

ตัวกำเนิดพลังงานขนาดจิ๋วไทรโบอิเล็กทริกเตรียมจากวัสดุคอมโพสิต  
พอลิเมอร์พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์เฮกซะฟลูออโรโพรพิลีน

TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR PREPARED FROM  
POLY(VINYLIDENEFLUORIDE-HEXAFLUOROPROPYLENE) POLYMER  
COMPOSITE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR PREPARED FROM  
POLY(VINYLIDENEFLUORIDE-HEXAFLUOROPROPYLENE) POLYMER  
COMPOSITE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
DEPARTMENT OF PHYSICS SCHOOL OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2023-SC-M-030-056



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์               | ตัวกำเนิดพลังงานขนาดจิ๋วไทรโบอิเล็กทริกเตรียมจากวัสดุคอมโพสิตพอลิเมอร์พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์เฮกซะฟลูออโรโพรไพลีน |
| ชื่อนักศึกษา                    | นางสาวภัทรสุดา วรรณฤมล  |
| รหัสประจำตัว                    | 62605025  |
| ปริญญา                          | วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)   |
| ภาควิชา                         | ฟิสิกส์   |
| พ.ศ.                            | 2566  |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์     | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศาล สุขวิสูตร   |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลีมสุวรรณ   |

### บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์ในการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสมพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์เฮกซะฟลูออโรโพรไพลีน (PVDF-HFP) และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) โดยใช้การขึ้นรูปฟิล์มแบบวิธีด็อกเตอร์เบลต ก่อนนำฟิล์มนี้ไปสร้างเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริกขนาดเล็กนั้นฟิล์มจะถูกนำไปตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราดความละเอียดสูง เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ และเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ผลการทดสอบบ่งชี้ว่าฟิล์มคอมโพสิตมีความเป็นผลึกมากที่สุด (28.4 %) เมื่อมีการเตรียมฟิล์มแบบใช้ตัวทำละลายอะซิโตนผสมไตรเมทิลฟออร์มาไมด์ และมีการเติม rGO 1 % โดยน้ำหนัก (wt%) และผลึกมีปริมาณเฟสปีต้าสูงสุดประมาณ 82 % อย่างไรก็ตามปริมาณ rGO ที่ผสมมากกว่า 1 wt% จะทำให้เฟสปีต้าลดลง นอกจากนี้การเติม rGO จะส่งผลให้จุดหลอมเหลวของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2-4 °C ด้วยลักษณะพื้นผิวของฟิล์มคอมโพสิตจะมีรูพรุนและขรุขระมากขึ้นเมื่อมีการใช้ทั้งอะซิโตนและ rGO เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสร้างจากพอลิเมอร์ PVDF-HFP เติม rGO 1 wt% ที่เตรียมแบบใช้อะซิโตนจะให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดถึง 115  $\mu$ W ในขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้านี้จะลดลงเมื่อ rGO มากกว่า 1 wt% เพราะ rGO เกิดการรวมตัวกลุ่มเป็นผลให้เฟสปีต้าลดลงที่มากขึ้น

**คำสำคัญ :** เครื่องกำเนิดพลังงานแบบไทรโบอิเล็กทริก, ไตรเมทิลฟออร์มาไมด์, พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์เฮกซะฟลูออโรโพรไพลีน, รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์, อะซิโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                   |   |
|-------------------|---|
| Thesis Title      | Triboelectric nanogenerator prepared from poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene) polymer composite |
| Student Name      | Miss Pattarasuda Wannarumon   |
| Student ID        | 62605025  |
| Degree            | Master of Science (Applied Physics)   |
| Department        | Physics   |
| Year              | 2023  |
| Thesis Advisor    | Assistant Professor Dr.Pisan Sukwisute  |
| Thesis Co-Advisor | Professor Dr.Pichet Limsuwan  |

### Abstract

The research aim is to prepare composite polymer films by mixing poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene) (PVDF-HFP) and reduced graphene oxide (rGO) using a doctor blade method. Before the energy harvesting test of triboelectric nanogenerators, the films were examined by high-resolution transmission electron microscope, X-ray diffraction apparatus, Raman Spectrometer, Fourier transform infrared spectrometer, and differential scanning calorimeter. The results indicated that the PVDF-HFP film prepared using acetone and N, N dimethylformamide mixed solvents and rGO 1 wt% displayed the maximum crystallinity (28.4 %) and  $\beta$  phase content (82 %). However, a rGO addition of over 1 wt% decreased the  $\beta$  phase quantity. The rGO mixing caused an increase in the melting point of the composite by approximately 2-4 °C. The surface morphology of the PVDF-HFP film with acetone and rGO usage became further porous and rough as compared to the others. The nanogenerator built from this PVDF-HFP polymer with rGO 1 wt% yielded the highest maximum harvested power of 115 W, while this value was decreased with rGO content greater than 1 wt% because of rGO aggregates resulting in a reduction of  $\beta$  phase.

**Keywords :** Triboelectric nanogenerator, N,N-dimethylformamide, Poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene), Reduced graphene oxide, Acetone

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่านดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พิศาล สุขวิสูตร อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ และเสนอแนวทางในการแก้ปัญหา ตลอดจนรวมถึงดูแลเรื่องค่าใช้จ่ายในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร. พิเชษฐ ลีสุวรรณ อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ที่ได้ร่วมกันเขียน และให้คำแนะนำในงานวิจัยเพื่อตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อาภาภรณ์ สกฤตกระเวก อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำความรู้ ความช่วยเหลือ แนะนำแนวทางในการแก้ปัญหา รวมทั้งการใช้เครื่องมือในการทำงานวิจัยในมีความครบถ้วนสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ภัทรสุดา วรรณฤมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

|  | หน้า      |
|--|-----------|
| บทคัดย่อ.....  | ก         |
| ABSTRACT.....  | ข         |
| กิตติกรรมประกาศ .....  | ค         |
| สารบัญ.....  | ง         |
| สารบัญตาราง.....   | ฉ         |
| สารบัญรูป.....   | ช         |
| <b>บทที่ 1 บทนำ .....</b>                                    | <b>9</b>  |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                      | 9         |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....                             | 10        |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัยและระยะเวลาการวิจัย.....                | 10        |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                           | 11        |
| <b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>           | <b>12</b> |
| 2.1 การเก็บเกี่ยวพลังงาน.....                                | 12        |
| 2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....                          | 13        |
| 2.2.1 ไพโซอิเล็กทริก.....                                    | 13        |
| 2.2.2 ไทรโบอิเล็กทริก.....                                   | 14        |
| 2.3 ปฏิกิริยาการเกิดไพโรอิเล็กทริก.....                      | 14        |
| 2.3.1 ลำดับไพโรอิเล็กทริก.....                               | 15        |
| 2.3.2 ปฏิกิริยาการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต.....                    | 16        |
| 2.3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กแบบไพโรอิเล็กทริก.....       | 17        |
| 2.4 พอลิเมอร์ PVDF-HFP.....                                  | 20        |
| 2.5 แกรฟีน.....  | 22        |
| 2.6 เทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์ม PVDF-HFP.....        | 24        |
| 2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง..... | 24        |
| 2.6.2 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....    | 25        |
| 2.6.3 เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี.....                           | 26        |
| 2.6.4 ดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....               | 27        |
| 2.6.5 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....                      | 29        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 2.6.6 เครื่องวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยแรงลม 247 N ขนาดความถี่ที่ 3 Hz.....      | 30        |
| 2.7 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง   | 31        |
| <b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย .....</b>                                      | <b>33</b> |
| 3.1 วัสดุ   | 33        |
| 3.2 กระบวนการสังเคราะห์ rGO   | 33        |
| 3.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์ม PVDF-HFP   | 34        |
| 3.3.1 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF-HFP แบบไม่เติม rGO.....                      | 34        |
| 3.3.2 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF-HFP แบบเติม rGO.....                         | 36        |
| 3.4 การทดสอบคุณสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF-HFP เติมและไม่เติม rGO              | 37        |
| 3.5 การวัดคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าด้วยแรงกดที่ได้จากเครื่องกดที่ความถี่ 3 Hz          | 40        |
| 3.5.1 ขั้นตอนการประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริกจากฟิล์มพอลิเมอร์     | 40        |
| 3.5.2 กลไกการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริก .....                 | 40        |
| 3.5.3 การเก็บเกี่ยวพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริก.....          | 42        |
| <b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>                                  | <b>43</b> |
| 4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี                        | 43        |
| 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี | 45        |
| 4.3 การตรวจสอบความเป็นผลึกและสมบัติเชิงความร้อน                                 | 49        |
| 4.4 การวิเคราะห์ฟิล์มด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์                                 | 51        |
| 4.5 การตรวจพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง         | 52        |
| 4.6 ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต PVDF-HFP           | 53        |
| <b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>                                | <b>59</b> |
| 5.1 สรุปผลงานวิจัย  | 59        |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ  | 59        |
| เอกสารอ้างอิง .....   | 60        |
| ภาคผนวก .....   | 65        |
| ภาคผนวก ก.....  | 66        |
| ประวัติผู้เขียน.....  | 67        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 1.1 แผนการดำเนินงานและระยะเวลาการวิจัย .....   | 11   |
| 2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย TENG.....   | 20   |
| 2.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่มีการผสมวัสดุคอมโพสิตใน TENG.....   | 20   |
| 2.3 คุณสมบัติของแกรไฟีน .....  | 22   |
| 2.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางของแกรไฟีนบริสุทธิ์และอนุพันธ์ของแกรไฟีน (Qureshi and Panesar 2019).....                   | 24   |
| 3.1 สัดส่วนของพอลิเมอร์ ตัวทำละลาย และ rGO สำหรับการเตรียมฟิล์ม.....   | 37   |
| 4.1 ความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดที่ส่องผ่านและสัดส่วนของเฟสปีต้าของสารตัวอย่างที่ใช้และไม่ใช้ อะซิโตนเป็นตัวทำละลาย..... | 48   |
| 4.2 อุณหภูมิการหลอมเหลว เอนทาลปีการหลอมเหลว และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก .....   | 50   |
| 4.3 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชนิดผลิตได้ .....  | 54   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แหล่งพลังงานในสิ่งแวดล้อม [2] .....  | 13   |
| 2.2 ลักษณะการทำงานของระบบไพโซโซอิเล็กทริก (ก) ปรากฏการณ์แบบตรง และ (ข) ปรากฏการณ์แบบกลับ [5] .....   | 14   |
| 2.3 กระบวนการเกิดปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริกของวัสดุ 2 ชนิด (ก) วัสดุ 2 ชนิดที่ต่างกัน (ข) แรงภายนอกทำให้สัมผัสกัน และ (ค) เกิดการถ่ายโอนประจุ .....                              | 15   |
| 2.4 ตารางลำดับไพโรอิเล็กทริก .....   | 16   |
| 2.5 ปรากฏการณ์การเกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (ก) ความเป็นกลางทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าและฉนวนไฟฟ้า และ (ข) วางวัสดุทั้งสอง 2 ใกล้กัน [7] .....                                       | 17   |
| 2.6 โหมดพื้นฐานทั้ง 4 โหมดของไพโรอิเล็กทริก (ก) โหมดการสัมผัสแล้วแยกออกในแนวตั้ง (ข) โหมดการเลื่อนด้านข้าง (ค) โหมดการต่ออิเล็กโทรดด้านเดียว และ (ง) โหมดการหมุนแบบอิสระ ..... | 18   |
| 2.7 กลไกการสัมผัสแบบเลื่อนไปด้านข้าง .....   | 19   |
| 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ PVDF-HFP [23] .....  | 21   |
| 2.9 โครงสร้างเฟสแอลฟา (ซ้าย) และเฟสบีตา (ขวา) ของ PVDF .....   | 21   |
| 2.10 เส้นใย PVDF-HFP ที่นำมาสร้างเป็นตัวเก็บเกี่ยวพลังงาน .....  | 22   |
| 2.11 โครงสร้างของแกรฟีนและอนุพันธ์ของแกรฟีนแบบต่าง ๆ .....   | 23   |
| 2.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง รุ่น JSM-7001F .....  | 25   |
| 2.13 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีรุ่น NICOLET 6700 .....  | 26   |
| 2.14 กระบวนการการกระเจิงของแสงแบบ Rayleigh และแบบ Raman .....  | 27   |
| 2.15 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ รุ่น Discovery DSC25 .....   | 28   |
| 2.16 ลักษณะเตาเผาของ DSC .....   | 29   |
| 2.17 ลักษณะของกราฟ DSC ที่แสดงค่าอุณหภูมิสภาพแก้ว การตกผลึก การดูดและคายความร้อน [33] .....  | 29   |
| 2.18 เครื่องเอกซเรย์ดีฟแฟรกโตมิเตอร์ รุ่น SmartLab SE .....  | 30   |
| 2.19 องค์ประกอบของกล่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยวิธีไพโรอิเล็กทริกแบบ Vertical contact-separation mode .....  | 31   |
| 3.1 ไดอะแกรมการสังเคราะห์ rGO .....  | 34   |
| 3.2 แผนภาพในการขึ้นรูปฟิล์มที่ไม่มีกรเทียม rGO (ก) เครื่องด็อกเตอร์เบลต (ข) ฟิลเลอร์เกจ (ค) ขั้นตอนการทำฟิล์มพอลิเมอร์ .....   | 36   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 3.3 ขั้นตอนการสร้างฟิล์ม DMF–Acetone–rGO.....   | 37   |
| 3.4 แผนผังการเตรียมฟิล์มและทดสอบสมบัติต่าง ๆ .....  | 39   |
| 3.5 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....   | 40   |
| 3.6 แผนผังกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF-HFP แบบไพโรโบอิเล็คทริก... 41                           | 41   |
| 4.1 สเปกตรัมรามานของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีการเติม rGO 0-10 wt% แบบไม่ใช้อะซิโตน .....                              | 44   |
| 4.2 สเปกตรัมรามานของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีการเติม rGO 0-10 wt% แบบใช้อะซิโตน.....                                  | 44   |
| 4.3 สเปกตรัมการส่องผ่านของฟิล์มพอลิเมอร์แบบใช้ตัวทำละลายที่ไม่ผสมอะซิโตน .....                                  | 45   |
| 4.4 สเปกตรัมการส่องผ่านของฟิล์มพอลิเมอร์แบบใช้ตัวทำละลายที่ผสมอะซิโตน .....                                     | 46   |
| 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น rGO กับ สัดส่วนของเฟสบีต้าในสารตัวอย่างที่มีการใช้และไม่ใช้อะซิโตน .....     | 49   |
| 4.6 พฤติกรรมการคายความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต.....  | 50   |
| 4.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต.....   | 51   |
| 4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่กำลังขยาย 10000 เท่า.....        | 52   |
| 4.9 กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไพโรโบอิเล็คทริกผลิตได้ .....                           | 53   |
| 4.10 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไพโรโบอิเล็คทริกชนิดต่าง ๆ .....                       | 54   |
| 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้า.....  | 55   |
| 4.12 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่มีการเติม rGO 1wt% (ก) ตัวทำละลาย DMF (ข) ตัวทำละลายเป็น DMF/Acetone ..... | 56   |
| 4.13 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มความหนาต่างกัน .....                          | 57   |
| 4.14 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไพโรโบอิเล็คทริกที่ใช้ฟิล์มความหนาต่าง ๆ.....                               | 58   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วิถีชีวิตของมนุษย์ในยุคปัจจุบันและอนาคตข้างหน้ามีความเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีไร้สาย และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาสามารถสวมใส่ได้มีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น โดยยังสามารถทำงานได้เป็นเวลานาน อุปกรณ์เหล่านี้จะมีความเกี่ยวข้องกับระบบต่าง ๆ เช่น ระบบเซ็นเซอร์ไร้สาย ระบบการควบคุมไร้สาย ระบบการรักษาความปลอดภัย และระบบการตรวจจับการเคลื่อนไหว สารเคมี เป็นต้น [1,2] การทำให้อุปกรณ์เหล่านี้สามารถทำงานได้เป็นเวลานานนั้นต้องอาศัยการพัฒนา 3 ด้าน คือ การออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์ให้กินพลังงานให้น้อยลงโดยประสิทธิภาพการทำงานไม่ลดลง การเพิ่มความจุแบตเตอรี่ให้มากขึ้น และการสร้างเครื่องกำเนิดพลังงานขนาดจิ๋วให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถผลิตพลังงานได้เองโดยการแปลงพลังงานเหลือใช้จากสิ่งแวดล้อมที่อุปกรณ์นั้นทำงานอยู่โดยวิธีสุดท้ายนี้เป็นหนทางที่ยั่งยืนลดภาระการบำรุงรักษา และทำให้ได้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถผลิตพลังงานได้เอง (self-power electronics) [3] ตัวกำเนิดพลังงานขนาดจิ๋วสามารถผลิตขึ้นได้จากวัสดุหลายชนิดการเลือกใช้วัสดุชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบและความเสถียรของพลังงานในสิ่งแวดล้อมที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้น ๆ ทำงานอยู่ ซึ่งการสร้างตัวกำเนิดพลังงานขนาดจิ๋วสามารถผลิตพลังงานเชิงพื้นที่และเชิงปริมาตรได้สูงถึง  $500 \text{ W/m}^2$  และ  $15 \text{ MW/m}^3$  ตามลำดับ [4]

ตัวกำเนิดพลังงานขนาดจิ๋วแบบไตรโบอิเล็กทริก (triboelectric Nanogenerator) คือ อุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งอาศัยปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริก (triboelectric effect) และการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (electrostatic induction) ที่เกิดขึ้นระหว่างการสัมผัสและเสียดสีระหว่างผิวของวัสดุ 2 ชนิดซึ่งมีสภาพขั้วทางไฟฟ้าที่ต่างกัน โดยวัสดุจะได้รับการประจุไฟฟ้าหลังการสัมผัสกับวัสดุอีกชนิดหนึ่งด้วยการเสียดสีเมื่อผิวสัมผัสแยกออกจากกันจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นเนื่องจากอะตอมที่พื้นผิวด้านหนึ่งจะมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดีกว่า (มีประจุบวกที่ผิวจำนวนมาก) ส่วนอะตอมอีกพื้นผิวหนึ่งจะมีความสามารถยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนไว้ได้ดี (มีประจุลบที่ผิวจำนวนมาก) ดังนั้นหากมีการต่อขั้วไฟฟ้าและลวดนำไฟฟ้าเชื่อมวัสดุทั้ง 2 เข้าด้วยกันจะเกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าสถิตส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในเส้นลวดได้ ดังนั้นการปรับปรุงพื้นผิวสัมผัสของวัสดุไตรโบอิเล็กทริกจึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มความขรุขระระดับนาโนเมตรและสร้างประจุบนพื้นผิววัสดุ โดยได้มีงานวิจัยที่มีการนำอนุภาคแกรฟีนออกไซด์ (GO) และท่อนาโนคาร์บอนไปผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลลิดีฟลูออไรด์ (PVDF) เพื่อสมบัติทางไตรโบอิเล็กทริก [2-5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการสร้างตัวกำเนิดพลังงานขนาดจิ๋วแบบไทรโบอิเล็กทริกโดยสร้างจากแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรไพลีน (PVDF-HFP) [6] กับ GO และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ที่ปริมาณต่าง ๆ มอนอเมอร์ PVDF-HFP นี้ประกอบด้วยอะตอมฟลูออรีนจำนวนมากกว่า PVDF จึงน่ามีความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนได้ดีกว่า ส่วน rGO จะมีความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่สูงกว่า GO [2, 5] ดังนั้นจึงน่าจะเป็นตัวเติมที่เหมาะสมในการเพิ่มประจุพื้นผิวให้กับพอลิเมอร์ PVDF-HFP ให้สูงขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มคอมโพสิต rGO และ PVDF-HFP ที่เตรียมได้จะมีการนำมาตรวจสอบความขรุขระระดับนาโนเมตร โครงสร้างผลึก ศักย์ไฟฟ้าสถิตพื้นผิว และประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเมื่อสร้างเป็นตัวกำเนิดพลังงานแบบไทรโบอิเล็กทริก

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานของตัวกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริกของฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF-HFP ที่มีการเติม rGO
- 2) เพื่อศึกษาสมบัติของฟิล์ม PVDF-HFP เติม rGO ที่ใช้สำหรับตัวกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริก

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัยและระยะเวลาการวิจัย

ระยะเวลาดำเนินการ 24 เดือน (สิงหาคม พ.ศ. 2562 ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2563) แสดงดังตารางที่ 1.1 โดยขอบเขตการศึกษาวิจัยประกอบด้วย

- 1) การดำเนินงานวิจัยนี้จะเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PVDF-HFP และ rGO ที่มีปริมาณ 0-10 % โดยน้ำหนัก (wt%) และเตรียมด้วยการใช้ตัวทำละลาย 2 ชนิด คือไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) และตัวทำละลายอะซิโตน (Acetone) ผสม DMF
- 2) การศึกษาลักษณะเฟสของผลึกที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีรังเอ็กซ์ ฟลูอริเอรทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี รามานสเปกโทรสโกปี
- 3) การตรวจสอบหาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนและปริมาณผลึกในฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry)
- 4) ฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตจะได้รับการตรวจสอบลักษณะพื้นผิว ความขรุขระและรูพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนความละเอียดสูง
- 5) การตรวจสอบประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริกจะดำเนินการในช่วงความต้านทานไฟฟ้า 200  $\Omega$  - 1000 M $\Omega$

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานและระยะเวลาการวิจัย

| กิจกรรม  | ระยะเวลา (เดือน) |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |
|--|------------------|-----|-----|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | 1-2              | 2-4 | 5-6 | 7-8 | 9-10 | 11-12 | 13-14 | 15-16 | 17-18 | 19-20 | 21-22 | 23-24 |
| 1. การสืบค้นเอกสารเพื่อการวิจัย และจัดซื้อวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือวิจัย   |                  |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |
| 2. เตรียมฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PVDF-HFP และ rGO                      |                  |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |
| 3. ทดสอบหาโครงสร้างตัวกำเนิดพลังงานไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริกที่เหมาะสมกับฟิล์ม |                  |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |
| 4. ตรวจสอบโครงสร้างเฟสผลึกของฟิล์มและลักษณะพื้นผิว                           |                  |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |
| 5. สร้างตัวกำเนิดพลังงานและตรวจสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าของฟิล์มคอมโพสิต  |                  |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |
| 6. วิเคราะห์ สรุปและเผยแพร่ผลงานวิจัย  |                  |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |
| 7. การเขียนและสอบป้องกันวิทยานิพนธ์  |                  |     |     |     |      |       |       |       |       |       |       |       |

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) งานวิจัยทำให้ทราบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของตัวกำเนิดพลังงานแบบไทรโบอิเล็กทริกของฟิล์มคอมโพสิต PVDF-HFP ที่จะสามารถต่อยอดเป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเซ็นเซอร์ขนาดเล็กได้
- 2) งานวิจัยก่อให้เกิดองค์ความรู้เรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานแบบไทรโบอิเล็กทริกด้วย rGO
- 3) งานวิจัยช่วยให้ทราบถึงปริมาณความชื้นที่จะทำให้ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานแบบไทรโบอิเล็กทริกลดลง ซึ่งเป็นประโยชน์ในด้านการออกแบบการบรรจุ (packaging design) ตัวกำเนิดพลังงานแบบไทรโบอิเล็กทริกต่อไป
- 4) งานวิจัยช่วยให้ทราบถึงความหนาที่เหมาะสมที่ได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของฟิล์มคอมโพสิต PVDF-HFP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

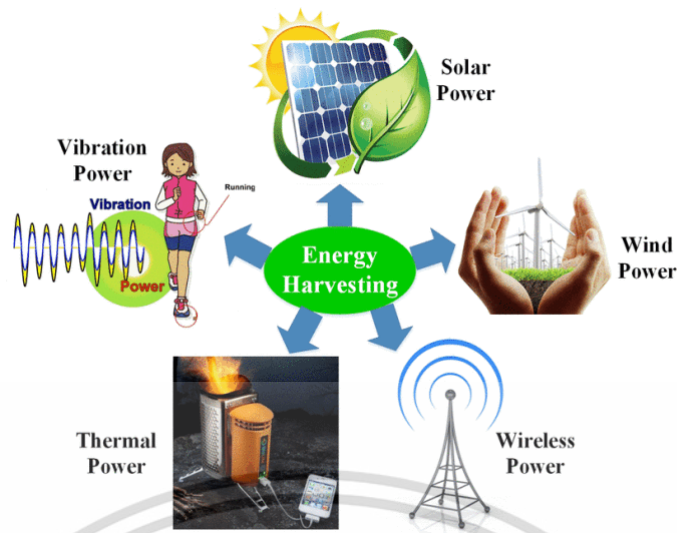
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยจะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 8 ส่วน ดังนี้

- 2.1 การเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting)
- 2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Electric microgenerator)
- 2.3 ปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect)
- 2.4 พอลิเมอร์ PVDF-HFP
- 2.5 แกรฟีน (Graphene)
- 2.6 เทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์ม PVDF-HFP
- 2.7 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การเก็บเกี่ยวพลังงาน

การเก็บเกี่ยวพลังงานคือการเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง เพื่อวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ด้วยคำจำกัดความง่าย ๆ ของการเก็บเกี่ยวพลังงานก็คือการแปลงพลังงานที่ได้จากสิ่งแวดล้อมไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยพลังงานรอบ ๆ ตัวเรานั้น หลักๆ มีด้วยกัน 4 แหล่งคือ แหล่งพลังงานกล (Mechanical energy) เช่น พลังงานที่ได้จากการสั่นสะเทือน (Vibration power) การเคลื่อนที่ของลมและน้ำ แหล่งพลังงานความร้อน (thermal energy) เช่น ได้จากดวงอาทิตย์ หรือ พลังงานในของเหลวร้อนใต้พื้นพิภพ พลังงานจากการแผ่รังสี (Radiant Energy) เป็นพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ได้มาจากแสงอาทิตย์ และรังสีอินฟราเรด และสุดท้ายคือพลังงานเคมี (Chemical energy) โดยพลังงานเหล่านี้เป็นพลังงานที่สะอาดและอยู่รอบ ๆ ตัวเราถ้าหากไม่มีการเก็บเกี่ยว พลังงานเหล่านี้ก็จะสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ในการเก็บเกี่ยวพลังงานเหล่านี้มีด้วยกันหลากหลายวิธีในงานวิจัยนี้เราสนใจที่จะเก็บเกี่ยวพลังงานจากแหล่งพลังงานกลด้วยกระบวนการไทรโบอิเล็กทริก [1]



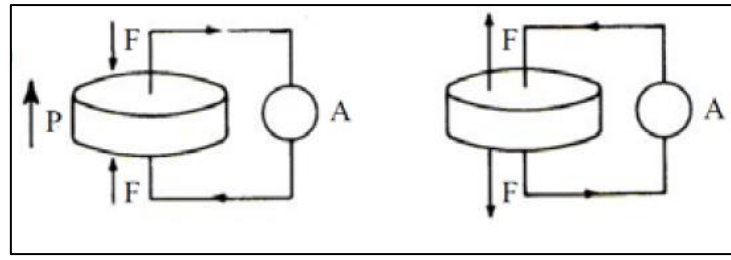
รูปที่ 2.1 แหล่งพลังงานในสิ่งแวดล้อม [2]

## 2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

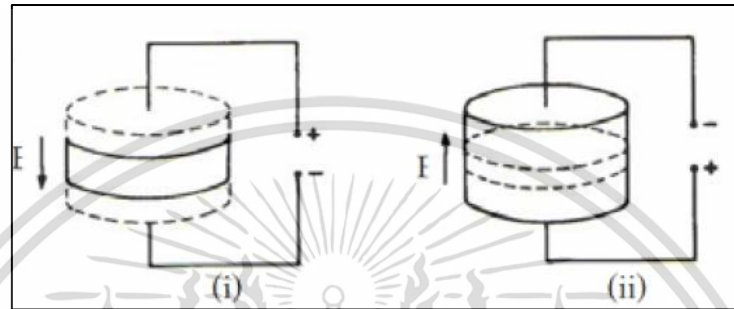
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการแปลงพลังงานที่เหลือใช้ในสิ่งแวดล้อมมาเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานได้สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กเพื่อลดปริมาณการใช้แบตเตอรี่และสามารถผลิตพลังงานออกมาเพื่อขับเคลื่อนระบบของตัวเองได้โดยไม่ต้องพึ่งพาแหล่งพลังงานประเภทแบตเตอรี่ (self-powered) ตัวอย่างของพลังงานกลที่ จะสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ที่เห็นได้ชัดคือพลังงานที่ได้จากการก้าวเท้าของมนุษย์เป็นกิจกรรมหนึ่งซึ่งใช้และให้พลังงานมาก เมื่อเทียบกับกิจกรรมในการใช้อวัยวะอื่น ๆ ของร่างกาย ในปัจจุบัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานมีด้วยกันหลายรูปแบบดังต่อไปนี้ [3]

### 2.2.1 ไพเอโซอิเล็กทริก

เมื่อวัสดุซึ่งมีคุณสมบัติไพเอโซอิเล็กทริกถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างภายนอกด้วยการกดหรือการดึงโครงสร้างภายในของวัสดุ เช่น ผลึกหรือโมเลกุลซึ่งมีขั้วไฟฟ้าบวกและลบก็จะเปลี่ยนรูปร่างเช่นกัน ส่งผลให้สมดุลของขั้วไฟฟ้าในวัสดุเปลี่ยนแปลงวัสดุจึงผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ ไพเอโซอิเล็กทริก (piezoelectric) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงกลต่าง ๆ เช่น แรงดัน ความเร่ง การสั่น แรงเครียด หรือแรงกระทำอื่น ๆ โดยเปลี่ยนพลังงานกลต่าง ๆ เหล่านี้ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ในทางกลับกันเมื่อให้ป้อนพลังงานไฟฟ้าแก่วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นไพเอโซอิเล็กทริกวัสดุนั้นก็จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้เช่นกัน



a) direct effect



วัสดุหดตัว (ii)

วัสดุขยายตัว

รูปที่ 2.2 ลักษณะการทำงานของระบบไพเอโซอิเล็กทริก (ก) ปรากฏการแบบตรง และ (ข) ปรากฏการแบบกลับ [5]

### 2.2.2 ไทโรโบอิเล็กทริก

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กแบบไทโรโบอิเล็กทริกเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการของ 2 ปรากฏการณ์คือปรากฏการณ์ไทโรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect) และปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electrostatic induction effect) ซึ่งในกระบวนการนี้จะอธิบายในหัวข้อถัดไป

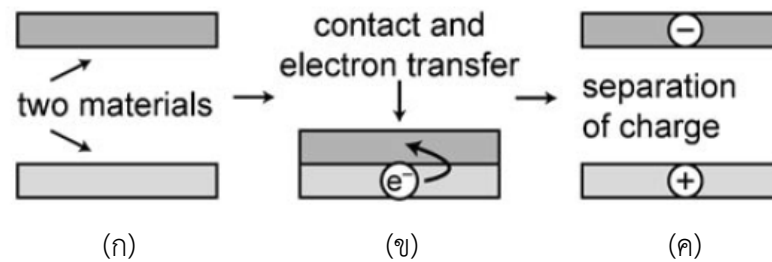
### 2.3 ปรากฏการณ์ไทโรโบอิเล็กทริก

ไทโรโบอิเล็กทริกคือ ปรากฏการณ์ที่เกิดจากการถ่ายเทของประจุอิเล็กตรอนบนพื้นผิวระหว่างวัสดุสองชนิดที่มีความเป็นขั้วไฟฟ้าที่ต่างกัน เมื่อนำมาสัมผัสหรือเสียดสีกัน โดยปกติอะตอมของวัสดุที่เป็นกลางทางไฟฟ้า จะประกอบด้วยโปรตอนที่อยู่ในนิวเคลียส ซึ่งจะมีจำนวนเท่ากับอิเล็กตรอนที่โคจรรอบๆ นิวเคลียสนั้น จำนวนของโปรตอนที่ให้ประจุเป็นบวกจะมีจำนวนเท่ากับอิเล็กตรอนที่ให้ประจุเป็นลบ ทำให้อะตอมนั้นมีประจุเป็นกลาง เมื่อวัสดุทั้งสองสัมผัสกันอิเล็กตรอนจะถูกถ่ายเทจากผิวสัมผัสของวัสดุหนึ่งไปยังอีกวัสดุหนึ่ง เมื่อวัสดุทั้งสองถูกแยกออกจากกันจะเกิดความไม่สมดุลของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นโดยวัสดุที่มีอิเล็กตรอนขาดหายไปจะแสดงคุณสมบัติเป็นบวกและวัสดุที่ได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจะแสดงคุณสมบัติเป็นลบ นั่นคือการที่วัสดุใด ๆ จะแสดงความสัมพันธ์ที่มากกว่ากันหลังจากการเสียดสีขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุซึ่งจะแสดงคุณสมบัติความเป็นขั้วไฟฟ้าของวัสดุ

ตามตาราง Triboelectric series [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

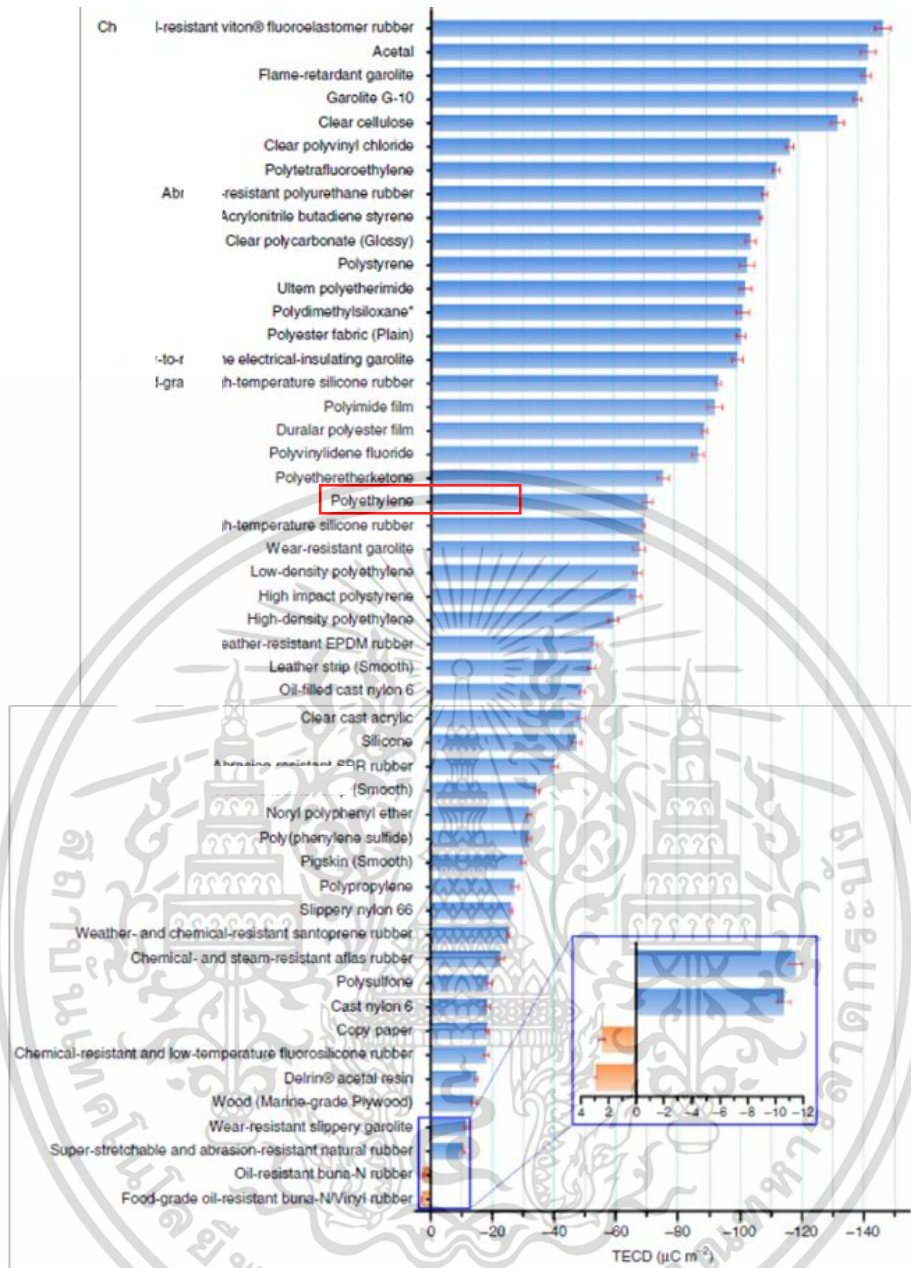
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กระบวนการเกิดปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริกของวัสดุ 2 ชนิด (ก) วัสดุ 2 ชนิดที่ต่างกัน (ข) แรงภายนอกทำให้สัมผัสกัน และ (ค) เกิดการถ่ายโอนประจุ

### 2.3.1 ลำดับไทรโบอิเล็กทริก

ลำดับไทรโบอิเล็กทริกเป็นตารางที่แสดงคุณสมบัติความเป็นขั้วไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ ซึ่งจะมี 2 คุณสมบัติ นั่นคือถ้าวัสดุแสดงคุณสมบัติความเป็นบวก (positive) คือการที่วัสดุได้รับอิเล็กตรอน ภายหลังการเสียดสี และคุณสมบัติความเป็นลบ (negative) คือการที่วัสดุสูญเสียอิเล็กตรอน ซึ่งถ้าหากต้องการให้มีการถ่ายเทประจุระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดมาก ๆ นั้น จะต้องเลือกวัสดุที่มีระยะห่างกันในตารางของ Triboelectric series มาก ๆ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุที่เป็นอลูมิเนียมฟอยด์ (Al) มีคุณสมบัติเป็นบวกคือให้อิเล็กตรอน และวัสดุอีกชนิดคือพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรไพลีน (PVDF-HFP) หรือ (PVDF) มีคุณสมบัติเป็นลบ คือรับอิเล็กตรอน [7]

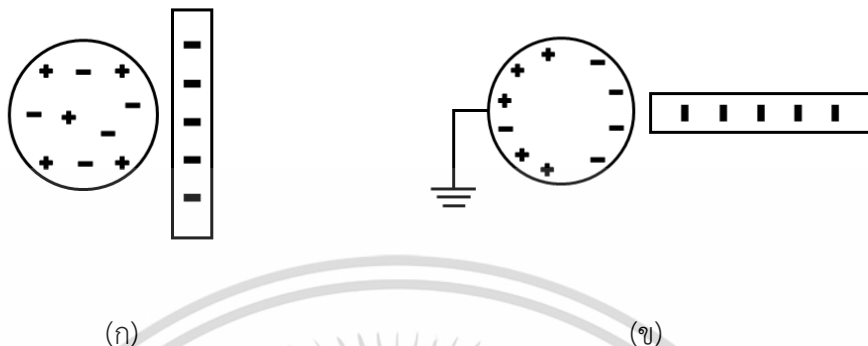


รูปที่ 2.4 ตารางลำดับโพรไบโออิเล็กทรอนิกส์

### 2.3.2 ปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต

การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตคือการสร้างกระแสไฟฟ้าสถิตในวัสดุ 2 ชนิดที่มีความเป็นขั้วทางไฟฟ้า โดยที่วัสดุหนึ่งจะมีตัวหนึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าและอีกหนึ่งตัวเป็นฉนวนไฟฟ้า เมื่อนำมาวางใกล้กันจะทำให้เกิดแรงระหว่างประจุขึ้นขึ้น นั่นคือเมื่อเรานำวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบอยู่ภายในตัวเองมาเข้าใกล้กับวัสดุที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าซึ่งจะมีเพียงแค่ประจุลบในตัวเองเท่านั้น ประจุลบจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าจะผลักประจุลบที่อยู่ในวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าทำให้ประจุลบเคลื่อนที่ไปอยู่ยังอีกด้านของตัวนำไฟฟ้าเรียกแรงนี้ว่าแรงผลักถ้าหากทำการต่อขั้วไฟฟ้าลงกราวด์ประจุนั้นก็ไหลลงกราวด์ ทำให้พื้นผิวที่อยู่ใกล้กับวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้ามีประจุลบน้อยลงและมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุบวกมากขึ้นทำให้พื้นผิวของวัสดุนำไฟฟ้าด้านที่อยู่ใกล้วัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้ามีประจุต่างชนิดกัน เกิดเป็นแรงดึงดูดกันเรียกแรงระหว่างประจุว่าแรงดึงดูด [8] แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์การเกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (ก) ความเป็นกลางทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้า และฉนวนไฟฟ้า และ (ข) วางวัสดุทั้งสอง 2 ใกล้กัน [7]

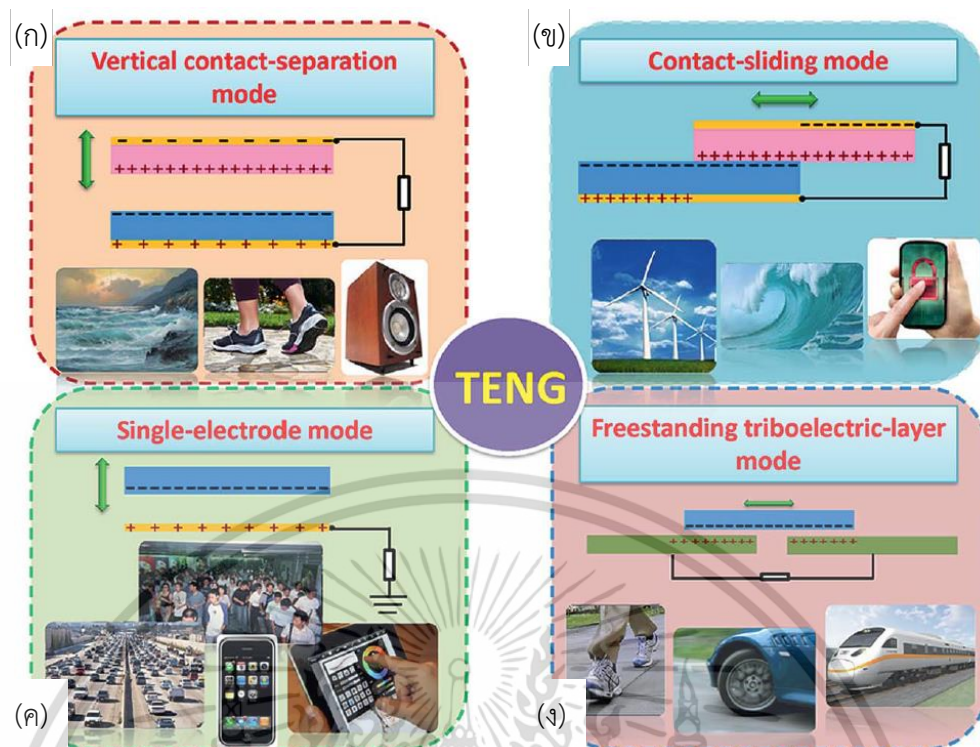
### 2.3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กแบบโทรโบอิเล็กทริก

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กแบบโทรโบอิเล็กทริก เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการของ 2 ปรากฏการณ์คือปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect) และปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electrostatic induction effect) โดยในการสร้างประจุไฟฟ้านั้นเกิดได้จากการเสียดสีระหว่างวัสดุ 2 ชนิดที่สัมผัสหรือถูกันไปตามแบบเดียวกับการเกิดไฟฟ้าสถิตซึ่งเมื่อทำการต่อขั้วอิเล็กโทรดเพื่อเชื่อมวัสดุทั้งสองชนิดจะเกิดการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอนขึ้น เกิดเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นโดยความต่างศักย์จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่นประเภทของวัสดุ ความชื้น และขึ้นอยู่กับโหมดที่ทำให้เกิดความต่างศักย์เป็นต้น โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีโหมดการทำงานพื้นฐานอยู่ 4 โหมดดังต่อไปนี้ [9]

#### 1) โหมดการสัมผัสแล้วแยกออกในแนวตั้ง (Vertical contact-separation mode)

โหมดนี้มีโครงสร้างเป็นไปดังรูปที่ 2.6 โดยเมื่อนำฟิล์มที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก 2 ชนิด มาเผชิญหน้ากันโดยที่ทั้งแผ่นด้านบนและแผ่นด้านล่างทำการต่อขั้วไฟฟ้าเมื่อมีแรงจากภายนอกมากจะทำให้วัสดุทั้งสองชนิดสัมผัสกัน การสัมผัสกันของฟิล์มทั้ง 2 จะสร้างประจุที่ตรงข้ามกันบนพื้นผิวของฟิล์มและเมื่อพื้นผิวทั้งสองแยกจากกันด้วยช่องว่างเล็ก ๆ โดยการยกของแรงภายนอกจะมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างพื้นผิวทั้งสองขึ้น ถ้าขั้วอิเล็กโทรดของทั้งสองเชื่อมต่อกับโหนด (ตัวต้านทาน) อิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าหนึ่งจะไหลไปยังอีกขั้วไฟฟ้าหนึ่งทำให้มีศักย์ไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามเกิดขึ้นเพื่อสร้างสมดุลของสนามไฟฟ้าสถิตและเมื่อวัสดุสัมผัสกัน (ปิดช่องว่าง) อีกครั้งศักย์ไฟฟ้าก็จะหายไปและเกิดการไหลกลับของอิเล็กตรอน

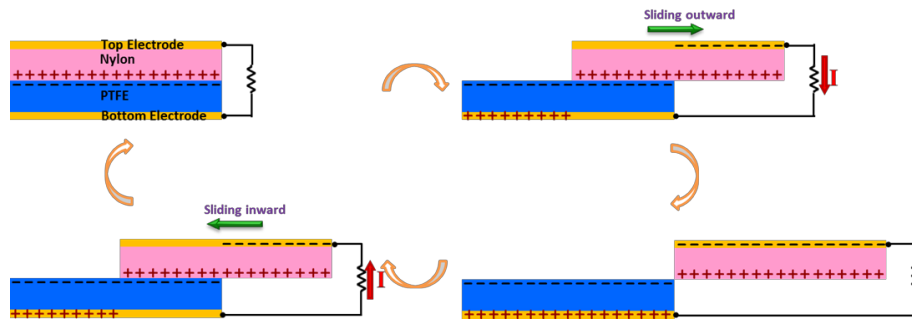
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 โหมดพื้นฐานทั้ง 4 โหมดของไทรโบอิเล็กทริก (ก) โหมดการสัมผัสแล้วแยกออกในแนวตั้ง (ข) โหมดการเลื่อนด้านข้าง (ค) โหมดการต่ออิเล็กโทรดด้านเดียว และ (ง) โหมดการหมุนแบบอิสระ

## 2) โหมดการเลื่อนด้านข้าง (Contact-sliding mode)

โครงสร้างเริ่มต้นจะเหมือนกันกับโหมดการสัมผัสแล้วแยกออกตามแนวตั้งแต่จะไม่มีช่องว่างเล็ก ๆ เกิดขึ้นในโครงสร้าง ฟิสิกส์ไดอิเล็กตริกทั้งสองจะซ้อนทับกันและสัมผัสกันอย่างสนิท กลไกการผลิตกระแสไฟฟ้าเกิดจากวัสดุทั้งสองจะสร้างประจุขึ้นมาที่พื้นผิวจากการสัมผัสโดยการเลื่อนไปในแนวขนานกับพื้นผิวตามรูปที่ 2.7 ในตำแหน่งแรกพื้นผิวหนึ่งจะมีประจุบวกมากกว่าและอีกพื้นผิวหนึ่งจะมีประจุลบมากกว่าเมื่อแผ่นบนเริ่มเลื่อนออกจากตำแหน่งสมดุลจะมีความต่างศักย์ตกคร่อมโดยจะเกิดการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนจากขั้วอิเล็กโทรดด้านบนมายังขั้วด้านล่างผ่านโพลดเมื่อแผ่นบนเคลื่อนไปจนสุดประจุที่ขั้วด้านบนและด้านล่างจะมีเท่ากันและเมื่อเลื่อนแผ่นบนกลับก็จะเกิดการไหลกลับของอิเล็กตรอนซึ่งขั้วอิเล็กโทรดจะกลับมาสมดุลอีกครั้งเมื่อวัสดุทั้งสองสัมผัสกันพอดี [8]



รูปที่ 2.7 กลไกการสัมผัสแบบเลื่อนไปด้านข้าง

### 3) โหมดการต่ออิเล็กโทรดด้านเดียว (Single-electrode mode)

โหมดนี้ใช้ในกรณีที่วัสดุไทรโบอิเล็กทริกไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ โหมดการทำงานนี้จึงมีโครงสร้างของแผ่นขั้วอิเล็กโทรดแผ่นล่างเชื่อมต่อกับโหนด(ตัวต้านทาน)ลงกราวด์ดังรูปที่ 2.6 และเมื่อมีวัสดุไทรโบอิเล็กทริกอีกชนิดหนึ่งมาสัมผัสก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเกิดการเหนี่ยวนำประจุให้เคลื่อนที่โดยไหลลงกราวด์ซึ่งขนาดของไทรโบอิเล็กทริกและระยะทางของทั้งสองวัสดุมีผลต่อการเหนี่ยวนำประจุไฟฟ้าการเก็บเกี่ยวพลังงานในลักษณะนี้ใช้เก็บเกี่ยวพลังงานจากการก้าวเท้าของมนุษย์ เป็นต้น

### 4) โหมดการหมุนแบบอิสระ (Freestanding triboelectric-layer mode)

เป็นโหมดที่ชั้นของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองมีอิสระต่อกันเชื่อมต่อกันผ่านโหนดซึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองและขนาดของขั้วอิเล็กโทรดกับวัสดุไดอิเล็กทริกจะต้องมีขนาดเท่ากันดังรูปที่ 2.6 เมื่อวัสดุเคลื่อนที่ไปมาระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองจะมีศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยโหมดการหมุนนี้วัสดุที่เคลื่อนที่ไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับผิวด้านบนของขั้วอิเล็กโทรดโดยตรง ทำให้การสึกหรอของพื้นผิวจะลดลง [9]

พลังงานที่ได้จาก Triboelectric nanogenerator (TENG) นอกจากจะขึ้นอยู่กับโหมดในการสร้างแล้วยังขึ้นอยู่กับวัสดุที่เลือกใช้หรือวัสดุคอมโพสิตที่เลือกมาใช้ในการแปลงพลังงานอีกด้วยซึ่งวัสดุที่ใช้มีด้วยกันหลากหลายชนิดเช่น PVC, PTFE, PDMS หรือ PMMA เป็นต้น ซึ่งแต่ละวัสดุก็จะให้ค่าพลังงานที่ต่างกันออกไปดังตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ TENG และตารางที่ 2.2 แสดงงานวิจัยที่มีการผสมวัสดุคอมโพสิตใน TENG

ตารางที่ 2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย TENG

| Reference                 | Positive material | Negative material | Output Voltage (V) | Power density (W/m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-----------------------------------|
| (Liu, et al. 2017) [10]   | Slik              | PET               | 213.9              | 0.068                             |
| (Jihoon, et al.2015) [11] | Silve             | PTFE              | 132                | -                                 |
| Guang, et al. 2013 [12]   | Gold              | PDMS              | 200                | -                                 |
| Feifei, et al. 2015 [13]  | POM               | PTFE              | 236.8              | -                                 |
| Long, et al.2014 [15]     | Aluminum          | FEP               | 250                | 1.22                              |
| Youbin, et al. 2014 [14]  | Nylon             | PVDF              | 1163               | 26.6                              |
| Yange,et al. 2018 [16]    | Leaf powder       | PVDF              | 430                | -                                 |

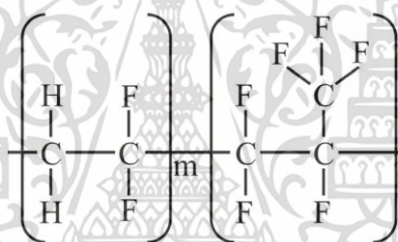
ตารางที่ 2.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่มีการผสมวัสดุคอมโพสิตใน TENG

| Reference                    | Positive material | Negative material      | Composite                           | Output Voltage (V) | Output Voltage Composite (V) |
|------------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------------------|--------------------|------------------------------|
| Chaoxing, et al. 2017 [17]   | Aluminum          | Kapton                 | Reduced Graphene oxide (rGO)        | 30                 | 100                          |
| Xue, et al. 2020 [18]        | Nylon             | PVDF                   | Zinc oxide (ZnO)                    | 250                | 330                          |
| Navneet, et al. 2016 [19]    | Aluminm           | PVDF                   | Zinc stannate (ZnSnO <sub>3</sub> ) | 90                 | 242                          |
| S.Parandeh, et al. 2019 [20] | paper             | Polycaprolactone (PCL) | Graphene oxide (GO)                 | 2                  | 20 (GO 4%)                   |
| Abu, et al. 2019 [21]        | PDMS              | PTFE                   | Reduced Graphene oxide (rGO)        | 0.65               | 1 (0.5 mg)                   |

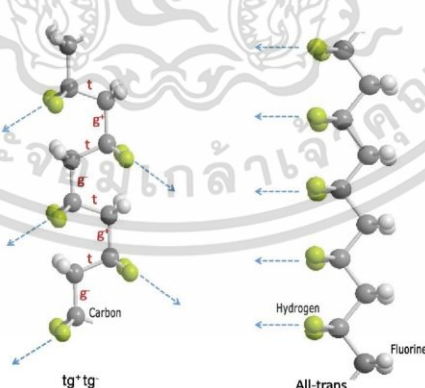
## 2.4 พอลิเมอร์ PVDF-HFP

PVDF-HFP เป็นสารฟลูออโรอีลาสโตเมอร์ (fluor elastomer) ชนิดหนึ่งที่ทนทานต่อเชื้อเพลิง น้ำมัน และความร้อนเพราะว่ามีความเสถียรทางเคมีของพันธะระหว่างคาร์บอน (C) และเอกซารีนเป็นเอกซารีนที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟลูออรีน (F) (พลังงานพันธะของ C—F 485 kJ/mol) และสายโซ่พอลิเมอร์ของ C—C นั้นล้อมรอบด้วยอะตอมของฟลูออรีน [22] โครงสร้างของ PVDF-HFP แสดงดังรูปที่ 2.8 สายโซ่พอลิเมอร์นี้เกิดจากการเรียงต่อกันของมอนอเมอร์ 2 ชนิดคือ ไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ ( $-\text{CH}_2\text{CF}_2-$ ) และเฮกซะฟลูออโรโพรไพเลน ( $-\text{CF}_2\text{CFCF}_3-$ ) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเป็นการปรับปรุงพอลิเมอร์พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ด้วยการแทรกมอนอเมอร์  $-\text{CF}_2\text{CFCF}_3-$  เข้าไปในสายโซ่ ส่งผลให้พอลิเมอร์มีฟลูออรีนที่มากขึ้น มีคุณสมบัติการไม่ชอบน้ำมากขึ้น และมีความเป็นผลึกที่น้อยลงเมื่อเทียบกับ PVDF [23] นอกจากนี้มอนอเมอร์เฮกซะฟลูออโรโพรไพเลนที่ใส่เข้าไปยังช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติทางไพโซอิเล็กทริกด้วย [22] ได้ทำการเปรียบเทียบสมบัติไพโซอิเล็กทริกของสาร PVDF-HFP เทียบกับ PVDF พบว่า ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกของสารทั้ง 2 มีค่า 43.1 และ 22.4 pm/V ที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่า มอนอเมอร์เฮกซะฟลูออโรโพรไพเลนนั้นจะส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์ของ PVDF เกิดการเปลี่ยนเฟสแอลฟา ( $\alpha$ -phase) ซึ่งมีไดโพลโมเมนต์สุทธิเป็นศูนย์ไปเป็นเฟสบีต้า ( $\beta$ -phase) ที่มีไดโพลโมเมนต์มีทิศทางเดียวกัน

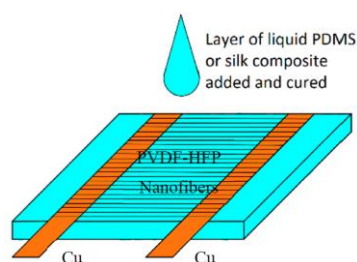


รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ PVDF-HFP [23]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างเฟสแอลฟา (ซ้าย) และเฟสบีต้า (ขวา) ของ PVDF

ในงานวิจัยทางการเก็บเกี่ยวพลังงานนั้น PVDF-HFP ได้ถูกนำมาสร้างเป็นตัวเก็บเกี่ยวพลังงานกล ในปี ค.ศ. 2017 [24] ได้เตรียมเส้นใย PVDF-HFP ที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.10 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 เส้นใย PVDF-HFP ที่นำมาสร้างเป็นตัวเก็บเกี่ยวพลังงาน

## 2.5 แกร์ฟีน

แกร์ฟีนเป็นอัญรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งมีการค้นพบในปี ค.ศ. 2004 โดย ศ.ดร.คอนสแตนติน โนโวเชลอฟ และคณะ [25] แกร์ฟีนเป็นสารที่เกิดจากการเรียงตัวของคาร์บอนแบบ 2 มิติ มีลักษณะเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยม พันธะยึดเหนี่ยวอะตอมของคาร์บอนในระนาบของแผ่นแกร์ฟีนเข้าด้วยกันจะเป็นพันธะโควาเลนต์แบบ  $SP^2$  ส่วนแกร์ฟีนแต่ละแผ่นนั้นจะมีการจะสามารถยึดเหนี่ยวกันได้ด้วยแรงแวนเดอวาลล์ (van der Waals force) ความหนาของแกร์ฟีน 1 ชั้น จะเทียบได้กับความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของอะตอม [26] วัสดุนี้นี้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากทั้งในด้านแวดวงการศึกษาเชิงวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และอุตสาหกรรม เนื่องจากมีคุณสมบัติโดดเด่นหลายด้าน เช่น ความแข็งแรงเชิงกลที่สูง การนำไฟฟ้าที่สูง ความสามารถในการขวางกั้นโมเลกุล เป็นต้น คุณสมบัติโดยทั่วไปของแกร์ฟีนแสดงได้ตารางที่ 2.3

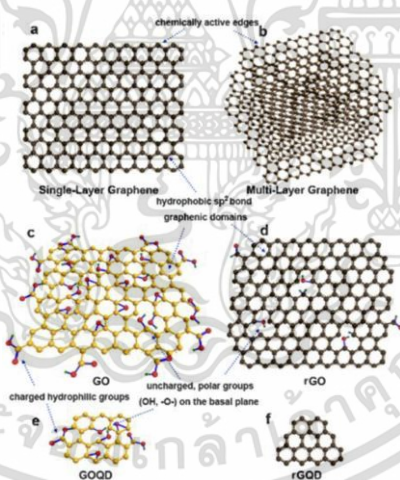
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของแกร์ฟีน

| คุณสมบัติ                         | ค่าที่รายงาน                                     | อ้างอิง                                      |
|-----------------------------------|--|--|
| Theoretical specific surface area | $2630 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$                  | (Zhu, et al. 2010)                           |
| Intrinsic electron mobility       | $200,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ | (Bolotin, et al. 2008, Morozov, et al. 2008) |
| Young's modulus                   | $\sim 1 \text{ TPa}$                             | (Lee, et al. 2008)                           |
| Thermal conductivity              | $\sim 5000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$         | (Balandin, et al. 2008)                      |
| Optical transmittance             | 97.7%  | (Li, et al. 2009)                            |
| Electrical conductivity           | $10^7\text{-}10^8 \text{ S/m}$                   | (Chen, et al. 2008, Marinho, et al. 2012)    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การค้นพบคุณสมบัติตามตารางที่ 2.3 ของแกรฟีนนั้นทำให้วัสดุนี้ได้รับความนิยมนำมาผสมกับวัสดุประเภทพอลิเมอร์เพื่อสร้างเป็นวัสดุพอลิเมอร์แบบนาโนคอมโพสิต (polymer-based nanocomposite) หลายชนิด [27] โดยทั่วไปการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีสร้างจากเล็กไปใหญ่ (bottom-up synthesis) จะทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากอันตรกิริยาแบบแวนเดอร์วาลส์ของแกรฟีนทำให้มีการละลายตัวได้น้อย [26] และเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนได้ง่ายในสารละลาย ดังนั้นการสังเคราะห์แกรฟีนแบบสร้างจากใหญ่ไปเล็ก (top-down synthesis) จึงได้รับความนิยม ยกตัวอย่างเช่น การลอกชั้นแกรฟีนแบบเชิงกลระดับจุลภาค (micromechanical cleavage) ด้วยเทปกาว และการผลิตแกรฟีนด้วยวิธีทางเคมีโดยการทำให้ชั้นย่อย ๆ ของแกรไฟต์ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน (oxygen-based functional groups) เกิดเป็นแกรไฟต์ออกไซด์ซึ่งประกอบด้วย การซ้อนกันของ GO จากนั้นทำปฏิกิริยารีดักชันเพื่อลดจำนวนหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนลง

แกรฟีนที่สังเคราะห์ขึ้นมาใช้ประโยชน์นั้นมีด้วยกันหลายรูปแบบแสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งประกอบด้วยแกรฟีนชั้นเดียว (single layer graphene) แกรฟีนซ้อนหลายชั้น (multi-layer graphene) GO rGO ควอนตัมดอทแกรฟีนออกไซด์ (graphene oxide quantum dot, GOQD) และควอนตัมดอทรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (graphene quantum dot, rGQD)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของแกรฟีนและอนุพันธ์ของแกรฟีนแบบต่าง ๆ

โครงสร้างของอนุพันธ์ของแกรฟีนแต่ละแบบในรูปที่ 2.11 นั้นมีคุณสมบัติที่ต่างกันขึ้นอยู่กับความหนา จำนวนชั้นการซ้อน หมู่ฟังก์ชัน และขนาด GOQD และ rGQD เป็นอนุพันธ์ของแกรฟีนชนิดใหม่ซึ่งนิยามเป็นแผ่นแกรฟีนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 100 nm และมีแผ่นแกรฟีนซ้อนกันไม่เกิน 10 ชั้น ควอนตัมดอทแกรฟีนทั้ง 2 ชนิด ได้รับการออกแบบเพื่อใช้ประโยชน์จาก 2 คุณสมบัติคือ ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์ (quantum confinement) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนในแกรฟีนชนิดนี้ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ส่งผลให้ค่าระดับพลังงานของอิเล็กตรอนภายในมีค่าไม่ต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้มีการเรียงแสงที่เสถียรและสามารถปรับช่องว่างแถบพลังงานได้ตามขนาดของควอนตัมดอท (Cheng, et al. 2017, Li, et al. 2013) โดยทั่วไปขนาดของช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อควอนตัมดอทเล็กลง และอีกคุณสมบัติหนึ่งคือการใช้ปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณขอบของควอนตัมดอทแกรฟีน [29]

สำหรับ GO และ rGO นั้นจัดได้ว่ามีการศึกษาที่ค่อนข้างแพร่หลายเพราะมีโครงสร้างวงแหวนคาร์บอน ไพ-อิเล็กตรอนอิสระ ( $\pi$ -free electron) และการเกิดปฏิกิริยาหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ได้ GO คือแผ่นแกรฟีนที่จับด้วยหมู่ฟังก์ชันที่โมเลกุลมีออกซิเจน เช่น hydroxyl ( $-\text{OH}$ ), alkoxy ( $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ), carbonyl ( $\text{C}=\text{O}$ ), และ carboxylic acid ( $-\text{COOH}$ ) เป็นต้น การสังเคราะห์ GO ทำได้ง่ายกว่าแกรฟีน สามารถละลายน้ำได้ดีกว่า และสามารถจับกับหมู่ฟังก์ชันใช้เป็นสารเติมแต่งขนาดนาโน (nano filler) ในวัสดุคอมโพสิต (Kuilla, et al. 2010) นอกจากนี้ GO นั้นถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต rGO ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแกรฟีนบริสุทธิ์ (pure graphene) ตารางแสดงการเปรียบเทียบสมบัติระหว่างแกรฟีน GO และ rGO แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางของแกรฟีนบริสุทธิ์และอนุพันธ์ของแกรฟีน (Qureshi and Panesar 2019)

| Property                | Graphene oxide     | Reduced graphene oxide | Graphene        |
|-------------------------|--------------------|------------------------|-----------------|
| Tensile strength        | ~0.13 Gpa          | -                      | ~130 Gpa        |
| Elastic modulus         | 23-42 Gpa          | 250±150 Gpa            | 1000 Gpa        |
| Elongation modulus      | 0.6 %              | -                      | 0.8 %           |
| Electrical conductivity | Non conductive     | 667 S/m                | ~1000 S/m       |
| Dispersibility in water | Highly dispersible | Moderately dispersible | Not dispersible |

## 2.6 เทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์ม PVDF-HFP

### 2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง ((Field Emission Scanning Electron Microscope; FESEM) เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษา โครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค และเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการวิจัย และการผลิต ภาคอุตสาหกรรม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษา ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้ อีกทั้ง FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือหัววัด อื่น ๆ เพื่อใช้ศึกษาวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ที่ต่างกันออกไป เช่น เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์การเรียงตัวของ ผลึกโดยใช้สัญญาณจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Electron Backscatter Diffraction; EBSD) นอกจากนี้ FESEM ยังสามารถประยุกต์โดยเชื่อมต่อกับชุดอุปกรณ์ควบคุมลา อิเล็กตรอนเพื่อใช้เขียนลวดลาย ขนาดเล็กลงบนชิ้นงาน (Electron Beam Lithography) จะเห็นได้ว่า FESEM เป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นต่อ การศึกษาวิจัย ด้วยกำลังขยายที่สูง และสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายและครอบคลุมการศึกษาวิจัยในระดับจุลภาค



รูปที่ 2.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง รุ่น JSM-7001F

### 2.6.2 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform Infrared (FTIR) Spectroscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลโดยจะวิเคราะห์ จำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และพันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณโดยเป็นการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ทำให้เกิดช่วงกลาง (Middle infrared region) ช่วงความยาวคลื่น 2.5 - 50  $\mu\text{m}$ , ช่วงเลขคลื่น 4000 - 400  $\text{cm}^{-1}$  เป็นเทคนิคการวัดที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (nondestructive) คือไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของตัวอย่างหลังการวัด ซึ่งเทคนิคนี้นิยมใช้วิเคราะห์สารอินทรีย์ใช้ได้กับสารตัวอย่างที่มีความบริสุทธิ์สูงทั้งในรูปของของแข็ง ของเหลวและก๊าซ เทคนิคนี้เป็นการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงเมื่อแสงอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างๆ ผ่านสารอินทรีย์พันธะเคมีในโมเลกุลของสารจะดูดกลืนพลังงานที่ค่าความยาวคลื่นค่าหนึ่งจากนั้นข้อมูลจะถูกประมวลโดยคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้สมการเชิงอนุพันธ์ที่เรียกว่าฟู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียร์ทรานฟอร์ม (Fourier Transform) ซึ่งจะคำนวณพลังงานของแต่ละความยาวคลื่นแล้วแปลงผลออกมาเป็นสเปกตรัม [30]



รูปที่ 2.13 เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีรุ่น NICOLET 6700

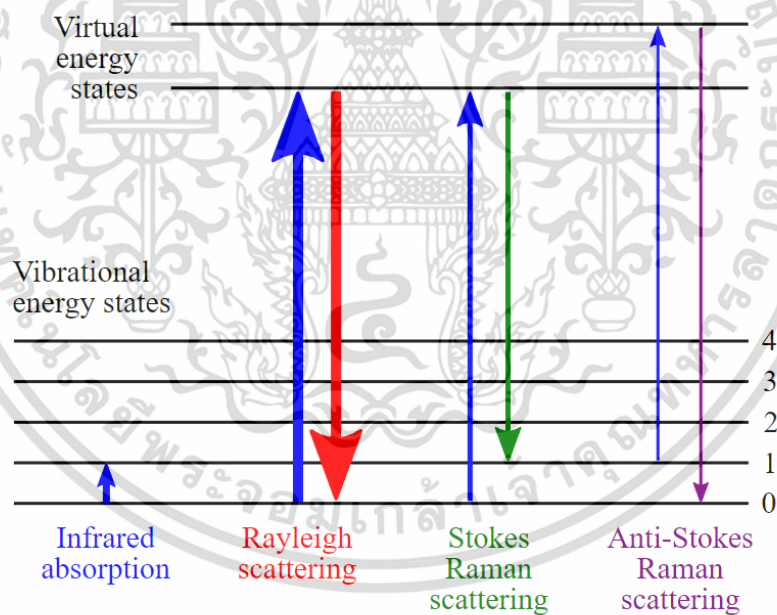
### 2.6.3 เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี

เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างของโมเลกุลซึ่งสามารถตรวจได้ทั้งสถานะของแข็ง ของเหลว และแก๊ส นั้นเพราะสเปกตรัมของรามานบอกข้อมูลในส่วนของ การสั่นภายในโมเลกุลของสารนั้น ๆ ซึ่งเทคนิครามานสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่อาศัยการวัดการกระเจิงของคลื่นแสงโดยใช้คลื่นแสงจากแหล่งกำเนิดคลื่นที่มีความถี่เดียว (monochromatic radiation) ที่มีความเข้มสูงเช่นแหล่งกำเนิดประเภทเลเซอร์ ซึ่งการฉายแสงโฟตอนลงไปยังวัสดุจะไม่เป็นการทำลายวัสดุตัวอย่าง

รามานสเปกโทรสโกปีเป็นการวัดการกระเจิงของคลื่นแสงช่วงเลขคลื่นระหว่าง  $3600-50\text{ cm}^{-1}$  เกิดจากคลื่นแสงเลเซอร์ที่มีความถี่เดียว ( $\nu_0$ ) และมีความเข้มสูง อาจเป็นคลื่นแสงในช่วง ยูวี-วิสิเบิล หรืออินฟราเรดย่านใกล้ก็ได้ เกิดการชนกับโมเลกุล ทำให้โมเลกุลรับพลังงานสูงขึ้น ( $h\nu_0$ ) ไปอยู่ที่ระดับพลังงานกึ่งสภาวะเร้า (excited virtual state) ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่อยู่ระหว่างสภาวะพื้นของระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ ( $E_0$ ) และสภาวะเร้าของระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ ( $E_1$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ระดับพลังงานของกึ่งสภาวะเร้าจะขึ้นกับพลังงานของแสงเลเซอร์และพลังงานของโมเลกุลพบว่าพลังงานคลื่นแสงเลเซอร์ประมาณ  $10^{-4}$  ส่วน ทำให้เกิดการชนแบบไม่สูญเสียพลังงานที่เรียกว่า การชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) และทำให้การกระเจิงแสงที่มีพลังงานเท่ากับพลังงานของคลื่นแสงเลเซอร์ เรียกว่า การกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering) ในขณะที่พลังงานแสงเลเซอร์ประมาณ  $10^{-9}$  ส่วน ทำให้เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) เกิดการเปลี่ยนแปลงของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่ทำให้โมเลกุลรับพลังงานลดลงหรือเพิ่มขึ้นเท่ากับระดับพลังงานของการสั่นหรือการหมุน และเกิดการกระเจิงแสงโดยมีการคายพลังงานแสงที่มีความถี่ต่างๆกันออกมาเรียกว่า การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) โดยมี 2 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยประเภทแรกคือมีรูปแบบเป็นเส้นสโตกส์ (Stoke line) จะมีเส้นสเปกตรัมที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่แสงเลเซอร์ เกิดการชนระหว่างโมเลกุลและโฟตอนที่อยู่ในสถานะพื้นที่มีระดับพลังงานการสั่น ( $V = 0$ ) ความถี่ของสเปกตรัมของเส้นสโตกส์จะเลื่อนไปทางความถี่ของคลื่นแสง (red shift) ส่วนประเภทที่สองมีรูปแบบเป็นเส้นแอนติสโตกส์ (anti-stokes line) จะมีเส้นสเปกตรัมที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ของคลื่นแสงเลเซอร์ เกิดจากการชนระหว่างโมเลกุลและโฟตอนที่อยู่ในสถานะพื้นที่มีระดับพลังงานการสั่น ( $v = 1$ ) ความถี่ของสเปกตรัมของเส้นแอนติสโตกส์จะเลื่อนไปทางความถี่ของคลื่นสีน้ำเงิน 47 (blue shift) เนื่องจากที่ระดับพลังงานการสั่นที่สถานะพื้น  $V = 0$  จะมีจำนวนโมเลกุลมากกว่าที่ระดับ พลังงานการสั่นที่สถานะเร้าหรือกึ่งสถานะเร้า  $V = 1$  จึงทำให้เส้นสโตกส์มีความเข้มของการกระเจิง แบบรามานสูงกว่าเส้นแอนติสโตกส์ที่มีความถี่เลื่อนไปเท่ากัน ดังนั้นในเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี จึงเลือกใช้สเปกตรัมของเส้นสโตกส์มากกว่าสเปกตรัมของเส้นแอนติสโตกส์



รูปที่ 2.14 กระบวนการการกระเจิงของแสงแบบ Rayleigh และแบบ Raman

#### 2.6.4 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Colorimeter; DSC) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อน (thermal transition) ของวัสดุ ใช้ในการวัดปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุ เช่น การเกิดผลึก (Crystallization) จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลอมเหลว (melting point) จุดเดือด (boiling point) การรวมตัวกันของโครงสร้าง อุณหภูมิสถานะ  
คล้ายแก้ว (glass transition temperature) เป็นต้น [32]



รูปที่ 2.15 เครื่องดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ รุ่น Discovery DSC25

ซึ่งสามารถวัดสมบัติทางกายภาพและเคมีของอาหารได้โดยวัดความแตกต่างระหว่างการ  
ถ่ายเทความร้อน (heat flow) ของสารตัวอย่าง (sample pan) เทียบกับสารอ้างอิง (reference pan)  
ซึ่งหลักการทำงานของเครื่อง DSC คือ จะมีถาด 2 ถาดคือถาดที่มีสารตัวอย่างและอีกถาดคือถาด  
อ้างอิงที่ไม่มีสารตัวอย่าง วางไว้บนเตาให้ความร้อน (heater) 2 เตา ที่เป็นชนิดเดียวกันโดยให้ความ  
ร้อนที่เตาทั้ง 2 เครื่องจะควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ตามที่กำหนดเช่น  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  จะ  
ควบคุมอัตราการเพิ่มความร้อนให้เท่ากันตลอดการทดลอง ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งอัตราการให้ความร้อนที่  
ช้าเพิ่มความละเอียดในการวิเคราะห์แต่จะใช้เวลานานในการวิเคราะห์จึงไม่เหมาะกับชิ้นงานที่ไม่ทน  
ต่อความร้อน เช่น พหุสัณฐาน (polymorph) ของยาแต่การให้ความร้อนในอัตราสูงจะเพิ่มความไวใน  
การวิเคราะห์ให้สภาวะการวัดใกล้เคียงกับสภาวะจริงของวัสดุแต่จะมีข้อเสียคือจะมีความละเอียดต่ำ  
โดยเตาเผาของถาดสารตัวอย่างจะต้องให้ความร้อนมากกว่าเตาเผาของถาดสารอ้างอิงเนื่องจากถาด  
สารตัวอย่างมีสารมากกว่าถาดสารอ้างอิงซึ่งจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิทำให้เห็นภาพ  
ด้วยการสร้างกราฟมีแกน x เป็นค่าของอุณหภูมิ (Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )) แกน y เป็นค่าความแตกต่าง  
ของอุณหภูมิของเตาทั้งสอง (heat flow (W/g) ดังรูปที่ 2.17 ขณะเครื่องมือทำงานบรรยากาศมีส่วน  
สำคัญต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่ ซึ่งจะใช้เป็นก๊าซเฉื่อยคือไนโตรเจนหรือฮีเลียม ก๊าซฮีเลียม  
สามารถนำความร้อนได้ดีกว่าไนโตรเจนส่งผลให้มีการวิเคราะห์ที่ละเอียดกว่า แต่จะเข้าสู่สภาวะสมดุล  
ได้ช้ากว่าไนโตรเจนหลังจากการเปิดเตาเพื่อเตรียมตัวอย่าง [32] พลังงานที่ให้กับสารตัวอย่าง  
เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy) ของสารตัวอย่างเมื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบดูด  
พลังงานความร้อนจะเรียกว่าการเปลี่ยนแปลงแบบ Endothermic และเมื่อเกิดปฏิกิริยาแบบคาย  
พลังงานความร้อนจะเรียกว่า การเปลี่ยนแปลงแบบ Exothermic ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 2.17 สามารถ  
นำมาคำนวณหาค่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ได้จากสมการที่ 2.1 [33]

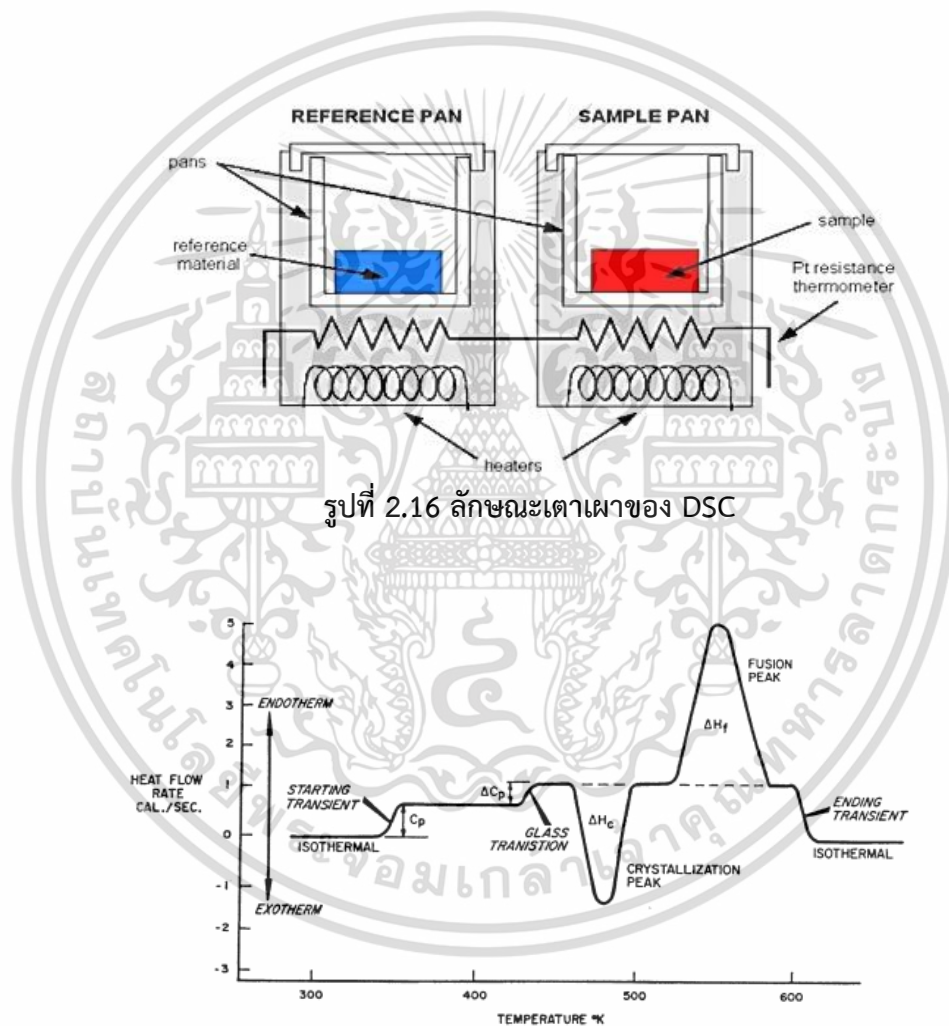
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^\phi} \times 100\% \quad (2.1)$$

เมื่อ  $X_c$  คือค่าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ (Degree of crystalline)

$\Delta H_m$  คือการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการหลอมเหลวของสารตัวอย่าง (melting enthalpy of composite film)

$\Delta H_m^\phi$  คือการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการหลอมเหลวของ PVDF-HFP (104.50 J/g)



รูปที่ 2.17 ลักษณะของกราฟ DSC ที่แสดงค่าอุณหภูมิสภาพแก้ว การตกผลึก การดูดและคายความร้อน [33]

### 2.6.5 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer; XRD) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์วัสดุพื้นฐาน เป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) ใช้ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์เกี่ยวกับโครงสร้างผลึก การจัดเรียงอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ซึ่งวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ หลักการการทำงานอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอกซ์ เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับหรือเลี้ยวเบน ที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ ที่มุมต่างๆกันโดยมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูลองค์ประกอบและโครงสร้างของสารตัวอย่างจะมีองศาในการเลี้ยวเบนที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบ ลักษณะของผลึกและรูปร่างซึ่งผลที่ได้จะสามารถแบ่งแยกประเภทและชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ว่ามีโครงสร้างผลึกแบบใดหรือยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง โดยความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) นั้นเพราะสารประกอบแต่ละชนิด จะมีรูปแบบโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน มีระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันด้วยเช่นกัน ซึ่งขนาดและประจําอะตอมของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว ในปี ค.ศ.1948 นาย W.L Bragg ได้ประดิษฐ์ เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ขึ้น ซึ่งได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องจนสามารถนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงาน และวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อให้เกิดความแม่นยำและรวดเร็วมากขึ้น ทำให้เป็นที่รู้จักและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ในกลุ่มนักเคมีวิทยา วัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา และโลหะวิทยา [34] ซึ่งเครื่องสามารถวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้ทั้งในรูปแบบผง (powder) และฟิล์มบาง (Thin film)

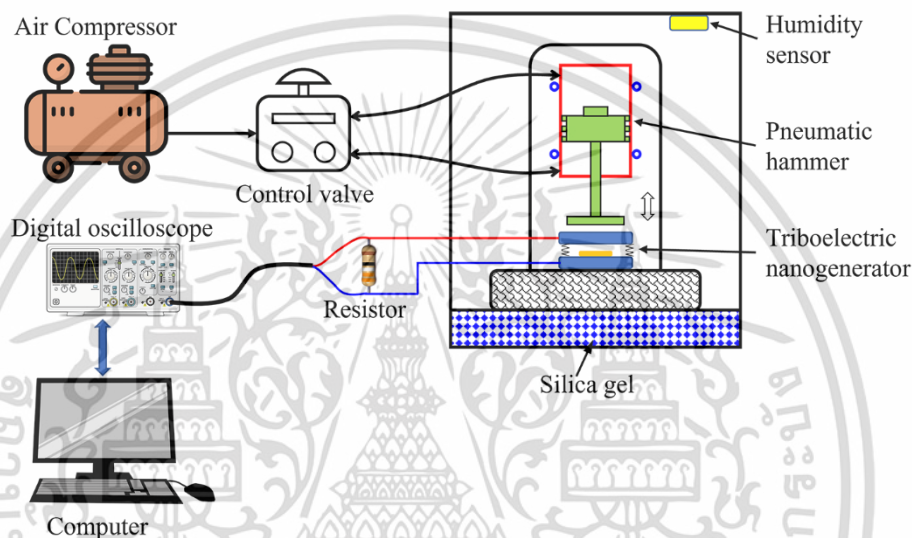


รูปที่ 2.18 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ รุ่น SmartLab SE

#### 2.6.6 เครื่องวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยแรงลม 247 N ขนาดความถี่ที่ 3 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกวดในแนวตั้งเป็นเครื่องที่ทำงานโดยใช้แรงกดจากลมที่ได้จากปั๊มลมในการอัดให้แขนกลทำงานขยับขึ้นลง ในแนวตั้ง แรงที่วัดได้ของเครื่องมีค่าสูงสุดประมาณ 247 N ความถี่ต่ำสุดประมาณ 0.5 Hz วัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่อง มัลติมิเตอร์รุ่น (Rigol; DM 3058E model) ซึ่งวิเคราะห์ข้อมูลโดยคอมพิวเตอร์ (Computer) แปลงค่าข้อมูลออกมาเป็นไฟล์เอกซ์เซล (Excel) และเครื่องออสซิลโลสโคปรุ่น (DSO-X 2012A) ใช้ในการวัดสัญญาณค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากฟิล์มบันทึกค่าข้อมูลออกมาได้เป็นไฟล์เอกซ์เซล (Excel) ส่วนประกอบและระบบของเครื่องกวดแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 องค์ประกอบของกล่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยวิธีเทรโบอิเล็กทริกแบบ Vertical contact-separation mode

## 2.7 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Abu Naushad Parvez และคณะ (2019) ได้ทำการศึกษาการเก็บเกี่ยวฟิล์มพอลิเมอร์ที่ใช้พอลิเมอร์โพลีไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) ที่มีการเติม rGO (rGO) ที่มีความเข้มข้นของ rGO เท่ากับ 0.5, 0.8, 1.2, 1.8 และ 2.8 mg โดยในงานวิจัยนี้ประสิทธิภาพของฟิล์มพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นหลายเทคนิคซึ่งที่เด่นๆ คือความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ต่างกันโดยการเติม rGO ที่ความเข้มข้น 0.5 mg พื้นผิวของฟิล์มจะมีริ้วรอย (wrinkle) ที่ค่อนข้างจะสม่ำเสมอ rGO ถูกพอลิเมอร์ห่ออย่างสมบูรณ์และมีการกระจายตัวบนพื้นผิวได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้ได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 2V กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 2 nA ซึ่งในขณะเดียวกันที่ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นเป็น 0.8 mg จะเกิดรอยย่นขึ้นบนพื้นผิวของฟิล์มเมื่อทำการส่องดูพื้นผิวฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบความละเอียดสูง FE-SEM เกิดการรวมตัวกันของริ้วรอยบนพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ซึ่งมาจากการซ้อนทับกันของเกร็ด rGO และเมื่อความเข้มข้นของ rGO เพิ่มมากขึ้นการกระจายตัวจะเริ่มลดลงเนื่องจาก

สะกิดเหล่านี้จะแสดงพฤติกรรมรวมสูงขึ้นเนื่องมาจากพลังงานจำเพาะจำนวนมาก (substantial เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

specific energy) ดังนั้นสรุปได้ว่าการเติมวัสดุตัวเติมที่ปริมาณต่ำจึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ [35]

Nuanyang Cui และคณะ(2016) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประจุที่พื้นผิวของไทรโบอิเล็กทริกบนชั้นแรงเสียดทานเป็นอีกหนึ่งแนวทางพื้นฐานที่ดีของการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดพลังงานแบบไทรโบ (TENGs) ซึ่งจากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเก็บเกี่ยวประจุของไทรโบอิเล็กทริกในชั้นแรงเสียดทาน ได้ทำการอภิปรายเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของพาหะและความเข้มข้นในกระบวนการกักเก็บประจุตามแนวของผลลัพท์ โครงสร้างคอมโพสิตชนิดหนึ่งจะถูกสร้างขึ้นในชั้นแรงเสียดทานเชิงลบ ซึ่งชั้นแรงเสียดทานเชิงลบเป็นชั้นของโครงสร้างคอมโพสิตโดยการรวมโพลีสไตรีน (PS) และท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) เข้ากับโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) และได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นแรงเสียดทานแบบ PVDF บริสุทธิ์ ชั้นแรงเสียดทานแบบคอมโพสิตสามารถเพิ่มความหนาแน่นของประจุไทรโบอิเล็กทริกได้ถึง 11.2 เท่า เวลาที่อยู่อาศัยที่ขยายออกไปของอิเล็กตรอนในชั้นแรงเสียดทานมีสาเหตุมาจากระดับกับดักอิเล็กตรอนจำนวนมากจาก PS [36]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินงานวิจัยเพื่อสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก โดยการเตรียมฟิล์ม PVDF-HFP ที่ผสมกับ rGO ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0, 1, 3, 5 และ 10 wt% ซึ่งมีตัวทำละลายเป็น DMF และอะซิโตน โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบ Doctor-blade processing และวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มด้วยเทคนิคต่าง ๆ

#### 3.1 วัสดุ

ผงพอลิเมอร์ชนิด PVDF-HFP (Solef 11010/1001, ขนาด 100  $\mu\text{m}$ ) สั่งซื้อจากบริษัท โซลเวย์ประเทศไทย ผงคาร์บอนไฟต์ความบริสุทธิ์ 99 % สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), สารละลายไฮดราซีนไฮเดรต 65%, และตัวทำละลายไดเมทิลฟอร์มาไมด์ ได้รับจากบริษัทซิกมาอัลดริชประเทศสหรัฐอเมริกา มีความบริสุทธิ์ 98% ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) และกรดไฮโดรคลอริก ความบริสุทธิ์ 37% ( $\text{HCl}$ , 37%) จากบริษัท เมอร์ค ประเทศเยอรมนี

#### 3.2 กระบวนการสังเคราะห์ rGO

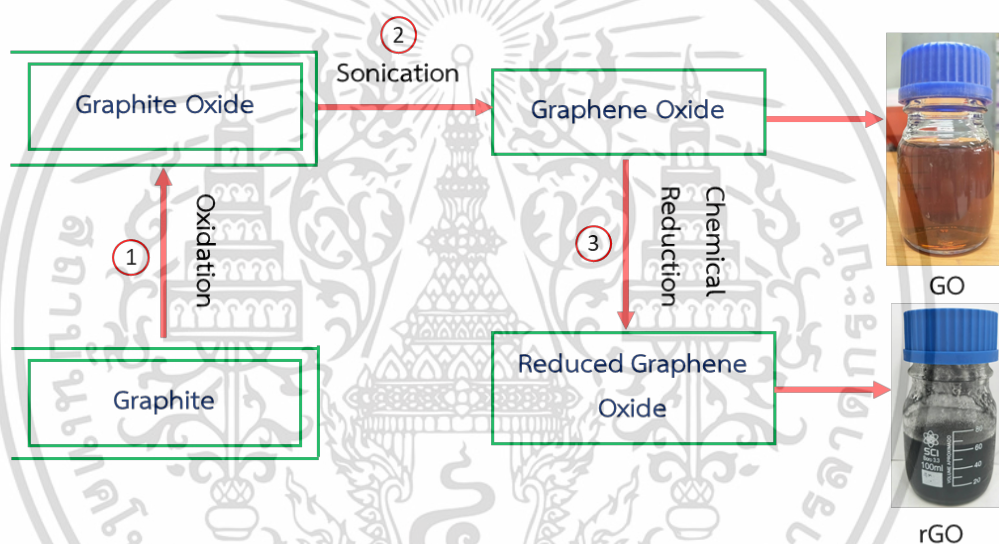
ขั้นตอนที่ 1 ทำการสังเคราะห์ GO ซึ่งสังเคราะห์โดยวิธี Hummer's method โดยใช้ผงแกรไฟท์มาออกซิไดซ์กับกรดและสารออกซิไดซ์ ในกระบวนการสังเคราะห์ใช้แกรไฟท์แบบเป็นผง (Graphite powder) 2 กรัม ผสมรวมกับ  $\text{KMnO}_4$  6 กรัม ลงในปิกเกอร์ จากนั้นได้นำส่วนผสมที่ได้ซึ่งมีสถานะเป็นของแข็งใส่ไปในขวดขนาด 500 ml แล้วนำไปทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิ 0 °C เป็นเวลา 10 min หลังจากนั้นขณะที่กวน (stirring) และทำให้เย็น (cooling) ใส่กรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ประมาณ 46 ml ลงไปในขวดอย่างระมัดระวัง ในขณะที่เดียวกันอุณหภูมิของสารที่ผสมจะต้องต่ำกว่า 15 °C อย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 30 min เมื่อครบเวลาส่วนผสมจะถูกกวนที่อุณหภูมิ 40 °C ในน้ำ หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่น 90 ml ลงไปตามด้วยการกวนต่อที่อุณหภูมิ 95 °C ในน้ำมันไปอีก 60 min ต่อมาทำการเติมน้ำกลั่นลงไปเพิ่มอีก 250 ml และเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 10 ml ลงไปเพื่อหยุดยั้งการเกิดปฏิกิริยา ผลของส่วนผสมที่ได้จะมีสีน้ำตาลอมเหลือง จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปทำการหมนเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนผสมที่ได้ออกจากน้ำ จากนั้นล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ ) 5% เพื่อกำจัดซัลเฟต และถูกทำให้สารมีความบริสุทธิ์มากขึ้นด้วย ต่อมา นำไปล้างด้วยน้ำกลั่น 2-3 รอบจนค่า pH ของสารละลายบริสุทธิ์มีค่าประมาณอยู่ที่ 7

ขั้นตอนที่ 2 นำแกรไฟต์ออกไซด์ (Graphite Oxide) ที่เป็นสารแขวนลอยอยู่ในน้ำไปกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่สูง (Ultrasonication) แล้วตามด้วยการหมนเหวี่ยง (Centrifugation) เป็นเวลา 90

min จะได้เป็นตะกอน (Supernatant) ที่แยกชั้นกับน้ำ มีสีน้ำตาลเข้ม จากนั้นนำไปสังเคราะห์ต่อเพื่อให้ได้เป็น rGO

ขั้นตอนที่ 3 rGO ถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางเคมี (modified chemical reduction) ในขั้นตอนต่อจากนี้เราจะยกตัวอย่างการสังเคราะห์ rGO จาก GO 100 ml เริ่มจาก นำ GO ที่เป็นสารแขวนลอยอยู่ในน้ำเติมน้ำกลั่น 100 ml ลงในบีกเกอร์ตามด้วยสารละลายไฮดราซีนไฮเดรต (hydrazine hydrate) 0.1 ml และแอมโมเนีย 1 ml จากนั้นนำสารที่ผสมแล้วไปกวนจนได้สารละลายสีดำดังแสดงในรูปที่ 3.1 [36]

ซึ่งในกระบวนการสังเคราะห์ rGO จากขั้นตอนข้างต้นจะได้ rGO ที่มีความเข้มข้น 2 mg/ml โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ rGO ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 6 mg/ml ซึ่งความเข้มข้นนี้ได้จากการนำ rGO ไป heat บน hot plate ที่อุณหภูมิ 100 °C เพื่อไล่น้ำออกโดยจะระเหยจนได้ความเข้มข้นที่ต้องการ



รูปที่ 3.1 ไคอะแกรมการสังเคราะห์ rGO

### 3.3 ขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์ม PVDF-HFP

ในการเตรียมฟิล์มพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรไพลีน (PVDF-HFP) จะทำการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคการขึ้นด้วยกระบวนการด็อกเตอร์เบลด (Doctor-blade processing) โดยฟิล์มที่เตรียมขึ้นจะมีการผสมกับ rGO ที่มีปริมาณ rGO ต่างกันตามความเข้มข้น 0, 1, 3, 5 และ 10 wt% ตามสัดส่วนของพอลิเมอร์ กระบวนการเตรียมฟิล์มมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF-HFP แบบไม่เติม rGO

ละลายสารตั้งต้น PVDF-HFP ที่ความเข้มข้น 20 wt% ในตัวทำละลาย 30 ml ตัวทำละลายที่ใช้มี 2 ส่วนคือ DMF และ ตัวทำละลายผสม DMF:Acetone ผสมเข้ากับ rGO มีปริมาตรตามที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณได้จากสมการที่ 2 ซึ่งอัตราส่วนตัวทำละลายจะได้ปริมาตรตามตารางที่ 3.1 ในการเตรียมฟิล์มแบบไม่เติม rGO เทตัวทำละลายลงในบีกเกอร์ 100 ml ที่มี PVDF - HFP = 6 g นำไปกวนบนเครื่อง hot plate magnetic stirrer เป็นเวลา 30 min ที่ความเร็วรอบ 350 rpm อุณหภูมิในการกวนเท่ากับ 70 °C โดยกวนแบบปิดแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ที่ปากของบีกเกอร์เมื่อครบ 30 min เปิดแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ออกกวนต่อที่อุณหภูมิและความเร็วรอบเท่าเดิมเพื่อระเหยให้สารละลายมีน้ำหนักเหลือเป็น 1:4 ของน้ำหนักเริ่มต้น (ในการกวนต้องคอยชั่งน้ำหนักสารละลายอย่างสม่ำเสมอ) เมื่อน้ำหนักเหลือเป็น 1:4 ของน้ำหนักเริ่มต้นทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเทคนิคการปาดแบบกระบวนการตัดอกเตอร์เบลต Doctor-blade processing ดังรูปที่ 3.2(ก) โดยหยดสารละลายลงบนกระจกขนาด 5x5 cm กำหนดความหนาของฟิล์มโดยใช้ฟิลเลอร์เกจ (Feeler gauge) รูปที่ 3.2(ข) ในการปรับระยะให้ได้ความหนาเท่ากับ 1 mm ซึ่งในปาดใช้เครื่องปาดที่มีความเร็วรอบของมอเตอร์เท่ากับ 800 rpm จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 h ดังรูปที่ 3.2(ค)

- 1) การคำนวณหาปริมาณของผง PVDF-HFP

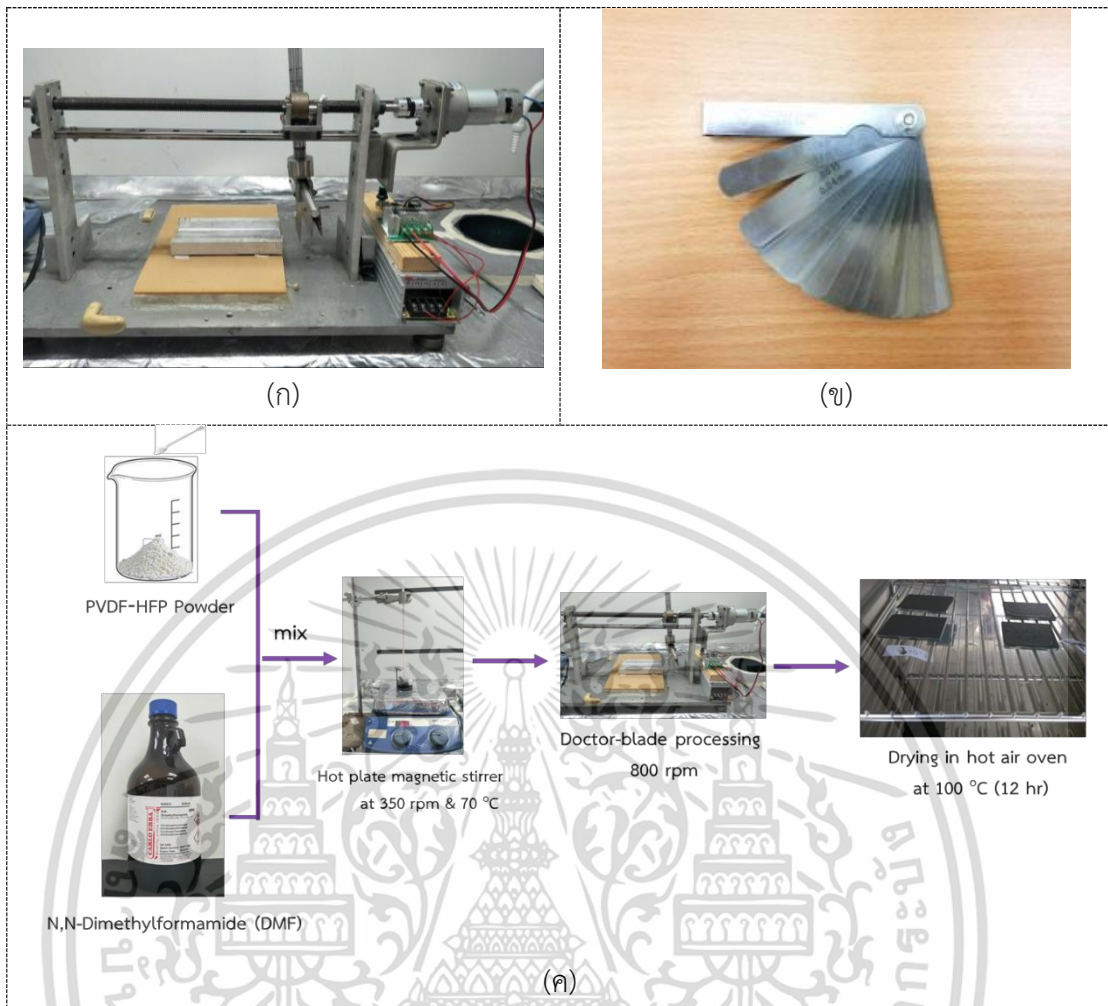
$$\begin{aligned} PVDF - HFP &= \frac{20 \text{ wt}\%}{100} \times 30 (\text{vol. DFM / Acetone}) \\ &= 6 \text{ g} \end{aligned} \quad (3.1)$$

- 2) การคำนวณหาปริมาตรของ rGO

$$Volume \text{ rGO}(\text{ml}) = \frac{\% \text{ concentration}}{100} \times \frac{PVDF - HFP(\text{g})}{rGO \text{ concentration}(\frac{\text{mg}}{\text{ml}})} \times 1000 \quad (3.2)$$

ตัวอย่าง ผสม rGO ที่ความเข้มข้น 1 wt%:

$$\text{ปริมาตร rGO} = \frac{1}{100} \times \frac{6(\text{g})}{6(\frac{\text{mg}}{\text{ml}})} \times 1000 = 10(\text{ml})$$



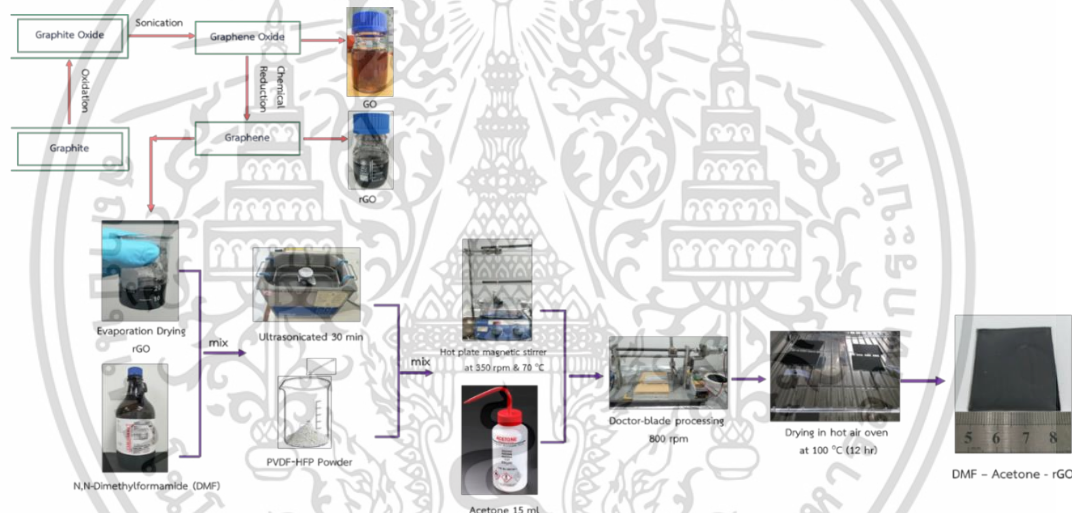
รูปที่ 3.2 แผนภาพในการขึ้นรูปฟิล์มที่ไม่มีคาร์บอนเติม rGO (ก) เครื่องด็อกเตอร์เบลต (ข) ฟิวเลอร์เกจ (ค) ขั้นตอนการทำฟิล์มพอลิเมอร์

### 3.3.2 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF-HFP แบบเติม rGO

นำสารละลาย rGO ไปอัลตราโซนิก เป็นเวลา 30 min เมื่อครบตามเวลาดวง rGO ตามปริมาณในตารางที่ 3.1 ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 ml นำไประเหยน้ำออกที่อุณหภูมิ 100 °C ด้วยเครื่อง hot plate โดยระเหยจนกว่า rGO จะเหลือน้ำน้อยที่สุด จากนั้นตวง DMF ผสมลงในบีกเกอร์ที่มี rGO ที่ระเหยแห้งจากนั้นนำไปอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 min และนำไปกวนต่อบนเครื่อง hot plate magnetic stirrer อีก 30 min ที่ความเร็วรอบ 500 rpm อุณหภูมิในการกวนเท่ากับ 60 °C หลังจากนั้นขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีด็อกเตอร์เบลต เหมือนในหัวข้อที่ 3.3.1 แผนภาพขั้นตอนการเตรียมฟิล์มแบบเติม rGO แสดงดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของพอลิเมอร์ ตัวทำละลาย และ rGO สำหรับการเตรียมฟิล์ม

| Composition                             | Denoted sample               | rGO content (wt%) | Solvent  |              | rGO solution (mL) |
|---|------------------------------|-------------------|----------|--------------|-------------------|
|   |                              |                   | DMF (mL) | Acetone (mL) |                   |
| PVDF-HFP/DMF                            | PVDF                         | 0                 | 30       | 0            | 0                 |
| PVDF-HFP/DMF/rGO <sub>1%</sub>          | PVDF/rGO <sub>1%</sub>       | 1                 | 30       | 0            | 10                |
| PVDF-HFP/DMF/rGO <sub>3%</sub>          | PVDF/rGO <sub>3%</sub>       | 3                 | 30       | 0            | 30                |
| PVDF-HFP/DMF/rGO <sub>5%</sub>          | PVDF/rGO <sub>5%</sub>       | 5                 | 30       | 0            | 50                |
| PVDF-HFP/DMF/rGO <sub>10%</sub>         | PVDF/rGO <sub>10%</sub>      | 10                | 30       | 0            | 100               |
| PVDF-HFP/DMF/Acetone                    | PVDF/Ace.                    | 0                 | 15       | 15           | 0                 |
| PVDF-HFP/DMF/Acetone/rGO <sub>1%</sub>  | PVDF/Ace./rGO <sub>1%</sub>  | 1                 | 15       | 15           | 10                |
| PVDF-HFP/DMF/Acetone/rGO <sub>3%</sub>  | PVDF/Ace./rGO <sub>3%</sub>  | 3                 | 15       | 15           | 30                |
| PVDF-HFP/DMF/Acetone/rGO <sub>5%</sub>  | PVDF/Ace./rGO <sub>5%</sub>  | 5                 | 15       | 15           | 50                |
| PVDF-HFP/DMF/Acetone/rGO <sub>10%</sub> | PVDF/Ace./rGO <sub>10%</sub> | 10                | 15       | 15           | 100               |



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสร้างฟิล์ม DMF-Acetone-rGO

### 3.4 การทดสอบคุณสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF-HFP เต็มและไม่เต็ม rGO

ฟิล์ม PVDF-HFP ที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการปาดแบบกระบวนการด็อกเตอร์เบลต (Doctor-blade processing) จะถูกนำไปศึกษาสมบัติของฟิล์มด้านต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

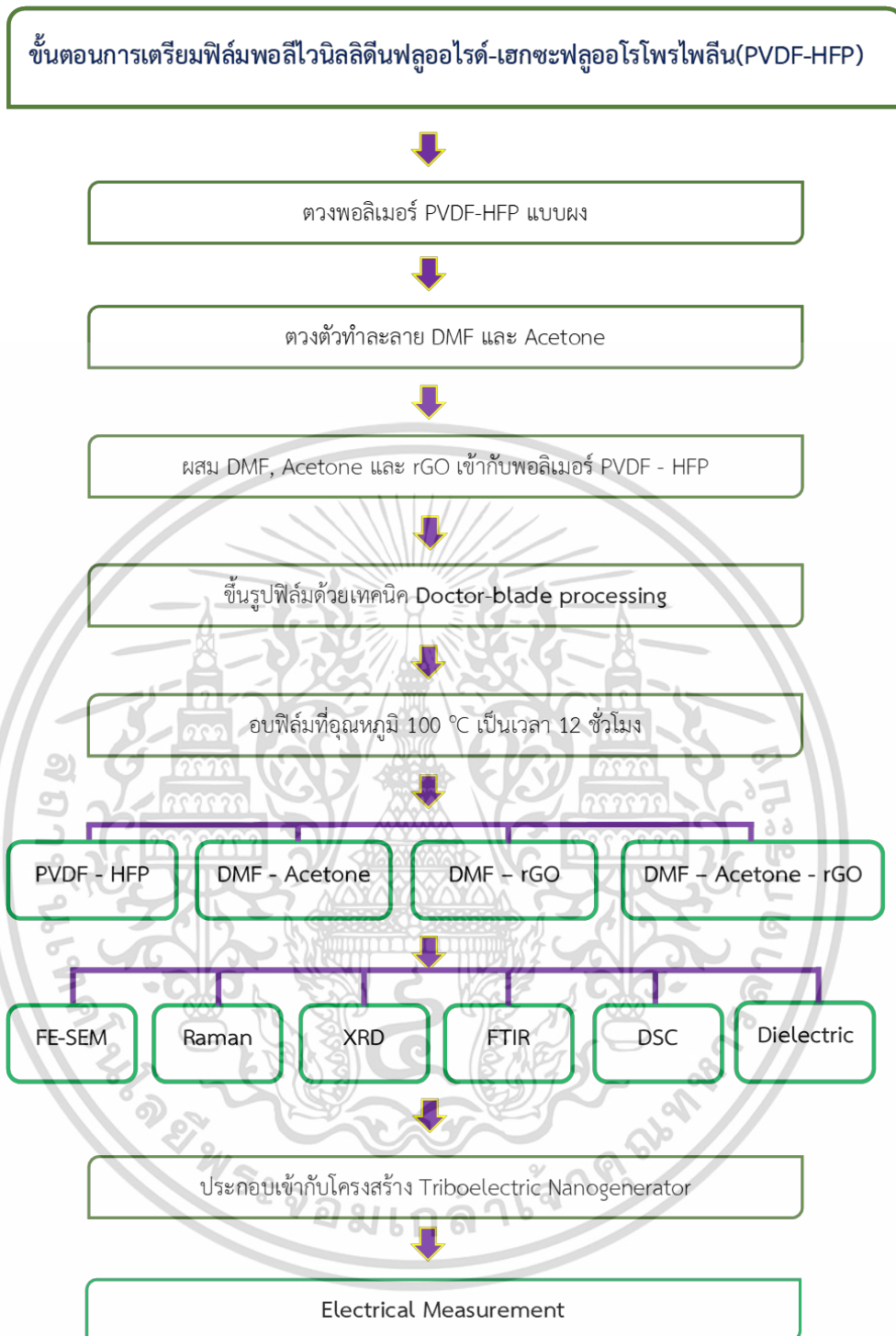
ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มได้รับตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภาคสนาม (FE-SEM: FEI, Apreo) เฟสของผลึกของฟิล์มตรวจสอบด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี และฟูเรียร์-ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) สเปกตรัมของรามานตรวจวัดด้วยรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Thermo Scientific, DXR SmartRaman) ในช่วงสเปกตรัมตั้งแต่ 500 ถึง 2,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{cm}^{-1}$  และการดูดกลืนสเปกตรัมอินฟราเรดทดสอบโดยใช้เครื่อง FTIR spectrometer (Bruker, Vertex70) ซึ่งวัดในช่วงเลขคลื่น  $1600\text{-}400\text{ cm}^{-1}$  พฤติกรรมการหลอมละลายและการตกผลึกของฟิล์มได้รับการวิเคราะห์โดยใช้ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอรีเมตรี (DSC: TA Instruments, Discovery DSC25) โดยใช้ตัวอย่างทดสอบประมาณ  $1.6\text{ mg}$  โดยฟิล์มตัวอย่างนั้นจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิห้องถึง  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ด้วยอัตราการให้ความร้อน  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน และคงที่ไว้ที่อุณหภูมิ  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา  $5\text{ min}$  เพื่อลบประวัติความร้อน จากนั้นถูกทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องที่อัตราการทำความเย็น  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  นอกจากนี้ยังใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ทดสอบหาลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer (Rigaku, Rint 2000)) โดยใช้รังสี  $\text{Cu K}\alpha$  บันทึกการเลี้ยวเบนรังสีที่มุม  $2\theta$   $10\text{-}35\text{ }^{\circ}$  และใช้ความเร็วในการสแกน  $2\text{ }^{\circ}\cdot\text{min}^{-1}$  และถูกนำไปวิเคราะห์ผลทางไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



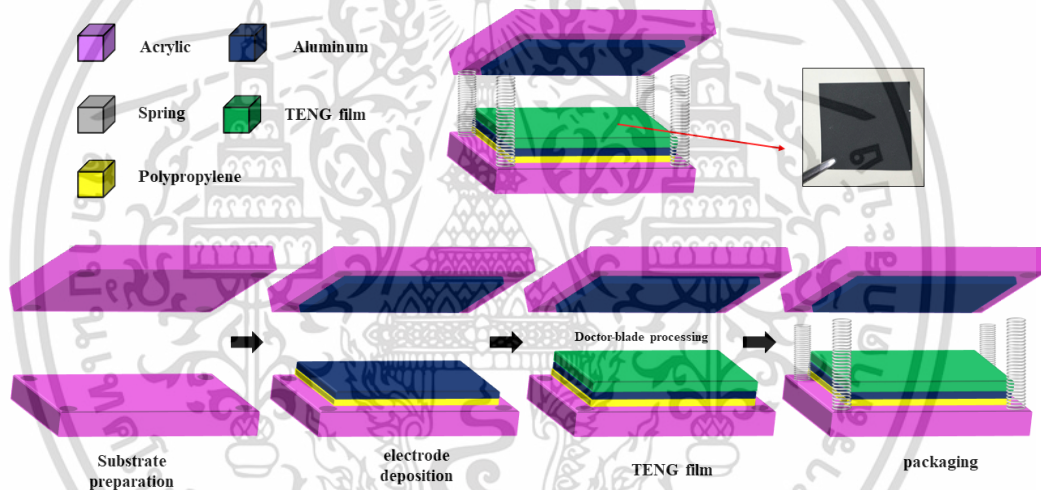
รูปที่ 3.4 แผนผังการเตรียมฟิล์มและทดสอบสมบัติต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การวัดคุณสมบัติเชิงไฟฟ้าด้วยแรงกดที่ได้จากเครื่องกดที่ความถี่ 3 Hz

#### 3.5.1 ขั้นตอนการประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริกจากฟิล์มพอลิเมอร์

จากไดอะแกรมในรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นขั้นตอนการประกอบโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริกเพื่อทดสอบสัญญาณทางไฟฟ้าโดยใช้แรงกดจากด้านบนลงมาสัมผัสกับพื้นผิวฟิล์มด้านล่างในขั้นตอนแรกใช้แผ่นอะคริลิก 2 แผ่นขนาด 8 cm x 10 cm x 3 mm ที่มุมทั้งสี่ด้านเจาะรูขนาด 0.5 mm เพื่อใช้เป็นรูหนีต จากนั้นนำแผ่นอะคริลิกแผ่นล่าง ทำการติดแผ่นพอลิโพรไพลีน ตามด้วยแผ่นอลูมิเนียมเทป ขนาด 3.5 x 3 cm<sup>2</sup> เพื่อใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดและนำแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ที่เตรียมขึ้นติดกับแผ่นอลูมิเนียมเทปซึ่งที่แผ่นอะคริลิกแผ่นบนทำการติดอลูมิเนียมเทปขนาด 3.5 x 3 cm เพียงอย่างเดียว จากนั้นในขั้นตอนสุดท้ายนำอะคริลิกแผ่นบนและแผ่นล่างมาประกบกัน โดยมีรูหนีตและสปริงจับยึดที่มุมทั้งสี่ด้าน ซึ่งเมื่อแผ่นบนลงมาสัมผัสกับแผ่นล่างก็จะเกิดแรงผลักของสปริงที่มุมทั้ง 4 ด้านให้แผ่นทั้งสองแยกออกจากกัน

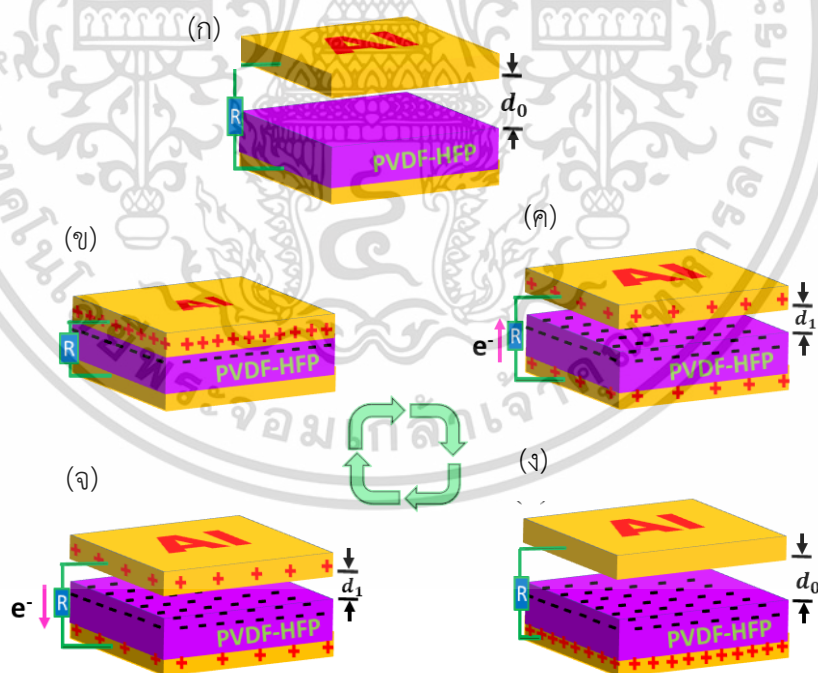


รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

#### 3.5.2 กลไกการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริก

กระบวนการสร้างพลังงานสามารถอธิบายได้ด้วย 2 ปรากฏการณ์คือ ปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect) และปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electrostatic induction) ปรากฏการณ์ทั้งสองเกิดขึ้นระหว่างการสัมผัสและเสียดสีระหว่างผิวของวัสดุ 2 ชนิดซึ่งมีสภาพขั้วทางไฟฟ้าที่ต่างกันตามตารางของไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric series) เมื่อมีการต่อโหนดระหว่างขั้วอิเล็กโทรดแผ่นบนและแผ่นล่างก็จะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น รูปที่ 3.6 แสดงกลไกการทำงานของไทรโบอิเล็กทริกภายใต้แรงกดจากภายนอกมากกระทำ ในสถานะเริ่มต้นก่อนการสัมผัสของวัสดุไทรโบ (PVDF-HFP) และขั้วอิเล็กโทรด (Al) ด้านบนจะไม่มีการถ่ายโอนประจุซึ่งกันและกันดังนั้นจึงไม่มีศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นดังรูป รูปที่ 3.6 (ก) เมื่อมีแรงภายนอกมากดลงทำให้แผ่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บนสัมผัสกับแผ่นล่างดังรูป รูปที่ 3.6 (ข) จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุขึ้นที่พื้นผิว ตามตารางไทรโบอิเล็กทริกจะมีตัวที่ให้และรับอิเล็กตรอนนั้นคือ อิเล็กตรอนจะถูกผลักจากอลูมิเนียมแผ่นบนไปยัง PVDF-HFP ซึ่งจะทำให้บนพื้นผิวมีประจุลบมากขึ้นและแผ่นอลูมิเนียมเสมือนมีประจุบวกที่พื้นผิวส่วนที่สัมผัสมากขึ้น โดยประจุบวกที่อยู่ในเนื้อของ PVDF-HFP จะถูกประจุบวกที่ผิวของอลูมิเนียมผลักให้เคลื่อนที่ไปอยู่อีกด้านหนึ่งของพอลิเมอร์ เมื่ออ่อนแรงกวดวัสดุทั้งสองจะเริ่มแยกออกจากกันด้วยแรงผลักของสปริงเป็นระยะ  $d_1$  ดังรูปที่ 3.6 (ค) ขั้วอิเล็กโทรดแผ่นบนจะเกิดความต่างศักย์ที่สูงขึ้นกว่าขั้วอิเล็กโทรดแผ่นล่างดังนั้นในขณะที่แยกออกจะเกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electrostatic induction) ขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรดแผ่นบนและแผ่นล่างโดยแผ่นบนมีศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าจะเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนผ่านโพลดภายนอกจากแผ่นล่างขึ้นไปแผ่นบนเพื่อให้อิเล็กโทรดแผ่นบนเกิดสมดุลทางไฟฟ้าและเป็นกลางทางไฟฟ้าเมื่อมีระยะเท่ากับ  $d_0$  ซึ่งอิเล็กโทรดแผ่นล่างจะเกิดศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นแทนดังรูปที่ 3.6 (ง) เมื่อมีแรงมากดลงอีกครั้งแผ่นบนและแผ่นล่างมีระยะห่างระหว่างแผ่นเป็นระยะ  $d_1$  อิเล็กโทรดแผ่นล่างจะเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนจากแผ่นบนลงมาจากโพลดภายนอก ดังรูปที่ 3.6 (จ) และจะเกิดความสมดุลทางไฟฟ้าที่ขั้วของแผ่นล่างเมื่อวัสดุทั้งสองสัมผัสกันและจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุขึ้นที่พื้นผิวอีกครั้งดังรูปที่ 3.6 (ข) ดังนั้นเมื่อทำการกดซ้ำ ๆ ก็จะมีการสร้างประจุไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 3.6 แผนผังกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF-HFP แบบไทรโบอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้เราหาความเข้มข้นของสารเติม rGO ที่เหมาะสมได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทานซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงที่สุดจะอยู่ที่ความต้านทานเท่ากับ 1 MΩ

### 3.5.3 การเก็บเกี่ยวพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริก

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างการกำเนิดไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างจากฟิล์ม PVDF-HFP แบบเติมและไม่เติม rGO และค่าความต้านทาน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า TENG ที่สร้างขึ้นจะถูกติดตั้งในตัวยึดแบบปัดอัตโนมัติ (Vertical contact-separation setup) ภายในกล่องควบคุมความชื้นดังที่แสดงในรูปที่ 2.19 ในระหว่างการทดลอง ความชื้นจะถูกตรวจสอบโดยเซ็นเซอร์วัดความชื้น (Humidity sensor) เม็ดซิลิกาเจล (silica gel) ถูกใช้เพื่อควบคุมความชื้นให้ต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแรงที่วัดได้ของเครื่องมีค่าสูงสุดประมาณ 247 N TENG ได้รับแรงสั่นที่ 3 Hz จากค้อนลม (Pneumatic hammer) ที่ขับเคลื่อนโดยระบบควบคุมด้วยลม ความถี่และทิศทางของแรงดันอากาศจากเครื่องปั๊มลมถูกควบคุมโดยวาล์วควบคุมเพื่อขับเคลื่อนค้อนลม สำหรับการวัดการเก็บเกี่ยวพลังงาน อิเล็กโทรดของ TENG เชื่อมต่อกับตัวต้านทาน (100 Ω-100 MΩ) แบบอนุกรมกัน โดยความสามารถการเก็บเกี่ยวพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า TENG ที่สร้างจากฟิล์มทุกเงื่อนไขความเข้มข้นการเติม rGO จะถูกเปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ฟิล์มที่ใช้จะมีขนาด  $3.5 \times 3 \text{ cm}^2$  มีความหนาประมาณ  $100 \text{ }\mu\text{m}$  จากนั้นจะทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นด้วยออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล (Keysight Technologies, DSO-X2012) และนำมาคำนวณเป็นกำลังไฟฟ้าด้วยสมการที่ 3.3

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3.3)$$

- เมื่อ  $P$  คือกำลังไฟฟ้าที่ TENG ผลิตได้มีหน่วยเป็นวัตต์  
 $V$  คือความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานมีหน่วยเป็นโวลต์  
 $R$  คือความต้านทานไฟฟ้ามมีหน่วยเป็นโอห์ม

วัดในบรรยายที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น

## บทที่ 4

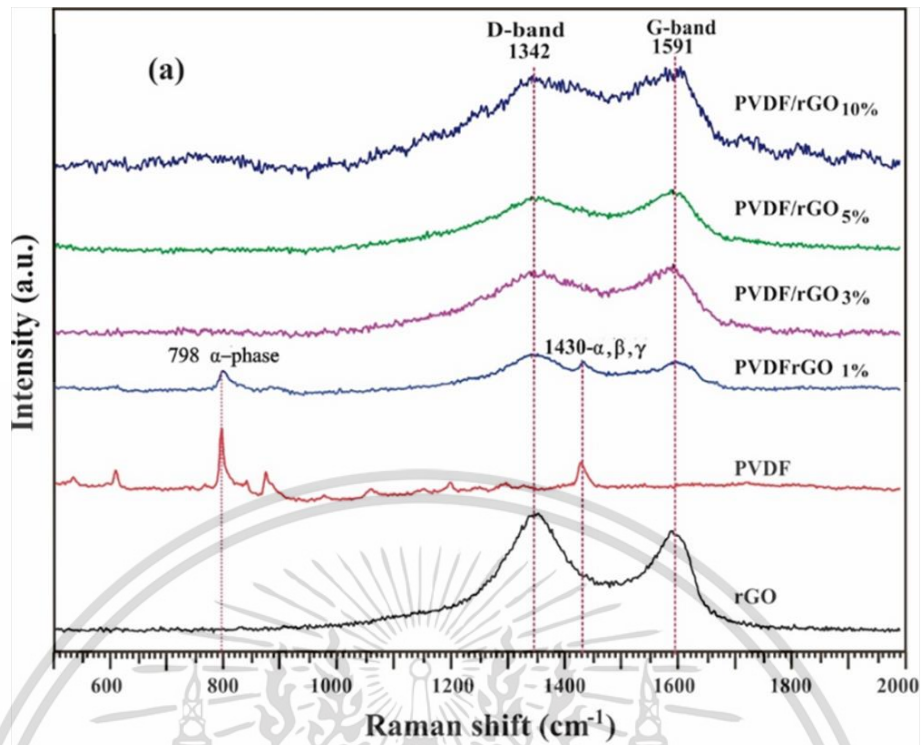
### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองในบทที่ 3 และเพื่อป้องกันการสับสนในการอธิบายผลต่าง ๆ ในบทนี้ฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ระบุในแต่ละกราฟจะใช้การอ้างอิงตามตารางที่ 3.1 และในส่วนเนื้อหาที่อธิบายผลการทดลองจะใช้พอลิเมอร์ PVDF-HFP แทนคำว่า PVDF ที่เขียนอยู่ในกราฟแต่ละรูปและตาราง

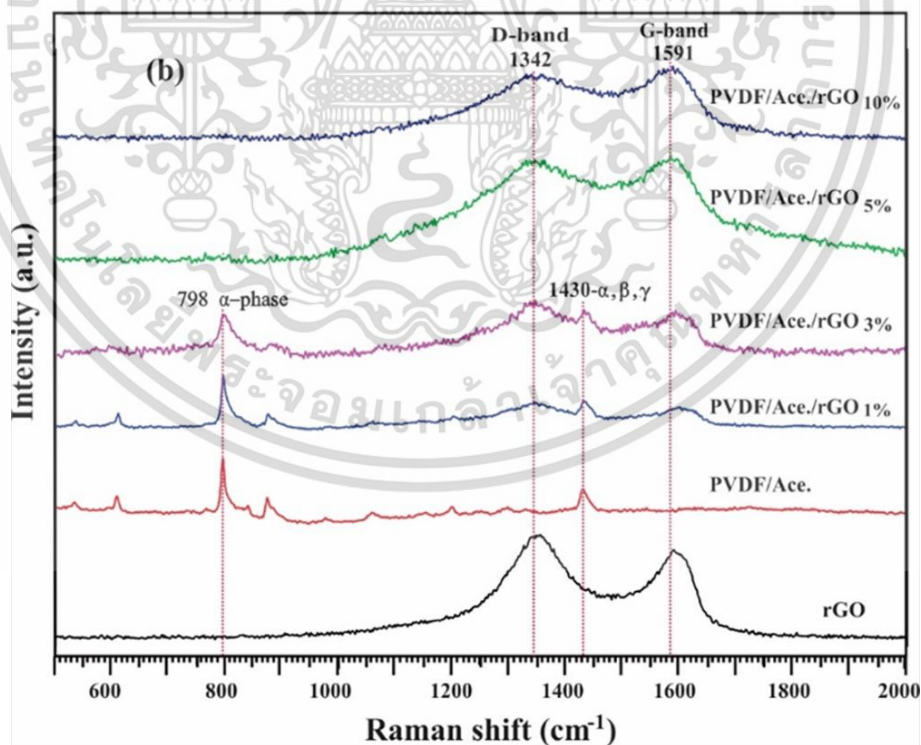
#### 4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี

ฟิล์มพอลิเมอร์ที่เติมและไม่เติม rGO ถูกนำไปวิเคราะห์โครงสร้างของผลึก โดยใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี ซึ่งให้ลำแสงเดี่ยวที่มีความเข้มสูงจากแหล่งกำเนิดไปยังชิ้นงาน แล้วมีการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) ทำให้ความถี่ของแสงนั้นเปลี่ยนแปลงไป ซึ่ง จะแสดงออกมาเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการกระเจิงแบบรามาน (Raman intensity) และเลขคลื่น (Wavenumber) แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบเลเซอร์ซึ่งมีลำแสงกระตุ้นที่มีความยาวคลื่น 532 nm ในช่วงแสงสีเขียวเมื่อวัดการกระเจิงของ คลื่นแสงที่มีความถี่เดี่ยว (monochromatic radiation) ชนกับโมเลกุลที่เป็นการ ชนแบบไม่ยืดหยุ่น ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานของการสั่น โดยคายพลังงานที่มีความถี่ต่าง ๆ กัน ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงอยู่ในรูปแบบเฉพาะของโครงสร้างของสารนั้น ๆ

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงรามานสเปกตรัมของฟิล์ม PVDF-HFP ที่มีการเติม rGo 0, 1, 3, 5 และ 10 wt% ที่มีและไม่มีตัวทำละลายเป็นอะซิโตนพบว่าแสงเกิดการกระเจิงที่เลขคลื่น  $1342\text{ cm}^{-1}$  กับ  $1591\text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับคุณลักษณะของ D-band และ G-band ของ rGO โดยอัตราส่วนความเข้มของ D-band/G-band ที่มากกว่า 1 จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะของ rGO [28] ดังนั้นจึงทำให้ทราบว่าฟิล์มที่เตรียมขึ้นนั้นมี rGO ผสมอยู่ไม่ว่าฟิล์มที่เตรียมขึ้นจะผสมหรือไม่ผสมอะซิโตนก็ตาม แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นเป็น 3, 5 และ 10 wt% จะพบได้ว่าที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่  $1342\text{ cm}^{-1}$  มีค่าความเข้มสูงกว่าตำแหน่งเลขคลื่น  $1591\text{ cm}^{-1}$  นั่นคือ D-band มีค่ามากกว่า G-band ซึ่งเป็นสมบัติของ GO ทำให้ทราบว่าเมื่อทำการเติม rGO เข้าไปมากขึ้นจะส่งผลให้ rGO จับตัวเป็นก้อนและมีสภาพกลายเป็น GO และตำแหน่งเลขคลื่นที่  $798, 1430\text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับเฟสแอลฟาและเฟสที่ผสมกันระหว่างเฟสแอลฟา บีต้า และแกมมาของพอลิเมอร์ PVDF-HFP ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 สเปกตรัมรามานของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีการเติม rGO 0-10 wt% แบบไม่ใช้เอซีโตน

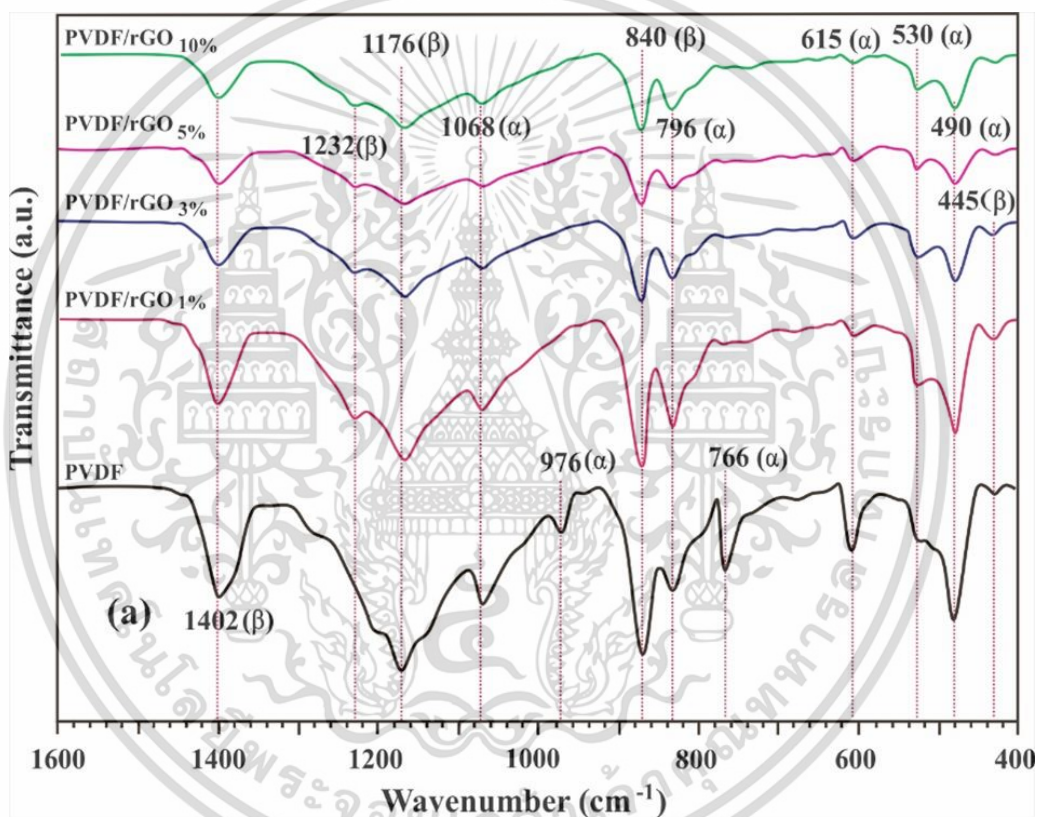


รูปที่ 4.2 สเปกตรัมรามานของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีการเติม rGO 0-10 wt% แบบใช้เอซีโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

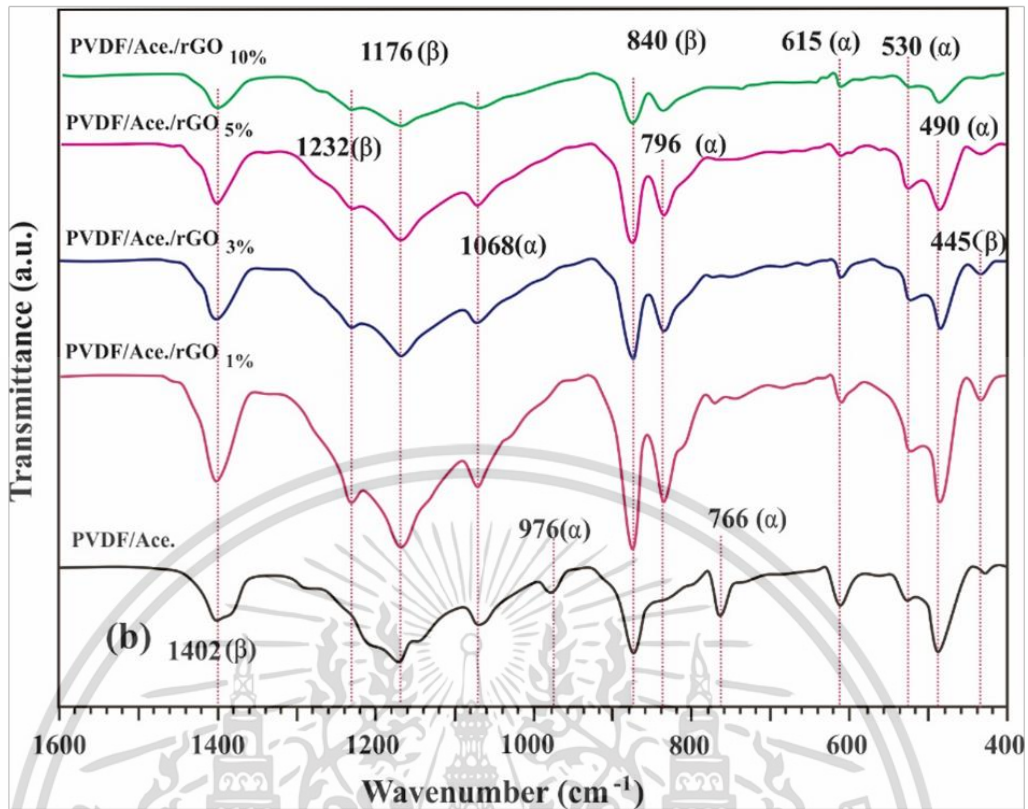
## 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ฟิล์มพอลิเมอร์ที่เตรียมขึ้นถูกนำมาวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกโดยการวัดปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืน วัดด้วยการกระตุ้นสารด้วยพลังงานช่วงแสงอินฟราเรด โมเลกุลของสารจะดูดกลืนแสงอินฟราเรดเข้าไปทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและหมุนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของแสงอินฟราเรดจะต้องเท่ากับความถี่ในการสั่นของโมเลกุลของสารนั้น ซึ่งจะมีความจำเพาะแตกต่างกันออกไป จึงใช้ในการบอกหมู่ของฟังก์ชันของสารนั้น ๆ ได้



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมการส่องผ่านของฟิล์มพอลิเมอร์แบบใช้ตัวทำละลายที่ไม่ผสมอะซิโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมการส่องผ่านของฟิล์มพอลิเมอร์แบบใช้ตัวทำละลายที่ผสมอะซิโตน

ค่าสเปกตรัมการส่องผ่านของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีการเติม rGO ในรูปที่ 4.3 เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมขึ้นโดยไม่ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลาย และรูปที่ 4.4 เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมขึ้นโดยผสมอะซิโตนในตัวทำละลาย การดูดกลืนสูงสุดที่เลขคลื่น 840 cm<sup>-1</sup> แสดงคุณสมบัติเป็นเฟสบีต้าที่ตำแหน่งการดูดกลืน 530 cm<sup>-1</sup> และ 766 cm<sup>-1</sup> แสดงคุณสมบัติเป็นเฟสแอลฟาที่เลขคลื่น 1068 cm<sup>-1</sup>, 1179 cm<sup>-1</sup> และ 1402 cm<sup>-1</sup> แสดงตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน —CF<sub>3</sub>, —CF<sub>2</sub> และ —CH<sub>2</sub> ของพอลิเมอร์ PVDF-HFP ตามลำดับ [37] จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นได้ว่าการเติม rGO จะทำให้ยอดกราฟที่ตำแหน่ง 840 cm<sup>-1</sup> มีความสูงเพิ่มขึ้นนั่นแปลว่าเมื่อเติม rGO เข้าไปส่งผลให้พอลิเมอร์มีผลึกที่เป็นเฟสบีต้าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัว PVDF-HFP เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตที่เติมเข้ามามีโครงสร้างเป็นผลึกของอะตอมคาร์บอนที่มีความแข็งแรงซึ่งตัวอะตอมคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ PVDF-HFP จะช่วยทำให้เกิดนิวเคลียส (nucleation) ของผลึกเฟสบีต้า และในการเติม rGO ทำให้เกิดกิริยา (interaction) ระหว่างอะตอมของฟลูออรีนของหมู่ฟังก์ชัน —CF<sub>2</sub> ของ PVDF-HFP กับหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล —C=O ของ —COOH ในโครงสร้างของ rGO นอกจากนี้ประจุลบตามขอบของโครงสร้าง rGO อาจเกิดปฏิสัมพันธ์ (interact) กับอะตอมไฮโดรเจนบนสายโซ่ด้านข้างของ PVDF-HFP ทำให้เกิดการเคลื่อนที่และจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ไปตามแนวพื้นผิวของวัสดุคอมโพสิตที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเกิดการเรียงตัวของอะตอมทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของผลึกเฟสบีต้าในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์ PVDF-HFP-rGO [37] ซึ่งยอดกราฟจะสูงที่สุดที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1 wt% และยอดจะค่อย ๆ ลดต่ำลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น ทั้งแบบที่ใช้อะซิโตนและไม่ใช้อะซิโตนในการทำละลาย โดยยอดกราฟของฟิล์มที่ใช้อะซิโตนในการทำละลายจะมีความเป็นผลึกของ เบต้าเฟสปีต้ามากกว่าแบบที่ไม่ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายเพียงเล็กน้อยซึ่งถือว่าไม่มีความสำคัญ และในทางกลับกันเมื่อความเข้มข้นในการเติม rGO มากขึ้นส่งผลให้ยอดกราฟที่ตำแหน่ง  $840\text{ cm}^{-1}$ ,  $766\text{ cm}^{-1}$  และ  $530\text{ cm}^{-1}$  ลดลงและหายไปทำให้ทราบได้ว่าผลึกเฟสแอลฟาเพิ่มขึ้น และเฟสปีต้ามีค่าลดลง พฤติกรรมนี้อาจเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคของ rGO ที่มีความเข้มข้นสูงทำให้สายโซ่และโมเลกุลพอลิเมอร์ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนเฟสลดลง [38] สัดส่วนความเป็นผลึกเฟสปีต้าของฟิล์มพอลิเมอร์ ( $F(\beta)$ ) สามารถดูได้จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5 ซึ่งคำนวณมาจากสมการ 4.1 และเปอร์เซ็นต์ผลึกในเฟสปีต้าในตัวอย่างฟิล์มสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2

$$F(\beta) = \frac{A_\beta}{\frac{k_\beta}{k_\alpha} \cdot A_\alpha + A_\beta} \quad (4.1)$$

$$= \frac{A_\beta}{1.26 A_\alpha + A_\beta}$$

เมื่อ  $A_\beta$  คือค่าการดูดกลืนแสงของเฟสปีต้า ที่  $840\text{ cm}^{-1}$   
 $A_\alpha$  คือค่าการดูดกลืนแสงของเฟสแอลฟา ที่  $766\text{ cm}^{-1}$   
 $k_\beta$  คือค่าคงที่ของเฟสปีต้า มีค่าเท่ากับ  $7.7 \times 10^4\text{ cm}^2/\text{mole}$   
 $k_\alpha$  คือค่าคงที่ของเฟสแอลฟา มีค่าเท่ากับ  $6.1 \times 10^4\text{ cm}^2/\text{mole}$  หรือ  $\frac{k_\beta}{k_\alpha} = 1.26$   
 $F(\beta)$  คือสัดส่วนความเป็นผลึกเฟสปีต้าของฟิล์มได้คำนวณจากกราฟ FTIR

และ

$$\% \beta = F(\beta) \times X_c \quad (4.2)$$

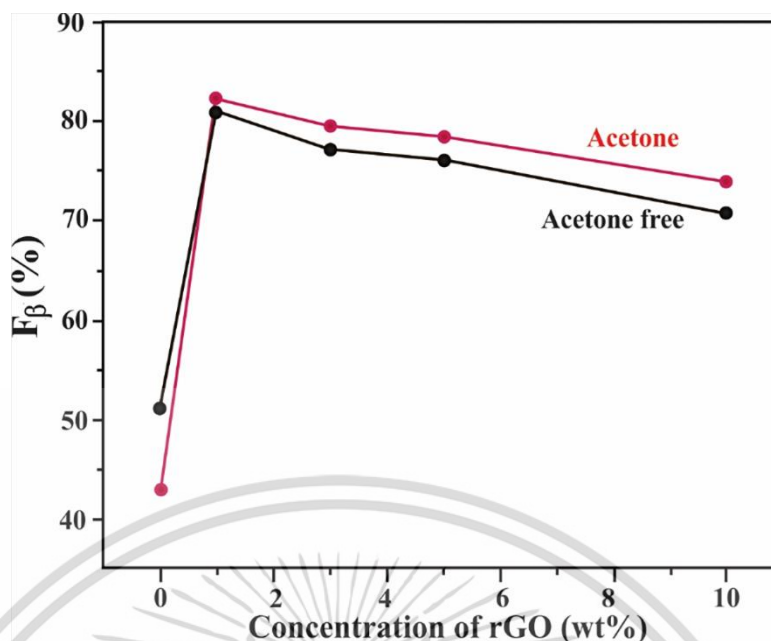
เมื่อ  $\% \beta$  คือเปอร์เซ็นต์ผลึกในเฟสปีต้าในตัวอย่างฟิล์ม  
 $X_c$  คือค่าความเป็นผลึก (Degree of crystalline) ของพอลิเมอร์ได้จากผลของ DSC

[41]

ตารางที่ 4.1 ความเข้มของรังสีอินฟราเรดที่ส่องผ่านและสัดส่วนของเฟสบีต้าของสารตัวอย่างที่ใช้และไม่ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลาย

| ตัวอย่าง                     | เลขคลื่น<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | ความเข้มการส่งผ่าน | $F(\beta)$<br>(%) |
|------------------------------|----------------------------------|--------------------|-------------------|
| PVDF                         | 766                              | 0.1928             | 50.84             |
|                              | 840                              | 0.2513             |                   |
| PVDF/rGO <sub>1%</sub>       | 766                              | 0.0482             | 80.87             |
|                              | 840                              | 0.2568             |                   |
| PVDF/rGO <sub>3%</sub>       | 766                              | 0.0280             | 77.18             |
|                              | 840                              | 0.1178             |                   |
| PVDF/rGO <sub>5%</sub>       | 766                              | 0.0269             | 75.95             |
|                              | 840                              | 0.0819             |                   |
| PVDF/rGO <sub>10%</sub>      | 766                              | 0.0270             | 70.74             |
|                              | 840                              | 0.1152             |                   |
| PVDF/Ace.                    | 766                              | 0.0816             | 42.91             |
|                              | 840                              | 0.0773             |                   |
| PVDF/Ace./rGO <sub>1%</sub>  | 766                              | 0.0451             | 82.06             |
|                              | 840                              | 0.2599             |                   |
| PVDF/Ace./rGO <sub>3%</sub>  | 766                              | 0.0278             | 79.14             |
|                              | 840                              | 0.1269             |                   |
| PVDF/Ace./rGO <sub>5%</sub>  | 766                              | 0.0261             | 78.36             |
|                              | 840                              | 0.1270             |                   |
| PVDF/Ace./rGO <sub>10%</sub> | 766                              | 0.0225             | 73.87             |
|                              | 840                              | 0.0613             |                   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น rGO กับ สัดส่วนของเฟสปีต้าในสารตัวอย่างที่มีการใช้และไม่ใช้อะซิโตน

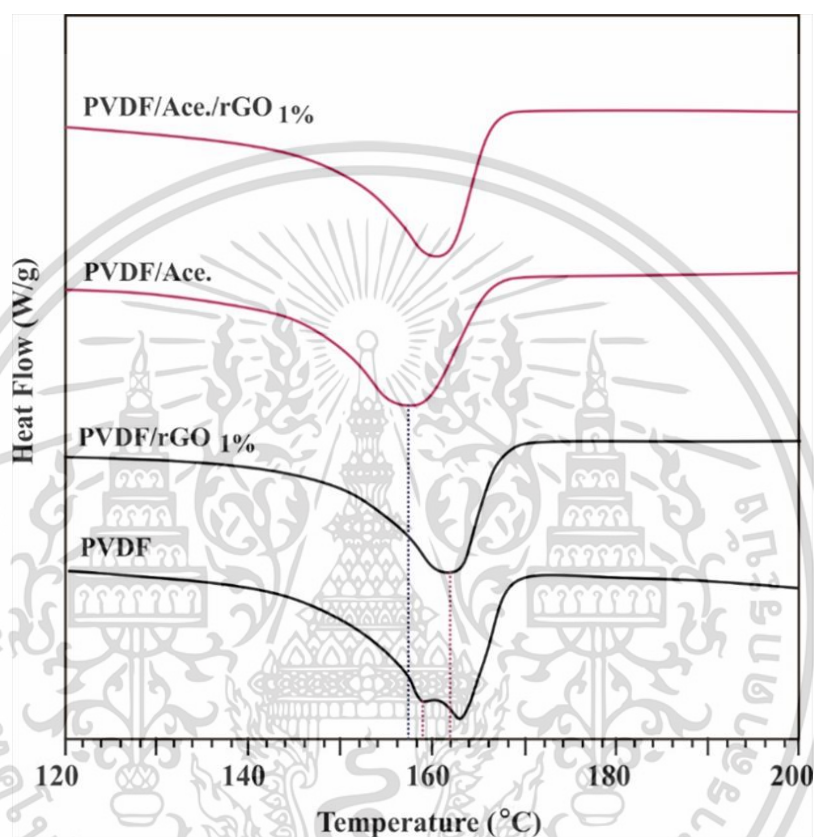
#### 4.3 การตรวจสอบความเป็นผลึกและสมบัติเชิงความร้อน

จากผลการทดลองก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสม rGO ที่ 1 wt% ให้ให้ความเป็นผลึกเฟสปีต้าที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงได้นำฟิล์มชนิดนี้มาทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อนเพื่อศึกษาว่าฟิล์มคอมโพสิตนี้มีความเป็นผลึกและสมบัติเชิงความร้อนเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร โดยจะศึกษาโดยใช้เครื่องดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มที่เปลี่ยนไปฟิล์มที่ใช้จะมีน้ำหนักเท่ากับ 1.6 mg และจะวัดการคายความร้อนในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนในช่วงอุณหภูมิ 20 – 200 °C อัตราการเปลี่ยนอุณหภูมิ 10 °C/min ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาความเป็นผลึกได้จากสมการ 2.1 และแสดงให้เห็นตำแหน่งของการเกิดผลึกของฟิล์ม

รูปที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ของฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF-HFP และฟิล์ม PVDF-HFP ที่มีการเติม rGO 1 wt% ที่เตรียมขึ้นแบบใช้ตัวทำละลาย 2 ชนิด (อะซิโตนและไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์) ฟิล์ม PVDF-HFP, PVDF-HFP-rGO ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ DMF เป็นตัวทำละลายเพียงอย่างเดียวจะมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 158 °C และ 162 °C ตามลำดับ แต่ฟิล์ม PVDF-HFP-Acetone, PVDF-HFP-Acetone-rGO ใช้ acetone และ DMF ในอัตราส่วน 1:1 จะมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 157 และ 160 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเติม rGO มากขึ้นจะส่งผลให้ฟิล์ม มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่สูงขึ้น ทั้งนี้ เป็นผลมาจาก rGO ช่วยเพิ่มความเป็นผลึกให้กับโครงสร้างพอลิเมอร์ [43] ได้ ซึ่งเมื่อคำนวณหาความเป็นผลึกจะเห็นอย่างได้ชัดเจนตามตารางที่ 4.2 ฟิล์ม PVDF-HFP ที่เติม rGO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 wt% แบบไม่ใช้อะซิโตนมีความเป็นผลึก 27.60 ในขณะที่ฟิล์มที่ไม่เติม rGO 1 wt% มีความเป็นผลึกเพียง 25.03 เท่านั้น และสำหรับฟิล์มที่มีการใช้อะซิโตนก็มีลักษณะความเป็นผลึกในลักษณะทำนองเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบถึงผลของตัวทำละลายอะซิโตนนั้น จะพบว่าฟิล์มที่มีการใช้อะซิโตนจะมีความเป็นผลึกมากกว่าแบบที่ไม่ใช้ ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะว่า การใช้อะซิโตนนั้นจะทำให้เกิดความเป็นผลึกปึกที่มากกว่านั่นเองตามที่ได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้



รูปที่ 4.6 พฤติกรรมการคายความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต

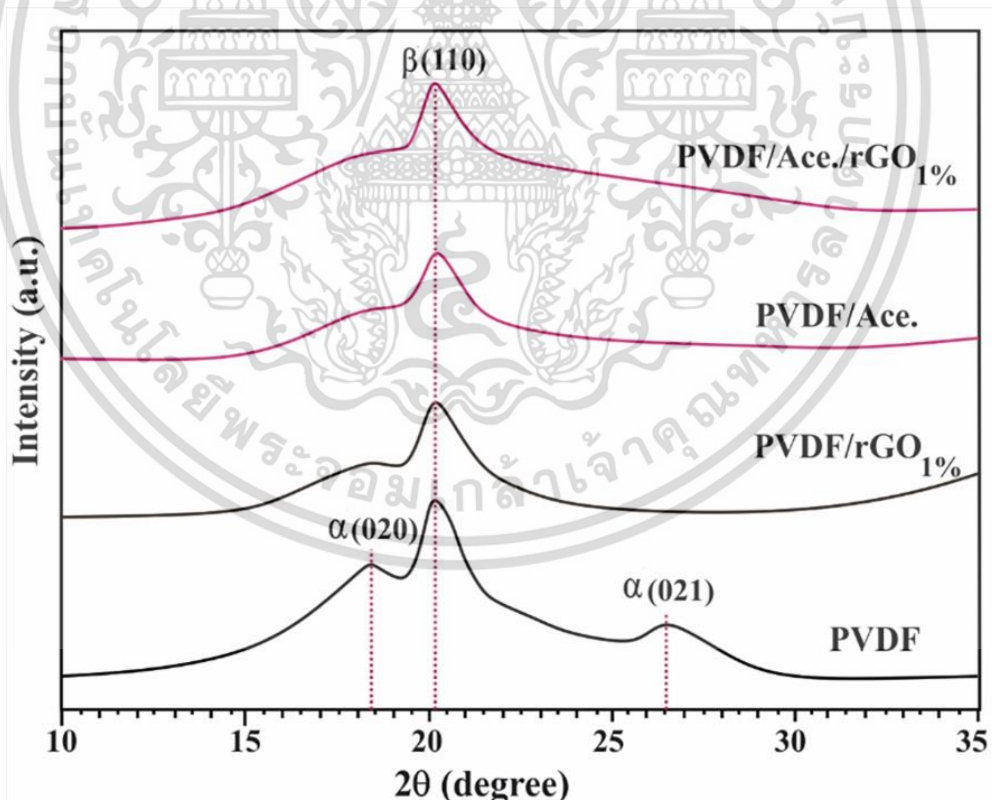
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการหลอมเหลว เอนทัลปีการหลอมเหลว และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก

| ตัวอย่าง                    | จุดหลอมเหลว<br>(°C) | เอนทัลปีหลอมเหลว<br>(J/g) | ความเป็นผลึก (%) |
|-----------------------------|---------------------|---------------------------|------------------|
| PVDF                        | 158                 | 26.15                     | 25.03            |
| PVDF/rGO <sub>1%</sub>      | 162                 | 28.84                     | 27.60            |
| PVDF/Ace.                   | 157                 | 28.00                     | 26.79            |
| PVDF/Ace./rGO <sub>1%</sub> | 160                 | 29.68                     | 28.40            |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การวิเคราะห์ฟิล์มด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF-HFP ที่มีการเติม rGO 0 และ 1 wt% โดยทำการวัดในช่วงมุม  $2\theta$  จาก  $10^\circ$  ถึง  $35^\circ$  โดยการวัดได้ใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของมุม  $0.01^\circ/\text{s}$  ความเร็วในการวัดอยู่ที่  $10^\circ/\text{min}$  พบว่าการเลี้ยวเบนอยู่ที่ระนาบมุม  $18.8^\circ$  และ  $20.7^\circ$  โดยสอดคล้องกับระนาบ (100) และ (110) ตามลำดับเมื่อเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 00-038-1638 รูปที่ 4.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีการใช้และไม่ใช้อะซิโตนในการทำละลาย จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าการเลี้ยวเบนที่มุม  $18.8^\circ$  สอดคล้องกับระนาบของเฟสแอลฟา (020) และการเลี้ยวเบนที่มุม  $26.50^\circ$  สอดคล้องกับระนาบของเฟสแอลฟา (021) แสดงให้เห็นว่าฟิล์ม PVDF-HFP มีเฟสแอลฟาอยู่เป็นปริมาณมาก สำหรับฟิล์มชนิดอื่น ๆ เฟสแอลฟาจะลดลง สังเกตได้จากการลดลงและไม่ปรากฏของการเลี้ยวเบนที่มุมทั้ง 2 นี้ การเลี้ยวเบนที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $20.7^\circ$  พบว่าเป็นระนาบที่ (110) ของเฟสบีตา จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า ทุกตัวอย่างนั้นจะพบผลึกเฟสบีตา สาเหตุการเพิ่มขึ้นของเฟสบีตาเป็นผลมาจากการเติม rGO ซึ่งช่วยยืนยันผลการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด และรามานสเปกโทรสโกปี

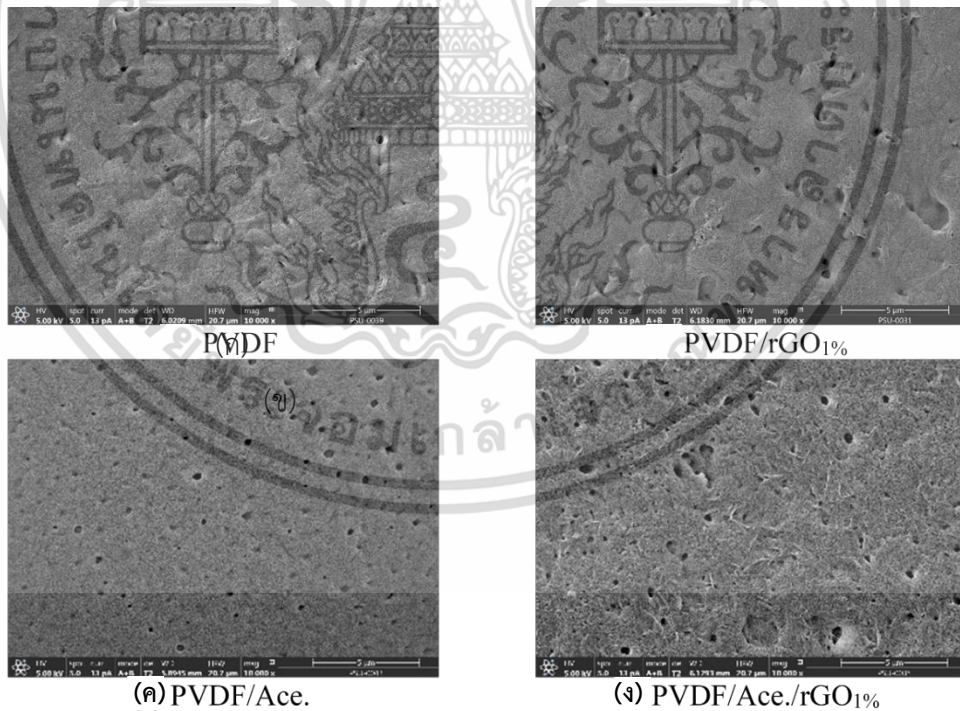


รูปที่ 4.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การตรวจพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มได้ถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง รุ่น FEI Apreo ที่กำลังขยายระดับ 10,000 เท่า โดยลักษณะพื้นผิวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อดูจากลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจะมีลักษณะของริ้วหรือรอยย่นขนาดเล็กเกิดขึ้นเมื่อมีการเติมวัสดุคอมโพสิต rGO มากกว่าในฟิล์มที่ไม่มีการเติม rGO แสดงในรูปที่ 4.8 (ข) และ 4.8 (ง) เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.8 (ก) ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะส่งผลให้เห็นว่าพื้นผิวของฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้น เมื่อเปลี่ยนตัวทำละลายพอลิเมอร์เป็น DMF/Acetone ลักษณะของพื้นผิวจะมีรูพรุน (porous) เกิดมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในรูปที่ 4.8 (ค) และ 4.8 (ง) นั่นเป็นเพราะเวลานำฟิล์มที่ได้ไปอบให้แห้ง ฟิล์มที่มีอะซิโตนเป็นส่วนผสมในตัวทำละลาย ตัวทำละลายจะระเหยบนพื้นผิวได้เร็วกว่าฟิล์มที่มีแคโทลฟอราไมด์เป็นตัวทำละลาย มีสาเหตุมาจากอะซิโตนมีอุณหภูมิในการระเหยต่ำกว่า ส่งผลให้บริเวณพื้นผิวด้านบนของฟิล์มจะแห้งเร็วกว่าเนื้อฟิล์มภายใน เนื้อด้านในที่ยังไม่แห้งก็จะเกิดการปะทุออกมาทำให้เกิดเป็นรูพรุนขึ้น ซึ่งรูพรุนส่งผลให้ตัวฟิล์มพอลิเมอร์มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อการเกิดปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริกเมื่อมีแรงจากภายนอกกระทำทำให้พื้นผิวระหว่างฟิล์มพอลิเมอร์กับขั้วอิเล็กโทรด การสัมผัสหรือเสียดสีกันจะส่งผลให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพในการดักจับประจุที่พื้นผิวได้ดีขึ้นทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วยซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป [45]

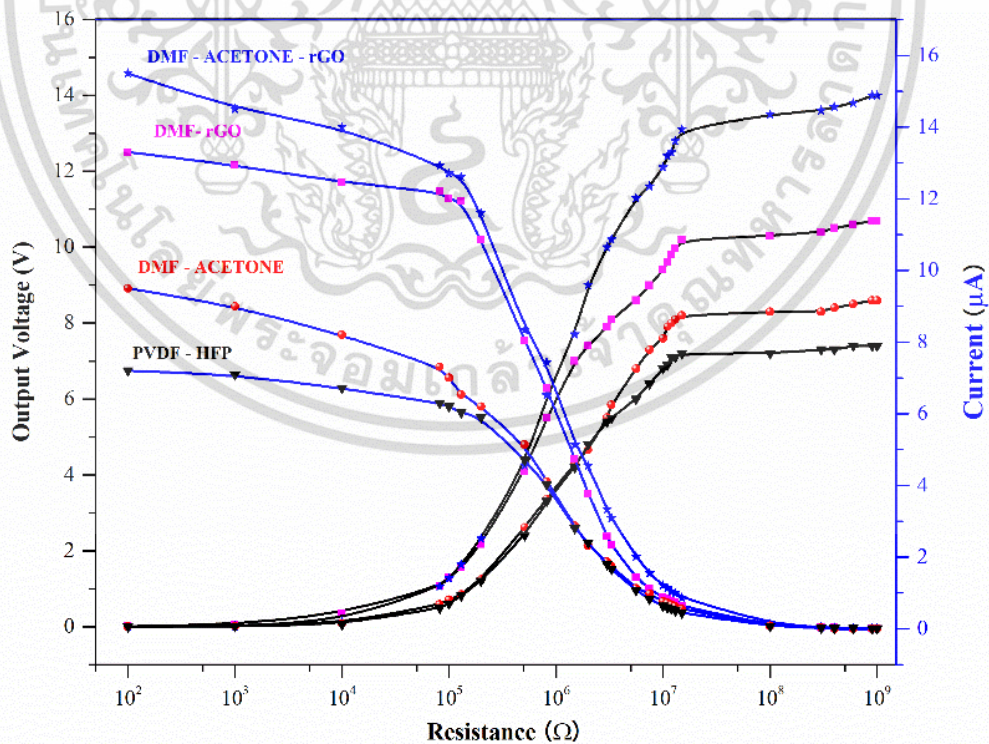


รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต PVDF-HFP

ในงานวิจัยนี้เราได้ทำการศึกษาและทดลองเพื่อหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าของฟิล์มพอลิโวลินลิตินฟลูออไรด์-เฮกซะฟลูออโรโพรไพลีน (PVDF-HFP) ที่มีการเติม rGO 1 wt% และเพิ่มความพรุนให้กับเนื้อของพอลิเมอร์ด้วยการเติมสารละลายอะซิโตน ในการวัดค่าทางไฟฟ้านั้นจะทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบ Open-circuit voltage ( $V_{oc}$ ) และวัดค่ากระแสแบบ Short-circuit current ( $I_{sc}$ ) เป็นโหมดการวัดแบบตั้งฉาก (Vertical Contact-Separation Mode) ซึ่งเป็นการวัดที่มีแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของฟิล์ม จากรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า DMF-Acetone-rGO<sub>1%</sub> มี  $V_{oc} = 14.5$  V,  $P = 47.80 \mu W$  DMF-rGO<sub>1%</sub> มี  $V_{oc} = 12.5$  V,  $P = 30.0 \mu W$  PVDF-HFP มี  $V_{oc} = 6.7$  V,  $P = 14.06 \mu W$  และ DMF-Acetone มี  $V_{oc} = 8.89$  V,  $P = 13.70 \mu W$  และสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่มีทั้งด้านบวกและด้านลบดังรูปที่ 4.10 นอกจากนี้ตารางที่ 4.3 ยังแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริกที่สร้างจากฟิล์มคอมโพสิต PVDF-HFP แบบไม่ใช้ตัวทำละลายอะซิโตนนั้นสามารถให้กำลังไฟฟ้าที่ไม่แตกต่างกันมากเมื่อเปลี่ยนปริมาณการเติม rGO ยกเว้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ rGO 10 wt% ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการผสม rGO ที่มากเกินไปทำให้เกิดการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อฟิล์มถูกกด ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้อะซิโตนนั้น ปริมาณ rGO ที่ผสมอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์จะมีผลต่อความสามารถในการผลิตไฟฟ้าอย่างเห็นได้ชัดเจน

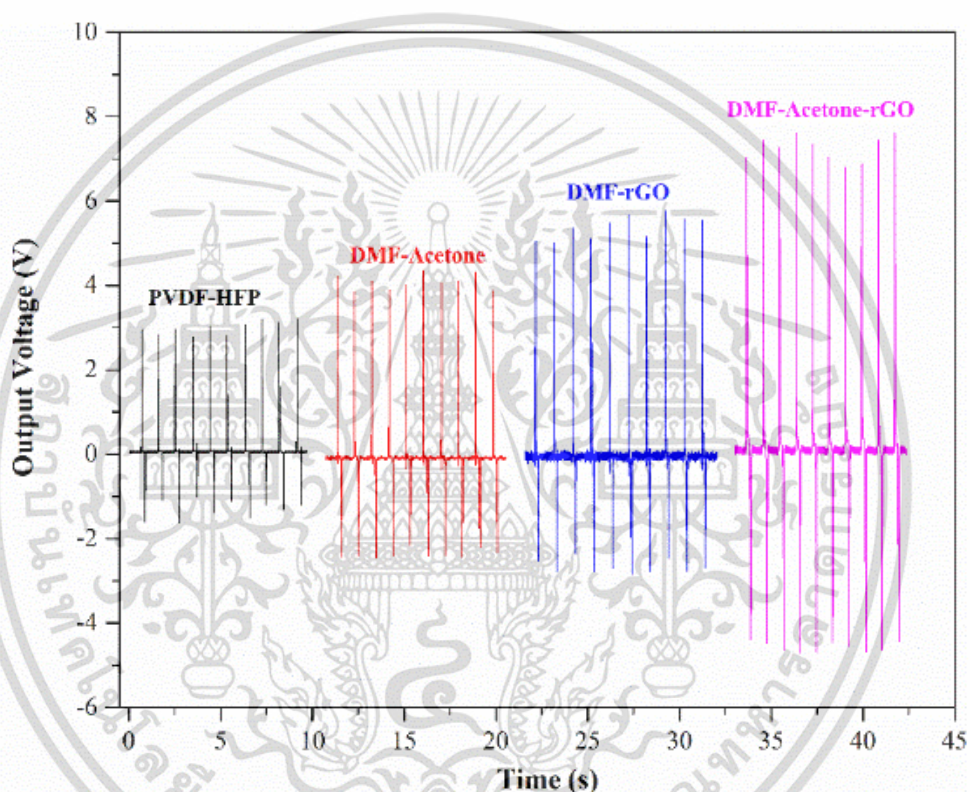


รูปที่ 4.9 กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริกผลิตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละชนิดผลิตได้

| ตัวอย่าง<br>(ไม่ใช่อะซิโตน)      | กำลังไฟฟ้า<br>( $\mu$ W) | ตัวอย่าง<br>(ใช่อะซิโตน)                | กำลังไฟฟ้า<br>( $\mu$ W) |
|----------------------------------|--------------------------|---|--------------------------|
| PVDF-HFP/DMF                     | 3.38                     | PVDF-HFP/DMF/Acetone                    | 4.01                     |
| PVDF-HFP/DMF/ rGO <sub>1%</sub>  | 3.37                     | PVDF-HFP/DMF/Acetone/rGO <sub>1%</sub>  | 114.58                   |
| PVDF-HFP/DMF/ rGO <sub>3%</sub>  | 3.34                     | PVDF-HFP/DMF/Acetone/rGO <sub>3%</sub>  | 1.66                     |
| PVDF-HFP/DMF/ rGO <sub>5%</sub>  | 3.31                     | PVDF-HFP/DMF/Acetone/rGO <sub>5%</sub>  | 1.51                     |
| PVDF-HFP/DMF/ rGO <sub>10%</sub> | 1.75                     | PVDF-HFP/DMF/Acetone/rGO <sub>10%</sub> | 1.45                     |

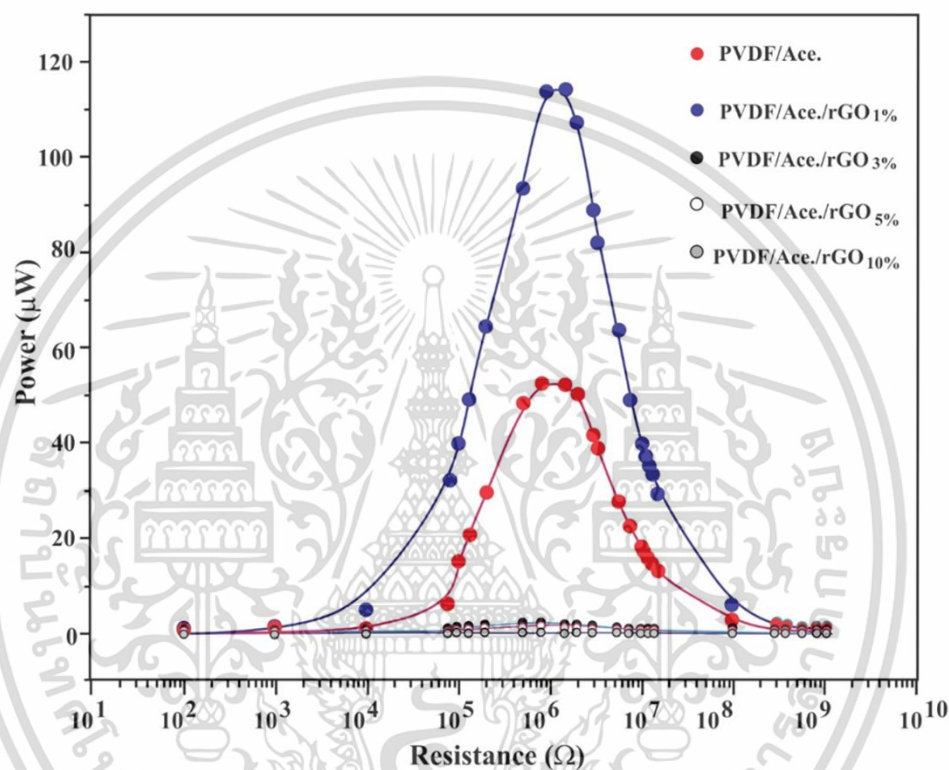


รูปที่ 4.10 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไพโรอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ

เมื่อนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มที่ใช้ตัวทำละลายอะซิโตนมาคำนวณหา กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และจ่ายให้กับตัวต้านทานค่าต่าง ๆ ผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าแสดงรูปที่ 4.11 ซึ่งสามารถบอกได้ว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเกิดที่ความต้านทานเท่ากับ  $1 \text{ M}\Omega$  จากกราฟจะเห็นว่า เมื่อมีการเติม rGO 1 wt% ในฟิล์ม PVDF-HFP การผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดของฟิล์มจะสูงขึ้นเนื่อง rGO จะไปเพิ่มประจุอิสระและเพิ่มความขรุขระให้กับพื้นผิวสัมผัสของฟิล์มมากยิ่งขึ้นตามที่ได้เห็นในภาพ FE-SEM ที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ rGO ที่ผสมจะช่วยให้เพิ่มเฟสบีตาให้เนื้อฟิล์มมากขึ้นเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับแรงกด บีตาเฟสในเนื้อฟิล์มจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดโพลโมเมนต์ซึ่งจะช่วยให้การเหนี่ยวนำประจุที่พื้นผิวให้มากขึ้นด้วย ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

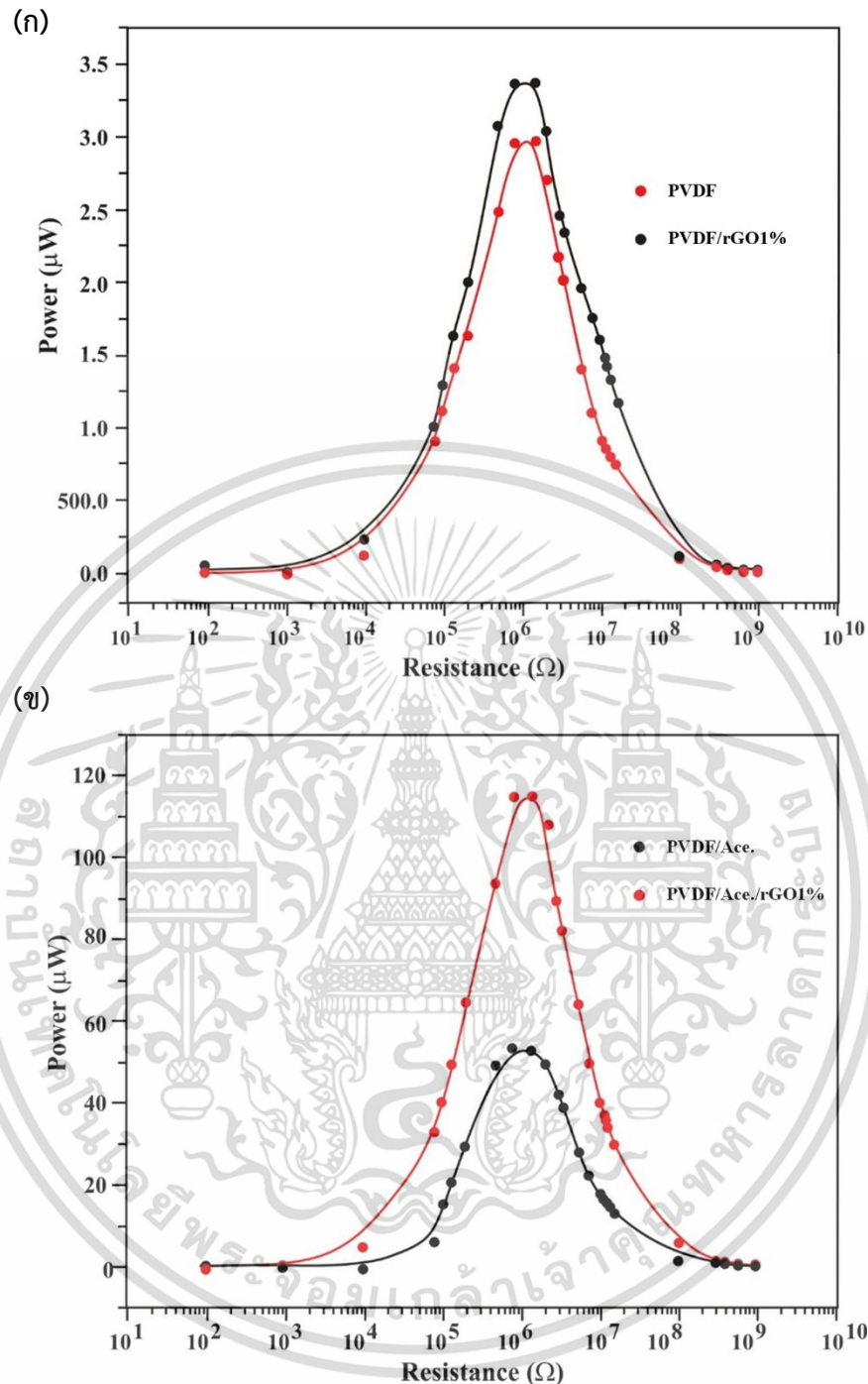
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะลดลงเมื่อใช้ฟิล์ม PVDF-HFP ที่เติม rGO เพิ่มขึ้น (rGO 3-10 wt%) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณเฟสบีต้าที่ลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ rGO ดังที่ปรากฏในผลการทดลองรูปที่ 4.5 และการเติม rGO สูง ๆ จะส่งผลให้ประจุที่เกิดขึ้นมีการสูญเสีย (loss) ไปเพราะฟิล์มมีสภาพเป็นตัวนำ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่พื้นผิวของฟิล์มด้วยเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ขณะเกิดการเสียดสีกันของพื้นผิวฟิล์มและขั้วไฟฟ้า ประจุจะไม่ถูกกักเก็บไว้ในฟิล์มแต่จะเคลื่อนที่ไปรวมกับประจุที่ขั้วอิเล็กโทรดด้านตรงข้ามทำให้เกิดการหักล้างกันไปจนหมดส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้านลดลง



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้า

รูปที่ 4.12 (ก) เป็นผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโทรโบอิเล็กทริกที่สร้างจากฟิล์ม PVDF-HFP ที่ใช้ DMF เป็นตัวทำละลายอย่างเดียวก่อน ซึ่งปรากฏอย่างเห็นได้ชัดว่าการเติม rGO 1 wt% ลงในเนื้อฟิล์มนั้นมีผลน้อยมากในการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการใช้ฟิล์ม PVDF-HFP บริสุทธิ์ไม่เติม rGO (เส้นแดง) จะให้กำลังไฟฟ้าเพียง  $3.0 \mu W$  และให้กำลังไฟฟ้า  $3.3 \mu W$  สำหรับการใส่ฟิล์ม PVDF-HFP แบบเติม rGO และใช้ DMF (เส้นดำ) ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ DMF เป็นตัวทำละลายในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม และผสม rGO สำหรับใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโทรโบอิเล็กทริกนั้นจะส่งผลให้การเพิ่มกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโทรโบอิเล็กทริกไม่โดดเด่นอย่างมีนัยสำคัญ

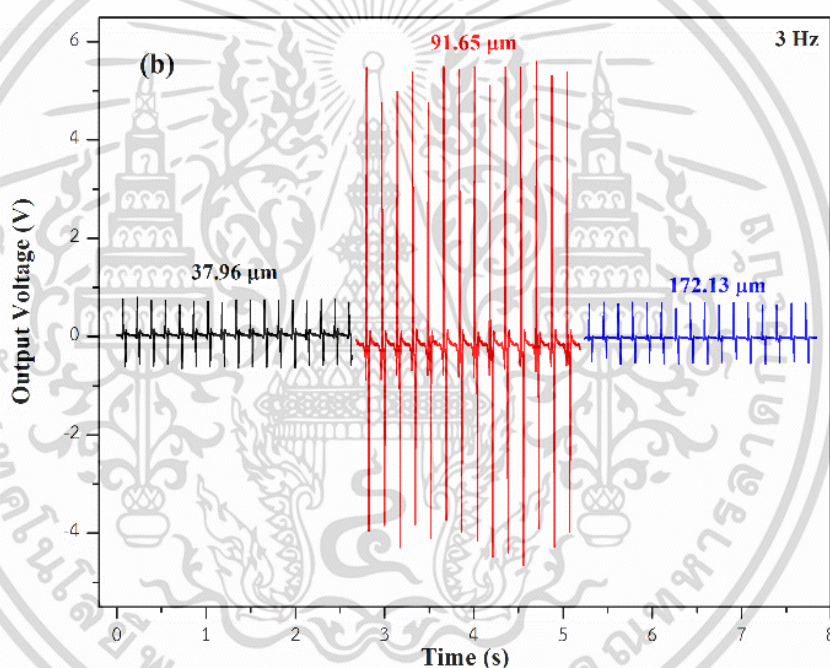


รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่มีการเติม rGO 1wt% (ก) ตัวทำละลาย DMF (ข) ตัวทำละลายเป็น DMF/Acetone

รูปที่ 4.12 (ข) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการเพิ่มความสามารถในการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริกที่ใช้ฟิล์ม PVDF-HFP ที่ใช้โซลเวนต์ผสม DMF เป็นตัวทำละลาย ฟิล์ม PVDF-HFP บริสุทธิ์แบบใช้โซลเวนต์ (เส้นดำ) ที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริกสามารถเก็บเกี่ยวกำลังไฟฟ้าได้ประมาณ 55  $\mu\text{W}$  ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่ามากกว่าผลการผลิตกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

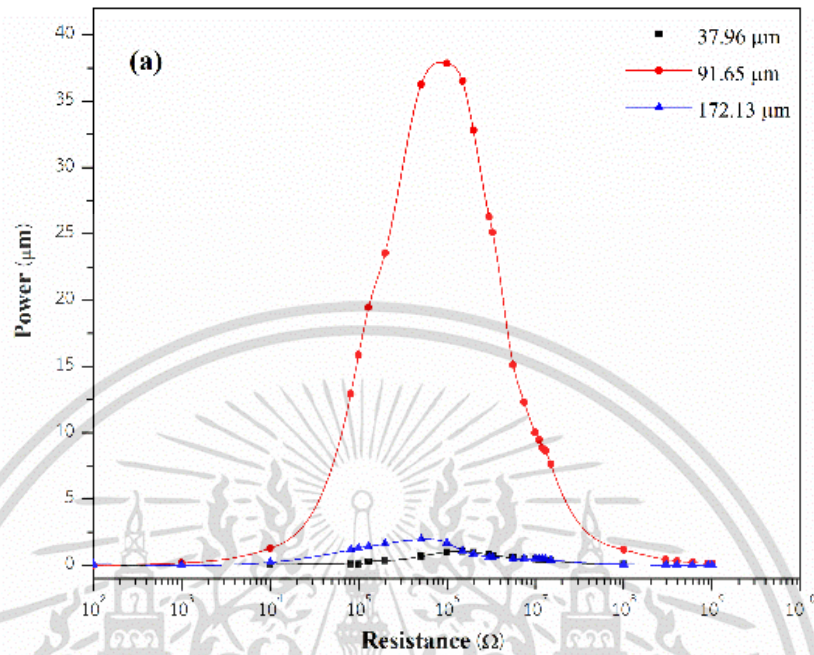
ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริกในรูปที่ 4.12 (ก) หลายเท่า ทั้งนี้เพราะเกิดขึ้นจากลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์ม PVDF-HFP/DMF/acetone ดังปรากฏในรูปที่ 4.8 (ค) ซึ่งมีความพรุนและขรุขระมากกว่าฟิล์ม PVDF-HFP/DMF/rGO และ PVDF-HFP/DMF (รูปที่ 4.8 (ก) และ (ข)) และเมื่อพิจารณาฟิล์มคอมโพสิตที่มีอะซิโตน PVDF-HFP/acetone/rGO<sub>1wt%</sub> (เส้นแดง) ซึ่งนำมาสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ประมาณ 115  $\mu$ W หรือประมาณ 2 เท่าของกำลังไฟฟ้าที่ฟิล์ม PVDF-HFP/DMF/acetone ผลิตได้ ทั้งนี้เกิดขึ้นจากฟิล์มที่ใช้อะซิโตนและเติม rGO ซึ่งมีสภาพพื้นผิวที่ขรุขระ ความพรุน ความเป็นผลึกและเฟสบีตามากที่สุดซึ่งยืนยันด้วยผลการทดลอง DSC, FTIR, XRD และ SEM ก่อนหน้า ผลการทดสอบนี้จึงเป็นที่น่าสนใจซึ่งการใช้ตัวทำละลายอะซิโตนและการเติม rGO จะช่วยให้การเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริกเป็นไปอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.13 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มความหนาต่างกัน

รูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงให้เห็นผลของความหนาของฟิล์มที่ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริกผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ต่างกัน โดยความหนาที่มากและต่ำจนเกินไปจะส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถผลิตความต่างศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าได้น้อยมาก ๆ ถ้าความหนาที่บางมาก ๆ นั้นจะส่งผลให้มีโอกาสที่ทำให้ rGO ที่เติมลงในเนื้อฟิล์มมีการเชื่อมต่อกันระหว่างแผ่น rGO ไกล่เคียง อันจะส่งผลให้เมื่อฟิล์มได้รับแรงกด ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการกดจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านเนื้อฟิล์มได้หรือเกิดการรั่วไหลของประจุ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงน้อย และเป็นผลให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าน้อยตามไปด้วย ในทางกลับกันสำหรับฟิล์มที่มีความ

หนามากเกินไป เมื่อฟิล์มได้รับการกด ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสจะไม่สามารถเหนี่ยวนำให้ผิวของฟิล์มด้านตรงกันข้ามเกิดประจุไฟฟ้าต่างชนิดขึ้นได้ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่จึงไหลได้น้อย



รูปที่ 4.14 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโทรโบอิเล็กทริกที่ใช้ฟิล์มความหนาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

โดยสรุป ในงานนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริกที่ประดิษฐ์ขึ้นจากฟิล์มคอมโพสิต PVDF-HFP และ rGO ที่เตรียมโดยใช้ตัวทำละลาย DMF และตัวทำละลาย DMF และอะซิโตน การเติม rGO และอะซิโตนในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริก การเกิดเฟสปีต้าของฟิล์มคอมโพสิต PVDF/rGO ส่วนใหญ่มาจาก rGO ที่เพิ่มขึ้นในเมทริกซ์ของ PVDF-HFP โดยการผสม rGO 1 wt% และใช้ตัวทำละลายผสมของ DMF และอะซิโตนเตรียมฟิล์ม PVDF-HFP นั้นสามารถปรับปรุงลักษณะสัญญาณวิทยาทงพื้นผิวและเฟสปีต้าของฟิล์มได้ และเพิ่มการเก็บเกี่ยวพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้สูงสุด  $115 \mu W$

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

การปรับปรุงฟิล์มไทรโบอิเล็กทริกที่มีการเติม rGO ที่มีตัวทำละลายเป็นอะซิโตนในขั้นตอนการกวนสารละลายควรปิดปากบีกเกอร์ให้มิดชิดเพื่อป้องกันการระเหยของอะซิโตนที่เร็วเกินไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Z.L. Wang, J. Chen, L. Lin, Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors, *Energy & Environmental Science*, 8 (2015) 2250-2282.
- [2] D.Y. Kim, H.S. Kim, J.H. Jung, Ar plasma treated polytetrafluoroethylene films for a highly efficient triboelectric generator, *Journal of the Korean Physical Society*, 69 (2016) 1720-1723.
- [3] M.-K. Kim, M.-S. Kim, H.-B. Kwon, S.-E. Jo, Y.-J. Kim, Wearable triboelectric nanogenerator using a plasma-etched PDMS–CNT composite for a physical activity sensor, *RSC Advances*, 7 (2017) 48368-48373.
- [4] M. Suvrajyoti , R. Sahoo, L. Unnikrishnan, Investigation of the electro-active phase content and dielectric behaviour of mechanically stretched PVDF-GO and PVDF-rGO composites, *MRB* 110732 (2019), doi.org/10.1016/j.materresbull.2019.110732.
- [5] V.P. Pavlovic, V.B. Pavlovic, B. Vlahovic, Structural properties of composites of polyvinylidene fluoride and mechanically activated BaTiO<sub>3</sub> particles, *Phys. Scr. T157* (2013), DOI 10.1088/0031-8949/2013/T157/014006.
- [6] A. Naushad, M.d. Habibur, H. Cheol, Optimization of triboelectric energy harvesting from falling water droplet onto wrinkled polydimethylsiloxane-reduced graphene oxide nanocomposite surface, *composites part B* 174 (2019) 1359-8368.
- [7] L.M.M. Costa, R.E.S. Bretas, Effect of solution concentration on the electrospray/electrospinning transition and on the crystalline phase of pvdf, *MSA*, 1 (2010), 247-252.
- [8] W. Changsheng, C. Wang Aurelia., D. Wenbo, Triboelectric Nanogenerator: A Foundation of the Energy for the New Era, 9 (2018) 1614-6832. DOI: 10.1002/aenm.201802906
- [9] J.R. Gregorio, D.S. Borges, Effect of crystallization rate on the formation of the polymorphs of solution cast poly(vinylidene fluoride), *polymer* 49 (2008) 4009-4016. DOI:10.1016/j.polymer.2008.07.010
- [10] K.Y. Lee, *et al.*, Transparent flexible stretchable piezoelectric and triboelectric nanogenerators for powering portable electronics, *Nano Energy* 14, 139-160 (2015). DOI: 10.1016/j.nanoen.2014.11.009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [11] P. Pascariu, et al.: Graphene and TiO<sub>2</sub>- PVDF Nanocomposites for Potential Applications in Triboelectronics, International Semiconductor Conference (CAS), 237-240 (2018). DOI: 10.1109/SMICND.2018.8539781.
- [12] S. Naval, et al., Multi-output AC/DC triboelectric generator with dual rectification, Nano Energy 105, 108004 (2023). DOI: 10.1016/j.nanoen.2022.108004.
- [13] J. Chen, et al., Enhancing Performance of Triboelectric Nanogenerator by Filling High Dielectric Nanoparticles into Sponge PDMS Film, ACS Appl. Mater. Interfaces 8(1), 736-744 (2016). DOI: 10.1021/acsami.5b09907.
- [14] F.-R. Fan, et al., Flexible triboelectric generator, Nano Energy 1(2), 328-334 (2012). DOI: 10.1016/j.nanoen.2012.01.004.
- [15] A. Šutka, et al., PEDOT electrodes for triboelectric generator devices, Org. Electron. 51, 446-451 (2017). DOI: 10.1016/j.orgel.2017.09.052.
- [16] D. Kim, et al., A spring-type piezoelectric energy harvester, RSC Adv. 3(10), 3194-3198 (2013). DOI: 10.1039/C2RA22554A.
- [17] L. Wu, et al., Improved energy harvesting capability of poly(vinylidene fluoride) films modified by reduced graphene oxide, J. Intell. Mater. Syst. Struct. 25(14), 1813-1824 (2014). DOI: 10.1177/1045389x14529609.
- [18] Z. Wang, et al., Enhancing the performance of triboelectric nanogenerator through prior-charge injection and its application on self-powered anticorrosion, Nano Energy 10, 37-43 (2014). DOI: 10.1016/j.nanoen.2014.08.017.
- [19] K. Y. Lee, et al., Transparent flexible stretchable piezoelectric and triboelectric nanogenerators for powering portable electronics, Nano Energy 14, 139-160 (2015). DOI: 10.1016/j.nanoen.2014.11.009.
- [20] V. Bhavanasi, et al., Enhanced Piezoelectric Energy Harvesting Performance of Flexible PVDF-TrFE Bilayer Films with Graphene Oxide, ACS Appl. Mater. Interfaces 8(1), 521-529 (2016). DOI: 10.1021/acsami.5b09502.
- [21] P. Pascariu, et al.: Graphene and TiO<sub>2</sub>- PVDF Nanocomposites for Potential Applications in Triboelectronics, International Semiconductor Conference (CAS), 237-240 (2018). DOI: 10.1109/SMICND.2018.8539781.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [22] W. Feipeng, B.W. YANG, J. CHEN, Experimental characterization and mechanism of hydraulic pulsation waves driving microscopic residual oil, 1411-1422(2022). [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(23\)60359-3](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(23)60359-3)
- [23] S. Mishra, et al., Investigation of the electroactive phase content and dielectric behaviour of mechanically stretched PVDF-GO and PVDF-rGO composites, Mater. Res. Bull. 124, 110732 (2020). DOI: 10.1016/j.materresbull.2019.110732.
- [24] R. M. Habibur, et al., The effect of RGO on dielectric and energy harvesting properties of P(VDF-TrFE) matrix by optimizing electroactive  $\beta$  phase without traditional polling process, Mater. Chem. Phys. 215, 46-55 (2018). DOI: 10.1016/j.matchemphys.2018.05.010.
- [25] U. Yaqoob, et al., The effect of reduced graphene oxide on the dielectric and ferroelectric properties of PVDF–BaTiO<sub>3</sub> nanocomposites, RSC Adv. 6(36), 30747-30754 (2016). DOI: 10.1039/C6RA03155B.
- [26] Y. Zhu, et al., An Integrated Flexible Harvester Coupled Triboelectric and Piezoelectric Mechanisms Using PDMS/MWCNT and PVDF, J. Microelectromech. Syst. 24(3), 513-515 (2015). DOI: 10.1109/JMEMS.2015.2404037.
- [27] U. Yaqoob and G.-S. Chung, Effect of surface treated MWCNTs and BaTiO<sub>3</sub> nanoparticles on the dielectric properties of a P(VDF-TrFE) matrix, J. Alloys Compd. 695, 1231-1236 (2017). DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.10.250.
- [28] M.S.S. Bafqi, et al., Fabrication of composite PVDF-ZnO nanofiber mats by electrospinning for energy scavenging application with enhanced efficiency, J. Polym. Res. 22(7), 130 (2015). DOI: 10.1007/s10965-015-0765-8.
- [29] Peng, Wei, Ranganathan, Keblinski, awel, Viscoelastic and Dynamic Properties of Well-Mixed and Phase-Separated Binary Polymer Blends: A Molecular Dynamics Simulation Study, (2017). DOI:10.1021/acs.macromol.7b00657
- [30] M. Doumeng a, L. Makhlof, A comparative study of the crystallinity of polyetheretherketone by using density, DSC, XRD, and Raman spectroscopy techniques, Volume 93, (2021), 106878. DOI:10.1016/j.polymertesting.2020.106878

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [31] A.N. Parvez, M.H. Rahaman, Optimization of triboelectric energy harvesting from falling water droplet onto wrinkled polydimethylsiloxane-reduced graphene oxide nanocomposite surface, *Composites Part B* 174 1359-8368 (2019). DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106923
- [32] C Nuanyang, G Long, Dynamic Behavior of the Triboelectric Charges and Structural Optimization of the Friction Layer for a Triboelectric Nanogenerator, *ACS N*, 6131–6138 (2016). DOI: 10.1021/acs.nano.6b02076
- [33] C Phrompet, C Sriwong, Mechanical, dielectric, thermal and antibacterial properties of reduced graphene oxide (rGO)-nanosized C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub> cement nanocomposites for smart cement-based materials, *Composites Part B* 175 (2019), /DOI.10.1016/j.compositesb.2019.107128
- [34] X. Xia, et al., Aligning graphene sheets in PDMS for improving output performance of triboelectric nanogenerator, *Carbon* 111, 569-576 (2017). DOI: 10.1016/j.carbon.2016.10.041.
- [35] Y. Zhong, et al., High-performance flexible self-powered triboelectric pressure sensor based on chemically modified micropatterned PDMS film, *Sens. Actuator A Phys.* 349, 114013 (2023). DOI: 10.1016/j.sna.2022.114013.
- [36] K. Lee, et al., A high-performance PDMS-based triboelectric nanogenerator fabricated using surface-modified carbon nanotubes via pulsed laser ablation, *J. Mater. Chem. A* 10(3), 1299-1308 (2022). DOI: 10.1039/D1TA08414C.
- [37] Y. Qian, et al., A high-output flexible triboelectric nanogenerator based on polydimethylsiloxane/three-dimensional bilayer graphene/carbon cloth composites, *J. Mater. Chem. A* 8(33), 17150-17155 (2020). DOI: 10.1039/D0TA04341A.
- [38] Y. Yang, et al., MWCNTs/PDMS composite enabled printed flexible omnidirectional strain sensors for wearable electronics, *Compos. Sci. Technol.* 226, 109518 (2022). DOI: 10.1016/j.compscitech.2022.109518.
- [39] Keith E. Whitener, and Paul E. Sheehan Graphene synthesis, : S0925-9635 (2014). : S0925-9635(14). <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2014.04.006>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [40] K. Liu, et al., Highly stretchable, superhydrophobic and wearable strain sensors based on the laser-irradiated PDMS/CNT composite, *Compos Sci Technol* 218, 109148 (2022). DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.109148.
- [41] X. Han, et al., Polyaniline-based Schottky-triboelectric hybrid DC generators with tunable electrical outputs, *Nano Energy* 104, 107956 (2022). DOI: 10.1016/j.nanoen.2022.107956.
- [42] X. Dong, et al., Eco-friendly solvents and their mixture for the fabrication of polysulfone ultrafiltration membranes: An investigation of doctor blade and slot die casting methods, *J. Membr. Sci.* 614, 118510 (2020). DOI: 10.1016/j.memsci.2020.118510.
- [43] C. Phrompet, et al., Electrochemical properties of tricalcium aluminate hexahydrate – reduced graphene oxide nanocomposites for supercapacitor device, *J. Energy. Storage.* 30, 101474 (2020). DOI: 10.1016/j.est.2020.101474.
- [44] B. Wang and H.-X. Huang, Incorporation of halloysite nanotubes into PVDF matrix: Nucleation of electroactive phase accompany with significant reinforcement and dimensional stability improvement, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 66, 16-24 (2014). DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.07.001.
- [45] P. Martins, et al., Electroactive phases of poly(vinylidene fluoride): Determination, processing and applications, *Prog. Polym. Sci.* 39(4), 683-706 (2014). DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2013.07.006.



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
จดหมายตอบรับการตีพิมพ์



Acceptance Letter

June 20, 2023

Manuscript Number: S10\_P30

Title: Triboelectric nanogenerator prepared from poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene) polymer composite

Dear Dr. Pisan Sukwisute,

We sincerely appreciate your submission of the manuscript titled "Triboelectric Nanogenerator Prepared from Poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene) Polymer Composite" to Integrated Ferroelectrics.

We are delighted to inform you that, after a rigorous peer-reviewed process, your manuscript has been accepted for publication in Integrated Ferroelectrics. This accomplishment highlights the significance of your research contribution.

The production process will now commence, and your manuscript will be transferred to our esteemed publisher. They will create a proof for your review and request your completion of essential online forms. If any additional information is required during production, the publisher will reach out to you directly.

Please don't hesitate to contact us if you have any questions or require further assistance.

Kind regards,

*Rattikorn Yimnirun.*

Guest Editors:

Rattikorn Yimnirun, Ph.D.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

|                      |  |
|----------------------|--|
| ชื่อ                 | นางสาวภัทรสุดา วรรณฤมล   |
| วัน เดือน ปีเกิด     | 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2540  |
| ที่อยู่ปัจจุบัน      | 56 ม.6 ต.ประสาทสิทธิ์ อ.ดำเนินสะดวก จ.ราชบุรี 70210  |
| ประวัติการศึกษา      | ปีจบการศึกษา 2562 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์<br>คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง<br>ปีจบการศึกษา 2566 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์<br>คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ | ทุนผู้ช่วยวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร<br>ลาดกระบัง  |
| ผลงานทางวิชาการ      | 1. Triboelectric nanogenerator prepared from poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene) polymer composite, Integrated Ferroelectrics. (Accepted manuscript)   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้