

ผลกระทบของสารเติมที่มีต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิตพอลิเมอร์  
สำหรับใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบยืดหยุ่น

IMPACT OF NANO-FILLER ON PIEZOELECTRIC PROPERTIES OF POLYMER  
NANOCOMPOSITES USED AS FLEXIBLE NANOGENERATOR



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPACT OF NANO-FILLER ON PIEZOELECTRIC PROPERTIES OF  
POLYMER NANOCOMPOSITES USED AS FLEXIBLE NANOGENERATOR



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

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

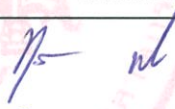
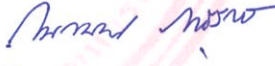

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลกระทบของสารเติมที่มีต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต  
พอลิเมอร์สำหรับใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบยืดหยุ่น  
Special Project Title Impact of Nano-filler on Piezoelectric Properties of Polymer  
Nanocomposites used as Flexible Nanogenerator  
นักศึกษา ปรีดาภรณ์ หุ่นสมาน  
รหัสประจำตัว 58110035  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน  
ปีการศึกษา 2561  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วรณวิทย์ วิทยากร

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ทศิยาภรณ์ ทิววงศ์	
ผศ.ดร. กนกนันท์ ภาชีรักษ์	
รศ.ดร. วรณวิทย์ วิทยากร	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)

หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วันที่ 20 เดือน มิ.ย. พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	ผลกระทบของสารเติมที่มีต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต พอลิเมอร์สำหรับใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบยืดหยุ่น
นักศึกษา	นางสาว ปรีดาภรณ์ หยุ่นสมาน
รหัสประจำตัว	58110035
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. วรรณวิไลย์ วิทยากร

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะทำการเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสำหรับใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบยืดหยุ่น โดยจะทำการเลือกพอลิเดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) มาใช้เป็นเฟสพอลิเมอร์เพื่อช่วยในเรื่องของความยืดหยุ่นของชิ้นงาน ส่วนเฟสเพียโซอิเล็กทริกนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงให้หลากหลายเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของเฟสที่มีต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและสมบัติทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในงานนี้ได้เลือกใช้อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT-np) เส้นลวดนาโน โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมให้หลากหลายด้วย เพื่อศึกษาผลของปริมาณของสารเติมนี้ จากนั้นจะทำการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้งหมด แล้วทำการทดสอบสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของชิ้นงานที่เตรียมได้ด้วยการนำไปกระแทกด้วยแรงเชิงกลแล้วบันทึกแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ชิ้นงานปล่อยออกมา นอกจากนี้ยังทำการทดสอบความล้าของชิ้นงานทั้งหมดด้วยโดยการให้แรงเชิงกลต่อเนื่องเป็นเวลานานแล้วสังเกตการลดลงของแรงดันไฟฟ้าที่วัสดุแสดงออกมา จากผลการทดลองการเติมอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตมีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อนำอุปกรณ์ไปทดสอบแรงเชิงกลพบว่าที่อัตราส่วนอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ 20wt% ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงที่สุดประมาณ 1.7 โวลต์ หลังจากการทดสอบความล้า พบว่าชิ้นงานยังคงให้ค่าแรงดันไฟฟ้าออกมาอย่างสม่ำเสมอ และยังไม่พบการเสื่อมสภาพของชิ้นงานในระยะเวลาที่ทำการทดสอบความล้านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project	Impact of Nano-filler on Piezoelectric Properties of Polymer Nanocomposites used as Flexible Nanogenerator
Students	Miss Preedaporn Yunsamarn
Student ID	58110035
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2018
Adviser	Assoc. Prof. Dr. Wanwilai Vittayakorn

### Abstract

In this work, the nanocomposites between piezoelectric material and polymer are prepared by the conventional casting method in order to apply as flexible nanogenerator. Polydimethylsiloxane (PDMS) has been chosen as a polymer matrix to improve the flexibility of this device, whereas the piezoelectric phases are varied. The effect of these piezoelectric fillers on piezoelectric behavior and related electric properties of all nanocomposites is investigated. Barium titanate nanoparticle are chose as filler in these nanocomposites. The physical properties and microstructure of all samples are investigated. Finally, the generated output current and voltage are carried out by applying the mechanical force to the samples. The fatigue effect of all samples is also measured by applying the mechanical force for a long period of time until the decreasing of voltage output is observed. For the experimental results, it has been found that BT nanoparticle showed the tetragonal structure. The fabricated FPNC was mechanically pressed for investigating the electrical output performance. The result showed that ratio of Nano BaTiO<sub>3</sub> 20wt% provided a maximum voltage about 1.7 voltages and for the fatigue test, the nanocomposites maintain steady voltage without degradation.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความกรุณาและความร่วมมือของทุก ๆ ท่าน รวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วรณวิไลย์ วิทยากร ที่มอบหมายงานให้แก่ข้าพเจ้ารวมทั้งคอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด ให้คำแนะนำแนวคิด ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษนี้และให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ทูติยาภรณ์ ทิววงศ์ ที่กรุณามาเป็นประธานกรรมการคุมสอบ และตรวจสอบโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. กนกนันท์ ภาชีรัชย์ ที่กรุณามาเป็นกรรมการคุมสอบ และตรวจโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณอาจารย์คณะวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และคอยให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือและห้องปฏิบัติการทางเคมี เจ้าหน้าที่ธุรการ คณะวิทยาศาสตร์ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี ที่ให้การช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในเครื่องอุปกรณ์สารเคมี และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เพื่อน ๆ นักศึกษาปริญญาตรีคณะวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือเกี่ยวกับโครงการพิเศษนี้ จนทำให้โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ ให้โอกาสในการศึกษา รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ข้าพเจ้าผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ปรีดาภรณ์ หยุ่นสมาน

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ .....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
บทที่ 1 .....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
บทที่ 2 .....	5
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก.....	5
2.2 เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (Piezoelectric Nanogenerator).....	7
2.3 เพียโซอิเล็กทริก-พอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต (Piezoelectric nanocomposite).....	11
2.4 งานวิจัยและบทความที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.5 วัสดุและเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัย.....	16
2.5.1 พอลิไดมethylซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane : PDMS).....	16
2.5.3 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาค (SEM).....	18
2.5.4 การตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าจากแรงกด.....	20
บทที่ 3 .....	22
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	22
3.1 สารเคมีใช้ในการเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต.....	22
3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ.....	22
3.2.1 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตพอลิไดมethylซิลอกเซน.....	22
3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต.....	23
3.3.1	การเตรียมชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตระหว่างอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน .....	23
3.4	กระบวนการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตพอลิเมอร์ .....	26
3.5	วิธีการหาความหนาแน่นโดยรวม (bulk density) .....	26
3.6	เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์.....	27
3.6.1	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	27
3.6.2	ชุดการทดสอบแรงดันไฟฟ้าจากแรงกด .....	28
3.6.3	การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก .....	28
3.6.4	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD) .....	29
3.6.5	เครื่องตรวจสอบเอกลักษณ์ของสาร Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR).....	30
บทที่ 4	.....	31
ผลการทดลอง	.....	31
4.1	สมบัติทางกายภาพของนาโนคอมโพสิตระหว่างอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (BT/PDMS) .....	31
4.1.1	ลักษณะทางกายภาพ.....	31
4.1.2	ลักษณะโครงสร้างจุลภาค.....	34
4.1.3	ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction technique: XRD).....	38

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 สมบัติทางไฟฟ้า.....	42
4.2.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric constant and Dielectric loss) ที่อุณหภูมิห้อง.....	42
4.2.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric constant and Dielectric loss) ที่อุณหภูมิห้อง ที่กำหนดความถี่.....	46
4.2.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric constant and Dielectric loss) ที่ทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น.....	49
4.3 สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก.....	53
4.3.1 ผลการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต ที่มีอัตราของอนุภาคนาโนแบบเรียมไททานेट (BT nanoparticle) ที่แตกต่างกัน.....	53
4.3.2 ผลการตรวจสอบกระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต ที่มีอัตราของอนุภาคนาโนแบบเรียมไททานेट (BT nanoparticle) ที่แตกต่างกัน.....	56
4.3.3 อิทธิพลของความถี่ที่ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริกยึดหยุ่นได้ ที่มีอัตราส่วนอนุภาคนาโนแบบเรียมไททานेट (BT nanoparticle) ที่ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกสูงที่สุด.....	60
บทที่ 5 .....	66
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	66
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
บรรณานุกรม.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	69

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน .....	4
4.1 ค่าความหนา ความหนาแน่น และน้ำหนักของชั้นงานนาโนคอมโพสิต BaTiO <sub>3</sub> /PDMS .....	33



# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 รูปร่างของเฟสเพียโซอิเล็กทริกในมิติต่างๆ [1] .....	3
2.1 ปรัชญาการณเพียโซอิเล็กทริกโดยตรง Direct Effect [2].....	5
2.2 ปรัชญาการณเพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม Converse Effect [2].....	6
2.3 โครงสร้างผลึกของเพอโรฟสไกต์ (Perovskite) [3] .....	6
2.4 โครงสร้างคิวบิกที่มีการให้กระแสไฟฟ้าในแนวแกน z[4] .....	7
2.5 ภาพจำลองกลไกการทำงานของนาโนเจนเนอเรเตอร์แต่ละประเภท [5] .....	8
2.6 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดนาโน ZnO ที่ประยุกต์ใช้เป็นเพียโซอิเล็กทริกนาโน เจนเนอเรเตอร์และภาพจำลองระหว่างการใช้งานร่วมกับหัววัด AFM [6].....	10
2.7 เป็นภาพจำลองลักษณะโครงสร้างของคอมโพสิตที่ควรจะเป็น ตามกฎของการผสม [7]	12
2.8 ภาพจำลองลักษณะโครงสร้างของคอมโพสิตระหว่างเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกกับพอลิ- เมอร์สำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นนาโนเจนเนอเรเตอร์ยืดหยุ่น [8].....	13
2.9 เส้นใยนาโนแบบเรียงไททานตที่มีการจัดเรียงในแนวที่แตกต่างกัน [9] .....	13
2.10 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน และเส้นใยนาโนแบบเรียงไททานต ที่เรียงตัวแบบสุ่ม (BTNF-R) [9].....	14
2.11 (A) แรงดันไฟฟ้าส่งออก และ (B) การเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน BaTiO <sub>3</sub> /PDMS ภายใต้การบีบอัดด้วยกลไกเป็นระยะ ๆ รูปที่แทรกใน [9].....	15
2.12 หน่วยโครงสร้างของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> SiO [10].....	16
2.13 ลักษณะโครงสร้างของแบบเรียงไททานต [11].....	18
2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	19
2.15 หลักการทำงานของ SEM [12].....	20
2.16 เครื่องทดสอบแรงกด (Compression machine) .....	21

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.17 ออสซิลโลสโคป.....	21
3.1 ขั้นตอนการผสมพอลิโดเมทิลไซลอกเซน กับอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่อัตราส่วน 10wt% 20wt% 30wt% 40wt% และ 50wt%.....	24
3.2 ชิ้นงานที่นาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต .....	24
3.3 นำชิ้นงานที่เตรียมได้ทำด้วย ซิลเวอร์พ่น เป็นลักษณะทรงกลม .....	25
3.4 การต่อขั้วชิ้นงานนำเทปทองแดงติดให้ทั่วชิ้นงานทั้งสองด้าน.....	25
3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	27
3.6 ชุดทดสอบแรงกด.....	28
3.7 เครื่อง LCR meter .....	28
3.8 เครื่อง X-Ray Diffractometer.....	29
3.9 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer.....	30
4.1 ภาพถ่ายสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน .....	32
4.2 ภาพถ่ายผิวหน้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต พอลิโดเมทิลไซลอกเซน/BaTiO <sub>3</sub> .....	32
4.3 ภาพถ่ายลักษณะด้านข้างของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต.....	33
4.4 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BaTiO <sub>3</sub> ).....	35
4.5 ภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าของอนุภาคนาโนคอมโพสิต BaTiO <sub>3</sub> / พอลิโดเมทิลไซลอกเซนที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่อัตราส่วนต่างๆของ BaTiO <sub>3</sub> (A) 0% (B) 10% (C) 20% (D) 3% (E) 40% และ (F) 50%.....	36
4.6 ภาพถ่าย SEM ของภาพตัดขวางของอนุภาคนาโนคอมโพสิต BaTiO <sub>3</sub> / พอลิโดเมทิลไซลอกเซนที่กำลังขยาย 2,500 เท่า ที่อัตราส่วนต่างๆของ BaTiO <sub>3</sub> (A) 0% (B) 10% (C) 20% (D) 30% (E) 40% และ (F) 50%.....	37

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle)	38
4.8 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) .....	39
4.9 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ในวัสดุนาโนคอมโพสิต ระหว่าง BaTiO <sub>3</sub> / พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ที่ BT (A) 10wt% และ (B) 20wt%.....	40
4.10 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ในวัสดุนาโนคอมโพสิต ระหว่าง BaTiO <sub>3</sub> / พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ที่ BT (A) 30wt% และ (B) 40wt%.....	41
4.11 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ในวัสดุนาโนคอมโพสิต ระหว่าง BaTiO <sub>3</sub> / พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ที่ BT 50wt% .....	42
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับอัตราส่วน ของ (A) พอลิไดเมทิลซิลอกเซน และ (B) BT 10wt%.....	43
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับอัตราส่วน ของอนุภาคนาโนคอมโพสิต BaTiO <sub>3</sub> / พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ที่ BT (A) 20wt% และ (B) 30wt%.....	44
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความถี่ของ อนุภาคนาโนคอมโพสิต BaTiO <sub>3</sub> / พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ที่ BT (A) 40wt% และ (B)50wt%.....	45
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับอัตราส่วน ของอนุภาคนาโนคอมโพสิต BaTiO <sub>3</sub> / พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ที่ความถี่ 10 Hz.....	46
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับอัตราส่วน ของอนุภาคนาโนคอมโพสิต BaTiO <sub>3</sub> /พอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่ความถี่ (A) 100 Hz และ (B) 1,000 Hz .....	47

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับอัตราส่วนของอนุภาคนาโนคอมโพสิต ที่ความถี่ (A) 10,000 Hz และ(B) 100,00 Hz .....	48
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของชิ้นงานพอลิไดเมทิลซิลลอกเซน (PDMS).....	49
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราส่วน BT ที่ .....	50
(A) 10wt% และ (B) 20wt%.....	50
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราส่วน BT ที่ .....	51
(A) 30wt% และ (B) 40 wt% .....	51
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น BT ที่ 50 wt% .....	52
4.22 แรงดันไฟฟ้าส่งออกของพอลิไดเมทิลซิลลอกเซน (PDMS).....	53
4.23 แรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต โดยมีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ที่ (A) 10 wt% (B) 20 wt% .....	54
4.24 แรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต โดยมีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ที่ (A) 30 wt% (B) 40 wt% .....	55
4.25 แรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต โดยมีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ที่ 50 wt%.....	56
4.26 กระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต โดยมีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต คือ (A) 0wt% (B) 10wt% .....	57
4.27 กระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต โดยมีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต คือ (A) 20wt% (B) 30wt%.....	58

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.28 กระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต โดยมีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต คือ (A) 40wt% (B) 50wt%.....	59
4.29 แรงดันไฟฟ้าส่งออกของ (A) พอลิไดเมทิลซิลอกเซน และ(B)ที่อัตราส่วน BT 10 wt% โดยให้แรงเชิงกลอย่างต่อเนื่อง 1000 รอบ .....	61
4.30 แรงดันไฟฟ้าส่งออกที่อัตราส่วน BT (A) 20wt% และ(B) 30 wt% โดยให้แรงเชิงกลอย่างต่อเนื่อง 1000 รอบ .....	62
4.31 แรงดันไฟฟ้าส่งออกที่อัตราส่วน BT (A) 40wt% และ(B) 50 wt% โดยให้แรงเชิงกลอย่างต่อเนื่อง 1000 รอบ .....	63
4.32 ภาพถ่าย SEM ของภาพตัดขวางของอนุภาคนาโนคอมโพสิต BaTiO <sub>3</sub> / พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า ที่อัตราส่วนต่างๆของ BaTiO <sub>3</sub> (A) 0% (B) 10% (C) 20% (D) 30% ที่ผ่านการให้แรงเชิงกล 1000 รอบ .....	64
4.33 ภาพถ่าย SEM ของภาพตัดขวางของอนุภาคนาโนคอมโพสิต BaTiO <sub>3</sub> / พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า ที่อัตราส่วนต่างๆของ BaTiO <sub>3</sub> (A) 40% และ (B) .	65

# บทที่ 1

## บทนำ

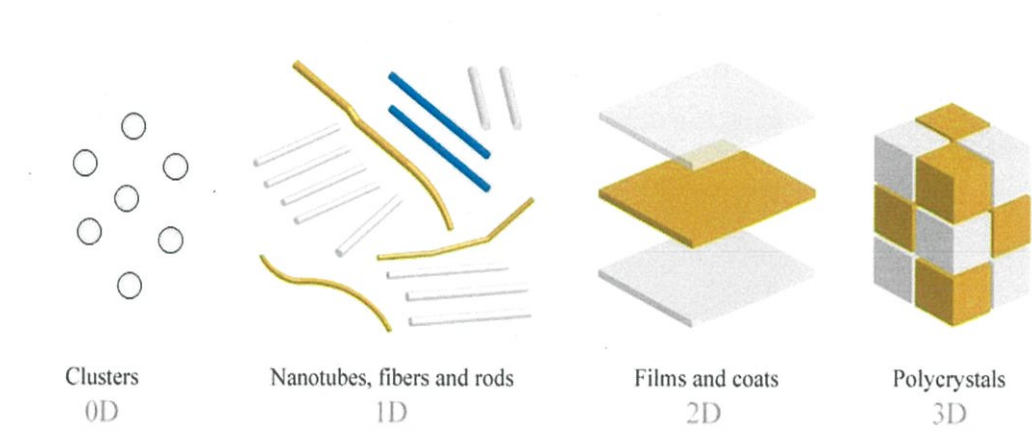
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้ประชากรมีการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในชีวิตประจำวันมากขึ้น เช่น คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก เครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน หรือแม้กระทั่งโทรศัพท์มือถือ ที่ในปัจจุบันนี้เป็นสิ่งจำเป็นที่ทุกคนในสังคมมีเพื่อใช้ในการสื่อสาร การทำงาน หรือแม้กระทั่งทำการค้าขายผ่านระบบออนไลน์ เพียงแค่มีอินเทอร์เน็ต และโทรศัพท์โดยอุปกรณ์เหล่านี้ต้องการพลังงานหรือว่าแบตเตอรี่ในการใช้งาน ซึ่งในโลกยุคปัจจุบันประชากรส่วนใหญ่มีการใช้โทรศัพท์มือถือ และโทรศัพท์มือถือนั้นก็จำเป็นที่จะต้องชาร์จแบตเตอรี่เพื่อนำไปใช้งาน แม้ว่าการชาร์จต่อครั้งจะใช้กำลังไฟไม่มาก แต่ประชากรที่ใช้โทรศัพท์มือถือนั้นก็จำเป็นจะต้องชาร์จแบตเตอรี่ทุกวันอย่างน้อยวันละครั้ง หนึ่งเดือน 30 ครั้ง หนึ่งปี 365 ครั้ง เมื่อนับรวมๆ แล้วก็มีการใช้พลังงานที่มาก ทำให้เป็นการใช้พลังงานอย่างสิ้นเปลือง และทำให้เกิดปัญหาต่างๆ กับสิ่งแวดล้อม เพราะนอกจากการใช้โทรศัพท์มือถือแล้วยังมีอุปกรณ์อื่น ๆ อีกมากมาย เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในชีวิตประจำวันที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการใช้งาน ผู้คนจำนวนมากเลยหันมาสนใจนวัตกรรมพลังงานสะอาดกันมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยลดหรือประหยัดพลังงานและทรัพยากรจึงมีการคิดค้นเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานรอบ ๆ ตัวเรา มาเป็นพลังงานไฟฟ้าแหล่งพลังงานที่จะนำมาใช้มีทั้งขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ พลังงานขนาดเล็ก ยกตัวอย่าง เช่น เคลื่อนไหวในชีวิตประจำวันต่าง ๆ การเต้นของหัวใจ การขยับแขน การขยับขา พลังงานขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น พลังลม พลังคลื่นในทะเล ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกเก็บไว้ในแบตเตอรี่หรือตัวเก็บประจุ

นาโนเจนเนอเรเตอร์ (Nanogenerator) เป็นเทคโนโลยีชนิดหนึ่งที่จะเปลี่ยนจากพลังงานเชิงกล พลังงานความร้อน ไปเป็นพลังงานงานไฟฟ้า โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพขนาดเล็ก โดยนาโนเจนเนอเรเตอร์ แบ่งได้ 3 ชนิด ได้แก่ (1) เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) เกิดไฟฟ้าเมื่อมีการกดหรือการบิด มักจะใช้เส้นลวดนาโน (2) ไทโรโบอิเล็กทริก (Triboelectric) เกิดไฟฟ้าเมื่อมีการเสียดสีสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานทั้งข้างใต้เยาะ วัสดุที่ใช้ทำเป็สารอินทรีย์ และ (3) ไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric) เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยในงานวิจัยนี้ให้ความสนใจไปที่ตัวเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ เนื่องจากสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานกลรอบตัวเรามาใช้ประโยชน์ได้สูงสุด ซึ่งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ตัวแรกที่ถูกนำเสนอขึ้นมาเพื่อใช้งาน เป็นนาโนเจนเนอเรเตอร์ก็คือ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยเป็นการใช้งานซิงค์ออกไซด์ในลักษณะของเส้นลวดนาโนที่ปลูกขึ้นบนแผ่นซิลิกอนและเคลือบด้วยแพลทินัมเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแล้วนำไปติดตั้งที่หัววัดของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ในโหมดสัมผัสเพื่อทดลองรับแรงจากการสัมผัสพื้นผิว

วัสดุและหัววัด AFM และแสดงสัญญาณทางไฟฟ้าออกมา หลังจากนั้นเป็นต้นมานักวิจัยจำนวนมากก็ มุ่งเน้นค้นคว้าและพัฒนานาโนเจนเนอเรเตอร์ระบบนี้ โดยที่ ZnO ก็ได้รับความนิยมในการศึกษา ค้นคว้ามาตลอด เนื่องจากสามารถเตรียมให้อยู่ในรูปร่างที่ต้องการได้อย่างหลากหลายที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้การควบคุมทิศทางการโตและรูปร่างของเส้นลวดนาโน ZnO นั้นไม่ใช่เรื่องง่าย อีกทั้งยังมีข้อจำกัด ในเรื่องของการจำเป็นที่จะต้องใช้ซับสเตรตสำหรับการปลูกเส้นลวดนาโนเสมอ นอกจากนี้ค่า สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของ ZnO ที่มีถือว่าต่ำมากเมื่อเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกตัวอื่น โดยค่า  $d_{33}$  ของ ZnO มีค่าราว 12.4 pC/N ในขณะที่ค่า  $d_{33}$  ของ BaTiO<sub>3</sub> มีค่าราว 75-190 pC/N ดังนั้น การพยายามนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกโครงสร้างอื่นมาพัฒนาเป็นตัวนาโนเจนเนอเรเตอร์ก็ยังมีอยู่อย่าง ต่อเนื่องโดยเฉพาะเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ เช่น แบเรียม ไทเทเนต (BaTiO<sub>3</sub>) และเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) เนื่องจากเป็นกลุ่มที่มีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่สูงมากๆ แต่วัสดุนี้จะมีข้อจำกัดในเรื่องของการเตรียมที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากเมื่อเทียบกับ ZnO หรือความแข็งและการคงรูปของเซรามิกที่ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน ทั้งนี้ปัญหาจุดนี้ก็ได้มีนักวิจัยจำนวนหนึ่งได้เสนอแนวทางในการแก้ไข้ปัญหาโดยการนำเทคนิคทางเคมีเข้ามาช่วยในการ เตรียมผงของเซรามิกกลุ่มนี้ซึ่งนอกจากจะสามารถเตรียมผงได้ในขนาดเล็กระดับนาโนเมตรแล้วยังใช้ อุณหภูมิในกระบวนการที่ต่ำกว่ามาก และการทำนาโนเจนเนอเรเตอร์ให้อยู่ในรูปของคอมโพสิต ระหว่างผงนาโนเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกกับวัสดุกลุ่มพอลิเมอร์ซึ่งจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของชิ้นงาน ได้มาก สามารถขยายความสามารถในการนำไปใช้งานให้มีศักยภาพและคล่องตัวมากยิ่งขึ้น

ด้วยเหตุนี้เองงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งความสนใจไปที่การเลือกใช้เซรามิกแบเรียมไทเทเนต (BaTiO<sub>3</sub>) ซึ่งเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะมีค่าคงที่ทางเพียโซอิเล็กทริกสูง และไม่มียึดประกอบของสารที่จะเป็น พิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีการนำมาใช้งานเป็นนาโนเจนเนอเรเตอร์ โดยจะทำการผสมกับตัว PDMS ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่นอกจากจะมีความยืดหยุ่นแล้วยังมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกด้วยเช่นกัน ซึ่งนอกจาก งานวิจัยนี้จะทำขึ้นเพื่อทำการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตระหว่าง BaTiO<sub>3</sub> และ PDMS เพื่อใช้งานเป็น นาโนเจนเนอเรเตอร์แล้วยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของเพลาเพียโซอิเล็กทริกในมิติต่าง ๆ ด้วย ดังภาพที่ 1.1 ซึ่งเชื่อว่าหากวัสดุมีรูปร่างแตกต่างกันก็จะส่งผลให้สมบัติที่แสดงออกมาแตกต่างกันด้วย



ภาพที่ 1.1 รูปร่างของเฟสเพียโซอิเล็กทริกในมิติต่างๆ [1]

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสำหรับใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของสารเติมที่มีรูปร่างแตกต่างกันที่มีต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้

## 1.3 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้จะทำการเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีรูปร่างหลากหลายโดยในงานนี้จะเลือกใช้แบเรียมไททาเนตที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมและเส้นลวดที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร รวมถึงแผ่นนาโนของไททานเนียมออกไซด์ในสัดส่วนผสมต่าง ๆ โดยจะทำการขึ้นรูปด้วยการหล่อขึ้นงานตามแบบให้ได้ขนาดราว 3x3 เซนติเมตร จากนั้นจะทำการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ น้ำหนัก ปริมาตรและความหนาแน่นของชิ้นงานทั้งหมดพร้อมกับตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากนั้นจะทำการทดสอบกระแสและแรงดันไฟฟ้าเมื่อชิ้นงานได้รับแรงเชิงกลรวมถึงความล้าทางไฟฟ้าเมื่อวัสดุได้รับแรงเชิงกลต่อเนื่องเป็นเวลานาน เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนแบบยืดหยุ่น โดยแผนการทำวิจัยทั้งหมดแสดงไว้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนและการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน								
	2561				2562				
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาข้อมูลของ โครงการวิจัย	→								
2.จัดซื้อวัสดุอุปกรณ์และ สารเคมี	→								
3.ผสม PDMS กับ อนุภาคแบเรียมไททาเนต		→							
4.วัดสมบัติทางไฟฟ้า ไดอิเล็กทริกของ PDMS ที่ผสมกับ Barium titanate nanoparticel				→					
5.วัดสมบัติเพียโซอิเล็กท ริกของ PDMS ที่ผสมกับ Barium titanate nanoparticel						→			
6.ตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างจุลภาค (SEM) ของ PDMS ที่ผสมกับ Barium titanate nanoparticel							→		
7. ตรวจสอบเอกลักษณ์ ของสารด้วยเครื่อง XRD								→	
8.ตรวจสอบเอกลักษณ์ ของสารในวัสดุคอมโพสิต ด้วยเครื่อง FT-IR									→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ แบบเรียบมโททานาคอนดคุมสมบัติต่าง ๆ วิธีการเตรียมแบเรียมโททานาคอนด รวมไปถึง ทฤษฎีการตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆในนาโนคอมโพสิตโพลีเมอร์โดยมีละเอียดดังต่อไปนี้

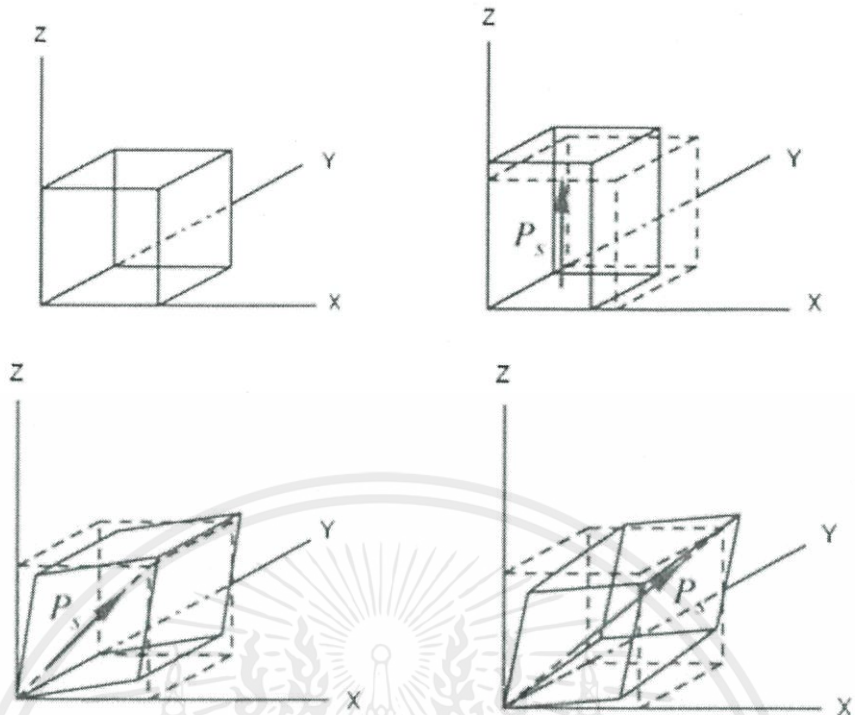
#### 2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) ถูกค้นพบครั้งแรกในปี 1880 โดยสองพี่น้องซึ่งเป็นนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Pierre และ Jacques Curie โดยได้ศึกษาผลึกของแร่บางชนิดเช่น ควอตซ์ (Quartz) ที่สามารถให้กำเนิดไฟฟ้าได้เมื่อมีแรงกดกระทำต่อผลึกโดยการวัดประจุบนผิวของสารตัวอย่างปรากฏการณ์นี้เรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก คำว่าเพียโซ (Piezo) มาจากภาษากรีกที่มีความหมายถึงการกดหรือบีบ ดังนั้นสภาพเพียโซอิเล็กทริกจึงเป็นการเกิดขึ้นของสภาพทางไฟฟ้าจากแรงกดที่ให้เข้าไปกับผลึกซึ่งเป็นแรงเชิงกลทำให้เกิดความเครียดในผลึกซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวไปในทางทิศเดียวกันเรียกว่าการโพลาไรเซชันและให้กระแสไฟฟ้าออกมา ปริมาณและเครื่องหมายของการโพลาไรเซชันจะแปรผันตามความเครียดที่ได้รับ หนึ่งในลักษณะเฉพาะโดยตรงของปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกคือสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงผันกลับได้หมายความว่าวัสดุที่แสดงผลกระทบจากเพียโซอิเล็กทริกโดยตรงจากการที่วัสดุสามารถเกิดขั้วไฟฟ้าขึ้นเนื่องจากความเครียด (Strain) เมื่อได้รับความเค้น (Stress) เข้าไปเรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง Direct Effect (ภาพที่ 2.1) และในทางกลับกันเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุที่เป็นเพียโซอิเล็กทริกแล้วสามารถเกิดความเครียดซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป เรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม Converse Effect (ภาพที่ 2.2)



ภาพที่ 2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง Direct Effect [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



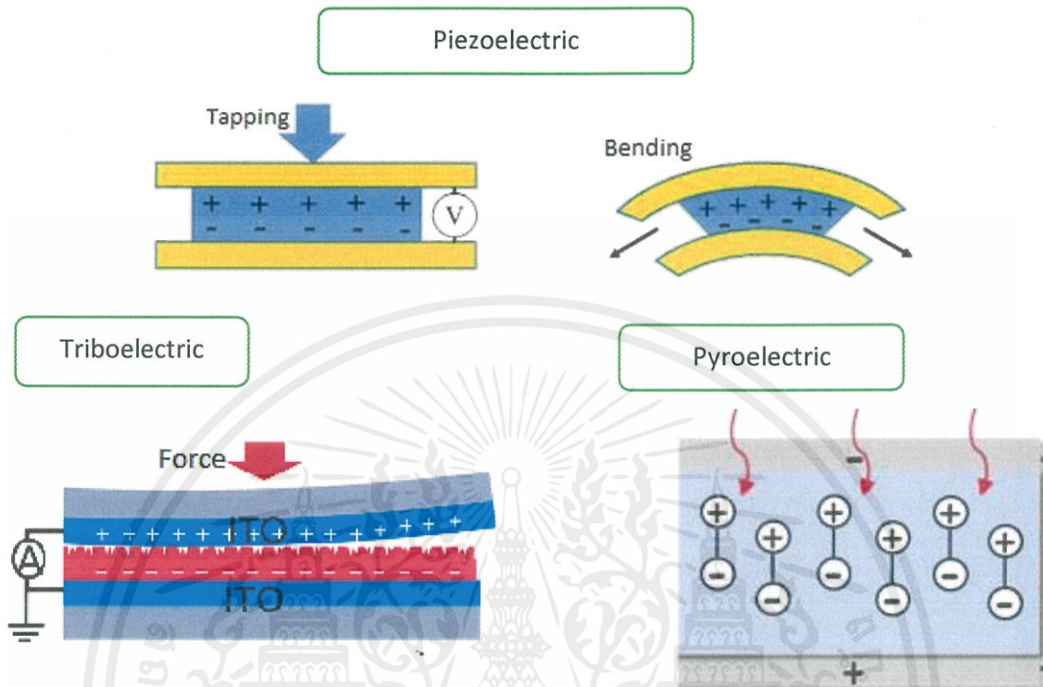
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างคิวบิกที่มีการให้กระแสไฟฟ้าในแนวแกน z จะเกิดการยืดหดตัวในแนวแกน z โครงสร้าง เปลี่ยนเป็นเตตราโกนัล (ภาพขวาบน) ให้กระแสไฟฟ้าในแนวแกน x หรือ y เกิดการเฉือนโครงสร้างเปลี่ยนเป็นรอมโบฮีดรัล (ภาพซ้ายล่าง) หรือ โมโนคลินิก (ภาพ ขวาล่าง) [4]

## 2.2 เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (Piezoelectric Nanogenerator)

แหล่งกำเนิดไฟฟ้านาโนหรือนาโนเจนเนอเรเตอร์ (Nanogenerator) เป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานที่อยู่รอบ ๆ ตัวเราแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในชีวิตประจำวันโดยนาโนเจนเนอเรเตอร์แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (Piezoelectric) ไตรโบอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (Triboelectric) และไพโรอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (Pyroelectric) โดยตัวเพียโซอิเล็กทริกและ ไตรโบอิเล็กทริกจะเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเพียโซอิเล็กทริกจะเป็นแรงเชิงกลเช่น การกดหรือบิด ในขณะที่ไตรโบอิเล็กทริกจะเป็นแรงเสียดสี ส่วนประเภทสุดท้ายไพโรอิเล็กจะเปลี่ยนจากพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยภาพจำลองกลไกการเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าของนาโนเจนเนอเรเตอร์แต่ละประเภทแสดงดังภาพที่ 2.5 ทั้งนี้ไม่ว่าจะเป็นนาโนเจนเนอเรเตอร์ประเภทใดสิ่งที่สำคัญของประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปของพลังงานจะอยู่ที่โครงสร้างผลึกของวัสดุเป็นหลักซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากในภาพจำลองซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุแต่ละประเภทในขณะที่โครงสร้างจุลภาคและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างมหภาคก็มีบทบาทต่อการเปลี่ยนรูปพลังงานไม่แพ้กันแต่ทั้งสองโครงสร้างนี้สามารถปรับแต่งให้เป็นไปตามต้องการได้ผ่านตัวแปรในระหว่างกระบวนการเตรียมนั่นเอง



ภาพที่ 2.5 ภาพจำลองกลไกการเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าของนาโนเจนเนอเรเตอร์แต่ละประเภท[5]

ทั้งนี้ในโครงงานวิจัยนี้มุ่งความสนใจไปที่ตัวเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (Piezoelectric Nanogenerator) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ทำจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีการศึกษาค้นคว้ามาเป็นเวลานานทำให้มีข้อมูลของวัสดุกลุ่มนี้ค่อนข้างมาก มีคำอธิบายเกี่ยวกับผลกระทบของขนาดในระดับนาโนเมตรที่มีต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและสมบัติทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องค่อนข้างมาก จึงทำให้มีการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่หลากหลายรวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วย ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีเนื่องจากทำให้มีแหล่งข้อมูลสำหรับค้นคว้าและอ้างอิงที่ถูกต้องแม่นยำ โดยเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์จะอาศัยหลักการของปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก ซึ่งพิจารณาอันตรกิริยาระหว่างพฤติกรรมเชิงกลกับพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ว่า

$$S = s^E T + dE \quad \text{และ} \quad D = dT + \epsilon^T E \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = -gT + (\varepsilon^T)^{-1}D \quad \text{และ} \quad S = s^D T + gD \quad (2.2)$$

เมื่อ  $E$  คือ สนามไฟฟ้า ( $Vm^{-1}$ )

$T$  คือ ความเค้น ( $Nm^{-2}$ )

$S$  คือ ความเครียด (ไม่มีหน่วย)

$D$  คือ การกระจัดไดอิเล็กทริก ( $Cm^{-2}$ )

โดยตัวยกกำลังที่อยู่บนค่าสภาพยอมไดอิเล็กทริก  $\varepsilon$  (permittivity) และสภาพยืดหยุ่น  $S$  (compliance) นั้นหมายถึงปริมาณที่ควบคุมให้คงที่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด เช่น  $\varepsilon^T$  หมายถึงสภาพยอมไดอิเล็กทริก (permittivity) ที่ความเค้นคงที่ สำหรับค่า  $d$  และ  $g$  นั่นก็คือค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric constants) นั่นเอง ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของ  $d$  และ  $g$  ได้ดังสมการ (3) ดังนี้

$$d = \varepsilon_r \varepsilon_0 g \quad (2.3)$$

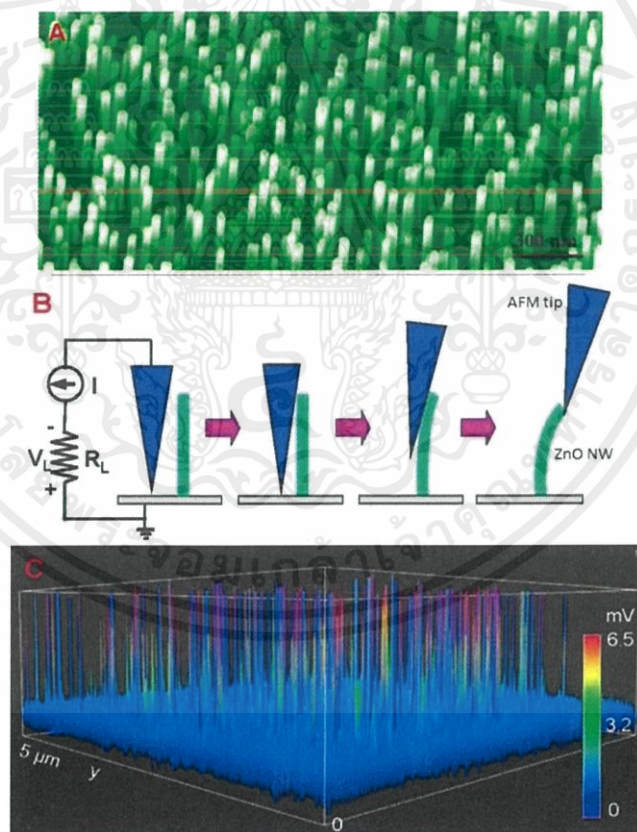
โดยที่  $\varepsilon_r$  คือ สภาพยอมสัมพันธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

$\varepsilon_0$  คือ สภาพยอมของสุญญากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ  $8.85 \times 10^{-12} F/m$

เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ตัวแรกที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้งานเพื่อเป็นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนั้นทำจากเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanowire) ที่ปลูกบนแผ่นซิลิกอนและเคลือบด้วยแพลทินัมเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแล้วนำไปติดตั้งที่หัววัดของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ในโหมดสัมผัสเพื่อทดลองรับแรงจากการสัมผัสพื้นผิววัสดุแล้วจึงตรวจสอบสัญญาณทางไฟฟ้าที่แสดงออกมาผ่านหัววัด AFM โดยเส้นลวดนาโน ZnO นี้จัดว่ามีรูปร่างแบบ 1 มิติ (1D) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 นาโนเมตรและมีความยาวมากกว่า 1 ไมโครเมตร อีกทั้งวัสดุส่วนมากที่อยู่ในรูปของเส้นลวดนาโนนั้นมักจะเป็นเฟสเดียวทำให้ความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานมีความพิเศษมากกว่าในสถานะอื่น ไม่ว่าจะเป็นการแสดงผลปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกมากกว่าปกติถึง 400-500% เนื่องจากความสามารถในการโค้งงอและค่าความเครียด (strain) ที่มากเป็นพิเศษ หรือความไวต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงกลขนาดเล็ก โดยภาพที่ 2.6 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดนาโน ZnO ที่ประยุกต์เป็นเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ พร้อมภาพจำลองระหว่างการใช้งานร่วมกับหัววัด AFM ทั้งนี้แม้ว่าเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ที่ทำจากเส้นลวดนาโน ZnO จะมีประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวและแปลงพลังงานได้มากแต่ก็ยังคงมีข้อจำกัดในแง่ของความยากในการเตรียมให้เกิดเป็นเส้นลวดนาโนที่สวยงามและเป็นระเบียบ ความจำเป็นต้องใช้ขั้นตอนทุกครั้งในการปลูกเส้นลวดนาโน และค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของ ZnO ที่ต่ำกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกตัวอื่นมาก จึงได้มีนักวิจัยจำนวนหนึ่งได้ขยายวงการศึกษาและพัฒนาเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ออกไปยังวัสดุอื่น โดยเฉพาะในกลุ่มวัสดุเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่สูงมาก โดยความสนใจหลักมุ่งไปที่เซรามิกแบเรียมไทเทเนต ( $\text{BaTiO}_3$ ) ซึ่งเป็นเซรามิกที่มีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่สูงและไม่มีองค์ประกอบของสารตะกั่วหรือปรอทที่จะทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังสามารถเตรียมได้ง่ายในหลากหลายรูปร่างและมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรด้วยไม่ว่าจะเป็นอนุภาค เส้นลวด คอรัล-เชลล์ หรือเส้นใย



ภาพที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดนาโน ZnO ที่ประยุกต์ใช้เป็นเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์และภาพจำลองระหว่างการใช้งานร่วมกับหัววัด AFM [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 เพียโซอิเล็กทริก-พอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต (Piezoelectric nanocomposite)

ในการนำเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกโครงสร้างเพอรอฟสไกต์มาพัฒนาเป็นเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์นั้นก็มีข้อจำกัดอยู่โดยเฉพาะในเรื่องของความไม่ยืดหยุ่นของเซรามิก โดยเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกนั้นจะสามารถแสดงสมบัติทางไฟฟ้าได้อย่างเต็มประสิทธิภาพที่สุดเมื่อชิ้นงานมีความแน่น ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็ง (hardness) มากและใส่สอดคล้องกับหลักการทำงานของนาโนเจนเนอเรเตอร์ที่ต้องมีการเคลื่อนที่ของผลึกผ่านแรงเชิงกลในลักษณะของการยืดหดหรือโค้งงอจึงจะสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานทางไฟฟ้าได้ ดังนั้นแนวทางการแก้ไขความไม่ยืดหยุ่นของชิ้นงานนี้คือการเตรียมให้อยู่ในรูปของคอมโพสิตระหว่างเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกกับพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง โดยหลักการสำคัญของการเตรียมคอมโพสิตนี้คือจะต้องสามารถดึงสมบัติที่ดีของแต่ละเฟสออกมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งสมบัติที่ดีของเฟสที่เป็นเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกคือมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกสูง ส่วนสมบัติที่ดีของเฟสพอลิเมอร์ก็คือมีความสามารถในการยืดหยุ่นสูง นั้นหมายความว่าคอมโพสิตระหว่างเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกกับพอลิเมอร์ที่เตรียมได้นี้จะต้องมีความยืดหยุ่นที่ดีและมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่ดีด้วยเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานนาโนเจนเนอเรเตอร์ยืดหยุ่น โดยภาพที่ 2.7 เป็นภาพจำลองลักษณะโครงสร้างของคอมโพสิตที่ควรจะเป็น ซึ่งเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกจะอยู่ในรูปของอนุภาคที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรล้อมรอบด้วยเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงและมีการยึดเกาะกันกับอนุภาคได้ดี โดยหากกำหนดให้  $M$  คือเมทริกซ์พอลิเมอร์ และ  $P$  คืออนุภาคเพียโซอิเล็กทริกแล้วจะสามารถทำนายค่ามอดูลัสยืดหยุ่น ( $E$ ) ของคอมโพสิตที่เกิดขึ้นได้ด้วยกฎการผสมอย่างง่าย (rule of mixture) ตามสมการดังนี้

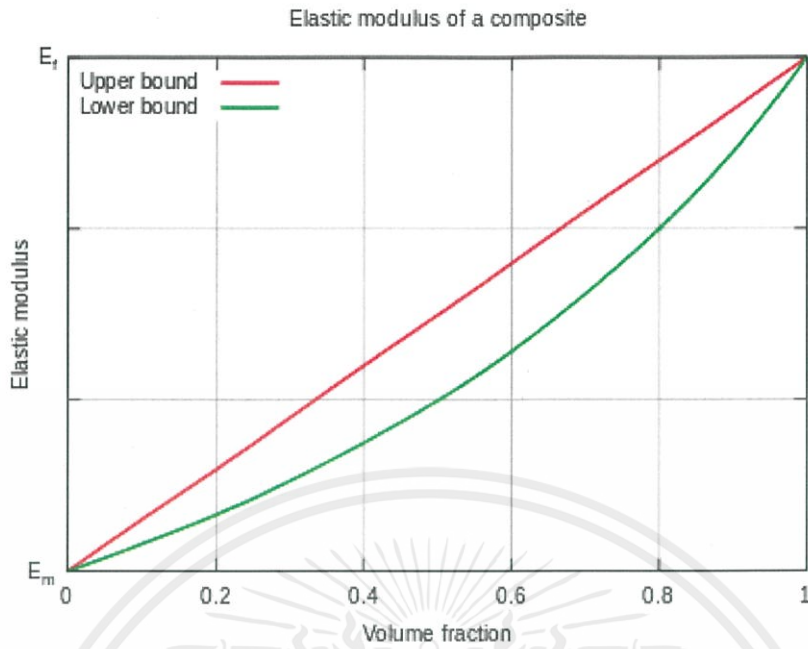
ค่าที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ (ขอบบน) คือ

$$E_1 = E_M V_M + E_P V_P \quad (2.4)$$

ค่าที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ (ขอบล่าง) คือ

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_M}{E_M} + \frac{V_P}{E_P} \quad (2.5)$$

โดย  $V$  คือ ค่าสัดส่วนโดยปริมาตร



ภาพที่ 2.7 เป็นภาพจำลองลักษณะโครงสร้างของคอมโพสิตที่ควรจะเป็น ตามกฎของการผสม [7]

ในการทำงานเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกก็สามารถทำนายได้ด้วยกฎการผสมอย่างง่ายนี้ เช่นเดียวกัน โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิตนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของแต่ละเฟสแล้ว ยังมีค่าสัดส่วนการผสมที่ต้องคำนึงถึงเสมอ และเมื่อพิจารณาปัจจัยของรูปร่างและการวางตัวของเฟสพร้อมด้วยพบว่ามีสมการในการทำนายสมบัติก็จะซับซ้อนขึ้น ซึ่งหากกำหนดให้ค่า  $K$  คือตัวแปรประสิทธิภาพ (efficiency parameter) ของรูปร่างและการวางตัวของเฟส จะสามารถเขียนสมการได้ใหม่ว่า

$$E_1 = E_M V_M + M E_P V_P \quad (2.6)$$

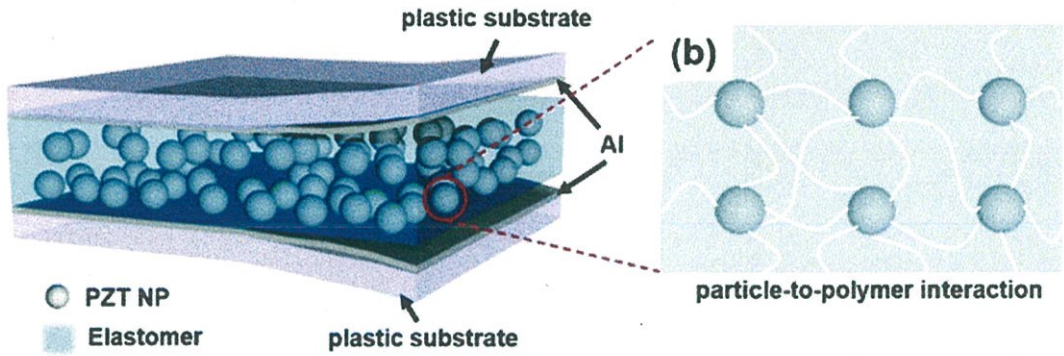
โดย  $M$  มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเฟสตรงมีรูปร่างแบบ 1 มิติ และวางตัวแนวเดียวกับทิศทางของแรงกล

$M$  มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อเฟสตรงมีรูปร่างแบบ 1 มิติ และวางตัวตั้งฉากกับทิศทางของแรงกล

$M$  มีค่าเท่ากับ  $3/8$  เมื่อเฟสตรงมีรูปร่างแบบ 2 มิติ

$M$  มีค่าเท่ากับ  $1/5$  เมื่อเฟสตรงมีรูปร่างแบบ 3 มิติ

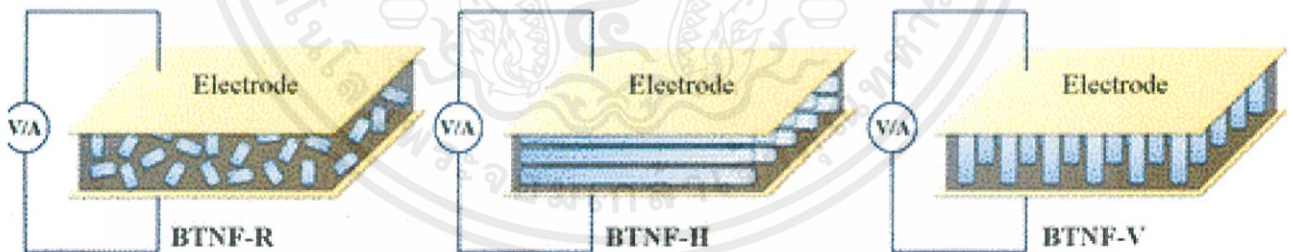
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.8 ภาพจำลองลักษณะโครงสร้างของคอมโพสิตระหว่างเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกกับพอลิเมอร์สำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นนาโนเจนเนอเรเตอร์ยืดหยุ่น [8]

#### 2.4 งานวิจัยและบทความที่เกี่ยวข้อง

จากเอกสารและงานวิจัยของ Jing Yan และ Young Gyu Jeong พบว่าจากการที่ทำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต ที่เตรียมด้วยวิธีการโซลเจล และกระบวนการเผา ซึ่งในงานวิจัยได้มีการเตรียมเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่มีการจัดเรียงในแนวที่ต่างกันคือ แนวตั้ง แนวนอน และแบบสุ่ม ดังภาพที่ 2.9 ที่มีการจัดเรียงตัวที่ต่างกันเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพเพียโซอิเล็กทริกของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่มีการจัดเรียงในแนวที่ต่างกัน



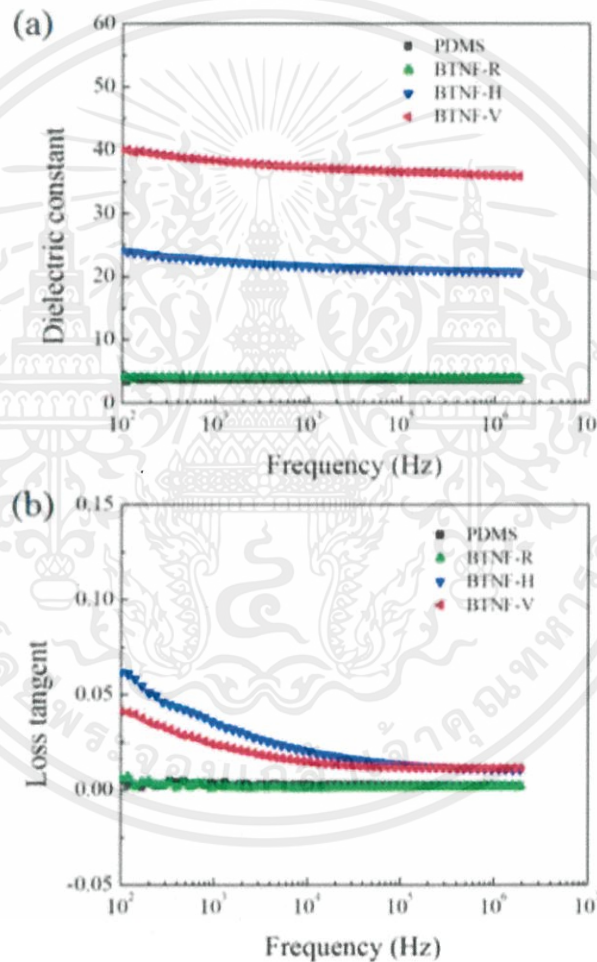
ภาพที่ 2.9 เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่มีการจัดเรียงในแนวที่ต่างกัน [9]

จากงานวิจัยพบว่าค่าความเป็นไดอิเล็กทริกและเพียโซอิเล็กทริกของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตขึ้นอยู่กับทิศทางการจัดตำแหน่งหรือทิศทาง จากงานวิจัยจะเห็นได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่มีการจัดเรียงในแนวตั้ง (BTNF-V) และแนวนอน (BTNF-H) มีค่าสูงกว่าเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่มีการจัดเรียงแบบสุ่ม (BTNF-R) ถึงแม้ว่าจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ เช่น ที่ 40.23 ที่ 100 Hz ถึง 35.88 ที่ 2 MHz ของตัว BTNF-V และ 23.99 ที่ 100 Hz ถึง 20.72 ที่ 2 MHz ของตัว BTNF-H จากผลการทดลองที่ได้อัตราส่วนที่สูงขึ้นของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตใน BTNF-V และ BTNF-H เนื่องจากมีค่าซึมผ่านที่ต่ำกว่า BTNF-R ดังภาพที่ 2.10 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่เรียงตัวแบบสุ่ม (BTNF-R) ยังคงมีค่าคงที่ในช่วงความถี่ของคลื่นความถี่ที่ใช้ไฟฟ้าด้วยค่า 3.85 และ 4.14 ที่ 100 Hz ตามลำดับ

จากข้อเท็จจริงที่ว่าเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตมีค่าความเป็นไดอิเล็กทริกที่สูงกว่า ~820 มากกว่า PDMS บริสุทธิ์ที่ 3.85 และ BTNF-V มีความหนาแน่นของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตสูงกว่า BTNF-H ตามทิศทางการทดสอบ

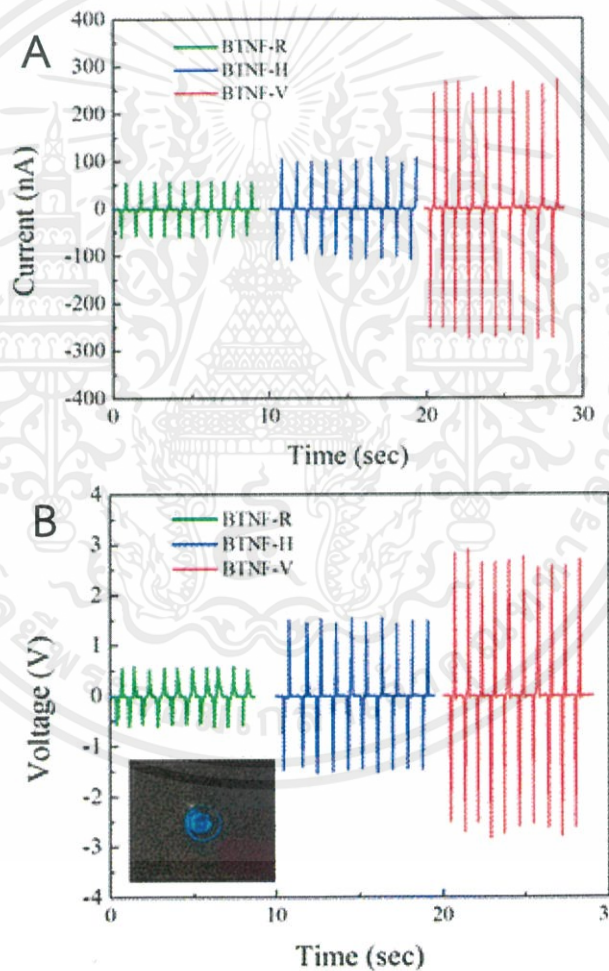


ภาพที่ 2.10 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน และเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่เรียงตัวแบบสุ่ม (BTNF-R) [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจัดตำแหน่งที่แตกต่างกันของเส้นใยนาโนแบเรียมไททานेट แสดงให้เห็นถึงค่าแรงดันไฟฟ้าดังภาพที่ 2.11 ว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกเฉลี่ยถึง  $\sim 0.56$   $\sim 1.48$  และ  $\sim 2.67$  V สำหรับ BTNF-R, BTNF-H และ BTNF-V ตามลำดับซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการแทรกซึม และการจัดตำแหน่งตามเกณฑ์ทิศทางระหว่างขั้วไฟฟ้าโดยเฉพาะ BTNF-V ใช้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่  $\sim 2.67$  V ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ผลของการทำให้เกิดขั้ว (Efficient poling) สำหรับ BTNF-V ถ้าไม่มีการใช้การทำให้เกิดขั้วสัญญาณแรงดันส่งออกของ BTNF-V จะอยู่ที่ประมาณ  $-0.08$  V.

จากภาพที่ 2.11 แสดงค่ากระแสที่ออกมาของ BTNF-R, BTNF-H และ BTNF-V มีค่าเท่ากับ 57.78  $\sim 103.33$  และ  $\sim 261.40$  nA ตามลำดับ ซึ่งดังภาพแสดงการแปรผันเช่นเดียวกับแรงดันส่งออก นอกจากนี้ยังกล่าวได้ว่ากำลังส่งออกที่ผลิตจาก BTNF-V สูงพอที่จะส่องโดยตรงกับไฟไดโอดเปล่งแสง (LED) ซึ่งพาณิชย์ได้ดังแสดงในภาพ 2.11



ภาพที่ 2.11 (A) แรงดันไฟฟ้าส่งออก และ (B) การเปลี่ยนแปลงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน

BaTiO<sub>3</sub>/PDMS ภายใต้การบีบอัดด้วยกลไกเป็นระยะ ๆ รูปที่แทรกใน [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยสรุปได้ว่าเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตที่ได้รับการจัดวางอยู่ในแนวเดียวกันถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และผ่านกระบวนการเผา โดยรวมกับพอลิโดเมทิลไซลอกเซน เครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโน BaTiO<sub>3</sub>/PDMS ยืดหยุ่นได้ ที่มีการจัดเรียงตัวแตกต่างกัน 3 แบบ ซึ่งผลิตด้วยเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนตเรียงตามแนวตั้ง แนวนอน และแบบส้อมในเมทริกซ์พอลิโดเมทิลไซลอกเซนที่ถูกผลิตขึ้นพบว่าคุณสมบัติของไดอิเล็กทริก และเพียโซอิเล็กทริกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนขึ้นอยู่กับทิศทางการจัดตำแหน่งของเส้นใยนาโนของเส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต

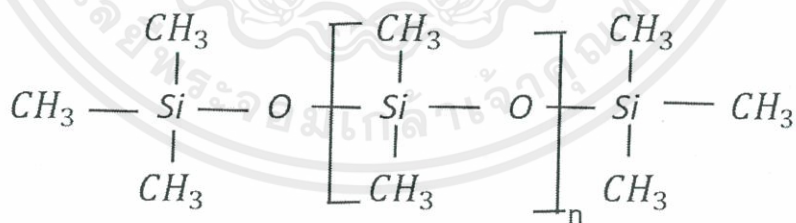
ค่าความเป็นไดอิเล็กทริกของ BTNF-V และ BTNF-H สูงกว่า BTNF-R ถึงแม้ว่าจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความถี่เช่น 40.23 ที่ 100 Hz ถึง 35.88 ที่ 2 MHz สำหรับ BTNF-V และ 23.99 ที่ 100 Hz ถึง 20.72 ที่ 2 MHz สำหรับ BTNF-H

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 พลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นได้ถูกนำมาใช้ในไดโอดเปล่งแสงเชิงพาสซีฟ และสามารถชาร์จประจุ 1  $\mu$ F เป็น 0.46 V ใน 34 วินาที

## 2.5 วัสดุและเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัย

### 2.5.1 พอลิโดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane : PDMS)

พอลิโดเมทิลไซลอกเซน หรือ ซิลิโคน จะประกอบไปด้วยสารอนินทรีย์ที่มีหน่วยโครงสร้างเป็นแบบ (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>SiO ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 หน่วยโครงสร้างของพอลิโดเมทิลไซลอกเซน (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>SiO [10]

มีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวมัน ไม่มีสี แสงสามารถทะลุผ่านได้ ไม่ละลายน้ำ จุดหลอมเหลวอยู่ที่ -49.9 - 40 °C อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำ (T<sub>g</sub> ≈ -125 °C) ความสามารถในการกระจายตัวที่ไม่ซ้ำกัน (ค่าโมดูลัสเฉือนของ G อาจแตกต่างกันระหว่าง 100 kPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 3 MPa) การสูญเสียการสัมผัสกันต่ำมาก ( $\tan\delta \sim 0.001$ ) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของค่าคงตัวทางกายภาพยังน้อย (ยกเว้นการขยายตัวทางความร้อน  $\alpha \approx 20 \times 10^{-5} K^{-1}$ ) ความเป็นฉนวน (~14) (อย่างน้อยที่สุดจาก -100 °C ถึง +100 °C) ปฏิกริยาทางเคมีต่ำ ยกเว้นที่ค่าสัมบูรณ์ของค่าความเป็นกรด - ต่าง ความสามารถในการดูดซึมก๊าซสูง เป็นธรรมชาติไม่มีพิษ ไม่มีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า ราคาถูก ใช้งานทั่วไปทางด้านคอนแทคเลนส์ และการผ่าตัดศัลยกรรม

สมบัติทางเคมีของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน หลังจากการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) และโครงสร้างร่างแห (Cross linked) แล้วตัวอย่างพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่เป็นของแข็งจะทำให้พื้นผิวที่อยู่ภายนอกไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ซึ่งทำให้น้ำซึมผ่านพื้นผิวไม่ได้ อย่างไรก็ตาม ตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดอาจทำให้เกิดอาการบวมที่มีขนาดเล็กพอที่จะสามารถใช้ร่วมกับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนได้ เช่น ในช่องของอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิก (Microfluidic PDMS) อัตราส่วนการบวมของวัสดุมีความสัมพันธ์เชิงผกผันกับค่าการละลายของตัวทำละลายไดไอโซโพรพิลลามาย (Diisopropylamine) ขยายสู่ระดับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนมากที่สุด ตัวทำละลาย เช่น คลอโรฟอร์ม อีเทอร์ (Chloroform ether) และเตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran) จะทำให้วัสดุเกิดการบวมในปริมาณมาก ตัวทำละลาย เช่น อะซิโตน 1- โพรพานอล และไพรีดีน จะทำให้วัสดุเกิดการบวมในปริมาณน้อย แอลกอฮอล์และตัวทำละลายมีขี้ผึ้ง เช่น เมทานอล กลีเซอรอล และน้ำ ไม่ทำให้เกิดการขยายตัวของวัสดุ

สมบัติทางแสงของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน เป็นวัสดุใส เมื่อโมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงสามารถกำหนดค่าดัชนีหักเหของแสงได้ (Refractive index) นำไปใช้งานทางด้านเลนส์ กล้อง และเส้นใยแก้วนำแสงที่มีสารเคมีเป็นตัววัด (Sensor) สมบัติทางกลของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน เมื่อเกิดโครงสร้างร่างแหแล้วจะมีลักษณะทางกายภาพเป็นของแข็งใสที่สามารถยืดหยุ่นได้ เมื่อทำการโค้งงอวัสดุและปล่อยพอลิเมอไรเซอร์จะกลับมาสู่รูปร่างเดิม สมบัติการยืดหยุ่นจะขึ้นกับปริมาณสารเชื่อมโยง ถ้าอยู่ในปริมาณมาก พอลิเมอไรเซอร์จะมีความแข็งแรงมากขึ้น ถ้ามีปริมาณน้อยหรือไม่มี พอลิเมอไรเซอร์จะคงสภาพเป็นของเหลวหนืด

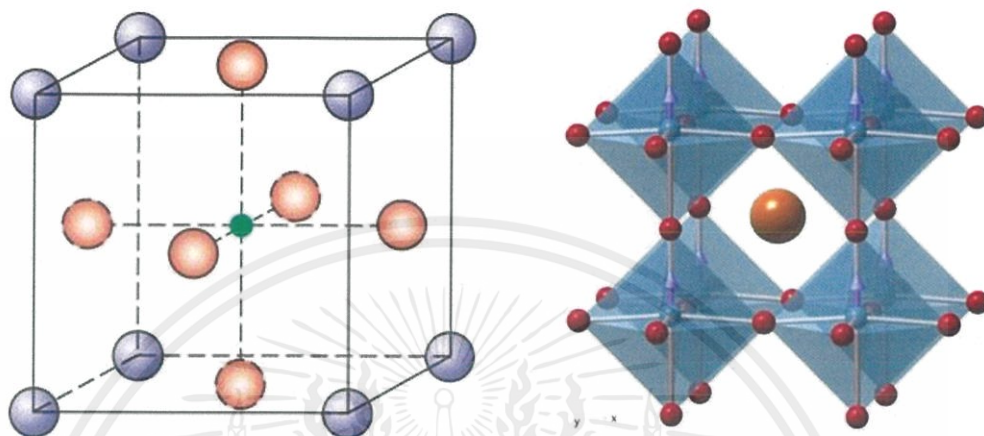
## 2.5.2 แบเรียมไททานเตต (Barium titanate)

แบเรียมไททานเตตตั้งภาพ เป็นสารที่ต้องสังเคราะห์ขึ้น เนื่องจากไม่พบในธรรมชาติ การเตรียมทำได้หลายวิธี วิธีการเตรียมที่ง่ายที่สุดคือทำปฏิกิริยาระหว่างแบเรียมคาร์บอเนตและไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเผาที่อุณหภูมิสูง อีกวิธีการหนึ่งคือกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมในระบบสารละลายของสารประกอบแบเรียมและไทเทเนียมโดยการตกตะกอนลงมาแล้วนำไปเผา แบเรียมไททานเตตส่วนใหญ่ใช้เป็นตัวเก็บประจุ โดยมีปริมาณการใช้ถึงประมาณ 14 ล้านปอนด์ต่อปี ซึ่งเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 30 พันล้านตัวเก็บประจุ ทั้งในรูปแบบของตัวเก็บประจุแบบแผ่นกลมและแบบมีลิตีเลเยอร์ เซรามิก

แบบเรียบมีททานต์มีค่าสัมประสิทธิ์และค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกสูง และไม่มีองค์ประกอบของสาร ตะกั่วหรือสารที่ทำให้เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม



ภาพ 2.13 ลักษณะโครงสร้างของแบเรียมไททานต์ [11]

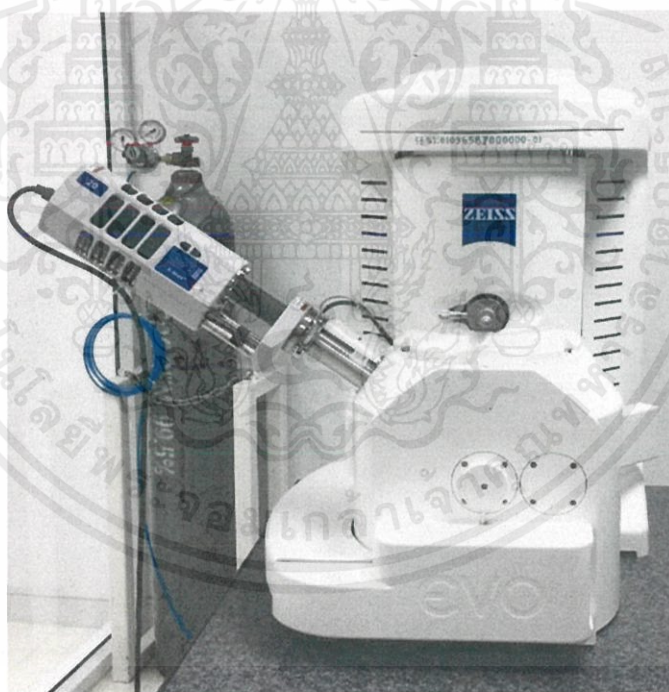
### 2.5.3 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาค (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยาย 6 -1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร สามารถถ่ายภาพตัวอย่างได้หลากหลายโดยไม่มีควมจำเป็นต้องเคลือบผิวด้วยสารตัวนำไฟฟ้าก่อนการถ่ายภาพ โดยเลือกระบบสุญญากาศในห้องใส่ตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างแต่ละประเภท ได้แก่ ระบบสุญญากาศระดับสูง(High Vacuum) สำหรับตัวอย่างประเภทเป็นของแข็ง แห้ง และนำไฟฟ้า เช่น โลหะ ระบบสุญญากาศระดับต่ำ(Low Vacuum) สำหรับตัวอย่างประเภทเป็นของแข็ง แห้ง และไม่นำไฟฟ้าเช่น พอลิเมอร์ ยาง ระบบสุญญากาศระดับสถานะแวดล้อม(Environmental SEM) ที่สามารถทำงานที่ความดัน 10 ถึง 2600 Pa เหมาะกับตัวอย่างที่มีความชื้น มีน้ำเป็นองค์ประกอบ สามารถปรับระดับความชื้นในห้องใส่ตัวอย่างได้ตามความต้องการและสามารถวัดตัวอย่างที่มีอุณหภูมิต่ำได้ เช่น ไอศกรีม ตัวอย่างแช่แข็ง ตัวอย่างทางชีวภาพ ทางการแพทย์ เป็นต้น

หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อ

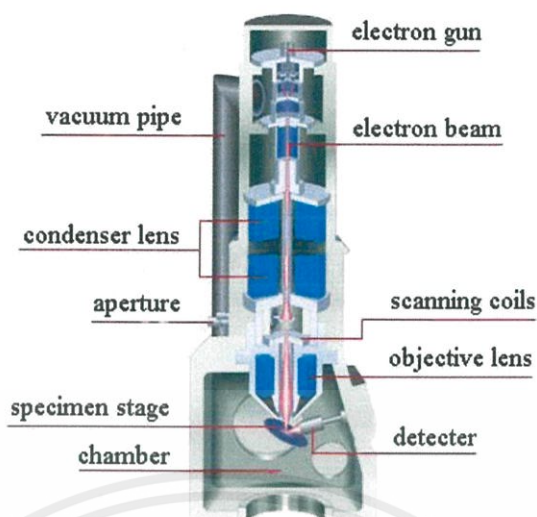
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และภาพจะแสดงผ่านจอคอมพิวเตอร์ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) สัญญาณนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว นอกจากนี้สัญญาณเหล่านี้แล้ว ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอ็กซ์เรย์, คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, ไอเจอิเล็กตรอน เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างที่แตกต่างกันไป



ภาพที่ 2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

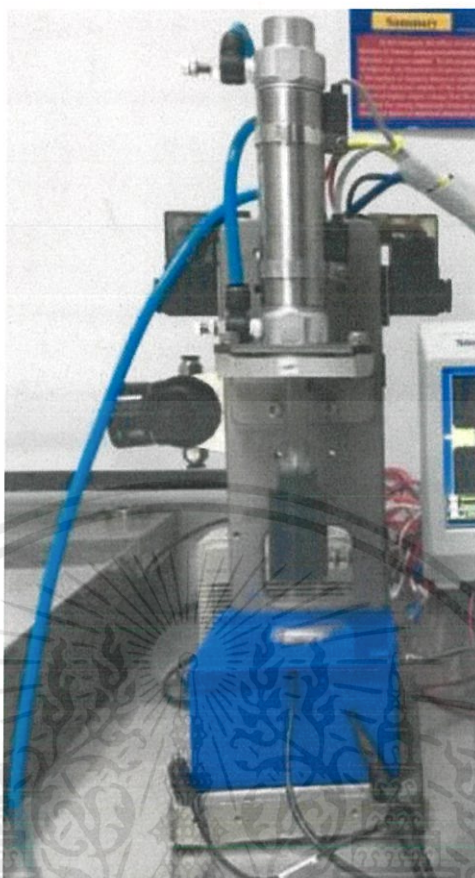
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.15 หลักการทำงานของ SEM [12]

#### 2.5.4 การตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าจากแรงกด

การทดสอบแรงดันทำโดยการยึดตัวอย่างเพียโซอิเล็กทริกแบบยึดหยุ่นไว้กับแท่นสีฟ้าของเครื่องทดสอบแรงกด รูปที่ 2.16 จากนั้นจึงเปิดสวิตช์เพื่ออัดแรงดันเข้าสู่เครื่องทดสอบแรงกด เครื่องจะทำการกดตัวอย่างเพียโซอิเล็กทริกแบบยึดหยุ่น จะได้แรงดันทางไฟฟ้า โดยค่าแรงดันทางไฟฟ้าที่ได้จะแสดงที่จอโทรทัศน์ของเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ภาพที่ 2.17 โดยใช้ฐานเวลาเท่ากับ 500 มิลลิวินาที และทำการเก็บข้อมูล 10 รอบ จากนั้นนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์



ภาพที่ 2.16 เครื่องทดสอบแรงกด (Compression machine)



ภาพที่ 2.17 ออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมีวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้กระบวนการ

#### 3.1 สารเคมีใช้ในการเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต

1. ซิลิโคนอีลาสโตเมอร์เบส (Silicone elastomer base) ผลิตโดย บริษัท ดาว คอร์ปอเรชัน (Dow corning corporation) ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium Titanate Nano Powder) ผลิตโดย บริษัท อินฟราแมท แอดวานซ์ แมททีเรียล (Inframat Advanced Materials) ประเทศสหรัฐอเมริกา

#### 3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ

##### 3.2.1 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททาเนตพอลิไดเมทิลไซ

ลอกเซน

1. บีกเกอร์ขนาด 25 และ 50 ml
2. ปิเปตขนาด 1 และ 5 ml
3. ขวดปรับปริมาตร ขนาด 10 ml
4. หลอดหยดสาร
5. ซ้อนตักสาร
6. ซ้อนพลาสติก
7. ถ้วยพลาสติกขนาดเล็ก
8. ที่คืบ
9. ฟลอยด์อลูมิเนียม
10. แท่งแม่เหล็กคนสาร
11. ก่องพลาสติก
12. เทปกาว
13. กระจกนาฬิกา
14. ครูซิเบิล
15. เตาอบสาร
16. เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.0001 กรัม รุ่น ML204 ผลิตโดยบริษัท Mettler-Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
17. เทฟลอน ออโต้เคลป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. เครื่องวัดค่า pH แบบตั้งโต๊ะ
19. เทปทองแดง
20. สายทองแดง

### 3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. ชุดทดสอบแรงกด (compressive test setup)
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) รุ่น JSM-6335F ผลิตโดยบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น
3. ออสซิลโลสโคป รุ่น ทีบีเอส 1072บี-อีดียู (TBS 1072B-EDU)
4. Fourier Transform Infrared Spectrophotometer ของ Perkin Elmer รุ่น Spectrum Two
5. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD) รุ่น SmartLa ผลิตโดยบริษัท Rigaku ประเทศแคนาดา
6. เครื่อง LCR Meter ผลิตโดยบริษัท Hewlette Packard ประเทศมาเลเซีย

## 3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมแบเรียมไททาเนต

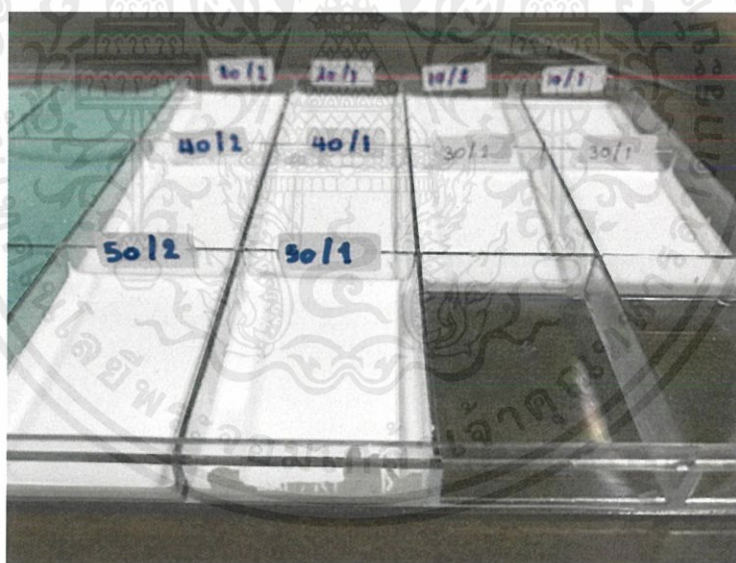
### 3.3.1 การเตรียมชิ้นงานวัสดุคอมโพสิตระหว่างอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน

ขั้นตอนการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซน โดยที่อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเป็นเฟสรอง เริ่มจากการนำอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ผลิตโดย บริษัท อินฟาแมท แอดวานซ์ แมททีเรียล ประเทศสหรัฐอเมริกา กับพอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่ผลิตโดย บริษัท ดาว คอร์นนิ่ง (Dow corning corporation) ประเทศสหรัฐอเมริกา มาชั่งโดยน้ำหนักโดยรวมของชิ้นงานหนัก 5 กรัม เริ่มจากการชั่ง สารแบเรียมไททาเนตที่ 10wt% ตามด้วย PDMS ให้น้ำหนักโดยรวมได้ทั้งหมด 5 กรัม ลงในภาชนะที่ใช้หล่อขึ้นรูป จากนั้นทำซ้ำ โดยทำการเปลี่ยนอัตราส่วนของสารแบเรียมไททาเนตที่ 20wt% 30wt% 40wt% และ 50wt% ตามลำดับ ลงบนภาชนะที่เตรียมไว้ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้สารผสมแข็งตัว เมื่อชิ้นงานแข็งตัวแล้วนำชิ้นงานที่ได้ออกมาขัดผิวเล็กน้อยเพื่อให้ชิ้นงานที่มีลักษณะเรียบและผิวเท่ากันมากยิ่งขึ้น จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ทำด้วยซิลเวอร์ เฟัน เป็นลักษณะทรงกลม เพื่อนำไปเข้าเครื่อง LCR meter เพื่อวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก จากนั้นทำชิ้นงานที่วัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเสร็จแล้ว ไปต่อขั้วโดยการนำเทปทองแดงติดให้ทั่วชิ้นงานทั้งสองด้าน จากนั้นนำสายไฟติดชิ้นงานทั้งสองด้าน โดยวางคนละฝั่ง และทำการติดเทปกาวทั้งชิ้นงานเพื่อกันอากาศ จากนั้นนำไปต่อเข้ากับชุดทดสอบแรงกดเพื่อตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของวัสดุอนุภาคนาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการผสมพอลิไดเมทิลไซลอกเซน กับอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่อัตราส่วน 10wt% 20wt% 30wt% 40wt% และ 50wt%



ภาพที่ 3.2 ชิ้นงานที่นำโนคอมโพสิตที่เตรียมได้ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 นำชิ้นงานที่เตรียมได้ทำด้วย ซิลเวอร์พ่น เป็นลักษณะทรงกลม



ภาพที่ 3.4 นำเทปทองแดงติดให้ทั่วชิ้นงานทั้งสองด้าน จากนั้นนำสายไฟติดชิ้นงานทั้งสองด้าน โดยวางคนละฝั่ง และทำการติดเทปกาวหุ้มชิ้นงานเพื่อกันอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 กระบวนการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตพอลิเมอร์

ขั้นตอนการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตพอลิเมอร์แบบเตรียมไททานเตนจะเตรียมโดยวิธีการ part of filler per hundred parts of polymer by weight (php) [13] ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{\text{filler}}{\text{polymer} + \text{curing agent} + \text{filler}} \times 100 = \text{wt\%} \quad (3.1)$$

โดยกำหนดให้ filler คือ สัดส่วนของเฟสรอง หน่วยเป็น php

Polymer คือ สัดส่วนของเฟสหลัก หน่วยเป็น php

Curing agent คือ สัดส่วนของสารช่วยให้อแข็งตัว หน่วยเป็น php

Wt% คือ น้ำหนักของเฟสรอง (filler) หน่วยเป็น wt%

\*หมายเหตุ\* ต้องกำหนดน้ำหนักรวของวัสดุคอมโพสิตและคำนวณ polymer + curing agent จะมีค่าเป็น 100 php เสมอ

### 3.5 วิธีการหาความหนาแน่นโดยรวม (bulk density)

การคำนวณหาความหนาแน่นโดยรวมของวัสดุคอมโพสิต ซึ่งคือน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุนั้น เมื่อทำการใส่สารตัวเติมลงไปในพอลิเมอร์จะส่งผลให้ความหนาแน่นโดยรวมเปลี่ยนแปลงไปซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาความหนาแน่นของวัสดุ โดยใช้สมการดังนี้

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.2)$$

โดยกำหนดให้  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน หน่วยเป็น กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

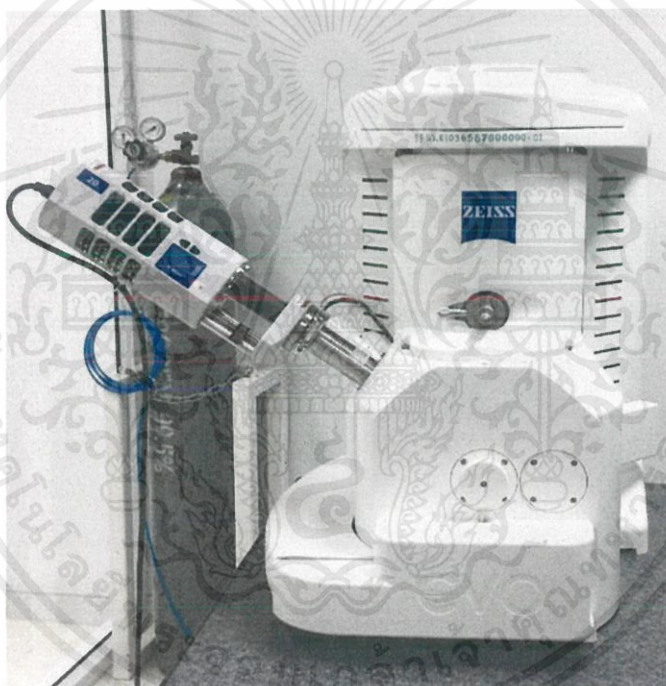
$m$  คือ น้ำหนักของชิ้นงาน หน่วยเป็น กรัม

$v$  คือ ปริมาตรของชิ้นงาน หน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร

### 3.6 เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์

#### 3.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ติดคาร์บอนเทปบนสตัป (Stub) แล้วนำตัวอย่างไปโปรยบนคาร์บอนเทป จากนั้นนำไปเคลือบทองคำโดยเทคนิคสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปใส่บนแท่นรองรับตัวอย่างของเครื่องตรวจสอบเอกลักษณ์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยในการทดลองจะศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ เส้นใยก่อนเผา เส้นใยนาโนแบบเรียมไททานตหลังเผา อนุภาคนาโนแบบเรียมไท-ทานต การกระจายตัวของเส้นใยนาโนแบบเรียมไททานต และอนุภาคนาโนแบบเรียมไททานตบนขั้วไฟฟ้าอินเทอร์ดิจิทัล

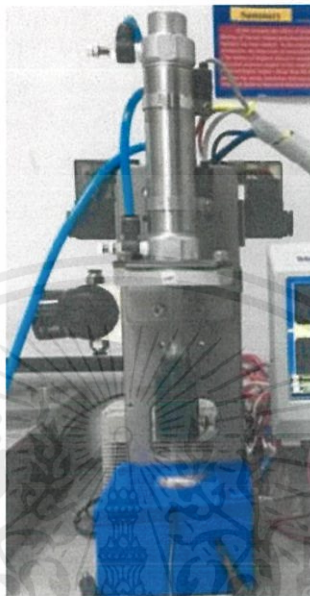


ภาพที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.2 ชุดการทดสอบแรงดันไฟฟ้าจากแรงกด

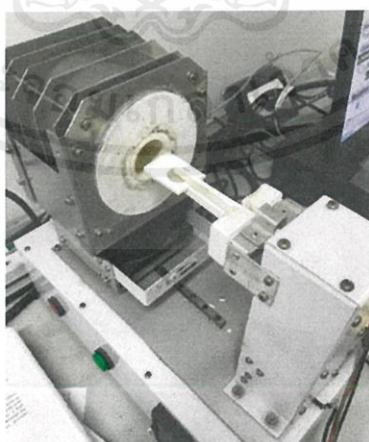
นำตัวอย่างวางบนแท่นกด ต่อขั้วไฟฟ้าเปิดบีมลมเพื่อให้แท่งกดเคลื่อนที่ตกลงบนตัวอย่าง สัญญาณที่ได้จะแสดงผลที่หน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป จากนั้นบันทึกผลโดยการกดบันทึกที่หน้าจอ และนำข้อมูลที่ได้มาพลอตกราฟ



ภาพที่ 3.6 ชุดทดสอบแรงกด

### 3.6.3 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

สามารถทำได้โดยการวางชิ้นงานที่จะทดสอบระหว่างขั้วไฟฟ้าของเครื่อง LCR meter โดยเครื่องจะทำการวัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ

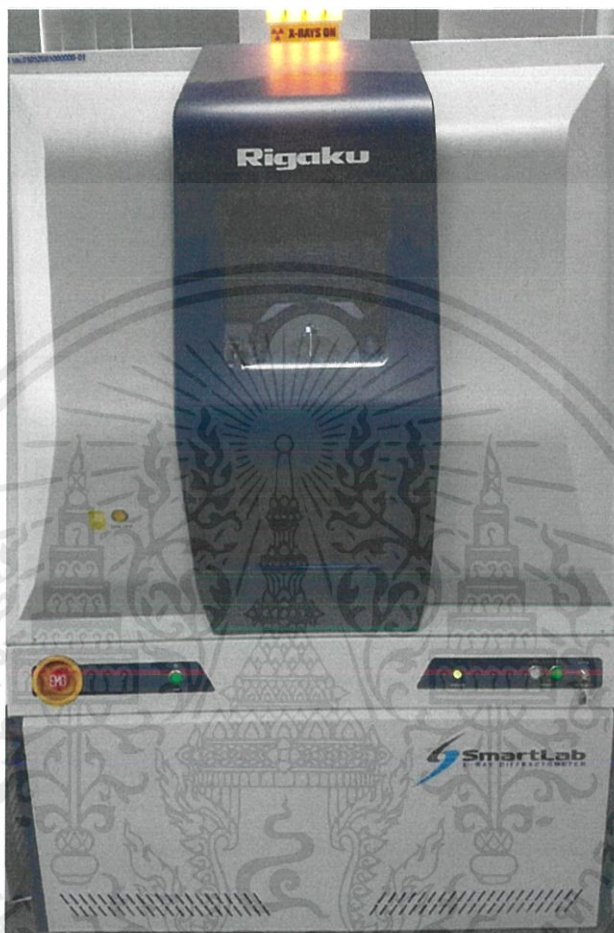


ภาพที่ 3.7 เครื่อง LCR meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-Ray Diffractometer (XRD)

ใส่สารตัวอย่างในภาชนะสำหรับใส่สารตัวอย่าง เคลื่อนให้ตัวให้ผิวของตัวอย่างเรียบและเสมอกับขอบของแผ่นที่บรรจุ นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ไปใส่ที่ตำแหน่งตัวอย่างของเครื่อง

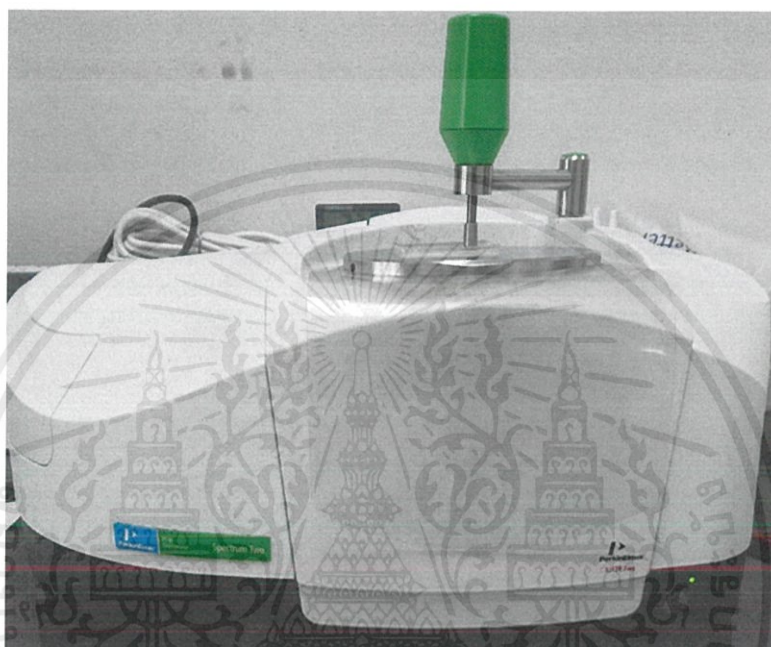


ภาพที่ 3.8 เครื่อง X-Ray Diffractometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.5 เครื่องตรวจสอบเอกลักษณ์ของสาร Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

การตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) ในช่วงความยาวคลื่น  $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  เพื่อวิเคราะห์เอกลักษณ์ หมู่ฟังก์ชัน (Functional group) โดยทำการนำชิ้นงานหรือสารที่ต้องการจะทดสอบวางบนเรื่อง จากนั้นทำการหมุนหัวกด (Force gauge)



ภาพที่ 3.9 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่างแบเรียมไททาเนตกับ PDMS (พอลิไดเมทิลซิลอกเซน) ในสัดส่วนต่าง ๆ ซึ่งรายละเอียดประกอบด้วยผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ สมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเพียโซอิเล็กทริก ของนาโนคอมโพสิตในระบบดังกล่าว โดยมีรายละเอียดดังนี้

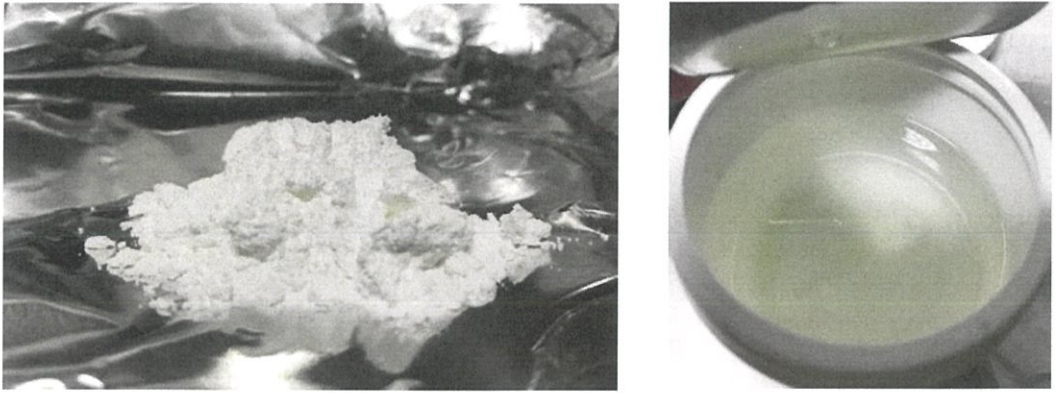
#### 4.1 สมบัติทางกายภาพของนาโนคอมโพสิตระหว่างอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (BT/PDMS)

เมื่อทำการเติมอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตในพอลิไดเมทิลซิลอกเซนสัดส่วนปริมาณของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเป็น 0 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พร้อมทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการหล่อแบบตั้งเดิมเกิดเป็นชิ้นงานนาโนคอมโพสิตของสัดส่วนเหล่านี้จึงนำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

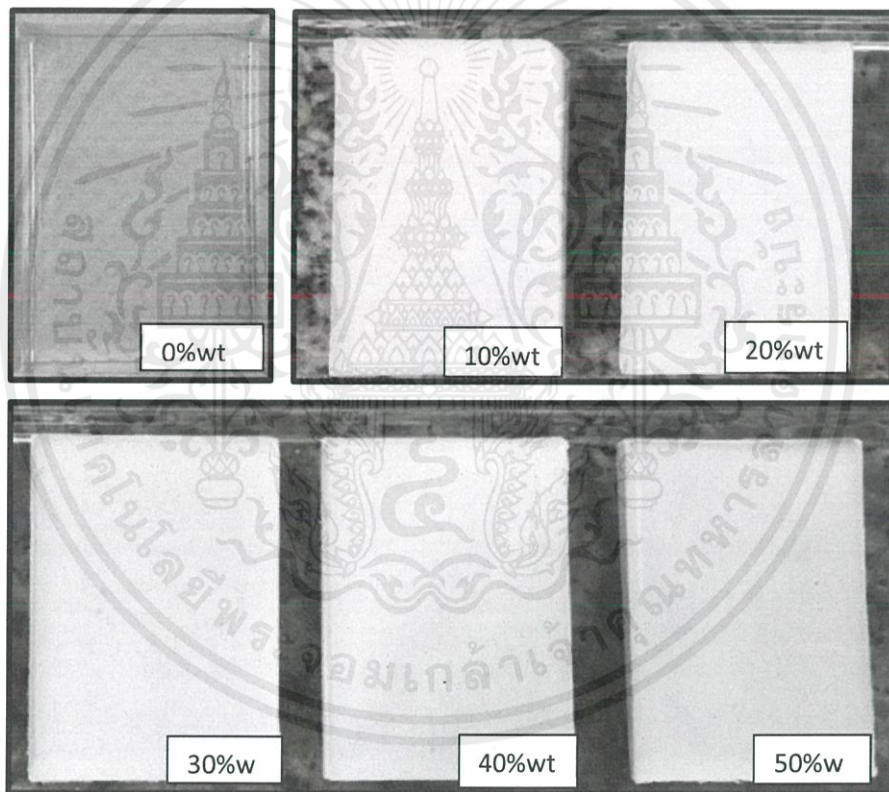
##### 4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

ค่าความหนา ปริมาตร และน้ำหนักของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต  $\text{BaTiO}_3/\text{PDMS}$  ดังตารางที่ 4.1 และนำสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน และชิ้นงานนาโนคอมโพสิต  $\text{BaTiO}_3/\text{PDMS}$  ที่สัดส่วนต่างๆ ไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ของผิวหน้าและภาพตัดขวางของชิ้นงานทั้งหมดดังแสดงในภาพที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ โดยจากภาพจะเห็นว่าที่สัดส่วนอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเป็น 0 (พอลิไดเมทิลซิลอกเซนบริสุทธิ์) จะเห็นว่าสีของชิ้นงานเป็นสีขาวใสคล้ายกระจกความหนามีค่าเท่ากับ 2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าเท่ากับ 1.9 เซนติเมตร และน้ำหนักโดยรวมอยู่ที่ 4.50 กรัม จากนั้นเมื่อเติม  $\text{BaTiO}_3$  ลงไปในพอลิไดเมทิลซิลอกเซนในปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่าสีของชิ้นงานมีลักษณะขาวขุ่นขึ้น และเมื่อเติม  $\text{BaTiO}_3$  มากขึ้นเรื่อยๆ สีก็มีความขาวขุ่นมากขึ้น ส่วนชิ้นงานที่เป็น  $\text{BaTiO}_3$  50 เปอร์เซ็นต์นั้นจะเห็นว่า มีสีขาวเรียบเนียนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.9 เซนติเมตร สำหรับภาพด้านข้างของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต  $\text{BaTiO}_3/\text{PDMS}$  ทั้งหมดได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.3 ซึ่งก็จะเห็นว่า เมื่อเติม  $\text{BaTiO}_3$  เพิ่มขึ้นจะสามารถสังเกตเห็นว่าชิ้นงานมีสีขาวขุ่นมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

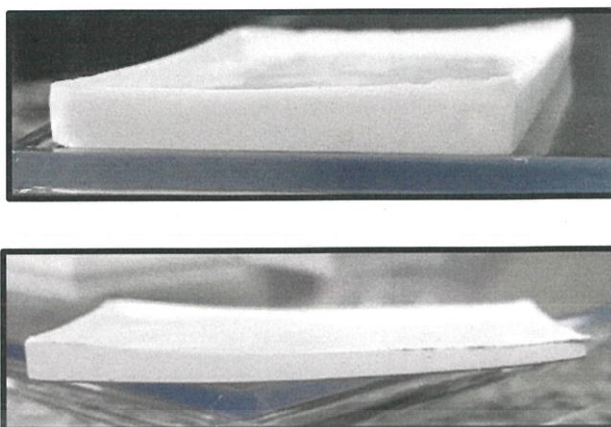


ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน คือผงอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตและพอลิไดเมทิลซิลอกเซน



ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายผิวหน้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต พอลิไดเมทิลซิลอกเซน/ $\text{BaTiO}_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายลักษณะด้านข้างของชิ้นงานงานนาโนคอมโพสิต พอลิโดเมทิลไซลอกเซน/  
BaTiO<sub>3</sub> ที่สัดส่วน 10%wt และ 50%wt

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนา ความหนาแน่น และน้ำหนักของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต BaTiO<sub>3</sub>/PDMS

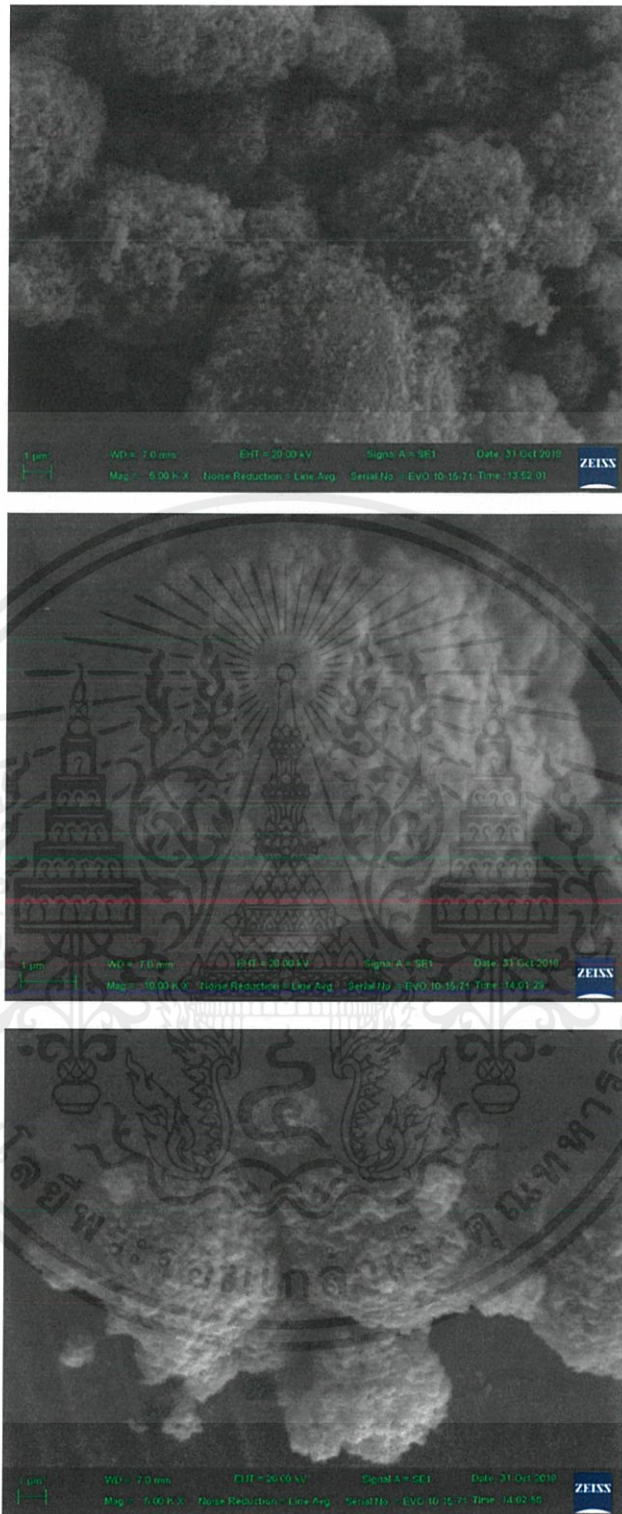
ปริมาณ BT (wt%)	ความหนา (มม.)	ความหนาแน่น (กก/ลบ.ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)
0	2	1.15	4.5
10	2	1.09	4.48
20	2	1.14	4.66
30	2	1.13	4.64
40	2	1.15	4.7
50	2	1.13	4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค

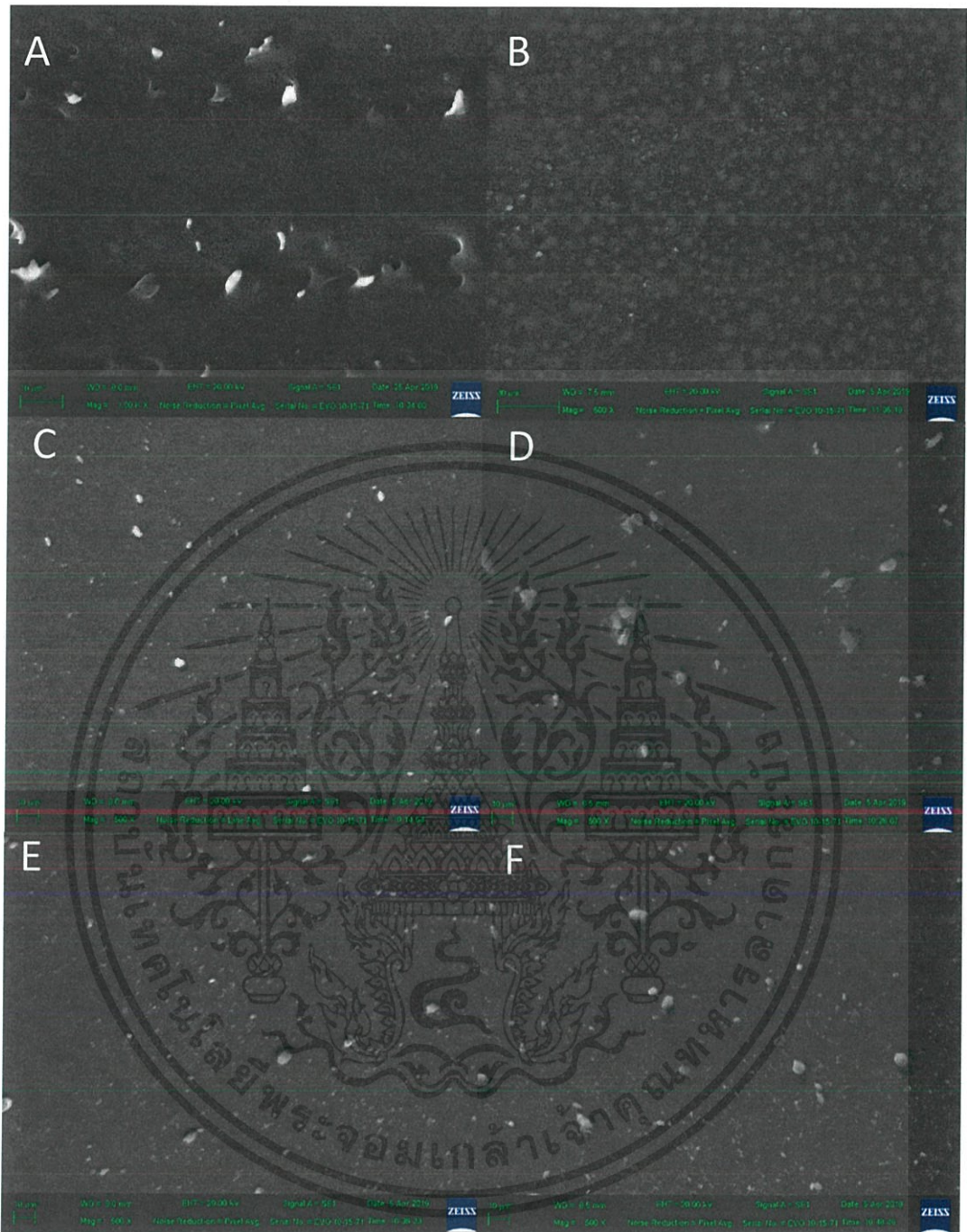
การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคนั้นจะทำการตรวจสอบอนุภาคนาโน ผิวน้ำและภาพตัดขวาง เพื่อให้ได้ข้อมูลทั้งผิวน้ำด้านบนและโครงสร้างด้านในของชิ้นงาน และนำข้อมูลที่นำมาใช้ประกอบการอธิบายองค์ประกอบ โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมขึ้น

นำสารที่ใช้ในการเตรียมคอมโพสิตระหว่าง  $\text{BaTiO}_3$  / พอลิไธเมทิลไซลอกเซน และชิ้นงานนาโนคอมโพสิต  $\text{BaTiO}_3$  / พอลิไธเมทิลไซลอกเซน ที่สัดส่วนต่างๆ ไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของลักษณะผิวนาโนแบเรียมไททาเนต พบว่ามีลักษณะเป็นอนุภาคจริง และมีการเกาะตัวกันของอนุภาคอย่างแน่นหนา แสดงในภาพที่ 4.4 ผิวน้ำและภาพตัดขวางของชิ้นงานแสดงในภาพที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ โดยจากภาพที่ 4.5 แสดงผิวน้ำของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตจะเห็นว่าที่สัดส่วนอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเป็น 0 ชิ้นงานมีลักษณะผิวเรียบ ยังไม่เห็นอนุภาคของนาโนแบเรียมไททาเนตเมื่อทำการเติมอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่อัตราส่วนต่างๆ ดังภาพที่ 4.5 (B-F) จะสังเกตเห็นอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่อยู่ใต้ผิวของชิ้นงาน และจากภาพที่ 4.6 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตจะเห็นว่าที่สัดส่วนอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเป็น 0 (พอลิไธเมทิลไซลอกเซนบริสุทธิ์) จะเห็นว่าไม่มีลักษณะผิวเรียบยังไม่พบอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต แต่เมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเพิ่มขึ้นพบว่า มีอนุภาคทรงกลม เป็นอนุภาคของตัวแบเรียมไททาเนตที่มีการกระจายตัวอยู่ในพอลิไธเมทิลไซลอกเซนบริสุทธิ์



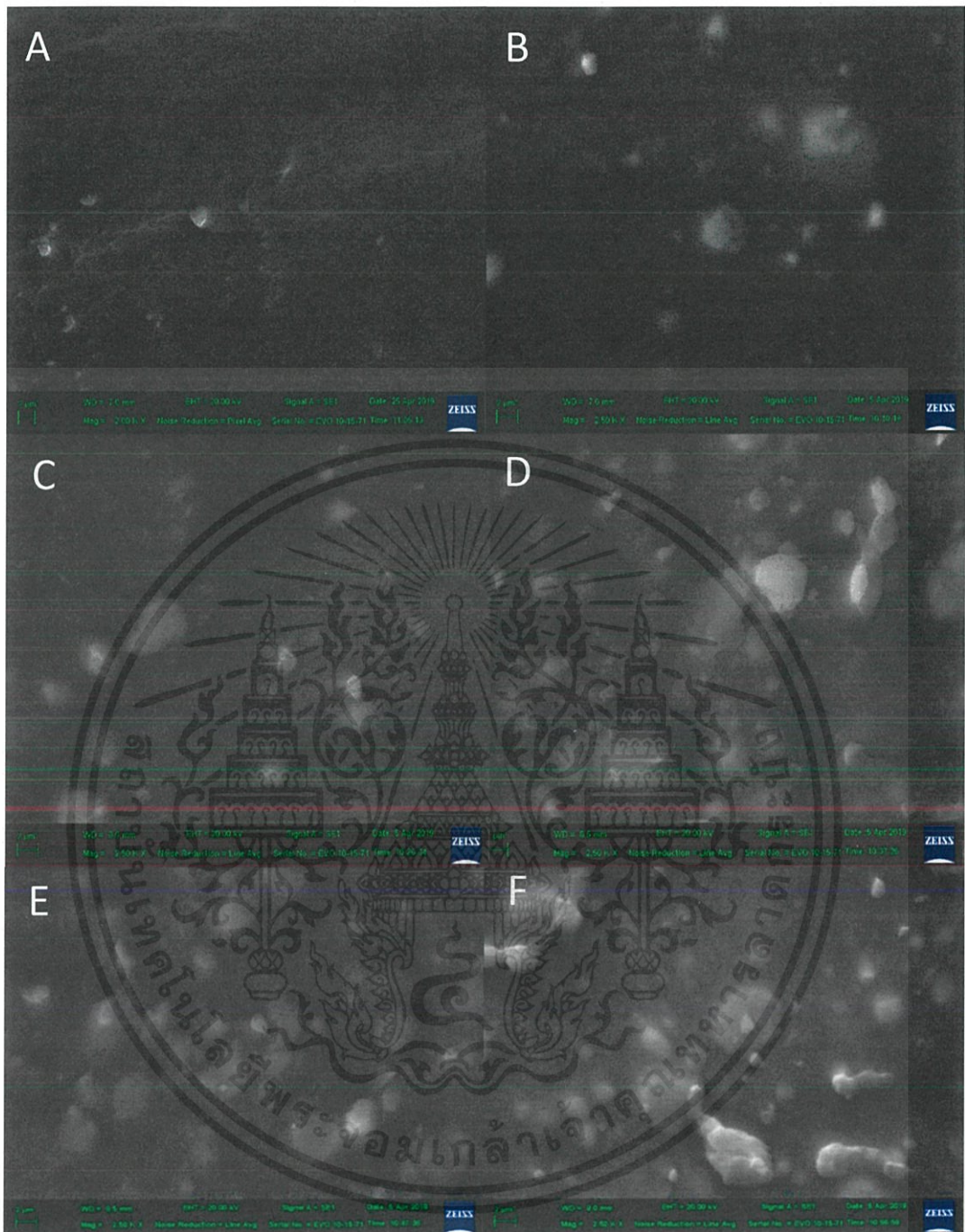
ภาพที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ( $\text{BaTiO}_3$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าของอนุภาคนาโนคอมโพสิต  $\text{BaTiO}_3$  / พอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่อัตราส่วนต่างๆของ  $\text{BaTiO}_3$  (A) 0% (B) 10% (C) 20% (D) 3% (E) 40% และ (F) 50%

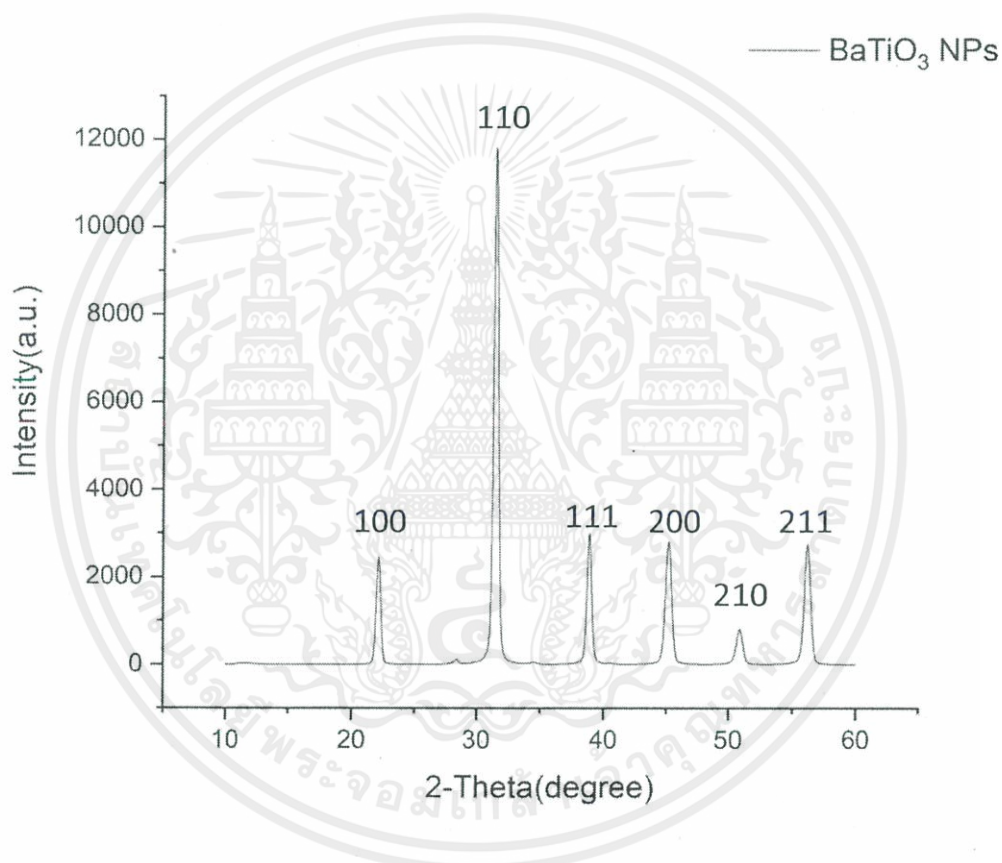
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM ของภาพตัดขวางของอนุภาคนาโนคอมโพสิต  $\text{BaTiO}_3$  / โพลีไดมเมทิลไซ  
 ลอกเซนที่กำลังขยาย 2,500 เท่า ที่อัตราส่วนต่างๆของ  $\text{BaTiO}_3$  (A) 0% (B) 10%  
 (C)20% (D) 30% (E) 40% และ (F) 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique: XRD) จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ได้จากบริษัท Inframat Advanced Materials ที่ความบริสุทธิ์ 99% ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสี จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าตำแหน่งของค่า 2-Theta ที่แสดง ระนาบที่เกิดขึ้นของผงแบเรียมไททาเนตคือ 22.13, 31.51, 38.85, 45.2, 50.87 และ 56.16 ตรงกับฐานข้อมูล JCPDS No. 31-0174 แสดงดังภาพที่ 4.7

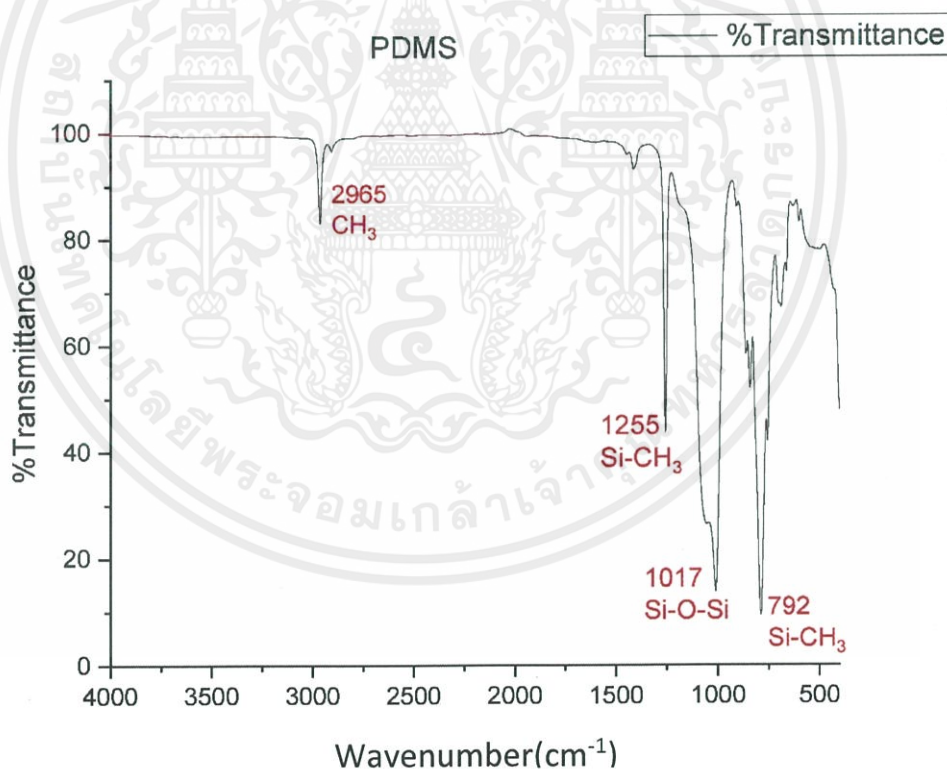


ภาพที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle)

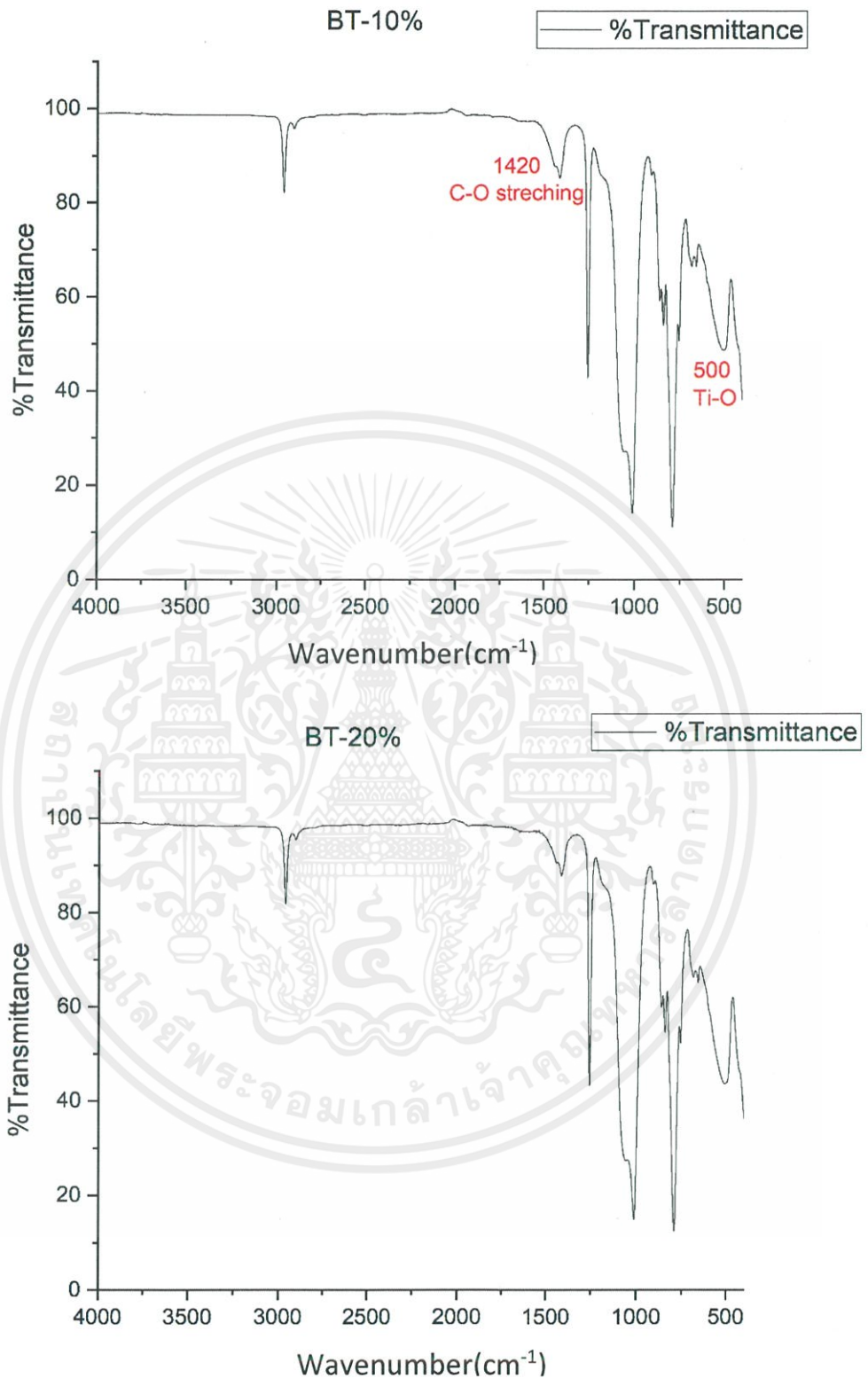
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometer: FT-IR)

จากการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) ในช่วงความยาวคลื่น  $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  เพื่อวิเคราะห์เอกลักษณ์ หมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน และนาโนคอมโพสิตระหว่างอนุภาคแบเรียมไททาเนตกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (BT/PDMS) จะพบการดูดกลืนความยาวคลื่นที่หลากหลายเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของพันธะ (Stretching vibration) และการสั่นแบบงอของพันธะ (Bending vibration) โดยการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นที่  $1255 \text{ cm}^{-1}$  ของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ Si-CH<sub>3</sub> (Si-C stretching in Si-CH<sub>3</sub>) ดังภาพที่ 4.8 (A) และอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตในวัสดุนาโนคอมโพสิตที่อัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่แตกต่างกัน จะพบการดูดกลืนช่วง  $1420 \text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O ซึ่งเกิดจากความชื้น ดังภาพที่ 4.9-4.11

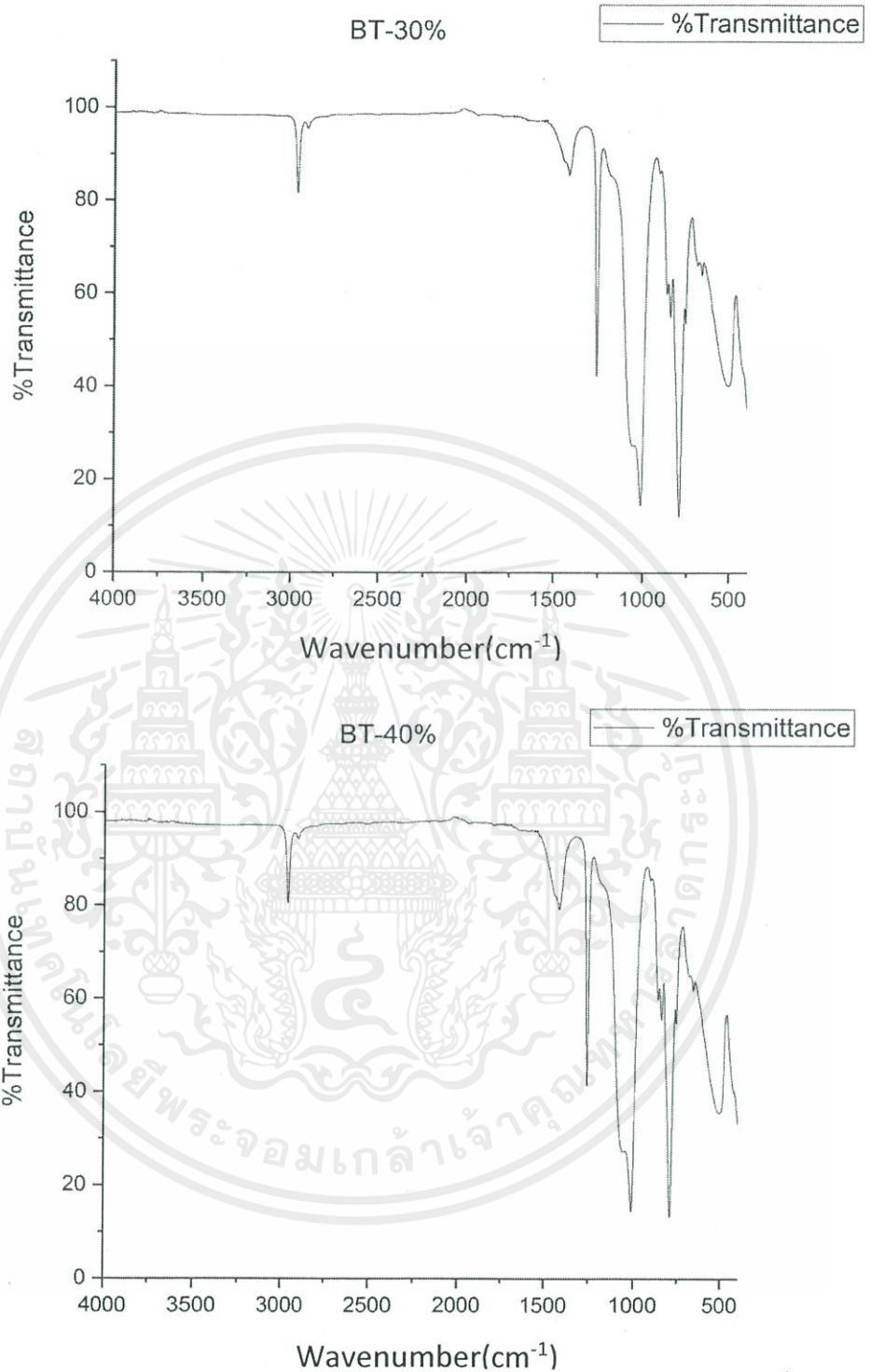


ภาพที่ 4.8 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS)



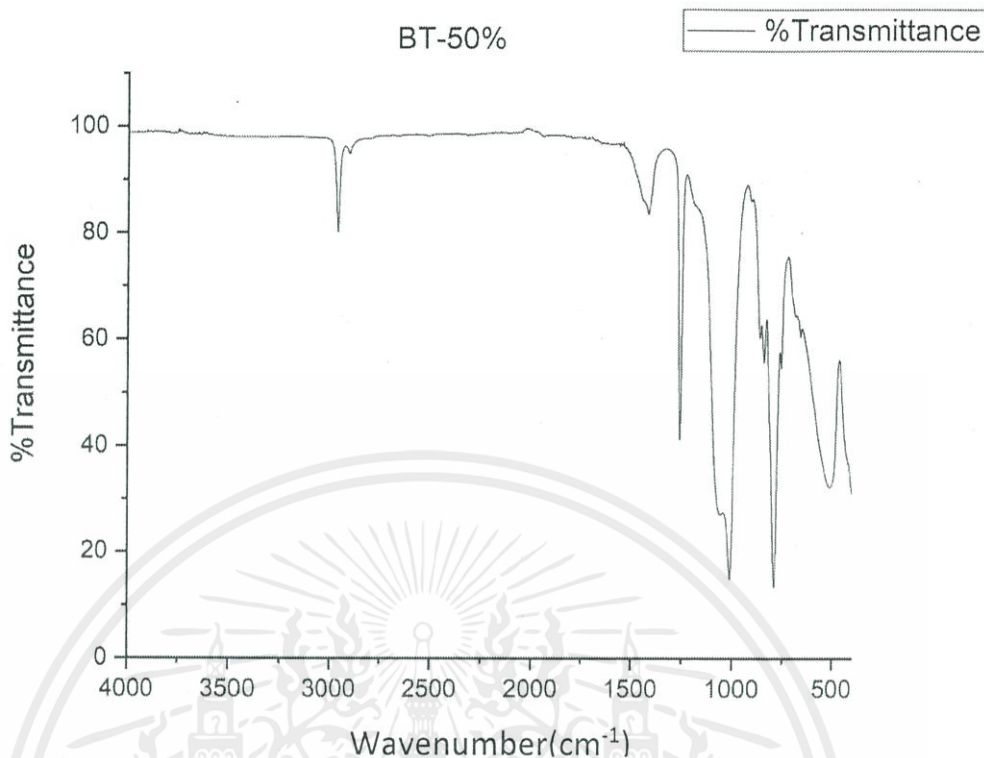
ภาพที่ 4.9 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ในวัสดุนาโนคอมโพสิต ระหว่าง BaTiO<sub>3</sub> / พอลิไธเมทิลไซลอกเซน ที่ BT (A) 10wt% และ (B) 20wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ในวัสดุนาโนคอมโพสิต ระหว่าง BaTiO<sub>3</sub> / พอลิไธเมทิลไซลอกเซน ที่ BT (A) 30wt% และ (B) 40wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



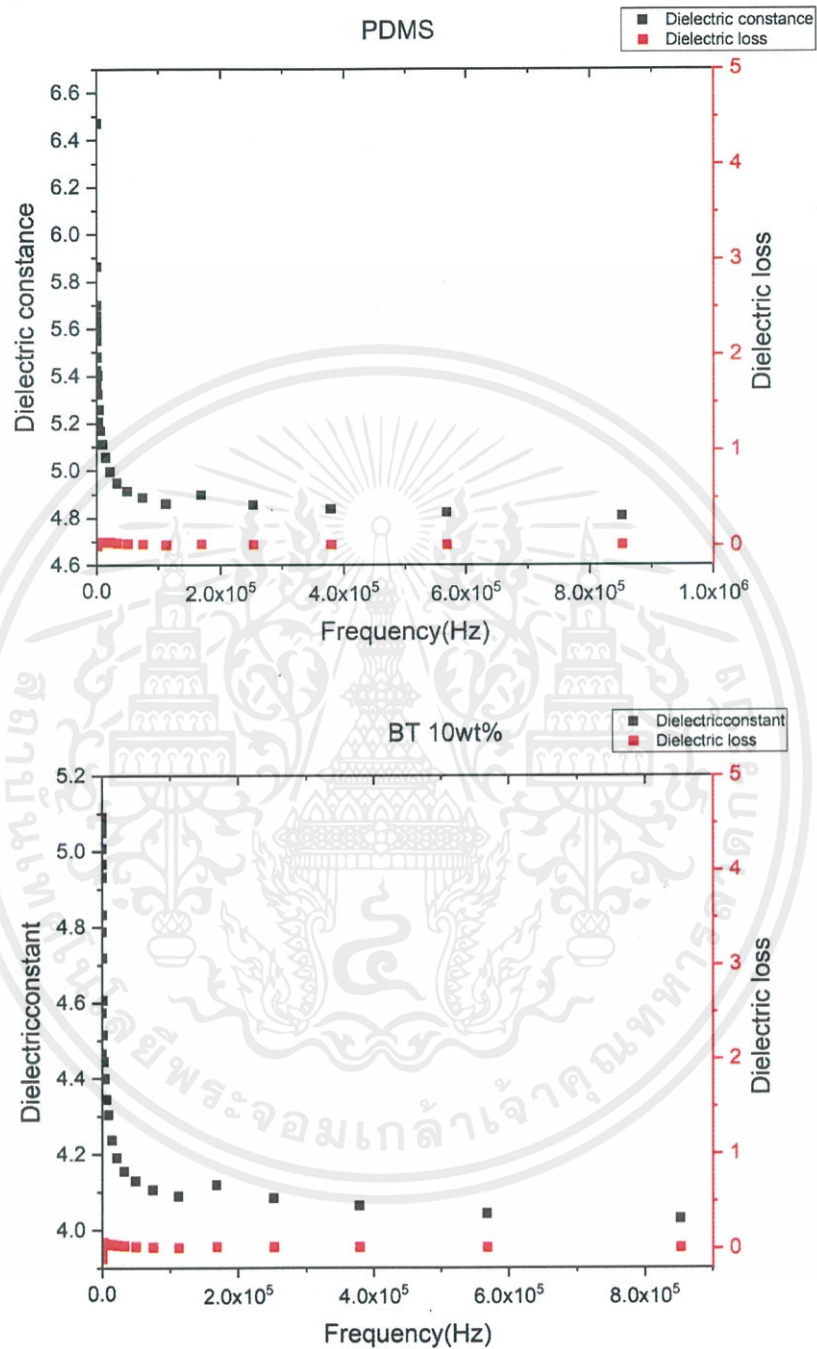
ภาพที่ 4.11 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ในวัสดุนาโนคอมโพสิต ระหว่าง  $\text{BaTiO}_3$  / โพลีไคเมทิลไซลลอกเซน ที่ BT 50wt%

## 4.2 สมบัติทางไฟฟ้า

### 4.2.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric constant and Dielectric loss) ที่อุณหภูมิห้อง

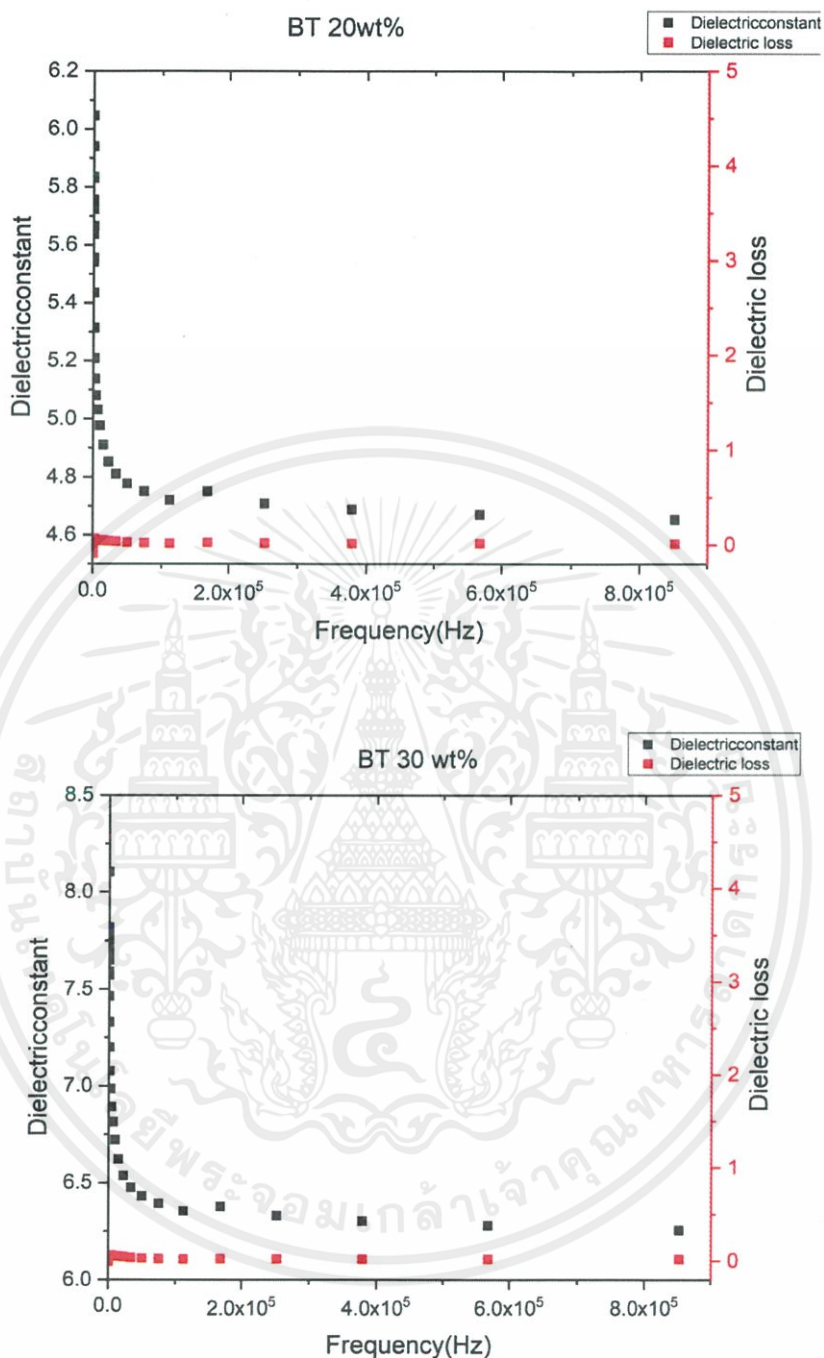
เมื่อนำชิ้นงานคอมโพสิตไปตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุที่มีความถี่ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง ดังภาพที่ 4.12-4.14 พบว่าสัดส่วนปริมาณของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มากที่สุดโดยค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 9.36 แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกร่วมด้วยพบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่า 0.743 ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าในช่วงความถี่ต่าง ๆ ค่าสูงชันเล็กน้อยแต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกไม่เปลี่ยนแปลงมากขึ้นนั่นหมายความว่าความถี่ต่ำไม่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซึ่งในสัดส่วนปริมาณของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต 40 เปอร์เซ็นต์โดย

น้ำหนักมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูง และเปรียบเทียบให้เห็นได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นที่ความถี่ 10 100 1,000 10,000 100,000 เฮิรซ์ ดังภาพที่ 4.16-4.18 ตามลำดับ



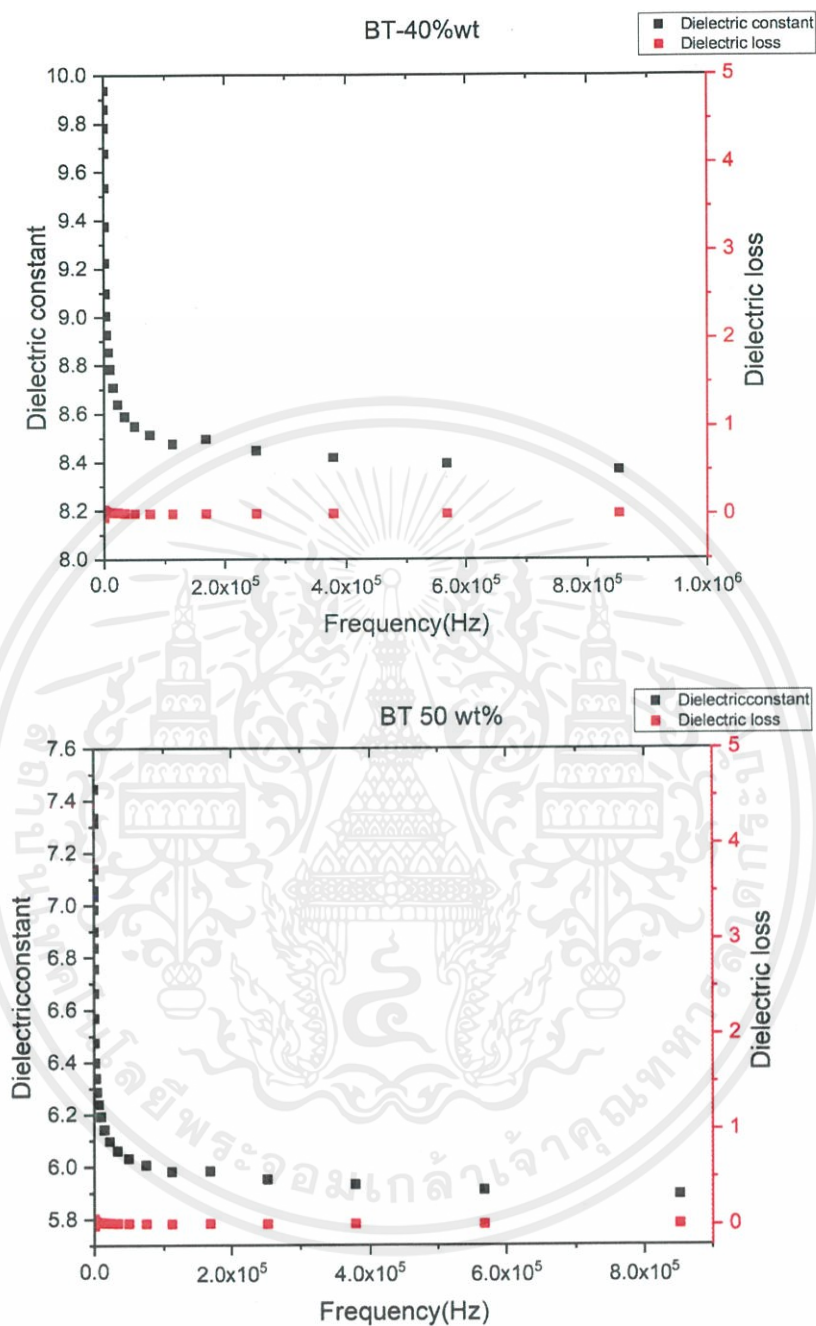
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับอัตราส่วน ของ (A) พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) และ (B) BT 10wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกกับอัตราส่วนของอนุภาคนาโนคอมโพสิต BaTiO<sub>3</sub> / พอลิไวดิเมทิลไซลอกเซน ที่ BT (A) 20wt% และ (B) 30wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

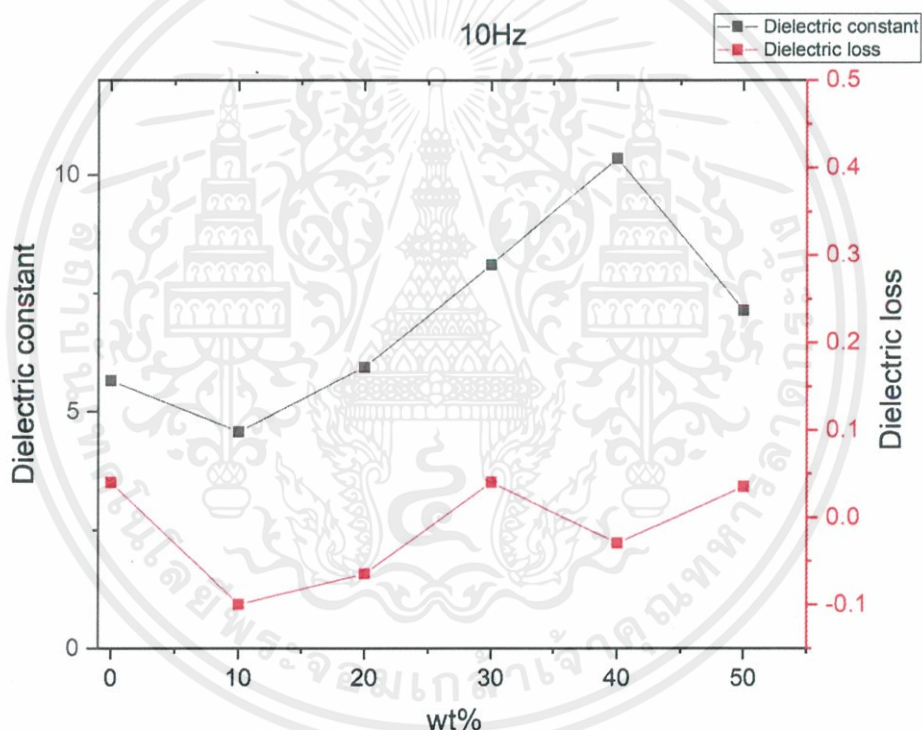


ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความถี่ของอนุภาคนาโนคอมโพสิต BaTiO<sub>3</sub> / พอลิไคเมทิลไซลอกเซน ที่ BT (A) 40wt% และ (B)50wt%

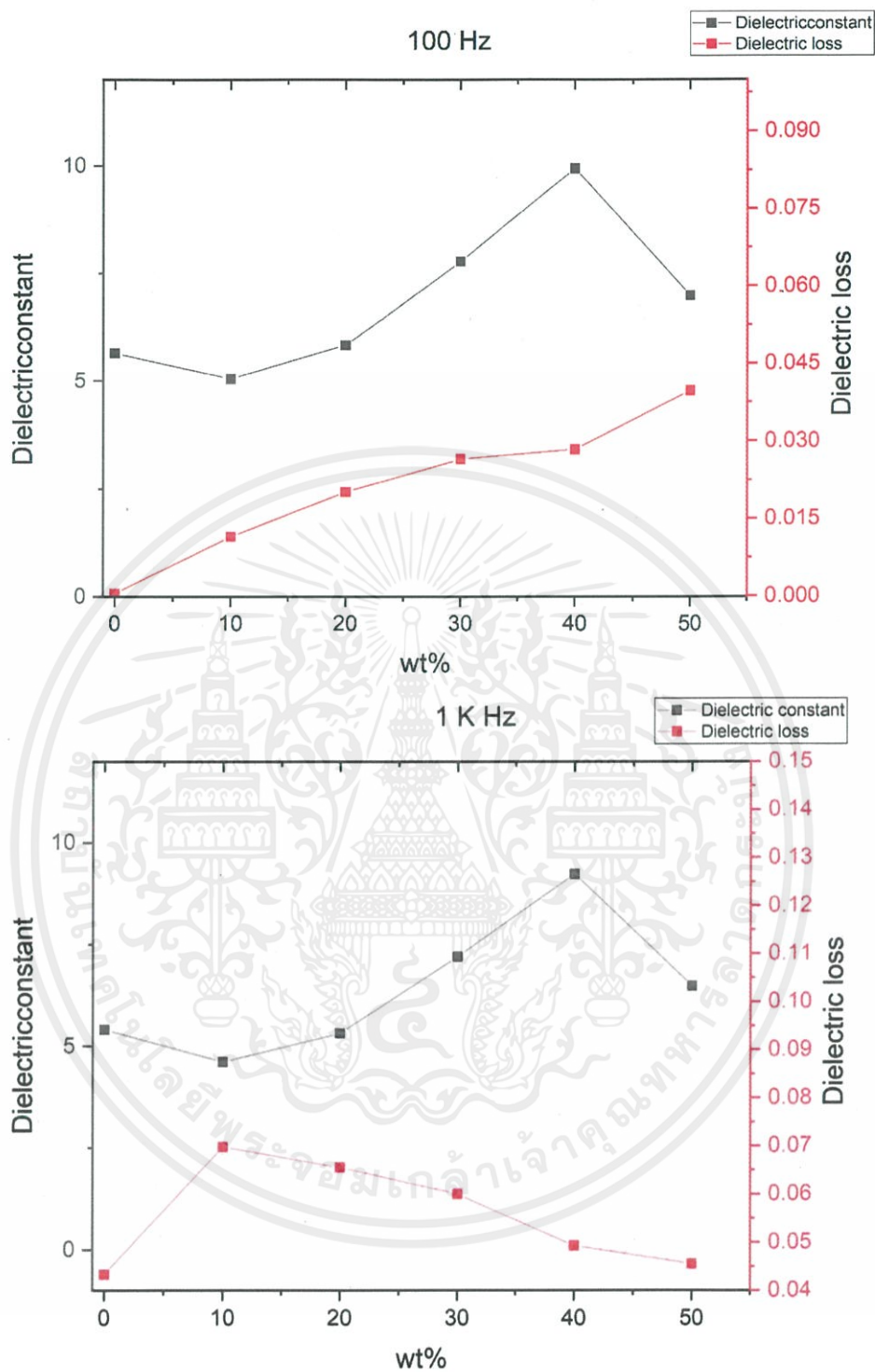
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric constant and Dielectric loss) ที่อุณหภูมิห้อง ที่กำหนดความถี่

เมื่อนำชิ้นงานคอมโพสิตไปตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุที่กำหนดความถี่ ดังภาพที่ 4.15-4.17 จะเห็นได้ว่าความถี่ต่ำค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าขึ้นกับความถี่เล็กน้อย และยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อความถี่เพิ่ม ซึ่งจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ 40 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุด ที่ทุกๆความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ และที่อัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ 20 เปอร์เซ็นต์มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต่ำที่สุด เมื่อเพิ่มความถี่ขึ้น และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.836

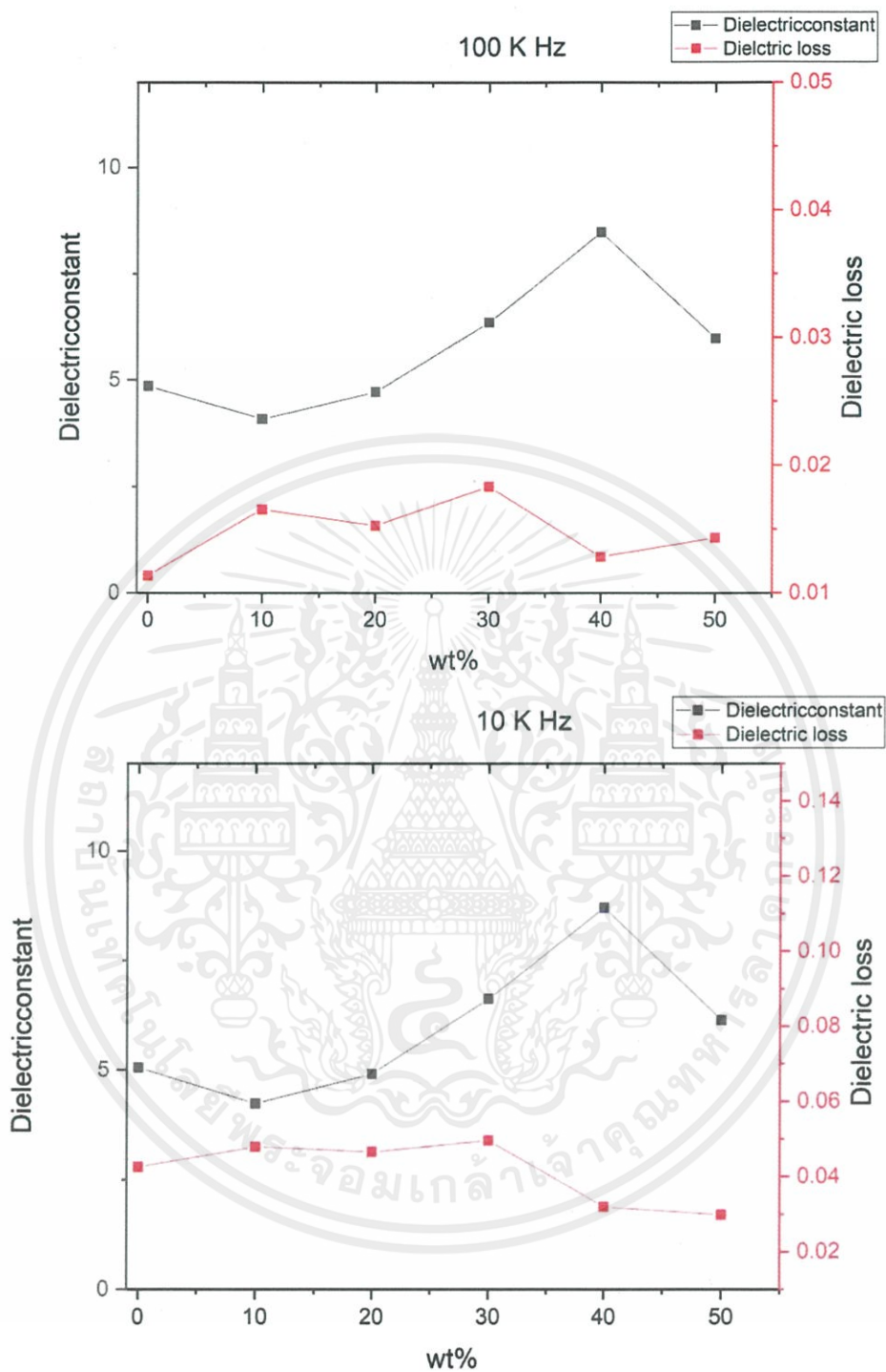


ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับอัตราส่วนของอนุภาคนาโนคอมโพสิต  $\text{BaTiO}_3$  / พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ที่ความถี่ 10 Hz



ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับอัตราส่วนของอนุภาคนาโนคอมโพสิต  $\text{BaTiO}_3$  /พอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่มีความถี่ (A) 100 Hz และ (B) 1,000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

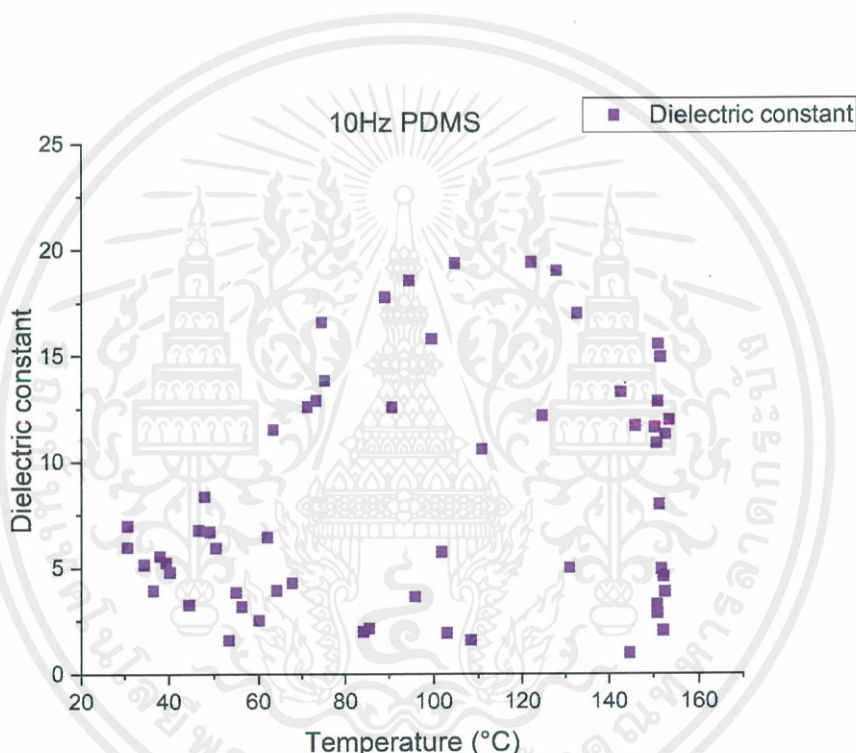


ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับอัตราส่วนของอนุภาคนาโนคอมโพสิต BaTiO<sub>3</sub> / โพลีไวดิเมทิลไซลอกเซน ที่ความถี่ (A) 10,000 Hz และ (B) 100,00 Hz

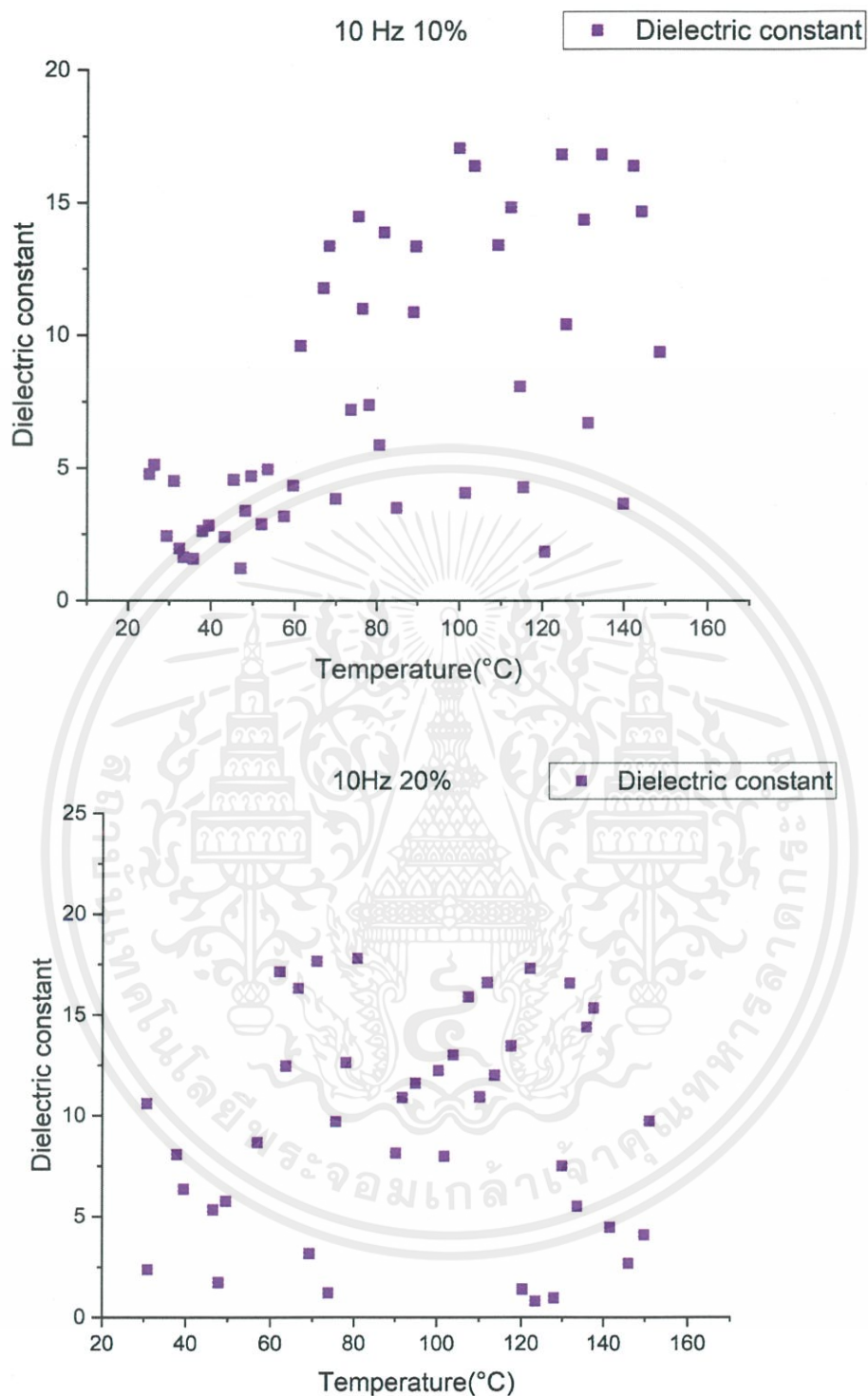
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric constant and Dielectric loss) ที่ทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น

เมื่อนำชิ้นงานคอมโพสิตไปตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุที่ความถี่คงที่โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น จะเห็นได้ว่าการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ความถี่คงที่ ที่มีการเพิ่มอุณหภูมิพบว่า ค่าไดอิเล็กทริกในช่วงความถี่นี้มีการกระจายตัว มีการจัดเรียงตัวของข้อมูลที่ ไม่เป็นระเบียบ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้น ชิ้นงานเกิดการหลอมเหลว ไม่แข็งตัว ทำให้มีการแกว่งของค่า ชิ้นงานเกิดการสั้นจากความร้อนทำให้ค่าไม่เสถียร และที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าไดอิเล็กทริกที่ได้ มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ดังภาพที่ 4.18-4.21

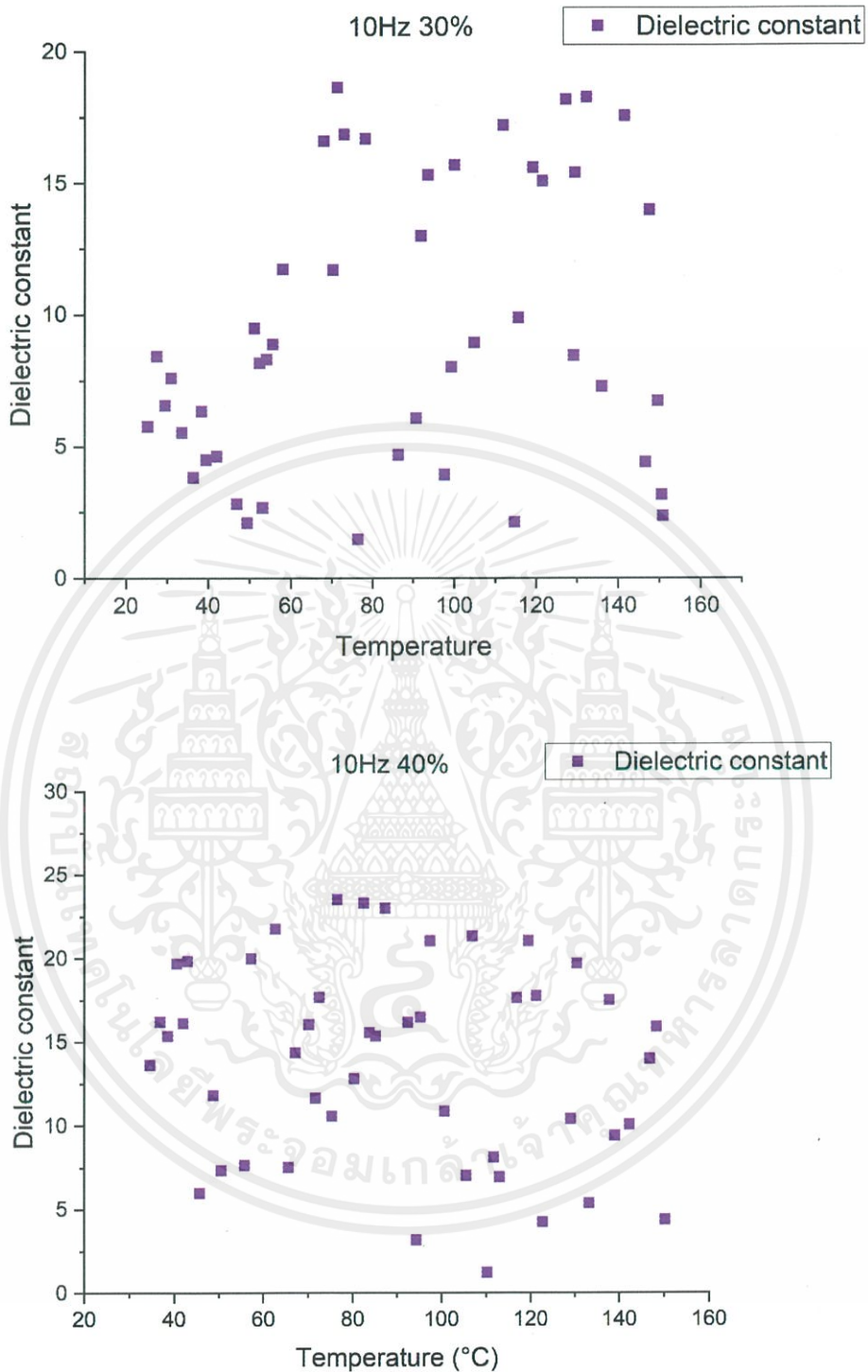


ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของชิ้นงานพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS)



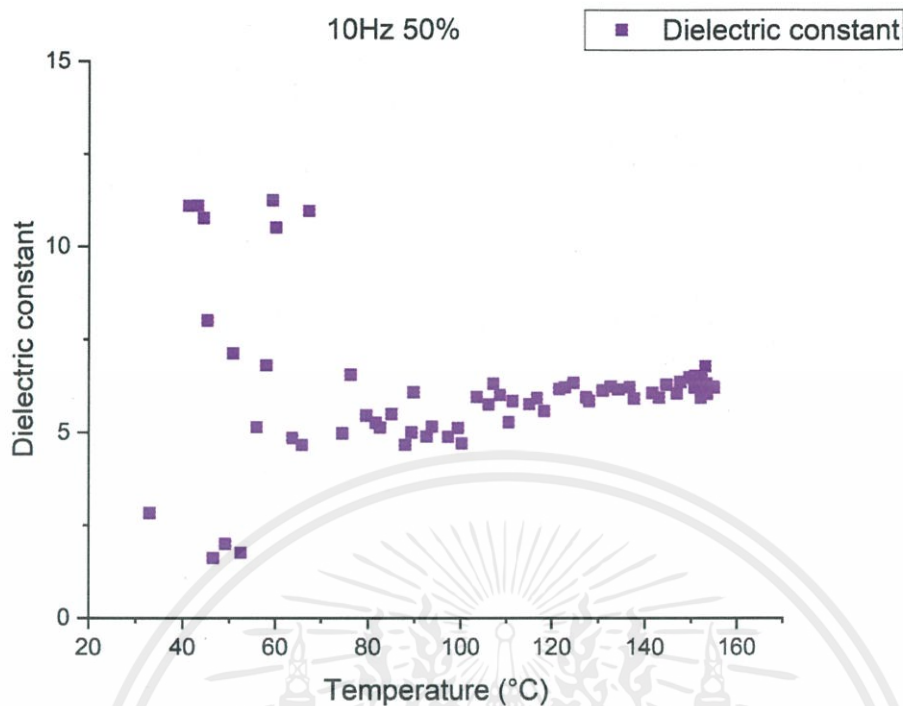
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราส่วน BT ที่ (A) 10wt% และ (B) 20wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราส่วน BT ที่ (A) 30wt% และ (B) 40 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราส่วน BT ที่ 50 wt%

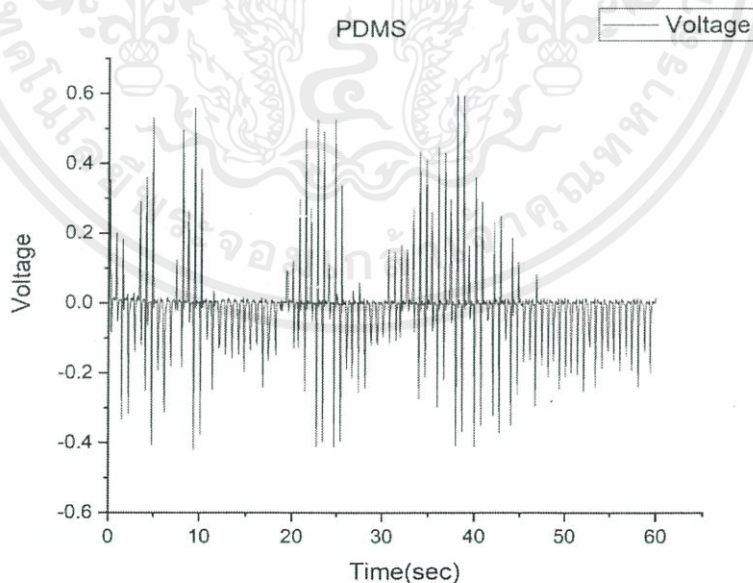
จากภาพที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าไดอิเล็กทริกของชั้นงานคอมโพสิตระหว่าง PDMS/BaTiO<sub>3</sub> ที่ 50 wt% พบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าไดอิเล็กทริกมีค่าที่ลดลงและคงที่ อาจเป็นผลมาจาก เมื่อทำการเติมอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ปริมาณ 50 wt% ชั้นงานมีความเป็นของแข็งมากยิ่งขึ้น อนุภาคมีการรวมตัว ไม่มีการกระจายตัวที่ดี และชั้นงานนี้ไม่เหมาะสมกับให้นำไปใช้ที่อุณหภูมิสูง

### 4.3 สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก

#### 4.3.1 ผลการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต ที่มีอัตราของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ที่แตกต่างกัน

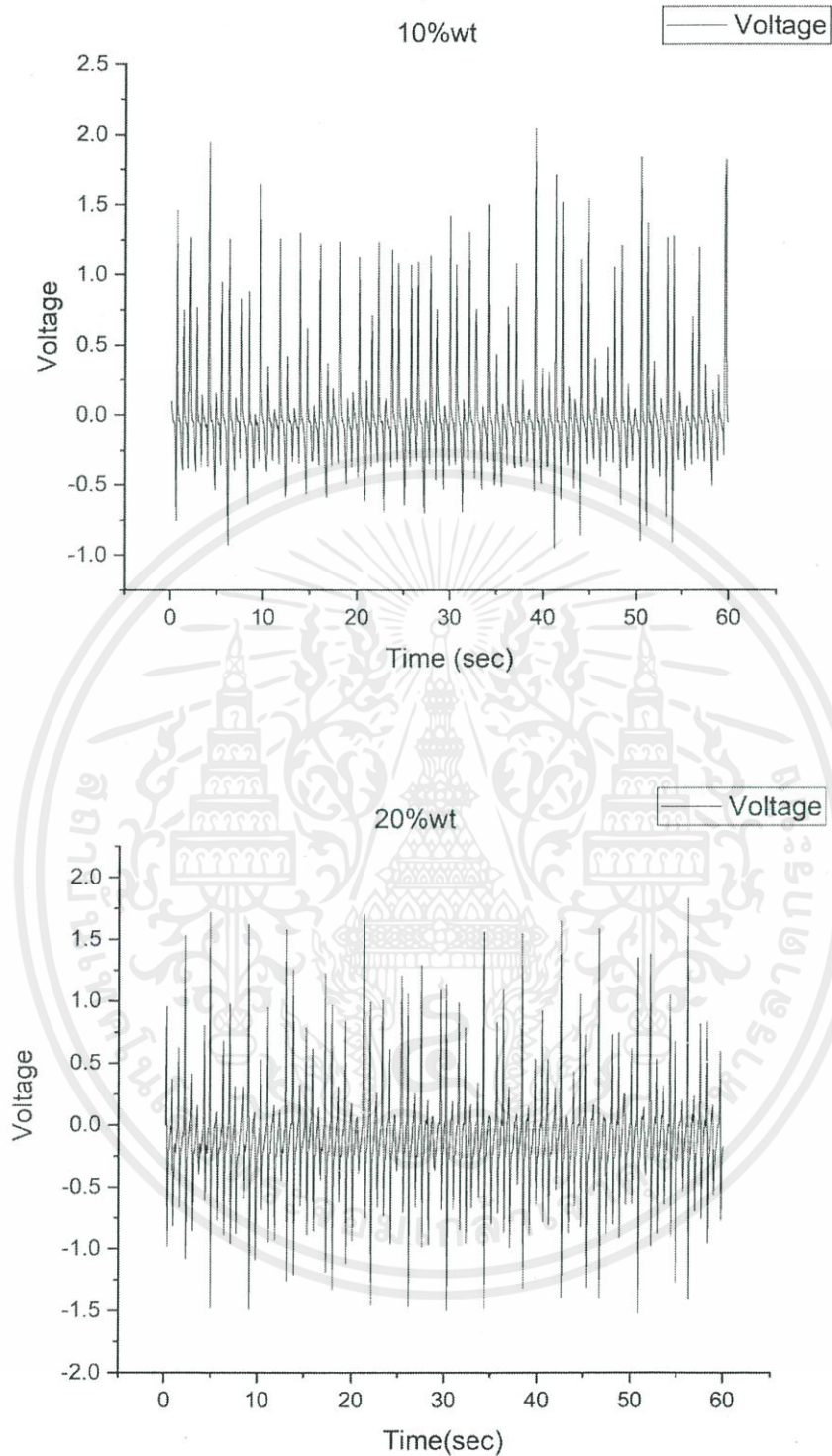
จากการนำชิ้นงานนาโนคอมโพสิต BaTiO<sub>3</sub>/PDMS ที่มีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตแตกต่างกัน คือ ที่ 0% 10% 20% 30% 40% และ 50% โดยนำไปทำการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุภายใต้การให้แรงเชิงกล โดยใช้ชุดการทดสอบแรงดันไฟฟ้าจากแรงกดเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออก แสดงผลดังภาพที่ 4.22-4.25

จากตรวจสอบพบว่าวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิไดเมทิลซิลอกเซนกับอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตชิ้นงานนาโนคอมโพสิต BaTiO<sub>3</sub>/PDMS จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ที่ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 4.24 (A,B) โดยค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยอยู่ที่ 0.45 และ 1.7 โวลต์ ของอัตราส่วนอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่อัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตตั้งแต่ 30 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จะพบว่ากราฟที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเดียว และจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตขึ้นอีกค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกที่ได้จะมีค่าลดลงเนื่องจากอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตรวมตัวและเกาะกลุ่มกันมากขึ้นทำให้การกระจายตัวของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตในพอลิไดเมทิลซิลอกเซนไม่ค่อยดีนัก เมื่อให้แรงเชิงกลโดยการกดลงบนวัสดุส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอะตอม และเกิดแรงดันไฟฟ้าส่งออกขึ้น



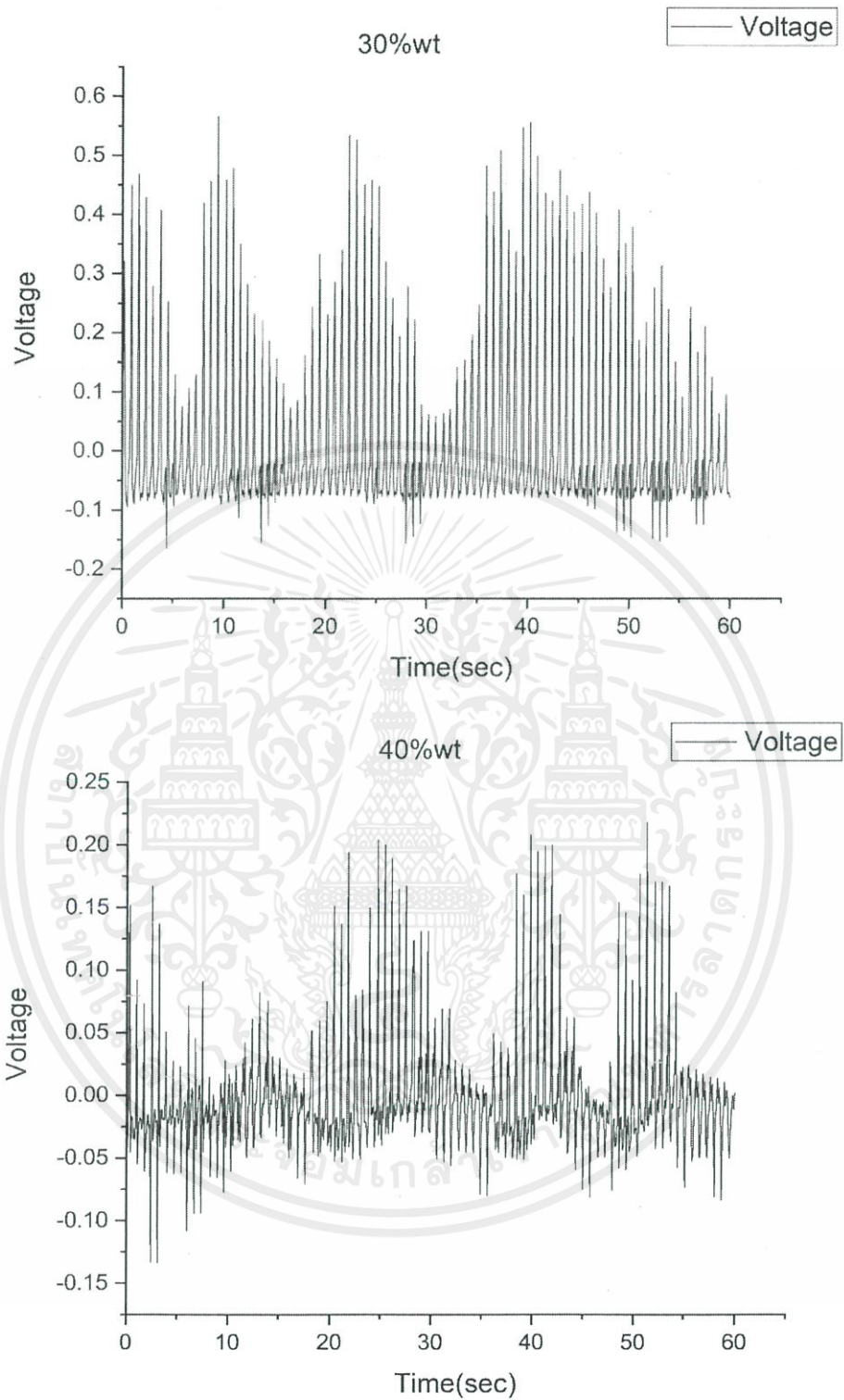
ภาพที่ 4.22 แรงดันไฟฟ้าส่งออกของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



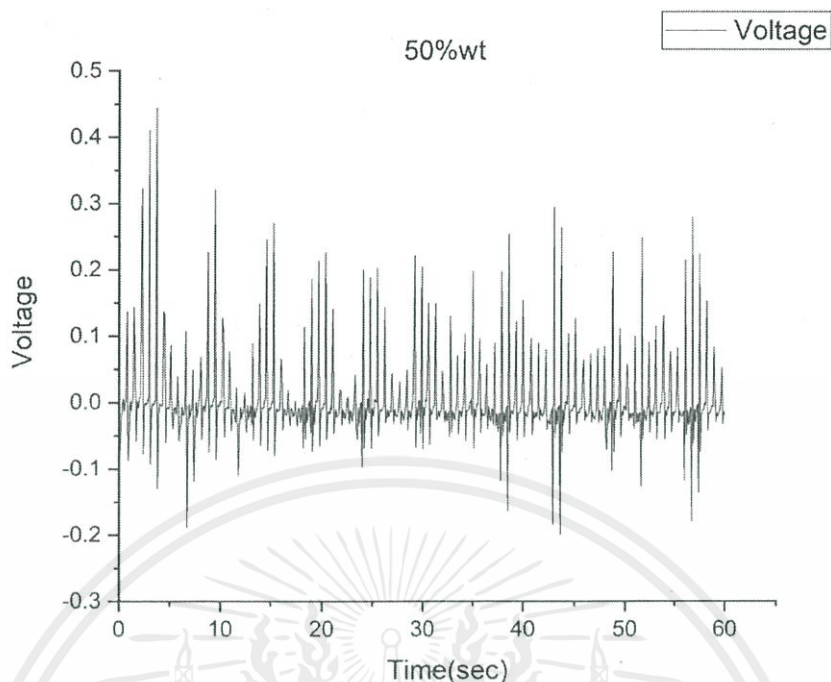
ภาพที่ 4.23 แรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต โดยมีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ที่ (A) 10 wt% (B) 20 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.24 แรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต โดยมีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ที่ (A) 30 wt% (B) 40 wt%

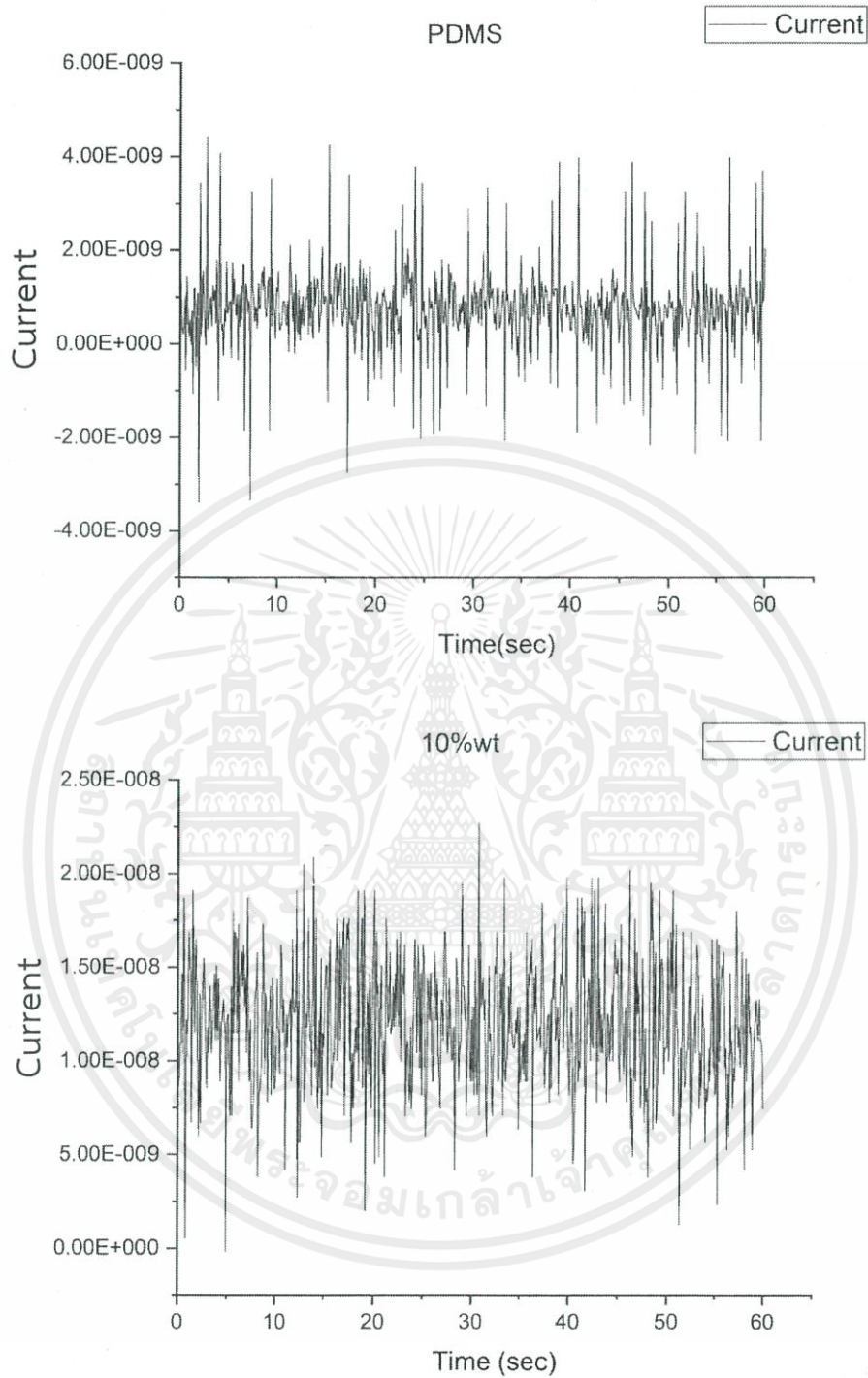
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.25 แรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต โดยมีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ที่ 50 wt%

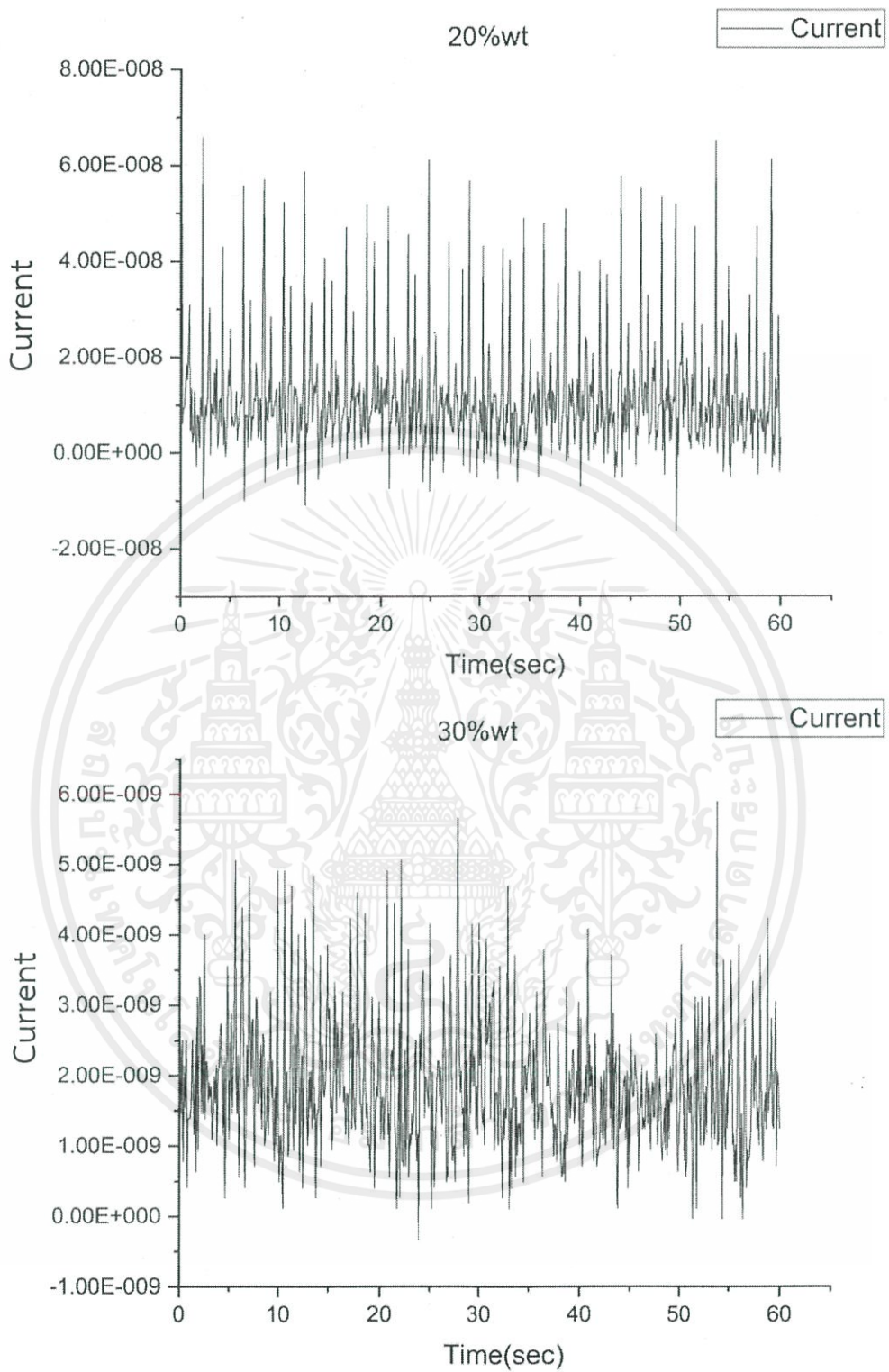
#### 4.3.2 ผลการตรวจสอบกระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต ที่มีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ที่แตกต่างกัน

จากการนำชิ้นงานนาโนคอมโพสิต  $\text{BaTiO}_3/\text{PDMS}$  ที่มีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตแตกต่างกัน คือ ที่ 0wt% 10wt% 20wt% 30wt% 40wt% และ 50wt% โดยนำไปทำการตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุภายใต้การให้แรงเชิงกล โดยใช้ชุดการทดสอบแรงดันไฟฟ้าจากแรงกด เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกที่เวลา 1 นาที พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ของตัว PDMS อยู่ที่ 25 nA และที่เพิ่มอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตขึ้น พบว่ากราฟมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและกระแสไฟฟ้าที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงผลดังภาพที่ 4.26-4.28



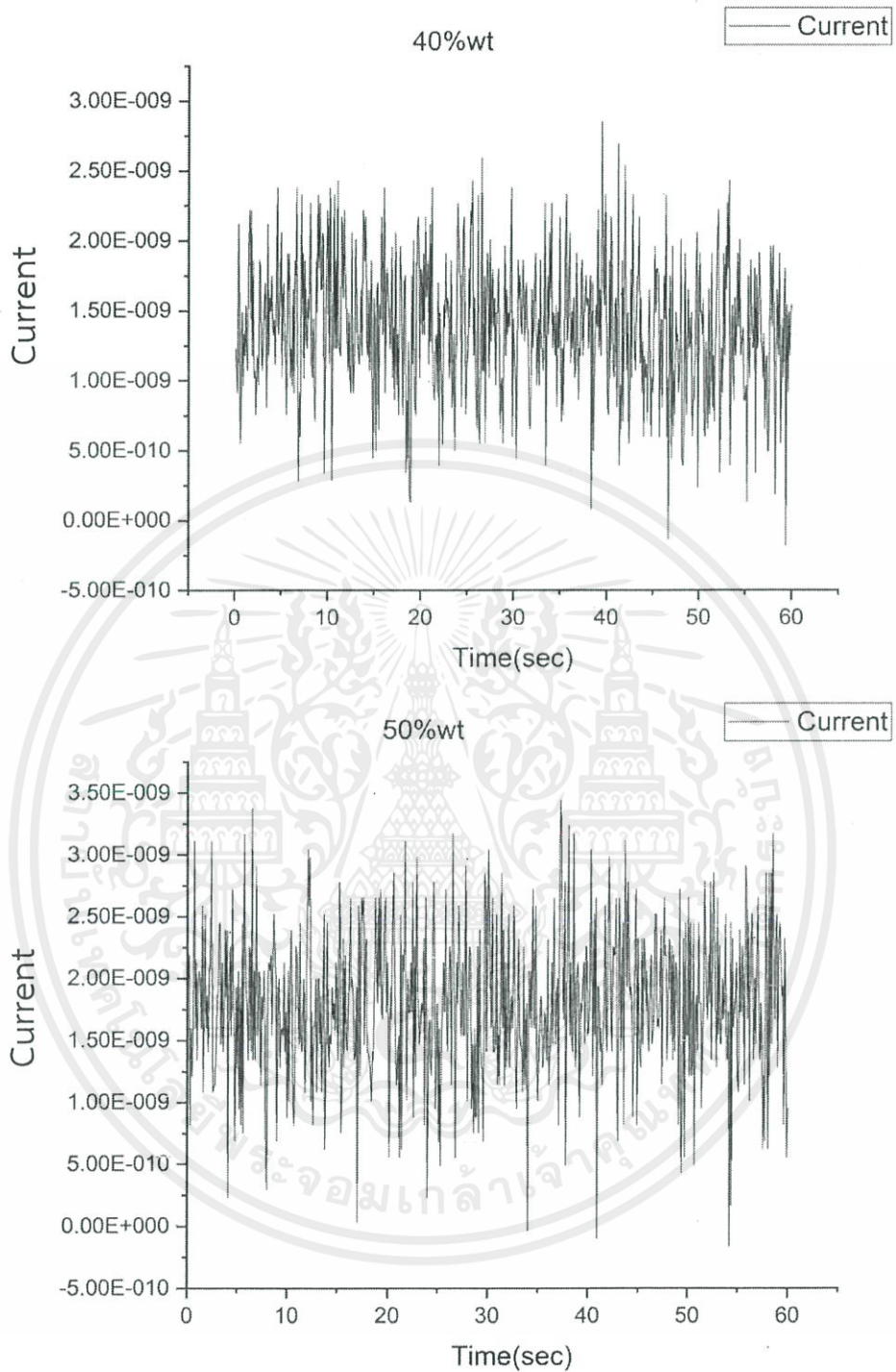
ภาพที่ 4.26 กระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต โดยมีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต คือ (A) 0wt% (B) 10wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.27 กระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต โดยมีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต คือ (A) 20wt% (B) 30wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

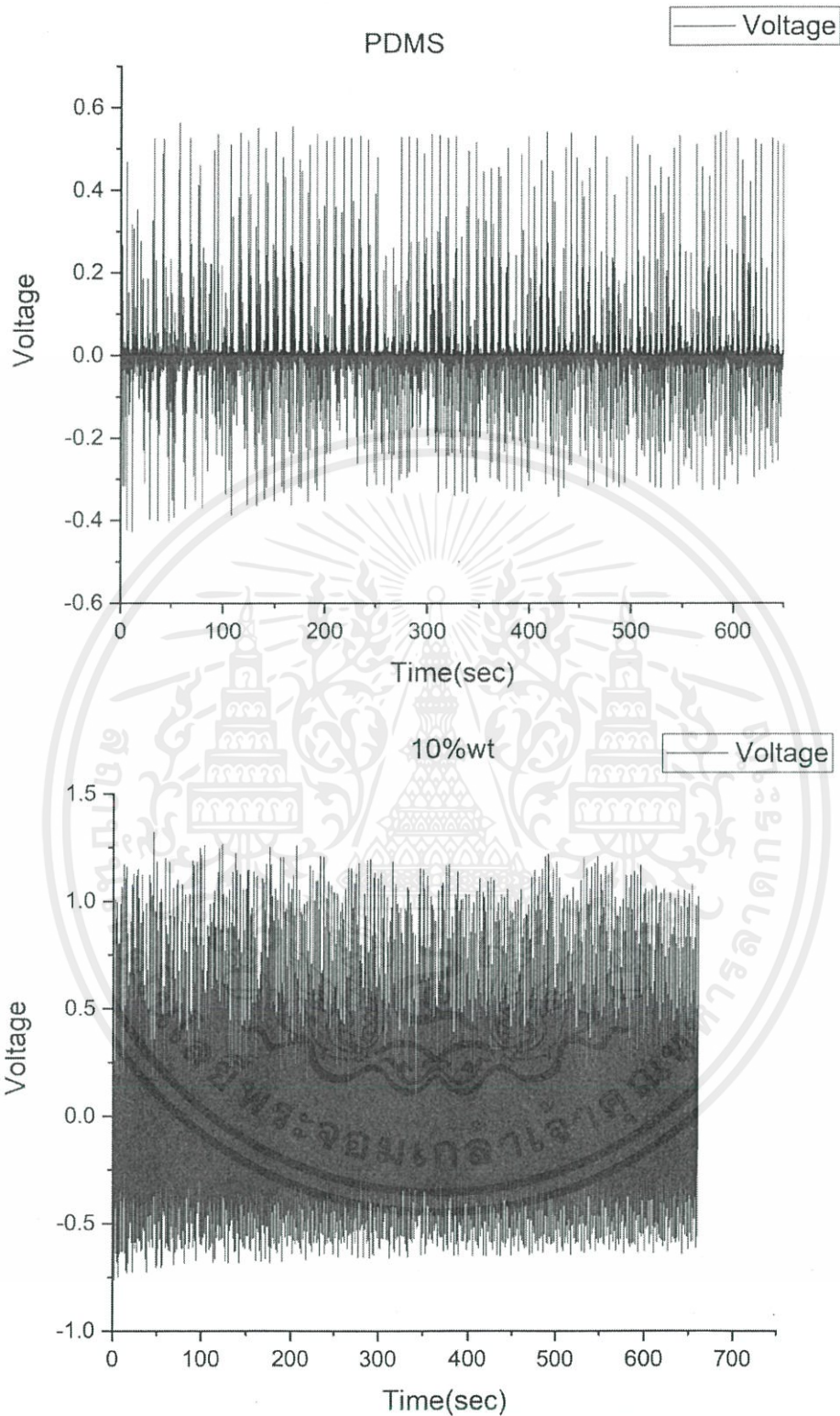


ภาพที่ 4.28 กระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิต โดยมีอัตราส่วนของอนุภาคนาโน-  
แบเรียมไททาเนต คือ (A) 40wt% (B) 50wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3 อิทธิพลของความถี่ที่ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก ยืดหยุ่นได้ ที่อัตราส่วนอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (BT nanoparticle) ที่ให้แรงดันไฟฟ้า ส่งออกสูงที่สุด

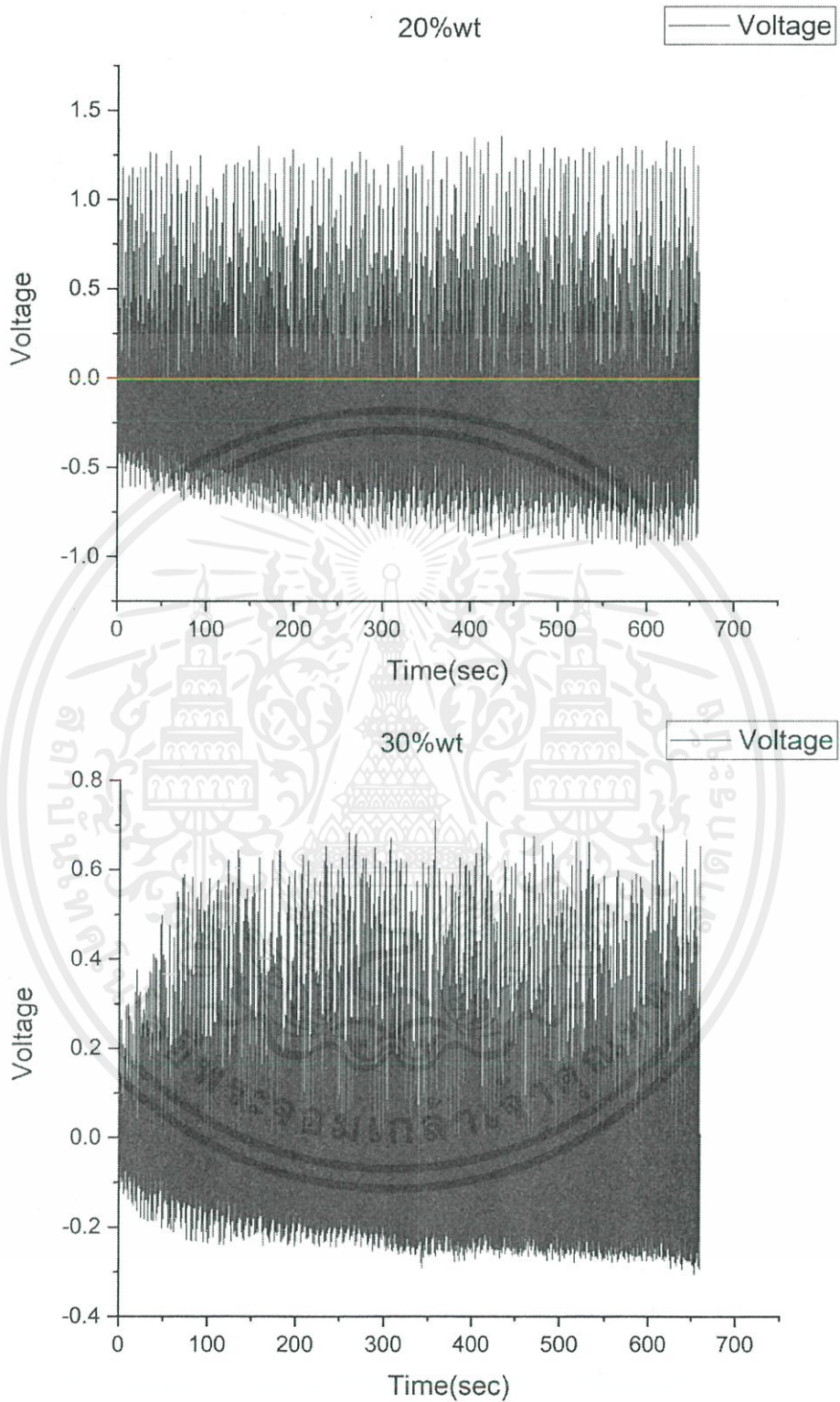
จากผลการตรวจสอบประสิทธิภาพความคงทนของชิ้นงานที่เตรียมได้ และตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิตของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต และพอลิไธเมทิลไซลอกเซน ที่มีอัตราส่วนอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเท่ากับ 0% 10% 20% 30% 40% และ 50% จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกที่สูงที่สุดคือ 20% ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยเท่ากับ 750 mV จากนั้นได้ศึกษาอิทธิพลของความถี่ที่ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิตที่มีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ที่อัตราส่วนของอนุภาคนาโนคอมโพสิต  $BaTiO_3$  / พอลิไธเมทิลไซลอกเซน ที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยการทดสอบ โดยการเริ่มให้แรงเชิงกลโดยการกระแทกแทนกดลงบนตัวอย่างวัสดุนาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้ จากนั้นจะได้แรงดันทางไฟฟ้า โดยค่าแรงดันทางไฟฟ้าที่ได้จะแสดงที่เครื่องออสซิลโลสโคป (Digital oscilloscope) โดยทำการให้แรงเชิงกลอย่างต่อเนื่อง 1,000 รอบ และทำการบันทึกข้อมูลแรงดันไฟฟ้าส่งออก แสดงดังภาพที่ 4.29 จะพบว่าเมื่อให้แรงเชิงกลต่อเนื่อง 1000 รอบ แนวโน้มของกราฟมีลักษณะเพิ่มขึ้น และค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกที่ได้ยังคงมีค่าคงที่ในช่วงแรงกดที่ทำการทดสอบนี้ ซึ่งทำให้เห็นว่าวัสดุนาโนคอมโพสิตเพียโซอิเล็กทริกที่เตรียมขึ้นมีความคงทนในช่วงที่ทดสอบ จากนั้นทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตที่ผ่านการให้แรงเชิงกล 1000 รอบ จากภาพที่ 4.32



ภาพที่ 4.29 แรงดันไฟฟ้าส่งออกของ (A) พอลิไดเมทิลไซลอกเซน และ(B)ที่อัตราส่วน BT 10 wt%

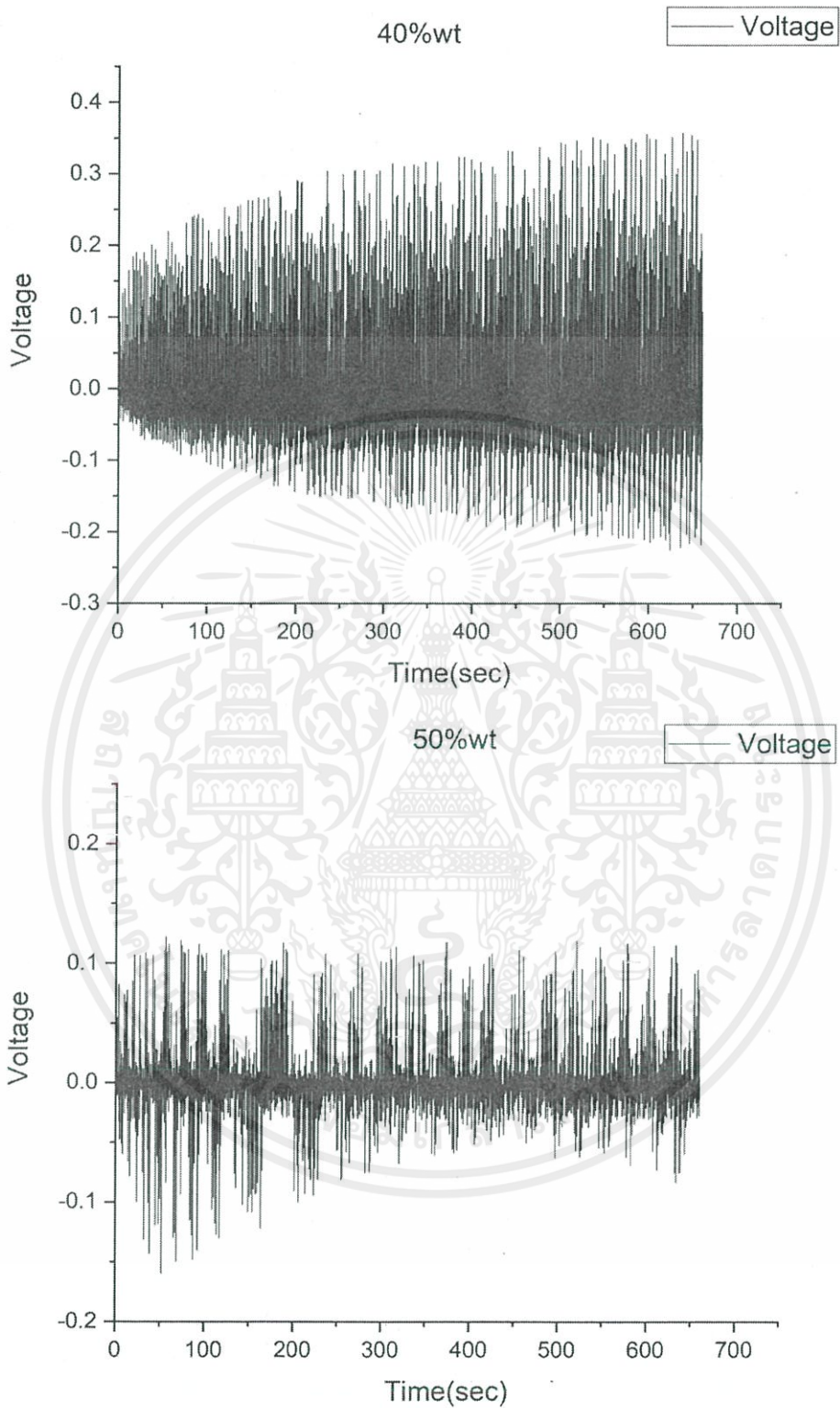
โดยให้แรงเชิงกลอย่างต่อเนื่อง 1000 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.30 แรงดันไฟฟ้าส่งออกที่อัตราส่วน BT (A) 20wt% และ(B) 30 wt% โดยให้แรงเชิงกลอย่างต่อเนื่อง 1000 รอบ

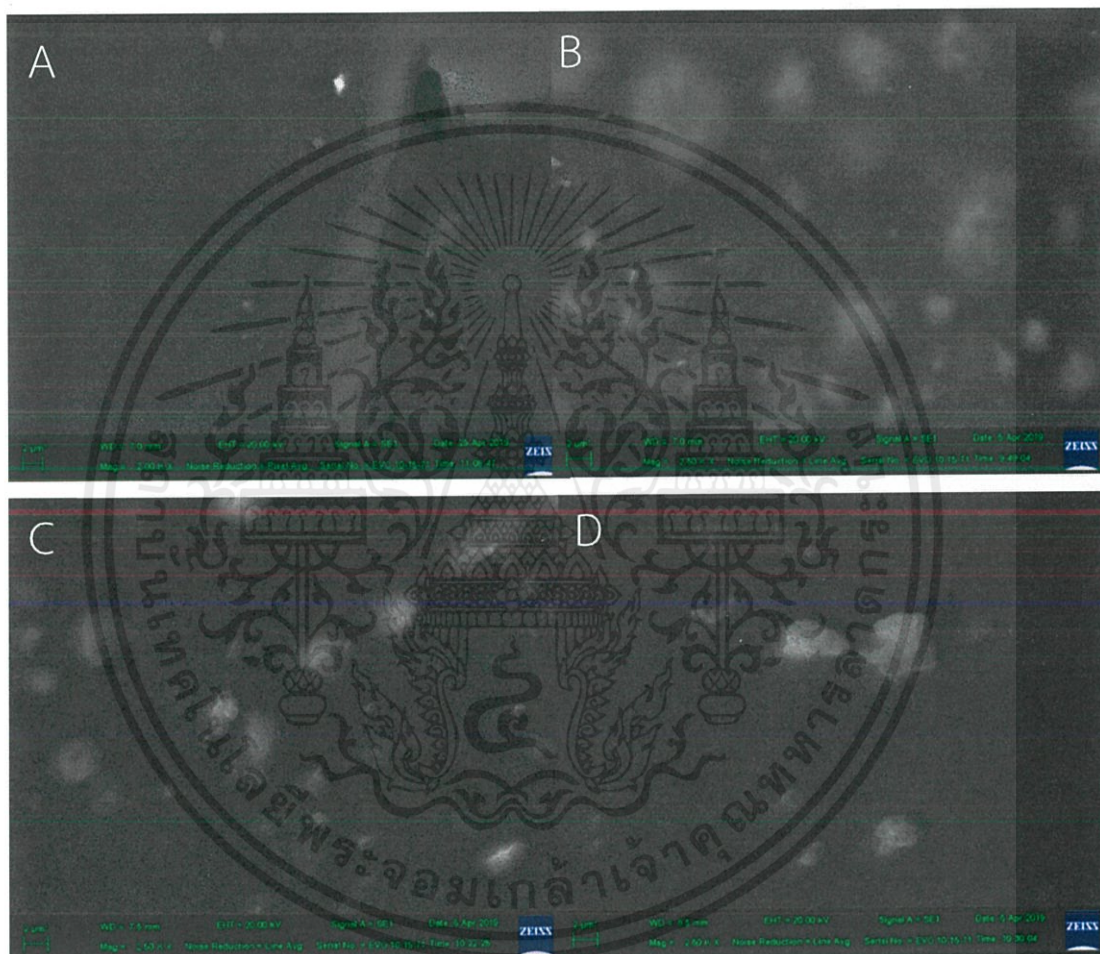
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.31 แรงดันไฟฟ้าส่งออกที่อัตราส่วน BT (A) 40wt% และ(B) 50 wt% โดยให้แรงเชิงกล  
อย่างต่อเนือง 1000 รอบ

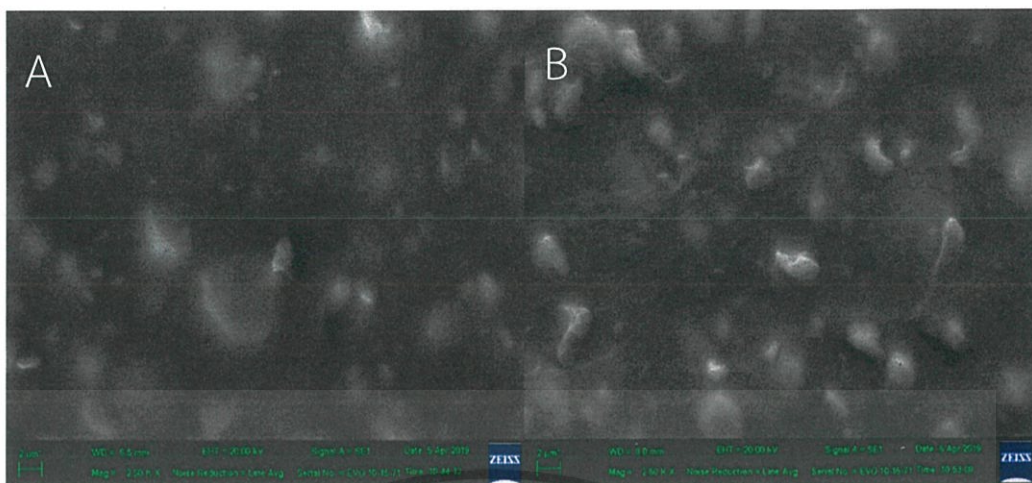
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการให้แรงเชิงกล 1,000 รอบ จะได้ดังภาพที่ 4.32-4.33 เป็นภาพตัดขวางของวัสดุนาโนคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต ที่ 0wt% 10wt% 20wt% 30wt% 30wt% และ 50wt% จะพบว่าชิ้นงานที่มีการเติมอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่อัตราส่วนต่างๆในพอลิโอดีเมทิลไซลอกเซน จะเห็นอนุภาคลักษณะทรงกลมมีการกระจายตัวภายในชิ้นงานคอมโพสิต ชิ้นงานมีลักษณะผ่านการให้แรงเชิงกลและอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันอยู่มีการกระจายตัวออกเล็กน้อยก่อนการให้แรงเชิงกลแก่ชิ้นงาน

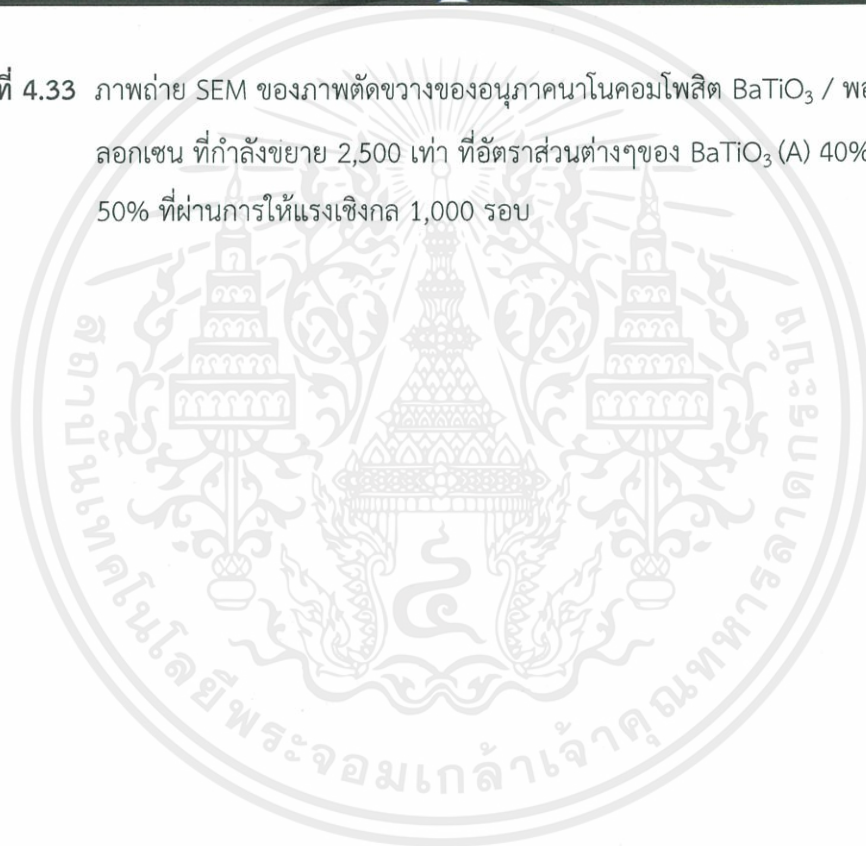


ภาพที่ 4.32 ภาพถ่าย SEM ของภาพตัดขวางของอนุภาคนาโนคอมโพสิต  $BaTiO_3$  / พอลิโอดีเมทิลไซลอกเซน ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า ที่อัตราส่วนต่างๆของ  $BaTiO_3$  (A) 0% (B) 10% (C) 20% (D) 30% ที่ผ่านการให้แรงเชิงกล 1000 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.33 ภาพถ่าย SEM ของภาพตัดขวางของอนุภาคนาโนคอมโพสิต  $\text{BaTiO}_3$  / พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า ที่อัตราส่วนต่างๆของ  $\text{BaTiO}_3$  (A) 40% และ (B) 50% ที่ผ่านการให้แรงเชิงกล 1,000 รอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานที่ได้จากการเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่างแบเรียมไททาเนตกับ PDMS (พอลิไดเมทิลซิลอกเซน) ในสัดส่วนต่าง ๆ เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานที่เตรียมขึ้น ทั้ง 6 สัดส่วนได้ ทั้งนี้ข้อสรุปและข้อเสนอแนะที่ได้จากผลการทดลองทั้งหมด มีดังต่อไปนี้

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1) สามารถเตรียมชิ้นงานนาโนคอมโพสิต  $\text{BaTiO}_3$ /พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ที่มีสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต เป็น 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักโดยรวม ด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม และทิ้งให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (FT-IR) เทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2) ผลการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter โดยวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกชิ้นงานนาโนคอมโพสิต  $\text{BaTiO}_3$ /พอลิไดเมทิลซิลอกเซน ที่มีการเติมอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง และที่เพิ่มอุณหภูมิ โดยจากผลการตรวจวัดพบว่าที่อัตราส่วนแบเรียมไททาเนตที่ 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มากที่สุดโดยค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 9.36 แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกร่วมด้วยพบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่า 0.025 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าที่ความถี่ต่ำไม่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และทำการเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ของที่อัตราส่วนต่าง ๆ ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตให้ชัดเจนยิ่งขึ้นด้วยการกำหนดความถี่ ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการทดสอบด้วยการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ไม่มีความเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่อุณหภูมิห้องมากนัก จึงสรุปว่าอุณหภูมิไม่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

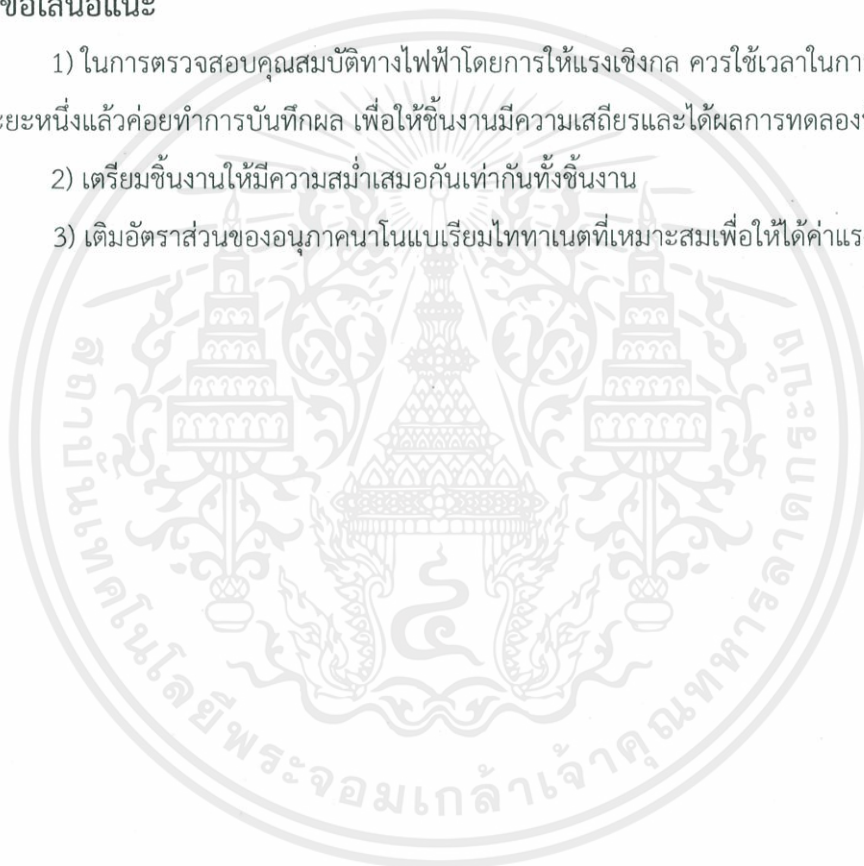
3) ผลการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุนาโนคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่แตกต่างกันโดยการทดสอบแรงดันไฟฟ้าจากแรงกดเชิงกลพบว่าอัตราส่วน 20wt% ให้แรงดันไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 1.7 โวลต์ และจากผลการตรวจสอบกระแสไฟฟ้าส่งออกพบว่า ที่อัตราส่วน 20wt% มีค่าเฉลี่ยที่ 50 nA จากการวัดแรงดันและ

กระแสไฟฟ้าของชิ้นงานที่เตรียมได้ พบว่าที่อัตราส่วน 20wt% ได้ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด เมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนอื่น

4) อิทธิพลของความล้าที่ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าส่งออกของวัสดุนาโนคอมโพสิต ที่อัตราส่วนอนุภาคนาโนแบเรียมไททานेटต่าง ๆ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพความคงทนของวัสดุนาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้ โดยทำการตรวจสอบอิทธิพลของความล้าโดยการให้แรงเชิงกลแก่ชิ้นงาน 1,000 รอบ พบว่ากราฟที่ได้จากการทดสอบของทุกๆชิ้นงานค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกที่ได้มีค่าคงที่ในช่วงแรงกดที่ทำการทดสอบนี้ ซึ่งทำให้เห็นว่าวัสดุนาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้มีความคงทนในช่วงที่ใช้ในการทดสอบ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยการให้แรงเชิงกล ควรใช้เวลาในการให้แรงไปสักระยะหนึ่งแล้วค่อยทำการบันทึกผล เพื่อให้ชิ้นงานมีความเสถียรและได้ผลการทดลองที่ดีที่สุด
- 2) เตรียมชิ้นงานให้มีความสม่ำเสมอกันเท่ากันทั้งชิ้นงาน
- 3) เติมอัตราส่วนของอนุภาคนาโนแบเรียมไททานेटที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าแรงดันสูงสุด



## บรรณานุกรม

- [1] Gusev A. I. Nanomaterials, Nanostructures, and Nanotechnologies (in Russian) // Fizmatlit, Moscow (2007) - 416 pp.
- [2] Herbert, A.J. and Moulson, J. M. 1990. "Electroceramics Materials Properties Application". Cambridge : Great Britain at the University Press.
- [3] Jia, J. Gu, B. and Fan, M. 2014. "Perovskite based low cost and high efficiency hybrid halid-solar cells". Photon Research. 2 : 111-120.
- [4] [Online]. Available : <http://www.dss.go.th/images/st-article/ct-10-2555-pieso.pdf>
- [5] High transparency and triboelectric charge generation properties of nano-patterned PDMS, Hao Xue and Quan Yang 2017, "A wearable pyroelectric nanogenerator and self-powered breathing sensor" P147-154
- [6] [Online]. Available : <https://arstechnica.com/science/2008/11/turning-vibrations-into-energy-nanowire-style/>, Georgia Institute of Technology through nsf.gov
- [7] [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Ruleofmixtures>
- [8] Eun Jung Lee, Tae Yun Kim, Sang-Woo Kim, Sunho Jeong, Youngmin Choi and Su Yeon Lee "High-performance piezoelectric nanogenerators based on chemically-reinforced composites"
- [9] Jing Yan และ Young Gyu Jeong "High Performance Flexible Piezoelectric Nanogenerators based on BaTiO<sub>3</sub> Nanofibers in Different Alignment Modes"
- [10] XIAMETER. 2009. "An Overview of Polydimethylsiloxane (PDMS) Fluids in the Environment". USA
- [11] W.D. Callister, D.G. Rethwisch, Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach, John Wiley & Sons, 2012.
- [12] [Online]. Available : <https://stic.mfu.ac.th/stic-analysis-tools/stic-tool-detail/20.html>
- [13] Nayak, S., Chaki, T.K. and Khastgir, D, 2014. Development of flexible piezoelectric poly (dimethylsiloxane)-BaTiO<sub>3</sub> nanocomposites for electrical energy harvesting Industrial & Engineering Chemistry Research, 53(39), pp.14982-1492

