภาคคอร์เชลล์ (BT coreshell)

ส่วนวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) เป็นวัฏภาคกระจายตัวให้ค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกสูงที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุผสมในระบบอื่นๆ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกเพิ่มขึ้นจากวัสดุผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT-CNT-PDMS) ถึงร้อยละ 236.36 และกราฟที่ได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ เป็นผลมาจากแท่งนาโนแบเรียมไททาเนตมีความเป็นเตตะโกนอลมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบเรียมไททาเนตในรูปแบบอื่น ซึ่งสังเกตได้จากค่าอัตราส่วนแลตทิตพารามิเตอร์ (c/a) ที่สูงกว่าอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ทำให้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกและสมบัติโพลาไรเซชันแบบเกิดขึ้นเองได้ดีกว่าอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ซึ่งสมบัติเหล่านี้สัมพันธ์กับสมบัติทางไฟฟ้า ดังนั้นแท่งนาโนแบเรียมไททาเนตจึงมีสมบัติทางไฟฟ้าที่สูง นอกจากนี้การเตรียมในรูปแบบของแท่งระดับนาโนยังส่งผลให้วัสดุมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น จึงมีความว่องไวในการเกิดอันตรกิริยาและการส่งออกพลังงานเพิ่มขึ้น และลักษณะที่เป็นแท่งทำให้เกิดการเกี่ยวพันกับท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งทำหน้าที่เป็นเส้นทางการเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Conduction path) [29] ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวได้ดี วัสดุจึงมีประสิทธิภาพในการส่งออกพลังงานได้ดีขึ้น และค่าศักย์ไฟฟ้าของวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว มีค่าสูงสุดที่ 2.5 โวลต์ แม้ว่าจะต่ำกว่าวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) เป็นวัฏภาคกระจายตัว แต่ยังคงสูงกว่าวัสดุผสมผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT-CNT-PDMS) วัสดุผสมที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว ($BT_{treated}$-$CNT_{treated}$-PDMS) ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 227.27 เมื่อเทียบกับวัสดุผสมผสมที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัว (BT-CNT-PDMS) ซึ่งใกล้เคียงกับค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanorod) เป็นวัฏภาคกระจายตัว ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายตัวที่ดีและไม่เกาะกลุ่มกันของอนุภาคแบเรียมไททาเนต จากการเกิดเป็นสารคอลลอยด์กับพอลิไดแอริลแอมโมเนียมคลอ-ไรด์ (PDADMAC) ดังที่อธิบายไว้เบื้องต้น อีกทั้งแผ่นฟิล์มไททาเนตที่ทำหน้าที่เป็นเชลล์ยังมีสมบัติเป็น สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ซึ่งช่วยในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของแต่ละอนุภาคภายหลังได้รับแรงเชิงกลไปยังท่อนาคาร์บอน [48] จึงส่งผลให้วัสดุผสมมีค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกที่สูง แต่อย่างไรก็ตามวัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกที่ค่อนข้างเสถียรกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแท่งนาโนมีพื้นผิวที่มากกว่า จึงมีความว่องไวในการเกิดอันตรกิริยาต่อแรงเชิงกลที่ได้รับ และเกิดการส่งออกพลังงานได้อย่างสม่ำเสมอ จึงสรุปได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัวและรูปร่างของแบเรียมไททาเนตที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อสมบัติไฟฟ้าของวัสดุผสมในระบบแบเรียมไททาเนต ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT – CNT - PDMS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่ยืดหยุ่นได้สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวกักเก็บพลังงานขนาดเล็ก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของวัสดุผสมโดยทำการปรับปรุงพื้นผิวของวัฏภาคกระจายตัวแบเรียมไททาเนตและท่อนาโนคาร์บอนและนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุผสม โดยในขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมจะเตรียมโดยใช้วัฏภาคกระจายตัวแบเรียมไททาเนตที่ต่างกัน 3 รูปแบบด้วยกัน ซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า แท่งนาโนแบเรียม-ไททาเนตที่สังเคราะห์ขึ้นผ่านกระบวนการเกลือหลอมเหลว และคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตกับแผ่นนาโนไททาเนตซึ่งถูกสังเคราะห์ขึ้นมาผ่านกระบวนการโซโนเคมี จากนั้นนำมาเตรียมเป็นวัสดุผสมร่วมกับวัฏภาคหลักพอลิไดเมทิลไซลอกเซน และมีการปรับปรุงพื้นผิวของแบเรียมไททาเนตและท่อนาโนคาร์บอนเพื่อเพิ่มสมบัติ โดยในการตรวจวิเคราะห์ผลของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ จะตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวแบนรังสีเอกซ์ (XRD) การส่องผ่านรังสีอินฟราเรด (FT-IR) ตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตรวจวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric) และตรวจวิเคราะห์การส่งออกศักย์ไฟฟ้า (Output Voltage) โดยผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

5.11 จากการศึกษาผลการปรับปรุงพื้นผิวแบเรียมไททาเนตและท่อนาโนคาร์บอน

1. จากการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวแบเรียมไททาเนตและตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคแบเรียมไททาเนตด้วย SEM พบว่าอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมีขนาดของกลุ่มอนุภาคที่ลดลง และการกระจายตัวที่ดีกว่าแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิว

2. จากการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนและตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM ไม่สามารถบอกความแตกต่างทางลักษณะสัณฐานวิทยาได้อย่างชัดเจน

5.1.2 จากการศึกษาเอกลักษณ์ที่ต่างกันของแบเรียมไททาเนต 3 รูปแบบ

1. FTIR BT สามารถเตรียมวัฏภาคกระจายตัวที่ปรับปรุงพื้นผิวได้ ซึ่งยืนยันจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ด้วย (FT-IR) พบพีคในช่วงการดูดกลืนที่ 3200-3600 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H และพีคการดูดกลืนที่ 925 cm^{-1} ที่สอดคล้องกับการสั่นแบบงอของพันธะ O-H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. RAMAN จากการตรวจสอบรูปแบบรามานสเปกตรัมของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า (BT) และอนุภาคแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ($BT_{treated}$) พบว่าพีคที่ตรวจพบทั้งหมดนั้นสอดคล้องกับรูปแบบรามานสเปคตรัมของสารประกอบแบเรียมไททาเนต ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล

นอกจากนี้ในคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตสามารถพบพีคสเปกตรัมรามานที่ตำแหน่ง 305 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นในระดับอะตอมแบบไม่สมมาตร (asymmetric vibration) ของพันธะระหว่าง Ti-O ในตำแหน่งออกตระฮีดรอล (TiO_6) ซึ่งพีคที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของโครงสร้างแบบเตตระโกนอล

SEM

3. จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตด้วย (SEM) พบว่ามีขนาดกลุ่มก้อนอนุภาคโดยเฉลี่ยที่เล็กลงประมาณ 267.9 ± 62.1 นาโนเมตร และมีการกระจายตัวได้ดีมากกว่าแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวซึ่งมีกลุ่มอนุภาคโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 428.4 ± 95.4 นาโนเมตร

แบเรียมไททาเนตมีลักษณะเป็นแท่งระดับนาโน มีขนาดศูนย์กลางเฉลี่ย 87.7 ± 17.7 ซึ่งพบว่าแท่งนาโนแบเรียมไททาเนตมีขนาดและการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและมีค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (aspect ratio) ประมาณ 4.5

อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตที่อัตราส่วน BTrich (50:1) เป็นสัดส่วนที่ดีที่สุดจากทั้งหมดซึ่งมีการกระจายตัวที่ดีไม่เกาะตัวเป็นก้อนอนุภาคคอร์เชลแบเรียมไททาเนตเท่ากับ 90.5 ± 11.1 นาโนเมตร

TEM

4. จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแท่งนาโนแบเรียมไททาเนตด้วย (TEM) แสดงรูปร่างที่มีลักษณะเป็นแท่งของสารตัวอย่าง มีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตรและมีการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับระนาบ (001) (110) และ (111) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของโครงสร้างแบบเตตระโกนอลของสารประกอบแบเรียมไททาเนต

2. จากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตด้วย (TEM) พบว่าที่อัตราส่วน 50:1 (BT rich) เป็นสัดส่วนที่ดีที่สุด โดยมีความหนาของฟิล์มเฉลี่ยของอนุภาคคอร์เชลล์ของแบเรียมไททาเนตอัตราส่วน 50:1 (BT rich) โดยน้ำหนัก เท่ากับ 8.9 ± 3.0 nm

5. XRD จากการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตด้วย (XRD) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว พบว่าแบเรียมไททาเนตไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือมีเฟสแปลกปลอมเกิดขึ้นหลังจากทำการปรับปรุงพื้นผิว

ในแท่งนาโนแบเรียมไททาเนตมีรูปแบบการเลี้ยวเบน พีคที่ระนาบ (111) มีความเข้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตกับแผ่นนาโนไททาเนต พบพีค 2θ ที่มุม 23.87 ที่สอดคล้องกับระนาบ (111) ซึ่งแสดงถึงวัฏภาคอนาเทส (anatase) และมุม 24.26 ที่สอดคล้องกับระนาบ (101) ซึ่งแสดงถึงวัฏภาครูไทล์ (rutile) ซึ่งเป็นของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

5.1.3 จากการศึกษาเอกลักษณ์จากการเตรียมวัสดุผสม

1. SEM จากการตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมเพื่อศึกษาสมบัติความเข้ากันได้ พบว่าแบเรียมไททาเนตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวซึ่งเป็นวัฏภาคกระจายตัวมีการเชื่อมต่อกันกับวัฏภาคเนื้อหลักได้ดีกว่าแบเรียมไททาเนตที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิว นอกจากนี้แบเรียมไททาเนตที่ผ่านการการปรับปรุงพื้นผิวมีการกระจายตัวในวัฏภาคหลักที่ดีกว่าแบเรียมไททาเนตที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวในวัสดุผสม

นอกจากนี้การตรวจวิเคราะห์วัฏภาคกระจายตัวที่มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาต่างกันทั้ง 3 รูปแบบ คือ อนุภาคแบเรียมไททาเนต แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต และคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตด้วย SEM พบว่าวัฏภาคแบเรียมไททาเนตที่มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาทั้ง อนุภาคนาโน แท่งนาโน และคอร์เชลล์ มีการกระจายตัวที่ดีในวัสดุผสมไม่เกาะกลุ่มกัน

EDX

จากการตรวจวิเคราะห์วัสดุผสมแบเรียมไททาเนตคอร์เชลล์พอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่ปรับปรุงสมบัติด้วยท่อนาโนคาร์บอน ($BT_{coreshell}$ – $CNT_{treated}$ - PDMS) พบว่ามีแผ่นนาโนไททาเนตกระจายตัวอย่างทั่วถึงทั้งวัสดุผสม

2. Dielectric จากการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมพบว่า

3. Output V จากการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสมพบว่า วัสดุผสมที่ใช้แท่งนาโนแบเรียมไททาเนต เป็นวัฏภาคกระจายตัวให้ค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกสูงสุดที่ 2.6 โวลต์ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 236.36 และกราฟที่ได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ รองลงมาเป็นวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคคอร์เชลล์แบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว มีค่าสูงสุดที่ 2.5 โวลต์ ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 227.27 และวัสดุผสมที่ใช้อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นวัฏภาคกระจายตัว จะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าส่งออกสูงสุดที่ 1.1 โวลต์ ซึ่งน้อยที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 วัสดุผสมที่เตรียมได้เกิดรูพรุนภายในทำให้ส่งผลต่อการส่งออกของศักย์ไฟฟ้า

5.2.2 ศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้าและเทคนิคการวัดสมบัติที่เหมาะสม

5.2.3 ศึกษาเทคนิคอื่นๆที่สามารถเตรียมวัสดุผสมให้มีการกระจายตัวที่ดีและลดการเกิดรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Z. Wang, X. Pan, Y. He, Y. Hu, H. Gu and Y. Wang. **"Review Article Piezoelectric Nanowires in Energy Harvesting Applications"**. Hindawi Publishing Corporation Advances in Materials Science and Engineering Volume 2015.

[2] S. Siddiqui, D. Kim, L.T. Duy, M.T. Nguyen, S. Muhammad, W.S. Yoon, N.E. Lee, **"High-performance flexible lead-free nanocomposite piezoelectric nanogenerator for biomechanical energy harvesting and storage"**. Nano Energy (2015) 15, 177–185.

[3] G. H. Haertling. **"Ferroelectric ceramics: History and technology"**. Journal of American Ceramic Society. Volume 82, 797-818, 1999.

[4] นายอัศวิน พืชทองหลาง. **"ผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนต่อการเสื่อมอายุของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต"**. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.2556.

[5] P. Dineva et al., **"Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials"**, Solid Mechanics and Its Applications 212. 2014.

[6] Erhart , Jiri. "Piezoelectricity and ferroelectricity: Phenomena and properties". Department of Physics, Technical University of Liberec. Archived from the original on May 8, 2014.

[7] Q. Guo , G. Z. Cao, I. Y. Shen **"Measurements of Piezoelectric Coefficient d_{33} of Lead Zirconate Titanate Thin Films Using a Mini Force Hammer"** Journal of Vibration and Acoustics FEBRUARY 2013, Vol. 135

[8] น. วิทยากร. **"วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์และการประยุกต์ใช้งาน"**. 2557.

[9] A. ToolKit **"Spontaneous polarization of ferroelectric $BaTiO_3$"** Version 2015.2 2008–2015 QuantumWise A/S

[10] ส. เนียมเจริญ, น. วิทยากร, ร. เมืองเหลือ. **"วัสดุผสมนาโนคอมพอสิตสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเก็บประจุพลังงานสูง"**. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] R. S. Roth, **"Classification of Perovskite and Other ABO_3-Type Compounds".** Journal of Research of the National Bureau of Standards Vol. 58, No.2, February 1957.

[12] G. K. Sahoo. **"Synthesis and characterization of $BaTiO_3$ Prepared by Molten Salt Synthesis Method".** Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of technology in ceramic engineering.

[13] ALEX C. M. KUO **"Polymer Data Handbook"**. Oxford University Press, Inc. All rights reserved,411- 435. 1999.

[14] H. C. Hilborg.**"Loss and recovery of hydrophobicity of polydimetylsiloxane after exposure to electrical discharges"**. Department of polymer technology, Royal institute of technology, Stockholm, Sweden. 2001.

[15] [Online available] http://www.dowcorning.com/content/discover/discoverchem/properties.aspx.

[16] F. Xu and Y. Zhu. **"Highly Conductive and Stretchable Silver Nanowire Conductors"** Adv. Mater. 2012, 24, 5117–5122.

[17] X.Thomas, D. Corning, S. Seneffe . **"Silicones in medical applications"**. Nova Science Publishers.

[18] V. Choudhary and A. Gupta.**" Polymer/Carbon Nanotub Nanocomposites"**. book edited by Siva Yellampalli, August 17, 2011.

[19] K. and M.K. Majumder, **"Carbon Nanotube Based VLSI Interconnects"**, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, DOI 10.1007/978-81-322-2047-3_2 .

[20] ส. คำหอม. **"คาร์บอนนาโนทิวบ์".** ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต. 2558.

[21] S. Mishra, et al.**"Synthesis of PVDF/CNT and their functionalized composites forstudying their electrical properties to analyze their applicability inactuation & sensing"**. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 509 (2016) 684–696.

[22] S.H. Park and K.-M. Chu. **"Highly conducting carbon nanotube composite for electric heating unit applications"**. ELECTRONICS LETTERS 1. 7th January 2013 Vol. 49 No. 2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[23] J. Salzbrenner, C. Apblett and T. Khraishi. 2013. **"Mechanical and electrical properties of carbon nanotubes surface-stamped on polydimethylsiloxane for microvalve actuation"**. Polymer International. Volume 62, 608–615.

[24] Autar K. Kaw. **"Mechanical of composites materials"**. Mechanical engineering; v. 29. 2006 .

[25] C. F. Pirri, S. M. Lombardi **"Development of composite piezoelectric materials for tactile Sensing"** . Politecnico di Torino Dipartimento di Scienza Applicata Tecnologia, January 2012 - December 2014.

[26] L. Xie, X. Huang, Y. Huang, K. Yang, and P.Jiang. **"Core-shell Structured Hyperbranched Aromatic Polyamide/$BaTiO_3$ Hybrid Filler for Poly(vinylidene fluoride trifluoroethylenechlorofluoroethylene) Nanocomposites with the Dielectric Constant Comparable to That of Percolative Composites"**. ACS Appl. Mater. Interfaces 2013, 5, 1747–1756.

[27] Y. Feng, W. L. Li, Y. F. Hou, Y. Yu, W. P. Cao,a T. D. Zhang and W. D. Fei. **"Enhanced dielectric properties of PVDF-HFP/$BaTiO_3$-nanowire composites induced by interfacial polarization and wire-shape"**. J. Mater. Chem. C, 2015, 3, 1250–1260.

[28] T. Zhou, J. W. Zha, R. Y. Cui, B. H. Fan, J. K. Yuan, and Z. M. Dang, **"Improving Dielectric Properties of BaTiO3/ Ferroelectric Polymer Composites by Employing Surface Hydroxylated $BaTiO_3$ Nanoparticles"**. ACS Applied Materials & Interfaces

[29] K. Park , M. Lee , Y. L. , S. Moon , G. T. Hwang , G. Zhu , J. E. Kim , S. O. Kim , D. K. Kim, Z. L. Wang , and K. J. Lee, **"Flexible Nanocomposite Generator Made of $BaTiO_3$ Nanoparticles and Graphitic Carbons"**. Adv, Mater 2012, 24, 2999–3004.

[30] C. K. Jeong , K. Park , J. Ryu , G. T. Hwang , and K. J. Lee, **"Large-Area and Flexible Lead-Free Nanocomposite Generator Using Alkaline Niobate Particles and Metal Nanorod Filler"**, Adv. Funct. Mater. 2014, 24, 2620–2629.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[31] Jean-Fabian and Dantras, Eric and Laffont Dantras, Lydia and Dandurand, Jany and Lacabanne, **"Nanotexture influence of $BaTiO_3$ paticles on piezoelectric behaviour of PA11/$BaTiO_3$ nanocomposites"**. Jounal of non-crystalline solids, vol.356 (11-17).pp.629-634.

[32] M. Zhang, T. Gao, J. Wang, J. Liao, Y. Qiu, H. Xue, Z. Shi, Z. Xiong, L. Chen. **"Single $BaTiO_3$ nanowires-polymer fiber based nanogenerator"**. Nano Energy (2015) 11, 510–517

[33] [Online]. Available; https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_crystallography

[34] [Online]. Available; http://articheck.co.uk/spectroscopy-series-fourier-transformed-infrared/

[35] [Online]. Available; https://cmrf.research.uiowa.edu/scanning-electron-Microscopy

[36] T. Charoonsuk , N. Vittayakorn. **"A facile one step conversion of the sub - micrometer to uniform nanopowder in tetragonal $BaTiO_3$ Via a surface active etching salt "**. Materials and design 110 (2016) 233-244.

[37] Y. Shiratori, C. Pithan, J. Dornseiffer and R. Waser. **"Raman scattering studies on nanocrystalline $BaTiO_3$ Part II – consolidated polycrystalline ceramics"**. J. Raman Spectrosc. 2007; 38: 1300–1306.

[38] Y. Shiratori, C. Pithan, J. Dornseiffer and R. Waser. **"Raman scattering studies on nanocrystalline $BaTiO_3$ Part I – consolidated polycrystalline ceramics"**. J. Raman Spectrosc. 2007; 38: 1300–1306.

[39] V. Buscaglia , M.T. Buscaglia , M. Viviani , T. Ostapchuk , I. Gregora , J. Petzelt , L. Mitoseriu , P. Nanni , A. Testino , R. Calderone , C. Harnagea , Z. Zhao , M. Nygren. **"Raman and AFM piezoresponse study of dense $BaTiO_3$ nanocrystalline ceramics"**. Journal of the European Ceramic Society 25 (2005) 3059 – 3062.

[40] P. Xue, Y. Hu, W. Xia, H. Wu, X. Zhu. **"Molten-salt synthesis of $BaTiO_3$ powders and their atomic-scale structural characterization"**. Journal of Alloys and Compounds 695 (2017) 2870 - 2877.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[41] T. Gao, H. Fjellvåg, and P. Norby. **"Raman Scattering Properties of a Protonic Titanate $H_xTi_{2-x/4}\square_{x/4}O_4 \cdot H_2O$ (□, vacancy; x = 0.7) with Lepidocrocite-Type Layered Structure".** J. Phys. Chem. B 2008, 112, 9400 – 9405.

[42] T. Zhou, Jun-Wei Zha, Rui-Yao Cui, Ben-Hui Fan, Jin-Kai Yuan, and Zhi-Min Dang. **"Improving Dielectric Properties of $BaTiO_3$ / Ferroelectric Polymer Composites by Employing Surface Hydroxylated $BaTiO_3$ Nanoparticles".** ACS Appl. Mater. Interfaces.

[43] H.Z. Akbas, Z. Aydin, I.H. Karhan, T. Dilsizoglu , S. Turgut. **"Process Control using FT-IR analysis of $BaTiO_3$ From ultrasonically activated $BaCO_3$ and TiO_2".**

[44] Isaac W Mwangi, J Catherine Ngila and Patrick Ndungu. **"A new spectrophotometric method for determination of residual polydiallyldimethylammonium chloride flocculant in treated water based on a diazotization-coupled ion pair".** Water SA vol.38 n.5 Pretoria Jan. 2012

[45] S. Costa, B. Scheibe, M. Rummeli, and E. Borowiak-Palen. **"Raman spectroscopy study on concentrated acid treated carbon nanotubes".** Phys. Status Solidi B 246, No. 11–12, 2717–2720 (2009).

[46] R. Schönfelder , F. Avilés , M. Knupfer , J.A. Azamar-Barrios , P.I. González-Chi & M.H. Rümmeli. **"Influence of architecture on the Raman spectra of acid-treated carbon nanostructures".** Journal of Experimental Nanoscience, 2014 .

[47] U. J. Kim, A. Furtado, X. Liu, G. Chen, and P.C. Eklund. **"Raman and IR Spectroscopy of Chemically Processed Single-Walled Carbon Nanotubes".** J. AM. CHEM. SOC. 2005, 127, 15437-15445.

[48] Dmitry V. Bavykin, Jens M. Friedrich, and Frank C. Walsh. **"Protonated Titanates and TiO_2 Nanostructured Materials: Synthesis, Properties, and Applications".** Adv. Mater. 2006, 18, 2807–2824.

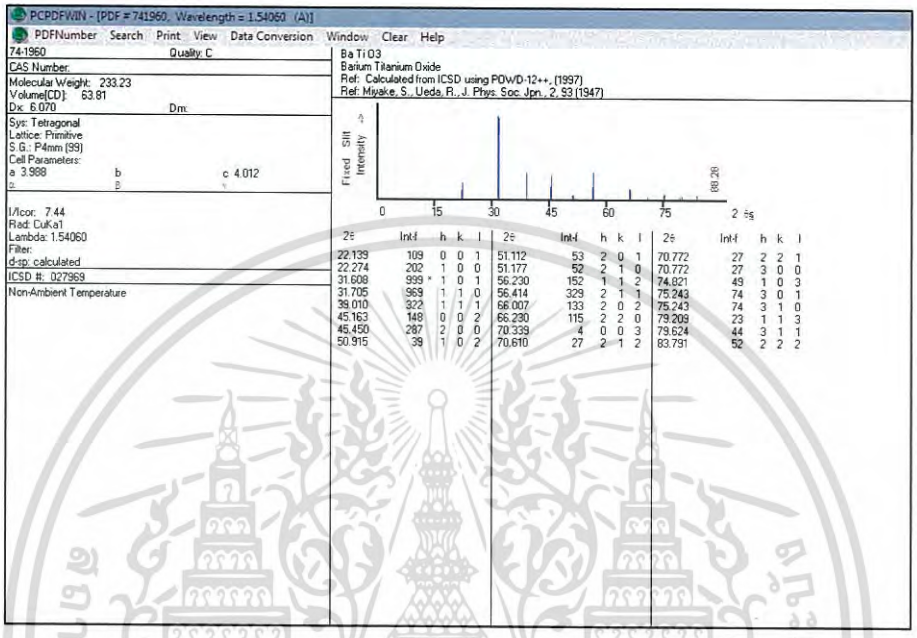
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

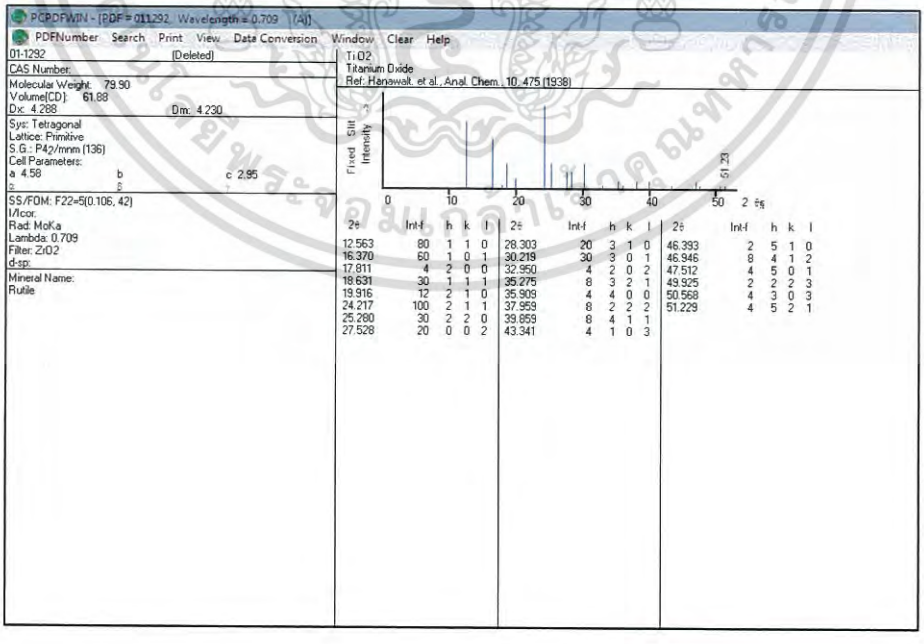
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

JCPDS NO. 74-1960

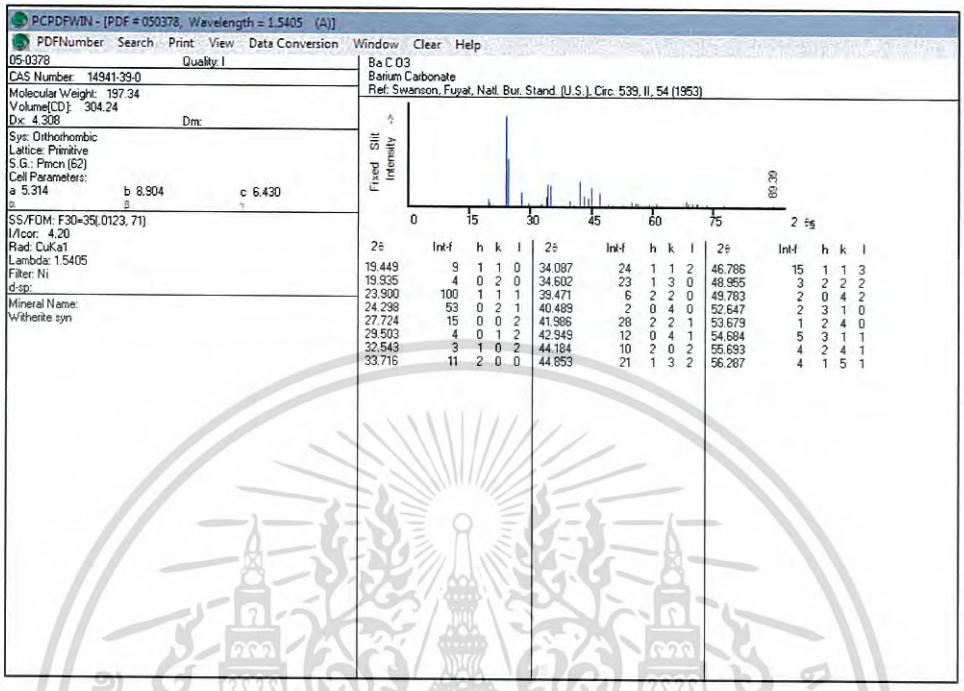


JCPDS NO. 74-1960



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

JCPDS NO. 05-0378



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

1. การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต 5 กรัม

มวลโมเลกุลของธาตุแต่ละชนิดมีดังแต่ไปนี้

Ba = 137.33	C = 12.01	O = 15.99	Ti = 47.87
Na = 22.99	Cl = 35.50	K = 39.10	

ตัวอย่าง การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต 5 กรัม

$$BaCO_3(s) + TiO_2(s) \xrightarrow{NaCl + KCl} BaTiO_3(s) + CO_2(g)$$

เตรียม $BaTiO_3$ nanorod 221.2 กรัม ต้องใช้ $BaCO_3$ 197.34 กรัม

เตรียม $BaTiO_3$ nanorod 5 กรัม ต้องใช้ $BaCO_3$ 4.4606 กรัม

ดังนั้นต้องใช้ $BaCO_3$ จำนวน 4.4606 กรัม

เตรียม $BaTiO_3$ nanorod 221.2 กรัม ต้องใช้ TiO_2 83.87 กรัม

เตรียม $BaTiO_3$ nanorod 5 กรัม ต้องใช้ TiO_2 1.8958 กรัม

ดังนั้นต้องใช้ TiO_2 จำนวน 1.8958 กรัม

โดยเตรียมในอัตราส่วนสารตั้งต้นต่อเกลือเท่ากับ 1 : 50 โดยโมล ซึ่งใช้เกลือ NaCl และ KCl ในอัตราส่วน 25 : 25 โดยโมล

จากสูตร $mol = \frac{g}{MW}$; $g = mol \times MW$

$g\ (NaCl) = 25\ mol \times 58.50\ g/mol$

$= 1462.5\ g$

$g\ (KCl) = 25\ mol \times 74.06\ g/mol$

$= 1865\ g$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียม $BaTiO_3$ nanorod 221.2 กรัม ต้องใช้ NaCl 1462.5 กรัม
เตรียม $BaTiO_3$ nanorod 5 กรัม ต้องใช้ NaCl 33.0583 กรัม

ดังนั้นต้องใช้ NaCl จำนวน 33.0583 กรัม

เตรียม $BaTiO_3$ nanorod 221.2 กรัม ต้องใช้ KCl 1865 กรัม
เตรียม $BaTiO_3$ nanorod 5 กรัม ต้องใช้ KCl 42.1564 กรัม

ดังนั้นต้องใช้ KCl จำนวน 42.1564 กรัม

2. **การคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric permittivity)**

จากสูตร $$\varepsilon_r = \frac{C_p d}{\varepsilon_0 A}$$

เมื่อ ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของสารตัวอย่าง
Cp คือ ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของสารตัวอย่าง (F)
d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง (m)
A คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่าง (m^2)
ε_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ มีค่า 8.854×10^{-12} ฟารัด/เมตร

ตัวอย่าง การคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสม

d = 0.00323 m A = 0.00805 m × 0.00989 m = 7.96×10^{-5} m^2

$C_p = 5.58 \times 10^{-12}$ F $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m

แทนค่าจากสูตร จะได้

$$\varepsilon_r = \frac{5.58 \times 10^{-12}\ F \times 0.00323\ m}{8.85 \times 10^{-12}\ \frac{F}{m} \times 7.96 \times 10^{-5}\ m^2}$$

$$= \frac{1.8023 \times 10^{-14}}{7.0459 \times 10^{-16}}$$

$$= 25.5794$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้