

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริก

ELECTRIC MICROGENERATOR FROM  
THE TRIBOELECTRIC EFFECT



ภัทรสุดา วรรณฤมล  
สุจินดา โตศิริ  
หนึ่งฤทัย เพ็ชรผุดผ่อง

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2561

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและเผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRIC MICROGENERATOR FROM  
THE TRIBOELECTRIC EFFECT



PATTARASUDA WANNARUMON  
SUJINDA TOSIRI  
NUENGRUETHAI PHETPUDPONG

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ACADEMIC YEAR 2018  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากปรากฏการณ์เทรโบอิเล็กทริก Electric Microgenerator from the Triboelectric Effect
ชื่อนักศึกษา	นางสาวภัทรสุดา วรรณฤมล รหัสนักศึกษา 58051117
	นางสาวสุจินดา โตศิริ รหัสนักศึกษา 58051159
	นางสาวหนึ่งฤทัย เพ็ชรผุดผ่อง รหัสนักศึกษา 58051167
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.พิศาล สุขวิสูตร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก ประธานกรรมการ	อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก
ผศ.ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการ	ทิพวรรณ คล้ายบุญมี
ดร.พิศาล สุขวิสูตร กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	พิศาล สุขวิสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก
ชื่อนักศึกษา	นางสาวภัทรสุดา วรรณฤมล รหัสนักศึกษา 58051117 นางสาวสุจินดา โตศิริ รหัสนักศึกษา 58051159 นางสาวหนึ่งฤทัย เพ็ชรผุดผ่อง รหัสนักศึกษา 58051167
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.พิศาล สุขวิสูตร

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการแปลงพลังงานเชิงกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กโดยอาศัยปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริกและการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กประกอบด้วยอลูมิเนียมพอยล์และชั้นของพอลิเมอร์ที่ติดกับอิเล็กโทรดอลูมิเนียม ชั้นของพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานนี้คือฟิล์มพอลิโพรพิลีนและพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของฟิล์ม ความถี่ในการกด และแรงกระแทก กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $3.36 \mu\text{W}$  ได้จากฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีขนาด  $7 \times 10 \text{ cm}^2$  เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่สร้างจากฟิล์มพอลิโพรพิลีนสามารถให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้มากกว่าฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีน และเมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและแรงกระแทก จะเห็นได้ว่ามีความเป็นเชิงเส้นที่ดีที่สุด ผลการทดสอบนี้ชี้ให้เห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากฟิล์มพอลิโพรพิลีนมีศักยภาพในการใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดแรงกระแทก

คำสำคัญ : เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก พอลิเตตระฟลูออโรเอธิลีน พอลิโพรพิลีน การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Electric Microgenerator from the Triboelectric Effect		
<b>Students</b>	Miss Pattarasuda Wannarumon	Student ID 58051117	
	Miss Sujinda Tosiri	Student ID 58051159	
	Miss Nuengruethai Phetpudpong	Student ID 58051167	
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Applied Physics)		
<b>Department</b>	Physics		
<b>Faculty</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
<b>Academic Year</b>	2018		
<b>Advisor</b>	Dr.Pisan Sukwisute		

### Abstract

This special project is to study the electric microgenerators for mechanical-electrical conversion via the triboelectric effect and electrostatic induction. The microgenerators are composed of an aluminium foil and a dielectric polymer layer attached to an aluminium electrode. The dielectric layers used in this work are polypropylene and polytetrafluoroethylene films. The experimental results show that the values of output voltage and power produced from the triboelectric generator increase with increasing the surface area of film, pressing frequency and impact force. The highest output power of  $3.36 \mu W$  is obtained from the generator mode of the polypropylene film with  $7 \times 10 \text{ cm}^2$ . The polypropylene microgenerator can generate more output voltage than the polytetrafluoroethylene one and presents the best linear relationship between the voltage and impact force. These findings point out that the microgenerator fabricated from the polypropylene film displays potential for sensing the impact force.

Keywords: Triboelectric microgenerator, triboelectric effect, polytetrafluoroethylene, polypropylene, electrostatic induction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ดร. พิศาล สุขวิสูตร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษาเสนอแนะแนวทางในการแก้ปัญหาและตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษนี้ให้สามารถดำเนินการจัดทำโครงการพิเศษนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ศ ทิพวรรณ คล้ายบุญมี อาจารย์สุรชาติ กมลติลภ นายเพชร พงศ์วิสิษฐ์ และ นายวีระพันธ์ ทิพาพงษ์ รวมทั้งพี่ ๆ นักวิทยุทุก ๆ ท่านที่ได้ให้คำแนะนำในส่วนของการทำงานต่าง ๆ และความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และเครื่องมือที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการทำโครงการวิจัยในครั้งนี้จนทำให้งานนี้จึงสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ได้ให้องค์ความรู้ให้คำแนะนำ และให้ความคิดเห็นเป็นอย่างดีเสมอมา ทำให้ผู้วิจัยได้ข้อมูลที่ครบถ้วนในการทำงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดา และคณาจารย์ผู้ประสพวิทยุความรู้ ตลอดจนทุกๆท่านที่ได้ให้กำลังใจ ให้การสนับสนุนด้านปัจจัยและความช่วยเหลือในหลายๆอย่างจนกระทั่งโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ภทรสุดา วรรณถมล  
สุจินดา ไตศิริ  
หนึ่งฤทัย เพ็ชรผุดผ่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ก
Abstract .....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญตาราง .....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>4</b>
2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Electric microgenerator).....	4
2.1.1 ไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric technique).....	4
2.1.2 ไทโรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Electrostatics technique) .....	4
2.1.3 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction technique).....	5
2.1.4 รีเวิร์สอิเล็กโทรเวตติง (Reverse Electrowetting technique) .....	5
2.1.5 แม่เหล็กอุทกพลศาสตร์ (Magnetohydrodynamics technique).....	5
2.2 ปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect).....	5
2.3 ปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electrostatic induction effect).....	6
2.4 กฎอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า .....	6
2.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริก .....	7
2.5.1 ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	7
2.5.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ปรากฏการณ์ ไทรโบอิเล็กทริก.....	8
2.6 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR).....	10
2.7 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM).....	10
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนไวสำหรับกรใชงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3</b> วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	14
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ.....	14
3.2 การดำเนินงานวิจัย .....	15
3.2.1 การประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	15
3.2.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยแรงกดจากฝ่ามือ.....	19
3.2.3 การประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กกับเครื่องกำเนิดการสัน.....	20
3.2.4 การทดสอบการกดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดการสัน.....	22
3.2.5 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดสัญญาณขนาดเล็ก .....	24
3.2.6 การทดสอบหาความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายใต้แรงกระทำที่ ต่างกัน .....	25
3.2.7 การตรวจสอบโครงสร้างฟิล์มพอลิโพรพิลีนและพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน .....	26
3.2.8 การตรวจสอบความขรุขระของฟิล์มพอลิโพรพิลีนและพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน.....	26
<b>บทที่ 4</b> ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	27
4.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเนื่องจากแรงกดฝ่ามือ.....	27
4.2 ผลการกดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยเครื่องกำเนิดการสัน .....	32
4.2.1 สัญญาณไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กดด้วยความถี่ 20 Hz .....	32
4.2.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กดด้วยความถี่ต่าง ๆ.....	34
4.3 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	35
4.4 การตรวจวัดระดับแรงกระทำด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	38
4.4.1 การวัดแรงกระทำด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากฟิล์มพอลิโพรพิลีน.....	38
4.4.2 การวัดแรงกระทำด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโร เอทิลีน .....	39
4.4.3 ความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะเวลาการปล่อยมวล .....	40
4.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	42
4.5.1 โครงสร้างของฟิล์มพอลิโพรพิลีน.....	42
4.5.2 โครงสร้างของฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน.....	44
4.6 ความขรุขระของผิวฟิล์มพอลิโพรพิลีนและพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน .....	45
<b>บทที่ 5</b> สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	47
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง .....	49
ภาคผนวก .....	51
ภาคผนวก ก .....	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเปลี่ยนแรงกดเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยไพโซอิเล็กทริก .....	4
2.2 แผนภาพ Triboelectric Series .....	6
2.3 แสดงปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต .....	6
2.4 แผนผังไดอะแกรมกลไกการแยกการสัมผัส .....	7
2.5 แสดงแผนผังกลไกแบบการเลื่อนสัมผัส .....	8
2.6 การตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อแรงดันที่ใช้ .....	8
2.7 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงขึ้น .....	9
2.8 แสดงองค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope ในแบบ AFM .....	10
2.9 แสดงลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่าง ๆ กัน .....	11
2.10 แสดงภาพที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเข็มปลายแหลมไปบนผิวงานในเทคนิคแบบ Contact mode (ภาพซ้าย) Non-Contact mode (ภาพกลาง) .....	12
3.1 ลักษณะแผ่นอะคริลิกทั้ง 3 ขนาดที่เจาะรูแล้ว .....	15
3.2 แผ่นอะคริลิกทั้ง 3 ขนาด ที่ทำการติดอลูมิเนียมฟอยล์ .....	16
3.3 ไม้อัดความหนา 10 mm ใช้สำหรับวางแผ่นฟิล์ม .....	16
3.4 แผ่นไม้หุ้มอลูมิเนียมฟอยล์ที่ติดบนแผ่นอะคริลิก .....	17
3.5 สายไฟที่บัดกรีติดบนอลูมิเนียมฟอยล์ a. บริเวณอะคริลิกแผ่นบนหุ้มด้วยอลูมิเนียมและ b. บริเวณแผ่นไม้อัดหุ้มอลูมิเนียมฟอยล์ .....	17
3.6 การสวมสปริงที่นิ้วที่ติดบนแผ่นอะคริลิก .....	18
3.7 แผ่นฟิล์มพอลิโพรพิลีน .....	18
3.8 a. แผ่นฟิล์มพอลิโพรพิลีนบนอลูมิเนียมที่หุ้มฐานไม้ b. การประกบอะคริลิกแผ่นบนกับ ฐานไม้ และ c. ชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก .....	19
3.9 วัดสัญญาณทางไฟฟ้าโดยการต่อเครื่องออสซิลอสโคป .....	19
3.10 วงจรการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยการต่อโอซีไดโอด .....	20
3.11 a. บานานาแจ๊ค b. ไม้อัดเจาะรู และ c. บานานาแจ๊คยึดติดกับไม้อัดเจาะรู .....	21
3.12 เหล็กฉากใช้เป็นส่วนจับยึดอะคริลิกแผ่นล่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	21
3.13 a. การติดบานานาแจ๊คที่สวมไม้อัดเจาะรูกับอะคริลิกแผ่นบน และ b. การยึดอะคริลิกแผ่น ล่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเหล็กฉาก .....	22
3.14 ชุดทดลองแสดงการต่อเครื่องกำเนิดการสั่นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไพโรอิเล็กทริก .....	22
3.15 แผนผังการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไพโรอิเล็กทริก .....	23
3.16 ชุดทดลองวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไพโรอิเล็กทริก .....	23
3.17 แผนผังการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไพโรอิเล็กทริก .....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 a. ชุดทดลองสำหรับวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็ก ภายใต้แรงกระแทก และ b. ตัวอย่างความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า ขนาดเล็กเมื่อมวลตกกระทบ .....	26
4.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเมื่อทำการกลับขั้วไฟฟ้า .....	27
4.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีน .....	28
4.3 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีน .....	29
4.4 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีน .....	29
4.5 ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่สัมพันธ์กับ .....	31
4.6 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีน .....	32
4.7 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีน .....	32
4.8 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีน .....	33
4.9 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของพื้นที่ผิวฟิล์มพอลิโพรพิลีน .....	34
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความถี่การกวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	35
4.11 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กวดด้วยความถี่ 5 Hz .....	36
4.12 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กวดด้วยความถี่ 10 Hz .....	36
4.13 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กวดด้วยความถี่ 15 Hz .....	37
4.14 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กวดด้วยความถี่ 20 Hz .....	37
4.15 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กวดด้วยความถี่ 25 Hz .....	38
4.16 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มพอลิโพรพิลีนเป็นฟังก์ชันของระยะปล่อยมวล .....	39
4.17 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนเป็นฟังก์ชันของระยะปล่อยมวล .....	40
4.18 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มที่ขนาดพื้นที่ $3.5 \times 5 \text{ cm}^2$ .....	41
4.19 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มที่ขนาดพื้นที่ $5 \times 5.25 \text{ cm}^2$ .....	41
4.20 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มที่ขนาดพื้นที่ $5 \times 7 \text{ cm}^2$ .....	42
4.21 โครงสร้างทางเคมีของฟิล์มพอลิโพรพิลีน .....	43
4.22 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของพอลิโพรพิลีน .....	44
4.23 โครงสร้างทางเคมีของฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน .....	44
4.24 ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR ของฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน .....	45
4.25 ภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิโพรพิลีน a. ก่อนทดลอง และ b. หลังการทดลอง .....	46
4.26 ภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน a. ก่อนทดลอง .....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
3.1 เงื่อนไขการทดลองสำหรับวัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	25
4.1 ความขรุขระของพื้นผิวพอลิโพรพิลีนและพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน.....	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เทคโนโลยีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของโลกยุคปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะพัฒนาให้มีขนาดเล็ก พกพาได้สะดวก และสามารถใช้ประโยชน์ได้ การพัฒนาทางอิเล็กทรอนิกส์และเทคโนโลยีด้านการเก็บพลังงานที่ออกแบบให้ แบตเตอรี่มีขนาดลดลงและความจุพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กกว่าขนาดของโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันหลายร้อยเท่าในอนาคต อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กเหล่านี้สามารถทำงานได้โดยใช้พลังงานที่น้อยมาก ทำให้การแปลงพลังงานจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบเพื่อจ่ายให้กับอุปกรณ์เหล่านี้ทำงานนั้นมีความเป็นไปได้สูง [1] ดังนั้นอุปกรณ์จะสามารถทำงานได้นานขึ้นและลดการพึ่งพาแบตเตอรี่ ในทศวรรษข้างหน้าการประดิษฐ์และพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะมีความเกี่ยวข้องกับระบบเซ็นเซอร์เป็นอย่างมาก ระบบนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อการนำทาง การควบคุมไร้สาย การรักษาความปลอดภัย การตรวจจับการเคลื่อนไหว สารเคมี สารชีวภาพ สิ่งแวดล้อมและแก๊สต่าง ๆ หรือเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพาและสวมใส่ได้ ถึงแม้ว่าการใช้พลังงานของอุปกรณ์เหล่านี้แต่ละตัวจะมีค่าน้อย แต่ด้วยอุปกรณ์เหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นจำนวนมากจึงทำให้การใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานเพียงแหล่งเดียวนั้นแทบจะเป็นไปไม่ได้เมื่ออุปกรณ์ต้องมีการทำงานอย่างต่อเนื่อง เพราะในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยเซ็นเซอร์นับพันนับหมื่นตัว ผู้ดูแลรักษาจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของเซ็นเซอร์ที่จะเปลี่ยนแบตเตอรี่และต้องตรวจสอบระดับพลังงานที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ด้วย ดังนั้นการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy harvesting) จากสิ่งแวดล้อมมาจ่ายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้จึงเป็นหนทางที่ยั่งยืน ลดการบำรุงรักษา และได้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถผลิตพลังงานได้เอง (self-power electronics)

การเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กมีด้วยกันหลายเทคนิค การเลือกใช้เทคนิคใดนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบพลังงานในสิ่งแวดล้อมที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้น ๆ ทำงานอยู่อีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการเลือกใช้เทคนิคการเก็บเกี่ยวพลังงานก็คือเรื่องของความมีเสถียรภาพของแหล่งพลังงานในสิ่งแวดล้อม ในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ระดับค่าพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้จะขึ้นอยู่กับช่วงเวลากลางวันและกลางคืนซึ่งระดับพลังงานของ 2 ช่วงนี้จะต่างกันมาก ๆ ดังนั้นการเลือกใช้เทคนิคเพื่อแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจึงเป็นตัวเลือกหนึ่งที่น่าสนใจที่จะช่วยเสริมความมีเสถียรภาพของแหล่งพลังงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พลังงานกลที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมและธรรมชาติ เช่น การสั่นเครื่องจักร การเคลื่อนไหวของมนุษย์และสัตว์ พลังงานลม และพลังงานคลื่น เป็นต้น

เทคโนโลยีการแปลงพลังงานกลเป็นไฟฟ้าส่วนใหญ่ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาจะเป็นการมุ่งเป้าไปที่การใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) ซึ่งสร้างกระแสไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันภายในวัสดุเมื่อได้รับความเค้นภายนอก วัสดุไพโซอิเล็กทริกส่วนใหญ่ที่สามารถกำเนิดพลังงานไฟฟ้าที่สูงจะเป็นสารที่มีสารตะกั่วเป็นส่วนประกอบซึ่งไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และในอีกแง่หนึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุประเภท เซรามิกซึ่งมีความแข็งแต่เปราะหักง่ายมีความยืดหยุ่นน้อย ดังนั้นจึงได้มีการประดิษฐ์วัสดุประกอบ (composite) ระหว่างเซรามิกและพอลิ

เมอร์ขึ้นแต่ก็ส่งผลให้ความสามารถในการเก็บเกี่ยวพลังงานลดลงเช่นกัน เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีการเสนอตัวเก็บเกี่ยวพลังงานแบบใหม่ที่อาศัยปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริกซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุสามารถเกิดประจุไฟฟ้าขึ้นที่ผิวเมื่อมีการสัมผัสหรือเสียดสีกับวัสดุต่างชนิด ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตขึ้นในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ตัวเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าชนิดนี้มีความสามารถที่จะผลิตกระแสไฟฟ้าป้อนให้กับแอลอีดีที่มีสีเขียวและสีแดง จำนวน 600 ดวงสว่างได้ [2] วัสดุที่สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริกนั้นสามารถหาได้ทั่วไปตามท้องตลาด มีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก อีกทั้งง่ายต่อการศึกษาและวิจัย ดังนั้นโครงการนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาวัสดุที่มีคุณสมบัติตามหลักของโทรโบอิเล็กทริกซีรี่ส์ที่เราสามารถหาได้ง่ายในท้องตลาดเพื่อนำมาสร้างเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบโทรโบอิเล็กทริกโดยการแปลงพลังงานกลซึ่งได้มาจากการสัมผัสเสียดสีกันของพื้นผิววัสดุหรือการเพิ่มความเค้นให้กับพื้นผิวไปเป็นพลังงานไฟฟ้า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากการแปลงพลังงานกลโดยใช้ปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect)
- 2) ศึกษาเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบโทรโบอิเล็กทริกที่ผลิตจากแผ่นฟิล์มพอลิโพรพิลีน (Polypropylene), ฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene) หรือเทพลอน
- 3) ออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene) หรือเทพลอน
- 4) ศึกษาความเป็นไปได้ในการวัดระดับแรงกระแทกด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กระหว่างฟิล์มพอลิโพรพิลีนกับฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีโทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric method) โดยใช้แผ่นฟิล์มพอลิโพรพิลีน (Polypropylene film)
- 2) ทดสอบหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีโทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric method)
- 3) ทดสอบประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างขึ้น
- 4) ตรวจสอบระดับแรงกระแทกด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากแผ่นฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน
- 5) วิเคราะห์หาโครงสร้างของฟิล์มด้วยเทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) และตรวจดูพื้นผิวของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope) หรือ AFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม	ระยะเวลา									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
สืบค้นข้อมูลและจัดหาอุปกรณ์										
สร้างเครื่องกำเนิด Triboelectric method										
ทดสอบหาความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไตรโบอิเล็กทริก										
ศึกษาวิเคราะห์ผลและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้า										
สรุปผลและเขียนรายงาน										

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้รับความรู้ในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริก
- 2) ได้ทราบปัจจัยที่เหมาะสมในการประดิษฐ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไตรโบอิเล็กทริก
- 3) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กได้
- 4) ได้ทราบถึงขนาดของพื้นที่ฟิล์มที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นเซนเซอร์ในการวัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

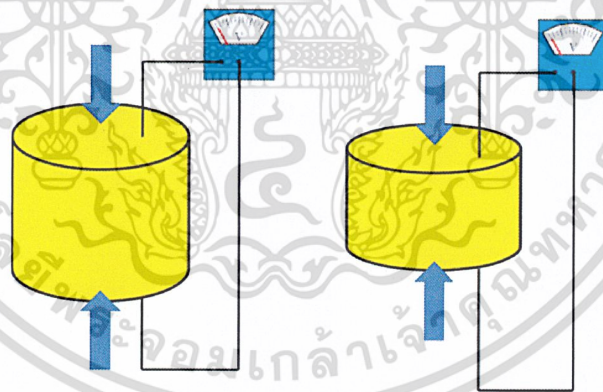
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Electric microgenerator)

ตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยหลักการแปลงพลังงานที่เหลือใช้ในสิ่งแวดล้อมมาเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานได้สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กตัวอย่างเช่นกัน การก้าวเท้าของมนุษย์เป็นกิจกรรมหนึ่งซึ่งใช้และให้พลังงานมาก เมื่อเทียบกับกิจกรรมในการใช้อวัยวะอื่นๆ ของร่างกาย ในปัจจุบัน การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการก้าวเท้าจะเปลี่ยนพลังงานขณะการลงเท้าเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการแปลงพลังงานสามารถสร้างขึ้นด้วยหลายๆเทคนิคดังต่อไปนี้ [3]

##### 2.1.1 ไพโซโซอิเล็กทริก (Piezoelectric technique)

เมื่อวัสดุซึ่งมีคุณสมบัติไพโซโซอิเล็กทริกถูกทำให้เปลี่ยนรูปร่างภายนอกด้วยการกดหรือการดึง โครงสร้างภายในของวัสดุ เช่น ผลึกหรือโมเลกุลซึ่งมีขั้วไฟฟ้าบวกและลบก็จะเปลี่ยนรูปร่างเช่นกัน ส่งผลให้สมดุลของขั้วไฟฟ้าในวัสดุเปลี่ยนแปลง วัสดุจึงผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ ไพโซโซอิเล็กทริก (piezoelectric) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงกลต่างๆ เช่น แรงดัน ความเร่ง การสั่น แรงเครียด หรือแรงกระทำอื่นๆ โดยเปลี่ยนพลังงานกลต่างๆเหล่านี้ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ในทางกลับกันเมื่อให้พลังงานไฟฟ้าแก่วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นไพโซโซอิเล็กทริกวัสดุนั้นก็จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้เช่นกัน



(a) สภาวะปกติที่ไม่มีแรงกระทำ (b) สภาวะเมื่อมีแรงมากระทำ  
รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแรงกดเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยไพโซโซอิเล็กทริก

##### 2.1.2 ไทโรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Electrostatics technique)

เทคนิคนี้อาศัยความไม่สมดุลของประจุไฟฟ้าภายในหรือบนพื้นผิวของวัสดุหนึ่ง ประจุยังคงอยู่กับที่จนกระทั่งมันสามารถเคลื่อนที่โดยอาศัยการไหลของอิเล็กตรอน หรือมีการปลดปล่อยประจุ (electrical discharge) ไฟฟ้าสถิตเป็นปรากฏการณ์ที่มีปริมาณประจุไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบบนผิววัสดุมีค่าไม่เท่ากันทำให้เกิดแรงดึงดูดเมื่อวัตถุทั้ง 2 ชั้นมีประจุต่างชนิดกัน หรือเกิดแรงผลักรันเมื่อวัสดุทั้ง 2 ชั้นมีประจุชนิดเดียวกันเมื่อนำผิวสัมผัสของวัสดุ 2 ชั้นมาขัดสีกันพลังงานที่เกิดจากการขัดสีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันหรือเสียดสีกันจะทำให้ประจุไฟฟ้าบนผิววัสดุเกิดการแลกเปลี่ยนประจุซึ่งกันและกันแล้วทำให้วัสดุ นั้นสามารถดูดวัตถุขนาดเล็กๆ ได้

### 2.1.3 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction technique)

เทคนิคนี้อาศัยการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กผ่านพื้นผิวของวงจรรปิด (เช่น ขดลวดตัวนำ) ก็ จะเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เกิดขึ้นและผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา เมื่อ กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสนามแม่เหล็กจะมีผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตัวนำในสนามแม่เหล็กซึ่งจะเกิด แรงเคลื่อนไฟฟ้าในตัวนำนั้น เรียกว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะเกิดขึ้นเสมอในตัวนำที่วางอยู่ ในสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง

### 2.1.4 รีเวิร์สอิเล็กโทรเวตติง (Reverse Electrowetting technique)

เป็นกระบวนการย้อนกลับของอิเล็กโทรเวตติง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหยด ของเหลว ซึ่งมีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้าบนพื้นผิวของฉนวน (dielectric) ด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าในรีเวิร์ สอิเล็กโทรเวตติงเมื่อหยดของเหลวซึ่งมีประจุไฟฟ้าอยู่ถูกเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้วยพลังงานกล เช่น การ สั่นหรือการไหลของเหลวของเหลวนี้ก็จะขับประจุไฟฟ้าให้ไหลออกมากลายเป็นกระแสไฟฟ้าเพื่อลดประจุ และพลังงานของระบบให้อยู่ในสถานะต่ำสุด

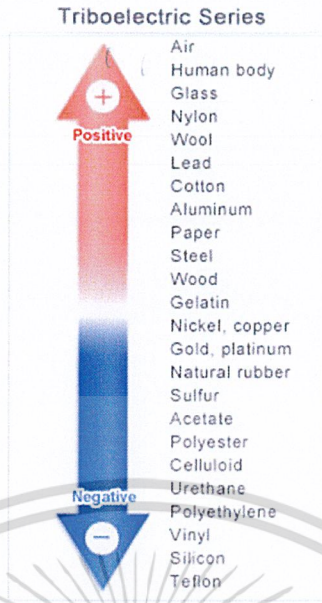
### 2.1.5 แม่เหล็กอุทกพลศาสตร์ (Magnetohydrodynamics technique)

มีหลักการคล้ายการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า แต่จะใช้ของไหลซึ่งมีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้าไหล ผ่านสนามแม่เหล็ก

## 2.2 ปปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect)

คือปรากฏการณ์ที่เกิดจากการถ่ายเทของประจุอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุทั้งสองเมื่อเกิดการ สัมผัสหรือเสียดสีกัน โดยปกติอะตอมของวัสดุที่เป็นกลางทางไฟฟ้า จะประกอบด้วยโปรตอนที่อยู่ใน นิวเคลียส ซึ่งจะมีจำนวนเท่ากับอิเล็กตรอนที่โคจรรอบอยู่รอบ ๆ นิวเคลียสนั้น จำนวนของโปรตอนที่ทำให้ ประจุเป็นบวกจะมีจำนวนเท่ากับอิเล็กตรอนที่ให้ประจุเป็นลบ ทำให้อะตอมนั้นมีประจุเป็นกลาง เมื่อ วัสดุทั้งสองสัมผัสกันอิเล็กตรอนจะถูกถ่ายเทจากผิวสัมผัสของวัสดุหนึ่งไปยังอีกวัสดุหนึ่ง เมื่อวัสดุทั้ง สองถูกแยกออกจากกัน วัสดุที่ไม่สมดุลโดยมีอิเล็กตรอนขาดหายไป จะแสดงคุณสมบัติเป็นบวก และ วัสดุที่ไม่สมดุลโดยที่ได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น จะแสดงคุณสมบัติเป็นลบ การที่วัสดุใดจะแสดง คุณสมบัติเป็นบวกหรือลบ การให้หรือรับอิเล็กตรอนของวัสดุจะขึ้นอยู่กับความเป็นขั้วของวัสดุที่ จัดเรียงอยู่ในลำดับ Triboelectric Series แสดงดังรูป.2 2 โดยเมื่อนำวัสดุดังกล่าวมาสัมผัสกัน วัสดุ ที่อยู่ด้านบนของตารางจะให้คุณสมบัติเป็นบวกจะรับประจุอิเล็กตรอนส่วนวัสดุที่อยู่ด้านล่างของ ตารางจะมีคุณสมบัติเป็นลบจะให้ประจุอิเล็กตรอน ตัวอย่างเช่น เมื่อนำ Polydimethylsiloxane (PDMS) มาสัมผัสกับแผ่นทอง (Gold) ที่อยู่ลำดับต่ำกว่า (PDMS) จะแสดงคุณสมบัติเป็นประจุบวก และทองจะแสดงคุณสมบัติเป็นประจุลบ [4]

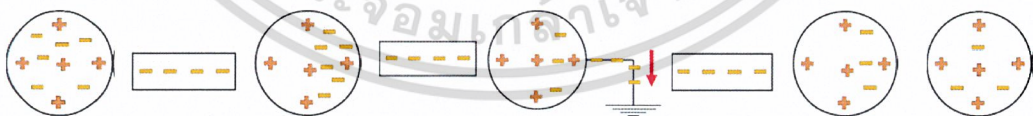
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แผนภาพ Trieboelectric Series[4]

### 2.3 ปฏิกิริยาการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electrostatic induction effect)

คือการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตเป็นการสร้างกระแสไฟฟ้าสถิตในวัสดุชนิด 2 ที่มีความเป็นขั้วทางไฟฟ้า โดยที่วัสดุหนึ่งจะมีตัวหนึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าและอีกหนึ่งตัวเป็นฉนวนไฟฟ้าเมื่อนำมาวางใกล้ ๆ กันทำให้เกิดแรงระหว่างประจุ นั่นคือเมื่อเรานำวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบอยู่ภายในตัวเองมาเข้าใกล้กับวัสดุที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าซึ่งจะมีเพียงแค่ประจุลบในตัวเองเท่านั้น ประจุลบจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าจะผลักประจุลบที่อยู่ในวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าทำให้ประจุลบเคลื่อนที่ไปอยู่ยังอีกด้านของตัวนำไฟฟ้าเรียกแรงนี้ว่าแรงผลักรังสีทำให้พื้นผิวที่อยู่ใกล้กับวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้ามีประจุลบน้อยลงและมีประจุบวกมากกว่าขึ้นทำให้พื้นผิวของวัสดุนำไฟฟ้าด้านที่อยู่ใกล้วัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้ามีประจุต่างชนิดกันเกิดเป็นแรงดึงดูดกันเรียกแรงระหว่างประจุว่าแรงดึงดูด [5] แสดงดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต

### 2.4 กฎอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า

การนำวัตถุมาถูกันแล้วทำให้วัตถุมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าการถูกันของวัตถุทั้ง 2 ชนิดจะเกิดการถ่ายโอนประจุให้กับอิเล็กตรอนของอะตอมตรงบริเวณที่ถูกันทำให้พลังงานของอิเล็กตรอนสูงขึ้นจนสามารถหลุดเป็นอิสระออกจากอะตอมของวัตถุหนึ่งไปสู่อะตอมของอีกวัตถุหนึ่ง เอกสารนี้ทำให้อะตอมของวัตถุที่รับอิเล็กตรอนมีประจุลบเพิ่มขึ้น ส่วนอะตอมของวัตถุที่เสียอิเล็กตรอนไปจะมีประจุบวกเพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าการทำให้วัตถุมีประจุไฟฟ้าไม่ใช่เป็นการสร้างประจุขึ้นใหม่แต่เป็นเพียง

การย้ายประจุจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง [6] ดังสมการที่ 2.4.1 โดยที่ผลรวมของจำนวนประจุทั้งหมดในระบบที่พิจารณาคงเท่าเดิมเสมอเรียกกฎนี้ว่า “กฎการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า”

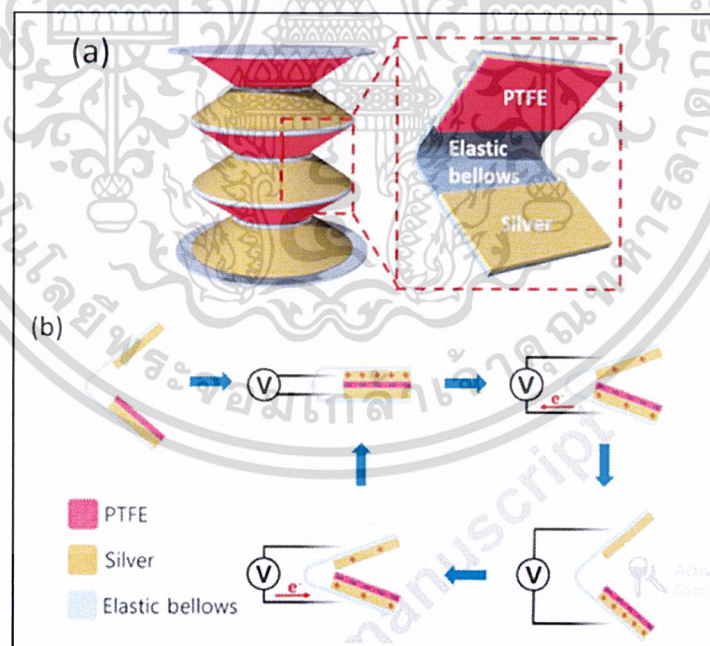
$$\text{ผลรวมประจุก่อนแตะ} = \text{ผลรวมประจุหลังแตะ} \quad (2.4.1)$$

## 2.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโทรโบอิเล็กทริก

### 2.5.1 ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

#### 2.5.1.1. กลไกการแยกการสัมผัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เรียงซ้อนกันในแนวตั้งประกอบด้วยอิเล็กโทรดด้านนอกสองอันและเยื่อแบ่งชั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อการเก็บเกี่ยวพลังงานแบบสองทิศทาง เพื่อป้องกันการเกาะตัวของขี้ไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนมีการสลักโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโคร (microstructure) แบบพีระมิดไว้บนขี้ไฟฟ้าเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและทำให้ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้ามากขึ้น กำลังไฟฟ้าที่ออกก็จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนกับจำนวนของชั้น (ชั้นๆที่เป็นลูกกลม) ลูกกลมมีความยืดหยุ่นตามธรรมชาติเมื่อกดจะมีรูปร่างเปลี่ยนไปแต่เมื่อไม่มีแรงกดจะกลับสู่รูปร่างเดิม อุปกรณ์ทำงานบนกลไกการแยกหน้าสัมผัสตามแนวตั้งและสร้างเอาต์พุตด้วยแรงดันจากภายนอก เมื่อมีการใช้แรงดันภายนอกอิเล็กโทรดจะสัมผัสกันและมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเกิดขึ้น [7] เช่น กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นซึ่งแสดงโดยแผนผังไดอะแกรมในรูปที่ 2.4

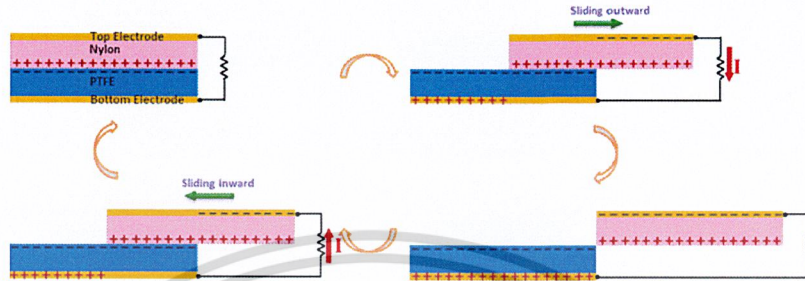


รูปที่ 2.4 แผนผังไดอะแกรมกลไกการแยกการสัมผัส[7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1.2. กลไกการเลื่อนแบบสัมผัส

กลไกการเลื่อนของวัสดุที่แตกต่างกันสองชนิดจะเคลื่อนที่ด้วยความการสไลด์ซึ่งกันและกัน เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุโดยการเสียดสีแบบเลื่อนเป็นการเปลี่ยนแปลงระยะของพื้นที่สัมผัสระหว่างสองพื้นผิวทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมกลไกการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการเลื่อนเกิดขึ้นตามแผนผังในรูปที่ 2.5

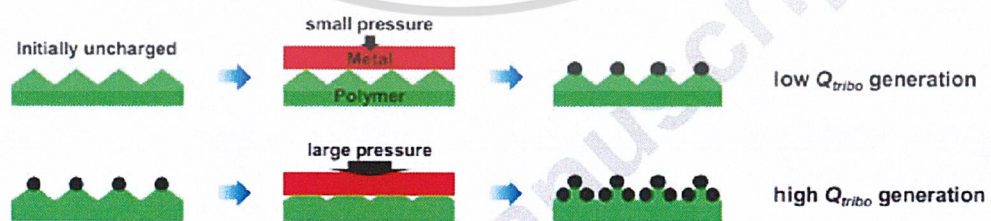


รูปที่ 2.5 แสดงแผนผังกลไกแบบการเลื่อนสัมผัส[7]

## 2.5.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริก

### 2.5.2.1. ผลกระทบของแรงปะทะ

การเปลี่ยนแปลงของแรงสัมผัสมีผลต่อสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อแรงสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดหรือวัสดุขั้วลงพื้นที่สัมผัสกันขั้วลงจึงเกิดความหนาแน่นประจุโทรโบอิเล็กทริกน้อยลง เมื่อแรงสัมผัสมีมากขึ้นพื้นที่สัมผัสขนาดใหญ่ขึ้นความหนาแน่นประจุของโทรโบอิเล็กทริกก็มีมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.6 ส่งผลถึงเมื่อความดันน้อยถูกนำมาใช้ระหว่างวัสดุโทรโบอิเล็กทริกความหนาแน่นประจุที่น้อยกว่านั้นเกิดขึ้นเนื่องจากพื้นที่สัมผัสน้อยกว่าในขณะที่สองเนื่องจากความดันขนาดใหญ่ตามขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสที่ใหญ่ขึ้นส่งผลให้เกิดประจุไฟฟ้ามากขึ้น ความเครียดในวัสดุสามารถส่งผลกระทบต่ออัตราการถ่ายโอนประจุระหว่างวัสดุโทรโบอิเล็กทริกได้อย่างมาก ความเครียดส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของพื้นผิวที่มีผลต่อการถ่ายโอนประจุ ในกรณีของวัสดุยืดหยุ่นเมื่อพื้นผิวของวัสดุสัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุอื่น ๆ ที่เพิ่มขึ้นพื้นที่ติดต่อเพิ่มการถ่ายโอนประจุไฟฟ้า แรงที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการสัมผัสทำให้เกิดการย้อนกลับของทิศทางการถ่ายโอนประจุและทำให้เกิดแรงดึงของวัสดุ [7]

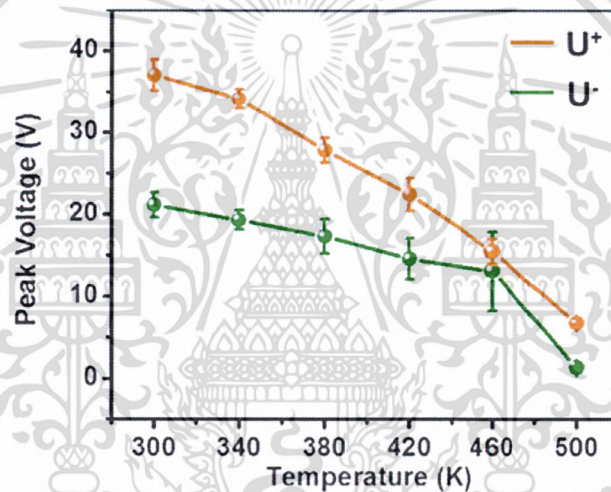


รูปที่ 2.6 การตอบสนองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อแรงดันที่ใช้[7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2.2. ผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้น

ผลของความชื้นและความดันมีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสามารถปรับให้เหมาะสมการสร้างประจุระหว่างวัสดุของโทรโบอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นมากกว่า 20% เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ลดลงและเมื่อความดันบรรยากาศลดลงถึง 50 torr ความชื้นสูงทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบโทรโบอิเล็กทริกลดลงโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโทรโบอิเล็กทริกมีประสิทธิภาพที่ความดันต่ำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบโทรโบอิเล็กทริกที่ต้านทานความชื้นสามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยการเคลื่อนไหวทางชีวกลศาสตร์ของมนุษย์ผลิตพลังงานสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่สวมใส่ได้ซึ่งทำงานภายใต้ความชื้นสูง ชั้นของพื้นผิววัสดุได้รับการปรับเปลี่ยนทางเคมีเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของประจุที่ผิว วัสดุที่ถูกเลือกนั้นมีความทนทานต่อน้ำสูง (ไม่ยอมแพ้) เพื่อให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้ภายใต้ความชื้นที่หลากหลายด้วยความสามารถในการผลิตเอาต์พุตเดียวกัน นักวิจัยบางคนได้ศึกษาผลของประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบโทรโบอิเล็กทริกในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง คุณสมบัติของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ



รูปที่ 2.7 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงขึ้น[7]

กราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแรงดันไฟขาออกจะลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ยังคงแสดงให้เห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบโทรโบอิเล็กทริกสามารถผลิตเอาต์พุตในอุณหภูมิที่หลากหลายซึ่ง  $U^+$  หมายถึงแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เป็นบวกค่าเฉลี่ยและ  $U^-$  หมายถึงแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยเชิงลบ

### 2.5.2.3. พารามิเตอร์อื่น ๆ

การออกแบบจลนศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบโทรโบอิเล็กทริกสามารถเตรียมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานโดย กลไกการเหวี่ยงของเกียร์รอกไฟถูกใช้ในการตั้งค่าเพื่อให้ได้ความถี่ที่สูงซึ่งได้ผลว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นส่งผลให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับที่ความถี่ต่ำ.

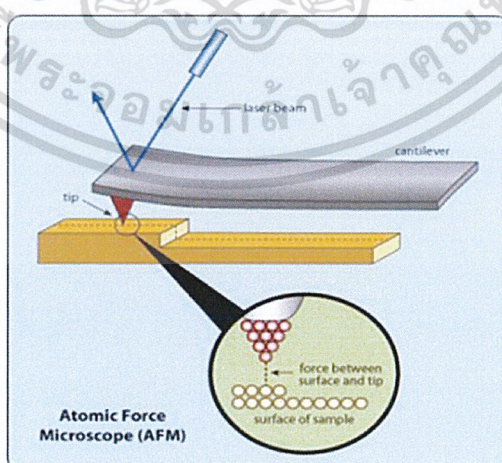
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR)

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 ซึ่งเทคนิคนี้นิยมใช้วิเคราะห์สารอินทรีย์ได้ดีกับสารตัวอย่างที่มีความบริสุทธิ์สูงทั้งในรูปของของแข็ง ของเหลวและก๊าซ เทคนิคนี้เป็นการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงเมื่อแสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ผ่านสารอินทรีย์พันธะเคมีในโมเลกุลของสารจะดูดกลืนพลังงานที่ค่าความยาวคลื่นค่าหนึ่งจากนั้นข้อมูลจะถูกประมวลโดยคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้สมการเชิงอนุพันธ์ที่เรียกว่าฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier Transform) ซึ่งจะคำนวณพลังงานของแต่ละความยาวคลื่นแล้วแปลงผลออกมาเป็นสเปกตรัม [8]

## 2.7 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM)

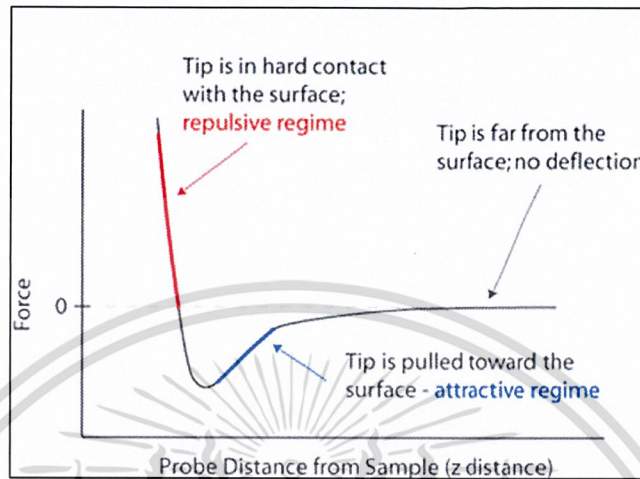
AFM เป็นเทคนิคหนึ่งในกลุ่ม Scanning Probe Microscopy (SPM) ซึ่งเป็นกลุ่มเทคนิคที่สามารถใช้ในการศึกษาสภาพพื้นผิวของวัสดุประเภทต่างๆ ได้หลักการพื้นฐานคือการใช้เข็มตรวจวัดขนาดเล็กที่ทำจากซิลิคอนไนไตรด์ (silicon nitride,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) เคลื่อนที่กราด (scan) ไปทั่วบริเวณต่างๆ ของผิววัสดุโดยมีตัวไพโซอิเล็กทริกสแกนเนอร์ (piezoelectric scanner) เป็นตัวควบคุมระยะห่างของตัวอย่างกับปลายเข็ม ซึ่งสภาพผิวของวัสดุที่แตกต่างกันไปจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกับเข็มตรวจวัดที่แตกต่างกันไป โดยตัวคานที่มีเข็มเกาะติดอยู่จะมีการโค้งงอ (bending) เกิดขึ้นซึ่งปริมาณการโค้งงอนี้สามารถตรวจวัดได้โดยใช้โฟโตดีเทคเตอร์ (photodetector) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงองค์ประกอบหลักของเครื่องมือ Scanning Probe Microscope ในแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา [9] เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในเทคนิคแบบ AFM จะกล่าวถึงสิ่งที่ทำให้คานที่มีเข็มเกาะอยู่ เกิดการโค้งงอขึ้นก็คือ แรงกระทำระหว่างอะตอมซึ่งอาจจะเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักร ก็ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเข็มปลายแหลม (Tip) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของแรงกระทำระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นในระยะห่างระหว่างวัตถุต่างๆ กัน [9]

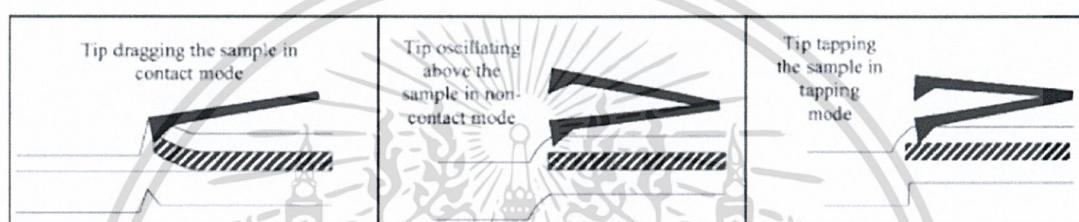
ดังนั้น เทคนิค AFM จึงสามารถที่จะใช้ทำการศึกษได้หลายวิธีอย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นการใช้ AFM ในวิธีใดแรงกระทำที่เกิดขึ้นก็จะมีเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพรูปทรง Topography ของพื้นผิวงานและทำให้ได้ภาพที่สอดคล้องกับสภาพผิวของวัสดุ [9] เช่นกันรูปแบบในการศึกษา AFM จะสามารถศึกษาได้ออย่างน้อย 3 รูปแบบ (Mode) ที่สำคัญ คือ

1) Contact mode เป็นการวัดรูปทรงของสภาพผิวชิ้นงานโดยการขยับให้เข็มโกล (Slide) ไปบนผิวงานซึ่งจะทำให้มีแรงผลักรเกิดขึ้นเนื่องจากว่าเข็มกับผิวงานจะอยู่ใกล้กันมาก(ประมาณ 1-2 Angstrom) ซึ่งแรงผลักรดังกล่าวนี้ จะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงของผิวงาน ซึ่งจะทำให้มีการโค้งงอ (Deflection) ของคาน (Cantilever) ที่มีเข็มยึดเกาะอยู่ที่ปลายโดยมีขนาดของการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องเป็นไปตามลักษณะรูปทรงของผิวงานอย่างไรก็ตามเทคนิคแบบ Contact Mode นี้จะมีข้อเสียคือในการที่จะลากให้เข็มตรวจวัดเคลื่อนที่โกลข้ามไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน อาจจะทำให้เกิดตำหนิ หรือสภาพพื้นผิววัสดุที่ต่างไปจากสภาพเดิมและความเสียหายเกิดขึ้นแก่ผิวงาน

2) Non-Contact mode เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคแบบ Non-Contact mode ขึ้นมาโดยในที่นี้ตัวเข็มปลายแหลมจะถูกยกขึ้นมาให้มีระยะห่างเหนือผิวงานสูงมากขึ้นคือประมาณ 10-100 Angstrom จึงไม่มีปัญหาเรื่องการทำลายโครงสร้างผิวงานโดยในกรณีนี้แรงกระทำระหว่างตัวคานที่มีเข็มปลายแหลมยึดเกาะอยู่กับผิวงานจะเป็นลักษณะแรงดึงดูดซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงของสภาพผิวงานอย่างไรก็ตามวิธีนี้จะมีข้อจำกัดที่เกี่ยวกับความละเอียดของภาพที่เกิดขึ้นนั่นคือแรงดึงดูดประเภท Van der Waals ที่เกิดขึ้นระหว่าง tip กับ surface ในกรณีนี้จะเป็นแรงที่อ่อนกว่าเมื่อเทียบกับแรงผลักรที่

เกิดขึ้นในกรณีของ Contact Mode (ปกติอยู่ที่ประมาณ 10-12 N) ดังนั้นสัญญาณการเปลี่ยนแปลงจึงอาจจะไว (Sensitive) ต่อสิ่งแปลกปลอมที่อยู่บนผิวงานอย่างเช่น หยดน้ำที่เกาะอยู่บนผิว

- 3) Tapping Mode เป็นเทคนิคที่รวมเอาลักษณะของการวัดทั้งในแบบของ Contact mode และ Non- Contact mode เข้าด้วยกัน กล่าวคือ ยังคงให้มีการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับผิวงานในระยะที่ใกล้กันมาก เหมือนกับกรณีของ Contact Mode เพื่อให้เกิดภาพที่ชัดเจนในขณะเดียวกันก็ยังมี การสั่นหรือขยับเข้มนปลายแหลมให้เคลื่อนที่ขึ้นลงไปพร้อม ๆ กับการเคลื่อนที่สแกนไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน ดังนั้นจึงเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการลากไกล เข้มนปลายแหลมซึ่งจะทำให้เกิดการทำลายสภาพของผิวงานได้ ดังที่เคยเป็นปัญหาใน Contact Mode



รูปที่ 2.10 แสดงภาพที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเข้มนปลายแหลมไปบนผิวงานในเทคนิคแบบ Contact mode (ภาพซ้าย) Non-Contact mode (ภาพกลาง) และ Tapping mode (ภาพขวา)

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการเก็บเกี่ยวพลังงานขนาดใหญ่ด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยมุ่งไปที่งานด้านอนุภาคนาโน สำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยการผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริก งานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริกที่สร้างจากแผ่นอะคริลิกชนิดโพลีเมททิวเมทาคริลิต (PMMA), โพลีดีเมททิวซิลิโอสแกน (PDMS) และโค้ดทองคำ อนุภาคนาโนลงบนแผ่นอะคริลิกชนิด PDMS เพื่อศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการสัมผัสหรือเสียดสีกันของวัสดุที่มีคุณสมบัติทางชีวไฟฟ้าที่ต่างกันตามหลักของ Triboelectric Series ในงานวิจัยนี้วัสดุที่ใช้คือทองและ PDMS โดยใช้แผ่นอะคริลิกที่มีขนาด 3x2 นิ้ว ทำการวัดกระแสไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ซึ่งกระแสที่วัดได้มีค่ามากถึง 2 mA กำลังไฟฟ้าได้มากถึง 1.2 W มีค่ากำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ได้มากถึง 313 W/cm<sup>2</sup> กระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริกชนิดนี้สามารถทำให้หลอดไฟแอลอีดีสีแดงและสีเขียวที่มีการต่อกันแบบอนุกรมติดมากได้สุดถึง 600 ดวง [2]

จากการเก็บเกี่ยวพลังงานที่มีความถี่ต่ำของพื้นรองเท้าที่ได้จากธรรมชาติของการเดินด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริก งานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวมใส่ได้ สำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยไทรโบอิเล็กทริก จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือทดสอบวัสดุที่ใช้ในการทำพื้นรองเท้าก็ทำวัสดุที่ทำพื้น สำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยไทรโบอิเล็กทริก จากงานวิจัยนี้ไม่ใช่ชีวไฟฟ้า ไม่ว่าจะแต่ใช้ร่างกายมนุษย์และพื้นทำหน้าที่เป็นชีวไฟฟ้าแทน โดยส่วนประกอบของการทดลองมีร่างกาย

มนุษย์หรือเท้า พื้นรองรองเท้า และพื้น พื้นรองรองเท้ากับพื้นทำมาจากวัสดุต่างชนิดกัน ซึ่งมีความเป็นขั้วที่ไม่เหมือนกัน จากงานวิจัยประสบความสำเร็จคือได้ไทรโบอิเล็กทริกแบบที่ใช้ร่างกายมนุษย์เป็นขั้วไฟฟ้า สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเดินได้ วัสดุที่เหมาะสมทำเป็นพื้นในไทรโบอิเล็กทริกคืออะคริลิกและวัสดุที่เหมาะสมทำเป็นพื้นรองรองเท้าคือยาง อะคริลิกกับยางเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุด เพราะให้กระแสสูงที่สุดในการผลิต [10]

จากปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริกในระดับนาโนที่สามารถแปลงพลังงานเพื่อนำมาใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบไร้สาย เป็นการเก็บเกี่ยวพลังงานเชิงกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยการผลิตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริก จากงานวิจัยนี้กล่าวถึงการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริกที่สร้างจากแผ่นอลูมิเนียม แผ่นอะคริลิกชนิดโพลีไดเมททิวซิลอกเซน (PDMS) อะคริลิกชนิดเทปโพลีอิมายด์ (Kapton) และขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการกดสัมผัสหรือเสียดสีกันของวัสดุที่มีคุณสมบัติทางขั้วไฟฟ้าที่ต่างกันตามหลักของ Triboelectric Series ในงานวิจัยนี้วัสดุที่ใช้คืออะลูมิเนียมและ PDMS โดยเมื่อวัสดุทั้งสองชนิดนี้สัมผัสกันอลูมิเนียมมีความเป็นลบตามหลักของ Triboelectric Series จะเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนไปให้กับพื้นผิวของ PDMS เมื่อมีการแยกออกจากกันของวัสดุทั้งสองชนิดจะเกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าขึ้นทำให้เกิดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขึ้นโดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้มีมากถึง  $15.5 \mu\text{A}$  ต่อพื้นที่  $1 \text{ cm}^2$  มีความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นเท่ากับ 230 V ซึ่งพลังงานที่ได้สามารถนำไปใช้ในการชาร์จของแบตเตอรี่โทรศัพท์แบบพกพาใช้เวลาในการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มเป็นเวลา 12.8 ชั่วโมงทำให้สามารถใช้โทรศัพท์ได้นานถึง 5.2 ชั่วโมง [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับ วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือการทำวิจัย รวมทั้งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีโทรโบอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

1) ออสซิลโลสโคป (Rigol DS1052D)	1	เครื่อง
2) เครื่องกำเนิดการสั่น	1	เครื่อง
3) แผ่นอะคริลิกหนา 3 mm	6	แผ่น
4) กระดาษอลูมิเนียมฟอยล์	1	ม้วน
5) แผ่นฟิล์มพอลิโพรพิลีน (polypropylene film) (Tesla amazing)	1	ชุด
6) ไม้อัดหนา 10 mm	1	แผ่น
7) สายไฟ CSA ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.51 mm	1	ม้วน
8) บานาน่าแจ๊คขนาด 8 mm	3	ตัว
9) เทปกาวยสองหน้า	1	ม้วน
10) เทปใส	1	ม้วน
11) เอทานอล	1	ขวด
12) หัวฉีดและน็อตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm ยาว 40 mm	30	ชุด
13) สปริง	12	ตัว
14) เหล็กฉากหนา 4.5 cm ยาว 40 cm	1	ท่อน
15) ปากกาจับเหล็กตัวซีขนาด 3 นิ้ว	1	ตัว
16) ตัวต้านทานแบบค่าคงที่ -10 k $\Omega$ , 50 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$ , 510 k $\Omega$ , 1 M $\Omega$ , 5.6 M $\Omega$ และ 300 M $\Omega$		
17) ไอซีเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์ไดโอด (diode bridge rectifier ic)	1	ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การดำเนินงานวิจัย

### 3.2.1 การประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

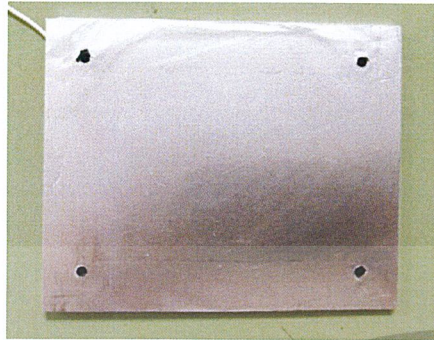
1) ทำการตัดแผ่นอะคริลิกที่มีขนาดความหนา 3 มิลลิเมตร ด้วยเลื่อยเหล็กออกเป็น 3 ขนาด คือ S ( $9 \times 10 \text{ cm}^2$ ), M ( $11 \times 14 \text{ cm}^2$ ) และ L ( $14 \times 24 \text{ cm}^2$ ) แต่ละขนาดตัดจำนวน 2 แผ่น จากนั้นทำการเจาะรูบนแผ่นอะคริลิกที่มุมทั้ง 4 ของทุกแผ่น โดยเจาะรูห่างจากขอบเป็นระยะ 1.2 cm สำหรับแผ่นอะคริลิกขนาด S และเจาะรูห่างจากขอบเป็นระยะ 1.5 cm สำหรับแผ่นอะคริลิกขนาด M และ L รูที่เจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm เท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกสว่าน ตำแหน่งและขนาดรูเจาะของแผ่นอะคริลิกทั้ง 3 ขนาดแสดงดังรูปที่ 3.1 ระหว่างการเจาะรูนั้นจะต้องนำแผ่นอะคริลิก 2 แผ่นที่มีขนาดเดียวกันประกบกันให้สนิทและขอบเสมอกันแล้วจึงทำการเจาะรูพร้อมกันเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งรูเจาะ



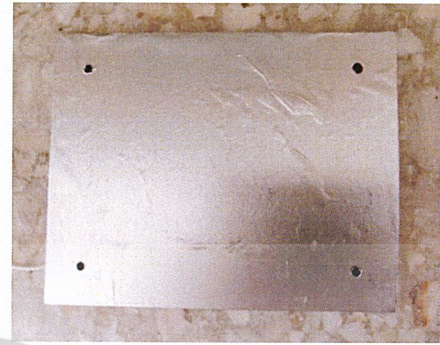
รูปที่ 3.1 ลักษณะแผ่นอะคริลิกทั้ง 3 ขนาดที่เจาะรูแล้ว

2) นำแผ่นอะคริลิกที่เจาะรูแล้วขนาดละ 1 แผ่น มาลอกกระดาษหุ้มสีน้ำตาลออกเพียง 1 ด้านแล้วทำการติดอลูมิเนียมฟอยล์บนแผ่นอะคริลิกด้วยกาวน้ำเนื้อละเอียด และเกลี่ยไล่ฟองอากาศที่แทรกระหว่างอลูมิเนียมฟอยล์และอะคริลิกออกให้หมด การไล่ฟองอากาศจะต้องระวังไม่ให้ผิวของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อลูมิเนียมเกิดรอยยับหรือรอยขีดข่วนเพราะจะส่งผลกระทบต่อประจุไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้น แผ่นอะคริลิกที่ติดอลูมิเนียมพอยล์แล้วแสดงดังรูปที่ 3.2



a. ขนาด  $9 \times 11 \text{ cm}^2$



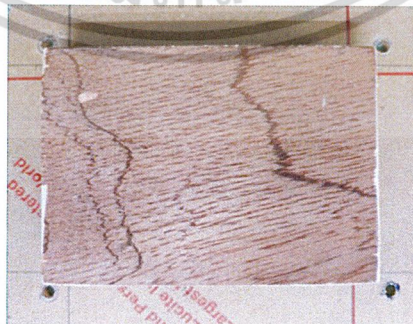
b. ขนาด  $11 \times 14 \text{ cm}^2$



c. ขนาด  $14 \times 24 \text{ cm}^2$

รูปที่ 3.2 แผ่นอะคริลิกทั้ง 3 ขนาด ที่ทำการติดอลูมิเนียมพอยล์

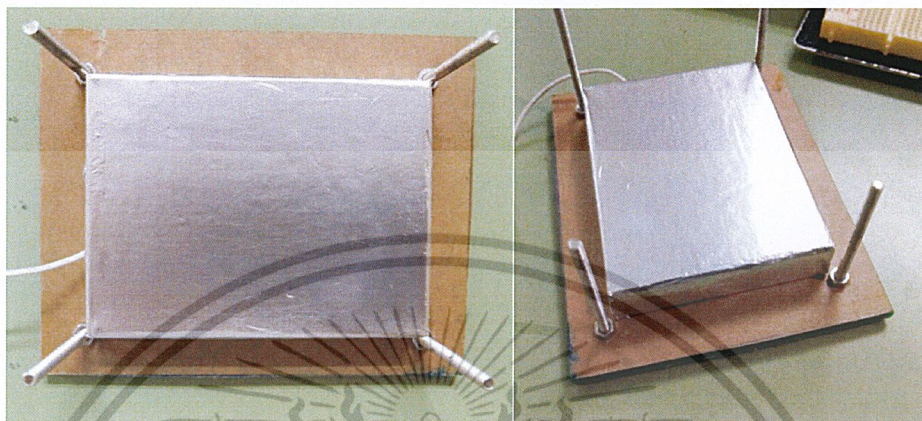
3) ทำการตัดไม้อัดที่มีความหนา 10 mm ตัดด้วยเลื่อยวงเดือนออกเป็น 3 แผ่นมีขนาด  $6 \times 8$   $8 \times 11$  และขนาด  $11 \times 21 \text{ cm}^2$  จากนั้นนำไม้ที่ทำการตัดเรียบร้อยมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 เพื่อให้เกิดความเรียบ และลบเศษไม้ที่เกิดขึ้น แผ่นไม้อัดทั้ง 3 แผ่นนี้จะใช้ทำเป็นฐานในการวางแผ่นฟิล์ม แผ่นไม้ที่ตัดและขัดแล้วแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ไม้อัดความหนา 10 mm ใช้สำหรับวางแผ่นฟิล์ม

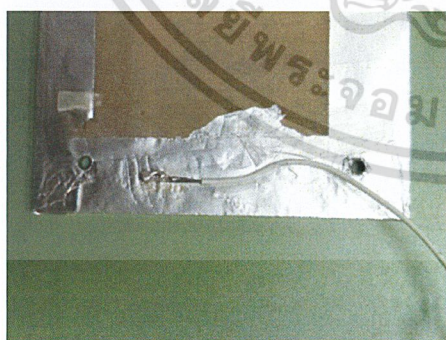
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) นำไม้อัดที่ตัดและขัดแล้วทั้ง 3 ขนาดนำมาทากาวแล้วเกลี่ยให้เรียบ จากนั้นติดอลูมิเนียมฟอยล์ลงไปบนแผ่นไม้และไล่ฟองอากาศออกเช่นเดียวกับการติดอลูมิเนียมฟอยล์กับอะคริลิกก่อนหน้านี้ หลังจากนั้นทำการติดไม้อัดลงบนแผ่นอะคริลิกอีกแผ่นที่ใช้เป็นแผ่นฐานดังรูปที่ 3.4 แผ่นอะคริลิกที่เป็นฐานนี้จะยึดติดกับน็อต 4 ตัวบริเวณมุมที่เจาะรูไว้

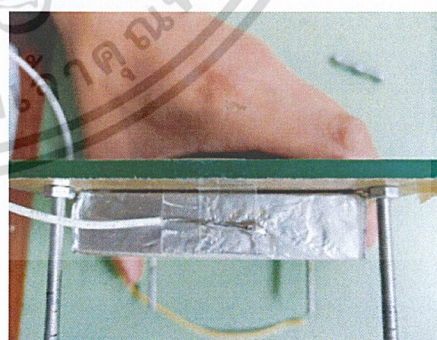


รูปที่ 3.4 แผ่นไม้หุ้มอลูมิเนียมฟอยล์ที่ติดบนแผ่นอะคริลิก

5) ทำขั้วไฟฟ้าให้กับแผ่นไม้และอะคริลิกที่หุ้มอลูมิเนียมฟอยล์ดังรูป 3.5(a) และ 3.5(b) โดยทำการบัดกรีสายไฟชนิด CSA สาย CSA นี้เป็นสายไฟกลมทำด้วยลวดตัวนำเป็นอลูมิเนียมขนาด 0.51 มิลลิเมตร ทนอุณหภูมิได้ 80 องศาเซลเซียสและทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 300 โวลต์ ทำการตัดสาย CSV ที่ใช้ยาว 10 เซนติเมตรและปลอกสายไฟยาว 1.5 เซนติเมตรด้วยคีมปลอกสายไฟ เพื่อป้องกันการรั่วไหลของอิเล็กตรอนบริเวณขั้วไฟฟ้า ขณะทำการบัดกรีจะต้องใช้หัวแร้งจี้บริเวณจุดบัดกรีให้ร้อนแล้วจึงนำลวดตะกั่วบัดกรีตะกั่วบริเวณดังกล่าวจนลวดตะกั่วหลอมรวมสายไฟและอลูมิเนียมเข้าด้วยกัน



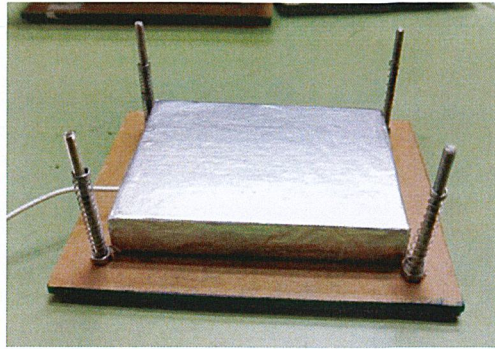
a.



b.

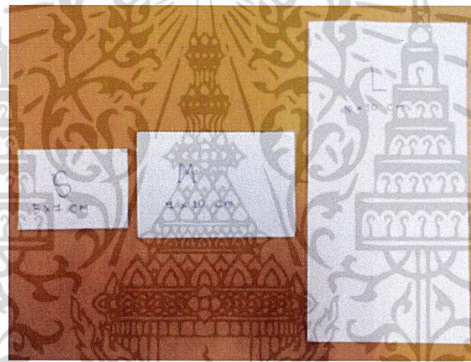
รูปที่ 3.5 สายไฟที่บัดกรีติดบนอลูมิเนียมฟอยล์ a. บริเวณอะคริลิกแผ่นบนหุ้มด้วยอลูมิเนียม b. บริเวณแผ่นไม้อัดหุ้มอลูมิเนียมฟอยล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 การสวมสปริงที่น็อตที่ติดบนแผ่นอะคริลิก

6) นำเทียนโซมาลูที่ตัวน็อตซึ่งยึดติดกับแผ่นอะคริลิกแผ่นที่ใช้เป็นฐานทั้ง 3 ขนาด เพื่อให้เกิดความลื่นเพราะพารฟินของเทียนโซจะมาอุดร่องเกลียวของตัวน็อตและสวมสปริงที่มีขนาดเท่ากันลงไปน็อตทั้ง 4 (รูปที่ 3.6)

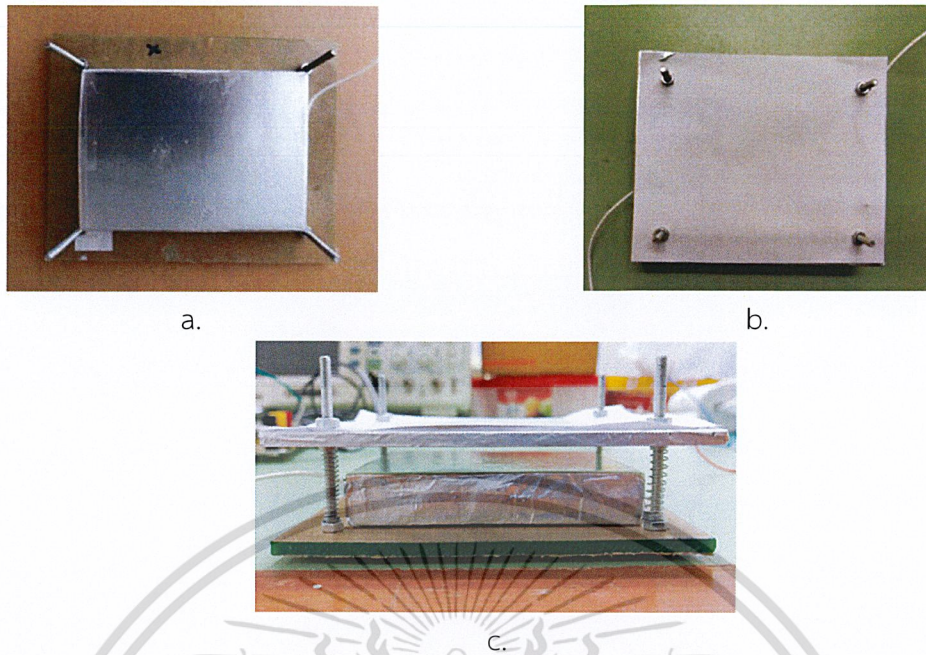


รูปที่ 3.7 แผ่นฟิล์มพอลิโพรพิลีน

7) ตัดแผ่นฟิล์มพอลิโพรพิลีนด้วยคัตเตอร์ออกเป็น 3 ขนาดคือ  $5 \times 7$   $7 \times 10$  และ  $10 \times 20$   $\text{cm}^2$  แผ่นฟิล์มที่ตัดแล้วจะถูกเก็บรักษาด้วยการประกบกับกระดาษขาวขนาด A4 ทั้งด้านหน้าและหลังเพื่อป้องกันฝุ่นดังรูปที่ 3.7

8) ทำความสะอาดแผ่นอลูมิเนียมที่หุ้มแผ่นอะคริลิกแผ่นบนและแผ่นไม้อัดที่เป็นฐานด้วยเอทานอล จากนั้นติดแผ่นฟิล์มพอลิโพรพิลีนบนอลูมิเนียมที่หุ้มฐานไม้อัดด้วยเทปใส (รูป 3.8(a)) ซึ่งจะต้องติดให้ตึงไม่ให้เกิดช่องว่างระหว่างแผ่นฟิล์มและอลูมิเนียมฟอยล์ หลังจากนั้นประกบอะคริลิกแผ่นบนที่หุ้มอลูมิเนียมแล้วกับฐานไม้ซึ่งวางบนอะคริลิกแผ่นล่าง โดยการสวมให้เข้ากับน็อตทั้ง 4 ตัว (รูป 3.8(b)) และปรับระยะระหว่างผิวหน้าอลูมิเนียมหุ้มอะคริลิกแผ่นบนและแผ่นพอลิโพรพิลีนเป็น 0.5 cm ด้วยหัวน็อตที่อยู่ด้านบนอะคริลิกแผ่นบน เพื่อไม่ให้เกิดการขยับเกินระยะที่กำหนด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เสร็จสมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 3.8(c)

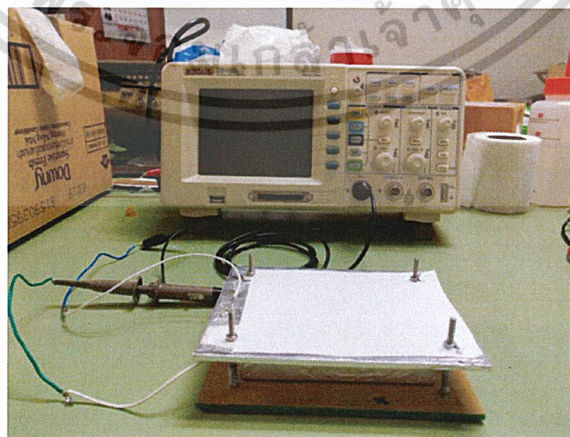
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 a. แผ่นฟิล์มพอลิโพรพิลีนบนอลูมิเนียมที่หุ้มฐานไม้ b. การประกบอะคริลิกแผ่นบนกับฐานไม้ และ c. ชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

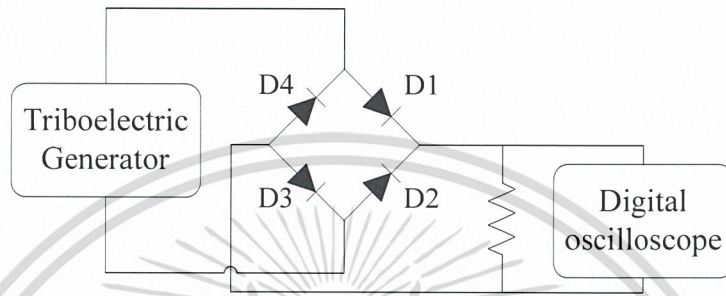
### 3.2.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยแรงกดจากฝ่ามือ

การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไตรโบอิเล็กทริก (triboelectric generator) ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นนั้น สามารถจัดอุปกรณ์เป็นดังรูปที่ 3.9 โดยวงจรการวัดจะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไตรโบอิเล็กทริก และดิจิตอลออสซิลโลสโคป (digital oscilloscope) ต่ออนุกรมกันโดยตรง หลังจากนั้นใช้ฝ่ามือกดอะคริลิกแผ่นบนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความถี่ประมาณ 5 Hz และกดด้วยแรงสม่ำเสมอ จากนั้นจึงบันทึกภาพสัญญาณที่เกิดขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยผู้ดูแลหอสมุดขอสงวนสิทธิ์ในนโยบายด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริกที่นำมาตรวจวัดจะประกอบด้วยแผ่นฟิล์มพอลิโพรพิลีนทั้ง 3 ขนาด (S M และ L) นอกจากนี้เพื่อทดสอบว่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริกนั้นสามารถที่จะแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้หรือไม่ จึงได้เพิ่มไอซีเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์ไดโอดและความต้านทาน 1 MΩ ต่อขึ้นระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและดิจิตอลออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 3.10 และทดลองกดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นจังหวะด้วยฝ่ามือประมาณ 5 Hz และบันทึกสัญญาณเหมือนที่ทำการทดลองก่อนหน้า

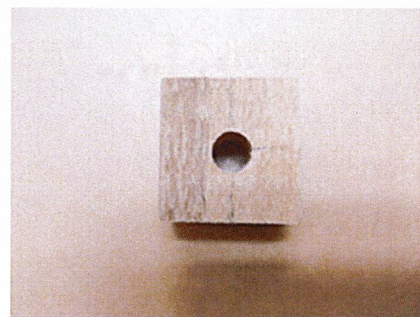
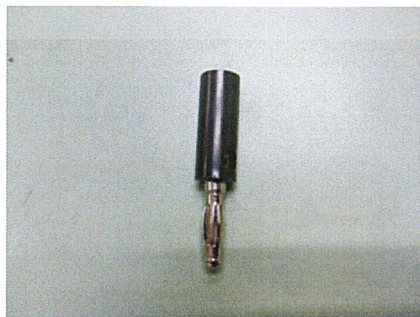


รูปที่ 3.10 วงจรการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยการต่อไอซีไดโอด

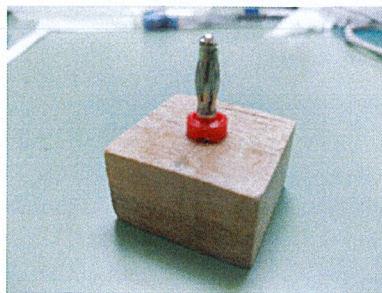
### 3.2.3 การประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กกับเครื่องกำเนิดการสั่น

เนื่องจากการกดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่สร้างขึ้นด้วยฝ่ามือจะส่งผลให้การกำหนดความถี่และแรงกดยังมีความแม่นยำน้อย ดังนั้นในการทดลองนี้จึงปรับปรุงวิธีการกด โดยใช้แรงกดจากเครื่องกำเนิดการสั่นแทนแรงกดจากฝ่ามือ เครื่องกำเนิดการสั่นนี้จะให้แรงกดคงที่ และสามารถปรับเปลี่ยนความถี่การสั่นได้ตามความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าป้อนเข้า ขั้นตอนการประกอบเครื่องกำเนิดการสั่นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีการดำเนินงานดังนี้

1) ทำการตัดไม้อัดที่มีความหนาเท่ากับ 1.5 cm<sup>2</sup> ให้มีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 3x3 cm<sup>2</sup> จากนั้นทำการเจาะรูตรงกลางด้วยสว่าน เพื่อใช้สำหรับใส่หัวบานานาแจ๊ค (รูปที่ 3.11(a)) เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะมีขนาด 0.8 cm ดังรูปที่ 3.11(b) เมื่อเจาะเสร็จแล้วจะทำการขัดไม้อัดนี้ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 เพื่อทำการลบขอบและเสี้ยนไม้ที่เกิดจากการตัดและเจาะ จากนั้นหากาวที่บานานาแจ๊คแล้วสวมเข้ากับไม้อัดที่เจาะรูไว้ดังรูปที่ 3.11(c) บานานาแจ๊คยึดติดกับไม้อัดเจาะรูนี้จะถูกนำมาใช้สำหรับการจับยึดตะขอคริสลิกแผ่นบนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับเครื่องกำเนิดการสั่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



c.

รูปที่ 3.11 a. บานานาแจ๊ค b. ไม้อัดเจาะรู และ c. บานานาแจ๊คยึดติดกับไม้อัดเจาะรู

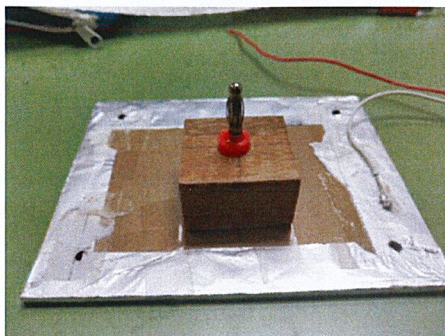
2) ขั้นตอนนี้เป็น การสร้างส่วนจับยึดอะคริลิกแผ่นล่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 3 ขนาด โดยเริ่มจากการตัดเหล็กฉากขนาดกว้าง 4.5 cm และหนา 0.55 cm ให้มีความยาว 40 cm จำนวน 1 ท่อน ด้วยเลื่อยไฟฟ้า จากนั้นจึงเจาะรูที่เหล็กฉากให้ระยะห่างของรูเท่ากับระยะของน็อตที่อะคริลิกแผ่นล่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งมีระยะ 8 11 และ 21 cm ดังรูปที่ 3.12 เหล็กฉากที่ตัดและเจาะรูเรียบร้อยแล้วจะต้องนำมาถูด้วยตะไบเหล็กเพื่อลบเหลี่ยมความคมออกให้หมดก่อนนำไปใช้งาน



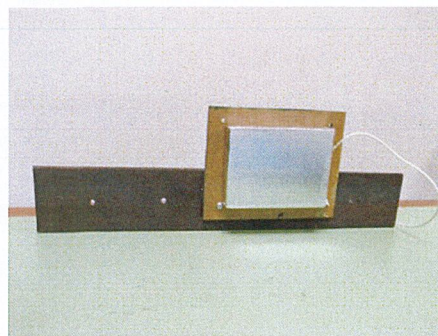
รูปที่ 3.12 เหล็กฉากใช้เป็นส่วนจับยึดอะคริลิกแผ่นล่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3) นำบานานาแจ๊คที่สวมกับไม้อัดเจาะรูตามรูปที่ 3.11(c) มายึดติดกับอะคริลิกแผ่นบนแต่ ละขนาดด้วยเทปกาว 2 หน้าดังรูปที่ 3.13(a) หลังจากนั้นจึงนำอะคริลิกแผ่นล่างแต่ละขนาดของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ายึดติดกับเหล็กฉากด้วยน็อตดังรูป 3.13(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a.



b.

รูปที่ 3.13 a. การติดบานานาแจ๊คที่สวมไม้อัดเจาะรูกับอะคริลิกแผ่นบน และ b. การยึดอะคริลิกแผ่นล่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับเหล็กฉาก

4) นำปลายของบานานาแจ๊คที่สวมกับไม้อัดติดแผ่นอะคริลิกตามรูปที่ 3.13(a) สวมเข้ากับเครื่องกำเนิดการสั่น และยึดเหล็กฉากกับขอบโต๊ะทดลองให้แน่นด้วยปากกาจับชิ้นงานรูปตัวซี หลังจากนั้นจึงใช้เอทานอลทำความสะอาดอลูมิเนียมฟอยล์ทั้งสองแผ่น ทั้งที่หุ้มอะคริลิกแผ่นบนและหุ้มไม้อัดที่ติดกับอะคริลิกแผ่นล่างและเหล็กฉาก

5) เมื่อผิวอลูมิเนียมฟอยล์สะอาดแล้ว ให้นำแผ่นฟิล์มโพลิโพรพิลีนติดที่อลูมิเนียมฟอยล์ที่หุ้มไม้อัดติดอยู่กับอะคริลิกแผ่นล่าง ส่วนเครื่องกำเนิดการสั่นให้วางในแนวนอนและเลื่อนตัวเครื่องกำเนิดการสั่นจนผิวหน้าอลูมิเนียมฟอยล์ที่หุ้มอะคริลิกแผ่นบนห่างจากผิวหน้าฟิล์มโพลิโพรพิลีนเป็นระยะ 0.2 cm การจัดวางชุดทดลองสำหรับการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดการสั่นแสดงดังรูปที่ 3.14



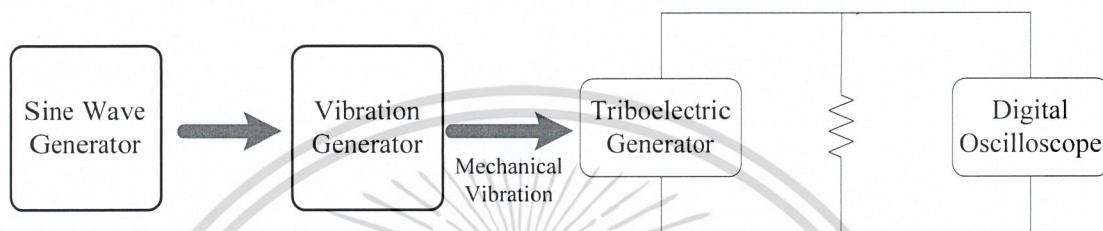
รูปที่ 3.14 ชุดทดลองแสดงการต่อเครื่องกำเนิดการสั่นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไพโรอิเล็กทริก

### 3.2.4 การทดสอบการกวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดการสั่น

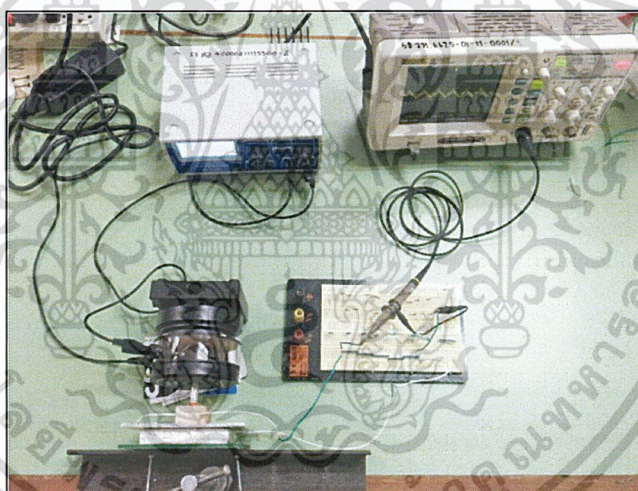
ภายหลังจากที่ประกอบเครื่องกำเนิดการสั่นเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กได้แล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปก็จะเป็นการทดสอบการกวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่สร้างขึ้นทั้ง 3 ขนาด ซึ่งใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เห็นผลได้จริงในการกวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เห็นผลจริงโดยมีขั้นตอนที่กล่าวไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาด S ( $5 \times 7 \text{ cm}^2$ ) M ( $7 \times 10 \text{ cm}^2$ ) และ L ( $10 \times 20 \text{ cm}^2$ ) ตามลำดับ วิธีการทดลองมีดังนี้

1) ทดลองวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กโดยการต่อวงจรและเครื่องมือต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ซึ่งประกอบด้วย เครื่องกำเนิดการสั่น (vibration generator) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไทรโบอิเล็กทริก (triboelectric generator) ตัวต้านทานขนาด  $1 \text{ M}\Omega$  เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ารูปไซน์ (sine wave generator) และดิจิตอลออสซิลโลสโคป (digital oscilloscope)



รูปที่ 3.15 แผนผังการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริก



รูปที่ 3.16 ชุดทดลองวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไทรโบอิเล็กทริก

2) ภาพหลังจากที่จัดชุดทดลองตามรูปที่ 3.16 เสร็จแล้วก็จะจ่ายสัญญาณไฟฟ้าให้กับเครื่องกำเนิดการสั่นด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ารูปไซน์โดยปรับความถี่ของสัญญาณเป็น  $20 \text{ Hz}$  และแอมพลิจูดของสัญญาณให้มีค่า  $1 \text{ V}$  ส่งผลให้เครื่องกำเนิดการสั่นกดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่สร้างขึ้นเป็นจังหวะที่สม่ำเสมอและผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ด้วยปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริกและการเหนี่ยวนำแบบไฟฟ้าสถิต กระแสไฟฟ้าที่ได้จะไหลผ่านตัวต้านทานไฟฟ้าภายนอกทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทานไฟฟ้าซึ่งต่ออนุกรมอยู่ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กแต่ละขนาดจะถูกวัดด้วยดิจิตอลออสซิลโลสโคป

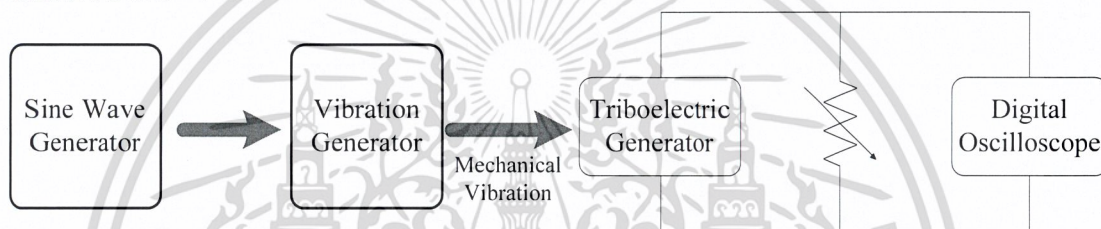
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) นอกจากนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กทั้ง 3 ขนาด จะถูกศึกษาด้วยการวัดที่ความถี่ต่าง ๆ คือ 5 10 15 และ 25 Hz ด้วย และวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ด้วยดิจิตอล ออสซิลโลสโคปเช่นเดียวกับที่ทำในข้อ 2)

### 3.2.5 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดสัญญาณขนาดเล็ก

เนื่องจากการจะนำแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าใด ๆ มาใช้งานนั้นจะต้องคำนึงประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าซึ่งบ่งบอกได้ด้วยค่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาหรือกำลังไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้านั้น ๆ ดังนั้นการวัดเพียงแต่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่สร้างขึ้นนั้นไม่เพียงพอ และควรที่จะทดลองหาลำดับกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะผลิตได้ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) จัดวางชุดทดลองตามแผนผังในรูปที่ 3.17 โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มขนาด  $5 \times 7 \text{ cm}^2$



รูปที่ 3.17 แผนผังการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไตรโบอิเล็กทริก

2) ปรับค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่จ่ายออกมาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ารูปไซน์ให้มีค่า 1 V มีค่ากระแสไฟฟ้า 0.1 A และปรับความถี่ของสัญญาณเป็น 5 Hz

3) ทดลองวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบค่าเฉลี่ยกำลังสอง ( $v_{rms}$ ) ความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบพีคทูพีคที่ตกคร่อมตัวต้านทานที่มีค่า 20 k $\Omega$  ด้วยออสซิลโลสโคป

4) ทดลองซ้ำในข้อ 3) แต่เปลี่ยนความต้านทานไฟฟ้าเป็นค่าต่าง ๆ ดังนี้ 30 k $\Omega$ , 50k $\Omega$ , 70 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$ , 200 k $\Omega$ , 300 k $\Omega$ , 400 k $\Omega$ , 510 k $\Omega$ , 1 M $\Omega$ , 3M $\Omega$ , 5.6M $\Omega$ , 10M $\Omega$ , 300M $\Omega$ , 600M $\Omega$ , 900M $\Omega$ , 1200M $\Omega$  และ 1500M $\Omega$

5) ทดลองซ้ำในข้อ 2) ถึงข้อ 4) แต่เปลี่ยนความถี่เป็น 10 15 20 และ 25 Hz

6) คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า ( $P$ ) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มขนาด  $5 \times 7 \text{ cm}^2$  ที่ทดลองทุกเงื่อนไขโดยใช้สมการที่ 3.1

$$P = \frac{V_{rms}^2}{R}$$

เมื่อ  $R$  คือความต้านทานไฟฟ้าในหน่วยโอห์ม

7) สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มขนาด  $7 \times 10$  และ  $20 \times 10 \text{ cm}^2$  ก็ทำการทดลองในทำนองเดียวกับข้อ 1) ถึง ข้อ 6) แต่ปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองให้เป็นไปตามตารางที่ 3.1 ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

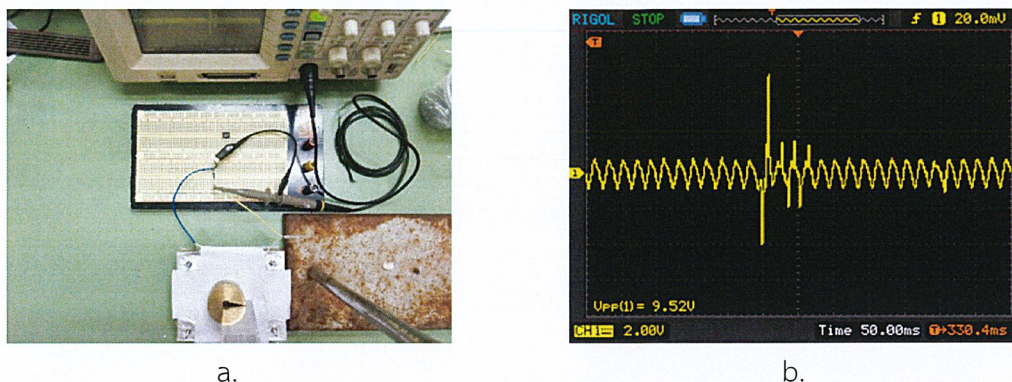
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดลองสำหรับวัตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

ขนาดฟิล์ม (cm <sup>2</sup> )	ความถี่ในการกด (Hz)	ความต้านทาน
5×7	5	20 kΩ - 1500MΩ
	10	
	15	
	20	
	25	
7×10	5	20 kΩ - 1500MΩ
	10	
	15	
	20	
	25	
10×20	5	20 kΩ - 1500MΩ
	10	
	15	
	20	
	25	

### 3.2.6 การทดสอบหาความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายใต้แรงกระทำที่ต่างกัน

ทดลองโดยการต่อตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานเท่ากับ 510 kΩ แบบอนุกรมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กดังรูป 3.18(a) และมีการเปลี่ยนขนาดพื้นที่ฟิล์มพอลิโพรพีลีนและระยะปล่อยมวล 200 ฐ กระแทกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้านบน พื้นที่ของฟิล์มพอลิโพรพีลีนมี 4 ขนาด คือ 5×7 5×5.3 3.5×5 และ 2.5×3.5 cm<sup>2</sup> โดยการทดลองแต่ละพื้นที่จะมีการเปลี่ยนระยะในการกระแทกมีค่าระหว่าง 0.5-15 cm และบันทึกค่าสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบพิกชูพิก ตัวอย่างลักษณะสัญญาณที่ได้แสดงดังรูป 3.18(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 a. ชุดทดลองสำหรับวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็กภายใต้แรงกระแทก และ b. ตัวอย่างความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็กเมื่อมวลตกกระทบ

### 3.2.7 การตรวจสอบโครงสร้างฟิล์มพอลิไพโรพิลีนและพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน

โครงสร้างของฟิล์มพอลิไพโรพิลีนและพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนสามารถตรวจสอบได้ด้วยการใช้เทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform Infrared (FTIR) spectroscopy) โดยพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดจะถูกตัดออกเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาด  $3.5 \times 5 \text{ cm}^2$  แล้วนำไปติดตั้งในเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี รุ่น NICOLET 6700 ที่ทำงานในโหมดการสะท้อน ATR (Attenuated Reflectance mode พอลิเมอร์จะถูกกระตุ้นด้วยการฉายแสงช่วงรังสีอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น  $400\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$  ไปยังสารพอลิเมอร์ แล้ววัดค่าการดูดกลืนพลังงานแสงของหมู่ฟังก์ชันของโครงสร้างโมเลกุลของสารแต่ละชนิด

### 3.2.8 การตรวจสอบความขรุขระของฟิล์มพอลิไพโรพิลีนและพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน

ฟิล์มพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดจะถูกนำมาตรวจสอบสภาพความขรุขระของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Nanosurf Easyscan 2 AFM, Switzerland) ที่ติดตั้งโพรบ ACLA ซึ่งทำมาจากซิลิกอนมีรูปร่างเป็นคานทิลเวอร์สี่เหลี่ยม มีค่าคงที่สปริง  $45 \text{ N/m}$  ความถี่ธรรมชาติ  $190 \text{ Hz}$  และทำงานในโหมดไม่สัมผัส (noncontact mode) ฟิล์มที่ตรวจสอบจะถูกตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาดเล็กประมาณ  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  วางบนฐานจับตัวอย่าง พื้นผิวฟิล์มจะถูกตรวจสอบด้วยเงื่อนไขการสแกนพื้นที่ขนาด  $10 \times 10 \text{ }\mu\text{m}$  และสแกนด้วยความละเอียด  $256 \text{ point/line/s}$

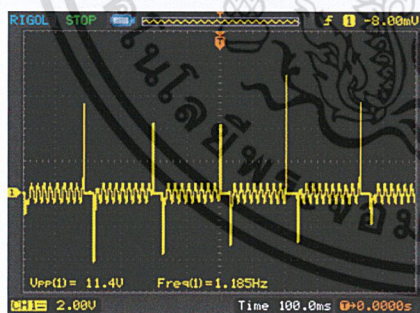
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

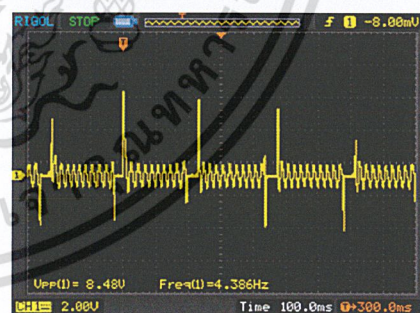
### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเนื่องจากแรงกดฝ่ามือ

การกดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยมือถือเป็นการทดสอบด้วยแรงจริงในธรรมชาติ ซึ่งความแรงมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาดพื้นที่  $5 \times 7 \text{ cm}^2$  แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในรูปที่ 4.1(a) จะปรากฏทั้งด้านบวกและลบ แอมพลิจูดด้านบวกและลบจะมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับว่าเกิดจากกลไกการกดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในจังหวะใด จากการสังเกตพบว่า เมื่อทำการกดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ผิวลูมิเนียมแผ่นบนสัมผัสกับผิวพอลิโพรพิลีนนั้นจะทำให้เกิดสัญญาณพีคด้านบวก และเมื่อปล่อยให้ลูมิเนียมแผ่นบนติดตัวกลับเคลื่อนที่ออกจากฟิล์มพอลิโพรพิลีนก็จะทำให้เกิดแอมพลิจูดด้านลบขึ้น ดังนั้นการกดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 ครั้งจะทำให้ได้สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าออกมา 2 พีค คือแอมพลิจูดด้านบวกและลบ การกดแต่ละครั้งอาจทำให้ขนาดแอมพลิจูดที่ได้ไม่เท่ากันเพราะความเร็วและแรงกดจากฝ่ามือแต่ละครั้งที่ไม่เท่ากัน การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสลับขั้วไฟฟ้าจะทำให้ได้สัญญาณที่กลับขั้วด้วยตามรูปที่ 4.1(b) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้นั้นเป็นสัญญาณที่ได้ออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจริง ไม่ได้เกิดจากสัญญาณรบกวน อย่างไรก็ตามสัญญาณที่วัดได้จะมีสัญญาณรบกวนจากความถี่ 50 Hz ปนมาด้วยแต่ขนาดสัญญาณมีค่าค่าน้อยกว่าสัญญาณจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ส่วนความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาดพื้นที่  $7 \times 10$  และ  $10 \times 20 \text{ cm}^2$  ก็มีลักษณะเดียวกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากฟิล์มขนาดพื้นที่  $5 \times 7 \text{ cm}^2$  ดังนั้นจึงไม่ได้แสดงไว้



a.



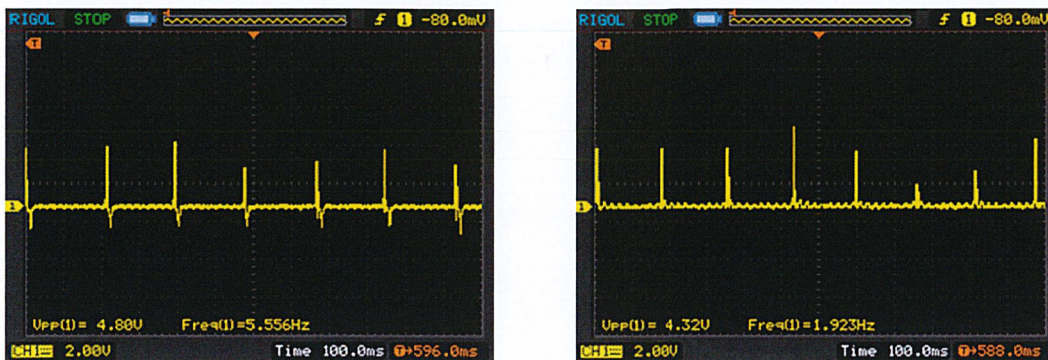
b.

รูปที่ 4.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเมื่อทำการกลับขั้วไฟฟ้า

a. ไม่กลับขั้วไฟฟ้า และ b. กลับขั้วไฟฟ้า

เมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กกับไอซีเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์ไดโอดและตัวต้านทานขนาด  $1 \text{ M}\Omega$  ตามรูปที่ 3.10 แล้ววัดสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคปผลปรากฏดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a.

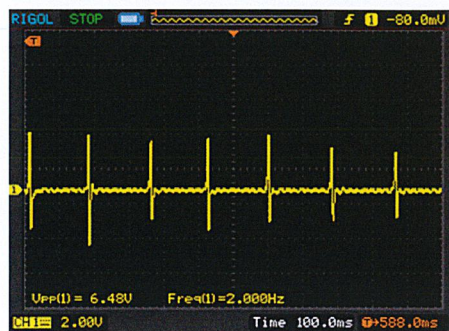
b.

รูปที่ 4.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีน ขนาด  $5 \times 7 \text{ cm}^2$  a. ไม่ใช่ และ b. ใช้ไอซีเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์ไดโอด

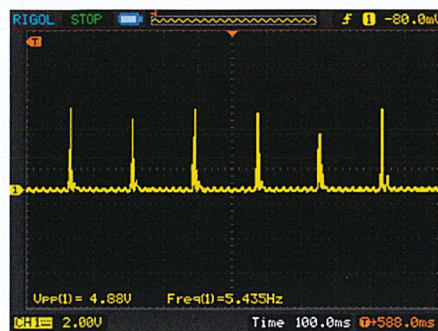
จากรูปที่ 4.2(a) แสดงให้เห็นว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กผลิตขึ้นได้ มีความถี่ 5.43 Hz ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่ของมือที่กดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระดับแอมพลิจูดของสัญญาณที่วัดทั้งด้านบวกและลบมีค่าไม่เท่ากัน แอมพลิจูดด้านบวกเกิดขึ้นขณะฟิล์มพอลิโพรพิลีนเคลื่อนเข้าหาอลูมิเนียมแผ่นนั้นจะมีค่ามากกว่าแอมพลิจูดด้านลบซึ่งเกิดขึ้นขณะฟิล์มเคลื่อนออกจากอลูมิเนียม เหตุที่เป็นเช่นนี้ เพราะเมื่อพิจารณาอนุกรมโทรโบอิลิกของวัสดุทั้ง 2 แล้วพบว่า ฟิล์มพอลิโพรพิลีนมีความสามารถในการที่จะสูญเสียอิเล็กตรอนได้ยากกว่าอลูมิเนียม ดังนั้นเมื่อผิวหน้าวัสดุ 2 ชนิดนี้แตะและแยกออกจากกันหลาย ๆ รอบ จะทำให้เกิดการเสียดสีของโมเลกุลที่ผิวหน้าและอิเล็กตรอนจะเกิดการแลกเปลี่ยนจากโมเลกุลอลูมิเนียมไปสะสมที่โมเลกุลพอลิโพรพิลีน เมื่อฟิล์มพอลิโพรพิลีนแยกออก อิเล็กตรอนจะยังคงอยู่ที่ผิวหน้าของฟิล์มนี้ แต่เมื่อฟิล์มพอลิโพรพิลีนเคลื่อนเข้าหาอลูมิเนียมใหม่อีกครั้ง อิเล็กตรอนหรือประจุลบที่ผิวพอลิโพรพิลีนจะผลักอิเล็กตรอนของอลูมิเนียมให้ไหลไปตามสายไฟ เกิดเป็นแอมพลิจูดด้านบวกขึ้น และส่งผลให้อลูมิเนียมเสียอิเล็กตรอนและมีความเป็นประจุบวกมากขึ้น หลังจากนั้นเมื่อฟิล์มพอลิโพรพิลีนเคลื่อนออกจากอลูมิเนียมอีกครั้งอลูมิเนียมซึ่งขณะนี้มีความเป็นบวกจะดึงดูดอิเล็กตรอนที่เคยไหลไปในสายไฟกลับมาดังเดิมจึงทำให้เกิดแอมพลิจูดด้านลบขึ้น ขนาดแอมพลิจูดด้านบวกและลบที่ไม่เท่ากันอาจเกิดจากความเร็วในการเคลื่อนเข้าและออกของฟิล์มพอลิโพรพิลีนและอลูมิเนียมที่ไม่เท่ากัน ขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาด  $5 \times 7 \text{ cm}^2$  มีค่า  $4.80 \text{ V}_{pp}$

ความต่างศักย์ไฟฟ้าตามรูปที่ 4.2(a) มีลักษณะเป็นแบบกระแสสลับ เมื่อกระแสไฟฟ้านี้ไหลผ่านไอซีเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์ไดโอดจะทำให้สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าถูกเรกติไฟเออร์กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้กระแสตรงตามรูปที่ 4.2(b) นั่นคือแอมพลิจูดด้านลบจะถูกกลับมาเป็นแอมพลิจูดฝั่งบวกและความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าลดลงเหลือ  $4.32 \text{ V}_{pp}$  แต่ความถี่ของสัญญาณที่วัดได้นั้นยังคงเป็น 5.43 Hz เหมือนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a.

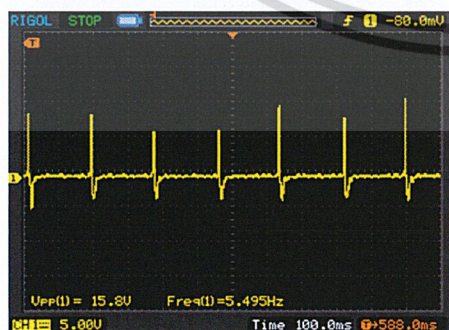


b.

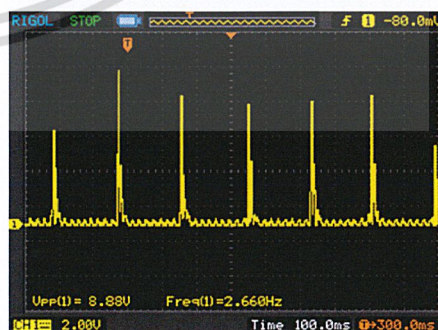
รูปที่ 4.3 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีน ขนาด  $7 \times 10 \text{ cm}^2$  a. ไม่ใช้ และ b. ใช้ไอซีเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์ไดโอด

รูปที่ 4.3(a) แสดงผลการทดลองวัดสัญญาณทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาด  $7 \times 10 \text{ cm}^2$  และวัดโดยไม่ใช้ไอซีเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์ไดโอด พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีลักษณะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเช่นเดียวกับสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาด  $5 \times 7 \text{ cm}^2$  ซึ่งมีความถี่ 5.43 Hz เท่าเดิม แต่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าสูงกว่าคือ 6.48 V<sub>pp</sub> แต่เมื่อวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ไอซีเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์ไดโอดจะทำให้ได้สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบกระแสตรงได้ ความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงเหลือ 4.88 V<sub>pp</sub> ตามรูป 4.3(b)

สำหรับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาด  $10 \times 20 \text{ cm}^2$  แสดงดังรูป 4.4 ความถี่ของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อวัดสัญญาณแบบไม่ใช้ไอซีเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์ไดโอดยังคงเป็นแบบไฟฟ้ากระแสสลับและมีความถี่ 5.43 Hz เช่นเดิม (รูปที่ 4.4(a)) โดยความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่า 15.8 V<sub>pp</sub> เมื่อกระแสไฟฟ้านี้ไหลผ่านไอซีเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์ไดโอด ความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทาน  $1 \text{ M}\Omega$  ตามวงจรไฟฟ้าในรูปที่ 3.10 มีค่า 8.88 V<sub>pp</sub> และเป็นไฟฟ้ากระแสตรงดังรูป 4.4(b)



a.



b.

รูปที่ 4.4 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีน ขนาด  $10 \times 20 \text{ cm}^2$  a. ไม่ใช้ และ b. ใช้ไอซีเรกติไฟเออร์แบบบริดจ์ไดโอด

ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็กผลิตได้เป็นฟังก์ชันของพื้นที่ผิวฟิล์มพอลิโพรพิลีนแสดงดังรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อพื้นที่สัมผัสระหว่างฟิล์มพอลิโพรพิลีนกับอลูมิเนียมพอยล์มากขึ้นจะส่งผลให้ความต่างศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการสำหรับตัวกำเนิดไฟฟ้าแบบทรานซิสเตอร์แบบโพลีไดอิเล็กทริกแบบโหมตการสัมผัส [12]

$$V = -\frac{Q}{S\epsilon_0}(d_0 + x(t)) + \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $Q$  คือประจุถ่ายโอน  $S$  แทนพื้นที่ผิวสัมผัสคู่วัสดุทรานซิสเตอร์  $\epsilon_0$  คือสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศมีค่า  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m  $x(t)$  คือระยะระหว่างชั้นทรานซิสเตอร์ที่ขึ้นกับเวลา และ  $\sigma$  แทนความหนาแน่นประจุ (charge density) ทรานซิสเตอร์ที่เกิดขึ้น ส่วน  $d_0$  เป็นค่าความหนาไดอิเล็กทริกยังผล (effective dielectric thickness) ซึ่งมีค่า

$$d_0 = \frac{d_1}{\epsilon'_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon'_{r2}} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $d_1$  และ  $d_2$  แทนความหนาของชั้นวัสดุทรานซิสเตอร์ชั้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ส่วนค่า  $\epsilon'_{r1}$  และ  $\epsilon'_{r2}$  เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุทรานซิสเตอร์ชนิดที่ 1 และ 2 เมื่อพิจารณากรณีที่ไม่มีประจุถ่ายโอน ( $Q=0$ ) จะเห็นได้ว่าพจน์แรกของสมการที่ 4.1 สามารถตัดออกได้ ทำให้จึงลดรูปเหลือเป็นสมการ

$$V_{oc} = \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (4.3)$$

เมื่อ  $V_{oc}$  คือความต่างศักย์วงจรมืด สำหรับกรณีที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสลัดวงจร ( $V=0$ ) จะได้

$$I_{sc} = \frac{\sigma S d_0 v(t)}{(d_0 + x(t))^2} \quad (4.3)$$

เมื่อ  $v(t)$  คือความเร็วการเคลื่อนที่ของชั้นทรานซิสเตอร์ จะเห็นได้ว่าสมการที่ 4.3 นั้น กระแสลัดวงจรจากตัวกำเนิดไฟฟ้าแปรผันตรงพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุคู่ทรานซิสเตอร์ อย่างไรก็ตามสำหรับการทดลองนี้ใช้ตัวต้านทานที่มีค่า  $1 \text{ M}\Omega$  ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่ทำให้ตัวกำเนิดพลังงานไฟฟ้าทำงานในช่วงทั่วไป ดังนั้นจึงต้องผนวกสมการที่ 4.1 กับกฎของโอห์มเข้าด้วยกันดังสมการ

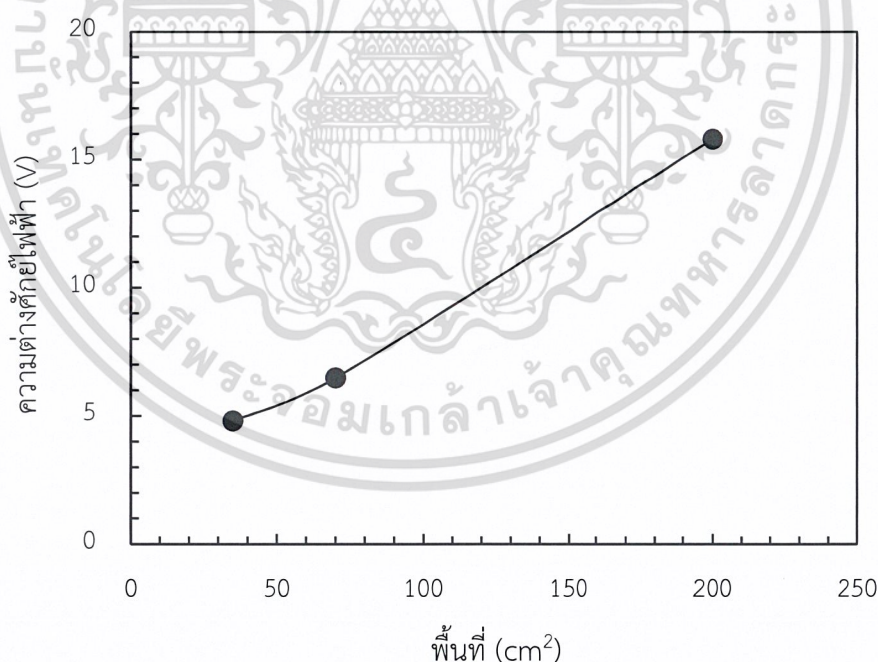
$$R \frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{S\epsilon_0}(d_0 + x(t)) + \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาผลเฉลยของสมการที่ 4.4 ทำให้ทราบได้ว่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบโทรโบอิเล็กทริกจ่ายให้กับตัวต้านทานคงที่ใดๆ จะมีค่าแปรผันตามพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุโทรโบอิเล็กทริก กล่าวคือการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุคู่โทรโบอิเล็กทริกจะส่งผลให้ประจุไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของตัวกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการเสียดสีและแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าระหว่างโมเลกุลของวัสดุทั้งสองมีมากขึ้น จำนวนประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นไปตามความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกับประจุไฟฟ้า  $Q$  ที่เกิดขึ้นในตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดมีการเคลื่อนที่ดังสมการ [13]

$$Q = \sigma S = CV \quad (4.5)$$

เมื่อ  $C$  คือความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า จากการทดลองนั้นไม่ได้มีการเปลี่ยนชนิดของฟิล์มพอลิโพรพิลีนจึงทำให้ค่าความหนาแน่นประจุของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวเท่ากัน ดังนั้นตามสมการที่ 4.5 แล้ว การเพิ่มพื้นที่ผิวฟิล์มจะส่งผลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบโทรโบอิเล็กทริกสามารถจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ทดลองไปแล้วตามรูปที่ 4.5 โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาดพื้นที่ 35 (5×7) 70 (7×10) และ 200 (10×20)  $\text{cm}^2$  จะให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4.8 6.48 และ 15.8 V ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดลองที่ได้ยังสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ได้สืบค้นไว้ก่อนหน้านี้ด้วย [14]



รูปที่ 4.5 ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่สัมพันธ์กับพื้นที่ฟิล์มพอลิโพรพิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการกวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยเครื่องกำเนิดการสั่น

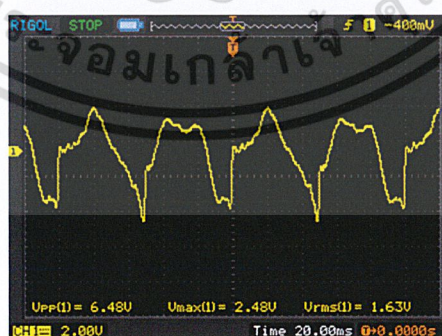
### 4.2.1 สัญญาณไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กวดด้วยความถี่ 20 Hz

การกวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยเครื่องกำเนิดการสั่นจะทำให้สามารถวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานขนาด  $1\text{ M}\Omega$  ได้ดังรูปที่ 4.6 4.7 และ 4.8 ซึ่งเกิดจากการใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาด  $5\times 7$   $7\times 10$  และ  $10\times 20\text{ cm}^2$  ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาด  $5\times 7\text{ cm}^2$  เมื่อกวดด้วยความถี่ 20 Hz

รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทาน  $1\text{ M}\Omega$  ที่ได้เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาดพื้นที่  $35\text{ cm}^2$  มีลักษณะเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่คล้ายรูปไซน์ ขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีค่า  $5.2\text{ V}_{pp}$  ความผิดเพี้ยนของสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นอาจเป็นผลมาจากการกวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความถี่นั้นจะทำให้ผิวหน้าอลูมิเนียมพอยล์ซึ่งหุ้มอะคริลิกแผ่นบนเคลื่อนเข้าหาผิวหน้าแผ่นฟิล์มพอลิโพรพิลีนแบบไม่ได้ขนานกันอย่างสมบูรณ์แต่ละตำแหน่งที่สัมผัสกันของวัสดุทั้ง 2 อาจเกิดการเสียดสีของเวลาเล็กน้อยจึงทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่บิดเบี้ยวจากรูปคลื่นไซน์ปกติ



รูปที่ 4.7 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาด  $7\times 10\text{ cm}^2$  เมื่อกวดด้วยความถี่ 20 Hz

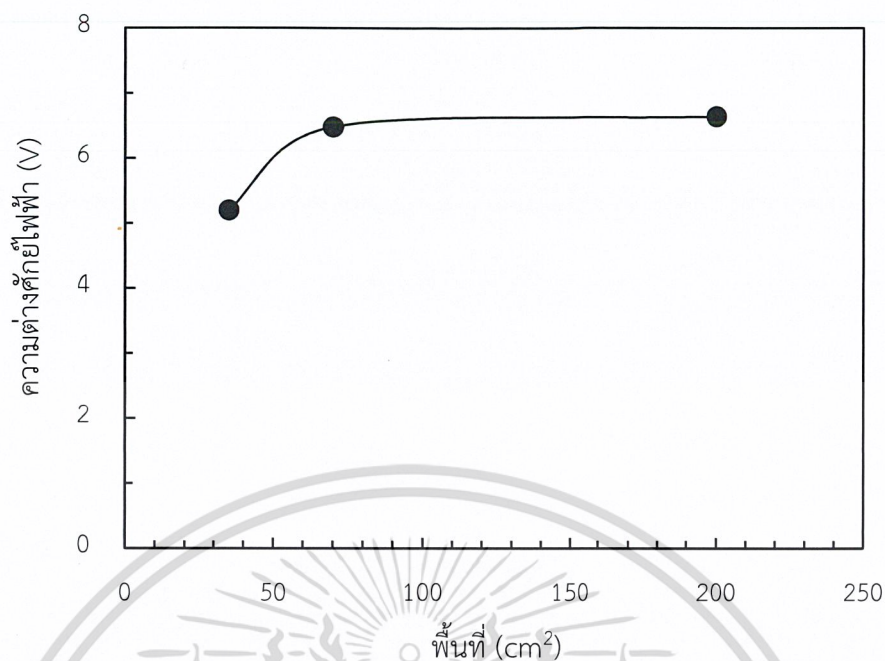
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาด  $70 \text{ cm}^2$  ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดต่ำสุดคร่อมตัวต้านทานขนาด  $1 \text{ M}\Omega$  ที่วัดได้มีค่า  $6.48 \text{ V}_{pp}$  ซึ่งมีค่ามากกว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มขนาด  $35 \text{ cm}^2$  ที่เป็นเช่นนี้เพราะพื้นที่ที่สัมผัสกันระหว่างอลูมิเนียมและฟิล์มพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นทำให้โอกาสในการเกิดประจุไฟฟ้ามากขึ้นไปด้วย อย่างไรก็ตามลักษณะสัญญาณที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับนั้นมิรูปลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ได้จากการใช้ฟิล์มขนาดพื้นที่  $35 \text{ cm}^2$  ความเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นนี้จะจะเป็นผลมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างฟิล์มพอลิโพรพิลีนและอลูมิเนียม ส่งผลให้ผิววัสดุทั้ง 2 ขนานกันน้อยลงขณะที่กดผิวอลูมิเนียมด้วยความถี่ แต่ละจุดที่ผิววัสดุจะสัมผัสในเวลาเดียวกันมีโอกาสน้อยลง ความเพี้ยนของสัญญาณจึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาด  $10 \times 20 \text{ cm}^2$  เมื่อกดด้วยความถี่  $20 \text{ Hz}$

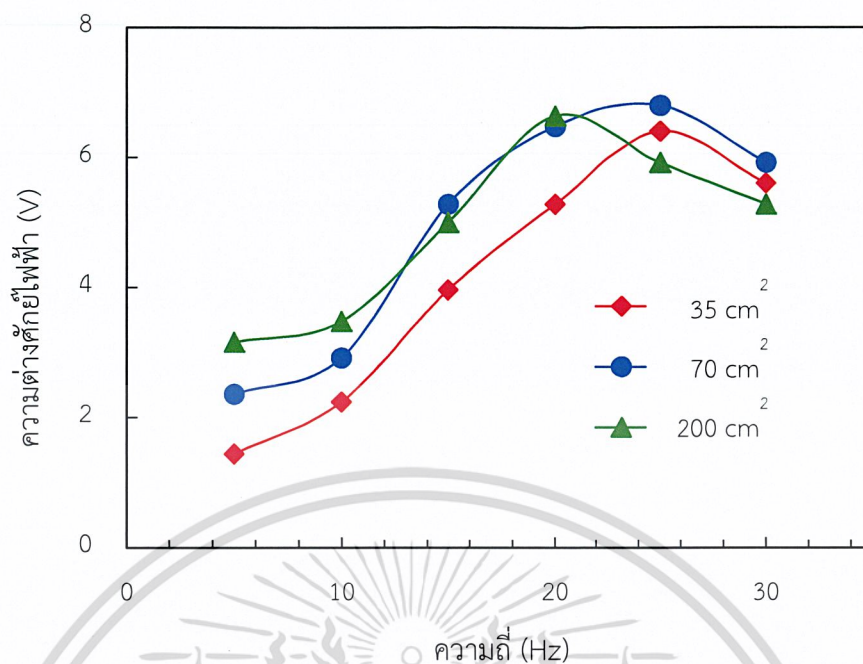
จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาด  $200 \text{ cm}^2$  นั้นให้สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีความเพี้ยนมากที่สุด เป็นลักษณะสัญญาณที่น่าจะเกิดขึ้นมาจากการผสมกันของสัญญาณหลาย ๆ ความถี่ แสดงว่าขณะที่กดอะคริลิกแผ่นบนให้ผิวอลูมิเนียมชนผิวฟิล์มพอลิโพรพิลีนด้วยความถี่  $20 \text{ Hz}$  จะทำให้การสัมผัสของผิววัสดุทั้ง 2 นั้นเกิดขึ้นได้ไม่ดีหรือความขนานกันของผิวสัมผัสมีค่าน้อยที่สุดเพราะแผ่นอะคริลิกมีขนาดใหญ่สุด น้ำหนักมากกว่าอะคริลิกที่ใช้กับฟิล์มขนาด  $5 \times 7 \text{ cm}^2$  และขนาด  $7 \times 10 \text{ cm}^2$  ดังนั้นจึงทำให้มีโอกาสโค้งงอได้มาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดต่ำสุดที่วัดได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้มีค่าเพียง  $6.64 \text{ V}_{pp}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ( $0.16 \text{ V}$ ) และถือว่าไม่มีความสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มขนาด  $70 \text{ cm}^2$  ดังนั้นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็น  $200 \text{ cm}^2$  ไม่ส่งผลให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น และพื้นที่ขนาดนี้ก็ไม่น่าเหมาะนำมาทำเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบโทรโบอิเล็กทริก ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดต่ำสุดที่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวฟิล์มพอลิโพรพิลีนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของพื้นที่ผิวฟิล์มพอลิโพรพิลีน

#### 4.2.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กีดด้วยความถี่ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าขนาดของพื้นที่มีผลต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้านั้นก็คือเมื่อพื้นที่มีขนาดใหญ่ขึ้นความต่างศักย์ไฟฟ้าก็จะเพิ่มมากขึ้นเช่นกันแต่จากกราฟขนาดพื้นที่ที่ 200 cm<sup>2</sup> และพื้นที่ขนาด 70 cm<sup>2</sup> มีค่าความต่างศักย์ต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากเมื่อพื้นที่มากขึ้นน้ำหนักของแผ่นอะคริลิกก็มากขึ้นตามไปด้วยเช่นกันเมื่อถูกกดมากๆทำให้ตัวแผ่นอะคริลิกเกิดการโก่งตัวขึ้นทำให้ผิวสัมผัสของแผ่นฟิล์มและแผ่นอลูมิเนียมสัมผัสกันได้ไม่เต็ม 100 % ทำให้ค่าความต่างศักย์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันและจากกราฟความถี่ที่ 20Hz ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีค่ามากที่สุดของพื้นที่ขนาด 70 cm<sup>2</sup> และ 200 cm<sup>2</sup> แต่ที่พื้นที่ขนาด 35 cm<sup>2</sup> ความถี่ที่ 25 Hz จะมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามากที่สุดแล้วจากนั้นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเริ่มลดลงตามความถี่ที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความถี่การกวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

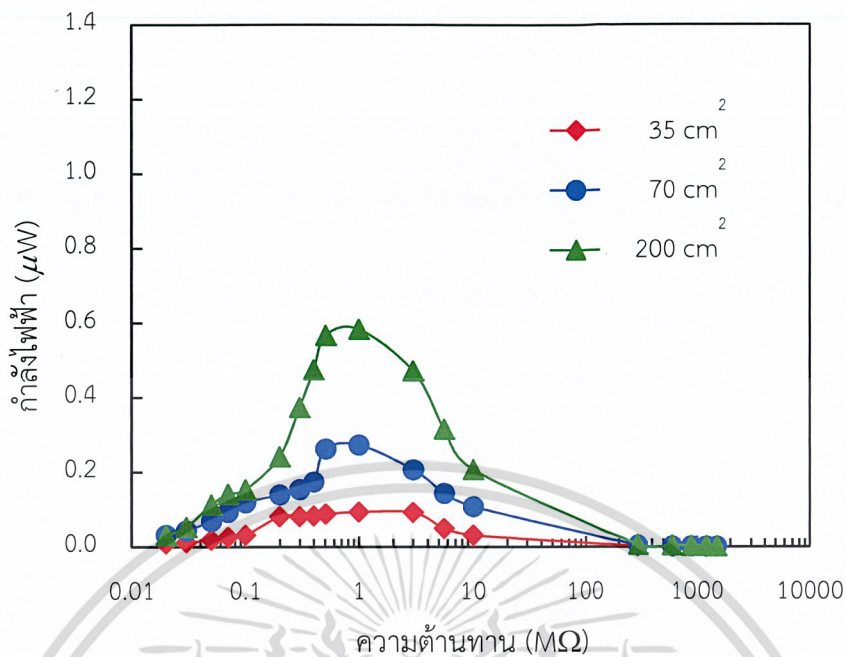
#### 4.3 การทดสอบกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในส่วนนี้เป็นผลการทดลองวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการเปลี่ยนค่าของตัวต้านทานเป็นค่าต่าง ๆ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้รับแรงกวดด้วยความถี่สม่ำเสมอ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะถูกนำไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยศึกษาฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่มีพื้นที่ต่างกันมีด้วยกัน 3 ขนาดคือ 35 70 และ 200 cm<sup>2</sup> กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ได้รับแรงกวดแต่ละความถี่แสดงดังรูปที่ 4.11-4.15

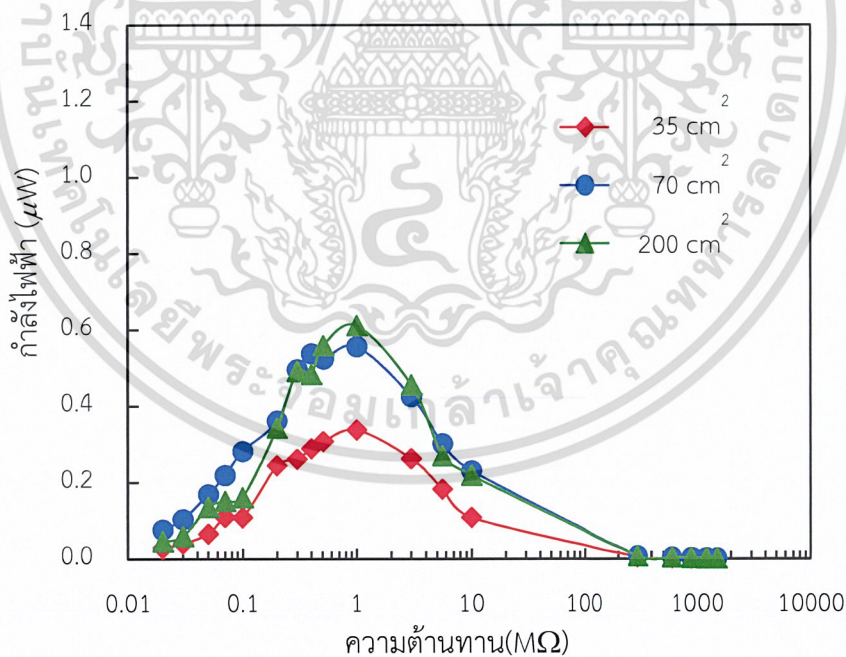
รูปที่ 4.11-4.15 แสดงให้เห็นว่า เมื่อความต้านทานเพิ่มมากขึ้นกำลังไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยกำลังไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุดที่ความต้านทาน 1 M $\Omega$  และหลังจากนั้นค่ากำลังไฟฟ้าจะค่อย ๆ ลดลงทำให้กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นทรงระฆังคว่ำเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลได้น้อยลง

เมื่อพิจารณากรณีที่พื้นที่ผิวฟิล์มเท่ากันแต่มีการเปลี่ยนความถี่ พบว่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่การกวด นั่นคือกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 25 Hz มีค่าประมาณ 2.4 3.3 และ 2.9  $\mu$ W สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มขนาด 35 70 และ 200 cm<sup>2</sup> ตามลำดับ การที่กำลังไฟฟ้าของฟิล์มพื้นที่ 200 cm<sup>2</sup> น้อยกว่ากำลังไฟฟ้าของฟิล์มขนาดพื้นที่ 70 cm<sup>2</sup> นั้นเป็นผลมาจากการลดลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อขนาดพื้นที่ฟิล์มเพิ่มขึ้นตามรูปที่ 4.10 ดังนั้นขนาดพื้นที่สัมผัสกันระหว่างแผ่นอลูมิเนียมพอลิโพรพิลีนและแผ่นพอลิโพรพิลีนที่มากเกินไปจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดลงเพราะการสัมผัสของวัสดุทั้ง 2 เกิดขึ้นได้ไม่ดี ผลการทดลองบ่งชี้ว่าขนาดฟิล์มที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ควรมีขนาดพื้นที่เกิน 70 cm<sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

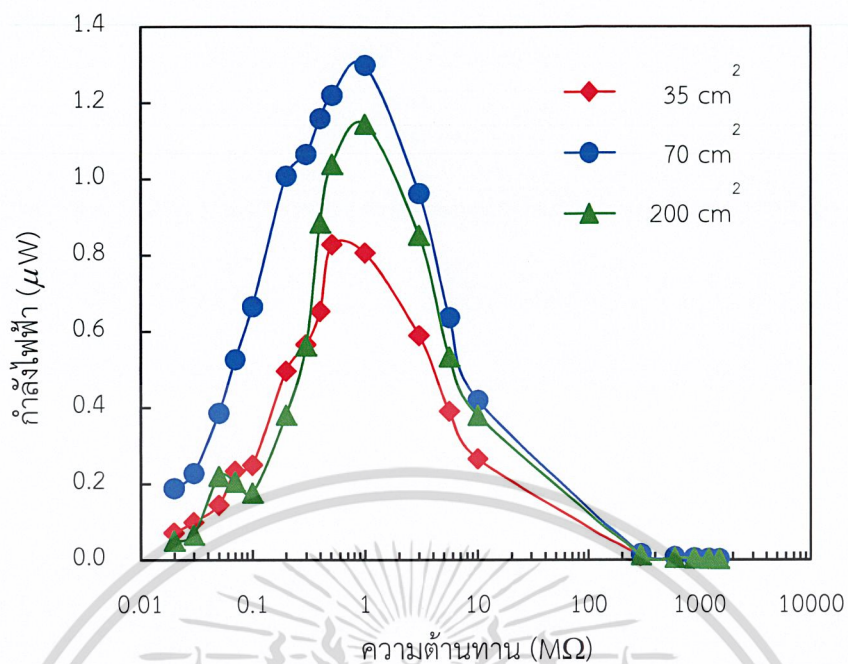


รูปที่ 4.11 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดด้วยความถี่ 5 Hz

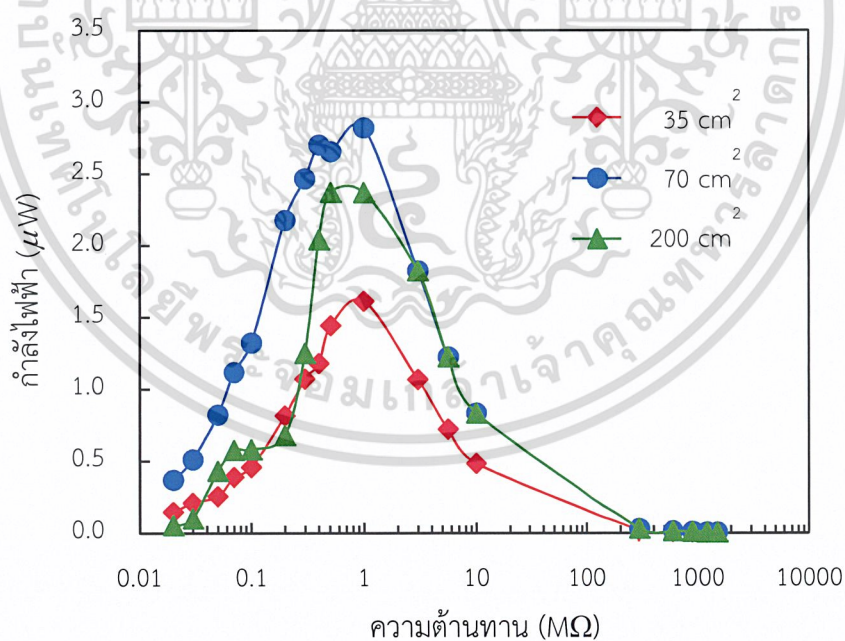


รูปที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดด้วยความถี่ 10 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

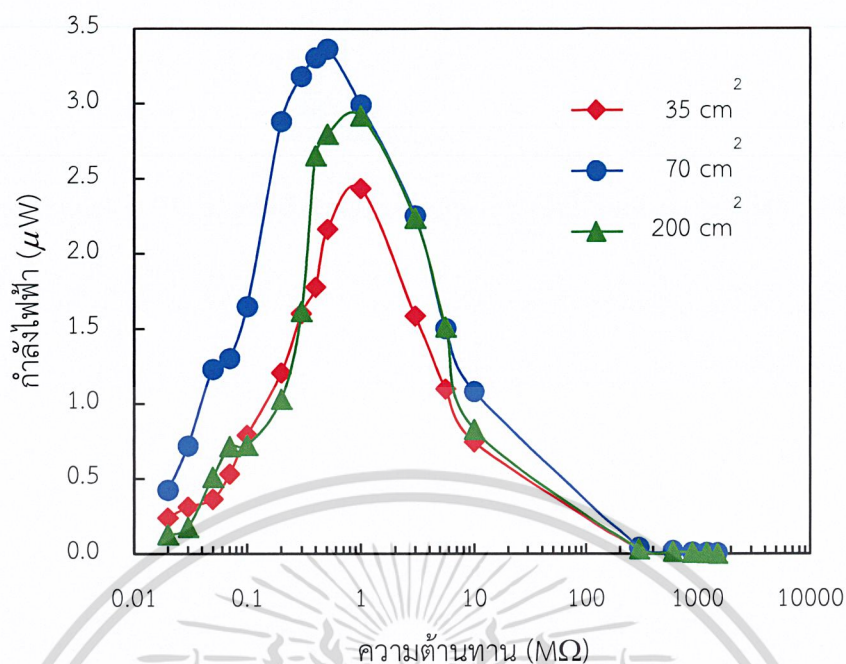


รูปที่ 4.13 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดด้วยความถี่ 15 Hz



รูปที่ 4.14 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดด้วยความถี่ 20 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ก่ดด้วยความถี่ 25 Hz

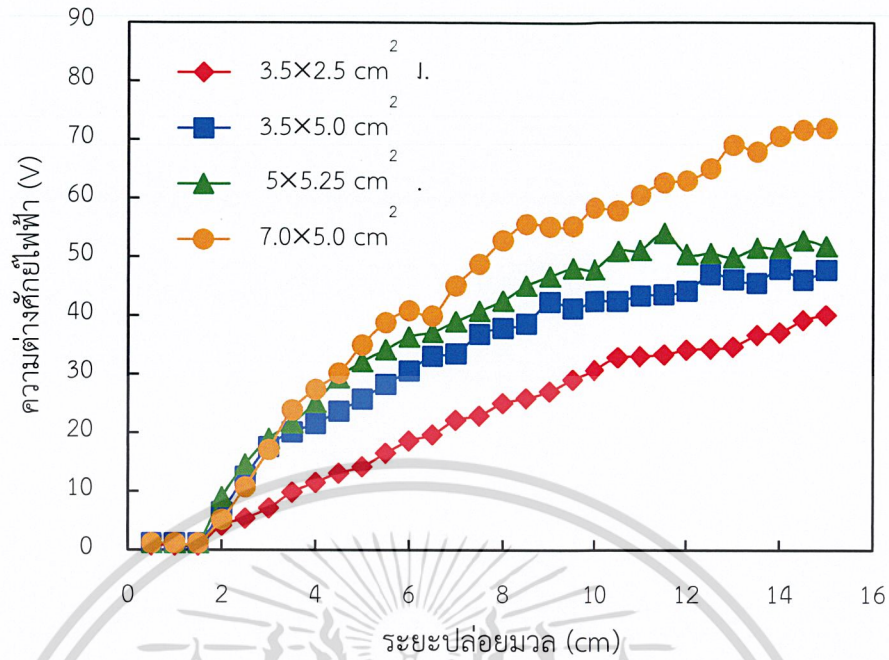
#### 4.4 การตรวจวัดระดับแรงกระแทกด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

แรงมีผลต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก แรงที่ใช้ในการทดลองนี้ได้จากการปล่อยมวลหนัก 200 กรัม กระแทกลงบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยมีระยะในการปล่อยมวลเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 เซนติเมตร ทดลองปล่อยมวลช่วงระยะทั้งหมดคือ 15 เซนติเมตร ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มทั้ง 2 ชนิด มีดังนี้

##### 4.4.1 การวัดแรงกระแทกด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากฟิล์มพอลิโพรพิลีน

รูปที่ 4.16 เป็นกราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตามขนาดของพื้นที่ที่มีขนาดต่างกัน 4 ขนาด ซึ่งค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ของตัวต้านทาน 510 kΩ เพื่อต้องการลดขนาดของสัญญาณให้เล็กลงโดยกราฟเส้นสีม่วงมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 70 V พื้นที่มีขนาด 7 × 5 cm<sup>2</sup> เส้นสีเขียวคือพื้นที่ขนาด 5.25 × 5 cm<sup>2</sup> ได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 52 V เส้นสีแดงคือพื้นที่ขนาด 5 × 3.5 cm<sup>2</sup> ได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 45 V และสุดท้ายเส้นสีน้ำเงินคือพื้นที่ขนาด 3.5 × 2.5 cm<sup>2</sup> ได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 38 V ทำให้เห็นว่า เมื่อพื้นที่มากขึ้นพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสองชนิดจะมีมากขึ้นทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามขนาดของพื้นที่ที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้รูปที่ 4.16 ยังบ่งบอกให้รู้ว่าการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากฟิล์มพอลิโพรพิลีนขนาด 3.5×2.5 cm<sup>2</sup> มีความเป็นเชิงเส้นตรงที่สุด ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นเซ็นเซอร์วัดแรงกระแทกได้ดีที่สุด

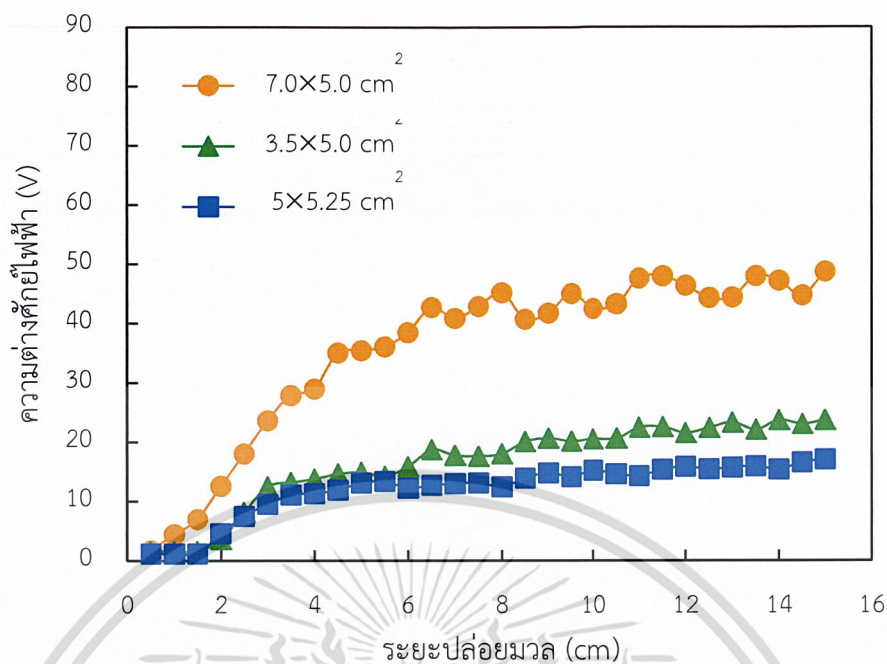
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มพอลิโพรพิลีนเป็นฟังก์ชันของระยะปล่อยมวล

#### 4.4.2 การวัดแรงกระแทกด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากฟิล์มพอลิเอทีลีน

รูปที่ 4.17 เป็นกราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้ตามขนาดของพื้นที่ เมื่อมีการปล่อยมวลกระแทกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ฟิล์มชนิดพอลิเอทีลีน โดยความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามระยะที่ปล่อยมวลตกกระทบบนฟิล์ม เมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มมากขึ้นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน พื้นที่ขนาด  $7 \times 5 \text{ cm}^2$  กราฟเส้นสีส้มได้ค่าความต่างศักย์สูงสุดเท่ากับ 50 V โดยขนาดของฟิล์มที่เล็กลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกันดังแสดงในกราฟ นอกจากนี้เมื่อพิจารณากราฟแต่ละเส้นพบว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มจะมีค่าเพิ่มขึ้นเร็ว แต่เมื่อระยะปล่อยมวลเพิ่มมากขึ้นความชันของกราฟแต่ละเส้นจะลดลง แสดงให้เห็นว่าความไวในการตรวจจับระดับการกระแทกลดลง และเมื่อเปรียบเทียบความชันของกราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากพอลิเอทีลีน (รูปที่ 4.17) นั้นจะมีค่าที่น้อยกว่าความชันของกราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากพอลิโพรพิลีน (รูปที่ 4.16) ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำมาจากฟิล์มพอลิเอทีลีนจะมีความเหมาะสมในการนำมาทำเป็นเซ็นเซอร์วัดระดับการกระแทกได้ดีกว่า

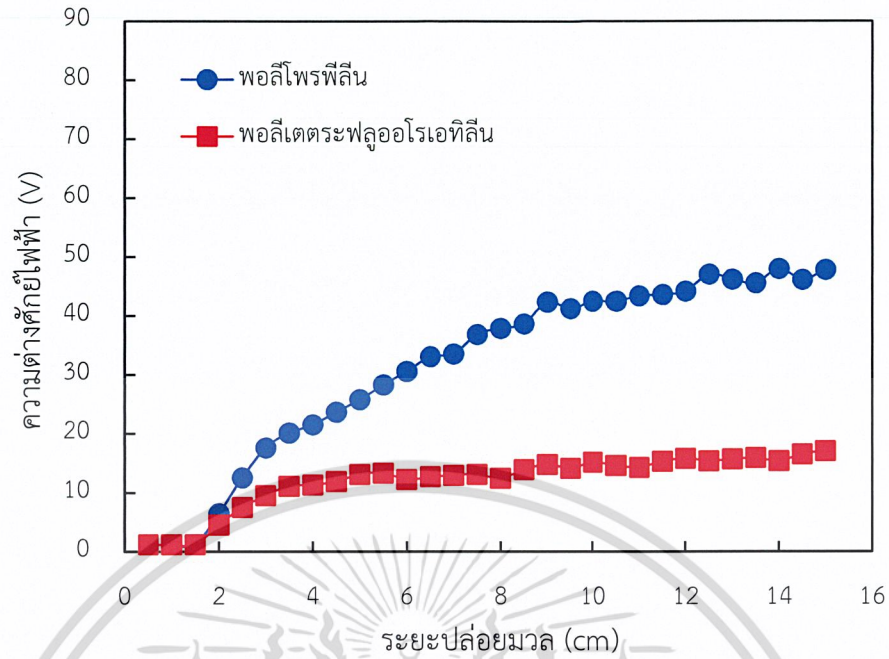


รูปที่ 4.17 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนเป็นฟังก์ชันของระยะปล่อยมวล

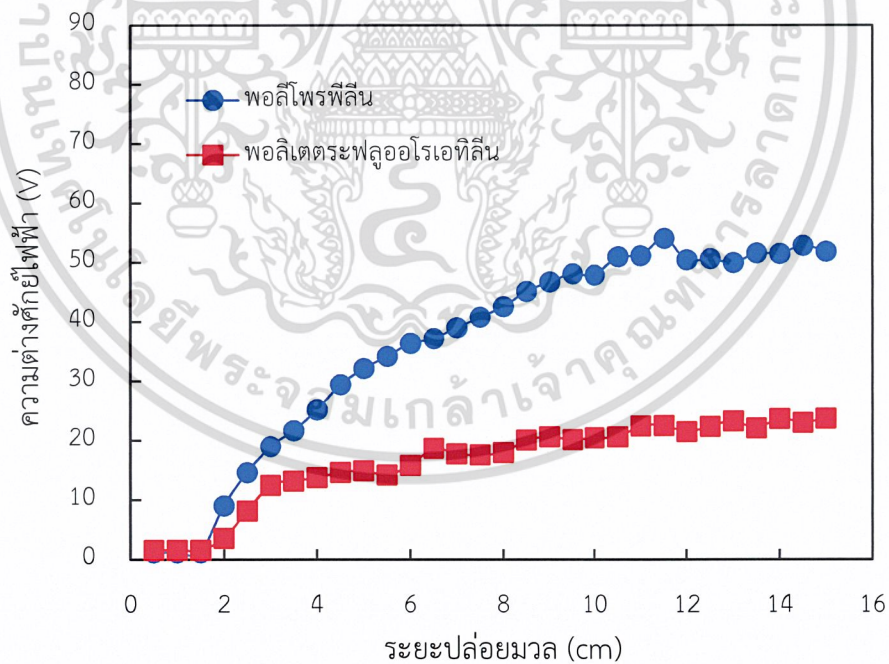
#### 4.4.3 ความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะการปล่อยมวล

เมื่อเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มพอลิโพรพิลีนและฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนที่พื้นที่ขนาด  $3.5 \times 5 \text{ cm}^2$ ,  $5 \times 5.25 \text{ cm}^2$  และขนาด  $5 \times 7 \text{ cm}^2$  จะทำให้ทราบว่าขนาดของพื้นที่และระยะที่ใช้ในการปล่อยมวลยังคงมีผลต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยที่เมื่อพื้นที่และระยะการปล่อยเพิ่มมากขึ้นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นโดยฟิล์มพอลิโพรพิลีนจะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามากกว่าฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนเนื่องจากฟิล์มพอลิโพรพิลีนมีการเพิ่มประจุไฟฟ้าที่พื้นผิวของฟิล์มแต่กับฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนไม่ได้มีการเพิ่มประจุที่พื้นผิว ซึ่งมีกราฟเปรียบเทียบเพียง 3 กราฟ เนื่องจากที่ขนาดพื้นที่  $2.5 \times 3.5 \text{ cm}^2$  ของฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนมีสัญญาณไฟฟ้าที่น้อยมากจนวัดไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

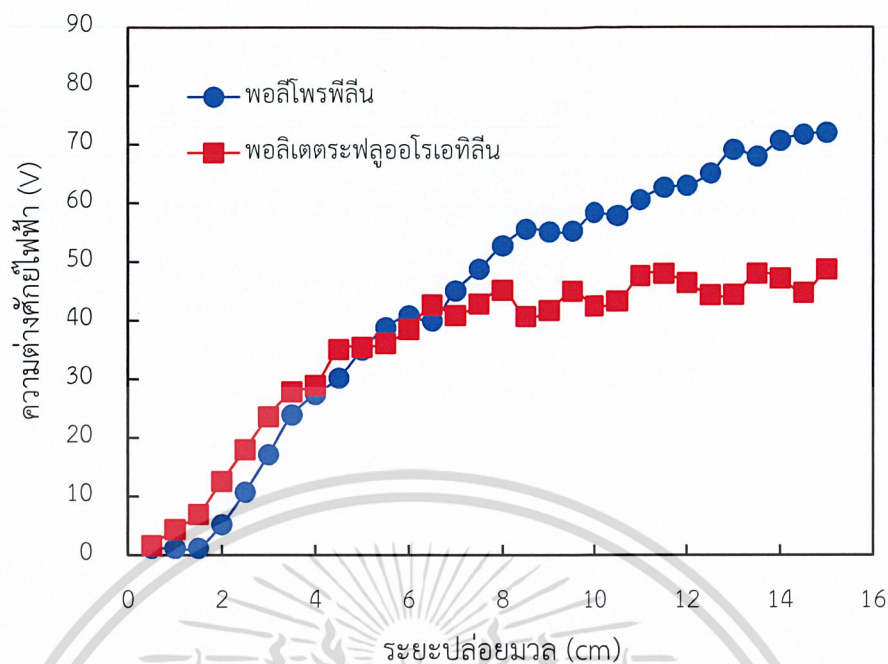


รูปที่ 4.18 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มที่ขนาดพื้นที่  $3.5 \times 5 \text{ cm}^2$



รูปที่ 4.19 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มที่ขนาดพื้นที่  $5 \times 5.25 \text{ cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มที่ขนาดพื้นที่  $5 \times 7 \text{ cm}^2$

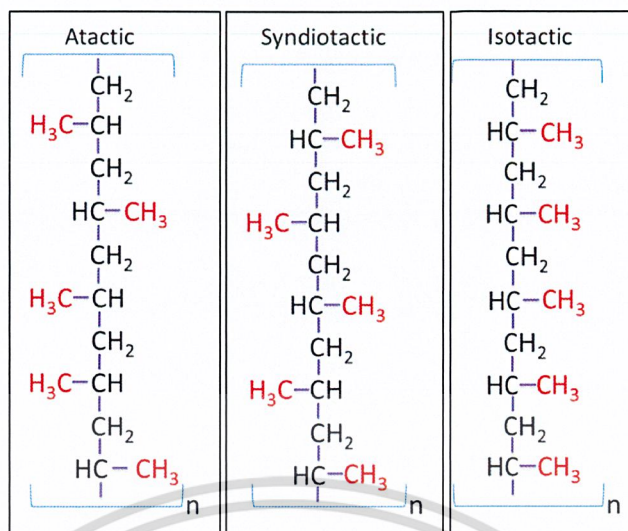
#### 4.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ทำการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวฟิล์มพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทเรทเทอโรฟลูออโรเอทิลีนเพื่อวิเคราะห์หาชนิดของสารประกอบ โดยการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงรังสีอินฟราเรดโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR) ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น NICOLET 6700 ผลิตจากประเทศเยอรมัน

##### 4.5.1 โครงสร้างของฟิล์มพอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกที่เบา มีความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทกและไม่เสียรูปได้ง่าย คุณสมบัติทางเคมีของพอลิโพรพิลีนสามารถแบ่งออกเป็น 3 โครงสร้างคือเป็นอะแทคติกพอลิโพรพิลีน (atactic polypropylene, PP-at), เซนดิโอแทคติกพอลิโพรพิลีน (syndiotactic polypropylene, PP-st) และไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน (isotactic polypropylene, PP-it) แต่ละโครงสร้างจะมีการจัดเรียงโมเลกุลหรือหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกัน ดังรูป 4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



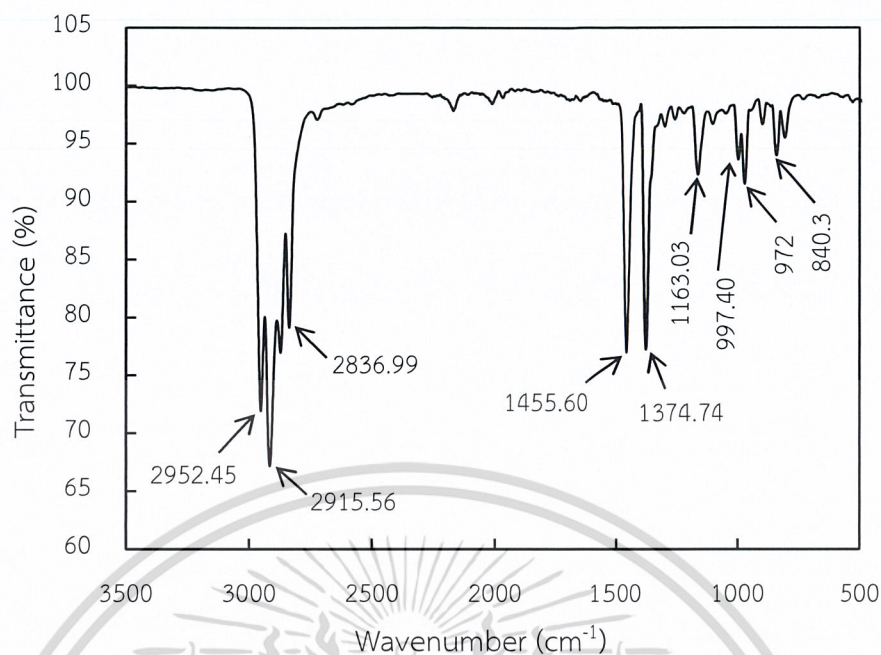
รูปที่ 4.21 โครงสร้างทางเคมีของฟิล์มพอลิโพรพิลีน

- Atactic polypropylene หมู่ฟังก์ชันเมทิล(-CH<sub>3</sub>) จะถูกจัดเรียงแบบสุ่มมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและไม่มีโครงสร้างผลึก ทำให้สามารถละลายในตัวทำละลายที่อุณหภูมิไม่สูงมาก และโครงสร้างนี้เป็นผลพลอยได้จากการผลิต Isotactic polypropylene นอกจากนี้ยังเป็นโครงสร้างที่มีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำ สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิ -15 ถึง 120 °C เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR แล้วจะได้ค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่น 977 cm<sup>-1</sup> และ 963 cm<sup>-1</sup> [15]

- Syndiotactic polypropylene หมู่ฟังก์ชันเมทิลมีการจัดเรียงตรงข้ามกัน มีความเป็นผลึกสูงกว่า atactic polypropylene แต่น้อยกว่า isotactic polypropylene ทำให้มีความแข็งแรงระดับปานกลางเมื่อเทียบกับอีก 2 โครงสร้าง มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 160-185 °C เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ได้พิกัดสัญญาณการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 1005, 867 และ 812 cm<sup>-1</sup> [16]

- Isotactic polypropylene โครงสร้างมีการจัดเรียงของหมู่เมทิลอยู่ด้านเดียวกันอย่างเป็นระเบียบจึงมีความเป็นผลึกสูง ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรง ทนทาน มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 170-220 °C ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงโครงสร้างและความเป็นผลึก เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR จะพบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 2950, 2915, 2838, 1455, 1377, 1166, 997, 972, 840 และ 808 cm<sup>-1</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

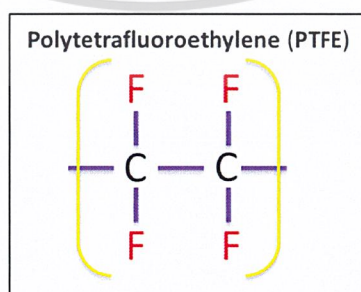


รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของพอลิโพรพิลีน

จากรูปที่ 4.22 พบว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 840.3 972 997.40 1163.03 1374.74 1455.60 2836.99 2915.56 และ 2952.45  $\text{cm}^{-2}$  ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดกลืนของพอลิโพรพิลีนที่มีโครงสร้างแบบไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน

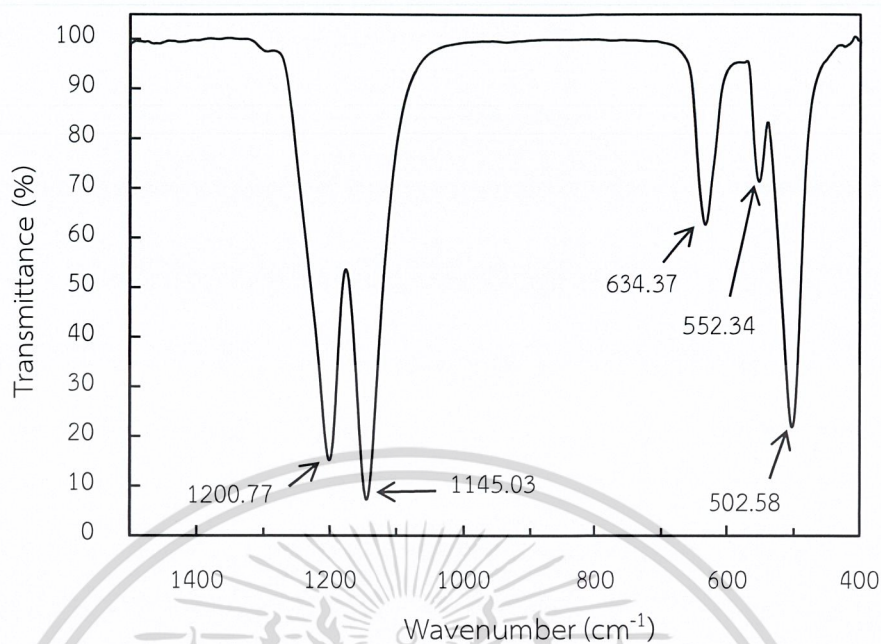
#### 4.5.2 โครงสร้างของฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน

พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene; PTFE) หรือ เทฟลอน (Teflon) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นสารประกอบคาร์บอนและฟลูออรีนที่มีมวลโมเลกุลสูง มีคุณสมบัติเป็นของแข็งชนิดไฮโดรโฟบิก ทนอุณหภูมิที่สูงและต่ำได้ดี เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ได้พีคสัญญาณการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 1201, 1147, 638, 554 และ 509  $\text{cm}^{-1}$  [15] มีสูตรโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 โครงสร้างทางเคมีของฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

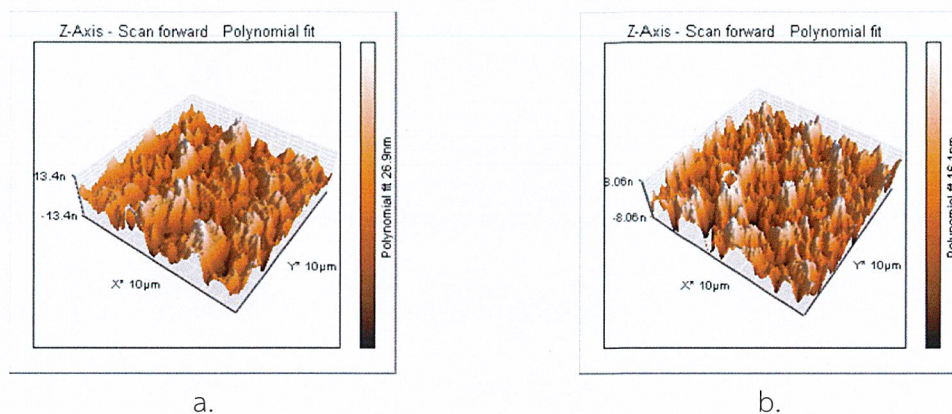


รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR ของฟิล์มพอลิเอทเธอร์ฟลูออโรเอทิลีน

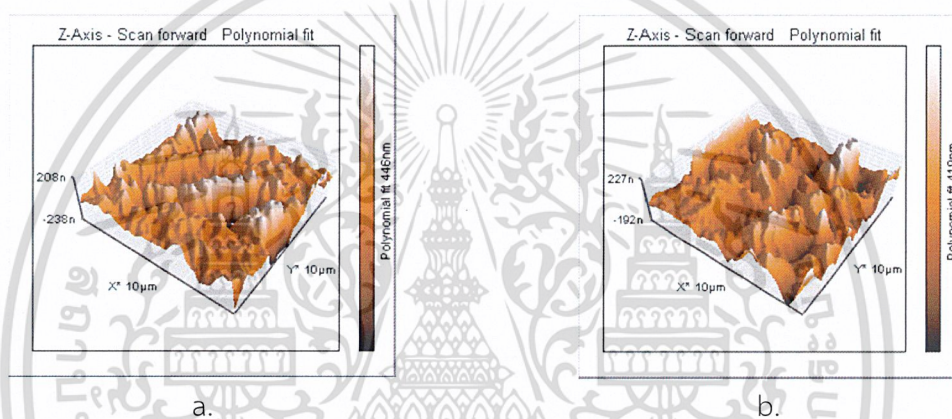
จากรูป 4.24 พบว่าฟิล์มพอลิเอทเธอร์ฟลูออโรเอทิลีนที่ใช้ในการทดลองแสดงค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 502.58 552.34 634.37 1145.03 และ 1200.77  $\text{cm}^{-2}$  ซึ่งสอดคล้องกับพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่ได้จากผลงานของนักวิจัยก่อนหน้า

#### 4.6 ความขรุขระของผิวฟิล์มพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทเธอร์ฟลูออโรเอทิลีน

รูปที่ 4.25 และ 4.26 แสดงให้เห็นสภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทเธอร์ฟลูออโรเอทิลีนทั้งก่อนและหลังการทดลองปล่อยมวลกระแทกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของพอลิเอทเธอร์ฟลูออโรเอทิลีนหรือเทปลอนจะมีผิวที่ขรุขระกว่าผิวของพอลิโพรพิลีนอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาผลการวัดค่าความขรุขระพื้นผิวเฉลี่ยกำลังสอง ( $S_q$ ) ตามตารางที่ 4.1 พบว่าความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มพอลิโพรพิลีนทั้งก่อนและหลังทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน จึงถือได้ว่าการกดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำมาจากฟิล์มพอลิโพรพิลีนจะไม่ทำให้สภาพผิวฟิล์มชนิดนี้เกิดการเปลี่ยนแปลง ในทางตรงกันข้ามความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มพอลิเอทเธอร์ฟลูออโรเอทิลีนหลังการทดลองจะมีค่าที่น้อยกว่าก่อนการทดลองปล่อยมวล แสดงให้เห็นว่าการกดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้ผิวฟิล์มเทปลอนเรียบมากขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้น่าจะมาจากเทปลอนมีความแข็งที่น้อยกว่าพอลิโพรพิลีน การที่ผิวฟิล์มพอลิเอทเธอร์ฟลูออโรเอทิลีนเรียบมากขึ้นเมื่อได้รับแรงกระแทกนั้นจะส่งผลเสียทำให้ความสามารถในการสร้างประจุของฟิล์มลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าในหัวข้อก่อนหน้า



รูปที่ 4.25 ภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิโพรพิลีน a. ก่อนทดลอง และ b. หลังการทดลอง



รูปที่ 4.26 ภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน a. ก่อนทดลอง และ b. หลังการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ความขรุขระของพื้นผิวพอลิโพรพิลีนและพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน

ฟิล์ม	ความขรุขระ (nm)	
	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง
พอลิโพรพิลีน	6.46	5.53
พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน	216.32	187.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กโดยอาศัยหลักการโทรโบอิเล็กทริก ซึ่งสามารถประดิษฐ์ขึ้นมาจากวัสดุที่มีอยู่ทั่วไปตามท้องตลาด ระดับความสามารถการผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง จากการทำโครงการพิเศษสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่สร้างขึ้นเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการสัมผัสและแยกออกจากกันของวัสดุ 2 ชนิด ที่มีสภาพความเป็นขั้วทางไฟฟ้าต่างกันหรือมีลำดับอนุกรมโทรโบอิเล็กทริก (triboelectric series) ที่ต่างกัน โดยในโครงการนี้ได้เลือกใช้วัสดุ 3 ชนิด คือ อลูมิเนียมฟอยล์ พลาสติกโพรพิลีน และโพลีเอทเธอร์ฟลูออโรเอทิลีน มาสร้างเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2 แบบ คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากอลูมิเนียมและฟิล์มโพลีโพรพิลีน และจากอลูมิเนียมกับโพลีเอทเธอร์ฟลูออโรเอทิลีน ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเคมีโพลีโพรพิลีนพบว่าหมู่ฟังก์ชัน  $-CH_3$  อยู่เป็นจำนวนมากและมีรูปแบบการตกกิ่งรังสีอินฟราเรดตรงกับโครงสร้างแบบไอโซแทคติก (isotactic) แสดงให้เห็นว่าหมู่ฟังก์ชัน  $-CH_3$  มีการจัดเรียงในทิศทางเดียวกัน ส่วนโพลีเอทเธอร์ฟลูออโรเอทิลีนนั้นตรวจพบหมู่ฟังก์ชัน  $-CF_2$  อยู่บริเวณผิวฟิล์มเป็นจำนวนมาก หมู่ฟังก์ชันทั้ง 2 นี้มีความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนได้ดีกว่าอะตอมอลูมิเนียม ดังนั้นการสัมผัสกันของโพลีเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้กับอลูมิเนียมจะทำให้เกิดปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริกได้ดีด้วยจึงสามารถนำมาสร้างเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กได้

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจากอลูมิเนียมและฟิล์มโพลีโพรพิลีนด้วยขนาด  $10 \times 20 \text{ cm}^2$  พบว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 3 ขนาดนี้สามารถจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าออกมาได้มากขึ้นเมื่อพื้นที่สัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและฟิล์มโพลีโพรพิลีนเพิ่มขึ้น ความต่างศักย์ไฟฟ้ามากที่สุด  $15.8 \text{ V}$  ได้มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ฟิล์มขนาดพื้นที่  $10 \times 20 \text{ cm}^2$  และได้รับแรงกดจากฝ่ามือของมนุษย์ แต่สำหรับการกดด้วยเครื่องกำเนิดการสั่นนั้นจะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้ามากที่สุดเพียง  $6.64 \text{ V}$  ที่พื้นที่ฟิล์มขนาดเท่ากัน ที่เป็นเช่นนี้น่าจะเกิดจากแรงกดที่น้อยของเครื่องกำเนิดการสั่นและพื้นที่การส่งแรงกดไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมีพื้นที่น้อยกว่าการใช้ฝ่ามือจึงส่งผลให้แต่ละตำแหน่งของพื้นผิวฟิล์มโพลีโพรพิลีนและอลูมิเนียมฟอยล์สัมผัสกันความดันที่ไม่สม่ำเสมอ

ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด  $7 \times 5$  และ  $7 \times 10 \text{ cm}^2$  แสดงให้เห็นว่า กำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวการสัมผัสกันระหว่างอลูมิเนียมฟอยล์และฟิล์มโพลีโพรพิลีน โดยกำลังไฟฟ้ามักมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มพื้นที่การสัมผัส นอกจากนี้เมื่อทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนความถี่การกดแต่คงพื้นที่การสัมผัสให้เท่ากันพบว่า กำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเพิ่มตามความถี่การกดที่สูงขึ้น กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตได้มีค่า  $3.36 \times 10^{-6} \text{ W}$  เมื่อใช้ฟิล์มโพลีโพรพิลีนขนาด  $7 \times 10 \text{ cm}^2$  ความถี่การกด  $25 \text{ Hz}$ . และความต้านทาน  $1 \text{ M}\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาตรวจวัดระดับแรงกระแทกโดยการเปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการใช้ฟิล์มพอลิโพรพิลีนและพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนแล้วพบว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีค่ามากขึ้นเมื่อระยะเวลาการปล่อยมวลกระทบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาพื้นที่ฟิล์มที่เท่ากัน พอลิโพรพิลีนจะให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากกว่าพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน ยิ่งไปกว่านั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มพอลิโพรพิลีนที่วัดได้ยังมีการความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นมากกว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะฟิล์มพอลิโพรพิลีนแข็งกว่าพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน ความขรุขระพื้นผิวของพอลิโพรพิลีนไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากได้รับการกระแทก สัดส่วนประจุไฟฟ้าต่อแรงกระแทกจึงไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนจึงมีความเหมาะสมเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดแรงกระแทกได้ดีกว่า จากการทดลองพบว่าฟิล์มขนาด  $2.5 \times 3.5 \text{ cm}^2$  เป็นขนาดที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นเซ็นเซอร์มากที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) การสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กควรจัดวางพื้นผิววัสดุทรีโบอิเล็กทริกให้ขนานกันที่สุด
- 2) ในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กควรติดตั้งวัสดุทรีโบอิเล็กทริกติดกับแผ่นอะคริลิกและแผ่นไม้ให้เรียบที่สุดและไม่มีฟองอากาศ
- 3) ควรทำความสะอาดพื้นผิวหรือป้องกันฝุ่นที่จะเกาะวัสดุทรีโบอิเล็กทริกเพื่อป้องกันการสูญเสียประจุไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก
- 4) ในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กควรออกแบบให้ได้รับความดันหรือแรงกดอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ผิววัสดุทรีโบอิเล็กทริกแต่ละตำแหน่งสัมผัสได้สนิทและสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Wang, Z.L. and Song J. 2006. "Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays." *Science*. 312(5771) : 242-246.
- [2] Zhu, G. Lin Z.-H. Jing Q. Bai P. Pan C. Yang Y. Zhou Y. and Wang Z.L. 2013. "Toward Large-Scale Energy Harvesting by a Nanoparticle-Enhanced Triboelectric Nanogenerator." *Nano Letters*. 13(2) : 847-853.
- [3] Priya, S. and Inman D.J. 2008. **Energy Harvesting Technologies**. Springer US.
- [4] Zhu, G. Pan C. Guo W. Chen C.-Y. Zhou Y. Yu R. and Wang Z.L. 2012. "Triboelectric-Generator-Driven Pulse Electrodeposition for Micropatterning." *Nano Letters*. 12(9) : 4960-4965.
- [5] Serway, R.A. and Jewett J.W. 2013. **Physics for Scientists and Engineers**. Cengage Learning.
- [6] Niu, S. Liu Y. Wang S. Lin L. Zhou Y.S. Hu Y. and Wang Z.L. 2013. "Theory of Sliding-Mode Triboelectric Nanogenerators." *Advanced Materials*. 25(43) : 6184-6193.
- [7] Rathore, S. Sharma S. Swain B.P. and Ghadai R.K. 2018. "A Critical Review on Triboelectric Nanogenerator." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 377 : 012186.
- [8] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. 2019. เทคนิคฟูเรียร์ทรานซฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR). [online].  
Available: <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec>.
- [9] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. 2019. การวิเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Atomic Force Microscopy. [online].  
Available: <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec>.
- [10] Xing, F. Jie Y. Cao X. Li T. and Wang N. 2017. "Natural triboelectric nanogenerator based on soles for harvesting low-frequency walking energy." *Nano Energy*. 42 : 138-142.
- [11] Wang, S. Lin L. and Wang Z.L. 2012. "Nanoscale Triboelectric-Effect-Enabled Energy Conversion for Sustainably Powering Portable Electronics." *Nano Letters*. 12(12) : 6339-6346.
- [12] Lasagni, M. Pavan P. Bertacchini A. and Larcher L. Force impact effect in contact-mode triboelectric energy harvesters: Characterization and modeling. 2016 IEEE SENSORS2016. p. 1-3.
- [13] Hinchet, R. Seung W. and Kim S.-W. 2015. "Recent Progress on Flexible Triboelectric Nanogenerators for SelfPowered Electronics." *ChemSusChem*. 8(14): 2327-2344.

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Seol, M.-L. Woo J.-H. Jeon S.-B. Kim D. Park S.-J. Hur J. and Choi Y.-K. 2015. "Vertically stacked thin triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting." *Nano Energy*. 14 : 201-208.
- [15] Jung, M.R. Horgen F.D. Orski S.V. Rodriguez C V. Beers K.L. Balazs G.H. Jones T.T. Work T.M. Brignac K.C. Royer S.-J. Hyrenbach K.D. Jensen B.A. and Lynch J.M. 2018. "Validation of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms." *Marine Pollution Bulletin*. 127 : 704-716.
- [16] Zheng, K. Liu R. Chang H. Shen D. and Huang Y. 2009. "In situ FTIR spectroscopic study of the conformational change of syndiotactic polypropylene during the isothermal crystallization." *Polymer*. 50(24) : 5782-5786.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้