



อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริก
บนพื้นฐานวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติและแกมมา-ไกลซีน
Triboelectric-piezoelectric hybrid nanogenerator based on
natural polymer/gamma-glycine composites

นางสาวสิรินยา อุกาสี

นางสาวจิรณิชา นิลทับ

นางสาวปรีตตา จูฑากักติ

โครงการทางวัสดุศาสตร์ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2564



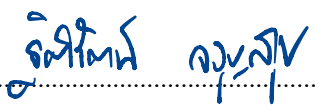
อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริก
บนพื้นฐานวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติและแกมมา-ไกลซีน
Triboelectric-piezoelectric hybrid nanogenerator based on
natural polymer/gamma-glycine composites

นางสาวสิรินยา อุกาสี
นางสาวจิรณิชา นิลทับ
นางสาวปรีตตา จูฑากักติ

โครงการทางวัสดุศาสตร์ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2564

ชื่อเรื่อง	อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริกบน พื้นฐานวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติและแกมมา-ไกลซีน	
	Triboelectric-piezoelectric hybrid nanogenerator based on natural polymer/gamma-glycine composites	
ชื่อผู้วิจัย	นางสาวสิรินยา	อุกาสิทธิ์
	นางสาวจิรณิชา	นิลทัพบ
	นางสาวปริตตา	จุฑาภักดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ฐิติรัตน์	จรรยาสุข

โครงการทางวัสดุศาสตร์นี้ ให้นับเป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.ฐิติรัตน์ จรรยาสุข)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาที่ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ ความอนุเคราะห์ และการสนับสนุนที่ดีจากทุก ๆ ท่าน รวมถึงหน่วยงานวิจัยต่าง ๆ ซึ่งคณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ฐิติรัตน์ จรุงสุข อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำแนะนำ แนวคิด ความรู้ ความเข้าใจ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการวิจัยฉบับนี้ อีกทั้งคอยอบรมสั่งสอนให้คณะผู้วิจัยได้พัฒนาศักยภาพของตนเอง ฝึกให้มีกระบวนการคิด และแก้ไขปัญหา ตลอดจนให้ข้อคิด เพื่อนำไปใช้ในการทำงานในอนาคต ทางคณะผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทุก ๆ ท่าน ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ การสนับสนุน และกำลังใจ แก่คณะผู้วิจัย เพื่อให้โครงการวิจัยฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.นราธิป วิทยากร และดร.สรณ ผ่องอำไพ ที่ให้การสนับสนุนในการใช้เครื่องมือวิจัย รวมทั้งให้ความรู้ และคำแนะนำในการใช้เครื่องมือ ทำให้โครงการวิจัยเล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลต่าง ๆ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ นักวิจัยทุกท่าน ที่ให้ความร่วมมือ ให้ความช่วยเหลือ และการสนับสนุนในการวิจัย จากสถาบันวิจัยต่าง ๆ ทำให้คณะผู้วิจัยสามารถทำโครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย จากสถาบันการวิจัยแห่งชาติ และทุนสนับสนุนงานวิจัย งบประมาณเงินรายได้มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปีงบประมาณ 2564

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้ความสนับสนุนทางด้านการศึกษา ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจ และเป็นแรงผลักดัน ในการทำโครงการวิจัยฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อน ๆ และบุคคลอื่นที่ไม่ได้กล่าวมาข้างต้น คณะผู้วิจัย ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

สิรินยา อุกาสี

จิรณิชา นิลทับ

ปรีตดา จูฑากักติ

หัวข้อโครงการ	อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริกบนพื้นฐานวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติและแกมมา-ไกลซีน		
ชื่อผู้วิจัย	นางสาวสิรินยา อุกาสี	61102010017	
	นางสาวจิรณิชา นิลทับ	61102010281	
	นางสาวปรีตตา จูฑากักติ	61102010292	
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วัสดุศาสตร์)		
ปีการศึกษา	2564		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. จูติรัตน์ จรุงสุข		

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและสวมใส่ได้เข้ามามีบทบาทต่อการใช้ชีวิตของมนุษย์ โดยเฉพาะการใช้งานสำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์ ซึ่งจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าภายนอกที่มีประสิทธิภาพและสามารถใช้งานร่วมกับร่างกายมนุษย์ได้ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงพัฒนาอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerators: TENGs) ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานเชิงกลจากการสัมผัสของวัสดุเหนียวนาให้เกิดกระแสไฟฟ้า โดยใช้วัสดุพอลิเมอร์ทางธรรมชาติ ได้แก่ แบคทีเรียเซลลูโลส (BC) และไคโตซาน (CS) เป็นชั้นสัมผัสหลักและทำการเพิ่มประสิทธิภาพค่าการส่งออกทางไฟฟ้าโดยการทำเป็นฟิล์มคอมโพสิตกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทางธรรมชาติจากกรดอะมิโนชนิด แกมมา-ไกลซีน (γ -gly) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาปริมาณ γ -gly ที่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และค่าการส่งออกทางไฟฟ้า ผลปรากฏว่า ฟิล์มคอมโพสิตยังคงมีความโปร่งแสงและความยืดหยุ่น แม้ปริมาณ γ -gly เพิ่มมากขึ้น เมื่อตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมโพสิต พบว่า อนุภาค γ -gly เกิดการแทรกกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ตามปริมาณ γ -gly ที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อทดสอบค่าการส่งออกทางไฟฟ้า พบว่า γ -gly สามารถเพิ่มค่าการส่งออกทางไฟฟ้าให้กับพอลิเมอร์ธรรมชาติได้ โดยในเมทริกซ์ BC ที่ γ -gly 5 wt% มีค่าความต่างศักย์ (V_{oc}) กระแสไฟฟ้า (I_{sc}) และกำลังไฟฟ้าขาออก ~ 46 V ~ 19.3 nA และ ~ 725.22 μ W ตามลำดับ ส่วนในเมทริกซ์ CS ที่ γ -gly 50 wt% มีค่าความต่างศักย์ (V_{oc}) กระแสไฟฟ้า (I_{sc}) และกำลังไฟฟ้าขาออกสูงถึง ~ 78.81 V ~ 64 nA และ ~ 705.96 μ W ตามลำดับ อีกทั้งฟิล์มคอมโพสิตทั้งสองชนิดยังสามารถชาร์จคาปาซิเตอร์ได้เต็มที่สองความจุคือ 0.22 μ F และ 0.33 μ F งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าปริมาณ γ -gly ที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญในการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตที่มีคุณภาพและให้สมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ซึ่งผู้วิจัยคาดหวังว่าการศึกษานี้จะเป็นแนวทางใหม่ในการปรับปรุงอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จากวัสดุธรรมชาติเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูง

คำสำคัญ: อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก, แกมมา-ไกลซีน, วัสดุเพียโซอิเล็กทริกทางธรรมชาติ, แบคทีเรียเซลลูโลส, ไคโตซาน, วัสดุคอมโพสิต

Title	Trieoelectric-piezoelectric hybrid nanogenerator based on naturalpolymer/gamma-glycine composites		
Students	Sirinya	Ukasri	61102010017
	Jiranicha	Nintub	61102010281
	Paritta	Jutapukti	61102010292
Degree	Bachelor of Science (Materials Science)		
Academic Year	2021		
Advisor	Dr. Thitirat Charoonsuk		

Abstract

Nowadays, portable and wearable electronic devices are now an important role in the daily lives of people nowadays. Especially, in the field of biomedical devices. These devices required a highly efficient external power source and have to be able operated in contact with the human body. Therefore, in this work, the authors pay attention to develop triboelectric nanogenerators (TENGs) that can harvest the mechanical energy and converting it into electricity by contacting of two materials and induced the electricity for serving as the electrical supply. Using bacterial cellulose (BC) and chitosan (CS) natural polymer as the main faction materials, then improving output efficiency of the composite films with bio-piezoelectric material from gamma-glycine (γ -gly) amino acid in different ratios to study the amount of γ -gly that affects physical appearance, morphology, and the electrical output. The results showed the composite films remain its translucency and flexibility despite the increased of γ -gly content. When examining the morphology of the composite films, it was found that the γ -gly particles dispersed in the matrix increased by the amount of γ -gly. Then, the electrical output is investigated. It was found that γ -gly was able to increase the electrical output value of natural polymer. In the BC matrix, with 5 wt% γ -gly added, the output voltage (V_{oc}), current (I_{sc}) and power can went up to ~46 V and ~19.3 nA and ~725.22 mW respectively. In the CS matrix, 50 wt% added, can provide output voltage (V_{oc}), current (I_{sc}) and power of ~78.81 V ~64 nA and ~705.96 μ W, respectively. Furthermore, both types of composite films can charge capacitors at two different capacities of 0.22 μ F and 0.33 μ F. This research indicates that appropriate γ -gly content is an important factor in the preparation of quality composite films and good electrical output. with this work. The authors expect that this study will provide a novel way to enhance the biocompatible, green and eco-friendly energy harvesting devices from natural materials to achieve high performance.

Keywords: Trieoelectric nanogenerators (TENGs), Gamma- glycine, Bio- piezoelectric material, Bacteria cellulose, Chitosan, Composite

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ต
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย/ปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และทบทวนวรรณกรรม	5
2.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและสวมใส่ได้ (Portable and wearable electronic devices)	5
2.2 เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting Technology).....	7
2.2.1 พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy)	7
2.2.1.1 แหล่งพลังงานลม (Wind energy)	8
2.2.1.2 แหล่งพลังงานน้ำ (Hydropow.....	8
2.2.1.3 แหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy.....	8
2.2.1.4 แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal energy)	9
2.2.1.5 แหล่งพลังงานชีวมวล (Biomass)	9
2.2.1.6 แหล่งพลังงานเชิงกล (Mechanical energy)	9
2.3 อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator:TENGs)	11
2.3.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ TENG ทั้ง 4 รูปแบบ	11
2.3.1.1 Vertical Contact-Separation Mode.....	11
2.3.1.2 Lateral Sliding Mode	11
2.3.1.3 Single-Electrode Mode	12
2.3.1.4 Freestanding Triboelectric-Layer Mode	12

2.3.2 หลักการทำงานและโครงสร้างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานไทรโบอิเล็กทริก...	13
2.4 วัสดุสำหรับอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก.....	14
2.5 วัสดุทางธรรมชาติ	18
2.5.1 แบคทีเรียเซลลูโลส (Bacteria Cellulose: BC)	21
2.5.2 ไคโตซาน (Chitosan: CS)	23
2.6 แนวทางการพัฒนา TENGs	26
2.6.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite material)	27
2.6.2 เมทริกซ์ (Matrix)	27
2.6.2.1 วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์	27
2.6.2.2 วัสดุคอมโพสิตโลหะ	27
2.6.2.3 วัสดุคอมโพสิตเซรามิก	28
2.6.3 วัสดุเสริมแรง (Reinforcement)	28
2.6.3.1 วัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใย	28
2.6.3.2 วัสดุเสริมแรงด้วยอนุภาค	29
2.6.3.3 วัสดุผสมโครงสร้าง	29
2.6.4 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric materials)	30
2.6.4.1 Piezoelectric Effect	31
2.6.4.2 Piezoelectric Constant	32
2.6.5 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชีวภาพ	36
2.7 ไกลซีน	41
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	44
3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้	44
3.1.1 อุปกรณ์	44
3.1.2 เครื่องมือ	44
3.1.3 สารเคมี	45
3.2 การสังเคราะห์ผลึกแกมมา-ไกลซีน	45
3.3 การเตรียมแผ่นฟิล์มจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ	46
3.3.1 การเตรียมแผ่นฟิล์มจากแบคทีเรียเซลลูโลส	46
3.3.2 การเตรียมแผ่นฟิล์มจากไคโตซาน	47
3.4 การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีน	48

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4.1 การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลล์โลสกับแกมมา-ไกลซีน ด้วยกระบวนการปลูกผลึกบนแผ่นฟิล์ม.....	48
3.4.2 การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลล์โลสกับแกมมา-ไกลซีน ด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting)	49
3.4.3 การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting)	50
3.5 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์เอกลักษณ์	51
3.5.1 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีชนิด ATR (Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy: ATR-FTIR)	51
3.5.1.1 หลักการทำงานของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	52
3.5.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)	52
3.5.2.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	52
3.5.3 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของวัสดุคอมโพสิตด้วยเทคนิค เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction: XRD)	53
3.5.3.1 หลักการทำงานของเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน	53
3.5.4 การวิเคราะห์โครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์ด้วยรังสีเอกซ์ใน ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron Radiation X-ray Tomographic Microscopy: SRXTM) ...	54
3.5.4.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์ด้วยรังสีเอกซ์ ในย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน	54
3.5.5 การวิเคราะห์ผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope)	55
3.5.5.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	55
3.6 การสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก- เพียโซอิเล็กทริก	56
3.7 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า	57
3.7.1 หลักการทำงานของเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope : Oc).....	57

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.7.2 หลักการทำงานของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter; DMM)	58
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	59
4.1 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของผงผลึกแกมมา-ไกลซีนด้วยเครื่อง อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีชนิด ATR (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy: ATR-FTIR).....	59
4.2 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของผงผลึกแกมมา-ไกลซีน จากกระบวนการตกตะกอนของสารละลายไกลซีนทางการค้ากับเกลือ NaCl และ เกลือ KNO ₃ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ XRD.....	61
4.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลึกแกมมา-ไกลซีนด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบใช้แสง	63
4.4 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของผลึกแกมมา-ไกลซีนของเกลือ NaCl ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM	64
4.5 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบปลูกผลึกของฟิล์ม แบคทีเรียเซลลูโลสกับสารละลายเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO ₃).....	65
4.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีน.....	66
4.6.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส.....	66
4.6.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มคอมโพสิตระหว่าง แบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน.....	67
4.6.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มไคโตซาน.....	70
4.6.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มคอมโพสิตระหว่าง ไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน.....	70
4.7 การตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ธรรมชาติด้วย เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีชนิด ATR-FTIR	72
4.7.1 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส	72
4.7.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มคอมโพสิตระหว่าง แบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน.....	74

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.7.3 ผลตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มไคโตซาน.....	75
4.7.4 ผลตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มคอมโพสิตระหว่าง ไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน.....	77
4.8 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ธรรมชาติด้วยเทคนิค การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ XRD	78
4.8.1 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส และฟิล์มคอมโพสิต ของแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน	78
4.8.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มไคโตซาน และฟิล์มคอมโพสิต ของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน	80
4.9 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ธรรมชาติด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM.....	81
4.9.1 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสและฟิล์มคอมโพสิต ของแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน	81
4.9.2 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มไคโตซาน และฟิล์มคอมโพสิต ของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน	82
4.10 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูง จากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน SRXTM	83
4.10.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบแขวน ของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสกับสารละลายเกลือโพแทสเซียมไนเตรท KNO_3 ...	84
4.10.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตหล่อแบบ ของแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน.....	86
4.10.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตหล่อแบบ ของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน.....	87
4.11 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มพอลิเมอร์ธรรมชาติ ที่ทำคอมโพสิตกับแกมมา-ไกลซีนที่อัตราส่วนแตกต่างกัน.....	89
4.11.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้าไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต่างศักย์ ทางไฟฟ้าขาออก และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก ของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส ที่ทำคอมโพสิตกับแกมมา-ไกลซีนที่อัตราส่วนแตกต่างกัน.....	91

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.11.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้าไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต่างศักย์ ทางไฟฟ้าขาออก และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก ของฟิล์มโคโตซาน ที่ทำคอมโพสิตกับแกมมา-ไกลซีนที่อัตราส่วนแตกต่างกัน.....	93
4.11.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้าไฟฟ้าเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าขาออก ของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส ที่ทำคอมโพสิตกับแกมมา-ไกลซีน อัตราส่วนแตกต่างกัน.....	94
4.11.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้าไฟฟ้าเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าขาออก ของฟิล์มโคโตซานที่ทำคอมโพสิตกับแกมมา-ไกลซีนอัตราส่วนแตกต่างกัน.....	97
4.11.5 การทดสอบความสามารถในการชาร์จประจุตัวเก็บประจุ (Capacitor).....	99
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	101
5.1 สรุปผลการวิจัย	101
5.1.1 จากการศึกษากระบวนการสังเคราะห์ผลึกแกมมา-ไกลซีน.....	101
5.1.2 จากการศึกษากระบวนการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลส กับแกมมา-ไกลซีน และ โคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน	101
5.1.3 จากการศึกษาการสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก ไฮบริดไทโรโบอิเล็กทรอนิกส์-เพียโซอิเล็กทรอนิกส์ในรูปแบบสัมผัสตั้งฉาก.....	102
5.1.4 จากการศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณแกมมา-ไกลซีนที่มีผลต่อ เอกลักษณ์เฉพาะและสัญญาณวิทยาของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต.....	102
5.1.5 จากการศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณแกมมา-ไกลซีนที่มีต่อ ค่าการส่งออกทางไฟฟ้า.....	103
5.2 ข้อเสนอแนะ	103
เอกสารอ้างอิง	104
ภาคผนวก	110
ประวัติผู้วิจัย	112

สารบัญรูป

หน้า

ภาพประกอบที่ 2.1 แนวโน้มทางการตลาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและสวมใส่.....	5
ภาพประกอบที่ 2.2 การเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลจากการเคลื่อนที่ของมนุษย์และแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ SR-TENG เพื่อขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่พกพาและสวมใส่ได้.....	6
ภาพประกอบที่ 2.3 ก. ระบบเซ็นเซอร์วัดเหงื่อที่สวมใส่ได้ ข. และ ค. แผ่นแปะเซ็นเซอร์วัดเหงื่อบนแผงวงจรบนฐานของระบบเซ็นเซอร์วัดเหงื่อที่สวมใส่ได้ ซึ่งสามารถสวมใส่บนลำตัวของมนุษย์	
ง. ภาพ FTENG พร้อมระบบเซ็นเซอร์วัดเหงื่อ	7
ภาพประกอบที่ 2.4 กราฟเปรียบเทียบความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแต่ละชนิด	10
ภาพประกอบที่ 2.5 รูปแบบพื้นฐาน 4 รูปแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนไทรโบอิเล็กทริก	12
ภาพประกอบที่ 2.6 รูปโครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก	13
ภาพประกอบที่ 2.7 ก. รูปโครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกจากพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่น	15
ภาพประกอบที่ 2.8 ค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก ก. ค่าความต่างศักย์ขาออก ข. ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก เมื่อต่อวงจรแบบฟอว์เวิร์ด ค. ค่าความต่างศักย์ขาออก ง. ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก เมื่อต่อวงจรแบบบริวีร์ส	15
ภาพประกอบที่ 2.9 ก. ภาพโครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก ข. กราฟค่ากระแสไฟฟ้าขาออกกับเวลา ที่ 3 Hz ค. กราฟค่ากระแสไฟฟ้าขาออกกับเวลาที่ความถี่ต่าง ๆ ง. ค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุดและค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันกับความต้านทานที่ความถี่ 3 Hz	16
ภาพประกอบที่ 2.10 ภาพ ก. และ ข. โครงสร้างและหลักการทำงานของ TPU/PP nonwoven fiber-based TENG ภาพ ค. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก (output voltage) และ ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) ภาพ ง. ค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (output power)	17
ภาพประกอบที่ 2.11 ก.-ข. ภาพโครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก eco-TENG จากวัสดุทางชีวภาพ ถั่วเหลือง ค. ค่าแรงดันไฟขาออกสูงสุดและค่ากระแสไฟสูงสุด ง. ค่ากำลังไฟฟ้ากับความต้านทานโหลดภายนอก	18

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบที่ 2.12 ก. วัสดุชีวภาพ ข. โครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก ค. และ ง. ภาพถ่ายสัณฐานวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และภาพกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของพื้นผิวของฟิล์มวัสดุทางชีวภาพ จ. ภาพรวมแสดงค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของ BN-TENG ที่ใช้ชั้นสัมผัสที่แตกต่างกัน ด้านบน: แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าออกสูงสุด ด้านล่าง: แสดงค่ากระแสไฟฟ้าออกสูงสุด	19
ภาพประกอบที่ 2.13 ก. การสังเคราะห์เจลาตินจากเกล็ดปลา ข. กระบวนการสร้างอุปกรณ์ FG-TENG ค. หลักการทำงานของอุปกรณ์ FG-TENG ง. มีค่าความต่างศักย์ขาออกสูงสุด (output voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าออกสูงสุด (output current) จ. ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า	20
ภาพประกอบที่ 2.14 โครงสร้างทางเคมีของแบคทีเรียเซลลูโลส	21
ภาพประกอบที่ 2.15 ก. แบคทีเรียเซลลูโลส ข. โครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก ค. มีค่าความต่างศักย์ขาออกสูงสุด (output voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าออกสูงสุด (output current) ง. ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า	22
ภาพประกอบที่ 2.16 ก. แบคทีเรียเซลลูโลส ข. โครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก ค.ค่าความต่างศักย์ขาออกสูงสุด (output voltage) ง. ค่ากระแสไฟฟ้าออกสูงสุด (output current)	23
ภาพประกอบที่ 2.17 ปฏิกริยาดิอะซีทิลเลชันของไคติน	24
ภาพประกอบที่ 2.18 โครงสร้างไคโตซาน	24
ภาพประกอบที่ 2.19 ก.ค่าความต่างศักย์ขาออก ข.ค่ากระแสไฟฟ้าออก ค.ค่าความหนาแน่นของพลังงาน	25
ภาพประกอบที่ 2.20 ก.โครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก ข.ค่าความต่างศักย์ส่งออกวงจรเปิด ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นของประจุถ่ายโอนของไคโตซานและกรดซิตริก	26
ภาพประกอบที่ 2.21 การเรียงของเส้นใย ก.เส้นใยต่อเนื่องแนวเดียว ข.เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงแนวเดียวกัน ค.เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวแบบอิสระ	29
ภาพประกอบที่ 2.22 การเรียงซ้อนกันของชั้นที่เสริมด้วยเส้นใยแบบเรียงต่อเนื่องสำหรับวัสดุผสมลามิเนต	30
ภาพประกอบที่ 2.23 รูปแบบโครงสร้างการเรียงกันเป็นแซนด์วิช	30
ภาพประกอบที่ 2.24 ก.direct effect ข.indirect effect (i) วัสดุหดตัว (ii) วัสดุขยายตัว	31

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
ภาพประกอบที่ 2.25 แสดงทิศทางของแรงที่ส่งผลต่อค่าเพียโซอิเล็กทริก	32
ภาพประกอบที่ 2.26 ก.โครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทโรโบอิเล็กทริก ข.ค่าความต่างศักย์ขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออก	
ค.ค่าความหนาแน่นของพลังงานสูงสุด	33
ภาพประกอบที่ 2.27 ก.กลไกการทำงานของ triboelectric acetone sensor (TAS)	
ข.ค่าความต่างศักย์	34
ภาพประกอบที่ 2.28 ก.กลไกการทำงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทโรโบอิเล็กทริก	
ข.ค่ากระแสไฟฟ้า(short current) ค.ค่าความต่างศักย์วงจรเปิด (open voltage)	
ง.ค่าความหนาแน่นของพลังงานสูงสุด (output power density)	35
ภาพประกอบที่ 2.29 ก.ค่าความต่างศักย์ขาออก ข.ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก	
ค.ค่าความหนาแน่นของพลังงาน	36
ภาพประกอบที่ 2.30 จำแนกประเภทวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชีวภาพตามแหล่งกำเนิดและ	
ค่าคงที่ประจุเพียโซอิเล็กทริก	37
ภาพประกอบที่ 2.31 ก.-ข. ค่าแรงดันไฟขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออก CS/albumin	
ค.-ง. ค่าแรงดันไฟขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออก CS/ ESM	
จ.-ฉ. ค่าแรงดันไฟขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออก CS/SF	39
ภาพประกอบที่ 2.32 ก. แผนภูมิเปรียบเทียบประเภทกรดอะมิโนและAlbumin, ESM และ SF	
ข. โครงสร้างโมเลกุลของกรดอะมิโนไกลซีน อะลานีน และซีรีน ค. การแปลงเชิงซ้ำของโมเลกุลกรด	
อีนานทีโอเมอร์ DL- α -amino ตามแนวหน้า (010) ของไกลซีน และปฏิกิริยาสวิตเตอร์ไอออนิกของ	
กรดแอล-อะมิโน (สีชมพู) กับโครงสร้างโมเลกุล D และ D' สำหรับการเข้าจับตำแหน่ง L และ L'...	40
ภาพประกอบที่ 2.33 โครงสร้างผลึกของกรดอะมิโนในโปรตีน	41
ภาพประกอบที่ 2.34 โครงสร้างผลึกกรดอะมิโนชนิดไกลซีน ก. α Glycine ข. β Glycine	
ค. γ Glycine	42
ภาพประกอบที่ 2.35 ก. ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก β Glycine ข. ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก	
γ Glycine	42
ภาพประกอบที่ 3.1 แสดงการสังเคราะห์ผลึกแอมมา-ไกลซีน จากเกลือ NaCl และ KNO ₃	46
ภาพประกอบที่ 3.2 แสดงวิธีการเตรียมฟิล์มแบบคทีเรียเซลลูโลสแบบหล่อแบบ (Casting).....	47
ภาพประกอบที่ 3.3 แสดงวิธีการเตรียมฟิล์มไคโตซานแบบหล่อแบบ (Casting).....	48

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
ภาพประกอบที่ 3.4 แสดงวิธีการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลล์โลสกับ แกมมา-ไกลซีนแบบปลูกผลึกบนแผ่นฟิล์ม.....	49
ภาพประกอบที่ 3.5 แสดงวิธีการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลล์โลสกับ แกมมา-ไกลซีนแบบหล่อแบบ (Casting)	50
ภาพประกอบที่ 3.6 แสดงวิธีการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตระหว่างไคโตซานกับ แกมมา-ไกลซีนแบบหล่อแบบ (Casting)	51
ภาพประกอบที่ 3.7 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี	52
ภาพประกอบที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	53
ภาพประกอบที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	54
ภาพประกอบที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์ด้วยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสง ซินโครตรอน.....	55
ภาพประกอบที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	56
ภาพประกอบที่ 3.12 แสดงส่วนประกอบและโครงสร้างของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก ไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริก	56
ภาพประกอบที่ 3.13 เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope; Oc).....	57
ภาพประกอบที่ 3.14 เครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter; DMM).....	58
ภาพประกอบที่ 4.1 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของผลึกแกมมา-ไกลซีน.....	60
ภาพประกอบที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแกมมา-ไกลซีนจากกระบวนการ ตกตะกอนของสารละลายไกลซีนทางการค้าที่มีโครงสร้างแอลฟาเกลือกับเกลือ NaCl และ KNO ₃	62
ภาพประกอบที่ 4.3 ก. แสดงลักษณะผลึกแกมมา-ไกลซีนที่สังเคราะห์ขึ้นได้จากกระบวนการ ตกผลึกในสารละลายเกลือ NaCl กับแอลฟาไกลซีน ข. ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง...	63
ภาพประกอบที่ 4.4 ก. แสดงลักษณะผลึกแกมมา-ไกลซีนที่สังเคราะห์ขึ้นได้จากกระบวนการ ตกผลึกในสารละลายเกลือ KNO ₃ กับแอลฟาไกลซีน ข. ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง..	64
ภาพประกอบที่ 4.5 แสดงภาพถ่าย SEM ของผง แกมมา-ไกลซีนของเกลือ NaCl ที่ได้จากการ บดมือและบดด้วยการ Ball milling ก.-ข. ผงแกมมา-ไกลซีนที่ได้จากการบดมือ ที่กำลังขยาย 400x และ 1500x ตามลำดับ ค.-ง. ผง γ -gly ที่ได้จากการบดด้วยการ Ball milling ที่กำลังขยาย 1500x และ 8000xตามลำดับ.....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบที่ 4.6 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบที่เรียเซลลูโลส แบบปลูกผลึกในสารละลายไกลซีนกับเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) ที่แขวนทิ้งไว้ เป็นเวลา ก. 3 วัน ข. 5 วัน ค. 7 วัน ง. 14 วัน	66
ภาพประกอบที่ 4.7 แสดงลักษณะของฟิล์มแบบที่เรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ ก. แสดงความโปร่งแสงของฟิล์ม และทดสอบความยืดหยุ่นด้วยการ ข. ม้วน ค. พับ และ ง. บิด....	67
ภาพประกอบที่ 4.8 แสดงลักษณะแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบที่เรียเซลลูโลสที่เติมแกมมา-ไกลซีน ที่อัตราส่วน 5 10 15 30 50 และ 70 wt% ก. แสดงความโปร่งแสงของฟิล์ม ทดสอบความยืดหยุ่นด้วยการ ข. ม้วน ค. พับ ง. บิด.....	68
ภาพประกอบที่ 4.9 กราฟแสดงความหนาของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบที่เรียเซลลูโลสที่เติม แกมมา-ไกลซีน.....	69
ภาพประกอบที่ 4.10 แสดงลักษณะของฟิล์มไคโตซานบริสุทธิ์ ก. แสดงความโปร่งแสงของฟิล์ม และทดสอบความยืดหยุ่นด้วยการ ข. ม้วน ค. พับ และ ง. บิด.....	70
ภาพประกอบที่ 4.11 แสดงลักษณะแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบที่เรียเซลลูโลสที่เติมแกมมา-ไกลซีน ที่อัตราส่วน 5 10 15 30 50 และ 70wt% ก. แสดงความโปร่งแสงของฟิล์ม ทดสอบความยืดหยุ่นด้วยการ ข. ม้วน ค. พับ ง. บิด.....	71
ภาพประกอบที่ 4.12 กราฟแสดงความหนาของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานที่เติมแกมมา-ไกลซีน	72
ภาพประกอบที่ 4.13 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมและโครงสร้างทางเคมีของแบบที่เรียเซลลูโลส	73
ภาพประกอบที่ 4.14 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มคอมโพสิตแบบที่เรียเซลลูโลสกับ แกมมา-ไกลซีน.....	75
ภาพประกอบที่ 4.15 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมและโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน	76
ภาพประกอบที่ 4.16 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน...	78
ภาพประกอบที่ 4.17 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มคอมโพสิตแบบที่เรียเซลลูโลส กับแกมมา-ไกลซีน ในปริมาณ 0 5 10 15 30 50 และ 70 wt%	80
ภาพประกอบที่ 4.18 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานกับ แกมมา-ไกลซีนในปริมาณ 0 5 10 15 30 50 และ 70 wt%	81

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบที่ 4.19 แสดงภาพถ่าย SEM ของแบคทีเรียเซลลูโลสและคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน แบบภาพตัดขวาง ก. แบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ ข. คอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 5wt% ค. คอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 15wt% ง. คอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับ แกมมา-ไกลซีน ที่อัตราส่วน 30 wt%	82
ภาพประกอบที่ 4.20 แสดงภาพถ่าย SEM ของคอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน แบบภาพตัดขวาง ก.-ข. คอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนที่ 15wt% ที่กำลังขยาย 500x และ 3000x ตามลำดับ ค.-ง. คอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนที่ 50wt% ที่กำลังขยาย 500x และ 3000x ตามลำดับ.....	83
ภาพประกอบที่ 4.21 แสดงโครงสร้างภายในของฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสที่ปลูกทิ้งไว้ในสารละลายไกลซีนของเกลือ KNO_3 เป็นเวลา 3 วัน ก. แบคทีเรียเซลลูโลส ข. อนุภาค ค. ภาพตัดขวางฟิล์มคอมโพสิต	84
ภาพประกอบที่ 4.22 แสดงโครงสร้างภายในของฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสที่ปลูกทิ้งไว้ในสารละลายไกลซีนของเกลือ KNO_3 เป็นเวลา 7 วัน ก. แบคทีเรียเซลลูโลส ข. อนุภาค ค. ภาพตัดขวางฟิล์มคอมโพสิต.....	85
ภาพประกอบที่ 4.23 แสดงโครงสร้างภายในของฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสที่ปลูกทิ้งไว้ในสารละลายไกลซีนของเกลือ KNO_3 เป็นเวลา 14 วัน ก. แบคทีเรียเซลลูโลส ข. อนุภาค ค. ภาพตัดขวางฟิล์มคอมโพสิต	85
ภาพประกอบที่ 4.24 แสดงโครงสร้างภายในของฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 15 wt% ก. คอมโพสิต. ข. แบคทีเรียเซลลูโลส ค. อนุภาค.....	86
ภาพประกอบที่ 4.25 แสดงโครงสร้างภายในของฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 30 wt% ก. คอมโพสิต ข. แบคทีเรียเซลลูโลส ค. อนุภาค.....	87
ภาพประกอบที่ 4.26 แสดงโครงสร้างภายในของฟิล์มคอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 5 wt% ก. คอมโพสิต. ข. แบคทีเรียเซลลูโลส ค. อนุภาค.....	88
ภาพประกอบที่ 4.27 แสดงโครงสร้างภายในของฟิล์มคอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 15 wt% ก. คอมโพสิต. ข. แบคทีเรียเซลลูโลส ค. อนุภาค	88
ภาพประกอบที่ 4.28 แสดงโครงสร้างภายในของฟิล์มคอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 50 wt% ก. คอมโพสิต ข. แบคทีเรียเซลลูโลส ค. อนุภาค	89

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบที่ 4.29 แสดงลักษณะอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกและกลไกการเกิดประจุของ TENG ในรูปแบบการวัดแบบการสัมผัสโดยให้แรงกระทำในแนวตั้งฉาก (Vertical contact-separation mode)	91
ภาพประกอบที่ 4.30 แสดงลักษณะของกราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ของชุดฟิล์มคอมโพสิตแบบที่เรียวเซลล์โลสกับแกมมา-ไกลซีน	92
ภาพประกอบที่ 4.31 แสดงลักษณะของกราฟกระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) ของชุดฟิล์มคอมโพสิตแบบที่เรียวเซลล์โลสกับแกมมา-ไกลซีน	92
ภาพประกอบที่ 4.32 แสดงลักษณะของกราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ของชุดฟิล์มคอมโพสิตโคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน.....	93
ภาพประกอบที่ 4.33 แสดงลักษณะของกราฟกระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) ของชุดฟิล์มคอมโพสิตโคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน.....	94
ภาพประกอบที่ 4.34 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดของแผ่นฟิล์มแบบที่เรียวเซลล์โลสบริสุทธิ์.....	95
ภาพประกอบที่ 4.35 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบที่เรียวเซลล์โลสกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 5 10 15 30 50 และ 70 wt%.....	96
ภาพประกอบที่ 4.36 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดของแผ่นฟิล์มโคโตซานบริสุทธิ์.....	98
ภาพประกอบที่ 4.37 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตโคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 5 10 15 30 50 และ 70 wt%.....	98
ภาพประกอบที่ 4.38 แสดงค่าความสามารถในการอัดประจุตัวเก็บประจุของ ก.แผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบที่เรียวเซลล์โลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 5 wt% และ ข. แผ่นฟิล์มคอมโพสิตโคโตซานกับ แกมมา-ไกลซีน ที่ 50 wt%.....	100

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงวัสดุโพรโบอิเล็คทริกที่มีความสามารถถ่ายเทประจุที่แตกต่างกัน	14
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก D_{33} วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	37
ตารางที่ 2.3 แสดงค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก D_{33} วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชีวภาพ	38
ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกแกมมา-ไกลซีน	46
ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสจากวุ้นมะพร้าวและ เอทานอล.....	47
ตารางที่ 3.3 แสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มไคโตซานด้วยกรดอะซิติกที่ความเข้มข้น 2.5%.....	48
ตารางที่ 3.4 แสดงอัตราส่วนในการทำคอมโพสิตแผ่นฟิล์มระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับ แกมมา-ไกลซีน.....	49
ตารางที่ 3.5 แสดงอัตราส่วนในการทำคอมโพสิตแผ่นฟิล์มระหว่างสารละลายไคโตซานกับ แกมมา-ไกลซีน.....	50
ตารางที่ 4.1 แสดงช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะของไกลซีน	61
ตารางที่ 4.2 แสดงช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะของแบคทีเรียเซลลูโลส	74
ตารางที่ 4.3 แสดงช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะของไคโตซาน	77
ตารางที่ 4.4 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และฟิล์ม คอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ปริมาณ 0 5 10 15 30 50 และ 70 wt%.....	97
ตารางที่ 4.5 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดของแผ่นฟิล์มไคโตซานบริสุทธิ์และฟิล์ม คอมโพสิตไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ที่ปริมาณ 0 5 10 15 30 50 และ 70 wt%.....	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย/ปัญหา

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและสวมใส่ (portable and wearable electronic devices) เช่น สมาร์ทโฟน (Smartphone) เสื้อผ้าอัจฉริยะ (Smart Clothes) รองเท้าอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Shoes) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อำนวยความสะดวก สามารถพกพาและสวมใส่ สั่งการด้วยระบบไร้สาย ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ทำให้ผู้คนใช้ชีวิตได้สะดวกสบายมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันเทคโนโลยีดังกล่าวข้างต้นจำเป็นต้องมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอก คือ แบตเตอรี่ ซึ่งต้องมีการอัดประจุซ้ำบ่อยครั้ง และมีอายุการใช้งานที่จำกัด นอกจากนี้ยังมีความเป็นพิษ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือก่ออันตรายต่อผู้ที่ใช้งานด้วยเหตุนี้จึงมีความพยายามสร้างแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมาใช้ขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ [1] ในปี ค.ศ. 2012 ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการผลิตพลังงานรูปแบบใหม่ โดย ศาสตราจารย์ Zong Lin Wang และ คณะ [2] ออกแบบอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerators หรือ TENGs) โดยอุปกรณ์นี้สามารถเปลี่ยนพลังงานเชิงกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดสีหรือการสัมผัสกันของผิวสัมผัสของวัสดุสองชนิด ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างวัสดุทั้งสองเหนี่ยวนำให้เกิดไฟฟ้าสถิตขึ้นบนพื้นผิววัสดุ โดยทั่วไปแล้ว วัสดุทุกประเภททั้งโลหะ เซรามิก และพอลิเมอร์ สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริกได้ [3] โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าวัสดุกลุ่มพอลิเมอร์สังเคราะห์เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้งานในอุปกรณ์ TENG อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้หลากหลาย อย่างไรก็ตาม การใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ก่อให้เกิดข้อจำกัดต่อกลุ่มการใช้งานทางการแพทย์และอุปกรณ์ที่มีความจำเป็นในการใช้งานที่มีความใกล้ชิดกับร่างกายมนุษย์ อีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์เมื่อหมดอายุการใช้งาน ทำให้การมองหาวัสดุทางเลือกที่ยังคงมีความยืดหยุ่นแต่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เข้ามาทดแทนวัสดุสังเคราะห์เป็นสิ่งที่ท้าทายต่อการวิจัยและกำลังได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน

ในงานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจไปที่วัสดุพอลิเมอร์ทางธรรมชาติ เนื่องจากไม่เป็นพิษกับทั้งมนุษย์และสิ่งแวดล้อมนอกจากนี้ยังหาได้ง่ายและมีราคาถูก ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น ลิกนิน [4],[5] ไหมไฟโบรอิน [6] ไคโตซาน [6] และเซลลูโลส [7] เป็นต้น ซึ่งพบว่าอุปกรณ์ TENG ที่สร้างจากวัสดุทางธรรมชาตินั้นมีค่าการส่งออกทางไฟฟ้าที่ไม่โดดเด่น ทำให้การผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากพอลิเมอร์ทางธรรมชาติเพียงอย่างเดียวให้มีประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าที่สูงนั้นเป็นไปได้ยาก การปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นโดยการทำคอมโพสิต ด้วยการเติมเฟสกระจาย

จึงเป็นแนวทางหนึ่งของการพัฒนาที่มีอัตราการแข่งขันสูงสำหรับงานวิจัยในปัจจุบัน โดยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในแบบไม่สมมาตร เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างมากในการใช้เป็นเฟสกระจายเพื่อเพิ่มความหนาแน่นประจุไฟฟ้าให้กับพอลิเมอร์ธรรมชาติ ซึ่งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นเฟสกระจายโดยส่วนใหญ่นั้นเป็นสารประกอบออกไซด์หรือออกไซด์เชิงซ้อน โดยเฉพาะสารประกอบออกไซด์หรือออกไซด์เชิงซ้อนที่มีโครงสร้างระดับนาโน เช่น BaTiO₃ nanorod [8] ZnO nanorod [9] และ ZnO nanowire [10] เป็นต้น อย่างไรก็ตามเฟสกระจายเพียโซอิเล็กทริกที่ได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้เหล่านี้ยังคงเป็นกลุ่มวัสดุสังเคราะห์ การใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกทางธรรมชาติสำหรับการเป็นเฟสกระจายในพอลิเมอร์ธรรมชาติเพื่อสร้างอุปกรณ์ TENG จึงเป็นประเด็นที่มีความน่าสนใจและยังคงมีงานวิจัยไม่มากนัก จนกระทั่งในปี 2021 T.Charoonsuk และคณะ [6] ได้ศึกษาการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทางธรรมชาติในกลุ่มโปรตีน ได้แก่ เส้นไหม (Silk fiber: SF) เยื่อหุ้มเปลือกไข่ (Egg-shell membrane: ESM) และอัลบูมิน (Albumin) มาเป็นเฟสกระจายในโคโตซาน พบว่า โปรตีนชนิดเส้นไหมมีความสามารถในการเพิ่มค่าส่งออกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ TENG ได้สูงสุดและมีค่าสูงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับวัสดุทางธรรมชาติ TENG จากงานวิจัยอื่น ๆ โดยสามารถแสดงค่าความต่างศักย์ขาออก (output voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) อยู่ที่ ~ 77 V และ ~ 13 μ A ตามลำดับและมีค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (output power) สูงสุดอยู่ที่ ~ 202 μ W โดยพบข้อมูลที่น่าสนใจว่าการที่ทำคอมโพสิตระหว่างโคโตซานและเส้นไหมให้ค่าการส่งออกทางไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากในเส้นไหมมีกรดอะมิโนชนิดไกลซีนเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับโปรตีนชนิดอื่นที่ทำการศึกษา ซึ่งกรดอะมิโนชนิดไกลซีนนั้นเป็นโมเลกุลกรดอะมิโนเพียงชนิดเดียวที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก งานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจไปที่กรดอะมิโนชนิดไกลซีนและมีแนวคิดในการใช้ไกลซีนเป็นเฟสกระจายในพอลิเมอร์ธรรมชาติ ซึ่งเมื่อศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมพบว่า ไกลซีนมีโครงสร้างโมเลกุล 3 แบบ ได้แก่ แอลฟา-ไกลซีน (α -glycine) เบตา-ไกลซีน (β -glycine) และแกมมา-ไกลซีน (γ -glycine) [11] โดยมีเพียงแกมมา-ไกลซีนที่มีโครงสร้างผลึกแบบไม่สมมาตรที่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งแกมมา-ไกลซีนมีค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก d_{33} เท่ากับ 10 pC/N และมีค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.46 VmN⁻¹ ซึ่งมีค่าสูงเมื่อเทียบกับ PZT ที่มีค่าคงที่แรงดันเท่ากับ 0.25 VmN⁻¹ [11] แสดงให้เห็นว่าแกมมา-ไกลซีนมีแนวโน้มที่จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ TENG ที่มีวัสดุฐานเป็นพอลิเมอร์ทางธรรมชาติได้

งานวิจัย จึงสนใจสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดจ์ไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริกบนพื้นฐานของวัสดุทางชีวภาพ ชนิดแบคทีเรียเซลลูโลส (Bacteria Cellulose : BC) และโคโตซาน (Chitosan: CS) และทำการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าด้วยการทำคอมโพสิตกับเฟสกระจายแกมมา-ไกลซีน โดยทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ผลึกแกมมา-ไกลซีน การเตรียมแผ่นฟิล์มของวัสดุเชิงประกอบ และความสัมพันธ์ของปริมาณไกลซีนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อันประกอบไปด้วยค่าความต่างศักย์ขาออก (output

voltage) ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (output power) ตามลำดับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์และหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ผลึกแกมมา-ไกลซีน
2. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน และไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน
3. เพื่อสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทโรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริก
4. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณแกมมา-ไกลซีน ที่มีต่อเอกลักษณ์เฉพาะและสัญญาณวิทยาของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต
5. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณแกมมา-ไกลซีนที่มีต่อค่าการส่งออกจากไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทโรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริกที่สร้างขึ้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สังเคราะห์แกมมา-ไกลซีนด้วยกระบวนการตกผลึก
2. เตรียมฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน และไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ในอัตราส่วนแกมมา-ไกลซีนที่ 0, 5, 10, 15, 30 และ 50 wt% ด้วยกระบวนการหล่อแบบ (casting) และการปลูกผลึกบนแผ่นฟิล์ม
3. สร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทโรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริกในรูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉาก (vertical contact separation mode)
4. ทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทโรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริกที่เตรียมได้จากการทำคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน และไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน โดยวัดค่าความต่างศักย์ขาออก (output voltage), ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (output power)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

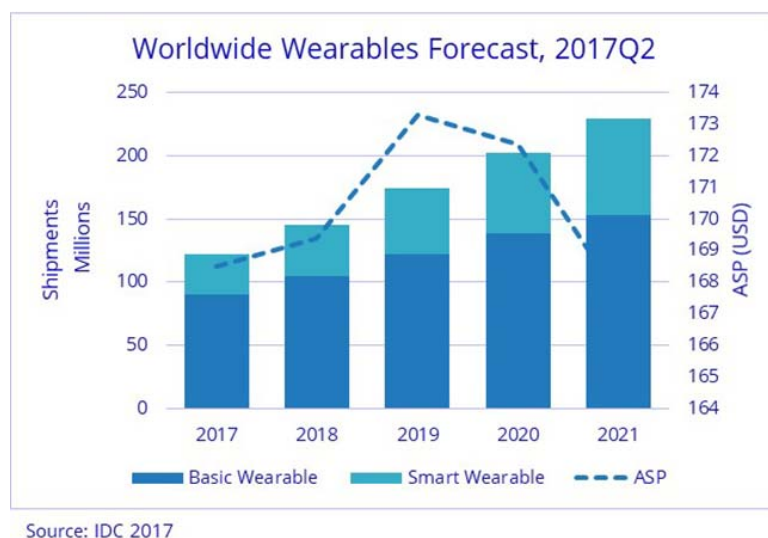
1. ได้ผลึกแกมมา-ไกลซีนจากกระบวนการตกผลึก
2. ได้แผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลล์ูโลสกับแกมมา-ไกลซีน และโคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน
3. ได้อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริกในรูปแบบการสัมผัสวัสดุแบบตั้งฉาก (vertical contact separation mode)
4. ทราบความสัมพันธ์ของปริมาณแกมมา-ไกลซีนที่มีผลต่อเอกลักษณ์เฉพาะ และสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต
5. ทราบความสัมพันธ์ของปริมาณแกมมา-ไกลซีนที่มีผลต่อค่าการส่งออกทางไฟฟ้า และทราบปริมาณที่ดีที่สุดที่ส่งผลให้อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริกแสดงค่าประสิทธิภาพสูงสุด โดยวัดค่าความต่างศักย์ขาออก (output voltage), ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (output power)

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และทบทวนวรรณกรรม

2.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและสวมใส่ได้ (Portable and wearable electronic devices)

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและสวมใส่ได้ (portable and wearable electronic devices) เช่น สมาร์ทโฟน (Smartphone) เสื้อผ้าอัจฉริยะ (Smart Clothes) รองเท้าอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Shoes) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อำนวยความสะดวก สามารถพกพาและสวมใส่ สักการด้วยระบบไร้สาย ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายและเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ในปัจจุบัน ทำให้ผู้คนใช้ชีวิตได้สะดวกสบายมากยิ่งขึ้น อีกทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและสวมใส่นี้เป็นอุปกรณ์ที่เข้าถึงง่ายจึงทำให้อัตราความต้องการหรือการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.1

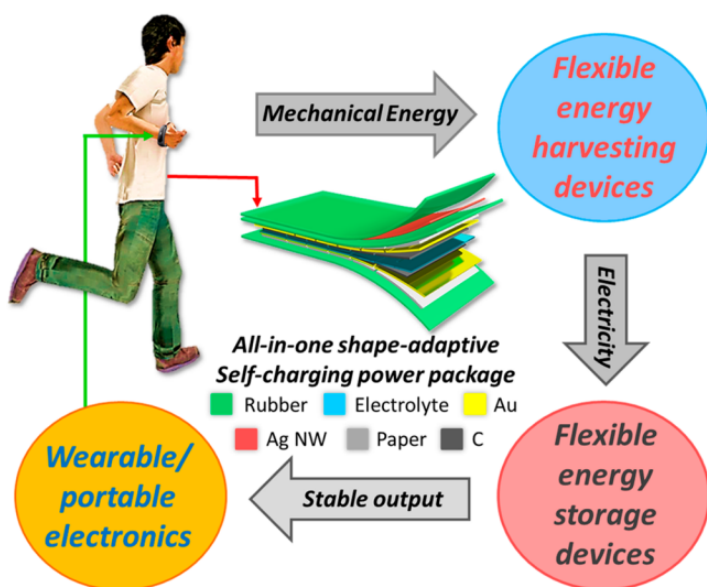


ภาพประกอบที่ 2.1 แนวโน้มทางการตลาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและสวมใส่ [12]

ที่มา: <https://campustechnology.com/articles/2017/09/15/wearables-to-see-double-digit-growth-through-2021>

แต่ในขณะเดียวกันเทคโนโลยีดังกล่าวข้างต้นจำเป็นต้องมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอก คือ แบตเตอรี่ ซึ่งต้องมีการอัดประจุซ้ำบ่อยครั้ง และมีอายุการใช้งานที่จำกัด นอกจากนี้ยังมีความเป็นพิษ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือก่ออันตรายต่อผู้ที่ใช้งาน ด้วยเหตุนี้จึงมีความพยายามสร้างแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมาใช้ขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ โดยแหล่งพลังงานหมุนเวียนนั้นมีอยู่อย่างหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็น แหล่ง

พลังงานลม แหล่งพลังงานน้ำ แหล่งพลังงานแสงอาทิตย์แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานชีวมวล หรือแหล่งพลังงานเชิงกล ซึ่งจากงานวิจัยของ Guo และ คณะ [13] ได้พัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและสวมใส่ที่สามารถกำเนิดพลังงานได้ด้วยตัวเอง (self-powered) ขึ้น ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแหล่งจ่ายพลังงานที่ขับเคลื่อนกับอุปกรณ์เป็นอย่างอื่นแทนการใช้แบตเตอรี่บนพื้นฐานเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงาน โดยสร้างอุปกรณ์ SR-TENG ที่มีความยืดหยุ่นสามารถเปลี่ยนรูปภายใต้การเคลื่อนไหว เช่น การยืด การบิด การงอ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.2 เพื่อเป็นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและสวมใส่นี้ โดยเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์และแปลงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและสวมใส่ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้มีค่าประมาณ 250 V ซึ่งเพียงพอที่จะขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก



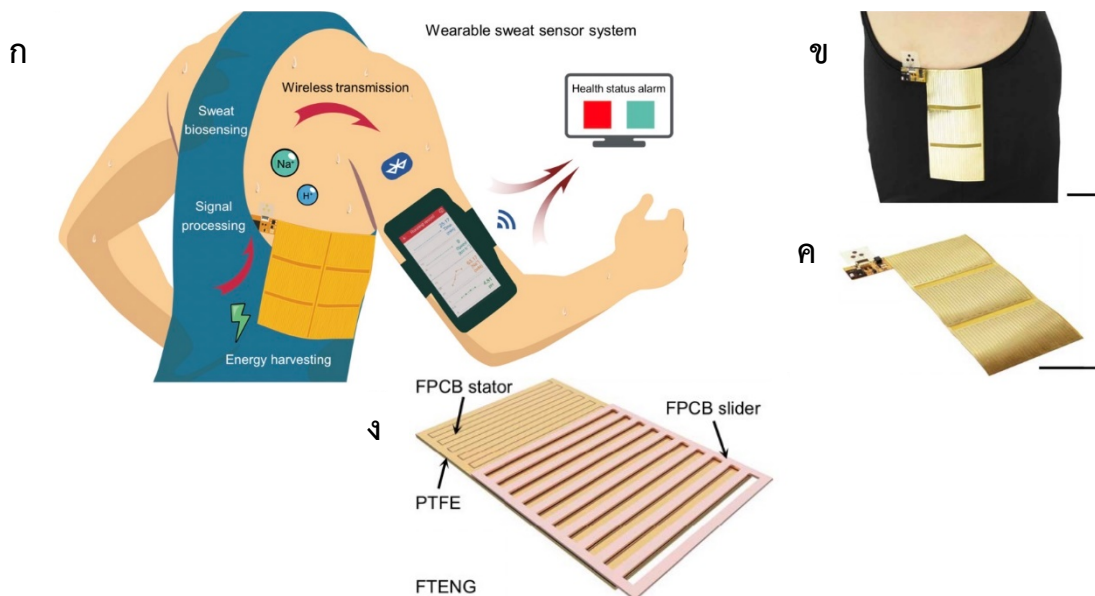
ภาพประกอบที่ 2.2 การเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลจากการเคลื่อนที่ของมนุษย์และแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ SR-TENG เพื่อขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้และพกพา [13]

ที่มา: Hengyu Guo (2016) American Chemical Society

Song และคณะ [14] ได้พัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก FTENG เพื่อขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้และพกพาไร้แบตเตอรี่ทางการแพทย์ที่เป็นไบโอเซนเซอร์ตรวจจับเหงื่อ เพื่อวัดการเคลื่อนไหวของมนุษย์สำหรับตรวจสอบสุขภาพ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.3 ซึ่งมีค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ประมาณ 416 mWm^{-2} โดยเทคโนโลยีนี้เป็นแนวทางที่น่าสนใจในการติดตามสุขภาพหรือการทากิจกรรมในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ซึ่งสามารถขับเคลื่อนด้วยตัวเองโดยไม่ใช้แบตเตอรี่และยังเป็นแบบไร้สาย

ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่าน ๆ ทำให้พบว่า การพัฒนาแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนและแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าได้รับการคิดค้นและพัฒนา

อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการเพิ่มจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและสวมใส่ในชีวิตประจำวันของเราทำให้เกิดความท้าทายใหม่ในการจัดหาพลังงานให้กับอุปกรณ์เหล่านี้ โดยเรียกเทคโนโลยีนี้ว่า เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting Technology) ซึ่งเป็นอีกช่องทางหนึ่งสำหรับพลังงานทดแทนในอนาคต



ภาพประกอบที่ 2.3 ก. ระบบเซ็นเซอร์วัดเหงื่อที่สวมใส่ได้ ข. และ ค. แผ่นแปะเซ็นเซอร์วัดเหงื่อบนแผงวงจรบนฐานของระบบเซ็นเซอร์วัดเหงื่อที่สวมใส่ได้ ซึ่งสามารถสวมใส่บนลำตัวของมนุษย์ ง. ภาพ FTENG พร้อมระบบเซ็นเซอร์วัดเหงื่อ [14]

ที่มา: Yu Song (2020) Science Advances

2.2 เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting Technology)

เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงาน คือการแปลงพลังงานแวดล้อมต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมให้เป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในการจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือวงจรไฟฟ้า โดยพลังงานไฟฟ้าที่แปลงได้นั้นสามารถใช้ได้ทันทีหรือเก็บไว้ใช้ในภายหลังได้ ซึ่งพลังงานส่วนใหญ่นิยมเก็บเกี่ยวนั้นจะเป็นพลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียน โดยที่การเก็บเกี่ยวพลังงานนั้นจะแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดและวัสดุอุปกรณ์ในการเก็บเกี่ยวพลังงานพลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียนนั้น ๆ

2.2.1 พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy)

พลังงานหมุนเวียน คือพลังงานที่ใช้แล้วไม่หมดไป สามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยแหล่งพลังงานหมุนเวียนนั้นมีอยู่อย่างหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็น แหล่งพลังงานลม แหล่งพลังงานน้ำ แหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ แหล่งพลังงานชีวมวล รวมถึงแหล่งพลังงานเชิงกล ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานจากธรรมชาติจึงมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่น้อย โดยในปัจจุบัน

แหล่งพลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งพลังงานสำคัญที่จะนำมาทดแทนแหล่งพลังงานแบบดั้งเดิมอย่างพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ที่มีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งถูกใช้ในการผลิตไฟฟ้า การขนส่ง การผลิตในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ เมื่อใช้แล้วจะหมดไป นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมากไม่ว่าจะเป็นในด้านของการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศส่งผลต่อสภาวะโลกร้อน (Global warming) ซึ่งพลังงานหมุนเวียนมีความสำคัญต่อการช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้

2.2.1.1 แหล่งพลังงานลม (Wind energy) เป็นแหล่งพลังงานสะอาดที่ไม่มีวันหมดไป โดยลมนี้เกิดจากการที่บรรยากาศได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ไม่สม่ำเสมอ บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงอากาศจะลอยสูงขึ้นแล้วอากาศจากบริเวณที่เย็นกว่าจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ ซึ่งการเคลื่อนที่ของอากาศเช่นนี้ทำให้เกิดลม ซึ่งในปัจจุบันได้มีการอาศัยลมที่เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าทดแทนแหล่งพลังงานแบบดั้งเดิม โดยมีกังหันลม (Wind turbine) ในการช่วยแปลงพลังงานลมให้เป็นพลังงานไฟฟ้า พลังงานลมมีข้อดีหลายประการ เช่น เป็นพลังงานสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษในอากาศ มีความคุ้มค่า และยั่งยืน ซึ่งปัจจัยหลักของการเกิดลมคือดวงอาทิตย์ โดยตราบใดที่ดวงอาทิตย์ยังส่องแสง พลังงานลมยังคงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง จึงทำให้พลังงานลมนี้เป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานที่เติบโตอย่างรวดเร็ว

2.2.1.2 แหล่งพลังงานน้ำ (Hydropower) เป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ใหญ่และได้ถูกใช้ประโยชน์มาอย่างเนิ่นนาน เป็นทรัพยากรที่สำคัญอย่างหนึ่งในการหล่อเลี้ยงชีวิตมนุษย์ ทั้งอุปโภคและบริโภค รวมถึงการนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันพลังงานน้ำที่เป็นที่รู้จักโดยทั่วไป ได้แก่ พลังงานน้ำตก พลังงานคลื่น โดยพลังงานน้ำตก เป็นการอาศัยการไหลของกระแสน้ำตามธรรมชาติเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยความแตกต่างของระดับความสูงของน้ำและควบคุมน้ำให้ไหลผ่านการควบคุมของเขื่อนขนาดใหญ่หรืออ่างเก็บน้ำลงสู่ที่ต่ำตามแรงโน้มถ่วงของโลก ไหลผ่านไปฉุดกังหัน และต่อเชื่อมเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าขึ้น ส่วนพลังงานคลื่น เป็นการเก็บเกี่ยวพลังงานของคลื่นบนผิวมหาสมุทรเพื่อมาใช้ประโยชน์ในการแปลงให้เป็นกระแสไฟฟ้า การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานน้ำมีข้อดีหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็น การเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีความสะอาด ไม่ปล่อยมลพิษสู่บรรยากาศ นอกจากนี้ยังมีความยั่งยืนและไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อเชื้อเพลิง

2.2.1.3 แหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy) เป็นรังสีที่มาจากดวงอาทิตย์ ที่ให้ความร้อนส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีหรือผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่ทรงพลังทำให้แสงแดดเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ใหญ่ที่สุด โดยรูปแบบทั่วไปที่นิยมของการเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) หรือเซลล์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic cell) ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงหรือโฟตอนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าและเก็บไว้ในแบตเตอรี่เพื่อใช้งานในยามที่ต้องการ โดยเซลล์เหล่านี้สร้างมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ เมื่อโดนความร้อนหรือโฟตอนจะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนไหลไปยังโหลดภายนอกและสร้างกระแสไฟฟ้าได้ พลังงาน

แสงอาทิตย์นั้นมียุติมากมาย ได้แก่ ช่วยลดค่าไฟฟ้ารายเดือนเนื่องจากสามารถติดตั้งอุปกรณ์ที่บ้าน และผลิตกระแสไฟฟ้าได้ด้วยตัวเองจากแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานสะอาด ไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และมลพิษที่เป็นอันตรายจึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีความยั่งยืน

2.2.1.4 แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal energy) เป็นพลังงานความร้อนที่อยู่ใต้พื้นโลก เป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญ ที่ถูกกักเก็บอยู่ในแกนของโลกตั้งแต่โลกถือกำเนิดขึ้น ความร้อนดังกล่าวทำให้น้ำอยู่ตามโพรงหินใต้พื้นโลกเดือดกลายเป็นไอน้ำที่มีพลังงานสูงดันขึ้นมาบนพื้นโลก ถูกนำไปใช้ประโยชน์ด้านต่าง ๆ เช่น ให้ความอบอุ่นแก่บ้านเรือนในประเทศเมืองหนาว หรือหนึ่งในการใช้ประโยชน์ที่สำคัญคือการนำไปผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยแรงดันไอน้ำที่มีพลังงานสูงดังกล่าวไปหมุนกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้า ซึ่งพลังงานความร้อนใต้พิภพนั้นเป็นพลังงานที่สะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และการใช้ประโยชน์พลังงานความร้อนใต้พิภพยังมีบทบาทสำคัญในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมากเนื่องจากการใช้พลังงานจากใต้พื้นโลกโดยไม่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้บนพื้นดินใด ๆ นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งพลังงานขนาดใหญ่จึงมีพลังงานเพียงพอที่จะใช้ประโยชน์แล้วไม่หมดไป

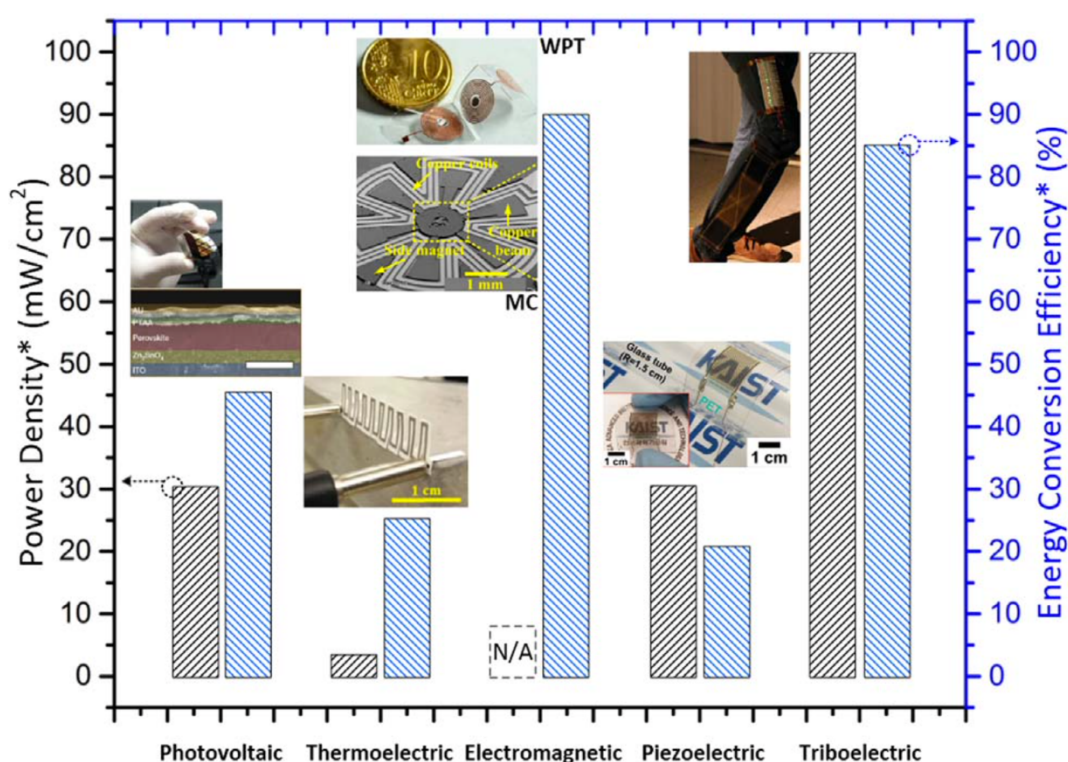
2.2.1.5 แหล่งพลังงานชีวมวล (Biomass) เป็นพลังงานธรรมชาติที่ได้จากวัสดุเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมเกษตร หรือเศษวัสดุชีวภาพต่าง ๆ ที่เหลือใช้จากการใช้ในชีวิตประจำวัน มาเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งวัสดุเหลือใช้ต่าง ๆ นี้อยู่อย่างมากมายและจะมีอยู่ตลอดเวลาตราบใดที่เรายังคงดำรงชีวิตจึงทำให้พลังงานชีวมวลเป็นพลังงานหมุนเวียน นอกจากนี้การใช้งานพลังงานชีวมวลเพื่อผลิตไฟฟ้ายังช่วยลดปริมาณขยะได้

2.2.1.6 แหล่งพลังงานเชิงกล (Mechanical energy) เป็นพลังงานที่อยู่รอบตัวเรา เกิดจากการกระทำ การเคลื่อนที่ของมนุษย์หรือวัตถุต่าง ๆ เป็นแหล่งพลังงานที่หลากหลาย สะอาดและยั่งยืนและไม่มีวันหมดไปตาบใดที่ยังมีการเคลื่อนไหว นอกจากนี้ยังสามารถแปลงเป็นพลังงานรูปแบบอื่นได้ เช่นการแปลงพลังงานเชิงกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า

แหล่งพลังงานเหล่านี้ล้วนมีข้อดี แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่บ้างในบางเรื่อง เช่น แหล่งพลังงานลม มีข้อจำกัดในเรื่องของการขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ การมีลมเป็นระยะ ๆ ไม่ต่อเนื่อง แหล่งพลังงานน้ำ มีข้อจำกัดในเรื่องของโรงไฟฟ้าพลังน้ำอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบ เนื่องจากใช้พื้นที่ในการสร้างเป็นบริเวณกว้างและขนาดใหญ่ แหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ มีข้อจำกัดคือไม่สามารถทำงานในเวลากลางคืนได้เนื่องจากไม่มีแสงอาทิตย์ แหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ มีข้อจำกัดในด้านของพื้นที่ที่ต้องมีความเฉพาะเจาะจงและสามารถเข้าถึงพลังงานได้ง่าย ส่วนแหล่งพลังงานชีวมวล มีข้อจำกัดในเรื่องค่าใช้จ่ายเข้ามาเกี่ยวข้อง เกี่ยวกับการเก็บเกี่ยว การขนส่งขยะชีวมวลก่อนที่จะนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า จากข้อจำกัดที่กล่าวมาจะส่งผลต่อการใช้ประโยชน์ในด้านการผลิตไฟฟ้าได้ไม่ต่อเนื่อง แต่ก็ยังมีแหล่งพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่ง ซึ่งก็คือ แหล่งพลังงานเชิงกล ที่เป็นแหล่งพลังงานที่ใกล้ตัว และสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานนี้ได้ตลอดเวลาซึ่งมีข้อได้เปรียบกว่าแหล่งพลังงานเหล่านั้น ซึ่งก็คือ แหล่งพลังงานเชิงกลนี้จะไม่มีวันหมดไป พลังงานนี้สามารถแปลงเป็นพลังงานรูปแบบอื่นได้ และเป็น

แหล่งพลังงานที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการวิ่งของรถ การออกแรงต่าง ๆ การเดินหรือแม้กระทั่งการขยับร่างกายของมนุษย์ ทำให้ในงานวิจัยนี้สนใจไปที่การเปลี่ยนแปลงแรงเชิงกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า

โดยปัจจุบันเทคโนโลยีที่สามารถเปลี่ยนพลังงานเชิงกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกันสองชนิด คือ อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric nanogenerator: PENG) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างจากวัสดุที่มีสมบัติพิเศษ คือ เมื่อได้รับแรงเชิงกลจะให้แรงดันไฟฟ้า โดยเกิดผ่านปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก และอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerator: TENG) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริก คือนำวัสดุ 2 ชนิดมาสัมผัสเสียดสีกันและเหนี่ยวนำทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตขึ้น โดยงานวิจัยนี้ให้ความสนใจไปที่อุปกรณ์ TENG ซึ่งสามารถเลือกใช้วัสดุได้หลากหลาย เนื่องจากวัสดุเกือบทุกชนิดสามารถเกิดปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริกได้ และเมื่อศึกษาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของอุปกรณ์ TENG และความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าจากภาพประกอบที่ 2.4 พบว่า ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ 85% และสามารถให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า 100 mW/cm^2 ซึ่งสูงกว่าอุปกรณ์เก็บเกี่ยวประเภทอื่น ๆ



ภาพประกอบที่ 2.4 กราฟเปรียบเทียบความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแต่ละชนิด [15]

ที่มา: Xiao-ShengZhang (2018) Nano Energy

2.3 อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerators: TENGs)

ในปี ค.ศ. 2012 ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการเก็บเกี่ยวพลังงานรูปแบบใหม่ โดยศาสตราจารย์ Zong Lin Wang และคณะ [2] ออกแบบอุปกรณ์ผลิตพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric nanogenerators หรือ TENGs) ซึ่งอุปกรณ์นี้สามารถเปลี่ยนพลังงานเชิงกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริก โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์นี้จะประกอบไปด้วยวัสดุที่มีความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนที่ต่างกันมาสัมผัสกัน เกิดการถ่ายโอนประจุระหว่างวัสดุทั้งสอง เหนี่ยวนำให้เกิดไฟฟ้าสถิตขึ้นบนพื้นผิววัสดุ และมีวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีติดอยู่ด้านหลังของวัสดุทั้งสองเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำจากการสัมผัสกันของวัสดุ สามารถเคลื่อนที่ผ่านขั้วไฟฟ้าไปยังโหลดภายนอกจะเกิดกระแสไฟฟ้าได้ โดยทั่วไปแล้ววัสดุทุกชนิดสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริกได้ ไม่ว่าจะเป็น พอลิเมอร์ เซรามิก หรือโลหะ โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของอุปกรณ์ TENG นั้นไม่ซับซ้อนมาก ซึ่งมีการนิยามโครงสร้างของอุปกรณ์ไว้ 4 รูปแบบ [16]

2.3.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ TENG ทั้ง 4 รูปแบบ

2.3.1.1 Vertical Contact-Separation Mode

การออกแบบอุปกรณ์โทรโบอิเล็กทริกโดยที่ใช้วัสดุสองชนิดที่แตกต่างกันหันหน้าเข้าหากัน และมีขั้วอิเล็กโทรดติดอยู่ที่ผิวด้านนอกของวัสดุทั้งสอง เมื่อให้แรงเชิงกลจะทำให้วัสดุทั้งสองเกิดการสัมผัสกันและวัสดุทั้งสองจะสร้างพื้นผิวที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งในขณะที่วัสดุทั้งสองสัมผัสกัน ประจุตรงข้ามบนพื้นผิวจะทำให้เป็นกลางซึ่งกันและกัน เมื่อคลายแรงเชิงกลออกวัสดุทั้งสองจะแยกออกจากกัน วัสดุพื้นผิวจะนำประจุที่ตัวเองสร้างติดตัวไปด้วย และไปเหนี่ยวนำขั้วอิเล็กโทรดของตนเองให้เกิดประจุตรงกันข้าม ด้วยเหตุนี้ กระแสจึงไหลในวงจรภายนอก เมื่อชั้นพื้นผิวสัมผัสกันอีกครั้ง ประจุที่ตรงกันข้ามจะทำให้กันและกันเป็นกลางอีกครั้ง ดังนั้นสนามไฟฟ้าสถิตจึงหายไปและกระแสจะไหลไปในทิศทางตรงกันข้ามจึงทำให้เกิดกระแสสลับ

2.3.1.2 Lateral Sliding Mode

โครงสร้างเริ่มต้นจะเหมือนกับ Vertical Contact-Separation Mode คือ วัสดุสองชนิดหันหน้าเข้าหากันและมีขั้วอิเล็กโทรดอยู่ที่ผิวด้านนอกของวัสดุทั้งสอง แต่ชั้นสัมผัสของวัสดุสองชนิดจะเลื่อนเข้าหากันแบบขนาน ซึ่งชั้นสัมผัสของวัสดุทั้งสองจะสร้างประจุที่ตรงกันข้ามขึ้นมา และเมื่อเลื่อนชั้นสัมผัสของวัสดุสองชนิดออกจากกัน วัสดุชั้นสัมผัสจะนำประจุที่ตัวเองสร้างติดตัวไปด้วย และไปเหนี่ยวนำขั้วอิเล็กโทรดของตนเองให้เกิดประจุตรงกันข้าม ซึ่งประจุบนอิเล็กโทรดจึงทำให้เกิดกระแสไหลในวงจรภายนอก โดยที่การเลื่อนเข้าและออกเป็นระยะของชั้นสัมผัสของวัสดุทั้งสองจะสร้างกระแสสลับในวงจรภายนอก ในที่นี้

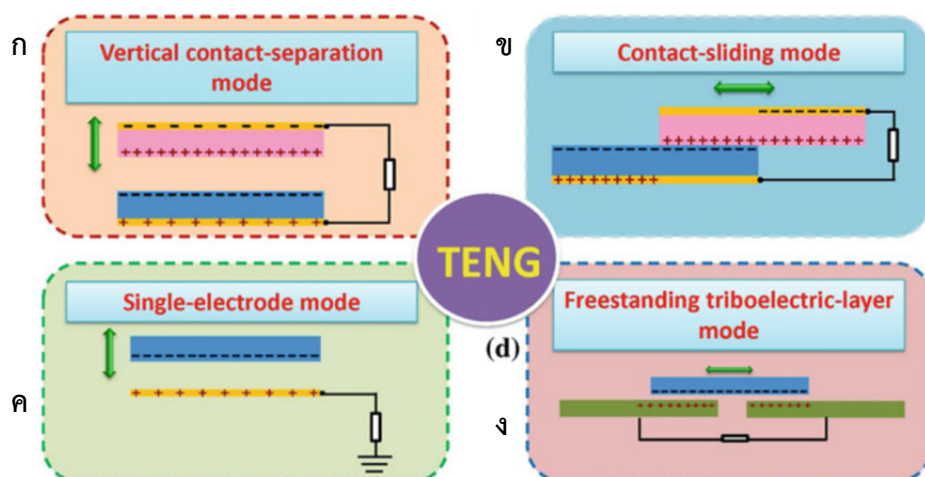
รูปแบบการเลื่อนของไทรโบอิเล็กทริกอาจเป็นการเคลื่อนที่แบบระนาบ, การหมุนแบบทรงกระบอก หรือ การหมุนแบบจาน

2.3.1.3 Single-Electrode Mode

ในรูปแบบนี้จะมีอิเล็กโทรดหนึ่งตัวและวัสดุชั้นสัมผัสหนึ่งชนิดซึ่งจะต่างจากรูปแบบอื่น เนื่องจากเป็นวัสดุชั้นสัมผัสชั้นใดชั้นหนึ่งเคลื่อนที่อย่างอิสระ ดังนั้นจึงไม่สามารถเชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดได้ ซึ่งการออกแบบอุปกรณ์ไทรโบอิเล็กทริกจะมีชั้นสัมผัสเดี่ยว และมีอิเล็กโทรดอยู่อีกด้านโดยอิเล็กโทรดนี้จะเชื่อมต่อกับสายดิน ซึ่งรูปแบบนี้จะเหมาะสำหรับการใช้งานในบางอย่าง เช่น เพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานกลจากการเดินของมนุษย์บนพื้น รถยนต์ที่กำลังเคลื่อนที่ การพิมพ์ด้วยนิ้ว หรือนิ้วเลื่อนผ่านหน้าจอสัมผัส ฯลฯ

2.3.1.4 Freestanding Triboelectric-Layer Mode

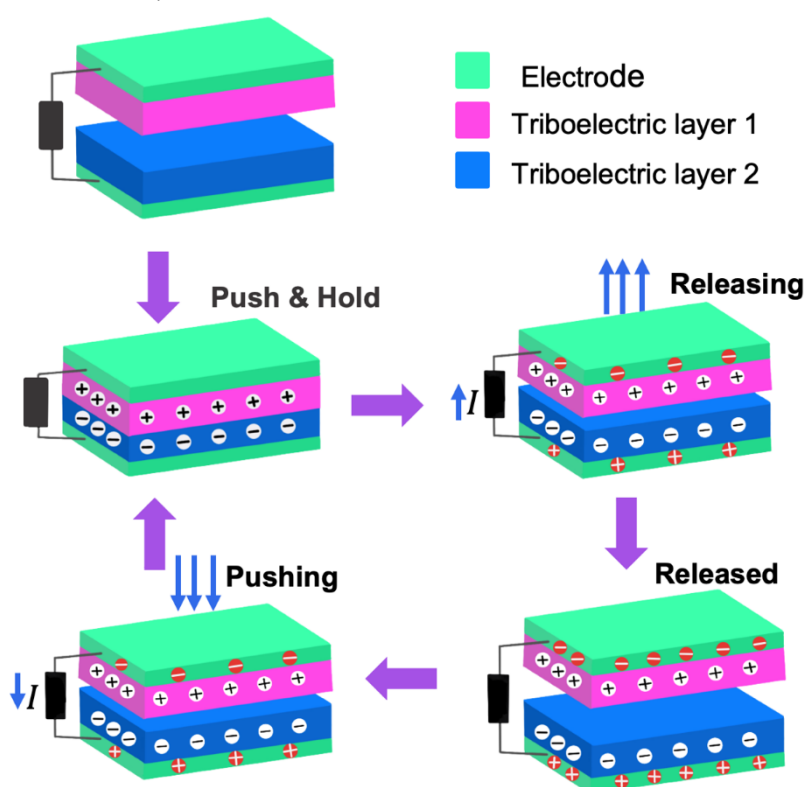
เป็นอุปกรณ์ไทรโบอิเล็กทริกที่ประกอบไปด้วยวัสดุชั้นสัมผัสหนึ่งชนิดอยู่ด้านบนและชั้นอิเล็กโทรดสมมาตรคู่หนึ่งอยู่ด้านล่าง ซึ่งได้รับการพัฒนาโดยอาศัยการเลื่อนไป-มาของชั้นสัมผัสเคลื่อนที่อิสระระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต โดยในรูปแบบนี้วัสดุชั้นสัมผัสไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับชั้นอิเล็กโทรดด้านล่างโดยตรง ซึ่งจะช่วยลดการสึกหรอของพื้นผิวลงและช่วยยืดอายุการใช้งานอุปกรณ์ไทรโบอิเล็กทริก



ภาพประกอบที่ 2.5 รูปแบบพื้นฐาน 4 รูปแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านาโนไทรโบอิเล็กทริก [16]
ที่มา: Zhong Lin Wang (2016) Green Energy and Technology

2.3.2 หลักการทำงานและโครงสร้างของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก

ประกอบไปด้วยวัสดุชั้นสัมผัสสองชนิดที่มีความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนที่ต่างกัน ติดขั้วอิเล็กโทรดไว้บนผิวด้านนอกของวัสดุทั้งสองและเชื่อมต่อกับโหลดภายนอก ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.6 เมื่อให้แรงเชิงกลทำให้วัสดุทั้งสองชนิดสัมผัสกัน จากที่วัสดุทั้งสองที่มีความเป็นกลางทางไฟฟ้าจะทำให้เกิดความไม่สมดุลของประจุเกิดขึ้นภายในวัสดุ เกิดการถ่ายโอนประจุระหว่างวัสดุทั้งสอง โดยวัสดุชั้นสัมผัสที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนจะถ่ายโอนอิเล็กตรอนให้อีกวัสดุหนึ่ง แล้วตัวมันเองจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวก ในขณะที่วัสดุชั้นสัมผัสอีกอันหนึ่งที่ได้รับอิเล็กตรอนมา จะเหนี่ยวนำทำให้ตัวมันเองเกิดประจุลบบนพื้นผิว โดยในขั้นตอนนี้ยังไม่เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น และเมื่อคลายแรงเชิงกลออก วัสดุทั้งสองชนิดจะแยกออกจากกัน ซึ่งวัสดุชั้นสัมผัสนั้นจะนำประจุที่ตัวเองสร้างขึ้นติดไปด้วย แล้วไปเหนี่ยวนำขั้วอิเล็กโทรดด้านของตัวเองให้เกิดเป็นประจุที่ตรงกันข้าม โดยที่วัสดุชั้นสัมผัสที่มีพื้นผิวเป็นประจุบวกจะ จะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุลบบนขั้วอิเล็กโทรด ในขณะที่วัสดุชั้นสัมผัสที่มีพื้นผิวเป็นประจุลบที่พื้นผิวจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งความแตกต่างของขั้วไฟฟ้านี้จะเป็นการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามไฟฟ้า และเมื่อต่อโหลดภายนอกกับขั้วอิเล็กโทรด จะเกิดกระแสไฟฟ้า โดยเมื่อเวลาผ่านไปกระแสก็จะหยุดไหลเมื่อประจุถึงจุดสมดุล แต่ถ้าเมื่อวัสดุสัมผัสกันอีกครั้งก็จะทำให้เกิดกระแสไหลขึ้นอีกและกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องถ้ามีการสัมผัสและแยกจากกันของวัสดุสลับไปเรื่อย ๆ

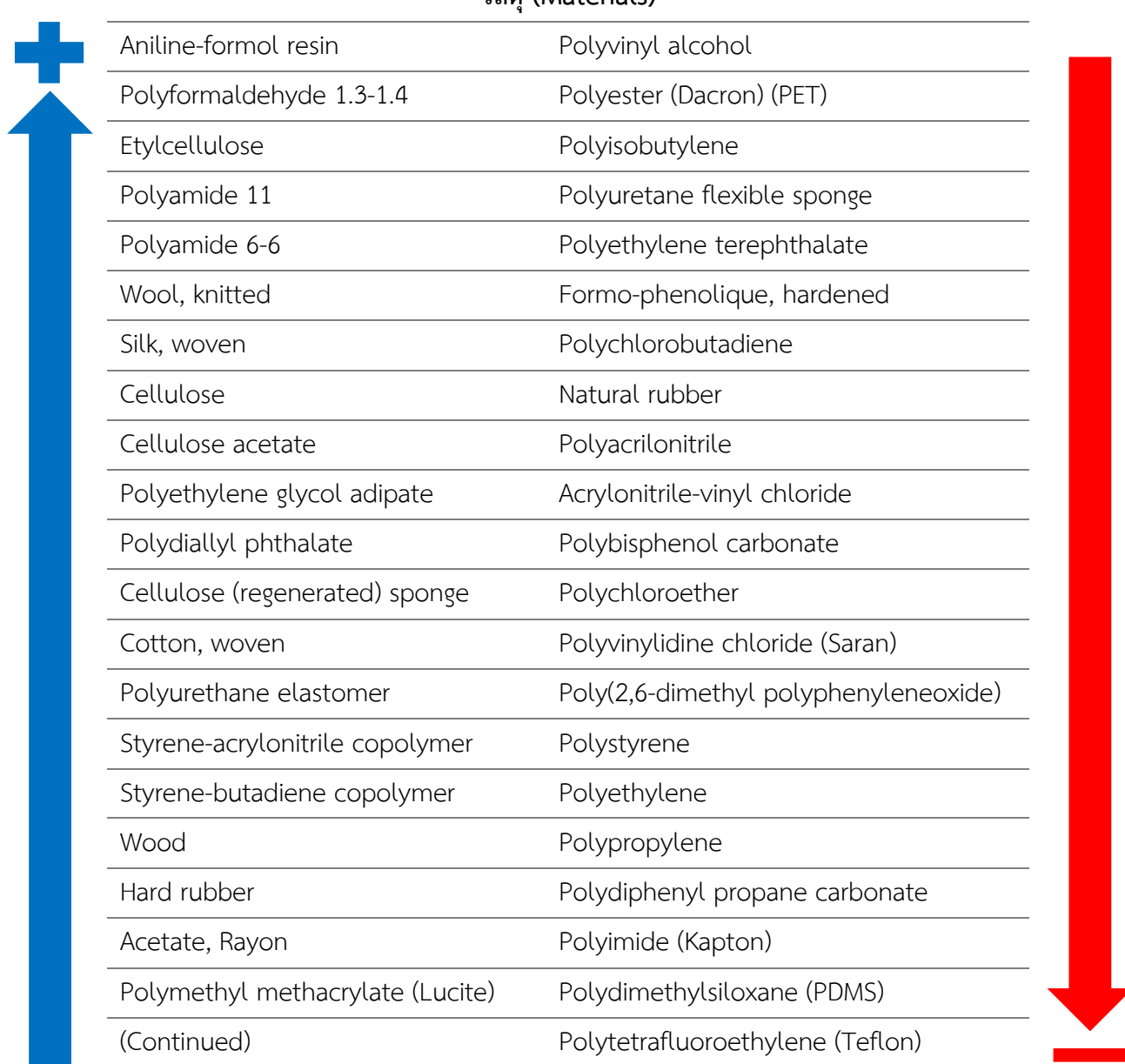


ภาพประกอบที่ 2.6 รูปโครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก

2.4 วัสดุสำหรับอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก

เป็นที่รู้กันดีว่าวัสดุเกือบทุกชนิดสามารถเกิดปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริก ไม่ว่าจะเป็น โลหะ พอลิ-เมอร์ เซรามิก ไปจนถึงวัสดุธรรมชาติต่าง ๆ ดังนั้นการเลือกวัสดุสำหรับสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กจึงค่อนข้างกว้าง โดยการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกให้มีประสิทธิภาพนั้นคือการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมโดยเลือกวัสดุที่มีความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนที่แตกต่างกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริกได้ ซึ่งประสิทธิภาพของการให้และรับอิเล็กตรอนของวัสดุจะเป็นไปตามตาราง Triboelectric series (ตารางที่ 2.1)

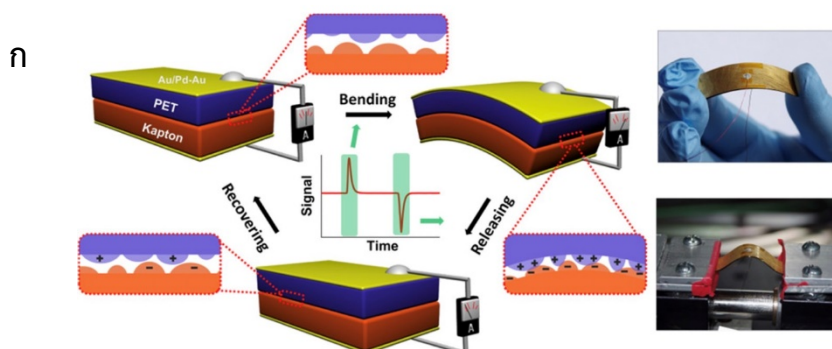
ตารางที่ 2.1 แสดงวัสดุโทรโบอิเล็กทริกที่มีความสามารถถ่ายเทประจุที่แตกต่างกัน ดัดแปลงจาก [16]



วัสดุ (Materials)	
Aniline-formol resin	Polyvinyl alcohol
Polyformaldehyde 1.3-1.4	Polyester (Dacron) (PET)
Etylcellulose	Polyisobutylene
Polyamide 11	Polyurethane flexible sponge
Polyamide 6-6	Polyethylene terephthalate
Wool, knitted	Formo-phenolique, hardened
Silk, woven	Polychlorobutadiene
Cellulose	Natural rubber
Cellulose acetate	Polyacrilonitrile
Polyethylene glycol adipate	Acrylonitrile-vinyl chloride
Polydiallyl phthalate	Polybisphenol carbonate
Cellulose (regenerated) sponge	Polychloroether
Cotton, woven	Polyvinylidene chloride (Saran)
Polyurethane elastomer	Poly(2,6-dimethyl polyphenyleneoxide)
Styrene-acrylonitrile copolymer	Polystyrene
Styrene-butadiene copolymer	Polyethylene
Wood	Polypropylene
Hard rubber	Polydiphenyl propane carbonate
Acetate, Rayon	Polyimide (Kapton)
Polymethyl methacrylate (Lucite)	Polydimethylsiloxane (PDMS)
(Continued)	Polytetrafluoroethylene (Teflon)

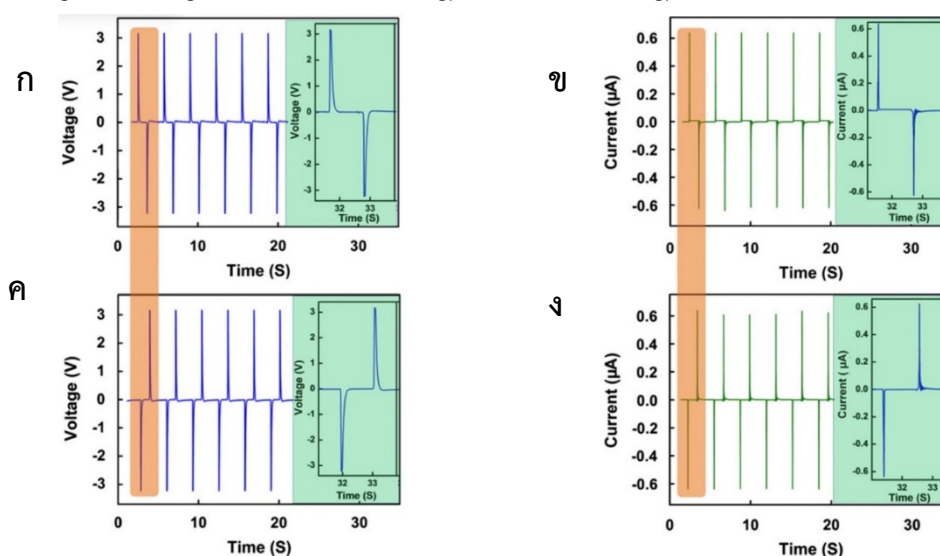
ที่มา: Zhong Lin Wang (2019) Green Energy and Technology

Fan และคณะ [17] สร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.7 โดยใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์สองแผ่นประกบกัน ได้แก่ ฟิล์มแคปคอน (Kapton) ที่มีความหนา $125\ \mu\text{m}$ แล้ววางทับลงบนพื้นผิวของอีกพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง คือ พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate; PET) ที่มีความหนา $220\ \mu\text{m}$ จากนั้นพื้นผิวทั้งด้านบนและด้านล่างของโครงสร้างถูกปกคลุมด้วยชั้นฟิล์มบางของทองอัลลอยด์ (Au alloy) มีความหนา $100\ \text{nm}$ เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า โดยอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกนี้ ให้ค่าความต่างศักย์ขาออก (output voltage) เท่ากับ $3.3\ \text{V}$ ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) เท่ากับ $0.6\ \mu\text{A}$ และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (output power) เท่ากับ $10.4\ \text{Wcm}^{-3}$ ซึ่งแสดงในภาพประกอบที่ 2.8



ภาพประกอบที่ 2.7 ก. รูปโครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกจากพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่น [17]

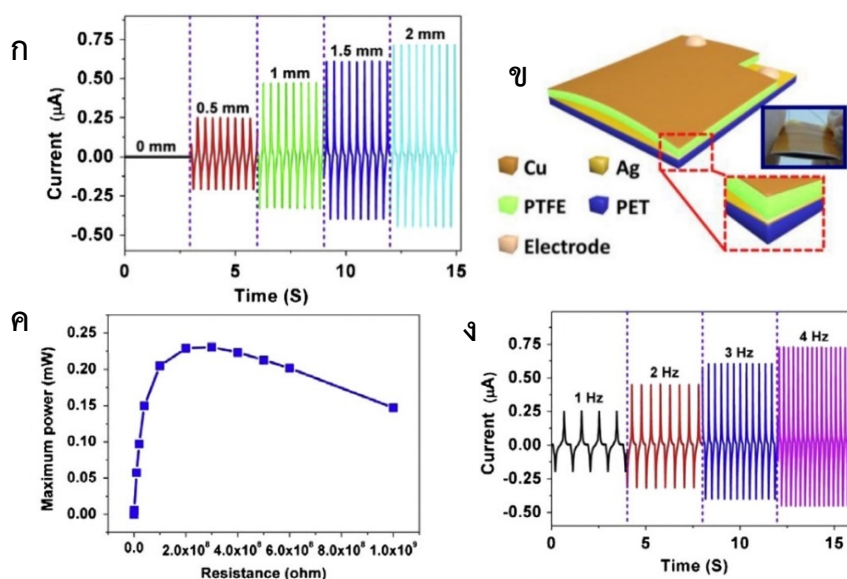
ที่มา: Zhong Lin Wang (2016) Green Energy and Technology



ภาพประกอบที่ 2.8 ค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก ก. ค่าความต่างศักย์ขาออก ข. ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก เมื่อต่อวงจรแบบฟอว์เวิร์ด ค. ค่าความต่างศักย์ขาออก ง. ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก เมื่อต่อวงจรแบบบริวีร์ส [17]

ที่มา: Feng-Ru Fana (2012) Nano energy

Zhong และคณะ [18] ออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.9 โดยใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene; PTFE) ที่มีความหนา 0.20 mm และถูกปกคลุมด้วยชั้นฟิล์มบางของทองแดง เพื่อเป็นขั้วอิเล็กโทรดด้านบน จากนั้นประกบกับพอลิเอทิลีน ไกลคอล เทเรฟทาเรต (Polyethylene glycol terephthalate; PET) ที่มีความหนา 0.22 mm ที่ปกคลุมด้วยชั้นฟิล์มบางของเงิน เพื่อเป็นขั้วอิเล็กโทรดด้านล่าง โดยแสดงในรูป 2.9 ก. และเมื่อศึกษาผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก พบว่ามีค่าความต่างศักย์ขาออกสูงสุด (output voltage) เท่ากับ 400 V ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) เท่ากับ 6 mA และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (output power) เท่ากับ 4.125 mW ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.9 ข.-ง.

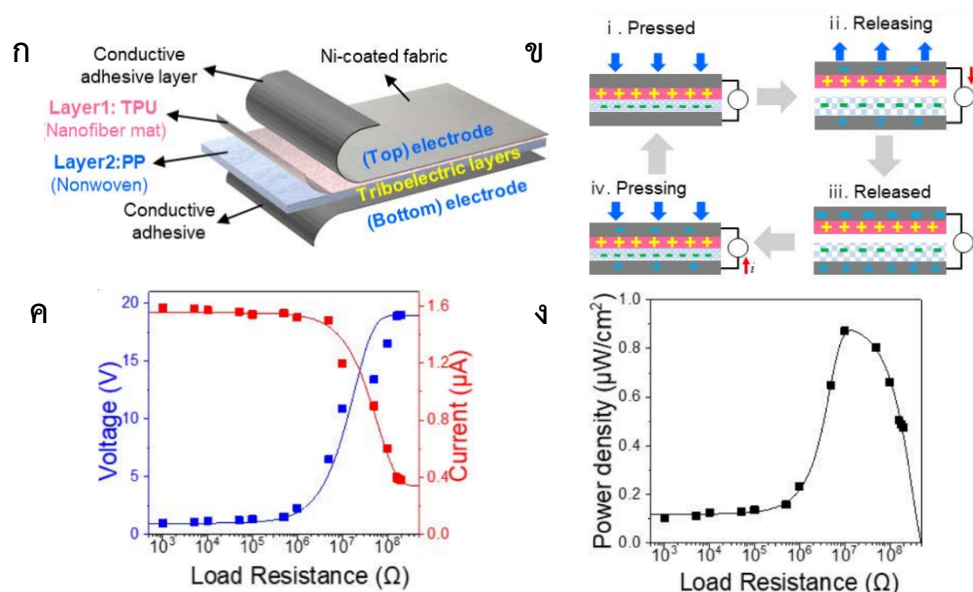


ภาพประกอบที่ 2.9 ก. ภาพโครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก ข. กราฟค่ากระแสไฟฟ้าขาออกกับเวลา ที่ 3 Hz ค.กราฟค่ากระแสไฟฟ้าขาออกกับเวลาที่ความถี่ต่าง ๆ ง. ค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุดและค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันกับความต้านทานที่ความถี่ 3 Hz [18]

ที่มา: JunwenZhong (2012) nano energy

งานวิจัยของ Oh และคณะ [19] ได้สร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็ก N-TENG ซึ่งประกอบจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (thermoplastic polyurethane; TPU) และ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP) เป็นชั้นสัมผัส โดยขึ้นรูปวัสดุพอลิเมอร์ทั้งสองเป็นเส้นใยจากนั้นขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยกระบวนการแบบไม่ถักไม่ทอ ซึ่ง TPU จะทำหน้าที่เป็นวัสดุตัวให้อิเล็กตรอน PP ทำหน้าที่เป็นวัสดุตัวรับอิเล็กตรอน และมีสิ่งเคลือบด้วยนิกเกิล (nickel) ทำหน้าที่เป็นขั้วอิเล็กโทรด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.10 ก.-ข. เมื่อศึกษาค่าการส่งออกทางไฟฟ้าพบว่า มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก (output voltage) ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current)

สูงสุดเท่ากับ 110.18 ± 6.06 V และ 7.28 ± 0.67 μ A ตามลำดับ และมีค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (output power) เท่ากับ 0.9 μ Wcm⁻² ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.10 ค.- ง.



ภาพประกอบที่ 2.10 ภาพ ก. และ ข. โครงสร้างและหลักการทำงานของ TPU/PP nonwoven fiber-based TENG ภาพ ค. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก (output voltage) และ ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) ภาพ ง. ค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (output power) [19]

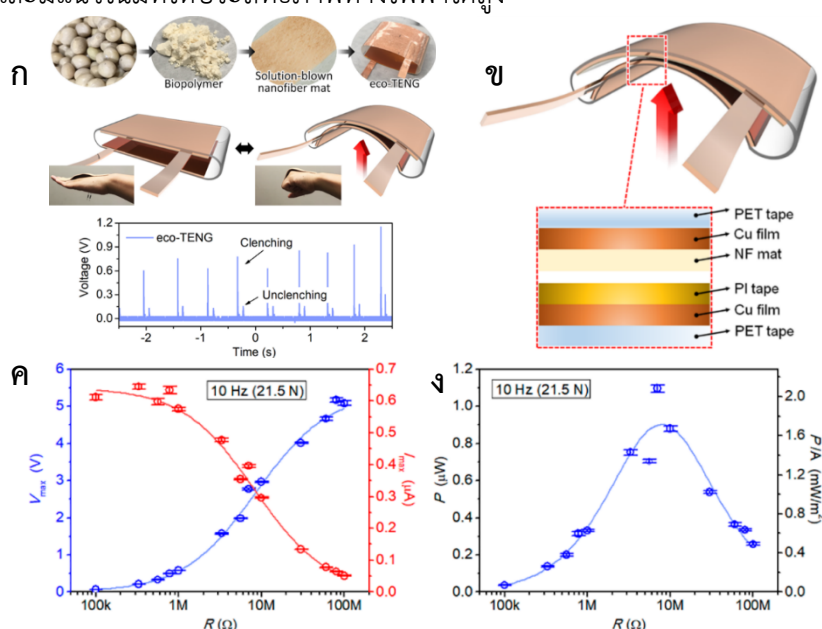
ที่มา: Hyun Ju Oh (2020) Hyun Ju Oh

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น สังเกตได้ว่า วัสดุที่นำมาผลิตเป็นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก เป็นวัสดุพอลิเมอร์สังเคราะห์ส่วนใหญ่ ไม่ว่าจะเป็น แคปตอน (Kapton) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate; PET) พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate; PET) หรือพอลิตetraฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene; PTFE) เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (thermoplastic polyurethane; TPU) พอลิโพรพอลีน (Polypropylene; PP) จะเห็นได้ว่าค่าการส่งออกทางไฟฟ้ามีค่าสูง แต่ในขณะเดียวกันวัสดุสังเคราะห์เป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยากและอาจก่อให้เกิดปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดต่อกลุ่มการใช้งานทางการแพทย์และอุปกรณ์ที่มีความจำเป็นในการใช้งานที่มีความใกล้ชิดกับร่างกายมนุษย์ ทำให้การมองหาวัสดุทางเลือกที่ยังคงมีความยืดหยุ่นแต่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เข้ามามีบทบาทแทนวัสดุสังเคราะห์เป็นสิ่งที่ท้าทายต่อการวิจัยและกำลังได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจในวัสดุทางชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถเข้ากันทางชีวภาพกับมนุษย์ได้ดี

2.5 วัสดุทางธรรมชาติ

ในปัจจุบันผู้คนสนใจในการค้นคว้าและพัฒนาวัสดุธรรมชาติมาทดแทนพลาสติกสังเคราะห์ วัสดุทางธรรมชาติจึงได้รับความสนใจในการมาเป็นวัสดุทางเลือก โดยวัสดุทางธรรมชาติ เป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ และมีความสามารถที่เข้ากันทางชีวภาพ (biocompatibility) สัมผัสหรือใกล้ชิดกับร่างกายของมนุษย์ได้โดยไม่ก่อให้เกิดอันตราย พบได้ในธรรมชาติหรือจากการสังเคราะห์ขึ้น ซึ่งวัสดุธรรมชาตินั้นก็สามารถใช้ประโยชน์ในด้านการแพทย์ ใช้ทดแทนเนื้อเยื่อหรืออวัยวะของมนุษย์ และในปัจจุบันวัสดุทางธรรมชาติสามารถนำมาพัฒนาและใช้ประโยชน์ในด้านอิเล็กทรอนิกส์

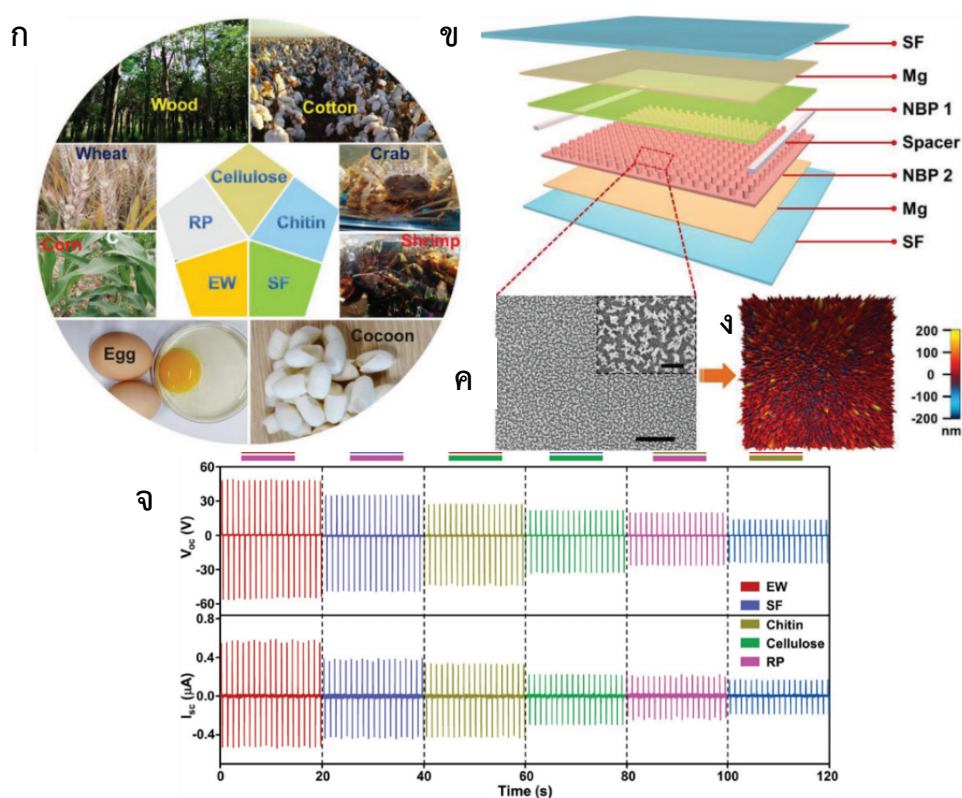
ในงานวิจัยของ An และคณะ [5] ได้พัฒนาวัสดุทางธรรมชาติสำหรับอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ eco-TENG ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.11 ก.-ข. ซึ่งโครงสร้างของ eco-TENG ประกอบด้วยพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ผลิตขึ้นจากวัสดุทางธรรมชาติ โปรตีน และลิกนิน จากถั่วเหลือง ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ solution blow spinning ให้ได้เป็นแผ่นเส้นใยระดับนาโน โดยมีทองแดงเป็นขั้วอิเล็กโทรด ผลการศึกษาทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ eco-TENG พบว่ามีค่าความต่างศักย์ขาออกสูงสุด (output voltage) ประมาณ 5 V ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) เท่ากับ 0.6 μA และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (output power) ประมาณ 0.9 μW ซึ่งแสดงในภาพประกอบที่ 2.11 ค.-ง. นอกจากนี้พอลิเมอร์ชาตินี้ยังมีความยืดหยุ่น โดยยืดหยุ่นได้ถึง 20-40% จากรูปเดิม ดังนั้นพอลิเมอร์จากวัสดุทางธรรมชาติจึงสามารถใช้ผลิตอุปกรณ์ TENG ที่ต้องการความยืดหยุ่น และมีแนวโน้มที่ให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าได้สูง



ภาพประกอบที่ 2.11 ก.-ข. ภาพโครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ eco-TENG จากวัสดุทางชีวภาพ ถั่วเหลือง ค. ค่าแรงดันไฟขาออกสูงสุดและค่ากระแสไฟสูงสุด ง. ค่ากำลังไฟฟ้ากับความต้านทานโหลดภายนอก [5])

ที่มา: Seongpil An (2018) ACS Applied Materials & Interfaces

Jiang และคณะ [20] ได้ออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกจากวัสดุทางธรรมชาติ BN-TENG โครงสร้างของ BN-TENG ประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ธรรมชาติอย่างเซลลูโลส ไคติน เส้นไหมไฟโบรอิน ข้าว และไข่ขาว เป็นชั้นสัมผัส ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.12 ก.-ข. โดยใช้แมกนีเซียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งจากการศึกษาผลทางไฟฟ้าพบว่า ชั้นสัมผัสระหว่างอุปกรณ์ BN-TENG ที่ใช้ไข่ขาวและข้าว มีค่าความต่างศักย์ขาออกสูงสุด (output voltage) เท่ากับ 55 V ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) เท่ากับ 0.6 μA และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (output power) เท่ากับ 21.6 mW ซึ่งแสดงในภาพประกอบที่ 2.12 จ.

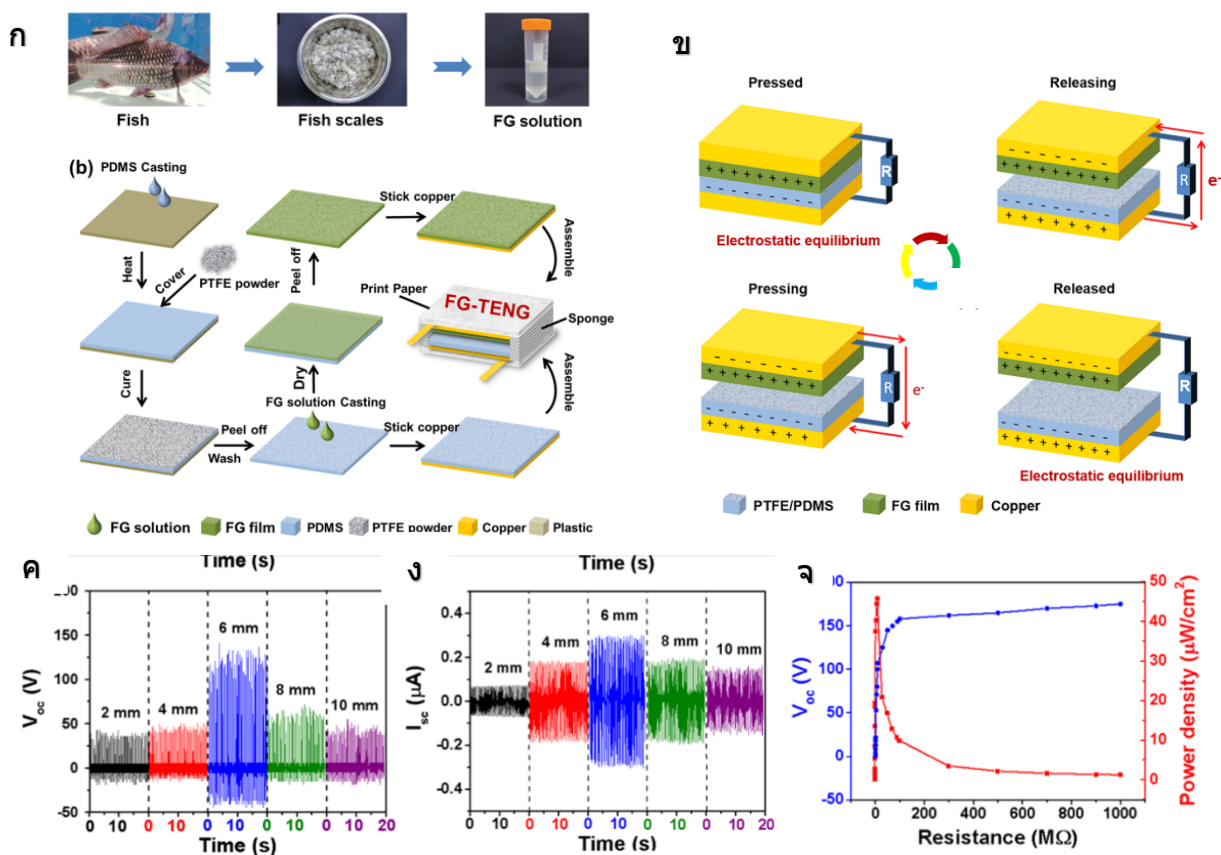


ภาพประกอบที่ 2.12 ก. วัสดุธรรมชาติ ข. โครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก ค. และ ง. ภาพถ่ายสัณฐานวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และภาพกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของพื้นผิวของฟิล์มวัสดุทางธรรมชาติ จ. ภาพรวมแสดงค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของ BN-TENG ที่ใช้ชั้นสัมผัสที่แตกต่างกัน ด้านบน: แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุด ด้านล่าง: แสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุด [20]

ที่มา: Wen Jiang (2018) Advanced Materials

จากงานวิจัยของ Han และคณะ [21] ได้พัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก FG-TENG จากเจลลาตินจากเกล็ดปลา ที่มีความยืดหยุ่น ต้นทุนต่ำ สามารถย่อยสลายได้และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นวัสดุชั้นสัมผัสที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุตัวจ่ายอิเล็กตรอน ประกบกับวัสดุอีกชนิดที่จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนคือ PTFE/PDMS คอมโพสิต และมีเทปทองแดงเป็นขั้วอิเล็กโทรด ดัง

แสดงในภาพประกอบที่ 2.13 และจากการศึกษาค่าส่งออกจากไฟฟ้า พบว่า มีค่าความต่างศักย์ขาออกสูงสุด (output voltage) เท่ากับ 130 V ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) เท่ากับ $0.35 \mu\text{A}$ และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (output power) เท่ากับ $45.8 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.13



ภาพประกอบที่ 2.13 ก. การสังเคราะห์เจลตินจากเกล็ดปลา ข. กระบวนการสร้างอุปกรณ์ FG-TENG ค. หลักการทำงานของอุปกรณ์ FG-TENG ง. มีค่าความต่างศักย์ขาออกสูงสุด (output voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุด (output current) จ. ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า [21]

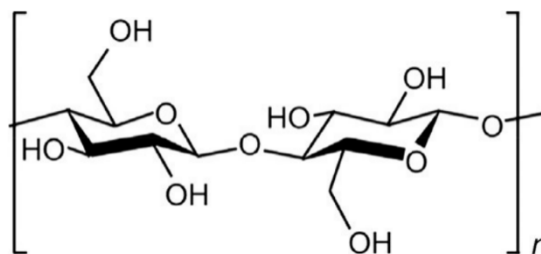
ที่มา: Yaojie Han (2020) ACS Applied Materials & Interfaces

ในหลายงานวิจัยได้มีการนำพอลิเมอร์จากวัสดุทางธรรมชาติอื่น ๆ เช่น เส้นผม [22] ใบไม้ [23] ไหมไฟโบรอิน [6] โคโตซาน [4] เซลลูโลส [7] มาพัฒนาเป็นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งพอลิเมอร์จากวัสดุธรรมชาติมีต้นทุนต่ำ มีความสามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพ มีความยืดหยุ่นไม่แพ้พอลิเมอร์สังเคราะห์ และมีอยู่อย่างมากมาย นอกจากนี้ จากงานวิจัยของ Zheng และคณะ [24] ได้นำพอลิเมอร์จากวัสดุทางธรรมชาติมาสร้างอุปกรณ์ BD-TENG สำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานชีวกลศาสตร์ในร่างกาย ซึ่งสามารถที่มีความสามารถย่อยสลายทางชีวภาพและจะถูกดูดซึมเข้าร่างกายได้เมื่อสิ้นสุดวัฏจักรการใช้งาน โดยไม่มีผลกระทบในระยะยาว แสดงให้เห็นว่าพอลิ

เมอร์จากวัสดุทางธรรมชาติมีประสิทธิภาพในการนำไปผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกที่สามารถใช้งานใกล้ชิดกับมนุษย์ สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ปลูกถ่ายในมนุษย์ได้ ในงานวิจัยนี้ได้จึงได้ให้ความสนใจในพอลิเมอร์จากวัสดุทางธรรมชาติด้วยกันสองชนิด คือ แบคทีเรียเซลลูโลส และไคโตซาน มาผลิตอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก เนื่องจากเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ง่ายและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีต้นทุนการผลิตต่ำ และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุทางธรรมชาติ

2.5.1 แบคทีเรียเซลลูโลส (Bacteria Cellulose: BC)

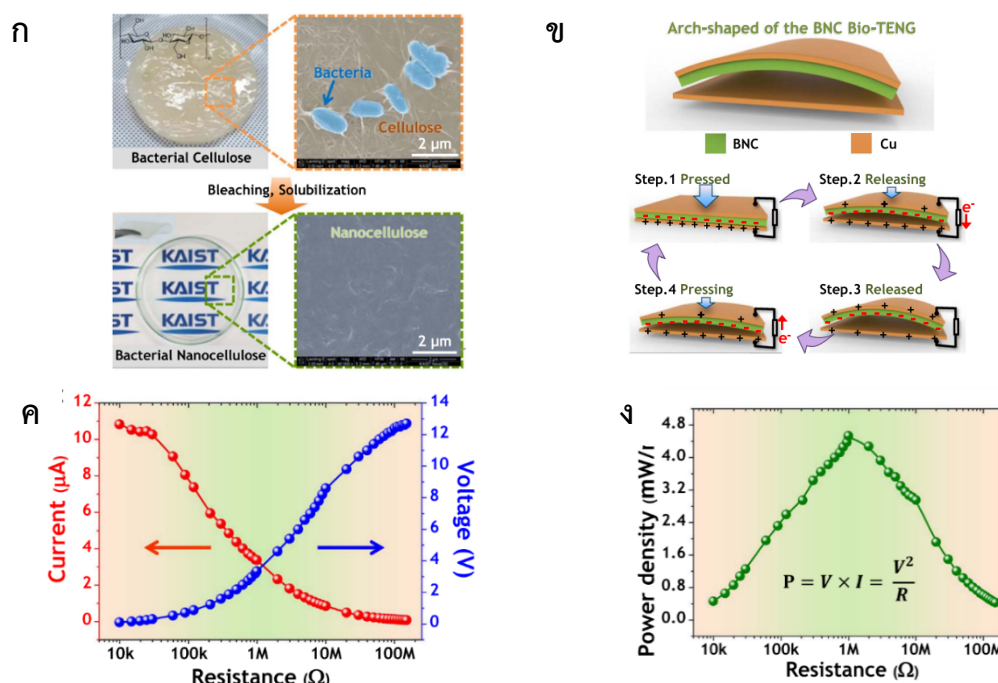
แบคทีเรียเซลลูโลส เป็นเส้นใยธรรมชาติ มีขนาดระดับนาโนโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20-100 nm [25] ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เซลลูโลสที่ได้จากการหมักของแบคทีเรีย อย่าง *Acetobacter xylinum* [26] *Gluconacetobacter xylinus* โดยมีน้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งอาหาร ซึ่งมีชื่อเรียกทั่วไปว่า วุ้นมะพร้าว (NATA de coco) มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.14 เป็นสารชีวโมเลกุลประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีหน่วยย่อยเป็นน้ำตาลกลูโคส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดบีตา (1 ~ 4) โครงสร้างโมเลกุลของแบคทีเรียเซลลูโลสประกอบไปด้วยโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ (homopolysaccharide) นอกจากนี้ยังมีสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ เช่น สมบัติทางกลที่ยืดหยุ่น มีความยืดหยุ่นสูง มีความเป็นผลึกสูง มีค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และค่าความต้านทานแรงดึงที่สูง การขยายตัวทางความร้อนต่ำ [27] และยังไม่มีความเป็นพิษ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable) และไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม จึงทำให้มีการนำแบคทีเรียเซลลูโลสมาประยุกต์ใช้อย่างหลากหลาย และเป็นที่ทราบกันดีว่าสารประกอบอินทรีย์มักใช้เป็นตัวให้อิเล็กตรอนเนื่องจากการสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่าย [28] และจากการที่แบคทีเรียเซลลูโลสประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ซึ่งในทางไทรโบอิเล็กทริก ถือเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี ทำให้แบคทีเรียเซลลูโลสเป็นวัสดุที่แสดงแนวโน้มความเป็นบวก



ภาพประกอบที่ 2.14 โครงสร้างทางเคมีของแบคทีเรียเซลลูโลส [29]

ที่มา: Heekyung Park (2020) Biomedical Sciences

Kim และคณะ [30] ได้นำแบคทีเรียเซลลูโลสมาประยุกต์ในการสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก โดยใช้ฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสที่มีความโปร่งใสและมีความยืดหยุ่นสูงเป็นชั้นสัมผัสและมีแผ่นพอลิโพรพิลีนเป็นขั้วอิเล็กโทรด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.15 ก.-ข. ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่าแบคทีเรียเซลลูโลสนั้นแสดงประจุเป็นลบ และจากการศึกษาผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์นี้ พบว่า มีค่าความต่างศักย์ขาออกสูงสุด (output voltage) ประมาณ 13 V ค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุด (output current) ประมาณ 11 μA และมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเท่ากับ $4.8 \mu\text{Wcm}^{-2}$ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.15 ค.-ง. เมื่อเปรียบเทียบผลทางไฟฟ้ากับพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั่วไปพบว่ายังมีช่องว่างต้องให้ปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อให้ได้อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกประสิทธิภาพสูง ที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ย่อยสลายทางชีวภาพ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

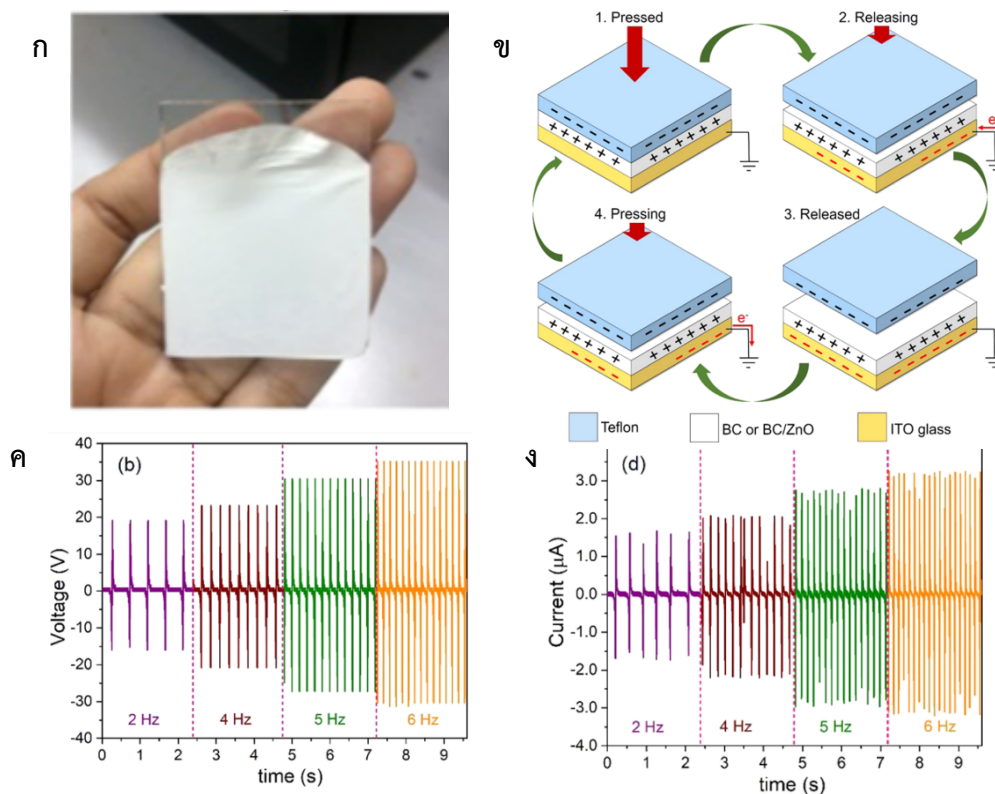


ภาพประกอบที่ 2.15 ก. แบคทีเรียเซลลูโลส ข. โครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก ค. มีค่าความต่างศักย์ขาออกสูงสุด (output voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุด (output current) ง. ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า [30]

ที่มา: Hyun-Jun Kim (2017) Nano energy

ในงานวิจัยของ Jakmuangpak และคณะ [31] สร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก bio-TENGs ซึ่งใช้แบคทีเรียเซลลูโลสทำเป็นวัสดุคอมโพสิต กับ ZnO เพื่อเป็นชั้นสัมผัส และมี ITO glass เป็นขั้วอิเล็กโทรด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.16 ก.-ข. เมื่อศึกษาผลทางไฟฟ้าพบว่ามีความต่างศักย์ขาออก เท่ากับ 57.6 V ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก เท่ากับ 5.78 μA และมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า เท่ากับ $42 \mu\text{Wcm}^{-2}$ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.16 ค.-ง. ซึ่งเมื่อ

พิจารณาผลทางไฟฟ้าพบว่า การเพิ่มอนุภาคนาโน ZnO ในฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส สามารถปรับปรุงทั้งผลทางไฟฟ้าได้ โดยค่าทางไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคนาโน ZnO ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ธรรมชาติจึงสามารถทำได้โดยการทำให้เป็นวัสดุคอมโพสิตกับวัสดุอื่น ๆ



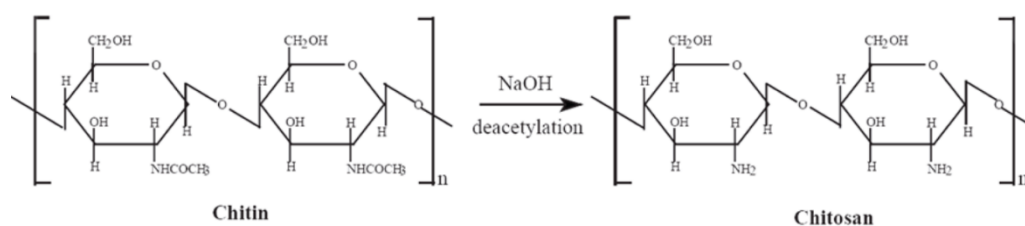
ภาพประกอบที่ 2.16 ก. แบคทีเรียเซลลูโลส ข. โครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก ค. ค่าความต่างศักย์ขาออกสูงสุด (output voltage) ง. ค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุด (output current) [31]

ที่มา: Supanan Jakmuangpak (2020) ACS Applied Electronic Materials

2.5.2 ไคโตซาน (Chitosan: CS)

ไคโตซาน เป็นอนุพันธ์ของไคติน เป็นสารสกัดที่ได้จากธรรมชาติซึ่งสามารถสกัดได้จากเปลือกกุ้ง กระจกปู แกนปลาหมึก เป็นต้น และเกิดจากการทำปฏิกิริยาดีอะซิไทเลชัน (Deacetylation) ของไคตินด้วยสารละลายด่างเข้มข้น [32] แสดงในภาพประกอบที่ 2.17 จึงทำให้โครงสร้างของไคตินบางส่วนเปลี่ยนแปลงไปโดยจะเปลี่ยนจากหมู่อะซีตามิโน ($-\text{NHCOCH}_3$) ไปเป็นหมู่เอมิโน ($-\text{NH}_2$) โดยที่หมู่เอมิโนแสดงสมบัติในการละลายได้ในกรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก กรดโพวาอิก กรดแลคติก เป็นต้น สามารถจับกับไอออนของโลหะได้ดี มีสูตรโครงสร้างแสดงในภาพประกอบที่ 2.18 ในโครงสร้างของไคโตซานจะประกอบด้วยหมู่เอมิโน ($-\text{NH}_2$) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นให้เปลี่ยนเป็นสารอนุพันธ์อื่น ๆ ได้อย่างหลากหลาย ทำให้ในปัจจุบันได้มีการนำไค

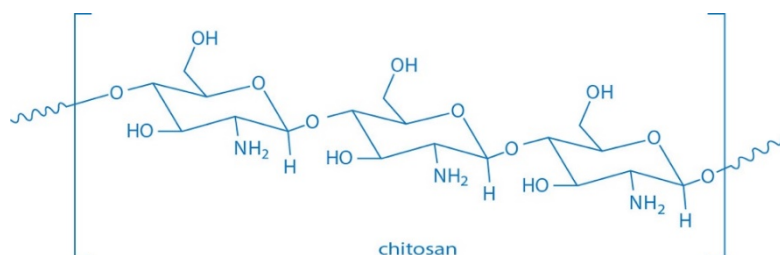
ไคโตซานไปประยุกต์ใช้งานอย่างมากมาย เนื่องจากสมบัติพิเศษหลายประการของไคโตซาน ซึ่งได้แก่ ไม่มีความเป็นพิษ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) และไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม โดยที่ไคโตซาน (chitosan) นั้นเป็นสารธรรมชาติที่รู้จักกันมานานกว่า 100 ปีแล้ว แต่ไม่ได้มีการศึกษาเพื่อนำมาใช้ จนเมื่อปี ค.ศ.1975 นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกได้มีการศึกษาคุณสมบัติของสารสกัดนี้ และจากผลการศึกษานักวิทยาศาสตร์ก็ได้ผลออกมาตรงกัน คือ ไคโตซานเป็นสารที่มีประจุเป็นบวก สามารถดักจับไขมันต่าง ๆ ที่เป็นประจุลบได้ [33] ทำให้ไคโตซานนั้นเป็นวัสดุที่เหมาะสมถ้าจะนำมาประกอบเป็นอุปกรณ์โทรโบอิเล็กทรอนิกส์



ภาพประกอบที่ 2.17 ปฏิกิริยาดิอะซีทิเลชันของไคติน [32]

ที่มา:

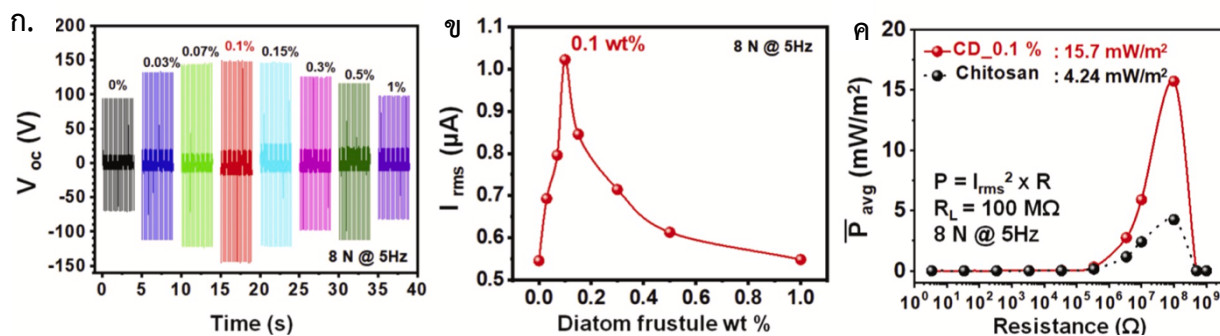
<http://www.lib.kps.ku.ac.th/SpecialProject/Science/2545/Bs/PattananWw/chapter1.pdf>



ภาพประกอบที่ 2.18 โครงสร้างไคโตซาน [33]

ที่มา: <https://www.disthai.com/16488248/ไคโตซาน>

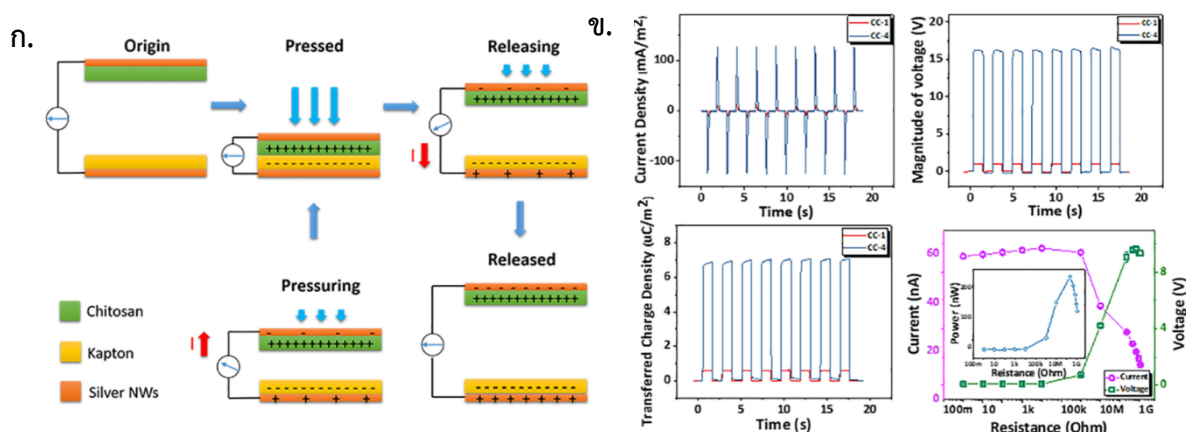
ในงานวิจัยของ Jong-Nam Kim และคณะ [34] ได้สร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ใช้ไคโตซาน (chitosan) ทำเป็นวัสดุเชิงประกอบกับ ไดอะตอม (diatoms) เพื่อเป็นชั้นสัมผัส โดย ไดอะตอม คือ สาหร่ายที่มีเซลล์เดียว ได้เป็น chitosan-diatom (DC) composite film เมื่อศึกษาผลทางไฟฟ้าพบว่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเกิดขึ้นเมื่อ DC 0.1% จะมีค่าความต่างศักย์ขาออก (output voltage) เท่ากับ 150 V ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) เท่ากับ 1.02 μA และค่าความหนาแน่นของพลังงานสูงสุด (output power density) เท่ากับ 15.7 mW/m^2 แสดงในภาพประกอบที่ 2.19 ก.-ค.



ภาพประกอบที่ 2.19 ก.ค่าความต่างศักย์ขาออก ข.ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก ค.ค่าความหนาแน่นของพลังงานสูงสุด [34]

ที่มา: Jong-NamKim (2020) nano energy

งานวิจัยของ Chenxiang Ma และคณะ [35] ได้ออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยการเตรียมฟิล์มไคโตซาน โดยการละลายไคโตซานในกรดซิตริก และปรับปรุงสมบัติโดยการเติม ซิลเวอร์นาโน และ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate; PET) จะได้ฟิล์มที่มีความหนาเท่ากับ $125 \pm 25 \mu\text{m}$ โดยจะใช้วัสดุชั้นสัมผัสชนิดแรก คือ ไคโตซาน และ วัสดุชั้นสัมผัสชนิดที่สอง คือ Kapton ซึ่งชั้นพื้นผิวของทั้งด้านบนและด้านล่าง ถูกคลุมด้วยชั้นของ Silver NWs เป็นขั้วอิเล็กทรอนิกส์ แสดงในภาพประกอบที่ 2.20 ก. จากการศึกษาผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ พบว่ามีค่าความต่างศักย์ส่งออกวงจรเปิดของไคโตซานและกรดซิตริก เท่ากับ 16.2 V ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของไคโตซานและกรดซิตริก เท่ากับ $125 \mu\text{A/m}^2$ และค่าความหนาแน่นของประจุถ่ายโอนของไคโตซานและกรดซิตริก เท่ากับ $6.8 \mu\text{C/m}^2$ แสดงในภาพประกอบที่ 2.20 ข.



ภาพประกอบที่ 2.20 ก. โครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก

ทริก ข. ค่าความต่างศักย์ส่งออกวงจรเปิด ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นของประจุถ่ายโอนของไคโตซานและกรดซิตริก [35]

ที่มา: Chenxiang Ma (2019) InfoMat

จากการศึกษาหลายงานวิจัยจึงทำให้พบว่าวัสดุทางธรรมชาติทั้งสองชนิด ได้แก่ แบคทีเรียเซลลูโลส และไคโตซานนั้นเป็นวัสดุที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ โดยที่จะนำมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) ขึ้นรูปเป็นฟิล์ม จึงมีความสนใจที่จะมุ่งเน้นในการนำวัสดุทางธรรมชาติทั้งสองชนิดนี้มาพัฒนาเป็นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก และเป็นที่รู้กันว่าการส่งออกทางไฟฟ้าของวัสดุทางธรรมชาติมีค่าการส่งออกไม่สูงมาก จึงจำเป็นต้องหาวิธีที่จะพัฒนาให้วัสดุทางธรรมชาติมีประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น โดยการเพิ่มความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริก

ทริก

2.6 แนวทางการพัฒนา TENGs

เนื่องจากวัสดุธรรมชาตินี้มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ไม่โดดเด่น ทำให้การผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จาก พอลิเมอร์ทางธรรมชาติเพียงอย่างเดียวให้มีประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าที่สูงนั้นเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงวัสดุให้มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้โดยการทำเป็นวัสดุคอมโพสิต (Composite material) ด้วยการเติมเฟสกระจาย ซึ่งวัสดุตัวเติมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ conductor และ insulator ในการเติม conductor หรือ conductive material ลงไปก็เพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายโอนประจุ และที่นิยมกันมาก คือ การใส่ insulator ได้แก่ dielectric, piezoelectric และ ferroelectric ลงไปเพื่อเพิ่มความสามารถในการสร้างประจุหรือเพิ่มความหนาแน่นประจุ ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจการเพิ่มความหนาแน่นประจุไฟฟ้าลงบนวัสดุ

2.6.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite material)

วัสดุคอมโพสิต (composite materials) เป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นด้วยวัสดุอย่างน้อยสองชนิดขึ้นไป โดยที่องค์ประกอบของวัสดุไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน และมีขอบเขตระหว่างเฟส วัสดุแต่ละชนิดที่นำมาทำวัสดุเชิงประกอบจะมีสมบัติกายภาพและสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยจะนำสมบัติเด่นของแต่ละวัสดุมาสร้างเป็นวัสดุใหม่ที่มีสมบัติที่ดีขึ้นและตรงตามความต้องการใช้งาน ซึ่งการผสมกันนี้จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ เมทริกซ์ (Matrix) เป็นวัสดุที่มีลักษณะต่อเนื่องกัน และล้อมรอบวัสดุที่กระจายตัวอยู่ภายใน อีกส่วนจะเป็นเฟสกระจายหรือวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) เป็นวัสดุที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อของเมทริกซ์ [36]

2.6.2 เมทริกซ์ (Metrix)

คือ องค์ประกอบที่เนื้อวัสดุเชื่อมกันอย่างต่อเนื่อง จะทำหน้าที่ปกป้องหรือห่อหุ้มสารเสริมแรง โดยสามารถจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC) วัสดุคอมโพสิตโลหะ (Metal matrix composite, MMC) และ วัสดุคอมโพสิตเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC)

2.6.2.1 วัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC)

พอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำต่อกันเป็นสายยาว จึงทำให้สมบัติทั่วไปของพอลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับโลหะและเซรามิก, มีความหนาแน่นต่ำ และทนทานต่อการกัดกร่อน ดังนั้นการจะทำให้พอลิเมอร์เป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าพอลิเมอร์ทั่วไป จึงทำได้โดยการเพิ่มวัสดุเสริมแรงลงไปในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ ซึ่งส่วนใหญ่แล้ววัสดุเสริมแรงของพอลิเมอร์จะเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง มีหน้าที่ในการรับและกระจายแรงกระทำ ตัวอย่างเช่น เส้นใยแก้ว, เส้นใยอะรามิด, เส้นใยคาร์บอน เป็นต้น โดยเมทริกซ์พอลิเมอร์ก็ยังแบ่งออกเป็นเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง (Thermosetting matrix) เป็นพอลิเมอร์ที่คงรูปหรือไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้หลังจากที่ผ่านความร้อน จึงไม่สามารถนำกลับมาหลอมเพื่อใช้ใหม่ได้ และเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic matrix) เป็นพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อนเกินจุดอุณหภูมิหลอมเหลว จึงสามารถนำกลับมาหลอมเพื่อใช้ใหม่ได้ เมื่อขึ้นรูปแล้วจะคงรูปเมื่อมีอุณหภูมิลดลง แต่เมื่อให้ความร้อนเกิดจุด ๆ หนึ่งก็จะกลับไปหลอมหลอมอีกครั้ง ซึ่งการเลือกชนิดก็ขึ้นอยู่กับต้องการให้วัสดุนั้น ๆ มีสมบัติเป็นอย่างไร นอกจากนี้วัสดุเสริมแรงก็อาจจะอยู่ในรูปของอนุภาค, แผ่น และวิสเกอร์ ก็เป็นได้

2.6.2.2 วัสดุคอมโพสิตโลหะ (Metal matrix composite, MMC)

เป็นการปรับปรุงสมบัติในด้านความทนทานต่อความล้าของโลหะ ทำได้โดยการเพิ่มวัสดุเสริมแรงลงไปในเมทริกซ์ของโลหะ โดยที่วัสดุเสริมแรงของโลหะจะมีลักษณะเป็นอนุภาค, เส้นใย หรือวิสเกอร์ก็ได้ ซึ่งสารเสริมแรงของโลหะนั้นต้องมีความแข็งแรงสูง และยังต้องทนความร้อนสูง เนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากในการขึ้นรูป อีกทั้งสารเสริมแรงที่เลือกใช้ก็ยังไม่เกิดการกัดกร่อนกับตัวเมทริกซ์ของโลหะ โดยทั่วไปแล้วลักษณะการนำไปใช้งานของวัสดุคอมโพสิตโลหะจะ

คล้ายกับโลหะทั่วไป ซึ่งการปรับปรุงนี้จะเพิ่มความสามารถในการทนต่อความล้าในวัสดุคอมโพสิตโลหะ อีกทั้งยังช่วยให้มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการที่จะนำวัสดุคอมโพสิตโลหะไปใช้งานนั้นยังมีน้อยเนื่องจากยังมีต้นทุนในการผลิตที่สูง

2.6.2.3 วัสดุคอมโพสิตเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC)

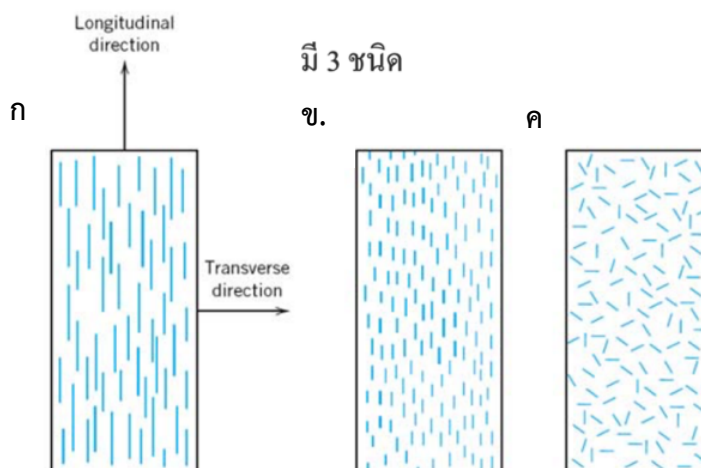
โดยทั่วไปนั้นเซรามิกเป็นวัสดุที่ทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทนทานต่อการกัดกร่อน และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับความร้อนต่ำ จึงมีการนำไปใช้ในงานที่ต้องการความทนต่ออุณหภูมิสูง หรือทนการกัดกร่อนได้สูง แต่เซรามิกก็มีข้อจำกัด คือ เปราะ, แตกหักได้ง่าย จึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติให้มีความทนทานเพิ่มขึ้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มวัสดุเสริมแรงลงไปในเมทริกซ์ของเซรามิก ซึ่งสารเสริมแรงที่ใช้นี้อาจอยู่ในรูปของอนุภาค, เส้นใย หรือวิสเกอร์ โดยวัสดุเสริมแรงที่เพิ่มเข้าไปนี้จะเข้าไปขัดขวางการแพร่ของรอยแตกที่อาจจะเกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน ทำให้เมื่อวัสดุคอมโพสิตเซรามิกได้รับแรงกระทำจึงยังไม่เกิดการแตกหักในทันที เนื่องจากรอยแตกจะถูกขวางด้วยวัสดุเสริมแรง [36, 37]

2.6.3 วัสดุเสริมแรง (Reinforcement)

คือ องค์ประกอบที่เนื้อวัสดุกระจายตัวกันอย่างไม่ต่อเนื่อง โดยสามารถจำแนกประเภทของวัสดุคอมโพสิตตามชนิดของวัสดุเสริมแรงออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใย (fiber-reinforced), วัสดุเสริมแรงด้วยอนุภาค (particle-reinforced) และวัสดุผสมโครงสร้าง (structural) ซึ่งส่วนมากวัสดุเสริมแรงมักจะเป็นเส้นใย (fiber-reinforced) มีหน้าที่เสริมสมบัติต่าง ๆ เช่น ความแข็งแรง ให้กับเมทริกซ์ เพื่อให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติตามที่ต้องการ

2.6.3.1 วัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใย (fiber-reinforced)

เส้นใยเป็นวัสดุที่มีลักษณะ 1 มิติ (1-dimentional) คือ ยาวออกในทิศทางเดียว โดยความยาวของเส้นใยจะมีผลต่อการรับแรง สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ เส้นใยต่อเนื่องแนวเดียว (Continuous and Aligned Fiber) เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงแนวเดียวกัน (Discontinuous and Aligned Fiber) และ เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวแบบอิสระ (Discontinuous and Randomly Oriented Fiber) ดังภาพประกอบที่ 2.21



ภาพประกอบที่ 2.21 การเรียงของเส้นใย ก.เส้นใยต่อเนื่องแนวเดียว ข.เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงแนวเดียวกัน ค.เส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวแบบอิสระ [38]

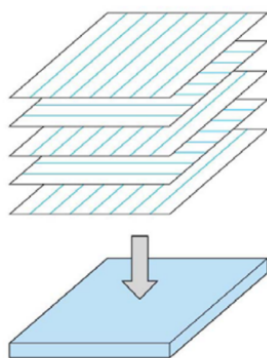
ที่มา: [http://pioneer.netser.chula.ac.th/~psuvanch/101/compo\(501\).pdf](http://pioneer.netser.chula.ac.th/~psuvanch/101/compo(501).pdf)

2.6.3.2 วัสดุเสริมแรงด้วยอนุภาค (particle-reinforced)

อนุภาคจะมีรูปร่างเป็นทรงกลม ลักษณะเท่ากันทุกทิศทาง ไม่มีรูปแบบการเรียงตัว โดยในอนุภาคนี้อาจช่วยเสริมความแข็งแรง หรือเป็นการชะลอการสึกกร่อน และยังช่วยลดต้นทุน ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ อนุภาคขนาดใหญ่ (Large-particle Composites) และอนุภาคละเอียด (Dispersion-strengthening Composites) ขนาดอนุภาคอยู่ที่ $0.01-0.1 \mu\text{m}$

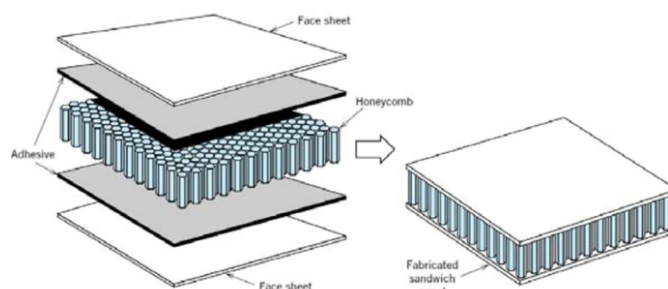
2.6.3.3 วัสดุผสมโครงสร้าง (structural)

เป็นการนำวัสดุเนื้อเดียวหรือวัสดุคอมพอสิตอื่น มาประกอบเข้าด้วยกันในลักษณะที่ซับซ้อน ในเชิงโครงสร้าง สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ วัสดุผสมลามิเนต (Laminates Composites) เป็นการประกอบเข้าด้วยกันของแผ่นวัสดุที่ประกบเข้าด้วยกันเป็นชั้น ๆ โดยชั้นวัสดุอาจจะเป็นวัสดุเนื้อล้วน หรืออาจจะเป็นคอมพอสิตเสริมเส้นใยก็ได้ แต่ส่วนมากจะเป็นแบบคอมพอสิตเสริมเส้นใย แสดงในภาพประกอบที่ 2.22 และวัสดุผสมที่ประกบกันเป็นแซนด์วิช (Sandwich Composites) ประกอบด้วย วัสดุที่อยู่ผิวข้างนอก (faces) เป็นแผ่นวัสดุที่มีความแข็งแรง ประกบเข้ากับไส้ใน (core) อาจทำจากวัสดุที่อ่อนกว่า แต่ทนแรงเฉือนหรือแรงกดอัดได้ดี แสดงในภาพประกอบที่ 2.23



ภาพประกอบที่ 2.22 การเรียงซ้อนกันของชั้นที่เสริมด้วยเส้นใยแบบเรียงต่อเนื่องสำหรับวัสดุผสมลามิเนต [38]

ที่มา: [http://pioneer.netserve.chula.ac.th/~psuvanch/101/compo\(501\).pdf](http://pioneer.netserve.chula.ac.th/~psuvanch/101/compo(501).pdf)



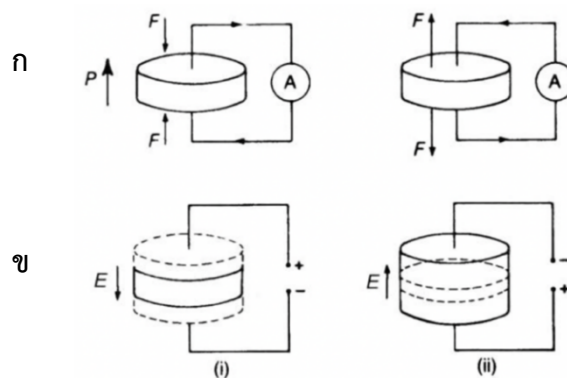
ภาพประกอบที่ 2.23 รูปแบบโครงสร้างการเรียงกันเป็นแซนด์วิช [38]

ที่มา: [http://pioneer.netserve.chula.ac.th/~psuvanch/101/compo\(501\).pdf](http://pioneer.netserve.chula.ac.th/~psuvanch/101/compo(501).pdf)

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำวัสดุคอมโพสิตระหว่างวัสดุทางธรรมชาติ ได้แก่ แบคทีเรียเซลลูโลส และไคโตซานกับวัสดุตัวเติม โดยวัสดุตัวเติมที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นประเภท insulator แบ่งออกเป็น dielectric, piezoelectric และ ferroelectric และเป็นการเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าให้กับวัสดุทางธรรมชาติ ซึ่งจากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาทำเป็นเฟสกระจาย

2.6.4. วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric materials)

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric materials) คือ วัสดุที่มีความสามารถในการสร้างประจุไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลต่าง ๆ (mechanical force) เช่น การเคลื่อนไหวของมนุษย์ เม็ดฝน คลื่นน้ำ ลม ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในแบบไม่สมมาตร เกิด Polarization ได้เป็นพลังงานไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเรียกว่า direct effect ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.24 ก. และในทางตรงกันข้ามเมื่อวัสดุได้รับพลังงานไฟฟ้าวัสดุก็จะทำการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (mechanical deformation) ได้ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.24 ข. เรียกว่า indirect effect [39]



ภาพประกอบที่ 2.24 ก.direct effect ข.indirect effect (i) วัสดุหดตัว (ii) วัสดุขยายตัว [39]

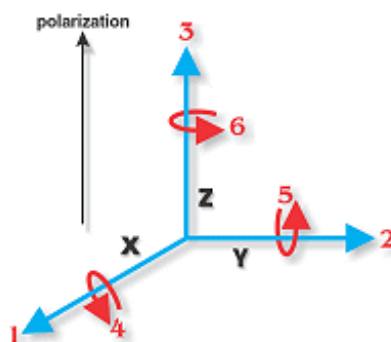
ที่มา: A. J. Moulson (2003) Applications. Electroceramics

2.6.4.1 Piezoelectric Effect

ซึ่งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกถูกค้นพบขึ้นในปี 1880 โดย Pierre-Jacques Curie นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสได้ทำการทดลองให้แรงกระทำกับวัสดุและทำการต่อขั้วไฟฟ้าพบว่าวัสดุสามารถให้กระแสไฟฟ้าได้ จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Piezoelectric Effect ต่อมาในปี 1881 Gabriel Lippman พบว่าการให้กระแสไฟฟ้ากับวัสดุส่งผลให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสามารถยืดหดหรือเกิดการสั่นได้ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Inverse Piezoelectric Effect ดังนั้นวัสดุที่สามารถมีพฤติกรรมทั้งสองแบบนี้ได้จึงเรียกว่าเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกนั้นจะเกิดกับโมเลกุลหรือผลึกที่มีโครงสร้างแบบไม่สมมาตร (Asymmetric Structure) ซึ่งมีความสามารถในการเกิด dipole moment จากการขยับของอะตอมที่อยู่ภายในโมเลกุลซึ่งเรียกผลรวมของ dipole moment ว่า Polarization (P) โดยหลายๆ dipole moment ที่มีทิศทางการเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันนั้นเรียกว่า domain ซึ่งการเรียงตัวของ domain สามารถบอกลักษณะเฉพาะของวัสดุนั้น ๆ ได้ ในสภาวะปกติหลายๆ domain จะอยู่รวมกันในผลึกเรียงตัวกันแบบสุ่มทำให้ผลรวมของ Polarization มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจาก dipole moment เกิดการหักล้างกันหมด แต่เมื่อทำการให้กระแสไฟฟ้ากับวัสดุนั้น domain จะเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าจากการเรียงตัวของ domain ภายในวัสดุทำให้เกิด mechanical stress วัสดุจึงเกิดการยืดหดหรือการสั่น แต่โดยปกติแล้วแม้จะให้แรงกระทำกับวัสดุ domain ส่วนใหญ่ก็ยังเรียงตัวเป็นแบบสุ่มทำให้ได้กระแสไฟฟ้าที่น้อย แต่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าได้ด้วยการ Poling Process โดยการให้สนามไฟฟ้าภายนอกแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเพื่อช่วยให้ domain เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันภายใต้สนามไฟฟ้าบังคับเป็นผลให้ได้ค่า Polarization มากขึ้น ฉะนั้นประสิทธิภาพของวัสดุจึงดีขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น

2.6.4.2 Piezoelectric Constant

เนื่องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีทิศทางการเรียงตัวแบบสุ่ม ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับทั้งทิศทางของแรงทางกลหรือกระแสไฟฟ้าที่ให้และทิศทางตั้งฉาก ดังนั้นค่าคงที่แต่ละตัวโดยทั่วไปจะมีตัวห้อยสองตัวได้แก่ i และ j ที่ใช้ระบุทิศทางของการวัดและทิศทางของแรงทางกลหรือกระแสไฟฟ้าที่ให้ตามลำดับโดยทิศทางของ polarization ที่มีค่าเป็นบวกจะขึ้นอยู่กับแกน Z ตามทิศทางตั้งฉากของแกน X, Y และ Z ดังภาพประกอบที่ 2.25 ซึ่งในทิศทางตั้งฉากกับแนวแกน X, Y หรือ Z จะแสดงด้วยตัวห้อย 1, 2 หรือ 3 ตามลำดับ และทิศทางตามแนวเฉือนจะแสดงด้วยตัวห้อย 4, 5 หรือ 6 ตามลำดับ โดยมีค่าคงที่ดังนี้ [40]



ภาพประกอบที่ 2.25 แสดงทิศทางของแรงที่ส่งผลต่อค่าเพียโซอิเล็กทริก [40]

ที่มา: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>

Piezoelectric Charge Constant (d_{ij}) คือ ค่าคงที่ประจุเพียโซอิเล็กทริก เป็นค่าโพลาริเซชันต่อหน่วยของความเค้นเชิงกลที่ให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก หรือในทางกลับกัน คือความเครียดเชิงกลที่เกิดจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกต่อหน่วยสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป โดยตัวห้อยตัวแรก i คือ การเกิดโพลาริเซชันในทิศ i ที่สร้างขึ้นในวัสดุเมื่อสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ หรือ ทิศทางของสนามไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในวัสดุ ส่วนตัวห้อยตัวที่สอง j เป็น ทิศทางการให้ความเค้นหรือการเหนี่ยวนำให้เกิดความเครียดในทิศ j หรือ การให้กระแสไฟฟ้าในทิศ j ที่ทำให้วัสดุเพียโซเกิดการยืดหด ซึ่งค่าคงที่ประจุเพียโซอิเล็กทริกนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความเหมาะสมของการใช้งานวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสำหรับการใช้งานที่ขึ้นกับความเครียด (actuator)

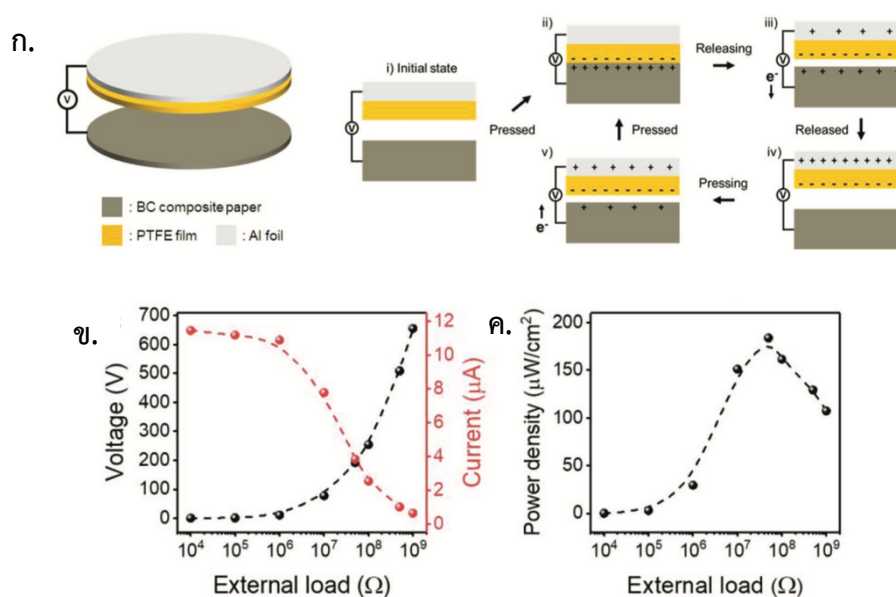
Piezoelectric Voltage Constant (g_{ij}) คือ ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก เป็นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการให้ความเค้นเชิงกลกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก หรือความเครียดทางกลที่เกิดจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่ให้ โดยตัวห้อยตัวแรก คือ i เป็นทิศทางของสนามไฟฟ้าในทิศ i ที่เกิดขึ้นในวัสดุหรือทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้ ส่วนตัวห้อยตัวที่สอง คือ j เป็น

ทิศทางการให้ความเค้นหรือการเหนี่ยวนำความเค้นในทิศ j ซึ่งค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก มีความสำคัญต่อการพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุในการใช้งานสำหรับการตรวจจับ (เซ็นเซอร์)

ซึ่งค่า d และ g ทั้งสองค่านี้เป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพของวัสดุ ถ้ายังมีค่าสูงประสิทธิภาพวัสดุก็จะดีมากขึ้นไปด้วย

Electromechanical Coupling Coefficient: k เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ได้แก่ การเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และ จากพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกล

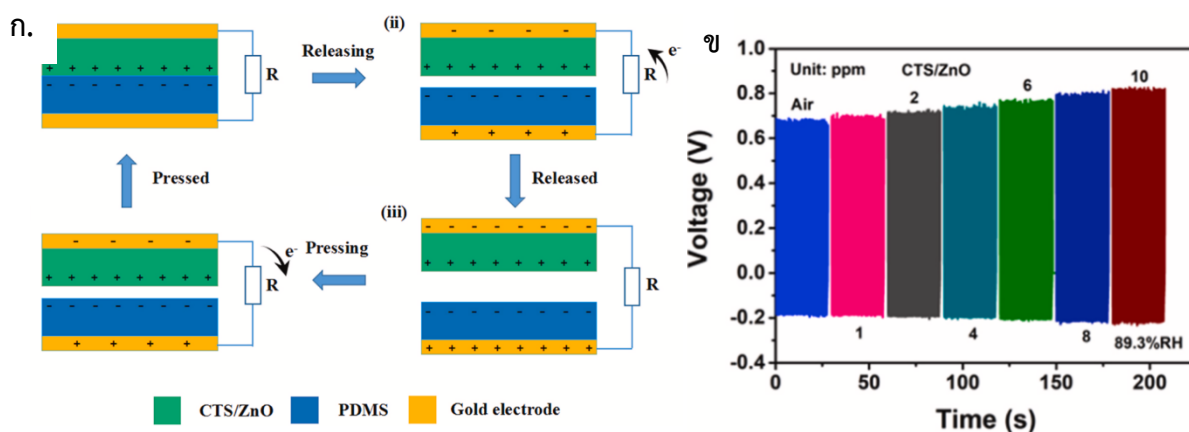
ในงานวิจัยของ Hwisu Oh และคณะ [7] ได้ออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็ก ไทโรโบอิเล็กทริกทำวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติ คือ แบคทีเรียเซลลูโลส กับ วัสดุตัวเติม คือ BaTiO_3 nanoparticle จนได้เป็น BC composite paper ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.26 ก. โดยวัสดุที่ใช้ คือ ฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE film) และถูกคลุมด้วยชั้นฟอยล์อลูมิเนียม (Al foil) เพื่อเป็นขั้วอิเล็กโทรดด้านบน ส่วนอีกวัสดุหนึ่ง คือ BC composite paper เพื่อเป็นขั้วอิเล็กโทรดด้านล่าง และเมื่อศึกษาผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็ก ไทโรโบอิเล็กทริก พบว่ามีค่าความต่างศักย์ขาออก (output voltage) เท่ากับ 170 V ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) เท่ากับ 9.8 μA และค่าความหนาแน่นของพลังงานสูงสุด (output power density) เท่ากับ $\sim 180 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ซึ่งแสดงในภาพประกอบที่ 2.26 ข.-ค.



ภาพประกอบที่ 2.26 ก. โครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็ก ไทโรโบอิเล็กทริก ข. ค่าความต่างศักย์ขาออกและค่ากระแสไฟฟ้าขาออก ค. ค่าความหนาแน่นของพลังงานสูงสุด [7]

ที่มา: Hwisu Oh (2019) Adv Funct Mater

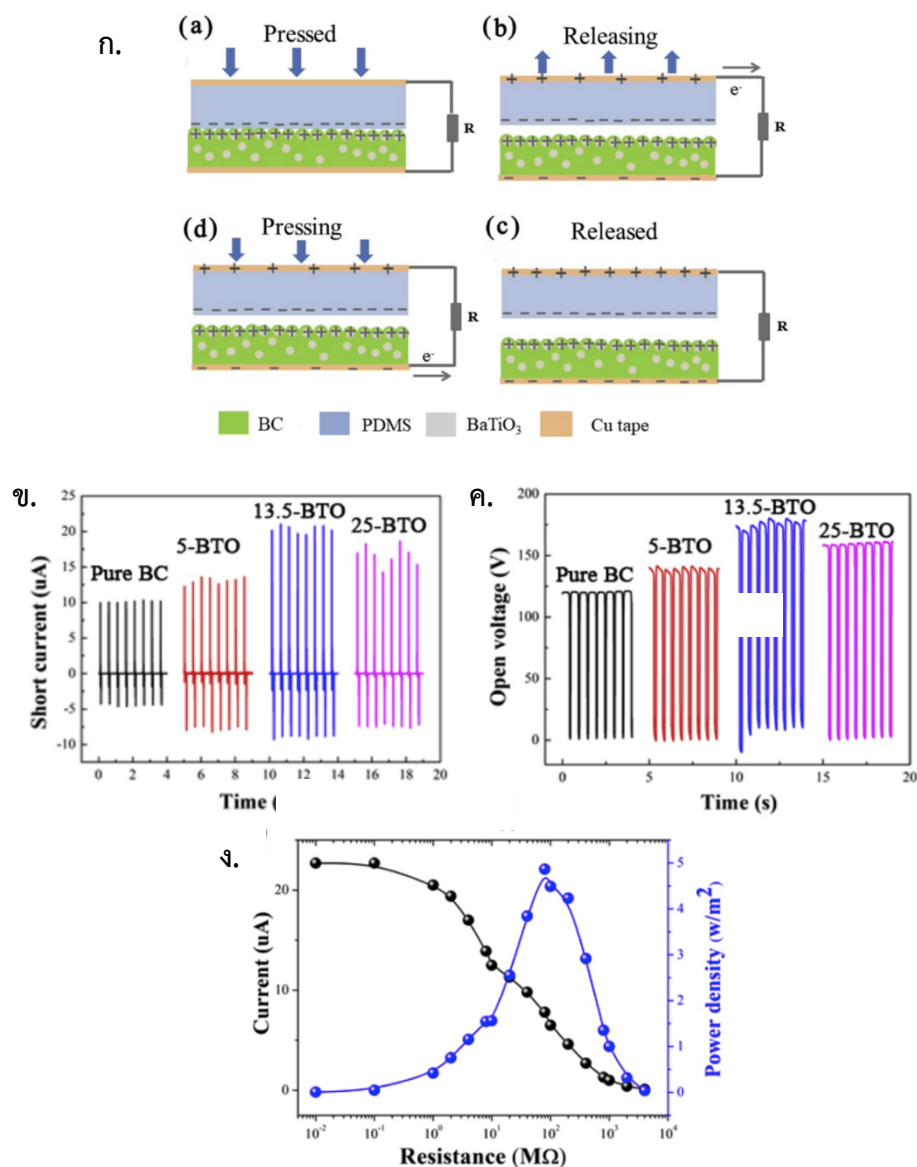
งานวิจัยของ Bohao Liu และคณะ [41] ได้ออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกทำวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติ คือ ไคโตซาน (CTS) กับ ZnO โดยวัสดุชั้นสัมผัสชนิดแรกที่ใช้ คือ CTS/ZnO กับ วัสดุชั้นสัมผัสชนิดที่สอง คือ พิล์มพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS) ซึ่งชั้นพื้นผิวของทั้งด้านบนและด้านล่างถูกคลุมด้วยชั้นของทองเป็นขั้วอิเล็กโทรด แสดงในภาพประกอบที่ 2.27 ก. โดยอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก พบว่ามีค่าความต่างศักย์ เท่ากับ 0.8 V แสดงในภาพประกอบที่ 2.27 ข.



ภาพประกอบที่ 2.27 ก.กลไกการทำงานของ triboelectric acetone sensor (TAS) ข.ค่าความต่างศักย์ [41]

ที่มา: Bohao Liu (2020) Nano Energy

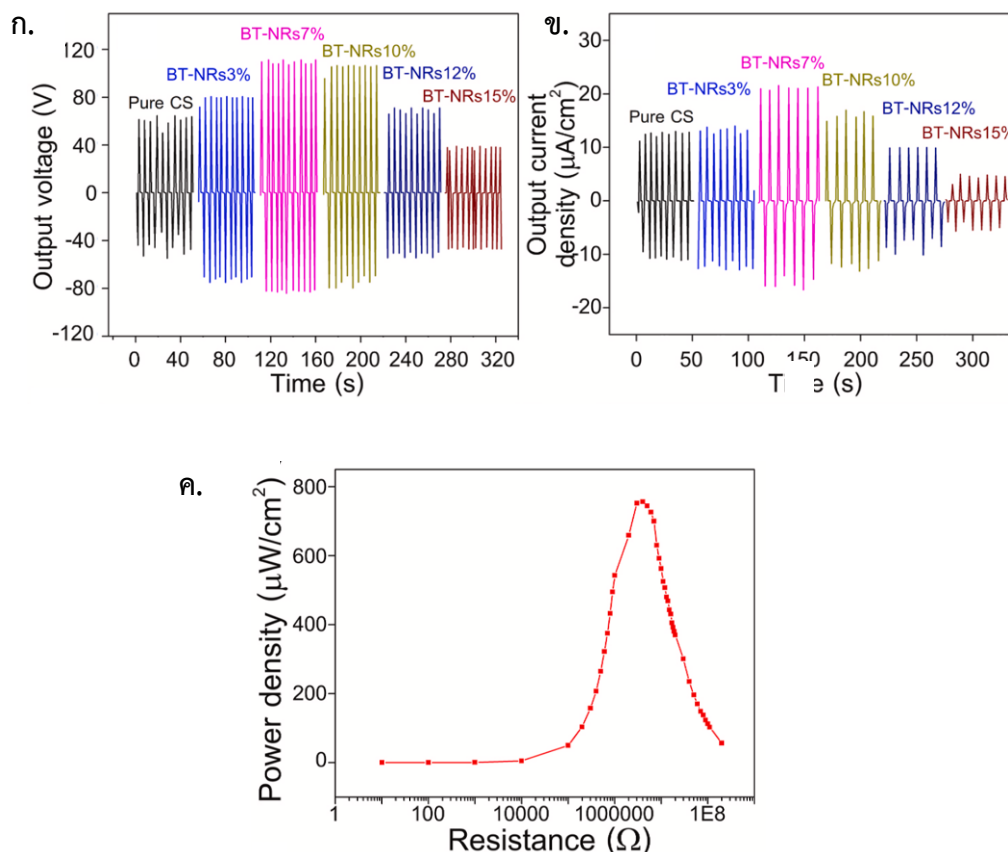
งานวิจัยของ Yan Shao และคณะ [42] สร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกโดยใช้พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS) เป็นชั้นสัมผัสด้านบน และแบคทีเรียเซลลูโลสทำเป็นวัสดุคอมโพสิตกับ BaTiO_3 เพื่อเป็นชั้นสัมผัสด้านล่าง ซึ่งชั้นพื้นผิวของทั้งด้านบนและด้านล่างถูกคลุมด้วยเทปทองแดง (Cu tape) เป็นขั้วอิเล็กโทรด แสดงในภาพประกอบที่ 2.28 เมื่อศึกษาผลทางไฟฟ้าพบว่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณ BaTiO_3 อยู่ที่ 13.5% พบว่ามีค่าความต่างศักย์วงจรเปิด (open voltage) เท่ากับ 181 V ค่ากระแสไฟฟ้า (short current) เท่ากับ 21 μA และค่าความหนาแน่นของพลังงานสูงสุด (output power density) เท่ากับ 4.8 W/m^2 แสดงในภาพประกอบที่ 2.28 ข.-ง.



ภาพประกอบที่ 2.28 ก.กลไกการทำงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก ข. ค่ากระแสไฟฟ้า(short current) ค.ค่าความต่างศักย์วงจรเปิด (open voltage) ง.ค่าความหนาแน่นของพลังงานสูงสุด (output power density) [42]

ที่มา: Shao Yan (2019) Nano Energy

งานวิจัยของ Satana Pongampai และคณะ [8] สร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกโดยใช้ไคโตซานทำเป็นวัสดุคอมโพสิตกับ BaTiO₃ โครงสร้างแบบนาโนร็อด จากการศึกษาลทางไฟฟ้าพบว่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเกิดขึ้นเมื่อปริมาณ BaTiO₃ อยู่ที่ 7% พบว่ามีค่าความต่างศักย์วงจรเปิดสูงสุด (the highest open-circuit voltage) เท่ากับ ~111.4 V ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (short circuit) เท่ากับ ~21.6 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ และค่าความหนาแน่นของพลังงานสูงสุด (output power density) เท่ากับ 756 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ แสดงในภาพประกอบที่ 2.29



ภาพประกอบที่ 2.29 ก.ค่าความต่างศักย์ขาออก ข.ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก ค.ค่าความหนาแน่นของพลังงานสูงสุด [8]

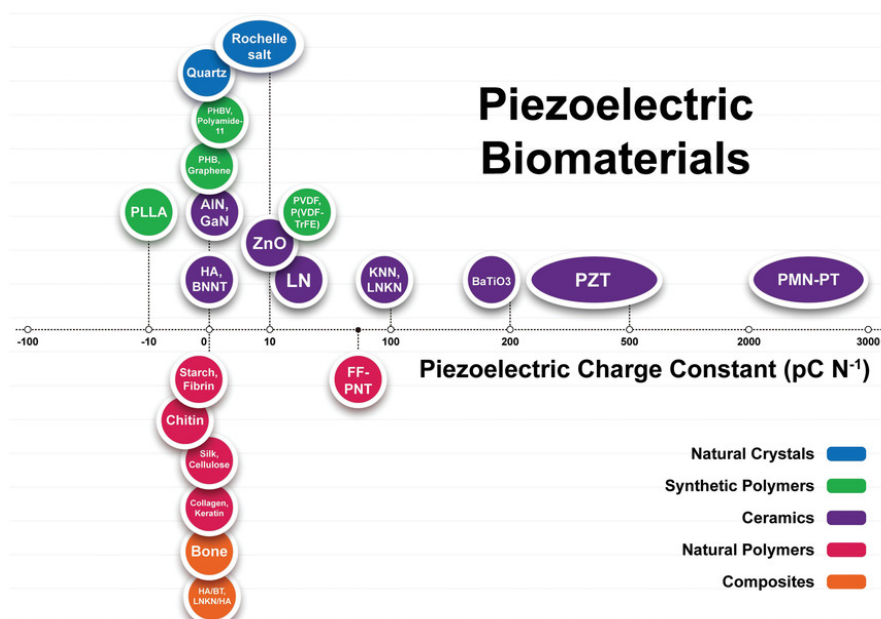
ที่มา: Satana Pongampai (2021) Compos B Eng

จากการศึกษาหลายงานวิจัยที่ผ่านมาวัสดุส่วนใหญ่ที่นำมาเป็นเฟสกระจายต่าง ๆ นั้นเป็นสารประกอบออกไซด์หรือออกไซด์เชิงซ้อน โดยเฉพาะสารประกอบออกไซด์หรือออกไซด์เชิงซ้อนที่มีโครงสร้างระดับนาโน เช่น BaTiO₃ nanoparticle [7] , BaTiO₃ nanotube [8] , ZnO nanorod [9] และ ZnO nanowire [10] เป็นต้น โดยจะเห็นว่าวัสดุที่กล่าวมานั้นเป็นวัสดุที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric materials) ซึ่งจากการศึกษาพบว่า เมื่อใช้วัสดุตัวเดิมเป็นวัสดุที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก มาทำเป็นเฟสกระจายในวัสดุคอมโพสิตเพื่อสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก ก็จะมีค่าการส่งออกทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

2.6.5. วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชีวภาพ (Bio-Piezoelectric Materials)

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชีวภาพ คือ วัสดุทางธรรมชาติ เช่น ผนังกระดูก ไหม ไวรัล ไข่หรือแม้กระทั่งกรดอะมิโน แต่จะเห็นได้ว่าวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างมากในการทำเฟสกระจายเพื่อเพิ่มความหนาแน่นประจุไฟฟ้าให้กับพอลิเมอร์ธรรมชาติส่วนมากมักเลือกใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยเฉพาะกลุ่มวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เป็นวัสดุสังเคราะห์ แต่ก็เป็นคำถามว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่

เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชีวภาพจะสามารถนำมาทำเฟสกระจายได้หรือไม่ จากการหาข้อมูลในงานวิจัยเพิ่มเติมพบว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชีวภาพนั้นก็มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกและมีค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก d_{33} ที่น่าสนใจเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.30 และตารางที่ 2.2 และ 2.3 ซึ่งแสดงค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชีวภาพ แต่อย่างไรก็ตามการมองหาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทางชีวภาพมาเป็นสารตัวเติมในอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric : TENG) นั้นยังมียู่จำกัด



ภาพประกอบที่ 2.30 จำแนกประเภทวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชีวภาพตามแหล่งกำเนิดและค่าคงที่ประจุเพียโซอิเล็กทริก [43]

ที่มา: Kapat Kausik (2020) Advanced Functional Materials

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก D_{33} วัสดุเพียโซอิเล็กทริก [44,45]

Piezoelectric Materials	Piezoelectric Property
ZnO NWs	d_{33} of ~5 to 10 pC/N
BaTiO ₃	d_{33} of ~190 pC/N
NaNbO ₃ NWs	0.85-4.26 pm/V
KnbO ₃ NWs	7.9 pm/V
BaTiO ₃ NWs	45 pC/N
ZnO pillars	d_{33} = 7.5 pm/V

Piezoelectric Materials	Piezoelectric Property
ZnO NRs	$d_{33} = 4.41 \pm 1.73 \text{ pm/V}$
ZnO	$d_{33} = 246 \text{ pC/N}$
LiNbO ₃	$d_{33} = 23 \text{ pC/N}$

ที่มา: Huicong Liu (2018) Applied Physics

Horacio D. E. (2012) Advanced Materials.

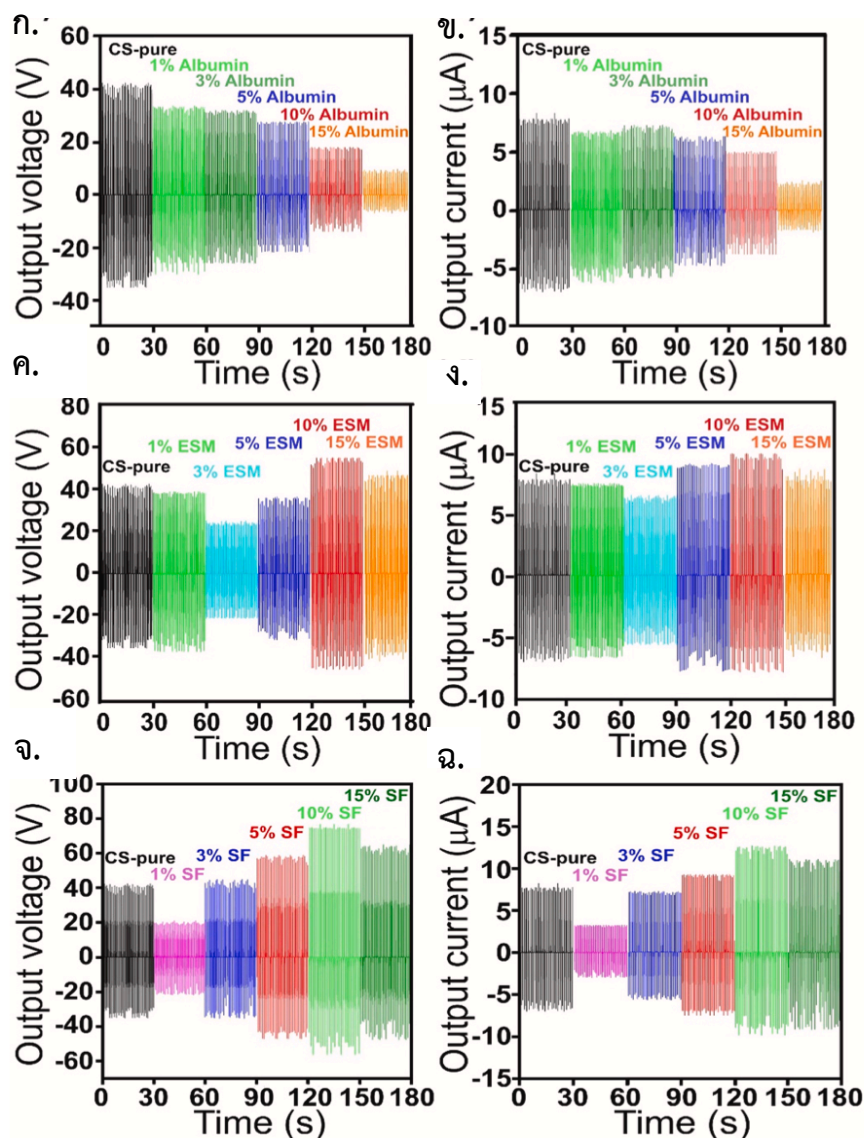
ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก D_{33} วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชีวภาพ [46]

Bio-Piezoelectric Materials	Piezoelectric Property
Virus	$d_{33} = 7.8 \text{ pC/N}$
Aligned phage nanopillars	$d_{33} = 10 \text{ pC/N}$
Silk fibroin	$d_{33} = 38 \pm 2 \text{ pm/V}$
Cellulose nanofibril/PDMS	$d_{33} = 19 \text{ pC/N}$
γ - glycine	$d_{33} = 10 \text{ pC/N}$
Fish scale	$d_{33} = 5.5 \text{ pC/N}$
Fish bladder	$d_{33} = 22 \text{ pC/N}$
Eggshell membrane	$d_{33} = \sim 23.7 \text{ pC/N}$
Human bone	$d_{33} = 7- 8 \text{ pC/N}$
Poly (γ -benzyl α , L-glutamate)	$d_{33} = 25 \text{ pC/N}$

ที่มา: Anupama Gaur (2018) Energy

จนกระทั่ง Thitirat Charoonsuk และคณะ [6] ได้ศึกษาการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชีวภาพอย่างโปรตีน 3 ชนิด ได้แก่ เส้นไหม (Silk fiber: SF), เยื่อหุ้มเปลือกไข่ (Egg-shell membrane: ESM) และอัลบูมิน (Albumin) มาเป็นเฟสกระจายในโคโตนาน และทำการวัดค่าไฟฟ้าขาออกของวัสดุทั้งสามชนิด ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก พบว่าปริมาณโปรตีนส่งผลต่อค่าส่งออกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric : TENG) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.31 พบว่าการใส่โปรตีนชนิด ไหมที่มีปริมาณ 10% ลงในโคโตนานนั้นมีค่าส่งออกทางไฟฟ้าสูงสุด ได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก 77 V ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก 13 mA และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก 202 μW โดย

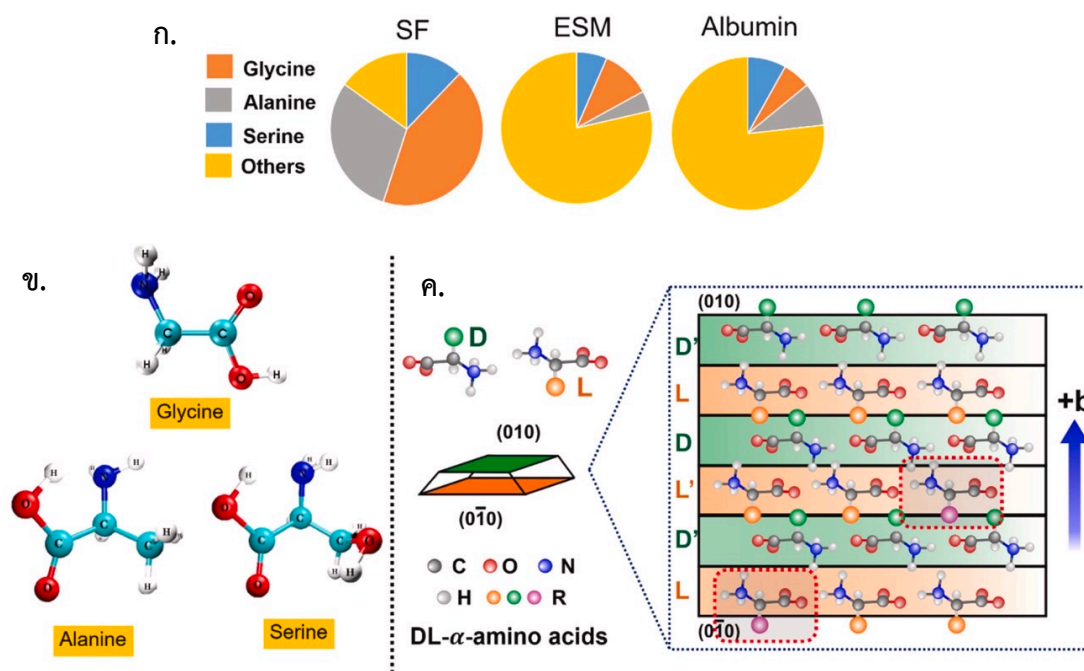
งานวิจัยนี้ระบุอย่างชัดเจนว่าเหตุผลที่วัสดุคอมโพสิตไคโตซานและไหมให้ค่าการส่งออกทางไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากในเส้นไหมมีปริมาณกรดอะมิโนชนิดไกลซีน (Glycine) เป็นองค์ประกอบสูงที่สุด



ภาพประกอบที่ 2.31 ก.-ข. ค่าแรงดันไฟขาออกและค่ากระแสไฟขาออก CS/albumin ค.-ง. ค่าแรงดันไฟขาออกและค่ากระแสไฟขาออก CS/ ESM จ.-ฉ. ค่าแรงดันไฟขาออกและค่ากระแสไฟขาออก CS/SF [6]

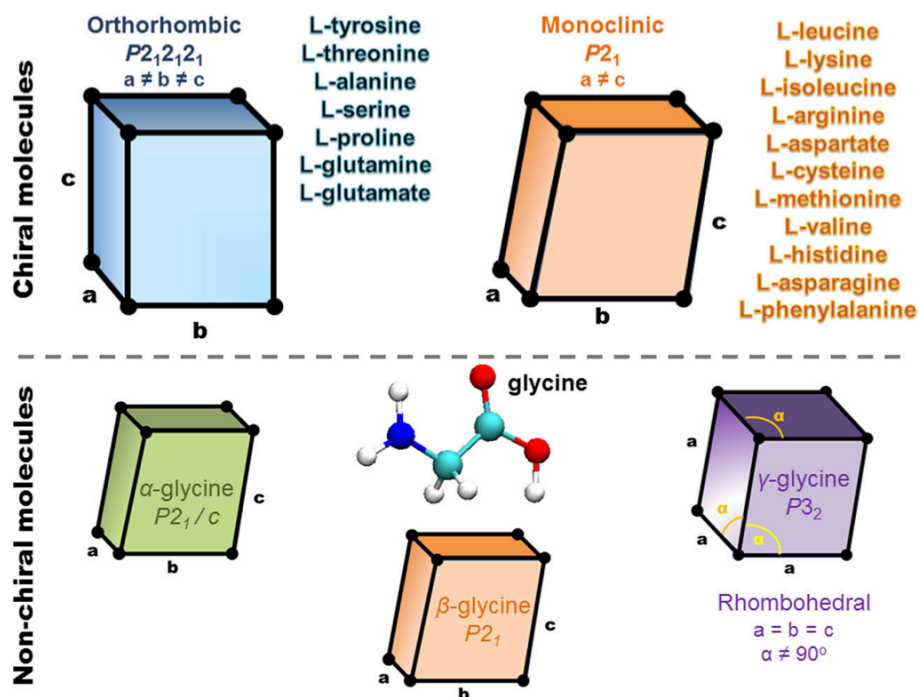
ที่มา: Thitirat Charoonsuk (2021) Nano Energy

อีกทั้งในภาพประกอบที่ 2.32 ค. จะเห็นได้ว่าการมี DL-amino acid ชนิด ไกลซีน (glycine) ผสมกับ อะลานีน (alanine) นั้นส่งผลให้ความไม่สมมาตรของโครงสร้างสูงขึ้นจึงทำให้มีสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริก และส่งผลให้สามารถเพิ่มค่า Polarization กับวัสดุคอมโพสิตทำให้ได้ค่าส่งออกทางไฟฟ้าที่สูง



ภาพประกอบที่ 2.32 ก. แผนภูมิเปรียบเทียบประเภทกรดอะมิโนและAlbumin, ESM และ SF ข. โครงสร้างโมเลกุลของกรดอะมิโนไกลซีน อะลานีน และซีรีน ค. การแพลงเชิงซ้ายของโมเลกุลกรดอีนานทีโอเมอร์ DL- α -amino ตามแนวหน้า (010) ของไกลซีน และปฏิกิริยาสวิตเตอร์ไอออนิกของกรดแอล-อะมิโน (สีชมพู) กับโครงสร้างโมเลกุล D และ D' สำหรับการเข้าจับตำแหน่ง L และ L' [6]
ที่มา: Thitirat Charoonsuk (2021) Nano Energy

จากงานวิจัยของ Sarah Guerin และคณะ [47] ก็ได้ทำการศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติเพียโซอิเล็กทริกจากวัสดุชีวภาพ โดยทำการศึกษากรดอะมิโนทั้งหมด 20 ชนิด พบว่ากรดอะมิโนจะเกิดการตกผลึกได้เป็นโครงสร้างผลึกแบบ Orthorhombic และ Monoclinic เป็นหลักทำให้มีความสมมาตรต่ำซึ่งจะแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.33 จากการศึกษาจึงสรุปได้ว่าวัสดุชีวภาพจากกรดอะมิโนนั้นก็แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก โดยการศึกษาการตกผลึกของวัสดุชีวภาพจากกรดอะมิโนนั้นช่วยให้สามารถทำนายพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวัสดุได้มากยิ่งขึ้น ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะสังเคราะห์กรดอะมิโนชนิดไกลซีน (glycine)



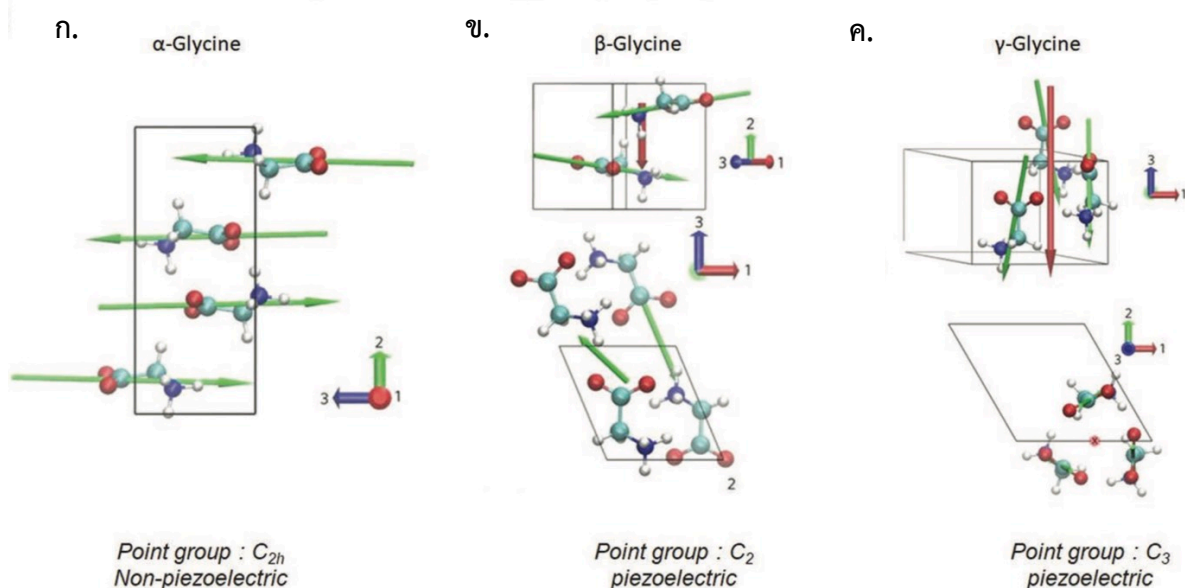
ภาพประกอบที่ 2.33 โครงสร้างผลึกของกรดอะมิโนในโปรตีน [47]

ที่มา: Sara Guerin (2019) NPG Asia Materials

2.7 ไกลซีน

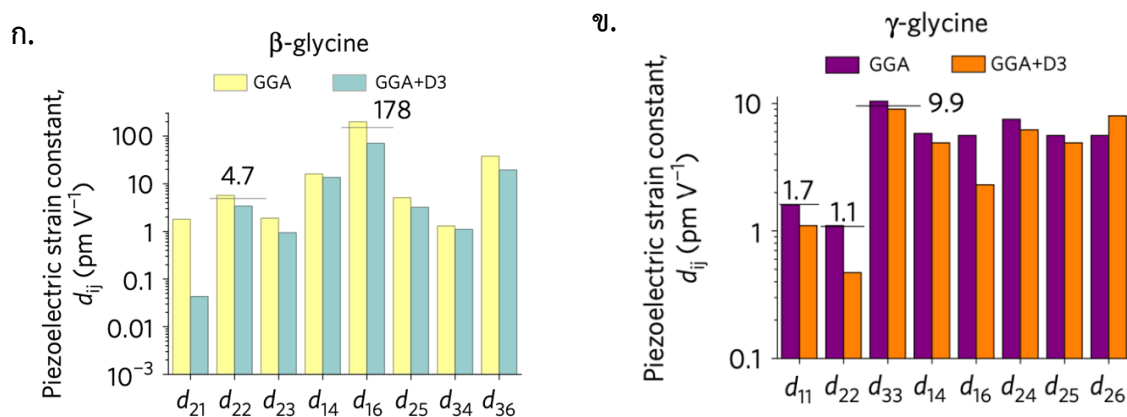
ไกลซีน (Glycine) คือ กรดอะมิโนชนิดหนึ่งจากกรดอะมิโน 20 ชนิดของโปรตีน ประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนเป็นหลัก ไกลซีนเป็นกรดอะมิโนที่มีความหลากหลายทางโครงสร้างมากกว่ากรดอะมิโนชนิดอื่น ๆ โดยมีโครงสร้าง 3 แบบ ได้แก่ แอลฟา-ไกลซีน เบต้า-ไกลซีน และแกมมา-ไกลซีน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.34 ซึ่งเมื่อศึกษาวิจัยเพิ่มเติมของ Sarah Guerin และ คณะ [11, 47] พบว่าจากโครงสร้างทั้ง 3 แบบ มีเพียงโครงสร้างแบบเบต้า-ไกลซีน และแกมมา-ไกลซีนเท่านั้นที่สามารถแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากภายในโครงสร้างแบบเบต้า-ไกลซีน และแกมมา-ไกลซีนนั้นมีความไม่สมมาตรของโครงสร้างภายในโมเลกุล ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.34 หลังจากนั้นได้ทำการนำเบต้า-ไกลซีน และแกมมา-ไกลซีน ไปวัดค่าทางไฟฟ้าดังภาพประกอบที่ 2.35 จากรูปจะพบว่าแกมมา-ไกลซีนมีค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกสูงที่สุด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.35 ข. โดยมีค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.46 VmN^{-1} ซึ่งมีค่าสูงเมื่อเทียบกับ PZT ที่มีค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.25 VmN^{-1} (11) และมีค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก d_{33} เท่ากับ 10 pC/N ซึ่งค่า d_{33} เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าแกมมา-ไกลซีนมีแนวโน้มสูงที่จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ TENG ได้

Crystalline class of glycine polymorphs



ภาพประกอบที่ 2.34 โครงสร้างผลึกกรดอะมิโนชนิดไกลซีน ก. α -Glycine ข. β -Glycine ค. γ -Glycine [11]

ที่มา: Sara Guerin (2018) Nat Mater



ภาพประกอบที่ 2.35 ก. ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก β -Glycine ข. ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก γ -Glycine [11]

ที่มา: Sara Guerin (2018) Nat Mater

จากการศึกษาหลายงานวิจัยดังกล่าว ผู้ทำการวิจัยจึงให้ความสนใจวัสดุทางชีวภาพจำพวก โปรตีนจากกรดอะมิโนชนิดไกลซีน เพราะมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก เป็นวัสดุที่สลายได้ง่ายและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อ (casting) กับพอลิเมอร์ธรรมชาติทั้งสองชนิด ได้แก่ แบคทีเรียเซลลูโลส และไคโตซาน ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม โดยในงานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการสังเคราะห์แกมมา-ไกลซีนด้วยกระบวนการระเหยตัวทำละลาย ศึกษาหาเอกลักษณ์เฉพาะของผลึก

แกมมา-ไกลซีนที่เตรียมได้ ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ธรรมชาติ ได้แก่ แบคทีเรียเซลลูโลส และ ไคโตซาน ด้วยวิธีการหล่อ (Casting) ศึกษาวัสดุคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ในอัตราส่วนแกมมา-ไกลซีนที่ 0, 5, 10, 15, 30, 50 และ 70 wt% ด้วยกระบวนการหล่อ (Casting) และการปลูกผลึกบนแผ่นฟิล์ม ศึกษาการสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพการส่งออกจากไฟฟ้าที่ดี ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแกมมา-ไกลซีนที่ส่งผลต่อค่าการส่งออกจากไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริกที่เตรียมได้จากวัสดุคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ศึกษาการสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริกในรูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉาก (vertical contact separation mode) และศึกษาการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริกที่เตรียมได้จากวัสดุคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน และไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน โดยวัดค่าความต่างศักย์ขาออก (output voltage), ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (output current) และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (output power)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้

3.1.1 อุปกรณ์

- ปีกเกอร์
- หลอดทดลอง
- กรวยกรองบุชเชอร์
- แผ่นกรองเบอร์ 93, เบอร์ 2, เบอร์ 1
- กระบอกตวง
- magnetic bar
- หลอดหยดสาร
- ซ้อนตักสาร
- แท่งแก้วคนสาร
- ถาดสำหรับการหล่อ (Cast)
- ขวดกำหนดปริมาตร
- ตะกร้า และกะละมัง
- ฟอยล์
- ถุงซิปล็อกขนาดต่าง ๆ
- ปากคีบ (forceps)
- ถุงมือยาง
- กระจกนาฬิกา
- เทอร์โมมิเตอร์

3.1.2 เครื่องมือ

- เครื่องชั่ง
- เครื่องปั่น

- เครื่องวัดความหนา
- เครื่องกรองสุญญากาศ
- เครื่องกวนสารเคมี (Hotplate magnet stirrer)
- เตาอบ
- เครื่องบดแบบลูกบอล (Ball milling)

3.1.3 สารเคมี

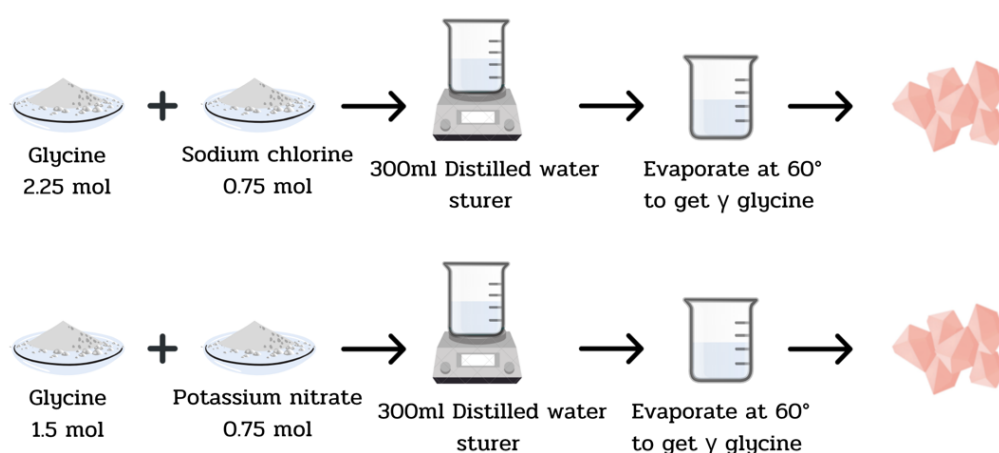
- น้ำกลั่น
- เอทานอล
- วุ้นมะพร้าว
- สารละลายเบเนดิกต์
- กลีเซอรอล
- Alpha-glycine
- Sodium chloride (NaCl)
- Potassium nitrate (KNO_3)
- ไคโตซาน
- กรดอะซิติก

3.2 การสังเคราะห์ผลึกแกมมา-ไกลซีน

ในการสังเคราะห์ไกลซีนดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.1 จะใช้เกลือ 2 ชนิด คือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และ โพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) ในการทำปฏิกิริยากับแอลฟา-ไกลซีน เพื่อให้ได้ผลึกแกมมา-ไกลซีน สัดส่วนแอลฟา-ไกลซีนต่อเกลือเป็น 3:1 และ 2:1 ตามลำดับ โดยขั้นตอนการเตรียม NaCl จะใช้แอลฟา-ไกลซีน 2.25 mol และ เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 0.75 mol ละลายลงในน้ำกลั่น 300 ml ปั่นกวนจนสารละลายใส จากนั้นทำการกรองเอาส่วนที่ไม่ละลายออกสองครั้งแล้วปล่อยให้ระเหยที่อุณหภูมิ 60°C เป็นระยะเวลา 28 วัน เพื่อให้เกิดผลึกแกมมา-ไกลซีน ในขั้นตอนการเตรียมเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) จะใช้วิธีเดียวกันกับการเตรียมเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โดยจะใช้แอลฟา-ไกลซีน 1.5 mol และเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) 0.75 mol ทั้งไว้ให้ระเหยที่อุณหภูมิ 60°C เป็นระยะเวลา 20 วัน เพื่อให้เกิดผลึกแกมมา-ไกลซีน ซึ่งอัตราส่วนที่ใช้ในการเตรียมแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกแกมมา-ไกลซีน

แอลฟา-ไกลซีน (mol)	เกลือ (mol)	ความเข้มข้น (mol)	สัดส่วน	น้ำกลั่น (ml)
2.25	NaCl 0.75	2.5	3:1	300
1.5	KNO ₃ 0.75	2.5	2:1	300



SALT ADDICTIVE	Mol Ratio
2.5 M Sodium chloride	3:1
2.5 M Potassium nitrate	2:1

ภาพประกอบที่ 3.1 แสดงการสังเคราะห์ผลึกแกมมา-ไกลซีน จากเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และ โพแทสเซียมไนเตรท (KNO₃)

3.3 การเตรียมแผ่นฟิล์มจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ

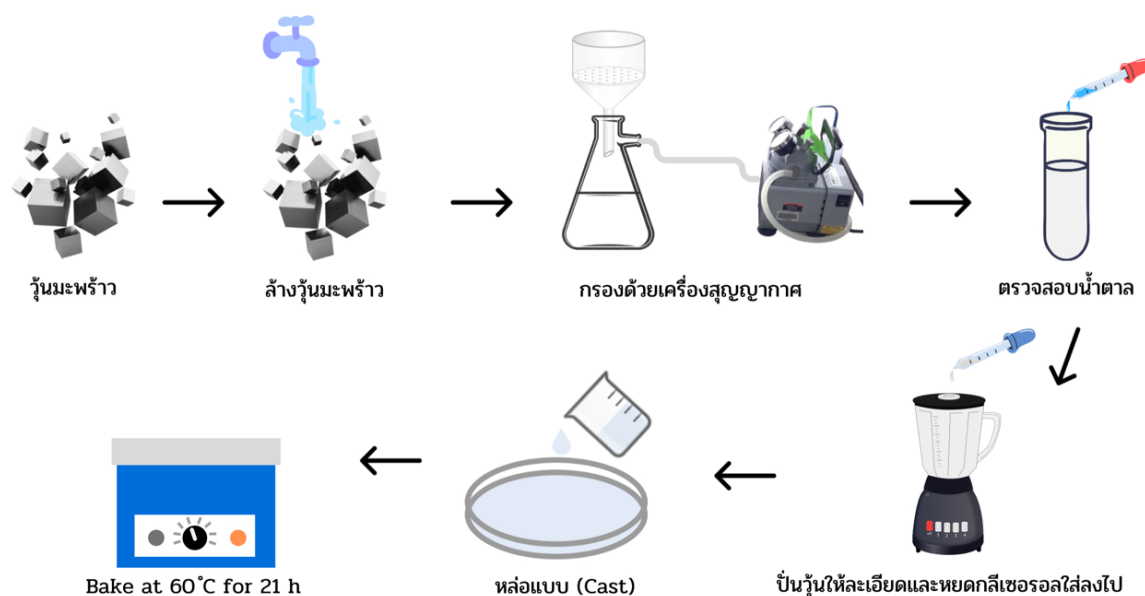
3.3.1 การเตรียมแผ่นฟิล์มจากแบคทีเรียเซลลูโลส (Bacteria Cellulose: BC)

ในการขึ้นรูปฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสจะใช้วุ้นมะพร้าวในการเตรียมดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.2 โดยทำการล้างวุ้นมะพร้าวให้ปราศจากน้ำตาลและกรองด้วยเครื่องสุญญากาศโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 93 ซึ่งจะทำให้การกรองโดยเทวุ้นมะพร้าวไปบนกรวยกรองและเทน้ำกลั่นลงไปประมาณหนึ่ง จากนั้นนำน้ำที่ได้จากการกรองมาทดสอบน้ำตาลด้วยสารละลายเบเนดิกต์แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 10-15 นาที ทำการสังเกตสีหลังนำไปต้มหากมีสีน้ำตาล แสดงว่ายังมีน้ำตาลเหลืออยู่ให้นำนวุ้นมะพร้าวไปทำการล้างต่อ แต่ถ้าหากเป็นสีฟ้าแสดงว่าวุ้นมะพร้าวที่ได้ปราศจากน้ำตาลและสามารถนำไปใช้ได้ จากนั้นนำวุ้นมะพร้าวที่ปราศจากน้ำตาลที่ปริมาณ วุ้นมะพร้าว 215 g ต่อ เอทานอล 150 ml แล้วเติมกลีเซอรอลปริมาตร 0.5 ml มาปั่นด้วยเครื่องปั่นผสมเป็นระยะเวลา

2 ชั่วโมง โดยทำการแบ่งปั่นรอบละ 15 นาที ทั้งหมด 8 รอบ แล้วทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) จากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นระยะเวลา 21 ชั่วโมง แสดงอัตราส่วนดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสจากวุ้นมะพร้าวและเอทานอล

ปริมาณวุ้น มะพร้าว (g)	น้ำกลั่น (ml)	กลีเซอรอล (ml)	เวลาในการปั่น (ชั่วโมง)	เวลาในการอบ (ชั่วโมง)
215	150	0.5	2	21



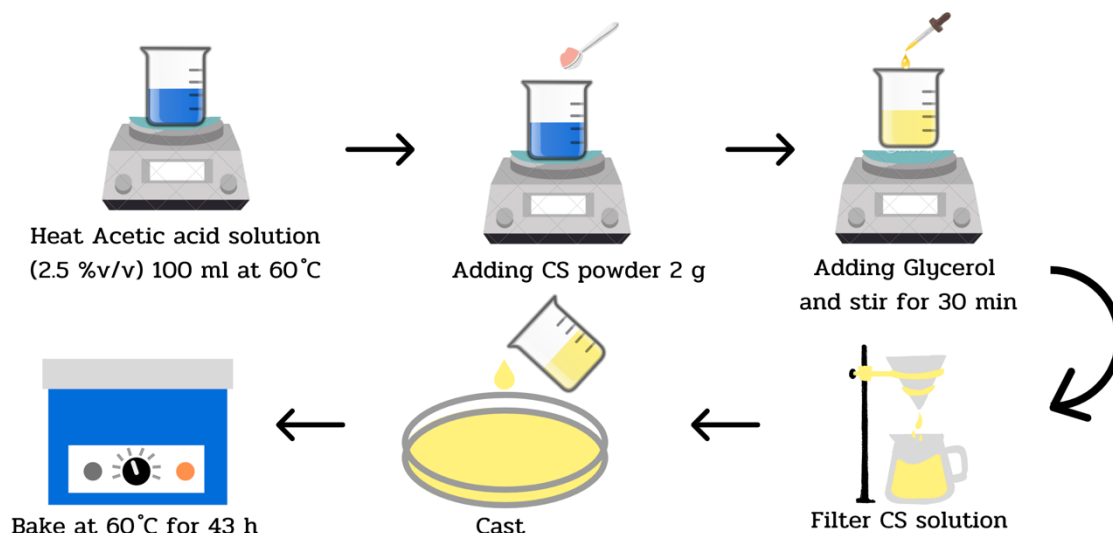
ภาพประกอบที่ 3.2 แสดงวิธีการเตรียมฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสแบบหล่อแบบ (Casting)

3.3.2 การเตรียมแผ่นฟิล์มจากไคโตซาน (Chitosan: CS)

ในการขึ้นรูปฟิล์มไคโตซันดังภาพประกอบที่ 3.3 โดยเริ่มจากการเตรียมสารละลายกรดอะซิติกที่ความเข้มข้น 2.5% โดยปริมาตร จากนั้นเตรียมฟิล์มไคโตซานในสารละลายกรดอะซิติก โดยให้ความร้อน 60°C กับสารละลายกรดอะซิติกที่ความเข้มข้น 2.5% ต่อปริมาตร 100 ml แล้วเติมผงไคโตซานปริมาณ 2 g ลงในสารละลายกรดอะซิติก จากนั้นทำการปั่นจนผสมให้เข้ากัน เมื่อสารละลายเข้ากันแล้วเติมกลีเซอรอลปริมาตร 0.5 ml และทำการปั่นจนต่ออีกเป็นระยะเวลา 30 นาที จึงทำการกรองสารละลาย แล้วทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) จากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นระยะเวลา 43 ชั่วโมง แสดงอัตราส่วนดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มไคโตซานด้วยกรดอะซิติกที่ความเข้มข้น 2.5%

ความเข้มข้น	ผงไคโตซาน	กลีเซอรอล	เวลาในการปั่น	เวลาในการอบ
(v/v)	(g)	(ml)	(ชั่วโมง)	(ชั่วโมง)
2.5	2	0.5	12	43



ภาพประกอบที่ 3.3 แสดงวิธีการเตรียมฟิล์มไคโตซานแบบหล่อแบบ (Casting)

3.4 การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีน

3.4.1 การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีนด้วยกระบวนการปลูกผลึกบนแผ่นฟิล์ม

ทำการเตรียมสารละลายแกมมา-ไกลซีนจากเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) จำนวน 4 บีกเกอร์ ใช้สัดส่วนแอลฟา-ไกลซีนต่อเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) เป็น 2:1 โดยขั้นตอนการเตรียมจะใช้แอลฟา-ไกลซีน 0.26 mol และ เกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) 0.13 mol ละลายลงในน้ำกลั่น 50 ml ปั่นจนจนสารละลายใส ที่อุณหภูมิ 60°C จากนั้นเมื่อได้สารละลายแกมมา-ไกลซีนที่ใสแล้วนำฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสขนาด 4×3 cm ไปแขวนในแต่ละบีกเกอร์ กำหนดระยะเวลาการแขวนฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสในแต่ละบีกเกอร์เป็น 3 5 7 และ 14 วัน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.4 เมื่อครบกำหนดของแต่ละบีกเกอร์จึงทำการเก็บแผ่นฟิล์มขึ้นจากสารละลายแกมมา-ไกลซีน

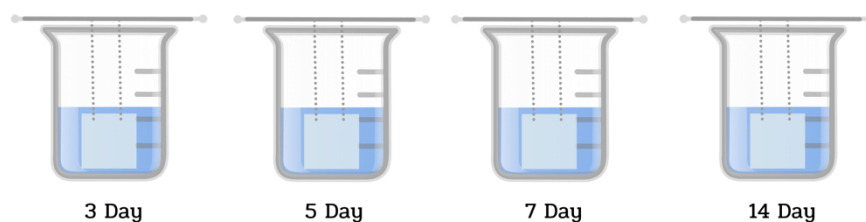
Gly : 2.5M KNO₃

2 : 1

Gly 19.52 g : KNO₃ 12.64 g

In DI water 50 ml

FILM CONDITIONS	SIZE
BC 200 g : DI 150 mL	4x3 cm



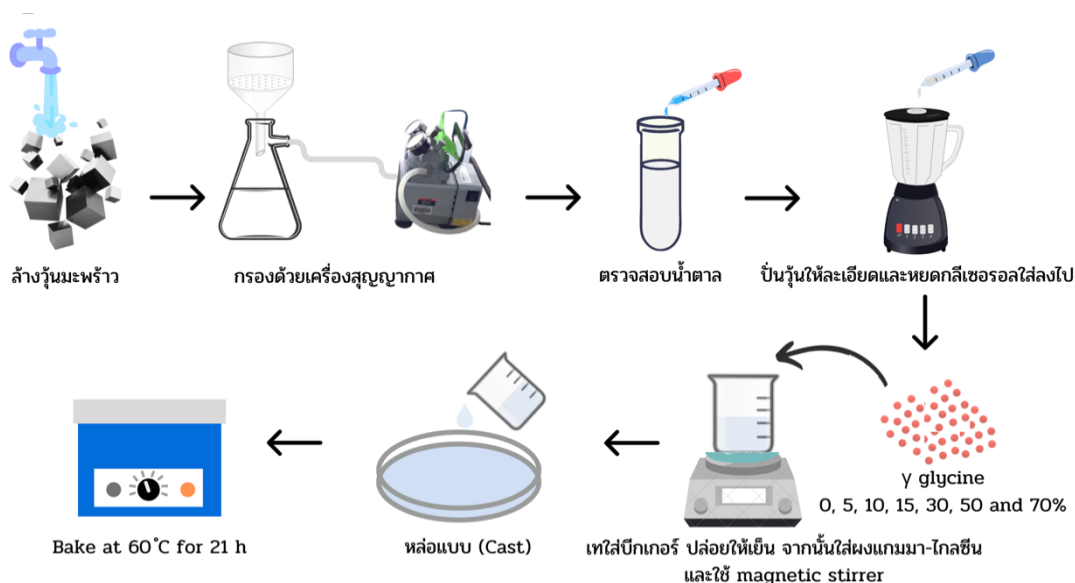
ภาพประกอบที่ 3.4 แสดงวิธีการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลล์ูโลสกับแกมมา-ไกลซีนแบบปลูกผลึกบนแผ่นฟิล์ม

3.4.2 การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลล์ูโลสกับแกมมา-ไกลซีนด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting)

หลังจากทำการสังเคราะห์ได้ผลึกแกมมา-ไกลซีนแล้วจะทำการบดผลึกไกลซีนด้วยกระบวนการ ball milling เพื่อให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงในระดับนาโน จากนั้นจึงทำการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มคอมโพสิตดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.5 โดยทำการผสมอนุภาคผงผลึกแกมมา-ไกลซีนกับสารละลายแบคทีเรียเซลล์ูโลสที่เตรียมไว้ในอัตราส่วนแกมมา-ไกลซีนที่ 5 10 15 30 50 และ 70 wt% ตามลำดับ ปั่นกวนให้เข้ากันต่อเป็นเวลา 15 นาที แล้วทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) จากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นระยะเวลา 21 ชั่วโมง แสดงอัตราส่วนดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงอัตราส่วนในการทำคอมโพสิตแผ่นฟิล์มระหว่างแบคทีเรียเซลล์ูโลสกับแกมมา-ไกลซีน

BC	แกมมา-ไกลซีน
(g)	(% wt)
215	5
215	10
215	15
215	30
215	50
215	70



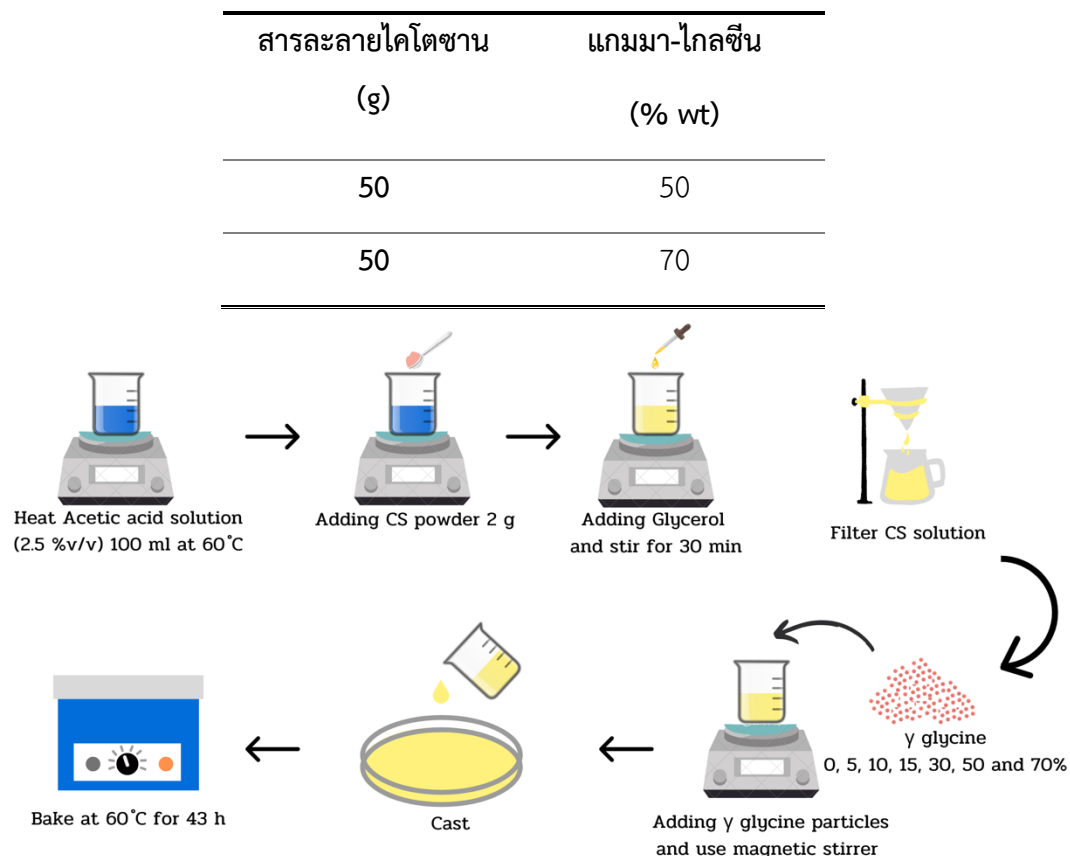
ภาพประกอบที่ 3.5 แสดงวิธีการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลล์ูโลสกับแกมมา-ไกลซีนแบบหล่อแบบ (Casting)

3.4.3 การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting)

ในการทำคอมโพสิตแผ่นฟิล์มระหว่างแกมมา-ไกลซีนกับสารละลายไคโตซานจะทำการบดผลึกไกลซีนด้วยวิธีการ ball milling เพื่อให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงในระดับนาโน จากนั้นจึงทำการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มคอมโพสิตดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.6 โดยทำการผสมอนุภาคผงผลึกแกมมา-ไกลซีนกับสารละลายไคโตซานที่เตรียมไว้ในอัตราส่วนแกมมา-ไกลซีนที่ 5 10 15 30 50 และ 70 wt% ตามลำดับ กวนผสมให้เข้ากันเป็นระยะเวลา 15 นาที แล้วทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) จากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นระยะเวลา 43 ชั่วโมง แสดงอัตราส่วนดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงอัตราส่วนในการทำคอมโพสิตแผ่นฟิล์มระหว่างแกมมา-ไกลซีนกับสารละลายไคโตซาน

สารละลายไคโตซาน (g)	แกมมา-ไกลซีน (% wt)
50	5
50	10
50	15
50	30



ภาพประกอบที่ 3.6 แสดงวิธีการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตระหว่างไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนแบบหล่อแบบ (Casting)

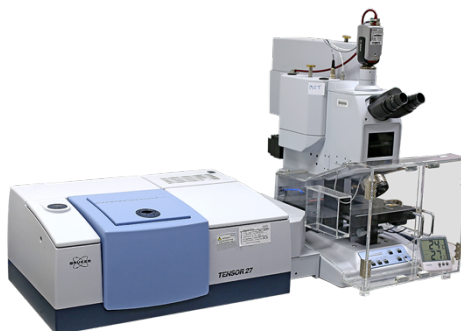
3.5 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์เอกลักษณ์

3.5.1 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีชนิด ATR (Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy: ATR-FTIR)

เป็นเทคนิคที่สามารถใช้วิเคราะห์ จำแนกประเภทของสาร เพื่อบอกหมู่ฟังก์ชันของสารที่นำมาวิเคราะห์ และบอกความเป็นเอกลักษณ์ของสารที่นำมาวิเคราะห์ โดยอาศัยหลักการการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น $4000\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งใช้วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและระบุชนิดของไกลซีน โดยในการวิเคราะห์เริ่มจากการนำผลึกไกลซีนมาบดละเอียดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) และอัดขึ้นรูปให้เป็นเม็ดจะได้เม็ดสารตัวอย่างที่บางและมีความโปร่งใส จึงนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (ATR-FTIR) และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิเมอร์ธรรมชาติทั้งสองชนิด (แบคทีเรียเซลลูโลส ไคโตซาน) และฟิล์มคอมโพสิตระหว่างทั้งสองชนิดกับแกมมา-ไกลซีน ซึ่งการเตรียมตัวอย่างทำได้โดยตัดฟิล์มให้มีขนาด $1\times 1\text{ cm}$ เพื่อทำการตรวจสอบ

3.5.1.1 หลักการทำงานของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (ภาพประกอบที่ 3.7) อาศัยหลักการของการดูดกลืนคลื่นรังสีช่วงกลางอินฟราเรด ซึ่งความยาวคลื่นที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอยู่ในช่วง $4,000-700\text{ cm}^{-1}$ เนื่องจากโมเลกุลของสารดูดกลืนแสงช่วงอินฟราเรดเข้าไปทำให้พันธะในโมเลกุลจะเกิดการสั่น (Stretching) และการหมุน (Bending) จึงทำให้โมเลกุลเกิดความเปลี่ยนแปลง ซึ่งการที่โมเลกุลนั้นจะดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ก็จะต้องมีความถี่การสั่นของโมเลกุลในสารนั้น ๆ ตรงกับความถี่ของรังสีอินฟราเรดนั้นด้วย ซึ่งสารแต่ละชนิดมีค่าความถี่การสั่นที่เฉพาะตัว จึงใช้ในการสัณฐานหมู่ฟังก์ชันของสารนั้น ๆ ได้



ภาพประกอบที่ 3.7 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี [48]

ที่มา: https://www.scri.or.th/bdd/images/IAR_LAB/FTIR.png

3.5.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

เป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจวัดลักษณะทางสัณฐานวิทยา และลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของลักษณะผลึกแกมมา-ไกลซีน และแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ธรรมชาติทั้งสองชนิด (แบคทีเรียเซลลูโลส ไคโตซาน) และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติทั้งสองชนิดกับแกมมา-ไกลซีน และตรวจสอบการกระจายตัวของแกมมา-ไกลซีนในแผ่นฟิล์มคอมโพสิตกับพอลิเมอร์ธรรมชาติ ทำการเตรียมตัวอย่างที่จะใช้ตรวจสอบโดยการโรยผงแกมมา-ไกลซีนลงบนคาร์บอนเทปและตัดแผ่นฟิล์มแปะลงบนคาร์บอนเทปที่ติดอยู่บนแผ่นอลูมิเนียม (Stub) จากนั้นใช้เทคนิคสัปดาห์จริงในการเคลือบผิวหน้าตัวอย่างด้วยทองบริสุทธิ์ แล้วจึงนำเข้าเครื่อง SEM เพื่อทำการตรวจวัดต่อไป

3.5.2.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ภาพประกอบที่ 3.8) อาศัยหลักการการส่องกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างด้วยลำอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) โดย Electron gun จะยิงอิเล็กตรอนผ่านเลนส์รวมแสง (Condenser lens) ทำให้อิเล็กตรอนจะรวมตัวกันกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งเลนส์ที่ใช้จะเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อควบคุมลำอิเล็กตรอนให้รวบรวม

อิเล็กตรอนวิ่งเข้าไปชนกับตัวอย่าง จากนั้นจะสะท้อนอิเล็กตรอนที่เกิดอันตรกิริยาต่าง ๆ ออกมา แล้วสะท้อนเข้าหาตัวตรวจจับอิเล็กตรอน (Detector) เพื่อวัดสัญญาณ ซึ่งตัวสัญญาณนี้จะถูกนำไปสร้างเป็นภาพออกมา



ภาพประกอบที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [49]

ที่มา: <http://www.env.eng.chula.ac.th/?q=content/fourier-transform-infrared-spectrometer>

3.5.3 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction: XRD)

ใช้เครื่อง X-ray diffraction: XRD ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.9 ซึ่งเป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบนผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างกัน แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมการแทรกสอด (Diffraction, 2θ) กับความเข้มของแสงที่สะท้อนกลับ (Intensity, a.u.) เพื่อใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างและระบุชนิดของโกลชิน และตรวจสอบเอกลักษณ์ของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ธรรมชาติทั้งสองชนิด (แบคทีเรียเซลลูโลส โคโตซาน) และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติทั้งสองชนิดกับแกมมา-โกลชิน ซึ่งผลึกของพอลิเมอร์ธรรมชาติและแกมมา-โกลชินจะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่วัดได้จากเทคนิค XRD ที่มีรูปแบบเฉพาะตัว

3.5.3.1 หลักการทำงานของเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

รังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดถูกยิงไปยังสารตัวอย่าง เมื่อรังสีเอกซ์กระทบกับหน้าผลึกของสารตัวอย่างจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ กัน โดยระยะห่างและความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไป จากนั้นจะมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวที่คอยรับสัญญาณข้อมูล ซึ่งรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารแต่ละตัวจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึกซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารตัวอย่างหรือบอกความเป็นผลึกของสารตัวอย่างได้



ภาพประกอบที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [50]

ที่มา: <http://www.nano.kmitl.ac.th/ftir/>

3.5.4 การวิเคราะห์โครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์ด้วยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron Radiation X-ray Tomographic Microscopy: SRXTM)

เป็นเทคนิคที่ใช้ดูโครงสร้างภายในของวัตถุแสดงออกมาเป็นภาพสามมิติ โดยการถ่ายภาพตั้งอย่างผ่านกล้องจุลทรรศน์ด้วยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดซินโครตรอน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.10 โดยจะใช้เทคนิค XTM ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของแกมมา-ไกลซีนในแผ่นฟิล์มคอมโพสิตกับพอลิเมอร์ธรรมชาติทั้งสองชนิด

3.5.4.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์ด้วยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน

โดยขั้นตอนหลัก ๆ ของการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค XTM จะเริ่มจากการเตรียมชิ้นงานใส่บน stub โดยต้องเตรียมชิ้นงานให้มีขนาดเล็กหรือบาง เพื่อให้แสงซินโครตรอนสามารถทะลุผ่านได้ดี หลังจากนั้นนำชิ้นงานเข้าไปใส่ที่ sample holder ในห้องทดลองและทำการควบคุมตำแหน่งของชิ้นงาน เพื่อให้สามารถเก็บภาพของชิ้นงานได้อย่างครบถ้วน จากนั้นกด X-ray on ให้แสงซินโครตรอนวิ่งชนกับชิ้นงาน โดยการวิเคราะห์ชิ้นงานแต่ละชิ้น จะใช้เวลาครั้งละ 17 นาที เมื่อครบ 17 นาที จะได้ภาพออกมาที่เรียกว่าภาพ Projection จากนั้นนำภาพ Projection มาเข้าโปรแกรมที่ชื่อว่า Octopus Reconstruction เพื่อเปลี่ยนเป็นภาพส่วนตัวของชิ้นงาน และเมื่อนำภาพส่วนตัวเหล่านั้นมาประกอบกันจะแสดงภาพสามมิติของชิ้นงานได้โดยใช้โปรแกรม Drishti ซึ่งจะให้เห็นโครงสร้างภายในของชิ้นงาน และยังสามารถทำการ segmentation องค์ประกอบที่อยู่ภายในโครงสร้างได้



ภาพประกอบที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์เอกซ์เรย์ด้วยรังสีเอกซ์ในย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน [51]

ที่มา: <https://www.sri.or.th/th/beamline/beamline-overview.html?view=article&id=4240>

3.5.5 การวิเคราะห์ผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope)

เป็นเทคนิคที่ใช้แสงเป็นตัวช่วยทำให้มองเห็นภาพของวัตถุ ใช้ดูพื้นผิวของลักษณะชิ้นงานในรูปแบบสองมิติ และสามารถกำหนดกำลังขยายได้ตามความต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ดูลักษณะทางกายภาพของผลึกแกมมา-ไกลซีนที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกผลึกของสารละลายแอลฟา-ไกลซีนกับเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารละลายแอลฟา-ไกลซีนกับเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3)

3.5.5.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

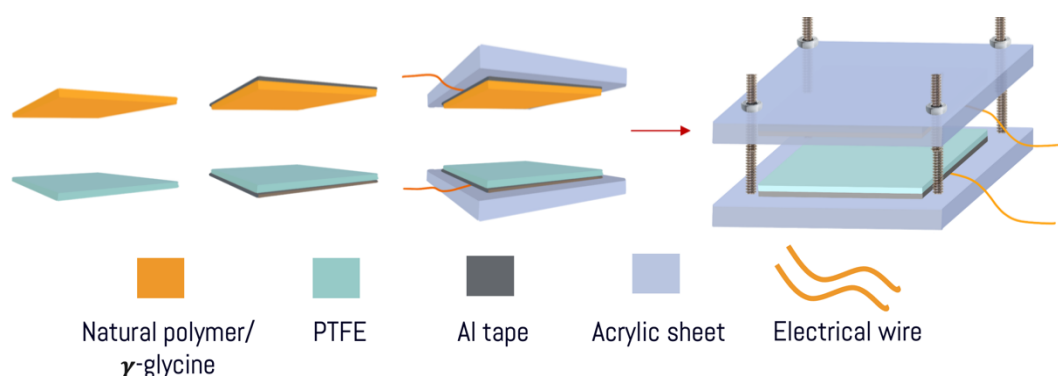
กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.11 เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงเป็นตัวช่วยในการทำให้มองเห็นภาพของวัตถุ โดยที่แสงจะวิ่งผ่านระบบเลนส์ที่กำลังขยายต่าง ๆ และส่องไปที่วัตถุก่อนที่แสงจะสะท้อนกลับเข้ามาสู่สายตาของเรา จึงทำให้เห็นภาพได้โดยการมองผ่านเลนส์ Eyepiece



ภาพประกอบที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง
ที่มา: แลปวิจัย ชั้น9 อาคาร19 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

3.6 การสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริก

อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กในงานวิจัยนี้ สร้างตามรูปแบบการสัมผัสโดยการให้แรงกระทำในแนวตั้งฉาก (Vertical contact-separation mode) โดยอุปกรณ์แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนด้านบนเตรียมจากแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติ (แบคทีเรียเซลลูโลส และไคโตซาน) กับแกมมา-ไกลซีน เพื่อเป็นชั้นสัมผัส จากนั้นวางสายไฟบนแผ่นคอมโพสิตและติดด้วยเทปทองแดงเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า (Electrode) แล้วปิดด้วยแผ่นอะคริลิก (Acrylic sheet) เพื่อป้องกันชั้นสัมผัสและขั้วอิเล็กโทรด และส่วนด้านล่างเตรียมได้เช่นเดียวกับส่วนด้านบนแต่ชั้นสัมผัสเป็นแผ่นเทฟลอน (PTFE) แล้วจะทำการยึดสองส่วนโดยการยึดแผ่นอะคริลิกด้วยสปริงทั้ง 4 มุมของอุปกรณ์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.12



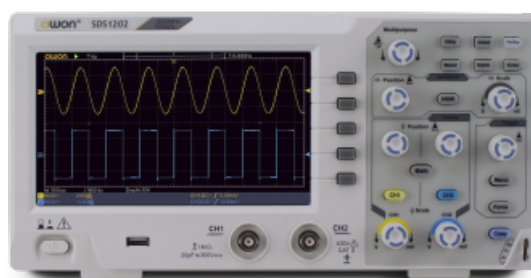
ภาพประกอบที่ 3.12 แสดงส่วนประกอบและโครงสร้างของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริก

3.7 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นของงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope; Oc) และเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter; DMM) โดยจะทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) ค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output power) และทดสอบความสามารถในการชาร์จประจุตัวเก็บประจุ (Capacitor)

3.7.1. หลักการทำงานของเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope: Oc)

เครื่องออสซิลโลสโคป (ภาพประกอบที่ 3.13) มีหลักการทำงานจะอาศัยการบังคับการเบี่ยงเบนอิเล็กตรอน ซึ่งเครื่องออสซิลโลสโคปประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ คือ หลอดรังสีแคโทด (Cathode-Ray Tube) ระบบเบี่ยงเบนแนวตั้ง (Vertical Deflection System) ระบบเบี่ยงเบนแนวนอน (Horizontal Deflection System) และโพรบ ซึ่งอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นเมื่อให้ความร้อนกับหลอดรังสีแคโทด จากนั้นจะถูกเร่งความเร็ว พุ่งไปกระทบจอภาพและแสดงผลของสัญญาณที่ได้รับ โดยก่อนที่อิเล็กตรอนจะพุ่งไปกระทบจอภาพ จะผ่านแผ่นเบี่ยงเบน 2 ชุด ได้แก่ แผ่นเบี่ยงเบนแนวตั้ง (Vertical Deflection Plate) และแผ่นเบี่ยงเบนแนวนอน (Horizontal Deflection Plate) ซึ่งจะอิเล็กตรอนจะเกิดการเบี่ยงเบนขึ้นในแนวตั้งและแนวนอนอย่างอิสระ โดยอาศัยหลักการเบี่ยงเบนทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Deflection) จึงทำให้ควบคุมอิเล็กตรอนตำแหน่งต่าง ๆ ของจอแสดงภาพได้ ซึ่งวิธีการวัดค่าทางไฟฟ้าสามารถทำได้โดย นำสายไฟ 2 สาย จากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกเชื่อมต่อกับโพรบในของเครื่อง จากนั้นให้แรงกดกับอุปกรณ์ สัญญาณจะปรากฏบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป และบันทึกข้อมูล

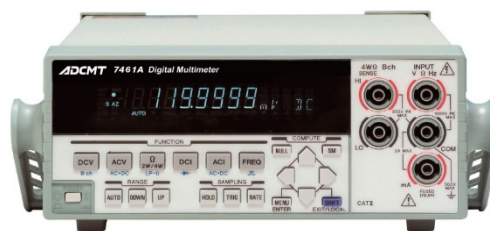


ภาพประกอบที่ 3.13 เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope; Oc) [52]

ที่มา: <https://eleshop.eu/owon-sds1202-oscilloscope.html>

3.7.2 หลักการทำงานของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter; DMM)

ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (ภาพประกอบที่ 3.14) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดค่าทางไฟฟ้าได้หลายประเภท เช่น ไฟฟ้ากระแสตรง ไฟฟ้ากระแสสลับ ความต้านทานไฟฟ้า ความต่างศักย์ ซึ่งมีวิธีการวัดค่าทางไฟฟ้า คือ นำสายไฟ 2 สาย จากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกเชื่อมต่อกับโพรบในของเครื่อง โดยเชื่อมสายสีแดงเข้ากับขั้วบวกและสีดำเข้ากับขั้วลบ จากนั้นให้แรงกดกับอุปกรณ์สัญญาณจะปรากฏบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ และบันทึกข้อมูล



ภาพประกอบที่ 3.14 เครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter; DMM) [53]

ที่มา: <https://www.adcmt.com/en/products/dmm>

บทที่ 4

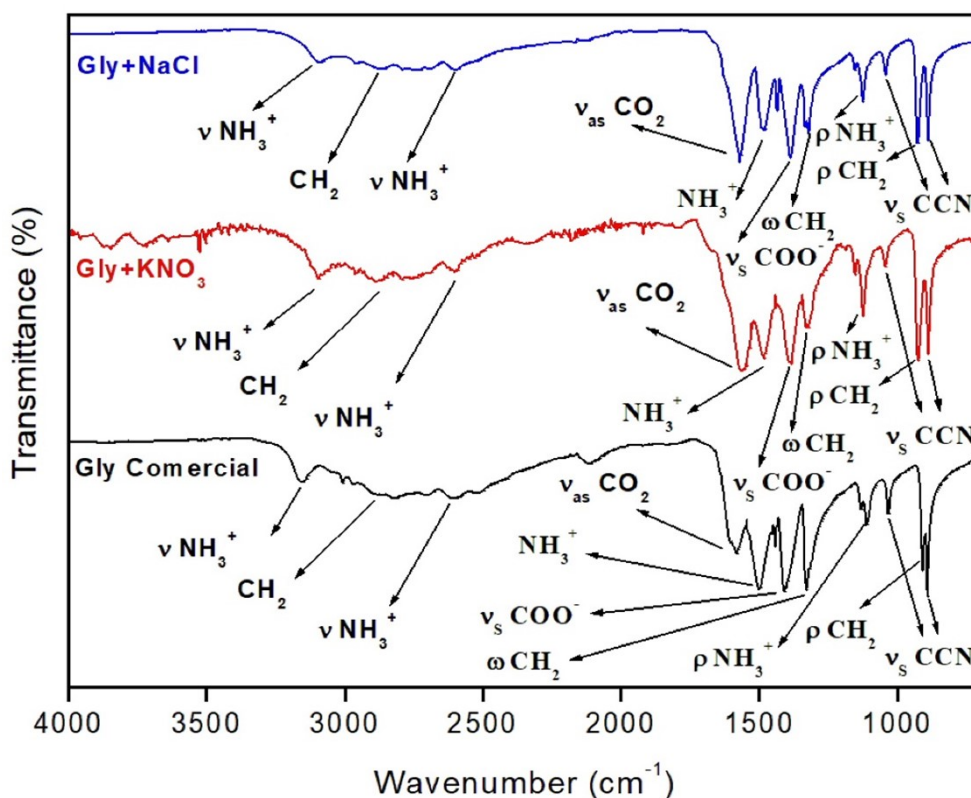
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ การตรวจสอบวิเคราะห์เอกลักษณ์ของผงลิกแกมมา-ไกลซีน แผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส (BC) แผ่นฟิล์มไคโตซาน (CS) และแผ่นฟิล์มวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์ธรรมชาติ (BC และ CS) กับแกมมา-ไกลซีน นอกจากนี้ยังแผ่นฟิล์มคอมโพสิตเหล่านี้มาศึกษาลักษณะทางกายภาพ และสัญญาณวิทยา เพื่อยืนยันความบริสุทธิ์ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่เตรียมได้ จากนั้นนำฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีนมาประกอบเป็นอุปกรณ์ TENG ในรูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉาก และศึกษาประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้า ซึ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์ทั้งหมดเป็นดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของผงลิกแกมมา-ไกลซีนด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ชนิดATR (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy: ATR-FTIR)

จากการนำผงไกลซีนที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกผลึกช้า ตรวจสอบเอกลักษณ์เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและระบุชนิดของไกลซีนด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (IR) ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง $4000-700\text{ cm}^{-1}$ ดังภาพประกอบที่ 4.1 เป็นการแสดงพีคการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันของไกลซีนทางการค้าและไกลซีนที่สังเคราะห์ขึ้นจากเกลือทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) ซึ่งไกลซีนทางการค้า (แสดงตามภาพประกอบที่ 4.1 เส้นสีดำ) ปรากฏพีคการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชัน ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 3154 cm^{-1} และ 2607 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ NH_3^+ พีคการดูดกลืนที่ 2891 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ CH_2 พีคการดูดกลืนที่ 1584 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตร (Asymmetrically stretching vibration) ของพันธะ CO_2 พีคการดูดกลืนที่ 1406 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ COO^- พีคการดูดกลืนที่ 1329 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบกระดิก (Wagging vibration) ของพันธะ CH_2 พีคการดูดกลืนที่ 1115 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบโยก (Rocking vibration) ของพันธะ NH_3^+ พีคการดูดกลืนที่ 1032 และ 887 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ CCN และพีคการดูดกลืนที่ 914 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบโยก (Rocking vibration) ของพันธะ CH_2 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งพีคการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันของไกลซีนทางการค้าที่ปรากฏขึ้นทั้งหมดสอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของไกลซีน (ดังภาพประกอบที่แสดงในภาคผนวก) และเมื่อพิจารณาไกลซีนที่สังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการตกผลึกช้าของไกลซีนทางการค้ากับเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) (ภาพประกอบที่ 4.1 เส้นสีน้ำเงิน) และไกลซีนทางการค้ากับเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) (ภาพประกอบที่ 4.1 เส้นสีแดง) จากการวิเคราะห์พบว่าไกลซีนที่สังเคราะห์ได้มีตำแหน่งพีคการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันที่

สอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของไกลซีนเช่นเดียวกับไกลซีนทางการค้า แต่จากการพิจารณาพีคการดูดกลืนที่เป็นลักษณะเฉพาะ (fingerprint) ของไกลซีน คือ ช่วงความยาวคลื่นประมาณ $1200\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$ ปรากฏพีคการดูดกลืนทั้งหมด 4 พีค ที่มีลำดับความเข้มของพีค (intensity) สูงต่ำแตกต่างกัน โดยไกลซีนทางการค้ามีลำดับความเข้มของพีค (intensity) ที่พีคการดูดกลืนที่ 1584 cm^{-1} ต่ำกว่าพีคการดูดกลืนที่ 1502 1406 และ 1329 cm^{-1} และไกลซีนที่สังเคราะห์ได้มีลำดับความเข้มของพีค (intensity) ที่พีคการดูดกลืนที่ 1502 และ 1329 cm^{-1} ต่ำกว่าพีคการดูดกลืนที่ 1584 และ 1406 cm^{-1} และเมื่อพิจารณาพบว่าไกลซีนทางการค้ามีลำดับความเข้มของพีค (intensity) สอดคล้องกับข้อมูลงานวิจัยของ Sergio Pilling และคณะ [54] จึงบอกได้ว่าผลึกไกลซีนทางการค้าเป็นไกลซีนโครงสร้างแอลฟา และพบว่าผลึกไกลซีนที่สังเคราะห์ได้มีลำดับความเข้มของพีค (intensity) สอดคล้องกับข้อมูลงานวิจัยของ Sd. Zulifiqar Ali Ahamed และคณะ [55] และ M. Esthaku Peter และคณะ [56] ที่ทำการสังเคราะห์ผลึกแกมมา-ไกลซีน จึงสามารถยืนยันได้เบื้องต้นว่าผลึกไกลซีนที่สังเคราะห์ได้เป็นไกลซีนโครงสร้างแกมมา



ภาพประกอบที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของผลึกแกมมา-ไกลซีน เส้นสีดำ: ไกลซีนทางการค้า เส้นสีแดง: แกมมา-ไกลซีนที่สังเคราะห์จากเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) และ เส้นสีน้ำเงิน: แกมมา-ไกลซีนที่สังเคราะห์จากเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

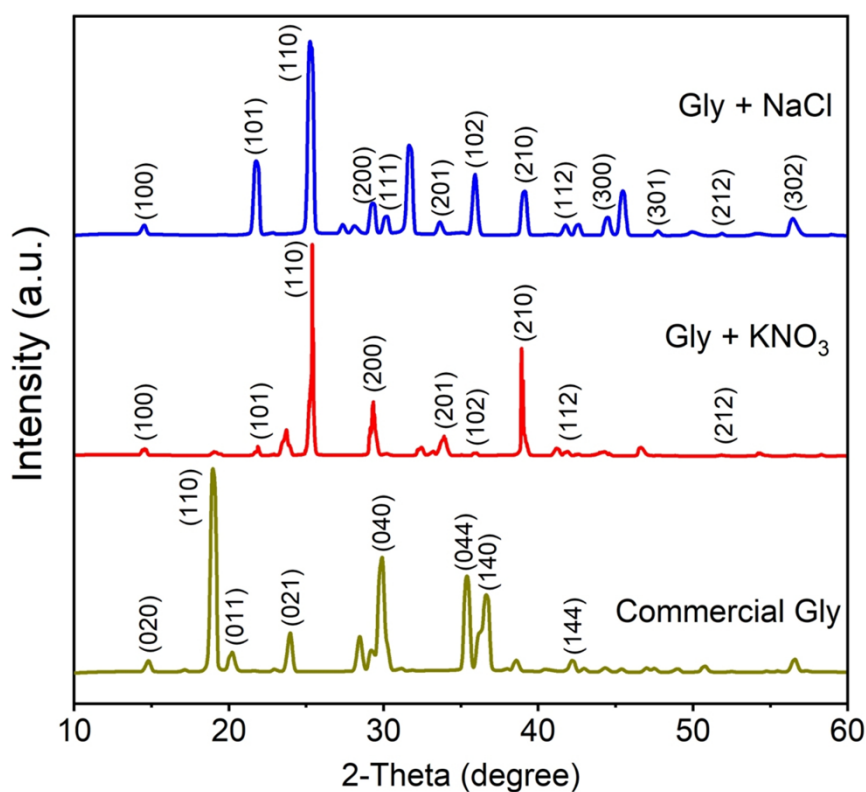
ตารางที่ 4.1 แสดงช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะของไกลซีน

ช่วงการดูดกลืน (cm^{-1})	รูปแบบการสั่นของพันธะ	หมู่ฟังก์ชัน/พันธะ
3154	การสั่นแบบยืดหด	NH_3^+ group
2891	การสั่นแบบยืดหด	CH_2
2607	การสั่นแบบยืดหด	NH_3^+ group
1584	การสั่นแบบยืดหด	CO_2
1502	การสั่นแบบยืดหด	NH_3^+ group
1406	การสั่นแบบยืดหด	COO^-
1329	การสั่นแบบกระดิก	CH_2
1115	การสั่นแบบโยก	NH_3^+ group
1032	การสั่นแบบยืดหด	CCN
914	การสั่นแบบโยก	CH_2
887	การสั่นแบบยืดหด	CCN

4.2 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของผงผลึกแกมมา-ไกลซีนจากกระบวนการตกตะกอนของสารละลายไกลซีนทางการค้ากับเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique: XRD)

จากการตรวจสอบผงไกลซีนที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกผลึกซ้ำ และนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อระบุโครงสร้างผลึกและระบุนิคมของไกลซีน โดยเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของไกลซีนทางการค้ากับไกลซีนที่สังเคราะห์ขึ้นจากเกลือทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.2 ซึ่งรูปแบบการเลี้ยวเบนของไกลซีนทางการค้า (ภาพประกอบที่ 4.2 เส้นสีเหลือง) พบพิกที่เพิ่มขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ 14.9° 19° 20.1° 24° 30° 35.3° 36.6° และ 42.3° สอดคล้องกับระบบผลึกของระนาบ (020) (110) (011) (021) (040) (044) (140) และ (144) ตามลำดับ ซึ่งการปรากฏของตำแหน่งพิกและระนาบของไกลซีนทางการค้ามีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากงานวิจัยของ ของ S. Anbu Chudar Azhagan และ S. Ganesan [57] และ S. Sankar และคณะ [58] จึงบอกได้ว่าผลึกไกลซีนทางการค้าเป็นไกลซีนโครงสร้างแอลฟา จากนั้นเปรียบเทียบกับไกลซีนที่สังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการตกผลึกซ้ำของ

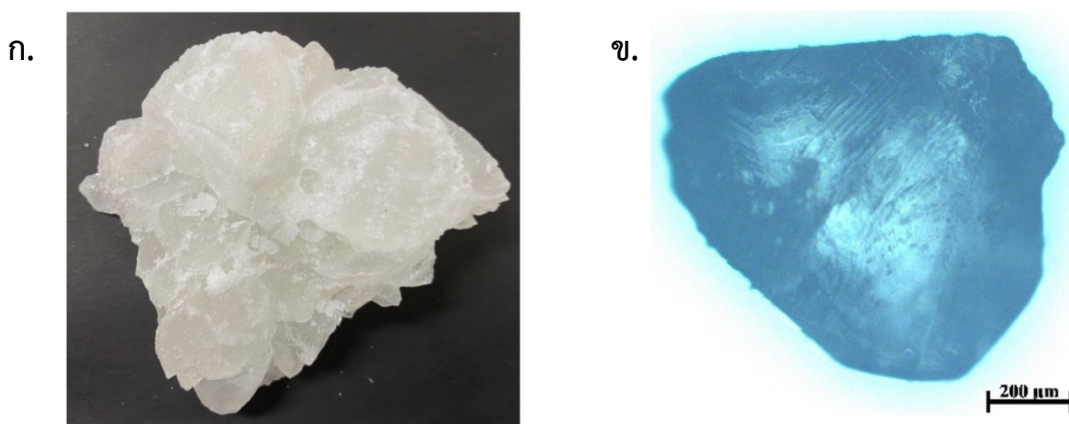
ไกลซินทางการค้ากับเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) (ภาพประกอบที่ 4.2 เส้นสีน้ำเงิน) และไกลซินทางการค้ากับเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) (ภาพประกอบที่ 4.2 เส้นสีแดง) พบพีคที่เกิดขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ 14.62° 21.78° 25.36° 29.54° 30.27° 33.65° 36.03° 39.27° 41.66° 44.69° 47.74° 51.78° และ 56.55° สอดคล้องกับระบบผลึกของระนาบ (100) (101) (110) (200) (111) (201) (102) (210) (112) (300) (301) (212) และ (302) ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่าไกลซินที่สังเคราะห์ได้มีตำแหน่งของพีคต่างจากไกลซินทางการค้า ซึ่งการปรากฏของตำแหน่งพีคและระนาบส่วนใหญ่ของไกลซินที่สังเคราะห์ขึ้นนี้ มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของข้อมูลจากงานวิจัยของ Sd. Zulifiqar Ali Ahamed และคณะ [55] ที่ทำการสังเคราะห์ผลึกของแกมมา-ไกลซิน ซึ่งตรงตามข้อมูลมาตรฐาน JCPDS เลขที่ 06-0230 ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal structure) $a=b \neq c$ โดยมีค่า lattice parameter $a, b = 7.0134$ และ $c = 5.1735 \text{ \AA}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ผลึกแกมมา-ไกลซิน



ภาพประกอบที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแกมมา-ไกลซินจากกระบวนการตกตะกอนของสารละลายไกลซินทางการค้าที่มีโครงสร้างแอลฟา กับเกลือ NaCl (เส้นสีน้ำเงิน) KNO_3 (เส้นสีแดง)

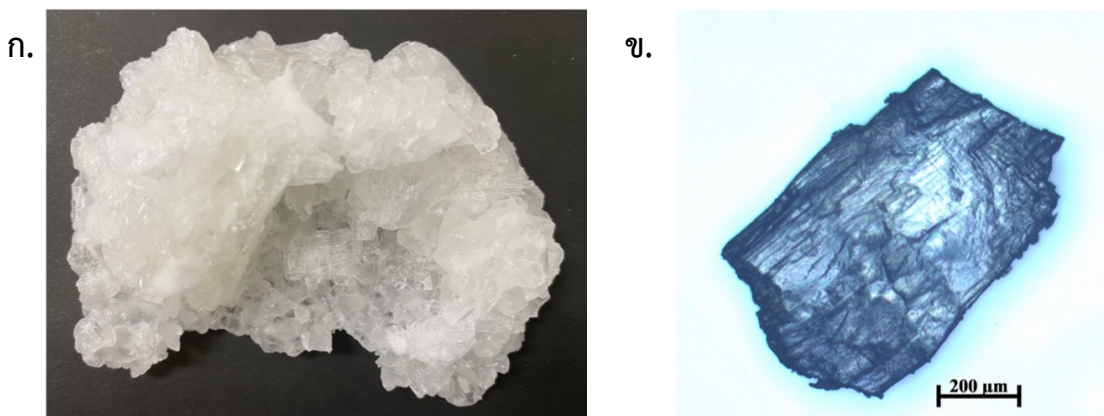
4.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลึกแกมมา-ไกลซีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM)

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลึกแกมมา-ไกลซีนที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) กับแอลฟา-ไกลซีน อัตราส่วน เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) : แกมมา-ไกลซีน เท่ากับ 3:1 พบว่าผลึกแกมมา-ไกลซีนที่สังเคราะห์ขึ้นได้หลังจากทำการตกผลึกภายในระยะเวลา 28 วัน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.3 ก. ผลึกที่ได้มีความโปร่งแสง มีสีขาวขุ่น และเมื่อนำผลึกที่ได้ไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ด้วยกำลังขยาย 5X พบว่าผลึกมีรูปร่างหลายหน้า (Polyhedral) และมีขนาดผลึก $286.24 \pm 21.96 \mu\text{m}$ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.3 ข.



ภาพประกอบที่ 4.3 ก. แสดงลักษณะผลึกแกมมา-ไกลซีนที่สังเคราะห์ขึ้นได้จากกระบวนการตกผลึกในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) กับแอลฟา-ไกลซีน ข. ภาพถ่ายผลึกแกมมา-ไกลซีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope)

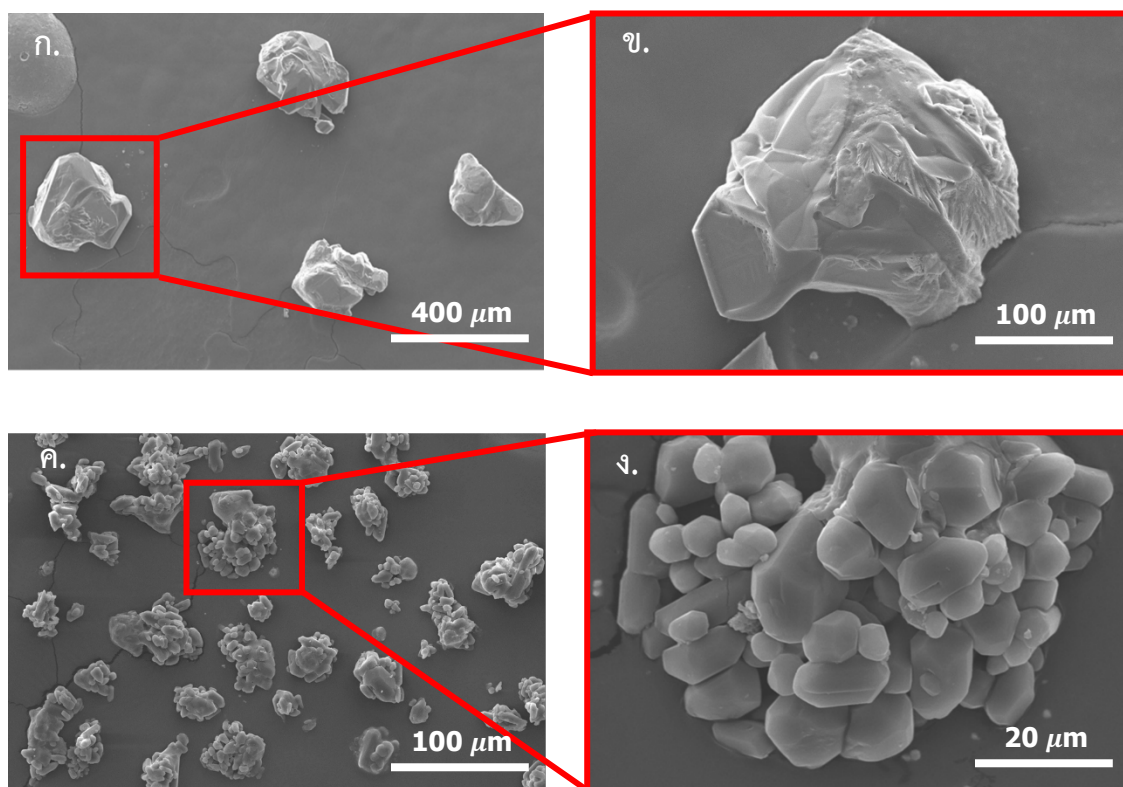
และจากการจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลึกแกมมา-ไกลซีนที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนของสารละลายเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) กับแอลฟา-ไกลซีน อัตราส่วน เกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) : แกมมา-ไกลซีน เท่ากับ 2:1 พบว่าผลึกแกมมา-ไกลซีนที่สังเคราะห์ขึ้นได้หลังจากทำการตกผลึกภายในระยะเวลา 20 วัน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.4 ก. ผลึกที่ได้มีความโปร่งแสง มีสีขาวขุ่น เช่นเดียวกับผลึกที่ได้จากการตกตะกอนของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) กับแอลฟา-ไกลซีน เมื่อนำผลึกที่ได้ไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ด้วยกำลังขยาย 5X พบว่าผลึกมีรูปร่างหลายหน้า (Polyhedral) และมีขนาดผลึก $236.39 \pm 47.79 \mu\text{m}$ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.4 ข.



ภาพประกอบที่ 4.4 ก. แสดงลักษณะผลึกแกมมา-ไกลซีนที่สังเคราะห์ขึ้นได้จากการตกผลึกในสารละลายเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) กับแอลฟา-ไกลซีน ข. ภาพถ่ายผลึกแกมมา-ไกลซีนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope)

4.4 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของผลึกแกมมา-ไกลซีนของเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

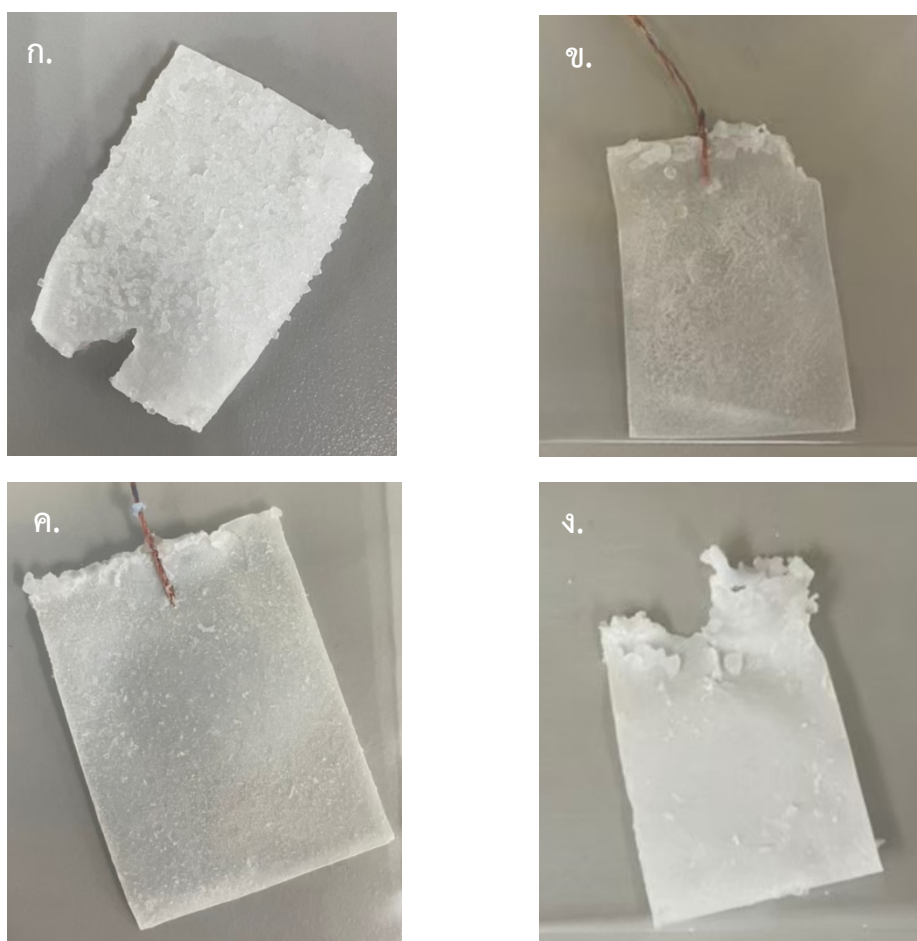
จากการนำผงอนุภาคแกมมา-ไกลซีนที่ได้จากการสังเคราะห์ผลึกแกมมา-ไกลซีนจากกระบวนการตกตะกอนของสารละลายไกลซีนทางการค้าที่มีโครงสร้างแอลฟา กับเกลือ NaCl จากนั้นนำมาบดผลึกด้วยมือและบดด้วยกระบวนการเครื่องบดแบบลูกบอล (Ball milling) เพื่อให้ได้ผงอนุภาค จากนั้นทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคของผงอนุภาคด้วยการใช้เทคนิค SEM ที่กำลังขยายตั้งแต่ 400x 1500x และ 8000x พบว่าผงอนุภาคแกมมา-ไกลซีนที่บดด้วยมือ มีรูปร่างอิสระ ผลึกมีขนาดใหญ่เฉลี่ยประมาณ $148.34 \pm 11.29 \mu\text{m}$ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.5 ก-ข. ที่กำลังขยาย 400x และ 1500x ตามลำดับ และเมื่อนำผงไปบดด้วยกระบวนการเครื่องบดแบบลูกบอลและผ่านการคัดขนาด (Sieve) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.5 ค. ซึ่งเป็นกำลังขยายเดียวกันกับภาพ ข. โดยจะเห็นว่าผงอนุภาคมีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อขยายภาพที่กำลังขยาย 8000x ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.5 ง. จะเห็นว่า รูปร่างของผงอนุภาคมีลักษณะแตกต่างกัน โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ $5.06 \pm 2.14 \mu\text{m}$ การกระจายตัวของรูปร่างและขนาดของผงอนุภาคค่อนข้างกว้าง นอกจากนี้จะเห็นว่าอนุภาคขนาดเล็กมีการเกาะเป็นกลุ่มก้อนกับอนุภาคขนาดใหญ่บางจุด



ภาพประกอบที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM ของผงแกมมา-ไกลซีน ของเกลือ NaCl ที่ได้จากการบดมือและบดด้วยการ Ball milling ก.-ข. ผงแกมมา-ไกลซีนที่ได้จากการบดมือ ที่กำลังขยาย 400x และ 1500x ตามลำดับ ค.-ง. ผงแกมมา-ไกลซีนที่ได้จากการบดด้วยการ Ball milling ที่กำลังขยาย 1500x และ 8000x ตามลำดับ

4.5 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบปลูกผลึกของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสกับสารละลายเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3)

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสจากการปลูกผลึกบนแผ่นฟิล์ม ที่แขวนทิ้งไว้ในสารละลายไกลซีนกับเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) จำนวน 4 ปีกเกอร์ ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน คือ 2.5 M จากนั้นสังเกตการเกิดของผลึกในแต่ละปีกเกอร์ตามระยะเวลาที่กำหนด คือ 3 5 7 และ 14 วัน จากนั้นเมื่อครบกำหนดของแต่ละปีกเกอร์นำฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสที่ได้มาตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ ผลพบว่า มีผลึกเกิดขึ้นมาเกาะบนแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส ทั้ง 3 5 7 และ 14 วัน ดังแสดงภาพประกอบที่ 4.6 อย่างไรก็ตามผลึกที่เกิดขึ้นมาเกาะบนแผ่นฟิล์มนั้นมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังไม่สามารถควบคุมการเกิดผลึกให้มีขนาดและการกระจายตัวที่ดีได้

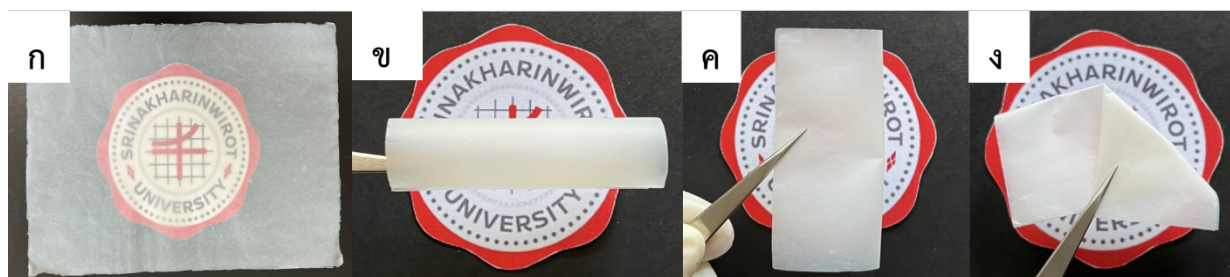


ภาพประกอบที่ 4.6 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสแบบปลูกผลึกในสารละลายไกลซีนกับเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) ที่แขวนทิ้งไว้เป็นเวลา ก. 3 วัน ข. 5 วัน ค. 7 วัน ง. 14 วัน

4.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีน

4.6.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส

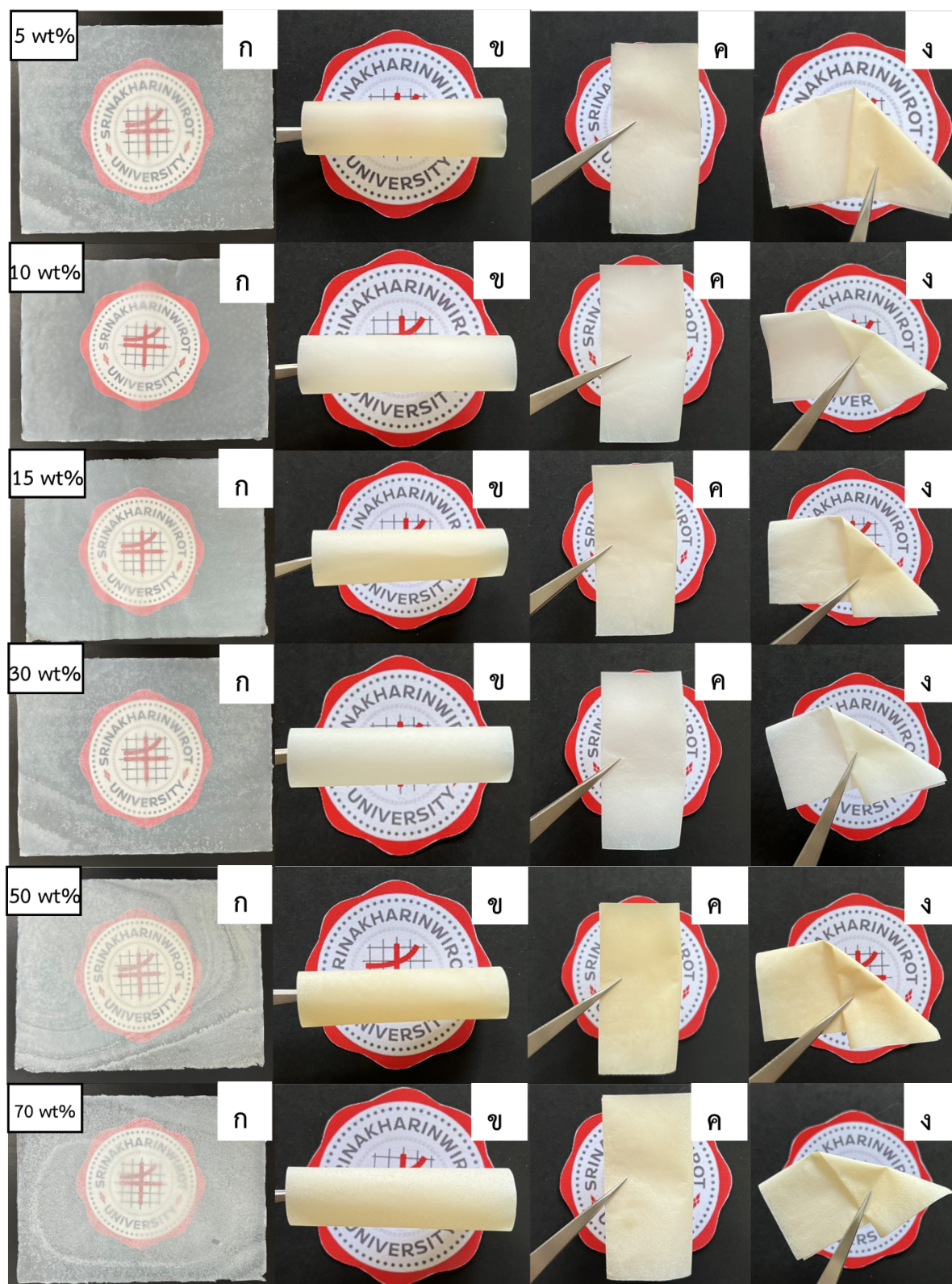
การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) และนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 21 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสที่ได้มาตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ พบว่าแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสที่ได้มีลักษณะสีขาวขุ่น โปร่งแสง โปร่งใส มีความยืดหยุ่น สามารถม้วน พับ และบิดงอได้ โดยมีความหนาเฉลี่ย $35 \pm 5 \mu\text{m}$ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.7



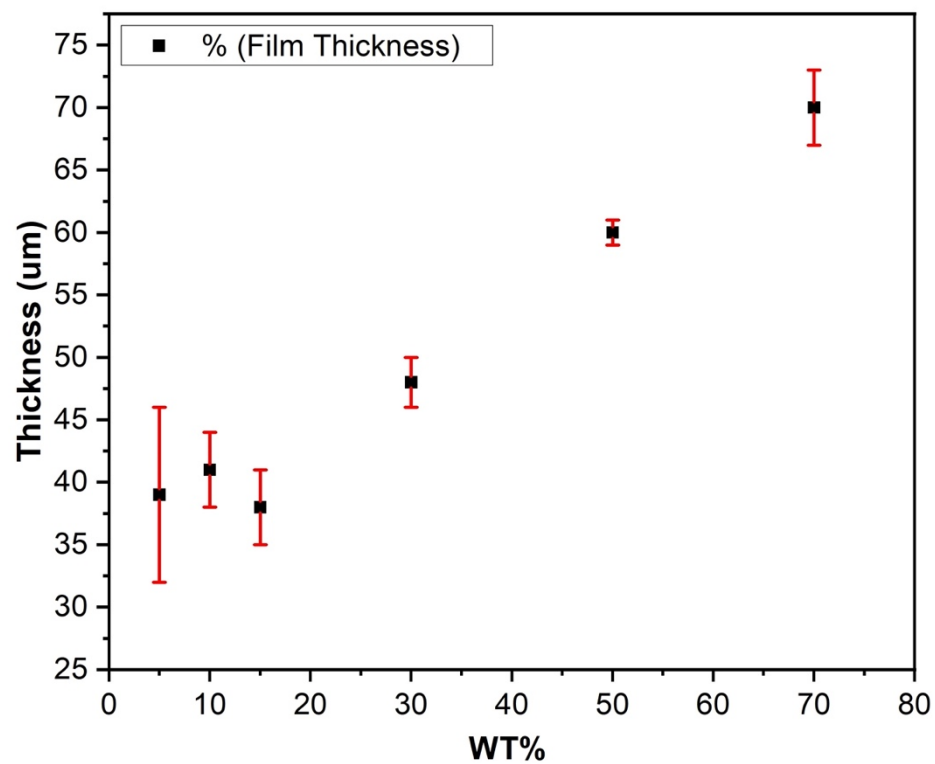
ภาพประกอบที่ 4.7 แสดงลักษณะของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ ก. แสดงความโปร่งแสงของฟิล์ม และทดสอบความยืดหยุ่นด้วยการ ข. ม้วน ค. พับ และ ง. บิด

4.6.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน

จากการตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสที่เติมด้วยแกมมา-ไกลซีน และขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) ที่อัตราส่วน 5 10 15 30 50 และ 70 wt% พบว่า แผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสที่ได้มีลักษณะสีขาวขุ่นมากกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ แต่ยังคงโปร่งแสง โปร่งใส มีความยืดหยุ่น สามารถม้วน พับ และบิดงอได้ แม้จะมีการเพิ่มปริมาณแกมมา-ไกลซีน ดังในภาพประกอบที่ 4.8 และมีความหนาเฉลี่ยที่แตกต่างกัน โดยที่ 5 wt% มีความหนาเฉลี่ย $39 \pm 7 \mu\text{m}$ 10 wt% มีความหนาเฉลี่ย $41 \pm 3 \mu\text{m}$ 15 wt% มีความหนาเฉลี่ย $38 \pm 3 \mu\text{m}$ 30 wt% มีความหนาเฉลี่ย $48 \pm 2 \mu\text{m}$ 50 wt% มีความหนาเฉลี่ย $60 \pm 1 \mu\text{m}$ และ 70 wt% มีความหนาเฉลี่ย $70 \pm 7 \mu\text{m}$ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.9



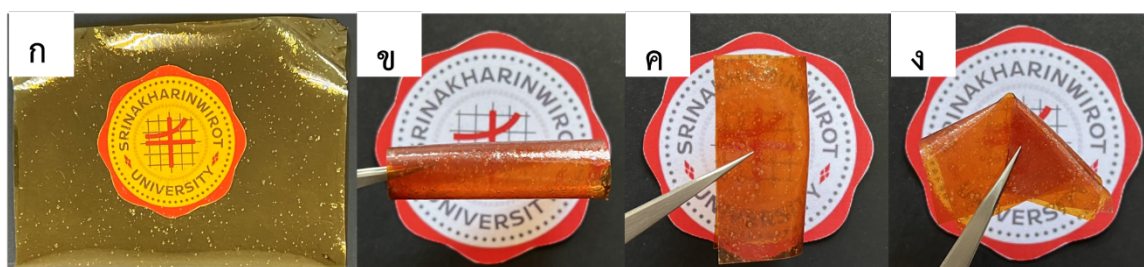
ภาพประกอบที่ 4.8 แสดงลักษณะแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบที่เรียเซลล์ูโลสที่เติมแกมมา-ไกลซีน ที่อัตราส่วน 5 10 15 30 50 และ 70 wt% ก. แสดงความโปร่งแสงของฟิล์ม ทดสอบความยืดหยุ่น ด้วยการ ข. ม้วน ค. พับ ง. บิด



ภาพประกอบที่ 4.9 กราฟแสดงความหนาของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบที่เรียวเซลล์ูโลสที่เติมแกมมา-ไกลซีน

4.6.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มไคโตซาน

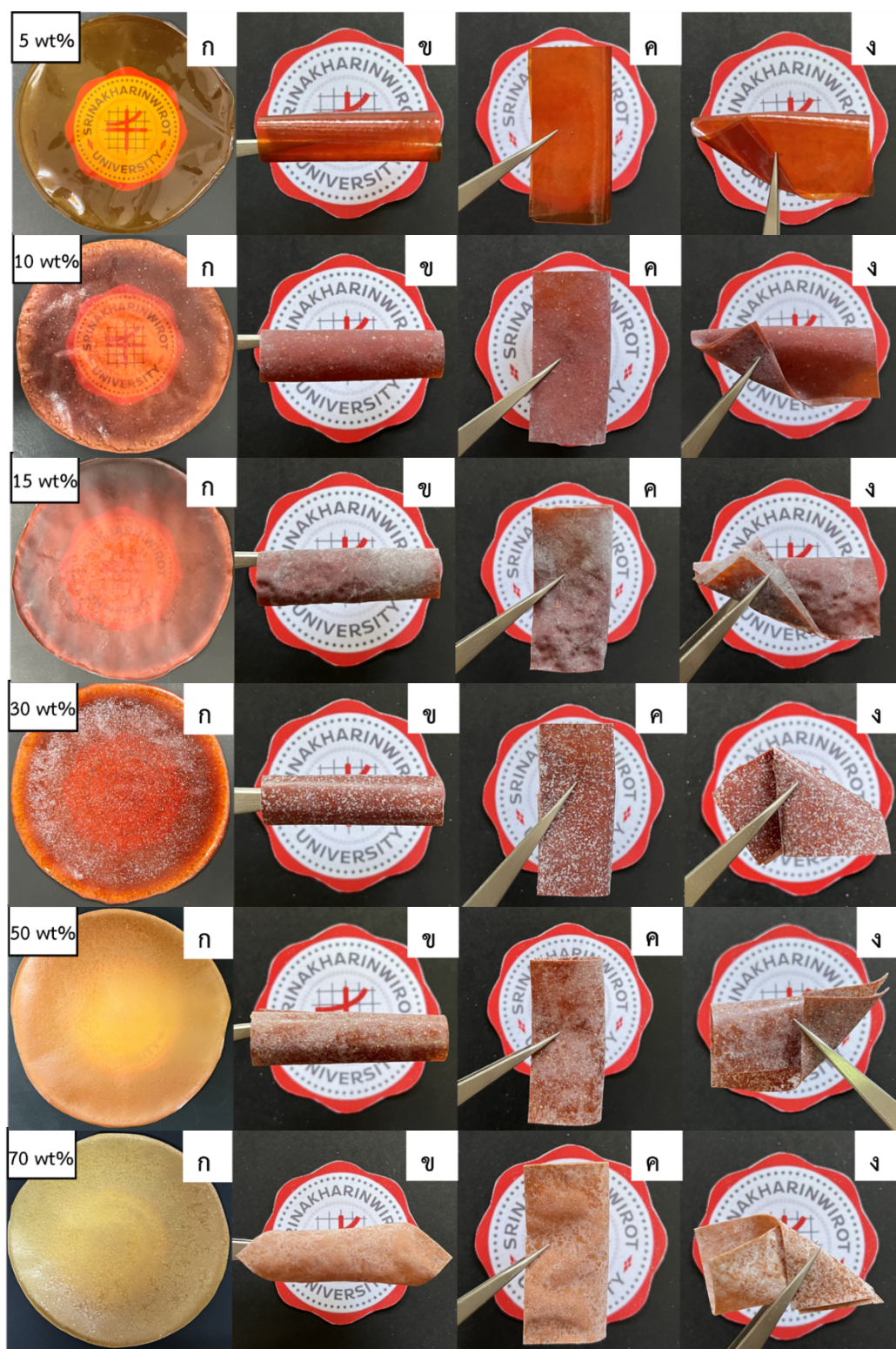
การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มไคโตซานที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) และนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 43 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นฟิล์มไคโตซานที่ได้มาตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ พบว่าแผ่นฟิล์มไคโตซานที่ได้มีลักษณะโปร่งแสง โปร่งใส มีความยืดหยุ่น สามารถม้วน พับ และบิดงอได้ โดยมีความหนาเฉลี่ย $443 \pm 31 \mu\text{m}$ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.10



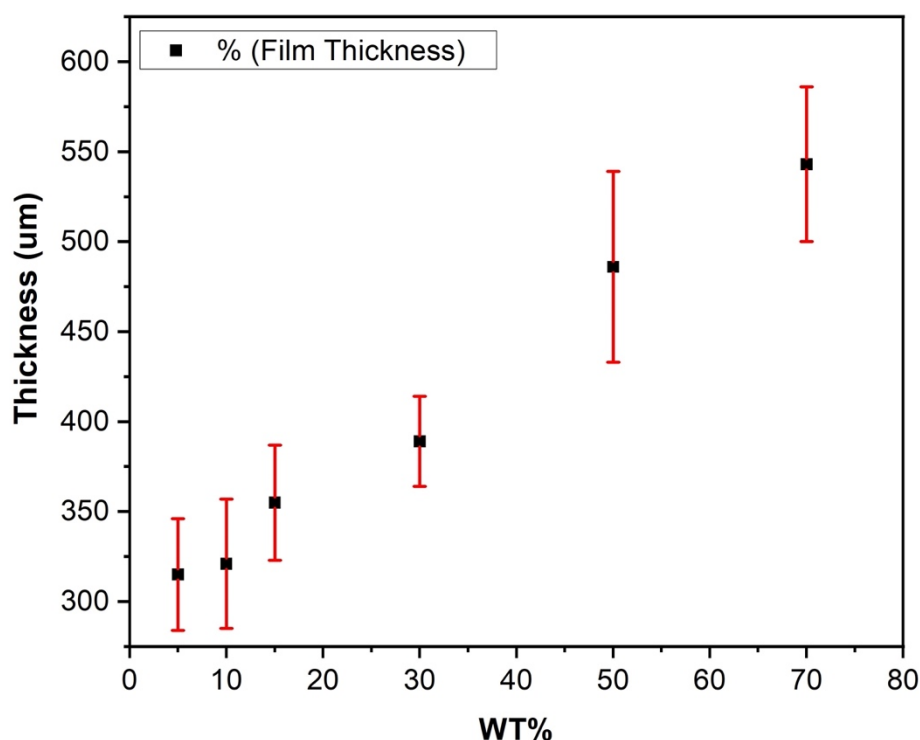
ภาพประกอบที่ 4.10 แสดงลักษณะของฟิล์มไคโตซานบริสุทธิ์ ก. แสดงความโปร่งแสงของฟิล์ม และทดสอบความยืดหยุ่นด้วยการ ข. ม้วน ค. พับ และ ง. บิด

4.6.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มคอมโพสิตระหว่างไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน

จากการตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานที่เติมด้วยแกมมา-ไกลซีน และขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) ที่อัตราส่วน 5 10 15 30 50 และ 70 wt% พบว่า แผ่นฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานที่ได้มีลักษณะสีเหลืองขุ่นถึงสีน้ำตาลมากกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มไคโตซานบริสุทธิ์ แต่ยังคงโปร่งแสง มีความยืดหยุ่น สามารถม้วน พับ และบิดงอได้ แม้จะมีการเพิ่มปริมาณแกมมา-ไกลซีน ดังในภาพประกอบที่ 4.11 และมีความหนาเฉลี่ยที่แตกต่างกัน โดยที่ 5 wt% มีความหนาเฉลี่ย $315 \pm 31 \mu\text{m}$ 10 wt% มีความหนาเฉลี่ย $321 \pm 36 \mu\text{m}$ 15 wt% มีความหนาเฉลี่ย $355 \pm 32 \mu\text{m}$ 30 wt% มีความหนาเฉลี่ย $389 \pm 25 \mu\text{m}$ 50 wt% มีความหนาเฉลี่ย $486 \pm 53 \mu\text{m}$ และ 70 wt% มีความหนาเฉลี่ย $543 \pm 43 \mu\text{m}$ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.12



ภาพประกอบที่ 4.11 แสดงลักษณะแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบทีเรียเซลลูโลสที่เติมแกมมา-ไกลซีน ที่อัตราส่วน 5 10 15 30 50 และ 70wt% ก. แสดงความโปร่งแสงของฟิล์ม ทดสอบความยืดหยุ่นด้วยการ ข. ม้วน ค. พับ ง. บิด



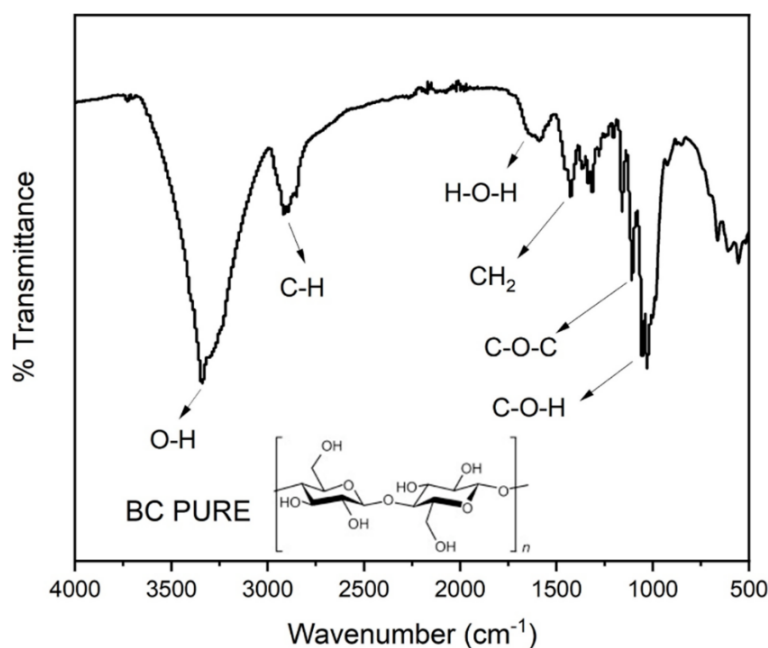
ภาพประกอบที่ 4.12 กราฟแสดงความหนาของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานที่เติมแกมมา-ไกลซีน

4.7 การตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีนด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีชนิด ATR (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy: ATR-FTIR)

4.7.1 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส

จากการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง $4000-400\text{ cm}^{-1}$ เพื่อตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลส แสดงตามภาพประกอบที่ 4.13 ปรากฏพิกการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 3343 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของหมู่ไฮดรอกซิล O-H ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของแบคทีเรียเซลลูโลส พิกการดูดกลืนที่ 2898 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ C-H พิกการดูดกลืนที่ 1633 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบดัดงอ (Bending vibration) ของพันธะ H-O-H ซึ่งแสดงถึงการดูดซับน้ำ พิกการดูดกลืนที่ 1436 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ CH_2 พิกการดูดกลืนที่ 1162 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตร (Asymmetric stretching vibration) ของพันธะ C-O-C ซึ่งบ่งบอกถึงตำแหน่งปีต้า -1,4 (β (1-4 glycosidic bond)) ของพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) และพิกการดูดกลืนที่ 1054 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ C-O-H ดังแสดงในตาราง 4.2 จากการวิเคราะห์แผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ที่ขึ้นรูปได้พบว่าแผ่นฟิล์มมีความ

บริสุทธิ์ เนื่องจากพิกัดทั้งหมดสอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของแบคทีเรียเซลลูโลส และปรากฏพิคการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันสอดคล้องกับการปรากฏพิคการดูดกลืนจากข้อมูลงานวิจัยของ Wang และคณะ [59] ได้ศึกษาการสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสจากแบคทีเรีย และได้ทำการวิเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งพบว่าข้อมูลช่วงการดูดกลืนมีความสอดคล้องกับในงานวิจัย โดยแบคทีเรียเซลลูโลสจะพบช่วงการดูดกลืนที่ 3338 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ O-H (Hydroxyl group) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของแบคทีเรียเซลลูโลส พิคการดูดกลืนที่ 2895 cm^{-1} เป็นพิคการดูดกลืนแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ C-H ของหมู่ CH_2 และหมู่เมทิล (CH_3) ส่วนพิคการสั่นแบบดัดงอ (Bending vibration) ของพันธะ O-H ที่เกิดจากการดูดซับของน้ำเกิดขึ้นในช่วงการดูดกลืน 1642 cm^{-1} พิคการดูดกลืนที่ 1426 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบดัดงอแบบสมมาตร (Symmetric bending vibration) ของพันธะ CH_2 พิคการดูดกลืนที่ 1160 cm^{-1} เป็นพิคการสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตรของพันธะ C-O-C ของปีต้า -1,4 (β -1-4 glycoside) นอกจากนี้ยังพบพิคการดูดกลืนในช่วงคลื่น 1054 cm^{-1} เป็นพิคการสั่นแบบดัดงอ (Bending vibration) ของพันธะ C-O-H ของคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) จึงยืนยันได้ว่าฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ที่ทำการขึ้นรูปไม่พบหมู่ฟังก์ชันของเฟสอินเจือปน



ภาพประกอบที่ 4.13 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมและโครงสร้างทางเคมีของแบคทีเรียเซลลูโลส

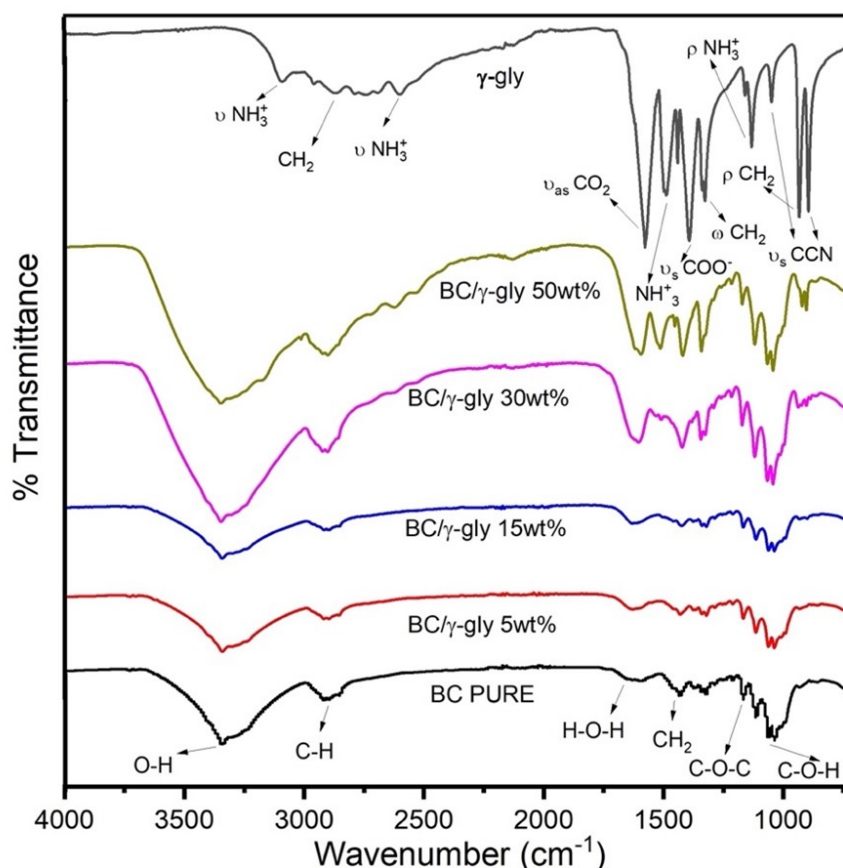
ตารางที่ 4.2 แสดงช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะของแบคทีเรียเซลลูโลส

ช่วงการดูดกลืน (cm^{-1})	รูปแบบการสั่นของพันธะ	หมู่ฟังก์ชัน/พันธะ
3343	การสั่นแบบยืดหด	OH group
2898	การสั่นแบบยืดหด	C-H bond
1633	การสั่นแบบดัดงอ	H-O-H bond
1436	การสั่นแบบยืดหด	CH_2
1162	การสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตร	C-O-C bond
1054	การสั่นแบบยืดหด	C-O-H bond

4.7.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน

จากการนำแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสที่เติมแกมมา-ไกลซีน ทำการเปลี่ยนแปลงที่อัตราส่วน 5 10 15 30 50 และ 70 wt% ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.14 โดยตรวจสอบเอกลักษณ์เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง $4000\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแกมมา-ไกลซีน ปรากฏพีกการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันในช่วงความยาวคลื่นที่ 3098 cm^{-1} 2594 cm^{-1} และ 1488 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ NH_3^+ พีกการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่ 2884 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ CH_2 พีกการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่ 1571 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหดไม่สมมาตร (Asymmetric stretching vibration) ของพันธะ CO_2 พีกการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่ 1385 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหดไม่สมมาตร (Asymmetric stretching vibration) ของพันธะ COO^- พีกการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่ 1322 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบกระดิก (Wagging vibration) ของพันธะ CH_2 พีกการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่ 1039 และ 887 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ CNN และพบพีกการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่ 922 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบโยก (Rocking vibration) ของพันธะ CH_2 ซึ่งจากการสังเกตพีกการดูดกลืนที่เกิดขึ้นของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสที่นำมาผสมกับแกมมา-ไกลซีน ในอัตราส่วน 5 10 15 30 และ 50 wt% สามารถบอกได้ว่า ที่แกมมา-ไกลซีน 5 และ 15 wt% พีกการดูดกลืนทั้งหมดที่พบนั้นสอดคล้องกับพีกการดูดกลืนของแบคทีเรียเซลลูโลส โดยยังไม่ปรากฏพีกเอกลักษณ์เฉพาะของแกมมา-ไกลซีนหลังจากนั้นที่ปริมาณแกมมา-ไกลซีน 30 และ 50 wt% พบว่าเริ่มปรากฏพีกการดูดกลืนที่เป็นพีกเอกลักษณ์

เฉพาะของแกมมา-ไกลซีน ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่า หลังจากที่ทำเป็นฟิล์มคอมโพสิตเพื่อการดูดกลืนที่เป็นพิกเอกลักษณะของแบคทีเรียเซลล์ูลอสันนั้นยังคงอยู่ สังเกตได้จากพิกการดูดกลืนที่ 3343 และ 2898 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ O-H (OH group) และพันธะ C-H ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการทำคอมโพสิตสำเร็จระหว่างแบคทีเรียเซลล์ูลอสและแกมมา-ไกลซีน

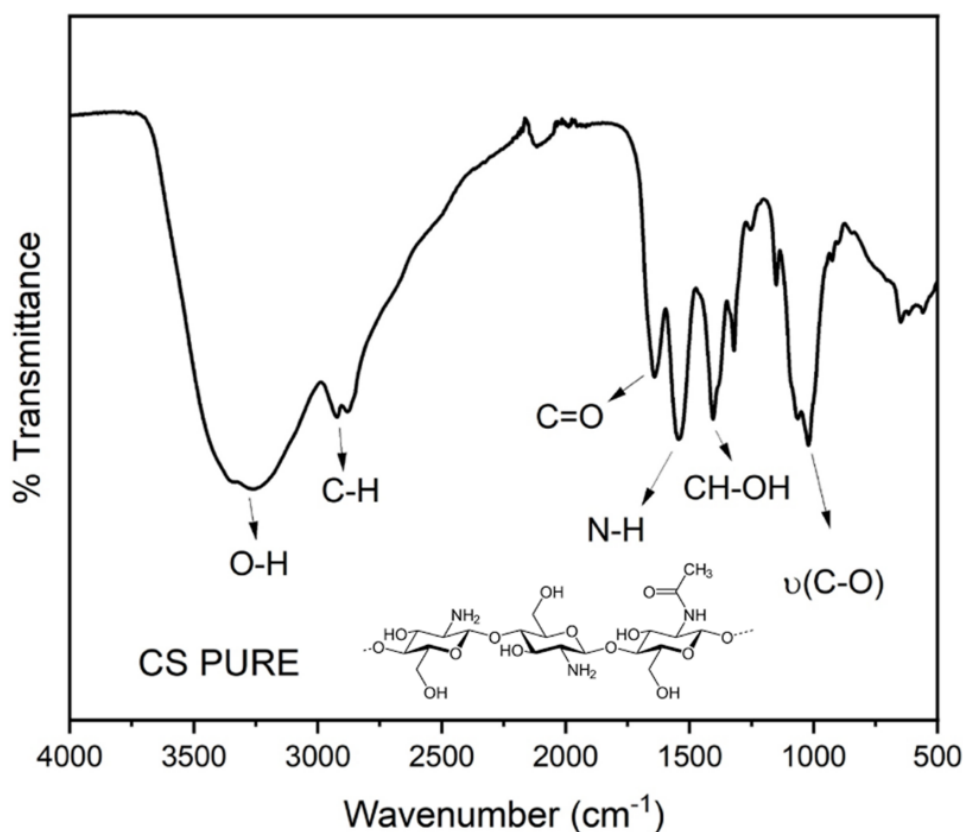


ภาพประกอบที่ 4.14 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลล์ูลอสกับแกมมา-ไกลซีน

4.7.3 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มไคโตซาน

การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของฟิล์มไคโตซานที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ เพื่อตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มไคโตซาน แสดงดังภาพประกอบที่ 4.15 ปรากฏพิกการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 3347 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ O-H (OH group) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของไคโตซาน พิกการดูดกลืนที่ช่วง $2925\text{--}2876\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ C-H พิกการดูดกลืนที่ 1642 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ C=O พิกการดูดกลืนที่ 1544 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบดัดงอ (Bending vibration) ของพันธะ N-H เป็น

การยืนยันของหมู่เอไมด์ (Amide II) พิกการดูดกลืนที่ 1407 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบดัดงอ (Bending vibration) ของพันธะ CH-OH ซึ่งเป็นพิกที่พบโดยทั่วไปในโครงสร้างของไคโตซาน และพิกการดูดกลืนที่ 1024 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ C-O ซึ่งเป็นพิกที่ยืนยันหรือพบได้ทั่วไปจากโครงสร้างไคโตซาน ดังแสดงในตาราง 4.3 ซึ่งจากการวิเคราะห์แผ่นฟิล์มไคโตซานบริสุทธิ์ที่ขึ้นรูปได้พบว่าแผ่นฟิล์มมีความบริสุทธิ์ เนื่องจากพิกทั้งหมดที่กล่าวมาสอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน และปรากฏพิกการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชัน สอดคล้องกับการปรากฏพิกการดูดกลืนจากข้อมูลงานวิจัยของ Queiroz และคณะ [60] ได้ศึกษาและวิเคราะห์ไคโตซาน ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปี ซึ่งพบว่าข้อมูลช่วงการดูดกลืนมีความสอดคล้องกับในงานวิจัย โดยไคโตซานจะพบพิกการดูดกลืนที่ 3291 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ O-H เช่นเดียวกับพันธะไฮโดรเจนในโมเลกุล พิกการดูดกลืนที่ $2921\text{--}2877\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตรและไม่สมมาตร (Symmetric and Asymmetric stretching vibration) ของพันธะ C-H พิกการดูดกลืนที่ 1654 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ C=O ของหมู่เอไมด์ (Amide I) พิกการดูดกลืนที่ 1589 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นแบบดัดงอ (Bending vibration) ของพันธะ N-H ของหมู่เอไมด์ (Amide I) จึงยืนยันได้ว่าฟิล์มไคโตซานบริสุทธิ์ที่ทำการขึ้นรูปไม่พบหมู่ฟังก์ชันของเฟสอื่นเจือปน



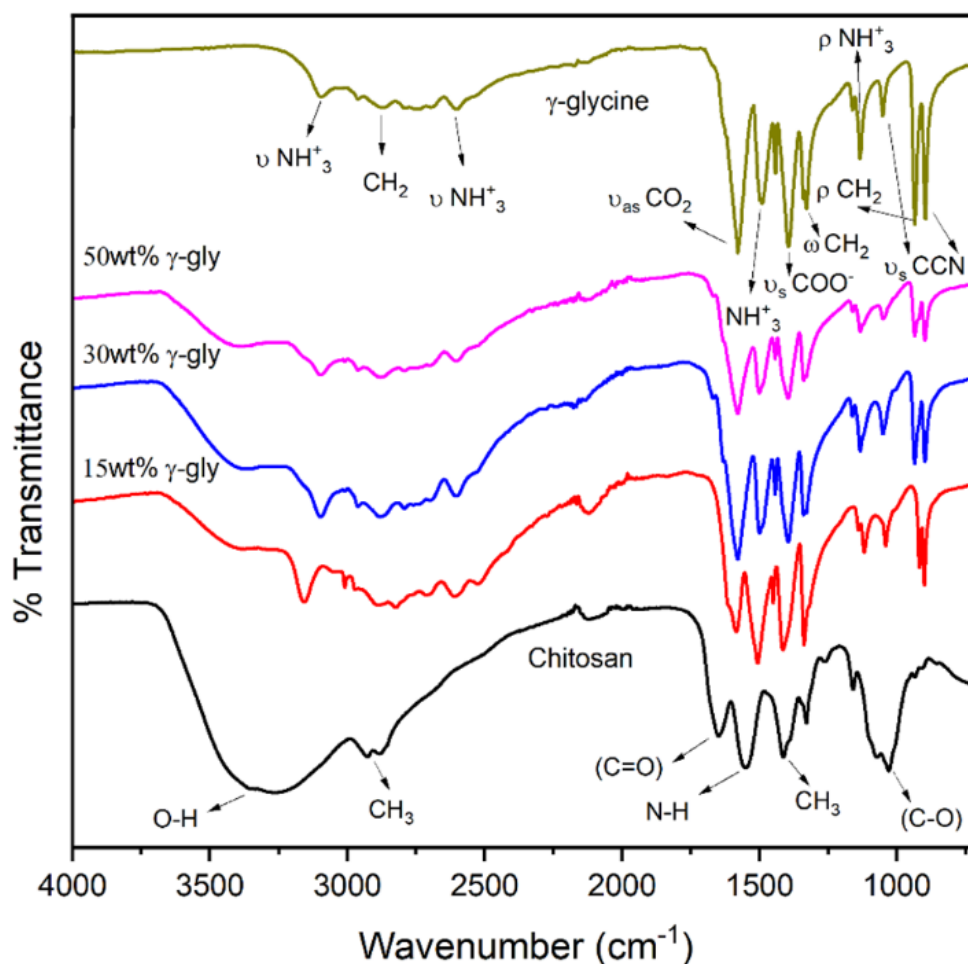
ภาพประกอบที่ 4.15 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมและโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน

ตารางที่ 4.3 แสดงช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะของไคโตซาน

ช่วงการดูดกลืน (cm^{-1})	รูปแบบการสั่นของพันธะ	หมู่ฟังก์ชัน/พันธะ
3347	การสั่นแบบยืดหด	OH group
2925-2876	การสั่นแบบยืดหด	C-H bond
1642	การสั่นแบบยืดหด	C=O bond
1544	การสั่นแบบดัดงอ	N-H bond
1407	การสั่นแบบดัดงอ	CH-OH bond
1024	การสั่นแบบยืดหด	C-O bond

4.7.4 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มคอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน

จากการนำแผ่นฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานที่เติมแกมมา-ไกลซีน เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนแกมมา-ไกลซีนที่ 5 10 15 30 50 และ 70 wt% ตรวจสอบเอกลักษณ์เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี แสดงผลการดูดกลืนตามภาพประกอบที่ 4.16 ซึ่งแกมมา-ไกลซีนปรากฏผลการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่ 3098 2594 และ 1488 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ NH_3^+ พิกการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่ 2884 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ CH_2 พิกการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่ 1571 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหดไม่สมมาตร (Asymmetric stretching vibration) ของพันธะ CO_2 พิกการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่ 1385 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหดไม่สมมาตร (Asymmetric stretching vibration) ของพันธะ COO^- พิกการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่ 1322 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบกระดิก (Wagging vibration) ของพันธะ CH_2 พิกการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่ 1039 และ 887 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ CNN และพบพิกการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่ 922 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบโยก (Rocking vibration) ของพันธะ CH_2 ซึ่งจากการสังเกตพิกการดูดกลืนที่เกิดขึ้นของฟิล์มไคโตซานที่นำมาผสมกับแกมมา-ไกลซีน ในปริมาณ 0 15 30 และ 50 wt% สามารถบอกได้ว่า ที่แกมมา-ไกลซีนปริมาณ 15 30 และ 50 wt% ปรากฏพิกการดูดกลืนที่เป็นพิกเอกลักษณ์ของแกมมา-ไกลซีน จากการวิเคราะห์พบว่า หลังจากที่ทำเป็นฟิล์มคอมโพสิตพิกการดูดกลืนที่เป็นพิกเอกลักษณ์เฉพาะของไคโตซานยังคงอยู่ สังเกตได้จากพิกการดูดกลืนที่ 3347 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะ O-H (OH group) จึงสามารถยืนยันการทำคอมโพสิตระหว่างไคโตซานที่เติมแกมมา-ไกลซีนได้สำเร็จ



ภาพประกอบที่ 4.16 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน

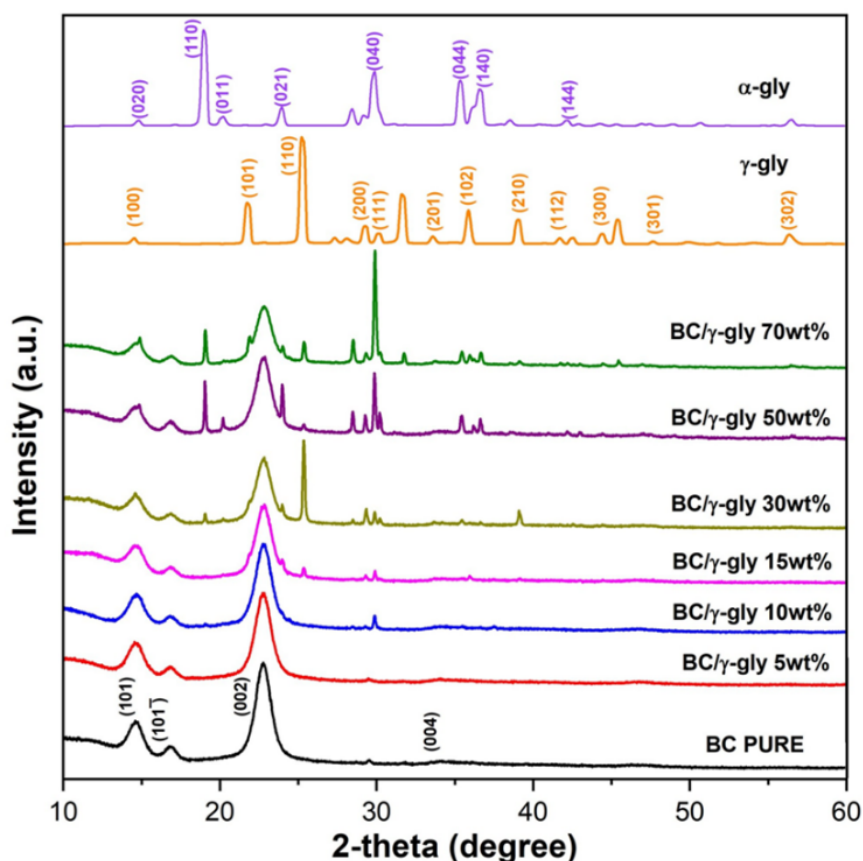
4.8 การตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีนด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique: XRD)

4.8.1 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มแบคทีเรียเซลล์ูโลสและฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลล์ูโลสกับแกมมา-ไกลซีน

จากการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลล์ูโลสแกมมา-ไกลซีน ที่อัตราส่วน 5 10 15 30 50 และ 70 wt% ตามลำดับ ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เพื่อระบุโครงสร้างผลึก ซึ่งปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ดังภาพประกอบที่ 4.17 ปรากฏพีคของแบคทีเรียเซลล์ูโลสบริสุทธิ์ขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ 14.6° 16.8° 22.8° และ 34° ซึ่งสอดคล้องกับระบบผลึกของระนาบ (101) ($10\bar{1}$) (002) และ (004) ตามลำดับ ซึ่งการปรากฏของตำแหน่งพีคและระนาบมีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จาก

งานวิจัยของ Lyubov A. Ivanova และคณะ [61] เมื่อเติมแกมมา-ไกลซีน ที่ปริมาณ 5 wt% (เส้นสีแดง) และ 10 wt% (เส้นสีน้ำเงิน) ไม่ปรากฏพิกการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแกมมา-ไกลซีนที่ใส่ลงไป หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนแกมมา-ไกลซีนที่ 15 wt% (เส้นสีชมพู) ปรากฏพิกการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแกมมา-ไกลซีน 2 พีคที่มุม 2θ เท่ากับ 25.36° และ 29.54° สอดคล้องกับระนาบ (110) และ (200) ที่อัตราส่วน 30 wt% (เส้นสีเหลือง) และ 50 wt% (เส้นสีม่วง) ปรากฏพิกการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแกมมา-ไกลซีน 3 พีคที่มุม 2θ เท่ากับ 25.36° 29.54° และ 38.96° ซึ่งสอดคล้องกับระบบผลึกของระนาบ (110) (200) และ (210) และที่อัตราส่วน 70 wt% (เส้นสีเขียว) ปรากฏพิกการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแกมมา-ไกลซีน 4 พีคที่มุม 2θ เท่ากับ 21.93° 25.36° 29.54° และ 38.96° สอดคล้องกับระนาบ (101) (110) (200) และ (210) จากการวิเคราะห์พบว่าหลังจากที่ทำเป็นฟิล์มคอมโพสิตยังคงมีพิกเอกลักษณ์ของแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์อยู่ แสดงให้เห็นถึงการทำฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีนได้สำเร็จ

แต่อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าในฟิล์มคอมโพสิตได้พบพิกเอกลักษณ์ XRD ของผลึกที่มาจากเฟสแอลฟา-ไกลซีนเกิดขึ้นด้วย จากการสมมติฐานนั้นเป็นเพราะเฟสที่เกิดขึ้นนั้นอาจเกิดในขั้นตอนของการเตรียมฟิล์มคอมโพสิต ส่งผลให้ไกลซีนเกิดการแปลงเฟส เนื่องจากในการทำฟิล์มคอมโพสิต อาศัยการผสมกันระหว่างเฟสเมทริกซ์และผงอนุภาคแกมมา-ไกลซีน เกล็ดแม่แบบ จากนั้นนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60°C ซึ่งจากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า การแปลงเฟสของแกมมา-ไกลซีนเป็นเฟสแอลฟา-ไกลซีน มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การละลาย [62] และ อุณหภูมิ [63] ซึ่งปัจจัยแรกเป็นการละลาย โดยจากกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มคอมโพสิต ระหว่างทำการผสมผงอนุภาคแกมมา-ไกลซีนลงในเฟสเมทริกซ์ที่มีส่วนประกอบของตัวทำละลาย และมีปริมาณมาก เมื่อเทียบกับผงอนุภาคแกมมา-ไกลซีน ที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก โอกาสในการละลายจึงเกิดได้ง่ายส่งผลให้ผงอนุภาคแกมมา-ไกลซีนละลายบางส่วน และปัจจัยที่สอง คือ อุณหภูมิ หลังจากเทส่วนผสมลงในแม่แบบ และนำเข้าตู้อบ จากนั้นเมื่ออบทิ้งไว้เป็นระยะเวลาจนฟิล์มแห้งทำให้มีเวลามากพอให้แกมมา-ไกลซีนที่ละลายอยู่ขณะที่ทำการผสมเป็นฟิล์มคอมโพสิตเกิดการตกผลึก และเนื่องจากไกลซีนตั้งต้นเป็นโครงสร้างแอลฟา เมื่อไม่มีเกลือเป็นตัวช่วยในการเปลี่ยนเฟสให้เป็นโครงสร้างแกมมา ซึ่งไม่มีไอออนของเกลือที่ไปเหนี่ยวนำทำให้ไกลซีนที่ละลายอยู่เกิดความชอบในการเรียงตัว (preferred orientation) ไปในทิศทางที่เป็นโครงสร้างแกมมา ส่งผลให้ไม่เกิดนิวเคลียสของแกมมา-ไกลซีนขึ้น [64, 65] จึงทำให้แกมมา-ไกลซีนที่ตกผลึกบางส่วนเปลี่ยนเฟสเป็นไกลซีนที่มีโครงสร้างแอลฟา ซึ่งเป็นเฟสที่มีความเสถียรมากกว่าไกลซีนโครงสร้างแกมมา

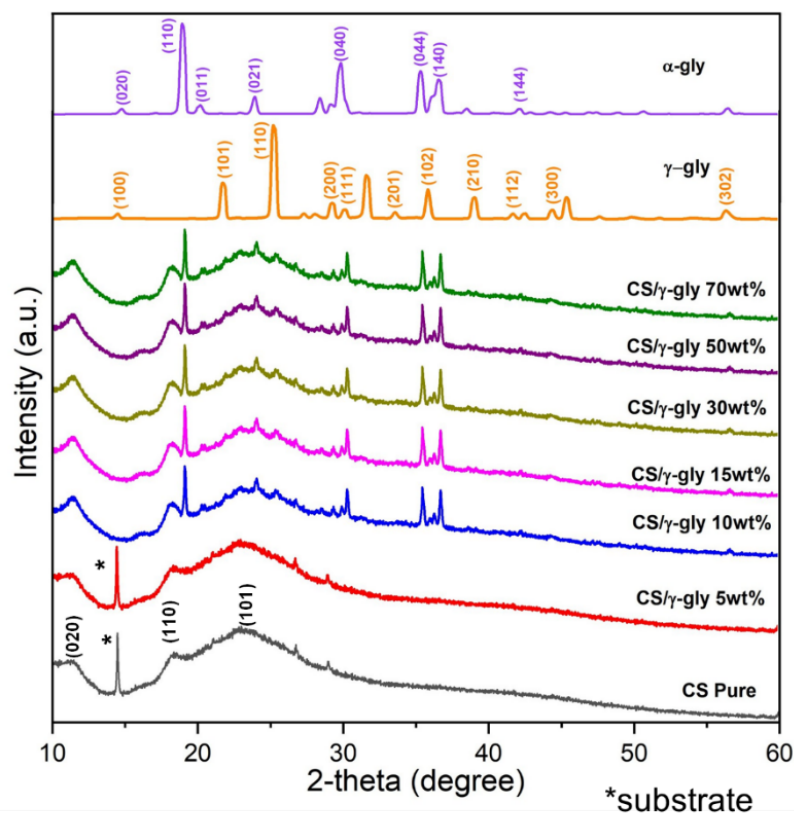


ภาพประกอบที่ 4.17 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ในปริมาณ 5 10 15 30 50 และ 70 wt%

4.8.2 ผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มไคโตซานและฟิล์มคอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน

จากการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ที่อัตราส่วน 5 10 15 30 50 และ 70 wt% ตามลำดับ ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อแบบ (Casting) ทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังภาพประกอบที่ 4.18 พบว่าไคโตซานบริสุทธิ์ พบพิกัดขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ 11.4° 17.8° และ 23.4° ซึ่งสอดคล้องกับระบบผลึกของระนาบ (020) (110) และ (101) ตามลำดับ ซึ่งการปรากฏของตำแหน่งพิกัดและระนาบมีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากงานวิจัยของ Gengxin Hao และคณะ [66] เมื่อเติมแกมมา-ไกลซีน ที่ปริมาณ 5 wt% (เส้นสีแดง) ไม่ปรากฏพิกัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแกมมา-ไกลซีนที่ใส่ลงไป หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนแกมมา-ไกลซีนที่ 10 wt% (เส้นสีน้ำเงิน) ที่อัตราส่วน 15 wt% (เส้นสีชมพู) ที่อัตราส่วน 30 wt% (เส้นสีเหลือง) ที่อัตราส่วน 50 wt% (เส้นสีม่วง) และที่อัตราส่วน 70 wt% (เส้นสีเขียว) ปรากฏพิกัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแกมมา-ไกลซีน 5 พิกัดที่มุม 2θ เท่ากับ 25.36° 29.54° 30.27° 41.66° และ 56.55° สอดคล้องกับระนาบ (110) (200) (111) (300) และ (302) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในฟิล์มคอมโพสิตก็ยังพบพิกัดเมทริกซ์ของไคโตซานบริสุทธิ์อยู่

แสดงให้เห็นถึงการทำฟิล์มคอมโพสิตระหว่างไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนได้สำเร็จ แต่อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าในฟิล์มคอมโพสิตได้พบพีกเอกลักษณ์ XRD ของผลึกที่มาจากเฟสแอลฟา-ไกลซีน เกิดขึ้นด้วย เนื่องจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องเช่นเดียวกับแบคทีเรียเซลลูโลส



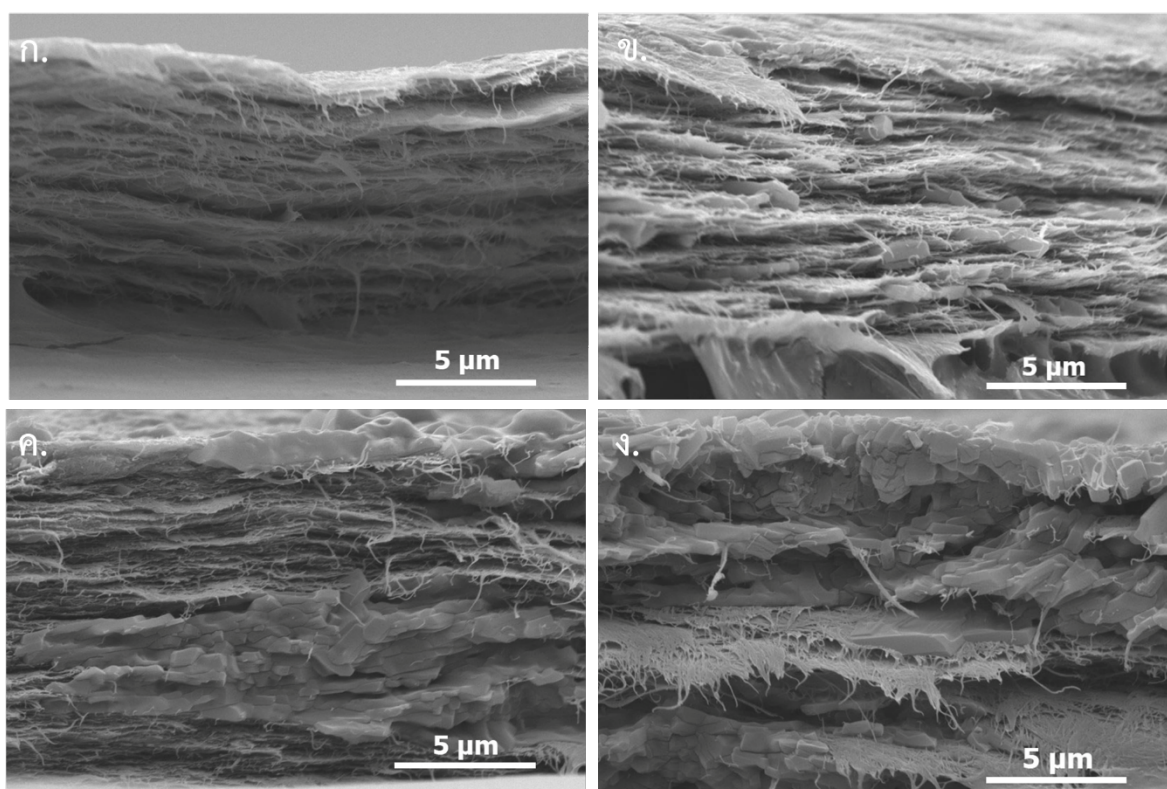
ภาพประกอบที่ 4.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของคอมโพสิตไคโตซานและแกมมา-ไกลซีน ใน ปริมาณ 5 10 15 30 50 และ 70 wt%

4.9 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

4.9.1 ผลการตรวจสอบพื้นฐานวิทยาของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสและฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน

จากการตรวจสอบพื้นฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสและฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีนที่อัตราส่วน 5 15 และ 30 wt% ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบ (Casting) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แบบภาพตัดขวาง (Cross section) ที่กำลังขยาย 20,000x แสดงดังภาพประกอบที่ 4.19

พบว่า ที่แบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ (ภาพประกอบที่ 4.19 ก.) พบเส้นใยของแบคทีเรียเซลลูโลสมีลักษณะเรียงซ้อนกันเป็นชั้นอย่างชัดเจน ซึ่งขนาดของเส้นใยมีขนาดเล็กกว่าในระดับไมครอน หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณแกมมา-ไกลซีนเป็น 5 wt% (ภาพประกอบที่ 4.19 ข.) จากภาพจะเห็นว่า ผลึกแกมมา-ไกลซีนมีการแทรกและกระจายตัวอยู่ตามชั้นของเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลส และเมื่อเพิ่มปริมาณผลึกแกมมา-ไกลซีนขึ้นเป็น 15 และ 30wt% (ภาพประกอบที่ 4.19 ค-ง.) จะเห็นว่าผลึกแกมมา-ไกลซีนเกิดการรวมตัวหรือเกาะกลุ่มกัน เนื่องจากผลึกมีปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ผลึกเกิดการเกาะกลุ่มกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ไม่สามารถแทรกเข้าไปในชั้นของเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสได้สม่ำเสมอ

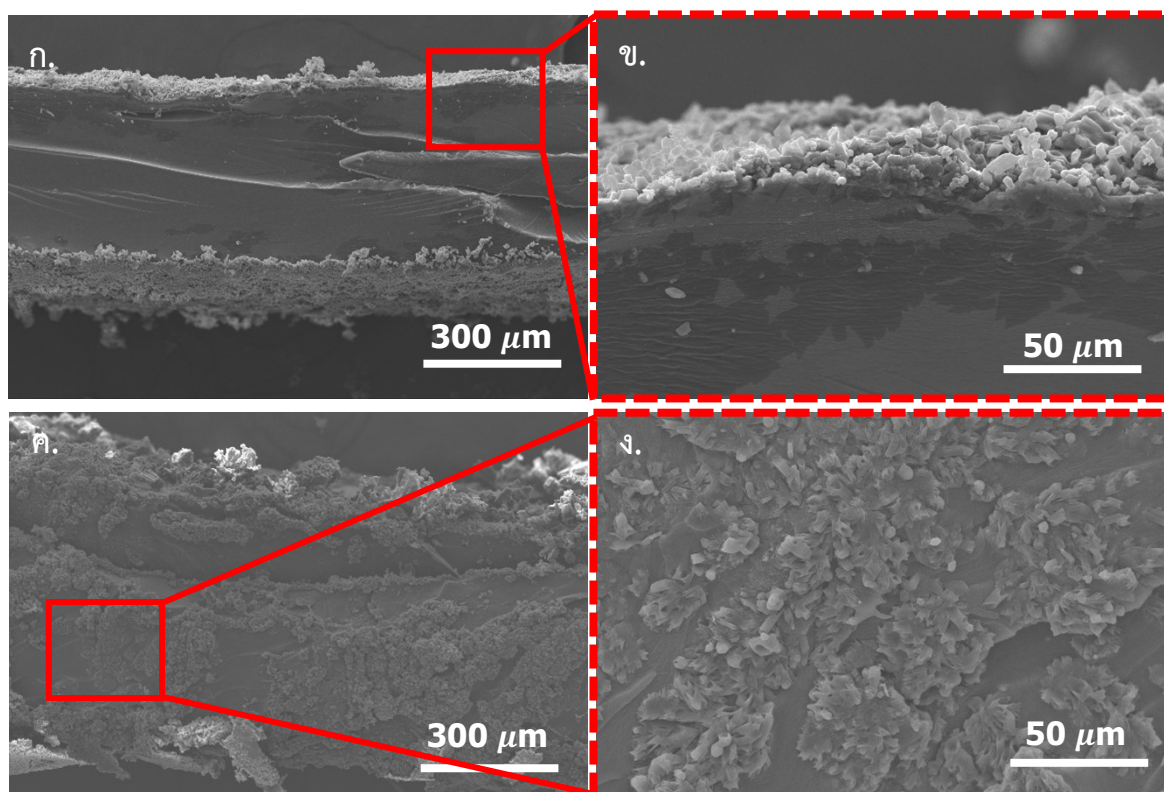


ภาพประกอบที่ 4.19 ภาพถ่าย SEM ของแบคทีเรียเซลลูโลสและคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีนแบบภาพตัดขวาง (Cross section) ก. แบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ ข. คอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 5 wt% ค. คอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 15 wt% ง. คอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 30 wt%

4.9.2 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มไคโตซานและฟิล์มคอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน

จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มไคโตซานและฟิล์มคอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบ (Casting) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์ม ซึ่งจากภาพเป็น

ภาพถ่าย SEM ตามขวาง (Cross section) ที่กำลังขยาย 500x และ 3000x จากภาพประกอบที่ 4.20 ก.-ข. เป็นคอมโพสิตไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ที่อัตราส่วน 15 wt% จากภาพพบการแทรกตัวของผงอนุภาคแกมมา-ไกลซีนในเมทริกซ์ไคโตซานเพียงบางบริเวณเท่านั้น เนื่องจากปริมาณผงแกมมา-ไกลซีนมีปริมาณการเติมที่น้อยเมื่อเทียบกับปริมาณเมทริกซ์ และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณแกมมา-ไกลซีนมากขึ้น จากภาพประกอบที่ 4.20 ค.-ง. เป็นคอมโพสิตไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนที่ 50 wt% พบว่าผงอนุภาคแกมมา-ไกลซีนบางจุดมีการเกาะกลุ่มรวมกันเป็นก้อน นอกจากนี้ยังมีการแทรกตัวและกระจายตัวอยู่ในเนื้อเมทริกซ์ไคโตซานมากกว่าที่เติมแกมมา-ไกลซีนในปริมาณที่ 15 wt%

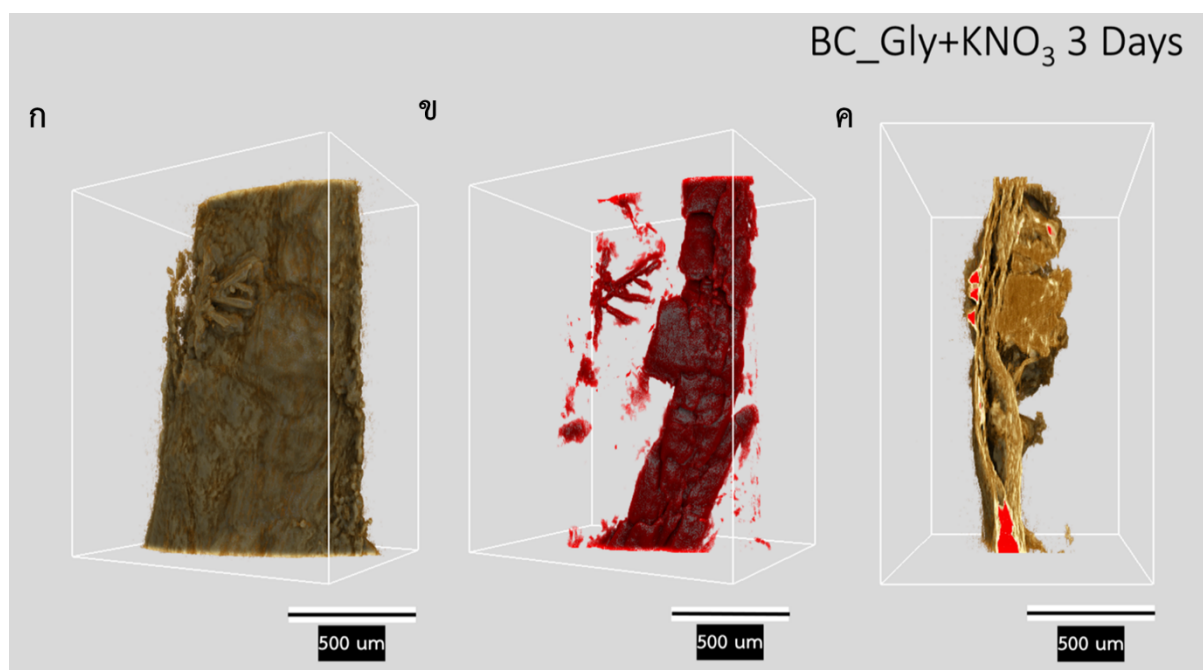


ภาพประกอบที่ 4.20 ภาพถ่าย SEM ของคอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนแบบภาพตัดขวาง (Cross section) ก.-ข. คอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนที่ 15 wt% ที่กำลังขยาย 500x และ 3000x ตามลำดับ ค.-ง. คอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนที่ 50 wt% ที่กำลังขยาย 500x และ 3000x ตามลำดับ

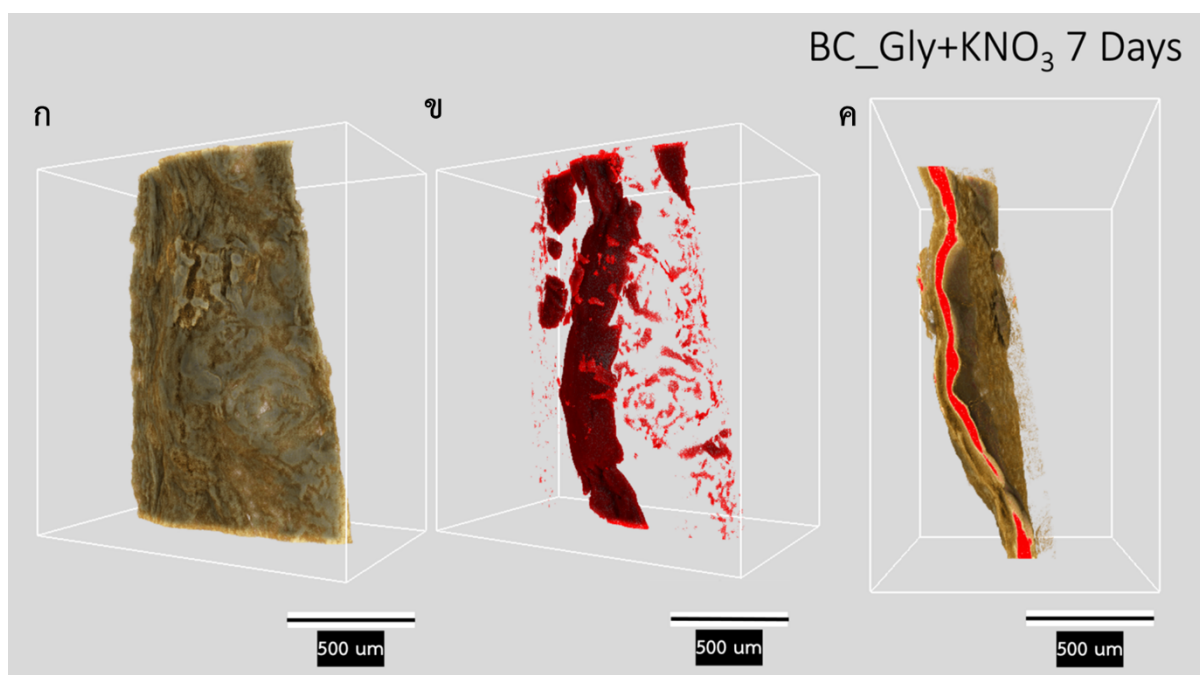
4.10 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์อาศัยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron Radiation X-ray Tomographic Microscopy: SRXTM)

4.10.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบแขวนของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสกับสารละลายเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3)

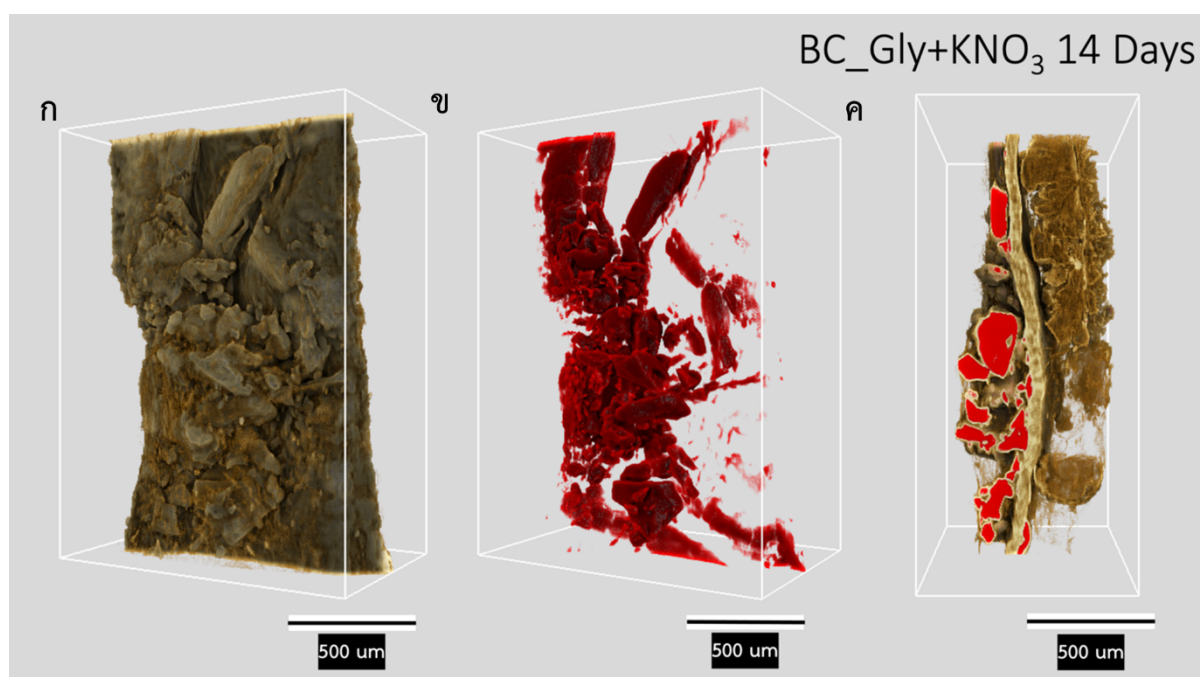
จากการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบปลูกผลึกของแบคทีเรียเซลลูโลสที่ปลูกทิ้งไว้ในสารละลายไกลซีนของเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) เป็นเวลา 3 7 และ 14 วัน แล้วนำมาวิเคราะห์โครงสร้างภายในของแผ่นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์ด้วยรังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (SRXTM) เพื่อดูการกระจายตัวของผลึกแกมมา-ไกลซีน ซึ่งเป็นการใช้รังสีเอกซ์สะท้อนเพื่อดูการเกิดและกระจายตัวของผลึกแกมมา-ไกลซีนในเนื้อเมทริกซ์และใช้โปรแกรมในการสร้างรูปสามมิติให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของเฟสตัวเติมในเนื้อเมทริกซ์อย่างไร ทำให้สามารถแยกเฟสขึ้นได้ จากภาพประกอบที่ 4.21 4.22 และ 4.23 เป็นภาพ 3 มิติ เปรียบเทียบการทำคอมโพสิตแบบปลูกผลึกที่ 3 7 และ 14 วัน ตามลำดับ พบว่าทั้งสามภาพไม่มีความแตกต่าง มีผลึกเกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มและเกิดแทรกเข้าไปในเนื้อฟิล์มบางส่วน แต่ผลึกที่เกิดขึ้นนั้นมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและขนาดที่ไม่เท่ากัน นอกจากนี้การเกิดขึ้นของผลึกยังมีการกระจายตัวที่ไม่ดี ผู้วิจัยจึงเห็นว่าไม่ควรทำคอมโพสิตแบบปลูกผลึกบนแผ่นฟิล์มต่อไป ฉะนั้นเราจึงเปลี่ยนวิธีการทำคอมโพสิตจากการปลูกผลึกบนแผ่นฟิล์ม เป็นวิธีการผสมเฟสกระจายลงในเมทริกซ์และทำการขึ้นรูปฟิล์มคอมโพสิตด้วยวิธีการบวกรุ่นหล่อแบบ (Casting)



ภาพประกอบที่ 4.21 โครงสร้างภายในของฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสที่ปลูกทิ้งไว้ในสารละลายไกลซีนของเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) เป็นเวลา 3 วัน ก. แบคทีเรียเซลลูโลส ข. อนุภาค ค. ภาพตัดขวางฟิล์มคอมโพสิต



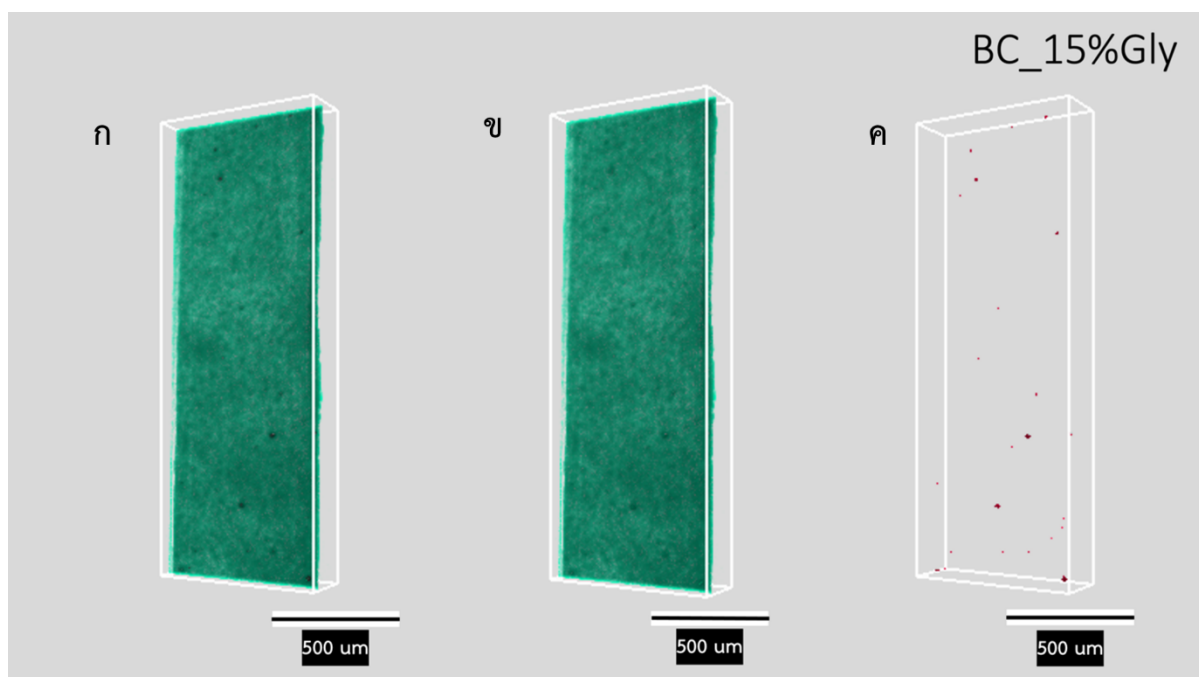
ภาพประกอบที่ 4.22 โครงสร้างภายในของฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสที่ปลูกทิ้งไว้ในสารละลายไกลซีนของเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO₃) เป็นเวลา 7 วัน ก. แบคทีเรียเซลลูโลส ข. อนุภาค ค. ภาพตัดขวางฟิล์มคอมโพสิต



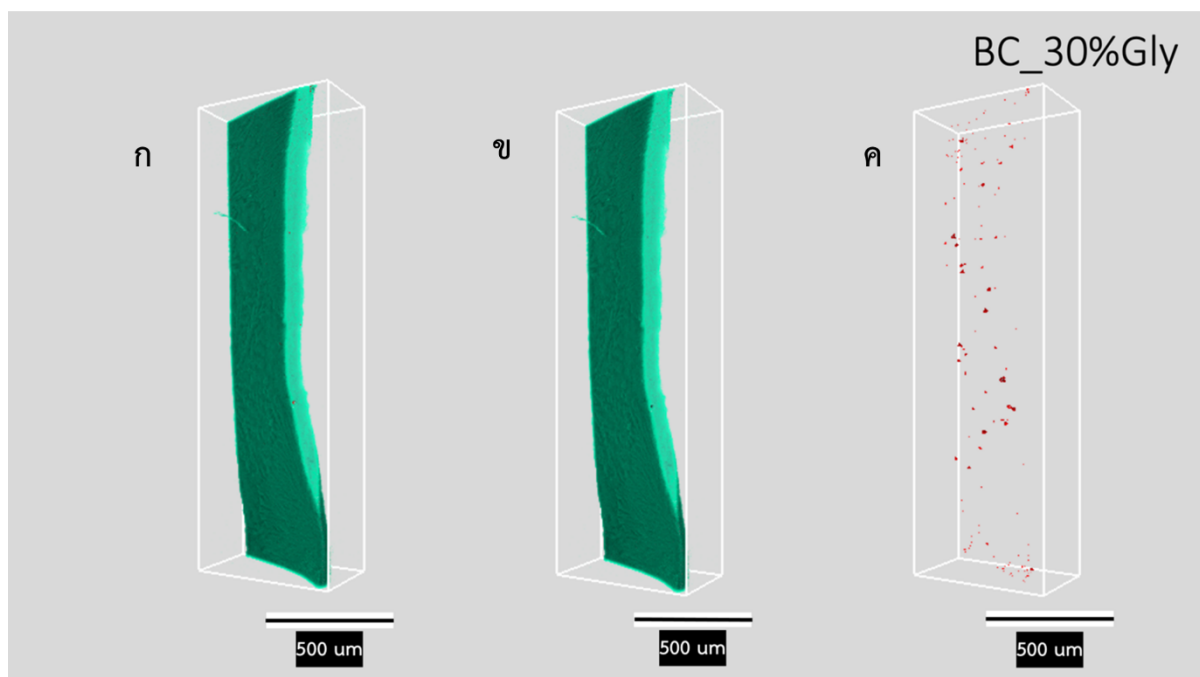
ภาพประกอบที่ 4.23 โครงสร้างภายในของฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสที่ปลูกทิ้งไว้ในสารละลายไกลซีนของเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO₃) เป็นเวลา 14 วัน ก. แบคทีเรียเซลลูโลส ข. อนุภาค ค. ภาพตัดขวางฟิล์มคอมโพสิต

4.10.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบหล่อแบบของแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน

จากการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบหล่อแบบ (casting) ของแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีนแล้วนำมาวิเคราะห์โครงสร้างภายในจากรูปเชิงสามมิติเปรียบเทียบกับฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสในปริมาณแกมมา-ไกลซีนที่แตกต่างกันคือ 15 wt% และ 30 wt% ด้วยกล้องจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (SRXTM) ดังภาพประกอบที่ 4.24 ซึ่งในแต่ละรูปย่อยแสดงการแยกเฟสระหว่าง คอมโพสิต เมทริกซ์ และเฟสกระจาย โดยจะเห็นได้ว่าที่วัสดุคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมาไกลซีนที่ปริมาณ 15 wt% นั้นจะพบอนุภาคของแกมมา-ไกลซีนกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ และจะพบว่าการกระจายตัวของแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 15 wt% ในเมทริกซ์ยังมีการกระจายตัวได้ไม่ดี และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณแกมมา-ไกลซีนเพิ่มขึ้นไปที่ปริมาณ 30 wt% พบว่าเฟสกระจายสีแดงดังในภาพประกอบที่ 4.25 ก็มีปริมาณหนาแน่นขึ้นเมื่ออัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณแกมมา-ไกลซีนที่ใส่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น



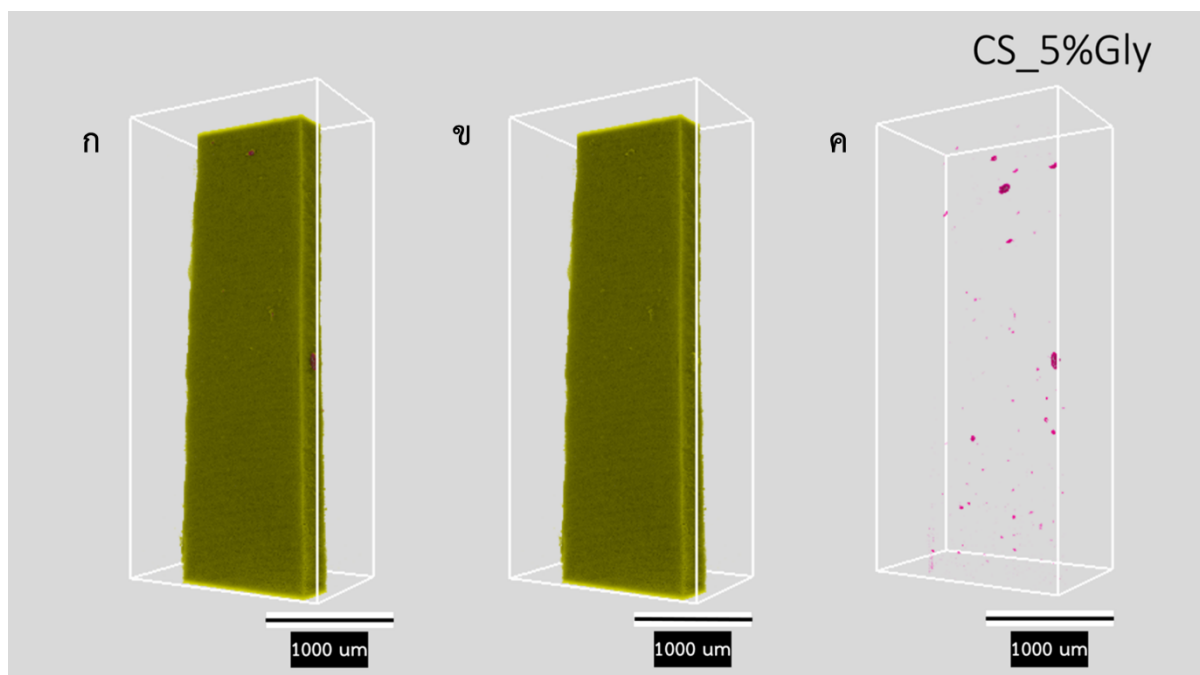
ภาพประกอบที่ 4.24 โครงสร้างภายในของฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 15 wt% ก. คอมโพสิต ข. แบคทีเรียเซลลูโลส ค. อนุภาค



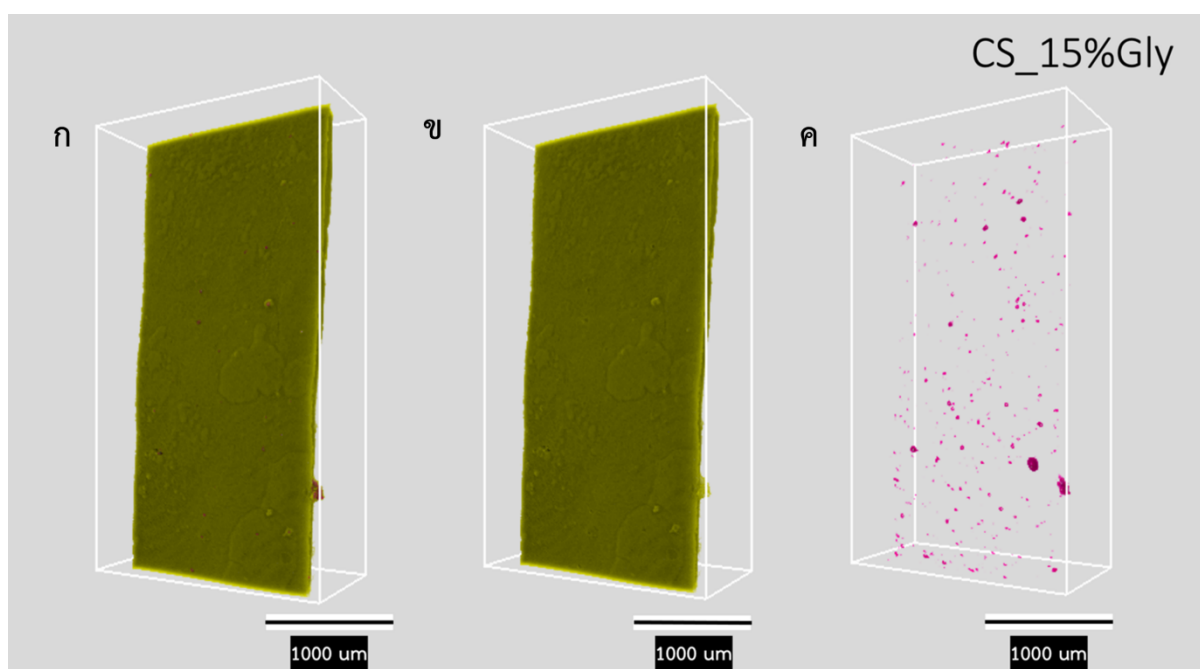
ภาพประกอบที่ 4.25 โครงสร้างภายในของฟิล์มคอมโพสิตของแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ปริมาณ 30 wt% ก. คอมโพสิต ข. แบคทีเรียเซลลูโลส ค. อนุภาค

4.10.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบหล่อแบบของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน

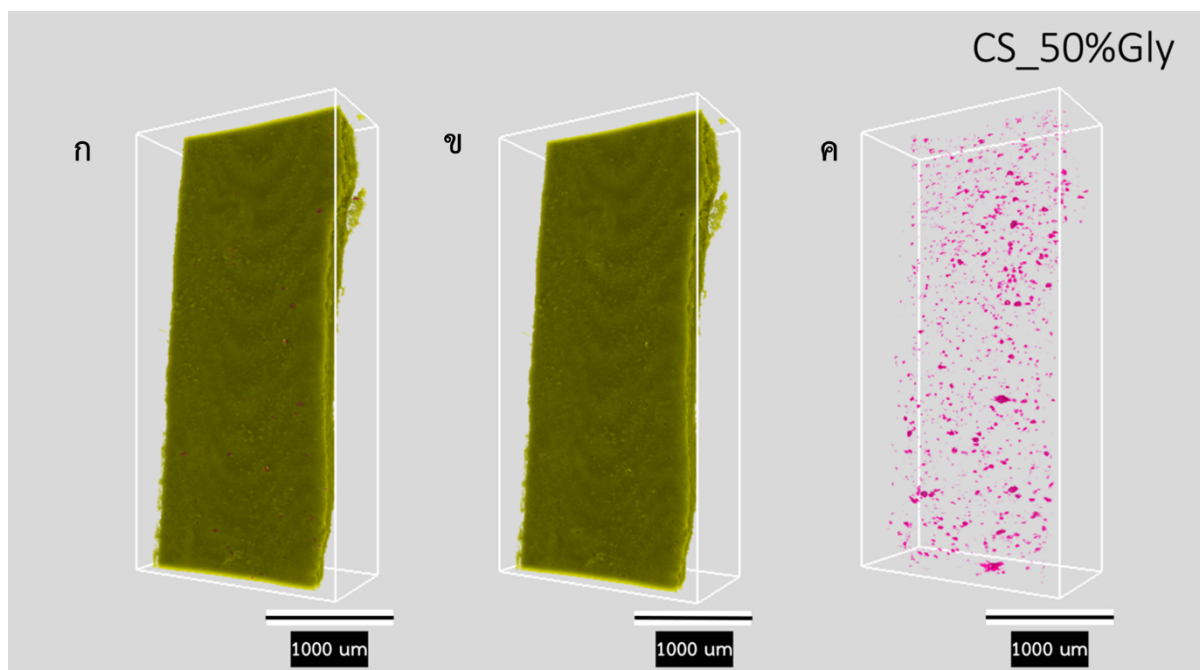
จากการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบหล่อแบบ (casting) ของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน แล้วนำมาวิเคราะห์โครงสร้างภายในจากรูปเชิงสามมิติเปรียบเทียบกับฟิล์มคอมโพสิตของไคโตซานในปริมาณแกมมา-ไกลซีนที่ต่างกันคือ 5 15 และ 50 wt% ด้วยกล้องจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ย่านพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (SRXTM) ดังภาพประกอบที่ 4.26 ซึ่งในแต่ละรูปย่อยแสดงการแยกเฟสระหว่าง คอมโพสิตเมทริกซ์ และเฟสกระจาย โดยจะเห็นได้ว่าคอมโพสิตไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 5 wt% นั้นจะพบอนุภาคของแกมมา-ไกลซีนกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ และจะพบว่าการกระจายตัวของแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 5 wt% ในเมทริกซ์นั้นยังมีการกระจายตัวได้ไม่ดี และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณแกมมา-ไกลซีนเพิ่มขึ้นไปที่ปริมาณ 15 wt% และ 50 wt% พบว่าเฟสกระจายสีแดงดังในภาพประกอบที่ 4.27 และ ภาพประกอบที่ 4.28 มีปริมาณหนาแน่นขึ้นเมื่ออัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณแกมมา-ไกลซีนที่ใส่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น



ภาพประกอบที่ 4.26 โครงสร้างภายในของฟิล์มวัสดุคอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 5 wt% ก. คอมโพสิต ข. แบนคที่เรียเซลล์โลส ค. อนุภาค



ภาพประกอบที่ 4.27 โครงสร้างภายในของฟิล์มคอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 15 wt% ก. คอมโพสิต ข. แบนคที่เรียเซลล์โลส ค. อนุภาค

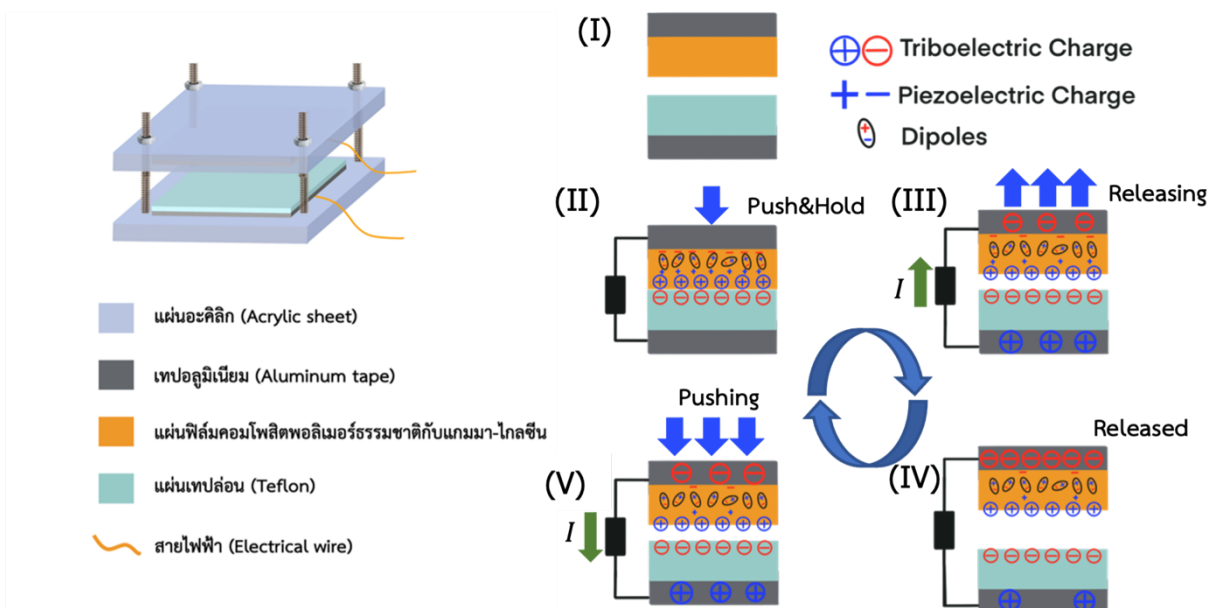


ภาพประกอบที่ 4.28 โครงสร้างภายในของฟิล์มคอมโพสิตของไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 50 wt% ก. คอมโพสิต ข. แบบที่เรียเซลล์ูโลส ค. อนุภาค

4.11 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อหาค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าขาออก (Output voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของฟิล์มพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ทำคอมโพสิตกับแกมมา-ไกลซีนที่อัตราส่วน 5 10 15 30 50 และ 70 wt%

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกจากวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีน ด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) และเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter) เพื่อหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก (Output voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) ภายใต้รูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Contact-separation mode) รูปแบบอย่างง่ายที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน โดยใช้แผ่นเทปลอน (PTFE) ที่มีขนาด 3x3 cm เป็นวัสดุที่มีสมบัติความเป็นลบ เมื่อเทียบกับฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีน ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่มีแนวโน้มสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายและแสดงสมบัติความเป็นบวก โดยจะใช้ที่ขนาด 3x3 cm เช่นเดียวกับเทปลอน (PTFE) โดยชั้นสัมผัสแต่ละชั้นจะติดด้วยเทปอะลูมิเนียม (Al tape) เพื่อเป็นขั้วอิเล็กโทรดแล้วเชื่อมต่อสายไฟบนพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด และใช้แผ่นอะคริลิกเพื่อป้องกันชั้นสัมผัสและชั้นรับแรงเชิงกล ซึ่งกลไกการเกิดประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริก โดยทั่วไปเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์สำคัญ 2 ประการ [8] ในขณะให้แรงเชิงกลกับอุปกรณ์ ประการแรก เกิดจากปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect) เหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้าสถิตจากการ

สัมผัสเสียดสีกันแบบตั้งฉากระหว่างวัสดุฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีนและวัสดุคู่สัมผัส คือ เทฟลอน (PTFE) ประการที่สอง เกิดจากการเหนี่ยวนำประจุจากปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) จากภายในเนื้อฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีน โดยจากทำงานของอุปกรณ์ TENG ที่ขั้นแรก (State I) ยังไม่มีการให้แรงเชิงกลทำให้วัสดุสัมผัสกัน จึงไม่มีการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างวัสดุคู่โทรโบอิเล็กทริก ในที่นี้คือ ฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีนและเทฟลอน (PTFE) และยังไม่มีการสร้างประจุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric charge) เมื่อให้แรงเชิงกล ในขั้นที่ 2 (State II) วัสดุคู่โทรโบอิเล็กทริกจะสัมผัสเสียดสีกัน ส่งผลให้จากที่วัสดุทั้งสองมีความเป็นกลางทางไฟฟ้าจะทำให้เกิดความไม่สมดุลของประจุเกิดขึ้นภายในวัสดุ เกิดการถ่ายโอนประจุระหว่างวัสดุทั้งสอง โดยวัสดุฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีนมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนจะถ่ายโอนอิเล็กตรอนให้กับเทฟลอน (PTFE) ที่มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดี แล้วตัวมันเองจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวก ในขณะที่เทฟลอน (PTFE) ที่ได้รับอิเล็กตรอนมา จะเหนี่ยวนำทำให้ตัวมันเองเกิดประจุลบบนพื้นผิว นอกจากนี้ยังเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกขึ้นในขั้นนี้ ทำให้จากเดิมที่ไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในฟิล์มคอมโพสิต มีการจัดเรียงตัวกันแบบสุ่ม ผลรวมของประจุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric charge) จึงมีค่าเท่ากับ 0 แต่หลังจากที่ได้รับแรงเชิงกลจะทำให้ไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน ส่งผลให้ผลรวมของประจุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric charge) มีค่าไม่เท่ากับ 0 ทำให้มีประจุคงค้างส่งออกมาที่พื้นผิว จากนั้นเมื่อคลายแรงเชิงกลออก ในขั้นที่ 3 (State II) วัสดุจะแยกออกจากกัน ซึ่งวัสดุทั้งสองจะนำประจุเพียโซอิเล็กทริกที่ตัวเองสร้างขึ้นติดไปด้วย แล้วไปเหนี่ยวนำข้อวอิเล็กโทรดลูมิเนียมด้านของตัวเองให้เกิดเป็นประจุที่ตรงกันข้าม โดยวัสดุฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีนที่มีพื้นผิวเป็นประจุบวกจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุลบบนข้อวอิเล็กโทรดลูมิเนียม ในขณะที่เทฟลอน (PTFE) มีพื้นผิวเป็นประจุลบจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกที่ข้อวอิเล็กโทรดลูมิเนียม ซึ่งความแตกต่างของข้อวไฟฟ้านี้เป็นการเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามไฟฟ้า และเมื่อต่อโหนดภายนอกกับข้อวอิเล็กโทรดลูมิเนียมจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น โดยทิศทางของกระแสจะไหลจากวัสดุที่มีความเป็นลบไปทางวัสดุที่มีความเป็นบวก จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปกระแสจะหยุดไหลเมื่อประจุถึงจุดสมดุลในขั้นที่ 4 (state IV) หลังจากนั้นเมื่อให้แรงเชิงกลทำให้วัสดุสัมผัสกันอีกครั้งจะทำให้เกิดกระแสไหลขึ้นอีก โดยกระแสจะไหลย้อนกลับไปในทิศทางตรงกันข้ามผ่านโหนดภายนอก ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องถ้ามีการสัมผัสและแยกออกจากกันของวัสดุสลับกันไปเรื่อย ๆ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.29 ซึ่งทั้งพฤติกรรมระหว่างปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริก และ ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก สามารถเพิ่มความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของฟิล์มคอมโพสิตเพิ่มสูงขึ้น

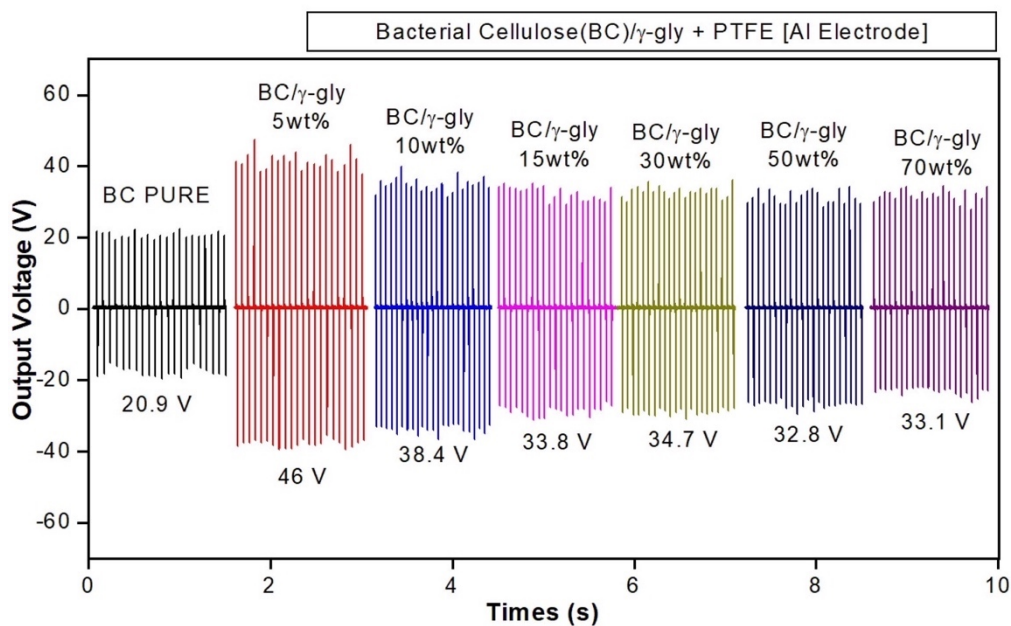


ภาพประกอบที่ 4.29 แสดงลักษณะอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกและกลไกการเกิดประจุของ TENG ในรูปแบบการวัดแบบการสัมผัสโดยให้แรงกระทำในแนวตั้งฉาก (Vertical contact-separation mode)

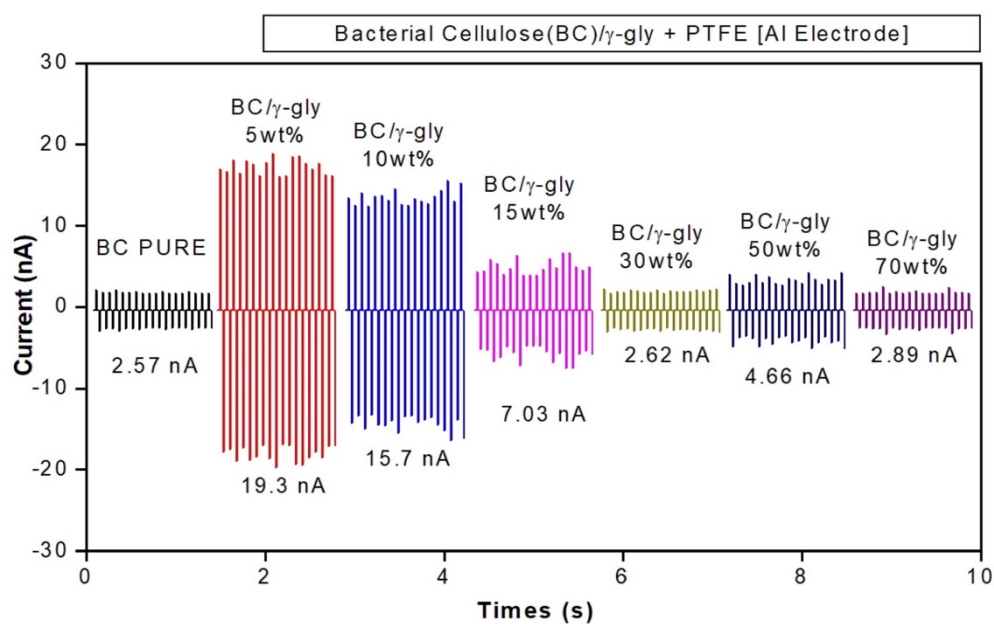
4.11.1 การวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อหาค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าขาออก (Output voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสที่ทำคอมโพสิตกับแกมมา-ไกลซีนที่อัตราส่วน 5 10 15 30 50 และ 70 wt%

จากการศึกษาและเปรียบเทียบผลทางไฟฟ้าระหว่างแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการทำเป็นคอมโพสิตกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณแตกต่างกันคือ 5 10 15 30 50 และ 70 wt% ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.30 และ 4.31 เป็นการวัดค่าความต่างศักย์ขาออก (Output voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) ของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสที่เติมด้วยแกมมา-ไกลซีน และนำมาจับคู่สัมผัสกับแผ่นเทฟลอน (PTFE) ผลพบว่าฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ มีค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าขาออก (Output voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) อยู่ที่ 20.9 V และ 2.71 nA ตามลำดับ และเมื่อเติมแกมมา-ไกลซีนลงไป พบว่าแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีนที่ 5 wt% มีประสิทธิภาพในการส่งออกไฟฟ้าสูงสุดโดยมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 46 V และค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุดอยู่ที่ 19.3 nA เมื่อเทียบกับฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ พบว่ามีผลทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 2.2 เท่า แสดงให้เห็นว่าแกมมา-ไกลซีนสามารถเพิ่มความหนาแน่นของประจุให้กับแบคทีเรียเซลลูโลสได้ ทำให้ฟิล์มคอมโพสิตที่เตรียมได้สามารถเหนี่ยวนำทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระได้มากยิ่งขึ้น เมื่อสัมผัสกับแผ่นเทฟลอนที่มีความเป็นลบและเกิดการถ่ายโอนประจุกันระหว่างวัสดุทั้งสองส่งผลให้ได้ผลทางไฟฟ้ามากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแกมมา-ไกลซีนมากขึ้นพบว่ามีผลทางไฟฟ้า

ลดลง ซึ่งเกิดจากการที่มีปริมาณแกมมา-ไกลซีนที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้มีค่าทางไฟฟ้าที่ลดลง



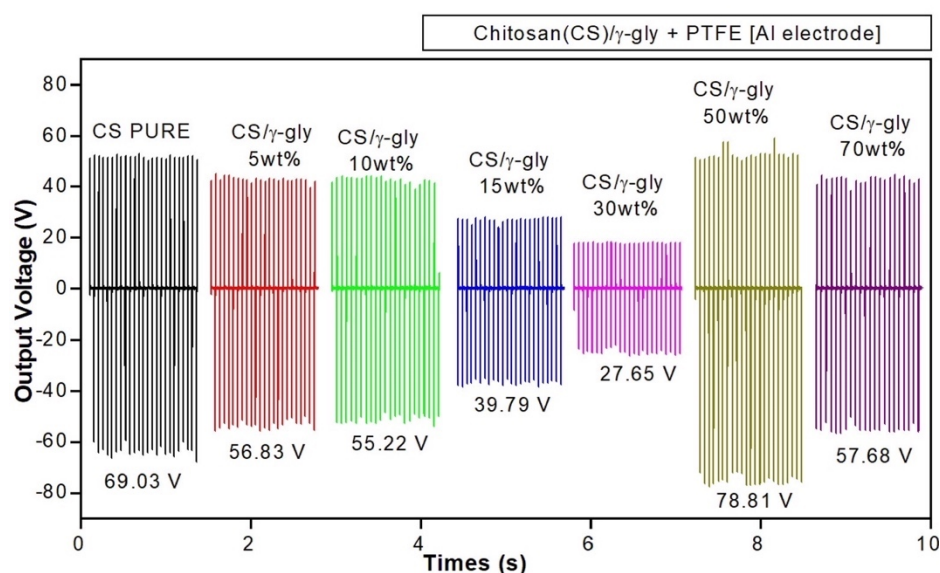
ภาพประกอบที่ 4.30 แสดงลักษณะของกราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ของชุดฟิล์มคอมโพสิตแบบที่เรียเซลล์ูโลสกับแกมมา-ไกลซีน



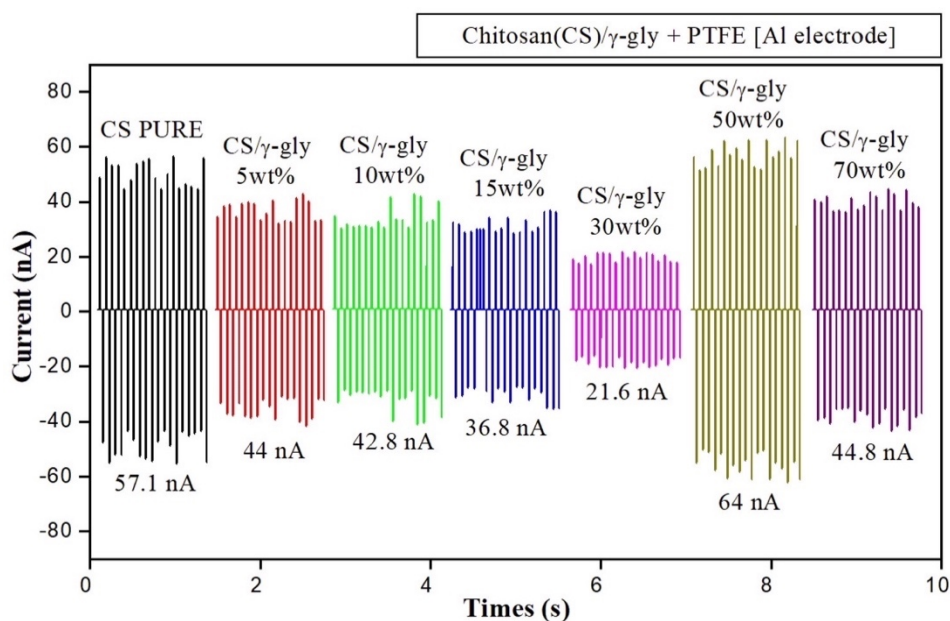
ภาพประกอบที่ 4.31 แสดงลักษณะของกราฟกระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) ของชุดฟิล์มคอมโพสิตแบบที่เรียเซลล์ูโลสกับแกมมา-ไกลซีน

4.11.2 การวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อหาค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าขาออก (Output voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของฟิล์มไคโตซานที่ทำคอมโพสิตกับแกมมา-ไกลซีนที่อัตราส่วน 5 10 15 30 50 และ 70 wt%

จากการศึกษาและเปรียบเทียบผลทางไฟฟ้าระหว่างแผ่นฟิล์มไคโตซานที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการทำเป็นคอมโพสิตกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณแตกต่างกันคือ 5 10 15 30 50 และ 70 wt% แสดงดังภาพประกอบที่ 4.32 และ 4.33 เป็นการวัดค่าความต่างศักย์ขาออก (Output voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) ของฟิล์มไคโตซานบริสุทธิ์และฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานที่เติมด้วยแกมมา-ไกลซีนที่นำมาจับคู่สัมผัสกับกับเทฟลอน (PTFE) ผลพบว่าไคโตซานบริสุทธิ์มีค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าขาออก (Output voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) อยู่ที่ 69.03 V และ 57.1 nA ตามลำดับ และเมื่อเติมแกมมา-ไกลซีนลงไป พบว่าแผ่นฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนที่ 50 wt% มีประสิทธิภาพในการส่งออกไฟฟ้าสูงสุดโดยมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ 78.81 V และค่ากระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุดอยู่ที่ 64 nA เมื่อเทียบกับฟิล์มไคโตซานบริสุทธิ์ พบว่ามีผลทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 1.14 เท่า แสดงให้เห็นว่าแกมมา-ไกลซีนสามารถเพิ่มความหนาแน่นของประจุให้กับไคโตซานได้ ทำให้ฟิล์มคอมโพสิตที่เตรียมได้สามารถเหนี่ยวนำทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระได้มากยิ่งขึ้น เมื่อสัมผัสกับแผ่นเทฟลอนที่มีความเป็นลบและเกิดการถ่ายโอนประจุกันระหว่างวัสดุทั้งสองส่งผลให้ได้ผลทางไฟฟ้ามากขึ้นแต่เมื่อเพิ่มปริมาณแกมมา-ไกลซีนมากขึ้น พบว่ามีผลทางไฟฟ้าลดลง ซึ่งเกิดจากการที่มีปริมาณแกมมา-ไกลซีนที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้มีค่าทางไฟฟ้าที่ลดลง



ภาพประกอบที่ 4.32 แสดงลักษณะของกราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก (Output voltage) ของชุดฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน

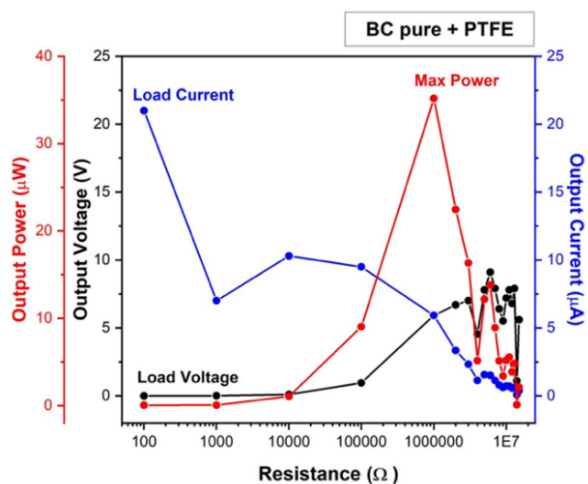


ภาพประกอบที่ 4.33 แสดงลักษณะของกราฟกระแสไฟฟ้าขาออก (Output current) ของชุดฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน

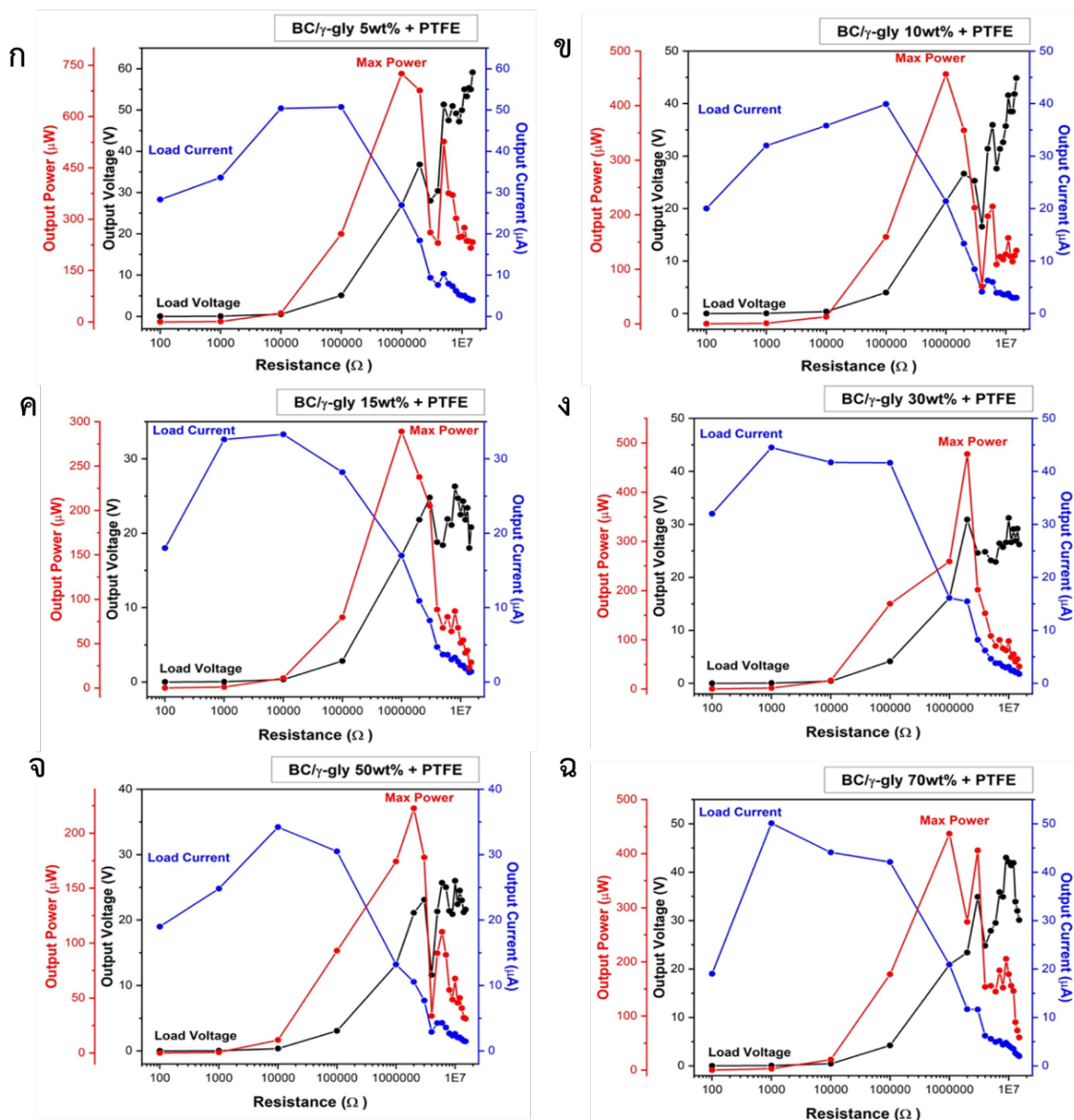
4.11.3 การวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output power) ของฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสที่ทำคอมโพสิตกับแกมมา-ไกลซีนที่อัตราส่วน 5 10 15 30 50 และ 70 wt%

จากการตรวจสอบค่าทางการกำลังไฟฟ้าขาออกของอุปกรณ์ TENG ที่สร้างขึ้นจากแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน โดยการคำนวณผ่านค่าความต่างศักย์ขาออก (V) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (I) ที่ตรวจวัดได้โดยใช้เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ที่ค่าความต้านทานต่าง ๆ ตั้งแต่ 100 1k 10k 100k 1M 2M 3M 4M 5M 6M 7M 8M 9M 10M 11M 12M 13M 14M และ 15MΩ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) มีสูตรเป็น $V=IR$ โดยตัวต้านทานที่ค่าเหมาะสมที่สุด จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าขาออกของอุปกรณ์ TENG ที่สร้างจากฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับ แกมมา-ไกลซีน ที่ 5 10 15 30 50 และ 70 wt% พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าขาออก ดังตารางที่ 4.4 จากการตรวจวัดพบว่าฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ ที่ความต้านทาน 1MΩ ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ 35.16 μW ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.34 ฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 5wt% ที่ความต้านทาน 1MΩ ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ 725.22 μW ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.35 ก. ฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 10wt% ที่ความต้านทาน 1MΩ ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ 457.96 μW ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.35 ข. ฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 15wt% ที่ความต้านทาน 1MΩ ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ 289 μW ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.35 ค. ฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 30wt% ที่ความต้านทาน 2MΩ ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ 477.41 μW

ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.35 จ. फिल्मคอมโพสิตแบบที่เรียเซลล์โลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 50wt% ที่ความต้านทาน $2\text{M}\Omega$ ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ $222.61\text{ }\mu\text{W}$ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.35 จ. फिल्मคอมโพสิตแบบที่เรียเซลล์โลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 70wt% ที่ความต้านทาน $1\text{M}\Omega$ ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ $436.81\text{ }\mu\text{W}$ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.35 ฉ.



ภาพประกอบที่ 4.34 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดของแผ่นฟิล์มแบบที่เรียเซลล์โลสบริสุทธิ์



ภาพประกอบที่ 4.35 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 5 10 15 30 50 และ 70 wt%

ตารางที่ 4.4 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดของแผ่นฟิล์มแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 5 10 15 30 50 และ 70 wt%

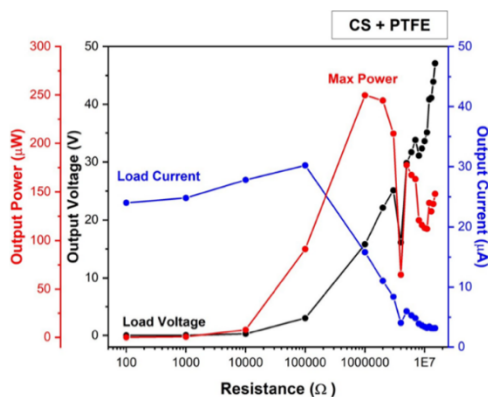
ชนิดของฟิล์ม	ค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (μW)
BC Pure	35.16
BC/ γ -gly 5 wt%	725.22
BC/ γ -gly 10 wt%	457.96
BC/ γ -gly 15 wt%	289
BC/ γ -gly 30 wt%	477.41
BC/ γ -gly 50 wt%	222.61
BC/ γ -gly 70 wt%	436.81

4.11.4 การวิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (Output power) ของฟิล์มโคโตซานที่ทำคอมโพสิตกับแกมมา-ไกลซีนที่อัตราส่วน 5 10 15 30 50 และ 70 wt%

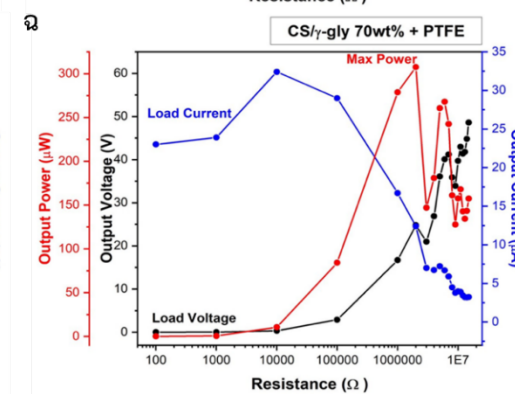
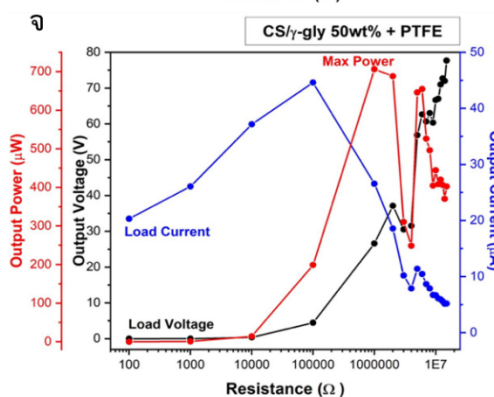
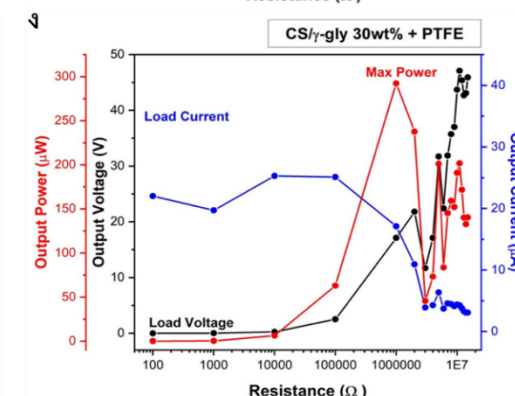
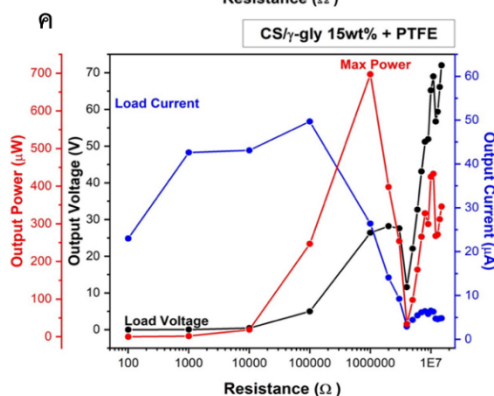
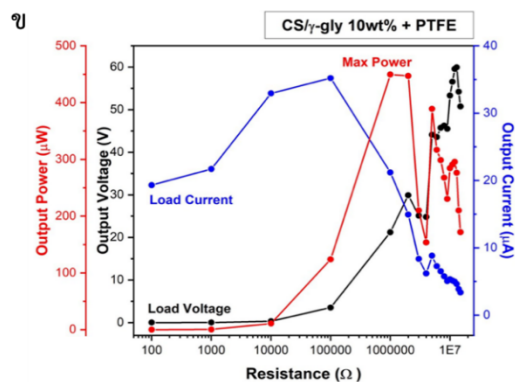
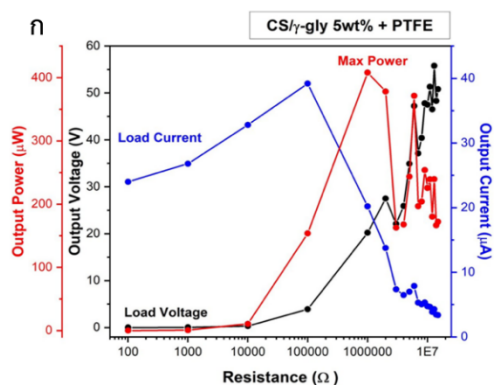
จากการตรวจสอบค่าทางการกำลังไฟฟ้าขาออกของอุปกรณ์ TENG ที่สร้างขึ้นจากแผ่นฟิล์มคอมโพสิตโคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน โดยการคำนวณผ่านค่าความต่างศักย์ขาออก (V) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (I) ที่ตรวจวัดได้โดยใช้เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ที่ค่าความต้านทานต่าง ๆ ตั้งแต่ 100 Ω 1k Ω 10k Ω 100k Ω 1M Ω 2M Ω 3M Ω 4M Ω 5M Ω 6M Ω 7M Ω 8M Ω 9M Ω 10M Ω 11M Ω 12M Ω 13M Ω 14M Ω และ 15M Ω ซึ่งสามารถคำนวณได้จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) มีสูตรเป็น $V=IR$ โดยตัวต้านทานที่ค่าเหมาะสมที่สุด จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าขาออกของอุปกรณ์ TENG ที่สร้างจากฟิล์มคอมโพสิตโคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 5 10 15 30 50 และ 70 wt% พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าขาออก ดังตารางที่ 4.5 จากการตรวจวัดพบว่าฟิล์มโคโตซานบริสุทธิ์ ที่ความต้านทาน 1M Ω ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ 249.64 μW ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.36 ฟิล์มคอมโพสิตโคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 5wt% ที่ความต้านทาน 1M Ω ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ 408.04 μW ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.37 ก. ฟิล์มคอมโพสิตโคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 10wt% ที่ความต้านทาน 1M Ω ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ 449.44 μW ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.37 ข. ฟิล์มคอมโพสิตโคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 15wt% ที่ความต้านทาน 1M Ω ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ 696.96 μW ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.37 ค. ฟิล์มคอมโพสิตโคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 30wt% ที่ความต้านทาน 1M Ω ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ 292.41 μW ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.37 ง. ฟิล์มคอมโพสิตโคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 50wt% ที่ความต้านทาน 1M Ω ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ 705.96 μW ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.37 จ. ฟิล์มคอมโพสิตโคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 70wt% ที่ความ

ต้านทาน $2\text{M}\Omega$ ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดเท่ากับ $307.52\ \mu\text{W}$ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.37

ฉ.



ภาพประกอบที่ 4.36 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดของแผ่นฟิล์มไคโตซานบริสุทธิ์



ภาพประกอบที่ 4.37 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีนที่ปริมาณ 5 10 15 30 50 และ 70 wt%

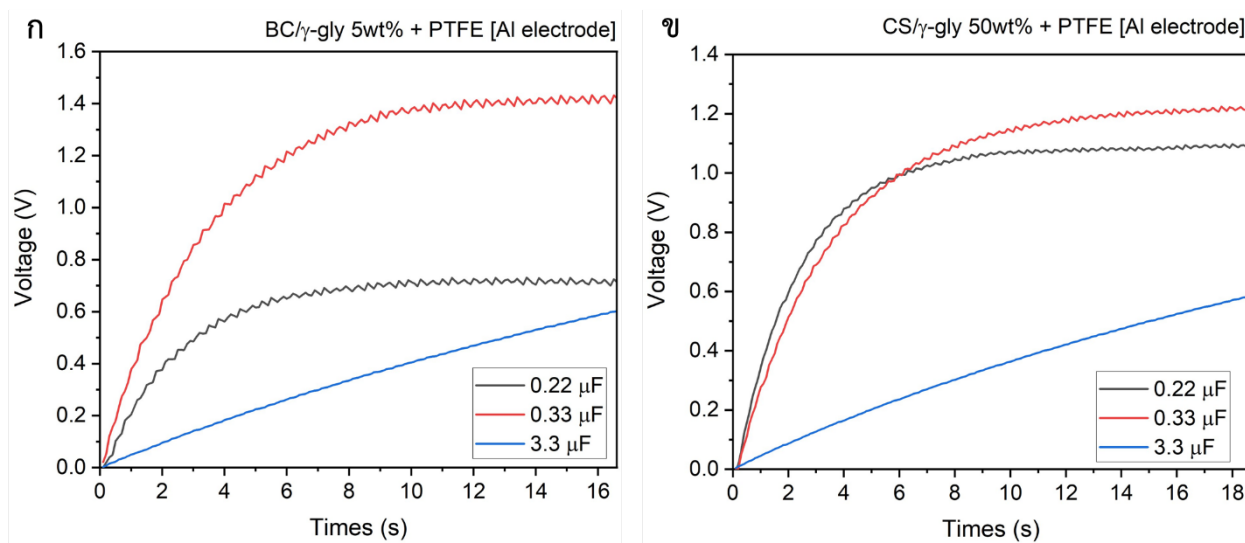
ตารางที่ 4.5 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดของแผ่นฟิล์มไคโตซานบริสุทธิ์และฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ที่ปริมาณ 5 10 15 30 50 และ 70 wt%

ชนิดของฟิล์ม	ค่ากำลังไฟฟ้าขาออก (μW)
CS Pure	249.64
CS/ γ -gly 5 wt%	408.04
CS/ γ -gly 10 wt%	449.44
CS/ γ -gly 15 wt%	696.96
CS/ γ -gly 30 wt%	292.41
CS/ γ -gly 50 wt%	705.96
CS/ γ -gly 70 wt%	307.52

4.11.5 การทดสอบความสามารถในการชาร์จประจุตัวเก็บประจุ (Capacitor)

จากการทดสอบความสามารถในการอัดประจุตัวเก็บประจุ หรือคาปาซิเตอร์ (Capacitor) เพื่อทดสอบความสามารถในการทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า (Power supply) ของฟิล์มคอมโพสิตของพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีน โดยใช้ตัวเก็บประจุมาเป็นตัวแทน ซึ่งฟิล์มคอมโพสิตที่เลือกในการทดสอบในการอัดประจุนั้นจะเลือกฟิล์มคอมโพสิตพอลิเมอร์ธรรมชาติกับแกมมา-ไกลซีน ในปริมาณแกมมา-ไกลซีน ที่ให้ค่าการส่งออกทางไฟฟ้าสูงสุด ได้แก่ ฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 5 wt% และ ฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 50 wt% และตัวเก็บประจุที่เลือกนั้นได้ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของความจุที่อยู่ในตัวเก็บประจุตั้งแต่ตัวต่ำสุดคือ 0.22 0.33 และ 3.3 μF ตามลำดับ เพื่อดูประสิทธิภาพในการอัดประจุ ผลปรากฏว่าฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 5 wt% สามารถอัดประจุตัวเก็บประจุได้เต็มที่สองความจุคือ 0.22 และ 0.33 μF โดยสามารถอัดประจุตัวเก็บประจุที่ความจุ 0.22 μF ได้เต็มที่ประมาณ 0.7 V โดยใช้เวลา 9.35 วินาที ในขณะที่สามารถอัดประจุตัวเก็บประจุที่ความจุ 0.33 μF ได้เต็มที่ประมาณ 1.4 V ในเวลา 11.41 วินาที แต่ไม่สามารถอัดประจุตัวเก็บประจุที่ความจุ 3.3 μF ได้อีก ซึ่งสังเกตได้จากเส้นกราฟที่ไม่คงที่ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.38 ก.

สำหรับฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 50 wt% พบว่าสามารถอัดประจุตัวเก็บประจุได้เต็มที่สองความจุคือ 0.22 และ 0.33 μF ได้เช่นกัน โดยสามารถอัดประจุตัวเก็บประจุที่ความจุ 0.22 μF ได้เต็มที่ประมาณ 1.07 V โดยใช้เวลา 9.26 วินาที ในขณะที่สามารถอัดประจุตัวเก็บประจุที่ความจุ 0.33 μF ได้เต็มที่เช่นกันที่ประมาณ 1.2 V เวลา 13.63 วินาที และไม่สามารถอัดประจุตัวเก็บประจุที่ความจุ 3.3 μF ได้อีก ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.38 ข.



ภาพประกอบที่ 4.38 แสดงค่าความสามารถในการอัดประจุตัวเก็บประจุของ ก. แผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบบที่เรียวเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 5 wt% และ ข. แผ่นฟิล์มคอมโพสิตไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ที่ 50 wt%

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษากระบวนการสังเคราะห์ผลึกแกมมา-ไกลซีนเพื่อใช้สำหรับเตรียมฟิล์มคอมโพสิตระหว่าง แบคทีเรียเซลลูโลสแกมมา-ไกลซีน และ ไคโตซานแกมมา-ไกลซีน ภายใต้การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขปริมาณแกมมา-ไกลซีน 5 10 15 30 50 70 wt% สำหรับสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริก (Triboelectric-piezoelectric hybrid nanogenerator) ในโหมดการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical contact separation mode) โดยทำการวิเคราะห์และตรวจสอบเอกลักษณ์ของผลึกแกมมา-ไกลซีนก่อนทำการคอมโพสิตด้วยเทคนิค ATR-FTIR และ XRD แล้วนำฟิล์มคอมโพสิตที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ผล โดยศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) และค่าการส่งออกทางไฟฟ้า (Electrical Output) ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) กระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) กำลังไฟฟ้าขาออก (Output Power) และทดสอบความสามารถในการชาร์จประจุตัวเก็บประจุ หรือคาปาซิเตอร์ (Capacitor)

5.1.1 จากการศึกษากระบวนการสังเคราะห์ผลึกแกมมา-ไกลซีน

ในงานวิจัยนี้ สามารถสังเคราะห์ผลึกแกมมา-ไกลซีนจากวิธีการตกผลึกซ้ำจากสารละลายเกลือทั้งสองชนิด ได้แก่ เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และเกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) กับแอลฟา-ไกลซีน อัตราส่วน โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) : แอลฟา-ไกลซีน เท่ากับ 3:1 และ เกลือโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) : แอลฟา-ไกลซีน เท่ากับ 2:1 ที่ความเข้มข้น 2.5 mol/L โดยผลจากการวิเคราะห์เอกลักษณ์ของผลึกแกมมา-ไกลซีนที่สังเคราะห์ขึ้นมาด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่าผลึกที่สังเคราะห์ขึ้นมาได้จากกระบวนการตกผลึกซ้ำนั้นมีลำดับความเข้มของพีค (intensity) สอดคล้องกับโครงสร้างแกมมา-ไกลซีน และเมื่อตรวจสอบเอกลักษณ์โครงสร้างผลึกของแกมมา-ไกลซีนด้วยเทคนิค XRD พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผลึกที่สังเคราะห์ได้นั้นสอดคล้องกับระนาบของผลึกแกมมา-ไกลซีน แสดงให้เห็นว่า งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์แกมมา-ไกลซีนด้วยกระบวนการตกผลึกซ้ำ

5.1.2 จากการศึกษาการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน และ ไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน

ในงานวิจัยนี้ สามารถเตรียมได้ฟิล์มคอมโพสิตระหว่าง แบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซีน และ ไคโตซานกับแกมมา-ไกลซีน ด้วยกระบวนการปลูกผลึกบนแผ่นฟิล์ม และ กระบวนการหล่อแบบ

- การเตรียมฟิล์มคอมโพสิตด้วยกระบวนการปลูกผลึกบนแผ่นฟิล์ม

ผลการศึกษาการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสจากการปลูกผลึกบนแผ่นฟิล์ม โดยใช้สารละลายไกลซีนกับเกลือโพแทสเซียมไนเตรต

(KNO₃) พบว่า ฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ มีลักษณะขุ่น เนื่องจากเกิดการเกาะของผลึกบนแผ่นฟิล์ม และไม่มีความยืดหยุ่น โดยไม่สามารถบิด ม้วน หรือพับได้

- การเตรียมฟิล์มคอมโพสิตด้วยกระบวนการหล่อแบบ

ผลจากการใช้แรงเชิงกลกับฟิล์มคอมโพสิตโดยการบิด ดึง และโค้งงอ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งพบว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มีความมีความยืดหยุ่นสูง สามารถดึง บิดงอ และพับได้หลายชั้น อีกทั้งเมื่อปล่อยแรงที่ให้กับฟิล์มคอมโพสิต ดังกล่าว ฟิล์มสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้โดยที่ไม่มีการสูญเสียรูปร่าง จากการศึกษาการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตทั้งสองวิธีนั้น จึงสรุปได้ว่าไม่ควรเตรียมฟิล์มคอมโพสิตด้วยกระบวนการปลูกผลึกบนแผ่นฟิล์ม เนื่องจาก ไม่สามารถควบคุมการเกิดผลึกของไกลซินให้มีขนาดและการกระจายตัวที่ดีได้ ฉะนั้นจึงเปลี่ยนการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มคอมโพสิตจากวิธีการปลูกผลึกบนแผ่นฟิล์มมาเป็นวิธีการผสมเฟสตัวเติมลงในเมทริกซ์ด้วยวิธีการหล่อแบบ (casting)

5.1.3 จากการศึกษาการสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริกในรูปแบบสัมผัสตั้งฉาก

ในงานวิจัยนี้ สามารถสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไฮบริดไทรโบอิเล็กทริก-เพียโซอิเล็กทริกในรูปแบบสัมผัสตั้งฉาก (Vertical Contact-separation mode) โดยชั้นสัมผัสประกอบไปด้วยวัสดุหลักคือ พอลิเมอร์ธรรมชาติ ได้แก่ แบคทีเรียเซลลูโลส และไคโตซาน ซึ่งทำคอมโพสิตกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทางธรรมชาติอย่างแกมมา-ไกลซิน และวัสดุคู่สัมผัสที่ใช้อ้างอิงอีกด้านคือ PTFE โดยทำการติดอลูมิเนียมเทปกับวัสดุทั้งสองเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า แล้วทำการติดลวดทองแดงเพื่อให้เกิดการไหลเวียนของกระแสไฟ และประกบด้วยแผ่นอะคริลิกเพื่อป้องกันชั้นสัมผัสเมื่อมีแรงกลมากระทบ

5.1.4 จากการศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณแกมมา-ไกลซินที่มีผลต่อเอกลักษณ์เฉพาะและสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต

ผลการศึกษาปริมาณแกมมา-ไกลซินที่มีผลต่อลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลส และไคโตซาน พบว่า เมื่อปริมาณแกมมาไกลซินที่เติมลงในฟิล์มคอมโพสิตทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มมีความโปร่งแสงและโปร่งใสดลง แต่ยังคงความยืดหยุ่น อีกทั้งยังมีความหนาเพิ่มขึ้น และเมื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าแผ่นฟิล์มคอมโพสิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับแกมมา-ไกลซินที่ 5 wt% ผลึกแกมมา-ไกลซินแทรกและกระจายตัวอยู่ตามชั้นของเส้นใยเซลลูโลสได้ดี แต่เมื่อปริมาณแกมมา-ไกลซินเพิ่มขึ้น ผลึกเกิดการรวมตัวเกาะกลุ่มกันของอนุภาคไกลซินทำให้ไม่สามารถกระจายตัวแทรกอยู่ตามชั้นของเส้นใยเซลลูโลสได้สม่ำเสมอ และปริมาณแกมมา-ไกลซินที่เติมลงในแผ่นฟิล์มไคโตซานที่ 15 wt% เกิดการแทรกตัวของอนุภาคไกลซินแค่บางบริเวณ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแกมมา-ไกลซินที่ 50 wt% พบว่าเกิด

การรวมตัวหรือเกาะกลุ่มกันของอนุภาคโกลซินแทรกและกระจายตัวในเนื้อของเมทริกซ์ไคโตซานมากขึ้นตามปริมาณแกมมา-โกลซินที่เพิ่มมากขึ้น

5.1.5 จากการศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณแกมมา-โกลซินที่มีต่อค่าการส่งออกทางไฟฟ้า

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณแกมมา-โกลซินที่มีค่าการส่งออกทางไฟฟ้าของฟิล์มคอมโพสิต พบว่าปริมาณแกมมาโกลซินส่งผลต่อค่าการส่งออกทางไฟฟ้า โดยปริมาณแกมมาโกลซินที่เติมลงในแบคทีเรียเซลลูโลสที่ 5 wt% สามารถให้ค่าการส่งออกทางไฟฟ้าได้ดีที่สุด โดยมีค่าความต่างศักย์ขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก เท่ากับ 46 V, 19.3 nA, 725 μ W ตามลำดับ อีกทั้งสามารถชาร์จคาปาซิเตอร์ได้เต็มที่สองความจุคือ 0.22 μ F สามารถอัดประจุได้เต็มที่ 0.7 V โดยใช้ระยะเวลา 9.35 วินาที ในขณะที่สามารถชาร์จประจุ 0.33 μ F ได้เต็มที่ 1.4 V ในระยะเวลา 11.41 วินาที และปริมาณแกมมาโกลซินที่เติมลงในไคโตซานที่ 50 wt% สามารถให้ค่าการส่งออกทางไฟฟ้าได้ดีที่สุด โดยมีค่าความต่างศักย์ขาออก ค่ากระแสไฟฟ้าขาออก และค่ากำลังไฟฟ้าขาออก เท่ากับ 78.81 V, 64 nA, 706 μ W ตามลำดับ และสามารถชาร์จคาปาซิเตอร์ได้เต็มที่สองความจุคือ 0.22 μ F สามารถอัดประจุได้เต็มที่ 1.07 V โดยใช้ระยะเวลา 9.26 วินาที ในขณะที่สามารถชาร์จประจุ 0.33 μ F ได้เต็มที่ 1.2 V ในระยะเวลา 13.63 วินาที โดยผู้วิจัยหวังอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสมบัติดังกล่าว ให้มีสมบัติที่ต้องการและประยุกต์ใช้ในอนาคตได้มากยิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ศึกษาการเติม plasticizer ในการขึ้นรูปฟิล์มคอมโพสิต
- 5.2.2 ศึกษาการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ให้เหมาะสมและได้ประสิทธิภาพสูง
- 5.2.3 ศึกษาเทคนิคการขึ้นรูปฟิล์มคอมโพสิต ที่ช่วยในการกระจายตัว และยับยั้งการเปลี่ยนเฟสในฟิล์มคอมโพสิตขณะทำการขึ้นรูป เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการส่งออกไฟฟ้าที่สูงขึ้น
- 5.2.4 ศึกษาปริมาณสัดส่วนแกมมา-โกลซินและแอลฟา-โกลซินในฟิล์มคอมโพสิต เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น
- 5.2.5 ศึกษาโครงสร้างผลึก ขนาดและตำแหน่งการกระจายตัวที่มีผลต่อประสิทธิภาพการส่งออกไฟฟ้า
- 5.2.6 ศึกษาการเติมเกลือเพื่อยับยั้งการเปลี่ยนเฟสขณะขึ้นรูปฟิล์มคอมโพสิต

เอกสารอ้างอิง

1. Xu C, Song Y, Han M, Zhang H. Portable and wearable self-powered systems based on emerging energy harvesting technology. *Microsystems & Nanoengineering*. 2021;7(1):25.
2. Niu S, Wang ZL. Theoretical systems of triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*. 2015;14:161-92.
3. Intuorn Appamato VH. Frabication of triboelectric nanogenerator from natural rubberfilm NGRC. 2021:270-6.
4. Bao Y, Wang R, Lu Y, Wu W. Lignin biopolymer based triboelectric nanogenerators. *APL Materials*. 2017;5:074109.
5. An S, Sankaran A, Yarin AL. Natural Biopolymer-Based Triboelectric Nanogenerators via Fast, Facile, Scalable Solution Blowing. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2018;10(43):37749-59.
6. 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;89:106430.
7. 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).
8. Pongampai S, Charoonsuk T, Pinpru N, Pulphol P, Vittayakorn W, Pakawanit P, et al. Triboelectric-piezoelectric hybrid nanogenerator based on BaTiO₃ - Nanorods/Chitosan enhanced output performance with self-charge-pumping system. *Composites Part B: Engineering*. 2021;208:108602.
9. Rafique S, Kasi AK, Kasi JK, Aminullah, Bokhari M, Shakoor Z. Fabrication of silver-doped zinc oxide nanorods piezoelectric nanogenerator on cotton fabric to utilize and optimize the charging system. *Nanomaterials and Nanotechnology*. 2020;10:1847980419895741.
10. Wang Zhong L, Song J. Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays. *Science*. 2006;312(5771):242-6.
11. Guerin S, Stapleton A, Chovan D, Mouras R, Gleeson M, McKeown C, et al. Control of piezoelectricity in amino acids by supramolecular packing. *Nature Materials*. 2018;17(2):180-6.

12. Bolkan J. Wearables to See Double-Digit Growth through 2021. [Online] 2017. Available from: <https://campustechnology.com/articles/2017/09/15/wearables-to-see-double-digit-growth-through-2021>.
13. Guo H, Yeh M-H, Lai Y-C, Zi Y, Wu C, Wen Z, et al. All-in-One Shape-Adaptive Self-Charging Power Package for Wearable Electronics. *ACS Nano*. 2016;10(11):10580-8.
14. Song Y, Min J, Yu Y, Wang H, Yang Y, Zhang H, et al. Wireless battery-free wearable sweat sensor powered by human motion. *Science Advances*. 6(40):eaay9842.
15. Zhang X-S, Han M, Kim B, Bao J-F, Brugger J, Zhang H. All-in-one self-powered flexible microsystems based on triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*. 2018;47:410-26.
16. Wang ZL, Lin, L., Chen, J., Niu, S., & Zi, Y. Triboelectric Nanogenerators. *Green Energy and Technology*. 2016.
17. Fan F-R, Tian Z-Q, Lin Wang Z. Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*. 2012;1(2):328-34.
18. Zhong J, Zhong Q, Fan F, Zhang Y, Wang S, Hu B, et al. Finger typing driven triboelectric nanogenerator and its use for instantaneously lighting up LEDs. *Nano Energy*. 2013;2(4):491-7.
19. Oh HJ, Bae JH, Park YK, Song J, Kim DK, Lee W, et al. A Highly Porous Nonwoven Thermoplastic Polyurethane/Polypropylene-Based Triboelectric Nanogenerator for Energy Harvesting by Human Walking. *Polymers*. 2020;12(5).
20. Li H, Zhao C, Wang X, Meng J, Zou Y, Noreen S, et al. Fully Bioabsorbable Capacitor as an Energy Storage Unit for Implantable Medical Electronics. *Advanced Science*. 2019;6.
21. Han Y, Han Y, Zhang X, Li L, Zhang C, Liu J, et al. Fish Gelatin Based Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Biomechanical Energy and Self-Powered Sensing of Human Physiological Signals. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020;12(14):16442-50.
22. Jayaweera EN, Wijewardhana KR, Ekanayaka TK, Shahzad A, Song J-K. Triboelectric Nanogenerator Based on Human Hair. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2018;6(5):6321-7.
23. Jie Y, Jia X, Zou J, Chen Y, Wang N, Wang Z, et al. Natural Leaf Made Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Environmental Mechanical Energy. *Advanced Energy Materials*. 2018;8:1703133.

24. Zheng Q, Zou Y, Zhang Y, Liu Z, Shi B, Wang X, et al. Biodegradable triboelectric nanogenerator as a life-time designed implantable power source. *Science Advances*.2(3):e1501478.
25. Gorgieva S, Trček J. Bacterial Cellulose: Production, Modification and Perspectives in Biomedical Applications. *Nanomaterials* (Basel). 2019;9(10):1352.
26. Forng ER, Anderson SM, Cannon RE. Synthetic Medium for *Acetobacter xylinum* That Can Be Used for Isolation of Auxotrophic Mutants and Study of Cellulose Biosynthesis. *Appl Environ Microbiol*. 1989;55(5):1317-9.
27. Klemm D, Schumann D, Kramer F, Heler N, Hornung M, Schmauder HP, et al. Nanocelluloses as Innovative Polymers in Research and Application. In: Klemm D, editor. *Polysaccharides II*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2006. p. 49-96.
28. Hassan SHA, Kim YS, Oh S-E. Power generation from cellulose using mixed and pure cultures of cellulose-degrading bacteria in a microbial fuel cell. *Enzyme and Microbial Technology*. 2012;51(5):269-73.
29. Manoukian O, Sardashti N, Stedman T, Gailunas K, Ojha A, Penalosa A, et al. *Biomaterials for Tissue Engineering and Regenerative Medicine*. 2018.
30. 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.
31. 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.
32. พัฒนันทน์ วงศ์วิวัฒน์. 2545. การสกัดไคติน-ไคโตซานจากเปลือกหอย. กรุงเทพฯ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ปรินูญานิพนธ์ [Online] Available from: <http://www.lib.kps.ku.ac.th/SpecialProject/Science/2545/Bs/PattananWw/chapter1.pdf>
33. Disthai. ไคโตซาน [Online] 2021. Available from: <https://www.disthai.com/16488248/%E0%B9%84%E0%B8%84%E0%B9%82%E0%B8%95%E0%B8%8B%E0%B8%B2%E0%B8%99>.
34. Kim J-N, Lee J, Go TW, Rajabi-Abhari A, Mahato M, Park JY, et al. Skin-attachable and biofriendly chitosan-diatom triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*. 2020;75:104904.

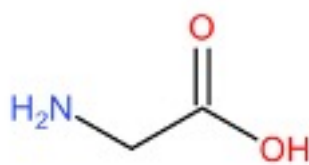
35. Ma C, Gao S, Gao X, Wu M, Wang R, Wang Y, et al. Chitosan biopolymer-derived self-powered triboelectric sensor with optimized performance through molecular surface engineering and data-driven learning. *InfoMat*. 2019;1.
36. วัสดุเชิงประกอบ [Online]. 2021. Available form:
<http://cms.dru.ac.th/jspui/bitstream/123456789/1464/6/Unit%202.pdf>
37. หฤทศักดิ์ กิริติเสวี ฌตยวรดตล, อภิรตน์ เลาห์บุตตรี. ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ. *วิศวกรรมสาร มก*. 2010; 70.
38. วัสดุผสม composite materials [Online] 2021. Available from:
[http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~psuvanch/101/compo\(501\).pdf](http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~psuvanch/101/compo(501).pdf).
39. Moulson AJ, Herbert JM. *Electroceramics : materials, properties, applications*. Second edition. ed. New York: Wiley; 2003.
40. International, Ltd. Piezoelectric constants. [Online] Available from:
<https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>.
41. Liu B, Wang S, Yuan Z, Duan Z, Zhao Q, Zhang Y, et al. Novel chitosan/ZnO bilayer film with enhanced humidity-tolerant property: Endowing triboelectric nanogenerator with acetone analysis capability. *Nano Energy*. 2020;78:105256.
42. Shao Y, Feng C-p, Deng B-W, Yin B, Yang M-b. Facile method to enhance output performance of bacterial cellulose nanofiber based triboelectric nanogenerator by controlling micro-nano structure and dielectric constant. *Nano Energy*. 2019;62.
43. Kapat K, T. H. Shubhra Q, Zhou M, Leeuwenburgh S. Piezoelectric Nano-Biomaterials for Biomedicine and Tissue Regeneration. *Advanced Functional Materials*. 2020;30:1909045.
44. Horacio D, Bernal R, Minary M. A Review of Mechanical and Electromechanical Properties of Piezoelectric Nanowires. *Advanced materials* (Deerfield Beach, Fla). 2012;24:4656-75.
45. Liu H, Zhong J, Lee C, Lee S-W, Lin L. A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications. *Applied Physics Reviews*. 2018;5:041306.
46. Gaur A, Tiwari S, Kumar C, Maiti P. Biobased Piezoelectric Nanogenerator for Mechanical Energy Harvesting using Nanohybrid of Poly(vinylidene fluoride). *Nanoscale Advances*. 2019;1.

47. Guerin S, Tofail S, Thompson D. Organic piezoelectric materials: milestones and potential. NPG Asia Materials. 2019;11:10.
48. สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน. FTIR Micro-Spectrometer เครื่องฟลูอิดรีयरทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรไมโครสโคป[Online] 2021. Available from:
https://www.slri.or.th/bdd/images/IAR_LAB/FTIR.png
49. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิอิมิชชันและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ [Online] 2021. Available from:
<http://www.strec.chula.ac.th/base/wp-content/uploads/Equipment/SEMIT500hr.jpg>.
50. OpenEI. Exploration Technique: X-Ray Diffraction (XRD) [Online]2021. Available from: [https://openei.org/wiki/X-Ray_Diffraction_\(XRD\)](https://openei.org/wiki/X-Ray_Diffraction_(XRD)).
51. สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน. X-ray Tomography [Online] 2021. Available from: <https://www.slri.or.th/th/beamline/beamline-overview.html?view=article&id=4240>.
52. Eleshop B.V. (2021). Owon SDS1202 oscilloscope. Retrieved November 1, from <https://eleshop.eu/owon-sds1202-oscilloscope.html>
53. ADC corporation. (2021). Digital Multimeters. Retrieved November 1, from , <https://www.adcmt.com/en/products/dmm>.
54. Pilling S, Mendes LA, Bordalo V, Guaman CF, Ponciano CR, da Silveira EF. The influence of crystallinity degree on the glycine decomposition induced by 1 MeV proton bombardment in space analog conditions. Astrobiology. 2013;13(1):79-91.
55. Ali Ahamed SZ, Dillip GR, Raghavaiah P, Mallikarjuna K, Deva Prasad Raju B. Spectroscopic and thermal studies of γ -glycine crystal grown from potassium bromide for optoelectronic applications. Arabian Journal of Chemistry. 2013;6(4):429-33.
56. Peter ME, Gurumurthi T, Tadele Z, Aboye B, Hussan MA. Growth and characterization of nonlinear optical crystal Gamma glycine by the additive of lithium bromide. Optics & Laser Technology. 2018;106:321-6.
57. Anbu Chudar Azhagan S, Ganesan S. Effect of zinc acetate addition on crystal growth, structural, optical, thermal properties of glycine single crystals. Arabian Journal of Chemistry. 2017;10:S2615-S24.
58. Sankar S, Manikandan MR, Gopal Ram SD, Mahalingam T, Ravi G. Gel growth of α and γ glycine and their characterization. Journal of Crystal Growth. 2010;312(19):2729-33.

59. Wang S-S, Han Y-H, Ye Y-X, Shi X-X, Xiang P, Chen D-L, et al. Physicochemical characterization of high-quality bacterial cellulose produced by *Komagataeibacter* sp. strain W1 and identification of the associated genes in bacterial cellulose production. *RSC Advances*. 2017;7(71):45145-55.
60. Fernandes Queiroz M, Melo KR, Sabry DA, Sassaki GL, Rocha HA. Does the Use of Chitosan Contribute to Oxalate Kidney Stone Formation? *Marine Drugs*. 2015;13(1).
61. Ivanova LA, Ustinovich KB, Khamova TV, Eneyskaya EV, Gorshkova YE, Tsvigun NV, et al. Crystal and Supramolecular Structure of Bacterial Cellulose Hydrolyzed by Cellobiohydrolase from *Scytalidium Candidum* 3 C: A Basis for Development of Biodegradable Wound Dressings. *Materials*. 2020;13(9).
62. Bouchard A, Hofland GW, Witkamp G-J. Solubility of Glycine Polymorphs and Recrystallization of β -Glycine. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2007;52(5):1626-9.
63. Tylczynski Z, Busz P. Transformation from γ to α modification in glycine crystal. *Phase Transitions: A Multinational Journal*. 2014;87.
64. Han G, Chow PS, Tan RBH. Effects of Common Inorganic Salts on Glycine Polymorphic Transformation: An Insight into Salt-Dependent Polymorphic Selectivity. *Crystal Growth & Design*. 2016;16(11):6499-505.
65. Han G, Chow PS, Tan RBH. Salt-dependent growth kinetics in glycine polymorphic crystallization. *CrystEngComm*. 2016;18(3):462-70.
66. Hao G, Hu Y, Shi L, Chen J, Cui A, Weng W, et al. Physicochemical characteristics of chitosan from swimming crab (*Portunus trituberculatus*) shells prepared by subcritical water pretreatment. *Scientific Reports*. 2021;11(1):1646.

ภาคผนวก

กรดพนวก



glycine

โครงสร้างทางเคมีของไกลซีน

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวสิรินยา อุกาสี
วัน เดือน ปีเกิด	วันพุธที่ 13 มกราคม พ.ศ. 2542
สถานที่เกิด	ยโสธร
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนคำเขื่อนแก้วชนูปถัมภ์ จังหวัดยโสธร พ.ศ 2560 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2564
ชื่อ-สกุล	นางสาวจิรณิชา นิลทับ
วัน เดือน ปีเกิด	วันพฤหัสบดีที่ 10 มิถุนายน พ.ศ. 2542
สถานที่เกิด	ชัยนาท
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์ พ.ศ 2560 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2564
ชื่อ-สกุล	นางสาวปรีตตา จุฑาทักติ
วัน เดือน ปีเกิด	วันอังคารที่ 14 มีนาคม พ.ศ.2543
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนชลประทานวิทยา จังหวัดนนทบุรี พ.ศ.2560 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2564