



การตอบสนองต่อแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว

นาย ปุณณนันท อรุณโรจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การตอบสนองต่อแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว



นายปุณณันท์ อรุณโรจน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การตอบสนองต่อแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว

โดย นาย ปุณณนันท อรุณโรจน์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ จันทรวีวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล พิสิฐพิพัฒนสิน)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุพงศ์ ใจบาล)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.จักรวาล ไม้ทิพย์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนาวลัย สุทธิอาภรณ์)

ชื่อ : ปุณณนันท์ อรุณโรจน์
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การตอบสนองต่อแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสจาก
กะลามะพร้าว
สาขาวิชา : เทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุพงศ์ ใจบาล
ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการตอบสนองต่อแรงกดของนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว (Cellulose nanofibrils: CNF) โดยเริ่มจากการสกัดเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว (Coconut shell cellulose: CSC) ด้วยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อกำจัดเฮมิเซลลูโลส เพื่อกำจัดลิกนินออกนำมาฟอกสีด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเตรียมนาโนเซลลูโลสผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป (Tempo : 2,2,6,6-tetramethylpiperidine 1-oxyl) และนำไปทำให้แห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง (Freeze dry) เปรียบเทียบกับการทำให้แห้งด้วยความร้อน (Oven dry) จากนั้นทำการขึ้นฟิล์มโดยใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์หลัก และมีการเติมแคลเซียมคลอไรด์เพื่อศึกษาการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า นำมาจับคู่กับแผ่นฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE) เพื่อสร้างอุปกรณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์ (TENG) ในแบบอิเล็กโทรดเดี่ยว (Single electrode mode) ใช้เทปทองแดงเป็นอิเล็กโทรด ซึ่งได้นำตัวอย่างทั้งหมดมาศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) การสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ โดยเทคนิคสเปกโทรสโกปีเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (EDS) ระบุกลุ่มฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) ทดสอบการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุ (Tensile strength) ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ด้วยเครื่องอิเล็กโตรมิเตอร์ จากการทดสอบพบว่า แผ่นฟิล์ม CNF3%CaCl₂1% ให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 165 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด 0.44 ไมโครแอมป์ ซึ่งสามารถทำให้ไดโอดเปล่งแสงเชิงพาณิชย์สีเขียวสว่างได้ 82 ดวง

คำสำคัญ : กะลามะพร้าว, ไทรโบอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์, นาโนเซลลูโลส

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : PUNNANAN ARUNLOGN
Thesis Title : Pressing force response of nanocellulose films from coconut shells
Major Field : Energy Technology and Management
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Associate Professor PANUPONG JAIBAN
Academic Year : 2024

Abstract

This research examines the pressing force response of nanocellulose films from coconut shells. Coconut shell cellulose (CSC) is prepared using sodium hydroxide to remove hemicellulose and hydrogen peroxide for lignin removal. Cellulose nanofibrils (CNF) are extracted via TEMPO-mediated oxidation and dried by freeze-drying or oven-drying for comparison. CNF is then used to fabricate biofilms with polyvinyl alcohol (PVA) as the primary polymer, while calcium chloride is added to study voltage generation. The CNF-based biofilms are paired with polytetrafluoroethylene (PTFE) film to construct a triboelectric nanogenerator (TENG) in single-electrode mode, with copper tape as the electrode. Material characterization is conducted using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Optical absorption is analyzed with a UV-visible spectrophotometer, and an electrometer measures mechanical and electrical properties. The CNF3%CaCl₂1% film generates 165 volts and 0.44 microamps, successfully powering 82 commercial LEDs.

Keyword : Coconut shell, Nanocellulose, Triboelectric nanogenerator

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ขอขอบพระคุณอาจารย์รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุพงศ์ ใจบาล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ให้คำปรึกษา หลักคิดในการดำเนินการและให้กำลังใจ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเมตตา เอาใจใส่และความเสียสละเวลาอันมีค่าให้แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล พิสิฐพิพัฒน์สิน ประธานสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.จักรารัฐ ไม้ทิพย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พนาวัลย์ สุทธิอาภรณ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือแก้ไข ให้การชี้แนะแนวทาง และให้ความรู้ทางด้านวิชาการ ทางด้านเทคนิคและให้คำแนะนำที่มีประโยชน์มาตลอดการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความกรุณาถ่ายทอดความรู้ หรือเทคนิคต่าง ๆ ให้แก่ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณและผู้เชี่ยวชาญทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือและให้ข้อเสนอต่าง ๆ เป็นอย่างดีในการสร้างเครื่องมือวิจัยที่มีความถูกต้องสมบูรณ์ รวมทั้งผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการให้ข้อมูล ความรู้แก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดีในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง ที่เป็นสถานที่ในการทำวิจัยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ขอขอบคุณอาจารย์สาขาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ สาขากระบวนการอุตสาหกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม และทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ให้การสนับสนุนผู้วิจัยเป็นอย่างดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและระลึกถึงความกรุณาของทุกท่านเป็นอย่างสูง

ทั้งนี้ขอขอบพระคุณทุก ๆ ท่านที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ซึ่งผู้วิจัยจะสามารถกล่าวนามได้ทั้งหมด ณ ที่นี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวซึ่งสนับสนุนในด้านการเงิน ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ปณณันท์ อรุณโรจน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 มะพร้าว (Coconut).....	4
2.2 เซลลูโลส (Cellulose).....	5
2.3 นาโนเซลลูโลส (Nanocellulose).....	6
2.3.1 ลักษณะโครงสร้าง	6
2.3.2 คุณสมบัติของนาโนเซลลูโลส	7
2.3.3 ประเภทของนาโนเซลลูโลส	7
2.4 กระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป (2,2,6,6-Tetramethylpiperidine 1-oxyl; TEMPO)..	9
2.5 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites).....	11
2.6 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol); PVA)	11

2.7 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties).....	12
2.7.1 วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric Materials).....	13
2.7.2 ปรากฏการณ์ประจุไฟฟ้าสถิต (Static Electricity หรือ Electrostatic Charge).....	15
2.7.3 ปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Effect).....	16
2.8 หลักการทำงานของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้า (Rectifier circuit).....	26
2.8.1 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่น (Half-wave rectifier circuit).....	26
2.8.2 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น (Full wave rectifier circuit).....	28
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	44
3.1 สารเคมี.....	44
3.2 อุปกรณ์.....	44
3.3 เครื่องมือ	45
3.4 ชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลส.....	46
3.4.1 การสกัดเซลลูโลสจากผงกะลามะพร้าว (CSC).....	46
3.4.2 การสังเคราะห์เซลลูโลสนาโนไฟบริล (CNF).....	48
3.4.3 การขึ้นฟิล์มโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)	50
3.4.4 การขึ้นฟิล์มชีวภาพจากเซลลูโลสนาโนไฟบริล	51
3.4.5 การขึ้นฟิล์มชีวภาพจากเซลลูโลสนาโนไฟบริลที่เติมไอออนแคลเซียมคลอไรด์	53
3.4.6 การขึ้นรูปอีพอกซีใส.....	54
3.4.7 การประดิษฐ์อุปกรณ์.....	55
3.5 การศึกษาลักษณะเฉพาะ	56
3.5.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	56
3.5.2 การศึกษาองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมี.....	57
3.5.3 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบทางเคมี.....	57

3.5.4 การศึกษาการดูดกลืนแสง	58
3.5.5 การทดสอบความทนทาน	59
3.6 การทดสอบการตอบสนองต่อแรงกดด้วยการทดสอบสัญญาณทางไฟฟ้า.....	60
3.7 วิธีการดำเนินงานวิจัย	62
3.7.1 การทดลองแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดสูงสุด.....	64
3.7.2 การทดลองการอัดประจุ.....	65
3.7.3 การทดลองต่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับไดโอดเปล่งแสง (LED).....	66
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	67
4.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวอย่างทั้งหมด.....	67
4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของตัวอย่างทั้งหมด	69
4.3 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา	72
4.4 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี.....	74
4.5 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุ	78
4.6 ผลการศึกษาวิเคราะห์การส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิค UV-vis	79
4.7 ผลการตรวจสอบการตอบสนองต่อแรงกด	81
4.8 ผลการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า	84
4.9 ผลการทดสอบเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับไดโอดเปล่งแสง (LED).....	85
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	89
5.1 สรุปผลและอภิปรายผล	89
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	90
บรรณานุกรม.....	91
ประวัติผู้เขียน	95

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ชนิด แหล่งที่มา และข้อมูลของนาโนเซลลูโลสชนิดต่างๆ	9
ตารางที่ 2-2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ TENG จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43
ตารางที่ 4-1 ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมึกฟังก์ชันต่าง ๆ ของตัวอย่างผงกะลามะพร้าว เซลลูโลส และ นาโนเซลลูโลส.....	71
ตารางที่ 4-2 ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมึกฟังก์ชันต่าง ๆ ของฟิล์ม PVA ฟิล์มนาโนเซลลูโลส และฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่ได้รับการเติม CaCl_2 ลงไป	72
ตารางที่ 4-3 แสดงค่าต่าง ๆ จากการทดสอบ Tensile strength ของแผ่นฟิล์ม PVA, CNF3%, $\text{CNF3}\%\text{CaCl}_2\text{1}\%$ และ $\text{CNF3}\%\text{CaCl}_2\text{4}\%$	79
ตารางที่ 4-4 แสดงค่าการส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 600 nm ของฟิล์ม CNF ที่ 0%, 1%, 2%, 3%, CNF3% ที่เติม CaCl_2 ลงไป 0.5%, 1%, 2%, และ 4%.....	80
ตารางที่ 4-5 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม CNF ที่ 0%, 1%, 2%, 3%, CNF3% ที่เติม CaCl_2 ลงไป 0.5%, 1%, 2%, และ 4%.....	83
ตารางที่ 4-6 แสดงจำนวนหลอดไฟ LEDs ที่สามารถติดไฟได้ในแต่ละตัวอย่างที่นำมาทำอุปกรณ์ ...	88

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2-1 ลักษณะของกะลามะพร้าว	5
ภาพที่ 2-2 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	6
ภาพที่ 2-3 โครงสร้างของนาโนเซลลูโลส	6
ภาพที่ 2-4 การสกัดเส้นใยเซลลูโลสได้ในรูปแบบต่างๆ	8
ภาพที่ 2-5 ลักษณะของแบคทีเรีย <i>G. xylinus</i>	8
ภาพที่ 2-6 การออกซิเดชันแบบเลือกตำแหน่ง (Regioselective oxidation) โดยใช้กระบวนการออกซิเดชันด้วย TEMPO/NaBr/NaClO.....	10
ภาพที่ 2-7 โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	12
ภาพที่ 2-8 ผลของสนามไฟฟ้าต่อโมเลกุลมีขั้วในไดอิเล็กทริก	13
ภาพที่ 2-9 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน	14
ภาพที่ 2-10 ลำดับประจุไฟฟ้าไตรโบอิเล็กทริกของวัสดุต่างๆ (Triboelectric series for the most promising series of materials).....	17
ภาพที่ 2-11 เครือข่ายแสดงการจับคู่ตัวรับและตัวให้อิเล็กตรอน (Network of electron acceptors and donors).....	19
ภาพที่ 2-12 สัดส่วนของตัวอย่างวัสดุตัวรับอิเล็กตรอน (A) และตัวให้อิเล็กตรอน (B).....	19
ภาพที่ 2-13 การแยกหน้าสัมผัส (Contact separation).....	20
ภาพที่ 2-14 การเลื่อนด้านข้าง (Lateral-sliding).....	21
ภาพที่ 2-15 โหมดอิสระ (Freestanding).....	22
ภาพที่ 2-16 อิเล็กโทรดเดี่ยว (Single-electrode).....	23
ภาพที่ 2-17 Energy flow chart of triboelectric system.	24
ภาพที่ 2-18 เอาต์พุตแรงดันกระแสตรงของเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น.....	27
ภาพที่ 2-19 การต่อวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่น.....	27

ภาพที่ 2-20 การเปรียบเทียบระหว่างการทำงานของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่น และวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น.....	28
ภาพที่ 2-21 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นสองไดโอด	29
ภาพที่ 2-22 การทำงานช่วงครึ่งรอบบวก (Positive half-cycle).....	29
ภาพที่ 2-23 การทำงานช่วงครึ่งรอบลบ (Negative half-cycle).....	29
ภาพที่ 2-24 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์.....	30
ภาพที่ 2-25 การทำงานช่วงครึ่งรอบบวกของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์	31
ภาพที่ 2-26 การทำงานช่วงครึ่งรอบลบของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์	31
ภาพที่ 2-27 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์ CS&RS-TENG	34
ภาพที่ 2-28 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าทั้งสองแบบของ CS&RS-TENG.....	34
ภาพที่ 2-29 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่แผ่นฟิล์ม CNF ที่ดัดแปลงแบบต่าง ๆ จากอุปกรณ์ CS&RS TENG.....	35
ภาพที่ 2-30 ภาพฟิล์มไดอิเล็กทริกของแป้งที่ติดอยู่กับอลูมิเนียม	36
ภาพที่ 2-31 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ CS-TENG.....	36
ภาพที่ 2-32 เอادتพุทของอิเล็กโทรไลต์ฟิล์มแป้งหลังจากการย่อยสลายทางชีวภาพเป็นเวลา 5 วัน .	37
ภาพที่ 2-33 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์ non-contact TENG.....	38
ภาพที่ 2-34 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ non-contact TENG....	38
ภาพที่ 2-35 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดจากอุปกรณ์ non-contact TENG	39
ภาพที่ 2-36 แรงดันไฟฟ้าสูงสุดถึงจุดสูงสุดของ PVDF/12 wt%AP ในพื้นที่ขนาดต่าง ๆ.....	39
ภาพที่ 2-37 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์ SL-TENG.....	40
ภาพที่ 2-38 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ SL-TENG.....	40
ภาพที่ 2-39 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดจากอุปกรณ์ SL-TENG	41
ภาพที่ 2-40 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์ SOP-TENG.....	42
ภาพที่ 2-41 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ SOP-TENG.....	42

ภาพที่ 2-42 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดจากอุปกรณ์ SOP-TENG	43
ภาพที่ 3-1 ภาพผงกะลามะพร้าวที่ผ่านการล้างและอบแล้ว	46
ภาพที่ 3-2 การปรับสภาพผงกะลามะพร้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	47
ภาพที่ 3-3 ทำการฟอกสีเซลลูโลสด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	47
ภาพที่ 3-4 การอบเซลลูโลส	48
ภาพที่ 3-5 ลักษณะเซลลูโลส (CSC)	48
ภาพที่ 3-6 การใช้เครื่อง pH meter เพื่อรักษาค่า pH ไว้ที่ 10.5	49
ภาพที่ 3-7 ตัวอย่างเซลลูโลสนาโนไฟบริลหลังทำให้แห้งด้วยความเย็น (CNF-2FD)	49
ภาพที่ 3-8 ตัวอย่างเซลลูโลสนาโนไฟบริลหลังทำให้แห้งด้วยความร้อน (CNF-2OV)	50
ภาพที่ 3-9 ตัวอย่างฟิล์มโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ขนาด 4 * 4 ตารางเซนติเมตร	51
ภาพที่ 3-10 การขึ้นฟิล์มนาโนเซลลูโลสขณะปั่นกวน	51
ภาพที่ 3-11 ตัวอย่างฟิล์มนาโนเซลลูโลสขนาด 4 * 4 ตารางเซนติเมตร	52
ภาพที่ 3-12 ตัวอย่างฟิล์ม CNF 4-5%	52
ภาพที่ 3-13 ตัวอย่างฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่เติมไอออนแคลเซียมคลอไรด์ขนาด 4 * 4 ตารางเซนติเมตร	53
ภาพที่ 3-14 ตัวอย่างฟิล์ม CNF3%CaCl ₂ 5%	54
ภาพที่ 3-15 ตัวอย่างอีพอกซีใสขนาด 5 * 5 ตารางเซนติเมตร	54
ภาพที่ 3-16 โครงสร้างอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลส	55
ภาพที่ 3-17 แบบจำลองอุปกรณ์และชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลส	56
ภาพที่ 3-18 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smart Lab	56
ภาพที่ 3-19 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น FT-NIR	57
ภาพที่ 3-20 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Environmental Scanning Electron Microscope หรือ ESEM ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Quattro ESEM	58
ภาพที่ 3-21 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ KLAB รุ่น Optizen POP	59

ภาพที่ 3-22 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ยี่ห้อ Shimadzu/ EZ-Test(EZ-LX).....	59
ภาพที่ 3-23 เครื่องทดสอบแรงกด รุ่น AAS-Q101.....	60
ภาพที่ 3-24 เครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า Electrometer ยี่ห้อ Keithley รุ่น 6517B.....	61
ภาพที่ 3-25 ไดอะแกรมของชุดทดลองอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลส.....	63
ภาพที่ 3-26 ไดอะแกรมการทำงานอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลส	64
ภาพที่ 3-27 การทดลองชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลส	64
ภาพที่ 3-28 ตัวอย่างฟิล์ม (ก CNF0% หรือ PVA (ข CNF1% (ค CNF2% (ง CNF3% (จ CNF3%CaCl ₂ 0.5% (ฉ CNF3%CaCl ₂ 1% (ช CNF3%CaCl ₂ 2% และ (ซ CNF3%CaCl ₂ 4%.....	65
ภาพที่ 3-29 การต่อวงจรทดลองการอัดประจุ.....	66
ภาพที่ 3-30 การต่อวงจรทดลองแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับไดโอดเปล่งแสง (LED).....	66
ภาพที่ 4-1 รูปแบบ XRD ของ CS, CSC, CNF-2FD และ CNF-2OV.....	68
ภาพที่ 4-2 รูปแบบ XRD ของฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่อัตราส่วนต่าง ๆ และ CNF3% ที่เติม CaCl ₂ ลงไปที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	69
ภาพที่ 4-3 รูปแบบ FTIR ของกะลามะพร้าวและเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว.....	70
ภาพที่ 4-4 รูปแบบ FTIR ของ CNF-2FD และ CNF-2OV.....	70
ภาพที่ 4-5 รูปแบบ FTIR ของฟิล์ม PVA ฟิล์มนาโนเซลลูโลส และฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่ได้รับการเติม CaCl ₂ ลงไป	71
ภาพที่ 4-6 รูปแบบ ESEM ของ ก) CNF-2OV ข) ภาพขยาย CNF-2OV ค) CNF-2FD และ ง) ภาพขยาย CNF-2FD	73
ภาพที่ 4-7 รูปแบบ ESEM ของฟิล์ม ก) PVA ข) CNF3% ค) CNF3%CaCl ₂ 1% และ ง) CNF3%CaCl ₂ 4%	73
ภาพที่ 4-8 รูปแบบ EDS ของ CNF-2OV	75
ภาพที่ 4-9 รูปแบบ EDS ของ CNF-2FD.....	75
ภาพที่ 4-10 ภาพ SEM-EDS Mapping แผ่นฟิล์ม PVA หรือ CNF0%.....	76
ภาพที่ 4-11 ภาพ SEM-EDS Mapping แผ่นฟิล์ม CNF3%	76

ภาพที่ 4-12 ภาพ SEM-EDS Mapping แผ่นฟิล์ม CNF3%CaCl1%	77
ภาพที่ 4-13 ภาพ SEM-EDS Mapping แผ่นฟิล์ม CNF3%CaCl4%	77
ภาพที่ 4-14 กราฟทดสอบ Tensile strength ของแผ่นฟิล์ม PVA, CNF3%, CNF3%CaCl ₂ 1% และ CNF3%CaCl ₂ 4%	78
ภาพที่ 4-15 กราฟ Transmittance ของแผ่นฟิล์ม PVA, CNF1%, CNF2%, CNF3%, CNF3%CaCl ₂ 0.5%, CNF3%CaCl ₂ 1%, CNF3%CaCl ₂ 2% และ CNF3%CaCl ₂ 4%	80
ภาพที่ 4-16 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างความเร็วการกดที่แตกต่างกันบนอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม PVA	81
ภาพที่ 4-17 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม PVA กับ CNF1%	82
ภาพที่ 4-18 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม CNF1%, CNF2% และ CNF3%	82
ภาพที่ 4-19 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม CNF3%CaCl ₂ 0.5%, CNF3%CaCl ₂ 1%, CNF3%CaCl ₂ 2% และ CNF3%CaCl ₂ 4%	83
ภาพที่ 4-20 ผลการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ 0.10, 0.22 และ 0.47 μ F	84
ภาพที่ 4-21 แหล่งจ่ายไฟให้กับเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น ก) ปิดวงจร ข) เปิดวงจร	85
ภาพที่ 4-22 อุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่ 0%, 1%, 2% และ 3%	86
ภาพที่ 4-23 อุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์ม CNF3% ที่เติม CaCl ₂ ลงไป 0.5%, 1%, 2% และ 4%	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (Internet of Things; IoT) เข้ามามีบทบาทสำคัญในทุกภาคส่วนของธุรกิจและการใช้ชีวิตประจำวัน ซึ่ง IoT เป็นเครือข่ายที่เชื่อมต่อระหว่างสิ่งต่าง ๆ โดยใช้การเชื่อมต่อแบบไร้สายผ่านเซ็นเซอร์อัจฉริยะ สรรพสิ่งในเครือข่าย IoT สามารถสื่อสารและเชื่อมต่อกันได้ผ่านโพรโทคอลที่ออกแบบมาสำหรับการสื่อสารโดยเฉพาะ อีกทั้งยังมีความสามารถในการระบุตัวตน รับรู้บริบทของสภาพแวดล้อม และมีปฏิสัมพันธ์ร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างของการทำงานร่วมกันในระบบ IoT ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ในสำนักงาน บ้านพักอาศัย หรือแม้แต่ในอุปกรณ์ทางการแพทย์ เครื่องจักรกลการเกษตรและเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรม การสื่อสารระหว่างสรรพสิ่งเหล่านี้ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน แต่ยังนำไปสู่การพัฒนานวัตกรรมและบริการใหม่ ๆ เช่น การใช้เซ็นเซอร์เพื่อตรวจจับการเคลื่อนไหวหรือสัญญาณจากผู้ป่วยและส่งข้อมูลไปยังบุคลากรทางการแพทย์เพื่อการตอบสนองที่รวดเร็วและแม่นยำ

ปัจจุบันนี้มีเทคโนโลยีต่าง ๆ ในการเก็บเกี่ยวพลังงานที่พัฒนาอย่างก้าวหน้าและหลากหลาย เช่น การเก็บเกี่ยวพลังงานจากเคมี ชีวภาพ และการสั่นสะเทือน ซึ่งเป็นรูปแบบการเก็บเกี่ยวพลังงานที่มีศักยภาพในการพัฒนาและผลิตพลังงานเพื่อตอบสนองความต้องการในด้านพลังงานดังกล่าว ด้วยเหตุนี้งานวิจัยจึงได้นำเสนอเทคโนโลยีที่น่าสนใจในด้านการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงกลแรงกลที่เกิดขึ้นสามารถนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ โดยผ่านกระบวนการสัมผัสหรือการเสียดสีของวัสดุต่าง ๆ โดยอาศัยปรากฏการณ์ไฟฟ้าสถิต ในกระบวนการนี้จะเกิดการเหนี่ยวนำและการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ซึ่งวัสดุที่เลือกใช้จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันในการรับและจ่ายอิเล็กตรอน ทำให้วัสดุไทรโบอิเล็กทริก (Trieboelectric materials) กลายเป็นวัสดุที่สำคัญในการผลิตขั้วอิเล็กโทรด วัสดุที่ใช้ในการผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริก (TEG) มีหลายประเภท เช่น แบ่ง เซลลูโลส อย่างไรก็ตามฟิล์มชีวภาพได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากกระบวนการผลิตที่ง่ายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นนาโนเซลลูโลสจึงกลายเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการผลิตฟิล์มชีวภาพ ซึ่งสามารถนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานได้

ปัจจุบันการศึกษาการใช้ประโยชน์จากเซลลูโลส ซึ่งเป็นไบโอโพลิเมอร์ (Bio-polymers) ที่สามารถทดแทนวัสดุอื่นได้และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะการศึกษาการผลิตและการใช้ประโยชน์จากนาโนเซลลูโลส เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพที่โดดเด่นของนาโนเซลลูโลส มีความแข็งแรงประมาณร้อยละ 25 เมื่อเทียบกับคาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon nanotube) และยังมีข้อได้เปรียบในด้านราคาที่ถูกกว่าวัสดุนี้อื่น ผลิตภัณฑ์นาโนเซลลูโลส (Cellulose whisker) ถูกเตรียมขึ้นและนำไปผสมกับโพลิเมอร์ธรรมชาติหรือโพลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ เพื่อสร้างวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร (Nanocomposite) ที่ช่วยเสริมแรงให้กับโพลิเมอร์เหล่านั้น นอกจากนี้ ผลิตภัณฑ์นาโนเซลลูโลสยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายด้าน เช่น ทางด้านการแพทย์ ด้านวัสดุบรรจุภัณฑ์และทางด้านเครื่องสำอาง เป็นต้น

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตผลิตภัณฑ์นาโนเซลลูโลสจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในประเทศไทย โดยเลือกใช้กะลามะพร้าว ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีจำนวนมากในประเทศไทยมาเป็นวัตถุดิบในการศึกษาในครั้งนี้ การใช้กะลามะพร้าวในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์นาโนเซลลูโลสจะช่วยลดปริมาณมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาฟิล์มชีวภาพที่มีนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าวที่สามารถตอบสนองต่อแรงกด

1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมีที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว

1.2.3 เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ตอบสนองต่อแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าวที่ทำขึ้นจากวัสดุที่หาใช้งานได้ง่ายและมีราคาถูก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเตรียมตัวอย่างกะลามะพร้าวเพื่อผลิตนาโนเซลลูโลส โดยเริ่มจากการล้างและอบให้สะอาด จากนั้นปรับสภาพผงกะลามะพร้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide; NaOH) ต่อมาเซลลูโลสถูกฟอกสีด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2) และทำการอบให้แห้ง หลังจากนั้นทำการผลิตนาโนเซลลูโลสด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป (TEMPO) และทำให้แห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง จนได้ตัวอย่างนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว (Cellulose nanofibrils; CNF) ขั้นตอนถัดไปคือการเตรียมแผ่นฟิล์มชีวภาพจากนาโนเซลลูโลสโดยการขึ้นฟิล์มจากการต้มนาโนเซลลูโลสและโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl

alcohol; PVA) ในสารละลาย โดยจะกวนส่วนผสมจนกลายเป็นสารละลายโปร่งใส และจะนำไปเทลงบนแม่พิมพ์และนำไปแช่เย็นเพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มชีวภาพที่ต้องการ หลังจากนั้นแผ่นฟิล์มชีวภาพถูกนำมาผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริกในโหมด Single mode (SE-TENG) จากกากกะลามะพร้าว ซึ่งเป็นของเหลือใช้ทางการเกษตร เซลลูโลสและแผ่นฟิล์มชีวภาพจะถูกศึกษา ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ร่วมกับเทคนิคสเปกโตรสโคปีเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy; EDS) การศึกษาผลึกของเซลลูโลสจะทำด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) และการระบุกลุ่มฟังก์ชันของวัสดุด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy; FTIR) แผ่นฟิล์มนาโนเซลลูโลสจะถูกนำไปใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริกในโหมด Single mode เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 การพัฒนาแผ่นฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่มาจากของเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้เป็นวัสดุสำหรับเป็นอุปกรณ์ตอบสนองต่อแรงกด

1.4.2 องค์ความรู้ในการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ในการทำวัสดุสำหรับเป็นอุปกรณ์ตอบสนองต่อแรงกด

1.4.3 งานวิจัยนี้แสดงผลให้เห็นถึงอุปกรณ์ต้องการให้ระบบทำงานเป็นอิสระ ไม่ต้อง พึ่งพาพลังงานจากแบตเตอรี่

1.4.4 เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานที่มีอยู่รอบตัวด้วยวิธีการและวัสดุที่หาใช้งานได้ง่าย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี วิธีการและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบของการพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลส ทำให้เกิดแรงกระทำภายในอุปกรณ์จากแรงกดที่มาจากภายนอกมีการบีบอัดและขยายตัวเป็นระยะ ส่งผลให้เกิดการสัมผัสของวัสดุไดอิเล็กทริกมีความเป็นขั้วสูงระหว่างสองขั้วได้แก่ ขั้วบวกและขั้วลบที่สามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับหลักการทํางานและรายละเอียดของอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในการออกแบบสำหรับสร้างชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว

2.1 มะพร้าว (Coconut)

มะพร้าวเป็นพืชตระกูลปาล์มชนิดหนึ่ง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cocos nucifera* Linn. เป็นพืชยืนต้นขนาดปานกลางในตระกูลเดียวกับต้นจาก มะพร้าวเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่เขตร้อนซึ่งมีลักษณะเป็นดินทรายหรือในบริเวณชายทะเล โดยส่วนลำต้นของมะพร้าวจะมีเปลือกแข็งหุ้มอยู่โดยรอบ ส่วนใบมีลักษณะเป็นทางยาวแยกออกไปจากแกนกลางของใบ ผลอ่อนของมะพร้าวจะมีสีเขียวและเมื่อแก่จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ผลมะพร้าวมีเปลือกหุ้มด้านนอกที่แข็ง และภายในจะมีเส้นใยหุ้มอีกชั้นหนึ่ง มะพร้าวสามารถนำส่วนต่าง ๆ มารับประทานได้ทั้งน้ำและเนื้อของผล นอกจากนี้ส่วนของลำต้นอ่อนในบริเวณยอดของลำต้นก็ยังสามารถนำมารับประทานได้เช่นเดียวกัน (กระยาทิพย์ เรือนใจ, 2543) ส่วนของมะพร้าวที่มีความสำคัญมากต่ออุตสาหกรรมอาหารคือส่วนของเมล็ดที่เรียกว่า Seed, Kernel หรือ Meat ซึ่งก็คือ ส่วนของเนื้อมะพร้าวที่อยู่ใต้กะลา ประกอบด้วย Seed coat ซึ่งอยู่ระหว่างเนื้อมะพร้าวกับกะลา ส่วนนี้จะติดแน่นกับเอนโดสเปิร์ม ซึ่งเอนโดสเปิร์มมีความหนาประมาณ 4 - 20 มิลลิเมตร ส่วนของลูกมะพร้าวอีกส่วนหนึ่งที่มักถูกทิ้งเป็นวัสดุเหลือใช้ คือ “กะลามะพร้าว” ซึ่งเมื่อเนื้อของมะพร้าวถูกนำไปบริโภคหมดแล้ว กะลามะพร้าวจะกลายเป็นเศษวัสดุที่มีมูลค่าน้อย ประชาชนในอดีตมักจะนำกะลามะพร้าวไปใช้เป็นเชื้อเพลิง หรือในบางกรณีก็อาจนำมาใช้ทำเครื่องใช้ในครัวเรือน เช่น กระบวยตักน้ำ ทัพพี ถ้วย ชาม เป็นต้น ความสำคัญของกะลามะพร้าวในสมัยก่อนนั้นจึงไม่มากนัก

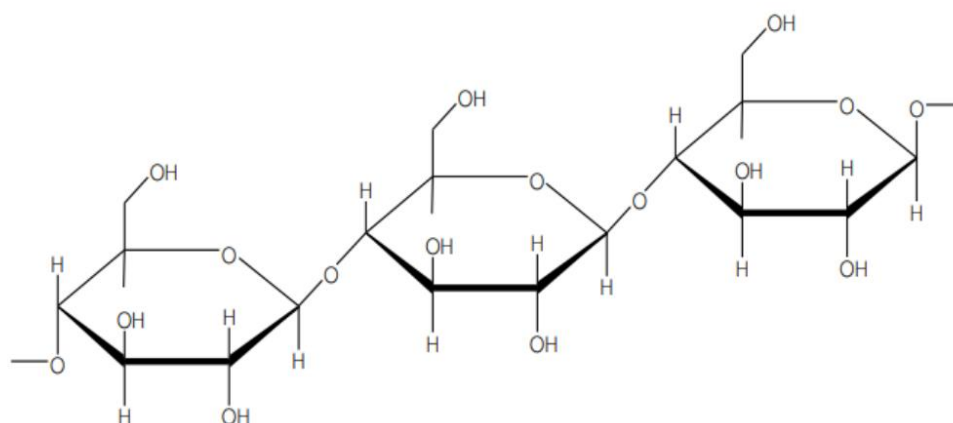


ภาพที่ 2-1 ลักษณะของกะลามะพร้าว

ที่มา : <https://www.istockphoto.com/th>

2.2 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นสารอินทรีย์ที่พบได้มากที่สุดที่สุดในธรรมชาติและจัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสำคัญในผนังเซลล์ของพืชชั้นสูง เช่น ไม้ปอ และไผ่ นอกจากนี้ยังพบเซลลูโลสในสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ นอกเหนือจากพืช เช่น สาหร่ายสีเขียว รา และแบคทีเรียบางชนิด เซลลูโลสมีคุณสมบัติที่แข็งแรงและมั่นคงเนื่องจากมีโครงสร้างเส้นใยที่เสถียร โดยมีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ ซึ่งจัดเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ในธรรมชาติ เซลลูโลสมักจะพบในรูปอิสระ แต่จะพบร่วมกับกลีซิน เอมิเซลลูโลส กัมเพนโตแซน แทนนิน ไขมัน และสารที่ให้สีในพืช เป็นต้น สำหรับโครงสร้างของเซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส (Glucose) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) เป็นหมู่หลักมาเรียงต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ที่ตำแหน่ง $\beta(1-4)$ ($\beta(1-4)$ glycosidic bond) ซึ่งจะเป็สายยาวที่ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสมากกว่า 1,000 – 10,000 โมเลกุล โดยมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2-2 โดยในแต่ละหน่วยซ้ำจะมีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล และอีก 1 หมู่ที่เหลือทำพันธะกับโมเลกุลข้างเคียง จึงทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรงและความเป็นผลึกสูง ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการหลอมตัว และเซลลูโลสไม่สามารถละลายในสารละลายอินทรีย์ทั่วไป ในทางอุตสาหกรรม การหาน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณของเซลลูโลสสามารถทำได้จากการวัดค่าความหนืด (Viscosity) (จิตตรา ดอกบัว, 2552)



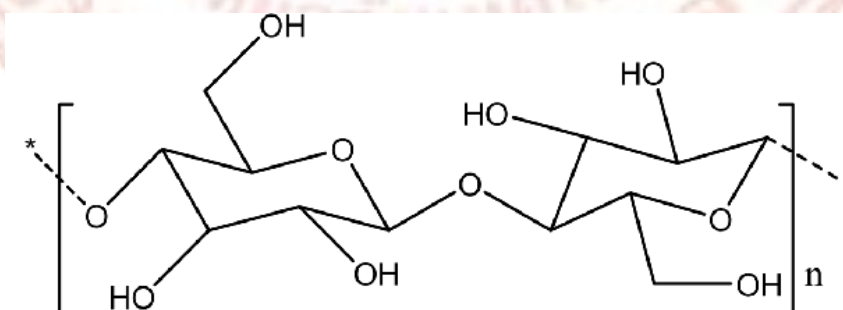
ภาพที่ 2-2 โครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา : จิตตรา, 2552

2.3 นาโนเซลลูโลส (Nanocellulose)

2.3.1 ลักษณะโครงสร้าง

นาโนเซลลูโลสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลและเครือข่ายพันธะไฮโดรเจนจำนวนมาก ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลที่โดดเด่นของเส้นใยเซลลูโลส โครงสร้างของเซลลูโลสประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ บริเวณโครงสร้างผลึก (Crystalline structure) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบ และบริเวณโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous structure) ที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบ ในส่วนของโครงสร้างผลึก โมเลกุลจะมีการรวมตัวอย่างแน่นหนา ส่งผลให้เซลลูโลสมีความแข็งแรงและทนทานสูง ส่วนของโครงสร้างอสัณฐานมีบทบาทในการเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับวัสดุ



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างของนาโนเซลลูโลส

ที่มา : Taib et al., 2018

2.3.2 คุณสมบัติของนาโนเซลลูโลส

นาโนเซลลูโลสสามารถสกัดได้จากเส้นใยธรรมชาติที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้วนาโนเซลลูโลสที่ได้จากการสกัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 นาโนเมตร นอกจากนี้ นาโนเซลลูโลสเป็นวัสดุชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีน้ำหนักเบา และความหนาแน่นต่ำ แต่กลับมีความแข็งแรงสูง โดยเฉพาะในด้านความเหนียวของเส้นใย ซึ่งสามารถทนทานต่อแรงดึงได้สูงถึง 10 กิกะปาสคาล (GPa) ซึ่งสูงกว่าเส้นใยเหล็กขึ้นรูป และมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูงกว่าค่าเหล็กกล้าไร้สนิมถึงแปดเท่า นอกจากนี้ นาโนเซลลูโลสยังมีคุณสมบัติเป็นวัสดุโปร่งใสและมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารที่มีขั้วได้ดี

2.3.3 ประเภทของนาโนเซลลูโลส

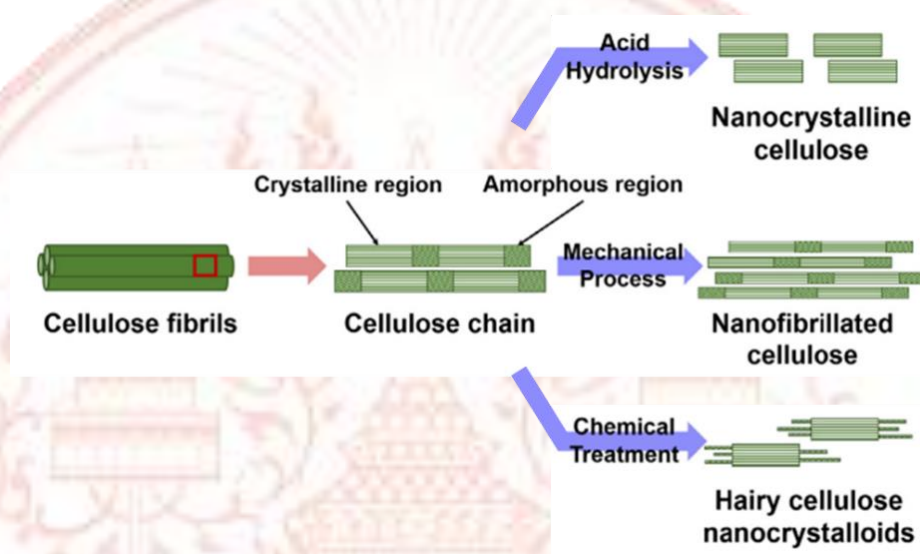
นาโนเซลลูโลสสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ซึ่งแม้ว่า นาโนเซลลูโลสทั้ง 3 ประเภทจะประกอบด้วยสารเคมีชนิดเดียวกัน แต่มีความแตกต่างกันของรูปร่าง ขนาด และลักษณะของผลึก โดยคุณสมบัติเฉพาะต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของเซลลูโลสและวิธีการสกัดที่ใช้ในการผลิตได้แก่

2.3.3.1 นาโนไฟบริลเลตเซลลูโลส (Nano fibrillated cellulose) หรือเซลลูโลสนาโนไฟบริล (Cellulose Nanofibrils) มีลักษณะเป็นเส้นใยที่ยาว ยืดหยุ่น และมีเส้นใยที่พันกันแน่น โดยสามารถสกัดได้ด้วยวิธีทางกล ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอยู่ในช่วง 1 - 100 นาโนเมตร และความยาวประมาณ 500 - 2,000 นาโนเมตร เส้นใยนาโนไฟบริลเลตประกอบด้วยเซลลูโลสทั้งหมด และมีทั้งส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึกและโครงสร้างอสัณฐาน ดังภาพที่ 2-4 โดยจากภาพพบว่า การสกัดด้วยวิธีทางกลเส้นใยจะมีความยาวที่มากขึ้นและมีพื้นที่ผิวมากกว่ากลุ่มอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีหมู่ไฮดรอกซิลที่พร้อมสำหรับการปรับสภาพพื้นผิวจำนวนมาก ซึ่งทำให้เส้นใยประเภทนี้มีคุณสมบัติที่ดีในการปรับเปลี่ยนและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานต่างๆ

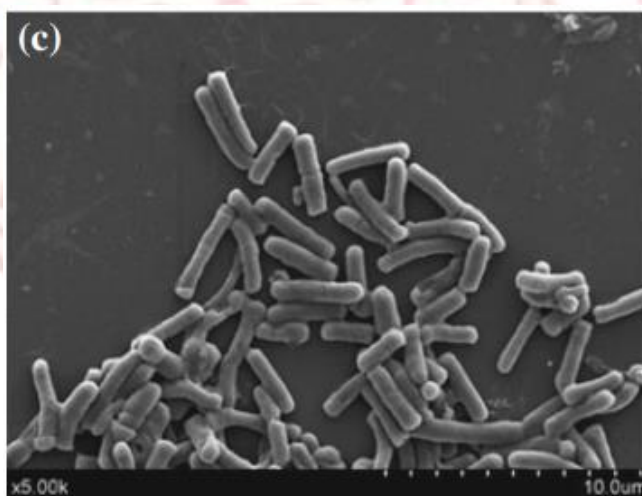
2.3.3.2 นาโนคริสตัลลีนเซลลูโลส (Nanocrystalline cellulose) หรือเซลลูโลสนาโนคริสตัล (Cellulose nanocrystals) เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง สามารถสกัดได้จากเส้นใยเซลลูโลสโดยการแยกด้วยกรด ซึ่งสารที่สกัดออกมาจะมีลักษณะเป็นแท่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 - 20 นาโนเมตร และความยาวอยู่ในช่วง 100 - 500 นาโนเมตร โดยประกอบด้วยสารเซลลูโลสที่มีโครงสร้างผลึกเป็นส่วนใหญ่ ในกระบวนการสกัดด้วยกรดนั้น ส่วนของโครงสร้างอสัณฐานจะถูกกำจัดออกไป ทำให้เหลือเพียงโครงสร้างผลึก ซึ่งยังคงมีลักษณะความเป็นผลึกที่สูง ซึ่งส่งผลให้ได้นาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลที่โดดเด่นในลักษณะแท่ง

2.3.3.3 นาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรีย (Bacterial nanocellulose) เป็นรูปแบบหนึ่งของนาโนเซลลูโลส ซึ่งได้มาจากการสร้างโดยแบคทีเรีย *Gluconacetobacter xylinus* โดยใช้แหล่งคาร์โบไฮเดรต เช่น น้ำตาลในการสังเคราะห์ นาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียเป็นสาร

ที่มีความบริสุทธิ์ ไม่มีการปนเปื้อนของลิกนิน เฮมิเซลลูโลส เพกติน หรือสารอื่นๆ เส้นใยนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียมีลักษณะเป็นการบิดเกลียวของเส้นใย โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 20 - 100 นาโนเมตร และความยาวอยู่ในระดับไมโครเมตร นอกจากนี้ เส้นใยชนิดนี้ยังมีพื้นที่ผิวที่สูงต่อหน่วย ซึ่งทำให้มันมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่โดดเด่นสำหรับการใช้งานต่าง ๆ (Phanthong et al., 2018)



ภาพที่ 2-4 การสกัดเส้นใยเซลลูโลสได้ในรูปแบบต่างๆ
ที่มา : ดัดแปลงจาก Phanthong et.al., 2018



ภาพที่ 2-5 ลักษณะของแบคทีเรีย *G. xylinus*
ที่มา : Zheng et al., 2014

ตารางที่ 2-1 ชนิด แหล่งที่มา และข้อมูลของนาโนเซลลูโลสชนิดต่างๆ

ชนิดของนาโนเซลลูโลส	แหล่งที่มา	ข้อมูลและขนาดโดยเฉลี่ย
Nano fibrillated cellulose หรือ Cellulose Nanofibrils (NFC/CNF)	ไม้ ปืท มันฝรั่ง ปอ ป่าน	สามารถแยกสกัดได้ด้วยวิธีทางกล โดยใช้การตัดให้อยู่ในระดับนาโน เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 - 60 นาโนเมตร ความยาว ระดับไมโครเมตร
Nanocrystalline cellulose (NCC)	ไม้ นุ่น ปอ ป่าน ข้าว สาลี เปลือกไม้ตัน หม่อน สาหร่าย	สามารถแยกสกัดได้ด้วยวิธีทางเคมี โดยใช้กรดละลายส่วนไม่เป็นรูปร่าง และเหลือเพียงส่วนที่เป็นผลึกเท่านั้น เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 - 70 นาโนเมตร ความยาว 100-250 นาโนเมตร
Bacterial nanocellulose (BNC)	น้ำตาลและแอลกอฮอล์ โมเลกุลต่ำ	สังเคราะห์มาจากแบคทีเรีย เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 - 100 นาโนเมตร ความยาวแตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้าง

ที่มา : พิชญ์, 2564

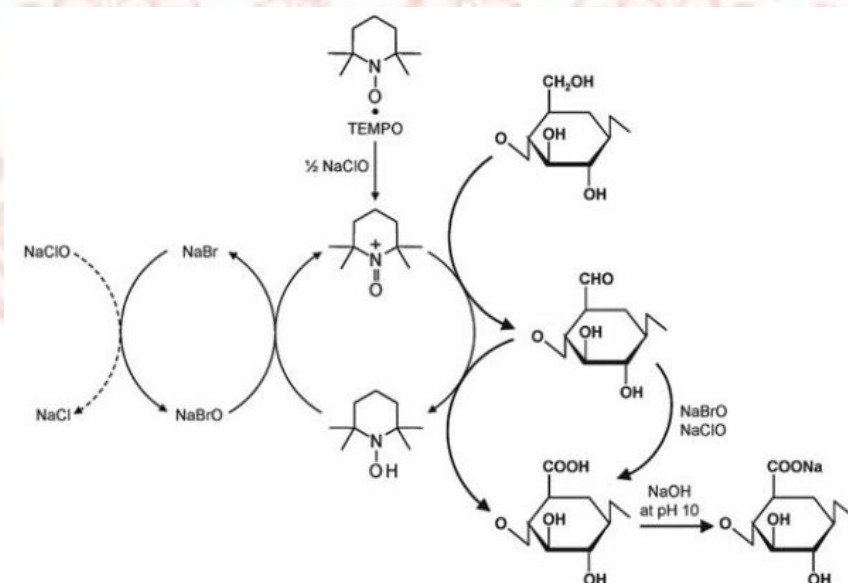
2,2,6,6-Tetramethylpiperidine 1-oxyl

2.4 กระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป (2,2,6,6-Tetramethylpiperidine 1-oxyl; TEMPO)

จากงานวิจัยของ Isogai et al. (2011) ได้ทำการศึกษากระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโปของ หมูไฮดรอกซิลปฐุมภูมิที่ตำแหน่ง C6 ของเซลลูโลสผ่านระบบ TEMPO/NaBr/NaClO แสดงดังภาพที่ 2-6 กระบวนการออกซิเดชันของหมูไฮดรอกซิลปฐุมภูมิที่ตำแหน่ง C6 ของเซลลูโลส สามารถเกิดขึ้นได้โดยใช้ระบบ TEMPO/NaBr/NaClO ในน้ำที่มีค่า pH 10-11 โดยสามารถติดตาม กระบวนการออกซิเดชันนี้ได้จากรูปแบบการใช้ NaOH ในน้ำ ซึ่งต้องเติมลงในสารละลาย อย่างต่อเนื่องเพื่อรักษาค่า pH ให้อยู่ที่ 10 ตลอดระยะเวลาของปฏิกิริยา เมื่อทำการออกซิเดชันด้วย TEMPO/NaBr/NaClO กับเซลลูโลสจากธรรมชาติ เช่น เส้นใยฝ้าย (Cotton linters) เยื่อกระดาษ คราฟต์ที่ผ่านการฟอกขาวและเซลลูโลสจากแบคทีเรียพบว่า ภายใต้สภาวะออกซิเดชันที่รุนแรง หรือระยะเวลาปฏิกิริยาที่ยาวนาน ผลิตภัณฑ์ที่สามารถละลายน้ำได้มีปริมาณน้อยมากหรือแทบไม่มี ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการออกซิเดชันกับเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการรีเจนเนอเรต (Regenerated) และเมอร์เซอร์ไรซ์ (Mercerized) รวมถึงเซลลูโลสที่ผ่านการบดด้วยลูกบอล (Ball-milled) และที่ผ่านการบำบัดด้วยแอมโมเนียเหลว (Liquid NH₃-treated) พบว่า สารละลายค่อย ๆ ใสขึ้นตามความ คืบหน้าของปฏิกิริยา และสามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำได้ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการออกซิเดชันมี

โครงสร้างทางเคมีที่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งประกอบด้วยโซเดียม (1→4)-β-D-โพลีกลูคูโรเนต หรือเกลือโซเดียมของเซลลูโรนิกแอซิด (Cellouronic acid; CUA) ซึ่งมีเพียงหน่วย D-glucuronosyl เท่านั้น ดังนั้นหมู่ไฮดรอกซิลปฐมภูมิที่ตำแหน่ง C6 ของเซลลูโลสสามารถถูกเปลี่ยนเป็นหมู่โซเดียมคาร์บอกซิเลตได้อย่างสมบูรณ์และเลือกจำเพาะสูงโดยใช้กระบวนการออกซิเดชันที่ควบคุมด้วย TEMPO นอกจากนี้มีการยืนยันว่าหมู่คาร์บอกซิเลตที่ตำแหน่ง C6 สามารถเกิดขึ้นได้ไม่เพียงแต่จาก TEMPO ที่ถูกออกซิไดซ์เท่านั้น แต่ยังเกิดจาก NaBrO และ/หรือ NaClO ที่มีอยู่ในระบบ TEMPO/NaBr/NaClO ที่ค่า pH 10 อย่างไรก็ตามค่าดัชนีโพลิเมอไรเซชันเฉลี่ยเชิงน้ำหนัก (Weight-average degree of polymerization; DPw) ของ CUA ที่เตรียมผ่านกระบวนการออกซิเดชันด้วย TEMPO/NaBr/NaClO ที่ค่า pH 10 มีค่าอยู่ในช่วง 40 – 80 ซึ่งต่ำกว่าค่าของเซลลูโลสตั้งต้นที่ใช้เป็นวัตถุดิบ (DPw 380–1,200) อย่างมาก มีความเป็นไปได้ว่าสองกลไกหลักที่อาจทำให้เกิดการลดขนาดของพอลิเมอร์ (Depolymerization) ของ CUA ได้แก่

1. β-Elimination: เกิดจากหมู่อัลดีไฮด์ที่ตำแหน่ง C6 ซึ่งเป็นโครงสร้างกลางในสภาวะเบส (Alkaline conditions) แสดงดังภาพที่ 2-6
2. การแตกพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic Bond Cleavage): เกิดจากการทำลายพันธะ (1→4)-β-glycoside ของ CUA ผ่านปฏิกิริยาของหมู่ไฮดรอกซิลและ/หรืออนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการออกซิเดชันที่ควบคุมด้วย TEMPO



ภาพที่ 2-6 การออกซิเดชันแบบเลือกตำแหน่ง (Regiospecific oxidation) โดยใช้กระบวนการออกซิเดชันด้วย TEMPO/NaBr/NaClO

ที่มา : Isogai et al., 2011

2.5 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites)

พอลิเมอร์คอมโพสิตประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ สารเสริมแรง (Reinforcement) และ เมทริกซ์ (Matrix) โดยสารเสริมแรงจะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบ ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงและมอดูลัสสูง เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fibers), เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers), และเส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar fibers) เป็นต้น ส่วนเมทริกซ์จะเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงให้แน่นอยู่ในตำแหน่งที่กำหนดและช่วยปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดสีสภาพเนื่องจากปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิและความชื้น เมทริกซ์มักมีความแข็งแรงและมอดูลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทแรงที่กระทำไปยังส่วนเสริมแรง ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นเมทริกซ์และใช้เส้นใยนาโนเซลลูโลสเป็นสารเสริมแรง

2.5.1 หน้าที่ของเส้นใย (Fiber)

- เส้นใยมีมอดูลัสสูง ซึ่งทำให้สามารถต้านทานการเปลี่ยนรูปได้ดี เมื่อมีแรงกระทำภายนอก จะเกิดการส่งผ่านแรงจากเมทริกซ์ไปยังเส้นใย และแรงกระทำจะกระจายไปในเฟสเส้นใย
- เสริมความแข็งแรง ทนทานต่อแรงกระทำ และเพิ่มความเสถียรของรูปร่างและความร้อนให้แก่เมทริกซ์ เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสมีความเสถียรทางความร้อนที่สูงกว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์ทั่วไป จึงช่วยเสริมความเสถียรทางความร้อนให้แก่เมทริกซ์
- เสริมคุณสมบัติการเป็นฉนวนให้ดีขึ้น ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้เส้นใยที่เหมาะสม

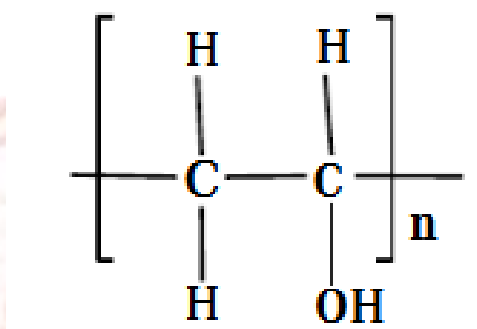
2.5.2 หน้าที่ของเมทริกซ์ (Matrix)

- เมทริกซ์ช่วยยึดและเชื่อมโยงเส้นใยเข้าด้วยกันและส่งต่อแรงที่กระทำต่อชิ้นงานไปยังเส้นใย
- มีความทนทานต่อแรงกระแทกและความเหนียว ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้
- ป้องกันเส้นใยจากการกัดกร่อนจากสารเคมี เช่น กรดและด่าง

2.6 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol); PVA)

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีสารพิษ ไม่มีกลิ่น และสามารถละลายน้ำได้ มีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงดังภาพที่ 2-7 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีคุณสมบัติเด่นในการก่อฟิล์ม การละลายของเหลว และการยึดติดที่ยอดเยิ้ม อีกทั้งยังทนการกัดกร่อนจากน้ำมัน น้ำมันหล่อลื่น ชนิดหนา และตัวทำละลายได้ดี มีความแข็งแรงดึงและความยืดหยุ่นสูง นอกจากนี้ยังสามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วด้วยวิธีทางชีวภาพ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถประยุกต์ใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้เป็นสารเกาะยึดและการเคลือบผิว เช่น ฟิล์มเคลือบผิวสำหรับการป้องกันความชื้นและการเคลือบตัวเม็ดยา นอกจากนี้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ยังถูกพัฒนาเป็นตัวเคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร เพื่อป้องกันความชื้น ก๊าซออกซิเจน (Oxygen; O₂) และองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อม



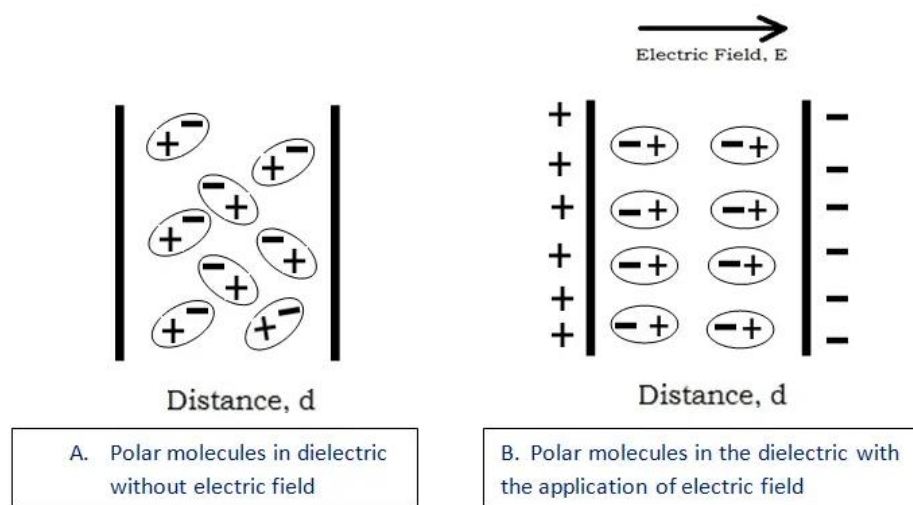
ภาพที่ 2-7 โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ที่มา : Sabah et al., 2018

2.7 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties)

สมบัติทางไดอิเล็กทริก หมายถึง คุณสมบัติของสารหรือวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กทริก (Dielectric) ซึ่งมีสมบัติเป็นฉนวนและสามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าได้ วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric material) แต่ละชนิดจะมีค่าความเป็นขั้วที่สามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้า หรือค่าความจุของตัวเก็บประจุในวัสดุไดอิเล็กทริกนั้น ๆ ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเป็นหลายเท่าตัว เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุในสุญญากาศ วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีความเป็นขั้ว (Polar) สูง ซึ่งสามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้และทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า โดยไม่ให้อิเล็กตรอนประจุไฟฟ้าถ่ายโอนถึงกัน แต่จะอนุญาตให้อำนาจไฟฟ้าส่งผ่านถึงกันได้ ในระบบไฟฟ้า ประจุไฟฟ้าจะมี 2 ประเภท ได้แก่ ประจุไฟฟ้าบวก (Positive charge) และประจุไฟฟ้าลบ (Negative charge) โดยประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันจะดึงดูดกัน ในขณะที่ประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันจะผลักรัน ซึ่งจะทำให้พลังงานศักย์ไฟฟ้าของระบบสูงขึ้นตามค่าความต่างศักย์ระหว่างสองวัสดุ

จากภาพที่ 2-8 มีวัสดุบางชนิดที่มีโมเลกุลที่มีคุณสมบัติก่อตัวเป็นขั้วไฟฟ้าอยู่แล้ว โดยไม่ขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าทิศทางของขั้วคู่ไฟฟ้า (Electric dipole) ซึ่งในทิศทางที่ไม่มีระเบียบ จึงไม่สามารถแสดงสมบัติความเป็นขั้วออกมาได้จะแสดงก็ต่อเมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้า (Electric field) ภายนอกมากระทำต่อโมเลกุลจะทำให้ขั้วคู่เล็กๆ เหล่านี้ถูกเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ โดยโมเลกุลชนิดนี้เรียกว่าโมเลกุลมีขั้ว (Polar molecule) และเรียกขั้วไฟฟ้างดงกล่าวขั้วถาวร (Permanent dipole) ซึ่งจากสภาพดังกล่าวทำให้วัสดุประเภทนี้เกิดประจุเหนี่ยวนำบวกและลบขึ้นที่พื้นผิวตรงข้ามกันแสดงอำนาจไฟฟ้าออกมาด้วยตัวเอง



ภาพที่ 2-8 ผลของสนามไฟฟ้าต่อโมเลกุลมีขั้วในไดอิเล็กทริก

(Electrical4U, 2023)

2.7.1 วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric Materials)

วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) สูง บ่งชี้ว่าวัสดุนั้นสามารถกักเก็บประจุได้มากขึ้นต่อหน่วยพื้นที่ วัสดุเหล่านี้ประกอบด้วยโมเลกุลซึ่งเป็นหน่วยย่อยที่ประกอบไปด้วยอะตอม โดยอะตอมประกอบด้วยกลุ่มโปรตอนและกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีจุดศูนย์กลางมวลรวมกัน และอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและแรงยึดเหนี่ยวภายในอะตอม เมื่อมีสนามไฟฟ้ากระทำต่ออะตอม ศูนย์กลางของประจุบวก (โปรตอน) และประจุลบ (อิเล็กตรอน) จะเกิดการแยกออกจากกัน โดยกลุ่มโปรตอนจะถูกผลักไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า ในขณะที่กลุ่มอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทางกับสนามไฟฟ้า กระบวนการนี้ทำให้เกิดการแยกของศูนย์กลางประจุ แต่ไม่ได้ทำให้ประจุหลุดออกจากอะตอมไปเป็นประจุอิสระ กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า “การก่อดั้วของโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole Moment)” ซึ่งมีทิศทางสอดคล้องกับสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในวัสดุ โดยวัสดุไดอิเล็กทริกประเภทนี้จัดเป็นวัสดุที่มีโมเลกุลไม่มีขั้ว (Non-Polar Molecule)

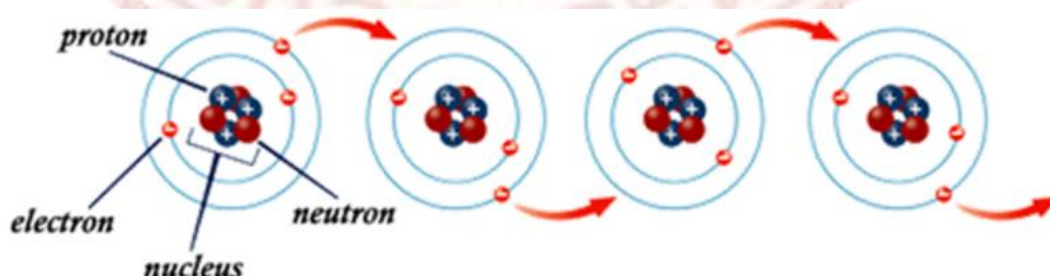
พลังงานไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งจะสามารถเคลื่อนที่ได้ก็ต่อเมื่อมีแรงดันไฟฟ้ามากระทำ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำขึ้นอยู่กับปริมาณการสะสมของประจุไฟฟ้าต่างขั้วที่ดึงดูดเข้าหากัน วัสดุที่มีอิเล็กตรอนยึดติดกันอย่างหนาแน่น เช่น ฉนวนไฟฟ้า (Insulator) จะมีอิเล็กตรอนที่ไม่สามารถหลุดออกจากอะตอมหรือโมเลกุลได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูงมากพอเพื่อให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม โครงสร้างของอะตอมประกอบด้วยอนุภาคหลัก 3 ชนิด ได้แก่

1. โปรตอน (Proton) : เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวก (+) มีสัญลักษณ์ P^+ อยู่ร่วมกับนิวตรอนในนิวเคลียสของอะตอม โปรตอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ และจำนวนของโปรตอนในนิวเคลียสจะเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนในอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า

2. นิวตรอน (Neutron) : เป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า หรือเป็นกลางทางไฟฟ้า มีสัญลักษณ์ N^0 อยู่ร่วมกับโปรตอนในนิวเคลียส นิวตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เช่นเดียวกับโปรตอน

3. อิเล็กตรอน (Electron) : เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ (-) มีสัญลักษณ์ e^- และเคลื่อนที่อยู่รอบๆ นิวเคลียสของอะตอม จำนวนอิเล็กตรอนในอะตอมที่เป็นกลางจะเท่ากับจำนวนโปรตอน อิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้กับนิวเคลียสมากที่สุดจะมีพลังงานต่ำที่สุด และถูกแรงดึงดูดจากนิวเคลียสมาก ทำให้หลุดออกจากวงโคจรได้ยาก อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นนอกสุด เรียกว่า “วาเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence Electron)” ซึ่งมีระดับพลังงานสูงสุดและสามารถหลุดออกจากอะตอมได้ง่าย เมื่อมีแรงดันไฟฟ้ามากระทำ เนื่องจากถูกแรงดึงดูดจากนิวเคลียสน้อยที่สุด เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม จะถูกเรียกว่า “อิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron)” ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และเป็นปัจจัยสำคัญในการนำไฟฟ้าของวัสดุ

โดยปกติแล้วอะตอมของธาตุจะอยู่ในสภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า กล่าวคือ ไม่มีประจุไฟฟ้าแสดงออกมา อย่างไรก็ตาม ประจุไฟฟ้าที่ปรากฏบนวัสดุจะเกิดจากการเคลื่อนที่และถ่ายเทของอิเล็กตรอน เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรของอะตอม จะทำให้โครงสร้างของอะตอมเกิดความไม่สมดุล ส่งผลให้มีโปรตอนมากกว่าอิเล็กตรอน ซึ่งทำให้อะตอมนั้นมีประจุเป็นบวก โปรตอนในอะตอมดังกล่าวจะดึงดูดอิเล็กตรอนจากอะตอมข้างเคียงให้เข้ามาแทนที่ ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอมหนึ่ง กระบวนการนี้ทำให้เกิดกระแสอิเล็กตรอน หรือที่เรียกว่าการไหลของกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้แรงจากภายนอกที่กระทำต่ออิเล็กตรอนเพื่อให้มันเคลื่อนที่นั้น เรียกว่า แรงดันไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

ที่มา : Verma, 2020

2.7.2 ปรากฏการณ์ประจุไฟฟ้าสถิต (Static Electricity หรือ Electrostatic Charge)

ไฟฟ้าสถิตเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นจากการสะสมของประจุไฟฟ้า แต่ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์โดยตรงในชีวิตประจำวัน วัสดุที่ไม่มีอำนาจไฟฟ้าคือวัสดุที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (Neutral) ซึ่งมีปริมาณประจุบวก (โปรตอน) และประจุลบ (อิเล็กตรอน) เท่ากัน วัสดุที่มีความเป็นขั้วสูง จะมีแรงดึงดูดระหว่างขั้วที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีปริมาณประจุบวกและประจุลบไม่เท่ากัน หากวัสดุได้รับประจุลบเพิ่มขึ้น จะมีอำนาจไฟฟ้าเป็นลบ ในทางกลับกัน วัสดุที่สูญเสียประจุลบจะมีอำนาจไฟฟ้าเป็นบวก ขนาดของอำนาจไฟฟ้าขึ้นอยู่กับผลต่างระหว่างจำนวนประจุบวกและประจุลบ ซึ่งเรียกว่าประจุอิสระ ไฟฟ้าสถิตสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในวัตถุที่เหมือนกันและแตกต่างกัน ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะของเหลว ของแข็ง หรือก๊าซ โดยสามารถเกิดขึ้นจากหลายกระบวนการ เช่น การสัมผัสและแยกตัวของวัตถุ การไหลของของเหลว การชนกันของของแข็ง ประจุไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นต้น ปรากฏการณ์เหล่านี้ส่งผลให้เกิดการสะสมของประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งอาจก่อให้เกิดแรงดึงดูดหรือแรงผลักระหว่างวัตถุที่มีประจุ

การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Induction) เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวนำ โดยอาศัยวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าเข้ามาใกล้ โดยไม่จำเป็นต้องสัมผัสโดยตรงกับวัตถุที่มีประจุอื่น กระบวนการนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอก ซึ่งทำให้ประจุภายในวัสดุมีการจัดเรียงตัวใหม่ เนื่องจากแรงดึงดูดหรือแรงผลักระหว่างประจุ โดยทั่วไป กระบวนการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตทำงานตามลำดับดังนี้

- การกระจายประจุเริ่มต้น ในขั้นต้น วัตถุอาจมีประจุไฟฟ้ากระจายอยู่ทั่วพื้นผิวหรือภายในปริมาตรของมัน ซึ่งอาจเป็นประจุบวกหรือประจุลบ ขึ้นอยู่กับสภาพของวัตถุนั้น
- การเข้าใกล้วัตถุที่มีประจุ เมื่อนำวัตถุที่มีประจุเข้าใกล้วัตถุที่ไม่มีประจุตั้งแต่แรก สนามไฟฟ้าจากวัตถุที่มีประจุจะส่งผลต่อการกระจายตัวของประจุภายในวัตถุที่ไม่มีประจุ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งประจุภายใน
- การกระจายประจุใหม่ อิเล็กตรอนภายในวัตถุที่ไม่มีประจุจะได้รับแรงจากสนามไฟฟ้าของวัตถุที่มีประจุ ส่งผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ โดยบางส่วนอาจถูกดึงดูดเข้าหาหรือถูกผลักออกไปจากวัตถุที่มีประจุ ทำให้เกิดการกระจายตัวของประจุใหม่ภายในวัตถุ
- การสร้างไดโพล (Dipole) การกระจายประจุใหม่ทำให้เกิดบริเวณที่มีประจุบวกและลบในปริมาณที่ไม่สมดุลกันภายในวัตถุ ส่งผลให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole Moment) ด้านที่อยู่ใกล้วัตถุที่มีประจุมากที่สุดจะมีประจุตรงข้ามกับวัตถุที่มีประจุ ในขณะที่ด้านที่อยู่ไกลออกไปจะมีประจุชนิดเดียวกัน

- การแยกประจุที่เหนี่ยวนำ แม้ว่าวัตถุทั้งสองจะไม่ได้สัมผัสกันโดยตรง แต่การจัดเรียงตัวของประจุภายในวัตถุที่ไม่มีประจุจะทำให้เกิดการแยกประจุที่เหนี่ยวนำขึ้น โดยด้านหนึ่งของวัตถุจะมีประจุบวก ส่วนอีกด้านจะมีประจุลบทำให้เกิดผลกระทบทางไฟฟ้าต่อไป

2.7.3 ปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Effect)

ปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริกเป็นกระบวนการที่ทำให้วัตถุบางชนิดเกิดประจุไฟฟ้าเมื่อสัมผัสกันและแยกออกจากกัน ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุทั้งสองในระหว่างกระบวนการสัมผัสและการแยกตัว คำว่า “Tribo” มาจากภาษากรีก ซึ่งหมายถึง “การถู” เนื่องจากปรากฏการณ์นี้มักเกิดขึ้นจากการถู การแตะ หรือการเสียดสีระหว่างวัสดุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างกัน เมื่อวัสดุเหล่านี้สัมผัสกัน อิเล็กตรอนจะถูกถ่ายเทจากวัสดุหนึ่งไปยังอีกวัสดุหนึ่ง และเมื่อแยกออกจากกันจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าสถิตบนพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการประยุกต์ต่าง ๆ เช่นการเก็บพลังงาน เซนเซอร์ และการป้องกันการกระชากไฟฟ้าสถิต วัสดุโทรโบอิเล็กทริกมักถูกใช้ในอุปกรณ์เช่น อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric generators) และเซนเซอร์เพื่อแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า วิธีการทำงานของการเกิดโทรโบอิเล็กทริก สามารถอธิบายได้ดังนี้

- การสัมผัส (Contact) คือเมื่อวัสดุสองชนิดสัมผัสกัน อะตอมที่พื้นผิวของวัสดุแต่ละชนิดจะมีปฏิสัมพันธ์กัน ปฏิกริยาเหล่านี้อาจทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุได้ วัสดุหนึ่งมีแนวโน้มที่จะดึงดูดอิเล็กตรอนได้แรงกว่าวัสดุอื่นเนื่องจากความแตกต่างในความสัมพันธ์ของอิเล็กตรอน

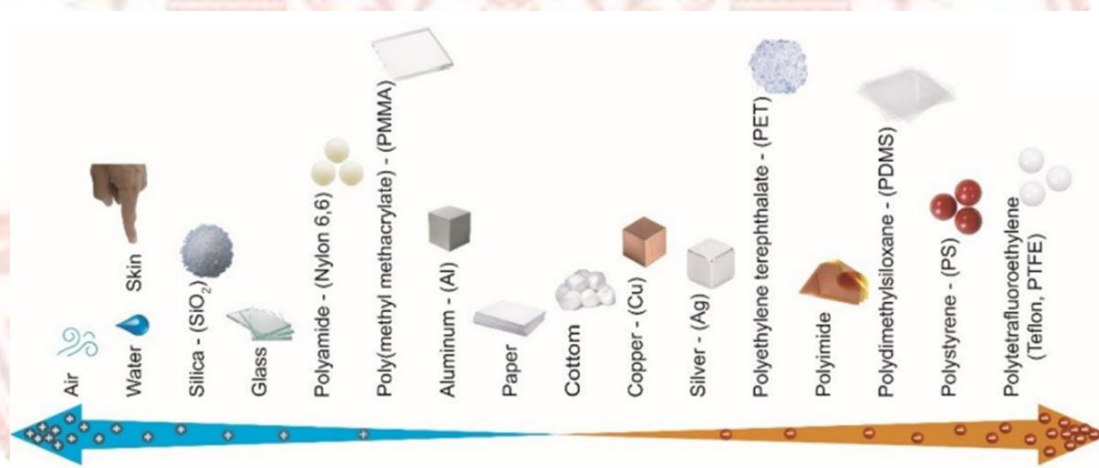
- การแยก (Separation) คือ เมื่อวัสดุทั้งสองถูกแยกออกจากกัน วัสดุทั้งสองจะคงประจุที่ได้รับระหว่างการสัมผัส การแยกประจุนี้สร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัสดุทั้งสอง การจัดลำดับประจุไฟฟ้า คือรายการวัสดุที่จัดอันดับตามแนวโน้มที่จะได้รับหรือสูญเสียอิเล็กตรอนเมื่อวัสดุสัมผัสกัน วัสดุที่อยู่ด้านบนสุดของอนุกรมมีแนวโน้มที่จะได้รับอิเล็กตรอนและมีประจุลบ ในขณะที่วัสดุที่อยู่ด้านล่างมีแนวโน้มที่จะสูญเสียอิเล็กตรอนและมีประจุบวก ลำดับประจุไฟฟ้าช่วยทำนายผลลัพธ์ของปฏิกริยาระหว่างวัสดุต่างๆ

- ความไม่สมดุลของประจุ (Charge imbalance) คือ หลังจากการแยกตัววัสดุหนึ่งกลายเป็นมีประจุบวกเนื่องจากการสูญเสียอิเล็กตรอน ในขณะที่อีกอันกลายเป็นมีประจุลบเนื่องจากการได้รับอิเล็กตรอน ซึ่งสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัสดุสองชนิด

- การโอนอิเล็กตรอน (Electron transfer) คือ ในระหว่างการสัมผัส อิเล็กตรอนบางตัวอาจถ่ายโอนจากวัสดุหนึ่งไปยังอีกวัสดุหนึ่ง วัสดุที่ได้รับอิเล็กตรอนจะมีประจุลบในขณะที่วัสดุที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะมีประจุบวก

- การกระจายประจุไฟฟ้าสถิต (Charge distribution) คือ เมื่อวัสดุที่มีประจุไฟฟ้าถูกนำเข้าไปใกล้กับตัวนำธรรมชาติหรือเป็นกลาง (Neutral conductor) ก็จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสมดุลของประจุของตัวนำกลางแยกออกจากกัน โดยขั้วของประจุที่เกิดขึ้นจะเกิดตรงกันข้ามกับประจุของวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าสถิตโดยไม่ต้องมีการสัมผัสโดยตรง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “การกระจายไฟฟ้าสถิต (Charge distribution)” ซึ่งมีบทบาทในการใช้ในการประยุกต์ใช้ต่างๆ

- ลำดับประจุไฟฟ้าไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric series) คือ ลำดับความยากง่ายในการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าบวกและลบของวัสดุต่าง ๆ ตามความสามารถในการสูญเสียหรือได้รับอิเล็กตรอนเมื่อมีการสัมผัสกับวัสดุอื่นๆ วัสดุที่อยู่ในลำดับสูงขึ้นไปมักจะมีแนวโน้มที่จะสูญเสียอิเล็กตรอน (กลายเป็นมีประจุบวก) ในขณะที่วัสดุที่อยู่ในลำดับต่ำกว่ามักจะมีแนวโน้มที่จะได้รับอิเล็กตรอน (กลายเป็นมีประจุลบ) วัสดุสองชนิดเกิดการเสียดสีหรือสัมผัสกันอย่างต่อเนื่องด้วยแรงเชิงกลจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 2-10 ลำดับประจุไฟฟ้าไตรโบอิเล็กทริกของวัสดุต่างๆ

(Triboelectric series for the most promising series of materials)

ที่มา : Rodrigues et al., 2020

จากภาพที่ 2-10 การเลือกวัสดุที่อยู่บริเวณด้านซ้ายสุดมีแนวโน้มที่จะมีการให้ประจุบวกมากที่สุดและบริเวณสูงสุดด้านขวาสุดมีแนวโน้มที่จะมีการให้ประจุลบมากที่สุด ตัวอย่างของประเภทวัสดุไตรโบอิเล็กทริกที่นิยมใช้ในแต่ละงานแต่ละประเภทได้แก่

1) พอลิเมอร์ เช่น พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene; PTFE) โพลีเอทิลีน (Polyethylene; PE) และยางซิลิโคน (Silicone rubber) เป็นต้น นิยมใช้เป็นวัสดุ

ไทรโบอิเล็กทริก เนื่องจากความสามารถในการสร้างประจุไฟฟ้าสถิตได้มากเมื่อถูกลูและทำการสัมผัสกับวัสดุอื่น

2) โลหะ เช่น อลูมิเนียม (Aluminum) ทองแดง (Copper) และสแตนเลสสตีล (Stainless Steel) สามารถแสดงคุณสมบัติไทรโบอิเล็กทริกเมื่อมีการสัมผัสกับวัสดุอื่น โลหะเหล่านี้สามารถใช้ในการสร้างประจุไฟฟ้าสถิตได้

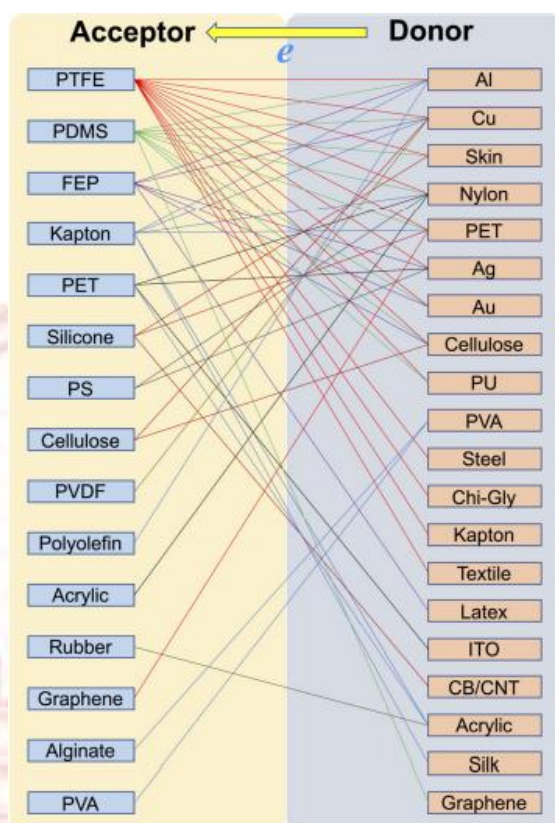
3) ผ้า เช่น ขนแกะ ไหม และโพลีเอสเตอร์วัสดุเหล่านี้นิยมใช้ในเสื้อผ้าและสิ่งทอผ้าเพื่อสร้างประจุไฟฟ้าสถิต

4) เซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductors) เช่น ซิลิคอนและเจอร์เมเนียมวัสดุเหล่านี้มักถูกใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเซนเซอร์

จากการเรียงลำดับประจุไฟฟ้าข้างต้นในปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก จะใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุแบ่งออกมาได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) วัสดุที่มีคุณสมบัติการให้อิเล็กตรอน (Electron acceptors) นั้นเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนน้อยกว่า ดังนั้นมักจะสูญเสียอิเล็กตรอนเมื่อมาสัมผัสกับวัสดุอื่น ๆ โดยผลลัพธ์ทำให้กลายเป็นวัสดุที่มีประจุบวกอยู่ในวัสดุ

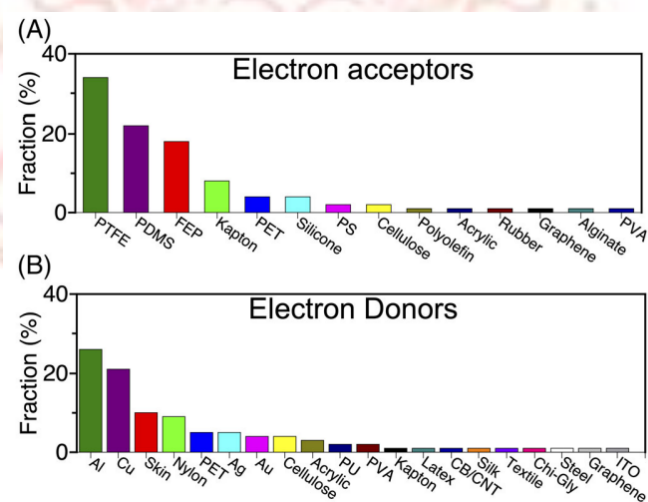
2) วัสดุที่มีคุณสมบัติการรับอิเล็กตรอน (Electron donors) เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนมากกว่ามักจะได้รับอิเล็กตรอนเมื่อสัมผัสกับวัสดุอื่นๆ โดยผลลัพธ์ทำให้กลายเป็นวัสดุที่มีประจุลบอยู่ในวัสดุ ในการเลือกจับคู่กันเพื่อที่จะสามารถบรรลุประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการแปลงพลังงานได้เพิ่มขึ้นสามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 2-11 และ 2-12



ภาพที่ 2-11 เครือข่ายแสดงการจับคู่ตัวรับและตัวให้อิเล็กตรอน

(Network of electron acceptors and donors)

ที่มา : Zhang et al., 2020

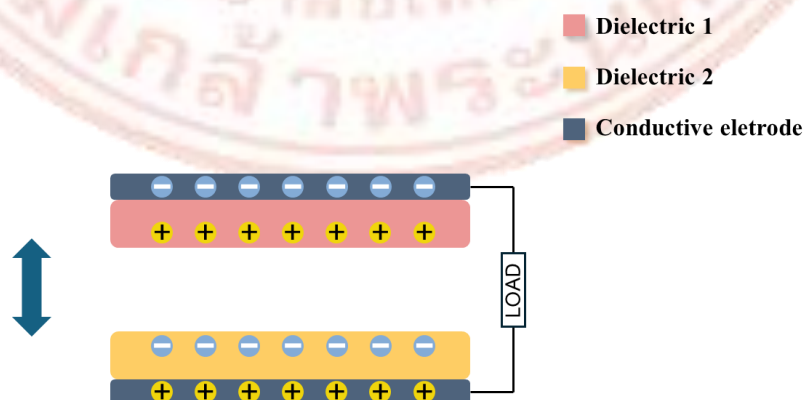


ภาพที่ 2-12 สัดส่วนของตัวอย่างวัสดุตัวรับอิเล็กตรอน (A) และตัวให้อิเล็กตรอน (B)

ที่มา : Zhang et al., 2020

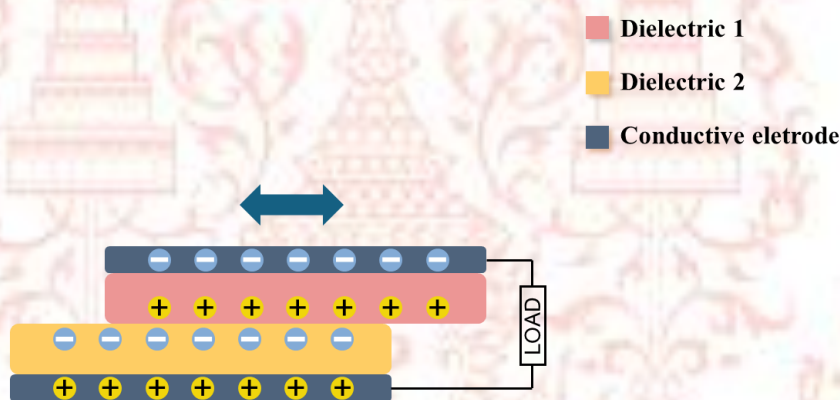
โดยประจุที่สร้างขึ้นเมื่อวัสดุสองชนิดที่มีความแตกต่างที่ชั่วสูงเกิดการสัมผัสและแยกออกจากกันทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต เป็นกระบวนการที่วัตถุทั้งสองที่เดิมไม่มีประจุ จะมีประจุเมื่อสัมผัสกันแล้วแยกออกจากกัน วัสดุทั้งสองเป็นประจุโดยได้รับอิเล็กตรอนจากวัสดุอื่นซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นกับวัสดุที่มีฉนวนสูงทั้งหมด โพลีเมอร์สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้เป็นระยะเวลานานหากมีฉนวนเพียงพอ โดยที่ขนาดและชั่วของประจุขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุทั้งสองที่ได้รับผลกระทบจากหลายปัจจัย เช่น สภาพพื้นผิว ขนาดของพื้นที่สัมผัส ความเร็วของการแยก และความชื้น การประกอบชั้นโพลีเมอร์ (Polymer layers) วัสดุสองชนิดที่มีความเป็นชั่วที่แตกต่างกัน โดยมีวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เช่น ทองแดง อะลูมิเนียม ติดอยู่ด้านบนและด้านล่างของวัสดุสองชนิด เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (Electrode) ซึ่งสามารถจำแนกลักษณะการเกิดไทรโบอิเล็กทริก ได้จาก 4 ลักษณะดังนี้

1) การแยกหน้าสัมผัส (Contact separation) ทำงานโดยอาศัยการสัมผัสและการแยก วัสดุสองชนิดที่มีขั้วต่อสองขั้วที่มีขั้วคุณสมบัติลำดับประจุไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบ จะอยู่ที่ด้านบนและด้านล่าง กระบวนการสัมผัสและการแยกตัวสามารถทำซ้ำได้ต่อเนื่องเรื่อย ๆ ตลอดเมื่อมีการเคลื่อนที่หรือการกระตุ้น โครงสร้างแสดงในภาพที่ 2-13 ขั้วทั้งสองมีช่องว่างอากาศเล็กน้อยระหว่างกัน เมื่อแรงกลภายนอกมากจะทำให้เกิดการสัมผัส และแยกออกจากกัน อิเล็กตรอนถูกถ่ายโอนระหว่างสองวัสดุเนื่องจากการคายหรือปลดปล่อยออกมาจากการรับอิเล็กตรอนวัสดุหนึ่งมีแนวโน้มที่จะได้รับอิเล็กตรอนและกลายเป็นประจุลบ ในขณะที่อีกวัสดุมีแนวโน้มที่จะสูญเสียอิเล็กตรอนและกลายเป็นประจุบวก กล่าวคือทำให้เกิดการดึงดูดประจุต่างขั้วระหว่างกันส่งผลให้มีประจุบวกเกิดขึ้นที่ขั้วลบและมีประจุลบเกิดขึ้นที่ขั้วบวก เมื่อเกิดการสัมผัสและแยกตัวซ้ำ ๆ จากกระทำของแรงกลภายนอกทำให้เกิดการสะสมประจุที่มากขึ้น ทำให้เกิดการไม่สมดุลของประจุระหว่างวัสดุเกิดเป็นไฟฟ้าสถิตและประจุที่ถูกสร้างขึ้นจะไหลผ่านวงจรเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าทำให้เก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าได้



ภาพที่ 2-13 การแยกหน้าสัมผัส (Contact separation)

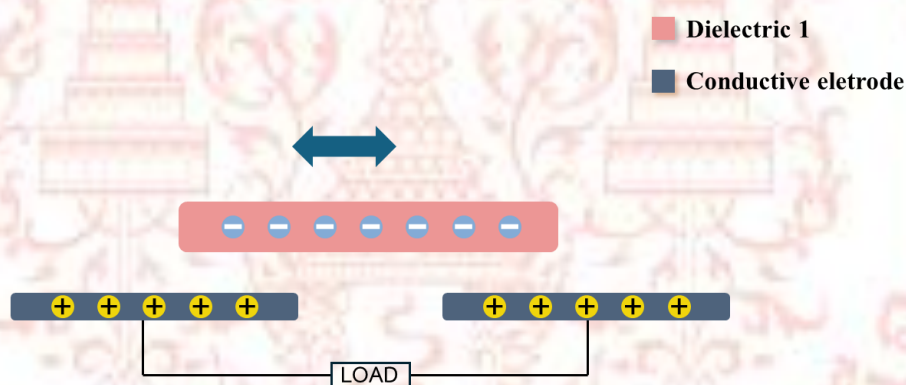
2) การเลื่อนด้านข้าง (Lateral-sliding) อาศัยแรงเสียดทานเลื่อนไปด้านข้างระหว่างวัสดุสองชนิดที่มีขั้วต่อสองขั้วที่มีขั้วคุณสมบัติลำดับประจุไฟฟ้า (Triboelectric series) ตรงข้ามกัน (ขั้วบวกและขั้วลบ) ประสิทธิภาพของไทรโบอิเล็กทริกในโหมดนี้ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์กันของการเคลื่อนไหวยระหว่างวัสดุสองชนิดบนพื้นผิวสัมผัสสูงแทนที่จะการสัมผัสและแยกออกแบบรวดเร็ว โครงสร้างการประกอบแสดงในภาพที่ 2-14 ลักษณะการสัมผัสกันระหว่างประจุขั้วบวกและขั้วลบจะถูกนำไปในทิศทางที่สัมผัสเลื่อนด้านข้างกัน การเคลื่อนนี้สร้างการแบ่งประจุระหว่างชั้นของวัสดุสองชั้น โดยซึ่งชั้นหนึ่งติดประจุบวกและอีกชั้นหนึ่งติดประจุลบเมื่อพื้นผิวทั้งสองสัมผัสหรือแยกออก การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นระยะในพื้นผิวสัมผัสระหว่างทั้งสองวัสดุที่ถูกเลื่อนเข้าและออกหากัน ส่งผลให้พื้นผิวเกิดการแยกตัวของประจุด้านข้างแรงเสียดทานจะทำให้เกิดการถ่ายโอนประจุทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัสดุทั้งสองทำให้เกิดการผลิตงานไฟฟ้า



ภาพที่ 2-14 การเลื่อนด้านข้าง (Lateral-sliding)

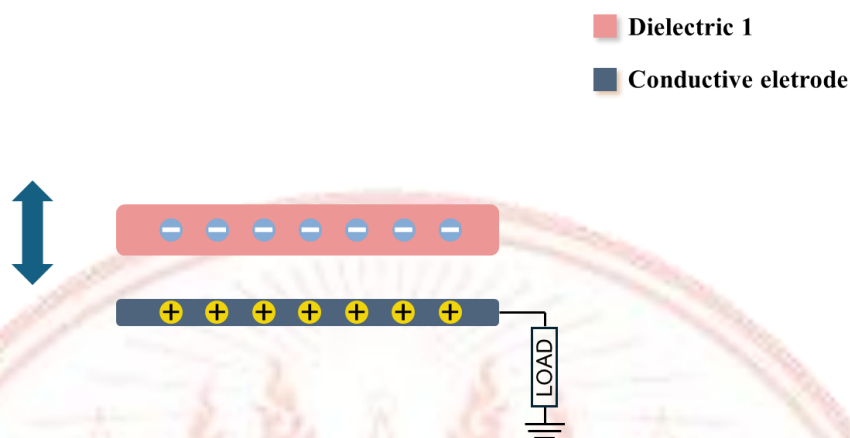
3) โหมดอิสระ (Freestanding) วัสดุเคลื่อนที่อย่างอิสระในอากาศหรือสื่อของของเหลว พวกเขามาสัมผัสและแยกตัวซ้ำ ๆ การเคลื่อนที่นี้สามารถกระตุ้นโดยปัจจัยต่าง ๆ เช่น ลม การสั่นสะเทือนหรือการไหลของสื่อเหลวใช้วัสดุชนิดเดียว โดยส่วนใหญ่เพื่อให้มีโครงสร้างที่เรียบง่าย โดยใช้เพียงขั้วเดียวสามารถดำเนินการต่อไปได้ตลอดเวลาประกอบด้วยวัสดุสองชนิดที่มีขั้วคุณสมบัติลำดับประจุไฟฟ้า (Triboelectric series) ตรงข้ามกัน (ขั้วบวกและขั้วลบ) และเรียงในโครงสร้างที่เป็นอิสระ วัสดุเหล่านี้มักมีน้ำหนักเบาและยืดหยุ่นเพื่อให้เกิดการเคลื่อนไหวยในอากาศหรือสื่อของของเหลวได้ในขณะที่มีการเคลื่อนที่สัมผัสหรือการกระตุ้นกลไกให้เกิดการสัมผัสและการแยกตัวระหว่างขั้วกับวัสดุหรือพื้นผิวอื่น ๆ อิเล็กโทรดทั้งสองอยู่กับที่และไม่เชื่อมต่อกับกราวด์ (GND) จะประกอบด้วยอิเล็กโทรดสมมาตรสองตัวที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกันผ่านโหลด (Load)

การเหนี่ยวนำจะสร้าง ความไม่สมดุลในการกระจายประจุเมื่อส่วนประกอบที่เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric material) ถูกเลื่อนออกระหว่างอิเล็กโทรด ทำให้เกิดการถ่ายโอนประจุผ่านอิเล็กโทรด จะโดยไหลผ่านโหลดภายนอก พื้นผิวของโครงสร้างการประกอบแสดงในภาพที่ 2-15 อาศัย การเคลื่อนไหวที่สัมพันธ์กันระหว่างอิเล็กโทรดกับวัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric material) ทำให้เกิด การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตจากแรงเสียดทาน (Triboelectric friction) เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุบางชนิด จะมีประจุไฟฟ้าเมื่อมาสัมผัสกันและหลังจากการสัมผัสนั้นจะเป็นต้นทางสำหรับการถ่ายโอน อิเล็กตรอนระหว่างวัสดุ การถ่ายโอนนี้นำไปสู่การสร้างไฟฟ้าสถิตหรือประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวของวัสดุ ประสิทธิภาพในการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ประเภทของวัสดุที่เกี่ยวข้อง เนื้อผิวของวัสดุ และแรงที่ใช้ขณะการขัดกัน การประกอบลักษณะนี้ช่วยให้เกิดการพัฒนาได้จากการ เคลื่อนที่อิเล็กตรอนไหลผ่านระหว่างขั้ว



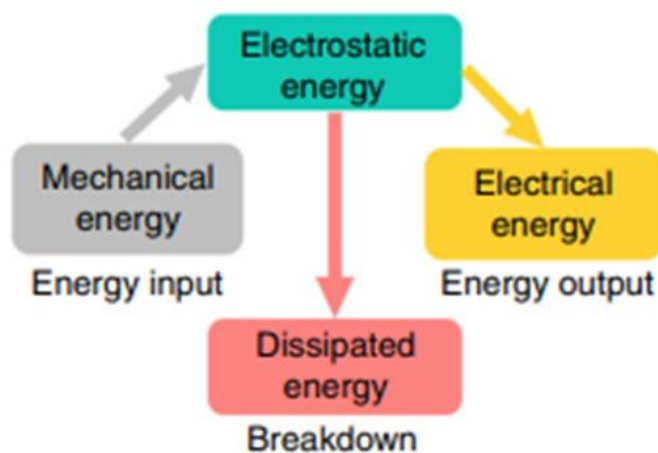
ภาพที่ 2-15 โหมดอิสระ (Freestanding)

4) อิเล็กโทรดเดี่ยว (Single-electrode) ประกอบด้วยโครงสร้างขั้วเดียวช่วยให้ โครงสร้างเรียบง่ายลงมักจะเคลื่อนบนฐานที่ยึดหยุ่น ขณะที่ขั้วนี้มีการสัมผัสกับวัสดุหรือพื้นผิวอื่น ๆ กับการทำงานแต่ละรอบของการสัมผัสและการแยกตัว ประจุไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นและสามารถนำไปใช้ ในการประยุกต์ที่ต่างกันได้ โครงสร้างการประกอบแสดงดังภาพที่ 2-16 การสัมผัสและการแยกตัว ประกอบด้วยขั้วเดียวซึ่งมักจะเคลื่อนบนฐานที่ยึดหยุ่น ขณะที่ขั้วนี้มีการสัมผัสกับวัสดุหรือพื้นผิวอื่น ๆ ที่มีค่าความแตกต่างทางขั้วกันจะเกิดปรากฏการณ์ไโรโบอิเล็กทริก ขณะสัมผัสอิเล็กตรอนถูกถ่ายโอน ระหว่างวัสดุโดยทำให้เกิดประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวของขั้วเดียว เมื่อวัสดุแยกออกจากกันประจุไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นจะยังคงอยู่บนพื้นผิวของขั้วเดียวการแยกตัวของประจุนี้สร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้ว เดียวและสิ่งรอบข้าง สามารถใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้โดยการเชื่อมต่อวงจรภายนอกกับขั้วเดียว ประจุ ที่สะสมได้สามารถไหลผ่านวงจรไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 2-16 อิเล็กโทรดเดี่ยว (Single-electrode)

กลไกและผลลัพธ์ของการเกิดปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก โดยทั่วไปการศึกษาเกี่ยวกับไทรโบอิเล็กทริกมุ่งเน้นไปที่การกำหนดรูปแบบและกลไกที่สามารถนำมาใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแหล่งกำเนิดและสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน การทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกล (Energy input) การสูญเสียพลังงานระหว่างกระบวนการ (Breakdown) และพลังงานไฟฟ้าที่ได้ (Energy output) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน จากภาพที่ 2-17 แสดงให้เห็นว่าพลังงานกล (Mechanical energy) เป็นตัวกระตุ้นหลักในกระบวนการไทรโบอิเล็กทริก ซึ่งเกิดจากการนำวัสดุสองชนิดมาสัมผัสและแยกตัวออกจากกัน แหล่งที่มาของพลังงานกลสามารถมาจากหลายปัจจัย เช่น การเคลื่อนไหวของมนุษย์ การสั่นสะเทือนหรือแรงกระทำจากสิ่งแวดล้อม พลังงานกลที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการนี้มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการเก็บเกี่ยวพลังงานในรูปของพลังงานไฟฟ้าสถิต (Electrostatic energy) ซึ่งเกิดขึ้นจากการสะสมของประจุไฟฟ้าระหว่างการสัมผัสและแยกตัวของวัสดุ การศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับกลไกของไทรโบอิเล็กทริกและปัจจัยที่ส่งผลต่อการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาเทคโนโลยีด้านพลังงานที่ยั่งยืน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการออกแบบอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย (Xia et al., 2019)



ภาพที่ 2-17 Energy flow chart of triboelectric system.

ที่มา : Xia et al., 2019

โดยพลังงานที่เก็บเกี่ยวในรูปแบบพลังงานไฟฟ้าสถิต (Electrostatic energy) มี 2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกันในกระบวนการ ได้แก่

1) พลังงานที่สูญเสีย (Dissipated energy) ระหว่างกระบวนการคือพลังงานที่สูญเสียหรือแปลงเป็นรูปแบบอื่นในระหว่างการทำงานของอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นด้วยเหตุผลต่าง ๆ อย่างเช่น

- การสูญเสียจากการเสียดสี (Frictional losses) ระหว่างการสัมผัสและแยกมีแรงเสียดสีที่เกิดขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน ซึ่งพลังงานนี้จะถูกสูญเสียไปยังสิ่งแวดล้อมและไม่ได้ถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า

- การสูญเสียจากความสูญเสียทางกล (Mechanical losses) จากส่วนประกอบของอุปกรณ์ในการประกอบ ติดตั้งของสองวัสดุ หรือเลือกใช้วัสดุที่ไม่มีประสิทธิภาพมากพอในการเก็บเกี่ยวพลังงานทางกล

- การสูญเสียจากส่วนที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้า (Electrical losses) เกิดความต้านทานภายในกระบวนการทำให้การไหลของกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้ผลลัพธ์น้อยลง

- ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม (Environmental factors) เงื่อนไขสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และแรงดันของอากาศ

2) พลังงานทางไฟฟ้า (Electrical energy) พลังงานที่ได้จากการถูกเก็บเกี่ยวเป็นพลังงาน

ไฟฟ้า ประจุไฟฟ้าที่สะสมขึ้นจากนั้นถูกเก็บรวบรวมและนำไปผ่านวงจรภายนอก ซึ่งสามารถใช้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้ โดยกระแสไฟฟ้าที่ได้จะเป็นกระแสสลับ นำอุปกรณ์มาต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit) เพื่อเรียงกระแสเป็นไฟฟ้าแรงดันตรง เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าได้ตั้งแต่ไมโครวัตต์ถึงวัตต์ขึ้นอยู่กับ ปัจจัยต่าง ๆ เช่น วัสดุที่ใช้การออกแบบอุปกรณ์และเงื่อนไขการใช้งานสามารถวัดประสิทธิภาพของพลังงานที่ได้จากพารามิเตอร์การวัดค่าที่สำคัญดังนี้

- แรงดันเอาต์พุต (Output voltage) หมายถึง แรงดันที่สร้างขึ้นเมื่อทำงานบ่งบอกถึงความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วบวกและลบของอุปกรณ์ 2 ลักษณะ ได้แก่

1) ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (V) เป็นการวัดค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่พร้อมทำงานต่อหน่วยประจุระหว่างพื้นผิวทั้งสองส่วนความต่างนี้เป็นค่าที่วัดปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรภายนอกขณะที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์

2) ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าในวงจรเปิดมีหน่วยเป็นโวลต์ (V_{oc}) วัดจากอิเล็กทรอนิกส์โดยตรงแบบไม่มีโหลดเชื่อมต่อเป็นตัวบ่งบอกที่สำคัญสำหรับการประเมินประสิทธิภาพและ ความเหมาะสมสำหรับการใช้งานต่าง ๆ

- กระแสเอาต์พุต (Short-circuit current) มีหน่วยวัดเป็นแอมป์ (A) โดยทั่วไปจะมีหน่วยเป็นไมโครแอมป์ (μA) หรือมิลลิแอมป์ (mA) บ่งบอกถึงความสามารถในการส่งออกกระแสสูงสุดของการผลิตไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่ดีที่สุด โดยที่ขั้วบวกและลบถูกเชื่อมต่อโดยตรงโดยไม่มีโหลดภายนอกในวงจรที่อาจถูกกระทบโดยปัจจัยต่าง ๆ เช่น พื้นที่ผิวของวัสดุแรงกดและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์

- พลังงานเอาต์พุต (Output power) มีหน่วยวัดเป็นวัตต์ (W) อุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานในปัจจุบัน มักจะเก็บพลังงานก่อนจะจ่ายพลังงานไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นความหนาแน่นของพลัง (Power density) ที่สามารถจัดเก็บได้เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการวัดประสิทธิภาพการนำมาใช้งาน โดยทั่วไปจะมีการวัดจากค่ากระแสและแรงดันขณะกักเก็บพลังงานที่ตัวเก็บประจุ (Capacitor) สามารถคำนวณด้วยสมการที่ 2-1 ดังนี้

$$P_{Density} = \frac{P}{A} \quad (2-1)$$

เมื่อ $P_{Density}$ คือ ค่าความหนาแน่นของพลัง (W/m^2)

P คือ ค่าพลังงานที่ถูกผลิต (W)

A คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิ (m^2)

– การโอนย้ายประจุ (Transferred charge output) มีหน่วยวัดเป็นคูลอมบ์ (C) โดยทั่วไปจะมีหน่วยวัดเป็นนาโนคูลอมบ์ (nC) ปริมาณของประจุที่ถูกโอนย้ายระหว่างวัสดุสองชนิด ในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect) การโอนย้ายประจุขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น วัสดุที่ใช้ คุณสมบัติของพื้นผิวของวัสดุ พื้นที่สัมผัส และแรงทางกลที่ใช้ การประเมินปริมาณการโอนย้ายประจุ เป็นสิ่งสำคัญสำหรับเข้าใจกลไกการสร้างพลังงานและปรับปรุงประสิทธิภาพ ใช้เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเก็บเกี่ยวได้อีกทั้งการวัดความหนาแน่นประจุเชิงผิว (Surface charge density) สัญลักษณ์ σ มีหน่วยเป็นไมโครตารางเซนติเมตร (μCm^{-2}) ยังเป็นปัจจัยสำคัญเพื่อวัดปริมาณการกระจายประจุไปเฉพาะจุดบนพื้นผิวสามารถคำนวณด้วยสมการที่ 2-2 ดังนี้

$$\sigma = \frac{q}{A} \quad (2-2)$$

เมื่อ σ คือ ค่าความหนาแน่นประจุเชิงผิว (μCm^{-2})

q คือ ค่าปริมาณของประจุ (nC)

A คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิ (m^2)

จากค่าพารามิเตอร์การวัดดังกล่าวข้างต้นเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการระบุประสิทธิภาพและการปรับปรุงการออกแบบของอุปกรณ์สำหรับการใช้งานต่าง ๆ ที่รวมถึงการเก็บเกี่ยวพลังงานทางไฟฟ้าที่ได้

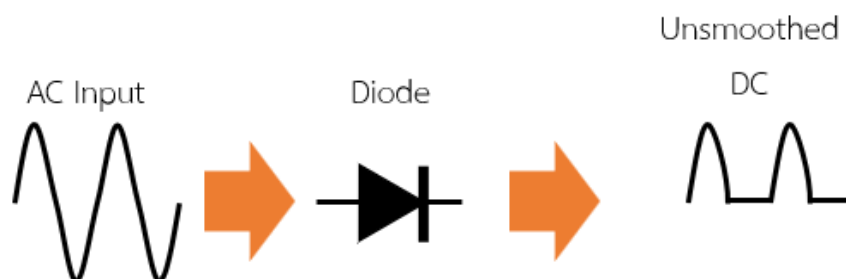
2.8 หลักการทำงานของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้า (Rectifier circuit)

วงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับ (AC) ให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (DC) โดยจะอนุญาตให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางเดียว อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการแปลงสัญญาณนี้ ได้แก่ ไดโอด วงจรนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.8.1 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่น (Half-wave rectifier circuit)

วงจรประเภทนี้ทำหน้าที่ตัดเอาแรงดันไฟสลับที่ป้อนเข้ามา โดยอาจเป็นครึ่งบวกหรือครึ่งลบ ขึ้นอยู่กับการจัดวงจรไดโอด แรงดันที่ส่งออกจากเอาต์พุตจะเป็นรูปครึ่งคลื่นบวกเท่านั้น ซึ่งหมายความว่าในช่วงที่มีแรงดันจะมีไฟฟ้าไหลผ่าน และในช่วงที่ไม่มีแรงดันจะไม่มีการไหลของกระแส วงจรนี้ประกอบด้วยไดโอดตัวเดียวดังภาพที่ 2-18 การทำงานของวงจรไฟกระแสสลับจะปรากฏที่ขาของแอโนด (Anode) โดยไดโอดจะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ทางเดียว คือช่วงที่

ได้รับไบอัสตรง ดังนั้นวงจรจะมีกระแสไหลเพียงในช่วงบวกของไฟสลับทเท่านั้น และในช่วงลบจะไม่มีกระแสไหลของกระแสแรงดันไฟตรงที่ขาออก (Voltage output)



ภาพที่ 2-18 เอาต์พุตแรงดันกระแสตรงของเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

การทำงานของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่นมีลักษณะวงจรดังภาพที่ 2-19 โดยพิจารณาการทำงานในแต่ละรอบของคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อมีการจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine wave) เข้าสู่ขาแอโนด (Anode) ของไดโอด ในช่วงที่แรงดันอยู่ในซีกบวก ไดโอดจะได้รับไบอัสตรง (Forward bias) ส่งผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปยังโหลด (Load) และเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่โหลด แรงดันเอาต์พุตในช่วงนี้จะเป็นรูปคลื่นในซีกบวกของสัญญาณอินพุต เมื่อรูปคลื่นไซน์เข้าสู่ช่วงครึ่งคลื่นลบ แรงดันไฟฟ้าที่ขาแอโนดของไดโอดจะมีค่าต่ำกว่าขาแคโทด (Cathode) ส่งผลให้ไดโอดได้รับไบอัสกลับ (Reverse bias) ทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านวงจรและไม่เกิดแรงดันตกคร่อมที่โหลด ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าขาออกจะมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากแรงดันซีกลบทั้งหมดตกคร่อมที่ไดโอด (Kittiamornkul, 2017)

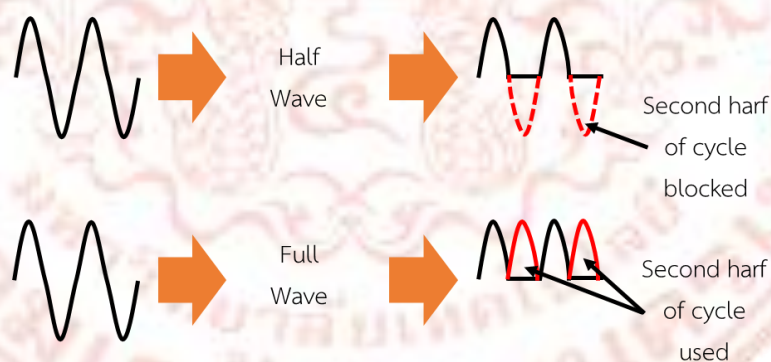


ภาพที่ 2-19 การต่อวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่น

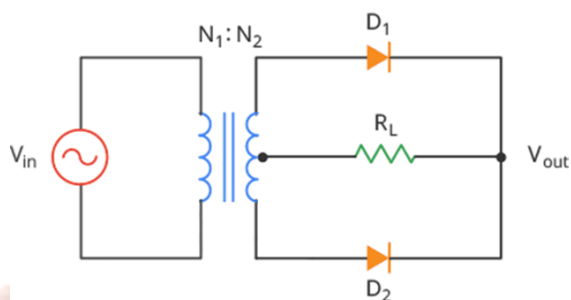
2.8.2 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น (Full wave rectifier circuit)

เนื่องจากวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่นเกิดปัญหาสัญญาณไฟฟ้าขาออก (Output) ไม่เรียบหรืออาจกล่าวได้ว่าเกิดรอยหยัก (Ripple) เพื่อลดปัญหาของรอยหยักที่เกิดขึ้นจากวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่น วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นจึงถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้งาน ทำให้การเรียงกระแสไฟฟ้าออกมาทั้งครึ่งรอบบวกและครึ่งรอบลบเป็นการเรียงกระแสให้ออกมาเพียงครึ่งรอบบวกเรียงกันไป (Poole, 2018) ดังภาพที่ 2-20 ซึ่งประเภทของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นมีอยู่ 2 ประเภท โดยแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติเฉพาะและความเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกัน ได้แก่

2.8.2.1 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นสองไดโอด (Two diode full wave rectifier circuit) มาจากการใช้งานที่ประกอบด้วยไดโอด 2 ตัว ทำหน้าที่ผลิตกันทำงานที่ละครึ่งคลื่น โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลมาครบวงจรที่จุดหม้อแปลงชนิดเซนเตอร์แทป (Center tap transformer) แสดงดังภาพที่ 2-21 สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งรอบบวกและวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งรอบลบโดยขึ้นอยู่กับการจัดเรียงการทำงานของไดโอดในวงจรเพื่อใช้งาน สามารถพิจารณาการทำงานวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งรอบบวกและวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งรอบลบทั้งสองแบบได้จากภาพที่ 2-22 และภาพที่ 2-23 ตามลำดับ

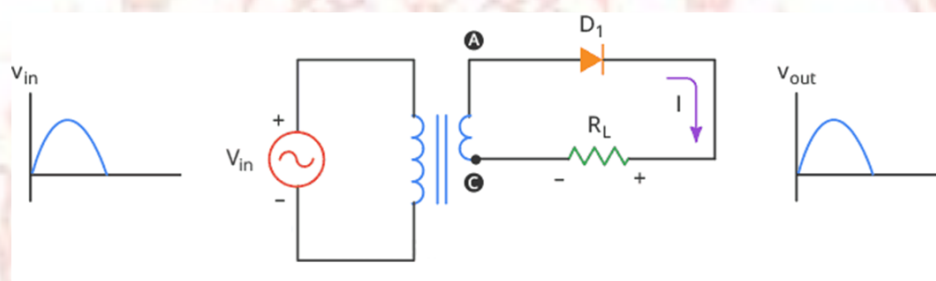


ภาพที่ 2-20 การเปรียบเทียบระหว่างการทำงานของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่น และวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น



ภาพที่ 2-21 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นสองไดโอด

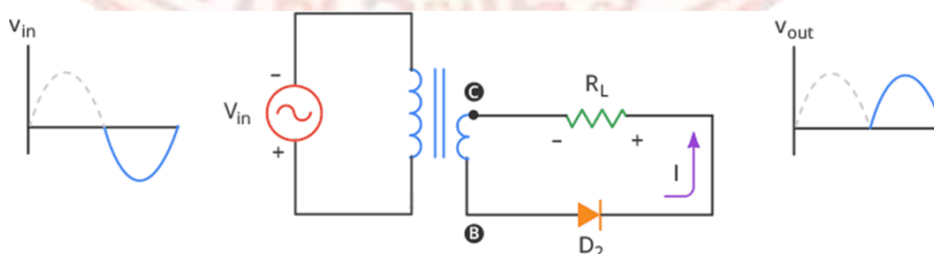
ที่มา : Engineers, 2019



ภาพที่ 2-22 การทำงานช่วงครึ่งรอบบวก (Positive half-cycle)

ที่มา : Engineers, 2019

จากภาพที่ 2-22 เมื่อมีสัญญาณขาเข้า (Input) ซึ่งเป็นสัญญาณครึ่งรอบบวกเข้ามาไดโอด D1 จะอยู่ในสภาวะไบอัสตรง เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าภาระที่เป็นบวกบนตัวต้านทานภาระ R_L ตามลักษณะของสัญญาณขาเข้า

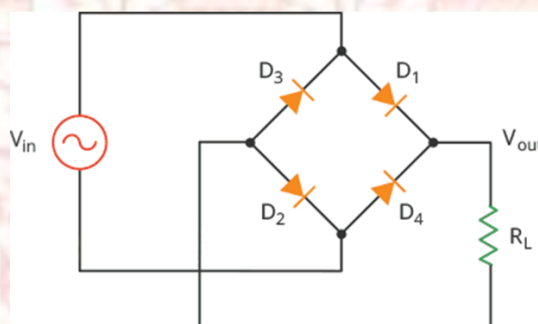


ภาพที่ 2-23 การทำงานช่วงครึ่งรอบลบ (Negative half-cycle)

ที่มา : Engineers, 2019

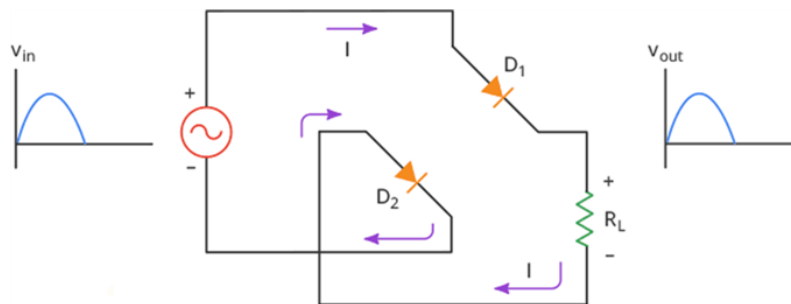
จากภาพที่ 2-23 เมื่อเริ่มแรกมีสัญญาณขาเข้าผ่านตัวต้านทานภาระ R_L ซึ่งเป็นสัญญาณครึ่งรอบบวกเข้ามา ไดโอด D_2 จะอยู่ในสภาวะไบอัสตรง กระแสไฟฟ้าสามารถไหลเข้ามาครบวงจรบริเวณจุด C หรือ Center tap ของหม้อแปลงแบบ Center tap transformer ได้โดยจะผ่านมาได้เฉพาะสัญญาณครึ่งรอบลบเท่านั้น ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าภาระที่เป็นบวกบนตัวต้านทานภาระ R_L เช่นเดิม

2.8.2.2 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นแบบสะพาน (Full wave bridge rectifier circuit) หรือวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์ (Full bridge rectifier circuit) มีลักษณะเหมือนวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นสองไดโอดแต่วงจรนี้ไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงชนิดเซนเตอร์แทป เพราะแรงดันเอาต์พุตที่ได้เป็นแบบเต็มคลื่น ข้อแตกต่างระหว่างการเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นแบบบริดจ์และเต็มคลื่นแบบธรรมดาต่างกันตรงการต่อวงจรไดโอดแบบเต็มคลื่นสองไดโอดจะใช้ไดโอด 2 ตัว แบบบริดจ์จะใช้ไดโอด 4 ตัว แสดงดังภาพที่ 2-24 สามารถอธิบายหลักการทำงานของไดโอดที่ทำงานในช่วงครึ่งรอบบวกและครึ่งรอบลบพิจารณาได้จากภาพที่ 2-25 และภาพที่ 2-26 ตามลำดับ



ภาพที่ 2-24 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์

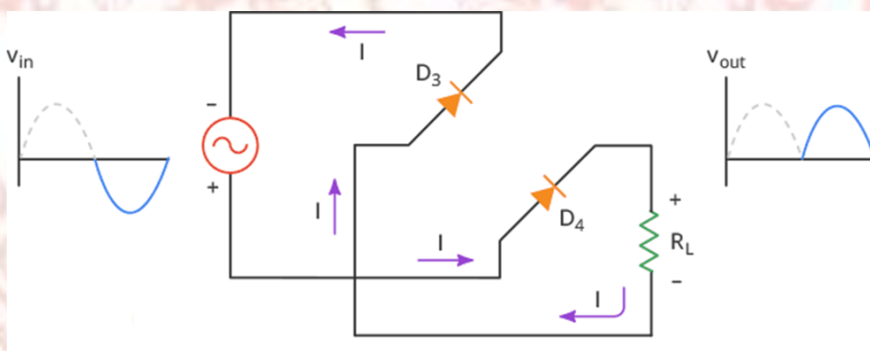
ที่มา : Engineers, 2019



ภาพที่ 2-25 การทำงานช่วงครึ่งรอบบวกของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์

ที่มา : Engineers, 2019

จากภาพที่ 2-25 เมื่อสัญญาณขาเข้า ครึ่งรอบบวกของไฟฟ้ากระแสสลับ ไดโอด D1 และ D2 จะอยู่ในสถานะไบอัสตรง ซึ่งจะทำหน้าที่นำกระแส ในขณะที่ D3 และ D4 อยู่ในสถานะไบอัสกลับ กระแสไฟฟ้าจึงไหลครบวงจรเกิดสัญญาณขาออก ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าภาระที่เป็นบวกบนตัวต้านทานภาระ R_L ตามลักษณะของสัญญาณขาเข้า (สามารถสังเกตขั้วบวก-ลบที่ตัวต้านทานภาระ R_L)



ภาพที่ 2-26 การทำงานช่วงครึ่งรอบลบของวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์

ที่มา : Engineers, 2019

จากภาพที่ 2-26 เมื่อสัญญาณขาเข้า สลับเป็นครึ่งรอบลบของไฟฟ้ากระแสสลับ ไดโอด D3 และ D4 จะอยู่ในสถานะไบอัสตรง ซึ่งจะทำหน้าที่นำกระแส ในขณะที่ D1 และ D2 อยู่ในสถานะไบอัสกลับ กระแสไฟฟ้าจึงไหลครบวงจรเกิดสัญญาณขาออก ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าภาระที่เป็นบวกบนตัวต้านทานภาระ R_L เช่นเดิม

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันและในอนาคตนั้นมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ Artificial Intelligence (AI) ในการสร้างคอมพิวเตอร์อัจฉริยะโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถวางแผน หาเหตุผล เรียนรู้ รับรู้ และสร้างมุมมองความรู้ที่สามารถสื่อสารได้อย่างเป็นธรรมชาติ และเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) หรือ อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่งเพื่อถ่ายโอนหรือแลกเปลี่ยน ข้อมูลระหว่างเครือข่ายถูกเชื่อมโยงเข้ากับสิ่งต่าง ๆ เข้าหากันเพื่อตอบสนองต่อความสะดวกสบายในการใช้งานในด้านต่าง ๆ ของมนุษย์ ทำให้ความต้องการใช้พลังงานมีเพิ่มมากขึ้น แต่มีข้อจำกัดในการผลิตที่เฉพาะจากแหล่งเชื้อเพลิงธรรมชาติไม่ได้มาจากพลังงานที่สะอาด ยั่งยืน และมาจากแหล่งพลังงานที่แพร่หลาย

พลังงานกล (Mechanical energy) หรือพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของวัตถุที่เกิดโดยรอบตัวเรา ในสภาพร่างกายหรือเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ อาทิเช่น แรงกดจากการเดินหรือวิ่ง การงอหรือขยับของข้อต่อ และการสั่นของเส้นเสียงหรืออวัยวะภายใน แต่น่าเสียดายที่พลังงานเสียงยังไม่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากความ หนาแน่นของพลังงานต่ำ และขาดเทคโนโลยีพลังงานที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกลนี้เป็นพลังงานทางไฟฟ้า

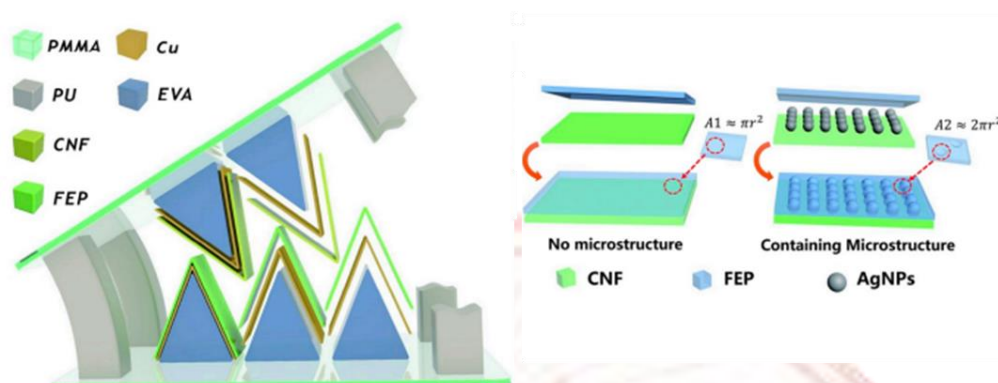
อย่างไรก็ตามการศึกษาก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่นั้นเน้นไปที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) หรือการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic induction) แต่มีข้อเสียที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เช่น ได้ประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้าต่ำหรือการประกอบโครงสร้างค่อนข้างซับซ้อนจึงมีความจำเป็นเพื่อพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานกลที่มีประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้าสูง เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยรอบที่เพิ่งเกิดขึ้นใหม่โดยอาศัยการผสมผสานระหว่างเอฟเฟกต์ไฟฟ้า ไตรโบและการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโนแบบไตรโบอิเล็กทริก (TENG) จึงดึงดูดความสนใจของผู้คนนับตั้งแต่มีการเสนอเทคโนโลยีนี้

อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานกลถูกพัฒนาเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานกลที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์ที่ถูกใช้โดยเปล่าประโยชน์ อาศัยปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect) จากสมการของ Maxwell's Equations เรื่องการเคลื่อนที่ของกระแส (Displacement current) เป็นแรงผลักดันในการแปลงพลังงานกลแบบกระจัดกระจาย (Disorganized type) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่ดีในการเก็บเกี่ยวพลังงานและระบบผลิตพลังงานด้วยตัวเอง (Self-powered systems) นอกจากนี้ยังมีลักษณะเด่นที่มีขนาดเล็ก ต้นทุนต่ำ น้ำหนักเบา ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย และมีประสิทธิภาพอีกทั้งยังสามารถนำมาแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้

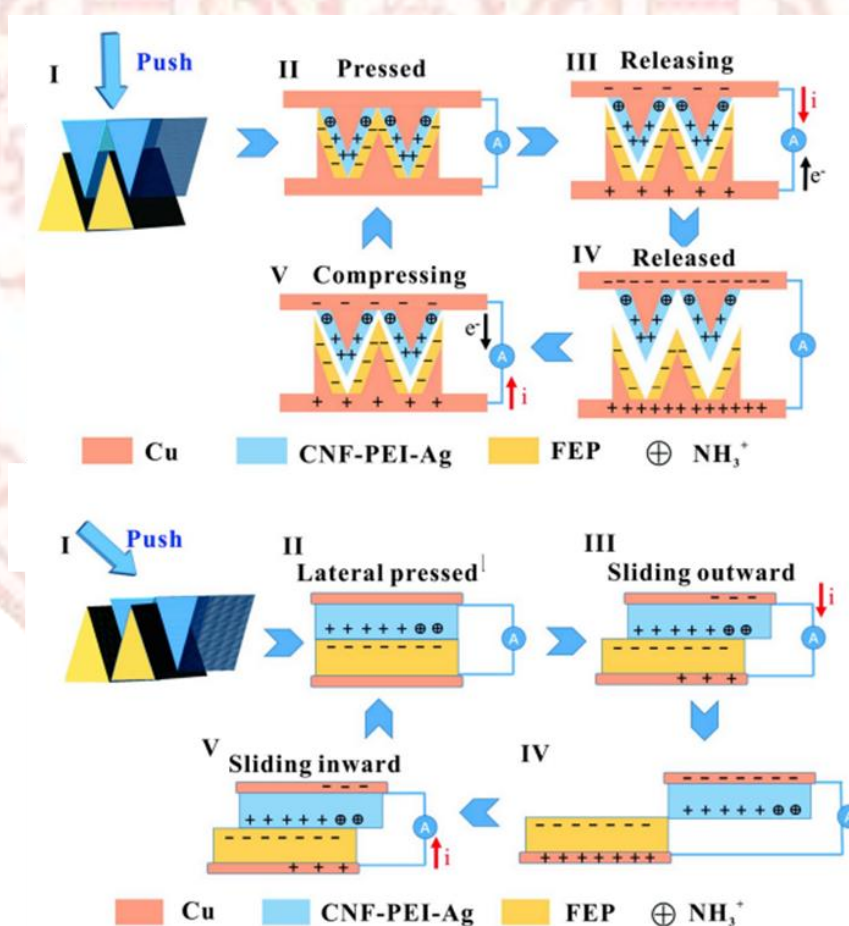
จากงานวิจัยของ Hassan et al. (2021) งานวิจัยนี้ได้ทำการมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาแผ่นฟิล์มนาโนเซลลูโลส (CNF) ที่สังเคราะห์จากแหล่งชีวมวลที่ยั่งยืน ซึ่งมีศักยภาพในการทำงานเป็น

เยื่อเมมเบรนชนิดนำไฟฟ้าที่ใช้ในตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitors) เซลลูโลสบริสุทธิ์ทางเคมี ถูกสกัดจากส่วนต่างๆ ของมะพร้าว (กะลามะพร้าวและกาบมะพร้าว) และผ่านกระบวนการ ออกซิเดชันด้วย 2,2,6,6-tetramethylpiperidine 1-oxyl radical (TEMPO) เพื่อเตรียมนาโน เซลลูโลส (CNF) คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของ CNF ที่ได้ถูกศึกษาทั้งในด้านองค์ประกอบทางเคมี และระดับผลึก, คุณสมบัติพื้นผิว, ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิว และคุณสมบัติทางความร้อน พบว่า CNF ที่สกัดจากเปลือกมะพร้าวและกาบมะพร้าวมีคุณสมบัติตรงตามลักษณะของ นาโนเซลลูโลส โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอยู่ในช่วง 70–120 นาโนเมตร และ 150–330 นาโนเมตร ตามลำดับ จากนั้น แผ่นฟิล์ม CNF ถูกเตรียมโดยใช้วิธีการหล่อจากสารละลาย (solvent casting) เพื่อตรวจสอบค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) รวมถึงคุณสมบัติ ไฟโอซีโออิเล็กทรอนิกส์และไดอิเล็กทริก จากการศึกษาคุณสมบัติเชิงกล พบว่าแผ่นฟิล์ม CNF จากกะลามะพร้าวมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าแผ่นฟิล์ม CNF จากกาบมะพร้าว โดยมีค่า 8.39 GPa และ 5.36 GPa ตามลำดับ ประสิทธิภาพของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม CNF มีความสัมพันธ์ กับระดับผลึกและคุณสมบัติทางความร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของส่วนต่างๆ ของมะพร้าวที่ใช้

จากงานวิจัยของ Zhang et al. (2019) ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพที่ดี โดยการ ดัดแปลงการให้ประจุกับวัสดุพอลิเมอร์ที่ได้นำมาทำการทดลองอุปกรณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดนาโน แบบไทรโบอิเล็กทริก (TENG) ได้นำ Polyethyleneimine (PEI) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ ที่มีกิ่งก้านสูงและอุดมไปด้วยหมู่เอมีนมีคุณสมบัติที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้อย่างดีเยี่ยม อนุภาค ระดับนาโนของ Ag ที่ถูกเตรียมโดยการเคลือบอย่างสม่ำเสมอกับบนพื้นผิวของแผ่นฟิล์ม CNF-PEI จึงมีชื่อว่า CNF-PEI-Ag ส่งผลให้มีค่าประจุบวกที่สูงขึ้นบนพื้นผิวระดับนาโนเมตร ส่งผลให้การถ่าย โอนประจุเพิ่มมากขึ้นในอุปกรณ์นี้ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์นี้ใช้แผ่นฟิล์ม CNF ที่ดัดแปลงแล้ว สามารถให้เอาต์พุตจาก 68 เป็น 100 V และเอาต์พุต กระแสเพิ่มขึ้นจาก 0.6 เป็น 1.1 μA นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอโครงสร้างแบบกริดทรงเพชรรูปแบบใหม่ที่ใช้ TENG โครงสร้าง ดังกล่าวช่วยปรับปรุงเอาต์พุตกระแสไฟฟ้าและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้อย่างมาก ประสิทธิภาพเอาต์พุตทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ TENG ได้อย่างมาก และภาพการประกอบอย่างสมบูรณ์

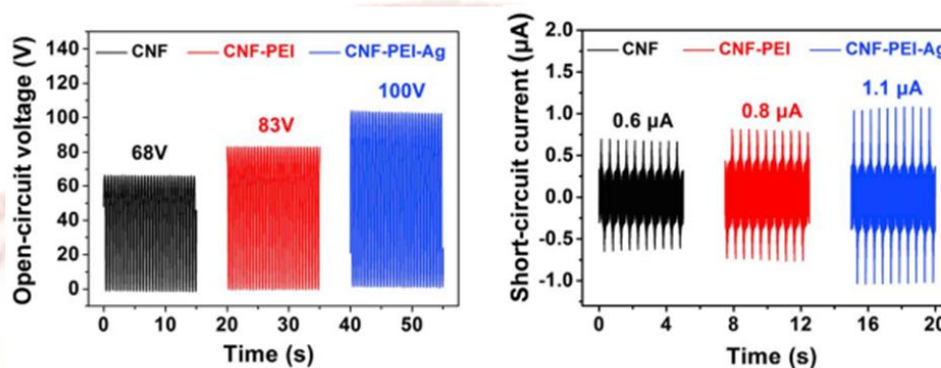


ภาพที่ 2-27 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์ CS&RS-TENG
ที่มา : ดัดแปลงจาก Zhang et al., 2019



ภาพที่ 2-28 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าทั้งสองแบบของ CS&RS-TENG
ที่มา : Zhang et al., 2019

จากภาพที่ 2-28 งานวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นทองแดง เซลลูโลสนาโนไฟบริล (CNF) และฟลูออไรด์เอทิลีนโพรพิลีน (FEP) ซึ่งใช้ทั้งโหมดการเลื่อนด้านข้างและการแยกหน้าสัมผัสเพื่อเชื่อมต่อหน่วยโครงสร้างหลายหน่วยแบบขนาน ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

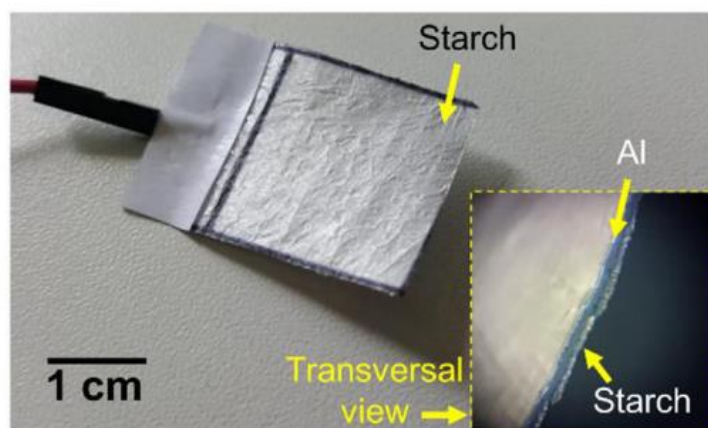


ภาพที่ 2-29 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่แผ่นฟิล์ม CNF ที่ดัดแปลงแบบต่าง ๆ

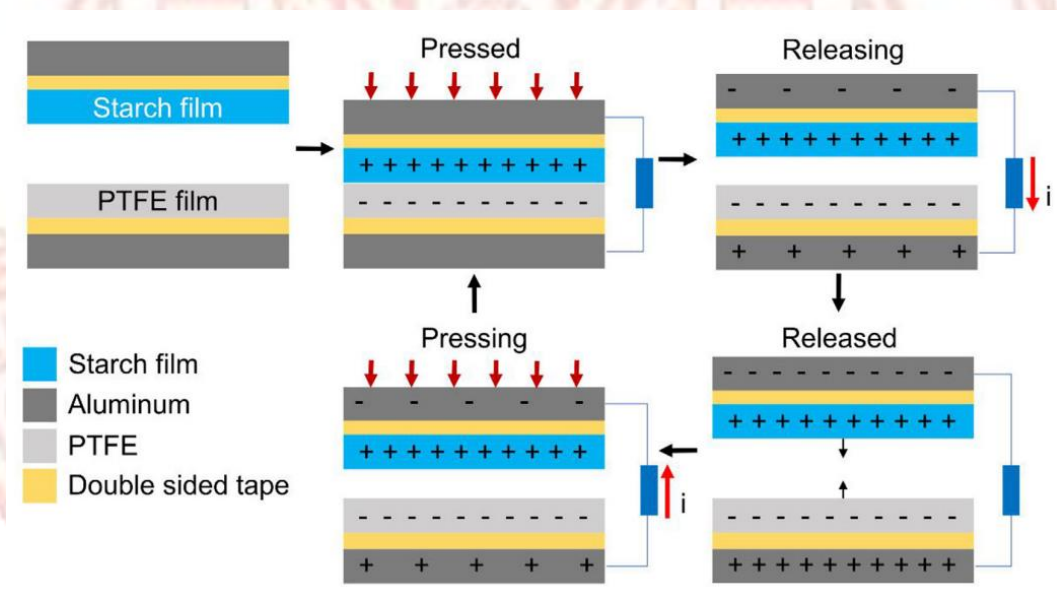
จากอุปกรณ์ CS&RS TENG

ที่มา : ดัดแปลงจาก Zhang et al., 2019

จากงานวิจัยของ Ccorahua et al. (2019) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริก (TENGs) อย่างกว้างขวาง ได้เน้นไปที่ประเด็นการยกระดับความสามารถในการผลิตไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริก ปรากฏการณ์ใหม่ที่พบบ่อยของการใช้โพลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์สำหรับ TENGs แสดงให้เห็นในเชิงบวกในการศึกษาวัสดุที่หลากหลาย วัสดุหมุนเวียน เช่น อิเล็กโตรไลต์โพลิเมอร์ชีวภาพ ดังภาพที่ 2-30 งานวิจัยดังกล่าวประดิษฐ์ขึ้นงานขึ้นโดยใช้ต้นทุนต่ำ โดยแผ่นฟิล์มมีลักษณะทางไฟฟ้า ที่โหลด ความถี่ ความหนาที่แตกต่างกัน ยิ่งไปกว่านั้น งานวิจัยดังกล่าวทำให้โพลิเมอร์แป้งมี CaCl_2 เพื่อเพิ่มความจุและประสิทธิภาพการทำงานของไทรโบอิเล็กทริกฟิล์มแป้งที่ความเข้มข้นของเกลือร้อยละ 0.5 แรงดันไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.2 โวลต์ ซึ่งมากกว่าถึงสามเท่าของแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นของโพลิเมอร์ชีวภาพบริสุทธิ์ที่ได้ทำการเปรียบเทียบกันโดยวัสดุที่ทำการเปรียบเทียบได้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ที่ 0.4 โวลต์ ดังภาพที่ 2-32 นอกจากนี้ประสิทธิภาพแรงดันไฟฟ้ายังแปรผันกับความหนาและบางของ แผ่นฟิล์ม ในขณะที่ความชื้นของแผ่นฟิล์มได้รับการพิสูจน์ว่ามีส่วนสำคัญในการผลิตกระแสไฟฟ้า แผ่นฟิล์มที่แห้งจะให้ประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าแผ่นฟิล์มที่ได้รับความชื้น นอกจากนี้งานวิจัยยังได้ทดสอบ อุปกรณ์กับอุปกรณ์ชนิดอื่น เช่น การทดสอบกับหลอดไฟ LED

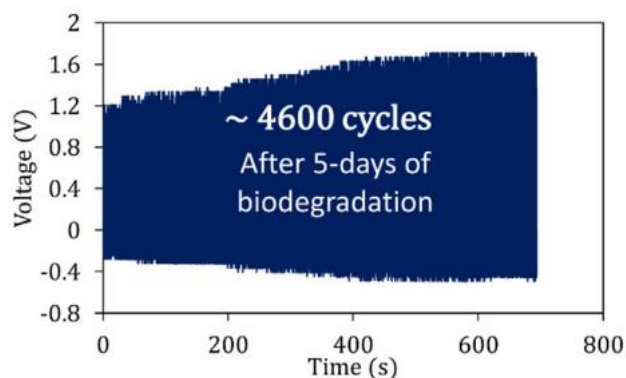


ภาพที่ 2-30 ภาพฟิล์มไดอิเล็กตริกของแป้งที่ติดอยู่กับอลูมิเนียม
ที่มา : Ccorahua et al., 2019



ภาพที่ 2-31 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ CS-TENG
ที่มา : Ccorahua et al., 2019

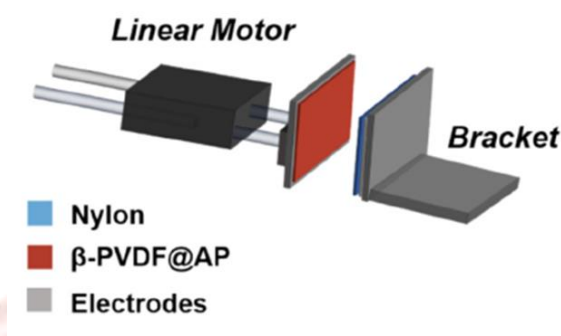
จากภาพที่ 2-31 งานวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นอลูมิเนียม พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE) และแผ่นฟิล์มแป้ง แปะด้วยเทปกาวสองหน้าติดกัน ซึ่งใช้ทั้งโหมดการแยกหน้าสัมผัสเพื่อทำหน้าที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ 2-32 เอาต์พุตของอิเล็กทรอนิกส์ฟิล์มแปงหลังจากการย่อยสลายทางชีวภาพเป็นเวลา 5 วัน

ที่มา : Ccorahua et al., 2019

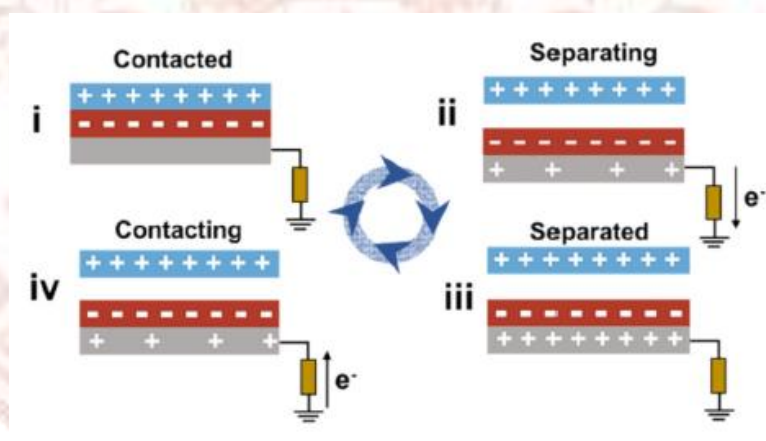
จากงานวิจัยของ Huang et al. (2025) ได้พัฒนาวัสดุทรานซิสเตอร์ที่มีประจุลบประสิทธิภาพสูงโดยการรวมเส้นใยนาโน PVDF ในโครงสร้าง β -phase เข้ากับกระดาษที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน (AP) ผ่านกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ของสิ่งทอที่ทำจากเซลลูโลสได้อย่างมีนัยสำคัญ TENG ที่พัฒนาขึ้นจาก PVDF/12 wt%AP แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของการสร้างประจุ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ซึ่งเน้นย้ำถึงประสิทธิภาพของแนวทางนี้ในการเพิ่มสมรรถนะการแปลงพลังงาน นอกเหนือจากการเก็บเกี่ยวพลังงานแล้ว วัสดุนี้ยังสามารถนำไปใช้ในระบบเซ็นเซอร์ที่ใช้พลังงานในตัวเองแบบไม่สัมผัส เพื่อการจำแนกวัตถุและตรวจจบบการเคลื่อนไหวของมนุษย์ได้อย่างแม่นยำ แสดงให้เห็นถึงความอ่อนโยนประสงค์ของวัสดุ งานวิจัยนี้ให้ข้อมูลเชิงลึกใหม่ในการพัฒนาวัสดุทรานซิสเตอร์ และแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่มีแนวโน้มสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวมใส่และเทคโนโลยีเซ็นเซอร์อัจฉริยะพบว่าค่าทางไฟฟ้าของ PVDF/12 wt%AP ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 79.95 V และ 2.64 μ A ตามลำดับ และจากการวิจัยนี้พบว่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดถึงจุดสูงสุดของ PVDF/12 wt%AP ในพื้นที่ขนาดต่าง ๆ พื้นที่ที่มีขนาดมากที่สุดขนาด 4 * 4 ตารางเซนติเมตร สามารถให้แรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด



ภาพที่ 2-33 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์ non-contact TENG

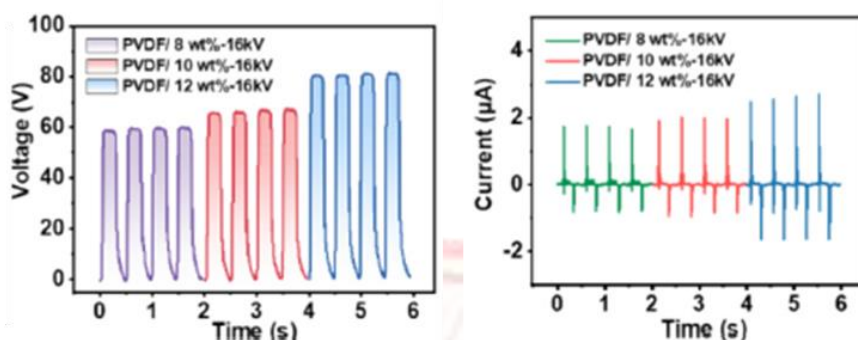
ที่มา : ดัดแปลงจาก Huang et al., (2025)

จากภาพที่ 2-33 งานวิจัยนี้เลือกใช้กลไกการทำงานของ TENG แบบไม่สัมผัส เพราะมีข้อได้เปรียบเหนือกว่า TENG แบบสัมผัส เนื่องจากไม่มีการสึกหรอของวัสดุและไม่จำเป็นต้องมีการรีเวิร์สชาร์จ ส่งผลให้ TENG แบบไม่สัมผัสเหมาะสมกว่าสำหรับการใช้งานด้านการตรวจจับที่ใช้ PVDF/12 wt%@AP ที่มีประจุลบถูกวางไว้ที่ด้านหนึ่งของมอเตอร์เชิงเส้น โดยมีฟิล์มไนลอนอยู่ในระยะที่เหมาะสมจากมัน และมีการเชื่อมต่อสายไฟและเครื่องวัดไฟฟ้าสถิตเพื่อรับข้อมูลแบบเรียลไทม์



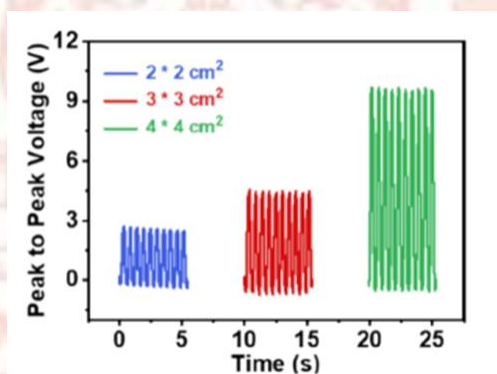
ภาพที่ 2-34 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ non-contact TENG

ที่มา : ดัดแปลงจาก Huang et al., (2025)



ภาพที่ 2-35 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดจากอุปกรณ์ non-contact TENG

ที่มา : ดัดแปลงจาก Huang et al., (2025)

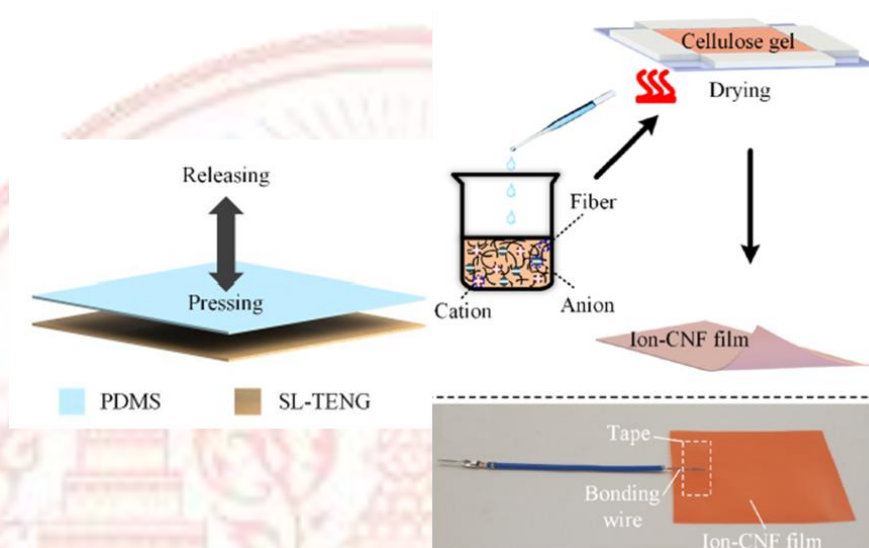


ภาพที่ 2-36 แรงดันไฟฟ้าสูงสุดถึงจุดสูงสุดของ PVDF/12 wt%@AP ในพื้นที่ขนาดต่าง ๆ

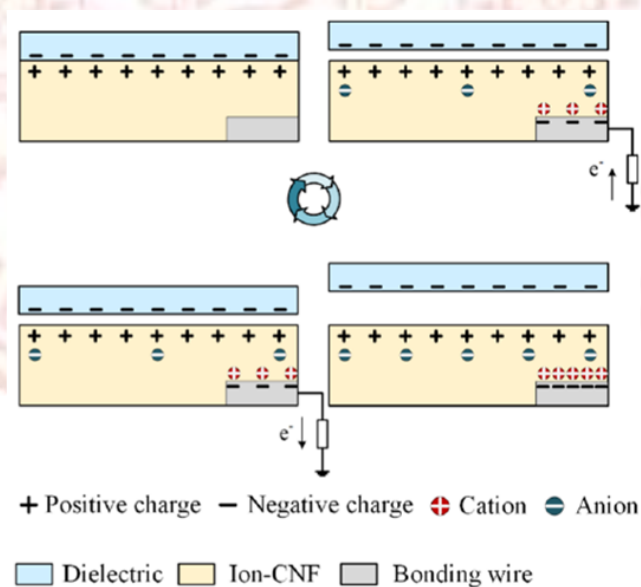
ที่มา : ดัดแปลงจาก Huang et al., (2025)

จากงานวิจัยของ Ba et al. (2020) ได้ทำการศึกษาได้นำเสนอการออกแบบนาโนเจนเนอเรเตอร์แบบไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Nanogenerator; TENG) แบบชั้นเดียว (SL-TENG) ที่มีโครงสร้างเรียบง่ายเป็นพิเศษ ซึ่งเป็นครั้งแรกที่ผสมกลไกการถ่ายโอนประจุพื้นผิวเข้ากับการเคลื่อนที่ของไอออนเพื่อสร้างหลักการทำงานแบบผสมใหม่ การใช้ฟิล์มเซลล์ูโลสนาโนไฟบริล (CNF) ที่ผลิตโดยการประกอบเนื้อเยื่อแครอตชั้นใหม่ และคงคุณสมบัติไฮโดรเจลจากพืชที่สามารถนำไอออนได้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเติมไอออนต่าง ๆ เช่น ซิงค์ซัลเฟต (ZnSO_4) และ แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) พบว่า การเติม CaCl_2 เข้าไปในฟิล์ม CNF อุปกรณ์สามารถสร้างค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Peak-to-peak voltage) 254 V และ กระแสลัดวงจร (Short-circuit current) 11.52 μA ซึ่งให้ผลประสิทธิภาพที่สูงที่สุดสำหรับการเปรียบเทียบกับไอออนแต่ละชนิด การใช้บนอุปกรณ์ TENG

แบบชั้นเดียวที่มีแบบเป็นอิเล็กโทรดเดี่ยว (Single-electrode TENG) งานวิจัยนี้ใช้ Ion-CNF เป็นชั้นเสียดสีและ ใช้แผ่นทองแดงหรือสายไฟ (Cu film) เป็นชั้นอิเล็กโทรด พบว่าการจับคู่ที่ไม่สมมาตรของไอออนนั้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพไฟฟ้า

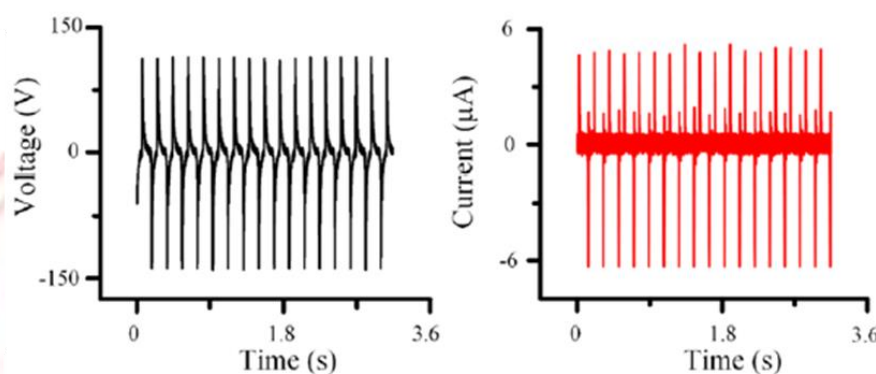


ภาพที่ 2-37 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์ SL-TENG
ที่มา : ดัดแปลงจาก Ba et al., 2020)



ภาพที่ 2-38 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ SL-TENG
ที่มา : ดัดแปลงจาก Ba et al., 2020)

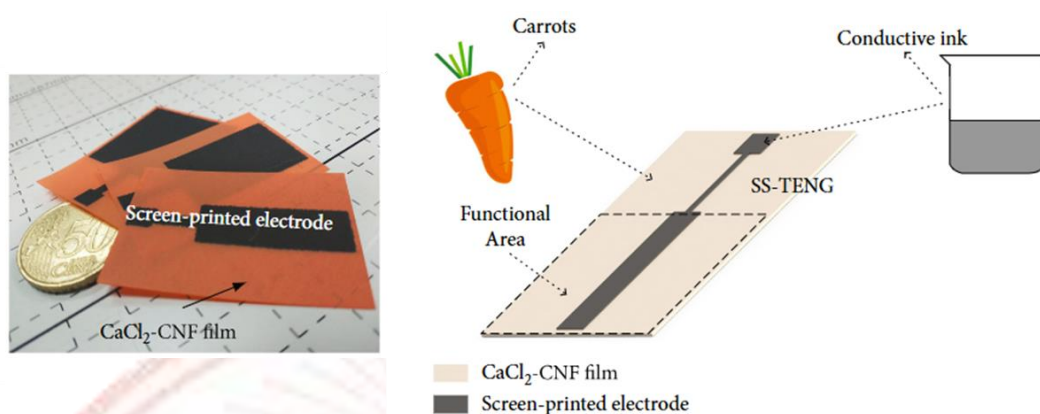
จากภาพที่ 2-38 งานวิจัยนี้เลือกใช้สายไฟเป็นอิเล็กโทรดแปะด้วยเทปกาวยึดกับเซลล์โกลนาโนไฟบริลที่มีการเติมไอออนชนิดต่าง ๆ (Ion-CNF) และ โพลีไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) ซึ่งใช้โหมดที่คล้ายกับอิเล็กโทรดเดี่ยวอย่างโหมดชิ้นเดียว ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ 2-39 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดจากอุปกรณ์ SL-TENG

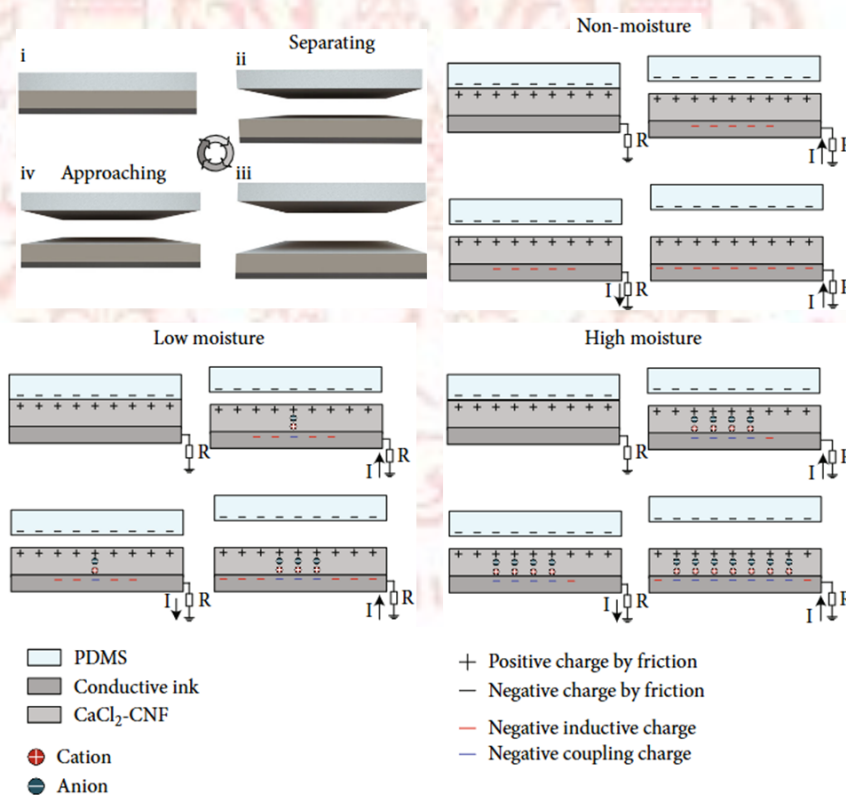
ที่มา : Ba et al., 2020

จากงานวิจัยของ Ba et al. (2021) เสนออุปกรณ์ TENG ที่มีโครงสร้างยืดหยุ่นและให้ประสิทธิภาพคงที่ SOP-TENG (Stable Output Performance Triboelectric Nanogenerator) โดยใช้ฟิล์มเซลล์โกลนาโนไฟบริลที่สกัดจากเนื้อเยื่อแครอต ซึ่งคงคุณสมบัติการนำไอออนของพืชไฮโดรเจล ทำหน้าที่เป็นทั้งชั้นไทรโบอิเล็กทริกและอิเล็กโทรด การเติม CaCl_2 ลงในฟิล์ม CNF นั้นเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการนำไฟฟ้า และใช้แกรไฟต์ (Graphite) เป็นอิเล็กโทรดที่พิมพ์ด้วยเทคนิคสกรีน เนื่องจากมีความเสถียรทางเคมี อุปกรณ์ SOP-TENG ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 246 V และค่ากระแสไฟฟ้า 5.52 μA อีกทั้งยังศึกษาและทดสอบผลเกี่ยวกับความชื้นสัมพัทธ์ และภาพการประกอบอย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 2-40 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์ SOP-TENG

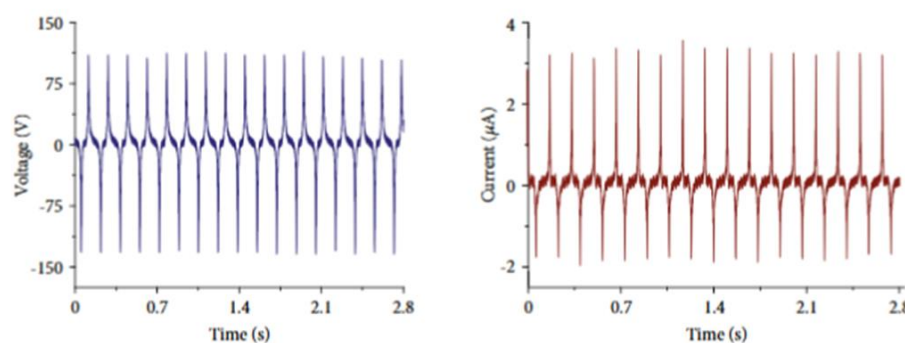
ที่มา : ดัดแปลงจาก Ba et al., 2021



ภาพที่ 2-41 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ SOP-TENG

ที่มา : ดัดแปลงจาก Ba et al., 2021

จากภาพที่ 2-41 งานวิจัยนี้เลือกใช้แกรไฟต์เป็นอิเล็กโทรดที่พิมพ์ด้วยเทคนิคสกรีน เซลลูโลสนาโนไฟบริลที่มีการเติมแคลเซียมคลอไรด์ ($\text{CaCl}_2\text{-CNF}$) และ โพลีไดเมทิลซิลอกเซน (PDMS) ซึ่งใช้โหมตอิเล็กโทรดเดี่ยว ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ 2-42 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดจากอุปกรณ์ SOP-TENG

ที่มา : ดัดแปลงจาก Ba et al., 2021

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ TENG จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ TENG จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Positive triboelectric materials	Structure	Working mode	Voltage (V)	Current (μA)
CNF-PEI-Ag film	กริดทรงเพชร รูปแบบใหม่	การเลื่อนด้านข้างและ การแยกหน้าสัมผัส	100	1.1
Starch film	เรียบง่ายและยึดกัน ด้วยเทปกาวสองหน้า	การแยกหน้าสัมผัส	1.2	N/A
ฟิล์มไนลอน	เรียบง่าย	อิเล็กโทรดเดี่ยว แบบไม่สัมผัส	79.95	2.64
Ion-CNF	เรียบง่าย	แบบชั้นเดียวคล้ายกับ อิเล็กโทรดเดี่ยว	254	11.52
$\text{CaCl}_2\text{-CNF}$	เรียบง่าย	อิเล็กโทรดเดี่ยว	246	5.52

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาการตอบสนองต่อแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว ได้ทำการศึกษาขนาดของอนุภาคนาโนเซลลูโลสที่นำมาขึ้นฟิล์มชีวภาพและศึกษาอัตราส่วนของไอออนแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้ในการผสมร่วมกับเซลลูโลสนาโนไฟบริล (CNF) จากกะลามะพร้าว โดยมีสารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือและวิธีการทดลองตามลำดับ ดังนี้

3.1 สารเคมี

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ (NaOH, ยี่ห้อ Merck, Germany บริษัท Sigma-Aldrich)
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% (NaOH, ยี่ห้อ Merck, Germany บริษัท Sigma-Aldrich)
3. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% (H_2O_2 , ยี่ห้อ Merck, Germany บริษัท Sigma-Aldrich)
4. เทมโป (Tempo : 2,2,2,6,6-tetramethylpiperidine 1-oxyl, ยี่ห้อ Merck, Germany บริษัท Sigma-Aldrich)
5. โซเดียมโบรไมด์ (NaBr, บริษัท Tokyo Chemical Industry)
6. โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaClO, ยี่ห้อ Loba Chemie)
7. กรดไฮโดรคลอริก 37% (HCl, ยี่ห้อ QreC New Zealand)
8. แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$, ยี่ห้อ Merck, Germany บริษัท Sigma-Aldrich)
9. โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA, ยี่ห้อ Merck, Germany บริษัท Sigma-Aldrich)
10. น้ำกลั่น (H_2O , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง)
11. อีพอกซีใส

3.2 อุปกรณ์

1. บีกเกอร์ ขนาด 1,000, 600 และ 50 มิลลิลิตร (Beaker, ยี่ห้อ Duran)
2. ช้อนตักสารเคมี (Spatula)
3. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic)
4. แท่งแก้วคนสาร (Glass stirring rod)

5. ถังกรองสาร (Heat seal)
6. ไซริงค์ ขนาด 5 มิลลิลิตร (syringe)
7. อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum foil, ยี่ห้อ Diamond)
8. ถาดอลูมิเนียมสำหรับอบสาร (Aluminum tray)
9. กระบอกตวง ขนาด 100 และ 50 มิลลิลิตร (Cylinder Glass, ยี่ห้อ Isolab, Germany)
10. ถุงมือ (Medical gloves, ยี่ห้อ ศรีตรังโกลฟส์)
11. พอร์เซปสแตนเลส (Forceps, ยี่ห้อ Mira)
12. จานเพาะเชื้อ (Petri dish, ยี่ห้อ Anumbra, Czech)
13. ครกสำหรับบดสาร
14. แม่พิมพ์กระຈกมีขนาด 5 * 8 ตารางเซนติเมตร มีความลึก 1 มิลลิเมตร
15. เทปทองแดง (Copper Foil tape)
16. เทปทนความร้อนที่ใช้ฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE)
17. สายไฟ ทดสอบวงจร (Wire)
18. เทปกาว (Duct tape)
19. กรรไกร (Scissors)
20. หลอดไฟ LEDs
21. โพรโทบอร์ด (Protoboard)
22. ไดโอด (Diode)

3.3 เครื่องมือ

1. เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper, ยี่ห้อ Artikelnr)
2. เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น MS1003TS/00)
3. เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Hotplate Stirrer, ยี่ห้อ LABTron รุ่น HS1-A และยี่ห้อ M-TOPS รุ่น HS Series-MS300HS)
4. ตู้อบลมร้อน (Drying Oven, ยี่ห้อ Pol-Eko Aparatura รุ่น SLW 115)
5. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer, ยี่ห้อ Hanna รุ่น HI98501)
6. พีเอชมิเตอร์ (SevenCampact pH/ion S220, Kit)
7. เครื่องมัลติมิเตอร์ (True RMS Multimeter, ยี่ห้อ Keysight รุ่น U1232A)
8. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic, ยี่ห้อ GT-SONIC รุ่น D-Series)
9. เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (Centrifuge, ยี่ห้อ Eppendorf รุ่น Centrifuge 5430 knbos)
10. เครื่องอบแห้งแช่แข็งสุญญากาศ (Vacuum Freeze Dryer)

11. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smart Lab
12. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FT-IR) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น FT-NIR
13. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Environmental Scanning Electron Microscope หรือ ESEM ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Quattro ESEM
14. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer, UV-VIS) ยี่ห้อ KLAB รุ่น Optizen POP
15. เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ยี่ห้อ Shimadzu/ EZ-Test(EZ-LX)
16. เครื่องทดสอบแรงกด รุ่น AAS-Q101
17. เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและประจุไฟฟ้า (Electrometer)

3.4 ชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลส

3.4.1 การสกัดเซลลูโลสจากผงกะลามะพร้าว (CSC)

3.4.1.1 ขั้นตอนแรก นำผงกะลามะพร้าวที่ได้มาจากโรงงานขายนะพรว้าแปรรูป ซึ่งเป็นของที่เหลือใช้แล้ว ทำการล้างให้สะอาด แล้วไปอบแห้งหรือตากแดดให้แห้ง แสดงดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ภาพผงกะลามะพร้าวที่ผ่านการล้างและอบแล้ว

3.4.1.2 ทำการปรับสภาพผงกะลามะพร้าว โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 กรัม และปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตร

ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นนำผงกะลามะพร้าวมาต้มในสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 การปรับสภาพผงกะลามะพร้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.4.1.3 นำสารที่ทำการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์มาล้างด้วยน้ำกลั่น จนมีค่า pH เป็นกลาง

3.4.1.4 นำเซลล์ูโลสมาทำการฟอกสีด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30% ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 ทำการฟอกสีเซลล์ูโลสด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.4.1.5 นำเซลลูโลสที่ทำการฟอกสีด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาล้างด้วยน้ำกลั่น กระทั่งมีค่า pH เป็นกลาง

3.4.1.6 นำเซลลูโลสมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3-4 จะได้เซลลูโลสจากกะลามพร้าว (CSC)



ภาพที่ 3-4 การอบเซลลูโลส

3.4.1.7 ลักษณะเซลลูโลสจากกะลามพร้าวหลังจากการอบ ดังภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 ลักษณะเซลลูโลส (CSC)

3.4.2 การสังเคราะห์เซลลูโลสนาโนไฟบริล (CNF)

3.4.2.1 นำเซลลูโลสที่ได้มาทำการออกซิเดชันด้วยเทมโปโดยใช้เทมโป 0.032 กรัม โซเดียมโบรไมด์ 0.2 กรัม NaClO 0.18 กรัม ต่อ CSC 1 กรัม ในน้ำที่ปราศจากไอออน (DI)

200 มิลลิลิตร และปรับให้เป็น pH 10.5 ด้วย 0.5 โมลาร์ NaOH โดยใช้เครื่อง pH meter เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังภาพที่ 3-6

3.4.2.2 จากนั้นทำให้เป็นกลางด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.5 โมลาร์

3.4.2.3 นำไปแยกตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน Centrifuge ปั่นจนตกตะกอน

3.4.2.4 หลังจากแยกตะกอนนำไปทำการทำให้แห้งแบบ แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -80°C

3.4.2.5 ลักษณะตัวอย่างเซลลูโลสนาโนไฟบริลหลังทำให้แห้งด้วยความเย็น (CNF-2FD)

แสดงดังภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-6 การใช้เครื่อง pH meter เพื่อรักษาค่า pH ไว้ที่ 10.5



ภาพที่ 3-7 ตัวอย่างเซลลูโลสนาโนไฟบริลหลังทำให้แห้งด้วยความเย็น (CNF-2FD)

3.4.2.6 หลังจากแยกตะกอน (3.4.2.3) นำไปทำการทำให้แห้งแบบอบในตู้อบลมร้อน

3.4.2.7 ลักษณะตัวอย่างเซลลูโลสนาโนไฟบริลหลังทำให้แห้งด้วยความร้อน (CNF-2OV)

แสดงดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 ตัวอย่างเซลลูโลสนาโนไฟบริลหลังทำให้แห้งด้วยความร้อน (CNF-2OV)

3.4.3 การขึ้นฟิล์มโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)

3.4.3.1 ทำการขึ้นฟิล์มด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 3 ต่อปริมาตรน้ำ ซึ่งมีน้ำเป็นตัวทำละลาย ปั่นกวน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

3.4.3.2 นำสารละลายหนืดคล้ายเจลที่ได้เทลงบนแม่พิมพ์

3.4.3.3 นำไปอบในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

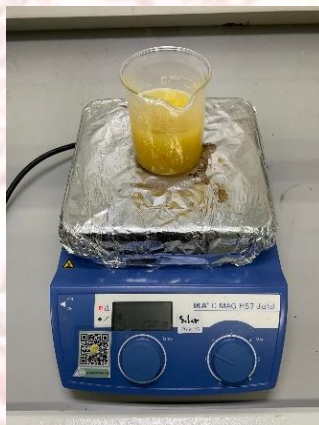
3.4.3.4 ลักษณะฟิล์มโพลีไวนิลแอลกอฮอล์หลังทำให้แห้ง ดังภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 ตัวอย่างฟิล์มโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ขนาด 4 * 4 ตารางเซนติเมตร

3.4.4 การขึ้นฟิล์มชีวภาพจากเซลลูโลสนาโนไฟบริล

3.4.4.1 นำนาโนเซลลูโลสที่ได้มาทำการขึ้นฟิล์มด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยอัตราส่วน CNF ร้อยละ 1, 2 และ 3 ต่อปริมาตรน้ำและโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 3 โดยมวล ต่อปริมาตรน้ำ ซึ่งมีน้ำเป็นตัวทำละลาย ปั่นกวน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้สถานะเจลของสารละลายนาโนเซลลูโลส ดังภาพที่ 3-10

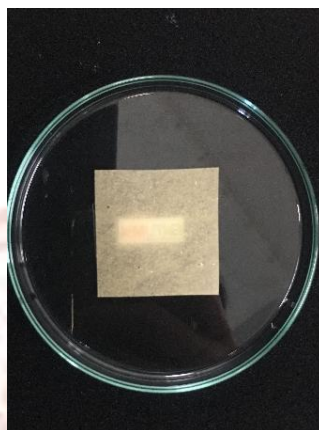


ภาพที่ 3-10 การขึ้นฟิล์มนาโนเซลลูโลสขณะปั่นกวน

3.4.4.2 นำสารละลายหนืดคล้ายเจลที่ได้เทลงบนแม่พิมพ์ขนาด 5 * 8 ตารางเซนติเมตร

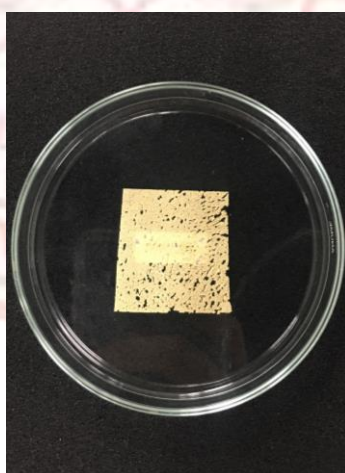
3.4.4.3 นำไปอบในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

3.4.4.4 ลักษณะฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าวหลังทำให้แห้ง ดังภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-11 ตัวอย่างฟิล์มนาโนเซลลูโลสขนาด 4 * 4 ตารางเซนติเมตร

จากภาพที่ 3-12 จากการทดลองพบว่า การเติม CNF มากกว่า 3% ส่งผลให้ไม่สามารถสร้างฟิล์มที่สมบูรณ์ได้ เนื่องจากเกิดการแตกร้าวของฟิล์ม สาเหตุหลักมาจากปริมาณ CNF ที่สูงเกินไปเมื่อเทียบกับตัวสร้างฟิล์มหลักอย่าง PVA (3%) ทำให้เกิดปัญหาด้านโครงสร้าง ฟิล์มที่มี CNF ในปริมาณสูงอาจมีการกระจายตัวของเส้นใยไม่สม่ำเสมอ เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่ม (agglomeration) ส่งผลให้แรงยึดเกาะระหว่างโพลิเมอร์ลดลง นอกจากนี้ CNF มีแนวโน้มดึงดูดน้ำทำให้เกิดแรงเค้นภายใน (internal stress) เมื่อฟิล์มแห้ง ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและไม่สามารถขึ้นรูปฟิล์มที่แข็งแรงได้



ภาพที่ 3-12 ตัวอย่างฟิล์ม CNF 4-5%

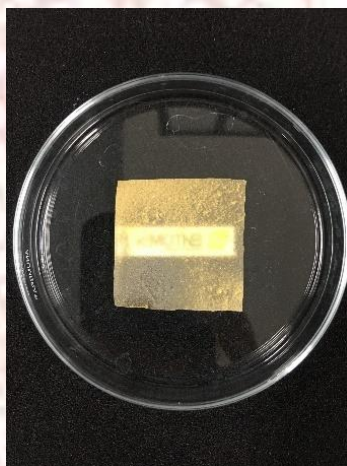
3.4.5 การขึ้นฟิล์มชีวภาพจากเซลลูโลสนาโนไฟบริลที่เติมไอออนแคลเซียมคลอไรด์

3.4.5.1 นำนาโนเซลลูโลสที่ได้มาทำการขึ้นฟิล์มด้วยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยอัตราส่วน CNF ร้อยละ 3 ต่อปริมาตรน้ำ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 3 ต่อปริมาตรน้ำ และทำการเติมแคลเซียมคลอไรด์ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0.5, 1, 2 และ 4 ต่อปริมาตรน้ำ ซึ่งมีน้ำเป็นตัวทำละลาย ปั่นกวน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้สถานะเจลของสารละลายนาโนเซลลูโลส

3.4.5.2 นำสารละลายหนืดคล้ายเจลที่ได้เทลงบนแม่พิมพ์

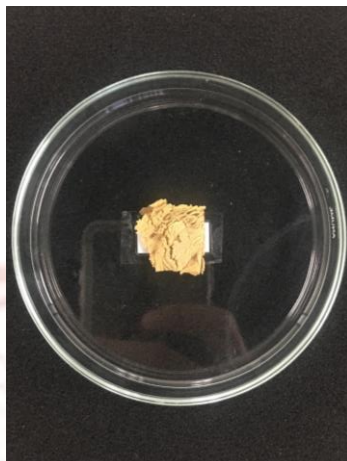
3.4.5.3 นำไปอบในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

3.4.5.4 ลักษณะฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากกะลามพร้าวหลังทำให้แห้ง ดังภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-13 ตัวอย่างฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่เติมไอออนแคลเซียมคลอไรด์ขนาด 4 * 4 ตารางเซนติเมตร

จากภาพที่ 3-14 จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อเติม CaCl_2 ในปริมาณมากกว่า 4% ส่งผลให้โครงสร้างของฟิล์มเปลี่ยนไป โดยเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน ทำให้ไม่สามารถสร้างฟิล์มที่สมบูรณ์เป็นแผ่นบางได้ สาเหตุอาจเกิดจากการที่ไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) มีบทบาทสำคัญในการเชื่อมโยงโมเลกุลของพอลิเมอร์ ส่งผลให้เกิดการจับตัวกันมากเกินไป (over-crosslinking) ทำให้ฟิล์มขาดความยืดหยุ่นและแตกตัวเป็นก้อน แทนที่จะกระจายตัวเป็นแผ่นเรียบ



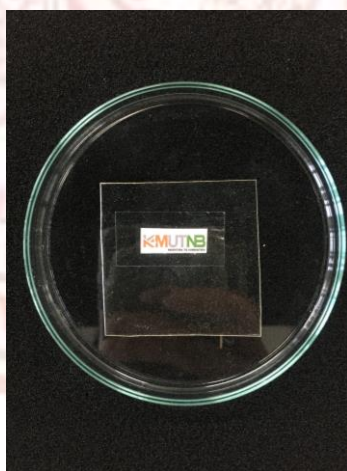
ภาพที่ 3-14 ตัวอย่างฟิล์ม CNF3%CaCl₂5%

3.4.6 การขึ้นรูปอีพอกซีใส

3.4.6.1 นำอีพอกซีใส Base 1 ส่วน ต่อ Curing Agent 1 ส่วน ผสมให้เข้ากัน (W/W) พยายามผสมกันโดยให้ไม่เกิดฟองอากาศหรือคนอย่างช้า ๆ จนกระทั่งผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

3.4.6.2 จากนั้นเทลงบนแม่พิมพ์ และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชม. กระทั่งแห้งจึงจะสามารถแกะอีพอกซีออกได้

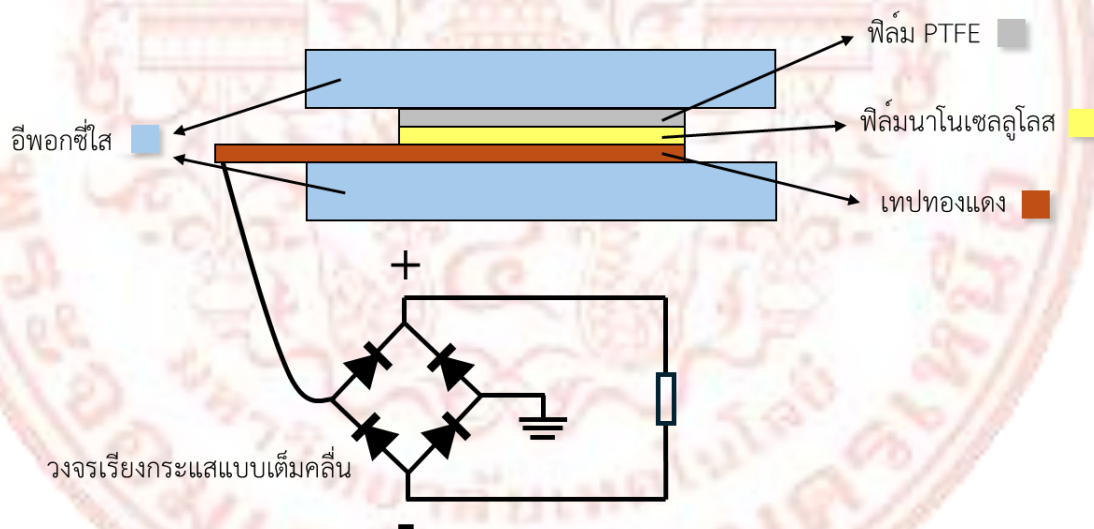
3.4.6.3 ลักษณะอีพอกซีใสหลังทิ้งไว้ให้แห้ง ดังภาพที่ 3-15



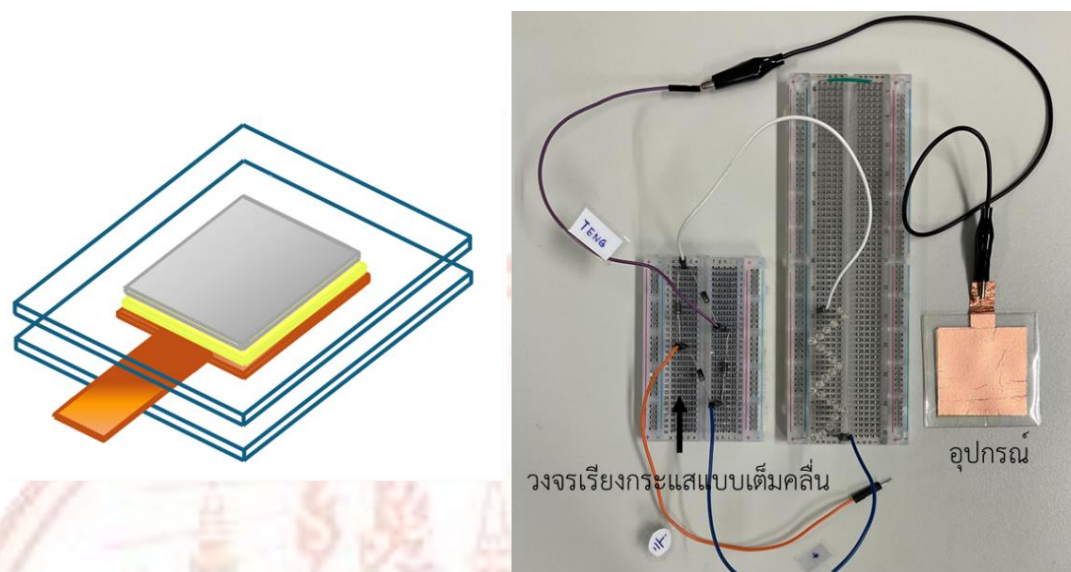
ภาพที่ 3-15 ตัวอย่างอีพอกซีใสขนาด 5 * 5 ตารางเซนติเมตร

3.4.7 การประดิษฐ์อุปกรณ์

จากภาพที่ 3-16 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว การขึ้นรูปอีพอกซีใสได้อีพอกซีใสขนาด 5×5 ตารางเซนติเมตร นำอีพอกซีใสมา 2 แผ่น ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันหรือฉนวน นำแผ่น PTFE ขนาด 4×4 ตารางเซนติเมตร แปะติดกึ่งกลางแผ่นอีพอกซีใสแผ่นที่ 1 นำแผ่นเทปทองแดงขนาด 4×4 ตารางเซนติเมตร ที่มีส่วนยื่นออกมาขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร เรียกว่า “แท็บ” ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อไฟฟ้า บริเวณแท็บถูกแปะด้านล่างด้วยเทปทองแดงเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงจากนั้นทำการแปะติดกึ่งกลางแผ่นอีพอกซีใสแผ่นที่ 2 นำสองชิ้นงานมาประกบเข้าด้วยกัน โดยตรงกึ่งกลางมีฟิล์มชีวภาพที่ต้องการจะทดสอบขนาด 4×4 ตารางเซนติเมตร จากนั้นทำการเชื่อมต่อสายไฟเข้ากับวงจรกระแสแบบเต็มคลื่น และเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสสลับขาออก (Output) เข้ากับไดโอดต่อวงจรเรียงแบบกระแสแบบเต็มคลื่นเพื่อทำการเรียงกระแสสลับ (AC) เป็นกระแสตรง (DC) แสดงการประกอบอุปกรณ์แบบสมบูรณ์ดังภาพที่ 3-17 แบบจำลองอุปกรณ์และชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลส



ภาพที่ 3-16 โครงสร้างอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลส



ภาพที่ 3-17 แบบจำลองอุปกรณ์และชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลส

3.5 การศึกษาลักษณะเฉพาะ

3.5.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่าง โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบบนหน้าผลึกของสารตัวอย่าง และขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง 10 องศา จนถึง 80 องศา ด้วยอัตราเร็ว 0.5 องศา/วินาที ดังภาพที่ 3-18



ภาพที่ 3-18 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smart Lab
ที่มา : <https://rigaku.com/products/x-ray-diffraction-and-scattering/xrd/smartlab>

3.5.2 การศึกษาองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมี

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรสโคปี (FTIR) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยการชั่งสารที่ต้องการวิเคราะห์มาที่น้ำหนัก 2-3 มิลลิกรัม โดยศึกษาหมู่ฟังก์ชัน ที่ช่วงเลขคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ ดังภาพที่ 3-19



ภาพที่ 3-19 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น FT-NIR
ที่มา : ห้องวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

3.5.3 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบทางเคมี

ศึกษาสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างทั้งหมดด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการเตรียมตัวอย่างที่ขนาด 1×1 ตารางเซนติเมตร โดยถ่ายภาพพื้นผิวของตัวอย่างทั้งหมดที่กำลังขยาย 25,000 และ 50,000 เท่า ดังภาพที่ 3-20



ภาพที่ 3-20 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Environmental Scanning Electron Microscope หรือ ESEM ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Quattro ESEM
ที่มา : <https://www.thermofisher.com/th/en/home/electron-microscopy/products/scanning-electron-microscopes/quattro-esem.html?SID=srch-srp-QUATTROESEM>

3.5.4 การศึกษาการดูดกลืนแสง

การศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มทั้งหมดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำการเตรียมตัวอย่างที่ขนาด 4×4 ตารางเซนติเมตร โดยใช้ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 800 นาโนเมตร ในการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 3-21



ภาพที่ 3-21 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ KLAB รุ่น Optizen POP
ที่มา : https://www.gibthai.com/product/product_detail/38331

3.5.5 การทดสอบความทนทาน

ฟิล์มทั้งหมดถูกทดสอบความทนทานในด้านแรงกดอัดด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ทำการเตรียมฟิล์มขนาด 10 * 50 ตารางมิลลิเมตร โดยกำหนดแรงกด 40 มิลลิเมตรต่อนาที ช่วงความเค้น 0 – 30,000 kPa ในการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 3-22



ภาพที่ 3-22 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ยี่ห้อ Shimadzu/ EZ-Test(EZ-LX)
ที่มา : <https://tsen.in.th/texture-analyzer/>

3.6 การทดสอบการตอบสนองต่อแรงกดด้วยการทดสอบสัญญาณทางไฟฟ้า

การทดสอบแรงกดด้วยเครื่องทดสอบแรงกด รุ่น AAS-เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงกดที่จำเป็นในการบีบอัดหรือทำลายวัตถุหรือวัสดุ เพื่อประเมินความแข็งแรงและคุณสมบัติทางกลของวัสดุนั้น ๆ เครื่องนี้มีเซ็นเซอร์ที่มีความละเอียดสูง ทำให้สามารถวัดแรงกดได้อย่างแม่นยำ สามารถปรับความเร็วมอเตอร์ ย่านการปรับ 10%-60% (น้อยกว่า 10% มอเตอร์ไม่หมุน, มากกว่า 60% มอเตอร์ Overload) เครื่องถูกออกแบบด้วยระบบความปลอดภัย เพื่อป้องกันอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ ถ้าในระหว่างนี้เปิดประตูเครื่องหรือครบจำนวนรอบที่ตั้งไว้ เครื่องหยุดทำงาน ออกสัญญาณเตือนดังเตือน มีแผงควบคุมที่ใช้งานง่าย ด้วยจอแบบสัมผัส สำหรับควบคุมการทำงานช่วยให้ผู้ใช้สามารถตั้งค่าและปรับพารามิเตอร์การทดสอบได้อย่างสะดวก ดังภาพที่ 3-23 จากนั้น ก็ทำการทดสอบผลลัพธ์ทางไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า Electrometer ยี่ห้อ Keithley รุ่น 6517B เครื่องมือละเอียดอ่อนที่ใช้สำหรับวัด ศักย์ไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า หรือประจุ สามารถตรวจจับกระแสไฟฟ้าหรือประจุที่มีขนาดเล็กมากได้อย่างแม่นยำ โดยทั่วไปแล้วเครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า Electrometer ใช้ในการวัดศักย์ไฟฟ้าสถิตและ การกระจายประจุในฉนวนและตัวนำ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เพื่อวัดอัตราส่วนประจุต่อมวลของ อนุภาคที่มีประจุ เช่น ไอออนและอิเล็กตรอน ของไฟฟ้าสถิตซึ่งหมายถึงกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการ ไหลของอนุภาคที่มีประจุจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งการวัดแรงดันและประจุสามารถทำได้โดยใช้ กระแส รั่วไหลที่ต่ำมากเพียง 1 เฟมโตแอมแปร์ ภาพที่ 3-24 แสดงดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์โวลต์มิเตอร์ Electrometer ยี่ห้อ Keithley รุ่น 6517B



ภาพที่ 3-23 เครื่องทดสอบแรงกด รุ่น AAS-Q101

ที่มา : ห้องวิจัย 54-417 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

Specifications of the Force Tester Machine :

- MODEL : AAS-Q101
- POWER SUPPLY : 220 VAC 1 PHASE 50 Hz
- PROTECTION : RCBO 10 AT 30 mA
- SAFETY : DOOR SWITCH & EMERGENCY SWITCH (Software)
- CONTROL SUPPLY : 24 VDC 2.5 A
- CONTROLLER : PLC+TOUCH PANEL SCREEN+PANEL SWITCH
- MOTOR : BRUSHLESS DC 120W
- FORCE : > 20 kgf (35 kgf Max.)
- LOAD CELL : 50 kgf
- STROKE ADJUSTMENT : 100-150 mm
- SPEED ADJUSTMENT : 10%-60%
- DIMENSION (WXHxD) : 600X1600X500 mm
- STRUCTURE : A5083, SPCC, SUS304, PLASTIC
- COVER : A5083, SPCC, SUS304, ACYLIC CLEAR
- TABLE : SS400, SUS304



ภาพที่ 3-24 เครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า Electrometer ยี่ห้อ Keithley รุ่น 6517B

Specifications of the Electrometer:

- Measures currents from 1 aA to 20 mA
- Voltage measurements from 1 μ V to 200 V
- Measures resistances up to $10^{18} \Omega$
- Charge measurements from 1 fC to 2 μ C

- < 20 μV burden voltage on the lowest current ranges
- 200 T Ω input impedance
- <3 fA bias current
- 0.75 fA p-p noise
- Built-in ± 1 kV source

โดยอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลล์โลสที่เตรียมไว้ทำการทดสอบด้วยเงื่อนไขดังนี้

- ทดสอบผลลัพธ์ทางไฟฟ้าจากอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลล์โลสทั้งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Voc) และกระแสไฟฟ้าวงจรปิด (Isc)

- ทดสอบผลลัพธ์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลล์โลสที่มีการเติมนาโนเซลล์โลสในอัตราส่วนต่าง ๆ และฟิล์มเติมนาโนเซลล์โลส 3% ที่มีการเติมแคลเซียมคลอไรด์ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการทดสอบกับเครื่องทดสอบแรงกด

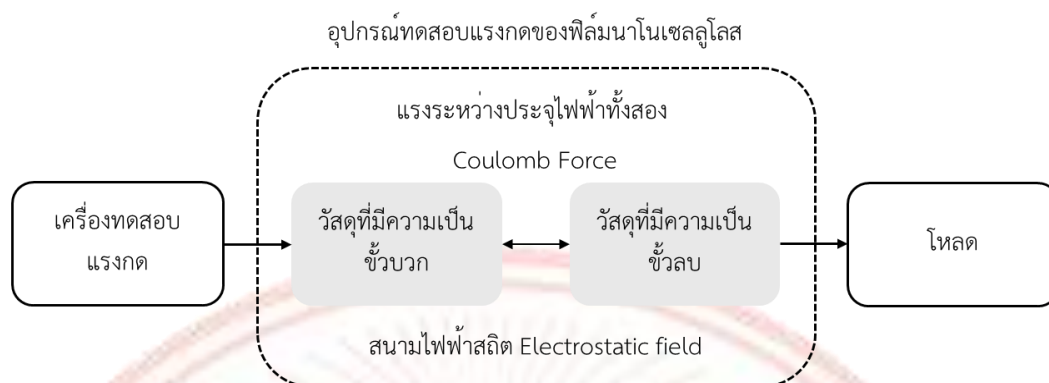
3.7 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ไดอะแกรมของชุดทดลองอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลล์โลสดังภาพที่ 3-25 ประกอบไปด้วยเครื่องทดสอบแรงกด รุ่น AAS-Q101 ใช้ในการจำลองการเกิดแรงกด โดยนำอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลล์โลสมาทดสอบการตอบสนองต่อแรงกดด้วยเครื่องทดสอบแรงกด รุ่น AAS-Q101 โดยเปิดประตูแล้วใส่ชิ้นงาน ตั้งระยะที่ฐาน ปรับระดับความสูงของฐานรับแรงกดให้พอดีกับตัวอย่าง เสร็จเรียบร้อยแล้วปิดประตูเครื่อง ใช้แรงกดกระทำ 5 กิโลกรัม ใช้ความเร็วรอบของมอเตอร์ประมาณ 30% เลื่อนสวิตช์ไปที่ตำแหน่งโหมดอัตโนมัติ แล้วกดปุ่มเริ่ม นำสัญญาณกระแสสลับขาออกจากอุปกรณ์ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเพื่อทำการเรียงกระแสไฟฟ้าสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ใช้เพื่อแปลงสัญญาณที่ออกจากอุปกรณ์ จากนั้นทำการต่อไปยังเครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า (Electrometer) เพื่อวัดค่าแรงดันและกระแสที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 3-25 ไดอะแกรมของชุดทดลองอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลล์โลส

จากภาพที่ 3-26 อธิบายไดอะแกรมการทำงานอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลล์โลสจากกะลามะพร้าวแสดงวิธีการทำงานของอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลล์โลสจากกะลามะพร้าวด้วยเครื่องทดสอบแรงกดโดยแรงกดที่เกิดขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดการแตะและสัมผัสระหว่างวัสดุที่มีความเป็นขั้วบวกกับวัสดุที่มีความเป็นขั้วลบ วัสดุทั้งสองนี้ทำงานร่วมกันโดยเกิดแรงระหว่างประจุ (Coulomb force) ซึ่งเป็นแรงผลักหรือแรงดูดขึ้นอยู่กับชนิดของประจุที่เกี่ยวข้อง สนามไฟฟ้าสถิตจึงเกิดขึ้นในบริเวณระหว่างวัสดุทั้งสองที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน สนามไฟฟ้าสถิตนี้ส่งผลต่อแรงที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุและถูกนำไปใช้งานในโหนดเพื่อเป็นการจ่ายพลังงานหรือเป็นการทำงานของอุปกรณ์ต่อเนื่องในระบบและทำการทดลองแสดงดังภาพที่ 3-27 การทดลองชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลล์โลส



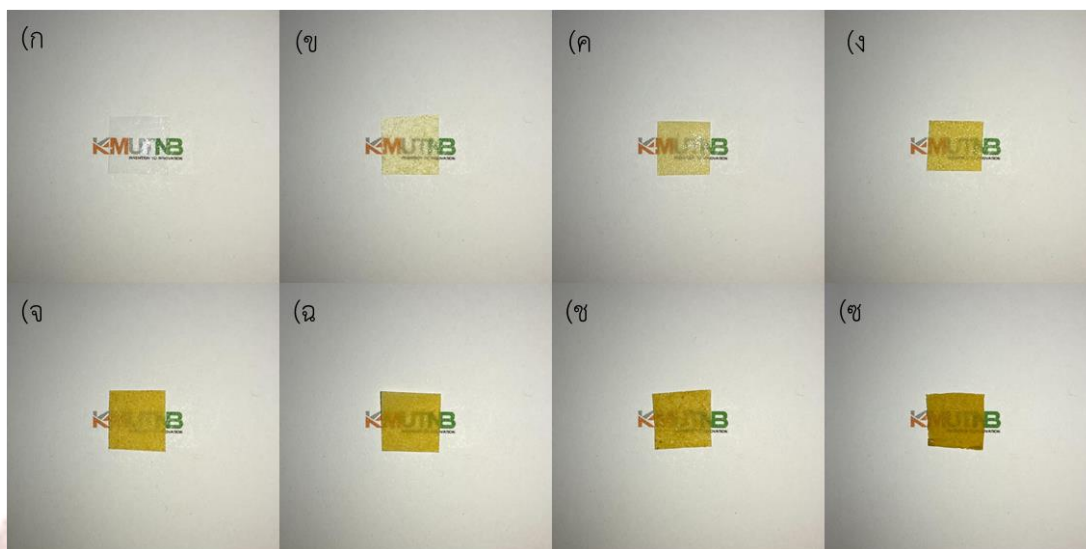
ภาพที่ 3-26 ไดอะแกรมการทำงานอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลล์โลส



ภาพที่ 3-27 การทดลองชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลล์โลส

3.7.1 การทดลองแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดสูงสุด

การทดลองแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดสูงสุดจากอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลล์โลสที่นำมาใช้ในการทดสอบกับเครื่องทดสอบแรงกด โดยฟิล์มนาโนเซลล์โลสมีการเติมนาโนเซลล์โลสในอัตราส่วนต่าง ๆ และฟิล์มนาโนเซลล์โลส 3% ที่มีการเติมแคลเซียมคลอไรด์ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนการเติมนาโนเซลล์โลสและอัตราส่วนการเติมแคลเซียมคลอไรด์ในฟิล์มนาโนเซลล์โลส 3% แสดงดังภาพที่ 3-28 เพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดสูงสุดของอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลล์โลส



ภาพที่ 3-28 ตัวอย่างฟิล์ม (ก CNF0% หรือ PVA (ข CNF1% (ค CNF2% (ง CNF3% (จ CNF3%CaCl₂0.5% (ฉ CNF3%CaCl₂1% (ช CNF3%CaCl₂2% และ (ซ CNF3%CaCl₂4%

3.7.2 การทดลองการอัดประจุ

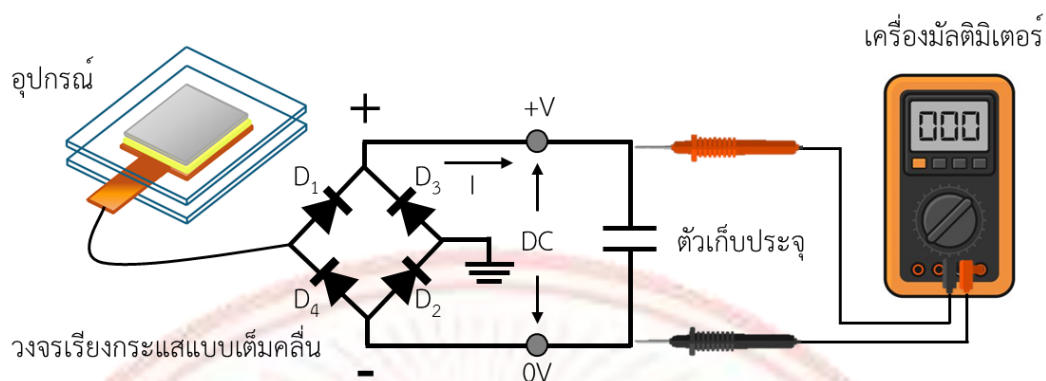
การทดลองการอัดประจุมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการอัดประจุของตัวเก็บประจุ (Capacitor) และการทำงานเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยตัวเก็บประจุทำหน้าที่สะสมพลังงานไฟฟ้าไว้ชั่วคราวและจ่ายพลังงานออกเมื่อจำเป็น เมื่อตัวเก็บประจุเริ่มรับประจุไว้ จึงเริ่มมีการต้านการไหลของประจุเนื่องจากที่ขั้วบวกของตัวเก็บประจุพยายามดึงดูดอิเล็กตรอนเข้ามา ในขณะที่ขั้วลบของตัวเก็บประจุพยายามต้านการเพิ่มของจำนวนอิเล็กตรอน ในระหว่างที่เกิดกระบวนการนี้ ตัวเก็บประจุจะคอยสะสมประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งเกิดความต่างศักย์ (Voltage) ระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งส่งผลให้กระแสไฟฟ้าค่อย ๆ ลดลง เมื่อค่าความต่างศักย์ถึงจุดสมดุล (Steady State) ตัวเก็บประจุจะหยุดรับประจุเพิ่มเติม และกระแสไฟฟ้าจะหยุดไหลสามารถต่อวงจรทดลองแสดงดังภาพที่ 3-29

ค่าความจุ (สัญลักษณ์ C) เป็นตัววัดความสามารถเก็บประจุของตัวเก็บประจุ ค่าความจุมากหมายถึง สามารถเก็บประจุได้มาก ค่าความจุมีหน่วยวัดเป็นฟารัด แทนด้วย F

μ (micro) หมายถึง 10^{-6}

n (nano) หมายถึง 10^{-9}

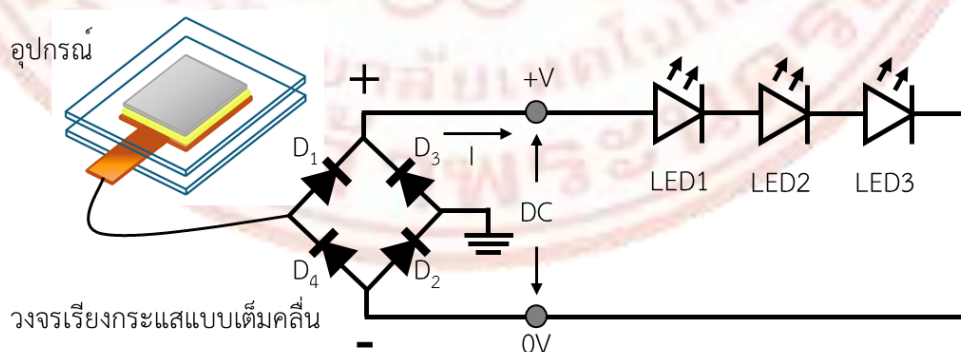
p (pico) หมายถึง 10^{-12}



ภาพที่ 3-29 การต่อวงจรทดลองการอัดประจุ

3.7.3 การทดลองต่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับไดโอดเปล่งแสง (LED)

เพื่อวัดความสามารถในการเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับไดโอดเปล่งแสง แรงดันไฟฟ้าในการทำงานของไดโอดเปล่งแสงโดยทั่วไปแรงดันตกคร่อมอยู่ระหว่าง 1.5V และ 3.3V ขึ้นอยู่กับชนิดของ LED และสีของแสงที่เปล่งออกมา แรงดันไฟฟ้างกล่าวเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของ LED และมีความสำคัญในการออกแบบวงจร กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน LED โดยทั่วไปอยู่ในช่วงระหว่าง 5 - 20mA ไดโอดเปล่งแสงนี้มีรูปร่างและขนาดต่าง ๆ กันตามการใช้งาน ไดโอดเปล่งแสงแบบ ห้ามุม โดยปกติจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3mm และ 5mm ซึ่งทำด้วยพลาสติกโปร่งแสงเพื่อช่วยกระจายแสงและเพิ่มความทนทาน การเชื่อมต่อวงจรดังกล่าวสามารถต่อวงจรทดลองแสดงดังภาพที่ 3-30



ภาพที่ 3-30 การต่อวงจรทดลองแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับไดโอดเปล่งแสง (LED)

บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากการทดลองครั้งนี้เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเซลลูโลส นาโนเซลลูโลส และฟิล์มนาโนเซลลูโลส จากการสกัดนาโนเซลลูโลสจากพืชในท้องถิ่นที่ได้จากกะลามะพร้าว ซึ่งได้ทำการสกัดพืชดังกล่าวโดยใช้วิธีทางเคมีโดยใช้ การบำบัดด้วยด่าง การฟอกด้วยกรด และกระบวนการออกซิเดชันด้วยเทมโป นำไปทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคดังต่อไปนี้

- X-ray powder diffraction (XRD)
- Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)
- การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ESEM)
- การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy; EDS)
- การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุ
- การศึกษาวิเคราะห์การส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิค UV-vis
- การศึกษาการทดสอบการตอบสนองต่อแรงกด
- การทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า
- การทดสอบเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับไดโอดเปล่งแสง (LED)

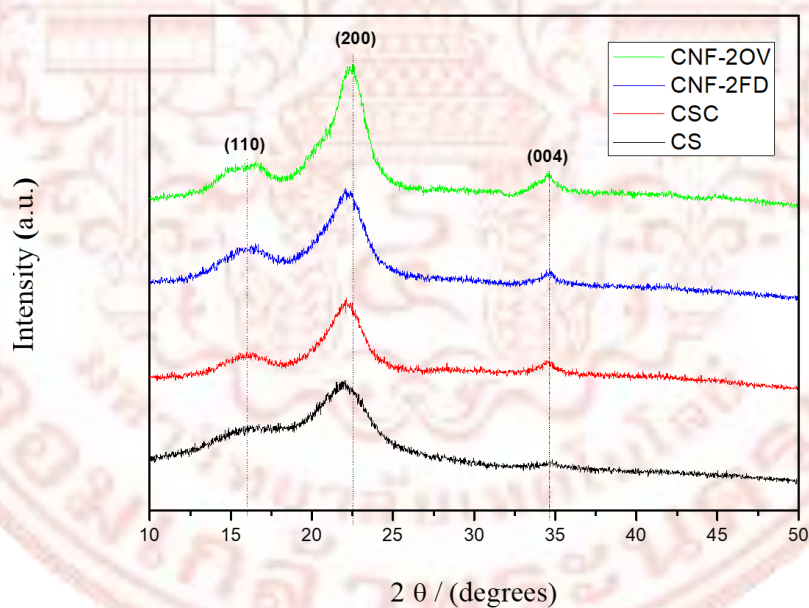
4.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวอย่างทั้งหมด

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของกะลามะพร้าว เซลลูโลส นาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว ฟิล์มนาโนเซลลูโลส และฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่ได้รับการเติมไอออนลงไป โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ในช่วงมุมเลี้ยวเบนระหว่าง 10 องศา ถึง 80 องศา

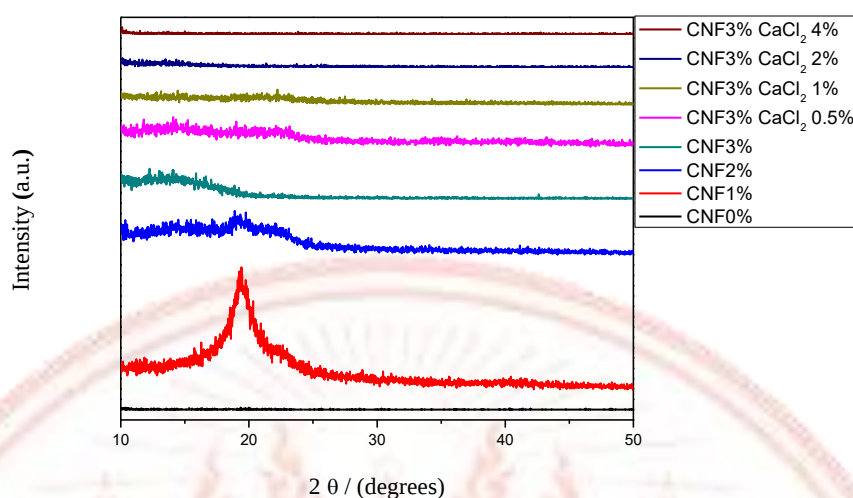
จากภาพที่ 4-1 รูปแบบ XRD ของกะลามะพร้าว (CS), เซลลูโลสจากกะลามะพร้าว (CSC), เซลลูโลสนาโนไฟบริลหลังทำให้แห้งด้วยความเย็น (CNF-2FD) และ เซลลูโลสนาโนไฟบริลหลังทำให้แห้งด้วยความร้อน (CNF-2OV) แสดงถึงผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของกะลามะพร้าว (CS) โดยพบว่าผลลัพธ์แสดงจุดสูงสุดที่ 22.5 องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบน (200) โดยพิกัดนี้แสดงถึงความเป็นผลึกของเซลลูโลสซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน JCPDS No.03-0226 (Louis and Venkatachalam, 2020) นอกจากนี้ พิกัด (110) และ (004) แสดงถึงโครงสร้างของเฟสอสัณฐานในเซลลูโลส ผลลัพธ์นี้สามารถยืนยันได้ว่ากะลามะพร้าวประกอบไปด้วยเซลลูโลสที่มีโครงสร้างต่างกัน

อีกทั้งเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว (CSC), เซลลูโลสนาโนไฟบริลหลังทำให้แห้งด้วยความเย็น (CNF-2FD) และ เซลลูโลสนาโนไฟบริลหลังทำให้แห้งด้วยความร้อน (CNF-2OV) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนที่คล้ายคลึงกันกับเซลลูโลสดั้งเดิม โดยมีจุดสูงสุดของการเลี้ยวเบนที่ $2\theta = 16.5^\circ$, 22.5° และ 34.6° ซึ่งสามารถรับรองได้จากโครงสร้างเซลลูโลส 1 ทัวไป โดยปกติดัชนีความเป็นผลึกของตัวอย่างจะเปลี่ยนไปหลังจากทำการกำจัดองค์ประกอบส่วนอื่นที่ไม่ใช่เซลลูโลส (เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) ของเส้นใยผ่านการบำบัดด้วยสารทางเคมี ในขณะที่เส้นใยเซลลูโลสที่เหลืออยู่นั้นประกอบไปด้วยทั้งบริเวณที่เป็นผลึกและอสัณฐาน ซึ่งลักษณะที่เป็นผลึกแสดงที่จุดสูงสุดสามจุดคือ $2\theta = 16.5^\circ$, 22.2° , 34.6° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบโครงตาข่าย (110), (200) และ (004) ตามลำดับ

ถัดมาจากภาพที่ 4-2 รูปแบบ XRD ของฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่อัตราส่วน 0%, 1%, 2% และ 3% มีชื่อว่า CNF0% หรือ PVA, CNF1%, CNF2% และ CNF3% ตามลำดับ และฟิล์มนาโนเซลลูโลส 3% ที่เติมไอออน CaCl_2 ลงไปที่อัตราส่วน 0.5%, 1%, 2% และ 4% มีชื่อว่า CNF3% CaCl_2 0.5%, CNF3% CaCl_2 1%, CNF3% CaCl_2 2% และ CNF3% CaCl_2 4% ตามลำดับ



ภาพที่ 4-1 รูปแบบ XRD ของ CS, CSC, CNF-2FD และ CNF-2OV



ภาพที่ 4-2 รูปแบบ XRD ของฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่อัตราส่วนต่าง ๆ และ CNF3% ที่เติม CaCl_2 ลงไปที่อัตราส่วนต่าง ๆ

4.2 ผลการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของตัวอย่างทั้งหมด

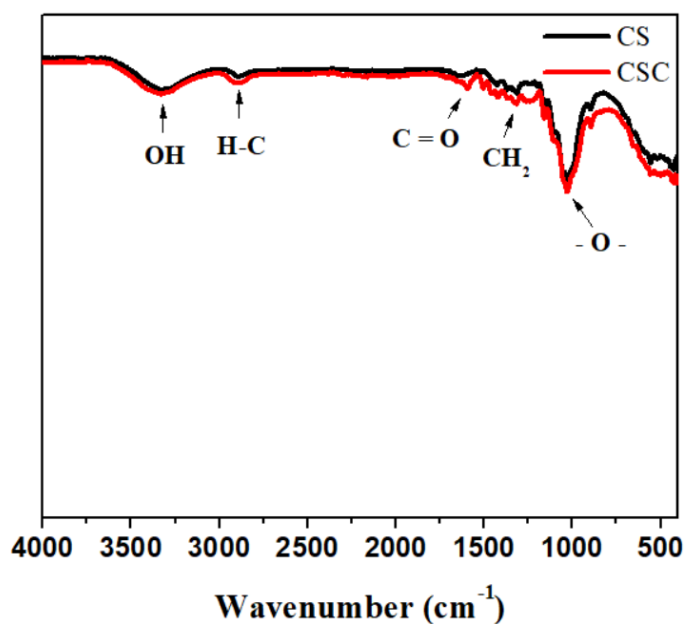
จากการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของกะลามะพร้าว เซลลูโลส นาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว ฟิล์มนาโนเซลลูโลส และฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่ได้รับการเติมไอออนลงไป โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) ในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 4000 cm^{-1} .

จากภาพที่ 4-3 แสดงสเปกตรัม FTIR ของกะลามะพร้าว และเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว โดยจากผลการทดลองของกะลามะพร้าวพบพันธะเคมีหลายพันธะในตัวอย่าง โดยพิกัดแรกที่ 3290 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับการสั่นแบบยืดของกลุ่มไฮดรอกซิล (-OH stretching) และพิกัดที่สองที่ 2927 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮโดรคาร์บอน (C-H stretching) และส่วนอื่น ๆ ปรากฏที่พิกัด 1589 cm^{-1} , 1408 cm^{-1} และ 1102 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนแบบยืดของหมู่คาร์บอกซิลิก (C=O stretching), การสั่นแบบงอของหมู่เมทิล ($-\text{CH}_2$ scissoring) และการสั่นแบบยืดของหมู่อีเธอร์ (-O- stretching) ตามลำดับ โดยพิกัดที่สังเกตได้ทั้งหมดสะท้อนถึงพันธะเคมีในโครงสร้างเซลลูโลส (Rachtanapun, 2009) ซึ่งเซลลูโลสจากกะลาพรวาก็พบพิกัดแบบเดียวกัน

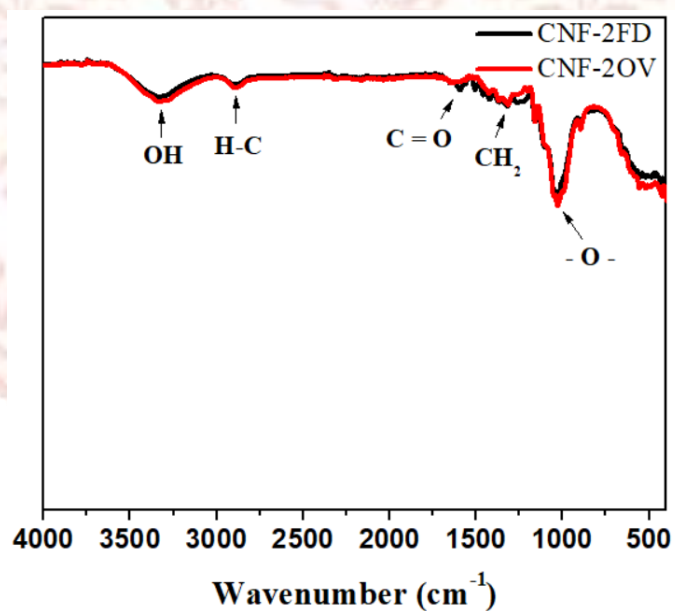
จากภาพที่ 4-4 แสดงรูปการเปรียบเทียบสเปกตรัม FTIR ระหว่างเซลลูโลสนาโนไฟบริลหลังทำให้แห้งด้วยความเย็น (CNF-2FD) กับ เซลลูโลสนาโนไฟบริลหลังทำให้แห้งด้วยความร้อน (CNF-2OV) โดยพิกัด FTIR ของเซลลูโลสนาโนไฟบริลทั้งสองนี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และมีพันธะเคมีในโครงสร้างเซลลูโลส

จากภาพที่ 4-5 แสดงรูปการเปรียบเทียบสเปกตรัม FTIR ระหว่าง FTIR ของฟิล์ม PVA ฟิล์มนาโนเซลลูโลส และฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่ได้รับการเติมไอออนลงไป โดยพิกัด FTIR ของฟิล์ม PVA ฟิล์มนา

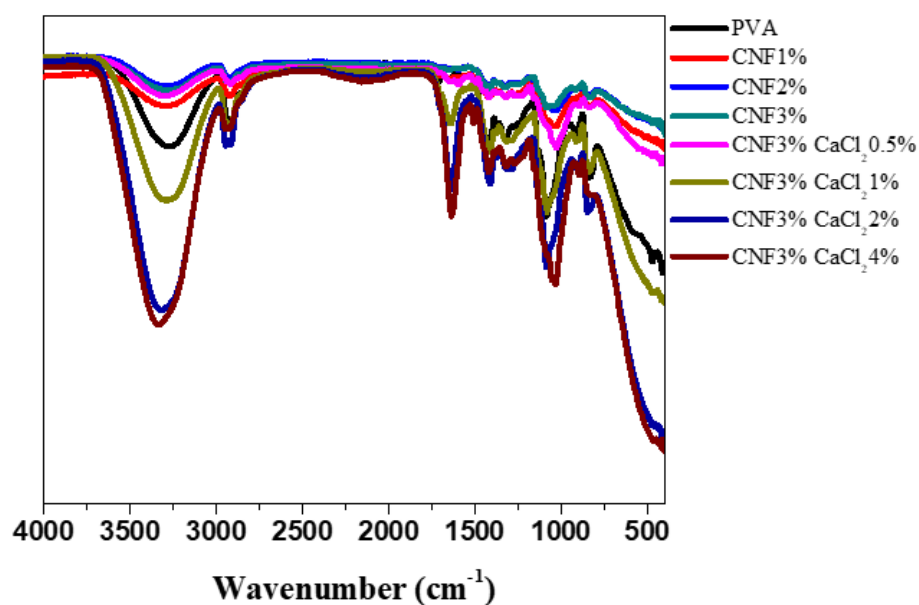
โนเซลลูโลส และฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่ได้รับการเติมไอออนลงไปนี้ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และมีพันธะเคมีในโครงสร้าง PVA



ภาพที่ 4-3 รูปแบบ FTIR ของกะลามะพร้าวและเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว



ภาพที่ 4-4 รูปแบบ FTIR ของ CNF-2FD และ CNF-2OV



ภาพที่ 4-5 รูปแบบ FTIR ของฟิล์ม PVA ฟิล์มนาโนเซลลูโลส
และฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่ได้รับการเติม CaCl_2 ลงไป

ตารางที่ 4-1 ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของตัวอย่างผงกะลามะพร้าว เซลลูโลส และ นาโนเซลลูโลส

เลขคลื่น (cm^{-1}) (Wavenumbers)	พันธะเคมี (Chemical bonding)
3290	OH stretching
2927	C-H stretching
1589	C=O stretching
1408	CH_2 scissoring
1102	-O- stretching

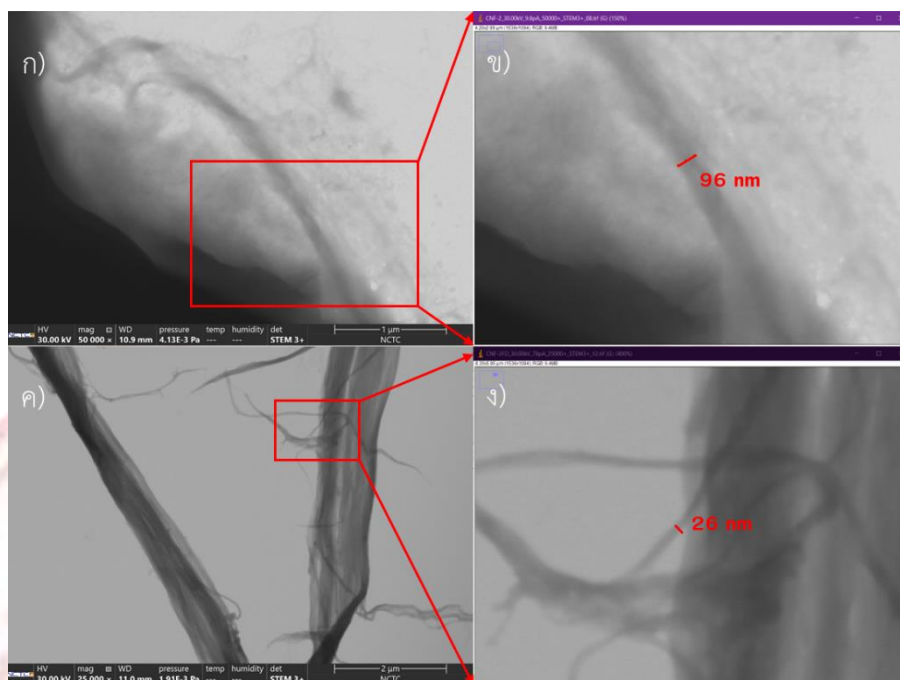
ตารางที่ 4-2 ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของฟิล์ม PVA ฟิล์มนาโนเซลลูโลส และฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่ได้รับการเติม CaCl_2 ลงไป

เลขคลื่น (cm^{-1}) (Wavenumbers)	พันธะเคมี (Chemical bonding)
3262	O-H stretching
2909,2942	C-H stretching
1414	CH_2 scissoring
1325	CH_2 deformation
1086	C-O stretching
915	C-C stretching

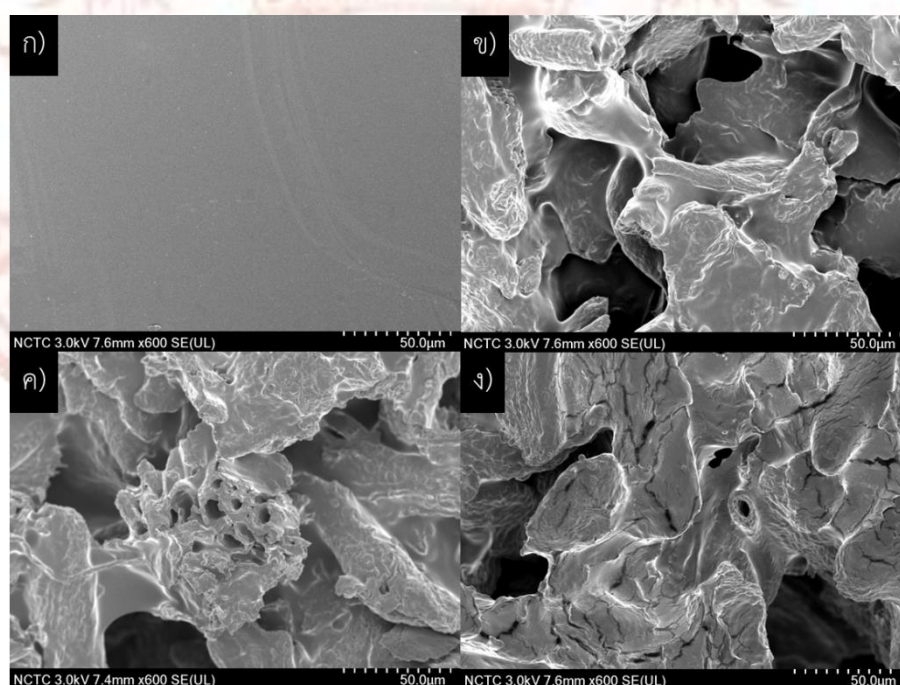
4.3 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว แผ่นฟิล์ม PVA แผ่นฟิล์มนาโนเซลลูโลส และแผ่นฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่เติม CaCl_2 โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Environmental Scanning Electron Microscope หรือ ESEM)

จากภาพที่ 4-6 ก) และ ข) พบว่าขนาดของนาโนเซลลูโลสที่พบเซลลูโลสนาโนไฟบริลหลังทำให้แห้งด้วยความร้อนมีขนาดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 0.096 ไมโครเมตร หรือ 96 นาโนเมตร จากภาพที่ 4-6 ค) และ ง) พบว่าขนาดของนาโนเซลลูโลสที่พบในเซลลูโลสนาโนไฟบริลหลังทำให้แห้งด้วยความเย็น มีขนาดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 0.026 ไมโครเมตร หรือ 26 นาโนเมตร โดยจากภาพรูปแบบ ESEM ของเซลลูโลสนาโนไฟบริลที่แตกต่างกันทั้งสองนี้สามารถยืนยันถึงความเป็นอนุภาคนาโนของขนาดอนุภาคนาโนเซลลูโลสได้ เมื่อวัสดุมีขนาดหรืออนุภาคในช่วง 1-200 นาโนเมตร และจากภาพที่ 4-7 พบว่า ก) ฟิล์ม PVA บริสุทธิ์หรือ CNF0% มีพื้นผิวเรียบ ไม่มีโครงสร้างพรุนหรือความขรุขระที่ชัดเจน บ่งบอกได้ว่าฟิล์มมีความหนาแน่นและมีการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ที่สม่ำเสมอ แต่ไม่มีการเสริมแรงของวัสดุเส้นใย ข) ฟิล์ม CNF3% มีโครงสร้างที่หยาบขึ้น และเกิดช่องว่างระหว่างวัสดุ บ่งบอกได้ว่าการเติม CNF ทำให้เกิดการกระจายตัวของเส้นใยในโครงสร้างของฟิล์ม ค) ฟิล์ม CNF3% CaCl_2 1% มีโครงสร้างที่ซับซ้อนขึ้น และมีรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่าง ข ซึ่ง CaCl_2 อาจมีบทบาทในการเชื่อมโยงโครงสร้างภายในของฟิล์ม ทำให้เกิดรูพรุนจากการรวมตัวของไอออน ง) ฟิล์ม CNF3% CaCl_2 4% โครงสร้างมีการอัดแน่นและมีรอยแตกร้าวมากขึ้น บ่งบอกได้ว่าการเติม CaCl_2 เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการแข็งตัวของโครงสร้างมากขึ้นจนเกิดการแตกร้าว โดยอาจเพิ่มความเปราะให้กับฟิล์ม ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม



ภาพที่ 4-6 รูปแบบ ESEM ของ ก) CNF-2OV ข) ภาพขยาย CNF-2OV ค) CNF-2FD และ ง) ภาพขยาย CNF-2FD



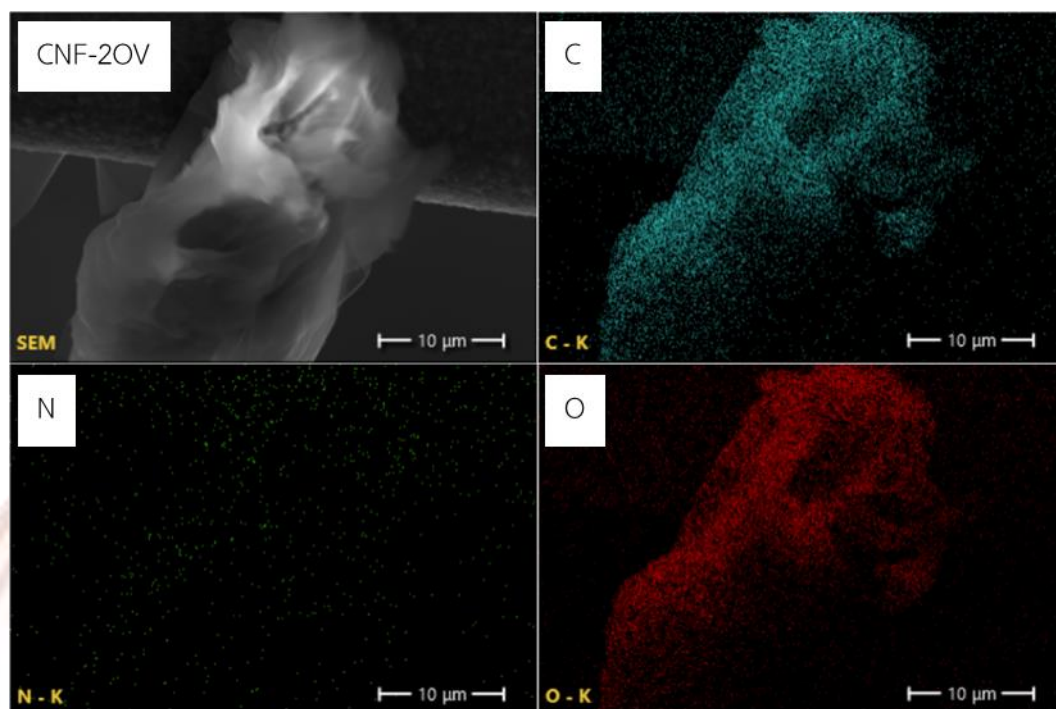
ภาพที่ 4-7 รูปแบบ ESEM ของฟิล์ม ก) PVA ข) CNF3% ค) CNF3%CaCl₂1% และ ง) CNF3%CaCl₂4%

4.4 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี

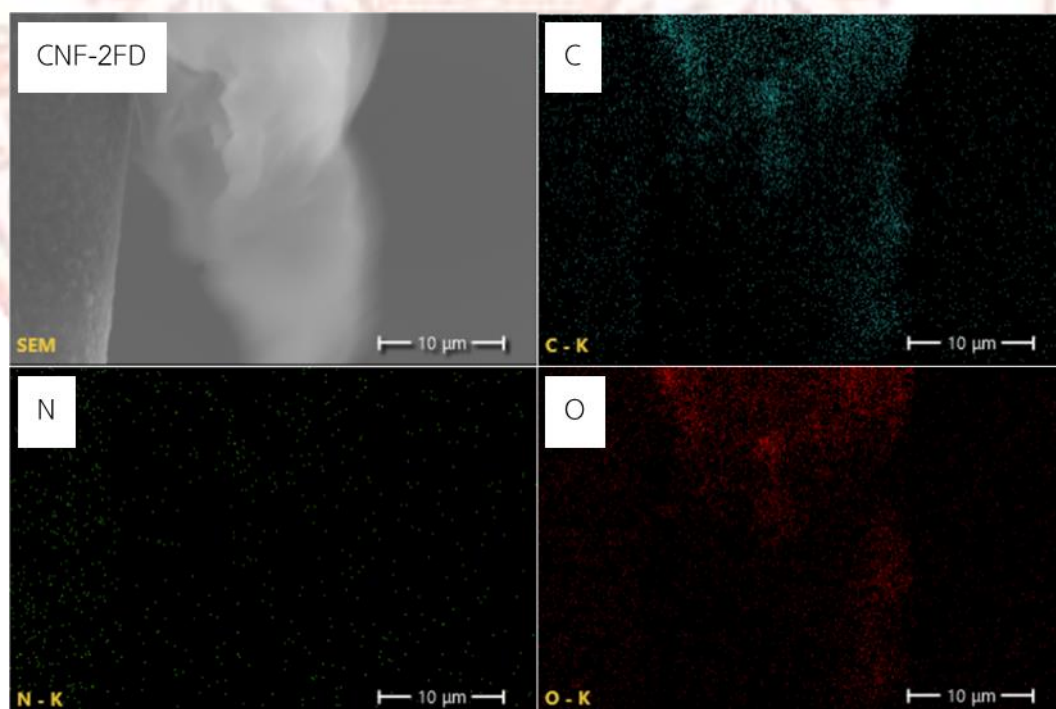
จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว แผ่นฟิล์ม PVA แผ่นฟิล์มนาโนเซลลูโลส และแผ่นฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่เติม CaCl_2 การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการเลือกตัวอย่าง ดังนี้ ในการเลือก CNF-2OV กับ CNF-2FD มาเพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างนาโนเซลลูโลสและเปรียบเทียบว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร ในการเลือกตัวอย่างฟิล์ม CNF0% หรือ PVA เพื่อเป็นตัวมาตรฐานของฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่ไม่มีการเติมนาโนเซลลูโลสลงไป ในการเลือกตัวอย่างฟิล์ม CNF3% ในการศึกษาเนื่องจากสามารถให้ผลทดสอบทางไฟฟ้าได้ดีสำหรับการเติมเพียงนาโนเซลลูโลส ในการเลือกตัวอย่างฟิล์ม CNF3% CaCl_2 1% ในการศึกษาเนื่องจากสามารถให้ผลทดสอบทางไฟฟ้าได้ดีที่สุด ในการเลือกตัวอย่างฟิล์ม CNF3% CaCl_2 4% ในการศึกษาเนื่องจากสามารถให้ผลทดสอบทางไฟฟ้าได้ดีรองลงมาและเป็นฟิล์มที่มีการเติม CaCl_2 สูงที่สุด ทำการศึกษาโดยเทคนิค EDS-Mapping หรือสเปกโทรสโกปีเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy; EDS)

จากภาพที่ 4-8 ตัวอย่าง CNF-2OV ตรวจพบธาตุ C, O และ N มีปริมาณร้อยละ 33.5, 50.0 และ 16.5 ตามลำดับ และจากภาพที่ 4-9 ตัวอย่าง CNF-2FD ตรวจพบธาตุ C, O และ N มีปริมาณร้อยละ 28.7, 47.8 และ 23.5 ตามลำดับ

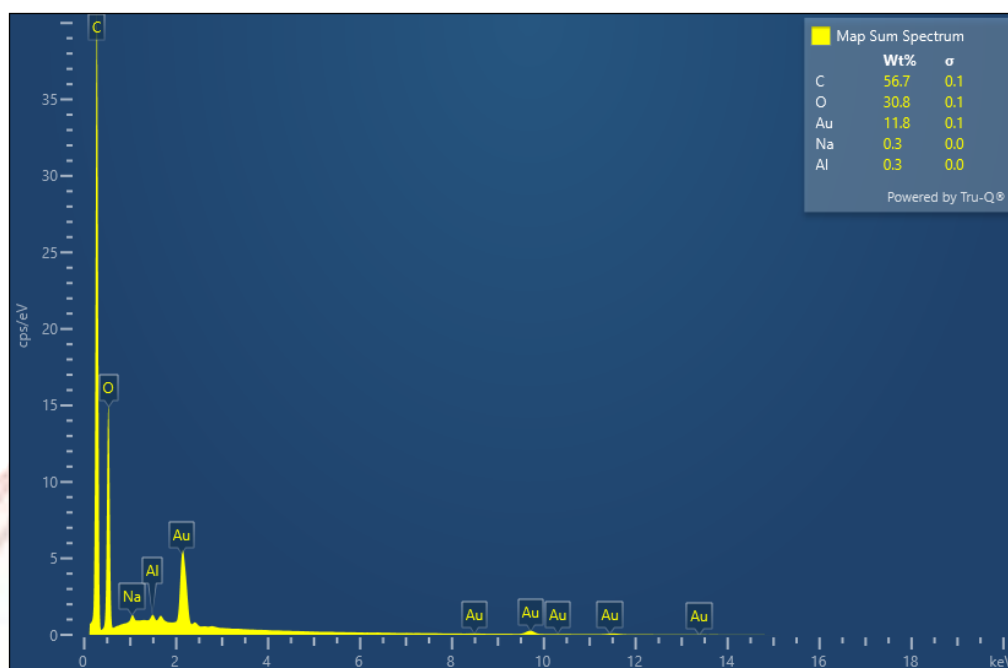
จากผลการทดลองที่แสดงไว้ในภาพที่ 4-10 แผ่นฟิล์ม PVA หรือ CNF0% ตรวจพบธาตุ C, O, Au, Na และ Al มีปริมาณร้อยละ 56.7, 30.8, 11.8, 0.3 และ 0.3 ตามลำดับ ภาพที่ 4-11 แผ่นฟิล์ม CNF3% ตรวจพบธาตุ C, O, Au, Na และ Al มีปริมาณร้อยละ 55.1, 35.5, 8.7, 0.4 และ 0.3 ตามลำดับ ภาพที่ 4-12 แผ่นฟิล์ม CNF3% CaCl_2 1% ตรวจพบธาตุ C, O, Cl, Au, Ca, Al และ Na มีปริมาณร้อยละ 50.3, 30.5, 7.2, 6.5, 4.9, 0.3 และ 0.3 ตามลำดับ และสุดท้ายแผ่นฟิล์ม CNF3% CaCl_2 4% แสดงไว้ในภาพที่ 4-13 ตรวจพบธาตุ C, O, Cl, Ca, Au, Al และ Na มีปริมาณร้อยละ 42.1, 25.0, 17.1, 10.1, 5.1, 0.4 และ 0.3 ตามลำดับ



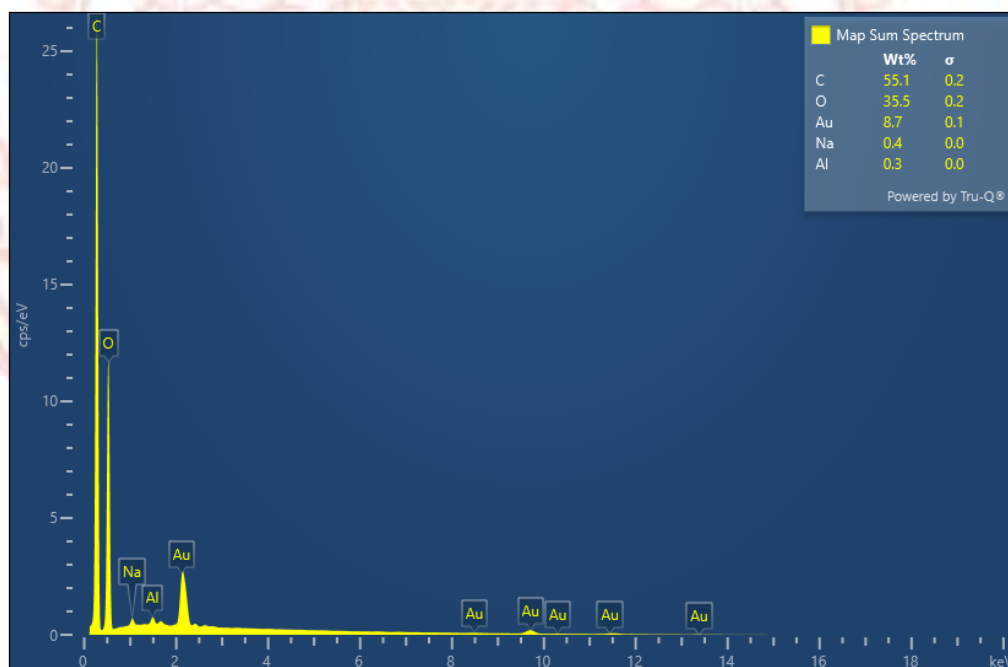
ภาพที่ 4-8 รูปแบบ EDS ของ CNF-2OV



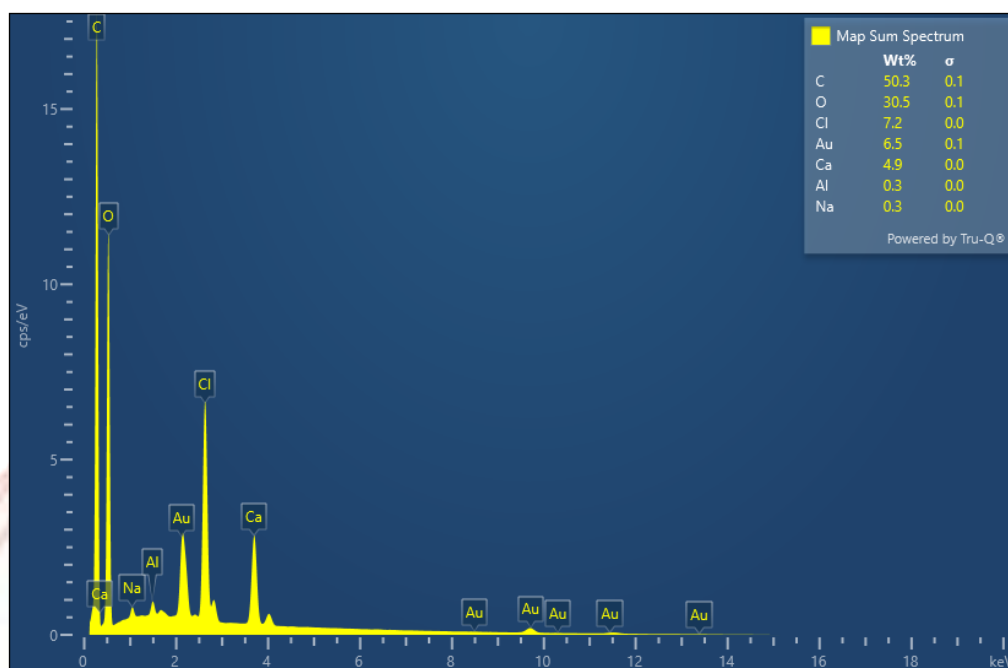
ภาพที่ 4-9 รูปแบบ EDS ของ CNF-2FD



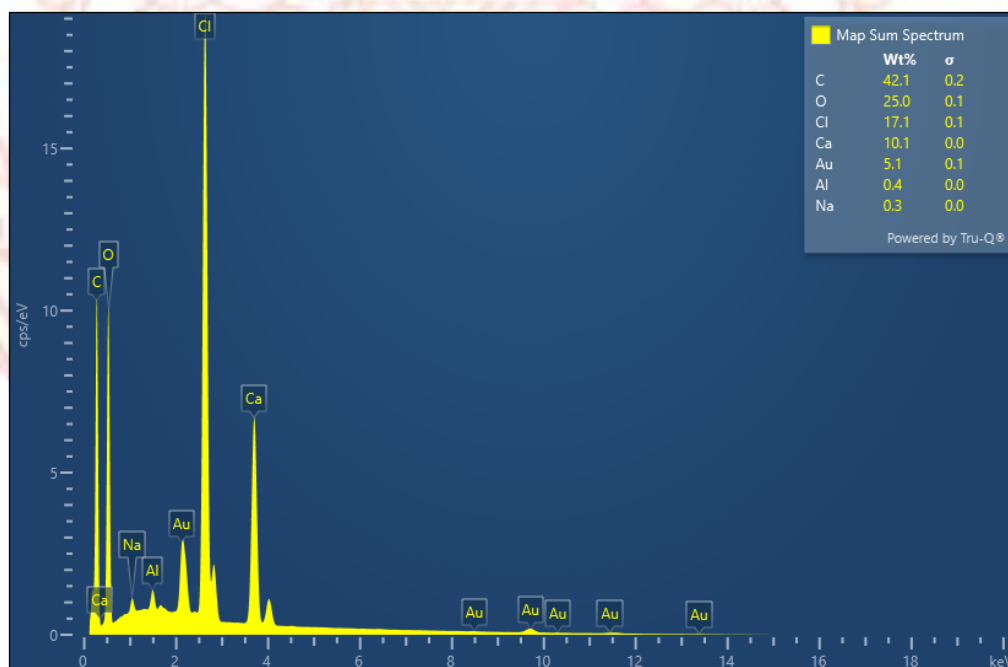
ภาพที่ 4-10 ภาพ SEM-EDS Mapping แผ่นฟิล์ม PVA หรือ CNF0%



ภาพที่ 4-11 ภาพ SEM-EDS Mapping แผ่นฟิล์ม CNF3%



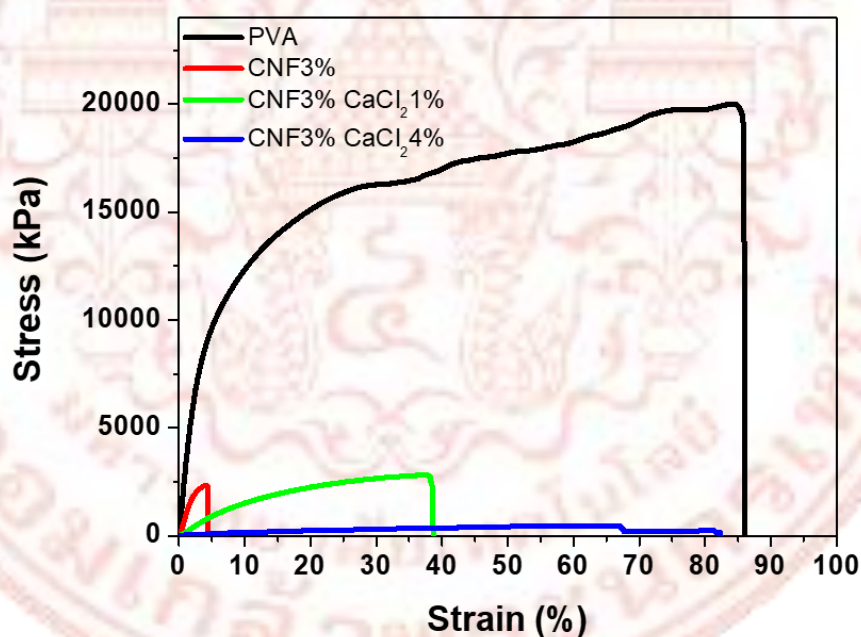
ภาพที่ 4-12 ภาพ SEM-EDS Mapping แผ่นฟิล์ม CNF3%CaCl1%



ภาพที่ 4-13 ภาพ SEM-EDS Mapping แผ่นฟิล์ม CNF3%CaCl4%

4.5 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุ

จากภาพที่ 4-14 ทดสอบวัดแรงดึงของวัสดุ โดยใช้เครื่อง Tensile strength ทดสอบแผ่นฟิล์ม PVA, CNF3%, CNF3%CaCl₂1% และ CNF3%CaCl₂4% นำไปทดสอบได้ผล Tensile Strength เท่ากับ 20,008.9, 2,343.08, 2,804.87, 476.737 kPa ตามลำดับ และได้ผลการทดสอบ Elongation at break (%) 85.7860, 4.30525, 38.1715 และ 82.2943 ตามลำดับ จากการทดสอบนี้พบว่า ฟิล์ม PVA บริสุทธิ์มีความสามารถในการยืดตัวสูงสุดและความแข็งแรงเชิงกลที่ดีที่สุด ฟิล์มที่ทำการเติม CNF 3% ทำให้ฟิล์มแข็งแรงขึ้นและเปราะขึ้นมาก จึงไปลดความสามารถในการยืดตัว และลดความแข็งแรง ฟิล์มที่ทำการเติม CaCl₂ 1% ลงใน CNF 3% ทำให้ฟิล์มยืดหยุ่นขึ้นกว่าฟิล์ม CNF 3% อย่างเดียว แต่ยังแข็งแรงน้อยกว่า PVA บริสุทธิ์ และฟิล์ม CNF3%CaCl₂4% เป็นฟิล์มที่มีความสามารถในการยืดตัวสูงขึ้นมากเกือบเท่ากับ PVA บริสุทธิ์ แต่มีความแข็งแรงนั้นลดลงมาก (Tensile Strength ต่ำที่สุด) นันสรุปได้ว่าฟิล์มนี้มีความอ่อนตัวและความเปราะเพิ่มมากขึ้น



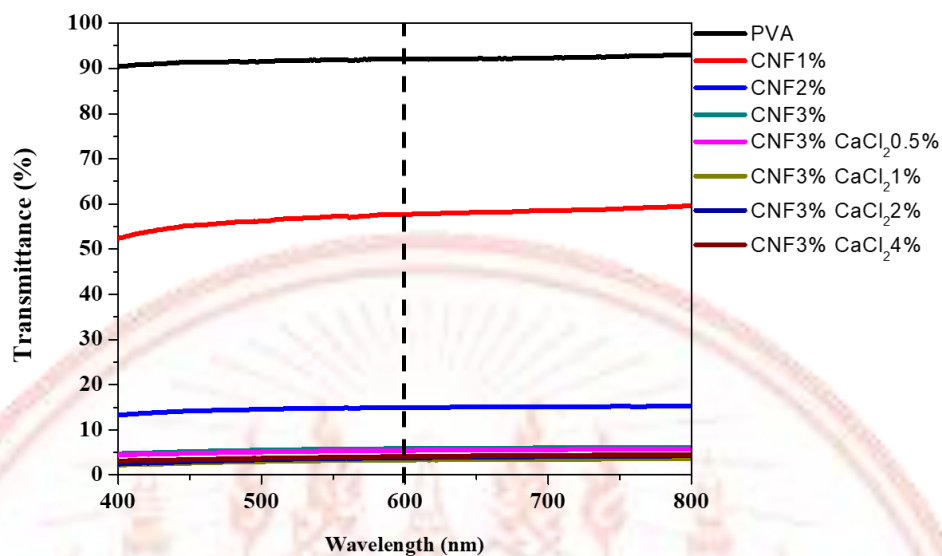
ภาพที่ 4-14 กราฟทดสอบ Tensile strength ของแผ่นฟิล์ม PVA, CNF3%, CNF3%CaCl₂1% และ CNF3%CaCl₂4%

ตารางที่ 4-3 แสดงค่าต่าง ๆ จากการทดสอบ Tensile strength ของแผ่นฟิล์ม PVA, CNF3%, CNF3%CaCl₂1% และ CNF3%CaCl₂4%

Name Parameters Unit	Elongation at break (%)	Tensile Strength (kPa)	Thickness	Width (mm)
PVA	85.7860	20,008.9	0.0500	10.0000
CNF3%	4.30525	2,343.08	0.2325	10.0000
CNF3%CaCl ₂ 1%	38.1715	2,804.87	0.4125	10.0000
CNF3%CaCl ₂ 4%	82.2943	476.737	0.2767	10.0000

4.6 ผลการศึกษาวิเคราะห์การส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิค UV-vis

จากภาพที่ 4-15 นำมาแสดงนั้นเป็นแผ่นฟิล์ม จากกราฟที่นำมาแสดงพบว่าการส่องผ่านในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นที่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร ทำการวิเคราะห์ค่าการส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 600 nm ฟิล์ม PVA มีค่าการส่องผ่าน 92.12% ซึ่งบ่งบอกถึงความโปร่งใสของฟิล์ม PVA บริสุทธิ์ CNF1% มีค่าการส่องผ่าน 57.7% ค่าลดลงจาก PVA อย่างมาก แสดงว่า CNF มีผลต่อการกระเจิงของแสง ฟิล์ม CNF2% มีค่าการส่องผ่าน 14.93% ฟิล์ม CNF3% มีค่าการส่องผ่าน 5.85% ฟิล์ม CNF3%CaCl₂0.5% มีค่าการส่องผ่าน 5.46% ฟิล์ม CNF3%CaCl₂1% มีค่าการส่องผ่าน 3.31% ลดลงมากที่สุด ฟิล์ม CNF3%CaCl₂2% มีค่าการส่องผ่าน 3.8% และ ฟิล์ม CNF3%CaCl₂4% มีค่าการส่องผ่าน 4.08% มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์มที่ทำให้การกระเจิงแสงลดลง ดังนั้น ถ้าต้องการวัสดุโปร่งใสควรใช้ PVA บริสุทธิ์ แต่ถ้าต้องการวัสดุลดแสงผ่านควรใช้ ฟิล์มที่มี CNF และถ้าต้องการควบคุมระดับความทึบแสงควรมีการเติม CaCl₂ ในฟิล์ม CNF3% สามารถช่วยปรับค่าการส่องผ่านแสงให้เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการ อีกทั้ง ผลการศึกษานี้มีประโยชน์ต่อการพัฒนา ฟิล์มเคลือบแก้ว, ฟิล์มกันแสง, วัสดุกรองแสง และฟิล์มอัจฉริยะ ที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุก่อสร้าง และบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการควบคุมการส่องผ่านของแสง



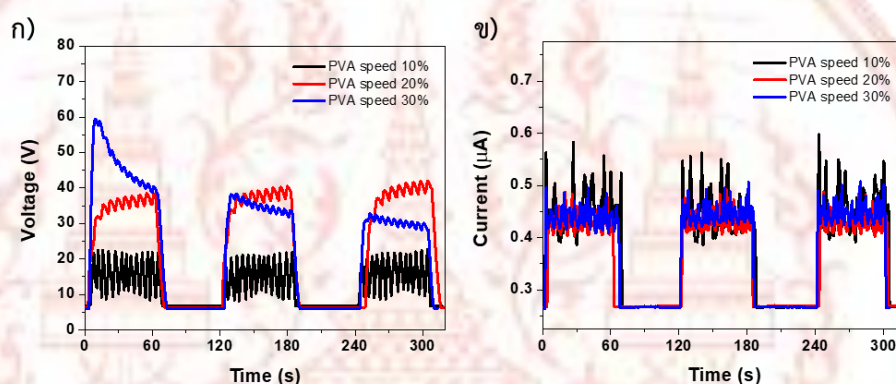
ภาพที่ 4-15 กราฟ Transmittance ของแผ่นฟิล์ม PVA, CNF1%, CNF2%, CNF3%, CNF3%CaCl₂0.5%, CNF3%CaCl₂1%, CNF3%CaCl₂2% และ CNF3%CaCl₂4%

ตารางที่ 4-4 แสดงค่าการส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 600 nm ของฟิล์ม CNF ที่ 0%, 1%, 2%, 3%, CNF3% ที่เติม CaCl₂ ลงไป 0.5%, 1%, 2%, และ 4%

Name Parameters Unit	Transmittance (%) At 600 nm
PVA	92.12
CNF1%	57.7
CNF2%	14.93
CNF3%	5.85
CNF3%CaCl ₂ 0.5%	5.46
CNF3%CaCl ₂ 1%	3.31
CNF3%CaCl ₂ 2%	3.8
CNF3%CaCl ₂ 4%	4.08

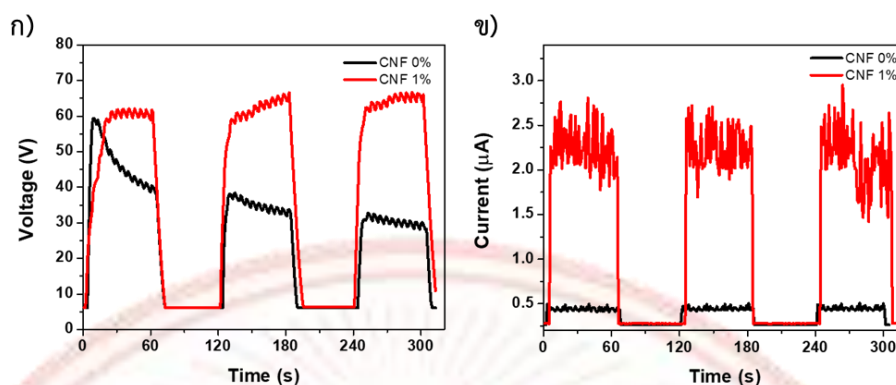
4.7 ผลการตรวจสอบการตอบสนองต่อแรงกด

จากภาพที่ 4-16 ผลการตรวจสอบลักษณะการตอบสนองต่อแรงกดของฟิล์มชีวภาพบนตัวอุปกรณ์ตอบสนองแรงกดเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากเครื่อง Electrometer พบว่าการควบคุมความเร็วของเครื่องทดสอบแรงกดแตกต่างกันที่ 10%, 20% และ 30% บนตัวอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม CNF 0% (PVA pure) นั้น มีค่าแรงดันไฟฟ้า 22.5, 40 และ 60 V ตามลำดับ ค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ 0.5 μA สำหรับทุก ๆ ความเร็ว ดังนั้น ความเร็วการกดที่ 30% สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ดีที่สุด



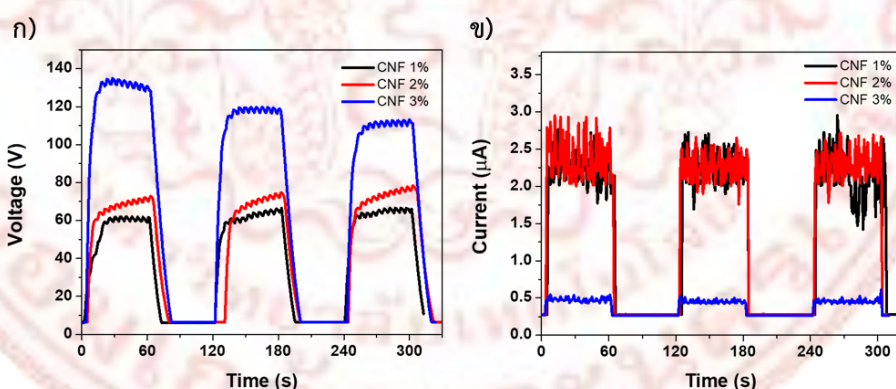
ภาพที่ 4-16 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างความเร็วการกดที่แตกต่างกันบนอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม PVA

จากภาพที่ 4-17 ผลการตรวจสอบลักษณะการตอบสนองต่อแรงกดของฟิล์มชีวภาพบนตัวอุปกรณ์ตอบสนองแรงกดเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากเครื่อง Electrometer พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม CNF 0% (PVA pure) มีค่าแรงดันไฟฟ้า 60 V ค่ากระแสไฟฟ้า 0.5 μA และอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม CNF 1% มีค่าแรงดันไฟฟ้า 65 V ค่ากระแสไฟฟ้า 2.8 μA



ภาพที่ 4-17 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม PVA กับ CNF1%

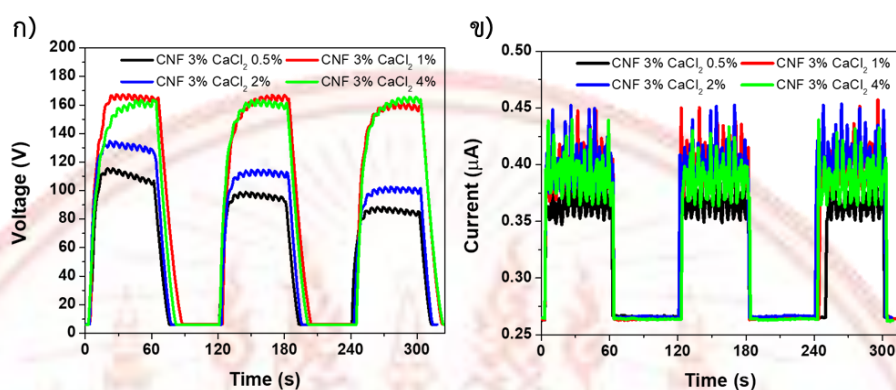
จากภาพที่ 4-18 ผลการตรวจสอบลักษณะการตอบสนองต่อแรงกดของฟิล์มชีวภาพบนตัวอุปกรณ์ตอบสนองแรงกดเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากเครื่อง Electrometer พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม CNF 1% มีค่าแรงดันไฟฟ้า 65 V ค่ากระแสไฟฟ้า 2.8 μA อุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม CNF 2% มีค่าแรงดันไฟฟ้า 75 V ค่ากระแสไฟฟ้า 2.8 μA และอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม CNF 3% มีค่าแรงดันไฟฟ้า 130 V ค่ากระแสไฟฟ้า 0.54 μA



ภาพที่ 4-18 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม CNF1%, CNF2% และ CNF3%

จากภาพที่ 4-19 ผลการตรวจสอบลักษณะการตอบสนองต่อแรงกดของฟิล์มชีวภาพบนตัวอุปกรณ์ตอบสนองแรงกดเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากเครื่อง Electrometer พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม CNF3%CaCl₂0.5% มีค่าแรงดันไฟฟ้า 110 V ค่ากระแสไฟฟ้า 0.4 μA CNF3%CaCl₂1% มีค่าแรงดันไฟฟ้า 165 V ค่ากระแสไฟฟ้า 0.44 μA CNF3%CaCl₂2% มีค่า

แรงดันไฟฟ้า 130 V ค่ากระแสไฟฟ้า 0.44 μA และ CNF3%CaCl₂4% มีค่าแรงดันไฟฟ้า 160 V ค่ากระแสไฟฟ้า 0.43 μA



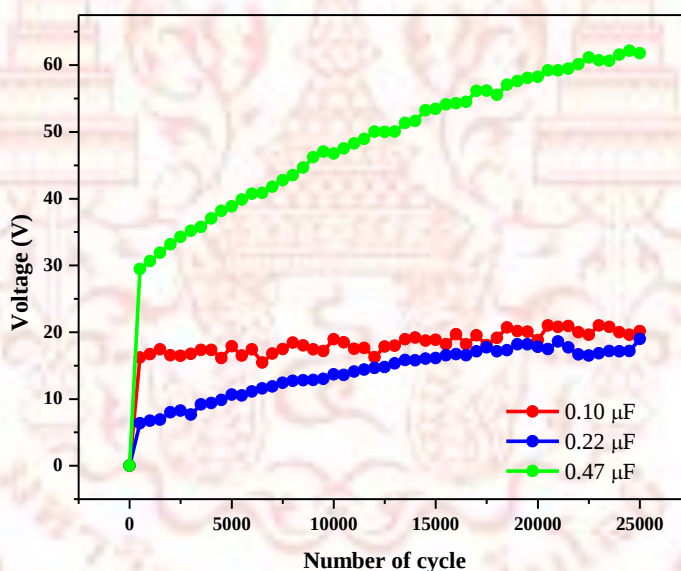
ภาพที่ 4-19 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม CNF3%CaCl₂0.5%, CNF3%CaCl₂1%, CNF3%CaCl₂2% และ CNF3%CaCl₂4%

ตารางที่ 4-5 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้ฟิล์ม CNF ที่ 0%, 1%, 2%, 3%, CNF3% ที่เติม CaCl₂ ลงไป 0.5%, 1%, 2%, และ 4%

ตัวอย่าง	ค่าแรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (μA)
CNF 0% (PVA pure)	60	0.5
CNF 1%	65	2.8
CNF 2%	75	2.8
CNF 3%	130	0.54
CNF 3% CaCl 0.5%	110	0.4
CNF 3% CaCl 1%	165	0.44
CNF 3% CaCl 2%	130	0.44
CNF 3% CaCl 4%	160	0.43

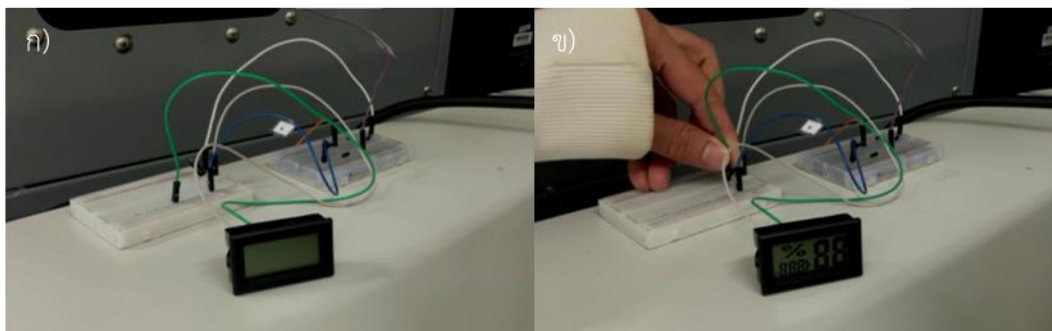
4.8 ผลการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า

จากภาพที่ 4-20 การทดสอบประจุไฟฟ้ากับค่าความจุที่แตกต่างกัน นำตัวเก็บประจุขนาด 0.1, 0.22 และ 0.47 μF มาทำการทดสอบประจุไฟฟ้า โดยนำอุปกรณ์มาทดสอบกับเครื่องทดสอบแรงกด ที่จำนวนรอบ 25,000 รอบ ทำการบันทึกในทุกช่วง 500 รอบ พบว่าความสามารถในการอัดประจุไฟฟ้าได้ที่ค่าความจุขนาด 0.1 μF รอบที่ 500 ได้ค่าแรงดันไฟฟ้า 16.22 V เมื่อถึงรอบที่ 25,000 ได้ค่าแรงดันไฟฟ้า 20.18 V พบว่าค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแบบผันผวน ที่ค่าความจุขนาด 0.22 μF รอบที่ 500 ได้ค่าแรงดันไฟฟ้า 6.36 V เมื่อถึงรอบที่ 25,000 ได้ค่าแรงดันไฟฟ้า 19 V พบว่าค่าเพิ่มขึ้นเกือบใกล้เคียงกับค่าเก็บประจุ 0.1 μF และที่ค่าความจุขนาด 0.47 μF รอบที่ 500 ได้ค่าแรงดันไฟฟ้า 29.46 V เมื่อถึงรอบที่ 25,000 ได้ค่าแรงดันไฟฟ้า 61.79 V พบว่าค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงอย่างรวดเร็วตามลำดับ



ภาพที่ 4-20 ผลการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ 0.10, 0.22 และ 0.47 μF

จากผลการทดสอบข้างต้นอุปกรณ์มีความสามารถในการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุเพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้แก่ เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น หลังจากการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ 0.47 μF แสดงดังภาพที่ 4-21

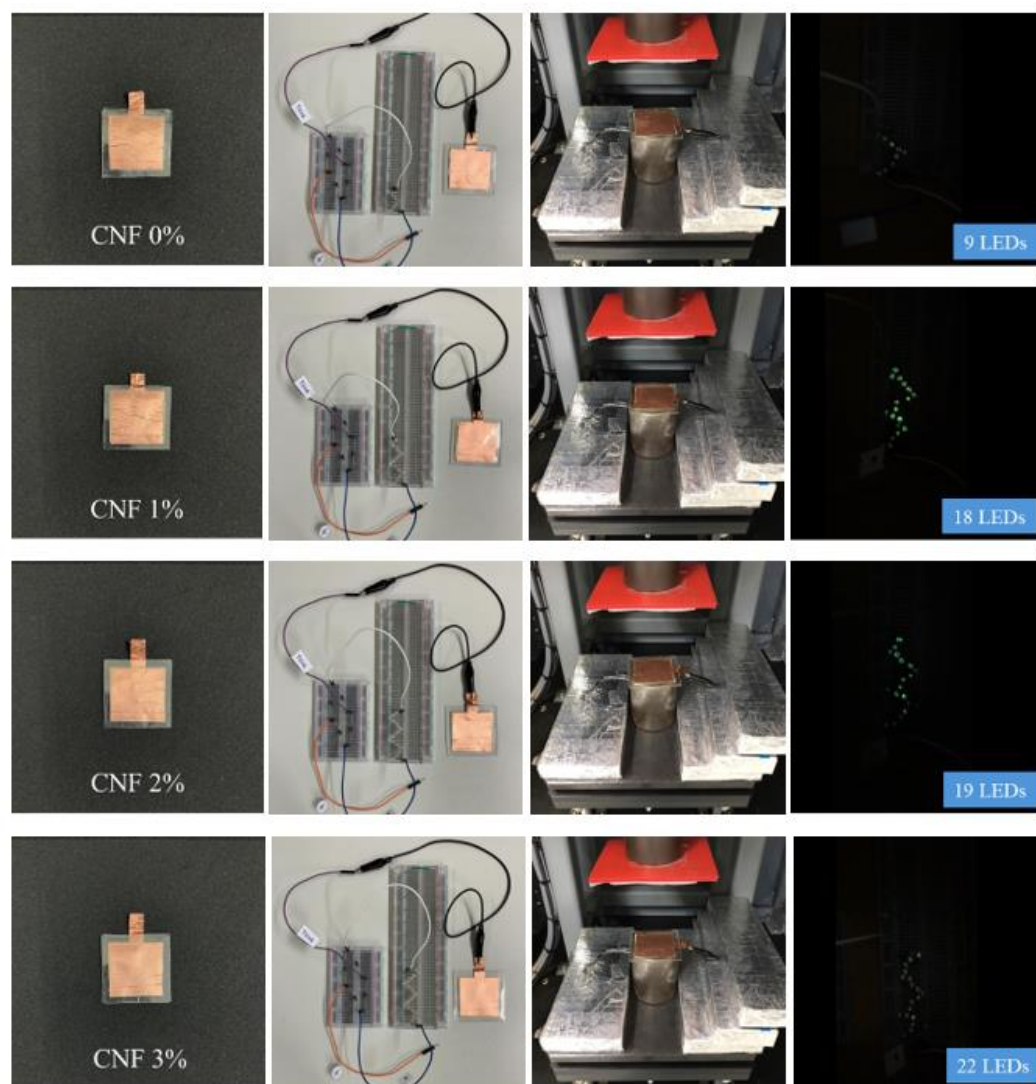


ภาพที่ 4-21 แหล่งจ่ายไฟให้กับเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น ก) ปิดวงจร ข) เปิดวงจร

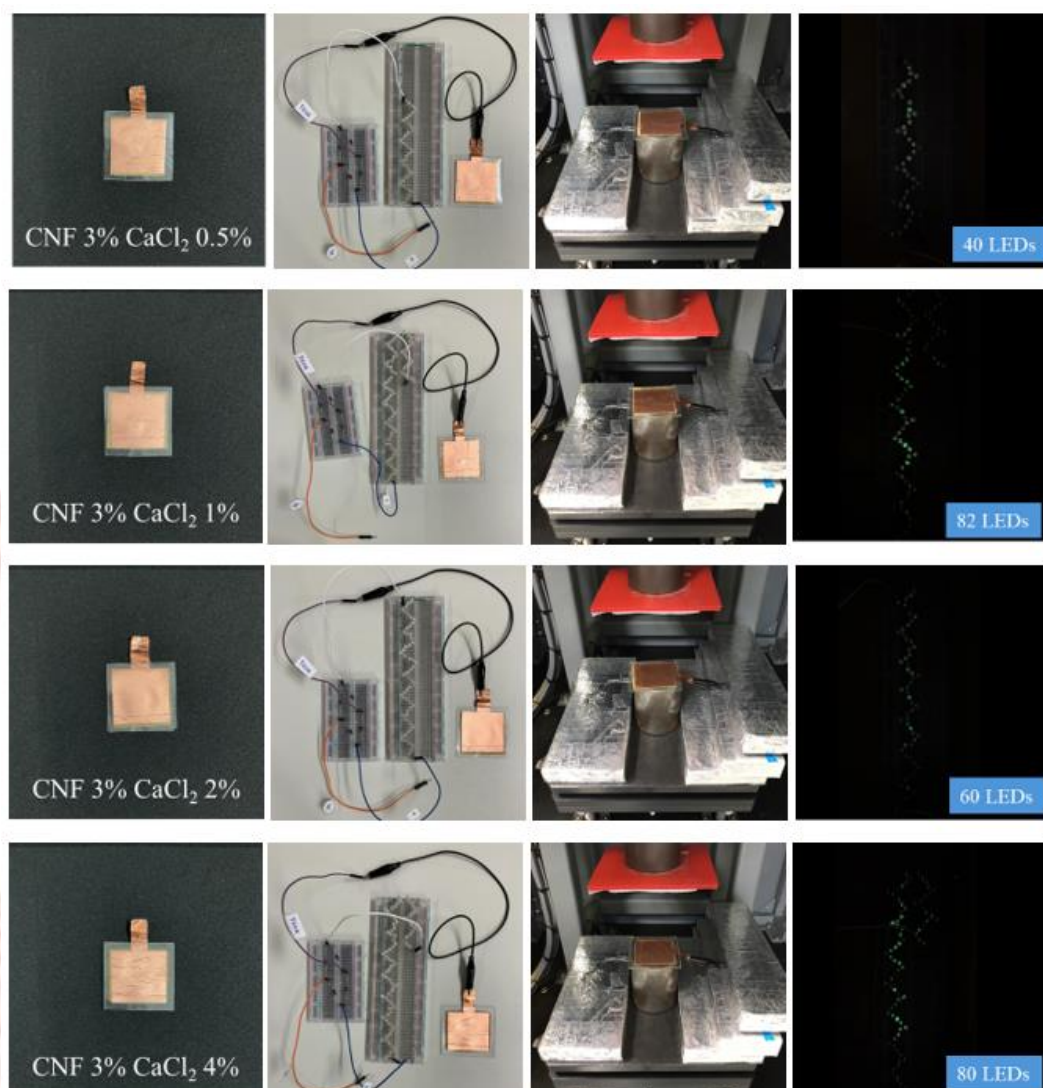
4.9 ผลการทดสอบเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับไดโอดเปล่งแสง (LED)

จากการศึกษาการทดสอบการตอบสนองต่อแรงกดของ พิล์มนาโนเซลลูโลสและฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่ได้รับการเติม CaCl_2 ลงไป ประกอบเป็นอุปกรณ์ทดสอบแรงกดโดยเครื่องทดสอบแรงกด (force tester machine) ปรับความสูงของแท่นรับแรงกดให้พอดีกับตัวอย่าง ใช้แรงกดกระทำ 5 กิโลกรัม และใช้ความเร็ว 30% ในโหมดอัตโนมัติ

จากภาพที่ 4-22 และภาพที่ 4-23 การทดสอบแรงกดด้วยเครื่องทดสอบแรงกดเพื่อศึกษาการตอบสนองต่อแรงกดด้วยวัสดุฟิล์มชีวภาพจาก CNF ที่ปริมาณ 0%, 1%, 2% และ 3% ศึกษาการเติมไอออน CaCl_2 ให้กับ CNF 3% ที่ปริมาณ 0.5%, 1%, 2% และ 4% ที่มีส่วนช่วยในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้า โดยต่อเข้ากับวงจร full wave bridge rectifier circuit โดยมีหลอด LEDs เป็นตัวบ่งบอกปริมาณทางไฟฟ้าด้วยจำนวนของหลอด LEDs พบว่า มีจำนวน 9, 18, 19, 22, 40, 82, 60 และ 80 หลอด ตามลำดับ ซึ่ง CNF3% CaCl_2 1% มีจำนวนหลอดสูงที่สุดถึง 82 หลอด เพราะให้ค่าแรงดันทางไฟฟ้าสูงสุดถึง 165V ในการทดสอบแรงดันไฟฟ้า



ภาพที่ 4-22 อุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสที่ 0%, 1%, 2% และ 3%



ภาพที่ 4-23 อุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์ม CNF3% ที่เติม CaCl_2 ลงไป 0.5%, 1%, 2% และ 4%

ตารางที่ 4-6 แสดงจำนวนหลอดไฟ LEDs ที่สามารถติดไฟได้ในแต่ละตัวอย่างที่นำมาทำอุปกรณ์

ตัวอย่าง	จำนวน LEDs โดยเฉลี่ย (หลอด)
CNF0% (PVA pure)	9
CNF 1%	18
CNF 2%	19
CNF 3%	22
CNF 3% CaCl_2 0.5%	40
CNF 3% CaCl_2 1%	82
CNF 3% CaCl_2 2%	60
CNF 3% CaCl_2 4%	80

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเพื่อพัฒนาฟิล์มชีวภาพที่มีนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าวที่สามารถตอบสนองต่อแรงกดได้ และพัฒนาอุปกรณ์มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเพื่อศึกษาวัสดุแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถหาได้ง่าย สะดวกและต้นทุนไม่สูง ผลการทดลองของอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าวด้วยฟิล์ม $\text{CNF3\%CaCl}_2\text{1\%}$ สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า ได้ผลลัพธ์ค่าแรงดันวงจรเปิดสูงสุดที่ 165 V และผลลัพธ์ค่ากระแสวงจรปิดสูงสุดที่ 0.44 μA สามารถเป็นแหล่งจ่ายไฟอิสระให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยไม่พึ่งพาแหล่งพลังงานแบตเตอรี่และเป็นแนวทางการเก็บเกี่ยวพลังงานจากทางกลมาใช้ให้เกิดประโยชน์และสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้งานเป็นการพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในอนาคตต่อไปได้ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

จากผลการทดลองประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าวใช้สุดในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากแผ่นฟิล์มนาโนเซลลูโลสมีค่าไดโอดเล็กทรอนิกส์ให้ประจุเป็นบวกและฟิล์ม PTFE มีค่าไดโอดเล็กทรอนิกส์ให้ประจุเป็นลบ จากการทดลอง การปรับปริมาณ CNF และการเติม CaCl_2 พบว่า ฟิล์ม $\text{CNF3\%CaCl}_2\text{1\%}$ มีประสิทธิภาพดีที่สุด จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นสัญญาณแรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ยังคงมีเสถียรสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เมื่ออยู่ในสภาวะการทำงานอย่างต่อเนื่อง ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของ CaCl_2 ส่งผลต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ซึ่งบรรลุตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

จากผลการทดลองการอัดประจุไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าวด้วยฟิล์ม $\text{CNF3\%CaCl}_2\text{1\%}$ ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นจนกว่าจะถึงความจุสูงสุดเมื่อประจุตัวเก็บประจุแล้ว จะสามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น สามารถทำงานได้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

จากผลการทดลองเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าอิสระไม่พึ่งพาแหล่งพลังงานแบตเตอรี่อุปกรณ์ทดสอบแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าวด้วยฟิล์ม $\text{CNF3\%CaCl}_2\text{1\%}$ สามารถจ่ายไฟให้กับไดโอดเปล่งแสงเชิงพาณิชย์สว่างได้สูงสุดถึง 82 ดวง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การเลือกใช้วัสดุในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจะต้องคำนึงถึงพื้นผิว ขนาดและความหนาของวัสดุเพื่อให้เกิดการเคลื่อนไหวแรงเชิงกลได้อย่างอิสระซึ่งจะส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า ของอุปกรณ์

การทดลองจากแรงกดและระดับของแรงกดที่มีค่าคงที่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ วัดผลความทนทานของตัวอุปกรณ์ เพื่อดูระยะเวลาอายุการใช้งาน เพื่อประสิทธิภาพในการรับปริมาณของแรงกดและระดับความแรงอย่างเหมาะสมและเพื่อลดการเกิดความคลาดเคลื่อนของแรงกระทำต่ออุปกรณ์ที่ส่งผลต่อการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวอุปกรณ์



บรรณานุกรม

- Ba, Y.-Y., Bao, J.-F., Deng, H.-T., Wang, Z.-Y., Li, X.-W., Gong, T., . . . Zhang, X.-S. (2020). Single-layer triboelectric nanogenerators based on ion-doped natural nanofibrils. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(38), 42859-42867.
- Ba, Y.-Y., Bao, J.-F., Liu, X.-T., Li, X.-W., Deng, H.-T., Wen, D.-L., & Zhang, X.-S. (2021). Electron-ion coupling mechanism to construct stable output performance nanogenerator. *Research*.
- Ccorahua, R., Huaroto, J., Luyo, C., Quintana, M., & Vela, E. A. (2019). Enhanced-performance bio-triboelectric nanogenerator based on starch polymer electrolyte obtained by a cleanroom-free processing method. *Nano Energy*, 59, 610-618.
- Coconut shell. (2022). Retrieved from <https://www.istockphoto.com/th>
- Electrical4U. (2023). Dielectric Materials. Retrieved from https://www.electrical4u.com/dielectric-material-as-an-electric-fieldmedium/#google_vignette
- Engineers, L. M. (2019). BASIC ELECTRONICS. Retrieved from <https://lastminuteengineers.com/the-full-wave-bridge-rectifier/>
- Hassan, S., Velayutham, T., Chen, Y., & Lee, H. (2021). TEMPO-oxidized nanocellulose films derived from coconut residues: Physicochemical, mechanical and electrical properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 180, 392-402.
- Huang, L.-Z., Ding, Y., Li, D.-D., & Ma, M.-G. (2025). Engineered cellulosic triboelectric materials for multi-modal sensing via β -phase programming. *International Journal of Biological Macromolecules*, 141198.
- Isogai, A., Saito, T., & Fukuzumi, H. (2011). TEMPO-oxidized cellulose nanofibers. *nanoscale*, 3(1), 71-85.
- Kittiamornkul, P. D. N. (2017). Rectifier Circuit. Retrieved from <https://navapadol.wordpress.com/>
- Louis, A. C. F., & Venkatachalam, S. (2020). Energy efficient process for valorization of

- corn cob as a source for nanocrystalline cellulose and hemicellulose production. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 260-269.
- Phanthong, P., Reubroycharoen, P., Hao, X., Xu, G., Abudula, A., & Guan, G. (2018). Nanocellulose: Extraction and application. *Carbon Resources Conversion*, 1(1), 32-43.
- Poole, L. (2018). Rectifier Circuit. Retrieved from https://www.electronicnotes.com/articles/analogue_circuits/diode-rectifiers/half-wave-rectifiercircuits.php
- Quattro Environmental Scanning Electron Microscope. (2006). Retrieved from <https://www.thermofisher.com/th/en/home/electron-microscopy/products/scanning-electron-microscopes/quattro-esem.html?SID=srch-srp-QUATTROESEM>
- Rachtanapun, P. (2009). Blended films of carboxymethyl cellulose from papaya peel (CMCp) and corn starch. *Agriculture and Natural Resources*, 43(5), 259-266.
- Rodrigues, C., Nunes, D., Clemente, D., Mathias, N., Correia, J., Rosa-Santos, P., . . . Ventura, J. (2020). Emerging triboelectric nanogenerators for ocean wave energy harvesting: state of the art and future perspectives. *Energy & Environmental Science*, 13(9), 2657-2683.
- Salman, S., Bakr, N., & Humad, H. (2018). Section C: physical sciences DSC and TGA properties of PVA films filled with Na₂S₂O₃· 5H₂O salt. *J. Chem. Biol. Phys. Sci*, 8, 1-11.
- Taib, M. N. A. M., Yehye, W. A., Julkapli, N. M., & Hamid, S. B. O. A. (2018). Influence of hydrophobicity of acetylated nanocellulose on the mechanical performance of nitrile butadiene rubber (NBR) composites. *Fibers and Polymers*, 19, 383-392.
- Texture Analyzer. (2018). Retrieved from <https://tsen.in.th/texture-analyzer/>
- UV/Visible Spectrophotometer (2021). Retrieved from https://www.gibthai.com/product/product_detail/38331
- Verma, K. (2020). Atomic Particle. Retrieved from <https://goglobalways.com/blog/whatis-electricity-atom-structure/>
- X-ray Diffraction & Scattering. (2024). Retrieved from <https://rigaku.com/products/x-ray-diffraction-and-scattering/xrd/smartlab>

- Xia, X., Fu, J., & Zi, Y. (2019). A universal standardized method for output capability assessment of nanogenerators. *Nature communications*, 10(1), 4428.
- Zhang, C., Lin, X., Zhang, N., Lu, Y., Wu, Z., Liu, G., & Nie, S. (2019). Chemically functionalized cellulose nanofibrils-based gear-like triboelectric nanogenerator for energy harvesting and sensing. *Nano Energy*, 66, 104126.
- Zhang, R., & Olin, H. (2020). Material choices for triboelectric nanogenerators: A critical review. *EcoMat*, 2(4), e12062.
- Zheng, X., Zhong, C., Liu, M., Guo, A., Li, Y., & Jia, S. (2014). *The cells of Gluconacetobacter xylinus response to Exposure*. Paper presented at the Proceedings of the 2012 International Conference on Applied Biotechnology (ICAB 2012) Volume 3.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ ปุณณนันท อรุณโรจน์
ชื่อวิทยานิพนธ์ การตอบสนองต่อแรงกดของฟิล์มนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว
สาขาวิชา เทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ
ประวัติ เกิดเมื่อวันที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2543 จังหวัดฉะเชิงเทรา
 ประวัติการศึกษา
 พ.ศ. 2559 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาต้นหลักสูตร วิทย-คณิต
 โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารามราชวิทยาลัย ชลบุรี
 พ.ศ. 2562 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาปลายหลักสูตร วิทย-คณิต
 โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารามราชวิทยาลัย ชลบุรี
 พ.ศ. 2566 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิชากระบวนการอุตสาหกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม
 คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง
 ตีพิมพ์วารสาร
 ปุณณนันท อรุณโรจน์ และ ภาณุพงศ์ ใจบาล (2567)
 “การเตรียมและลักษณะเฉพาะของนาโนเซลลูโลสจากกะลามะพร้าว”
 วารสารการประชุมวิชาการระดับชาติเชิงสร้างสรรค์ ครั้งที่ 9
 ช่องทางการติดต่อ
 เบอร์โทร 096-352-4994
 อีเมล solarpunna@gmail.com