

แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก
แบบยืดหยุ่นได้โดยใช้วัสดุเชิงประกอบซิลเวอร์เฟล็กส์
และยางซิลิโคนที่มีพื้นผิวเป็นแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ

FLEXIBLE TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR
BASED ON SILVER FLAKES – SILICONE RUBBER
PILLAR ARRAYS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไขเอกสารฉบับนี้
ปีการศึกษา 2565

**FLEXIBLE TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR
BASED ON SILVER FLAKES – SILICONE RUBBER
PILLAR ARRAYS**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, SCHOOL OF SCIENCE**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2022

หัวข้อโครงการพิเศษ

แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่น
ได้โดยใช้วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟล็กส์ที่มี
พื้นผิวเป็นแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ

FLEXIBLE TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR
BASED ON SILVER FLAKES – SILICONE RUBBER
PILLAR ARRAYS

ชื่อนักศึกษา

นางสาว พิตตินันท์ ลำพูน รหัสนักศึกษา 62050314
นางสาว สุชาวี นิตยโรจน์ รหัสนักศึกษา 62050348

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี



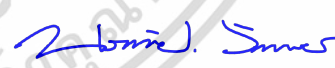
ปีการศึกษา

2565

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศ.ดร.นราธิป วิทยากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี
อุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช ประธานกรรมการ	
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญารากร กรรมการ	
ศ.ดร.นราธิป วิทยากร กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น ได้โดยใช้วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟล็กส์ที่มี พื้นผิวเป็นแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ
ชื่อนักศึกษา	นางสาว พิตตินันท์ ลำพูน รหัสนักศึกษา 62050314 นางสาว สุธาวี นิตยโรจน์ รหัสนักศึกษา 62050348
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ.ดร.นราธิป วิทยากร

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้มีการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุสำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ (TENG) โดยการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม การเติมวัสดุนาโนที่นำไฟฟ้า การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสทางกายภาพของวัสดุ และการกำหนดระยะห่างที่เหมาะสม เริ่มจากการสังเคราะห์ซิลเวอร์เฟล็กส์ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) จากนั้นนำไปตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าซิลเวอร์เฟล็กส์ที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์สูง จากนั้นขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟล็กส์โดยปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุให้มีพื้นผิวแบบแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ (Pillar Arrays) ด้วยกระบวนการหล่อแบบไล่ขี้ผึ้ง (Lost Wax Casting) โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) พบว่าซิลเวอร์เฟล็กส์ที่ทำหน้าที่เป็นเฟสกระจายตัวสามารถกระจายตัวบนซิลิโคนที่ทำหน้าที่เป็นเฟสต่อเนื่อง ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเฟสต่อเนื่องและเฟสกระจายตัว จากนั้นนำไปตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ประเภทการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical Contact-Separation Mode) พบว่าวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแบบแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ ซึ่งสัมผัสเป็นคู่วัสดุร่วมกับเทปอลูมิเนียม ที่ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) เท่ากับ 1 มิลลิเมตร ให้ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดที่ความต้านทาน 10 เมกะโอห์ม เท่ากับ 0.61 ไมโครวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ : ตัวกำเนิดพลังงานขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ ซิลเวอร์เฟล็กส์ แถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ

Title	FLEXIBLE TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR BASED ON SILVER FLAKES – SILICONE RUBBER PILLAR ARRAYS
Students	Miss Pittinan Lampoo Student ID 62050314 Miss Suthawee Nitroj Student ID 62050348
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
School	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2022
Advisor	Prof. Dr. Naratip Vittayakorn

Abstract

This study aimed to improve the efficiency of small-scale Triboelectric Nanogenerators (TENGs) materials by selecting appropriate material pairs, incorporating electrically conductive nanomaterials, increasing the physical contact surface area, and selecting appropriate separation distance. The process involved synthesizing silver flakes through chemical precipitation, which were then characterized using X-ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM). The synthesized silver flakes were found to be single-phase with a flat, plate-like shape. Next, the synthesized silver flakes were combined with silicone rubber to create composite materials with varying silver flake content. The composite materials were characterized using XRD and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) to analyze their crystalline structure and molecular bonds. The results showed that silver flakes can be dispersed on silicone without chemical reactions. The electrical properties of the small-scale TENG devices operating in Vertical Contact-Separation Mode were then investigated using composite materials with a 3% weight ratio of silver flakes with ordered pillar-like structures paired with aluminum tape. Several parameters were optimized to improve output performance, and the maximum output power of the optimized devices with a resistance of 10 megaohms was measured to be 0.61 micro-watts. The optimized condition for the device was achieved by setting the distance between the materials (x) at 10 millimeters and the contact distance (y) at 1 millimeter.

Keywords : Triboelectric nanogenerator, Silver Flakes, Pillar arrays

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ประสบความสำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ศ.ดร. นราธิป วิทยากร ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำปรึกษา สนับสนุนโครงการพิเศษ งบประมาณในการทดลอง ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ในทุกวิชาที่สามารถประยุกต์ใช้กับโครงการนี้ได้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทางเคมี เจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาเคมี รวมถึงเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้การช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในเรื่องอุปกรณ์สารเคมี และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณ พี่อ้น พี่ต้า พี่น้ำ พี่เนย พี่นั้ง พี่ตรีม ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และให้การสนับสนุนการทำโครงการให้สำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว และเพื่อนๆ ที่สนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำโครงการพิเศษจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

พิตตินันท์ ลำพู
สุธาวิ นิตย์โรจน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect).....	4
2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก.....	4
2.2.1 รูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical Contact-Separation Mode).....	4
2.2.2 รูปแบบการสัมผัสแบบเลื่อน (Lateral-Sliding Mode).....	5
2.2.3 รูปแบบการสัมผัสแบบอิเล็กโทรดเดี่ยว (Single Electrode Mode).....	6
2.2.4 รูปแบบการสัมผัสแบบอิสระ (Freestanding Mode).....	7
2.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ TENG.....	8
2.3.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect) โดยการเลือกวัสดุที่เหมาะสม (Choice of Materials).....	10
2.3.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect) โดยการขึ้นรูปวัสดุแบบกอนด้วยแม่พิมพ์ (Modulating Bulk Friction Materials).....	12
2.3.2.1 การใช้เจือวัสดุนาโนลงในวัสดุแบบกอน (Doping Nanomaterials into Bulk Friction Materials).....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในห้องเรียนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในชื่อและเครื่องหมายและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2.2 การเพิ่มชั้นย่อยลงในวัสดุแบบก้อน (Adding Sublayers into Bulk Friction Materials).....	13
2.3.3 การเพิ่มประสิทธิภาพของปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก (Trieboelectric effect) โดยวิศวกรรมพื้นผิว (Surface Engineering)	13
2.3.3.1 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวสัมผัสทางกายภาพ (Physical surface modification)	13
2.3.3.2 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวสัมผัสทางเคมี (Chemical surface modification)	14
2.4 ซิลเวอร์ฟลักส์ (Silver flakes).....	15
2.5 ยางซิลิโคน (Silicone Rubber).....	15
2.6 วัสดุเชิงประกอบ (Composite material).....	16
2.6.1 องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ	16
2.6.1.1 เมทริกซ์ (Matrix).....	16
2.6.1.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement).....	16
2.6.2 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ	17
2.6.2.1 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC) ...	17
2.6.2.2 วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite, MMC)	17
2.6.2.3 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC).....	17
2.7 แถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ (Pillar arrays).....	18
2.8 แหล่งกำเนิดพลังงานขนาดเล็กที่ขับเคลื่อนด้วยตัวเอง (Self-charging Nanogenerator)	18
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	24
3.1 สารเคมี.....	24
3.2 วัสดุและอุปกรณ์	24
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนี้ผู้จัดทำเห็นได้แต่แบบสงวนสิทธิ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 การเตรียมแม่พิมพ์ซีดีที่มีรูพรุนจากแม่แบบซิลิโคนที่มีรูปแบบเป็นวงแหวนขยายออก	25
3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมแม่พิมพ์ซีดีที่มีรูพรุนจากแม่แบบซิลิโคนที่มีรูปแบบเป็นวงแหวนขยายออก	25
3.5 การสังเคราะห์ซิลเวอร์เฟลกส์	26
3.5.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซิลเวอร์เฟลกส์	26
3.6 การเตรียมชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ	27
3.6.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ	27
3.7 การเตรียมชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ	27
3.7.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ	27
3.8 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟลกส์ที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ	28
3.8.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟลกส์ที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ	28
3.9 เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์	30
3.9.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)	30
3.9.2 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD)	31
3.9.3 การพิสูจน์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR)	32
3.10 การเตรียมและการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก ไทโรโบอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่น (Flexible Triboelectric nanogenerator)	33
3.10.1 การเตรียมอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก ไทโรโบอิเล็กทริก	33
3.10.2 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าขาออก	34
3.10.3 การทดสอบกระแสไฟฟ้าขาออก	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.10.4 การทดสอบกำลังไฟฟ้าขาออก	36
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	37
4.1 การสังเคราะห์ซิลเวอร์เฟลกส์ (Silver Flakes) ด้วยการตกตะกอนทางเคมี.....	37
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของซิลเวอร์เฟลกส์	37
4.1.2 ผลการศึกษาความเป็นผลึกของซิลเวอร์เฟลกส์ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique; XRD).....	37
4.1.3 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิลเวอร์เฟลกส์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM).....	38
4.2 การศึกษาวัสดุเชิงประกอบแบบยึดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์	39
4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบแบบยึดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์.....	40
4.2.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของวัสดุเชิงประกอบจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR)	42
4.2.3 ผลการศึกษาความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD).....	44
4.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ประเภทการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical contact-separation mode; CS).....	45
4.3.1 ความเสถียรของอุปกรณ์ (Device Stability).....	46
4.3.2 ผลการศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage).....	47
4.3.3 ผลการศึกษาระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current).....	59
4.3.4 ผลการศึกษากำลังไฟฟ้าขาออก (Output Power).....	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 สรุปผลการวิจัย	62
5.1.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของวัสดุเชิงประกอบแบบยึดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ ได้
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
เอกสารอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก.....	69
ภาคผนวก ข.....	77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงตารางมาตรฐานที่ใช้ในการบ่งบอกความหนาแน่นประจุของวัสดุไพโรอิเล็กทริก ⁶	11
2.2 แสดงสมบัติของซิลเวอร์เฟล็กส์ (ทางทฤษฎี) ดัดแปลงจาก ⁸	15
3.1 อัตราส่วนของยางซิลิโคน ซิลเวอร์เฟล็กส์ และตัวเร่งแข็งยางซิลิโคน	28
4.1 ความสามารถในการยืดหยุ่นของยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ ยางซิลิโคน บริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ และวัสดุเชิงประกอบยาง ซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งทดสอบ ให้แรงเชิงกลโดยการงอ.....	40
4.3 แสดงช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะที่พบในวัสดุเชิงประกอบ.....	43
ก.1 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบเรียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ.....	70
ก.2 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ	71
ก.3 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ	72
ก.4 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ	73
ก.5 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ	74
ก.6 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ	75
ก.7 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ	76
ข.1 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบเรียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ.....	77
ข.2 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อย ละ 0.5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ.....	77
ข.3 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อย ละ 0.75 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ	78
ข.4 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อย ละ 1 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ.....	78
ข.5 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อย ละ 3 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ.....	78

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ข.6 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ.....	79
ข.7 แสดงผลแรงดันไฟฟ้าขาออกของระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่เหมาะสม ที่ระยะสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) แตกต่างกันตั้งแต่ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงรูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉากของวัสดุไทโรโบอิเล็ทริก ดัดแปลงจาก ⁴	5
2.2 แสดงรูปแบบการสัมผัสแบบเลื่อนของวัสดุไทโรโบอิเล็ทริก ดัดแปลงจาก ⁴	5
2.3 แสดงรูปแบบการสัมผัสแบบอเล็กโทรดเดี่ยวของวัสดุไทโรโบอิเล็ทริก ดัดแปลงจาก ⁴	6
2.4 แสดงรูปแบบการสัมผัสแบบอิสระของวัสดุไทโรโบอิเล็ทริก ดัดแปลงจาก ⁴	7
2.5 แบบจำลองทฤษฎีของ TENG	8
2.6 แสดงวัสดุไทโรโบอิเล็ทริกในอนุกรมตามแนวโน้มที่จะสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายและได้รับอิเล็กตรอนได้ง่าย ³	10
2.7 แสดงวิธีการทดลองและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของการเจือวัสดุไดอิเล็กทริกต่างๆ ลงในวัสดุก้อนโพลีดีเมทิลซิลอกเซน (PDMS) (a) วิธีการทดลอง (b) ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ³	12
2.8 แสดงแผนภาพและความหนาแน่นของประจุไทโรโบอิเล็ทริกของการเพิ่มขึ้นย่อยโพลีสไตรีน (PS) ที่ด้านล่างของชั้นโพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ³	13
2.9 แสดงแผนภาพการออกแบบ ลักษณะโครงสร้าง และประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง โพลีดีเมทิลซิลอกเซน (PDMS) ที่มีรูปแบบรูปทรงแบบเส้น แบบลูกบาศก์ และแบบพีรามิด (a) การออกแบบ (b) ลักษณะโครงสร้างและประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ³	14
2.10 แสดงภาพการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวสัมผัสทางเคมี โดยเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันลงในวัสดุ ³	14
2.11 โครงสร้างโมเลกุลของยางซิลิโคน ดัดแปลงมาจาก ¹⁰	16
2.12 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ ¹²	17
2.13 แสดงลักษณะพื้นผิวไมโครแพทเทิร์นของพอลิเมอร์ที่มีพื้นผิวเป็นแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ (Pillar arrays) ¹⁶	18
2.14 แสดงแผนภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานกลที่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าและเป็นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ขับเคลื่อนด้วยตัวเอง ¹⁸	18
2.15 ก) โครงสร้างของอุปกรณ์ ข) มุมมองด้านข้างของโครงสร้างนาโนฟิลลาร์ ค) แรงดันไฟฟ้าของชิ้นงานที่มีพื้นผิวต่างกัน ง) แรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ติดอยู่บนไหล่ และ จ) บนขา ก่อนและหลังการพลิกตัว ²	19
2.16 ก) ภาพ SEM ของฟิล์มบาง PDMS ที่มีลวดลายแบบเส้นตรง ข) แบบลูกบาศก์ และ ค) แบบพีรามิด ง) ลักษณะของฟิล์มบาง PDMS ที่ประดิษฐ์ขึ้น โดยรูปบนขวาเป็นภาพถ่ายของฟิล์มบาง PDMS ที่ประดิษฐ์ขึ้นบนแม่พิมพ์ซิลิโคน ซึ่งมีขอบสัญญาณรบกวนอยู่บนผิวฟิล์มบ่งบอกว่ามีลวดลายอยู่บนพื้นผิวมาก และรูปซ้ายล่างแสดงถึงความยืดหยุ่นและโปร่งใสของฟิล์ม จ) แรงดันไฟฟ้าออก และ ฉ) กระแสไฟฟ้าออกของฟิล์มบาง PDMS ที่มีพื้นผิวต่างกัน ¹⁹	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 ก) ภาพถ่ายดิจิทัลของชิ้นงาน ข) แรงดันไฟฟ้าขาออก และ ค) กระแสไฟฟ้าขาออกของชิ้นงาน ²⁰	21
2.18 ก) โครงสร้างของพื้นรองเท้าที่ใช้ TENG ประกอบด้วย (จากบนลงล่าง) แผ่นเทฟลอน, โฟมพียู, ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ NR-Ag และแผ่นนำไฟฟ้าคอปเปอร์ ข) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากพื้นรองเท้า TENG ระหว่างการเดิน วิ่ง และกระโดด ²¹	22
2.19 a) แสดงภาพ SEM ของซิลเวอร์เฟลกส์ b) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD-pattern) ของผงซิลเวอร์ ²²	23
3.1 วิธีการเตรียมแม่พิมพ์ซีเมนต์ที่มีรูพรุนและมีรูปแบบเป็นวงแหวนขยายออก.....	26
3.2 วิธีการสังเคราะห์ซิลเวอร์เฟลกส์	26
3.3 การเตรียมชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ	27
3.4 การเตรียมชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ.....	27
3.5 การเตรียมชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟลกส์ที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ	29
3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 250, USA ²³	30
3.7 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smart lab ²³ ...	31
3.8 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น IRTracer-100 ²³	32
3.9 (ก) แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิลิกทริก (ข) แสดงชุดทดสอบอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิลิกทริก	33
3.10 แสดงโครงสร้างการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าส่งออกจากเครื่องออสซิลโลสโคป (ก) กำหนดที่ระยะ y เท่ากับ 0 มิลลิเมตร (ข) กำหนดที่ระยะ y เท่ากับ 1 มิลลิเมตร (ค) กำหนดที่ระยะ y เท่ากับ 2 มิลลิเมตร	34
3.11 แสดงโครงสร้างการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับการตรวจสอบกระแสไฟฟ้าส่งออกจากเครื่องออสซิลโลสโคปโดยต่อร่วมกับออปแอมป์.....	35
3.12 แสดงโครงสร้างการเชื่อมต่อเพื่อตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าส่งออกจากเครื่องออสซิลโลสโคปโดยต่อร่วมกับตัวต้านทาน	36
4.1 แสดงผงตัวอย่างของซิลเวอร์เฟลกส์ที่สังเคราะห์ได้.....	37
4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของซิลเวอร์เฟลกส์ ที่สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของข้อมูลกราฟมาตรฐาน PDF #040783	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แสดงภาพถ่าย SEM ของซิลเวอร์เฟล็กส์	39
4.4 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนของซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักตามลำดับ และเปรียบเทียบกับชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ และชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ขึ้นรูปด้วยปริมาณสุทธิเดียวกัน ในช่วง $700-4000\text{ cm}^{-1}$	43
4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักตามลำดับ เปรียบเทียบกับชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบและข้อมูลกราฟมาตรฐาน PDF #040783 ของซิลเวอร์เฟล็กส์	45
4.6 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่นประเภทการสัมผัสแบบตั้งฉาก	46
4.7 แสดงความเสถียรของอุปกรณ์จากการทดสอบ 9 ครั้งและทดสอบซ้ำทั้งหมด 3 รอบของชิ้นงานต่างๆ	47
4.8 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบเรียบที่ระยะ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตรตามลำดับ	48
4.9 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ระยะ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร	48
4.10 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ระยะ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร	49
4.11 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ระยะ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร	50
4.12 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ระยะ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร	50
4.13 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ระยะ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร	51
4.14 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ระยะ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุดของละชั้นงาน ที่การสัมผัสระหว่างวัสดุสัมผัสกันที่ผิวพอดี ($y = 0$ มิลลิเมตร).....	52
4.16 (ก) ชั้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบแผ่นเรียบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.3 เซนติเมตร (ข) คู่วัสดุระหว่างเทปอลูมิเนียมกับชั้นงานยางซิลิโคนที่มีพื้นผิวแบบเรียบสัมผัสกัน (ค) ชั้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.3 เซนติเมตร (ง) คู่วัสดุระหว่างเทปอลูมิเนียมกับชั้นงานยางซิลิโคนที่มีพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบสัมผัสกัน	53
4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการนำไฟฟ้า (Conductance) กับ ความเข้มข้นของสารตัวเติมนำไฟฟ้า (Conductive filler concentration) ²⁴	54
4.18 แสดงแบบจำลองการกระจายตัวของซิลเวอร์เฟลกส์ภายในเนื้อยางซิลิโคน (ก) Insulation region (ข) Percolation region (ค) Conduction region ²⁷	54
4.19 แสดงระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุที่การกดคลิกเท่ากับ (ก) 1 มิลลิเมตร (ค) 2 มิลลิเมตร และภาพจำลองลักษณะการเสีรูปของชั้นงานยางซิลิโคนที่ (ข) 1 มิลลิเมตร (ง) 2 มิลลิเมตร.....	55
4.20 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดของยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ ที่ x คงที่ และ y เท่ากับ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ.....	55
4.21 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.5 ที่ x คงที่ และ y เท่ากับ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ	56
4.22 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.75 ที่ x คงที่ และ y เท่ากับ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ.....	56
4.23 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 1 ที่ x คงที่ และ y เท่ากับ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ.....	57
4.24 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 3 ที่ x คงที่ และ y เท่ากับ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ.....	57
4.25 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 5 ที่ x คงที่ และ y เท่ากับ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ.....	58
4.26 แสดงกราฟสรุปผลแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ระยะ (ก) y เท่ากับ 1 มิลลิเมตร (ข) y เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และแสดงแบบจำลองการกระจายตัวซิลเวอร์เฟลกส์ในเนื้อยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ (ค) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ²⁷ (ง) ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ²⁸	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 แสดงกราฟกระแสไฟฟ้าขาออกของ (ก) วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ (ข) วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ เปรียบเทียบกับยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ	60
4.28 แสดงกราฟกำลังไฟฟ้าขาออกของ (ก) ยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ (ข) วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ (ค) ยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ และ (ง) วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 3 โดยมวลแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ	61
ก.1 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบเรียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ที่ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4 มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร (ง) 8 มิลลิเมตร (จ) 10 มิลลิเมตร และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร.....	69
ก.2 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ที่ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4 มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร (ง) 8 มิลลิเมตร (จ) 10 มิลลิเมตร และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร	70
ก.3 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ที่ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4 มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร (ง) 8 มิลลิเมตร (จ) 10 มิลลิเมตร และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร.....	71
ก.4 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ที่ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4 มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร (ง) 8 มิลลิเมตร (จ) 10 มิลลิเมตร และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร.....	72
ก.5 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ที่ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4 มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร (ง) 8 มิลลิเมตร (จ) 10 มิลลิเมตร และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สามารถนำสำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยและพัฒนาต่อไป ขอสงวนสิทธิ์ในภาพไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.6 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ที่ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4 มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร (ง) 8 มิลลิเมตร (จ) 10 มิลลิเมตร และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร	74
ก.7 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ที่ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4 มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร (ง) 8 มิลลิเมตร (จ) 10 มิลลิเมตร และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีที่สวมใส่ได้ (Wearable Technology) คือ อุปกรณ์ที่สวมใส่แล้วช่วยเก็บข้อมูล ติดตามความเคลื่อนไหวได้ด้วยเซ็นเซอร์ ตลอดจนเชื่อมต่อกับระบบนิเวศอุปกรณ์อื่นๆ ได้ เช่น เสื้ออัจฉริยะ นาฬิกาอัจฉริยะ เป็นต้น ซึ่งได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีแนวโน้มการใช้งานที่ดีในการตรวจสุขภาพ ปัญญาประดิษฐ์ ส่วนต่อประสานระหว่างมนุษย์กับอุปกรณ์ วิทยาการหุ่นยนต์ เป็นต้น¹ และจากข้อมูลของบริษัท Grand view research พบว่ามีการเติบโตของเทคโนโลยีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้ในอเมริกาเหนือ ในช่วงปี 2023 – 2030 ซึ่งได้คาดการณ์ว่าตลาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้จะเติบโต 12.9% ซึ่งปัจจุบันมีมูลค่าอยู่ที่ 15.4 พันล้านดอลลาร์ แต่ปัญหาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้ ต้องอาศัยแหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่หรือการใช้ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องโดยปลั๊กไฟฟ้า ดังนั้น จึงต้องการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้ที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของร่างกายมนุษย์เพื่อเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า และสามารถขับเคลื่อนตัวเองได้โดยไม่ต้องมีแหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งพลังงานกลเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทน ได้แก่ พลังงานลม พลังงานชีวมวล เป็นต้น แต่เป็นพลังงานที่ไม่สามารถชาร์จอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้ ดังนั้นจึงต้องหาแหล่งพลังงานที่ใกล้ร่างกายเพื่อที่จะชาร์จอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้ ซึ่งพลังงานกลเป็นพลังงานเดียวที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้ และอุปกรณ์ที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของร่างกายมนุษย์แล้วเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ คือ นาโนเจนเนอเรเตอร์ หรือ ตัวกำเนิดพลังงานขนาดเล็ก ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า² เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ต้นทุนต่ำ โครงสร้างหลากหลาย และเลือกใช้วัสดุได้หลากหลาย³ จะสามารถแก้ไขแนวโน้มของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้ จึงเลือกที่จะพัฒนานาโนเจนเนอเรเตอร์ที่มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น สามารถชาร์จได้ด้วยตัวเอง มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และเมื่อเร็ว ๆ นี้ มีการพัฒนานาโนเจนเนอเรเตอร์แบบใหม่ที่ใช้ปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริกในการเก็บเกี่ยวพลังงานกลแล้วแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า² โดยอาศัย 2 ปรากฏการณ์ คือ ปรากฏการณ์การเกิดประจุไฟฟ้าสถิตจากการสัมผัสของวัสดุ (Triboelectricity effect) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อวัสดุสองชนิดสัมผัสกันด้วยแรงเชิงกลและแยกออกจากกันระหว่างส่วนประกอบสองชิ้น ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าที่ผิววัสดุ (Electrostatic induction) และสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งขับเคลื่อนกระแสอิเล็กตรอนในวงจรภายนอก โดยวัสดุต่างๆ ที่มีขั้วไทรโบอิเล็กทริกต่างกันจะถูกนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าและปรับปรุง

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การเลือกจับคู่วัสดุเสียดทานที่เหมาะสมตามความแตกต่างของข้อและการตัดแปงพื้นผิวด้วยเทคนิคทางกายภาพหรือเคมีเพื่อให้วัสดุมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของอุปกรณ์⁴ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุยางซิลิโคน (Silicone rubber) ซึ่งเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง แข็งแรง เมื่อนำมาทำเป็นวัสดุเชิงประกอบจะช่วยให้เสริมแรงส่งผลให้มีสมบัติทางกลดีขึ้น โดยงานวิจัยนี้สร้างวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนและใช้ซิลเวอร์เฟล็กส์ (Silver flakes) เป็นเฟสกระจายเพื่อปรับปรุงสภาพการเหนียวนำไฟฟ้าของวัสดุคู่เสียดทาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตพลังงานขนาดเล็ก ซึ่งงานวิจัยมุ่งเน้นที่จะนำวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟล็กส์ที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก มาทำเป็นอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่นที่มีความสามารถในการยืดหยุ่นตัวสูง ซึ่งมีการออกแบบโครงสร้างเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุโดยวิธีการหล่อแบบไล่ขี้ผึ้ง (Lost Wax Casting) ให้ได้วัสดุที่มีพื้นผิวเป็นโครงสร้างแบบเสาเสาที่มีความเป็นระเบียบ (Pillar arrays) แล้วนำไปทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุสำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก โดยการเลือกใช้คู่วัสดุที่เหมาะสม การเติมวัสดุนาโนที่นำไฟฟ้า (Doping nanomaterials into bulk materials) การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสทางกายภาพของวัสดุ (Physical surface modification) และการกำหนดระยะห่างระหว่างคู่วัสดุ (x) ที่เหมาะสม
2. เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์ซิลเวอร์เฟล็กส์
3. เพื่อศึกษาการสร้างพื้นผิววัสดุให้มีลักษณะเป็นเสาเสาที่มีความเป็นระเบียบ (Pillar Arrays)
4. เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟล็กส์ที่อัตราส่วนต่างๆ
5. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟล็กส์ที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก
6. เพื่อศึกษาและออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกประเภทการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical Contact-Separation Mode)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมแม่พิมพ์ที่มีรูพรุนจากแม่แบบซิลิโคนที่มีรูปแบบเป็นวงแหวนขยายออกด้วยกระบวนการหล่อแบบไล่ขี้ผึ้ง (Lost Wax casting)
2. ศึกษาการสังเคราะห์ซิลเวอร์เฟล็กส์ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical

เอกสารนี้เป็นเอกสารประกอบการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ศึกษาการทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของซิลเวอร์เฟล็กส์ ดังนี้ เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.1 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)
- 3.2 ศึกษาความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD)
4. ศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟลกส์ด้วยกระบวนการหล่อแบบไล่ขี้ผึ้ง (Lost Wax Casting)
5. ศึกษาปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของซิลเวอร์เฟลกส์ในการผสมลงในยางซิลิโคนที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก
6. ศึกษาการทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟลกส์ ดังนี้
 - 6.1 ศึกษาความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD)
 - 6.2 ศึกษาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR)
7. ศึกษาการออกแบบอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ประเภทการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical Contact-Separation Mode)
8. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์โดยการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าส่งออก (Output Voltage) กระแสไฟฟ้าส่งออก (Output Current) และกำลังไฟฟ้าขาออก (Output Power)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงการเตรียมแม่พิมพ์ที่มีรูปทรงจากแม่แบบซิลิโคนที่มีรูปแบบเป็นวงแหวนขยายออก
2. ทราบถึงขั้นตอนการสังเคราะห์ซิลเวอร์เฟลกส์
3. ทราบถึงกระบวนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟลกส์
4. ทราบถึงวิธีการขึ้นรูปพื้นผิววัสดุให้มีลักษณะเป็นแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ
5. ทราบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ประเภทการสัมผัสแบบตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในการอ้างอิงทำโครงการพิเศษซึ่งประกอบด้วย ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน รูปแบบการทำงาน การประยุกต์ใช้งาน วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก ด้วยการเลือกวัสดุที่เหมาะสม (Choice of Materials) การขึ้นรูปวัสดุแบบก้อนด้วยแม่พิมพ์ (Modulating Bulk Friction Materials) เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของประจุ (Charge density) และการปรับปรุงพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface Engineering) ของวัสดุเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface Area) ของวัสดุ

2.1 ปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect)

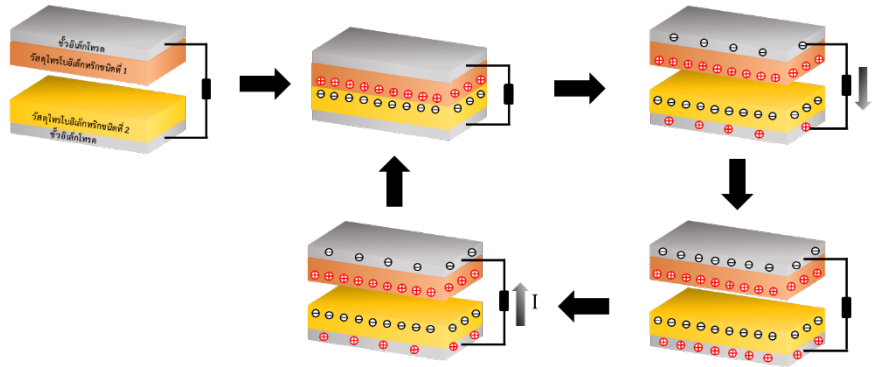
ปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect) เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างวัสดุสองชนิดที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนต่างกัน ส่งผลให้เกิดประจุไฟฟ้าสถิตจากการสัมผัสของวัสดุ (Triboelectrification) เมื่อวัสดุทั้งสองแยกออกจากกัน จะเกิดการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าที่ผิววัสดุ (Electrostatic induction) แรงกระตุ้นเชิงกลทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างวัสดุขึ้น ซึ่งขับเคลื่อนกระแสอิเล็กตรอนในวงจรรายนอก โดยทั่วไปวัสดุทุกชนิดสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ได้

2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก

2.2.1 รูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical Contact-Separation Mode)

รูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉากเป็นรูปแบบพื้นฐานที่เรียบง่ายที่สุด และสึกกร่อนน้อย โดยนำคู่วัสดุโทรโบอิเล็กทริกสองชนิดที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนต่างกันให้หันหน้าเข้าหากัน และติดขั้วอิเล็กโทรดให้กับวัสดุโทรโบอิเล็กทริกแต่ละตัว เมื่อวัสดุทั้งสองสัมผัสกันจะเกิดประจุตรงข้ามบนผิวของวัสดุทั้งสอง เมื่อแยกออกจากกัน พื้นผิวสัมผัสของวัสดุจะรักษาประจุไว้และเกิดความต่างศักย์ระหว่างวัสดุทั้งสองและอิเล็กโทรด ดังนั้น ประจุไฟฟ้าจึงถูกถ่ายโอนจากอิเล็กโทรดหนึ่งไปยังอีกอิเล็กโทรดด้วยสนามไฟฟ้าสถิต ซึ่งขับเคลื่อนอิเล็กตรอนให้ไหลผ่านวงจรรายนอกเพื่อรักษาสมดุลของสนามไฟฟ้าสถิต เมื่อวัสดุสัมผัสกันอีกครั้ง สนามไฟฟ้าสถิตจะหายไป ซึ่งอิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะไหลกลับบนโหนดภายนอก เมื่อกระบวนการเกิดวนซ้ำไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกสร้างขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.1

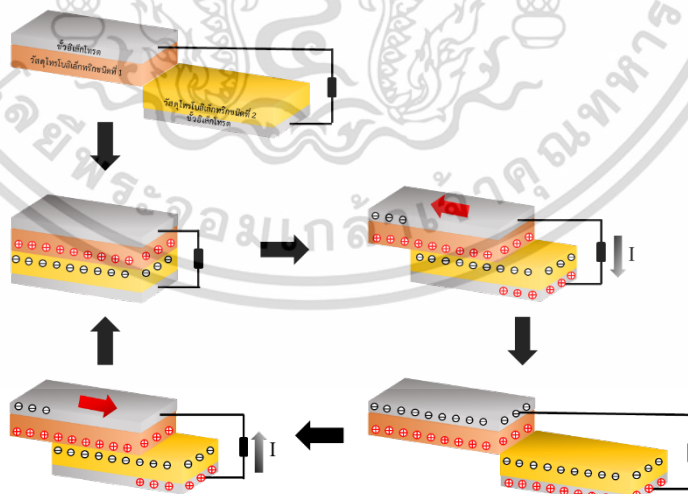
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบการสัมผัสแบบตั้งฉากของวัสดุไพโรอิเล็กทริก ดัดแปลงจาก ⁴

2.2.2 รูปแบบการสัมผัสแบบเลื่อน (Lateral-Sliding Mode)

รูปแบบการสัมผัสแบบเลื่อนหรือเคลื่อนไหวยังสามารถทำได้โดยนำวัสดุไพโรอิเล็กทริกสองชนิดมาวางขนานให้สัมผัสกัน และติดขั้วอิเล็กโทรดให้กับวัสดุไพโรอิเล็กทริกแต่ละตัว และให้แรงเชิงกลในแนวระนาบ ไม่แยกจากกันระหว่างการเลื่อน ประจุไพโรอิเล็กทริกจะถูกสร้างขึ้นบนพื้นผิวระหว่างวัสดุ ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างสองอิเล็กโทรด ความต่างศักย์จะเปลี่ยนแปลงตามพื้นที่สัมผัส อิเล็กตรอนไหลผ่านวงจรภายนอก และสร้างไฟฟ้ากระแสสลับ แสดงดังรูปที่ 2.2 แต่เนื่องจากวัสดุต้องเลื่อนสัมผัสกัน ส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานมากจึงไม่เหมาะกับการใช้งานที่ความถี่สูง เพราะอาจส่งผลให้อุปกรณ์สึกกร่อนและความแข็งแรงลดลง

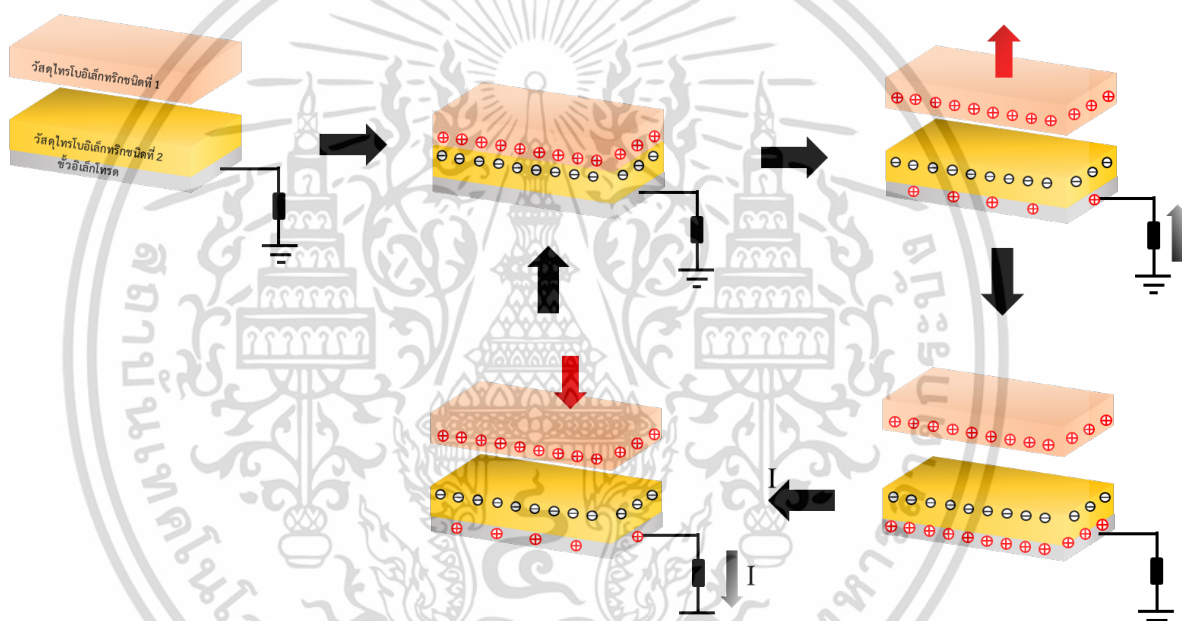


รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบการสัมผัสแบบเลื่อนของวัสดุไพโรอิเล็กทริก ดัดแปลงจาก ⁴

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 รูปแบบการสัมผัสแบบอิเล็กโทรดเดี่ยว (Single Electrode Mode)

รูปแบบการสัมผัสแบบอิเล็กโทรดเดี่ยวเหมาะกับอุปกรณ์ที่ต้องการอิสระในการเคลื่อนที่ซึ่งส่วนใหญ่ใช้เป็นนิ้วมือหรือผิวหนังมนุษย์ มีหลักการทำงานที่แตกต่างจากสองรูปแบบที่กล่าวไปข้างต้น เนื่องจากใช้วัสดุโทรโบอิเล็กทริกสองชนิด แต่ติดขั้วอิเล็กโทรดให้กับวัสดุโทรโบอิเล็กทริกแค่หนึ่งตัวที่เชื่อมต่อกับกราวด์ผ่านโพลด เมื่อนิ้วมือเข้าใกล้และออกจากอิเล็กโทรดอ้างอิงที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งให้อิเล็กตรอนเป็นระยะๆ ผ่านทางแนวตั้งหรือแนวขวาง ประจุไฟฟ้าจะถ่ายโอนระหว่างอิเล็กโทรดและกราวด์ ดังแสดงรูปที่ 2.3 แต่รูปแบบการสัมผัสนี้มีจุดด้อย คือ สร้างแรงดันไฟฟ้าและกระแสได้ไม่เสถียร เนื่องจากวัสดุโทรโบอิเล็กทริกอีกชนิดไม่มีอิเล็กโทรดอ้างอิง ซึ่งแตกต่างจากการใช้อิเล็กโทรดสองตัว ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการส่งออกที่ได้จะต่ำกว่าแบบที่กล่าวไปข้างต้น

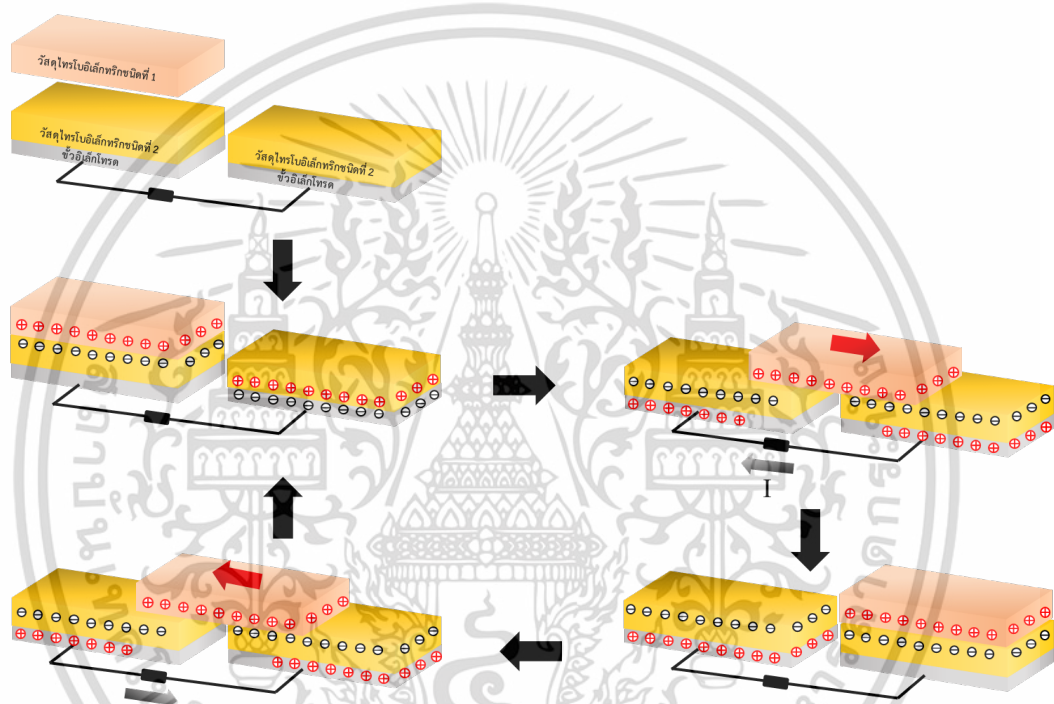


รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบการสัมผัสแบบอิเล็กโทรดเดี่ยวของวัสดุโทรโบอิเล็กทริก ดัดแปลงจาก ⁴

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 รูปแบบการสัมผัสแบบอิสระ (Freestanding Mode)

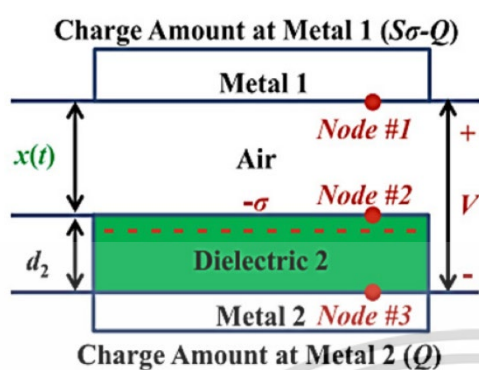
รูปแบบการสัมผัสแบบอิสระมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับโหมดอื่นๆ โดยจะใช้วัสดุทรานซิสเตอร์ชนิดที่ 2 จำนวนสองชิ้นมาเป็นฐาน และใช้วัสดุทรานซิสเตอร์ชนิดที่ 1 จำนวนหนึ่งชิ้นวางขนานด้านบน และติดขั้วอิเล็กโทรดให้กับวัสดุทรานซิสเตอร์ชนิดที่ 1 ทั้งสองชิ้น โดยไม่ให้ขั้วอิเล็กโทรดเชื่อมติดกัน เมื่อให้แรงเชิงกลในแนวระนาบโดยการเลื่อนไปมา ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าที่พื้นผิววัสดุและเหนี่ยวนำให้เกิดประจุตรงข้าม ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองผ่านโหนดภายนอก แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบการสัมผัสแบบอิสระของวัสดุทรานซิสเตอร์ชนิดที่ 2 ดัดแปลงจาก ⁴

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ TENG



เมื่อ V คือ ความต่างศักย์ระหว่างสองอิเล็กโทรด
 d_2 คือ ความหนาของวัสดุไดอิเล็กทริกที่ 1
 $x(t)$ คือ ระยะห่างระหว่างวัสดุไดอิเล็กทริก
 Q คือ จำนวนประจุที่เกิดการเหนี่ยวนำและ
 ถ่ายโอนระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว
 S คือ พื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุไดอิเล็กทริก
 σ คือ ความหนาแน่นของประจุโทรโบ-
 อิเล็กทริก

รูปที่ 2.5 แบบจำลองทฤษฎีของ TENG

จากทฤษฎีพื้นฐานของ CS-mode ของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกในขณะแสดงกลไกการทำงานของ TENG โดยส่วนใหญ่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทไดอิเล็กทริกต่อไดอิเล็กทริก (Dielectric-to-Dielectric) และประเภทตัวนำต่อไดอิเล็กทริก (Conductor-to-Dielectric) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงแค่ประเภทตัวนำต่อไดอิเล็กทริก โดยในรูปที่ 2.12 จะเป็นประเภทตัวนำต่อไดอิเล็กทริก จากทฤษฎีบทเกาส์ความแรงของสนามไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่จะได้รับ⁵ สามารถคำนวณหาความหนาแน่นของสนามไฟฟ้า ได้ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์สามตัว $V-Q-x$ ดัง สมการที่ (2.3) ซึ่งสามารถอธิบายผลทางไฟฟ้าพื้นฐานของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของผลทางไฟฟ้าขาออกในสภาวะวงจรเปิด (OC) และสภาวะลัดวงจร (SC) ได้ดังสมการที่ (2.4) (2.5) และ (2.6)

ค่าสนามไฟฟ้าภายในวัสดุไดอิเล็กทริก :

$$E_2 = \frac{Q}{S\epsilon_0\epsilon_r2} \quad \text{สมการที่ (2.1)}$$

ค่าสนามไฟฟ้าของอากาศ :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\text{air}} = \frac{Q}{S} + \sigma(t) \quad \text{สมการที่ (2.2)}$$

จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ V-Q-x สำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก ในโหมดสัมพันธ์ ดังนี้ :

$$V = E_2 d_2 + E_{\text{air}} x = -\frac{Q}{S \epsilon_0} \left(\frac{d_2}{\epsilon_{r2}} + x(t) \right) + \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad \text{สมการที่ (2.3)}$$

โดยที่ V คือ ความต่างศักย์ระหว่าง 2 อิเล็กโทรด

S คือ พื้นที่ผิวสัมผัสของไดอิเล็กทริก

σ คือ ความหนาแน่นของประจุโทรโบอิเล็กทริก

ϵ_r คือ ค่าคงที่สัมพัทธ์ของวัสดุไดอิเล็กทริก

ϵ_{r0} คือ ค่าคงที่สัมพัทธ์ของอากาศ

Q คือ จำนวนประจุที่เกิดการเหนี่ยวนำและถ่ายโอนระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว

d คือ ความหนาของวัสดุไดอิเล็กทริก

x(t) คือ ระยะห่างระหว่างวัสดุไดอิเล็กทริก

สภาวะวงจรเปิดจะได้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) :

$$V_{oc} = \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad \text{สมการที่ (2.4)}$$

สภาวะลัดวงจรจะได้ประจุที่เกิดการถ่ายโอน และกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) :

$$Q_{sc} = \frac{S \sigma x(t)}{d_0 + x(t)} \quad \text{สมการที่ (2.5)}$$

$$I_{sc} = \frac{dQ_{sc}}{dt} = \frac{S \sigma d_0}{(d_0 + x(t))^2} \frac{dx}{dt} = \frac{S \sigma d_0 v(t)}{(d_0 + x(t))^2} \quad \text{สมการที่ (2.6)}$$

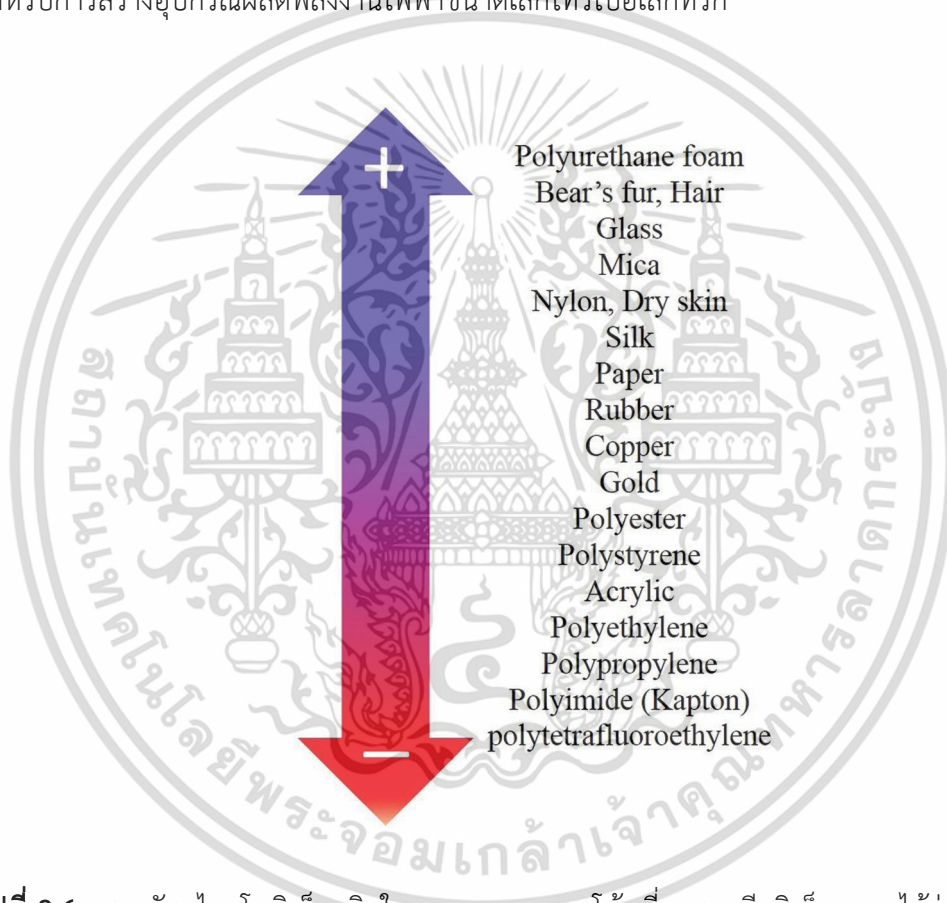
จากสมการแสดงความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวไปข้างต้น พบว่า มีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกและสามารถดำเนินการได้หลายวิธีด้วยกันเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การเลือกคู่วัสดุให้เหมาะสม การขึ้นรูปวัสดุแบบก้อนด้วยแม่พิมพ์ การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุ โดยขอยกตัวอย่างการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และขอยกข้อมูไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect) โดยการเลือกวัสดุที่เหมาะสม (Choice of Materials)

ซีรีส์โทรโบอิเล็กทริกสามารถคาดการณ์ให้เลือกวัสดุโทรโบอิเล็กทริกที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเอาต์พุตสูงตามสาขาการใช้งาน โดยวัสดุที่สูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายจะเป็นวัสดุที่ให้ค่าความเป็นบวก และวัสดุที่รับอิเล็กตรอนได้ง่ายจะเป็นวัสดุที่ให้ค่าความเป็นลบ ซึ่งประสิทธิภาพของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างช่วงของวัสดุวัสดุโทรโบอิเล็กทริก หากเลือกวัสดุที่ให้ค่าความเป็นบวกสูงคู่กับวัสดุที่ให้ค่าความเป็นลบสูง จะทำให้ความหนาแน่นของประจุโทรโบอิเล็กทริกสูง ส่งผลให้ค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าสูง ดังนั้น การเลือกวัสดุจึงเป็นขั้นตอนแรกสำหรับการสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก³



รูปที่ 2.6 แสดงวัสดุโทรโบอิเล็กทริกในอนุกรมตามแนวโน้มที่จะสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายและได้รับอิเล็กตรอนได้ง่าย³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงตารางมาตรฐานที่ใช้ในการบ่งบอกความหนาแน่นประจุของวัสดุทริโบอิเล็กทริก⁶

Table 2.1 Triboelectric series of materials and their triboelectric charge density (TECD)				
Materials	Abbr.	Average TECD ($\mu\text{C m}^{-2}$)	STDEV	α
Chemical-Resistant Viton® Fluoroelastomer Rubber		-148.20	2.63	-1.31
Acetal		-143.33	2.48	-1.27
Flame-retardant garolite		-142.76	1.49	-1.26
Garolite G-10		-139.89	1.31	-1.24
Clear cellulose		-133.30	2.28	-1.18
Clear polyvinyl chloride	PVC	-117.53	1.31	-1.04
Polytetrafluoroethylene	PTFE	-113.06	1.14	-1.00
Abrasion-resistant polyurethane rubber		-109.22	0.86	-0.97
Acrylonitrile butadiene styrene	ABS	-108.07	0.50	-0.96
Clear polycarbonate (Glossy)	PC	-104.63	1.79	-0.93
Polystyrene	PS	-103.48	2.48	-0.92
Ultem polyetherimide	PEI	-102.91	2.16	-0.91
Polydimethylsiloxane*	PDMS	-102.05	2.16	-0.90
Polyester fabric (Plain)		-101.48	1.49	-0.90
Easy-to-machine electrical-insulating garolite		-100.33	1.79	-0.89
Food-grade high-temperature silicone rubber		-94.03	0.99	-0.83
Polyimide film	Kapton	-92.88	2.58	-0.82
DuraLar polyester film	PET	-89.44	0.86	-0.79
Polyvinylidene fluoride	PVDF	-87.35	2.06	-0.77
Polyetheretherketone	PEEK	-76.25	1.99	-0.67
Polyethylene	PE	-71.20	1.71	-0.63
High-temperature silicone rubber		-69.95	0.50	-0.62
Wear-resistant garolite		-68.51	1.99	-0.61
Low-density polyethylene	LDPE	-67.94	1.49	-0.60
High impact polystyrene		-67.37	1.79	-0.60
High-density polyethylene	HDPE	-59.91	1.79	-0.53
Weather-resistant EPDM rubber		-53.61	0.99	-0.47
Leather strip (Smooth)		-52.75	1.31	-0.47
Oil-filled cast nylon 6		-49.59	0.99	-0.44
Clear cast acrylic	PMMA	-48.73	1.31	-0.43
Silicone		-47.30	1.49	-0.42
Abrasion-resistant SBR rubber		-40.13	1.31	-0.35
Flexible leather strip (Smooth)		-34.40	0.86	-0.30
Noryl polyphenyl ether		-31.82	0.86	-0.28
Poly(phenylene Sulfide)	PPS	-31.82	0.86	-0.28
Pigskin (Smooth)		-30.10	0.86	-0.27
Polypropylene	PP	-27.23	1.31	-0.24
Slippery nylon 66		-26.09	0.50	-0.23
Weather- and chemical-resistant santoprene rubber		-25.23	0.50	-0.22
Chemical- and steam-resistant aflas rubber		-22.65	1.31	-0.20
Polysulfone		-18.92	0.86	-0.17
Cast nylon 6		-18.35	0.99	-0.16
Copy paper		-18.35	0.50	-0.16
Chemical-resistant and low-temperature fluorosilicone rubber		-18.06	0.86	-0.16
Delrin® Acetal Resin		-14.91	0.50	-0.13
Wood (marine-grade plywood)		-14.05	0.99	-0.12
Wear-resistant slippery garolite		-11.47	0.50	-0.10
Super-stretchable and abrasion-resistant natural rubber		-10.61	0.50	-0.09
Oil-resistant buna-N rubber		2.49	0.23	0.02
Food-grade oil-resistant buna-N/vinyl rubber		2.95	0.13	0.03

Note: STDEV refers to the standard deviation. The α refers to the measured triboelectric charge density of tested materials over the absolute value of the measured triboelectric charge density of the reference material. The material marked with an asterisk "*" means it has strong adhesion with mercury, a small drop of mercury is observed when it is separated with mercury. The measured TECD value may be a bit lower than its real value. Source data are provided as a Source Data file.

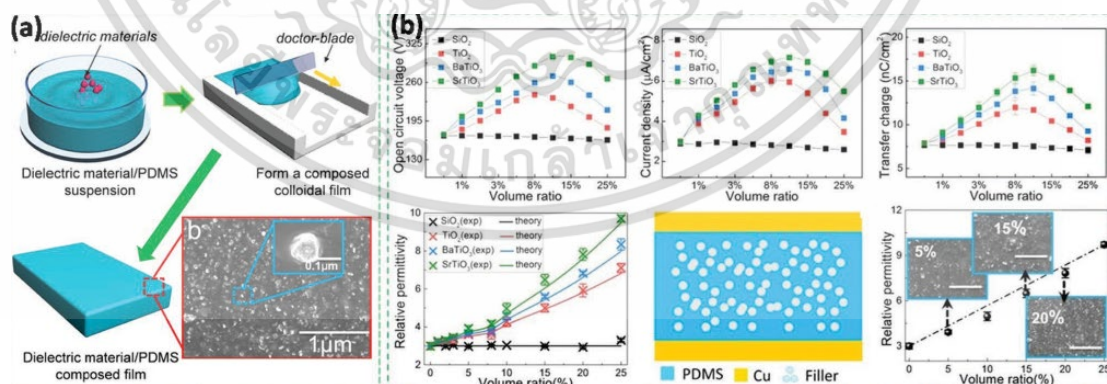
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect) โดยการขึ้นรูปวัสดุแบบกึ่งด้วยแม่พิมพ์ (Modulating Bulk Friction Materials)

นอกเหนือจากการเพิ่มความหนาแน่นของประจุไทรโบอิเล็กทริกจากการเลือกวัสดุที่เหมาะสมแล้ว ยังสามารถเพิ่มความหนาแน่นของประจุไทรโบอิเล็กทริกได้โดยการขึ้นรูปวัสดุแบบกึ่งด้วยแม่พิมพ์ (Modulating Bulk Friction Materials) ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติของวัสดุได้โดยการเพิ่มความหนาแน่นของประจุไทรโบอิเล็กทริก แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การเจือวัสดุนาโนลงในวัสดุแบบกึ่ง (Doping Nanomaterials into Bulk Friction Materials) และ การเพิ่มชั้นย่อยลงในวัสดุแบบกึ่ง (Adding Sublayers into Bulk Friction Materials)³

2.3.2.1 การเจือวัสดุนาโนลงในวัสดุแบบกึ่ง (Doping Nanomaterials into Bulk Friction Materials)

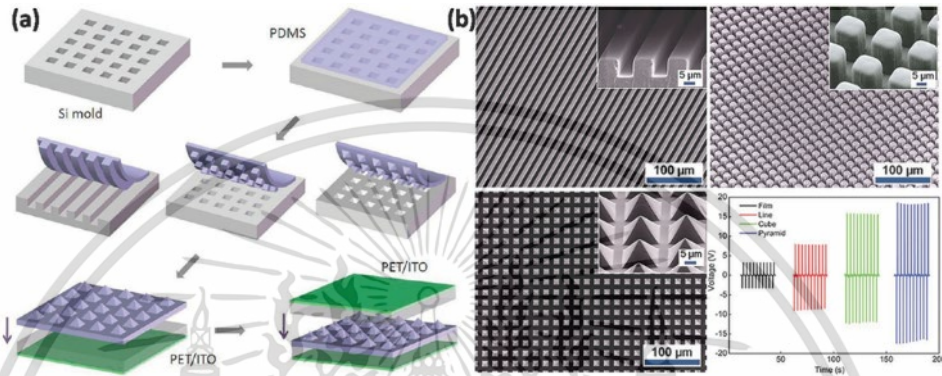
เป็นการปรับปรุงสมบัติของวัสดุโดยการเจือวัสดุนาโนลงในกึ่งวัสดุ เช่น การเจือโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (MoS_2) ลงในกึ่งวัสดุไทรโบอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์เป็นชั้นตัวรับอิเล็กตรอนแบบไทรโบอิเล็กทริกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้า โดยการเจือวัสดุนาโนที่เป็นโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (MoS_2) จะกักเก็บประจุไทรโบอิเล็กทริกได้มากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของประจุไทรโบอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของไทรโบอิเล็กทริกนาโนเจนเนอเรเตอร์เพิ่มสูงขึ้น และการเจือวัสดุไดอิเล็กทริกต่างๆ เช่น อนุภาคนาโนซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) และ สตรอนเทียมไททาเนต (SrTiO_3) ลงในกึ่งวัสดุโพลีดีเมทิลซิลอกเซน (PDMS) จะช่วยปรับปรุงค่าทางไฟฟ้า โดยทำให้ความหนาแน่นของประจุไทรโบอิเล็กทริกที่พื้นผิวเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกเพิ่มสูงขึ้น เป็นต้น



รูปที่ 2.7 แสดงวิธีการทดลองและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของการเจือวัสดุไดอิเล็กทริกต่างๆ ลงในวัสดุกึ่งโพลีดีเมทิลซิลอกเซน (PDMS) (a) วิธีการทดลอง (b) ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

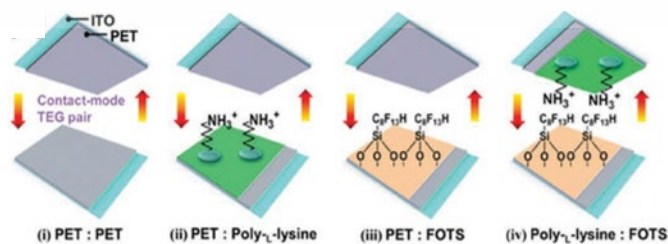
ออกแบบพื้นผิวที่เป็นรูปแบบหรือรูปทรงที่ต่างกัน จะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสต่างกัน ส่งผลโดยตรงกับค่าความต่างศักย์และกระแสที่ได้ออกมา ซึ่งลักษณะทางกายภาพในระดับนาโนนั้นมีหลายรูปแบบ เช่น โครงสร้างแบบเส้น (line) โครงสร้างแบบลูกบาศก์ (cubic) และโครงสร้างแบบพีรามิด (pyramid) เป็นต้น สามารถมองเห็นได้ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope/ SEM) ซึ่งมีกำลังขยายสูง ทำให้เห็นถึงโครงสร้าง ความสม่ำเสมอของรูปแบบ ขนาด ความสูง ระยะห่าง และหน้าตัดของโครงสร้าง



รูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพการออกแบบ ลักษณะโครงสร้าง และประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของฟิล์มบางโพลีไคเมทิลไซลอคเซน (PDMS) ที่มีรูปแบบรูปทรงแบบเส้น แบบลูกบาศก์ และแบบพีรามิด (a) การออกแบบ (b) ลักษณะโครงสร้างและประสิทธิภาพทางไฟฟ้า³

2.3.3.2 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวสัมผัสทางเคมี (Chemical surface modification)

เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากการนำสารเคมีมาปรับความสามารถในการรับหรือให้อิเล็กตรอน เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของประจุที่พื้นผิว เช่น การปรับองค์ประกอบของวัสดุโดยการเติมวัสดุนาโนหรือวัสดุไดอิเล็กทริกลงไป การเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน การปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันด้วยการฉายรังสีด้วยไอออนหรือรังสียูวี และการที่หมู่ฟังก์ชันเปลี่ยนเพียงหมู่เดียวก็สามารถทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ ในแต่ละหมู่ฟังก์ชันก็จะให้ค่าประจุบวกและลบที่แตกต่างกัน ซึ่งล้วนเป็นวิธีการที่มีผลต่อประสิทธิภาพการส่งออกของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก



รูปที่ 2.10 แสดงภาพการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวสัมผัสทางเคมี โดยเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันลงในวัสดุ³ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ซิลเวอร์เฟล็กส์ (Silver flakes)

ซิลเวอร์เฟล็กส์ได้รับความสนใจในหลายงานวิจัย เนื่องจากสามารถเพิ่มคุณสมบัติที่ใช้งานทางแสง ไฟฟ้า ตัวเร่งปฏิกิริยา และแม่เหล็ก ซึ่งการใช้งานอีกอย่างหนึ่งคือเป็นตัวเติมตัวนำไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพิมพ์ (Printed Electronics) ⁷

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติของซิลเวอร์เฟล็กส์ (ทางทฤษฎี) ดัดแปลงจาก ⁸

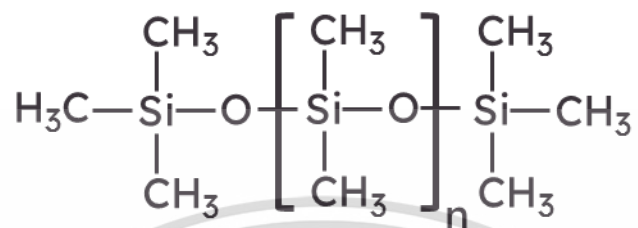
คุณสมบัติ (Property)	ค่า (Value)
1. มวลโมเลกุล (Molecular Weight)	107.87
2. ลักษณะ (Appearance)	Silver solid
3. จุดหลอมเหลว (Melting Point)	961.78 °C
4. จุดเดือด (Boiling Point)	2162 °C
5. ความหนาแน่น (Density)	10.49 g/cm ³
6. ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity)	1.586 nΩ ·cm (20 °C)
7. อิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity)	1.93 Paulings
8. ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Heat of Fusion)	11.28 kJ ·mol ⁻¹
9. ความร้อนของการกลายเป็นไอ (Heat of Vaporization)	250.58 kJ ·mol ⁻¹
10. อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio)	0.37
11. ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)	0.233 J/gm ·K
12. การนำความร้อน (Thermal Conductivity)	429 W ·m ⁻¹ ·K ⁻¹

2.5 ยางซิลิโคน (Silicone Rubber)

ยางซิลิโคนเป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อเลียนแบบยางจากธรรมชาติที่มีข้อจำกัดด้านคุณภาพการใช้งาน ยางซิลิโคนเป็นยางสังเคราะห์ที่มีแกนสายโซ่หลักประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นพอลิซิลอกเซน (Polysiloxane) ซึ่งมีทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ทำให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากยางอินทรีย์อื่นๆ

เนื่องจากพันธะ Si-O ของยางซิลิโคนทำให้มีคุณสมบัติทนความร้อน มีความเสถียรทางเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า ทนต่อการขีดถู ทนต่อสภาพอากาศ และมีความยืดหยุ่นสูง ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะยางซิลิโคนได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ทดแทนผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การบินและอวกาศ อุตสาหกรรมอาวุธยุทโธปกรณ์ รถยนต์ การก่อสร้าง ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ การแพทย์ และการแปรรูปอาหารอุตสาหกรรม⁹



รูปที่ 2.11 โครงสร้างโมเลกุลของยางซิลิโคน ดัดแปลงมาจาก¹⁰

2.6 วัสดุเชิงประกอบ (Composite material)

วัสดุเชิงประกอบหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite materials) หมายถึง วัสดุที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปแล้วทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบดีขึ้น สำหรับความหมายเชิงวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปโดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ¹¹

2.6.1 องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ

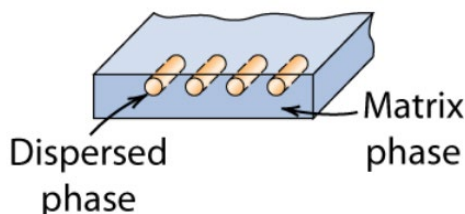
2.6.1.1 เมทริกซ์ (Matrix)

เมทริกซ์ คือ วัสดุที่เป็นเนื้อหลักและเป็นเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) ทำหน้าที่ห่อหุ้มส่วนเสริมแรง ปกป้องส่วนเสริมแรงจากความเสียหายที่อาจจะเกิดจากสภาพแวดล้อม และแรงที่กระทำกับวัสดุ ทำให้วัสดุเชิงประกอบเป็นรูปร่างขึ้น ยึดส่วนเสริมแรงให้อยู่ด้วยกัน

2.6.1.2 ส่วนเสริมแรง (Reinforcement)

ส่วนเสริมแรง คือ วัสดุส่วนที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อวัสดุหลักนั้น เป็นเฟสกระจายตัว (Distribute phase) ทำหน้าที่เสริมสมบัติให้เมทริกซ์ และทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติตามต้องการ เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการแตกหัก ส่วนมากมักเป็นเส้นใย (Fiber) หรืออนุภาค (Particle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ¹²

2.6.2 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

2.6.2.1 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC)

โดยธรรมชาติพอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำ เชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่มาก ความหนาแน่นต่ำ และทนทานต่อการกัดกร่อน การเสริมแรงให้พอลิเมอร์ทำได้โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยวัสดุเชิงประกอบจะมีความแข็งแรงสูงที่สุดตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง¹³

2.6.2.2 วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composite, MMC)

วัสดุเชิงประกอบโลหะปรับปรุงความสามารถในการทนทานต่อความล้าของโลหะให้ดีขึ้น ส่วนเสริมแรงอาจอยู่ในลักษณะของอนุภาคเส้นใยหรือวิสเกอร์ (Whisker) เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์อะลูมินา เส้นใยโบรอน เป็นต้น นอกจากนี้ส่วนเสริมแรงสำหรับโลหะต้องมีความแข็งแรงสูง และทนความร้อนสูง เนื่องจากโลหะต้องใช้อุณหภูมิสูงมากในการขึ้นรูป และส่วนเสริมแรงที่ใช้ต้องไม่เกิดการกัดกร่อนกับเมทริกซ์โลหะ¹⁴

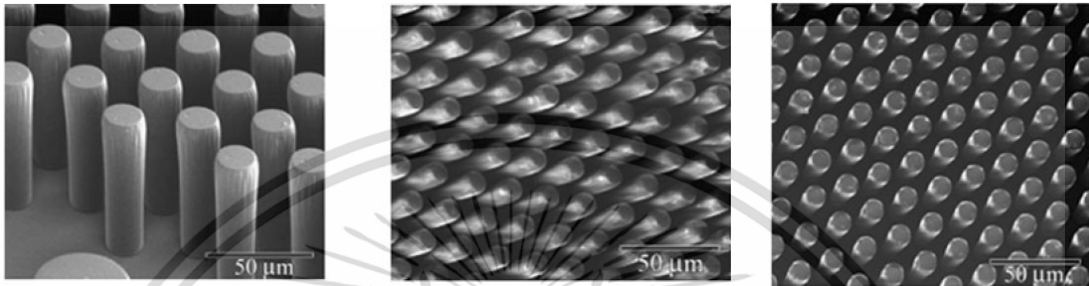
2.6.2.3 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC)

เซรามิกเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ไม่นำความร้อน ทนทานต่อการกัดกร่อน แต่วัสดุเซรามิกนั้นเปราะและแตกหักง่าย การเสริมแรงให้กับเมทริกซ์เซรามิกเป็นการปรับปรุงสมบัติให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีความเหนียวและทนทานมากขึ้น ส่วนเสริมแรงจะเข้าไปขวางการแพร่ของรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน เมื่อวัสดุเชิงประกอบได้รับแรงจะไม่เกิดการเปราะแตกในทันที ส่วนเสริมแรงที่ใช้ในการเสริมแรงอาจอยู่ในรูปอนุภาค เส้นใยหรือวิสเกอร์ (Whisker) ได้แก่ อะลูมินา ซิลิกา ซิลิกอนคาร์ไบด์ และคาร์บอน เป็นต้น¹⁵

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 แถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ (Pillar arrays)

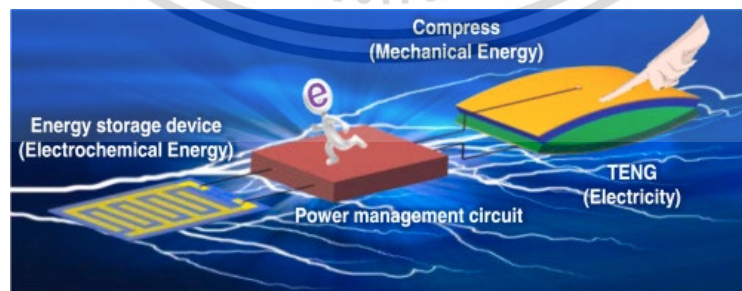
เป็นแถวเสาที่มีอัตราส่วนของภาพสูง (High-aspect-ratio/ HAR) มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ และลักษณะพื้นผิวที่ชัดเจน การออกแบบประยุกต์พื้นผิวเป็นรูปแบบแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบของวัสดุให้มีขนาดเล็กหรือมีขนาดอยู่ในระดับนาโนได้ สามารถใช้ประโยชน์ในการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีความเป็นระเบียบและมีความสมมาตรที่ตอบสนองต่อการใช้งานต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพที่สูงได้¹⁶



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะพื้นผิวไมโครแพทเทิร์นของพอลิเมอร์ที่มีพื้นผิวเป็นแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ (Pillar arrays)¹⁶

2.8 แหล่งกำเนิดพลังงานขนาดเล็กที่ขับเคลื่อนด้วยตัวเอง (Self-charging Nanogenerator)

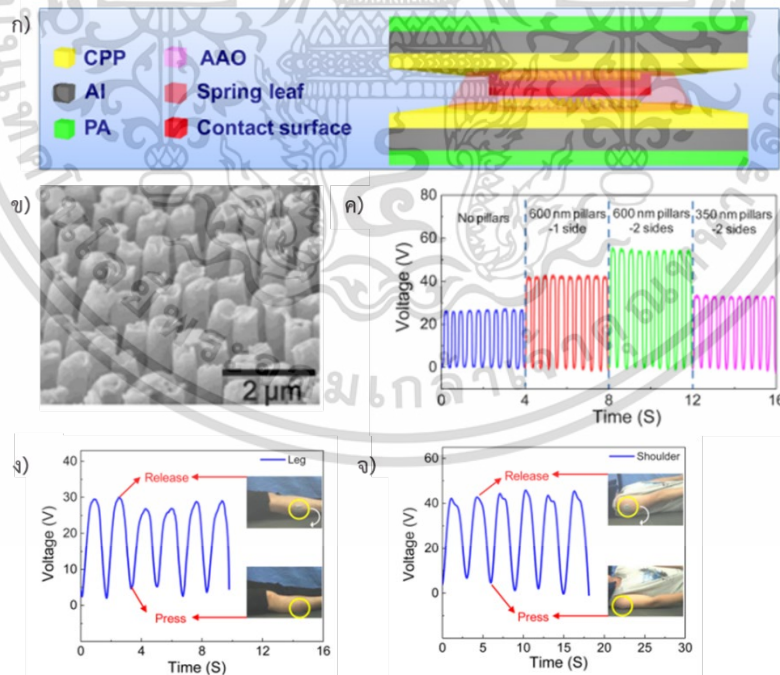
ความท้าทายที่สำคัญประการหนึ่งสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คือ อุปกรณ์จัดเก็บพลังงานไม่สามารถให้พลังงานเพียงพอสำหรับการทำงานอย่างต่อเนื่องและยาวนาน ซึ่งนำไปสู่การชาร์จซ้ำบ่อยหรือการเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่ไม่สะดวก เพื่อตอบสนองความต้องการของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในอนาคตสำหรับการทำงานอย่างต่อเนื่อง ความก้าวหน้าที่ได้เห็นชัดเจนได้รับความสำเร็จเกี่ยวกับการพัฒนาอุปกรณ์เก็บพลังงานแบบชาร์จตัวเองที่ใช้แหล่งกำเนิดพลังงานขนาดเล็ก (Nanogenerator)¹⁷



รูปที่ 2.14 แสดงแผนภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานกลที่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าและเป็น
เอกสารนี้
อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ขับเคลื่อนด้วยตัวเอง¹⁸เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 Weixing Song และคณะ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก ไทโรโบอิเล็กทรอนิกส์ (TENG) จากฟิล์มพลาสติก-อะลูมิเนียมที่มีพื้นผิววัสดุเป็นโครงสร้างนาโนฟิลลาร์ และติดแคนทีลิวเวอร์สปริงลิฟ (Cantilever spring leaf) เพื่อมาประยุกต์ใช้สำหรับเซ็นเซอร์แบบไทโรโบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวและมีพลังงานในตัวเอง (TES) สำหรับการติดตามการเคลื่อนไหวของร่างกายขณะหลับเพื่อวินิจฉัยความผิดปกติของการนอนหลับ โดยมีโครงสร้างอุปกรณ์เป็นแบบแซนดวิช แสดงดังรูปที่ 2.15ก และจากการปรับปรุงพื้นผิววัสดุให้เป็นโครงสร้างนาโนฟิลลาร์ ด้วยกระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกโดยใช้แม่แบบ Anodic aluminum oxide (AAO) ได้เป็นโครงสร้างนาโนฟิลลาร์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด ที่เส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอ 600 นาโนเมตรและความยาว 1.5 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 2.15ข และ ค เมื่อให้แรงกดจากการเคลื่อนไหวภายนอกและการคลายที่เกิดจากการคืนตัวเนื่องจากการติดกลับของสปริงลิฟ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ไทโรโบอิเล็กทรอนิกส์และการถ่ายโอนประจุระหว่างฟิล์มพลาสติก-อะลูมิเนียม (APLF) และคอปเปอร์ของสปริงลิฟที่ติดอยู่ ซึ่งให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 55 โวลต์ ซึ่งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานแบบอื่น ดังนั้นความไวของ TENG จึงได้รับการปรับปรุงอย่างมาก และใช้เป็น TES สำหรับตรวจสอบการเคลื่อนไหวในลักษณะพลิกของไหล่และขาระหว่างการนอนหลับ โดยติดตั้งบนไหล่และขาของร่างกายมนุษย์ แสดงดังรูปที่ 2.15ง และ จ ตามลำดับ

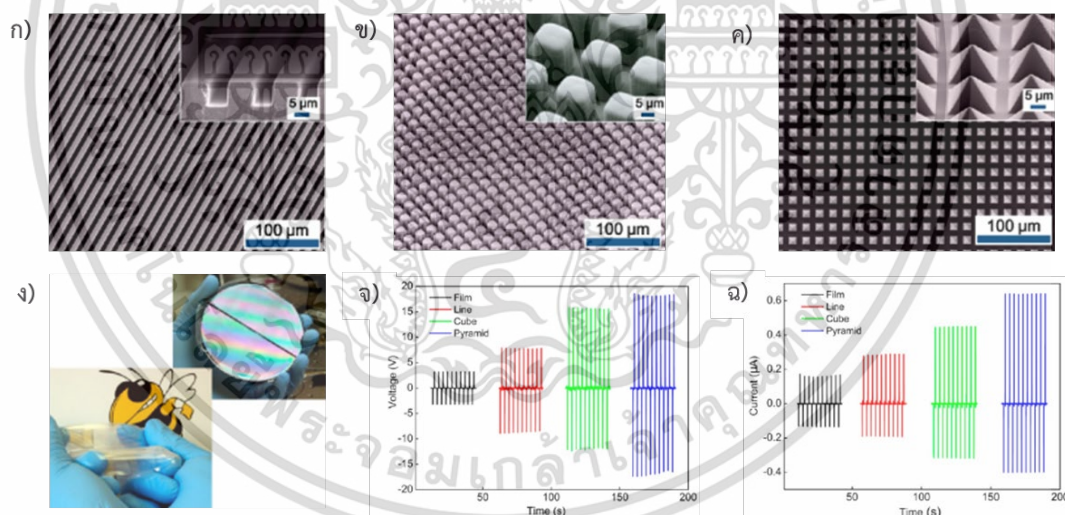


รูปที่ 2.15 ก) โครงสร้างของอุปกรณ์ ข) มุมมองด้านข้างของโครงสร้างนาโนฟิลลาร์ ค) แรงดันไฟฟ้า

ของชิ้นงานที่มีพื้นผิวต่างกัน ง) แรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ติดอยู่บนไหล่ และ จ) บนขา ก่อนและหลังการพลิกตัว²

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

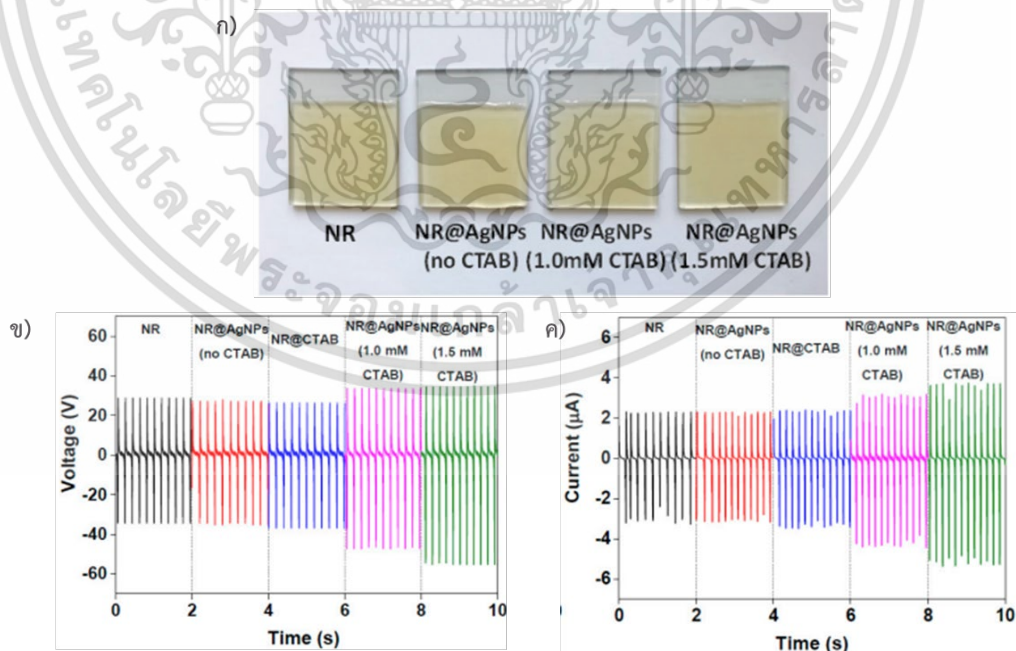
2.9.2 Feng-Ru Fan และคณะ¹⁹ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับฟิล์มพลาสติกใสยืดหยุ่นที่ปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งออกโดยสร้างลวดลายบนพื้นผิว PDMS เพื่อเพิ่มพื้นที่แรงเสียดทาน โดยสร้างลักษณะพื้นผิวในระดับไมโครเมตรที่ต่างกันสามแบบบนแม่พิมพ์ซิลิคอน คือ แบบเส้น แบบลูกบาศก์ แบบพีระมิด แสดงดังรูปที่ 2.16 ก, ข และ ค ตามลำดับ เพื่อมาประยุกต์ใช้สำหรับเซ็นเซอร์แบบทรานซิสเตอร์ที่มีพลังงานในตัวเอง ซึ่งสามารถใช้ตรวจจับแรงกดและแรงสั่นสะเทือนเล็กน้อย เช่น ตรวจจับการตกของหยดน้ำและการสัมผัสที่นุ่มนวลของขนนกบนพื้นผิว ลักษณะของฟิล์มแสดงดังรูปที่ 2.16 ง จากนั้นทดสอบประสิทธิภาพการส่งออกทางไฟฟ้าของอุปกรณ์โดยใช้คุณสมบัติของฟิล์มบาง PDMS ที่แตกต่างกัน 4 แบบ คือ แบบเรียบ (ไม่มีโครงสร้างที่มีลวดลาย) แบบเส้น แบบลูกบาศก์ แบบพีระมิด ซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพส่งออกของเครื่องผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กได้อย่างมีนัยสำคัญ ประสิทธิภาพการส่งออกของฟิล์มบางเป็นดังนี้ แบบเรียบ < แบบเส้น < แบบลูกบาศก์ < แบบพีระมิด แสดงดังรูปที่ 2.16 จ และ ฉ โดยปัจจัยที่ส่งผลให้การส่งออกทางไฟฟ้าของฟิล์มแบบที่มีลวดลายต่างจากฟิล์มแบบเรียบ คือ การเกิดปรากฏการณ์ทรานซิสเตอร์ของฟิล์มที่มีลวดลายในระดับจุลภาค เนื่องจากพื้นผิวที่มีโครงสร้างซับซ้อนกว่าจะเกิดปรากฏการณ์ทรานซิสเตอร์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่า และสามารถสร้างประจุที่พื้นผิวได้มากขึ้นระหว่างที่วัสดุสัมผัสกัน



รูปที่ 2.16 ก) ภาพ SEM ของฟิล์มบาง PDMS ที่มีลวดลายแบบเส้นตรง ข) แบบลูกบาศก์ และ ค) แบบพีระมิด ง) ลักษณะของฟิล์มบาง PDMS ที่ประดิษฐ์ขึ้น โดยรูปบนขวาเป็นภาพถ่ายของฟิล์มบาง PDMS ที่ประดิษฐ์ขึ้นบนแม่พิมพ์ซิลิคอน ซึ่งมีขอบสัญญาณรบกวนอยู่บนผิวฟิล์มบ่งบอกว่ามีลวดลายอยู่บนพื้นผิวมาก และรูปซ้ายล่างแสดงถึงความยืดหยุ่นและโปร่งใสของฟิล์ม จ) แรงดันไฟฟ้าขาออก และ ฉ) กระแสไฟฟ้าขาออกของฟิล์มบาง PDMS ที่มีพื้นผิวต่างกัน¹⁹

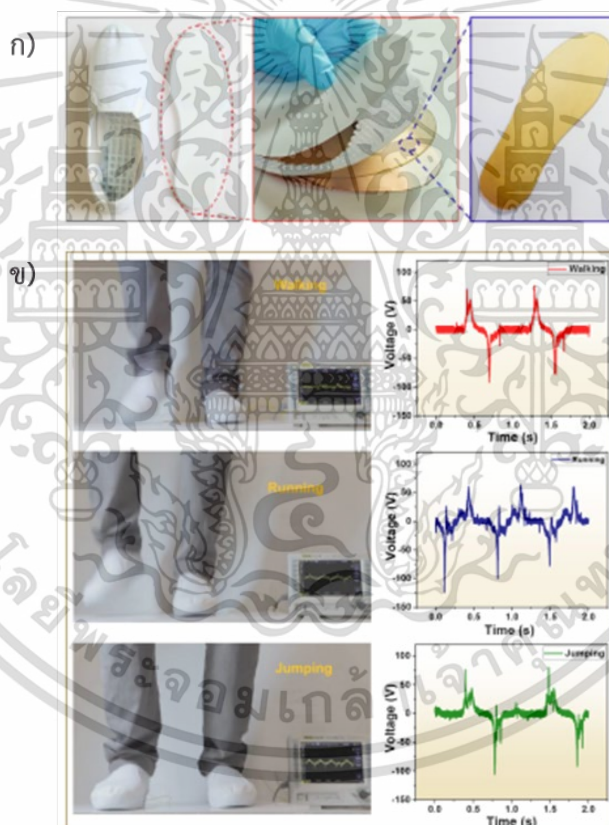
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 Pawanrat Suphasorn และคณะ²⁰ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติและอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นสำหรับนำมาผสมในยางธรรมชาติ เพื่อเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซึ่งส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กที่มากขึ้น อีกทั้งยังพบว่าขนาดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์จะลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว CTAB เพิ่มขึ้น นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิว CTAB ยังช่วยในการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในยางธรรมชาติที่เป็นฉนวน ซึ่งส่งเสริมโพลาริเซชันระหว่างพื้นผิวที่ส่งผลให้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุเชิงประกอบนี้ดีขึ้น ยางธรรมชาติเป็นหนึ่งในวัสดุโพลีอิเล็กทริกที่อยู่ในอนุกรมโพลีอิเล็กทริกที่มีความเป็นขั้วลบเล็กน้อย การใช้สารตัวนำไฟฟ้าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่เป็นฉนวนอย่างพอลิเมอร์ เนื่องจากทำให้เกิดการสะสมของประจุขนาดเล็ก ซึ่งสามารถเพิ่มคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุประกอบโดยกลไกโพลาริเซชันระหว่างพื้นผิว โดยอนุภาคนาโนซิลเวอร์เป็นหนึ่งในสารตัวนำไฟฟ้าที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในพอลิเมอร์คอมโพสิต เนื่องจากมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี สะดวกในการผลิต และคุ้มค่า แม้ว่าจะมีการศึกษามากมายเกี่ยวกับการนำอนุภาคนาโนซิลเวอร์ไปผสมเข้ากับยางธรรมชาติ แต่ส่วนใหญ่จะเป็นการใช้งานด้านชีวการแพทย์และด้านแบตเตอรี่ ซึ่งงานนี้เป็นครั้งแรกที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ-อนุภาคนาโนซิลเวอร์สำหรับใช้งานด้านการเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกล ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประจุโพลีอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น และด้วยเหตุนี้จึงเกิดเอาต์พุตทางไฟฟ้าที่มากขึ้น



รูปที่ 2.17 ก) ภาพถ่ายดิจิทัลของชิ้นงาน ข) แรงดันไฟฟ้าขาออก และ ค) กระแสไฟฟ้าขาออกของชิ้นงาน²⁰ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

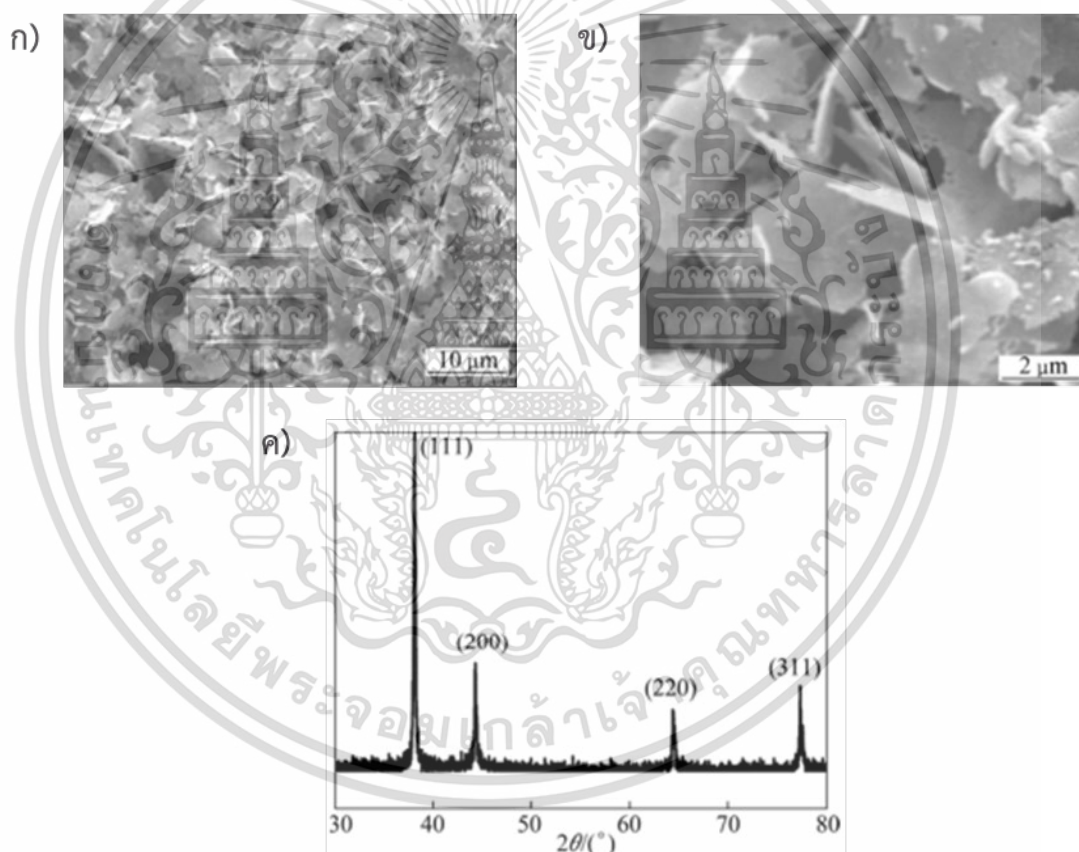
2.7.4 Intuorn Appamato และคณะ²¹ ได้ทำการศึกษาวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติซึ่งเป็นวัสดุพอลิเมอร์ โดยมีการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ด้วย สารลดแรงตึงผิวที่แตกต่างกันสองชนิดลงในพอลิเมอร์ที่เป็นยางธรรมชาติ โดยไอออนบวกของสารลดแรงตึงผิว CTAB ยังมีบทบาทสำคัญในการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในยางธรรมชาติ และเพิ่มประจุไตรโบโพลีที่พในวัสดุประกอบยางธรรมชาติ ซึ่งช่วยปรับปรุงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกให้ได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงขึ้นผ่านการโพล่าไรเซชันระหว่างพื้นผิวระหว่างยางธรรมชาติกับอนุภาคนาโนซิลเวอร์ เพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ TENG และนำไปประยุกต์ใช้เป็นพื้นรองเท้าที่เปลี่ยนแรงเชิงกลจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์ เช่น เดิน วิ่ง และกระโดดให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เช่น เครื่องคิดเลข อีกทั้งยังแสดงคุณสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียจากเชื้อ Staphylococcus aureus ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่นเท้า



รูปที่ 2.18 ก) โครงสร้างของพื้นรองเท้าที่ใช้ TENG ประกอบด้วย (จากบนลงล่าง) แผ่นเทพล่อน, โฟมพียู, ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ NR-Ag และแผ่นนำไฟฟ้าคอปเปอร์ ข) สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากพื้นรองเท้า TENG ระหว่างการเดิน วิ่ง และกระโดด²¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.5. Ai-xia ZHAI และคณะ²² ได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมซิลเวอร์เฟลคส์ (Silver flakes) โดยเทสารละลาย $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ลงในสารละลาย AgNO_3 ที่มีกรดซิตริกโดยตรง และนำไปปั่นกวนด้วยความเร็ว 150 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิห้องพบว่าปริมาณกรดซิตริกที่เหมาะสมเป็นตัวแปรสำคัญที่จะส่งเสริมการเติบโตแบบแอนไอโซโทรปิกของนิวเคลียสซิลเวอร์ให้เป็นเกล็ด เนื่องจากกรดซิตริกทำหน้าที่เป็นตัวตกตะกอน (Capping agent) และเข้าไปจับกับซิลเวอร์ไอออน นิวเคลียสของซิลเวอร์ไอออนจึงเติบโตเป็นผลึกที่มีความซับซ้อน ซึ่งไอออน (II) ไอออนจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) เปลี่ยนซิลเวอร์ไอออนให้เป็นซิลเวอร์จากการนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ผลปรากฏว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเฉพาะตัว อนุภาคจะเป็นเกล็ดสี่เหลี่ยมบางไม่สม่ำเสมอ และมีขนาดตั้งแต่ 2 ไมครอน ถึง 10 ไมครอน



รูปที่ 2.19 a) แสดงภาพ SEM ของซิลเวอร์เฟลคส์ b) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD-pattern) ของผงซิลเวอร์²²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟล็กส์ โดยขั้นตอนการเตรียมจะแบ่งออกเป็น ดังนี้ การเตรียมแม่พิมพ์ซีดีที่มีรูปทรงจากแม่แบบที่มีรูปแบบเป็นวงแหวนขยายออก การสังเคราะห์ซิลเวอร์เฟล็กส์ การเตรียมชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ การเตรียมชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีลักษณะพื้นผิวแบบแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ การเตรียมชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟล็กส์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก เพื่อนำมาใช้ในการสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริก ซึ่งมีรายละเอียดเกี่ยวกับสารเคมี วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ แสดงไว้ตามลำดับต่อไปนี้

3.1 สารเคมี

1. เม็ดซีดี (Hard wax beans)
2. ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver Nitrate) $\geq 99.0\%$ บริษัท Sigma-Aldrich
3. ไอรอน (II) ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต (Iron (II) Sulphate Heptahydrate) 99.0% บริษัท KEMAUS
4. กรดซิตริก (Citric acid) 99.0% บริษัท Univar Solutions
5. น้ำกลั่น (Distilled Water)
6. เอทานอล (Ethanol)
7. ยางซิลิโคนใส (Silicone Rubber) บริษัท Shin-Etsu รุ่น KE-1300T (Addition Curing)
8. ตัวเร่งยางซิลิโคน (Curing Agent) บริษัท Shin-Etsu รุ่น CAT-1300 (Addition Curing)

3.2 วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน (Hotplate and Magnetic Stirrer) บริษัท IKA รุ่น C-MAG HS7
2. ปีกเกอร์ (Beaker)
3. แม่แบบซิลิโคนที่มีรูปแบบเป็นวงแหวนขยายออก (Annular Pattern Template)
4. เตาอบลมร้อน (Hot air oven) บริษัท Memmert รุ่น ULE500
5. กระบอกตวง (Cylinder)
6. แท่งกวนคนสาร (Stirring Rod)
7. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic Bar)
8. กระดาษกรอง (Filter Papers)
9. กรวยกรองบูชเนอร์ (Buchner Funnel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ที่นำข้อมูลไปใช้โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ขวดกรองสาร (Suction Flask)
11. แหวนยาง รองกรวยกรองสีดำ
12. กระดาษชั่งสาร (Weighing paper)
12. เครื่องกวนสารแบบใบกวน (Overhead stirrer) บริษัท IKA รุ่น RW 20 digital

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

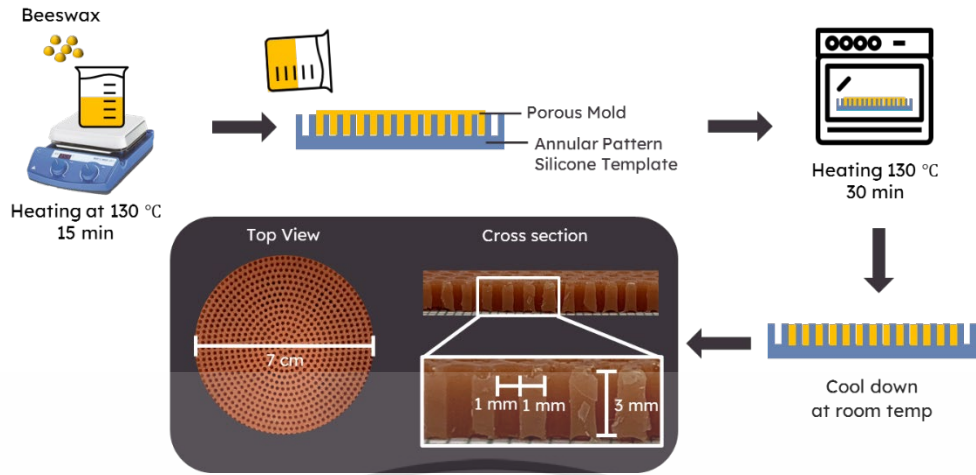
1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 250, USA
2. เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smartlab
3. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น IRTracer-100

3.4 การเตรียมแม่พิมพ์ซีดีที่มีรูพรุนจากแม่แบบซิลิโคนที่มีรูปแบบเป็นวงแหวนขยายออก

3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมแม่พิมพ์ซีดีที่มีรูพรุนจากแม่แบบซิลิโคนที่มีรูปแบบเป็นวงแหวนขยายออก

เตรียมด้วยวิธีการหล่อโดยแบบหล่อไลซ์ซีดี (Lost wax casting) เพื่อใช้เป็นแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปยางซิลิโคนให้มีพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ โดยจะนำเม็ดซีดี ปริมาณ 8 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์แล้วนำไปละลายบนเตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เมื่อซีดีละลายจนเหลวให้นำไปเทลงบนแม่แบบ และเนื่องจากซีดีแข็งตัวไวทำให้ซีดีบางส่วนแข็งตัวเป็นฟิล์มบางอยู่บนผิวของแม่แบบ จึงต้องนำไปให้ความร้อนในเตาอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ฟิล์มบางของซีดีละลายออกจากผิว จากนั้นนำออกจากเตาอบให้ซีดีแข็งและเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง แกะซีดีออกจากแม่แบบ ได้เป็นแม่พิมพ์ซีดีที่มีรูพรุนและมีรูปแบบเป็นวงแหวนขยายออกเพื่อใช้ในการขึ้นรูปยางซิลิโคนต่อไป โดยแม่พิมพ์ซีดีที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร และรูพรุนมีความกว้าง 1 มิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างรูพรุน 1 มิลลิเมตร ความสูง 3 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

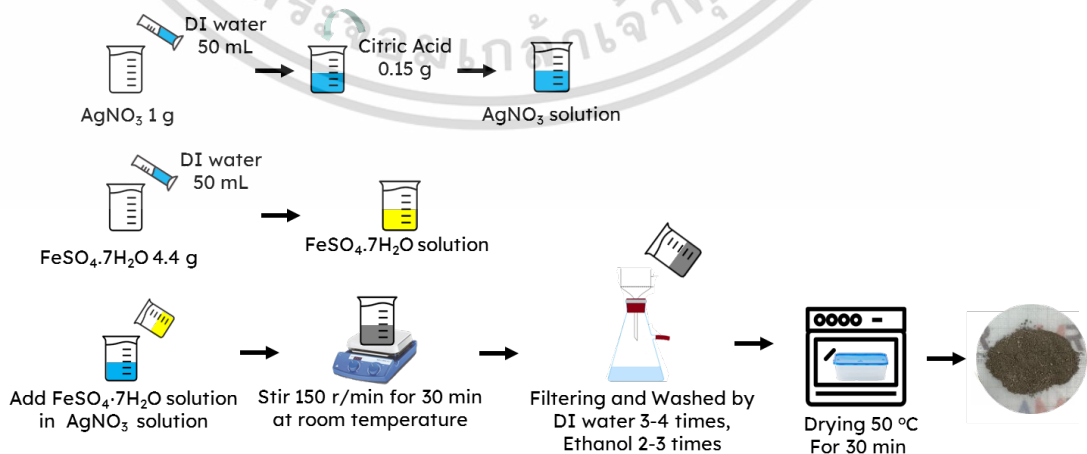


รูปที่ 3.1 วิธีการเตรียมแม่พิมพ์ซีผึ้งที่มีรูพรุนและมีรูปแบบเป็นวงแหวนขยายออก

3.5 การสังเคราะห์ซิลเวอร์เฟลกส์

3.5.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซิลเวอร์เฟลกส์

ชั่งซิลเวอร์ไนเตรต 1 กรัม และไอรอน (II) ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 4.4 กรัม แล้วนำไปละลายในน้ำกลั่นปริมาณ 50 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้นใส่กรดซิตริก 0.15 กรัม ลงในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต แล้วคนให้เข้ากัน จากนั้นเทสารละลายไอรอน (II) ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตลงในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต แล้วนำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer) ที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น 3-4 ครั้ง และเอทานอล 2-3 ครั้ง ตามลำดับ จากนั้นนำไปใส่ในภาชนะที่มีซิลิกาเจลและปิดให้สนิท เข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แสดงดังรูปที่ 3.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รูปที่ 3.2 วิธีการสังเคราะห์ซิลเวอร์เฟลกส์

3.6 การเตรียมชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ

3.6.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ

เทยางซิลิโคนลงในปีกเกอร์ โดยอัตราส่วนระหว่างยางซิลิโคนต่อตัวเร่งแข็ง คือ 10:1 จากนั้นนำยางซิลิโคนไปกำจัดฟองอากาศในโถแก้วที่ต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ใส่ตัวเร่งแข็งของยางซิลิโคนลงไป และคนส่วนผสมให้เข้ากันด้วยไม้ไอติมอย่างเบามือเพื่อให้เกิดฟองอากาศน้อยที่สุด จากนั้นเทส่วนผสมลงในแม่พิมพ์ที่เป็นถาดพลาสติกกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.5 เซนติเมตร ความสูง 5 มิลลิเมตร เกลี่ยให้พื้นผิวเรียบเสมอกัน กำจัดฟองอากาศที่ผิวโดยใช้ไม้ปลายแหลมจิ้มเบาๆ และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง จากนั้นแกะออกจากแม่พิมพ์และตัดให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.3 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3

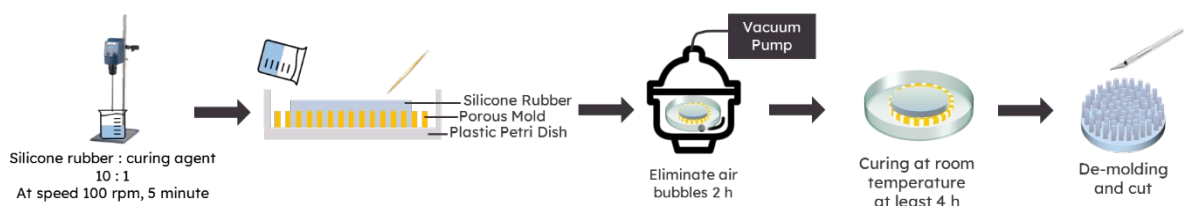


รูปที่ 3.3 การเตรียมชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ

3.7 การเตรียมชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ

3.7.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ

เทยางซิลิโคนและตัวเร่งแข็งของยางซิลิโคนที่อัตราส่วน 10 : 1 ในปีกเกอร์ ผสมด้วยเครื่องกวนสารแบบใบกวนที่อัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเทส่วนผสมลงบนแม่พิมพ์ซีฟิ่งที่มีรูพรุน กำจัดฟองอากาศที่ผิวโดยใช้ไม้ปลายแหลมจิ้มเบาๆ และนำชิ้นงานใส่ในโถแก้วที่ต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดฟองอากาศภายในชิ้นงาน จากนั้นพักไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง และแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ตัดให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.3 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด **รูปที่ 3.4** การเตรียมชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ

3.8 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟล็กส์ที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นแนวเสาที่มีความเป็นระเบียบ

3.8.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟล็กส์ที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นแนวเสาที่มีความเป็นระเบียบ

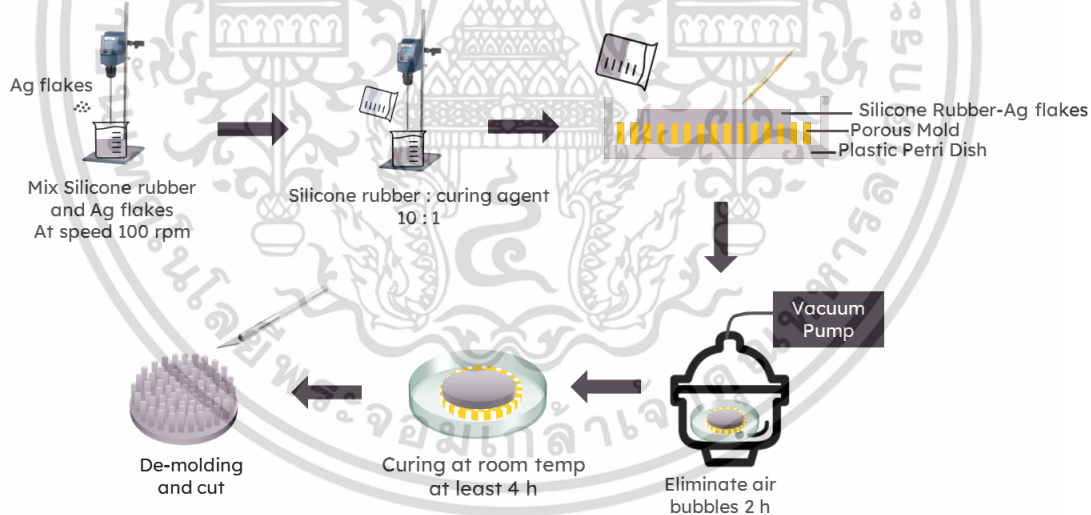
ผสมยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟล็กส์ด้วยเครื่องกวนสารแบบใบกวน (Overhead stirrer) ที่อัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที โดยแบ่งผสมซิลเวอร์เฟล็กส์ทีละน้อย ทุกๆ 10 นาทีจนกว่าจะหมดและผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นผสมตัวเร่งแข็งของยางซิลิโคนลงไปและปั่นกวนที่อัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที โดยอัตราส่วนของยางซิลิโคน ซิลเวอร์เฟล็กส์ และตัวเร่งแข็งยางซิลิโคนแสดงดังตารางที่ 3.1 จากนั้นเทส่วนผสมลงบนแม่พิมพ์ที่มีรูพรุน กำจัดฟองอากาศที่ผิวโดยใช้ไม้ปลายแหลมจิ้มเบาๆ และนำชิ้นงานใส่ในโถแก้วที่ต้องเข้ากับปั๊มเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อกำจัดฟองอากาศภายใน จากนั้นพักไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง และแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้เป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟล็กส์ที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นแนวเสาที่มีความเป็นระเบียบ แสดงดังรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของยางซิลิโคน ซิลเวอร์เฟล็กส์ และตัวเร่งแข็งยางซิลิโคน

ประเภทของชิ้นงาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อัตราส่วนของ ยางซิลิโคน : ตัวเร่งแข็ง	ปริมาณ ยางซิลิโคน (กรัม)	ปริมาณซิล- เวอร์เฟล็กส์ (กรัม)	ปริมาณ ตัวเร่งแข็ง (กรัม)
ยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบเรียบ	10 : 1	30.3586	-	3.0359
ยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบแนวเสา ที่มีความเป็นระเบียบ	10 : 1	6.5	-	0.65
วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่ อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแบบแนวเสาที่มีความ เป็นระเบียบ	10 : 1	6.4675	0.0358	0.6468
วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่ อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักแบบแนวเสาที่มี ความเป็นระเบียบ	10 : 1	6.4513	0.0536	0.6451

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทของชิ้นงาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อัตราส่วนของ ยางซิลิโคน : ตัวเร่งแข็ง	ปริมาณ ยางซิลิโคน (กรัม)	ปริมาณซิล- เวอร์เฟลกส์ (กรัม)	ปริมาณ ตัวเร่งแข็ง (กรัม)
วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่ อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักแบบแถวเสาที่มี ความเป็นระเบียบ	10 : 1	6.4350	0.0715	0.6435
วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่ อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแบบแถวเสาที่มี ความเป็นระเบียบ	10 : 1	6.3050	0.2145	0.6305
วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่ อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบบแถวเสาที่มี ความเป็นระเบียบ	10 : 1	6.1750	0.3575	0.6175



รูปที่ 3.5 การเตรียมชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟลกส์ที่มีลักษณะพื้นผิวเป็นโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 เทคนิคในการวิเคราะห์เอกลักษณ์

3.9.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)

เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างจุลภาค และพื้นผิวของวัสดุ นาโน (Nanomaterials) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยเตรียมผงซิลเวอร์เฟลกส์ลงบนสตั๊บ (Stub) นำไปเคลือบตัวทองเป็นเวลา 15-30 วินาทีก่อนทำการทดสอบ เพื่อให้ผิวของชิ้นงานตัวอย่างนำไฟฟ้า ใช้ความต่างศักย์ 5 kV เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิลเวอร์เฟลกส์ นอกจากนี้ยังทำการวัดขนาดขององค์ประกอบต่างๆของซิลเวอร์เฟลกส์ดังกล่าวในเป็นจำนวน 10 จุด ด้วยโปรแกรมอิมเมจเจ (ImageJ software) และรายงานผลออกมาเป็นค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 250, USA ²³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.2 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD)

เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของยางซิลิโคน ซิลเวอร์เฟลกส์ และวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟลกส์ ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยหลักการทำงานจะอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนพื้นผิววัสดุที่ต้องการตรวจวัด รังสีเอ็กซ์จะตกกระทบพื้นผิวทำให้เกิดการหักเหและสะท้อนออกมาเป็นมุมต่างๆ โดยแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างผลึกและระนาบการจัดเรียงตัวของผลึกแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดของอะตอมภายใน ส่งผลให้สารต่างๆมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD pattern) ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวจึงสามารถระบุได้ว่าสารที่นำมาวิเคราะห์เป็นสารชนิดใด โดยสภาวะมุม 2θ เริ่มต้นถึงสิ้นสุดที่ใช้ในการทดสอบ คือ 10-80 องศา ในการเตรียมตัวอย่างที่เป็นชิ้นงานทำได้โดยการเตรียมชิ้นงานให้เป็นแผ่นเรียบแล้วตัดให้ได้ขนาด 2.5x2.5 เซนติเมตร จากนั้นนำเข้าอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวลงในโถดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้อง และเตรียมตัวอย่างที่เป็นผงโดยนำผงที่ละเอียดไปใส่บนแท่นบรรจุตัวอย่าง (Sample holder) กดให้แน่นและปาดตัวอย่างให้ผิวหน้าตัวอย่างเรียบ และนำไปตรวจวัดด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์เพื่อศึกษาความเป็นผลึก



รูปที่ 3.7 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smart lab ²³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.3 การพิสูจน์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR)

ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy ; ATR-FTIR) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล โดยอาศัยการกระตุ้นด้วยพลังงานแสงในช่วงอินฟราเรดเพื่อทำให้พันธะเคมีของโมเลกุลนั้นสั่นและหมุน โดยสารแต่ละชนิดจะมีความถี่ของการสั่นที่จำเพาะ จึงสามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของสารได้ โดยข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจะถูกส่งไปประมวลผลในคอมพิวเตอร์ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform) และแปรผลออกมาในรูปของสเปกตรัม สำหรับการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบสามารถทำได้โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างของยางซิลิโคนและวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟล็กส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.3 เซนติเมตร เข้าอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวลงในโถดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี โดยทำการศึกษาในช่วงความยาวคลื่น $4000-700\text{ cm}^{-1}$ ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.8 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น IRTracer-100²³

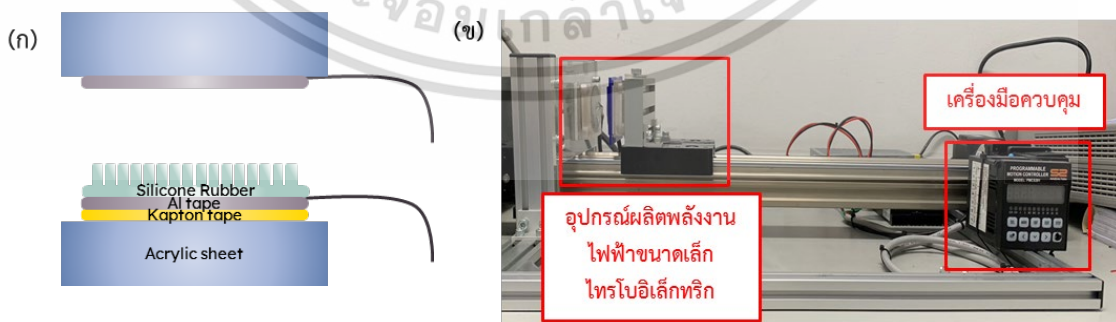
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 การเตรียมและการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก ไทโรโบอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่น (Flexible Triboelectric nanogenerator)

ในงานวิจัยนี้ได้นำวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟล็กส์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก มาประยุกต์ใช้สำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก ไทโรโบอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่น (Flexible Triboelectric nanogenerator) ประเภทการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical contact-separation mode) ร่วมกับอลูมิเนียม (Aluminum tape) จึงได้มีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ดังกล่าว โดยการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) กระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) และกำลังไฟฟ้าขาออก (Output Power) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.10.1 การเตรียมอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก ไทโรโบอิเล็กทริก

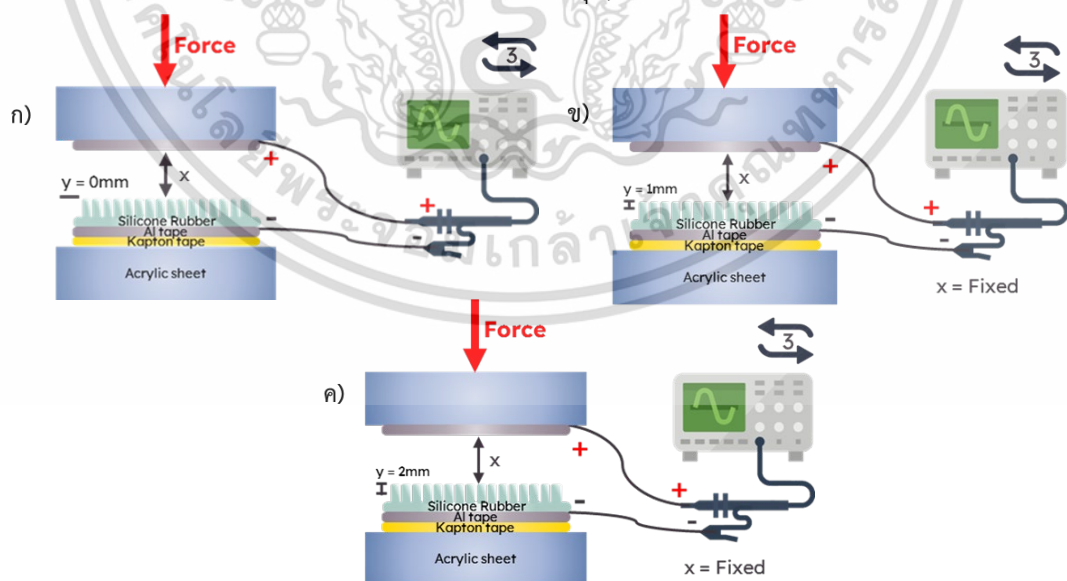
อุปกรณ์ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนบนและส่วนล่าง แสดงดังรูปที่ 3.9(ก) โดยส่วนบนจะติดเทปอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.3 เซนติเมตร ซึ่งทำหน้าที่เป็นคู่วัสดุสัมผัสและเป็นขั้วไฟฟ้าที่จะนำกระแสไฟฟ้าเข้าหรือออกจากระบบ ตามด้วยสายไฟสำหรับต่อเข้ากับเครื่องมือตรวจวัดต่างๆ ความยาว 15 เซนติเมตร ติดลงบนแผ่นอะคริลิกเพื่อยึดโครงสร้างอุปกรณ์ให้อยู่กับส่วนที่เคลื่อนที่ได้สำหรับการให้แรงเชิงกล และส่วนล่างจะนำชิ้นงานยางซิลิโคนซึ่งเป็นคู่วัสดุสัมผัสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.3 เซนติเมตร มาติดเข้ากับสายไฟสำหรับต่อเข้ากับเครื่องมือตรวจวัดต่างๆ ความยาว 15 เซนติเมตร ตามด้วยเทปอะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.3 เซนติเมตร ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าที่จะนำกระแสไฟฟ้าเข้าหรือออกจากระบบ และแคปตอนเทปซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.3 เซนติเมตร จากนั้นติดลงบนแผ่นอะคริลิกเพื่อยึดโครงสร้างอุปกรณ์ให้อยู่กับที่ ซึ่งจะมีเครื่องมือควบคุมสำหรับตั้งค่าการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.9(ข)



รูปที่ 3.9 (ก) แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็ก ไทโรโบอิเล็กทริก (ข) แสดงเอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่อมวลชนหรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10.2 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าขาออก

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) ทดสอบโดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกเข้ากับชุดทดสอบ และเชื่อมต่อสายไฟจากอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) โดยนำสายบวกของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกต่อกับหัวโพรบของเครื่องออสซิลโลสโคป และสายลบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกต่อกับต่อกับสายกราวด์ของเครื่องออสซิลโลสโคป และทำการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกขณะทำการเปิดวงจร (Open-circuit output voltage) เมื่อให้แรงเชิงกลโดยการกดอุปกรณ์ด้วยเครื่องให้แรงกด จะได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าส่งออกแสดงบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป และบันทึกผลออกมาในรูปแบบไฟล์เอ็กเซล (Excel) เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป โดยมีสภาวะในการทดสอบ คือ การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อศึกษาว่าระยะห่างระหว่างวัสดุส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าหรือไม่ และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) เท่ากับ 0 มิลลิเมตร คือวัสดุสัมผัสกันที่ผิวพอดี โดยทดสอบซ้ำทั้งหมด 3 รอบ แสดงดังรูปที่ 3.10(ก) จากนั้นเฉลี่ยค่าแรงดันไฟฟ้าออกมาเพื่อหาระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่เหมาะสม เมื่อได้ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่เหมาะสมที่ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดของแต่ละตัวอย่าง จากนั้นจะกำหนดระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ไว้ และเปลี่ยนแปลงระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) เท่ากับ 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ คือการกดลึกลงไปจากพื้นผิววัสดุ 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อศึกษาว่าเมื่อวัสดุสัมผัสกันมากขึ้นจะส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าอย่างไร และทดสอบซ้ำแต่ละระยะทั้งหมด 3 รอบ แสดงดังรูปที่ 3.10(ข) และ (ค) ตามลำดับ จากนั้นเฉลี่ยค่าแรงดันไฟฟ้าของแต่ละระยะออกมาเพื่อหาระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่เหมาะสม



รูปที่ 3.10 แสดงโครงสร้างการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าส่งออกจากเครื่อง

ออสซิลโลสโคป (ก) กำหนดที่ระยะ y เท่ากับ 0 มิลลิเมตร (ข) กำหนดที่ระยะ y เท่ากับ 1 มิลลิเมตร (ค) กำหนดที่ระยะ y เท่ากับ 2 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงงานเวสสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปเซประะยะขนดานการคา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10.3 การทดสอบกระแสไฟฟ้าขาออก

การทดสอบกระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ทดสอบโดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกเข้ากับชุดทดสอบ และต่ออุปกรณ์ร่วมกับออปแอมป์ (Operation amplifier ; Op-Amp) เชื่อมต่อสายไฟจากอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกทั้ง 2 สายกับขาเข้าของออปแอมป์ เชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) ขาบวกและขาลบเข้ากับวงจรออปแอมป์ เชื่อมต่อหัวโพรบของเครื่องออสซิลโลสโคปกับขาออกของออปแอมป์ และต่อสายกราวด์ของเครื่องออสซิลโลสโคปลงกราวด์ แสดงดังรูปที่ 3.11 และทำการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกขณะทำการลัดวงจร (Short-circuit output current) เมื่อให้แรงเชิงกลโดยการกดอุปกรณ์ด้วยเครื่องให้แรงกด จะได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกแสดงผลบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป และบันทึกผลออกมาในรูปแบบไฟล์เอ็กซ์เซล (Excel) นำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าจากกฎของโอห์ม ดังสมการที่ 3.1

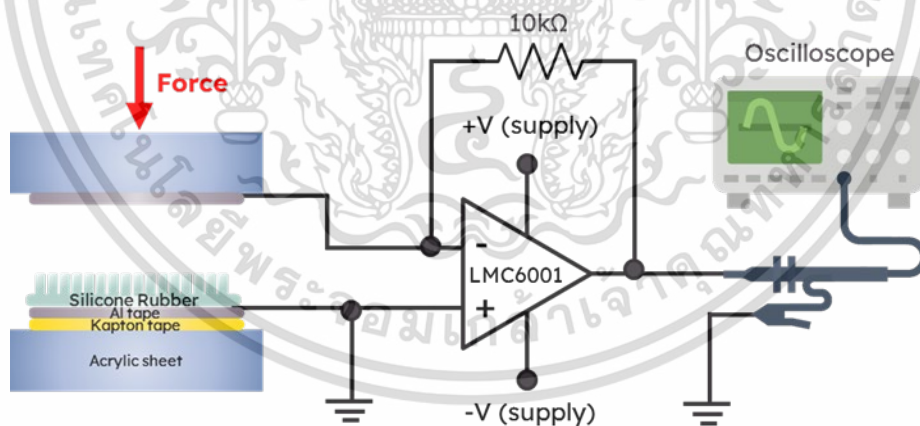
$$I = \frac{V}{R}$$

สมการที่ (3.1)

โดย V = ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (Voltage)

I = ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (Current)

R = ค่าความต้านทาน (Resistance)



รูปที่ 3.11 แสดงโครงสร้างการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับการตรวจสอบกระแสไฟฟ้าส่งออกจากเครื่องออสซิลโลสโคปโดยต่อร่วมกับออปแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

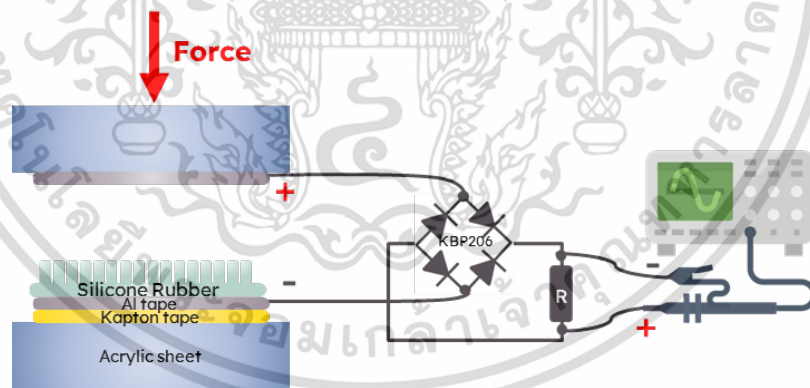
3.10.4 การทดสอบกำลังไฟฟ้าขาออก

การทดสอบกำลังไฟฟ้าขาออก (Output Power) ทดสอบโดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับชุดทดสอบ โดยเชื่อมต่อสายไฟจากอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับไดโอดบริดจ์ จากนั้นเชื่อมต่อสายไฟจากเครื่องออสซิลโลสโคปเข้ากับตัวต้านทาน และวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานในช่วงความต้านทาน $0.5M\Omega$ $1M\Omega$ $2M\Omega$ $5M\Omega$ $10M\Omega$ $20M\Omega$ $30M\Omega$ $40M\Omega$ $50M\Omega$ $60M\Omega$ $70M\Omega$ $80M\Omega$ $90M\Omega$ $100M\Omega$ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.12 เมื่อให้แรงเชิงกลโดยการกดอุปกรณ์ด้วยเครื่องให้แรงกด จะได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกแสดงผลบนหน้าจอเครื่องออสซิลโลสโคป และบันทึกผลออกมาในรูปแบบไฟล์เอ็กเซล (Excel) นำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าจากกฎของโอห์ม ดังสมการที่ 3.1 เมื่อคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าได้แล้ว จากนั้นนำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า ดังสมการ 3.2 และนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อไป

$$P = IV$$

สมการที่ (3.2)

โดย P = ค่ากำลังไฟฟ้า (Power)
 I = ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (Current)
 V = ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (Voltage)



รูปที่ 3.12 แสดงโครงสร้างการเชื่อมต่อเพื่อตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าส่งออกจากเครื่องออสซิลโลสโคป โดยต่อร่วมกับตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การสังเคราะห์ซิลเวอร์เฟลกส์ (Silver Flakes) ด้วยการตกตะกอนทางเคมี

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของซิลเวอร์เฟลกส์

จากการสังเคราะห์ซิลเวอร์เฟลกส์ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยซิงซิลเวอร์ไนเตรต 1 กรัม และไอรอน (II) ซัลเฟต 4.4 กรัม แล้วนำไปละลายในน้ำ DI ปริมาณ 50 มิลลิลิตรตามลำดับ จากนั้นใส่กรดซิตริก 0.15 กรัม ลงในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต แล้วคนให้เข้ากัน จากนั้นเทสารละลายไอรอน (II) ซัลเฟตลงในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต แล้วนำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสาร (Magnetic Stirrer) ที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น 3-4 ครั้ง และเอทานอล 2-3 ครั้ง ตามลำดับ จากนั้นนำไปใส่ในภาชนะที่มีซิลิกาเจลและปิดให้สนิท เข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยสารตัวอย่างซิลเวอร์เฟลกส์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นผงสีเทา ดังแสดงในรูปที่ 4.1



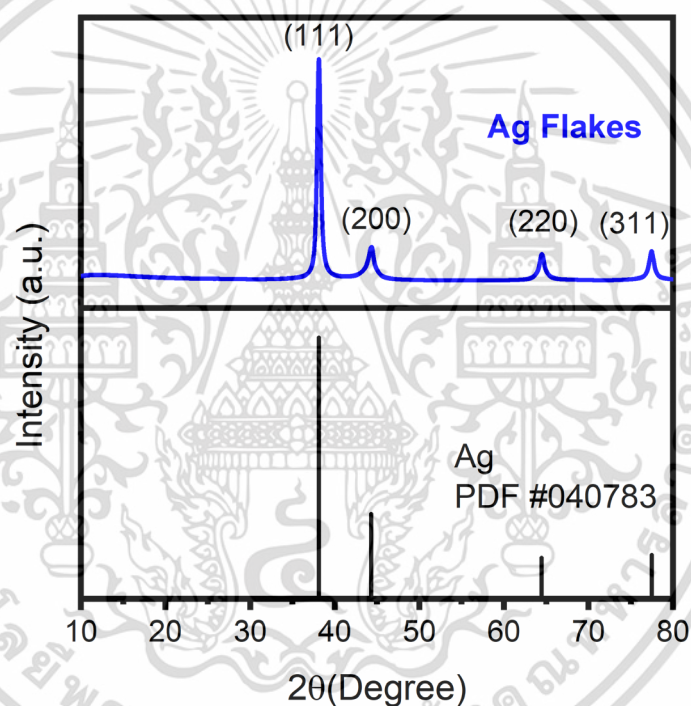
รูปที่ 4.1 แสดงผงตัวอย่างของซิลเวอร์เฟลกส์ที่สังเคราะห์ได้

4.1.2 ผลการศึกษาความเป็นผลึกของซิลเวอร์เฟลกส์ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique; XRD)

จากการศึกษาความเป็นผลึกของซิลเวอร์เฟลกส์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique; XRD) ในการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า ซิลเวอร์เฟลกส์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยเปลี่ยนจากซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ให้กลายเป็นซิลเวอร์ (Ag^0) ซึ่งมีการตรวจพบพีคของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ โดยพบพีคทั้งหมด 4 พีค ขึ้นที่มุม 2θ เอกสารนี้เท่ากับ 38.23° 44.45° 64.56° และ 77.49° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (111) (200) (220) และ (311) ไม่ว่าจะตามลำดับ โดยมีการปรากฏพีคของ รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซิลเวอร์เฟลกส์ดังกล่าว มีความ

สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของข้อมูลกราฟมาตรฐาน PDF #040783 นอกจากนี้จากข้อมูลกราฟมาตรฐานของซิลเวอร์เฟลกส์ในโปรแกรม PCPDFWIN ยังพบว่าซิลเวอร์เฟลกส์มีโครงสร้างผลึกเป็นลูกบาศก์ (Cubic) แบบกลางหน้า (Face-centered) มี Space group คือ $Fm\bar{3}m$ (225) และมีแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice parameter) ด้าน a เท่ากับ 4.086 Å

ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์ อนุมานได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างระบบผลึกลูกบาศก์แบบกลางหน้า (Face Centered Cubic; FCC) มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีวัฏภาคอื่นแปลกปลอมอยู่หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง จึงสรุปได้ว่าวิธีการที่เราสังเคราะห์สามารถเปลี่ยนจากซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) ให้กลายเป็นซิลเวอร์ (Ag^0) ได้ แต่เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ไม่ได้บ่งบอกลักษณะรูปร่างความเป็นเฟลกส์ได้ จึงต้องนำไปตรวจสอบเอกลักษณ์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อดูลักษณะรูปร่างของซิลเวอร์เฟลกส์



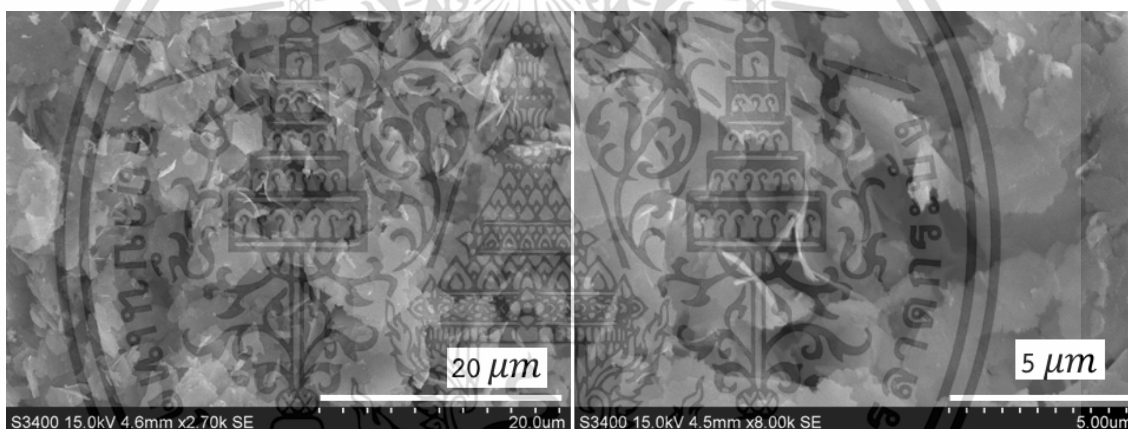
รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซิลเวอร์เฟลกส์ ที่สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของข้อมูลกราฟมาตรฐาน PDF #040783

4.1.3 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิลเวอร์เฟลกส์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

จากการสังเคราะห์ซิลเวอร์เฟลกส์ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี จึงนำผงซิลเวอร์เฟลกส์ที่สังเคราะห์ได้มาทำการตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิลเวอร์เฟลกส์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของซิลเวอร์เฟลกส์ แสดงดังรูป 4.3 จากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่ารูปร่างของซิลเวอร์เฟลกส์ที่สังเคราะห์ได้นั้น มีลักษณะเป็นเกล็ดเหมือนกัน

ทั้งหมด แต่มีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีขนาดเฉลี่ย $5.41 \pm 2.53 \mu\text{m}$ และมีความหนาเฉลี่ย $91.8 \pm 2.88 \text{ nm}$ และได้ค่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) ของซิลเวอร์เฟล็กส์อยู่ที่ 58.93 และไม่พบลักษณะรูปร่างอื่นที่แตกต่างจากเฟล็กส์

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Zhai, A. และคณะ²² พบว่าซิลเวอร์เฟล็กส์มีลักษณะเป็นเกล็ดที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอเหมือนกัน มีขนาดเฉลี่ย $4.44 \pm 1.27 \mu\text{m}$ ความหนาเฉลี่ย $95.58 \pm 19.54 \text{ nm}$ และมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) อยู่ที่ 46.45 สรุปได้ว่าซิลเวอร์เฟล็กส์ที่เราสังเคราะห์ได้นั้น มีลักษณะรูปร่างและขนาดที่ใกล้เคียงกันเมื่อเทียบจากงานวิจัยอ้างอิง และจาก 2 เทคนิค ได้แก่ เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และการตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (SEM) สามารถยืนยันได้ว่า กระบวนการที่ใช้สังเคราะห์นั้นมีประสิทธิภาพ สามารถสังเคราะห์ซิลเวอร์ให้มีรูปร่างเป็น เฟล็กส์ตามที่ต้องการได้ จากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และการตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (SEM) สามารถยืนยันได้ว่า กระบวนการที่ใช้สังเคราะห์นั้นมีประสิทธิภาพ สามารถสังเคราะห์ซิลเวอร์ให้มีรูปร่างเป็นเฟล็กส์ตามที่ต้องการได้



รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่าย SEM ของซิลเวอร์เฟล็กส์

4.2 การศึกษาวัสดุเชิงประกอบแบบยึดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟล็กส์

จากการเตรียมวัสดุเชิงประกอบแบบยึดหยุ่นโดยใช้ยางซิลิโคนเป็นเฟสหลัก (Matrix phase) และใช้ซิลเวอร์เฟล็กส์เป็นเฟสกระจาย (Dispersed phase) โดยซิลเวอร์เฟล็กส์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้สังเคราะห์ได้จากกระบวนการตกตะกอนทางเคมี ในงานวิจัยนี้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแบบโดยแบบหล่อไล่ซีพิ้ง (Lost Wax Casting) เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์แบบยึดหยุ่น จึงได้ศึกษาลักษณะทางกายภาพและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบแบบยืดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบแบบยืดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์ โดยใช้ปริมาณสุทธิของชิ้นงานเท่ากับ 7.15 กรัม ในการขึ้นรูป และเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก และเปรียบเทียบกับชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ และชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ขึ้นรูปด้วยปริมาณสุทธิตีเดียวกัน โดยทำให้แรงเพื่อกดงอชิ้นงานตั้งแต่ 0 องศาไปจนถึง 60 องศา

จากผลการทดลองนี้พบว่า ชิ้นงานมีความยืดหยุ่น เมื่อมีให้แรงเพื่อกดงอ สามารถคืนตัวได้โดยไม่เสียรูป หลังจากให้แรงงอชิ้นงาน ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานยังคงเหมือนเดิม ไม่เกิดการฉีกขาดหรือรอยร้าว ไม่เกิดการเสียหาย แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่มีเฟสเดียว ได้แก่ ชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ และชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ ซึ่งมีพื้นผิวที่แตกต่างกัน พื้นผิวที่แตกต่างกัน ยางซิลิโคนยังคงแสดงประสิทธิภาพหรือความสามารถในการยืดหยุ่น เมื่อปริมาณซิลเวอร์เฟลกส์เพิ่มขึ้นก็ไม่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน ยางซิลิโคนก็ยังคงประสิทธิภาพในความยืดหยุ่น โดยยางซิลิโคนเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติม เปลี่ยนโครงสร้างที่เป็นโซ่ตรง ให้เป็นโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง มอนอเมอร์เชื่อมพันธะกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ เกิดเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นและแข็งแรง เป็นโซ่ยาว ทำให้พอลิเมอร์เรียงชิดกัน จึงมีความหนาแน่นมาก ทำให้ซิลิโคนมีความเหนียวและยืดหยุ่น

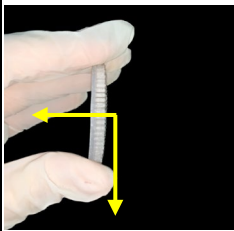
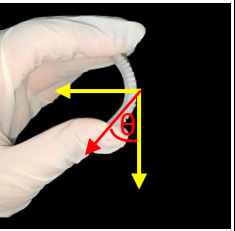
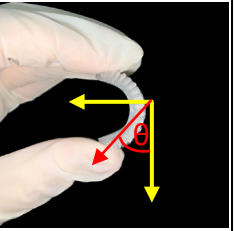
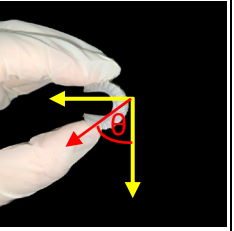
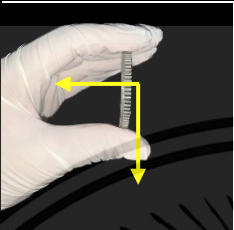
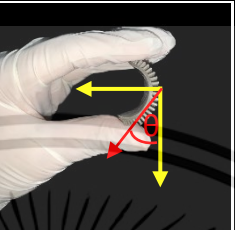
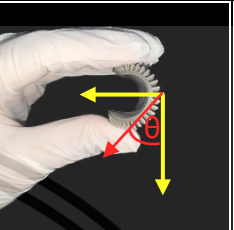
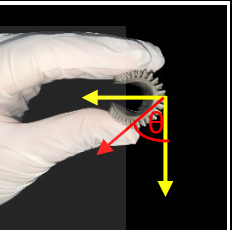
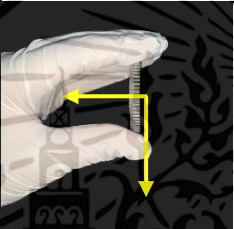
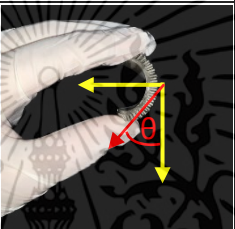
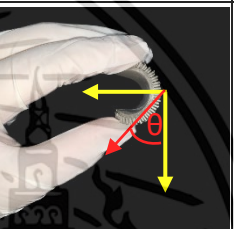
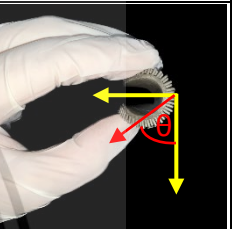
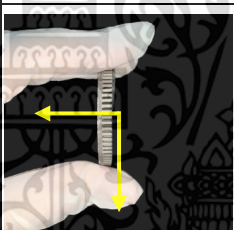
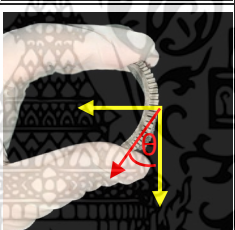
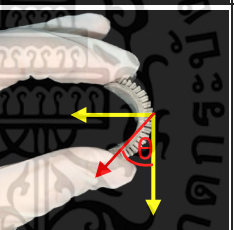
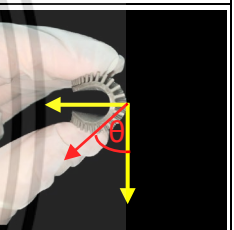
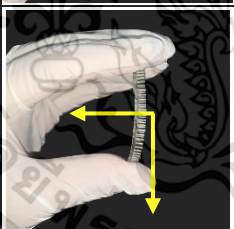

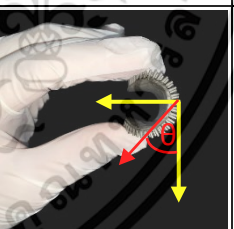
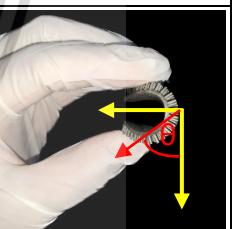
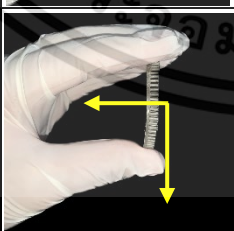
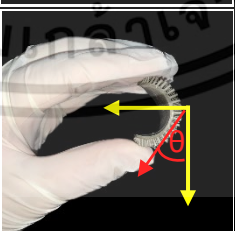
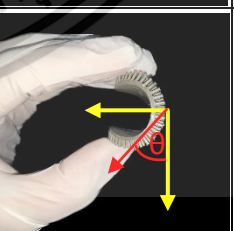
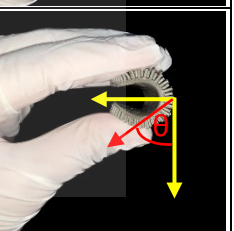
แสดงให้เห็นว่าปริมาณซิลเวอร์เฟลกส์ที่ศึกษาตั้งแต่อัตราส่วนร้อยละ 0.5 ถึง 5 โดยน้ำหนัก ไม่ได้ทำลายพันธะโคเวเลนต์ของยางซิลิโคน ทำให้ยางซิลิโคนยังคงเชื่อมพันธะกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ ความสามารถในการยืดหยุ่นของยางซิลิโคนไม่ได้ลดลงแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการยืดหยุ่นของยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ ยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ และวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งทดสอบให้แรงเชิงกลโดยการงอ

ประเภทของชิ้นงาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	$\sim 0^\circ$	$\sim 20^\circ$	$\sim 40^\circ$	$\sim 60^\circ$
ยางซิลิโคนบริสุทธิ์ แบบเรียบ				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทของชิ้นงาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	$\sim 0^\circ$	$\sim 20^\circ$	$\sim 40^\circ$	$\sim 60^\circ$
ยางซิลิโคนบริสุทธิ์ แบบแถวเสาที่มีความ เป็นระเบียบ				
ยางซิลิโคนที่อัตราส่วน ซิลเวอร์เพลทส์ร้อยละ 0.5 แบบแถวเสาที่มี ความเป็นระเบียบ				
ยางซิลิโคนที่อัตราส่วน ซิลเวอร์เพลทส์ร้อยละ 0.75 แบบแถวเสาที่มี ความเป็นระเบียบ				
ยางซิลิโคนที่อัตราส่วน ซิลเวอร์เพลทส์ร้อยละ 1 แบบแถวเสาที่มี ความเป็นระเบียบ				
ยางซิลิโคนที่อัตราส่วน ซิลเวอร์เพลทส์ร้อยละ 3 แบบแถวเสาที่มี ความเป็นระเบียบ				
ยางซิลิโคนที่อัตราส่วน ซิลเวอร์เพลทส์ร้อยละ 5 แบบแถวเสาที่มี ความเป็นระเบียบ				

(ต่อตารางที่ 4.1 ความสามารถในการยืดหยุ่นของยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ ยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ และวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เพลทส์ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งทดสอบให้แรงเชิงกลโดยการงอ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

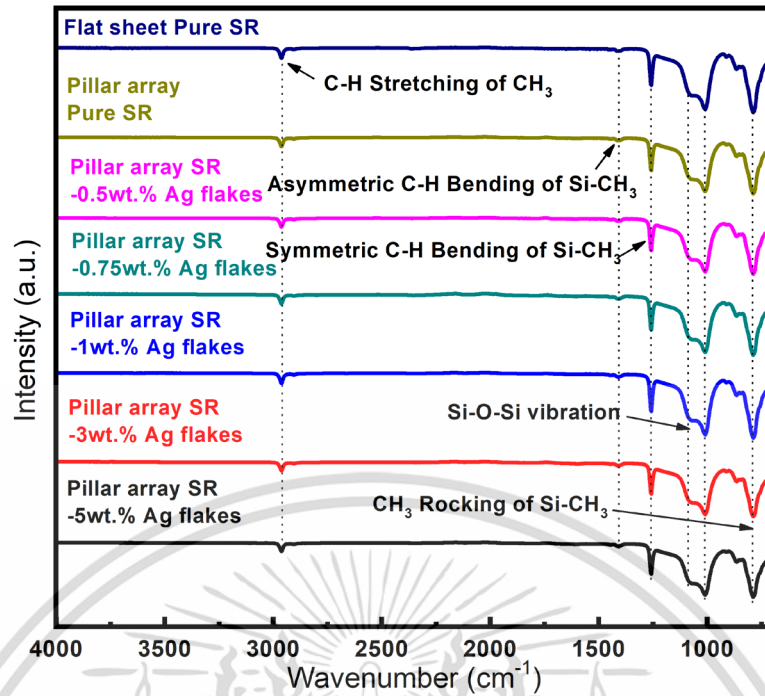
4.2.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของวัสดุเชิงประกอบจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟล็กส์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR)

จากการเตรียมชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบแบบยัดหยุนจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟล็กส์ จึงนำชิ้นงานที่เตรียมได้มาทำการตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิลเวอร์เฟล็กส์ ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR) เพื่อศึกษาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของวัสดุเชิงประกอบแบบยัดหยุนจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟล็กส์ แสดงดังรูป 4.4 จากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า ชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ มีการตรวจพบพีคการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชัน ประกอบไปด้วยทั้งหมด 7 พีค เริ่มจากพีคการดูดกลืนอยู่ในช่วง 2959 cm^{-1} เป็น C-H stretching vibration of CH_3 ในช่วง 1408 cm^{-1} เป็น Asymmetric C-H bending vibration of $\text{Si}(\text{CH}_3)_x$ ในช่วง 1259 cm^{-1} เป็น Symmetric C-H bending vibration of $\text{Si}(\text{CH}_3)_x$ ในช่วง 1068 cm^{-1} เป็น Asymmetric Si-O stretching of Si-O-Si ในช่วง 1004 cm^{-1} เป็น Symmetric Si-O stretching of Si-O-Si ในช่วง 866 cm^{-1} เป็น CH_3 rocking vibration of $\text{Si}(\text{CH}_3)_3$ และ ในช่วง 784 cm^{-1} เป็น CH_3 rocking vibration of $\text{Si}(\text{CH}_3)_2$

ซึ่งการสันจากหมู่ฟังก์ชันทั้งหมดตรงกับโครงสร้างของยางซิลิโคน โดยยางซิลิโคนมีสูตรโมเลกุลเป็นพอลิไซลอกเซน (Polysiloxane) และเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวเป็นชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแฉกเสาที่มีความเป็นระเบียบ พบว่ามีรูปแบบเดียวกับชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ แสดงให้เห็นว่าเมื่อปรับปรุงพื้นผิว รูปร่างและลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน จะไม่ส่งผลกับโครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุลของยางซิลิโคน

เมื่อเติมซิลเวอร์เฟล็กส์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก พบว่ามีรูปแบบเดียวกับชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ และชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแฉกเสาที่มีความเป็นระเบียบ แสดงให้เห็นว่าซิลเวอร์เฟล็กส์ไม่ได้ทำให้โครงสร้างของยางซิลิโคนเกิดการเปลี่ยนแปลง ไม่เห็นการเลื่อนของพีค ไม่พบพีคที่เป็นเกิดการกัณธระหว่างซิลเวอร์เฟล็กส์และยางซิลิโคนเกิดขึ้นภายในชิ้นงานตัวอย่าง ยืนยันได้ว่าชิ้นงานตัวอย่างไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเฟสต่อเนื่อง (Matrix phase) และเฟสกระจายตัว (Dispersed phase) ซึ่งก็ยืนยันได้ว่ายางซิลิโคนที่เติมซิลเวอร์เฟล็กส์ลงไปกลายเป็นวัสดุคอมโพสิตโดยสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบอย่างซิลิโคนที่อัตราส่วนของซิลเวอร์เฟล็กส์ ร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักตามลำดับ และเปรียบเทียบกับชิ้นงานอย่างซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ และชิ้นงานอย่างซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ขึ้นรูปด้วยปริมาณสุทธิเดียวกัน ในช่วง 700-4000 cm⁻¹

ตารางที่ 4.2 แสดงช่วงการดูดกลืนตามหมู่ฟังก์ชันและพันธะที่พบในวัสดุเชิงประกอบ

ช่วงการดูดกลืน (cm ⁻¹)	รูปแบบการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน/พันธะ
2959	การสั่นแบบยืดหด	หมู่เมทิล (C-H band)
1408	การสั่นแบบบิดงอที่ไม่สมมาตร	หมู่เมทิล (C-H band)
1259	การสั่นแบบบิดงอที่สมมาตร	หมู่เมทิล (C-H band)
1068 และ 1004	การสั่นแบบยืดหด	พันธะระหว่างซิลิกอนและออกซิเจน (Si-O-Si)

784 การสั่นแบบแกว่ง หมู่เมทิล (C-H band)

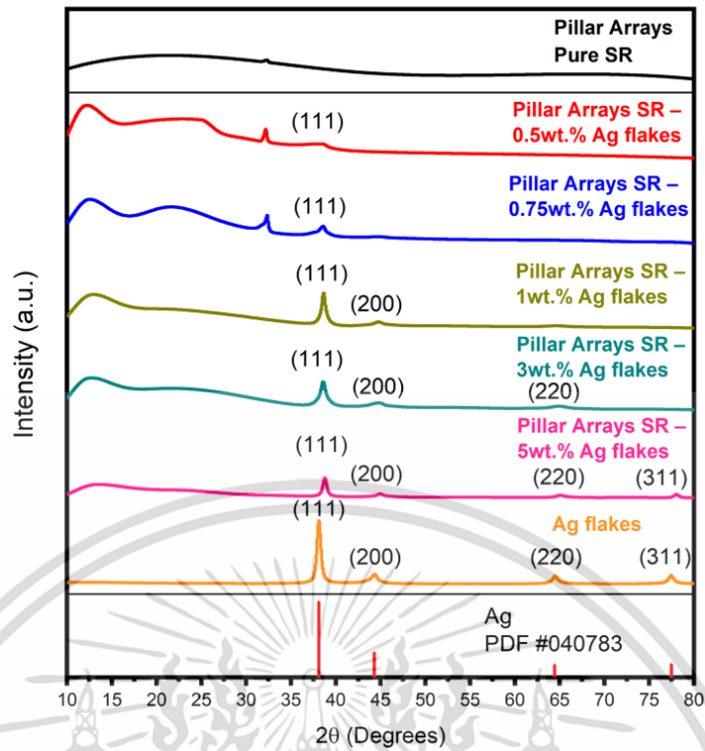
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการศึกษาความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD)

จากการเตรียมชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบแบบยืดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์ จึงนำชิ้นงานที่เตรียมได้มาทำการตรวจวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) เพื่อศึกษาความเป็นผลึกและชนิดของธาตุองค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบแบบยืดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์ แสดงดังรูป 4.5 จากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า ชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแกลเสาที่มีความเป็นระเบียบ รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ มีลักษณะเป็นพีคกว้าง เนื่องจากวัสดุที่เป็นอสัณฐาน การจัดเรียงตัวของอะตอมไม่มีรูปแบบในทุกทิศทาง สัญญาณที่ตรวจวัดได้จึงไม่มีรูปแบบเฉพาะ แต่พบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 32.21° ซึ่งปรากฏตรงกับพีคเอกลักษณ์ของไดคুমิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide) ซึ่งอยู่ในสารเชื่อมขวางของยางซิลิโคน โดยอ้างอิงจากวิจัยของ Vilesh, V. และ S. Ganesanpotti²³ และเมื่อเติมซิลเวอร์เฟลกส์ที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก พบพีคเพิ่มเติมขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ 38.55° สอดคล้องกับระบบผลึกในระนาบ (111) โดยปรากฏตรงกับพีคเอกลักษณ์ของซิลเวอร์เฟลกส์ เมื่อเพิ่มซิลเวอร์เฟลกส์เป็นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบพีคเพิ่มเติมขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ 44.89° ที่สอดคล้องกับระนาบ (200) ซึ่งปรากฏตรงกับพีคเอกลักษณ์ของซิลเวอร์เฟลกส์ เมื่อเพิ่มซิลเวอร์เฟลกส์เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พบพีคเพิ่มเติมขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ 65.13° ที่สอดคล้องกับระนาบ (220) ซึ่งตรงกับพีคเอกลักษณ์ของซิลเวอร์เฟลกส์ และเมื่อเพิ่มซิลเวอร์เฟลกส์เป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบพีคเพิ่มเติมขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ 78.06° ที่สอดคล้องกับระนาบ (311) ซึ่งตรงกับพีคเอกลักษณ์ของซิลเวอร์เฟลกส์ จากลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะสังเกตได้ว่า เมื่อปริมาณซิลเวอร์เฟลกส์เพิ่มขึ้น พบว่าที่ระนาบ (111) (200) และ (220) ความเข้ม (Intensity) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญแต่ที่ระนาบ (111) พบว่า ความเข้มเริ่มลดลงเมื่อมีปริมาณซิลเวอร์เฟลกส์อัตราส่วนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

แสดงให้เห็นว่า การเติมซิลเวอร์เฟลกส์เพื่อสร้างเป็นวัสดุคอมโพสิต ไม่พบเฟสแปลกปลอมอื่นๆที่เกิดขึ้นในลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์นี้ ยกเว้นพีคเอกลักษณ์ของไดคুমิลเปอร์ออกไซด์ซึ่งอยู่ในสารเชื่อมขวางของยางซิลิโคน ที่พบในชิ้นงานชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแกลเสาที่มีความเป็นระเบียบ วัสดุเชิงประกอบแบบยืดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์ ที่อัตราส่วนของซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.5 และ 0.75 โดยน้ำหนัก จึงยืนยันได้ว่าเชิงประกอบแบบยืดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์ที่เตรียมขึ้นมาเป็นวัสดุคอมโพสิต ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น และยืนยันได้ว่ากระบวนการที่ใช้ในการเตรียม เหมาะสมที่จะใช้ในการเตรียมวัสดุคอมโพสิตได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของวัสดุเชิงประกอบจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

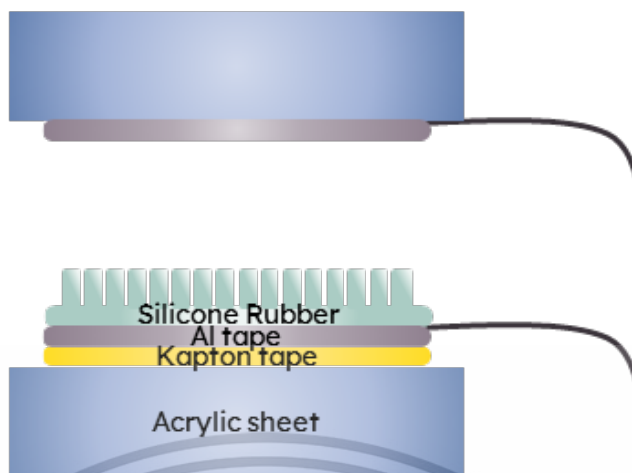


รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุเชิงประกอบอย่างซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักตามลำดับ เปรียบเทียบกับชิ้นงานอย่างซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบและข้อมูลกราฟมาตรฐาน PDF #040783 ของซิลเวอร์เฟล็กส์

4.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริก ประเภทการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical contact-separation mode; CS)

จากการนำวัสดุเชิงประกอบระหว่างอย่างซิลิโคนกับซิลเวอร์เฟล็กส์ที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก มาประยุกต์ใช้สำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่น (Flexible Triboelectric Nanogenerator) ประเภทการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical contact-separation mode; CS) ร่วมกับแผ่นอลูมิเนียม (Aluminum tape) แสดงดังรูปที่ 4.6 จึงได้มีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ดังกล่าวโดยการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) กระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) และกำลังไฟฟ้าขาออก (Output Power) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

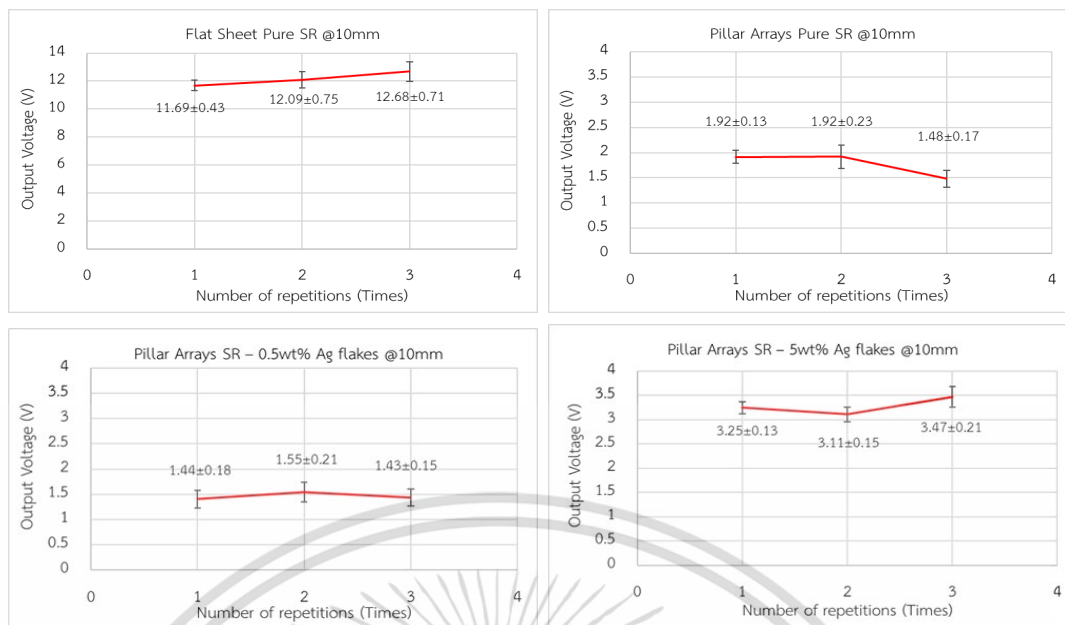


รูปที่ 4.6 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไทรโบอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่น ประเภทการสัมผัสแบบตั้งฉาก

4.3.1 ความเสถียรของอุปกรณ์ (Device Stability)

โดยผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของแต่ละชิ้นงาน จากการทดสอบ 9 ครั้งและทดสอบซ้ำทั้งหมด 3 รอบเพื่อแสดงถึงความเสถียรของอุปกรณ์ โดยเลือกชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวต่างกันคือแบบเรียบและแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ และเลือกชิ้นงานที่มีอัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์น้อยที่สุดคือร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และมากที่สุดคือร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มานำเสนอถึงความเสถียรของอุปกรณ์ แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่า ค่าที่ได้จากการทดสอบซ้ำของแต่ละชิ้นงานมีความใกล้เคียงกัน ไม่มีค่าที่โดดสูงออกไป อย่างเช่นในยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ยังคงให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกใกล้เคียงกันประมาณ 12 โวลต์ เมื่อมีการปรับปรุงพื้นพื้นผิวชิ้นงานให้เป็นโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ และมีการเติมซิลเวอร์เฟลกส์ลงไปทีอัตราส่วนต่างๆ พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้ก็ยังคงความเสถียร ซึ่งแสดงถึงความเสถียรของอุปกรณ์และบ่งบอกว่าเทคนิคที่ใช้มีความแม่นยำค่าที่ได้มีความน่าเชื่อถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

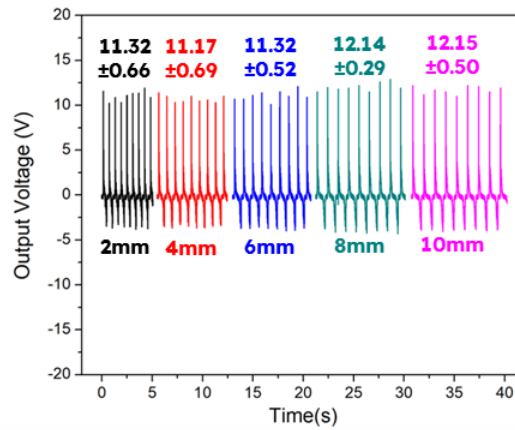


รูปที่ 4.7 แสดงความเสถียรของอุปกรณ์จากการทดสอบ 9 ครั้งและทดสอบซ้ำทั้งหมด 3 รอบของชิ้นงานต่างๆ

4.3.2 ผลการศึกษาค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage)

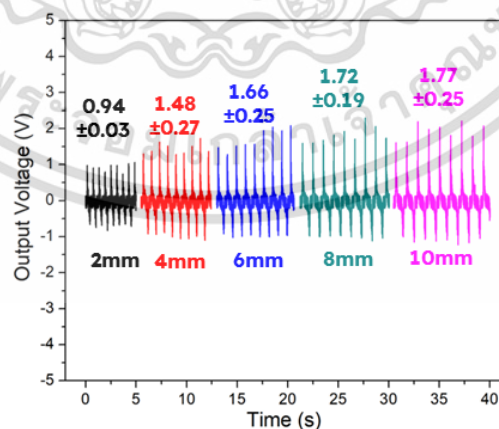
จากการศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบเรียบ โดยมีสถานะในการทดสอบ คือ มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร คือสัมผัสกันที่ผิวพอดี พบว่าที่ระยะ x ต่างกัน ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังรูปที่ 4.8 ที่ระยะห่าง 2 มิลลิเมตร (x = 2 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 11.32 ± 0.66 โวลต์ ที่ระยะห่าง 4 มิลลิเมตร (x = 4 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 11.17 ± 0.69 โวลต์ ที่ระยะห่าง 6 มิลลิเมตร (x = 6 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 11.32 ± 0.52 โวลต์ ที่ระยะห่าง 8 มิลลิเมตร (x = 8 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 12.14 ± 0.29 โวลต์ และที่ระยะห่าง 10 มิลลิเมตร (x = 10 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 12.15 ± 0.50 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่สูงที่สุดของชิ้นงานนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบเรียบที่ระยะ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ

จากการศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ โดยมีสภาวะในการทดสอบ คือ มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร คือสัมผัสกันที่ผิวพอดี พบว่าที่ระยะ x ต่างกัน ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.9 ที่ระยะห่าง 2 มิลลิเมตร (x = 2 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.94 ± 0.03 โวลต์ ที่ระยะห่าง 4 มิลลิเมตร (x = 4 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.48 ± 0.27 โวลต์ ที่ระยะห่าง 6 มิลลิเมตร (x = 6 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.66 ± 0.25 โวลต์ ที่ระยะห่าง 8 มิลลิเมตร (x = 8 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.72 ± 0.19 โวลต์ และที่ระยะห่าง 10 มิลลิเมตร (x = 10 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.77 ± 0.25 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่สูงที่สุดของชิ้นงานนี้

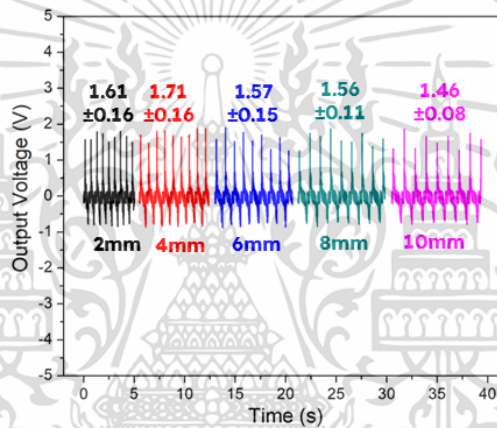


รูปที่ 4.9 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็น

ระเบียบที่ระยะ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร

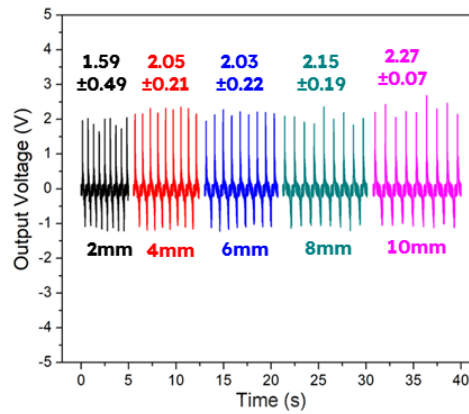
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ โดยมีสภาวะในการทดสอบ คือ มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร คือสัมผัสกันที่ผิวพอดี พบว่าที่ระยะ x ต่างกัน ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้มีแนวโน้มลดลง แสดงดังรูปที่ 4.10 ที่ระยะห่าง 2 มิลลิเมตร (x = 2 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.61 ± 0.16 โวลต์ ที่ระยะห่าง 4 มิลลิเมตร (x = 4 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.71 ± 0.16 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่สูงที่สุดของชิ้นงานนี้ ที่ระยะห่าง 6 มิลลิเมตร (x = 6 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.57 ± 0.15 โวลต์ ที่ระยะห่าง 8 มิลลิเมตร (x = 8 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.56 ± 0.11 โวลต์ และที่ระยะห่าง 10 มิลลิเมตร (x = 10 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.46 ± 0.08 โวลต์



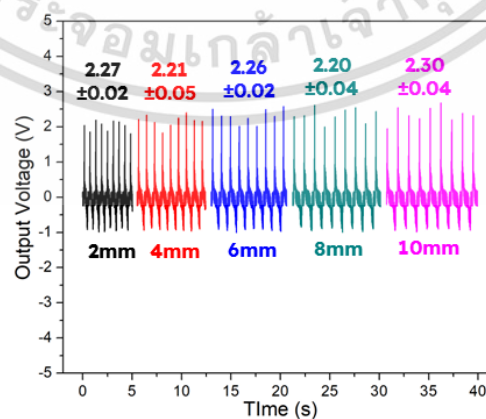
รูปที่ 4.10 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ระยะ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร

จากการศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ โดยมีสภาวะในการทดสอบ คือ มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร คือสัมผัสกันที่ผิวพอดี พบว่าที่ระยะ x ต่างกัน ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.11 ที่ระยะห่าง 2 มิลลิเมตร (x = 2 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.59 ± 0.49 โวลต์ ที่ระยะห่าง 4 มิลลิเมตร (x = 4 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.05 ± 0.21 โวลต์ ที่ระยะห่าง 6 มิลลิเมตร (x = 6 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.03 ± 0.22 โวลต์ ที่ระยะห่าง 8 มิลลิเมตร (x = 8 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.15 ± 0.19 โวลต์ และที่ระยะห่าง 10 มิลลิเมตร (x = 10 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.27 ± 0.07 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ไม่ว่ากสูงที่สุดของชิ้นงานนี้ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ระยะ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร

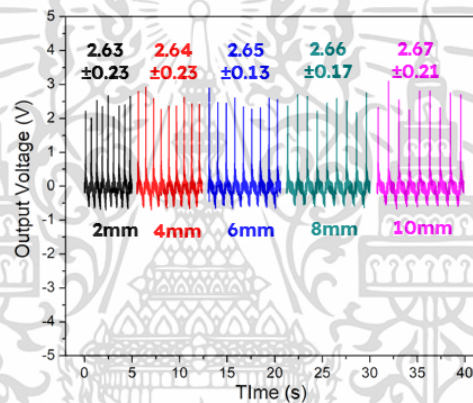
จากการศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ โดยมีสถานะในการทดสอบ คือ มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ และ กำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร คือสัมผัสกันที่ผิวพอดี พบว่าที่ระยะ x ต่างกัน ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังรูปที่ 4.12 ที่ระยะห่าง 2 มิลลิเมตร (x = 2 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.27 ± 0.02 โวลต์ ที่ระยะห่าง 4 มิลลิเมตร (x = 4 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.21 ± 0.05 โวลต์ ที่ระยะห่าง 6 มิลลิเมตร (x = 6 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.26 ± 0.02 โวลต์ ที่ระยะห่าง 8 มิลลิเมตร (x = 8 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.20 ± 0.04 โวลต์ และที่ระยะห่าง 10 มิลลิเมตร (x = 10 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.30 ± 0.04 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่สูงที่สุดของชิ้นงานนี้



รูปที่ 4.12 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ระยะ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานับ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

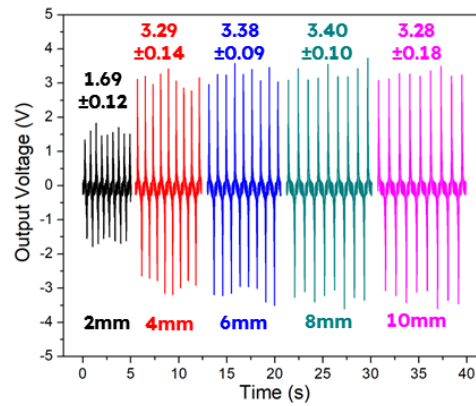
จากการศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบอย่างซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ โดยมีสถานะในการทดสอบคือ มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร คือสัมผัสกันที่ผิวพอดี พบว่าที่ระยะ x ต่างกัน ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังรูปที่ 4.13 ที่ระยะห่าง 2 มิลลิเมตร (x = 2 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.63 ± 0.23 โวลต์ ที่ระยะห่าง 4 มิลลิเมตร (x = 4 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.64 ± 0.23 โวลต์ ที่ระยะห่าง 6 มิลลิเมตร (x = 6 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.65 ± 0.13 โวลต์ ที่ระยะห่าง 8 มิลลิเมตร (x = 8 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.66 ± 0.17 โวลต์ และที่ระยะห่าง 10 มิลลิเมตร (x = 10 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.67 ± 0.21 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่สูงที่สุดของชิ้นงานนี้



รูปที่ 4.13 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบอย่างซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ระยะ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร

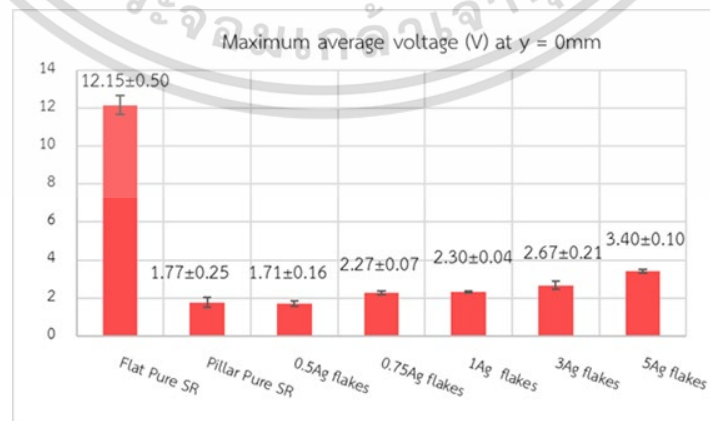
จากการศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบอย่างซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ โดยมีสถานะในการทดสอบคือ มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร คือสัมผัสกันที่ผิวพอดี พบว่าที่ระยะ x ต่างกัน ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.14 ที่ระยะห่าง 2 มิลลิเมตร (x = 2 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.69 ± 0.12 โวลต์ ที่ระยะห่าง 4 มิลลิเมตร (x = 4 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 3.29 ± 0.14 โวลต์ ที่ระยะห่าง 6 มิลลิเมตร (x = 6 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 3.38 ± 0.09 โวลต์ ที่ระยะห่าง 8 มิลลิเมตร (x = 8 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 3.40 ± 0.10 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่สูงที่สุดของชิ้นงานนี้ และที่ระยะห่าง 10 มิลลิเมตร (x = 10 มิลลิเมตร) มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 3.28 ± 0.18 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารผลงานวิจัยสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

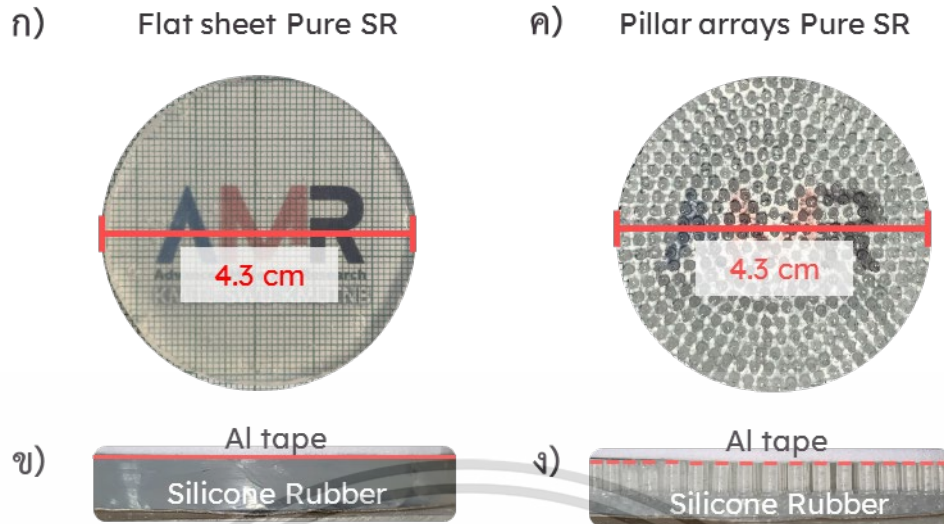


รูปที่ 4.14 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ระยะ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร

โดยค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุดของแต่ละชิ้นงาน ที่ระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุสัมผัสกันที่ผิวพอดิ ($y = 0$ มิลลิเมตร) สรุปได้ดังรูปที่ 4.15 เห็นได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิววัสดุของยางซิลิโคนบริสุทธิ์จากแบบเรียบเป็นแบบแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกลดประมาณ 85% เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานที่แตกต่างกัน ซึ่งชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบแผ่นเรียบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.3 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 4.16(ก) มีพื้นที่ผิวสัมผัส 14.52 ตารางเซนติเมตร โดยเมื่อคู่วัสดุระหว่างเทปอลูมิเนียมที่เป็นแผ่นเรียบสัมผัสกับผิวของยางซิลิโคนแบบเรียบ จะเห็นว่าผิววัสดุสัมผัสกันทั้งหมดเนื่องจากลักษณะพื้นผิวที่เรียบทั่วทั้งแผ่น แสดงดังรูปที่ 4.16(ข) และชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน แสดงดังรูปที่ 4.16(ค) มีพื้นที่ผิวสัมผัสลดลงเหลือ 2.93 ตารางเซนติเมตร โดยเมื่อคู่วัสดุระหว่างเทปอลูมิเนียมที่เป็นแผ่นเรียบสัมผัสกับผิวของยางซิลิโคนแบบแถวเสา จะเห็นว่าผิววัสดุสัมผัสกันน้อยลง เนื่องจากอลูมิเนียมเป็นแผ่นเรียบซึ่งไม่สามารถสัมผัสกับพื้นที่ผิวของยางซิลิโคนแบบแถวเสาที่ถูกสร้างขึ้นได้ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 4.16(ง) ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสลดลงประมาณ 80% เมื่อเทียบกับพื้นผิวที่ไม่มีการปรับปรุง ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงประมาณ 85%



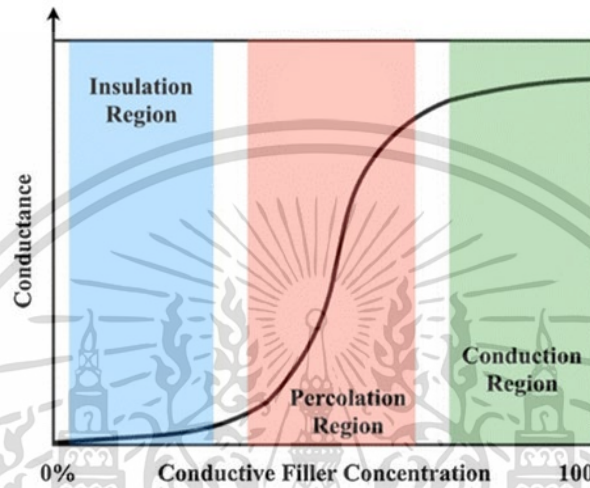
เอกสารนี้รูปที่ 4.15 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุดของละชิ้นงาน ที่การสัมผัสระหว่างวัสดุสัมผัสกันที่ผิวพอดิ ($y = 0$ มิลลิเมตร) มิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



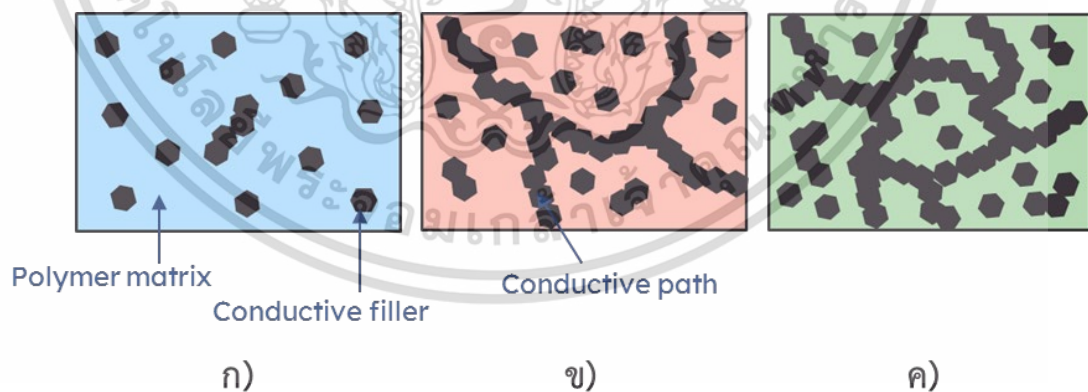
รูปที่ 4.16 (ก) ชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบแผ่นเรียบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.3 เซนติเมตร (ข) คู่วัสดุระหว่างเทปอลูมิเนียมกับชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีพื้นผิวแบบเรียบสัมผัสกัน (ค) ชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.3 เซนติเมตร (ง) คู่วัสดุระหว่างเทปอลูมิเนียมกับชิ้นงานยางซิลิโคนที่มีพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบสัมผัสกัน

และจากการเติมซิลเวอร์เฟลกส์ในยางซิลิโคนเพื่อปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5 ถึง 5 โดยน้ำหนัก ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลเวอร์เฟลกส์เพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีเพอร์โคเลชัน (Percolation theory) ที่อธิบายเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารตัวเติมนำไฟฟ้าภายใน เมทริกซ์ของวัสดุเชิงประกอบ โดยในงานวิจัยนี้มีสารตัวเติมนำไฟฟ้า คือ ผงซิลเวอร์เฟลกส์ ซึ่งมีสมบัติเป็นสารตัวนำ (Conductor) และเมทริกซ์ยางซิลิโคน ซึ่งมีสมบัติเป็นฉนวน (Insulator) โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการนำไฟฟ้า (Conductance) กับความเข้มข้นของสารตัวเติมนำไฟฟ้า (Conductive filler concentration) จะแบ่งความสามารถในการนำไฟฟ้าออกเป็น 3 ช่วง แสดงดังรูปที่ 4.17 ช่วงแรก (บริเวณ Insulating region ในรูปที่ 4.17) ที่ปริมาณของสารตัวเติมนำไฟฟ้าในเมทริกซ์มีปริมาณน้อยๆ แสดงดังรูปที่ 4.18(ก) วัสดุเชิงประกอบจะมีสมบัติเป็นฉนวน คือ แทบไม่มีการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะสร้างเส้นทางการนำไฟฟ้า (Conductive path) ที่มีประสิทธิภาพ ในช่วงถัดมา (บริเวณ Percolation region ในรูปที่ 4.17) เมื่อปริมาณสารตัวเติมที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดเส้นทางการนำไฟฟ้าที่ต่อเนื่องในวัสดุเชิงประกอบ (Percolation thresholds) แสดงดังรูปที่ 4.18(ข) ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดด เนื่องจากปริมาณสารตัวเติมมากขึ้นและมีแนวโน้มที่จะสัมผัสกันมากขึ้น จนถึงช่วงสุดท้าย (บริเวณ Conductive region ในรูปที่ 4.17) ที่สารตัวเติมมีปริมาณมากพอจะมีการนำไฟฟ้าที่เสถียร แสดงดังรูปที่ 4.18(ค) ซึ่งก่อตัวเป็นเส้นทางการนำไฟฟ้าที่เสถียร²⁴⁻²⁶

สรุปได้ว่าเมื่อปริมาณซิลเวอร์เฟลคส์เพิ่มขึ้นถึงอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะมีแนวโน้มการเกิดเส้นทางการนำไฟฟ้าภายในวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ก็เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าที่ได้ยังต่ำและมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง (linear) อนุมานได้ว่าปริมาณซิลเวอร์เฟลคส์ที่เติมลงในยางซิลิโคนตั้งแต่อัตราส่วนร้อยละ 0.5 ถึง 5 โดยน้ำหนักทำให้วัสดุเชิงประกอบนี้อยู่ในช่วงแรก (บริเวณ Insulation region) เท่านั้น ซึ่งยังไม่มากพอที่จะทำให้วัสดุเชิงประกอบนี้ถึงจุด Percolation thresholds ได้



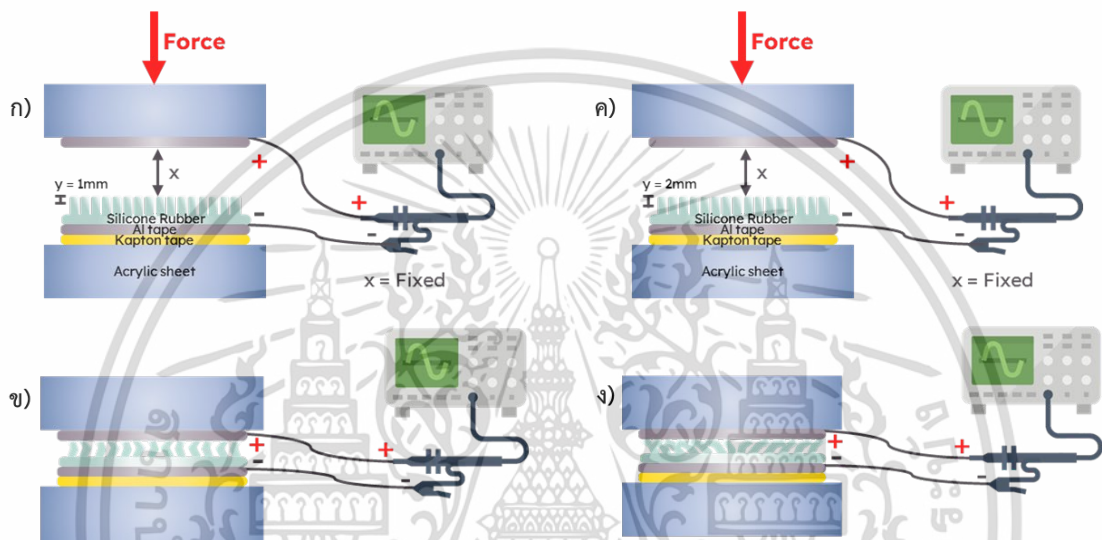
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการนำไฟฟ้า (Conductance) กับ ความเข้มข้นของสารตัวเติมนำไฟฟ้า (Conductive filler concentration)²⁴



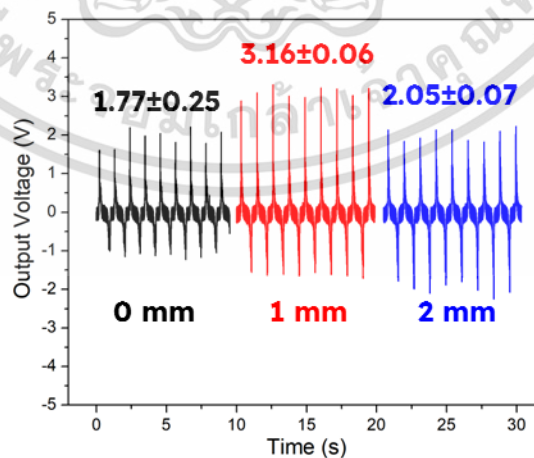
รูปที่ 4.18 แสดงแบบจำลองการกระจายตัวของซิลเวอร์เฟลคส์ภายในเนื้อยางซิลิโคน (ก) Insulation region (ข) Percolation region (ค) Conduction region²⁷

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการศึกษาผลของระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ต่อแรงดันไฟฟ้า โดยมีการกำหนดระยะ x ให้คงที่ และเปลี่ยนแปลงระยะ y เท่ากับ 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ คือ การกดลึกลงไปจากผิววัสดุ 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.19(ก-ง) และนำมาเปรียบเทียบกับระยะการสัมผัสที่ผิวพอดี ($y = 0$ มิลลิเมตร) โดยผลแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรถ่ายสัญญาณแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่าที่ y เท่ากับ 1 มิลลิเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 3.16 ± 0.06 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่สูงที่สุดของชิ้นงานนี้ ที่ y เท่ากับ 2 มิลลิเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.05 ± 0.07 โวลต์

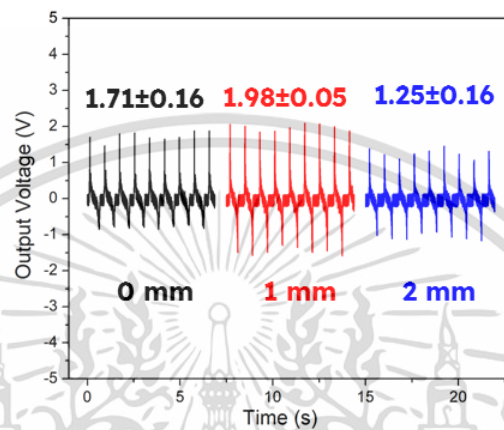


รูปที่ 4.19 แสดงระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุที่การกดลึกลงเท่ากับ (ก) 1 มิลลิเมตร (ค) 2 มิลลิเมตร และภาพจำลองลักษณะการเสียรูปของชิ้นงานยางซิลิโคนที่ (ข) 1 มิลลิเมตร (ง) 2 มิลลิเมตร



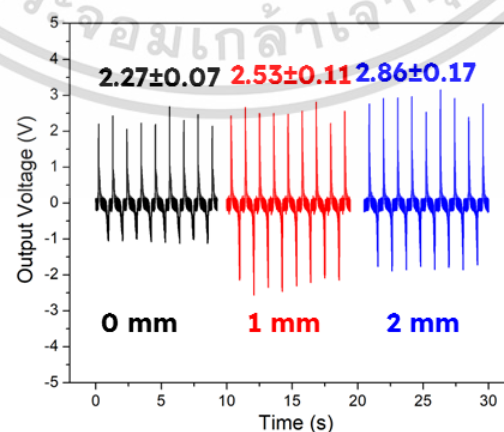
รูปที่ 4.20 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดของวงจรถ่ายสัญญาณที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ ที่ x คงที่ และ y เท่ากับ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ โดยกำหนดระยะ x ให้คงที่ และเปลี่ยนแปลงระยะ y เท่ากับ 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ และนำมาเปรียบเทียบกับระยะการสัมผัสกันที่ผิวพอดี ($y = 0$ mm) แสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่าที่ y เท่ากับ 1 มิลลิเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.98 ± 0.05 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่สูงที่สุดของชิ้นงานนี้ ที่ y เท่ากับ 2 มิลลิเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.25 ± 0.05 โวลต์



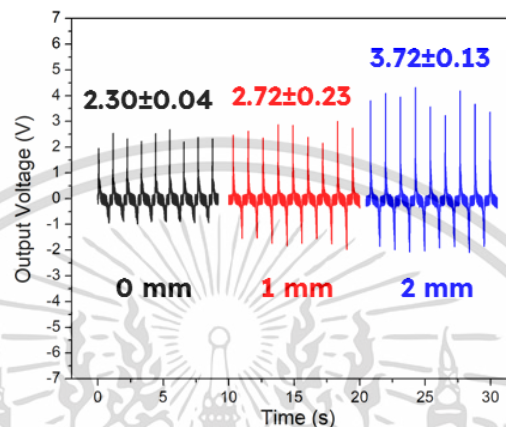
รูปที่ 4.21 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.5 ที่ x คงที่ และ y เท่ากับ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ

จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ โดยกำหนดระยะ x ให้คงที่ และเปลี่ยนแปลงระยะ y เท่ากับ 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ และนำมาเปรียบเทียบกับระยะการสัมผัสกันที่ผิวพอดี ($y = 0$ mm) แสดงดังรูปที่ 4.22 พบว่าที่ y เท่ากับ 1 มิลลิเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.53 ± 0.11 โวลต์ ที่ y เท่ากับ 2 มิลลิเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.86 ± 0.17 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่สูงที่สุดของชิ้นงานนี้



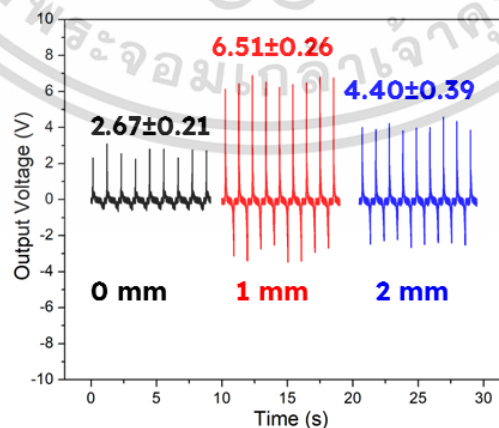
เอกสารนี้รูปที่ 4.22 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.75 ที่ x คงที่ และ y เท่ากับ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 1 โดยนำหน้าแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ โดยกำหนดระยะ x ให้คงที่ และเปลี่ยนแปลงระยะ y เท่ากับ 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ และนำมาเปรียบเทียบกับระยะการสัมผัสกันที่ผิวพอดี้ ($y = 0$ mm) แสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่าที่ y เท่ากับ 1 มิลลิเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.72 ± 0.23 โวลต์ ที่ y เท่ากับ 2 มิลลิเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 3.72 ± 0.13 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่สูงที่สุดของชิ้นงานนี้



รูปที่ 4.23 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 1 ที่ x คงที่ และ y เท่ากับ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ

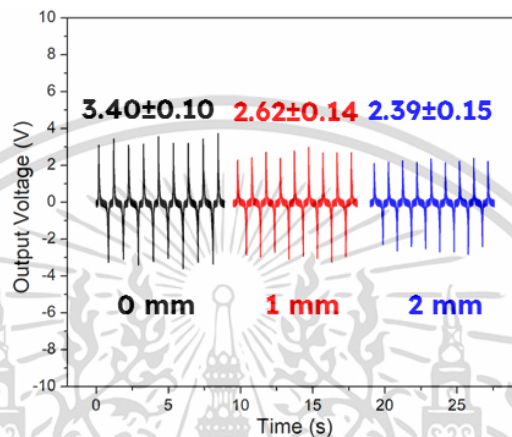
จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 3 โดยนำหน้าแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ โดยกำหนดระยะ x ให้คงที่ และเปลี่ยนแปลงระยะ y เท่ากับ 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ และนำมาเปรียบเทียบกับระยะการสัมผัสกันที่ผิวพอดี้ ($y = 0$ mm) แสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่าที่ y เท่ากับ 1 มิลลิเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 6.51 ± 0.26 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่สูงที่สุดของชิ้นงานนี้ ที่ y เท่ากับ 2 มิลลิเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 4.40 ± 0.39 โวลต์



รูปที่ 4.24 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 3 ที่ x คงที่ และ y เท่ากับ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

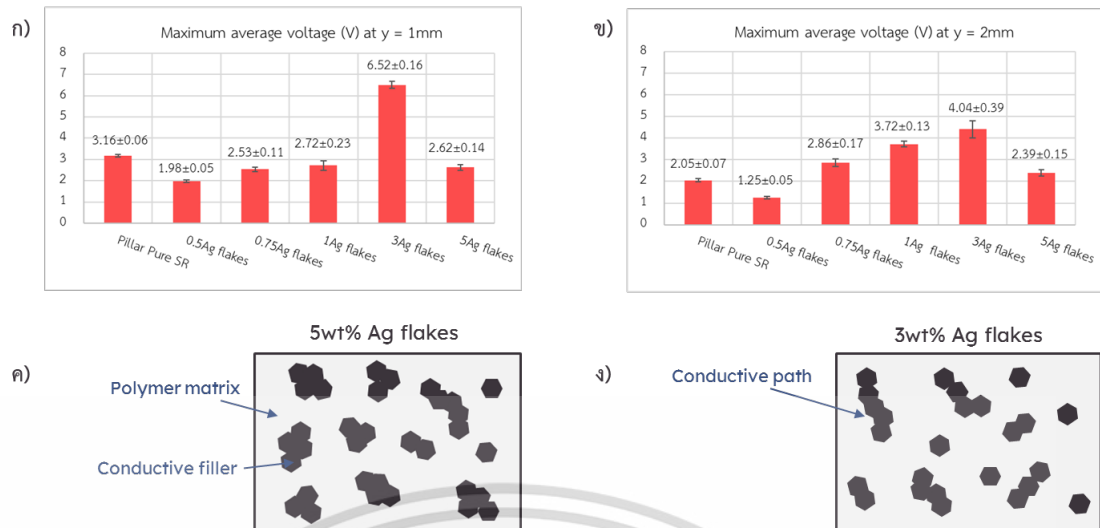
จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ โดยกำหนดระยะ x ให้คงที่ และเปลี่ยนแปลงระยะ y เท่ากับ 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ และนำมาเปรียบเทียบกับระยะการสัมผัสกันที่ผิวพอดี ($y = 0$ mm) แสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าที่ y เท่ากับ 1 มิลลิเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.62 ± 0.14 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่สูงที่สุดของชิ้นงานนี้ ที่ y เท่ากับ 2 มิลลิเมตร มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 2.39 ± 0.15 โวลต์



รูปที่ 4.25 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 5 ที่ x คงที่ และ y เท่ากับ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ

โดยสรุปผลค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุดของแต่ละชิ้นงาน ที่ระยะกดลึกลงไปจากผิววัสดุ (y) เท่ากับ 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.26(ก-ข) ซึ่งพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของทั้ง 2 ระยะมีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือ ที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 0.5 ถึง 3 โดยน้ำหนัก ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักมีค่าลดลง ซึ่งเกิดจากการที่ซิลเวอร์เฟล็กส์มีปริมาณมากจนเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มบางส่วน และกระจายตัวได้ไม่สม่ำเสมอ เมื่อคู่วัสดุระหว่างอลูมิเนียมสัมผัสกับยางซิลิโคนที่ลึกลงไปจากพื้นผิว ทำให้เจอกับกลุ่มซิลเวอร์เฟล็กส์ที่รวมตัวกัน ซึ่งขัดขวางการสร้างเส้นทางการนำไฟฟ้า ส่งผลให้มีเส้นทางการนำไฟฟ้าลดลง แสดงดังรูปที่ 4.26(ค) แตกต่างจากที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีการกระจายตัวของซิลเวอร์เฟล็กส์ที่ดี ทำให้มีแนวโน้มที่จะสัมผัสกันมากขึ้นและเกิดเป็นเส้นทางการนำไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.26(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

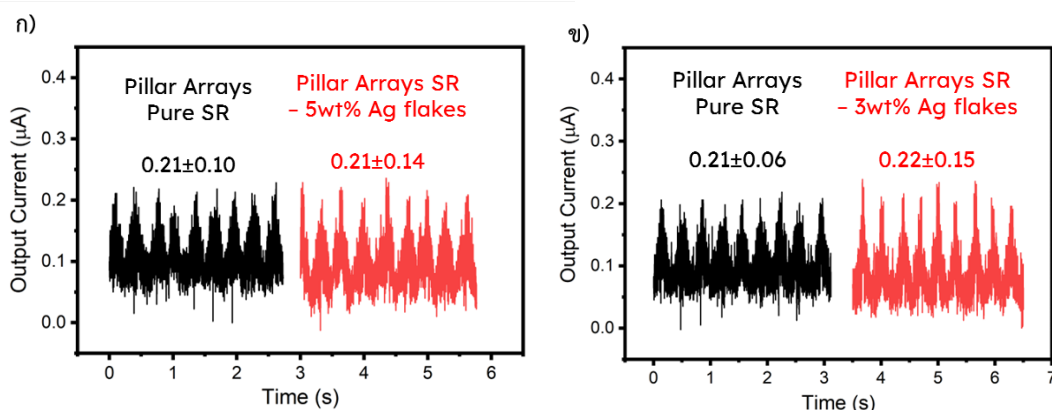


รูปที่ 4.26 แสดงกราฟสรุปผลแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ระยะ (ก) y เท่ากับ 1 มิลลิเมตร (ข) y เท่ากับ 2 มิลลิเมตร และแสดงแบบจำลองการกระจายตัวซิลเวอร์เฟลกส์ในเนื้อยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ (ค) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก²⁷ (ง) ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก²⁸

4.3.3 ผลการศึกษากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current)

จากการทดสอบแรงดันไฟฟ้าขาออก ที่ระยะสัมผัสระหว่างวัสดุแบบสัมผัสกันที่ผิวพอดี ($y = 0$ มิลลิเมตร) พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงที่สุด จึงเลือกมาทดสอบกระแสไฟฟ้าขาออก พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าขาออกอยู่ที่ 0.21 ± 0.14 ไมโครแอมแปร์ และเปรียบเทียบกับยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าขาออกเท่ากับ 0.21 ± 0.10 ไมโครแอมแปร์ ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังรูปที่ 4.27(ก) และจากการทดสอบแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ระยะสัมผัสระหว่างวัสดุแบบกดลึกลงไปจากพื้นผิว พบว่าที่ระยะกดลึก 1 มิลลิเมตร ($y = 1$ มิลลิเมตร) ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงที่สุด ซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จึงเลือกมาทดสอบกระแสไฟฟ้าขาออก พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าขาออกอยู่ที่ 0.22 ± 0.15 ไมโครแอมแปร์ และเปรียบเทียบกับยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ มีค่ากระแสไฟฟ้าขาออกอยู่ที่ 0.21 ± 0.06 ไมโครแอมแปร์ ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังรูปที่ 4.27(ข) เห็นได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าขาออกของแต่ละชิ้นงานไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

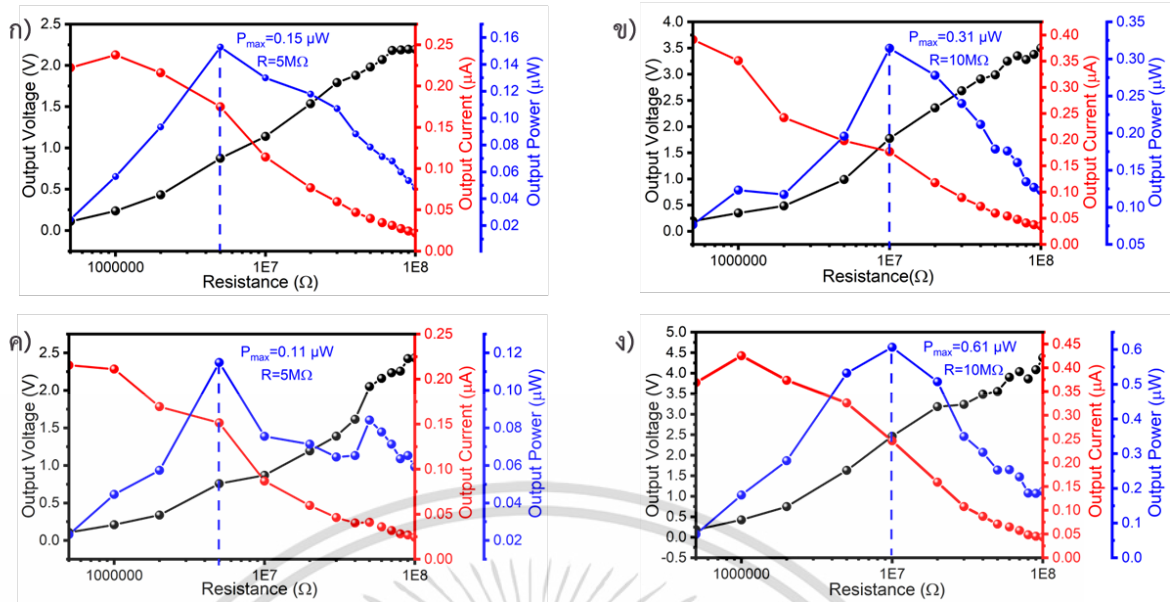


รูปที่ 4.27 แสดงกราฟกระแสไฟฟ้าขาออกของ (ก) วัสดุเชิงประกอบอย่างซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ (ข) วัสดุเชิงประกอบอย่างซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ เปรียบเทียบกับอย่างซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ

4.3.4 ผลการศึกษากำลังไฟฟ้าขาออก (Output Power)

จากการศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบอย่างซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ โดยมีการกำหนด x ให้คงที่ และเปลี่ยนแปลงระยะ y เท่ากับ 0 มิลลิเมตร แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (เส้นสีดำ) กระแสไฟฟ้าขาออก (เส้นสีแดง) กำลังไฟฟ้าขาออก (เส้นสีน้ำเงิน) ดังรูปที่ 4.28(ข) พบว่าที่ความต้านทาน 10 เมกะโอห์ม มีค่ากำลังไฟฟ้าส่งออกสูงสุดเท่ากับ 0.31 ไมโครวัตต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอย่างซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่มีเงื่อนไขในการศึกษาเหมือนกัน แสดงดังรูปที่ 4.28(ก) พบว่าที่ความต้านทาน 5 เมกะโอห์ม มีค่ากำลังไฟฟ้าส่งออกสูงสุดเท่ากับ 0.15 ไมโครวัตต์ และวัสดุเชิงประกอบอย่างซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ โดยมีการกำหนด x ให้คงที่ และเปลี่ยนแปลงระยะ y เท่ากับ 1 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.28(ง) พบว่าที่ความต้านทาน 10 เมกะโอห์ม มีค่ากำลังไฟฟ้าส่งออกสูงสุดเท่ากับ 0.61 ไมโครวัตต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอย่างซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบที่มีเงื่อนไขในการศึกษาเหมือนกัน แสดงดังรูปที่ 4.28(ค) พบว่าที่ความต้านทาน 5 เมกะโอห์ม มีค่ากำลังไฟฟ้าส่งออกสูงสุดเท่ากับ 0.11 ไมโครวัตต์ เห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบอย่างซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ มีค่ากำลังไฟฟ้าส่งออกสูงสุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แสดงกราฟกำลังไฟฟ้าขาออกของ (ก) ยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ (ข) วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลทส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ (ค) ยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ และ (ง) วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลทส์ร้อยละ 3 โดยมวลแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบแบบยึดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์ ซึ่งในการทดลองนี้มีการขึ้นรูปชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ ชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ และวัสดุเชิงประกอบแบบยึดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์ โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก และตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิคต่าง ๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้สำหรับอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ประเภทการสัมผัสแบบตั้งฉาก (Vertical Contact-Separation Mode) ร่วมกับแผ่นอะลูมิเนียม (Aluminum Tape) และตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ดังกล่าว สำหรับผลการทดลองต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของซิลเวอร์เฟลกส์

1. จากการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของซิลเวอร์เฟลกส์ พบว่าซิลเวอร์เฟลกส์มีลักษณะเป็นผงละเอียด มีสีเทา
2. ผลจากการศึกษาเอกลักษณ์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงซิลเวอร์เฟลกส์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) พบว่าปรากฏพิกของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ โดยการปรากฏพิกของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซิลเวอร์เฟลกส์ ดังกล่าว มีความสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของข้อมูลกราฟมาตรฐาน PDF #040783 ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์ อนุมานได้ว่าสารที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างตรงตามที่ต้องการ มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีวัฏภาคอื่นแปลกปลอมอยู่ หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง จึงสรุปได้ว่าเป็นซิลเวอร์บริสุทธิ์
3. จากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของซิลเวอร์เฟลกส์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) มีการตรวจพบลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นเกล็ดเหมือนกันทั้งหมด มีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีขนาดเฉลี่ย $5.41 \pm 2.53 \mu\text{m}$ และมีความหนาเฉลี่ย $91.8 \pm 2.88 \text{ nm}$ ได้ค่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) ของซิลเวอร์เฟลกส์ เท่ากับ 58.93 และไม่พบลักษณะรูปร่างอื่นที่แตกต่างจากเฟลกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ของวัสดุเชิงประกอบแบบยัดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์

1. จากการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบแบบยัดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์พบว่า วัสดุเชิงประกอบแบบยัดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์ที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก มีความโปร่งแสงน้อยกว่าชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ โดยความโปร่งแสงจะลดลงตามอัตราส่วนของซิลเวอร์เฟลกส์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาความสามารถในการยัดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบที่ทดสอบด้วยการบิดให้โค้งงอพบว่า วัสดุเชิงประกอบดังกล่าวสามารถยัดหยุ่นได้ดีและคืนสู่สภาพเดิมได้โดยไม่สูญเสียรูปร่างเช่นเดียวกับชิ้นงานแผ่นเรียบยางซิลิโคนบริสุทธิ์

2. จากการตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของซิลเวอร์เฟลกส์ให้แก่วสดุเชิงประกอบถึงร้อยละ 5 โดยมวล มีการตรวจพบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ 4 พีคหลักที่ตรงกับพีคเอกลักษณ์ของซิลเวอร์ และความเข้ม (Intensity) ของพีคเอกลักษณ์ของซิลเวอร์ จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังไม่พบเฟสแปลกปลอมอื่น ๆ เพิ่มเติมเกิดขึ้นในรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์นี้ ยกเว้นพีคเอกลักษณ์ของไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ ที่พบในชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแกลวเสาที่มีความเป็นระเบียบ และชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบแบบยัดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์ ที่อัตราส่วนของซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.5 และ 0.75 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถยืนยันได้จากกระบวนการที่ใช้ในการเตรียมเหมาะสมที่จะใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบได้

3. จากการตรวจสอบโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) ของชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบเรียบ มีการตรวจพบพีคการดูดกลืนที่เป็นไปตามหมู่ฟังก์ชันหลักของยางซิลิโคน เมื่อปรับปรุงพื้นผิวของชิ้นงานเป็นชิ้นงานยางซิลิโคนบริสุทธิ์ที่มีลักษณะพื้นผิวแบบโครงสร้างแกลวเสาที่มีความเป็นระเบียบ และชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบแบบยัดหยุ่นจากยางซิลิโคนและซิลเวอร์เฟลกส์ ที่อัตราส่วนของซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.5 0.75 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าลักษณะของพีคมีรูปแบบเดียวกัน ไม่เกิดการเลื่อนของพีค และไม่พบพีคเพิ่มเติม แสดงให้เห็นว่าเป็นการเชื่อมพันธะทางกายภาพ ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งสามารถยืนยันได้จากกระบวนการที่ใช้ในการเตรียมเหมาะสมที่จะใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบได้

5.1.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์

ในการตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) และค่ากระแสไฟฟ้าขาออก (Output Current) ของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าที่ระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกสูงสุด คือที่ระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) เท่ากับ 1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแบบแกลวเสาที่มีความเป็นระเบียบ มีแรงดันไฟฟ้าขาออก 6.52 ± 0.16 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดเมื่อ

เปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบในอัตราส่วนอื่น และมีค่ากระแสไฟฟ้าขาออก 0.22 ± 0.15 ไมโครแอมแปร์ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดและสอดคล้องกับค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก แต่ก็ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบอย่างซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แบบแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ นอกจากนี้ที่ความต้านทาน 10 เมกะโอห์ม วัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 3 โดยมวล ยังคงให้ค่ากำลังไฟฟ้าส่งออกสูงสุด (Max Power Output) เท่ากับ 0.61 ไมโครวัตต์ บ่งบอกว่าการนำวัสดุเชิงประกอบอย่างซิลิโคนที่มีอัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 3 โดยมวลแบบแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ มาสัมผัสเป็นคู่วัสดุร่วมกับแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ ที่ระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) เท่ากับ 1 มิลลิเมตร ส่งผลให้อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์แสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงสุดที่ 0.61 ไมโครวัตต์ เมื่อถูกใช้งานที่ความต้านทาน 10 เมกะโอห์ม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการออกแบบอุปกรณ์เพื่อสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ในโหมดการวัดแบบเลื่อนในแนวระนาบ (Relative-sliding mode; RS) หรือสร้างคู่วัสดุสัมผัสให้มีลักษณะพื้นผิวแบบแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบเหมือนกัน เพื่อใช้ประโยชน์จากพื้นที่ผิวสัมผัสด้านข้างของแถวเสา
2. เติมซิลเวอร์เฟลกส์ที่อัตราส่วนมากกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเพื่อให้วัสดุเชิงประกอบมีการนำไฟฟ้าอยู่ช่วง Percolation region จากทฤษฎีเพอร์โคเลชัน
3. ปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบให้ซิลเวอร์เฟลกส์สามารถกระจายตัวในยางซิลิโคนได้อย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอและการรวมกลุ่มกันของซิลเวอร์เฟลกส์ส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- (1) Xu, J.; Li, H.; Yin, Y.; Li, X.; Cao, J.; Feng, H.; Bao, W.; Tan, H.; Xiao, F.; Zhu, G. High sensitivity and broad linearity range pressure sensor based on hierarchical in-situ filling porous structure. *npj Flexible Electronics* **2022**, *6* (1), 62.
- (2) Song, W.; Gan, B.; Jiang, T.; Zhang, Y.; Yu, A.; Yuan, H.; Chen, N.; Sun, C.; Wang, Z. L. Nanopillar arrayed triboelectric nanogenerator as a self-powered sensitive sensor for a sleep monitoring system. *Acs Nano* **2016**, *10* (8), 8097-8103.
- (3) Yu, A.; Zhu, Y.; Wang, W.; Zhai, J. Progress in triboelectric materials: toward high performance and widespread applications. *Advanced Functional Materials* **2019**, *29* (41), 1900098.
- (4) Li, C.; Cao, R.; Zhang, X. Breathable materials for triboelectric effect-based wearable electronics. *Applied Sciences* **2018**, *8* (12), 2485.
- (5) Niu, S.; Wang, S.; Lin, L.; Liu, Y.; Zhou, Y. S.; Hu, Y.; Wang, Z. L. Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source. *Energy & Environmental Science* **2013**, *6* (12), 3576-3583.
- (6) Zou, H.; Zhang, Y.; Guo, L.; Wang, P.; He, X.; Dai, G.; Zheng, H.; Chen, C.; Wang, A. C.; Xu, C. Quantifying the triboelectric series. *Nature communications* **2019**, *10* (1), 1427.
- (7) Zhan, H.; Guo, J.; Shen, J.; Wang, X.; Fan, Z.; Guo, B.; Liu, W.; Shen, H. Synthesis of silver flakes and their application as conductive filler for low-curing-temperature silver pastes. *Journal of Electronic Materials* **2019**, *48*, 2745-2753.
- (8) Bujes-Garrido, J.; Izquierdo-Bote, D.; Heras, A.; Colina, A.; Arcos-Martínez, M. Determination of halides using Ag nanoparticles-modified disposable electrodes. A first approach to a wearable sensor for quantification of chloride ions. *Analytica chimica acta* **2018**, *1012*, 42-48.
- (9) Shit, S. C.; Shah, P. A review on silicone rubber. *National academy science letters* **2013**, *36* (4), 355-365.
- (10) Kashi, S.; Varley, R.; De Souza, M.; Al-Assafi, S.; Di Pietro, A.; de Lavigne, C.; Fox, B. Mechanical, thermal, and morphological behavior of silicone rubber during accelerated aging. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **2018**, *57* (16), 1687-1696.
- (11) Reinhart, T. J. Overview of composite materials. *Handbook of composites* **1998**, 21-33.
- (12) Callister Jr, W. D.; Rethwisch, D. G. *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*; John Wiley & Sons, 2020.

- (13) Monteiro, S. N.; Lopes, F. P. D.; Ferreira, A. S.; Nascimento, D. C. O. Natural-fiber polymer-matrix composites: cheaper, tougher, and environmentally friendly. *Jom* **2009**, *61*, 17-22.
- (14) Mortensen, A.; Llorca, J. Metal matrix composites. *Annual review of materials research* **2010**, *40*, 243-270.
- (15) Low, I.-M. *Ceramic-matrix composites: microstructure, properties and applications*; Woodhead Publishing, 2006.
- (16) Lee, E.; Yang, S. Bio-inspired responsive polymer pillar arrays. *MRS Communications* **2015**, *5* (2), 97-114.
- (17) Zhao, K.; Wang, Y.; Han, L.; Wang, Y.; Luo, X.; Zhang, Z.; Yang, Y. Nanogenerator-based self-charging energy storage devices. *Nano-Micro Letters* **2019**, *11*, 1-19.
- (18) He, W.; Fu, X.; Zhang, D.; Zhang, Q.; Zhuo, K.; Yuan, Z.; Ma, R. Recent progress of flexible/wearable self-charging power units based on triboelectric nanogenerators. *Nano Energy* **2021**, *84*, 105880.
- (19) Fan, F.-R.; Lin, L.; Zhu, G.; Wu, W.; Zhang, R.; Wang, Z. L. Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic films. *Nano letters* **2012**, *12* (6), 3109-3114.
- (20) Suphasorn, P.; Appamato, I.; Harnchana, V.; Thongbai, P.; Chanthad, C.; Siriwong, C.; Amornkitbamrung, V. Ag nanoparticle-incorporated natural rubber for mechanical energy harvesting application. *Molecules* **2021**, *26* (9), 2720.
- (21) Appamato, I.; Bunriw, W.; Harnchana, V.; Siriwong, C.; Mongkolthanaruk, W.; Thongbai, P.; Chanthad, C.; Chompoosor, A.; Ruangchai, S.; Prada, T. Engineering Triboelectric Charge in Natural Rubber–Ag Nanocomposite for Enhancing Electrical Output of a Triboelectric Nanogenerator. *ACS Applied Materials & Interfaces* **2022**.
- (22) Zhai, A.-x.; Cai, X.-h.; Bin, D. A novel wet-chemical method for preparation of silver flakes. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* **2014**, *24* (5), 1452-1457.
- (23) Vilesh, V.; Ganesanpotti, S. Silicone Rubber-BaBiLiTeO₆ Composites: Flexible Microwave Substrates for 5G Applications. *Journal of Electronic Materials* **2022**, *51* (6), 3237-3247.
- (24) Athukorala, S. S.; Tran, T. S.; Balu, R.; Truong, V. K.; Chapman, J.; Dutta, N. K.; Roy Choudhury, N. 3D printable electrically conductive hydrogel scaffolds for biomedical applications: A review. *Polymers* **2021**, *13* (3), 474.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (25) Khan, T.; Irfan, M.; Ali, M.; Dong, Y.; Ramakrishna, S.; Umer, R. Insights to low electrical percolation thresholds of carbon-based polypropylene nanocomposites. *Carbon* **2021**, *176*, 602-631.
- (26) Alemour, B.; Badran, O.; Hassan, M. R. A review of using conductive composite materials in solving lightning strike and ice accumulation problems in aviation. *Journal of Aerospace Technology and Management* **2019**, *11*, e1919.
- (27) Shi, Y.-D.; Li, J.; Tan, Y.-J.; Chen, Y.-F.; Wang, M. Percolation behavior of electromagnetic interference shielding in polymer/multi-walled carbon nanotube nanocomposites. *Composites Science and Technology* **2019**, *170*, 70-76.
- (28) Gulrez, S. K.; Ali Mohsin, M.; Shaikh, H.; Anis, A.; Pulose, A. M.; Yadav, M. K.; Qua, E. H. P.; Al-Zahrani, S. A review on electrically conductive polypropylene and polyethylene. *Polymer composites* **2014**, *35* (5), 900-914.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



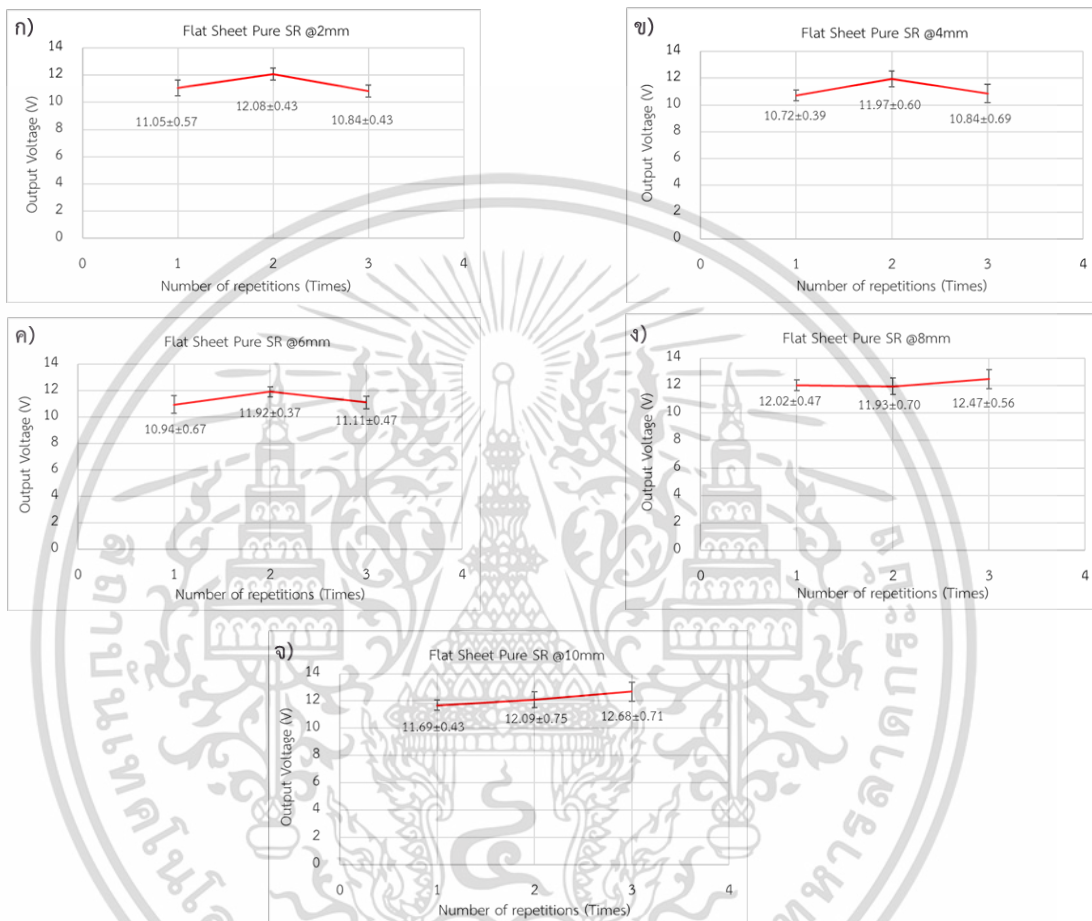
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ความเสถียรของอุปกรณ์จากการทดสอบแรงดันไฟฟ้าขาออกซ้ำ 3 รอบ

โดยมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร

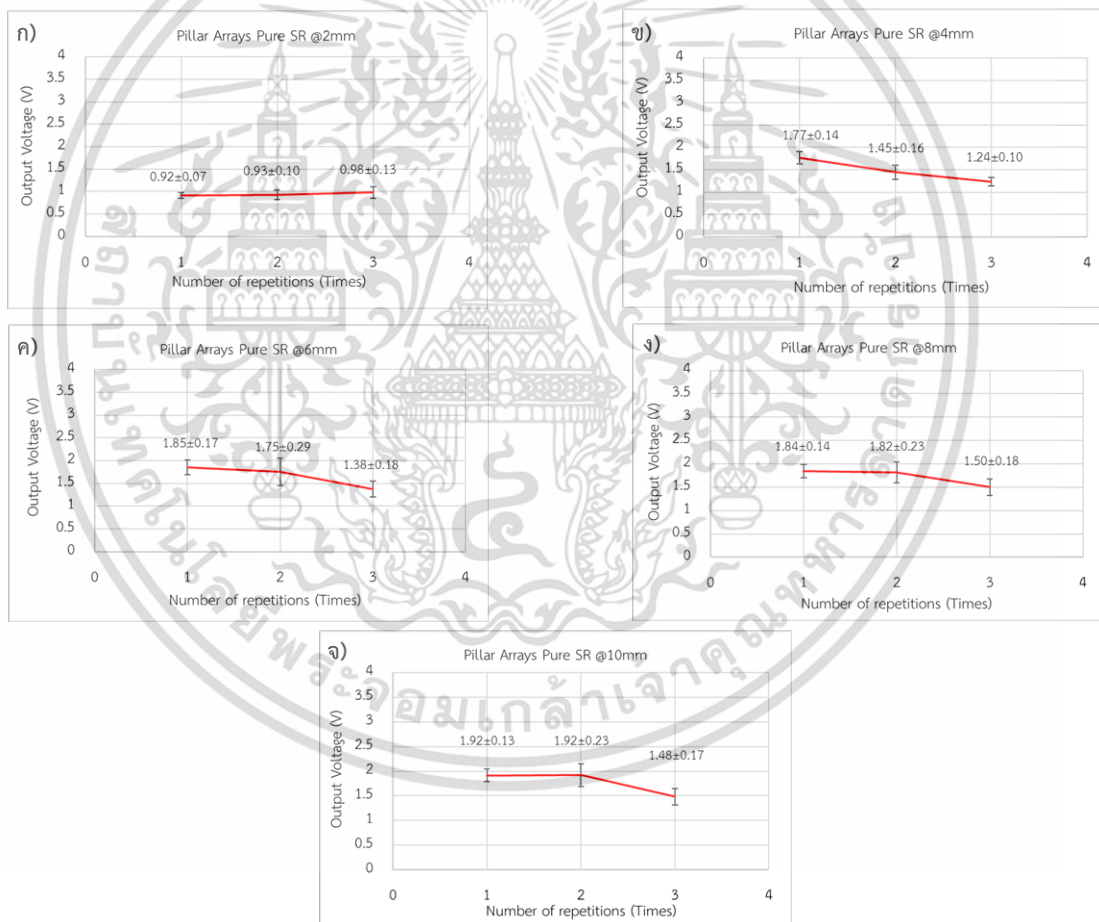


รูปที่ ก.1 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบเรียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ที่ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4 มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร (ง) 8 มิลลิเมตร (จ) 10 มิลลิเมตร และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบเรียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ

ระยะห่างระหว่างวัสดุ (มิลลิเมตร)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 1 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 2 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 3 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้า เฉลี่ย (โวลต์)
2	11.05±0.57	12.08±0.43	10.84±0.43	11.32±0.66
4	10.72±0.39	11.97±0.60	10.84±0.69	11.17±0.69
6	10.94±0.67	11.92±0.37	11.11±0.47	11.32±0.52
8	12.02±0.47	11.93±0.70	12.47±0.56	12.14±0.29
10	11.69±0.43	12.09±0.75	12.68±0.71	12.15±0.50

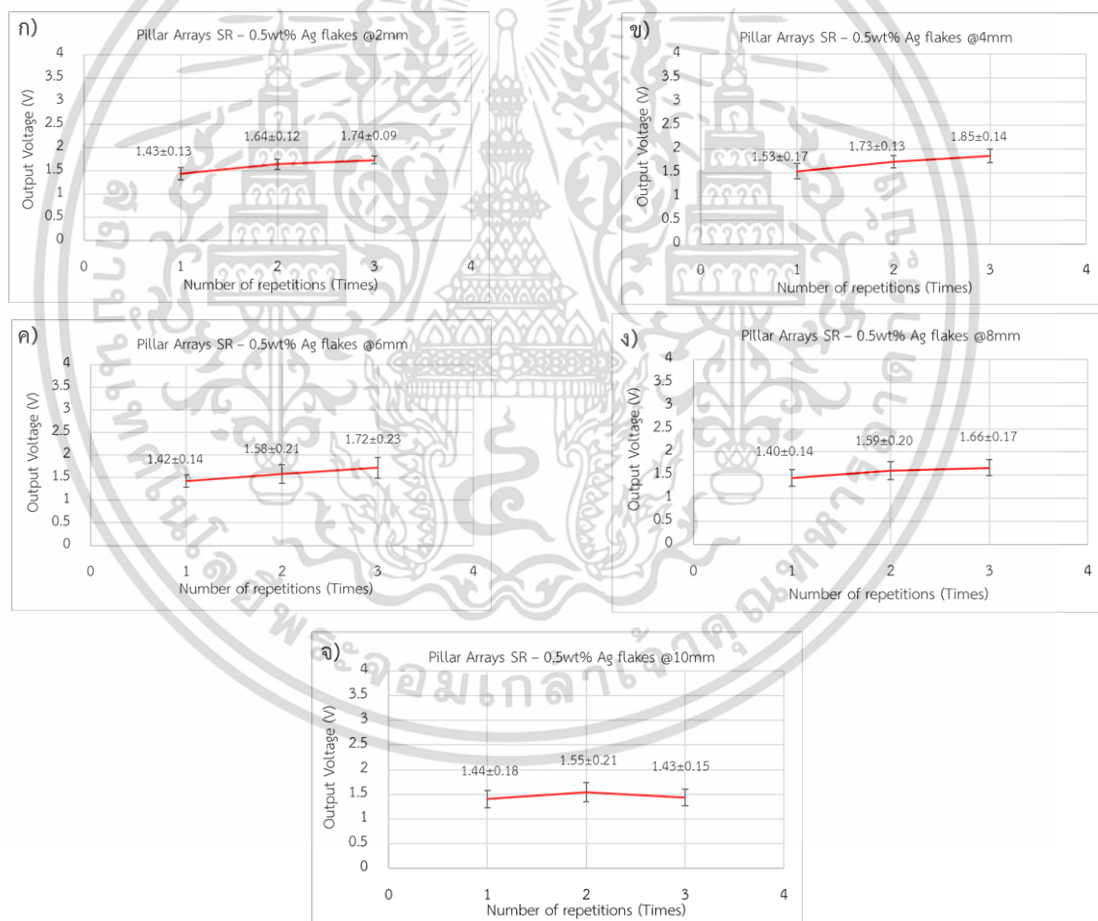


รูปที่ ก.2 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ที่ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4

มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร (ง) 8 มิลลิเมตร (จ) 10 มิลลิเมตร และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ

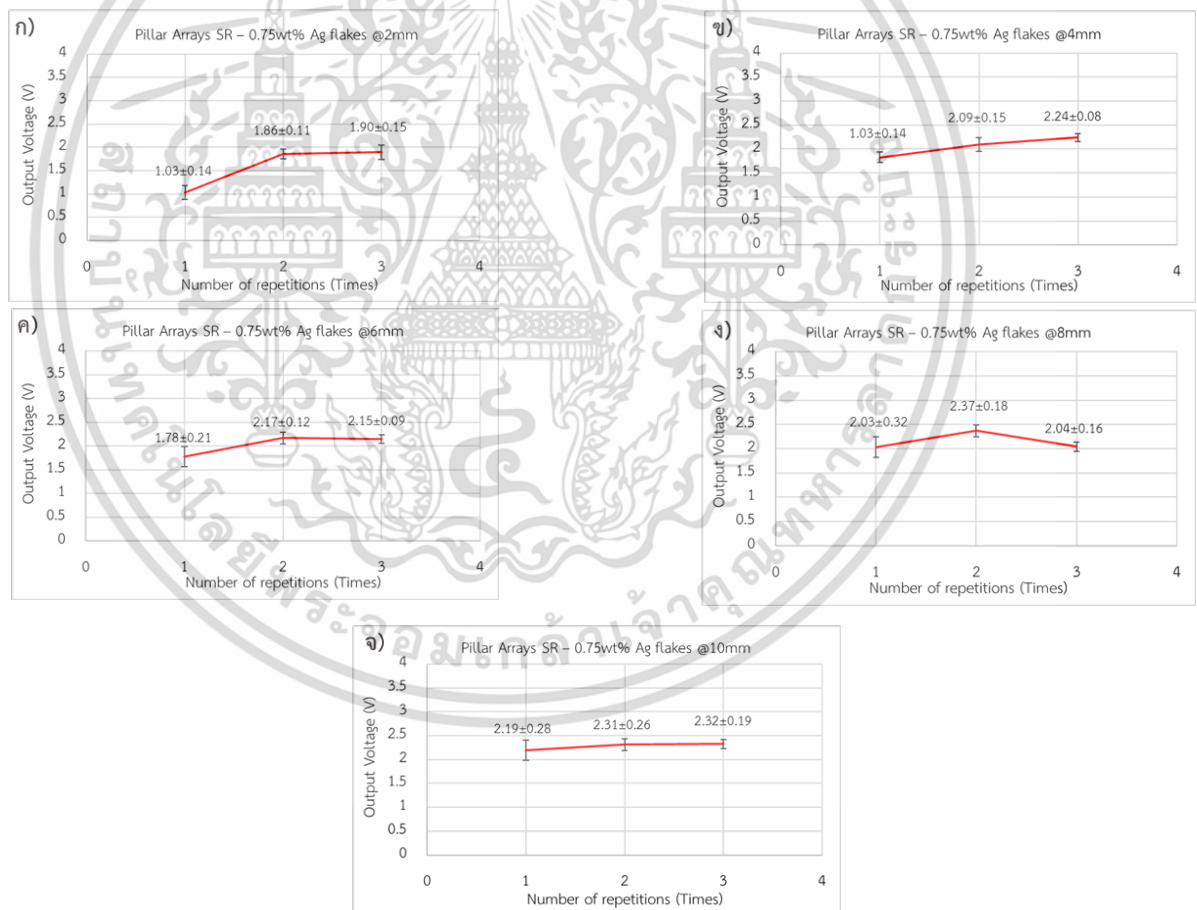
ระยะห่างระหว่างวัสดุ (มิลลิเมตร)	ค่าแรงดันไฟฟ้าครั้งที่ 1 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้าครั้งที่ 2 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้าครั้งที่ 3 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (โวลต์)
2	0.92 ± 0.07	0.93 ± 0.10	0.98 ± 0.13	0.94 ± 0.03
4	1.77 ± 0.14	1.45 ± 0.16	1.24 ± 0.10	1.48 ± 0.27
6	1.85 ± 0.17	1.75 ± 0.29	1.38 ± 0.18	1.66 ± 0.25
8	1.84 ± 0.14	1.82 ± 0.23	1.50 ± 0.18	1.72 ± 0.19
10	1.92 ± 0.13	1.92 ± 0.23	1.48 ± 0.17	1.77 ± 0.25



รูปที่ ก.3 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ที่ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4 มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร (ง) 8 มิลลิเมตร (จ) 10 มิลลิเมตร และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ

ระยะห่างระหว่างวัสดุ (มิลลิเมตร)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 1 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 2 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 3 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้า เฉลี่ย (โวลต์)
2	1.43±0.13	1.64±0.12	1.74±0.09	1.61±0.16
4	1.53±0.17	1.73±0.13	1.85±0.14	1.71±0.16
6	1.42±0.14	1.58±0.21	1.72±0.23	1.57±0.15
8	1.40±0.14	1.59±0.20	1.66±0.17	1.56±0.11
10	1.44±0.18	1.55±0.21	1.43±0.15	1.46±0.08

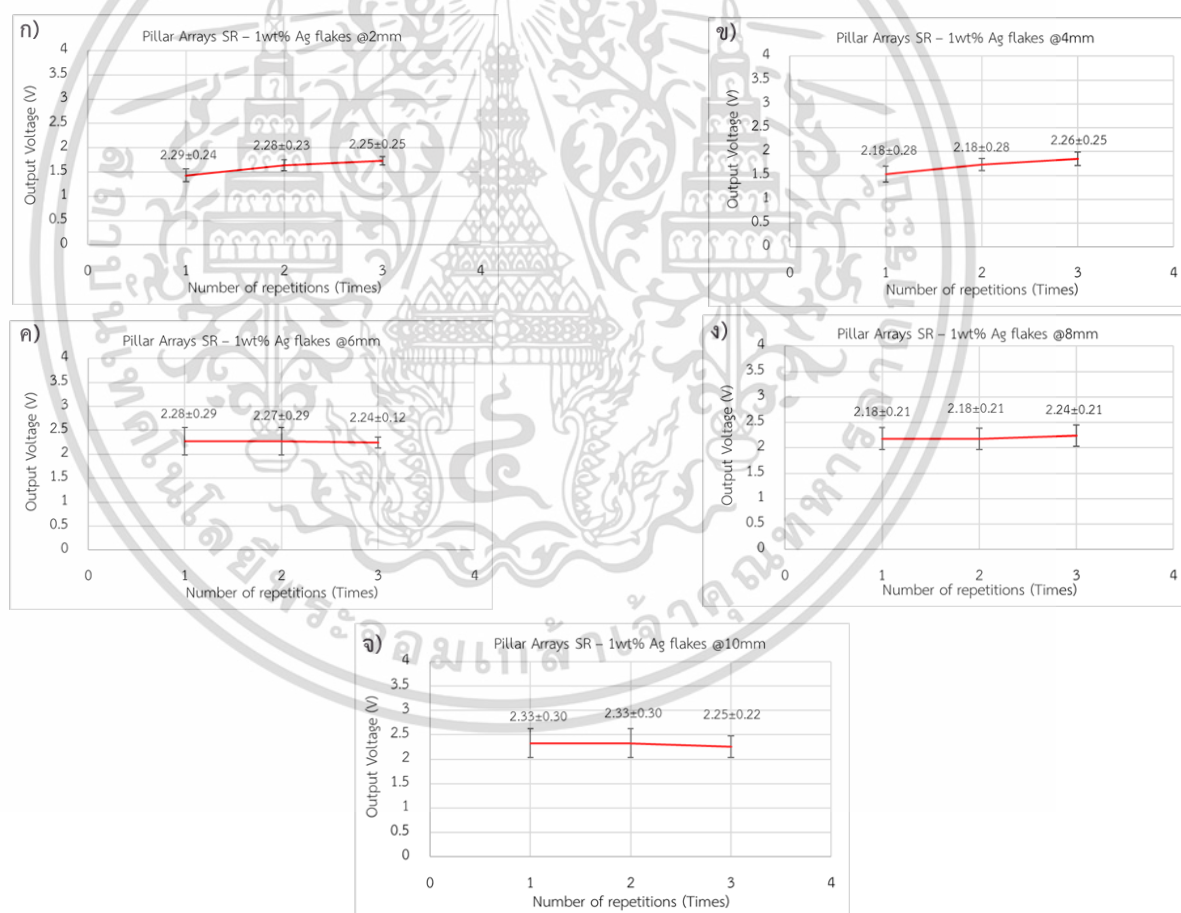


รูปที่ ก.4 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ที่

ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4 มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร (ง) 8 มิลลิเมตร (จ) 10 มิลลิเมตร และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ

ระยะห่างระหว่างวัสดุ (มิลลิเมตร)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 1 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 2 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 3 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้า เฉลี่ย (โวลต์)
2	1.03±0.14	1.86±0.11	1.90±0.15	1.59±0.49
4	1.03±0.14	2.09±0.15	2.24±0.08	2.05±0.21
6	1.78±0.21	2.17±0.12	2.15±0.09	2.03±0.22
8	2.03±0.32	2.37±0.18	2.04±0.16	2.15±0.19
10	2.19±0.28	2.31±0.26	2.32±0.19	2.27±0.07

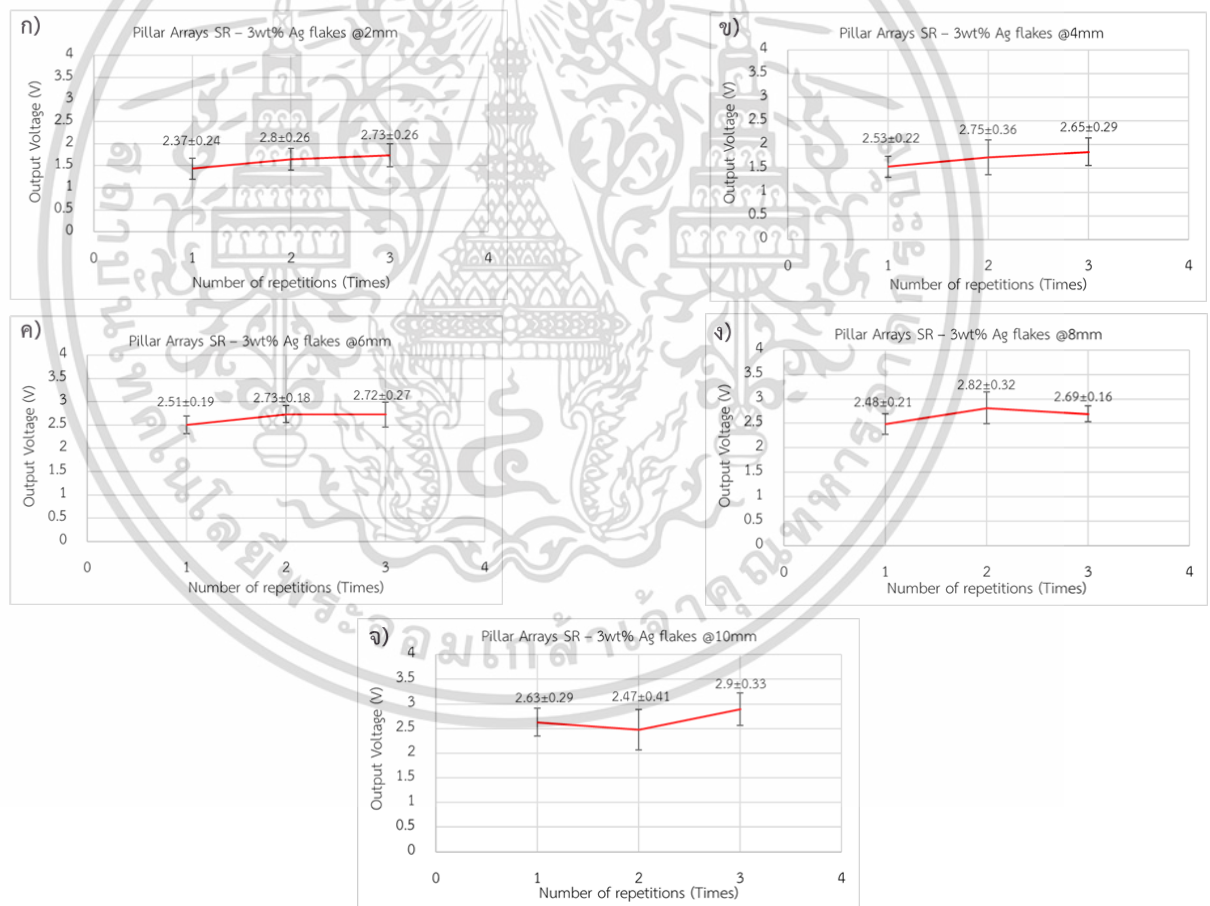


รูปที่ ก.5 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ ร้อย ละ 1 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ที่ระยะห่าง

ระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4 มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร (ง) 8 มิลลิเมตร (จ) 10 มิลลิเมตร และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร

ตารางที่ ก.5 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ

ระยะห่างระหว่างวัสดุ (มิลลิเมตร)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 1 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 2 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 3 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้า เฉลี่ย (โวลต์)
2	2.29±0.24	2.28±0.23	2.25±0.25	2.27±0.02
4	2.18±0.28	2.18±0.28	2.26±0.25	2.21±0.05
6	2.28±0.29	2.27±0.29	2.24±0.12	2.26±0.02
8	2.18±0.21	2.18±0.21	2.24±0.21	2.20±0.04
10	2.33±0.30	2.33±0.30	2.25±0.22	2.30±0.04

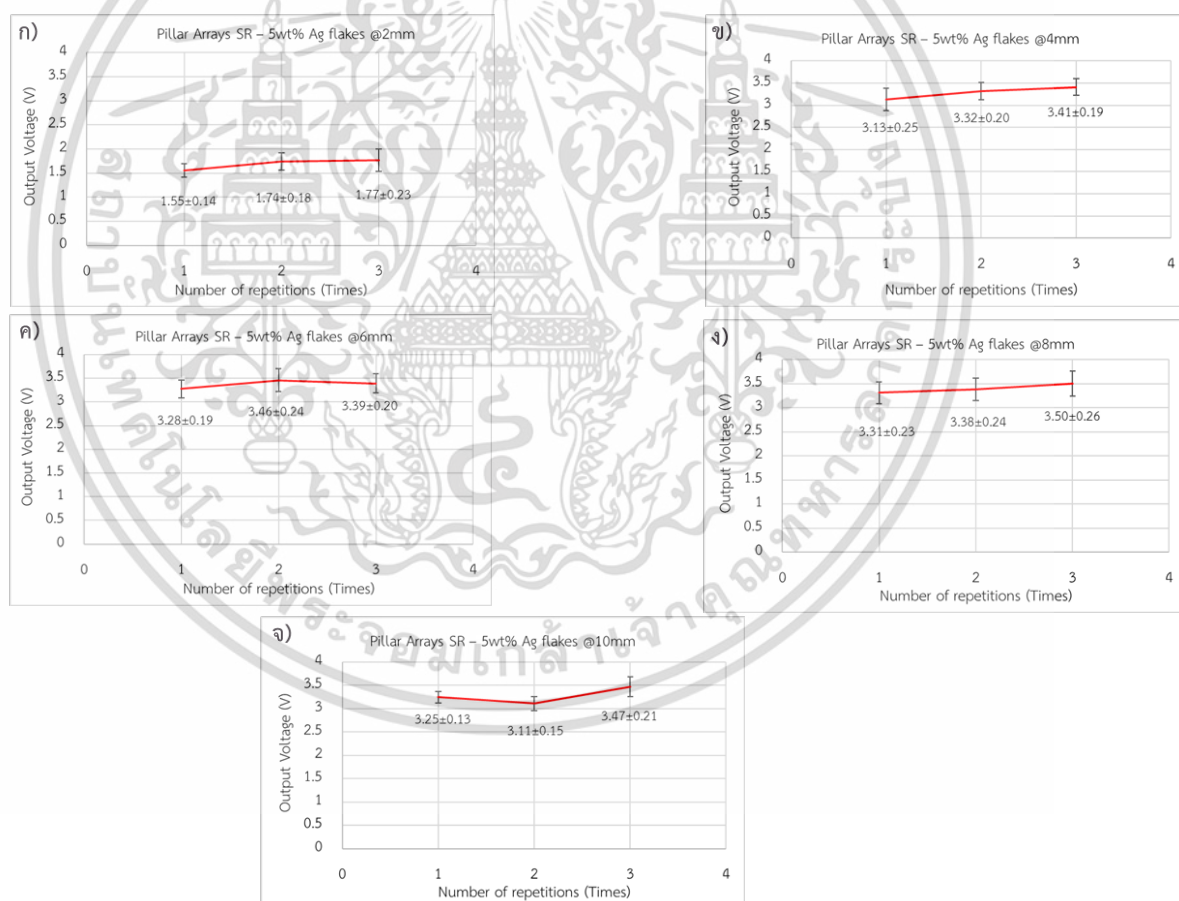


รูปที่ ก.6 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ที่ระยะห่าง

ระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4 มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร (ง) 8 มิลลิเมตร (จ) 10 มิลลิเมตร และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร

ตารางที่ ก.6 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ

ระยะห่างระหว่างวัสดุ (มิลลิเมตร)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 1 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 2 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 3 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้า เฉลี่ย (โวลต์)
2	2.37±0.24	2.80±0.26	2.73±0.26	2.63±0.23
4	2.53±0.22	2.75±0.36	2.65±0.29	2.64±0.23
6	2.51±0.19	2.73±0.18	2.72±0.27	2.65±0.13
8	2.48±0.21	2.82±0.32	2.69±0.16	2.66±0.17
10	2.63±0.29	2.47±0.41	2.90±0.33	2.67±0.21



รูปที่ ก.7 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟล็กส์ ร้อย ละ 5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ที่ระยะห่าง

ระหว่างวัสดุ (x) เท่ากับ (ก) 2 มิลลิเมตร (ข) 4 มิลลิเมตร (ค) 6 มิลลิเมตร (ง) 8 มิลลิเมตร (จ) 10 มิลลิเมตร และกำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 0 มิลลิเมตร

ตารางที่ ก.7 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ จากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ

ระยะห่างระหว่างวัสดุ (มิลลิเมตร)	ค่าแรงดันไฟฟ้าครั้งที่ 1 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้าครั้งที่ 2 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้าครั้งที่ 3 (โวลต์)	ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (โวลต์)
2	1.55±0.14	1.74±0.18	1.77±0.23	1.69±0.12
4	3.13±0.25	3.32±0.20	3.41±0.19	3.29±0.14
6	3.28±0.19	3.46±0.24	3.39±0.20	3.38±0.09
8	3.31±0.23	3.38±0.24	3.50±0.26	3.40±0.10
10	3.25±0.13	3.11±0.15	3.47±0.21	3.28±0.18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลแรงดันไฟฟ้าขาออกจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ

โดยมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ และ กำหนดระยะการสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) ที่ 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบเรียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ

ระยะห่างระหว่าง วัสดุ (x) ที่ เหมาะสม (มิลลิเมตร)	ระยะสัมผัส ระหว่างวัสดุ (y)	แรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 1 (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 2 (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 3 (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้า เฉลี่ย (โวลต์)
10	1	3.10±0.14	3.19±0.14	3.20±0.20	3.16±0.06
	2	2.13±0.16	2.01±0.13	2.02±0.16	2.05±0.07

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์
เฟลกส์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ

ระยะห่างระหว่าง วัสดุ (x) ที่ เหมาะสม (มิลลิเมตร)	ระยะสัมผัส ระหว่าง วัสดุ (y)	แรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 1 (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 2 (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้า ครั้งที่ 3 (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้า เฉลี่ย (โวลต์)
4	1	2.03±0.12	1.93±0.16	1.98±0.09	1.98±0.05
	2	1.29±0.13	1.26±0.12	1.20±0.16	1.25±0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ

ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่เหมาะสม (มิลลิเมตร)	ระยะสัมผัสระหว่างวัสดุ (y)	แรงดันไฟฟ้าครั้งที่ 1 (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าครั้งที่ 2 (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าครั้งที่ 3 (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (โวลต์)
10	1	2.52±0.17	2.43±0.19	2.64±0.21	2.53±0.11
	2	2.85±0.21	3.04±0.25	2.70±1.02	2.86±0.17

ตารางที่ ข.4 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ

ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่เหมาะสม (มิลลิเมตร)	ระยะสัมผัสระหว่างวัสดุ (y)	แรงดันไฟฟ้าครั้งที่ 1 (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าครั้งที่ 2 (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าครั้งที่ 3 (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (โวลต์)
10	1	2.98±0.42	2.59±0.28	2.58±0.23	2.72±0.23
	2	3.80±0.37	3.79±0.37	3.58±0.35	3.72±0.13

ตารางที่ ข.5 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ

ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่เหมาะสม (มิลลิเมตร)	ระยะสัมผัสระหว่างวัสดุ (y)	แรงดันไฟฟ้าครั้งที่ 1 (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าครั้งที่ 2 (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าครั้งที่ 3 (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (โวลต์)
10	1	6.37±0.25	6.51±0.26	6.68±0.38	6.51±0.16
	2	4.07±0.25	4.31±0.26	4.84±0.18	4.40±0.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของของวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบจากการทดสอบซ้ำ 3 รอบ

ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่เหมาะสม (มิลลิเมตร)	ระยะสัมผัสระหว่างวัสดุ (y)	แรงดันไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า
		ครั้งที่ 1 (โวลต์)	ครั้งที่ 2 (โวลต์)	ครั้งที่ 3 (โวลต์)	เฉลี่ย (โวลต์)
8	1	2.69±0.27	2.57±0.14	2.61±0.21	2.62±0.14
	2	2.21±0.10	2.46±0.16	2.49±0.15	2.39±0.15

ตารางที่ ข.7 แสดงผลแรงดันไฟฟ้าขาออกของระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่เหมาะสม ที่ระยะสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) แตกต่างกันตั้งแต่ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร

ประเภทของชิ้นงาน	ระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่เหมาะสม	ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกเฉลี่ย (โวลต์)		
		ระยะสัมผัสระหว่างวัสดุ (y)		
		0 มิลลิเมตร	1 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร
ยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบเรียบ	10	12.15±0.50	-	-
ยางซิลิโคนบริสุทธิ์แบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ	10	1.77±0.25	3.16±0.06	2.05±0.07
วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ	4	1.71±0.16	1.98±0.05	1.25±0.05
วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ	10	2.27±0.07	2.53±0.11	2.86±0.17
วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้างแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ	10	2.36±0.04	2.72±0.23	3.72±0.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทของชิ้นงาน	ระยะห่าง ระหว่างวัสดุ (x) ที่เหมาะสม	ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกเฉลี่ย (โวลต์)		
		ระยะสัมผัสระหว่างวัสดุ (y)		
		0 มิลลิเมตร	1 มิลลิเมตร	2 มิลลิเมตร
วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่ อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้าง แถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ	10	2.67±0.21	6.52±0.16	4.04±0.39
วัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคนที่ อัตราส่วนซิลเวอร์เฟลกส์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักแบบโครงสร้าง แถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ	8	3.40±0.10	2.62±0.14	2.39±0.15

(ต่อตารางที่ ข.8 แสดงผลแรงดันไฟฟ้าขาออกของระยะห่างระหว่างวัสดุ (x) ที่เหมาะสม ที่ระยะสัมผัสระหว่างวัสดุ (y) แตกต่างกันตั้งแต่ 0 1 และ 2 มิลลิเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 11 เดือน กันยายน พ.ศ. 2566

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว พิตตินันท์ ลำพูน รหัสประจำตัว 62050314

นาย/นาง/นางสาว สุธาวี นิตยโรจน์ รหัสประจำตัว 62050348

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา เรื่อง

ชื่อภาษาไทย แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กโทรโบอิเล็กทริกแบบยืดหยุ่นได้โดยใช้วัสดุเชิงประกอบซิลเวอร์-เฟล็กส์และยางซิลิโคนที่มีพื้นผิวเป็นแถวเสาที่มีความเป็นระเบียบ

ชื่อภาษาอังกฤษ Flexible Triboelectric Nanogenerator Based On Silver Flakes – Silicone Rubber Pillar Arrays

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักษรวิสุทธิ 0.97 %

ลงชื่อ..... พิตตินันท์ ลำพูน ลงชื่อ..... สุธาวี นิตยโรจน์

(พิตตินันท์ ลำพูน) (สุธาวี นิตยโรจน์)

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ศ. / รศ. / ผศ. / ดร. / อ. นราธิป วิทยากร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษาของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ..... Naraip. Witayakorn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (นราธิป วิทยากร)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจารย์ที่ปรึกษา