



การปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของแบคทีเรียเซลลูโลสโดยใช้ออกไซด์
นาโนซีทสำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก

Enhancing of electrical output performance for bacterial cellulose-
based triboelectric nanogenerator by adding dielectric oxide nanosheet

นางสาว จูติรัตน์ พิสิษฐ์ภาคิน

นางสาว ณัฏชา นวโฆษิตกุล

นางสาว สุธาศินี โชติประทุม

โครงการทางวัสดุศาสตร์ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2564



การปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของแบคทีเรียเซลลูโลสโดยใช้ออกไซด์
นาโนซีทสำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก

Enhancing of electrical output performance for bacterial cellulose-
based triboelectric nanogenerator by adding dielectric oxide nanosheet

นางสาว จูติรัตน์ พิสิษฐ์ภาคิน
นางสาว ณิชชา นวโฆษิตกุล
นางสาว สุธาศินี โชติประทุม

โครงการทางวัสดุศาสตร์ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2564

ชื่อเรื่อง

การปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของแบคทีเรียเซลลูโลส
โดยใช้ออกไซด์นาโนซีทสำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก
Enhancing of electrical output performance for bacterial cellulose-
based triboelectric nanogenerator by adding dielectric oxide
nanosheet

ผู้วิจัย

นางสาวฐิติรัตน์ พิสิษฐ์ภาคิน

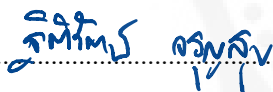
นางสาวณัฏชา นวโฆษิตกุล

นางสาวสุธาศินี โชติประทุม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. ฐิติรัตน์ จรุงสุข

โครงการทางวัสดุศาสตร์นี้ ให้นับเป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. ฐิติรัตน์ จรุงสุข)

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของแบคทีเรียเซลลูโลสโดยใช้ออกไซด์นาโนชีทสำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (Enhancing of electrical output performance for bacterial cellulose-based triboelectric nanogenerator by adding dielectric oxide nanosheet) เพื่อการสำเร็จการศึกษาของนักศึกษาระดับปริญญาตรี สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจาก ได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดีจาก ดร. จูติรัตน์ จรุงสุข ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ความรู้ ข้อคิด ตำแน่ง และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนกระทั่งการวิจัยครั้งนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณแหล่งทุนวิจัยจากสถาบันการวิจัยแห่งชาติ (วช) และมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ขอขอบคุณความร่วมมือและช่วยเหลือจากทีมวิจัยจากหน่วยวิจัยวัสดุขั้นสูงของ 3 สถาบันร่วม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนและนาโนเทค

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและผู้สนใจศึกษาต่อไป

นางสาว จูติรัตน์ พิสิษฐ์ภาคิน

นางสาว ณิชชา นวโมชิตกุล

นางสาว สุธาศินี โชติประทุม

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของแบคทีเรียเซลลูโลส โดยใช้ออกไซด์นาโนซีทสำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก โทรโบอิเล็กทริก	
ผู้วิจัย	นางสาว จิตติรัตน์ พิสิษฐ์ภาคิน	61102010285
	นางสาว ณัฏชา นวโฆษิตกุล	61102010286
	นางสาว สุธาศินี โชติประทุม	61102010514
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วัสดุศาสตร์)	
ปีการศึกษา	2564	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. จิตติรัตน์ จรุงสุข	

บทคัดย่อ

อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator; TENG) ที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลจากการสัมผัสแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากสำหรับการเป็นเซลล์ไฟฟ้าขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดพกพาและสวมใส่ได้โดยเฉพาะอุปกรณ์ทางการแพทย์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การสร้าง TENG จากการใช้วัสดุทางธรรมชาติแบคทีเรียเซลลูโลส (BC) เป็นชั้นสัมผัสหลัก และทำการปรับปรุงประสิทธิภาพค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของ BC ด้วยการเติมสารประกอบออกไซด์ไดอิเล็กทริกนาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ ($A_xM_yTi_{2-y}O_4$) 2 ชนิดหลัก ได้แก่ $CS_{0.7}M_{0.35}Ti_{1.65}O_4$, $K_{0.8}M_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ($M = Zn, Ni, CO$) โดยทำการเตรียมผ่านกระบวนการสังเคราะห์แบบบดละเอียด (Solid State reaction) การแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) การแยกชั้นของซีท (Exfoliation) และขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ โดยเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีทในอัตราส่วน 1.5, 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าชนิดและปริมาณของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทในฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสส่งผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและผลทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าขาออก (V_{OC}) กระแสไฟฟ้าขาออก (I_{SC}) และกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max}) โดย เมื่อเติม $CS_{0.7}Ni_{0.35}Ti_{1.65}O_4$ ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ส่งผลให้ได้ค่า V_{OC} I_{SC} และ P_{max} เท่ากับ 100.74 V 62.07 μA และ 39.6 μW ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของโลหะหลัก พบว่า $K_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ให้ค่าการส่งออกทางไฟฟ้า $V_{OC} = 54.76$ V $I_{SC} = 49.34$ μA ซึ่งมากกว่าการเติมสารประกอบ $CS_{0.7}Ni_{0.35}Ti_{1.65}O_4$ ที่อัตราส่วน 3% เท่ากัน งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ในการนำมาเป็นอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและสวมใส่ได้

คำสำคัญ : อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก, แบคทีเรียเซลลูโลส, ออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์

Title	Enhancing of electrical output performance for bacterial cellulose-based triboelectric nanogenerator by adding dielectric oxide nanosheet	
Authors	Thitirat Pisitpakin	61102010285
	Natcha Navakhositkul	61102010286
	Sutasinee Chotipratoom	61102010514
University	Srinakharinwirot University	
Academic Year	2020	
Advisor	Dr. Thitirat Charoonsuk	

Abstract

Triboelectric nanogenerator (TENG) that can harvest the mechanical energy by touching and transform into electricity has increased much attention for driving the portable/wearable electronics especially in medical devices. . This research provide the creation of TENG by using natural bacterial cellulose (BC) as the main friction layer and adjusting the electric output performance of BC by adding the 2 main types of $A_xM_yTi_{2-y}O_4$ Lepidocrocite structure oxide nanosheet compounds, $CS_{0.7}M_{0.35}Ti_{1.65}O_4$, $K_{0.8}M_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ($M = Zn, Ni, CO$). The nanosheet was synthesized by solid-State reaction, proton exchange and exfoliation. The composite films were prepared by casting via adding oxide nanosheet compound in ratio at 1.5, 3, 5, 10 and 20 % by volume. It was found that the quantity of oxide nanosheet in bacterial cellulose film affects to dielectric constant and electrical output, including output voltage (V_{OC}), output current (I_{SC}) and maximum power (P_{max}). According to the results, adding $CS_{0.7}Ni_{0.35}Ti_{1.65}O_4$ at 1.5 % by volume can provide the maximum V_{OC} , I_{SC} and P_{max} about 100.74 V, 62.07 μA and 39.6 μW , respectively. According to the comparison of the metal types, the $K_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ can provide the $V_{OC} = 54.76$ V | $I_{SC} = 49.34$ μA , which is higher than that of $CS_{0.7}Ni_{0.35}Ti_{1.65}O_4$ at the same 3% concentration. This research shows the potential of composite bacterial cellulose and dielectric lepidocrocite oxide for using in the power supply for portable and wearable electronic devices.

Keywords: Triboelectric nanogenerators, bacterial cellulose, oxide nanosheet, Lepidocrocite structure

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหางานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 อุปกรณ์ Energy harvesting	5
2.2 อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กทริโบอิเล็กทริก.....	7
2.2.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กทริโบอิเล็กทริก.....	7
2.3 วัสดุทริโบอิเล็กทริก.....	10
2.4 เซลลูโลส (Cellulose)	11
2.4.1 แบคทีเรียเซลลูโลส	15
2.5 วัสดุเชิงประกอบ (Composite Material)	20
2.5.1 สารเนื้อหลัก (Matrix)	20
2.5.2 เฟสกระจาย (Dispersed phase)	20
2.5.3 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ	21
2.6 วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric Material)	23
2.7 วัสดุนาโนไดอิเล็กทริก	31
2.8 โครงสร้างออกไซด์นาโนชีตแบบโครงสร้างเลพิโดโครไซต์ (Lepidocrocite)	32

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	34
3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มแบบคทีเรียเซลล์โลส	34
3.1.1 อุปกรณ์	34
3.1.2 เครื่องมือ.....	34
3.1.3 สารเคมี	34
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มแบบคทีเรียเซลล์โลส	35
3.3 อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท	36
3.3.1 อุปกรณ์	36
3.3.2 เครื่องมือ	36
3.3.3 สารเคมี	36
3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท.....	35
3.4.1 การเตรียมสารประกอบออกไซด์โครงสร้างเลพิโดโครไซต์ ($\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)	36
3.4.2 การเตรียมสารประกอบออกไซด์โครงสร้างเลพิโดโครไซต์ ($\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$).....	39
3.4.3 การเตรียมสารประกอบออกไซด์โครงสร้างเลพิโดโครไซต์ ($\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)	42
3.4.4 การเตรียมสารประกอบออกไซด์โครงสร้างเลพิโดโครไซต์ ($\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) ..	45
3.4.5 การเตรียมสารประกอบออกไซด์โครงสร้างเลพิโดโครไซต์ ($\text{K}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)	48
3.5 อุปกรณ์ เครื่องมือและสารที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของแบบคทีเรียเซลล์โลส กับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท	51
3.5.1 อุปกรณ์	51
3.5.2 เครื่องมือ	51
3.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	51
3.5.4 สารเคมี.....	51

สารบัญ

	หน้า
3.6 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลล์โลสกับ	
สารประกอบออกไซด์นาโนซีท	52
3.7 เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์	53
3.7.1 การวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและ	
วิธีเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-VIS Spectroscopy).....	53
3.7.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน	
(Transmission Electron Microscope ;TEM)	53
3.7.3 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิควิเคราะห์	
การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction ;XRD)	54
3.7.4 การพิสูจน์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared	
spectroscopy (FTIR)	55
3.7.5 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties).....	57
3.7.6 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า.....	57
3.7.7 การวัดกระแสไฟฟ้า.....	57
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	58
4.1 ศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์	58
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์ด้วยกระบวนการสังเคราะห์	
ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction)	58
4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์โครงสร้าง	
แบบเลพิโดโครไซต์จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	
(Solid-state reaction) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	
(Scanning electron microscope: SEM)	61

สารบัญ

หน้า

4.1.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารประกอบออกไซด์โครงสร้าง แบบเลพิโดโครไซต์จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction technique: XRD)	63
4.2 ศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์นาโนชีต (Oxide Nanosheets) โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์	65
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพและปริมาณของสารประกอบออกไซด์ด้วย กระบวนการการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ครั้งที่ 1 กับกรดไฮโดรคลอริก (HCl)	65
4.2.2 ลักษณะทางกายภาพและปริมาณของสารประกอบออกไซด์ด้วย กระบวนการการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ครั้งที่ 1 กับกรดอะซิติก (CH ₃ COOH)	72
4.2.3 ลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนชีตด้วย กระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation).....	77
4.2.4 ผลการตรวจสอบการเกิดปรากฏการณ์ทินดอลล์ (Tyndall effect)ของสารประกอบ ออกไซด์นาโนชีต.....	85
4.2.5 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์นาโนชีต โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์จากกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope:TEM).....	86
4.2.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิค อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-VIS Spectroscopy) ของสารประกอบออกไซด์นาโนชีตโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์	88

สารบัญ

หน้า

4.2.7	ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิธีเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS Spectroscopy) เพื่อหาค่า Energy gap (Eg) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์	95
4.3	ผลการศึกษาการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลส(Bacterial Cellulose) กับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Oxide Nanosheets) โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์	95
4.3.1	ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส (BC)	95
4.3.2	ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท	95
4.3.3	ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)	102
4.3.4	ผลการศึกษาการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์.....	103
4.3.5	ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction technique: XRD)...	106
4.3.6	ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total Reflectance : ATR-IR)	108

สารบัญ

หน้า

4.3.7 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส คอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์.....	110
4.4 ผลการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้า (Output Voltage) และกระแสไฟฟ้า (Output Current) ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์	114
4.5 ผลการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าส่งออกของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิต กับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์	120
บทที่ 5 ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	123
5.1 สรุปผลการทดลอง	123
5.1.1 จากการศึกษาและสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์โครงสร้าง แบบเลพิโดโครไซต์	123
5.1.2 จากการศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Oxide Nanosheets)	124
5.1.3 จากการศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบไทรโบอิเล็กทริก ระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับ สารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Oxide Nanosheets)...	124
5.1.4 การสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator)	125
5.1.5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณของวัสดุเชิงประกอบ ระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Oxide Nanosheets) ต่อสมบัติไดอิเล็กทริก	125
5.1.6 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณของวัสดุเชิงประกอบ ระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Oxide Nanosheets) ต่อค่าการส่งออกทางไฟฟ้า	125
5.2 ข้อเสนอแนะ	126

สารบัญรูป

	หน้า
ภาพประกอบ 2.1 อุปกรณ์ Energy Harvesting	5
ภาพประกอบ 2.2 โครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก	7
ภาพประกอบ 2.3 ตัวอย่างโครงสร้างและหลักการทำงานของ TENG	8
ภาพประกอบ 2.4 โครงสร้าง TENG 4 รูปแบบ	9
ภาพประกอบ 2.5 Triboelectric series แสดงแนวโน้มการให้-รับอิเล็กตรอนของวัสดุทั่วไป	10
ภาพประกอบ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูลอส	11
ภาพประกอบ 2.7 ก. แผนผังโครงสร้างของ TENG ข. ภาพ SEM ของฟิล์ม CNF-PEI-Ag ค.แผนภาพจริงของ TENG	13
ภาพประกอบ 2.8 ก. กลไกของประสิทธิภาพการส่งออก ข. แรงดันไฟวงจรเปิด ค. กระแสไฟลัดวงจร และค. ค่าเอาต์พุตของ TENG ที่ใช้ CNF ก่อนและหลังการปรับเปลี่ยน	13
ภาพประกอบ 2.9 แสดงเอาต์พุตโวลเทจของ TENG ที่ทำจากฟิล์มคู่ต่างๆ ของ a) CNF/Cu, b) methyl-CNF/Cu, c) nitro-CNF/Cu, d) FEP/Cu, e) CNF/CNF, f) nitro- CNF/ CNF, g) Methyl-CNF/CNF, h) nitro-CNF/methyl-CNF, i) FEP/CNF และ j) FEP/methyl-CNF k) เอาต์พุต แรงดันไฟฟ้าระยะยาวของ TENG ที่ทำจากคู่ nitro-CNF/methyl-CNF	14
ภาพประกอบ 2.10 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของแบคทีเรียเซลลูลอสบนพื้นผิว ก. 50,000× ข. 10,000× และแบบตัดขวาง ค. 20,000× ง. 10,000×	15
ภาพประกอบ 2.11 ก. แบคทีเรียเซลลูลอส ข. โครงสร้างอุปกรณ์ TENG ค. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด และค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุด ง. ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า	16
ภาพประกอบ 2.12 แสดงวิธีการสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูลอส	17
ภาพประกอบ 2.13 ความสัมพันธ์ของการสร้างเอาต์พุตกับลักษณะโครงสร้าง ก. แรงดันเอาต์พุตที่สร้างขึ้น ข. การเปรียบเทียบอัตราส่วนสูงสุดภายใต้รัศมีความโค้งที่แตกต่างกัน ค. แรงดันไฟขาออกที่สร้างขึ้น ง.การเปรียบเทียบความหนาแน่นของแรงดันไฟฟ้าภายใต้ส่วนแรงเสียดทานที่แตกต่างกัน	19
ภาพประกอบ 2.14 วัสดุเชิงประกอบ	20
ภาพประกอบ 2.15 แสดงการจัดเรียงตัวของเฟสกระจายในวัสดุหลัก	20
ภาพประกอบ 2.16 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์	21
ภาพประกอบ 2.17 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์	21
ภาพประกอบ 2.18 วัสดุเชิงประกอบโลหะ	22

สารบัญรูป

หน้า

ภาพประกอบ 2.19 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก	22
ภาพประกอบ 2.20 ก. กระบวนการผลิตอุปกรณ์กำเนิดพลังงานนาโนที่ใช้กระดาษเพียโซอิเล็กทริก BTO /BC ข. แรงดันไฟฟ้าออกของกระดาษแบบเพียโซอิเล็กทริก BTO/BC ค. แรงดันไฟฟ้าออกเฉลี่ยบนสนามไฟฟ้าแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	24
ภาพประกอบ 2.21 ก. ความหนาแน่นกระแสและ ข.ความหนาแน่นกำลัง BTO/BC และ ค. ความหนาแน่นกระแสและ ง. ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของ BTO/PDMS	24
ภาพประกอบ 2.22 ภาพประกอบทางเคมีของ BC บริสุทธิ์และการผลิตคอมโพสิต BC-CNT-PPy ที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้า	25
ภาพประกอบ 2.23 ก. แสดงภาพประกอบการทำกระดาษ BC คอมโพสิต ข. แสดงโครงสร้างและ กลไกการทำงานของ BC-TENG ค. ประสิทธิภาพเอ้าท์พุตของ TENG แบบต่างๆ ง. แรงดันไฟฟ้าออกและกระแสของ BC-TENG	26
ภาพประกอบ 2.24 กระบวนการผลิตไฮโดรเจลนาโนคอมโพสิต BC/ZnO (ZBC)	27
ภาพประกอบ 2.25 แรงดันเอ้าท์พุตและกระแสของ TENG ที่สร้างขึ้นจากฟิล์ม BC และ ZBC	27
ภาพประกอบ 2.26 ค่าแรงดัน และกระแสไฟฟ้าออกของ TENG phosphorylated BC (PBC) (ก,ข) และ TENG sulfonated BC (SBC) (ค,ง)	28
ภาพประกอบ 2.27 SEM ของ BC phosphorylated BC (PBC) ที่บำบัดที่ 130 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย: 15,000x (ซ้าย) และ 30,000 (ขวา) และ sulfonated BC (SBC) ที่แช่ในสารละลาย NaIO ₄ 48 ชั่วโมงด้วยความเข้มข้น 0.02M และ 0.04M	29
ภาพประกอบ 2.28 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มคอมโพสิต	30
ภาพประกอบ 2.29 วัสดุนาโนระบบ 0D, 1D และ 2D	31
ภาพประกอบ 2.30 การจำกัดมิติในระบบศูนย์มิติ	31
ภาพประกอบ 2.31 การจำกัดมิติในระบบหนึ่งมิติ	31
ภาพประกอบ 2.32 การจำกัดมิติในระบบสองมิติ	32
ภาพประกอบ 2.33 แสดงโครงสร้างเลพิโดโครไซด์	32
ภาพประกอบ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มแบคทีเรียเซลล์ูโลส	35
ภาพประกอบ 3.2 แสดงแผนภาพสรุปขั้นตอนในการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ Ni _{0.35} Ti _{1.65} O ₄	38
ภาพประกอบ 3.3 แสดงแผนภาพสรุปขั้นตอนในการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ Ni _{0.4} Ti _{1.6} O ₄	41

สารบัญรูป

หน้า

ภาพประกอบ 3.4 แสดงแผนภาพสรุปขั้นตอนในการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ $\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_2$	44
ภาพประกอบ 3.5 แสดงแผนภาพสรุปขั้นตอนในการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ $\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$	47
ภาพประกอบ 3.6 แสดงแผนภาพสรุปขั้นตอนในการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ $\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$	50
ภาพประกอบ 3.7 แสดงขั้นตอนการเตรียมแบคทีเรียเซลล์โลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท	52
ภาพประกอบ 3.8 เครื่อง UV-VIS Spectroscopy	53
ภาพประกอบ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (Transmission Electron Microscope ;TEM)	54
ภาพประกอบ 3.10 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD)	55
ภาพประกอบ 3.11 FT-IR Fourier Transform Infrared Spectrometer	56
ภาพประกอบ 3.12 เครื่องวัดค่าประจุไฟฟ้า (LCR Meter)	56
ภาพประกอบ 3.13 เครื่องออสซิลอโคป (Digital Oscilloscope)	57
ภาพประกอบ 3.14 เครื่อง Electroscopy	57
ภาพประกอบ 4.1 แสดงภาพผงของสารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ที่ผ่านการสังเคราะห์ ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ของสารตั้งต้นหลังการเผาแคลไซน์	58
ภาพประกอบ 4.2 แสดงภาพผงของสารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ที่ผ่านการสังเคราะห์ ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ของสารตั้งต้นหลังการเผาแคลไซน์	59
ภาพประกอบ 4.3 แสดงภาพผงของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ที่ผ่านการสังเคราะห์ ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ของสารตั้งต้นหลังการเผาแคลไซน์	59
ภาพประกอบ 4.4 แสดงภาพผงของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ที่ผ่านการสังเคราะห์ ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ของสารตั้งต้นหลังการเผาแคลไซน์	60
ภาพประกอบ 4.5 แสดงภาพผงของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ที่ผ่านการสังเคราะห์ ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ของสารตั้งต้นหลังการเผาแคลไซน์	61

สารบัญรูป

หน้า

ภาพประกอบ 4.6 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$	62
ภาพประกอบ 4.7 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$	62
ภาพประกอบ 4.8 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique: XRD) ของสารประกอบออกไซด์โครงสร้างแบบเลฟิโดโครไซต์ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction)	64
ภาพประกอบ 4.9 แสดงแบบจำลองโครงสร้างผลึกก่อนและหลังกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) ของสารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$	65
ภาพประกอบ 4.10 สารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	66
ภาพประกอบ 4.11 แสดงแบบจำลองโครงสร้างผลึกก่อนและหลังกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) ของสารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$	66
ภาพประกอบ 4.12 สารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	67
ภาพประกอบ 4.13 แสดงแบบจำลองโครงสร้างผลึกก่อนและหลังกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) ของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$	68
ภาพประกอบ 4.14 สารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน.....	68
ภาพประกอบ 4.15 แสดงแบบจำลองโครงสร้างผลึกก่อนและหลังกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) ของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$	69
ภาพประกอบ 4.16 สารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน	70
ภาพประกอบ 4.17 แสดงแบบจำลองโครงสร้างผลึกก่อนและหลังกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) ของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$	70
ภาพประกอบ 4.18 สารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน	71
ภาพประกอบ 4.19 สารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน	72
ภาพประกอบ 4.20 สารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน	73
ภาพประกอบ 4.21 สารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน	74

สารบัญรูป

	หน้า
ภาพประกอบ 4.22 สารประกอบออกไซด์ $K_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน	75
ภาพประกอบ 4.23 สารประกอบออกไซด์ $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน	76
ภาพประกอบ 4.24 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบออกไซด์ ($H_{0.7}Ni_{0.35}Ti_{1.65}O_4$) ในกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) และสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($Ni_{0.35}Ti_{1.65}O_4$) ^{0.7-} ในกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation)	78
ภาพประกอบ 4.25 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ทำปฏิกิริยา ครบระยะเวลา 7 วัน	78
ภาพประกอบ 4.26 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบออกไซด์ ($H_{0.7}Co_{0.35}Ti_{1.65}O_4$) ในกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) และสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($Co_{0.35}Ti_{1.65}O_4$) ^{0.7-} ในกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation)	79
ภาพประกอบ 4.27 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ทำปฏิกิริยา ครบระยะเวลา 7 วัน	80
ภาพประกอบ 4.28 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบออกไซด์ ($H_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ในกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) และสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ^{0.8-} ในกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation)	81
ภาพประกอบ 4.29 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ทำปฏิกิริยา ครบระยะเวลา 7 วัน	81
ภาพประกอบ 4.30 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบออกไซด์ ($H_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ในกระบวนการ การแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) และสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ^{0.8-} ในกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation)	82
ภาพประกอบ 4.31 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ทำปฏิกิริยาครบ ระยะเวลา 7 วัน	83
ภาพประกอบ 4.32 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบออกไซด์ ($H_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ในกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) และสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ^{0.8-} ในกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation)	8

สารบัญรูป

หน้า

ภาพประกอบ 4.33 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ทำปฏิกิริยาครบ ระยะเวลา 7 วัน	84
ภาพประกอบ 4.34 ภาพแสดงการยิงเลเซอร์ในสารละลายคอลลอยด์ของสารประกอบ ออกไซด์นาโนซีท.....	86
ภาพประกอบ 4.35 ภาพแสดงปรากฏการณ์ทินดอลล์ในสารละลายคอลลอยด์ของสารประกอบ ออกไซด์นาโนซีท.....	86
ภาพประกอบ 4.36 ภาพถ่าย TEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (ก) $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ (ข) $(\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ (ค) $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ (ง) $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ และ (จ) $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$	87
ภาพประกอบ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และ ค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$	88
ภาพประกอบ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และ ค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$	90
ภาพประกอบ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และ ค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$	91
ภาพประกอบ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และ ค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$	92
ภาพประกอบ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และ ค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$	93
ภาพประกอบ 4.42 แสดงค่า Energy gap ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีททั้ง 5 ชนิด คือ $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$, $(\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$, $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$, $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ และ $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$	94
ภาพประกอบ 4.43 ภาพ SEM ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์ นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	102
ภาพประกอบที่ 4.44 ภาพ SEM ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์ นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	103

สารบัญรูป

หน้า

ภาพประกอบ 4.45 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ^{0.7-} ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.....	104
ภาพประกอบ 4.46 การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C), ออกซิเจน (O), นิกเกิล (Ni), ไทเทเนียม (Ti) และ ซีเซียม (Cs) ในแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ^{0.7-} ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.....	105
ภาพประกอบ 4.47 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ^{0.7-} ที่ 1.5, 5 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	107
ภาพประกอบ 4.48 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ^{0.7-} ที่ 3 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.....	108
ภาพประกอบ 4.49 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ^{0.7-} , ($\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) ^{0.8-} และ ($\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) ^{0.8-} และ ($\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) ^{0.8-}	109
ภาพประกอบ 4. 50 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์เทียบกับแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ^{0.7-}	111
ภาพประกอบ 4.51 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์เทียบกับแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ^{0.7-}	112
ภาพประกอบ 4.52 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์เทียบกับแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) ^{0.8-}	114

สารบัญรูป

หน้า

ภาพประกอบ 4.53 แสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าโดยแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ^{0.7-} ที่อัตราส่วน 1.5, 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ	
(ก) ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและ (ข) ค่ากระแสไฟฟ้าส่งออก	115
ภาพประกอบ 4.54 แสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าโดยแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ^{0.7-} ที่อัตราส่วน 1.5, 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ	
(ก) ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและ (ข) ค่ากระแสไฟฟ้าส่งออก.....	116
ภาพประกอบ 4.55 แสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าโดยแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) ^{0.8-} ที่อัตราส่วน 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ (ก) ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและ (ข) ค่ากระแสไฟฟ้าส่งออก	117
ภาพประกอบ 4.56 แสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าโดยแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) ^{0.8-} ที่อัตราส่วน 1.5, 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ (ก) ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและ (ข) ค่ากระแสไฟฟ้าส่งออก	118
ภาพประกอบ 4.57 แสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าโดยแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) ^{0.8-} ที่อัตราส่วน 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ (ก) ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและ (ข) ค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกภาพประกอบ 4.58 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าส่งออก กระแสไฟฟ้าส่งออกและกำลังไฟฟ้าส่งออกสูงสุด ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์	119
ภาพประกอบ 4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าส่งออก กระแสไฟฟ้าส่งออกและกำลังไฟฟ้าส่งออกสูงสุด ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ^{0.7-} ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	12

สารบัญรูป

หน้า

ภาพประกอบ 4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าส่งออก กระแสไฟฟ้าส่งออก และกำลังไฟฟ้าส่งออกสูงสุด ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบ ออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ^{0.7-} ที่ 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	121
ภาพประกอบ 4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าส่งออก กระแสไฟฟ้าส่งออกและ กำลังไฟฟ้าส่งออกสูงสุด ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ^{0.7-} ที่ 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	122



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบแสดงเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปเมื่อผ่านกระบวนการการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ระหว่างกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดอะซิติก (CH ₃ COOH)	77
ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะสารในปฏิกิริยาแยกชั้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ทำปฏิกิริยา (Exfoliation) ครบระยะเวลา 7 วัน	85
ตารางที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส	95
ตารางที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสโพลีเมอร์กับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Ni _{0.35} Ti _{1.65} O ₄) ^{0.7-}	96
ตารางที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสโพลีเมอร์กับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Co _{0.35} Ti _{1.65} O ₄) ^{0.7-}	97
ตารางที่ 4.6 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสโพลีเมอร์กับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Zn _{0.4} Ti _{1.6} O ₄) ^{0.8-}	98
ตารางที่ 4.7 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสโพลีเมอร์กับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Ni _{0.4} Ti _{1.6} O ₄) ^{0.8-}	99
ตารางที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสโพลีเมอร์กับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Co _{0.4} Ti _{1.6} O ₄) ^{0.8-}	101
ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS ในแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Ni _{0.35} Ti _{1.65} O ₄) ^{0.7-} ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันผู้คนมีความต้องการในการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการดำเนินชีวิตและการพัฒนาอุตสาหกรรมโดยเฉพาะกับกลุ่มอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กพกพา (portable devices) การคิดค้นแหล่งพลังงานทดแทนจึงเป็นหนึ่งในรูปแบบพลังงานที่นักวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญโดยในปัจจุบันมีการคิดค้นอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กซึ่งเป็นตัวเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า (1) และอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric devices) เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า (2) เป็นต้น อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ที่ต้องเปลี่ยนพลังงานจากสิ่งแวดล้อมนั้นยังมีข้อจำกัดในเรื่องของสภาวะหรือสภาพแวดล้อมในการเก็บเกี่ยวพลังงาน เช่น ไม่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้ตลอดทั้งวันหรือต้องนำอุปกรณ์ออกไปยังแหล่งจ่ายพลังงานโดยตรงเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจการเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลซึ่งสามารถเก็บเกี่ยวได้ตามเวลาที่ต้องการโดยมีข้อจำกัดด้านสภาพภูมิอากาศเข้ามาเกี่ยวข้องโดยให้ความสนใจไปที่อุปกรณ์ผลิตพลังงานขนาดเล็ก Triboelectric nanogenerator (TENG) ซึ่งสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลได้จากการสัมผัสโดยอาศัยพฤติกรรมและกิจกรรมของมนุษย์ในการสร้างพลังงานไฟฟ้า เช่น การเคลื่อนไหว การสัมผัสเทือน และเสียง

โดย TENG เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลจากการสัมผัสเป็นกระแสไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นโดยอาศัยหลักการเกิดไฟฟ้าสถิตเมื่อวัสดุสองชนิดสัมผัสกันวัสดุจะมีการให้และรับอิเล็กตรอนทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุและเกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าทำให้เกิดพลังงานไปขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กได้ นับตั้งแต่อุปกรณ์นี้ได้ถูกคิดค้นในปี 2012 โดยศาสตราจารย์ Wang และคณะ (3) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าวัสดุที่เป็นที่ถูกลำมาสร้างเป็นขั้วสัมผัสใน TENG ส่วนใหญ่ คือ พอลิเมอร์สังเคราะห์เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง มีความบาง และน้ำหนักเบาทำให้สามารถปรับการใช้งานให้เข้ากับการใช้ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ได้ง่าย อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์สังเคราะห์นั้นส่งผลกระทบต่อในระยะยาวด้านสิ่งแวดล้อมเมื่อหมดอายุการใช้งานกลุ่มพอลิเมอร์สังเคราะห์เหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติก่อให้เกิดมลภาวะและขยะอิเล็กทรอนิกส์และมีข้อจำกัดสำหรับการใช้งานทางการแพทย์ ในปัจจุบันจึงพบว่านักวิจัยให้ความสนใจไปที่การประยุกต์ใช้วัสดุทางธรรมชาติหรือวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในการนำมาใช้งานเป็นอุปกรณ์ TENG เพิ่มขึ้น เช่น ไคโตซาน (4) ไหมไฟโบริน (5) และเซลลูโลส (6) เป็นต้น ซึ่งเซลลูโลสเป็นวัสดุธรรมชาติชนิดหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีปริมาณสูงในธรรมชาติ หาได้ง่าย และมีราคาไม่แพง โดยงานวิจัยนี้สนใจ

เซลลูโลสที่มาจากกากอาหารของแบคทีเรียเรียกว่าแบคทีเรียเซลลูโลส (bacterial cellulose, BC) (7) เนื่องจากมีเส้นใยขนาดเล็กในระดับนาโนมีความเป็นผลึกสูง สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำและใช้พลังงานต่ำในการเตรียม

แต่อย่างไรก็ตามการใช้แบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์มาใช้ใน TENG ยังคงให้ประสิทธิภาพการส่งออกไฟฟ้าที่ต่ำ โดยงานวิจัยของศาสตราจารย์ S.Sriphan และคณะ (8) พบว่าการใช้แบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์มีค่าศักย์ไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 3 โวลต์ มีกระแสไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 0.3 ไมโครแอมแปร์ ส่งผลให้งานวิจัยส่วนใหญ่ในปัจจุบันทำการปรับปรุงประสิทธิภาพค่าการส่งออกไฟฟ้าของแบคทีเรียเซลลูโลสโดยการเติมวัสดุไดอิเล็กทริกในระดับโครงสร้างนาโน เช่น เส้นใยนาโนและเส้นลวดนาโน (9) เป็นต้น โดยในงานวิจัยของศาสตราจารย์ S.Sriphan และคณะ [8] ได้มีการเจือ $\text{Ti}_{0.8}\text{O}_2$ โครงสร้างนาโนซีทในเซลลูโลสที่เป็นกระดาษกรองและแบคทีเรียเซลลูโลสที่ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าประมาณ 42 โวลต์และประมาณ 1 ไมโครแอมแปร์ ซึ่งเพิ่มสูงขึ้นจากการใช้แบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์อย่างมีนัยสำคัญแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างนาโนแบบ 2 มิติ (2D) มีส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งออกของแบคทีเรียเซลลูโลสและในปี 2020 งานวิจัยของศาสตราจารย์ T.Charoonsuk และคณะ (10)[10] พบว่าการเปลี่ยนแปลงชนิดไอออนในโครงสร้างนาโนซีท (2D) $\text{A}_x\text{M}_y\text{Ti}_{2-y}\text{O}_4$ ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กทริกเป็นอย่างมากส่งผลให้มีแนวโน้มที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการส่งออกของไฟฟ้าได้อันประกอบด้วยค่าความต่างศักย์ขาออกต่างกระแสไฟฟ้าขาออกและกำลังไฟฟ้าขาออกของอุปกรณ์ TENG อย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจสร้างอุปกรณ์ Triboelectric nanogenerator (TENG) จากวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมชนิดแบคทีเรียเซลลูโลสและทำการปรับปรุงประสิทธิภาพค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของแบคทีเรียเซลลูโลส TENG ด้วยการเติมวัสดุออกไซด์โครงสร้างแบบ 2 มิติ (2D layer structure) โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์และทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงชนิดของโลหะในโครงสร้างนาโนซีทและปริมาณการเติมที่ส่งผลต่อค่าไดอิเล็กทริกและค่าการส่งออกทางไฟฟ้าอันประกอบด้วย ค่าความต่างศักย์ขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าขาออกและกำลังไฟฟ้าขาออกของ TENG

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์
2. เพื่อศึกษาการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสและสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์
3. เพื่อสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (TENG) รูปแบบสัมผัสแบบตัก
4. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ต่อสมบัติไดอิเล็กทริก
5. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ต่อค่าการส่งออกทางไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สังเคราะห์สารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ ($A_xM_yTi_{2-y}O_4$) ประกอบด้วย $Cs_{0.7}Ni_{0.35}Ti_{1.65}O_4$, $K_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$, $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$, $Cs_{0.7}Co_{0.35}Ti_{1.65}O_4$ และ $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$
2. เตรียมฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสและสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์โดยการขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการหล่อแบบ
3. สร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (TENG) ในรูปแบบการสัมผัสแบบตัก
4. ทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์
5. ทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (TENG) ที่เตรียมได้จากคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสและสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์โดยจะศึกษาค่าความต่างศักย์ขาออก (output voltage), ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (output power)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ทั้ง 5 ชนิด
2. ได้แผ่นฟิล์มของวัสดุเชิงประกอบระหว่างแบคทีเรียเซลล์ูโลสและสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์
3. ได้อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (TENG) รูปแบบสัมผัสแบบตั้งฉาก
4. ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ต่อสมบัติไดอิเล็กทริก
5. ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ต่อค่าการส่งออกทางไฟฟ้า

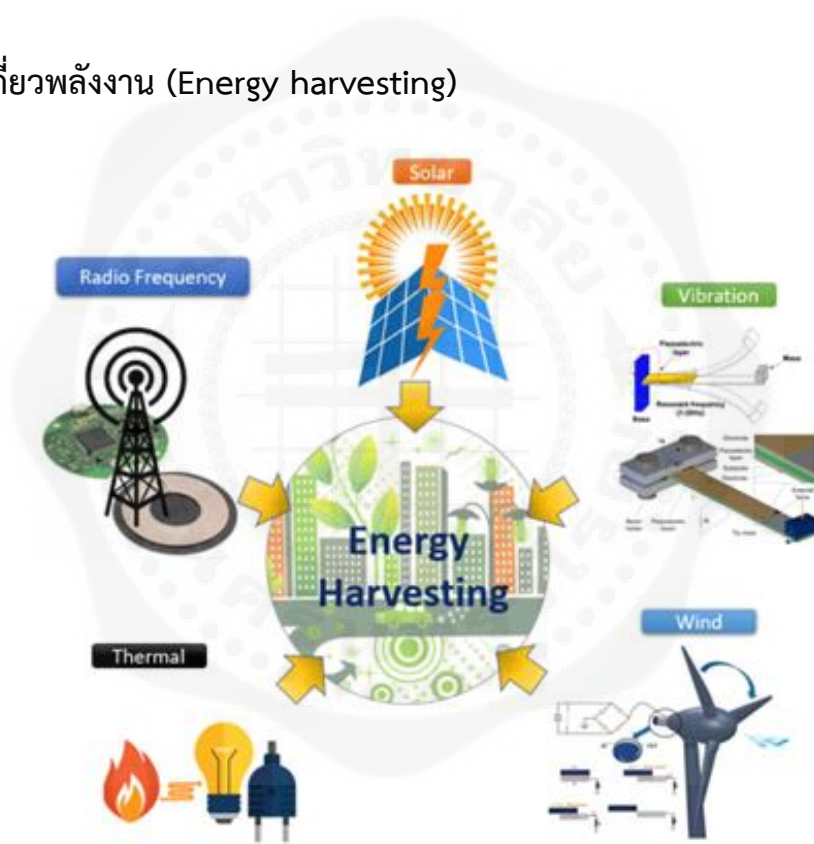


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันผู้คนมีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจึงทำให้มีการคิดค้นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าจากหลายแหล่งและมีแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าที่น่าสนใจเป็นอย่างมากนั่นก็คือพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) คือพลังงานที่นำมาใช้เพื่อทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงรูปแบบเดิมจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งเป็นพลังงานที่สร้างมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นพลังงานที่กำลังจะหมดไปในอนาคตในขณะที่พลังงานหมุนเวียนเป็นพลังงานสะอาดที่ได้มาจากธรรมชาติทำให้สามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยอาศัยอุปกรณ์ในการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy harvesting)

2.1 การเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy harvesting)



ภาพประกอบ 2.1 อุปกรณ์ Energy Harvesting

ที่มา : <https://1th.me/e2Erw>

การเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy harvesting) คือกระบวนการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมให้เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ใช้งานในเวลาที่ต้องการหรือในเวลาที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้างานประกอบ 2.1 อันได้แก่

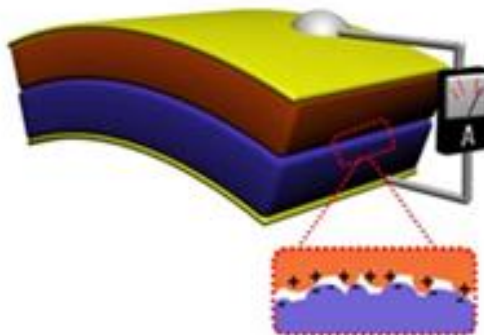
1. พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar cell) คือการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า
2. พลังงานจากแรงสั่นสะเทือน (Vibration) คือการเปลี่ยนพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนบนเครื่องจักรหรือจากการเคลื่อนไหวของร่างกายมนุษย์เป็นพลังงานไฟฟ้า
3. พลังงานลม (Wind energy) คือการเปลี่ยนพลังงานจากการเคลื่อนที่ของลมเป็นพลังงานไฟฟ้า
4. พลังงานความร้อน (Thermal energy) คือการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า
5. พลังงานคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency, RF) คือการเปลี่ยนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานไฟฟ้า

โดยพลังงานที่กล่าวมาข้างต้นนั้นมีแนวโน้มการใช้งานที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดที่สามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้เพื่อทดแทนพลังงานรูปแบบเดิมที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) อย่างไรก็ตามอุปสรรคที่ต้องเปลี่ยนพลังงานจากสิ่งแวดล้อมนั้นยังมีข้อจำกัดในเรื่องต่างๆ

1. พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar cell) ไม่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าได้ในเวลาตามที่เราต้องการเนื่องจากสภาพภูมิอากาศไม่ได้มีแดดออกทั้งวันหรือบางวันฝนตกทำให้ไม่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้และยังมีข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่โดยต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ในการติดตั้งและต้องเป็นพื้นที่ที่เหมาะสม
2. พลังงานจากแรงสั่นสะเทือน (Vibration) ไม่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าได้หากไม่มีการสั่นสะเทือน
3. พลังงานลม (Wind energy) ไม่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าได้ในเวลาตามที่เราต้องการเนื่องจากสภาพภูมิอากาศบางฤดูอาจไม่มีลมและด้วยพื้นที่ที่เหมาะสมนั้นจำกัดในการเก็บเกี่ยวพลังงาน
4. พลังงานความร้อน (Thermal energy) ไม่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าได้หากไม่มีความร้อนให้กับตัวอุปกรณ์และอาจทำให้เกิดมลภาวะทั้งทางดิน น้ำและอากาศ
5. พลังงานคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency, RF)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจการเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกล ซึ่งสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าได้ตามเวลาที่ต้องการ โดยมีข้อจำกัดด้านสภาพภูมิอากาศเข้ามาเกี่ยวข้องและในปี ค.ศ. 2012 ศาสตราจารย์ Zong lin Wang และคณะ (3) ทำการคิดค้นเทคโนโลยีอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานรูปแบบใหม่ ซึ่งอาศัยพลังงานเชิงกลในการเก็บเกี่ยวพลังงานและเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบพลังงานไฟฟ้าโดยเรียกอุปกรณ์นี้ว่าอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator ; TENG)

2.2 อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator ; TENG)



ภาพประกอบ 2.2 โครงสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก

โดยอุปกรณ์โทรโบอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลจากการให้แรงกลเป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งโครงสร้างของอุปกรณ์โทรโบอิเล็กทริกนั้น จะประกอบด้วย 2 วัสดุดังภาพประกอบ 2.2 ที่ทำหน้าที่เป็นชั้น positive และ ชั้น Negative และจะมีขั้วโลหะติดอยู่หลังวัสดุทั้งสองและต่อเข้ากับขั้วอิเล็กโทรดเพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นโดยอาศัยหลักการเกิดไฟฟ้าสถิตเมื่อวัสดุ 2 ชนิด สัมผัสกันวัสดุจะมีการให้และรับอิเล็กตรอนทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุและเกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าทำให้เกิดพลังงานไปขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กได้

2.2.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator ; TENG)

หลักการทำงานของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (TENG) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลจากการให้แรงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยโครงสร้างของอุปกรณ์โทรโบอิเล็กทริกจะใช้วัสดุ 2 ชนิดที่ทำหน้าที่แตกต่างกัน โดยอีกชั้นหนึ่งทำหน้าที่เป็นชั้น Positive ที่เกิดประจุส่วนเกินบนพื้นผิวและชั้น negative ที่เกิดประจุส่วนลบที่พื้นผิว และมีขั้วโลหะที่ด้านหลังของวัสดุทั้งสองโดยเชื่อมต่อกับขั้วอิเล็กโทรดเพื่อให้เกิดการไหลของ

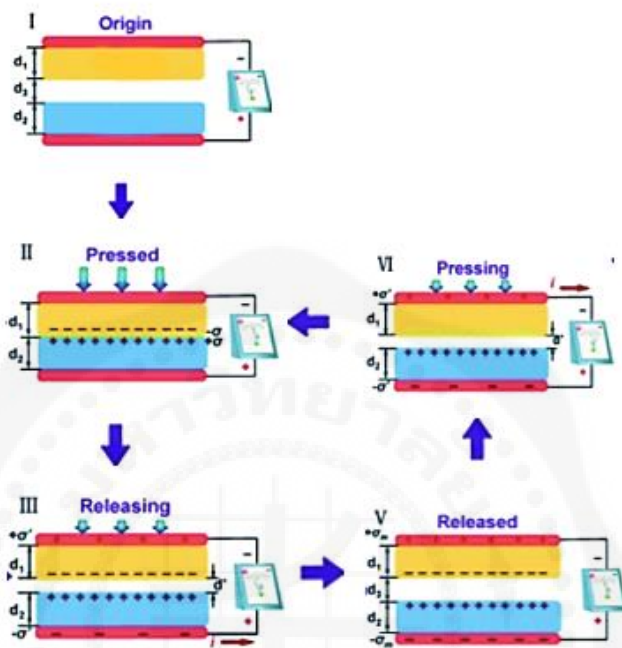
กระแสไฟฟ้า ซึ่งหลักการการเกิดกระแสไฟฟ้าของ TENG มี 2 หลักการคือหลักการเกิดไฟฟ้าสถิต (Triboelectrification effect) และหลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electrostatic induction)

1) หลักการเกิดไฟฟ้าสถิต (Triboelectrification effect)

หลักการเกิดไฟฟ้าสถิตของ Triboelectric nanogenerator เกิดจากที่วัสดุ 2 ชนิดที่ต่างกันนั้นมาเสียดสีกันจนทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตขึ้นมาทำให้วัสดุหนึ่งแสดงความเป็นขั้วบวกซึ่งจะเกิดการเสียอิเล็กตรอนได้ง่าย (Positive) และอีกวัสดุหนึ่งจะแสดงความเป็นขั้วลบซึ่งจะเกิดการรับอิเล็กตรอนได้ง่าย (Negative) ทำให้ประจุไฟฟ้าของวัสดุทั้ง 2 ชนิดเกิดเป็นขั้วที่ตรงข้ามกันบนผิวของวัสดุของทั้งสอง

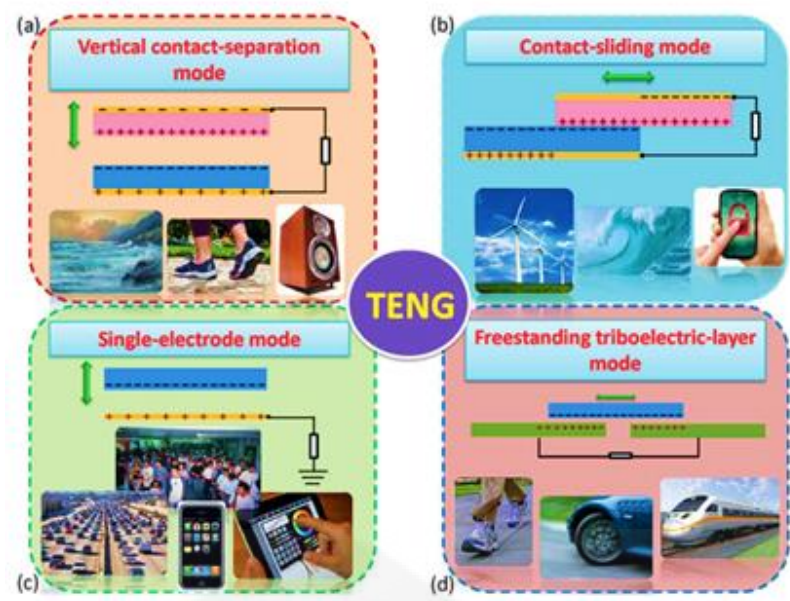
2) หลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electrostatic induction)

หลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตของ triboelectric nanogenerator เกิดหลังจากวัสดุทั้ง 2 ชนิดเกิดประจุไฟฟ้าเป็นขั้วตรงข้ามกันบนพื้นผิวของวัสดุ โดยต่อมาวัสดุจะเกิดการเหนี่ยวนำประจุที่ขั้วโลหะที่ติดกับวัสดุทั้งสองทำให้เกิดประจุตรงข้ามกันกับประจุบนพื้นผิวของวัสดุทำให้อิเล็กตรอนนั้นเกิดการเคลื่อนที่จากขั้วโลหะไหลเข้าสู่วงจรไฟฟ้าภายนอก



ภาพประกอบ 2.3 ตัวอย่างโครงสร้างและหลักการทำงานของ TENG

ภาพประกอบ 2.3 แสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์ TENG โดยมีวัสดุ 2 ชนิดและมีขั้วโลหะที่ด้านหลังเมื่อวัสดุ 2 ชนิดเข้าใกล้กันหรือสัมผัสกันจะเกิด Triboelectrification effect ซึ่งวัสดุชั้นสีฟ้าทำหน้าที่เป็นชั้น Positive เกิดประจุส่วนเกินบนพื้นผิวและวัสดุชั้นสีเหลือง ทำหน้าที่เป็นชั้น Negative เกิดประจุลบส่วนเกินบนพื้นผิว เมื่อวัสดุเริ่มห่างจากกัน จะทำให้เกิด Electrostatic induction ที่ขั้วโลหะที่เป็นวัสดุสีแดง โดยจะมีการเหนี่ยวนำที่ขั้วโลหะจะทำให้มีประจุตรงข้ามกับสภาพประจุส่วนเกินที่ผิวของวัสดุ ส่งผลให้อิเล็กตรอนเกิดการไหลระหว่างขั้วโลหะ เกิดเป็นสัญญาณเอาต์พุตตามจังหวะการสัมผัสการกดและการปล่อย โดยสามารถจำแนกรูปแบบในการทำงานของอุปกรณ์จากการสัมผัสของวัสดุได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้



ภาพประกอบ 2.4 โครงสร้าง TENG 4 รูปแบบ

1) รูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical contact-separation mode)

รูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉากนั้น เป็นรูปแบบที่เป็นพื้นฐานและออกแบบง่าย มีการใช้อย่างแพร่หลายในการทำ TENG โดยจะใช้วัสดุ 2 ชนิด วางประกบกันโดยมีชั้นโลหะติดกับวัสดุของทั้ง 2 ชนิด และต่อขั้วอิเล็กโทรดกับชั้นโลหะ รูปแบบในการทำงานคือเมื่อให้แรงกลภายนอก วัสดุจะเสียดสีกัน เกิดการแลกเปลี่ยนประจุที่พื้นผิวและเกิดประจุตรงข้ามกันบนพื้นผิวของวัสดุ และหลังจากนั้นจะเกิดการไหลของประจุไฟฟ้าสู่โหลดภายนอก

2) รูปแบบการสัมผัสแบบเลื่อน (Contact Sliding mode)

รูปแบบการสัมผัสแบบเลื่อน เป็นรูปแบบการทำงานที่ขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ที่เสียดสีกันของวัสดุตามแนวนอน ซึ่งแรงเชิงกลจะให้ตามแนวนอนโดยอุปกรณ์นั้นวัสดุจะวางขนานกันและเมื่อเกิดการเสียดสีเกิดการแลกเปลี่ยนประจุที่พื้นผิวและเกิดประจุตรงข้ามกันบนพื้นผิวของวัสดุและหลังจากนั้นจะเกิดการไหลของประจุไฟฟ้าสู่โหลดภายนอก

3) รูปแบบการสัมผัสแบบอิเล็กโทรดเดี่ยว (Single electrode mode)

รูปแบบการสัมผัสแบบอิเล็กโทรดแบบเดี่ยว เป็นรูปแบบที่มีวัสดุชนิดหนึ่งจะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและมาสัมผัสกับวัสดุอีกชนิดที่เป็นชั้นโลหะที่ต่อกับขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งจะต่อเพียงด้านเดียวของพื้นผิว เมื่อวัสดุสัมผัสกัน เกิดการแลกเปลี่ยนประจุที่พื้นผิวและเกิดประจุตรงข้ามกันบนพื้นผิวของวัสดุและหลังจากนั้นจะเกิดการไหลของประจุไฟฟ้าสู่โหลดภายนอกเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระจะนิยมนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ที่ต้องมีการเคลื่อนไหวเป็นหลัก

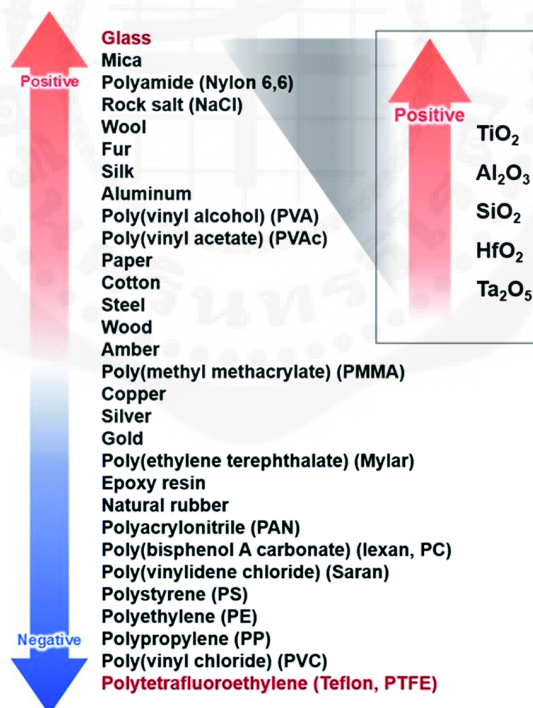
4) รูปแบบการสัมผัสแบบอิสระ (Free standing mode)

รูปแบบการสัมผัสแบบอิสระเป็นรูปแบบการทำงานที่จะมีชั้น Triboelectric และชั้นของวัสดุข้อโลหะ 2 ชั้น โดย จะอาศัยการเกิดกระแสไฟฟ้าโดยการเคลื่อนที่ของชั้น Triboelectric ผ่านระหว่างวัสดุข้อโลหะทั้ง 2 ชนิด โดยข้อโลหะจะอยู่หนึ่ง เมื่อวัสดุสัมผัสกัน เกิดการแลกเปลี่ยนประจุที่พื้นผิวและเกิดประจุตรงข้ามกันบนพื้นผิวของวัสดุ และหลังจากนั้นจะเกิดการไหลของประจุไฟฟ้าสู่ไหลภายนอก

แต่อย่างไรก็ตามการเกิดปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริกนั้น ต้องเกิดจากวัสดุสองชนิดที่ทำการให้และรับอิเล็กตรอน โดยการเลือกวัสดุต้องดูจากค่าความเป็นขั้วบวกและความเป็นขั้วลบของวัสดุ

2.3 วัสดุไทรโบอิเล็กทริก

วัสดุไทรโบอิเล็กทริกคือวัสดุ 2 ชนิดสัมผัสกันโดยจะมีวัสดุชนิดหนึ่งทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนจึงทำให้เป็นขั้วบวก (Positive) และวัสดุอีกชนิดหนึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจึงทำให้เป็นขั้วลบ (Negative) ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุและเกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าจึงเกิดประจุไฟฟ้าขั้วตรงข้ามขึ้นที่ผิวของทั้ง 2 วัสดุ ซึ่งได้มีการสรุปแนวโน้มการให้-รับอิเล็กตรอนของวัสดุทั่วไปเรียกว่า Triboelectric series ดังแสดงในภาพประกอบ 2.5



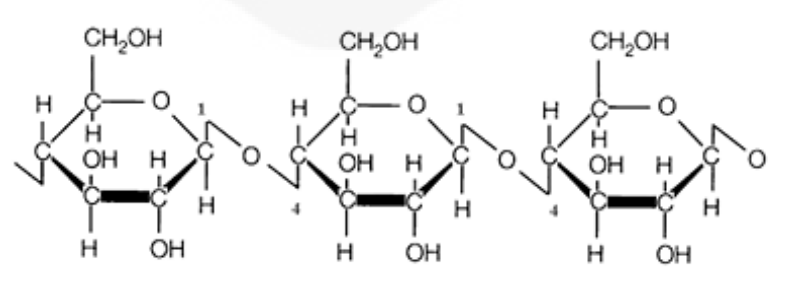
ภาพประกอบ 2.5 Triboelectric series แสดงแนวโน้มการให้-รับอิเล็กตรอนของวัสดุทั่วไป

โดยการสร้างและออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์นั้น สามารถทำได้จากวัสดุที่หลากหลายไม่ว่าจะเป็นกลุ่มโลหะ พอลิเมอร์ เซรามิก รวมไปถึงกลุ่มวัสดุธรรมชาติต่างๆ เช่น สาหร่าย ไข่มุก ชนสัตว์ เปลือกไข่ เป็นต้น โดยในการเลือกวัสดุนั้น นับได้ว่าเป็นมีความสำคัญ เป็นอย่างมากสำหรับการสร้างอุปกรณ์ TENG เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติให้และรับอิเล็กตรอนที่ไม่เท่ากัน การจับคู่วัสดุให้เหมาะสม จึงส่งผลให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพและอุปกรณ์สามารถเกิดปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทรอนิกส์

โดยคุณสมบัติของ TENG ที่ต้องการคือมีความสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติไม่ก่อให้เกิดขยะอิเล็กทรอนิกส์ในอนาคต ปัจจุบันมีวัสดุอีกประเภทหนึ่งมีความน่าสนใจมากขึ้นนั่นก็คือพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติและที่เราน่าสนใจในงานวิจัยนี้ คือ เซลลูโลส (Cellulose) เนื่องจากกลุ่มพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่นำมาใช้ทั่วไปนั้นก่อให้เกิดกลุ่มขยะอิเล็กทรอนิกส์มากขึ้นและมีแนวโน้มจะเพิ่มสูงขึ้นในอนาคต และจากการศึกษาพบว่าเซลลูโลสเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีมากที่สุดในโลกเนื่องจากเซลลูโลสเป็นเส้นใยซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในพืช โดยสามารถพบเซลลูโลสในเส้นใยฝ้ายปริมาณสูงถึง 90% และสามารถพบเซลลูโลสในเนื้อไม้คือสูงถึง 40–50% วัสดุจากธรรมชาติหรือกลุ่มพอลิเมอร์ธรรมชาตินั้นเป็นกลุ่มวัสดุที่นักวิจัยให้ความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน

2.4 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส (Cellulose) มีสูตรโมเลกุลคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ซึ่งสามารถพบได้ในพืชเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์พืชและสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ สำหรับโครงสร้างของเซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส (Glucose) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) เป็นหมู่หลัก เมื่อเรียงต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ที่ตำแหน่งปีต้า-1,4 (β (1-4 glycosidic bond)) จะได้เป็นสายยาวที่ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสกว่า 1,000 – 10,000 โมเลกุล



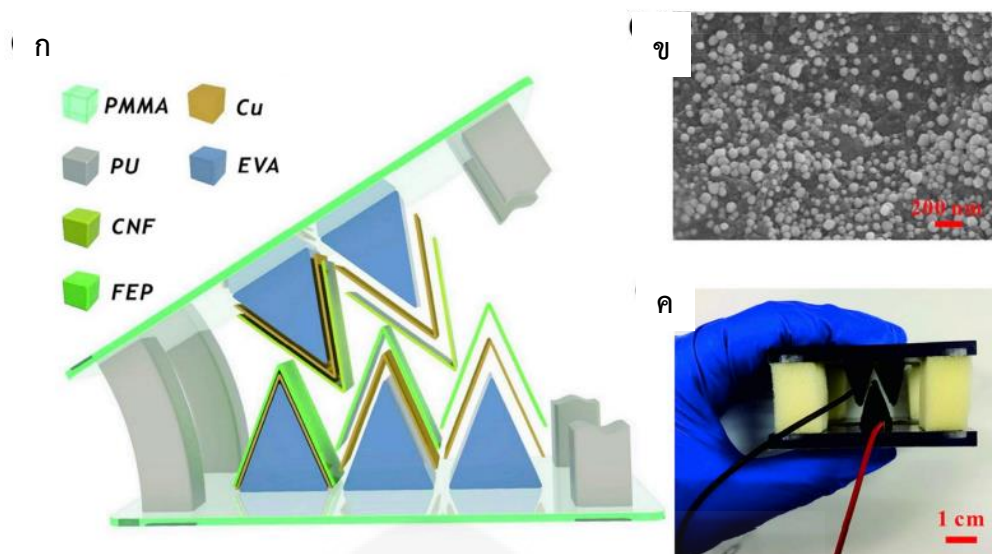
ภาพประกอบ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

โดยทั่วไปเซลลูโลสสามารถพบได้ทั้งในพืชและสัตว์โดยเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบโครงสร้างที่สำคัญของหลักผนังเซลล์ของพืช เช่น ในเนื้อไม้ ฟางข้าว ชานอ้อย หรือซังข้าวโพดและสามารถพบได้ในสัตว์เนื่องจากบางสายพันธุ์ของเชื้อแบคทีเรียจะสามารถหลั่งเซลลูโลสออกมาได้ในรูปแบบไบโอฟิล์มอาจถือได้ว่าเซลลูโลส

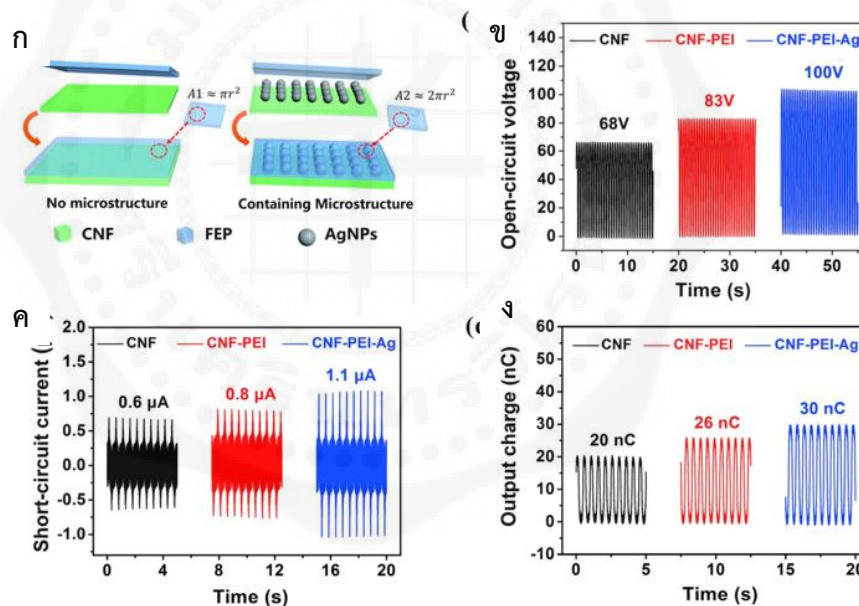
เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีมากที่สุดในโลก และในปัจจุบันเซลลูโลสที่ถูกนำมาพัฒนาและใช้งานใน TENG ซึ่งเป็นที่ยอมรับสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือเซลลูโลสที่ได้จากพืชและเซลลูโลสที่ได้จากการกินอาหารของแบคทีเรีย โดยเซลลูโลสทั้ง 2 ประเภทมาจากแหล่งที่มาที่ต่างกันส่งผลให้คุณภาพของเส้นใยและสมบัติมีความแตกต่างกัน

โดยในงานวิจัยของ RaviS. Baghel และคณะ (11) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเซลลูโลสที่ได้จากสาหร่าย และแอปพลิเคชันที่นำไปใช้งานในอนาคต ซึ่งกล่าวไว้ว่าเซลลูโลสเป็นวัสดุที่ดึงดูดความสนใจของนักวิจัยมาเป็นเวลานานและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหลากหลายรูปแบบ เนื่องจากสามารถพบได้ในปริมาณมาก ต้นทุนต่ำ และมีกระบวนการผลิตที่ง่ายขึ้น อีกทั้งลักษณะเฉพาะของเซลลูโลส เช่น น้ำหนักเบา ไม่เป็นพิษ ความแข็งแรงเชิงกล ลักษณะที่ชอบน้ำและดูดความชื้น มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ และความสามารถในการรีไซเคิล ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานเชิงพาณิชย์ต่างๆ มีการนำเซลลูโลสและอนุพันธ์ของเซลลูโลสมาใช้กันอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็น ในกระดาษ สิ่งทอ เกษษณภัณฑ์ สัตวแพทย์ เครื่องสำอาง อุตสาหกรรมอาหาร และในงานวิจัยนี้ได้พูดถึงกลุ่มนาโนเซลลูโลส ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีเอกลักษณ์ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มาจากเซลลูโลส โดยนาโนเซลลูโลสสามารถแบ่งออกเป็นสามประเภทตามคุณสมบัติโครงสร้างและแหล่งที่มา 1. เซลลูโลสนาโนคริสตัลไลน์(CNC) 2. เซลลูโลสนาโนไฟเบอร์(CNF) และ 3. เซลลูโลสจากแบคทีเรีย (BC) หรือที่เรียกว่าเซลลูโลสจุลินทรีย์ ซึ่งขนาดและความเป็นผลึกเป็นลักษณะสำคัญของนาโนเซลลูโลส จากการศึกษาพบว่านาโนเซลลูโลสได้ถูกนำมาใช้ในแอปพลิเคชันต่างๆเช่นกัน ไม่ว่าจะเป็นกลุ่มอาหาร เครื่องสำอางและการประยุกต์ใช้ทางชีวการแพทย์ เช่น เซอร์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

และในปี 2019 Chenyuan Zhang และคณะ (12) พวกเขาได้นำวัสดุโพรโบอิเลกทริกที่ใช้เซลลูโลสที่ถูกเตรียมโดยการดัดแปลงพื้นผิวและการเคลือบอนุภาคนาโนด้วยเงินของเซลลูโลสนาโนไฟบริล (CNF) ซึ่งเซลลูโลสนาโนไฟบริล (CNFs) ที่ได้จากการบำบัดทางเคมีหรือทางกายภาพของสารชีวมวลให้ประโยชน์ เช่น ต้นทุนต่ำ ความโปร่งใสทางแสงสูง น้ำหนักเบา และคุณสมบัติทางกลที่ดีและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ สามารถสังเกตได้ในภาพประกอบ 2.7 ข. ว่าอนุภาคนาโน Ag ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 60 นาโนเมตรถูกเคลือบอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวของฟิล์ม CNF-PEI และติดแน่นบนพื้นผิวของฟิล์ม แต่อย่างไรก็ตามโครงทั้งหมดทำจากแผ่นโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) โดยผลการวิจัยพบว่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของ TENG ที่ใช้ฟิล์ม CNF ที่ดัดแปลงแล้วเพิ่มขึ้นจาก 68 เป็น 100 V และกระแสไฟลัดวงจรเพิ่มขึ้นจาก 0.6 เป็น 1.1 μA ตามภาพประกอบ 2.8 ก-ง การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่สูงของ TENG ที่ใช้ CNF



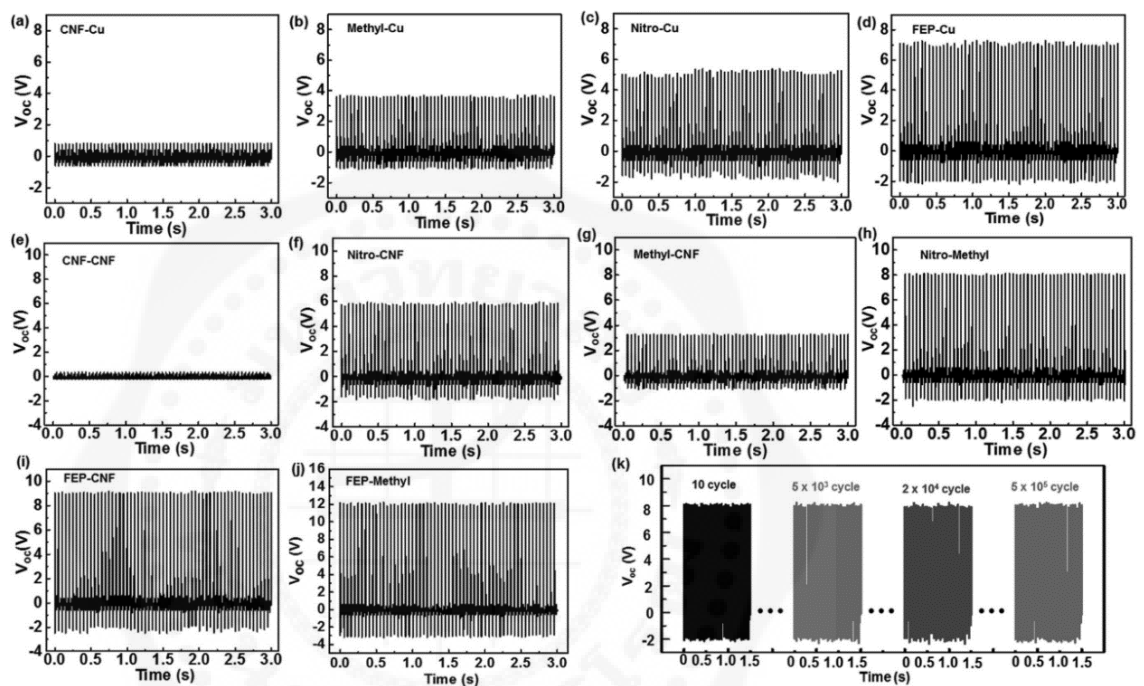
ภาพประกอบ 2.7 ก. แผนผังโครงสร้างของ TENG ข. ภาพ SEM ของฟิล์ม CNF-PEI-Ag ค. แผนภาพจริงของ TENG



ภาพประกอบ 2.8 ก. กลไกของประสิทธิภาพการส่งออก ข. แรงดันไฟวงจรเปิด ค. กระแสไฟลัดวงจร และค. ค่าเอตัพุดของ TENG ที่ใช้ CNF ก่อนและหลังการปรับเปลี่ยน

งานวิจัยของ Chunhua Yao และคณะ (13) เป็นอีกหนึ่งงานวิจัยบอกว่าเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีอยู่มากที่สุด สามารถหมุนเวียนและย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยทำการพัฒนาเครื่องกำเนิดนาโนไทรโบอิเล็กทริก (TENG) ที่มีวัสดุสัมผัสทั้งสองที่ทำจากวัสดุเซลลูโลส เซลลูโลสนาโนไฟบริล (CNFs) ถูกใช้เป็นวัสดุติด และใช้วิธีการทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อยึดหมู่ไนโตรและหมู่เมทิลเข้ากับโมเลกุลเซลลูโลส เพื่อเปลี่ยนไทรโบโพลาริตีของ CNF ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพไทรโบอิเล็กทริกโดยเฉพาะอย่างยิ่ง nitro-CNF มีความ

หนาแน่นของประจุที่พื้นผิวเป็นลบที่ 85.8 ไมโครคูลอมบ์ต่อตารางเมตร ในขณะที่ methyl-CNF มีความหนาแน่นของประจุที่พื้นผิวเป็นบวก 62.5 ไมโครคูลอมบ์ต่อตารางเมตร ซึ่งสูงถึง 71% และ 52% ของค่าความหนาแน่นประจุของฟลูออรีนเอทิลีนโพรพิลีน (FEP) นอกจากนี้เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ดังภาพประกอบ 2.9 อุปกรณ์ TENG ที่ประดิษฐ์จากไนโตร CNF ที่จับคู่กับ methyl-CNF แสดงให้เห็นถึงแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ย 8 V และเอาต์พุตปัจจุบัน 9 μA ซึ่งเข้าใกล้ระดับเดียวกันที่ได้รับจาก TENG ที่ทำจาก FEP งานนี้แสดงให้เห็นความสำเร็จในการใช้วัสดุเซลลูโลสที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อทดแทน โพลีเมอร์สังเคราะห์ในการพัฒนา TENG

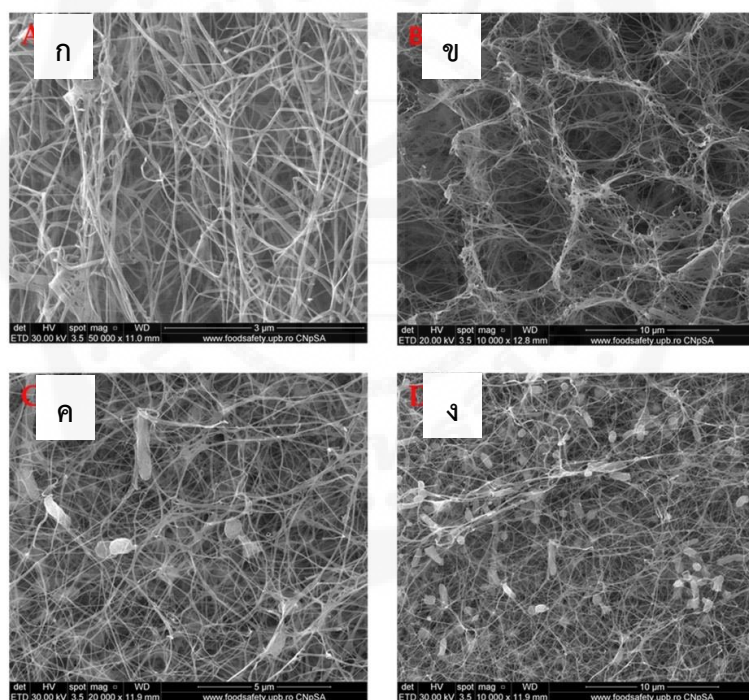


ภาพประกอบ 2.9 แสดงเอาต์พุตโวลเทจของ TENG ที่ทำจากฟิล์มคู่ต่างๆ ของ a) CNF/Cu, b) methyl-CNF/Cu, c) nitro-CNF/Cu, d) FEP/Cu, e) CNF/CNF, f) nitro- CNF/ CNF, g) Methyl-CNF/CNF, h) nitro-CNF/methyl-CNF, i) FEP/CNF และ j) FEP/methyl-CNF k) เอาต์พุตแรงดันไฟฟ้าระยะยาวของ TENG ที่ทำจากคู่ nitro-CNF/methyl-CNF

จากงานวิจัยนำเสนอมาข้างต้น (12, 13) ก็สามารถใช้เป็นตัวยืนยันได้ว่าเซลลูโลสนั้นมีคุณสมบัติมีความโปร่งใส น้ำหนักเบา คุณสมบัติทางกลที่ดี ซึ่งสมบัติเหล่านี้เป็นสมบัติที่น่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้ ในการสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไทรโบอิเล็กทริก (TENG) เป็นอย่างมาก

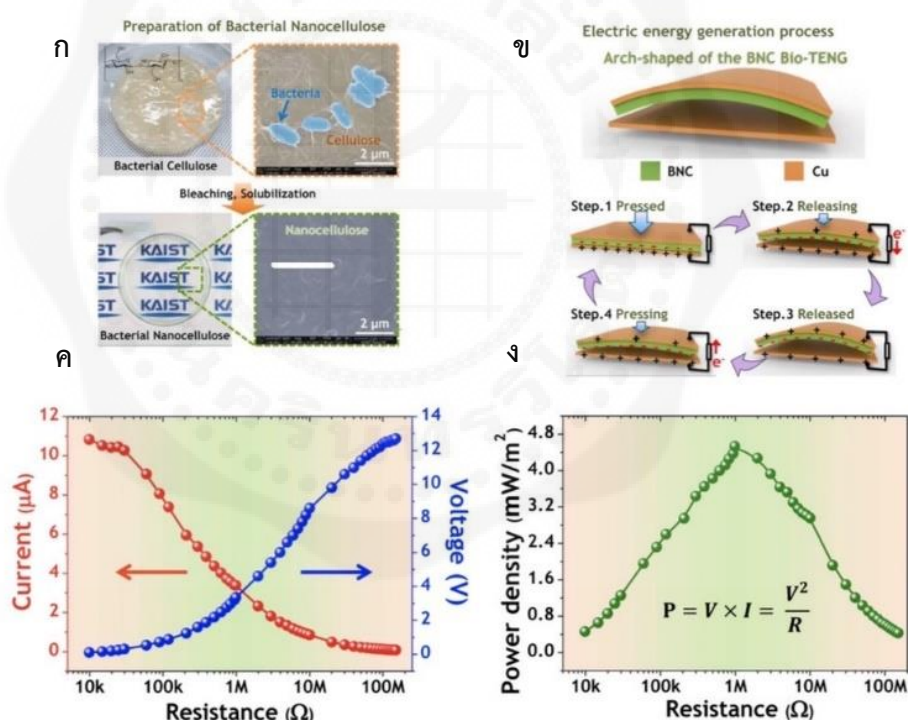
2.4.1 แบคทีเรียเซลลูโลส (bacterial cellulose, BC)

เซลลูโลสจากแบคทีเรียเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมักด้วยแบคทีเรียสกุล *Acetobacter* โดยสายพันธุ์ที่นิยมใช้ คือ *Acetobacter xylinum* เป็นแบคทีเรียแกรมลบ ที่รูปร่างมีทั้งแบบกลมและแบบแท่งอยู่เป็นเซลล์เดี่ยวเซลล์คู่หรือเรียงต่อกันเป็นสาย ต้องการอากาศในการเจริญเติบโต โดยเจริญได้ดีที่สภาวะอุณหภูมิช่วง 25-30 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 3-7 ใช้แหล่งคาร์บอนในการเจริญเติบโตและสังเคราะห์เซลลูโลสออกมาภายนอกเซลล์ (14) เนื่องจากเซลลูโลสที่ผลิตได้จากการหมักของแบคทีเรียสายพันธุ์ดังกล่าวมีคุณสมบัติเฉพาะ คือ เส้นใยมีขนาดเล็ก (ภาพประกอบ 2.10) เมื่อเทียบกับเซลลูโลสจากพืชมีความบริสุทธิ์สูงความสามารถอุ้มน้ำได้ปริมาณมาก แข็งแรงทนต่อแรงดึงได้สูง (15) มีเครือข่ายรูพรุนสามมิติที่โดดเด่น เมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลสจากพืช แบคทีเรียเซลลูโลสแสดงให้เห็นถึงข้อดีของความบริสุทธิ์ที่ ความเป็นผลึก ความพรุน การซึมผ่านของของเหลวและก๊าซ ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และความทนทานเชิงกลที่สูงกว่าเซลลูโลสทั่วไปยิ่งไปกว่านั้นการปรับเปลี่ยนพื้นผิวทางเคมีและกายภาพบนแบคทีเรียเซลลูโลสสามารถทำได้ง่ายกว่าเซลลูโลสทั่วไปเนื่องจากมีกลุ่ม -OH ที่กระจายอยู่ทั่วไปและโครงสร้างเครือข่ายที่มีรูพรุน



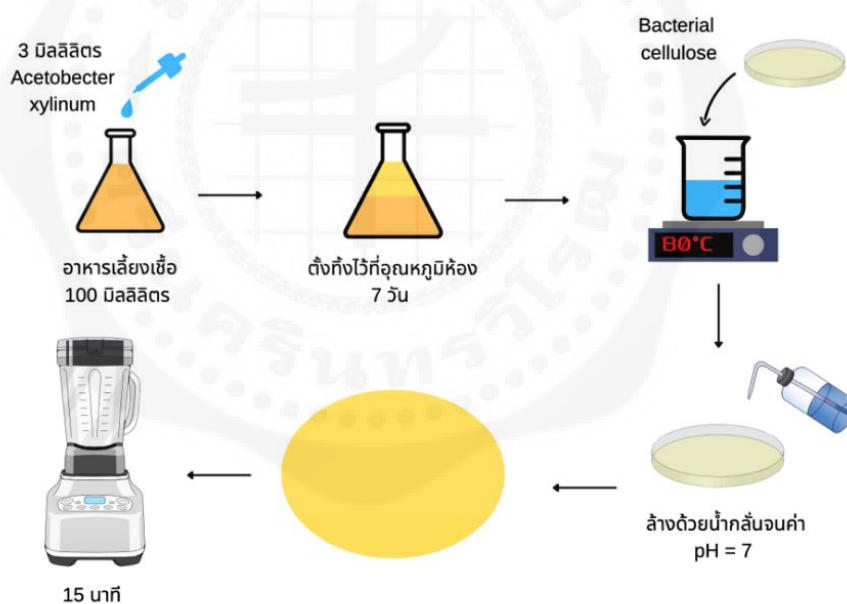
ภาพประกอบ 2.10 ภาพ SEM แสดงสัญญาณวิทยาของแบคทีเรียเซลลูโลสบนพื้นผิว ก. 50,000× ข. 10,000× และแบบตัดขวาง ค. 20,000× ง. 10,000×

ในปี 2107 Kim และคณะ (7) ได้ทำการนำแบคทีเรียเซลลูโลสมาใช้ในการสร้างเครื่องกำเนิดนาโนไทรโบอิเล็กทริกเป็นครั้งแรกเนื่องจากแบคทีเรียเซลลูโลสเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและในการเตรียมฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียและกระบวนการสร้างพลังงานแบบไทรโบอิเล็กทริกดังในภาพประกอบ 2.11 ก-ข ซึ่งมีความโปร่งใส ความยืดหยุ่น และมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพเมื่อนำไปสร้างเป็นชั้นสัมผัสบนเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงาน โครงสร้างและกลไกการทำงานของ BNC Bio-TENG ด้านบนทำหน้าที่เป็นตัวสะสมกระแส ในขณะที่ชั้นล่างมีทำหน้าที่เป็นตัวสะสมกระแสและเก็บแรงเสียดทานนอกจากนี้ในการทดสอบค่าทางไฟฟ้าของอุปกรณ์พบว่าอุปกรณ์มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 13 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุด 11 ไมโครแอมแปร์และค่าความหนาแน่นของพลังงานสูงสุดประมาณ 4.8 เมกะวัตต์ต่อตารางเมตร ดังที่แสดงในภาพประกอบ 2.11 ค-ง แต่อย่างไรก็ตามจากค่าที่ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่แสดงออกมาพบว่าอุปกรณ์ TENG ยังคงสามารถมากที่จะปรับปรุงและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นได้เมื่อเทียบกับการใช้วัสดุสังเคราะห์



ภาพประกอบ 2.11 ก. แบคทีเรียเซลลูโลส ข. โครงสร้างอุปกรณ์ TENG ค. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุด ง. ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า

โดยการสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสสามารถทำได้โดยการเริ่มต้นด้วยทำความสะอาดด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำ (Autoclave) ให้อุปกรณ์ทั้งหมดปลอดเชื้อ โดยใช้เวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากนั้นเริ่มทำการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียโดยการให้อาหาร ซึ่งก็คือ กลูโคส 25 กรัม สารสกัดจากยีสต์ 2.5 กรัม สาร $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 2.5 กรัม สาร (KH_2PO_4) 2 กรัม สารแมกนีเซียมซัลเฟต (MgNO_3) 0.05 กรัม และน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นทำการย้ายไปใส่ในขวดดูแลนด์ขนาด 500 มิลลิลิตร และทิ้งไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ใช้เวลาทั้งหมด 24 ชั่วโมง จากนั้นแบ่งเทใส่ขวดลูกหมูปูขนาด 150 มิลลิลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เติมห้วเชื้อแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* 3 มิลลิลิตร ในอาหารเลี้ยงเชื้อเขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน ได้เป็นแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส จากนั้นนำไปต้มในสารละลาย 0.1 โมล NaOH ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นทำการล้างด้วยน้ำกลั่นและวัดเมื่อค่า pH ของแบคทีเรียเซลลูโลสให้ได้เท่ากับ 7 และสังเกตสีของแบคทีเรียเซลลูโลสจะเปลี่ยนเป็นสีขาว จึงนำไปปั่นในเครื่องเป็นเวลา 15 นาที อัตราส่วนระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับน้ำเท่ากับ 1:1 ดังแสดงในภาพประกอบ 2.12 ทำให้ได้แบคทีเรียเซลลูโลสที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ เพื่อใช้ในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อขึ้นรูป (solution casting)



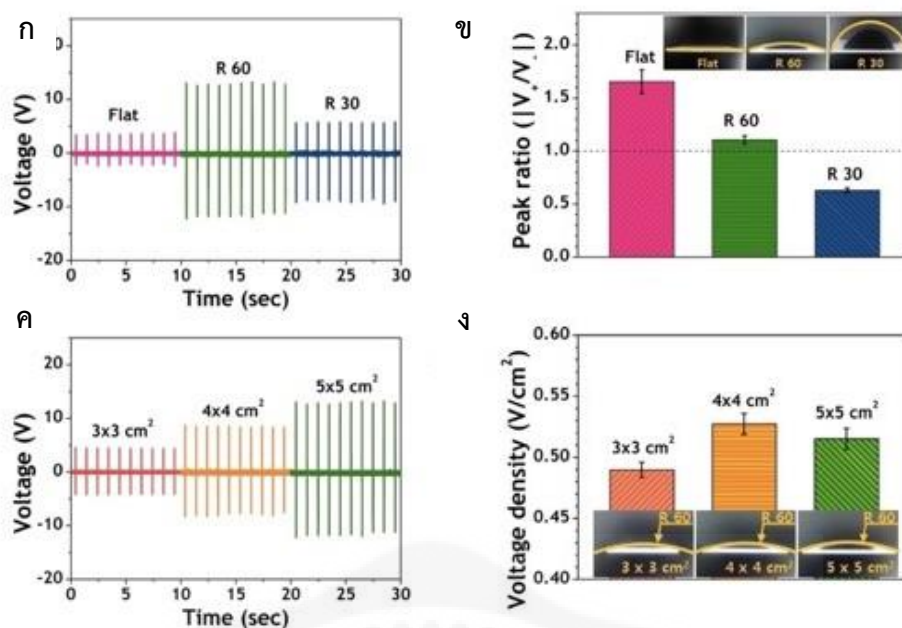
ภาพประกอบ 2.12 แสดงวิธีการสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลส

สมบัติของแบคทีเรียเซลลูโลส(bacterial cellulose, BC)

1. มีความสามารถในการย่อยสลาย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
2. มีสมบัติเชิงกลที่ดี
3. มีรูพรุน ดูดซับน้ำได้มาก
4. มีความโปร่งใส
5. มีความยืดหยุ่น

ในการสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ที่อาศัยพลังงานทางกล ซึ่งได้จากเก็บเกี่ยวพลังงานขึ้นจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์ ทำให้อุปกรณ์นั้นต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญเป็นอย่างมากคือความยืดหยุ่น เพื่อให้มีคุณสมบัติในการประยุกต์เข้ากับอุปกรณ์ต่างๆ และงานวิจัยของ Kim และคณะ (7) ได้บอกถึงขั้นตอนในการสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสเพื่อนำไปสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน โดยแบคทีเรียเซลลูโลสจะถูกผลิตจาก *Acetobacter xylinum* โดยใช้น้ำตาลกลูโคส (glucose) และน้ำตาลฟรุกโตส (fructose) เป็นอาหารให้แก่แบคทีเรีย ซึ่งหลังจากฟักตัวที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 36 ชั่วโมง pellicles หนึ่งถูกเพาะเลี้ยงแบบคงที่ที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน มักปรับ pH 5.25 ทำให้แบคทีเรียเซลลูโลสที่บริสุทธิ์ก็ได้รับจากแบคทีเรียข้างต้น หลังการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ ที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาทีเพื่อสลายแบคทีเรียบนแบคทีเรียเซลลูโลสและล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งสีเปลี่ยนเป็นสีขาว แบคทีเรียที่บริสุทธิ์เตรียมอบแห้งในเตาอบสุญญากาศที่ 50 องศาเซลเซียสและชั่งน้ำหนักเพื่อทำฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส โดยนำแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ละลายด้วยเอทิลอะซิเตท ที่ความเข้มข้น 0.5 w/v% กวนด้วยแม่เหล็ก 100 รอบต่อนาทีแล้วตากให้แห้งที่อุณหภูมิห้องตามวิธีการในเตรดแบคทีเรียเซลลูฟิล์มอัลตราโซนิฟิเคชันถูกใช้เพื่อขจัดฟองอากาศที่เป็นเนื้อเดียวกันด้วยสารละลายจากนั้นฟิล์มนาโนเซลลูโลสของแบคทีเรียที่สร้างใหม่คือเตรียมโดยการหล่อบนจานเพาะเชื้อในเตาอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถดูได้จากภาพประกอบ 2.13 ก.

และจากการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ TENG ของงานวิจัยข้างต้นพบว่าการสร้างฟิล์มแบคทีเรียนาโนเซลลูโลสที่สม่ำเสมอควรบำบัดโดยใช้สารละลายที่ความเข้มข้นเฉพาะดังที่เห็นในภาพประกอบ 2.13 ก. และภาพประกอบ 2.13 ข. ความโค้งของอุปกรณ์ถูกสร้างขึ้นเพื่อเมื่อวัสดุทั้งสองชั้นของอุปกรณ์สัมผัสกันและถูกเข้าด้วยกันด้วยแรงอัด อุปกรณ์ TENG จะสามารถกลับคืนรูปกลับได้ภายใต้แรงกด พื้นผิวแรงเสียดทานทั้งสองสัมผัสกันทางกายภาพส่งผลให้พื้นผิวที่มีประจุตรงข้ามกันขัดเคืองความแตกต่างของคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น พลังงานระหว่างพื้นผิวเมื่อพื้นผิวแรงเสียดทานทั้งสองถูกแยกออกจากกันหรือปล่อยออกจะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองจากนั้นจะมีอิเล็กตรอนไหลผ่านวงจรภายนอกและเกิดประจุสะสม

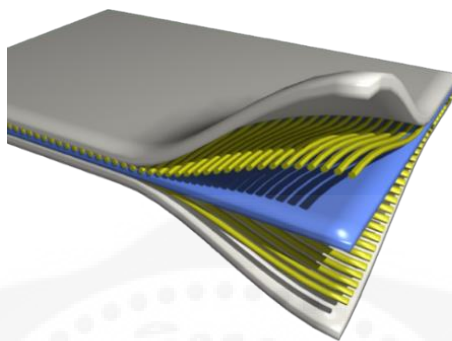


ภาพประกอบ 2.13 ความสัมพันธ์ของการสร้างเอาต์พุตกับลักษณะโครงสร้าง ก. แรงดันเอาต์พุตที่สร้างขึ้น ข. การเปรียบเทียบอัตราส่วนสูงสุดภายใต้รัศมีความโค้งที่แตกต่างกัน ค. แรงดันไฟขาออกที่สร้างขึ้น ง. การเปรียบเทียบความหนาแน่นของแรงดันไฟฟ้าภายใต้ส่วนแรงเสียดทานที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างของความโค้งพื้นที่เสียดทานและขนาดของพื้นที่เสียดทานของอุปกรณ์ TENG ส่งผลต่อคุณสมบัติของอุปกรณ์เป็นอย่างมากโดยแสดงในภาพประกอบ 2.13 ก-ข ความโค้งของอุปกรณ์แต่ละส่วนสามารถมีแรงยึดหยุ่นที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนแรงดันพีคสัมบูรณ์ใกล้เคียงกับ 1 เมื่อรัศมีความโค้งเท่ากับ 60 มม. นั่นคือปริมาณการผลิตไฟฟ้าจะไม่ผันผวนแต่ละจะสม่ำเสมอหลังจากแก้ไขสัญญาณสลับ นอกจากนี้ภาพประกอบ 2.13 ค. แสดงว่าเอาต์พุตแรงดันไฟฟ้าของ TENG ซึ่งบอกได้ว่า เมื่อพื้นที่ผิวเสียดทานที่เพิ่มขึ้น ที่บริเวณพื้นผิวแรงเสียดทานที่กว้างขึ้นจะได้รับประจุที่ถ่ายโอนมากขึ้นและจะทำให้เกิดการผลิไฟฟ้าที่ดีขึ้นเพื่อตรวจสอบขนาดที่มีประสิทธิภาพของพื้นที่เสียดทาน ค่าความหนาแน่นของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแรงดันไฟฟ้าสูงสุดถูกหารด้วยพื้นที่เสียดทาน ดังแสดงในภาพประกอบ 2.13 ง. ซึ่งแสดงพื้นที่เสียดทานที่มีขนาด 4 ซม. × 4 ซม. สามารถใช้กับแบคทีเรียเซลล์โลสในอุปกรณ์ TENG ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามการใช้แบคทีเรียเซลล์โลสบริสุทธิ์มาใช้ใน TENG ยังคงให้ประสิทธิภาพการส่งออกไฟฟ้าที่ต่ำ แนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าด้วยการทำเป็นวัสดุเชิงประกอบจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญ งานวิจัยนี้จึงเป็นอีกงานวิจัยหนึ่งที่ทำให้ความสนใจไปที่การปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของแบคทีเรียเซลล์โลสด้วยการทำเป็นวัสดุเชิงประกอบ

2.5 วัสดุเชิงประกอบ (Composite Material)

วัสดุเชิงประกอบ คือวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดขึ้นไปที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือผสมเป็นเนื้อเดียวกัน แสดงในภาพประกอบ 2.14 โดยวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาทำเป็นวัสดุเชิงประกอบจะมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปวัสดุเชิงประกอบจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ 1. สารเนื้อหลัก (Matrix) 2. เฟสกระจาย (Dispersed phase) หรือเฟสเสริมแรง (Reinforced phase)



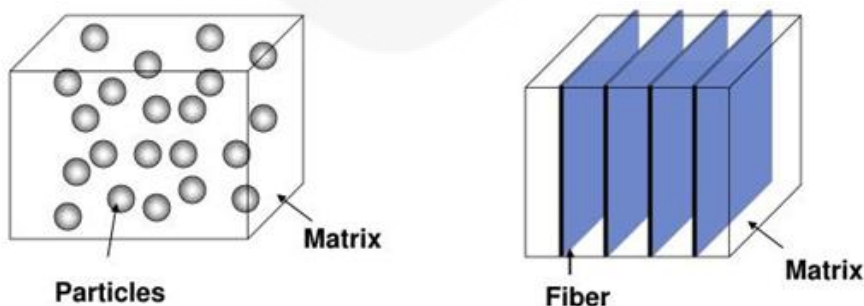
ภาพประกอบ 2.14 วัสดุเชิงประกอบ

2.5.1 สารเนื้อหลัก (Matrix)

สารเนื้อหลักจะทำหน้าที่ปกป้องเฟสกระจายจากความเสียหายที่อาจเกิดจากสภาพแวดล้อมและแรงที่กระทำกับวัสดุ และใช้เป็นตัวยึดเฟสกระจายให้ติดไว้

2.5.2 เฟสกระจาย (Dispersed phase)

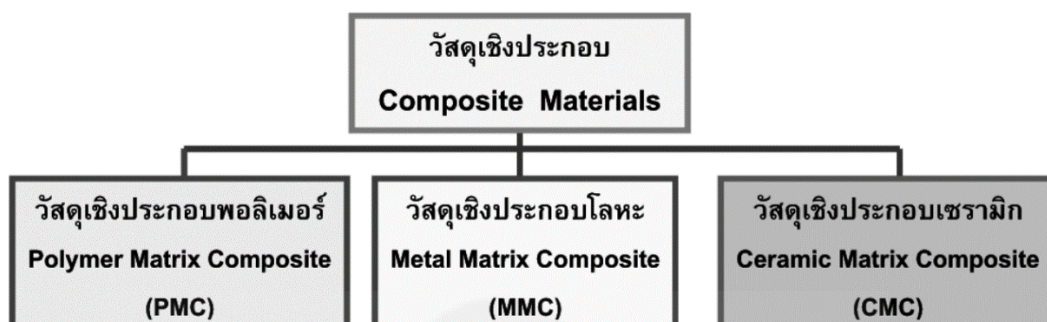
เฟสกระจาย (Dispersed phase) หรือเฟสเสริมแรง (reinforced phase) ส่วนมากจะมีลักษณะเป็นเส้นใย (Fiber) หรือเป็นอนุภาค (Particle) โดยจะมีหน้าที่ในการเสริมความแข็งแรงให้กับสารเนื้อหลัก (Matrix) แสดงในภาพประกอบ 2.15 เพื่อป้องกันไม่ใหวัสดุเชิงประกอบเกิดความเสียหายหรือถูกทำลาย



ภาพประกอบ 2.15 แสดงการจัดเรียงตัวของเฟสกระจายในวัสดุหลัก

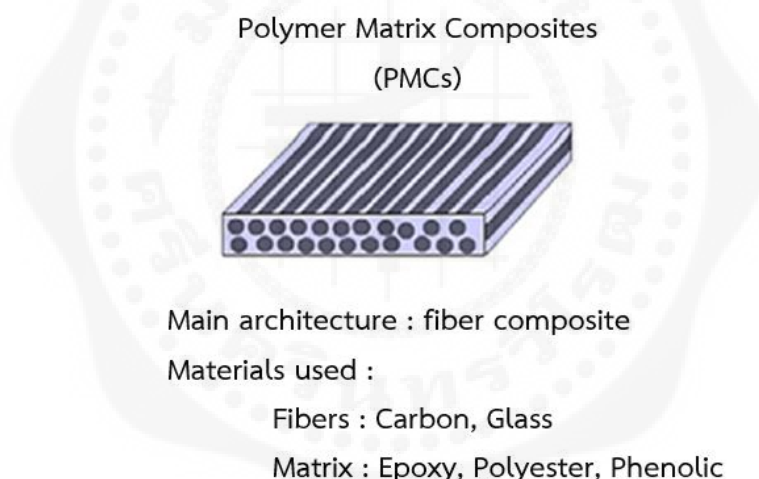
2.5.3 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบสามารถจำแนกประเภทออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC) วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite, MMC) และวัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC)



ภาพประกอบ 2.16 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์

2.5.3.1 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC)

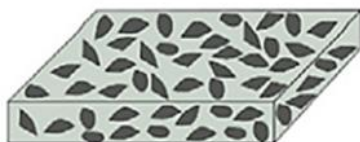


ภาพประกอบ 2.17 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์

วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เป็นการเสริมแรงให้พอลิเมอร์โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงเพื่อทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความแข็งแรงสามารถทนต่อแรงต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้นเช่นแรงดึงหรือแรงกดทับได้สูงขึ้นกว่าวัสดุหลักที่ไม่ได้รับการเสริมแรง โดยตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ได้แก่ เส้นใยแก้ว ไฟเบอร์กลาส เส้นใยคาร์บอน เส้นลวดโลหะ เป็นต้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2.17

2.5.3.2 วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite, MMC)

Metal Matrix Composites (MMCs)



Main architecture : particulate composite

Materials used :

Fibers : SiC

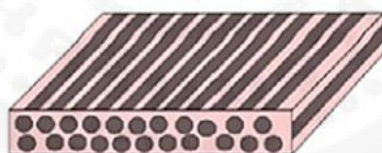
Matrix : Aluminium, Titanium, Magnesium

ภาพประกอบ 2.18 วัสดุเชิงประกอบโลหะ

วัสดุเชิงประกอบโลหะจะมีโลหะเป็นวัสดุหลักอันได้แก่ อะลูมิเนียม เป็นต้น ส่วนวัสดุเสริมแรงของวัสดุเชิงประกอบกลุ่มนี้เป็นวัสดุเซรามิก หรือสารเสริมแรงโลหะ เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ เส้นใยโบรอน เป็นต้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2.18

2.5.3.3 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC)

Ceramic Matrix Composites (CMCs)



Main architecture : fiber composite

Materials used :

Fibers : SiC, Carbon, SiO_2 , Al_2O_3

Matrix : SiC, Carbon, ZrB_2 , HfB_2 , Al_2O_3

ภาพประกอบ 2.19 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก

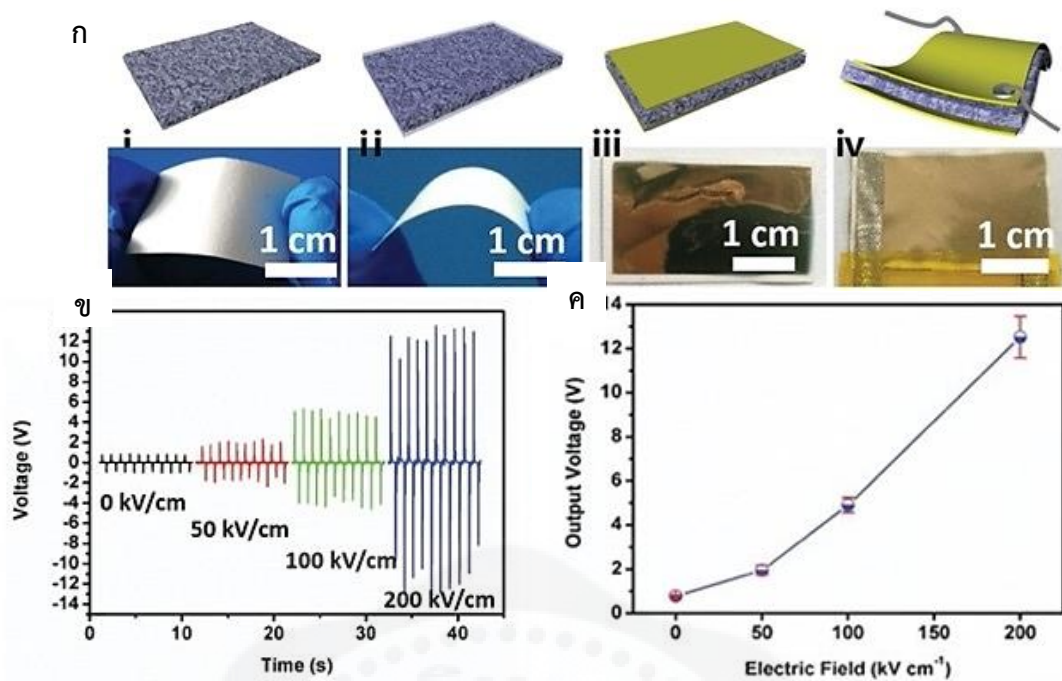
วัสดุเชิงประกอบเซรามิกเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทนทานต่อการกัดกร่อน และไม่นำความร้อนแต่จะมีข้อจำกัดคือเปราะและแตกหักง่ายดังนั้นจึงมีการผสมสารเสริมแรงเพื่อให้วัสดุเชิงประกอบชนิดนี้มีความเหนียวและทนทานมากขึ้นโดยสารเสริมแรงที่ใช้กันอยู่ในรูปแบบเส้นใยหรืออนุภาค เช่น อะลูมินา ซิลิกา ซิลิคอนคาร์ไบด์ เป็นต้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2.19

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นวัสดุเชิงประกอบประเภทพอลิเมอร์ซึ่งจะใช้แบคทีเรียเซลลูโลสและวัสดุไดอิเล็กทริกเป็นเฟสกระจายโดยวัสดุไดอิเล็กทริกที่ใช้คือสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่มีลักษณะโครงสร้างนาโนแบบ 2 มิติ (2D) มีลักษณะของวัสดุอยู่ในรูปของแผ่นซีท (Nanosheet) กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ซึ่งก็คือแบคทีเรียเซลลูโลสเพื่อสร้างอุปกรณ์ TENG

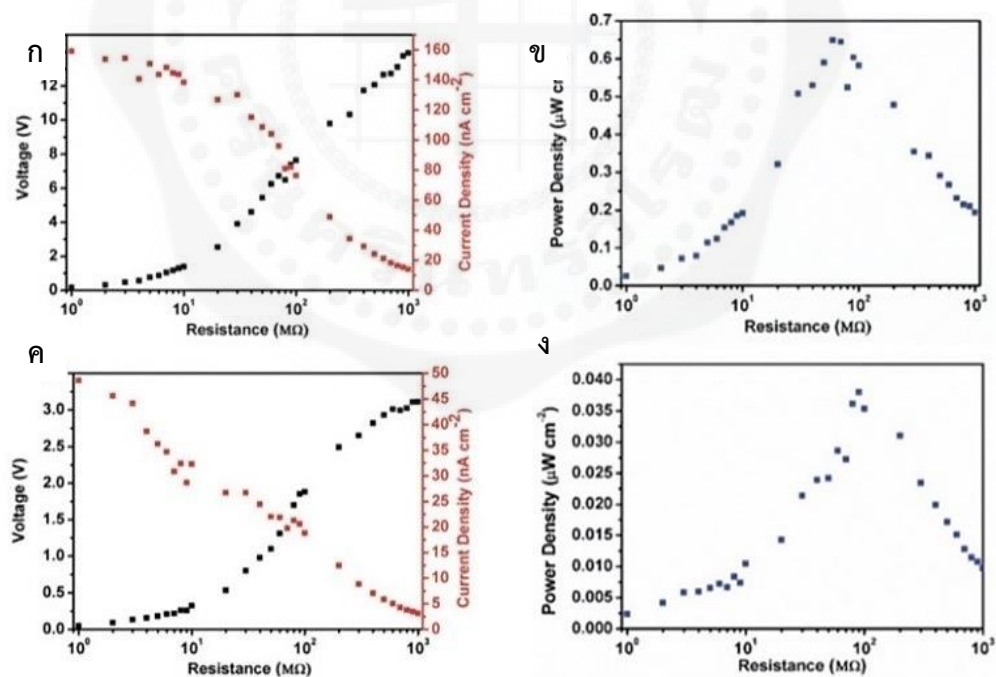
2.6 วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric Material)

วัสดุไดอิเล็กทริกคือวัสดุที่มีความเป็นฉนวน (Insulator) ไฟฟ้าและมีความสามารถในการเกิดโพลาไรซ์ (Polarize) ภายใต้สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) สูงและเป็นวัสดุสำคัญในการเก็บประจุ (Capacitor) ไฟฟ้า โดยทั่วไปโครงสร้างของตัวเก็บประจุ (Capacitor) เกิดจากการนำสารตัวนำ 2 ชั้นมาวางในลักษณะขนานใกล้ๆกันแต่ไม่ได้ติดกันและระหว่างตัวนำทั้งสองจะถูกกั้นด้วยฉนวนที่เรียกว่าไดอิเล็กทริก (Dielectric) กล่าวได้ว่าวัสดุไดอิเล็กทริกนั้นส่งผลต่อค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ TENG ทำให้อุปกรณ์ TENG มีประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ดีขึ้นได้โดยการเติมวัสดุไดอิเล็กทริกลงในแบคทีเรียเซลลูโลสซึ่งในปัจจุบันได้มีงานวิจัยหลากหลายงานที่สนใจในการเติมวัสดุไดอิเล็กทริกเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของอุปกรณ์

โดยงานวิจัยของ Guangjie Zhang และคณะ (16) ได้ทำการเตรียมอนุภาคนาโน BaTiO_3 (BTO) และแบคทีเรียเซลลูโลส (BC) เพื่อมาทำการคอมพอสิตวัสดุซึ่งแสดงในภาพประกอบ 2.20 ก. และทำการทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ซึ่งแสดงในภาพประกอบ 2.20 ข-ค พบว่าประสิทธิภาพเอาต์พุตไฟฟ้าเท่ากับ 14 โวลต์ และความหนาแน่นกระแสลัดวงจรที่ 190 ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และงานวิจัยนี้ได้บอกอีกว่าเมื่อทำการทดสอบและเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานสูงสุดที่เกิดจากโครงสร้าง BTO/BC และ BTO/polydimethylsiloxane ซึ่งแสดงดังในภาพประกอบ 2.21 ก.-ง. และบอกได้ว่าความหนาแน่นของพลังงานสูงสุดที่เกิดจากโครงสร้าง BTO/BC สูงกว่าโครงสร้าง BTO/polydimethylsiloxane ถึงสิบเท่า ในสภาวะตัดโค้งการปรับปรุงคุณสมบัติโดยการคอมพอสิตนี้สามารถกล่าวได้ว่าเป็นการกระจายตัวที่เป็นเนื้อเดียวกันของอนุภาคนาโน BTO ในเมทริกซ์ BC แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการใช้งานที่เป็นไปได้ในฐานะเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานที่ยืดหยุ่น มีน้ำหนักเบา เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

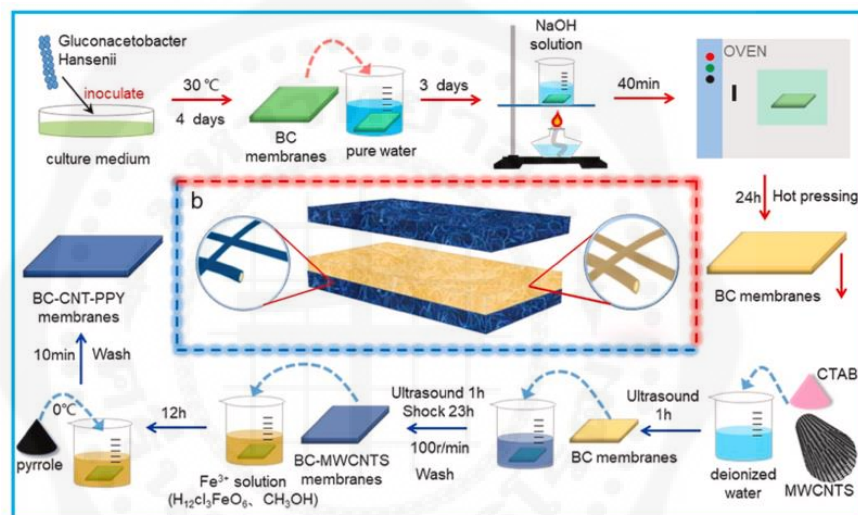


ภาพประกอบ 2.20 ก. กระบวนการผลิตอุปกรณ์กำเนิดพลังงานนาโนที่ใช้กระดาษเพียโซอิเล็กทริก BTO/BC ข. แรงดันไฟฟ้าออกของกระดาษแบบเพียโซอิเล็กทริก BTO/BC ค. แรงดันไฟฟ้าออกเฉลี่ยบนสนามไฟฟ้าแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก



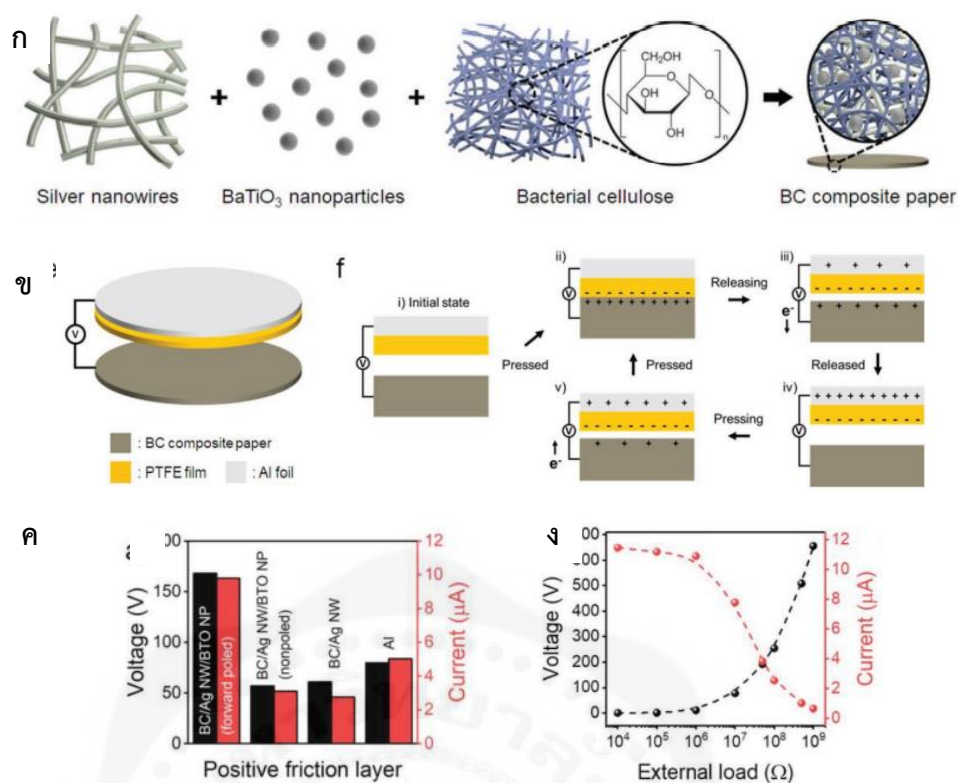
ภาพประกอบ 2.21 ก. ความหนาแน่นกระแสและ ข.ความหนาแน่นกำลัง BTO/BC และ ค. ความหนาแน่นกระแสและ ง. ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของ BTO/PDMS

โดย Jintao Zhang และคณะ (17) ได้ทำการวิจัยและสร้างเครื่องกำเนิดพลังงานนาโนแบบไตรโบอิเล็กทริกสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานแบบกระจาย (TENG) โดยคำนึงถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งส่งผลกระทบยาวจึงเลือกนำแบคทีเรียเซลลูโลส (BC) และทำการพัฒนาอุปกรณ์ โดยสร้าง BC- TENG ที่มีโครงสร้างแบบแซนดวิชประกอบด้วย BC บริสุทธิ์และ BC ที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าที่ตกตะกอนด้วยวัสดุนาโนที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าและเสริมแรงเป็นชั้นแรงเสียดทานและอิเล็กโทรดซึ่งก็คือพอลิไพร์โรล (PPy) และโพลีอะนิลีน (PANI) ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) ซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 2.22 และทำการทดลองย่อยสลาย ซึ่งสามารถบอกได้ว่าสามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 8 ชั่วโมงภายใต้สภาวะของเอนไซม์เซลลูโลสไลติก นอกจากนี้ได้ตรวจสอบประสิทธิภาพเอาต์พุตของ TENG ซึ่งแสดงแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดสูงสุด 29 V กระแสไฟฟ้ 0.6 μA และกำลังขับที่ 3 μW TENG ซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 2.22 งานวิจัยนี้ทำการยืนยันได้ว่าแบคทีเรียเซลลูโลสสามารถนำมาใช้ในอุปกรณ์ TENGs ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



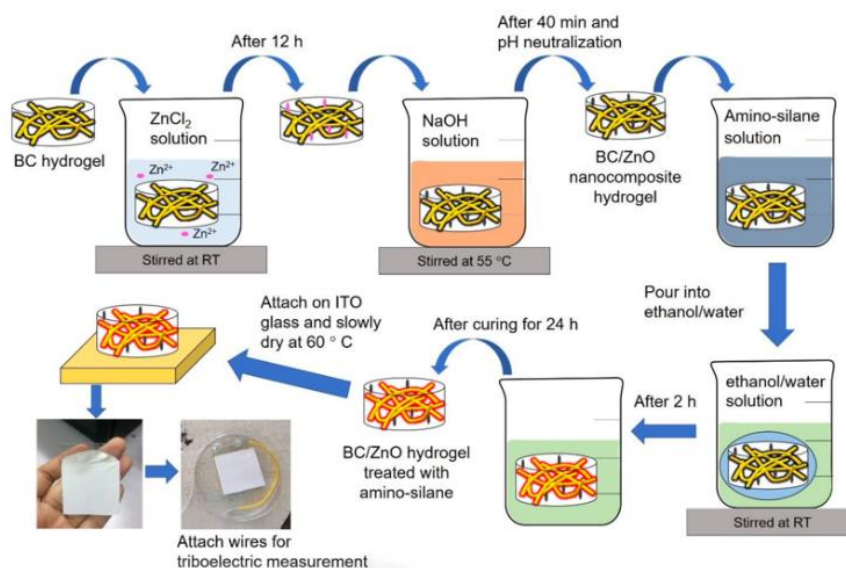
ภาพประกอบ 2.22 ภาพประกอบทางเคมีของ BC บริสุทธิ์และการผลิตคอมโพสิต BC-CNT-PPy ที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้า

งานวิจัยของ Hwisu Oh และคณะ (18) ทำการประดิษฐ์กระดาษคอมโพสิตเฟอร์โรอิเล็กทริกเซลลูโลสที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้า ที่มีอนุภาคนาโนพาทิเคิลของเงินและอนุภาคนาโน BaTiO_3 ซึ่งแสดงองค์ประกอบ โครงสร้างและกลไกการทำงาน ดังภาพประกอบ 2.23 ก-ข โดยทำการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าออกและกระแสไฟของ BC-TENG แบบมีขั้วซึ่งได้ค่าสูงถึง 170 V และ 9.8 μA ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าของ BC-TENG ที่ไม่มีขั้วถึงสามเท่าดังแสดงในภาพประกอบ 2.23 ค. ซึ่งงานวิจัยนี้ทำให้สรุปได้อย่างชัดเจนว่าประสิทธิภาพของ TENG ที่ใช้กระดาษผสม BaTiO_3 ทำให้ BC มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

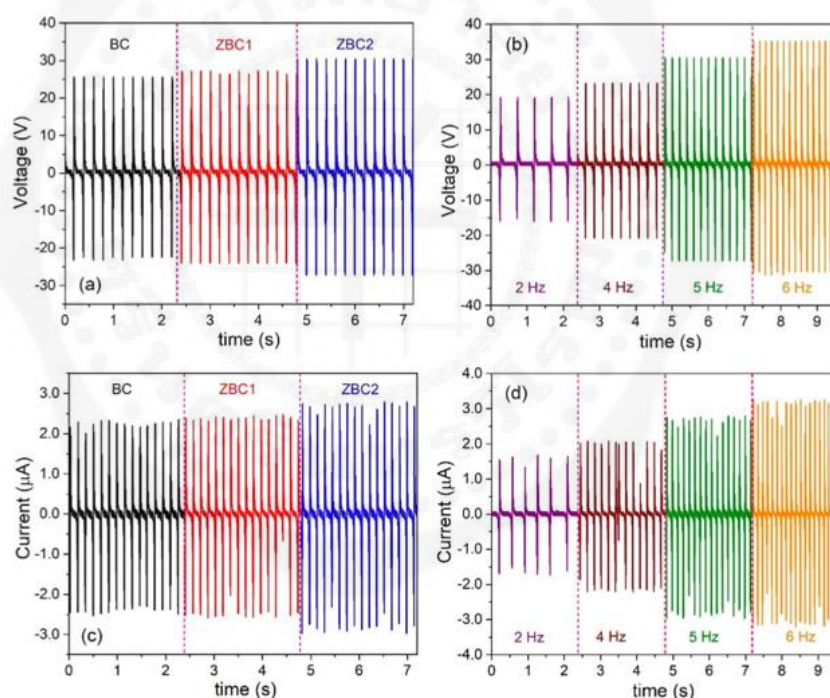


ภาพประกอบ 2.23 ก. แสดงภาพประกอบการทำกระดาษ BC คอมพอสิต ข. แสดงโครงสร้างและกลไกการทำงานของ BC-TENG ค. ประสิทธิภาพเอ้าท์พุทของ TENG แบบต่างๆ ง. แรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสของ BC-TENG

และในงานวิจัยของ Supanan Jakmuangpak และคณะ (19) ได้นำเอาแบคทีเรียเซลลูโลสมาทำนาโนคอมโพสิตกับซิงค์ออกไซด์ BC/ZnO (ZBC) เพื่อนำมาสร้างเป็นเครื่องกำเนิดนาโนไบโอไทรโบอิเล็กทริก (bio-TENG) ซึ่งอธิบายจากสังเคราะห์ได้จากภาพประกอบ 2.24 และจากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการประดิษฐ์ bio-TENG จากฟิล์มนาโนคอมโพสิต BC และ BC/ZnO (ZBC) การรวมตัวกันของอนุภาคนาโน ZnO ในฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสช่วยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ได้ ซึ่งประสิทธิภาพจะขึ้นตามความเข้มข้นของ ZnO โดยในงานวิจัยนี้ ZBC2 ทำให้ได้ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 57.6 โวลต์และ 5.78 ไมโครแอมแปร์ตามลำดับและสามารถดูการเปรียบเทียบได้จากภาพประกอบ 2.25



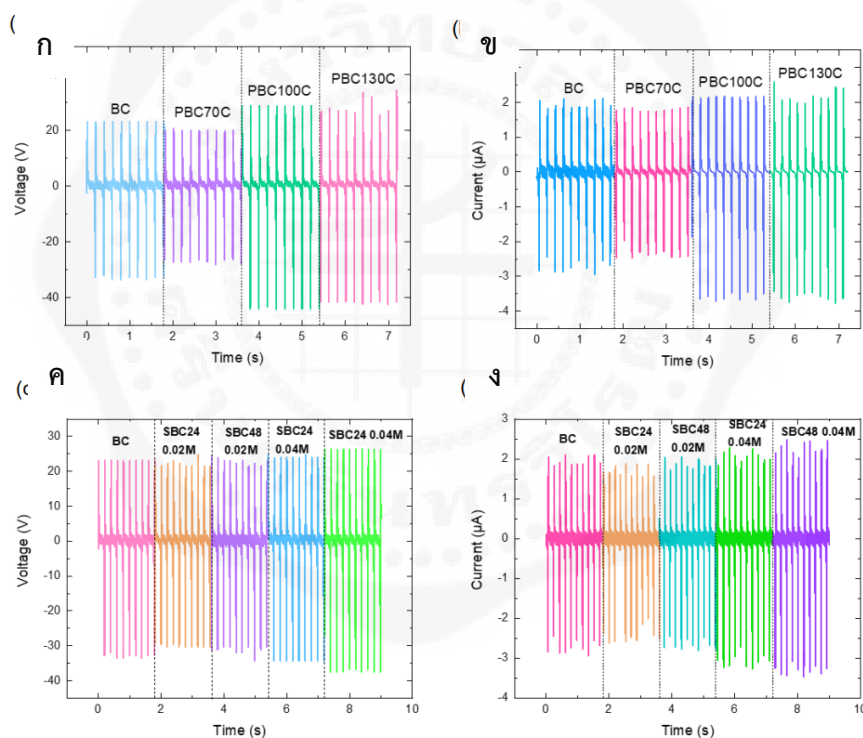
ภาพประกอบ 2.24 กระบวนการผลิตไฮโดรเจลนาโนคอมโพสิต BC/ZnO (ZBC)



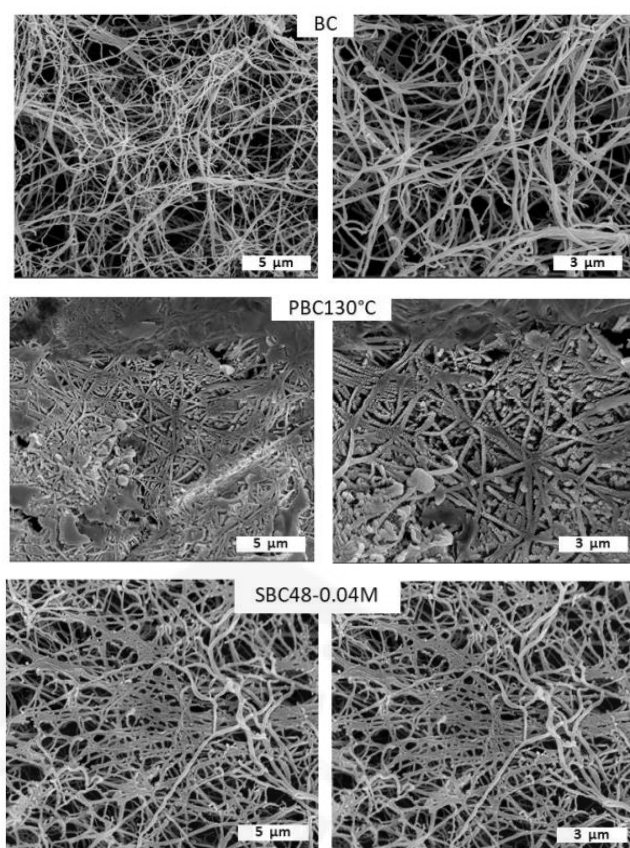
ภาพประกอบ 2.25 แรงดันเอาต์พุตและกระแสของ TENG ที่สร้างขึ้นจากฟิล์ม BC และ ZBC

งานวิจัยของ Natcha Boonchai และคณะ (20) ทำการนำแบคทีเรียเซลลูโลสมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ TENG โดยกระบวนการฟอสฟอรีเลชัน (phosphorylation) และซัลโฟเนชัน (sulfonation) เพื่อปรับปรุงกลุ่มฟังก์ชันที่มีลักษณะเฉพาะบนเส้นใยนาโนของ BC โดยหลังจากสร้าง PBC และ SBC เป็นชิ้นแรงเสียดทานสำหรับ TENG แล้ว ทำการทดสอบค่าการส่งออกทางไฟฟ้าซึ่งแสดงผลดังภาพประกอบ 2.26 แรงดันไฟฟ้าขาออกของ BC บริสุทธิ์คือ 54.4 V และค่ากระแสไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 4.96 μA และ

หลังจากการนำแบคทีเรียเซลลูโลสไปแช่ในสารละลาย NaO_4 เป็นเวลา 24 และ 48 ชั่วโมงด้วยความเข้มข้น 0.02M และ 0.04M ผลลัพธ์ของ TENG แรงดันและกระแสไฟขาออกของเท่ากับ 76.7 V และ $6.35 \mu\text{A}$ และ 64 โวลต์และ $45.94 \mu\text{A}$ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการปรับเปลี่ยนพื้นผิวของ BC ด้วยฟอสฟอรีเลชัน (phosphorylation) และซัลโฟเนชัน (sulfonation) สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของ TENG ทั้งแรงดันและกระแสไฟขาออกนอกจากนี้ดังภาพประกอบ 2.27 ภาพ SEM แสดงให้เห็นว่าฟอสฟอรีเลชัน (phosphorylation) และซัลโฟเนชัน (sulfonation) ทำให้เกิดความขรุขระของพื้นผิวมากขึ้นเมื่อกลุ่มฟังก์ชันเคลือบบนนาโนไฟเบอร์ BC เส้นใย BC มีความหนาแน่นมากขึ้นและรูพรุนระหว่างเส้นใยลดลง ดังนั้นเมื่อทำการ phosphorylated BC และ sulfonated BC ที่จับคู่กับ PTFE ในการทดสอบ TENG ประสิทธิภาพของเอาต์พุตทั้งแรงดันและกระแสดีขึ้นเมื่อเทียบกับ BC ที่ยังไม่ได้ปรับปรุง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการปรับเปลี่ยนพื้นผิวของ BC โดยฟอสฟอรีเลชันหรือซัลโฟเนชันสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของ TENG (ทั้งแรงดันและกระแสไฟขาออก) เมื่อเปรียบเทียบกับ BC ที่ไม่ได้แก้ไข

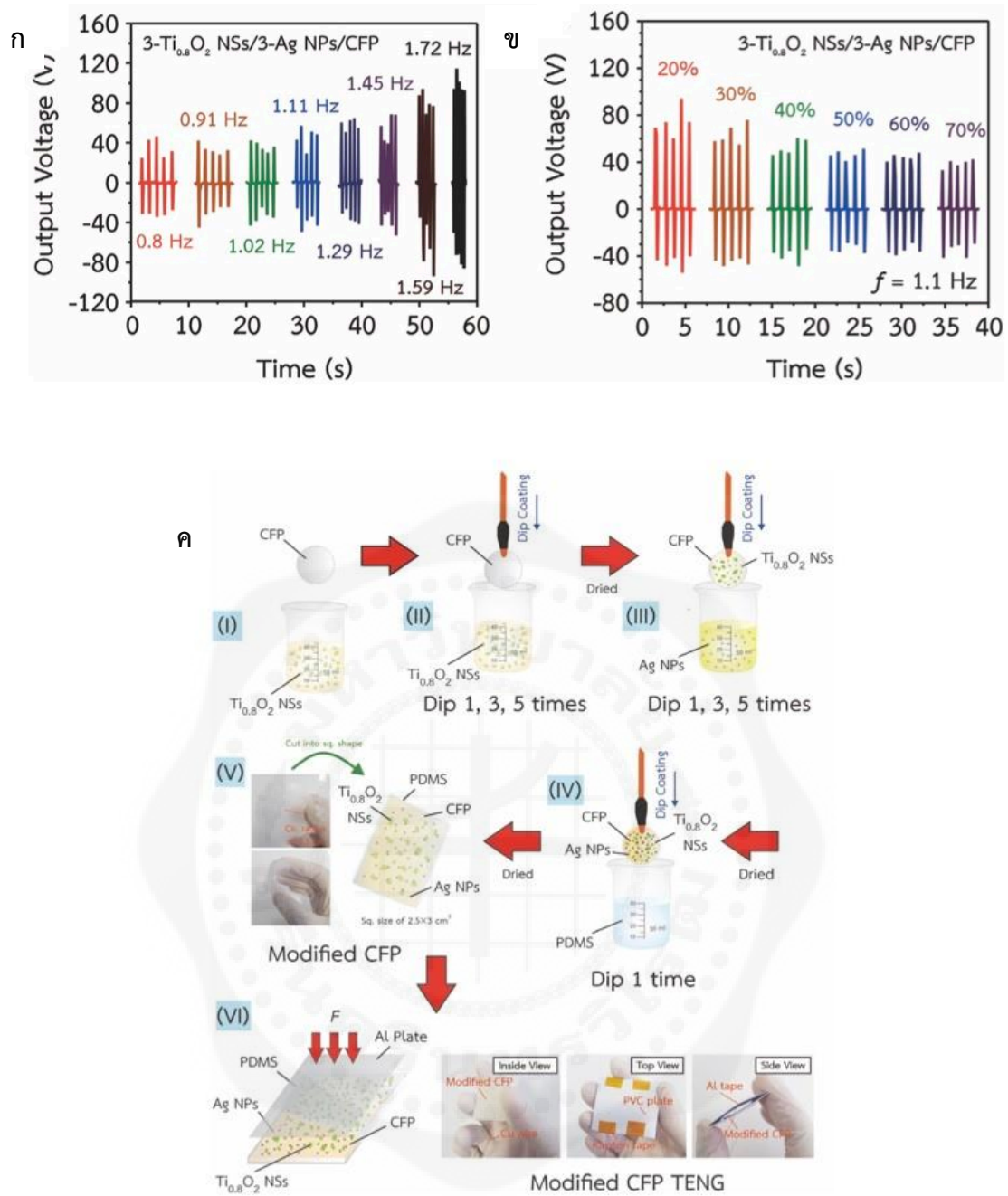


ภาพประกอบ 2.26 ค่าแรงดันและกระแสไฟขาออกของ TENG phosphorylated BC (PBC) (ก,ข) และ TENG sulfonated BC (SBC) (ค,ง)



ภาพประกอบ 2.27 SEM ของ BC phosphorylated BC (PBC) ที่บำบัดที่ 130 องศาเซลเซียสที่กำลังขยาย : 15,000x (ซ้าย) และ 30,000 (ขวา) และ sulfonated BC (SBC) ที่แช่ในสารละลาย NaIO_4 48 ชั่วโมงด้วยความเข้มข้น 0.02M และ 0.04M

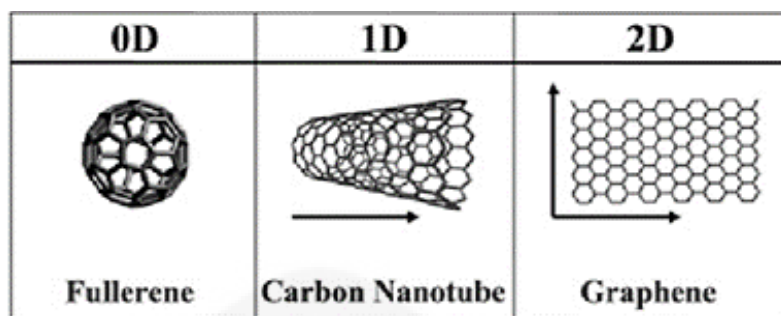
การปรับคุณสมบัติของอุปกรณ์โทรโบอิเล็กทรอนิกส์สามารถทำได้โดยการเติมหรือการดัดแปลงวัสดุไดอิเล็กทริกลงในพอลิเมอร์ธรรมชาติหรือแบคทีเรียเซลลูโลส โดยการเลือกชนิดของวัสดุที่นำมาประกอบเป็น TENG ซึ่งใช้การเลือกคู่วัสดุที่มีค่าการรับและให้อิเล็กตรอนที่แตกต่างกัน และในปริมาณในการเติมวัสดุที่เหมาะสมจะช่วยส่งผลให้อุปกรณ์โทรโบอิเล็กทรอนิกส์มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยในปี 2021 Saichon Sriphan และคณะ (8) ได้ทำการศึกษาไททาเนียมไดออกไซด์นาโนซิท ($\text{Ti}_{0.91}\text{O}_2\text{NSs}$) ที่นำไปคอมพอสิตกับแบคทีเรียเซลลูโลส (BC) เพื่อปรับปรุงสมบัติค่าการส่งออกทางฟ้าของวัสดุ โดยจากทดสอบประสิทธิภาพทางของอุปกรณ์พบว่า ในการคอมพอสิตไททาเนียมไดออกไซด์นาโนซิทกับแบคทีเรียเซลลูโลส ที่แสดงในภาพประกอบ 2.28 ก. และ ข. ส่งผลให้ค่าไดอิเล็กทริกของอุปกรณ์เพิ่มสูงขึ้น และจากค่าไดอิเล็กทริกที่เพิ่มสูงขึ้นและสัมพันธ์กับค่าทางไฟฟ้า ซึ่งสรุปได้ว่าในปรับปรุงคุณสมบัติของอุปกรณ์ TENG สามารถทำได้โดยการใส่วัสดุไดอิเล็กทริกลงบนแบคทีเรียเซลลูโลสหรือเรียกได้ว่าการคอมพอสิตดังภาพประกอบ 2.28 ข.



ภาพประกอบ 2.28 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มคอมโพสิต

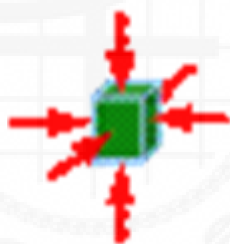
2.7 วัสดุนาโนไดอิเล็กทริก

วัสดุนาโนไดอิเล็กทริก คือวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตร โดยวัสดุหรือโครงสร้างที่มีขนาดในระดับนาโนถูกจำแนกได้เป็น ระบบศูนย์มิติ (0D), ระบบหนึ่งมิติ (1D) และระบบสองมิติ (2D) แสดงตัวอย่างเปรียบเทียบดังภาพประกอบ 2.29



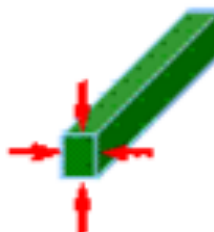
ภาพประกอบ 2.29 วัสดุนาโนระบบ 0D, 1D และ 2D

1. ระบบศูนย์มิติ (zero-dimensional systems , 0D) คือโครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพทั้งสามมิติถูกจำกัดในช่วงนาโนดังแสดงในภาพประกอบ 2.30



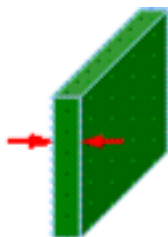
ภาพประกอบ 2.30 การจำกัดมิติในระบบศูนย์มิติ

2. ระบบหนึ่งมิติ (one-dimensional systems , 1D) คือโครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพสองมิติถูกจำกัดอยู่ในช่วงนาโนและมีมิติอีกหนึ่งมิติที่ไม่ได้ถูกจำกัดขนาดในช่วงนาโนดังแสดงในภาพประกอบ 2.31



ภาพประกอบ 2.31 การจำกัดมิติในระบบหนึ่งมิติ

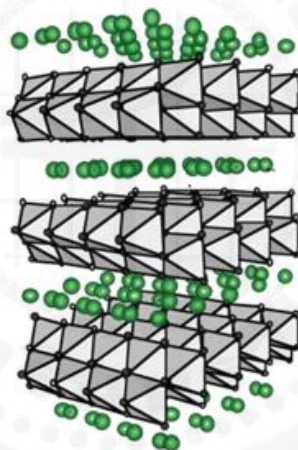
3. ระบบสองมิติ (two-dimensional systems , 2D) คือโครงสร้างที่มีมิติทางกายภาพหนึ่งมิติที่ถูกจำกัดในช่วงนาโนและมีมิติอีกสองมิติที่ไม่ได้ถูกจำกัดขนาดในช่วงนาโนดังแสดงในภาพประกอบ 2.32



ภาพประกอบ 2.32 การจำกัดมิติในระบบสองมิติ

มิติที่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดลักษณะของวัสดุนาโนรวมทั้งทางกายภาพ , เคมีและชีวภาพ เมื่อมิติลดลงจะทำให้การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนพื้นผิวต่อปริมาตร (Surface area) เพิ่มขึ้น ทำให้รู้ได้ว่าวัสดุนาโนมิติที่เล็กกว่านั้นมีพื้นที่ผิวที่สูงกว่ามิติที่ใหญ่ โดยในงานวิจัยนี้สนใจวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบ 2 มิติ คือวัสดุไดอิเล็กทริกออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์

2.8 โครงสร้างออกไซด์นาโนซีทแบบโครงสร้างเลพิโดโครไซต์(Lepidocrocite)



ภาพประกอบ 2.33 แสดงโครงสร้างเลพิโดโครไซต์

โครงสร้างเลพิโดโครไซต์จะมีสมมาตรแบบออร์โธโรมบิก มีรูปแบบโครงสร้าง 2 มิติ (2D) และมีสูตรโครงสร้าง $A_xM_yTi_{2-y}O_4$ เช่น $X_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ โดยจากภาพ 2.34 จุดสีเขียว ● คือธาตุ X (ธาตุโลหะหรือธาตุอัลคาไลน์) และโครงสร้างเตตระโกนอล ◼ คือธาตุ Ti (ไทเทเนียม) ที่อยู่ภายในโครงสร้างเตตระโกนอลเชื่อมด้วย O (ออกซิเจน) ที่เป็นจุดสีดำระหว่างมุม ส่วนสีขาวตรงโครงสร้างเตตระโกนอลคือธาตุ Ni (นิกเกิล)

โดยในปี 2020 Thitirat Charoonsuk และคณะ (10) ได้ทำการศึกษาการนำไฟฟ้ากระแสสลับและสมบัติไดอิเล็กทริกของโครงสร้างเลพิโดโครไซต์แบบ $A_xM_yTi_{2-y}O_4$ โดยโครงสร้างเลพิโดโครไซต์ที่นำมาศึกษา คือ $Cs_{0.7}M_{0.35}Ti_{1.65}O_4$, $K_{0.8}M_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ($M = Zn, Ni$) และ $Cs_{0.7}K_{0.1}Zn_{0.35}Ti_{1.65}O_4$ พบว่า $Cs_{0.7}Zn_{0.35}Ti_{1.65}O_4$ ซึ่งจากการทำงานร่วมกันขององค์ประกอบ x, A+ และ M ภายในโครงสร้างต่อความคงตัวของโครงสร้างที่อุณหภูมิสูง, การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ, ลักษณะการเผาผลาญและคุณสมบัติทางไฟฟ้าใน lepidocrocite titanate พบว่าในสารตัวอย่างที่มี Cs ใน interlayer เช่น $Cs_{0.7}Zn_{0.35}Ti_{1.65}O_4$, ค่าการนำไฟฟ้ากระแสสลับทั้งหมดคือ $\sim 7 \times 10^{-8}$ ถึง $2 \times 10^{-6} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ที่ 200–350 °C และพลังงานกระตุ้น $E_a \sim 865 \text{ meV}$ และสารตัวอย่างที่มี K ใน interlayer เช่น $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ค่าการนำไฟฟ้าของสูงกว่า 1 ลำดับ ที่ 25–150 °C ซึ่งต่ำกว่าและพลังงานกระตุ้น $E_a \sim 250 \text{ meV}$ ที่น้อยกว่าซึ่งความแตกต่างนี้มาจากการมี Cs เป็นองค์ประกอบและสารตัวอย่างที่มี Cs+ ใน interlayer โดยมี K+ ในโครงสร้างคือ $Cs_{0.7}K_{0.1}Zn_{0.35}Ti_{1.65}O_4$ ทำให้ค่าการนำไฟฟ้า อุณหภูมิและค่าพลังงานกระตุ้นลดลงไปอีก ซึ่ง Cs กับ K นั้นส่งผลให้เกิดการสร้างการชดเชยประจุ, การลดความหนาแน่นของประจุในแผ่นและการดูดกลืนไฟฟ้าสถิต และระยะห่างระหว่างชั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่า มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก สูงสุดที่ 109 โดยที่กล่าวมาแสดงให้เห็นศักยภาพของการแปรผันขององค์ประกอบต่อการปรับคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากการทำงานร่วมกันขององค์ประกอบ x, A+ และ M ภายในโครงสร้างเลพิโดโครไซต์แบบ $A_xM_yTi_{2-y}O_4$

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มแบคทีเรียเซลล์ูโลสและสารประกอบออกไซด์นาโนซีท เพื่อนำมาคอมพอสิตโดยแบ่งเป็นขั้นตอนการเตรียมฟิล์มแบคทีเรียเซลล์ูโลส การสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์นาโนซีทและการเตรียมวัสดุคอมพอสิตระหว่างแบคทีเรียเซลล์ูโลสกับสารประกอบออกไซด์โครงสร้างนาโนซีทเพื่อนำมาสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator)

3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มแบคทีเรียเซลล์ูโลส

3.1.1 อุปกรณ์

1. ปีกเกอร์
2. กรวยแก้วกรองสาร
3. กระดาษกรอง
4. ขวดรูปชมพู่
5. หลอดทดลอง
6. หลอดแก้วหยดสาร
7. กระบอกตวง
8. ถาด

3.1.2 เครื่องมือ

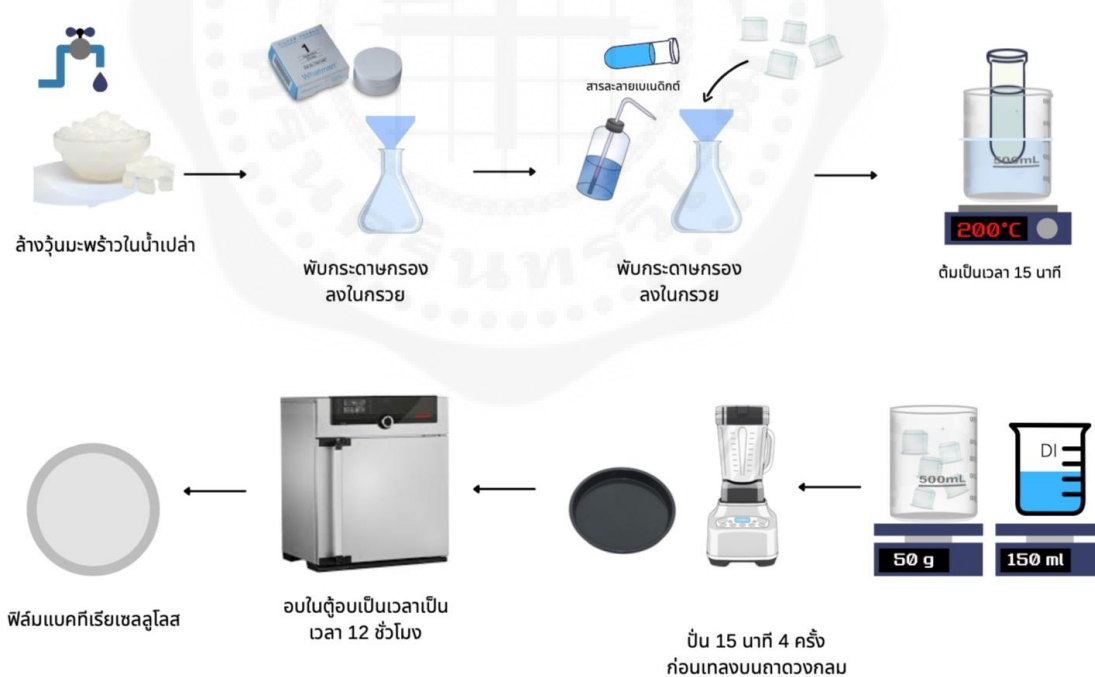
1. เครื่องปั่น
2. เครื่องชั่งดิจิทัล
3. เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน
4. ตู้อบ

3.1.3 สารเคมี

1. วุ้นมะพร้าว
2. น้ำปราศจากไอออน
3. เบเนดิกต์

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส

1. นำวุ้นมะพร้าวมาล้างน้ำจนกว่าค่า pH เป็นกลาง (ไม่มีน้ำตาล) ดังภาพประกอบ 3.1
2. ตรวจสอบน้ำตาลในวุ้นมะพร้าวโดยใช้เบเนดิกต์โดยพับกระดาษกรองแล้วใส่ลงในกรวยแก้วกรองสาร ที่มีขูดรูปชมพู่ลองอยู่จากนั้นนำวุ้นมะพร้าวประมาณ 4 ลูกใส่กระดาษกรองแล้วหยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านวุ้นมะพร้าวแล้วนำน้ำที่ได้ใส่ในหลอดทดลองแล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 200 องศา เซลเซียสเป็นเวลา 15 นาทีถ้าต้มแล้วได้สีน้ำตาลแสดงว่ายังมีน้ำตาลอยู่ยังต้องนำไปล้างน้ำอีก แต่ถ้า หากต้มแล้วได้สีฟ้าแสดงว่าวุ้นมะพราวนั้นสามารถใช้ได้ (ไม่มีน้ำตาล) ดังภาพประกอบ 3.1
3. นำวุ้นมะพร้าวที่ผ่านการทดสอบแล้วไม่มีน้ำตาลในขั้นตอนที่ 2. มาปั่นโดยใช้วุ้นมะพร้าว 5 กรัม : น้ำโดยปราศจากไอออน 150 มิลลิลิตร โดยปั่น 15 นาที 4 รอบ แล้วพักเพื่อไม่ให้เครื่องปั่นร้อนเกินไป ดังภาพประกอบ 3.1
4. นำวุ้นมะพร้าวที่ปั่นเสร็จเทใส่ถาดแล้วนำเข้าเครื่องอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 3.1
5. เมื่ออบจนแห้งจะได้เป็นแผ่นฟิล์มที่อยู่ในถาดจากนั้นแกะแผ่นฟิล์มออกจากถาดเพื่อวัดขนาดและดูคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มที่ได้ ดังภาพประกอบ 3.1



ภาพประกอบ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส

3.3 อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท

3.3.1 อุปกรณ์

1. ปีกเกอร์
2. ขวดรูปชมพู่
3. ซ้อนตักสาร
4. ขวดดูแรน
5. พาราฟิล์ม

3.3.2 เครื่องมือ

1. เครื่องชั่งดิจิตอล
2. ตู้อบสาร

3.3.3 สารเคมี

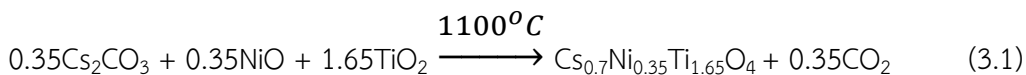
1. $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$
2. $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$
3. $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$
4. $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$
5. $\text{K}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$
6. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 37% 1 M
7. น้ำปราศจากไอออน

3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท

3.4.1 การเตรียมสารประกอบออกไซด์โครงสร้างเลพิโดโครไซต์ ($\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)

3.4.1.1 การเตรียมผงผลึก $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ด้วยการทำปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (Solid State reaction)

ทำการเตรียมผงผลึก $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ดังสมการเคมีต่อไปนี้



1. ชั่งสารตั้งต้น คือ Cs_2CO_3 , NiO , TiO_2 ตามสัดส่วนที่คำนวณได้จากสมการ มาผสมรวมกัน
2. นำสารทั้ง 3 ที่กล่าวมาในข้อ 1. ใส่ในหม้อบดแบบลูกบอล (Ball milling) ซึ่งบรรจุเม็ดบอลอยู่ภายใน ทำการเติมเอทานอลปริมาณ $\frac{3}{4}$ ของหม้อบด ทำการบดด้วยเครื่องบดกำลังสูง (vibratory milling) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 3.2
3. นำสารที่ได้มาล้างทำความสะอาด เพื่อแยกสารที่ได้ออกจากเม็ดบอล และทำการระเหยตัวทำละลายเอทานอลออกด้วยการอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 3.2

4. นำมาสารที่ได้เผาไหม้ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิที่ 10°C/นาที ดังภาพประกอบ 3.2
5. นำผง $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ที่ได้มาบดและคัดขนาด (sieving)
6. ทำการตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิค XRD

3.4.1.2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนโปรตรอน (Proton Exchange)

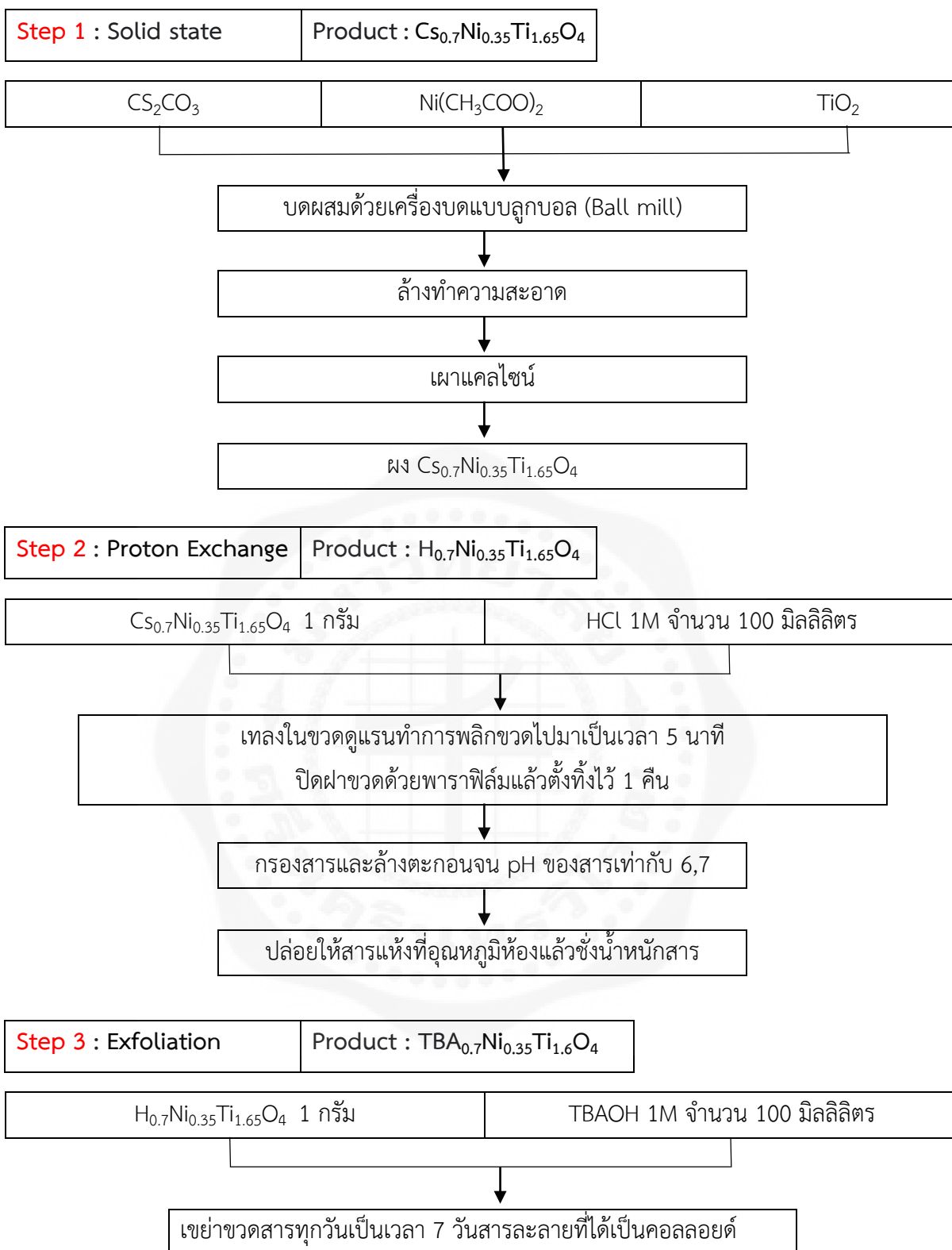
1. นำสาร $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ชั่งในเครื่องชั่งดิจิทัลจำนวน 1 กรัม จากนั้นนำสารที่ชั่งเทใส่ขวดดูแรน ดังภาพประกอบ 3.2
2. นำ HCl 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร เทลงในขวดดูแรนที่มีสารอยู่จากนั้นทำการพลิกขวดไปมาเป็นเวลา 5 นาที ดังภาพประกอบ 3.2
3. ปิดฝาขวดด้วยพาราฟิล์มเพื่อให้ฝาแน่นสนิทเพื่อป้องกันไม่ให้สารไม่หกและป้องกันสิ่งปนเปื้อน แล้วตั้งทิ้งไว้ 1 คืน ดังภาพประกอบ 3.2
4. ทำการกรองสาร $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ที่ผสมกับ HCl 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร เพื่อหาน้ำหนักของสารที่กรองได้โดยทำการชั่งกระดาษกรองสาร จากนั้นจึงทำการกรองสารโดยกรองสารจนได้ค่า pH=6,7 ถ้ายังไม่เป็นไปตามค่า pH ที่ต้องการให้หยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านกระดาษกรองสารที่กรองสารอยู่เพื่อให้ได้ค่า pH=6,7 เมื่อกรองสารเสร็จจึงให้สารแห้งสนิทเป็นเวลา 1 คืน ดังภาพประกอบ 3.2
5. ชั่งสารที่กรองพร้อมกระดาษกรองเพื่อหาน้ำหนักของสารโดยนำน้ำหนักสารกับกระดาษกรองที่ได้ลบกับกระดาษกรองก่อนหน้านั้นที่ซึ่งจะทำให้ได้น้ำหนักสาร โดยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนโปรตรอนเป็นไปตามสมการที่ 3.2



3.4.1.3 กระบวนการแยกชั้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Exfoliation)



1. ชั่งสาร $\text{H}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ จำนวน 1 กรัมโดยเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนโปรตรอนในข้อ 3.4.1.2
2. นำสาร TBAOH ปริมาตร 3.7 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 1 โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็น 100 มิลลิลิตร ดังภาพประกอบ 3.2
3. นำสาร $\text{H}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ในข้อ 1. เทลงขวดดูแรนแล้วใส่สารละลาย TBAOH ในข้อ 2. ผลที่ได้เป็นสารละลายมีตะกอนขาวขุ่น ปิดฝาขวดให้สนิทแล้วนำพาราฟิล์มปิดฝาขวดให้แน่น ดังภาพประกอบ 3.2
4. เขย่าขวดสารทุกวันเป็นเวลา 7 วันสารละลายที่ได้เป็นคอลลอยด์ ดังภาพประกอบ 3.2
5. นำสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ได้ทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis

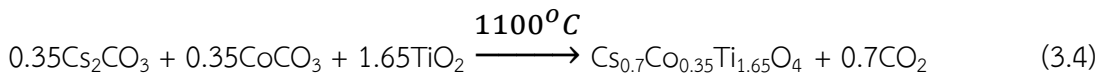


ภาพประกอบ 3.2 แสดงแผนภาพสรุปขั้นตอนในการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$

3.4.2 การเตรียมสารประกอบออกไซด์โครงสร้างเลพิโดโครไซต์ ($\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)

3.4.2.1 การเตรียมผงผลึก $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ด้วยการทำปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (Solid State reaction)

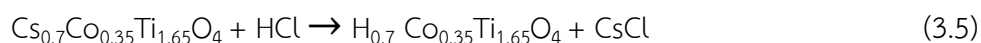
ทำการเตรียมผงผลึก $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ดังสมการเคมีต่อไปนี้



1. ชั่งสารตั้งต้น คือ Cs_2CO_3 , CoCO_3 , TiO_2 ตามสัดส่วนที่คำนวณได้จากสมการ มาผสมรวมกัน
2. นำสารทั้ง 3 ที่กล่าวมาในข้อ 1. ใส่ในหม้อบดแบบลูกบอล (Ball milling) ซึ่งบรรจุเม็ดบอลอยู่ภายใน ทำการเติมเอทานอลปริมาณ $\frac{3}{4}$ ของหม้อบด ทำการบดด้วยเครื่องบดกำลังสูง (vibratory milling) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 3.3
3. นำสารที่ได้มาล้างทำความสะอาด เพื่อแยกสารที่ได้ออกจากเม็ดบอล และทำการระเหยตัวทำละลายเอทานอลออกด้วยการอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 3.3
4. นำมาสารที่ได้เผาไหม้ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิที่ $10^\circ\text{C}/\text{นาที่}$ ดังภาพประกอบ 3.3
5. นำผง $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ที่ได้มาบดและคัดขนาด (sieving)
6. ทำการตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิค XRD

3.4.2.2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange)

1. นำสาร $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ชั่งในเครื่องชั่งดิจิทัลจำนวน 1 กรัม จากนั้นนำสารที่ชั่งเทใส่ขวดดูแรน ดังภาพประกอบ 3.3
2. นำ HCl 1M จำนวน 100 ml เทลงในขวดดูแรนที่มีสารอยู่จากนั้นทำการพลิกขวดไปมาเป็นเวลา 5 ดังภาพประกอบ 3.3
3. ปิดฝาขวดด้วยพาราฟิล์มเพื่อให้ฝาแน่นสนิทเพื่อป้องกันไม่ให้สารไม่หกและป้องกันสิ่งปนเปื้อนแล้วตั้งทิ้งไว้ 1 คืน ดังภาพประกอบ 3.3
4. ทำการกรองสาร $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ที่ผสมกับ HCl 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร เพื่อหาน้ำหนักของสารที่กรองได้โดยการชั่งกระดาษกรองสาร จากนั้นจึงทำการกรองสารโดยกรองสารจนได้ค่า pH=6,7 ถ้ายังไม่เป็นไปตามค่า pH ที่ต้องการให้หยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านกระดาษกรองสารที่กรองสารอยู่เพื่อให้ได้ค่า pH=6,7 โดยเมื่อกรองสารเสร็จทิ้งให้สารแห้งสนิทเป็นเวลา 1 คืน ดังภาพประกอบ 3.3
5. ชั่งสารที่กรองพร้อมกระดาษกรองเพื่อหาน้ำหนักของสารโดยนำน้ำหนักสารกับกระดาษกรองที่ได้ลบกับกระดาษกรองก่อนหน้านี้นี้ซึ่งจะทำให้ได้น้ำหนักสาร โดยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นไปตามสมการที่ 3.5

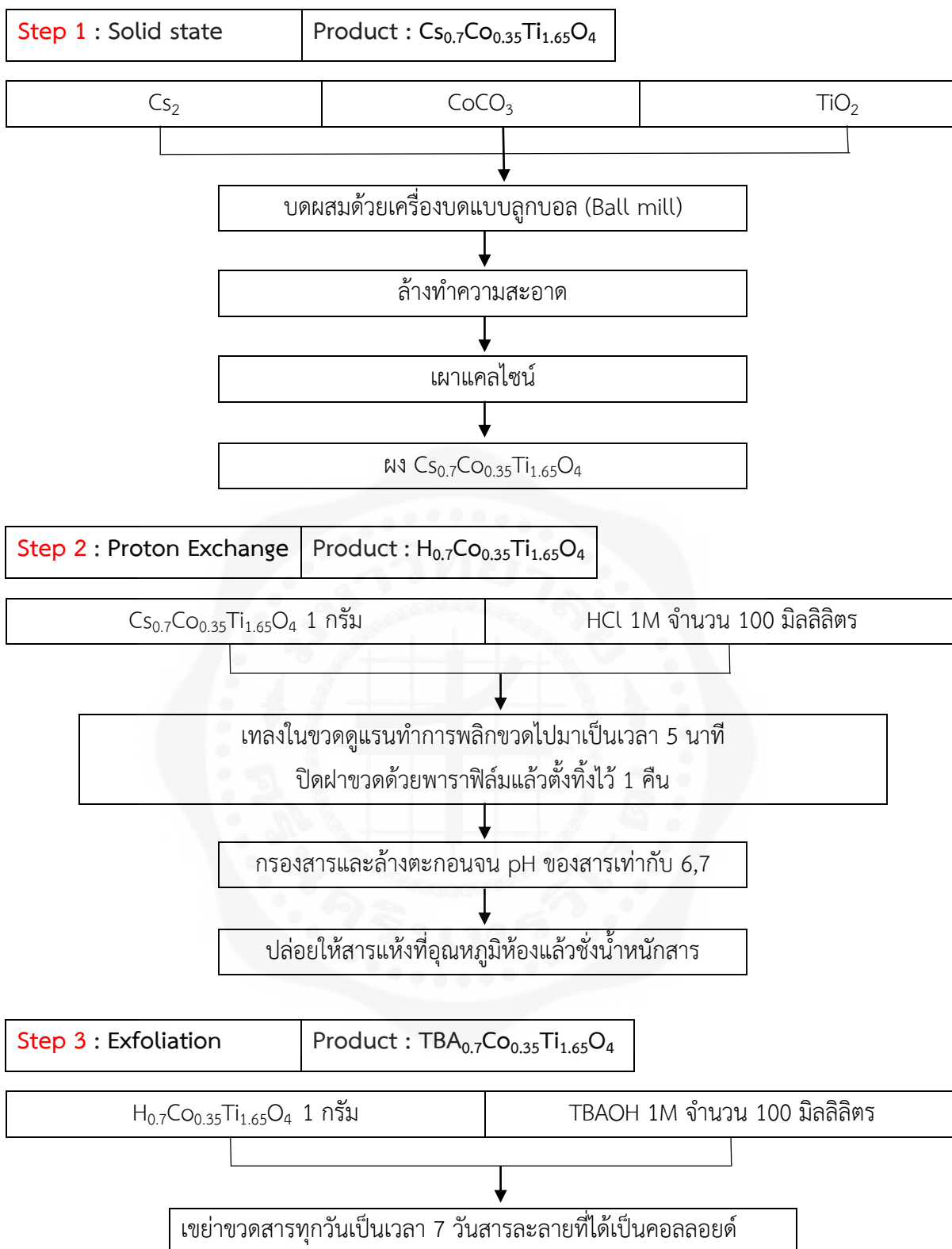


3.4.2.3 กระบวนการแยกชั้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Exfoliation)



1. ชั่งสาร $\text{H}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ จำนวน 1 กรัมโดยเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนโปรตอนในข้อ 3.4.2.2
2. นำสาร TBAOH ปริมาตร 3.7 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 1 โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็น 100 มิลลิลิตร ดังภาพประกอบ 3.3
3. นำสาร $\text{H}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ในข้อ 1. เทลงขวดดูแรนแล้วใส่สารละลาย TBAOH ในข้อ 2. ผลที่ได้เป็นสารละลายมีตะกอนขาวขุ่น ปิดฝาขวดให้สนิทแล้วนำพาราฟิล์มปิดฝาขวดให้แน่น ดังภาพประกอบ 3.3
4. เขย่าขวดสารทุกวันเป็นเวลา 7 วันสารละลายที่ได้เป็นคอลลอยด์ ดังภาพประกอบ 3.3
5. นำสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ได้ทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis



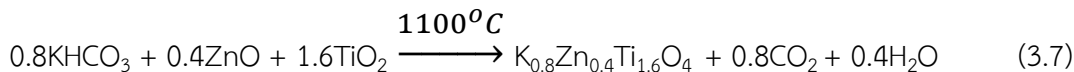


ภาพประกอบ 3.3 แสดงแผนภาพสรุปขั้นตอนในการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ $(\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$

3.4.3 การเตรียมสารประกอบออกไซด์โครงสร้างเลพิโดโครไซต์ ($K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$)

3.4.3.1 การเตรียมผงผลึก $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ด้วยการทำปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (Solid State reaction)

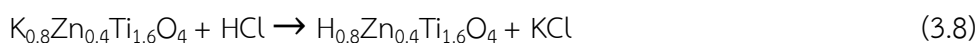
ทำการเตรียมผงผลึก $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ดังสมการเคมีต่อไปนี้



1. ชั่งสารตั้งต้น คือ $KHCO_3$, ZnO , TiO_2 ตามสัดส่วนที่คำนวณได้จากสมการ มาผสมรวมกัน
2. นำสารทั้ง 3 ที่กล่าวมาในข้อ 1. ใส่ในหม้อบดแบบลูกบอล (Ball milling) ซึ่งบรรจุเม็ดบอลอยู่ภายใน ทำการเติมเอทานอลปริมาณ $\frac{3}{4}$ ของหม้อบด ทำการบดด้วยเครื่องบดกำลังสูง (vibratory milling) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 3.4
3. นำสารที่ได้มาล้างทำความสะอาด เพื่อแยกสารที่ได้ออกจากเม็ดบอล และทำการระเหยตัวทำละลายเอทานอลออกด้วยการอบที่อุณหภูมิ $80^\circ C$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 3.4
4. นำมาสารที่ได้เผาไหม้ที่อุณหภูมิ $1100^\circ C$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิที่ $10^\circ C/นาท$ ดังภาพประกอบ 3.4
5. นำผง $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ที่ได้มาบดและคัดขนาด (sieving)
6. ทำการตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิค XRD

3.4.3.2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange)

1. นำสาร $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ชั่งในเครื่องชั่งดิจิทัลจำนวน 1 กรัม จากนั้นนำสารที่ชั่งเทใส่ขวดดูแรน ดังภาพประกอบ 3.4
2. นำ HCl 1M จำนวน 100 ml เทลงในขวดดูแรนที่มีสารอยู่จากนั้นทำการพลิกขวดไปมาเป็นเวลา 5 นาที ดังภาพประกอบ 3.4
3. ปิดฝาขวดด้วยพาราฟิล์มเพื่อให้ฝาแน่นสนิทเพื่อป้องกันไม่ให้สารไม่หกและป้องกันสิ่งปนเปื้อน แล้วตั้งทิ้งไว้ 1 คืน ดังภาพประกอบ 3.4
4. ทำการกรองสาร $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ที่ผสมกับ HCl 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร เพื่อหาน้ำหนักของสารที่กรองได้โดยทำการชั่งกระดาษกรองสาร จากนั้นจึงทำการกรองสารโดยกรองสารจนได้ค่า pH=6,7 ถ้ายังไม่เป็นไปตามค่า pH ที่ต้องการให้หยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านกระดาษกรองสารที่กรองสารอยู่เพื่อให้ได้ค่า pH=6,7 โดยเมื่อกรองสารเสร็จทิ้งให้สารแห้งสนิทเป็นเวลา 1 คืน ดังภาพประกอบ 3.4
5. ชั่งสารที่กรองพร้อมกระดาษกรองเพื่อหาน้ำหนักของสารโดยนำน้ำหนักสารกับกระดาษกรองที่ได้ลบกับกระดาษกรองก่อนหน้านั้นซึ่งจะทำให้ได้น้ำหนักสาร โดยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นไปตามสมการที่ 3.8

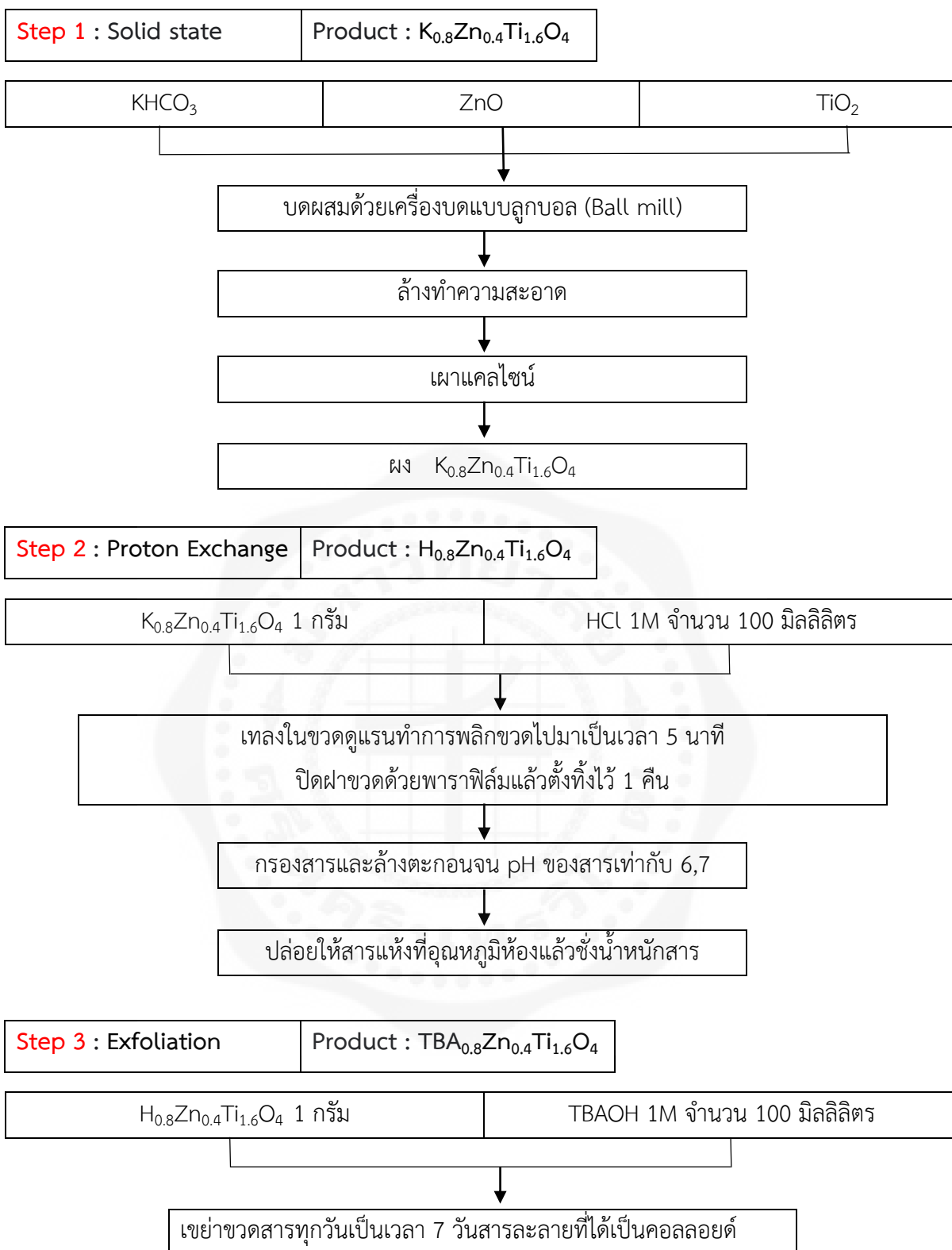


3.4.3.3 กระบวนการแยกชั้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Exfoliation)



1. ชั่งสาร $\text{H}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ จำนวน 1 กรัมโดยเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนโปรตอนในข้อ 3.4.3.2
2. นำสาร TBAOH ปริมาตร 3.7 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 1 โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็น 500 มิลลิลิตร ดังภาพประกอบ 3.4
3. นำสาร $\text{H}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ในข้อ 1. เทลงขวดดูแรนแล้วใส่สารละลาย TBAOH ในข้อ 2. ผลที่ได้เป็นสารละลายมีตะกอนขาวขุ่น ปิดฝาขวดให้สนิทแล้วนำพาราฟิล์มปิดฝาขวดให้แน่น ดังภาพประกอบ 3.4
4. เขย่าขวดสารทุกวันเป็นเวลา 7 วันสารละลายที่ได้เป็นคอลลอยด์ ดังภาพประกอบ 3.4
5. นำสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ได้ทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis



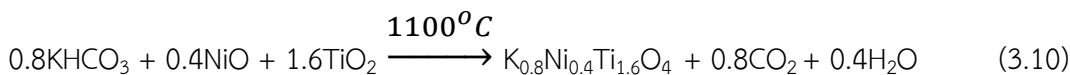


ภาพประกอบ 3.4 แสดงแผนภาพสรุปขั้นตอนในการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$

3.4.4 การเตรียมสารประกอบออกไซด์โครงสร้างเลพิโดโครไซต์ ($K_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$)

3.4.4.1 การเตรียมผงผลึก $K_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ด้วยการทำปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (Solid State reaction)

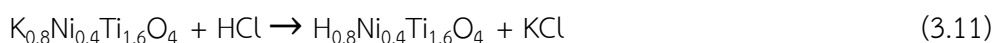
ทำการเตรียมผงผลึก $K_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ดังสมการเคมีต่อไปนี้



1. ชั่งสารตั้งต้น คือ $KHCO_3$, NiO , TiO_2 ตามสัดส่วนที่คำนวณได้จากสมการ มาผสมรวมกัน
2. นำสารทั้ง 3 ที่กล่าวมาในข้อ 1. ใส่ในหม้อบดแบบลูกบอล (Ball milling) ซึ่งบรรจุเม็ดบอลอยู่ภายใน ทำการเติมเอทานอลปริมาณ $\frac{3}{4}$ ของหม้อบด ทำการบดด้วยเครื่องบดกำลังสูง (vibratory milling) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 3.5
3. นำสารที่ได้มาล้างทำความสะอาด เพื่อแยกสารที่ได้ออกจากเม็ดบอล และทำการระเหยตัวทำละลายเอทานอลออกด้วยการอบที่อุณหภูมิ $80^\circ C$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 3.5
4. นำมาสารที่ได้เผาไหม้ที่อุณหภูมิ $1100^\circ C$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิที่ $10^\circ C/นาท$ ดังภาพประกอบ 3.5
5. นำผง $K_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ที่ได้มาบดและคัดขนาด (sieving)
6. ทำการตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิค XRD

3.4.4.2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange)

1. นำสาร $K_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ชั่งในเครื่องชั่งดิจิทัลจำนวน 1 กรัม จากนั้นนำสารที่ชั่งเทใส่ขวดดูแรน ดังภาพประกอบ 3.5
2. นำ HCl 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร เทลงในขวดดูแรนที่มีสารอยู่จากนั้นทำการพลิกขวดไปมาเป็นเวลา 5 นาที ดังภาพประกอบ 3.5
3. ปิดฝาขวดด้วยพาราฟิล์มเพื่อให้ฝาแน่นสนิทเพื่อป้องกันไม่ให้สารไม่หกและป้องกันสิ่งปนเปื้อนแล้วตั้งทิ้งไว้ 1 คืน ดังภาพประกอบ 3.5
4. ทำการกรองสาร $K_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ที่ผสมกับ HCl 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร เพื่อหาน้ำหนักของสารที่กรองได้โดยทำการชั่งกระดาษกรองสาร จากนั้นจึงทำการกรองสารโดยกรองสารจนได้ค่า $pH=6,7$ ถ้ายังไม่เป็นไปตามค่า pH ที่ต้องการให้หยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านกระดาษกรองสารที่กรองสารอยู่เพื่อให้ได้ค่า $pH=6,7$ โดยเมื่อกรองสารเสร็จทิ้งให้สารแห้งสนิทเป็นเวลา 1 คืน ดังภาพประกอบ 3.5
6. ชั่งสารที่กรองพร้อมกระดาษกรองเพื่อหาน้ำหนักของสารโดยนำน้ำหนักสารกับกระดาษกรองที่ได้ลบกับกระดาษกรองก่อนหน้านี้นี้ซึ่งจะทำให้ได้น้ำหนักสาร โดยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นไปตามสมการที่ 3.11

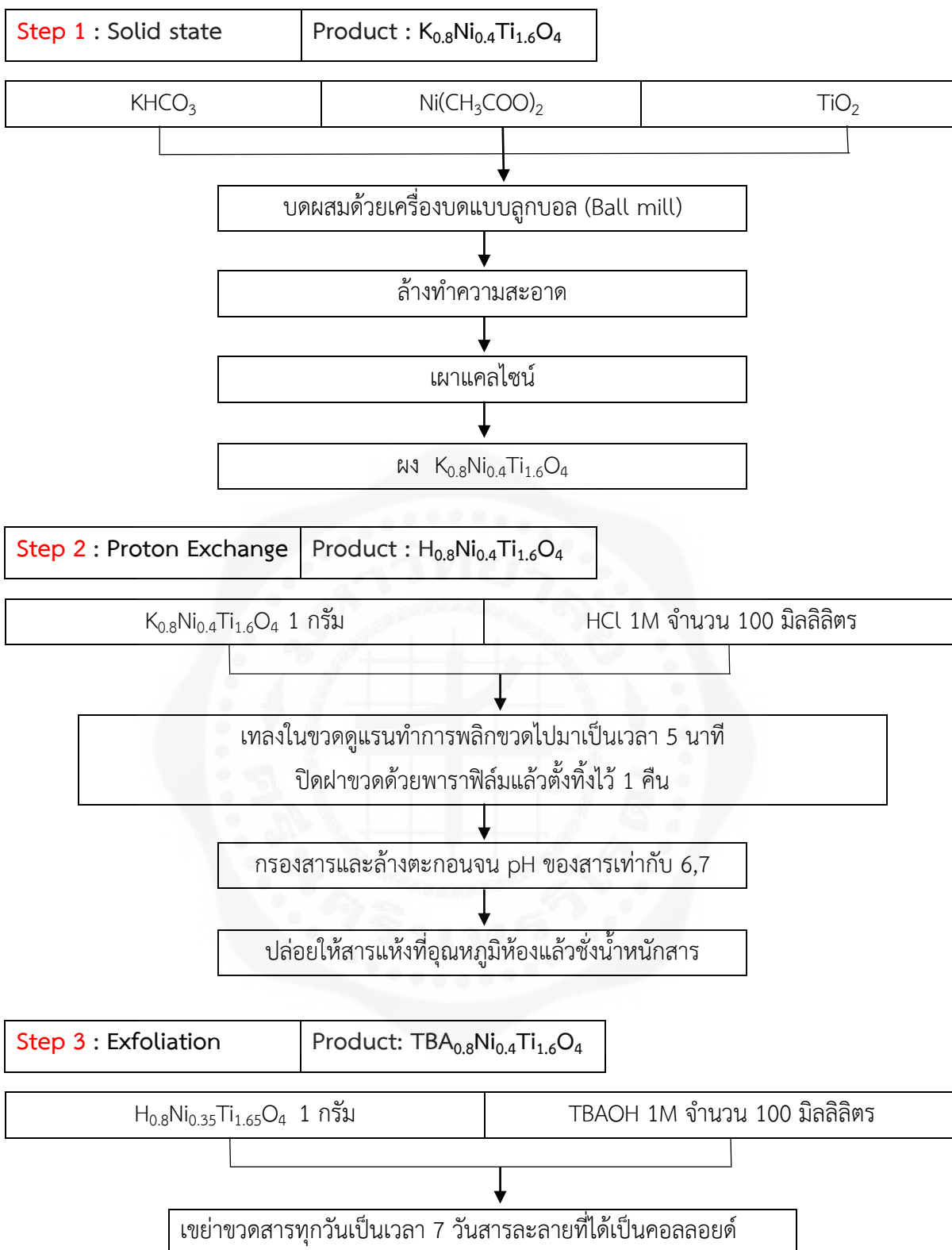


3.4.4.3 กระบวนการแยกชั้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Exfoliation)



1. ชั่งสาร $\text{H}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ จำนวน 1 กรัมโดยเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนโปรตอนในข้อ 3.4.4.2
2. นำสาร TBAOH ปริมาตร 3.7 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 1 โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็น 100 มิลลิลิตร ดังภาพประกอบ 3.5
3. นำสาร $\text{H}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ในข้อ 1. เทลงขวดดูแรนแล้วใส่สารละลาย TBAOH ในข้อ 2. ผลที่ได้เป็นสารละลายมีตะกอนขาวขุ่น ปิดฝาขวดให้สนิทแล้วนำพาราฟิล์มปิดฝาขวดให้แน่น ดังภาพประกอบ 3.5
4. เขย่าขวดสารทุกวันเป็นเวลา 7 วันสารละลายที่ได้เป็นคอลลอยด์ ดังภาพประกอบ 3.5
5. นำสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ได้ทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis



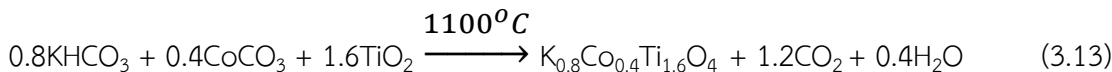


ภาพประกอบ 3.5 แสดงแผนภาพสรุปขั้นตอนในการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ $(Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4)^{0.8-}$

3.4.5 การเตรียมสารประกอบออกไซด์โครงสร้างเลพิโดโครไซต์ ($K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$)

3.4.5.1 การเตรียมผงผลึก $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ด้วยการทำปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (Solid State reaction)

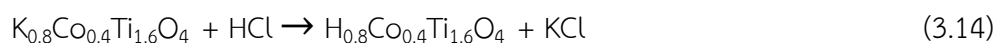
ทำการเตรียมผงผลึก $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ดังสมการเคมีต่อไปนี้



1. ชั่งสารตั้งต้น คือ $KHCO_3$, $CoCO_3$, TiO_2 ตามสัดส่วนที่คำนวณได้จากสมการ มาผสมรวมกัน
2. นำสารทั้ง 3 ที่กล่าวมาในข้อ 1. ใส่ในหม้อบดแบบลูกบอล (Ball milling) ซึ่งบรรจุเม็ดบอลอยู่ภายใน ทำการเติมเอทานอลปริมาณ $\frac{3}{4}$ ของหม้อบด ทำการบดด้วยเครื่องบดกำลังสูง (vibratory milling) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 3.6
3. นำสารที่ได้มาล้างทำความสะอาด เพื่อแยกสารที่ได้ออกจากเม็ดบอล และทำการระเหยตัวทำละลายเอทานอลออกด้วยการอบที่อุณหภูมิ $80^\circ C$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 3.6
4. นำมาสารที่ได้เผาไหม้ที่อุณหภูมิ $1100^\circ C$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิที่ $10^\circ C/นาท$ ดังภาพประกอบ 3.6
5. นำผง $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ที่ได้มาบดและคัดขนาด (sieving)
6. ทำการตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิค XRD

3.4.5.2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange)

1. นำสาร $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ชั่งในเครื่องชั่งดิจิทัลจำนวน 1 กรัม จากนั้นนำสารที่ชั่งเทใส่ขวดดูแรน ดังภาพประกอบ 3.6
2. นำ HCl 1M จำนวน 100 ml เทลงในขวดดูแรนที่มีสารอยู่จากนั้นทำการพลิกขวดไปมาเป็นเวลา 5 นาที ดังภาพประกอบ 3.6
3. ปิดฝาขวดด้วยพาราฟิล์มเพื่อให้ฝาแน่นสนิทเพื่อป้องกันไม่ให้สารไม่หกและป้องกันสิ่งปนเปื้อน แล้วตั้งทิ้งไว้ 1 คืน ดังภาพประกอบ 3.6
4. ทำการกรองสาร $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ที่ผสมกับ HCl 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร เพื่อหาน้ำหนักของสารที่กรองได้โดยทำการชั่งกระดาษกรองสาร จากนั้นจึงทำการกรองสารโดยกรองสารจนได้ค่า pH=6,7 ถ้ายังไม่เป็นไปตามค่า pH ที่ต้องการให้หยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านกระดาษกรองสารที่กรองสารอยู่เพื่อให้ได้ค่า pH=6,7 โดยเมื่อกรองสารเสร็จทิ้งให้สารแห้งสนิทเป็นเวลา 1 คืน ดังภาพประกอบ 3.6
5. ชั่งสารที่กรองพร้อมกระดาษกรองเพื่อหาน้ำหนักของสารโดยนำน้ำหนักสารกับกระดาษกรองที่ได้ลบกับกระดาษกรองก่อนหน้านี้นี้ซึ่งจะทำให้ได้น้ำหนักสาร โดยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นไปตามสมการที่ 3.14

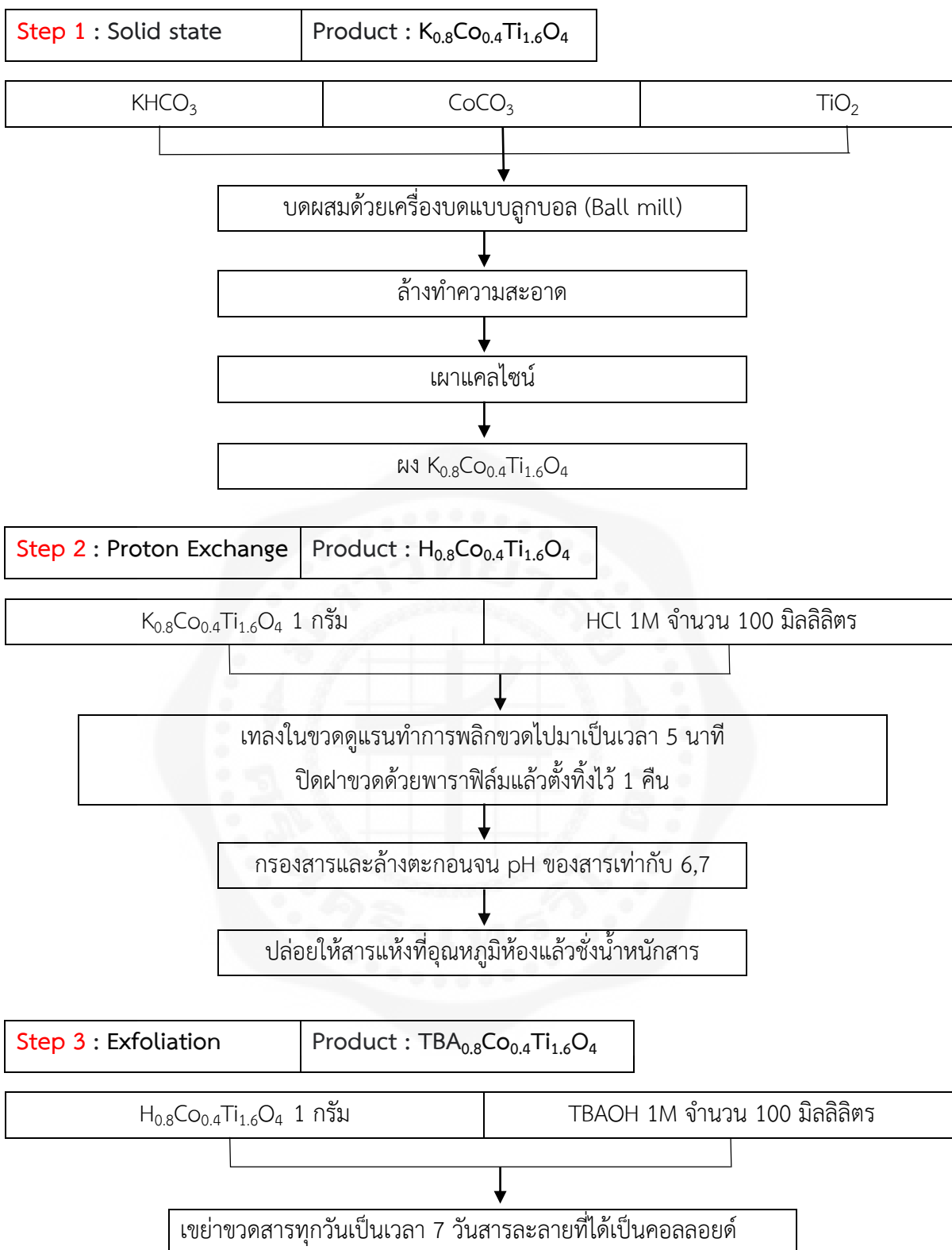


3.4.5.3 กระบวนการแยกชั้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Exfoliation)



1. ชั่งสาร $\text{H}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ จำนวน 1 กรัมโดยเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนโปรตอนในข้อ 3.4.5.2
2. นำสาร TBAOH ปริมาตร 3.7 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 1 โมล/ลูกบาศก์เดซิเมตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็น 100 มิลลิลิตร ดังภาพประกอบ 3.6
3. นำสาร $\text{H}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ในข้อ 1. เทลงขวดดูแรนแล้วใส่สารละลาย TBAOH ในข้อ 2. ผลที่ได้เป็นสารละลายมีตะกอนขาวขุ่น ปิดฝาขวดให้สนิทแล้วนำพาราฟิล์มปิดฝาขวดให้แน่น ดังภาพประกอบ 3.6
4. เขย่าขวดสารทุกวันเป็นเวลา 7 วันสารละลายที่ได้เป็นคอลลอยด์ ดังภาพประกอบ 3.6
5. นำสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ได้ทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis





ภาพประกอบ 3.6 แสดงแผนภาพสรุปขั้นตอนในการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์ $(Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4)^{0.8-}$

3.5 อุปกรณ์ เครื่องมือและสารที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของแบคทีเรียเซลลูโลสกับ สารประกอบออกไซด์นาโนซีท

3.5.1 อุปกรณ์

1. ปีกเกอร์
2. กระบอกดวง
1. หลอดหยดสาร
2. ปิเปต
3. ลูกยางดูดปิเปต
4. กระดาษฟอยล์
5. ถาดแม่แบบ

3.5.2 เครื่องมือ

1. เครื่องชั่งดิจิตอล
2. เตาอบสาร

3.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

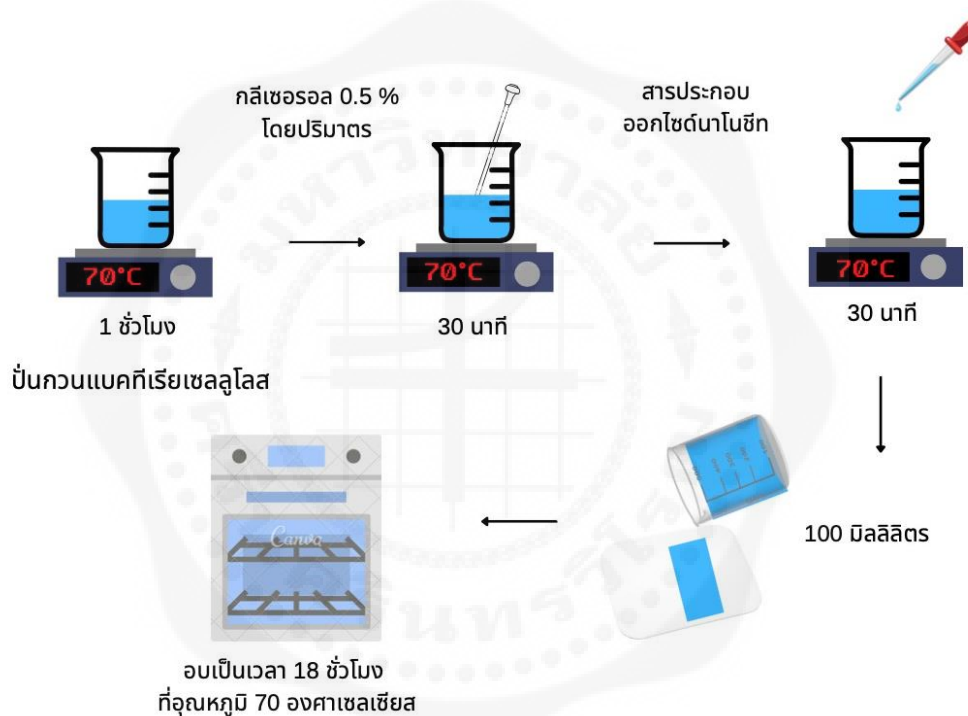
1. เครื่องตรวจการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
2. เครื่องฟูรีเยร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
4. เครื่องอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี
5. เครื่องวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก
6. ชุดวัดสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก
7. เครื่องออสซิลโลสโคป
8. เครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์

3.5.4 สารเคมี

1. แบคทีเรียเซลลูโลสที่เตรียมก่อนหน้านี้
2. น้ำไปราศจากไอออน
3. กลีเซอรอล
4. $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้
5. $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้
6. $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้
7. $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้
8. $\text{K}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้

3.6 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท

เริ่มด้วยการทำการปั่นกวนแบคทีเรียเซลลูโลส โดยให้ความร้อนตลอดเวลาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเติมกลีเซอรอล 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นใส่สารประกอบออกไซด์นาโนซีท $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$, $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$, $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$, $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ และ $\text{K}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้ตามอัตราส่วน 1.5, 3, 5, 10, 20 เปอร์เซ็นต์ต่อปริมาตร และทำการกวนต่อเป็นเวลาทั้งหมด 30 นาทีหรือจนกว่าสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนเทสารละลายปริมาตร 100 มิลลิลิตร บนภาตแม่แบบและนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลาทั้งหมด 18 ชั่วโมงโดยสามารถดูได้จากภาพประกอบที่ 3.7



ภาพประกอบ 3.7 แสดงขั้นตอนการเตรียมแบคทีเรียเซลลูโลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท

3.7 เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์

3.7.1 การวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-VIS Spectroscopy)

การใช้เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงของสารละลายด้วยเครื่อง อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-VIS Spectroscopy) ในช่วงความยาวคลื่น 190-1000 nm ขั้นตอนแรกจะเตรียมสารตัวอย่างซึ่งได้จากการบวกรวบรวมการแยกชั้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท 0.2 ml แล้วนำมาปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดปรับปริมาตร 100 ml แล้วนำสารตั้งอย่างใส่ลงในควอตซ์ ปริมาตร 3 ใน 4 ของคิวเวท แล้วนำมาวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างด้วยเครื่อง UV-VIS Spectroscopy

ซึ่งเทคนิคในการวิเคราะห์การส่องผ่านของแสงของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่อง UV-VIS Spectroscopy ในช่วงความยาวคลื่น 300-900 nm ซึ่งจะเตรียมสารตัวอย่างจากแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสและวัสดุเชิงประกอบระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทตัดให้มีขนาด 2.5x2.5 เซนติเมตร แล้วนำมาวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงจากแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสและวัสดุเชิงประกอบระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทด้วยเครื่อง UV-VIS Spectroscopy



ภาพประกอบ 3.8 เครื่อง UV-VIS Spectroscopy

3.7.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (Transmission Electron Microscope ;TEM)

เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างจุลภาคและพื้นผิวของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชันดังภาพที่ 3.9 โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบต้องมีความบาง เนื่องจากในการทดสอบลำอนุภาคอิเล็กตรอนต้องสามารถผ่านทะลุขึ้นตัวอย่างได้ ซึ่งในการทดสอบเครื่อง TEM ลำแสงที่เกิดจากอิเล็กตรอนจะวิ่งไปชนกับวัตถุชิ้นงานที่ใช้ทดสอบซึ่งมีขนาดบางมากเกิดการกระเจิงของอนุภาคและอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนี้จะถูกปรับโฟกัสของภาพเพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจนและละเอียดมากกว่าที่สื่อก่อนส่งไปยังจอ การทดสอบชิ้นงานด้วยเครื่อง TEM จะได้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร)



ภาพประกอบ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน(Transmission Electron Microscope ;TEM)

3.7.3 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction ;XRD)

เทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอกซ์มาใช้ในการวิเคราะห์ ระบุชนิดของสารประกอบ และ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง โดยลักษณะของเครื่องจะแสดงดังภาพที่ 3.10 โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่อง XRD ในการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของแบคทีเรียเซลล์โลส สารประกอบออกไซด์นาโนซีท และวัสดุเชิงประกอบระหว่างแบคทีเรียเซลล์โลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ซึ่งจะทำให้การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ทดสอบให้มีขนาด 4x4 เซนติเมตร และการเตรียมตัวอย่างผงที่บดละเอียดจากนั้นทำการ เกลงบนแท่นบรรจุตัวอย่าง (Sample holder) พร้อมทั้งปาดให้ผิวตัวอย่างมีลักษณะเรียบก่อนนำเข้าเครื่อง X-ray diffractometer จากนั้นทำการตรวจสอบเพื่อศึกษาปริมาณผลึก



ภาพประกอบ 3.10 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD)

3.7.4 การพิสูจน์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total Reflectance Fourier transform Infrared; ATR-FT-IR) ดังแสดงในภาพที่ 3.11 โดยการเตรียมตัวอย่างเป็นการนำชิ้นงานของแบคทีเรียเซลล์ูโลสและวัสดุเชิงประกอบ ระหว่างแบคทีเรียเซลล์ูโลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท มาตัดขนาด 1x1 เซนติเมตร ก่อนนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี ในการทดลองทำการทดสอบในช่วงความยาวคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ และทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง



ภาพประกอบ 3.11 FT-IR Fourier Transform Infrared Spectrometer

3.7.5 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties)

งานวิจัยนี้ทำการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลล์ูโลสและวัสดุเชิงประกอบ ระหว่างแบคทีเรียเซลล์ูโลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท โดยตรวจวัดค่าคงที่และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก โดยการนำแผ่นฟิล์มตัวอย่างมาทำการขึ้นรูปเป็นลักษณะแผ่นกลมแบน ซึ่งตัวอย่างที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร และมีความหนา 0.6 มิลลิเมตร จากนั้นนำเทปทองแดงมาทำขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองด้านก่อนนำไปตรวจสอบด้วยเครื่องตรวจวัดสมบัติไดอิเล็กทริกดังภาพ 3.12 เพื่อเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ในช่วง 0.001-1MHz และ อุณหภูมิในช่วง 25-100 °C



ภาพประกอบ 3.12 เครื่องวัดค่าประจุไฟฟ้า (LCR Meter)

3.7.6 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบระหว่างแบคทีเรีย เซลลูโลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$, $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$, $\text{K}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$, $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ และ $\text{K}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ตามอัตราส่วน 5% 15% 30% 40% และ 50% โดยปริมาตรด้วยเครื่องวัดประจุบนพื้นผิวดังแสดงในภาพที่ 3.13



ภาพประกอบ 3.13 เครื่องออสซิลอโคป (Digital Oscilloscope)

3.7.7 การวัดกระแสไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ทำการตรวจสอบกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้าและประจุไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทชนิดความเป็นขั้วบวกและลบโดยใช้เครื่องอิเล็กทรอนิกส์โคป (Electroscope) ดังแสดงในภาพที่ 3.14



ภาพประกอบ 3.14 เครื่อง Electroscope

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

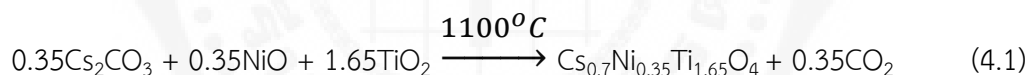
ในบทนี้เป็นการรายงานผลการทดสอบและอภิปรายผลจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานแบบขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator) โดยทำการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ ทั้ง 5 ชนิด คือ $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$, $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$, $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$, $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ และ $\text{K}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ และทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ ลักษณะเส้นใยของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส รวมถึงการลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์

4.1 ศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์ด้วยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction)

4.1.1.1 ลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$

จากการสังเคราะห์สารผลึกตั้งต้นจากสารประกอบ $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) โดยการบดผสมและเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูง ดังสมการที่ 4.1



โดยพบว่าหลังจากการเผาจะทำให้ได้ผงที่ละเอียดสีเหลือง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.1 มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (Uniform) ไม่จับตัวกันเป็นก้อน

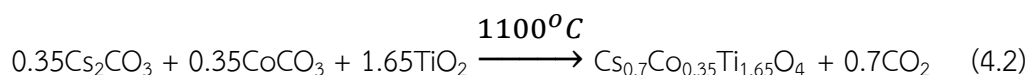


$\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$

ภาพประกอบ 4.1 แสดงภาพผงของสารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ของสารตั้งต้นหลังการเผาแคลไซน์

4.1.1.2 ลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$

จากการสังเคราะห์สารผลึกตั้งต้นจากสารประกอบ $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) โดยการบดผสมและเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูง ดังสมการที่ 4.2



โดยพบว่าหลังจากการเผาจะทำให้ได้ผงที่ละเอียดสีเทา ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.2 มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (Uniform) ไม่จับตัวกันเป็นก้อน

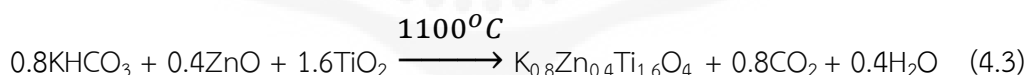


$\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$

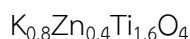
ภาพประกอบ 4.2 แสดงภาพผงของสารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ของสารตั้งต้นหลังการเผาแคลไซน์

4.1.1.3 ลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$

จากการสังเคราะห์สารผลึกตั้งต้นจากสารประกอบ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) โดยการบดผสมและเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูง ดังสมการที่ 4.3



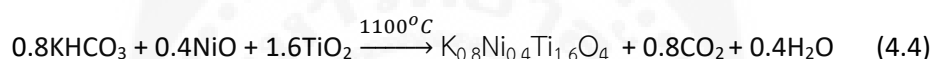
โดยพบว่าหลังจากการเผาจะทำให้ได้ผงที่ละเอียดสีขาว ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.3 มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (Uniform) ไม่จับตัวกันเป็นก้อน



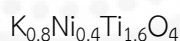
ภาพประกอบ 4.3 แสดงภาพผงของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ของสารตั้งต้นหลังการเผาแคลไซน์

4.1.1.4 ลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$

จากการสังเคราะห์สารผลึกตั้งต้นจากสารประกอบ $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) โดยการบดผสมและเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูง ดังสมการที่ 4.4



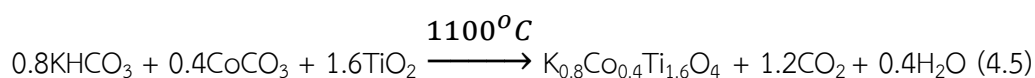
โดยพบว่าหลังจากการเผาจะทำให้ได้ผงที่ละเอียดสีเหลือง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.4 มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (Uniform) ไม่จับตัวกันเป็นก้อน



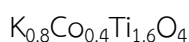
ภาพประกอบ 4.4 แสดงภาพผงของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ของสารตั้งต้นหลังการเผาแคลไซน์

4.1.1.5 ลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$

จากการสังเคราะห์สารผลึกตั้งต้นจากสารประกอบ $\text{K}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) โดยการบดผสมและเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูง ดังสมการที่ 4.5



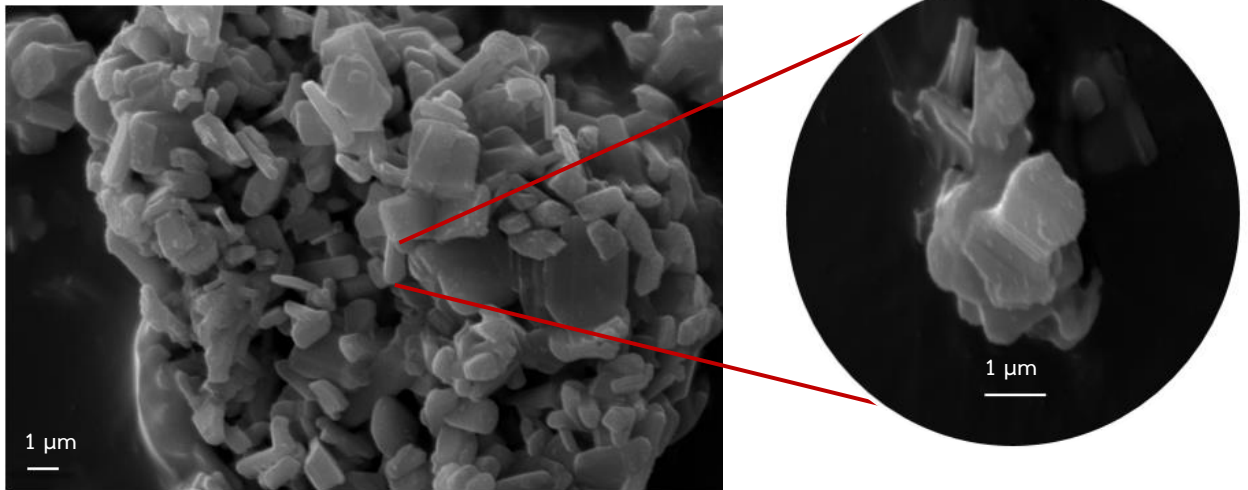
โดยพบว่าหลังจากการเผาจะทำให้ได้ผงที่ละเอียดสีเทา ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.5 มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (Uniform) ไม่จับตัวกันเป็นก้อน



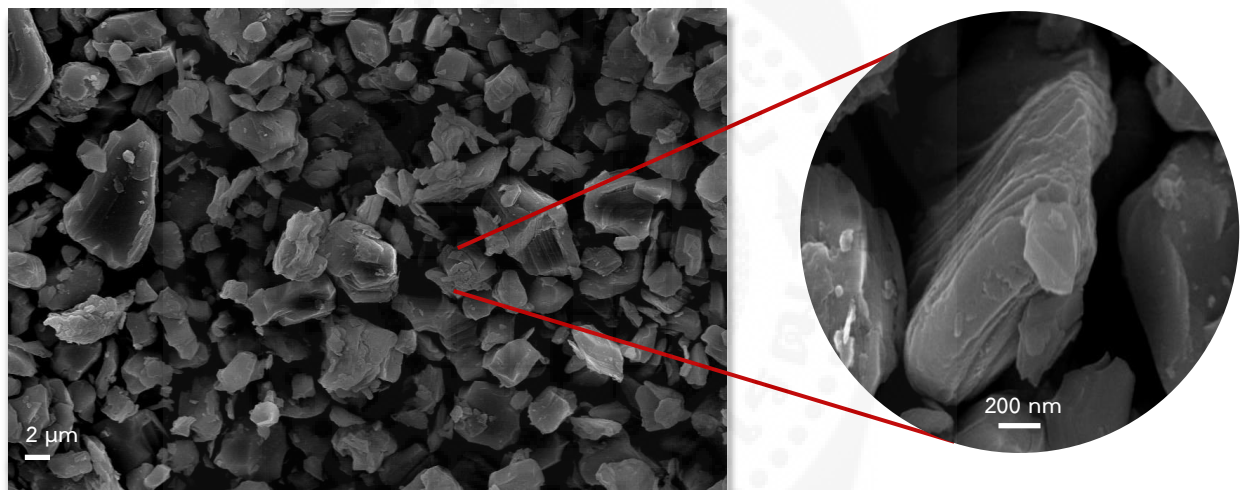
ภาพประกอบ 4.5 แสดงภาพผงของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ของสารตั้งต้นหลังการเผาแคลไซน์

4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

จากการตรวจสอบและวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์คือสารประกอบออกไซด์ $\text{CS}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ และ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ โดยจากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่าผงของสารประกอบออกไซด์ $\text{CS}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ โดยจากผงของสารประกอบออกไซด์มีลักษณะโครงสร้างซ้อนทับกันเป็นชั้นอย่างเห็นได้ชัดเจน แสดงดังภาพประกอบที่ 4.6 เช่นเดียวกับผงของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ที่ได้มีลักษณะโครงสร้างที่ซ้อนทับกันเป็นชั้นๆคล้ายกับแผ่นกระดาษที่ทับกันอย่างชัดเจนโดยแต่ละชั้นจะมีขนาดประมาณ 200 นาโนเมตรแสดงดังภาพประกอบที่ 4.7 จากภาพทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าผงของสารประกอบออกไซด์มีโอกาสที่จะสามารถเป็นสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (2 D) หลังกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอนและการลอกชั้น (proton exchange-exfoliation)



ภาพประกอบ 4.6 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์ $\text{CS}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$

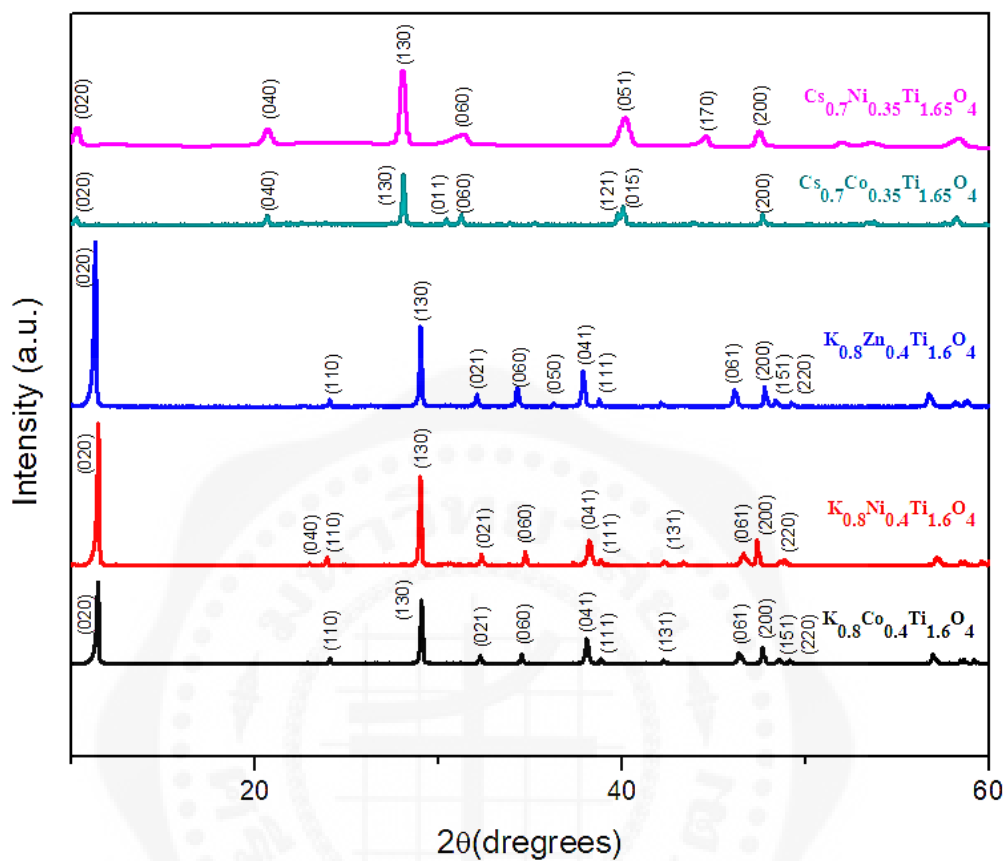


ภาพประกอบ 4.7 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$

4.1.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารประกอบออกไซด์โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction technique: XRD)

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของสารประกอบออกไซด์โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ ($A_xM_yTi_{2-y}O_4$) ซึ่งประกอบด้วย $Cs_{0.7}Ni_{0.35}Ti_{1.65}O_4$, $Cs_{0.7}Co_{0.35}Ti_{1.65}O_4$, $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$, $K_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ และ $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction technique: XRD) แสดงดังภาพประกอบที่ 4.8 ในการวิเคราะห์เบื้องต้นของสารประกอบออกไซด์โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ ($A_xM_yTi_{2-y}O_4$) ที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็งของสารผลึกตั้งต้นด้วยการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าปรากฏพิกของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ดังภาพประกอบที่ 4.8 เส้นสีชมพู คือ สารประกอบ $Cs_{0.7}Ni_{0.35}Ti_{1.65}O_4$ ซึ่งพบพิกทั้งหมด 7 พิกหลักขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ ซึ่งสอดคล้องกับระบบผลึกของระนาบ (020) (040) (130) (060) (051) (170) และ (200) ตามลำดับ โดยการปรากฏของทั้ง 7 พิกแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบ $Cs_{0.7}Ni_{0.35}Ti_{1.65}O_4$ และเส้นสีเขียวคือ สารประกอบ $Cs_{0.7}Co_{0.35}Ti_{1.65}O_4$ ซึ่งพบพิกทั้งหมด 8 พิกหลักขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ ซึ่งสอดคล้องกับระบบผลึกของระนาบ (020) (040) (130) (011) (060) (121) (051) และ (200) โดยการปรากฏของทั้ง 8 พิกแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบ $Cs_{0.7}Co_{0.35}Ti_{1.65}O_4$ มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากข้อมูลงานวิจัยของ Tadashi และคณะ (21) ซึ่งแสดงในเห็นสารที่ทำการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารประกอบออกไซด์ทั้ง 2 ตัวที่ทำการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ที่ได้สอดคล้องกับโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์และโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล โดยเส้นสีน้ำเงิน คือ สารประกอบ $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ซึ่งพบพิกทั้งหมด 12 พิกหลักขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ ซึ่งสอดคล้องกับระบบผลึกของระนาบ (020) (110) (130) (021) (060) (050) (041) (111) (061) (200) (151) และ (220) โดยการปรากฏของทั้ง 12 พิกแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบ $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ เส้นสีแดง คือ $K_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ซึ่งพบพิกทั้งหมด 12 พิกหลักขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ ซึ่งสอดคล้องกับระบบผลึกของระนาบ (020) (040) (110) (130) (021) (060) (041) (111) (131) (061) (200) และ (220) โดยการปรากฏของทั้ง 12 พิกแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบ $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ และเส้นสีดำ คือ $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ซึ่งพบพิกทั้งหมด 12 พิกหลักขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ ซึ่งสอดคล้องกับระบบผลึกของระนาบ (020) (110) (130) (021) (060) (041) (111) (131) (061) (200) (151) และ (220) โดยการปรากฏของทั้ง 12 พิกแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบ $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ดังกล่าว มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากข้อมูลงานวิจัยของ Thitirat และคณะ (10)

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารประกอบออกไซด์ทั้ง 3 ตัวที่ทำการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) ที่ได้สอดคล้องกับโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์และโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล

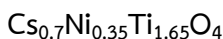


ภาพประกอบ 4.8 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique: XRD) ของสารประกอบออกไซด์โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction)

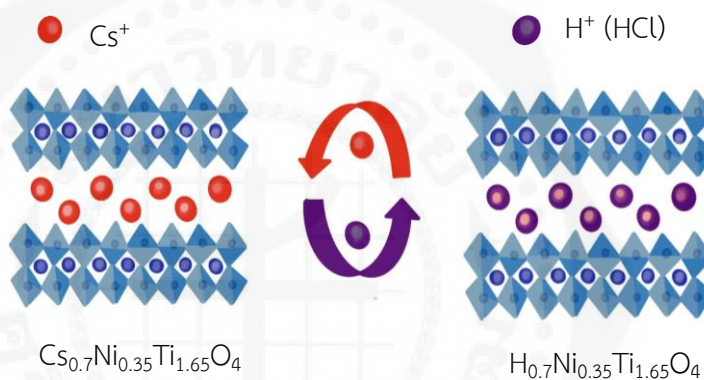
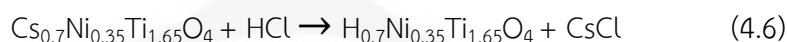
4.2 ศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์นาโนชีต (Oxide Nanosheets) โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพและปริมาณของสารประกอบออกไซด์ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ครั้งที่ 1 กับกรดไฮโดรคลอริก (HCl)

4.2.1.1 กระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ของสารประกอบออกไซด์

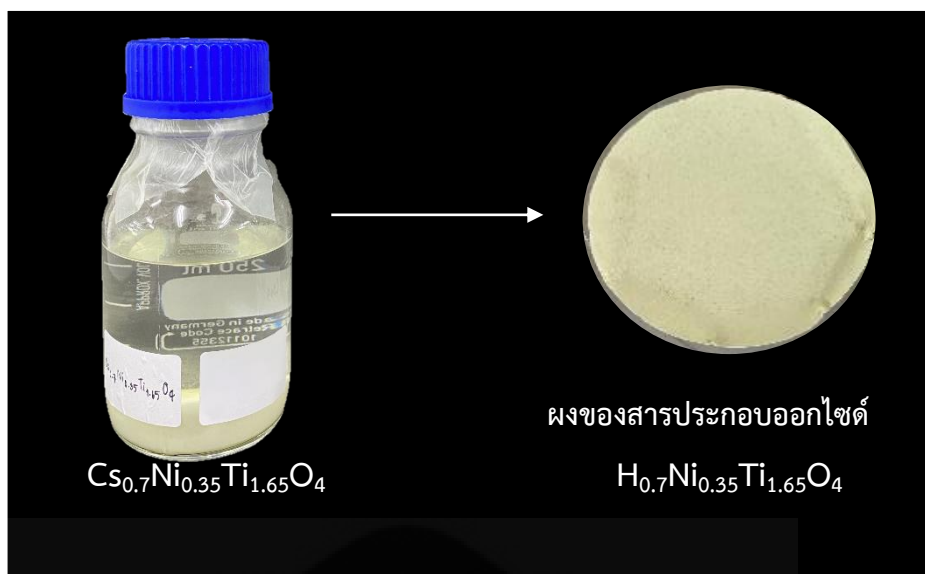


โดยการใช้สารผลึกตั้งต้นจากการะบวนการสังเคราะห์ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) มาทำปฏิกิริยาต่อด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) เพื่อการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) จากการแทนที่ไอออน Cs^+ ด้วยไอออน H^+ ดังสมการที่ 4.6 และภาพประกอบที่ 4.9



ภาพประกอบ 4.9 แสดงแบบจำลองโครงสร้างผลึกก่อนและหลังกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) ของสารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$

หลังจากทำการกรองสาร $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ 1 กรัม ที่ผสมกับ HCl 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร ทำให้ได้ผงละเอียดสีเหลืองที่มีขนาดเล็ก ($\text{H}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ดังภาพประกอบที่ 4.10 และเพื่อหาน้ำหนักของสารที่กรองได้โดยทำการชั่งกระดาษกรองสารแผ่นที่ 1 ได้น้ำหนัก 0.2600 กรัม กระดาษกรองสารแผ่นที่ 2 ได้น้ำหนัก 0.2700 กรัม จากนั้นจึงทำการกรองสารโดยกรองสารจนได้ค่า pH=6,7 ถ้ายังไม่เป็นไปตามค่า pH ที่ต้องการให้หยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านกระดาษกรองสารที่กรองสารอยู่เพื่อให้ได้ค่า pH=6,7 เมื่อกรองสารเสร็จทิ้งให้สารแห้งสนิทเป็นเวลา 1 คืน โดยชั่งสารที่กรองพร้อมกระดาษกรองเพื่อหาน้ำหนักของสารโดยน้ำหนักสารกับกระดาษกรองหนักแผ่นที่ 1 หนัก 0.6111 กรัม สารแผ่นที่ 1 หนัก $0.6111 - 0.2600 = 0.3511$ กรัม และน้ำหนักสารกับกระดาษกรองหนักแผ่นที่ 2 หนัก 0.4472 กรัม สารแผ่นที่ 2 หนัก $0.4472 - 0.2700 = 0.1172$ กรัม ดังนั้นสารหนัก $0.3511 + 0.1172 = 0.5283$ กรัม *สารหนักไม่ถึง 1 กรัม จึงต้องเปลี่ยนสารละลายที่ใช้

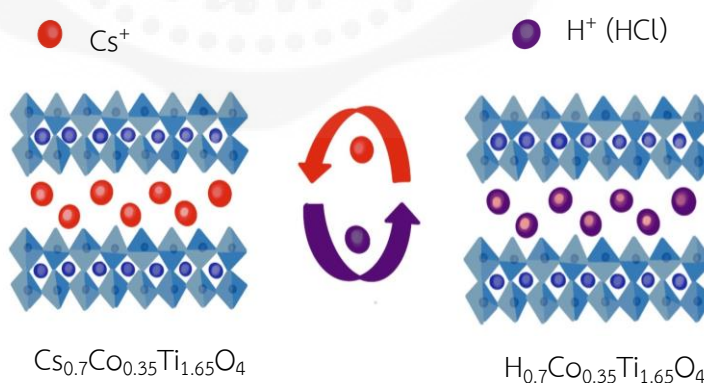
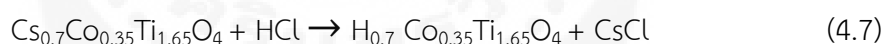


ภาพประกอบ 4.10 สารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน

4.2.1.2 กระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ของสารประกอบ

ออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$

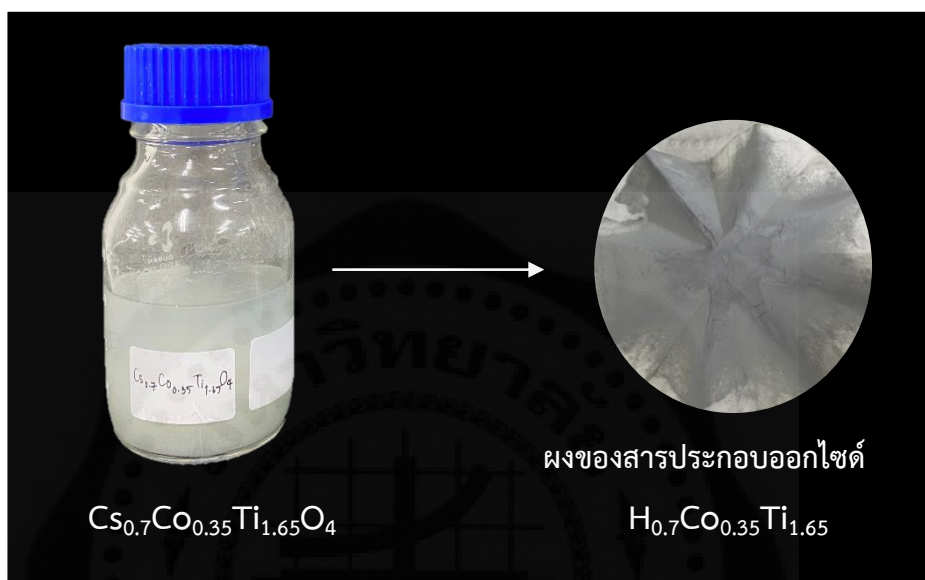
โดยการใช้สารผลึกตั้งต้นจากการะบวนการสังเคราะห์ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) มาทำปฏิกิริยาต่อด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) เพื่อการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) จากการแทนที่ไอออน Cs^+ ด้วยไอออน H^+ ดังสมการที่ 4.7 และภาพประกอบที่ 4.11



ภาพประกอบ 4.11 แสดงแบบจำลองโครงสร้างผลึกก่อนและหลังกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) ของสารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$

หลังจากทำการกรองสาร $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ 1 กรัม ที่ผสมกับ HCl 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร ทำให้ได้ผงละเอียดสีเทาที่มีขนาดเล็ก ($\text{H}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ดังภาพประกอบที่ 4.12 และเพื่อหาน้ำหนักของสารที่กรองได้

โดยทำการชั่งกระดาษกรองสารได้น้ำหนัก 0.3372 กรัม จากนั้นจึงทำการกรองสารโดยกรองสารจนได้ค่า pH=6,7 ถ้ายังไม่เป็นไปตามค่า pH ที่ต้องการให้หยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านกระดาษกรองสารที่กรองสารอยู่เพื่อให้ได้ค่า pH=6,7 เมื่อกรองสารเสร็จทิ้งให้สารแห้งสนิทเป็นเวลา 1 คืน โดยชั่งสารที่กรองพร้อมกระดาษกรองเพื่อหาน้ำหนักของสารโดยน้ำหนักสารกับกระดาษกรองหนัก 1.0000 กรัม ดังนั้นสารหนัก $1.0000 - 0.3372 = 0.6628$ กรัม *สารหนักไม่ถึง 1 กรัม จึงต้องเปลี่ยนสารละลายที่ใช้เนื่องจากสาร $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ละลายใน HCl 1M

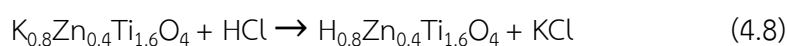


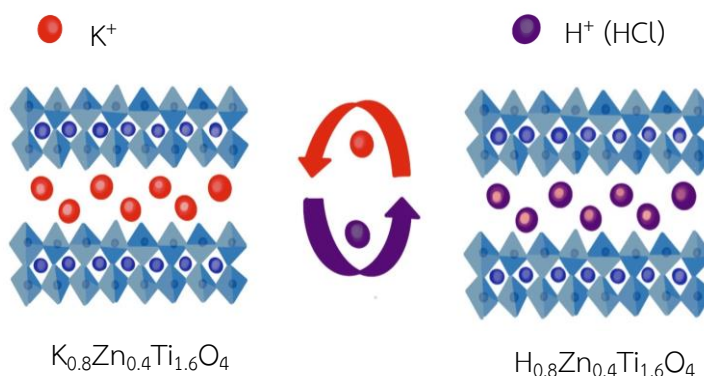
ภาพประกอบ 4.12 สารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน

4.2.1.3 กระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ของสารประกอบ

ออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$

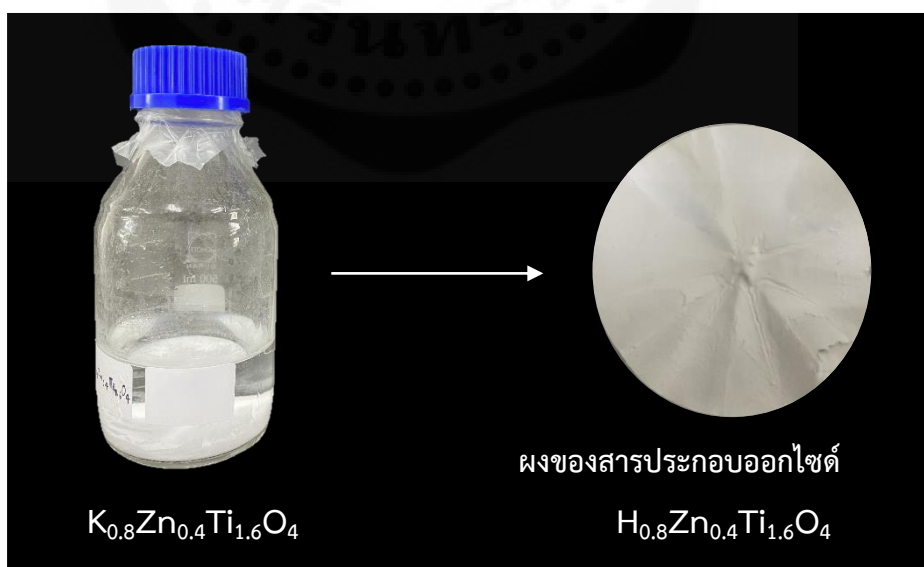
โดยการใช้สารผลึกตั้งต้นจากการะบวนการสังเคราะห์ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) มาทำปฏิกิริยาต่อด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) เพื่อการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) จากการแทนที่ไอออน K^+ ด้วยไอออน H^+ ดังสมการที่ 4.8 และภาพประกอบที่ 4.13





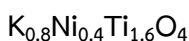
ภาพประกอบ 4.13 แสดงแบบจำลองโครงสร้างผลึกก่อนและหลังกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) ของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$

หลังจากทำการกรองสาร $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ 1 กรัม ที่ผสมกับ HCl 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร ทำให้ได้ผงละเอียดสีขาวที่มีขนาดเล็ก ($\text{H}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) ดังภาพประกอบที่ 4.14 และเพื่อหาน้ำหนักของสารที่กรองได้ โดยทำการชั่งกระดาษกรองสารได้น้ำหนัก 0.3340 กรัม จากนั้นจึงทำการกรองสารโดยกรองสารจนได้ค่า pH=6,7 ถ้ายังไม่เป็นไปตามค่า pH ที่ต้องการให้หยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านกระดาษกรองสารที่กรองสารอยู่เพื่อให้ได้ค่า pH=6,7 เมื่อกรองสารเสร็จทิ้งให้สารแห้งสนิทเป็นเวลา 1 คืน โดยชั่งสารที่กรองพร้อมกระดาษกรองเพื่อหาน้ำหนักของสารโดยน้ำหนักสารกับกระดาษกรองหนัก 0.9800 กรัม ดังนั้นสารหนัก $0.9800 - 0.3340 = 0.6460$ กรัม *สารหนักไม่ถึง 1 กรัม จึงต้องเปลี่ยนสารละลายที่ใช้เนื่องจากสาร $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ละลายใน HCl 1M

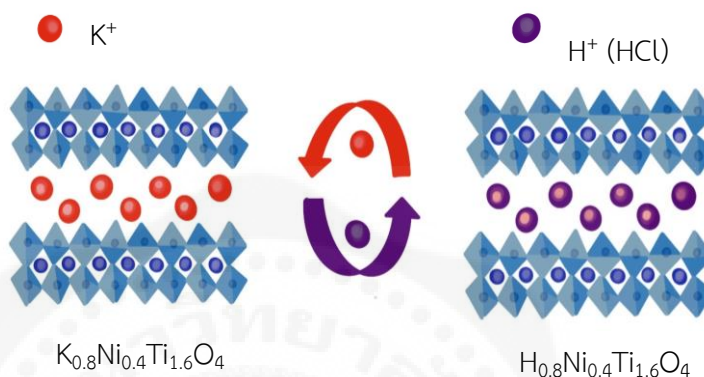
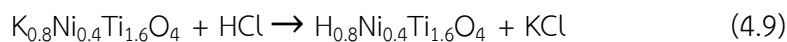


ภาพประกอบ 4.14 สารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน

4.2.1.4 กระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ของสารประกอบ ออกไซด์

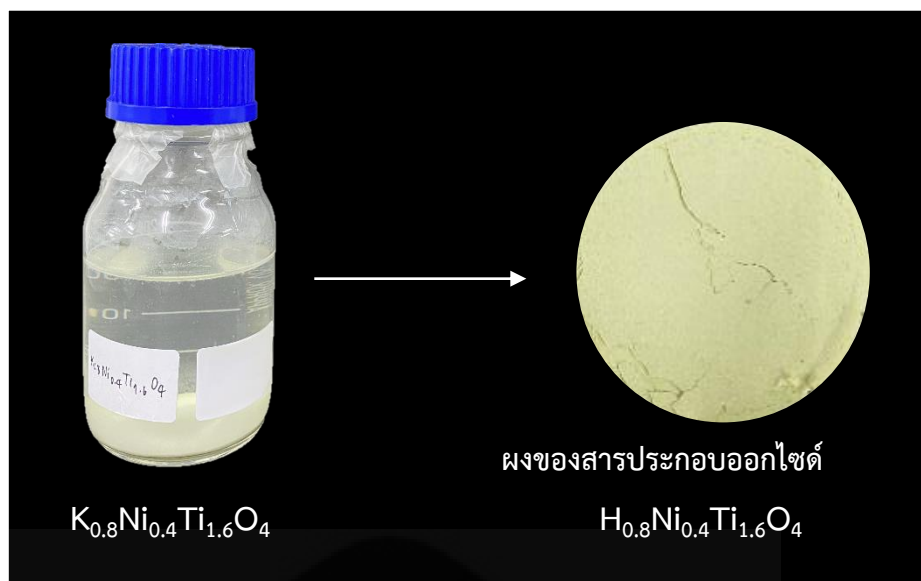


โดยใช้สารผลึกตั้งต้นจากการะบวนการสังเคราะห์ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) มาทำปฏิกิริยาต่อด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) เพื่อการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) จากการแทนที่ไอออน K^+ ด้วยไอออน H^+ ดังสมการที่ 4.9 และภาพประกอบที่ 4.15



ภาพประกอบ 4.15 แสดงแบบจำลองโครงสร้างผลึกก่อนและหลังกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) ของสารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$

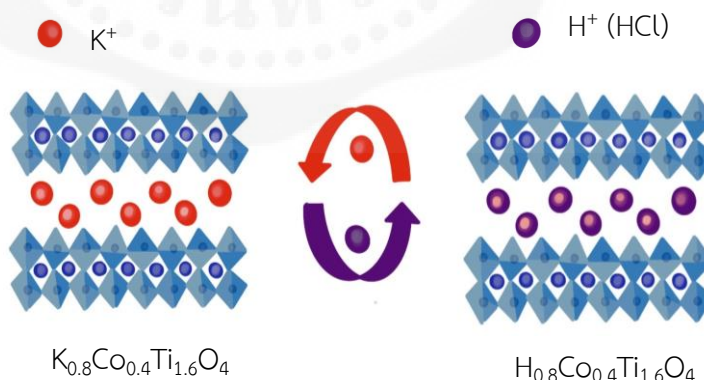
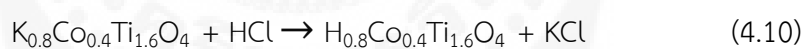
หลังจากทำการกรองสาร $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ 1 กรัม ที่ผสมกับ HCl 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร ทำให้ได้ผงละเอียดสีเหลืองที่มีขนาดเล็ก ($\text{H}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) ดังภาพประกอบที่ 4.16 และเพื่อหาน้ำหนักของสารที่กรองได้ โดยทำการชั่งกระดาษกรองสารได้น้ำหนัก 0.2553 กรัม จากนั้นจึงทำการกรองสารโดยกรองสารจนได้ค่า pH=6,7 ถ้ายังไม่เป็นไปตามค่า pH ที่ต้องการให้หยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านกระดาษกรองสารที่กรองสารอยู่เพื่อให้ได้ค่า pH=6,7 เมื่อกรองสารเสร็จทิ้งให้สารแห้งสนิทเป็นเวลา 1 คืน โดยชั่งสารที่กรองพร้อมกระดาษกรองเพื่อหาน้ำหนักของสารโดยน้ำหนักสารกับกระดาษกรองหนัก 1.0696 กรัม ดังนั้นสารหนัก $1.0696 - 0.2553 = 0.8143$ กรัม *สารหนักไม่ถึง 1 กรัม จึงต้องเปลี่ยนสารละลายที่ใช้เนื่องจากสาร $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ละลายใน HCl 1M



ภาพประกอบ 4.16 สารประกอบออกไซด์ $K_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน

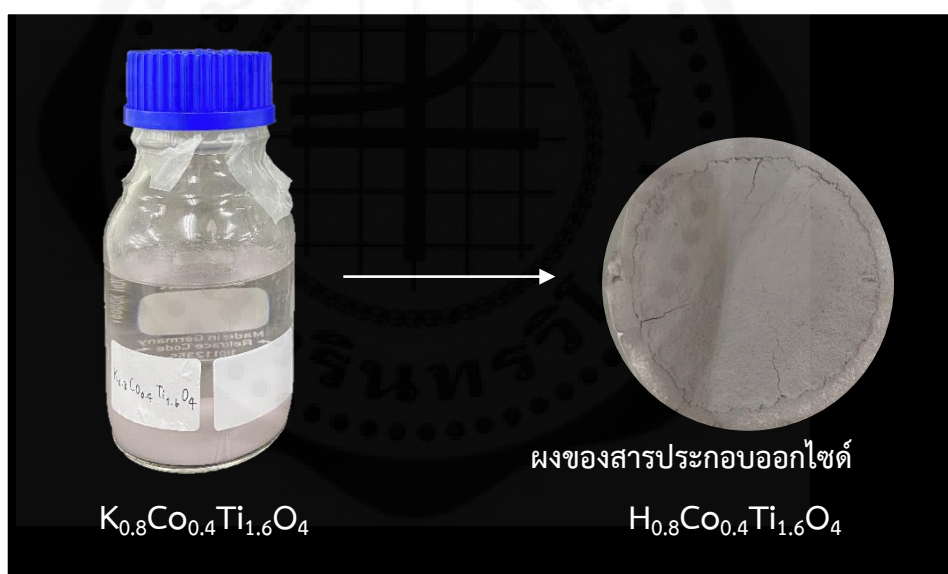
4.2.1.5 กระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ของสารประกอบออกไซด์ $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$

โดยการใช้สารผลึกตั้งต้นจากการระบวนการสังเคราะห์ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) มาทำปฏิกิริยาต่อด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) เพื่อการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) จากการแทนที่ไอออน K^+ ด้วยไอออน H^+ ดังสมการที่ 4.10 และภาพประกอบที่ 4.17



ภาพประกอบ 4.17 แสดงแบบจำลองโครงสร้างผลึกก่อนและหลังกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) ของสารประกอบออกไซด์ $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$

หลังจากทำการกรองสาร $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ 1 กรัม ที่ผสมกับ HCl 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร ทำให้ได้ผงละเอียดสีเทาที่มีขนาดเล็ก ($H_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ดังภาพประกอบที่ 4.18 และเพื่อหาน้ำหนักของสารที่กรองได้โดยการชั่งกระดาษกรองสารแผ่นที่ 1 ได้น้ำหนัก 0.3500 กรัม กระดาษกรองสารแผ่นที่ 2 ได้น้ำหนัก 0.2700 กรัม จากนั้นจึงทำการกรองสารโดยกรองสารจนได้ค่า pH=6,7 ถ้ายังไม่เป็นไปตามค่า pH ที่ต้องการให้หยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านกระดาษกรองสารที่กรองสารอยู่เพื่อให้ได้ค่า pH=6,7 เมื่อกรองสารเสร็จทิ้งให้สารแห้งสนิทเป็นเวลา 1 คืน โดยชั่งสารที่กรองพร้อมกระดาษกรองเพื่อหาน้ำหนักของสารโดยน้ำหนักสารกับกระดาษกรองหนักแผ่นที่ 1 หนัก 0.3700 กรัม สารแผ่นที่ 1 หนัก $0.3700 - 0.3500 = 0.0200$ กรัม และน้ำหนักสารกับกระดาษกรองหนักแผ่นที่ 2 หนัก 1.0300 กรัม สารแผ่นที่ 2 หนัก $1.0300 - 0.2700 = 0.7600$ กรัม ดังนั้นสารหนัก $0.0200 + 0.7600 = 0.7800$ กรัม *สารหนักไม่ถึง 1 กรัม จึงต้องเปลี่ยนสารละลายที่ใช้เนื่องจาก สาร $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ละลายใน HCl 1M

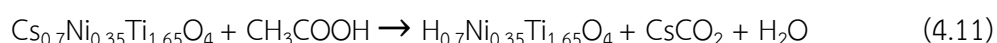


ภาพประกอบ 4.18 สารประกอบออกไซด์ $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน

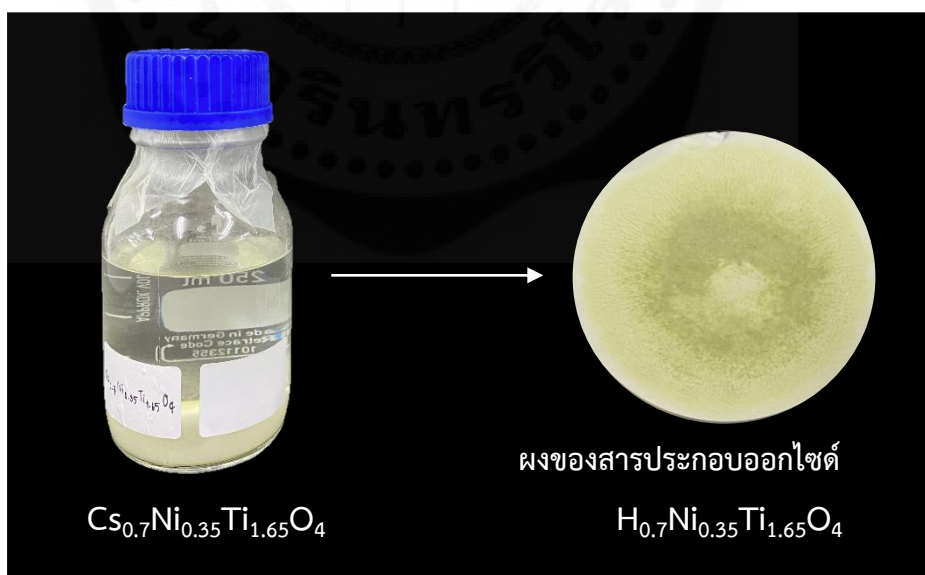
4.2.2 ลักษณะทางกายภาพและปริมาณของสารประกอบออกไซด์ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ครั้งที่ 1 กับกรดอะซิติก (CH_3COOH)

4.2.2.1 กระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ของสารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$

โดยใช้สารผลึกตั้งต้นจากการระเหิดของสารประกอบออกไซด์ (Solid-state reaction) มาทำปฏิกิริยาต่อด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) เพื่อการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) จากการแทนที่ไอออน Cs^+ ด้วยไอออน H^+ ดังสมการที่ 4.11

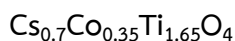


หลังจากทำการกรองสาร $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ 1 กรัม ที่ผสมกับ CH_3COOH 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร ทำให้ได้ผงละเอียดสีเหลืองที่มีขนาดเล็ก ($\text{H}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ดังภาพประกอบที่ 4.19 และเพื่อหาน้ำหนักของสารที่กรองได้โดยการชั่งกระดาษกรองสารได้น้ำหนัก 0.3420 กรัม จากนั้นจึงทำการกรองสารโดยกรองสารจนได้ค่า pH=6,7 ถ้ายังไม่เป็นไปตามค่า pH ที่ต้องการให้หยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านกระดาษกรองสารที่กรองสารอยู่เพื่อให้ได้ค่า pH=6,7 เมื่อกรองสารเสร็จทิ้งให้สารแห้งสนิทเป็นเวลา 1 คืน โดยชั่งสารที่กรองพร้อมกระดาษกรองเพื่อหาน้ำหนักของสารโดยน้ำหนักสารกับกระดาษกรองหนัก 1.0857 กรัม ดังนั้นสารหนัก $1.0857 - 0.3420 = 0.7437$ กรัม



ภาพประกอบ 4.19 สารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน

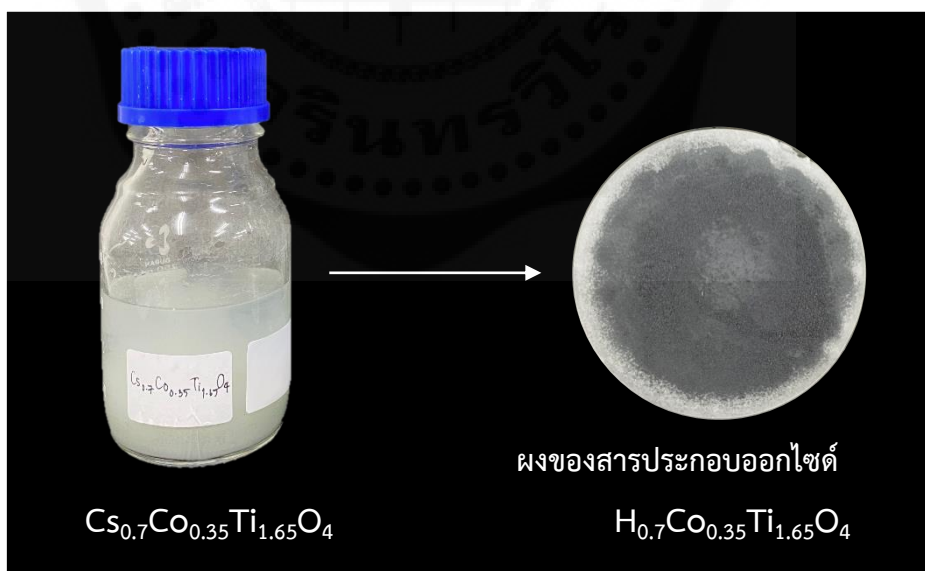
4.2.2.2 กระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ของสารประกอบออกไซด์



โดยการใช้สารผลึกตั้งต้นจากการระเหิดของสารประกอบออกไซด์ (Solid-state reaction) มาทำปฏิกิริยาต่อด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) เพื่อการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) จากการแทนที่ไอออน Cs^+ ด้วยไอออน H^+ ดังสมการที่ 4.12

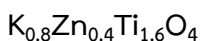


หลังจากทำการกรองสาร $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ 1 กรัม ที่ผสมกับ CH_3COOH 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร ทำให้ได้ผงละเอียดสีเทาที่มีขนาดเล็ก ($\text{H}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ดังภาพประกอบที่ 4.20 และเพื่อหาน้ำหนักของสารที่กรองได้โดยการชั่งกระดาษกรองสารได้น้ำหนัก 0.3321 กรัม จากนั้นจึงทำการกรองสารโดยกรองสารจนได้ค่า pH=6,7 ถ้ายังไม่เป็นไปตามค่า pH ที่ต้องการให้หยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านกระดาษกรองสารที่กรองสารอยู่เพื่อให้ได้ค่า pH=6,7 เมื่อกรองสารเสร็จทิ้งให้สารแห้งสนิทเป็นเวลา 1 คืน โดยชั่งสารที่กรองพร้อมกระดาษกรองเพื่อหาน้ำหนักของสารโดยน้ำหนักสารกับกระดาษกรองหนัก 1.1091 กรัม ดังนั้นสารหนัก $1.1091 - 0.3321 = 0.7770$ กรัม

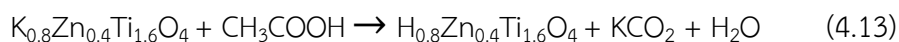


ภาพประกอบ 4.20 สารประกอบออกไซด์ $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน

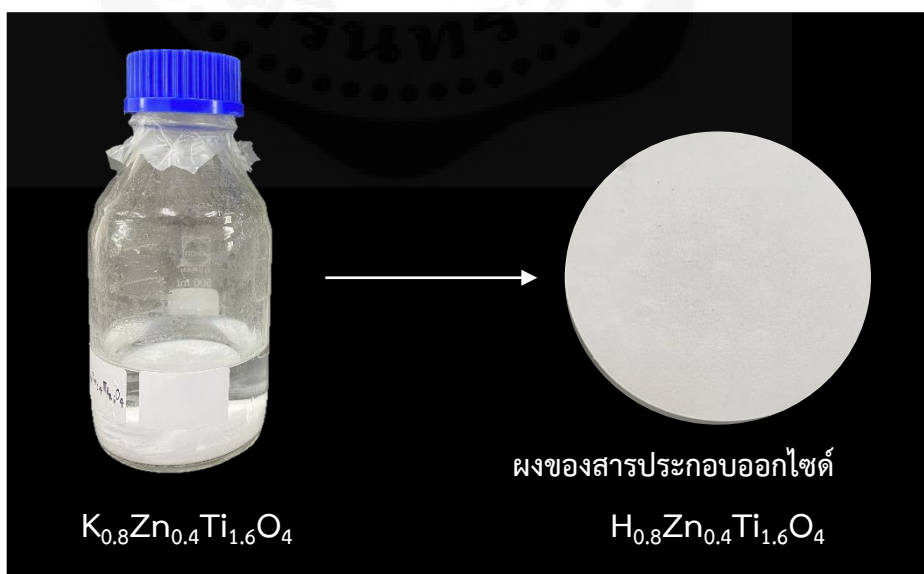
4.2.2.3 กระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ของสารประกอบออกไซด์



โดยการใช้สารผลึกตั้งต้นจากการะบวนการสังเคราะห์ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) มาทำปฏิกิริยาต่อด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) เพื่อการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) จากการแทนที่ไอออน K^+ ด้วยไอออน H^+ ดังสมการที่ 4.13

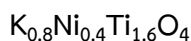


หลังจากทำการกรองสาร $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ 1 กรัม ที่ผสมกับ CH_3COOH 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร ทำให้ได้ผงละเอียดสีขาวที่มีขนาดเล็ก ($\text{H}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) ดังภาพประกอบที่ 4.21 และเพื่อหาน้ำหนักของสารที่กรองได้โดยทำการชั่งกระดาษกรองสารแผ่นที่ 1 ได้น้ำหนัก 0.6876 กรัม กระดาษกรองสารแผ่นที่ 2 ได้น้ำหนัก 0.6700 กรัม จากนั้นจึงทำการกรองสารโดยกรองสารจนได้ค่า $\text{pH}=6,7$ ถ้ายังไม่เป็นไปตามค่า pH ที่ต้องการให้หยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านกระดาษกรองสารที่กรองสารอยู่เพื่อให้ได้ค่า $\text{pH}=6,7$ เมื่อกรองสารเสร็จทิ้งให้สารแห้งสนิทเป็นเวลา 1 คืน โดยชั่งสารที่กรองพร้อมกระดาษกรองเพื่อหาน้ำหนักของสารโดยน้ำหนักสารกับกระดาษกรองหนักแผ่นที่ 1 หนัก 1.4587 กรัม สารแผ่นที่ 1 หนัก $1.4587 - 0.6876 = 0.7711$ กรัม และน้ำหนักสารกับกระดาษกรองหนักแผ่นที่ 2 หนัก 0.7548 กรัม สารแผ่นที่ 2 หนัก $0.7548 - 0.6700 = 0.0848$ กรัม ดังนั้นสารหนัก $0.7711 + 0.0848 = 0.8559$ กรัม

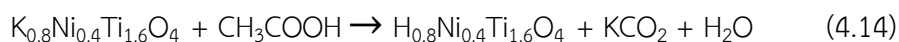


ภาพประกอบ 4.21 สารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน

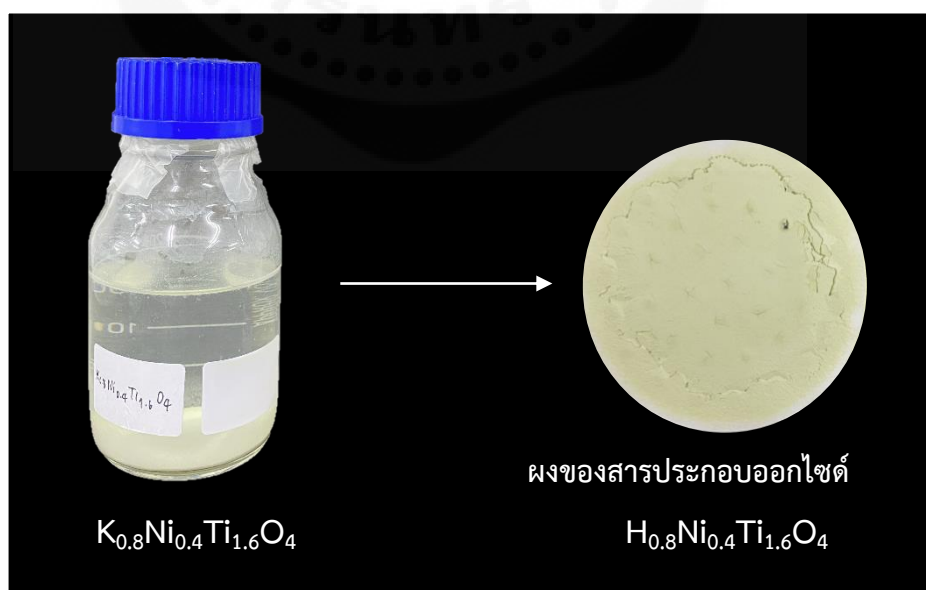
4.2.2.4 กระบวนการการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ของสารประกอบออกไซด์



โดยใช้สารผลิตภัณฑ์ตั้งต้นจากการกระบวนการสังเคราะห์ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) มาทำปฏิกิริยาต่อด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) เพื่อการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) จากการแทนที่ไอออน K^+ ด้วยไอออน H^+ ดังสมการที่ 4.14



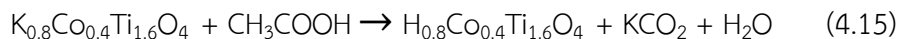
หลังจากทำการกรองสาร $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ 1 กรัม ที่ผสมกับ CH_3COOH 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร ทำให้ได้ผงละเอียดสีขาวที่มีขนาดเล็ก ($\text{H}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) ดังภาพประกอบที่ 4.22 และเพื่อหาน้ำหนักของสารที่กรองได้ โดยทำการชั่งกระดาษกรองสารแผ่นที่ 1 ได้น้ำหนัก 0.3430 กรัม กระดาษกรองสารแผ่นที่ 2 ได้น้ำหนัก 0.3302 กรัม จากนั้นจึงทำการกรองสารโดยกรองสารจนได้ค่า $\text{pH}=6,7$ ถ้ายังไม่เป็นไปตามค่า pH ที่ต้องการ ให้หยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านกระดาษกรองสารที่กรองสารอยู่เพื่อให้ได้ค่า $\text{pH}=6,7$ เมื่อกรองสารเสร็จ ทิ้งให้สารแห้งสนิทเป็นเวลา 1 คืน โดยชั่งสารที่กรองพร้อมกระดาษกรองเพื่อหาน้ำหนักของสารโดยน้ำหนัก สารกับกระดาษกรองหนักแผ่นที่ 1 หนัก 0.8636 กรัม สารแผ่นที่ 1 หนัก $0.8636 - 0.3430 = 0.5206$ กรัม และน้ำหนักสารกับกระดาษกรองหนักแผ่นที่ 2 หนัก 0.6807 กรัม สารแผ่นที่ 2 หนัก $0.6807 - 0.3302 = 0.3505$ กรัม ดังนั้นสารหนัก $0.5206 + 0.3505 = 0.8711$ กรัม



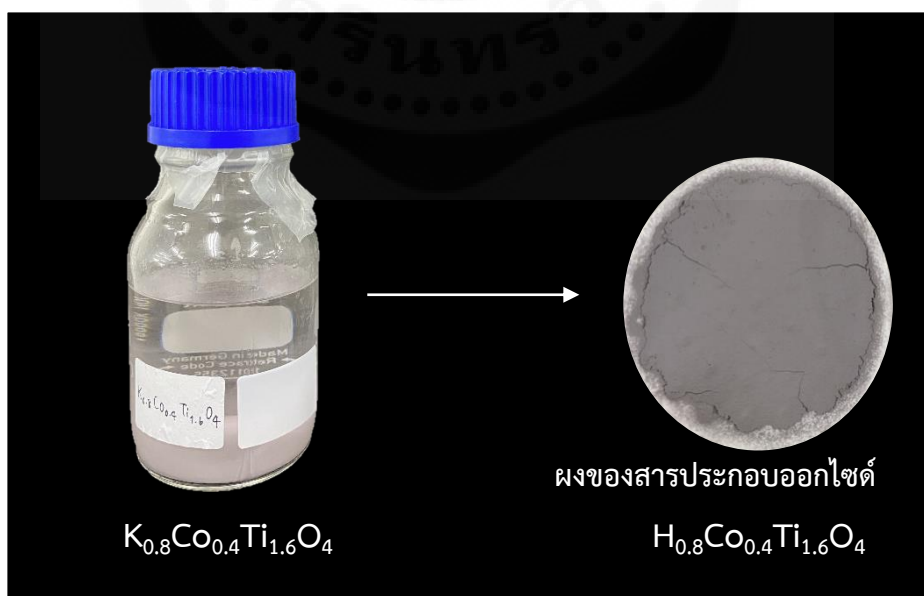
ภาพประกอบ 4.22 สารประกอบออกไซด์ $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน

4.2.2.5 กระบวนการการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ของสารประกอบออกไซด์ K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O₄

โดยการใช้สารผลึกตั้งต้นจากการะบวนการสังเคราะห์ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) มาทำปฏิกิริยาต่อยกกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) เพื่อการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) จากการแทนที่ไอออน K⁺ ด้วยไอออน H⁺ ดังสมการที่ 4.15



หลังจากทำการกรอง K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O₄ 1 กรัม ที่ผสมกับ CH₃COOH 1M จำนวน 100 มิลลิลิตร ทำให้ได้ผงละเอียดสีขาวที่มีขนาดเล็ก (H_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O₄) ดังภาพประกอบที่ 4.23 และเพื่อหาน้ำหนักของสารที่กรองได้ โดยทำการชั่งกระดาษกรองสารแผ่นที่ 1 ได้น้ำหนัก 0.3305 กรัม กระดาษกรองสารแผ่นที่ 2 ได้น้ำหนัก 0.3333 กรัม จากนั้นจึงทำการกรองสารโดยกรองสารจนได้ค่า pH=6,7 ถ้ายังไม่เป็นไปตามค่า pH ที่ต้องการ ให้หยดน้ำโดยปราศจากไอออนผ่านกระดาษกรองสารที่กรองสารอยู่เพื่อให้ได้ค่า pH=6,7 เมื่อกรองสารเสร็จ ทิ้งให้สารแห้งสนิทเป็นเวลา 1 คืน โดยชั่งสารที่กรองพร้อมกระดาษกรองเพื่อหาน้ำหนักของสารโดยน้ำหนัก สารกับกระดาษกรองหนักแผ่นที่ 1 หนัก 1.1323 กรัม สารแผ่นที่ 1 หนัก 1.1323 - 0.3305 = 0.8018 กรัม และน้ำหนักสารกับกระดาษกรองหนักแผ่นที่ 2 หนัก 0.4319 กรัม สารแผ่นที่ 2 หนัก 0.4319 - 0.3333 = 0.0986 กรัม ดังนั้นสารหนัก 0.8018 + 0.0986 = 0.9004 กรัม



ภาพประกอบ 4.23 สารประกอบออกไซด์ K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O₄ ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนโปรตอน

หลังจากกระบวนการการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) โดยจะใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดอะซิติก (CH_3COOH) พบว่าผงของสารประกอบออกไซด์ทั้ง 5 ชนิดละลายในกรดไฮโดรคลอริกโดยดูได้จากตารางที่ 4.1 โดยจะแสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปหลังผ่านกระบวนการการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ระหว่างกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดอะซิติก (CH_3COOH)

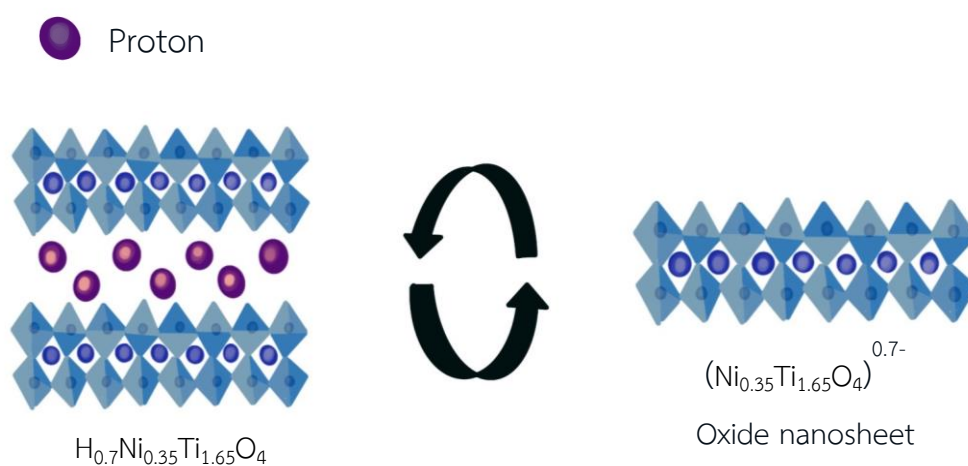
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบแสดงเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปเมื่อผ่านกระบวนการการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) ระหว่างกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดอะซิติก (CH_3COOH)

Proton Exchange กับกรดไฮโดรคลอริก (HCl)		Proton Exchange กับกรดอะซิติก (CH_3COOH)	
สาร	น้ำหนักสุทธิของสารที่หายไป (%)	สาร	น้ำหนักสุทธิของสารที่หายไป (%)
$\text{H}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$	47.17	$\text{H}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$	34.91
$\text{H}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$	33.72	$\text{H}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$	27.82
$\text{H}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$	35.40	$\text{H}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$	31.76
$\text{H}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$	47.17	$\text{H}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$	21.98
$\text{H}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$	24.60	$\text{H}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$	24.53

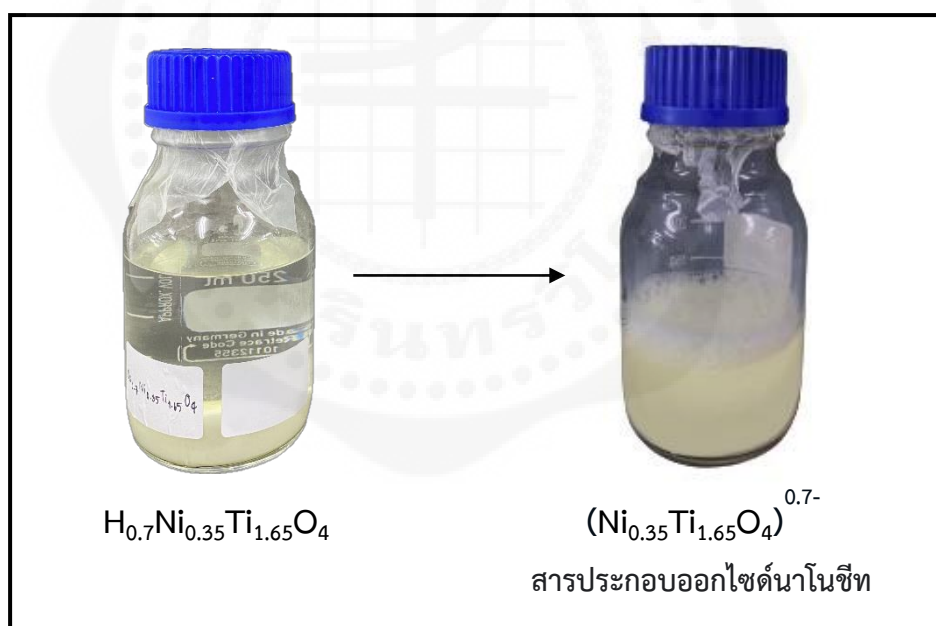
4.2.3 ลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทด้วยกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation)

4.2.3.1 ลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทด้วยกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$

โดยการใช้สารผลึกตั้งต้นจากการะบวนการสังเคราะห์ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) มาทำปฏิกิริยาต่อด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) เพื่อการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) และนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายเตตระบิวทิล-แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TBAOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และปรับปริมาตรด้วยน้ำโดยปราศจากไอออนที่ 100 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเขย่าสารเป็นระยะเวลา 7 วัน โดยกระบวนการจะแสดงดังภาพประกอบที่ 4.24 ที่อุณหภูมิห้องเมื่อครบระยะเวลา 7 วัน จะได้สารละลายที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่มีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น ดังแสดงในภาพที่ 4.25



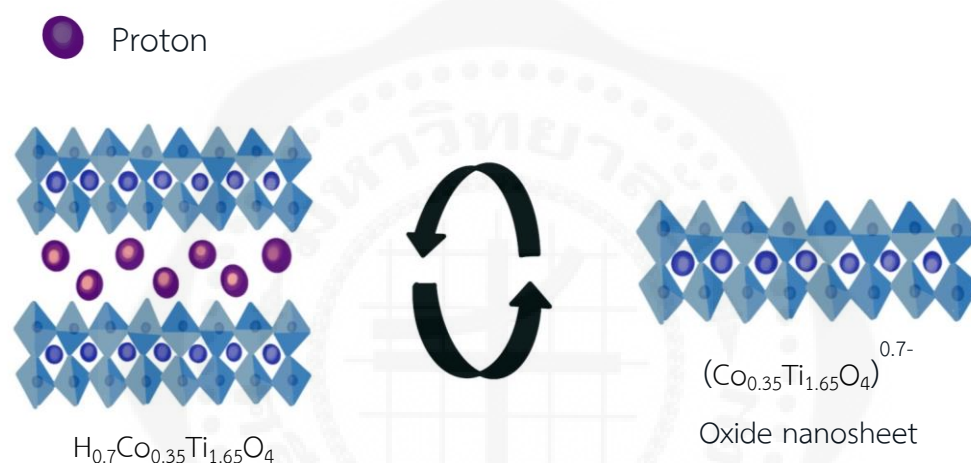
ภาพประกอบ 4.24 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบออกไซด์ ($\text{H}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ในกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) และสารประกอบออกไซด์นาโนชีต $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ ในกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation)



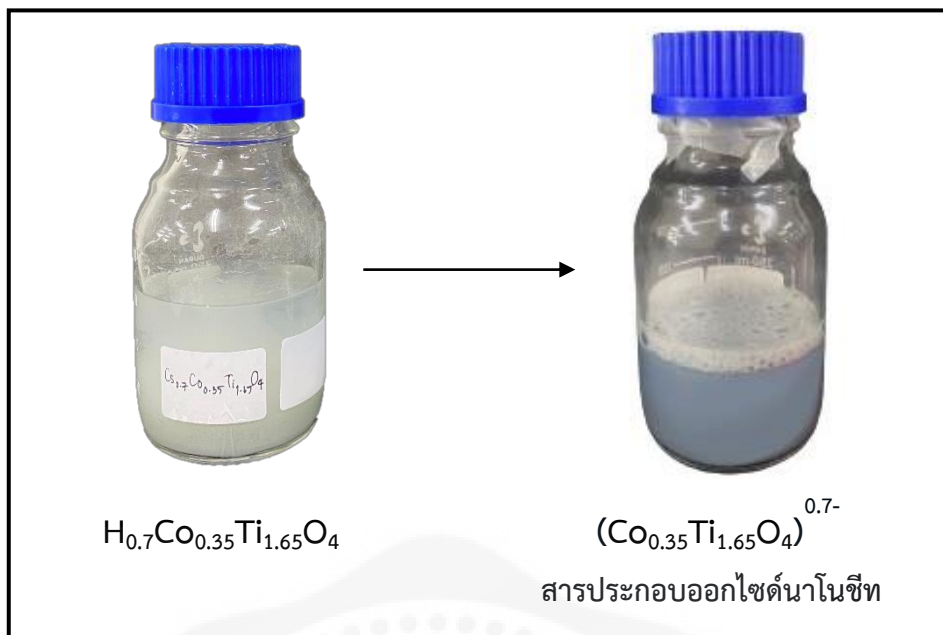
ภาพประกอบ 4.25 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนชีตที่ทำปฏิกิริยาครบระยะเวลา 7 วัน

4.2.3.2 ลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนชีตด้วยการการแยกชั้น (Exfoliation) ของสารประกอบออกไซด์นาโนชีต $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$

โดยการใช้สารผลึกตั้งต้นจากการะบวนการสังเคราะห์ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) มาทำปฏิกิริยาต่อด้วยการะบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) เพื่อการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) และนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายเตตระบิวทิล-แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TBAOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และปรับปริมาตรด้วยน้ำโดยปราศจากไอออนที่ 100 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเขย่าสารเป็นระยะเวลา 7 วัน โดยกระบวนการจะแสดงดังภาพประกอบที่ 4.26 ที่อุณหภูมิห้องเมื่อครระยะเวลา 7 วัน จะได้สารละลายที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่มีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น ดังแสดงในภาพที่ 4.25 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนชีตที่ทำปฏิกิริยาครระยะเวลา 7 วัน



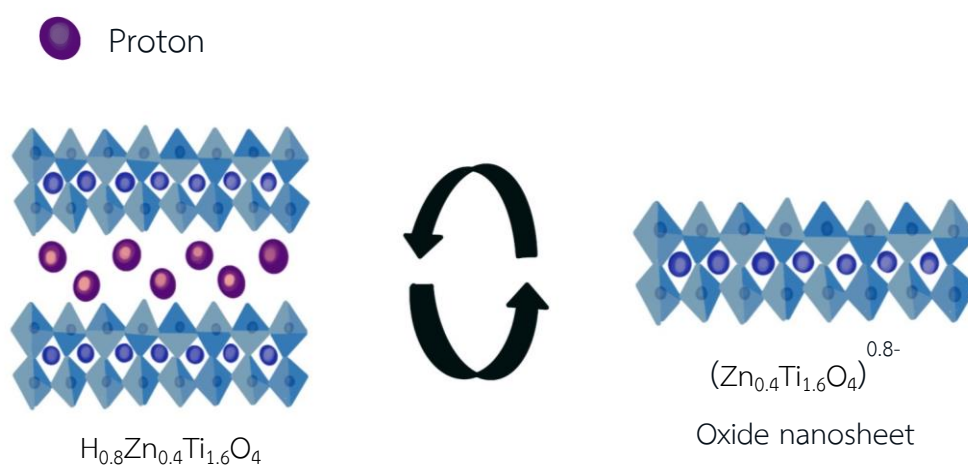
ภาพประกอบ 4.26 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบออกไซด์ ($\text{H}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ในกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) และสารประกอบออกไซด์นาโนชีต ($(\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$) ในกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation)



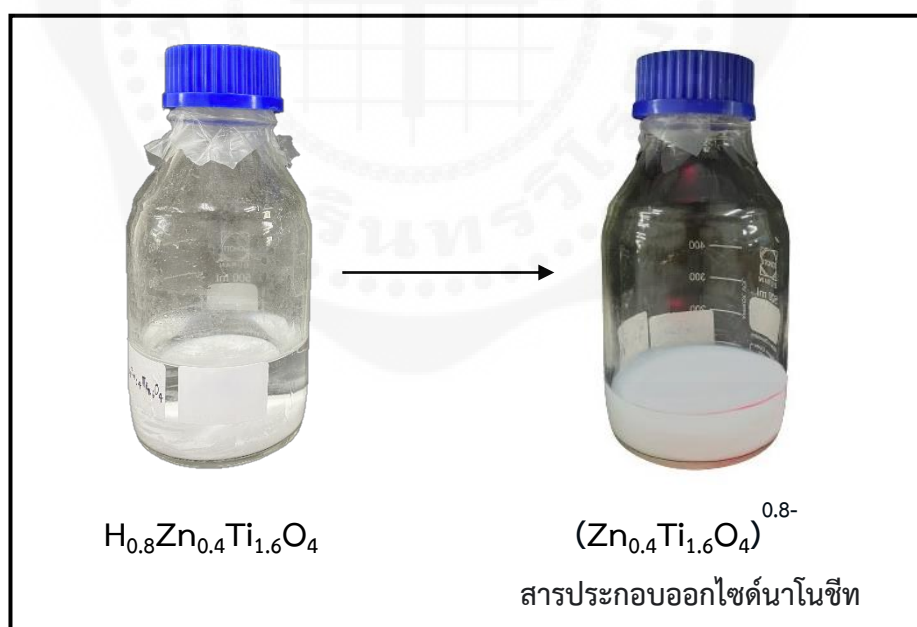
ภาพประกอบ 4.27 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ทำปฏิกิริยาครระยะเวลา 7 วัน

4.2.3.3 ลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทด้วยกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $K_{0.8}Zn_{0.4}Ti_{1.6}O_4$

โดยใช้สารผลึกตั้งต้นจากการะบวนการสังเคราะห์ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) มาทำปฏิกิริยาต่อด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) เพื่อการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) และนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายเตตระบิวทิล-แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TBAOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และปรับปริมาตรด้วยน้ำโดยปราศจากไอออนที่ 100 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเขย่าสารเป็นระยะเวลา 7 วัน โดยกระบวนการจะแสดงดังภาพประกอบที่ 4.28 ที่อุณหภูมิห้องเมื่อครระยะเวลา 7 วัน จะได้สารละลายที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่มีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น ดังแสดงในภาพที่ 4.27 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ทำปฏิกิริยาครระยะเวลา 7 วัน



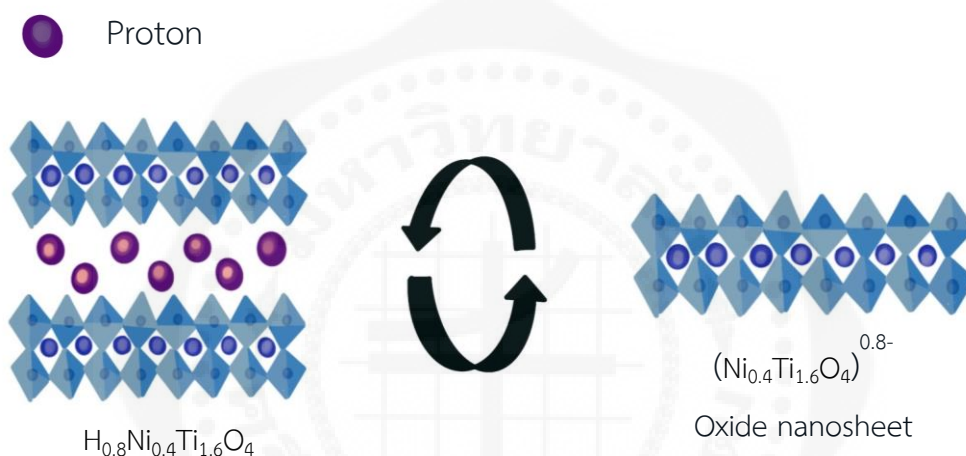
ภาพประกอบ 4.28 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบออกไซด์ ($\text{H}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) ในกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) และสารประกอบออกไซด์นาโนชีต $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ในกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation)



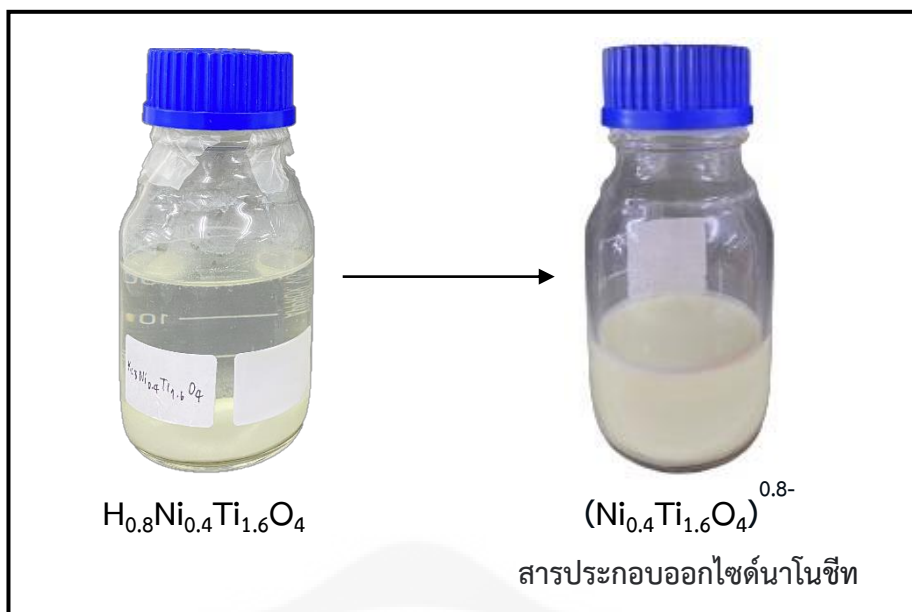
ภาพประกอบ 4.29 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนชีตที่ทำปฏิกิริยาครบระยะเวลา 7 วัน

4.2.3.4 ลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทด้วยกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $K_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$

โดยใช้สารผลึกตั้งต้นจากการะบวนการสังเคราะห์ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) มาทำปฏิกิริยาต่อด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) เพื่อการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) และนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายเตตระบิวทิล-แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TBAOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และปรับปริมาตรด้วยน้ำโดยปราศจากไอออนที่ 100 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเขย่าสารเป็นระยะเวลา 7 วัน โดยกระบวนการจะแสดงดังภาพประกอบที่ 4.30 ที่อุณหภูมิห้องเมื่อครบระยะเวลา 7 วัน จะได้สารละลายที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่มีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น ดังแสดงในภาพที่ 4.31 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ทำปฏิกิริยาครบระยะเวลา 7 วัน



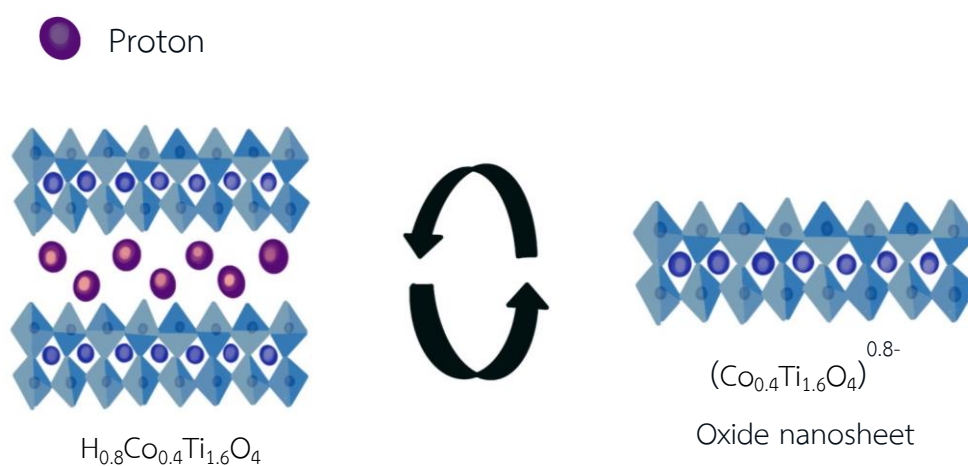
ภาพประกอบ 4.30 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบออกไซด์ ($H_{0.8}Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4$) ในกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) และสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($(Ni_{0.4}Ti_{1.6}O_4)^{0.8-}$) ในกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation)



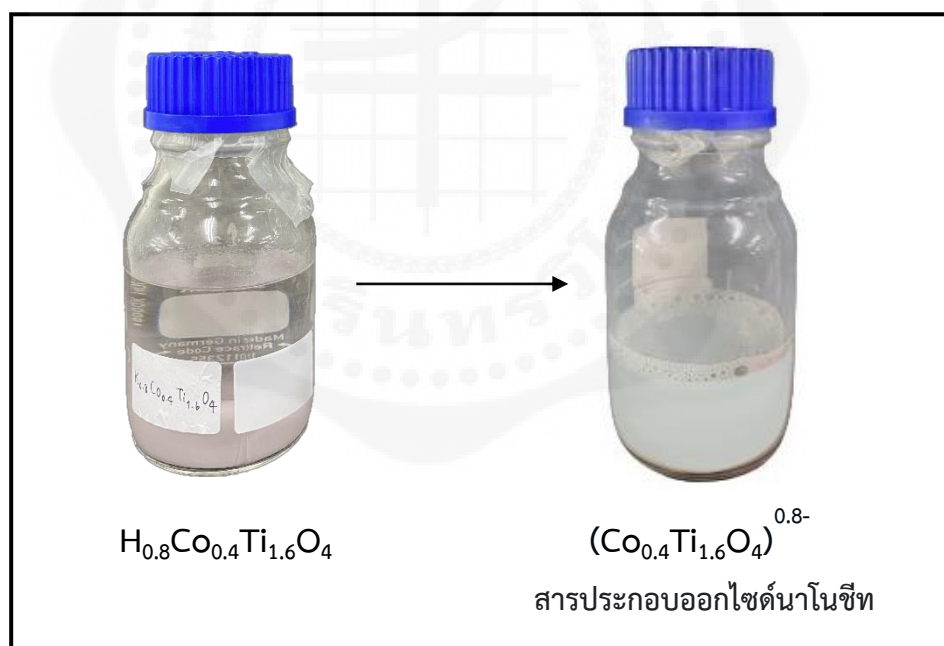
ภาพประกอบ 4.31 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ทำปฏิกิริยาครบระยะเวลา 7 วัน

4.2.3.5 ลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทด้วยกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $K_{0.8}Co_{0.4}Ti_{1.6}O_4$

โดยการใช้สารผลึกตั้งต้นจากการะบวนการสังเคราะห์ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction) มาทำปฏิกิริยาต่อด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) เพื่อการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) และนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายเตตระบิวทิล-แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TBAOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และปรับปริมาตรด้วยน้ำโดยปราศจากไอออนที่ 100 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเขย่าสารเป็นระยะเวลา 7 วัน โดยกระบวนการจะแสดงดังภาพประกอบที่ 4.32 ที่อุณหภูมิห้องเมื่อครบระยะเวลา 7 วัน จะได้สารละลายที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่มีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น ดังแสดงในภาพที่ 4.33 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ทำปฏิกิริยาครบระยะเวลา 7 วัน



ภาพประกอบ 4.32 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของสารประกอบออกไซด์ ($\text{H}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) ในกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) และสารประกอบออกไซด์นาโนชีต $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ในกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation)



ภาพประกอบ 4.33 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบออกไซด์นาโนชีตที่ทำปฏิกิริยาครบระยะเวลา 7 วัน

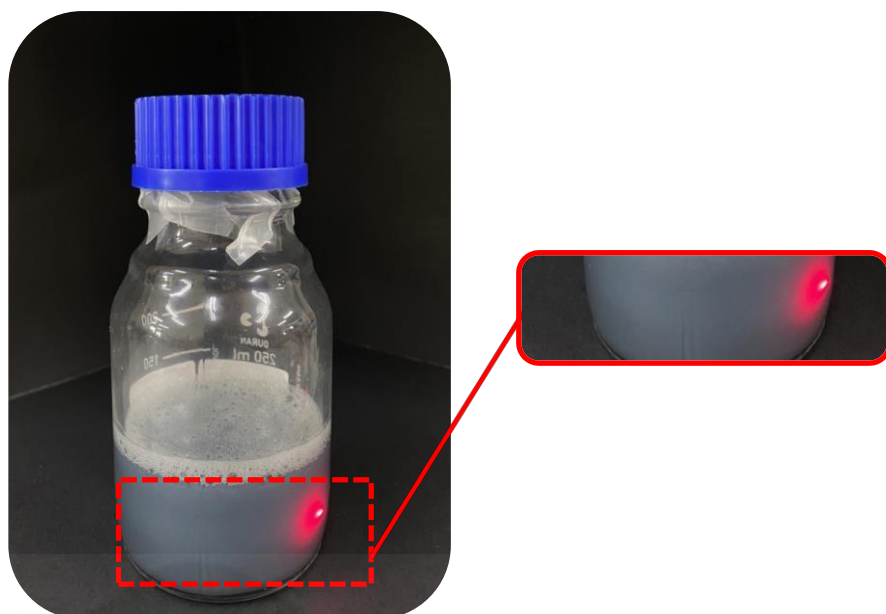
จากกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีททั้ง 5 ชนิดสามารถดูลักษณะเบื้องต้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทได้จากตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทในระยะเวลา 7 วัน

ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะสารในปฏิกิริยาแยกชั้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ทำปฏิกิริยา (Exfoliation) ครบระยะเวลา 7 วัน

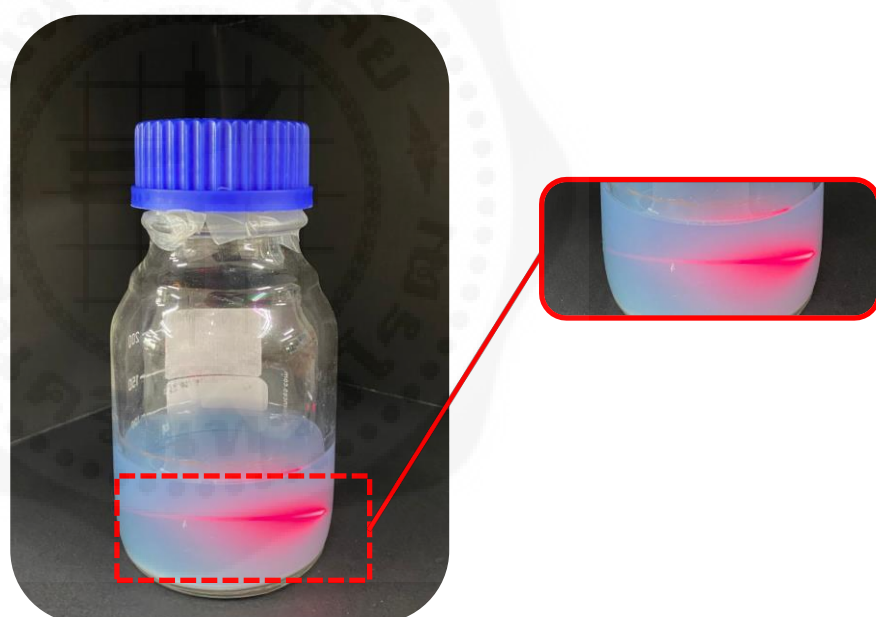
ระยะเวลา (วัน)	ลักษณะก่อนแยก	ลักษณะหลังแยก (15 วินาที)
1-3	มีลักษณะด้านบนใสและด้านล่างขุ่นเป็นตะกอน	สารละลายขาวขุ่นเป็นเนื้อเดียวกัน
4-6	มีลักษณะด้านบนใสและด้านล่างขุ่นเป็นตะกอน	สารละลายขาวขุ่นเป็นเนื้อเดียวกัน
7	มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่มีสีขาวขุ่น	มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่มีสีขาวขุ่น

4.2.4. ผลการตรวจสอบการเกิดปรากฏการณ์ทินดอลล์ (Tyndall effect) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท

ปรากฏการณ์ทินดอลล์เป็นปรากฏการณ์การกระเจิงแสงที่เกิดขึ้นเฉพาะในสารคอลลอยด์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เมื่อฉายลำแสงไปในสารที่มีอนุภาคของคอลลอยด์และเมื่อแสงชนกับอนุภาคคอลลอยด์ทำให้เกิดการกระเจิงแสงจึงมองเห็นเป็นลำแสง เมื่อทำการทดสอบกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่เป็นอนุภาคคอลลอยด์ โดยการยิงเลเซอร์พบว่าไม่เกิดการกระเจิงแสงในสารละลายคอลลอยด์จึงทำให้ไม่สามารถมองเห็นลำแสงสีแดงผ่านตลอดสาร โดยสาเหตุที่เลเซอร์ไม่สามารถผ่านสารละลายคอลลอยด์ทำให้เห็นเป็นลำแสงได้อาจเกิดมาจากสารละลายคอลลอยด์เป็นสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ยังไม่สมบูรณ์เนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาที่มากกว่าในกระบวนการการลอกชั้น (Exfoliation) หรือสารประกอบออกไซด์นาโนซีทนั้นไม่ได้มีฐานวิทยาศาสตร์ที่จะสามารถทำเป็นนาโนซีทได้ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.34 จนกระทั่งระยะเวลาผ่านไปจึงได้ทำทดสอบโดยการยิงแสงเลเซอร์อีกครั้งทำให้พบว่าเกิดการกระเจิงแสงในสารละลายคอลลอยด์จึงทำให้มองเห็นลำแสงสีแดงผ่านตลอดสารละลายคอลลอยด์ ทำให้สามารถอนุมานอนุภาคคอลลอยด์เป็นสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.35



ภาพประกอบ 4.34 ภาพแสดงการยิงเลเซอร์ในสารละลายคอลลอยด์ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท

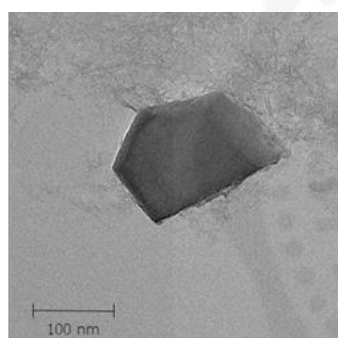


ภาพประกอบ 4.35 ภาพแสดงปรากฏการณ์ทินดอลล์ในสารละลายคอลลอยด์ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท

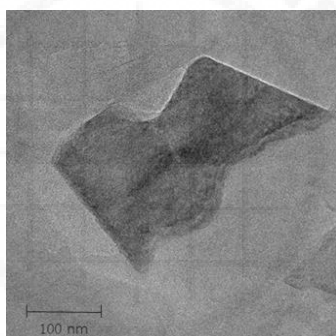
4.2.5 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์จากกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope: TEM)

จากการตรวจวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างเลพิโดโครไซต์จากกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) โดย

ตัวอย่างที่ใช้คือสารประกอบออกไซด์นาโนซีททั้ง 5 ชนิด คือ $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$, $(\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$, $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$, $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ และ $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ หลังจากผ่านกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation) จากภาพถ่ายจากกล้องและลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่าโครงสร้างของผลึกมีลักษณะคล้ายกับแผ่นซีทหรือแผ่นกระดาษ ดังภาพประกอบที่ 4.36 จากการดูสัณฐานวิทยาพบว่าสามารถเตรียมสารประกอบออกไซด์นาโนซีททั้ง 5 ชนิดได้โดยดูได้จากภาพถ่ายที่ปรากฏลักษณะของสารประกอบออกไซด์นาโนซีททั้ง 5 ชนิด โดยสารประกอบออกไซด์นาโนซีททั้ง 5 ชนิดจะมีขนาดที่แตกต่างกัน โดยสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ มีขนาด 172 ± 28 นาโนเมตร, สารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ มีขนาด 316 ± 86 นาโนเมตร, สารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ มีขนาด 1108 ± 182 นาโนเมตร, สารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ มีขนาด 316 ± 86 นาโนเมตร และสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ไม่สามารถหาขนาดที่ชัดเจนได้เนื่องจากลักษณะของแผ่นซีทอยู่ในลักษณะที่เสียรูป



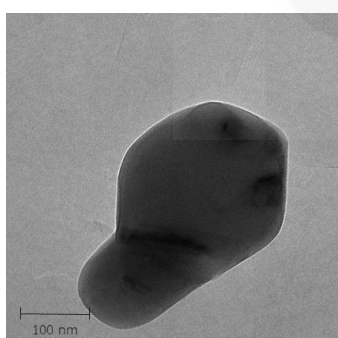
(ก)



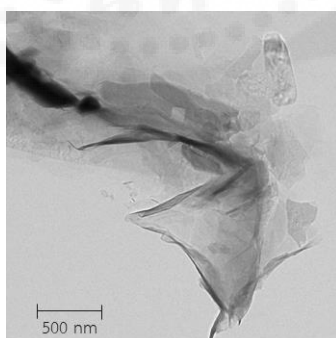
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพประกอบ 4.36 ภาพถ่าย TEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท

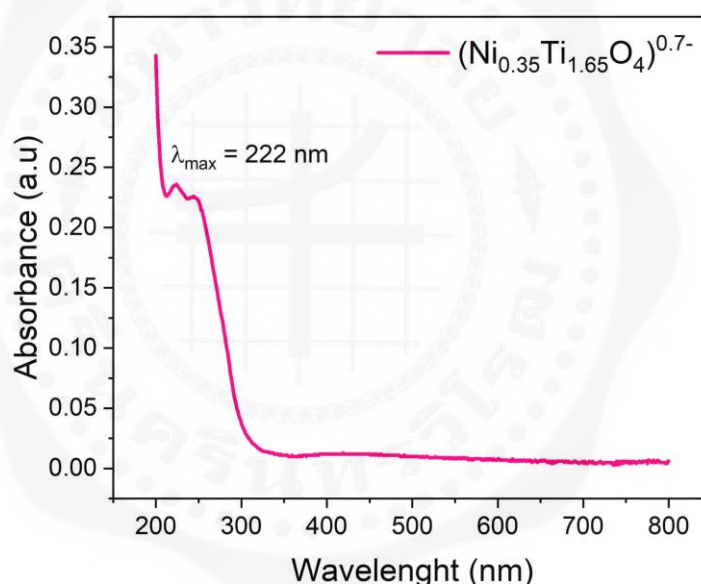
(ก) $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ (ข) $(\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ (ค) $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ (ง) $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$

และ (จ) $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$

4.2.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-VIS Spectroscopy) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์

4.2.6.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปีของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$

การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร โดยการเตรียมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ ที่มีปริมาตร 200 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วทำการวิเคราะห์ซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง โดยผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนจากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร พบว่าสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 222 นาโนเมตรและมีค่าการดูดกลืนเท่ากับ 0.2360 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.37



ภาพประกอบ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$

โดยผลการวิเคราะห์ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความยาวคลื่น เพื่อนำมาหาค่าความเข้มข้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ โดยวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ตามกฎของ เบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert) ดังสมการที่ 4.16 จะเห็นได้หาค่าการดูดกลืนแสงของสารจะมีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของสาร

$$A = \epsilon bc \quad (4.16)$$

A = ค่าการดูดกลืน

ϵ = ค่าคงที่จำเพาะของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวค่าหนึ่ง ($4.390 \times 10^4 \text{ mol}^{-1}\text{dm}^3$)

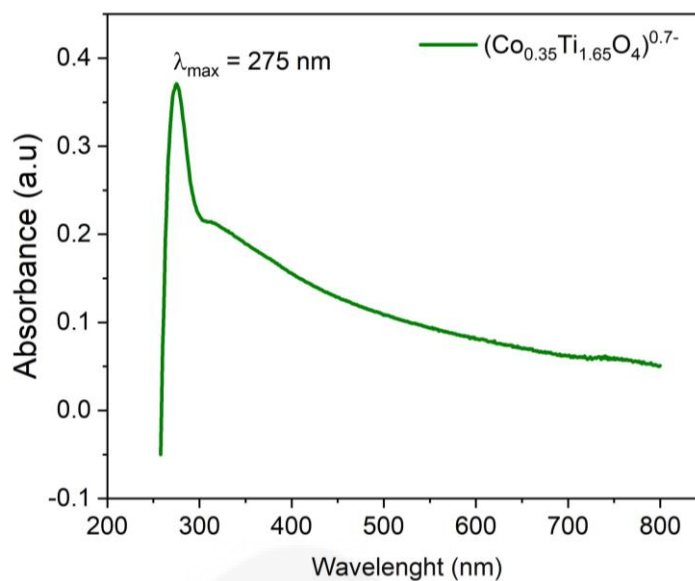
b = ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่างหรือความกว้างของเซลล์ (cm) ; 1 cm ในงานวิจัยนี้

c = ความเข้มข้นเป็น โมล/ลิตร หรือโมลาร์ (M)

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (c) และค่าการดูดกลืนแสงของ เปียร์-แลมเบิร์ตจะ คำนวณหาความเข้มข้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ทำการเจือจางจากการเตรียม ตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี โดยได้ค่าความเข้มข้นเท่ากับ $5.376 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$

4.2.6.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปีของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-}

การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร โดยการเตรียมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่มีปริมาตร 200 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วทำการวิเคราะห์ซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง โดยผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนจากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร พบว่าสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 275 นาโนเมตรและมีค่าการดูดกลืนเท่ากับ 0.3710 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.38

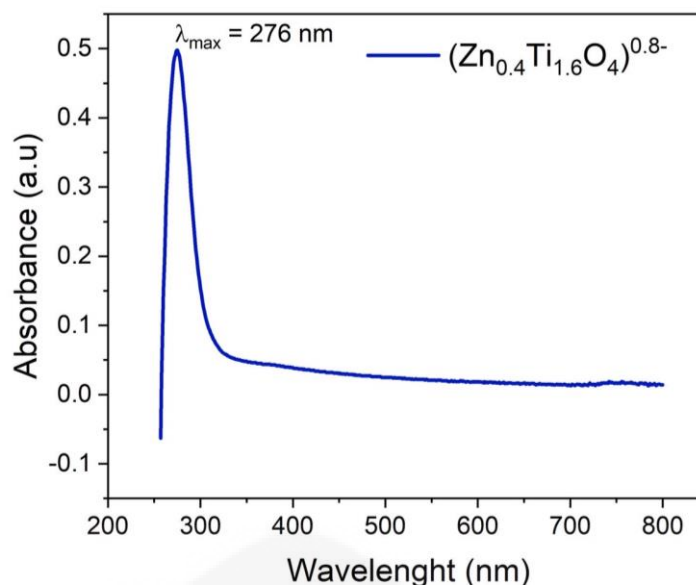


ภาพประกอบ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (c) และค่าการดูดกลืนแสงของเบียร์-แลมเบิร์ตจะคำนวณหาความเข้มข้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ ที่ทำการเจือจางจากการเตรียมตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี โดยได้ค่าความเข้มข้นเท่ากับ $8.451 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$

4.2.6.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปีของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$

การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร โดยการเตรียมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ที่มีปริมาตร 200 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วทำการวิเคราะห์ซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง โดยผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนจากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร พบว่าสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 276 นาโนเมตรและมีค่าการดูดกลืนเท่ากับ 0.4970 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.39

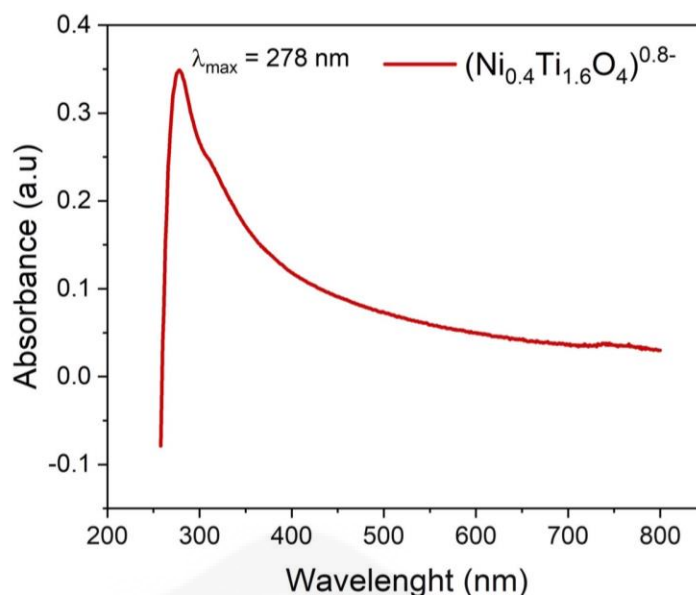


ภาพประกอบ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (c) และค่าการดูดกลืนแสงของเปียร์-แลมเบิร์ตจะคำนวณหาความเข้มข้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ที่ทำการเจือจางจากการเตรียมตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี โดยได้ค่าความเข้มข้นเท่ากับ $1.132 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$

4.2.6.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปีของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$

การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร โดยการเตรียมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ที่มีปริมาตร 200 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วทำการวิเคราะห์ซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง โดยผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนจากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร พบว่าสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 280 นาโนเมตรและมีค่าการดูดกลืนเท่ากับ 0.3480 นาโนเมตรดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.40

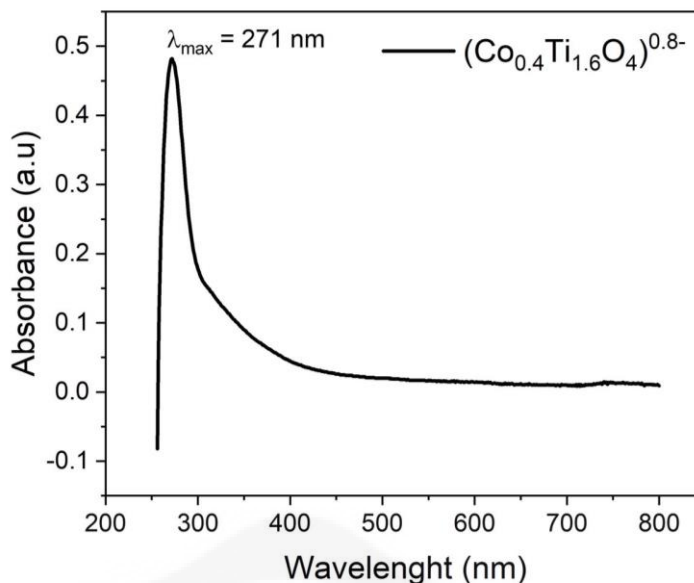


ภาพประกอบ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (c) และค่าการดูดกลืนแสงของเบียร์-แลมเบิร์ต จะคำนวณหาความเข้มข้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ที่ทำการเจือจางจากการเตรียมตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี โดยได้ค่าความเข้มข้นเท่ากับ $7.927 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$

4.2.6.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปีของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$

การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร โดยการเตรียมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ที่มีปริมาตร 200 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วทำการวิเคราะห์ซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง โดยผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนจากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร พบว่าสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 271 นาโนเมตรและมีค่าการดูดกลืนเท่ากับ 0.4820 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.41

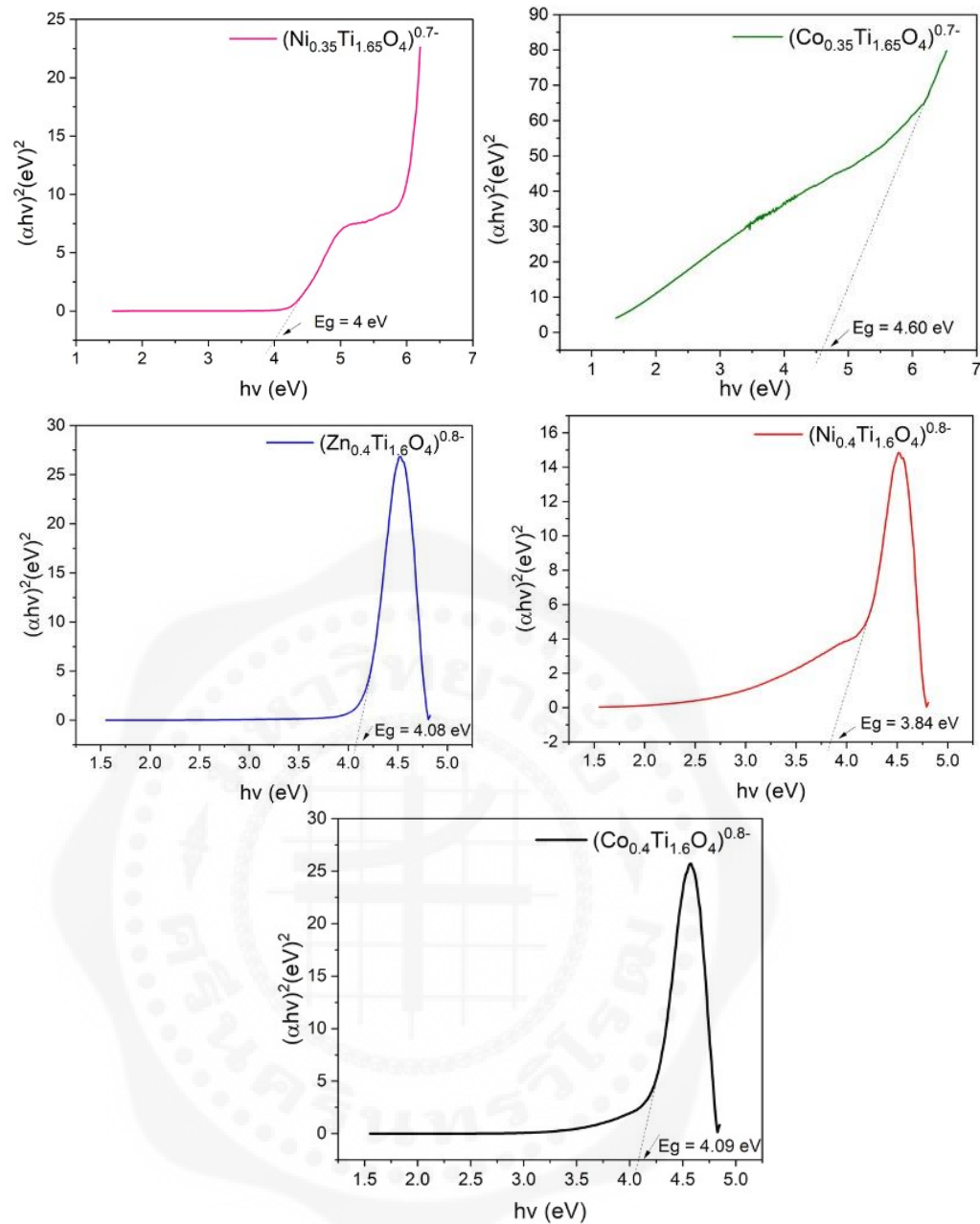


ภาพประกอบ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (c) และค่าการดูดกลืนแสงของเบียร์-แลมเบิร์ต จะคำนวณหาความเข้มข้นของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ที่ทำการเจือจางจากการเตรียมตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี โดยได้ค่าความเข้มข้นเท่ากับ $1.098 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$

4.2.7 ผลการวิเคราะห์สมบัติการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-VIS Spectroscopy) เพื่อหาค่า Energy gap (Eg) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์

การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีททั้ง 5 ชนิด คือ $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$, $(\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$, $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$, $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ และ $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ เพื่อหาค่า Eg จากภาพประกอบที่ 4.42 พบว่าสารประกอบออกไซด์นาโนซีททั้ง 5 ชนิด มีค่า Eg ที่ใกล้เคียงกันคือ 3-4 eV ทำให้สามารถบอกได้เบื้องต้นว่าสารประกอบออกไซด์นาโนซีทมีสมบัติเป็นไดอิเล็กทริกหมายถึงวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง มีความเป็นฉนวนสูงทำให้สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ได้และเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดีทำให้มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulator)



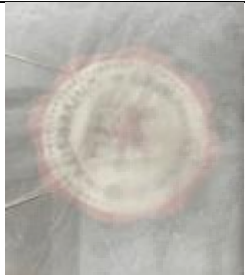
ภาพประกอบ 4.42 แสดงค่า Energy gap ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีททั้ง 5 ชนิด คือ $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$, $(\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$, $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$, $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ และ $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$

4.3 ผลการศึกษาการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลส (Bacterial Cellulose) กับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Oxide Nanosheets) โครงสร้างแบบเลฟโดโครไมต์

4.3.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส (BC)

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสที่ได้จากกระบวนการหล่อแบบเพื่อนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มแล้วทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง พบว่าแผ่นฟิล์มมีสีขาว มีลักษณะโปร่งแสง และมีความหนาเฉลี่ย 43 ± 5 ไมโครเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส

แผ่นฟิล์ม	ภาพประกอบ	สี	ลักษณะพื้นผิว	ความโปร่งแสง	เนื้อสัมผัส	ความยืดหยุ่น
แบคทีเรียเซลลูโลส		สีขาวขุ่น	เรียบ	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่นดี

โดยในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสโดยการคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีททั้ง 5 ชนิด คือ $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$, $(\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$, $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$, $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ และ $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ที่อัตราส่วน 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

4.3.2 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท

4.3.2.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงการเติมที่อัตราส่วน 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรพบว่าแผ่นฟิล์มมีสีเหลือง มีลักษณะโปร่งแสง ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และมีความหนาที่แตกต่างกันโดยที่ 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 46 ± 7 ไมโครเมตร , 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 41 ± 8 ไมโครเมตร , 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 45 ± 5 ไมโครเมตร และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 60 ± 13 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสโพลีตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท
($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-}

BC + ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$) ^{0.7-} (% vt)	ภาพประกอบ	สี	ลักษณะ พื้นผิว	ความ โปร่ง แสง	เนื้อ สัมผัส	ความ ยืดหยุ่น
3		สีเหลือง ขุ่น	เรียบ	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่นดี
5		สีเหลือง ขุ่น	เรียบ	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่นดี
10		สีเหลือง ขุ่น	เรียบ	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่นดี
20		สีเหลือง ขุ่น	เรียบ	ค่อนข้าง ทึบแสง	เรียบ	ยืดหยุ่นดี

4.3.2.2 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพลีตกับ สารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-}

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพลีตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ภายใต้การเปลี่ยนแปลงการเติมที่อัตราส่วน 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรพบว่าแผ่นฟิล์มมีสีเทา มีลักษณะโปร่งแสง ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และมีความหนาที่แตกต่างกัน โดยที่ 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 45 ± 5 ไมโครเมตร , 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนา

เฉลี่ย 44 ± 5 ไมโครเมตร , 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 41 ± 6 ไมโครเมตร และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 47 ± 7 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสโพลีสกัดกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$

BC + $(\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ (% vt)	ภาพประกอบ	สี	ลักษณะพื้นผิว	ความโปร่งแสง	เนื้อสัมผัส	ความยืดหยุ่น
3		สีเทาขุ่น	ค่อนข้างเรียบ	โปร่งแสง	ค่อนข้างเรียบ	ยืดหยุ่นดี
5		สีเทาขุ่น	เรียบ	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่นดี
10		สีเทาขุ่น	ขรุขระ	โปร่งแสง	ขรุขระ	ยืดหยุ่นดี
20		สีเทาขุ่น	ขรุขระ	ทึบแสง	ขรุขระ	ยืดหยุ่นดี

4.3.2.3 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-}

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-} ภายใต้การเปลี่ยนแปลงการเติมที่อัตราส่วน 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรพบว่าแผ่นฟิล์มมีสีขาว มีลักษณะโปร่งแสง ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และมีความหนาที่แตกต่างกัน โดยที่ 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 40 ± 8 ไมโครเมตร , 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 43 ± 9 ไมโครเมตร , 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 41 ± 6 ไมโครเมตร และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 43 ± 5 ไมโครเมตร



ตารางที่ 4.6 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสโพลีเมอร์กับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-}

BC + ($\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$) ^{0.8-} (% vt)	ภาพประกอบ	สี	ลักษณะ พื้นผิว	ความ โปร่ง แสง	เนื้อ สัมผัส	ความ ยืดหยุ่น
3		สีขาวขุ่น	เรียบ	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่นดี
5		สีขาวขุ่น	เรียบ	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่นดี
10		สีขาวขุ่น	ขรุขระ	โปร่งแสง	ขรุขระ	ยืดหยุ่นดี
20		สีขาวขุ่น	เรียบ	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่นดี

4.3.2.4 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-}

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-} ภายใต้การเปลี่ยนแปลงการเติมที่อัตราส่วน 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรพบว่าแผ่นฟิล์มมีสีเหลือง มีลักษณะโปร่งแสง ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และมีความหนาที่แตกต่างกันโดยที่ 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 41 ± 6 ไมโครเมตร , 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความ

หนาเฉลี่ย 45 ± 8 ไมโครเมตร , 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 49 ± 6 ไมโครเมตร และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 44 ± 9 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.7 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสโพลีตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$

BC + $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ (% vt)	ภาพประกอบ	สี	ลักษณะ พื้นผิว	ความ โปร่ง แสง	เนื้อ สัมผัส	ความ ยืดหยุ่น
3		สีเหลือง ขุ่น	เรียบ	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่นดี
5		สีเหลือง ขุ่น	เรียบ	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่นดี
10		สีเหลือง ขุ่น	ขรุขระ	โปร่งแสง	ขรุขระ	ยืดหยุ่นดี
20		สีเหลือง ขุ่น	เรียบ	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่นดี

4.3.2.5 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพลีตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพลีตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงการเติมที่อัตราส่วน 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

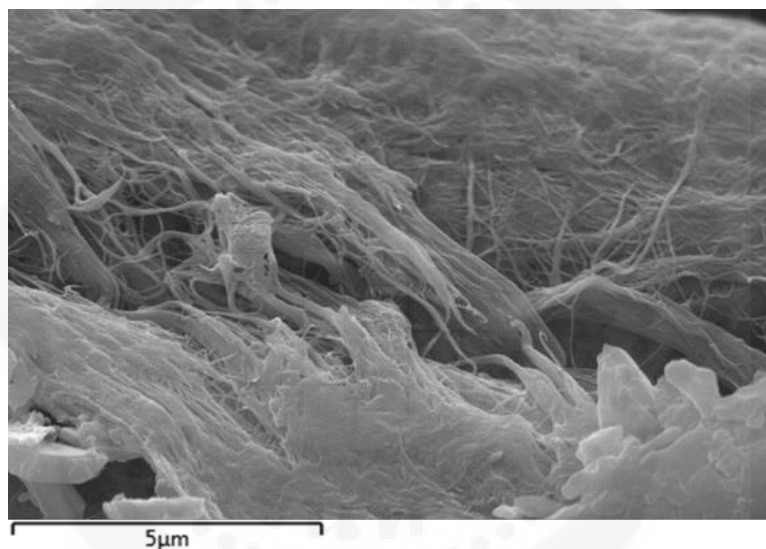
โดยปริมาตรพบว่าแผ่นฟิล์มมีสีเทา มีลักษณะโปร่งแสง ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และมีความหนาที่แตกต่างกัน โดยที่ 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 44 ± 5 ไมโครเมตร , 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 44 ± 5 ไมโครเมตร , 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 41 ± 4 ไมโครเมตร และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีความหนาเฉลี่ย 43 ± 5 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.8 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสโพลีตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$

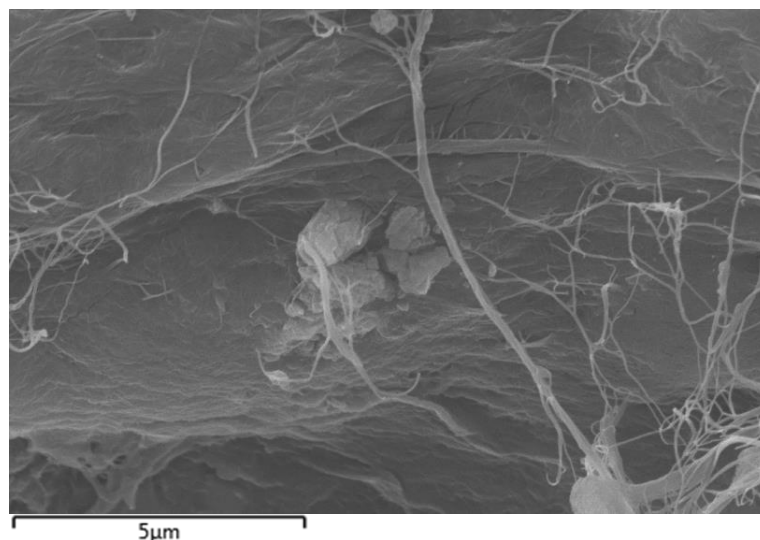
BC + $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ (% vt)	ภาพประกอบ	สี	ลักษณะ พื้นผิว	ความ โปร่ง แสง	เนื้อ สัมผัส	ความ ยืดหยุ่น
3		สีเทาขุ่น	ขรุขระ	โปร่งแสง	ขรุขระ	ยืดหยุ่นดี
5		สีเทาขุ่น	เรียบ	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่นดี
10		สีเทาขุ่น	เรียบ	โปร่งแสง	เรียบ	ยืดหยุ่นดี
20		สีเทาขุ่น	ขรุขระ	ค่อนข้าง ทึบแสง	ขรุขระ	ยืดหยุ่นดี

4.3.3 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

จากการตรวจสอบและวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 1.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบเพียงเส้นใยของแบคทีเรียเซลลูโลสเท่านั้นไม่พบสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ดังภาพประกอบที่ 4.43 ในขณะที่แผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรพบการเกาะกลุ่ม (Agglomerate) กันอย่างหนาแน่นซึ่งคาดว่า จะเป็นสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ดังภาพประกอบที่ 4.44



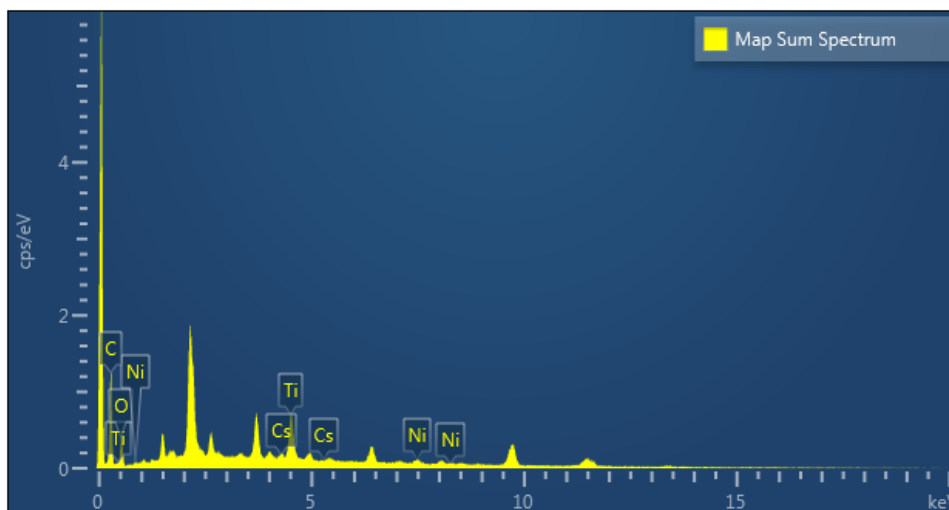
ภาพประกอบ 4.43 ภาพ SEM ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



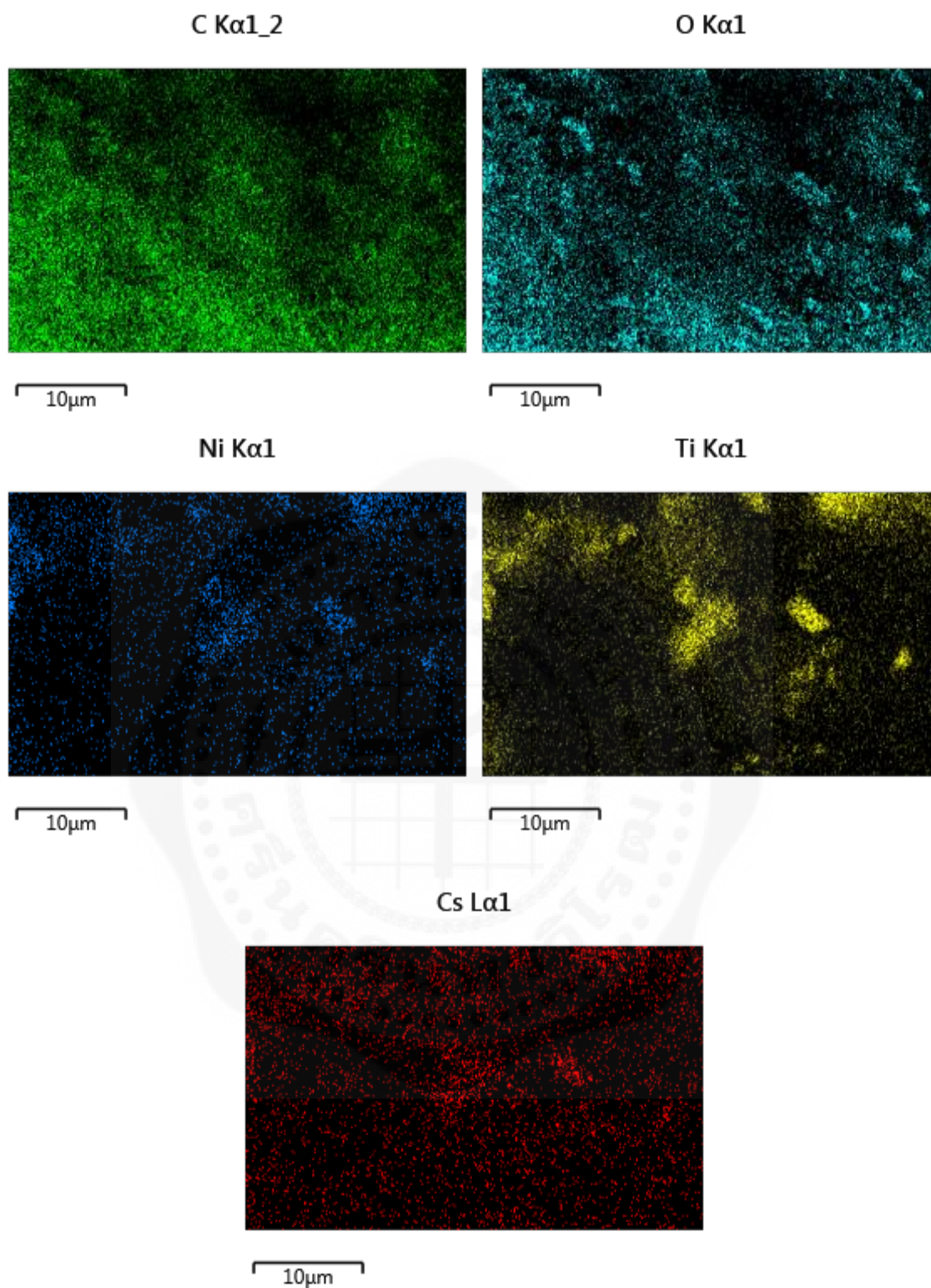
ภาพประกอบที่ 4.44 ภาพ SEM ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

4.3.4 ผลการศึกษาการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์

จากการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) แบบ Mapping analysis ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าจากภาพกราฟที่แสดงในภาพประกอบที่ 4.45 พบว่าเจือปนของธาตุ คาร์บอน (C), ออกซิเจน (O), นิกเกิล (Ni), ไทเทเนียม (Ti) และ ซีเซียม (Cs) จากกราฟที่แสดงยังสอดคล้องกับการกระจายตัวของธาตุที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสโดยดูได้จากภาพประกอบที่ 4.46 โดยจะมีการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C), ออกซิเจน (O), นิกเกิล (Ni), ไทเทเนียม (Ti) และ ซีเซียม (Cs) ปรากฏอย่างชัดเจนโดยในทางทฤษฎีแล้วธาตุซีเซียม (Cs) นั้นไม่ควรจะปรากฏในกราฟเนื่องจากผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange) และกระบวนการการแยกชั้น (Exfoliation) แต่ที่ธาตุซีเซียม (Cs) ปรากฏบนกราฟอาจจะเกิดมาจากการแทนที่ของโปรตอนที่ไม่สามารถเข้าไปแทนที่ได้จึงทำให้หลงเหลือธาตุซีเซียม (Cs) ปรากฏลงบนกราฟ นอกจากเทคนิค EDS จะวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพ (การกระจายตัว) ยังสามารถวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณได้อีกด้วยโดยจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของธาตุที่มีอยู่ในแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังตารางที่ 4.9



ภาพประกอบ 4.45 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



ภาพประกอบ 4.46 การกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C), ออกซิเจน (O), นิกเกิล (Ni), ไทเทเนียม (Ti) และ ซีเซียม (Cs) ในแผ่นฟิล์มแบบที่เรียวเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

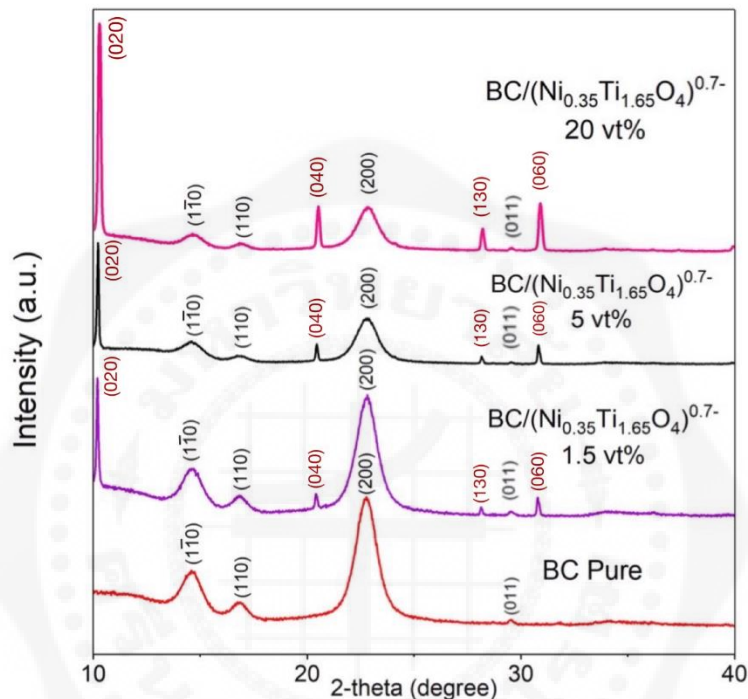
ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณด้วยเทคนิค EDS ในแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

Map Sum Spectrum									
Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
C	K series	15.60	0.15598	54.17	0.35	63.89	C Vit	Yes	
O	K series	8.46	0.02845	38.72	0.36	34.28	SiO2	Yes	
Ti	K series	2.28	0.02279	4.79	0.07	1.42	Ti	Yes	
Ni	K series	0.59	0.00585	1.26	0.07	0.30	Ni	Yes	
Cs	L series	0.50	0.00501	1.07	0.10	0.11	Cs (v)	Yes	
Total:				100.00		100.00			

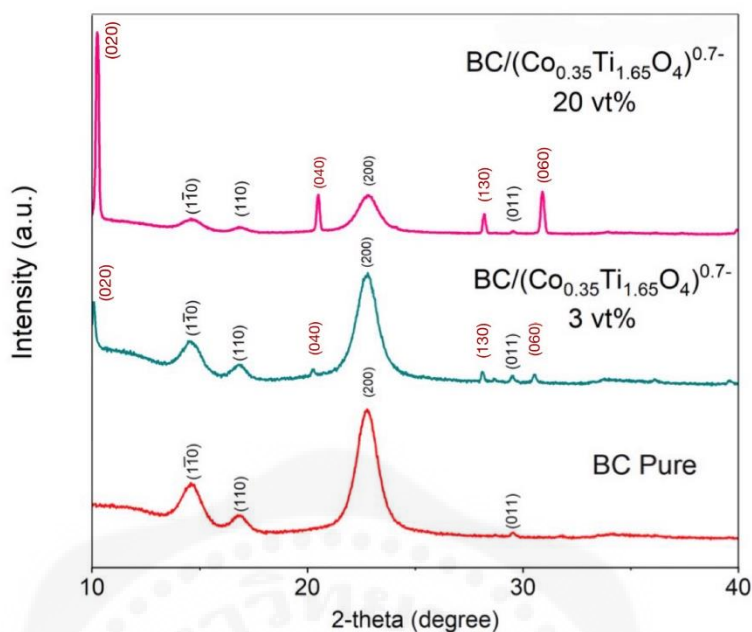
4.3.5 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction technique: XRD)

จากการตรวจสอบเอกลักษณ์ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 1.5, 5 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังภาพประกอบที่ 4.47 และแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 3 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังภาพประกอบที่ 4.48 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction technique: XRD) พบว่าแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์พบระนาบของแบคทีเรีย

เซลลูโลสที่ตำแหน่ง 14.6, 16.8, 22.8, 29 องศา สอดคล้องกับระบบผลึกของระนาบ (110) (110) (200) (011) ตามลำดับ หลังจากเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} และ ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} พบพิกที่ปะปนกันระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสและสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ตำแหน่ง 10, 21, 28 และ 31 องศา สอดคล้องกับผลึกของระนาบ (020) (040) (130) (060) ตามลำดับซึ่งเป็นพิกของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท แสดงให้เห็นถึงการคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสและสารประกอบออกไซด์นาโนซีท



ภาพประกอบ 4.47 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 1.5, 5 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

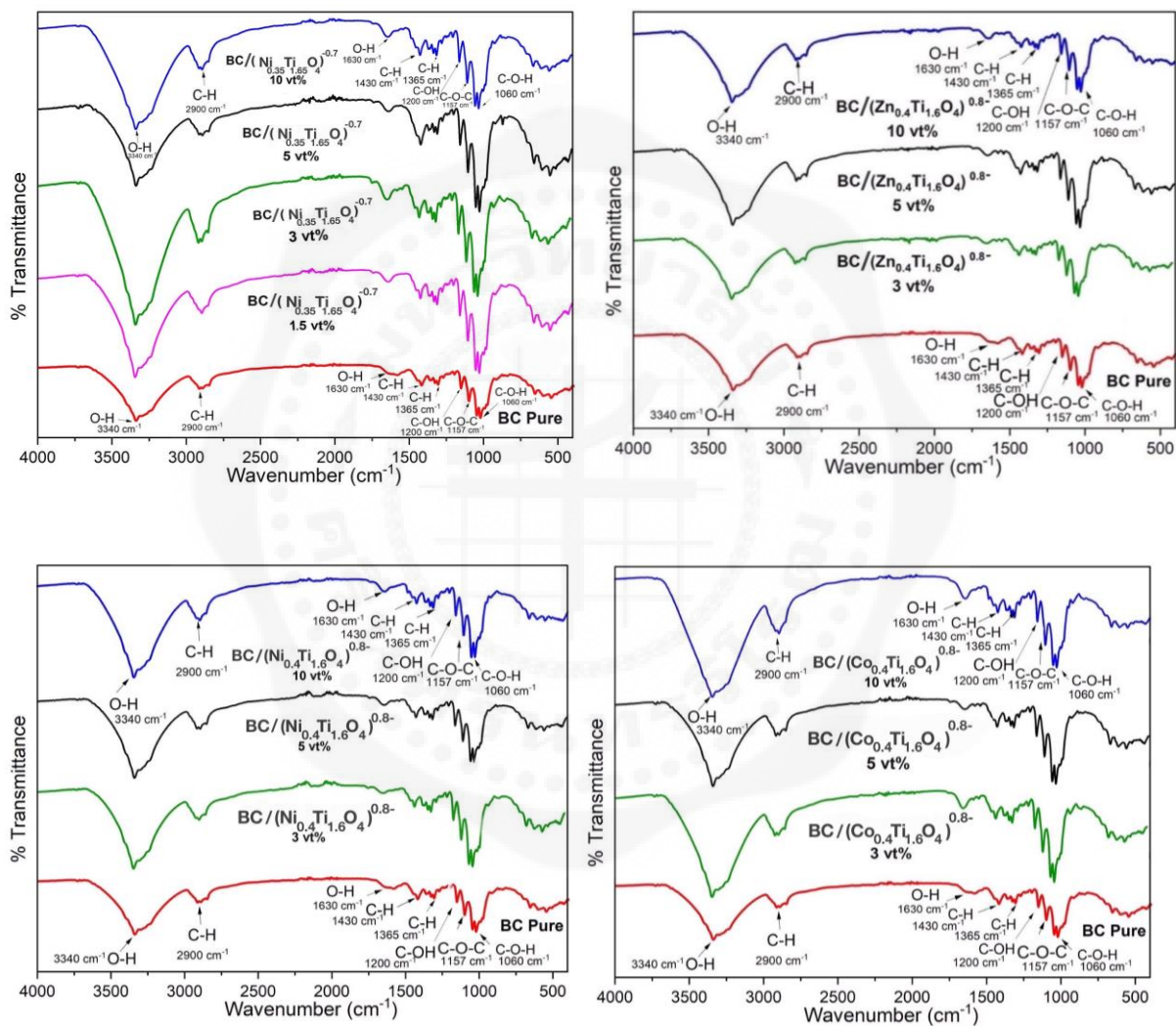


ภาพประกอบ 4.48 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ ที่ 3 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

4.3.6 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์ ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total Reflectance : ATR-IR)

จากการตรวจสอบเอกลักษณ์ของโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชัน ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total Reflectance : ATR-IR) ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$, $(\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ และ $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ และ $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ เพื่อตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้น จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค ATR-IR ที่ช่วงความยาวคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ พบว่าในแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์มีพีคการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันหลักของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ที่พีคการดูดกลืน 3340 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ O-H (หมู่ไฮดรอกซิล) ที่พีคการดูดกลืน 2900 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ C-H (หมู่เมทิล) และพบพีคการดูดกลืนที่ช่วงความยาวคลื่น 1630 cm^{-1} , 1200 cm^{-1} , 1157 cm^{-1} และ 1060 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบบิดงอของพันธะ O-H การสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-O-H การ

สัณแบบยึดหดของพันธะ C-O-C และการสัณแบบยึดหดของพันธะ C-O-H ตามลำดับ ซึ่งพิกัดทั้งหมดสอดคล้องกับโครงสร้างของแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์หลังจากการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซิท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-}, ($\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-}, ($\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-} และ ($\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-} ดังภาพประกอบที่ 4.49 พบเพียงเอกลักษณ์ของแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์เท่านั้นไม่พบพิกัดของสารประกอบออกไซด์นาโนซิทอื่นเนื่องมาจากพิกัดของสารประกอบออกไซด์นาโนซิทอยู่ต่ำกว่าที่เครื่องจะสามารถวัดได้

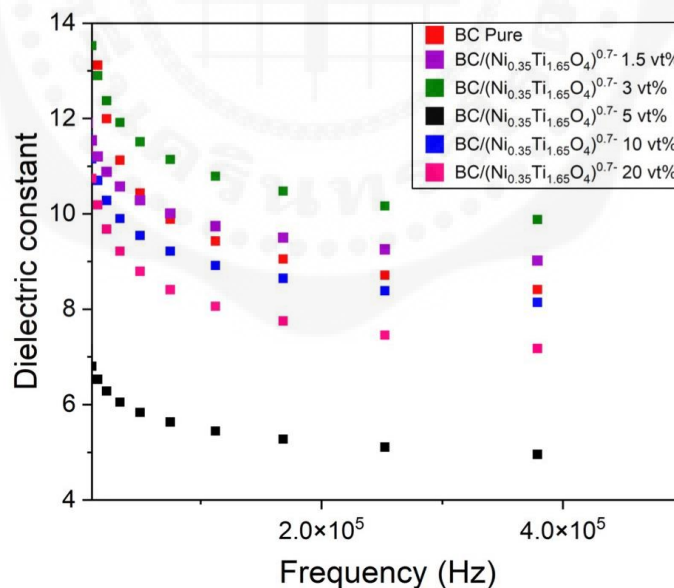


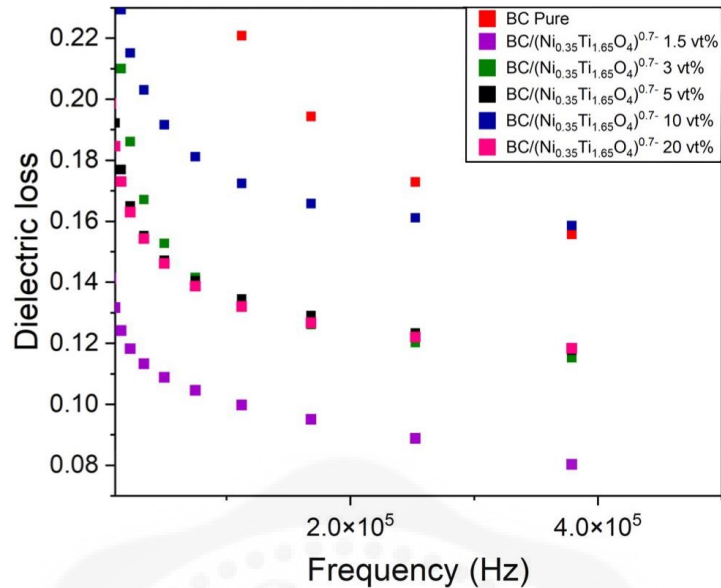
ภาพประกอบ 4.49 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซิท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-}, ($\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-} และ ($\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-} และ ($\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-}

4.3.7 ผลการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่นฟิล์มแบบที่เรียวเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์

4.3.7.1 สมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่นฟิล์มแบบที่เรียวเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$

จากการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่นฟิล์มแบบที่เรียวเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ เทียบกับแผ่นฟิล์มแบบที่เรียวเซลลูโลสบริสุทธิ์โดยดูได้จากค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ดังภาพประกอบที่ 4.50 พบว่าแผ่นฟิล์มแบบที่เรียวเซลลูโลสบริสุทธิ์มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 10 หลังจากเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ ที่ 1.5, 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าที่ 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดโดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 12 และหลังจากเพิ่มการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดต่ำลงเช่นเดียวกับค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก โดยแผ่นฟิล์มแบบที่เรียวเซลลูโลสบริสุทธิ์มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.16 หลังจากเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ ที่ 1.5, 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกต่ำที่สุดโดยมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.08 และหลังจากเพิ่มการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรพบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

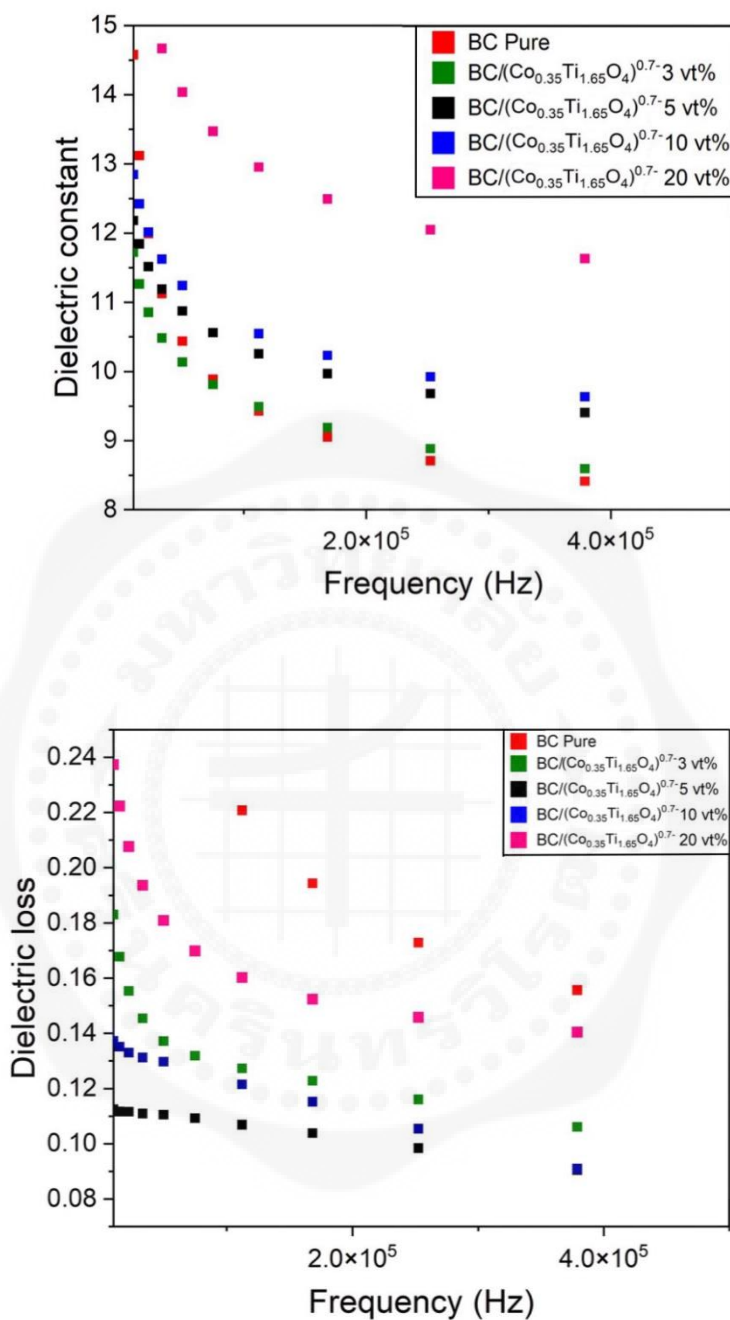




ภาพประกอบ 4. 50 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์เทียบกับแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-}

4.3.7.2 สมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-}

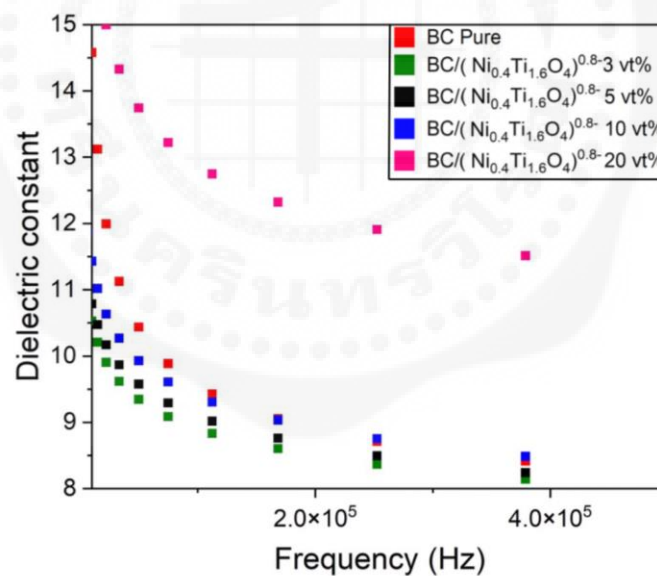
จากการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} เทียบกับแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์โดยดูได้จากค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ดังภาพประกอบที่ 4.51 พบว่าแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 10 หลังจากเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าที่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดโดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 13 และหลังจากลดการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดต่ำลงเช่นเดียวกับค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก โดยแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.16 หลังจากเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าที่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงที่สุดโดยมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.15 และหลังจากลดการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรพบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดต่ำลง

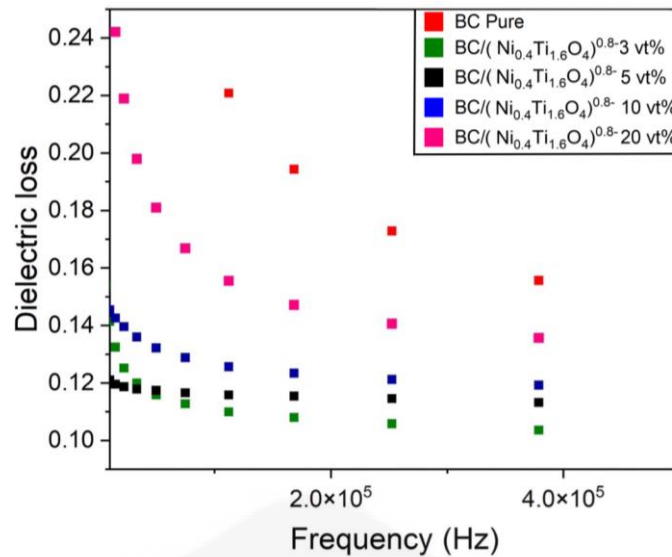


ภาพประกอบ 4.51 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์เทียบกับแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Co_{0.35}Ti_{1.65}O₄)^{0.7-}

4.3.7.3 สมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$

จากการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ เทียบกับแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์โดยดูได้จากค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ดังภาพประกอบที่ 4.52 พบว่าแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 10 หลังจากเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ที่ 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าที่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงที่สุดโดยมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 13 และหลังจากลดการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดต่ำลงเช่นเดียวกับการสูญเสียไดอิเล็กทริก โดยแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์มีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.16 หลังจากเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท $(\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ที่ 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าที่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกสูงที่สุดโดยมีค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 0.14 และหลังจากลดการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรพบว่าค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีแนวโน้มลดต่ำลง



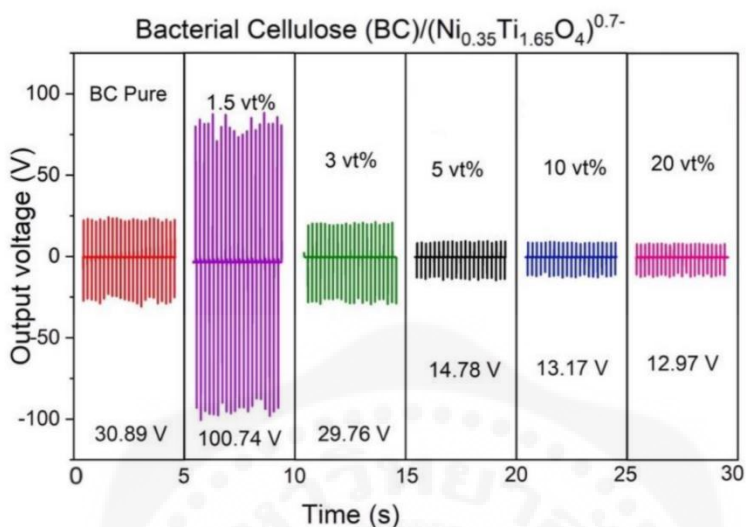


ภาพประกอบ 4.52 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric loss) ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์เทียบกับแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-}

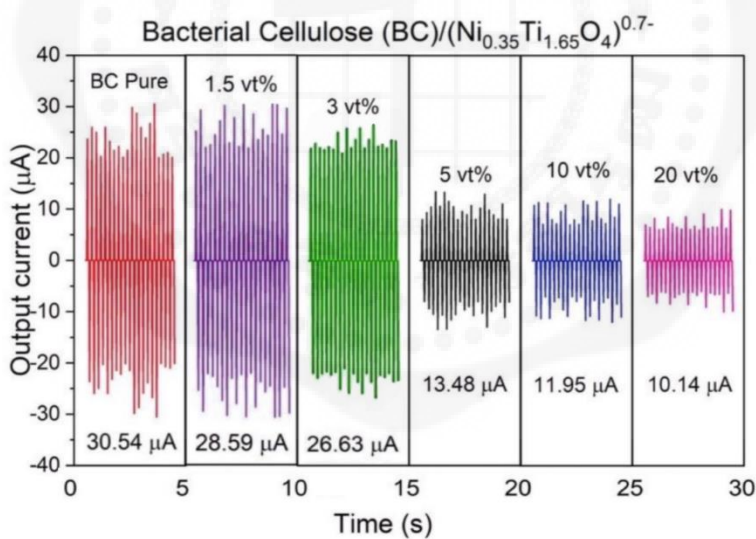
4.4 ผลการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้า (Output Voltage) และกระแสไฟฟ้า (Output Current) ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์

จากการนำแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท 5 ชนิด คือ ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-}, ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-}, ($\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-}, ($\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-} และ ($\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-} ที่อัตราส่วน 1.5, 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร นำไปตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและกระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุด้วยแรงเชิงกล พบว่าวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ดังภาพประกอบที่ 4.53 วัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ภาพประกอบที่ 4.54 วัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-} ภาพประกอบที่ 4.55 วัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-} ภาพประกอบที่ 4.56 และวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$)^{0.8-} ภาพประกอบที่ 4.57 พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและกระแสไฟฟ้าส่งออกจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีททั้ง 5 ชนิด จนถึงที่ 1.5 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดย

ปริมาณจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและกระแสไฟฟ้าส่งออกที่สูงที่สุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมสารประกอบออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น

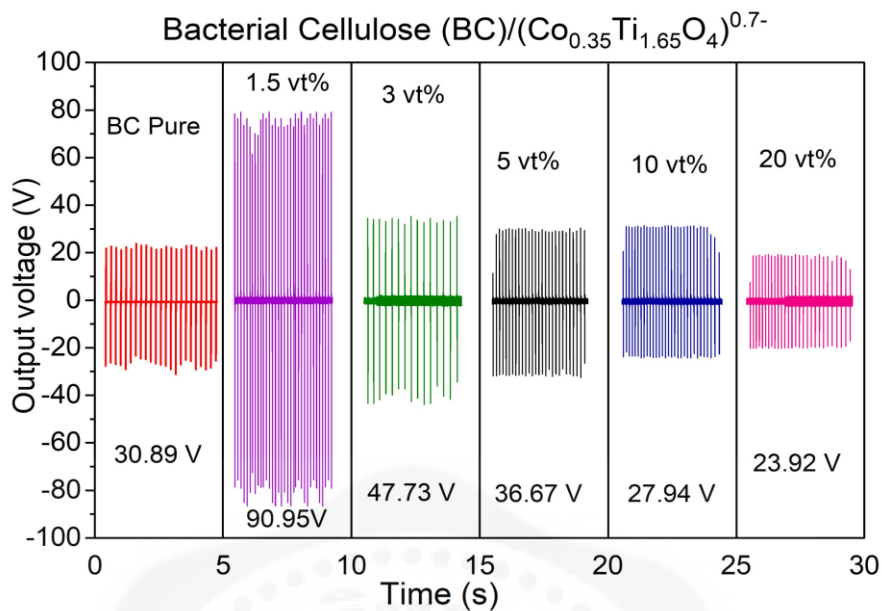


(ก)

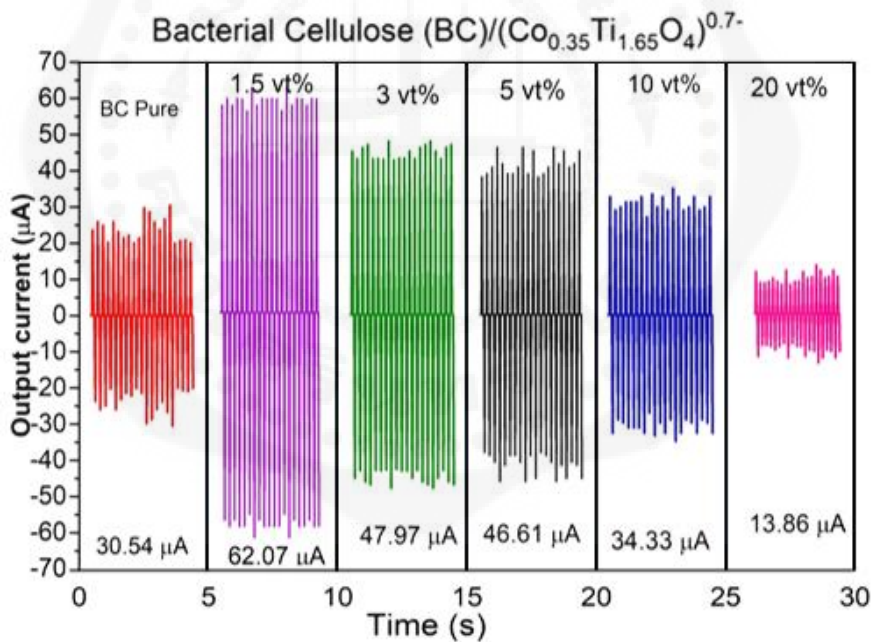


(ข)

ภาพประกอบ 4.53 แสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าโดยแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซิท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่อัตราส่วน 1.5, 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ (ก) ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและ (ข) ค่ากระแสไฟฟ้าส่งออก

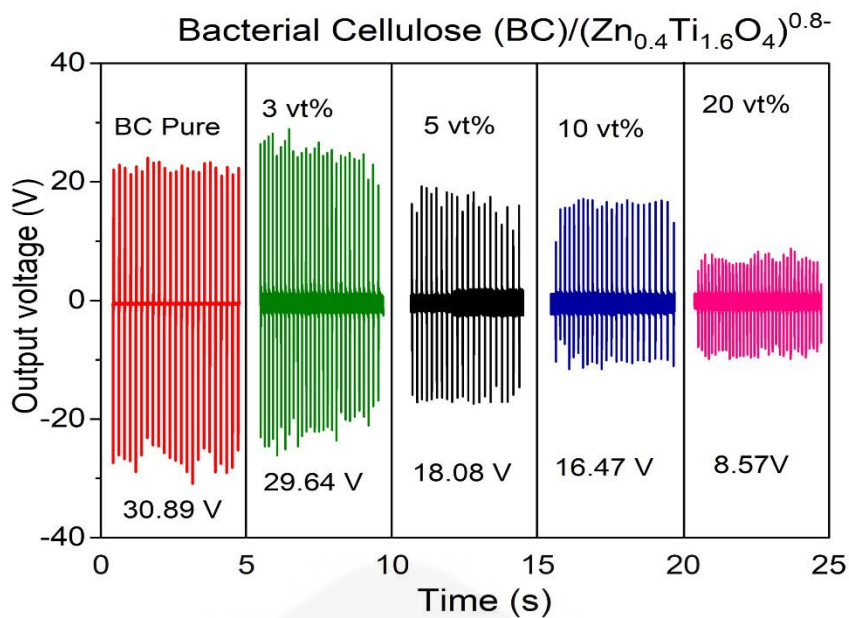


(ก)

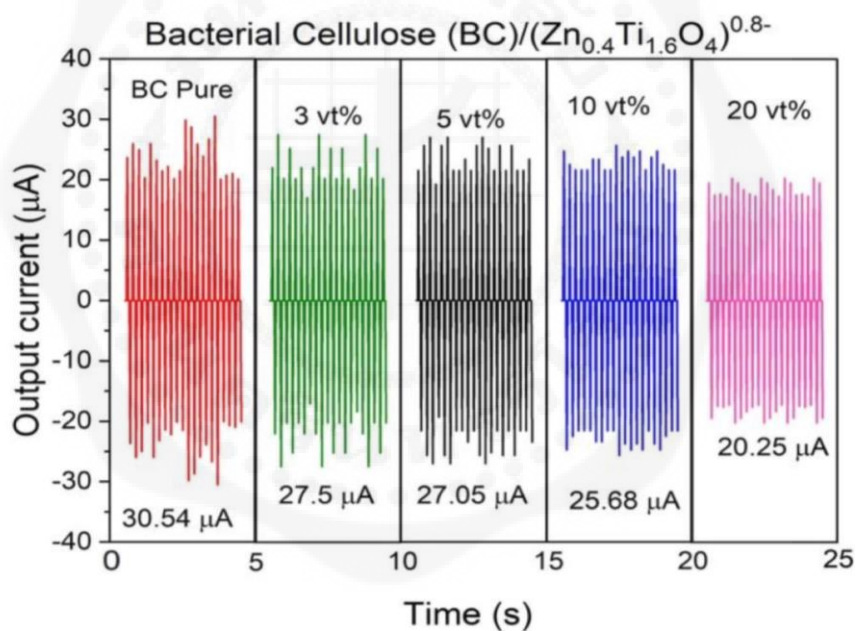


(ข)

ภาพประกอบ 4.54 แสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าโดยแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซิท (Co_{0.35}Ti_{1.65}O₄)^{0.7-} ที่อัตราส่วน 1.5, 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ (ก) ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและ (ข) ค่ากระแสไฟฟ้าส่งออก

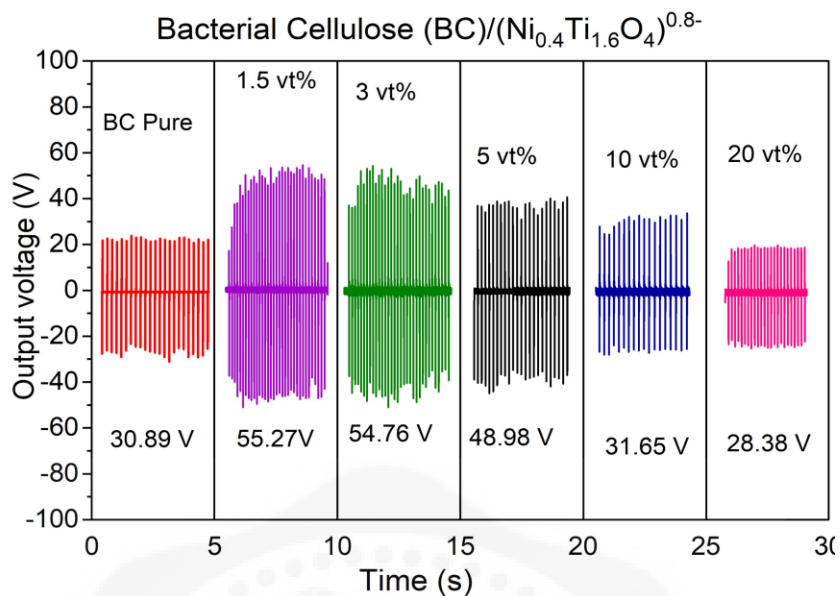


(ก)

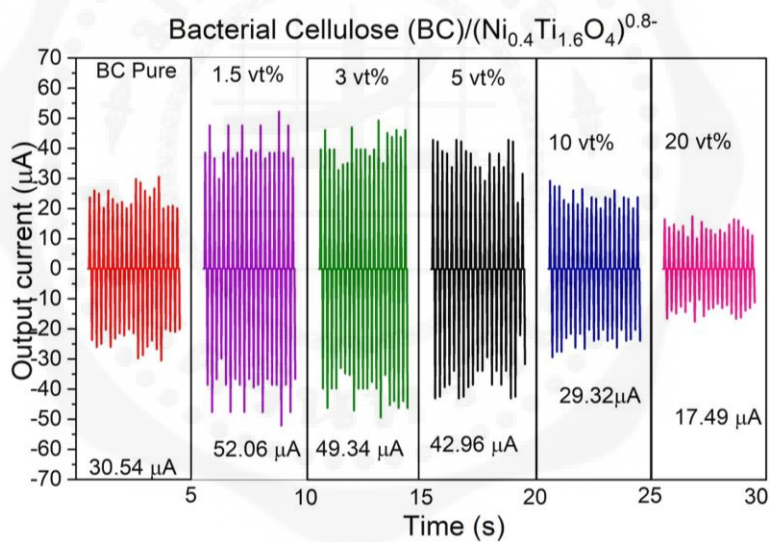


(ข)

ภาพประกอบ 4.55 แสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าโดยแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Zn_{0.4}Ti_{1.6}O₄)^{0.8-} ที่อัตราส่วน 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ (ก) ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและ (ข) ค่ากระแสไฟฟ้าส่งออก

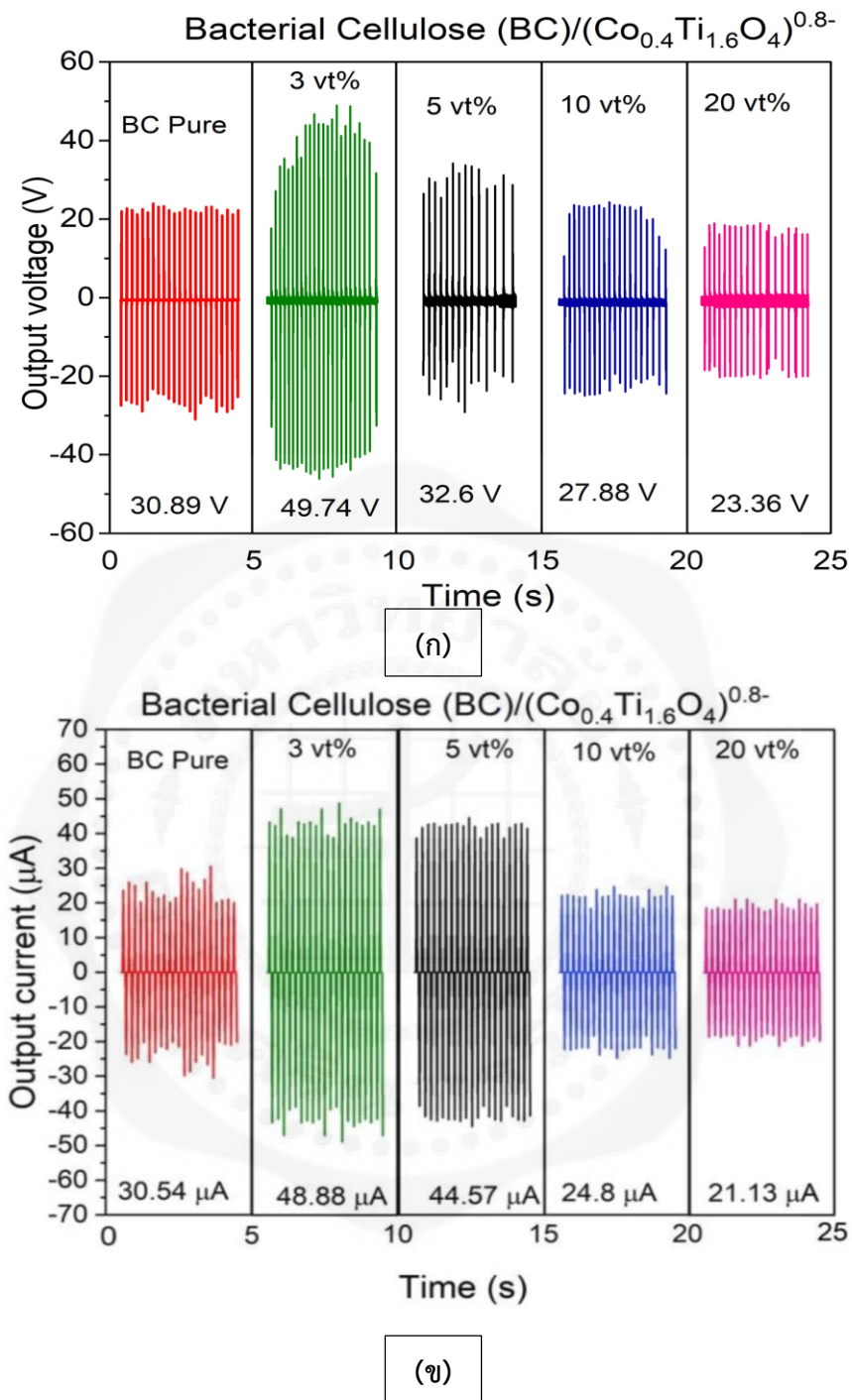


(ก)



(ข)

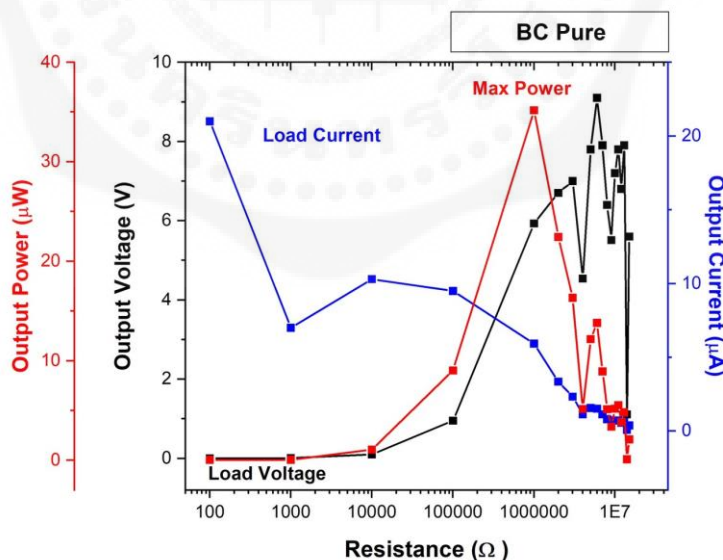
ภาพประกอบ 4.56 แสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าโดยแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Ni_{0.4}Ti_{1.6}O₄)^{0.8-} ที่อัตราส่วน 1.5, 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ (ก) ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและ (ข) ค่ากระแสไฟฟ้าส่งออก



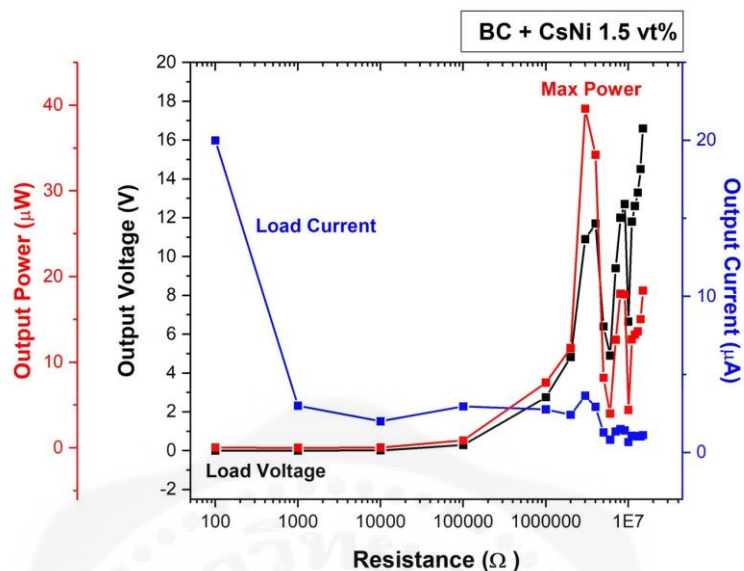
ภาพประกอบ 4.57 แสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าโดยแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกของวัสดุคอมโพสิตที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Co_{0.4}Ti_{1.6}O₄)^{0.8-} ที่อัตราส่วน 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ (ก) ค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและ (ข) ค่ากระแสไฟฟ้าส่งออก

4.5 ผลการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าส่งออกของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซต์

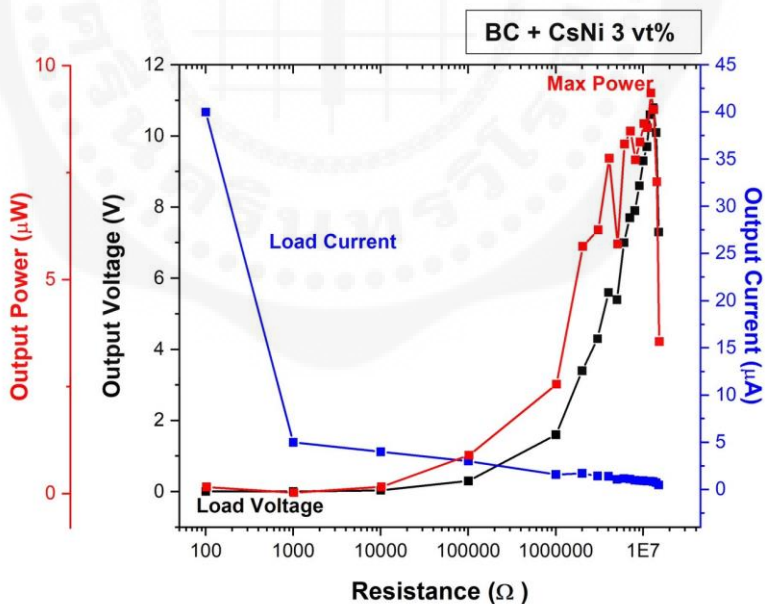
จากผลการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าส่งออกของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 1.5, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์มีค่ากำลังไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ย 35.1 ไมโครวัตต์ ดังภาพประกอบที่ 4.58 และแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีค่ากำลังไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ย 39.6 ไมโครวัตต์ ดังภาพประกอบที่ 4.59 ที่ 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีค่ากำลังไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ย 9.39 ไมโครวัตต์ดังภาพประกอบที่ 4.60 และที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีค่ากำลังไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ย 7.2 ไมโครวัตต์ดังภาพประกอบที่ 4.61 จากค่ากำลังไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยของวัสดุมีแนวโน้มตามค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและค่ากระแสไฟฟ้าส่งออก โดยจากค่ากำลังไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยทั้งหมดที่กล่าวมาพบว่าแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีค่ากำลังไฟฟ้าส่งออกเฉลี่ยสูงที่สุด ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกเนื่องจากแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออกและค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกสูงที่สุด



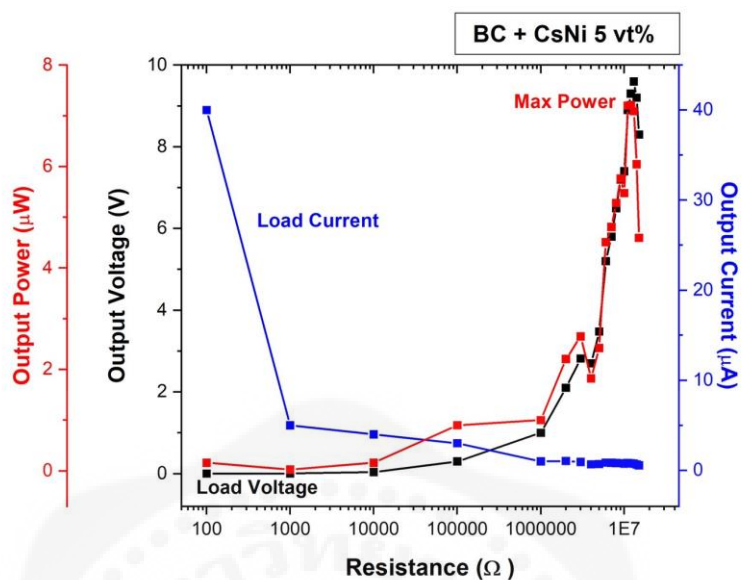
ภาพประกอบ 4.58 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าส่งออก กระแสไฟฟ้าส่งออกและกำลังไฟฟ้าส่งออกสูงสุด ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์



ภาพประกอบ 4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าส่งออก กระแสไฟฟ้าส่งออกและกำลังไฟฟ้าส่งออกสูงสุด ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซิท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



ภาพประกอบ 4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าส่งออก กระแสไฟฟ้าส่งออกและกำลังไฟฟ้าส่งออกสูงสุด ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซิท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



ภาพประกอบ 4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าส่งออก กระแสไฟฟ้าส่งออกและกำลังไฟฟ้าส่งออกสูงสุด ของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลล์โลสคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ($\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$)^{0.7-} ที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

บทที่ 5

ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์โครงสร้างแบบเลพิโคโครไซด์เพื่อขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสและสารประกอบออกไซด์ โดยทำการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์นาโนซีทโครงสร้างแบบเลพิโดโครไซด์ทั้ง 5 ชนิด คือ $\text{Cs}_{0.7}\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$, $\text{K}_{0.8}\text{Ni}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$, $\text{K}_{0.8}\text{Zn}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$, $\text{Cs}_{0.7}\text{Co}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4$ และ $\text{K}_{0.8}\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4$ และนำไปคอมพอสิตกับแบคทีเรียเซลลูโลสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์โดยการตรวจวิเคราะห์ผลของสารตัวอย่างที่เตรียมทำการตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน Transmission electron microscope (TEM) พิสูจน์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค (Attenuated Total Reflectance : ATR-IR) วิเคราะห์ความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบด้วย (X-ray diffraction: XRD) ตรวจสอบการกระจายตัวของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทคอมพอสิตกับแบคทีเรียเซลลูโลส (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDS Mapping analysis) ตรวจวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric) ตรวจวิเคราะห์ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และกระแสไฟฟ้าส่งออก (Output current) และความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าส่งออก (Output Power) โดยผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการศึกษาและสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์โครงสร้างแบบเลพิโคโครไซด์

ผลจากการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์โครงสร้างแบบเลพิโคโครไซด์พบว่าสามารถทำได้ด้วยกระบวนการทำปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid State reaction) จากนั้นทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารประกอบออกไซด์ทั้ง 5 ชนิด ด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่ากราฟแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบออกไซด์โครงสร้างแบบเลพิโดโครไซด์โดยมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล จากนั้นนำไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าผลึกของสารประกอบออกไซด์ตั้งต้นมีสัณฐานวิทยาแบบแผ่นซ้อนกันหลายชั้น (Stack layer morphology) จึงสามารถอนุมานได้เบื้องต้นว่าผงออกไซด์มีโอกาสที่สามารถจะกลายเป็นสารประกอบออกไซด์นาโนซีทได้

5.1.2 จากการศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Oxide Nanosheets)

ผลจากเตรียมสารประกอบออกไซด์นาโนซีทด้วยกระบวนการการแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange) และกระบวนการลอกชั้นของซีท (Exfoliation) พบว่าหลังจากกระบวนการดังกล่าวสารที่ได้อยู่ในรูปแบบคอลลอยด์ เนื่องจากสารมีอนุภาคที่เล็กมากอยู่ในระดับนาโน จากนั้นทำการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน Transmission electron microscope (TEM) พบว่าโครงสร้างผลึกมีลักษณะบางเป็นแผ่นซีทหรือคล้ายแผ่นกระดาษบาง จากนั้นทำการทดสอบการดูดกลืนของแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-800 นาโนเมตร ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-VIS Spectroscopy) พบว่าช่วงการดูดกลืนของสารประกอบออกไซด์นาโนซีททั้ง 5 ตัว มีช่วงการดูดกลืนที่ใกล้เคียงกันที่ 276, 278, 271, 222 และ 257 นาโนเมตร ซึ่งมีช่วงการดูดกลืนใกล้เคียงกับช่วงการดูดกลืนความยาวคลื่นสูงสุดที่ 265 นาโนเมตรที่เป็นช่วงการดูดกลืนของโครงสร้างไททาเนท (TiO)

5.1.3 จากการศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบไทโรโบอิเล็กทริกระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับ สารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Oxide Nanosheets)

ผลจากการศึกษาแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแบคทีเรียเซลลูโลสที่ทำการคอมโพสิตกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ที่อัตราส่วน 1.5, 3, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าเมื่อให้แรงเชิงกลโดยการแรงบิด ดึง และพับในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ฟิล์มที่ได้มีความความยืดหยุ่นสูง สามารถดึงยืดและบิดงอได้ และเมื่อปล่อยแรงที่ให้กับฟิล์มดังกล่าว แผ่นฟิล์มสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้โดยที่ไม่มีการสูญเสียรูปร่าง จากนั้นทำการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเติมสารของประกอบที่ 1.5% 3% 5% 10% และ 20% ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เบื้องต้นพบว่าที่ปริมาณการเติมสารประกอบที่ 1.5% ไม่มีสังเกตเห็นอนุภาคของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท แต่ที่ปริมาณการเติมสารประกอบที่ 5% เริ่มสังเกตเห็นได้ถึงการเกาะกลุ่มกันของอนุภาครวมอยู่ภายในเส้นใยของแบคทีเรียเซลลูโลส จึงนำไปทดสอบการกระจายตัวด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS Mapping analysis) ซึ่งพบว่าที่ปริมาณ 1.5% มีการกระจายตัวของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าที่ 1.5% ยังคงมีสารประกอบออกไซด์นาโนซีทขนาดเล็กปะปนอยู่ภายในแผ่นฟิล์มคอมโพสิต โดยหลังจากนั้นทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทคอมโพสิตกับแบคทีเรียเซลลูโลส ด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าในแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์พบตำแหน่งมุม 2 theta ที่ 14.6, 16.8, 22.8 และ 29 degree มีความสอดคล้องกับระบบผลึกของระนาบ 110 110 200 และ 011 ตามลำดับ และเมื่อทำการเจือสารประกอบออกไซด์นาโนซีทพบว่าตำแหน่ง 2 theta ที่มุม 21, 28, 31 สอดคล้องกับระบบผลึกของระนาบ 040 130 และ 160 ตามลำดับเพิ่มขึ้นมา ซึ่งเป็นค่า

พิกของสารประกอบออกไซด์นาโนซีท จึงสามารถสรุปได้ว่าสามารถเตรียมฟิล์มที่ทำการคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสและสารประกอบออกไซด์นาโนซีทได้สำเร็จ

5.1.4 การสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (TENG) รูปแบบสัมผัสแบบตั้งฉาก ซึ่งประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดที่มีความสามารถให้และรับอิเล็กตรอนที่แตกต่างกัน เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุกันระหว่างวัสดุ 2 ชนิด เราจึงใช้แผ่นฟิล์มที่ทำการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีทหรือฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสคอมโพสิตเป็นองค์ประกอบของวัสดุบวกโดยทำการใช้อะลูมิเนียมเทปในการพาประจุ และเป็นขั้วส่งต่อไปที่ลวดทองแดงเพื่อให้เกิดการไหลเวียนของกระแสไฟฟ้า เพื่อนำไปประกบกับฝั่งที่ใช้แผ่นเทปลอนใสเป็นวัสดุลบและติดอะลูมิเนียมเทปที่ทำหน้าที่เป็นขั้วและตัวพาประจุก่อนต่อกับลวดทองแดง และสุดท้ายนำไปประกบกับแผ่นอะคริลิกเพื่อให้เป็นอุปกรณ์ที่สมบูรณ์

5.1.5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณของวัสดุเชิงประกอบระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Oxide Nanosheets) ต่อสมบัติไดอิเล็กทริก

เมื่อทำการตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติมด้วยสารประกอบออกไซด์นาโนซีท โดยที่ฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 10 เมื่อทำการเติม $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ ในแบคทีเรียเซลลูโลสที่ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงสุดเท่ากับ 12 และได้ค่าลดต่ำลงเมื่อทำการเติมที่ปริมาณต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะแปรผกผันกับแรงดันไฟฟ้าขาออก โดยเมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกต่ำลง

5.1.6 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณของวัสดุเชิงประกอบระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับสารประกอบออกไซด์นาโนซีท (Oxide Nanosheets) ต่อค่าการส่งออกจากไฟฟ้า

จากการทดสอบอุปกรณ์ผลิตพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (TENG) ที่ทำการใช้ฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสและสารประกอบออกไซด์นาโนซีทเป็นวัสดุเชิงประกอบ หลังจากนั้นทำการทดสอบค่าความต่างศักย์ขาออก (output voltage), ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (output power) ด้วยเครื่องออสซิลอโคป (Oscilloscope) และเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าส่งออก กระแสไฟฟ้าส่งออก และกำลังไฟฟ้าส่งออกของวัสดุเชิงประกอบที่ทำการเติมด้วยสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ปริมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ให้ค่าทางความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่สูงที่สุดเท่ากับ 100.74 โวลต์ ของการเติม $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ ค่าไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 62.07 ไมโครแอมแปร์ ที่การเติม $(\text{Co}_{0.4}\text{Ti}_{1.6}\text{O}_4)^{0.8-}$ ที่ปริมาณการเติม 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงที่สุดที่

39.6 ไมโครวัตต์ ที่การเติม $(\text{Ni}_{0.35}\text{Ti}_{1.65}\text{O}_4)^{0.7-}$ ที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าที่ปริมาณการเติมสารประกอบออกไซด์นาโนซีทที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะให้ค่าทางไฟฟ้าสูงสุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

ระยะเวลาในกระบวนการแยกชั้น (Exfoliation) ของสารประกอบออกไซด์นาโนซีทแต่ละชนิดมีระยะเวลาในการเป็นนาโนซีทที่สมบูรณ์ไม่เท่ากัน ส่งผลต่อการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าของฟิล์มคอมโพสิต



อ้างอิง

1. network G. 10 แหล่งพลังงานทดแทน เพื่อการผลิตไฟฟ้าแห่งอนาคต 2019 [Available from: <https://1th.me/5n9yR>.
2. สมาคมฟิสิกส์ไทย. นักวิจัยสร้างวัสดุยืดหยุ่นสำหรับการใช้ในเทอร์โมอิเล็กทริก 2020 [Available from: <http://www.thaiphysoc.org/article/243/>.
3. Wang ZL. Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors - principles, problems and perspectives. *Faraday Discuss.* 2014;176:447-58.
4. Charoonsuk T, Pongampai S, Pakawanit P, Vittayakorn N. Achieving a highly efficient chitosan-based triboelectric nanogenerator via adding organic proteins: Influence of morphology and molecular structure. *Nano Energy.* 2021;89.
5. Luo Y, Li Y, Feng X, Pei Y, Zhang Z, Wang L, et al. Triboelectric nanogenerators with porous and hierarchically structured silk fibroin films via water electrospray-etching technology. *Nano Energy.* 2020;75.
6. Zhang C, Mo J, Fu Q, Liu Y, Wang S, Nie S. Wood-cellulose-fiber-based functional materials for triboelectric nanogenerators. *Nano Energy.* 2021;81.
7. Kim H-J, Yim E-C, Kim J-H, Kim S-J, Park J-Y, Oh I-K. Bacterial Nano-Cellulose Triboelectric Nanogenerator. *Nano Energy.* 2017;33:130-7.
8. Sriphan S, Charoonsuk T, Maluangnont T, Pakawanit P, Rojviriya C, Vittayakorn N. Multifunctional Nanomaterials Modification of Cellulose Paper for Efficient Triboelectric Nanogenerators. *Advanced Materials Technologies.* 2020;5(5).
9. Yan H, Liu L, Zhang Z. Alignment of electrospun nanofibers using dielectric materials. *Applied Physics Letters.* 2009;95(14).
10. Charoonsuk T, Sriphan S, Pulphol P, Vittayakorn W, Vittayakorn N, Maluangnont T. AC Conductivity and Dielectric Properties of Lepidocrocite-type Alkali Titanate Tunable by Interlayer Cation and Intralayer Metal. *Inorg Chem.* 2020;59(21):15813-23.
11. Baghel RS, CRRPS. Seaweed-based cellulose: applications, and future perspectives. 2021.
12. Zhang C, Lin X, Zhang N, Lu Y, Wu Z, Liu G, et al. Chemically functionalized cellulose nanofibrils-based gear-like triboelectric nanogenerator for energy harvesting and sensing. *Nano Energy.* 2019;66.

13. Yao C, Yin X, Yu Y, Cai Z, Wang X. Chemically Functionalized Natural Cellulose Materials for Effective Triboelectric Nanogenerator Development. *Advanced Functional Materials*. 2017;27(30).
14. บุปผาชาติ ยศคันโท ค, มลทิรา ต๊ะบุญจง, วลัยลักษณ์ ไชยสกุล. การศึกษาคุณสมบัติของเซลลูโลสแบบที่เรียเพื่อการผลิตกระถางย่อยสลายได้
Properties of Bacterial Cellulose for Producing Biodegradable Pots. 2555.
15. เขมาชีวะกุล จ. การผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสสายพันธุ์ *Acetobacter xylinum* และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. 2016.
16. Zhang G, Liao Q, Zhang Z, Liang Q, Zhao Y, Zheng X, et al. Novel Piezoelectric Paper-Based Flexible Nanogenerators Composed of BaTiO₃ Nanoparticles and Bacterial Cellulose. *Adv Sci (Weinh)*. 2016;3(2):1500257.
17. Zhang J, Hu S, Shi Z, Wang Y, Lei Y, Han J, et al. Eco-friendly and recyclable all cellulose triboelectric nanogenerator and self-powered interactive interface. *Nano Energy*. 2021;89.
18. Oh H, Kwak SS, Kim B, Han E, Lim GH, Kim SW, et al. Highly Conductive Ferroelectric Cellulose Composite Papers for Efficient Triboelectric Nanogenerators. *Advanced Functional Materials*. 2019;29(37).
19. Jakmuangpak S, Prada T, Mongkolthanaruk W, Harnchana V, Pinitsoontorn S. Engineering Bacterial Cellulose Films by Nanocomposite Approach and Surface Modification for Biocompatible Triboelectric Nanogenerator. *ACS Applied Electronic Materials*. 2020;2(8):2498-506.
20. Chemical Functionalization of Bacterial Cellulose Film for Enhancing Output Performance of Bio-Triboelectric Nanogenerator. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 2021;12(2):1587-600.

ภาคผนวก



ภาคผนวก

สมการ Energy Gab

$$E = h\nu$$

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

เมื่อ

E คือ พลังงานของโปรตอน

h คือ $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

ν คือ ความถี่ (Hz)

c คือ $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$

λ คือ ความยาวคลื่น (m)

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล ณัฏชา นวโมชิตกุล

วัน เดือน ปีเกิด 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2543

สถานที่เกิด โรงพยาบาลศิริราช ถนนวังหลัง แขวงศิริราช เขตบางกอกน้อย จังหวัดกรุงเทพมหานคร

วุฒิการศึกษา มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพระมารดานิจจานุเคราะห์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2560

วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2564

ชื่อ-สกุล จิตรีรัตน์ พิสิษฐ์ภาคิน

วัน เดือน ปีเกิด 29 สิงหาคม พ.ศ. 2542

สถานที่เกิด โรงพยาบาลกำแพงเพชร ต.ในเมือง อ.เมือง จังหวัดกำแพงเพชร

วุฒิการศึกษา มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนกำแพงเพชรพิทยาคม จังหวัดกำแพงเพชร พ.ศ. 2560

วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2564

ชื่อ-สกุล สุธาศินี โชติประทุม

วัน เดือน ปีเกิด 2 เมษายน พ.ศ. 2542

สถานที่เกิด โรงพยาบาลตากสิน 543 ถนนสมเด็จพระเจ้าอยุธยา แขวงคลองสาน เขตคลอง กรุงเทพฯ

วุฒิการศึกษา มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนดัดดรุณี จังหวัดฉะเชิงเทรา พ.ศ. 2560

วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2564