

# การเก็บเกี่ยวพลังงานกลด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

HARVESTING ON MECHANICAL ENERGY WITH PIEZOELECTRIC MATERIAL



ดาร์รัตน์ เสมอใจ

DARARAT SAMKHAI

วราภรณ์ ร่วงแก้ว

WARAPORN RUANGKEAW

สิริยากร นุ้ยชะวะดี

SIRIYAKORN NUICHAWADEE

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การเก็บเกี่ยวพลังงานกลด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

HARVESTING ON MECHANICAL ENERGY WITH PIEZOELECTRIC MATERIAL



ดรรารัตน์ เสม็ไข

DARARAT SAMKHAI

วราภรณ์ ร่วงแก้ว

WARAPORN RUANGKEAW

สิริยากร นุ้ยชะวะดี

SIRIYAKORN NUICHAWADEE

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# HARVESTING ON MECHANICAL ENERGY WITH PIEZOELECTRIC MATERIAL



A PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN ENERGY ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
PRINCE OF CHUMPHON CAMPUS

2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2021**

**DEPARTMENT OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**PRINCE OF CHUMPHON CAMPUS**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การเก็บเกี่ยวพลังงานกลด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก  
PROJECT TITLE Harvesting on mechanical energy with piezoelectric material  
ชื่อนักศึกษา นางสาวดารารัตน์ เส็มไข รหัสประจำตัว 60514018  
นางสาววราภรณ์ รุ่งแก้ว รหัสประจำตัว 60514044  
นางสาวสิริยากร น้อยชะวะดี รหัสประจำตัว 60514052  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมพลังงาน  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.วิสิทธิ์ เอกวานิช  
ปริญญาานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์			ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ปราโมทย์ กุศล	กรรมการสอบ		
ผศ.ดร.ปัญญาแดงวิไลลักษณ์	กรรมการสอบ		
ดร.วิสิทธิ์ เอกวานิช	อาจารย์ที่ปรึกษา		

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 28 พฤษภาคม 2564 เวลา 09.00 – 14.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้องประชุมออนไลน์

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ กุศล)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 28 พฤษภาคม พ.ศ. 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>หัวข้อปริญญานิพนธ์</b>	การเก็บเกี่ยวพลังงานกลด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	
<b>ชื่อนักศึกษา</b>	นางสาวดารารัตน์ เล็มไม	<b>รหัสประจำตัว</b> 60514018
	นางสาววารารณ์ ร่วงแก้ว	<b>รหัสประจำตัว</b> 60514044
	นางสาวสิริยากร น้อยชะวะดี	<b>รหัสประจำตัว</b> 60514052
<b>ปริญญา</b>	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
<b>สาขาวิชา</b>	วิศวกรรมพลังงาน	
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ดร.วิสิทธิ์ เอกวานิช	
<b>ปริญญานิพนธ์</b>		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ออกแบบและสร้างชุดพื้นที่ทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าโดยการกระตุ้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ประกอบด้วยชุดพื้นที่ทดลองรับแรงกระตุ้นขนาด 100 x 100 เซนติเมตร ที่ประกอบด้วยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกชนิดตะกั่วเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate, PZT) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร จำนวน 50 แผ่น เพื่อผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานกลจากแรงกระตุ้นของผู้เข้าร่วมทดลอง โดยในงานวิจัยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้า คือ ขนาดของแรงและความถี่กระตุ้นจากตำแหน่งการเหยียบบนพื้นชุดทดลอง เมื่อใช้ขนาดแรงกระตุ้น 490 588 และ 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 60 และ 70 กิโลกรัม) ตามลำดับ และใช้ความถี่ 0.4 0.7 1 และ 1.3 เฮิร์ตซ์ จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มขนาดของแรงกระตุ้นจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าของพื้นที่ทดลองมีค่าสูงขึ้นและเมื่อเพิ่มความถี่ที่ใช้ในการทดลองส่งผลให้การผลิตกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มขนาดของแรงกระตุ้นในแต่ละรอบการทดลอง ขนาดของแรงกระตุ้น 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) และความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ (ประมาณ 80 ครั้งต่อนาที) สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด และตำแหน่งกลางการเหยียบชุดพื้นที่ทดลองสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ดีที่สุด จากการศึกษาชุดพื้นที่ทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าโดยการกระตุ้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดคือ 2,359.44 วัตต์ต่อชั่วโมง

**คำสำคัญ:** การเก็บเกี่ยวพลังงาน, เพียโซอิเล็กทริก

<b>Project Title</b>	Harvesting on mechanical energy with piezoelectric material	
<b>Student</b>	Miss.Dararat Samkhai	<b>Student ID</b> 60514018
	Miss.Waraporn Ruangkeaw	<b>Student ID</b> 60514044
	Miss.Siriyakorn Nuichawadee	<b>Student ID</b> 60514052
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering	
<b>Program</b>	Energy Engineering	
<b>Project Advisor</b>	Dr. Visit Eakvanich	

## ABSTRACT

The research of this study was the design and produce the experimental for energy harvesting using piezoelectric actuator. The energy harvesting floor (100 x 100 square centimeter) consisted of 50 cells of piezoelectric materials (lead zirconate titanate, PZT) which were 25-millimeter in cell diameter to generate an electric charge in response to applied mechanical stress from the impulses of the experimental participants. Factors affecting power generation were magnitude and frequency of the impulse from the stepping position on the energy harvesting floor. When using the magnitude of the impulse 490 588 and 686 Newton (50 60 and 70 Kilograms weight) respectively and the frequency of 0.4 0.7 1 and 1.3 Hertz. The results of the research were as follows; the electric power was increases with increasing magnitude of the impulse. Moreover, the increasing frequency of the impulse caused a slight increase of the electrical power. The magnitude of the impulse 686 Newton (70 kilograms weight) and the frequency of 1.3 Hertz (approximately 80 times per minute), the energy harvesting floor generated the highest amount of electrical power. The center position of the energy harvesting floor was a good actuated point to generate the electric power. In this research, the highest power energy of the energy harvesting floor for energy harvesting using piezoelectric actuator was 2,3 5 9 . 4 4 Watt per hour.

**Keywords:** Energy Harvesting, Piezoelectric

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากบุคลากรหลายท่าน ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้  
ดังนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร. วิสิทธิ์ เอกวานิช ที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ อย่าง  
ด้วยความเมตตาและเอาใจใส่แก่คณะผู้วิจัย ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์อย่างดี และได้  
ให้ความกรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ปราโมทย์ กุศล และ ผศ.ดร. ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ ที่ให้ความกรุณา  
เป็นกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำและแก้ไขปริญญาานิพนธ์ให้สมบูรณ์

ท้ายสุดนี้ ขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่า  
เรียน คอยสนับสนุนช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่คณะผู้วิจัยเสมอมาตลอดจนจบการศึกษา

ดรรรัตน์ เส็มไข  
วารภรณ์ ร่วงแก้ว  
สิริยากร นุ้ยชะวะดี  
พฤษภาคม 2564

# สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	I
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	IX
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	3
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 ระยะเวลาที่ทำปริญญานิพนธ์	4
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.7 แผนการดำเนินงาน	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)	6
2.1.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก	7
2.1.2 การนำไปประยุกต์ใช้งาน	9
2.2 การเชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดการสั่นกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและอุปกรณ์	11
2.2.1 หลักการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด	12
2.2.2 วงจรเรียงกระแส	12
2.2.3 วงจรควบคุมแรงดัน	12
2.3 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน	13
2.3.1 ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitor)	13
2.3.2 แบตเตอรี่	14
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
<b>บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ</b>	
3.1 การ Simulation	22
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการ Simulation	29
3.3 ขั้นตอนการทำการวิเคราะห์ Linear static	30
3.4 การออกแบบในการทำชุดทดลองจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก	38
3.4.1 การออกแบบ	39
3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำชุดทดลอง	39
3.6 วิธีการทำชุดทดลองผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก	43
3.7 การทดสอบประสิทธิภาพจากชุดวงจรผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก	45
<b>บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผล</b>	
4.1 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากแรงกระตุ้นแต่ละขนาด	46
4.1.1 ความถี่ 0.4 เฮิรตซ์ โดยการเหยียบบนพื้นชุดทดลองประมาณ 20 ครั้งต่อนาที	46
4.1.2 ความถี่ 0.7 เฮิรตซ์ โดยการเหยียบบนพื้นชุดทดลองประมาณ 40 ครั้งต่อนาที	50
4.1.3 ความถี่ 1 เฮิรตซ์ โดยการเหยียบบนพื้นชุดทดลองประมาณ 60 ครั้งต่อนาที	54
4.1.4 ความถี่ 1.3 เฮิรตซ์ โดยการเหยียบบนพื้นชุดทดลองประมาณ 80 ครั้งต่อนาที	58
4.2 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของพื้นชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยวิธีการทางเพียโซอิเล็กทริก	63
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการทดลอง	65
5.2 ปัญหาที่พบ	66
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	66
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	67

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลขอรระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจศาสตร์	69
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง	72
ประวัติผู้เขียน	85



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานการออกแบบและสร้างชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงาน โดยวิธีการทางเพียโซอิเล็กทริก	5
2.1 การเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ และลิเธียมไอออน (ทั่วไป)	13
4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองแต่ละขนาด ที่ความถี่ 0.4 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	47
4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองแต่ละขนาด ที่ความถี่ 0.7 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	51
4.3 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองแต่ละขนาด ที่ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	55
4.4 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองแต่ละขนาด ที่ความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	59
ข.1 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 0.4 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	73
ข.2 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 0.4 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	74
ข.3 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 0.4 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	75
ข.4 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 0.7 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	76
ข.5 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 0.7 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	77
ข.6 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 0.7 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	78
ข.7 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	79
ข.8 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	80

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ข.9 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	81
ข.10 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	82
ข.11 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	83
ข.12 ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน	84



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเพียโซอิเล็กทริกและกลุ่มย่อยที่มีพื้นฐานและกลุ่มย่อยที่มีพื้นฐานของความสมมาตร	7
2.2 ปฏิกิริยาการแผ่รังสีเพียโซอิเล็กทริกทางตรง	8
2.3 ปฏิกิริยาการแผ่รังสีเพียโซอิเล็กทริกผกผัน	8
2.4 วงจรสมมูลแหล่งจ่ายแรงดันต่อโหลดปรับค่าได้ในวงจรไฟ	12
2.5 วงจรควบคุมแรงดันโดยซีเนอร์ไดโอด	13
2.6 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	14
2.7 แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม	15
2.8 แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์	16
2.9 แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน	16
3.1 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างวงกลม วัสดุทองเหลือง ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร	23
3.2 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างวงกลม วัสดุเซรามิก ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร	24
3.3 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างสี่เหลี่ยม วัสดุทองเหลือง ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร	25
3.4 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างสี่เหลี่ยม วัสดุเซรามิก ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร	26
3.5 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างสามเหลี่ยม วัสดุทองเหลือง ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร	27
3.6 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างสามเหลี่ยม วัสดุเซรามิก ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร	28
3.7 โน้ตบุ๊ก ยี่ห้อ Lenovo รุ่น IdeaPad S340-15IIL-81VW009BTA	29
3.8 โปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks 2018 SP5.0	29
3.9 แผนผังการทำงานของชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยวิธีการทางเพียโซอิเล็กทริก	38
3.10 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาใช้ในงานวิจัย	39
3.11 แผ่นไม้ MDF	40

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 สายไฟอ่อน รุ่น 22 AWG (UL 1007 TR-64)	40
3.13 หัวแร้งปืน SUMO รุ่น 981	41
3.14 ตะกั่วบัดกรี	41
3.15 น้ำยาผสมหรือที่เรียกว่าฟลักซ์	42
3.16 มัลติมิเตอร์ดิจิตอล รุ่น UNI-T UT33A+	42
3.17 ชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ติดบนแผ่นไม้	43
3.18 ชุดวงจรของเพียโซอิเล็กทริก	44
3.19 ชุดวงจร	44
3.20 ชุดทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าโดยชุดวงจรผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก	45
4.1 ตำแหน่งการเหยียบบนชุดทดลอง	46
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่	48
0.4 เฮิร์ตซ์ เมื่อขนาดแรงกระตุ้น ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม)	
ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)	
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ 0.4 เฮิร์ตซ์ เมื่อขนาด	49
แรงกระตุ้น ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม)	
ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)	
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่	52
0.7 เฮิร์ตซ์ เมื่อขนาดแรงกระตุ้น ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม)	
ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)	
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ 0.7 เฮิร์ตซ์ เมื่อขนาด	53
แรงกระตุ้น ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม)	
ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)	
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่	56
1 เฮิร์ตซ์ เมื่อขนาดแรงกระตุ้น ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม)	
ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ เมื่อขนาดแรงกระตุ้น ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)	57
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ เมื่อขนาดแรงกระตุ้น ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)	60
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ เมื่อขนาดแรงกระตุ้น ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)	61
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงกระตุ้นของผู้ที่เข้าร่วมทดลองและกำลังไฟฟ้า	62
ก.1 แสดงข้อมูลของระบบไฟฟ้า	70
ก.2 แสดงข้อมูลการใช้ไฟฟ้า	71

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ในปัจจุบันพลังงานหลักทั่วโลกมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ สวนทางกับอัตราการใช้พลังงานของโลกที่มีอัตราสูงขึ้น โดยน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นพลังงานที่ใช้มากที่สุดเป็นอันดับหนึ่ง อันดับที่สองคือก๊าซธรรมชาติ และรองลงมาถ่านหิน กระทรวงพลังงานประเทศสหรัฐอเมริกาคาดการณ์ว่าในปี พ.ศ. 2564 ทั่วโลกจะมีอัตราการใช้น้ำมันอยู่ที่ร้อยละ 37 ก๊าซธรรมชาติร้อยละ 27 ถ่านหินร้อยละ 25 พลังงานหมุนเวียนร้อยละ 8 และพลังงานนิวเคลียร์ร้อยละ 3 หากโลกยังคงมีการใช้พลังงานฟอสซิลในอัตราที่สูง เช่น ในปัจจุบัน ไม่มีการค้นหาแหล่งผลิตพลังงานเพิ่มเติม เราจะมีน้ำมันใช้ได้อีกประมาณ 30 ปี ก๊าซธรรมชาติ 50 ปี ถ่านหินประมาณ 200 ปี จะส่งผลกระทบต่อคนทั้งโลก พลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือกเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและถือเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะแก้ไขวิกฤตพลังงาน [1]

การใช้ไฟฟ้าของประเทศไทยปี 2562 มีการใช้ไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 185,124 กิกะวัตต์ชั่วโมง เพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 1.2 โดยปริมาณการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในเกือบทุกสาขา ยกเว้นองค์กรที่ไม่แสวงหากำไรที่มีการใช้ไฟฟ้าลดลงร้อยละ 1.7 ทั้งนี้ ภาคเกษตรกรรมมีอัตราความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงสุด โดยความต้องการใช้ไฟฟ้าสำหรับสูบน้ำเพื่อการเกษตรเพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 11.6 สอดคล้องกับการขยายตัวของดัชนีผลผลิตสินค้าเกษตรกรรมส่วนภาคอุตสาหกรรมซึ่งมีส่วนการใช้ไฟฟ้าสูงสุดคิด เป็นร้อยละ 47.4 ของการใช้ทั้งหมด มีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.0 เมื่อเทียบกับปีก่อน เกิดจากความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในกลุ่มอุตสาหกรรมหลักสำคัญ อาทิ อาหาร เหล็ก และโลหะพื้นฐานอิเล็กทรอนิกส์ ยางและผลิตภัณฑ์ยาง [2]

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น สามารถแก้ไขได้โดยการหันมาใช้พลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานที่เกิดจากการเคลื่อนไหวและการสั่นสะเทือน เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญของพลังงานที่เกิดจากการเคลื่อนไหวและการสั่นสะเทือน (Vibration and motion energy) การที่จะนำพลังงานดังกล่าวมาใช้จะต้องอาศัยระบบการเก็บเกี่ยวพลังงาน (energy harvesting System) เช่น การเก็บเกี่ยวพลังงานการไหลหรือการตกของน้ำด้วยกังหันน้ำ พลังงานดังกล่าวมาขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่าง ๆ ถ้าเราไม่เก็บเกี่ยวพลังงานดังกล่าวซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติ พลังงานเหล่านี้ก็อาจจะสูญหายไปโดยเปล่าประโยชน์ การเคลื่อนไหวของมนุษย์ก็จัดว่าเป็นแหล่งพลังงานซึ่งสามารถเก็บเกี่ยวได้เช่นกันการเดินเป็นกิจกรรมหนึ่งซึ่งใช้และให้พลังงานมากเมื่อเทียบกับกิจกรรมในการใช้อวัยวะอื่น ๆ หรือแม้แต่การสัญจรของมนุษย์ก็

ยังสามารถทำให้เกิดพลังงานได้ [3]

ปัจจุบันนักวิจัยจากประเทศต่าง ๆ พยายามศึกษาและค้นคว้าด้านพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกกันอย่างมากมาย และมีทางเลือกพลังงานใหม่ ๆ ออกมาให้เราได้เห็นรวมถึงทดลองใช้กันเป็นระยะ ๆ ซึ่งพลังงานทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในขณะนี้คือ การนำแรงสั่นสะเทือนหรือที่เรียกกันว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) มาใช้ในการสร้างพลังงานกำลังได้รับการพัฒนาให้สามารถสร้างพลังงานได้จริงอย่างแพร่หลาย และสามารถนำไปใช้งานได้หลายรูปแบบ ทั้งนี้เพราะปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกสามารถสร้างพลังงานและปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้าออกมาได้โดยใช้กลไกสร้างพลังงานจากพลังงานจลน์ที่เกิดจากการสั่นสะเทือน ดังนั้นทุกกิจกรรมที่มีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นก็สามารถสร้างพลังงานได้ [4]

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ สามารถเปลี่ยนพลังงานกล (Mechanical Energy) เป็นพลังงานไฟฟ้า (Voltage) หรือในทางกลับกันก็สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงโวลตาไรเซชันทางไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงทางกล ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปการสั่น การบิด การกด จะให้แรงดันไฟฟ้า ซึ่งเรียกปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct Piezoelectric Effect) หรือในทางกลับกันเมื่อวัสดุได้รับแรงดันไฟฟ้าจะทำให้มีการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เกิดพลังงานกล ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบผกผัน (Converse Piezoelectric Effect) โดยเมื่อได้รับแรงเค้น (Mechanical Stress) จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้า (Electrical Charge) หรือการจัดเรียงตัวทางไฟฟ้าขึ้น (Polarization) หรือในทางกลับกันเมื่อวัสดุอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าจะเกิดแรงเครียดอัดภายในผลึก (Compressive Strain) ทำให้วัสดุเกิดการบิดรูปไปจากเดิม และหากกลับทิศทางของสนามจะเกิดแรงเครียดดึง (Tensile Strain) เซรามิกจะเกิดการหดและขยายตัว ตามลำดับ [5]

จากคุณสมบัติพิเศษดังกล่าวทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่สำคัญของระบบ Micro-electro mechanical system (MEMS) ซึ่งจะสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น อุปกรณ์อัลตราโซนิก (Ultrasonic) ทางการแพทย์ ลำโพง เซ็นเซอร์ (Sensor) แอ็กชูเอเตอร์ (Actuator) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประกอบที่สำคัญของเครื่องพิมพ์รวมถึงชุดเตอร์ในกล้องถ่ายรูป วาล์วไฮดรอลิก (Hydraulic Valve) ตัวบันทึกหน่วยความจำแบบแฟร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric Memories) และการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting) เป็นต้น [6]

ดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงสนใจเกี่ยวกับการเก็บเกี่ยวพลังงานที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ โดยปัจจัยเหล่านั้น ได้แก่ รูปร่าง ขนาด ปริมาณของตะกั่วในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โครงสร้างของเซรามิกในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และสร้างชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยวิธีการทางเพียโซอิเล็กทริกผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเก็บพลังงานจากแรงกดจาก

น้ำหนักของมนุษย์เป็นแรงขับทางกลที่พื้นเท้า เป็นการเปลี่ยนพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนความถี่มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เป็นการนำพลังงานกลที่สูญเสียไปอย่างเปล่าประโยชน์กลับมาใช้ใหม่อีกครั้งหนึ่ง และสามารถพัฒนาแนวทางในการสร้างทางเลือกสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก
- 1.2.2 เพื่อศึกษากระบวนการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยวิธีการทางเพียโซอิเล็กทริก
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการออกแบบและสร้างชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยวิธีการทางเพียโซอิเล็กทริกผลิตกระแสไฟฟ้า
- 1.2.4 เพื่อศึกษาปัจจัยของแรงกดและความถี่ในการกระตุ้นที่ส่งผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า

## 1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

- 1.3.1 ศึกษาความแข็งแรง (Stress) ของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก โดยการ Simulation ด้วยโปรแกรม SolidWorks
- 1.3.2 สร้างชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยการกระตุ้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดตะกั่วเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate, PZT) ขนาด 100 x 100 เซนติเมตร และใช้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความหนา  $0.35 \pm 0.1$  มิลลิเมตร จำนวน 50 แผ่น
- 1.3.3 ชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยวิธีการทางเพียโซอิเล็กทริกสามารถผลิตไฟฟ้าได้ไม่น้อยกว่า 5 โวลต์ และ 80 มิลลิแอมป์
- 1.3.4 ใช้ขนาดแรงกระตุ้น 490 588 และ 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 60 และ 70 กิโลกรัม) ตามลำดับ และใช้ความถี่ 0.4 0.7 1 และ 1.3 เฮิรตซ์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่ได้รับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ด้าน คือ ประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมและประโยชน์ทางด้านพลังงานทดแทน

### ประโยชน์ทางด้านวิศวกรรม

1. สามารถเข้าใจคุณสมบัติ หลักการทำงาน และวงจรเก็บเกี่ยวพลังงานของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กทรอนิกส์ได้

2. สามารถนำแผ่นเพียโซอิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้บนพื้นทางเดินได้
3. สามารถนำพลังงานจากการเก็บเกี่ยวไปใช้กับโพลตแสงสว่าง โดยไม่ใช่ไฟฟ้าจากการไฟฟ้า

#### ประโยชน์ทางด้านพลังงานทดแทน

1. เพื่อนำมาพิจารณาเป็นพลังงานทางเลือกชนิดใหม่ในประเทศไทย
2. เพื่อนำพลังงานทางกลที่สูญเสียไปอย่างเปล่าประโยชน์มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า

### 1.5 ระยะเวลาที่ทำปริญญานิพนธ์

ระยะเวลาทำโครงการ 1 ปีการศึกษา ตั้งแต่ สิงหาคม 2563 – มิถุนายน 2564

### 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.6.1 ศึกษาและรวบรวมหาข้อมูลจากงานที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในทุก ๆ ด้าน
- 1.6.2 ศึกษาอิทธิพลปัจจัยต่าง ๆ ของแผ่นเพียโซอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้โปรแกรม SolidWorks เพื่อจำลองออกแบบชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานและเลือกวัสดุที่จะใช้ในการทำชิ้นงาน
- 1.6.3 จัดเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ได้แก่ เพียโซอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน อุปกรณ์และเครื่องมือวัด เป็นต้น
- 1.6.4 สร้างชิ้นงานขนาด กว้าง 100 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร ติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทรอนิกส์ 50 แผ่น
- 1.6.5 ศึกษาและหาข้อมูลเกี่ยวกับวงจรเก็บเกี่ยวพลังงาน
- 1.6.6 สร้างวงจรเก็บเกี่ยวพลังงาน
- 1.6.7 ดำเนินการทดลอง
- 1.6.8 บันทึกและวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อนำมาสรุปผลการทดลอง
- 1.6.9 เรียบเรียงและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.7 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานการออกแบบและสร้างชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยวิธีการทางเพียโซอิเล็กทริก

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินการ 2563 - 2564										
	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2					
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
1. รวบรวมข้อมูลและศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเพียโซอิเล็กทริก	←→										
2. ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก โดยการ Simulation ด้วยโปรแกรม SolidWorks	←→	←→									
3. ออกแบบชิ้นงานและจัดหาอุปกรณ์		←→	←→								
4. สร้างชิ้นงานขนาด กว้าง 100 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร			←→	←→							
5. ศึกษาและหาข้อมูลเกี่ยวกับวงจรเก็บเกี่ยวพลังงาน						←→	←→				
6. สร้างวงจรเก็บเกี่ยวพลังงาน						←→	←→				
7. ดำเนินการทดลองและสรุปผลการทดลอง								←→	←→		
8. เรียบเรียงและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์										←→	←→

←→ แผนที่วางไว้      ←--- แผนที่ปฏิบัติจริง

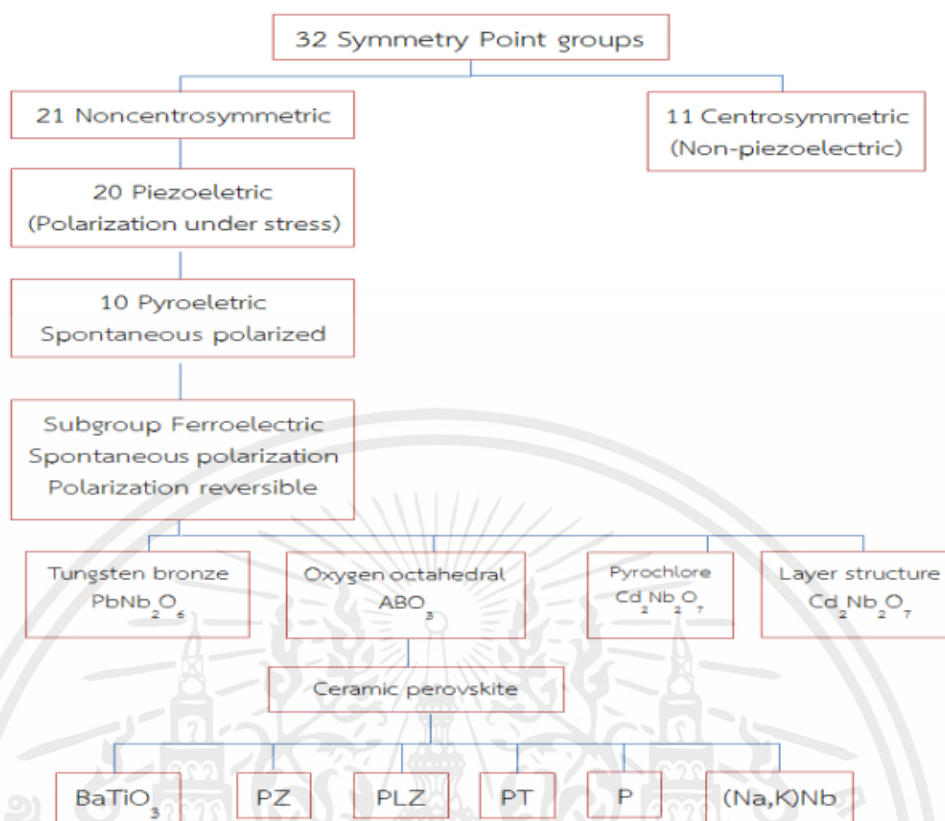
## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก เป็นวัสดุที่มีความสามารถเปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานกลได้ อันเนื่องมาจากลักษณะเฉพาะของวัสดุ ถูกพบว่าสามารถนำมาใช้งานแบบไดนามิกที่เกี่ยวข้องกับแรงกดและแรงดึง แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้ถูกนำมาใช้ในหลายรูปแบบ ขณะที่วัสดุเหล่านี้ถูกค้นพบและนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ในรูปแบบการเก็บเกี่ยวพลังงานแต่เนื่องจากเป็นสิ่งที่ยังถูกพัฒนาได้ไม่นานในด้านการตลาดจึงยังไม่ค่อยเกิดการซื้อขายกันเท่าไร ทำให้อัตราการเติบโตของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทางด้านการตลาดค่อนข้างต่ำ ผลที่ตามมาคือมีการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไปพัฒนาและได้บทสรุปคือนำมาใช้งานทางด้านการกักเก็บพลังงานจากพลังงานที่สูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ ดังเช่น การสั่นของวัตถุที่กำลังทำงาน การเดินของมนุษย์

### 2.1 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)

เพียโซอิเล็กทริกเกิดจากวัสดุจากธรรมชาติ ซึ่งวัสดุจำพวก โพลีคริสตัลไลน์เฟอร์โรอิเล็กทริก เซรามิกเป็นต้น จะเป็นจำพวก แบเรียมไททาเนต ( $BaTiO_3$ ) และตะกั่วเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) โดยจากการปรับปรุงคุณสมบัติและพัฒนาอย่างต่อเนื่องในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา เป็นที่รู้กันว่าสภาพความเป็นเพียโซอิเล็กทริกพิจารณาได้จากระดับโครงสร้างอะตอมของผลึกและหลักการการแพร่กระจายของไอออนภายในโครงสร้างของผลึก การจัดกลุ่มของไอออนจะถูกจำกัดด้วยตำแหน่งที่มีพลังงานสูงสุด ผลึกมีองค์ประกอบทางเคมีคงที่ และประกอบด้วยไอออนเรียงตัวกันซ้ำ ๆ ต่อกันเป็นเครือข่ายเกิดเป็นระบบผลึก (lattice) หน่วยที่เล็กที่สุดที่มีความสมมาตรเรียกว่าหน่วยเซลล์ (unit cell) และเป็นตัวบอกความเป็นไปได้ของการมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกในผลึกการแบ่งกลุ่มของผลึกจึงพิจารณาจากสมมาตรของผลึกโดยแบ่งเป็น 32 กลุ่มผลึก [7] (ดังแสดงในรูปที่ 2.1)



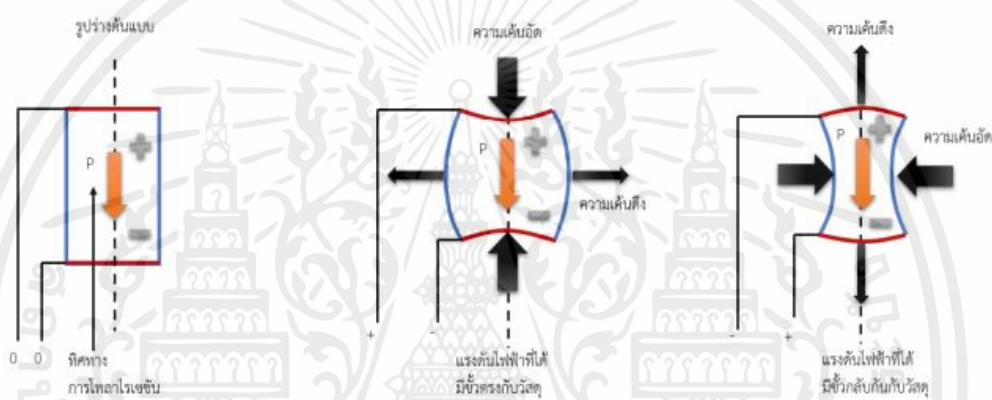
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเพียโซอิเล็กทริกและกลุ่มย่อยที่มีพื้นฐานของความสมมาตร [7]

### 2.1.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

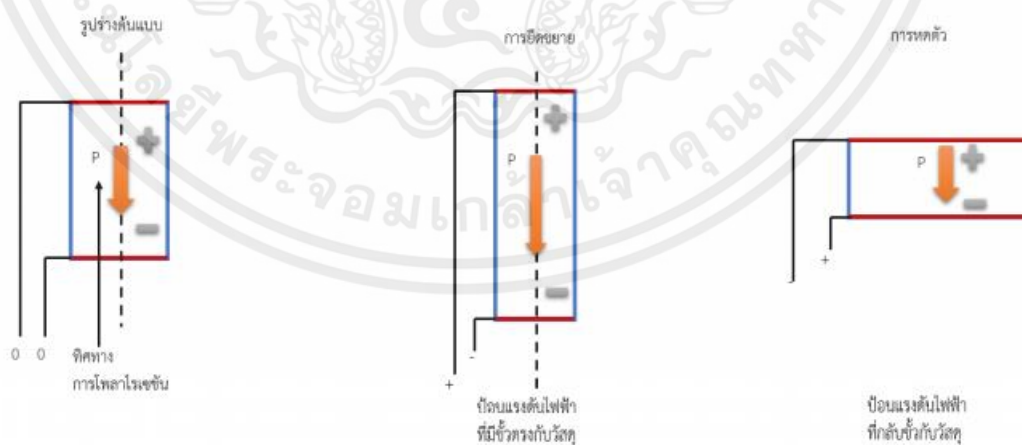
ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectricity) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมทางกลและทางไฟฟ้าของวัสดุ ถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ.1880 โดยพี่น้องตระกูลคูรี J. Curie และ P. Curie จากแร่ควอตซ์ (quartz) โดยทำการทดลองป้อนแรงทางกลทั้งแรงกดและแรงดึงเพื่อให้เกิดความเค้นทางกลขึ้นกับผลึกควอตซ์ ปรากฏว่าขั้วคู่ (dipoles) ภายในเกิดการจัดเรียงตัว กล่าวคือขั้วบวกไปอยู่ที่ผิว ด้านหนึ่งส่วนขั้วลบไปอยู่ที่ฝั่งตรงกันข้ามทำให้ผลึกอยู่ในสถานะขั้ว (polarized state) เกิดการกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement) และสนามไฟฟ้าก็ถูกสร้างขึ้น เข็มของเครื่องมือวัดเบนออกแสดงว่ามีความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างผิวของวัสดุ และได้เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางตรง (direct piezoelectric effect) (ดังแสดงในรูปที่ 2.2) จะเห็นได้ว่าถ้าสมมติทิศทางการโพลาริเซชันดังรูป เมื่อออกแรงกดหรือป้อนความเค้นอัดในทิศทางเดียวกันหรือขนานกับทิศทางการโพลาริเซชันของเพียโซอิเล็กทริก แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีขั้วตรงกันกับโพลาริเซชันของวัสดุ เรียกลักษณะการแปลงพลังงานนี้ว่าการทำงานในโหมดตามยาว (longitudinal mode) แต่ถ้าหากป้อนความเค้นอัดในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวการโพลาริเซชัน กล่าวคือเกิดความเค้นดึงในทิศทางขนานกับแนวการโพลาริเซชัน ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับกรณีแรก

กล่าวคือแรงที่ป้อนกับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีทิศทางตั้งฉากกัน จึงเรียกว่าการทำงานในโหมดตามขวาง (transverse mode)

และในทางตรงกันข้ามเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าแก่วัสดุแล้วเกิดความเค้นทางกลสะสมในผลึกทำให้ วัสดุเกิดการเคลื่อนไหวแสดงถึงพลังงานทางกลที่ได้รับ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกผกผัน (converse piezoelectric effect) (ดังแสดงในรูปที่ 2.3) จะเห็นได้ว่าเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางขนานกับทิศทางการโพลาริเซชันของวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) ในลักษณะการยืดขยายและเกิดการหดตัวเมื่อป้อนสนามไฟฟ้ากลับขั้วกันกับทิศทางการโพลาริเซชันของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางตรง [7]



รูปที่ 2.3 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกผกผัน [7]

ความเป็นเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectricity) เพียโซอิเล็กทริกเป็นคุณสมบัติหนึ่งของวัสดุที่มี โครงสร้างผลึกพิเศษ กล่าวคือปริมาณประจุไฟฟ้าบนผิวของวัสดุสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เมื่อ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รับแรงทางกล (mechanical force) และเกิดความเค้น (stress) ภายในผลึก ส่งผลให้เกิดการกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement) และเกิดความต่างศักย์ (voltage different) ที่ขั้วของวัสดุได้ หรือที่เรียกกันว่าวัสดุเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (Direct piezoelectric effect) และในทางกลับกันหากวัสดุที่มีความเป็นเพียโซอิเล็กทริกได้รับการกระตุ้นจากพลังงานไฟฟ้า กระแสสลับก็จะสามารถแปลงพลังงานนั้นเป็นพลังงานทางกลอยู่ในรูปของการสั่นสะเทือน (vibration) หรือปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกผกผัน (converse piezoelectric effect) ปัจจุบันได้มีการนำเอาวัสดุที่มีโครงสร้างทางเคมีเฉพาะเหล่านี้มาประยุกต์เป็นแหล่งพลังงานขนาดเล็กโดยอาศัยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางตรง ใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการกำลังไฟฟ้าต่ำ เช่น อุปกรณ์ในระบบไร้สาย (wireless devices) และตัวตรวจจับ (Sensor) เรียกเทคโนโลยีนี้ว่า เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric energy harvesting: PEH) ประสิทธิภาพและพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบยังเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่องให้เป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานทดแทนขนาดเล็กในอนาคต

### 2.1.2 การนำไปประยุกต์ใช้งาน

2.1.2.1 เครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนบนเครื่องจักร คือ การเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนโดยใช้หลักการเพียโซเพื่อติดตามสภาพเครื่องจักรงานวิจัยชิ้นแรกนี้เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนตามเครื่องจักรในโรงงานโดยการนำอุปกรณ์เพียโซบัสเซอร์แบบรับแรงกระทำไปติดตั้งที่เครื่องจักร เมื่อเครื่องจักรทำงานจะเกิดแรงสั่นสะเทือนไปยังอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซบัสเซอร์ และแปลงแรงกระทำที่ได้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีแรงดัน 100 โวลต์ เก็บสะสมไว้ที่ตัวประจุ โดยพลังงานที่เก็บเกี่ยวมาได้นี้จะถูกนำมาใช้เพื่อให้พลังงานกับอุปกรณ์เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิเครื่องจักร โดยเซ็นเซอร์จะส่งข้อมูลตรวจวัดอุณหภูมิไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อติดตามและตรวจสอบคุณภาพเครื่องจักรและป้องกันการเกิดอุบัติเหตุและความเสียหายจากเครื่องจักรชำรุดได้ และเมื่อมีการพัฒนาอุปกรณ์ชิ้นนี้ให้สามารถเก็บพลังงานได้ในปริมาณมากขึ้น ในอนาคตเครื่องจักรต่าง ๆ ในโรงงานจะถูกขับเคลื่อนด้วยพลังงานหมุนเวียนที่เครื่องจักรเหล่านี้สร้างขึ้นเองได้ ทำให้การผลิตสินค้าในโรงงานลดต้นทุนจากพลังงานสิ้นเปลืองได้อีกมาก

2.1.2.2 เครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของร่างกาย คือ การเก็บเกี่ยวพลังงานจากข้อต่อหัวเข่าและการเคลื่อนไหวของร่างกายรูปแบบการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของร่างกายมนุษย์ หรือการเดินซึ่งจะใช้ส่วนการทำงานของกล้ามเนื้อขาเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ทำจากสเตปเปอร์มอเตอร์ต่อเข้ากับขาสวนข้อต่อ เมื่อเกิดการในงานวิจัยชิ้นนี้ทำจากสเตปเปอร์มอเตอร์มีส่วนประกอบของแผ่นเพียโซต่อเข้ากับขาสวนข้อต่อเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการเคลื่อนไหวส่วนขาหรือเกิดแรงเหวี่ยงทำให้แกนสเตปเปอร์มอเตอร์มีการเคลื่อนที่และเกิดเป็นพลังงานไฟฟ้าขึ้นมา ซึ่งโดยปกติแล้วมนุษย์เรามีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา ทำให้การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของร่างกายมนุษย์ก่อกำเนิดเป็นพลังงานได้ในปริมาณมากโดยอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนี้สามารถเก็บสะสมพลังงานที่ได้จากการเดิน 1 กิโลเมตรไปใช้ให้พลังงานไฟฟ้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าต่ำได้ หรือประมาณ 7 โวลต์ ซึ่งในอนาคตจะสามารถพัฒนาให้เป็นเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากร่างกายมนุษย์เพื่อใช้ชาร์จแบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือได้ และหากทุกคนติดอุปกรณ์ชิ้นนี้ไว้กับตัวพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการเคลื่อนไหวนี้

2.1.2.3 เครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานจากรถเข็นสินค้า หรือ รถเข็นกำเนิดพลังงานหรือการเก็บเกี่ยวพลังงานจากรถเข็นช้อปปิ้ง การเก็บเกี่ยวพลังงานจากรถเข็นช้อปปิ้งโดยใช้แผ่นเพียโซติดบริเวณล้อเป็นการดำเนินชีวิตของผู้คนในปัจจุบันเป็นอย่างมากโดยในแต่ละวันมีผู้ใช้บริการห้างสรรพสินค้าและรถเข็นช้อปปิ้งสำหรับใส่สินค้าเป็นจำนวนมาก ซึ่งงานวิจัยอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากรถเข็นช้อปปิ้งนี้จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่น ๆ ได้อาที่จ่ายไฟให้กับแท็บเล็ตแสดงรายการสินค้า หรือเครื่องตรวจสอบราคาสินค้า โดยอาศัยการหมุนของล้อรถเข็นช้อปปิ้งเป็นส่วนกำเนิดพลังงาน ซึ่งใช้หลักการเหนี่ยวนำที่สามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ และเมื่อล้อรถเข็นหมุนด้วยความเร็ว 2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อุปกรณ์กำเนิดพลังงานจะเก็บสะสมพลังงาน และแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้ และในอนาคตอุปกรณ์ชิ้นนี้สามารถพัฒนาให้เก็บพลังงานได้มากขึ้น และเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่สำคัญของห้างสรรพสินค้าหรือซูเปอร์มาร์เกต ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณมากได้

2.1.2.4 piezoelectric buzzers เป็นแผ่นเซรามิกติดกับแผ่นโลหะบาง เมื่อมีสัญญาณไฟฟ้าประยุกต์ แผ่นเซรามิกก็จะสั่นเกิดเสียงขึ้น ใช้ใน alarms, Sound producing calculators และ electronic Watches

2.1.2.5 มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric accelerometer) เมื่อ seismic mass (m) ถูกทำให้เกิดอัตราเร่งขึ้น (ถูกกด) มันจะส่งผ่านแรงกดไปกระทำกับ piezoelectric crystal ที่ถูกยึดติดอยู่ด้วยกัน ด้วยคุณสมบัติพิเศษของมันจะทำให้ประจุไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นและถูกสายนำสัญญาณออกไปยังเอาต์พุตของวงจร โดยที่ด้านเอาต์พุตจะต้องมีวงจรขยายประจุไฟฟ้า (charge amplifier) เพื่อขยายค่าประจุไฟฟ้าที่ได้ให้เป็นแรงดันเอาต์พุตตามสัดส่วนของอัตราเร่งที่เกิด จะได้สามารถแสดงผลได้ด้วยโวลต์มิเตอร์ มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริกตอบสนองต่อทางด้านความถี่สูงได้ดี แต่ในทางกลับกันก็จะมีผลตอบสนองทางด้านความถี่ต่ำที่ไม่ดีนัก มีขนาดค่อนข้างเล็ก น้ำหนักเบา และสามารถใช้งานที่มีอัตราเร่งได้สูงถึง 250,000 m.s<sup>-2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.6 การติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกยังวางรถไฟเพื่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า เทคโนโลยีเพียโซอิเล็กทริกนั้น (Piezoelectric) สามารถสร้างพลังงานจากความดัน แรงกดลงบนพื้นผิว หรือการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นไฟฟ้า เราเคยเห็นเทคโนโลยีดังกล่าวจากแผ่นที่รองรับพลังงานจากการย่ำเท้า ซึ่งแต่เดิมติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกยังถนนไฮเวย์ได้มีแผนขยายการใช้งานเทคโนโลยีไปยังวางรถไฟเพิ่ม โดยเทคโนโลยีนั้นจะเรียกว่า “ Piezoelectric IPEG PADS” ที่นอกจากจะให้กำเนิดพลังงานจากรถไฟที่วิ่งผ่าน แผ่นกำเนิดพลังงานตัวใหม่ยังสามารถตรวจสอบขนาดของล้อ ความเร็วและน้ำหนักของพาหนะได้ โดยเทคโนโลยีต้นแบบได้ติดตั้งไปแล้ว และจากโครงการติดตั้งดังกล่าวด้วยรถไฟแบบตู้โดยสาร 10-20 ten-car จะสามารถผลิตพลังงานได้ 120 กิโลวัตต์ เพียงพอต่อระบบโครงสร้างพื้นฐานของการรถไฟอาทิหลอดไฟป้ายสัญญาณ ในขณะที่พลังงานส่วนเกินนั้นถูกส่งเข้าระบบต่อไป

2.1.2.7 เทคนิคลายนิ้วมือเชิงกล คือ การสร้างตัวรับรู้ลายนิ้วมือโดยใช้เทคนิคเพียโซอิเล็กทริก สามารถทำได้โดยการสร้างอิเล็กโทรด (Electrode) สองด้านประกบวัสดุเซรามิกที่ฝังอยู่ในสารกึ่งตัวนำที่วางเป็นแถวลำดับตามตำแหน่งจุดภาพ โดยมีอิเล็กโทรดด้านบนที่ติดกับแผ่นเคลือบป้องกัน จากภาพ เมื่อมีแรงกดจากนิ้วมือเส้นสัมผัสจะกดลงบนอิเล็กโทรดด้านบนซึ่งจะทำให้เกิดผลเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ณ ตำแหน่งที่มีแรงกด ทำให้สามารถแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าอย่างอ่อน ทุกตำแหน่งที่เส้นสัมผัส วงจรรวม (Integrate Circuit) ประกอบตัวรับรู้นี้จะรับรู้สัญญาณไฟฟ้านี้แล้วเปลี่ยนเป็นภาพสองระดับ

2.1.2.8 ฟิล์มบางแบบเพียโซอิเล็กทริกเมื่อมีแรงกดจะเกิดแรงดันไฟฟ้า และพบคลื่นความถี่บางอย่างที่อาจทำหน้าที่เหมือนกับสายอากาศได้ หากงานวิจัยนี้พัฒนาต่อไป อาจเป็นหนทางสู่การผนวกลายอากาศเข้าไปในชิปได้ ซึ่งนอกจากจะทำให้อุปกรณ์พกพามีขนาดเล็กลงแล้ว ยังสามารถประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ขนาดเล็กกว่า เช่น Internet of Things ก็เป็นไปได้

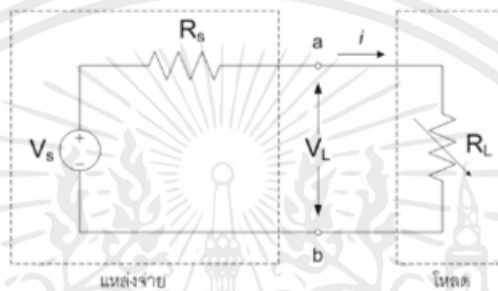
## 2.2 การเชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดการสั่นกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและอุปกรณ์

การเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างวัสดุเพียโซอิเล็กทริกกับโหลดความต้านทาน พลังงานที่ถูกเปลี่ยนรูปจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าอยู่ในรูปแบบของกระแสสลับ การนำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้องเปลี่ยนเป็นกระแสตรง (dc signal) มักทำวงจรควบคุมแรงดันรวมมาในไอซีที่สิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าต่ำสำหรับระบบเก็บเกี่ยวพลังงานโดยเฉพาะ อย่างไรก็ตามส่วนสำคัญที่ทำให้ระบบจัดการพลังงานสมบูรณ์และทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพคือการเก็บกระแสไฟฟ้าในตัวเก็บประจุหรือแบตเตอรี่หุติยภูมิ (rechargeable battery) สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคืออุปกรณ์จะสามารถทำงานได้ดีต้องถูกออกแบบมาเพื่อใช้กำลังไฟฟ้าระดับต่ำ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้ [8]

**2.2.1 หลักการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด** โหลดได้รับกำลังไฟฟ้าสูงสุดในวงจรเชิงเส้นแบบ กระแสตรง เมื่อผลรวมของค่าความต้านทานรวมของแหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานรวมของ โหลด กำลังไฟฟ้าที่ได้รับคือกำลังไฟฟ้าที่คร่อมโหลด (ดังแสดงในรูปที่ 2.4) แสดงแหล่งจ่ายไฟอุดมคติ ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดัน  $V_s$  และความต้านทานภายในของแหล่งจ่าย  $R_s$  เป็นค่าอ้างอิง แรงดัน ที่คงที่สามารถพบได้ เช่น แบตเตอรี่ (แตกต่างจากแหล่งจ่ายกระแสที่ไม่สามารถทำให้คงที่ได้ เพราะ กระแสในวงจรขึ้นอยู่กับโหลด)



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลแหล่งจ่ายแรงดันต่อโหลดปรับค่าได้ในวงจรไฟ [8]

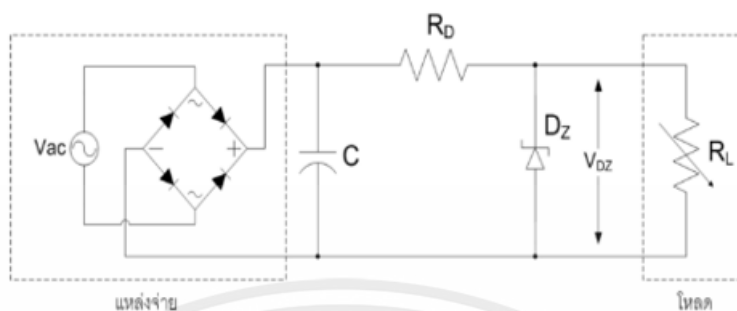
**2.2.2 วงจรเรียงกระแส** คือ วงจรแปลงสัญญาณไฟสลับเป็นไฟตรง (ac-to-dc converter) ประกอบด้วยไดโอดเรกติไฟเออร์ (diode rectifier) 4 ตัว ต่อตัวแบบวงจรบริดจ์ป้อนสัญญาณไฟฟ้า สลับ 1 รอบ ก่อนเข้าวงจร เมื่อผ่านวงจรดังกล่าวสัญญาณก็ยังคงครบ 1 รอบ แต่ถูกเรียงให้อยู่ในทาง เดียวกันเป็นสัญญาณบวกทำให้ได้ไฟตรง เรียกว่า วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (full-wave rectifier)

**2.2.3 วงจรควบคุมแรงดัน** เป็นวงจรที่ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันฝั่งขาออก ต่ออยู่ระหว่าง แหล่งจ่ายไฟตรงแรงดันไม่คงที่ ซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้หลังจากผ่านวงจรเรียงกระแส และผ่านตัวเก็บ ประจุ สัญญาณดังกล่าวสามารถเกิดระลอกของแรงดันได้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดจึงทำให้กระแส ที่ไหลในวงจรเปลี่ยน วงจรสามารถทำให้แรงดันที่ได้เรียบเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ นำไปใช้กับอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์และการประจุกระแสใหม่ให้กับแบตเตอรี่ทุติยภูมิได้ วงจรควบคุมแรงดันสามารถทำได้ หลายวิธีซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์แบบไม่เชิงเส้น (non-linear) คือใช้ซีเนอร์ไดโอด (zener diode) ทรานซิสเตอร์ (transistor) ไอซี และ หลักการสวิตซ์ซิ่ง (switching)

**2.2.3.1 วงจรควบคุมแรงดันโดยใช้ซีเนอร์ไดโอด ทรานซิสเตอร์ ซีเนอร์ไดโอดเป็น** อุปกรณ์ที่ออกแบบมาให้ทำงานได้สองหน้าที่ กล่าวคือ เมื่อทำการไบแอสแบบตรง (forward bias) ตัวอุปกรณ์จะทำหน้าที่เป็นไดโอดเรียงกระแส แต่เมื่อไบแอสแบบกลับ (reverse bias) ตัวไดโอดจำทำ หน้าที่รักษาระดับแรงดันที่ตกคร่อมให้อยู่ในช่วงที่ออกแบบไว้จากโรงงานผู้ผลิต จากหลักการดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถควบคุมแรงดันขาออกด้วยซีเนอร์ไดโอดได้ โดยการต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน (ดังแสดงในรูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 วงจรควบคุมแรงดันโดยใช้ซีเนอร์ไดโอด [8]

## 2.3 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน [9]

### 2.3.1 ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitor)

ซูเปอร์คาปาซิเตอร์หรือที่เราอาจรู้จักในชื่อของ อัลตราคาปาซิเตอร์ (Ultracapacitor) หรือตัวเก็บประจุแบบแผ่นสองชั้น (Electric Double Layer Capacitor: EDLC) ซึ่งตัวเก็บประจุแบบสองชั้นนี้จะแตกต่างจากตัวเก็บประจุแบบปกติ ก็คือ ตัวเก็บประจุแบบแผ่นสองชั้นจะมีความจุมากกว่ามาก อาจมีขนาดเป็นฟารัด ตัวเก็บประจุจะกักเก็บพลังงานโดยใช้วิธีการชาร์ตที่คงที่ซึ่งตรงกันข้ามกับปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ต่างกันเข้าที่แผ่นตัวเก็บประจุบวก และแผ่นตัวเก็บประจุลบ

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ และลิเธียมไอออน (ทั่วไป)

	ซูเปอร์คาปาซิเตอร์	ลิเธียมไอออน (ทั่วไป)
เวลาในการชาร์ต	1 – 10 วินาที	10 – 60 นาที
ราคา (Wh/kg)	\$20	\$0.50 - \$1.00
แรงดันเซลล์	2.3 – 2.75 โวลต์	3.6 – 3.7 โวลต์
อุณหภูมิในการชาร์จ	-40 – 65 องศาเซลเซียส	0 – 45 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิในการคายประจุ	-40 – 65 องศาเซลเซียส	-20 – 60 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ คือ อุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ใช้กักเก็บพลังงาน ถือเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานเคมี ให้เป็นไฟฟ้าได้โดยตรงด้วยการใช้เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) ที่ประกอบด้วยขั้วบวกและขั้วลบ พร้อมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution) แบตเตอรี่อาจประกอบด้วยเซลล์กัลวานิกเพียง 1 เซลล์หรือมากกว่าก็ได้ โดยแบตเตอรี่จะแบ่งได้ 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่

2.3.2.1 แบตเตอรี่ปฐมภูมิ เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถใช้ได้เพียงครั้งเดียว เมื่อใช้งานหมดแล้วไม่สามารถนำกลับมาอัดประจุไฟฟ้าได้ใหม่ เนื่องจากสารเคมีภายในแบตเตอรี่ปฐมภูมินั้นมีการเปลี่ยนแปลง แล้วไม่สามารถกลับไปอยู่ในสภาพเดิมได้ แบตเตอรี่ประเภทนี้เหมาะกับอุปกรณ์ขนาดเล็กที่พกพาสะดวก และใช้ไฟน้อย

2.3.2.2 แบตเตอรี่ทุติยภูมิ เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถอัดประจุได้ใหม่ เมื่อใช้งานหมดเนื่องจากสารเคมีภายในแบตเตอรี่ประเภทนี้สามารถทำให้กลับไปอยู่ในรูปเดิมได้ โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ชาร์ตเจอร์ เป็นตัวอัดประจุ

- แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-acid battery)

แบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นอุปกรณ์จัดเก็บไฟฟ้าที่ใช้ปฏิกิริยาทางเคมีที่ผันกลับได้ แบตเตอรี่ตะกั่วกรดประกอบด้วยแผ่นขั้วบวก และแผ่นขั้วลบวางสลับกันจุ่มอยู่ในอิเล็กโทรไลต์ที่ทำจากสารละลายกรดซัลฟิวริก โดยแผ่นเพลทจะวางสลับกัน เพื่อจะได้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ได้มาก อิเล็กโทรดเป็นขั้วลบจะสร้างขึ้นมาจากตะกั่วบริสุทธิ์ ในขณะที่ขั้วบวกจะสร้างจากส่วนผสมของตะกั่วและตะกั่วเปอร์ออกไซด์ (ดังแสดงในรูปที่ 2.6)

ข้อดี ราคาถูก ผลิตง่ายคายประจุด้วยตัวเองน้อยความเชื่อถือสูง

ข้อเสีย ความจุของพลังงานต่อน้ำหนักต่ำทำให้น้ำหนักมากเป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.6 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด [9]

- แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม (Nickel Cadmium Battery: NiCd)

แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม มีส่วนประกอบสำคัญคือนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ni(OH)}_2$ ) ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วบวก และแคดเมียมซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วลบอัดเม็ดอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์คือสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (ดังแสดงในรูปที่ 2.7)

ข้อดี สามารถจ่ายกระแสได้มาก , มีค่าความต่างศักย์ค่อนข้างคงที่และทนทานต่อการใช้งานหนักได้

ข้อเสีย ต้นทุนและวัสดุมีราคาแพง เป็นอันตรายต่อการสูดดม



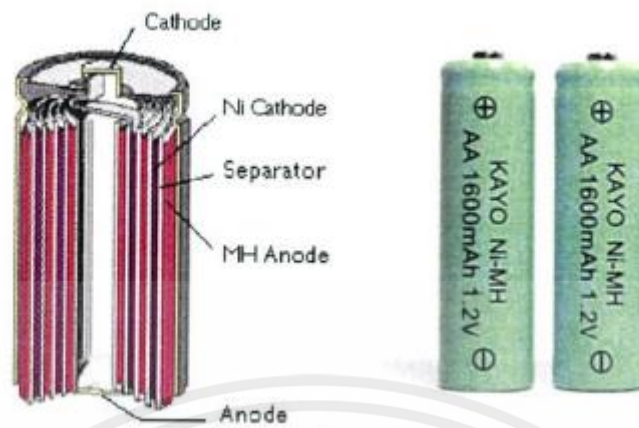
**รูปที่ 2.7** แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม [9]

- แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ (Nickel Metal hydride: NiMH)

แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์มีส่วนประกอบที่สำคัญคือขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ได้แก่ นิกเกิลและเมทัลไฮไดรด์เป็นการพัฒนาจากนิกเกิลแคดเมียมเนื่องจากแคดเมียมอันตรายต่อการสูดดม (ดังแสดงในรูปที่ 2.8)

ข้อดี คือ สามารถจ่ายกระแสได้มาก , มีค่าความต่างศักย์ค่อนข้างคงที่และทนทานต่อการใช้งานหนักได้

ข้อเสีย คือ อัตราการคายประจุเองและราคาแพง



รูปที่ 2.8 แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ [9]

- แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Advanced Li-Ion battery)

ลิเทียมเป็นองค์ประกอบในการผลิตแบตเตอรี่ที่สำคัญและได้รับความนิยมในปัจจุบัน แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีส่วนประกอบหลักสามส่วนเหมือนแบตเตอรี่ทั่วไป ซึ่งก็คือ ขั้วลบ ขั้วบวก และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยส่วนใหญ่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้ จะมีขั้วบวกที่ทำมาจากลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ ( $\text{LiCoO}_2$ ) และขั้วลบที่ทำมาจากคาร์บอนหรือกราฟไฟต์ ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือเกลือลิเทียมในสารละลายออร์แกนิก (Lithium salt in an organic solvent) (ดังแสดงในรูปที่ 2.9)

ข้อดี กระแสจะมีการไหลที่ค่อนข้างดีและสม่ำเสมอทำให้พลังงานดีกว่าแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด 5 เท่า น้ำหนักเบา

ข้อเสีย เมื่อทำปฏิกิริยาอาจทำให้เกิดการระเบิดได้ เนื่องจาก Li เป็นธาตุหมู่ 1



รูปที่ 2.9 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yang และคณะ [10] มีการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการวัดในแหล่งกำเนิดหลายครั้ง เพื่อศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกจากการเสียดสีของถนน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกภายใต้สภาพการจราจรจริงคือยังไม่ทราบ ในการศึกษานี้เป็นแบบจำลองทางกลไฟฟ้าของเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกพร้อมพารามิเตอร์โดยละเอียด (รวมถึงพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตพารามิเตอร์วัสดุและวงจร) และอิทธิพลของการไหลของการจราจร (เช่นความเร็วการจราจรและความหนาแน่นของการจราจร) เกี่ยวกับกำลังขับของเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกจะถูกระบุโดยใช้วิธีกฎหมายมาตราส่วนและทฤษฎีการไหลของการจราจร ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่ามีความแตกต่างที่น่าทึ่งในโพลารูปแบบและความถี่ระหว่างการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (หรือการวัดในแหล่งกำเนิด) กับสภาพการจราจรจริงเนื่องจากความแตกต่างเหล่านี้ผลลัพธ์ (โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้าที่ส่งออกและวิธีการออกแบบการเพิ่มประสิทธิภาพ) ของการศึกษาก่อนหน้านี้อาจใช้ไม่ได้กับเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกที่ฝังอยู่ในถนน พิจารณาคูสมบัติที่แตกต่างของรูปแบบการรับส่งข้อมูลเกณฑ์การปรับให้เหมาะสมเพื่อกำหนดพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตและเนื้อแท้ที่ได้รับพารามิเตอร์ระบบของเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกและความหนาแน่นของกำลังขับที่เหมาะสมที่สอดคล้องกันของเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกจะได้รับการสอบเทียบเชิงปริมาณด้วย ผลลัพธ์ทางทฤษฎีเหล่านี้อาจใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกที่ฝังอยู่ในถนนภายใต้กระแสการจราจรที่แตกต่างกัน

Xiong และ Wang [11] ศึกษาการพัฒนาตัวเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริกแบบใหม่ (piezoelectric energy harvester-PEH) เพื่อใช้ประโยชน์สูงสุด ปริมาณพลังงานที่เสียโดยยานพาหนะบนทางหลวงสาธารณะได้อธิบายไว้ PEH ถูกออกแบบมาเพื่อแปลงพลังงานการเปลี่ยนรูปที่เกิดจากการเคลื่อนสัจจรทางเท้าไปเป็นพลังงานไฟฟ้าต้นแบบเก็บเกี่ยวพลังงานประกอบ ด้วยแผ่นเซรามิก PZT ปิดผนึกในชุดป้องกัน ได้รับการพัฒนาต้นแบบของ PEH5 ได้รับการประดิษฐ์และติดตั้งบนทางเท้าจริงเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในเรื่องการประยุกต์ใช้งาน การผลิตไฟฟ้าของเครื่องเก็บเกี่ยวที่ติดตั้งได้รับการประเมินโดยการวัดเอาท์พุทแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นภายใต้การจราจรจริง คำนวณกำลังไฟฟ้าได้ทันทีและเฉลี่ยรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าขาออกและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ การวิเคราะห์ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลผลิตทางไฟฟ้าของเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานมีความสัมพันธ์กับการกำหนดค่าเพลาและขนาดของยานพาหนะที่ผ่าน

Jasim และคณะ [12] การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนารูปแบบของตัวแปลงสัญญาณ piezoelectric ด้วยรูปทรงเรขาคณิตที่ดีที่สุดนั่นคือเป้าหมายสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานในถนน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้การบรรทุกยานพาหนะ ตัวแปลงสัญญาณ Bridge มีชั้นโพลิ่ง และ ออกแบบขั้วไฟฟ้า เพื่อเพิ่มพลังงาน การวิเคราะห์ห้องประกอบถูกจำกัด ได้ดำเนินการเพื่อคาดการณ์การส่งมอผ่านพลังงาน และความเค้นในตัวแปลงสัญญาณ การจำลองแบบมัลติฟิสิกส์ได้รับการดำเนินการเพื่อประเมินผลการผลิตพลังงานโดยใช้กลุ่มสารจำพวกเซอร์โคเนตไททาเนต วัสดุที่แตกต่างกันขนาดตัวแปลงสัญญาณ และพารามิเตอร์ทางเรขาคณิต การกำหนดค่าที่เหมาะสมของตัวแปลงสัญญาณเรขาคณิตได้รับการประเมินโดยคำนึงถึงความสมดุลระหว่างสมรรถนะการเก็บเกี่ยวพลังงานกับกลไกความล้มเหลว เนื่องจากความเข้มข้นของความเครียด การออกแบบใหม่ของตัวแปลงสัญญาณของสะพานด้วยชั้นการโพลิ่ง และขั้วไฟฟ้า ผลิตพลังงานได้มากกว่าสะพานแบบเดิมและตัวแปลงสัญญาณ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าภายใต้ความเค้นที่ปล่อยออกมาผ่านตัวแปลงสัญญาณสะพานมีกำลังไฟฟ้า 556 วัตต์ ซึ่งอาจส่งผลให้พลังงานที่มีศักย์ไฟฟ้าได้ 0.743 มิลลิจูล (วงจรเปิด) สำหรับตัวแปลงสัญญาณแบบเดี่ยว ภายใต้ความเค้นภายนอก 0.7 เมกะปาสคาล การทดสอบในห้องปฏิบัติการเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงาน พบว่าผลการจำลองสอดคล้องกันกับกำลังที่วัดได้

Riemer และ Shapiro [13] ได้ศึกษาการประเมินพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหวของร่างกายที่แตกต่างกันภายใต้สมมติฐานที่แตกต่างกันเช่นการพิมพ์นิ้ว (~ 19 มิลลิวัตต์) การหายใจ (~ 1 วัตต์) ยกแขน (60 วัตต์) และเดิน (67 วัตต์) แสดงพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหวของมนุษย์ที่แตกต่างกันสำหรับผู้เก็บเกี่ยวพลังงานท่ามกลางการเคลื่อนไหวร่างกายทั้งหมดเดินเป็นหนึ่งในการเคลื่อนไหวที่พบมากที่สุดและใช้พลังงานมาก โดยวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยใช้กล้ามเนื้อในแต่ละข้อหรือส่วนของร่างกายในระหว่างการเดิน พวกเขาคิดว่าคน 80 กิโลกรัมเดินอยู่ที่ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ โดยเฉลี่ยสามารถใช้พลังงานได้มากกว่า 1 จูล สามารถเก็บเกี่ยวได้ในแต่ละขั้นตอนซึ่งหมายความว่าพลังงานมากกว่า 1 วัตต์ใช้ในการเก็บเกี่ยว

Zhong Lin Wang [14] ได้ค้นพบวิธีสร้างกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อยจากการกระตุ้นสายไฟนาโนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasound) จะสามารถเปลี่ยนการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นไปเป็นพลังงานได้โดยใช้ตัวตรวจจับขนาดเล็กที่ติดตั้งไว้ในสิ่งแวดล้อมหรือแม้แต่ในตัวของผู้คนก็ได้ ทำให้เขามองไปถึงการสร้างแหล่งพลังงานระดับนาโนโดยเขาได้คิดค้นสายไฟนาโนที่ทำมาจากซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริก หรือปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้าออกมาได้เมื่อสายไฟนาโนเกิดการโค้งงอ เขาและทีมงานได้สร้างเครือข่ายของสายไฟนาโนขึ้นในสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และวางแผ่นอิเล็กโทรดซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นลูกฟูกเหนือสารกึ่งตัวนำนั้น แล้วปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasound) เข้าไป คลื่นเสียงจะผ่านเครื่องมือไปทำให้แผ่นอิเล็กโทรดเกิดการเคลื่อนที่ไปมา ทำให้สายไฟนาโนเกิดการโค้งงอได้และเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นมา ประจุไฟฟ้าที่ได้จะถูกส่งถ่ายไปยังชั้นผิวโลหะของแผ่นอิเล็กโทรด และส่วนที่เรียกว่า Voila ซึ่งเป็นแถวสายไฟนาโนจำนวน 500 เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดนาโนแอมแปร์ออกมา นำอิเล็กโทรดฝังเข้าไปในแผ่นพลาสติก PVDF ที่หนาเพียง 25 ไมโครเมตร แล้วหยดน้ำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1-5 มิลลิเมตร ลงไปบนแผ่นพลาสติก เมื่อน้ำกระทบแผ่นพลาสติกจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและเกิดเป็นประจุอิเล็กโทรดขึ้น ประจุที่ได้จะนำไปใช้เป็นพลังงานต่อไป

Qian และคณะ [15] ศึกษาเรื่องเท้าเก็บเกี่ยวพลังงานจำเป็นต้องตอบสนองทั้งฟังก์ชันทางเทคนิคและการประยุกต์ใช้งาน และไม่จำกัดการปลดปล่อยพลังงานและความทนทานใช้งานได้สะดวก รองเท้าเป็นกุญแจสำคัญที่สร้างความท้าทายในการออกแบบเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานจากรองเท้า บทความนี้นำเสนอการออกแบบการเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างแบบจำลองและการทดสอบของเครื่องเพียโซอิเล็กทริกฝังตัวสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเดินของมนุษย์ เป็นการขยายโครงสร้าง ได้รับการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งและขยายแรงจากส้นเท้าตามแนวตั้งไปยังด้านในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกวางในแนวนอน ใช้แผ่นอลูมิเนียมทำเป็นรูปสันสูง 2 ชั้นรวมและถ่ายโอนแรงกลแบบไดนามิกจากการกระแทกของส้นเท้าไปยังกรอบการขยายกำลังที่จัดในรูปแบบแซนวิชรูปแบบไดนามิกแรงที่ได้จากส้นเท้ากระแทกจะวัดเพื่อออกแบบเพิ่มประสิทธิภาพและจำลองเครื่องเก็บเกี่ยวรองเท้าเพียโซอิเล็กทริก ค่าที่ได้จากแบบจำลองนำไปพัฒนาและตรวจสอบเพื่อให้สามารถคาดการณ์ได้อย่างแม่นยำ สองต้นแบบเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานแปรและหักจุดของการวางแผ่นเพียโซอิเล็กทริก กำลังประดิษฐ์และทดสอบบนลู่วิ่งที่แตกต่างกันความเร็วในการเดินและความต้านทานภายนอก การจำลองเชิงตัวเลขสอดคล้องกับการทดลอง เครื่องเก็บเกี่ยวเพียโซอิเล็กทริก อย่างน้อยอาจผลิตพลังงานมากขึ้นที่ความเร็วในการเดินเดียวกันและความต้านทานที่สอดคล้องกับผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานจากรองเท้าที่มีแปดและหกจุด ตามลำดับที่ 7 มิลลิวัตต์ / ก้าวและกำลังขับเคลื่อนเฉลี่ย 9 มิลลิวัตต์ / ก้าวที่ความเร็วในการเดิน 3.0 ไมล์ต่อชั่วโมง (4.8 กม. / ชม.) ผลการจำลองจากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ผ่านการตรวจสอบแล้วพบว่าเครื่องเก็บเกี่ยวที่มีเพียโซอิเล็กทริกสี่จุดสามารถเก็บเกี่ยว 14 มิลลิวัตต์ / ก้าวและกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 20 มิลลิวัตต์ / ก้าวที่ 3.0 ไมล์ต่อชั่วโมง (4.8 กม. / ชม.) และ 3.5 ไมล์ต่อชั่วโมง (5.6 กม. / ชม.) ตามลำดับ

Wang และคณะ [16] ศึกษาการผลิตไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก สำหรับทางเท้าเป็นเทคนิคการเก็บเกี่ยวพลังงานที่มั่นคงและมีประสิทธิภาพยังแสดงความท้าทายในหลายด้าน ในการศึกษาออกแบบและประเมินการเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์สร้างพลังงานที่มีขนาด 100 x 100 มิลลิเมตร สามารถใช้งานได้กำลังไฟฟ้าที่ดีที่สุด กำลังไฟฟ้ามี่ความสัมพันธ์เชิงบวกกับจำนวนเพียโซอิเล็กทริก ขนาดหน่วยการเก็บเกี่ยวพลังงานขนาดของโวลต์และความถี่ของการจราจร สูงสุดกำลังส่งที่กำลังรับน้ำหนัก 0.2 เมกะปาสคาล และความถี่ในการให้โวลต์ 10 เฮิร์ตซ์ เท่ากับ 0.88 มิลลิวัตต์ และเหมาะสมที่สุดคือ 20 กิโลโอมห์ กำลังส่งสูงสุดที่ 0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MPa และ 15 เฮิร์ตซ์ สามารถโหลดได้สูงสุด 11.67 มิลลิวัตต์ และโหลดที่เหมาะสมที่สุดคือ 10 กิโลกรัม ต่อมาจะมีการทดสอบสมรรถนะเครื่องกลและการจำลอง (MTS) กับ 40,000 รอบต่อการให้โหลดและการเปลี่ยนรูปโดยสิ้นเชิงของอุปกรณ์สร้างพลังงานที่มีน้อยและผลิตไฟฟ้าของหน่วยการเก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซอิเล็กทริก ยังคงมีเสถียรภาพ สุดท้ายพิจารณาเป็นแผนการวิจัยในอนาคต

Phosy Panthongsy และคณะ [17] ศึกษาเกี่ยวกับการประดิษฐ์และการประเมินกระเบื้องปูพื้นการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้เสาเข็มเพียโซอิเล็กทริก PZT เพื่อแปลงพลังงานจลน์จากฝีเท้าของมนุษย์เป็นไฟฟ้าที่ใช้งานได้ การทำงานของกระเบื้องขึ้นอยู่กับกลไกการแปลงความถี่ซึ่งการสั่นของอินพุตความถี่ต่ำจะถูกแปลงเป็นการสั่นความถี่สูงของการส่งผ่านทางกลไฟฟ้า ความถี่ในการทำงานของ PZT ถูกแปลงขึ้นโดยปฏิสัมพันธ์ระหว่างแม่เหล็กถาวรกับแท่งเหล็ก การกระจัดในแนวตั้งของคานเหวี่ยงได้รับการแปลเป็นภาษาท้องถิ่นโดยมีตัวหยุดเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดกับชั้นเพียโซอิเล็กทริกจากการกระแทกหรือการกระตุ้นจากการเคลื่อนที่เกิน ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กระหว่างแม่เหล็กและแท่งเหล็กถูกตรวจสอบโดยการจำลองการวิเคราะห์องค์ประกอบ เพื่อกำหนดช่องว่างอากาศที่เหมาะสมที่สุด จากการทดลองในชั้นต้นเสาเข็ม PZT แบบ unimorph ได้รับการสร้างต้นแบบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงการแปลงความถี่ที่ประสบความสำเร็จโดยมีความถี่ต่อเนื่องที่ 10.54 เฮิร์ตซ์ จากนั้นจึงขยายขนาดโดยการรองรับ PZT แบบ unimorph 24 ตัว ตามด้วยการตรวจสอบการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงาน แท้แขนแต่ละตัวเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสสะพานคลื่นเต็มรูปแบบจากนั้นเชื่อมต่อแบบขนานกับคานขวางอื่น ๆ กำลังไฟฟ้าและพลังงานทั่วไปถูกตรวจสอบผ่านโหลดตัวต้านทานต่าง ๆ พบว่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยและพลังงานทั้งหมดที่ผลิตโดยการก้าวเท้าเดียวบนแผ่นกระเบื้องพบว่าเท่ากับ 1.24 มิลลิวัตต์ และ 3.49 มิลลิจูล ตามลำดับที่ความต้านทานโหลดที่เหมาะสมที่ 74.44 กิโลโอห์ม ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงถึง 17.12 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์

Tsai และคณะ [18] ได้มีการคิดค้นและเตรียมวัสดุผสมฟิล์มเพียโซอิเล็กทริกยางและการประยุกต์ใช้ใน heartbeat sensing ได้สำเร็จ สำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานจากมนุษย์โดยได้มุ่งเน้นถึงความสามารถในการยืดหยุ่น (stretchability) และไฟฟ้าเชิงกล (electromechanical) ที่สูงซึ่งช่องว่างภายในโครงสร้างของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (polydimethylsiloxane (PDMS)) จะถูกสอดด้วยไมโครมิเตอร์ ซึ่งจะตอบละมีการส่งสัญญาณไฟฟ้าได้อย่างหลากหลาย วัสดุผสมมีความยืดหยุ่น (มีความยืดหยุ่นประมาณ 300 กิโลปาสคาล) และแสดงความเป็นเพียโซอิเล็กทริกที่ดี (ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก  $d_{33}$  สูงกว่า 1500 pC/N) ในตัวอย่าง การเดินอย่างอิสระระบบการตรวจสอบการใช้เพียโซอิเล็กทริกโดยจะแสดงให้เห็นเมื่อรวมกับ 12-a H ใส่กระเปาะอุปกรณ์พลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเครื่องขยายเสียงเป็น 552 คิดเป็นนาโนพลังงานพลังงานจากการเก็บเกี่ยวร่างกายมนุษย์จะถูกจัดเก็บและใช้ในการตรวจสอบการเต้นของหัวใจมีพื้นที่ทำงาน 10 ตารางเซนติเมตร และทำการให้แรง 10 กิโลกรัม คาดว่าค่าใช้จ่ายของ 0.1 C วงจรเพียโซอิเล็กทริกฟิล์ม นอกจากนี้การซ้อนกันหลายชั้นและเชื่อมต่อแบบขนานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูง เช่น เพียโซอิเล็กทริกยางซึ่งฟังก์ชันทั้งยืดหยุ่นพลังงานเก็บเกี่ยวและเซ็นเซอร์ที่มีความไวสูงมีศักยภาพที่ดีสำหรับการรับรู้ของมนุษย์และสวมใส่สามารถปลูกฝังทางสรีรวิทยาาระบบได้

Thakrit Panklib และคณะ [19] ศึกษาการพัฒนาต้นแบบกระเป๋าสะพายเก็บเกี่ยวพลังงานเพื่อความมั่นคง ภัยพิบัติ และพื้นที่ห่างไกล ในตัวกระเป๋าสะพายประกอบด้วยอุปกรณ์หลักห้าส่วน ได้แก่ ระบบสะสมพลังงานระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นผิวโลก (GPS) ระบบเก็บเกี่ยวพลังงาน ระบบควบคุมการเก็บเกี่ยวพลังงาน และระบบกันกระสุน (สำหรับส่วนหางงานเพื่อความมั่นคง) โดยในส่วนของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานสามารถแยกออกเป็นระบบพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 10 วัตต์ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหลัก และระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวขนาด 200 มิลลิวัตต์ ซึ่งเป็นส่วนเสริมในสถานการณ์ที่ไม่มีแสงสว่างหรืออยู่ในพื้นที่ปิด แต่จะเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของผู้ใช้งาน ตัวกระเป๋าสะพายได้ออกแบบโดยอาศัยหลักการทางกายศาสตร์ให้มีการถ่ายเทน้ำหนักลงแผ่นหลังเพื่อลดอาการเมื่อยล้า นอกจากนี้ระบบเก็บเกี่ยวพลังงานและระบบสะสมพลังงานจะช่วยให้ผู้ใช้งานลดขนาดของแบตเตอรี่สำรองที่จะใช้ในภารกิจได้ และในขณะเดียวกันระหว่างการเดินเพื่อสำรวจหรือลาดตระเวน วัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะทำหน้าที่เก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหว ทั้งนี้การเคลื่อนไหวอาจให้พลังงานที่ไม่เสถียรงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุซึ่งเป็นระบบสะสมพลังงานที่สามารถเก็บพลังงานได้อย่างรวดเร็วเพื่อเพิ่มเสถียรภาพทางพลังงานของระบบ ทั้งนี้เมื่อมีการใช้งานเฉพาะวิทยุสื่อสารอย่างต่อเนื่องด้วยกำลังส่ง 2 วัตต์ สามารถใช้งานได้ 26 ชั่วโมง 6 นาที และเมื่อใช้งานวิทยุสื่อสารเพื่อรับข่าวสารสามารถใช้งานได้ 52 ชั่วโมง 18 นาที

## บทที่ 3

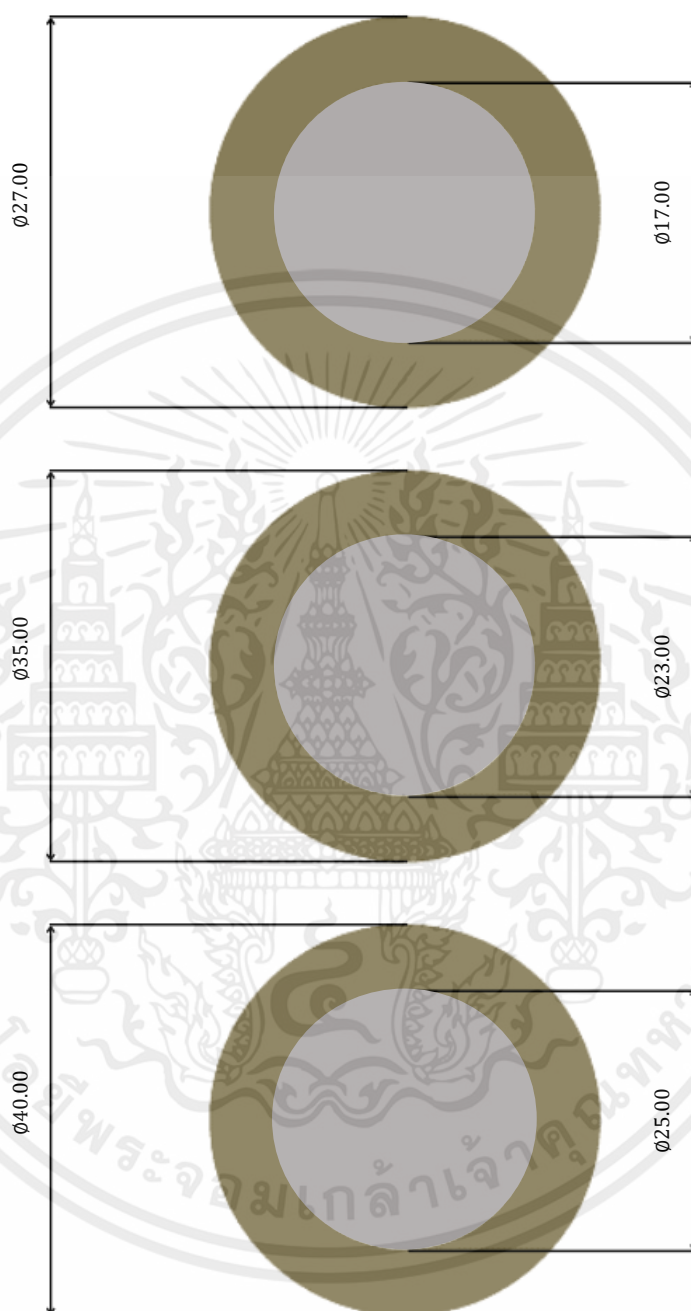
# อุปกรณ์และวิธีการ

### 3.1 การ Simulation

ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นการรวบรวมองค์ความรู้ต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการออกแบบ โดยอาศัยแหล่งข้อมูลจากการค้นคว้าจากงานวิจัยที่สำเร็จแล้วจากอินเทอร์เน็ต และแผ่นเพียโซอิเล็กทริกผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีการใช้งานในปัจจุบัน ตัวอย่าง เช่น ทฤษฎีของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ในทางกลับกันเมื่อให้พลังงานไฟฟ้าก็สามารถเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกลได้เช่นกัน ในการวิเคราะห์ได้ใช้หลักการที่เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) และปรากฏการณ์อินเวอร์สเพียโซอิเล็กทริก (Inverse piezoelectric effect) ในการวิเคราะห์ได้ใช้หลักการที่เรียกว่า ทฤษฎีโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA) คือการใช้คอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม เช่น ปัญหาทางโครงสร้าง และการกระจายตัวของความร้อนภายในวัสดุ เป็นต้น โดยเริ่มจากการจำลองรูปร่างของปัญหาแล้วทำการแบ่งรูปร่างออกเป็น element เล็ก ๆ เพื่อลดความซับซ้อนและเพื่อความสะดวกในการแก้ปัญหา ทำการกำหนดสมบัติของวัสดุและสภาพการใช้งานจริง (boundary Conditions) และทำการแก้ปัญหาโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ส่วนสำคัญอย่างยิ่งคือเรื่องของวัสดุ โดยวัสดุแต่ละชนิดก็จะมีสมบัติทางกล (Mechanical properties of materials) ต่างกัน ซึ่งในการออกแบบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะศึกษาด้วยโปรแกรม SolidWorks 2018 ในการวิเคราะห์

ออกแบบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกลำดับขั้นตอนในการออกแบบขนาด รูปร่าง และวัสดุ ของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks 2018 มาช่วยในการออกแบบแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ให้มีความง่ายขึ้น สะดวกขึ้น และรวดเร็วในการออกแบบ เพื่อมาศึกษาในเรื่อง Linear static โดยการออกแบบมี 6 ลักษณะดังนี้

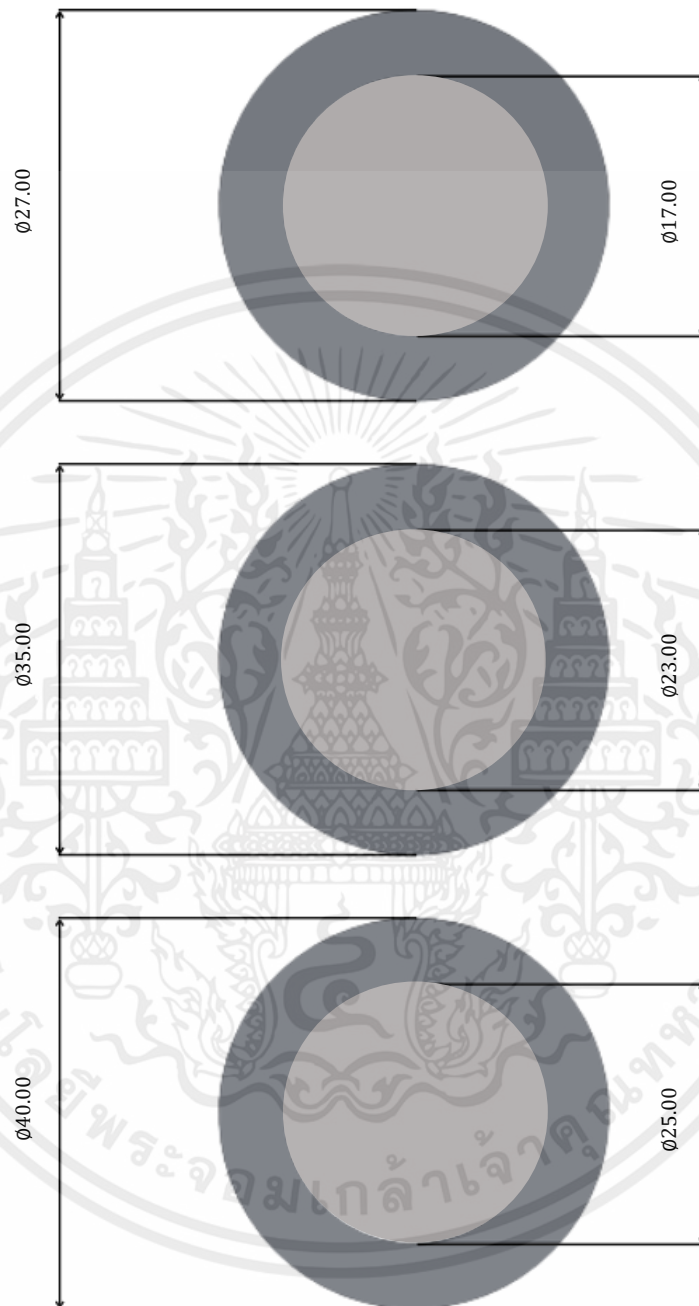
แบบที่ 1 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างกลม วัสดุทองเหลือง ที่มีขนาด 27 30 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างกลม วัสดุทองเหลือง ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

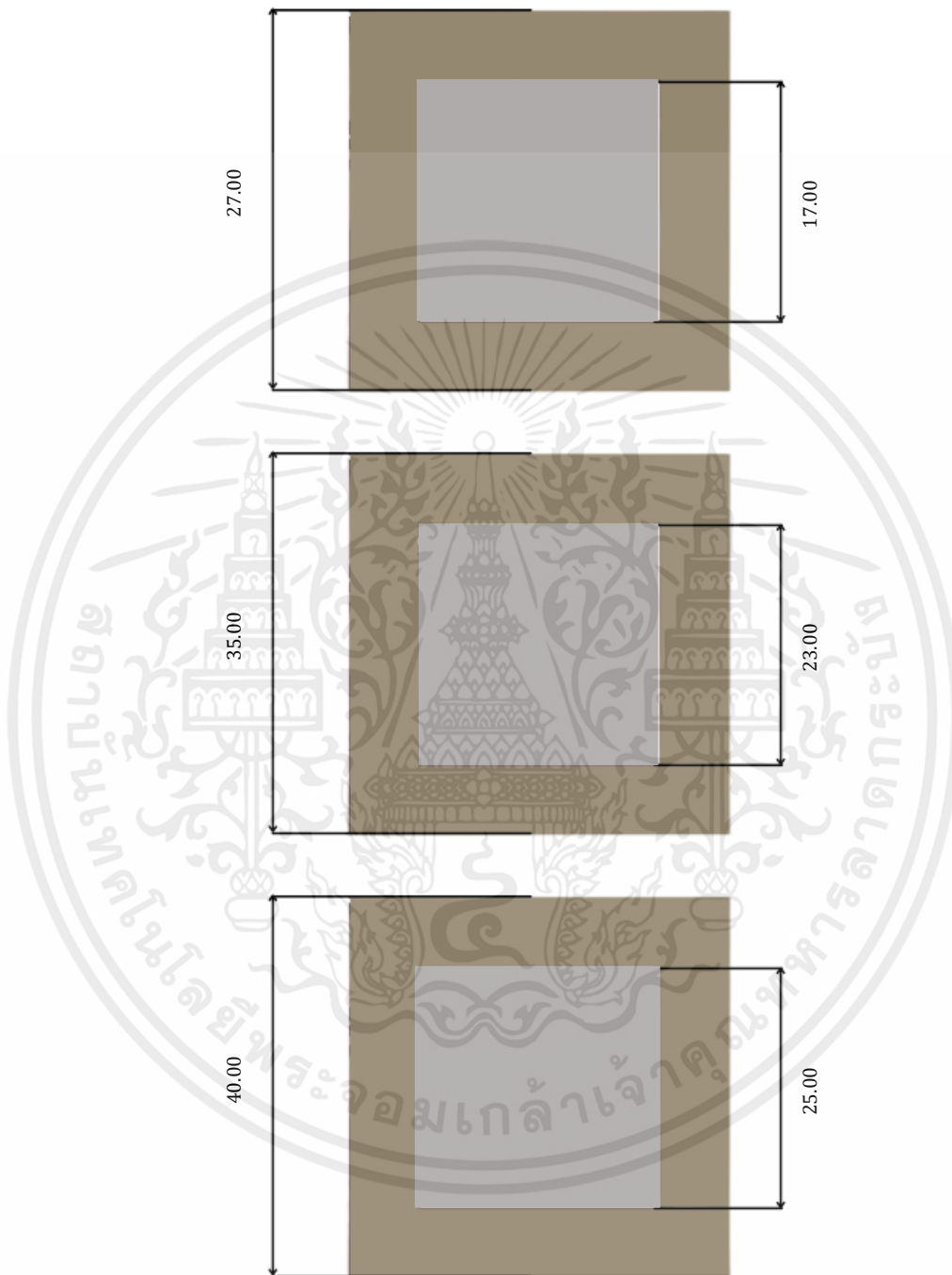
แบบที่ 2 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างวงกลม วัสดุเซรามิก ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างวงกลม วัสดุเซรามิก ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

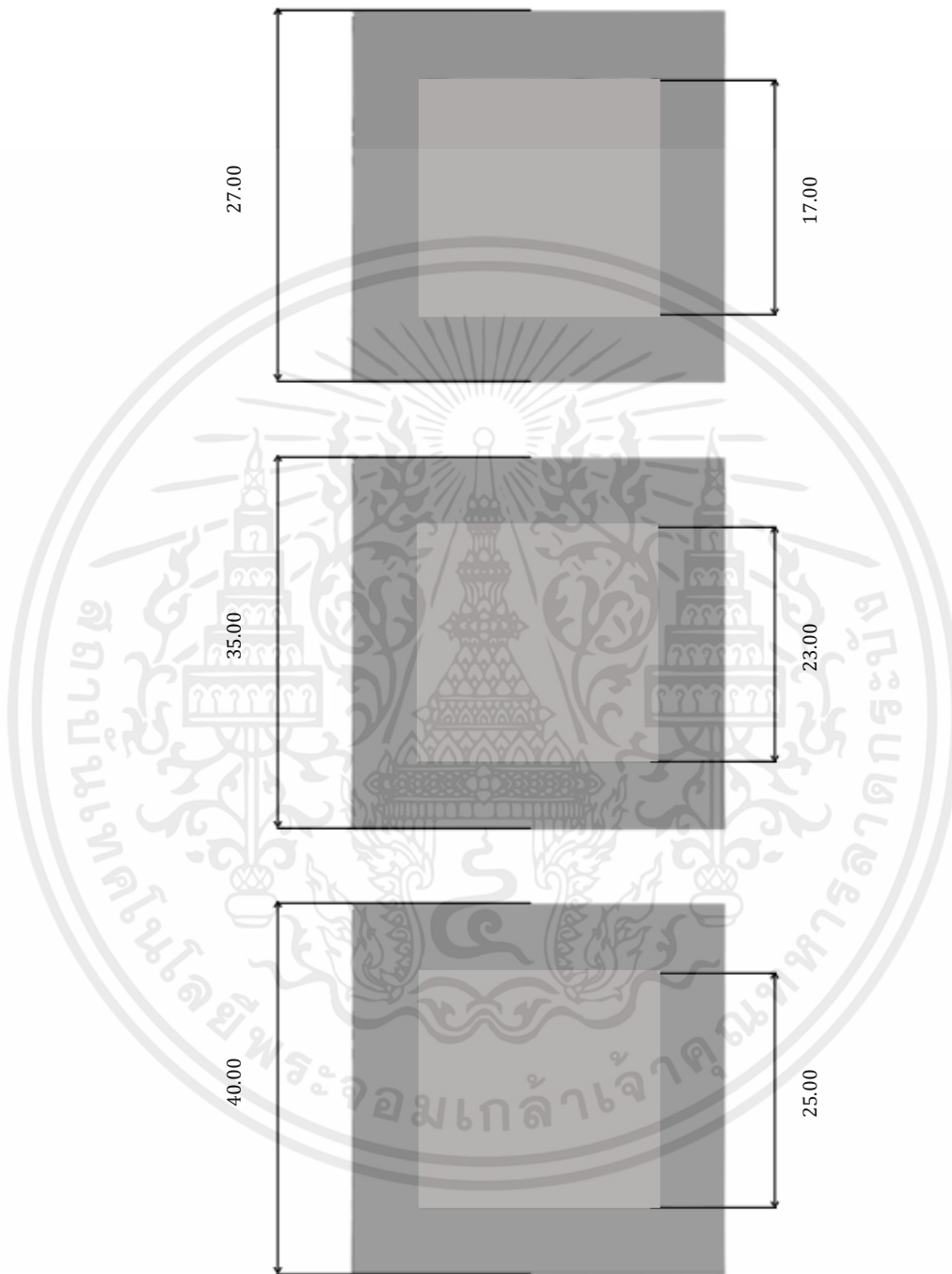
แบบที่ 3 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างสี่เหลี่ยม วัสดุทองเหลือง ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างสี่เหลี่ยม วัสดุทองเหลือง ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

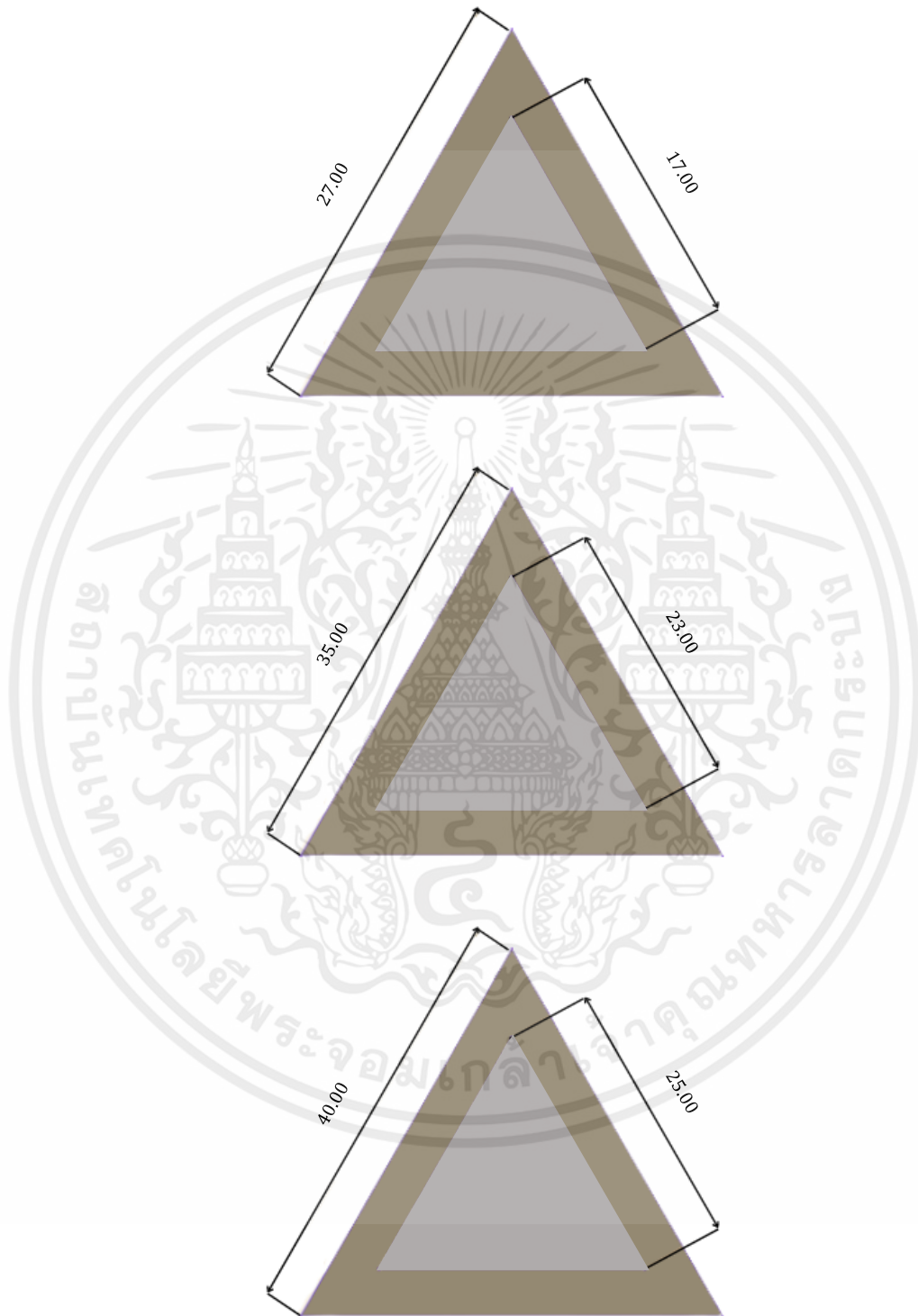
แบบที่ 4 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างสี่เหลี่ยม วัสดุเซรามิก ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างสี่เหลี่ยม วัสดุเซรามิก ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

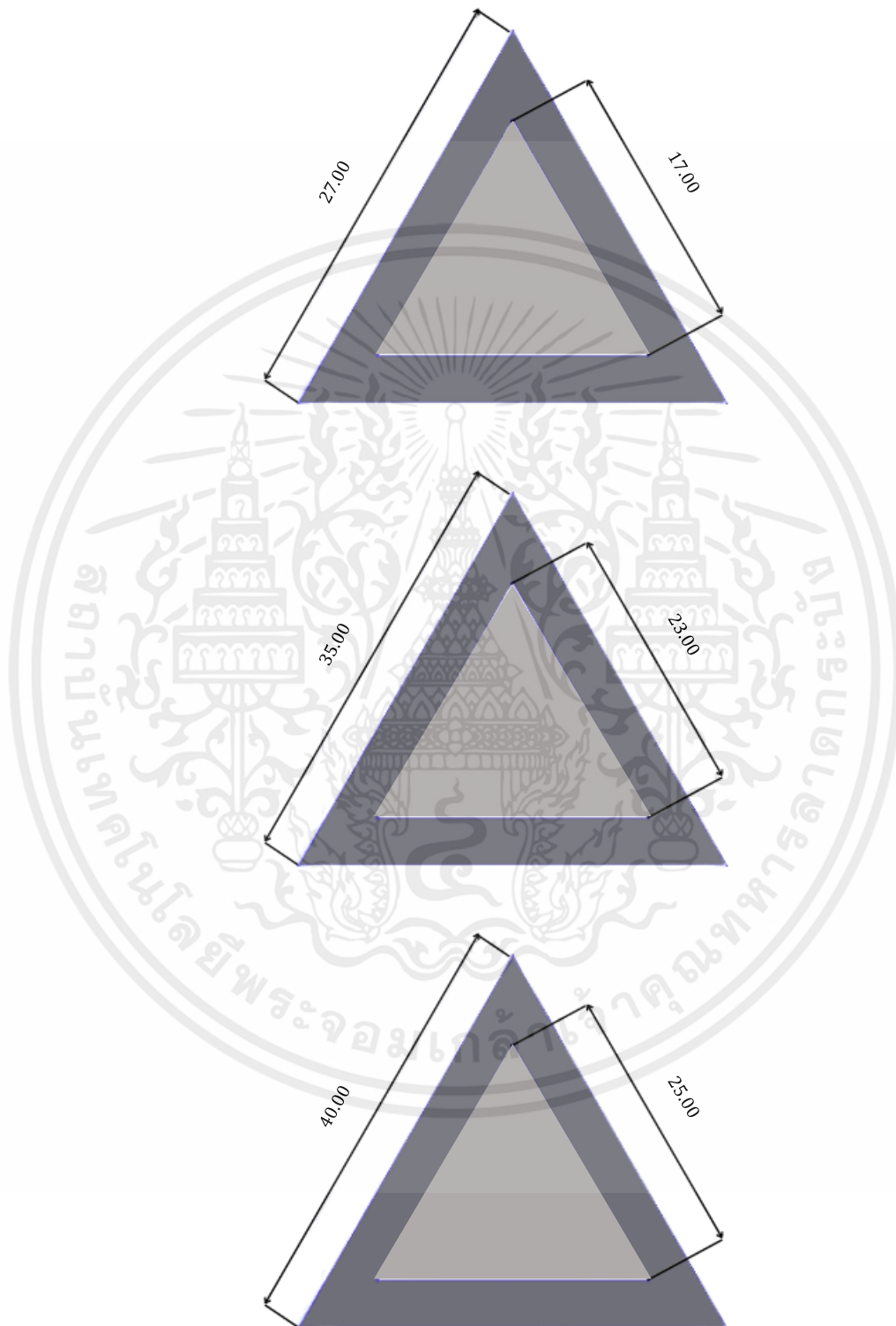
แบบที่ 5 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างสามเหลี่ยม วัสดุทองเหลือง ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 3.5)



**รูปที่ 3.5** แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างสามเหลี่ยม วัสดุทองเหลือง ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 6 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกทรงรูปร่างสามเหลี่ยม วัสดุเซรามิก ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกทรงรูปร่างสามเหลี่ยม วัสดุเซรามิก ที่มีขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1-3.6 การ Simulation จะเห็นว่าเลือกใช้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกขนาด 27 35 และ 40 mm เนื่องจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่มีการจำหน่ายในท้องตลาดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 20 21 27 35 และ 40 มิลลิเมตร จึงได้ทำการเลือกมา 3 ขนาดเพื่อศึกษาในเรื่อง Linear static

## 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการ Simulation

3.2.1 โน้ตบุ๊ก ยี่ห้อ Lenovo รุ่น IdeaPad S340-15IIL-81VW009BTA (ดังแสดงในรูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 โน้ตบุ๊ก ยี่ห้อ Lenovo รุ่น IdeaPad S340-15IIL-81VW009BTA

3.2.2 โปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks 2018 SP5.0 (ดังแสดงในรูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 โปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks 2018 SP5.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ขั้นตอนการทำการวิเคราะห์ Linear static

การศึกษา Linear static การวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงกระทำสามารถดูการรับแรง (Stress) ที่ตำแหน่งต่างๆของชิ้นงาน และดูการบิดงอ (Displacement) และหาค่าความเค้นจากสมการที่ 3.1 ดังนี้

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

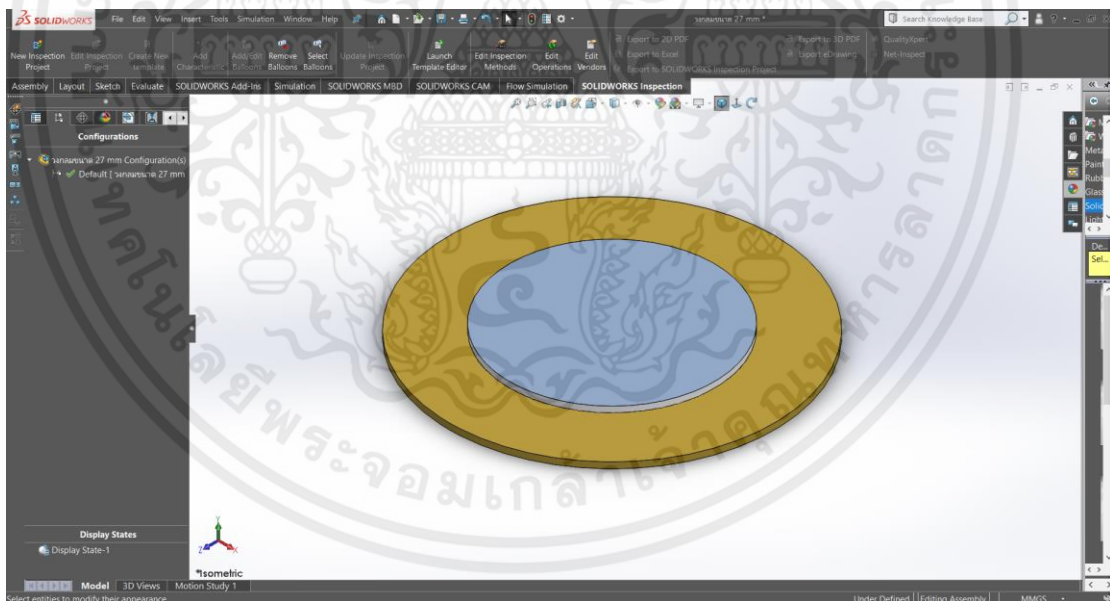
เมื่อ  $\sigma$  = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็น (Pa, 1 Pa = N/m<sup>2</sup>) หรือ kgf/mm<sup>2</sup>  
หรือ psi (lbf/in<sup>2</sup>)

P = แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ lbf

A = พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ มีหน่วยเป็น m<sup>2</sup> หรือ mm<sup>2</sup> หรือ in<sup>2</sup>

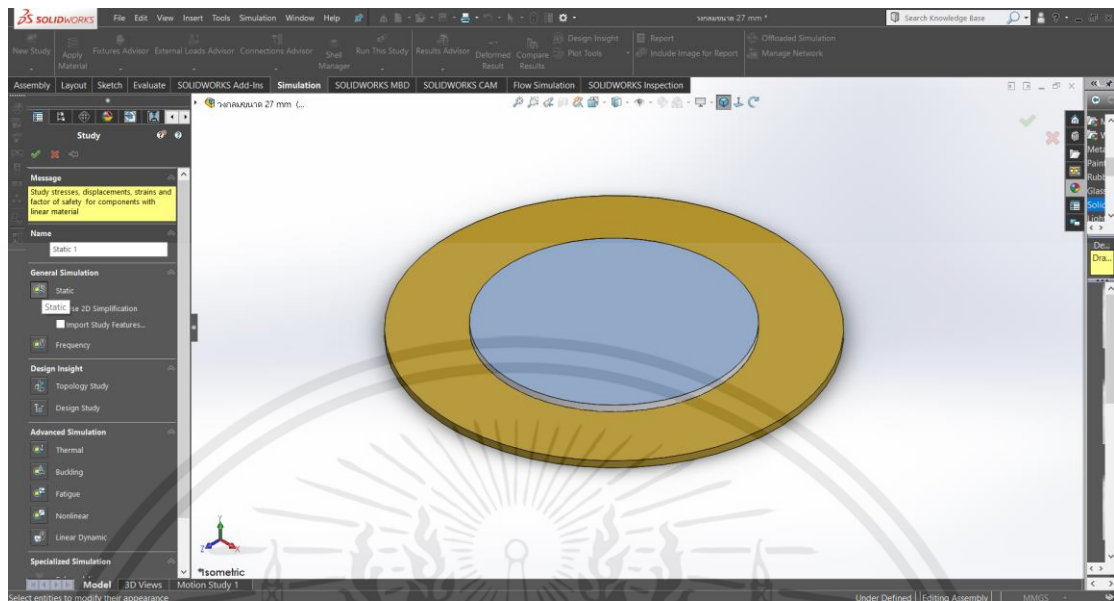
ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเสียหายของแบบจำลองแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเมื่อมีแรงมากระทำ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks 2018 มีขั้นตอนดังนี้

#### 1. เปิดชิ้นงานที่ต้องการ Simulation

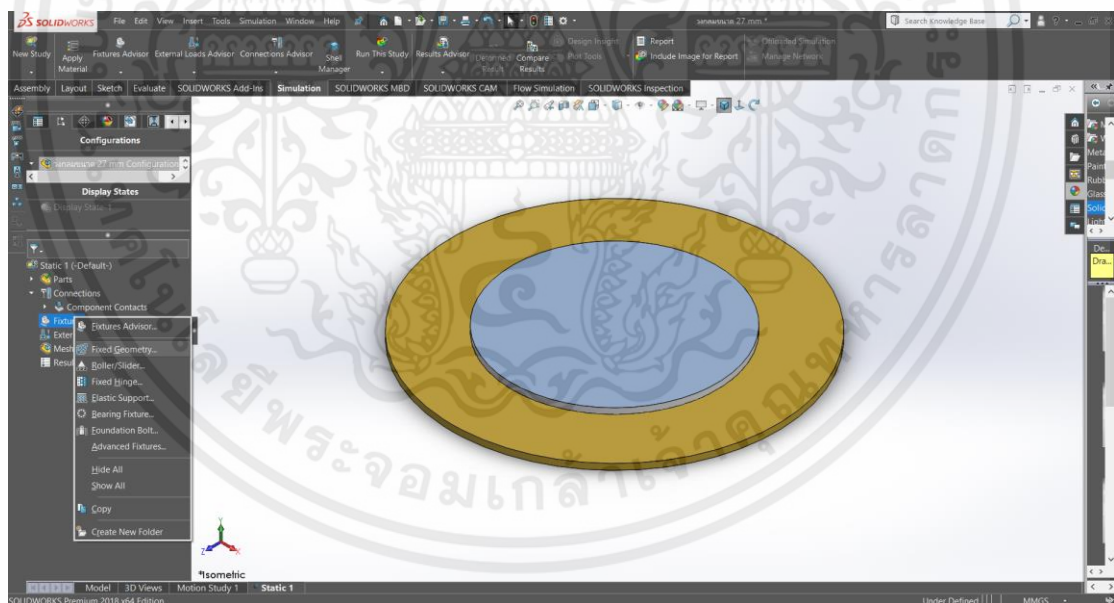


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. เลือกโหมด Simulation > New study > Static

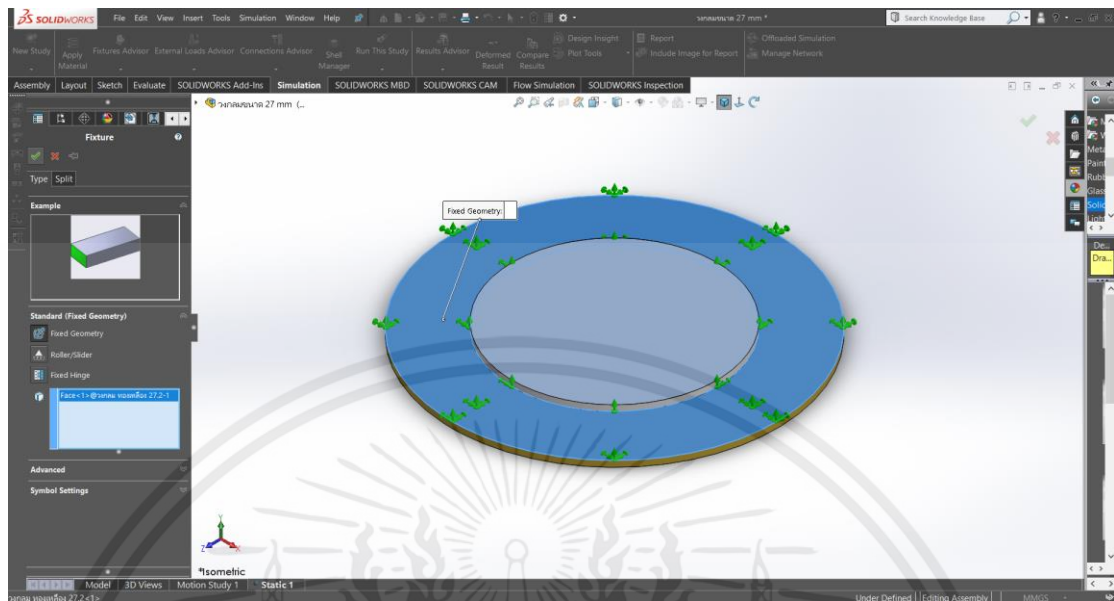


## 3. เลือก Fixtures > click ขวาเลือก Fixed Geometry

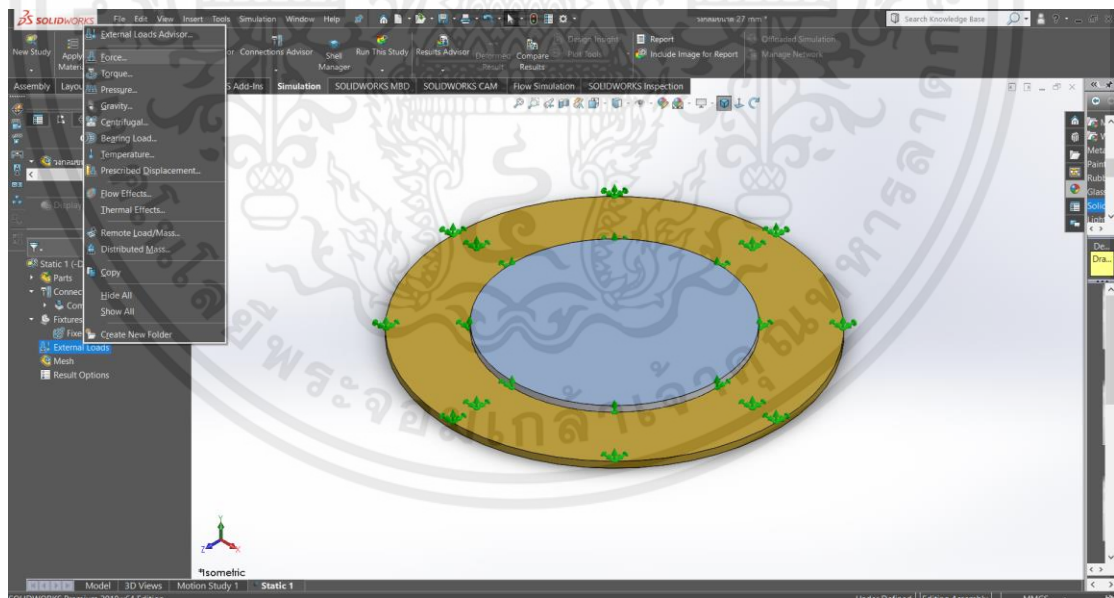


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. จากนั้นเลือกด้านที่ต้องการยึดจับ

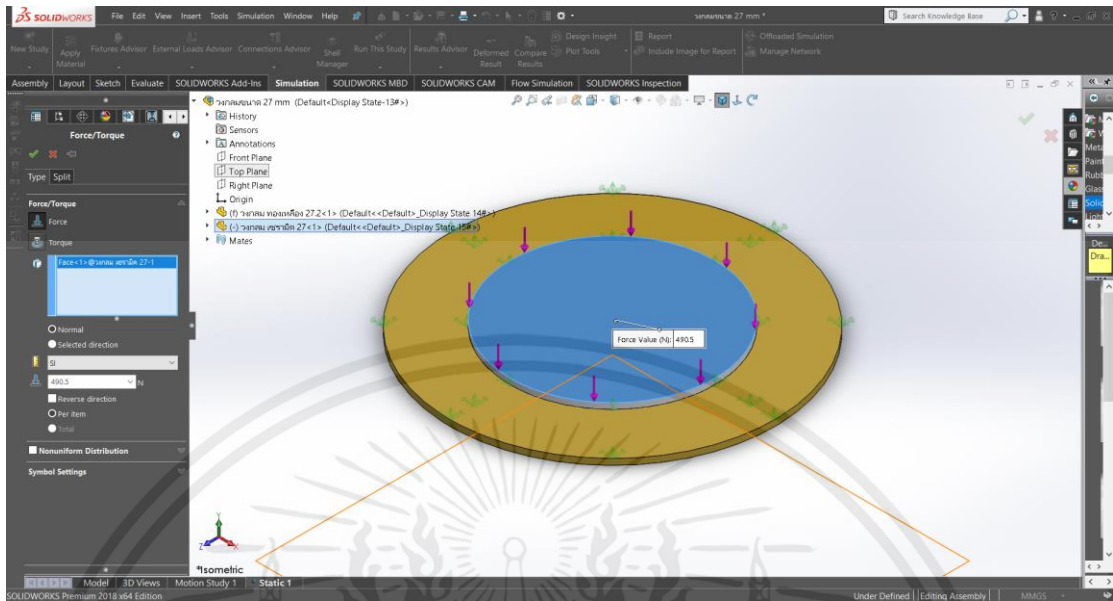


#### 5. จากนั้น click ขวาที่ External Load > Force เพื่อใส่แรงในการกระทำลงไป กำหนดค่าเป็น 490 นิวตัน หรือ 50 กิโลกรัม

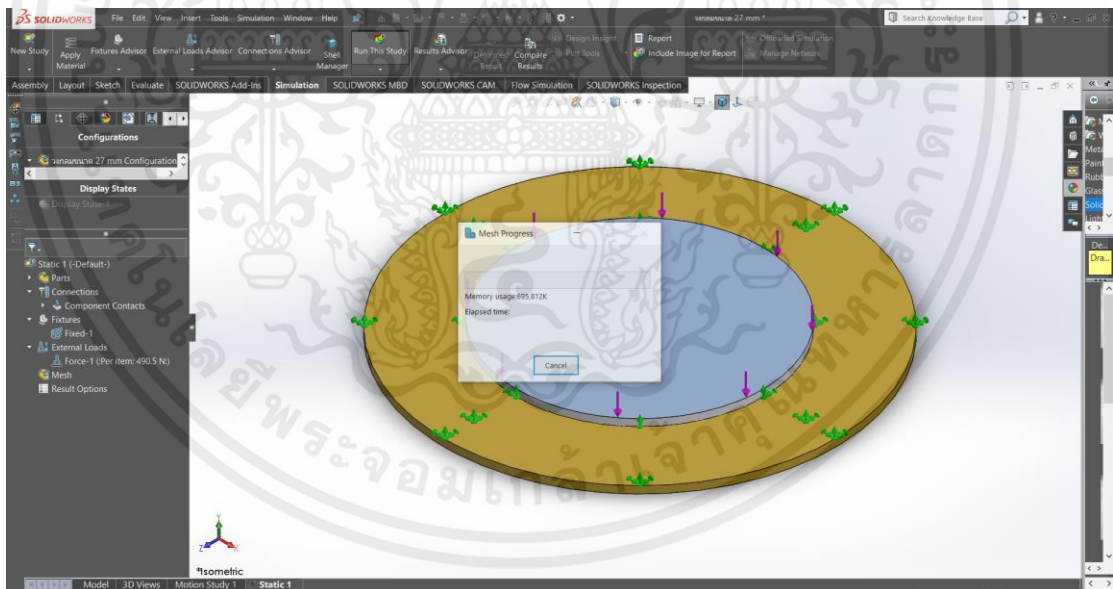


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

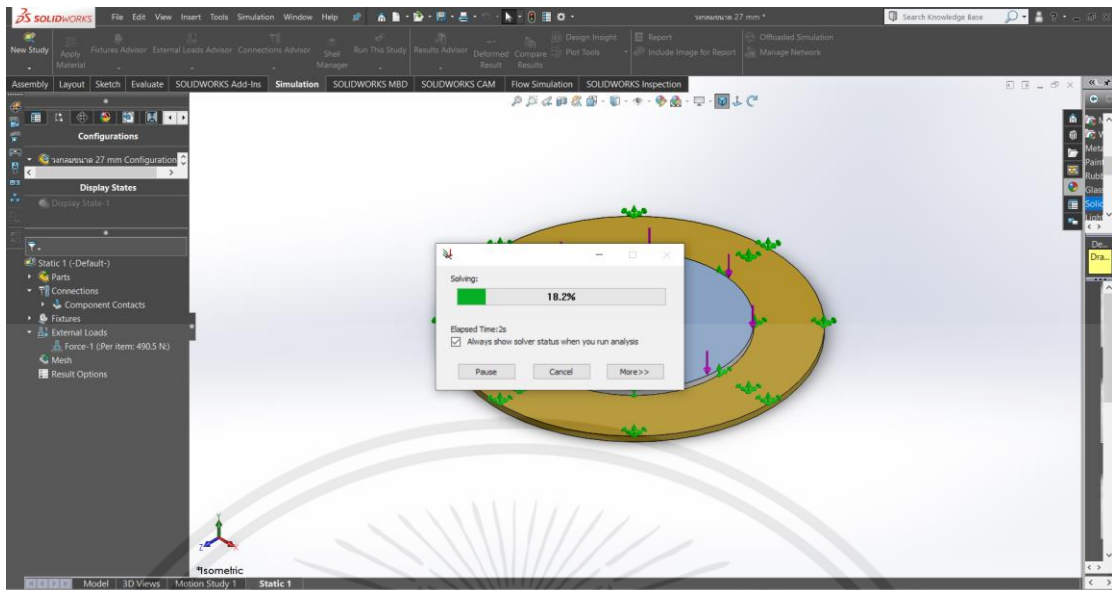
6. เลือกด้านที่ต้องการใส่แรงลงไป จากนั้นเลือก Top Plane เพื่อระบุขนาดของแรงที่มากกระทำ



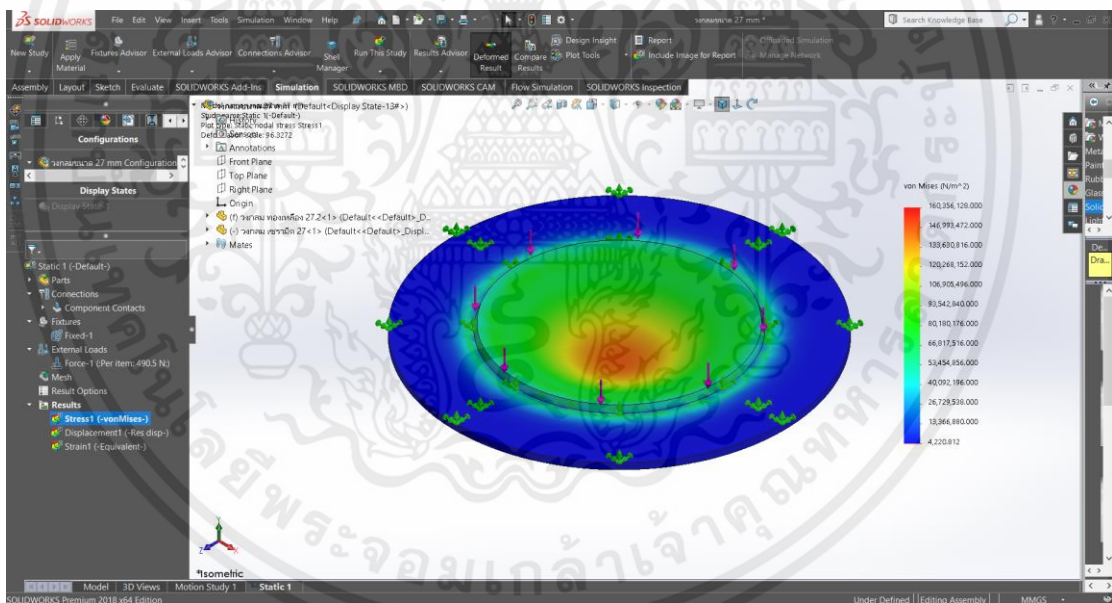
7. เมื่อใส่ค่าที่ต้องการครบแล้วให้ กดปุ่ม Run This Study เพื่อเริ่มการจำลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

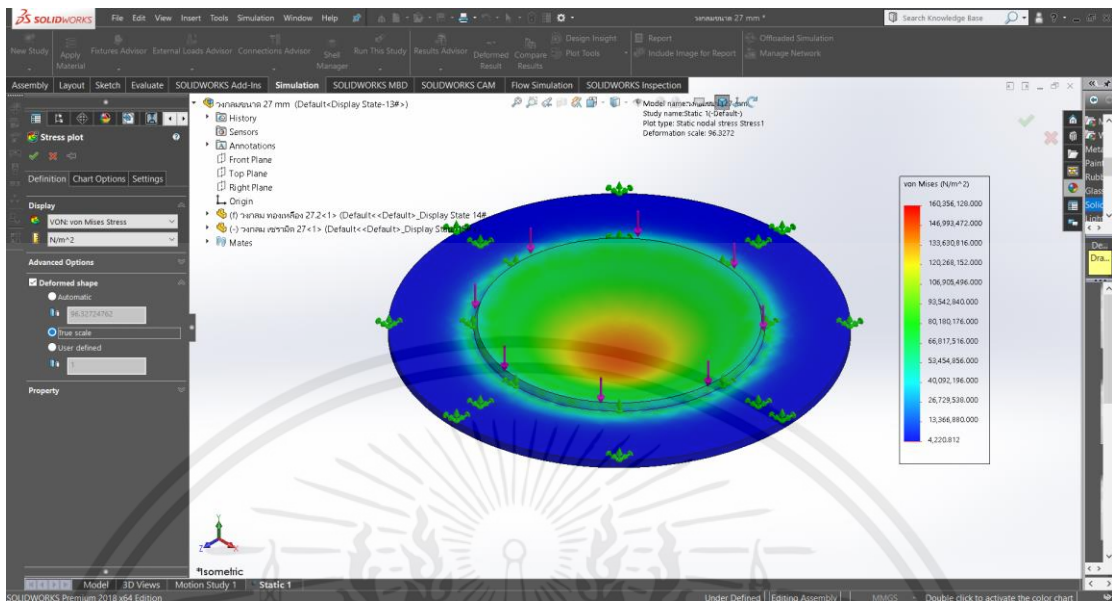


8. เมื่อ โปรแกรม Run เสร็จแล้ว Double click ที่ Stress1 เพื่อตรวจสอบค่าที่แสดง

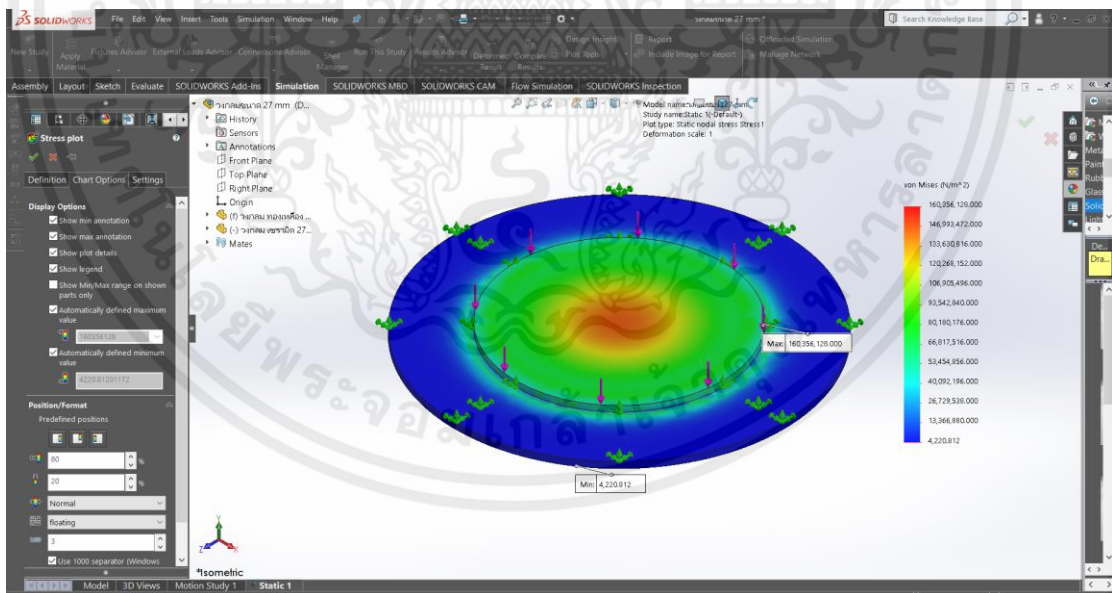


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. หลังจากนั้น เลือก Definition > True scale เพื่อที่จะได้ค่าตามความจริง

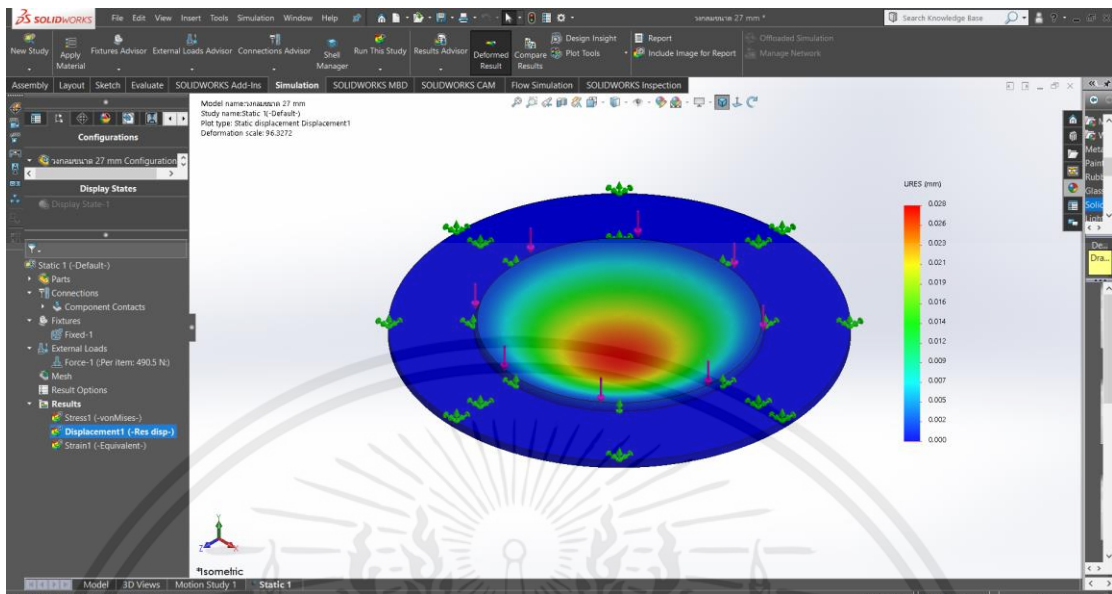


10. จากนั้นเลือก Chart Option เลือกถูกที่ Show min annotation และ Show max annotation เพื่อแสดงจุดที่มีค่า Stress น้อยที่สุดและมากที่สุด แล้วกดปุ่มถูก

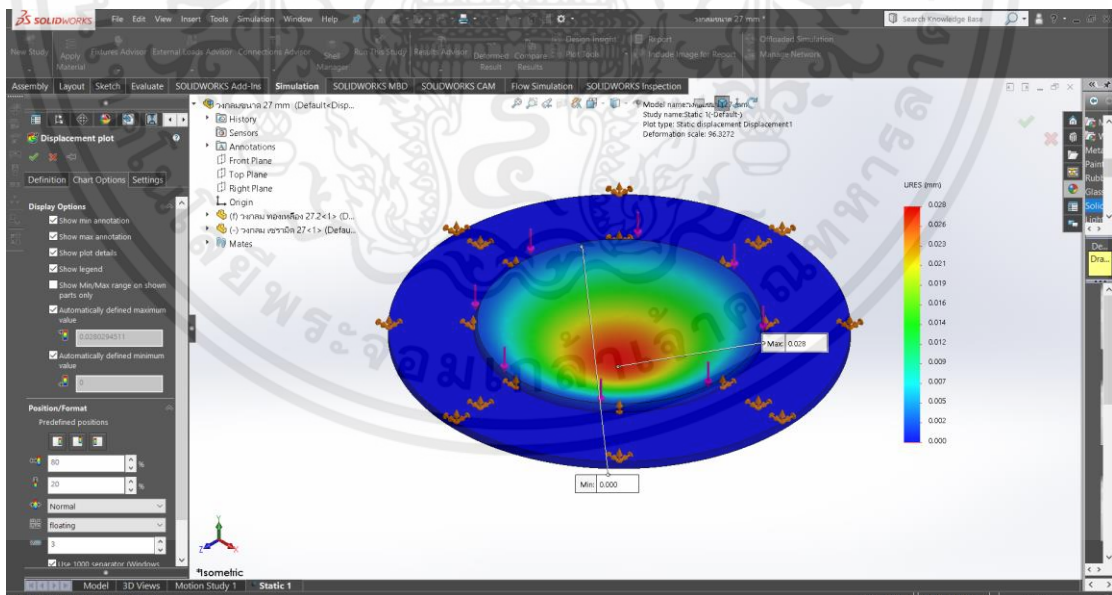


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. Double click ที่ Displacement เพื่อดูระยะยืดและตรวจสอบค่าที่แสดง

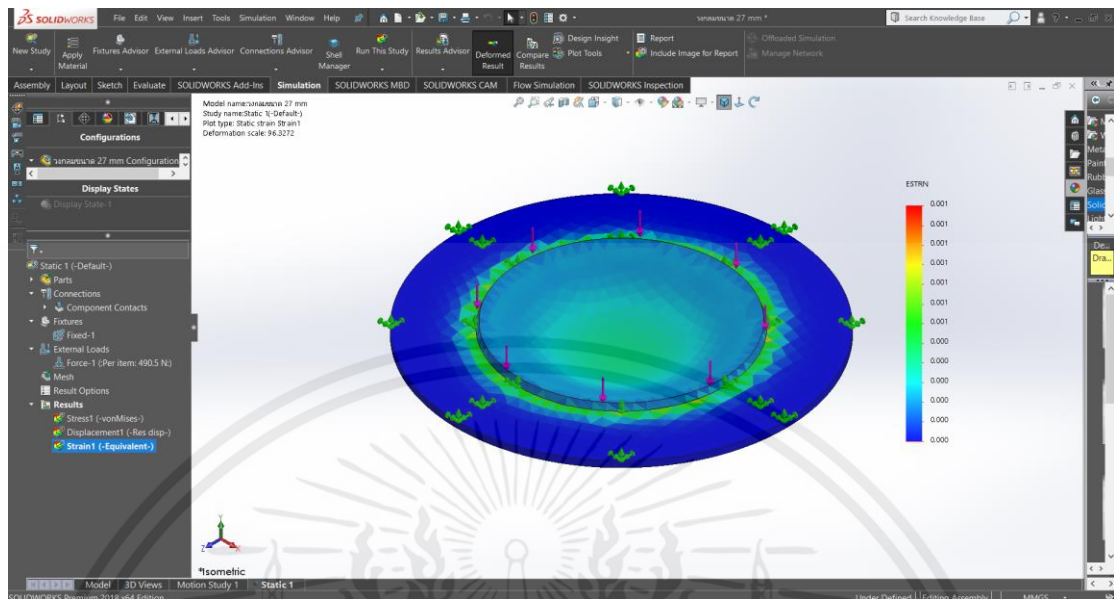


12. หลังจากนั้น เลือก Definition > True scale เพื่อที่จะได้ค่าตามความจริง แล้วเลือก Chart Option เลือกถูกที่ Show min annotation และ Show max annotation เพื่อแสดงจุดที่มีค่า Displacement น้อยที่สุดและมากที่สุด แล้วกดปุ่มถูก

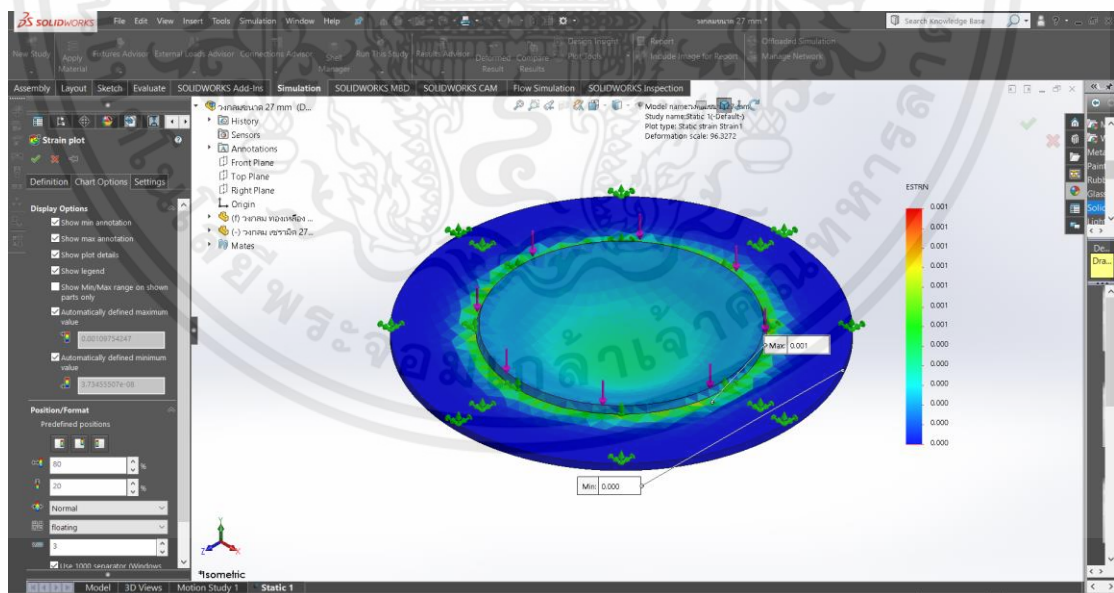


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. Double click ที่ Strain1 เพื่อตรวจสอบค่าที่แสดง



14. หลังจากนั้น เลือก Definition > True scale เพื่อที่จะได้ค่าตามความจริง แล้วเลือก Chart Option เลือกถูกที่ Show min annotation และ Show max annotation เพื่อแสดงจุดที่มีค่า Strain น้อยที่สุดและมากที่สุด แล้วกดปุ่มถูก



15. ทำซ้ำ ในขั้นตอนที่ 1-14 ในการจำลองถัดไป คือ แผ่นเพียโซอิเล็กทริกขนาด 27 35 และ 40 มิลลิเมตร รูปร่าง วงกลม สามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

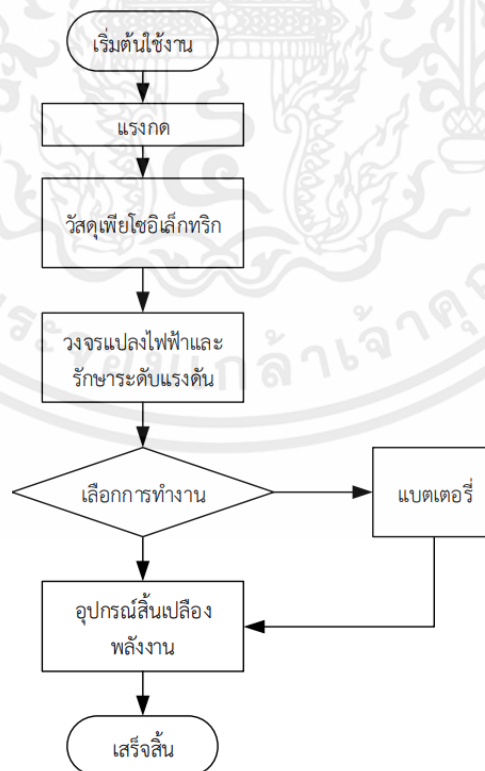
จากการวิเคราะห์ความเสียหายของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก เมื่อได้รับแรงกระทำแสดงให้เห็นว่าแต่ละขนาดและรูปร่างที่ได้รับแรงกระทำเกิดความเสียหายบริเวณตรงกลางและขอบด้านในของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกมากที่สุด เนื่องจากเป็นบริเวณที่รับแรงและกระจายแรงได้ดี ซึ่งหมายความว่า ถ้าหากรับแรงได้เยอะเท่าใดความเสียหายก็จะเกิดขึ้นบริเวณของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเยอะเท่านั้น

ขั้นตอนที่ 11 จะเป็นการแสดงค่าความเค้น (Stress) ในทิศทางต่าง ๆ ของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ค่าความเค้น Von Mises มีค่าสูงสุดบริเวณที่แสดงเป็นสีแดงซึ่งมีค่าอยู่ที่ 160.356 เมกะปาสคาล

แผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่เหมาะสมกับการสร้างชิ้นชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยวิธีการทางเพียโซอิเล็กทริก คือ แผ่นเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างวงกลม เนื่องจากมีการกระจายแรงที่มีผลต่อการเกิดกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่ารูปร่างสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม และขนาดที่เหมาะสมแก่การใช้ทดลอง คือ ขนาด 40 มิลลิเมตร เนื่องจาก ยิ่งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกมีขนาดใหญ่มากขึ้นเท่าใดก็จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นเท่านั้น

### 3.4 การออกแบบในการทำชุดทดลองจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

การสร้างชุดทดลองในการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากแผ่นไม้ MDF โดยใช้วิธีการทางเพียโซอิเล็กทริกมีขั้นตอนการทำงานและการออกแบบ (ดังแสดงในรูปที่ 3.9)



**รูปที่ 3.9** แผนผังการทำงานของชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยวิธีการทางเพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

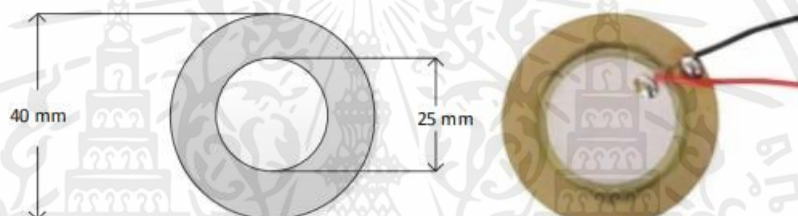
### 3.4.1 การออกแบบ

ออกแบบและสร้างชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าโดยใช้วิธีการทางเพียโซอิเล็กทริก ประกอบด้วยกัน 3 ส่วน คือ

- 3.5.1.1 ชุดโครงแผ่นไม้ MDF ที่เป็นส่วนรับแรงกดหรือแรงที่จะกระแทก
- 3.5.1.2 วงจรแปลงไฟฟ้าและรักษาระดับแรงดัน
- 3.5.1.3 อุปกรณ์เก็บกระแสไฟฟ้า

## 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำชุดทดลอง

3.5.1 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร (ดังแสดงในรูปที่ 3.10) จำนวน 50 แผ่น



รูปที่ 3.10 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาใช้ในงานวิจัย

3.5.2 แผ่นไม้ MDF (เคลือบเมลามีน) ขนาด 100 x 100 เซนติเมตร (Medium Density Fiberboard) หรือ เรียกว่าแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ประเภท Composite Panel ชนิดหนึ่งที่ได้จากการนำเส้นใยของไม้หรือพืชที่มีเส้นใย หรือเส้นใยของวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Lignocelluloses Material) วัตถุดิบที่ใช้ ยูคาลิปตัส ยางพารา ฯลฯ นำมาผสมกับกาวสังเคราะห์ แล้วจึงอัดเป็นแผ่นโดยกรรมวิธีแห้ง คืออัดด้วยความร้อน (Dry Process) เพื่อให้เกิดความยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยจนเป็นเนื้อเดียวกันโดยมีกาวเป็น ตัวช่วยประสาน โดยมีความหนาแน่นสูง มีผิวเนื้อในละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั่วทั้งแผ่น มีความหนา ความแน่น และความเรียบสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น (ดังแสดงในรูปที่ 3.11) [20]



**รูปที่ 3.11** แผ่นไม้ MDF [20]

3.5.3 สายไฟอ่อน รุ่น 22 AWG (UL 1007 TR-64) เหมาะสำหรับใช้เชื่อมต่อภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไป แรงดัน 300 โวลต์ ทนต่ออุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส วัสดุของฉนวนเป็น PVC วัสดุของตัวนำเป็น ทองแดงชุบดีบุก (Tinned copper) ชนิดของสายไฟฟ้า Stranded wire [21] (ดังแสดงในรูปที่ 3.12)



**รูปที่ 3.12** สายไฟอ่อน รุ่น 22 AWG (UL 1007 TR-64) [21]

3.5.4 หัวแร้งปืน SUMO รุ่น 981 แรงความร้อน (Soldering Iron Gun Mod. 981 SUMO) มีคุณสมบัติ คือ ลวดฮีทเตอร์เซรามิกเกรดพิเศษ ให้ความร้อนเร็ว, ปุ่มแรงความร้อนสามารถปรับอุณหภูมิได้ 350 – 450 องศาเซลเซียส, ด้วยกรรมวิธีการผลิตที่มีประสิทธิภาพปลายหัวแร้งจึงมีอายุการใช้งานที่นาน ทนต่อการกัดกร่อนได้สูง (ทนกว่าปลายหัวแร้งแบบทองแดงถึง 10 เท่า), ผลิตจากสแตนเลส 304 ที่มีความทนต่อการเกิดสนิมสูงมาก และ หน้าแปลนไม่สัมผัสกับด้ามจับ ช่วยป้องกันไม่ให้ความร้อนถ่ายเทไปถึงด้ามจับ [22] (ดังแสดงในรูปที่ 3.13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 หัวแร้งปืน SUMO รุ่น 981 [22]

3.5.5 ตะกั่วบัดกรี ตราหั่วนก (SolderWire) คือ วัสดุที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานรอยต่อของสายไฟ หรือขาของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้าด้วยกันหรือต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับลายวงจรพิมพ์ (ดังแสดงในรูปที่ 3.14) ซึ่งส่วนประกอบของตะกั่วบัดกรีประกอบด้วยดีบุก (Tin) และตะกั่ว (Lead) จุดหลอมละลายของตะกั่วบัดกรีต่ำสุดจะมีค่าประมาณ 177 องศาเซลเซียส ที่ส่วนประกอบประมาณ 60/40 คือดีบุกประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และตะกั่วประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ถือว่าเป็นตะกั่วบัดกรีชนิดคุณภาพดี ซึ่งตะกั่วบัดกรีที่ผลิตมาใช้ในการงานด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์นั้นจะมีลักษณะเป็นเส้นลวดเล็กๆ กลมยาวขดไว้เป็นม้วนมีหลายขนาด ทั้งขนาดของเส้นตะกั่วและขนาดของความยาว ตะกั่วบัดกรีชนิดนี้ตอนกลางของเส้นตะกั่วจะมีน้ำยาประสานหรือที่เรียกว่าฟลักซ์ (Flux) (ดังแสดงในรูปที่ 3.15) บรรจุอยู่ด้วยเพื่อช่วยในการทำความสะอาดผิวหน้าของจุดบัดกรีทำให้เกาะติดชิ้นงานได้ดี และช่วยเคลือบผิวตะกั่วบัดกรีและชิ้นงานไม่ให้เกิดสนิมอีก [23]



รูปที่ 3.14 ตะกั่วบัดกรี [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 น้ายาสานหรือที่เรียกว่าฟลักซ์ [23]

3.5.6 มัลติมิเตอร์ดิจิตอล รุ่น UNI-T UT33A+ (Digital Multimeters) คือ เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าได้หลายปริมาณ แต่วัดได้ทีละปริมาณ โดยสามารถตั้งเป็นโวลต์มิเตอร์ แอมป์มิเตอร์ หรือ โอห์มมิเตอร์ และเลือกไฟฟ้ากระแสตรง (DC) หรือไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ได้ (ดังแสดงในรูปที่ 3.16)



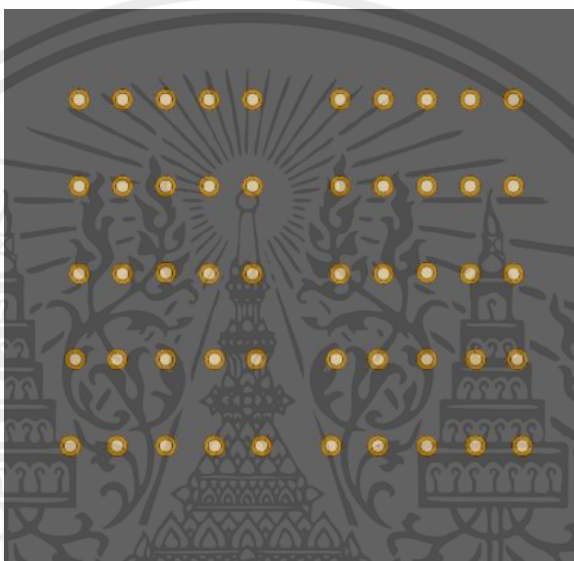
รูปที่ 3.16 มัลติมิเตอร์ดิจิตอล รุ่น UNI-T UT33A+

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 วิธีการทำชุดทดลองผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก

3.6.1 ใช้แผ่นไม้ MBF ที่มีความหนา 1.5 เซนติเมตร ความกว้าง 50 เซนติเมตร และความยาว 50 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น

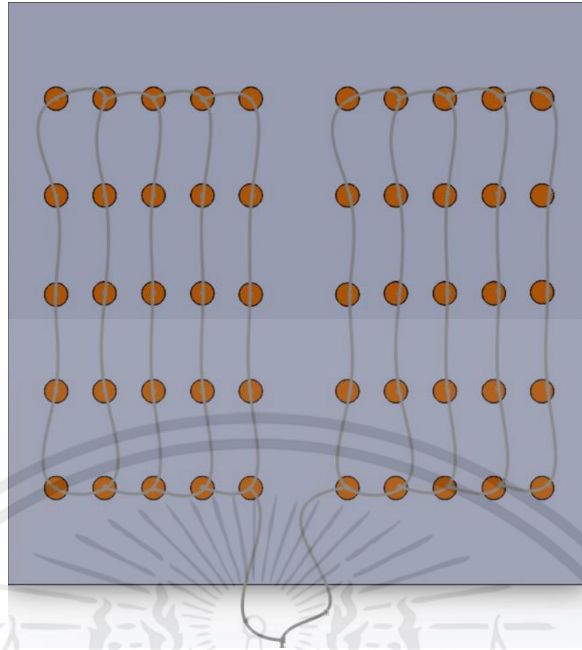
3.6.2 สำหรับแผ่นไม้ MBF ทั้ง 2 แผ่น นำแผ่นเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร วางบนแผ่นกาวยาง (กาวสองหน้า) จำนวน 25 แผ่น วางเรียงกันแถวละ 5 ชั้น 5 แถว (ดังแสดงในรูปที่ 3.17)



รูปที่ 3.17 ชุดวงจรอเล็กทริกที่ติดบนแผ่นไม้

3.6.3 ทำการเชื่อมแผ่นเพียโซอิเล็กทริกต่อกับสายไฟโดยบัดกรีเชื่อมด้วยตะกั่ว

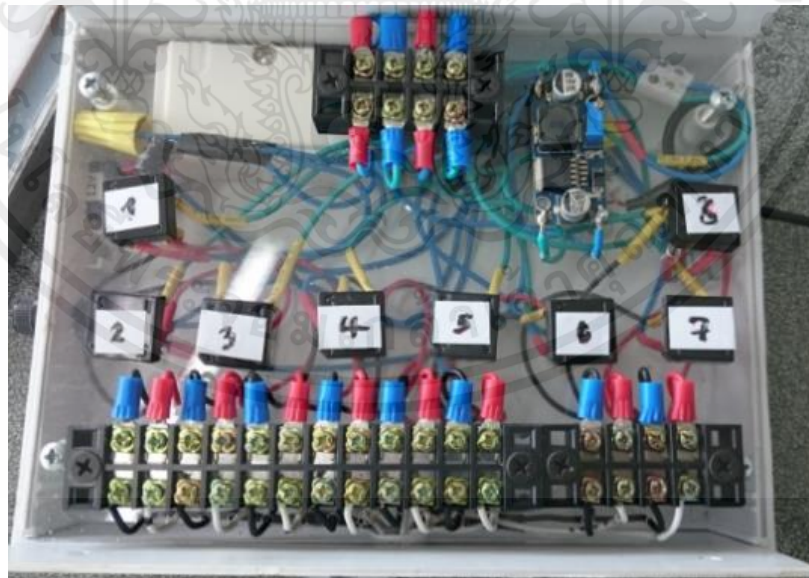
3.6.4 จากนั้นทำการเชื่อมต่อสายไฟด้านหน้าแผ่นเพียโซอิเล็กทริกด้วยการต่อวงจรแบบผสม (ดังแสดงในรูป 3.18)



รูปที่ 3.18 ชุดวงจรของเพียโซอิเล็กทริก

3.6.5 ใช้จุกยางรูปร่างวงกลมที่มีความสูง 1 เซนติเมตร ติดไว้บนแผ่นเพียโซอิเล็กทริก

3.6.6 จากนั้นทำวงจรแปลงกระแสไฟฟ้าและวงจรรักษาระดับแรงดันใช้การออกแบบวงจรอย่างง่ายโดยใช้วงจรเรียงกระแสทั่วไปและวงจรรักษาแรงดันที่ใช้ IC สำเร็จรูป (ดังแสดงในรูปที่ 3.19)

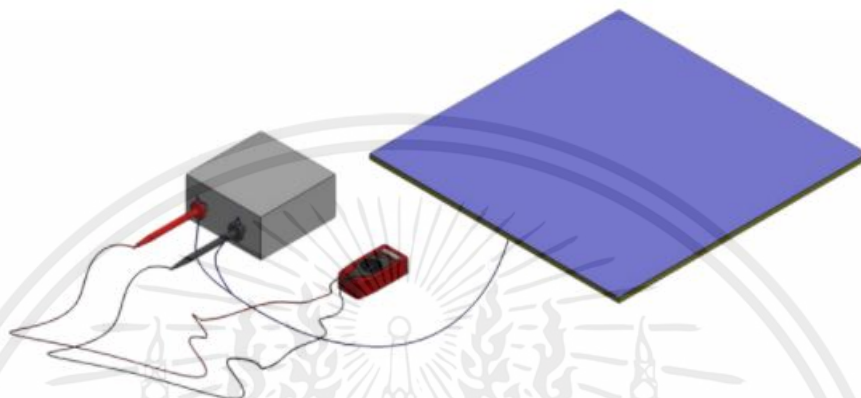


รูปที่ 3.19 ชุดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 การทดสอบประสิทธิภาพจากชุดวงจรผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก

3.7.1 นำชุดวงจรผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก ทดสอบโดยการใช้ขนาดแรงกระตุ้น 490 588 และ 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 60 และ 70 กิโลกรัม) ตามลำดับ และใช้ความถี่ 0.4 0.7 1 และ 1.3 เฮิรตซ์ เพื่อวัดหาค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า (ดังแสดงในรูป 3.20)



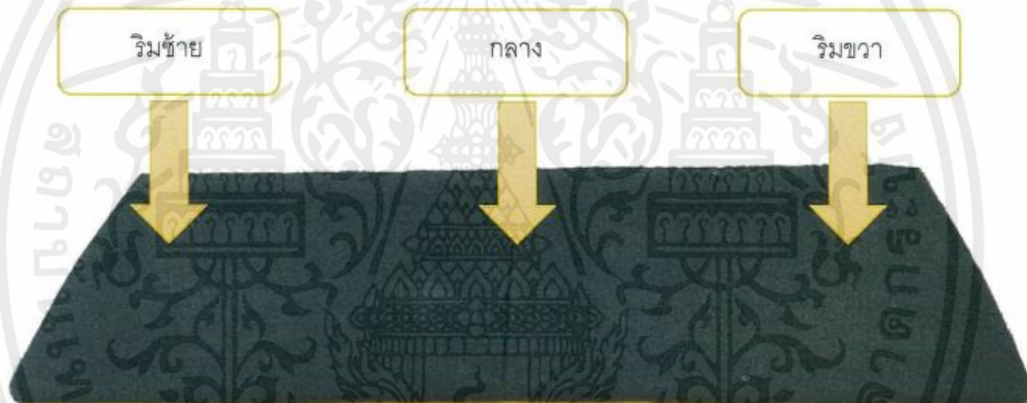
รูปที่ 3.20 ชุดทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าโดยชุดวงจรผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผล

ในการทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีทางเพียโซอิเล็กทริก จะวัดค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด โดยให้แรงกระตุ้นแต่ละขนาดแตกต่างกันคือ 490 588 และ 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 60 และ 70 กิโลกรัม) ตามลำดับ และใช้ความถี่ 0.4 0.7 1 และ 1.3 เฮิรตซ์ โดยการเหยียบบนชุดทดลองที่มีขนาด 100 x 100 เซนติเมตร ประกอบด้วยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกขนาด 40 มิลลิเมตร จำนวน 50 แผ่น โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง เมื่อทราบค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดและแรงดันไฟฟ้าสูงสุด จะนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า ตามตำแหน่งการเหยียบที่แตกต่างกัน (ดังแสดงในรูปที่ 4.1) เพื่อเปรียบเทียบแรงกระตุ้นและความถี่ของชุดทดลอง



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งการเหยียบบนชุดทดลอง

#### 4.1 กำลังไฟฟ้าที่ได้จากแรงกระตุ้นแต่ละขนาด

4.1.1 ความถี่ 0.4 เฮิรตซ์ โดยการเหยียบบนพื้นชุดทดลอง ประมาณ 20 ครั้งต่อนาที โดยคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า จากสมการที่ 4.1

$$P = VI \quad (4.1)$$

เมื่อ  $P$  คือ กำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวัตต์ (W)

$V$  คือ แรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

$I$  คือ กระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองให้ผู้เข้าร่วมทดลองกระตุ้นแผ่นเพียโซอิเล็กทริกความถี่ 0.4 เฮิร์ตซ์ โดยการเหยียบพื้นชุดทดลอง ประมาณ 20 ครั้งต่อนาที ที่ขนาด 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.80 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 62.28 มิลลิแอมป์ ที่ตำแหน่งกลาง สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.83 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 71.57 มิลลิแอมป์ และที่ตำแหน่งริมขวา สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.80 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 61.89 มิลลิแอมป์ ที่ขนาด 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.04 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 81.42 มิลลิแอมป์ ที่ตำแหน่งกลาง สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.08 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 87.51 มิลลิแอมป์ และที่ตำแหน่งริมขวา สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.03 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 81.79 มิลลิแอมป์ และที่ขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.95 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 90.51 มิลลิแอมป์ ที่ตำแหน่งกลาง สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.02 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 97.10 มิลลิแอมป์ และที่ตำแหน่งริมขวา สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.97 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 90.14 มิลลิแอมป์ (ดังแสดงในตารางที่ 4.1)

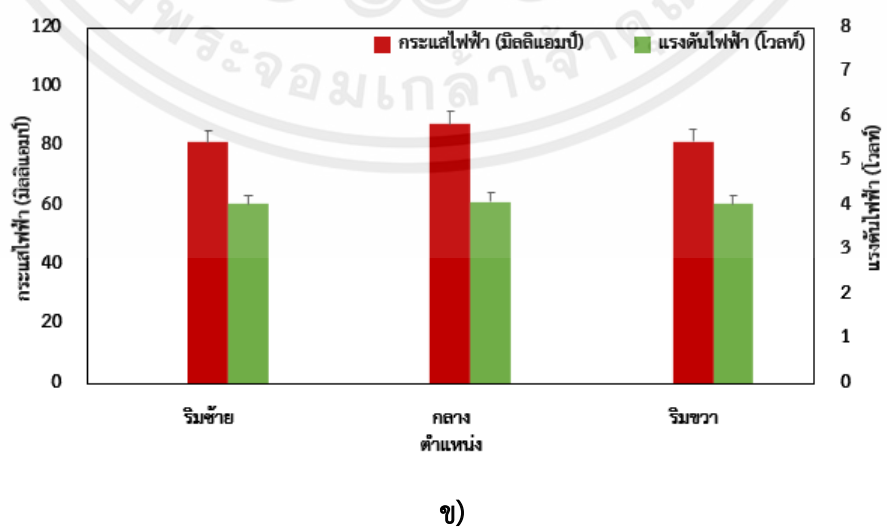
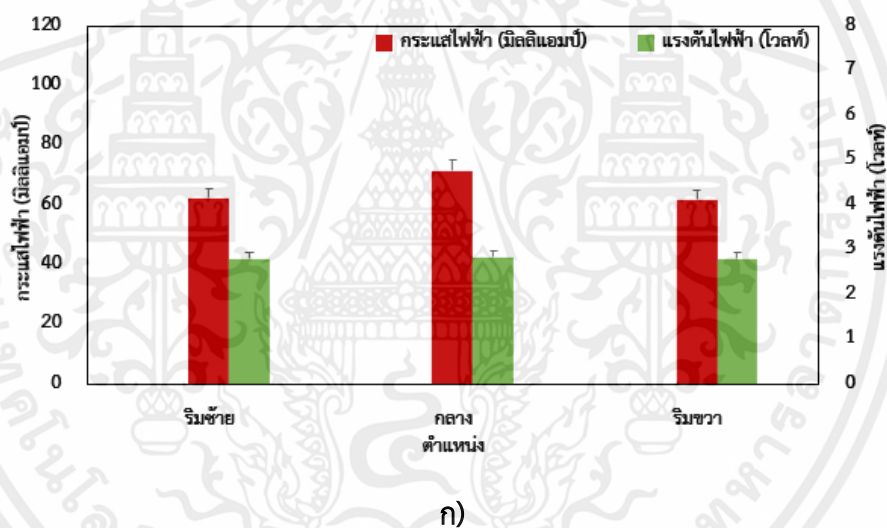
**ตารางที่ 4.1** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่ากำลังไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองแต่ละขนาดที่ความถี่ 0.4 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ขนาดแรงกระตุ้น	ตำแหน่ง	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมป์)	กำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์)
490 นิวตัน (น้ำหนัก 50 กิโลกรัม )	ริมซ้าย	2.80	62.28	174.2
	กลาง	2.83	71.57	203.5
	ริมขวา	2.80	61.89	173.3
	เฉลี่ย	2.81	65.24	183.6
588 นิวตัน (น้ำหนัก 60 กิโลกรัม )	ริมซ้าย	4.04	81.42	328.9
	กลาง	4.08	87.51	357.0
	ริมขวา	4.03	81.79	329.6
	เฉลี่ย	4.05	83.57	338.5

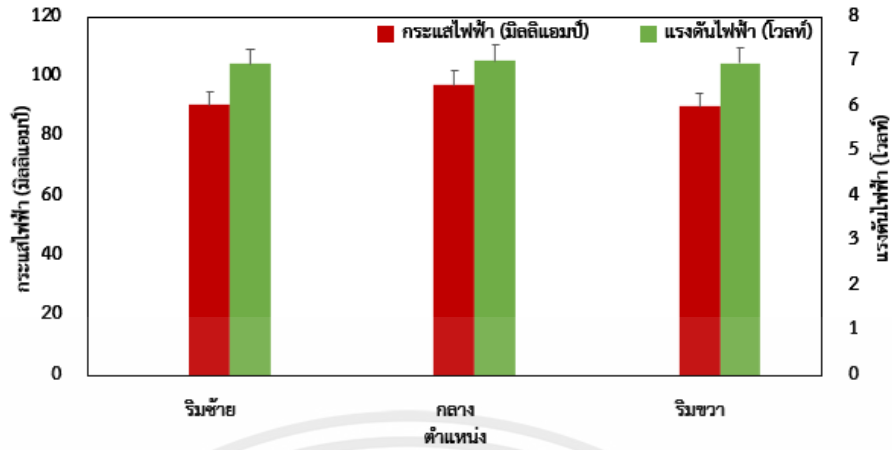
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.1** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่ากำลังไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองแต่ละขนาดที่ความถี่ 0.4 เฮิรตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน (ต่อ)

ขนาดแรงกระตุ้น	ตำแหน่ง	แรงดันไฟฟ้า (โวลท์)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมป์)	กำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์)
686 นิวตัน (น้ำหนัก 70 กิโลกรัม )	ริมซ้าย	6.95	90.51	629.0
	กลาง	7.02	97.10	681.6
	ริมขวา	6.97	90.14	628.3
	เฉลี่ย	6.98	92.60	646.3

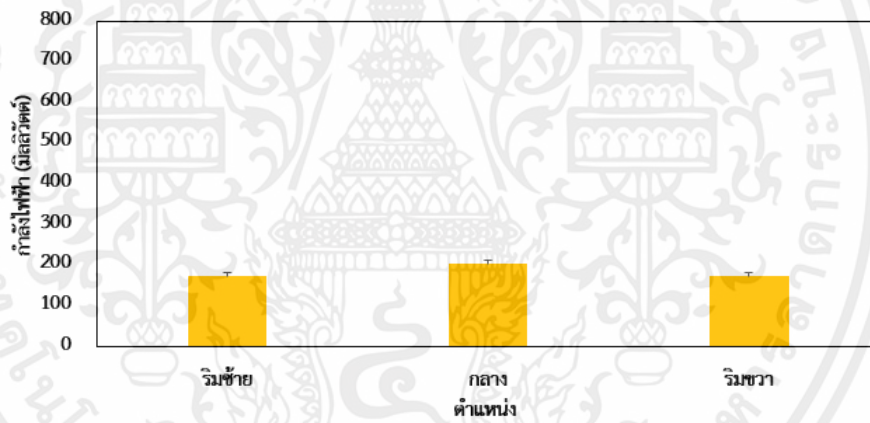


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

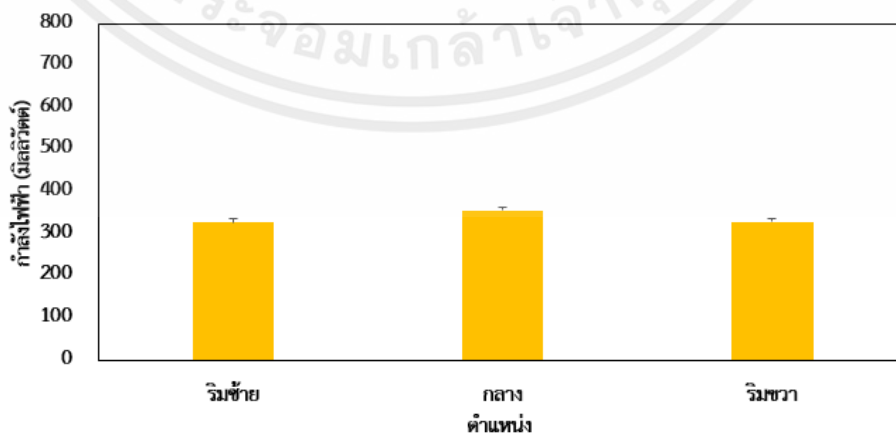


ค)

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 0.4 เฮิร์ตซ์ เมื่อขนาดแรงกระตุ้น ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)

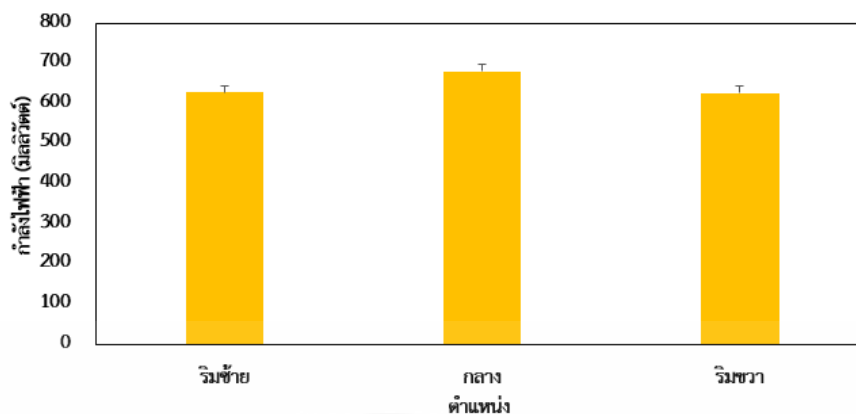


ก)



ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค)

**รูปที่ 4.3** ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ 0.4 เฮิรตซ์ เมื่อขนาดแรงกระตุ้น ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)

จากรูปที่ 4.3 เมื่อให้ผู้เข้าร่วมทดลองกระตุ้นแผ่นเพียโซอิเล็กทริกความถี่ 0.4 เฮิรตซ์ โดยการเหยียบพื้นชุดทดลอง ประมาณ 20 ครั้งต่อนาที ที่ ก) ขนาด 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 174.2 มิลลิวัตต์ ตำแหน่งกลาง มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 203.5 มิลลิวัตต์ และที่ตำแหน่งริมขวา มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 173.3 มิลลิวัตต์ ข) ขนาด 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 328.9 มิลลิวัตต์ ตำแหน่งกลาง มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 357.0 มิลลิวัตต์ และที่ตำแหน่งริมขวา มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 329.6 มิลลิวัตต์ และ ค) ขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 629.0 มิลลิวัตต์ ตำแหน่งกลาง มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 681.6 มิลลิวัตต์ และที่ตำแหน่งริมขวา มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 628.3 มิลลิวัตต์

จะเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อแรงกระตุ้นแต่ละขนาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าของชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีทางเพียโซอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น และตำแหน่งที่ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด คือ ตำแหน่งกลาง เนื่องจาก เมื่อให้แรงกระตุ้นบนชุดทดลองทำให้เกิดแรงกระจายตัวได้ดีกว่าริมขวาและริมซ้าย

4.1.2 ความถี่ 0.7 เฮิรตซ์ โดยการเหยียบบนพื้นชุดทดลอง ประมาณ 40 ครั้งต่อนาที โดยคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า

จากการทดลองให้ผู้เข้าร่วมทดลองกระตุ้นแผ่นเพียโซอิเล็กทริกความถี่ 0.7 เฮิรตซ์ โดยการเหยียบพื้นชุดทดลอง ประมาณ 40 ครั้งต่อนาที ที่ขนาด 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม)

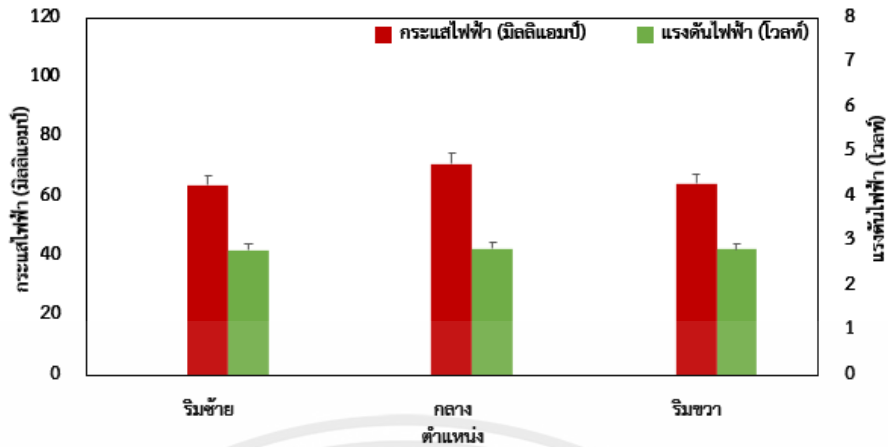
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.80 โวลท์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 63.95 มิลลิแอมป์ ที่ตำแหน่งกลาง สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.83 โวลท์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 70.88 มิลลิแอมป์ และที่ตำแหน่งริมขวา สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.81 โวลท์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 64.22 มิลลิแอมป์ ที่ขนาด 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.05 โวลท์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 80.55 มิลลิแอมป์ ที่ตำแหน่งกลาง สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.10 โวลท์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 88.64 มิลลิแอมป์ และที่ตำแหน่งริมขวา สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.04 โวลท์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 81.12 มิลลิแอมป์ และที่ขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.98 โวลท์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 90.65 มิลลิแอมป์ ที่ตำแหน่งกลาง สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.00 โวลท์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 98.76 มิลลิแอมป์ และที่ตำแหน่งริมขวา สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.97 โวลท์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 90.61 มิลลิแอมป์ (ดังแสดงในตารางที่ 4.2)

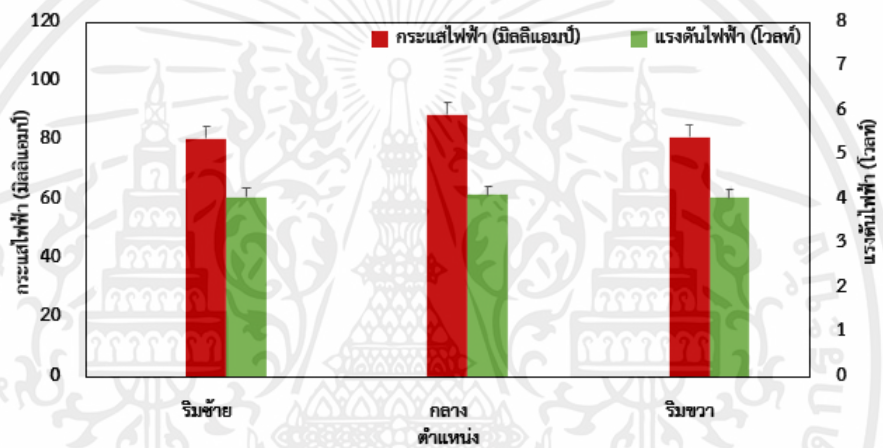
**ตารางที่ 4.2** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่ากำลังไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองแต่ละขนาดที่ความถี่ 0.7 เฮิรตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ขนาดแรงกระตุ้น	ตำแหน่ง	แรงดันไฟฟ้า (โวลท์)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมป์)	กำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์)
490 นิวตัน (น้ำหนัก 50 กิโลกรัม )	ริมซ้าย	2.80	63.95	179.1
	กลาง	2.83	70.88	200.6
	ริมขวา	2.81	64.22	180.5
	เฉลี่ย	2.81	66.35	186.7
588 นิวตัน (น้ำหนัก 60 กิโลกรัม )	ริมซ้าย	4.05	80.55	326.2
	กลาง	4.10	88.64	363.4
	ริมขวา	4.04	81.12	327.7
	เฉลี่ย	4.06	83.44	339.1
686 นิวตัน (น้ำหนัก 70 กิโลกรัม )	ริมซ้าย	6.98	90.65	632.7
	กลาง	7.00	98.76	691.3
	ริมขวา	6.97	90.61	631.6
	เฉลี่ย	6.98	93.34	651.9

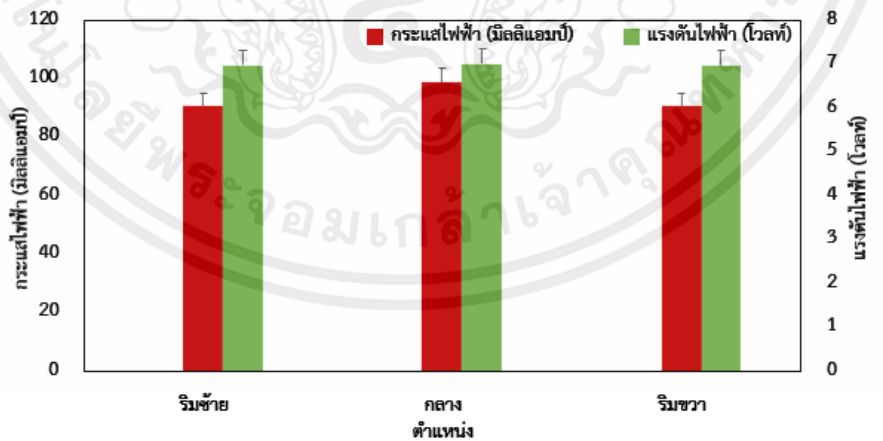
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)

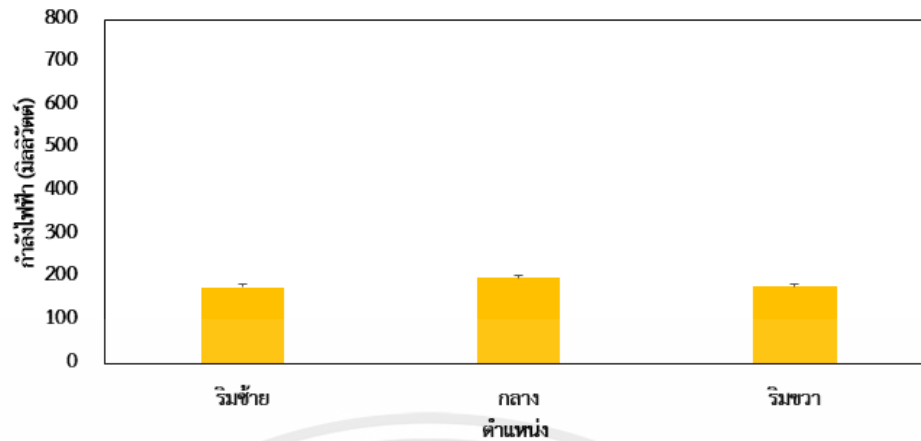


ค)

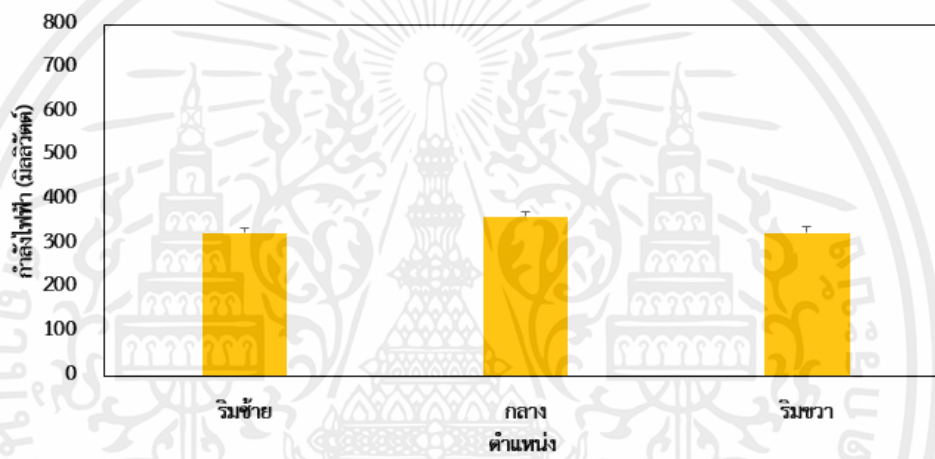
**รูปที่ 4.4** ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 0.7 เฮิรตซ์ เมื่อขนาดแรงกระตุ้น ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม)

ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)

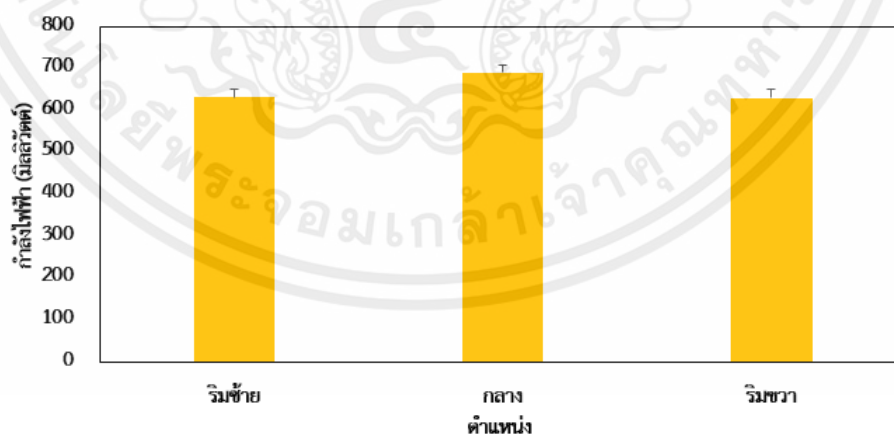
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)



ค)

**รูปที่ 4.5** ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ 0.7 เฮิรตซ์ เมื่อขนาดแรงกระตุ้น

ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60

กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 เมื่อให้ผู้เข้าร่วมทดลองกระตุ้นแผ่นเพียโซอิเล็กทริกความถี่ 0.7 เฮิร์ตซ์ โดยการเหยียบพื้นชุดทดลอง ประมาณ 40 ครั้งต่อนาที ที่ ก) ขนาด 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 179.1 มิลลิวัตต์ ตำแหน่งกลาง มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 200.6 มิลลิวัตต์ และที่ตำแหน่งริมขวา มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 180.5 มิลลิวัตต์ ข) ขนาด 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 326.2 มิลลิวัตต์ ตำแหน่งกลาง มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 363.4 มิลลิวัตต์ และที่ตำแหน่งริมขวา มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 327.7 มิลลิวัตต์ และ ค) ขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 632.7 มิลลิวัตต์ ตำแหน่งกลาง มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 691.3 มิลลิวัตต์ และที่ตำแหน่งริมขวา มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 631.6 มิลลิวัตต์

จะเห็นได้ชัดเลยว่า เมื่อแรงกระตุ้นแต่ละขนาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าของชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีทางเพียโซอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น และตำแหน่งที่ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด คือ ตำแหน่งกลาง เนื่องจาก เมื่อให้แรงกระตุ้นบนชุดทดลองทำให้เกิดแรงกระจายตัวได้ดีกว่าริมขวาและริมซ้าย

4.1.3 ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ โดยการเหยียบบนพื้นชุดทดลอง ประมาณ 60 ครั้งต่อนาที โดยคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า

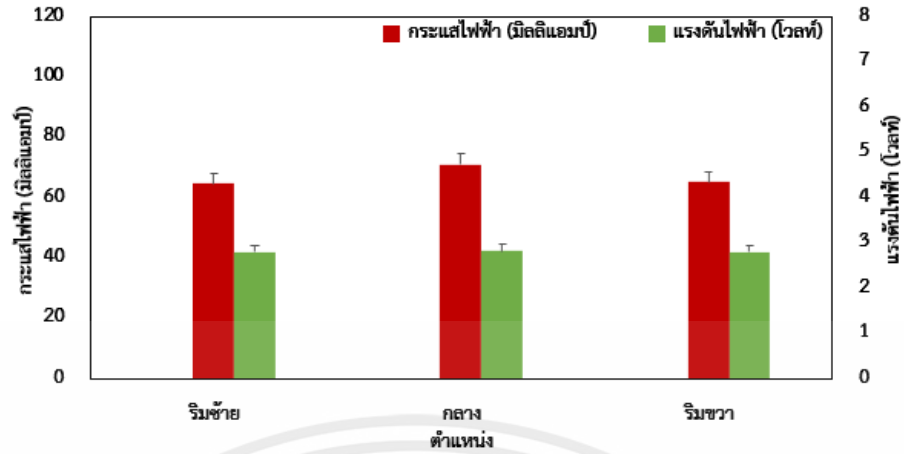
จากการทดลองให้ผู้เข้าร่วมทดลองกระตุ้นแผ่นเพียโซอิเล็กทริกความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ โดยการเหยียบพื้นชุดทดลอง ประมาณ 60 ครั้งต่อนาที ที่ขนาด 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.80 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 64.64 มิลลิแอมป์ ที่ตำแหน่งกลาง สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.82 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 70.92 มิลลิแอมป์ และที่ตำแหน่งริมขวา สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.79 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 65.09 มิลลิแอมป์ ที่ขนาด 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.03 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 81.11 มิลลิแอมป์ ที่ตำแหน่งกลาง สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.09 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 89.02 มิลลิแอมป์ และที่ตำแหน่งริมขวา สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.05 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 80.67 มิลลิแอมป์ และที่ขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.95 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 91.45 มิลลิแอมป์ ที่ตำแหน่งกลาง สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.01 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 98.24 มิลลิแอมป์ และที่ตำแหน่งริมขวา สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.96 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 93.63 มิลลิแอมป์ (ดังแสดงในตารางที่ 4.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

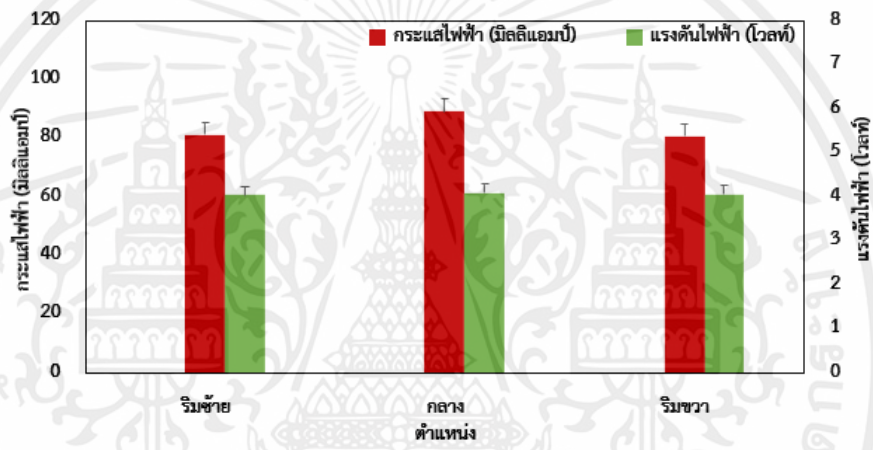
**ตารางที่ 4.3** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่ากำลังไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองแต่ละขนาดที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ขนาดแรงกระตุ้น	ตำแหน่ง	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมป์)	กำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์)
490 นิวตัน (น้ำหนัก 50 กิโลกรัม )	ริมซ้าย	2.80	64.64	180.9
	กลาง	2.82	70.92	199.9
	ริมขวา	2.79	65.09	181.6
	เฉลี่ย	2.80	66.88	187.5
588 นิวตัน (น้ำหนัก 60 กิโลกรัม )	ริมซ้าย	4.03	81.11	326.9
	กลาง	4.09	89.02	364.1
	ริมขวา	4.05	80.67	326.7
	เฉลี่ย	4.06	83.60	339.2
686 นิวตัน (น้ำหนัก 70 กิโลกรัม )	ริมซ้าย	6.95	91.45	635.6
	กลาง	7.01	98.24	688.7
	ริมขวา	6.96	91.21	634.8
	เฉลี่ย	6.97	93.63	653.0

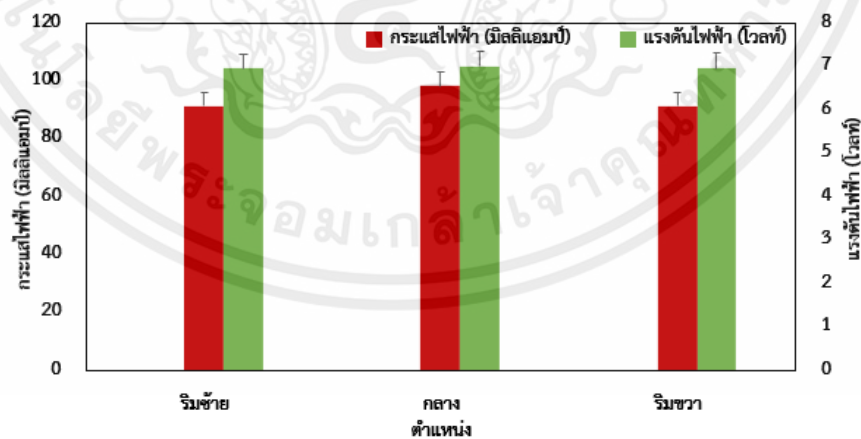
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)



ค)

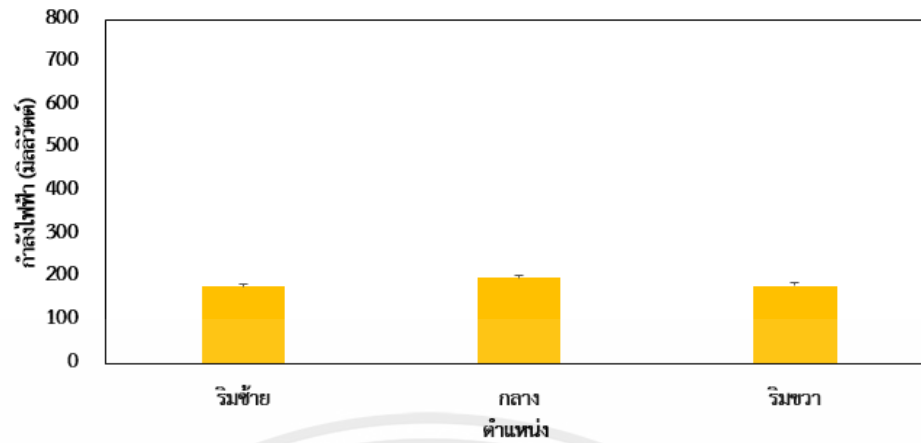
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ เมื่อ

ขนาดแรงกระตุ้น ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม)

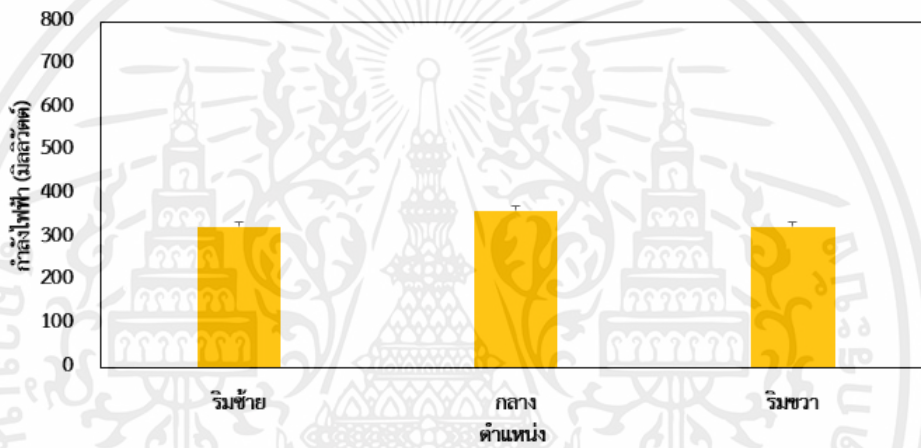
ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

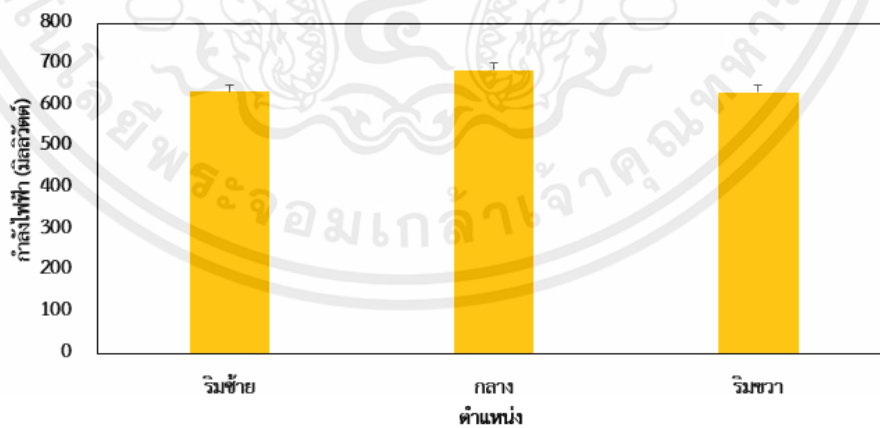
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ เมื่อขนาดแรงกระตุ้น

ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60

กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 เมื่อให้ผู้เข้าร่วมทดลองกระตุ้นแผ่นเพียโซอิเล็กทริกความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ โดยการเหยียบพื้นชุดทดลอง ประมาณ 60 ครั้งต่อนาที ก) ขนาด 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 180.9 มิลลิวัตต์ ตำแหน่งกลาง มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 199.9 มิลลิวัตต์ และที่ตำแหน่งริมขวา มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 181.6 มิลลิวัตต์ ข) ขนาด 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 326.9 มิลลิวัตต์ ตำแหน่งกลาง มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 364.1 มิลลิวัตต์ และที่ตำแหน่งริมขวา มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 326.7 มิลลิวัตต์ และ ค) ขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 635.6 มิลลิวัตต์ ตำแหน่งกลาง มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 688.7 มิลลิวัตต์ และที่ตำแหน่งริมขวา มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 634.8 มิลลิวัตต์

จะเห็นได้ชัดชัดเจนว่า เมื่อแรงกระตุ้นแต่ละขนาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าของชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีทางเพียโซอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น และตำแหน่งที่ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด คือ ตำแหน่งกลาง เนื่องจาก เมื่อให้แรงกระตุ้นบนชุดทดลองทำให้เกิดแรงกระจายตัวได้ดีกว่าริมขวาและริมซ้าย

4.1.4 ความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ โดยการเหยียบบนพื้นชุดทดลอง ประมาณ 80 ครั้งต่อนาที โดยคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า

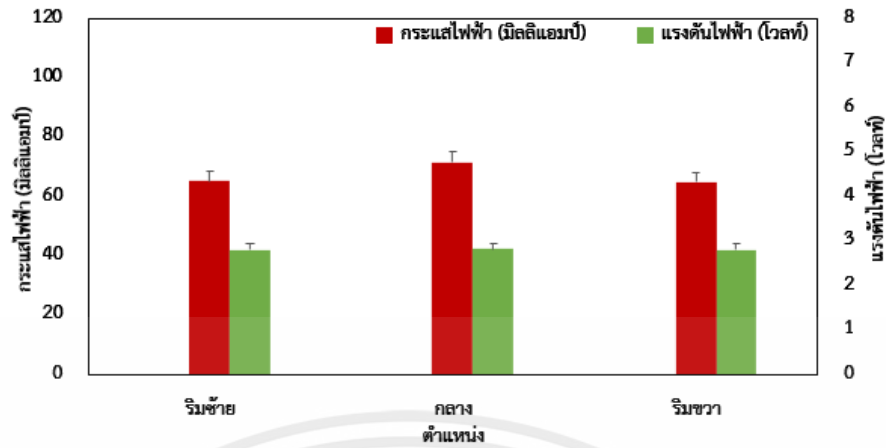
จากการทดลองให้ผู้เข้าร่วมทดลองกระตุ้นแผ่นเพียโซอิเล็กทริกความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ โดยการเหยียบพื้นชุดทดลอง ประมาณ 80 ครั้งต่อนาที ที่ขนาด 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.80 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 65.04 มิลลิวัตต์ ที่ตำแหน่งกลาง สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.81 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 71.52 มิลลิวัตต์ และที่ตำแหน่งริมขวา สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.80 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 64.89 มิลลิวัตต์ ที่ขนาด 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.03 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 81.22 มิลลิวัตต์ ที่ตำแหน่งกลาง สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.11 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 88.59 มิลลิวัตต์ และที่ตำแหน่งริมขวา สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.04 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 80.79 มิลลิวัตต์ และที่ขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.97 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 91.81 มิลลิวัตต์ ที่ตำแหน่งกลาง สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.00 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 98.33 มิลลิวัตต์ และที่ตำแหน่งริมขวา สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.96 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 91.69 มิลลิวัตต์ (ดังแสดงในตารางที่ 4.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

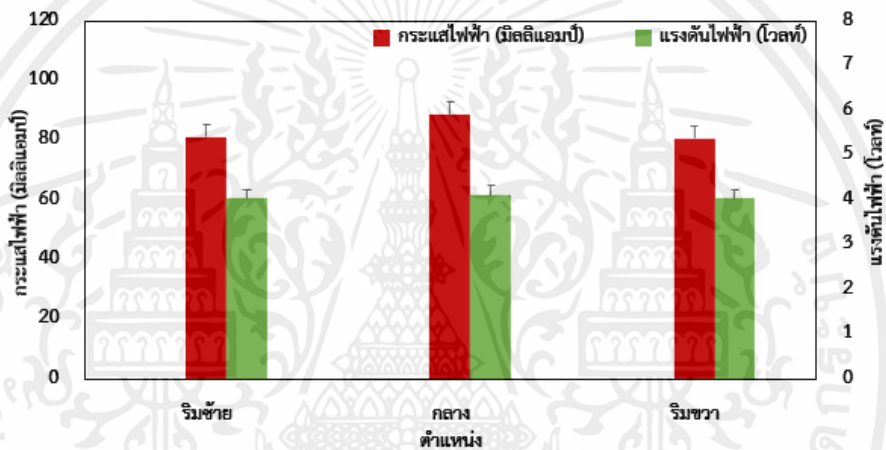
**ตารางที่ 4.4** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่ากำลังไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองแต่ละขนาดที่ความถี่ 1.3 เฮิรตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ขนาดแรงกระตุ้น	ตำแหน่ง	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมป์)	กำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์)
490 นิวตัน (น้ำหนัก 50 กิโลกรัม )	ริมซ้าย	2.80	65.04	182.1
	กลาง	2.81	71.52	201.0
	ริมขวา	2.80	64.89	181.7
	เฉลี่ย	2.80	67.15	188.3
588 นิวตัน (น้ำหนัก 60 กิโลกรัม )	ริมซ้าย	4.03	81.22	327.3
	กลาง	4.11	88.59	364.1
	ริมขวา	4.04	80.79	326.4
	เฉลี่ย	4.06	83.53	339.3
686 นิวตัน (น้ำหนัก 70 กิโลกรัม )	ริมซ้าย	6.97	91.81	639.9
	กลาง	7.00	98.33	688.1
	ริมขวา	6.96	91.69	638.2
	เฉลี่ย	6.98	93.94	655.4

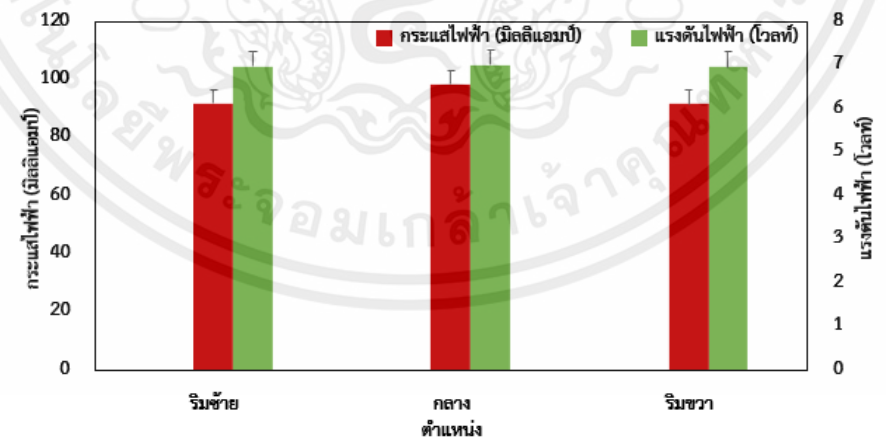
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)



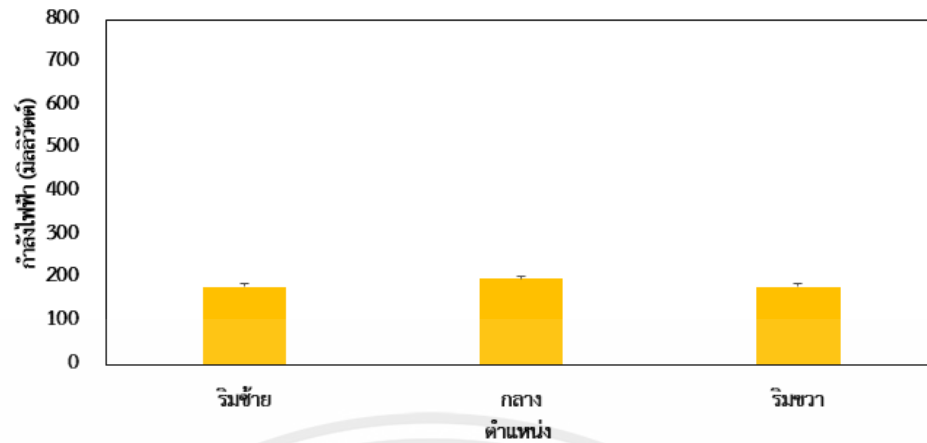
ค)

**รูปที่ 4.8** ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ เมื่อ

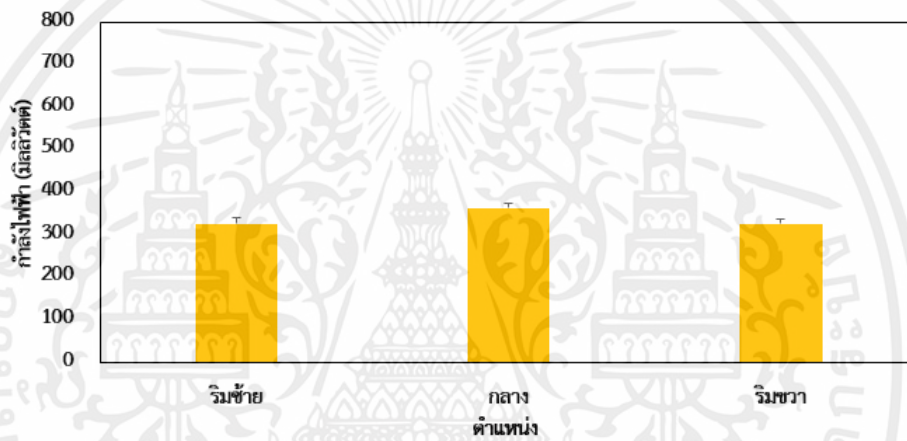
ขนาดแรงกระตุ้น ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม)

ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)

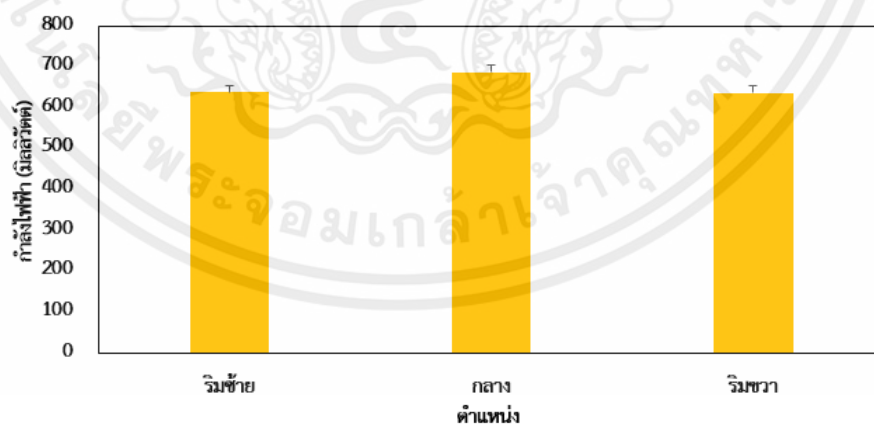
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)



ค)

**รูปที่ 4.9** ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ 1.3 เฮิรตซ์ เมื่อขนาดแรงกระตุ้น

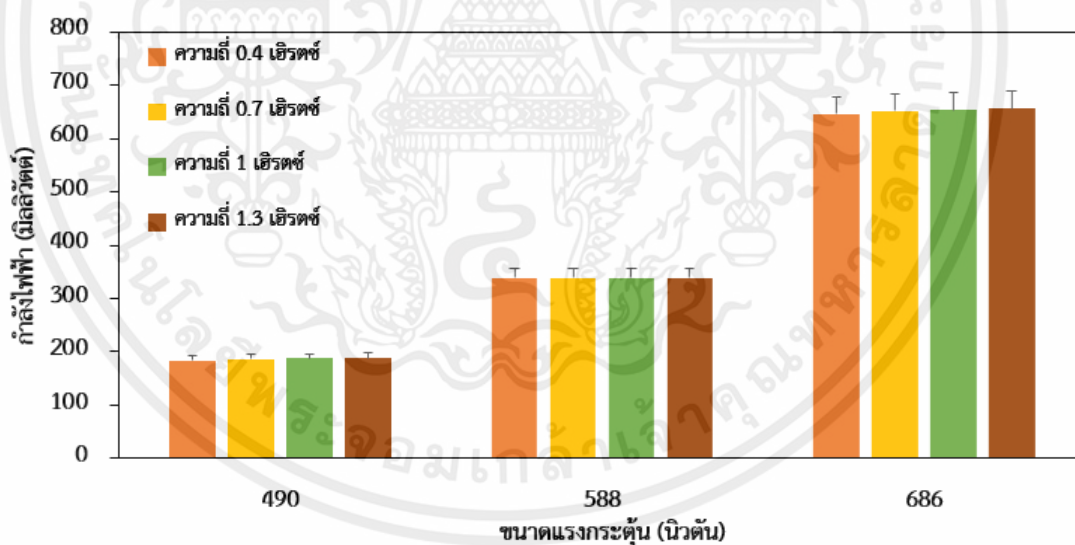
ก) 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ข) 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60

กิโลกรัม) และ ค) 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 เมื่อให้ผู้เข้าร่วมทดลองกระตุ้นแผ่นเพียโซอิเล็กทริกความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ โดยการเหยียบพื้นชุดทดลอง ประมาณ 80 ครั้งต่อนาที ที่ ก) ขนาด 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย ซ้าย มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 182.1 มิลลิวัตต์ ตำแหน่งกลาง มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 201.0 มิลลิวัตต์ และที่ตำแหน่งริมขวา มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 181.7 มิลลิวัตต์ ข) ขนาด 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 327.3 มิลลิวัตต์ ตำแหน่งกลาง มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 364.1 มิลลิวัตต์ และที่ตำแหน่งริมขวา มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 326.4 มิลลิวัตต์ และ ค) ขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) พบว่าที่ตำแหน่งริมซ้าย มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 639.9 มิลลิวัตต์ ตำแหน่งกลาง มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 688.1 มิลลิวัตต์ และที่ตำแหน่งริมขวา มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 638.2 มิลลิวัตต์

จะเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อแรงกระตุ้นแต่ละขนาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าของชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีทางเพียโซอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น และตำแหน่งที่ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด คือ ตำแหน่งกลาง เนื่องจาก เมื่อให้แรงกระตุ้นบนชุดทดลองทำให้เกิดแรงกระจายตัวได้ดีกว่าริมขวาและริมซ้าย



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงกระตุ้นของผู้ที่เข้าร่วมทดลองและกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระตุ้นของผู้ที่เข้าร่วมการทดลองและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ พบว่าที่แรงกระตุ้น ขนาด 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 183.6 – 188.3 มิลลิวัตต์ ขนาด 588 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) มีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 338.5 – 339.3 มิลลิวัตต์ และขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) มี

ค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 646.3 – 655.4 มิลลิวัตต์ ขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด และที่ขนาด 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) มีค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุด จะเห็นว่าที่ความถี่ 0.4 เฮิร์ตซ์ (การเหยียบพื้นชุดทดลองประมาณ 20 ครั้งต่อนาที) ความถี่ 0.7 เฮิร์ตซ์ (การเหยียบพื้นชุดทดลองประมาณ 40 ครั้งต่อนาที) ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ (การเหยียบพื้นชุดทดลองประมาณ 60 ครั้งต่อนาที) และความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ (การเหยียบพื้นชุดทดลองประมาณ 80 ครั้งต่อนาที) เมื่อมีการเพิ่มความถี่ขึ้นทำให้ส่งผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าน้อยมากเมื่อเทียบกับการเพิ่มขนาดแรงกระตุ้น

จากการวิเคราะห์เกี่ยวกับขนาดของแรงกระตุ้นของผู้ที่เข้าร่วมการทดลอง จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มขนาดของแรงกระตุ้นจะผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ เมื่อขนาดของแรงกระตุ้นเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของพื้นชุดทดลองโดยวิธีการทางเพียโซอิเล็กทริก

จากการวิเคราะห์เกี่ยวกับความถี่ที่ใช้ในการทดลอง จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความถี่จะผลิตกำลังไฟฟ้าได้ แต่จะผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยมากเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ การเพิ่มแรงกระตุ้นของผู้เข้าร่วมการทดลองในแต่ละรอบการทดลอง จึงสรุปได้ว่าความถี่มีนัยสำคัญ กล่าวคือ เมื่อ มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ให้มีความถี่สูงขึ้นก็จะส่งผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าพื้นชุดทดลองทางเพียโซอิเล็กทริก

#### 4.2 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของพื้นชุดทดลองการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยวิธีการทางเพียโซอิเล็กทริก

การคิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จะคิดคำนวณจากต้นทุนในการสร้างพื้นชุดทดลองโดยวิธีการทางเพียโซอิเล็กทริก โดยไม่คิดค่าแรงและค่าซ่อมบำรุงระหว่างการใช้งาน การคิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จะคิดในกรณีที่ทดลองให้ผู้เข้าร่วมทดลองกระตุ้นแผ่นเพียโซอิเล็กทริกความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ โดยการเหยียบพื้นชุดทดลอง ประมาณ 80 ครั้งต่อนาที ที่ขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)

ต้นทุนในการทดสอบ 6,300 บาท

ราคาไฟฟ้าหน่วยละ 4.06 บาท (โดยใช้คำนวณค่าไฟฟ้าของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร)

กรณีที่ทดลองให้ผู้เข้าร่วมทดลองกระตุ้นแผ่นเพียโซอิเล็กทริกความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ โดยการเหยียบพื้นชุดทดลอง ประมาณ 80 ครั้งต่อนาที ที่ขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม)

กำลังไฟฟ้าที่ได้คือ 655.4 มิลลิวัตต์ หรือ 0.6554 วัตต์ (ในเวลา 0.75 วินาที)

เมื่อคิดเป็นเวลา 1 นาที (60 วินาที) จะได้ 39.324 วัตต์

เมื่อคิดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (60 นาที) จะได้ 2,359.44 วัตต์/ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้มีการเหยียบพื้นชุดทดลองที่มีจำนวนนักศึกษาเข้า – ออก ห้องสมุดอาคารเรียนรวมประมาณ 4 ชั่วโมง/วัน จะได้

$$2,359.44 \times 4 = 9,437.76 \text{ วัตต์/วัน}$$

คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อเดือน จะได้

$$\frac{9,437.76 \times 1}{1,000} \times 30 = 283.13 \text{ หน่วย/เดือน}$$

คิดเป็นเงินจำนวนต่อปี จะได้

$$283.12 \times 12 \times 4.06 = 13,793.6 \text{ บาท/ปี}$$

ระยะคืนทุน

$$\frac{7,300}{13,793.6} = 0.53 \text{ ปี}$$

จากการคำนวณระยะเวลาคืนทุนในกรณีที่กระตุ้นแผ่นเพียโซอิเล็กทริกความถี่ 1.3 เฮิรตซ์ โดยการเหยียบพื้นชุดทดลอง ประมาณ 80 ครั้งต่อนาที ที่ขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) มีระยะเวลาคืนทุน 0.53 ปี เนื่องจากห้องสมุดไม่ได้มีจำนวนเข้า – ออกตลอดทั้งวัน และยังมีในการจำกัดของผู้เข้าร่วมทดลองรวมถึงขนาดของพื้นชุดทดลอง อาจยังประสิทธิภาพยังไม่ดีนัก ถ้าหากจะนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ควรเลือกใช้ในสถานที่ที่มีการเดินผ่านตลอดเวลา เช่น จำนวนผู้โดยสารที่ใช้บริการรถไฟฟ้าสถานีสยามมีจำนวนประมาณ 148,000 คนต่อวัน [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการวิเคราะห์ความแข็งแรง (Stress) ของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก โดยการ Simulation ด้วย โปรแกรม SolidWorks เมื่อโปรแกรมประมวลผลเรียบร้อยแล้วจะแสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นตามแถบชั้นสี (Fringe Point) เพื่อใช้อธิบายถึงตำแหน่งบนชิ้นงานที่ได้รับแรงกระทำมากที่สุดเท่าใด ทำให้ทราบถึงบริเวณความเสียหายของชิ้นงาน จะเกิดขึ้นบริเวณขอบด้านในของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากเป็นบริเวณที่กระจายแรงได้ดีที่สุด ที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 พบว่า ค่าความเค้นสูงสุด (Von Mises) ที่แรงกระตุ้น 490 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 160.365 เมกะปาสคาล จากการศึกษาเพื่อใช้ในการออกแบบ พบว่าการวิเคราะห์วัสดุให้ผลการจำลองมีประโยชน์ต่อการใช้งานจริง กล่าวคือสามารถให้ขนาดแรงกระตุ้นหรือน้ำหนักของผู้เข้าร่วมทดลองสูงสุดที่เทียบบับนพื้นวัสดุสามารถรับได้เพื่อแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยที่ไม่เกิดความเสียหายต่อวัสดุ

จากการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยวิธีการทางเพียโซอิเล็กทริก พบว่าเพียโซอิเล็กทริกสามารถแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก ซึ่งจากการทดลองสามารถอธิบายการเปรียบเทียบขนาดของแรงกระตุ้นและความถี่จากตำแหน่งการเหยียบบนพื้นชุดทดลองได้ว่า ขนาดของแรงกระตุ้นมีผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้า เมื่อเพิ่มขนาดของแรงกระตุ้นก็จะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้น และความถี่ที่ใช้ในการทดลองมีผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า เมื่อเพิ่มความถี่จะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มขนาดของแรงกระตุ้นในแต่ละรอบการทดลอง และตำแหน่งการเหยียบบนพื้นชุดทดลอง ตำแหน่งที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้ามากที่สุดคือ ตำแหน่งกลาง กล่าวคือ เมื่อให้แรงกระตุ้นจากผู้เข้าร่วมทดลองทำให้เกิดการกระจายตัวของแรงได้ดีกว่าริมขวาและริมซ้าย จากทฤษฎีจะอธิบายได้ว่าตำแหน่งตรงกลางจะได้ค่าการผลิตกำลังไฟฟ้ามากที่สุด ตำแหน่งริมซ้ายและริมขวาจะได้ค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าที่เท่ากัน จากการทดลองพบว่าขนาดของแรงกระตุ้นและความถี่ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ดีที่สุด คือ ที่แรงกระตุ้นขนาด 686 นิวตัน (กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) โดยให้ผู้เข้าร่วมทดลองกระตุ้นแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ความถี่ 1.3 เฮิรตซ์ โดยการเหยียบพื้นชุดทดลอง ประมาณ 80 ครั้งต่อนาที สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดถึง 655.4 มิลลิวัตต์ หรือ 2,359.44 วัตต์ต่อชั่วโมง

## 5.2 ปัญหาที่พบ

5.2.1 ในการทดลองเมื่อให้ผู้เข้าร่วมทดลองออกแรงเหยียบบนชุดพื้นชุดการทดลองแต่ละครั้ง ทำให้การวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอาจมีค่ามากหรือน้อยแตกต่างกัน เนื่องจากการออกแรงเหยียบมีความไม่สม่ำเสมอเท่ากันพอดีทุกครั้ง ซึ่งควบคุมได้ยาก ทำให้ผลเกิดการคลาดเคลื่อน

## 5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

5.3.1 ควรนำพื้นชุดทดลองไปทดลองในสถานที่จริงที่มีผู้คนเดินผ่านไปมาในปริมาณมากเพื่อเก็บข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ในแต่ละวัน และเพื่อทดสอบความคงทนของชิ้นงาน

5.3.2 สามารถออกแบบโครงสร้างของพื้นชุดทดลองให้มีขนาดใหญ่กว่านี้ได้ ซึ่งจะมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริงมากขึ้น

5.3.3 วัสดุโครงสร้างของพื้นชุดทดลองในปริณยานิพนธ์ได้ทำจากไม้ ดังนั้นอาจมีวัสดุที่ดีกว่า

5.3.4 พลังงานสูงสุดจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเกิดเมื่อมีการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก แต่ค่าความถี่ธรรมชาติของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกมีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นควรทดสอบด้วยเครื่องออสซิลโลสโคปเพื่อหาค่าที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2563). **ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงตั้งแต่เดือนมกราคม – ธันวาคม 2563**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง: <https://www.egat.co.th>
- [2] เกียรติชัย ศิลจิตสง. **ประสิทธิภาพพลังงาน**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง: <http://www.green.kmutt.ac.th/news/Question.asp?GID=29>
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. **ยุทธศาสตร์พลังงานทดแทน**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง: [https://www.dede.go.th/more\\_news.php?cid=34&filename=index](https://www.dede.go.th/more_news.php?cid=34&filename=index)
- [4] ptteapresSo. **รวมแหล่งพลังงานในประเทศไทยสามารถนำไปใช้ประโยชน์อะไรได้บ้าง**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง: <https://blog.pttexpresso.com/energy-sources-in-thailand/>
- [5] วิกีพีเดียสารานุกรมเสรี. **พลังงานทดแทน**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง: [https://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/kz80\\_p40-47.pdf](https://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/kz80_p40-47.pdf)
- [6] โคเฮย์ ฮายามิชิ. **ผลิตไฟฟ้าด้วยแรงสั่นจากการเดิน**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง: [https://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/kz80\\_p40-47.pdf](https://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/kz80_p40-47.pdf)
- [7] ชาญณรงค์ น้อยบางยาง และ ถาวร สุวรรณกิจ. **ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกและการประยุกต์ใช้งาน (Piezoelectric Effect and Application)**. วารสารวิทยาศาสตร์. ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 1-12, มิถุนายน 2552
- [8] Ahmad S (1994). **Development of Piezoelectric Composites for Transducers**. , J. Phys. III France, 4, 1129-1149.
- [9] Battery University. **Supercapacitor**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง: [http://www.batteryuniversity.com/learn/article/whats\\_the\\_role\\_of\\_the\\_supercapacitor](http://www.batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor)
- [10] Yang , Panga S, Fanb J, Shena X and Panb T: **Highly enhanced piezoelectric properties of PLZT/PVDF composite by tailoring the ceramic Curie temperature, particle size and volume fraction**, Sensor Actuator. 2013; 204: 74-78.
- [11] Haocheng X and Linbing W: **Piezoelectric energy harvester for public roadway: On site installation and evaluation**, Appl Energy. 2016; 174: 101-107.
- [12] Jasim A, Wang H, Yesner G, Safari A and Maher A: **Optimized design of layered bridge transducer for piezoelectric energy harvesting from roadway**, Energy. 2017; 141: 1133-1145.

- [13] Chen, H., Dong, X., Zeng, T., Zhou, Z. and Yang, H. (2007). **The Mechanical and Electric Properties of Infiltrated PZT/Polymer Composites**, *Ceramics International*, 33, 1369-1374.
- [14] Liu, X., Xiong, C., Sun, H., Dong, L., Li, R. and Liu, Y., (2006). **Piezoelectric and Dielectric Properties of PZT/PVC and Graphite Doped with PZT/PVC Composites**, *Materials Science and Engineering*, 127, 261-266.
- [15] Qian F, Xu TB and Zuo L: **Design, optimization, modeling and testing of a piezoelectric footwear energy harvester**, *Energy Convers Manage.* 171. 2018: 1352–1364.
- [16] Wang C, Wang S, Joshua Q, Wang X, Gao Z and Zhang L: **Fabrication and performance of a power generation device based on stacked piezoelectric energy-harvesting units for pavements**, *Energy Convers Manage.* 2018; 163: 196–207.
- [17] Ploss, B., Ng, W., Chan, H.L., Ploss, B. and Choy, C., (2001). **Poling study of PZT/P(VDF-TrFE) composites**, *Composites Science and Technology*, 61, 957-962.
- [18] Rujjanagul, G., Jompruan, S. and Chaipanich, A., (2008). **Influence of Graphite Particle Size on Electrical Properties of Modified PZT-Polymer Composites**, *Current Applied Physics*, 8, 359-362.
- [19] Thakrit Panklib. **Energy Harvesting Backpack for Applications in Security, Disaster and Remote Areas**. ISSN 2392-5701 JEET 2018, 27-34.
- [21] **ประเภทสายไฟ**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่เข้าถึง: [https://www.tngroup.co.th/media/article\\_detail/131](https://www.tngroup.co.th/media/article_detail/131)
- [22] **การบัดกรี**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่เข้าถึง: <https://sites.google.com/site/wrkrkhnlak/13>
- [23] **ตะกั่วบัดกรี**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่เข้าถึง: [http://119.46.116.126/self\\_all/selfaccess9/m3/527/more/lesson3/p4.php](http://119.46.116.126/self_all/selfaccess9/m3/527/more/lesson3/p4.php)
- [24] BTS-MRT. **สถิติผู้ใช้บริการ**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง: <https://sites.google.com/a/samakkhi.ac.th/bts-mrt/sthiti-phu-chi-bri-ka>



ภาคผนวก ก

**ข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณความคุ้มค่าทาง  
เศรษฐศาสตร์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. ข้อมูลเบื้องต้น

ชื่อนิติบุคคล : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง TSIC – ID : 85302-0153

ชื่ออาคารควบคุม : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

ที่อยู่อาคาร : เลขที่ 107 หมู่ 2 ตำบล ชุมโค อำเภอ ปะทิว จังหวัด ชุมพร รหัสไปรษณีย์ 86160

โทรศัพท์ : 077-591-445-6 โทรสาร : 077-591-445-6

ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานสามัญ : นายอมรศักดิ์ วงศ์แก้ว ทะเบียนเลขที่ : ผขอ.3114

## 2. ข้อมูลการใช้ไฟฟ้า

ขนาดพิกัดติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ารวมของอาคารควบคุมภาครัฐ

- กลุ่มที่ 1 (ขนาดเล็ก) : (<3,000 kW หรือ <3,530 kVA หรือ <60 ล้าน MJ/ปี)
- กลุ่มที่ 2 (ขนาดใหญ่) : ( $\geq 3,000$  kW หรือ  $\geq 3,530$  kVA หรือ  $\geq 60$  ล้าน MJ/ปี)

หม้อแปลงรวม 7,290 kVA

ลำดับ ที่	หมายเลข ผู้ใช้ไฟฟ้า	รหัส เครื่องวัด	ประเภท อัตรา	แรงดัน (KV)	ประจำที่
5	980202000 4206927	23056700	3.22	22-33	(1) อาคารเรียนรวม (2) อาคารบริหาร (3) อาคารปฏิบัติการวิศวะอิเล็กทรอนิกส์ (4) อาคารปฏิบัติการเครื่องกล (5) อาคารวิศวกรรม (6) อาคารปฏิบัติการเกษตร (7) อาคารเรียนรวมทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ (8) อาคารสำนักวิชาวิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

รูปที่ ก.1 แสดงข้อมูลของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	date	09/2562	08/2562	07/2562	06/2562	05/2562	04/2562	03/2562	02/2562	01/2562	average
5	kW (Peak)	288.00	224.00	208.00	208.00	276.00	304.00	316.00	268.00	196.00	316.00
	kWh	52,520.00	53,480.00	47,000.00	45,720.00	55,000.00	69,120.00	57,680.00	48,080.00	43,760.00	52,484.44
	kVAR	88.00	80.00	72.00	64.00	92.00	92.00	96.00	100.00	96.00	86.67
	Bath	220,730.28	214,656.02	183,363.47	182,799.97	223,257.00	293,044.73	238,718.48	197,004.24	168,974.34	213,616.50
	Bath/kWh	4.20	4.01	3.90	4.00	4.06	4.24	4.14	4.10	3.86	4.06

รูปที่ ก.2 แสดงข้อมูลการใช้ไฟฟ้า



ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.1** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลิ่งไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 490 นิวตัน  
(กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 0.4 เฮิรตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ตำแหน่ง การกด	ริมซ้าย			กลาง			ริมขวา			เฉลี่ย
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
แรงดัน ไฟฟ้า (โวลต์)	2.79	2.80	2.80	2.85	2.84	2.84	2.80	2.80	2.80	2.8
เฉลี่ย	2.8			2.83			2.80			
กระแส ไฟฟ้า (มิลลิ แอมป์)	62.65	62.71	61.50	70.56	72.46	71.69	61.93	61.68	62.07	65.24
เฉลี่ย	62.28			71.57			61.89			
กำลัง ไฟฟ้า (มิลลิ วัตต์)	174.8	175.6	172.2	201.1	205.8	203.6	173.4	172.7	173.8	183.6
เฉลี่ย	174.2			203.5			173.3			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.2** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 588 นิวตัน  
(กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 0.4 เฮิรตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ตำแหน่ง การกด	ริมซ้าย			กลาง			ริมขวา			เฉลี่ย
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
แรงดัน ไฟฟ้า (โวลต์)	4.05	4.03	4.04	4.05	4.10	4.09	4.04	4.04	4.01	4.05
เฉลี่ย	4.04			4.08			4.03			
กระแส ไฟฟ้า (มิลลิ แอมป์)	80.96	82.25	81.05	87.62	86.45	88.46	82.54	82.68	80.15	83.57
เฉลี่ย	81.42			87.51			81.79			
กำลัง ไฟฟ้า (มิลลิ วัตต์)	327.8	331.5	327.4	354.9	354.4	361.8	333.5	334.0	321.4	338.5
เฉลี่ย	328.9			357.0			329.6			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.3** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 686 นิวตัน  
(กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 0.4 เฮิรตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ตำแหน่ง การกด	ริมซ้าย			กลาง			ริมขวา			เฉลี่ย
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
แรงดัน ไฟฟ้า (โวลท์)	6.95	6.90	7.00	7.02	7.01	7.03	7.01	6.9	7.0	6.98
เฉลี่ย	6.95			7.02			6.97			
กระแส ไฟฟ้า (มิลลิ แอมป์)	89.96	90.24	91.33	96.88	96.97	97.45	91.88	89.13	89.41	92.60
เฉลี่ย	90.51			97.10			90.14			
กำลัง ไฟฟ้า (มิลลิ วัตต์)	625.2	622.7	639.3	680.1	679.7	685.1	644.1	615.0	625.9	646.3
เฉลี่ย	629.0			681.6			628.3			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.4** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลิ่งไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 490 นิวตัน  
(กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 0.7 เฮิรตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ตำแหน่ง การกด	ริมซ้าย			กลาง			ริมขวา			เฉลี่ย
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
แรงดัน ไฟฟ้า (โวลต์)	2.80	2.80	2.80	2.83	2.84	2.82	2.83	2.79	2.81	2.81
เฉลี่ย	2.80			2.83			2.81			
กระแส ไฟฟ้า (มิลลิ แอมป์)	62.62	65.01	64.22	71.65	70.12	70.87	63.01	65.08	64.57	66.35
เฉลี่ย	63.95			70.88			64.22			
กำลัง ไฟฟ้า (มิลลิ วัตต์)	175.3	182.0	179.8	202.8	199.1	199.9	178.3	181.6	181.4	186.7
เฉลี่ย	179.1			200.6			180.5			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.5** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 588 นิวตัน  
(กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 0.7 เฮิรตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ตำแหน่ง การกด	ริมซ้าย			กลาง			ริมขวา			เฉลี่ย
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
แรงดัน ไฟฟ้า (โวลต์)	4.05	4.06	4.04	4.07	4.10	4.13	4.02	4.05	4.05	4.06
เฉลี่ย	4.05			4.10			4.04			
กระแส ไฟฟ้า (มิลลิ แอมป์)	80.24	80.65	80.76	89.24	88.12	88.56	81.07	81.95	80.34	83.44
เฉลี่ย	80.55			88.64			81.12			
กำลัง ไฟฟ้า (มิลลิ วัตต์)	325.0	327.4	326.3	363.2	361.3	365.8	325.9	331.9	325.4	339.1
เฉลี่ย	326.2			363.4			327.7			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.6** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลิ่งไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 686 นิวตัน  
(กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 0.7 เฮิรตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ตำแหน่ง การกด	ริมซ้าย			กลาง			ริมขวา			เฉลี่ย
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
แรงดัน ไฟฟ้า (โวลต์)	7.01	6.98	6.95	6.99	7.0	7.1	7.01	6.95	6.95	6.98
เฉลี่ย	6.98			7.00			6.97			
กระแส ไฟฟ้า (มิลลิ แอมป์)	90.62	89.45	91.88	98.98	98.54	98.76	90.73	91.04	90.06	93.34
เฉลี่ย	90.65			98.76			90.61			
กำลัง ไฟฟ้า (มิลลิ วัตต์)	635.2	624.4	638.6	691.9	689.8	692.2	636.0	632.7	626.0	651.9
เฉลี่ย	632.7			691.3			631.6			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.7** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลิ่งไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 490 นิวตัน  
(กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ตำแหน่ง การกด	ริมซ้าย			กลาง			ริมขวา			เฉลี่ย
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
แรงดัน ไฟฟ้า (โวลต์)	2.81	2.79	2.80	2.83	2.81	2.82	2.77	2.8	2.8	2.80
เฉลี่ย	2.80			2.82			2.79			
กระแส ไฟฟ้า (มิลลิ แอมป์)	63.92	65.12	64.82	71.08	70.55	71.13	63.15	65.69	66.43	66.88
เฉลี่ย	64.64			70.92			65.09			
กำลัง ไฟฟ้า (มิลลิ วัตต์)	179.6	181.7	181.5	201.2	198.2	200.6	175.0	183.9	186.0	187.5
เฉลี่ย	180.9			199.9			181.6			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.8** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลิ่งไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 588 นิวตัน  
(กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ตำแหน่ง การกด	ริมซ้าย			กลาง			ริมขวา			เฉลี่ย
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
แรงดัน ไฟฟ้า (โวลต์)	4.02	4.03	4.04	4.07	4.11	4.09	4.05	4.05	4.05	4.06
เฉลี่ย	4.03			4.09			4.05			
กระแส ไฟฟ้า (มิลลิ แอมป์)	81.86	81.43	80.04	88.95	87.45	90.66	81.58	79.98	80.45	83.60
เฉลี่ย	81.11			89.02			80.67			
กำลัง ไฟฟ้า (มิลลิ วัตต์)	329.1	328.2	323.4	362.0	359.4	370.8	330.4	324.0	325.8	339.2
เฉลี่ย	326.9			364.1			326.7			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.9** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลิ่งไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 686 นิวตัน  
(กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ตำแหน่ง การกด	ริมซ้าย			กลาง			ริมขวา			เฉลี่ย
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
แรงดัน ไฟฟ้า (โวลต์)	7.0	6.9	6.95	7.03	7.0	7.0	6.93	6.95	7.0	6.97
เฉลี่ย	6.95			7.01			6.96			
กระแส ไฟฟ้า (มิลลิ แอมป์)	91.75	90.88	91.72	97.21	98.76	98.75	91.66	90.94	90.76	93.63
เฉลี่ย	91.45			98.24			91.12			
กำลัง ไฟฟ้า (มิลลิ วัตต์)	642.3	627.1	637.5	683.4	691.3	691.3	635.2	632.0	635.3	653.0
เฉลี่ย	635.6			688.7			634.8			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.10** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลิ่งไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 490 นิวตัน  
(กรณีน้ำหนัก 50 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ตำแหน่ง การกด	ริมซ้าย			กลาง			ริมขวา			เฉลี่ย
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
แรงดัน ไฟฟ้า (โวลต์)	2.80	2.79	2.81	2.81	2.82	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80
เฉลี่ย	2.80			2.81			2.80			
กระแส ไฟฟ้า (มิลลิ แอมป์)	65.75	65.12	64.25	71.14	70.98	72.44	64.12	66.0	64.55	67.15
เฉลี่ย	65.04			71.52			64.89			
กำลัง ไฟฟ้า (มิลลิ วัตต์)	184.1	181.7	180.5	199.9	200.2	202.8	179.5	184.8	180.7	188.3
เฉลี่ย	182.1			201.0			181.7			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.11** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 588 นิวตัน  
(กรณีน้ำหนัก 60 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ตำแหน่ง การกด	ริมซ้าย			กลาง			ริมขวา			เฉลี่ย
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
แรงดัน ไฟฟ้า (โวลต์)	4.04	4.03	4.02	4.12	4.09	4.12	4.05	4.05	4.02	4.06
เฉลี่ย	4.03			4.11			4.04			
กระแส ไฟฟ้า (มิลลิ แอมป์)	81.09	80.45	82.12	87.77	90.76	87.24	79.86	81.23	81.28	83.53
เฉลี่ย	81.22			88.59			80.79			
กำลัง ไฟฟ้า (มิลลิ วัตต์)	327.6	324.2	330.1	361.6	371.2	359.4	323.4	329.0	326.7	339.9
เฉลี่ย	327.3			364.1			326.4			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข.12** ตารางบันทึกผลการทดลองการหาค่าลึงไฟฟ้าของผู้เข้าร่วมทดลองขนาด 686 นิวตัน  
(กรณีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม) ที่ความถี่ 1.3 เฮิร์ตซ์ โดยตำแหน่งที่แตกต่างกัน

ตำแหน่ง การกด	ริมซ้าย			กลาง			ริมขวา			เฉลี่ย
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
แรงดัน ไฟฟ้า (โวลต์)	6.96	6.95	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	6.97	6.97	6.98
เฉลี่ย	6.97			7.00			6.98			
กระแส ไฟฟ้า (มิลลิ แอมป์)	91.66	93.02	90.75	97.60	98.16	99.23	91.56	91.45	92.06	93.94
เฉลี่ย	91.81			98.33			91.69			
กำลัง ไฟฟ้า (มิลลิ วัตต์)	638.0	646.5	635.2	683.2	687.1	694.6	640.9	637.4	641.7	655.4
เฉลี่ย	639.9			688.1			638.2			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล นางสาวดารารัตน์ เส็มไข  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 24 เดือน ธันวาคม พ.ศ 2541  
 ภูมิลำเนา จังหวัดตรัง  
 ที่อยู่ 231 หมู่ที่ 5 ตำบล ในควน อำเภอย่านตา  
 ขาว จังหวัดตรัง 92140

### ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนย่านตาขาวรัฐชนูปถัมภ์
- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนย่านตาขาวรัฐชนูปถัมภ์
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ สาขาวิศวกรรมพลังงาน ปีการศึกษา 2563 จากสถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร เขตอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-สกุล            นางสาววราภรณ์ รุ่งแก้ว  
 วัน เดือน ปีเกิด   วันที่ 27 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2541  
 ภูมิลำเนา           จังหวัดกระบี่  
 ที่อยู่                61 หมู่ที่ 6 ตำบล พรุเตียว อำเภอ เขาพนม  
                           จังหวัดกระบี่ 81140

ประวัติการศึกษา   - สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนพนม  
                           เบญจา  
                           - สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพนม  
                           เบญจา  
                           - สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
                           วศ.บ สาขาวิศวกรรมพลังงาน ปีการศึกษา 2563 จากสถาบัน  
                           เทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร เขต  
                           อุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

