

การศึกษาอิทธิพลของเฟสกระจายตัวต่อผลทางไฟฟ้าส่งออกของ  
ตัวกำเนิดพลังงานวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่นได้

The study of Phase Dispersion Effect on The  
Electrical Output Performance for  
The Composite-Based Flexible



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาอิทธิพลของเฟสกระจายตัวต่อผลทางไฟฟ้าส่งออกของ  
ตัวกำเนิดพลังงานวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่นได้

The study of Phase Dispersion Effect on The  
Electrical Output Performance for  
The Composite-Based Flexible



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The study of Phase Dispersion Effect on The Electrical Output Performance for The Composite-Based Flexible



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 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาอิทธิพลของเฟสกระจายตัวต่อผลทางไฟฟ้าส่งออกของตัวกำเนิดพลังงานวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่นได้  
The study of Phase Dispersion Effect on The Electrical Output Performance for The Composite-Based Flexible Piezoelectric Nanogenerator

ชื่อนักศึกษา

นางสาววนิษา คำภีระ รหัสนักศึกษา 57050498  
นางสาวสุดธิดา ไชยราช รหัสนักศึกษา 57050534  
นางสาวสุธาสินี นาคสุข รหัสนักศึกษา 57050538

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2560

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.นราธิป วิทยากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช กรรมการ	
รศ.ดร.นราธิป วิทยากร กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาอิทธิพลของเฟสกระจายตัวต่อผลทางไฟฟ้าส่งออกของตัวกำเนิดพลังงานวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่นได้
ชื่อนักศึกษา	นางสาววนิษา คำภีระ รหัสนักศึกษา 57050498 นางสาวสุดธิดา ไชยราช รหัสนักศึกษา 57050534 นางสาวสุธาสินี นาคสุข รหัสนักศึกษา 57050538
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.นราธิป วิทยากร

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการเตรียมเส้นใยนาโนแบบยืดหยุ่นไททานเตตด้วยวิธีโซลเจล และกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เพื่อใช้เป็นวัสดุกระจายในวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ โดยโครงสร้างของอุปกรณ์ประกอบด้วยวัสดุกระจายตัวระหว่างเส้นใยนาโน และอนุภาคนาโนแบบยืดหยุ่นไททานเตตในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยใช้ขั้วไฟฟ้าคือขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิท และถูกปกคลุมด้วยพอลิไดเมทิลซิลอกเซน โดยทำการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเส้นใย และอนุภาคนาโนแบบยืดหยุ่นไททานเตต รวมถึงการกระจายตัวของวัสดุกระจายบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิทด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบวิเคราะห์เอกลักษณ์ของเส้นใย และอนุภาคนาโนแบบยืดหยุ่นไททานเตต ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ และเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด จากนั้นตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกรวมถึงความถี่ของอุปกรณ์ ผลการทดลองพบว่าเส้นใยนาโน และอนุภาคนาโนมีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์แบบเตตระโกนอล เมื่อนำอุปกรณ์ไปทดสอบแรงกดเชิงกลพบว่าที่อัตราส่วนเส้นใยต่ออนุภาคที่ 50%:50% ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงที่สุดประมาณ 9 V หลังจากทดสอบความถี่ พบว่าอุปกรณ์เสื่อมสภาพเมื่อให้แรงเชิงกลอย่างต่อเนื่อง สันนิษฐานว่าเกิดจากความเสียหายบริเวณรอยต่อที่เกิดการเสียดสีกันระหว่างชั้นของพอลิเมอร์และพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า รวมทั้งเส้นใยและอนุภาคบางส่วนเกิดการหลุดและแตกหัก จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ด้อยลง ทั้งนี้การทดลองนี้ได้เสนอแนวทางในการเตรียมเส้นใยนาโนแบบยืดหยุ่นไททานเตตที่มีคุณภาพ รวมถึงการสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่นที่มีโครงสร้างอย่างง่าย โดยเสนอแนวทางการวิเคราะห์ผลทางไฟฟ้าสามารถเป็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพ และมีความคงทนต่อการใช้งาน

**คำสำคัญ :** วัสดุเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ แบบยืดหยุ่นไททานเตต การผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

<b>Title</b>	The study of Phase Dispersion Effect on The Electrical Output Performance for The Composite Based Flexible Piezoelectric Nanogenerator		
<b>Students</b>	Miss Wanisa Khumpeera	Student ID 57050498	
	Miss Suttida Chairach	Student ID 57050534	
	Miss Sutasinee Naksuk	Student ID 57050538	
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Faculty</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMIL)		
<b>Academic Year</b>	2017		
<b>Advisor</b>	Assoc. Prof. Naratip Vittayakorn		

### Abstract

In this research, the BaTiO<sub>3</sub> (BT) nanofibers were prepared by using the sol-gel and the electrospinning methods. These were used to be the dispersed phase in the flexible piezoelectric nanocomposite (FPNC). For the FPNC structure, it mainly consisted of the dispersion of BT nanofiber and BT nanoparticle at various ratios, the interdigital electrode (IDEs) was being used as the electrode, and the polydimethylsiloxane (PDMS) was used to cover the composite. This experiment analyzed the morphological surfaces of fiber and particle deposited on the IDEs by scanning electron microscope (SEM). The X-ray diffraction (XRD) technique and the Fourier transform electroscopy were used to analyze the material identity. The generated output voltage and the fatigue effect were carried out by applying the mechanical force to the device. For the experimental results, it has been found that both calcined BT nanofiber and BT nanoparticle showed the tetragonal structure. The fabricated FPNC was mechanically pressed for investigating the electrical output performance. The averaged output voltage was approximately 9 V by adding BT nanofiber ratio of 50% into device. For the fatigue test, the device degradation was clearly found when continuously pressing for a long time. The degradation was observed due to the frictional damage produced at the interface between PDMS and IDEs surface. The BT nanofiber and BT nanoparticle were damaged. This affects the electrical output performance for the FPNC device. This work suggested the route to fabricate the FPNC device with the facile fabrication, and demonstrated the fatigue effect of the device.

**Keywords :** Flexible piezoelectric composites, Barium titanate, Electrospinning

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความกรุณา และความร่วมมือของทุก ๆ ท่านรวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.นราธิป วิทยากร ที่มอบหมายงานให้แก่กลุ่มของข้าพเจ้ารวมทั้งคอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด ให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษ และให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ จึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร ที่กรุณามาเป็นประธานกรรมการคุมสอบ และตรวจสอบโครงการพิเศษ รวมถึงช่วยกรุณาแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช ที่กรุณาเป็นกรรมการคุมสอบ และตรวจสอบโครงการพิเศษ รวมถึงช่วยกรุณาแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชาความรู้ และคอยให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทางเคมี เจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาเคมี รวมถึงเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ และวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง ที่ให้การช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณพี่ ๆ นักศึกษาปริญญาโท และปริญญาเอกภาคเคมีทุกคนที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือเกี่ยวกับโครงการพิเศษฉบับนี้ จนทำให้โครงการพิเศษฉบับนี้ให้สำเร็จด้วยดี

กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ทุกคนในครอบครัวที่ให้โอกาสในการศึกษาตลอดจนอบรมสั่งสอน และเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมถึงเพื่อน ๆ และบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

วณิษา คำภีระ  
 สุธธิตา ไชยราช  
 สุธาสินี นาคสุข

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป .....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 วัสดุผสม (Composite).....	3
2.2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric material).....	4
2.2.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบอิทธิพลทางตรง (Direct effect).....	5
2.2.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบอิทธิพลทางกลับ (Reverse effect).....	6
2.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant).....	6
2.4 เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric).....	7
2.5 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovsite structure).....	8
2.6 แบเรียมไททาเนต (Barium titanate).....	9
2.7 พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS).....	11
2.8 โซลเจล (Sol-gel).....	12
2.9 กระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning).....	13
2.10 เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์.....	15
2.10.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปก- โทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometer: FT-IR).....	15
2.10.2 เครื่องตรวจการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) .	16
2.10.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM).....	17
2.10.5 ชุดการทดสอบแรงดันไฟฟ้าจากแรงกด.....	18
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	33
3.1 สารเคมี.....	33
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanofiber).....	33

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanoparticle) .....	33
3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต .....	33
3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ .....	33
3.2.1 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตพอลิไดเมทิลซิลลอกเซน .....	33
3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	34
3.3 ขั้นตอนในการเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต .....	34
3.3.1 การเตรียมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตโดยวิธีโซลเจล .....	34
3.3.2 การเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต (Barium titanate composite) ....	35
3.4 เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์ .....	36
3.4.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี .....	36
3.4.2 เครื่องตรวจการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....	36
3.4.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	36
3.4.5 ชุดการทดสอบแรงดันไฟฟ้าจากแรงกด .....	37
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย และการอภิปรายผล .....</b>	<b>38</b>
4.1 การศึกษาการเตรียมวัสดุภาคกระจายตัวของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ (Flexible piezoelectric composites) เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanofiber: BT nanofiber) และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanoparticle: BT nanoparticle) .....	38
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุภาคกระจายตัว เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) ก่อนเผา หลังเผา และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) .....	38
4.1.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) ก่อนเผา หลังเผา และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique: XRD) .....	42
4.1.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) ก่อนเผา หลังเผา และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometer: FT-IR) .....	49

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การศึกษาการเตรียมวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ (Flexible piezoelectric composites) ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) และพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS) .....	51
4.2.1 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกมีวัฏภาคกระจายคือเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) และวัฏภาคหลักคือพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS) .....	51
4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ที่มีวัฏภาคกระจายคือ เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM).....	53
4.2.2 ผลการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ที่มีอัตราส่วนเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) แตกต่างกัน.....	55
4.2.3 อิทธิพลของความถี่ที่ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ ที่อัตราส่วนเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) ต่ออนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ที่ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงสุด.....	59
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>62</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	62
5.1.1 จากการศึกษาการเตรียมวัฏภาคกระจายตัว อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanoparticle: BT nanoparticle) และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanofiber: BT nanofiber) .....	63
5.1.2 จากการศึกษาการเตรียมวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ (Flexible piezoelectric composites).....	63
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	64
<b>เอกสารอ้างอิง</b> .....	<b>65</b>
<b>ภาคผนวก</b> .....	<b>69</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 อัตราส่วนระหว่างเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต .....	35
4.1 ผลของตัวแปร (Parameters) ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีรีดเวลต์โดยการใช้ซอฟต์แวร์ JANA 2006 (Rietveld Refinement Analysis by JANA 2006).....	47
4.2 อัตราส่วนระหว่างเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต .....	53
4.3 แสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ซึ่งมีอัตราส่วนเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) ต่ออนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) เท่ากับ 100%:0% 90%:10% 70%:30% 50%:50% 30%:70% 10%:90% และ 0%:100% .....	57
4.4 ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดอื่น .....	57
4.5 ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ที่มีวิฎุภาคกระจายตัวคือเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่อัตราส่วนที่ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงที่สุดคือ 50%:50% โดยให้แรงเชิงกลอย่างต่อเนื่องทั้งหมด 10 รอบ 17000 ครั้ง.....	59

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ชนิดของวัสดุผสมที่ยึดตามรูปแบบการเสริมแรงในการจำแนกชนิดของวัสดุผสมตามวัสดุเมทริกซ์ ดัดแปลงจาก (5) .....	3
2.2 ลักษณะของเฟสกระจายตัวที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุผสม ดัดแปลงจาก [5] .....	3
2.3 การจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสในวัสดุผสม ดัดแปลงจาก [5] .....	4
2.4 แผนผังการแบ่งกลุ่มของผลึกโดยการใช้พื้นฐานสมมาตรของผลึก ดัดแปลงจาก [9] .....	5
2.5 ปรัชญาการพิมพ์โฮอิเล็กทริกแบบอติพลาทางตรง ดัดแปลงจาก [7] .....	6
2.6 ปรัชญาการพิมพ์โฮอิเล็กทริกแบบอติพลาทางกลับ ดัดแปลงจาก [7] .....	6
2.7 ภาพประกอบแสดงความหมายของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก .....	7
2.8 เซลล์หน่วยของโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ ดัดแปลงจาก [14] .....	9
2.9 โครงสร้างผลึกแบเรียมไททานเตแบบเพอโรฟสไกต์ ดัดแปลงจาก [17] .....	10
2.10 แลตทิซพารามิเตอร์ของแบเรียมไททานเตในแต่ละอุณหภูมิ ดัดแปลงจาก [17] .....	10
2.11 การเปลี่ยนเฟสของแบเรียมไททานเตไปตามอุณหภูมิต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าความยินยอมสัมพัทธ์ ดัดแปลงจาก [19] .....	11
2.12 หน่วยโครงสร้างของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน ( $\text{CH}_3$ ) <sub>2</sub> SiO .....	11
2.13 กระบวนการโซลเจล (Sol-gel processing) ดัดแปลงจาก [24] .....	13
2.14 กระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ดัดแปลงจาก [25] .....	13
2.15 พฤติกรรมของของเหลวที่พุ่งออกมาจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิ่ง ดัดแปลงจาก [28] .....	14
2.16 ส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ดัดแปลงจาก [33] .....	15
2.17 การสะท้อนของรังสีเอ็กซ์จากโครงสร้างผลึก ดัดแปลงจาก [34] .....	17
2.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดัดแปลงจาก [35] .....	18
2.19 เครื่องทดสอบแรงกด (Compression machine) .....	19
2.20 ออสซิลโลสโคป .....	19
2.21 เส้นใยนาโนแบเรียมไททานเตเรียงตามแนวที่แตกต่างกันคือ แนวตั้ง แนวนอน และแบบสุมในพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่เป็นเมทริกซ์ .....	20
2.22 (a) ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริก และ (b) การสูญเสียการสัมผัสกันของพอลิไดเมทิลซิลอกเซนและแบเรียมไททานเตในเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนที่ความถี่ต่าง ๆ .....	21
2.23 (a) แรงดันไฟฟ้าส่งออก และ (b) การเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน BaTiO <sub>3</sub> /PDMS ภายใต้การบีบอัดด้วยกลไกเป็นระยะ ๆ รูปที่แทรกใน (a) คือภาพถ่ายของไฟไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินในเชิงพาณิชย์ซึ่งสว่างขึ้นโดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจาก BTNF-V .....	22
2.24 (a) ภาพของเครื่องกำเนิดพลังงานนาโนแบบยืดหยุ่น (b) และ (c) การตัดด้วยกลไกของพื้นผิวจะสร้างความเค้นแรงดึง และแรงอัดในสายนาโนตามลำดับ และคำนวณสมรรถนะของเพียโซอิเล็กทริกในเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนที่อยู่ในรูปของ (b) และ (c) .....	24

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 แรงดันไฟฟ้าลัดวงจร (ซ้าย) และแรงดันไฟฟ้าของวงจรเปิด (ด้านขวา) ของเครื่องกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์แบบยืดหยุ่นได้เมื่อมีความเค้นแรงดึง (a) ต่อเชื่อมต่อกับระบบการวัด และ (b) เชื่อมต่อย้อนกลับกับการวัด .....	25
2.26 แรงดันไฟฟ้าในปัจจุบัน และแรงดันไฟฟ้าเมื่อสองเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน เชื่อมต่อกันเป็นชุด (a) (b) และแบบขนาน (c) (d) ด้วยคอนแทคต่าง ๆ .....	25
2.27 แรงดันไฟฟ้าลัดวงจร (ซ้าย) และแรงดันไฟฟ้าที่เปิดวงจร (ด้านขวา) ของเครื่องกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์แบบอ่อนได้เมื่อเชื่อมต่อกับการวัด .....	26
2.28 แรงดันไฟฟ้าลัดวงจร (ซ้าย) และแรงดันไฟฟ้าของวงจรเปิด (ด้านขวา) ของเครื่องกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์แบบยืดหยุ่นที่มีสมบัติการแตกตัวแตกต่างกัน .....	26
2.29 สัญญาณไฟฟ้าที่ปลดปล่อยอย่างช้า ๆ (a) (b) และสัญญาณไฟฟ้าที่ปลดปล่อยอย่างช้า ๆ (c) (d) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน .....	27
2.30 (a) การสร้างกำลังของตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนแบบเรียบไททาเนตแบบยืดหยุ่นก่อนการตัดและหลังการตัด โดยโดโพลจัดเรียงตัวในทิศทางตามยาวของพื้นผิวอุปกรณ์ในสถานะดั้งเดิมโดยที่ไม่ตัด รูปที่ 2.30 a-i, ii ประจุกถูกสร้างขึ้นเนื่องจากความเค้นแรงดึง และความเค้นแรงดึงผ่านการตัด รูปที่ 2.30 a-iii, iv ประจุกสามารถไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทองคำ และสร้างความต่างศักย์ ( $\Delta V$ ) ระหว่าง IDEs วัดกระแสที่ออกมา รูปซ้าย i และความต่างศักย์ รูปขวา ii ของตัวกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบเรียบไททาเนตบนพื้นผิวพลาสติกระหว่างการตัด และไม่ตัด เป็นระยะ (b) เมื่อเชื่อมต่อแบบไปข้างหน้า รูปแทรกอยู่ในรูปที่ 2.30 b-i กับเครื่องวัดกระแส และ (c) เมื่อเชื่อมต่อแบบย้อนกลับ รูปแทรกอยู่ในรูปที่ 2.30 c-i กับเครื่องวัดกระแส รูปที่แทรกอยู่แสดงถึงตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนที่ถูกตัดและไม่ถูกตัด .....	29
2.31 สังเคราะห์อนุภาคนาโนแบบเรียบไททาเนตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (a) อนุภาคทรงกลมขนาดนาโน และ (b) เส้นลวดขนาดนาโน (c) ส่วนผสมของอนุภาคทรงกลมขนาดนาโน (Spherical nanoparticles: SPC) และเส้นลวดขนาดนาโน (d) ในเมทริกซ์ PDMS (e) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ( $20^\circ - 80^\circ$ ) ของอนุภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโนแบบสังเคราะห์ที่มีมุมการเลี้ยวเบนขยาย (พีค (200): $44^\circ - 46^\circ$ ) (f) สเปกตรัมของรามาน (Raman) ของอนุภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโน .....	30
2.32 (a) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าวัสดุผสมนาโนไร้ตะกั่ว (b) อัตราส่วนน้ำหนักของแบบเรียบไททาเนตอนุภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวัสดุผสมนาโน .	31
3.1 แผนผังแสดงอุณหภูมิ ระยะเวลา และอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิในการสังเคราะห์ .....	35
3.2 ขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่าง [34] .....	36
3.3 การวางชิ้นงานเพื่อตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าจากแรงกด .....	37
4.1 ลักษณะของสารที่เตรียมได้ด้วยวิธีโซลเจล (ก) สารละลายผสมระหว่างแบบเรียบอะซิเตทและ ไททาเนียมบิวทอกไซด์ (ข) สารละลายผสมระหว่างแบบเรียบอะซิเตท ไททาเนียมบิวทอกไซด์ และพอลิเอทิลีนออกไซด์ .....	38
4.2 แบบจำลองการเกิดพันธะเคมีด้วยวิธีโซลเจล (Sol-gel) ดัดแปลงมาจาก [40] .....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ชุดการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) (ก) เครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้า (ข) ตำแหน่งของการติดตั้งเครื่องมือในการผลิตเส้นใย .....	40
4.4 ลักษณะของ (ก) และ (ข) เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผา (ค) และ (ง) เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตหลังเผา.....	41
4.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ (ก) และ (ข) เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผา (ค) และ (ง) เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตหลังเผา และ (จ) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า.....	42
4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) ก่อนเผา หลังเผา และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle).....	44
4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์หลังผ่านการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีรีดิวต์โดยการใช้อยู่ซอฟต์แวร์ JANA 2006 (Rietveld Refinement Analysis by JANA 2006) (ก) เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) (ข) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) .....	46
4.8 อัตราส่วนระหว่างค่าความเป็นเตตระโกนอลของภูมิภาคกระจายตัวของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber).....	48
4.9 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผา (Uncalcined BT nanofiber) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า (BT nanoparticle) และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตหลังเผา (Calcined BT nanofiber) ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometer: FT-IR).....	50
4.10 (ก) แบบจำลองภายในของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ (ข) ลักษณะทางกายภาพของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ (ค) และ (ง) ขนาดความยาว และความกว้างของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ (จ) และ (ฉ) การโค้งงอของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้.....	52
4.11 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) การกระจายตัวของวัสดุผสมที่มีเพียงเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตชนิดเดียว (ข) การกระจายตัวของวัสดุผสมที่มีเพียงอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตชนิดเดียว (ค) (ง) (จ) (ฉ) และ (ช) การกระจายตัวของวัสดุผสมระหว่างเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตในอัตราส่วน 90%:10% 70%:30% 50%:50% 30%:70% และ 10%:90% ตามลำดับ .....	54
4.12 แรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ โดยมีอัตราส่วนของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตต่ออนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต คือ (ก) 100%:0% (ข) 90%:10% (ค) 70%:30% (ง) 50%:50% (จ) 30%:70% (ฉ) 10%:90% และ (ช) 0%:100%.....	56
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (%) (Ratio of BT nanofiber:BT nanoparticle) กับค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ย (Average Voltage) (V).....	58

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 แรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยึดหยุ่นได้ที่มีวัฏภาคกระจายตัว คือ อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่อัตราส่วนที่ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงที่สุดคือ 50%:50% โดยให้แรงเชิงกลอย่างต่อเนื่องทั้งหมด 10 รอบ 17000 ครั้ง.....	60
4.15 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงเฟสกระจายที่ติดอยู่บนพอลิ-ไดเมทิลไซลอคเซนหลักจากผ่านการให้แรงเชิงกลโดยการกระแทก (ก) ผ่านการให้แรง 0 ครั้ง (ข) ผ่านการให้แรง 5000 ครั้ง (ค) ผ่านการให้แรง 10000 ครั้ง.....	61



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากสำหรับมนุษย์ และคาดว่าในอนาคตจะมีความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้นอีกหลายเท่าตัว เนื่องมาจากมีการเติบโตของอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีต่าง ๆ อย่างรวดเร็วส่งผลให้ปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักลดน้อยลงทำให้เกิดการขาดแคลนพลังงานเชื้อเพลิง ดังนั้นการหาแหล่งพลังงานทดแทนที่จะนำมาใช้ในอนาคตจึงมีความสำคัญอย่างมาก แหล่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจคือพลังงานที่เราสามารถใช้ได้ทุกที่ มีอยู่มาก และเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ นั่นคือพลังงานกล เช่นพลังงานจากลม น้ำ รวมถึงกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ที่ทำให้เกิดพลังงานกล พลังงานเหล่านี้จะสามารถนำไปใช้ขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้โดยเทคโนโลยีเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ซึ่งวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric material) สามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยเกิดจากการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างผลึกในวัสดุ เรียกว่า อิทธิพลทางตรง (Direct effect) หรือเมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับกระแสไฟฟ้า จะเกิดการยืดหดตัวเองเกิดพลังงานกล เรียกว่า อิทธิพลทางกลับ (Reverse effect) [1] ในปัจจุบันมีการศึกษา และวิจัยเกี่ยวกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกกันอย่างแพร่หลาย และมีการนำมาประยุกต์ใช้งานในทางด้านต่าง ๆ

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นเซรามิกมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกสูง แต่มีข้อจำกัดในการนำมาใช้งานเนื่องจากมีความเปราะ และขึ้นรูปได้ยาก จึงมีการทำเป็นวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก กับพอลิเมอร์เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว [2] งานวิจัยก่อนหน้าได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสัณฐานวิทยาของแบเรียมไททาเนตที่ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าส่งออก พบว่าแท่งนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanorod) ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกที่ดีกว่าแบบอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตแต่มีการกระจายตัวที่ต่ำกว่าแบบอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต [3] ต่อมา Changyeon Baek และคณะ ได้ทำการผสมระหว่างแบเรียมไททาเนตแบบอนุภาคนาโน และเส้นลวดนาโนในวัสดุผสมกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนเพื่อให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกัน และเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้น โดยทำการสังเคราะห์แบเรียมไททาเนตแบบอนุภาคนาโน และเส้นลวดนาโน ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล และหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด [4] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเตรียมวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกกับพอลิเมอร์ ระหว่างแบเรียมไททาเนต (Barium titanate) ที่มีสัณฐานวิทยาแบบเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanofiber) เพื่อเพิ่มการเชื่อมโยงระหว่างวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และเพิ่มกระจายตัวของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่กระจายตัวอยู่บนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดิจิท (Interdigitated electrodes: IDEs) กับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxanes: PDMS) ในการศึกษานี้ได้ทำการเตรียมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต ด้วยกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) และใช้อุณหภูมิในการเตรียมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต โดยหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกที่เพิ่มขึ้น และมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอบนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดิจิทที่คลุมด้วยพอลิไดเมทิลซิลอกเซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่น (Flexible piezoelectric composites)
- 2) เพื่อศึกษาการเตรียมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตโดยกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
- 3) เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอบนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิทที่ถูกคลุมด้วยพอลิโดเมทิลไซลอกเซน และให้สมบัติทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น
- 4) ศึกษาอิทธิพลของความถี่ที่ส่งผลต่อเฟสกระจายในวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นต่อแรงดันไฟฟ้าส่งออก

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) เตรียมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตโดยกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
- 2) เตรียมวัสดุผสมระหว่างแบเรียมไททาเนต ที่มีสัญญาณวิทยาเป็นแบบอนุภาคนาโน และเส้นใยนาโนบนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิทที่ถูกคลุมด้วยพอลิโดเมทิลไซลอกเซนโดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอนุภาคนาโน และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่อัตราส่วน 0%:100% 10%:90% 30%:70% 50%:50% 70%:30% 90%:10% และ 100%:0%
- 3) ศึกษาแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่น
- 4) ศึกษาอิทธิพลของความถี่ที่ส่งผลต่อเฟสกระจายในวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ของวัสดุผสมที่มีแรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงสุด

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถเตรียมวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นระหว่างแบเรียมไททาเนต ที่มีสัญญาณวิทยาเป็นแบบอนุภาคนาโน และเส้นใยนาโน บนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิทกับพอลิโดเมทิลไซลอกเซนได้
- 2) สามารถเตรียมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตโดยกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
- 3) ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอบนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิทที่ถูกคลุมด้วย พอลิโดเมทิลไซลอกเซน และให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกที่เพิ่มขึ้น
- 4) ทราบถึงอิทธิพลของความถี่ที่ส่งผลต่อเฟสกระจายในวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นต่อแรงดันไฟฟ้าส่งออก

## บทที่ 2

# ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

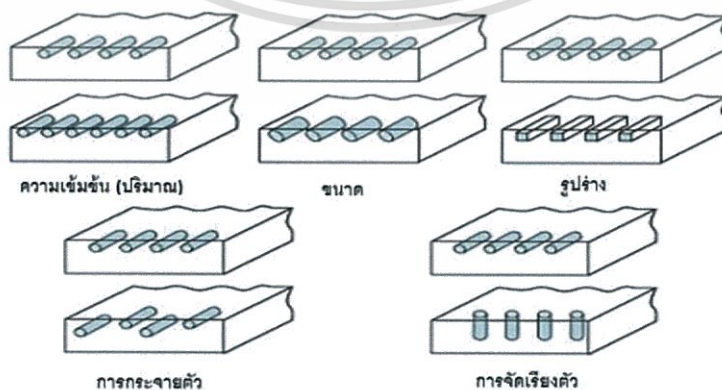
### 2.1 วัสดุผสม (Composite)

วัสดุผสม เป็นวัสดุที่มีการรวมกันของวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ที่มีความแตกต่างกันทั้งทางองค์ประกอบทางเคมีหรือทางโครงสร้าง กระจายอยู่ภายในเฟสต่อเนื่อง วัสดุผสมโดยทั่วไปจะประกอบด้วย เฟสเมทริกซ์ (Matrix phase) คือ เฟสต่อเนื่อง ทำหน้าที่เป็นเนื้อหลัก และเฟสกระจาย (Distribute phase) ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ มักเรียกว่า เฟสเสริมแรง (Reinforcement phase) อาจอยู่ในรูปของอนุภาค เส้นใยสั้น เส้นใยต่อเนื่อง หรือ แผ่น ดังรูปที่ 2.1 แสดงถึงลักษณะของเฟสกระจายที่อาจอยู่ในรูปของอนุภาค เส้นใยสั้น เส้นใยยาว หรือแผ่น ซึ่งอาจทำให้ได้คุณสมบัติแตกต่างกัน



รูปที่ 2.1 ชนิดของวัสดุผสมที่ยึดตามรูปแบบการเสริมแรงในการจำแนกชนิดของวัสดุผสมตามวัสดุเมทริกซ์ ดัดแปลงจาก [5]

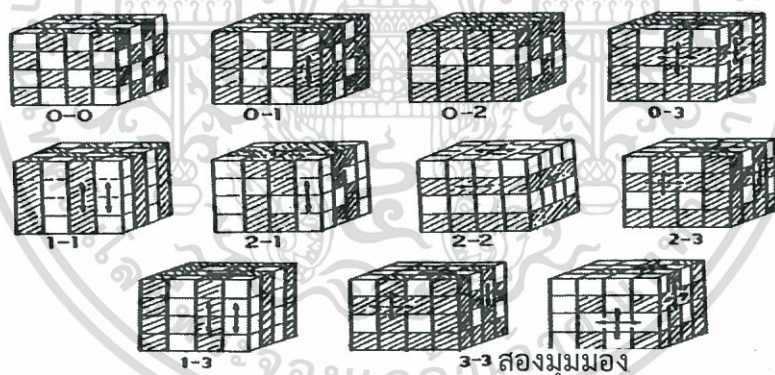
วัสดุผสมถูกสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมต่อการใช้งาน สมบัติที่ได้ขึ้นกับอัตราส่วนของวัสดุและลักษณะของเฟสที่กระจายตัว ซึ่งมีผลต่อสมบัติของวัสดุผสม เมื่อความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง การกระจายตัว และการจัดเรียงตัวต่างกันจะให้คุณสมบัติที่ต่างกันไปด้วย ดังรูปที่ 2.2 แสดงถึงลักษณะต่าง ๆ ของเฟสที่กระจายตัวอยู่ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของวัสดุผสม จะเห็นได้ว่าถึงแม้จะเป็นวัสดุผสมที่เกิดจากเมทริกซ์ และเฟสที่กระจายตัวอยู่ชนิดเดียวกัน แต่ถ้ามีความเข้มข้น (ปริมาณ) ขนาด รูปร่าง ลักษณะการกระจาย หรือการจัดเรียงตัวของเฟสที่กระจายตัวอยู่แตกต่างกันแล้ว วัสดุผสมที่ได้จะมีสมบัติที่ไม่เหมือนกัน



รูปที่ 2.2 ลักษณะของเฟสกระจายตัวที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุผสม ดัดแปลงจาก [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสในวัสดุผสม (Connectivity) [6] ในการเลือกเฟสของวัสดุแต่ละเฟส เพื่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน หรือสมบัติทางไฟฟ้าสัมพันธ์กับปริมาณ และรูปแบบการเรียงติดกันของแต่ละเฟส แนวความคิดของการเรียงติดกันถูกนำมาใช้กับวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกโดย Newnham และคณะนำเสนอแนวคิดของการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสในวัสดุผสมสำหรับการจัดประเภท เลดเซอร์โคเนียมไททาเนต (Lead zirconate titanate: PZT) ต่าง ๆ ในโครงสร้างพอลิเมอร์ผสม เมื่อพิจารณาแบบสองเฟสรวมกันมีระบุมารเชื่อมต่อกันของแต่ละเฟส เช่น ถ้าเชื่อมต่อเองในทุกทิศทาง  $x$   $y$  และ  $z$  จะถูกเรียกว่า 3 ถ้าเฟสมีการเชื่อมต่อเองเฉพาะในทิศทาง  $z$  จะเรียกว่า 1 วัสดุผสมไดฟาซิก (Diphasic composite) ถูกระบุด้วยสัญลักษณ์นี้ด้วยตัวเลขสองตัวด้วย  $m$ - $n$  เมื่อ  $m$  หมายถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ (Active phase) เช่น เลดเซอร์โคเนตไททาเนต และ  $n$  หมายถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่เป็นเมทริกซ์ (Inactive phase) เช่น พอลิเมอร์ โดยทั่วไปวัสดุผสมฟาซิก (Phasic composite) มี 10 แบบ คือ 0-0 1-0 2-0 3-0 1-1 1-2 1-3 2-2 3-2 และ 3-3 ดังแสดงในรูปที่ 2.3 วัสดุผสม 0-0 อธิบายการสลับกันของสองลูกบาศก์ที่แรงเงา (Hatched) และไม่แรงเงา (Unhatched) คอมโพสิต 1-0 มีเฟสที่ 1 เชื่อมต่อตามทิศทาง  $z$  คอมโพสิต 1-3 มีโครงสร้างในเลดเซอร์โคเนตไททาเนตซึ่งแท่ง (Rods) มี 1 มิติเชื่อมต่อ จะถูกจัดเรียงในเมทริกซ์ 3 มิติเชื่อมต่อในพอลิเมอร์เมทริกซ์ และวัสดุผสม 3-1 เลดเซอร์โคเนตไททาเนต รูปทรงรังผึ้ง ประกอบด้วยเฟสเชื่อมต่อ 1 มิติกับเฟสพอลิเมอร์ 2-2 แสดงโครงสร้างที่แผ่นเซรามิก และพอลิเมอร์ซ้อนสลับกัน และ 3-3 ประกอบด้วยเฟรม เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Jungle-gym-like PZT frame) ผังในพอลิเมอร์เชื่อมต่อ 3 มิติ

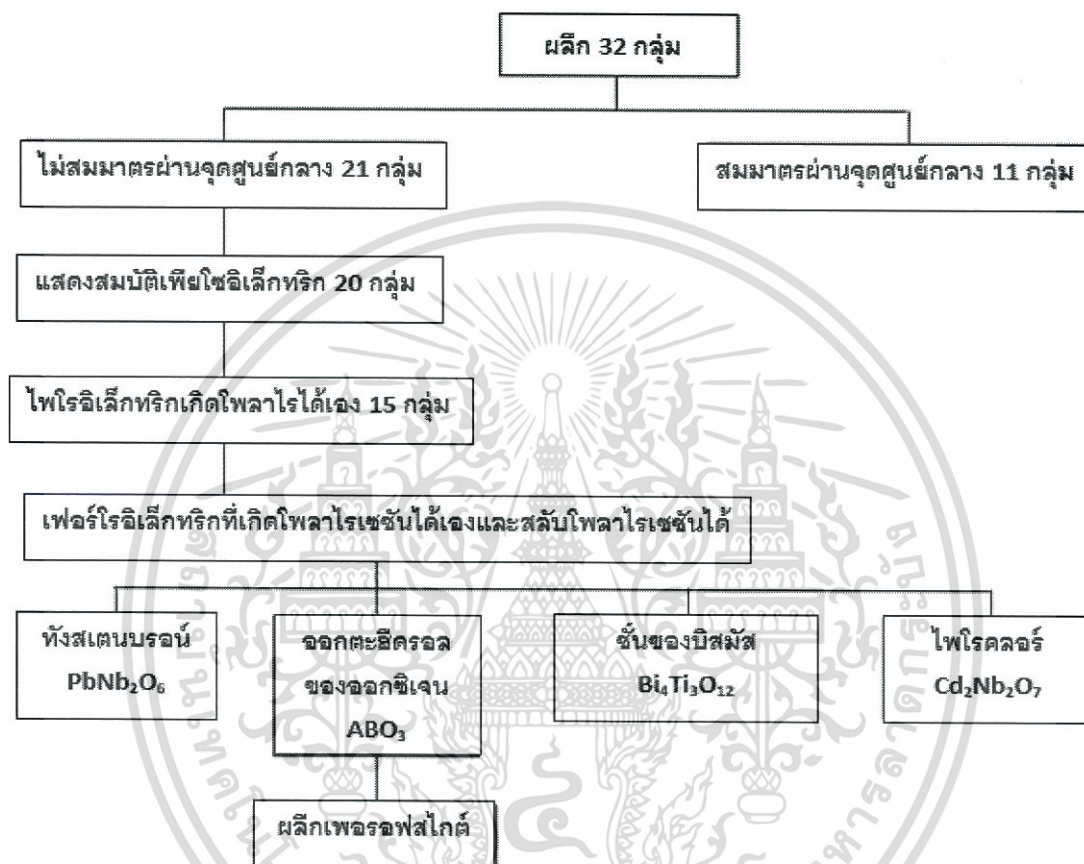


รูปที่ 2.3 การจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสในวัสดุผสม ดัดแปลงจาก [5]

## 2.2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric material)

วัสดุทั้งหมดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กน้อยเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าถ้าความเครียดที่เกิดขึ้น เป็นสัดส่วนกับกำลังสองของสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต (Electrostrictive effect) วัสดุบางอย่างแสดงให้เห็นถึงผลย้อนกลับ คือ การพัฒนาโพลาริเซชันทางไฟฟ้าเมื่อมีการบีบอัดผ่านการให้ความเค้น คือ เพียโซอิเล็กทริก [7] วัสดุเพียโซอิเล็กทริกถูกค้นพบโดย Pierre และ Jacques Curie ในปี 1880 โดยการเปรียบเทียบกับค่าที่เกิดจากอุณหภูมิในผลึกไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric crystals) จึงสังเกตเห็นกระแสไฟฟ้าภายใต้แรงกดดันทางกลของผลึก รวมถึงทัวร์มาลีน (Tourmaline) ควอตซ์ (Quartz) เกลือโรเชลล์ (Rochelle salt) ถ้าโพลาริเซชันเป็นสัดส่วน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับความเค้นจะเรียกว่าเพียโซอิเล็กทริกแบบอิทธิพลทางตรง (Direct piezoelectric effect) วัสดุเพียโซอิเล็กทริกแบบอิทธิพลทางกลับ (Reverse piezoelectric effect) คือการพัฒนาของความเครียด ( $x$ ) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้ กลุ่มของผลึกแบ่งเป็น 32 กลุ่ม มี 11 กลุ่มที่มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง (Centrosymmetry) และไม่มีขั้ว ถ้าให้ความเค้นแก่วัสดุชนิดนี้ผลคือจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงโดยรวมของโมเมนต์ไดโพล ผลึก 21 กลุ่มจะไม่มีสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง (Non-centrosymmetry) และ 20 กลุ่มจะแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก [8] ดังรูปที่ 2.4



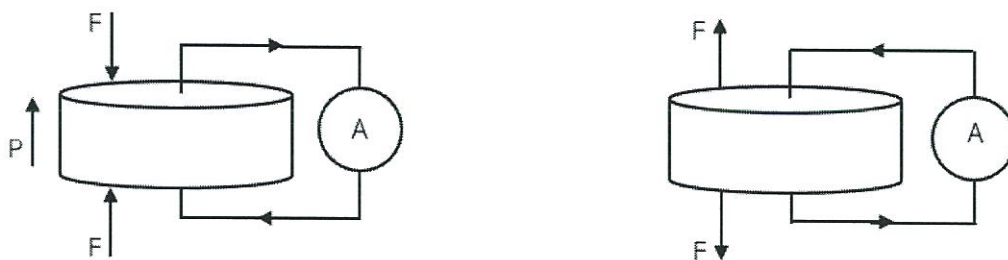
รูปที่ 2.4 แผนผังการแบ่งกลุ่มของผลึกโดยการใช้พื้นฐานสมมาตรของผลึก ดัดแปลงจาก [9]

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกนำไปสู่การใช้เซรามิกเพียโซอิเล็กทริกอย่างกว้างขวาง สมบัติเพียโซอิเล็กทริกของสารสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ อิทธิพลทางตรง และอิทธิพลทางกลับ

### 2.2.1 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบอิทธิพลทางตรง (Direct effect)

วัสดุเซรามิกที่เมื่อได้รับแรงกดหรือแรงดึงจะเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังรูปที่

2.5



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาเพียโซอิเล็กทริกแบบอิทธิพลทางตรง ดัดแปลงจาก [7]

### 2.2.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบอิทธิพลทางกลับ (Reverse effect)

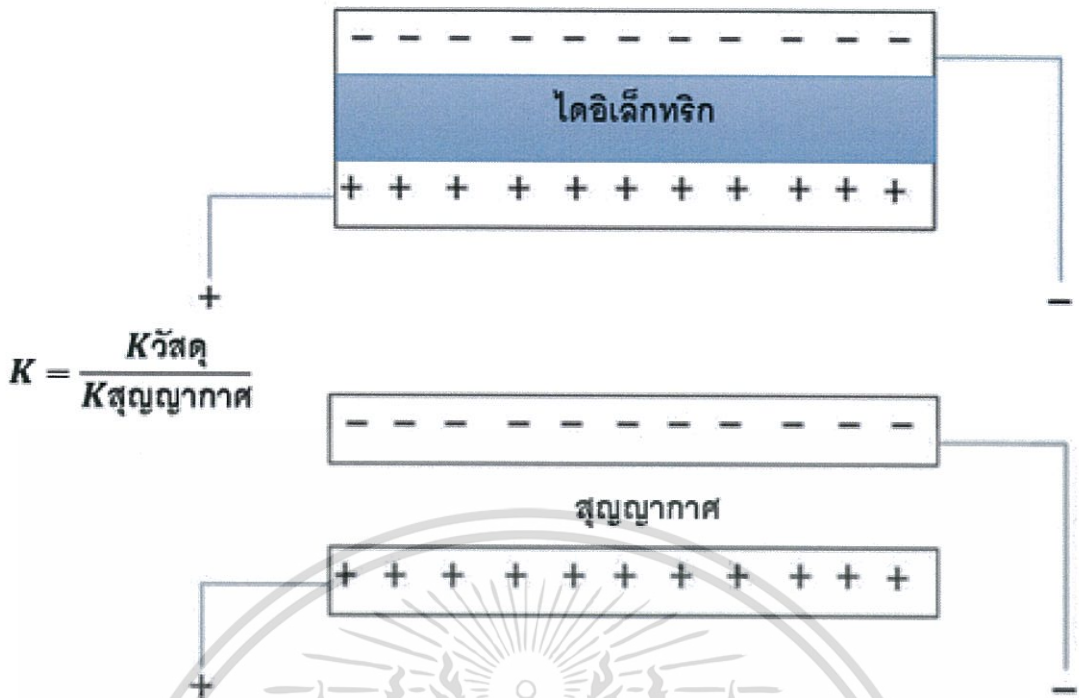
วัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับกระแสไฟฟ้าจะเกิดการยืดหดตัวเองได้ ขนาดของการยืดหดนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ได้รับ คือ การเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เรียกว่า อิทธิพลทางกลับ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาเพียโซอิเล็กทริกแบบอิทธิพลทางกลับ ดัดแปลงจาก [7]

## 2.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)

เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกถูกบรรจุอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าโลหะแบบขนาน และให้สนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้ประจุที่อยู่ภายในวัสดุไดอิเล็กทริกแยกออกจากกันโดยประจุบวกเคลื่อนไปทางด้านลบของขั้วไฟฟ้า และประจุลบเคลื่อนไปทางด้านบวกของขั้วไฟฟ้า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่า โพลารีเซชันทางไฟฟ้า (Electronic polarization) การเกิดโพลารีเซชันทำให้แผ่นตัวนำไฟฟ้าโลหะแบบขนานที่บรรจุวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ระหว่างแผ่นมีความสามารถในการเก็บประจุเพิ่มขึ้น และที่ความต่างศักย์เท่าเดิม อัตราส่วนระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก กับค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative permittivity) หรือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant:  $K$ ) [10] แนวคิดของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแสดง ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ภาพประกอบแสดงความหมายของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \dots\dots\dots 1$$

จากสมการที่ 1  $\epsilon_r$  แทนค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกขณะที่  $\epsilon_0$  แทนค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (Permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m และค่า  $\epsilon$  คือค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก (Permittivity of dielectric) ดังนั้นจะกล่าวได้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก คือ อัตราส่วนระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกกับค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศดังสมการที่ 1

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ผลกระทบนั้นจะเกิดขึ้นจากการโพลาไรเซชัน และความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้ หรือความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นที่กระทบกับวัสดุยังส่งผลกระทบต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ (Low dielectric constant) จะประยุกต์ใช้งานเป็น ฉนวนไฟฟ้า (Electrical Insulator) วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง (High dielectric constant) จะใช้ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุและคุณสมบัติอื่น ๆ ที่น่าสนใจเป็นอย่างมากที่มีอยู่ในวัสดุไดอิเล็กทริก คือ สมบัติเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectricity) [11]

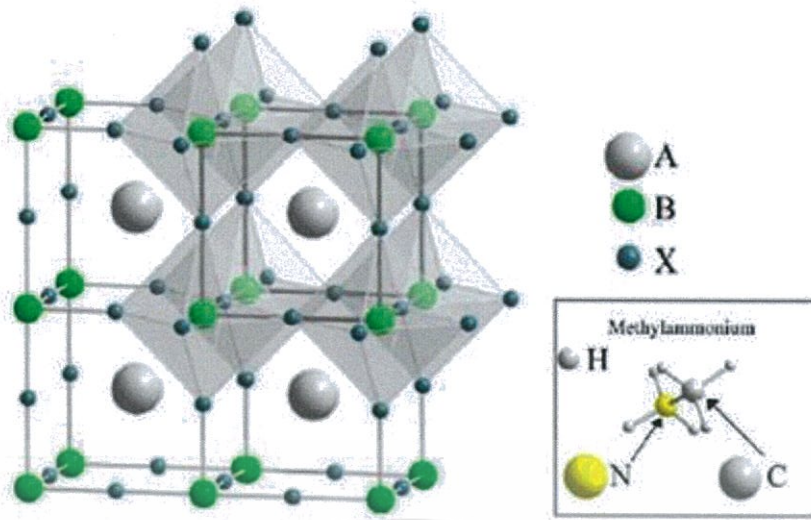
## 2.4 เฟอโรอิเล็กทริก (Ferroelectric)

ปรากฏการณ์เฟอโรอิเล็กทริก [6] เป็นปรากฏการณ์ของผลึกที่สามารถเกิดการโพลาไรเซชันได้เอง (Spontaneous polarization) โดยที่ไม่มีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอกซึ่งการโพลาไรเซชันนี้สามารถที่จะสลับขั้วไปในทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้เข้าไปได้ เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าภายนอกที่เหมาะสม

ปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริกนี้ ถูกค้นพบโดย J. Valasek [12] ในปี ค.ศ.1921 ซึ่งพบในผลึกเดี่ยว (Single crystal) ของเกลือโรเชลล์ โดยทั่วไปผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 32 กลุ่มตามความสมมาตร และในจำนวนนี้สามารถแบ่งเป็นผลึกที่มีลักษณะสมมาตรผ่านจุดศูนย์กลาง 11 กลุ่ม และที่มีลักษณะสมมาตรไม่ผ่านจุดศูนย์กลางอีก 21 กลุ่ม ซึ่งในกลุ่มนี้สามารถแสดงสมบัติที่เป็นเพียโซอิเล็กทริก 20 กลุ่ม และใน 20 กลุ่มนี้มี 10 กลุ่มเท่านั้นที่สามารถแสดงสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ สามารถเกิดการโพลาไรเซชันได้เองโดยที่ไม่มีการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าภายนอก ซึ่งถ้ามีการเปลี่ยนเฟสจากเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นคิวบิกพาราอิเล็กทริก จะเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสนั้นว่า อุณหภูมิคูรี (Curie temperature:  $T_c$ ) วัสดุที่มีขั้วจะช่วยกระตุ้นให้เกิดประจุไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ ในขณะที่ไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก โดยทั่วไปขั้วที่หลากหลายมีการเรียงตัวแบบสุ่มในพื้นที่ว่าง เรียกว่า วัสดุไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric materials) ขั้วทั้งหมดจะเรียงตัวไปในแนวเดียวกัน ทำให้เกิดการสะสมของพื้นผิว ซึ่งวัดได้จากการเกิดโพลาไรเซชันขึ้นเอง ซึ่งมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Macroscopic spontaneous polarization:  $P_s$ ) เฟอร์โรอิเล็กทริก เป็นกรณีพิเศษของวัสดุขั้วที่มีโพลาไรเซชันเกิดขึ้นอย่างน้อยสองสถานะสมมูล ทิศทางของโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเองอาจถูกสลับไปมาระหว่างการวางแนวเหล่านี้โดยสนามไฟฟ้า วัสดุไพโรอิเล็กทริกทั้งหมดต้องเป็นเพียโซอิเล็กทริกส่วนใหญ่ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในปัจจุบันยกเว้นควอตซ์เป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกส่วนใหญ่ได้รับการเปลี่ยนเฟสโครงสร้างที่อุณหภูมิสูงที่ไม่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก (Non ferroelectric) หรือ พาราอิเล็กทริก (Paraelectric) ในเฟสที่ต่ำกว่าอุณหภูมิเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริก เฟอร์โรอิเล็กทริก บางอย่าง เช่น แบเรียมไททาเนต ได้รับการเปลี่ยนเฟสไปอย่างต่อเนื่องในเฟสเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric phase) การเปลี่ยนแปลงไปสู่ขั้นตอนของเฟอร์โรอิเล็กทริกมักจะนำไปสู่ความผิดปกติที่รุนแรงในคุณสมบัติเป็นฉนวน (Dielectric) ความยืดหยุ่น ความร้อน และคุณสมบัติอื่น ๆ ของวัสดุ และมีการเปลี่ยนแปลง ขนาดของเซลล์ผลึก ความเครียดที่เกี่ยวข้อง เรียกว่า ความเครียดที่เกิดขึ้นเอง (Spontaneous strain:  $X_s$ )

## 2.5 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovsite structure)

โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์มีโครงสร้างคล้ายแร่แคลเซียมไททาเนต ( $\text{CaTiO}_3$ ) ซึ่งค้นพบครั้งแรกโดย Gustav Rose และตั้งชื่อเป็นเกียรติให้แก่ Lev Perovski นักธรณีวิทยาที่มีชื่อเสียงชาวรัสเซีย เป็นโครงสร้างที่มีความสำคัญมากในวัสดุเซรามิกชั้นสูงทางไฟฟ้า เนื่องจากแสดงสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่น และมีคุณสมบัติพิเศษหลากหลาย โครงสร้างเพอโรฟสไกต์โดยทั่วไปมีสูตรเคมีของสารประกอบ คือ  $\text{ABX}_3$  ประกอบด้วยไอออนอย่างน้อยสองชนิด (A และ B) ซึ่งมีขนาดไอออนต่างกัน และแอนไอออนส่วนใหญ่ คือ ออกซิเจน โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ถือว่าเป็นโครงสร้างอนุพันธ์ที่พัฒนาจากโครงสร้างพื้นฐานแบบ FCC หรือที่เรียกว่า FCC-derivativative structure โดยไอออนบวกที่มีขนาดใหญ่ (A) กับออกซิเจนจะยึดเกาะกันจนก่อรูปขึ้นมาเป็นแลตทิซ แบบ FCC ในขณะที่ไอออนบวกที่มีขนาดเล็กกว่า (B) อยู่ในตำแหน่งคั่นกลางระหว่างช่องว่างทรงแปดหน้า (Octahedral) ที่เกิดจากการจัดเรียงตัวแบบ FCC โดยมีเพียงอะตอมของออกซิเจนที่เป็นอะตอมข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดเท่านั้น เซลล์หน่วยของโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ [13] แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เซลล์หน่วยของโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ ดัดแปลงจาก [14]

โดยเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่นำมาใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่มีโครงสร้างผลึกเป็นผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ ตัวอย่างเช่น แบเรียมไททาเนต ( $\text{BaTiO}_3$ ) เลดไททาเนต ( $\text{PbTiO}_3$ ) เลดเซอร์โคเนต ( $\text{PbZrO}_3$ ) เลดเซอร์โคเนตไททาเนต ( $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ ) เลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต (PLZT)

โพแทสเซียมไนโอเบต ( $\text{KNO}_3$ ) เป็นต้น สมบัติด้านไฟฟ้าเช่น ค่าพลังงานของแถบพลังงาน (Band gap) ยังสามารถปรับแต่งได้ด้วยการปรับโครงสร้างเคมี เนื่องจากรูปแบบของขนาดไอออนิกและการกระจายตัวของอะตอมที่มีขนาดเล็กนำไปสู่การบิดเบือนโครงสร้าง และการลดสมมาตรมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของวัสดุอย่างมาก โครงสร้างของเพอโรฟสไกต์มีบทบาทสำคัญในเซรามิกอิเล็กทริก ซึ่งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกส่วนใหญ่มีโครงสร้างอยู่ในรูปของ โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ [15] แบเรียมไททาเนตเป็นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกตัวแปลงสัญญาณตัวแรกที่ถูกพัฒนาขึ้น [16] จากนั้นจึงถูกศึกษาอย่างกว้างขวาง และประสบความสำเร็จเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้ในวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ และมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับวัสดุโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ที่ซับซ้อนขึ้น (Complex perovskite) ซึ่งงานวิจัยนี้มีผลต่อการพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นอย่างมาก

## 2.6 แบเรียมไททาเนต (Barium titanate)

แบเรียมไททาเนตเป็นวัสดุที่น่าสนใจ และมีความสำคัญมากในด้านอิเล็กทรอนิกส์ และไม่โครอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากเป็นวัสดุเซรามิกที่มีสมบัติไดอิเล็กทริก แบเรียมไททาเนตถูกประยุกต์ใช้งานในประเภทต่าง ๆ อย่างหลากหลาย เช่น ตัวเก็บประจุ (Capacitors) ตัวเก็บประจุหลายชั้น (Multilayer capacitors: MLCs) อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน และถูกใช้กันอย่างกว้างขวางในอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric devices) และกลายเป็นส่วนสำคัญในเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric ceramics) [17] เป็นสารอนินทรีย์ มีสูตรสารเคมีคือ  $\text{BaTiO}_3$  แบเรียมไททาเนตเป็นสารเพียโซอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรก [18] และยังคงใช้กันเป็นที่แพร่หลายตลอดจนถึงปัจจุบัน

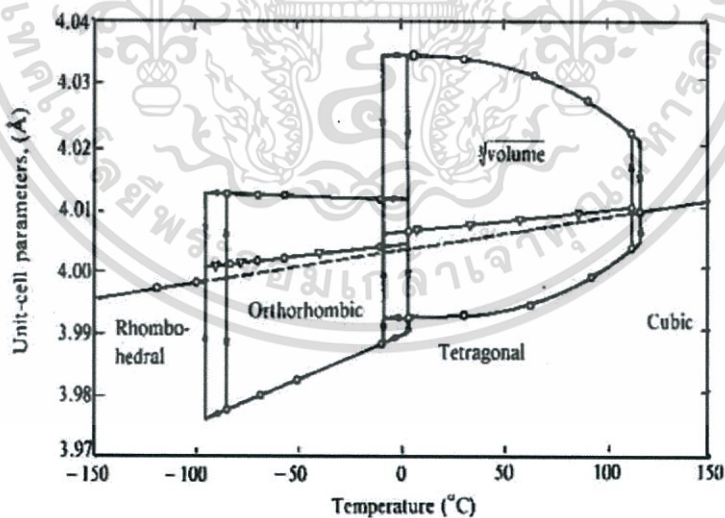
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบเรียมไททานेट มีโครงสร้างผลึกพื้นฐาน 2 รูปแบบ ได้แก่ 1. โครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ รูปที่ 2.9 แสดงผลของเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยจะขึ้นกับอุณหภูมิ และ 2. โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ซึ่งไม่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกจะไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง และจะเสถียรที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 1460 °C



รูปที่ 2.9 โครงสร้างผลึกแบเรียมไททานेटแบบเพอโรฟสไกต์ ดัดแปลงจาก [17]

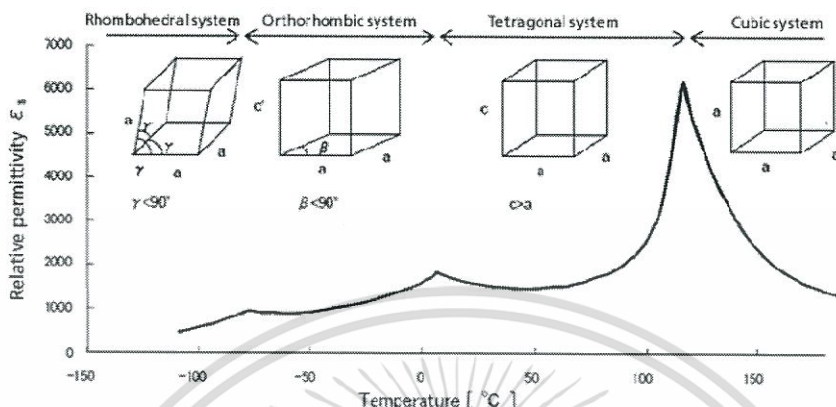
ขนาดแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice parameters) เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แลตทิซพารามิเตอร์ของแบเรียมไททานेटในแต่ละอุณหภูมิ ดัดแปลงจาก [17]

เนื่องจากความผิดเพี้ยนของทรงแปดหน้า จาก  $\text{TiO}_6$  เมื่ออุณหภูมิลดลง ที่อุณหภูมิสูงจะเปลี่ยนเป็นคิวบิก (Cubic) สมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) จะขึ้นกับอุณหภูมิ โดยโครงสร้างของสารแบเรียมไททานेट ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีจะเกิดการบิดเบี้ยวจากคิวบิกไปเป็นเฟสเตตระโกนอล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Tetragonal phase) โดยมีโมเมนต์ขั้วคู่เกิดขึ้นมาในทิศทางตามแนวแกน c จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงมาถึงที่อุณหภูมิประมาณ 5 °C จะเปลี่ยนไปเป็นเฟสออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic phase) และที่อุณหภูมิต่ำกว่า -90 °C จะเปลี่ยนจากเฟสออร์ทอโรมบิกไปเป็นเฟสรอมโบฮีดรอล (Rhombohedral phase) ตามลำดับ แสดงดัง รูปที่ 2.11

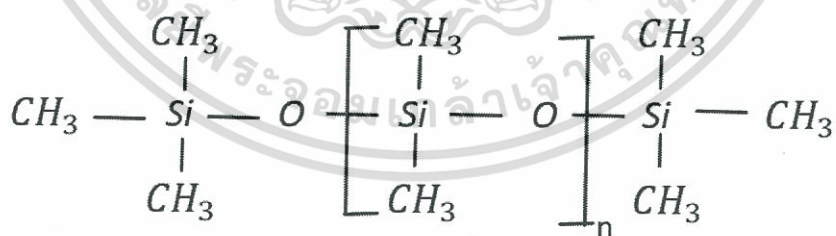


รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนเฟสของแบเรียมไททาเนตไปตามอุณหภูมิต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าความยินยอมสัมพัทธ์ ดังแสดงจาก [19]

ซึ่งการเปลี่ยนเฟสของแบเรียมไททาเนต ไปตามอุณหภูมิ ดังที่กล่าวมาจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าความยินยอมสัมพัทธ์ และค่าที่มีขั้วในตัวเอง [20]

## 2.7 พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS)

พอลิไดเมทิลไซลอกเซน หรือ ซิลิโคน จะประกอบไปด้วยสารอนินทรีย์ที่มีหน่วยโครงสร้างเป็นแบบ  $(\text{CH}_3)_2\text{SiO}$  ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 หน่วยโครงสร้างของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน  $(\text{CH}_3)_2\text{SiO}$

มีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวมัน ไม่มีสี แสงสามารถทะลุผ่านได้ ไม่ละลายน้ำ จุดหลอมเหลวอยู่ที่ -49.9 - 40 °C อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำ ( $T_g \sim -125$  °C) ความสามารถในการกระจายตัวที่ไม่เข้ากัน (ค่าโมดูลัสเฉือนของ G อาจแตกต่างกันระหว่าง 100 kPa และ 3 MPa) การสูญเสียการสัมผัสกันต่ำมาก ( $\tan \delta \sim 0.001$ ) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของค่าคงตัวทางกายภาพยังคงน้อย (ยกเว้นการขยายตัวทางความร้อน  $\alpha \approx 20 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ ) ความเป็นฉนวน ( $\sim 14$ ) (อย่างน้อยที่สุดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-100 °C ถึง +100 °C) ปฏิบัติทางเคมีต่ำ ยกเว้นที่ค่าสัมบูรณ์ของค่าความเป็นกรด - ต่างความสามารถในการดูดซึมก๊าซสูง เป็นธรรมชาติไม่มีพิษ ไม่มีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า ราคาถูก ใช้งานทั่วไปทางด้านคอนแทคเลนส์ และการผ่าตัดศัลยกรรม [21]

สมบัติทางเคมีของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน หลังจากการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) และโครงสร้างร่างแห (Cross linked) แล้วตัวอย่างพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่เป็นของแข็งจะทำให้พื้นผิวที่อยู่ภายนอกไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ซึ่งทำให้น้ำซึมผ่านพื้นผิวไม่ได้ อย่างไรก็ตาม ตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดอาจทำให้เกิดอาการบวมที่มีขนาดเล็กพอที่จะสามารถใช้ร่วมกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนได้ เช่น ในช่องของอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก (Microfluidic PDMS) อัตราส่วนการบวมของวัสดุมีความสัมพันธ์เชิงผกผันกับค่าการละลายของตัวทำละลายไดไอโซโพรพิลลามาย (Diisopropylamine) ขยายสู่ระดับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนมากที่สุด ตัวทำละลาย เช่น คลอโรฟอร์มอีเทอร์ (Chloroform ether) และเตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran) จะทำให้อัตราการบวมในปริมาณมาก ตัวทำละลาย เช่น อะซิโตน 1-โพรพานอล และไพริดีน จะทำให้อัตราการบวมในปริมาณน้อย แอลกอฮอล์และตัวทำละลายมีขี้วี เช่น เมทานอล กลีเซอรอล และน้ำ ไม่ทำให้เกิดการขยายตัวของวัสดุ

สมบัติทางแสงของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน เป็นวัสดุใส เมื่อโมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงสามารถกำหนดค่าดัชนีหักเหของแสงได้ (Refractive index) นำไปใช้งานทางด้านเลนส์ กล้อง และเส้นใยแก้วนำแสงที่มีสารเคมีเป็นตัววัด (Sensor)

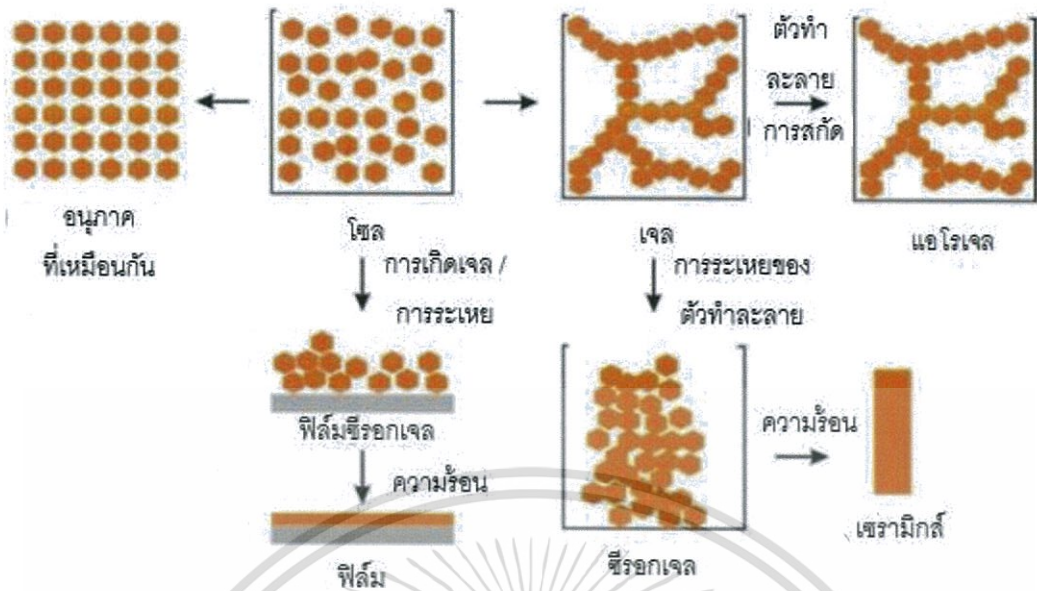
สมบัติทางกลของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน เมื่อเกิดโครงสร้างร่างแหแล้วจะมีลักษณะทางกายภาพเป็นของแข็งใสที่สามารถยืดหยุ่นได้ เมื่อทำการโค้งงอวัสดุและปล่อยพอลิเมอร์จะกลับมาสู่รูปร่างเดิม สมบัติการยืดหยุ่นจะขึ้นกับปริมาณสารเชื่อมโยง ถ้าอยู่ในปริมาณมาก พอลิเมอร์จะมีความแข็งแรงมากขึ้น ถ้ามีปริมาณน้อยหรือไม่มี พอลิเมอร์จะคงสภาพเป็นของเหลวหนืด [22]

## 2.8 โซลเจล (Sol-gel)

โซล (sol) คือ อนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายอยู่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ในของเหลวหรือสารละลาย เจล (gel) สิ่งที่มีความเข้มข้น เมื่ออนุภาคคอลลอยด์นั้นเชื่อมกัน หรือเมื่อโมเลกุลพอลิเมอร์มีการเชื่อมกัน กระบวนการโซลเจลถูกใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการผลิตเซรามิก รวมถึงการเตรียม มี 2 สิ่งที่แตกต่างกันจากกระบวนการทั่วไปคือ 1. อนุภาคคอลลอยด์ประกอบด้วยอนุภาคแน่น 2. เจลพอลิเมอร์ประกอบด้วยสายโซ่พอลิเมอร์แต่ไม่มีอนุภาคที่แน่น

การเตรียมสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการโซลเจล ประกอบด้วยเกลืออนินทรีย์ หรือสารประกอบโลหะ-อินทรีย์ สารตั้งต้นโลหะ-อินทรีย์ถูกใช้เป็นจำนวนมากในการศึกษากระบวนการนี้ ปฏิบัติทางเคมีเกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นให้เป็นเจล มีอิทธิพลเป็นอย่างมากเกี่ยวกับโครงสร้างและความเป็นเนื้อเดียวกันของเจล หลังจากการเตรียมมีเจลจำนวนมากที่เกิดการเชื่อมต่อกัน และจะถูกทำให้แห้งก่อนที่จะเปลี่ยนไปเป็นวัสดุที่ใช้งานได้ วิธีทำให้แห้งโดยการระเหยของเหลวจะทำให้ช่องของความดันเพิ่มขึ้น เนื่องจากการหดตัวของเจล ส่งผลให้เรียกเจลที่แห้งนั้นว่า ซีรอกเจล (Xerogel) ช่องความดันค่อนข้างใหญ่ในเจลพอลิเมอร์เนื่องจากรูพรุนโดยปกติแล้วจะเล็กกว่าในคอลลอยด์เจล ดังนั้นในพอลิเมอร์เจลมีแนวโน้มที่จะเกิดการงอ และแตกหัก เจลส่วนมากมีโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานแม้ว่าหลังจากการแห้งจะมีรูพรุนเล็ก ๆ ซึ่งจะมีขนาดที่เท่ากัน แสดงในรูปที่ 2.13 [23]

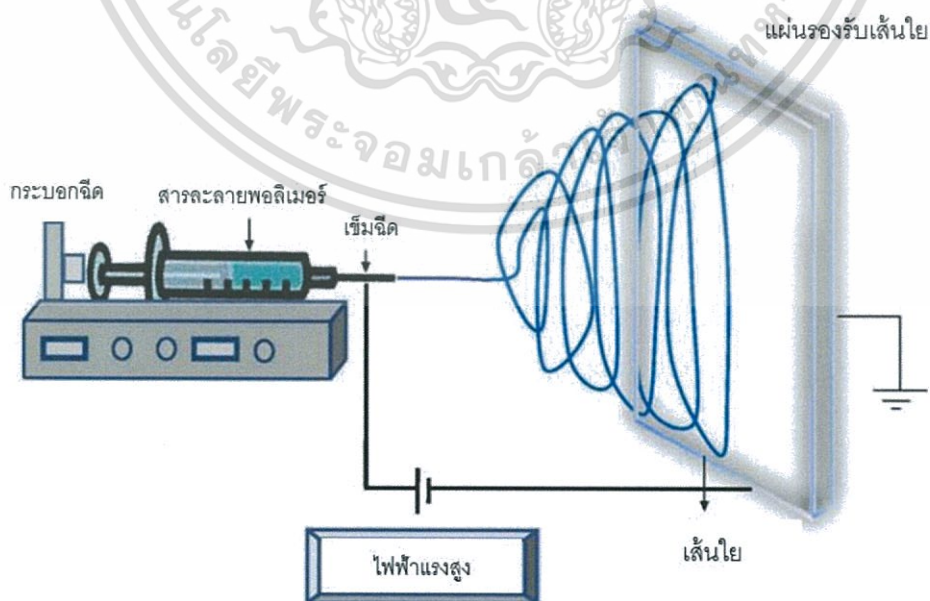
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กระบวนการโซลเจล (Sol-gel processing) ดัดแปลงจาก [24]

## 2.9 กระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)

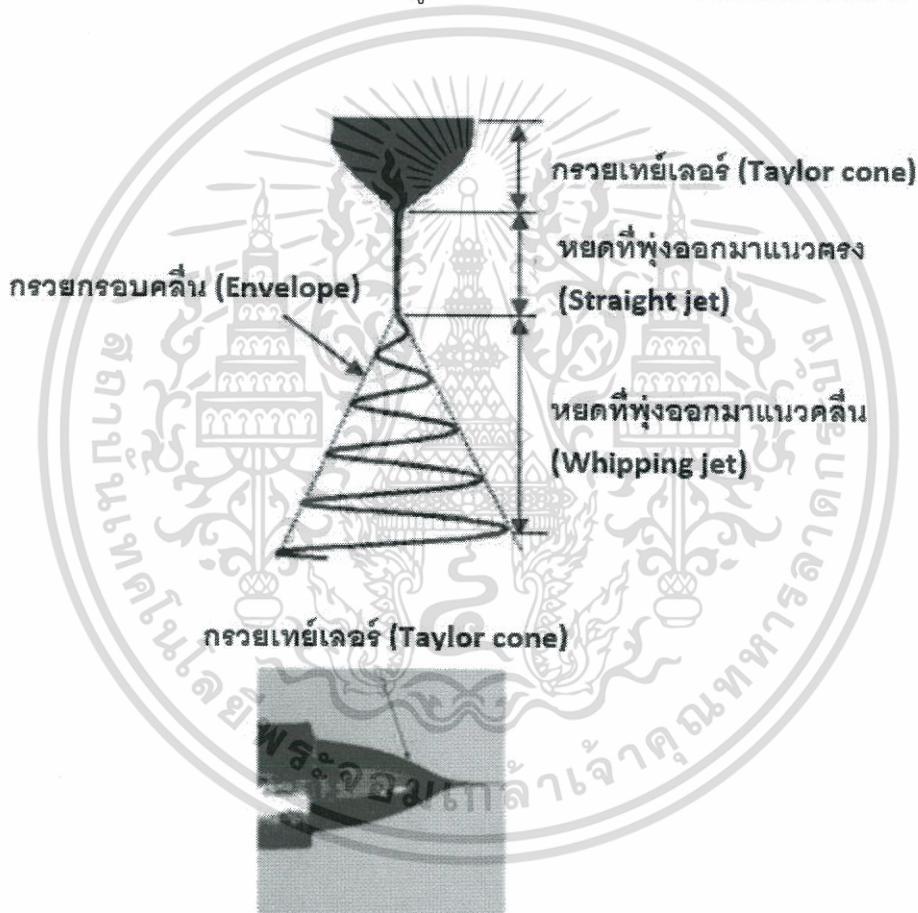
กระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตหรือที่เรียกว่า อิเล็กโทรสปินนิ่งสามารถผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กตั้งแต่ระดับไมโครเมตรจนถึงระดับนาโนเมตรโดยอาศัยแรงที่เกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าได้แผ่นเส้นใยในรูปแบบไม่ถักทอ (Nonwoven) ซึ่งเกิดจากการซ้อนทับกันของเส้นใย มีกระบวนการ ดังรูปที่ 2.14 คือสารละลายพอลิเมอร์จะถูกบรรจุในกระบอกฉีดยา และถูกดันออกผ่านหัวเข็มขนาดเล็ก จากนั้นจะถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าไฟฟ้า และเส้นใยถูกเก็บที่แผ่นโลหะ



รูปที่ 2.14 กระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ดัดแปลงจาก [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นเทคนิคเก่าแก่ที่ถูกคิดค้นเมื่อปี ค.ศ. 1897 กระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตใช้แรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อกระตุ้นการก่อตัวของของเหลวที่พุ่งออกมา (Liquid jets) จะทำให้เกิดหยดหรืออนุภาคเล็ก ๆ ขึ้นเนื่องจากถูกสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และเส้นใยที่กำลังแข็งตัวจะถูกดึงยืดออก เส้นใยจะกระจายตัว และถูกเก็บอย่างต่อเนื่อง สนามไฟฟ้ามีส่วนสำคัญที่จะทำให้แรงทางไฟฟ้าเอาชนะแรงตึงผิว ของเหลวที่พุ่งออกมา จะถูกดึงคูดและทำให้เกิดเป็นรูปทรงคล้ายกรวย (Taylor cone) ตัวทำละลายจะระเหยออกไปในอากาศ [26] ปี ค.ศ. 1969 Taylor ได้ค้นพบหลักการอธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปร่างของสารละลายพอลิเมอร์จากทรงกลมเป็นลักษณะสามเหลี่ยมคล้ายโคนภายใต้แรงสนามไฟฟ้า ซึ่งต่อมามีการเรียกลักษณะเช่นนี้ว่ากรวยเทย์เลอร์ [27] พฤติกรรมกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต สามารถอธิบายได้ดัง รูปที่ 2.15 แสดงพฤติกรรมของของเหลวที่พุ่งออกมาเกิดอันตรกิริยาของค่าไฟฟ้าในสารละลายโพลิเมอร์กับสนามไฟฟ้าภายนอกส่งผลให้กรวยเทย์เลอร์ถูกดึงยืดออกเกิดจากความไม่แน่นอนในการ ดัดงอด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 2.15 พฤติกรรมของของเหลวที่พุ่งออกมาจากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง ดัดแปลงจาก [28]

เทคนิคกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตถูกนำมาใช้ประโยชน์มากมายหลายด้านรวมทั้งใช้ในการเก็บเกี่ยวและเก็บรักษาพลังงาน โดยวัสดุที่มีรูปร่างเป็นเส้นใยนาโนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน และการจัดเก็บพลังงานได้อย่างมีนัยสำคัญมากกว่าวัสดุในกลุ่มเดียวกันที่มีรูปร่างแบบอื่น [29] โดยในเครื่องมือเก็บเกี่ยวพลังงานกลที่ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง และแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการเปิดเครื่องอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบใช้พลังงานไฟฟ้าชนิดนี้เรียกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน (Nanogenerators) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญ [30] โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหล่านี้มักทำจากสารอินทรีย์เส้นลวดนาโน (Nanowire) ที่มีการเตรียมที่ถูกรวบรวมอย่างแม่นยำ [31] วัสดุเลเซอร์โคเนตไททาเนตที่แข็งเปราะได้ถูกผลิตขึ้นมาเป็นเส้นใยนาโนที่มีความยืดหยุ่นสูงสำหรับการผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นหลังจากบรรจุพอลิเมอร์อ่อน [32]

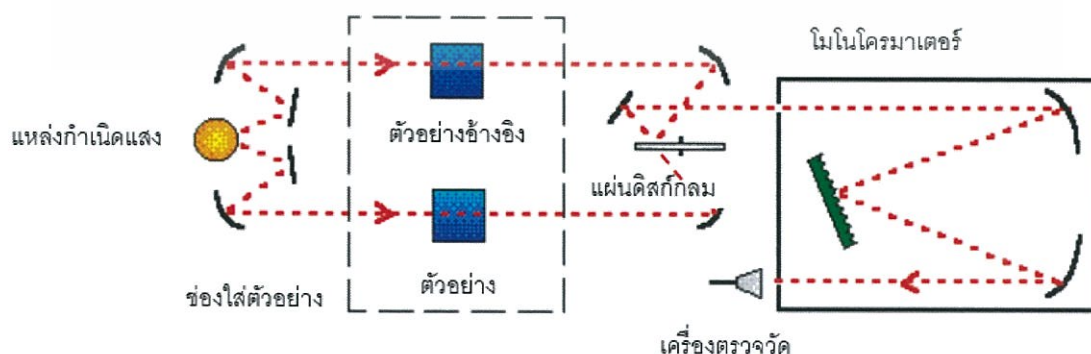
## 2.10 เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์

### 2.10.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometer: FT-IR)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่ความถี่ต่าง ๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละพันธะ โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ  $12800-10\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยทั่วไปรังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วงรังสีแสงสว่าง (Visible radiation) กับรังสีไมโครเวฟ (Microwave radiation) โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

1. รังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared region wavenumber: NIR)  $12,800-4,000\text{ cm}^{-1}$
2. รังสีอินฟราเรดย่านกลาง (Middle infrared region wavenumber: MIR)  $4,000-400\text{ cm}^{-1}$
3. รังสีอินฟราเรดย่านไกล (Far infrared region wavenumber: FIR)  $400-5\text{ cm}^{-1}$

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้แก่ช่วงรังสีอินฟราเรดย่านกลาง (Middle IR) เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่น และการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้น ๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะ และแตกต่างกันไปโดยค่าความยาวคลื่นที่ได้เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวของแต่ละวัสดุ หลังจากนั้นลำรังสีจะตกลงบนเครื่องตรวจวัดและจะแปลงสัญญาณที่ได้ออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วบันทึกดังรูปที่ 2.16 ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ดัดแปลงจาก [33]

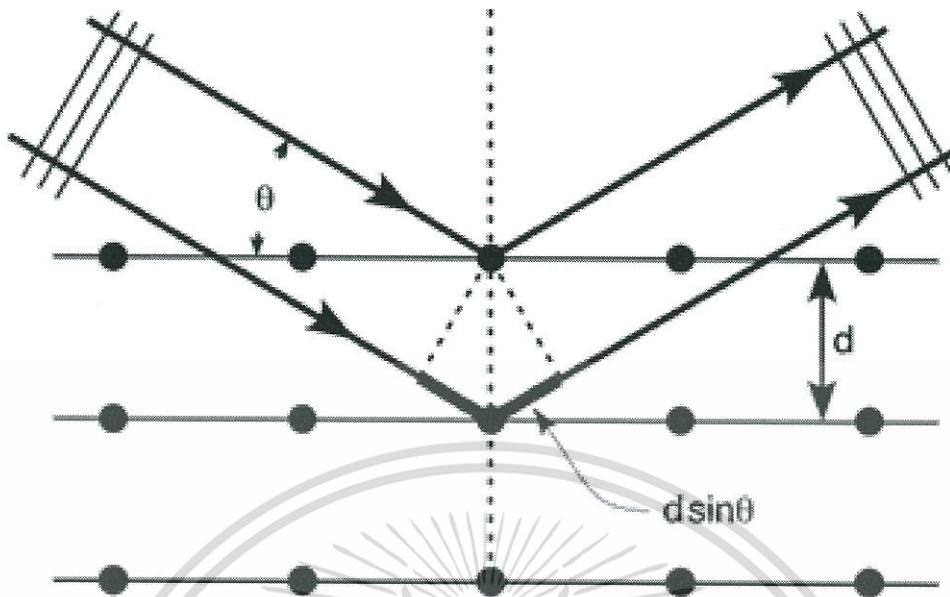
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10.2 เครื่องตรวจการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD)

ในปี 1885 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อว่าวิลเฮล์ม คอนราต เรินต์เกน ได้ค้นพบรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง  $0.01 - 100 \text{ \AA}$  ตรงกับความถี่ในช่วง  $30 - 30,000 \text{ pHz}$  ถึงแม้ว่ารังสีเอกซ์ไม่สามารถมองเห็นได้เนื่องจากมีความยาวคลื่นที่สั้นกว่าแสงที่มองเห็นได้ ( $400 - 700 \text{ nm}$ ) รังสีเอกซ์ยังถูกใช้ในการวินิจฉัยด้วยรังสี และฟิสิกส์วิยาเฉพาะความยาวคลื่นในช่วง  $0.5 - 2.5 \text{ \AA}$  เท่านั้นที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลึกด้วยรังสีเอกซ์ รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะถูกสร้างขึ้นโดยรังสีเอกซ์จะแทรกสอดเข้าไปในช่องว่างของแลตทิซในผลึกแล้วจะถูกบันทึก และวิเคราะห์เพื่อแสดงถึงลักษณะของแลตทิซ รังสี  $k\alpha$  ของทองแดง (Cu) มีความยาวคลื่นเท่ากับ  $1.54 \text{ \AA}$  ซึ่งนิยมใช้ในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบน ความยาวคลื่นของ  $k\alpha$  ของทองแดง สามารถเปรียบเทียบได้กับระยะระหว่างแลตทิซในผลึก และเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์ การจัดเรียงโครงสร้างของอะตอมในช่วงกว้างของวัสดุโดยทั่วไป รังสีเอกซ์ถูกสร้างขึ้นจากหลอดรังสีเอกซ์ หลอดรังสีเอกซ์เป็นแหล่งของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ รังสีเอกซ์ที่ได้จากท่อรังสีเอกซ์ คือ รังสีต่อเนื่อง และรังสีลักษณะเฉพาะ รังสีต่อเนื่องมีช่วงความยาวคลื่นกว้าง เนื่องจากการลดความเร็วลงอย่างรวดเร็วของอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเสียพลังงานอย่างต่อเนื่องขณะที่ทะลุผ่านเข้าไปในเป้าโลหะ นอกจากนั้นความเข้มของรังสีแบบต่อเนื่องสามารถเพิ่มได้โดยการเพิ่มความต่างศักย์ ในทางตรงกันข้ามความยาวคลื่นของรังสีแบบเอกลักษณะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างอะตอมของเป้าโลหะระนาบแลตทิซและกฎของแบรกก์

วัสดุออสติฐานจะไม่มีการจัดเรียงอะตอมภายในในช่วงกว้าง ซึ่งแตกต่างกับผลึกซึ่งจะมีการจัดเรียงตัวเป็นช่วงกว้าง และโครงสร้างพื้นฐานในสามมิติเรียกว่า หน่วยเซลล์ หน่วยเซลล์คือกล่องขนาดเล็กที่บรรจุหนึ่งจุดแลตทิซ หรือมากกว่า ผลึกถูกพิจารณาในแนวตั้ง และแนวขวางเชื่อมกันในช่วงกว้าง เมื่อรังสีเอกซ์ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นที่ใกล้เคียงกับระยะห่างระหว่างอะตอมถูกใช้ในระบบผลึก ปรากฏการณ์การแทรกสอดจะเกิดขึ้นในระนาบแลตทิซในผลึกเกิดการสะท้อนของรังสีเอกซ์จากโครงสร้างผลึก โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างสม่ำเสมอ และรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบส่วนมากมีปฏิสัมพันธ์กับอิเล็กตรอนในอะตอม เมื่อโฟตอนรังสีเอกซ์ชนกับอิเล็กตรอนซึ่งอยู่ด้านบนโฟตอนบางตัวจะเกิดการเลี้ยวเบนจากทิศทางที่ตกกระทบ ถ้าความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากการชน จะเรียกกระบวนการนี้ว่า การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) ซึ่งมีเพียงทิศทางเท่านั้นที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการนี้ รังสีเอกซ์ที่กระจายลงมาสามารถให้ข้อมูลที่สัมพันธ์กับการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในผลึก นอกจากนี้การกระจายตัวของอิเล็กตรอนเกี่ยวข้องอย่างมากกับตำแหน่งของอะตอมในผลึก ดังรูปที่ 2.17

## รังสีเอ็กซ์



รูปที่ 2.17 การสะท้อนของรังสีเอ็กซ์จากโครงสร้างผลึก ดัดแปลงจาก [34]

ทำให้สามารถคาดการณ์ได้ถึงโครงสร้างผลึกจากผลการตรวจสอบการเลี้ยวเบนตามกฎของแบรกก์  $2d\sin\theta = n\lambda$  โดยที่

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (d-spacing)

$\theta$  คือ มุมของรังสีเอ็กซ์ที่มาตกกระทบ

$N$  คือ เลขจำนวนเต็มใด ๆ (1, 2, 3, ...)

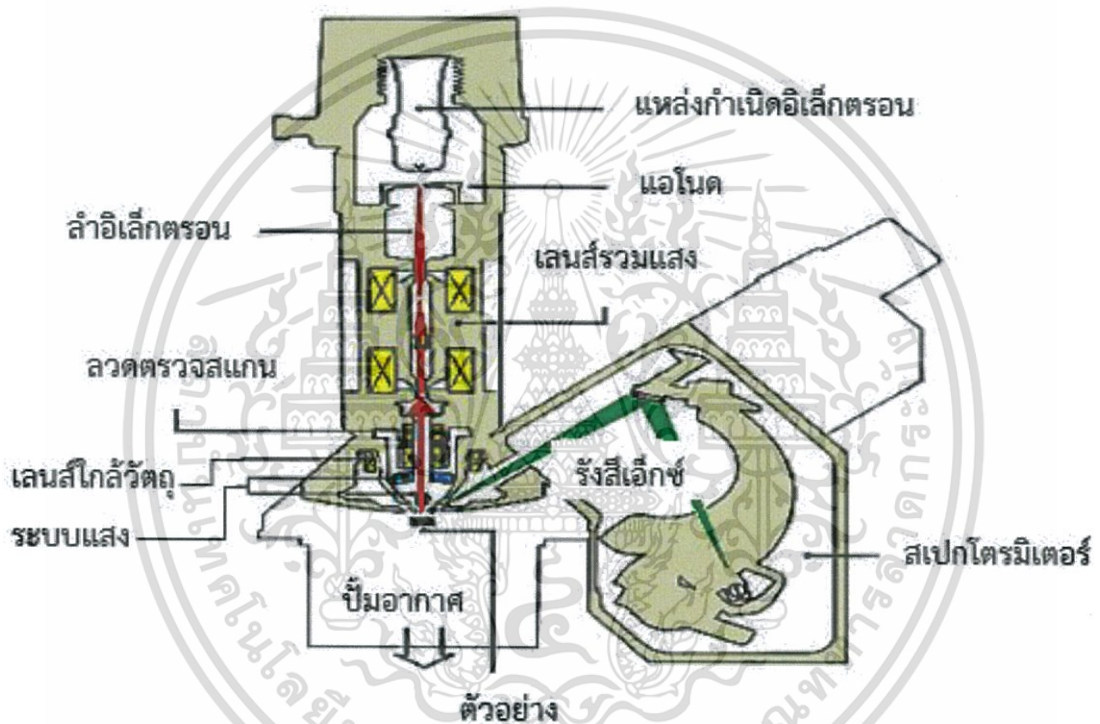
$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (1.54 Å)

การแทรกสอดของรังสีเอ็กซ์เป็นหลักฐานโดยตรงสำหรับโครงสร้างอะตอมของผลึก ถ้าอะตอมในผลึกมีการจัดเรียงอย่างสม่ำเสมอในช่วงกว้างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะมีพีคการแทรกสอดที่แหลม [34]

### 2.10.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [35] เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 nm การเตรียมตัวอย่างไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางมาก (เพราะ ไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐาน และรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อ และเซลล์ หน้าตัดของโลหะ และวัสดุ ข้อดีของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ ภาพโครงสร้างที่เห็น จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการใช้งานมีความรวดเร็ว และใช้งานง่าย หลักการทำงานของ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนให้แก่ระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่ หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอตริทัศน์ได้

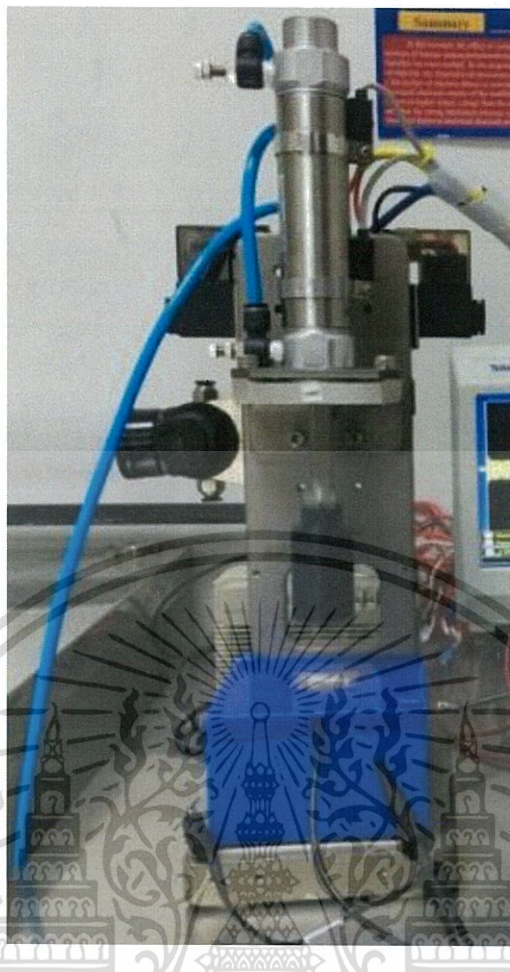


รูปที่ 2.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตัดแปลงจาก [35]

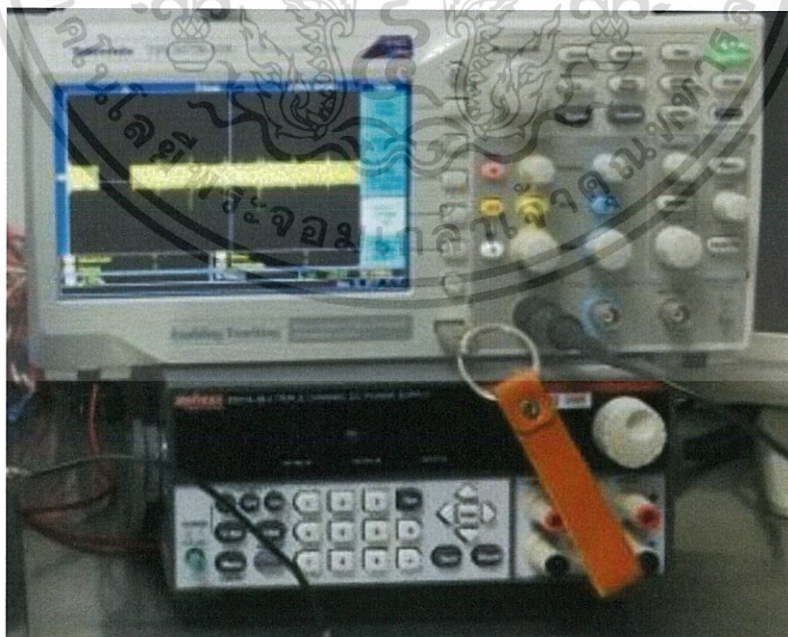
#### 2.10.5 ชุดการทดสอบแรงดันไฟฟ้าจากแรงกด

การทดสอบแรงดันทำโดยการยึดตัวอย่างเพียโซอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่นไว้กับแท่นสี่ขาของเครื่องทดสอบแรงกด รูปที่ 2.19 จากนั้นจึงเปิดสวิสซ์เพื่ออัดแรงดันเข้าสู่เครื่องทดสอบแรงกด เครื่องจะทำการกดตัวอย่างเพียโซอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่น จะได้แรงดันทางไฟฟ้า โดยค่าแรงดันทางไฟฟ้าที่ได้จะแสดงที่จอโทรทัศน์ของเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) รูปที่ 2.20 โดยใช้ฐานเวลาเท่ากับ 500 มิลลิวินาที และทำการเก็บข้อมูล 10 รอบ จากนั้นนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับความต่างศักย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 เครื่องทดสอบแรงกด (Compression machine)

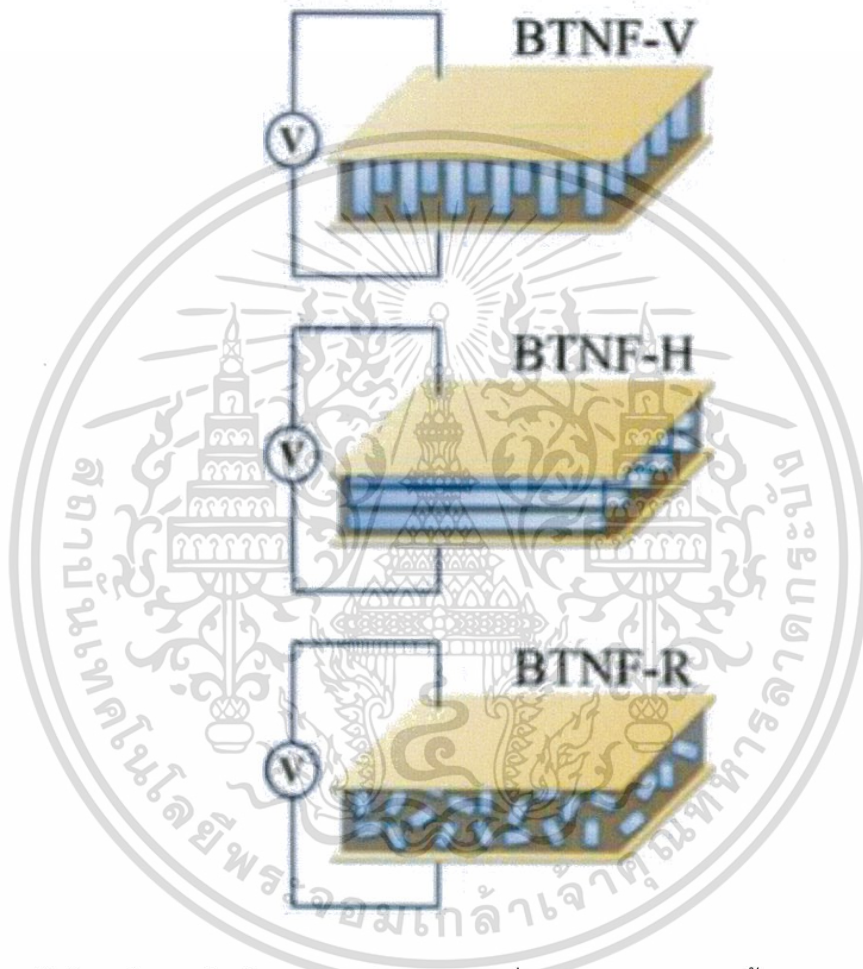


รูปที่ 2.20 ออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jing Yan และ Young Gyu Jeong [2] ได้รายงานเกี่ยวกับการทำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนาโนโดยใช้สารตั้งต้นเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตจากกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ใช้สารตั้งต้นเป็นโซลเจล และตามด้วยกระบวนการเผา ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการเตรียมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตโดยใช้เทคนิคจากกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยมีเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตเรียงตามแนวที่แตกต่างกัน คือ แนวตั้ง แนวนอน และแบบสุ่ม ในพอลิไคเมทิลไซลลอกเซนที่เป็นเมทริกซ์ ดังรูปที่ 2.21



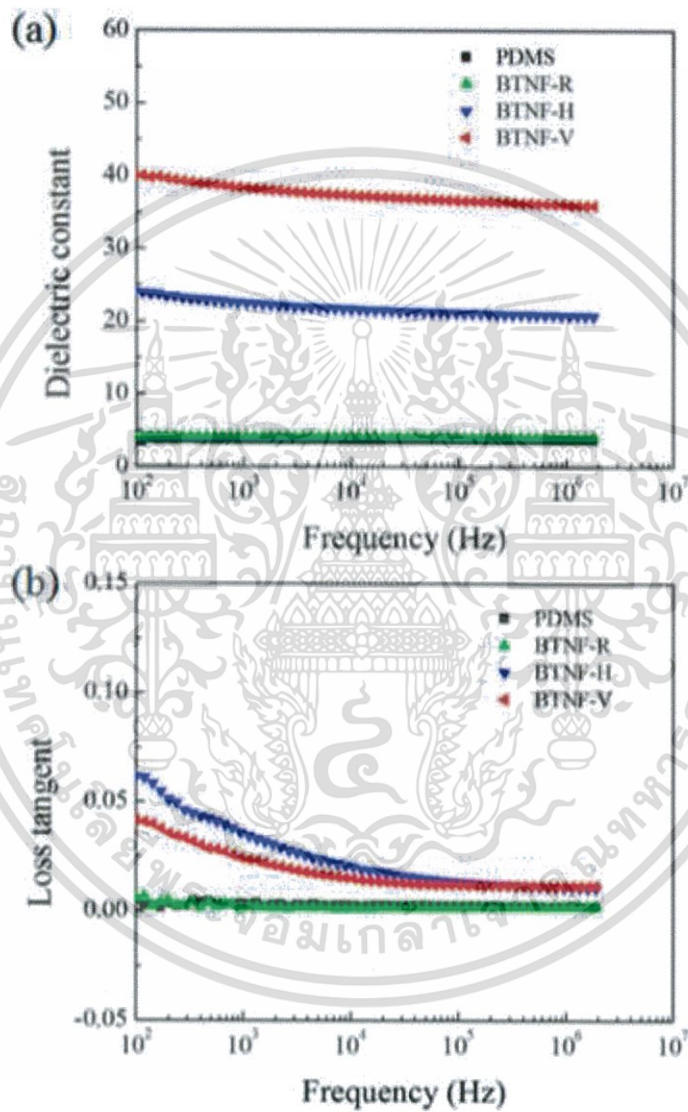
รูปที่ 2.21 เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตเรียงตามแนวที่แตกต่างกันคือ แนวตั้ง แนวนอน และแบบสุ่มในพอลิไคเมทิลไซลลอกเซนที่เป็นเมทริกซ์

รูปที่ 2.22 (a) แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของพอลิไคเมทิลไซลลอกเซน และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่เรียงตัวแบบสุ่ม (Barium titanate nanofiber-random: BTNF-R) ยังคงมีค่าคงที่ในช่วงความถี่ของคลื่นความถี่ที่ใช้ไฟฟ้าด้วยค่า 3.85 และ 4.14 ที่ 100 Hz ตามลำดับ

ในทางกลับกันค่าความเป็นไดอิเล็กทริกของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่เรียงตัวตามแนวตั้ง (Barium titanate nanofiber-vertical: BTNF-V) และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่เรียงตัวตามแนวนอน (Barium titanate nanofiber-horizontal: BTNF-H) สูงกว่า BTNF-R ถึงแม้ว่าจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความถี่เช่น 40.23 ที่ 100 Hz ถึง 35.88 ที่ 2 MHz สำหรับ BTNF-V และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23.99 ที่ 100 Hz ถึง 20.72 ที่ 2 MHz สำหรับ BTNF-H ผลการทดลองนี้ได้รับการกล่าวอ้างว่าเป็นอัตราส่วนที่สูงขึ้นของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตใน BTNF-V และ BTNF-H เนื่องจากมีค่าการซึมผ่านที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ BTNF-R ที่มีเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตสั้น ๆ

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ BTNF-V มากกว่าความถี่ที่ใช้มีค่าเกือบ 2 เท่าของ BTNF-H จากข้อเท็จจริงที่ว่าเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตมีค่าความเป็นไดอิเล็กทริกที่สูงกว่า  $\sim 820$  มากกว่า PDMSบริสุทธิ์ที่ 3.85 และ BTNF-V มีความหนาแน่นของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตสูงกว่า BTNF-H ตามทิศทางการทดสอบ

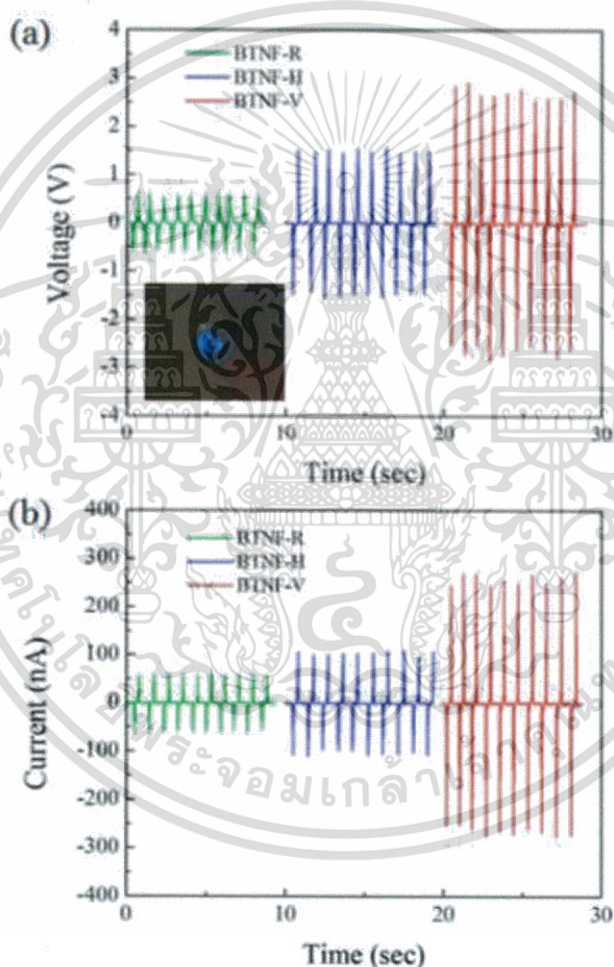


รูปที่ 2.22 (a) ค่าคงที่ของไดอิเล็กทริก และ (b) การสูญเสียการสัมผัสกันของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน และแบเรียมไททาเนตในเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนที่ความถี่ต่าง ๆ

รูปที่ 2.23 (a) แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์แรงดัน และกระแสของเครื่องกำเนิดพลังงานนาโนที่มีการจัดตำแหน่งที่แตกต่างกันของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต แรงดันไฟฟ้าขาออกเฉลี่ยถึง  $\sim 0.56$   $\sim 1.48$  และ  $\sim 2.67$  V สำหรับ BTNF-R, BTNF-H และ BTNF-V ตามลำดับซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดจากการแทรกซึม และการจัดตำแหน่งตามเกณฑ์ทิศทางระหว่างขั้วไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่ง BTNF-V ใช้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่  $\sim 2.67$  V ซึ่งสามารถอธิบายได้ในสองแง่มุมที่เป็นไปได้ คือ ผลของการทำให้เกิดขั้ว (Efficient poling) สำหรับ BTNF-V ถ้าไม่มีการใช้การทำให้เกิดขั้วสัญญาณแรงดันส่งออกของ BTNF-V จะอยู่ที่ประมาณ  $-0.08$  V.

BTNF-R BTNF-H และ BTNF-V มีค่าเท่ากับ  $57.78 \sim 103.33$  และ  $\sim 261.40$  nA ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.23 (b) ซึ่งแสดงรูปแบบการแปรผันเช่นเดียวกันกับแรงดันส่งออกนอกจากนี้ยังควรกล่าวว่กำลังส่งออกที่ผลิตจาก BTNF-V สูงพอที่จะส่องโดยตรงกับไฟไดโอดเปล่งแสง (LED) เชนพลาสมิซึ่ได้ดังแสดงในภาพที่แทรกอยู่ในรูปที่ 2.23 (a) แรงดันส่งออก และกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน แสดงค่าที่ตรงกันตรงกันแสดงว่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ และสัญญาณกระแสถูกสร้างขึ้นโดยพฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน



รูปที่ 2.23 (a) แรงดันไฟฟ้าส่งออก และ (b) การเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน  $\text{BaTiO}_3/\text{PDMS}$  ภายใต้การบีบอัดด้วยกลไกเป็นระยะ ๆ รูปที่แทรกใน (a) คือภาพถ่ายของไฟไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินในเชิงพาณิชย์ซึ่งสว่างขึ้นโดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจาก BTNF-V

สรุปได้ว่าเส้นใยนาโนแบบเรียบโททานาเนตที่ได้รับการจัดวางอยู่ในแนวเดียวกันถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และผ่านกระบวนการเผา โดยรวมกับพอลิไดเมทิลไซลอก-เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซน เครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน BaTiO<sub>3</sub>/PDMS ยืดหยุ่นได้ ที่มีการจัดเรียงตัวแตกต่างกัน 3 แบบ ซึ่งผลิตด้วยเส้นใยนาโนแบบเรียงโททานเนตเรียงตามแนวตั้ง แนวนอน และแบบสุมในเมทริกซ์พอลิโดเมทิลไซลอคเซนที่ถูกผลิตขึ้นพบว่าคุณสมบัติของไดอิเล็กทริก และเพียโซอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนขึ้นอยู่กับทิศทางการจัดตำแหน่งของเส้นใยนาโนของเส้นใยนาโนแบบเรียงโททานเนต

ค่าความเป็นไดอิเล็กทริกของ BTNF-V และ BTNF-H สูงกว่า BTNF-R ถึงแม้ว่าจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความถี่เช่น 40.23 ที่ 100 Hz ถึง 35.88 ที่ 2 MHz สำหรับ BTNF-V และ 23.99 ที่ 100 Hz ถึง 20.72 ที่ 2 MHz สำหรับ BTNF-H

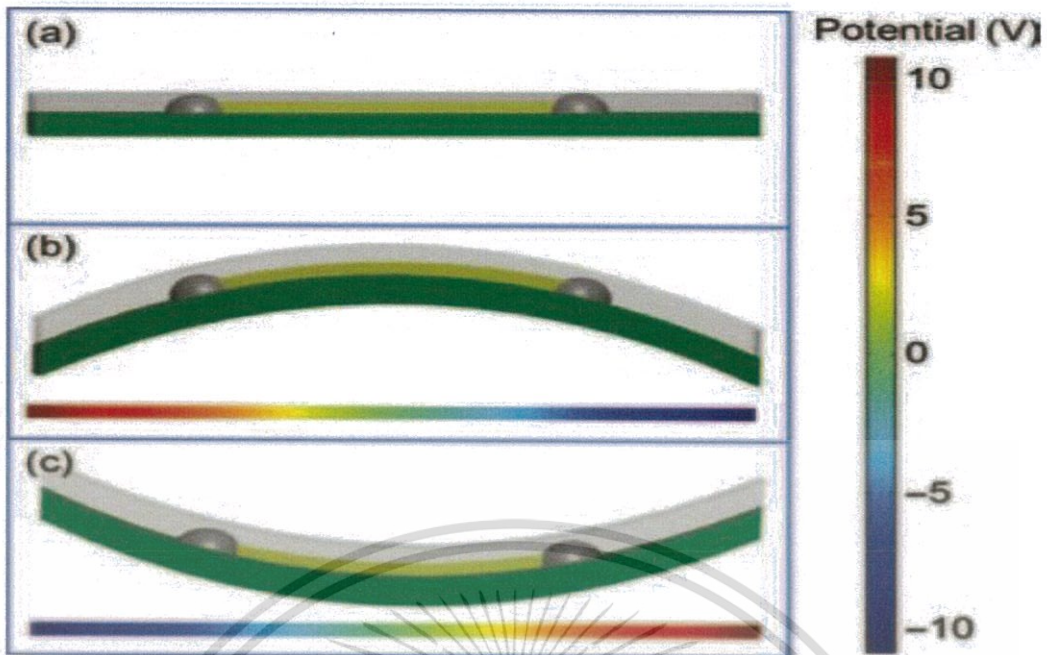
แม้ว่าค่าความคงที่ของไดอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน BaTiO<sub>3</sub>/PDMS มีค่าคงที่สูญเสียยังคงต่ำอยู่ที่ 0.042 0.062 และ 0.006 ที่ 100 Hz สำหรับ BTNF-V BTNF-H และ BTNF-R ตามลำดับ ดังนั้น BTNF-V จึงมีแรงดันส่งออกสูงสุดที่ 2.67 V และกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้สูง 261.40 nA ภายใต้แรงดันเชิงกลต่ำที่ 0.002 MPa ซึ่งสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยประมาณ 0.1181 ไมโครเมตร เทียบกับ BTNF-H และ BTNF-R พลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นได้ถูกนำมาใช้ในไดโอดเปล่งแสงเชิงพาณิชย์ และสามารถชาร์จประจุ 1  $\mu$ F เป็น 0.46 V ใน 34 วินาที

ผลการเป็นไดอิเล็กทริก และเพียโซอิเล็กทริกยืนยันการใช้งานที่มีศักยภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน BaTiO<sub>3</sub>/PDMS ยืดหยุ่น เป็นเครื่องจักรกลที่มีความสามารถเก็บเกี่ยว และจัดเก็บพลังงานสำหรับอุปกรณ์ไร้สาย อุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยตนเอง และเซ็นเซอร์

Xia Ni และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนยืดหยุ่น (Flexible nanogenerator) บนลวดนาโนแบบเรียงโททานเนต ซึ่งลวดนาโนแบบเรียงโททานเนตถูกผลิตขึ้นโดยใช้กระบวนการผลิตเส้นใยด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าสถิต ลวดแบบเรียงโททานเนตถูกถ่ายโอนไปยังพื้นผิวพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate: PET) และอุปกรณ์ดังกล่าวได้รับการบรรจุด้วยพอลิโดเมทิลไซลอคเซนเพื่อสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบยืดหยุ่นตามสายชนิดเดียวของแบบเรียงโททานเนตเพื่อทำการศึกษาระงัดไฟฟ้าส่งออกของอุปกรณ์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้ลวดนาโนแบบเรียงโททานเนต

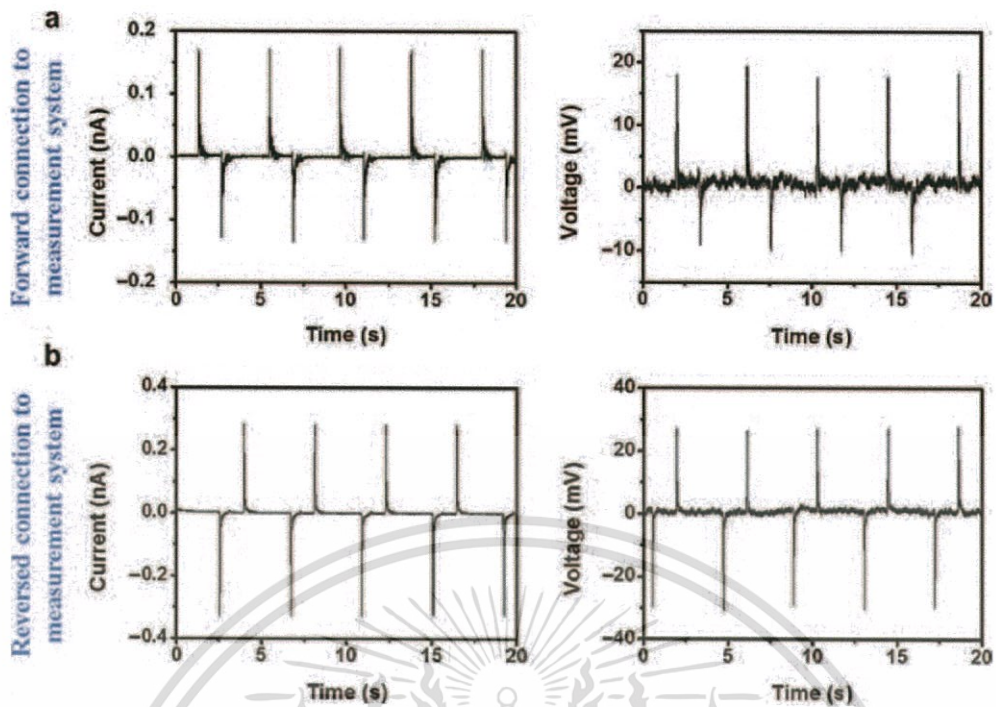
เริ่มจากลวดนาโนแบบเรียงโททานเนต ที่ได้จากกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตถูกถ่ายโอนไปยังพื้นผิว พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตแบบยืดหยุ่นได้ โดยใช้กาวเงิน (Silver plate) เพื่อให้ปลายทั้งสองด้านของสายนาโนติดอย่างแน่นหนาบนพื้นผิวที่ยืดหยุ่นได้ และเชื่อมต่อสายทองแดงซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อกับมิเตอร์วัดกระแส แรงดันไฟฟ้า ท้ายที่สุดอุปกรณ์นี้ถูกบรรจุด้วยพอลิโดเมทิลไซลอคเซน และถูกโพลาริเซชันกับสนามไฟฟ้า 100 kV/cm ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบยืดหยุ่น

ในการทดสอบใช้มอเตอร์เชิงเส้นเพื่อดูช่วงงอ และช่วงปล่อยบนพื้นผิวพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตเพื่อนำมาใช้เป็นช่วง ๆ และปล่อยแรงดึง/การบีบอัดในสายนาโน ดังรูปที่ 2.24 (b) และ (c) สามารถปรับค่าความกว้างของแรงตัด และความเร็วในการตัดหรือความถี่ในการตัดได้ เพื่อควบคุมความเครียดและอัตราความเครียดตามลำดับ สัญญาณแรงดันและกระแสถูกวัดผ่านระบบวิจัยสแตนฟอร์ด (Stanford research systems: SR560) เครื่องขยายกำลังสัญญาณรบกวนต่ำ SR560 และเครื่องขยายกระแสสัญญาณรบกวนต่ำ SR570 ในระหว่างการตรวจวัดไม่มีแหล่งพลังงานจากภายนอกที่นำมาใช้ในวงจร

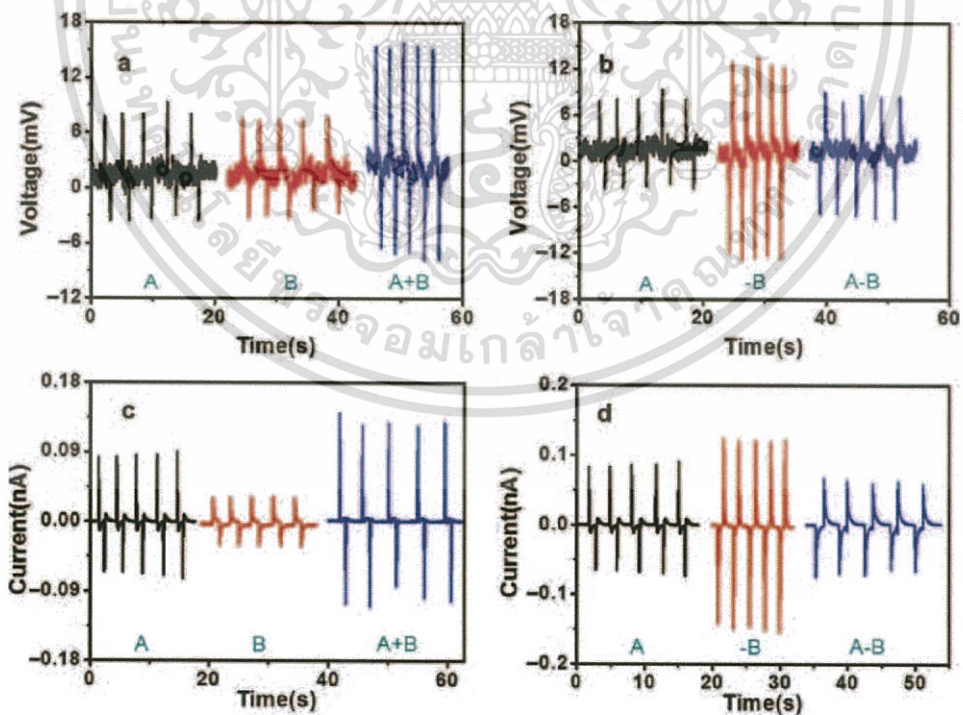


รูปที่ 2.24 (a) ภาพของเครื่องกำเนิดพลังงานนาโนแบบยืดหยุ่น (b) และ (c) การตัดด้วยกลไกของพื้นผิวจะสร้างความเค้นแรงดึง และแรงอัดในสายนาโนตามลำดับ และคำนวณสมรรถนะของเพียโซ-อิเล็กทริกในเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนที่อยู่ในรูปของ (b) และ (c)

การตรวจสอบศักยภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบยืดหยุ่น การวัดแรงดันไฟฟ้าลัดวงจร และแรงดันไฟฟ้าที่เปิดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.25 (a) ที่ความกว้างของการตัด 15 mm และความถี่ตัด 0.33 Hz แรงดันไฟฟ้าจุดสูงสุด และกระแสไฟฟ้าจะถึง 18 mV และ 0.17 nA ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบว่าได้รับสัญญาณมาจากเพียโซอิเล็กทริกของลวดนาโนแบเรียมไททาเนต การทดสอบการเปลี่ยนขั้วในรูปที่ 2.25 (b) และการทดสอบการซ้อนทับเป็นเส้นตรง (Linear superposition test) ในรูปที่ 2.26 ได้ถูกนำมาใช้ และจากรูปที่ 2.25 (b) จะเห็นได้ว่าสัญญาณของกระแส และแรงดันไฟฟ้าส่งออกจะตรงกันข้ามเมื่อระบบวัดถูกเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน และผลการซ้อนทับแสดงในรูปที่ 2.26 เป็นไปตามเกณฑ์สัญญาณที่แท้จริงซึ่งหมายความว่า กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าส่งออกเป็นสัญญาณที่แท้จริง กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้อีกรูปที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.27 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 0.21 V และกระแสไฟฟ้า 1.3 nA เครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนแต่ละชิ้นแสดงพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกันมากโดยเน้นถึงความสามารถในการทำแบบซ้ำ ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน

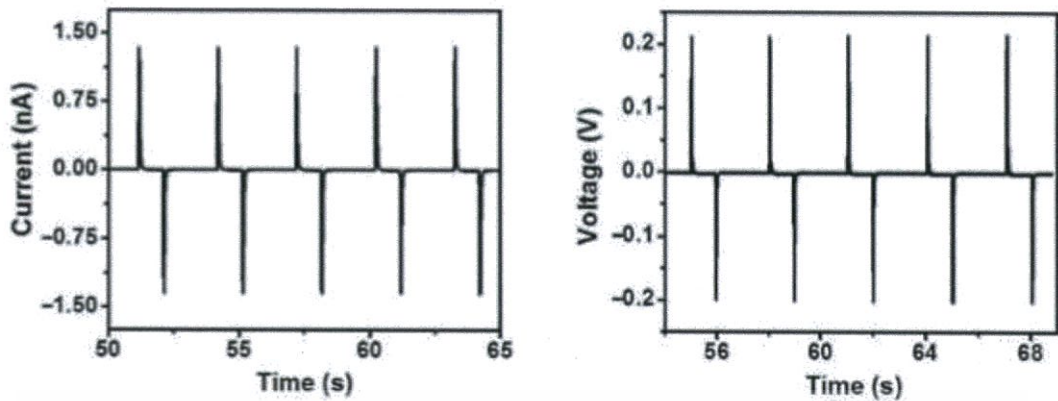


รูปที่ 2.25 แรงดันไฟฟ้าลัดวงจร (ซ้าย) และแรงดันไฟฟ้าของวงจรเปิด (ด้านขวา) ของเครื่องกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์แบบยืดหยุ่นได้เมื่อมีความเค้นแรงดึง (a) ต่อเชื่อมต่อกับระบบการวัดและ (b) เชื่อมต่อย้อนกลับกับการวัด



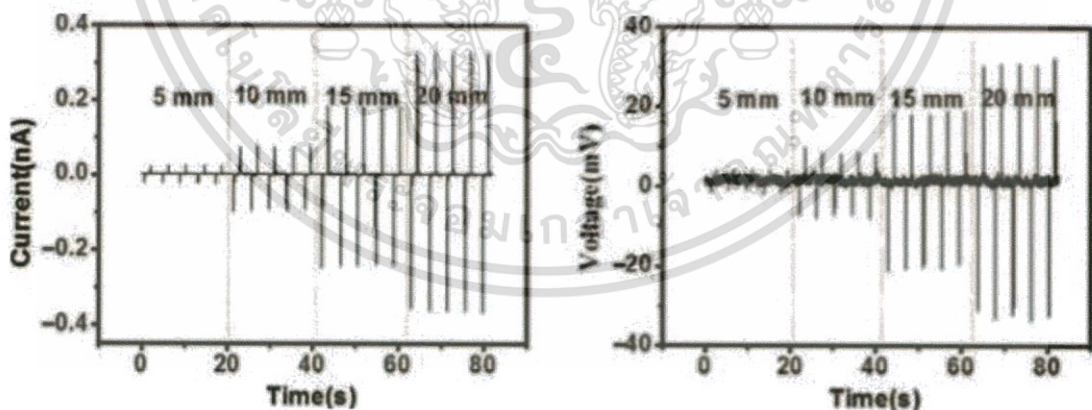
รูปที่ 2.26 แรงดันไฟฟ้าในปัจจุบัน และแรงดันไฟฟ้าเมื่อสองเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนเชื่อมต่อกันเป็นชุด (a) (b) และแบบขนาน (c) (d) ด้วยคอนแทคต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 แรงดันไฟฟ้าลัดวงจร (ซ้าย) และแรงดันไฟฟ้าที่เปิดวงจร (ด้านขวา) ของเครื่องกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์แบบอ่อนได้เมื่อเชื่อมต่อการวัด

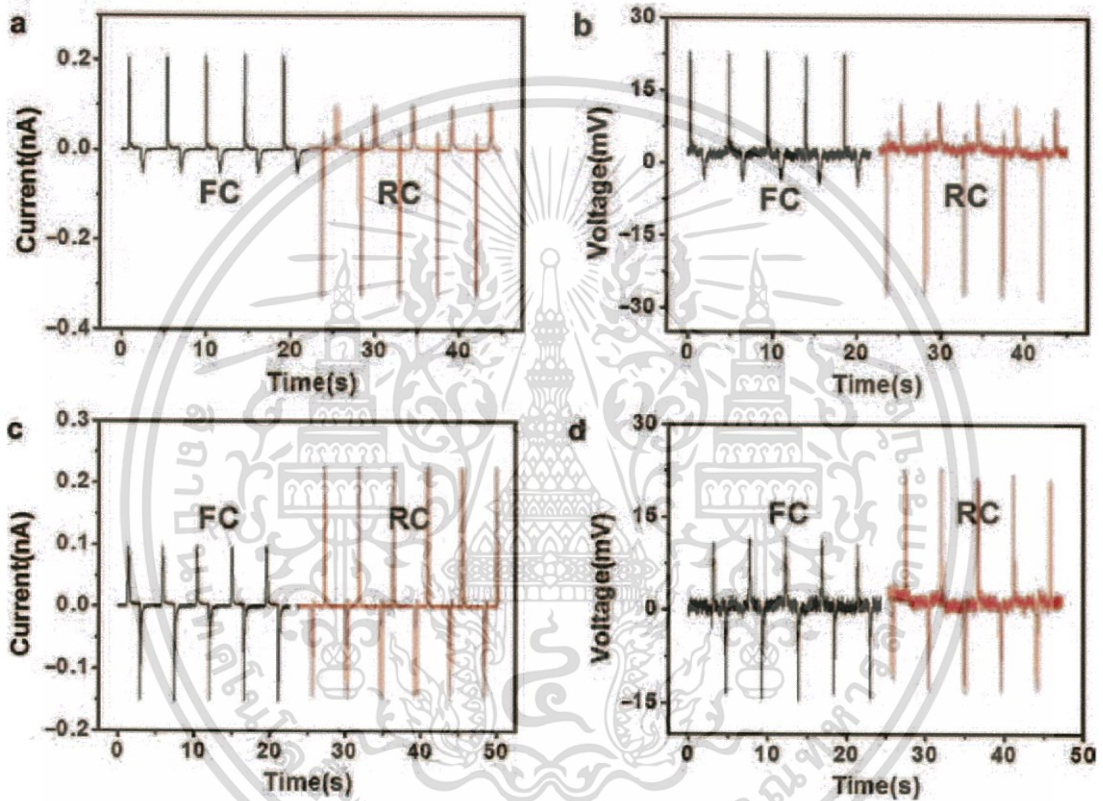
ศักยภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนจะขึ้นอยู่กับความเครียด ลวดนาโนแบบเรียบไททานิคจะพิจารณาจากแรงดัดที่ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน ซึ่งจะพิจารณาจากการเคลื่อนที่สูงสุดของมอเตอร์เชิงเส้นจากตำแหน่งสมดุล (ความกว้างของการดัด) สามารถคาดเดาได้ว่าความเครียดจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแรงดัด เป็นผลให้ศักยภาพเพียโซอิเล็กทริกระหว่างปลายทั้งสองของลวดนาโนแบบเรียบไททานิคจะเพิ่มขึ้น และแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะถูกสร้างขึ้น รูปที่ 2.28 เป็นแรงดันไฟฟ้าลัดวงจร และแรงดันไฟฟ้าที่เปิดวงจรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน ที่มีค่าการแผ่รังสีแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.28 โดยมีค่าแรงดัดเพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 20 mm แรงดันส่งออกจะเพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 21 mV



รูปที่ 2.28 แรงดันไฟฟ้าลัดวงจร (ซ้าย) และแรงดันไฟฟ้าของวงจรเปิด (ด้านขวา) ของเครื่องกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์แบบยืดหยุ่นที่มีสมบัติการแตกตัวแตกต่างกัน

ผลผลิตทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนยังขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด อัตราความเครียดของแบบเรียบไททานิคขนาดไมโครสามารถควบคุมได้ด้วยความเร็วการดัด (ความเร็วในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เชิงเส้น) หรือความถี่ดัดเมื่อความเครียดคงที่การเพิ่มความถี่ในการดัดหรือเอกซาร์นิเป็นเอกซาร์นิที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปลดปล่อยทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นอย่างมากของสัญญาณส่งออกที่สอดคล้องกันซึ่ง แสดงในรูปที่ 2.29 สัญญาณส่งออกที่เพิ่มขึ้นสามารถกำหนดได้ว่ามีอัตราการเพิ่มหรือลดประจุที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก อีกนัยหนึ่งจำนวนอิเล็กตรอนในวงจรรายนอกจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่น้อยลงระหว่างปลายทั้งสองของลวดนาโน ซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงขึ้นบนความถี่ที่เห็นได้ชัดว่าผลที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามความถี่ของการดัดงอที่เพิ่มขึ้น ผลการทดลองได้ยืนยันถึงผลกระทบของอัตราความเครียดต่อศักยภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์จะไปถึงความอึดเมื่อความถี่ที่ดัดเกินกว่าค่าที่กำหนด ซึ่งเป็นผลมาจากการลดค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกด้วยการเพิ่มความถี่ของความเครียดในการขับเคลื่อน

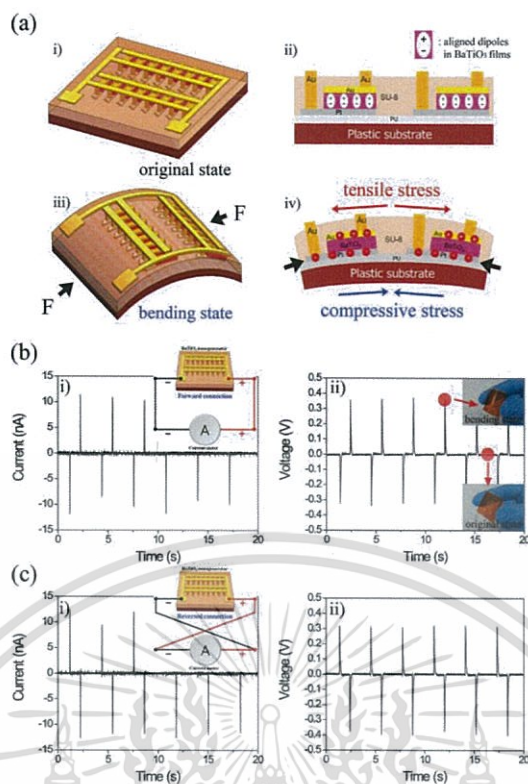


รูปที่ 2.29 สัญญาณไฟฟ้าที่ปลดปล่อยอย่างซ้ำ ๆ (a) (b) และสัญญาณไฟฟ้าที่ปลดปล่อยอย่างซ้ำ ๆ (c) (d) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน

จากการจำลองทางทฤษฎีแสดงให้เห็นว่าลวดนาโนแบบเรียวไททานเนต มีศักยภาพไฟฟ้าเพียโซ-อิเล็กทริกที่ดีกว่าระหว่างปลายทั้งสองของลวดนาโนเทียบกับลวดนาโนของเลดเซอร์โคเนตไททานเนต (PZT) ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนที่สามารถอธิบายบนพื้นฐานเดียวกับลวดนาโนแบบเรียวไททานเนต พบว่าผลการผลิตไฟฟ้าเป็นไปตามสัดส่วนความเค้น และความเครียด นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าได้โดยเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสองเครื่องเข้าด้วยกัน และขนานกับขั้ว และลำดับที่ถูกต้อง งานวิจัยนี้สามารถหาศักยภาพของการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้ลวดนาโนแบบเรียวไททานเนต และแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะขยายขนาดของกำลังไฟฟ้าส่งออก

Kwi-Il Park และคณะ [37] ศึกษาการใช้แบเรียมไททาเนตที่ใช้ในทางชีวภาพปราศจากตะกั่ว ในการสร้าง และการตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนบนพื้นผิวยืดหยุ่น ซึ่งทำการนำไปไว้บนเซรามิกเพอรอฟสไกต์ชนิดฟิล์มบางแบเรียมไททาเนตลงบน Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/(111) พื้นผิวซิลิคอน โดยวิธี อาร์เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง (Rf magnetron sputtering) อบอ่อนที่ 700 °C สำหรับการเกิดผลึก และทำให้มีขั้วเพื่อเพิ่มสมบัติเพียโซอิเล็กทริก จากนั้นฟิล์มบางแบเรียมไททาเนตจะถูกถ่ายโอนลงบนพื้นผิวยืดหยุ่นโดยวิธีมาตรฐานการประดิษฐ์ขนาดจุลภาค (Standard microfabrication) และเทคนิคการฉายแสงแก๊พอลิเมอร์ให้แข็งตัว (Soft lithographic) เพื่อที่จะวัดความต่างศักย์บวก ลบ และสัญญาณกระแส นักวิจัยได้ทำการฝากขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดิจิทบนแบเรียมไททาเนตยืดหยุ่น

รูป 2.30 a-i และ ii แสดงแผนผังการปรากฏ และโครงสร้างตัดขวางของตัวกำเนิดไฟฟ้านาโนแบเรียมไททาเนตที่มีขั้วรูปแบบเดิมโดยไม่มีการตัด วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีไดโพลในแนวราบโดยทำให้มีขั้วโดยการโพลายไต์สนามไฟฟ้าสูง รูป 2.30 a-ii ที่แสดงในโครงสร้างตัดขวางอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนที่มีขั้วในรูปแบบเดิม ไดโพลในฟิล์มบางแบเรียมไททาเนตจัดเรียงตัวในทิศทางตามยาวกับผิวของอุปกรณ์ เมื่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนถูกโค้ง รูป 2.30 a-iii ประจุจะถูกสร้างในแต่ละโครงสร้างโลหะ ฉนวน โลหะ เนื่องจากความเค้นแรงดึงที่ซิกน้าผ่านการโค้งตัวของอุปกรณ์ รูป 2.30 a-iv ประจุที่ถูกสร้างสามารถไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทองคำ และสะสมความต่างศักย์ ( $\Delta V$ ) ระหว่างขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดิจิท เมื่อตัวกำเนิดไฟฟ้านาโนไม่โค้งอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่กลับไปยังทิศทางตรงข้าม รูป 2.30 b และ c แสดงการวัดความต่างศักย์ที่ได้ออกมา และกระแสของตัวกำเนิดไฟฟ้านาโนแบเรียมไททาเนตแบบยืดหยุ่น โครงสร้างโลหะ ฉนวน โลหะ ระหว่างการตัดอย่างต่อเนื่อง และไม่ตัด เพื่อยืนยันสัญญาณที่ออกมาซึ่งถูกสร้างจากการตัดโครงสร้างโลหะ ฉนวน โลหะ โดยส่วนใหญ่ใช้การทดสอบการสลับความเป็นขั้ว (Switching-polarity test) ตามรูป 2.30 b เมื่อเครื่องวัดกระแสเชื่อมต่อกับตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนความต่างศักย์บวก และจังหวะของกระแสถูกสร้างระหว่างการตัดอย่างรวดเร็วของพื้นผิว ในกรณีของการต่อแบบย้อนกลับ รูป 2.30 c สัญญาณที่ออกมาจะเป็นลบแล้วถูกบันทึก ภายใต้การเคลื่อนไหวเป็นระยะอย่างช้า ๆ ของการตัด และไม่ตัด ตัวกำเนิดไฟฟ้านาโนแบเรียมไททาเนตแบบยืดหยุ่นมีพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 82 mm<sup>2</sup> และปัจจัยที่เพิ่มมาประมาณ 16.4% ความต่างศักย์ที่ถูกสร้างขึ้นช้า ๆ อยู่ที่ 0.3 - 0.4 V และจังหวะของกระแสอยู่ที่ 8 - 12 nA ค่านี้คือค่าที่ถูกสร้างขึ้นที่ความเครียดสูงสุด 0.40 - 0.55% อัตราความเครียดเท่ากับ 1.2 - 1.6% s<sup>-1</sup> ความต่างศักย์ และกระแสที่ได้มานั้นขึ้นอยู่กับมุมอัตราการตัดระหว่างการตัด/ไม่ตัด อย่างเป็นระยะของตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโน ความต่างศักย์สูงสุด และสัญญาณกระแสประมาณ 1.0 V และ 26 nA ตามลำดับ ค่าที่ได้นี้มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนที่ใช้ขั้วไฟฟ้าขนานแบบปกติ ในอนาคตสัญญาณที่ออกมานั้นถูกคาดหวังว่าจะดีขึ้นโดยการเพิ่มประสิทธิภาพอย่างเหมาะสม เช่น กระบวนการผลิต การคัดเลือกวัสดุ การปรับปรุงวงจร และโครงสร้างโดยรวมทาง 3 มิติ

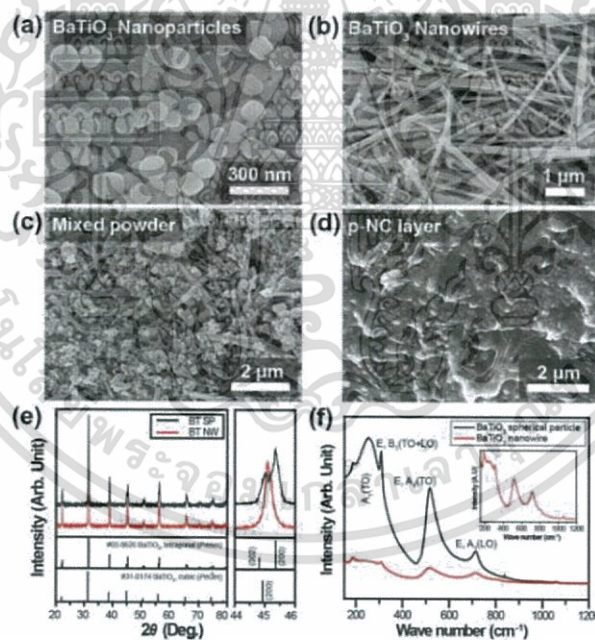


รูปที่ 2.30 (a) การสร้างกำลังของตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนแบบเรียบมีไททาเนตแบบยืดหยุ่นก่อนการตัด และหลังการตัด โดยไดโพลจัดเรียงตัวในทิศทางตามยาวของพื้นผิวอุปกรณ์ในสภาวะดั้งเดิมโดยที่ไม่ตัด รูปที่ 2.30 a-i, ii ประจุถูกสร้างขึ้นเนื่องจากความเค้นแรงดึง และความเค้นแรงดัดผ่านการตัด รูปที่ 2.30 a-iii, iv ประจุสามารถไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทองคำ และสร้างความต่างศักย์ ( $\Delta V$ ) ระหว่าง IDEs วัดกระแสที่ออกมา รูปซ้าย i และความต่างศักย์ รูปขวา ii ของตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนแบบเรียบมีไททาเนตบนพื้นผิวพลาสติกระหว่างการตัด และไม่ตัดเป็นระยะ (b) เมื่อเชื่อมต่อแบบไปข้างหน้า รูปแทรกอยู่ในรูปที่ 2.30 b-i กับเครื่องวัดกระแส และ (c) เมื่อเชื่อมต่อแบบย้อนกลับ รูปแทรกอยู่ในรูปที่ 2.30 c-i กับเครื่องวัดกระแส รูปที่แทรกอยู่แสดงถึงตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนที่ถูกตัดและไม่ถูกตัด

การประดิษฐ์ฟิล์มแบบเรียบมีไททาเนตบนตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนแบบยืดหยุ่น การอบอุ่น การทำให้เกิดขั้ว ฟิล์มบางแบบเรียบมีไททาเนตเฟอร์โรอิเล็กทริก ได้ทำการเปลี่ยนโอนอย่างสมบูรณ์ไปยังพื้นผิวพลาสติกโดยทำตามการประดิษฐ์ขนาดไมโคร (Microfabrication) และเทคนิคการฉายแสงใสพอลิเมอร์ให้แข็งตัว (Soft lithographic techniques) ตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนแบบเรียบมีไททาเนตสร้างบนพื้นผิวพลาสติกเปลี่ยนพลังงานกล (การดัด) เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยได้ความต่างศักย์ 1.0 V และกระแส 26 nA ความหนาแน่นของกระแสที่ได้ถูกคำนวณเท่ากับ  $0.19 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  และคำนวณความหนาแน่นของกำลังได้  $7 \text{ mW}/\text{cm}^3$  การคำนวณนี้อยู่บนฐานของพื้นที่ และปริมาตรทั้งหมดของโครงสร้างโลหะ ฉนวน โลหะ ความต่างศักย์ที่ได้มานั้นเป็นไปตามทฤษฎีการคำนวณเพียงข้อที่แฝงอยู่ เทคนิคตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนการถ่ายโอนฟิล์มบางเฟอร์โรอิเล็กทริกจากพื้นผิวใหญ่ไปยังพื้นผิวยืดหยุ่น แสดงถึงความเป็นไปได้ของการสร้างตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนฟิล์มบางกับเพอรอฟสไกต์วัสดุออกไซด์ เช่น  $\text{BiFeO}_3$  และ PZT สามารถแสดงประสิทธิภาพทางเพียโซอิเล็กทริกสูงกว่าแบบเรียบมีไททาเนต และการขยายของการใช้งานที่ก้าวหน้าน่ามากขึ้นสำหรับอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน และยังให้โอกาสในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความก้าวหน้าสำหรับอุปกรณ์ทางชีววิทยาที่สามารถฝังได้ (ตัวตรวจจับทางชีววิทยาแบบไร้สายที่สร้างกำลังเองได้ และหุ่นยนต์) เนื่องจากสมบัติของวัสดุทางชีวภาพของแบเรียมไททาเนต และศักยภาพที่ชัดเจนสำหรับการใช้งานทางไฟฟ้า (เช่น ผิวนิ่งเทียม ไดโอดเปล่งแสง จอแสดงผลเพียโซอิเล็กทริกที่สามารถสัมผัสได้ และอุปกรณ์เพียโซ) สามารถขับเคลื่อนได้โดยการให้แรงดันจากแหล่งภายนอก

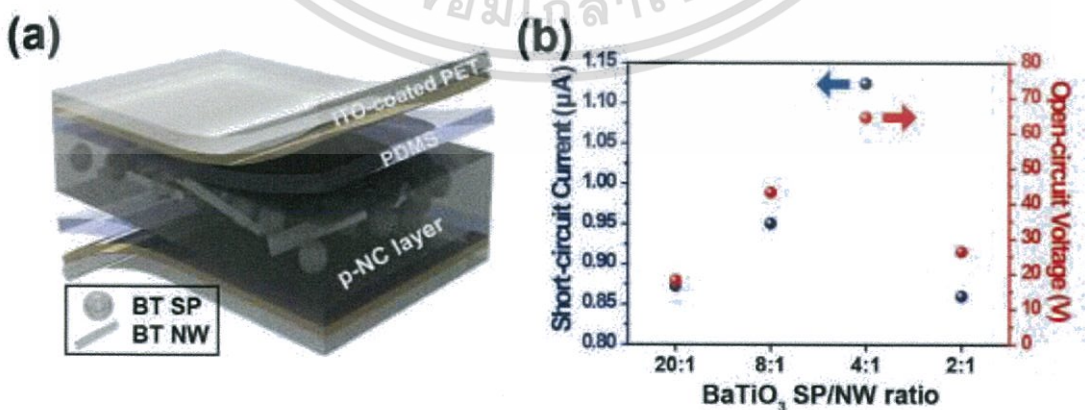
Changyeon Baek และคณะ [4] ได้ผสมระหว่างอนุภาคขนาดนาโนแบเรียมไททาเนต หนึ่งมิติเข้ากับอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าวัสดุผสมขนาดนาโน (Nanocomposite generator: NCG) เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นเนื้อเดียวกัน และเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้น โดยทำการสังเคราะห์แบเรียมไททาเนตอนุภาคทรงกลมขนาดนาโน (Spherical nanoparticles: SPs) และเส้นลวดขนาดนาโน (Nanowire: NWs) ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล พบว่ามีอัตราส่วนของวัสดุผสมนาโนเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric nanocomposite: P-NC) ที่แตกต่างกันโดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักที่แตกต่างกันของแบเรียมไททาเนตอนุภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโน หาอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าวัสดุผสมขนาดนาโน สัญญาณไฟฟ้าส่งออกที่ได้อัตราส่วนของแบเรียมไททาเนตอนุภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโน แตกต่างกันไป ค่าสัญญาณไฟฟ้าส่งออกสูงสุดที่ได้คือ (VOC ~ 60V และ ISC ~ 1.1 A) ในอัตราส่วน 4:1 กำลังไฟฟ้าทันที (40 W) ถูกคำนวณจากสัญญาณไฟฟ้าส่งออกเป็นส่วนหนึ่งของการต้านทานภายนอก



รูปที่ 2.31 สังเคราะห์อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (a) อนุภาคทรงกลมขนาดนาโน และ (b) เส้นลวดขนาดนาโน (c) ส่วนผสมของอนุภาคทรงกลมขนาดนาโน (Spherical nanoparticles: SPC) และเส้นลวดขนาดนาโน (d) ในเมทริกซ์ PDMS (e) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ( $20^{\circ} - 80^{\circ}$ ) ของอนุภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโนแบบสังเคราะห์ที่มีมุมการเลี้ยวเบนขยาย (พีค (200):  $44^{\circ} - 46^{\circ}$ ) (f) สเปกตรัมของรามาน (Raman) ของอนุภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.31 แสดงโครงสร้างทางจุลภาค และโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่สังเคราะห์มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 120 nm ที่มีรูปทรงใกล้เคียงทรงกลม การสังเคราะห์เส้นลวดขนาดนาโนจากปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอร์แบบสองขั้นตอนมีลักษณะพื้นฐานวิทยาศาสตร์เป็นแท่งที่มีความยาวไม่กี่ไมครอน และมีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่กี่สิบนานาเมตรส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันของส่วนประกอบทั้งสอง และสถานะฝังตัวของมันในเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้รับการยืนยันจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่แสดงในรูป 2.31 (c) และ (d) แบเรียมไททาเนตอนุภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโนมีการกระจายอย่างดีโดยไม่มีการรวมตัว และยังคงอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ มีข้อสังเกตว่าแบเรียมไททาเนตแบบเส้นลวดขนาดนาโนสามารถทำหน้าที่เป็นตัวกระจายตัวได้เช่นเดียวกับสารนาโนที่มีมิติเดียวในงานก่อนหน้านี้ โครงสร้างผลึกของแบเรียมไททาเนตอนุภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโน แสดงในรูปที่ 2.31 (e) แบเรียมไททาเนตอนุภาคทรงกลมขนาดนาโนมีโครงสร้างเตตระโกนอล (P4mm) ที่มีพีคที่มีการแยกสูงสุดที่โดดเด่นซึ่งหมายถึงการยึดตัวแบบไม่สมมาตรตามแกน c แบเรียมไททาเนตแบบเส้นลวดขนาดนาโนมีโครงสร้างลูกบาศก์ (Pm3m) โดยไม่มีการแตกแยกของรูปแบบการเลี้ยวเบน ยอดการเลี้ยวเบนของแบเรียมไททาเนตแบบเส้นลวดขนาดนาโนจะขยับขึ้นเล็กน้อยไปยังมุมที่สูงขึ้นซึ่งแสดงถึงสถานะของเฟสเตตระโกนอลเพียงเล็กน้อย ความผิดเพี้ยนนี้ในแบเรียมไททาเนตอนุภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโนได้รับการเปิดเผยอย่างชัดเจนในสเปกตรัมของรามาน หลาย ๆ พีคแสดงการกระเจิงมีความสัมพันธ์กับเตตระโกนอลแบเรียมไททาเนตที่ประมาณ  $307\text{ cm}^{-1}$  แสดงให้เห็นถึงการปรากฏตัวของเฟสเตตระโกนอลอย่างชัดเจน [38] [39] ความแตกต่างของสัญญาณของพีครามานที่ได้จากทั้งแบเรียมไททาเนตอนุภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโนมีความสอดคล้องกับผลของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ สัญญาณที่อ่อนแอของพีครามานของแบเรียมไททาเนตเส้นลวดขนาดนาโนแสดงให้เห็นว่าระยะเตตระโกนอลมีอยู่ในอนุภาคแม้ว่าจะไม่ได้มีอยู่ในปริมาณที่มากนัก จากผลกระทบนีแบเรียมไททาเนตเส้นลวดขนาดนาโนไม่แสดงการเลี้ยวเบนของพีคที่แยกจากกันสูงสุด แต่แทนที่จะแสดงพีคยอดไหล่สมมติฐานที่สองมีความเป็นไปได้ที่จะอธิบายถึงระยะเตตระโกนอลเล็กน้อยนี้ ประการแรกคือแบเรียมไททาเนตเส้นลวดขนาดนาโนเป็นหลายผลึก (Polycrystalline) ได้แก่ ผลึกจำนวนมากที่มีขนาดน้อยกว่าไม่กี่นาโนเมตร ข้อสันนิษฐานที่เป็นไปได้ที่สอง คืออย่างน้อยหนึ่งมิติ (ส่วนใหญ่จะเป็นความหนาของแบเรียมไททาเนตเส้นลวดขนาดนาโน) ถูกจำกัดให้มีขนาดเล็กมากไม่กี่นาโนเมตร



รูปที่ 2.32 (a) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าวัสดุผสมนาโนไร้ตะกั่ว (b) อัตราส่วนน้ำหนักของแบเรียมไททาเนตอนุภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวัสดุผสมนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวัสดุผสมนาโนไร้ตะกั่วซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของแบเรียมไททานเตอนูภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโน แสดงในรูปที่ 2.32 (a) ชั้นส่วนของสารเพียโซอิเล็กทริกในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวัสดุผสมนาโนมีความยืดหยุ่นอย่างเต็มที่จึงช่วยให้อุปกรณ์สามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็วทุกรูปแบบของการเสียรูปเชิงกล เมื่อเทียบกับอุปกรณ์อื่น ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวัสดุผสมนาโน ชั้นของวัสดุผสมนาโนเพียโซอิเล็กทริก ในการศึกษาี้ไม่มีส่วนประกอบนำไฟฟ้าแม้ว่าจะมีการไหลของอิเล็กตรอนโดยตรงระหว่างสองขั้วเกิดขึ้นน้อยลงชั้นพอลิเมอร์บาง ๆ ซึ่งวางอยู่บนทั้งสองด้านบนและด้านล่างของ วัสดุผสมนาโนเพียโซอิเล็กทริกยังคงสามารถปรับปรุงเสถียรภาพของชั้น วัสดุผสมนาโนเพียโซอิเล็กทริกได้โดยการป้องกันความล้มเหลวของลัดวงจรในระหว่างกระบวนการทำให้เกิดขั้ว

ในรูปที่ 2.32 (b) แสดงการเพิ่มอัตราส่วนน้ำหนักของ แบเรียมไททานเตอนูภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวัสดุผสมนาโนเป็นการลดขนาดของสมรรถนะอุปกรณ์เนื่องจากการบิดเบี้ยวในเฟสเตตระโกนอลในแบเรียมไททานเตอนูภาคทรงกลมขนาดนาโน น้อยกว่าแบเรียมไททานเตอนูภาคทรงกลมขนาดนาโนในชั้นวัสดุผสมนาโนเพียโซอิเล็กทริกที่มีอัตราส่วนน้ำหนักที่แตกต่างกันของแบเรียมไททานเตอนูภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโนได้จัดทำขึ้นเป็น 2:1 เพื่อยืนยันจำนวนที่เหมาะสมสำหรับประสิทธิภาพการทำงานที่เพิ่มขึ้น ชั้นวัสดุผสมนาโนเพียโซอิเล็กทริกที่มีอัตราส่วนน้ำหนักเท่ากับ 1:1 ไม่เสถียรและเสียหายเมื่อดึงออกจากพื้นผิวสัญญาณไฟฟ้าส่งออกที่ได้จากในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวัสดุผสมนาโนมีค่าสูงที่สุด ที่มีอัตราส่วนแบเรียมไททานเตอนูภาคทรงกลมขนาดนาโน และเส้นลวดขนาดนาโนเท่ากับ 4:1

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 สารเคมี

#### 3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanofiber)

1. แบเรียมอะซิเตต (Barium acetate) ความบริสุทธิ์ 99% ผลิตโดย บริษัท ซิกม่า-อัลดริช (Sigma-aldrich) ประเทศเยอรมนี
2. ไททาเนียมบิวทอกไซด์ (Titanium(IV) butoxide) เกรดห้องปฏิบัติการ ความบริสุทธิ์ 97% ผลิตโดย บริษัท ซิกม่า-อัลดริช (Sigma-aldrich) ประเทศเยอรมนี
3. กรดอะซิติก (Acetic acid) ผลิตโดย บริษัท แมลลินครอดท์ เคมีคอล (Mallincrodt chemicals) ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. พอลิเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene oxide) ผลิตโดย บริษัท ซิกม่า-อัลดริช (Sigma-aldrich) ประเทศเยอรมนี
5. เอทานอลบริสุทธิ์ (Absolute ethanal) ผลิตโดย บริษัท เมอร์ค-เคมีคอล (Merck-chemicals)

#### 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanoparticle)

1. อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ความบริสุทธิ์ 99.95% ผลิตโดย บริษัท อินฟราแมท แอดวานซ์ แมททีเรียล (Inframat advance material)

#### 3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต

1. ซิลิโคนอีลาสโตเมอร์เบส (Silicone elastomer base) ผลิตโดย บริษัท ดาว คอร์นนิ่ง (Dow corning corporation) ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. ซิลิโคนอีลาสโตเมอร์เคียวริงเอเจนท์ (Silicone elastomer curing agent) ผลิตโดย บริษัท ดาว คอร์นนิ่ง (Dow corning corporation) ประเทศสหรัฐอเมริกา

### 3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ

#### 3.2.1 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

1. บีกเกอร์ขนาด 25 และ 50 ml
2. ปิเปตขนาด 1 และ 5 ml
3. กระจกฉีดยาขนาด 1.5 และ 10 ml
4. ขวดปรับปริมาตร ขนาด 10 ml
5. หลอดหยดสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ซ้อนตุ๊กสาร
7. ที่คืบ
8. ฟลอยด์ลูมิเนียม
9. แท่งแม่เหล็กคนสาร
10. กล่องพลาสติก
11. เทปกาว
12. เข็มฉีดยาเบอร์ 24
13. ขวดแก้วขนาดเล็กทรงกระบอกสูงมีฝาปิด
14. ครูซิเบิล
15. ขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิต
17. เตอบสสาร ผลิตโดย บริษัท ซวโซติ
18. เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 g รุ่น เอ็มแอล 204/01 (ML204/01) ผลิตโดย บริษัท เมทเทิล โทลีโด (Mettler toledo)
19. เครื่องกำเนิดความต่างศักย์ ผลิตโดย บริษัท แกมมา ไฮ โวลต์เทจ รีเสิร์ช (Gamma high voltage research)
20. เครื่องปั๊มกระบอกฉีดยา ผลิตโดย บริษัท นิว อีรา ปั๊ม ซีสเท็ม (New Era pump systems)
21. เครื่องปั่นกวนสาร รุ่น ซี-เอ็มเอจี เอชเอส 7 (C-MAG HS 7) ผลิตโดย บริษัท ไอเคเอ (IKA)
22. เครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ผลิตโดย บริษัท เอ็นอีวาย เด็นทอล (NEY Dental)
23. เครื่องให้ความร้อน รุ่น ซี-เอ็มเอจี เอชเอส 7 (C-MAG HS 7) ผลิตโดย บริษัท ไอเคเอ (IKA)

### 3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

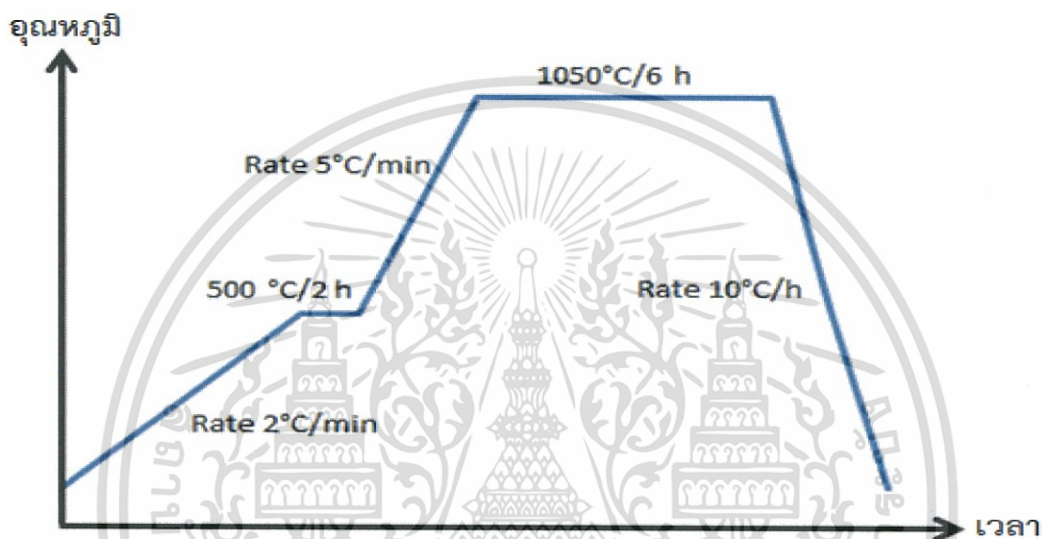
1. เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ผลิตโดย บริษัท ParkinElmer
2. เครื่องตรวจการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลิตโดย บริษัท Siemens รุ่น D8 Advance
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ ZEISS รุ่น EVO MA 10
4. ออสซิลโลสโคป รุ่น ทีบีเอส 1072บี-อีดียู (TBS 1072B-EDU)
5. ชุดทดสอบแรงกด (Compressive test setup)

## 3.3 ขั้นตอนในการเตรียมวัสดุผสมแบบเรียมไททานเนต

### 3.3.1 การเตรียมเส้นใยนาโนแบบเรียมไททานเนตโดยวิธีโซลเจล

การเตรียมเส้นใยนาโนแบบเรียมไททานเนต เริ่มจากการซึ่งสารตั้งต้นแบบเรียมอะซิเตต และไททานเนียมบิวทอกไซด์ ในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:1 ซึ่งแบบเรียมอะซิเตต 2.5542 g ละลายด้วยกรดอะซิติกเข้มข้น 5 ml ปั่นกวนพร้อมให้ความร้อนที่ 70 °C เมื่อแบบเรียมอะซิเตต ละลายหมด (30 นาที) จึงค่อย ๆ หยดไททานเนียมบิวทอกไซด์ 3.4034 g ลงในแบบเรียมอะซิเตต ที่ละลายในกรดอะซิติกพร้อมปั่นกวน และให้ความร้อนที่ 70 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการปรับปริมาตรโดยเอทานอลบริสุทธิ์ในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 ml จากนั้นซึ่งพอลิเอทิลีนออกไซด์ 0.0733 g ละลายในเอกซาทันเป็นเอกซาทันที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นองูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอทานอลบริสุทธิ์ ปั่นกวนพร้อมให้ความร้อนที่  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที จนได้สารละลายใส จึงนำไปผสมเข้ากับสารละลายผสมสีเหลือง ระหว่างแบเรียมไททาเนต และไททาเนียมบิวทอกไซด์ปั่นกวนพร้อมให้ความร้อนที่  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที จะได้สารละลายสีเหลืองขุ่นเพื่อใช้ในการฉีด ฉีดสารละลายด้วยเครื่องผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยใช้อัตราการฉีดเท่ากับ  $0.5\text{ ml/hr}$  ใช้แรงดันไฟฟ้า  $10\text{ kV}$  และปลายเข็มอยู่ห่างจากแผ่นโลหะรองรับ  $15\text{ cm}$  จากนั้นนำเส้นใยที่ได้จากการฉีดมาเผาที่อุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยอัตราการขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ  $2\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  คงไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพิ่มอุณหภูมิเป็น  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  อัตราการเพิ่มเท่ากับ  $5\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$  คงไว้เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงโดยอัตราการลดอุณหภูมิอยู่ที่  $10\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$  แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงอุณหภูมิ ระยะเวลา และอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิในการสังเคราะห์

### 3.3.2 การเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต (Barium titanate composite)

นำสารประกอบแบเรียมไททาเนตที่มีสัณฐานวิทยาเป็นเส้นใยนาโน และอนุภาคนาโนไปสั่นในเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) โดยปรับอัตราส่วนระหว่างเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตโดย  $0.01\text{ g}$  เท่ากับ  $100\%$  ดังแสดงในตารางที่ 3.1 แล้วนำไปใส่ขวดแก้ว เติมน้ำเอทานอล ปิดฝาจากนั้นนำไปสั่นที่เครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที นำขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิทที่ทำการต่อขั้วแล้วมาวางบนเครื่องให้ความร้อนแล้วทำการหยดสารที่อยู่ในขวดแก้วลงบนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิทที่ทำการต่อขั้วแล้ว จากนั้นนำพอลิไดเมทิลซิลอกเซนมาหล่อทับบนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิทที่มีแบเรียมไททาเนตที่ระเหยเอทานอลออกจนหมด

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนระหว่างเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต

เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (%)	100	90	70	50	30	10	0
อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (%)	0	10	30	50	70	90	100

### 3.4 เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์

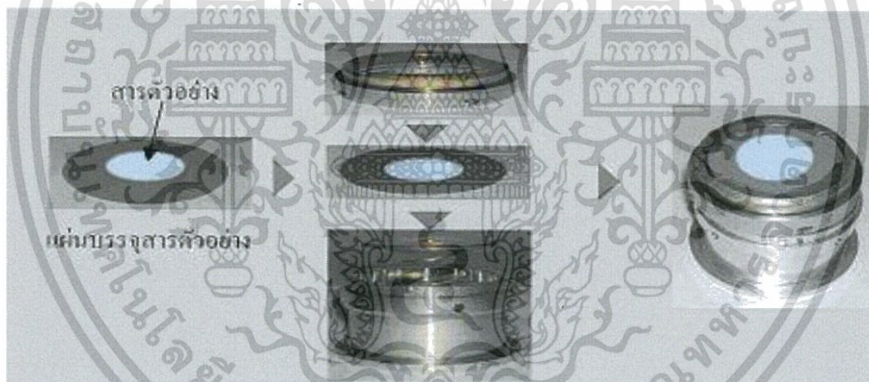
#### 3.4.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การตรวจสอบตัวอย่างที่เป็นผงเริ่มจากการนำสารตัวอย่างปริมาณเพียงเล็กน้อยมาผสมกับโพแทสเซียมโบไมด์ (KBr) ที่ปราศจากความชื้นบดสารให้ละเอียดโดยให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอใส่ตัวอย่างที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์ และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ให้อยู่ได้สภาวะที่ความดันประมาณ  $10^4$  ingsไว้ 2 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาถอดตัวประกบแม่พิมพ์ออก ตัวอย่างจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์ มีลักษณะเป็นวงกลมโปร่งแสง และตัวอย่างจะกระจายอยู่บนโพแทสเซียมโบไมด์ (KBr) จากนั้นจึงนำสารตัวอย่างไปตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

หมายเหตุ โพแทสเซียมโบไมด์ไม่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วง  $4000 - 666 \text{ cm}^{-1}$  แต่โพแทสเซียมโบไมด์ดูดความชื้น ได้เร็วมากแม้จะระมัดระวังความชื้นเป็นพิเศษก็อาจมีความชื้นหลงเหลืออยู่

#### 3.4.2 เครื่องตรวจการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

นำเส้นใยนาโนมาบดให้ละเอียด ใส่สารตัวอย่างในภาชนะสำหรับใส่สารตัวอย่าง เกลี่ยให้ทั่วให้ผิวของตัวอย่างเรียบและเสมอกับขอบของแผ่นที่บรรจุ นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ไปใส่ที่ตำแหน่งตัวอย่างของเครื่อง ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่าง [34]

โดยใช้สภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25	°C
มุม เริ่มต้น - สิ้นสุด	10 - 80	องศา
Step size	0.02	องศา
Time step	1	วินาที

#### 3.4.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

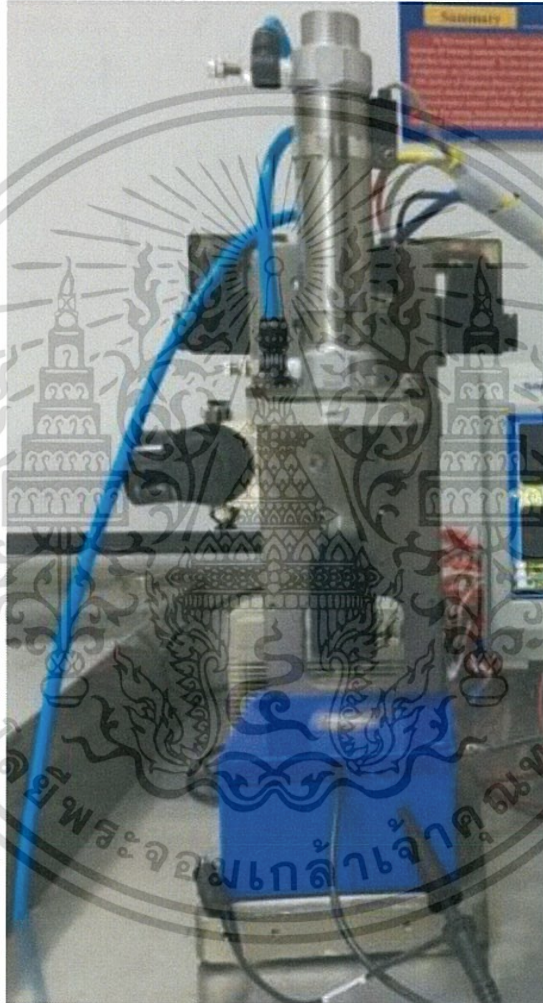
ติดคาร์บอนเทปบนสตัป (Stub) แล้วนำตัวอย่างไปโปรยบนคาร์บอนเทป จากนั้นนำไปเคลือบทองคำโดยเทคนิคสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปใส่บนแท่นรองรับตัวอย่างของเครื่องตรวจสอบเอกลักษณ์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยในการทดลองจะศึกษาลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางสัณฐานวิทยาของ เส้นใยก่อนเผา เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตหลังเผา อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต การกระจายตัวของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตบน ใยไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิท

### 3.4.5 ชุดการทดสอบแรงดันไฟฟ้าจากแรงกด

นำตัวอย่างวางบนแท่นกด ต่อขั้วไฟฟ้าดังรูปที่ 3.3 เปิดปั้มลมเพื่อให้แท่งกดเคลื่อนที่กดลงบน ตัวอย่าง สัญญาณที่ได้จะแสดงผลที่หน้าจอเครื่องออสซิลิโคป จากนั้นบันทึกผลโดยการกดบันทึกที่ หน้าจอและนำข้อมูลที่ได้มาพลอตกราฟ



รูปที่ 3.3 การวางชิ้นงานเพื่อตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าจากแรงกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

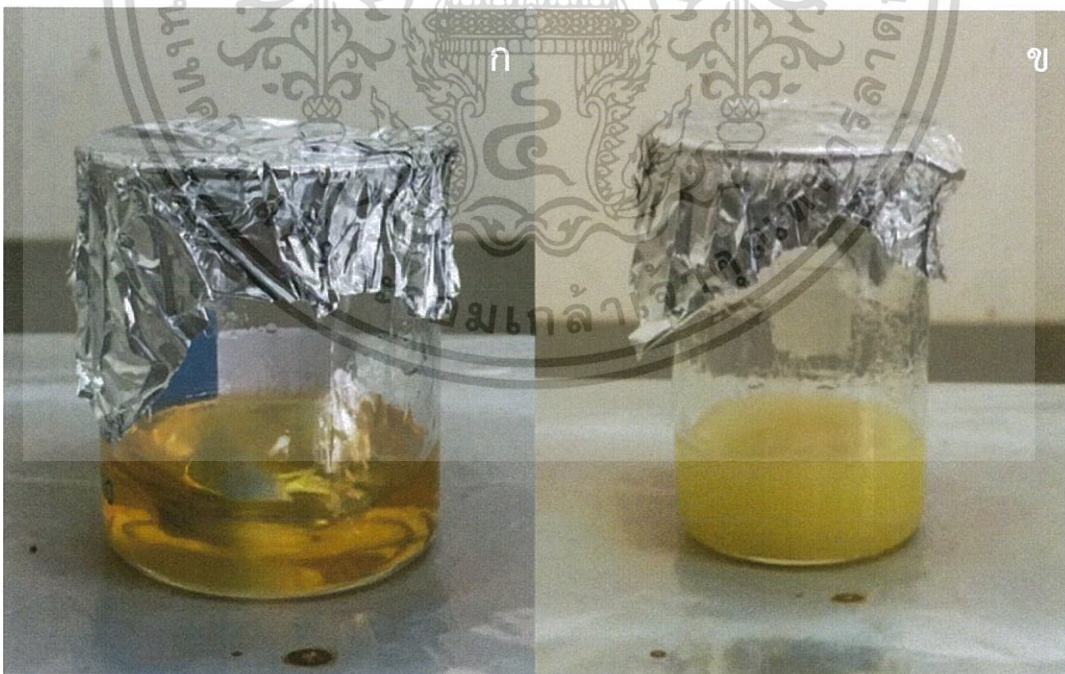
## บทที่ 4

### ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

4.1 การศึกษาการเตรียมวัสดุภาควิทยาระบายตัวของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ (Flexible piezoelectric composites) เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanofiber: BT nanofiber) และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanoparticle: BT nanoparticle)

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุภาควิทยาระบายตัวของ เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) ก่อนเผา หลังเผา และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

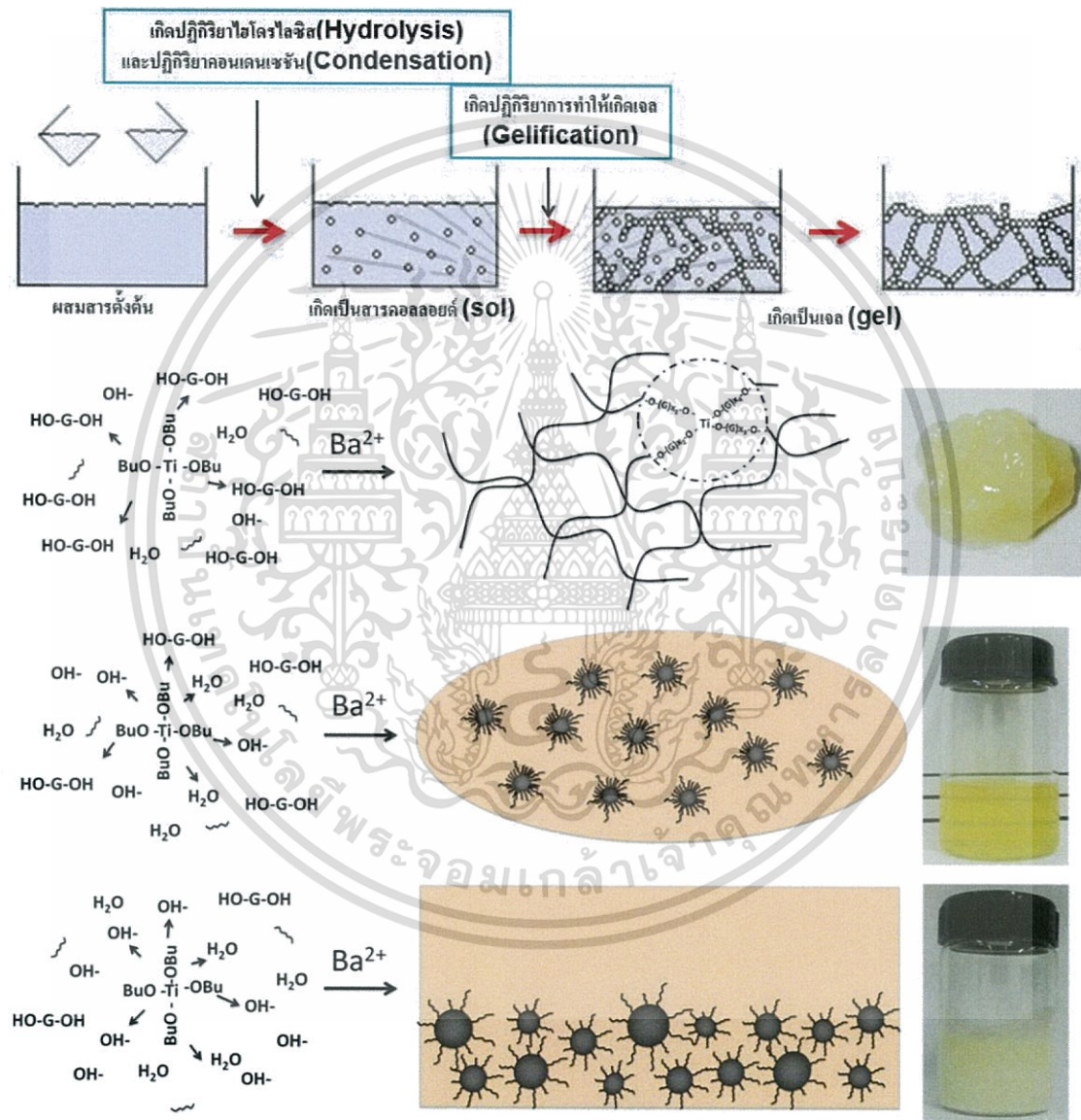
จากการตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผา หลังเผา และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต โดยศึกษาการเตรียมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตด้วยเทคนิคการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งทำการเตรียมสารด้วยวิธีโซลเจลจากการนำแบเรียมอะซิเตทที่ละลายในกรดอะซิติกผสมด้วยไททาเนียมบิวทอกไซด์จะได้สารละลายสีเหลืองใส ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) จากนั้นผสมกับพอลิเอทิลีนออกไซด์ที่ละลายในเอทานอลจะได้สารละลายสีเหลืองขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข)



รูปที่ 4.1 ลักษณะของสารที่เตรียมได้ด้วยวิธีโซลเจล (ก) สารละลายผสมระหว่างแบเรียมอะซิเตท และไททาเนียมบิวทอกไซด์ (ข) สารละลายผสมระหว่างแบเรียมอะซิเตท ไททาเนียมบิวทอกไซด์ และพอลิเอทิลีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเกิดพันธะเคมีตามแบบจำลองโซลเจลโดยเมื่อนำสารตั้งต้นมาผสมกันแล้วจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) คือ ปฏิกิริยาที่มีน้ำเข้าไปสลายพันธะ ทำให้สารโมเลกุลใหญ่ แตกตัวเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลง และเกิดปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation) เป็นปฏิกิริยารวมตัวของมอนอเมอร์ที่มีการกำจัดบางส่วนของมอนอเมอร์ออกไป โดยเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิเมอร์ และสารอื่น ๆ ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก จนเกิดเป็นสารประกอบคอลลอยด์ จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาการทำให้เป็นเจล (Gelification) เนื่องจากสารประกอบที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาควบแน่น-เซชันต่อไปจนเกิดเป็นร่างแหอยู่ในสถานะที่เรียกว่าเจล (Gel) ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แบบจำลองการเกิดพันธะเคมีด้วยวิธีโซลเจล (Sol-gel) ดัดแปลงมาจาก [40]

เมื่อสารพร้อมสำหรับกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจะใช้สารละลายในการฉีดยา 10 ml ในกระบอกฉีดยา อัตราในการฉีดยาเป็น 0.5 ml/hr ความต่างศักย์ 10 kV และระยะห่างของปลายเข็มฉีดยา และแท่นรองรับห่างประมาณ 15 cm โดยมีสายลitzหมพูนีบบริเวณเข็มฉีดยาทำหน้าที่เป็นขั้วลบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

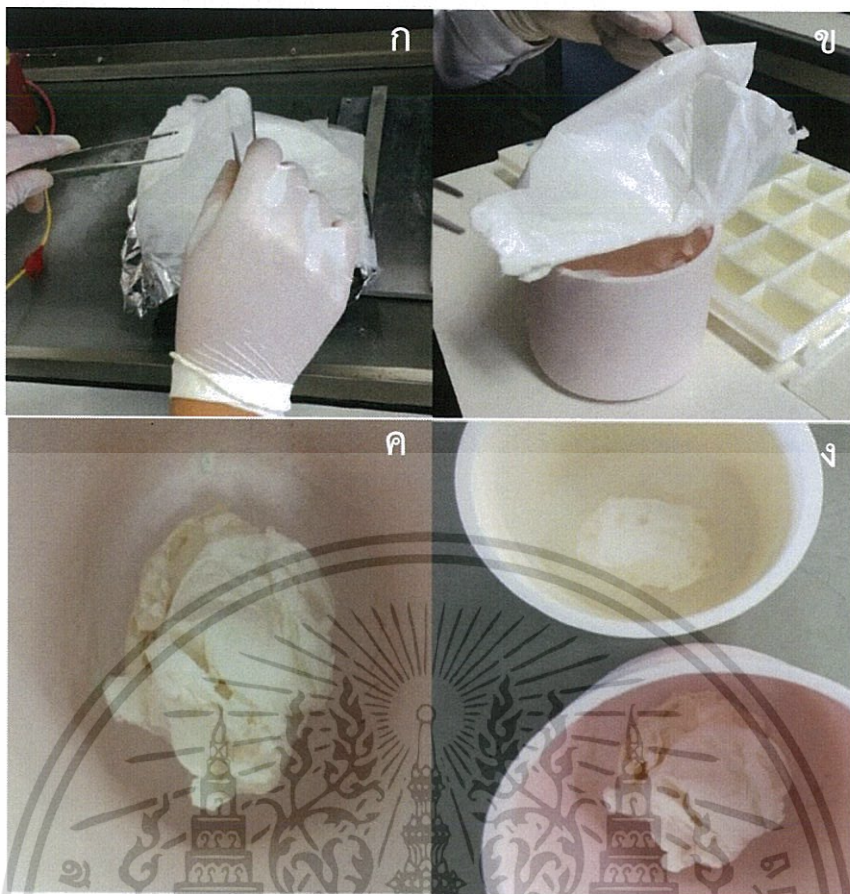
และสายสีเหลืองหนีบที่แท่นรองรับเส้นใยทำหน้าที่เป็นขั้วบวก ซึ่งทั้งสองสายนั้นต่อมาจากเครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้า ดังแสดงในรูป 4.3



รูปที่ 4.3 ชุดการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) (ก) เครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้า (ข) ตำแหน่งของการติดตั้งเครื่องมือในการผลิตเส้นใย

ลักษณะของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่ได้ก่อนเผา ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) มีลักษณะเป็นแผ่นสีขาว บางเบา ฉีกขาดง่ายคล้ายทิชชู เมื่อนำไปเผาแล้ว ลักษณะของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่ได้หลังเผา ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ค) และ (ง) มีลักษณะเป็นแผ่นที่หดลงเป็นก้อน เมื่อโดนกระทบจะทำให้แตกออกเป็นผงได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

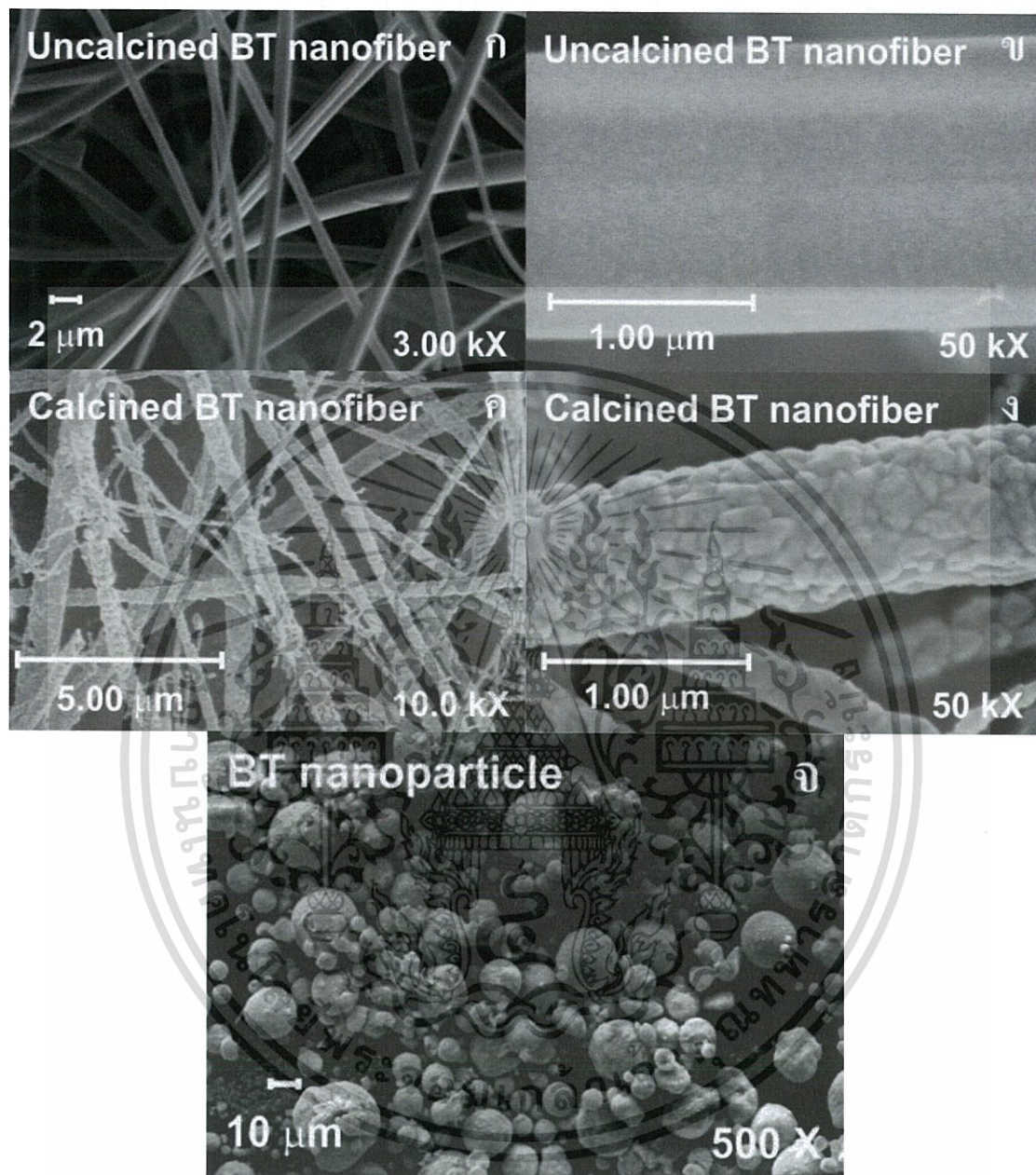


รูปที่ 4.4 ลักษณะของ (ก) และ (ข) เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผา (ค) และ (ง) เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตหลังเผา

จากนั้นจึงทำการศึกษาลักษณะของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผา หลังเผา และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผา ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) และ (ข) มีลักษณะเป็นเส้นใยที่เป็นเส้นยาวต่อเนื่องกัน พื้นผิวมีความเรียบ เนื่องจากถูกผสมด้วยพอลิเอทิลีนออกไซด์ซึ่งเคลือบบนพื้นผิว โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ  $1.59 \pm 0.018 \mu\text{m}$  เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตหลังเผาดังรูปที่ 4.5 (ค) และ (ง) พบว่าเส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นแตกหักเล็กน้อย มีพื้นผิวที่ขรุขระ เนื่องจากการเกิดการจัดเรียงตัวผลึกของแบเรียมไททาเนตในขั้นตอนของการเผาเส้นใยที่อุณหภูมิสูง โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ  $895 \pm 18.18 \text{ nm}$  ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ที่ผสมเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ให้เป็นเส้นใยถูกสลายตัวในขั้นตอนของการเผา โดยในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า  $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$  มีการสลายตัวของความชื้น และตัวทำละลายต่าง ๆ ที่ถูกขังในเส้นใย ในช่วงอุณหภูมิ  $400 - 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$  มีการสลายตัวของพอลิเอทิลีนออกไซด์ ในช่วงอุณหภูมิ  $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เกิดเกรนของแบเรียมไททาเนตขึ้นจึงทำให้พื้นผิวมีความขรุขระ ผลการตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้าขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $50 \text{ nm}$  ความบริสุทธิ์  $99.95\%$  ผลิตโดย บริษัท อินฟราแมท แอดวานซ์ แมททีเรียล (Inframat advance material) ดังรูป 4.5 (จ) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตไม่ได้เป็นขนาดนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างแท้จริง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $9.67 \pm 4.77 \mu\text{m}$  เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต



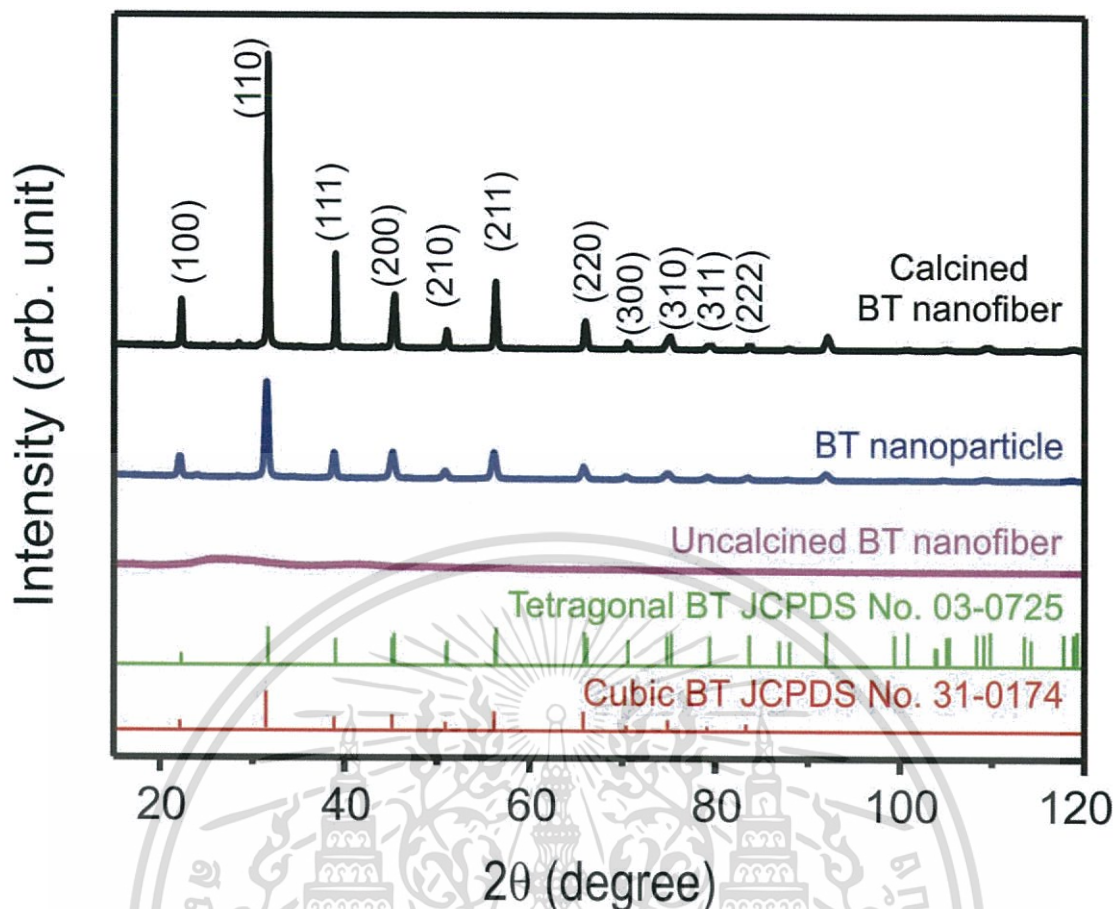
รูปที่ 4.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ (ก) และ (ข) เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผา (ค) และ (ง) เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตหลังเผา และ (จ) ลักษณะอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกิดการค้ำ

#### 4.1.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) ก่อนเผา หลังเผา และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique: XRD)

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผา หลังเผา และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XRD) แสดงดังรูปที่ 4.6 จากการวิเคราะห์ในเบื้องต้น โดยนำรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จากข้อมูลมาตรฐาน ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลมาตรฐานชุด JCPDS หมายเลข 31-0174 รูปที่ 4.6 เส้นสีแดง ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานของสารประกอบเพอรอฟสไกต์แบบเรียมไททานเต ที่มีโครงสร้างแบบคิวบิก (Cubic) พบว่าเส้นโยนาโนแบบเรียมไททานเตก่อนเผาไม่ปรากฏพีคของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ดังรูปที่ 4.6 เส้นสีชมพู เนื่องจากการตรวจสอบโดยใช้รังสีเอ็กซ์เพื่อหาโครงสร้างผลึกของวัสดุต้องอาศัยหลักการเลี้ยวเบนผ่านระนาบผลึกของวัสดุในทางผลึกศาสตร์ (Crystallography) ใช้รังสีเอ็กซ์ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของวัสดุ โดยอาศัยการเลี้ยวเบนผ่านระนาบของผลึกของวัสดุด้วยกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งแผนภาพที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะมีลักษณะที่จำเพาะเจาะจงสำหรับวัสดุแต่ละชนิด จะเห็นได้ว่าเส้นโยนาโนแบบเรียมไททานเตก่อนเผานั้นยังไม่มีความเป็นผลึกจึงไม่ปรากฏพีคของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เนื่องจากเส้นโยนาโนแบบเรียมไททานเตก่อนเผายังไม่มีความเป็นผลึกยังเป็นเพียงแค่น้ำแบบเรียมไททานเตที่แขวนลอยอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์เพื่อทำการขึ้นรูปให้เป็นเส้นใยได้ ซึ่งแตกต่างกับอนุภาคนาโนแบบเรียมไททานเต และเส้นโยนาโนแบบเรียมไททานเตหลังจากการเผาที่อุณหภูมิสูง ที่ปรากฏพีคของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ดังรูปที่ 4.6 เส้นสีน้ำเงิน และเส้นสีดำตามลำดับ และมีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแบบเรียมไททานเต โดยพบพีคขึ้นที่มุม  $2\theta$  21.047 31.659 38.718 44.930 50.790 55.968 65.381 69.688 74.442 78.549 และ  $82.748^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (100) (110) (111) (200) (210) (211) (220) (300) (310) (311) และ (222) ตามลำดับ ซึ่งมีโครงสร้างเพอรอฟสไกต์แบบคิวบิก แต่เนื่องจากมีพีคที่ไม่มีความสมมาตร อาจเป็นพีคที่มีการซ้อนทับกับอยู่จึงทำการขยายพีคที่ตรงกับระนาบ (200) (211) (220) ดังรูปที่ 4.6 พบว่าเป็นพีคที่ไม่สมมาตรกัน จึงทำการเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากข้อมูลมาตรฐานชุด JCPDS หมายเลข 03-0725 รูปที่ 4.6 เส้นสีเขียว ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานของสารประกอบเพอรอฟสไกต์แบบเรียมไททานเต ที่มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) พบว่ามีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแบบเรียมไททานเตโดยพบพีคขึ้นที่มุม  $2\theta$  22.208 31.610 38.900 45.310 51.017 56.241 66.012 70.588 75.0381 79.351 และ  $83.513^\circ$  ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (100) (110) (111) (200) (210) (211) (220) (300) (310) (311) และ (222) ตามลำดับ มีโครงสร้างเพอรอฟสไกต์แบบเตตระโกนอล อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เบื้องต้น พบว่าอนุภาคนาโนแบบเรียมไททานเตเกรดการค้า และเส้นโยนาโนแบบเรียมไททานเตหลังเผาที่ได้จากการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการโซเจล (Sol-gel) และทำการฉีดยกด้วยกระบวนการสังเคราะห์เส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) ไม่เกิดการเปลี่ยนโครงสร้าง หรือมีเฟสแปลกปลอมอื่น ๆ เกิดขึ้น จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยรวมที่ได้



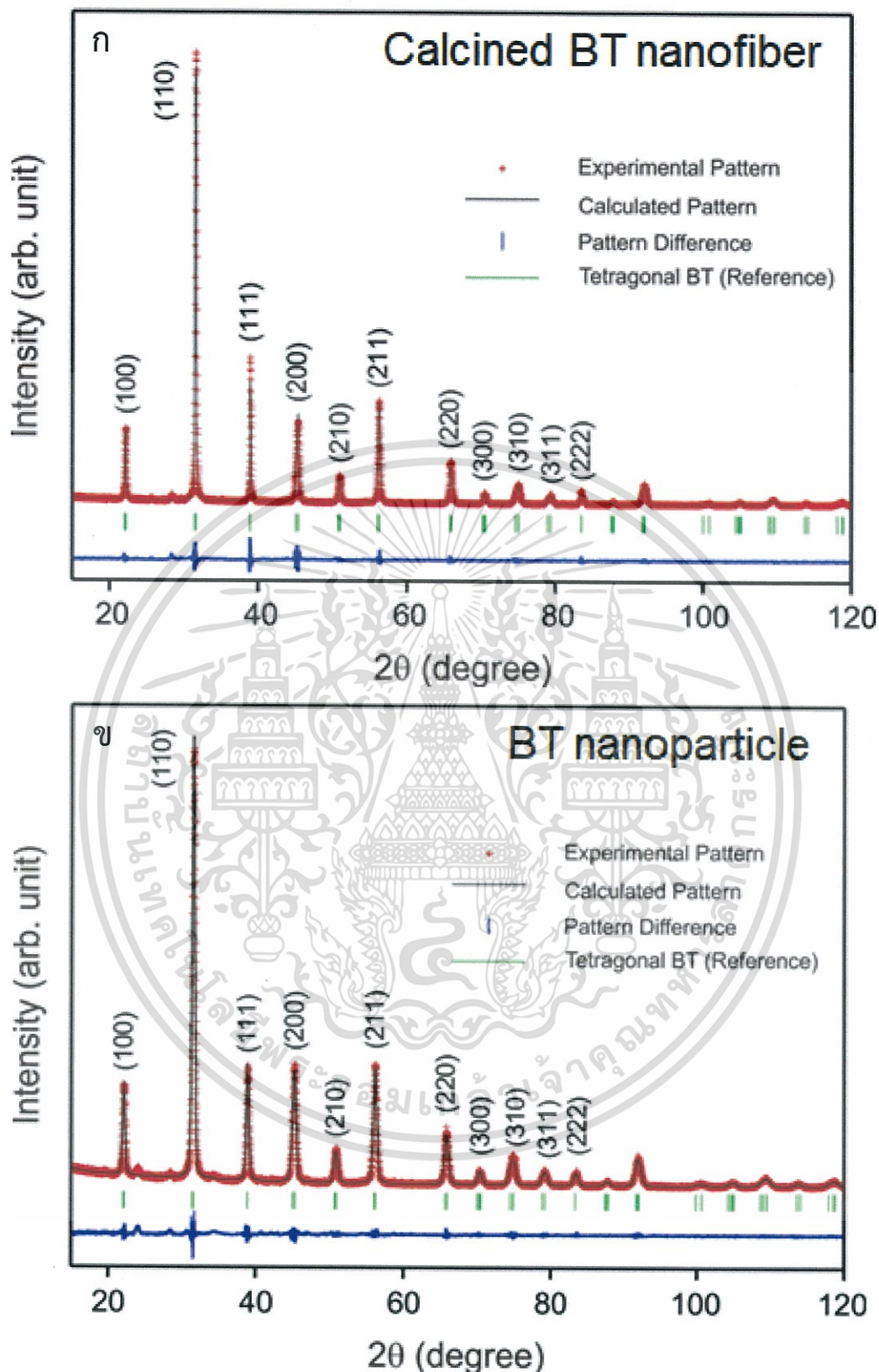
รูปที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) ก่อนเผา หลังเผา และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle)

ต่อมาได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลทางโครงสร้างเชิงลึกของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตหลังเผา และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า เนื่องจากกระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกวิทยาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ข้างต้นนั้นมีความสำคัญโดยเฉพาะวัสดุพหุผลึกซึ่งมีความซับซ้อนของโครงสร้างมากกว่าผลึกเดี่ยว อันเนื่องมาจากการที่พหุผลึกนั้นมีการเรียงโครงสร้างแบบสุ่ม (Random orientation) ส่งผลให้พีคของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ได้เกิดการซ้อนทับกัน (Overlap) ของข้อมูล ดังนั้นชุดข้อมูลดิบที่ได้จึงยากแก่การทำการวิเคราะห์ และอาจทำให้ไม่สามารถสรุปผลของโครงสร้างของผลึกได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำเพื่อเป็นการยืนยันว่าสารที่ทำการสังเคราะห์ได้มีโครงสร้างเป็นแบเรียมไททาเนตแบบคิวบิก หรือเตตระโกนอล ด้วยกระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างรีทเวลดต์ โดยการใช้ซอฟต์แวร์ JANA 2006 (Rietveld Refinement Analysis by JANA 2006) แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีคุณภาพ และเป็นที่ยอมรับในกลุ่มงานวิจัยในปัจจุบัน [41] โดยจำลองรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ สำหรับโครงสร้างแบบต่าง ๆ เพื่อนำมาเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตหลังเผา และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้าที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือให้ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดเพื่อยืนยันโครงสร้างที่แม่นยำ โดยในการจำลองรูปแบบการเลี้ยวเบนโครงสร้าง นั้นอาศัยหลักการประมาณค่าจากตัวแปรทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด [42]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วนำตัวแปรทางคณิตศาสตร์เขียนออกมาในรูปแบบสมการเส้นโค้งก่อนนำมาเปรียบเทียบ หรือที่เรียกว่า ฟิต เข้ากับของมูลดิบที่ได้ ตัวอย่างของตัวแปรทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณ ได้แก่ รูปร่างพิก ความกว้างพิก และการจัดเรียงของเซลล์หน่วย เป็นต้นจากนั้นนำแต่ละสมการทางคณิตศาสตร์ของแต่ละตัวแปรมาทำการฟิตเข้ากับข้อมูลดิบแล้วทำการเปรียบเทียบรูปแบบที่ได้จากการทดลองจริง กับรูปแบบที่ได้จากการจำลองโครงสร้างที่คำนวณได้ โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ค่าที่น้อยที่สุด ในงานวิจัยนี้ทำการเทียบกับไฟล์ข้อมูลมาตรฐานของโครงสร้างผลึก (Crystallographic information standard) จากแหล่งข้อมูล คือ เว็บไซต์ Inorganic crystal database หมายเลข ICSD - 67520 แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยเครื่องหมายวงสี่แฉกแสดงในรูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากเครื่องมือ เส้นสีดำในรูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ เส้นแนวตั้งสีเขียวในรูปที่ 4.7 แสดงระนาบ  $h$   $k$   $l$  และเส้นสีน้ำเงินในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ และจากการคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ ผลที่ได้พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตหลังเผา และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบแบเรียมไททาเนต โครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลตรงกับไฟล์ข้อมูลมาตรฐานของโครงสร้างผลึก หมายเลข ICSD - 67520 ดังกล่าว พบว่าอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต มีค่าแลตทิซพารามิเตอร์ ( $a=b \neq c$ ) ใกล้เคียงกับค่าแลตทิซพารามิเตอร์จากข้อมูลมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 4.1

โดยการยืนยันผลการวิเคราะห์ที่มีความน่าเชื่อถือที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงลึกด้วยวิธีรีฟายน์เมนต์โดยใช้ซอฟต์แวร์ JANA 2006 (Rietveld Refinement Analysis by JANA 2006) นั้นจะขึ้นอยู่กับกลุ่มค่าวัดความถูกต้องที่เรียกว่า R-factors อันประกอบด้วย  $R_p$  (Profile R-factor) คือค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากสมการกำลังสองน้อยที่สุด  $R_{wp}$  (Weighted profile R-factor) คือค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักที่ได้จากความเข้มของพิก  $R_{exp}$  (Expected R-factor) คือค่าประมาณที่ดีที่สุดของค่า  $R_{wp}$  และ  $R_{obs}$  (Observed R-factor) คือค่า  $R$  ที่เป็นไปตามลักษณะเฉพาะของโครงสร้าง และ ภูมิภาคที่เป็นโดยค่า  $R$  เหล่านี้ควรจะมีค่าน้อยกว่า 10 จึงจะถือว่าผลของการวิเคราะห์โครงสร้างนี้มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าค่า  $R$  เหล่านี้มีค่าต่ำกว่า 10 ส่วนคุณภาพความละเอียดของการทำโดยเฉลี่ยจะบอกด้วยค่าความเข้ากันของการฟิต (Goodness-of-fit : GOF) ซึ่งควรมีค่าน้อยกว่า 1 จึงจะถือว่าผลการวิเคราะห์โครงสร้างมีความน่าเชื่อถือ ในงานวิจัยนี้มีค่า GOF อยู่ที่ 1.11 และ 1.50 ดังแสดงในตารางที่ 4.1



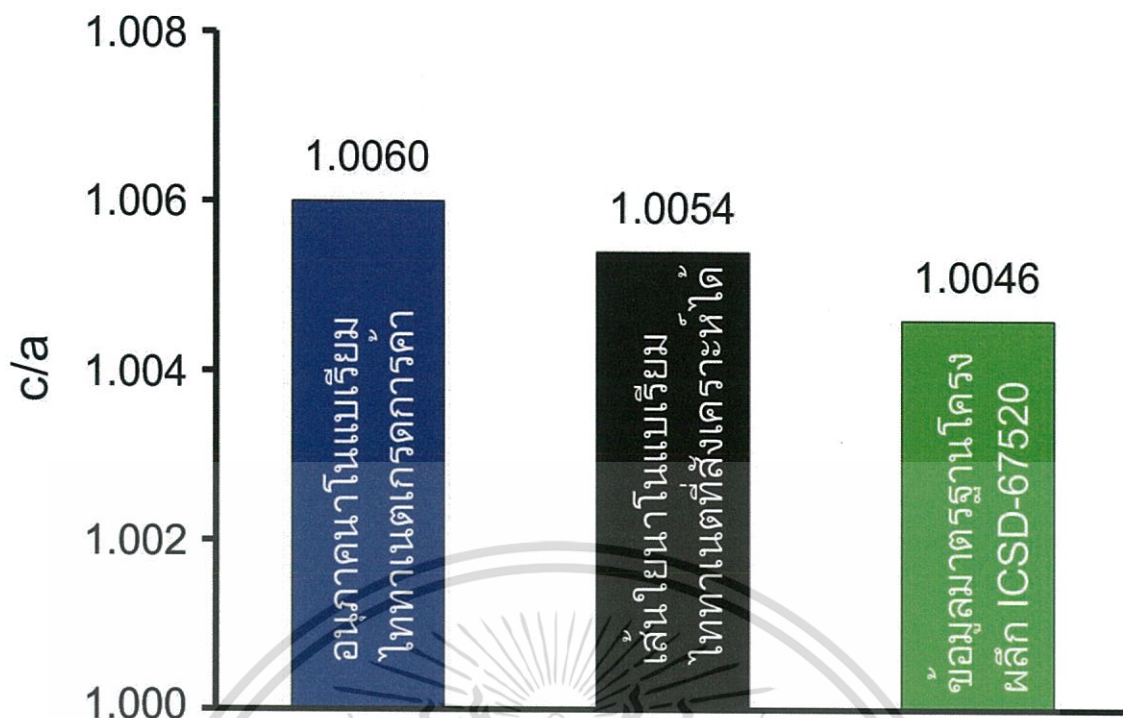
รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์หลังผ่านการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีรีดเวลดโดยการใชซอฟต์แวร์ JANA 2006 (Rietveld Refinement Analysis by JANA 2006) (ก) เส้นใยนาโนแบบเรียงไททาเนต (BT nanofiber) (ข) อนุภาคนาโนแบบเรียงไททาเนต (BT nanoparticle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลของตัวแปร (Parameters) ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีรีฟิเนเมนต์โดยการ  
ใช้ซอฟต์แวร์ JANA 2006 (Rietveld Refinement Analysis by JANA 2006)

	อนุภาคนาโน แบเรียมไททาเนต	เส้นใยนาโน แบเรียมไททาเนต	ข้อมูลมาตรฐานของ โครงสร้างผลึก ICSD - 67520
โครงสร้างผลึก	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล
กรุปปริภูมิ (space group)	P4mm	P4mm	P4mm
a (Å)	$4.0027 \pm 0.0003$	$3.9997 \pm 0.0002$	3.9998
c (Å)	$4.0269 \pm 0.0005$	$4.0212 \pm 0.0002$	4.0180
c/a	$1.0060 \pm 0.0004$	$1.0054 \pm 0.0002$	1.0046
R <sub>p</sub>	6.55	7.49	
R <sub>wp</sub>	9.72	10.79	
GOF	1.11	1.5	

อัตราส่วนระหว่างค่าความเป็นเตตระโกนอล (c/a) ของวัฏภาคกระจายตัวของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต ซึ่งมีค่ามากกว่าของข้อมูลมาตรฐานโครงสร้างผลึก ICSD - 67520 โดยที่อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า มีค่าความเป็นเตตระโกนอลมากกว่าเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่สังเคราะห์ขึ้นเล็กน้อยดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 อัตราส่วนระหว่างค่าความเป็นเตตระโกนอลของวัสดุกระจายตัวของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber)

ค่าความเป็นเตตระโกนอลของแบเรียมไททาเนตจากไฟล์ข้อมูลมาตรฐานของโครงผลึก ICSD - 67520 เท่ากับ 1.0046 เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตเท่ากับ  $1.0054 \pm 0.0002$  และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเท่ากับ  $1.0060 \pm 0.0004$  จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่สังเคราะห์ได้นั้นมีค่าความเป็นเตตระโกนอลมากกว่าไฟล์ข้อมูลมาตรฐานที่เป็นแบเรียมไททาเนต โครงสร้างเพอโรฟสไกต์แบบเตตระโกนอล ซึ่งโครงสร้างแบบเตตระโกนอลจะมีแกน  $a = b \neq c$  แกน  $c$  จะยืดยาวกว่า และ  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  ค่าความเป็นเตตระโกนอลขึ้นอยู่กับ ค่า  $c/a$  ยิ่งมีค่ามากจะทำให้มีค่าความเป็นเตตระโกนอลมาก ซึ่งส่งผลกับสมบัติเพียโซอิเล็กทริกทำให้มีสมบัติสูงขึ้น เนื่องจากเกิดความไม่สมมาตรขึ้นในโครงสร้างเพอโรฟสไกต์เป็นผลมาจากแกน  $c$  ที่ยืดยาวขึ้น เมื่อโครงสร้างเตตระโกนอลใดมีแกน  $c$  ยาวกว่าจะมีความเป็นเพียโซอิเล็กทริกมากกว่า ดังนั้นเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่สังเคราะห์ได้นั้นมีค่าความเป็นเตตระโกนอลแต่น้อยกว่าอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต

เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ในการสังเคราะห์รวมถึงขนาดของอนุภาค และเส้นใยซึ่งค่าความเป็นเส้นใยของแบเรียมไททาเนตจะช่วยเพิ่มความเชื่อมโยงให้สารเพียโซอิเล็กทริกแบบอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตซึ่งมีค่าความเป็นเตตระโกนอลที่มากกว่า และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกอยู่ด้วยจะช่วยทั้งในเรื่องการกระจายตัวของเฟสกระจาย และมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกด้วยจากโครงสร้างที่ไม่สมมาตรของเพอโรฟสไกต์แบบเตตระโกนอล อัตราส่วนที่เหมาะสมของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่จะทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของสารเพียโซอิเล็กทริก และเพิ่มการกระจายตัวของสารเพียโซอิเล็กทริกซึ่งเป็นเฟสกระจายที่อยู่บนขั้วไฟฟ้า อินเทอร์ดิคิตที่อยู่ในวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยึดหยุ่นได้จะส่งผลให้วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยึดหยุ่นได้ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีประสิทธิภาพในการผลิตแรงดันไฟฟ้าส่งออกมากขึ้น ทั้งนี้จะรวมถึงองค์ประกอบหลาย ๆ อย่างที่นอกเหนือจากองค์ประกอบหลักอย่างอิทธิพลของเฟสกระจายแล้ว ที่จะ

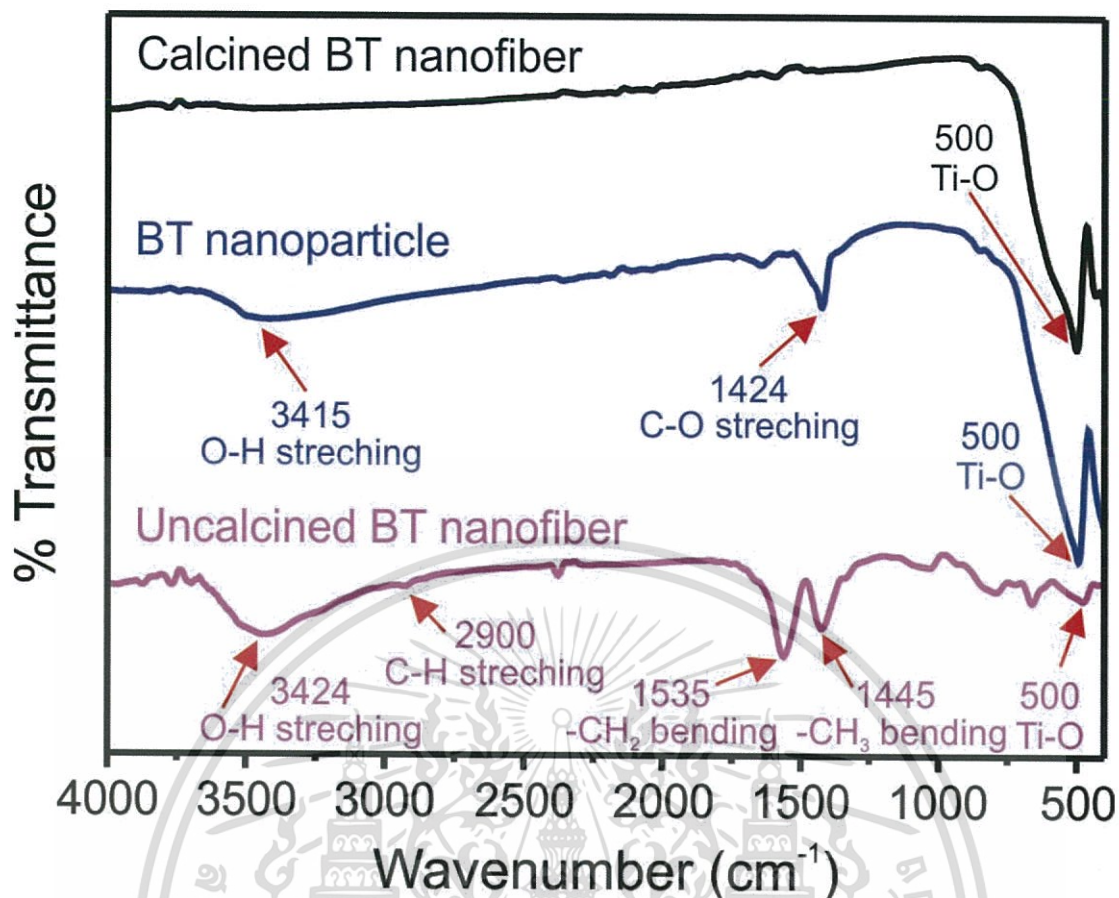
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้เชิงพาณิชย์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นปัจจัยในการที่จะทำให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้สูงขึ้น อย่างเช่นขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดสมบัติของวัสดุผสม วัสดุพอลิเมอร์ที่ช่วยในเรื่องความยืดหยุ่นและการรับแรงกระแทก การเตรียมชั้นของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ และรวมถึงการควบคุมอัตราส่วนขณะซึ่งตรง และหยดลงบนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดิทิจิให้มีความแม่นยำ ซึ่งจะมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้สูง ทั้งหมดนี้จะส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้

#### 4.1.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) ก่อนเผา หลังเผา และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometer: FT-IR)

จากการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในช่วงความยาวคลื่น  $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  เพื่อวิเคราะห์เอกลักษณ์ หมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผา และหลังเผา โดยการสังเคราะห์เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตจะใช้เทคนิคการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งใช้กระบวนการโซลเจลในการสังเคราะห์สารตั้งต้นที่ใช้ในการฉีดยาเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตโดยเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผ่าจะพบการดูดกลืนความยาวคลื่นที่หลากหลายเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของพันธะ (Stretching vibration) และการสั่นแบบงอของพันธะ (Bending vibration) โดยการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นที่  $3000 - 3600 \text{ cm}^{-1}$  ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผา สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H (O-H Stretching vibration) ซึ่งมาจากเอทานอลที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นใย และความชื้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าภายในเส้นใยแบเรียมไททาเนตยังคงมีเอทานอล และความชื้น พิศการดูดกลืนที่  $2900 \text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-H (C-H Stretching vibration) ของพอลิเอทิลีนออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เส้นใยแบเรียมไททาเนต พิศการดูดกลืนที่  $1535 \text{ cm}^{-1}$  และ  $1455 \text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับการสั่นแบบงอของพันธะ  $-\text{CH}_2$  และ  $-\text{CH}_3$  ( $-\text{CH}_2$ ,  $-\text{CH}_3$  Bending vibration) ตามลำดับซึ่งเกิดจากสายโซ่ของพอลิเอทิลีนออกไซด์ที่ใช้ พิศการดูดกลืนที่  $1030 \text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของ C-O (C-O Stretching vibration) จากพอลิเอทิลีนออกไซด์ ความชื้น และการสั่นแบบโยกของพันธะ  $\text{CH}_3$  ( $-\text{CH}_3$  Rocking vibration) และ พิศการดูดกลืนที่  $450 - 800 \text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ Ti-O หลังจากทำการเผาเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่  $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$  จะพบว่าพิศการดูดกลืนส่วนมากหายไป เนื่องจากสารอินทรีย์และความชื้นที่อยู่ภายในเส้นใยสลายไปที่อุณหภูมิในการเผา และจะปรากฏพิศการดูดกลืนที่  $500 \text{ cm}^{-1}$  ที่ชัดเจนมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของพันธะ M-O (Ti-O) ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต โดยการสั่นของพันธะ Ba-O จะอยู่ต่ำกว่า  $400 \text{ cm}^{-1}$  จึงไม่สามารถเห็นการสั่นของพันธะนี้ได้ อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้าที่ใช้จะพบการดูดกลืนในช่วง  $3415 \text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H และการดูดกลืนช่วง  $1424 \text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O ซึ่งเกิดจากความชื้น ดังรูปที่ 4.9 โดยเส้นสีชมพูแสดงถึงเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผา เส้นสีน้ำเงินแสดงถึงอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า และเส้นสีดำคือเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตหลังเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผา (Uncalcined BT nanofiber) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้า (BT nanoparticle) และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตหลังเผา (Calcined BT nanofiber) ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometer: FT-IR)

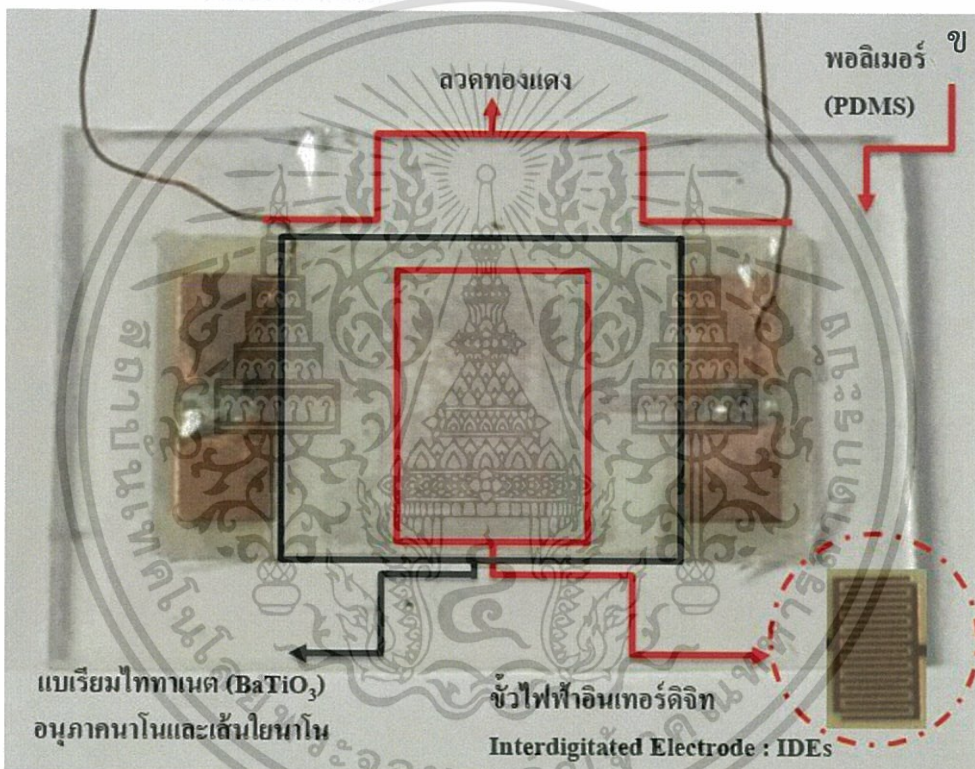
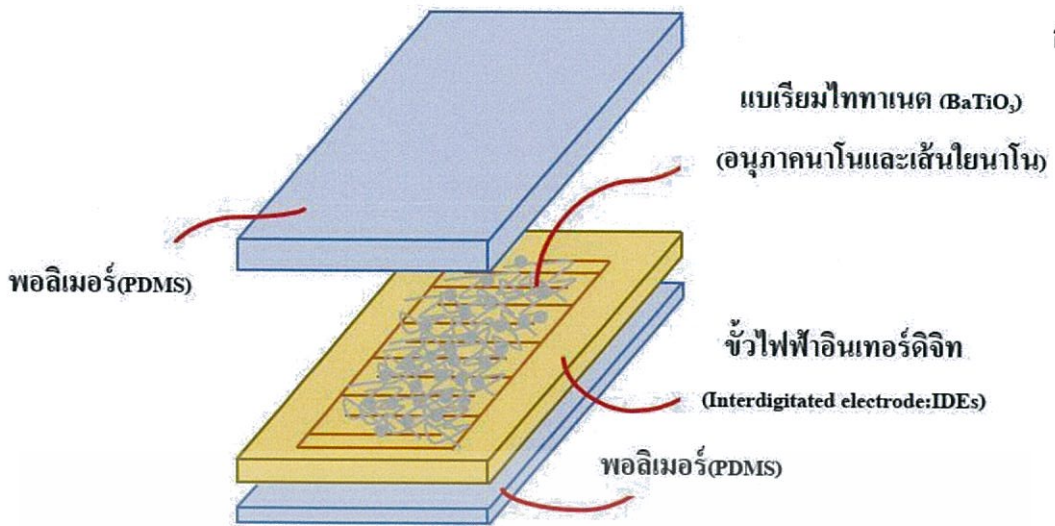
โดยงานวิจัยของ Chanisa Nawani [43] และคณะได้ศึกษาการเตรียมเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนตโดยกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และใช้กระบวนการโซลเจลในการสังเคราะห์สารตั้งต้น จากนั้นนำเส้นใยที่สังเคราะห์นำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีโดยเส้นใยที่ฉีดออกมาก่อนนำไปเผาจะพบการดูดกลืนในช่วง  $3400\text{ cm}^{-1}$   $1600\text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด และการสั่นแบบงอของพันธะ O-H ตามลำดับ การดูดกลืนช่วง  $2900\text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-H การดูดกลืนในช่วง  $1450\text{ cm}^{-1}$   $1337\text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับการสั่นแบบงอของพันธะ  $\text{-CH}_2$  และ  $\text{-CH}_3$  ตามลำดับ ซึ่งมาจากพอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์สารตั้งต้นในการฉีดเส้นใยนาโนเลดเซอร์โคเนต การดูดกลืนช่วง  $1020\text{ cm}^{-1}$  และ  $1048\text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของ C-O และการสั่นแบบโยกของ  $\text{-CH}_3$  ตามลำดับ หลังจากนำเส้นใยที่ได้ออกมาไปเผาแล้วจะพบการดูดกลืนในช่วง  $548\text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับการดูดกลืนของพันธะ M-O (Zr-O)

## 4.2 การศึกษาการเตรียมวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ (Flexible piezoelectric composites) ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) และพอลิไดเมทิลซิลลอกเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS)

### 4.2.1 ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกมีวิฎภาคกระจายคือเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) และวิฎภาคหลักคือพอลิไดเมทิลซิลลอกเซน (Polydimethylsiloxane: PDMS)

จากการเตรียมวัสดุผสมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต กับพอลิไดเมทิลซิลลอกเซนโดยมีแบบจำลองดังรูปที่ 4.10 (ก) โดยมีวิฎภาคกระจายตัว ได้แก่ เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ในอัตราส่วน 100%:0% 90%:10% 70%:30% 50%:50% 30%:70% 10%:90% และ 0%:100% ตามลำดับ กระจายตัวอยู่บนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิท แล้วคลุมด้วยพอลิไดเมทิลซิลลอกเซน โดยลักษณะของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ที่สังเคราะห์ขึ้นมาแสดงดังรูปที่ 4.10 (ข) โดยมีเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตกระจายตัวอยู่บนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิท แล้วถูกคลุมทั้งชิ้นงานด้วยพอลิไดเมทิลซิลลอกเซนตามแบบจำลอง วัสดุเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ที่เตรียมขึ้นมาจะมีเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตกระจายตัวอยู่บนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิทที่ทำการต่อขั้วด้วยลวดทองแดง ที่ต่อจากขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิทกับลวดทองแดงเพื่อที่จะให้ลวดทองแดงเป็นตัวช่วยในการวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตส่งผ่านแรงดันไฟฟ้าส่งออกได้ ซึ่งชิ้นงานจะถูกคลุมด้วยพอลิไดเมทิลซิลลอกเซน โดยขนาด ความยาว x ความกว้าง ของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่นเท่ากับ  $3.3 \times 2.1$  cm ดังรูปที่ 4.10 (ค) และ (ง) เมื่อทดสอบให้แรงเชิงกล เช่น แรงบิด การโค้งงอ การตัด แก้ววัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่นได้พบว่าวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ที่เตรียมได้นั้นมีความยืดหยุ่นบางส่วน ดังรูปที่ 4.10 (จ) และ (ฉ) เนื่องจากขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิทที่ใช้มีความแข็งบิดตัวหรือโค้งงอได้ยาก ทำให้มีความยืดหยุ่นตัวต่ำ แต่พอลิไดเมทิลซิลลอกเซนที่ถูกใช้ในการคลุมขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิทมีความยืดหยุ่นตัวสูง จึงเป็นตัวช่วยให้วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่นได้สามารถรับแรงเชิงกลได้เพิ่มขึ้น เช่น การยืดหยุ่นตัว บิดงอ โค้งงอ หรือการตัด วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ที่เตรียมได้จึงมีความยืดหยุ่นตัว บิดตัว หรือโค้งงอได้บางส่วน แต่เมื่อวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตถูกใช้งานอย่างต่อเนื่องหรือเป็นเวลานาน พอลิไดเมทิลซิลลอกเซนที่คลุมบนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิทอาจเกิดความเสียหายหรือเสื่อมสภาพ เนื้อของพอลิไดเมทิลซิลลอกเซนภายในชิ้นงานฉีกขาดหรือแตกออก ทำให้ประสิทธิภาพของวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตในการส่งออกแรงดันไฟฟ้าต่ำลง และมีขีดจำกัดในการใช้งาน

ก



รูปที่ 4.10 (ก) แบบจำลองภายในของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ (ข) ลักษณะทางกายภาพของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ (ค) และ (ง) ขนาดความยาว และความกว้างของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ (จ) และ (ฉ) การโค้งงอของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

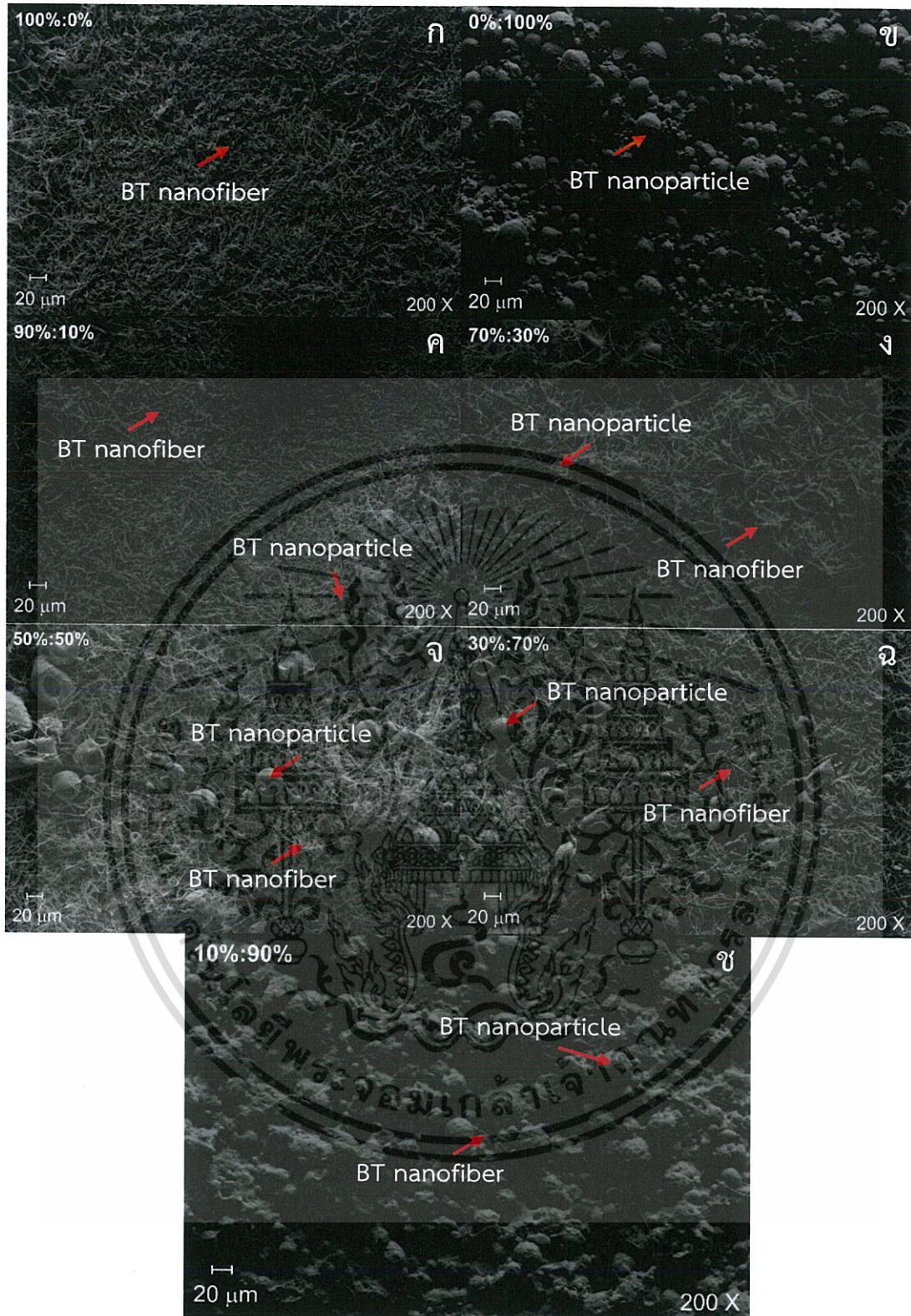
4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ ที่มีวัฏภาคกระจายคือ เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

หลังจากการเตรียมวัสดุผสมระหว่างเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต กับพอลิโอดีเมทิลไซลอกเซน จากนั้นนำวัสดุที่เตรียมได้ ได้แก่ วัสดุผสมระหว่างเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต กับพอลิโอดีเมทิลไซลอกเซนในอัตราส่วนดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนระหว่างเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต

เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (%)	100	90	70	50	30	10	0
อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (%)	0	10	30	50	70	90	100

จากนั้นนำวัสดุผสมทั้งหมดที่ได้ไปทำการตรวจวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูป 4.11 (ก) แสดงการกระจายตัวของวัสดุผสมที่มีแต่เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตเพียงชนิดเดียว จะพบว่ามี การกระจายตัวของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตอย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่รูป 4.11 (ข) แสดงการกระจายตัวของวัสดุผสมที่มีแต่อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเพียงชนิดเดียวมีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตต่ำ เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันระหว่างอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และรูปที่ 4.11 (ค) (ง) (จ) (ฉ) และ (ช) แสดงการกระจายตัวของวัสดุผสมระหว่างเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตในอัตราส่วน 90%:10% 70%:30% 50%:50% 30%:70% และ 10%:90% ตามลำดับ พบว่าในรูปที่ 4.11 (ค) การกระจายตัวของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตบางส่วนจนแทบไม่เห็นในขณะที่เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตบางส่วนเกิดการแตกหักและมีการทับถมกัน เนื่องจากมีปริมาณของเส้นใยมากกว่า ในรูปที่ 4.11 (ง) มีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเพิ่มขึ้นบางส่วนในขณะที่เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตบางส่วนเกิดการแตกหัก และมีการทับถมกัน เนื่องจากมีปริมาณของเส้นใยมากกว่า ในรูปที่ 4.11 (จ) มีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตใกล้เคียงกับการกระจายตัวของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตบางส่วนเกิดการแตกหักแต่อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตบางส่วนเริ่มเกิดการเกาะกลุ่มกัน ในรูปที่ 4.11 (ฉ) มีการกระจายตัวของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่เกิดการแตกหักบางส่วนในอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตบางส่วนที่เกิดการเกาะกลุ่มกันและเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตจะเป็นตัวช่วยให้อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตกระจายตัวได้ดีขึ้น ในรูปที่ 4.11 (ช) มีการกระจายตัวของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่เกิดการแตกหักส่วนน้อยจนแทบมองไม่เห็นในอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตบางส่วนที่เกิดการเกาะกลุ่มกัน



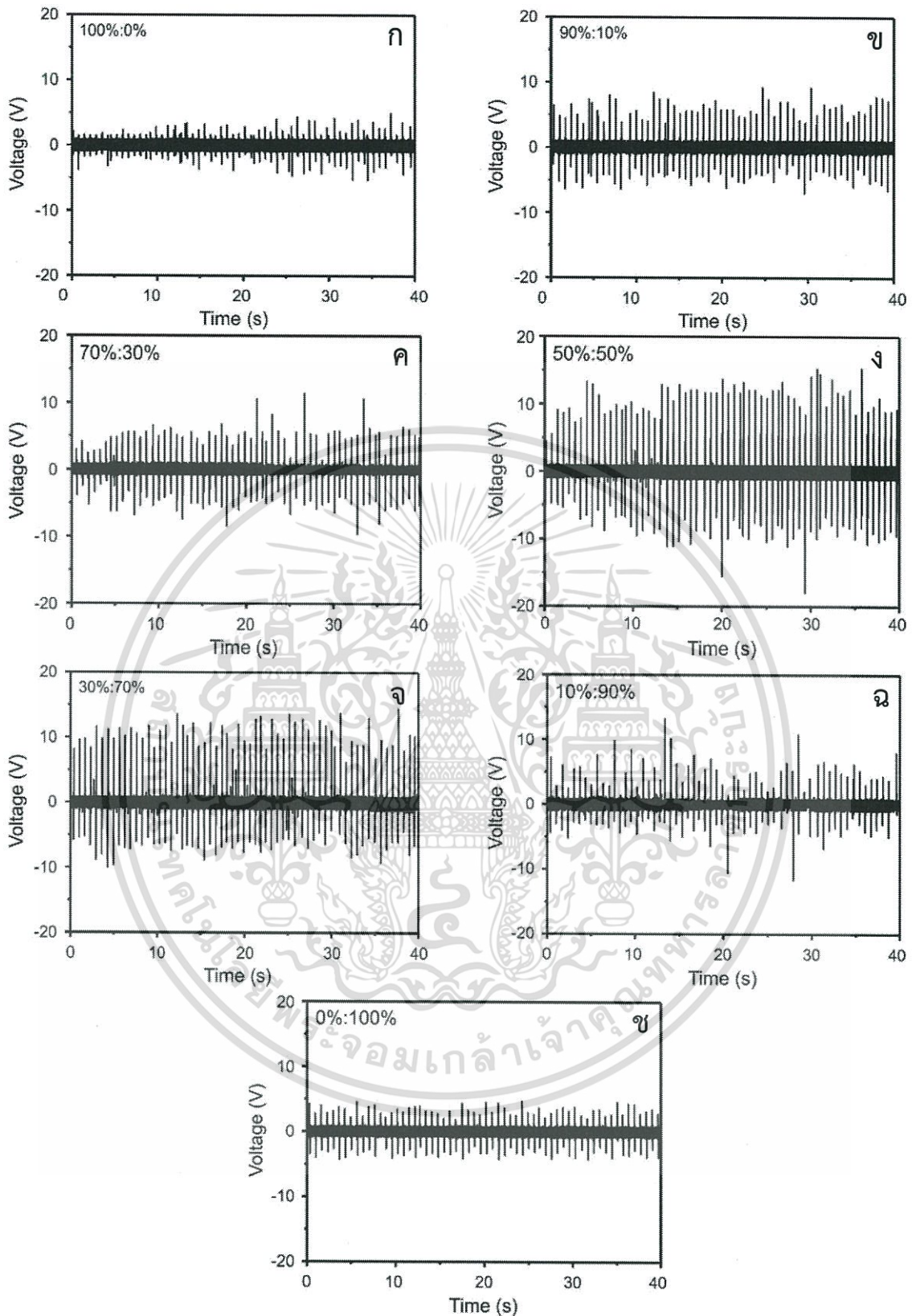
รูปที่ 4.11 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) การกระจายตัวของวัสดุผสมที่มีเพียงเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตชนิดเดียว (ข) การกระจายตัวของวัสดุผสมที่มีเพียงอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตชนิดเดียว (ค) (ง) (จ) และ (ฉ) และการกระจายตัวของวัสดุผสมระหว่างเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตในอัตราส่วน 90%:10% 70%:30% 50%:50% 30%:70% และ 10%:90% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยึดหยุ่นได้ ที่มีอัตราส่วนเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) แตกต่างกัน

จากการนำวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยึดหยุ่นได้ ที่มีอัตราส่วนของวัฏภาคกระจายแตกต่างกัน คือ อัตราส่วนเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตต่ออนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต เท่ากับ 100%:0% 90%:10% 70%:30% 50%:50% 30%:70% 10%:90% และ 0%:100% โดยนำไปทำการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุภายใต้การให้แรงเชิงกล โดยใช้ชุดการทดสอบแรงดันไฟฟ้าจากแรงกดเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออก แสดงผลดังรูปที่ 4.12

จากตรวจสอบพบว่าวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยึดหยุ่นได้ที่มีการผสมวัฏภาคกระจายตัวระหว่างเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต เนื่องจากอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ใช้มีความเป็นเตตระโกนอลที่มากกว่า แต่เมื่อมีปริมาณของวัฏภาคกระจายตัวที่เป็นอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเพียงชนิดเดียวจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกที่วัดได้มีค่าลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตรวมตัวและเกาะกลุ่มกัน แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตไปจนถึงที่อัตราส่วน 50%:50% เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตจะทำให้มีความเชื่อมโยงกันของสารเพียโซอิเล็กทริก และเพิ่มการกระจายตัวของสารเพียโซอิเล็กทริกในเฟสกระจายของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยึดหยุ่นได้ ซึ่งจะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงที่สุด เนื่องจากผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตมีโครงสร้างเป็นเพอรอฟสไกต์แบบเตตระโกนอล ซึ่งมีค่าความเป็นเตตระโกนอลใกล้เคียงกัน คือ 1.0060 และ 1.0054 ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตให้มากกว่า 50% จะส่งผลให้ปริมาณของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตลดลง ทำให้วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยึดหยุ่นได้ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกที่ลดลง เนื่องจากอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตมีการเกาะกลุ่มกันมากขึ้น การเชื่อมโยงกันของสารเพียโซอิเล็กทริกบนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิทน้อยลง และจากผลของภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการกระจายตัวของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยึดหยุ่นได้ที่มีวัฏภาคกระจาย คือ อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต พบว่าอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตมีการเกาะกลุ่มกัน และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตมีการกระจายตัวที่ดี ซึ่งในแต่ละอัตราส่วนที่มีปริมาณอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตต่างกันจะเห็นจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดว่ามีการกระจายของอนุภาคแบเรียมไททาเนตน้อยมากจนบางภาพที่มีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตในปริมาณที่น้อยแทบมองไม่เห็นการกระจายตัวของเฟสกระจายที่เป็นอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ซึ่งส่วนมากจะพบวัฏภาคกระจายตัวเป็นเพียงการกระจายตัวของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตบนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีจิท เมื่อให้แรงเชิงกลโดยการกดลงบนวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยึดหยุ่นได้ที่มีวัฏภาคกระจายตัวคือเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเพอรอฟสไกต์แบบเตตระโกนอล โดยมีความไม่สมมาตรเกิดขึ้นในโครงสร้างเมื่อให้แรงกดลงไปจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมของไททาเนียม และเกิดแรงดันไฟฟ้าส่งออกขึ้น ซึ่งนั่นคือสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุ



รูปที่ 4.12 แรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ โดยมีอัตราส่วนของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตต่ออนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต คือ (ก) 100%:0% (ข) 90%:10% (ค) 70%:30% (ง) 50%:50% (จ) 30%:70% (ฉ) 10%:90% และ (ช) 0%:100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ตั้งอัตราส่วนข้างต้นแสดงผลของค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ย และแรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงสุดดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ ซึ่งมีอัตราส่วนเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) ต่ออนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) เท่ากับ 100%:0% 90%:10% 70%:30% 50%:50% 30%:70% 10%:90% และ 0%:100%

อัตราส่วนระหว่างเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคแบเรียมไททาเนต ในวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้	ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ย (V)	ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงสุด (V)
100%:0%	1.91 ± 0.39	4.72
90%:10%	2.75 ± 0.39	9.20
70%:30%	5.97 ± 0.38	11.40
50%:50%	9.23 ± 0.98	19.20
30%:70%	7.33 ± 1.05	14.10
10%:90%	3.08 ± 0.61	13.20
0%:100%	2.17 ± 0.31	5.04

เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกของงานวิจัยก่อนหน้า ดังตารางที่ 4.4 พบว่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยจากงานวิจัยนี้มีค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกที่มากกว่า

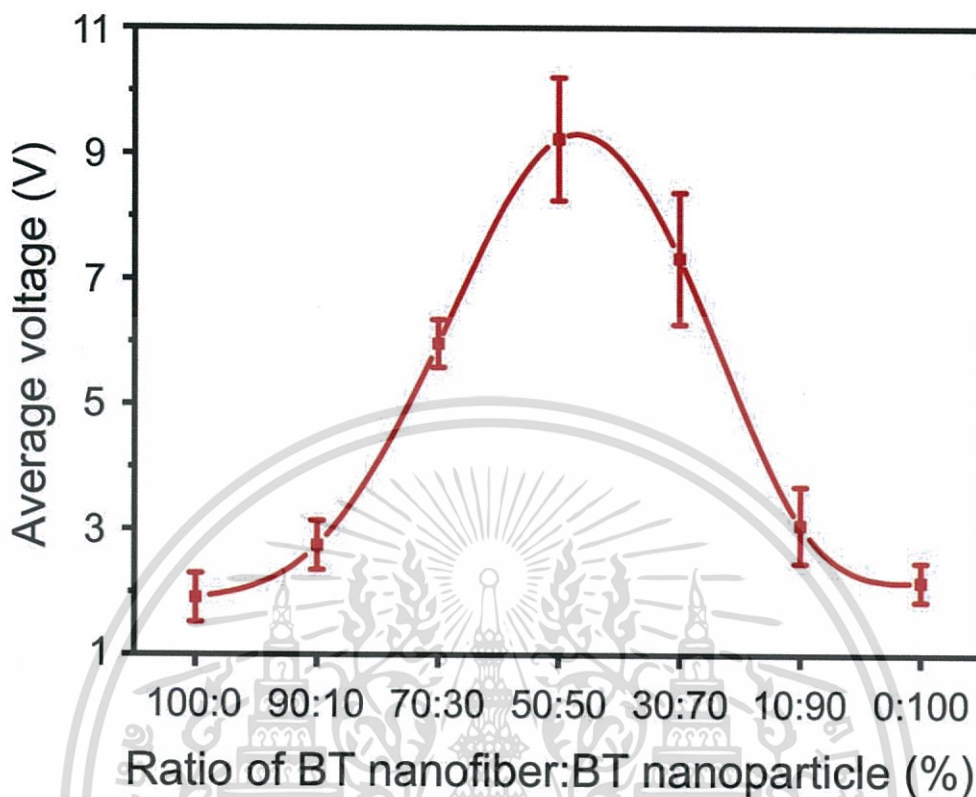
ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดอื่น

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	แรงดันไฟฟ้าส่งออก (V)	อ้างอิง
PDMS/BaTiO <sub>3</sub> (10)/MWCNT(2.0)	0.69	[44]
PDMS/BaTiO <sub>3</sub> (20)/MWCNT(2.0)	2.04	[44]
PDMS/BaTiO <sub>3</sub> (30)/MWCNT(2.0)	3.00	[44]
PDMS/BaTiO <sub>3</sub> (40)/MWCNT(2.0)	3.73	[44]
PDMS/BaTiO <sub>3</sub> (50)/MWCNT(2.0)	0.91	[44]
เพียโซอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่นเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต	0.45	[45]

จากนั้นจึงนำค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการให้แรงกับแรงดันไฟฟ้าส่งออกดังรูปที่ 4.13 จากกราฟจะเห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยที่สูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ที่อัตราส่วนของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตต่ออนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเท่ากับ 50%:50% ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $9.23 \pm 0.98$  V



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (%) (Ratio of BT nanofiber:BT nanoparticle) กับค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ย (Average Voltage) (V)

วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยึดหยุ่นได้ที่มีอัตราส่วนระหว่างเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต พบว่าค่าความเป็นเตตระโกนอลมีค่าใกล้เคียงกันทำให้ทั้งเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตแสดงสมบัติเพอร์โรอิเล็กทริก และสมบัติโพลาริเซชันแบบเกิดขึ้นเองได้ซึ่งสมบัติเหล่านี้สัมพันธ์กับสมบัติทางไฟฟ้า การเตรียมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นสายยาวทำให้เกิดการเกี่ยวพันกับอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ทำหน้าที่เป็นเส้นทางเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (Conduction path) ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวได้ดี ลดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยึดหยุ่นจึงมีประสิทธิภาพของแรงดันไฟฟ้าส่งออกมากขึ้น วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มีเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตเพียงชนิดเดียวจะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกที่ต่ำ วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่มีอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเพียงชนิดเดียวจะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกที่สูงแต่จะเกิดการเกาะกลุ่มกันระหว่างอนุภาคทำให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกมีค่าลดลง ทั้งนี้วัฏภาคกระจายถูกกระจายตัวบนอินเทอร์เฟซที่มีความแข็ง และยึดหยุ่นตัวได้เพียงเล็กน้อยอาจทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกที่ได้ลดลง จึงสรุปได้ว่าวัฏภาคกระจายตัวโครงสร้าง และรูปร่างของแบเรียมไททาเนตที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกแบบยึดหยุ่นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 อิทธิพลของความล้าที่ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก ยืดหยุ่นได้ ที่อัตราส่วนเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) ต่ออนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ที่ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงที่สุด

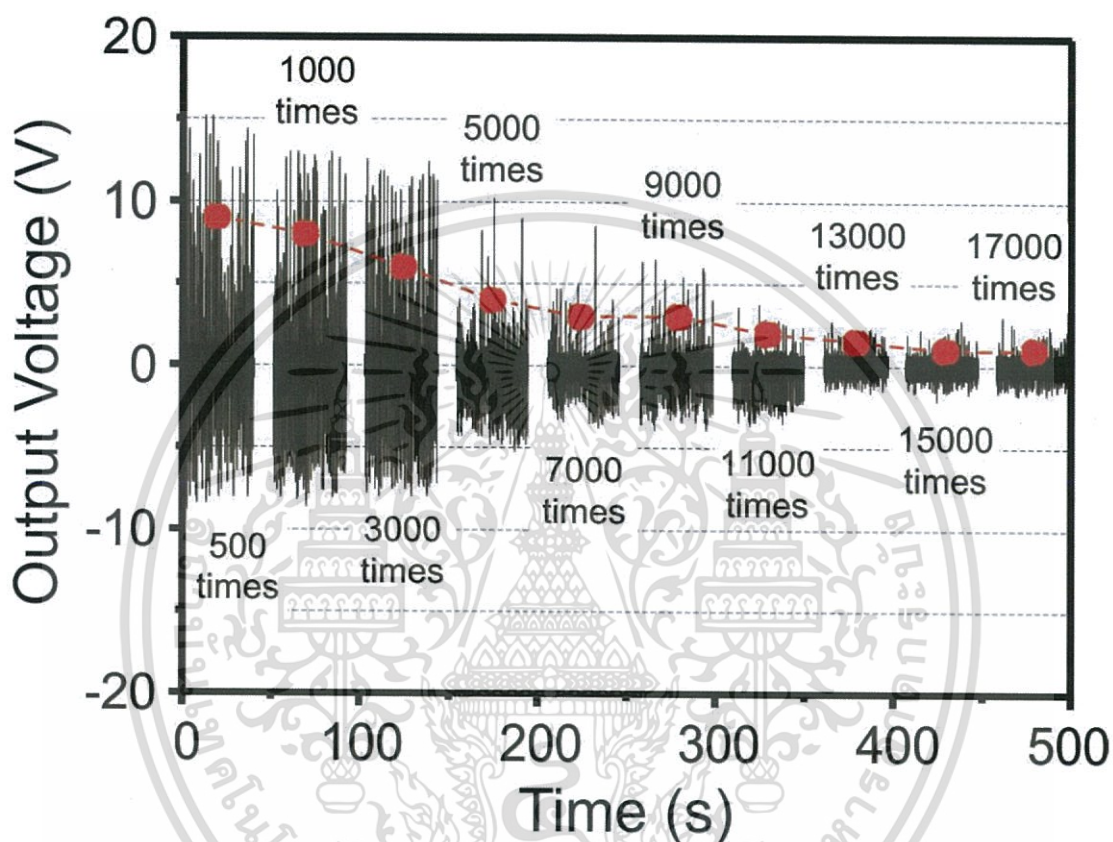
จากผลการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และพอลิเดเมทิลไซลอคเซน ที่มีอัตราส่วนเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตต่ออนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเท่ากับ 100%:0% 90%:10% 70%:30% 50%:50% 30%:70% 10%:90% และ 0%:100% จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกที่สูงที่สุดคือ 50%:50% ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยเท่ากับ  $9.23 \pm 0.98$  V จากนั้นได้ศึกษาอิทธิพลของความล้าที่ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ที่มีวิฎภาคกระจายตัว คือ เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่อัตราส่วนที่ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงที่สุด คือ 50%:50% โดยการทดสอบโดยการเริ่มให้แรงเชิงกลโดยการกระแทกแท่นกดลงบนตัวอย่างเพียโซอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่น จากนั้นจะได้แรงดันทางไฟฟ้า โดยค่าแรงดันทางไฟฟ้าที่ได้จะแสดงที่เครื่องออสซิลโลสโคป (Digital oscilloscope) โดยทำการให้แรงเชิงกลอย่างต่อเนื่องทั้งหมด 10 รอบ และทำการบันทึกข้อมูลแรงดันไฟฟ้าส่งออกของทุกรอบ แสดงดังรูปที่ 4.14 รอบแรกทำการกด 500 ครั้ง รอบที่ 2 ทำการกดอีก 500 ครั้ง รวมเป็น 1000 ครั้ง จากนั้นทำการกดต่อโดยทำการกดรอบละ 2000 ครั้ง เมื่อครบ 10 รอบ ตัวอย่างเพียโซอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่นที่มีอัตราส่วนของเฟสกระจาย คือ เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต อัตราส่วน 50%:50% จะได้รับแรงเชิงกลทั้งหมด 17000 ครั้ง ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ที่มีวิฎภาคกระจายตัว คือ เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ที่อัตราส่วนที่ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงที่สุดคือ 50%:50% โดยให้แรงเชิงกลอย่างต่อเนื่องทั้งหมด 10 รอบ 17000 ครั้ง

รอบของการให้แรงเชิงกล	จำนวนครั้งของการกด (ครั้ง)	ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออก (V)
1	500	9.23
2	1000	7.05
3	3000	6.10
4	5000	4.05
5	7000	2.95
6	9000	2.95
7	11000	1.95
8	13000	1.50
9	15000	1.00
10	17000	1.00

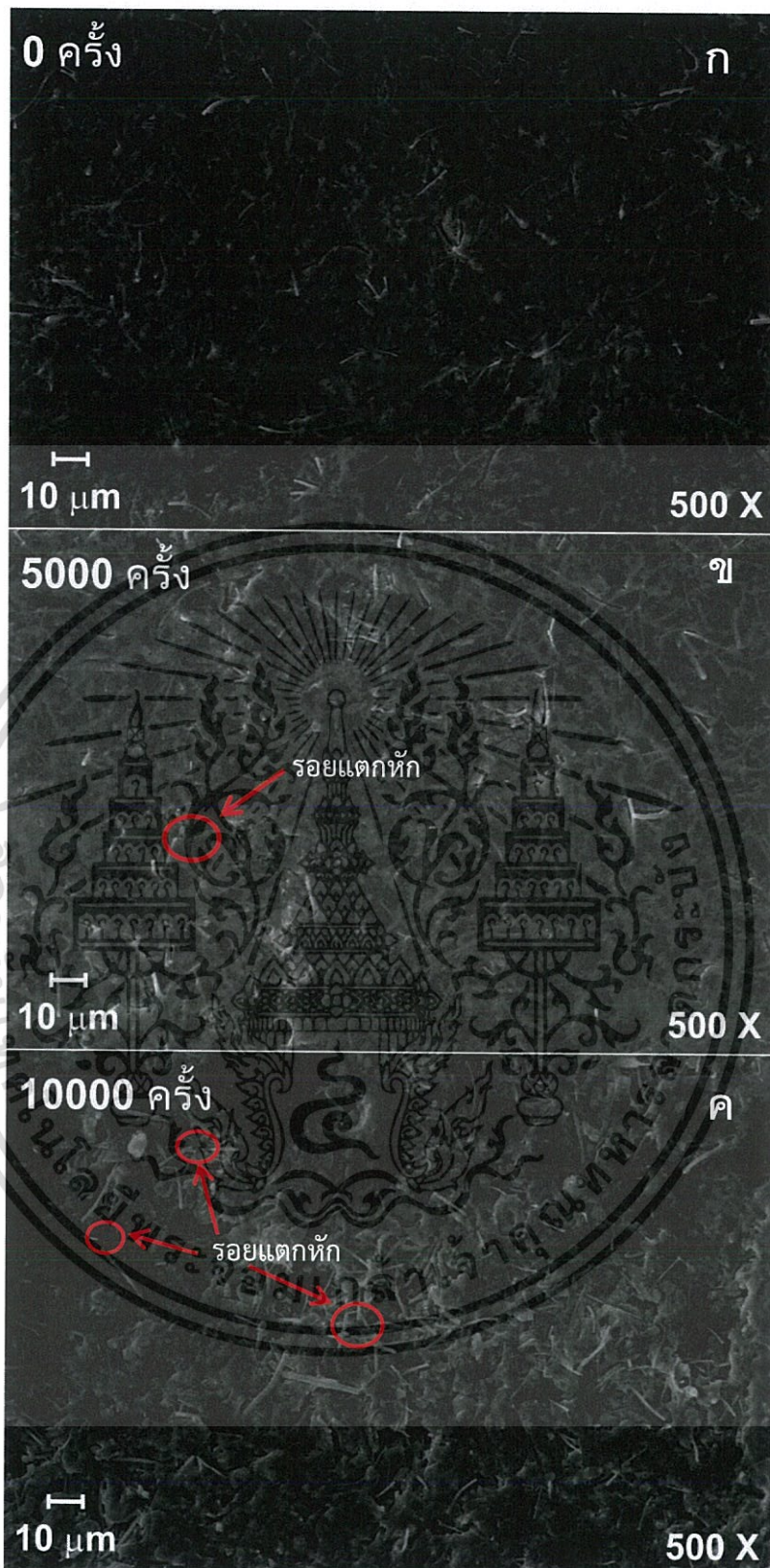
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มของแรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยลดลง จนมีค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกคงที่ประมาณ 1.00 V คาดว่าเป็นผลมาจาก การล้าของเฟสกระจายเนื่องจากแรงกระแทก (Impact Fatigue) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกอยู่ภายใต้การรับแรงกระแทกแบบซ้ำ ๆ เฉพาะที่ (Localized Impact) ซึ่งทำให้เกิดการแตกหักของเส้นใยนาโนแบบเรียบมโหฬารที่เป็นสายยาวทำให้เกิดการเกี่ยวพันกับอนุภาคโดยเส้นใยทำหน้าที่เป็นเส้นทางเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าส่งผลให้อนุภาคแบบเรียบมโหฬารเกิดการกระจายตัวได้ดี ลดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค



รูปที่ 4.14 แรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยึดหยุ่นได้ที่มีวิฎุภาคกระจายตัว คือ อนุภาคนาโนแบบเรียบมโหฬาร และเส้นใยนาโนแบบเรียบมโหฬารที่อัตราส่วนที่ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงที่สุดคือ 50%:50% โดยให้แรงเชิงกลอย่างต่อเนื่องทั้งหมด 10 รอบ 17000 ครั้ง

ที่แนวโน้มของแรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยลดลงเป็นผลมาจากการถูกแรงเชิงกลลดลงซ้ำ ๆ จากรูปที่ 4.15 (ก) เป็นรูปที่ยังไม่ได้รับการกดจะเห็นว่าเส้นใยนาโนแบบเรียบมโหฬารยังคงมีเส้นยาวอยู่เมื่อเริ่มทำการกดผ่านไปที่ 5000 ครั้งพบว่าเส้นใยนาโนแบบเรียบมโหฬารเริ่มมีการแตกหัก แสดงดังรูปที่ 4.15 (ข) เป็นผลให้แรงดันไฟฟ้าลดลง และเมื่อทำการกดต่อไปจนถึง 10000 ครั้ง จะพบว่าเส้นใยนาโนแบบเรียบมโหฬารมีการแตกหักเพิ่มมากขึ้นจนเป็นเพียงแคเส้นใยสั้น ๆ ที่กระจายตัวอยู่แสดงดังรูปที่ 4.15 (ค)



รูปที่ 4.15 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงเฟสกระจายที่ติดอยู่บนพอลิ-ไดเมทิลซิลอกเซนหลักจากผ่านการให้แรงเชิงกลโดยการกระแทก (ก) ผ่านการให้แรง 0 ครั้ง (ข) ผ่านการให้แรง 5000 ครั้ง (ค) ผ่านการให้แรง 10000 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งงานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของวิฎภาคกระจายตัวแบบเรียมไททาเนตที่มีลักษณะสัณฐาน คือ เส้นใยนาโนแบบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) และอนุภาคนาโนแบบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) โดยการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมซึ่งจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้สูงที่สุด โดยทำการเตรียมแบบเรียมไททาเนตแบบเส้นใยนาโน ด้วยวิธีการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการโซลเจล (Sol-gel) และทำการฉีดยึดเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) โดยสารที่ใช้คือแบบเรียมอะซิเตท และไททาเนียมบิวทอกไซด์ ในอัตราส่วน 1:1 เมื่อทำการผสมไททาเนียมบิวทอกไซด์ลงในแบบเรียมอะซิเตทที่ถูกละลายในอะซิติกแอซิดแล้ว จะได้สารละลายสีเหลืองใส ปั่นกวนทิ้งไว้ แล้วทำการละลายพอลิเอทิลีนออกไซด์ในเอทานอลจนได้สารละลายพอลิเอทิลีนออกไซด์ 3% โดยน้ำหนัก นำไปผสมกับสารละลายสีเหลืองในขั้นตอนก่อนหน้า จะได้สารละลายสีเหลืองขุ่นที่มีความหนืดเพิ่มขึ้น จากนั้นนำสารละลายสีเหลืองขุ่นที่ได้ไปทำการฉีดยึดด้วยกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยใส่สารละลายที่เตรียมได้ไว้ในกระบอกฉีดยึด 10 ml ระยะห่างระหว่างเข็มฉีดยึดกับแท่นรองรับเส้นใยห่างประมาณ 15 cm ใช้อัตราในการฉีดยึดเป็น 0.5 ml/hr และใช้ความต่างศักย์ 10 kV ในการเหนี่ยวนำเส้นใย เมื่อทำการฉีดยึดเสร็จจะได้เส้นใยติดอยู่ที่แผ่นรองรับเส้นใย จากนั้นทำการเผาเพื่อให้เกิดเป็นผลึกของแบบเรียมไททาเนต และใช้อนุภาคนาโนแบบเรียมไททาเนตเกรดการค้า จากนั้นนำมาเตรียมเป็นวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ โดยการนำแบบเรียมไททาเนตที่มีสัณฐานแบบอนุภาคนาโน และเส้นใยนาโน จะกระจายตัวอยู่บนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดีทิจิตที่ต่อขั้วไฟฟ้าแล้ว จากนั้นถูกคลุมทับด้วยวิฎภาคหลักคือ พอลิไคเมทิลไซลลอกเซน เมื่อพอลิไคเมทิลไซลลอกเซนครบรูปจะได้เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ โดยในการตรวจวิเคราะห์ผลของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ด้วยวิธีการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการโซลเจล และทำการฉีดยึดเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต จะตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (FT-IR) เทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตรวจวิเคราะห์ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ และทำการศึกษาอิทธิพลของความล้าที่ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ที่มีวิฎภาคกระจายคือแบบเรียมไททาเนตแบบอนุภาคนาโน และเส้นใยนาโนที่อัตราส่วนที่ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงที่สุดโดยให้แรงเชิงกลโดยการกดอย่างต่อเนื่องทั้งหมด 10 รอบ และทำการบันทึกข้อมูลแรงดันไฟฟ้าส่งออกของทุกรอบ รอบแรกทำการกด 500 ครั้ง รอบที่ 2 ทำการกดอีก 500 ครั้ง รวมเป็น 1000 ครั้ง จากนั้นทำการกดต่อโดยทำการกดรอบละ 2000 ครั้ง เมื่อครบ 10 รอบวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้จะได้รับแรงเชิงกลทั้งหมด 17000 ครั้ง โดยผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

### 5.1.1 จากการศึกษาการเตรียมวัสดุนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanoparticle: BT nanoparticle) และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanofiber: BT nanofiber)

1. ผลจากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanofiber) ก่อนเผา และหลังเผา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้ำซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 50 nm มีการกระจายตัวที่ไม่ดีเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผามีลักษณะเป็นเส้นยาวพื้นผิวเรียบ มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ  $1.59 \pm 0.018 \mu\text{m}$  และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตหลังเผามีลักษณะเป็นเส้นยาวเกิดการแตกหักเล็กน้อย พื้นผิวขรุขระเนื่องจากการเกิดเกรน มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย  $895 \pm 18.18 \text{ nm}$  ซึ่งพบว่าเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตมีการกระจายตัวที่ดี

2. ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของแบเรียมไททาเนต แบบอนุภาคนาโน และเส้นใยนาโน หลังเผาด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่าอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเกรดการค้ำ และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต หลังเผาที่ได้จากการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการโซเจล และทำการฉีดยกด้วยกระบวนการสังเคราะห์เส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เป็นแบเรียมไททาเนตที่มีโครงสร้างเพอรอฟสไกต์แบบเตตระโกนอล ซึ่งไม่เกิดการเปลี่ยนโครงสร้าง หรือมีเฟสแปลกปลอมอื่น ๆ เกิดขึ้น และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตก่อนเผาไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เนื่องจากยังไม่เกิดเป็นผลึกของแบเรียมไททาเนต

3. ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของแบเรียมไททาเนต ด้วยเทคนิควิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (FT-IR) พบว่าเส้นใยก่อนเผาพบจะพบการดูดกลืนความยาวคลื่นที่หลากหลาย เช่น การดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นที่  $3000 - 3600 \text{ cm}^{-1}$  ของ O-H (Stretching vibration) เนื่องจากความชื้น และแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นใย และพบการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นที่  $2900 \text{ cm}^{-1}$  เป็น C-H (Stretching vibration) ของพอลิเมอร์ หลังจากนำเส้นใยที่สังเคราะห์ได้ไปเผาแล้ว พบว่า การดูดกลืนความยาวคลื่นในช่วงที่กล่าวมาข้างต้นหายไป เหลือเพียงการดูดกลืนในช่วง  $500 \text{ cm}^{-1}$  นั่นคือการสั่นของพันธะ Ti-O ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต

### 5.1.2 จากการศึกษาการเตรียมวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ (Flexible piezoelectric composites)

1. ผลจากการให้แรงเชิงกล (โดยการบิดงอ) พบว่าวัสดุผสมที่เตรียมได้มีความยืดหยุ่นบางส่วน เนื่องจากข้อไฟฟ้าอินเทอร์ดิคิตที่มีค่าความแข็ง ทำให้บิดตัวหรือโค้งงอ

2. ผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกมีวัสดุนาโนแบเรียมไททาเนต และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต มีการกระจายตัวต่ำ การเกิดเกาะกลุ่มกันมากในทุก ๆ อัตราส่วนที่มีการใส่อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และพบว่าเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ เกิดการแตกหักบ้างเป็นบางส่วน

3. ผลการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยืดหยุ่นได้ ที่มีอัตราส่วนอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตแตกต่างกันโดยการทดสอบ

แรงดันไฟฟ้าจากแรงกด พบว่าที่อัตราส่วน 50%:50% เป็นวิธภาคที่ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยสูงที่สุดที่ประมาณ  $9.23 \pm 0.98$  V

4. อิทธิพลของความถี่ที่ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยึดหยุ่นได้ที่อัตราส่วนอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตต่อเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต 50%:50% ที่ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ  $9.23 \pm 0.98$  V โดยเมื่อให้แรงเชิงกลเป็นรอบ ๆ พบว่ามีแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง จนรอบที่ 10 ผ่านการให้แรงเชิงกลมาทั้งหมด 17000 ครั้ง พบว่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกเหลือเพียงประมาณ 1.00 V

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดิิจมีความหนา และแข็งทำให้ยึดหยุ่นตัวได้น้อยจึงส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าส่งออกควรหาขั้วไฟฟ้าที่มีความยืดหยุ่นสูง
2. ศึกษาเทคนิคการเตรียมวัสดุผสมที่จะทำเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตเกิดการแตกหักที่น้อยที่สุด
3. ศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้า และเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าที่เหมาะสม



## เอกสารอ้างอิง

- [1]. Privratská , E. Erhart , J. Tichý , J. and Kitting , J. 2010. “Fundamentals of Piezoelectric Sensorics”. New York : Springer Heidelberg Dordrecht Londen.
- [2]. Lee , K. Liu , M. Moon , Y. Hwang , S. Zhu , G. Kim , G. Kim , J. E. Kim , S. O. Wang , D. K. Lee , Z. L. and Park , K. J. 2012. “Flexible Nanocomposite Generator Made of BaTiO<sub>3</sub> Nanoparticles and Graphite Carbons”. *Advanced Materials*, 24 : 2999-3004.
- [3]. เทียนชัย ภู่เกสร นิศากร นะคะจัด และ ลออรัตน์ สุวรรณมณี. 2559. “วัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกที่ยืดหยุ่นได้สำหรับการกักเก็บพลังงานขนาดเล็ก”. *สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.
- [4]. Yuna, C. Wanga, J. Wanga, H.S. Park , J.E. Baeka , H. 2008. “Enhanced output performance of a lead-free nanocomposite generator using BaTiO<sub>3</sub> nanocomposites and nanowires filler”. *Applied Surface* ,429 : 164-170.
- [5]. Chawla , K.K. 1993. “Ceramic matrix composite”. Cambridge : The University Press.
- [6]. Dekker , K. and Uchino , M. 2000. “Ferroelectric devices”. New York : Marcel Dekker, Inc., 255-256
- [7]. Herbert, A.J. and Moulson , J. M. 1990. “Electroceramics Materials Properties Application”. Cambridge : Great Britain at the University Press.
- [8]. Akdogan, A. and Safari , E. K. 2008. “Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications”. New York : Sringer.
- [9]. วรณวิทย์ ไชยสาร.2552. “อิทธิพลของความมาคีนอัดที่มีผลต่อสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกของเซรามิกแบเรียมไททานเนต(และเซรามิกเลดเซอร์โคเนต เลตนิคเกิลไนโอเบต)”. *เชียงใหม่ : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*.
- [10]. Richerson , D. W. 1992. “Modern ceramic engineering: Properties, processing, and use in design”. Marcel Dekker, inc.
- [11]. Osman , K. I. 2011. “Synthesis and characterization of BaTiO<sub>3</sub> ferroelectric material”. *Degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY Faculty of Engineering Cairo University*.
- [12]. Mayergoyz , I. and Bertotti , G. 2005. “Hysteresis in Piezoelectric and Ferroelectric Materials”. *The Science of Hysteresis*. Elsevier, 3.
- [13]. Li , C. Wu , F. Tan, F. Zhai , F. Zhang , Y. and Chen , V. 2014. “Efficient Perovskite Solar Cells based on Low-Temperature Solution-Processed (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>)PbI<sub>3</sub> Perovskite/CuInS<sub>2</sub> Planar Heterojunctions”. *Nanoscale Research Letters*. 9 : 457-464
- [14]. Jia, J. Gu, B. and Fan , M. 2014. “Perovskite based low cost and high efficiency hybrid halid-solar cells”. *Photon Research*. 2 : 111-120.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15]. Patel , I. 2011. “Ceramic based intelligent piezoelectric energy harvesting device”. *Advances in ceramics-electric and magnetic ceramics, bioceramics, ceramics, and environment*. InTech, 1 : 133-154.
- [16]. G. H. Haertling. 1999. “Ferroelectric Ceramics: History and Technology”. *J. Am. Ceram. Soc.* 82 (4) : 797–818
- [17]. Bobić, M.M. Stojanović , J.D. Vijatović , B.D. 2008. “History and challenges of barium titanate part I”. *Science of sintering*.40 : 155-165.
- [18]. G. H. Haertling. 1999. “Ferroelectric Ceramics: History and Technology”. *Journal of the american ceramic society*. 82 : 797-818.
- [19]. G. K. Sahoo. 2009 “Synthesis and characterization of BaTiO<sub>3</sub> prepared by molten salt synthesis method”. *Department of Ceramic Engineering National Institute of Technology Roarkla*
- [20]. Bobić , M. M. Stojanović , J. D. and Vijatović , B. D. 2008. “History and Challenges of barium titanat part II”. *Science of sintering*. 40 : 235-244.
- [21]. XIAMETER. 2009. “An Overview of Polydimethylsiloxane (PDMS) Fluids in the Environment”. USA
- [22]. Olthuis , J. C. Veltink , W. Bergveld , P. H. and L’otters , P. 1996. “Polydimethylsiloxane as an elastic material applied in a capacitive accelerometer”. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 6 : 52–54.
- [23]. Rahaman , M. N. 2007. “Ceramic Processing”. CRC Press United States of America.
- [24]. C. Jeffrey Brinker 1990. “Sol-Gel Science the Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing”. Academic Press. Inc.
- [25]. Chen , X. and Zhu , N. 2013. “Biofabrication of Tissue Scaffolds”. *Advances in Biomaterials Science and Biomedical Applications*. 316-328.
- [26]. Kundu , S.C. and Bhardwaj , N. 2010. “A fascinating fiber fabrication technique”. *Biotechnology Advances*. 28 : 325-347.
- [27]. Taylor , G. 1969. “Electrically driven jets”. *Proceedings of the royal society of london*. 313 : 453-475.
- [28]. Angamma , C. J. and Jayaram , S. H. 2011. “A theoretical understanding of the physical mechanisms of electrospinning”. *Proceedings of ESA Annual Meeting on Electrostatics*.1-9.
- [29]. Fang , J. Wang , X. and Lin T. 2011. “Functional applications of electrospun nanofibers” . *School of Textile Science and Engineering, Wuhan Textile University : Intechopen* .
- [30]. Song, J. and Wang , Z.L. 2006. “Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays”. *Science*. 312(5771) : 243-246.

- [31]. Song , M. Y. Lu , J.M. Lee , P. Chen , C. Y. Wang , L. J. and Lu , Z. L. 2009. “ZnO-ZnS heterojunction and ZnS nanowire arrays for electricity generation”. *ACS Nano*. 3(2) : 357-362.
- [32]. Tran , C. Wang , V. H. Fuh , J. Lin , Y.K. and Chang , L. 2010. “Direct-write piezoelectric polymeric nanogenerator with high energy conversion efficiency”. *Nano Letters*. 10(2) :726-731.
- [33]. B. C. Smith. 2011. “Fourier Transform Infrared Spectroscopy”. Taylor and Francis Grop.
- [34]. Li , S. Kumar , L. and Zhang , K. 2009. “Materials Characterization Techniques”. CRC Press.
- [35]. L. Reimer. 1993. “Image Formation in Low-Voltage Sanning Electron Microscopy”. *The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineering*, USA.
- [36]. Fei , N. Anan , W. Qi , L. Zhi , X. Yong , Y. and Xia , N. 2013. “Flexible Nanogenerator Based on Single BaTiO<sub>3</sub> Nanowire”. *Science of Advanced materials*. 5 : 1-7.
- [37]. Xu , K. Liu , S. Hwang , Y. Kang , G. Wang , S. L. Lee , Z. L. Park , K. J. 2010. “Piezoelectric BaTiO<sub>3</sub> Thin Film Nanogenerator on Plastic Substrates”. *Nano Letters*. 10 : 4939-4943.
- [38]. Moon , H.W. Choi , S. Kim , C.H. and Lee , D.K. 2012. “Synthesis and size control of tetragonal barium titanate nanopowders by facile solvothermal method”. *J. Am. Ceram. Soc.* 95 : 2429–2434.
- [39]. Baek , C. Wang , J. E. Moon , S. Choi , C. and Kim , D. 2016. “Formation and accumulation of intragranular pores in the hydrothermally synthesized barium titanate nanoparticles”. *J. Am. Ceram. Soc.* 99 : 3802–3808.
- [40]. Hao , Y. Wang , X. Kim , J. and Li , L. 2014. “Rapid Formation of Nanocrystalline BaTiO<sub>3</sub> and Its Highly Stable Sol” *J. Am. Ceram. Soc.*, 97(11) : 3434–3441
- [41]. Rietveld , H. 1966. “The Crystal Structure of Some Alkaline Earth Mwtal Uranates of the Type M3U06”. *Acta Crystallographica*, 20 : 508-513
- [42]. “Science Mission Directorate. “Visible Light” NASA Science.” Ed. National Aeronautics and Space Administration, 2010.
- [43]. Nawani , C., Boomchom , B. B., Jutarat P., Wanwilai C. V., Naratip V. 2012 “Synthesis and phase evolution of electrospun antiferroelectric lead zirconate (PbZrO<sub>3</sub>) nanofibers” *Materials Science and Engineering B* 177 1009-1016
- [44]. J. Yan, Y.G. Jeong 2017 “Roles of carbon nanotube and BaTiO<sub>3</sub> nanofiber in the electrical, dielectric and piezoelectric properties of flexible nanocomposite generators” *Composites Science and Technology* 144 1-10

- [45]. Feifei W., Yiu-Wing M., Danyang W., Rui D., Wangzhou S. 2015 “High quality barium titanate nanofibers for flexible piezoelectric device applications” *Sensors and Actuators A* 233 195–201

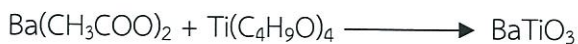


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

1. การคำนวณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต  
มวลโมเลกุลของสารแต่ละชนิดมีดังนี้

$$\text{Ba} = 137.33 \quad \text{C} = 12.011 \quad \text{O} = 15.999 \quad \text{Ti} = 47.867 \quad \text{H} = 1.008$$



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็น 1:1 ดังนั้น

$$1 \text{ โมลของ BaTiO}_3 = 233.194 \text{ g}$$

$$0.01 \text{ โมล} = 2.3319 \text{ g}$$

$$\text{เตรียม BaTiO}_3 = 233.194 \text{ g} \quad \text{ใช้ Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2 = 255.418 \text{ g} \quad \text{Ti}(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_4 = 340.327 \text{ g}$$

$$\text{เตรียม BaTiO}_3 = 0.01 \text{ โมล} \quad \text{ใช้ Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2 = 2.5542 \text{ g} \quad \text{Ti}(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_4 = 3.4034 \text{ g}$$

การคำนวณปริมาณของพอลิเอทิลีนไดเอมีน 3% w/w

$$\text{ความหนาแน่นของพอลิเอทิลีนไดเอมีน} = 0.79$$

$$\text{ดังนั้นพอลิเอทิลีนไดเอมีนน้ำหนัก} = 2.37 \text{ g}$$

3% w/w

$$\text{สารละลาย 100 g} \quad \text{ตัวทำละลาย 97 g} \quad \text{พอลิเอทิลีน 3 g}$$

$$2.37 \text{ g} \quad 0.0733 \text{ g}$$

2. การคำนวณการเตรียมอัตราส่วนระหว่างเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตต่ออนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต

0.01 g เท่ากับ 100%

ถ้าใช้อัตราส่วนเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตต่ออนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต เท่ากับ 70%:30%

จะให้เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตเท่ากับ 0.007 g เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต 0.003 g