

การเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทานโดยการเพิ่ม
ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าด้วยวัสดุคอมโพสิตของพอลิไดเมทิลไซโลเซน-
พอลิ(3-เฮกซิลไทโอฟีน)-ท่อนาโนคาร์บอน

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR BASED
ON POLYDIMETHYLSILOXANE-POLY(3-HEXYLTHIOPHENE)-
CARBON NANOTUBE COMPOSITES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR BASED
ON POLYDIMETHYLSILOXANE-POLY(3-HEXYLTHIOPHENE)-
CARBON NANOTUBE COMPOSITES



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

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาภาคนาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ

การเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทาน โดย การเพิ่ม ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าด้วยวัสดุคอมโพสิตของ พอลิไดเมทิลไซโลเซน-พอลิ(3-เฮกซิลไทโอเฟน)-ท่อนาโนคาร์บอน

Special Project Title

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR BASED ON POLYDIMETHYLSILOXANE-POLY (3-HEXYLTHIOPHENE)-CARBON NANOTUBE COMPOSITES

นักศึกษา

นาย กิตติภูมิ สุวรรณพัชรกุล

รหัสประจำตัว

57110003

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา

ภาคนาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุนาโน

ปีการศึกษา

2560

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ทศยาภรณ์	ทิววงศ์	
ดร. สากล	ระหงษ์	
ผศ.ดร. วินัดดา	วงศ์วิริยะพันธ์	

ภาควิชาภาคนาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติ ให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คารินี พรหมโยธิน)
หัวหน้าภาควิชาภาคนาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่.....15.....เดือน.....พ.ย.....พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง

นักศึกษา

ประจำตัว

ปริญญา

สาขาวิชา

พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษา

การเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทานโดยการเพิ่มความหนาแน่นประจุไฟฟ้าด้วยวัสดุคอมโพสิตของพอลิไดเมทิลไซโลเซน-พอลิ(3-เฮกซิลไทโอฟีน)-ท่อนาโนคาร์บอน

นายกิตติภฏ สุวรรณพัชรกุล

57110003

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

วิศวกรรมวัสดุนาโน

2560

ผศ. ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

บทคัดย่อ

อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทาน (Triboelectric nanogenerator; TENG) อุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลจากการเสียดสีต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าได้ โดยหลักการทำงานที่สำคัญคือการเกิดประจุไฟฟ้าจากการเสียดทานและการเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดบริเวณผิวของวัสดุตั้งนั้น โครงสร้างและชนิดวัสดุที่นำมาใช้จึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของ TENG ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพ TENG โดยการเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดประจุไฟฟ้าด้วยวัสดุผสมของพอลิไดเมทิลไซโลเซน-พอลิ(3-เฮกซิลไทโอฟีน)-ท่อนาโนคาร์บอน (PDMS-P3HT-CNT) โดยใช้ PDMS เป็นวัสดุภาคเนื้อพื้น และใช้ P3HT และ CNT เป็นวัสดุภาคที่กระจายเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า หลังจากนั้นจึงประดิษฐ์ TENG โดยใช้คู่วัสดุพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต (PET) กับวัสดุผสม PDMS-P3HT-CNT พบว่า PDMS-P3HT-CNT ที่ความเข้มข้น P3HT และ CNT เป็น 0.50 และ 0.1 wt% ตามลำดับให้ค่าประสิทธิภาพของ TENG สูงที่สุด โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 87.33 ± 3.26 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด 12.82 ± 0.26 ไมโครแอมแปร์ และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 0.085 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งให้ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าขณะกดที่ดีกว่า PDMS 4 เท่าและ 6 เท่า นอกจากนี้การเติม CNT ลงไปยังช่วยปรับปรุงเรื่องการคืนตัวของวัสดุผสมทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าขณะปล่อยที่ดีกว่า PDMS-P3HT 2 เท่าและ 4 เท่าตามลำดับ ประสิทธิภาพของ TENG ที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากการที่ P3HT กับ PDMS ผสมกันทำให้เกิดรอยต่อ p-n โดย P3HT และ PDMS ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นตามลำดับ ทำให้เกิดคูโฮลและอิเล็กตรอนที่รอยต่อ ส่งผลให้ PDMS ที่มีสภาพบวกมากขึ้นเมื่อสัมผัสกับ PET จะเหนี่ยวนำให้เกิดคู่ประจุบวกและลบที่รอยต่อเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพ TENG เพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special project title	PERFORMANCE IMPROVEMENT OF TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR BASED ON POLYDIMETHYLSILOXANE -POLY(3-HEXYLTHIOPHENE)-CARBON NANOTUBE COMPOSITES
Student	Mr.KITTIPAT SUWANPATCHARAKUL
Student ID	57110003
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2017
Special Project Advisor	Asst. Prof. Dr. Winadda Wongwiriyan

Abstract

Triboelectric nanogenerator (TENG) is a device that converts mechanical energy caused by friction into electrical energy. The main principles of TENG are is electrification and electrostatic induction. Therefore, the structure and the type of materials are the key factors for the performance of TENG. In this special project, the performance of TENG has been improved by an enhancement of electrification using composite materials of polydimethylsiloxane-poly(3-hexylthiophene)-carbon nanotube (PDMS-P3HT-CNT). PDMS was used as a matrix phase, while P3HT and CNT were used as a disperse phase. TENG device was fabricated by utilizing the friction between polyethylene terephthalate (PET) and composites of PDMS-P3HT-CNT. The PDMS-P3HT-CNT with concentrations of P3HT and CNT of 0.50 and 0.1 wt%, respectively, shows the maximum outputs of voltage, current and power density of 87 V, 12 μ A and 0.085 mW/cm², in which voltage and current outputs are higher than that of PDMS for 4 and 6 times, respectively. Moreover, adding CNT has improved a fast recover of composites, resulting in an improvement of voltage and current outputs while releasing for 2 and 4 times higher than that of PDMS-P3HT. The performance improvement of TENG is attributed to the mixing of P3HT and PDMS, resulting in a formation of p-n junction. Electron-hole pair is formed upon P3HT and PDMS, which are p- and n-type semiconductors, respectively. While contacting with PET, the positive PDMS induces the higher electron-hole pairs at the interface, resulting in a higher performance of TENG.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและjiห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ สามารถดำเนินมาจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับคำปรึกษา ความช่วยเหลือจาก ผศ.ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษและ ดร. อรรถพร คล้าชื่น ขอขอบพระคุณผศ.ดร. ทศติยาภรณ์ ทิวาวงศ์ และ ดร. สากล ระหงษ์ ประธานกรรมและกรรมการคุมสอบที่คอยให้คำแนะนำที่ดีตลอดจนการตรวจสอบโครงการพิเศษนี้ ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง นายนราธร เขมะศิริ นายสุกฤตยะ เจษฎาลักษณ์ นายณัฐเกียรติ เกตมะมะ นายชินธันย์ ปิ่นมิ่ง และ นางสาวชนกนันท์ รัตนบุษย์ ที่คอยแนะนำและสอนวิชาต่างๆเป็นเวลา 4 ปีที่ข้าพเจ้าได้ทำการศึกษา ขอขอบคุณพ่อแม่ และญาติพี่น้องของข้าพเจ้าที่คอยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อนๆในวิทยาลัยนาโนฯ ที่อยู่ร่วมกันมาตลอดระยะเวลา 4 ปี ไม่ว่าจะเป็นยามทุกข์หรือยามสุข

ข้าพเจ้าหวังว่าโครงการพิเศษเรื่องนี้จะเป็นประโยชน์ต่อบุคคลากรคนอื่นๆ ซึ่งประโยชน์ที่เกิดนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้ผู้มีพระคุณทุกท่านของข้าพเจ้า ซึ่งถ้าหากข้าพเจ้าได้ทำอะไรผิดพลาดหรือล่วงเกินก็กราบขอภัยใน ณ ที่นี้ด้วย

กิตติภักดิ์ สุวรรณพัชรกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	i
Abstract.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญภาพ	vii
สารบัญตาราง.....	ix
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 กรอบแนวคิดในการออกแบบงานวิจัย	4
1.5 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย	4
1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	6
2.1 ทฤษฎีไฟฟ้าสถิต	6
2.1.1 ประจุไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า	6
2.1.2 กฎของเกาส์.....	11
2.1.3 ศักย์ไฟฟ้า	13
2.1.4 ความจุ และ ตัวเก็บประจุ และไดอิเล็กทริก	14
2.2 ทฤษฎีของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานโดยอาศัยการเกิดพลังงานไฟฟ้าจาก การเสียดทาน.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ iv ีองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานโดยอาศัยการเกิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทาน (TENG).....	16
2.2.2 การนำ TENG ไปประยุกต์ใช้	19
2.2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ TENG รูปแบบต่างกัน.....	19
2.3 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube; CNT).....	20
2.3.1 คุณสมบัติของ CNTs.....	21
2.3.2 การประยุกต์ใช้ CNTs.....	22
2.4 พอลิ(3-เฮกซิลไทโรเฟน-2,5-ไดอิล) (Poly(3-Hexylthiophene-2,5-Diyl) P3HT).....	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
3.1 การเตรียม PDMS-P3HT และขั้วไฟฟ้า	23
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	23
3.1.3 การเตรียมแผ่น PET/ITO.....	24
3.1.4 การเตรียมสารละลาย P3HT.....	24
3.1.5 การเตรียมสารละลาย PDMS.....	24
3.1.6 การเตรียมสารละลายผสม PDMS-P3HT	24
3.1.7 การเตรียมฟิล์ม PDMS-P3HT.....	24
3.1.8 การเตรียมสารละลาย PDMS-P3HT-CNT	25
3.1.9 การเตรียมฟิล์ม PDMS-P3HT	25
3.2 การตรวจวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของวัสดุผสม PDMS-P3HT-CNT	26
3.3 การสร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยการเสียดทาน.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัย การเสียดทาน.....	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	30
4.1 ผลของความเข้มข้นของ พอลี(3-เฮกซิลไทโอฟิน) ต่อความหนาของฟิล์มบาง คอมโพสิตของพอลิไดเมทิลไซโลเซน-พอลี(3-เฮกซิลไทโอฟิน)	30
4.2 ลักษณะการกระจายตัวของ P3HT ในฟิล์มบางคอมโพสิตของพอลิไดเมทิลไซโลเซน- พอลี(3-เฮกซิลไทโอฟิน)	32
4.3 สมบัติสารกึ่งตัวนำชนิด P-type ของคอมโพสิตของพอลิไดเมทิลไซโลเซน-พอลี (3-เฮกซิลไทโอฟิน).....	36
4.4 สมบัติทางไฟฟ้าคอมโพสิตของพอลิไดเมทิลไซโลเซน-พอลี(3-เฮกซิลไทโอฟิน) ท่อนาโนคาร์บอน	37
4.5 ประสิทธิภาพของ TENG โดยการเพิ่มความหนาแน่นประจุและความนำไฟฟ้าด้วย วัสดุคอมโพสิตของพอลิไดเมทิลไซโลเซน-พอลี(3-เฮกซิลไทโอฟิน)- ท่อนาโนคาร์บอน	38
4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาที่เงื่อนไขต่างๆ.....	39
4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่เงื่อนไขต่างๆ.....	42
4.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความต้านทานค่าต่างๆ	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา.....	48
บรรณานุกรม	50
ประวัติผู้เขียน	52

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 รูปแสดงการเหนี่ยวนำประจุบนลูกบอลโลหะ [3].....	9
2.2 ตารางแสดง Triboelectric – series [2].....	16
2.3 รูปแสดงหลักการทำงานของ TENG แบบ Vertical contact-separation mode [2].....	17
2.4 รูปแสดงหลักการทำงานของ TENG แบบ Lateral sliding Mode [2].....	18
2.5 โครงสร้างเคมีของ P3HT [15].....	22
3.1 ระบบทดสอบ TENG.....	27
3.2 วงจรวัดค่าความต่างศักย์ของ TENG.....	27
3.3 วงจรวัดค่ากระแสไฟฟ้าของ TENG.....	28
3.4 วงจรวัดค่ากำลังไฟฟ้า TENG.....	28
3.5 ขั้นตอนการดำเนินโครงการพิเศษ.....	29
4.1 ภาพถ่าย FE-SEM ด้านข้าง แสดงความหนาของฟิล์มบางคอมโพลีเมอร์ที่ความเข้มข้น พอลิ (3-เฮกซิลไทโอฟีน) ที่ (a) 0.00 (b) 0.17 (c) 0.50 (d) 0.67 และ (e) 0.83 wt%.....	31
4.2 แสดงการกระจายตัวของฟิล์ม P3HT ความเข้มข้น 0.00 wt% ที่พีครามานในช่วง 2900 cm^{-1} (a) และ 2960 (b)	33
4.3 แสดงการกระจายตัวของฟิล์ม P3HT ความเข้มข้น 0.17 wt% ที่พีครามานในช่วง 1376 (a) , 1447 (b) , $2900\text{ cm}^{-1}\text{ (c)}$ และ 2960 (d)	34
4.4 แสดงการกระจายตัวของฟิล์ม P3HT ความเข้มข้น 0.50 wt% ที่พีครามานในช่วง 1376 (a) , 1447 (b) , $2900\text{ cm}^{-1}\text{ (c)}$ และ 2960 (d)	34
4.5 แสดงการกระจายตัวของฟิล์ม P3HT ความเข้มข้น 0.67 wt% ที่พีครามานในช่วง 1376 (a) , 1447 (b) , $2900\text{ cm}^{-1}\text{ (c)}$ และ 2960 (d)	35
4.6 แสดงการกระจายตัวของฟิล์ม P3HT ความเข้มข้น 0.83 wt% ที่พีครามานในช่วง 1376 (a) , 1447 (b) , $2900\text{ cm}^{-1}\text{ (c)}$ และ 2960 (d)	35
4.7 แสดงสเปกตรารามานของวัสดุผสม PDMS-P3HT ที่ความเข้มข้นของ P3HT ค่าต่างๆ.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและ **vii** อย่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.8 ภาพโครงสร้างอุปกรณ์ FET แบบ back gate	37
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าต่อศักย์ไฟฟ้าในช่วง -3 V ถึง 3 V ที่ความเข้มข้น P3HT ต่างๆ	37
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาที่เงื่อนไขความเข้มข้น P3HT ที่ 0.00, 0.17, 0.50, 0.67 และ 0.83 wt% ซึ่งต่อวงจรแบบ ฟอร์เวิร์ด (a) และ รีเวิร์ส (b) โดยใช้กาวเงิน	40
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาที่เงื่อนไขความเข้มข้น P3HT ที่ 0.00, 0.17, 0.33, 0.50, 0.67, 0.83 wt% และผสม CNT 0.10 wt% ซึ่งต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ด (a) และ รีเวิร์ส (b) โดยใช้การบัดกรี.....	41
4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าที่เงื่อนไขต่างๆ	42
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่เงื่อนไขความเข้มข้น P3HT ที่ 0.00, 0.17, 0.50, 0.67 และ 0.83 wt% ซึ่งต่อวงจรแบบ ฟอร์เวิร์ด (a) และรีเวิร์ส (b) โดยใช้กาวเงิน	44
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่ความเข้มข้น P3HT ที่ 0.00, 0.17, 0.33, 0.50, 0.67, 0.83 wt% และผสม CNT 0.10 wt% ซึ่งต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ด (a) และ รีเวิร์ส (b) โดยใช้การบัดกรี.....	45
4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่เงื่อนไขต่างๆ	46
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ที่ความต้านทานภายนอก ค่าต่างๆ.....	47
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า ที่ความต้านทานภายนอกค่าต่างๆ	47

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของ กฟผ. ปี 2560 [1]	2
1.2 แสดงแผนการดำเนินงานในช่วงเวลาต่างๆ ในแต่ละเดือน.....	5
2.1 การเปรียบเทียบค่าเอาท์พุทของงานวิจัย	20
3.1 อัตราส่วนความเข้มข้นโดยน้ำหนัก P3HT ต่อ PDMS	25
3.2 อัตราส่วนความเข้มข้นโดยน้ำหนักของ CNT ต่อ สารผสม PDMS-P3HT.....	25
4.1 ตารางแสดงค่าความหนาฟิล์มที่เงื่อนไขต่างๆ.....	31
4.2 ตารางแสดงค่าความต้านทานเฉลี่ยของคอมโพสิตฟิล์มที่เงื่อนไขต่างๆ	38
4.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ที่เงื่อนไขต่างๆโดยใช้กาวเงินเชื่อมสายไฟ	41
4.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ที่เงื่อนไขต่างๆโดยวิธีบัดกรีสายไฟ	41
4.5 ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ที่เงื่อนไขต่างๆโดยใช้กาวเงินเชื่อมสายไฟ	44
4.6 ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ที่เงื่อนไขต่างๆโดยวิธีบัดกรีสายไฟ	45

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบัน พลังงานไฟฟ้า เป็นสิ่งจำเป็นต่อประชากรทั่วทุกมุมโลก เนื่องจาก พลังงานไฟฟ้าถูกนำมาใช้งานในหลายๆด้าน อาทิเช่น ด้านการสื่อสาร ด้านการคมนาคม ด้านการศึกษา รวมถึงการใช้ในครัวเรือนทั่วไปอีกทั้งยังเป็นตัวแปรสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์

แหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าที่สำคัญในประเทศไทย มาจาก แหล่งพลังงานก๊าซธรรมชาติ และ ถ่านหิน ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ซึ่งในปัจจุบันประชากรมีจำนวนเพิ่มขึ้นทุกปีทำให้แหล่งพลังงานเหล่านี้เริ่มผลิตไม่พอกับปริมาณที่ต้องการใช้ ดังนั้นการเลือกใช้พลังงานทดแทนจึงเป็นที่น่าสนใจ โดยพลังงานทดแทนได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อน พลังงานนิวเคลียร์ และ พลังงานกล จากนั้นพลังงานเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อทดแทนพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานสะอาด สามารถใช้ได้ไม่หมดหรือสามารถหามาทดแทนได้โดยที่อัตราส่วนการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานต่าง ๆ ในปี 2560 แสดงดังตารางที่ 1.1 การเปลี่ยนรูปพลังงานทดแทนเป็นพลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน ซึ่งอุปกรณ์ในระดับนาโนเมตร ที่ทำการเปลี่ยนรูปพลังงานต่าง ๆ ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า เรียกว่าอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโน (Nanogenerator) [2] โดยอาศัยกระบวนการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า (Piezoelectric) [2] กระบวนการเปลี่ยนการเสียดทานเป็นพลังงานไฟฟ้า (Triboelectric) [2] กระบวนการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า (Pyroelectric) [2] ซึ่งในปัจจุบันนั้น อุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนโดยอาศัยการเกิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทาน (Triboelectric nanogenerator, TENG) [2] เป็นที่สนใจ เนื่องจากการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์มีการเสียดทานเกิดขึ้นมากมายไม่ว่าจะเป็น การขยับของร่างกาย การหิวนม การขยับของเสื้อผ้าที่สวมใส่ เป็นต้น ซึ่ง TENG จะอาศัย 2 ปรัชญาการณ ในการกำเนิดไฟฟ้าได้แก่ 1. กระบวนการสร้างประจุจากการเสียดทานของวัตถุ (Triboelectrification effect) [2] เป็นการนำวัตถุ 2 ชนิดที่มีค่า สัมประรรคภาพอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แสดงสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของ กฟผ. ปี 2560 [1]

ประเภทเชื้อเพลิง	สะสมเดือนมกราคม-ธันวาคม 2560	
	จำนวน (ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง)	ร้อยละ
ก๊าซธรรมชาติ	119,881.02	63.48
ถ่านหิน (รวมลิกไนต์)	44,598.79	23.62
พลังงานหมุนเวียน (พลังน้ำ, อื่นๆ)	21,938.43	11.62
น้ำมันเตา	219.57	0.11
น้ำมันดีเซล	190.57	0.10
อื่นๆ (สปป ลาว, มาเลเซีย, ลำตะคองชลภาวัฒนา)	2,018.49	1.07
รวม	188,846.35	100

(Electron affinity: EA) ต่างกันมาสัมผัสกัน โดยวัตถุที่มีค่า EA น้อยกว่าจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ส่วนวัตถุที่มีค่า EA มากกว่าจะเป็นตัวให้อิเล็กตรอน เพื่อให้เกิดประจุส่วนเกินที่ผิวของวัตถุ 2 ชนิดที่มากสัมผัสกัน 2. การเหนี่ยวนำประจุที่ขั้วไฟฟ้า (Electrostatic induction) [2] หลังจากที่เกิดประจุส่วนเกินที่ผิวของวัตถุ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าที่ขั้วโลหะโดยที่ประจุที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจะมีประจุตรงข้ามกับสภาพประจุส่วนเกินที่ผิวของวัตถุ และเมื่อต่อขั้วไฟฟ้าทั้งที่ติดกับด้านหลังของวัตถุทั้ง 2 ชนิดเข้าด้วยกันจะส่งผลให้อิเล็กตรอนเกิดการไหลระหว่างขั้วไฟฟ้า เพื่อทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ฝั่งมีค่าเท่ากัน อิเล็กตรอนที่เกิดการไหลจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นมาในทิศตรงข้าม

การเพิ่มความหนาแน่นประจุไฟฟ้าสามารถทำได้หลายวิธีได้แก่ (1) การเลือกวัสดุที่มีค่า EA ต่างกันเช่น พอลิไดเมทิลไซโลเซน (PDMS) กับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต (PET) ในที่นี้ PDMS จะเป็นบวกมากกว่า PET (2) การออกแบบลวดลายโครงสร้างในระดับไมโคร-นาโนเมตร เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสัมผัสของ TENG [2] ส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าที่ขั้ว มีการนำเสนอวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์กับท่อนาโนคาร์บอนเพื่อปรับปรุงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของพอลิเมอร์ (Dielectric constant) และเพิ่มค่ามอดูลัสของยังของตัววัสดุเพื่อให้วัสดุสามารถคืนรูปได้อย่างรวดเร็วหลังการสัมผัสทำให้สามารถเหนี่ยวนำกระแสได้อย่างรวดเร็ว

อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาแน่นประจุไฟฟ้าโดยการเลือกวัสดุจากการพิจารณาค่า EA มีข้อจำกัดเนื่องจากปริมาณชนิดของวัสดุที่มีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงนำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทานโดยการเพิ่มความหนาแน่นประจุไฟฟ้าด้วยวัสดุคอมโพสิตของ PDMS-P3HT-CNT โดยใช้ PDMS เป็นวัสดุภาคเนื้อพื้นและใช้P3HT ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี และท่อนาโนคาร์บอนซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีและมามีค่ามอดูลัสของยังสูงเป็นวัสดุภาคที่กระจาย

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการสร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนโดยอาศัยการเกิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทาน (TENG)
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการเตรียมสารผสมคอมโพสิต PDMS-P3HT-CNT
- 1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำเนิดไฟฟ้าจากการเสียดทานจากการเพิ่มความหนาแน่นประจุไฟฟ้าโดยการสร้าง TENG ที่ใช้ PDMS-P3HT-CNT เป็นองค์ประกอบ

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

เนื่องจากการเลือกใช้วัสดุที่มีค่า EA ต่างกันจะส่งผลต่อการให้และรับอิเล็กตรอน ซึ่งทำให้ความหนาแน่นประจุมากยิ่งขึ้นโดยการเลือกใช้พอลิไดเมทิลไซโลเซน-พอลิ(3-เฮกซิลไทโอฟีน) (P3HT) มาเป็นวัสดุคอมโพสิตนั้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ TENG ได้เนื่องจากเมื่อผสม P3HT กับ พอลิไดเมทิลไซโลเซน (PDMS) แล้วไปสัมผัสกับ ขั้ว พอลิเอทิลีนเทเรพทาเรต/อินเดียมทินออกไซด์ (PET/ITO) ตัว PET จะมีค่า EA สูงกว่า PET ทำให้เป็นตัวให้อิเล็กตรอนแก่ PDMS ส่งผลให้ PET มีความเป็นบวกมากกว่า PDMS และถ้าเราเติม P3HT ที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณผิวของ PET มาที่ PDMS ได้ง่ายขึ้นซึ่งช่วยในการเกิดการแลกเปลี่ยนประจุมากขึ้นที่บริเวณผิวที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง PDMS และ PET ทำให้ความหนาแน่นประจุไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการผสม CNT ที่มีค่ามอดูลัสของยังที่สูงช่วยในการทนการสึกหรอและทำให้ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity) มีค่าลดลงซึ่งส่งผลให้ประจุไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำมีค่ามากขึ้นและนอกจากนี้ CNT ยังเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู๋บริเวณผิวของ PET มาที่ PDMS ได้ง่ายขึ้นซึ่งช่วยในการเกิดการแลกเปลี่ยนประจุมากขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง PDMS และ PET ทำให้ความหนาแน่นประจุไฟฟ้ามากยิ่งขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของ TENG มีค่าสูงยิ่งขึ้น

ดังนั้นการทำวัสดุคอมโพสิต PDMS-P3HT-CNT จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่เกิดจากการสัมผัสกันของวัสดุสองชนิดมากยิ่งขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของ TENG มีค่าสูงขึ้น และช่วยเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มคอมโพสิตที่มี PDMS เป็นเนื้อพื้น

1.4 กรอบแนวคิดในการออกแบบงานวิจัย

1.4.1 การใช้พอลิไดเมทิลไซโลเซน-พอลิ(3-เฮกซิลไทโอฟีน) (P3HT) ที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะช่วยเพิ่มความหนาแน่นประจุไฟฟ้ามากยิ่งขึ้นส่งผลให้ TENG มีค่าเอาต์พุตสูงขึ้น

1.4.2 การใช้ CNT เข้ามาทำเป็นวัสดุคอมโพสิต จะทำให้ TENG ที่สร้างขึ้นมีความยืดหยุ่น ทนแรงต่อการกด และเพิ่มความหนาแน่นประจุไฟฟ้ามากยิ่งขึ้นทำให้ TENG มีประสิทธิภาพเอาต์พุตได้มากขึ้น

1.5 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ทำการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิต PDMS-P3HT-CNT โดยใช้กระบวนการการเคลือบผิวแบบปั่นเหวี่ยง (Spin coating) ในการสร้างแผ่นฟิล์ม ซึ่งตัวแปรได้แก่ ความเข้มข้นของ P3HT และความหนาของฟิล์ม

1.5.2 ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสม PDMS-P3HT-CNT

1.5.3 ทดสอบประสิทธิภาพของ TENG ที่ใช้แผ่นฟิล์มคอมโพสิต PDMS-P3HT-CNT โดยศึกษา ค่าเอาต์พุตในด้าน ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และค่าระยะเวลาการถ่ายเทประจุ

1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย

- 1.6.1 ศึกษาหาข้อมูลและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.6.2 ทำการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิต PDMS-P3HT-CNT โดยใช้เทคนิค Spin coating
- 1.6.3 ทำการประกอบ TENG โดยใช้แผ่นฟิล์มคอมโพสิต PDMS-P3HT-CNT
- 1.6.4 ทำการวิเคราะห์ ความหนาและพื้นผิว แผ่นฟิล์มคอมโพสิต PDMS-P3HT-CNT
- 1.6.5 ทดสอบประสิทธิภาพของ TENG ที่ประดิษฐ์ขึ้นมา

แสดงแผนการดำเนินงานในช่วงเวลาต่าง ๆ ในแต่ละเดือนดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 แสดงแผนการดำเนินงานในช่วงเวลาต่างๆ ในแต่ละเดือน

แผนการดำเนินงาน	ช่วงเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานแต่ละส่วน			
	สิงหาคม - ตุลาคม พ.ศ. 2560	พฤศจิกายน - ธันวาคม พ.ศ.2560	มกราคม - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561	มีนาคม - เมษายน พ.ศ. 2561
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 ทฤษฎีไฟฟ้าสถิต

2.1.1 ประจุไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า

ในปัจจุบันนี้ การใช้ชีวิตของมนุษย์มีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากที่สร้างจากปรากฏการณ์ สภาวะแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetism) ไม่ว่าจะเป็น โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์ โทรทัศน์ เป็นต้น ซึ่งสภาวะแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นการรวม 2 ปรากฏการณ์เข้าด้วยกันคือ ปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก นอกจากสภาวะแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกนำไปใช้เป็นหลักการพื้นฐานในการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ แล้ว ยังสามารถนำไปอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติที่พบในชีวิตประจำวันได้ เช่น ฟ้าแลบ ฟ้าผ่า ฟ้าร้อง และรุ้งกินน้ำ เป็นต้น

ก่อนหน้านี้ได้มีการศึกษาค้นคว้าเรื่องไฟฟ้าสถิต และมีการประดิษฐ์คิดค้นอุปกรณ์ที่จะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าปริมาณมากขึ้น หลากหลายวิธีด้วยกัน โดยถ้าเกิดประจุสะสม ประจุไฟฟ้าจะทำให้เกิดประกายไฟฟ้าได้ เพราะเกิดจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าผ่านอากาศอย่างรวดเร็ว โดยคนที่พิสูจน์ปรากฏการณ์นี้ ก็คือ เบนจามิน แฟรงคลิน (Benjamin Franklin) ซึ่งใช้ขั้วเป็นเครื่องมือทดสอบว่ามีประจุไฟฟ้าอยู่ในเมฆ และฟ้าผ่าคือการถ่ายเทประจุไฟฟ้าเช่นเดียวกับการเกิดประกายไฟฟ้า นอกจากนี้ เบนจามิน แฟรงคลิน ก็ยังเป็นผู้ริเริ่มประดิษฐ์สายล่อฟ้า

2.1.1.1 ประจุไฟฟ้า

ในอดีตเมื่อประมาณ 600 ปีก่อนคริสต์ศักราช ได้มีนักปราชญ์ชาวกรีกชื่อ ทาลีส ค้นพบว่าเมื่อนำแท่งอำพัน (Amber) มาถูกับผ้าขนสัตว์ ทำให้แท่งอำพันสามารถดูดขนนกหรือวัตถุที่มีขนาดเล็กๆ ได้ ซึ่งการถูจะทำให้วัตถุเกิดประจุไฟฟ้าขึ้น หรือสามารถอธิบายได้อีกอย่างว่า วัตถุมีประจุไฟฟ้าสุทธิปริมาณหนึ่ง โดยคำว่า electricity มาจากคำว่า elecktron ในภาษากรีกหมายถึง อำพัน นอกจากนี้มีวัตถุอีกหลายชนิดที่สามารถทำการถูกันแล้วเกิดประจุไฟฟ้าขึ้นได้

เมื่อทำการทดลอง โดยนำผ้าแพรถูกับแท่งแก้ว 2 แท่ง แล้วนำแท่งแท่งแก้วทั้งสอง มาแขวนไว้ใกล้กัน ปรากฏว่า แท่งแก้วทั้งสองเบนหนีออกจากกัน แสดงว่ามีแรงผลักระหว่างแท่งแก้วทั้ง

สอง แต่ทว่า ถ้านำแท่งแก้ว 2 แท่ง แท่งหนึ่งถูด้วยผ้าแพร อีกแท่งถูด้วยผ้าขนสัตว์ แล้วนำมาแขวนใกล้กันปรากฏว่า แท่งแก้วทั้งสองเบนเข้าหากัน แสดงว่ามีแรงดูดเกิดขึ้นระหว่างแท่งแก้วทั้งสอง

จากการทดลอง จะสรุปได้ว่าประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการถูกันจะมีเพียง 2 ชนิดเท่านั้น โดยประจุชนิดเดียวกันจะผลักรัน ประจุต่างชนิดกันจะดึงดูดเข้าหากัน ซึ่ง เบนจามิน แฟรงคลิน ได้กำหนดให้ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแท่งแก้วเมื่อถูด้วยผ้าแพรจะเป็นประจุบวก (Positive Charge) โดยแทนด้วยเครื่องหมาย “+” ส่วนประจุที่เกิดขึ้นที่แท่งอำพันเมื่อถูด้วยผ้าขนสัตว์จะเป็นประจุลบ (Negative Charge) โดยแทนด้วยเครื่องหมาย “-”

เมื่อทำการทดลองกับวัตถุอื่น ๆ มาถูกัน ดังการทดลองข้างต้นแล้วเกิดประจุไฟฟ้าขึ้นจะพบว่า ไม่ว่าจะเปลี่ยนไปใช้วัสดุประเภทใด ก็เกิดแรงกระทำไม่ผลักรันก็ดึงดูดกัน จึงสรุปได้ว่าถ้าประจุที่เป็นชนิดเดียวกันจะผลักรัน แต่ถ้าประจุต่างชนิดกันจะดึงดูดกัน ซึ่งที่กล่าวมานี้เป็นพื้นฐานของประจุไฟฟ้า เป็นเพียงจุดเริ่มต้นการค้นพบประจุไฟฟ้าเท่านั้น

2.1.1.2 ประจุไฟฟ้าในอะตอม

จากที่กล่าวมาข้างต้น วัตถุชนิดต่างๆก่อนที่จะนำมาถูกับผ้า จะไม่แสดงอำนาจทางไฟฟ้า ซึ่งเราสามารถศึกษาทฤษฎีไฟฟ้า ได้จาก ทฤษฎีอิเล็กตรอน (Electron Theory) ทฤษฎีนี้จะอธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างของอะตอม โดยแบบจำลองอะตอมจะประกอบด้วย

1. นิวเคลียส (Nucleus) ซึ่งเป็นแกนกลางของอะตอม ภายในนิวเคลียสประกอบด้วย อนุภาคที่มีประจุบวก เรียกว่าโปรตอน และอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเรียกว่า นิวตรอน
2. อิเล็กตรอน (Electron) เป็นอนุภาคที่มีประจุลบ เคลื่อนที่กระจายตัวรอบนิวเคลียส

โดยนิวเคลียสจะมีขนาดเล็กมากเมื่อทำการเทียบกับขนาดของอะตอม ถ้าหากนิวเคลียสมีขนาดประมาณ ลูกแอปเปิ้ล อะตอมจะมีขนาดประมาณ 2-3 กิโลเมตร แม้ว่าขนาดของนิวเคลียสจะมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของอะตอม แต่ทว่ามวลทั้งหมดเกือบ 100% ของอะตอมจะอยู่ที่นิวเคลียส เนื่องจากอิเล็กตรอนมีมวลน้อยมากเมื่อเทียบกับ โปรตอนและนิวตรอน จึงทำให้อิเล็กตรอนสามารถหลุดออกจากอะตอมหนึ่งไปอีกอะตอมได้เมื่อได้รับพลังงานมากกระตุ้นมากพอ ซึ่งอะตอมที่มีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับจำนวนโปรตอน จะไม่แสดงอำนาจทางไฟฟ้าเนื่องจาก ประจุในอิเล็กตรอนและโปรตอนมีเครื่องหมายประจุเท่ากัน(เครื่องหมายตรงกันข้าม) ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ เรียกสภาวะนี้ว่า เป็นกลางทางไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม ประจุสุทธิในอะตอมมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ก็ได้เรียกว่าสภาพัตถุมีประจุไฟฟ้า หากจำนวนโปรตอนมีมากกว่าจำนวนอิเล็กตรอนจะทำให้อะตอมมีประจุส่วนเกินเป็นประจุบวก ซึ่งจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกอะตอมที่มีประจุส่วนเกินเป็นบวกว่าไอออนบวก แต่ถ้าหากจำนวนอิเล็กตรอนมีมากกว่าจำนวนโปรตอนจะทำให้อะตอมมีประจุส่วนเกินเป็นประจุลบ โดยจะเรียกอะตอมที่มีประจุส่วนเกินเป็นลบว่าไอออนลบ

นอกจากนี้ยังมีหลักการสำคัญของประจุไฟฟ้าอีกข้อคือ กฎการอนุรักษ์ (Law of conservation of charge) คือการที่เราทำให้วัตถุมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นไม่ใช่การสร้างประจุขึ้นมาใหม่ แต่เป็นการเคลื่อนย้ายประจุจากแห่งหนึ่งไปยังอีกแห่งหนึ่ง โดยประจุไฟฟ้ารวม หรือผลรวมของจำนวนประจุทั้งหมดในระบบที่เราสนใจยังคงเท่าเดิม

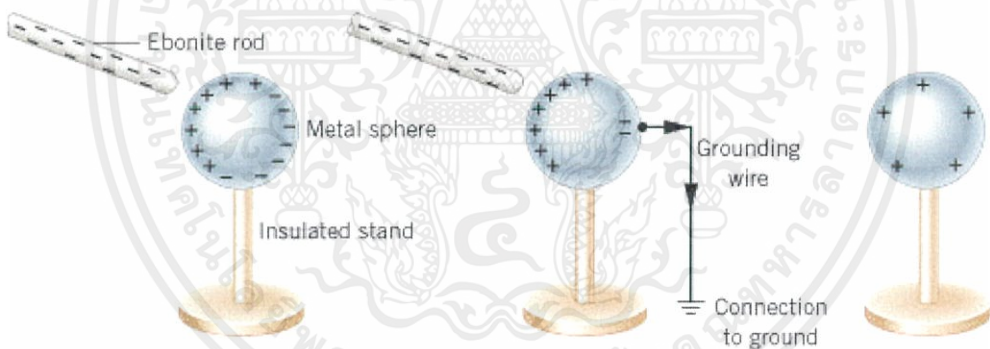
2.1.1.3 ฉนวนและตัวนำ

การที่ประจุมีความสามารถในการเคลื่อนที่จากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่ง ซึ่งเราสามารถแบ่งประเภทการที่ประจุเคลื่อนที่ได้ออกเป็น 4 ประเภทหลักๆ โดยประเภทแรกคือ ตัวนำไฟฟ้า (Conductor) หรือเรียกอีกอย่างว่า ตัวนำ คือ วัตถุที่ประจุเคลื่อนที่กระจายไปได้ตลอดเนื้อวัตถุอย่างง่ายหรือสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ โดยวัตถุประเภทตัวนำไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นโลหะ เช่น เงิน ทองแดง ทองคำ เป็นต้น ประเภทที่ 2 คือ ฉนวนไฟฟ้า (Insulator) หรือเรียกสั้นๆว่าฉนวน เป็นวัตถุที่ประจุไม่สามารถเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่ได้หรือไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เช่น กระเบื้อง ยาง พลาสติก เป็นต้น ประเภทที่ 3 คือ สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งสารกึ่งตัวนำจะมีคุณสมบัติเป็นได้ทั้ง ตัวนำและฉนวน โดยถ้าโครงสร้างของวัตถุเป็นผลึก สารกึ่งตัวนำจะมีสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า แต่ทว่าหากมีการเติมสารเจือปนเข้าไปในโครงสร้างผลึก จนทำให้มีการรับหรือสูญเสียอิเล็กตรอน จะส่งผลทำให้สารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำ ได้แก่ ซิลิกอน (Silicon) และเจอร์เมเนียม (Germanium เป็นต้น ซึ่งสารกึ่งตัวนำนิยมทำเป็นชิ้นส่วนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ (Transistor) ประเภทที่ 4 คือ ตัวนำยิ่งยวด เป็นวัตถุที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงมาก (ประมาณอนันต์) เมื่อวัตถุมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) หรืออธิบายได้ว่า ตัวนำยิ่งยวดมีค่าความต้านทานการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าเป็นศูนย์ ทำให้กระแสไฟฟ้าอยู่ในตัวนำยิ่งยวดโดยไม่ลดลง

โดยปกติวัตถุจะมีโปรตอนและอิเล็กตรอนในจำนวนที่เท่ากัน เพราะฉะนั้นประจุบวกและประจุลบในวัตถุจึงเท่ากันและจะไม่มีแรงระหว่างประจุไฟฟ้ากระทำต่อกันเรียกว่า วัตถุอยู่ในสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ซึ่งเราสามารถทำให้วัตถุมีประจุเราสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การถู การแตะ การเหนี่ยวนำ เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีไม่ได้เป็นการสร้างประจุใหม่แต่เป็นเพียงการย้ายประจุเท่านั้น จำนวนประจุรวมทั้งระบบยังคงเท่าเดิม ตามกฎการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (Electric Induction) เป็นการนำวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าเข้าใกล้กับวัตถุที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า จะทำให้มีการเหนี่ยวนำทางประจุไฟฟ้าบนผิวตัวนำเกิดการเคลื่อนที่แยกออกจากกัน เพราะว่ามีคุณสมบัติการเกิดแรงดึงดูดกับผลักระหว่างประจุ ส่งผลให้ผิวตัวนำฝั่งที่อยู่ใกล้กับวัตถุที่นำมาเหนี่ยวนำมีชนิดประจุตรงข้ามกัน ส่วนผิวตัวนำที่อยู่อีกฝั่งจะมีประจุชนิดเดียวกับวัตถุที่นำมาเหนี่ยวนำ เช่น ถ้านำแท่งที่มีประจุลบเข้าใกล้กับลูกบอลโลหะที่เป็นกลาง ในตอนแรกประจุบวกที่ผิวลูกบอลโลหะจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ประจุลบของแท่งที่นำมาเหนี่ยวนำ เนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างประจุ (ประจุลบกับประจุบวก ประจุต่างชนิดกันจะดึงดูดกัน) ส่วนประจุลบที่ผิวลูกบอลโลหะจะเคลื่อนที่ไปอีกฝั่งเนื่องจากมีแรงผลักระหว่างประจุ (ประจุลบกับประจุลบ เนื่องจากประจุชนิดเดียวกันจะผลักรัน) ถ้านำแท่งที่มีประจุบวก ประจุในผิวลูกบอลโลหะจะกลับมาเป็นเหมือนเดิมและเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่ว่าถ้านำลวดตัวนำด้านหนึ่งต่อเข้ากับผิวฝั่งตรงข้ามแท่งเหนี่ยวนำ ส่วนปลายอีกด้านต่อลงดิน จะส่งผลทำให้ประจุลบบางตัวเคลื่อนที่ผ่านลวดลงดิน เนื่องจากการรั่วสายฟ้าหรือลวดตัวนำต่อระหว่างวัตถุที่มีประจุกับพื้นดิน เพื่อจะทำให้วัตถุนั้นเป็นกลางทางไฟฟ้า จากนั้นเมื่อนำลวดตัวนำออกจากผิวลูกบอลโลหะจะทำให้มีประจุบวก เหลืออยู่ที่ลูกบอลโลหะ ดังภาพ 2.1



ภาพที่ 2.1 รูปแสดงการเหนี่ยวนำประจุบนลูกบอลโลหะ [3]

2.1.1.4 แรงไฟฟ้าระหว่างประจุ (กฎคูลอมบ์)

นักวิทยาศาสตร์ได้แบ่งแรงในธรรมชาติออกเป็น 4 ประเภท ซึ่งประกอบด้วย แรงโน้มถ่วง (Gravitational force) แรงแม่เหล็ก (Magnetic force) แรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) และแรงนิวเคลียร์ (Nuclear force) ซึ่งการค้นพบประจุไฟฟ้า ทำให้ทราบว่า ประจุไฟฟ้าหนึ่งจะออกแรงกระทำต่ออีกประจุไฟฟ้าหนึ่ง ถ้าหากว่าประจุมีเครื่องหมายเหมือนกัน แรงที่เกิดจะเป็นแรงผลักรันระหว่างประจุ ถ้าหากประจุมีเครื่องหมายตรงข้ามกัน แรงที่เกิดจะเป็นแรงดึงดูดระหว่างประจุ ต่อมา

นักวิทยาศาสตร์ ชาร์ล-โอกุสแตง เดอ คูลอมบ์ (Charles-Augustin de Coulomb) ได้ทำการศึกษาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงระหว่างประจุไฟฟ้า โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องชั่งการบิด (Torsion balance) ซึ่งมี ส่วนประกอบสำคัญได้แก่คานเล็กๆทำด้วยฉนวนและมีลูกพิทติดที่ปลายคาน ข้างละหนึ่งลูก คือ ลูก A และ ลูก B ซึ่งคานนี้แขวนกับลวดเงินเส้นเล็กๆ โดยที่คานวางตัวอยู่ในแนวระดับ ลูกพิทอีกลูกหนึ่งคือ C อยู่ใกล้กับ A เมื่อ C ทำให้ A เกิดประจุ จะทำให้เกิดแรงระหว่างประจุบน A กับ C ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดโมเมนต์กระทำต่อคาน ส่งผลให้คานเบี่ยงเบนออกจากแนวเดิม โดยมีลวดเงินเป็นแกนหมุน ลวดเงินจะเกิดการบิดตามการหมุนของคาน จากผลการทดลองของคูลอมบ์ สามารถสรุปได้ว่า (1. แรงระหว่างประจุมีค่าแปรผันตรงกับผลคูณระหว่างประจุทั้งสอง เขียนสมการออกมาได้ในลักษณะดังนี้ $F \propto q_1 q_2$ (2. แรงระหว่างประจุแปรผกผันกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างประจุทั้งสอง ($F \propto \frac{1}{r^2}$) ซึ่งถ้าอาศัยหลักการคณิตศาสตร์จะได้ว่า

$$F = k_0 \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (2.1)$$

โดยที่ค่า k_0 ใช้ตัวห้อยเลขศูนย์เพื่อแสดงว่า ขนาดของแรงไฟฟ้าในสมการเกิดขึ้นจาก ประจุ q_1 และ q_2 ที่เกิดอยู่ในสุญญากาศเท่านั้น ในทางปฏิบัติสามารถใช้ค่าคงตัว k_0 ในกรณีที่อยู่ในอากาศ ได้ โดยค่า k_0 มีค่าประมาณ $8.988 \times 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2$ นอกจากนี้เรายังสามารถแทน k_0 ด้วยค่า ϵ_0 เรียกอีกอย่างได้ว่า สภาพยอมของสุญญากาศ(Permittivity constant) ได้ดังนี้

$$k_0 = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \quad (2.2)$$

เมื่อ ϵ_0 มีค่าประมาณ $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{Nm}^2$

2.1.1.5 สนามไฟฟ้า

จากที่กล่าวมาข้างต้น การคำนวณแรงไฟฟ้ายังมีจุดอ่อนที่เห็นได้ชัดเจนคือ ขนาดของแรงไฟฟ้าบนประจุ q_2 จากการกระทำของประจุ q_1 แต่ไม่ได้ขึ้นกับ q_1 เพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับประจุ q_2 ด้วยเช่นกัน ซึ่ง ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้เสนอแนวคิดที่ทำให้ยอมรับแรงทางไฟฟ้าที่กระทำบนระยะห่างได้ง่ายขึ้น และช่วยในการคำนวณแรงทางไฟฟ้าเมื่อประจุมีการเปลี่ยนแปลง คือ สนามไฟฟ้า สามารถอธิบายได้ว่า สนามไฟฟ้าในบริเวณที่นำประจุไปวาง และเรียกประจุนั้นว่า ประจุทดสอบ (q_0) ซึ่งนิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้เป็นประจวบทุก ส่วนประจุที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าจะแทนด้วย q_s หรือเรียกว่าจุดแหล่ง(Source point) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงบริเวณที่ว่างรอบๆประจุ q_s จะเรียกว่า สนามไฟฟ้า (E) จากประจุ q_s ถ้าเราพิจารณาประจุทดสอบ q_0 สนามไฟฟ้าที่เกิดจะมีแรงทางไฟฟ้าออกจากประจุ q_s มากกระทำกับประจุทดสอบ q_0 ซึ่งแนวคิดของหลักการ สนามไฟฟ้าจึงทำให้แรงไฟฟ้ามีลักษณะใกล้เคียงกับแรงสัมผัส ทำให้ยอมรับได้ง่ายขึ้น โดยเราสามารถเขียนสมการที่มีแรงกระทำทางไฟฟ้าที่ประจุทดสอบ q_0 ได้ดังนี้

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (2.3)$$

ซึ่งสนามไฟฟ้า E จะเท่ากับแรงทางไฟฟ้าต่อประจุ โดยหน่วยของแรงทางไฟฟ้าจะมีหน่วยเป็นนิวตัน ส่วนประจุ จะมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ ส่งผลให้สนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น นิวตันต่อคูลอมบ์ (N/C) ในอีกกรณีที่เรารู้สนามไฟฟ้า เราสามารถหาแรงที่กระทำต่อประจุนั้นได้จากสมการ

$$F = qE \quad (2.4)$$

สนามไฟฟ้าที่กล่าวถึง เป็นเพียงหลักการเบื้องต้นอธิบายว่า สนามไฟฟ้าจะส่งผลให้แรงทางไฟฟ้า มีลักษณะใกล้เคียงกับแรงสัมผัส และ สนามไฟฟ้าสามารถใช้สมการคำนวณแรงทางไฟฟ้าที่จุดใดๆได้ เมื่อมีประจุวางอยู่บริเวณนั้น ดังนั้นในต่อไปจะอธิบายรายละเอียดอื่นๆเพิ่มเติมเพื่อช่วยในการคำนวณและเข้าใจหลักการสนามไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งก็คือ ขนาดและทิศทางของสนามไฟฟ้า เนื่องจากสนามไฟฟ้าเป็นปริมาณเวกเตอร์ ทิศทางของสนามไฟฟ้าแบ่งได้ เป็น 2 ประเภทตาม ชนิดของประจุ q_s เราสามารถทดสอบได้โดย ถ้าเรานำประจุทดสอบ q_0 ไปวางใกล้บริเวณประจุ q_s แล้วประจุ q_s เป็นประจวบทุกทิศทางของสนามไฟฟ้าจะมีทิศพุ่งออกจากประจุ q_s แต่ถ้าประจุ q_s เป็นประจุลบทิศทางของสนามไฟฟ้าจะมีทิศพุ่งเข้าสู่ประจุ q_s ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า สนามไฟฟ้าของประจุที่จุดแหล่งจะมีทิศพุ่งออกจากประจวบทุก แต่มีทิศพุ่งเข้าหาประจุลบเสมอ

2.1.2 กฎของเกาส์

จากการคำนวณหาสนามไฟฟ้าที่ได้ศึกษาจากที่กล่าวมาทำให้เห็นว่าการหาสนามไฟฟ้าจะใช้กฎคูลอมบ์มาใช้ร่วมกับหลักการสนามไฟฟ้า ซึ่งอาจต้องใช้การคำนวณปริพันธ์ทำให้หาค่าได้ลำบาก

แต่ยังมีวิธีในการหาสนามไฟฟ้าเรียกว่า กฎของเกาส์ (Gauss' Law)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎของเกาส์ถูกคิดค้นโดยนักคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อ คาร์ล ฟรีดริช เกาส์ (Carl Friedrich Gauss) ซึ่งกฎของเกาส์เกิดจากการพิจารณาเส้นสนามไฟฟ้าที่ผ่านผิวใดๆ ส่งผลให้เกิดปริมาณใหม่เรียกว่า ฟลักซ์ไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น ถ้านำพื้นผิวรูปสี่เหลี่ยม ที่มีพื้นที่ A วางไว้ในสนามไฟฟ้า แล้วสังเกตทิศที่ระนาบของผิวตั้งฉากกับเส้นสนามไฟฟ้าจะเห็นว่า มีเส้นสนามไฟฟ้าจำนวนหนึ่งผ่านสี่เหลี่ยม พื้นที่ A โดยที่จำนวนเส้นสนามไฟฟ้าทั้งหมดที่ผ่านสี่เหลี่ยมพื้นที่ A เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ EA ซึ่งปริมาณ EA คือฟลักซ์ไฟฟ้า เราสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ว่า

$$\Phi_E = EA \quad (2.5)$$

ในกรณีที่พื้นผิวทำมุม Θ กับสนามไฟฟ้าจะมีอีกสมการในการคำนวณคือ

$$\Phi_E = EA \cos \Theta \quad (2.6)$$

แต่ถ้าเราพิจารณา ฟลักซ์ไฟฟ้าทั้งหมดที่พื้นผิว หรือ การรวมฟลักซ์ของแต่ละส่วนพื้นผิวทำให้ได้

$$\Phi_E = \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.7)$$

ส่วนกรณีฟลักซ์ไฟฟ้าผ่านพื้นที่ผิวปิดฟลักซ์ไฟฟ้าจะขึ้นกับประจุสุทธิภายในผิวปิด ซึ่งเป็นหลักการสำคัญของกฎของเกาส์ โดยจะแสดงเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิต่อประจุไฟฟ้าสุทธิ Q_{encl} ที่อยู่ภายในผิวปิดดังนี้

$$\Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0} \quad (2.8)$$

โดย E คือสนามไฟฟ้ารวมจากแต่ละประจุตามหลักการซ้อนทับและ Q_{encl} คือประจุไฟฟ้าสุทธิภายในผิวปิด [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ศักย์ไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาประจุในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าจะพบว่าประจุจะได้รับแรงที่กระทำจากสนามไฟฟ้า ส่งผลให้ประจุเคลื่อนที่และเกิดงานได้ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อประจุอยู่ที่ตำแหน่งใดๆ ที่มีสนามไฟฟ้าค่าหนึ่งจะมีพลังงานศักย์ เรียกว่าพลังงานศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential Energy: U) โดยที่

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ_0}{r} \quad (2.9)$$

เราสามารถเขียน งานจากแรงไฟฟ้าในรูปของการเปลี่ยนพลังงานศักย์ไฟฟ้างานนี้

$$W_{A \rightarrow B} = U_A - U_B \quad (2.10)$$

เราสามารถหาพลังงานศักย์ไฟฟ้าบนพื้นฐานประจุหนึ่งหน่วย เหมือนกับสนามไฟฟ้าที่เป็นการพิจารณาแรงไฟฟ้าต่อประจุหนึ่งหน่วย โดยเมื่อนำประจุทดสอบ q_0 ไปวางไว้ที่ตำแหน่งหนึ่งในสนามไฟฟ้า แล้วประจุเกิดพลังงานศักย์ไฟฟ้าที่จุดนั้น พลังงานศักย์ไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยประจุ จะเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้า (Potential: V)

$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \quad (2.11)$$

ซึ่งหน่วยของศักย์ไฟฟ้า V และความต่างศักย์ไฟฟ้า ΔV จะมีหน่วยกันคือ J/C หรือเรียกอีกอย่างว่า โวลต์ (Volt) เพื่อเป็นเกียรติแก่ผู้ค้นพบ นอกจากนี้ยังมีหน่วย อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) โดย 1 eV จะมีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} J ในกรณีศักย์ไฟฟ้าจากประจุหลายประจุจะมีสมการคำนวณดังนี้

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i} \quad (2.12)$$

โดย r_i คือระยะห่างระหว่างประจุที่ i หรือ q_i จนถึงจุดที่เราต้องการคำนวณหาศักย์ไฟฟ้า

2.1.4 ความจุ และ ตัวเก็บประจุ และไดอิเล็กทริก

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บประจุไฟฟ้า เรียกว่าตัวเก็บประจุ (Capacitor) ซึ่งประจุที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย โดยหลักการของตัวเก็บประจุ ที่ทำให้ตัวเก็บประจุสามารถกักเก็บประจุได้ คือ เมื่อมีประจุบนตัวนำในแต่ละตัว ตัวนำที่ถูกแยกออกจากกันด้วยฉนวนจะทำให้ประจุไม่สามารถเคลื่อนที่ระหว่างตัวนำได้ นอกจากนี้ยังมีแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างประจุที่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามของตัวนำแต่ละตัว ส่งผลให้มีแรงดึงดูดบนตัวนำจึงสามารถเก็บประจุไว้บนตัวนำแต่ละตัวได้

โดยทั่วไปนั้น ตัวเก็บประจุจะประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำ ขนาด 2 แผ่น และมีฉนวนคั่นกลาง กล่าวได้ว่าความจุ (Capacitance หรือ capacity: C) เป็นความสามารถในการที่จะกักเก็บประจุได้ โดยความจุของตัวนำใด ๆ นั้นมีค่าเท่ากับ สัดส่วนโดยตรงกับประจุที่จะเก็บได้ แต่ผกผันกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของตัวนำนั้น เขียนสมการได้เป็น

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (2.13)$$

โดยหน่วยของตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับ C/V เรียกอีกอย่างได้ว่า ฟารัด (Farad: F)

จากการพิจารณาตัวเก็บประจุซึ่งภายในช่องว่างระหว่างตัวนำเป็นสุญญากาศ แต่ยังมีกรณีที่มีวัสดุเป็นฉนวนแทรกอยู่ระหว่างตัวนำของตัวเก็บประจุ เช่น ยาง แก้ว เป็นต้น โดยจะเรียกวัสดุที่เป็นฉนวนเหล่านี้ว่า ไดอิเล็กทริก (Dielectric) โดยที่เมื่อตัวเก็บประจุนั้นมีไดอิเล็กทริกแทรกอยู่ระหว่างตัวนำ ค่าความจุ C จะเพิ่มขึ้นจากความจุเดิม C_0 ด้วยค่า k เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$C = kC_0 = k\epsilon_0 \frac{A}{d} = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.14)$$

ตัวประกอบ k เรียกว่าค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของตัววัสดุที่นำมาแทรกระหว่างตัวนำทั้งสอง จากสมการจะเห็นว่า ตัวเก็บประจุมีไดอิเล็กทริก จะสามารถหาค่าความจุได้จากสมการของความจุ C_0 โดยให้แทนสภาพยอมของสุญญากาศ ϵ_0 ด้วย $\epsilon = k\epsilon_0$ จะเรียก ϵ ว่า สภาพยอมของไดอิเล็กทริก (Permittivity of dielectric)

นอกจากนี้เรายังสามารถหาค่าการเก็บประจุจากพลังงานได้อีกด้วย โดยงานที่เคลื่อนที่ของประจุเข้าไปในตัวเก็บประจุนี้ จะเป็นพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ แทนด้วยสัญลักษณ์ U ซึ่งหาได้จากสมการนี้

$$U = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} C(\Delta V)^2 = \frac{1}{2} Q\Delta V \quad (2.15)$$



เมื่อ Q คือประจุที่สะสมอยู่ภายในและมีความต่างศักย์เป็น ΔV โดยสมการดังกล่าวสามารถใช้กับตัวเก็บประจุประเภทใดก็ได้ [4]

2.2 ทฤษฎีของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานโดยอาศัยการเกิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทาน

อุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนโดยอาศัยการเกิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทาน (Triboelectric nanogenerator, TENG) คือ อุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นไฟฟ้า โดยอาศัย 2 ปรากฏการณ์หลักคือ การเกิดประจุจากการเสียดทาน (Triboelectricification) และ การเหนี่ยวนำให้เกิดประจุ (Electrostatic induction) ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Prof. Zhong Lin Wang และคณะวิจัยของ Georgia Institute of Technology ในปี ค.ศ. 2012 โดยศักย์ไฟฟ้าจะถูกสร้างจากการเสียดทาน และจะมีค่าขึ้นกับ การถ่ายโอนประจุระหว่าง ฟิล์มบาง organic/inorganic ที่แสดงความเป็นขั้วแตกต่างกัน โดยฟิล์มหนึ่งมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอน อีกฟิล์มจะแสดงความสามารถในการรับอิเล็กตรอน จากนั้นเมื่อทำการต่อวงจรภายนอก จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนเกิดการไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ด้านหลังของแต่ละฟิล์ม

เราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานระดับนาโนโดยอาศัยการเกิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทาน ได้โดยการเพิ่มประจุที่เกิดจากการเสียดทาน ซึ่งสามารถทำได้โดย 1. เลือกชนิดของวัสดุที่นำมาสัมผัสกันโดยวัสดุทั้งสองต้องมีการรับ-ให้อิเล็กตรอนต่างกันมาก ๆ ซึ่งเราสามารถดูค่าการรับ-ให้อิเล็กตรอนได้จาก Triboelectric-series (ดังภาพที่ 2.2) 2. การเพิ่มพื้นที่ผิวของฟิล์มที่สัมผัสกัน สามารถทำได้โดยการทำลวดลาย โดยใช้กระบวนการ Lithography

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ภาพที่ 2.2 ตารางแสดง Triboelectric – series [2]

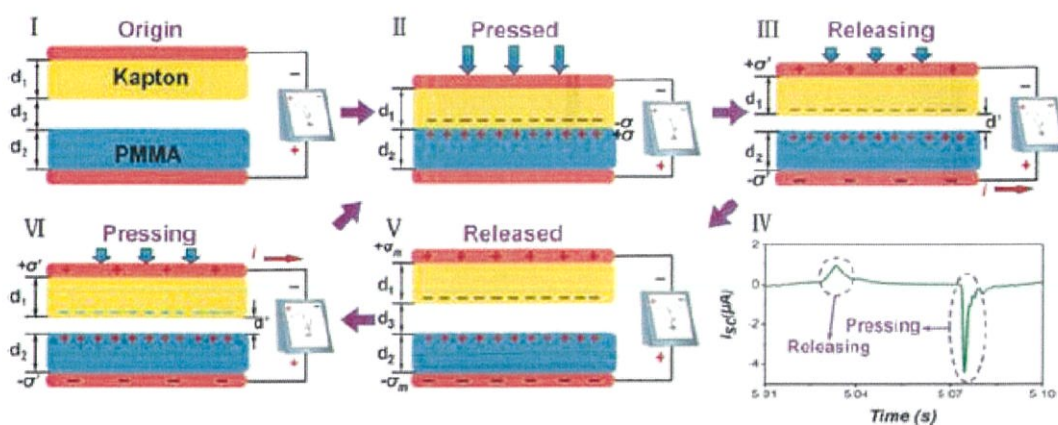
2.2.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานโดยอาศัยการเกิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทาน (TENG)

โดยการทำงานของ TENG แบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ 1. โหมดการทำงานแบบสัมผัสและแยกออกในแนวตั้ง (Vertical contact-separation mode) 2. โหมดการทำงานแบบเลื่อนจากด้านข้าง (Lateral sliding mode)

2.2.1.1 Vertical contact-separation mode

ในหลักการทำงานของ Vertical contact-separation mode นั้นเราสามารถอธิบายได้โดยใช้ 2 ปรากฏการณ์ คือ contact electricfication (หรือเรียกอีกอย่างได้ว่า triboelectricfication) และ electrostatic induction ตามลำดับ โดยหลักการทำงานจะแสดงให้เห็นตามภาพที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 รูปแสดงหลักการทำงานของ TENG แบบ Vertical contact-separation mode [2]

เมื่อ พอลิเมอร์ 2 ชนิดถูกนำมาสัมผัสกัน ประจุบริเวณพื้นผิวจะมีการถ่ายเทประจุเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดไฟฟ้าการเสียดทาน (Triboelectric effect) ตามตาราง triboelectric series ที่เคยกล่าวไปนั้น จะเป็นตารางที่รายชื่อวัสดุที่มีแนวโน้มว่าจะให้อิเล็กตรอนหรือรับอิเล็กตรอน ซึ่งในตาราง polymethyl methacrylate (PMMA) มีแนวโน้มที่จะให้อิเล็กตรอน ส่วน Kapton มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอน ทำให้เมื่อมาสัมผัสกัน อิเล็กตรอนจะหลุดออกจาก PMMA ไปยัง Kapton ทำให้เกิดประจุลบที่บริเวณผิว Kapton และเกิดประจุบวกที่บริเวณผิว PMMA ตามลำดับ ซึ่งเราจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า contact electrification

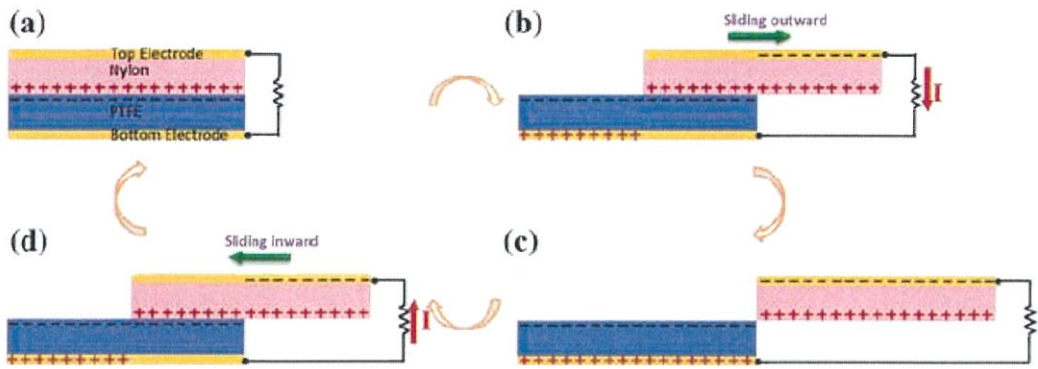
ถัดมาเมื่อทำการแยก PMMA และ Kapton ออกจากกัน ประจุที่เกิดบริเวณผิวทั้งสองของ PMMA และ Kapton จะเหนี่ยวนำประจุให้เกิดที่ขั้วอิเล็กโทรดโดยประจุที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจะมีประจุตรงข้ามกับวัสดุ เพื่อให้เกิดการสมดุลกันของประจุ โดยอิเล็กตรอนจากขั้วอิเล็กโทรดด้านบนจะไหลมายังขั้วอิเล็กโทรดด้านล่าง เป็นผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่เป็นบวกเกิดขึ้น และถ้าทำการกดอีกครั้ง จะเป็นการลดระยะห่างระหว่าง PMMA และ Kapton จะทำให้ขั้วอิเล็กโทรดด้านบน มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า ขั้วอิเล็กโทรดด้านล่าง ส่งผลให้อิเล็กตรอนที่การไหลจาก ขั้วอิเล็กโทรดด้านล่างกลับไปยังขั้วอิเล็กโทรดด้านบน ทำให้ประจุที่เกิดจากการเหนี่ยวนำลดลงจนเป็นกลาง และจะมีกระแสไฟฟ้าลบเกิดขึ้น

2.2.1.2 Lateral sliding Mode

ในส่วนของ Lateral sliding Mode จะยกตัวอย่างเป็น Polymer material 2 ชนิด คือ Nylon และ PTFE ซึ่งหลักการพื้นฐานนี้สามารถนำไปใช้กับวัสดุอื่นๆได้เช่นกัน โดยจะแสดงให้เห็นในภาพที่

2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.4 รูปแสดงหลักการทำงานของ TENG แบบ Lateral sliding Mode [2]

ในตอนแรกเมื่อ Nylon และ PTFE สัมผัสกันจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุเกิดขึ้น เมื่อเทียบในตาราง Triboelectric – series ตัว Nylon จะมีแนวโน้มให้อิเล็กตรอนส่วน PTFE มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนทำให้เวลาสัมผัสกัน Nylon จะให้อิเล็กตรอนแก่ PTFE เป็นผลทำให้บริเวณพื้นผิวของ Nylon จะเป็นประจุบวก ส่วน PTFE บริเวณผิวจะเป็นประจุลบ การแยกออกระหว่างพื้นผิวที่ประจุบวกกับประจุลบในบริเวณที่ทับซ้อนกัน จะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นเล็กน้อยบริเวณชั่ว ส่วนประจุจะยังคงอยู่ที่ผิว เมื่อทำการเลื่อน Nylon และ PTFE ออกจากกัน จะเกิดการแยกประจุเกิดขึ้นเนื่องจากบริเวณที่สัมผัสกันลดลง ทำให้ประจุที่แยกออกจากกันจะมีการสร้างสนามไฟฟ้าขึ้น โดยสนามไฟฟ้าจะมีทิศทางจากทิศขวาไปยังซ้าย และเกือบจะขนานกับทิศการเลื่อน ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดการเหนี่ยวนำศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูง บริเวณขั้วอิเล็กโทรดด้านบน ซึ่งความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลจากขั้วอิเล็กโทรดด้านบนไปยังขั้วอิเล็กโทรดด้านล่าง จนศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นลดลงจนหายไป ระยะทางในแนวตั้งระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง และ ประจุที่เกิดจากการเสียดทานของ Nylon และ PTFE จะมีค่าน้อยมาก เมื่อเราทำการเปรียบเทียบกับระยะประจุที่แยกออกจากกันทางแนวขวาง ดังนั้นเราจึงสามารถประมาณได้ว่าจำนวนประจุที่เกิดการเคลื่อนย้ายบนขั้วอิเล็กโทรดจะมีปริมาณเท่ากับจำนวนของประจุ ที่เกิดจากการแยก ส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องตลอดที่ Nylon และ PTFE เลื่อนออกจากกันทางด้านข้าง ประจุที่เกิดจากการแยกจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกว่า Nylon จะเลื่อนออกจาก PTFE อย่างสมบูรณ์

ถ้าเราทำการเลื่อน Nylon กลับ ประจุที่เกิดจากการแยกจะสัมผัสกันอีกครั้ง เพื่อทำให้เกิดการสมดุลทางไฟฟ้าอีกครั้ง กระแสไฟฟ้าจะไหลย้อนกลับจากขั้วอิเล็กโทรดด้านล่างไปยัง ขั้วอิเล็กโทรด

ด้านบน จนกระทั่ง Nylon และ PTFE กลับมาสัมผัสกันเต็มอีกครั้ง จะทำให้ไม่มีการเคลื่อนย้ายประจุจากขั้ว electrode และตัวอุปกรณ์จะกลับสู่สภาวะแรก

2.2.2 การนำ TENG ไปประยุกต์ใช้

2.2.2.1 ประยุกต์ใช้ในด้านระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยตัว (Self-powered systems)

เนื่องจาก TENG สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยตัวเองทำให้สามารถนำไปใช้กับ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, ใช้ในด้านปฏิกิริยาเคมีและทางด้านการแพทย์ นอกจากนี้ยังถูกนำมาใช้แทนแบตเตอรี่ เนื่องจาก TENG มีอายุการใช้งานกว่าอุปกรณ์ที่ใช้แบตเตอรี่ และสามารถนำไปใช้ในด้านเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม เช่นการไหลของน้ำ เป็นต้น

2.2.2.2 ประยุกต์ใช้ในด้านอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensors)

เนื่องจากตัว TENG มีการตอบสนองสูงและเร็วบริเวณที่มีแรงดันต่ำ ๆ เราจึงสามารถนำมาเป็นอุปกรณ์ตัววัดในร่างกายได้ [2]

2.2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ TENG รูปแบบต่างกัน

แสดงการเปรียบเทียบค่าเอาท์พุทของงานวิจัยที่ไปสืบค้นมาดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบค่าเอาต์พุตของงานวิจัย

Researcher	Material	Pattern	Electrical output	Device size	Force	Normalized output
Feng-RuFan (2012) [5]	PET-KAPTON	no pattern	3.3 V and 0.6 μ A	4.5 x 1.2 cm^2	0.33 Hz	0.61 V 0.11 μ A/ cm^2
JunwenZhong (2012) [6]	Ag-PTFE	Ag coat on PVA nanowires	125 V and 0.72 mA	3.5 x 2.5 cm^2	4 Hz	14.28 V 82 μ A/ cm^2
Feng-Ru Fan (2012) [7]	PET-PDMS	Pyramid	18 V and 0.7 μ A	4.5 x 1.2 cm^2	1Hz	3.33 V 0.13 μ A/ cm^2
Guang Zhu (2012) [8]	PMMA-KAPTON	Kapton nanowires	110 V and 6 μ A	1.2 x 1.2 cm^2	-	76.38 V 4.16 μ A/ cm^2
Sihong Wang (2013) [9]	Al-PDMS	Pyramid-Cube	230 V and 0.13 mA	3 x 2.8 cm^2	10 Hz	27.38 V 15.47 μ A/ cm^2
Peng Bai (2013) [10]	Al-PTFE	Al nanopores	215 V and 0.66 mA	3.8 x 3.8 cm^2	50 N	14.89 V 45.70 μ A/ cm^2

2.3 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube; CNT)

ในอดีตได้มีการค้นพบวิธีการสร้างเส้นใยคาร์บอนที่มีขนาดอยู่ในช่วงระดับนาโนเมตร ต่อมาได้พบโครงสร้างของตัวคาร์บอนที่มีขนาดเล็ก เรียกว่า Fullerene ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นลักษณะทรงกลม (Buckyballs) หรือลักษณะที่เป็นท่อ (Nanotube) ต่อมาในปี ค.ศ. 1991 นักฟิสิกส์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ Sumio Iijima [11] ได้สร้างตัว Carbon nanotubes (CNTs) ขึ้นมาเป็นครั้งแรกโดยตัว CNTs ประกอบด้วยโครงสร้างวงแหวน 6 เหลี่ยมของคาร์บอนเรียงต่อกัน ทำให้ CNTs ได้รับความสนใจจากนักวิจัยจากทั่วโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสังเคราะห์ CNTs สามารถทำได้ทั้งแบบ ผนังชั้นเดียว (Single walled carbon nanotube) และแบบผนังหลายชั้น (Multi walled carbon nanotube) โดยในปัจจุบัน CNTs สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายอย่างได้แก่ ใช้เป็นวัสดุผสมคอมโพสิตกับโลหะเพื่อใช้เป็นโครงจักรยาน หรือนำไปใช้ในอุปกรณ์กีฬาเช่น ไม้เทนนิส ไม้แบดมินตัน เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไม่ว่าจะเป็น สารกึ่งตัวนำยิ่งยวด ตัวเก็บประจุ และ ตัวนำไฟฟ้า [12]

2.3.1 คุณสมบัติของ CNTs

2.3.1.1 การนำไฟฟ้าขึ้นกับโครงสร้าง

เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะเป็นวัสดุหนึ่งมิติ (1D nanomaterial) มีโครงสร้างเป็นแผ่นแกรไฟต์ม้วนเข้าหากันเป็นลักษณะท่อ นอกจากนี้ยังสามารถมีเส้นผ่านศูนย์กลางได้หลายขนาดขึ้นกับการสังเคราะห์ และมีการจัดเรียงตัวของวงคาร์บอนหกเหลี่ยมเทียบกับแนวของเส้นรอบวงท่อได้ออกเป็น 3 แบบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วย เวกเตอร์ C_n (Chiral vector) ที่มีทิศตั้งฉากกับแทนท่อและมีขนาดเท่ากับเส้นรอบวง เพื่อกำหนดลักษณะของตัวโครงสร้างของท่อ โดยเวกเตอร์ a_1 และ a_2 มีขนาดเท่ากันคือ 0.246 นาโนเมตร ทำมุมกัน 60 องศา เราสามารถหาเวกเตอร์ C_n ได้จากสมการ $C_n = na_1 + ma_2$ หรือเขียนได้อีกอย่างในรูปแบบตัวย่อได้ว่า (n,m) เมื่อ n และ m เป็นจำนวนเต็ม มีทิศตามแนวเส้นประและมีขนาดเท่ากับ $0.246 \times (n^2 + nm + m^2)^{1/2}$ นาโนเมตร ซึ่งการม้วนของเวกเตอร์ C_n เป็นเส้นรอบวงโดยให้ตำแหน่งปลายลูกศร (n,m) ซ้อนทับกับตำแหน่งเริ่มต้น $(0,0)$ จะได้ลักษณะท่อ 3 แบบที่แตกต่างกัน คือ 1. Armchair (n,n) และมี $\Theta = 30$ องศา, 2. Chiral (n,m) โดยที่ $0 > \Theta < 30$ องศา และ 3. Zigzag $(n,0)$ มี $\Theta = 0$ องศา นอกจากนี้ถ้า $(n-m)$ หารด้วย 3 ลงตัวแล้วเราจะได้ท่อที่มีการนำไฟฟ้าแบบโลหะ (Metallic type) แต่ถ้าเหลือเศษเราจะได้ท่อที่นำไฟฟ้าแบบกึ่งตัวนำ (Semiconducting type) ดังนั้นในจำนวน $1/3$ ของโครงสร้างที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะนำไฟฟ้าได้แบบโลหะ และที่เหลืออีก 2 ชนิดจะมีการนำไฟฟ้าแบบกึ่งตัวนำ ซึ่งถ้าหากว่าเราพิจารณาโครงสร้างแบบ Armchair หรือในกรณีที่ $n=m$ แล้วเราจะได้ท่อทุกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีการนำไฟฟ้าแบบโลหะ [13]

2.3.1.2 มีค่างามอดูลัสที่สูง

เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีค่า ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) สูงมากในทิศตามแนวยาว เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนจากมีลักษณะโครงสร้างเป็นวัสดุนาโน แบบ 1มิติ ซึ่งมีค่าความต้านแรงดึงสูงถึง 63GPa [14]

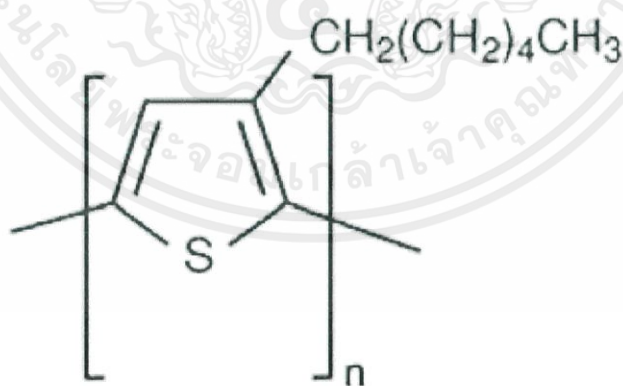
2.3.2 การประยุกต์ใช้ CNTs

การที่ CNTs มีคุณสมบัติยืดหยุ่นและสามารถนำไฟฟ้า ที่ดี จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน ไม่ว่าจะเป็น หัวจ่ายอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุผสมพลาสติกให้นำไฟฟ้า ตัวกักเก็บเชื้อเพลิง ไฮโดรเจน ตัวผสมกาวต่อเชื่อมชนิดนำไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ระดับโมเลกุล หัววัดแก๊ส หัววัด AFM ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไนโตรคาร์บอเนต วัสดุถ่ายเทความร้อน วัสดุเสริมความแกร่งในนาโนคอมโพสิตเส้นใยและสิ่งทอ ตัวรองรับคะตะลิสต์ และการประยุกต์ทาง Biomedical เป็นต้น

2.4 พอลิ(3-เฮกซิลไทโรเฟน-2,5-ไดอิล) (Poly(3-Hexylthiophene-2,5-Diyl);

P3HT)

ในปัจจุบันสารกึ่งตัวนำที่เป็นพอลิเมอร์ได้เป็นที่สนใจเนื่องจากสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายโดยหนึ่งในนั้นก็คือ พอลิ(3-เฮกซิลไทโรเฟน-2,5-ไดอิล) หรือ P3HT ซึ่งมีคุณสมบัติ Optoelectronic และนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ที่มีคุณภาพและถูกนำมาใช้ในหลายงานวิจัย เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ P3HT มีความสามารถที่เปลี่ยนโครงสร้างผลึกได้หลากหลายขึ้นกับเงื่อนไขการสังเคราะห์ และยังมีคุณสมบัติที่ทำให้ สภาพคล่องประจุ เคลื่อนตัวได้ดีส่งผลให้ถูกนำไปใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของ ประจุบวก (Hole) [15]



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างเคมีของ P3HT [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในการเตรียมการสร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานโดยอาศัยการเกิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทาน (TENG) โดยในการสร้างจะประกอบด้วยพอลิไดเมทิลไซโลเซน-พอลิ(3-เฮกซิลไทโอฟีน)-ท่อนาโนคาร์บอน (PDMS-P3HT-CNT) ที่มีความเป็นลบและใช้พอลิเอทิลีนเทเรพทาเรตที่มีความเป็นบวกโดยขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ด้านจะใช้อินเดียมทินออกไซด์ (Indium tin oxide: ITO) ซึ่งงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของความเข้มข้นของ P3HT และผลการนำไฟฟ้าของ CNT ในวัสดุผสม PDMS-P3HT-CNT ซึ่งมีผลต่อสมบัติของ TENG

3.1 การเตรียม PDMS-P3HT และขั้วไฟฟ้า

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- (1) แผ่นพลาสติกใสที่เคลือบฟิล์มนำไฟฟ้า (PET/ITO)
- (2) คลอโรฟอร์ม (Chloroform)
- (3) พอลิ(3-เฮกซิลไตรโอฟีน-2,5-ไดอิล) (Poly(3-Hexylthiophene-2,5-Diyl); P3HT)
- (4) พอลิไดเมทิลพอลิไซโลเซน (PDMS) และ ตัวประสาน (curing agent)
- (5) เอทานอล (Ethanol)
- (6) น้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI water)
- (7) ท่อนาโนคาร์บอนหลายชั้น (MWCNT)

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- (1) สายไฟทองแดง
- (2) เทปทองแดง,
- (3) กาวเงิน
- (4) โถดูดความชื้น
- (5) เครื่องชั่งน้ำหนักสารแบบดิจิตอล 4 ตำแหน่ง
- (6) เตาอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (7) ปีกเกอร์
- (8) เครื่องสปินโคทเตอร์ (Spin coater)
- (9) เครื่องล้างความถี่เหนือเสียง (Ultrasonic cleaner)
- (10) อุปกรณ์บัดกรี

3.1.3 การเตรียมแผ่น PET/ITO

- (1) ตัดแผ่น PET/ITO ให้มีขนาด $4 \times 2 \text{ cm}^2$
- (2) นำไปล้างด้วยน้ำ DI ด้วยเครื่องล้างความถี่เหนือเสียง เป็นเวลา 5 นาที
- (3) นำไปล้างด้วยเอทานอลด้วยเครื่องล้างความถี่เหนือเสียงเป็นเวลา 5 นาที
- (4) นำไปแช่ในน้ำ DI
- (5) นำแผ่น PET/ITO ไปเป่าด้วยแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3.1.4 การเตรียมสารละลาย P3HT

- (1) ผสม P3HT ในคลอโรฟอร์มในอัตราส่วนที่ศึกษาได้แก่ 1:1, 3:1 และ 5:1 ให้เข้ากัน
- (2) นำไปคนเป็นเวลา 10 นาที

3.1.5 การเตรียมสารละลาย PDMS

- (1) ผสม PDMS กับ ตัวประสาน (Curing agent) ในอัตราส่วน 10:1 (ใช้ PDMS 3 g)
- (2) นำ PDMS จากข้อ (1) ผสมใน คลอโรฟอร์ม 15 ml
- (3) นำไปคนเป็นเวลา 5 นาที

3.1.6 การเตรียมสารละลายผสม PDMS-P3HT

- (1) นำสารผสม P3HT จาก 3.1.4 และ PDMS ปริมาณ 4 ml จากข้อ 3.1.5 ผสมเข้าด้วยกัน
- (2) นำไปคนเป็นเวลา 5 นาที

3.1.7 การเตรียมฟิล์ม PDMS-P3HT

- (1) นำสารผสมในข้อ 3.1.6 มาเคลือบลงบนแผ่น PET/ITO ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงบนด้าน PET ที่ความเร็วรอบ 1500 rpm เป็นเวลา 1 นาที
- (2) นำไปอบที่ 50 องศา เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.1.8 การเตรียมสารละลาย PDMS-P3HT-CNT

- (1) นำเงื่อนไขของวัสดุผสม PDMS-P3HT ที่มีค่าประสิทธิภาพ TENG สูงสุดมาทำการศึกษาความเข้มข้นของ MWCNT
- (2) ทำการผสม MWCNT ลงไปในสารผสม PDMS-P3HT ในอัตราส่วนความเข้มข้น 0.1 wt% ในผสมในข้อ 3.1.6
- (3) นำไปคนเป็นเวลา 5 นาที

3.1.9 การเตรียมฟิล์ม PDMS-P3HT

- (1) นำสารผสมในข้อ 3.1.8 เคลือบลงบนแผ่น PET/ITO ในด้าน PET ที่ความเร็วรอบ 1500 rpm เป็นเวลา 1 นาที
- (2) นำไปอบที่ 50 องศา เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.1 และ 3.2 แสดงอัตราส่วนความเข้มข้นของวัสดุผสมที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนความเข้มข้นโดยน้ำหนัก P3HT ต่อ PDMS

ตัวอย่าง	PDMS	P3HT (wt%)
A	1.00	0.00
B	1.00	0.17
C	1.00	0.50
D	1.00	0.83

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนความเข้มข้นโดยน้ำหนักของ CNT ต่อ สารผสม PDMS-P3HT

ตัวอย่าง	PDMS-P3HT	CNT (wt%)
E	1.00	0.00
F	1.00	0.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การตรวจวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของวัสดุผสม PDMS-P3HT-CNT

(1) วัดสมบัติทางไฟฟ้าของ PDMS-P3HT-CNT

(1.1) วัดค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานด้วยเทคนิค 4-point-probe

(1.2) วัดค่าความหนาแน่นประจุโดยการวัดค่าความนำไฟฟ้าด้วยโครงสร้างทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (Field effect transistor; FET) โดยใช้เครื่อง Keithley รุ่น 2410

(2) วัดความหนาฟิล์ม PDMS-P3HT-CNT ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Field Emission Scanning electron microscope; FESEM) รุ่น FEI, Versa 3D

3.3 การสร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยการเสียดทาน

ในการสร้างอุปกรณ์กำเนิดพลังงานโดยอาศัยการเกิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทาน จะสร้างขั้วลบของ TENG ด้วยใช้เครื่องสปินโคเตอร์ รุ่น SPIN150 สร้างฟิล์มผสม PDMS-P3HT-CNT ที่อยู่บนแผ่น PET/ITO จากนั้นสร้างขั้วบวกของ TENG โดยเตรียมจากแผ่น PET/ITO ปกติ มาประกบเข้าด้วยกันและต่อกับสายไฟทองแดงที่ขั้ว ITO โดยใช้กาวเงินในการทำและอีกส่วนทำการต่อสายไฟโดยใช้วิธีบัดกรีเข้ากับเทปทองแดงแล้วนำเทปทองแดงไปติดที่ฝั่ง ITO จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

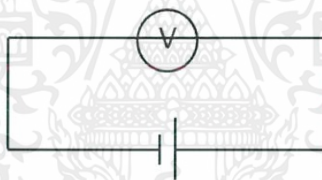
3.4 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยการเสียดทาน

ทดสอบประสิทธิภาพของ TENG ด้วยระบบทดสอบ TENG ซึ่งเป็นระบบควบคุมการให้แรงของ TENG ประกอบไปด้วย (1) กระจบอกลูกสูบนิวเมติกส์ (2) ไมโครคอนโทรเลอร์ Arduino (3) แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) (4) ปืนลม โดยสามารถควบคุมความถี่ในการให้แรงได้ในขอบเขตความถี่ 0.33- 5 เฮิร์ตและสามารถสร้างแรงกดได้ถึง 200 N ตามภาพที่ 3.1 แล้วนำไปค่าดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.1 ระบบทดสอบ TENG

(1) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลา โดยส่วนที่เป็น TENG คือบริเวณ สัญลักษณ์ —|—|— จากนั้นโดยต่อวงจรตามภาพที่ 3.2

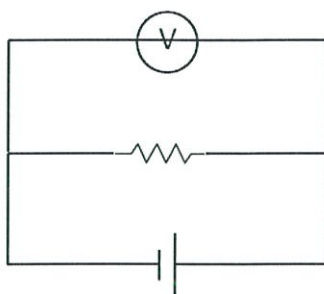


ภาพที่ 3.2 วงจรวัดค่าความต่างศักย์ของ TENG

(2) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา

ซึ่งในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของ TENG นั้นทำการต่ออนุกรมเข้ากับตัวต้านทานโดยส่วนที่เป็น TENG คือบริเวณสัญลักษณ์ —|—|— แล้วจึงวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมจากเครื่อง ออสซิลโลสโคป แล้วแปลงกลับเป็นค่ากระแสไฟฟ้าตามกฎของโอห์มโดยต่อวงจรตามภาพที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

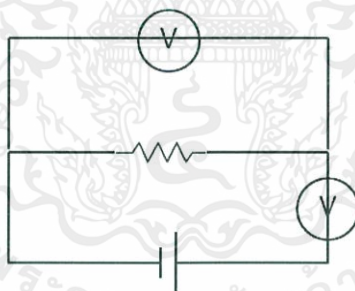


ภาพที่ 3.3 วงจรวัดค่ากระแสไฟฟ้าของ TENG

(3) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความต้านทานค่าต่างๆ

ซึ่งในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าของ TENG นั้นทำการต่ออนุกรมเข้ากับตัวต้านทานโดยส่วนที่เป็น TENG คือบริเวณสัญลักษณ์ —|— แล้วทำการวัดค่าความต่างศักย์และค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ จากนั้นจึงทำการคำนวณกำลังไฟฟ้า (P) โดยคิดจากสมการ 3.1 และมีการต่อวงจรตามภาพที่ 3.4

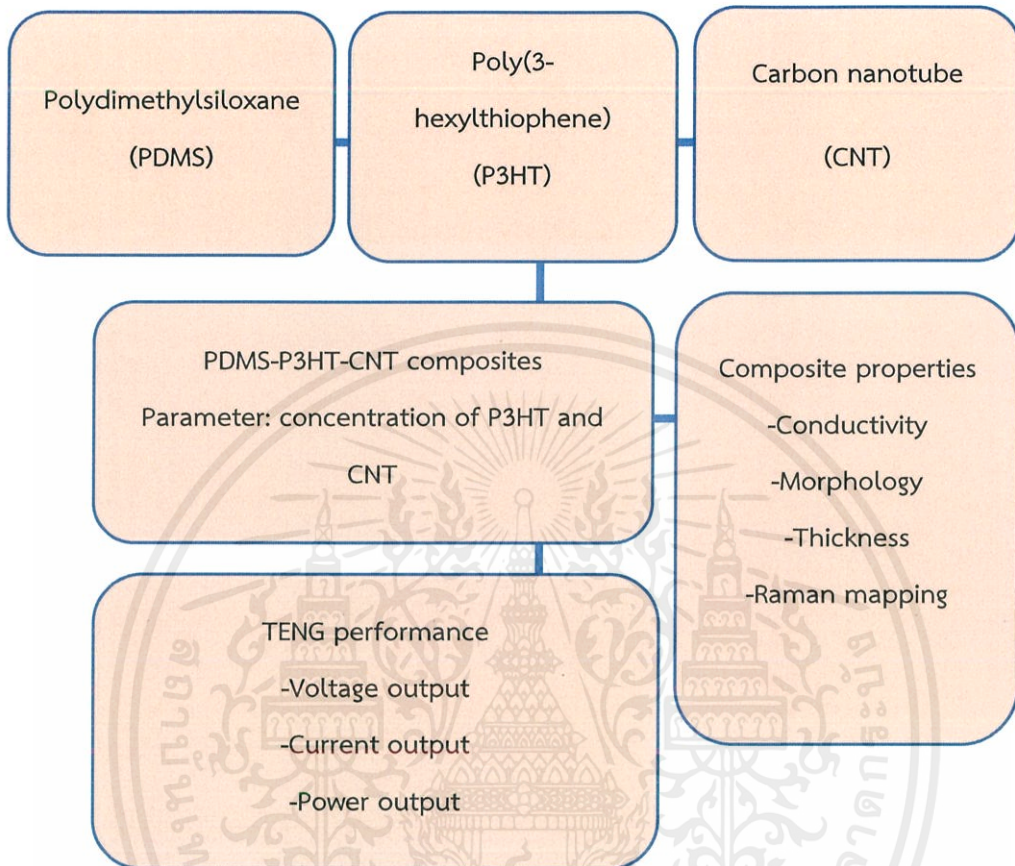
$$P = IR^2 \quad (3.1)$$



ภาพที่ 3.4 วงจรวัดค่ากำลังไฟฟ้า TENG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งขั้นตอนการดำเนินโครงการพิเศษจะสามารถสรุปได้ตามภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการดำเนินโครงการพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในส่วนของบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง แบ่งผลการทดลอง ออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

ผลการทดลองที่ 1 คือ การศึกษาผลของความเข้มข้นของ P3HT ต่อความหนาของฟิล์มบางคอมโพสิตของ PDMS-P3HT

ผลการทดลองที่ 2 คือ การศึกษาการกระจายตัวของ P3HT ในฟิล์มบางคอมโพสิตของ PDMS-P3HT

ผลการทดลองที่ 3 คือ การศึกษาผลความเป็น P-type ของคอมโพสิตของ PDMS-P3HT

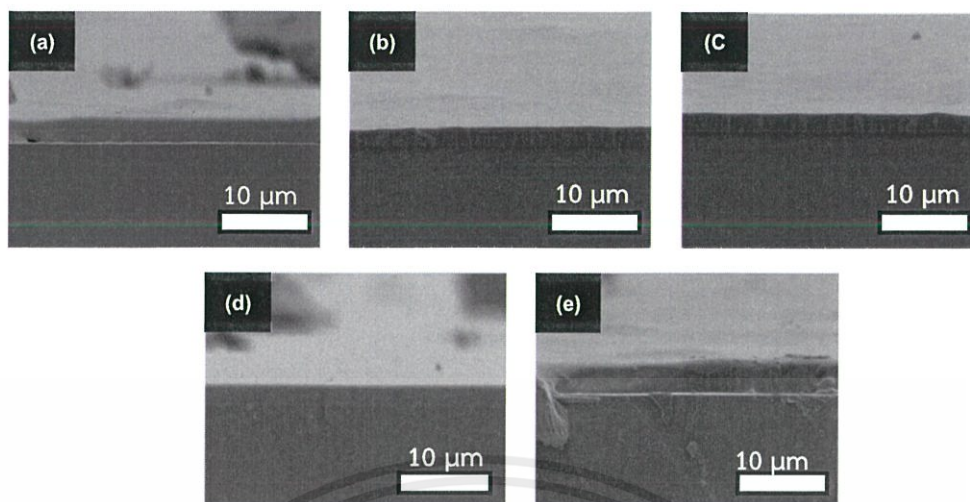
ผลการทดลองที่ 4 คือ การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของคอมโพสิตของ PDMS-P3HT-CNT

ผลการทดลองที่ 5 คือ การศึกษาผลทางไฟฟ้าของ TENG โดยการเพิ่มความหนาแน่นประจุและความนำไฟฟ้าด้วยวัสดุคอมโพสิตของ PDMS-P3HT-CNT

โดยมีรายละเอียดผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองทั้ง 5 การทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ผลของความเข้มข้นของ พอลิ(3-เฮกซิลไทโอฟีน) ต่อความหนาของฟิล์มบางคอมโพสิตของพอลิไดเมทิลไซโลเซน-พอลิ(3-เฮกซิลไทโอฟีน)

ภาพที่ 4.1 แสดงความหนาของฟิล์มบางคอมโพสิตของ PDMS-P3HT จากการเตรียมด้วยเครื่องเครื่องสปินโคทเตอร์ โดยใช้ความเร็วรอบคงที่ ที่ 1500 rpm เป็นเวลา 1 นาที และแสดงค่าความหนาที่เงื่อนไขต่างๆดังตารางที่ 4.1 จากผลการทดลอง พบว่าความเข้มข้นของ P3HT ไม่ส่งผลต่อความหนาของฟิล์มอย่างชัดเจน ซึ่งถ้าความหนาของฟิล์มมีค่าไม่เท่ากันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของ TENG โดยถ้าความหนาของฟิล์มยิ่งบางจะได้รับการกักเก็บประจุที่สูง แต่ถ้าฟิล์มหนากการกักเก็บประจุจะต่ำตามสมการของตัวเก็บประจุ $C = \frac{\epsilon A}{d}$ โดยฟิล์มที่ได้มีความหนาที่ใกล้เคียงกันและมีความหนาของฟิล์มเฉลี่ยอยู่ที่ 2.56 ± 0.14 ไมโครเมตร




ภาพที่ 4.1 ภาพถ่าย FE-SEM ด้านข้าง แสดงความหนาของฟิล์มบางคอมโพลีเมอร์ที่ความเข้มข้น พอลิ (3-เฮกซิลไทโอฟีน) ที่ (a) 0.00 (b) 0.17 (c) 0.50 (d) 0.67 และ (e) 0.83 wt%

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าความหนาฟิล์มที่เงื่อนไขต่างๆ

Concentration of P3HT (wt%)	Thickness (μm)
0.00	2.61 ± 0.08
0.17	2.43 ± 0.23
0.50	2.63 ± 0.08
0.67	2.40 ± 0.05
0.83	2.72 ± 0.05
AVG	2.56 ± 0.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ลักษณะการกระจายตัวของ P3HT ในฟิล์มบางคอมโพสิตของพอลิไธโอเฟนไฮโดรเจน-พอลิ(3-เฮกซิลไทโอฟีน)

เมื่อนำฟิล์มคอมโพสิต PDMS-P3HT ที่เตรียมไว้ทำการวัดการกระจายตัวด้วยการวัด raman mapping เมื่อเทียบพีค PDMS และ P3HT กับเอกสารอ้างอิง [16] และ [17] จะพบว่า พีคของ PDMS จะอยู่ในช่วง 2900 และ 2960 cm^{-1} โดยพีค 2900 cm^{-1} จะเป็นพันธะของ C-H₃ symmetric stretching และ 2960 cm^{-1} จะเป็นพันธะ C-H₃ asymmetric stretching ในส่วนพีคของ P3HT จะอยู่ที่ ช่วง 1376 และ 1447 cm^{-1} โดยพีค 1376 cm^{-1} จะเป็นพันธะ C-C skeletal stretching และ 1447 cm^{-1} จะเป็นพันธะ C=C stretching vibrations of the thiophene ring ()

ภาพที่ 4.2 (a) แสดงการกระจายตัวของพีครามานช่วงที่ 2900 cm^{-1} ซึ่งยิ่งสีเข้มแสดงถึงปริมาณมากโดยจะมีการกระจายตัวทั่วพื้นที่ (b) แสดงการกระจายตัวของพีครามานช่วงที่ 2960 cm^{-1} ของพันธะ โดยจะมีการกระจายตัวทั่วพื้นที่

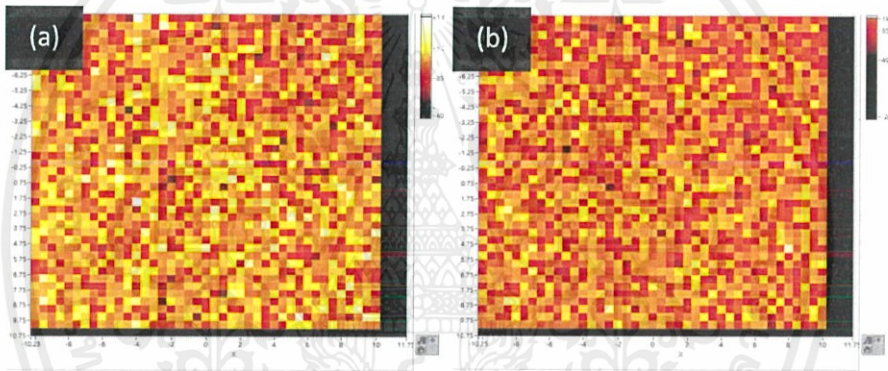
ภาพที่ 4.3 (a) แสดงการกระจายตัวของพีครามานช่วงที่ 1376 cm^{-1} โดยจะมีปริมาณมากและกระจายตัวทั่วพื้นที่ (b) แสดงการกระจายตัวของพีครามานช่วงที่ 1447 cm^{-1} โดยจะมีปริมาณมากและกระจายตัวทั่วพื้นที่ โดยบริเวณตรงกลางและรอบๆจะมีปริมาณสูงมาก (c) แสดงการกระจายตัวของพีครามานช่วงที่ 2900 cm^{-1} โดยจะมีการกระจายตัวทั่วพื้นที่และมีปริมาณมาก (d) แสดงการกระจายตัวของพีครามานช่วงที่ 2960 cm^{-1} ของพันธะ โดยจะมีการกระจายตัวทั่วพื้นที่

ภาพที่ 4.4 (a) แสดงการกระจายตัวของพีครามานช่วงที่ 1376 cm^{-1} โดยจะมีปริมาณมากและกระจายตัวทั่วพื้นที่ (b) แสดงการกระจายตัวของพีครามานช่วงที่ 1447 cm^{-1} โดยจะมีปริมาณมากและกระจายตัวทั่วพื้นที่ โดยบริเวณตรงกลางจะมีปริมาณสูงมาก (c) แสดงการกระจายตัวของพีครามานช่วงที่ 2900 cm^{-1} โดยจะมีการกระจายตัวทั่วพื้นที่ (d) แสดงการกระจายตัวของพีครามานช่วงที่ 2960 cm^{-1} ของพันธะ โดยจะมีการกระจายตัวทั่วพื้นที่

ภาพที่ 4.5 (a) แสดงการกระจายตัวของพีครามานช่วงที่ 1376 cm^{-1} โดยจะมีปริมาณมากและกระจายตัวทั่วพื้นที่ (b) แสดงการกระจายตัวของพีครามานช่วงที่ 1447 cm^{-1} โดยจะมีปริมาณมากและกระจายตัวทั่วพื้นที่ โดยบริเวณตรงกลางและรอบๆจะมีปริมาณสูงมาก (c) แสดงการกระจายตัวของพีครามานช่วงที่ 2900 cm^{-1} โดยจะมีการกระจายตัวทั่วพื้นที่ (d) แสดงการกระจายตัวของพีครามานช่วงที่ 2960 cm^{-1} ของพันธะ โดยจะมีการกระจายตัวทั่วพื้นที่

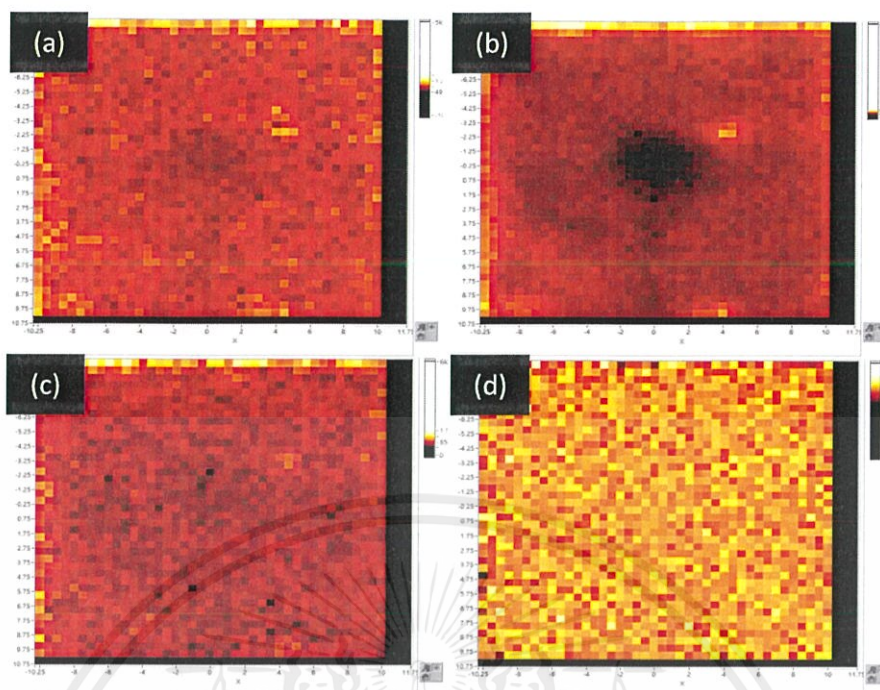
ภาพที่ 4.6 (a) แสดงการกระจายตัวของพีครามาในช่วงที่ 1376 cm^{-1} โดยจะมีปริมาณในระดับหนึ่งและกระจายตัวทั่วพื้นที่ (b) แสดงการกระจายตัวของพีครามาในช่วงที่ 1447 cm^{-1} โดยจะมีปริมาณสูงมากและกระจายตัวทั่วพื้นที่ (c) แสดงการกระจายตัวของพีครามาในช่วงที่ 2900 cm^{-1} โดยจะมีการกระจายตัวทั่วพื้นที่ (d) แสดงการกระจายตัวของพีครามาในช่วงที่ 2960 cm^{-1} ของพันธะ โดยจะมีการกระจายตัวทั่วพื้นที่

ภาพที่ 4.7 แสดงพีครามาแต่ละช่วงของความเข้มข้น P3HT ที่ความเข้มข้น 0.00, 0.17, 0.50, 0.67 และ 0.83 wt% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าพีคช่วง 1376 และ 1447 cm^{-1} จะไม่มีความสูงขึ้นมา แต่เมื่อเติม P3HT ที่ความเข้มข้น 0.17, 0.50, 0.67 และ 0.83 wt% จะพบว่าพีคช่วง 1376 และ 1447 cm^{-1} นั้นมีความสูงเพิ่มขึ้นมาอย่างชัดเจน แต่ที่ความเข้มข้น 0.00 wt% นั้น ช่วงพีคที่ 2900 และ 2960 cm^{-1} นั้นมีความสูงมากกว่าความเข้มข้นอื่นๆ

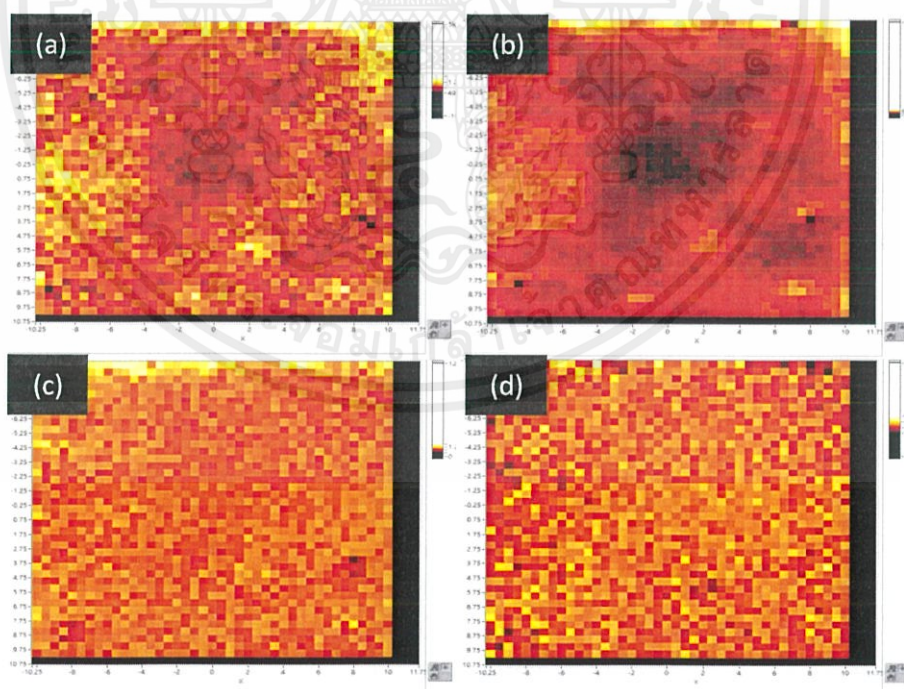


ภาพที่ 4.2 แสดงการกระจายตัวของฟิล์ม P3HT ความเข้มข้น 0.00 wt% ที่พีครามาในช่วง 2900 cm^{-1} (a) และ 2960 (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

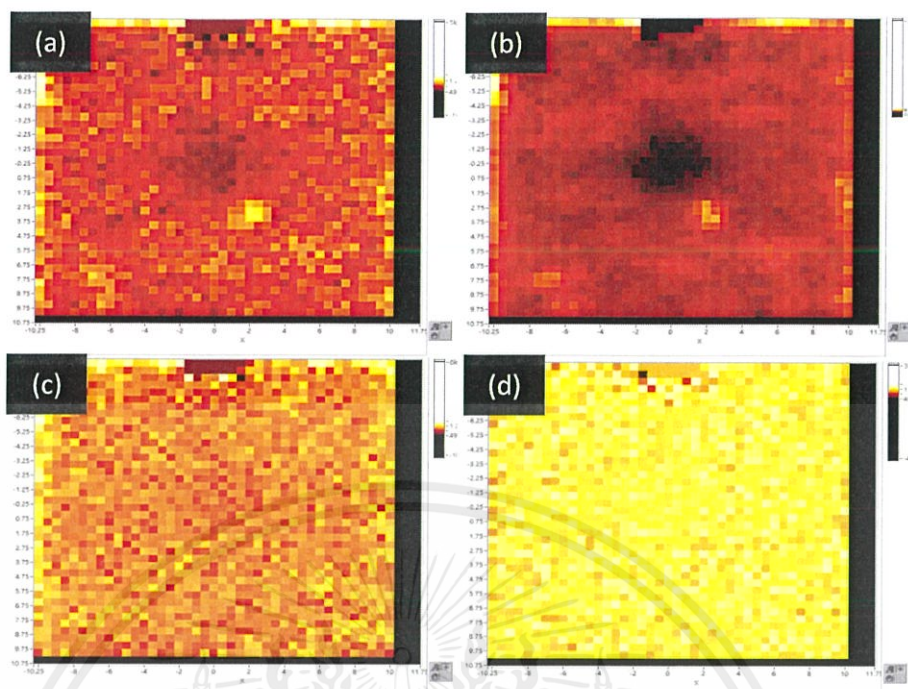


ภาพที่ 4.3 แสดงการกระจายตัวของฟิล์ม P3HT ความเข้มข้น 0.17 wt% ที่พิกะรามานในช่วง 1376 (a), 1447 (b), 2900 cm^{-1} (c) และ 2960 (d)

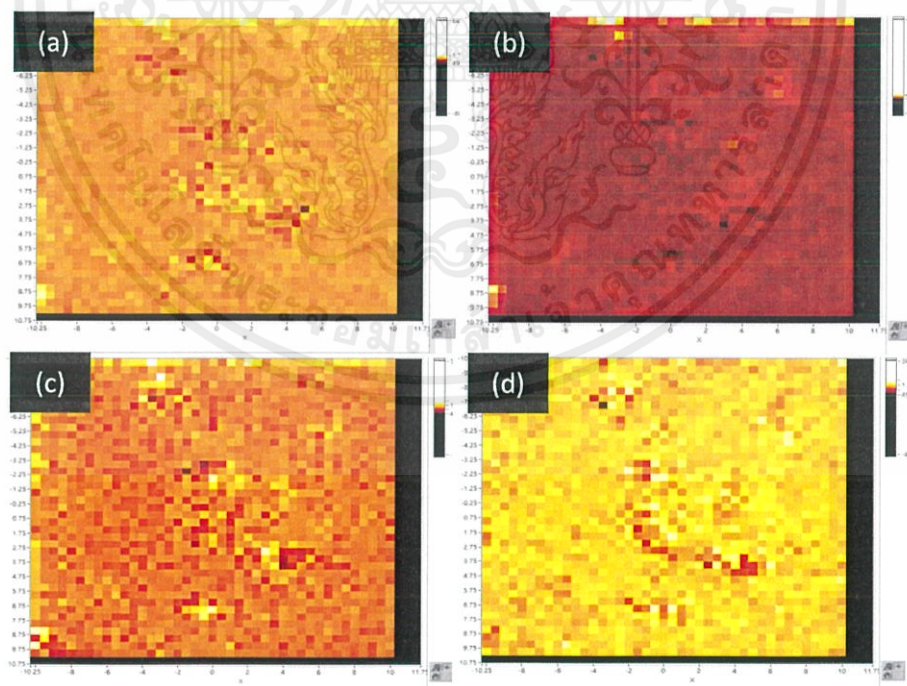


ภาพที่ 4.4 แสดงการกระจายตัวของฟิล์ม P3HT ความเข้มข้น 0.50 wt% ที่พิกะรามานในช่วง 1376 (a), 1447 (b), 2900 cm^{-1} (c) และ 2960 (d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

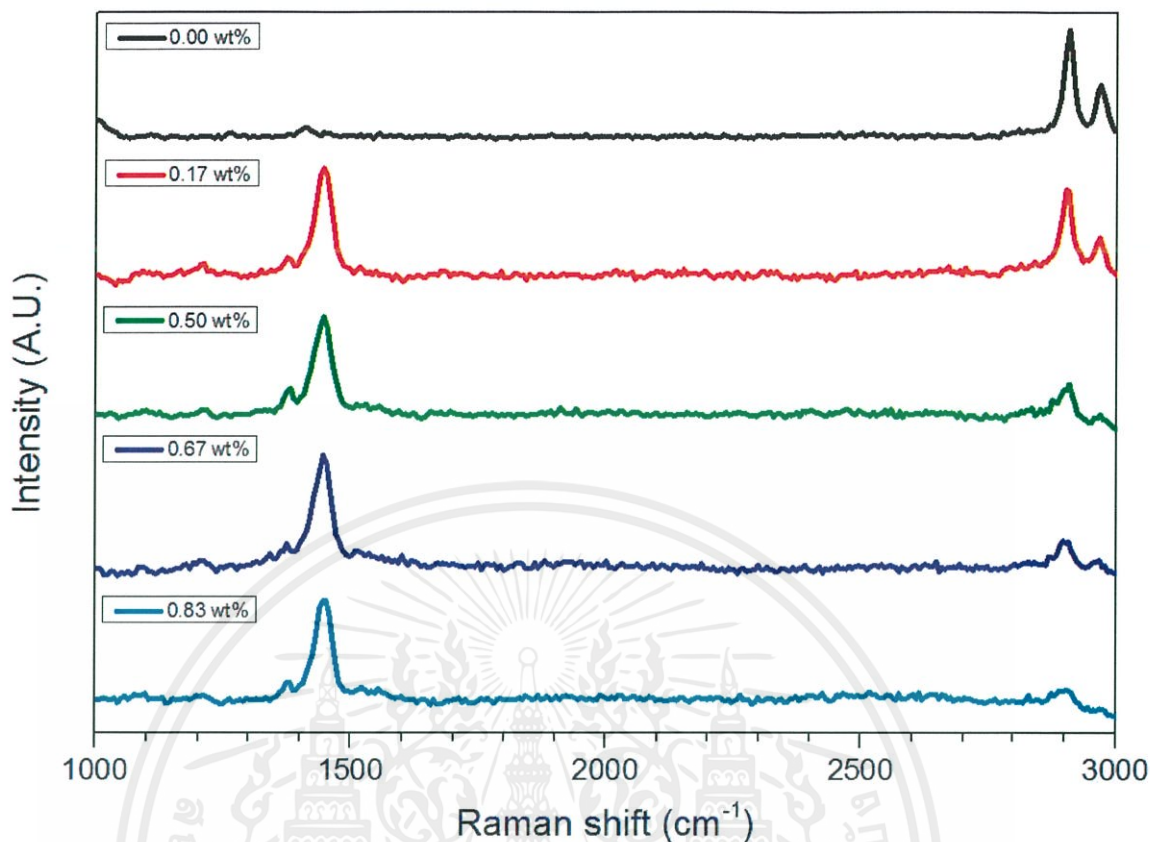


ภาพที่ 4.5 แสดงการกระจายตัวของฟิล์ม P3HT ความเข้มข้น 0.67 wt% ที่พีคอรามาโนในช่วง 1376 (a), 1447 (b), 2900 cm^{-1} (c) และ 2960 (d)



ภาพที่ 4.6 แสดงการกระจายตัวของฟิล์ม P3HT ความเข้มข้น 0.83 wt% ที่พีคอรามาโนในช่วง 1376 (a), 1447 (b), 2900 cm^{-1} (c) และ 2960 (d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



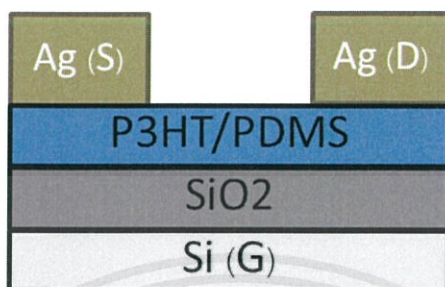
ภาพที่ 4.7 แสดงสเปกตรารามานของวัสดุผสม PDMS-P3HT ที่ความเข้มข้นของ P3HT ค่าต่างๆ

4.3 สมบัติสารกึ่งตัวนำชนิด P-type ของคอมโพสิตของพอลิไดเมทิลไซโลเซน-พอลิ (3-เฮกซิลไทโอฟีน)

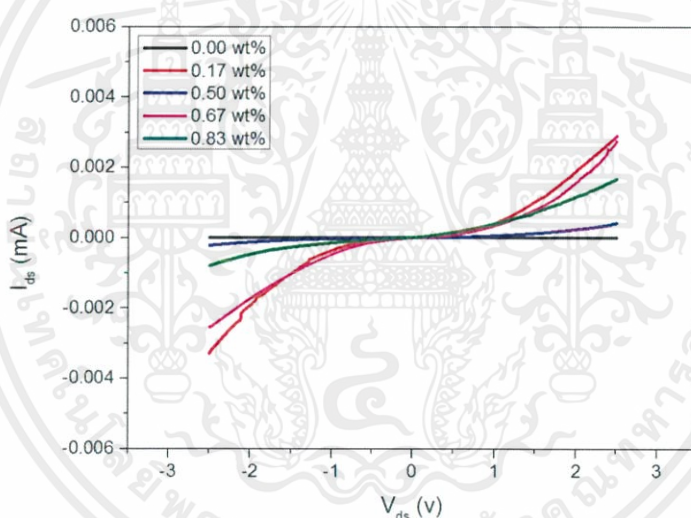
จากการการสร้างอุปกรณ์ FET แบบ back gate ขึ้นโดยให้ขั้ว source กับ drain เป็นกาวเงิน ส่วนในขั้ว gate นั้นเป็น Si ตามภาพที่ 4.8 และใช้คอมโพสิต PDMS-P3HT ต่างๆได้แก่ความเข้มข้น P3HT ที่ 0.00, 0.17, 0.50, 0.67 และ 0.83 wt% เป็น channel จากนั้นเมื่อทำการให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว source กับ drain ซึ่งกำหนดศักย์ไฟฟ้าในช่วงตั้งแต่ -3 V จนถึง 3 V และให้ศักย์ไฟฟ้าที่ gate เป็น 0 V จะได้ลักษณะกราฟดังภาพที่ 4.9 จากผลการทดลองพบว่าที่ PDMS-P3HT ที่ความเข้มข้น P3HT 0.00 wt% นั้นเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันจะไม่พบกระแสที่เกิดขึ้นเนื่อง PDMS นั้นมีความเป็นฉนวนสูงจึงทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้า แต่เมื่อทำการผสม P3HT ที่ความเข้มข้นต่างๆ จะมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นโดยที่ศักย์ไฟฟ้าในช่วงที่เป็นลบจะได้กระแสไฟฟ้าที่เป็นลบส่วนศักย์ไฟฟ้าในช่วงที่เป็นบวกจะได้กระแสไฟฟ้าที่เป็นบวก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเติม P3HT ลงไปจะช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นมา แต่ในทั้งนี้ไม่สามารถวัดค่า I_G ได้เนื่องจากเมื่อทำการเปลี่ยนค่า V_G กราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นคลื่นรบกวนซึ่งอาจเกิดจากการเตรียมอุปกรณ์ FET ไว้ไม่ดีพอทำให้ไม่สามารถวัดได้



ภาพที่ 4.8 ภาพโครงสร้างอุปกรณ์ FET แบบ back gate



ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าต่อศักย์ไฟฟ้าในช่วง -3 V ถึง 3 V ที่ความเข้มข้น P3HT ต่างๆ

4.4 สมบัติทางไฟฟ้าคอมโพสิตของพอลิไดเมทิลไซโลเซน-พอลิ(3-เฮกซิลไทโอฟีน)- ท่อนาโนคาร์บอน

นำฟิล์ม PDMS-P3HT และ PDMS-P3HT-CNT (CNT 0.1 wt%) ไปทำการวัดผลเพื่อศึกษา ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า โดยใช้เครื่อง Four-point probe ซึ่งทำให้สามารถวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Resistivity, ρ) ได้ตามตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าความต้านทานเฉลี่ยของคอมโพสิตฟิล์มที่เงื่อนไขต่างๆ

Concentration of P3HT (wt%)	Resistance ($M\Omega \cdot cm$)
0.00 wt%	-
0.17 wt%	-
0.33 wt%	-
0.50 wt%	-
0.67 wt%	-
0.83 wt%	-
0.50 wt%-CNT	3.61 ± 1.23

จากการทดลองไม่สามารถวัดค่าความต้านทานของคอมโพสิต PDMS-P3HT เนื่องจากโครงสร้างของฟิล์มส่วนใหญ่จะประกอบด้วย PDMS ที่เป็นฉนวนไฟฟ้า แต่เมื่อทำการผสม CNT ลงไป จะเห็นว่าสามารถวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าได้แสดงว่า CNT ช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าให้กับฟิล์มคอมโพสิตได้จริง

4.5 ประสิทธิภาพของ TENG โดยการเพิ่มความหนาแน่นประจุและความนำไฟฟ้าด้วยวัสดุคอมโพสิตของพอลิไดเมทิลไซโลเซน-พอลิ(3-เฮกซิลไทโอฟีน)-ท่อนาโนคาร์บอน

ในการวัดประสิทธิภาพของ TENG ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ TENG ที่ประดิษฐ์ขึ้นจากการใช้วัสดุคอมโพสิตระหว่าง PDMS-P3HT โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของ P3HT ที่แตกต่างกัน และการใช้วัสดุคอมโพสิตระหว่าง PDMS-P3HT-CNT และวัดความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลา กระแสไฟฟ้ากับเวลา และ กำลังไฟฟ้ากับความต้านทานค่าต่างๆ ขณะทำการต่อวงจรแบบฟอว์เวิร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และรีเวิร์ส ตามลำดับ โดยการให้แรงกด-ปล่อยในทิศตั้งฉาก กับ TENG ด้วยแรงขนาด 12 N และความถี่คงที่ 1 Hz

4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาที่เงื่อนไขต่างๆ

ภาพที่ 4.10 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage, V) กับเวลา (Time) ของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PDMS-P3HT ที่ P3HT ความเข้มข้น 0.00, 0.17, 0.50, 0.67 และ 0.83 wt% ซึ่งทำการต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ดโดยใช้กาวเงินเป็นตัวเชื่อมสายไฟ จากผลการทดลองจะพบว่าพิกัดสัญญาณของฝั่ง V ที่มีค่าบวกจะมีค่าสูงกว่าพิกัดสัญญาณของฝั่ง V ที่มีค่าลบเนื่องจากแรงที่กระทำต่อ TENG ตอนกดมีค่ามากกว่าตอนปล่อย ซึ่งตอนกดแรงที่เกิดจะมาจากเครื่องให้แรงมาตรฐานแต่ว่าตอนปล่อยจะไม่มีแรงมากกระทำจะเป็นเพียงการคลายตัวของโครงสร้าง TENG จากกราฟจะพบว่าเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบ V ฝั่งบวกที่เกิดขึ้นเนื่องจากเป็นแรงกดของเครื่องที่ใช้จะพบว่าความเข้มข้นของ P3HT $0.50 > 0.17 > 0.67 > 0.83 > 0.00$ wt%

ภาพที่ 4.10 (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage, V) กับเวลา (Time) ของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PDMS-P3HT ที่ P3HT ความเข้มข้น 0.00, 0.17, 0.50, 0.67 และ 0.83 wt% ซึ่งทำการต่อวงจรแบบรีเวิร์ดโดยใช้กาวเงินเป็นตัวเชื่อมสายไฟ จากผลของการทดลองจะพบว่าลักษณะของพิกัดสัญญาณนั้นจะมีทิศกลับจากบวกเป็นลบโดยที่ขนาดของสัญญาณยังมีลักษณะเดิมทำให้มีทิศตรงกันข้ามกับ ภาพที่ 4.10 (a)

จะพบว่ากรณีการต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ดเมื่อ TENG เกิดการกดจะได้พิกัดสัญญาณ V ที่เป็นบวก ขณะที่เมื่อคลายตัวจะเกิดพิกัดสัญญาณ V ลบ ในขณะที่ต่อวงจรแบบรีเวิร์ดพิกัดสัญญาณ V ในทิศตรงข้ามกับฟอร์เวิร์ด และยังพบว่าพิกัดที่เกิดจากการกด-ปล่อยนั้น จะมีพิกัดสองพิกัดต่อเนื่องกัน ทั้งแบบฟอร์เวิร์ดและรีเวิร์ด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า V ที่ได้มากจากการทำงานของ TENG ที่เกิดจากการกดและคลายตัวจริง แต่ว่าเนื่องจากกันต่อสายไฟโดยใช้กาวเงินนั้นมีปัญหาเวลาให้แรงกดไปเรื่อยๆ สายไฟที่ยึดไว้จะหลุดออกจาก TENG ซึ่งได้มีการทำ TENG ที่มีการยึดสายไฟโดยใช้วิธีบัดกรีเข้ากับเทปทองแดง

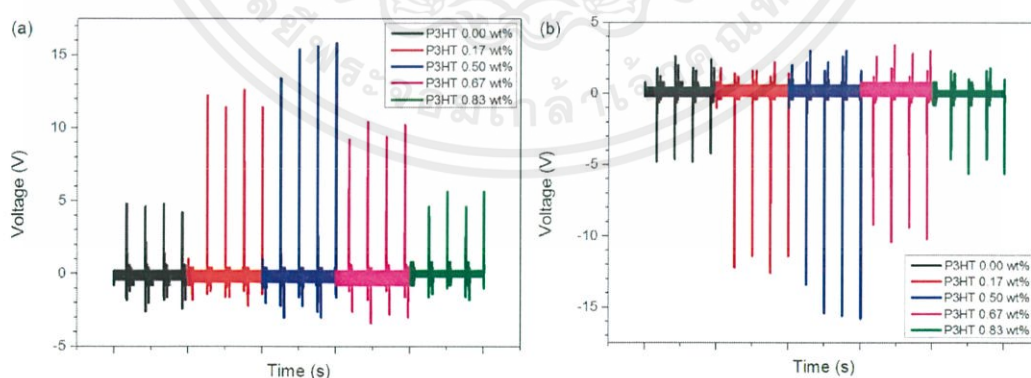
ภาพที่ 4.11 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage, V) กับเวลา (Time) ของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PDMS-P3HT ที่ P3HT ความเข้มข้น 0.00, 0.17, 0.33, 0.50, 0.67, 0.83 wt% และ 0.50-CNT ซึ่งทำการต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ดโดยใช้วิธีบัดกรีตัวเชื่อมสายไฟ ซึ่งผลพิกัดสัญญาณ V ที่ได้จะมีลักษณะดังนี้ ที่ความเข้มข้น P3HT $0.50 - \text{CNT} > 0.50 > 0.33 > 0.17 > 0.67 > 0.83 > 0.00$ wt% แต่พิกัด V ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าแบบใช้กาวเงินเนื่องจากขั้วที่ใช้บัดกรีเป็นเทปทองแดงซึ่งมีการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าขั้ว ITO ที่ใช้กาวเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.11 (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลา ของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PDMS-P3HT ที่ P3HT ความเข้มข้น 0.00, 0.17, 0.33, 0.50, 0.67, 0.83 wt% และ 0.50-CNT ซึ่งทำการต่อวงจรแบบรีเวิร์สโดยใช้วิธีบัดกรีตัวเชื่อมสายไฟ ซึ่งจากผลของการทดลองจะพบว่าลักษณะของพีคสัญญาณนั้นจะมีทิศกลับจากบวกเป็นลบโดยที่ขนาดของสัญญาณยังมีลักษณะเดิมทำให้มีทิศตรงกันข้ามกับ ภาพที่ 4.11 (a)

จากการทดลองทั้งการต่อสายไฟแบบใช้กาวเงินและบัดกรีจะพบว่าความเข้มข้นที่ P3HT 0.50 wt% จะได้พีคสัญญาณ V ที่สูงที่สุดในการที่ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากการที่ P3HT กับ PDMS ผสมกันซึ่งจะทำให้เกิดรอยต่อ p-n เกิดขึ้นโดย P3HT จะเป็น p ส่วน PDMS จะเป็น n ซึ่งการเกิดรอยต่อนี้ในส่วนของของ PDMS ที่เป็น n นั้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังฝั่ง p ทำให้เกิดประจุบวกเกิดขึ้น โดยประจุบวกที่เกิดขึ้นในฝั่งของ PDMS นั้นจะช่วยดึงอิเล็กตรอนเมื่อตัว PDMS สัมผัสกับ PET ทำให้ประจุลบที่เกิดบริเวณผิวมากขึ้นส่งผลต่อการเกิดประจุที่ขั้วมากขึ้น จึงได้เลือกความเข้มข้นนี้มาผสมกับ CNT ปริมาณ 0.1 wt% เพื่อดูว่าการนำไฟฟ้าจะมีผลต่อประสิทธิภาพของ TENG หรือไม่ จึงทำการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเทียบกับเงื่อนไขอื่น ๆ เห็นได้จากตารางที่ 4.2 โดยจะแสดงตารางสรุปผลค่าศักย์ไฟฟ้าในตารางที่ 4.3 และ 4.4

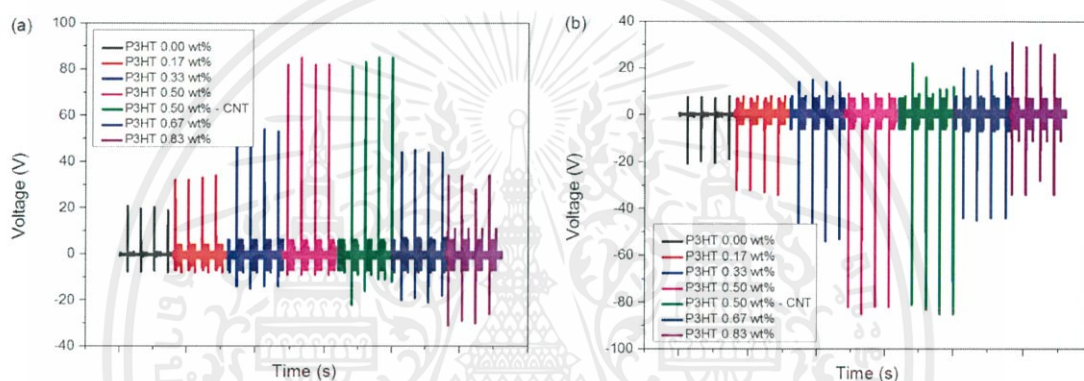
เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าโดยวิธีบัดกรีสายไฟของ PDMS-P3HT-CNT จะพบว่า ศักย์ไฟฟ้าตอนกดจะมีค่ามากกว่า PDMS-P3HT และ PDMS อยู่ที่ 1.08 เท่าและ 4 เท่า ตามลำดับ ส่วนตอนปล่อยมีค่ามากกว่า 2 เท่า และ 3 เท่า ตามลำดับ ซึ่งดูได้จากภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาที่เงื่อนไขความเข้มข้น P3HT ที่ 0.00, 0.17, 0.50, 0.67 และ 0.83 wt% ซึ่งต่อวงจรแบบ ฟอว์เวิร์ด (a) และ รีเวิร์ส (b) โดยใช้กาวเงิน

ตารางที่ 4.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ที่เงื่อนไขต่างๆโดยใช้กาวเงินเชื่อมสายไฟ

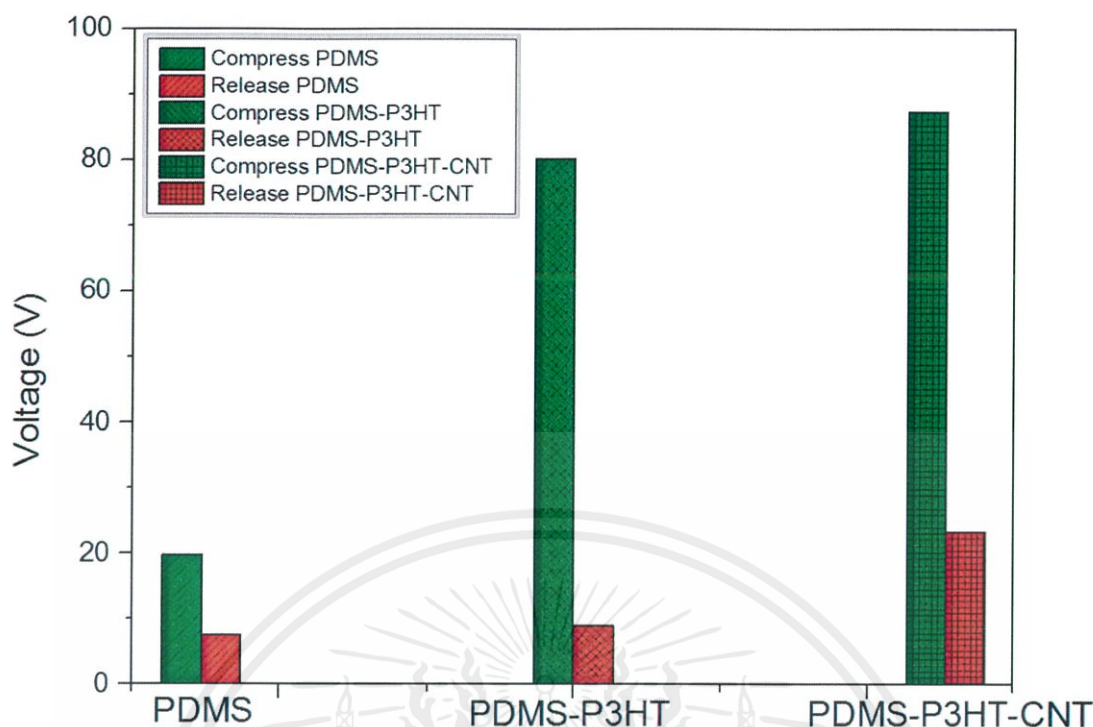
Concentration of P3HT (wt%)	Compress voltage (V)	Release voltage (V)
0.00	5.04 ± 0.46	2.74 ± 0.55
0.17	12.49 ± 1.65	1.77 ± 0.37
0.50	15.33 ± 1.46	2.07 ± 0.57
0.67	9.53 ± 0.49	1.70 ± 0.55
0.83	5.04 ± 0.83	1.40 ± 0.31



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาที่เงื่อนไขความเข้มข้น P3HT ที่ 0.00, 0.17, 0.33, 0.50, 0.67, 0.83 wt% และผสม CNT 0.10 wt% ซึ่งต่อวงจรแบบ พอร์เวิร์ด (a) และ รีเวิร์ส (b) โดยใช้การบัดกรี

ตารางที่ 4.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ที่เงื่อนไขต่างๆโดยใช้วิธีบัดกรีสายไฟ

Concentration of P3HT (wt%)	Compress voltage (V)	Release voltage (V)
0.00	19.87 ± 0.69	7.63 ± 0.27
0.17	32.00 ± 1.06	6.91 ± 0.29
0.33	52.67 ± 2.15	13.92 ± 0.51
0.50	80.25 ± 2.77	9.08 ± 0.79
0.50 - CNT	87.33 ± 3.26	23.42 ± 2.39
0.67	43.58 ± 1.78	17.83 ± 2.32
0.83	33.17 ± 1.85	28.08 ± 2.35



ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าที่เงื่อนไขต่างๆ

4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่เงื่อนไขต่างๆ

ในส่วนของการวัดพิกัดสัญญาณกระแสไฟฟ้า (Current, I) จะใช้ TENG ที่มีเงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าคือเป็นวัสดุคอมโพสิต PDMS-P3HT ที่ P3HT ความเข้มข้นแตกต่างกัน 0.00, 0.17, 0.50, 0.67 และ 0.83 wt% แล้วก็ในส่วนของวัสดุคอมโพสิต PDMS-P3HT-CNT โดยทำการต่อวงจรแบบฟอว์เวิร์ดและรีเวิร์ส ด้วยการให้แรงกด-ปล่อยในทิศตั้งฉากกับ TENG ด้วยความถี่คงที่ 1 Hz ซึ่งสามารถสรุปค่ากระแสไฟฟ้าได้ในตารางที่ 4.3 และจะทำการวิเคราะห์กราฟผลทางทดลองดังภาพต่อไปนี้

ภาพที่ 4.13 (a) จะเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (Current, I) กับเวลา (Time) ของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PDMS-P3HT ที่ P3HT ความเข้มข้น 0.00, 0.17, 0.50, 0.67 และ 0.83 wt% ซึ่งทำการต่อวงจรแบบฟอว์เวิร์ดโดยใช้กาวเงินเป็นตัวเชื่อมสายไฟ จากผลการทดลองจะพบว่าพิกัดสัญญาณของฝั่ง I ที่มีค่าบวกจะมีค่าสูงกว่าพิกัดสัญญาณของฝั่ง I ที่มีค่าลบเนื่องจากแรงที่กระทำต่อ TENG ตอนกดมีค่ามากกว่าตอนปล่อย ซึ่งตอนกดแรงที่กดจะมาจากเครื่องให้แรงมาตรฐานแต่ว่าตอนปล่อยจะไม่มีแรงมากกระทำจะเป็นเพียงการคลายตัวของโครงสร้าง TENG จากกราฟจะพบว่าเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบ I ฝั่งบวกที่เกิดขึ้นเนื่องจากเป็นแรงกดของเครื่องที่ใช้จะพบว่าความเข้มข้นของ P3HT $0.50 > 0.67 > 0.83 > 0.17, 0.00$ wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.13 (b) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา ของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PDMS-P3HT ที่ P3HT ความเข้มข้น 0.00, 0.17, 0.50, 0.67 และ 0.83 wt% ซึ่งทำการต่อวงจรแบบรีเวิร์สโดยใช้กาวเงินเป็นตัวเชื่อมสายไฟ จากผลของการทดลองจะพบว่าลักษณะของฟิคสัญญาณนั้นจะมีทิศกลับจากบวกเป็นลบโดยที่ขนาดของสัญญาณยังมีลักษณะเดิมทำให้มีทิศตรงกันข้ามกับ ภาพที่ 4.13 (a)

ภาพที่ 4.14 (a) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา ของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PDMS-P3HT ที่ P3HT ความเข้มข้น 0.00, 0.17, 0.33, 0.50, 0.67, 0.83 wt% และ 0.50 – CNT ซึ่งทำการต่อวงจรแบบฟอร์เวิร์ดโดยใช้วิธีบัดกรีตัวเชื่อมสายไฟซึ่งผลฟิคสัญญาณ I ที่ได้จะมีลักษณะดังนี้ $P3HT\ 0.50 - CNT > 0.50 > 0.33 > 0.17 > 0.67 > 0.83 > 0.00\ wt\%$ แต่ฟิค I ที่ได้จะมีค่าสูงกว่าแบบใช้กาวเงินเนื่องจากขั้วที่ใช้บัดกรีเป็นเทปทองแดงซึ่งมีการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าขั้ว ITO ที่ใช้กาวเงิน

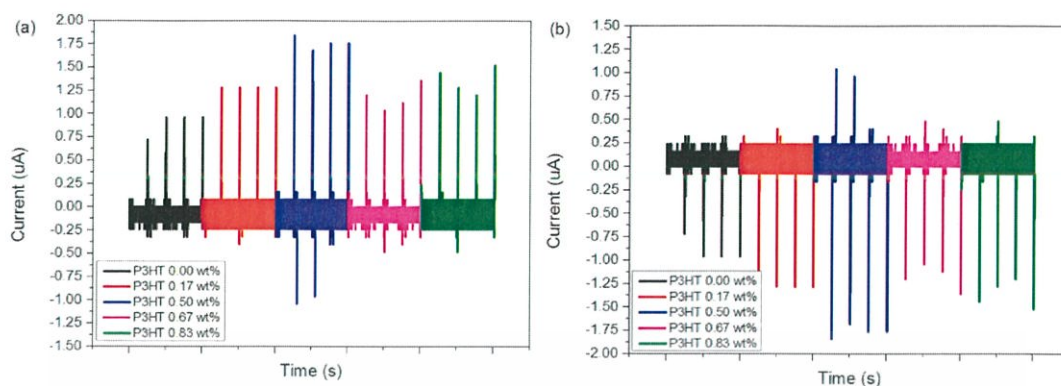
ภาพที่ 4.14 (b) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา ของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง PDMS-P3HT ที่ P3HT ความเข้มข้น 0.00, 0.17, 0.33, 0.50, 0.67, 0.83 wt% และ 0.50 – CNT ซึ่งทำการต่อวงจรแบบรีเวิร์สโดยใช้วิธีบัดกรีตัวเชื่อมสายไฟ ซึ่งจากผลของการทดลองจะพบว่าลักษณะของฟิคสัญญาณนั้นจะมีทิศกลับจากบวกเป็นลบโดยที่ขนาดของสัญญาณยังมีลักษณะเดิมทำให้มีทิศตรงกันข้ามกับ ภาพที่ 4.14 (a)

จากการทดลองทั้งการต่อสายไฟแบบใช้กาวเงินและบัดกรีจะพบว่าความเข้มข้นที่ P3HT 0.50 wt% จะได้ฟิคสัญญาณ I ที่สูงที่สุดในการที่ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากการที่ P3HT กับ PDMS ผสมกันซึ่งจะทำให้เกิดรอยต่อ PN เกิดขึ้นโดย P3HT จะเป็น P ส่วน PDMS จะเป็น N ซึ่งการเกิดรอยต่อนี้ในส่วนของของ PDMS ที่เป็น N นั้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังฝั่ง P ทำให้เกิดประจุบวกเกิดขึ้น โดยประจุบวกที่เกิดขึ้นในฝั่งของ PDMS นั้นจะช่วยดึงอิเล็กตรอนเมื่อตัว PDMS สัมผัสกับ PET ทำให้ประจุลบที่เกิดบริเวณผิวมากขึ้นส่งผลต่อการเกิดประจุที่ขั้วมากขึ้น จึงได้เลือกความเข้มข้นนี้มาผสมกับ CNT ปริมาณ 0.1 wt% เพื่อดูว่าการนำไฟฟ้าจะมีผลต่อประสิทธิภาพของ TENG หรือไม่ จึงทำการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเทียบกับเงื่อนไขอื่น ๆ เห็นได้จากตารางที่ 4.2 โดยจะแสดงตารางสรุปผลค่ากระแสไฟฟ้าในตารางที่ 4.5 และ 4.6

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าโดยวิธีบัดกรีสายไฟของ PDMS-P3HT-CNT จะพบว่า ศักย์ไฟฟ้าตอนกดจะมีค่ามากกว่า PDMS-P3HT และ PDMS อยู่ที่ 1.19 เเทาและ 6 เเทา ตามลำดับ

ส่วนตอนปล่อยจะมากกว่า 4 เเทาและ 4 เเทา ตามลำดับ ซึ่งดูได้จากภาพที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

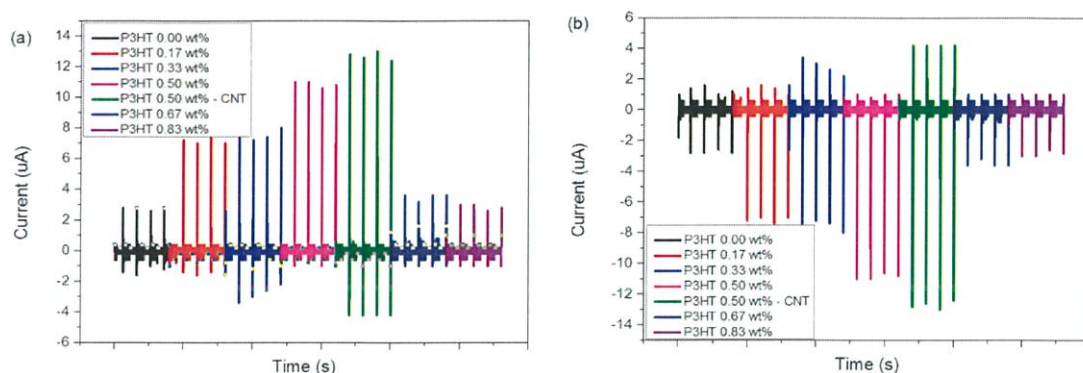


ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่เงื่อนไขความเข้มข้น P3HT ที่ 0.00, 0.17, 0.50, 0.67 และ 0.83 wt% ซึ่งต้องวงจรแบบ ฟอว์เวิร์ด (a) และ รีเวิร์ส (b) โดยใช้กาวเงิน

ตารางที่ 4.5 ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ที่เงื่อนไขต่างๆโดยใช้กาวเงินเชื่อมสายไฟ

Concentration of P3HT (wt%)	Compress current (μA)	Release current (μA)
0.00	0.87 ± 0.08	0.34 ± 0.05
0.17	1.27 ± 0.19	0.35 ± 0.49
0.50	1.74 ± 0.26	0.67 ± 0.29
0.67	1.73 ± 0.39	0.63 ± 0.21
0.83	1.36 ± 0.18	0.40 ± 0.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

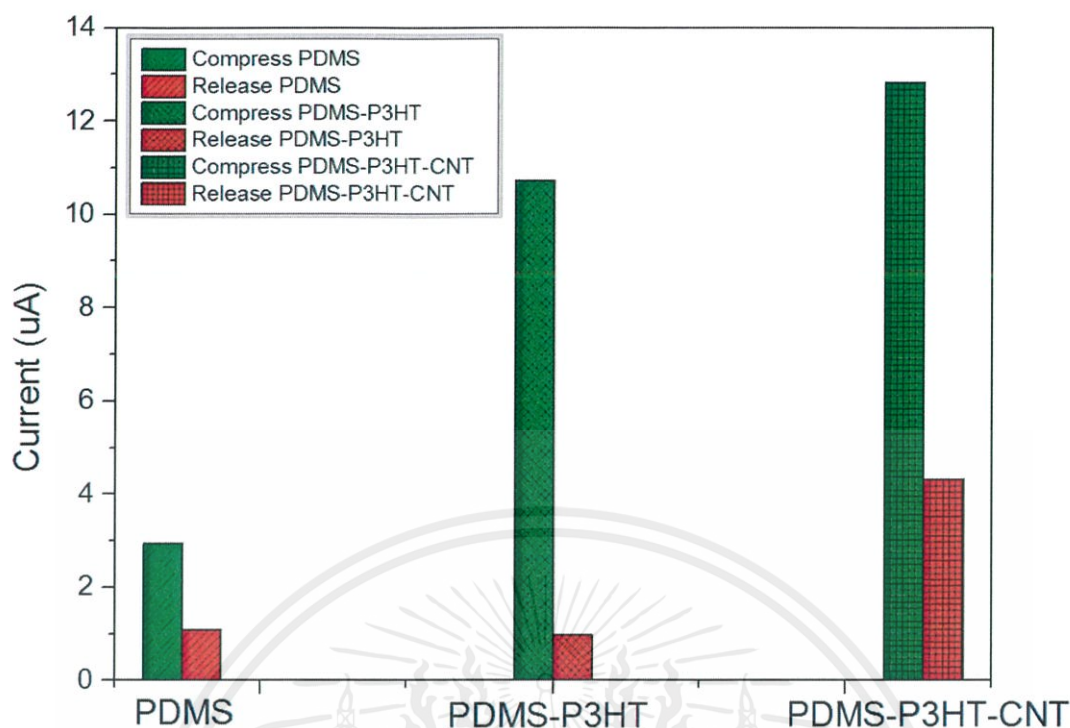


ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่ความเข้มข้น P3HT ที่ 0.00, 0.17, 0.33, 0.50, 0.67, 0.83 wt% และผสม CNT 0.10 wt% ซึ่งต่อวงจรแบบโพร์เวิร์ต (a) และ รีเวิร์ส (b) โดยใช้การบัดกรี

ตารางที่ 4.6 ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ที่เงื่อนไขต่างๆโดยใช้วิธีบัดกรีสายไฟ

Concentration of P3HT (wt%)	Compress current (μA)	Release current (μA)
0.00	2.95 ± 0.24	1.10 ± 0.20
0.17	7.03 ± 0.31	0.98 ± 0.30
0.33	8.00 ± 0.44	2.23 ± 0.53
0.50	10.73 ± 0.20	0.97 ± 0.08
0.50 - CNT	12.82 ± 0.26	4.33 ± 0.19
0.67	3.52 ± 0.13	1.00 ± 0.00
0.83	3.05 ± 0.23	1.08 ± 0.16

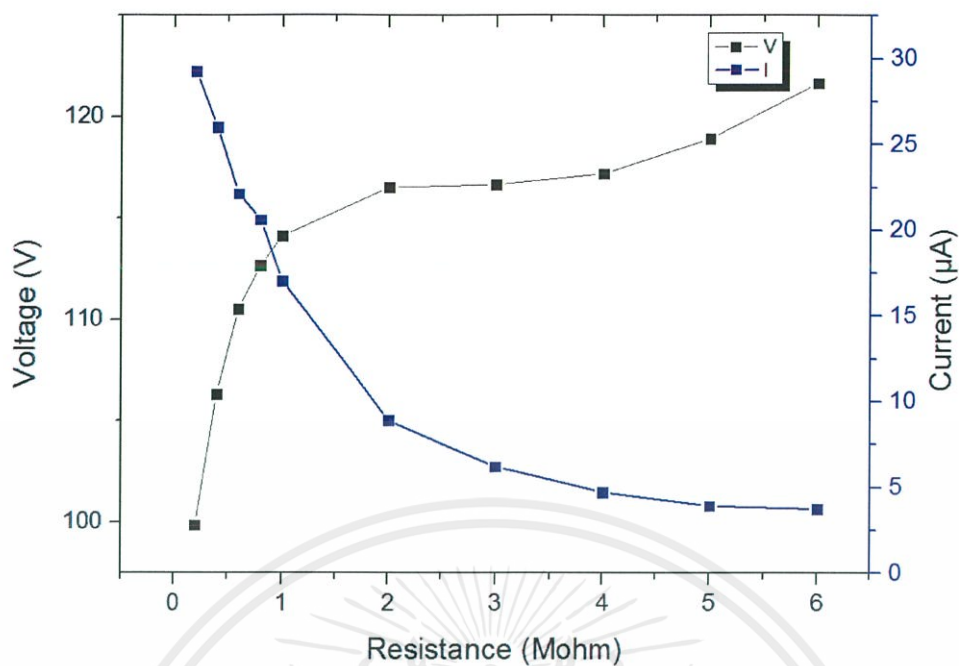
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



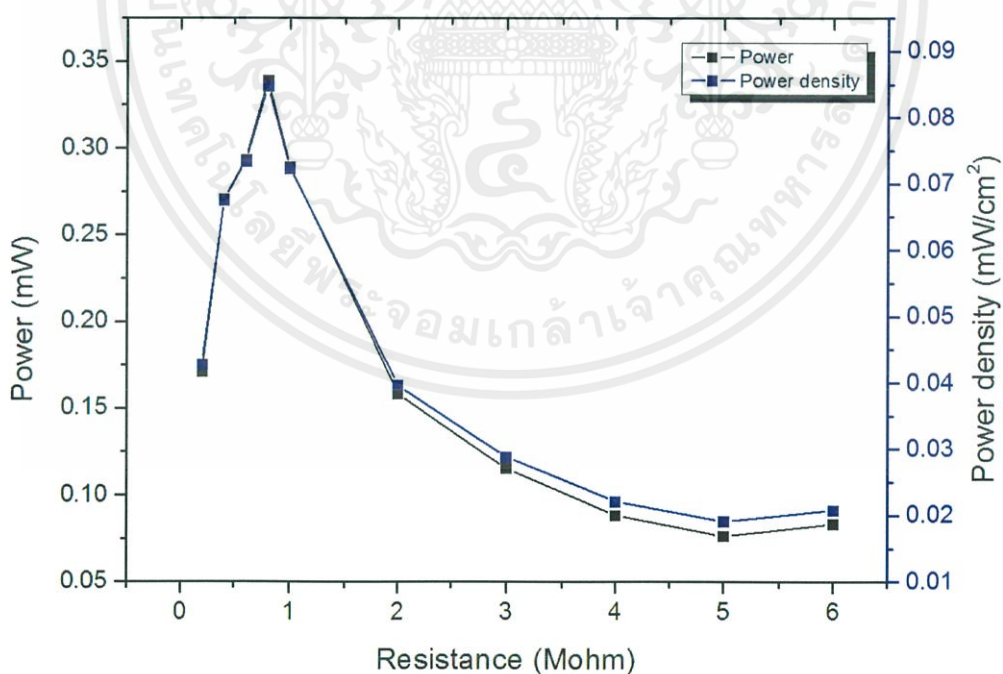
ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่เงื่อนไขต่างๆ

4.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความต้านทานค่าต่างๆ

ในการทำวัดค่ากำลังไฟฟ้าของ TENG เลือกใช้ TENG จากเงื่อนไขที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ PDMS-P3HT (0.5 wt%)-CNT(0.1 wt%) ซึ่งได้ทำการต่อ TENG เข้ากับความต้านทานภายนอกที่มีค่า 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 MΩ เพื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า โดยจะแสดงผลของสัญญาณทางไฟฟ้าที่ค่าความต้านทานต่างๆดังภาพที่ 4.16 และแสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่ค่าความต้านทานต่างๆดังภาพที่ 4.17 จากผลการทดลองนั้นพบว่าทั้งค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม $V = IR$ โดยถ้ายิ่งค่าความต้านทานสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าต่ำลง แต่ศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งกราฟของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าตัดกันที่ประมาณ 0.8 MΩ จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดนี้ไปคำนวณหา กำลังไฟฟ้าโดยใช้สมการ $P = I^2R$ ซึ่งจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 0.34 mW ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเทียบกับความต้านทานอื่นๆ คิดเป็นความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.085 mW/cm^2



ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ที่ความต้านทานภายนอกค่าต่างๆ



ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า ที่ความต้านทานภายนอกค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลทางไฟฟ้าของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทานโดยการเพิ่มความนำไฟฟ้าด้วยวัสดุคอมโพสิตของ PDMS-P3HT-CNT โดยการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยด้านความเข้มข้นของ P3HT ที่เปลี่ยนไป และค่าการนำไฟฟ้าของ CNT

ข้อสรุปที่ 1 สามารถสร้างฟิล์มบางที่เกิดจากการผสมระหว่างพอลิเมอร์ PDMS และ P3HT ได้ โดยฟิล์มที่เกิดขึ้นนั้นมีความหนาอยู่ที่ประมาณ $2.5 \mu\text{m}$ ซึ่งจากการเปลี่ยนความเข้มข้นของ P3HT นั้นไม่ได้ส่งผลต่อความหนาฟิล์มบาง

ข้อสรุปที่ 2 วัสดุคอมโพสิต PDMS-P3HT นั้นตัว P3HT มีการกระจายตัวดีทั่วทั้งฟิล์ม

ข้อสรุปที่ 3 วัสดุคอมโพสิต PDMS-P3HT จะมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับ PDMS แต่ในที่นี้ยังไม่สามารถวัด ความเป็น P-type ได้เนื่องจากมีปัญหาทางอุปกรณ์

ข้อสรุปที่ 4 เมื่อทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากการเสียดทานด้วยวัสดุคอมโพสิตของ PDMS-P3HT โดยการต่อสายด้วยกาวเงินนั้น ค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะมีแนวโน้มเดียวกันคือค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ P3HT แต่จะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของ P3HT นั้นอยู่ที่ $0.67 \text{ wt}\%$ จนถึงความเข้มข้นที่ $0.83 \text{ wt}\%$ ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงที่สุดจะอยู่ที่ความเข้มข้นของ P3HT ที่ $0.50 \text{ wt}\%$ แต่ TENG ที่เกิดจากการต่อสายด้วยกาวเงินนั้น เมื่อสายไฟได้รับแรงจากเครื่องให้แรงมาตรฐานเป็นเวลาหนึ่ง บางสายไฟเกิดการหลุดออกจากอุปกรณ์ TENG จึงได้มีการต่อสายไฟใหม่ด้วยวิธีบัดกรีเข้ากับเทปทองแดงแล้วทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าใหม่อีกครั้ง โดยได้เพิ่มอีก 1 ความเข้มข้น คือที่ P3HT $0.33 \text{ wt}\%$ ซึ่งผลค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้ยังคงมีแนวโน้มเดิม คือค่าเพิ่มขึ้นจนถึงความเข้มข้น P3HT ที่ $0.50 \text{ wt}\%$ เมื่อเพิ่มเกินกว่านั้นค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สูงที่สุดจะอยู่ที่ความเข้มข้น P3HT ที่ $0.50 \text{ wt}\%$ โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 80.25 V และ $10.73 \mu\text{A}$ ตามลำดับ ในการที่ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากการที่ P3HT กับ PDMS ผสมกันซึ่งจะทำให้เกิดรอยต่อ p-n เกิดขึ้นโดย P3HT จะเป็น p ส่วน PDMS จะเป็น N ซึ่งการเกิดรอยต่อนี้ในส่วนหนึ่งของ PDMS ที่เป็น n นั้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังฝั่ง p ทำให้เกิดประจุบวกเกิดขึ้น โดยประจุบวกที่เกิดขึ้นในฝั่งของ PDMS นั้นจะช่วยดึงอิเล็กตรอนเมื่อตัว PDMS สัมผัสกับ PET ทำให้ประจุลบที่เกิดบริเวณผิวมากขึ้นส่งผลต่อการเกิดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ขั้วมากขึ้น แต่ถ้าหากว่าเติม P3HT มากจนเกินไป ประจุบวกที่เกิดขึ้นจะเยอะเกินทำให้มันต้าน ประจุที่จะเกิดบริเวณขั้วทำให้ประสิทธิภาพของ TENG ลดลง

ข้อสรุปที่ 5 วัสดุคอมโพสิตของ PDMS-P3HT-CNT จะมีค่าความต้านทานพื้นผิว (sheet resistance) อยู่ที่ $3.61 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ จากนั้นเมื่อทำการวัดประสิทธิภาพของ TENG ค่าศักย์ไฟฟ้าและ กระแสไฟฟ้าจะมีค่าอยู่ที่ 87.33 V และ $12.82 \text{ }\mu\text{A}$ ตามลำดับ พบว่ามีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 0.34 mW และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ $0.085 \text{ mW}/\text{cm}^2$

ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้สามารถนำไปเพิ่มประสิทธิภาพให้กับ TENG ได้โดยอาจทำรูปแบบ pattern ให้กับตัว PDMS เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในตอนกดให้มากยิ่งขึ้น หรือการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการทำขั้วที่ ไวต่อสายไฟให้มีการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น ในส่วนของสัญญาณรบกวนนั้นอาจจะต้องทำในพื้นที่ที่ไม่มี สัญญาณภายนอกมารบกวนหรือทำการลดการสั่นจากการกระแทกซึ่งจะช่วยให้อสัญญาณที่เกิดมีความ นิ่งกว่าเดิม



บรรณานุกรม

- [1] "สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของ กฟผ. ปี 2560", *Egat.co.th*, 2017. [Online]. Available: https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=1623&Itemid=116. [Accessed: 12- Sep- 2017].
- [2] Z. Wang, *Triboelectric nanogenerators*. [S.l.]: Springer, 2016.
- [3] "Charging by Contact and by Induction", *Demo.webassign.net*, 2017. [Online]. Available: http://demo.webassign.net/ebooks/cj6demo/pc/c18/read/main/c18x18_4_ref.htm. [Accessed: 15- Sep- 2017].
- [4] พงษ์ศักดิ์ ชินนาบุญ, *ฟิล์มสัมนาวิทยาลัย 2 เล่ม 1, 5 ed.* สมุทรปราการ: บริษัทออฟเซ็ทพลัส จำกัด, 2555.
- [5] F. Fan, Z. Tian and Z. Lin Wang, "Flexible triboelectric generator", *Nano Energy*, vol. 1, no. 2, pp. 328-334, 2012.
- [6] J. Zhong, Q. Zhong, F. Fan, Y. Zhang, S. Wang, B. Hu, Z. Wang and J. Zhou, "Finger typing driven triboelectric nanogenerator and its use for instantaneously lighting up LEDs", *Nano Energy*, vol. 2, no. 4, pp. 491-497, 2013.
- [7] F. Fan, L. Lin, G. Zhu, W. Wu, R. Zhang and Z. Wang, "Transparent Triboelectric Nanogenerators and Self-Powered Pressure Sensors Based on Micropatterned Plastic Films", *Nano Letters*, vol. 12, no. 6, pp. 3109-3114, 2012.
- [8] Z. Wang, G. Zhu, Y. Yang, S. Wang and C. Pan, "Progress in nanogenerators for portable electronics", *Materials Today*, vol. 15, no. 12, pp. 532-543, 2012.
- [9] S. Wang, "Nanogenerator for mechanical energy harvesting and its hybridization with li-ion battery", *Smartech.gatech.edu*, 2014. [Online]. Available: <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/53437>. [Accessed: 05- Dec- 2017].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] P. Bai, G. Zhu, Z. Lin, Q. Jing, J. Chen, G. Zhang, J. Ma and Z. Wang, "Integrated Multilayered Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Biomechanical Energy from Human Motions", *ACS Nano*, vol. 7, no. 4, pp. 3713-3719, 2013.
- [11] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature*, vol. 354, no. 6348, pp. 56-58, 1991.
- [12] อ. ตำนานวิทยากร, ท่อนาโนคาร์บอน: วัสดุในอนาคต. Pathumthani: National Metal and Materials Technology Center, 2010, pp. 13-18.
- [13] "ท่อนาโนคาร์บอน", Th.wikipedia.org, 2017. [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%97%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B8%B2%E0%B9%82%E0%B8%99%E0%B8%84%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%9A%E0%B8%AD%E0%B8%99>. [Accessed: 29- Oct- 2017].
- [14] M. Yu, "Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load", *Science*, vol. 287, no. 5453, pp. 637-640, 2000.
- [15] D. Ponnamma, *Smart polymer nanocomposites*. Cham: Springer, 2017, pp. 96-98.
- [16] M. Kant, S. Shinde, D. Bodas, K. Patil, V. Sathe, K. Adhi and S. Gosavi, "Surface studies on benzophenone doped PDMS microstructures fabricated using KrF excimer laser direct write lithography", *Applied Surface Science*, vol. 314, pp. 292-300, 2014.
- [17] F. Otieno, B. Mutuma, M. Airo, K. Ranganathan, R. Erasmus, N. Coville and D. Wamwangi, "Enhancement of organic photovoltaic device performance via P3HT:PCBM solution heat treatment", *Thin Solid Films*, vol. 625, pp. 62-69, 2017.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล : กิตติภัฏ สุวรรณพัชรกุล

วัน เดือน ปี เกิด : 28 มิถุนายน 2539

ที่อยู่ปัจจุบัน : 185 ถนน พัฒนาการ ซอย 29 แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง
กรุงเทพมหานคร 10250

ช่องทางติดต่อสื่อสาร : E-mail: paradin_ice@hotmail.com

เบอร์โทรศัพท์ : 085-904-1455

กิจกรรมพิเศษ : อ่านหนังสือ

ประวัติการศึกษา : ชั้นประถมศึกษา โรงเรียนอุดมศึกษา จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ชั้นมัธยมศึกษา โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ จังหวัด

กรุงเทพมหานคร

ชั้นปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพมหานคร

ประวัติการได้รับทุน : 1. ได้รับทุนการศึกษาจากมูลนิธิกลุ่มอีซูซุ

2. ได้รับทุนการศึกษาต่อเนื่องจากมูลนิธินายห้างโรงปูนผู้หนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้