

การเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากการเสียดทานระดับนาโนโดย
การปรับปรุงพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียม

PERFORMANCE ENHANCEMENT OF TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR BY
TREATMENT OF ALUMINUM SHEET SURFACE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE ENHANCEMENT OF TRIBOELECTRIC
NANOGENERATOR BY TREATMENT OF ALUMINUM SHEET
SURFACE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKOT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาภาคนาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากการเสียดทานระดับนาโนโดยการปรับปรุงพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียม

Special Project Title Performance enhancement of triboelectric nanogenerator by treatment of aluminum sheet surface

นักศึกษา นางสาว เกษรา บัวใหญ่รักษา

รหัสประจำตัว 58110006

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน

ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ดร.กิตติพงศ์ อำนวยสวัสดิ์	กิตติพงศ์ อำนวยสวัสดิ์
ดร.สากล ระหงษ์	ระหงษ์
ผศ.ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์	วินัดดา

ภาควิชาภาคนาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)
หัวหน้าภาควิชาภาคนาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่ 20 เดือน มี.ย. พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากการเสียดทานระดับนาโนโดยการปรับปรุงพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียม
นักศึกษา	นางสาวเกษรา บัวใหญ่รักษา
รหัสประจำตัว	58110006
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากการเสียดทานระดับนาโนโดยการปรับปรุงพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียม อุปกรณ์ดังกล่าวมีหลักการที่สำคัญคือการเกิดประจุไฟฟ้าจากการเสียดทานและการเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนที่ระหว่างขั้วไฟฟ้า ดังนั้นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์คือความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าบนผิวของวัสดุ ในโครงการพิเศษนี้จึงศึกษาการปรับปรุงแผ่นอะลูมิเนียมด้วยเทคนิคการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนที่เวลาแตกต่างกัน และศึกษาสมบัติความขรุขระของพื้นผิว ความต้านทาน และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแผ่นอะลูมิเนียมที่ทำการปรับปรุง นอกจากนี้ได้นำแผ่นอะลูมิเนียมที่ปรับปรุงไปประกอบเป็นอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากการเสียดทานระดับนาโนและศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมด้านขั้วบวก และใช้พอลิเอทิลีนเทเรพทาเรตด้านขั้วลบ ซึ่งพบว่าการทรีตเมนต์แผ่นอะลูมิเนียมด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนเป็นเวลา 10 นาที ให้ค่าประสิทธิภาพความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 25 โวลต์ กระแสไฟฟ้าสูงสุด 12 ไมโครแอมป์ ส่วนอุปกรณ์ที่ประกอบจากแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการพลาสมาให้ค่าเพียง 8 โวลต์ และ 5 ไมโครแอมป์ ตามลำดับ ประสิทธิภาพอุปกรณ์ดีขึ้น 3.2 เท่า การปรับปรุงพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมโดยการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมา อาจเพิ่มขึ้นไดอิเล็กทริกบนแผ่นอะลูมิเนียมและความขรุขระบนพื้นผิว ทำให้ค่าความหนาแน่นของประจุเพิ่มขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: อะลูมิเนียม, ชั้นออกไซด์, ความขรุขระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special project title	Performance Enhancement of Triboelectric Nanogenerator by Treatment of Aluminum Sheet Surface
Student	Kedsara Buayairuksa
Student ID	58110006
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2018
Special Project Advisor	Asst. Prof. Dr. Winadda Wongwiriyanan

Abstract

This special project has studied on the performance enhancement of triboelectric nanogenerators (TENG) by treatment of aluminum sheet surface. The important principle of TENG is electrification from friction and electrostatic induction, resulting in a flow of electrons between the electrodes. Thus, the key parameter of the TENG performance is the density of electric charge on the surface of the material. In this special project, the surface of aluminum sheet was treated by oxygen plasma at different treatment times. The roughness, resistivity and dielectric constant of the treated aluminum sheet were characterized. In addition, TENG device was assembled by using the treated aluminum sheet and polyethylene terephthalate as triboelectric materials of positive and negative electrodes, respectively. It was found that the aluminum sheet treated with oxygen plasma for 10 min show the maximum voltage output of 25 V and maximum current output of 12 μ A compared to the pristine aluminum sheet with only voltage output of 8 V and current output of 5 μ A, resulting in a 3.2-time improvement. Oxygen plasma treatment of aluminum sheet could form oxide layer with a high dielectric constant and resulting in the charge density and TENG performance improvement.

Keyword: Aluminium, Oxide layer, Roughness

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษ เรื่องการเพิ่มความหนาแน่นประจุไฟฟ้าสถิตย์ของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากการเสียดทานระดับนาโนโดยการเพิ่มขึ้นไดอิเล็กทริกระหว่างวัสดุขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์นี้ ได้มีการดำเนินการจนสามารถสำเร็จได้ โดยได้รับคำแนะนำจาก ผศ.ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ นอกจากนี้ขอขอบคุณ ดร.กิตติพงศ์ อำนวยสวัสดิ์ และ ดร. สากล ระหงษ์ ประธานและกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษที่ได้ให้คำแนะนำแนวทางในการปรับปรุงรวมถึงตรวจสอบข้อบกพร่องของโครงการพิเศษเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และนายณัฐเกียรติ เกตมะมะ นักศึกษาปริญญาโทที่คอยดูแลการใช้เครื่องมือในการดำเนินการวิจัย อีกทั้งยังให้คำปรึกษาในด้านต่างๆจนสามารถเสร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบคุณบุคคลที่อยู่เบื้องหลังที่คอยสนับสนุนในด้านต่างๆ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการพิเศษนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาในเรื่องของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากการเสียดทานระดับนาโนเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพเพื่อพัฒนาพลังงานทดแทนซึ่งเป็นคุณสมบัติต่อการพัฒนาประเทศต่อไป และหากโครงการวิจัยนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ทางผู้ดำเนินการวิจัยต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

เกษรา บัวใหญ่รักษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VII
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 เทคโนโลยีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	6
2.2 พลังงานระดับนาโนและพลังงานเมกะ (Nano Energy and Mega Energy).....	7
2.3 ไฟฟ้าสถิต (Electrostatics).....	8
2.3.1 ประจุไฟฟ้า (Electric charge).....	9
2.3.2 สนามไฟฟ้า (electric field)	11
2.3.3 ศักย์ไฟฟ้า.....	12
2.3.4 ไดอิเล็กทริก	12
2.4 ไฟฟ้าที่เกิดจากการเสียดทานของวัสดุ (Triboelectric Effect).....	14
2.5 วัสดุสำหรับการเกิดประจุจากการเสียดทาน (Triboelectrification)	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ IV บังอาจอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานระดับนาโน (Triboelectric Nanogenerators).....	17
2.6.1 Vertical Contact-Separation Mode.....	18
2.6.2 Lateral Sliding Mode.....	18
2.6.3 Single-Electrode Mode.....	19
2.6.4 Freestanding Triboelectric-Layer Mode	19
2.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอุปกรณ์ TENG.....	20
2.7.1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ TENG ที่ใช้วัสดุต่างกัน.....	20
2.7.1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ TENG ที่ใช้รูปแบบพื้นผิวต่างกัน.....	21
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	22
3.1 การคัดเลือกวัสดุ.....	22
3.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้า.....	22
3.2.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า.....	22
3.2.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าและการทดลอง.....	22
3.2.3 การปรับปรุงพื้นผิววัสดุ.....	23
3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติของแผ่นอะลูมิเนียมที่ปรับปรุงพื้นผิว	24
3.4 การประกอบอุปกรณ์ TENG	24
3.4.1 การเตรียมขั้ว PET/ITO	24
3.4.2 การเตรียมช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า.....	24
3.4.3 การเชื่อมขั้วไฟฟ้า.....	25
3.5 การทดสอบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้า.....	25
3.5.1 การวัดค่าความต่างศักย์	25
3.5.2 การวัดกระแสไฟฟ้า.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและดองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.3 การวัดกำลังไฟฟ้าและความต้านทานค่าต่างๆ.....	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	28
4.1 ศึกษาลักษณะพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊ส ออกซิเจนและอาร์กอน.....	28
4.1.1 สัณฐานวิทยาของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ ด้วยแก๊สออกซิเจนและ อาร์กอนโดยใช้เทคนิค Scanning electron microscope (SEM)	28
4.1.2 ความขรุขระของพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของ แก๊ส ออกซิเจนและอาร์กอน	30
4.2 ศึกษาสภาพความต้านทานของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของ แก๊สออกซิเจนและอาร์กอน.....	33
4.3 ผลการทดลองออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโน ศึกษาถึงความเสถียรของ สัญญาณที่เกิดขึ้น	34
4.4 ผลการทดลองช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ TENG เพื่อศึกษาระยะห่าง ระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม	35
4.5 การศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ TENG	37
4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและเวลา.....	37
4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ความต้านทานต่างๆ	40
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	42
5.1 สรุปผลการทดลอง	42
5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม.....	43
บรรณานุกรม.....	44
ประวัติผู้เขียน.....	44

สารบัญภาพ

ภาพที่

หน้า

2.1 ขนาดของพลังงานและการประยุกต์ใช้งานที่ตรงกัน พลังงานระดับมาโครใช้สำหรับให้กำลังงานกับชุมชนเมือง รวมไปถึงชุมชนชนบท พลังงานระดับนาโนที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กการประยุกต์ใช้พลังงานทั้ง 2 สามารถวัดได้ในลักษณะที่แตกต่างกัน	7
2.2 การเกิดประจุจากการขัดถูของแท่งอำพันและผ้าขนสัตว์	9
2.3 การเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้า	10
2.4 การทำให้วัตถุตัวนำเกิดประจุไฟฟ้าอิสระโดยการแตะหรือสัมผัส	11
2.5 แรงที่กระทำกับ q_0 เนื่องจากสนามไฟฟ้าของ q	11
2.6 แบบจำลองของสารไดอิเล็กตริก เครื่องหมายบวกลบแสดงอำนาจของขั้วไฟฟ้าในโมเลกุลกรณีที่ไม่มีความหมายไฟฟ้าภายนอก โมเลกุลจะเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ	13
2.7 เมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอก โมเลกุลจะเรียงตัวตามสนามไฟฟ้า	13
2.8 แสดง 4 โหมดพื้นฐานของ TENG (a) vertical contact-separation mode, (b) lateral sliding mode, (c) single-electrode mode, (d) Freestanding Triboelectric-Layer Mode	19
2.9 แสดงรูปแบบของการสร้าง TENG บางส่วนสำหรับใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงาน (a) เก็บเกี่ยวพลังงานจากการกดของนิ้วมือ, (b) เก็บเกี่ยวพลังงานจากการไหลของอากาศ/ลม, (c) เก็บเกี่ยวพลังงานจากการเลื่อนในแนวระนาบ, (d) การล้อมรอบพื้นที่สำหรับเก็บเกี่ยวพลังงาน การสั่น/การรบกวนของคลื่นน้ำหรือ การสั่นเชิงกล, (e) การสร้างสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานการเคลื่อนที่ของร่างกาย, (f) TENG แบบโปร่งใสสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานจากหน้าจอสัมผัส, (g) พลังงานจากการกดของเท้า/มือ, (h) พลังงานการกระทบของน้ำ, (i) พลังงานการหมุนทรงกระบอก, (j) พลังงานการเดินจากรองเท้า, (k) โครงสร้างเกรตติ้งแบบโค้งงอสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเลื่อน, (l) พลังงานการหมุนในรูปแบบแผ่นดิสก์	21
3.1 ภาพจำลองของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมา	23
3.2 แสดงลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ TENG ในรูปแบบ (a) Top view และ (b) Cross section	25
3.3 แสดงการต่อวงจรเพื่อวัดประสิทธิภาพค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า TENG	26
3.4 แสดงการต่อวงจรเพื่อวัดประสิทธิภาพค่ากระแสไฟฟ้า TENG	26
3.5 แสดงการต่อวงจรเพื่อวัดประสิทธิภาพค่ากำลังไฟฟ้า TENG	27

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.6 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	28
4.1 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแก๊สออกซิเจน วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ที่เวลา (a) 0 นาที, (b) 1 นาที และ (c) 10 นาที.....	29
4.2 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแก๊สออกซิเจน วิเคราะห์ ที่เวลา (a) 0 นาที, (b) 1 นาที, (c) 10 นาที และ (d) 20 นาที.....	29
4.3 ภาพ AFM แสดงลักษณะพื้นผิว (Topography) (a-c ภาพเฟส (d-f) และ ภาพ AFM 3 มิติ (g-i) ของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแก๊สออกซิเจน ที่เวลา 0 นาที 1 นาที และ 10 นาที ตามลำดับ	30
4.4 แสดงลักษณะพื้นผิว (Topography) ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแก๊สอาร์กอน วิเคราะห์ด้วย เทคนิค AFM ที่เวลา (a) 1 นาที, (b) 10 นาที และ (c) 20 นาที ภาพเฟส (Phase) (d-f) และ ภาพ 3 มิติ (g-i) ของแผ่นอะลูมิเนียม ตามลำดับ	32
4.5 แสดงสภาพความต้านทานของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแก๊สออกซิเจนและ อาร์กอนที่เวลาต่างๆ.....	34
4.6 แสดงผลการทดสอบทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ (a) สัญญาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, (b) สัญญาณ กระแสไฟฟ้า ของอุปกรณ์.....	35
4.7 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ช่องว่างระหว่างขั้วตั้งแต่ 0.8-3 มิลลิเมตร.....	36
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และ (b) ค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาของ แผ่นอะลูมิเนียมที่ทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนที่เงื่อนไขแตกต่างกัน	37
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้ากับเงื่อนไขการทรีตเมนต์แผ่น อะลูมิเนียมด้วยพลาสมาแก๊สอาร์กอนด้วย ที่เวลาต่างๆ	38
4.10 แสดงผลของประสิทธิภาพอุปกรณ์ TENG ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวหรือทรีตเมนต์แผ่น อะลูมิเนียมด้วย (a) พลาสมาของแก๊สออกซิเจนและ (b) อาร์กอนที่เวลาต่างๆ.....	39
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ที่ความต้านทานภายนอก ขนาดต่างๆ.....	41
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ความต้านทานภายนอกขนาดต่างๆ.....	41

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การผลิตและซื้อพลังงานไฟฟ้าของ กฟผ.	2
1.2 แสดงแผนการดำเนินงานในช่วงของเดือนต่างๆ	5
2.1 ชุดของวัสดุ Triboelectric series ที่เป็นเพียงส่วนของวัสดุหนึ่งตามแนวโน้มความสามารถ ในการให้และรับอิเล็กตรอน.....	16
3.1 เงื่อนไขการพลาสมา.....	23
3.2 เทคนิควิเคราะห์ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ดังนี้	24



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ไฟฟ้ามีความสำคัญและจำเป็นต่อการดำรงชีวิต นอกจากนี้พลังงานไฟฟ้ายังเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาประเทศในด้านต่าง ๆ ได้แก่ ด้านคมนาคม ด้านเศรษฐกิจ ด้านอุตสาหกรรม ด้านเกษตรกรรม ด้านบริการ และด้านคุณภาพชีวิต อย่างไรก็ตาม การใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปีตามอัตราการเพิ่มจำนวนประชากร และความเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ โดยข้อมูลเบื้องต้นจากการสรุปสถานการณ์พลังงานของประเทศไทย มกราคม-กรกฎาคม 2561 ในสาขาเกษตรกรรม เพิ่มขึ้นร้อยละ 17.4 สาขาอุตสาหกรรม เพิ่มขึ้น ร้อยละ 11.5 สาขาบ้านอยู่อาศัย เพิ่มขึ้น ร้อยละ 6.6 สาขาธุรกิจการค้าเพิ่มขึ้น ร้อยละ 0.5 และสาขาขนส่ง เพิ่มขึ้น ร้อยละ 3.0 จากช่วงเดียวกันของปีก่อน โดยสาขาขนส่ง เป็นสาขาที่มีการใช้พลังงานในสัดส่วนที่สูงกว่าสาขาอื่น โดยมีสัดส่วนการใช้ ร้อยละ 39.1 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมดตรงลงมาเป็นสาขาอุตสาหกรรม บ้านอยู่อาศัย ธุรกิจการค้าและเกษตรกรรม โดยมีการใช้ ร้อยละ 36.3, 13.7, 7.5 และ 3.4 ตามลำดับ

โดยที่น้ำมันสำเร็จรูปยังคงเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 48.6 ของแหล่งพลังงานทั้งหมดตรงลงมาประกอบด้วย ไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ถ่านหิน/ลิกไนต์ พลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม และก๊าซธรรมชาติคิดเป็น ร้อยละ 19.6, 9.4, 8.7, 6.9 และ 6.8 ตามลำดับ

โดยข้อมูลการผลิตและซื้อไฟฟ้าของ กฟผ.ในเดือนตุลาคม 2561 จากตาราง 1.1 จะเห็นว่าพลังงานไฟฟ้าที่ กฟผ.ผลิตได้นั้น มาจาก ก๊าซธรรมชาติถึงร้อยละ 21.54 พลังงานถ่านหิน ร้อยละ 7.82 จากพลังงานหมุนเวียน น้ำมันดีเซล และพลังงานอื่นๆ ร้อยละ 2.86, 0.08 และ 0.15 ตามลำดับ ซึ่งโดยรวมแล้วพลังงานที่กฟผ.ผลิตได้ทั้งหมดร้อยละ 32.45 นั้นยังไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้พลังงานจึงจำเป็นต้องมีการซื้อพลังงานไฟฟ้าจากเอกชนถึงร้อยละ 67.55 นอกจากนี้แหล่งพลังงานหลักอย่าง ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน น้ำมัน เป็นต้น ซึ่งเป็นพลังงานที่มนุษย์กำลังใช้กันอย่างสิ้นเปลืองแล้วกำลังจะหมดไป และในการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินยังก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นอีกด้วย

เพื่อบรรเทาปัญหาสิ่งแวดล้อมและวิกฤตของพลังงานจึงมีความพยายามในการค้นหาแหล่งพลังงานที่เป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด อย่างเช่นพลังงานหมุนเวียน และพลังงานทดแทน[1-3] ดังนั้นพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์, พลังงานความร้อน, พลังงานเชิงกล และพลังงานทางชีวเคมี จึงเข้ามามีบทบาทและเป็นที่น่าสนใจในการเปลี่ยนพลังงานเหล่านี้ให้อยู่ในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากพลังงานเหล่านี้มีอยู่เป็นจำนวนมากในสิ่งแวดล้อมและชีวิตประจำวัน [4-8]

ตารางที่ 1.1 การผลิตและซื้อพลังงานไฟฟ้าของ กฟผ.

ประเภทเชื้อเพลิง	เดือน ตุลาคม 2561	
	จำนวน (ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง)	ร้อยละ
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของ กฟผ.		
- ก๊าซธรรมชาติ	3,533.16	21.54
- ถ่านหิน	1,282.82	7.82
- พลังงานหมุนเวียน	468.48	2.86
- น้ำมันเตา	-	-
- น้ำมันดีเซล	13.70	0.08
- พลังงานอื่น ๆ	25.58	0.15
รวม	5,323.74	32.45
พลังงานไฟฟ้าที่ซื้อจากเอกชน		
- ซื้อ	11,080.28	67.55
รวม	16,404.02	100.00

ข้อมูล : กองสื่อสารภายนอก ฝ่ายสื่อสารและประชาสัมพันธ์องค์กร กฟผ.

อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าระดับนาโน (Nanogenerator) คืออุปกรณ์ที่ประดิษฐ์จากวัสดุในระดับนาโนที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นอีกหนึ่งรูปแบบการกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเพื่อพัฒนาเป็นพลังงานทดแทน สำหรับใช้ขับเคลื่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ที่ใช้พลังงานไม่มาก ซึ่งเป็นแนวความคิดที่จะเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมมาใช้ให้เกิดประโยชน์

อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าระดับนาโนมีรูปแบบการเปลี่ยนพลังงานกลจากการกดหรือบีบเป็นพลังงานไฟฟ้า (Piezoelectric Nanogenerator) [9-11] เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า (Pyroelectric Nanogenerator) [12-14] และที่น่าสนใจคืออุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานกลจากการเสียดสี เสียดทานเป็นพลังงานไฟฟ้า (Triboelectric Nanogenerator, TENG) เนื่องจากในชีวิตประจำวันมีแรงจากการเสียดสี เสียดทานเกิดขึ้นมากมาย เช่น การเดิน การวิ่ง การขยับส่วนต่างๆของร่างกาย รวมทั้งการเคลื่อนไหวต่างในธรรมชาติ ล้วนแล้วแต่ทำให้เกิดพลังงานกลอย่างมาก นอกจากนี้ อุปกรณ์ TENG ยังมีข้อดีคือ มีความหนาแน่นของพลังงานที่สูง, ประสิทธิภาพดี, มีน้ำหนักเบา, ต้นทุนในการผลิตต่ำ และง่ายต่อการสร้างอุปกรณ์ [15-17]

อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากการเสียดทาน TENG อธิบายได้จาก 2 ปรากฏการณ์หลักทางฟิสิกส์ คือ ปรากฏการณ์การเกิดประจุจากการเสียดทาน (Contact electrification) และการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electrostatic induction) [18-19] โดยเกิดจากความแตกต่างของความสามารถในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้หรือรับอิเล็กตรอน (Electron affinity: EA) ของวัสดุ 2 ชนิด ที่มาสัมผัสกันเกิดการถ่ายโอนประจุระหว่างวัสดุ 2 ชนิด ทำให้เกิดประจุส่วนเกินขึ้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสอง โดยที่วัสดุที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนจะมีสภาพหลังจากการสัมผัสเสียดสีเป็นบวก ส่วนอีกวัสดุที่มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนจะมีสภาพหลังจากการสัมผัสเสียดสีเป็นลบ หลังจากนั้นประจุส่วนเกินจะเกิดการรวมตัวที่ผิวของวัสดุและจะเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้าที่ถูกติดตั้งอยู่ด้านหลังของวัสดุให้มีประจุตรงกันข้าม และเมื่อนำขั้วไฟฟ้าของวัสดุทั้ง 2 มาเชื่อมต่อกันก็จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนเนื่องจากความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น เพื่อให้ความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ฝั่งมีค่าเท่ากัน และเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในทิศตรงข้ามสวนทางกับทิศทางการไหลของอิเล็กตรอน

ดังนั้นการควบคุมความหนาแน่นประจุบนพื้นผิวสัมผัสของวัสดุถือเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าระดับนาโน [20] โดยทั่วไป การเพิ่มความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวสามารถทำได้โดย (1) การเลือกวัสดุคู่สัมผัส การเลือกวัสดุที่จะนำมาสัมผัสกัน [21] โดยให้วัสดุชนิดที่ 1 มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอน และวัสดุชนิดที่ 2 มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอน (2) การปรับปรุงลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุให้อยู่ในระดับไมโคร/นาโน [22] เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัส เสียดสี ของวัสดุ (3) การปรับปรุงเชิงเคมี เพื่อเป็นการเพิ่มความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนของวัสดุ

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุยังมีผลโดยตรงต่อค่าความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า แต่ยังไม่มีการวิจัยที่ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับผลกระทบดังกล่าวมากนัก [19] (Yeon Joo Kim) ทำการศึกษาการสร้างชั้นไดอิเล็กทริกโดยการเพิ่มชั้นออกไซด์ชนิดต่างๆ (TiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 , HfO_2 and Ta_2O_5) บนแผ่นซิลิกอน (si) และศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ TENG โดยพบว่าวัสดุที่มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดคือ TiO_2 , Ta_2O_5 , HfO_2 , Al_2O_3 and SiO_2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า TiO_2 , Ta_2O_5 , HfO_2 สามารถให้ค่าประสิทธิภาพ TENG ที่สูง แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องราคาที่สูง และมีกระบวนการสังเคราะห์ที่ซับซ้อน ซึ่งในขณะเดียวกัน Al_2O_3 ก็มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับอุปกรณ์ที่มีชั้นออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย และง่ายต่อการสังเคราะห์

ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงทำการศึกษารูปแบบการปรับปรุงพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมด้วยเทคนิคการทรีตเมนต์ด้วยออกซิเจนพลาสมา เพื่อเพิ่มชั้นออกไซด์บนแผ่นอะลูมิเนียม โดยใช้ปัจจัยที่ศึกษาคือ เวลาในการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาที่แตกต่างกัน และศึกษาความขรุขระ ค่าความต้านทาน และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแผ่นอะลูมิเนียม นอกจากนี้ได้นำฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไปประกอบเป็นอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากการเสียดทานระดับนาโนและศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โดยใช้ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ด้านขั้วบวก และใช้พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตด้านขั้วลบ และเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากอุปกรณ์ดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการสร้างและศึกษาสมบัติของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์บนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยเทคนิคการทรีตเมนต์ของออกซิเจนพลาสมา

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานระดับนาโนโดยใช้ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

ปัจจัยหลักที่มีผลต่ออุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าระดับนาโนคือ ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวของทั้ง 2 วัสดุ ดังนั้นแนวทางการเพิ่มความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิววัสดุนั้นสามารถทำได้โดยการเลือกคู่ของวัสดุที่มีค่าการให้และรับอิเล็กตรอนสูง และการปรับปรุงโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุให้อยู่ในระดับไมโคร/นาโนเพื่อเพิ่มโอกาสในการสัมผัสเสียดสีของวัสดุให้มาก นอกจากนี้ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้ายังแปรผันตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ดังนั้นหากสามารถควบคุมค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุให้เหมาะสมได้ ก็จะทำให้ค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วย

1.4 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 สังเคราะห์ชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์บนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยเทคนิคการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนที่เวลาต่างกัน
- 1.4.2 ศึกษาสมบัติความขรุขระของพื้นผิว สภาพความต้านทาน ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจน
- 1.4.3 ประดิษฐ์อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากการเสียดทานระดับนาโนโดยใช้ แผ่นอะลูมิเนียม / PET

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

สำหรับแผนการวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลักๆ ดังนี้

- 1.5.1 ศึกษาข้อมูลและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.5.2 ปรับปรุงแผ่นอะลูมิเนียมด้วยเทคนิคการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาแก๊สออกซิเจน
- 1.5.3 วิเคราะห์พื้นผิวและสภาพความต้านทานของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมา
- 1.5.4 ทดสอบประสิทธิภาพ TENG โดยใช้วัสดุ แผ่นอะลูมิเนียม/ PET

โดยแสดงแผนการดำเนินงานในช่วงของเดือนต่างๆ ดังในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 แสดงแผนการดำเนินงานในช่วงของเดือนต่างๆ

แผนการดำเนินงาน	ช่วงเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานแต่ละส่วน			
	สิงหาคม - ตุลาคม พ.ศ. 2561	พฤศจิกายน - ธันวาคม พ.ศ. 2561	มกราคม - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561	มีนาคม - เมษายน พ.ศ. 2561
1.5.1				
1.5.2				
1.5.3				
1.5.4				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

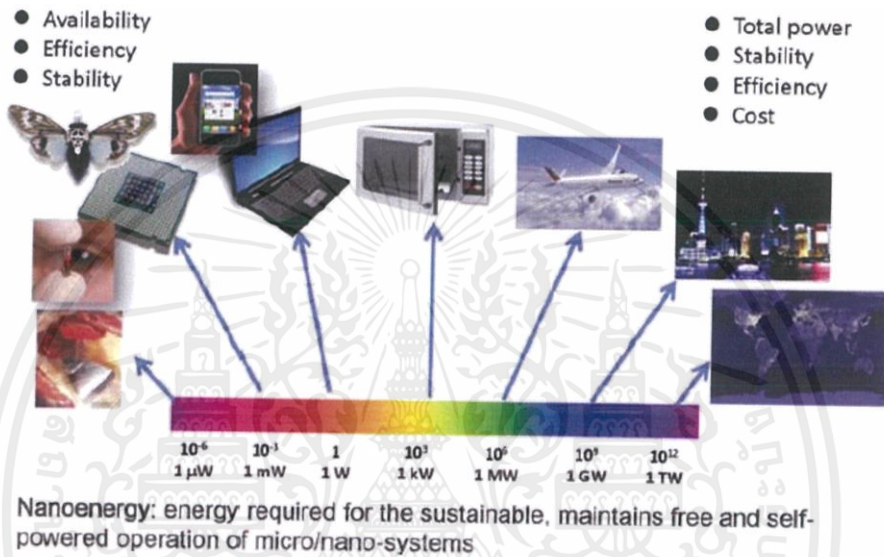
การพัฒนาของเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปเป็นการพัฒนาให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลง พกพาสะดวก และเพิ่มฟังก์ชันการทำงานให้กับอุปกรณ์ คอมพิวเตอร์เป็นรูปแบบตัวอย่างที่มีการพัฒนาให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลง โดยในรูปแบบเดิมมีการใช้ท่อสุญญากาศขนาดใหญ่ ต่อมามีการใช้ Solid state metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET) ในคอมพิวเตอร์และคอมพิวเตอร์พกพา [12]

อีกตัวอย่างหนึ่งคือการเพิ่มขึ้นของจำนวนการใช้โทรศัพท์มือถือ ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถพกพาได้ ในอนาคตข้างหน้าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีแนวโน้มที่จะพัฒนาต่อไปได้อีก รวมถึงการเพิ่มฟังก์ชันการทำงานของเซนเซอร์ประเภทต่างๆในอุปกรณ์เหล่านั้น ซึ่งจะไม่จำกัดเฉพาะเซนเซอร์การเคลื่อนที่ เช่น เซนเซอร์เชิงเคมี เซนเซอร์เชิงชีววิทยา และก๊าซเซนเซอร์ ภายในอนาคตอันใกล้นี้ มีแนวโน้มที่จะพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีขนาดเล็กกว่าโทรศัพท์มือถือ ดังนั้นแต่ละคนจะสามารถมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อย่างน้อย 12-100 เครื่องโดยเฉลี่ย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางตัวมีการทำงานโดยใช้พลังงานที่น้อยมากๆ ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะนำพลังงานจากสิ่งแวดล้อมมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นี้ จะไม่มีทางประสบความสำเร็จได้ถ้าเซนเซอร์เหล่านี้ยังมีความต้องการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ เนื่องจากเซนเซอร์มีเป็นจำนวนมาก มีขอบเขตการจ่ายพลังงานที่กว้างมากขึ้น ยากในการเก็บคืน และการรีไซเคิลที่ทำให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพน้อยที่สุด ด้วยเหตุนี้ แหล่งพลังงานจึงเป็นสิ่งที่ต้องการอย่างมาก เพื่อให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานได้อย่างอิสระและต่อเนื่อง ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้อย่างแพร่หลายใน เซนเซอร์เคมี เซนเซอร์ชีววิทยาที่มีความไวในการตอบสนองสูง เซนเซอร์โรบอตขนาดนาโน รวมไปถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับสวมใส่ของบุคคล

เทคโนโลยีปัจจุบันที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมเพื่อเป็นแหล่งพลังงานด้วยตนเองในระดับ ไมโคร/นาโนอย่างพอเพียงและยั่งยืน เป็นเทคโนโลยีรูปแบบใหม่ในนาโนเทคโนโลยีเพื่อพลังงาน ซึ่งเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้วัสดุนาโน และนาโนเทคโนโลยีเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับให้พลังงานกับระบบไมโคร/นาโน ในทศวรรษที่ผ่านมา มีการพัฒนานาโนเจนเนอเรเตอร์ (Nanogenerators ; NGs) สำหรับประดิษฐ์ระบบที่สามารถสร้างพลังงานด้วยตนเอง โดยมีการใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ 2 ปรากฏการณ์หลักๆสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็ก : ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก และ ปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริก

2.2 พลังงานระดับนาโนและพลังงานเมกะ (Nano Energy and Mega Energy)

โดยทั่วไปพลังงานมักจะหมายถึง กำลังงานที่จำเป็นต่อการดำเนินการเพื่อขับเคลื่อนกิจกรรมต่างๆ เช่น โรงงาน ชุมชนเมือง ชุมชนชนบท โดยทั่วไปเรียกพลังงานเมกะ โดยสามารถวัดค่าได้ในระดับกิกะวัตต์ หรือ เมกะวัตต์ ตัวแปรสำคัญของเทคโนโลยีระดับไมโครโดยทั่วไปคือ พลังงานเอาท์พุททั้งหมด ความเสถียร การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพ และราคา (ภาพที่ 2.1) ในหลายๆกรณีราคามีความสำคัญมาก เช่น ในเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 2.1 ขนาดของพลังงานและการประยุกต์ใช้งานที่ตรงกัน พลังงานระดับมาโครใช้สำหรับให้กำลังงานกับชุมชนเมือง รวมไปถึงชุมชนชนบท พลังงานระดับนาโนที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก การประยุกต์ใช้พลังงานทั้ง 2 สามารถวัดได้ในลักษณะที่แตกต่างกัน

ในทางตรงกันข้าม เมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างมาก การพัฒนาเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานจึงเป็นสิ่งสำคัญและขาดไม่ได้ เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้อาศัยพลังงานจากแบตเตอรี่ ถึงแม้ว่าความต้องการพลังงานของแต่ละอุปกรณ์จะน้อย แต่เมื่ออุปกรณ์มีเป็นจำนวนมาก พลังงานที่ต้องการก็จะเพิ่มมากขึ้น

ประชากรมากกว่า 3000 ล้านคนทั่วโลกมีการใช้โทรศัพท์มือถือ ดังนั้นจะมีเครือข่ายของเซ็นเซอร์จำนวนมากกระจายอยู่ทั่วโลก จึงเป็นเรื่องที่เป็นไปไม่ได้ที่จะเปิดใช้เครือข่ายที่ประกอบด้วยเซ็นเซอร์นับล้านล้านตัวด้วยแบตเตอรี่ เนื่องจากต้องหาตำแหน่ง, เปลี่ยนแบตเตอรี่ และตรวจสอบการทำงานของแบตเตอรี่เมื่อเวลาผ่านไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม เพื่อใช้ในเซ็นเซอร์เป็นวิธีการแก้ปัญหาที่มีความเป็นไปได้ ซึ่งเป็นหนึ่งในนาโนเทคโนโลยีเพื่อพลังงานที่ยั่งยืน รักษาไว้อย่างอิสระ และมีการกำเนิดพลังงานด้วยตัวเองของระบบไมโคร/นาโน

ลักษณะสำคัญของแหล่งพลังงานด้วยนาโนเทคโนโลยีคือ สามารถใช้พลังงานได้เสมอ (Availability) มีประสิทธิภาพ และมีเสถียรภาพ ในกรณีที่อุปกรณ์มีการใช้งานในที่ที่มีแสง การใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง แต่ในกรณีที่อุปกรณ์ใช้งานในที่มืดการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นทางกลจะเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด ในการประยุกต์ใช้ทางชีววิทยา การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการยืดหดของกล้ามเนื้อจะเป็นวิธีการที่ดี ถึงแม้ว่าจะมีเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงแต่เนื่องจากอุปกรณ์มีการทำงานร่วมกับแสง ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงจึงไม่ใช่ทางเลือกสำหรับอุปกรณ์เสมอไป ดังนั้นชนิดของพลังงานที่ต้องการเก็บเกี่ยวจึงขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมการทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งสิ่งเหล่านี้คือความหมายของความสามารถใช้งานได้ (Availability) ของแหล่งพลังงานสำหรับการใช้งานเฉพาะ

ความมั่นคงของแหล่งพลังงานก็มีความสำคัญเช่นกัน เพราะสามารถบ่งบอกได้ว่าอุปกรณ์จะสามารถทำงานได้ในระยะยาว ยกตัวอย่างเช่น การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งขึ้นกับเวลากลางวันหรือกลางคืน ขึ้นกับสภาพอากาศ และแม้แต่ฤดูกาลที่เปลี่ยนไป ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า สำหรับเซ็นเซอร์ขับเคลื่อนด้วยตัวเอง

2.3 ไฟฟ้าสถิต (Electrostatics)

เป็นแขนงของวิชาทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นที่ทราบกันมานานกว่า 1000 ปี คือเมื่อนำเอาแท่งอำพันซึ่งเกิดจากการทับถมของยางไม้เป็นเวลานานๆ มาถูกับผ้าแพรหรือผ้าสักหลาดแล้ว แท่งอำพันสามารถดูดวัตถุเบาๆได้ เช่น ขนนก เศษกระดาษ ซึ่ง ทาลีส (Thales) นักวิทยาศาสตร์ชาวกรีก เป็นผู้ได้ทำการทดลองในครั้งนี้แต่ไม่ได้นำมาศึกษาเพิ่มเติม

ต่อมา นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ ดร.วิลเลียม กิลเบิร์ต (William Gilbert) ได้ทำการทดลองอย่างเดียวกันโดยนำเอาแท่งแก้วและแท่งยางสนมาถูกับผ้าแพรหรือผ้าขนสัตว์แล้วนำมาทดลองดูดของเบาๆจะได้ผลเช่นเดียวกับทาลีส กิลเบิร์ตจึงให้ชื่อไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ว่าอิเล็กทริกซิตี (Electricity)

จึงสามารถบอกได้ว่าการที่นำวัตถุ 2 ชนิดมาถูกันแล้วมีอำนาจในการดูดวัตถุหรือสิ่งของเบาๆได้นั้น เรียกว่า วัตถุทั้ง 2 ต่างมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยการที่นำวัตถุ 2 ชนิดมาถูกันนั้นเรียกว่าการชาร์จวัตถุ และเมื่อวัตถุนั้นหมดอำนาจทางไฟฟ้าหรือไม่สามารถดูดวัตถุอื่นได้อีก เรียกว่า วัตถุนั้นเป็นกลางทางไฟฟ้า

ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติมากมายที่เป็นผลมาจากการเกิดไฟฟ้าสถิต เช่น ฟ้ายแลบ ฟ้ายผ่า หลังจากหิวลมแล้วหิวสามารถดึงดูดผมได้ ประกายไฟขณะหิวลมหรือสวมเสื้อในฤดูหนาว เป็นต้น ซึ่งล้วนแล้วแต่เกิดจากการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าระหว่าง 2 วัตถุ

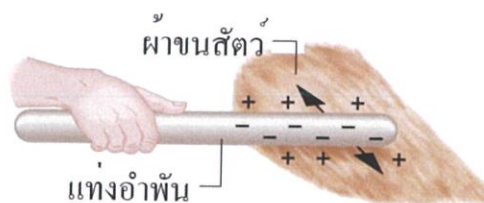
ฟ้ายแลบฟ้ายผ่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าสถิต ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุลบลงสู่ผิวโลก โดยประจุบวกที่อยู่บนก้อนเมฆ ส่วนประจุลบนั้นอยู่ทางด้านล่างของก้อนเมฆ พื้นดินบางแห่งมีประจุเป็นบวก บางแห่งมีประจุเป็นลบ ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า เมื่อประจุลบที่อยู่ผิวด้านล่างของก้อนเมฆถูกเหนี่ยวนำให้เข้าหาประจุบวกที่อยู่บนพื้นดิน ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจากก้อนเมฆลงมาสู่พื้นดิน เรียกว่า “ฟ้ายผ่า”

ต่อมา เบนจามิน แฟรงคลิน (Benjamin Franklin) นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกันได้ค้นพบไฟฟ้าในอากาศ โดยได้ทดลองปล่อยว่าที่มีกุญแจผูกติดที่สายป่านลอยขึ้นไปบนท้องฟ้าขณะที่ยังมีฝนตก และเมื่อเอามือเข้าใกล้กุญแจปรากฏว่ามีประกายไฟมายังมือของเขา ซึ่งทำให้เขาค้นพบปรากฏการณ์ฟ้ายแลบ ฟ้ายร้อง และฟ้ายผ่า ซึ่งเกิดจากประจุไฟฟ้าในอากาศ และเป็นคนแรกในการประดิษฐ์สายล่อฟ้าโดยการนำเอาโลหะ ต่อไว้กับยอดหอคอยที่สูง แล้วต่อสายลวดลงมายังดิน ซึ่งเป็นการป้องกันฟ้ายผ่าได้ กล่าวคือไฟฟ้าจากอากาศจะไหลเข้าสู่โลหะที่ต่ออยู่กับยอดหอคอยแล้วไหลลงมาตามสายลวดที่ต่อเอาไว้ลงสู่ดินหมดโดยไม่เป็นอันตรายต่อคนหรืออาคารบ้านเรือน

2.3.1 ประจุไฟฟ้า (Electric charge)

โดยทั่วไปวัตถุจะมีความเป็นกลางทางไฟฟ้า หรือไม่แสดงอำนาจทางไฟฟ้า เมื่อวัตถุได้รับพลังงานทำให้อิเล็กตรอนหรือไอออนอิสระเกิดการเคลื่อนที่ ส่งผลให้จำนวนประจุลบและประจุบวกไม่เท่ากัน เรียกว่า วัตถุมีประจุ (charge body) วัตถุที่มีประจุจะแสดงอำนาจไฟฟ้าตามชนิดของประจุที่มากกว่า เรียกว่า ประจุนอิสระ (Free charge) โดยประจุไฟฟ้าสามารถเกิดได้ 3 วิธี ดังนี้

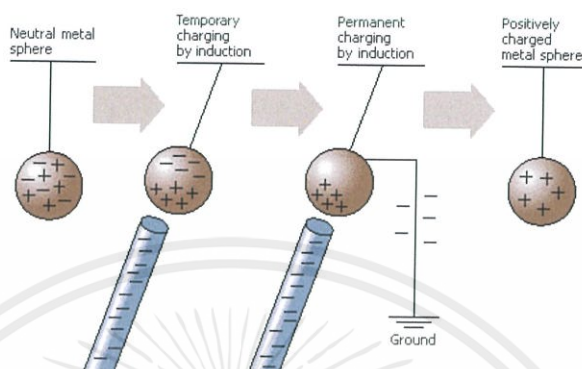
1. การเกิดประจุโดยการขัดถู (charging by friction) คือ การนำวัตถุต่างชนิดมาถูกัน เช่น นำผ้าสักหลาดมาถูกับแผ่นพีวีซี งานของแรงที่ใช้ถู ทำให้อิเล็กตรอนจะถ่ายโอนไปยังอีกวัตถุหนึ่ง วัตถุที่รับอิเล็กตรอนเพิ่มเข้าไปจะมีประจุลบส่วนวัตถุที่เสียอิเล็กตรอนไปจะมีประจุบวก ดังในภาพที่ 2.2 เมื่อนำแท่งอำพันมาถูกับผ้าขนสัตว์ทำให้แท่งอำพันมีประจุลบซึ่งแสดงถึงการรับอิเล็กตรอนเข้ามายังวัตถุ ส่วนผ้าขนสัตว์เกิดประจุนบวกรวมกันที่ผิวแสดงว่ามีการสูญเสียอิเล็กตรอน ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การเกิดประจุจากการขัดถูของแท่งอำพันและผ้าขนสัตว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

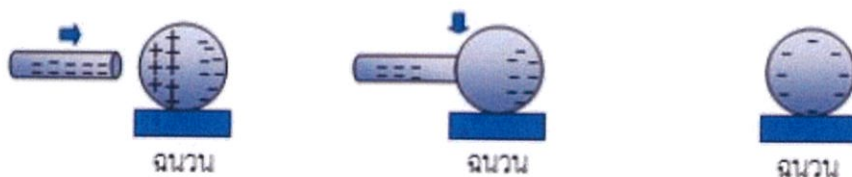
2. การเกิดประจุโดยการเหนี่ยวนำ (charge by induction) คือการนำวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าไปเข้าใกล้หรือสัมผัสกับวัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ทำให้วัตถุนั้นตอบสนองโดยการสร้างประจุตรงข้ามประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ประจุไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced charge)



ภาพที่ 2.3 การเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้า

การเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าของแท่งพลาสติกและลูกบอลโลหะที่มีความเป็นกลางทางไฟฟ้า แสดงในภาพที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำแท่งพลาสติกที่มีอิเล็กตรอนส่วนเกินเข้าใกล้โดยไม่ต้องแตะ อิเล็กตรอนส่วนเกินบนลูกบอลโลหะจะถูกผลักโดยอิเล็กตรอนที่อยู่บนแท่งพลาสติก ทำให้อิเล็กตรอนในลูกบอลโลหะเคลื่อนที่ออกห่างและไหลลงสู่กราวด์ เมื่อนำแท่งพลาสติกออกห่างจากลูกบอลโลหะ จะทำให้ลูกบอลโลหะมีประจุบวกสุทธิเหลืออยู่

3. การเกิดประจุโดยการสัมผัส (charging by conduction) คือ การนำวัตถุตัวนำที่มีประจุอิสระอยู่ มาสัมผัสกับตัวนำที่เราต้องการ จะให้เกิดมีประจุอิสระ โดยการถ่ายเทประจุไฟฟ้าระหว่างตัวนำทั้งสอง และในที่สุดตัวนำทั้งสองต่างจะมีประจุอิสระ ดังภาพที่ การนำแท่งพลาสติกซึ่งมีอิเล็กตรอนส่วนเกินจำนวนมากมาสัมผัสกับลูกบอลโลหะซึ่งมีความเป็นกลางทางไฟฟ้าและวางอยู่บนวัตถุที่เป็นฉนวนจะทำให้ให้อิเล็กตรอนส่วนเกินที่แท่งพลาสติกถ่ายโอนมายังลูกบอลโลหะทำให้อิเล็กตรอนบนแท่งพลาสติกลดลง และอิเล็กตรอนบนลูกบอลโลหะจะถูกผลักด้วยแรงสนามไฟฟ้า เมื่อนำแท่งพลาสติกออกจากลูกบอลโลหะจะทำให้มีประจุลบสุทธิเหลืออยู่บนลูกบอลโลหะ เรียก“การเกิดประจุโดยการสัมผัส”



ภาพที่ 2.4 การทำให้วัตถุตัวนำเกิดประจุไฟฟ้าอิสระโดยการแตะหรือสัมผัส

2.3.2 สนามไฟฟ้า (electric field)

ถ้ามีการวางประจุ q ไว้อย่างเดียวย่อมไม่มีแรงไฟฟ้าปรากฏขึ้น แต่ถ้ามีการนำประจุ q_0 มาวางไว้ใกล้กับประจุ q จะพบว่ามีความกระทำกับประจุ q_0 ดังภาพที่ โดยขนาดของแรงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของ q_0 และระยะห่างระหว่างประจุทั้ง 2 ตามกฎของคูลอมบ์ หรือกล่าวได้ว่า q_0 อยู่ในบริเวณสนามไฟฟ้าของประจุ q หรืออยู่ในสนามไฟฟ้า (Electric field) ของประจุ q นิยามของประจุไฟฟ้าที่จุดจุดใด คือแรงที่กระทำต่อประจุที่จุดนั้นหารด้วยขนาดของประจุ ด้วยเหตุนี้สนามไฟฟ้าจึงมีค่าเป็นปริมาณเวกเตอร์ โดยใช้สัญลักษณ์ \vec{E} ซึ่งมีทิศพุ่งออกจากประจุบวกและพุ่งเข้าหาประจุลบ



ภาพที่ 2.5 แรงที่กระทำกับ q_0 เนื่องจากสนามไฟฟ้าของ q

ดังนั้น
$$\vec{E} = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (2.1)$$

สนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น นิวตัน/คูลอมบ์ (N/C) และเรียก q_0 ว่าประจุทดสอบ ซึ่งประจุทดสอบ q_0 นี้จะต้องมีค่าน้อยที่สุด ไม่เช่นนั้นสนามไฟฟ้าของ q_0 จะกระทบกับสนามไฟฟ้าของ q ทำให้ประจุ q มีการเคลื่อนที่ หรืออาจจะเกิดการเหนี่ยวนำระหว่างประจุทำให้สนามไฟฟ้าเปลี่ยนไปจากเดิม

2.3.3 ศักย์ไฟฟ้า

ศักย์ไฟฟ้า คือ พลังงานศักย์ต่อประจุหนึ่งหน่วย นิยามศักย์ V ที่จุดใดๆ ในสนามไฟฟ้าว่าเป็น พลังงานศักย์ U ต่อประจุหนึ่งหน่วยที่สัมพันธ์กับประจุทดสอบ q_0

$$V = \frac{U}{q_0}, \text{ หรือ } U = q_0 V \quad (2.2)$$

พลังงานศักย์เป็นสเกลาร์ทั้งคู่ ดังนั้นศักย์จึงเป็นสเกลาร์ จากสมการ 2.2 สามารถหาหน่วยพลังงานได้จากหน่วยของประจุ ซึ่งเราเรียกหน่วยทาง SI ของศักย์ว่า 1 โวลต์ โดย 1 โวลต์คือ 1 จูลต่อคูลอมบ์

เมื่อทดลองเขียนสมการ 2. เทียบกับงานที่แรงไฟฟ้ากระทำระหว่างการกระจัด a ไป b เท่ากับปริมาณ $-U = -(U_b - U_a)$ ให้อยู่ในรูปของงานต่อประจุ 1 หน่วย โดยหาสมการนี้ด้วย q_0 จะได้

$$\frac{W_{a \rightarrow b}}{q_0} = -\frac{\Delta U}{q_0} = -\left(\frac{U_b}{q_0} - \frac{U_a}{q_0}\right) = -(V_b - V_a) = V_a - V_b \quad (2.3)$$

โดยที่ $V_a = U_a/q_0$ คือพลังงานศักย์ต่อประจุหนึ่งหน่วยจุด a และเรียก V_a และ V_b ว่าศักย์ที่จุด a และศักย์ที่จุด b ตามลำดับ ดังนั้นงานที่แรงไฟฟ้ากระทำต่อประจุหนึ่งหน่วยเมื่อวัตถุเคลื่อนที่จาก a ไป b ว่ามีค่าเท่ากับ ศักย์ที่จุด a ลบศักย์ที่จุด b

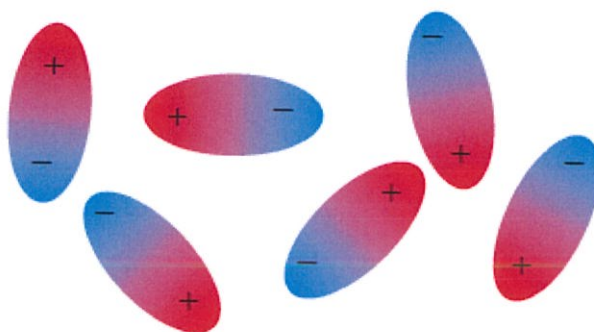
เราเรียกผลต่างของ $V_a - V_b$ ว่าศักย์ของ a เทียบกับศักย์ของ b มักเรียกปริมาณนี้ว่าความต่างศักย์ระหว่าง a และ b

2.3.4 ไดอิเล็กทริก

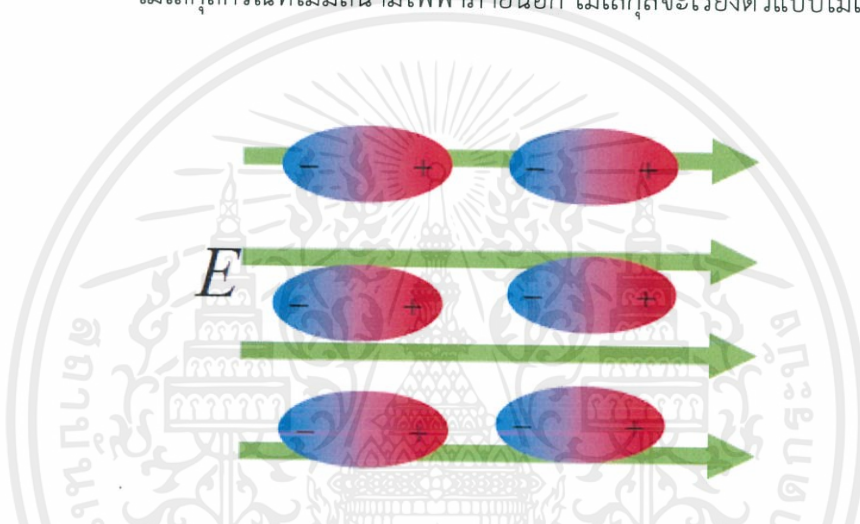
แนวทางในการเพิ่มความจุของตัวเก็บประจุ อาจทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของแผ่นคู่ขนาน หรือลดระยะห่างระหว่างแผ่นลง โดยเป็นการปรับปรุงด้านมิติทางกายภาพ แต่อีกแนวทางหนึ่งคือ การลด การเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ระหว่างขั้วของตัวเก็บประจุ ดังสมการ $C = \frac{Q}{V}$ เมื่อเราลดการ เปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ V ได้ ค่าความจุ C ก็จะเพิ่มมากขึ้นโดยอัตโนมัติ

การลดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ V อาจทำได้โดยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และสนามไฟฟ้า $V = Ed$ จะเห็นว่าถ้าเราสามารถลดค่าความเข้มสนามไฟฟ้า E ลงได้ ค่าความต่าง ศักย์ก็จะลดลงด้วย การลดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสามารถกระทำได้โดยการใช้สารบางชนิดใส่ลงไประหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนาน สารดังกล่าวมีสมบัติคือ มีขั้วทางไฟฟ้า และสามารถจัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้า ได้โดยไม่เคลื่อนที่หรือไม่นำไฟฟ้าเสียเอง สารกลุ่มนี้เรียกว่า สารไดอิเล็กทริก (dielectric) แสดง แบบจำลองแบบง่ายๆ ได้ดังภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.6 แบบจำลองของสารไดอิเล็กตริก เครื่องหมายบวกแสดงอำนาจของขั้วไฟฟ้าในโมเลกุลกรณีที่ไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก โมเลกุลจะเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ



ภาพที่ 2.7 เมื่อมีสนามไฟฟ้าภายนอก โมเลกุลจะเรียงตัวตามสนามไฟฟ้า

เมื่อเติมสารไดอิเล็กตริกดังกล่าวเข้าไประหว่างแผ่นตัวนำ คู่ขนานแล้ว ประจุไฟฟ้าที่เป็นขั้วในสาร ไดอิเล็กตริกจะจัดเรียงตัวไปหักล้างกับประจุไฟฟ้าเดิมที่อยู่บนแผ่นตัวนำ ทำให้ขั้วไฟฟ้าเสมือนมีประจุน้อยลง ส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นน้อยลงไปด้วย ความสามารถในการหันตัวเรียงไปตามสนามไฟฟ้านี้บอกได้ด้วยค่าคงที่ที่เรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) โดยที่ถ้าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าสูง แสดงว่ามีความสามารถในการจัดเรียงตัวได้ง่าย ทำให้ประจุบนแผ่นเกิดการหักล้างไปได้มาก สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะน้อยลง ค่าความต่างศักย์ ระหว่างแผ่นคู่ขนานก็จะน้อยลงตามไปด้วย ส่งผลให้ค่าความจุของตัวเก็บประจุสูงขึ้นตามต้องการ

สามารถหาความจุเดิม C_0 ได้จาก $C_0 = Q/V$ และหาค่าความจุ C หลังจากการเพิ่มไดอิเล็กตริกได้จาก $C = Q/V$ ประจุ Q จะมีค่าเท่ากันทั้ง 2 กรณี และ V จะน้อยกว่า V_0 จึงสรุปได้ว่าความจุ C เมื่อมีไดอิเล็กตริกจะมีค่าสูงกว่า C_0 เมื่อบริเวณไดอิเล็กตริเพิ่มเติมเราเรียกอัตราส่วนของ C ต่อ C_0 ว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ ตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K = \frac{c}{c_0} \quad (2.4)$$

2.4 ไฟฟ้าที่เกิดจากการเสียดทานของวัสดุ (Triboelectric Effect)

การเกิดไฟฟ้าที่เกิดจากการเสียดทานของวัสดุ (Triboelectric Effect) คือ การที่วัสดุ 2 ชนิด มาสัมผัสกันด้วยแรงเสียดทานและเกิดการเหนี่ยวนำของประจุ (Electrostatic induction) กลายเป็น กระแสไฟฟ้า ไฟฟ้าที่เกิดจากการเสียดทานของวัสดุเป็นสาเหตุของการเกิดไฟฟ้าสถิตในทุกๆวัน การนำวัสดุที่มีความแตกต่างกันของประจุ โดยขึ้นอยู่กับความเป็นขั้วของวัสดุมาสัมผัสหรือเชื่อมต่อกัน

การเกิดไฟฟ้าสถิตเป็นเพียงปรากฏการณ์เล็กๆที่รู้จักกันมาเกือบ 1000 ปี แม้ว่าจะเป็นเพียงปรากฏการณ์หนึ่งที่เราสามารถพบได้มากที่สุดในทุกๆวัน กลไกที่อยู่เบื้องหลังคือ Triboelectrification การเกิดประจุจากการเสียดทาน ที่ยังมีการศึกษาและหาคำอธิบาย โดยทั่วไปเชื่อว่าหลังจากวัสดุ 2 ชนิดที่มีประจุแตกต่างกัน เมื่อเกิดการสัมผัสกันของวัสดุ 2 ชนิดจะเกิดการสร้างพันธะเคมีขึ้นบางส่วนของพื้นผิว เรียกว่า แรงยึดติด (Adhesion) และจะเกิดการเคลื่อนที่ของประจุระหว่างวัสดุหนึ่งไปยังอีกวัสดุหนึ่งเพื่อให้เกิดความสมดุลทางไฟฟ้า เมื่อวัสดุทั้ง 2 ชนิดแยกออกจากกัน พันธะระหว่างอะตอมบางตัวจะมีการเก็บอิเล็กตรอนไว้ และพันธะของอะตอมบางตัวจะให้ อิเล็กตรอน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดประจุจากการเสียดสีที่ผิวของวัสดุ

อย่างไรก็ตามไฟฟ้าสถิตเป็นที่กังวลอย่างมากในเรื่องของความปลอดภัย เนื่องจากสามารถทำให้เกิดประกาย การระเบิด และเกิดการลุกไหม้ของไอระเหยของสารไวไฟ รถหรือรถเข็นที่อาจจะมีสารจำพวกของเหลวระเหยง่าย (Volatile liquids) สารไวไฟ หรือสารที่สามารถจุดระเบิด จะต้องมีการปล่อยออกอย่างถูกต้อง เพื่อป้องกันการเกิดไฟไหม้

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางตัวส่วนมากจะประกอบด้วยวงจรรวมสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วย โลหะออกไซด์ สามารถถูกทำลายด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีความต่างศักย์สูงๆ ดังนั้นอาจจะต้องใช้ถุงมือในการขนส่งหรือเคลื่อนย้าย เพื่อป้องกันไฟฟ้าสถิต

จะเห็นได้ว่าการเกิดประจุจากการเสียดทาน (Triboelectrification) ส่งผลในด้านลบมากที่สุดในชีวิตประจำวัน, การจัดการระบบอุตสาหกรรม และการขนส่ง สิ่งที่น่าแปลกใจคือถึงแม้ว่า การเกิดประจุจากการเสียดทาน (Triboelectrification) จะอยู่ในชีวิตประจำวันมาเป็นพันๆปีแต่ก็ยังไม่ได้อูกนำมาประยุกต์ใช้ในทางบวกมากนัก จนกระทั่งเมื่อไม่นานมานี้การเกิดประจุจากการเสียดทาน (Triboelectrification) ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง สำหรับการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า และเซ็นเซอร์ขับเคลื่อนด้วยตัวเอง



2.5 วัสดุสำหรับการเกิดประจุจากการเสียดทาน (Triboelectrification)

ไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นกับวัสดุเกือบทุกชนิด ตั้งแต่ โลหะ พอลิเมอร์ เส้นไหม และไม้ โดยวัสดุทั้งหมดนี้สามารถนำมาเปรียบเทียบความสามารถในการเกิดไฟฟ้าสถิตเพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานระดับนาโน (TENGs) ดังนั้นตัวเลือกทางวัสดุสำหรับ TENG จึงมีเป็นจำนวนมาก

อย่างไรก็ตามความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนของวัสดุจึงขึ้นอยู่กับความเป็นขั้วของวัสดุ John Carl Wilck ได้มีการจัดตาราง Triboelectric series ขึ้นในปี ค.ศ. 1757 ในตารางที่ 2.1 แสดงชุดของวัสดุบางส่วน วัสดุที่อยู่ด้านล่างของตารางเมื่อสัมผัสกับวัสดุที่อยู่ด้านบนของตาราง จะได้วัสดุที่เป็นประจุลบ จากในตารางยังใช้วัสดุที่ห่างกันจะยิ่งได้ประจุอิเล็กตรอนมากขึ้น เมื่อไม่นานมานี้มีการใช้การสัมผัสกันระหว่างของแข็งกับโลหะที่เป็นของเหลว เช่น โปรท เป็นวิธีที่พบบ่อยเพื่อวัดปริมาณความหนาแน่นของประจุที่พื้นผิวของวัสดุจากการเกิดไฟฟ้าสถิต



นอกเหนือจากการเลือกวัสดุที่อยู่ในตาราง Triboelectric series รูปร่างลักษณะของพื้นผิวยังสามารถปรับปรุงได้โดยใช้เทคนิคทางฟิสิกส์โดยการออกแบบให้เป็นรูปร่างต่างๆ เช่น พีระมิด ลูกบาศก์ หรือลักษณะทรงกลมคว่ำ ในอยู่ในระดับไมโคร หรือนาโน ซึ่งจะมีผลในเรื่องของการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส และเพิ่มโอกาสในการเกิดไฟฟ้าสถิต พื้นผิวของวัสดุยังสามารถทำการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันทางเคมี โดยใช้โมเลกุลต่างๆ เช่น ท่อนาโน (Nanotubes) เส้นใยนาโน (Nanowires) หรืออนุภาคนาโน (Nanoparticles) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดไฟฟ้าสถิต การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวสามารถเพิ่มความต่างศักย์ให้กับพื้นผิวของวัสดุได้อย่างมาก โครงสร้างในระดับนาโนที่อยู่บนพื้นผิวของวัสดุสามารถเปลี่ยนลักษณะของการสัมผัสระหว่างวัสดุ โดยในส่วนของพื้นที่ผิวสัมผัสสามารถทำได้โดยการคอมโพสิต เช่นการฝังอนุภาคนาโนเข้าไปในเนื้อของพอลิเมอร์ ซึ่งไม่เพียงแต่จะเป็นการเปลี่ยนการเกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวของวัสดุ แต่ยังเป็นการเปลี่ยนค่าการซึมผ่านของอิเล็กทริก (Permittivity) ของไดอิเล็กทริกเพื่อให้วัสดุมีความสามารถในการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 2.1 ชุดของวัสดุ Triboelectric series ที่เป็นเพียงส่วนของวัสดุหนึ่งตามแนวโน้มความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอน

 Positive	Polyformaldehyde 1.3-1.4	(continued)	 Negative
	Etylcellulose	Polyester (Dacron)	
	Polyamide 11	Polyisobutylene	
	Polyamide 6-6	Polyuretane flexible sponge	
	Melanime formol	Polyethylene Terephthalate	
	Wool, knitted	Polyvinyl butyral	
	Silk, woven	Polychlorobutadiene	
	Aluminum	Natural rubber	
	paper	Polyacrilonitrile	
	Cotton, woven	Acrylonitrile-vinyl chloride	
	Steel	Polybisphenol carbonate	
	Wood	Polychloroether	
	Hard rubber	Polyvinylidene chloride (Saran)	
	Nickel, copper	Polystyrene	
	Sulfur	Polyethylene	
	Brass, silver	Polypropylene	
	Acetate, Rayon	Polyimide (Kapton)	
	Polymethyl methacrylate (Lucite)	Polyvinyl Chloride (PVC)	
	Polyvinyl alcohol	Polydimethylsiloxane (PDMS)	
	(continued)	Polytetrafluoroethylene (Teflon)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ชุดของวัสดุ Triboelectric series ที่เป็นเพียงส่วนของวัสดุหนึ่งตามแนวโน้มความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอน

 Positive	Aniline-formol resin	Polyvinyl alcohol	 Negative
	Polyformaldehyde 1.3-1.4	Polyester (Dacron) (PET)	
	Etylcellulose	Polyisobutylene	
	Polyamide 11	Polyuretane flexible sponge	
	Polyamide 6-6	Polyethylene terephthalate	
	Melanime formol	Polyvinyl butyral	
	Wool, knitted	Formo-phenolique, hardened	
	Silk, woven	Polychlorobutadiene	
	Polyethylene glycol succinate	Butadiene-acrylonitrile copolymer	
	Cellulose	Nature rubber	
	Cellulose acetate	Polyacrylonitrile	
	Polyethylene glycol adipate	Acrylonitrile-vinyl chloride	
	Polydiallyl phthalate	Polybisphenol carbonate	
	Cellulose (regenerated) sponge	Polychloroether	
	Cotton, woven	Polyvinylidene chloride (Saran)	
	Polyurethane elastomer	Poly(2,6-dimethyl polyphenyleneoxide)	
	Styrene-acrylonitrile copolymer	Polystyrene	
	Styrene-butadiene copolymer	Polyethylene	
	Wood	Polypropylene	
	Hard rubber	Polydiphenyl propane carbonate	
Acetate, Rayon	Polyimide (Kapton)		
Polymethyl methacrylate (Lucite)	Polyethylene terephthalate		
Polyvinyl alcohol	Polyvinyl Chloride (PVC)		
(continued)	Polytrifluorochloroethylene		
	Polytetrafluoroethylene (Teflon)		

2.6 อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานระดับนาโน (Triboelectric Nanogenerators)

ปัจจุบันอิเล็กทรอนิกส์ เข้ามามีส่วนสำคัญกับกิจกรรมของมนุษย์อย่างมาก ทั้งในด้านสุขภาพ ความปลอดภัย และการสื่อสาร พลังงานที่มีมากที่สุดที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ คือแรงเชิงกล ซึ่งเป็นผลของการเคลื่อนที่ของร่างกาย

เมื่อไม่นานมานี้ มีการออกแบบให้เกิดประจุไฟฟ้าสถิตบนผิวของวัสดุที่แตกต่างกัน เมื่อนำวัสดุเหล่านี้มาเชื่อมต่อกันทางกายภาพ การเชื่อมต่อกันจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้าสถิต ซึ่งสามารถทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ เมื่อ 2 พื้นผิวนั้นแยกออกจากกันโดยแรงเชิงกล จะสามารถขับเคลื่อนให้มีการไหลระหว่าง 2 ขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านบนและด้านล่างของวัสดุทั้ง 2 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากการเสียดทานระดับนาโน ถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกโดยกลุ่มของหวาง (Wang's Group) ในปี ค.ศ.2012 [23] ซึ่งมีเป้าหมายในการเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลขนาดเล็ก โดย TENG มีรูปแบบอยู่ 4 โหมด ดังเนื้อหารายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.1 Vertical Contact-Separation Mode

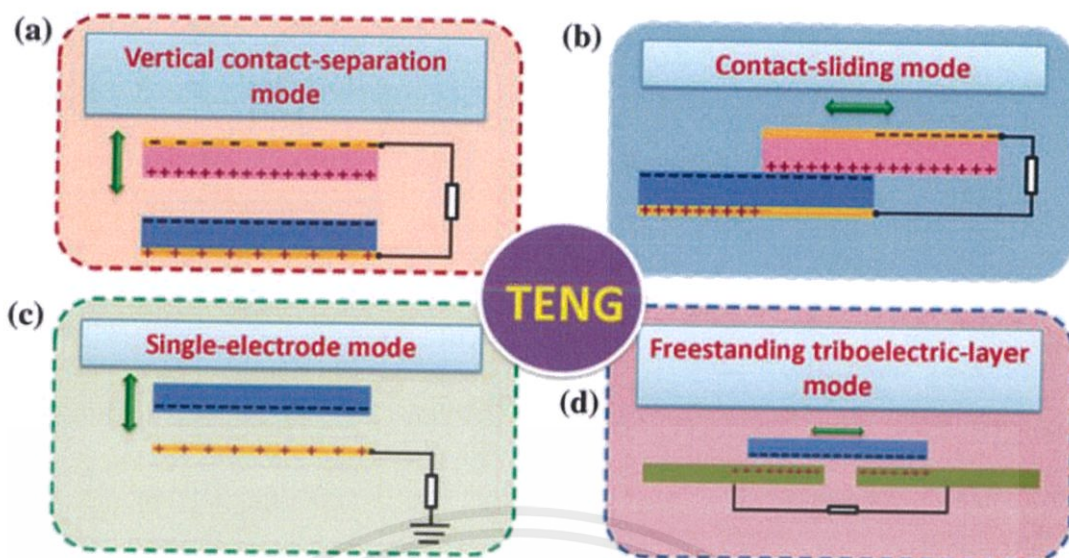
ใช้การออกแบบที่ง่ายที่สุดของ TENG แสดงในตัวอย่าง ภาพที่ 2.8a ทั้ง 2 พื้นผิวเป็นฟิล์มฉนวนที่แตกต่างกัน และมีขั้วไฟฟ้าอยู่ที่ด้านบนและด้านล่างของพื้นผิวโครงสร้างแบบซ้อนกัน การสัมผัสกันเชิงกายภาพระหว่างฟิล์มฉนวนทั้ง 2 ออกแบบให้มีประจุที่พื้นผิวตรงข้ามกัน ผิวทั้ง 2 ถูกแยกออกจากกันโดยช่องว่างขนาดเล็กที่อยู่ภายใต้ระหว่างขั้วไฟฟ้า ช่องว่างขนาดเล็กนั้นยกตัวขึ้นด้วยแรงจากภายนอก ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้น

ถ้าขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 มีการเชื่อมต่อกับไฟฟ้าโดยมีการเพิ่มโหลด อิเล็กตรอนจะมีการไหลเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกขั้วไฟฟ้าหนึ่ง เพื่อสร้างศักย์ไฟฟ้าตรงข้าม เพื่อให้เกิดความสมดุลของสนามไฟฟ้าสถิต เมื่อช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าถูกปิดลง หรือมาประกบกัน ประจุไฟฟ้าสถิตที่ทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตจะลดลงและหายไป อิเล็กตรอนจะมีการไหลย้อนกลับ

2.6.2 Lateral Sliding Mode

โครงสร้างเริ่มต้นมีลักษณะเหมือนกันกับ Vertical Contact-Separation Mode เมื่อฟิล์มฉนวนทั้ง 2 มีการสัมผัสกัน และมีการเลื่อนออกไปในแนวขนาน จะเกิดประจุไฟฟ้าสถิตขึ้นที่ผิวของทั้ง 2 วัสดุ ภาพที่ 2.8b การโพลาริไซในด้านข้างจึงเป็นการเลื่อนไปในทิศทางตามแนวยาว โดยอิเล็กตรอนจะไหลไปยังขั้วไฟฟ้าด้านล่างและด้านบน เพื่อให้สนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุไฟฟ้าสถิตเกิดความสมดุล การเลื่อนออกและเลื่อนกลับมาของขั้วไฟฟ้าเป็นช่วงๆ สามารถสร้างไฟฟ้ากระแสตรงได้

นี่เป็นโหมดการเลื่อนของ TENG ที่สามารถเลื่อนได้ในแนวระนาบ การหมุนทรงกระบอกหรือการหมุนแบบแผ่นดิสก์ เกี่ยวข้องกับการศึกษาในเชิงทฤษฎีสำหรับการใช้โหมดพื้นฐานและโครงสร้างของ TENG



ภาพที่ 2.8 แสดง 4 โหมดพื้นฐานของ TENG (a) vertical contact-separation mode, (b) lateral sliding mode, (c) single-electrode mode, (d) Freestanding Triboelectric-Layer Mode

2.6.3 Single-Electrode Mode

ทั้ง 2 โหมดที่ได้กล่าวไปใน 2.6.1 และ 2.6.2 นั้น มีของขั้วไฟฟ้าในการเชื่อมต่อ TENG ดังกล่าวสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นในกรณีของมือถือ TENG จะสามารถทำงานได้

แต่ในบางกรณี วัสดุที่เป็นส่วนหนึ่งของ TENG ไม่สามารถเชื่อมต่อกับไฟฟ้าโดยโหลดได้ เนื่องจากเป็นวัสดุเคลื่อนที่ได้ เช่น การเดินของมนุษย์บนพื้น เพื่อให้สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานในกรณีนี้ได้จึงมีการแนะนำให้ใช้ขั้วไฟฟ้าของ TENG แบบขั้วไฟฟ้าเดี่ยว ซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้านด้านล่างของ TENG เป็นกราวด์ ภาพที่ 2.8c ถ้าจำกัดขนาดของ TENG การเข้าใกล้หรือการเคลื่อนออกของวัสดุด้านบนจากขั้วไฟฟ้านด้านล่าง จะเปลี่ยนแปลงการกระจายของสนามไฟฟ้าภายใน ดังนั้น จึงมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้านด้านล่างและกราวด์ เพื่อรักษาการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า รูปแบบการเก็บเกี่ยวพลังงานสามารถเป็นได้ทั้ง contact-separation mode และ contact-sliding mode

2.6.4 Freestanding Triboelectric-Layer Mode

ในธรรมชาติ วัสดุที่มีการเคลื่อนที่จะมีประจุโดยธรรมชาติ เนื่องจากมีการสัมผัสกับอากาศหรือวัสดุอื่นๆ เช่น รองเท้าที่เดินบนพื้น โดยปกติจะมีประจุและคงอยู่บนผิวได้เป็นชั่วโมง และในช่วงเวลานี้การสัมผัสหรือเสียดทานนั้นเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็นเนื่องจากความหนาแน่นของประจุสูงสุด ถ้าทำให้ขั้วไฟฟ้าภายใต้ชั้นของฉนวนมีความสมมาตร และขนาดของขั้วไฟฟ้า และระยะช่องว่างของวัสดุมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

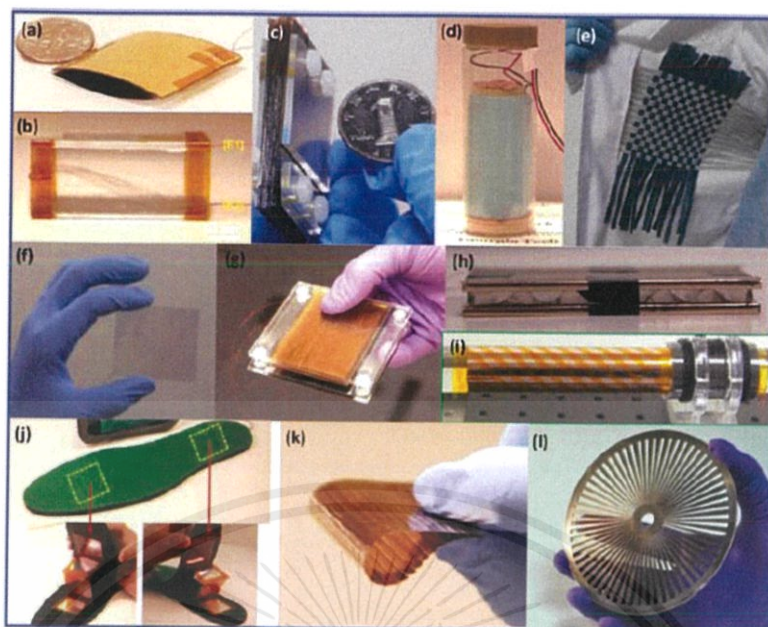
ขนาดเท่ากันกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ วัตถุจะเข้าใกล้ และ/หรือออกจากขั้วไฟฟ้า จะทำให้เกิดการกระจายตัวของประจุไม่สมมาตรภายในตัวกลาง ด้วยเหตุนี้อิเล็กตรอนจะเกิดการไหลระหว่าง 2 ขั้วไฟฟ้า เพื่อกระจายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้สมดุล ภาพที่ 2.8d การเคลื่อนที่ไปกลับระหว่างขั้วไฟฟ้าของอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดพลังงาน วัตถุที่เคลื่อนที่ไม่ได้ จะต้องมีการสัมผัสชั้นฉนวนโดยตรงที่ด้านบนของขั้วไฟฟ้า ดังนั้นในโหมดการหมุนแบบอิสระ จึงมีความเป็นไปได้ ที่จะไม่มีการการเชื่อมต่อเชิงกลโดยตรง ดังนั้นการสวมใส่พื้นที่ผิวจะลดลงอย่างมาก นี่จึงเป็นวิธีการที่ดีสำหรับการเพิ่มความแข็งแรงทนทานให้กับ TENG

จาก 4 โหมดพื้นฐานที่ได้แสดงข้างต้น มีการประดิษฐ์ TENG ขึ้นในรูปแบบต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับโหมดการใช้งานเฉพาะ ภาพที่ 2.9 แสดงชุดภาพถ่ายของ TENG ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นมาเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานชนิดต่างๆ โครงสร้าง TENG เหล่านี้เป็นหน่วยพื้นฐานสำหรับการให้พลังงานระดับไมโครสำหรับอุปกรณ์ขนาดเล็ก การประกอบและการรวบรวมรูปแบบของอุปกรณ์เหล่านี้เข้าด้วยกัน ก็จะสามารถเป็นพื้นฐานของพลังงานในระดับเมกะได้[23]

2.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอุปกรณ์ TENG

2.7.1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ TENG ที่ใช้วัสดุต่างกัน

Researcher	Material	Electrical output	Device size	Force	Normalized output	Ref
Sihong Wang (2013)	Al-PDMS	230 V 0.13 mA	3 × 2.8 cm ²	10 Hz	27.38 v 15.47 μA/cm ²	[24]
Peng Bai (2013)	Al-PTFE	215 V 0.66 mA	3.8 × 3.8 cm ²	50 N	14.89 v 45.70 μA/cm ²	[25]
Anki Mule (2018)	Al-PTFE	200 V 20 μA	2 × 2 cm ²	4 N	50 v 5 μA /cm ²	[26]
Bhaskar Dudem (2018)	Al-PTFE	625 V 50.5 μA	25 cm ²	5 N	25 V 2.02 μA/cm ²	[27]



ภาพที่ 2.9 แสดงรูปแบบของการสร้าง TENG บางส่วนสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงาน (a)เก็บเกี่ยวพลังงานจากการกดของนิ้วมือ, (b)เก็บเกี่ยวพลังงานจากการไหลของอากาศ/ลม, (c)เก็บเกี่ยวพลังงานจากการเลื่อนในแนวระนาบ, (d) การล้อมรอบพื้นที่สำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานการสั่น/การรบกวนของคลื่นน้ำหรือ การสั่นเชิงกล, (e) การสร้างสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานการเคลื่อนที่ของร่างกาย, (f) TENG แบบโปร่งใสสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานจากหน้าจอสัมผัส, (g) พลังงานจากการกดของเท้า/มือ, (h) พลังงานการกระทบของน้ำ, (i) พลังงานการหมุนทรงกระบอก, (j) พลังงานการเดินจากรองเท้า, (k) โครงสร้างกรตตั้งแบบโค้งงอสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเลื่อน, (l) พลังงานการหมุนในรูปแบบแผ่นดิสก์

2.7.2 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ TENG ที่ใช้รูปแบบพื้นผิวต่างกัน

ในงานวิจัย Transparent Triboelectric Nanogenerators and Self-Powered Pressure Sensors Based on Micropatterned Plastic Films โดย Feng-Ru Fan และคณะ [28] มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุในอุปกรณ์ TENG โดยทำการปรับปรุงพื้นผิว Polydimethylsiloxane (PDMS) ให้อยู่ในรูปแบบต่าง ๆ คือ Line, Cube และ Pyramid โดยกำหนดขนาดของอุปกรณ์ 9 cm² จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวให้อยู่ในรูปแบบ Pyramid > Cube > Line > Film มากที่สุดตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการมีพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ได้เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนกระบวนการเตรียมและการสร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานโดยอาศัย การเกิดไฟฟ้าจากการเสียดทาน วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลองการเตรียมการทดลอง และวิธีการทดลอง ซึ่งจะประกอบด้วย 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า 2 อุปกรณ์และวิธีการที่ใช้ ในการประกอบขั้วไฟฟ้า 3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดประสิทธิภาพ TENG

3.1 การคัดเลือกวัสดุ

การสร้างประจุจากการเสียดทานของวัสดุ (Triboelectrification effect) เป็นการนำวัสดุ 2 ชนิด ที่มีค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (Electron affinity: EA) ต่างกัน มาสัมผัสหรือเสียดสีกัน โดย วัสดุที่มีค่า EA น้อยกว่าจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ส่วนวัสดุที่มีค่า EA สูงกว่าจะเป็นตัวให้อิเล็กตรอน

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ แผ่นอะลูมิเนียม เพื่อเป็นวัสดุขั้วบวก และ เลือกใช้แผ่น PET/ITO โดยใช้ PET เป็นวัสดุขั้วลบ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความต่างของค่า EA สูง (ตาราง 2.1) นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่าย และง่ายต่อการปรับปรุง

3.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้า

3.2.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้า

- (1) แผ่นพลาสติกใสที่เคลือบสารนำไฟฟ้า (PET/ITO)
- (2) กาวเงิน
- (3) เอทานอล
- (5) น้ำไร้ประจุ (Deionized water)

3.2.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าและการทดลอง

- (1) เทปโฟมชนิดกาว 2 หน้า
- (2) เตาอบ
- (3) เทปทองแดง
- (4) สายไฟ
- (5) แผ่นอะลูมิเนียม
- (6) เทปเคปตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การปรับปรุงพื้นผิววัสดุ

- (1) ตัดแผ่นอะลูมิเนียมขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$ และล้างด้วยสารเคมีตามลำดับดังต่อไปนี้
เอทานอล ในเครื่องล้างอัลตราโซนิค 10 นาที
DI ในเครื่องล้างอัลตราโซนิค 10 นาที
- (2) เป่าให้แห้ง
- (3) นำไปทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของออกซิเจนและอาร์กอนด้วยเงื่อนไขดังตารางที่ 3.1 โดยวางด้านที่ไม่ได้ติดเทปขึ้นด้านบน
- (4) ต่อดตัวอย่างเข้ากับขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการทากาวเงิน

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการพลาสมา

เงื่อนไข	รายละเอียด
ชนิดแก๊ส	O_2, Ar
Flow rate	15 sccm
กำลังไฟฟ้า	300 วัตต์
ระยะเวลา	1-20 นาที
ความดัน	0.1 torr



ภาพที่ 3.1 ภาพจำลองของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมา

3.3 การวิเคราะห์สมบัติของแผ่นอะลูมิเนียมที่ปรับปรุงพื้นผิว

ทำการวัดสมบัติของแผ่นอะลูมิเนียมที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิคดังนี้ แสดงในตารางที่ 3.2 ตารางที่ 3.2 เทคนิควิเคราะห์ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ดังนี้

สมบัติ	เทคนิค
สัณฐานวิทยา	<ul style="list-style-type: none"> กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope)
ค่าความต้านทาน	<ul style="list-style-type: none"> 4-point probe
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	<ul style="list-style-type: none"> LCR

3.4 การประกอบอุปกรณ์ TENG

ประกอบอุปกรณ์ TENG โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมเป็นขั้วบวกและใช้ PET/ITO เป็นขั้วลบ

3.4.1 การเตรียมขั้ว PET/ITO

- (1) ตัดแผ่น PET/ITO ขนาด $2 \times 3 \text{ cm}^2$
- (2) นำไปล้างด้วย Ethanol ในเครื่องล้างอัลตราโซนิก 10 นาที
- (3) นำไปล้างด้วย DI ในเครื่องล้างอัลตราโซนิก 10 นาที
- (4) นำแผ่น PET/ITO ไปเป่าให้แห้ง

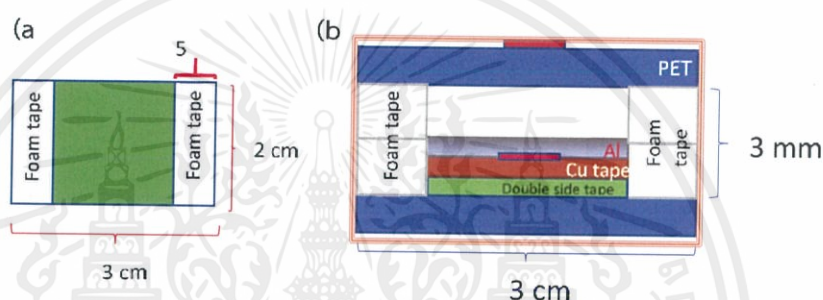
3.4.2 การเตรียมช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

เตรียมช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าโดยใช้เทปโฟมชนิดกาว 2 หน้าที่มีความหนา 0.8-3 มิลลิเมตร โดยมีขนาดกว้าง 0.5 มิลลิเมตร ยาว 2 มิลลิเมตรนำไปติดบนแผ่นพลาสติกที่ขอบซ้ายและขอบขวา โดยเว้นระยะระหว่างเทปโฟมกาว 2 หน้า 2 เซนติเมตรเพื่อติดกาว 2 หน้า ชนิดบาง ดังภาพ 3.2(a)

3.4.3 การเชื่อมขั้วไฟฟ้า

เชื่อมขั้วไฟฟ้าบวกและขั้วไฟฟาลบกับสายไฟ โดยทำการติดแผ่นเทปทองแดงที่ด้านขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมและขั้ว ITO ของแผ่น PET/ITO หลังจากนั้นทากาวเงินบนสายไฟกับขั้วอะลูมิเนียมและขั้ว ITO ของแผ่น PET/ITO หลังจากนั้นนำขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมติดด้วยเทปทองแดง และนำไปวางบนฐานรองรับที่พลาสติกที่เตรียมไว้ในข้อ 3.3.2 โดยวางลงบนกาว 2 หน้าชนิดบางระหว่างเทปโฟมกาว 2 หน้า

ทำการประกอบขั้วไฟฟ้าบวกและลบของ TENG โดยวางขั้วไฟฟ้า PET/ITO ลงบนเทปโฟมกาว 2 หน้าที่อยู่บนขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม จากนั้นใช้เทปแคปตอนพันรอบขั้วทั้ง 2 ขั้ว 5 รอบ ดังในภาพ 3.2 (b)



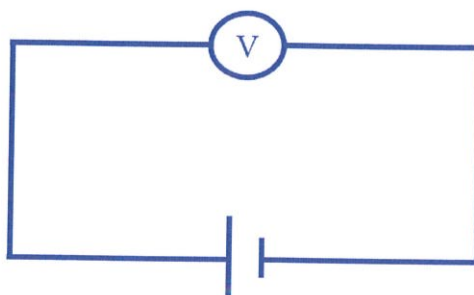
ภาพที่ 3.2 แสดงลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ TENG ในรูปแบบ (a) Top view และ (b) Cross section

3.5 การทดสอบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้า

ประกอบอุปกรณ์ TENG เข้ากับเครื่องควบคุมการให้แรง ซึ่งประกอบด้วย (1) กระจบอกลูกสูบนิวเมติกส์ (2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino) (3) แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) (4) ปืนลม โดยเครื่องสามารถให้แรงให้ช่วงความถี่ 0.33-12 เฮิรต สามารถให้แรงกด 200 N เมื่อแรงภายนอกกระทำต่อขั้วไฟฟ้า TENG ออสซิลโลสโคปจะวัดค่าสัญญาณที่ได้สัมพันธ์กับเวลา

3.5.1 การวัดค่าความต่างศักย์

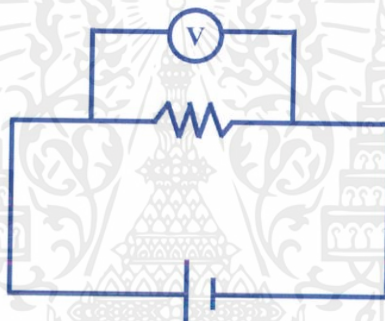
ต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อวัดค่าความต่างศักย์ ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แสดงการต่อวงจรเพื่อวัดประสิทธิภาพค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า TENG

3.5.2 การวัดกระแสไฟฟ้า

การวัดค่ากระแสไฟฟ้าจะนำตัวต้านทานมาต่ออนุกรมกับ TENG แล้ววัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อม และแปลงกลับเป็นค่ากระแสด้วยกฎของโอห์ม ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 แสดงการต่อวงจรเพื่อวัดประสิทธิภาพค่ากระแสไฟฟ้า TENG

3.5.3 การวัดกำลังไฟฟ้าและความต้านทานค่าต่างๆ

การวัดค่ากำลังไฟฟ้าของ TENG ทำได้โดยการต่อ TENG แบบอนุกรมเข้ากับตัวต้านทาน แล้วทำการวัดความต่างศักย์และค่ากระแสไฟฟ้า จากนั้นนำมาคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า (P) โดยคิดจากสมการ 3.1 โดยมีการต่อวงจรตามภาพที่

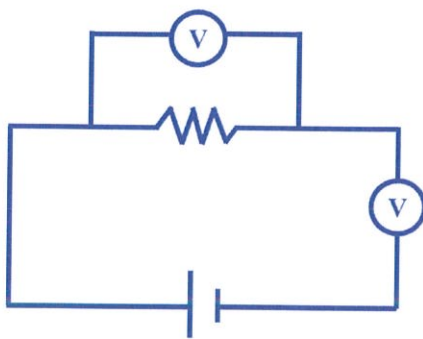
$$P=I^2R \quad (3.1)$$

โดย P : กำลังไฟฟ้า

I : กระแสไฟฟ้า

R : ค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

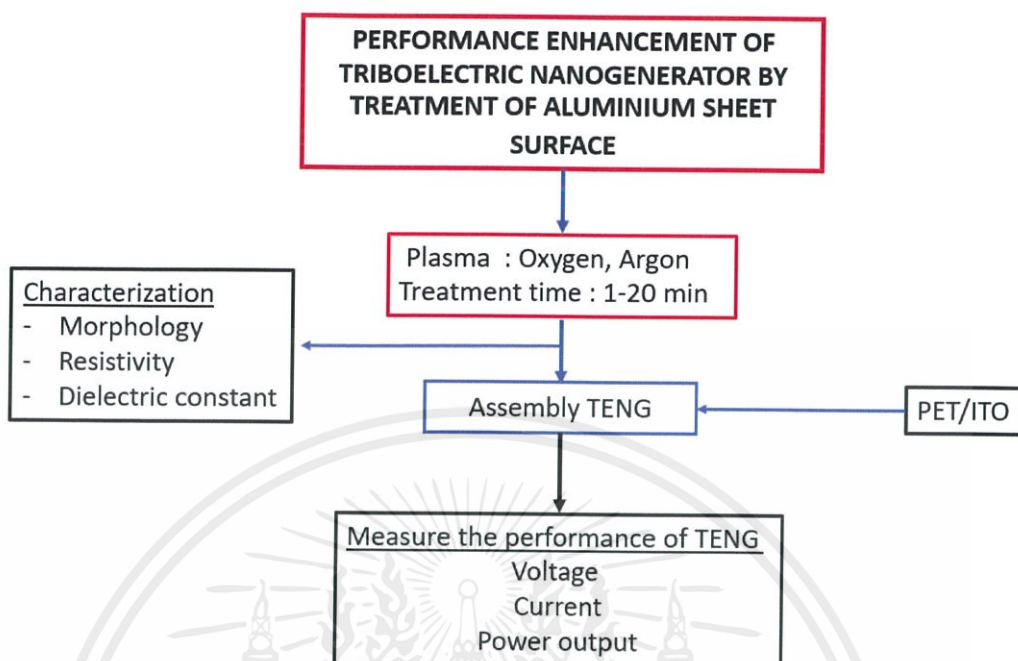


ภาพที่ 3.5 แสดงการต่อวงจรเพื่อวัดประสิทธิภาพค่ากำลังไฟฟ้า TENG



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการดำเนินงานสรุปได้ตามภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

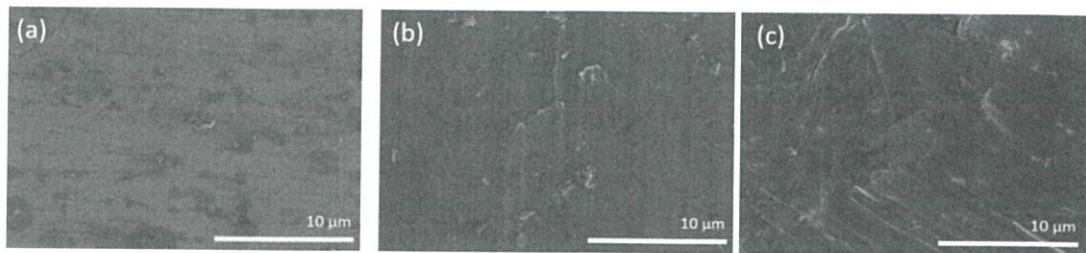
ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ Triboelectric nanogenerator (TENG) โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนและอาร์กอน ได้นำไปวิเคราะห์ศึกษาสมบัติต่างๆ และวัดประสิทธิภาพของอุปกรณ์ โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

- (1) ลักษณะพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนและอาร์กอน
- (2) สภาพความต้านทานของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนและอาร์กอน
- (3) การออกแบบโครงสร้าง TENG และความเสถียรของสัญญาณที่เกิดขึ้น
- (4) ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมของอุปกรณ์ TENG
- (5) ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ TENG

4.1 ศึกษาลักษณะพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนและอาร์กอน

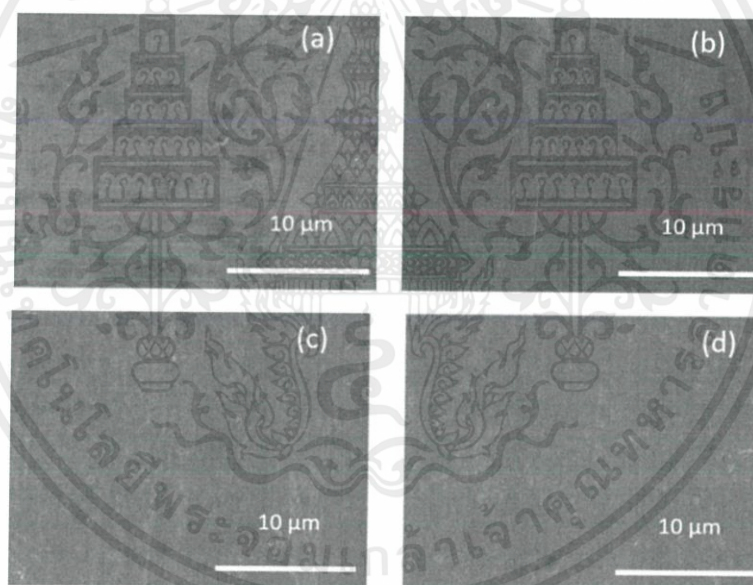
4.1.1 สันฐานวิทยาของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ ด้วยแก๊สออกซิเจนและอาร์กอนโดยใช้เทคนิค Scanning electron microscope (SEM)

ภาพที่ 4.1 แสดงภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแก๊สออกซิเจนที่เวลา (a) 0 นาที, (b) 1 นาที และ (c) 10 นาที ที่เงื่อนไขการพลาสมาแสดงในตารางที่ 3.1 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการพลาสมาหรือพลาสมา 0 นาที ภาพที่ 4.1(a) และแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแก๊สออกซิเจนที่เวลา 1 นาที และ 10 นาที แสดงให้เห็นว่าเวลาในการทำทรีตเมนต์ด้วยพลาสมามีผลต่อลักษณะพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียม โดยจะสังเกตว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการทำทรีตเมนต์ความขรุขระของพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมมีลักษณะที่เพิ่มขึ้น ภาพที่ 4.1 (b, c)



ภาพที่ 4.1 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแก๊ส ออกซิเจนเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ที่เวลา (a) 0 นาที, (b) 1 นาที และ (c) 10 นาที

ในขณะเดียวกันการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอนก็แสดงให้เห็นว่าเวลาในการทำทรีตเมนต์มีผลต่อลักษณะพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียม โดยเมื่อเพิ่มเวลาในการทำทรีตเมนต์ความขรุขระของพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังในภาพที่ 4.2

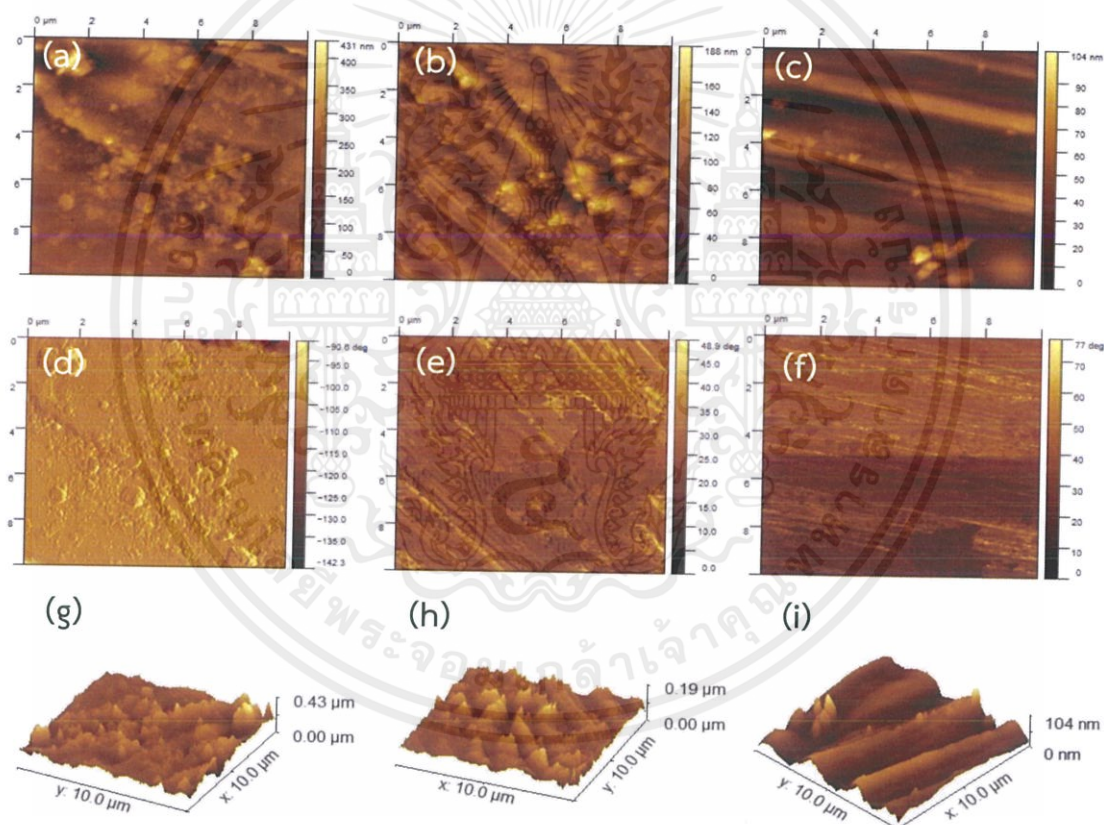


ภาพที่ 4.2 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแก๊ส ออกซิเจนเคราะห์ ที่เวลา (a) 0 นาที, (b) 1 นาที, (c) 10 นาที และ (d) 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ความขรุขระของพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊ส ออกซิเจนและอาร์กอน

หลังจากการศึกษาลักษณะพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแก๊สออกซิเจนและอาร์กอน โดยใช้เทคนิค SEM และเห็นว่ามีความขรุขระเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ได้ข้อมูลความขรุขระที่ชัดเจน จึงมีการศึกษาด้วยเทคนิค กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) ดังแสดงในภาพที่ 4.3 แสดงลักษณะพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์พลาสมาด้วยแก๊สออกซิเจนที่เวลาต่างๆ และแสดงผลการวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมด้วย AFM ในตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.3 ภาพ AFM แสดงลักษณะพื้นผิว (Topography) (a-c ภาพเฟส (d-f) และ ภาพ AFM 3 มิติ (g-i) ของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแก๊สออกซิเจน ที่เวลา 0 นาที 1 นาที และ 10 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าความขรุขระของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแก๊ส ออกซิเจนและอาร์กอนที่เวลาต่างๆ

Plasma	RMS (nm)			
	0 min	1 min	10 min	20 min
Oxygen plasma	38.33 nm	67.26 nm	67.19 nm	-
Argon plasma	38.33 nm	48.82 nm	60.35 nm	188.41 nm

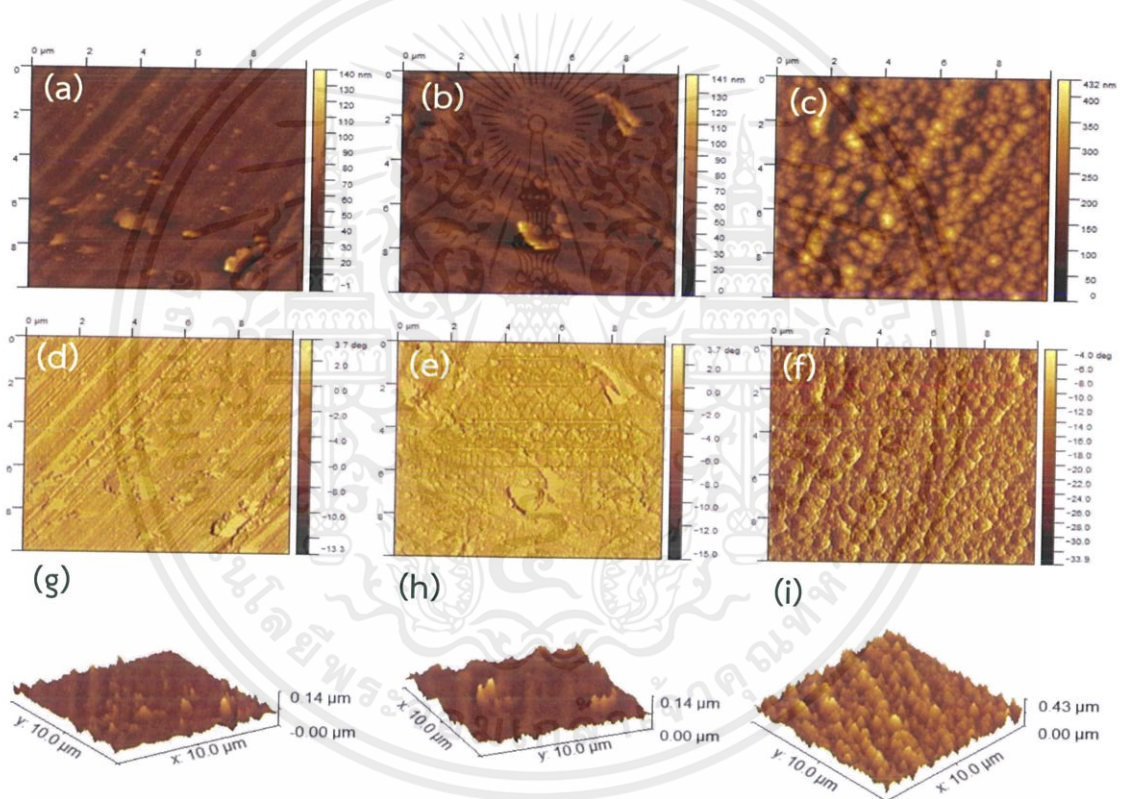
ลักษณะพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการพลาสมา แสดงลักษณะความขรุขระโดยธรรมชาติของพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียม ดังแสดงในภาพ AFM รวมทั้งภาพเฟสและภาพ 3 มิติ ในภาพที่ 4.3 (a, d และ g) ตามลำดับ ค่าความขรุขระของพื้นผิวทำการศึกษาโดยใช้โหมด Extract profile along arbitrary lines ในโปรแกรม Gwyddion จะได้ค่า Root mean square (RMS) เท่ากับ 38.33 nm ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ในขณะที่พื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการพลาสมาทรีตเมนต์ด้วยแก๊ส ออกซิเจนที่เวลา 1 นาที (ภาพที่ 4.3 (b)) จะสังเกตเห็นลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระเพิ่มขึ้นเกือบเท่าตัว โดยมีค่า RMS เท่ากับ 67.26 nm และเมื่อทำการเพิ่มเวลาในการทำออกซิเจนพลาสมาเป็น 10 นาที ดังในภาพ 4.3 (c) ความขรุขระเริ่มคงที่โดยมีค่า RMS เท่ากับ 67.19 nm

นอกจากนี้ภาพเฟส ของแผ่นอะลูมิเนียม ภาพที่ 4.3 (d-f) ที่เวลาในการทำพลาสมาทรีตเมนต์ต่างๆ แสดงถึงลักษณะที่แตกต่างกันของเฟสของแผ่นอะลูมิเนียม ที่เวลา 0 นาที บนแผ่นอะลูมิเนียมมีเฟสที่สม่ำเสมอ แต่หลังจากผ่านการทรีตเมนต์ พบว่ามีเฟสที่แตกต่างกันเกิดขึ้นบนแผ่นอะลูมิเนียม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาแก๊สออกซิเจนอาจจะทำให้เกิดการฟอร์มตัวของเฟสชนิดอื่นบนพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียม ซึ่งเกิดจากแก๊สออกซิเจนนั้นมีความสามารถในการทำความสะอาดพื้นผิว โดยกำจัดสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และสารอื่นๆเช่น ฝุ่น H_2O เป็นต้น และนอกจากนั้นออกซิเจนยังสามารถฟอร์มตัวเกิดเป็นชั้น Al_xO_y บนพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมได้เช่นกัน

ในขณะที่เดียวกันการทรีตเมนต์ด้วยแก๊สอาร์กอนก็สามารถเพิ่มความขรุขระให้กับแผ่นอะลูมิเนียมได้เช่นกันโดยแสดงในภาพ 4.4 แสดงลักษณะพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์พลาสมาด้วยแก๊สอาร์กอนที่เวลาต่างๆ จะเห็นว่าพลาสมาด้วยแก๊สอาร์กอนสามารถเพิ่มความขรุขระบนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมได้อย่างชัดเจน โดยสังเกตจากภาพ topography ภาพที่ 4.4 (a-c) และภาพ 3 มิติในภาพที่ 4.4 (g-i) เมื่อเพิ่มเวลาในการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊ส

อาร์กอน ค่า RMS ของแผ่นอะลูมิเนียม ที่เวลา 1 นาที, 10 นาที และ 20 นาที มีค่า 48.82 nm, 60.35 nm และ 188.41 nm ตามลำดับ ดังที่สรุปในตารางที่ 4.1

เนื่องจากแก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สเฉื่อยจึงเกิดการฟอร์มตัวหรือการทำพันธะระหว่างอะตอมบนแผ่นอะลูมิเนียมได้ยาก จึงเป็นไปได้ที่จะเกิดการ Bombardment บนพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียม โดยเกิดจากการชนของไอออนอาร์กอนบนแผ่นอะลูมิเนียม ทำให้อะตอมบนแผ่นอะลูมิเนียมหลุดออกและเกิดเป็นความขรุขระบนแผ่นอะลูมิเนียม โดยยิ่งใช้เวลาในการพลาสมานาน พื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมยิ่งมีความขรุขระมากขึ้น ซึ่งเมื่อสังเกตจากภาพเฟส ภาพที่ 4.4 (d-f) จะเห็นว่าพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมแสดงเฟสที่ได้จากการวัดเพียงเฟสเดียว สามารถบอกได้ว่าการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอนไม่ทำให้เกิดการฟอร์มตัวของเฟสอื่นบนแผ่นอะลูมิเนียม



ภาพที่ 4.4 แสดงลักษณะพื้นผิว (Topography) ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแก๊สอาร์กอน วิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ที่เวลา (a) 1 นาที, (b) 10 นาที และ (c) 20 นาที ภาพเฟส (Phase) (d-f) และ ภาพ 3 มิติ (g-i) ของแผ่นอะลูมิเนียม ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ศึกษาสภาพความต้านทานของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนและอาร์กอน

นำแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนและอาร์กอนไปวัดค่าสภาพความต้านทานของวัสดุโดยใช้เครื่องมือ 4-point probe โดยให้กระแสไฟฟ้าตั้งแต่ $-100 \mu\text{A}$ ถึง $100 \mu\text{A}$ และวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณสภาพความต้านทานภายในวัสดุจากสมการ 4.1

$$\rho = \frac{\pi}{\ln(2)} \left(\frac{V}{I} \right) t \quad (4.1)$$

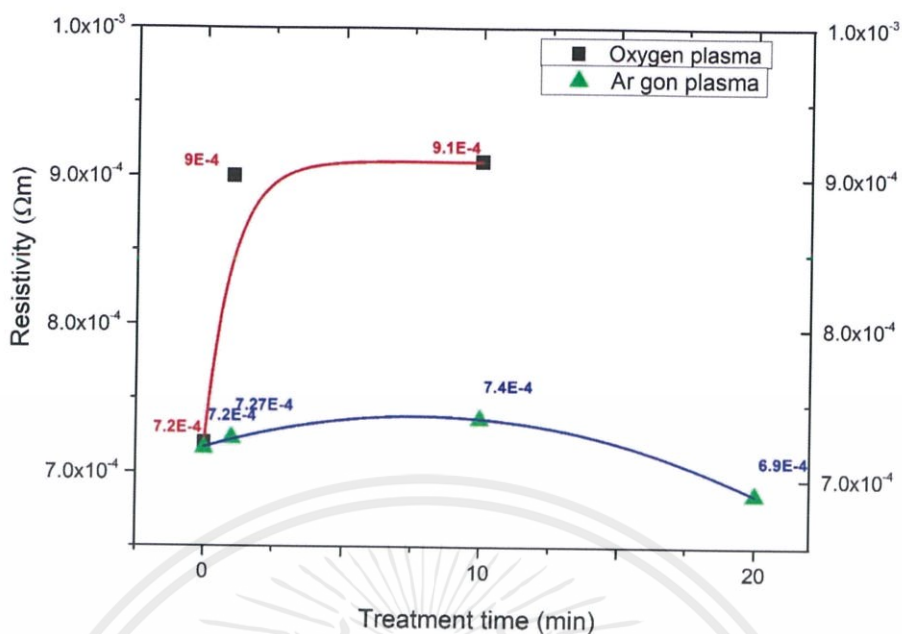
เมื่อ $\frac{\pi}{\ln(2)}$ = ค่าคงที่ของ probe (4.532)

V = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

I = ค่ากระแสไฟฟ้า (A)

t = ความหนาของชิ้นงาน (cm)

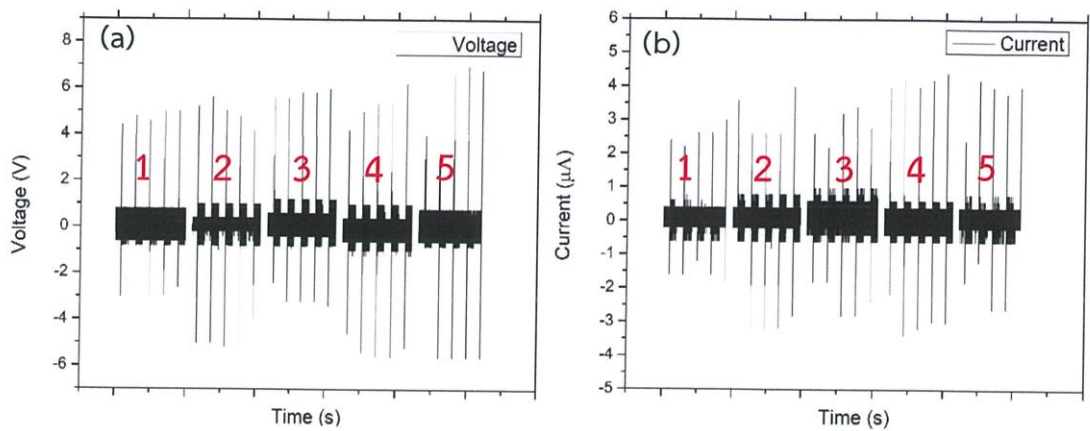
ภาพ 4.5 แสดง ค่าสภาพความต้านทานของแผ่นอะลูมิเนียมแต่ละเงื่อนไข โดยแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมามีสภาพความต้านทาน $7.23 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ แผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนพลาสมา 1 นาที และ 10 นาที มีค่าสภาพความต้านทาน $9.01 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ และ $9.1 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ และตามลำดับ ค่าสภาพความต้านทานซึ่งเพิ่มขึ้นเกือบ 1.2 เท่าเมื่อเทียบกับแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมา น่าจะเกิดจากการฟอร์มตัวของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์บนแผ่นอะลูมิเนียม นอกจากนี้สังเกตได้ว่าการทรีตเมนต์แผ่นอะลูมิเนียมด้วยพลาสมาแก๊สอาร์กอนที่เวลาการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมา 1, 10 และ 20 นาที มีค่าสภาพความต้านทานที่ 7.27×10^{-4} , 7.4×10^{-4} และ $7 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการพลาสมา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาแก๊สอาร์กอนไม่ส่งผลต่อค่าสภาพความต้านทานของแผ่นอะลูมิเนียม ผลค่าสภาพความต้านทานสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย AFM ว่าการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนมีการฟอร์มตัวของเฟสอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าสภาพความต้านทานเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.5 แสดงสภาพความต้านทานของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยแก๊สออกซิเจนและอาร์กอนที่เวลาต่างๆ

4.3 ผลการทดลองออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้านาโน ศึกษาถึงความเสถียรของสัญญาณที่เกิดขึ้น

หลังจากประกอบอุปกรณ์ TENG ตามที่ออกแบบ ได้ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ เพื่อศึกษาถึงความเสถียรของสัญญาณทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยทำการประกอบขึ้นมา 5 อุปกรณ์ และทำการต่อขั้วไฟฟ้าบวกทางด้านแผ่นอะลูมิเนียม และต่อขั้วไฟฟ้าลบให้กับแผ่น PET/ITO ซึ่งเป็นวงจรแบบฟอ์เวิร์ด โดยใช้ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 3 mm และวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ทั้ง 5 ดังแสดงในภาพ 4.6 a และ b)

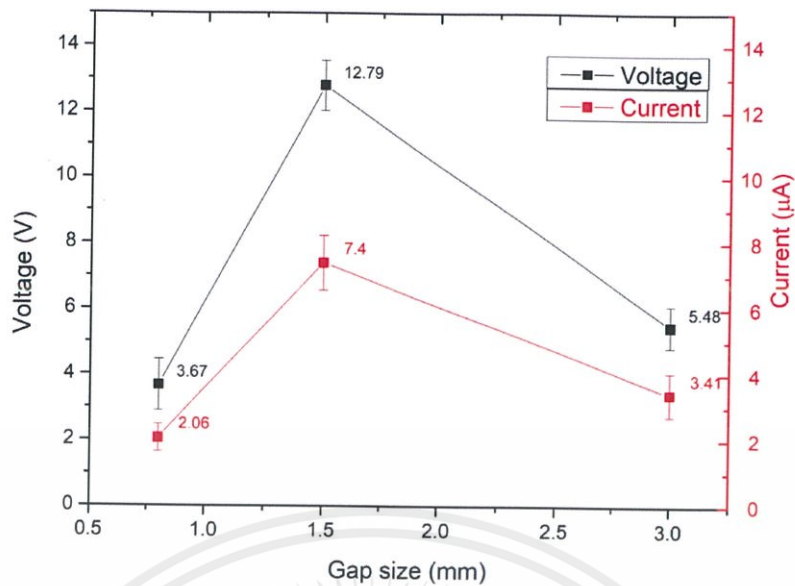


ภาพที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ (a) สัญญาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า , (b) สัญญาณกระแสไฟฟ้า ของอุปกรณ์

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าฝั่งบวก มีค่ามากกว่าสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าฝั่งลบ เนื่องจากการให้แรงกดมีค่ามากกว่าแรงในการคลายตัวของอุปกรณ์ ซึ่งแรงที่ได้ในขั้นตอนการกดจะมาจากแรงของเครื่องให้แรง ในขณะที่แรงที่ทำให้เกิดการคลายตัวเกิดจากการคลายตัวของโครงสร้าง TENG เพียงเท่านั้นไม่มีแรงภายนอกมากระทำ ดังนั้นในงานวิจัยจะพิจารณาสัญญาณไฟฟ้าทางด้านบวก ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณการเกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้ามียุทธศาสตร์กันทั้ง 5 อุปกรณ์ โดยมีค่าสัญญาณของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 5.48 ± 0.78 V และ 3.46 ± 0.66 μ A ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าการกระจายตัวของสัญญาณมีค่าที่ต่ำ จึงสรุปได้ว่าโครงสร้างของอุปกรณ์ TENG นี้มีความเสถียรและสามารถนำไปใช้ในการทดสอบเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อไปได้

4.4 ผลการทดลองช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ TENG เพื่อศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ภาพที่ 4.7 แสดงผลการทดลองหาช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าโดยใช้เทปโฟมกว 2 หน้า ที่ความหนาแตกต่างกันตั้งแต่ 0.8-3 มิลลิเมตร และวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์



ภาพที่ 4.7 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ช่องว่างระหว่างขั้วตั้งแต่ 0.8-3 มิลลิเมตร

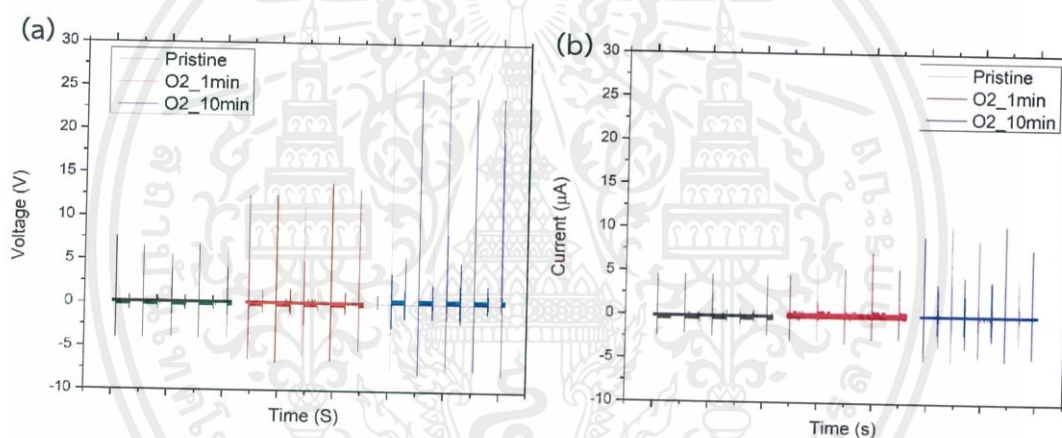
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (Gap size) 1.5 มิลลิเมตร มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุด โดยมีค่า 12.79 V และ 7.4 µA ตามลำดับ ในขณะที่ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้านขนาด 3 และ 0.8 มิลลิเมตร มีค่าทางไฟฟ้าต่ำลงมาตามลำดับซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการมีช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ต่ำเกินไป จึงอาจส่งผลให้ประจุที่อยู่บนพื้นผิวของแต่ละขั้วไฟฟ้าอาจจะยังมีแรงไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างกัน และทำให้ประจุที่เกิดจากการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นได้น้อย และทำให้เกิดสัญญาณความต่างศักย์และสัญญาณของกระแสไฟฟ้าได้น้อยเช่นกัน ส่วนระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มากเกินไป อาจส่งผลในเรื่องของการสัมผัสกันของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ซึ่งถ้าช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามากเกินไปหรือชั้นของโพลีเอทเพนนาเกินไป เมื่อให้แรงกดวัสดุ 2 ชนิดให้เคลื่อนที่สัมผัสกัน จะไม่สามารถสัมผัสกันได้ทั้งพื้นผิว โดยจะเหลือส่วนด้านขอบที่ติดกับโพลีเอทเป็นตัวรั้งไม่ให้วัสดุทั้ง 2 ชนิด สัมผัสกันได้สนิท ส่งผลให้ประจุที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสกันของวัสดุ 2 ชนิดเกิดขึ้นได้น้อย ค่าสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าก็จะลดลง ดังนั้นจึงพิจารณาช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ 1.5 มิลลิเมตร ในการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ TENG ต่อไป

4.5 การศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ TENG

การศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของ TENG โดยปรับปรุงพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมโดยการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนและอาร์กอน แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ (1) ศึกษาความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและเวลา (2) กระแสไฟฟ้าและเวลา และ (3) กำลังไฟฟ้าที่ความต้านทานต่างๆ

4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและเวลา

ภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้ากับเวลา ของแผ่นอะลูมิเนียมที่ทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนที่เงื่อนไขแตกต่างกัน



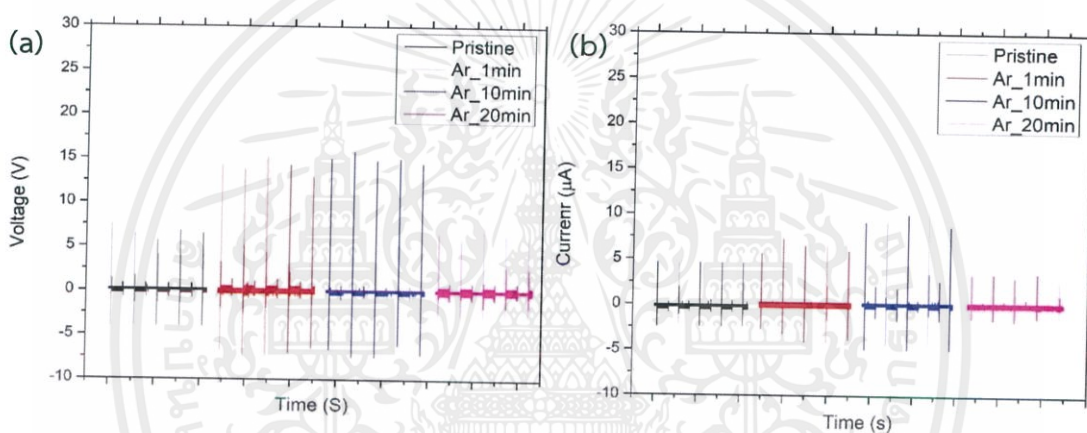
ภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และ (b) ค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา ของแผ่นอะลูมิเนียมที่ทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

จากการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุปกรณ์ TENG โดยการทรีตเมนต์แผ่นอะลูมิเนียมด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการทรีตเมนต์ เป็น 1 นาที และ 10 นาที ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ภาพที่ 4.8(a) และค่ากระแสไฟฟ้า ภาพที่ 4.8(b) มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมา หรือพลาสมา 0 นาที โดยการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมา 0 นาที 1 นาที และ 10 นาที มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 7.83 V, 12.36 V และ 25.3 V ตามลำดับ ค่ากระแสไฟฟ้า 4.62 μA , 7.12 μA และ 12.27 μA ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้านี้ เกิดขึ้นจากการทำทรีตเมนต์ด้วยพลาสมา ทำให้ความขรุขระ (RMS) ของพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลในเรื่องการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสของ

วัสดุ 2 ชนิด เมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุมีค่ามากขึ้น การเกิดประจุจากการเสียดสี (Triboelectrification) ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน

นอกจากค่าความขรุขระที่เพิ่มขึ้นแล้ว ค่าสภาพความต้านทานที่เพิ่มขึ้นจากหัวข้อ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนสามารถทำให้สภาพความต้านทานของแผ่นอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการฟอร์มตัวของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_xO_y) บนแผ่นอะลูมิเนียม โดยการเพิ่มขึ้นของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ บนแผ่นอะลูมิเนียมนี้ สามารถเพิ่มความหนาแน่นของประจุบนแผ่นอะลูมิเนียมได้ โดยจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าสถิต (Electrostatic induction) เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ TENG ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน

ในขณะที่อุปกรณ์ที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาแก๊สอาร์กอนแสดงค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ TENG ในภาพที่ 4.9

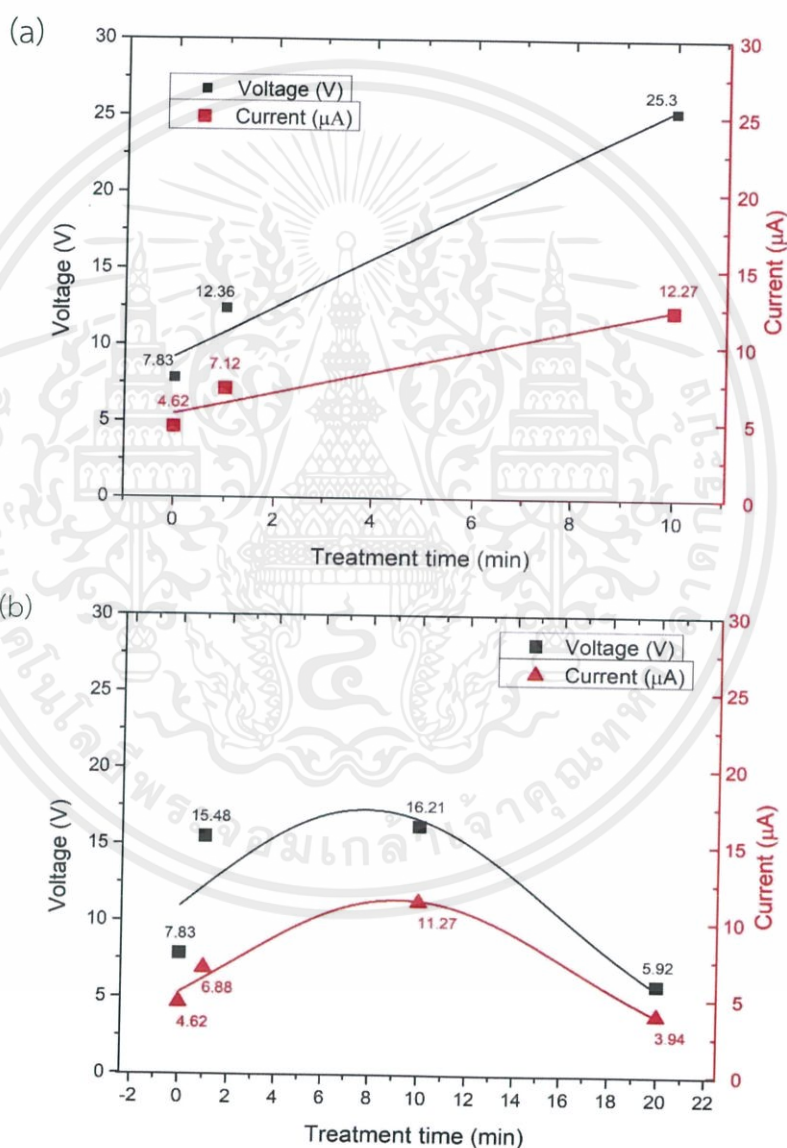


ภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้ากับเงื่อนไขการทรีตเมนต์แผ่นอะลูมิเนียมด้วยพลาสมาแก๊สอาร์กอนด้วย ที่เวลาต่างๆ

จากภาพที่ 4.9 จะแสดงให้เห็นได้ว่าอุปกรณ์ที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาแก๊สอาร์กอนที่เวลา 0 นาที 1 นาที 10 นาที และ 20 นาที ให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า เป็น, 7.83 V 15.48 V, 16.21 V และ 5.92 V ภาพที่ 4.9(a) และค่ากระแสไฟฟ้า เป็น 4.62 μA , 6.88 μA , 11.27 μA และ 3.94 μA ภาพที่ 4.9(b) ตามลำดับ โดยเวลาในการทำทรีตเมนต์ 10 นาที ให้ค่าประสิทธิภาพของ TENG ที่สูงที่สุด ซึ่งการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาแก๊สอาร์กอน มีผลในเรื่องการเพิ่มพื้นที่ผิวโดยเพิ่มความขรุขระ (RMS) ให้กับแผ่นอะลูมิเนียม ยิ่งเมื่อเวลาในการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมานาน (1-20 นาที) ความขรุขระยิ่งมากค่ามาก โดยความขรุขระที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุมีค่าเพิ่มมากขึ้น นำไปสู่การเกิดประจุจากการเสียดสี (Triboelectrification) มากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นความขรุขระที่เกิดขึ้นจึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้อุปกรณ์ได้เป็นอย่างดี แต่จะสังเกตว่าที่เวลาในการทรีตเมนต์แผ่นอะลูมิเนียม 20 นาที ซึ่งให้ค่าความขรุขระ (RMS) มากที่สุด แต่ให้ค่าความ

ต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าออกมาได้น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์อื่นๆ ซึ่งในสมมติฐานการทดลอง ยิ่งวัสดุมีความขรุขระมากยิ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุปกรณ์ได้มากเช่นกัน ดังนั้นปัญหาในข้อนี้จึงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อความเข้าใจที่มากขึ้นถึงปัจจัยที่แท้จริงที่ทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลดลงมา

ภาพที่ 4.10 แสดงผลของประสิทธิภาพอุปกรณ์ TENG ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวหรือทรีตเมนต์แผ่นอะลูมิเนียมด้วยพลาสติกของแก๊สออกซิเจนและแก๊สอาร์กอน



ภาพที่ 4.10 แสดงผลของประสิทธิภาพอุปกรณ์ TENG ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวหรือทรีตเมนต์แผ่นอะลูมิเนียมด้วย (a) พลาสติกของแก๊สออกซิเจนและ (b) อาร์กอนที่เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

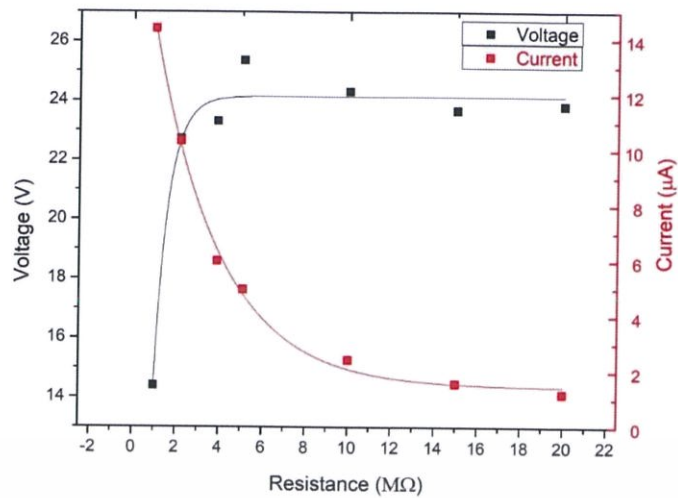
จากภาพที่ 4.10(a) จะเห็นได้ว่าการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาแก๊สออกซิเจนที่เวลาเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ TENG มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของความขรุขระของพื้นผิวบนแผ่นอะลูมิเนียม และชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_xO_y) ที่เพิ่มขึ้นโดยสังเกตจากค่าสภาพความต้านทานที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาแก๊สออกซิเจน ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ TENG นี้ เพิ่มขึ้นมาด้วย 2 ปัจจัย (1) เกิดจากการเพิ่มการเกิดประจุจากการเสียดสี (Triboelectrification) ซึ่งมาจากการเพิ่มความขรุขระให้กับพื้นผิววัสดุ (2) เกิดจากการเพิ่มการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic induction) ให้กับวัสดุ ซึ่งมาจากการเพิ่มชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_xO_y) บนแผ่นอะลูมิเนียม

ในขณะที่อุปกรณ์ที่ผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาแก๊สอาร์กอน ภาพที่ 4.10(b) ก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้เช่นกัน แต่การเพิ่มขึ้นของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสของอุปกรณ์เป็นเพียงผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความขรุขระเพียงอย่างเดียว นั่นคือเกิดจากการเพิ่มการเกิดประจุจากการเสียดสี (Triboelectrification) โดยจะไม่มีปอร์มตัวของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์บนแผ่นอะลูมิเนียมโดยสังเกตได้จากค่าสภาพความต้านทานของแผ่นอะลูมิเนียมที่มีค่าใกล้เคียงกับแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการทรีตเมนต์

ดังนั้นภายใต้เงื่อนไขการทรีตเมนต์ผิวของแผ่นอะลูมิเนียมด้วยพลาสมานั้น ประสิทธิภาพค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมผ่านการทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจน จึงมีค่าสูงกว่า

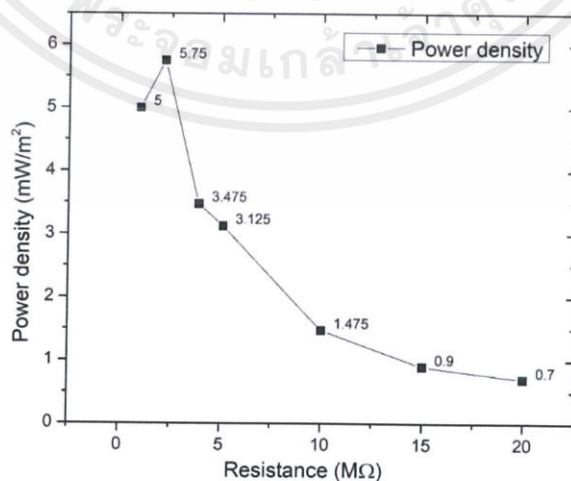
4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ความต้านทานต่างๆ

ในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ TENG ใช้อุปกรณ์ TENG ที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมผ่านการปรับปรุงพื้นผิวหรือทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจน ที่เวลาการทรีตเมนต์ 10 นาที และใช้ตัวต้านทานขนาดต่างๆ ตั้งแต่ 1-20 M Ω เพื่อวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโดยจะแสดงผลของสัญญาณไฟฟ้าที่ความต้านทานขนาดต่างๆดังแสดงในภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ที่ความต้านทานภายนอกขนาดต่างๆ

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไปตามกฎของโอห์ม $V=IR$ โดยยิ่งความต้านทานภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันค่ากระแสไฟฟ้าก็จะมีค่าต่ำลง ซึ่งกราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าแสดงจุดตัดที่ความต้านทานภายนอก 2.2 MΩ ซึ่งแสดงว่าความต้านทานที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ TENG นี้ คือ 2.2 MΩ จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละความต้านทานไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ โดยใช้สมการ $P=I^2R$ แสดงให้เห็นในภาพที่ 4.12 โดยจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นกำลังสูงสุดของอุปกรณ์อยู่ที่ 5.75 mW/m²



ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ความต้านทานภายนอกขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานระดับนาโน (Triboelectric nanogenerator ; TENG) โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทรีตเมนต์ผิวด้วยพลาสมาแก๊สออกซิเจนและอาร์กอนที่เวลาต่างๆ สามารถสรุปได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 การทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาแก๊สออกซิเจน และทำการวิเคราะห์พื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมด้วย SEM และ AFM แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มความขรุขระที่เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการทรีตเมนต์เพิ่มมากขึ้น โดยมีค่า RMS ที่เวลาการทรีตเมนต์ 0, 1 และ 10 นาที เท่ากับ 38.33 nm, 67.26 nm และ 67.19 nm ตามลำดับ และเมื่อวิเคราะห์ค่าสภาพความต้านทานของแผ่นอะลูมิเนียม แสดงให้เห็นว่าแผ่นอะลูมิเนียมมีค่าสภาพความต้านทาน $7.23 \times 10^{-4} \Omega m$, $9.01 \times 10^{-4} \Omega m$ และ $9.1 \times 10^{-4} \Omega m$ ตามลำดับ ดังนั้นการปรับปรุงพื้นผิวด้วยพลาสมาแก๊สออกซิเจนจึงเป็นการปรับปรุงเพื่อเพิ่มทั้งความขรุขระ และเพิ่มขึ้นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_xO_y) บนแผ่นอะลูมิเนียม

ส่วนที่ 2 การทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาแก๊สอาร์กอน แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มความขรุขระที่เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการทรีตเมนต์เพิ่มมากขึ้น โดยมีค่า RMS ที่เวลาการทรีตเมนต์ 0, 1, 10 และ 20 นาที เท่ากับ 38.33 nm, 48.82 nm, 60.35 nm และ 188.41 nm ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันยังมีการฟอร์มตัวของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_xO_y) โดยวิเคราะห์จากค่าสภาพความต้านโดยเทคนิค 4-point probe โดยแสดงค่าสภาพความต้านทาน $7.23 \times 10^{-4} \Omega m$, 7.27×10^{-4} , 7.4×10^{-4} และ $7 \times 10^{-4} \Omega m$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการพลาสมาหรือพลาสมา 0 นาที ดังนั้นการปรับปรุงพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมด้วยพลาสมาแก๊สอาร์กอนจึงเป็นการปรับปรุงความขรุขระของพื้นผิวเพียงอย่างเดียว

ส่วนที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ TENG เงื่อนไขของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขนาด 0.8, 1.5 และ 3 มิลลิเมตร ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน พบว่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่สามารถให้ประสิทธิภาพมากที่สุดคือคือระยะห่างขนาด 1.5 มิลลิเมตร เนื่องจากระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ 0.8 มิลลิเมตรเป็นระยะที่แคบเกินไปทำให้ประจุที่เกิดจากการเสียดสีที่พื้นที่ผิวของ 2 วัสดุยังมีแรงดึงดูดระหว่างกัน ในขณะที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ 3 มิลลิเมตร ก็เป็นระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่กว้างเกินไปทำให้วัสดุเทปโพลิเมอร์ที่ใช้เป็นตัวกั้นระหว่างขั้วไฟฟ้าขัดขวางการสัมผัสเสียดสีกันของขั้วไฟฟ้า ทำให้สัมผัสกันได้น้อยลง จึงเป็นผลทำให้ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ TENG ลดลง ดังนั้นระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1.5 มิลลิเมตรจึงเป็นระยะห่างที่เหมาะสมในการทดลอง

ส่วนที่ 4 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ TENG ที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่ทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจน ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้เวลา 10 นาที ทำให้อุปกรณ์ TENG มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 25.3 V ค่ากระแส 12.27 μA และเมื่อนำมาคำนวณความหนาแน่นกำลังกำลังไฟฟ้ามีค่า 5.75 mW/m^2 โดยค่าประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจาก 2 กลไก คือ (1) จากความขรุขระที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเกิดประจุจากการสัมผัสเสียดสี (Triboelectrification) เพิ่มขึ้น (2) การฟอร์มตัวของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ส่งผลให้การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic induction) เพิ่มขึ้นเช่นกัน

ส่วนที่ 5 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ TENG ที่ใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่ทรีตเมนต์ด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอน ให้ค่าสูงสุดเมื่อใช้เวลา 10 นาที ทำให้อุปกรณ์ TENG มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 16.21 V ค่ากระแสได้ 11.27 μA โดยค่าประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจาก 1 กลไก คือ ความขรุขระที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเกิดประจุจากการสัมผัสเสียดสี (Triboelectrification) เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพ TENG ที่น้อยกว่ากรณีออกซิเจน

5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

ทั้งนี้ในส่วนของงานวิจัยนี้ยังต้องการความเข้าใจที่เพิ่มมากขึ้นเกี่ยวกับการเกิดขึ้นของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) บนแผ่นอะลูมิเนียม ควรนำไปวิเคราะห์เพิ่มเติมโดยทำการศึกษาดัง

- (1) ค่าความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้น โดยใช้เทคนิค Auger electron spectroscopy (AES)
- (2) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแผ่นอะลูมิเนียม โดยใช้เทคนิค LCR
- (3) องค์ประกอบธาตุบนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมโดยใช้เทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

นอกจากนี้การศึกษาดังเงื่อนไขของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทรีตเมนต์พลาสมาของแผ่นอะลูมิเนียมก็เป็นปัจจัยสำคัญ เพื่อนำมาศึกษาถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์เพื่อความเข้าใจมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] Ghosh, S.K., et al., Porous polymer composite membrane based nanogenerator: A realization of self-powered wireless green energy source for smart electronics applications. *Journal of Applied Physics*, 2016. 120(17): p. 174501.
- [2] Jia, H., et al., Design and optimization of a photo-thermal energy conversion model based on polar bear hair. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017. 159: p. 345-351.
- [3] Zhao, T., et al., Flexible pyroelectric device for scavenging thermal energy from chemical process and as self-powered temperature monitor. *Applied Energy*, 2017. 195: p. 754-760.
- [4] Priya, S., Modeling of electric energy harvesting using piezoelectric windmill. *Applied Physics Letters*, 2005. 87(18): p. 184101.
- [5] Henry A., Sodano and Daniel J. Inman., Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting. *Devices for Recharging Batteries. Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005. 16(10), 799-807
- [6] Elfrink, R., et al., Vibration energy harvesting with aluminum nitride-based piezoelectric devices. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009. 19(9): p. 094005.
- [7] Hu, Y., et al., Optical characteristics of GaAs nanowire solar cells. *Journal of Applied Physics*, 2012. 112(10): p. 104311.
- [8] Xu, S., B.J. Hansen, and Z.L. Wang, Piezoelectric-nanowire-enabled power source for driving wireless microelectronics. *Nat Commun*, 2010. 1: p. 93.
- [9] Wu, W., et al., Lead zirconate titanate nanowire textile nanogenerator for wearable energy-harvesting and self-powered devices. *ACS Nano*, 2012. 6(7): p. 6231.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Lang, S.B., Pyroelectricity: From Ancient Curiosity to Modern Imaging Tool. *Physics Today*, 2005. 58(8): p. 31-36.
- [11] Ye, C.p., T. Tamagawa, and D.L. Polla, Experimental studies on primary and secondary pyroelectric effects in $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$, PbTiO_3 , and ZnO thin films. *Journal of Applied Physics*, 1991. 70(10): p. 5538-5543.
- [12] F. G. Shin, H. L. W. Chan, and C. L. Choy, Pyroelectric or piezoelectric compensated ferroelectric composites. *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 2000. 76(19): p.2776-2778.
- [13] Fan, F.-R., Z.-Q. Tian, and Z. Lin Wang, Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 2012. 1(2): p. 328-334.
- [14] Wang, Z.L., Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors. *ACS Nano*, 2013. 7(11): p. 9533-57.
- [15] Z. L. Wang, J. Chen, L. Lin., Progress in triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors. *Energy Environ. Sci.*, 2015. 00, 1-10.
- [16] Fan, F.-R., Z.-Q. Tian, and Z. Lin Wang, Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 2012. 1(2): p. 328-334.
- [17] Yang, Y., et al., Electret film-enhanced triboelectric nanogenerator matrix for self-powered instantaneous tactile imaging. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2014. 6(5): p. 3680-8.
- [18] Chen, J., et al., Enhancing Performance of Triboelectric Nanogenerator by Filling High Dielectric Nanoparticles into Sponge PDMS Film. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016. 8(1): p. 736-44.
- [19] Kim, Y.J., et al., Effect of the relative permittivity of oxides on the performance of triboelectric nanogenerators. *RSC Adv.*, 2017. 7(78): p. 49368-49373.

- [20] Cheng, L., et al., A self-improving triboelectric nanogenerator with improved charge density and increased charge accumulation speed. *Nat Commun*, 2018. 9(1): p. 3773.
- [21] Li, H., et al., 3D printed flexible triboelectric nanogenerator with viscoelastic inks for mechanical energy harvesting. *Nano Energy*, 2019. 58: p. 447-454.
- [22] Chen, H., et al., Enhanced stretchable graphene-based triboelectric nanogenerator via control of surface nanostructure. *Nano Energy*, 2019. 58: p. 304-311.
- [23] Z. L. Wang, L. Lin., J. Chen, S. Niu, Y. Zi., *Triboelectric Nanogenerators*. *Green Energy and Technology*, 2016, p. 1-511
- [24] s. wang, "Nanogenerator for mechanical energy harvesting and its hybridization with li-ion battery", *smartech.gatech.edu*, 2014. [Online]. Available: <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/53437>. [Accessed: 05-06-2019].
- [25] Bai, P., et al., Integrated multilayered triboelectric nanogenerator for harvesting biomechanical energy from human motions. *ACS Nano*, 2013. 7(4): p. 3713.
- [26] Mule, A.R., B. Dudem, and J.S. Yu, High-performance and cost-effective triboelectric nanogenerators by sandpaper-assisted micropatterned polytetrafluoroethylene. *Energy*, 2018. 165: p. 677-684.
- [27] Dudem, B., et al., Enhanced Performance of Microarchitected PTFE-Based Triboelectric Nanogenerator via Simple Thermal Imprinting Lithography for Self-Powered Electronics. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018. 10(28): p. 24181-24192.
- [28] Fan, F.R., et al., Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic films. *Nano Lett*, 2012. 12(6): p. 3109-14.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) : เกษรา บัวใหญ่รักษา

ชื่อ-นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) : Kedsara Buayairuksa

วัน เดือน ปีเกิด : 4 ตุลาคม 2539

ที่อยู่ : 127/81 โครงการเคหะรามอินทรา สุเหร่าคลอง1 ซอย 14
แขวง บางชัน เขต คลองสามวา กรุงเทพมหานคร 10510

ช่องทางติดต่อสื่อสาร : Kedsarabyrs@gmail.com
: โทร. 0836684224

ประวัติการศึกษา : ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-3 โรงเรียนท่าคันโทวิทยายน
ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4-6 โรงเรียนท่าคันโทวิทยาคาร
จังหวัดกาฬสินธุ์
ชั้นปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรม
วัสดุฯ
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้