

อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแรงเสียดทานประสิทธิภาพสูงโดยใช้อาร์เรย์
ลวดนาโนของคอมโพสิตระหว่างพอลิไดเมทิลไซโลเซนและท่อนาโนคาร์บอน

HIGH PERFORMANCE TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR BASED ON
POLYDIMETHYLSILOXANE/CARBONNANOTUBE NANOWIRE ARRAY



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HIGH PERFORMANCE TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR BASED
ON POLYDIMETHYLSILOXANE/CARBONNANOTUBE NANOWIRE
ARRAY



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIAL ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MON GKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาภาคนาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแรงเสียดทานประสิทธิภาพสูงโดยใช้
อาร์เรย์ลวดนาโนของคอมโพสิตระหว่างพอลิไดเมทิลไซโลเซนและท่อ
นาโนคาร์บอน

Special Project Title High performance triboelectric nanogenerator based on
nanowire array of polydimethylsiloxane/carbonnanotube
composites

นักศึกษา นายส่งศักดิ์ รัตนใหม่
รหัสประจำตัว 56110045
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.อรณพ คล้าชื่น

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.กรรช อ่อนละออ	
ดร.มยุรี พลเยี่ยม	
ผศ.ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์	

ภาควิชาภาคนาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชูติไพจิตร)
หัวหน้าภาควิชาภาคนาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่.....๕๖.....เดือน.....๕๖.....พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแรงเสียดทานประสิทธิภาพสูง โดยใช้อาร์เรย์ลวดนาโนของคอมโพสิตระหว่างพอลิไคเมทิล ไซโลเซนและท่อนาโนคาร์บอน
นักศึกษา	นายส่งศักดิ์ รัตนใหม่
รหัสประจำตัว	56110045
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.อรรณพ คล้าชื่น

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน (Triboelectric nanogenerator; TENG) โดยใช้อาร์เรย์ลวดนาโนของคอมโพสิตระหว่างพอลิไคเมทิลไซโลเซนและท่อนาโนคาร์บอน ในปัจจุบันด้วยข้อจำกัดของแหล่งพลังงานจากฟอสซิลทำให้ความจำเป็นของการนำแหล่งพลังงานหมุนเวียนมาใช้มีเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น TENG จึงเป็นอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าที่น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้งานในอนาคต ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปแบบพลังงานจากการเสียดสีต่างๆในชีวิตประจำวันของมนุษย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ หลักการพื้นฐานของ TENG คือการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากความแตกต่างของประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุสองชนิดที่ถูกกระตุ้นด้วยการเสียดสี ดังนั้น โครงสร้างและส่วนประกอบของวัสดุที่นำมาทำเป็นอุปกรณ์จึงเป็นกุญแจสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของ TENG TENG ในอุดมคติควร (1) มีเอาท์พุท (แรงดันขาออก) ที่สูง (2) ถ่ายทอดประจุได้อย่างรวดเร็ว (3) คืนตัวได้อย่างรวดเร็ว (4) ทนต่อการสึกหรอ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาประสิทธิภาพของ TENG ให้สูงขึ้นโดยออกแบบขั้ว TENG ให้อยู่ในระดับนาโนโดยใช้อาร์เรย์ลวดนาโนของคอมโพสิตระหว่างพอลิไคเมทิลไซโลเซนและท่อนาโนคาร์บอน (PDMS/CNT NW arrays) โครงสร้างอาร์เรย์ลวดนาโนทำให้มีพื้นที่สัมผัสมากขึ้น ทำให้ได้ค่าเอาท์พุทที่สูงขึ้น และวัสดุคอมโพสิต PDMS/CNT ทำให้สามารถถ่ายเทประจุได้เร็วขึ้น ขั้วสามารถกลับคืนตัวได้ไวขึ้น และสามารถทนการสึกหรอได้ ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเนื้อหา 2 ส่วน ได้แก่ 1) การสร้างเครื่องมือมาตรฐานสำหรับการวัดประสิทธิภาพ TENG โดยได้ออกแบบให้เครื่องมือสามารถสร้างการเสียดสีภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดได้โดยสามารถให้น้ำหนักแนวตั้งฉากกับอุปกรณ์สามารถให้แรงกดได้ถึง 140 นิวตัน สามารถทำให้อุปกรณ์ TENG โค้งงอได้ และเคลื่อนที่ได้ด้วยความถี่ในช่วง 0.3 ถึง 12 เฮิรต และส่วนที่ 2) การสร้างขั้วโดยใช้ PDMS/CNT NW arrays โดยใช้ลวดนาโนซิลิกอนเป็นแม่แบบ ซึ่งแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนนี้สร้างด้วยกระบวนการกัดทางเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่าย ไม่ต้องใช้เครื่องมือซับซ้อน สามารถทำได้ง่าย พบว่าขนาดของแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เหมาะสมที่สุดมีความกว้างและความยาว 5.16 ไมโครเมตร และ 9.89 ไมโครเมตร ตามลำดับ PDMS/CNT NW arrays ที่ถอดจากแม่แบบมีขนาดและความยาวเป็น 5.02 ไมโครเมตร และ 8.64 ไมโครเมตรตามลำดับ การประดิษฐ์ TENG ทำโดยประกบ PDMS/CNT NW arrays กับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) พบว่า TENG ให้ค่าความต่างศักย์ที่สูงที่สุดคือ 22.84 ± 0.85 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด 27.36 ± 0.88 ไมโครแอมแปร์ โดยมีค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 0.8 วัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งพบว่ามีค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ามากกว่า TENG ที่ใช้ขั้วเป็นแบบพอลิโดเมทิลไซโลเซนที่ไม่มีลวดลายถึง 18 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	High performance triboelectric nanogenerator based on nanowire array of polydimethylsiloxane/ carbonnanotube composites
Student	Mr.Songsak Rattanamai
Student ID	56110045
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2016
Special Project Advisor	Assistant Professor Dr. Winadda Wongwiryapan
Special Project Co-Advisor	Dr. Annop Klamchuen

ABSTRACT

In this research, high performance triboelectric nanogenerator (TEENG) was demonstrated based on nanowire array of polydimethylsiloxane (PDMS)-carbon nanotube (CNT) composites (PDMS/CNT NW arrays). Nowadays, electricity is mostly generated from lignite and natural gas. However, since the fossil crisis, the renewable energy greatly plays an important role in energy field in the future. TEENG, an energy harvesting device, has been interested for power generation in the future. TEENG is a technology that converts mechanical energy into electricity by combining effects between triboelectrification and electrostatic induction through friction. The structure and a type of material of TEENG are keys of high performance TEENG. Ideally, TEENG should have high output, fast charge transfer, fast shape recovery and wear resistance. To enhance performance of TEENG, PDMS/CNT NW arrays were used as the TEENG electrode, affording the large specific surface area and high elastic modulus resulting in high output, fast charge transfer and fast shape recovery. This research consisted of two parts. The first part is creation of standard instrument for measurement of TEENG performance. The standard instrument was designed to apply external force up to 140 N to make the TEENG bending and TEENG pressing with the control frequency in a range of 0.3-5 Hz. The second part of the research fabrication of high performance TEENG device. PDMS/CNT NW arrays was fabricated and used as negative electrode of TEENG by using silicon nanowire (Si NW) template. Si NW was fabricated by metal-assisted chemical etching (MACE). The advantage of MACE is low cost and non-complicated fabrication process. The optimum size and length of Si NW template were 5.16 and 9.89 μm , respectively. The size and length of PDMS/CNT NW arrays from Si NW template were 5.02 and 8.64 μm , respectively. TEENG consists of a sandwich structure of PDMS/CNT NW arrays covered by polyethylene terephthalate (PET)/ indium tin oxide (ITO). TEENG generated the maximum output voltage of 22.84 ± 0.85 V and the maximum output current of 27.36 ± 0.88 μA with a power density of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.8 W/m². The PDMS/CNT NW arrays-based TENG enabled an approximately 18-fold improvement in electrical output compared to the flat PDMS-based TENG.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่อง อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแรงเสียดทานประสิทธิภาพสูงโดยใช้ อาร์เรย์ลวดนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิไดเมทิลซิลโอเซนและท่อนาโนคาร์บอนนี้ สามารถดำเนินมาจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีได้ก็ด้วยการดูแล ให้คำปรึกษา การสอนสั่งและความอนุเคราะห์ต่างๆของ ผศ. ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ และ ดร.อรรณพ คล้าชื่น อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการพิเศษ จนโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยอย่างสมบูรณ์ ซึ่งข้าพเจ้ากราบขอบพระคุณท่านทั้ง 2 ด้วยความเคารพอย่างสูง ขอขอบคุณคณะกรรมการซึ่งประกอบด้วย ผศ.ดร.กรกช อ่อนละออ ประธานกรรมการและ ดร.มยุรี พลเยี่ยม กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาชี้แนวทางในการปรับปรุงและช่วยตรวจสอบร่างของโครงการพิเศษนี้เพื่อให้โครงการนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบคุณ ผศ.ดร.เบญจพล ต้นธุ์ และ ผศ.ดร.กรกช อ่อนละออ อาจารย์ประจำวิทยาลัยนาโนฯ ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงาน และบุคคลที่ข้าพเจ้ามีอาจลืมนอบขอบคุณได้คือนายชินธันย์ ปันมิ่ง นักศึกษาปริญญาโทที่ช่วยสอนและเตรียมกระบวนการเตรียมลวดนาโนซิลิกอนอีกทั้งยังช่วยเหลือเรื่องการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดให้ข้าพเจ้า ขอขอบคุณนายธัญญ์ธำรง หวานเข้ม นักศึกษาปริญญาโทสำหรับการออกแนวคิดในการสร้างและปรับปรุงระบบที่ใช้ในการให้แรง ขอขอบคุณนายกษิติศ จันทรแสงศรี นักศึกษาปริญญาโทสำหรับการให้คำปรึกษาเรื่องการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานของข้าพเจ้า ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังที่สั่งสอนวิชาต่างๆให้แก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลา 4 ปีที่ได้ศึกษาอยู่ ขอขอบคุณพ่อ แม่ พี่เพ็ริส น้องปลาย น้องข้าวและญาติพี่น้องของข้าพเจ้าที่คอยเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด ขอขอบคุณกลุ่มเพื่อนของข้าพเจ้า นนต์ เปา มิก และทาฮาที่คอยช่วยเหลือและสอนอะไรหลายอย่างให้ข้าพเจ้า ขอขอบคุณพี่เกียงสำหรับคำแนะนำเกี่ยวกับการลอกแบบ ขอขอบคุณพี่เนยสำหรับกระบวนการในการสร้างอุปกรณ์ ขอขอบคุณสมาชิกของครอบครัวนาโนทุกท่านที่อยู่ร่วมกันด้วยดีมาตลอด 4 ปี ขอขอบคุณสมาชิก Carbon Nanomaterials Research Laboratory สำหรับความช่วยเหลือและการดูแลที่ดีตลอดมา

คุณประโยชน์นานับประการที่เกิดจากโครงการพิเศษฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านของข้าพเจ้า หากข้าพเจ้าได้ทำผิดพลาดประการใดข้าพเจ้าขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ส่งศักดิ์ รัตนใหม่

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญภาพ	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย	3
1.4 กรอบแนวคิดในการออกแบบงานวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	7
2.1 ทฤษฎีไฟฟ้าสถิต	7
2.1.1 ประจุไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า.....	7
2.1.2 ศักย์ไฟฟ้า.....	14
2.1.3 ความจุไฟฟ้า.....	16
2.2 ทฤษฎีอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน.....	17
2.2.1 กลไกการทำงานของ TENG	19
2.2.2 การประยุกต์ใช้.....	21
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อ TENG	21
2.3 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube; CNT).....	24
2.3.1 สมบัติเด่นของ CNT.....	24
2.3.2 ตัวอย่างการประยุกต์.....	25
2.4 เส้นลวดนาโนซิลิกอน.....	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	28
3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องมือมาตรฐานการทดสอบประสิทธิภาพ TENG.....	28
3.2 การเตรียม PDMS/CNT NW array โดยใช้แม่แบบลวดนาโนของซิลิกอน	28
3.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.2.2 การเตรียมขั้ว PDMS	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3 การเตรียมขั้วคอมโพสิตของ PDMS และ CNT (PDMS/CNT).....	29
3.2.4 การเตรียมแม่แบบลวดนาโนซิลิกอน.....	29
3.2.5 การเตรียมอาร์เรย์ลวดนาโนคอมโพสิต PDMS/CNT จากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอน.....	30
3.3 การตรวจวิเคราะห์สมบัติของขั้วลวด.....	30
3.3.1 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า.....	30
3.3.2 การตรวจสอบลักษณะสัญญาณวิทยาของอาร์เรย์ลวดนาโน.....	31
3.4 การสร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน.....	31
3.5 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดสี.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	33
4.1 สมบัติของขั้วคอมโพสิตที่ทำการหล่อแบบจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอน.....	33
4.1.1 ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เวลาการกัดทางเคมีต่างๆ.....	33
4.1.2 ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของขั้วอาร์เรย์ลวดนาโนของพอลิไธไมเทิลไซโลเซนที่ใช้แม่แบบ ลวดนาโนซิลิกอน.....	36
4.1.3 ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนหลังการใช้งานเป็นแม่แบบลอก พอลิไธไมเทิลไซโลเซนออก.....	38
4.1.4 ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของขั้วอาร์เรย์ลวดนาโนของคอมโพสิตระหว่างพอลิไธไมเทิล ไซโลเซนและท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้แม่แบบลวดนาโนซิลิกอน.....	40
4.1.5 ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนหลังการใช้งานเป็นแม่แบบลอกคอมโพสิตระหว่างพอลิไธไมเทิลไซโลเซนและท่อนาโนคาร์บอน.....	41
4.1.6 สมบัติทางไฟฟ้าของคอมโพสิตระหว่างพอลิไธไมเทิลไซโลเซนและท่อนาโนคาร์บอน.....	43
4.2 สมบัติของ TENG โดยใช้ขั้วอาร์เรย์ลวดนาโนของคอมโพสิตระหว่างพอลิไธไมเทิล ไซโลเซนและท่อนาโนคาร์บอน.....	45
4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลา.....	45
4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา.....	49
4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความต้านทานค่าต่างๆ.....	52
4.3 การศึกษาสมบัติของ TENG โดยใช้ขั้วที่เตรียมได้จากแม่แบบอื่นๆ.....	54
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลา.....	54

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา.....	54
4.3.3 เปรียบเทียบข้อลบก PDMS ที่ลอกแบบจากแม่แบบที่มีลวดลายที่แตกต่างกัน	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	57
บรรณานุกรม.....	58
ประวัติผู้เขียน.....	59



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงแผนการดำเนินงานในช่วงเวลาต่าง ๆ ในแต่ละเดือน	5
2.1 ความแข็งแรงของ CNT เทียบกับวัสดุอื่น	25
4.1 ค่าความต้านทานเฉลี่ยของคอมโพสิตของ PDMS/CNT.....	44
4.2 ค่า Voltage ที่วัดได้ที่ขั้วลบเงื่อนไขต่างๆโดยการวัดแบบฟอร์เวิร์ด	48
4.3 ค่า Current ที่วัดได้ที่ขั้วลบเงื่อนไขต่างๆโดยการวัดแบบฟอร์เวิร์ด	50
4.4 เปรียบเทียบค่าสัญญาณความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของ TENG ที่เงื่อนไขต่างๆ	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 การสร้างลวดลายบน PDMS โดยใช้ Si Mold รูปแบบต่างๆ [3].....	2
2.1 ตัวอย่างนักสกีที่ใช้อธิบายเรื่องแรงทางไฟฟ้าที่กระทำต่อนักสกี.....	7
2.2 การทำให้ลูกบอลโลหะมีประจุโดยการเหนี่ยวนำ.....	10
2.3 โครงสร้างทั่วไปของ TENG [2].....	18
2.4 Triboelectric series [2].....	19
2.5 กลไกการทำงานของ TENG ด้วย Vertical contact-separation mode [2].....	20
2.6 กลไกการทำงานของ TENG ด้วย Lateral sliding Mode [2].....	20
2.7 แสดงผลของการเลือกคู่วัสดุต่อสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนไป.....	22
2.8 แสดงผลของความถี่ต่อสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนไป [4].....	22
2.9 แสดงผลของแรงที่กระทำต่อสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนไป [4].....	23
2.10 แสดงผลของความชื้นต่อสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนไป [5].....	23
4.1 ภาพ FE-SEM ด้านบนและภาพตัดขวาง แสดงโครงสร้างที่ได้จากการกัดทางเคมีโดยใช้โลหะทองที่มีความหนา 3 นาโนเมตร ช่วยในการทำปฏิกิริยาและใช้สารละลายกัดกร่อนที่ $p(0.8)^{4,8}$ เนื่องจากผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ (a), (b) 10 นาที (c), (d) 20 นาที และ (e), (f) 30 นาที.....	34
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์พื้นที่ปกคลุมของเส้นลวดนาโนซิลิกอน (% Coverage area of Si NWs), ความยาวของเส้นลวดนาโนซิลิกอน (Length of Si NWs) กับเวลาที่ใช้ในการกัดทางเคมี (Etching time).....	35
4.3 ภาพจำลองโครงสร้าง, พื้นที่ปกคลุมและความยาวของเส้นลวดนาโนซิลิกอนกับเวลาที่ใช้ในการกัดทางเคมี (Etching time).....	36
4.4 ภาพ FE-SEM ด้านบนและภาพตัดขวาง แสดงโครงสร้างที่ได้จากการลอกแบบของ PDMS โดยใช้แม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เตรียมได้จากการกัดทางเคมีโดยใช้โลหะช่วยในการทำปฏิกิริยาเนื่องจากผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ (a), (b) 10 นาที (c), (d) 20 นาที และ (e), (f) 30 นาที ของแม่แบบลวดนาโนซิลิกอน.....	37
4.5 ภาพ FE-SEM ด้านบนและภาพตัดขวาง แสดงโครงสร้างลวดนาโนซิลิกอนที่เงื่อนไขเวลาต่างๆภายหลังจากกระบวนการลอกแบบด้วย PDMS ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพื่อเตรียมแม่แบบที่ (a), (b) 10 นาที (c), (d) 20 นาที และ (e), (f) 30 นาที.....	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.6 ภาพ FE-SEM ด้านบนและภาพตัดขวาง แสดงโครงสร้างที่ได้จากการลอกแบบของคอมโพสิตระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและ PDMS โดยใช้แม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เตรียมได้จากการกัดทางเคมีโดยใช้โลหะช่วยในการทำปฏิกิริยาเนื่องจากผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ (a), (b) 10 นาที (c), (d) 20 นาที และ (e), (f) 30 นาที.....	40
4.7 ภาพ FE-SEM ด้านบนและภาพตัดขวาง แสดงโครงสร้างลวดนาโนซิลิกอนที่เงื่อนไขเวลาต่างๆภายหลังกระบวนการลอกแบบด้วย PDMS ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพื่อเตรียมแม่แบบที่ (a), (b) 10 นาที (c), (d) 20 นาที และ (e), (f) 30 นาที.....	42
4.8 ภาพจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของเส้นลวดนาโนซิลิกอนที่ขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาการกัดทางเคมีกับความยาวของ PDMS ที่ทำการลอกแบบออกมา	43
4.9 ความต้านทานไฟฟ้าของคอมโพสิต PDMS/CNT	44
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) กับเวลา (Time) ของขั้วลวดซึ่งสร้างขึ้นและวัดที่เงื่อนไขต่างกัน (a),(b) รีเวิร์สสแกนสแกนของ PDMS และ PDMS-CNT ที่เงื่อนไขเวลาในการสร้างแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่ 0, 10, 20 และ 30 นาที ตามลำดับ (c)(d) พอร์เวิร์ดสแกนของ PDMS และ PDMS-CNT ที่เงื่อนไขเวลาในการสร้างแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่ 0, 10, 20 และ 30 นาที ตามลำดับ.....	47
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (Voltage) กับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาการกัดทางเคมี (Etching times) ของแม่แบบซิลิกอนของขั้วลวดซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้ PDMS และคอมโพสิตระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและ PDMS (PDMS-CNT)	48
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (Current) กับเวลา (Time) ของขั้วลวดซึ่งสร้างขึ้นและวัดที่เงื่อนไขต่างกัน (a),(b) พอร์เวิร์ดสแกนของ PDMS และ PDMS-CNT ที่เงื่อนไขเวลาในการสร้างแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่ 0, 10, 20 และ 30 นาที ตามลำดับ	51
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (Current) กับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาการกัดทางเคมี (Etching times) ของแม่แบบซิลิกอนของขั้วลวดซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้ PDMS และคอมโพสิตระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและ PDMS (PDMS-CNT)	52
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (Current) และความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) ที่ความต้านทานภายนอกค่าต่างๆ.....	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า (Power) กับและความหนาแน่นกำลังงาน (Power density) ที่ความต้านทานภายนอกค่าต่างๆ.....	53
4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของ TENG ที่ใช้ขั้วลบ PDMS ซึ่งผ่านการลอกแบบจากแม่แบบดีวีดี ขณะต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ดสแกน ความถี่ 1 Hz พบว่า ค่าความต่างศักย์ของ TENG ขณะทำการกดเท่ากับ 4.96 ± 0.13 V และค่าความต่างศักย์ขณะทำการปล่อยเท่ากับ	54
4.17 ค่ากระแสไฟฟ้า (Current) ของขั้วลบที่ทำการลอกแบบจากแม่แบบดีวีดี (DVD-Rom).....	55
4.18 เปรียบเทียบขนาดสัญญาณทางไฟฟ้าของขั้วลบ PDMS ที่ลอกจากแม่แบบชนิดต่างๆ	55
4.19 แสดงกราฟเปรียบเทียบขนาดสัญญาณทางไฟฟ้าของ TENG ที่เงื่อนไขต่างๆ.....	56



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบัน พลังงานไฟฟ้ามีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อทุกๆครัวเรือนทั่วโลกเพราะเป็นพลังงานที่สามารถทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆทำงานได้ อาทิเช่น โทรทัศน์ โทรทัศน์ หลอดไฟ ตู้เย็น เครื่องทำน้ำอุ่น ไปจนถึงรถยนต์ ทำให้พลังงานไฟฟ้ากลายเป็นส่วนหนึ่งที่จำเป็นต่อการดำเนินชีวิตของผู้คนเพิ่มมากขึ้น นอกจากการใช้งานส่วนบุคคลภายในครัวเรือนและบนท้องถนนแล้ว ยังมีกิจกรรมอื่นๆที่จำเป็นในอีกหลายด้านเช่น ด้านการโทรคมนาคมสื่อสาร ด้านอุตสาหกรรมการผลิต ด้านเกษตรกรรม ด้านการแพทย์และสาธารณสุข เป็นต้น ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าพลังงานไฟฟ้าเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่ส่งผลให้มนุษย์มีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นได้

สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่เราใช้กันอยู่ในทุกวันนี้ มีที่มาจากแหล่งพลังงานพื้นฐานอันได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ นิวเคลียร์ ถ่านหินและพลังงานหมุนเวียน ซึ่งเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าหลายประเภทใช้พลังงานความร้อน เพื่อนำมาสร้างไอน้ำสำหรับปั่นกังหัน ซึ่งพลังงานกลจากกังหันจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยกลไกของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แต่สำหรับเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแบบอื่นอย่างเช่น โซลาร์เซลล์นั้นแสงจากดวงอาทิตย์สามารถที่จะเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แต่ทั้งนี้ไม่ว่าจะใช้พลังงานจากแหล่งใดมาผลิตพลังงานไฟฟ้าก็ตาม จำเป็นต้องใช้พลังงานนั้นๆปริมาณมหาศาลและปัญหาหลักที่เกิดขึ้นคือ พลังงานส่วนใหญ่สูญหายไประหว่างขั้นตอนการผลิตไฟฟ้าส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าผลิตได้ไม่เต็มประสิทธิภาพเช่น พลังงานจากก๊าซธรรมชาติมีประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าประมาณ 60% ความหมายว่าถ้าป้อนพลังงานเข้าไป 100 หน่วยจะมีพลังงานเพียง 60 หน่วยหรือต่ำกว่านั้นที่ถูกแปลงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า

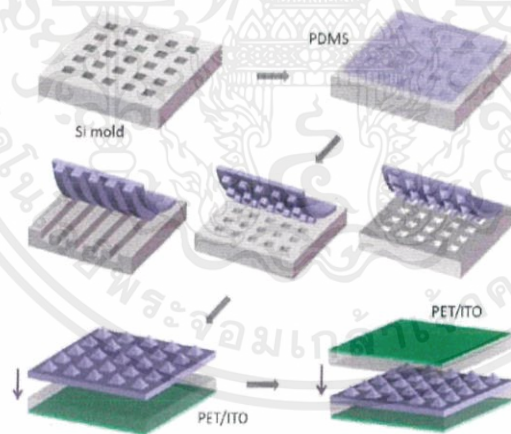
นอกจากนี้ไฟฟ้าอีกปริมาณมากยังสูญหายไปในระหว่างกระบวนการส่งผ่านสายไฟฟ้าไปตามบ้านเรือนอีกประมาณ 15% อีกด้วย ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าไม่สามารถประหยัดโดยเก็บสำรองปริมาณมากไว้ใช้ภายหลังได้ ด้วยเหตุนี้เองแหล่งพลังงานทดแทนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะถูกนำมาทำงานร่วมกับแหล่งพลังงานหลัก โดยจากอัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและการขยายตัวของเศรษฐกิจทั่วโลกนั้นจะส่งผลให้ความต้องการพลังงานในทุกประเทศทั่วโลกมีมากขึ้น ส่งผลให้ต้องมีการศึกษาแหล่งพลังงานใหม่ๆเพื่อนำมาประยุกต์ใช้สำหรับแหล่งพลังงานทางเลือก ซึ่งเทคโนโลยีเกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปพลังงานจากแหล่งพลังงานในสิ่งแวดล้อมไปเป็นพลังงานไฟฟ้า เป็นเรื่องที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้งานด้านพลังงานหมุนเวียน ซึ่งพลังงานประเภทนี้มักเป็นพลังงานสะอาดและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

นอกจากนี้ การเปลี่ยนรูปพลังงานในรูปแบบนี้ ยังได้รับการจับตามองว่าจะสามารถนำมาทดแทนแหล่งพลังงานจากเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในปัจจุบันได้ ในปัจจุบันอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโน (Nanogenerator) มีศักยภาพในการเปลี่ยนพลังงานในรูปแบบต่างๆไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยกลไกการเกิดพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานกล (Piezoelectric) กลไกการเกิดพลังงานไฟฟ้าจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียดสี (Triboelectric) กลไกของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) กลไกการเกิดไฟฟ้าจากพลังงานความร้อน (Pyroelectric) โดยในปัจจุบัน อุปกรณ์นาโนเจนเนอเรเตอร์โดยอาศัยการเกิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดสี (Triboelectric nanogenerator, TENG) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปแบบพลังงานกลจากการเสียดสีต่างๆในชีวิตประจำวันของมนุษย์ได้ โดยมีแหล่งพลังงานกลปริมาณมหาศาลที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างเช่น การเคลื่อนไหวของมนุษย์ คลื่นมหาสมุทรและการสั่นสะเทือน เป็นต้น ซึ่ง TENG นั้น จะอาศัยกระบวนการเสียดสีของวัสดุ (Triboelectrification effect) เพื่อให้เกิดสภาพประจุส่วนเกินทางไฟฟ้าสถิตที่บริเวณผิวสัมผัสทั้ง 2 ซึ่งเกิดจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างพอลิเมอร์สองชนิดที่นำมาเสียดสีกัน โดยพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งสามารถรับอิเล็กตรอนได้ง่ายและอีกแผ่นสามารถสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายระหว่างที่เกิดการเสียดสี จากนั้นสภาพประจุส่วนเกินจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าที่ขั้วโลหะซึ่งประจุที่ถูกเหนี่ยวนำจะมีประจุตรงข้ามกับสภาพประจุส่วนเกินที่ผิวของพอลิเมอร์ เมื่อขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ถูกต่อเข้าด้วยกันจะส่งผลให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ติดอยู่บริเวณด้านหลังของแผ่นพอลิเมอร์ทั้งสองเพื่อทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วทั้ง 2 เท่ากัน

กุญแจสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของ TENG คือโครงสร้างและส่วนประกอบของวัสดุที่นำมาทำอุปกรณ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมในระดับไมโคร-นาโนเมตร ด้วยพื้นที่สัมผัสที่มากทำให้พัฒนาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเกิดไฟฟ้าสถิตจากการเสียดสีไปสู่อุปกรณ์กำเนิดพลังงาน TENG ได้ ตัวอย่างเช่น การทำลวดลายระดับไมโครเมตรของพอลิเดเมทิลไซโลเซน (PDMS) โดยใช้แผ่นซิลิกอนเป็นแม่แบบ โดยการเตรียมแม่แบบซิลิกอนนั้น เตรียมด้วยวิธีโฟโตลิโธกราฟีดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 การสร้างลวดลายบน PDMS โดยใช้ Si Mold รูปแบบต่างๆ [3]

อย่างไรก็ตาม เอาท์พุทที่ต่ำ ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการนำ TENG ไปใช้งานจริง TENG ในอุดมคติจึงควรมีเอาท์พุทที่สูง มีถ่ายทอดประจุได้อย่างรวดเร็ว สามารถคืนตัวได้อย่างรวดเร็วและทนต่อการสึกหรอ ดังนั้นเพื่อให้ได้ TENG ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบแผ่นวัสดุของ TENG ให้มีพื้นผิวที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตร ซึ่งเมื่อมีพื้นที่สัมผัสเพื่อการเสียดสีที่มาก จะให้สามารถเกิดการเหนี่ยวนำประจุได้มากขึ้นด้วย ทำให้ได้เอาท์พุทที่สูงขึ้น ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น เป็นการทำลวดลายในระดับไมโครเมตรและการใช้แม่แบบจากวิธีการโฟโต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิโธกราฟีซึ่งมีขั้นตอนที่ซับซ้อนนอกจากนี้ การนำ TENG ไปใช้งานจริงนั้น ต้องทำปรับปรุงเพิ่มเติมในเรื่องความไวในการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้า มีความยืดหยุ่นสูง มีค่าการยึดติดที่ต่ำ (Weak adhesive) ระหว่างวัสดุทั้ง 2 แผ่น เพื่อให้สามารถแยกจากกันและสามารถสร้างประจุใหม่จากการเสียดสีได้อย่างต่อเนื่อง และทนต่อการสึกหรอ เพื่อให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งหนึ่งในวิธีการแก้ปัญหาคือการนำวัสดุนาโนมาใช้ โดยอาศัยสมบัติเด่นของวัสดุนาโน เช่น พื้นที่ผิวที่สูง สมบัติความยืดหยุ่นสูง เป็นต้น โดยการนำวัสดุนาโนมาเตรียมเป็นวัสดุคอมโพสิตกับพอลิเมอร์ ตัวอย่างของวัสดุนาโน เช่น ท่อนาโนคาร์บอน คาร์บอนแบล็ค อนุภาคนาโนแบเรียมไททาเนต เป็นต้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิด พัฒนาประสิทธิภาพของ TENG ให้สูงขึ้นโดยใช้วัสดุอาร์เรย์ลวดนาโนของคอมโพสิตพอลิไดเมทิลไซโลเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) และท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube, CNT) (PDMS/CNT NW array) เพื่อเพิ่มพลังงานไฟฟ้าและความไวในการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าให้สูงมากยิ่งขึ้นโดยการสร้าง PDMS/CNT NW array จากแม่แบบลวดนาโนของซิลิกอน ซึ่งเตรียมได้จากกระบวนการสร้างโครงสร้างนาโนของซิลิกอนด้วยกระบวนการกัดทางเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่าย ไม่ต้องใช้เครื่องมือซับซ้อน สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างเครื่องมือมาตรฐานสำหรับการวัดประสิทธิภาพ TENG

1.2.2 เพื่อศึกษาการเตรียม PDMS/CNT NW array โดยใช้แม่แบบลวดนาโนของซิลิกอน

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเก็บพลังงานไฟฟ้าจากการแรงเสียดทานโดยการประดิษฐ์ TENG ที่ใช้ PDMS/CNT NW array

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

การใช้ PDMS/CNT NW array เป็นขั้วลวดของ TENG โครงสร้างของลวดนาโนจะช่วยเพิ่มความหนาแน่นของประจุเนื่องจากมีพื้นที่สัมผัสมากขึ้นทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าเอาท์พุทที่สูงขึ้น และการผสม CNT ลงไปใน PDMS จากสมบัติของ CNTs ที่มีค่ามอดูลัสของยังที่สูง จะทำให้ขั้วไฟฟ้าสามารถถ่ายเทประจุได้เร็วขึ้นและ PDMS/CNT NW array สามารถกลับคืนตัวได้ไวขึ้น และสามารถทนการสึกหรอได้ และนอกจากนี้การเติม CNT ลงไปจะทำให้ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity) ลดลง ทำให้การเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Induction) เพิ่มสูงขึ้น

1.4 กรอบแนวคิดในการออกแบบงานวิจัย

1.4.1 การสร้างเครื่องมือมาตรฐานสำหรับการวัดประสิทธิภาพ TENG จะทำให้การทดสอบแต่ละครั้งมีความถูกต้อง แม่นยำ และได้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือ

1.4.2 การเตรียม PDMS/CNT NW array โดยใช้แม่แบบลวดนาโนของซิลิกอน เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากแม่แบบลวดนาโนของซิลิกอนเตรียมได้จากกระบวนการสร้างโครงสร้างนาโนของซิลิกอนด้วยกระบวนการกัดทางเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่าย ไม่ต้องใช้เครื่องมือซับซ้อน สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว

1.4.3 การใช้ PDMS/CNTs TENG NW array ซึ่งมีโครงสร้างในระดับนาโน เป็นขั้วไฟฟ้า จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปใช้งานเป็นTENG ซึ่งต้องการพื้นที่ผิวในการเสียดสีที่มาก

1.4.4 การใช้ PDMS/CNTs TENG NW array ซึ่งมีการเติม CNTs ลงไป จะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของขั้วให้มีความยืดหยุ่นคืนตัวได้อย่างรวดเร็ว, ทนต่อการสึกหรอและเพิ่มการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Induction) ให้สูงขึ้น

1.5 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ออกแบบและสร้างเครื่องมือมาตรฐานสำหรับการวัดประสิทธิภาพ TENG โดยให้สามารถให้แรงกดหรือทำให้อุปกรณ์โค้งงอได้ โดยสามารถให้แรงได้ถึง 140 นิวตัน และความถี่ในการให้แรงหรือการโค้งงออยู่ในระดับ 0.3 ถึง 12 เฮิร์ต

1.5.2 เตรียม PDMS/CNT NW array โดยใช้แม่แบบลวดนาโนของซิลิกอน โดยแม่แบบลวดนาโนของซิลิกอนเตรียมได้จากกระบวนการสร้างโครงสร้างนาโนของซิลิกอนด้วยกระบวนการกัดทางเคมี ศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดของลวดนาโนแม่แบบ และขนาดของ PDMS/CNT NW array ที่เตรียมได้ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ความหนาแน่น ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.5.3 ทดสอบประสิทธิภาพของ TENG โดยใช้ PDMS/CNTs TENG NW array เป็นขั้วไฟฟ้า ศึกษาความสัมพันธ์ของสัณฐานวิทยาของ PDMS/CNTs TENG NW array ต่อประสิทธิภาพของ TENG โดยศึกษาประสิทธิภาพในด้านค่าความต่างศักย์เอาท์พุท ค่ากระแสไฟฟ้าเอาท์พุท และค่ากำลังไฟฟ้า

1.5.4 ศึกษาหลักการเพิ่มประสิทธิภาพของ TENG โดยใช้ PDMS/CNTs TENG NW array โดยจะทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ดังนี้ ค่าความนำไฟฟ้า ด้วยการวัดค่า Sheet resistivity ด้วยเทคนิค Four-point probe

1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย

1.6.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย (Literature review)

1.6.2 ออกแบบและสร้างเครื่องมือมาตรฐานสำหรับการวัดประสิทธิภาพ TENG

1.6.3 เตรียม PDMS/CNT NW array โดยใช้แม่แบบลวดนาโนของซิลิกอน

1.6.4 ทดสอบประสิทธิภาพของ TENG โดยใช้ PDMS/CNTs TENG NW array

1.6.5 ศึกษาหลักการเพิ่มประสิทธิภาพของ TENG โดยใช้ PDMS/CNTs TENG NW array

แสดงแผนการดำเนินงานในช่วงเวลาต่าง ๆ ในแต่ละเดือนดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงานในช่วงเวลาต่าง ๆ ในแต่ละเดือน

แผนการดำเนินงาน	ช่วงเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานแต่ละส่วน			
	สิงหาคม - ตุลาคม พ.ศ. 2559	พฤศจิกายน - ธันวาคม พ.ศ. 2559	มกราคม - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	มีนาคม - พฤษภาคม พ.ศ. 2559
1				
2				
3				
4				
5				



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 ทฤษฎีไฟฟ้าสถิต

2.1.1 ประจุไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า

หากลองนึกถึงนักเล่นสกีน้ำ แรงส่วนใหญ่ที่ทำต่อนักสกีน้ำล้วนเป็นแรงทางไฟฟ้า อันตรกิริยาไฟฟ้าระหว่างโมเลกุลที่อยู่ใกล้กันทำให้เกิดแรงกระทำต่อนักสกีเช่น แรงที่น้ำทำต่อนักสกี แรงต้านอากาศ และแรงตึงในเส้นเชือก แรงทางไฟฟ้านี้เป็นแรงที่ยึดร่างกายของนักสกีไว้ มีแรงเดียวซึ่งไม่ใช่แรงไฟฟ้าที่ทำต่อนักสกี นั่นคือ แรงจากสนามโน้มถ่วงของโลก ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างนักสกีที่ใช้อธิบายเรื่องแรงทางไฟฟ้าที่กระทำต่อนักสกี

อันตรกิริยาเหล่านี้ล้วนเกี่ยวข้องกับอนุภาคซึ่งมีสมบัติที่เรียกว่าประจุไฟฟ้า สมบัตินี้เป็นสมบัติของอนุภาคพื้นฐานเช่นเดียวกับมวล เรบอกไม่ได้ว่าประจุไฟฟ้าคืออะไร สิ่งที่ได้คือเพียงบรรยายสมบัติและพฤติกรรมของมันเท่านั้น จากการพิจารณาธรรมชาติของประจุไฟฟ้า พบว่าประจุไฟฟ้ามีค่าไม่ต่อเนื่องและมีปริมาณคงตัว ซึ่งเราจะพิจารณาอันตรกิริยาของประจุไฟฟ้าซึ่งอยู่ในกรอบอ้างอิงที่เรียกว่าอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิต โดยอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิตมีสมบัติตามความสัมพันธ์อย่างง่ายที่เรียกว่ากฎของคูลอมบ์และแนวคิดของสนามไฟฟ้า [1]

2.1.1.1 ประจุไฟฟ้า

ชาวกรีกโบราณค้นพบสิ่งนี้ตั้งแต่เมื่อ 600 ปีก่อนคริสต์ศักราช โดยผู้ค้นพบคือธาลีสแห่งมิลีทัส (Thales of Miletus) เมื่อเขาถูแท่งอำพันกับขนสัตว์ อำพันจะมีอำนาจในการดูดวัตถุอื่นๆได้ สำหรับในปัจจุบันเราสามารถอธิบายได้ว่าอำพันได้รับประจุไฟฟ้า (electric charge) หรือมีประจุ โดยคำว่า “electric” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีกคำว่า “electron” ซึ่งมีความหมายว่าอำพัน สำหรับการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองสร้างประจุไฟฟ้าด้วยวิธีที่ง่ายที่สุดคือการเสียดสีวัสดุ 2 ชนิด ยกตัวอย่างแท่งพลาสติกและผ้าขนสัตว์ ใช้สำหรับสาธิตปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าสถิตได้เป็นอย่างดี เริ่มแรกนั้นเพียงเตรียม แท่งแก้วสองแท่ง ,แท่งพลาสติกสองแท่ง ,ผ้าไหมหนึ่งชิ้นและผ้าขนสัตว์หนึ่งชิ้น หลังจากที่ทำให้แท่งพลาสติกแต่ละแท่งมีประจุไฟฟ้าโดยการถูมันกับขนสัตว์พบว่าแท่งพลาสติกผลักรับกับแท่งแก้ว เมื่อถูแท่งแก้วกับผ้าไหมแท่งแก้วจะมีประจุและผลักรับกันเอง แต่แท่งพลาสติกที่มีประจุดูดแท่งแก้วที่มีประจุ นอกจากนั้นแท่งพลาสติกและผ้าขนสัตว์ดูดกัน และแท่งแก้วกับผ้าไหมก็ดูดกัน การทดลองเหล่านี้แสดงให้เห็นว่ามีประจุไฟฟ้าเพียงสองชนิดเท่านั้น โดยชนิดที่อยู่บนแท่งพลาสติกที่ถูด้วยผ้าขนสัตว์และชนิดบนแท่งแก้วที่ถูด้วยผ้าไหม เบนจามิน แฟรงคลิน (ค.ศ. 1706-1790) ได้เสนอให้เรียกประจุสองชนิดนี้ว่าลบและบวกตามลำดับ ตั้งแต่นั้นมาจึงเรียกกันแบบนี้มาจนถึงปัจจุบัน แท่งพลาสติกและผ้าไหมมีประจุลบ แท่งแก้วและผ้าขนสัตว์มีประจุบวก กล่าวได้ว่า “ประจุบวกสองประจุหรือประจุลบสองประจุผลักรับกัน ประจุบวกและประจุลบดูดกัน”

2.1.1.2 ประจุไฟฟ้าและโครงสร้างของสสาร

อนุภาคมีประจุไฟฟ้าเป็นสมบัติพื้นฐานซึ่งประกอบเป็นสสารเช่นเดียวกับมวล อันตรกิริยาซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างและสมบัติของอะตอมและโมเลกุลเป็นอันตรกิริยาไฟฟ้าระหว่างอนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ โครงสร้างของอะตอมนั้นประกอบด้วยอนุภาคสามอนุภาคได้แก่ อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ โปรตอนซึ่งมีประจุบวก ปลัสนิวตรอนซึ่งไม่มีประจุ โปรตอนและนิวตรอนในอะตอมประกอบเป็นแกนความหนาแน่นสูงเรียกว่านิวเคลียสซึ่งมีขนาดประมาณ 10^{-15} m รอบนิวเคลียสคืออิเล็กตรอนซึ่งกระจายออกไปถึงระยะประมาณ 10^{-10} m จากนิวเคลียส ถ้าอะตอมมีขนาดสองสามกิโลเมตรนิวเคลียสของมันจะมีขนาดเท่าลูกเทนนิส อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบถูกยึดไว้ภายในอะตอมด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าโดยมีนิวเคลียสซึ่งมีประจุบวกกระทำต่อมัน (โปรตอนและนิวตรอนถูกยึดไว้ภายในนิวเคลียสซึ่งเสถียรของอะตอมด้วยอันตรกิริยาดังดูดที่เรียกว่าแรงนิวเคลียร์ซึ่งเอาชนะแรงผลักรับไฟฟ้าของโปรตอน แรงนิวเคลียร์มีพิสัยสั้นประมาณขนาดนิวเคลียส และผลของมันมีระยะเกินนิวเคลียสไปไม่ไกล) มวลของแต่ละอนุภาคมีความเที่ยงถึงเท่าที่รู้ในปัจจุบันคือ มวลของอิเล็กตรอนมีค่า $9.1093897(54) \times 10^{-31}$ kg ,มวลของโปรตอนมีค่า $1.6726231(10) \times 10^{-27}$ kg และมวลของนิวตรอนมีค่า $1.6749286(10) \times 10^{-27}$ kg สังเกตว่ามวลของโปรตอนและนิวตรอนเกือบเท่ากันและมีค่าประมาณ 2000 เท่ามวลของอิเล็กตรอน กว่า 99.99% ของมวลของอะตอมใดๆรวมอยู่ในนิวเคลียสของอะตอมนั้น ประจุลบของอิเล็กตรอนมีขนาดเท่าประจุบวกของโปรตอนพอดี ในอะตอมที่เป็นกลางจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับจำนวนโปรตอนในนิวเคลียส และประจุไฟฟ้าสุทธิ (ผลบวกทางพีชคณิตของประจุทั้งหมด) มีค่าเท่ากับศูนย์พอดี เรียกจำนวนโปรตอนหรืออิเล็กตรอนในอะตอมที่เป็นกลางของธาตุว่าเลขอะตอมของธาตุนั้น ถ้าอะตอมเสียอิเล็กตรอนไปหนึ่งตัวหรือมากกว่า เรียกโครงสร้างประจุบวกที่เหลือว่าไอออนบวก ไอออนลบคืออะตอมที่ได้รับอิเล็กตรอนหนึ่งตัวหรือมากกว่า เราเรียกการได้รับหรือการสูญเสียอิเล็กตรอนว่าการแตกตัวเป็นไอออน เมื่อจำนวนโปรตอนทั้งหมดในวัตถุมหรรคณกับจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมด ประจุทั้งหมดเป็นศูนย์และวัตถุทั้งก้อนมีประจุไฟฟ้าเป็นกลาง เพื่อที่จะทำให้อัตมามีประจุลบส่วนเกิน เราอาจให้ประจุลบกับวัตถุที่เป็นกลางหรือการเอาประจุบวกออกจากวัตถุนั้น ในทำนองเดียวกันสามารถสร้างประจุบวกส่วนเกินได้โดยการให้ประจุบวกหรือเอาประจุลบออก ในกรณีส่วนมากนิยมให้หรือดึงอิเล็กตรอนที่มีประจุลบ (และเคลื่อนที่ได้ง่าย) จากวัตถุและวัตถุที่มีประจุบวก คือวัตถุซึ่งได้สูญเสียอิเล็กตรอนไปบางส่วน เมื่อพูดถึงประจุของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุเรขาคณิตหมายถึงประจุสุทธิเสมอ ประจุสุทธิมีขนาดเป็นเศษส่วนเพียงชนิดเดียวซึ่งโดยทั่วไปไม่เกิน 10^{-12} ของประจุบวกทั้งหมดหรือประจุลบทั้งหมดในวัตถุนั้น โดยมีหลักการที่สำคัญอยู่สองข้อที่ใช้ในการพิจารณา ข้อแรกคือหลักการอนุรักษ์ของประจุไฟฟ้าซึ่งกล่าวว่าผลบวกพีชคณิตของประจุไฟฟ้าทั้งหมดในระบบปิดใดๆมีค่าคงตัว ถ้าเราดูแท่งพลาสติกกับผ้าขนสัตว์ด้วยกันโดยที่แต่เดิมทั้งคู่ไม่มีประจุไฟฟ้าส่วนเกิน แท่งพลาสติกจะได้รับประจุลบเนื่องจากมันเอาอิเล็กตรอนมาจากผ้าขนสัตว์ และผ้าขนสัตว์มีประจุบวกขนาดเท่ากันเนื่องจากมันได้สูญเสียอิเล็กตรอนไปจำนวนเท่ากับที่แท่งพลาสติกได้รับ ดังนั้นประจุไฟฟ้าทั้งหมดบนวัตถุทั้งสองรวมกันไม่เปลี่ยนแปลง ในกระบวนการให้ประจุใดๆไม่มีการสร้างหรือทำลายประจุ ประจุเพียงแต่ถูกถ่ายโอนจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งเท่านั้น การอนุรักษ์ของประจุเป็นกฎการคงตัวสากลและไม่มีหลักฐานการทดลองใดที่ชี้ว่าฝ่าฝืนหลักการนี้ แม้แต่ในอันตรกิริยาพลังงานสูงที่มีการสร้างและทำลายอนุภาค เช่น การสร้างคู่อิเล็กตรอน-โพสิตรอน ประจุทั้งหมดของระบบปิดใดๆมีค่าคงตัวแน่นอน หลักการที่สำคัญข้อที่สองคือขนาดประจุของอิเล็กตรอนหรือโปรตอนเป็นหน่วยธรรมชาติของประจุ ปริมาณประจุไฟฟ้าที่สังเกตได้ทุกปริมาณมีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มเท่าของหน่วยพื้นฐานนี้เสมอ หรือพูดได้ว่าประจุถูกทำให้เป็นควอนตัม ประจุบนวัตถุใดๆถ้ามีค่าไม่เป็นศูนย์ก็พบว่ามีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มเท่า (ลบหรือบวก) ของประจุอิเล็กตรอนเสมอ

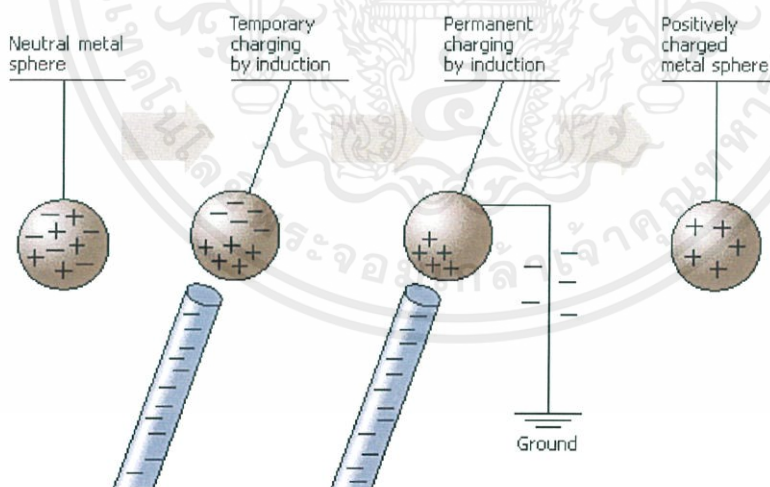
2.1.1.3 ตัวนำไฟฟ้า ฉนวนไฟฟ้า และประจุเหนี่ยวนำ

วัสดุบางชนิดยอมให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านตัวมันจากบริเวณหนึ่งไปยังบริเวณหนึ่งได้ง่าย ในขณะที่วัสดุอื่นไม่เป็นไปตามเช่นนั้น หากทดลองนำลวดทองแดงพันบนแท่งแก้วแล้วแตะปลายหนึ่งของลวดทองแดงด้วยแท่งพลาสติกมีประจุและแตะอีกปลายหนึ่งของลวดทองแดงกับลูกบอลโลหะซึ่งเดิมไม่มีประจุ เสร็จแล้วลองเอาเส้นลวดออก เมื่อนำวัตถุมีประจุอื่นเข้าใกล้ลูกบอลโลหะ ลูกบอลจะถูกดูดหรือถูกผลักซึ่งแสดงว่าลูกบอลนั้นมีประจุไฟฟ้า ประจุไฟฟ้าได้ถูกถ่ายโอนระหว่างลูกบอลและผิวของแท่งพลาสติกผ่านลวดทองแดง กล่าวได้ว่าลวดทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้า ถ้าทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนลวดทองแดงเป็นหนังยางหรือสายไนลอนจะพบว่าไม่มีการโอนถ่ายประจุไปยังลูกบอลโลหะเราเรียกวัดสคูเหล่านี้ว่าฉนวน ตัวนำยอมให้ประจุผ่านโดยง่ายในขณะที่ฉนวนไม่ยอม ยกตัวอย่างเช่น เส้นใยพรมในวันที่อากาศแห้งเป็นฉนวนที่ดี ขณะที่เดินบนพรม การถูระหว่างรองเท้ากับเส้นใยทำให้มีประจุสะสมบนตัวเราได้และประจุนี้จะยังคงอยู่บนตัวเราเพราะมันไหลผ่านเส้นใยฉนวนไม่ได้ ถ้าไปแตะวัตถุตัวนำไฟฟ้าเช่นลูกบิดประตู จะมีการถ่ายโอนประจุอย่างรวดเร็วระหว่างนิ้วมือกับลูกบิดประตูและจะทำให้โดนไฟฟ้าช็อก ซึ่งเหตุการณ์นี้สามารถป้องกันได้โดยสวมถุงมือฉนวนหรือพันเส้นใยพรมบางส่วนรอบแกนตัวนำเพื่อให้ประจุที่สะสมบนตัวถูกถ่ายโอนไปยังพรมได้โดยไม่เป็นอันตราย อีกวิธีแก้ปัญหาก็คือวิธีหนึ่งคือการเคลือบสารต้านไฟฟ้าสถิตเพื่อป้องกันการสะสมประจุบนตัวเราตั้งแต่แรก โลหะส่วนมากเป็นตัวนำที่ดี ขณะที่โลหะส่วนมากเป็นฉนวน เหตุผลที่โลหะสามารถนำไฟฟ้าได้นั้นก็เพราะอิเล็กตรอนวงนอกหนึ่งอนุภาคหรือมากกว่าในแต่ละอะตอมหลุดจากอะตอมและเคลื่อนที่ได้ อย่างเสรีตลอดวัสดุเหมือนกับที่โมเลกุลก๊าซสามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณเม็ดทรายในถังทราย การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนประจุลบเหล่านี้พาประจุผ่านโลหะ อิเล็กตรอนอื่นยังถูกยึดอยู่กับนิวเคลียสประจุบวกซึ่งถูกยึดเกือบอยู่กับที่ในวัสดุ สำหรับในฉนวนไม่มีอิเล็กตรอนอิสระหรือมีปริมาณน้อยมาก และประจุไฟฟ้าไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างเสรีผ่านวัสดุ หากเราทดลองทำให้ลูกบอลโลหะมีประจุขึ้นสามารถทำได้โดยการสัมผัสมันด้วยแท่งพลาสติกมีประจุ ในกระบวนการนี้อิเล็กตรอนส่วนเกินบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกถ่ายโอนจากแท่งพลาสติกไปยังลูกบอลโลหะและทำให้แท่งพลาสติกมีประจุลบน้อยลง มีเทคนิคต่างกันอย่างหนึ่งที่แท่งพลาสติกทำให้อีกวัตถุหนึ่งมีประจุเครื่องหมายตรงข้ามได้โดยที่ไม่เสียประจุของตัวเอง เรียกกระบวนการนี้ว่าการทำให้มีประจุโดยการเหนี่ยวนำ

จากภาพที่ 2.2 ตัวอย่างการทำให้มีประจุโดยการเหนี่ยวนำ ลูกบอลโลหะลูกหนึ่งถูกวางไว้บนที่ตั้งฉนวน เมื่อนำแท่งประจุมาใกล้โดยที่ไม่ได้แตะมัน อิเล็กตรอนอิสระในลูกบอลโลหะจะถูกผลักโดยอิเล็กตรอนส่วนเกินบนแท่งวัตถุและจะเคลื่อนไปด้านบนห่างจากแท่งวัตถุ อิเล็กตรอนเหล่านี้หนีจากทรงกลมไม่ได้เพราะที่ตั่งและอากาศโดยรอบเป็นฉนวน ดังนั้นเรามีประจุลบส่วนเกินที่ผิวลูกบอลโลหะทางด้านบนและมีประจุบวกสุทธิที่ผิวด้านล่าง เรียกประจุส่วนเกินเหล่านี้ว่าประจุเหนี่ยวนำ โดยอิเล็กตรอนอิสระไม่ได้เคลื่อนที่ไปที่ผิวด้านบนทั้งหมด พื้นที่ที่มีประจุเหนี่ยวนำขึ้น ประจุเหนี่ยวนำนั้นจะออกแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนอิสระอื่น อิเล็กตรอนนี้จะถูกผลักโดยประจุเหนี่ยวนำลบทางด้านบนและถูกดูดเข้าหาประจุเหนี่ยวนำบวกทางด้านล่าง ระบบเข้าสู่สถานะสมดุลที่แรงไปด้านบนซึ่งทำต่ออิเล็กตรอนเนื่องจากทั้งประจุหักล้างพอดีกับแรงไปด้านล่างเนื่องจากประจุเหนี่ยวนำ ถ้าเราเอาแท่งมีประจุนอกอิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนกลับเข้าสู่สถานะเป็นกลางดั้งเดิม แต่หากเราแตะปลายหนึ่งของลวดตัวนำเข้ากับผิวด้านบนของทรงกลมและต่ออีกปลายหนึ่งลงดินประจุลบบางส่วนจะไหลผ่านลงดิน นั่นก็เพราะว่าโลกเป็นตัวนำและมีขนาดใหญ่มากจนกระทั่งทำตัวเหมือนกับแหล่งอนันต์ของอิเล็กตรอนหรือบ่อทิ้งอิเล็กตรอนที่ไม่ต้องการ จากนั้นนำขดลวดออกแล้วเอาแท่งวัตถุออก จะมีประจุบวกสุทธิเหลืออยู่บนทรงกลม ประจุลบบนแท่งประจุลบไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างที่กระบวนการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นและโลกจะได้รับประจุลบในขนาดที่เท่ากับขนาดประจุบวกเหนี่ยวนำที่เหลืออยู่บนทรงกลม



ภาพที่ 2.2 การทำให้ลูกบอลโลหะมีประจุโดยการเหนี่ยวนำ

การทำให้มีประจุโดยการเหนี่ยวนำจะทำงานได้ดีพอกันถ้าประจุเคลื่อนที่เป็นประจุบวกแทนที่จะเป็นอิเล็กตรอนประจุลบ หรือแม้กระทั่งเมื่อมีประจุเคลื่อนที่ทั้งบวกและลบ ในตัวนำโลหะประจุเคลื่อนที่จะเป็นอิเล็กตรอนประจุลบเสมอ แต่บางสถานการณ์การพิจารณาว่าประจุเคลื่อนที่เป็นประจุบวกก็เป็นสิ่งที่สะดวก ในสารละลายไอออนหรือก๊าซไอออนทั้งประจุบวกและประจุลบเป็นประจุเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายนี้สังเกตว่าวัตถุประจุสามารถออกแรงกระทำต่อวัตถุซึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้าได้ ยกตัวอย่างเช่นการถูลูกโป่งกับพรมแล้วลองแตะลูกโป่งกับเพดาน ลูกโป่งจะติดกับเพดานแม้ว่าเพดานไม่มีประจุไฟฟ้าสุทธิ อีกตัวอย่างการทดลองหนึ่งคือการลากหวีผ่านเส้นผมเพื่อให้หวีมีประจุไฟฟ้า เราสามารถใช้หวีนั้นยกเศษกระดาษซึ่งไม่มีประจุไฟฟ้าสุทธิได้ด้วยหวี อันตรกิริยานี้เป็นปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำประจุ โดยหวีพลาสติกประจุลบทำให้มีการเลื่อนประจุชนิดน้อยในโมเลกุลของฉนวนซึ่งเป็นกลาง เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าโพลาริเซชัน ประจุบวกและลบในวัสดุมีปริมาณเท่ากันแต่ประจุบวกอยู่ใกล้หวีพลาสติกมากกว่าดังนั้นมันจึงรู้สึกถึงแรงดึงดูดมากกว่าแรงผลักโดยประจุลบ แรงสุทธิจึงเป็นแรงดึงดูด จากนั้นลองศึกษาโดยเปลี่ยนประจุนบนหวีจากลบไปเป็นประจุบวกพบว่าฉนวนที่เป็นกลางถูกดูดเข้าหาหวีที่มีประจุบวกด้วย เพียงแต่ในสถานการณ์นี้ประจุในฉนวนเลื่อนไปทิศทางตรงกันข้ามทำให้ประจุลบในฉนวนอยู่ใกล้หวีมากกว่าและรู้สึกถึงแรงดึงดูดมากกว่าแรงผลักโดยประจุบวกในฉนวน ดังนั้นวัตถุประจุไม่ว่าจะบวกหรือลบก็ออกแรงดึงดูดต่อฉนวนที่เป็นกลางได้

2.1.1.4 กฎของคูลอมบ์

ในปี ค.ศ. 1784 ได้มีการศึกษาแรงอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิตระหว่างอนุภาคมีประจุอย่างละเอียด โดย Charles Augustin de Coulomb (ค.ศ. 1736-1806) โดยเขาได้ใช้เครื่องชั่งแบบบิดสำหรับประจุจุดซึ่งหมายถึงวัตถุมีประจุซึ่งมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับระยะ r ระหว่างวัตถุ คูลอมบ์พบว่าแรงไฟฟ้าแปรผกผันกับ $1/r^2$ นั่นคือระยะ r เพิ่มเป็นสองเท่า แรงจะมีขนาดลดลงเป็นหนึ่งในสี่เท่าของค่าเดิม ในทางกลับกันเมื่อระยะลดลงครึ่งหนึ่ง แรงจะมีขนาดเพิ่มเป็นสี่เท่าของค่าเดิม แรงไฟฟ้าระหว่างประจุจุดสองประจุมีค่าขึ้นกับปริมาณประจุนแต่แต่ละวัตถุซึ่งจะแทนด้วย q หรือ Q เพื่อที่จะศึกษาความสัมพันธ์นี้ คูลอมบ์แบ่งประจุนออกเป็นสองส่วนเท่ากันโดยแต่ละตัวนำทรงกลมที่มีประจุนขนาดเล็กกับทรงกลมเหมือนกันแต่ไม่มีประจุ โดยสมมาตรประจุนจะแบ่งระหว่างทรงกลมสองลูกเท่ากัน เขาจึงได้ประจุนครึ่งหนึ่ง หนึ่งในสี่ และค่าอื่นๆต่อไปของประจุนเดิมๆได้ เขาพบว่าแรงซึ่งประจุจุด q_1 และ q_2 กระทำต่อกันแปรผกผันกับประจุนแต่ละประจุนดังนั้นแปรผกผันกับผลคูณ $q_1 q_2$ ของประจุนทั้งสอง ดังนั้นคูลอมบ์จึงได้กฎซึ่งในปัจจุบันรู้จักกันในชื่อที่เรียกว่ากฎของคูลอมบ์ ซึ่งกล่าวว่าขนาดของแรงไฟฟ้าระหว่างประจุจุดสองประจุนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลคูณของประจุนและเป็นสัดส่วนผกผันกับกำลังสองของระยะทางระหว่างประจุนทั้งสอง ทางคณิตศาสตร์เราเขียนขนาด F ของแรงที่ประจุจุด q_1 และ q_2 สองประจุนซึ่งอยู่ห่าง r ได้ดังนี้

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

โดยที่ k คือค่าคงตัวขึ้นกับระบบหน่วยที่ใช้ เราใช้เครื่องหมายค่าสัมบูรณ์ในสมการก็เพราะว่าประจุนอาจเป็นบวกหรือลบก็ได้ ขณะที่แรงมีค่าเป็นบวกเสมอโดยแรงซึ่งประจุนกระทำต่อกันมีทิศในแนวเส้นตรงที่เชื่อมประจุนทั้งสองเสมอ เมื่อประจุน q_1 และ q_2 มีเครื่องหมายเดียวกันซึ่งอาจเป็นบวกทั้งคู่หรือลบทั้งคู่ แรงจะเป็นแรงผลัก แต่เมื่อประจุนทั้งสองมีเครื่องหมายตรงข้ามกัน แรงจะเป็นแรงดูด โดยแรงทั้งสองมีสมบัติตามกฎของนิวตันข้อที่สาม แรงทั้งสองมีขนาดเท่ากันและมีทิศตรงข้ามกันเสมอ แม้แต่เมื่อประจุนขนาดที่ไม่เท่ากัน สำหรับหน่วย SI ของประจุไฟฟ้านั้นคือหนึ่งคูลอมบ์ โดยหลักการแล้วเราสามารถวัดแรงไฟฟ้าระหว่างประจุนที่เท่ากันสองประจุนซึ่งอยู่ห่างกันเป็นระยะใดๆที่วัดได้และใช้

กฎของคูลอมบ์หาค่าประจุได้ในหน่วย SI ค่า k ในสมการเป็น $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ทำให้สามารถเขียนกฎของคูลอมบ์อีกรูปหนึ่งได้ดังนี้

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1q_2|}{r^2}$$

โดย ϵ_0 มีค่าเท่ากับ $8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ และ ค่า k มีค่าเท่ากับ $8.988 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

จากที่เคยกล่าวมาก่อนหน้านี้ว่าหน่วยพื้นฐานที่สุดของประจุคือขนาดประจุของอิเล็กตรอนหรือโปรตอนซึ่งจะแทนด้วย e ซึ่งมีค่าโดยประมาณเท่ากับ $1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{ C}$. โดยหนึ่งคูลอมบ์จะแทนค่าลบบของประจุทั้งหมดของอิเล็กตรอนประมาณ 6×10^{18} อนุภาค สำหรับในปัญหาทางไฟฟ้าสถิต การพบประจุซึ่งมีขนาดหนึ่งคูลอมบ์เป็นเรื่องไม่ปกติมาก เพราะประจุ 1 C สองประจุซึ่งอยู่ห่างกัน 1 m จะออกแรงกระทำต่อกันสูงถึง

$9 \times 10^9 \text{ N}$ หรือประมาณล้านตัน ประจุทั้งหมดของอิเล็กตรอนทั้งหมดในเหรียญเพนนีทองแดงมีค่าสูงกว่านี้อีก โดยมีค่าประมาณ $1.4 \times 10^5 \text{ C}$ นี้แสดงให้เห็นว่าเราไม่สามารถรบกวนความเป็นกลางทางไฟฟ้าได้มากนักโดยไม่ใช้แรงแห่งมหาคาล โดยทั่วไปนั้นค่าทั่วไปของประจุที่ใช้กันจะอยู่ในช่วงไมโครคูลอมบ์และนาโนคูลอมบ์ [1]

2.1.1.5 สนามไฟฟ้าและแรงไฟฟ้า

เมื่อประจุไฟฟ้าสองประจุอยู่ในสุญญากาศและมีอันตรกิริยาต่อกัน แต่แต่ละประจู้รู้อย่างไรว่ามีอีกประจู้ตรงไหน สิ่งใดเกิดขึ้นในที่ว่างระหว่างประจู้ที่สื่อสารผลของแต่ละประจู้ต่ออีกประจู้หนึ่ง เพื่อที่จะแนะนำแนวคิดนี้ให้ลองดูการผลักรั้วกันและกันของวัตถุประจู้บวก A และ B สองวัตถุ สมมติว่า B มีประจู้ q_0 และให้ F เป็นแรงทางไฟฟ้าที่ประจู้ A ทำต่อ B วิธีที่ใช้มองแรงนี้วิธีหนึ่งคือมองว่าเป็นแรงระยะไกล นั่นคือแรงซึ่งทำผ่านสุญญากาศโดยไม่ต้องใช้สารใดๆถ่ายแรงผ่านบริเวณระหว่างกลาง (สามารถมองแรงโน้มถ่วงเป็นแรงกระทำระยะไกลได้ด้วย) แต่วิธีการมองภาพการผลักรั้วกันของประจู้นี้เป็นกระบวนการสองขั้นตอน ก่อนอื่นต้องมองภาพว่าวัตถุ A ซึ่งมีประจู้ไฟฟ้าทำให้สมบัติของที่ว่างรอบๆประจู้เปลี่ยนไป แล้ววัตถุ B ซึ่งมีประจู้ของตัวเองรับรู้ว่ามีบริเวณที่ว่างซึ่งมันอยู่ได้ถูกเปลี่ยนไป การตอบสนองของวัตถุ B คือการถูกกระทำด้วยแรง F ซึ่งต้องเน้นย้ำว่านี่เป็นอันตรกิริยาระหว่างวัตถุมีประจู้สองวัตถุ ประจู้เดียวประจู้หนึ่งก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าในบริเวณรอบๆ แต่สนามไฟฟ้านี้ไม่สามารถออกแรงสุทธิต่อตัวประจู้ที่ก่อให้เกิดสนามนั้น ซึ่งเป็นตัวอย่างของหลักการทั่วไปที่วัตถุไม่สามารถออกแรงสุทธิกระทำต่อตัวเองได้ตามใจชอบ เพราะถ้าหลักการนี้ไม่เป็นจริงเราจะสามารถยกตัวเองติดเพดานได้เพียงแค่ดึงเสื้อตัวเองขึ้น ในการทดลองคว้ามี่สนามไฟฟ้าที่จุดใดๆหรือไม่ เราวางวัตถุมีประจู้ซึ่งเราเรียกว่าประจู้ทดสอบที่จุดนั้น ถ้ามีแรงไฟฟ้าทำต่อประจู้ทดสอบ ก็แสดงว่ามีสนามไฟฟ้าที่จุดนั้นๆซึ่งสนามนี้เกิดจากประจู้ที่ไม่ใช่ประจู้ทดสอบ เนื่องจากแรงเป็นปริมาณเวกเตอร์ ดังนั้นสนามไฟฟ้าจึงเป็นปริมาณเวกเตอร์ด้วย เรานิยามสนามไฟฟ้า E ที่จุดใดๆว่ามีค่าเท่ากับแรงไฟฟ้า F ที่ทำต่อประจู้ทดสอบที่จุดนั้นหารด้วยประจู้ทดสอบ q นั่นคือสนามไฟฟ้าที่จุดใดๆมีค่าเท่ากับแรงไฟฟ้าต่อประจู้หนึ่งหน่วยที่ทำต่อประจู้ที่จุดนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = \frac{F}{q}$$

ในหน่วย SI ที่หน่วยของแรงคือ 1 N และหน่วยของประจุคือ 1 C หน่วยของขนาดสนามไฟฟ้าจะเป็น 1 N/C

ถ้าเรารู้สนามไฟฟ้า E ที่จุดหนึ่ง เราสามารถหาแรง F ซึ่งทำต่อประจุ q ที่จุดนั้นได้โดยเขียนสมการใหม่

$$F = qE$$

โดยประจุทดสอบ q อาจเป็นบวกหรือลบก็ได้ ถ้า q เป็นบวก แรง F ที่ทำต่อประจุนั้นมีทิศเดียวกับ E แต่ถ้า q เป็นลบ แรง F ที่ทำต่อประจุนั้นจะมีทิศตรงกันข้ามกับ E ซึ่งจากกฎของคูลอมบ์เราสามารถเขียนสมการของสนามไฟฟ้าที่จุดใดๆที่อยู่ห่างจากประจุจุดเจ้าของสนาม q ได้ดังสมการ

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{r^2}$$

โดยนิยาม สนามไฟฟ้าของประจุจุดมีทิศชี้ออกจากประจุบวกและมีทิศชี้เข้าหาประจุลบเสมอ ในอีกสถานการณ์หนึ่งที่ทำสนามไฟฟ้าได้ง่ายคือภายในวัตถุที่นำไฟฟ้าหรือตัวนำ ถ้ามีสนามไฟฟ้าภายในตัวนำ สนามไฟฟ้าจะออกแรงกระทำต่อทุกประจุในตัวนำ ส่งผลให้ประจุมีเสรีในการเคลื่อนที่แต่โดยนิยาม สถานการณ์ไฟฟ้าสถิตคือสถานการณ์ที่ประจุไม่มีการเคลื่อนที่ สรุปว่าในไฟฟ้าสถิต สนามไฟฟ้าที่ทุกจุดภายในตัวนำจำเป็นต้องเป็นศูนย์

2.1.1.6 ขั้วคูไฟฟ้า

ขั้วคูไฟฟ้าคือประจุจุดสองประจุซึ่งมีขนาดเท่ากันและมีเครื่องหมายตรงกันข้าม (ประจุบวก +q และประจุลบ -q) ซึ่งแยกอยู่ห่างกันระยะ d ซึ่งแนวคิดนี้จะถูกใช้พิจารณาในเรื่องไดอิเล็กตริกด้วย ยกตัวอย่างเกี่ยวกับโมเลกุลที่เป็นขั้วคูไฟฟ้าอย่างเช่นน้ำ โมเลกุลน้ำ (H_2O) ซึ่งทำตัวเหมือนขั้วคูไฟฟ้าในหลายทาง โมเลกุลของน้ำเป็นกลางไฟฟ้าทั้งโมเลกุล แต่พันธะเคมีภายในโมเลกุลทำให้ประจุมีการกระจาย ทำให้มีประจุลบสุทธิที่ปลายด้านออกซิเจนของโมเลกุล และประจุบวกสุทธิที่ด้านปลายไฮโดรเจน ซึ่งสิ่งนี้ประกอบกันเกิดเป็นขั้วคูไฟฟ้า ผลที่ได้เทียบเท่ากับการเลื่อนอิเล็กตรอนหนึ่งอนุภาคไปประมาณ 4×10^{-11} m (ประมาณรัศมีของอะตอมไฮโดรเจน) ซึ่งสิ่งที่ตามมาจากการเคลื่อนนี้ทำให้น้ำเป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับสารไอออนิกเช่นเกลือหรือโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) เพราะโมเลกุลน้ำเป็นขั้วคูไฟฟ้า เมื่อละลายน้ำเกลือจะแตกตัวออกเป็นไอออนโซเดียมซึ่งมีประจุบวกและไอออนของคลอไรด์ซึ่งมีประจุลบ ซึ่งมีแนวโน้มจะถูกดูดซับและปลายบวกของโมเลกุลน้ำตามลำดับ สิ่งนี้ยึดไอออนในสารละลาย ถ้าโมเลกุลน้ำไม่เป็นขั้วคูไฟฟ้า น้ำจะเป็นตัวทำละลายที่ไม่ดีและสารเคมีเกือบทั้งหมดที่เกิดในสารละลายน้ำจะเกิดขึ้นไม่ได้ รวมถึงปฏิกิริยาชีวเคมีทั้งหมดที่เกิดขึ้นในร่างกายของสิ่งมีชีวิตบนโลกนี้ด้วย กล่าวคือทุกชีวิตดำรงอยู่ได้ด้วยขั้วคูไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.7 กฎของเกาส์

ก่อนที่จะเข้าถึงกฎของเกาส์ มีความจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจเรื่องของฟลักซ์ไฟฟ้าเสียก่อน สมมติว่ามีกล่องหนึ่งในอุดมคติซึ่งถูกสร้างขึ้นจากวัสดุที่ไม่มีผลใดๆต่อสนามไฟฟ้า โดยให้กล่องนี้แทนผิวสมมุติซึ่งอาจล้อมรอบประจุบางประจุหรืออาจไม่ล้อมก็ได้เรียกว่าผิวปิด เพราะมันล้อมรอบสิ่งนั้นโดยสมบูรณ์ หากต้องการหาว่าในกล่องมีอะไรอยู่ก็เพียงแค่วัดสนามไฟฟ้าที่ผิวกล่องเท่านั้น หากมีประจุบวกภายในกล่องจะทำให้เกิดฟลักซ์ไฟฟ้าพุ่งออกมาจากผิวปิด (คำว่าฟลักซ์มาจากภาษาละตินแปลว่า “ไหล”) ในทางกลับกันหากมีประจุลบภายในกล่องจะทำให้เกิดฟลักซ์ไฟฟ้าพุ่งเข้าหาผิวปิด แต่หากว่าในกล่องไม่มีอะไรอยู่เลยก็จะมีฟลักซ์เข้าหรือออกจากกล่องซึ่งสถานการณ์นี้ให้ผลแบบเดียวกับกล่องที่มีประจุขนาดเท่ากันสองประจุแต่มีเครื่องหมายตรงกันข้าม นั่นคือประจุไฟฟ้าภายในกล่องจะเป็นศูนย์ มีสนามไฟฟ้าแต่สนามไฟฟ้าไหลเข้ากับสนามไฟฟ้าไหลออกในปริมาณเท่ากันจึงไม่มีฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิเข้าหรือออกจากกล่อง มีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณประจุสุทธิภายในผิวปิดและฟลักซ์ไฟฟ้าที่ผ่านผิวปิด สำหรับกรณีที่ผิวปิดมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมและการกระจายประจุเกิดจากประจุจุด ซึ่งพบว่ากรณีที่จะมีฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิพุ่งออกหรือเข้าผ่านผิวปิดนั้นล้วนขึ้นกับเครื่องหมายของประจุภายในผิวปิด โดยที่ฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณประจุสุทธิภายในผิวปิด แต่จะเพิ่มขึ้นกับขนาดของผิวปิด ข้อสำคัญคือประจุภายนอกผิวปิดไม่ทำให้เกิดฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิผ่านผิวปิดโดยรวมแล้วฟลักซ์ไฟฟ้าเป็นปริมาณที่วัดการไหลของสนามไฟฟ้าผ่านผิวปิดหนึ่งซึ่งปริมาณนี้มีค่ากับปริพันธ์ของผลคูณของชิ้นพื้นที่กับส่วนประกอบของสนามไฟฟ้า E ในทิศตั้งฉากกับพื้นที่

$$\Phi_E = \int E \cos \theta \, dA$$

ตามหลักฟิสิกส์แล้วกฎของเกาส์เป็นกฎที่มีฐานะเท่าเทียมกับกฎของคูลอมบ์แต่การใช้กฎของเกาส์ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาที่มีความสมมาตรที่สูงได้ง่ายขึ้นมาก โดยกฎของเกาส์กล่าวว่าฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิที่ผ่านผิวปิด ซึ่งเขียนในรูปของปริพันธ์บนผิวของส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับผิวได้ มีค่าเท่ากับค่าคงตัวคูณด้วยประจุไฟฟ้าทั้งหมด Q ที่อยู่ภายในผิวปิดนั้น

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

ในสมการค่า Q เป็นผลบวกทางพีชคณิตของประจุบวกและประจุลบทั้งหมดที่อยู่ภายในผิวปิดหรือผิวเกาส์เขียนเสมอ และสนามไฟฟ้าที่ใช้คือสนามไฟฟ้าสุทธิที่แต่ละจุดบนผิว กฎของเกาส์คือคำตอบต่อคำถามที่ว่า หากเราทราบรูปแบบของสนามไฟฟ้าในบริเวณหนึ่ง เราจะสามารถรู้อะไรได้บ้างเกี่ยวกับการกระจายประจุในบริเวณนั้น กฎนี้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าในผิวปิดและการกระจายประจุภายในผิว แต่ในบางกรณีเราใช้กฎของเกาส์เพื่อตอบคำถามกลับกันได้ว่า หากเราทราบการกระจายประจุ เราจะรู้อะไรเกี่ยวกับสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการกระจายประจุเหล่านั้น

2.1.2 ศักย์ไฟฟ้า

แรงไฟฟ้าจากกลุ่มประจุไฟฟ้าใดๆที่อยู่หนึ่งเป็นแรงอนุรักษ์ งาน W ที่แรงไฟฟ้ากระทำต่ออนุภาคมีประจุซึ่งกำลังเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าสามารถแทนด้วยฟังก์ชันพลังงานศักย์ U ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_{a \rightarrow b} = U_a - U_b$$

พลังงานศักย์ของประจุจุด q และ q_0 สองประจุซึ่งอยู่ห่างกันเป็นระยะ r มีค่า

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r}$$

และพลังงานศักย์สำหรับประจุ q_0 ในสนามไฟฟ้าเนื่องจากกลุ่มประจุ q_i มีค่า

$$U = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} + \dots \right) = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

โดยที่ r_i คือระยะห่างจาก q_i ถึง q_0 ถ้า q_0 อยู่ห่างอนันต์จากประจุอื่นทั้งหมด $U=0$

ศักย์ไฟฟ้าซึ่งเราแทนด้วยสัญลักษณ์ V คือพลังงานศักย์ไฟฟ้าต่อประจุหนึ่งหน่วย ศักย์ไฟฟ้าเนื่องจาก

ประจุจุด q ประจุเดียวที่ระยะห่าง r จากประจุนั้นมีค่า

$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

ศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากกลุ่มประจุจุดไฟฟ้า q_i มีค่า

$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

และศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากการกระจายประจุอย่างต่อเนื่องมีค่า

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r}$$

ความต่างศักย์ระหว่างจุด a และจุด b สองจุด ซึ่งเรียกว่าศักย์ของ a เทียบกับ b ด้วย มีค่าที่หาได้จาก

ปริพันธ์ตามเส้นของสนามไฟฟ้า E

$$V_a - V_b = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_a^b E \cos \phi \, dl.$$

หน่วยที่สมมูลกันสำหรับขนาดสนามไฟฟ้าคือโวลต์ต่อเมตร (V/m) และนิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) หนึ่งโวลต์คือหนึ่งจูลต่อคูลอมบ์ ($1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$) ในที่นี้หน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ซึ่งย่อว่า eV คือพลังงานที่เปลี่ยนไปของอนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้าเท่ากับของอิเล็กตรอนเมื่อนุภาคนั้นเคลื่อนที่ผ่านความต่างศักย์หนึ่งโวลต์ ตัวประกอบสำหรับแปลงหน่วยคือ $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$ ต่อไปจะอธิบายเกี่ยวกับผิวสมศักย์ ซึ่งเป็นผิวที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าเดียวกันที่ทุกจุด ณ จุดที่เส้นสนามตัดกับผิวสมศักย์ ปริมาณทั้งสองจะมีทิศตั้งฉากกันและกัน เมื่อประจุทั้งหมดอยู่หนึ่ง ผิวตัวนำจะเป็นผิวสมศักย์เสมอ และทุกจุดในเนื้อของตัวนำจะอยู่ที่ศักย์เดียวกัน เมื่อโพรงภายในตัวนำไม่มีประจุ โพรงทั้งหมดจะเป็นบริเวณที่ศักย์เท่ากัน และไม่มีประจุที่ตำแหน่งใดๆบนผิวของโพรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ความจุไฟฟ้า

ตัวเก็บประจุคือคูตัวนำใดๆ ที่มีฉนวนคั่นอยู่ เมื่อตัวเก็บประจุถูกอัดประจุ จะมีประจุขนาด Q เท่ากันและมีเครื่องหมายตรงกันข้ามบนตัวนำทั้งสอง และศักย์ V_{ab} ของตัวนำซึ่งมีประจุบวกเทียบกับตัวนำซึ่งมีประจุลบมีค่าแปรผันตรงกับขนาดของ Q ซึ่งให้นิยามของความจุไฟฟ้า C คืออัตราส่วนของประจุต่อความต่างศักย์

$$C = \frac{Q}{V_{ab}}$$

ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานทำจากแผ่นตัวนำขนานสองแผ่น แต่ละแผ่นมีพื้นที่ A วางห่างกันระยะ d ถ้าแผ่นตัวนำมีสูญญากาศคั่น ความจุจะมีค่า

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

โดยหน่วย SI ของความจุไฟฟ้าคือฟารัด ย่อเป็น F เพื่อให้เกียรติแก่ Michael Faraday นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษในคริสต์ศตวรรษที่สิบเก้า ซึ่งหนึ่งฟารัดคือหนึ่งคูลอมบ์ต่อโวลต์: $1 \text{ F} = 1 \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m} = 1 \text{ C}^2/\text{J}$ หน่วยไมโครฟารัด ($1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$) และพิโกฟารัด ($1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$) เป็นหน่วยที่ใช้กันทั่วไป โดยในปัจจุบันมาการพัฒนาเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดซึ่งสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ในระดับฟารัดถึงหลายร้อยฟารัด

เมื่อตัวเก็บประจุซึ่งมีความจุ C_1, C_2, C_3, \dots ต่อกันแบบอนุกรม ส่วนกลับของความจุสมมูล C_{eq} ของการต่อแบบอนุกรมมีค่าเท่ากับผลบวกของส่วนกลับของความจุแต่ละค่า

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

หากต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน ความจุสมมูลจะมีค่าเท่ากับผลบวกของความจุแต่ละค่ารวมกัน

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

พลังงาน U ที่ต้องใช้ในการอัดตัวเก็บประจุ C ให้มีความต่างศักย์ V และมีประจุ Q มีค่าเท่ากับพลังงานที่เก็บสะสมในตัวเก็บประจุและมีค่า

$$U = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV$$

เราสามารถมองได้ว่าพลังงานนี้อยู่ในสนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำ ความหนาแน่นพลังงาน u (พลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร) คือ

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้เมื่อช่องว่างระหว่างตัวนำมีวัสดุไดอิเล็กตริกสอดอยู่เต็ม ความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเป็น K เท่า เราเรียก K ว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุนั้น สำหรับตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานที่มีไดอิเล็กตริก เช่นนั้นอยู่เต็มระหว่างแผ่น ความจุคือ

$$C = KC_0 = K\epsilon_0 \frac{A}{d} = \epsilon \frac{A}{d}$$

โดยที่ $\epsilon = K\epsilon_0$ คือสภาพยอมของไดอิเล็กตริก สำหรับประจุจำนวนคงที่ค่าหนึ่งบนแผ่นตัวเก็บประจุ ประจุไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแผ่นไดอิเล็กตริกทำให้สนามไฟฟ้าและความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำมีขนาดลดลงด้วยตัวหาร K เท่ากัน ประจุที่ผิวเกิดจากโพลาริเซชันซึ่งเป็นการจัดเรียงประจุใหม่ระดับจุลภาคในไดอิเล็กตริกเนื่องจากการวางตัวใหม่ของโมเลกุลแบบมีขั้วในสนามไฟฟ้าที่กระทำ หรือเกิดจากการเกิดโมเมนต์ขั้วคู่เหนี่ยวนำในวัสดุแบบไร้ขั้ว ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่แรงพอ ไดอิเล็กตริกจะกลายเป็นตัวนำ เราเรียกลักษณะนี้ว่าการเสียของไดอิเล็กตริก ขนาดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วัสดุทนได้โดยไม่เสียเรียกว่าความแรงไดอิเล็กตริก

ค่าความหนาแน่นพลังงาน u ในสนามไฟฟ้าในไดอิเล็กตริกคือ

$$u = \frac{1}{2} K\epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \epsilon E^2$$

สำหรับในไดอิเล็กตริกนั้นเราสามารถใช้อิทธิพลของเกาส์เข้ามาช่วยแก้ปัญหาได้ ซึ่งเราเขียนกฎของเกาส์ใหม่ได้ดังนี้

$$\oint \mathbf{K}\mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q_{\text{encl-free}}}{\epsilon_0}$$

โดยที่ $Q_{\text{encl-free}}$ คือประจุอิสระทั้งหมด (ไม่นับประจุยึดเหนี่ยว) ภายในผิวเกาส์เขียน [1]

2.2 ทฤษฎีอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน

อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน (Triboelectric nanogenerator; TENG) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม ด้วยการเปลี่ยนพลังงานเชิงกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยกระบวนการสร้างประจุจากการเสียดสี (Triboelectrification) และการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าสถิต อุปกรณ์นี้ถูกนำมาแสดงครั้งแรกใน ค.ศ. 2012 โดย Dr. Zhong Lin Wang และคณะแห่ง Georgia Institute of Technology ซึ่งอุปกรณ์นี้ถูกสร้างจากวัสดุพอลิเมอร์เกือบทั้งหมด โดย TENG ตัวแรกสร้างขึ้นโดยการประกอบ polyimide (Kapton) และ polyester (PET) เข้าด้วยกันแล้วเคลือบด้านหลังแผ่นพอลิเมอร์ทั้งสองด้วยตัวนำไฟฟ้าเช่น ทองคำ (ภาพที่ 2.3) โดยลักษณะพิเศษของอุปกรณ์นี้คือ ความต่างศักย์ที่สร้างขึ้นจะเกิดจากปรากฏการณ์สร้างประจุจากการเสียดสี (Triboelectrification) เนื่องจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของแผ่นพอลิเมอร์สองชนิดซึ่งมีสมบัติในการให้และรับอิเล็กตรอนที่แตกต่างกัน จากนั้นเมื่อทำการต่อวงจรเข้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายนอกหรือต่อเข้าหากันแบบครบวงจร จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งอยู่ด้านหลังของแผ่นพอลิเมอร์ทั้งสองเพื่อทำให้ความต่างศักย์เกิดความสมดุล ทั้งนี้ปรากฏการณ์สร้างประจุจากการเสียดสีนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและลักษณะพื้นผิวสัมผัสที่ใช้ในการเสียดสี สำหรับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการที่ใช้ในพัฒนา TENG ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นนั้น สามารถทำได้โดยการเลือกวัสดุในตาราง Triboelectric series (ภาพที่ 2.4), การปรับปรุงลักษณะทางสัณฐานของวัสดุ เช่น รูปแบบเส้น, ลูกบาศก์ หรือพีระมิด เป็นต้น เพื่อที่จะเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสที่ใช้ในการเสียดสีให้มากขึ้น ในกรณีที่ต่างกันออกไปพื้นผิวของวัสดุสามารถปรับปรุงได้ด้วยการใช้ท่อนาโน, ลวดนาโน, หรืออนุภาคนาโน ซึ่งเปลี่ยนค่า Permittivity ของวัสดุและช่วยในการขยายขอบเขตความเป็นประจุบวกหรือประจุลบของ Triboelectric series ได้ [2]



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทั่วไปของ TENG [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 Positive	Polyformaldehyde 1.3-1.4	(continued)	 Negative
	Etylcellulose	Polyester (Dacron)	
	Polyamide 11	Polyisobutylene	
	Polyamide 6-6	Polyurethane 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)	

ภาพที่ 2.4 Triboelectric series [2]

2.2.1 กลไกการทำงานของ TENG

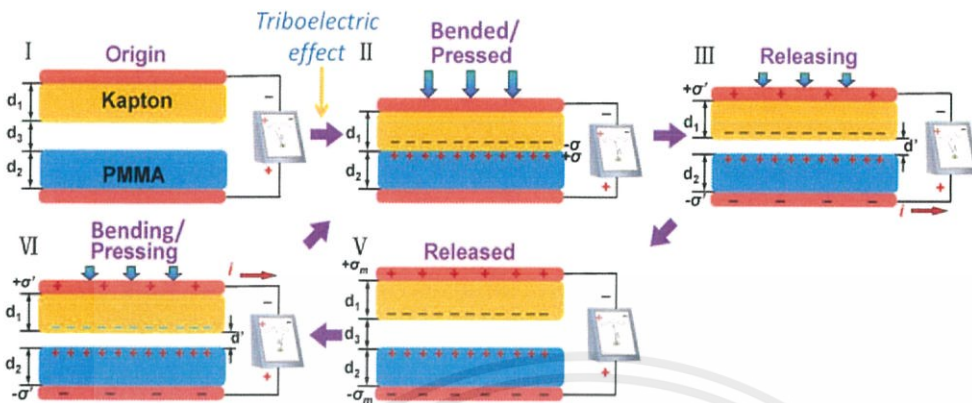
2.2.1.1 วิธีการสัมผัสและการแยกออกในแนวตั้ง (Vertical contact-separation mode)

กลไกการทำงานของ TENG สามารถอธิบายเป็นค่าความต่างศักย์ได้โดยการให้พอลิเมอร์สัมผัส (Contact) กัน แล้วแยกออกจากกัน (Separation) เมื่อให้แรงเชิงกลไปยังอุปกรณ์ด้วยการงอ (Bend) หรือกด (Press) พื้นผิวด้านในจะสัมผัสและเริ่มเกิดการถ่ายโอนของประจุ พื้นผิวด้านหนึ่งจะเป็นประจุบวก ส่วนอีกด้านเป็นประจุลบ เรียกว่า ปรากฏการณ์สร้างประจุจากการเสียดสี (triboelectrification หรือ triboelectric effect) เมื่อนำแรงเชิงกลออกไปหรือทำการปล่อยพื้นผิวทั้งสองจะแยกออกจากกัน และขั้วคู่ไฟฟ้าจะถูกสร้างขึ้นโดยประจุที่ได้จากการเสียดสีส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าและเกิดความต่างศักย์ที่แตกต่างกันที่ขั้วไฟฟ้าบนและล่าง โดยมีผลของระยะห่างระหว่างแผ่นพอลิเมอร์ ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงเกิดการไหลและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นจนกระทั่งความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทั้งสองกลับมาเท่ากันอีกครั้ง (ภาพที่ 2.5) เมื่อพอลิเมอร์ทั้งสองแผ่นถูกกดให้เคลื่อนเข้าหากันอีกรอบ จะส่งผลให้ขั้วคู่ไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองจะหายไปหรือลดขนาดลง เป็นผลให้อิเล็กตรอนไหลย้อนกลับจากขั้วไฟฟ้าด้านล่างสู่ด้านบน ซึ่งทำให้เกิดกระแสในทิศทางตรงข้าม เมื่อพื้นผิวสัมผัสกันแล้วประจุทั้งหมดจะกลายเป็นกลาง (Neutralized)

ขณะที่คู่วัสดุสัมผัสและสร้างประจุจากการเสียดสี วัสดุด้านหนึ่งจำเป็นจะต้องเป็นฉนวน เพราะประจุที่ถูกสร้างจากการเสียดสีนั้นจะยังไม่ไหล แต่ยังคงค้างอยู่ในพื้นผิวด้านในของฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

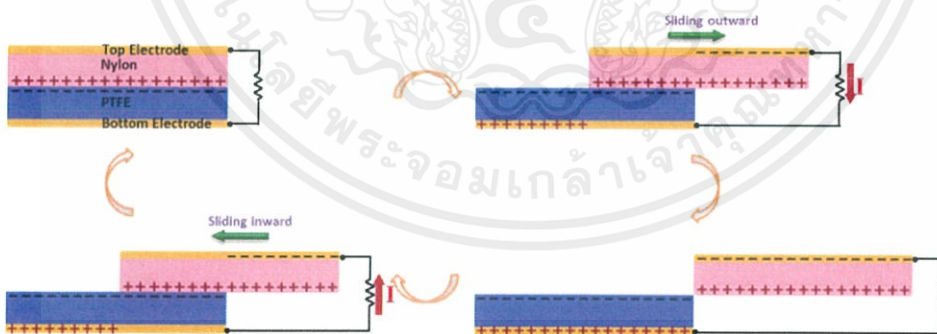
หลังจากนั้นเมื่อมีเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างขั้วประจุ ประจุที่ถูกสร้างขึ้นจากการเสียดสีจะสามารถเหนี่ยวนำการไหลของไฟฟ้ากระแสสลับผ่านวงจรภายนอกภายใต้ระยะทางที่เปลี่ยนเป็นช่วงๆได้



ภาพที่ 2.5 กลไกการทำงานของ TENG ด้วย Vertical contact-separation mode [2]

2.2.1.2 การสไลด์ด้านข้าง (Lateral sliding Mode)

กระบวนการเสียดสีมีหลักๆด้วยกันสองแบบคือ การสัมผัสธรรมดาจากแนวตั้งและการสไลด์ด้านข้าง แต่พื้นฐานของทั้งสองกระบวนการก็ยังคงใช้ปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าสถิตที่เหมือนกัน โดย TENG สามารถสไลด์ในระนาบระหว่างพื้นผิวในแนวนอน เมื่อเกิดการเสียดสีพื้นที่สัมผัสระหว่างพื้นผิวทั้งสองเปลี่ยนแปลงโดยจะค่อยๆ แยกออกจากกันทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า จากนั้นประจุจะถูกเหนี่ยวนำขึ้น ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 กลไกการทำงานของ TENG ด้วย Lateral sliding Mode [2]

ในสถานะเริ่มต้น พื้นผิวพอลิเมอร์ทั้งสองจะซ้อนทับกัน โดยมีสมบัติที่จะดึงดูดอิเล็กตรอนแตกต่างกัน พื้นผิวหนึ่งจะเป็นประจุบวก อีกด้านเป็นประจุลบที่มีความหนาแน่นเท่ากัน เนื่องจากประจุจากการเสียดสีบนฉนวนจะกระจายตัวอยู่เฉพาะที่พื้นผิวของฉนวนซึ่งมีสมบัติคล้ายกับกับดัก (trap) สำหรับกักขังประจุไฟฟ้าส่วนเกินไว้จึงทำให้ไม่เกิดการรั่วไหลออกไป ขณะที่พื้นผิวทั้งสองซ้อนทับกัน จะยังไม่มีกระแสระหว่างประจุบวกและประจุลบ แต่จะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นเพียงเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเมื่อพอลิเมอร์ด้านบนซึ่งมีประจุบวกถูกสไลด์ออกไป การแยกของประจุเกิดขึ้นเนื่องจากพื้นที่สัมผัสลดลง การแยกของประจุจะสร้างสนามไฟฟ้าจากขวาไปซ้ายที่เกือบจะขนานกับตัวอย่าง มีการเหนี่ยวนำให้เกิดความต่างศักย์สูงที่ขั้วไฟฟ้าด้านบน ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้านี้จะผลักดันให้กระแสไหลจากขั้วไฟฟ้าด้านบนไปขั้วไฟฟ้าด้านล่างจนกระทั่งความต่างศักย์ไฟฟ้าหายไป ระยะแนวตั้งระหว่างชั้นขั้วไฟฟ้าและชั้นพื้นผิวพอลิเมอร์ที่เกิดประจุที่สร้างจากการเสียดสีจะมีค่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับระยะการแยกในแนวนอน ดังนั้นปริมาณของการถ่ายโอนประจุบนขั้วไฟฟ้าจึงมีค่าประมาณปริมาณของประจุที่เกิดจากการแยก กระแสจะไหลต่อเนื่องจนกระทั่งกระบวนการสไลด์ ประจุที่เกิดจากการแยกจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งด้านบนสไลด์ออกไปจากด้านล่างจนหมดและประจุไทรโบบนพื้นผิวถูกแยกทั้งหมด ต่อจากนั้น เมื่อแผ่นบนสไลด์กลับ ประจุที่ถูกถ่ายโอนบนขั้วไฟฟ้าจะไหลกลับผ่านวงจรภายนอกด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส เพื่อให้เกิดสมดุลทางไฟฟ้า ทำให้เกิดการไหลของกระแสจากขั้วไฟฟ้าด้านล่างไปยังขั้วไฟฟ้าด้านบน แล้วพอลิเมอร์สองแผ่นจะมาซ้อนทับกันอีกครั้ง พื้นผิวสัมผัสกันเต็มที่จึงไม่มีการถ่ายโอนบนขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์จะกลับสู่สถานะแรกเริ่ม ในกระบวนการสไลด์ออกและเข้ามีความสมมาตร ดังนั้นคาดว่าจะเกิดสัญญาณกระแสสลับที่เป็นคู่สมมาตรกัน [2]

2.2.2 การประยุกต์ใช้

พลังงานไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจาก TENG ภายใต้แรงเชิงกลสามารถประยุกต์ใช้กับการเคลื่อนไหวได้มากมาย ดังต่อไปนี้

ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าในตัวเอง (Self-powered systems)

เป็นหนึ่งในการประยุกต์ใช้ที่สำคัญในการใช้ TENG เป็นแหล่งพลังงานสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าอิสระ TEG สามารถใช้เป็นพลังงานของอุปกรณ์พกพาได้โดยตรงหรือผลิตไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งควบคุมโดยเรกติฟายเออร์และอุปกรณ์เก็บพลังงาน และพลังงานถูกเก็บในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป เช่น supercapacitor

พลังงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนบุคคล (Power of personal electronics)

ตั้งแต่พลังงานเชิงกลถูกสร้างได้จากร่างกายของมนุษย์ในชีวิตประจำวัน เราสามารถใช้ TENG เปลี่ยนพลังงานเชิงกลเป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อที่จะชาร์จอุปกรณ์ส่วนบุคคล เช่น โทรศัพท์มือถือ แท็บเล็ต ถือว่าเป็นการพัฒนาคุณภาพชีวิตของมนุษย์ให้ดีขึ้น

เซนเซอร์วัดแรงดัน (Active (self-powered) pressure sensor)

TENG สามารถตอบสนองต่อแรงดันต่ำๆได้และมีความไวสูง (High sensitivity) [2]

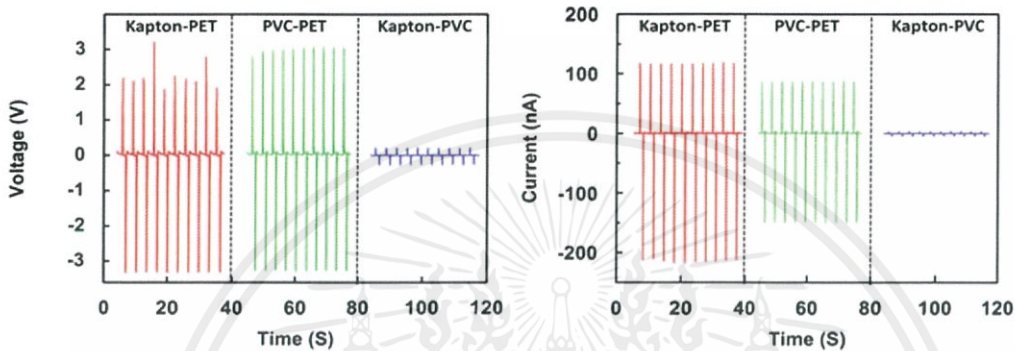
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อ TENG

2.2.3.1 การเลือกวัสดุและโครงสร้างพื้นผิว

วัสดุเกือบทุกชนิดแสดงสมบัติการเกิดปรากฏการณ์ Triboelectric effect ได้ อย่างไรก็ตามความสามารถในการได้รับ/ให้อิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับความถี่ของวัสดุ จอห์น คาร์ล วิลค์ได้เผยแพร่ Triboelectric series ในปี ค.ศ. 1757 วัสดุด้านล่างของตารางเมื่อสัมผัสกับวัสดุด้านบนของตารางจะมีแนวโน้มเป็นประจุลบมาก นอกจากการเลือกวัสดุใน Triboelectric series ลักษณะบนพื้นผิวสามารถถูกปรับปรุงด้วยเทคนิคทางกายภาพ เช่น การสร้างลวดลายระดับไมโครหรือนาโน เป็นต้น ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

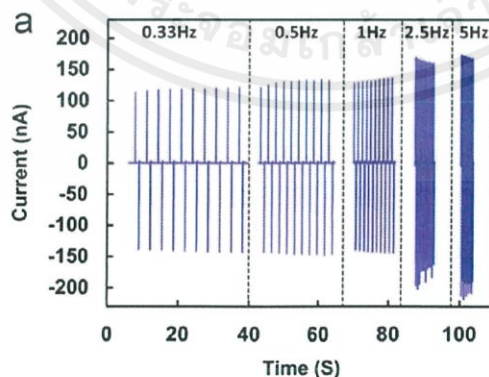
จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส พื้นผิวของวัสดุถูกปรับปรุงด้วยโมเลกุลต่างๆ เช่น ท่อนาโนคาร์บอน, ลวดนาโนหรืออนุภาคนาโน เพื่อเพิ่มการเกิดประจุจากการเสียดสี พื้นที่ผิวที่ถูกปรับปรุงสามารถเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าของพื้นผิว โครงสร้างพื้นผิวสามารถเปลี่ยนลักษณะการสัมผัส ซึ่งอาจจะเพิ่มการสร้างประจุจากการเสียดสีให้มากขึ้นได้ นอกจากนี้ วัสดุเนื้อเดียวสามารถเปลี่ยนเป็นวัสดุคอมโพสิต ซึ่งอาจจะเปลี่ยนการเกิดการสร้างประจุจากการเสียดสีบนพื้นผิวของวัสดุ ดังนั้น มีหลายวิธีในการเพิ่มประสิทธิภาพของ TENG จากวัสดุ ซึ่งเป็นความท้าทายใหม่ที่นักวิทยาศาสตร์จะต้องทำการศึกษาต่อไป



ภาพที่ 2.7 แสดงผลของการเลือกวัสดุต่อสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนไป

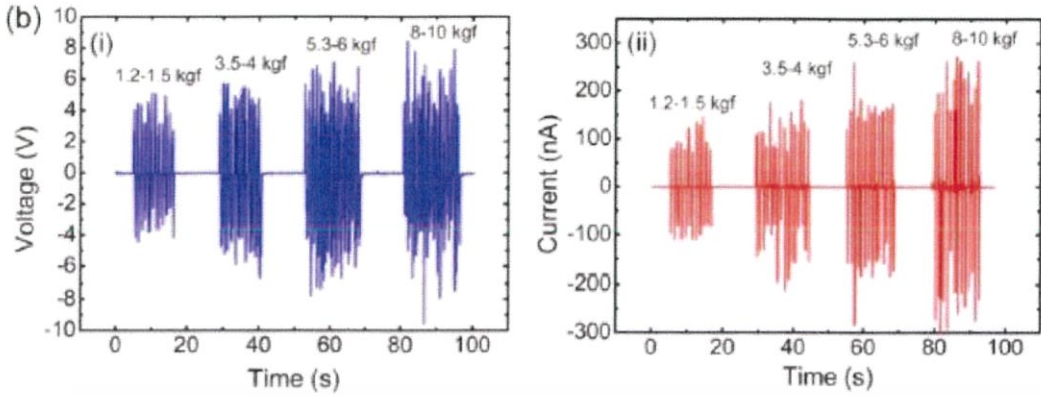
2.2.3.2 ผลของความถี่และแรง

ในการให้แรงกระทำต่อ TENG ด้วยการโค้งงอหรือการกดหลายๆรอบ เมื่อความถี่ในการให้แรงเพิ่มขึ้น สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากภายใต้ความถี่สูง ประจุบวกและประจุลบที่เกิดขึ้นที่พอลิเมอร์ยังไม่กลายเป็นกลางทางไฟฟ้า ทำให้เกิดการสะสมของประจุไฟฟ้าที่คงค้างบนขั้วไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อให้แรงกระทำมากขึ้น สัญญาณเอาต์พุตก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากทำให้เกิดการเสียดสีของพื้นผิววัสดุมากขึ้น [4]



ภาพที่ 2.8 แสดงผลของความถี่ต่อสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนไป [4]

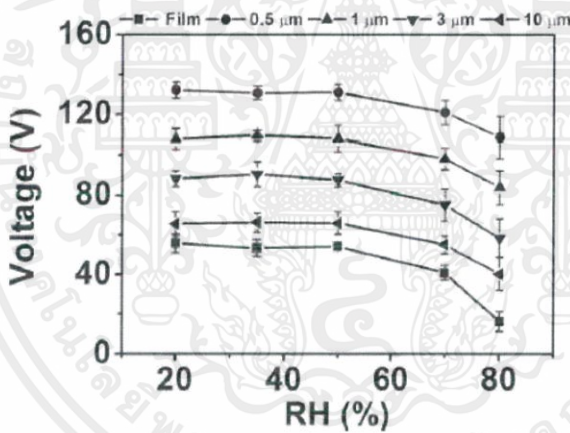
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.9 แสดงผลของแรงที่กระทำต่อสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนไป [4]

2.2.3.3 ความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นในบรรยากาศทำให้วัสดุกลายเป็น Antistatic ซึ่งลดการเกิดประจุจากโทรโบอิเล็กทริก ยิ่งความชื้นมาก ประสิทธิภาพของ TEG จะน้อยลง



ภาพที่ 2.10 แสดงผลของความชื้นต่อสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนไป [5]

2.2.3.4 การเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้า

แรงเชิงกลที่กระทำกับพอลิเมอร์ทำให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าบนและขั้วไฟฟาล่างลดลง ถ้าความจุไฟฟ้าเท่ากับ C และ V คือ ความต่างศักย์ที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง กระแสที่เกิดขึ้นดังสมการ

$$I = C \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial t}$$

พจน์แรกของสมการคือ การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากประจุไฟฟ้าสถิตที่ถูกเหนี่ยวนำพจน์ที่สอง คือการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสองขั้วอิเล็กโทรด ขณะที่ได้รับแรงกระทำ

2.2.3.5 ค่าฟังก์ชันงาน (Work function)

ค่าความแตกต่างของ Work function ระหว่างวัสดุสองชนิดสามารถเปลี่ยนความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวได้ เมื่อค่าความแตกต่างของ Work function เพิ่มขึ้น การเพิ่มสัญญาณเอาต์พุตของ TENG ก็เพิ่มขึ้น [f] สำหรับปัจจัยข้อนี้จะสอดคล้องกับปัจจัยการเลือกวัสดุใน (ข้อ 2.2.3.1)

2.3 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube; CNT)

CNT คือ วัสดุที่มีรูปร่างเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตรที่มีความยาวโดดเด่นออกไปในหนึ่งมิติ (1D nanomaterial) อะตอมในโครงสร้างอยู่ที่ผิวทั้งหมด ทำให้มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูง เนื่องจากอะตอมที่ผิวสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมรอบตัวได้ทุกอะตอมเกิดจากการม้วนให้มีรูปร่างเป็นท่อของแผ่นแกรฟีน (โครงสร้างวงแหวน 6 เหลี่ยมของคาร์บอนมาเรียงต่อกันในระนาบเดียวกันมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบแบน) [7] ผนังท่ออาจมีเพียงแค่ชั้นเดียว (Single-walled) หรือหลายชั้น (Multi-walled) ดังภาพที่ 2.13 ซึ่งประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุคาร์บอนเพียงธาตุเดียว ค้นพบครั้งแรกเมื่อปี 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อ Sumio Iijima ปัจจุบันพบว่าสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น ทำเส้นใยเสริมความแข็งแรงในวัสดุคอมโพสิต ทำอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มกำลังไฟและอายุการใช้งานในแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุ เป็นต้น CNT มีโครงสร้างและสมบัติหลากหลายซึ่งขึ้นกับวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ [8]

2.3.1 สมบัติเด่นของ CNT

(1) การนำไฟฟ้าขึ้นกับโครงสร้าง

CNT จะมีทั้งที่เป็นชั้นเดียว และหลายชั้น ในกรณีที่มีหลายชั้น แรงระหว่างชั้นของท่อนาโนคาร์บอนจะยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ CNT เป็นวัสดุนาโนที่อิเล็กตรอนถูกกักบริเวณให้เคลื่อนที่ได้ในทิศทางตามความยาวของท่อนาโนในทิศทางเดียว และระยะอิสระเฉลี่ย (Mean free path) ของอิเล็กตรอนมีค่าใกล้เคียงกับขนาดของท่อนาโนทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่ไม่มีความต้านทาน ไม่มีการชนกันของอิเล็กตรอนหรือที่เรียกว่าการนำไฟฟ้าแบบบัลลิสติก (Ballistic conduction) จึงนำมาใช้เป็นวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อลดความต้านทาน หรือความร้อนที่เกิดจากความต้านทานในวงจรได้ CNT มีโครงสร้างเป็นแผ่นแกรไฟต์ม้วนเป็นท่อไร้ตะเข็บ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้หลายขนาด มีรูปแบบการเรียงตัวของหกเหลี่ยมเทียบกับแนวเส้นรอบวงของท่อได้ 3 แบบ ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดเวกเตอร์ Ch (Chiral vector) ที่มีทิศตั้งฉากกับแกนท่อและมีขนาดเท่ากับเส้นรอบวงพอดีเพื่อกำหนดแทนโครงสร้างของท่อ เวกเตอร์ a_1 และ a_2 มีขนาดเท่ากันคือ 0.246 นาโนเมตร ทำมุมต่อกัน 60 องศา ส่วน $Ch = na_1 + ma_2$ หรือเขียนอย่างย่อคือ (n,m) เมื่อ n และ m คือจำนวนเต็ม มีทิศตามแนวเส้นประ (ดูรูปด้านขวา) และมีขนาดเท่ากับ $0.246 \times (n^2 + nm + m^2)^{1/2}$ นาโนเมตร การม้วน Ch เป็นเส้นรอบวงโดยให้ตำแหน่งปลายลูกศร (n,m) ซ้อนทับกับตำแหน่งเริ่มต้น $(0,0)$ พอดี จะได้ลักษณะท่อ 3 แบบ คือ (1) Armchair (n,n) และมี $\theta = 30^\circ$, (2) Chiral (n,m) โดยที่ $0 > \theta < 30^\circ$ และ (3) Zigzag $(n,0)$ มี $\theta = 0^\circ$ ถ้าหาก $(n-m)$ หารด้วย 3 ลงตัว ได้ท่อที่นำไฟฟ้าแบบโลหะ (Metallic type) แต่ถ้าเหลือเศษ 1 หรือ 2 ได้ท่อที่นำไฟฟ้าแบบกึ่งตัวนำ (Semiconducting type) ดังนั้นในจำนวน $1/3$ ของโครงสร้างที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะนำไฟฟ้าได้ดีแบบโลหะ และที่เหลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีก 2/3 นำไฟฟ้าแบบกึ่งตัวนำ หากพิจารณาเฉพาะโครงสร้างแบบ Armchair หรือเฉพาะกรณีที่ $n=m$ จะได้ท่อทุกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนำไฟฟ้าแบบโลหะ [9]

(2) น้ำหนักเบาแต่แข็งแรง

CNT มีน้ำหนักเบา แต่ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ของ CNT สูงกว่าเหล็กกล้าหลายเท่า ดังตารางที่ 2.2 โดย tensile strength ของ CNT จะมีค่าสูงมากในทิศทางตามความยาว เนื่องจาก CNT เป็นวัสดุนาโนแบบ 1 มิติ ที่มีความยาวด้านหนึ่งยืดยาวออกไปประกอบกับ CNT เกิดจากการสร้างด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรงที่สุด [7]

(3) มีความยืดหยุ่นสูง

เมื่อปล่อยแรงกระทำ เช่นแรงยืดหรือแรงอัดแล้ว สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ดังตารางที่

2.1

ตารางที่ 2.1 ความแข็งแรงของ CNT เทียบกับวัสดุอื่น

วัสดุ	ค่าโมดูลัสของยัง (GPa)	ค่าความต้านทานแรงดึง (GPa)	ค่าความหนาแน่น (GPa)
SWNTs	1054	150	1.33
MWNTs	1200	150	2.6
Steel	208	0.4	7.8
Epoxy	3.5	0.005	1.25
Wood	16	0.008	0.6

2.3.2 ตัวอย่างการประยุกต์

CNT สามารถนำไปประยุกต์ในหลายๆ ด้าน เช่น หัวจ่ายอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุผสมพลาสติกให้นำไฟฟ้า ตัวกักเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจน ตัวผสมกาวต่อเชื่อมชนิดนำไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ระดับโมเลกุล หัววัดแก๊ส หัววัด AFM หัววัดอิเล็กทรอนิกส์ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมในโทรศัพท์มือถือ วัสดุถ่ายเทความร้อน วัสดุเสริมความแข็งแรงในนาโนคอมโพสิต เส้นใยและสิ่งทอ ตัวรองรับคะตะลิสต์ และการประยุกต์ทาง Biomedical เป็นต้น [9]

2.4 เส้นลวดนาโนซิลิกอน

โครงสร้างเส้นลวดนาโนซิลิกอน หรือ Silicon nanowires (SiNWs) คือโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic Semiconductor) ที่มีลักษณะเป็นเส้นลวดมีเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร แต่มีความยาวที่มากถึงระดับไมโครเมตร กล่าวคือมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่สูงมาก (High aspect ratio, อยู่ในช่วงตั้งแต่ 100 ขึ้นไป) จากลักษณะทางกายภาพดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างของเส้นลวดนาโนซิลิกอนนั้นมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่ค่อนข้างสูงจึงมีสมบัติที่ดีในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านที่ต้องการพื้นที่ผิวสูง นอกจากนี้ โครงสร้างเส้นลวดนาโนซิลิกอนยังสามารถสร้างโครงสร้างแบบผสมกับวัสดุชนิดอื่นๆ ได้ดีอีกด้วย (Heterostructure) เช่น ในการประยุกต์ใช้งานเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) ในการใช้พื้นที่ผิวช่วยในการรับแสง และมีรอยต่อกับวัสดุชนิดอื่นในการเพิ่มปริมาณพาหะนำไฟฟ้าจากกระตุ้นด้วยแสง, อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซ (Gas sensor) ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มพื้นที่ผิวให้กับวัสดุตรวจจับโดยการเคลือบบนพื้นผิวของเส้นลวดนาโนซิลิกอนในการตรวจวัดก๊าซ เป็นต้น

นอกจากสมบัติทางกายภาพของเส้นลวดนาโนซิลิกอนที่ดีที่ทำให้เกิดการนำเอาเส้นลวดนาโนซิลิกอนไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางแล้ว เส้นลวดนาโนซิลิกอนยังมีสมบัติทางไฟฟ้าและความเป็นผลึกที่สูง (High Crystallinity) ทำให้มีสภาพคล่องของพาหะนำไฟฟ้า (Mobility) ที่ดี มีช่องว่างของแถบพลังงานที่ต่ำ (Low energy band gap) ประมาณ 1.1 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ทำให้เกิดการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์เช่น อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ (Transistor), เป็นต้น

เมื่อพิจารณาถึงสมบัติและข้อดีของโครงสร้างเส้นลวดนาโนซิลิกอนแล้ว การพิจารณาถึงต้นทุนของวัสดุในการเลือกนำมาประยุกต์ใช้งานยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ซิลิกอนเป็นวัสดุที่มีการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่าย มีราคาถูก คือพวกวัสดุกลุ่มซิลิกา (Silica, SiO₂) เช่น ทราย และมีกระบวนการในการสร้างโครงสร้างซิลิกอนที่มีความเป็นผลึกสูงได้เช่น กระบวนการ Czochralski เมื่อจะนำมาใช้งานจะมีการทำให้อยู่ในรูปของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ (Silicon wafer) [10]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการที่ใช้ในการเตรียมขั้วลบ การตรวจสอบสมบัติต่างๆของขั้วลบ ตลอดจนการนำขั้วลบมาสร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดสี เพื่อทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าและเครื่องควบคุมการให้แรง โดยในการสร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดสีจะต้องประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิดโดยพอลิเมอร์ที่มีความเป็นบวกคือพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate; PET) และพอลิเมอร์ที่มีความเป็นลบคือพอลิไดเมทิลไซโลเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS) โดยมีอินเดียมทินออกไซด์ (Indium tin oxide; ITO) เป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาผลของท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube; CNT) ที่คอมโพสิตกับPDMS และผลของการลอกหลุดลายจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอน ซึ่งมีผลต่อสมบัติของTENG

3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องมือมาตรฐานการทดสอบประสิทธิภาพ TENG

เครื่องมือมาตรฐานการทดสอบประสิทธิภาพ TENG เป็นระบบควบคุมการให้แรงของ TENG ประกอบไปด้วย

- (1) กระจกอลูมิเนียม
- (2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino
- (3) แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply)
- (4) ปีมล

โดยสามารถควบคุมความถี่ในการให้แรงได้ในขอบเขตความถี่ 0.33- 12 เฮิร์ตและสามารถสร้างแรงกดได้ถึง 140 N

3.2 การเตรียม PDMS/CNT NW array โดยใช้แม่แบบลวดนาโนของซิลิกอน

3.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- (1) แผ่นพลาสติกใสที่เคลือบสารนำไฟฟ้า (PET/ITO)
- (2) พอลิไดเมทิลไซโลเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS) และสารที่ทำให้แข็งตัว (Curing agent)
- (3) สารละลายเฮกเซน
- (4) ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotube; MWNT)
- (5) กระดาษขาว
- (6) แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ ชนิดพี ระนาบผลึก (100)
- (7) สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide, H_2O_2)
- (8) สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid, HF)
- (9) น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water, DI water)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (10) สายไฟทองแดง
- (11) ตะกั่ว
- (12) เครื่องออกซิเจนพลาสมา
- (13) โถดูดความชื้น
- (14) เครื่องซังน้ำหนักสาร
- (15) เตาอบ
- (16) เครื่องดีซีสปีดเตอรืงสำหรับเคลือบผิวตัวอย่าง (DC Sputtering Coater)
- (17) บีกเกอร์และขวดพลาสติกเพฟลอน
- (18) เครื่องสปินโคทเตอร์ (Spin Coater)
- (19) เครื่องล้างความถี่เหนือเสียง (Ultrasonic cleaner) และเครื่องปั่นกวนด้วยแม่เหล็ก

3.2.2 การเตรียมขั้ว PDMS

- (1) ผสม PDMS ต่อ Curing agent ในอัตราส่วน 10:1 โดยน้ำหนัก ให้เข้ากัน
- (2) นำไปวางในเครื่องดูดความชื้น เพื่อไล่ฟองอากาศ
- (3) เคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนด้วยเครื่องสปินโคทเตอร์ที่ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 1 นาที
- (4) นำตัวอย่างที่ไปอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- (5) ลอก PDMS ที่แข็งตัวออกมาประกบติดกับ PET/ITO โดยใช้ออกซิเจนพลาสมาที่เงื่อนไขเวลา 3 นาที

3.2.3 การเตรียมขั้วคอมโพสิตของ PDMS และ CNT (PDMS/CNT)

- (1) นำ CNT ไปพริตเมนต์พื้นผิวด้วยเทคนิคออกซิเจนพลาสมา ที่ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที ตามลำดับ
- (2) เตรียมสารละลาย CNT โดยใช้ตัวทำละลายเฮกเซน ที่ความเข้มข้นในอัตราส่วน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- (3) เตรียมคอมโพสิต PDMS/CNT โดยการเทสารละลาย CNT ผสมกับ PDMS ที่เตรียมจากข้อ 3.2.2 (1)
- (4) เคลือบ PDMS/CNT ลงบนแผ่นซิลิกอนด้วยเครื่องสปินโคทเตอร์ที่ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 1 นาที
- (5) นำตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- (6) ลอกแผ่นคอมโพสิต PDMS/CNT ที่แข็งตัวออกมาประกบติดกับ PET/ITO ด้วยวิธีออกซิเจนพลาสมาที่เงื่อนไขเวลา 3 นาที

3.2.4 การเตรียมแม่แบบลวดนาโนซิลิกอน

- (1) เตรียมแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนโดยอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์เรื่อง "การสร้างโครงสร้างนาโนของซิลิกอนด้วยกระบวนการกัดทางเคมีโดยใช้โลหะช่วยในการทำปฏิกิริยา" ของนายชินธัญย์ ปิ่นมิ่ง ปีการศึกษา 2558 โดยมีขั้นตอนในการทำดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (1.1) ทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนด้วยเครื่องล้างความถี่เหนือเสียง (Ultrasonic cleaner)
- (1.2) เคลือบฟิล์มโลหะทองด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงที่ความหนา 3 นาโนเมตร
- (1.3) เตรียมสารละลายกัดกร่อนระหว่างกรดไฮโดรฟลูออริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในอัตราส่วน 4.8 ต่อ 1.2 โมลาร์
- (1.4) แช่แผ่นซิลิกอนที่เคลือบโลหะทองแล้ว ลงในสารละลายกัดกร่อน
- (1.5) ควบคุมความยาวของลวดนาโนซิลิกอน โดยการควบคุมเวลาในการกัดกร่อนที่ 10, 15 และ 20 นาที
- (2) ศึกษาลักษณะพื้นฐานของแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.2.5 การเตรียมอาร์เรย์ลวดนาโนคอมโพสิต PDMS/CNT จากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอน

- (1) เตรียมสารละลายสำหรับคอมโพสิต PDMS/CNT อ้างอิงจากข้อ 3.2.3
- (2) เตรียมแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนโดยอ้างอิงจากข้อ 3.2.4
- (3) เคลือบคอมโพสิต PDMS/CNT ลงบนแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนด้วยเครื่องสปินโคทเตอร์ที่ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 1 นาที
- (4) นำตัวอย่างที่เคลือบแล้วเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
- (5) ลอกแผ่นอาร์เรย์ลวดนาโนของคอมโพสิต PDMS/CNT ที่แข็งตัวออกมาประกบติดกับ PET/ITO ด้วยวิธีออกซิเจนพลาสมาที่เงื่อนไขเวลา 3 นาที

3.3 การตรวจวิเคราะห์สมบัติของขั้วลวด

3.3.1 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิต PDMS/CNT ที่เงื่อนไขที่แตกต่างกันด้วยการวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด (Four-point probe) และด้วยเครื่องจ่ายและวัดศักย์ทางไฟฟ้ายี่ห้อ Keithley รุ่น 2410 ในการวัดค่าจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า (I-V) จากกราฟ I-V สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (ρ) ได้ดังนี้

- (1) ค่าความชัน (m) ของกราฟ I-V
- (2) แทนค่า m ในสมการที่ 3.1

$$\rho = \frac{1}{m} \times 4.532 \times w \quad [\Omega \cdot \text{cm}] \quad (3.1)$$

โดย w คือ ความหนาของคอมโพสิต PDMS/CNT ที่วัดได้จากไมโครมิเตอร์ หน่วยคือ เซนติเมตร (cm) และค่าคงที่ 4.532 คำนวณจากค่า $2\pi s$ เมื่อ s คือค่าระยะห่างเข็มวัด ซึ่งในที่นี้มีค่า 0.722 เซนติเมตร

3.3.2 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของอาร์เรย์ลวดนาโน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของอาร์เรย์ลวดนาโนซิลิกอนและอาร์เรย์ลวดนาโนคอมโพสิต PDMS/CNT ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope; FE-SEM) พร้อมด้วยเครื่องมือวัดธาตุเชิงปริมาณ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDS) (FEI, Versa 3D)

3.4 การสร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน

สร้างขั้วลบของ TENG โดยนำแผ่นอาร์เรย์ลวดนาโนคอมโพสิตของ PDMS/CNT ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.4 มาประกบติดกับ PET/ITO ด้วยวิธีการออกซิเจนพลาสมา จากนั้นสร้างขั้วบวกของ TENG โดยเตรียมจาก PET/ITO แล้วนำขั้วบวกและขั้วลบมาประกบเข้าด้วยกัน แล้วติดเทปทองแดงลงบนด้าน ITO ของแต่ละขั้ว จากนั้นต่อสายลวดทองแดงด้วยตะกั่วเข้ากับเทปทองแดง

3.5 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดสี

ประกอบ TENG เข้ากับเครื่องควบคุมการให้แรงโดยเครื่องสามารถให้แรงในช่วงความถี่ 0.33-12 เฮิร์ต เมื่อแรงภายนอกจากเครื่องให้แรงกระทำต่อ TENG แล้ว เครื่องออสซิลโลสโคปจะวัดค่าต่างๆดังต่อไปนี้

- (1) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลา
- (2) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา

ซึ่งในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าจะนำตัวต้านทานต่ออนุกรมเข้ากับ TENG แล้ววัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม และแปลงกลับเป็นค่ากระแสไฟฟ้าตามกฎของโอห์ม โดยการวัดข้อ 3.5(1) และ 3.5(2) จะมีการต่อวงจร 2 แบบ คือ การต่อแบบฟอร์เวิร์ดสแกน เป็นการต่อขั้วบวกของอุปกรณ์เข้ากับขั้วบวกเครื่องมือวัด ซึ่งการต่อแบบรีเวิร์ดสแกนจะต่อแบบสลับขั้ว

- (3) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและค่าความต้านทานต่างๆ

โดยนำตัวต้านทานมาต่ออนุกรมกับ TENG และวัดค่าความต่างศักย์และค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จากนั้นคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า (P) โดยนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้ามาคูณกัน ดังสมการที่ 3.2

$$P = VI \quad (3.2)$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทที่ 4 นี้ จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยแบ่งเป็นการทดลองเป็น 3 การทดลอง คือ

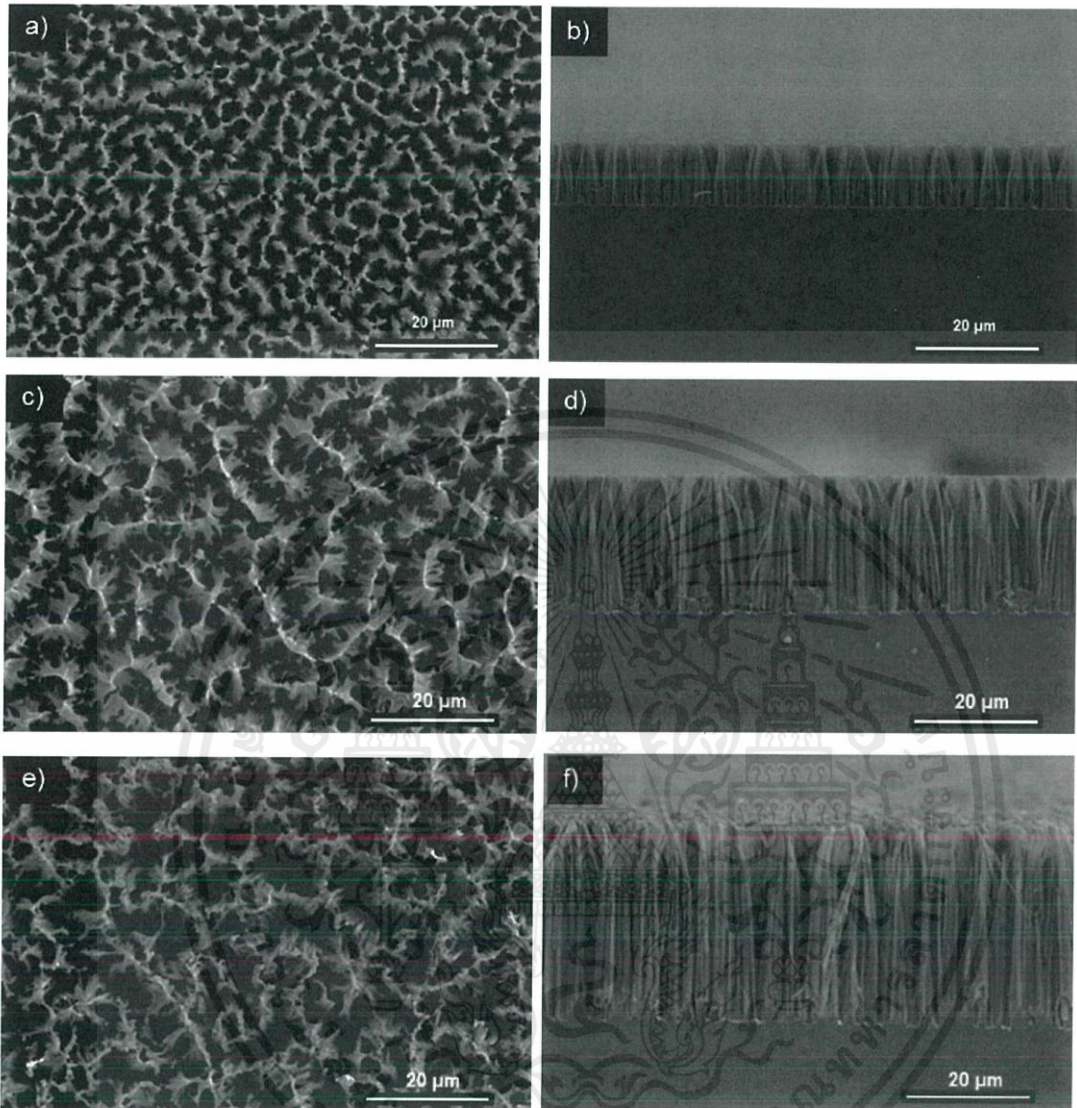
- การศึกษาสมบัติของขั้วคอมโพสิตที่ทำการหล่อแบบจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เตรียมจากเงื่อนไขเวลาการกักทางเคมีที่แตกต่างกัน
 - การศึกษาสมบัติของ TENG โดยใช้ขั้วอาร์เรย์ลวดนาโนของคอมโพสิตระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและ PDMS (PDMS/CNT NW arrays)
 - การศึกษาสมบัติของ TENG โดยใช้ขั้วที่เตรียมได้จากแม่แบบอื่นๆ
- มีรายละเอียดผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองทั้ง 3 การทดลองดังนี้

4.1 สมบัติของขั้วคอมโพสิตที่ทำการหล่อแบบจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอน

4.1.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เวลาการกักทางเคมีต่างๆ

เมื่อนำแผ่นซิลิกอนที่มีฟิล์มโลหะทองที่ค่าความหนา 3 นาโนเมตร มาช่วยในการทำปฏิกิริยากัดทางเคมีของแผ่นซิลิกอน โดยใช้สารละลายกัดกร่อนที่อัตราส่วนความเข้มข้นกรดไฮโดรฟลูออริกที่ 4.8 โมลาร์ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 1.2 โมลาร์ ($p(0.8)^{4.8}$) ซึ่งการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากัดทางเคมี พบว่าให้เวลาการกักทางเคมีมีผลต่อโครงสร้างของลวดนาโนซิลิกอน ภาพที่ 4.1 แสดงภาพ FE-SEM ของลวดนาโนซิลิกอน หลังจากการกักที่เวลาต่างๆ

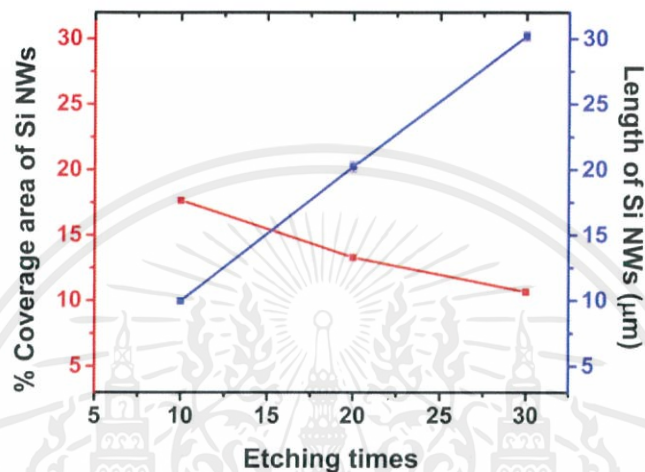
การกักทางเคมีใช้เวลา 10 20 และ 30 นาที ต่างให้โครงสร้างลวดนาโนซิลิกอนที่มีความเป็นระเบียบตลอดช่วงความลึกของการกักทางเคมี โดยมีช่วงความกว้างของขอลวดนาโนและความลึกเฉลี่ยที่แตกต่างกัน โดยเมื่อเวลานานขึ้น จะมีความกว้างของขอลวดนาโนที่มากขึ้น และมีความลึกที่มากขึ้น โดยเวลา 10 นาที มีช่วงความกว้างของขอลวดนาโนและความลึกเฉลี่ยประมาณ 5.11 ± 0.65 และ 9.96 ± 0.05 ไมโครเมตรตามลำดับ เวลา 20 นาที มีช่วงความกว้างของขอลวดนาโนและความลึกเฉลี่ยประมาณ 7.79 ± 0.93 และ 20.23 ± 0.4 ไมโครเมตรตามลำดับ และที่เวลา 30 นาที มีช่วงความกว้างของขอลวดนาโนและความลึกเฉลี่ยประมาณ 10.92 ± 1.84 และ 30.19 ± 0.37 ไมโครเมตรตามลำดับ



ภาพที่ 4.1 ภาพ FE-SEM ด้านบนและภาพตัดขวาง แสดงโครงสร้างที่ได้จากการกั้ดทางเคมีโดยใช้โลหะทองที่ความหนา 3 นาโนเมตร ช่วยในการทำปฏิกิริยา และใช้สารละลายกั้ดกร่อนที่ $p(0.8)^{4,8}$ ที่เวลาการกั้ดทางเคมี (a), (b) 10 นาที (c), (d) 20 นาที และ (e), (f) 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ จากภาพถ่าย FE-SEM สามารถนำมาวิเคราะห์พื้นที่ปกคลุมของเส้นลวดนาโนบริเวณผิวหน้าแผ่นซิลิกอนโดยใช้โปรแกรม ImageJ processing ในโหมด Threshold จากภาพถ่าย FE-SEM ด้านบน (Top view) ภาพที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์พื้นที่ปกคลุมของลวดนาโนซิลิกอน (Coverage area of Si NWs) และความยาวของเส้นลวดนาโนซิลิกอน (Length of Si NWs) กับเวลาที่ใช้ในการกัดทางเคมี (Etching time) โดยใช้สารละลายกัดกร่อน $\rho(0.8)^{4,8}$

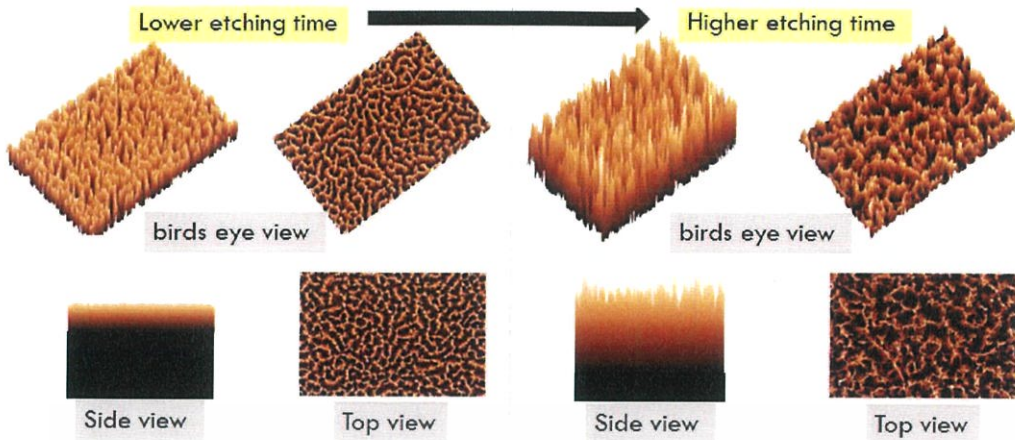


ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์พื้นที่ปกคลุมของเส้นลวดนาโนซิลิกอน (% Coverage area of Si NWs), ความยาวของเส้นลวดนาโนซิลิกอน (Length of Si NWs) กับเวลาที่ใช้ในการกัดทางเคมี (Etching time)

จากภาพที่ 4.2 พบว่าเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาการกัดทางเคมีนานมากขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์พื้นที่ปกคลุมของเส้นลวดนาโนซิลิกอนมีค่าลดลงโดยลดลงจาก 17.66% จนเหลือ 10.66% และความยาวของเส้นลวดนาโนซิลิกอนมีค่าสูงขึ้นจาก 9.96 ถึง 30.19 ไมโครเมตรตามลำดับ

จากข้อมูลที่ได้จากภาพที่ 4.1 และ 4.2 สามารถนำมาสร้างภาพจำลองลักษณะของโครงสร้างเส้นลวดนาโนซิลิกอนที่เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4.3

จากภาพที่ 4.3 จะเห็นว่าที่เวลาที่ใช้ในการกัดทางเคมีที่สั้น ความยาวของลวดนาโนซิลิกอนจะค่อนข้างสั้นและมีความหนาแน่นของลวดนาโนซิลิกอนที่ค่อนข้างสูงโดยสามารถพิจารณาได้เปอร์เซ็นต์พื้นที่ปกคลุมที่มีค่าสูงเนื่องจากซิลิกอนยังถูกกัดลงไปไม่มาก เมื่อเวลาที่ใช้กัดกร่อนนานขึ้นความยาวของลวดนาโนซิลิกอนจะสูงมากขึ้นแต่ความหนาแน่นของลวดนาโนซิลิกอนจะลดลงเนื่องจากซิลิกอนถูกกัดกร่อนมากขึ้น



ภาพที่ 4.3 ภาพจำลองโครงสร้าง, พื้นที่ปกคลุมและความยาวของเส้นลวดนาโนซิลิกอนกับเวลาที่ใช้ในการกัดทางเคมี (Etching time)

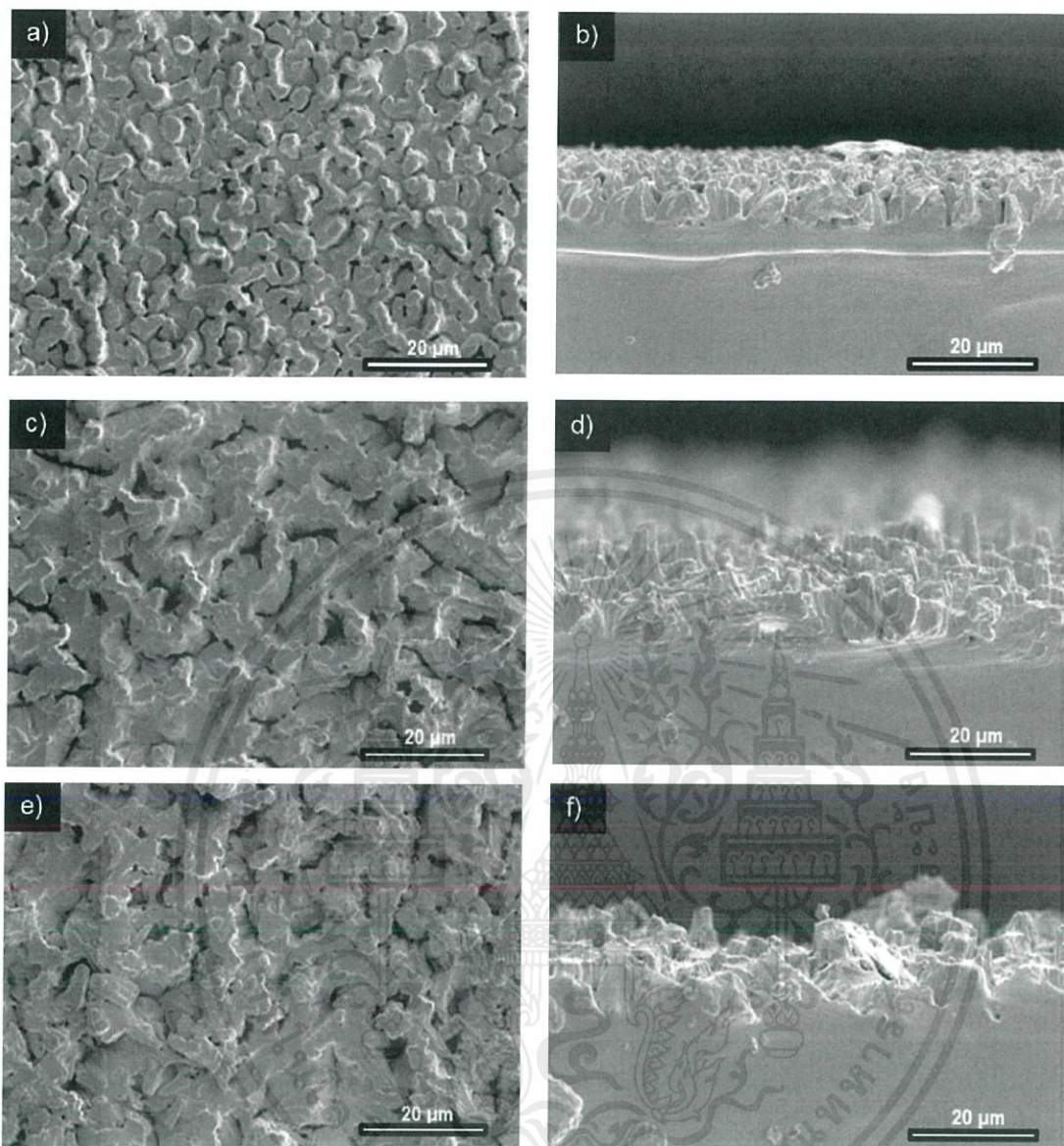
4.1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิวอาร์เรย์ลวดนาโนของพอลิไดเมทิลไซโลเซนที่ใช้แม่แบบลวดนาโนซิลิกอน

เมื่อนำแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เงื่อนไขเวลาต่างๆซึ่งมีลักษณะทางสัณฐานตามภาพที่ 4.1 มาทำหน้าที่เป็นแม่แบบในการลอกแบบของ PDMS พบว่าให้โครงสร้าง PDMS ที่เกิดจากลอกแบบที่แตกต่างกัน ภาพที่ 4.4 แสดงภาพ FE-SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโครงสร้างของซิวอาร์เรย์ลวดนาโนของ PDMS ที่ได้จากการลอกแบบออกจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เงื่อนไขเวลาต่างๆ

โครงสร้าง PDMS ที่ลอกจากแม่แบบลวดนาโนที่เวลาการกัด 10 นาที พบว่า PDMS มีลักษณะเป็นแท่งที่มีความยาวสม่ำเสมอและมีความเป็นระเบียบตลอดช่วงความลึกของการลอกโดยมีช่วงความยาวเฉลี่ยประมาณ 7.33 ± 0.34 ไมโครเมตร มีความกว้างของลวดลายที่ 4.29 ± 0.37 ไมโครเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.64 ± 0.18 ไมโครเมตร

โครงสร้าง PDMS ที่ลอกจากแม่แบบลวดนาโนที่เวลาการกัด 20 นาที พบว่า PDMS มีลักษณะไม่เป็นระเบียบและ PDMS ที่มีลักษณะเป็นแท่งที่กระจายตัวบนพื้นผิวมีปริมาณน้อย อีกทั้งแท่ง PDMS ที่ลอกได้นั้น มีความยาวที่ไม่สม่ำเสมอ มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 12.68 ± 1.44 ไมโครเมตร ความกว้างเฉลี่ยของลวดลายประมาณ 7.43 ± 0.18 ไมโครเมตร

โครงสร้าง PDMS ที่ลอกจากแม่แบบลวดนาโนที่เวลาการกัด 30 นาที พบว่า PDMS มีลักษณะไม่เป็นระเบียบมากกว่าที่เวลาการกัด 20 นาที มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 14.23 ± 2.02 ไมโครเมตร และความกว้างของลวดลาย 9.36 ± 0.44 ไมโครเมตร จากภาพด้านบนสังเกตเห็นลวดลายที่มีความกว้างจนเกือบจะเชื่อมถึงกันและกัน (ภาพที่ 4.4 (e)) และจากภาพตัดขวาง (ภาพที่ 4.4 (f)) พบว่าพอลิเมอร์ฉีกขาดเกือบทั่วบริเวณ



ภาพที่ 4.4 ภาพ FE-SEM ด้านบนและภาพตัดขวาง แสดงโครงสร้างที่ได้จากการลอกแบบของ PDMS โดยใช้แม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เตรียมได้จากการกัดทางเคมีโดยใช้โลหะช่วยในการทำปฏิกิริยาเนื่องจากผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ (a), (b) 10 นาที (c), (d) 20 นาที และ (e), (f) 30 นาที ของแม่แบบลวดนาโนซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

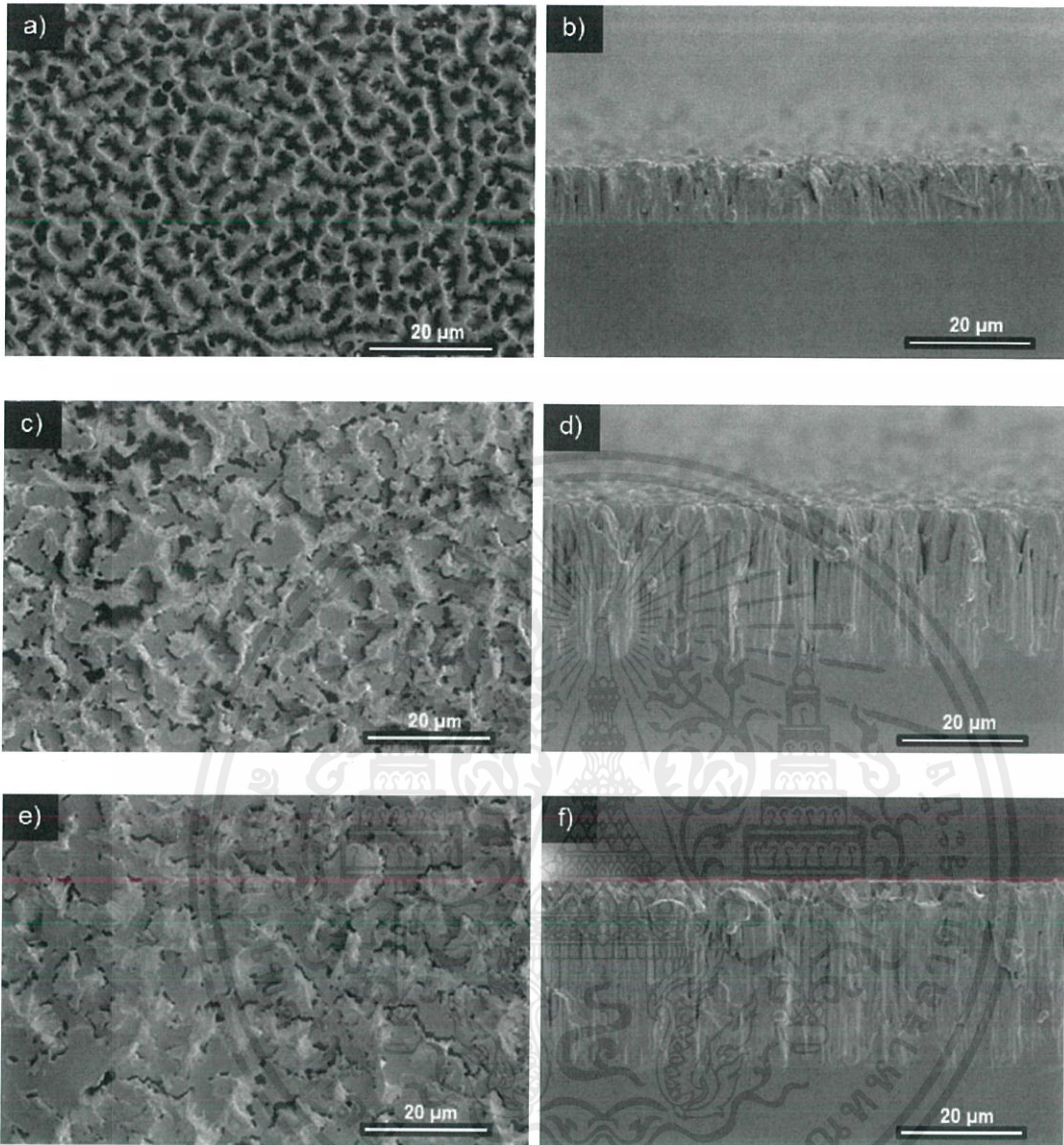
4.1.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนหลังการใช้งานเป็นแม่แบบลอกพอลิไดเมทิลไซโลเซนออก

ภายหลังกระบวนการลอกแบบ PDMS ด้วยแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนชนิดต่างๆที่เตรียมที่เวลาการกัดทางเคมีต่างๆกัน ได้นำแม่แบบที่ทำการลอก PDMS ออกแล้วมาทำการวิเคราะห์ โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM ดังแสดงในภาพที่ 4.5

สำหรับแม่แบบลวดนาโนที่ได้จากการกัดทางเคมี 10 นาที พบว่าหลังการลอกแบบ ลักษณะโครงสร้างลวดนาโนซิลิกอนยังคงมีความสม่ำเสมอและมีความเป็นระเบียบตลอดช่วงความลึกของการลอก มีช่วงความกว้างและความความลึกเฉลี่ยประมาณ 5.11 ± 0.65 และ 9.96 ± 0.05 ไมโครเมตร ตามลำดับ และพบ PDMS ฝังตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างลวดนาโนซิลิกอนเล็กน้อย

สำหรับแม่แบบลวดนาโนที่ได้จากการกัดทางเคมี 20 นาที พบว่าหลังการลอกแบบ ลักษณะโครงสร้างลวดนาโนซิลิกอน ยังคงมีความเป็นระเบียบตลอดช่วงความลึกของการลอกโดยมีความกว้างและความความลึกเฉลี่ยประมาณ 7.79 ± 0.93 และ 20.23 ± 0.4 ไมโครเมตร และพบ PDMS ฝังตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างลวดนาโนซิลิกอนปริมาณมาก

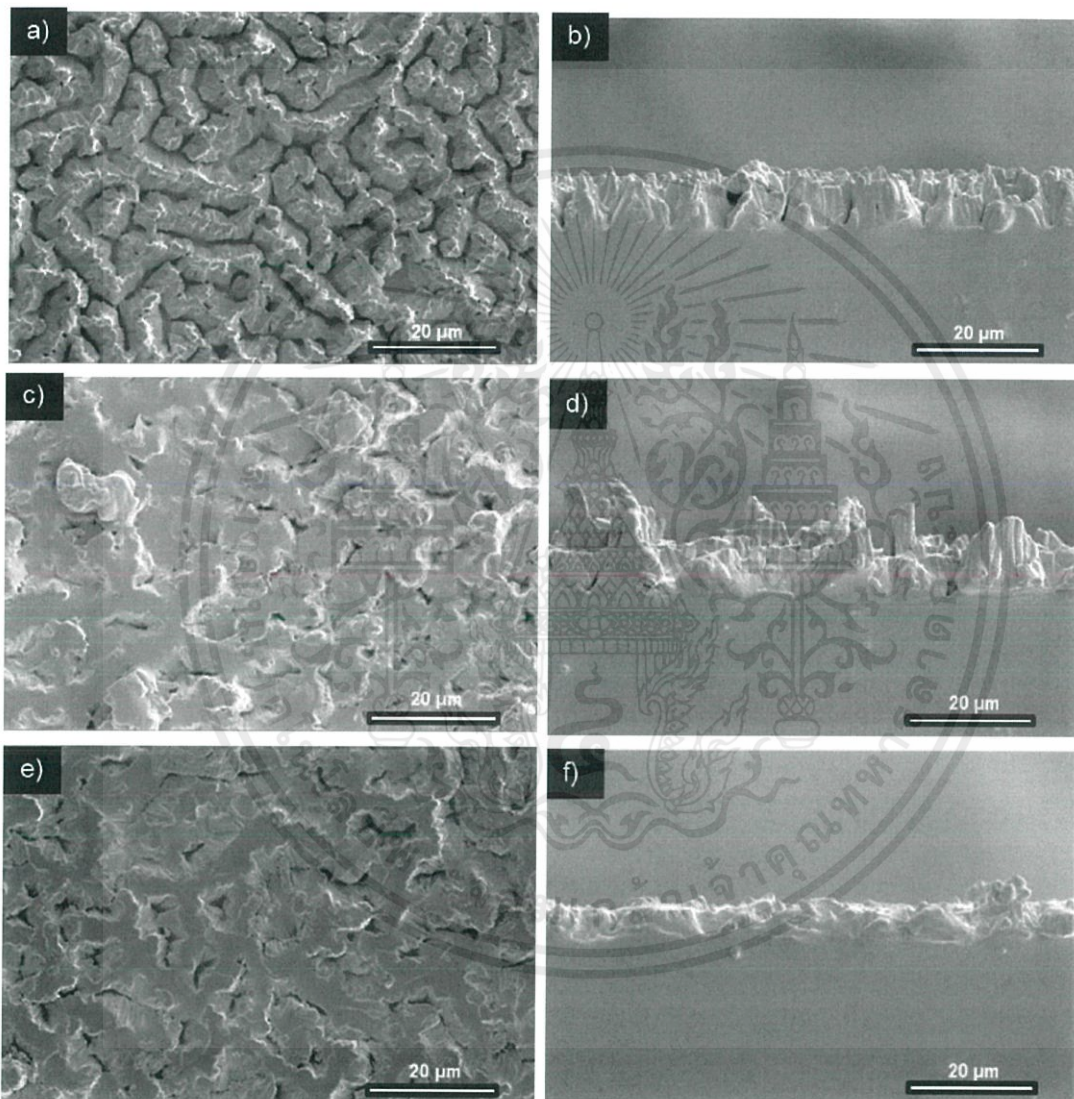
สำหรับแม่แบบลวดนาโนที่ได้จากการกัดทางเคมี 30 นาที พบว่าหลังการลอกแบบ ลักษณะโครงสร้างลวดนาโนซิลิกอน มีความเป็นระเบียบตลอดช่วงความลึกของการลอกโดยมีความกว้างและความความลึกเฉลี่ยประมาณ 7.79 ± 0.93 และ 20.23 ± 0.4 ไมโครเมตรและพบ PDMS ฝังตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างลวดนาโนซิลิกอนปริมาณมาก



ภาพที่ 4.5 ภาพ FE-SEM ด้านบนและภาพตัดขวาง แสดงโครงสร้างลวดนาโนซิลิกอนที่เงื่อนไขเวลาต่างๆภายหลังกระบวนการลอกแบบด้วย PDMS ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพื่อเตรียมแม่แบบที่ (a), (b) 10 นาที (c), (d) 20 นาที และ (e), (f) 30 นาที

4.1.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิวอาร์เรย์ลวดนาโนของคอมโพสิตระหว่างพอลิไดเมทิลไซโลเซนและท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้แม่แบบลวดนาโนซิลิกอน

นำแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่ได้จากการกัดทางเคมีที่เวลาต่างๆซึ่งมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาตามภาพที่ 4.1 มาทำหน้าที่เป็นแม่แบบในการลอกแบบคอมโพสิตระหว่างพอลิไดเมทิลไซโลเซนและท่อนาโนคาร์บอน (PDMS/CNT) โครงสร้าง PDMS/CNT ที่เกิดจากลอกแบบที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM ดังแสดงในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 ภาพ FE-SEM ด้านบนและภาพตัดขวาง แสดงโครงสร้างที่ได้จากการลอกแบบของคอมโพสิตระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและ PDMS โดยใช้แม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เตรียมได้จากการกัดทางเคมีโดยใช้โลหะช่วยในการทำปฏิกิริยาเนื่องจากผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ (a), (b) 10 นาที (c), (d) 20 นาที และ (e), (f) 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างคอมโพสิต PDMS/CNT ที่ลอกจากแม่แบบลวดนาโนที่เวลาการกัด 10 นาที พบว่า ลักษณะโครงสร้างซิวอาร์เรย์ลวดนาโนคอมโพสิต PDMS/CNT มีลักษณะเป็นแท่ง มีความลึกสม่ำเสมอและมีความเป็นระเบียบตลอดช่วงความลึกของการลอกโดยมีช่วงความความลึกเฉลี่ยประมาณ 8.54 ± 0.49 ไมโครเมตร มีความกว้างของลวดลายที่ 4.29 ± 0.37 ไมโครเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.68 ± 0.26 ไมโครเมตร

โครงสร้างคอมโพสิต PDMS/CNT ที่ลอกจากแม่แบบลวดนาโนที่เวลาการกัด 20 นาที พบว่า ลักษณะโครงสร้างซิวอาร์เรย์ลวดนาโนคอมโพสิต PDMS/CNT มีลักษณะที่ไม่มีความเป็นระเบียบตลอดช่วงความลึกของการลอกโดยมีช่วงความความลึกเฉลี่ยประมาณ 13.50 ± 3 ไมโครเมตร ความกว้างเฉลี่ยของลวดลายประมาณ 7.75 ± 0.52 ไมโครเมตร

โครงสร้างคอมโพสิต PDMS/CNT ที่ลอกจากแม่แบบลวดนาโนที่เวลาการกัด 30 นาที พบว่า ลักษณะโครงสร้างซิวอาร์เรย์ลวดนาโนคอมโพสิต PDMS/CNT มีลักษณะที่ไม่มีความเป็นระเบียบสูงมากตลอดช่วงความลึกของการลอกโดยมีช่วงความความลึกเฉลี่ยประมาณ 6.65 ± 1.2 ไมโครเมตร ความกว้างเฉลี่ยของลวดลายประมาณ 9.47 ± 1.03 ไมโครเมตร จากภาพด้านบนสังเกตเห็นลวดลายที่มีความกว้างจนเกือบจะเชื่อมถึงกัน จากภาพตัดขวางพบคอมโพสิต PDMS/CNT ฉีกขาดทั่วบริเวณ

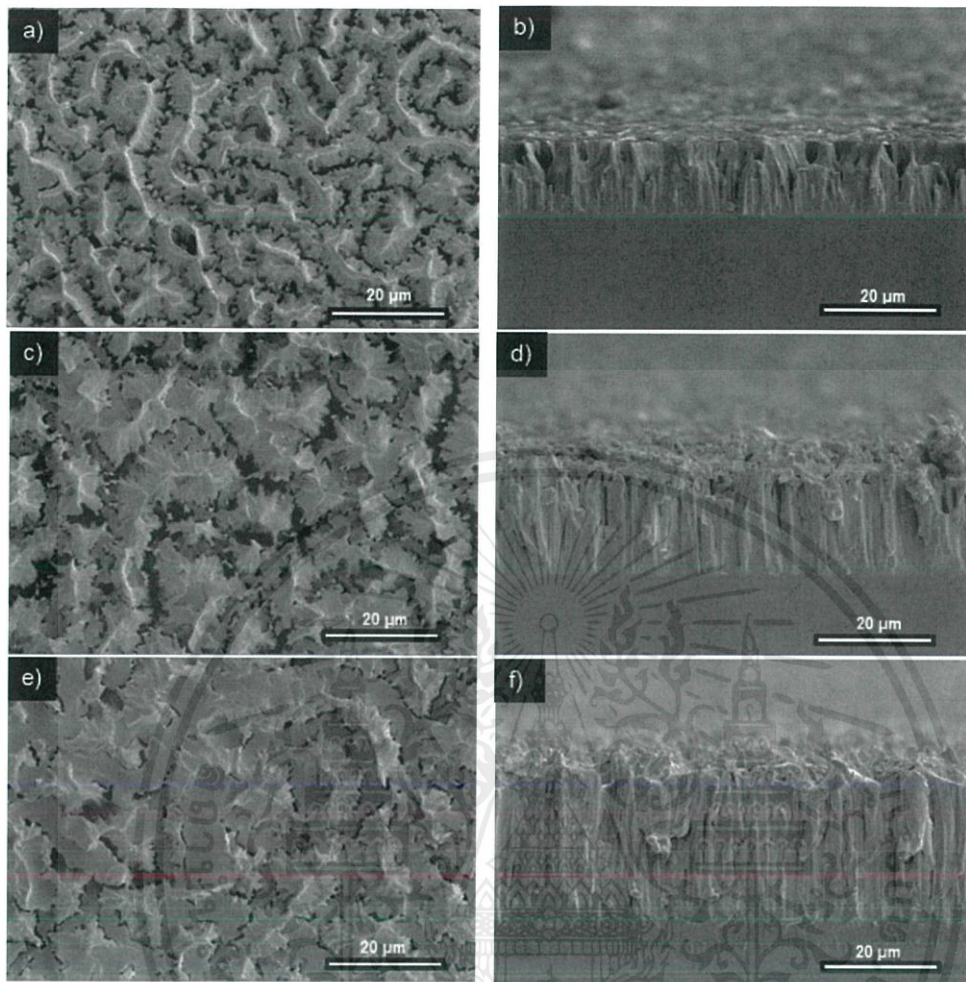
4.1.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนหลังการใช้งานเป็นแม่แบบลอกคอมโพสิตระหว่างพอลิไดเมทิลไซโลเซนและท่อนาโนคาร์บอน

ภายหลังกระบวนการลอกแบบคอมโพสิต PDMS/CNT ด้วยแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนชนิดต่างๆที่เตรียมที่เวลาการกัดทางเคมีต่างๆกัน ได้นำแม่แบบที่ทำการลอกแบบคอมโพสิต PDMS/CNT ออกแล้วมาทำการวิเคราะห์ โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM ดังแสดงในภาพที่ 4.7

สำหรับแม่แบบลวดนาโนที่ได้จากการกัดทางเคมี 10 นาที พบว่าหลังการลอกแบบ ลักษณะโครงสร้างลวดนาโนซิลิกอนยังคงมีความสม่ำเสมอและมีความเป็นระเบียบตลอดช่วงความลึกของการลอก มีความความลึกเฉลี่ยประมาณ 9.96 ± 0.049 ไมโครเมตร และพบคอมโพสิต PDMS/CNT ฝังตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างลวดนาโนซิลิกอนเล็กน้อย

สำหรับแม่แบบลวดนาโนที่ได้จากการกัดทางเคมี 20 นาที พบว่าหลังการลอกแบบ ลักษณะโครงสร้างลวดนาโนซิลิกอน ที่มีความเป็นระเบียบตลอดช่วงความลึกของการลอกมีความความลึกเฉลี่ยประมาณ 20.23 ± 0.4 ไมโครเมตรและพบคอมโพสิต PDMS/CNT ฝังตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างลวดนาโนซิลิกอนปริมาณมาก

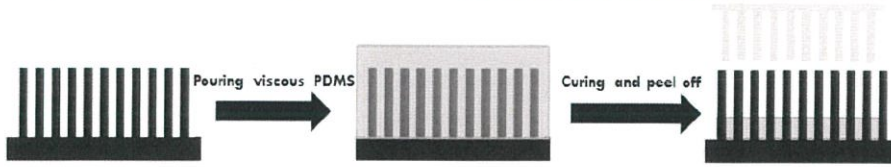
สำหรับแม่แบบลวดนาโนที่ได้จากการกัดทางเคมี 30 นาที พบว่าหลังการลอกแบบ ลักษณะโครงสร้างลวดนาโนซิลิกอนที่มีความเป็นระเบียบตลอดช่วงความลึกของการลอกโดยมีความความลึกเฉลี่ยประมาณ 30.19 ± 0.37 ไมโครเมตรและพบคอมโพสิต PDMS/CNT ฝังตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างลวดนาโนซิลิกอนปริมาณมาก



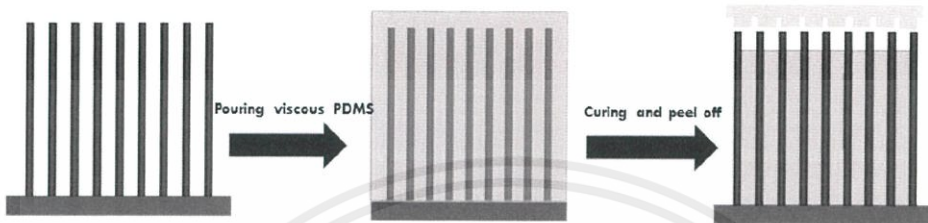
ภาพที่ 4.7 ภาพ FE-SEM ด้านบนและภาพตัดขวาง แสดงโครงสร้างลวดนาโนซิลิกอนที่เงื่อนไขเวลาต่างๆภายหลังกระบวนการลอกแบบด้วย PDMS ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพื่อเตรียมแม่แบบที่ (a), (b) 10 นาที (c), (d) 20 นาที และ (e), (f) 30 นาที

จากข้อมูลที่ได้จากภาพที่ 4.4, 4.5, 4.6 และ 4.7 สามารถเสนอแนวคิดแสดงความเป็นไปได้ของลักษณะของโครงสร้างของแม่แบบเส้นลวดนาโนซิลิกอนชนิดต่างๆ ภายหลังจากการลอกแบบด้วย PDMS หรือคอมโพสิต PDMS/CNT ดังแสดงในภาพที่ 4.8

Si NW mold at lower etching time → Low adhesion between Si and PDMS



Si NW mold at Higher etching time → High adhesion between Si and PDMS



ภาพที่ 4.8 ภาพจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของเส้นลวดนาโนซิลิกอนที่ขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาการกัดทางเคมีกับความยาวของ PDMS ที่ทำการลอกแบบออกมา

จากภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของเส้นลวดนาโนซิลิกอนที่ยาวแตกต่างกันตามเวลาการกัดทางเคมี กับความยาวของ PDMS หรือคอมโพสิต PDMS/CNT ที่ทำการลอกแบบออกมา จะเห็นว่าที่เวลาการกัดทางเคมีที่สั้น ความยาวและระยะห่างระหว่างกันของลวดนาโนซิลิกอนจะค่อนข้างสั้นและแคบ เมื่อทำการเท PDMS ลงไปแล้วให้อุณหภูมิจนแข็งตัวจากนั้นทำการลอกออก ความยาวของสาย PDMS จะสั้นกว่าความยาวของลวดนาโนซิลิกอนเล็กน้อยแตกต่างกับกรณีที่เวลาการกัดทางเคมีนานขึ้น ความยาวและระยะห่างระหว่างกันของลวดนาโนซิลิกอนจะยาวมากขึ้นและกว้างมากขึ้น เมื่อทำการเท PDMS ลงไปแล้วให้อุณหภูมิจนแข็งตัวจากนั้นทำการลอกออก ความยาวของสาย PDMS จะสั้นกว่าความยาวของลวดนาโนซิลิกอนเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากแรงยึดเกาะ (Adhesion) ที่สูงมากขึ้นเมื่อความยาวและระยะห่างระหว่างกันของลวดนาโนซิลิกอนเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้กระบวนการลอก PDMS ออกจากแม่แบบทำได้ยากขึ้นและทำให้เกิดการฉีกขาดของ PDMS ที่บริเวณด้านบนของลวดนาโนซิลิกอน ทำให้มี PDMS ปริมาณมากฝังอยู่ตามช่องว่างระหว่างลวดนาโนซิลิกอนและเมื่อพิจารณาจากพื้นผิวของ PDMS ที่ลอกออกมาพบว่าเมื่อใช้แม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่สั้น จะทำให้ได้ลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเป็นระเบียบต่างจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่ยาว ซึ่งเมื่อลอกแบบออกมา PDMS ที่ได้จะมีลักษณะพื้นผิวที่ไม่มีความเป็นระเบียบ อีกทั้งยังมีความสูงต่ำของพื้นผิวที่ไม่เท่ากันซึ่งเกิดจากการฉีกขาดของลวดสายที่เกิดขึ้น

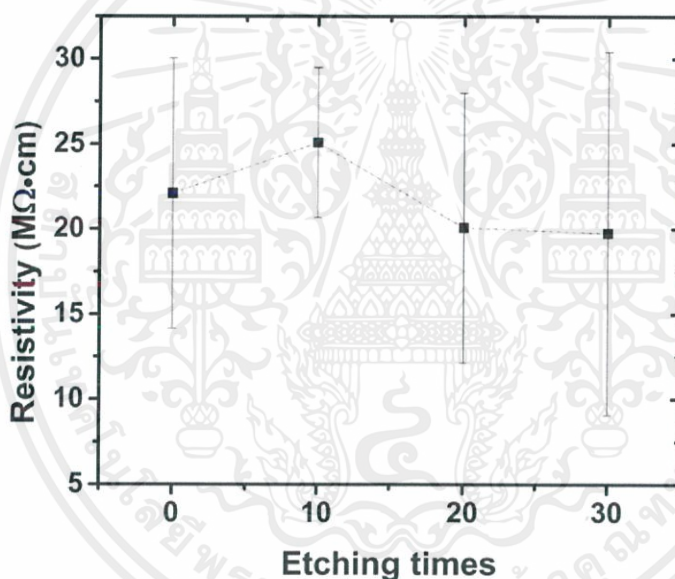
4.1.6 สมบัติทางไฟฟ้าของคอมโพสิตระหว่างพอลิไดเมทิลไซโลเซนและท่อนาโนคาร์บอน

นำ PDMS และคอมโพสิต PDMS/CNT (CNT 0.5 wt%) ที่ผ่านการลอกแบบจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนชนิดต่างๆ ไปศึกษาความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด (Four-point probe) จะสามารถหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity; ρ) ได้ดังตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.9 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของคอมโพสิต PDMS/CNT ชนิดต่างๆ พบว่า PDMS มีความเป็นฉนวนมากจึงมีความต้านทานสูงมากจนไม่สามารถวัดค่าความต้านทานออกมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานเฉลี่ยของคอมโพสิตของ PDMS/CNT

เงื่อนไข	ค่าความต้านทานเฉลี่ย ($M\Omega\cdot cm$)
PDMS ที่ลอกจาก Si	-
PDMS ที่ลอกจาก Si NW 10 min	-
PDMS ที่ลอกจาก Si NW 20 min	-
PDMS ที่ลอกจาก Si NW 30 min	-
PDMS-CNT 0.5%wt ที่ลอกจาก Si	22.1±7.9
PDMS-CNT 0.5%wt ที่ลอกจาก Si NW 10 min	25.1±4.4
PDMS-CNT 0.5%wt ที่ลอกจาก Si NW 20 min	20.1±7.9
PDMS-CNT 0.5%wt ที่ลอกจาก Si NW 30 min	19.8±10.7



ภาพที่ 4.9 ความต้านทานไฟฟ้าของคอมโพสิต PDMS/CNT

ค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอมโพสิต PDMS/CNT ที่ใช้แม่แบบลวดนาโนซิลิกอนชนิดต่างๆมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากมีอัตราส่วนของ CNT 0.5 wt% เท่ากัน ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่อ้างอิงจากวิทยานิพนธ์เรื่องอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแรงเสียดทานโดยใช้ขั้วคอมโพสิตของท่อนาโนคาร์บอนและพอลิเมอร์ของนางสาวนพิต เพ็ชรมานะ ปี 2557 ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนสามารถช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์ได้และลวดลายที่สร้างให้คอมโพสิตไม่มีนัยสำคัญกับการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า

นอกจากนี้ยังได้วัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (ϵ) ของอาร์เรย์ลวดนาโน PDMS และคอมโพสิต PDMS/CNT พบว่า อาร์เรย์ลวดนาโน PDMS มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าอยู่ที่ 52.93×10^{-12} F/m และเติม CNT ลงไปแล้ว พบว่าอาร์เรย์ลวดนาโนคอมโพสิต PDMS/CNT มีค่าลดลงเหลือ 43.52×10^{-12}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F/m ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารคอมโพสิตจะลดลงเมื่อทำการเติมวัสดุที่นำไฟฟ้า ซึ่งมีผลทำให้ค่าการเก็บประจุลดลง แต่จากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่เปลี่ยนไปเพียง 9.41×10^{-12} F/m นี้ เมื่อเทียบกับเอกสารอ้างอิง [11] พบว่าค่าที่เราวัดได้นั้นไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเมื่อเทียบกับการคอมโพสิต CNT ที่ 10 %wt ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเปลี่ยนจากเดิมไปกว่า 150 nF/m

4.2 สมบัติของ TENG โดยใช้ซิวาร์เรย์ลวดนาโนของคอมโพสิตระหว่างพอลิไดเมทิลไซโลเซนและท่อนาโนคาร์บอน

ในการวัดสมบัติของ TENG จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ TENG ที่ประดิษฐ์จากซิวลบบชนิดต่างๆ และซิวลวกคือ PET โดยซิวลบบที่ใช้ทดสอบได้แก่อาร์เรย์ลวดนาโน PDMS ที่ผ่านการลอกแบบจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่กัดทางเคมีที่เวลา 0, 10, 20 และ 30 นาทีตามลำดับ (PDMS 0, PDMS 10, PDMS 20 และ PDMS 30) และอาร์เรย์ลวดนาโนของคอมโพสิต PDMS/CNT (CNT 0.5 wt%) ที่ผ่านการลอกแบบจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่กัดทางเคมีที่เวลา 0, 10, 20 และ 30 นาทีตามลำดับ (PDMS-CNT 0, PDMS-CNT 10, PDMS-CNT 20 และ PDMS-CNT 30) ในการวัดสมบัติของ TENG ได้ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความต้านทานค่าต่างๆขณะต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ดสแกนและรีเวิร์สสแกนตามลำดับ ด้วยให้แรงกด-ปล่อยในทิศทางตั้งฉากกับ TENG ด้วยความถี่คงที่ 1 Hz

4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลา

ในภาพที่ 4.10(a) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage, V) กับเวลา (Time) ของซิวลบบ PDMS 0, PDMS 10, PDMS 20 และ PDMS 30 โดยทำการต่อวงจรแบบรีเวิร์สสแกน จากผลการวัดพบว่าพิกัดสัญญาณ V บวกจะมีค่าสูงกว่าพิกัดสัญญาณ V ลบ เนื่องจากแรงที่กระทำต่อ TENG ตอนกดมีมากกว่าตอนปล่อยซึ่งหมายความว่าตอนที่ปล่อย TENG จะไม่มีแรงภายนอกกระทำอยู่เลยจึงเป็นการคืนตัวของโครงสร้างของ TENG เพียงเท่านั้น จากการพิจารณา V ด้านบวกจะสามารถเปรียบเทียบสัญญาณ V บวกที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ PDMS 10 > PDMS 20 > PDMS 30 > PDMS 0 และเมื่อเปรียบเทียบสัญญาณ V ลบที่เกิดขึ้นพบว่า เป็นไปในแนวโน้มนัยเดียวกับด้านบวก

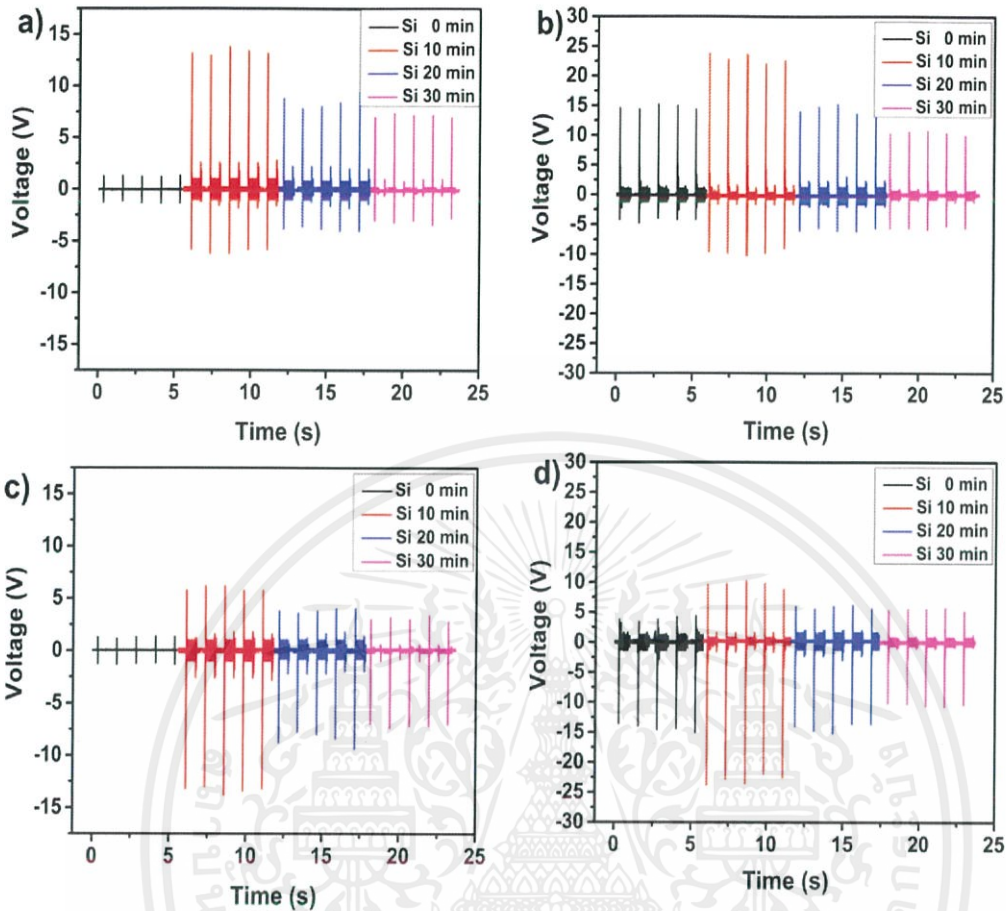
ในภาพที่ 4.10(b) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage, V) กับเวลา (Time) ของซิวลบบ PDMS-CNT 0, PDMS-CNT 10, PDMS-CNT 20 และ PDMS-CNT 30 โดยทำการต่อวงจรแบบรีเวิร์สสแกน จากผลการวัดพบว่าพิกัดสัญญาณ V บวกจะมีค่าสูงกว่าพิกัดสัญญาณ V ลบ เนื่องจากแรงที่กระทำต่อ TENG ตอนกด-ปล่อยที่ไม่เท่ากันซึ่งได้กล่าวเอาไว้ก่อนหน้านี้แล้ว จากการพิจารณา V ด้านบวกจะสามารถเปรียบเทียบสัญญาณ V บวกที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ PDMS 10 > PDMS 0 > PDMS 20 > PDMS 30 และเมื่อพิจารณาสัญญาณ V ลบที่เกิดขึ้นพบว่า PDMS 10 ยังคงมีขนาดสัญญาณสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาพที่ 4.10(c) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage, V) กับเวลา (Time) ของขั้วลบ PDMS 0, PDMS 10, PDMS 20 และ PDMS 30 โดยทำการต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ดสแกน จากผลการวัดพบว่าลักษณะสัญญาณความต่างศักย์ที่ได้นั้นมีกราฟกลับทิศจากบวกเป็นลบโดยที่ยังคงสัดส่วนของขนาดสัญญาณระหว่างบวกและลบที่สลับกันไว้ได้ทำให้มีทิศทางตรงกันข้ามกับภาพที่ 4.10(a)

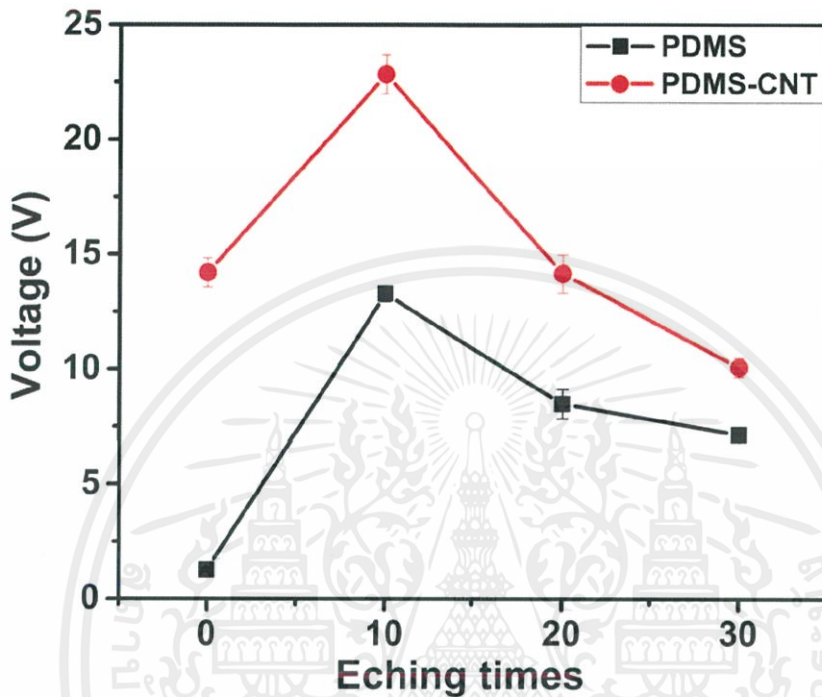
ในภาพที่ 4.10(d) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage, V) กับเวลา (Time) ของขั้วลบ PDMS-CNT 0, PDMS-CNT 10, PDMS-CNT 20 และ PDMS-CNT 30 โดยทำการต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ดสแกน จากผลการวัดพบว่าลักษณะสัญญาณความต่างศักย์ที่ได้นั้นมีกราฟกลับทิศจากบวกเป็นลบโดยที่ยังคงสัดส่วนของขนาดสัญญาณระหว่างบวกและลบที่สลับกันไว้ได้ทำให้มีทิศทางตรงกันข้ามกับภาพที่ 4.10(b)

ในกรณีฟอร์เวิร์ดสแกนเมื่อ TENG เกิดการกดจะได้อิทธิพลสัญญาณ V บวกขึ้นมา ขณะที่ปล่อยกลับจะเกิดพัลส์สัญญาณ V ลบ ในขณะที่รีเวิร์สสแกนจะได้อิทธิพลสัญญาณ V ในทิศตรงกันข้าม นอกจากนี้จะเห็นว่าพัลส์สัญญาณที่เกิดจากการกด-ปล่อยหรือสัมผัส-แยกกันนั้น จะมีพัลส์สองพัลส์ต่อเนื่องกัน ทั้งกรณีฟอร์เวิร์ดสแกนและรีเวิร์สสแกน แสดงว่า V ที่ได้ มาจากการทำงานของอุปกรณ์ TENG ที่เกิดจากการกด-ปล่อยจริง นอกจากนี้ในการทดลองนี้ยังได้ศึกษาผลของลวดลายที่สร้างจากการลอกแบบเปรียบเทียบกับสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นซึ่งพบว่า PDMS 10 ซึ่งเป็นขั้ว PDMS ที่ลอกลวดลายจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เงื่อนไขเวลา 10 นาที โดยขั้วที่ได้มีความเป็นระเบียบของลวดลายและมีความลึกของลวดลายที่สม่ำเสมอ ต่างจากอีก 2 ขั้วซึ่งไม่มีความเป็นระเบียบของลวดลายเลยอีกทั้งยังมีความลึกของลวดลายที่ไม่สม่ำเสมอเป็นผลให้เกิดการสัมผัสกับวัสดุอื่นได้ไม่ดีจึงทำให้ส่วนที่ไม่ได้รับการสัมผัสนั้นไม่สามารถเกิดประจุส่วนเกินจากการเสียดสี (Triboelectric charge) ขึ้นได้



ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) กับเวลา (Time) ของขั้วลบซึ่งสร้างขึ้นและวัดที่เงื่อนไขต่างกัน (a),(b) รีเวิร์สสแกนของ PDMS และ PDMS-CNT ที่เงื่อนไขเวลาในการสร้างแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่ 0, 10, 20 และ 30 นาที ตามลำดับ (c)(d) ฟอว์เวิร์ดสแกนของ PDMS และ PDMS-CNT ที่เงื่อนไขเวลาในการสร้างแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่ 0, 10, 20 และ 30 นาที ตามลำดับ

จากข้อมูลในภาพที่ 4.10 สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลาที่ใช้ในการกัดทางเคมีของแม่แบบซิลิกอนซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 4.11 และสรุปผลในตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) กับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาการกัดทางเคมี (Etching times) ของแม่แบบซิลิกอนของขั้วลบซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้ PDMS และคอมโพสิตระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและ PDMS (PDMS-CNT)

ตารางที่ 4.2 ค่า Voltage ที่วัดได้ที่ขั้วลบเงื่อนไขต่างๆโดยการวัดแบบฟอร์เวิร์ด

เงื่อนไข	Voltage ขณะกำลังกด (V)	Voltage ขณะกำลังปล่อย (V)
PDMS 0	1.26±0.05	-1.26±0.07
PDMS 10	13.28±0.33	-5.96±0.22
PDMS 20	8.48±0.64	-3.84±0.17
PDMS 30	7.16±0.17	-3.08±0.23
PDMS-CNT 0	14.20±0.63	-3.92±0.39
PDMS-CNT 10	22.84±0.85	-9.66±0.48
PDMS-CNT 20	14.16±0.83	-5.88±0.27
PDMS-CNT 30	10.08±0.41	-4.68±0.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากภาพที่ 4.11 จะแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่เป็นขั้ว PDMS และส่วนที่เป็นคอมโพสิต PDMS/CNT โดยในส่วนแรกที่เป็นขั้ว PDMS นั้น พบว่า PDMS ที่ลอกแบบจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เวลา 10 นาทีจะให้ค่า V ด้านบวกสูงที่สุดเมื่อพิจารณาถึงลักษณะทางสัญญาณวิทยาพบว่าพื้นผิวมีลักษณะเป็นลวดลายตรงข้ามของลวดนาโนซิลิกอนซึ่งลวดลายที่ได้จากการลอกแบบออกมาค่อนข้างที่จะมีความลึกสม่ำเสมอและมีการเรียงอย่างตัวเป็นระเบียบทำให้สามารถที่จะเกิดการสัมผัสกับขั้วบวกได้ง่ายและมีพื้นที่ในการสัมผัสที่มากกว่าเงื่อนไข 0 นาทีอย่างชัดเจน ทำให้มีประจุส่วนเกินที่เกิดจากการเสียดสีมากกว่าซึ่งส่งผลให้มีความต่างศักย์เพิ่มสูงขึ้นกว่า 10 เท่า ขณะที่ที่เงื่อนไขเวลา 20 และ 30 นาทีสร้างความต่างศักย์ได้สูงขึ้นเพียง 6 และ 5 เท่าตามลำดับซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะพื้นผิวที่มีความลึกไม่สม่ำเสมอและความไม่เป็นระเบียบที่ค่อนข้างมาก

สำหรับในส่วนที่สองกรณีขั้วลวดอาร์เรย์ลวดนาโนคอมโพสิต PDMS/CNT เมื่อพิจารณาถึงผลจากการเติมท่อนาโนคาร์บอนลงไปนั้น พบว่าขั้วลวดทุกเงื่อนไขเวลาจะมีความต่างศักย์เพิ่มขึ้นมากกว่าค่าความต่างศักย์ก่อนที่จะผสม CNT ลงไป ซึ่งสามารถเพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจนที่เงื่อนไข 0 นาทีโดยให้ความต่างศักย์สูงขึ้นถึง 11 เท่าซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์พื้นผิวให้มีความเป็นลบมากยิ่งขึ้นและอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงความขรุขระของพื้นผิวอันเกิดจากการกระจายตัวของ CNT ขณะที่เวลา 10, 20 และ 30 นาทีมีสัญญาณความต่างศักย์เพิ่มขึ้นมาเพียง 1.7, 1.6 และ 1.4 เท่าตามลำดับโดยค่าความต่างศักย์ด้านบวกของเงื่อนไขเวลา 0 นาทีและ 20 นาทีจะมีค่าไม่ต่างกันมาก และเงื่อนไขเวลา 30 นาทีจะมีค่าความต่างศักย์ต่ำที่สุดของขั้วคอมโพสิตซึ่งอาจเกิดเนื่องจากลักษณะของพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอเกิดการขัดขวางการสัมผัสกับขั้วบวกอย่างสมบูรณ์

4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา

ในการทดลองวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้า (Current; I) จะใช้ TENG ซึ่งมีเงื่อนไขของขั้วลบที่แตกต่างกันคือ PDMS ที่ผ่านการลอกแบบจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เงื่อนไขเวลา 0, 10, 20 และ 30 นาทีตามลำดับ (PDMS 0, PDMS 10, PDMS 20 และ PDMS 30) และคอมโพสิตระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและ PDMS (PDMS-CNT 0.5%wt) ที่ผ่านการลอกแบบจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เงื่อนไขเวลา 0, 10, 20 และ 30 นาทีตามลำดับ (PDMS-CNT 0, PDMS-CNT 10, PDMS-CNT 20 และ PDMS-CNT 30) ขณะต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ดสแกนและรีเวิร์สสแกนตามลำดับ ด้วยการให้แรงกด-ปล่อยในทิศทางตั้งฉากกับ TENG ด้วยความถี่คงที่ 1 Hz จากการทดลองพบว่า TENG ทำให้เกิดสัญญาณ I ได้จริง โดยแสดงตารางสรุปผลการวัดในตารางที่ 4.3 และกราฟผลการวัดดังภาพที่ 4.12 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลจากการวัดได้ดังนี้

ในภาพที่ 4.12(a) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (Current) กับเวลา (Time) ของขั้วลบซึ่งสร้างขึ้นจาก PDMS ที่ผ่านการลอกแบบจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เวลา 0, 10, 20 และ 30 นาทีตามลำดับ (PDMS 0, PDMS 10, PDMS 20 และ PDMS 30) โดยทำการต่อวงจรแบบรีเวิร์สสแกน จากผลการวัดพบว่าพีคสัญญาณ I บวกจะมีค่าสูงกว่าพีคสัญญาณ I ลบ เนื่องจากแรงที่กระทำต่อ TENG ตอนกดมีมากกว่าตอนปล่อย ทำให้สัญญาณ I ลบขึ้นอยู่กับการคืนตัวของโครงสร้างของ TENG เพียงเท่านั้น จากการพิจารณา I ด้านบวกจะสามารถเปรียบเทียบสัญญาณ I บวกที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ PDMS 10 > PDMS 20 > PDMS 30 > PDMS 0 และเมื่อ

เปรียบเทียบสัญญาณ I ลบที่เกิดขึ้นโดยรวมแล้ว พบว่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยหรือมีค่าที่ค่อนข้างต่ำเหมือนกัน จากการพิจารณาแนวโน้มของสัญญาณจะสังเกตเห็นว่า I ที่วัดได้มีแนวโน้มเดียวกับค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น

ในภาพที่ 4.12(b) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (Current) กับเวลา (Time) ของขั้วลบซึ่งสร้างขึ้นจากคอมโพสิตระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและ PDMS (PDMS-CNT 0.5%wt) ที่ผ่านการลอกแบบจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เงื่อนไขเวลา 0, 10, 20 และ 30 นาทีตามลำดับ (PDMS-CNT 0, PDMS-CNT 10, PDMS-CNT 20 และ PDMS-CNT 30) โดยทำการต่อวงจรแบบรีเวิร์ตสแกน จากผลการวัดพบว่าพิกัดสัญญาณ I บวกจะมีค่าสูงกว่าพิกัดสัญญาณ I ลบเนื่องจากแรงที่กระทำต่อ TENG ตอนกด-ปล่อยที่ไม่เท่ากันซึ่งได้กล่าวเอาไว้ก่อนหน้านี้แล้ว จากการพิจารณา I ด้านบวกจะสามารถเปรียบเทียบสัญญาณ V บวกที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ PDMS 10 > PDMS 0 > PDMS 20 > PDMS 30 และเมื่อพิจารณาสัญญาณ V ลบที่เกิดขึ้นพบว่า PDMS 10 ยังคงมีขนาดสัญญาณสูงที่สุด

ในภาพที่ 4.12(c) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (Current) กับเวลา (Time) ของขั้วลบซึ่งสร้างขึ้นจาก PDMS ที่ผ่านการลอกแบบจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เวลา 0, 10, 20 และ 30 นาทีตามลำดับ (PDMS 0, PDMS 10, PDMS 20 และ PDMS 30) โดยทำการต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ดสแกน จากผลการวัดพบว่าลักษณะสัญญาณ I ที่ได้นั้นมีกราฟกลับทิศจากบวกเป็นลบโดยที่ยังคงสัดส่วนของขนาดสัญญาณระหว่างบวกและลบที่สลับกันไว้ได้ทำให้มีทิศทางตรงกันข้ามกับรูป(a)

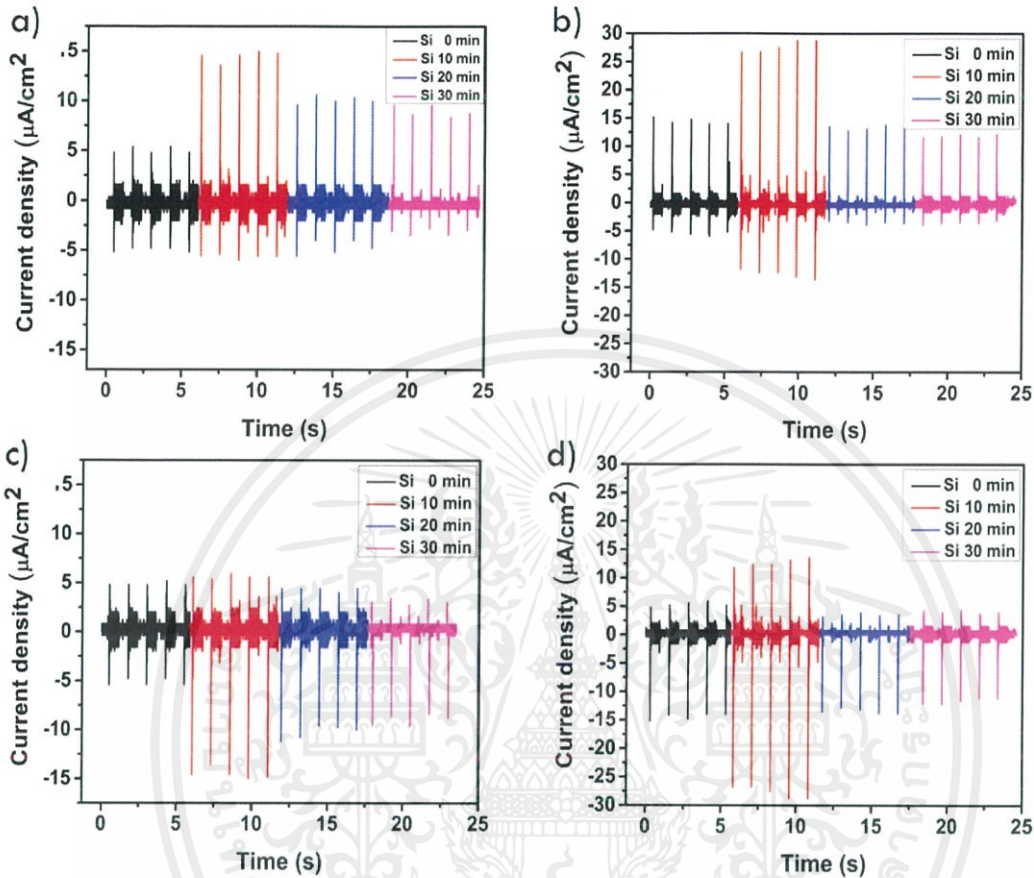
ในภาพที่ 4.12(d) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (Current) กับเวลา (Time) ของขั้วลบซึ่งสร้างขึ้นจากคอมโพสิตระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและ PDMS (PDMS-CNT 0.5%wt) ที่ผ่านการลอกแบบจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เงื่อนไขเวลา 0, 10, 20 และ 30 นาทีตามลำดับ (PDMS-CNT 0, PDMS-CNT 10, PDMS-CNT 20 และ PDMS-CNT 30) โดยทำการต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ดสแกน จากผลการวัดพบว่าลักษณะสัญญาณ I ที่ได้นั้นมีกราฟกลับทิศจากบวกเป็นลบโดยที่ยังคงสัดส่วนของขนาดสัญญาณระหว่างบวกและลบที่สลับกันไว้ได้ทำให้มีทิศทางตรงกันข้ามกับรูป(b)

ตารางที่ 4.3 ค่า Current ที่วัดได้ที่ขั้วลบเงื่อนไขต่างๆโดยการวัดแบบฟอร์เวิร์ด

เงื่อนไข	Current ขณะกำลังกด (μA)	Current ขณะกำลังปล่อย (μA)
PDMS 0	4.68±0.74	-5.2±0.40
PDMS 10	14.2±0.71	-5.48±0.44
PDMS 20	10.52±0.77	-4.32±0.18
PDMS 30	9.18±0.59	-3.26±0.34
PDMS-CNT 0	14.84±0.41	-5.28±0.33
PDMS-CNT 10	27.36±0.88	-12.68±0.71
PDMS-CNT 20	13.33±0.43	-3.52±0.26
PDMS-CNT 30	11.76±0.43	-4.04±0.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : เนื่องจากอุปกรณ์มีพื้นที่ $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ค่าของกระแสที่วัดได้จึงเทียบเท่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density; J) ในหน่วย $\mu\text{A}/\text{cm}^2$



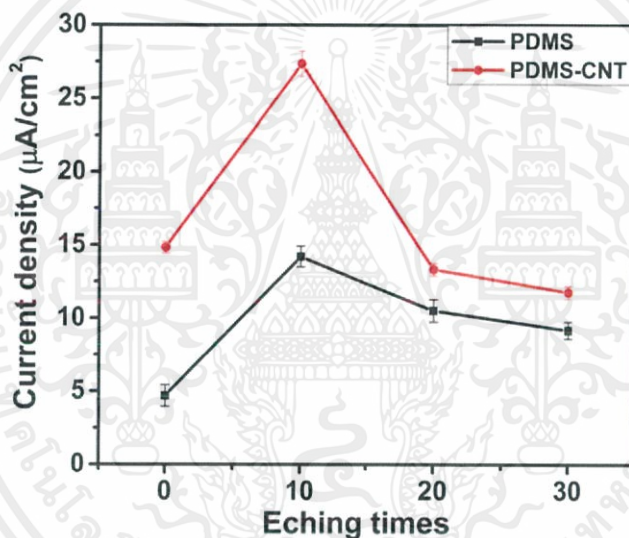
ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (Current) กับเวลา (Time) ของขั้วลบซึ่งสร้างขึ้นและวัดที่เงื่อนไขต่างกัน (a),(b) รีเวอร์สแกนของ PDMS และ PDMS-CNT ที่เงื่อนไขเวลาในการสร้างแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่ 0, 10, 20 และ 30 นาที ตามลำดับ (c)(d) ฟอว์เวิร์ดสแกนของ PDMS และ PDMS-CNT ที่เงื่อนไขเวลาในการสร้างแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่ 0, 10, 20 และ 30 นาที ตามลำดับ

จากข้อมูลในรูป 4.12 สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากัดทางเคมีของแม่แบบซิลิกอนซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 4.13

ซึ่งจากภาพที่ 4.13 จะแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่เป็นขั้ว PDMS และส่วนที่เป็นคอมโพสิตระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและ PDMS (PDMS-CNT) โดยในส่วนแรกนั้นจากความสัมพันธ์เมื่อพิจารณาถึงผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากัดทางเคมี พบว่า PDMS ที่ลอกแบบจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เวลา 10 นาทีจะให้ค่า I ด้านบวกสูงที่สุดเมื่อพิจารณาถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่าพื้นผิวมีลักษณะเป็นลวดลายตรงข้ามของลวดนาโนซิลิกอนซึ่งลวดลายที่ได้จากการลอกแบบออกมานี้ค่อนข้างที่จะมีความลึกสม่ำเสมอและมีการเรียงอย่างตัวเป็นระเบียบทำให้สามารถที่จะเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสัมผัสกับขั้วบวกได้ง่ายและมีพื้นที่ในการสัมผัสที่มากกว่าเงื่อนไข 0 นาที่อย่างชัดเจน ทำให้มีประจุส่วนเกินที่เกิดจากการเสียดสีมากกว่าซึ่งประจุส่วนเกินเหล่านี้จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าสถิตที่สูงขึ้นส่งผลให้มีกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น 3 เท่า ขณะที่ที่เงื่อนไขเวลา 20 และ 30 นาทีสร้างกระแสไฟฟ้าได้สูงขึ้นเพียง 2.2 และ 1.9 เท่าตามลำดับเมื่อเทียบกับที่ 0 นาที ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะพื้นผิวที่มีความลึกไม่สม่ำเสมอและความไม่เป็นระเบียบที่ค่อนข้างมาก สำหรับในส่วนที่สองนั้น จากความสัมพันธ์เมื่อพิจารณาถึงผลจากการเติมท่อนาโนคาร์บอนลงไปในนั้น พบว่าขั้วลบทุกเงื่อนไขเวลาจะมีกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากกว่าค่ากระแสไฟฟ้าก่อนที่จะผสม CNT ลงไป ซึ่งสามารถเพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจนที่เงื่อนไข 0 นาทีโดยให้กระแสไฟฟ้าสูงขึ้น 3 เท่าซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์พื้นผิวให้มีความเป็นลบมากยิ่งขึ้นและอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงความขรุขระของพื้นผิวอันเกิดจากการกระจายตัวของ CNT ซึ่งที่เวลา 10, 20 และ 30 นาทีที่มีสัญญาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมาเพียง 1.9, 1.2 และ 1.28 เท่าตามลำดับ โดยค่าความต่างศักย์ด้านบวกของเงื่อนไขเวลา 0, 20 และ 30 นาทีจะมีค่าไม่ต่างกันมาก



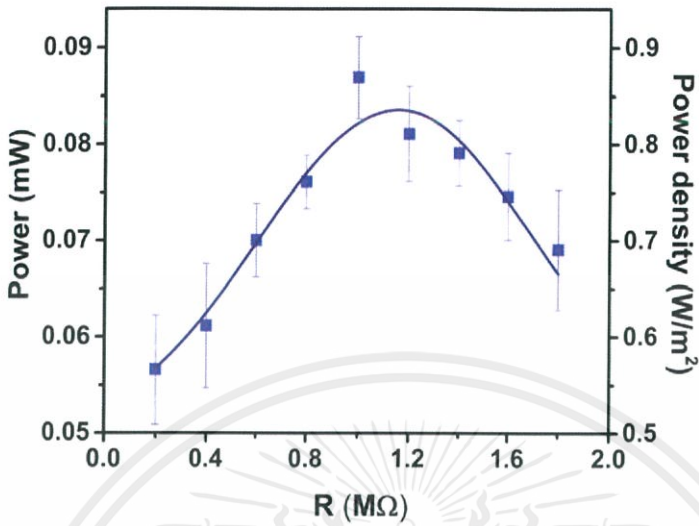
ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (Current) กับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาการกัดทางเคมี (Etching times) ของแม่แบบซิลิกอนของขั้วลบซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้ PDMS และคอมโพสิตระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและ PDMS (PDMS-CNT)

4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความต้านทานค่าต่างๆ

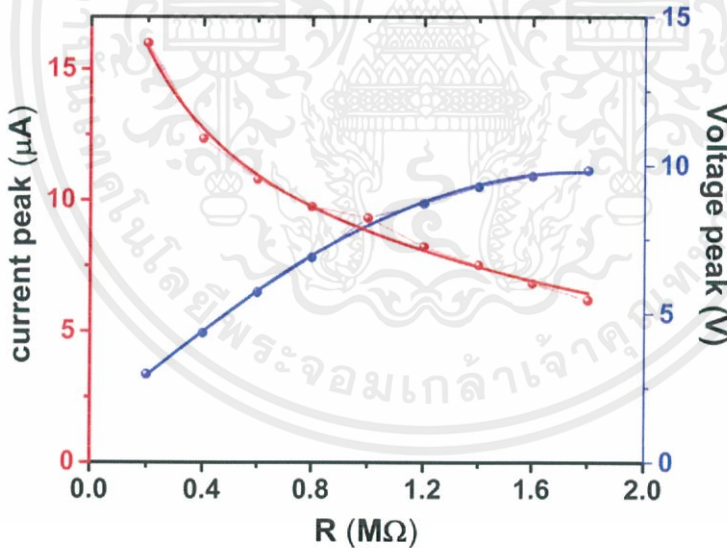
ในการทดลองหาค่ากำลังไฟฟ้าอุปกรณ์ จะใช้ TENG จากเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ PDMS-CNT 10 โดยทำการวัดค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าเมื่อต่อ TENG เข้ากับความต้านทานภายนอกที่มีค่า 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 และ 1.8 MΩ ตามลำดับซึ่งสามารถแสดงผลการตอบสนองของสัญญาณไฟฟ้าที่ค่าความต้านทานต่างๆได้ดังภาพที่ 4.14 และแสดงค่ากำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ค่าความต้านทานค่าต่างๆ ดังภาพที่ 4.15 ซึ่งจากความสัมพันธ์พบว่าค่าความต่างศักย์แปรผันโดยตรงกับความต้านทานและค่ากระแสไฟฟ้าแปรผกผันกับความต้านทานซึ่งเป็นไปตามกฎของโอห์ม $V=IR$ ซึ่งกราฟของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าตัดกันที่ค่าความต้านทาน 1 MΩ จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดตัดนี้ไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้สมการ $P=I^2R$ พบว่าให้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.0869 mW คิดเป็นความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.869 W/m^2 หรือ 0.869 mW/cm^3 ซึ่งคิดเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าจากความต้านทานค่าอื่นๆ



ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้า (Power) กับและความหนาแน่นกำลัง (Power density) ที่ความต้านทานภายนอกค่าต่างๆ



ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (Current) และความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) ที่ความต้านทานภายนอกค่าต่างๆ

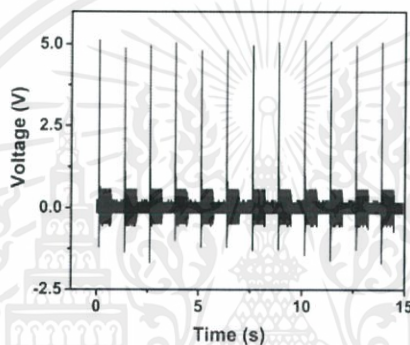
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาสมบัติของ TENG โดยใช้ข้าวที่เตรียมได้จากแม่แบบอื่นๆ

นอกจากข้าวลอบที่เตรียมจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอน ในงานวิจัยได้เตรียมข้าวลอบจากแม่แบบอีก 1 ชนิดคือแม่แบบดีวีดี (DVD-Rom) ซึ่งสามารถหาได้ง่ายและราคาไม่สูงเมื่อเทียบกับแม่แบบซิลิกอน เมื่อเตรียมข้าว PDMS จากแม่แบบดีวีดีแล้ว จากนั้นนำไปวัดสมบัติทางไฟฟ้า

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลา

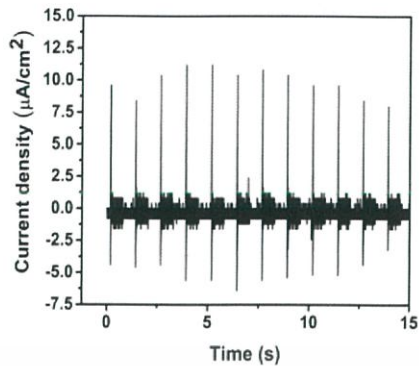
ภาพที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของ TENG ที่ใช้ข้าวลอบ PDMS ซึ่งผ่านการลอกแบบจากแม่แบบดีวีดี ขณะต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ดสแกน ความถี่ 1 Hz พบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของ TENG ขณะทำการกดเท่ากับ 4.96 ± 0.13 V และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขณะทำการปล่อยเท่ากับ -1.29 ± 0.25 V



ภาพที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของ TENG ที่ใช้ข้าวลอบ PDMS ซึ่งผ่านการลอกแบบจากแม่แบบดีวีดี ขณะต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ดสแกน ความถี่ 1 Hz พบว่า ค่าความต่างศักย์ของ TENG ขณะทำการกดเท่ากับ 4.96 ± 0.13 V และค่าความต่างศักย์ขณะทำการปล่อยเท่ากับ 1.26 ± 0.05 V

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา

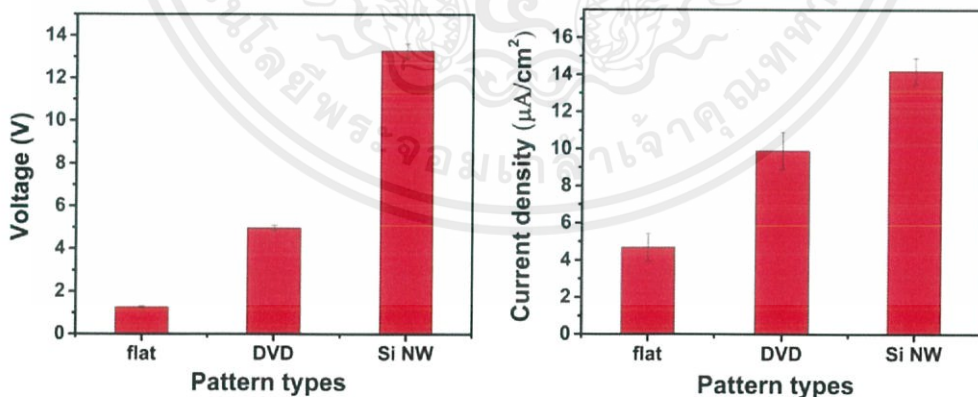
ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาของ TENG ที่ใช้ข้าวลอบ PDMS ซึ่งผ่านการลอกแบบจากแม่แบบดีวีดี ขณะต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ดสแกน ความถี่ 1 Hz พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าของ TENG ขณะทำการกดเท่ากับ 9.9 ± 1.03 μ A และค่ากระแสไฟฟ้าขณะทำการปล่อยเท่ากับ -4.92 ± 0.62 μ A



ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาของ TENG ที่ใช้ขั้วลบ PDMS ซึ่งผ่านการลอกแบบจากแม่แบบดีวีดี ขณะต่อวงจรแบบรีเวิร์สสแกน ความถี่ 1 Hz พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าของ TENG ขณะทำการกดเท่ากับ $9.9 \pm 1.03 \mu\text{A}$ และค่ากระแสไฟฟ้าขณะทำการปล่อยเท่ากับ $-4.92 \pm 0.62 \mu\text{A}$

4.3.3 เปรียบเทียบขั้วลบ PDMS ที่ลอกแบบจากแม่แบบที่มีลวดลายที่แตกต่างกัน

ภาพที่ 4.18 แสดงกราฟเปรียบเทียบขนาดสัญญาณทางไฟฟ้าของขั้วลบ PDMS ที่ลอกแบบจากแม่แบบที่มีลวดลายแตกต่างกัน พบว่า ขั้ว PDMS ที่ลอกจากแผ่นซิลิกอนที่มีผิวเรียบ ให้ค่าความต่างศักย์เท่ากับ $1.26 \pm 0.05 \text{ V}$ และค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกเท่ากับ $4.68 \pm 0.74 \mu\text{A}$ ขั้ว PDMS ที่ลอกจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เงื่อนไขเวลาในการกัดทางเคมีที่ 10 นาที ให้ค่าความต่างศักย์เท่ากับ $13.28 \pm 0.33 \text{ V}$ และค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกเท่ากับ $14.2 \pm 0.71 \mu\text{A}$ และขั้ว PDMS ที่ลอกจากแม่แบบดีวีดี ให้ค่าความต่างศักย์เท่ากับ $4.96 \pm 0.13 \text{ V}$ และค่ากระแสไฟฟ้าส่งออกเท่ากับ $9.9 \pm 1.03 \mu\text{A}$ ซึ่งจะ



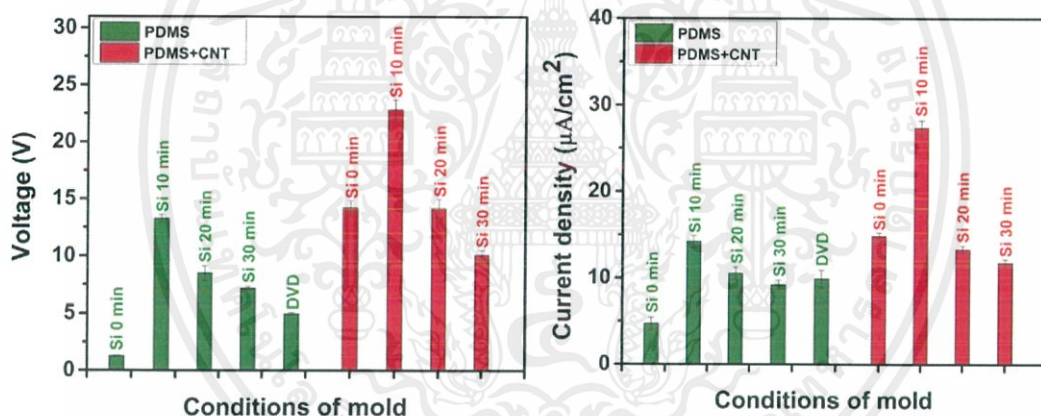
ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบขนาดสัญญาณทางไฟฟ้าของขั้วลบ PDMS ที่ลอกจากแม่แบบชนิดต่างๆ เห็นได้ว่าแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนสามารถใช้เป็นแม่แบบสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพให้ TENG ได้

จากภาพที่ 4.19 แสดงกราฟเปรียบเทียบขนาดสัญญาณทางไฟฟ้าของ TENG ที่เงื่อนไขต่างๆ โดยมีข้อมูลขนาดของสัญญาณดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4. 4 เปรียบเทียบค่าสัญญาณความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของ TENG ที่เงื่อนไขต่างๆ

เงื่อนไข	Voltage ขณะกำลังกด (Volt)	Voltage ขณะ กำลังปล่อย (Volt)	Current ขณะ กำลังกด (μA)	Current ขณะ กำลังปล่อย (μA)
PDMS 0	1.26 ± 0.05	-1.26 ± 0.07	4.68 ± 0.74	-5.2 ± 0.40
PDMS 10	13.28 ± 0.33	-5.96 ± 0.22	14.2 ± 0.71	-5.48 ± 0.44
PDMS 20	8.48 ± 0.64	-3.84 ± 0.17	10.52 ± 0.77	-4.32 ± 0.18
PDMS 30	7.16 ± 0.17	-3.08 ± 0.23	9.18 ± 0.59	-3.26 ± 0.34
PDMS-CNT 0	14.20 ± 0.63	-3.92 ± 0.39	14.84 ± 0.41	-5.28 ± 0.33
PDMS-CNT 10	22.84 ± 0.85	-9.66 ± 0.48	27.36 ± 0.88	-12.68 ± 0.71
PDMS-CNT 20	14.16 ± 0.83	-5.88 ± 0.27	13.33 ± 0.43	-3.52 ± 0.26
PDMS-CNT 30	10.08 ± 0.41	-4.68 ± 0.23	11.76 ± 0.43	-4.04 ± 0.22
PDMS-DVD	4.96 ± 0.13	-1.29 ± 0.25	9.9 ± 1.03	4.92 ± 0.62



ภาพที่ 4.19 แสดงกราฟเปรียบเทียบขนาดสัญญาณทางไฟฟ้าของ TENG ที่เงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของขั้ว PDMS/CNT NW arrays ซึ่งทำการหล่อแบบจากแม่แบบลวดนาโนซิลิกอน ซึ่งเตรียมได้จากเงื่อนไขเวลาการกัดทางเคมีที่ 10, 20 และ 30 นาทีตามลำดับ โดยได้ทำการคอมโพสิตท่อนาโนคาร์บอนลงไป 0.5%wt ซึ่งขั้วคอมโพสิตที่ได้จากการหล่อแบบสามารถเพิ่มขนาดสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้จริง สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของ TENG ให้สูงขึ้นซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองทั้งหมดได้ดังนี้

- เงื่อนไขการหล่อแบบ พบว่าที่เงื่อนไขเวลาการกัดทางเคมีที่ 10 นาทีสามารถหล่อ PDMS/CNT NW arrays ให้มีความเป็นระเบียบของลวดลายได้ดีที่สุด เนื่องจากมีความยาวของลวดนาโนซิลิกอนไม่มาก ทำให้แรงยึดเกาะ (adhesion) มีไม่มากเช่นกัน เวลาออกแบบจึงมีการฉีกขาดของพอลิเมอร์น้อยกว่าเงื่อนไขเวลาอื่นๆ ขนาดของแม่แบบลวดนาโนซิลิกอนที่เหมาะสมที่สุดมีความกว้างและความยาว 5.16 ไมโครเมตร และ 9.96 ไมโครเมตรตามลำดับ PDMS/CNT NW arrays ที่ถอดจากแม่แบบมีขนาดและความยาวเป็น 5.02 ไมโครเมตร และ 8.64 ไมโครเมตรตามลำดับ
- ขั้ว PDMS มีความต้านทานสูงมากจนไม่สามารถวัดความต้านทานได้ การผสม CNT 0.5%wt ลงไปใน PDMS ทำให้ความต้านทานของขั้วลดลง และลักษณะทางสัญญาณวิทยาของขั้วคอมโพสิตที่เงื่อนไขเวลาต่างๆ ไม่มีผลต่อค่าความต้านทานที่วัดได้ เนื่องจากผสม CNT คงที่
- การผสม CNT 0.5%wt ช่วยให้เกิดค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของ PDMS-CNT แบบที่ไม่มีลวดลายมีค่าสูงกว่าขั้ว PDMS ที่ไม่มีลวดลายถึง 11 และ 3 เท่าตามลำดับเนื่องจาก CNT เข้ามาช่วยทำให้ค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าลดลงทำให้การถ่ายโอนประจุที่ขั้วไฟฟ้าเกิดได้ดีขึ้น
- สมบัติทางไฟฟ้าของ TENG ที่ใช้ PDMS/CNT NW arrays ที่เงื่อนไขเวลาการกัดทางเคมี 10 นาที ให้ค่าความต่างศักย์สูงมากที่สุด 22.84 ± 0.85 V และให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงมากที่สุด 27.36 ± 0.88 μ A ซึ่งความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าขั้ว PDMS ที่ไม่มีลวดลายถึง 18 เท่าและสร้างกระแสไฟฟ้าสูงกว่าถึง 5.8 เท่า โดยมีค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 0.869 mW/cm^2

ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ สามารถพัฒนาต่อเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับ TENG ได้โดยอาจทำการศึกษาเพิ่มที่เงื่อนไขเวลาในการกัดทางเคมีที่น้อยกว่า 10 นาทีเพื่อทำการหาค่าเวลาที่เหมาะสมที่สุด หรืออาจปรับเปลี่ยนวัสดุที่ใช้สำหรับทำขั้วบวกให้มีความเป็นบวกสูงมากขึ้นซึ่งต้องพิจารณาสมบัติเชิงกลของวัสดุว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด และสามารถปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานได้ สำหรับเรื่องของสัญญาณรบกวนอาจจะต้องลดสภาพประจุส่วนเกินของวัสดุที่ใช้ในการให้แรงและควรวางวิธีลดการสั้นจากการกระแทกซึ่งจะมีผลให้สัญญาณนิ่งขึ้น ส่วนต่อมาก็คือการพัฒนาาระบบให้แรงให้สามารถทำงานได้ง่ายขึ้นและมีความแม่นยำสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] ปิยพงษ์ สิทธิคง. Young and Freedman. ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา-เล่มสอง อุณหพลศาสตร์ คลื่น แม่เหล็กไฟฟ้า. 2548. เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า.
- [2] Z. Wang, "Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered chemical sensors", *ACS Nano*, vol. 7, pp. 9533-9557, 2013.
- [3] F. R. Fan, L. Lin, W. Wu, R. Zhang and Z. Wang, "Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic Film", *Nano Letters*, vol. 12, pp. 3109-3114, 2012.
- [4] Y. Ko, G. Nagaraju, S. Lee and J. Yu, "PDMS-based triboelectric and transparent nanogenerators with ZnO nanorod arrays", *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 6, pp. 6631-6637, 2014.
- [5] K. Lee, J. Chun, J. Lee, K. Kim, N. Kang, J. Kim, M. Kim, K. Shin, M. Gupta, J. Baik and S. Kim, "Hydrophobic sponge structure-based triboelectric nanogenerator", *Advanced Materials*, vol. 26, pp. 5037-5042, 2014.
- [6] S. Kim, M. Gupta, K. Lee, A. Sohn, T. Kim, K. Shin, D. Kim, S. K. Kim, K. Lee, H. Shin, D. W. Kim and S. W. Kim, "Transparent flexible graphene triboelectric nanogenerators", *Advanced Materials*, vol. 26, pp. 3918- 3925, 2014.
- [7] อภิชาติ ด้านวิทยากุล. "ท่อนาโนคาร์บอน: วัสดุในอนาคต" เทคโนโลยีวัสดุ, ฉบับที่ 61, หน้า 13-18, 2553.
- [8] V. Choudhary and A. Gupta. Polymer/carbon nanotube nanocomposites (ออนไลน์). เข้าถึงได้เมื่อ เมษายน 2558. เข้าถึงได้จาก <http://www.intechopen.com/books/carbon-nanotubes-polymer-nanocomposites/polymer-carbon-nanotube-nanocomposites>.
- [9] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. ท่อนาโนคาร์บอน (ออนไลน์). เข้าถึงได้เมื่อ มีนาคม 2558. เข้าถึงได้จาก <http://th.wikipedia.org/wiki/ท่อนาโนคาร์บอน>.
- [10] McSweeney, W., Geaney, H. & O'Dwyer, C. "Metal-assisted chemical etching of silicon and the behavior of nanoscale silicon materials as Li-ion battery anodes", *Nano Research*, 8, 1395-1442, 2015.
- [11] Y. Zhu, B. Yang, J. Liu, X Wang, L Wang, X Chen and C. Yang, "A flexible and biocompatible triboelectric nanogenerator with tunable internal resistance for powering wearable devices", *Scientific Reports*, vol.6, 22233, 2016.

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล : สังกดิ์ รัตนใหม่
- วัน เดือน ปี เกิด : 20 เมษายน 2538
- ที่อยู่ปัจจุบัน : 86/126 ถ.ปากทาง ต.ในเมือง อ.เมืองพิจิตร จ.พิจิตร 66000
- ช่องทางติดต่อสื่อสาร : E-mail: songsakrattanamai@gmail.com
- เบอร์โทรศัพท์ : 091-0252050
- กิจกรรมพิเศษ : เล่นกีตาร์และเล่นกีฬาฟุตบอล
- ประวัติการศึกษา :
ชั้นประถมศึกษา โรงเรียนโรจนวิทย์มาลาเบี่ยง จังหวัดพิษณุโลก
ชั้นมัธยมศึกษา โรงเรียนพิจิตรพิทยาคม จ.พิจิตร
ชั้นปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ นาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร
- ประวัติการได้รับทุน :
1. ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยโครงการสร้างปัญญาวิทย์ ผลิตนักเทคโนโลยี (Young Scientist and Technologist Programme, YSTP) ร่วมกับ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งชาติ
- ประวัติการทำงานวิจัย :
1. ปี พ.ศ.2557 ผู้ช่วยทำงานวิจัยในหัวข้อ Electrodeposition of Manganese Oxide Nanosheets as Supercapacitor Electrode Materials ณ ห้องปฏิบัติการ Carbon Nanomaterial Research Laboratory
2. ปี พ.ศ.2558 ผู้ช่วยทำงานวิจัยในหัวข้อ Optimized manganese oxide nanosheet/manganese oxide thin film/ multiwalled carbon nanotubes as hybrid electrode materials for supercapacitors ณ ห้องปฏิบัติการ Carbon Nanomaterial Research Laboratory
3. ปี พ.ศ.2559.ได้นำเสนอผลงานวิชาการในงานประชุมวิชาการ Science and Technology of Emerging Materials (STEMa2016), พัทยา, ประเทศไทย 27-29 กรกฎาคม 2559 และได้รับรางวัล Paper award
4. ปี พ.ศ.2560 ได้รับรางวัลชนะเลิศในโครงการเยาวชนคนรักพลังงาน ซึ่งจัดโดยบริษัท โกลว์ พลังงาน จำกัด (มหาชน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้