การศึกษาผลกระทบของมิติของเฟสเพียโซอิเล็กทริกที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของนาโนเจนเนอเรเตอร์เพียโซอิเล็กทริก

EFFECT OF PIEZO-PHASE DIMENSION ON ELECTRICAL PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC NANOGENERATOR

ปฏิภาณ คงใจมั่น
PATIPARN KONGJAIMAN

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF PIEZO-PHASE DIMENSION ON ELECTRICAL PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC NANOGENERATOR

PATIPARN KONGJAIMAN

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
โครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาผลกระทบของมิติของเฟสเพียโซอิเล็กทริกที่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของนาโนเจนเนอเรเตอร์เพียโซอิเล็กทริก
Special Project Title	Effect of piezo-phase dimension on electrical properties of piezoelectric nanogenerator via vibratory milling technique
นักศึกษา	นาย ปฏิภาณ คงใจมั่น
รหัสประจำตัว	58110032
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. วรรณวิลัย วิทยากร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ทศพล เมลืองนนท์

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ	ลายมือชื่อ
ดร.อดิเรก แรงกสิกรณ์	
รศ.ดร. วรรณวิลัย วิทยากร	
ผศ.ดร.ทศพล เมลืองนนท์	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง	การศึกษาผลกระทบของมิติของเฟสเพียโซอิเล็กทริกที่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของนาโนเจนเนอเรเตอร์เพียโซอิเล็กทริก
นักศึกษา	นายปฏิภาณ คงใจมั่น
รหัสประจำตัว	58110032
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วรรณวิลัย วิทยากร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิไดเมทิลซิล๊อกเซน (PDMS) กับแบเรียมไททาเนตเพื่อสร้างเป็นเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งเฟสของที่แบเรียมไททาเนตที่ใช้นั้นประกอบไปด้วยรูปร่างต่างๆ เช่น อนุภาคนาโน (0 มิติ) และเส้นลวดนาโน (1 มิติ) โดยสังเคราะห์ด้วยกระบวนการต่างๆที่เหมาะสมของแต่ละวัสดุ วัสดุนาโนคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิล๊อกเซน/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต, นาโนคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิล๊อกเซน/เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนต และนาโนคอมโพสิตพอลิไดเมทิลซิล๊อกเซน/อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยมีลักษณะการผสมเป็นเนื้อเดียวกันและขึ้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ขนาด 3.35ซ.ม. X 4.66ซ.ม. นอกจากนี้ยังวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ เช่น การตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารด้วยเครื่อง XRD สมบัติทางเคมีด้วยเครื่อง FTIR สมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุด้วยเครื่อง LCR meter สมบัติเพียโซอิเล็กทริกโดยศึกษาการกำเนิดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความล้าของวัสดุด้วยการออกแรงเชิงกลให้กับชิ้นงาน และสมบัติทางกายภาพรวมถึงโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย SEM ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้คือสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุชิ้นงานนาโนคอมโพสิตนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของสารตัวเติมเพียโซอิเล็กทริก โดยที่พอลิไดเมทิลซิล๊อกเซน/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดคือ 0.32 V และ 13.2 nA ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title	Effect of piezo-phase dimension on electrical properties of piezoelectric nanogenerator
Student	Mister Patiparn Kongjaiman
Student ID	58110032
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2018
Project Advisor	Assoc.Prof.Dr.Wanwilai Vittayakorn

ABSTRACT

In this work, nanocomposite between polydimethylsiloxane (PDMS) and barium titanate are prepared in order to use as piezoelectric nanogenerator. Barium titanate phase with various forms such as nanoparticles (0D) and nanowires (1D) are synthesized via appropriated methods. The composites of PDMS/BT nanoparticles, PDMS/BT nanowires and PDMS/BT TiO_2 nanoparticles are homogeneously mixed and casted into 3.35cm X 4.66cm rectangle. Phase information chemical properties and microstructure for all samples are identified via X-ray Diffractometer (XRD), FTIR and SEM respectively. The influence of frequency and temperature on dielectric properties for all nanocomposite are measured by LCR meter. The piezoelectric properties are also investigated and performed by study the generated output voltage and current after applying the mechanical force to the samples. From the results, it is showed that electrical properties of these nanocomposites strongly depend on form and dimensions of piezoelectric fillers. PDMS/BT nanoparticles composite shows the best output of 0.32V and current of 13.2 nA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิจัยเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วรรณวิลัย วิทยากร ที่คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหา ตลอดจนความช่วยในด้านต่างๆทั้งความรู้และประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณ ดร.อดิเรก แรงกสิกรณ์ และ ผศ.ดร. ทศพล เมลืองนนท์ ประธานและกรรมการในการสอบหัวข้อและโครงร่างโครงงานวิจัยที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะสำหรับโครงงานนี้ รวมไปถึงการชี้แนะให้เห็นถึงข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้ข้าพเจ้าได้นำไปปรับปรุงแก้ไขเพื่อทำให้โครงงานวิจัยเล่มนี้สำเร็จและมีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณรุ่นพี่ทุกท่านที่เป็นสมาชิกในหน่วยงานวิจัยวัสดุขั้นสูงของคณะวิทยาศาสตร์ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางแก้ไขปัญหา ตลอดจนการช่วยเหลือในด้านการสังเคราะห์สาร การวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ และขอขอบคุณสมาชิกทุกท่านในห้องปฏิบัติการอิเล็กโตรเซรามิกและเพื่อนผู้ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัวทุกท่านที่คอยส่งเสริมและเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

ปฏิภาณ คงใจมั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ i

ABSTRACT ii

กิตติกรรมประกาศ iii

สารบัญ iv

สารบัญภาพ vii

สารบัญตาราง xii

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 5

1.3 ขอบเขตและแผนดำเนินงานวิจัย 5

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8

2.1 นาโนเจนเนอเรเตอร์ (Nanogenerator) 8

2.1.1 เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (Piezoelectric Nanogenerator) 8

2.1.2 ไตรโบอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (Triboelectric nanogenerator) 9

2.1.3 ไพโรอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (Pyroelectric Nanogenerator) 10

2.2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric materials) 11

2.2.1 ความหมายของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก 11

2.2.2 ประวัติและที่มาของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก 12

2.2.3 หลักการของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก 13

2.3 การนำเพียโซอิเล็กทริกไปใช้งานเป็นนาโนเจนเนอเรเตอร์ 16

2.3.1 เส้นใยนาโนเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ 16

2.3.2 การกักเก็บพลังงานด้วยเส้นลวดนาโนของซิงค์ออกไซด์ 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 17

2.5 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ 23

2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope , SEM) 23

2.5.2 เครื่องวัดสมบัติเพียโซอิเล็กทริก 25

2.5.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 26

2.5.4 การวิเคราะห์จำแนกประเภทและพันธะเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infared (FT-IR) 27

บทที่ 3 วิธีการทดลอง 29

3.1 สารเคมีที่ใช้ 29

3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ 29

3.3 กระบวนการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล 32

3.4 กระบวนการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตพอลิเมอร์ 34

3.5 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ 34

3.7 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า 36

3.7.1 การปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงสุดและแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 36

3.7.2 การวัดความล้าของวัสดุ 37

3.7.3 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก [13] 37

3.8 การตรวจสอบลักษณะทางเคมี 38

บทที่ 4 ผลการทดลอง 39

4.1 การศึกษาสมบัติกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารตัวเติมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ 39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.1 สมบัติทางกายภาพ 39
4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของสารตัวเติม 42
4.1.3 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารตัวเติมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ 44
4.2 การศึกษาสมบัติกายภาพ โครงสร้างจุลภาค ลักษณะทางเคมี และสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/พอลีไดเมทิลไซล็อกเซน และนาโนคอมโพสิตไททาเนียมไดออกไซด์/พอลีไดเมทิลไซล็อกเซน 47
4.2.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุนาโนคอมโพสิต 47
4.2.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุนาโนคอมโพสิต 49
4.2.4 สมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต 69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 80
5.1 สรุปผลการทดลอง 80
5.2 ข้อเสนอแนะ 81
บรรณานุกรม 82
ประวัติผู้เขียน 84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

1.1 ทิศทางของขั้วแบบผลึกเดี่ยวและผลึกรวม 3

1.2 ทิศทางโพลาไรเซชันของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (a) ทิศทางแบบสุ่ม (b) เกิดโพลาไรเซชัน และ (c) คงความมีทิศทางเดียวกัน 3

1.3 แนวคิดพื้นฐานของปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก 3

1.4 การวางตัวของเส้นลวดนาโนตั้งฉากกับขั้วอิเล็กโทรด 4

2.1 การเกิดโพลาไรเซชันของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (a) การวางตัวแบบสุ่มของโพลาร์ (b) โพลาไรเซชัน (c) การคงความโพลาไรเซชัน 9

2.2 การเกิดปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริกในแบบการสัมผัสแนวตั้ง 9

2.3 การเกิดปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริกในแบบการสัมผัสแนวนอน 10

2.4 ไพโรอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ 10

2.5 การเกิดปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริกที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 11

2.6 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก 12

2.7 ปรากฏการณ์อินเวิร์สเพียโซอิเล็กทริก 12

2.8 เพียโซอิเล็กทริกของควอทซ์ 13

2.9 (a) ตามแนวขวาง(Transverse direction) (b) ตามแนวยาว(Longitudinal direction) และ(c) ตามแรงเฉือน(Shear direction) 14

2.10 ทิศทางของขั้วแบบผลึกเดี่ยวและผลึกรวม 14

2.11 ทิศทางโพลาไรเซชันของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (a) ทิศทางแบบสุ่ม (b) เกิดโพลาไรเซชัน และ(c) คงความมีทิศทางเดียวกัน 15

2.12 การปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในผลึก 15

2.13 (a) การเตรียม PZT-NH_2 NP- based เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (b) PZT-NH_2 การจับตัวของ NP-to-polymer (c) ภาพตัดขวาง SEM ของคอมโพสิตฟิล์มประกอบด้วย PZT-NH_2 NPs และ polymer matrix (d) การยืดหยุ่นของวัสดุ PZT-NH_2 NP-based เพียโซอิเล็กทริก นาโนเจนเนอเรเตอร์ 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ หน้า

2.14 (a) แสดงปริมาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กำเนิดได้จากวัสดุต่างๆ (b) กับ (c) ภาพ HRTEM วิเคราะห์การกระจายตัวของ PZT-NH_2 NP based คอมโพสิตฟิล์ม (d) ปริมาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กำเนิดได้จาก PZT-NH_2 NP-based เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ในช่วงความต่างศักย์ที่ 300 ถึง 700 โวลต์ (e) ปริมาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เพียโซอิเล็กทริกที่ wt% แตกต่างกันของ PZT-NH_2 NPs 19

2.16 แสดงถึงการสังเคราะห์ $BaTiO_3$ ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (a) spherical nanoparticles (SPs) (b) nanowires (NWs) (c) การผสมกันระหว่าง BT SPs กับ NWs ที่อยู่ใน PDMS matrix (e) ภาพ X-ray diffraction pattern (20°-80°) ของการสังเคราะห์ BT SPs และ NWs โดยมุมการเลี้ยวเบน (200 peak :44°-46°) (f) ภาพจาก Raman spectra ของ BT SPs และ NWs..... 22

2.17 (a) ภาพแสดงการผสมกันของ BT SPs และ NWs ในนาโนคอมโพสิตเจนเนอเรเตอร์ (b) สัญญาณไฟฟ้าจากนาโนคอมโพสิตเจนเนอเรเตอร์ที่อัตราส่วนของ BT SPs และ NWs แตกต่างกัน (c) โมเดลการคำนวณศักย์เพียโซที่กระจายตัว (d) open-circuit voltage และ (e) short-circuit current จากนาโนคอมโพสิตเจนเนอเรเตอร์ที่อัตราส่วนของ BT SPs ต่อ NWs เท่ากับ 4:1 โดยมีทั้งต่อแบบ forward และ reverse 23

2.18 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 24

2.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 25

2.20 เครื่องเคาะจังหวะ 25

2.21 แผนภาพแสดงการตกกระทบของรังสีเอกซ์โดยอาศัยกฎของแบรกก์ (Bragg's law)..... 26

2.22 ส่วนประกอบและลำดับการทำงานของเครื่องตรวจวัดแหล่งกำเนิดรังสีของ Infared Spectrometer คือ สารเฉื่อยที่ถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิระหว่าง 1,000-1,800 องศาเซลเซียส 27

3.1 แผนผังขั้นตอนการทดลอง 31

3.2 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) 32

3.3 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter) 32

3.4 Teflon-autoclave 33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทำไฮโดรเทอร์มอล 33
3.6 การเตรียมเส้นลวดนาโนด้วยวิธีการหยดลงบนเทปทองแดง 35
3.7 เครื่องเคลือบผิวด้วยทองคำ 35
3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 36
3.9 เครื่องเคาะจังหวะ 37
3.10 เครื่อง LCR meter 38
4.1 ผงอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต 40
4.2 ผงเส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนต 41
4.3 ผงอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 41
4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด a) และ b) BT-NPs 5X, c), d), e) และ f) BT-NPs 10X 42
4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด a) BT-NWs 4X, b) BT-NWs 5X, c), d), e) และ f) BT-NWs 10X 43
4.6 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต 44
4.7 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของผงเส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนต 45
4.8 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของผงไททาเนียมไดออกไซด์เฟสอะนาเทส 46
4.9 ตัวอย่างชิ้นงานนาโนคอมโพสิตที่ได้จากการหล่อแบบดังเดิม a) PDMS, b) PDMS/TiO_2 NPs, c) PDMS/BT NWs และ d) PDMS/BT NPs 49
4.10 พื้นผิวหน้าของชิ้นงาน a) PDMS 750X, b) PDMS 1.00KX และ c) PDMS 2.50KX 50
4.11 พื้นผิวหน้าของชิ้นงาน a) PDMS/BT NPs 750X b) PDMS/BT NPs 1.00KX และ c) PDMS/BT NPs 2.00KX 51
4.12 พื้นผิวหน้าของชิ้นงาน a) PDMS/BT NWs 750X, b) PDMS/BT NWs 1.00KX และ c) PDMS/BT NWs 2.00KX 52
4.13 พื้นผิวหน้าของชิ้นงาน a) PDMS/TiO_2 NPs 750X, b) PDMS/TiO_2 NPs 1.00KX และ c) PDMS/TiO_2 NPs 2.00KX 53
4.14 ภาคตัดขวางชิ้นงานนาโนคอมโพสิตก่อนเสียรูปร่าง PDMS 35X 54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.13 พื้นผิวหน้าของชิ้นงาน a) PDMS/TiO_2 NPs 750X, b) PDMS/TiO_2 NPs 1.00KX และ c) PDMS/TiO_2 NPs 2.00KX 53

4.14 ภาคตัดขวางชิ้นงานนาโนคอมโพสิตก่อนเสียรูปร่าง PDMS 35X 54

4.15 ภาคตัดขวางชิ้นงานนาโนคอมโพสิตก่อนเสียรูปร่าง a) PDMS/BT NPs 40X, b) PDMS/BT NWs และ c) PDMS/TiO_2 NPs 40X 55

4.16 ภาคตัดขวางชิ้นนาโนคอมโพสิตก่อนเสียรูปร่าง a) PDMS 750X, b) PDMS 1.00KX และ c) PDMS2.00KX 56

4.17 ภาคตัดขวางชิ้นงานนาโนคอมพสิตก่อนเสียรูปร่าง a) PDMS/BT NPs 750X, b) PDMS/BT NPs 1.00KX และ c) PDMS/BT NPs 2.00KX 57

4.18 ภาคตัดขวางชิ้นงานนาโนคอมโพสิตก่อนเสียรูปร่าง a) ส่วนด้านล่าง PDMS/BT NWs 1.00KX, b) ส่วนด้านล่าง PDMS/BT NWs 2.00KX และ c) ส่วนด้านบน PDMS/BT NWs 2.00KX..... 58

4.19 ภาคตัดขวางชิ้นงานนาโนคอมโพสิตก่อนเสียรูปร่าง a) PDMS/TiO_2 NPs 1.00KX, b) ส่วนด้านบน PDMS/TiO_2 NPs 2.00KX และ c) ส่วนด้านล่าง PDMS/TiO_2..... 59

4.20 ภาคตัดขวางของชิ้นนาโนคอมโพสิตหลังเสียรูปร่าง a) PDMS 40X b) PDMS/BT NPs 40X และ c) PDMS/BT NWs 40X 61

4.21 ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตก่อนการเสียรูปร่าง PDMS/TiO_2 NPs 40X..... 62

4.22 ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตหลังการเสียรูปร่าง a) PDMS 750X, b) PDMS 1.00KX และ c) 2.00KX 63

4.23 ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตหลังเสียรูปร่าง a) PDMS/BT NPs 750X, b) PDMS/BT NPs 1.00KX และ c) PDMS/BT NPs 2.00KX 64

4.24 ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตหลังเสียรูปร่าง a) PDMS/BT NWs 750X, b) ส่วนด้านล่าง PDMS/BT NWs 1.00KX และ c) ส่วนด้านบน PDMS/BT NWs 2.00KX..... 65

4.25 ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตหลังเสียรูปทรง a) PDMS/TiO_2 NPs 750X, b) ส่วนด้านล่าง PDMS/TiO_2 NPs 1.00KX และ c) ส่วนด้านบน PDMS/TiO_2 NPs 2.00KX 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.29 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต PDMS ที่อุณหภูมิห้อง70

4.30 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต a) PDMS/BT NPs และ b) PDMS/BT NWs ที่อุณภูมิห้อง 71

4.31 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต a) PDMS/TiO_2 NPs ที่อุณหภูมิห้อง 72

4.32 เปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของแต่ละชิ้นงานที่ความถี่ต่ำสุดที่อุณหภูมิห้อง 72

4.33 เปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของแต่ละชิ้นงานที่ความถี่สูงสุดที่อุณหภูมิห้อง 73

4.34 เปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของแต่ละชิ้นงานที่ความถี่ต่ำสุดที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30-150 °C 73

4.35 เปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของแต่ละชิ้นงานที่ความถี่สูงสุดที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30-150 °C 74

4.36 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกชิ้นงานนาโนคอมโพสิต PDMS 76

4.37 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกชิ้นงานนาโนคอมโพสิต PDMS/BT NPs 77

4.38 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกชิ้นงานนาโนคอมโพสิต PDMS/BT NWs 78

4.39 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกชิ้นงานนาโนคอมโพสิต PDMS/TiO2 NPs 79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 แสดงการใช้กระแสไฟฟ้าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555-2559 1

1.2 แผนดำเนินงานวิจัย 6

4.1 น้ำหนัก ปริมาตร และความหนาแน่นของชิ้นงานที่วัดค่าได้ 48

4.2 ลักษณะผิวหน้าและสีของชิ้นงาน 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตและแผนดำเนินงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ยุคสมัยที่มีการแข่งขันทางด้านเทคโนโลยีที่สูงทำให้การคิดค้นเทคโนโลยีที่สามารถแสดงประสิทธิภาพได้สูงสุดต่อพลังงานที่ใช้จึงมีความจำเป็นอย่างมาก ซึ่งส่วนที่สำคัญในการที่จะทำให้อุปกรณ์เหล่านี้ทำงานได้คือพลังงานไฟฟ้า โดยจากสถิติการใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทยตามตารางที่ 1.1 ซึ่งเป็นข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยพบว่าในแต่ละปีจำนวนการใช้งานกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นและก็มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีกในอนาคต ดังนั้นจึงต้องมีนโยบายที่จะประหยัดพลังงานไฟฟ้าหรือสร้างพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนอย่างอื่นที่เป็นพลังงานสะอาด ในปัจจุบันมีพลังงานทดแทนต่างๆมากมายที่สามารถใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ เช่น พลังงานไฟฟ้าจากเขื่อนกั้นน้ำ พลังงานไฟฟ้าจากกังหันลม พลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานใต้พิภพ และอื่นๆอีกมากมาย ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการคิดค้นการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากเกิดสภาวะโลกร้อนเมื่อหลายปีที่ผ่านมาและส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศต่างๆ เช่น น้ำแข็งที่ขั้วโลกเหนือละลาย การเปลี่ยนของสภาพภูมิอากาศ การทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องมีการรณรงค์กิจกรรมต่างๆที่จะรักษาสิ่งแวดล้อมหรือลดการใช้สารเคมีที่อาจก่อให้เกิดมลพิษที่จะส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม เพราะเหตุนี้ทำให้จึงให้เกิดการคิดค้นนวัฒกรรมต่างๆในการพัฒนาวัสดุต่างๆที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายหรือสามารถที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ใช้ซ้ำได้

ตารางที่ 1.1 แสดงการใช้กระแสไฟฟ้าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555-2559 [1]

ปี	เมกะวัตต์	เพิ่มขึ้น/ลดลง
2555	26121.10	+9.29
2556	26598.14	+1.83
2557	26942.10	+1.29
2558	27345.80	+1.50
2559	29618.80	+8.31

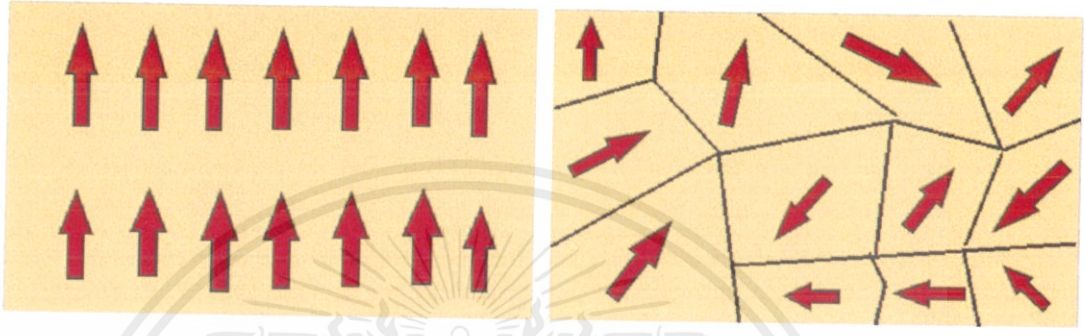
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในด้านงานทางด้านวิศวกรรมวัสดุก็ได้มีการคิดค้นอุปกรณ์ที่จะสามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานเชิงกล พลังงานความร้อนได้เช่นกัน ซึ่งตรงกับความต้องการในปัจจุบันที่จะเน้นไปทางการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมโดยใช้วัสดุจำพวกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (Nanogenerator) ที่มีความสามารถในการรับแรงเชิงกล แรงเฉือน หรือ พลังงานความร้อน แล้วเกิดการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าภายในตัววัสดุทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าและนำไปเก็บไว้กับอุปกรณ์ เช่น ตัวเก็บประจุหรือแบตเตอรี่ได้ ซึ่งวัสดุจำพวกนาโนเจนเนอเรเตอร์ก็จะเป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างง่ายโดยประยุกต์เข้ากับกิจกรรมต่างๆในชีวิตประจำวัน ยกตัวอย่างเช่น การวิ่ง การเดิน ก็ทำให้สามารถที่จะผลิตกระแสไฟฟ้าได้ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ 1) ไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric) คือวัสดุที่รับแรงเฉือนแล้วสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 2) เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) คือวัสดุที่รับแรงเชิงกลแล้วสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ และ 3) ไพโรอิเล็กทริก (Pyroelectric) คือวัสดุที่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนแล้วจะทำให้ขั้วภายในเปลี่ยนแปลงแล้วสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งจะเห็นว่าทั้ง 3 ชนิดต่างก็สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้แตกต่างกันตามแรงที่มากระทำในช่วงแรก

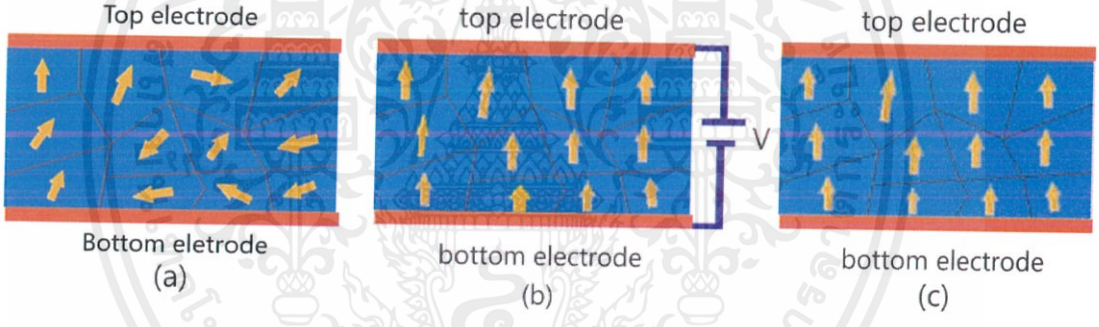
โดยในงานวิจัยนี้จะมุ่งความสนใจไปที่นาโนเจนเนอเรเตอร์ประเภทเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Nanogenerator) เนื่องจากแรงเชิงกลเช่น แรงกด แรงอัด เป็นแรงอย่างง่ายที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำของมนุษย์ ซึ่งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่มีสมบัติพิเศษโดยรับแรงกลดังกล่าวจะทำให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) และในทางตรงกันข้ามหากวัสดุได้รับแรงดันไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและเกิดแรงเชิงกลขึ้น ซึ่งจะเรียกว่าปรากฏการณ์อินเวิร์สเพียโซอิเล็กทริก (Inverse – Piezoelectric Effect) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความคิดที่จะนำแรงเหล่านี้ที่เกิดขึ้นไปใช้ให้เกิดกระโยชน์สูงสุด เช่น ในกิจกรรมของมนุษย์จะมีการเดิน วิ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดแรงกด แรงอัดเกิดขึ้นตรงตามความต้องการของวัสดุที่จะใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเมื่อพิจารณากลไกการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในนาโนเจนเนอเรเตอร์แล้วสามารถอธิบายหลักการคร่าวๆได้ว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในวัสดุเกิดจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงความเค้นเชิงกลบนวัสดุโดยแต่ละโมเลกุลจะประกอบไปด้วยผลึกที่มีโพลาไรเซชันด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงถึงขั้วลบและอีกด้านจะแสดงถึงขั้วบวกซึ่งจะเรียกว่าไดโพล (dipole) ซึ่งในผลึกเดี่ยว (Monocrystalline) จะมีการเรียงตัวของขั้วทั้งหมดของไดโพลไปในทิศทางเดียวซึ่งจะแตกต่างกับผลึกรวม (Polycrystalline) จะมีทิศทางการวางตัวของขั้วแบบสุ่มตามภาพที่ 1.1 ในการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในผลึกรวมจำเป็นจะต้องนำไปให้ความร้อนและอยู่ภายใต้ภายใต้สนามไฟฟ้าแรงสูงเนื่องจากเมื่อให้ความร้อนจะทำให้โมเลกุลมีอิสระมากขึ้นและสนามไฟฟ้าจะช่วยให้ไดโพลทั้งหมดของผลึกเรียงตัวไปในทิศทางที่ใกล้เคียงกันได้มากขึ้นดังภาพที่ 1.2 ส่วนภาพที่ 1.3 แสดงถึงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยภาพที่ 1.3a จะแสดงถึงวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่สภาวะปกติคือปราศจากความเค้นและประจุ แต่ถ้าวัสดุมีการถูกอัดด้วยแรงเชิงกลแล้วศักย์ไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกตรงกับขั้วไฟฟ้าที่ต่อก็จะสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าบนพื้นผิวได้เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของโครงข่ายผลึกภาพที่ 1.3b แต่ถ้ามีการยืดตัวออกจะทำให้เกิดขั้วของศักย์ไฟฟ้าที่อยู่ในตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

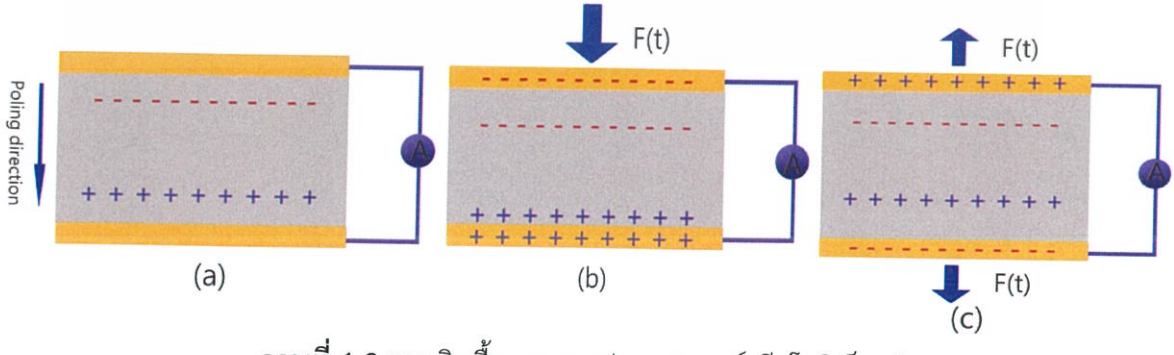
ตรงข้ามกันระหว่างทั้งสองขั้วอิเล็กโทรดภาพที่ 1.3c ซึ่งทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนมีผลมาจากศักย์เพียโซเมื่อมีการผลิตโดยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก อย่างแรกสนามไฟฟ้าจะถูกสร้างภายในเส้นลวดนาโนหรือเส้นใยนาโนเมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ถูกกระทำด้วยความเค้นอัดในทิศทางตั้งฉากกับเส้นลวดนาโนซึ่งสามารถอนุมานการเปลี่ยนรูปของเส้นลวดนาโนได้ นอกจากนั้นจะเกิดการสะสมของประจุที่พื้นผิวด้านบนและด้านล่างของขั้วอิเล็กโทรดอันเป็นผลเนื่องมาจากแรงไฟฟ้าสถิตย์ [2]



ภาพที่ 1.1 ทิศทางของขั้วแบบผลึกเดี่ยวและผลึกรวม

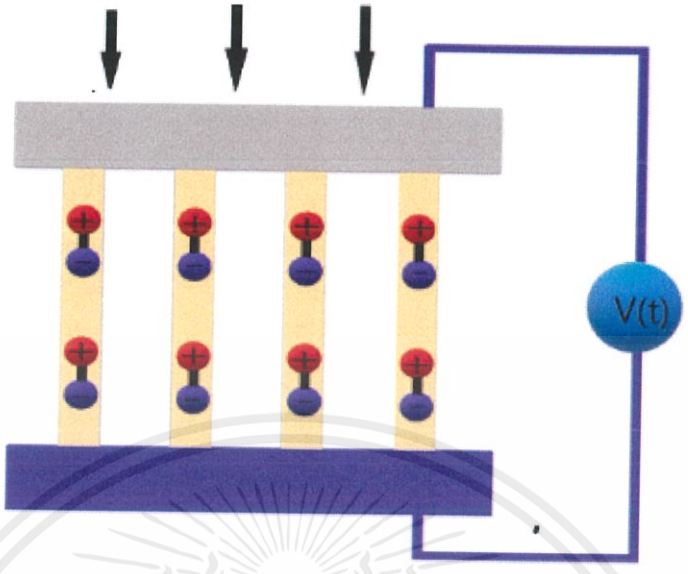


ภาพที่ 1.2 ทิศทางโพลาไรเซชันของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (a) ทิศทางแบบสุ่ม (b) เกิดโพลาไรเซชัน และ (c) คงความมีทิศทางเดียวกัน



ภาพที่ 1.3 แนวคิดพื้นฐานของปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 1.4 การวางตัวของเส้นลวดนาโนตั้งฉากกับขั้วอิเล็กโทรด

โดยในการคิดค้นเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ยุคแรกจะมุ่งความสนใจไปที่การใช้เส้นลวดนาโน (Nanowire) โดยให้ทิศทางของเส้นลวดนาโนนี้วางตัวตั้งฉากกันกับขั้วอิเล็กโทรดดังภาพที่1.4 เพื่อให้เอื้ออำนวยต่อการเกิดไดโพลในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นซึ่งสามารถเกิดพฤติกรรมทางเพียโซอิเล็กทริกได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งนี้การสังเคราะห์เส้นลวดนาโนให้เกิดรูปร่างและทิศทางตามที่ต้องการนั้นก็เป็นไปได้ยาก อีกทั้งวัสดุที่เกิดเป็นเส้นลวดนาโนได้ง่ายอย่างเช่น ZnO ก็มีค่าคงที่ทางเพียโซอิเล็กทริกที่ต่ำอีกด้วยเมื่อเทียบกับเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกดั้งเดิมเช่น $BaTiO_3$ ทำให้การพัฒนาเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ในยุคถัดมาให้ความสนใจไปที่เซรามิก $BaTiO_3$ โดยจะนิยมเตรียมในรูปอนุภาคผสมกับวัสดุพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความคงทนเชิงกลให้กับนาโนเจนเนอเรเตอร์ ด้วยเหตุนี้เองจึงเกิดแนวคิดในเรื่องของการใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกในรูปร่างที่หลากหลาย

สำหรับการดำเนินงานวิจัยนี้จะทำการทดลองเตรียม $BaTiO_3$ ให้อยู่ในรูปของเส้นลวดนาโนและอนุภาคนาโนมาใช้เป็นเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ มีการเตรียมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และทำการผสมพอลิเมอร์เข้าไปด้วยเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นทางกลให้กับชิ้นงานโดยเชื่อว่าการใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีรูปร่างในมิติที่แตกต่างกันจะทำให้การเกิดขั้วไดโพลที่ส่งผลต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกมีปริมาณและความหลากหลายมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตประกอบด้วยพอลิเมอร์และ วัสดุเพียโซอิเล็กทริกในหลายรูปร่างสำหรับใช้งานเป็นเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์แบบยืดหยุ่น

1.2.2 ศึกษาผลของรูปร่างที่มีต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตและแผนดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์มีความยืดหยุ่นและมีความสามารถในการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกที่ดีขึ้นเนื่องจากในงานวิจัยจะศึกษาเกี่ยวกับการผลกระทบของเฟสของสารแบเรียมไททาเนตในรูปร่างต่างๆ เช่น อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (0 มิติ) และเส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนต (1 มิติ) หรือ เส้นใยนาโนแบเรียมไททาเนต (1 มิติ) ที่ผสมในวัสดุนาโนคอมโพสิตโดยควบคุมอัตราส่วนในการผสมระหว่างพอลิเมอร์และสองเฟสแบเรียมไททาเนตเพื่อช่วยให้เหมาะสมต่อการเกิดการจัดเรียงตัวของไดโพลไปในทิศทางเดียวกันและยังสามารถเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้ดียิ่งขึ้น โดยมีแผนการดำเนินงานวิจัยดังตารางที่ 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 แผนดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการทำวิจัย									
	ปี 2561					ปี 2562				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	→	→								
2.ทดลองสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	→	→								
3.สังเคราะห์ $BaTiO_3$ Nanowires		→	→							
4.ตรวจ SEM ของ $BaTiO_3$Nanowires				→						
5.ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก				→	→					
6.สังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต					→	→				
7.ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต						→	→			
8.ทดสอบคุณสมบัติด้านอื่นๆของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกคอมโพสิต							→	→		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการทำวิจัย									
	ปี 2561					ปี 2562				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
9.วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงาน								→		
10.จัดพิมพ์รูปเล่มสมบูรณ์									→	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงความหมายของนาโนเจนเนอเรเตอร์ซึ่งจะอธิบายเกี่ยวกับประเภทและการทำงานของนาโนเจนเนอเรเตอร์ในแต่ละชนิด วัสดุเพียโซอิเล็กทริก การนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

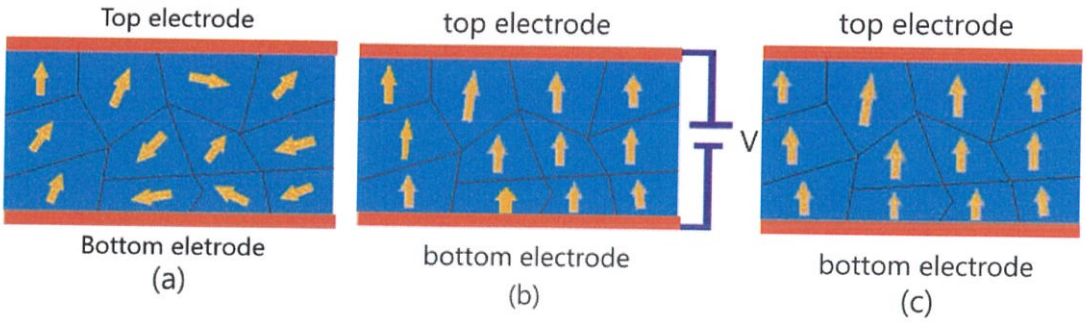
2.1 นาโนเจนเนอเรเตอร์ (Nanogenerator)

นาโนเจนเนอเรเตอร์มีที่มาจากคำว่า “นาโนเทคโนโลยี” รวมกับคำว่า “การกักเก็บพลังงานจลน์หรือพลังงานความร้อน” ซึ่งก็คือเทคโนโลยีชนิดหนึ่งที่เปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์หรือพลังงานความร้อนในระดับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเพียงเล็กน้อยให้สามารถกำเนิดกระแสไฟฟ้าได้ โดยที่นาโนเจนเนอเรเตอร์จะมีทั้งหมด 3 แบบดังนี้

2.1.1 เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (Piezoelectric Nanogenerator) [2]

เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่จะสามารถเปลี่ยนแปลงความเค้นเชิงกลจากภายนอกให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยโครงสร้างระดับนาโนของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกโดยทั่วไปแต่ละโมเลกุลในโครงสร้างผลึกจะประกอบไปด้วยโพลาไรเซชั่นซึ่งด้านหนึ่งของแต่ละโมเลกุลจะแสดงประจุลบส่วนอีกด้านจะแสดงประจุบวกซึ่งจะเรียกว่า “ไดโพล” ในผลึกแบบเดี่ยว (Monocrystalline) จะมีการเรียงตัวของไดโพลที่มีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันแตกต่างจากผลึกรวม (Polycrystalline) จะมีการเรียงตัวของไดโพลเป็นแบบสุ่มดังนั้นในการจะทำให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในผลึกแบบรวมจำเป็นจะต้องในเกิดโพลาไรเซชั่นในโครงผลึกก่อนเพื่อให้ไดโพลมีทิศทางเดียวกัน โดยหลักการเบื้องต้นจะของการควบทิศทางของไดโพลให้มีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันนั้นต้องนำผลึกไปกระตุ้นที่ภายใต้สนามไฟฟ้าแรงสูงและให้ความร้อนเพื่อให้โมเลกุลในผลึกสามารถมีอิสระในการเคลื่อนที่ได้จากนั้นจะทำให้เกิดโพลาไรเซชันและสามารถเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้ดีทำให้กำเนิดกระแสไฟฟ้าได้มาก

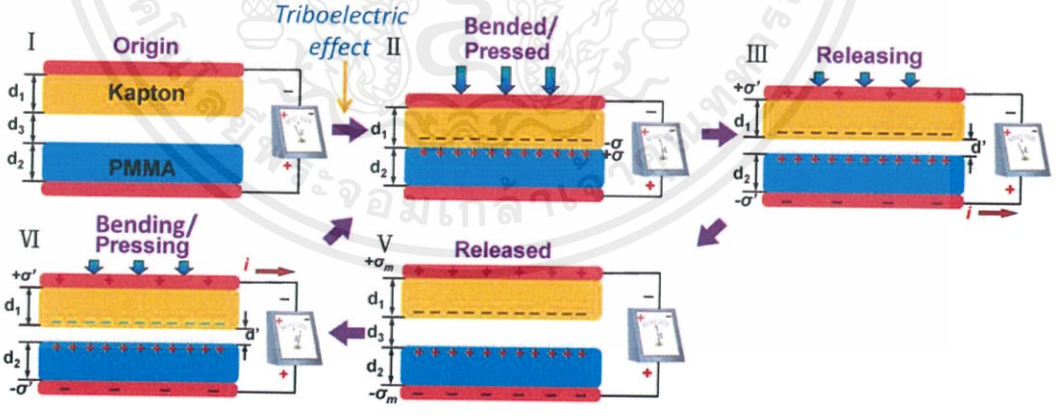
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 การเกิดโพลาไรเซชันของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (a) การวางตัวแบบสุ่มของโพลาร์ (b) โพลาไรเซชัน (c) การคงความโพลาไรเซชัน

2.1.2 ไตรโบอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (Triboelectric nanogenerator)

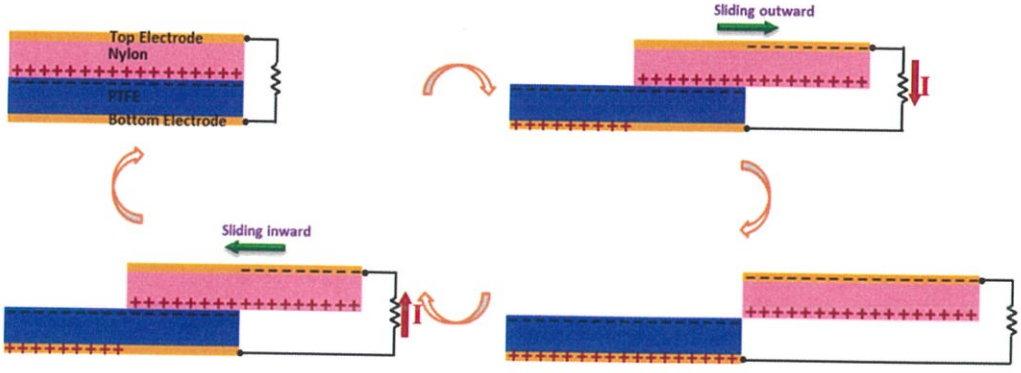
ไตรโบอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่เกี่ยวข้องการกับสัมผัสกันและแลกเปลี่ยนกันของประจุไฟฟ้าของวัสดุโดยการเกิดปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริกนั้นสามารถอธิบายได้อย่างง่ายคือการนำวัสดุที่เด่นทางด้านคุณสมบัติทางไฟฟ้าไปสัมผัสกับวัสดุอีกชนิดที่แตกต่างกันและให้มีช่องว่างระหว่างวัสดุกันก่อนเกิดการสัมผัส จากนั้นเมื่อนำวัสดุมาสัมผัสกันและแยกออกจากกันก็จะสามารถเกิดปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริกได้โดยที่ประจุไฟฟ้าที่พื้นผิวของวัสดุจะแสดงตรงกันข้ามกับพื้นผิวที่ขั้วของวัสดุ



ภาพที่ 2.2 การเกิดปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริกในแบบการสัมผัสแนวตั้ง [3]

นอกจากนี้แล้วการเกิดปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริกนั้นยังสามารถที่จะเกิดในแนวนอนได้ซึ่งจะเป็นในลักษณะของการสไลด์กันของวัสดุทั้งสองชนิด

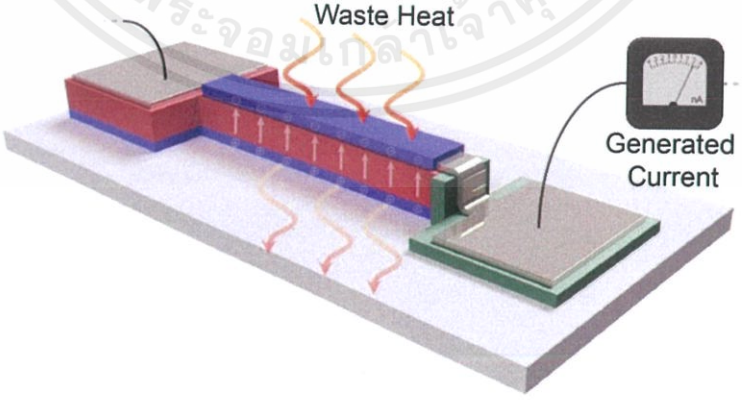
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 การเกิดปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริกในแบบการสัมผัสแนวนอน [3]

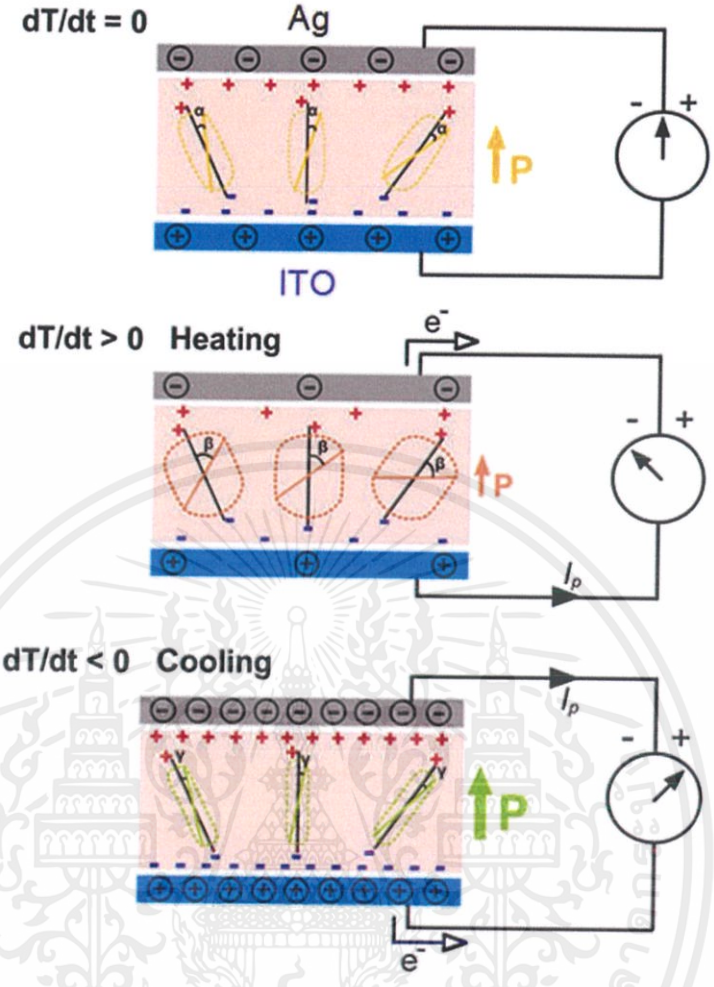
2.1.3 ไพโรอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (Pyroelectric Nanogenerator)

ไพโรอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนซึ่งจะแตกต่างจากนาโนเจนเนอเรเตอร์ในสองแบบแรกโดยหลักการทำงานเบื้องต้นของการเกิดปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริกจะใช้ความต่างของอุณหภูมิของปลายทั้งสองอุปกรณ์เพื่อให้สามารถเกิดการแพร่ของประจุได้โดยที่กลไกนี้ขึ้นอยู่กับแรงสั่นสะเทือนแบบสุ่มที่เกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากขั้วไฟฟ้าไฟฟ้ารอบๆ แกนสมดุลซึ่งมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้องปกติจะมีการจัดเรียงของไดโพลในลักษณะแบบสุ่มแต่ถ้าการให้อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ไดโพลไฟฟ้าสั่นในระดับที่กว้างกว่าโดยกระจายไปทั่วแกนปรับแนว ผลรวมของโพลาไรเซชันโดยธรรมชาติลดลงเนื่องจากการแพร่กระจายของมุมการสั่น ปริมาณของค่าเหนี่ยวนำในขั้วไฟฟ้าจะลดลงส่งผลให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอน แต่ถ้าอุปกรณ์มีการลดลงของอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณของโพลาไรเพิ่มขึ้นจำนวนประจุไฟฟ้าที่มากขึ้นแต่ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนจะตรงกันข้าม



ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างวัสดุไพโรอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.5 การเกิดปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริกที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ [3]

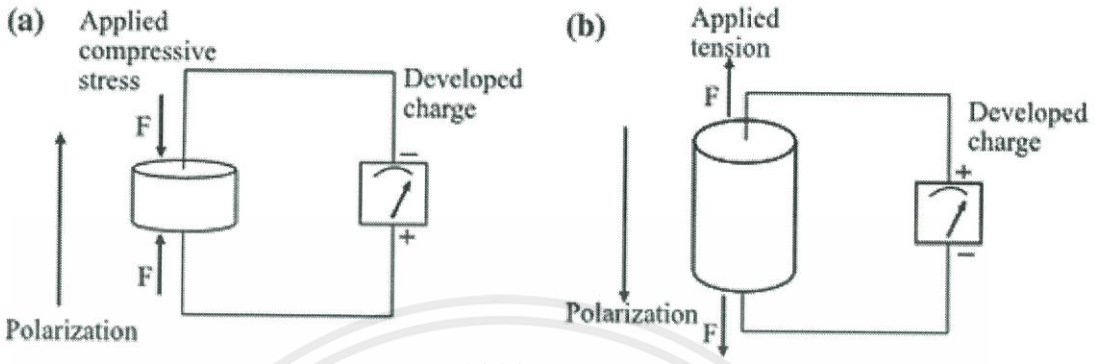
2.2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric materials)

2.2.1 ความหมายของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก [5]

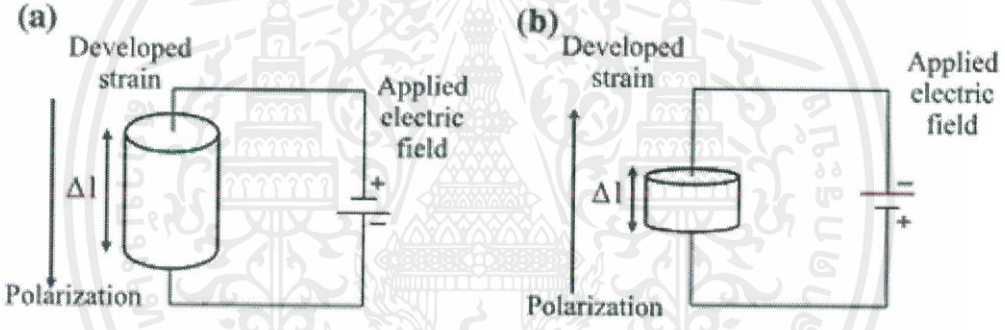
วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่มีความสามารถให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้เมื่อได้รับความเค้นเชิงกลในทางกลับกันถ้าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าเข้าไปในระบบก็จะทำให้วัสดุเกิดการความเค้นภายในวัสดุ ซึ่งคำว่า “เพียโซ (Piezo)” มาจากภาษากรีกมีความหมายถึงการกด ส่วนของเพียโซอิเล็กทริกซิตี้จะหมายถึงการผลิตกระแสไฟฟ้าได้จากการกดซึ่งก็เป็นการรวมคำของเพียโซกับอิเล็กทริกซิตี้โดยการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมก็จะทำให้วัสดุสามารถโค้งงอขยายหรือหดตัวเมื่อได้รับความต่างศักย์ทางไฟฟ้าซึ่งภายในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถเกิดได้ 2 ปรากฏการณ์คือ 1) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) คือวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถให้กระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าได้เมื่อได้รับแรงเชิงกลจากภายนอกมากระทำที่ผิวของวัสดุ และ 2) ปรากฏการณ์อินเวิร์สเพียโซอิเล็กทริก (Inverse – Piezoelectric Effect) จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงดันไฟฟ้าเข้าไปในตัววัสดุซึ่งจะทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่างและขนาดดังภาพที่ 2.6 และ 2.7



ภาพที่ 2.6 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก



ภาพที่ 2.7 ปรากฏการณ์อินเวิร์สเพียโซอิเล็กทริก

2.2.2 ประวัติและที่มาของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก [5]

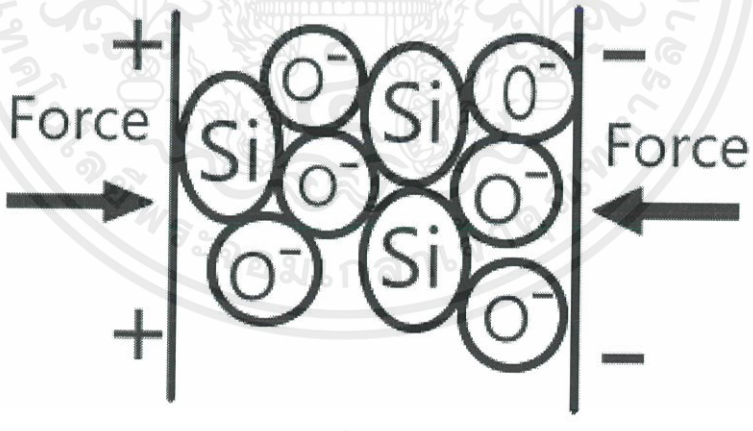
ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกถูกค้นพบครั้งแรกในปีค.ศ. 1880 โดยพี่น้องกูว์รี (Pierre and Jacques Curie) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการให้ความเค้นกับวัสดุที่เป็นผลึกบางชนิดจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวของวัสดุและเมื่อทำย้อนกลับกับวัสดุชนิดเดียวกันคือการให้สนามไฟฟ้ากับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างและขนาดโดยที่ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกี่ยวข้องกับไดโพลไฟฟ้า (Electrical dipoles) ของการจัดเรียงตัวเองภายใต้สนามไฟฟ้า โดยในช่วงแรกของการค้นพบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกพี่น้องกูว์รีได้ใช้ความรู้ที่เกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของวัสดุไพโรอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้และแสดงให้เห็นถึงผลของการเลือกใช้ผลึกต่างๆเช่น การเลือกใช้ทัวร์มาลีน (Tourmaline), ควอทซ์ (Quartz), บุษราคัม (Topaz), อ้อย (Cane sugar) และโรเชลล์เกลือ (Sodium potassium tartrate tetrahydrate) พบว่าควอทซ์และโรเชลล์เกลือมีการใช้เป็นวัสดุเพีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โซอิเล็กมากที่สุด ยุคแรกของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะเป็นการพัฒนาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกแบบธรรมชาติซึ่งในสมัยสงครามโลกครั้งที่1จะนำเพียโซอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้ทางด้านการสื่อสารเช่น ไมโครโฟน, เซนเซอร์วัดการเอียง, และอุลตร้าโซนิกเซนเซอร์เป็นต้น ยุคต่อมาช่วงสงครามโลกครั้งที่2 ซึ่งช่วงนั้นจะพัฒนาทางด้านอุปกรณ์ตัวเก็บประจุและค้นพบวัสดุเซรามิกบางชนิดที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงถึง 100 เท่าเมื่อเทียบกับผลึกทั่วไป นอกจากนี้วัสดุประเภทที่เรียกว่าเฟอโรอิเล็กทริก (Ferroelectrics) ก็ถูกนำไปใช้พัฒนาคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกซึ่งช่วงนี้จะมีการพัฒนาสารจำพวกเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกได้แก่สารแบเรียมไททาเนต (Barium titanate) หลังจากเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate) ต่อมามีการศึกษาโครงสร้างของแบเรียมไททาเนตพบว่ามีโครงสร้างแบบเพอรอบสไก (Perovskite structures) และความเกี่ยวข้องกับไฟฟ้าเชิงกล

2.2.3 หลักการของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก [5]

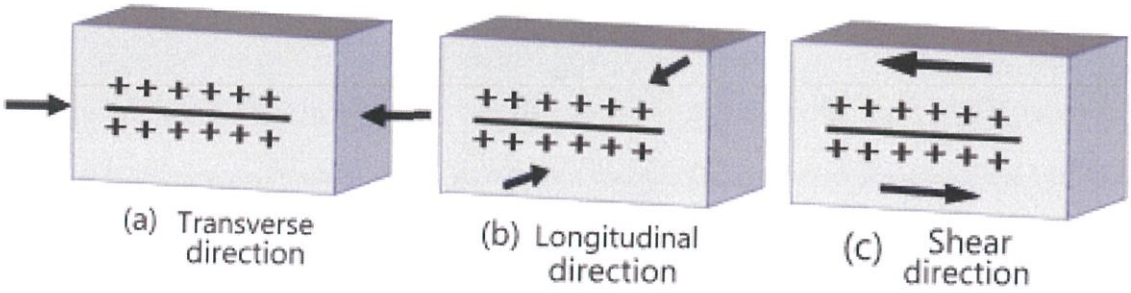
เนื่องจากในช่วงแรกของการค้นพบวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีผลมาจากการให้แรงเชิงกลแล้วมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างรวมถึงการเปลี่ยนตำแหน่งของประจุซึ่งประจุเหล่านี้มีสัดส่วนสูงมากเมื่อเทียบกับแรงที่ใช้ในการกด โดยจะยกตัวอย่างของควอทซ์ (SiO_2) โครงสร้างทรงสี่หน้า (Tetrahedron) เมื่อออกแรงกระทำกับโครงสร้างทรงสี่หน้าจะเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของประจุแคทไอออนและประจุแอนไอออนโดยจะอยู่คนละฝั่งกันดังภาพที่ 2.8 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ด้านนอกของผิวหน้าเพียโซอิเล็กทริกเกิดประจุที่ผิวเนื่องจากแรงกด



ภาพที่ 2.8 เพียโซอิเล็กทริกของควอทซ์

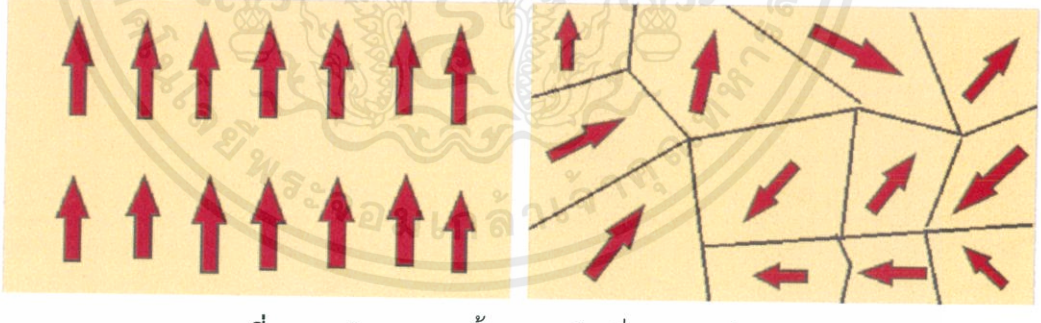
ในการออกแรงกระทำกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นมีแนวในการกระทำอยู่ 3 แบบคือ (a) ตามแนวขวาง (Transversal) (b) ตามแนวยาว (Longitudinal) และ (c) ตามแรงเฉือน (Shear)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.9 (a) ตามแนวขวาง(Transverse direction) (b) ตามแนวยาว(Longitudinal direction) และ(c) ตามแรงเฉือน(Shear direction)

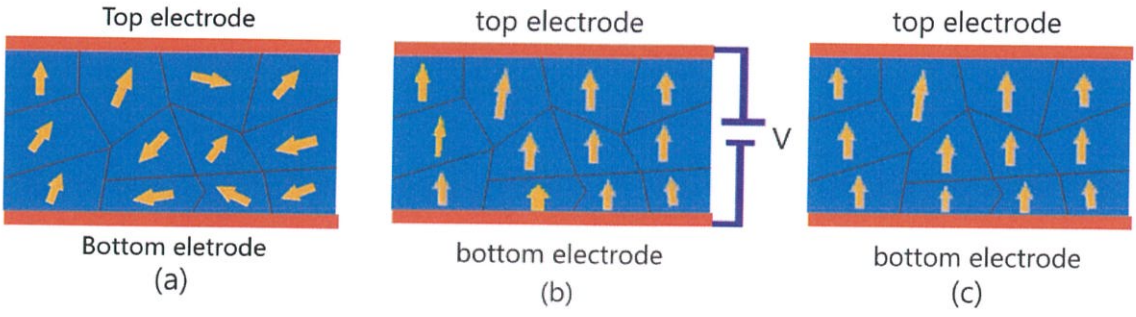
วัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นเป็นวัสดุที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานเชิงกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ซึ่งเป็นความพิเศษของวัดุชนิดนี้โดยในแต่ละโมเลกุลของผลึกจะประกอบไปด้วยโพลาไรเซชั่นซึ่งด้วยหนึ่งจะแสดงเป็นประจุบวกและอีกด้านจะแสดงเป็นประจุลบโดยจะเรียกไดโพลซึ่งในวัสดุที่เป็นผลึกเดี่ยวนั้นจะการเรียงตัวของไดโพลไปทิศทางเดียวกันซึ่งจะทำให้เกิดโพลาไรเซชั่นได้ดีส่งให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้ดี แตกต่างจากในผลึกรวมจะมีการเรียงตัวของไดโพลที่เป็นแบบสุ่มดังนั้นจึงต้องมีการให้ความร้อนและสนามไฟฟ้าเพื่อให้การจัดเรียงไดโพลไปในทิศทางเดียวกันทำให้เกิดโพลาไรเซชั่นรวมถึงการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้ดีขึ้น จากภาพที่ 2.10 จะแสดงการเรียงตัวของไดโพลในโครงสร้างผลึกแบบเดี่ยวและโครงสร้างผลึกแบบรวม



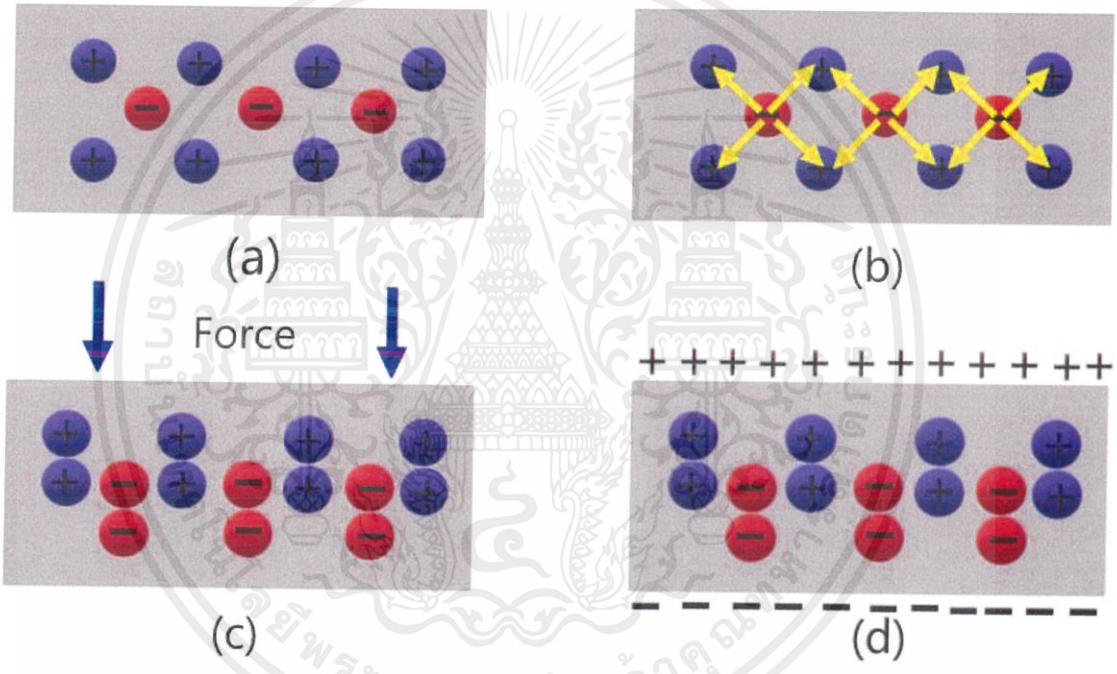
ภาพที่ 2.10 ทิศทางของขั้วแบบผลึกเดี่ยวและผลึกรวม

การทำให้ผลึกแบบรวมนั้นมีการจัดเรียงตัวไดโพลไปในทิศทางเดียวกันเพื่อให้แสดงคุณสมบัติเป็นโพลาไรเซชั่นจำเป็นจะต้องให้ความร้อนเพื่อให้โมเลกุลที่อิสระในการเคลื่อนที่รวมถึงการให้สนามไฟฟ้าที่สูงเพื่อช่วยในการจัดเรียงไดโพลให้มีทิศทางเดียวกันตามภาพที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 ทิศทางโพลาไรเซชันของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (a) ทิศทางแบบสุ่ม (b) เกิดโพลาไรเซชัน และ(c) คงความมีทิศทางเดียวกัน



ภาพที่ 2.12 การปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในผลึก

เบื้องต้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกก่อนการผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้นั้นภายในโครงสร้างของผลึกจะมีความเท่ากันของประจุไฟฟ้าภายในซึ่งโดยปกติแล้วประจุไฟฟ้าภายในผลึกจะไม่สามารถออกมาที่ผิวหน้าได้เนื่องมีทิศทางของไดโพลไฟฟ้าแต่ละตัวที่กันไว้ไม่ให้ตัวใดตัวหนึ่งหลุดออกมาได้ แต่เมื่อให้แรงเชิงกลกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนี้ก็จะให้ทำให้ประจุไฟฟ้าภายในสูญเสียสมดุลด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไดโพลไฟฟ้าที่เป็นตัวยึดไม่ให้ประจุไฟฟ้าหลุดออกไม่สามารถยึดไว้ได้จึงทำให้ประจุไฟฟ้าเกิดหลุดออกมาที่ผิวโดยด้านหนึ่งจะแสดงเป็นประจุบวกและอีกด้านจะแสดงเป็นประจุลบตามปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกดังนั้นเมื่อต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าประจุไฟฟ้าก็จะสามารถเคลื่อนไปตามขั้วได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การนำเพียโซอิเล็กทริกไปใช้งานเป็นนาโนเจนเนอเรเตอร์ [6]

เพียโซเซรามิก, เส้นลวดนาโน (ZnO, ZnS, InN, GaN, หรือ CdS), และพอลิเมอริก PVDF ล้วนแล้วแต่ตัวอย่างของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกซึ่งสามารถนำมาทำให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้ เพียโซเซรามิกมีค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อพลังงานกล-ไฟฟ้ามีสูง (large electromechanical coupling constants) ทำให้มีอัตราการแปลงพลังงานสูงซึ่งในปัจจุบันวัสดุเพียโซเซรามิกจะมีฟิล์มเป็นฐานในโครงสร้างแต่เนื่องจากมีความเปราะแตกหักง่ายถ้านำมาใช้เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบแบบฟิล์มในเพียโซเซรามิกกับเพียโซเซรามิกเส้นลวดนาโนพบว่าแบบเส้นลวดนาโนมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่สูงกว่าเป็นผลมาจากวัสดุเพียโซเซรามิกเส้นลวดนาโนมีความเป็นเพียโซอิเล็กทริกซิตี้สูงและด้วยสมบัติของสารกึ่งตัวนำทำให้ความสามารถในการกำเนิดไฟฟ้ารวมทั้งความสามารถในการส่งผ่านที่อินเตอร์เฟซ/รอยต่อได้ดี โดยส่วนมากเพียโซเซรามิกเส้นลวดนาโนจะต้องกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิสูงเพื่อเพิ่มสมบัติเพียโซอิเล็กทริกให้ดียิ่งขึ้นและยังมีวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดอื่นๆเช่น เส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO Nanowires) และ เส้นใยนาโน PVDF ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงง่ายต่อการขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง

2.3.1 เส้นใยนาโนเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ [6]

เพียโซอิเล็กทริกซิตี้เป็นความสามารถของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการกำเนิดไฟฟ้าได้จากการให้แรงเชิงกลกับวัสดุในงานวิจัยส่วนใหญ่จะเลือกใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์เนื่องด้วยจากเหตุผลที่ว่าวัสดุมีการแสดงคุณสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าคือพาหะไม่สามารถซึมผ่านจากโลหะอิเล็กโทรดไปยังวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้เนื่องจากเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกดังนั้นจึงสามารถผลิตไฟฟ้ากระแสสลับได้อย่างไรก็ตามเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ก็ถูกทำขึ้นจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซมิคอนดักเตอร์ซึ่งสามารถผลิตได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับโดยที่คุณสมบัติทั้งสองอย่างทั้งเซมิคอนดักเตอร์และเพียโซอิเล็กทริกเป็นเหตุผทำให้สามารถผลิตทั้งกระแสตรงและสลับได้ ส่วนกลไกการทำงานของวัสดุเส้นใยนาโนเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์คือ การไหลของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นจากศักย์เพียโซโดยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก เริ่มจากการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปกับเส้นใยนาโน เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ได้รับความเค้นอัดในทิศทางตั้งฉากกับเส้นลวดนาโนซึ่งสามารถอนุมานการเปลี่ยนรูปของเส้นลวดนาโนได้ นอกจากนั้นจะเกิดการสะสมของประจุที่พื้นผิวด้านบนและด้านล่างของขั้วอิเล็กโทรดอันเป็นผลเนื่องมาจากแรงไฟฟ้าสถิตย์เหมือนกับการให้ความเครียดกับเส้นใยนาโนซึ่งสามารถดูได้จากโพลาไรซ์ไดโพลโมเมนต์ในแผ่นตัวเก็บประจุที่เต็มไปด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก ท้ายที่สุดศักย์ไฟฟ้าของเพียโซก็จะหายไปทำให้กระแสอิเล็กตรอนไหลย้อนกลับผ่านวงจรนอกเมื่อมีการปลดปล่อยความเค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การกักเก็บพลังงานด้วยเส้นลวดนาโนของซิงค์ออกไซด์ [6]

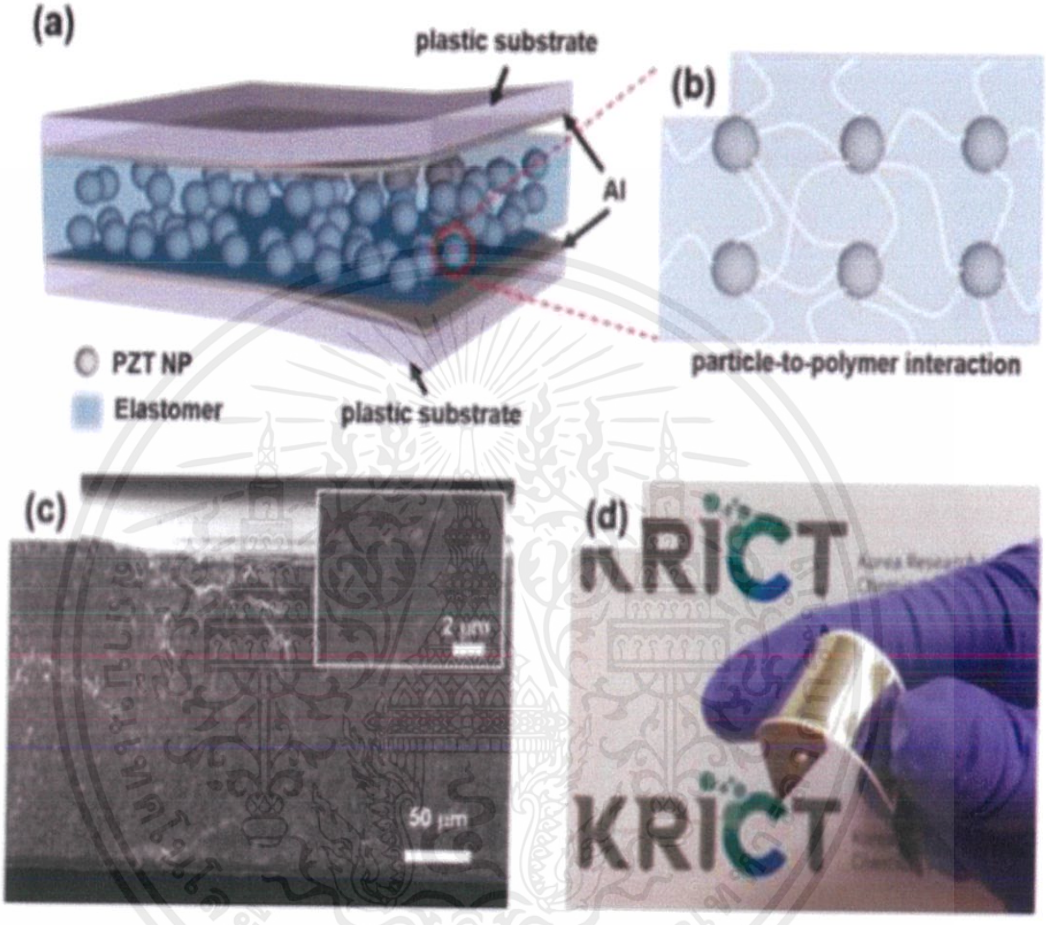
การปลูกเส้นลวดนาโนของซิงค์ออกไซด์ลงบนเส้นใยเป็นไปได้ที่จะนำไปขึ้นรูปเป็นอุปกรณ์ที่ยืดหยุ่นได้, พับเก็บได้, และเป็นแหล่งพลังงานที่สวมใส่ได้ในรูปต่างๆเช่น “power shirt” โดยที่อุปกรณ์นาโนเจนเนอเรเตอร์ทำงานที่ความถี่น้อยกว่า 10 เฮิร์ตซึ่งอยู่ในช่วงของการแปลงพลังงานกลจากการสั่น, การเดิน, และ อัตราการเต้นของหัวใจซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ของอุปกรณ์นาโนเจนเนอเรเตอร์ โดยในการปลูกให้มีประสิทธิภาพสูงนั้นจะมีปัจจัยอยู่ 2 อย่างคือ 1) การควบคุมรูปแบบและทิศทางในการเกิดซึ่งรวมถึงการปรับรูป มิติ และความเป็นไปได้ของรูปร่าง 2)เส้นใยนาโนจำเป็นจะต้องเกิดที่อุณหภูมิต่ำๆโดยเส้นลวดนาโนสามารถโตบนเส้นในนาโนได้ โดยในการพัฒนาระบบนี้ทำให้มีความสามารถในการแปลงพลังงานที่สูงกว่าเส้นลวดนาโนเพียโซเซรามิกนาโนเจนเนอเรเตอร์และเส้นลวดนาโนของซิงค์ออกไซด์นาโนเจนเนอเรเตอร์อยู่ 3 อย่างคือ 1) สามารถเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้สูงขึ้น 400-500% 2) สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า(ความเครียดวิกฤติขนาดใหญ่,ความยืดหยุ่นสูง, และอายุการใช้งานที่มากกว่า) 3) ตอบสนองได้ไวต่อแรงขนาดเล็กได้ดี

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Eun jung Lee และคณะ [7] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิของเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ทางเคมีในการเสริมแรงคอมโพสิตซึ่งเป็นการทำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์แบบคอมโพสิตคือใช้ lead zirconate titanate (PZT) nanoparticles (PZT NPs) โดยประกอบได้ amine-functional กลายเป็น (PZT-NH_2 NPs) ซึ่งจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการเพิ่มความแข็งแรงให้กับระบบคอมโพสิตโดยใช้ amine-functional กับ thermoplastic triblock copolymer ไม่มีการเติมสารเพิ่มยืดเหนี่ยว ซึ่งเพียโซอิเล็กทริก PZT NPs เป็น surface-functionalized กับ amine groups ยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์โดย maleic anhydride molecule ใน polymer matrix ซึ่งการกระจายตัวของ PZT-NH_2 NPs ในวัสดุคอมโพสิตจะช่วยเพิ่มการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ที่มีการเติมแค่ PZT อย่างเดียว และการทำเป็นวัสดุคอมโพสิตแบบทำให้เพิ่มความยืดหยุ่นให้กับระบบ

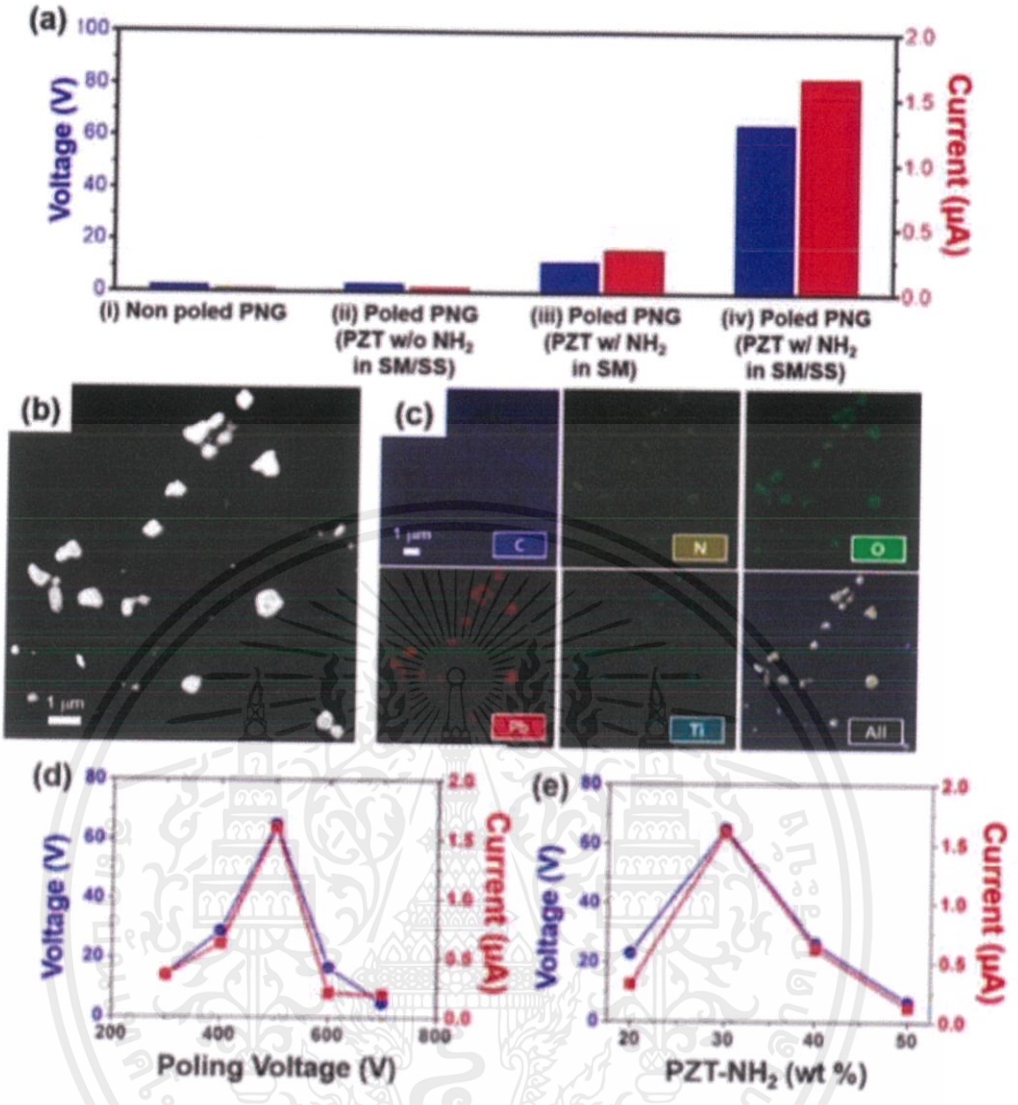
ผลการทดลองที่ได้วัสดุมีการกระจายของ PZT NP ใน Elastomer ได้ดีโดยให้ประสิทธิภาพในการทำงานเกี่ยวกักเก็บพลังงานได้ซึ่งใช้ amine-functional เติมเข้าไปใน PZT NPs เพื่อช่วยในการกำเนิดพลังงานซึ่งในภาพ (b) จะแสดงให้เห็นถึงการจับตัวระหว่าง polymer matrix กับ PZT NPs เป็นแบบโครงข่าย ซึ่งมีข้อดีหลายอย่าง โดยในการเติม PZT NPs ลงไปในคอมโพสิตฟิล์มทั้งนี้เพื่อช่วยเพิ่มการกระจายตัวของ NPs ใน polymer matrix ซึ่งช่วยเพิ่มความเค้นเข้าให้กับ NPs ขณะที่เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์มีการเปลี่ยนรูปร่างในการเพิ่มความเค้นนั้นจะช่วยประสิทธิภาพที่ออกมาของอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



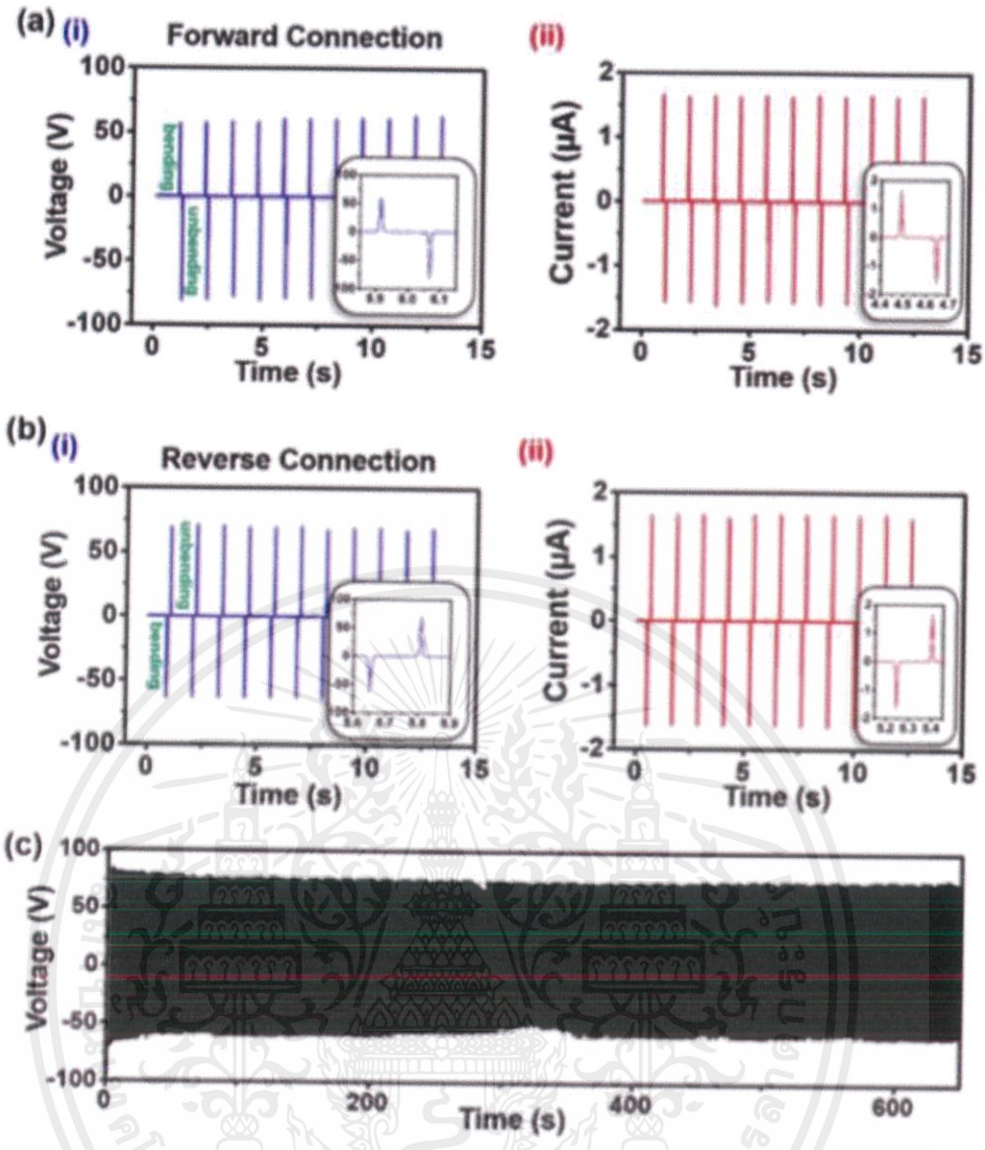
ภาพที่ 2.13 (a) การเตรียม PZT-NH_2 NP- based เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (b) PZT-NH_2 การจับตัวของ NP-to-polymer (c) ภาพตัดขวาง SEM ของคอมโพสิตฟิล์มประกอบด้วย PZT-NH_2 NPs และ polymer matrix (d) การยืดหยุ่นของวัสดุ PZT-NH_2 NP-based เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.14 (a) แสดงปริมาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กำเนิดได้จากวัสดุต่างๆ (b) กับ (c) ภาพ HRTEM วิเคราะห์การกระจายตัวของ PZT-NH_2 NP based คอมโพสิตฟิล์ม (d) ปริมาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กำเนิดได้จาก PZT-NH_2 NP-based เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ในช่วงความต่างศักย์ที่ 300 ถึง 700 โวลต์ (e) ปริมาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เพียโซอิเล็กทริกที่ wt% แตกต่างกันของ PZT-NH_2 NPs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



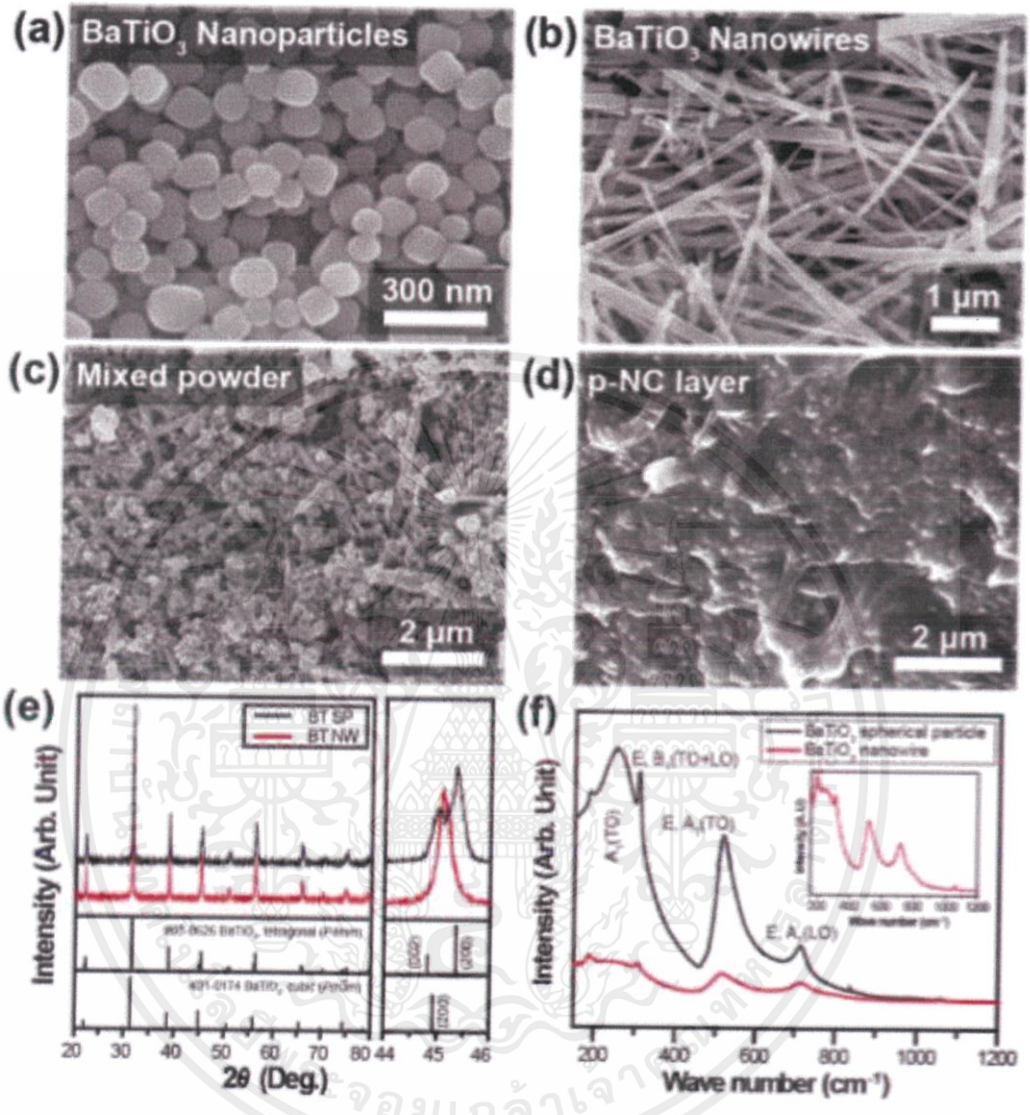
ภาพที่ 2.15 (a) การวัดสัญญาณปริมาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริกขณะที่ออกแรงกดแบบ forward (b) การวัดสัญญาณปริมาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริกขณะที่ออกแรงกดแบบ reverse (c) การวัดความล้าของวัสดุ PZT-NH_2 NP-based เพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์เมื่อมีการทำงาน 5000 cycles

ผลที่ได้คือปริมาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะแสดงเป็นบวกเมื่อมีการต่อวงจรแบบ forward ซึ่งจะแตกต่างจาก reverse และการวัดความสามารถในการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเมื่อผ่านการทำงาน 5000 cycles พบว่ายังให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่คงที่อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

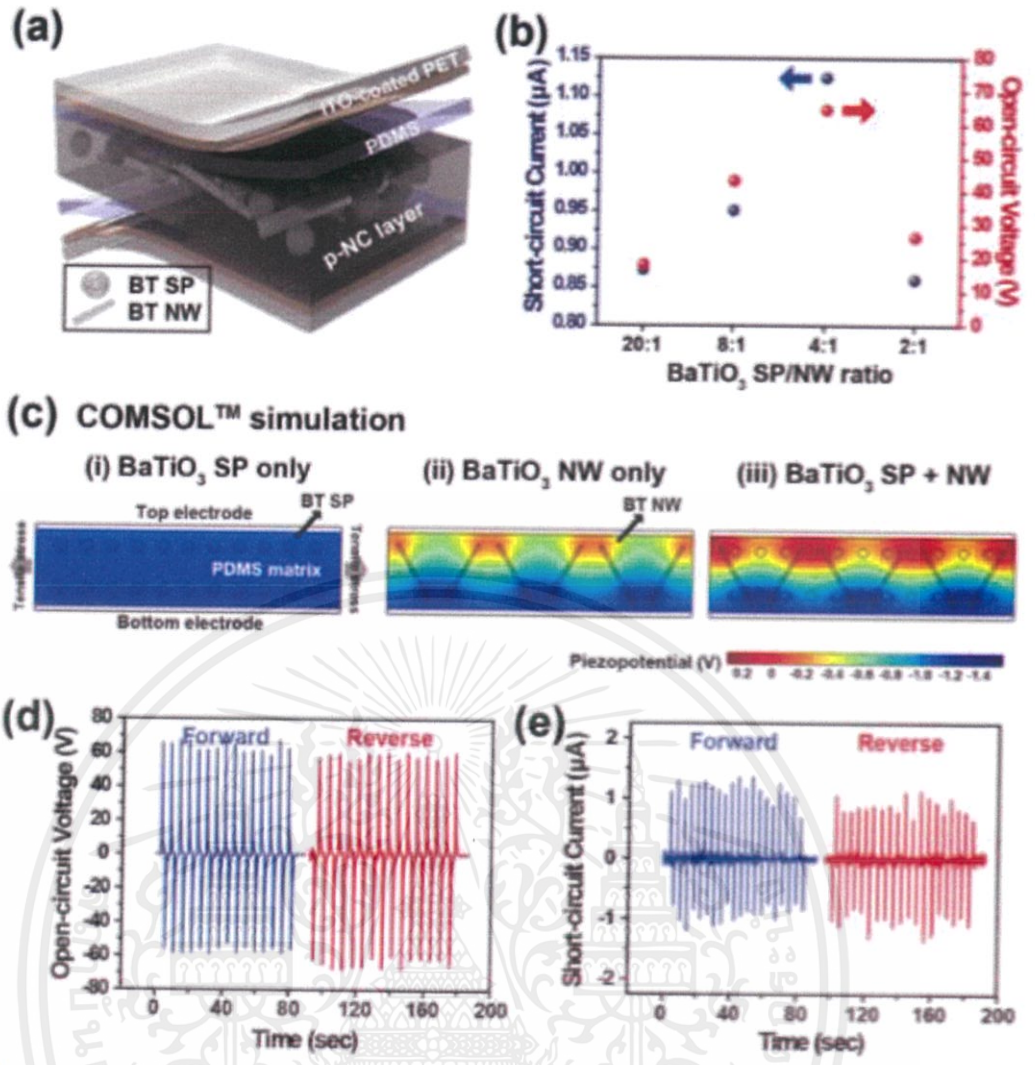
งานวิจัยของ Chabgyeon Baek และคณะ [8] สนใจเกี่ยวกับการศึกษายืดหยุ่นนาโนคอมโพสิตเจนเนอเรเตอร์บนเพียโซอิเล็กทริกอนุภาคนาโน (NPs)-polymer matrix เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและแปลงพลังงานไฟฟ้าได้จากพลังเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงที่รูปร่างอุปกรณ์ เพิ่มคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกในวัสดุนาโนคอมโพสิตจึงได้ศึกษาเกี่ยวโครงสร้างนาโนแบบหนึ่งมิติ เช่น CNTs, copper nanorods, และ Ag nanowires (NWs) เพื่อใช้เป็นตัวช่วยในการกระจายตัวในอีลาสโตเมอร์ได้ดี และให้ความสำคัญเกี่ยวกับสารเคมีที่ใช้ในอุปกรณ์ควรจะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและอุปกรณ์จะต้องมีประสิทธิภาพที่ดี ดังนั้นจึงได้สังเคราะห์ผลึก Barium titanate ($BaTiO_3$) ทรงกลม (NPs) ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล โดยจะนำมาทำเป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีทั้งอนุภาคนาโน($BaTiO_3$ NPs) และเส้นลวดนาโน($BaTiO_3$ NWs) โดยไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะควบคุมในอัตราส่วนต่างๆในการผสมระหว่างสารทั้งสองชนิดเพื่อประสิทธิภาพการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกให้ดียิ่งขึ้น และใช้ polydimethylsiloxane(PDMS) เป็นพอลิเมอร์เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการยืดหยุ่นให้กับวัสดุ ผลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลโดยภาพที่ 2.16 จะแสดงถึงสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุนาโนเพียโซอิเล็กทริกซึ่งในการสังเคราะห์ BT SPs ได้ค่าเฉลี่ยของขนาดอยู่ที่ 120 นาโนเมตรซึ่งใกล้เคียงกับรูปร่างทรงกลม ต่อมาในการสังเคราะห์ BT NWs แบบไฮโดรเทอร์มอลได้ลักษณะของความยาวอยู่ในช่วงไมครอนและเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงสิบนาโนเมตรกว่าๆ การผสมกันของวัสดุทั้งสองชนิดใน PDMS สามารถอธิบายได้ด้วยภาพ SEM ในภาพที่ 2.16 (c) และ (d) BT SPs และ BT NWs มีการกระจายตัวได้ดีโดยไม่เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนใน PDMS matrix ภาพรวมของการทำวัสดุนาโนคอมโพสิตเจนเนอเรเตอร์ที่ประกอบด้วยการผสมกันระหว่าง BT SPs และ NWs โดยปราศจากตะกั่วได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.17 ซึ่งแต่ส่วนประกอบของเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์เต็มไปด้วยความยืดหยุ่นซึ่งจะทำให้วัสดุมีความสามารถรับแรงเชิงกลที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปได้หลายรูปแบบและในชั้นของ p-NC ในงานวิจัยนี้ไม่มีส่วนที่เป็นสื่อนำไฟฟ้าได้ส่วนในชั้นของ PDMS ที่อยู่ทั้งบนและล่างของ p-NC ยังคงช่วยพัฒนาความสเถียรของชั้น p-NC ด้วยการป้องกัน short-circuit ล้มเหลวระหว่างกระบวนการ โดยที่งานวิจัยนี้จะให้ความสำคัญกับอัตราส่วนระหว่าง BT SPs กับ NWs ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โดยพบว่าที่อัตราส่วนของ BT SPs ต่อ NWs ที่ดีสุดคือ 4:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.16 แสดงถึงการสังเคราะห์ $BaTiO_3$ ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (a) spherical nanoparticles (SPs) (b) nanowires (NWs) (c) การผสมกันระหว่าง BT SPs กับ NWs ที่อยู่ใน PDMS matrix (e) ภาพ X-ray diffraction pattern (20°-80°) ของการสังเคราะห์ BT SPs และ NWs โดยมุมการเลี้ยวเบน (200 peak :44°-46°) (f) ภาพจาก Raman spectra ของ BT SPs และ NWs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.17 (a) ภาพแสดงการผสมกันของ BT SPs และ NWs ในนาโนคอมโพสิตเจนเนอเรเตอร์ (b) สัญญาณไฟฟ้าจากนาโนคอมโพสิตเจนเนอเรเตอร์ที่อัตราส่วนของ BT SPs และ NWs แตกต่างกัน (c) โมเดลการคำนวณศักย์เพียโซที่กระจายตัว (d) open-circuit voltage และ (e) short-circuit current จากนาโนคอมโพสิตเจนเนอเรเตอร์ที่อัตราส่วนของ BT SPs ต่อ NWs เท่ากับ 4:1 โดยมีทั้งต่อแบบ forward และ reverse

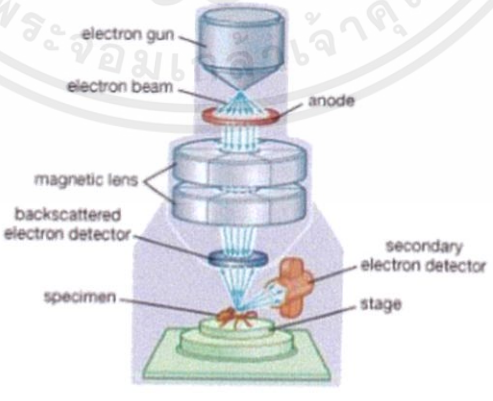
2.5 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope , SEM) [9]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้อิเล็กตรอนในการขยายภาพซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้ปืนยิงอิเล็กตรอน (electron gun) จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสให้เข้มขึ้นและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงโดยเลนส์ใกล้ตา จากนั้นจะถูกโฟกัสให้ตกลงบนผิวของ

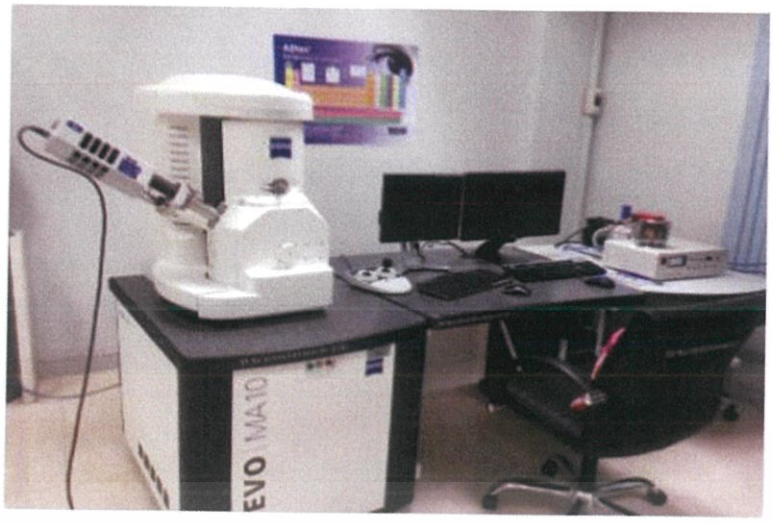
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างโดยเลนส์ใกล้วัตถุที่พื้นผิวของตัวอย่างที่อิเล็กตรอนตกกระทบจะเกิดสัญญาณอิเล็กตรอนขึ้นหลายรูปแบบซึ่งคล้ายกับการที่แสงตกกระทบวัตถุและสะท้อนออกจากผิวของวัตถุกล่าวคือถ้าพื้นผิวของวัสดุเรียบก็จะสามารถสะท้อนอิเล็กตรอนได้ดีแต่หากผิวของวัสดุมีความขรุขระเป็นหลุมลึกก็จะไม่มีการสะท้อนหรือสะท้อนได้น้อย ซึ่งสามารถรับอิเล็กตรอนที่สะท้อนออกมาได้ด้วยตัวตรวจจับอิเล็กตรอนและเกิดการสร้างเป็นภาพโดยอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นและเข้าไปที่ตัวรับสัญญาณเรียกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ส่วนอิเล็กตรอนที่เกิดจากปืนยิงอิเล็กตรอนเรียกว่าอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแตกต่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงทั่วไปตรงที่เปลี่ยน แหล่งกำเนิดที่ใช้จากแสงเป็นอิเล็กตรอน กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงธรรมดามีข้อจำกัดอยู่ที่ความสามารถในแยกภาพ (resolution) เนื่องจากแสงขาวที่ใช้จะมีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร แต่ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสั้นกว่านั้นมากจึงมีความสามารถในการแยกภาพได้ดีกว่าจึงส่งผลโดยตรงให้กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนมีกำลังขยายภาพมากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงปกติโดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงธรรมดาจะมีหลักการเดียวกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope : TEM) ภาพที่ได้ออกมาจะเป็นโครงสร้างลักษณะภายในและได้เป็นภาพสองมิติเช่นเดียวกัน แต่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะคล้ายกับกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบสเตอริโอ (Stereo microscope) ที่ได้ภาพลักษณะพื้นผิวออกมาเป็นสามมิติทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ได้รับเป็นภาพและภาพที่ปรากฏบนจอภาพก็พร้อมที่จะทำการบันทึกอุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อนำแสงและเครื่องขยายและเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอน เป็นสัญญาณไฟฟ้า การสร้างภาพเริ่มจากประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งประจุอิเล็กตรอนชุดนี้จะถูกจับ และรวบรวมไว้แล้วนำสู่แท่งแก้วใสประเภทท่อนำแสงในลักษณะของแสง แสงที่ผ่านท่อแท่งแก้วนี้จะขับเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (Photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแสงชนิดโฟตอนนี้ไปเป็นอิเล็กตรอน อีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าให้ปรากฏในจอภาพที่ติดตั้ง ไว้บนแผงควบคุม [9]



ภาพที่ 2.18 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.5.2 เครื่องวัดสมบัติเพียโซอิเล็กทริก

เครื่องเคาะจังหวะโดยที่การเคาะในแต่ละครั้งจะสัมพันธ์กับการปล่อยเข้ายังตัวเคาะซึ่งการเคาะก็จะถูกควบคุมด้วย Programmable logic controller (PLC) โดยจะถูกตั้งโปรแกรมให้มีการเคาะที่สัมพันธ์กับลมที่เข้ายังระบบ โดยที่ก่อนวัดจำเป็นจะต้องเตรียมชิ้นงานให้อยู่ในสภาพที่สามารถวัดสมบัติเพียโซได้คือจะต้องติดเทปนำไฟฟ้าให้ทั่วทั้งชิ้นงานรวมถึงการสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทั้งหน้าและด้านหลังเนื่องจากเมื่อทำการวัดสมบัติเพียโซอิเล็กทริกวัสดุจะทำการปล่อยประจุไฟฟ้าที่ผิวทั้งสองด้านโดยที่ด้านหนึ่งจะแสดงเป็นประจุบวกและอีกด้านจะแสดงเป็นประจุลบจากนั้นการอ่านค่าก็จะต้องทำการเชื่อมต่อเข้าเครื่องมัลติมิเตอร์และออสซิลโลสโคป ซึ่งในการวัดสมบัติเพียโซอิเล็กทริกก็จะมีอยู่ 3 อย่างที่จะบอกว่าเป็นวัสดุเพียโซที่ดีหรือไม่คือ 1) การวัดแรงดันไฟฟ้าที่วัสดุเพียโซสามารถให้ได้มากที่สุด) การวัดความสามารถในการกำเนิดกระแสไฟฟ้ามากที่สุด และ 3) การวัดความล้าของวัสดุหลังจากผ่านการใช้งานมาระยะเวลาหนึ่ง



ภาพที่ 2.20 เครื่องเคาะจังหวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [10]

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หรือเทคนิค (X-Ray Diffractometer หรือ XRD) เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอกซ์ (X) มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ (X) ที่ทราบความยาวคลื่น (λ) ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกันโดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X) จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาของฟิล์มได้อีกด้วย โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้อาศัยกฎของ แบรกก์ (Bragg's Law) ดังสมการที่ 2.1

$$n\lambda = 2d\,sin\theta \tag{2.1}$$

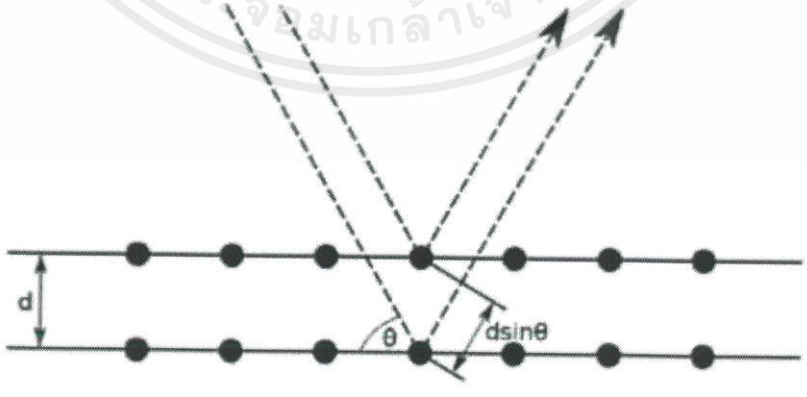
โดยค่า n คือ จำนวนเต็มใดๆ

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ มีค่าเท่ากับ 1.54 อังสตรอม

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

θ คือ มุมของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ

เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบที่บริเวณพื้นที่ผิวจะเกิดการหักเหของรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับ ระนาบขออนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบดังภาพที่ 2.21

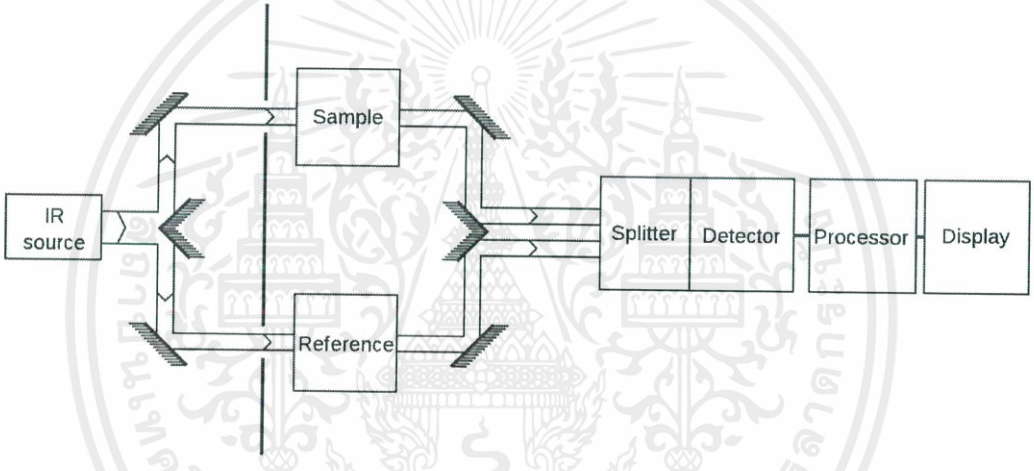


ภาพที่ 2.21 แผนภาพแสดงการตกกระทบของรังสีเอกซ์โดยอาศัยกฎของแบรกก์ (Bragg's law)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 การวิเคราะห์จำแนกประเภทและพันธะเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infared (FT-IR) [11]

หลักการ Fourier Transform Infared (FT-IR) เป็นเทคนิคที่ใช้จำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และพันธะเคมีในโมเลกุลรวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของตัวอย่างที่การสั่นความถี่ต่าง ๆ กัน ซึ่งมีความจำเพาะของแต่ละพันธะ การดูดกลืนรังสีอินฟาเรดที่อุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสมบูรณ์อะตอมทุกตัวในโมเลกุลจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลาเมื่อความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับความถี่ของรังสีอินฟาเรดที่ฉายมายังโมเลกุลและทำให้การดูดกลืนรังสีจำนวนแถบการดูดกลืนทั้งหมดที่ได้จะมีค่าไม่เท่ากับการสั่นมูลฐานของโมเลกุลทั้งหมดโดยจะมีค่าลดลงเพราะมีบางแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟาเรด ส่วนประกอบของเครื่องวัดระบบ FT-IR มีส่วนประกอบหลักดังนี้



ภาพที่ 2.22 ส่วนประกอบและลำดับการทำงานของเครื่องตรวจวัดแหล่งกำเนิดรังสีของ Infared Spectrometer คือ สารเฉื่อยที่ถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิระหว่าง 1,000-1,800 องศาเซลเซียส

หลักการทำงานคือตัวแยกรังสีแบบ Interferometer มีหน้าที่แยกลำรังสีออกทำให้เกิดทางเดินแสง (Path difference) ระหว่างลำแสงแล้วทำการรวมสัญญาณการแทรกสอดซึ่งที่เป็นฟังก์ชันกับทางเดินแสง โดยเครื่องตรวจวัด เครื่องตรวจวัดทำหน้าที่ประมวลผลจากสัญญาณการแทรกสอดที่ส่งผ่านมาจากตัวแยกรังสี รังสีอินฟาเรดจากแหล่งกำเนิดจะถูกฉายแสงไปยังอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferrometer) ซึ่งเครื่องนี้ประกอบด้วยกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้กระจกที่ตรึงอยู่กับที่โดยทั้งสองตั้งฉากซึ่งกันและกันและตัวแยกแสงซึ่งเป็นอุปกรณ์กึ่งสะท้อนแสงลำรังสีครึ่งหนึ่งจะทะลุผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่และอีกครึ่งหนึ่งจะสะท้อนไปยังกระจกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ หลังจากนั้นรังสีก็จะสะท้อนจากกระจกกลับมารวมกันที่ตัวแยกแสงเกิดการแทรกสอดขึ้นจากนั้นลำรังสีก็จะผ่านไปยังตัวอย่างและในที่สุดก็จะตกลงบนเครื่องตรวจวัด Path difference

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างลำรังสีที่ถูกแยกออกจากกัน เกิดขึ้นจากระยะทางสัมพัทธ์ระหว่างกระจกทั้งสองข้างถ้าแขนยึดกระจกทั้งสองข้างของอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ยาวเท่ากัน ลำรังสีทั้งสองจะเดินทางมาด้วยระยะทางที่เท่ากันมีเฟสตรงกัน ทำให้สัญญาณที่ไปถึงเครื่องตรวจวัดมีค่ามากที่สุด เมื่อกระจกเคลื่อนที่เป็นระยะทาง $\lambda/4$ ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น $\lambda/2$ รังสีทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180 องศา การแทรกสอดจะอยู่ในตำแหน่งหักล้างเมื่อเคลื่อนกระจกเป็นระยะทางอีก ระยะทางเดินของรังสีจะเปลี่ยนเป็น $\lambda/4$ รังสีทั้งสองจะกลับมามีเฟสตรงกันเมื่อกระจกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ความเข้มของสัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้จะมีลักษณะของ interferogram เป็นรูปคลื่นไซน์ โดยกราฟจะพล็อตระหว่างการตอบสนองที่เครื่องตรวจวัดบันทึกได้และเวลาที่กระจกมีการเคลื่อนที่ ถ้าตัวอย่างเกิดการดูดกลืนที่ค่าความถี่นี้ขนาดของแอมพลิจูดจะลดลงโดยสัมพันธ์กับปริมาณของตัวอย่างหลังจากนั้นใช้ Fourier Transform ซึ่งเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการแปลงผลที่ได้ (ขึ้นกับเวลา) ให้กลายเป็นค่าความเข้มกับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเตรียมวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์แบเรียมไททาเนต การสังเคราะห์เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Synthesis) รวมไปถึงเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสมบัติต่างๆ ได้แก่ เอกลักษณ์ของสาร สมบัติทางเคมี สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางกายภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้

3.1.1 พอลิไดเมทิลซิโลเซน (Polydimethylsiloxane)

3.1.2 สารที่ทำให้พอลิไดเมทิลซิโลเซนแข็งตัว (Curing agent)

3.1.3 อนุนาคโนแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$) ความบริสุทธิ์ 99.95% ผลิตโดยบริษัท Advance Material มีอนุภาคประมาณ 50 นาโนเมตร

3.1.4 ผงอะนาเทสไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ความบริสุทธิ์ 97% ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich Co.)

3.1.5 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.1.6 แบเรียมคลอไรด์ ($BaCl_2$)

3.1.7 แบเรียมอะซิเทต ($C_4H_6BaO_4$)

3.1.8 ไททาเนียมบิวทอกไซด์ ($C_{16}H_{36}O_4Ti$)

3.1.9 กรดอะซิติก (CH_3COOH)

3.1.10 เอทานอล (C_2H_6O) ความบริสุทธิ์ 95%

3.1.11 น้ำปลอดประจุ (deionized water)

3.1.12 พอลิเอทิลีนออกไซด์

3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

3.2.1 เครื่องชั่งดิจิตอล รุ่น GR-200 ผลิตโดยบริษัท A&D Company ประเทศญี่ปุ่น

3.2.2 เตาให้ความร้อนแบบกวนด้วยแม่เหล็ก (hotplate and magnetic stirrer) รุ่น C-MAGHS 7 ผลิตโดยบริษัท IKA ประเทศมาเลเซีย

3.2.3 ตู้อบสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ตู้ดูดความชื้น

3.2.5 เตาไฟฟ้าสำหรับเผาสารอุณภูมิสูง

3.2.6 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่างแบบดิจิตอล (pH meter)

3.2.7 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)

3.2.8 เครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (digital multimeter)

3.2.9 เครื่องออสซิโลสโคป (oscilloscope)

3.2.10 เครื่องเคาะจังหวะ

3.2.11 เครื่องผลิตเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

3.2.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope)

3.2.13 เทปกาวนำไฟฟ้า

3.2.14 Teflon-autoclave

3.2.15 กระดาษฟอยล์

3.2.16 ช้อนตักสาร

3.2.17 หลอดหยดสาร (dropper)

3.2.18 ขวดสำหรับฉีดเอทานอล

3.2.19 สายไฟขนาดเล็ก

3.2.20 เวอร์เนียร์คาร์ลิเปอร์ (electronic digital calipers)

3.2.21 ครกหยกสำหรับบดสาร (mortar)

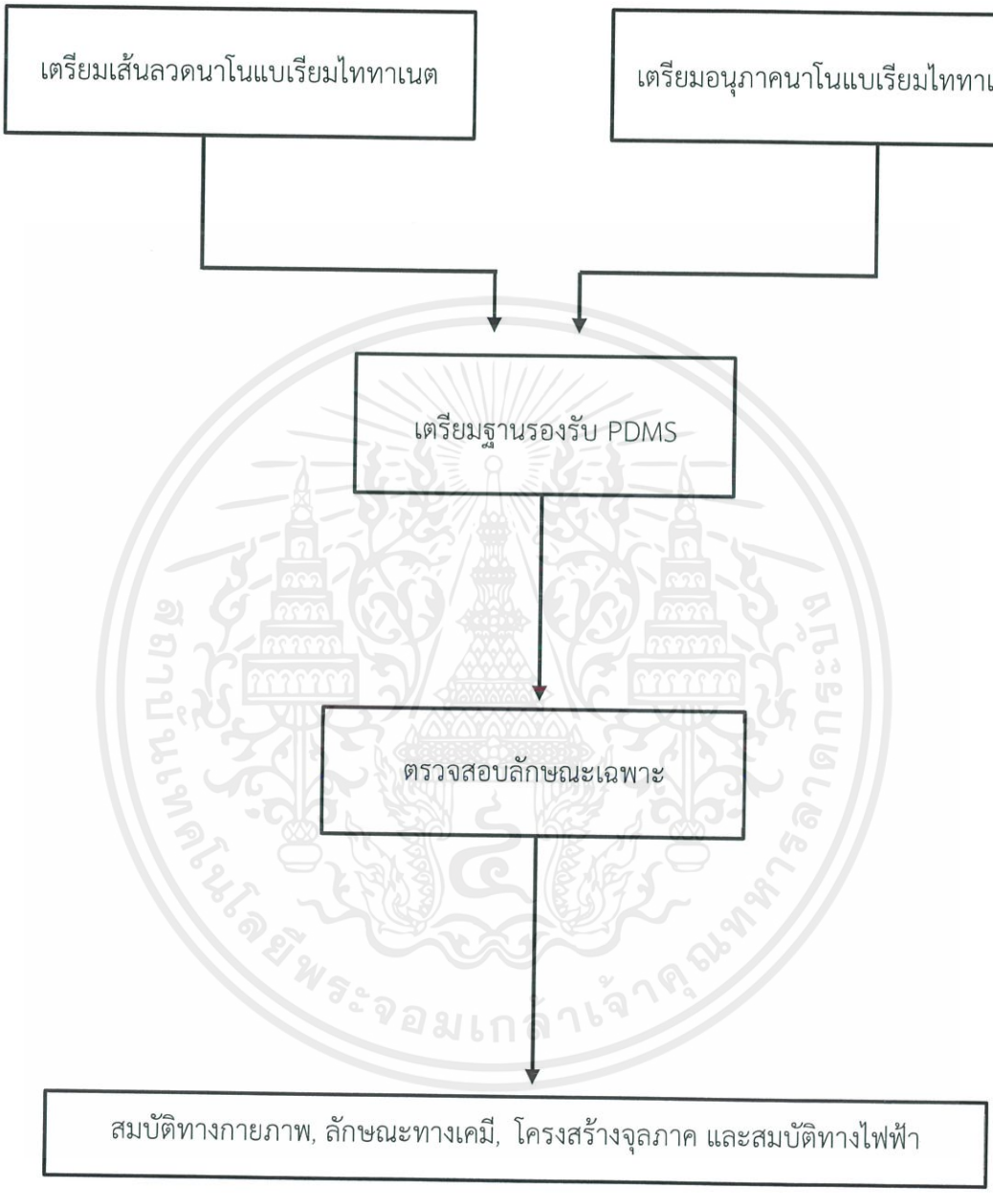
3.2.22 ถุงซิปล็อคสำหรับเก็บชิ้นงาน

3.2.23 บีกเกอร์

3.2.24 กระดาษทิชชู่

3.2.25 แท่งคนสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

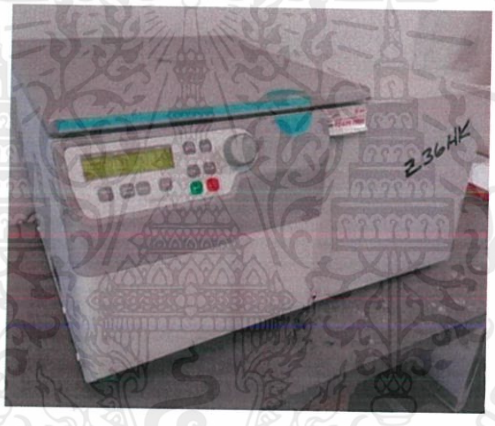


ภาพที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

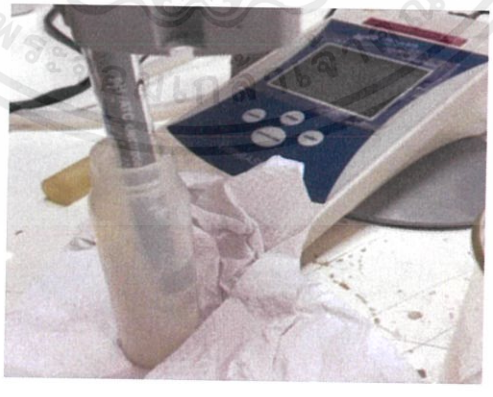
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

ในกระบวนการเตรียมเส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตนั้นจะแบ่งขั้นตอนเป็นสองส่วนในการทำไฮโดรเทอร์มอล ขั้นตอนแรกจะเป็นการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนโซเดียมเมต้าไททาเนต ($Na_2Ti_3O_7$ NWs) ก่อนซึ่งขั้นตอนในการสังเคราะห์เริ่มจากเตรียมผงอะนาเทสไททาเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม (TiO_2, 97%, Sigma-Aldrich Co.) โดยนำไปละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันในโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตรจากนั้นเทลงใน Teflon-autoclave เพื่อนำไปอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 72 ชั่วโมง เมื่ออบเสร็จก็นำมาล้างด้วยน้ำปลอดประจุจนกว่าค่าความเป็นกรดด่างจะเป็นกลางโดยในขั้นตอนการล้างด้วยน้ำปลอดประจุจะใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงในการแยกตะกอนกับสารละลาย เนื่องสารมีอนุภาคระดับนาโนเมตรจึงไม่สามารถใช้กระดาษกรองได้ซึ่งการตั้งค่าเครื่องหมุนเหวี่ยงคือรอบหมุนที่ 10000 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้องเวลาในการหมุนต่อรอบ 7 นาทีแล้วล้างด้วยเอทานอลจากนั้นจึงนำมาอบเพื่อให้แห้ง



ภาพที่ 3.2 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)



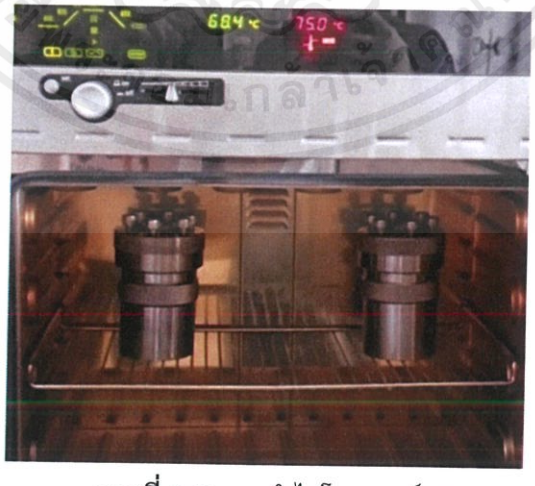
ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 Teflon-autoclave

ขั้นตอนที่สองนำสารที่ได้จากขั้นตอนที่แรกคือเส้นลวดนาโนโซเดียมเมต้าไททาเนตไปทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลกับแบเรียมใน Teflon-autoclave โดยนำเส้นลวดนาโนโซเดียมเมต้าไททาเนต 0.5 กรัมละลายในน้ำปลอดประจุแล้วทำการปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเทลงในสารละลายแบเรียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ปริมาตร 40 มิลลิลิตรแล้วทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วจึงนำไปทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเมื่อครตามที่กำหนดก็นำมาเข้าสู่กระบวนการอบให้แห้งแล้วจะได้เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$ NWs)



ภาพที่ 3.5 การทำไฮโดรเทอร์มอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 กระบวนการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตพอลิเมอร์

ขั้นตอนการเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตพอลิเมอร์แบบเรียมไททาเนตจะเตรียมโดยวิธีการ part of filler per hundred parts of polymer by weight (php) [12]
ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

โดยกำหนดให้ filler คือ สัดส่วนของเฟสรอง หน่วยเป็น php
polymer คือ สัดส่วนของเฟสหลัก หน่วยเป็น php
curing agent คือ สัดส่วนของสารช่วยให้แข็งตัว หน่วยเป็น php
wt% คือ น้ำหนักของสารเฟสรอง (filler) หน่วยเป็น wt%

หมายเหตุ จำเป็นจะต้องกำหนดน้ำหนักรวมของวัสดุคอมโพสิตและการคำนวณ polymer + curing agent จะมีค่าเป็น 100 php เสมอ

3.5 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของวัดุคอมโพสิตสามารถทำโดยวิธีการหาความหนาแน่นโดยรวม (bulk density) ซึ่งหมายถึงน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุนั้น เมื่อทำการใส่สารตัวเติม (filler) ลงไปในพอลิเมอร์จะส่งผลให้ความหนาแน่นโดยรวมเปลี่ยนแปลงไปซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาความหนาแน่นของวัสดุ โดยใช้สมการที่ 3.2

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

โดยกำหนดให้ ρ คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน หน่วยเป็น กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
m คือ น้ำหนักของชิ้นงาน หน่วยเป็น กรัม
v คือ ปริมาตรของชิ้นงาน หน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร

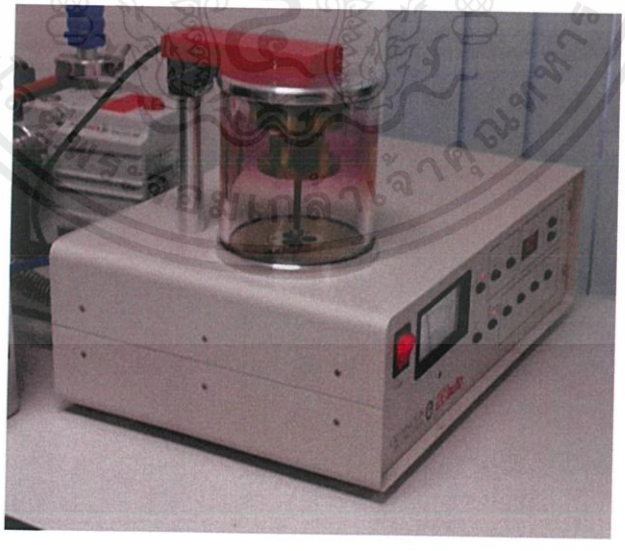
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขั้นตอนนี้จะเป็นการวิเคราะห์เกี่ยววัสดุที่สังเคราะห์ในขั้นตอนก่อนหน้าเพื่อตรวจสอบว่าวัสดุที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการต่างๆได้วัสดุตามที่ต้องการหรือไม่ เช่น การสังเคราะห์เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล เนื่องจากวัสดุไม่นำไฟฟ้าถึงจำเป็นต้องเคลือบผิวด้วยทองคำก่อนวิเคราะห์ จากนั้นจึงจะสามารถวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้



ภาพที่ 3.6 การเตรียมเส้นลวดนาโนด้วยวิธีการหยดลงบนเทปทองแดง



ภาพที่ 3.7 เครื่องเคลือบผิวด้วยทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.7 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุนาโนคอมโพสิตซึ่งจะประกอบไปด้วยปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่วัสดุสามารถให้ได้ ปริมาณแรงดันไฟฟ้าสูงสุด และความล้าของวัสดุที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำเนิดกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์

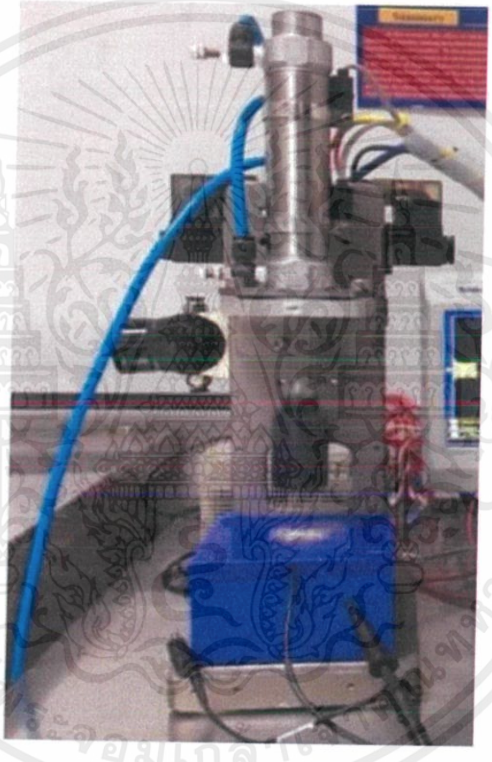
3.7.1 การปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงสุดและแรงดันไฟฟ้าสูงสุด

การเตรียมชิ้นที่จะใช้ในการวิเคราะห์จำเป็นจะต้องขึ้นรูปวัสดุในลักษณะสี่เหลี่ยมจัสตุรัสหรือผืนผ้าขนาดอย่างน้อยที่สุดคือ 3X3 เซนติเมตร เพื่อให้มีพื้นที่ผิวหน้าตัดมากพอที่จะสัมผัสกับเครื่องเคาะได้ จากนั้นต้องสร้างขั้วไฟฟ้าให้ชิ้นงานโดยทำการติดเทปกาวนำไฟฟ้าให้ทั่วทั้งชิ้นงานและต่อสายไฟบนเทปกาวนำไฟฟ้าทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ด้านละ 1 เส้น เนื่องจากในการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกนั้นจะมีประจุไฟฟ้าอยู่ที่ผิวหน้าของวัสดุตามทฤษฎีโดยด้านหนึ่งจะแสดงเป็นประจุบวกและอีกด้านจะแสดงเป็นประจุลบทั้งนี้ก็เพื่อให้สายไฟเป็นตัวเชื่อมระหว่างประจุที่ผิวของชิ้นกับเครื่องวัดมัลติมิเตอร์เพื่อบอกถึงปริมาณกระไฟฟ้าสูงสุดและประมาณความศักย์ไฟฟ้าสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 การวัดความล้าของวัสดุ

การเตรียมชิ้นงานที่จะใช้ในการวิเคราะห์ความล้าของวัสดุนั้นจะเตรียมเหมือนกับขั้นตอนในการวิเคราะห์ปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงสุดและแรงดันไฟฟ้าสูงสุดคือใช้เทปกาวนำไฟฟ้าติดรอบชิ้นงานและต่อสายไฟที่ชิ้นงานทั้งสองข้าง ซึ่งจะแตกต่างตรงผลที่จะได้จากการโดยใช้วัดด้วยเครื่องเคาะจังหวะแบบเดิมแต่ระยะเวลาในการวัดจะนานขึ้นทั้งนี้เพื่อดูความสามารถในการกำเนิดกระแสไฟฟ้าเมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่ง ถ้าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้ลดลงก็จะสามารถบอกถึงขีดจำกัดของการใช้งานวัสดุได้



ภาพที่ 3.9 เครื่องเคาะจังหวะ

3.7.3 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก [13]

สามารถทำได้โดยการวางชิ้นงานที่สดสอบระหว่างขั้วไฟฟ้าของเครื่อง LCR meter (ดังภาพที่ 3.10) โดยเครื่องจะทำการวัดค่าความจุไฟฟ้า และค่าการสูญทางไดอิเล็กทริกของวัสดุซึ่งวัดที่ความถี่ในช่วง 10 ถึง 10^6 เฮิร์ซ และจะสามารถคำนวณออกมาเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกดังสมการที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon_r = \frac{dC}{\varepsilon_0 A} \tag{3.7}$$

โดย ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของชิ้นงาน

ε_0 คือ ค่าคงไดอิเล็กทริกของสูญญากาศ

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชิ้นงาน (ฟารัด)

d คือ ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

A คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าบนชิ้นงาน



ภาพที่ 3.10 เครื่อง LCR meter

3.8 การตรวจสอบลักษณะทางเคมี

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีนั้นจะใช้ชิ้นงานที่เป็นนาโนคอมโพสิตซึ่งจะมีทั้งหมด 4 ชิ้นงาน คือ PDMS, PDMS/BT nanoparticles, PDMS/BT nanowires และ PDMS/TiO_2 โดยการวิเคราะห์เพื่อต้องการที่จะทราบถึงลักษณะของพันธะของสารที่ยึดกันระหว่างพอลีเมอร์ที่เป็นเมทริกซ์รวมถึงสารตัวเติมพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับชิ้นงานอื่นๆว่ามีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันหรือไม่อย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองเตรียมสารตัวเติมจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลและการเตรียมชิ้นงานนาโนคอมโพสิตพอลีไดเมทิลไซล็อกเซน/แบเรียมไททาเนต (barium titanate/polydimethylsiloxane) และนาโนคอมโพสิตไททาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide/polydimethylsiloxane) โดยความแตกต่างของตัวเติมแบเรียมไททาเนตจะเตรียมที่มิติต่างๆของวัสดุ ที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม โดยผลการทดลองประกอบไปด้วยสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงาน ซึ่งรายละเอียดของผลการทดลองดังกล่าวจะทำการอภิปรายไว้ดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาสมบัติกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารตัวเติมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

ในเบื้องต้นจะอธิบายเกี่ยวผลของวิเคราะห์สมบัติกายภาพโครงสร้างจุลภาค และการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารตัวเติมทั้งหมดสามชนิดคือ อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (0 มิติ), เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนต (1 มิติ) และ อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (0 มิติ) เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลเบื้องต้นในด้านและนำไปวิเคราะห์ในการทดลองในลำดับต่อไปโดยมีหัวข้อการนำเสนอดังต่อไปนี้

4.1.1 สมบัติทางกายภาพ

การตรวจสอบสมบัติกายภาพนั้นเพื่อทราบให้ถึงลักษณะโดยพื้นฐานของสาร เช่น สี ลักษณะภายนอก ขนาด มวลโมเลกุล ความหนาแน่นของสารนั้น เป็นต้น

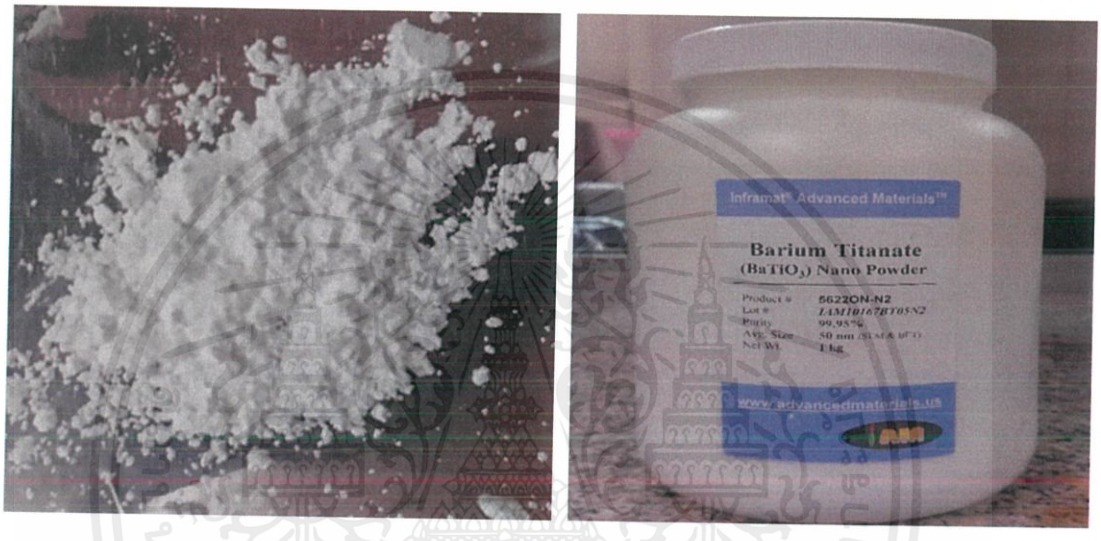
4.1.1.1 อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanoparticles)

เนื่องจากงานวิจัยได้ใช้อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตของบริษัท Inframat Advanced Materials ลักษณะภายนอกของผงแบเรียมไททาเนตนั้นเป็นผงสีขาวค่อนข้างละเอียดมีขนาดอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉลี่ยอยู่ที่ 50 นาโนเมตร โดยความบริสุทธิ์อยู่ที่ 99.95% มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพอรอฟสไกต์ ซึ่งข้อมูลพื้นฐานของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตมีดังนี้

- มวลโมเลกุล : 233.192 g/mol
- ความหนาแน่น : 6.02 g/cm^3
- อุณหภูมิคูรี : 120°C
- ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก : 7000-15000



ภาพที่ 4.1 ผงอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต

4.1.1.2 เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanowires)

เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนไฮโดรเทอร์มอล 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนแรกทำการเตรียมเส้นลวดนาโนโซเดียมเมต้าไททาเนตจากสารตั้งต้นอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เฟสอะนาเทสและโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ขั้นตอนที่สองคือนำสารที่ได้ไปทำปฏิกิริยากับแบเรียมคลอไรด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลนั้นมีลักษณะเป็นผงสีขาวคล้ายผงอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตเนื่องจากสารตั้งต้นของการเตรียมคือ ไททาเนียมไดออกไซด์และแบเรียมคลอไรด์ซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีขาว แต่มีความแตกต่างที่ลักษณะของผิวสัมผัสเนื้อสารที่มีความคล้ายกับผงแป้งที่มีความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

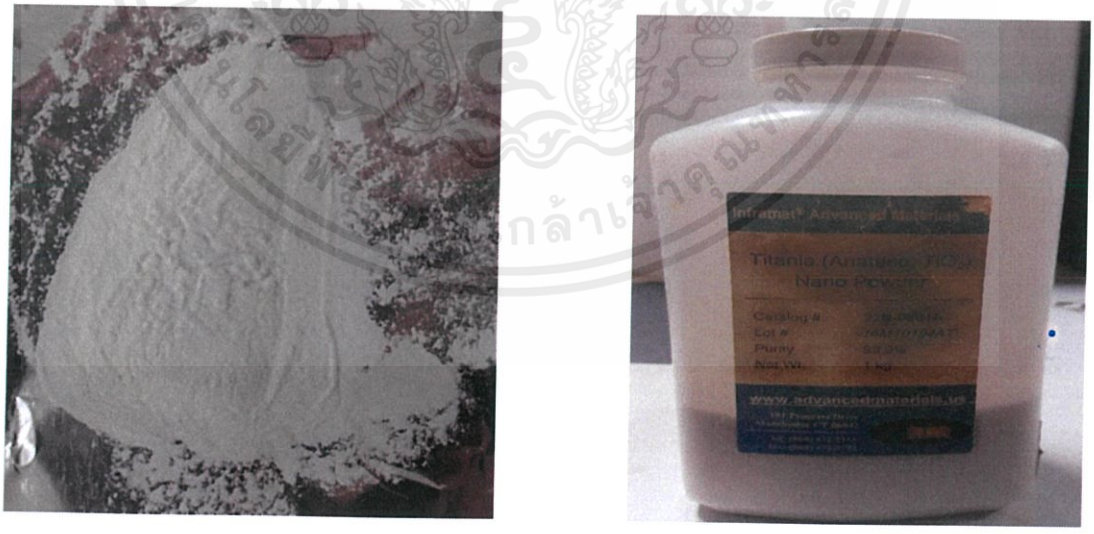


ภาพที่ 4.2 ผงเส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนต

4.1.1.3 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide nanoparticles)

งานวิจัยนี้ได้ใช้สารไททาเนียมไดออกไซด์ของบริษัท Inframat Advanced Materials ลักษณะภายนอกของผงไททาเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียดขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 40 นาโนเมตร มีความบริสุทธิ์ที่ 99.9% โครงสร้างผลึกเป็นแบบอะนาเทส มีข้อมูลพื้นฐานดังนี้

- มวลโมเลกุล : 79.866 g/mol
- ความหนาแน่น : 4.23 g/cm^3



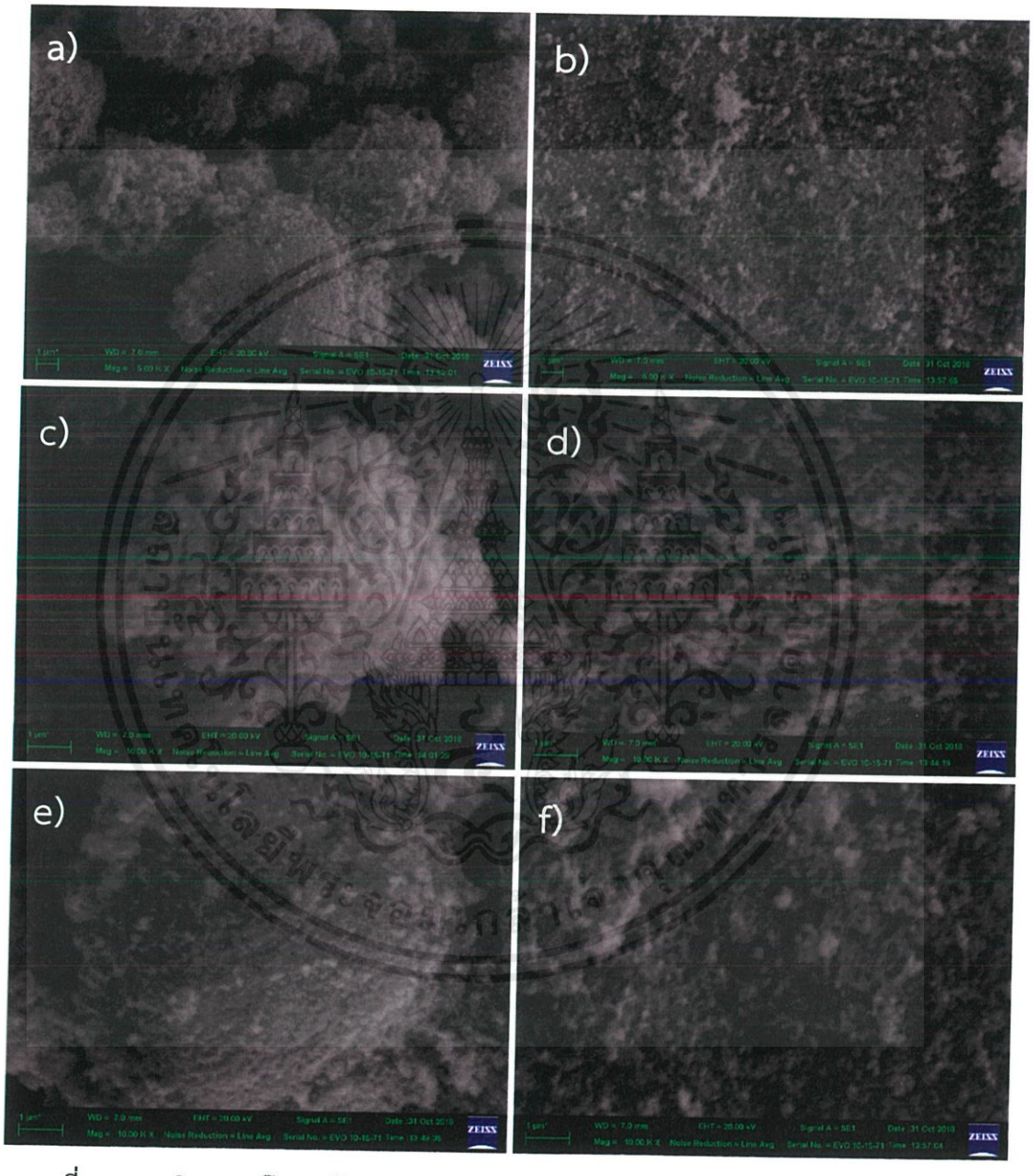
ภาพที่ 4.3 ผงอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของสารตัวเติม

4.1.2.1 อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanoparticles)

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสารแบเรียมไททาเนตสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อให้ทราบถึงการกระจายตัวของสารก่อนการนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

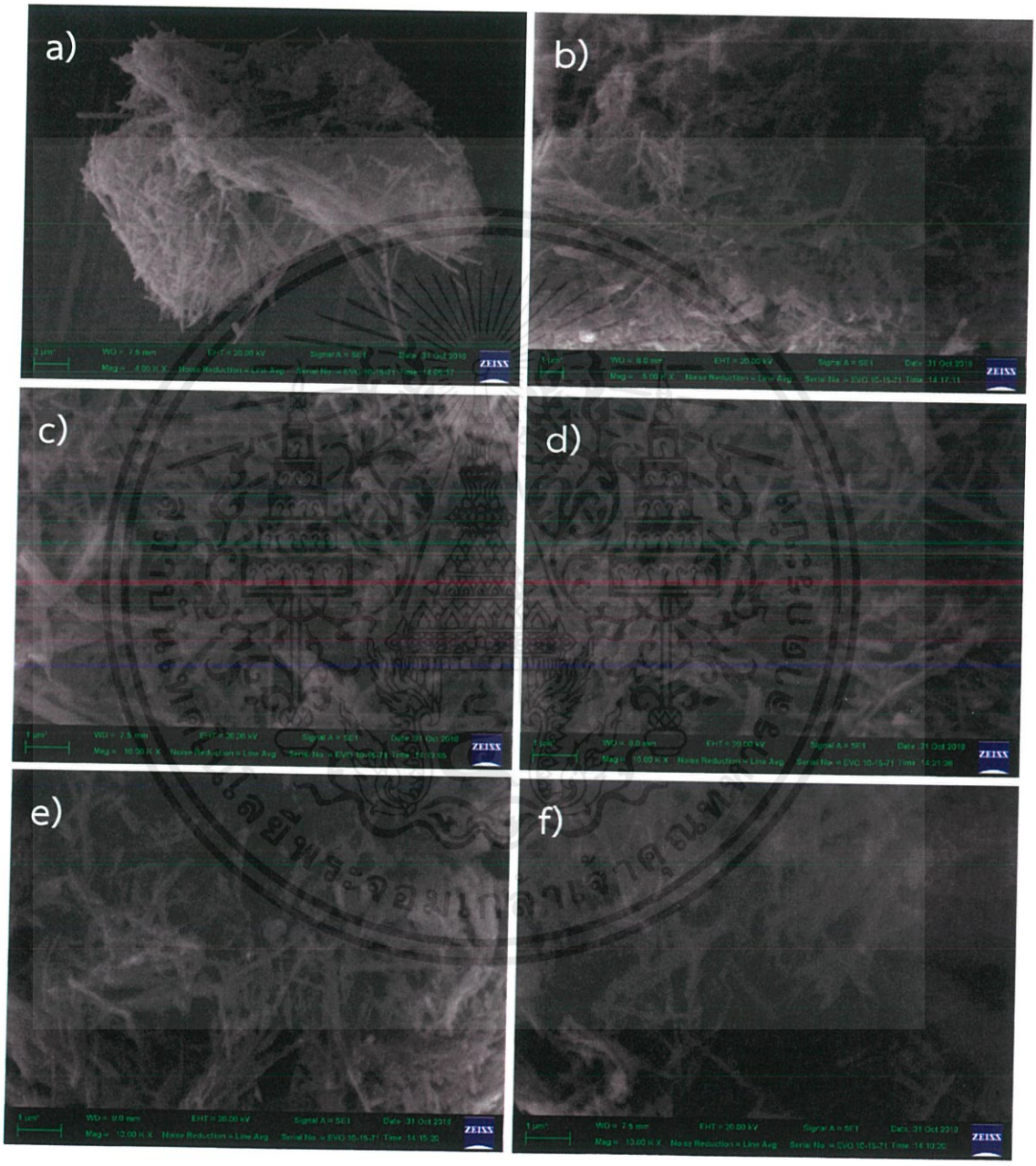


ภาพที่ 4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด a) และ b) BT-NPs 5X, c), d), e) และ f) BT-NPs 10X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanowires)

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของสารแบเรียมไททาเนตสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อให้ทราบถึงการกระจายตัวของสารก่อนการนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป



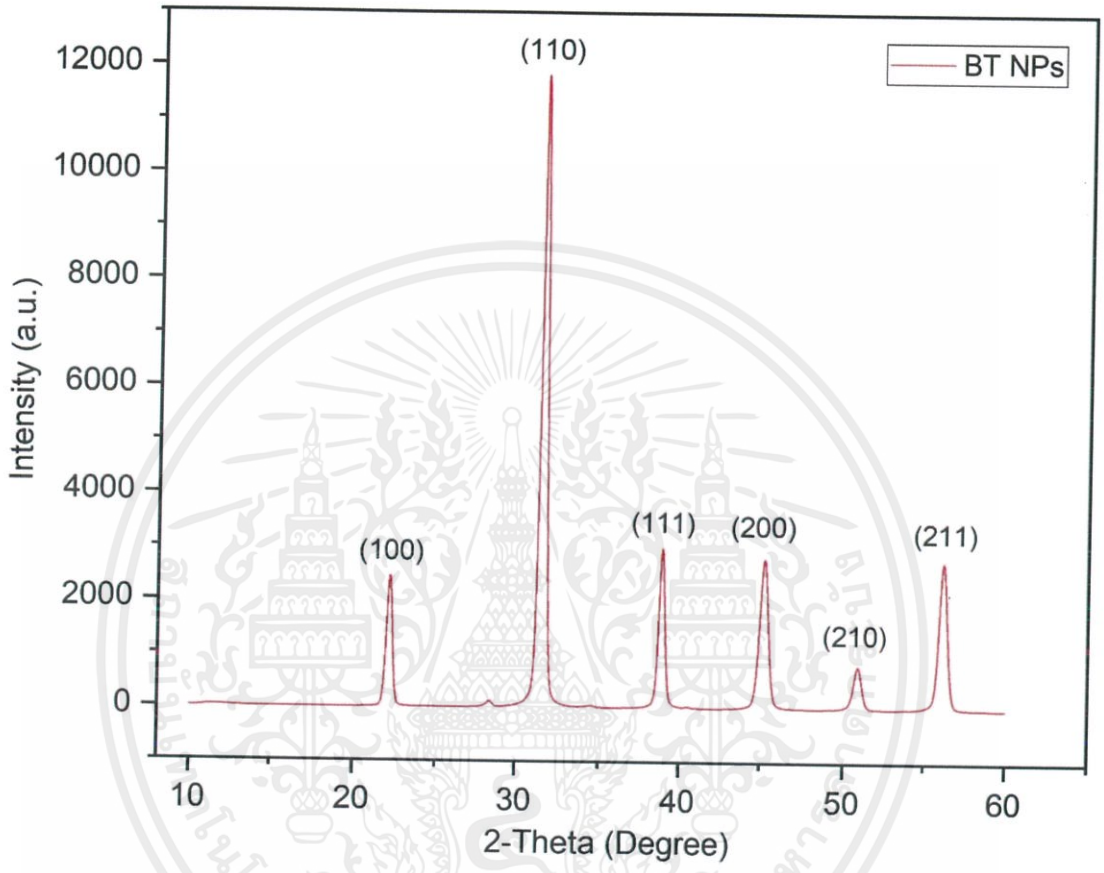
ภาพที่ 4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด a) BT-NWs 4X, b) BT-NWs 5X, c), d), e) และ f) BT-NWs 10X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารตัวเติมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

4.1.3.1 อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanoparticles)

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตของบริษัท Inframat advanced materials ที่มีความบริสุทธิ์ 99.95% ขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 50 นาโนเมตร จึงต้องการทำการทดสอบเฟสของสาร ซึ่งพบว่ามีโครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้นตามภาพที่ 4.6



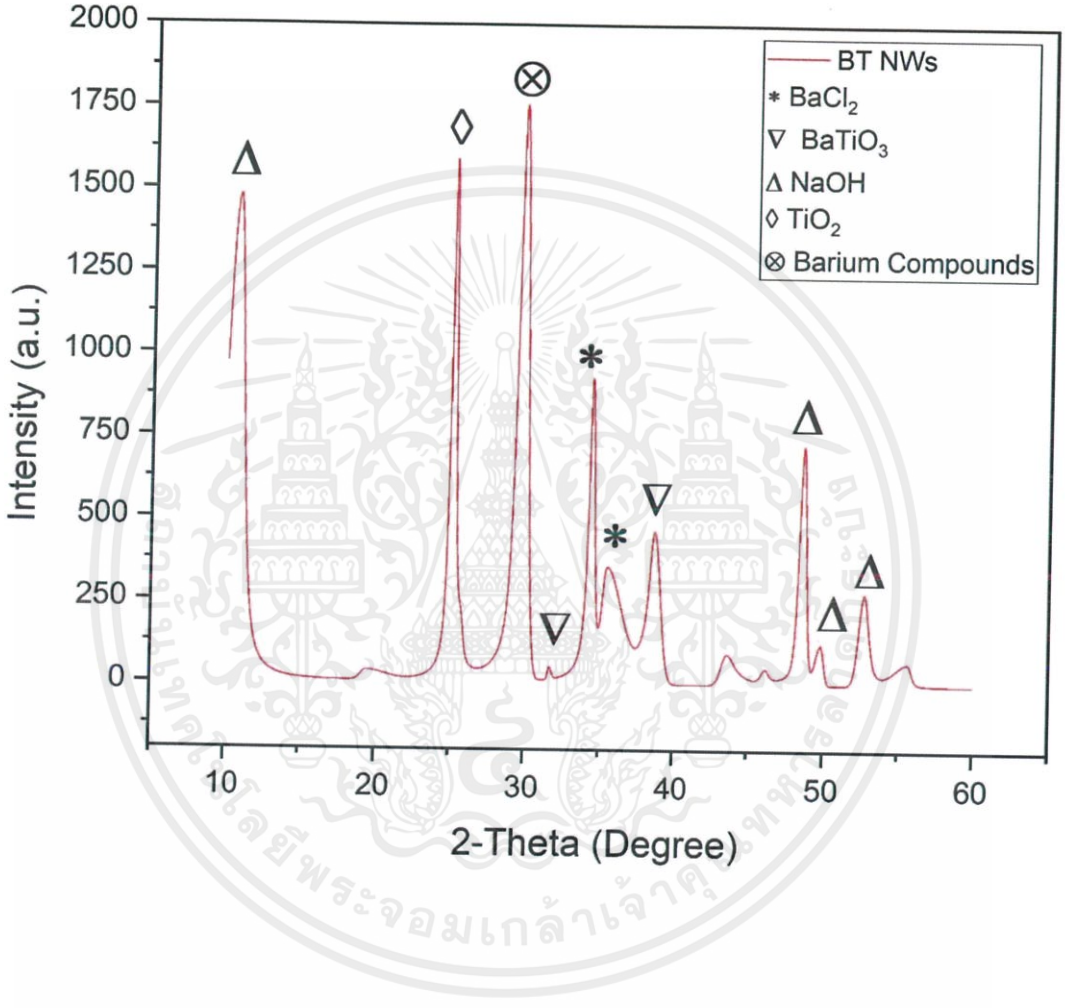
ภาพที่ 4.6 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต

ตำแหน่งของค่า 2-Theta ที่แสดงระนาบที่เกิดขึ้นของผงแบเรียมไททาเนตคือ 22.13, 31.51, 38.85, 45.2, 50.87 และ 56.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.2 เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนต (Barium titanate nanowires)

ตรวจสอบตำแหน่งของเฟสที่เกิดขึ้นของเส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล 2 ขั้นตอนโดยที่สารตั้งต้นของขั้นตอนแรกคือไททาเนียมไดออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์และขั้นตอนที่สองคือเส้นลวดนาโนโซเดียมเมต้าไททาเนตและแบเรียมคลอไรด์ ซึ่งพบว่าโครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้นเป็นไปตามภาพที่ 4.7



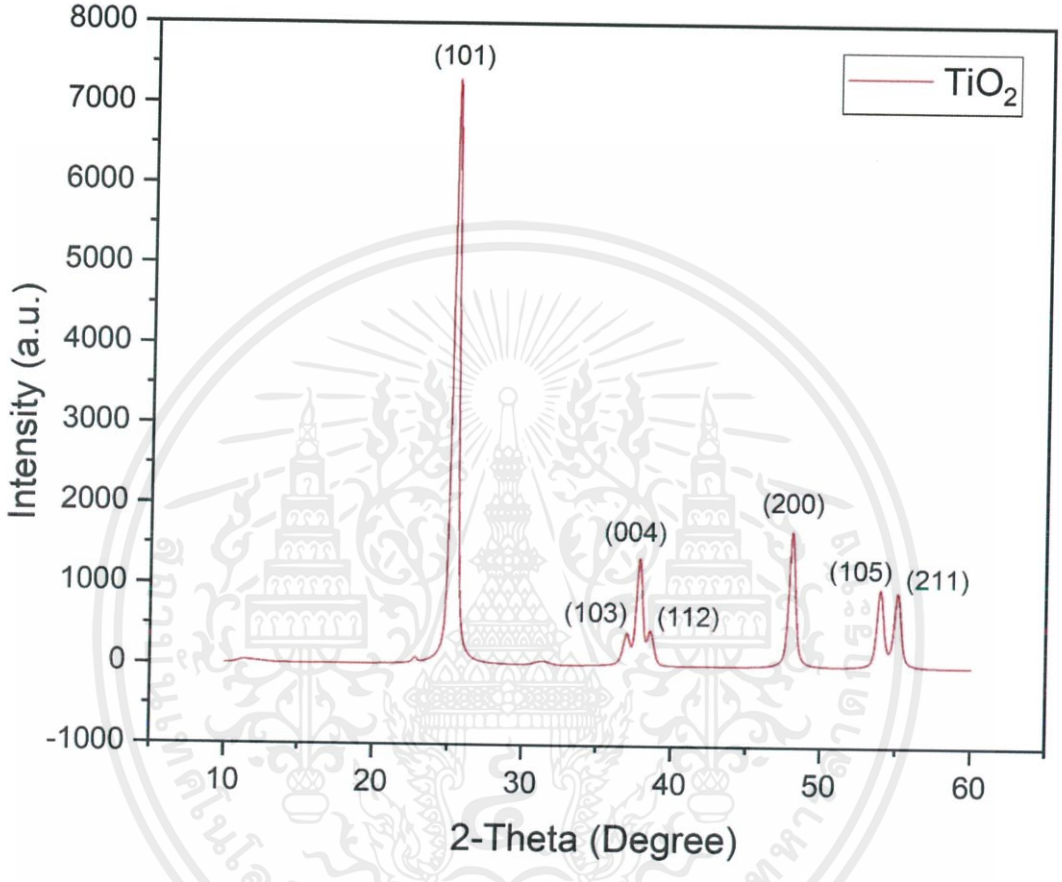
ภาพที่ 4.7 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของผงเส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนต

ตำแหน่งของค่า 2-Theta ที่แสดงระนาบที่เกิดขึ้นของผงแบเรียมไททาเนตคือ 10.06, 25.08, 29.68, 34.35, 35.47, 38.64, 48.59, และ 52.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.3 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide nanoparticles)

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ของบริษัท Inframat advanced materials ที่มีความบริสุทธิ์ 99.9% ขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 40 นาโนเมตร มีเฟสเป็นแบบอะนาเทส จึงต้องการทำการทดสอบเฟสของสาร ซึ่งพบว่ามีโครงสร้างเฟสที่เกิดขึ้นตามภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของผงไททาเนียมไดออกไซด์เฟสอะนาเทส

ตำแหน่งของค่า 2-Theta ที่แสดงระนาบที่เกิดขึ้นของผงแบเรียมไททาเนตคือ 25.3, 36.96, 37.81, 38.54, 48.07, 53.93 และ 55.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาสมบัติกายภาพ โครงสร้างจุลภาค ลักษณะทางเคมี และสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/พอลีไดเมทิลไซล็อกเซน และนาโนคอมโพสิตไททาเนียมไดออกไซด์/พอลีไดเมทิลไซล็อกเซน

เบื้องต้นสำหรับการเตรียมชิ้นงานนาโนคอมโพสิตแบเรียมไททาเนต/โพลีไดเมทิลไซล็อกเซนใช้อัตราส่วนเท่ากับ 5% โดยน้ำหนักของสารเติมแบเรียมไททาเนตและไททาเนียมไดออกไซด์ จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การทดลอง

4.2.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุนาโนคอมโพสิต

การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุคอมโพสิตสามารถทำโดยวิธีการหาความหนาแน่นโดยรวม (bulk density) ซึ่งหมายถึงน้ำหนักของวัสดุต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุนั้น ซึ่งเมื่อทำการใส่สารตัวเติม (filler) ลงไปในพอลิเมอร์จะส่งผลให้ความหนาแน่นโดยรวมเปลี่ยนแปลงไป โดยจะส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาความหนาแน่นโดยรวมของวัสดุเพื่อนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างของวัสดุ

เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมวัสดุคอมโพสิตได้มีการควบคุมสัดส่วนโดยรวมของ พอลีไดเมทิลซิล็อกเซน/สารทำให้แข็งตัว/สารตัวเติม ให้น้ำหนักก่อนหล่อรวมเท่ากับ 5 กรัม ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองหล่อขึ้นรูปพบว่าปริมาณน้ำหนักโดยรวมของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงเป็นไปตามตารางที่ 4.1 โดยการเปลี่ยนแปลงนี้พบว่าน้ำหนักโดยรวมของชิ้นงานมีการลดลงทุกชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้สารแบเรียมไททาเนตเป็นสารตัวเติมนั้นจะมีการลดลงเพียงเล็กน้อยทำให้ได้น้ำหนักที่มากที่สุด รองลงมาเป็นไททาเนียมไดออกไซด์และน้อยที่สุดคือโพลีไดเมทิลซิล็อกเซนบริสุทธิ์ ซึ่งคาดว่าเป็นผลเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น น้ำหนักโมเลกุลของสารตัวเติม, การระเหยของคอมโพสิตระหว่างการหล่อขึ้นรูป, หรือการสูญเสียไประหว่างการเตรียมชิ้นงานลงแม่แบบ เป็นต้น

การคำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 โดยที่นำน้ำหนักและปริมาตรของชิ้นงานแต่ละชิ้นจะเป็นไปตามตารางที่ 4.1 และข้อมูลลักษณะผิวหน้าของแต่ละชิ้นงานเป็นไปตามตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 น้ำหนัก ปริมาตร และความหนาแน่นของชิ้นงานที่วัดค่าได้

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm^3)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
PDMS	4.50	3.91	1.15
PDMS/BT NPs	4.63	3.91	1.18
PDMS/BT NWs	4.59	3.91	1.17
PDMS/TiO_2 NPs	4.46	3.91	1.14

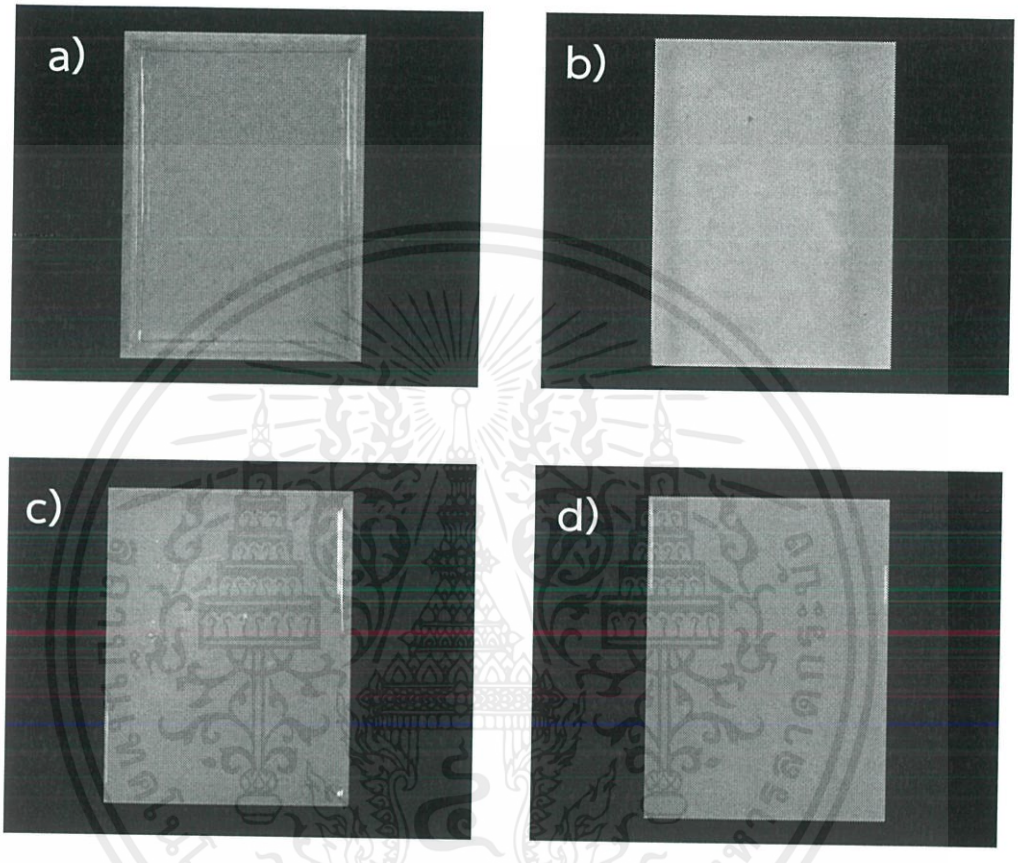
ตารางที่ 4.2 ลักษณะผิวหน้าและสีของชิ้นงาน

ตัวอย่าง	ลักษณะสีของชิ้นงาน	ลักษณะผิวหน้า
PDMS	สีขาวใส	ผิวหน้าเรียบ
PDMS/BT NPs	สีขาวมุก	ผิวหน้าเรียบ
PDMS/BT NWs	สีขาวแบบขุ่น	ผิวหน้าเรียบ
PDMS/TiO_2 NPs	สีขาวโทนเหลือง	ผิวหน้าเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุนาโนคอมโพสิต

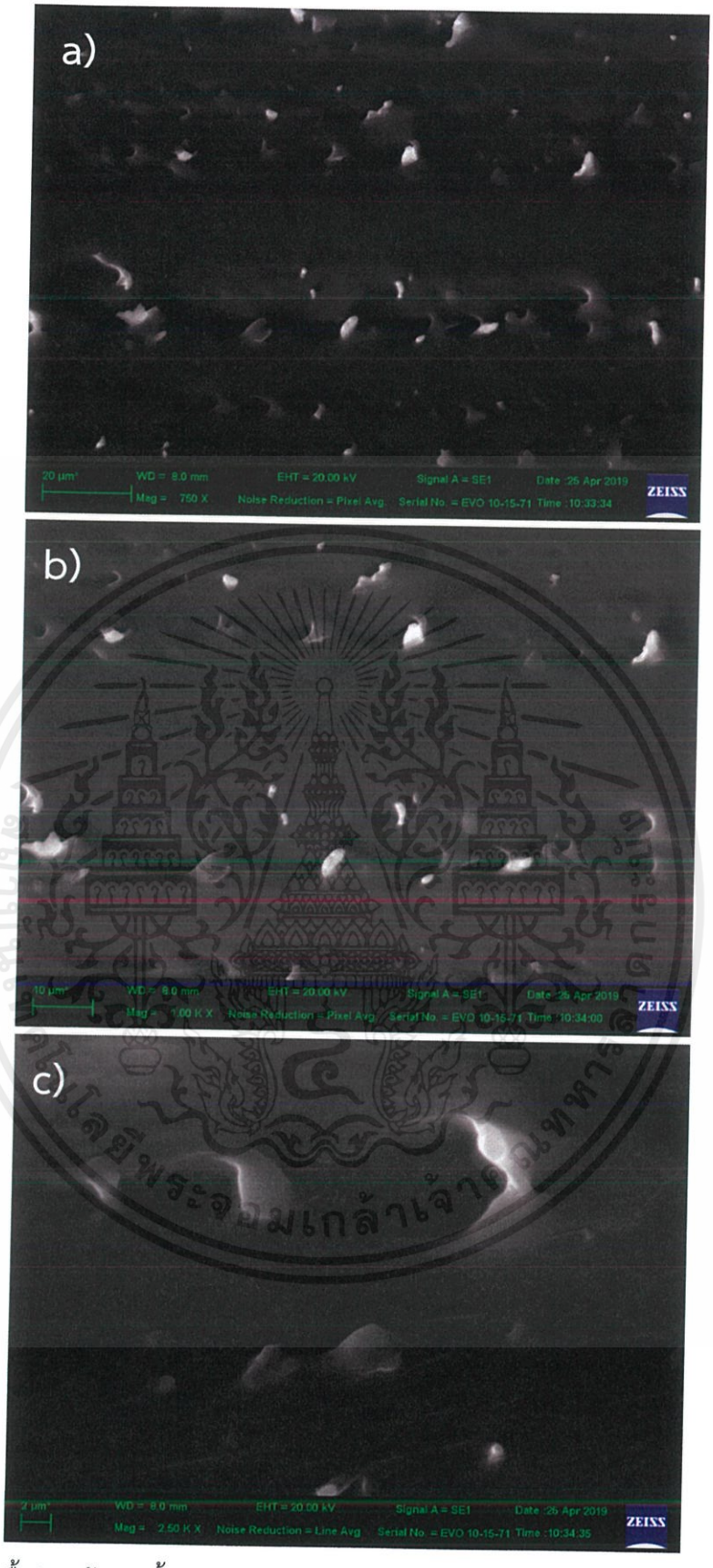
จากตารางข้อมูลตัวอย่างเกี่ยวกับน้ำหนัก ปริมาตร ความหนาแน่น และลักษณะผิวหน้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตซึ่งจะมีความแตกต่างกันที่ชนิดของสารตัวเติมและลำดับต่อมาจะแสดงภาพชิ้นงานนาโนคอมสิตที่เตรียมได้จากวิธีการหล่อแบบดังเดิมโดยเป็นไปตามภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 ตัวอย่างชิ้นงานนาโนคอมโพสิตที่ได้จากการหล่อแบบดังเดิม a) PDMS, b) PDMS/TiO_2 NPs, c) PDMS/BT NWs และ d) PDMS/BT NPs

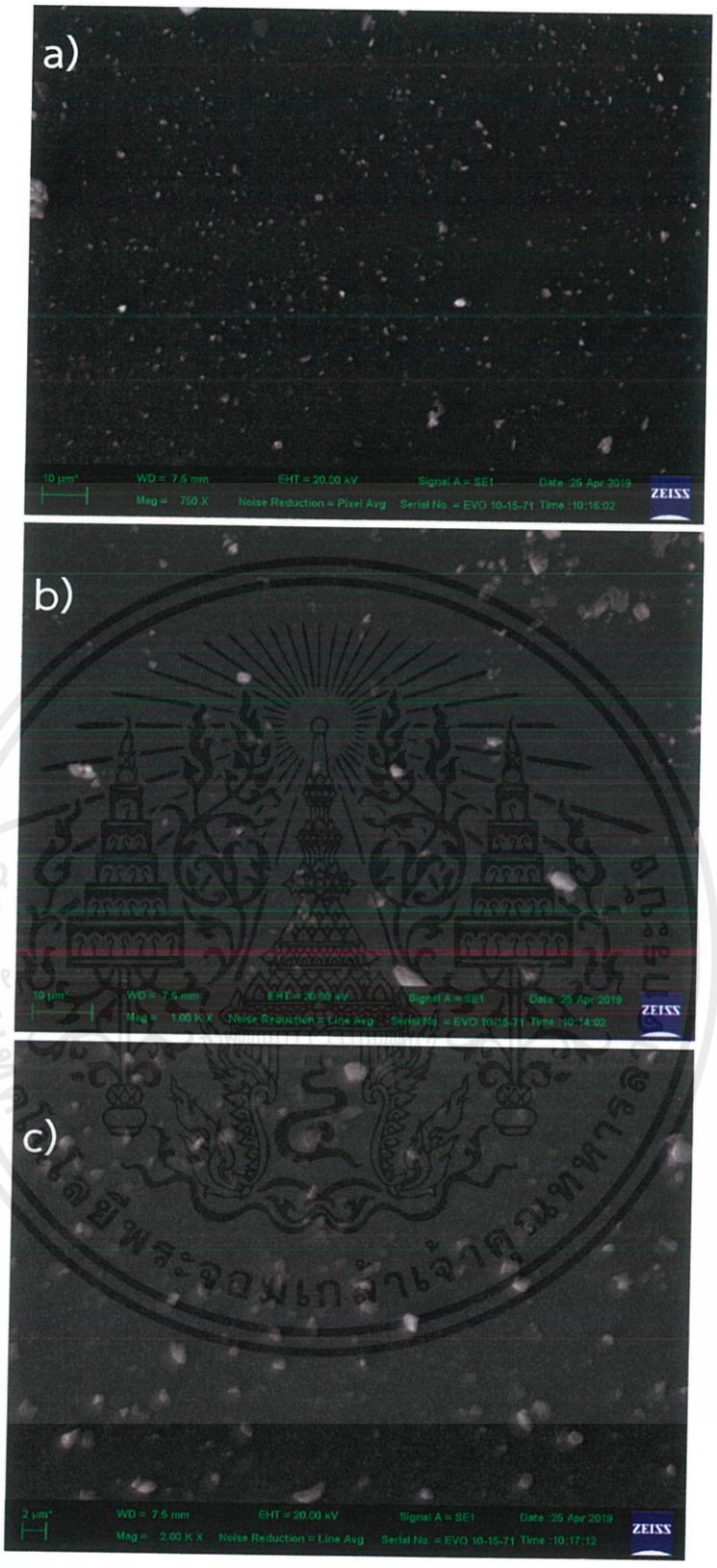
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นนี้จำเป็นจะต้องวิเคราะห์ทั้งลักษณะผิวหน้าของชิ้นงานและภาคตัดขวางโดยจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายต่างๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลทั้งพื้นผิวด้านบนและโครงสร้างด้านในของชิ้นงาน และนำข้อมูลมาใช้ประกอบการอธิบายความสัมพันธ์ในลำดับต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



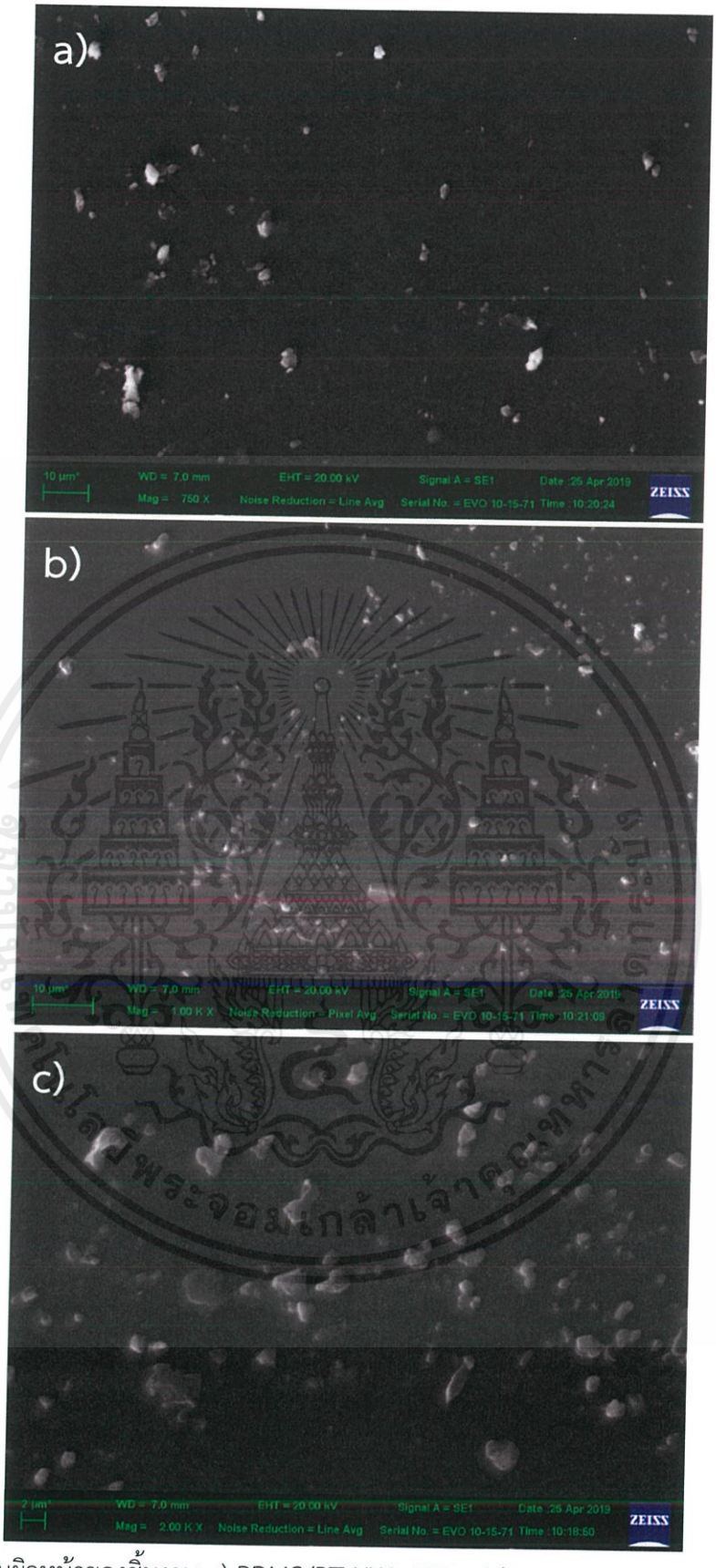
ภาพที่ 4.10 พื้นผิวหน้าของชิ้นงาน a) PDMS 750X, b) PDMS 1.00KX และ c) PDMS 2.50KX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



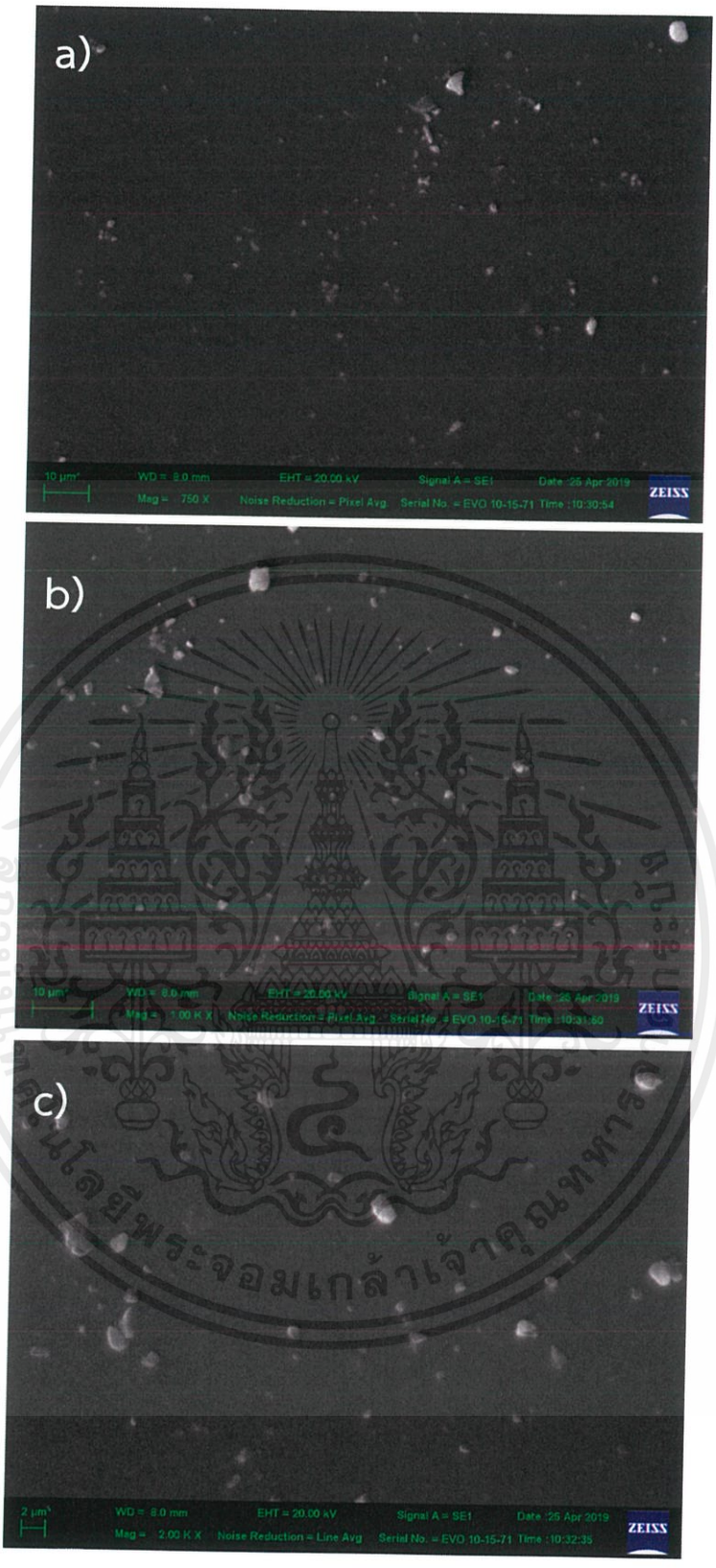
ภาพที่ 4.11 พื้นผิวหน้าของชิ้นงาน a) PDMS/BT NPs 750X b) PDMS/BT NPs 1.00KX และ c) PDMS/BT NPs 2.00KX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.12 พื้นผิวหน้าของชิ้นงาน a) PDMS/BT NWs 750X, b) PDMS/BT NWs 1.00KX และ c) PDMS/BT NWs 2.00KX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

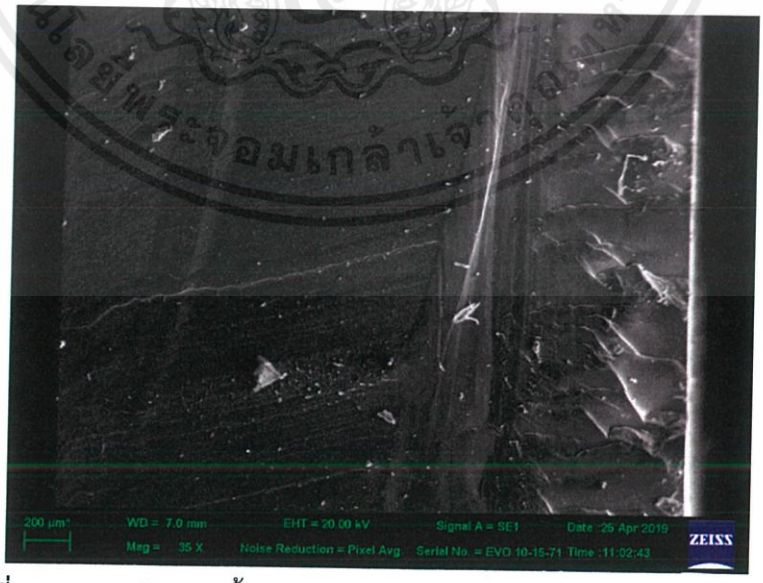


ภาพที่ 4.13 พื้นผิวหน้าของชิ้นงาน a) PDMS/TiO_2 NPs 750X, b) PDMS/TiO_2 NPs 1.00KX และ c) PDMS/TiO_2 NPs 2.00KX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

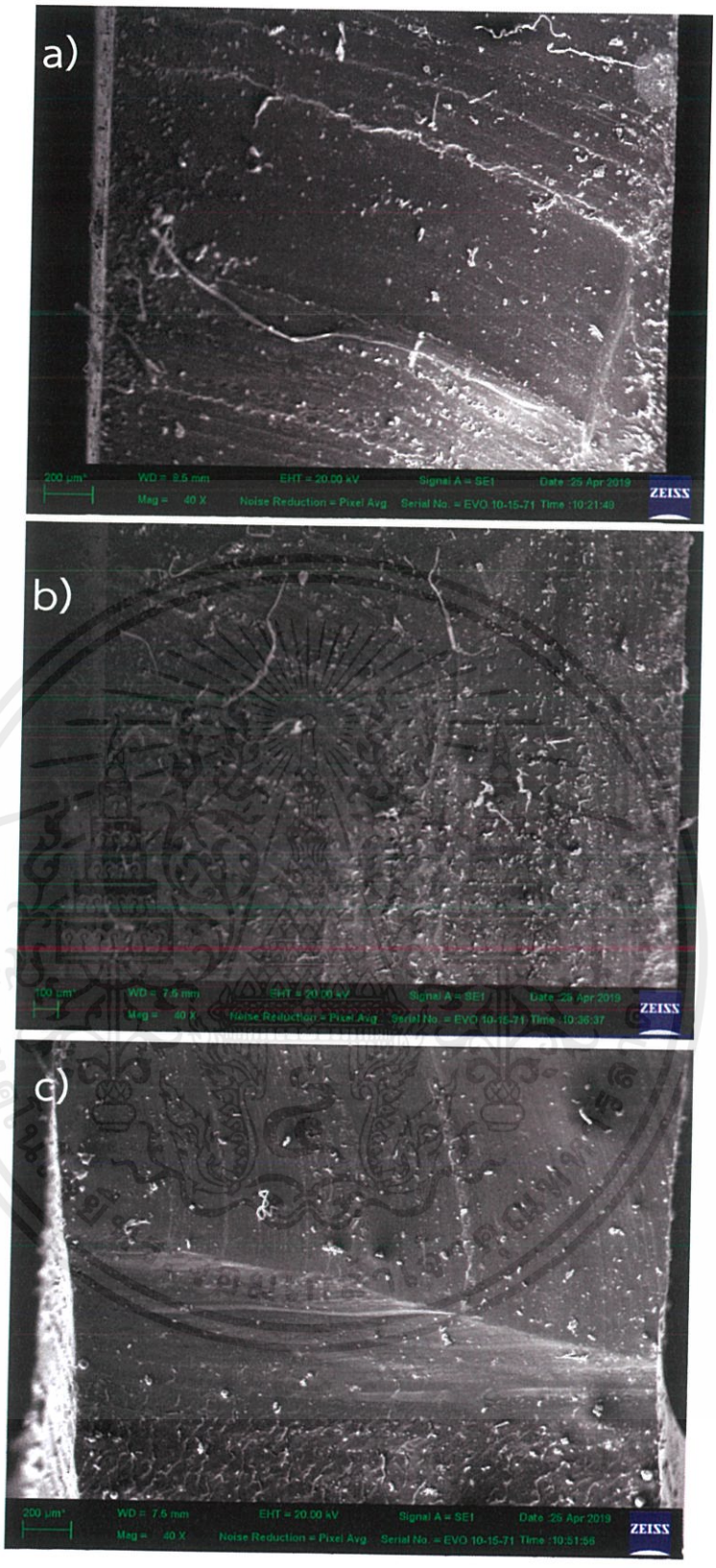
จากการวิเคราะห์พื้นผิวหน้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยในภาพที่ 4.10 ชิ้นงานพอลีไดเมทิลที่หล่อขึ้นรูปอย่างเดียวซึ่งลักษณะของผิวหน้ามีลักษณะเป็นคลื่นและเป็นหลุมกระจายอยู่ทั่วผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งเมื่อดูที่ชิ้นงานโดยปกติจะพบว่ามีผิวเรียบ ต่อมาในภาพที่ 4.11 ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตของพอลีไดเมทิลซิล๊อกเซน/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตซึ่งชิ้นงานมีการกระจายตัวอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตที่ค่อนข้างทั่วผิวหน้าของชิ้นเมื่อวัดที่กำลังขยายต่างๆ ภาพที่ 4.12 ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตของพอลีไดเมทิลซิล๊อกเซน/เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตซึ่งการกระจายตัวของเส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตที่ดีแต่ในบางจุดจะมีการกระจายตัวที่ต่ำเนื่องจากขนาดของอนุภาคมีความไม่สม่ำเสมอทำให้เกาะรวมกันเป็นกลุ่มในบางจุด และภาพที่ 4.13 ชิ้นงานนาโนคอมสิตพอลีไดเมทิลซิล๊อกเซน/อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ชิ้นงานมีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มากในบางพื้นที่และบางจุดมีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค จากชิ้นงานทั้งหมดที่หล่อขึ้นรูปมาด้วยวิธีดั้งเดิมโดยเพิ่มสารตัวเติมต่างๆ พบว่าอนุภาคต่างๆสามารถเกาะตัวรวมเป็นชิ้นงานนาโนคอมโพสิตได้

ลำดับต่อมาจะวิเคราะห์ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตที่เตรียมด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมจะวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยที่วิธีการจะทำการตัดชิ้นงานเป็นชิ้นเล็กๆและใช้ส่วนด้านในเนื้องานวิเคราะห์ ซึ่งการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ 1. การวิเคราะห์ภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ยังไม่ได้ถูกกระแทกด้วยเครื่องเคาะจังหวะเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกเพื่อต้องการจะศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัวของสารตัวเติมและพอลีเมอร์ก่อนการเสียรูปร่าง 2. การวิเคราะห์ภาคตัดขวางของชิ้นงานหลังถูกกระแทกด้วยเครื่องเคาะจังหวะเพื่อให้ศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัวของสารตัวเติมและพอลีเมอร์หลังมีการเสียรูปร่าง



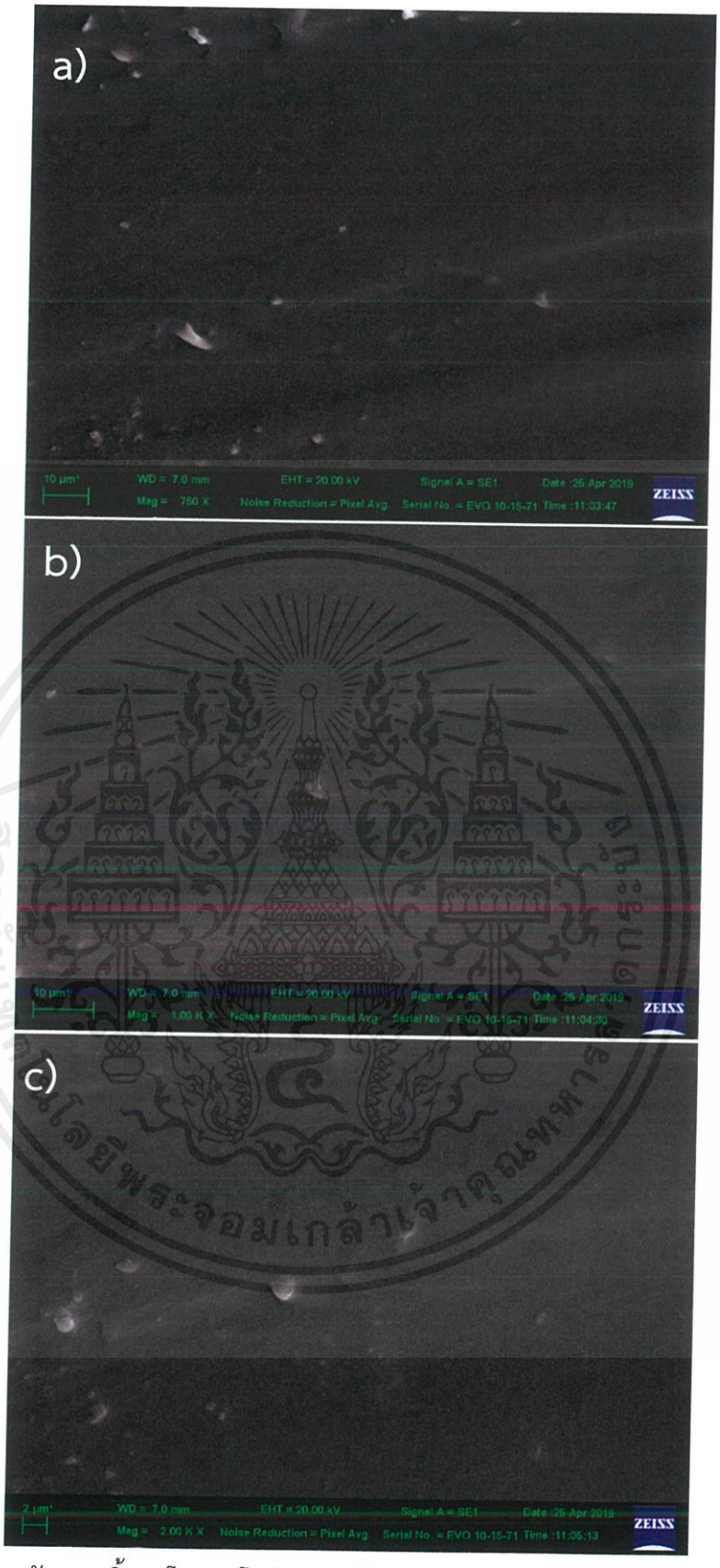
ภาพที่ 4.14 ภาคตัดขวางชิ้นงานนาโนคอมโพสิตก่อนเสียรูปร่าง PDMS 35X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



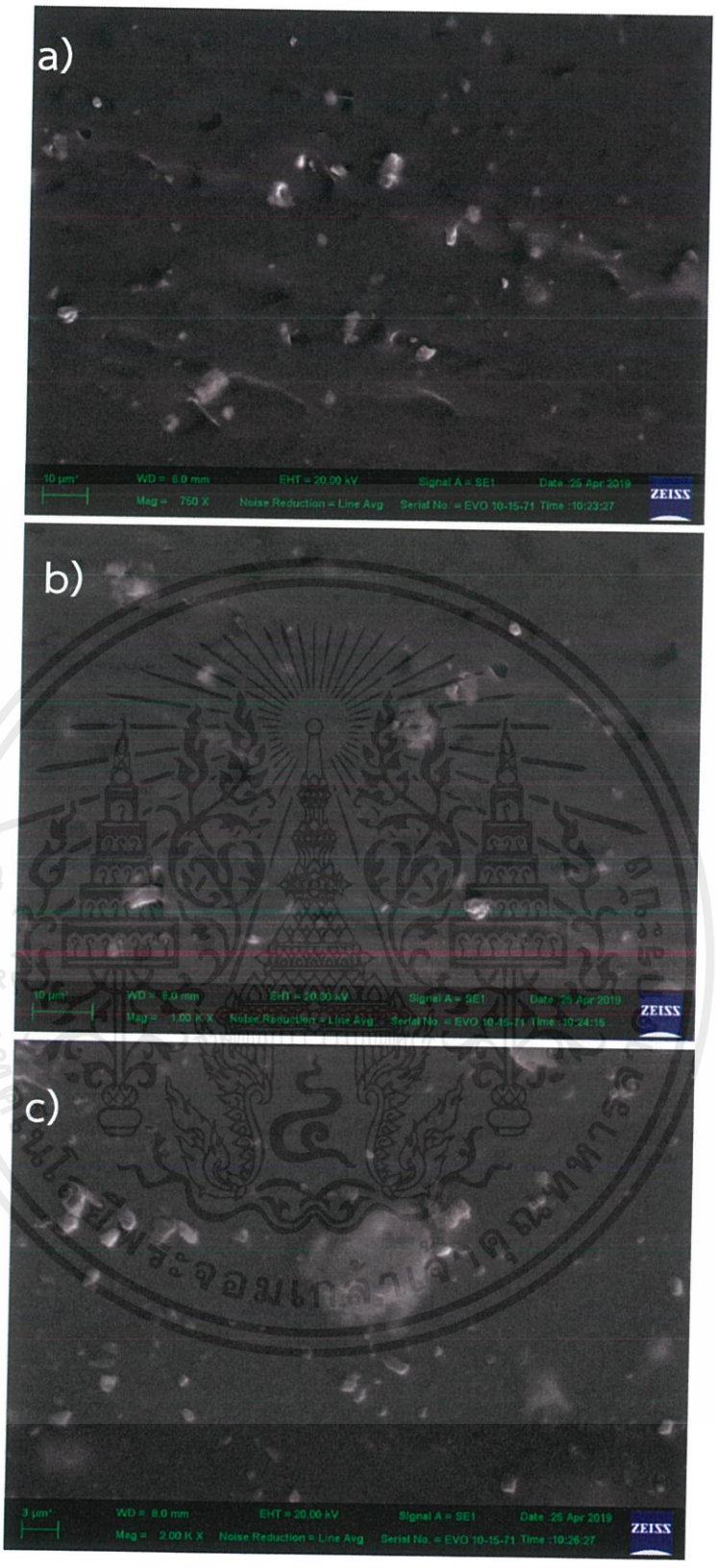
ภาพที่ 4.15 ภาคตัดขวางชิ้นงานนาโนคอมโพสิตก่อนเสียรูปร่าง a) PDMS/BT NPs 40X, b) PDMS/BT NWs และ c) PDMS/TiO_2 NPs 40X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



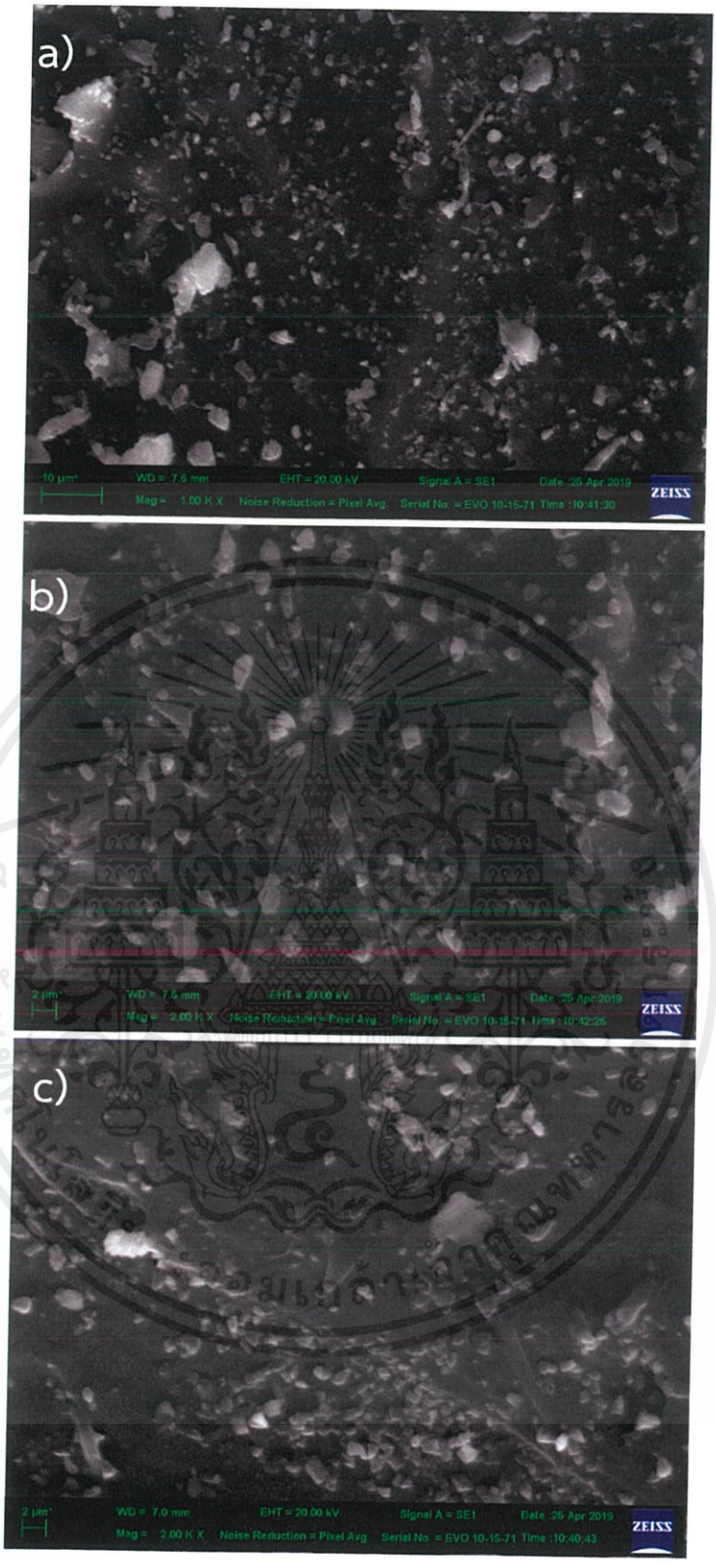
ภาพที่ 4.16 ภาคตัดขวางชิ้นนาโนคอมโพสิตก่อนเสียรูปร่าง a) PDMS 750X, b) PDMS 1.00KX และ c) PDMS2.00KX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



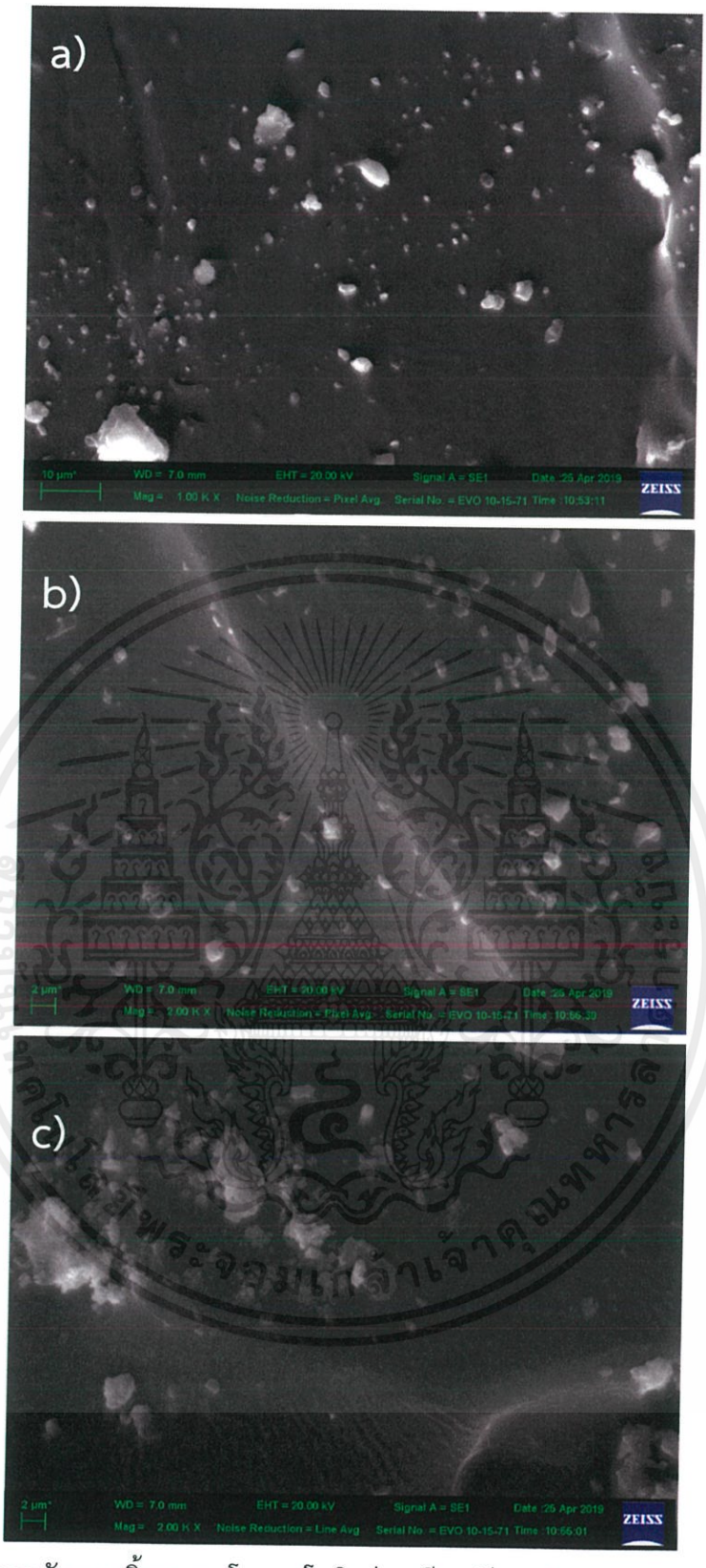
ภาพที่ 4.17 ภาคตัดขวางชิ้นงานนาโนคอมพสิตก่อนเสียรูปร่าง a) PDMS/BT NPs 750X, b) PDMS/BT NPs 1.00KX และ c) PDMS/BT NPs 2.00KX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.18 ภาคตัดขวางชิ้นงานนาโนคอมโพสิตก่อนเสียรูปร่าง a) ส่วนด้านล่าง PDMS/BT NWs 1.00KX, b) ส่วนด้านล่าง PDMS/BT NWs 2.00KX และ c) ส่วนด้านบน PDMS/BT NWs 2.00KX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.19 ภาคตัดขวางชิ้นงานนาโนคอมโพสิตก่อนเสียรูปร่าง a) PDMS/TiO_2 NPs 1.00KX, b) ส่วนด้านบน PDMS/TiO_2 NPs 2.00KX และ c) ส่วนด้านล่าง PDMS/TiO_2

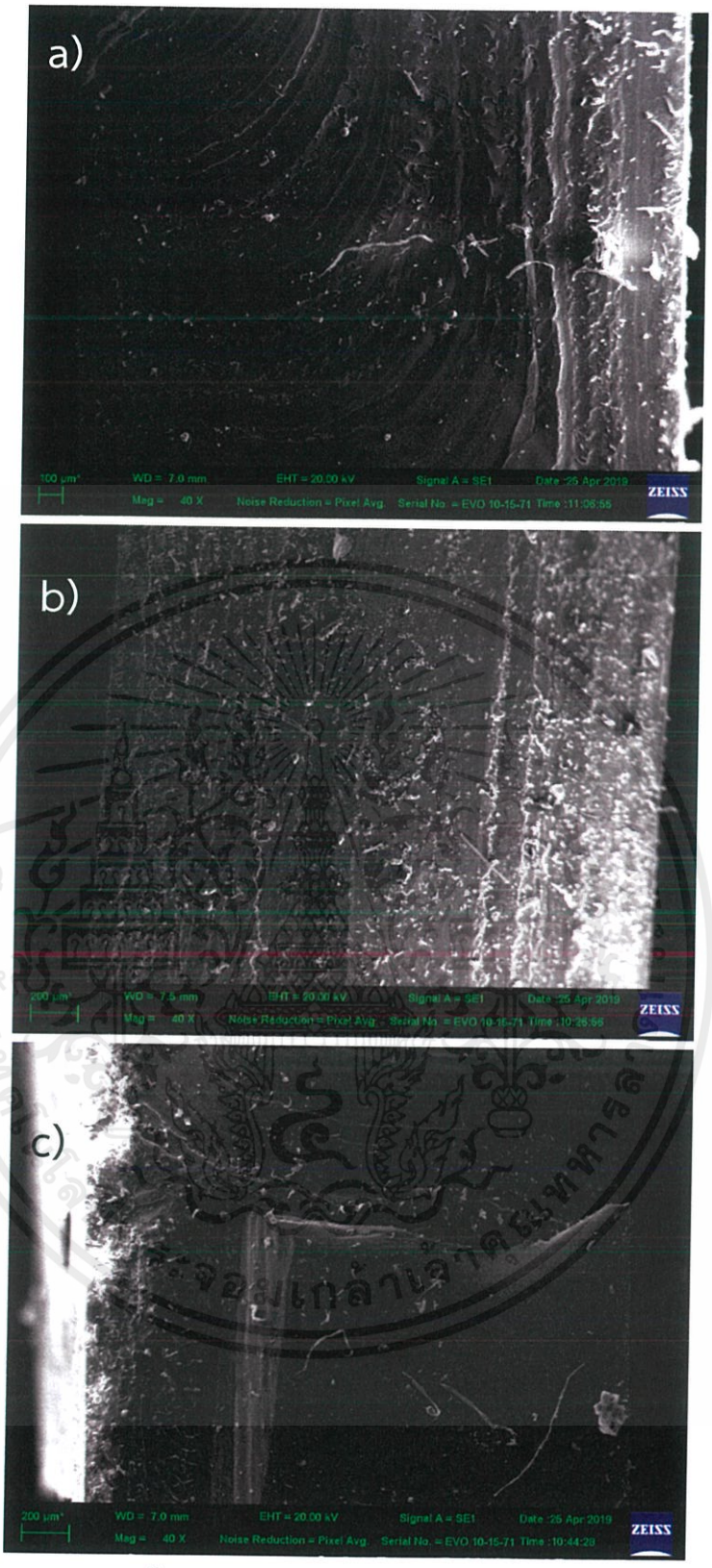
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพการวิเคราะห์ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 35 และ 40 เท่า ซึ่งในส่วนนี้จะอธิบายถึงผลของภาคตัดขวางโดยที่ชิ้นงานทั้งหมดยังไม่เกิดการเสียรูปร่างจากการนำไปทดสอบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก จากภาพที่ 4.14 และ 4.15 เป็นภาพของภาคตัดขวางของชิ้นงานทั้งชิ้น โดยในภาพที่ 4.14 เป็นชิ้นงานพอลีไดเมทิลไซล็อกเซน มีลักษณะเป็นคลื่นๆคล้ายชั้นของพอลิเมอร์ที่ก่อตัวกันเป็นชั้นแต่ก็มีส่วนที่เกิดขึ้นจากการตัดชิ้นงานก่อนนำไปวิเคราะห์โดยจะมีลักษณะเหมือนการเฉือนเช่นเดียวกัน และบางบริเวณมีลักษณะของฝุ่นเกิดขึ้นในขณะก่อนการนำมาทดสอบ ภาพที่ 4.15 a) ชิ้นงานพอลีไดเมทิลซิล็อกเซน/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตซึ่งภายในชิ้นงานมีส่วนของสารตัวเติมเกาะตัวในพอลีเมอร์ได้เป็นอย่างดีในชิ้นงานแต่การกระจายค่อนข้างต่ำเนื่องจากสารตัวเติมได้เกิดการตกตะกอนรวมกันที่ด้านล่างของชิ้นงานซึ่งจะเป็นทางด้านซ้ายของภาพ ส่วนในบางบริเวณอาจเกิดฝุ่นและรอยจากการเฉือนเกิดขึ้นที่ชิ้นงานก่อนการนำไปทดสอบทำให้เห็นเป็นลักษณะคล้ายชั้นของพอลีเมอร์ ภาพที่ 4.15 b) ชิ้นงานพอลีไดเมทิลซิล็อกเซน/เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตมีลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมทั่วทั้งชิ้นงานแต่มีการตกตะกอนของสารเกิดขึ้นบางส่วนเช่นเดียวกัน ภาพที่ 4.15 c) ชิ้นพอลีไดเมทิลซิล็อกเซน/อนุภาคนาโนไททาเนียมได้ออกไซด์ลักษณะชิ้นงานมีการกระจายตัวของสารตัวเติมที่ต่ำและมีการตกตะกอนเกิดมากที่บริเวณด้านล่างของชิ้นงานซึ่งจากภาพจะเห็นสารตัวเติมที่บริเวณด้านล่างของภาพมากกว่าบริเวณตรงกลางชิ้นงาน

การวิเคราะห์ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 750, 1.00K และ 2.00K เท่า โดยในภาพที่ 4.16 ชิ้นงานของพอลีไดเมทิลซิล็อกเซนซึ่งมีลักษณะเป็นคลื่นๆชั้นของพอลีเมอร์ที่ชัดเจนแต่มีส่วนของฝุ่นละอองในบางจุดของชิ้นงาน ภาพที่ 4.17 ชิ้นงานของพอลีไดเมทิลซิล็อกเซน/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตมีลักษณะการกระจายของอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตทั่วชิ้นงานพอลีเมอร์ดีแต่มีบางส่วนที่มีการเกาะกลุ่มส่วนพอลีเมอร์มีลักษณะเป็นคลื่นๆ ภาพที่ 4.18 ชิ้นงานของพอลีไดเมทิลซิล็อกเซน/เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตมีการเกาะตัวที่แน่นของสารตัวเติมที่มากทำให้บางจุดมีการกระจายที่น้อยเมื่อปรียบเทียบกับแบบอนุภาค ส่วนพอลีจะมีลักษณะคล้ายๆเดิมคือเป็นลักษณะของคลื่นเป็นชั้นในบางส่วน ภาพที่ 4.19 ชิ้นงานของพอลีไดเมทิลซิล็อกเซน/อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์การกระจายตัวของอนุภาคดีในบางบริเวณและเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคที่ด้านล่างของชิ้นงาน

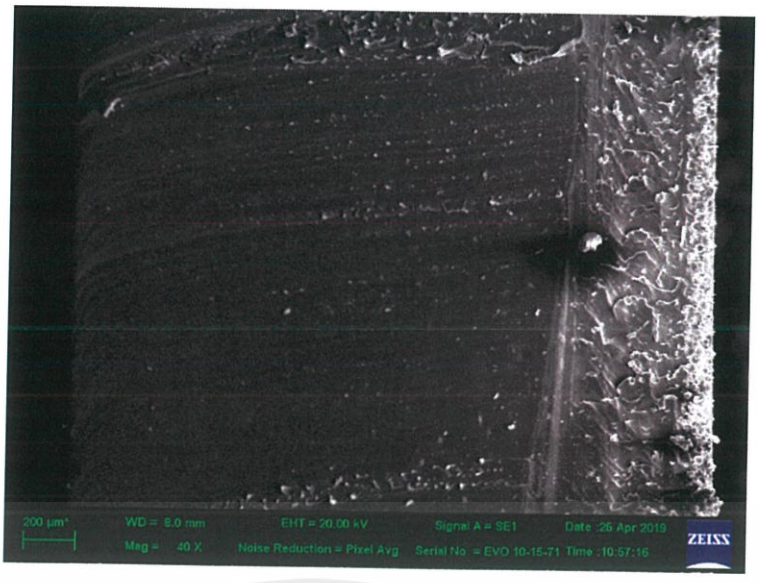
ลำดับต่อไปจะวิเคราะห์ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตที่เสียรูปร่างจากการเคาะด้วยเครื่องเคาะจังหวะเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.20 ภาคตัดขวางของชิ้นนาโนคอมโพสิตหลังเสียรูปร่าง a) PDMS 40X b) PDMS/BT NPs 40X และ c) PDMS/BT NWs 40X

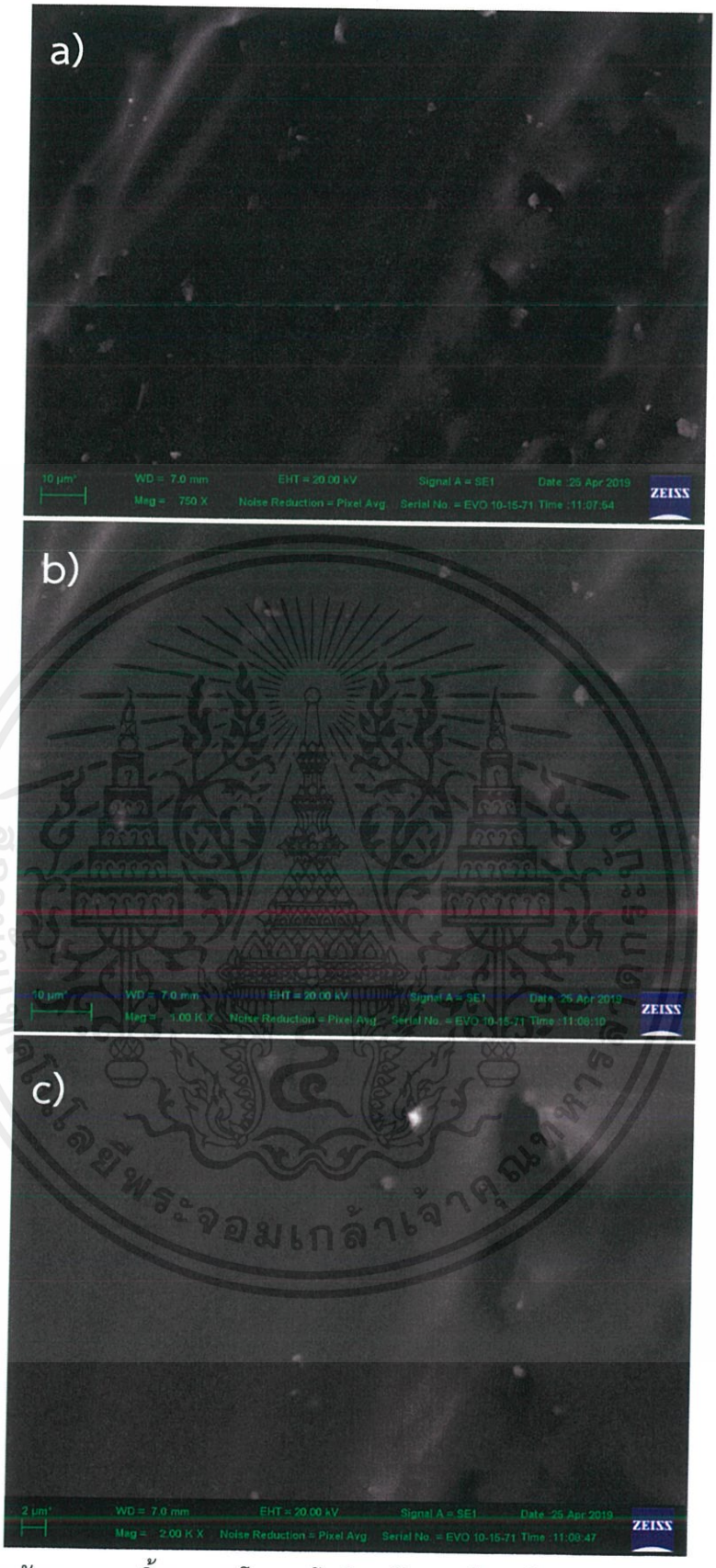
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.21 ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตก่อนการเสียรูปร่าง PDMS/TiO_2 NPs 40X

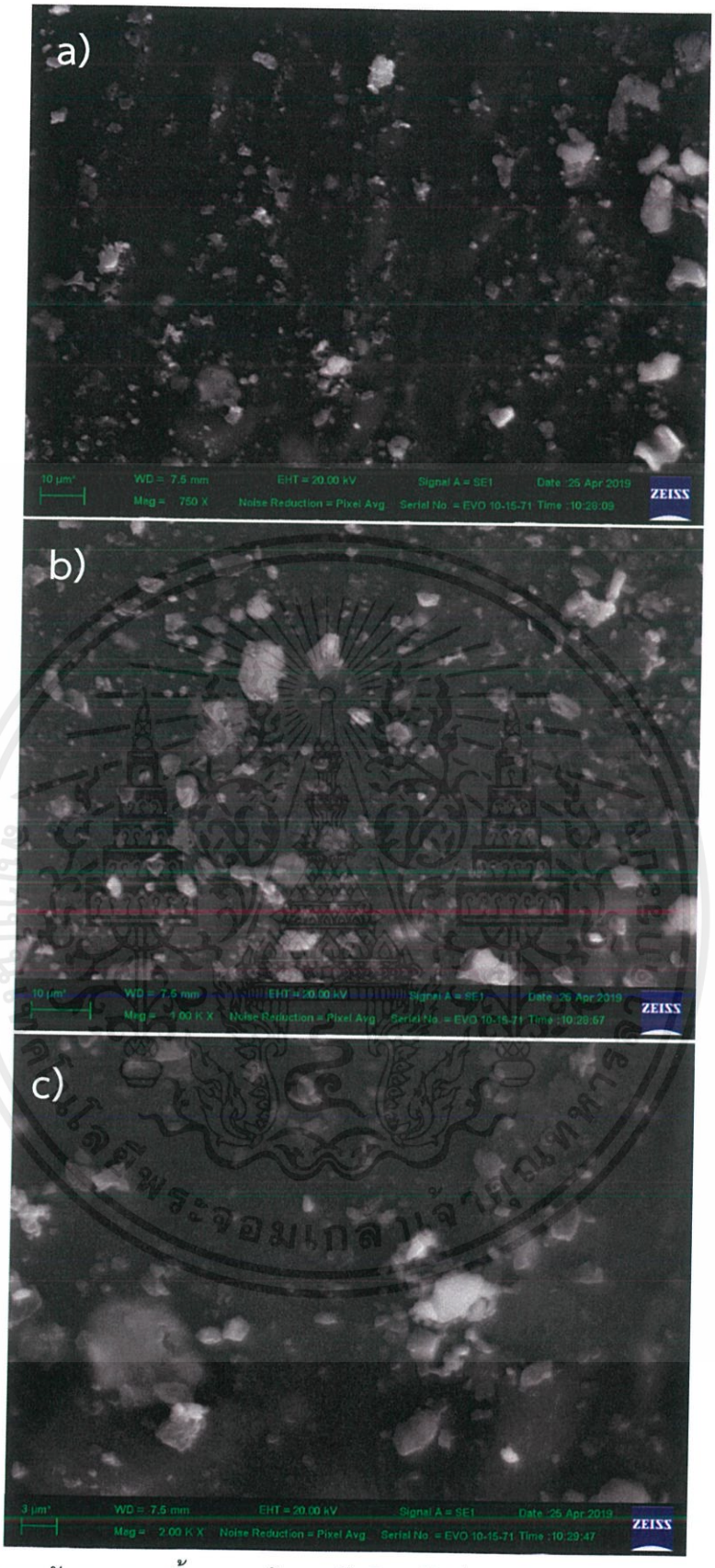
จากภาพการวิเคราะห์ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 40 เท่า ซึ่งในส่วนนี้จะอธิบายถึงผลของภาคตัดขวางโดยที่ชิ้นงานทั้งหมดที่เกิดการเสียรูปร่างจากการนำไปทดสอบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก จากภาพที่ 4.20 และ 4.21 เป็นภาพของภาคตัดขวางของชิ้นงานทั้งชิ้น โดยในภาพที่ 4.20 a) ชิ้นงานพอลีไดเมทิลซิล็อกเซนมีลักษณะเป็นคลื่นๆคล้ายชั้นของพอลิเมอร์ที่ก่อตัวกันเป็นชั้นและบางบริเวณมีลักษณะของฝุ่นเกิดขึ้นในขณะก่อนการนำมาทดสอบ ภาพที่ 4.20 b) ชิ้นงานพอลีไดเมทิลซิล็อกเซน/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตมีลักษณะของอนุภาคทั่วทั้งชิ้นงานแต่มีบางส่วนตกตะกอนที่ด้านล่างของชิ้นงานและบางบริเวณมีฝุ่นละอองเกาะที่ชิ้นงาน ภาพที่ 4.20 c) ชิ้นงานพอลีไดเมทิลซิล็อก/เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตมีลักษณะของชั้นพอลีเมอร์และการกระจายของเส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตที่ต่ำในบางส่วนเกิดการตกตะกอนใต้ชิ้นงานในภาพจะเป็นด้านซ้าย และภาพที่ 4.21 ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตพอลีไดเมทิลซิล็อกเซน/อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์การกระจายตัวจะค่อนข้างต่ำและเกิดการตกตะกอนใต้ชิ้นงานที่มากซึ่งจะเป็นไปตามภาพและสังเกตได้จากด้านซ้ายมือจะมีจำนวนของผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่มากกว่าบริเวณอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



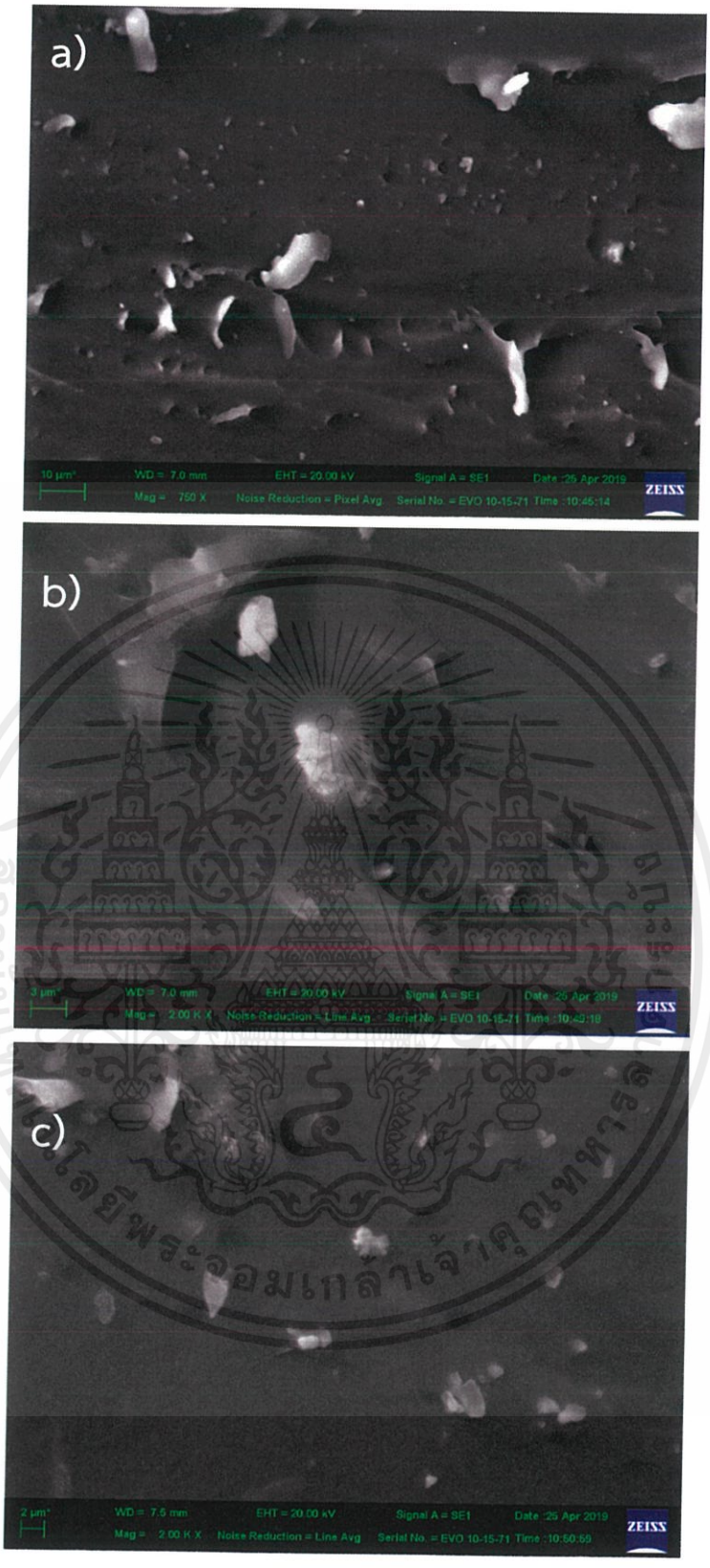
ภาพที่ 4.22 ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตหลังการเสียรูปร่าง a) PDMS 750X, b) PDMS 1.00KX และ c) 2.00KX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



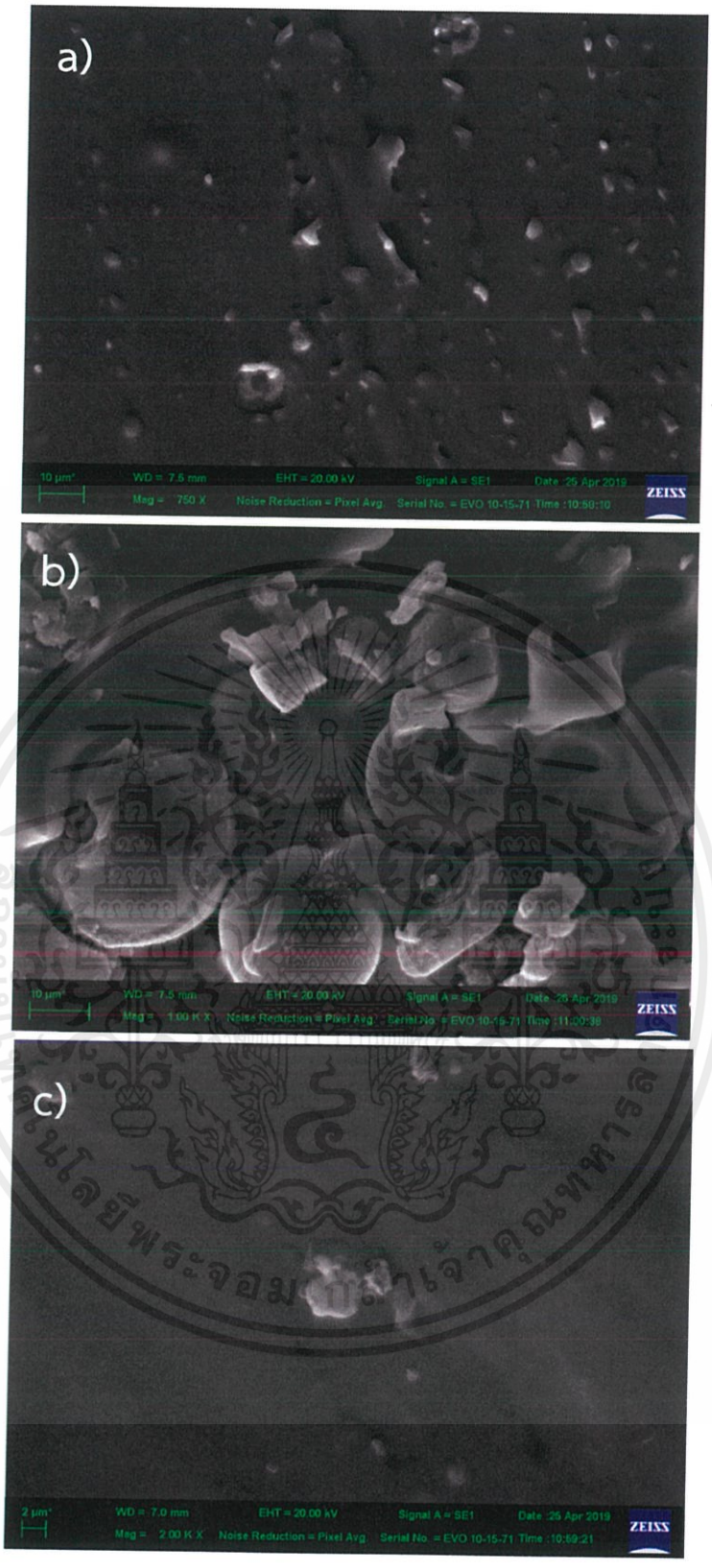
ภาพที่ 4.23 ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตหลังเสียรูปร่าง a) PDMS/BT NPs 750X, b) PDMS/BT NPs 1.00KX และ c) PDMS/BT NPs 2.00KX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.24 ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตหลังเสียรูปร่าง a) PDMS/BT NWs 750X, b) ส่วนด้านล่าง PDMS/BT NWs 1.00KX และ c) ส่วนด้านบน PDMS/BT NWs 2.00KX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



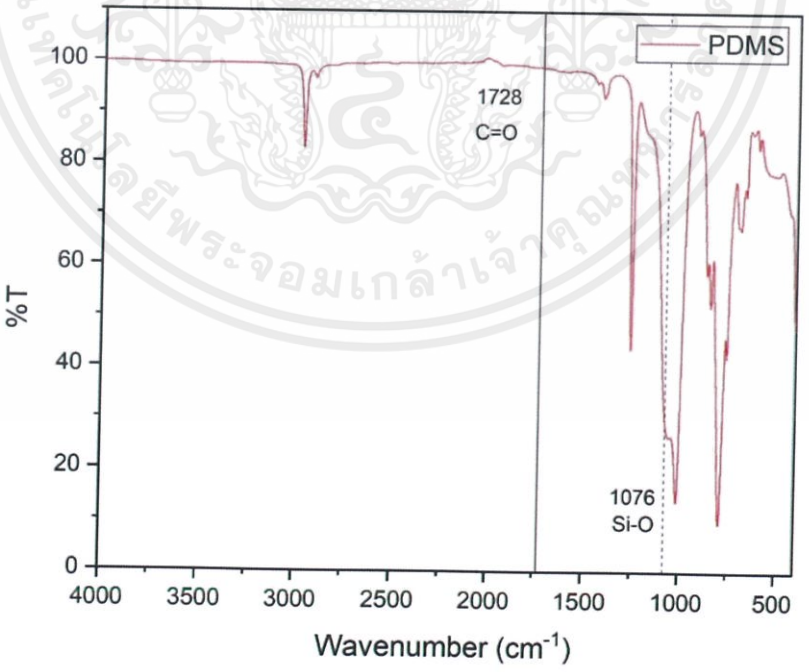
ภาพที่ 4.25 ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตหลังเสียรูปทรง a) PDMS/TiO_2 NPs 750X, b) ส่วนด้านล่าง PDMS/TiO_2 NPs 1.00KX และ c) ส่วนด้านบน PDMS/TiO_2 NPs 2.00KX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์ภาคตัดขวางของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 750, 1.00K และ 2.00K เท่า ภาพที่ 4.22 ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตพอลีไดเมทิลซิล็อกเซนเห็นลักษณะของชั้นพอลีเมอร์ที่คลี่นได้ชัดเจน ภาพที่ 4.23 ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตพอลีไดเมทิลซิล็อกเซน/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตซึ่งลักษณะของอนุภาคกระจายตัวได้ดีและมีลักษณะอยู่ในพอลีเมอร์ที่ชัดเจน ภาพที่ 4.24 ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตพอลีไดเมทิลซิล็อกเซน/เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตโดยที่ผลที่ได้คืออนุภาคฝังอยู่ในชั้นของพอลีเมอร์แต่มีการกระจายตัวที่น้อยทำให้จำนวนของอนุภาคไม่ทั่วถึงทุกบริเวณ ภาพที่ 4.25 ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตพอลีไดเมทิลซิล็อกเซน/อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคค่อนข้างต่ำแต่มีการตกตะกอนรวมกันที่ด้านใต้ของชิ้นงานที่มาก ซึ่งต่อมาจะวิเคราะห์ผลในลำดับต่อไป

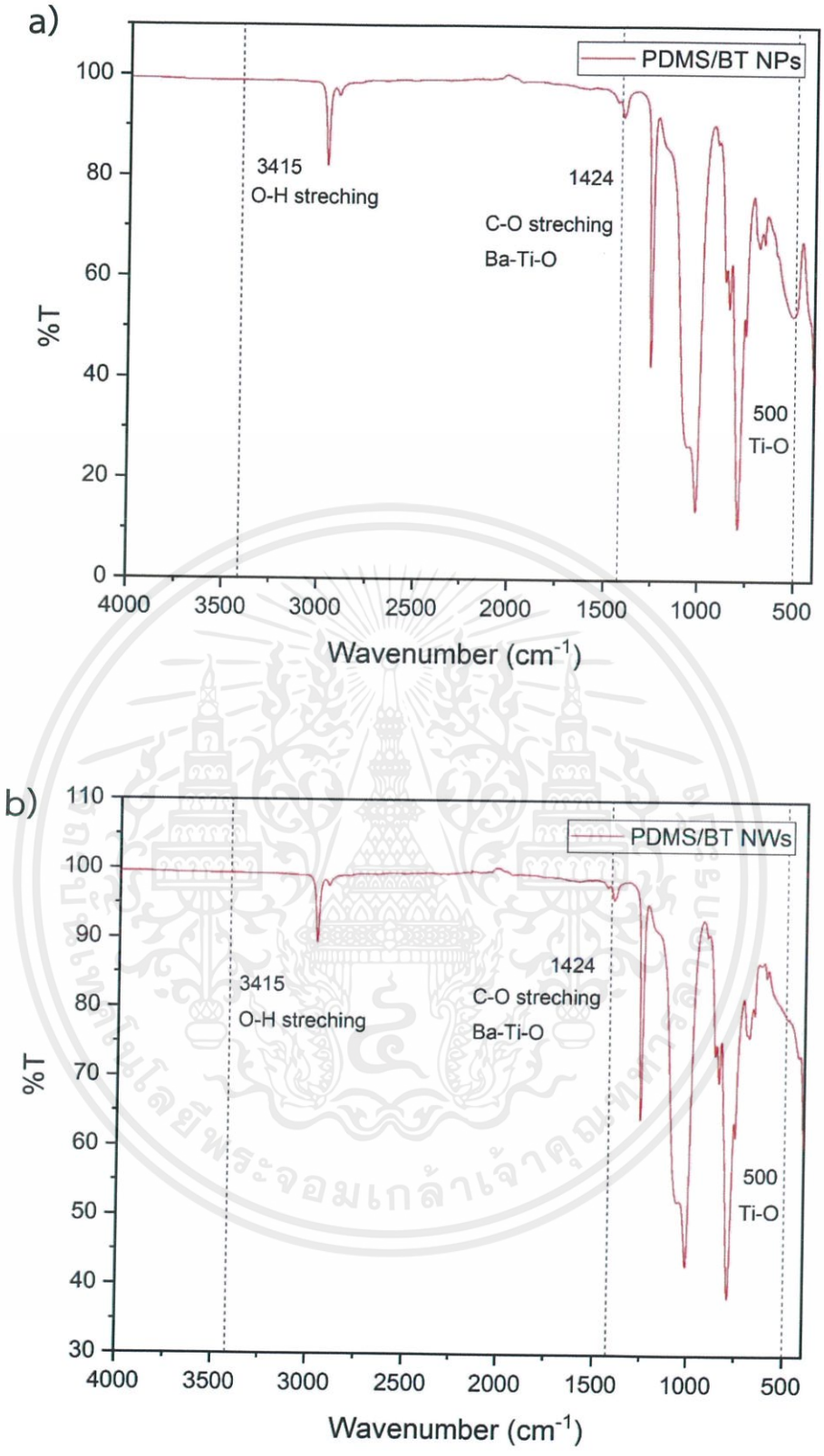
4.2.3 ลักษณะทางเคมีของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต

ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ด้วยจะศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของตำแหน่งที่ปรากฏพันธะที่เกิดขึ้นที่แสดงให้เห็นถึงแบเรียมไททาเนตปรากฏในชิ้นงาน ซึ่งในการวิเคราะห์จะใช้ชิ้นงานทั้งชิ้นและวิเคราะห์ด้วยการออกแรงกดโดยใช้หัวทดสอบลงบนชิ้นงาน



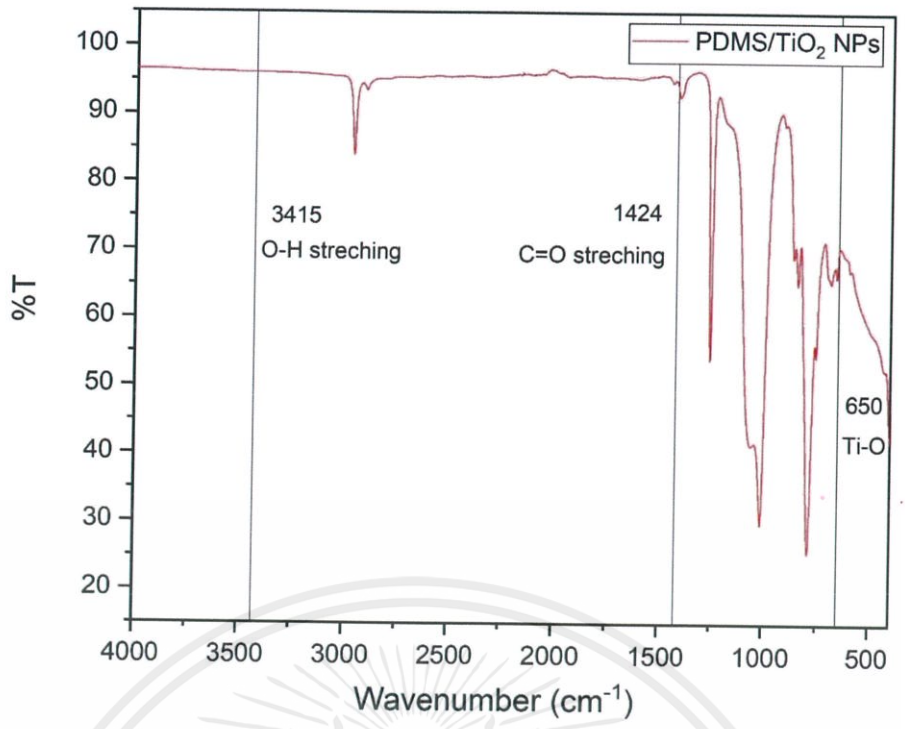
ภาพที่ 4.26 ชิ้นงานนาโนคอมโพสิต PDMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.27 ชิ้นงานนาโนคอมโพสิต a) PDMS/BT NPs b) PDMS/BT NWs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.28 ชิ้นงานนาโนคอมโพสิต PDMS/TiO_2 NPs

จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) พบว่าลักษณะของกราฟในภาพต่างๆตั้งแต่ภาพที่ 4.26 ถึง ภาพที่ 4.28 จะมีลักษณะที่คล้ายกัน เนื่องจากเป็นชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้พอลีไดเมทิลซิล๊อกเซนชนิดเดียวกันจึงทำให้ตำแหน่งของ Si-O เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกันคือ 1076, O-H stretching ที่ตำแหน่ง 3415 และ C=O stretching ที่ตำแหน่ง 1424 เช่นเดียวกัน ส่วนตำแหน่งของ Ba-Ti-O นั้นจะอยู่ประมาณช่วงตำแหน่งที่1424 เช่นเดียวกัน ซึ่งความแตกต่างของกราฟทั้ง 4 ชนิดนี้จะมีความแตกต่างกันที่ช่วง 500-750 ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากความแตกต่างกันของสารตัวเติมที่มีความแตกต่างกันแต่ละชิ้นงาน

4.2.4 สมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิต

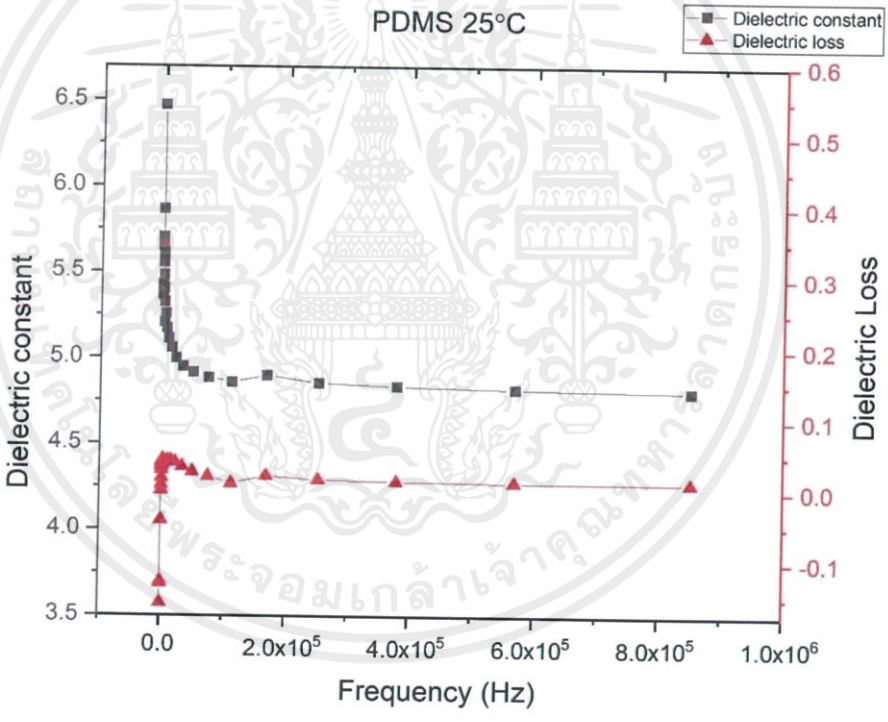
4.2.4.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

เครื่องวิเคราะห์สามารถทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุด้วยเครื่อง LCR Meter ที่ความถี่ตั้งแต่ 10^1 ถึง 10^6 ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงๆ จากนั้นนำค่ามาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับความถี่ของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตพอลีไดเมทิลซิล๊อกเซน/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

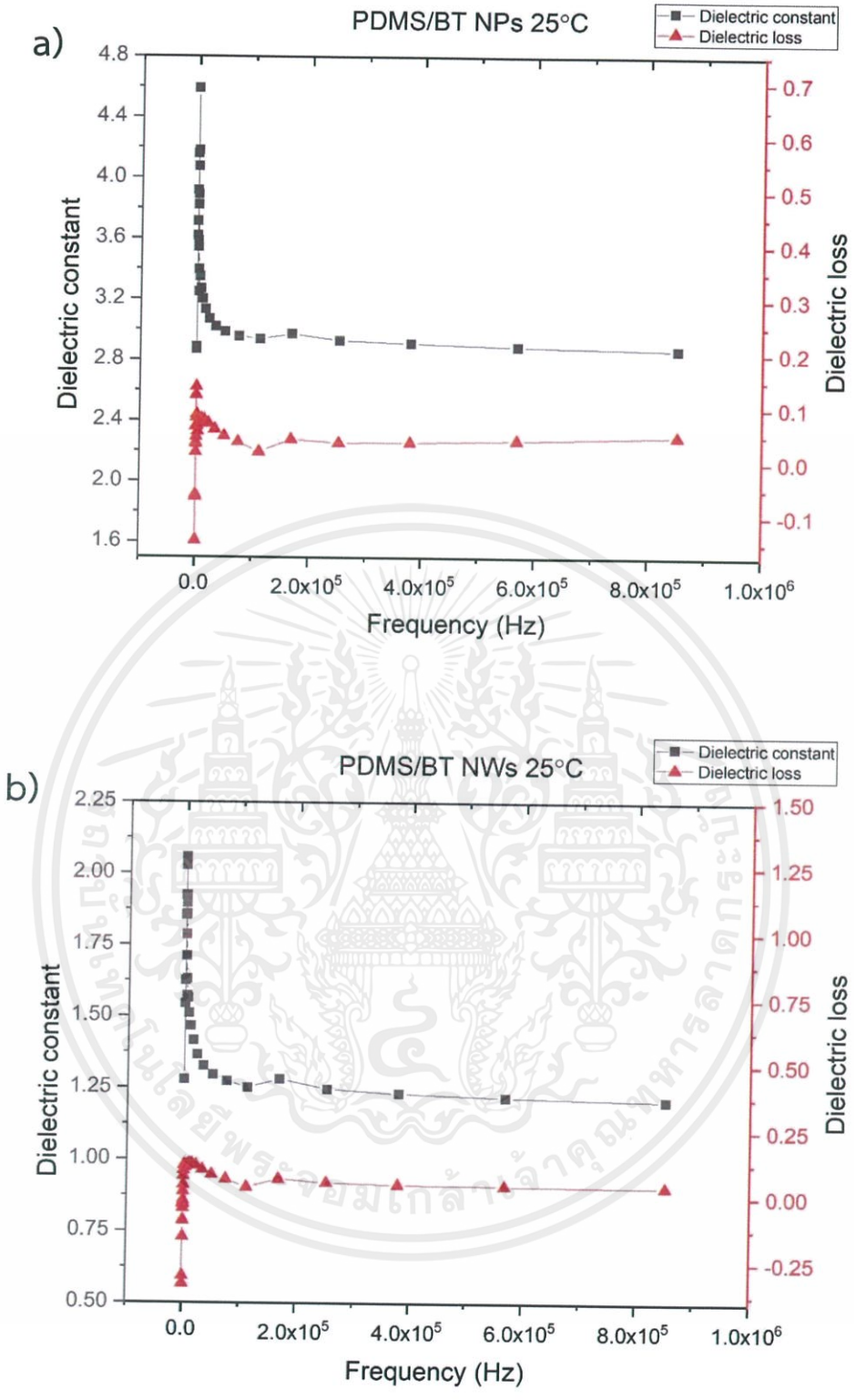
อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต, พอลีไดเมทิลซิล้อกเซน/เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนต และพอลีไดเมทิลซิล้อกเซน/อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งมีความแตกต่างกันที่ชนิดของสารตัวเติม

ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าที่ความถี่ต่ำๆค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าคงการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกจะมีค่าขึ้นกับความถี่เล็กน้อยและเริ่มมีค่าคงที่เมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น สามารถสังเกตได้จากภาพที่ 4.29 ซึ่งจะเป็นการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก โดยคาดการว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของพอลีไดเมทิลซิล้อกเซนมีค่ามากที่สุดแต่เมื่อมีการเติมสารตัวเติมเข้าไปแล้วพบว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ลดลงเมื่อความถี่สูงๆซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากปัจจัยอื่นๆ เช่น ปริมาณของสารตัวเติมและรวมไปถึงการกระจายตัวของสารตัวเติมที่อาจจะไม่ทั่วทั้งชิ้นงานเนื่องจากสารส่วนใหญ่มีการตกตะกอนเกิดขึ้นทุกชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบกับพอลีไดเมทิลซิล้อกเซนที่ไม่มีการเติมสารตัวเนื่องจากเป็นสารชนิดเดียวกันทั้งชิ้นงานทำให้เกิดความสม่ำเสมอของสารในชิ้นงานที่มากกว่านาโนคอมโพสิตชิ้นอื่น



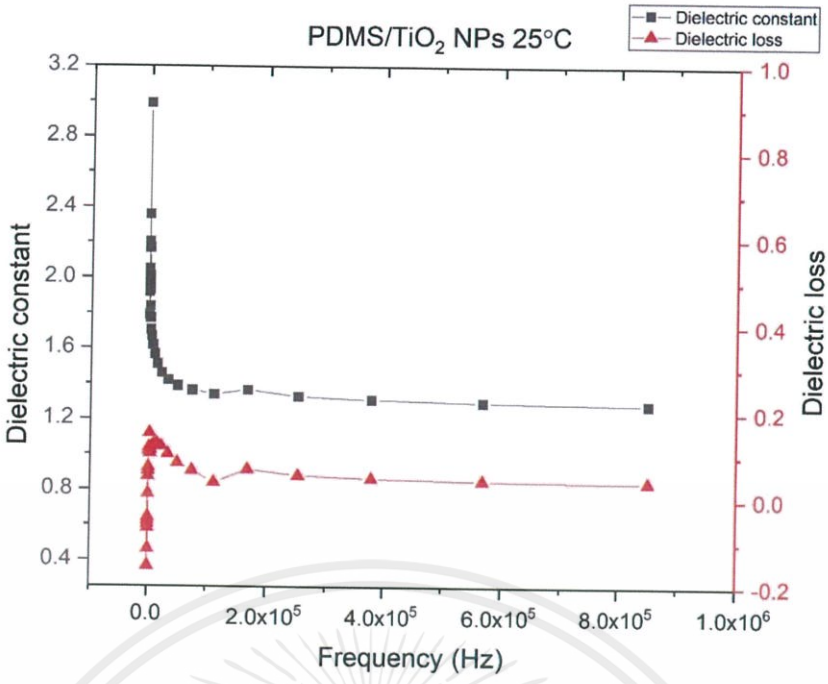
ภาพที่ 4.29 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต PDMS ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

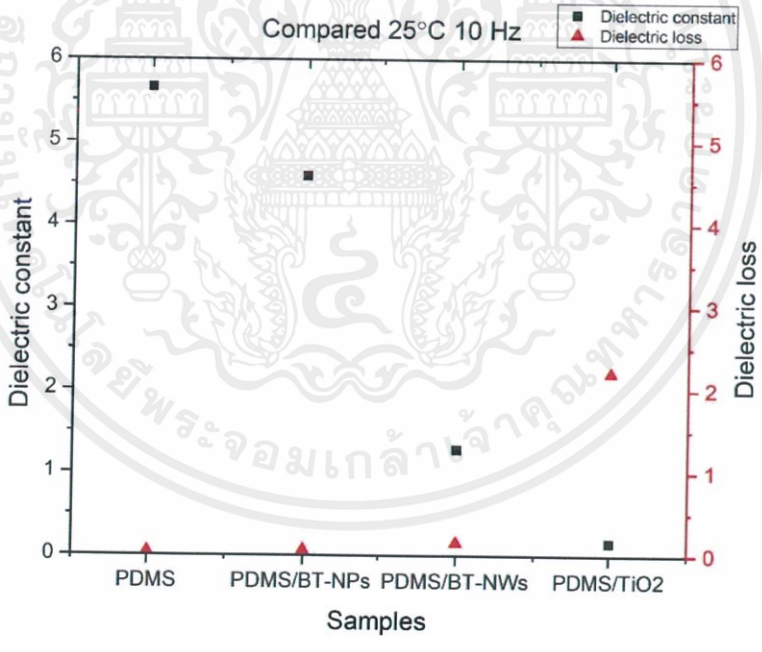


ภาพที่ 4.30 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต a) PDMS/BT NPs และ b) PDMS/BT NWs ที่อุณภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

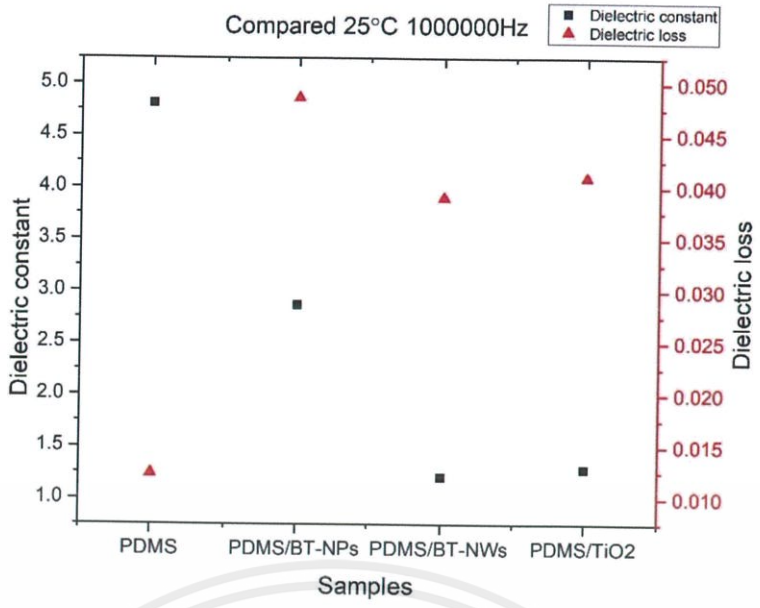


ภาพที่ 4.31 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของนาโนคอมโพสิต a) PDMS/TiO_2 NPs ที่อุณหภูมิห้อง

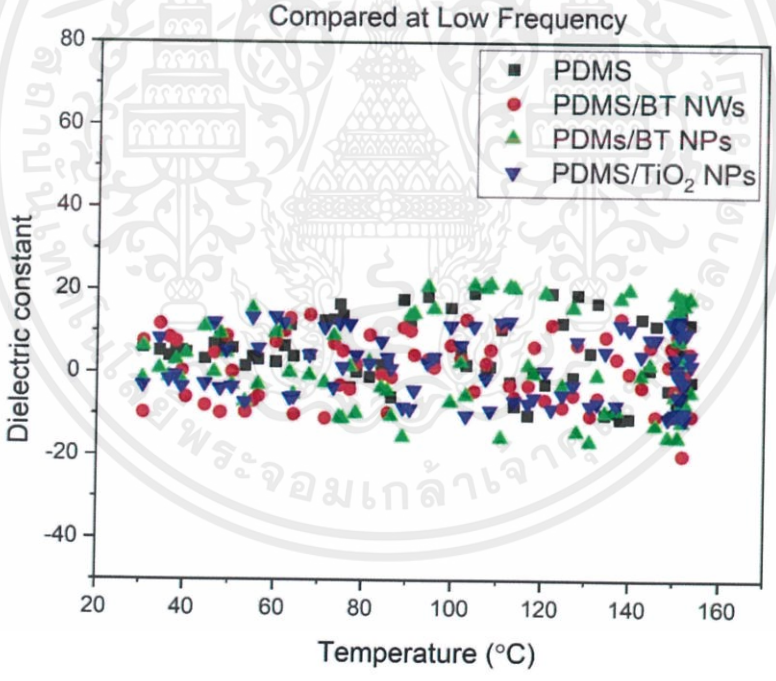


ภาพที่ 4.32 เปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของแต่ละชิ้นงานที่ความถี่ต่ำสุดที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

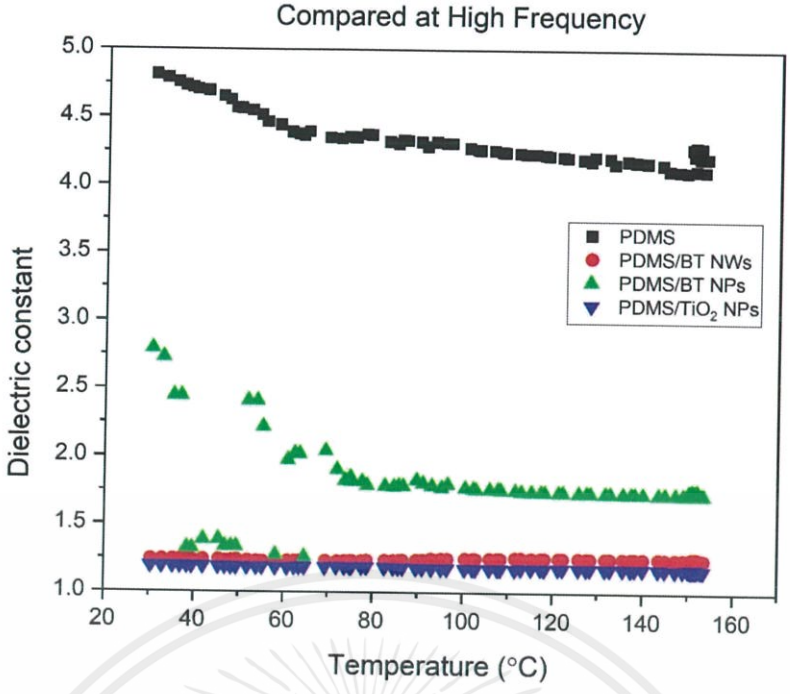


ภาพที่ 4.33 เปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของแต่ละชิ้นงานที่ความถี่สูงสุดที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.34 เปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของแต่ละชิ้นงานที่ความถี่ต่ำสุดที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30-150 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.35 เปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของแต่ละชิ้นงานที่ความถี่สูงสุดที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30-150 °C

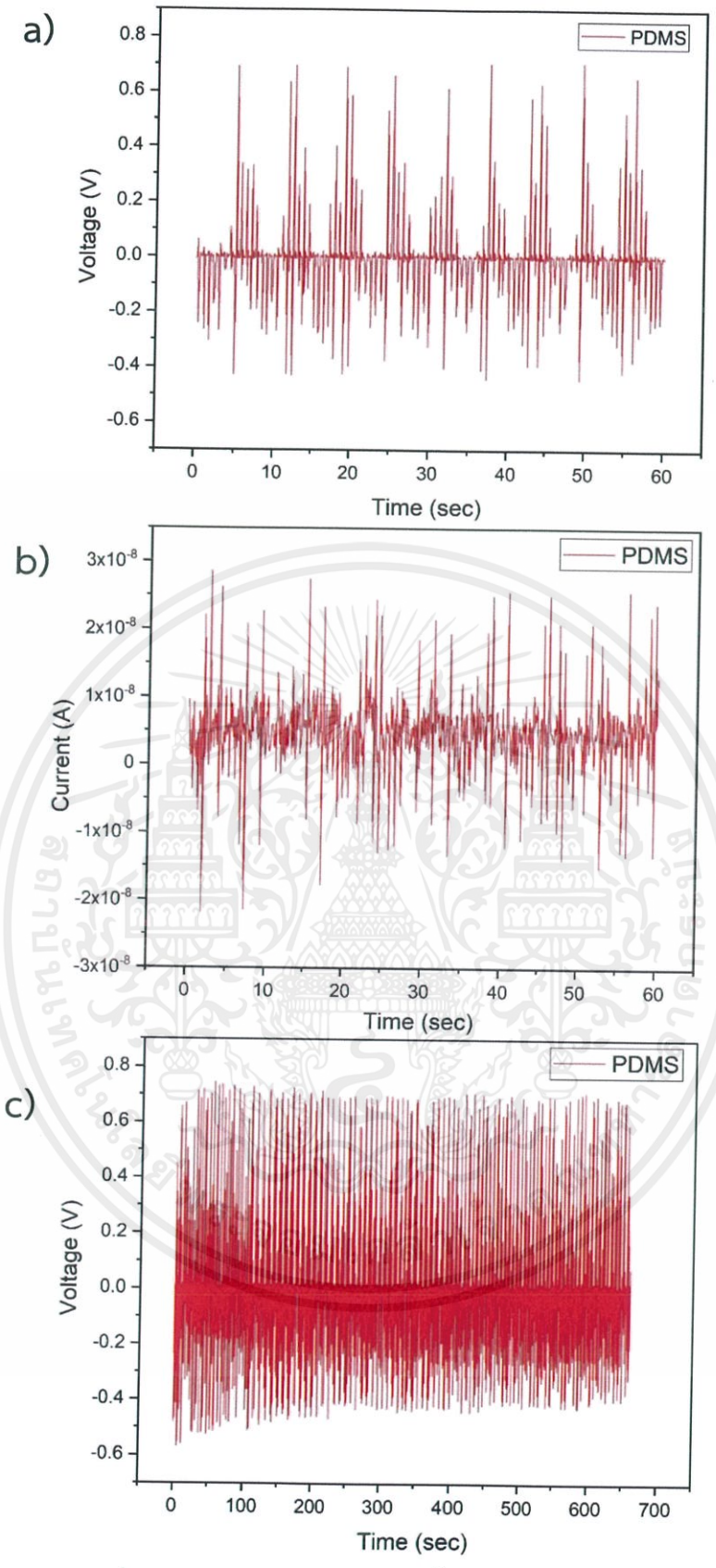
จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกด้วยเครื่อง LCR Meter ที่อุณหภูมิห้องที่ความถี่ต่ำสุดและความสูงสุดพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุทุกตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงซึ่งชิ้นงานที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดคือ PDMS, PDMS/ BT NPs, PDMS/BT NWs และ PDMS/TiO_2 NPs ตามลำดับ ส่วนค่าการส่วนเสียทางไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มที่ลดลงเช่นเดียวกันและลำดับที่มีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกที่น้อยที่สุดคือ PDMS, PDMS/NPs, PDMS/NWs และ PDMS/TiO_2 แต่เมื่อวิเคราะห์ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่อุณหภูมิต่างๆระหว่างความถี่ที่ต่ำสุดและสูงสุดแล้วพบว่าที่อุณหภูมิต่างๆที่ความถี่ต่ำสุดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าที่มากแต่เป็นค่าที่ไม่คงที่และไม่เป็นรูปแบบทำให้มีการเรียงตัวของกราฟแบบสุ่ม ส่วนที่ความถี่สูงสุดที่อุณหภูมิต่างๆจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ต่ำกว่าที่ความถี่ต่ำสุดแต่มีการจัดเรียงตัวที่เป็นรูปแบบและมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับแบบเส้นตรงทำให้ค่าเกิดความเสถียร โดยพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่มีค่ามากที่สุดคือ PDMS, PDMS/BT NPs, PDMS/BT NWs และ PDMS/TiO_2 ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปเป็นส่วนช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้อุปกรณ์ให้เหมาะสมกับค่าความถี่ต่างๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4.2 การวิเคราะห์สมบัติเพียโซอิเล็กทริก

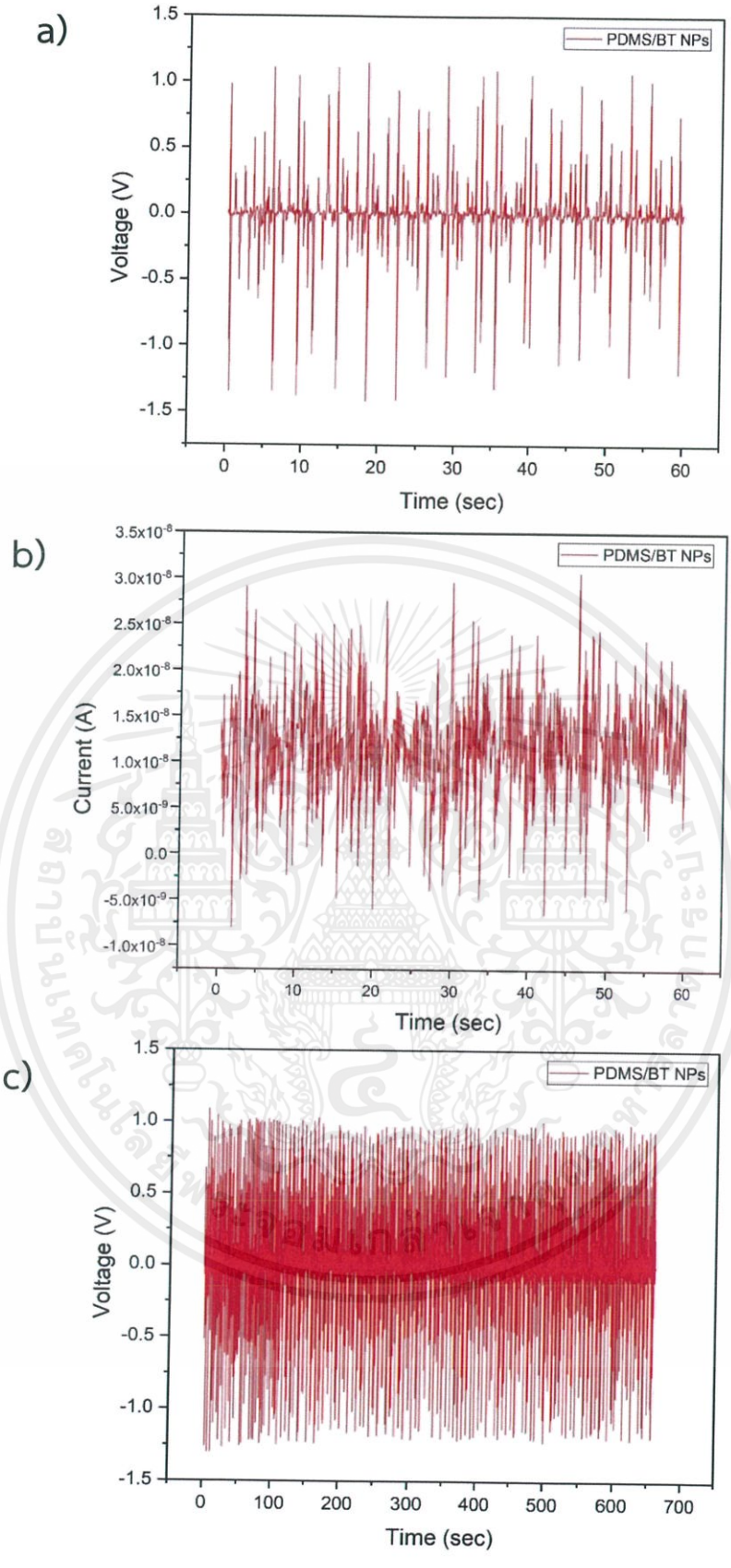
การวิเคราะห์สมบัติเพียโซอิเล็กทริกด้วยเครื่องเคาะจังหวะเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกซึ่งในการทดสอบจะนำชิ้นงานไปติดด้วยเทปทองแดงจากนั้นนำสายไฟมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าซึ่งความถี่ที่ใช้ในการเคาะคือ 1.5Hz โดยจำนวนรอบจะอยู่ที่ประมาณ 90 รอบ/นาที การทดสอบค่าความต่างศักย์และกระไฟฟ้าใช้เวลาประมาณ 60 วินาที ส่วนการทดสอบความล้าของวัสดุจะใช้เวลา11 นาที ซึ่งประมาณ 1000 รอบ ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะเป็นไปตามภาพที่ 4.36 ถึง 4.39 โดยจะแบ่งเป็นตามชิ้นงานนาโนคอมโพสิต ภาพที่ 4.35 ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตพอลีไดเมทิลซิล็อกเซนจากกราฟค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของชิ้นงานมีการเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นรูปแบบในช่วงเวลาต่างๆ กราฟจะค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.15 V ส่วนค่ากระแสไฟฟ้ามีลักษณะที่เป็นรูปแบบมีค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 7.92 nA ต่อมาการวิเคราะห์สมบัติความล้าของชิ้นงานพบว่าชิ้นงานให้ค่าความต่างศักย์ที่สม่ำเสมอตลอดการทดสอบและสามารถใช้งานได้เกินกว่า 1000 รอบ ภาพที่ 4.36 ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตพอลีไดเมทิลซิล็อกเซน/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตจากกราฟค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของชิ้นงานมีการเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นรูปแบบซึ่งค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.32 V ส่วนค่ากระแสไฟฟ้ามีลักษณะที่เป็นรูปแบบซึ่งค่าฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 13.2 nA และการวิเคราะห์สมบัติความล้าของชิ้นงานโดยพบว่ามีค่าความต่างศักย์ที่สม่ำเสมอ ภาพที่ 4.37 ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตพอลีไดเมทิลซิล็อกเซน/เส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตจากกราฟค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของชิ้นงานมีการเพิ่มขึ้นที่สูงซึ่งค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.35 V ส่วนค่ากระแสไฟฟ้ามีลักษณะที่สูงบ้างในบางช่วงซึ่งค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 12.2 nA ส่วนค่าการวิเคราะห์ความล้าของวัสดุก็ให้ค่าที่สม่ำเสมอตลอดการทดสอบ ภาพที่ 4.38 ชิ้นงานนาโนคอมโพสิตพอลีไดเมทิลซิล็อกเซน/อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จากกราฟวิเคราะห์ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของชิ้นงานมีลักษณะเป็นรูปแบบที่ชัดเจนซึ่งค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.25 V ส่วนค่าการวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.58 nA และผลการวิเคราะห์ความล้าของชิ้นงานพบว่าชิ้นงานนี้มีลักษณะของความล้าที่แตกต่างจากชิ้นงานอื่นเพียงเล็กน้อยแต่ให้ค่าของความสม่ำเสมอความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



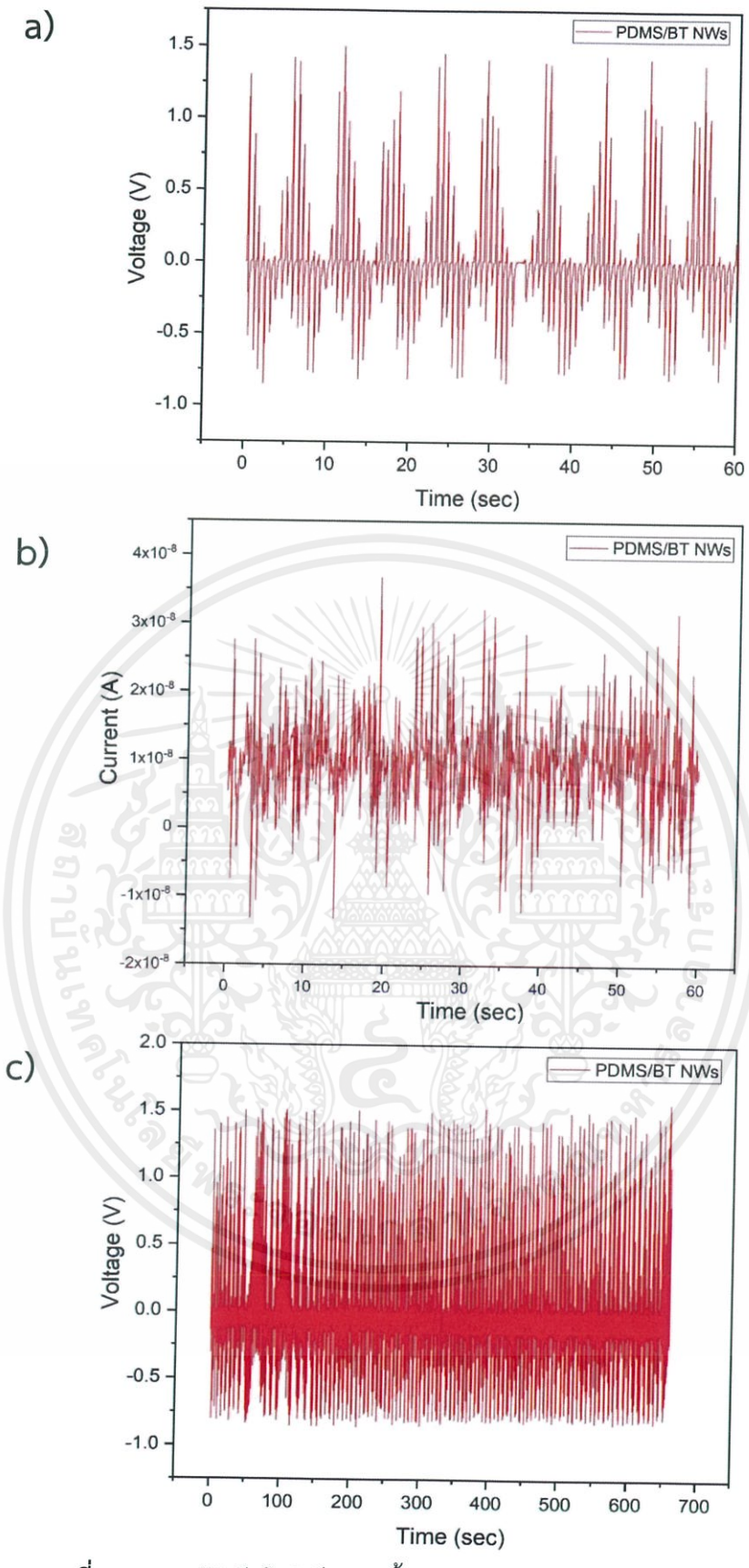
ภาพที่ 4.36 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกชิ้นงานนาโนคอมโพสิต PDMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



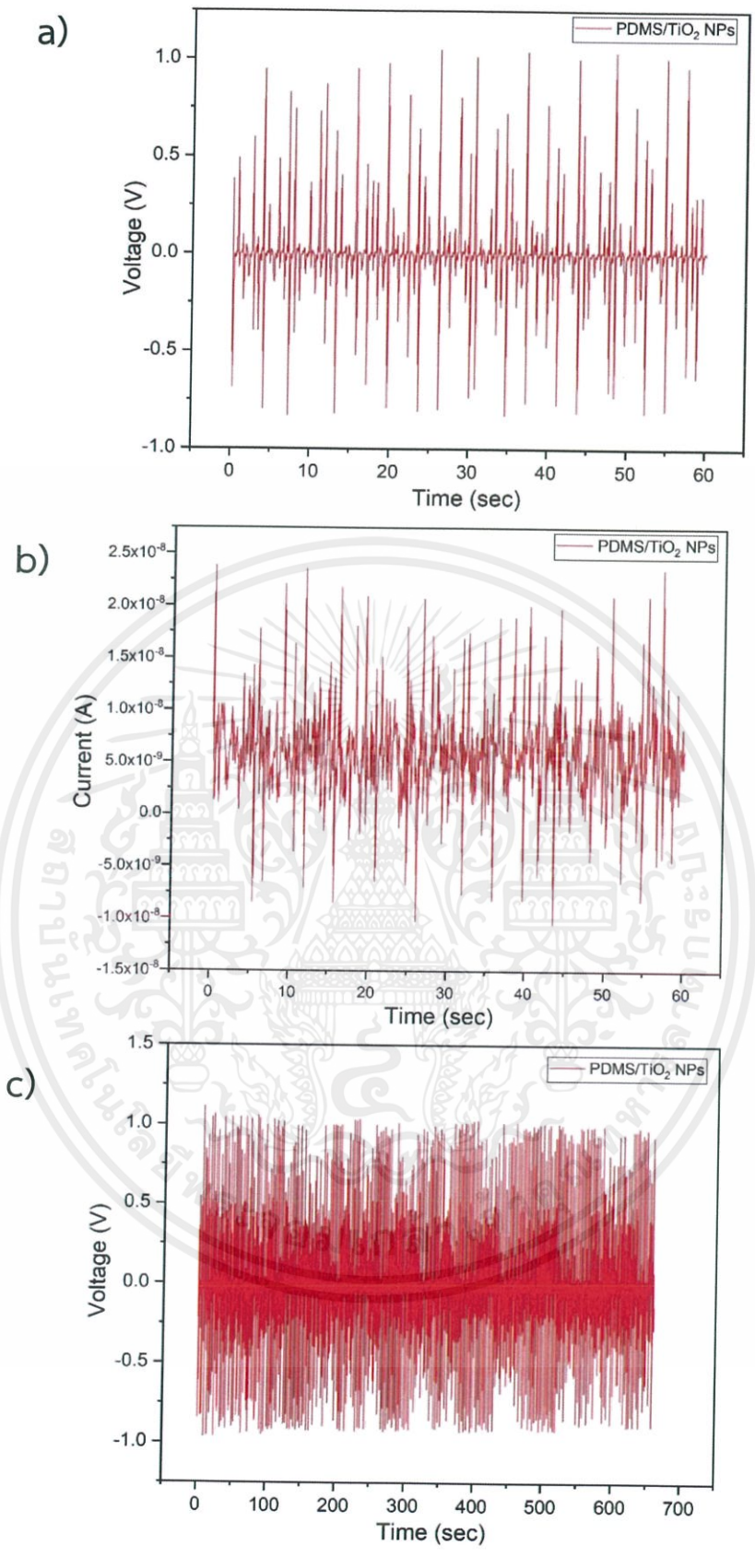
ภาพที่ 4.37 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกชิ้นงานนาโนคอมโพสิต PDMS/BT NPs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.38 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกชิ้นงานนาโนคอมโพสิต PDMS/BT NWs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.39 สมบัติเพียโซอิเล็กทริกชิ้นงานนาโนคอมโพสิต PDMS/TiO2 NPs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางเคมี และสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานนาโนคอมโพสิตพอลีไดเมทิลซิล๊อกเซน/แบเรียมไททาเนต และนาโนคอมโพสิตพอลีไดเมทิลซิล๊อกเซน/อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของชิ้นงานที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิม

5.1 สรุปผลการทดลอง

1) เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการเปรียบเทียบความแตกต่างของสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีความแตกต่างระหว่างสารตัวเติมซึ่งสารตัวเติม 2 ชนิด โดยแบบแรกคืออนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตส่วนแบบที่สองคืออนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์โดยที่สารทั้งสองชนิดเป็นแบบสำเร็จรูปของบริษัท Inframat advanced materials ซึ่งขนาดอนุภาคของแบเรียมไททาเนตอยู่ที่ประมาณ 50 นาโนเมตรและขนาดอนุภาคของไททาเนียมไดออกไซด์ประมาณ 40 นาโนเมตร โดยวัสดุทั้งสองชนิดนี้เปรียบเสมือนตัวแทนของกลุ่มสารที่เป็น 0 มิติ นอกจากงานวิจัยนี้การสังเคราะห์ผงเส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล 2 ขั้นตอนซึ่งจะเปรียบเสมือนกลุ่มวัสดุ 1 มิติ ซึ่งกระบวนการในการสังเคราะห์ขั้นตอนแรกคือเตรียมสารไททาเนียมไดออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้วจึงนำสารที่ได้ไปทำปฏิกิริยากับแบเรียมคลอไรด์จากนั้นทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลในลำดับต่อไป โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นลวดนาโนอยู่ที่ประมาณ 0.12 μm ซึ่งผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคสารตัวเติมก็สรุปได้ว่าสามารถที่จะสังเคราะห์เส้นลวดแบเรียมไททาเนตได้จริงจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

2) การเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตโดยใช้พอลีไดเมทิลซิล๊อกเซนเป็นเมทริกซ์นั้นจะใช้วิธีการหล่อแบบดั้งเดิมซึ่งวิธีการเตรียมคือจะควบคุมมวลรวมของสารให้เท่ากับ 5 กรัม อัตราส่วนของพอลีไดเมทิลซิล๊อกเซนต่อสารที่ทำให้แข็งตัวเท่ากับ 10:1 ส่วนสารเติมควบคุมที่ 5 wt% จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคซึ่งผลที่ได้คือชิ้นงานที่มีการเติมสารตัวเติมเป็นอนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนตมีค่าของสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีกว่าเนื่องจากค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณ 0.32V และกระแสเท่ากับ 13.2nA ซึ่งให้ผลที่ดีและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังมีค่าของเส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตที่ให้ค่าใกล้เคียงส่วนชิ้นงานอื่นคาดการว่าน่าจะมีปัจจัยอื่นๆเข้ามาเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของชิ้นงานวิเคราะห์ได้ เช่น ความบริสุทธิ์ของเส้นลวดนาโนแบเรียมไททาเนตมีการปนเปื้อนของสารอื่นที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสังเคราะห์อาจทำให้ประสิทธิภาพมีลดลงจากที่คาดการไว้ สมบัติพื้นฐานของสารที่มีความเป็นเพียโซอิเล็กทริกที่ต่ำจึงทำให้ประสิทธิภาพต่ำด้วย การกระจายตัวของสารตัวเติมในชิ้นงาน เป็นต้น

3) ชิ้นงานนาโนคอมสิตที่เตรียมด้วยพอลีไดเมทิลซิล็อกเซนโดยมีสารตัวเติมเป็นแบเรียมไททาเนตและไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมนั้นสามารถทำให้สารตัวเติมเกาะตัวกับเมทริกซ์ได้โดยผลวิเคราะห์ทางโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกล่าวคือลักษณะของสารตัวเติมมีการเกาะตัวและกระจายตัวอยู่ชิ้นงานได้หลายบริเวณ แต่เนื่องจากปัจจัยหลายๆอาจจะทำให้สารตัวเติมไม่สามารถกระจายตัวได้ดีพอจนทำให้เกิดการตกตะกอนของสารได้และทำให้คุณสมบัติอื่นๆของสารมีค่าเปลี่ยนแปลงไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) สำหรับเทคนิคการเตรียมชิ้นงานด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมซึ่งในโครงงานวิจัยนี้จะเตรียมที่อุณหภูมิห้องอาจทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อวัสดุและทำให้สมบัติต่างมีค่าที่เปลี่ยนแปลง

2) การเตรียมชิ้นงานก่อนการวัดสมบัติทางไฟฟ้านั้นควรที่จะเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้าให้เกิดการโพลาไรเซชั่นก่อนเพื่อให้ผลลัพท์ที่ดียิ่งขึ้นเมื่อวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆทั้งเพียโซอิเล็กทริกและค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

3) การเติมสารตัวเติมควรเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของสารในชิ้นงานให้มากยิ่งขึ้นเพื่อให้ความสามารถของชิ้นงานดีมากกว่าเดิมเมื่อวัดสมบัติต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] [Online]. Available: http://www.egat.co.th/en

[2] Liao, Q., Zhang, Z., Zhang, X., Mohr, M., Zhang, Y. and Fecht, H.J., 2014. Flexible piezoelectric nanogenerators based on a fiber/ZnO nanowires/paper hybrid structure for energy harvesting. *Nano Research*, *7*(6), pp.917-928.

[3] [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Nanogenerator

[4] [Online]. Available: https://scienceblog.com/wpcontent/uploads/2018/04/pyroelectric.jpg

[5] [Online]. Available: https://piezo.com/pages/history-of-piezoelectricity

[6] Mason, W.P., 1981. Piezoelectricity, its history and applications. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *70*(6), pp.1561-1566.

[7] Baek, C., Yun, J.H., Wang, H.S., Wang, J.E., Park, H., Park, K.I. and Kim, D.K., 2018. Enhanced output performance of a lead-free nanocomposite generator using BaTiO3 nanoparticles and nanowires filler. *Applied Surface Science*, *429*, pp.164-170.

[8] Lee, E.J., Kim, T.Y., Kim, S.W., Jeong, S., Choi, Y. and Lee, S.Y., 2018. High-performance piezoelectric nanogenerators based on chemically-reinforced composites. *Energy & Environmental Science*, *11*(6), pp.1425-1430.

[9] กันตภณ เอมปรากฏ, "ผลของการบำบัดด้วยความร้อนที่มีต่อสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพของอัลลอย โคบอลต์ – โครเมียม สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอวัยวะฝังใน", คณะวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2016)

[10] [Online]. Available: https://stic.mfu.ac.th/stic-analysis-tools/stic-tool-detail/17.html

[11] [Online]. Available: https://nuc2011.wordpress.com/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[12] Nayak, S., Chaki, T.K. and Khastgir, D., 2014. Development of flexible piezoelectric poly (dimethylsiloxane)–BaTiO3 nanocomposites for electrical energy harvesting. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *53*(39), pp.14982-14992.

[13] สุวภัทร คงสบาย, "การสังเคราะห์และสมบัติของแบเรียมไททาเนต/อิพอกซีเรซินนาโนคอมโพสิตสำหรับใช้งานเป็นตัวเก็บประจุความหนาแน่นพลังงานสูง", คณะวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายปฏิภาณ คงใจมั่น

วันเกิด 22 พฤษภาคม 2540

ภูมิลำเนา จังหวัดสุรินทร์

ที่อยู่ปัจจุบัน 71/6 ซอยรังสิต-นครนายก 27 ตำบลประชาธิปัตย์ อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12130

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2557 แผนเรียนวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์
โรงเรียนอุดมวิทยา อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

พ.ศ. 2561 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนลียีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้