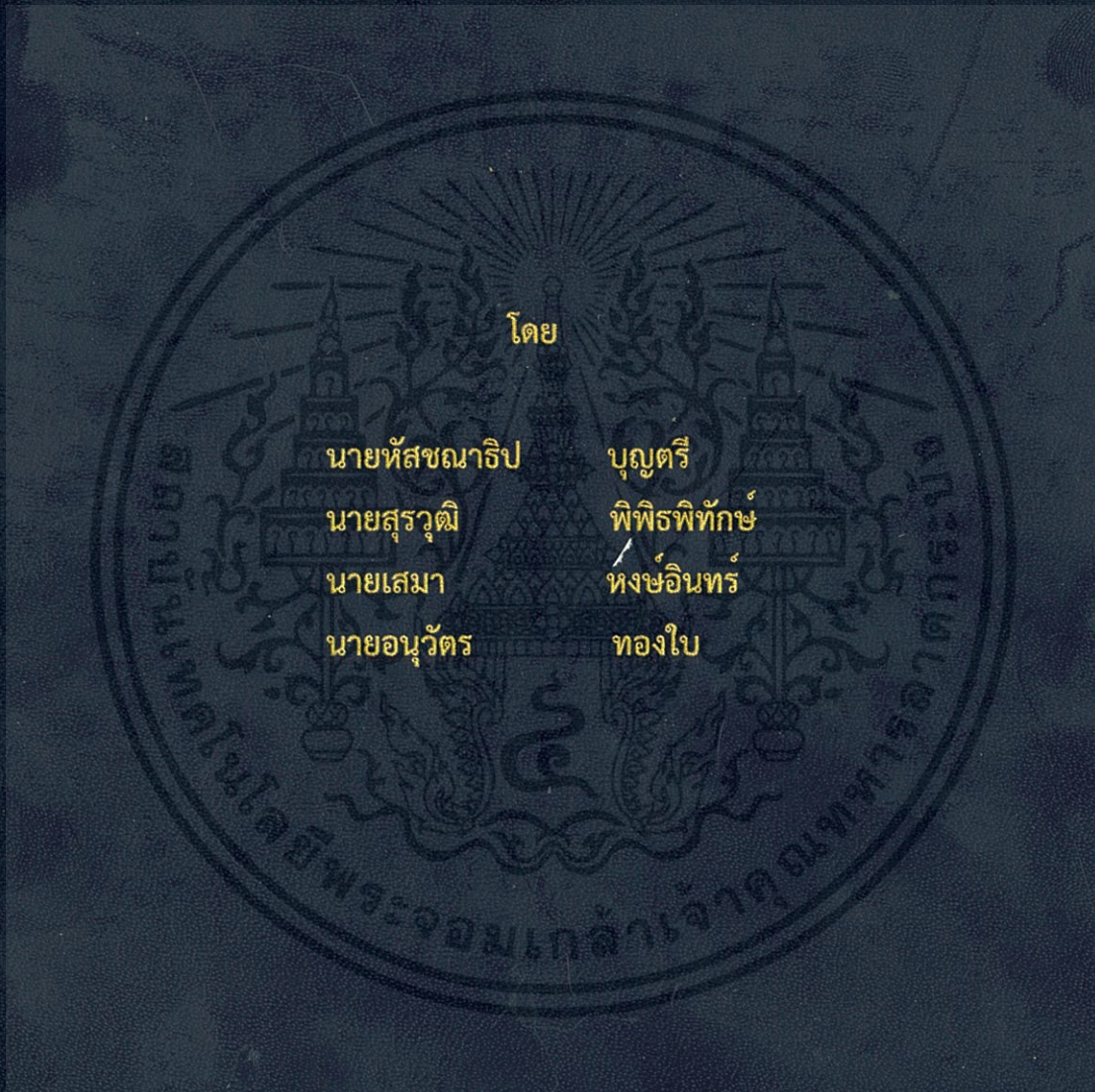


การเก็บสะสมพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ELECTRICAL ENERGY STORAGE FROM PIEZOELECTRIC MATERIALS



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

การเก็บสะสมพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ELECTRICAL ENERGY STORAGE FROM PIEZOELECTRIC MATERIALS



โดย

นาย หัสชนาริป

นาย สุรวุฒิ

นาย เสมอ

นาย อнуวัตร

บุญตรี

พิพิธพิทักษ์

หงษ์อินทร์

ทองใบ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

# ELECTRICAL ENERGY STORAGE FROM PIEZOELECTRIC MATERIALS



A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาน่าสนใจ ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2014

ปีการศึกษา 2557

การเก็บสะสมพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ELECTRICAL ENERGY STORAGE FROM PIEZOELECTRIC MATERIALS



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยนต์ เจตนาเสน  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเก็บสะสมพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย หัสชนาธิป บุญตรี
  2. นาย สุรวุฒิ พิพิธพิทักษ์
  3. นาย เสมอ หงษ์อินทร์
  4. นาย อนุวัตร ทองใบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ  ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารครั้งที่มีการนำไปใช้  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน)

## การเก็บสะสมพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

นาย หัสชนาธิป บุญตรี

นาย สุรวุฒิ พิพิธพิทักษ์

นาย เสมอ หงษ์อินทร์

นาย อนุวัตร ทองใบ

ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2557

### บทคัดย่อ

ปฏิญานินพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์พลังงานจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกมาเก็บสะสมให้อยู่ในรูปของแบตเตอรี่ และการนำไปต่อโหลดใช้งานจริง ซึ่งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกนี้มีคุณสมบัติคือเปลี่ยนจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยการสั่นหรือการกด ซึ่งน้ำหนักของแรงกดหรือสั่นแผ่นดังกล่าวก็จะมีผลต่อขนาดของพลังงานที่ได้แตกต่างกันไป ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกด้วยเนื่องจากเป็นวัสดุที่เปราะบางเสี่ยงต่อการแตกหักได้ง่าย อีกทั้งในปัจจุบันราคายังค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อที่จะหาวิธีดังกล่าว โดยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกไม่ได้รับความเสียหาย ปฏิญานินพนธ์นี้จึงได้เสนอวิธีการดึงพลังงานจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกมาเก็บสะสมให้อยู่ในรูปของแบตเตอรี่ และวิธีการนำพลังงานที่ได้มาต่อโหลดเพื่อใช้มาใช้ประโยชน์ โดยมีจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และผลการทดลองเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของการดึงพลังงานดังกล่าว ดังนั้นจึงเป็นประโยชน์สำหรับการใช้งานจริงกับอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไม่สูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ELECTRICAL ENERGY STORAGE FROM PIEZOELECTRIC MATERIALS

Hutchanatip Buntree

Suravut Phiphitphithak

Sema Hongin

Anuwat Thongbai

Asst.Prof.Dr.Chaiyan Jettanasen Supervisor

Year 2014

## ABSTRACT

This project studies on energy generated by piezoelectric material to be stored in the battery, and then connect to the load for any application .The piezoelectric material can convert mechanical energy to electrical energy ; the generated energy strongly depends on the pressing force or vibration. As the piezoelectric material used in this study is PZT that is very fragile and costly an optimal method must be applied to do not make it damaged . Therefor , this project proposes how to extract energy from piezoelectric material to be stored in the battery in order to later power other electronic/electrical devices. The simulation and experimental results confirm the effectiveness of energy extraction. Consequently, this work may be practical for energy supplying of the low power devices.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายๆท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกในการยืมอุปกรณ์ ตลอดจนคุณกมลวรรณ ถาวร เจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจอีกทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	1
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 ตารางการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric)	5
2.1.1 Piezoelectricity	7
2.1.2 แอคชูเอเตอร์ของ Piezo Motors	9
2.1.3 Single Layer Generator	12
2.1.4 การนำไปประยุกต์ใช้งาน	14
2.1.5 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้งานจริง	17
2.2 Rectifier	19
2.2.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น	19
2.2.2 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น	22
2.3 วงจรขยายกระแสดาร์ลิ่งตัน	28
2.3.1 ทรานซิสเตอร์	28
2.3.2 การสร้างทรานซิสเตอร์	28
2.3.3 รูปลักษณะของทรานซิสเตอร์	29
2.3.4 การทำงานของทรานซิสเตอร์	30
2.3.5 ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเป็นสวิตช์	30
2.3.6 ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเป็นตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.7 การจัดโบอัสให้กับทรานซิสเตอร์	32
2.3.8 วงจรดาร์ลิ่งตัน(คู่ดาร์ลิ่งตัน)	34
2.4 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน	35
2.4.1 ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์	35
2.4.2 แบตเตอรี่	35
<b>บทที่ 3 การออกแบบและจำลองระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก</b>	<b>38</b>
3.1 แบบจำลองลักษณะการทำงานของเพียโซอิเล็กทริก	38
3.1.1 ส่วนสวิตช์ควบคุม	38
3.1.2 วงจรเพียโซอิเล็กทริก	39
3.1.3 วงจรเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่นวงจร-วงจรเรียงกระแส-วงจรชาร์จ แบตเตอรี่	40
3.1.4 วงจรเพียโซอิเล็กทริกอนุกรม 2 แผ่นวงจร-วงจรเรียงกระแส-วงจรชาร์จ แบตเตอรี่	41
3.1.5 วงจรเพียโซอิเล็กทริกขนาน 2 แผ่นวงจร-วงจรเรียงกระแส- วงจรชาร์จ แบตเตอรี่	41
3.2 ผลการจำลอง	42
3.2.1 Switch ควบคุม	42
3.2.2 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่น	42
3.2.3 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรม	43
3.2.4 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนาน	43
3.2.5 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่นชาร์จแบตเตอรี่ NiMH 20 mAh	44
3.2.6 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรมชาร์จแบตเตอรี่ NiMH 20 mAh	44
3.2.7 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานชาร์จแบตเตอรี่ NiMH 20 mAh	45
3.2.8 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่นชาร์จแบตเตอรี่ NiMH 40 mAh	45
3.2.9 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรมชาร์จแบตเตอรี่ NiMH 40 mAh	46
3.2.10 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานชาร์จแบตเตอรี่ NiMH 40 mAh	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง</b>	47
4.1 Application ชาร์จแบตเตอรี่	47
4.1.1 วงจรการทดลอง Application ชาร์จแบตเตอรี่	47
4.1.1.1 โครงสร้างแบบจำลอง	47
4.1.1.2 วงจรชาร์จแบตเตอรี่	48
4.1.1.3 แบตเตอรี่	48
4.1.1.4 โครงสร้างแบบจำลองชาร์จแบตเตอรี่	49
4.1.2 ผลการวงจรการทดลอง Application ชาร์จแบตเตอรี่	49
4.1.2.1 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่น	49
4.1.2.2 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนาน	50
4.1.2.3 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรม	50
4.1.2.4 ระยะเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่	51
4.2 Application หลอดไฟ LED	54
4.2.1 วงจรทดลอง Application หลอดไฟ LED	54
4.2.2 ผลการวงจรการทดลอง Application หลอดไฟ LED	54
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	73
5.1 สรุปผลการทดลอง	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	75
5.3 แนวทางการพัฒนา	75
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	76
<b>ภาคผนวก</b>	77
เอกสารทางวิชาการ	78
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ของการแบ่งโครงสร้างของผลึก	6
2.2 ปรากฏการณ์ Piezoelectricity	7
2.3 การ Poling of Piezoelectric Ceramics	8
2.4 Longitudinal and Transverse Motors	9
2.5 2-Layer Transverse Motor, Expanding Lengthwise	10
2.6 Bending Motor ลักษณะต่างๆ	10
2.7 Stack Generators	11
2.8 Performance	11
2.9 Longitudinal and Transverse Generators	12
2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Extension Generator และ Compressed Lengthwise Bending	12
2.11 Bending Generator	13
2.12 Stack Generator	13
2.13 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกแต่ละขนาด	18
2.14 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาใช้งานจริง	18
2.15 ตัวไดโอดและสัญลักษณ์ที่ใช้แทนในวงจร	19
2.16 รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ	19
2.17 วงจรพื้นฐานแบบ Half Wave Rectifier	20
2.18 สัญญาณที่จะหาค่าประสิทธิภาพ	21
2.19 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบเซนเตอร์แทป	22
2.20 (ก) การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบเซนเตอร์แทปเมื่ออินพุตเป็นซิกบวก	23
2.20 (ข) การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบเซนเตอร์แทปเมื่ออินพุตเป็นซิกลบ	24
2.21 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์	25
2.22 (ก) การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เมื่ออินพุตเป็นซิกลบ	26
2.22 (ข) การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เมื่ออินพุตเป็นซิกบวก	27
2.23 ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN	28
2.24 ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP	28
2.25 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์	28
2.26 การสร้างทรานซิสเตอร์	29
2.27 ลักษณะของทรานซิสเตอร์	29
2.28 คอลเลคเตอร์ถูกต่อเข้ากับโลหะที่ทรานซิสเตอร์ติดตั้งอยู่ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับทรานซิสเตอร์	30
2.30 ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP	30
2.30 สภาวะ ON ของทรานซิสเตอร์	31
2.31 สภาวะ OFF ของทรานซิสเตอร์	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยและต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.32 ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเป็นตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้	32
2.33 การไบอัสทรานซิสเตอร์ NPN	32
2.34 การไบอัสทรานซิสเตอร์ PNP	32
2.35 การทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN	33
2.36 บริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อ	33
2.37 อิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งเคลื่อนที่ในรอยต่อ BE	33
2.38 วงจรคู่อาร์ลิงตัน	34
2.39 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	36
2.40 แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม	36
2.41 แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์	37
2.42 แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน	37
3.1 แผนผังแสดงการทำงาน	38
3.2 สวิตช์ควบคุม 1	38
3.3 สวิตช์ควบคุม 2	39
3.4 วงจรเพียโซอิเล็กทริก	40
3.5 วงจรเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่นวงจรเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแส (Rectifier) และวงจรชาร์จแบตเตอรี่	40
3.6 วงจรเพียโซอิเล็กทริกอนุกรม 2 แผ่นวงจร-วงจรเรียงกระแส-วงจรชาร์จแบตเตอรี่	41
3.7 วงจรเพียโซอิเล็กทริกขนาน 2 แผ่นวงจร-วงจรเรียงกระแส- วงจรชาร์จแบตเตอรี่	41
3.8 รูปคลื่นของสัญญาณ Switch1 และ Switch2	42
3.9 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกความถี่ 5 Hz	42
3.10 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรมความถี่ 5 Hz	43
3.11 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานความถี่ 5 Hz	43
3.12 รูปคลื่นลักษณะการชาร์จของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่น แบตเตอรี่ NiMH 20 mAh	44
3.13 รูปคลื่นลักษณะการชาร์จของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรม แบตเตอรี่ NiMH 20 mAh	44
3.14 รูปคลื่นลักษณะการชาร์จของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนาน แบตเตอรี่ NiMH 20 mAh	45
3.15 รูปคลื่นลักษณะการชาร์จของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่น แบตเตอรี่ NiMH 40 mAh	45
3.16 รูปคลื่นลักษณะการชาร์จของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรม แบตเตอรี่ NiMH 40 mAh	46
3.17 รูปคลื่นลักษณะการชาร์จของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนาน แบตเตอรี่ NiMH 40 mAh	46

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 โครงสร้างแบบจำลอง	47
4.2 วงจรชาร์จแบตเตอรี่	48
4.3 แบตเตอรี่ NiMH 20 mAh และ 40 mAh	48
4.4 โครงสร้างแบบจำลองชาร์จแบตเตอรี่	49
4.5 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่นความถี่ 5 Hz	49
4.6 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานความถี่ 5 Hz	50
4.7 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรมความถี่ 5 Hz	50
4.8 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันหลังวงจรเรียงกระแส	51
4.9 กราฟคุณลักษณะการชาร์จระหว่างแรงดันกับเวลา ของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรมขนาด 20 mAh	52
4.10 กราฟคุณลักษณะการชาร์จระหว่าง แรงดันกับเวลา ของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานขนาด 20 mAh	52
4.11 กราฟคุณลักษณะการชาร์จระหว่าง แรงดันกับเวลา ของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรมขนาด 40 mAh	53
4.12 กราฟคุณลักษณะการชาร์จระหว่าง แรงดันกับเวลา ของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานขนาด 40 mAh	53
4.13 วงจรทดลอง Application หลอดไฟ LED	54
4.14 แผ่น Polyethylene	55
4.15 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหยียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 1 แผ่น	55
4.16 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหยียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่น ต่อวงจรอนุกรม	56
4.17 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหยียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่น ต่อวงจรขนาน	56
4.18 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหยียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อวงจรอนุกรม	57
4.19 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหยียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อวงจรขนาน	57
4.20 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหยียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อคู่ขนานกันแล้วนำมาอนุกรมกัน	58
4.21 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหยียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อคู่อนุกรมกันแล้วนำมาขนานกัน	58
4.22 การต่ออุปกรณ์ IC bridge rectifier และ capacitor ขนาด 0.1 $\mu$ F	59
4.23 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหยียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 1 แผ่น	59
4.24 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหยียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่น ต่อวงจรอนุกรม	60

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่น ต่อวงจรถนนาน	60
4.26 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อวงจรถนุกรม	61
4.27 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อวงจรถนนาน	61
4.28 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อวงจรถุ่นานกันแล้วนำมาอนุกรมกัน	62
4.29 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อวงจรถุ่นุกรมกันแล้วนำมาขนาน	62
4.30 แผ่นพลาสติก	63
4.31 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 1 แผ่น	63
4.32 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่น ต่อกันแบบวงจรถนุกรม	64
4.33 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่น ต่อกันแบบวงจรถนนาน	64
4.34 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อกันแบบวงจรถนุกรม	65
4.35 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อกันแบบวงจรถนนาน	65
4.36 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อกันแบบคู่ขนานกันแล้วนำมาอนุกรมกัน	66
4.37 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อกันแบบคู่อนุกรมกันแล้วนำมาขนานกัน	66
4.38 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 1 แผ่น	67
4.39 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่น ต่อกันแบบวงจรถนุกรม	67
4.40 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่น ต่อกันแบบวงจรถนนาน	68

เอกสาร 4.41 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดต่อกันแบบวงจรถนุกรม ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกา 68 ไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อกันแบบวงจรขนาน	69
4.43 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อกันแบบวงจรคู่ขนานกันแล้วนำมาอนุกรมกัน	69
4.44 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อกันแบบวงจรคู่อนุกรมกันแล้วนำมาขนานกัน	70
4.45 การต่อวงจรขนานของแผ่น Piezoelectric	70
4.46 อุปกรณ์ rectifier ต่อกับวงจรดาร์ลิ่งตัน	71
4.47 รูปคลื่นสัญญาณแรงดัน Inputและ Output เมื่อผ่านวงจรขยายกระแส	71
4.48 ค่ากระแสที่วัดได้เมื่อผ่านวงจรขยายกระแส ซึ่งจาก V-A DC meter สามารถอ่านค่ากระแสได้ 35 mA หรือ 0.35 A	72
4.49 ป้ายไฟ LED ขณะทำการเหียบ	72
5.1 ผังแสดงการทำงาน Application 2 วงจรต่อโพล LED	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินการ	3
2.1 คุณลักษณะของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้งาน	17
2.2 การเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ และลิเธียมไอออน(ทั่วไป)	35
3.1 ค่าพารามิเตอร์ในวงจรจำลอง	39
4.1 ตารางแสดงระยะเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่	51
5.1 ตารางเปรียบเทียบผลการทดลอง Application 2 วงจรต่อโหลด LED	74
5.2 ตาราง $V_o/p,rms$ และ $I_o/p,rms$ หลังต่อวงจรขยายกระแสสตาร์ลิงตัน	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าโดยการใช้พลังงานทางเลือกนั้นมีอย่างแพร่หลายสามารถผลิตจากการเปลี่ยนพลังงานที่มีอยู่ตามธรรมชาติมาเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีการเปลี่ยนรูปพลังงานหลายวิธี เช่น พลังงานลม คลื่นน้ำทะเล ความร้อนใต้พิภพ และพลังงานแสงอาทิตย์ และด้วยความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มสูงมากขึ้นตามความเจริญเติบโตของประเทศทั้งในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรมทำให้ทั่วโลกไม่เฉพาะประเทศไทยเท่านั้นมีความจำเป็นที่จะต้องมีการทำวิจัยพัฒนาเกี่ยวกับพลังงานใหม่และพลังงานทดแทนรวมทั้งการอนุรักษ์พลังงานเพิ่มมากขึ้นซึ่งหนึ่งในจำนวนหัวข้อวิจัยที่ทั่วโลกให้ความสนใจคือระบบเก็บเกี่ยวและจัดการพลังงาน(Energy harvesting and management) เนื่องจากจะเป็นการเก็บพลังงานจากพลังงานกลหรือการเคลื่อนไหวที่เกิดขึ้นรอบๆตัว กลับมาเก็บในรูปของพลังงานไฟฟ้าซึ่งปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) ก็เป็นอีกหนึ่งความสนใจและมีการทำการศึกษาพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

เพียโซอิเล็กทริก เป็นการเปลี่ยนพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนมาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แต่เนื่องจากการชาร์จเข้าแบตเตอรี่จะต้องใช้ไฟฟ้ากระแสตรง จึงต้องมีวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่เรียกว่า “วงจรเรียงกระแส หรือ เรกติไฟเออร์ (Rectifier)” เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยการทำงานของสวิตช์ในตัวเรกติไฟเออร์แล้วจึงไปชาร์จแบตเตอรี่ และนำมาประยุกต์ใช้กับทางเดินเพื่อจ่ายพลังงานที่ได้เข้ากับโหลดต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก
2. เพื่อออกแบบวงจรชาร์จเจอร์เพื่อชาร์จเข้าแบตเตอรี่
3. เพื่อออกแบบการประยุกต์ใช้บนทางเดิน

### 1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

ขอบเขตในการศึกษาปริญญาโทฉบับนี้ คือ การสร้างแบบจำลอง ที่ใช้งานได้จริงจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในการผลิตไฟฟ้า เพื่อให้สามารถเก็บให้อยู่ในรูปของแบตเตอรี่และประยุกต์ใช้บนทางเดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

- 1.ศึกษาวิธีการจำลองการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกด้วยโปรแกรม Matlab Simulink
- 2.ศึกษาวงจรบริดจเรกติไฟเออร์แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส
- 3.ศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกบนทางเดิน
- 4.ศึกษาวิธีการดึงพลังงานจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกโดยไม่ให้แผ่นเกิดความเสียหาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ตารางการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินการ

ขั้นตอน	ภาคเรียนที่1				ภาคเรียนที่2				
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาทฤษฎี ข้อมูลต่างๆ และหาแหล่งจำหน่ายวัสดุเพื่อโซลิดีทริก รวมถึงโปรแกรมที่จะใช้ในการวิเคราะห์วงจร									
2.ศึกษาวัสดุเพื่อโซลิดีทริกที่หามาได้ว่าสามารถให้แรงดันและกำลังไฟฟ้าเท่าใด และหาวิธีที่ทำให้ได้แรงดันกับกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยไม่ให้เกิดความเสียหาย									
3.ศึกษาวงจรบริดเรคตีไฟเออร์แบบฟูลบริด 1 เฟส									
4.ศึกษาวงจรดาร์ลิงตัน									
5.ทำการจำลองระบบวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวัสดุเพื่อโซลิดีทริก โดยใช้โปรแกรมจำลอง									
6.ออกแบบการใช้งานจริงและลงมือทำ โดยยึดผลการจำลองที่ได้จากการจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเป็นหลัก									
7.เปรียบเทียบการออกแบบจริงกับการจำลองโปรแกรมว่ามีข้อผิดพลาดประการใดแล้วทำการแก้ไข									
8.สรุปผลพร้อมหาประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้									
9.เรียบเรียงและจัดทำรูปเล่มปฏิญานินทร์									

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ทางปัญญาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์เพื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหาและตั้งชื่อสิ่งจ้างของเอกสารชุดนี้มิฉะนั้นจะนำไปใช้

### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้สามารถเข้าใจคุณสมบัติและหลักการทำงานของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก
2. ทำให้สามารถเข้าใจหลักการทำงานของเรคตีไฟเออร์
3. ทำให้สามารถใช้โปรแกรมออกแบบ วิเคราะห์ และคาดคะเนผลที่เกิดขึ้นได้
4. ทำให้ได้ซาร์จเจอร์ประจุพลังงานไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่จากแหล่งกำเนิดที่เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก
5. ทำให้สามารถนำแผ่นเพียโซอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้บนทางเดินได้
6. ได้รับประสบการณ์การศึกษาและการทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) [1]

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1880 โดย Pierre Curie นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส (สามีของ Marie Curie) ได้ศึกษาผลของความดันต่อการเกิดประจุไฟฟ้าของผลึกควอตซ์ (Quartz) ดีเกลือ (Rochelle Salt) อัญมณี (Tourmaline) ว่าสามารถให้กำเนิดไฟฟ้าได้เมื่อมีแรงกดกระทำต่อผลึกเขาให้ชื่อกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect)” ต่อมาในปี ค.ศ. 1881 Gabriel Lippmann ได้ศึกษาค้นพบปรากฏการณ์ย้อนกลับได้โดยพิจารณาจากหลักเทอร์โมไดนามิกส์คือถ้าให้ไฟฟ้าเข้าไปในผลึกผลึกก็จะสั้นได้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ได้รับแรงเค้น (Mechanical Stress) จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการประจุไฟฟ้า (Electric Charge) หรือการจัดเรียงตัวทางแสงขึ้น (Polarization) เรียกว่า “ผลทางตรง” (Direct Effect) เมื่อนำวงจรต่อเข้ากับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกภายใต้แรงอัด จะมีกระแสไหลเข้าวงจรและหากเปลี่ยนเป็นแรงดึงจะเกิดกระแสไหลในทิศทางตรงข้าม

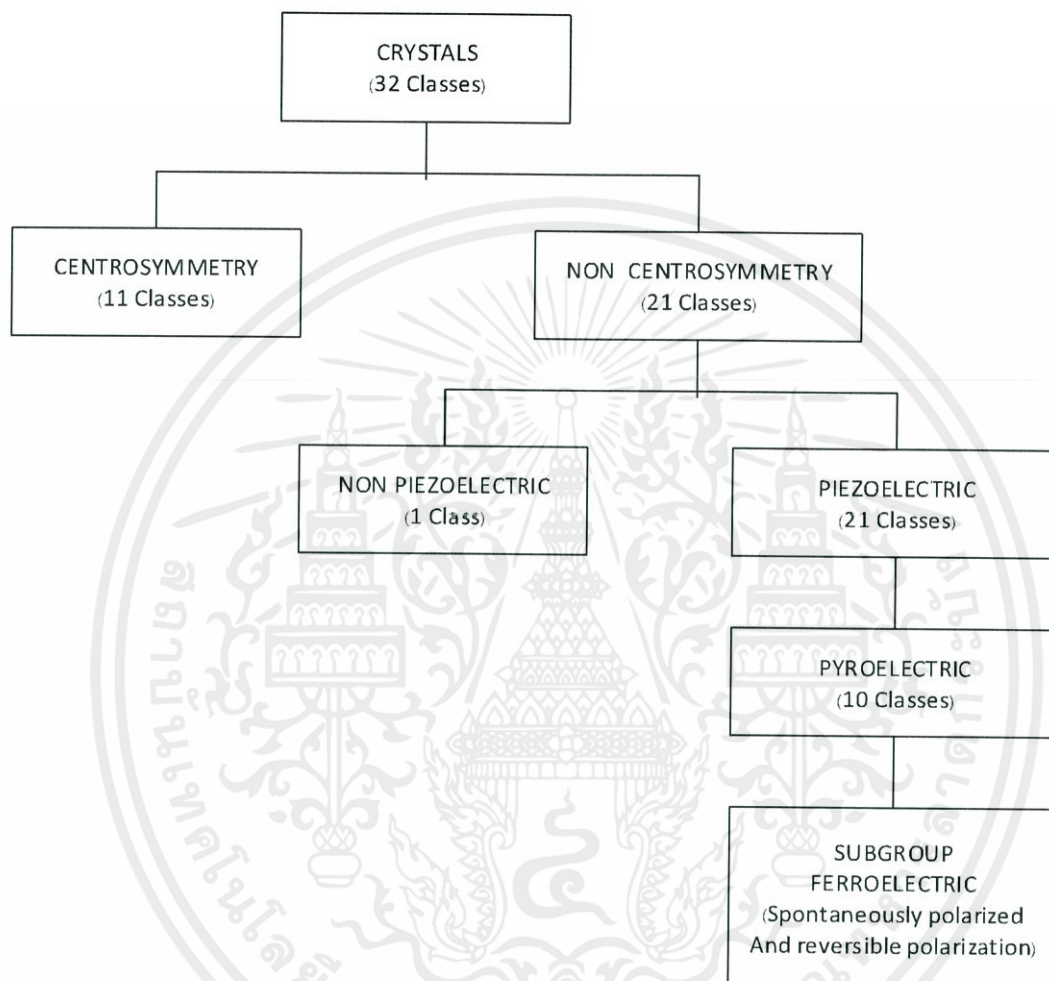
วัสดุเพียโซอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้าจะเกิดแรงเครียดอัดภายในผลึก (Compression Strain) ทำให้วัสดุเกิดการบิดรูปไปจากเดิมและหากกลับทิศทางของสนามจะเกิดแรงเครียดดึง (Tensile Strain) ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า “ผลทางอ้อม” (Indirect Effect, Converse Effect)

Piezoelectric เป็นคุณสมบัติชนิดของวัสดุที่มาจากคริสตอลรวมไปถึงคริสตอลธรรมชาติทั้งควอตซ์ (Quartz) ดีเกลือ (Rochelle Salt) และอัญมณี (Tourmaline) รวมกับเซรามิกเช่นแบเรียมไททาเนตและสไตรโคเนตเมื่อใช้ความดันทางกลปรับให้เข้ากับวัสดุเหล่านี้โครงสร้างที่เป็นคริสตอลจะสร้างสนามไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมกับความดันทำให้โครงสร้างถูกเปลี่ยนรูปร่างจนทำให้เกิดการเปลี่ยนมิติของวัสดุ

การทดลองที่เกี่ยวข้องระหว่างปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) กับโครงสร้างของคริสตอลถูกเผยแพร่ในปี ค.ศ. 1880 โดย Pierre และ Jacques Curie การทดลองของเขาศึกษาถึงการวัดการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าซึ่งปรากฏอยู่บนคริสตอลที่ได้รับจากความเครียดทางกลในวงการทางวิทยาศาสตร์ผลการทดลองนี้ถือว่าเป็นการค้นพบที่สำคัญและถูกตั้งชื่อให้อย่างรวดเร็วว่า “Piezoelectricity”

ลักษณะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนักฟิสิกส์ศาสตร์ได้แบ่งระบบโครงสร้างผลึกเป็น 7 ระบบโดยโครงสร้างผลึกสามารถแบ่งเป็น 32 กลุ่ม (Classes or Point Groups) ผลึกทั้ง 32 กลุ่มสามารถแบ่งหมวดได้ตั้งรูปที่ 1 ผลึกที่มีศูนย์กลางสมมาตร (Centro symmetry) มีอยู่ 11 กลุ่มและผลึกที่ไม่มีศูนย์กลางสมมาตร (Non Centrosymmetry) มีอยู่ 21 กลุ่มในจำนวนนี้มีผลึกถึง 20 กลุ่มสามารถแสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้ผลึกที่แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกจะแบ่งออกไปอีก 10 กลุ่มโดยเป็นผลึกที่มีทิศทางการโพลาริซ์ (dipoles) ตามธรรมชาติแม้จะไม่มีแรงเค้นหรือสนามไฟฟ้ามากระทำขนาดการโพลาริซ์สามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบรอบตัวหรือรอบทิศทางตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและบางกลุ่มเป็นแบบให้สนามไฟฟ้าซึ่งมีทั้งแบบที่เป็น Spontaneously Polarization และ Reversible Polarization ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Ferroelectric” ซึ่งอยู่ในกลุ่มของ “Pyroelectric” สารสังเคราะห์ Polycrystalline Materials ประกอบด้วยผลึกจำนวนมากที่มีทิศทาง

ข้อไฟฟ้ากระจายหลากหลายทิศทางทำให้ทิศการโพลาริไซได้ผลลัพธ์เป็นศูนย์และไม่สามารถตรวจวัดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้การจัดทิศทางสามารถทำได้โดยการจ่ายสนามไฟฟ้าเพื่อให้ทิศขั้วอยู่ในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้ามากที่สุดจึงทำให้สามารถตรวจสอบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้วิธีการดังกล่าวเรียกว่าการโพล (Poling)



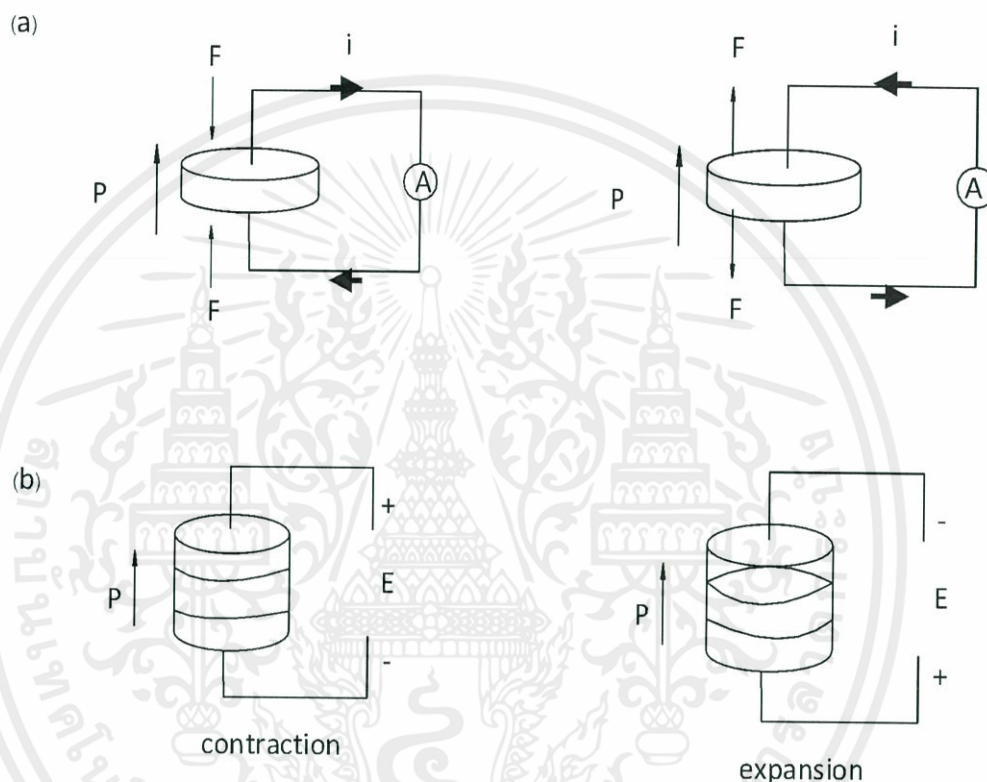
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของการแบ่งโครงสร้างของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 Piezoelectricity

จากเหตุผลข้างต้นที่ผ่านมาเพราะความไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลางของผลึกเซลล์ (Non Centrosymmetry) เมื่อมีแรงกดจะทำให้ Dipole เกิดขึ้นและเป็นผลทำให้เกิดกระแสขึ้นในทำนองกลับกันเมื่อมีแรงดึงจะทำให้ Dipole เกิดขึ้นและเป็นผลทำให้เกิดกระแสขึ้นเช่นกันดังรูปที่ 2a

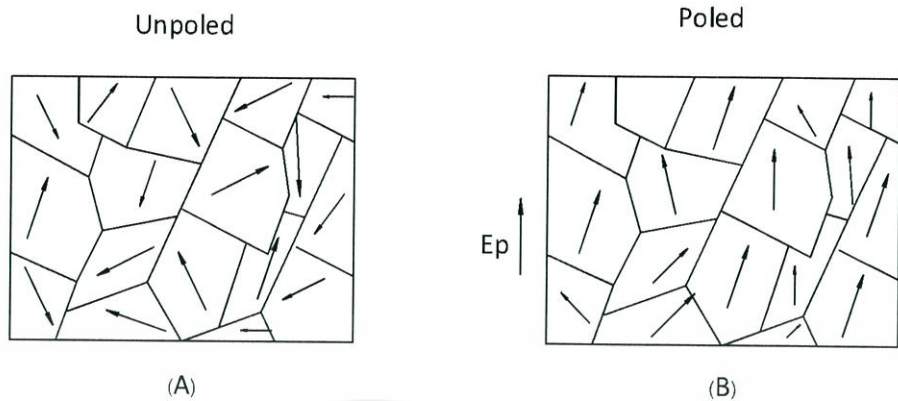
ในทำนองเดียวกันเมื่อเราป้อนแรงดันบนพีโซอิเล็กทริกเซรามิกตัวเซรามิกจะขยายและหดตัว ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลดังรูปที่ 2b



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ Piezoelectricity

เพียโซอิเล็กทริกนั้นจะมีการ Polarization ตามธรรมชาติซึ่งแตกต่างจาก Ferroelectric สารเพียโซอิเล็กทริกนั้นหลังจากการตัดให้เป็นชิ้นใหม่ๆ Dipoles ที่มีอยู่ในส่วน(Grains) ต่างๆนั้นไม่ได้เรียงไปในแนวทางเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการ Poling เพื่อให้ Dipoles ต่างๆเรียงไปในทิศทางเดียวกันดังรูปที่ 3 ซึ่งหากปราศจากกระบวนการ Poling แล้วสารเพียโซจะไม่แสดงสมบัติพิเศษใดๆเลยการ Poling จะกระทำที่อุณหภูมิคูรี( Curie Temperature,  $T_c$  )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การ Poling of Piezoelectric Ceramics  
สมการที่อธิบายเกี่ยวกับผลของปรากฏการณ์ Piezoelectric เขียนได้ดังนี้

$$D = dE + \epsilon^T E \dots\dots(2.1)$$

$$S = s E^T + dE \dots\dots(2.2)$$

เมื่อ  $D$  = ระยะประจุเคลื่อนที่ (Electric Displacement)

$T$  = ความเค้น (Stress)

$E$  = สนามไฟฟ้า (Electric Field)

$S$  = ความเครียด (Strain)

$d$  = ค่าคงที่ของเพียโซ (Piezoelectric Coefficient)

$\epsilon$  = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)

$s$  = ค่าของวัสดุที่ใช้ (Material Compliance)

ค่าของเพียโซไดอิเล็กตริกจะเกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงเค้นอาจจะเขียนในรูปของแรงดันหรือค่า  $g$  มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อนิวตันต่อตารางเมตรดังสมการ

$$g = \frac{\text{Open Circuit Electric Field}}{\text{Applied Mechanical Stress}} \dots\dots(2.3)$$

ซึ่งค่า  $g$  เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับ  $d$  ดังนี้

$$g = \frac{d}{\epsilon} = \frac{d}{\epsilon_r \epsilon_0} \dots\dots(2.4)$$

เมื่อ  $\epsilon$  = ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity)

$\epsilon_r$  = ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)

$\epsilon_0$  = ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (Permittivity in free space  $\approx 8.854 \times 10^{-12}$  F/m)

ส่วนค่าความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลหรือในทางกลับกันของเพียโซไดอิเล็กตริก (Piezoelectric Coupling Factor) สามารถหาได้ดังนี้

$$K = \sqrt{\frac{\text{Energy Output}}{\text{Total Mechanical Energy Input}}} \dots\dots(2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องเรียนเท่านั้น เมื่อผู้ภาคเรียนนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกชั้นห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

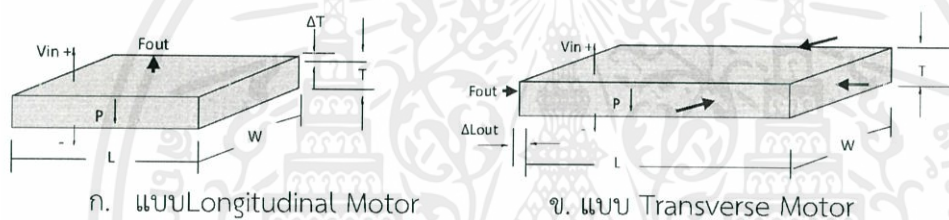
ซึ่งค่า  $K$  นั้นจะเป็นผลปรากฏการณ์ของเพียโซไดอิเล็กตริกทั้งผลทางตรง(Direct Effect) และผลทางอ้อม (Converse Effect) ทั้งสองกรณีและค่าของ  $K$  นั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ

## 2.1.2 แอคชูเอเตอร์ของ Piezo Motors

### 1. Longitudinal and Transverse Motors

เมื่อสนามไฟฟ้าที่มีขั้วเดียวกันกับขั้วโพลาไรเซชันเริ่มต้นถูกวางขวางความหนาของแผ่นเพียโซเซรามิกแผ่นเดียวแผ่นจะ

ขยายความหนาหรือขยายด้าน Longitudinal ดังรูปที่ 2.4 ก คือด้านเดียวกับแกนของโพลาไรเซชัน และเกี่ยวเนื่องกับทิศทางตั้งฉากกับแกนของโพลาไรเซชันหรือด้าน Transverse ดังรูปที่ 2.4 ข เมื่อสนามถูกย้อนกลับการเคลื่อนที่ก็ย้อนกลับด้วยแผ่นเซรามิกจะใช้ผลกระทบนี้อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของแผ่นด้านความหนาจะมีขนาดเล็กมาก (อยู่ในหน่วยของ Nanometers) ขณะเดียวกันการเคลื่อนที่ในทิศ Transverse ตามแนวยาวจะกว้างกว่า(ในหน่วยของ Microns) เนื่องจากทิศทางความยาวจะมากกว่าความหนา การเคลื่อนที่แนว Transverse ของแผ่นที่ผิวหน้าของโครงสร้างจะสามารถก่อให้เกิดความโค้งงอ



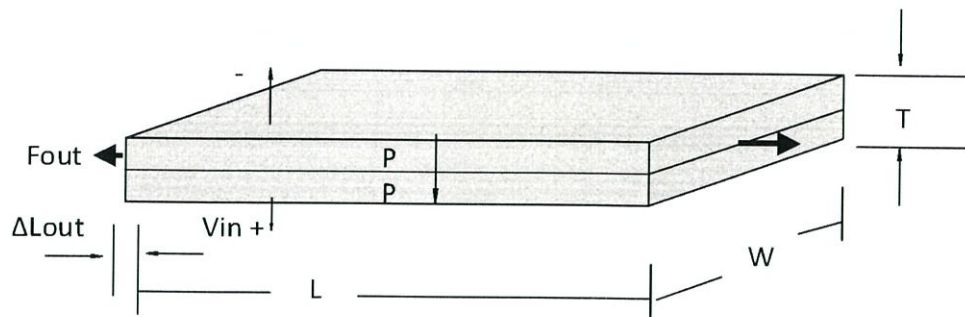
รูปที่ 2.4 Longitudinal and Transverse Motors

### 2. แบบ 2-Layer Motor

สารสองชั้นสามารถงอและบิดได้โดยขึ้นกับโพลาไรเซชันของชั้นสารเคลือบตรงกลางระหว่างสารเพียโซสองชั้นจะเพิ่มความแข็งแรงทางกลและความหนืดแต่จะลดการเคลื่อนที่ 2-Layer หมายถึงจำนวนชั้นของเพียโซและจริงแล้วสาร 2-Layer มี 8 ชั้นซึ่งประกอบไปด้วยชั้นอิเล็กโทรด 4 ชั้นเพียโซเซรามิก 2 ชั้นตัวยึด 2 ชั้นชั้นสองชั้นนี้จะช่วยให้สามารถลดความต่างศักย์ลงครึ่งหนึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาขานาน

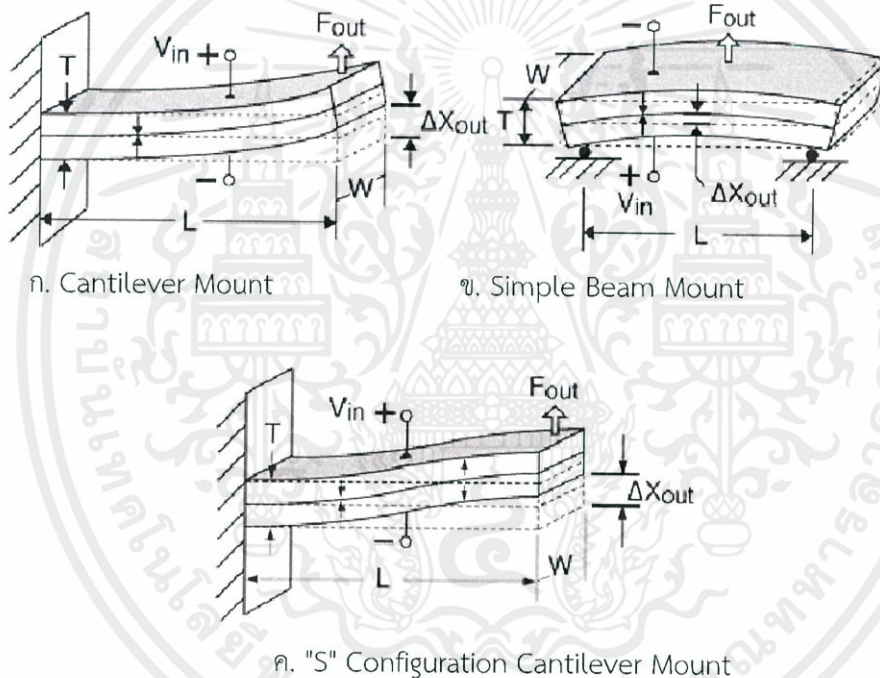
Extension Motors : สารสองชั้นจะแสดงเหมือนชั้นเดียวเมื่อทั้งสองชั้นขยายไปด้วยกันถ้าสนามไฟฟ้าถูกนำมาใช้ซึ่งจะทำให้สารบางลงและขยายยาวขึ้นโดยปกติการเคลื่อนที่ในหนึ่งแกนจะถูกนำมาใช้ในการเคลื่อนที่ซึ่งจะอยู่ในหน่วยของไมครอนและแรงจะอยู่ในช่วงของ 10 ถึง 100 นิวตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 2-Layer Transverse Motor, Expanding Lengthwise

Bending Motors : สารสองชั้นจะทำให้เกิดความโค้งงอเมื่อสารชั้นเดียวขยายขณะที่สารอื่นหดตัวลง Transducers เหล่านี้มักจะถูกกล่าวถึงว่าเป็นสารโค้งงอหรือสารที่ถูกปรับได้ การเคลื่อนที่ของการโค้งงอจะอยู่ในหลักร้อยถึงหลักพันไมครอนและแรงโค้งงอจะอยู่ในหลัก 10 ถึง 100 นิวตัน



ก. Cantilever Mount

ข. Simple Beam Mount

ค. "S" Configuration Cantilever Mount

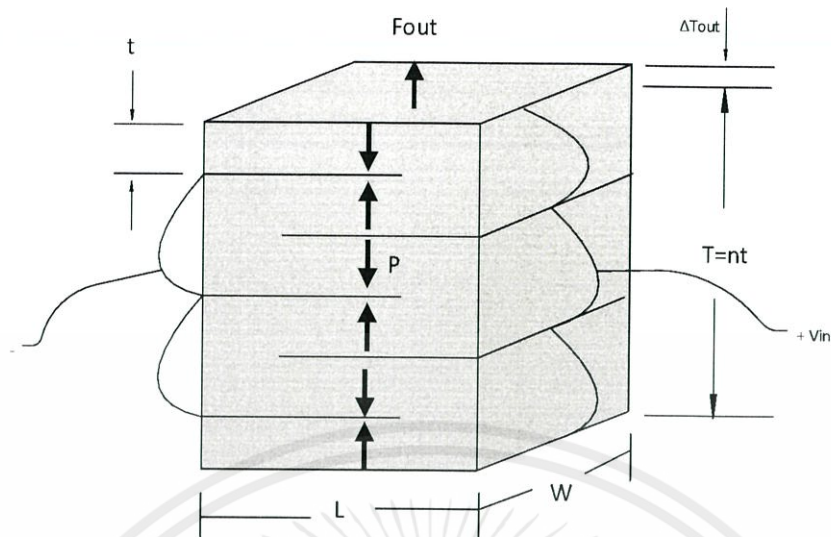
รูปที่ 2.6 Bending Motor ลักษณะต่างๆ

### 3. Multi-Layer

สารเพียโซจำนวนมากเท่าใดก็ได้สามารถนำมาต่อไว้บนอีกอันหนึ่ง การเพิ่มขึ้นของปริมาตรของเพียโซเซรามิกจะทำให้พลังงานเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อแรงกระทำด้วยการที่จำนวนชั้นมากขึ้นก็จะเพิ่มความยากของการเข้าถึงชั้นเหล่านั้นด้วยโดยปกติแล้วจะมีประมาณ 4 ชั้น

Stack Motors เป็นการประกอบและพันชั้นของสารเพียโซจำนวนมากให้อยู่ในโครงสร้างเดียวกัน การเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อยของแต่ละชั้นจะส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของทั้งหมดการเคลื่อนที่นี้จะอยู่ในหลักหน่วยถึงหลักสิบบไมครอนและแรงจะอยู่ในหลัก 100 ถึง 1000 นิวตัน

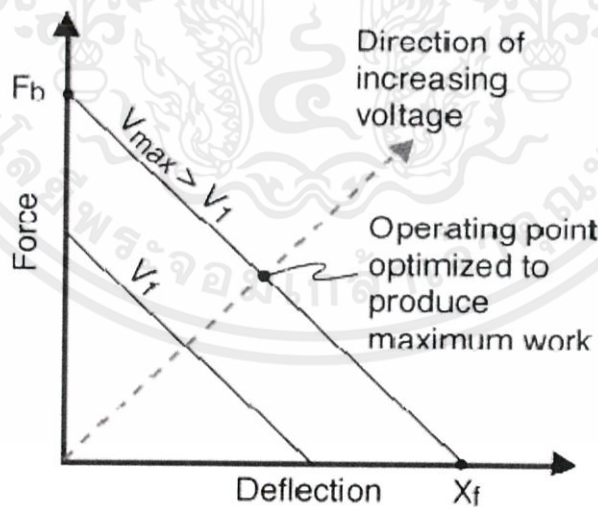
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย



รูปที่ 2.7 Stack Generators

4. Performance

Piezoelectric Actuators โดยทั่วไปแล้วจะถูกระบุถึงการเคลื่อนที่อย่างอิสระและการป้องกันแรงเคลื่อนที่อย่างอิสระ หมายถึงการเคลื่อนที่ที่ได้รับระดับความต่างศักย์มากที่สุดเมื่อ Actuators สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระและไม่ต้องการมีแรงมากระทำป้องกันการเคลื่อนที่ หมายถึงแรงที่ใส่เข้ามาที่ระดับความต่างศักย์มากที่สุดเมื่อ actuators ถูกป้องกันและไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้มุมเห (Deflection) เกิดที่จุดสูงสุดเมื่อแรงเป็นศูนย์และแรงจะอยู่ที่สูงสุดเมื่อมุมเหเป็นศูนย์ค่าอื่น ๆ ของการเคลื่อนที่และแรงจะถูกระบุโดยเส้นที่ลากระหว่างจุดสองจุดนี้ดังรูปที่ 8

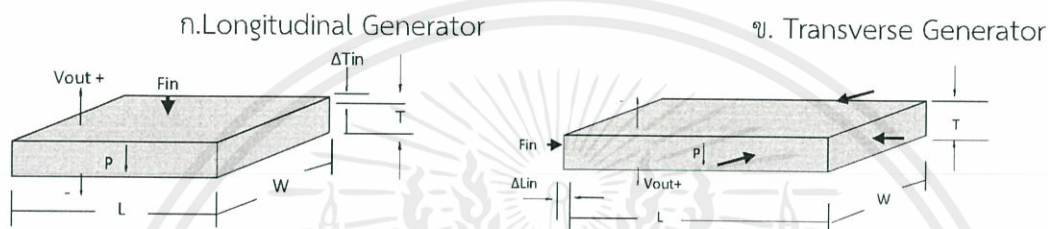


รูปที่ 2.8 Performance

เอกสารนี้เป็น... โดยปกติแล้วเพียโซมอเตอร์จะต้องเคลื่อนที่ในปริมาณและแรงที่ถูกระบุไว้ซึ่งจะบอกจุดทำงานบนแกนแรงและการเคลื่อนที่มุมเหจะถูกพิจารณาถึงจุดที่ว่าจะเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งาน โดยทั่วไปถ้ามันสามารถมีแรงที่ต้องการครึ่งหนึ่งของการเปลี่ยนรูปอย่างอิสระ

### 2.1.3 Single Layer Generator

1. Longitudinal and Transverse Generators :เมื่อความเค้นทางกลเกิดขึ้นบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแผ่นเดียวแนว Longitudinal คือในแนวนานกับแกนโพราไรเซชัน ความต่างศักย์จะเกิดขึ้นซึ่งจะพยายามไปเปลี่ยนความหนาของแผ่นให้อยู่ในรูปเดิมเหมือนกับเมื่อความเค้นทางกลเกิดขึ้นในทิศ Transverse คือตั้งฉากกับแกนโพราไรเซชันความต่างศักย์จะเกิดขึ้นและพยายามเปลี่ยนแผ่นเพียโซเซรามิกให้กลับมาอยู่ในรูปเดิมทั้งในแนวความยาวและความกว้างเมื่อแผ่นถูกเปลี่ยนรูปร่างไม่ว่าจะเป็นการยืดออกหรืออวกก็จะทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า

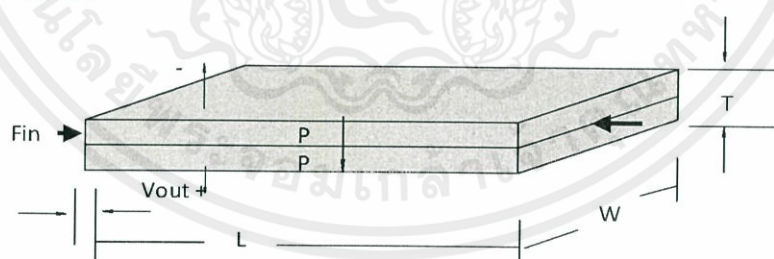


รูปที่ 2.9 Longitudinal and Transverse Generators

### 2. แบบ 2-Layer Generators

เมื่อความเค้นทางกลเกิดขึ้นบนแผ่นสองแผ่นที่ยึดติดกันจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งจะขึ้นอยู่กับทิศแรง ทิศของโพราไรเซชันและการต่อกันของแต่ละชั้น

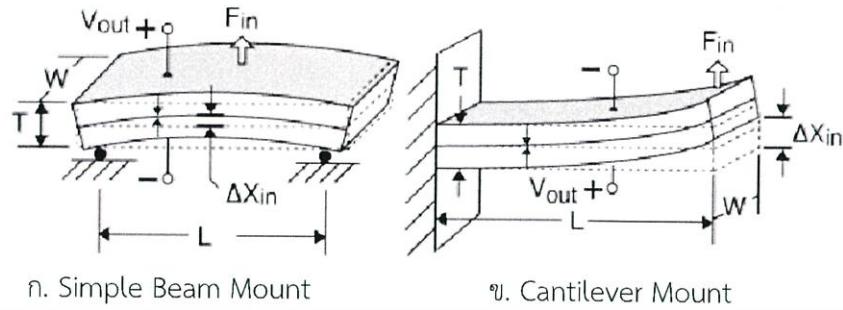
Extension Generators : เมื่อความเค้นทางกลเกิดขึ้นทำให้แผ่นสองแผ่นที่โพราไรซ์แล้วยึดหรือหดตัวความต่างศักย์จะเกิดขึ้นและพยายามทำให้แผ่นกลับมาสู่สถานะเดิมซึ่งเป็นการทำเหมือนกับแผ่นเดียวเหล็กตัวเชื่อมระหว่างแผ่นเพียโซทั้งสองจะรองรับแรงทางกลขณะที่มีการรับแรง



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Extension Generator และ Compressed Lengthwise

Bending Generators :เมื่อแรงทางกลเกิดขึ้นทำให้แผ่นสองแผ่นที่โพราไรซ์แล้วงอตัว ชั้นหนึ่งจะถูกกดขณะที่อีกชั้นจะยืดออกแรงทางกลจะเกิดข้ามแต่ละชั้นเพื่อพยายามลดแรงนั้นเพื่อให้แผ่นกลับมาสู่สภาพเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



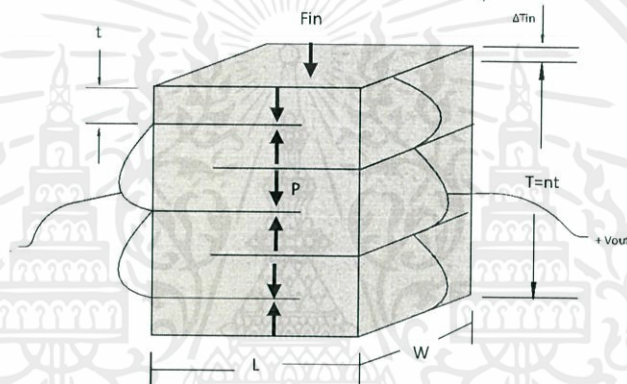
ก. Simple Beam Mount

ข. Cantilever Mount

รูปที่ 2.11 Bending Generator

### 3. Multi-Layer Generators

Stack Generators : สแตคซ์ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นเพียโซหลายชั้นเป็นแผ่นที่มีความจุมากเหมาะสำหรับการรับแรงจำนวนมากและสะสมประจุไฟฟ้าจำนวนมาก



รูปที่ 2.12 Stack Generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.4 การนำไปประยุกต์ใช้งาน

การนำเพียโซไปใช้ในรูปแบบต่างๆ ในสถานที่ต่างๆ

##### 1. เครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนบนเครื่องจักร

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนโดยใช้หลักการเพียโซเพื่อติดตามสภาพเครื่องจักรงานวิจัยชิ้นแรกนี้เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนตามเครื่องจักรในโรงงานโดยการนำอุปกรณ์เพียโซบัสเซอร์แบบรับแรงกระแทกไปติดตั้งที่เครื่องจักร เมื่อเครื่องจักรทำงานจะเกิดแรงสั่นสะเทือนไปยังอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเพียโซบัสเซอร์ และแปลงแรงกระแทกที่ได้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีแรงดัน 100 โวลต์ เก็บสะสมไว้ที่ตัวประจุ โดยพลังงานที่เก็บเกี่ยวมาได้นี้จะถูกนำมาใช้เพื่อให้พลังงานกับอุปกรณ์เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิเครื่องจักร โดยเซ็นเซอร์จะส่งข้อมูลตรวจวัดอุณหภูมิไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อติดตามและตรวจสอบคุณภาพเครื่องจักรและป้องกันการเกิดอุบัติเหตุและความเสียหายจากเครื่องจักรชำรุดได้ และเมื่อมีการพัฒนาอุปกรณ์ชิ้นนี้ให้สามารถเก็บพลังงานได้ในปริมาณมากขึ้น ในอนาคตเครื่องจักรต่างๆ ในโรงงานจะถูกขับเคลื่อนด้วยพลังงานหมุนเวียนที่เครื่องจักรเหล่านี้สร้างขึ้นเองได้ ทำให้การผลิตสินค้าในโรงงานลดต้นทุนจากพลังงานสิ้นเปลืองได้อีกมาก

##### 2. เครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของร่างกาย

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากข้อต่อหัวเข่าและการเคลื่อนไหวของร่างกายรูปแบบการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของร่างกายมนุษย์ หรือการเดินซึ่งจะใช้ส่วนการทำงานของกล้ามเนื้อขาเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ทำจากสเตปเปอร์มอเตอร์ต่อเข้ากับขาส่วนข้อต่อ เมื่อเกิดการในงานวิจัยชิ้นนี้ทำจากสเตปเปอร์มอเตอร์มีส่วนประกอบของแผ่นเพียโซต่อเข้ากับขาส่วนข้อต่อ เมื่อเกิดการเคลื่อนไหวส่วนขาหรือเกิดแรงเหวี่ยงทำให้แกนสเตปเปอร์มอเตอร์มีการเคลื่อนที่และเกิดเป็นพลังงานไฟฟ้าขึ้นมา ซึ่งโดยปกติแล้วมนุษย์เรามีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา ทำให้การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของร่างกายมนุษย์ก็กำเนิดเป็นพลังงานได้ในปริมาณมาก โดยอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนี้สามารถเก็บสะสมพลังงานที่ได้จากการเดิน 1 กิโลเมตรไปใช้ให้พลังงานไฟฟ้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าต่ำได้ หรือประมาณ 7 โวลต์ ซึ่งในอนาคตจะสามารถพัฒนาให้เป็นเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากร่างกายมนุษย์เพื่อใช้ชาร์จแบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือได้ และหากทุกคนติดอุปกรณ์ชิ้นนี้ไว้กับตัวพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการเคลื่อนไหวนี้

##### 3. เครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานจากรถเข็นสินค้า

รถเข็นกำเนิดพลังงาน หรือการเก็บเกี่ยวพลังงานจากรถเข็นข้อบึง การเก็บเกี่ยวพลังงานจากรถเข็นข้อบึงโดยใช้แผ่นเพียโซติดบริเวณล้อเป็นการดำเนินชีวิตของผู้คนในปัจจุบันเป็นอย่างมาก โดยในแต่ละวันมีผู้ใช้บริการห้างสรรพสินค้าและรถเข็นข้อบึงสำหรับใส่สินค้าเป็นจำนวนมาก ซึ่งงานวิจัยอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากรถเข็นข้อบึงนี้จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ ได้ อาทิ จ่ายไฟให้กับแท็บเล็ตแสดงรายการสินค้า หรือเครื่องตรวจสอบราคาสินค้า โดยอาศัยการหมุนของล้อรถเข็นข้อบึงเป็นส่วนกำเนิดพลังงาน ซึ่งใช้หลักการเหนี่ยวนำที่สามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ และเมื่อล้อรถเข็นหมุนด้วยความเร็ว 2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อุปกรณ์กำเนิดพลังงานจะเก็บสะสมพลังงาน และแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถ

ใช้งานได้ และในอนาคตอุปกรณ์ชิ้นสามารถพัฒนาให้เก็บพลังงานได้มากขึ้น และเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่สำคัญของห้างสรรพสินค้าหรือซูเปอร์มาร์เกต ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณมากได้

#### 4. พลังกำเนิดพลังงาน

พนักกำเนิดพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก มีเป้าหมายในการเก็บเกี่ยวพลังงานที่เกิดขึ้นอย่างสุญญเปล่ารอบๆ ตัวเรา และเปลี่ยนพลังงานเหล่านั้นให้เป็นพลังงานที่สามารถใช้งานได้ โดยพนักกำเนิดพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกเป็นการเก็บพลังงานจากการเดินผ่าน หรือการกดทับ และเมื่อมีการเหยียบเป็นจำนวน 15 ครั้ง โดยที่ผู้เหยียบมีน้ำหนัก 52 กิโลกรัม ทำให้ได้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 23 มิลลิจูล ซึ่งหากนำอุปกรณ์ชิ้นนี้ไปติดตั้งในที่สาธารณะที่มีคนพลุกพล่าน อาทิ สถานีรถไฟฟ้าสยาม ซึ่งมีผู้ใช้บริการประมาณ 112,600 คนต่อวัน พนักกำเนิดพลังงานขนาด  $19 \times 33$  เซนติเมตรนี้จะสามารถเก็บพลังงานได้กว่า 26 กิโลจูลต่อวัน และนำพลังงานที่เก็บสะสมได้นี้ไปใช้จ่ายไฟให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำได้ และหากสถานีรถไฟฟ้าหนึ่งๆ ติดตั้งพนักกำเนิดพลังงานนี้ไว้ทั่วสถานี จะยิ่งเพิ่มพลังงานที่ได้มากขึ้นไปอีก ซึ่งจะทำให้พนักกำเนิดพลังงานนี้กลายเป็นแหล่งพลังงานสำคัญที่ไม่มีวันหมดไปได้

#### 5. piezoelectric buzzers

เป็นแผ่นเซรามิกติดกับแผ่นโลหะบาง เมื่อมีสัญญาณไฟฟ้าประยุกต์ แผ่นเซรามิกก็จะสั่นเกิดเสียงขึ้น ใช้ใน alarms, sound producing calculators และ electronic watches

#### 6. มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric accelerometer)

เมื่อ seismic mass (m) ถูกทำให้เกิดอัตราเร่งขึ้น (ถูกกด) มันจะส่งผ่านแรงกดไปกระทำกับ piezoelectric crystal ที่ถูกยึดติดอยู่ด้วยกัน ด้วยคุณสมบัติพิเศษของมันจะทำให้ประจุไฟฟ้าถูกสร้างขึ้น และถูกสายนำสัญญาณออกไปยังเอาต์พุตของวงจร โดยที่ด้านเอาต์พุตจะต้องมีวงจรขยายประจุไฟฟ้า (charge amplifier) เพื่อขยายค่าประจุไฟฟ้าที่ได้ให้เป็นแรงดันเอาต์พุตตามสัดส่วนของอัตราเร่งที่เกิด จะได้สามารถแสดงผลได้ด้วยโวลต์มิเตอร์ มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริกตอบสนองต่อทางด้านความถี่สูงได้ดี แต่ในทางกลับกันก็จะมีผลตอบสนองทางด้านความถี่ต่ำที่ไม่ดีนัก มีขนาดค่อนข้างเล็ก น้ำหนักเบา และสามารถใช้งานที่มีอัตราเร่งได้สูงถึง  $250,000 \text{ m.s}^{-2}$

#### 7. การติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกยังรถรางไฟ

เพื่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าเทคโนโลยีเพียโซอิเล็กทริกนั้น (Piezoelectric) สามารถสร้างพลังงานจากความดัน แรงกดลงบนพื้นผิว หรือการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นไฟฟ้า เราเคยเห็นเทคโนโลยีดังกล่าวจากแผ่นที่รองรับพลังงานจากการย่ำเท้า ซึ่งแต่เดิมติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกยังถนนไฮเวย์ ได้มีแผนขยายการใช้งานเทคโนโลยีไปยังรางรถไฟเพิ่ม โดยเทคโนโลยีนั้นจะเรียกว่า “Piezoelectric IPEG PADS” ที่นอกจากจะให้กำเนิดพลังงานจากรถไฟที่วิ่งผ่าน แผ่นกำเนิดพลังงานตัวใหม่ยังสามารถตรวจสอบขนาดของล้อ ความเร็วและน้ำหนักของพาหนะได้ โดยเทคโนโลยีต้นแบบได้ติดตั้งไปแล้ว และจากโครงการติดตั้งดังกล่าวด้วยรถไฟแบบตู้โดยสาร 10-20 ten-car จะสามารถผลิตพลังงานได้ 120 กิโลวัตต์ เพียงพอต่อระบบโครงสร้างพื้นฐานของการรถไฟ อาทิ หลอดไฟ ป้ายสัญญาณ ในขณะที่พลังงานส่วนเกินนั้นถูกส่งเข้าระบบต่อไป

## 8. เทคนิคลายนิ้วมือเชิงกล

การสร้างตัวรับรู้ลายนิ้วมือโดยใช้เทคนิคเพียโซอิเล็กทริก สามารถทำได้โดยการสร้างอิเล็กโทรด (Electrode) สองด้านประกบวัสดุเซรามิกที่ฝังอยู่ในสารกึ่งตัวนำที่วางเป็นแถวลำดับตามตำแหน่งจุดภาพ โดยมีอิเล็กโทรดด้านบนที่ติดกับแผ่นเคลือบป้องกัน จากภาพ เมื่อมีแรงกดจากนิ้วมือ เส้นสั่นจะกดลงบนอิเล็กโทรดด้านบนซึ่งจะทำให้เกิดผลเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ณ ตำแหน่งที่มีแรงกด ทำให้สามารถแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าอย่างอ่อน ทุกตำแหน่งที่เส้นสั่นกด วงจรรวม (Integrate Circuit) ประกอบตัวรับรู้นี้จะรับรู้สัญญาณไฟฟ้านี้แล้วเปลี่ยนเป็นภาพสองระดับ

## 9. ฟิล์มบางแบบเพียโซอิเล็กทริก

ที่เมื่อมีแรงกดจะเกิดแรงดันไฟฟ้า และพบคลื่นความถี่บางอย่างที่อาจทำหน้าที่เหมือนกับสายอากาศได้ หากงานวิจัยนี้พัฒนาต่อไป อาจเป็นหนทางสู่การผนวกสายอากาศเข้าไปในชิปได้ ซึ่งนอกจากจะทำให้อุปกรณ์พกพามีขนาดเล็กลงแล้ว ยังสามารถประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ขนาดเล็กกว่า เช่น Internet of Things ก็เป็นไปได้



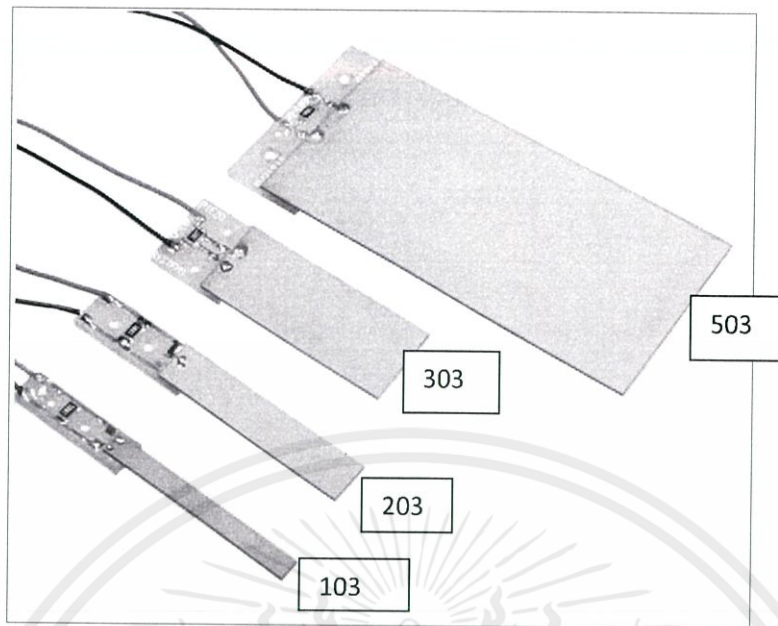
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.5 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้งานจริง [2]

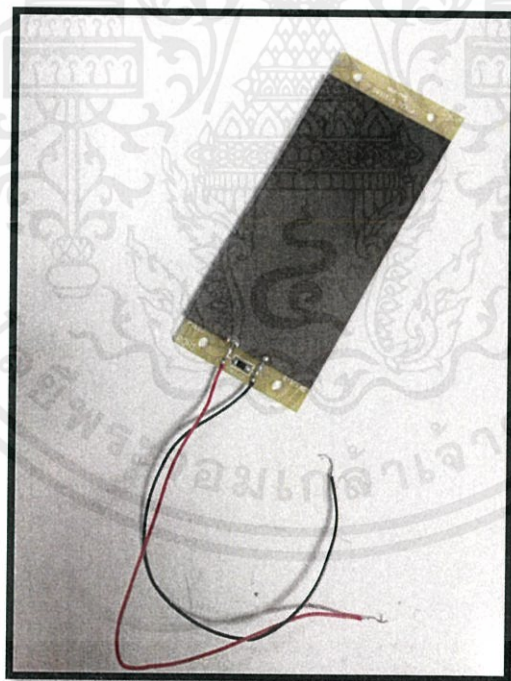
ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้งาน

PART NUMBERS	PIEZO MATERIAL	WEIGHT (grams)	STIFFNESS (N/m)	CAPACITANCE (nF) (Parallel Operation)		RATED TIP DEFLECTION (mmpeak)	RATED FREQUENCY (Hz)	OPEN CIRCUIT VOLTAGE <sup>①</sup> At rated deflection, parallel operation (Vpeak)	CLOSED CIRCUIT CURRENT <sup>①</sup> Per sinusoidal cycle, at rated deflection, parallel operation. ( $\mu$ Apeak/Hz)	RATED OUTPUT POWER <sup>①</sup> At rated deflection and frequency (mWrms)
D220-A4-103YB	5A4E	1.1	$6.1 \times 10^1$	12	$\pm 1.0$	$\pm 100$	$\pm 14.9$	$\pm 2.0$	0.37	
D220-A4-203YB 5A4E	5A4E	1.7	$1.2 \times 10^2$	23	$\pm 1.0$	$\pm 120$	$\pm 14.9$	$\pm 3.9$	0.88	
D220-A4-303YB 5A4E	5A4E	2.7	$3.6 \times 10^2$	46	$\pm 0.84$	$\pm 145$	$\pm 14.9$	$\pm 7.9$	2.1	
D220-A4-503YB 5A4E	5A4E	10.4	$1.9 \times 10^2$	232	$\pm 2.6$	$\pm 47$	$\pm 20.9$	$\pm 52$	6.4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกแต่ละขนาด

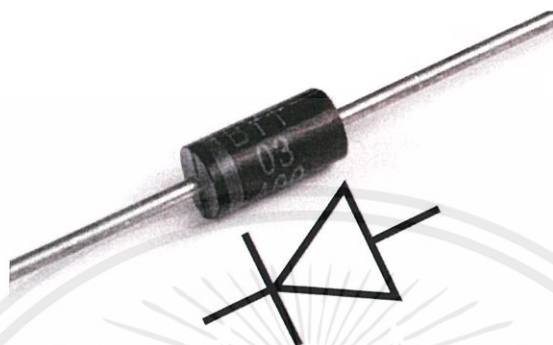


รูปที่ 2.14 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 Rectifier [3]

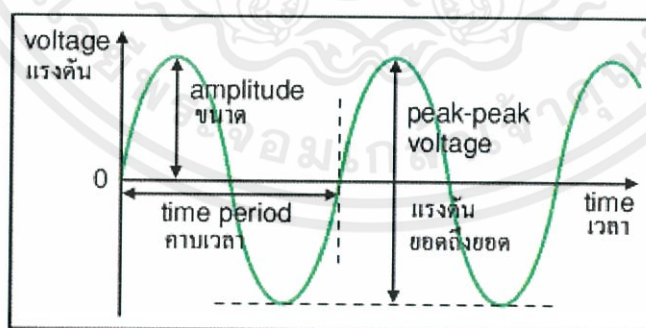
วงจรเรียงกระแสหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเรกติไฟเออร์คือวงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงหรือมีคุณสมบัติยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปทิศทางใดทิศทางหนึ่งอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการแปลงสัญญาณได้แก่ไดโอด



รูปที่ 2.15 ตัวไดโอดและสัญลักษณ์ที่ใช้แทนในวงจร

### 2.2.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifier Circuit)

จากรูปที่ 15 อธิบายการทำงานของวงจรได้ดังนี้เมื่อสัญญาณครึ่งบวกเข้ามาไดโอดจะถูกไบอัสตรงทำให้กระแสไหลในวงจรเกิดแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน L R ตามลักษณะของสัญญาณอินพุตแต่เมื่อมีสัญญาณครึ่งลบเข้ามาไดโอดจะถูกไบอัสกลับจึงทำให้ไม่มีกระแสไหลในวงจรแรงดันที่ตกคร่อม L R จึงมีค่าเป็นศูนย์ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ไหลจึงมีค่าเป็นสัญญาณรูปครึ่งไซเคิลที่เรียกว่าฮาล์ฟเวฟ ( Half wave)



รูปที่ 2.16 รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

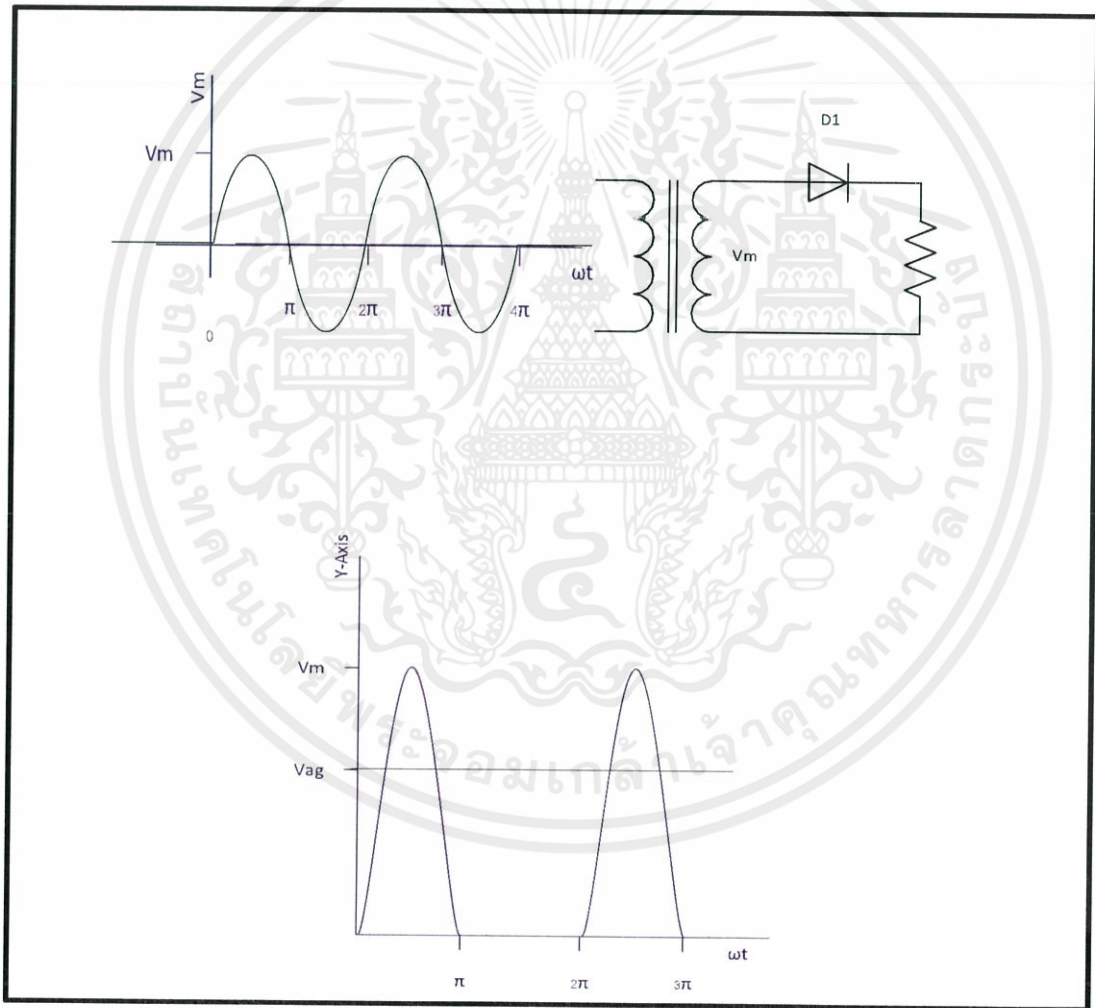
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ย (Average value)

สามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากพื้นที่ใต้กราฟของรูปแล้วหารด้วยเวลาของรูปคลื่นโดยคำนวณพื้นที่ใต้รูปคลื่นของสัญญาณที่เรียงกระแสแล้วจะต้องใช้วิธีการอินทิเกรตสัญญาณซึ่งสมการหาค่าเฉลี่ยแสดงได้ดังนี้

$$V_{dc} = V_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \dots \dots \dots (2.6)$$

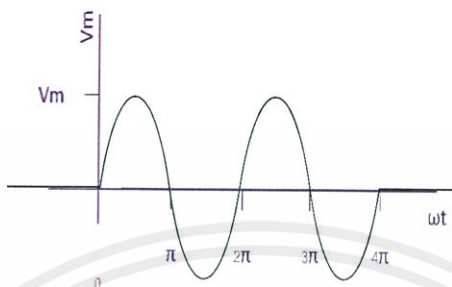
การหาค่าแรงดันเฉลี่ย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 2.17** วงจรพื้นฐานแบบ Half Wave Rectifier  
 ไม่ว่าจะผิดใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าประสิทธิผล (Effective value or Root Mean Square)

นิยามว่าแรงดันไฟสลับที่ก่อให้เกิดผลทางความร้อนเท่ากับค่าแรงดันไฟตรงเช่นถ้าหากป้อนแรงดันไฟสลับรูปไซน์ค่า 14.14 โวลต์คร่อมตัวต้านทานค่า 1 โอห์มจะทำให้เกิดความร้อนเท่ากับเมื่อป้อนแรงดันไฟตรงค่า 10 โวลต์



รูปที่ 2.18 สัญญาณที่จะหาค่าประสิทธิผล

จากรูปที่ 16 จะได้สมการการหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสคือ

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \dots\dots\dots (2.7)$$

การหาค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น  $V_{rms}$  แทนค่าของแรงดัน  $V(t) = V_m \sin(\omega t)$  ในสมการจะได้

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (V_m \sin(\omega t))^2 d(\omega t) + \frac{1}{2\pi} \int_\pi^{2\pi} (V_m \sin(\omega t))^2 d(\omega t)} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \int_0^\pi (V_m \sin^2(\omega t)) d(\omega t)} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \int_0^\pi \frac{1}{2} (1 - \cos(\omega t)) d(\omega t)} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \left[ \frac{1}{2} \int_0^\pi d(\omega t) - \frac{1}{2} \int_0^\pi \cos(\omega t) d(\omega t) \right]} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \left[ \frac{1}{2} (\omega t) \Big|_0^\pi - \frac{1}{4} \int_0^\pi \cos(2\omega t) d(2\omega t) \right]} \dots\dots\dots (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \left[ \frac{1}{2} (\pi) - \frac{1}{4} \sin(2\pi) - \frac{1}{2} (0) + \frac{1}{4} \sin(0) \right]} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \left(\frac{\pi}{2}\right)} \dots \dots \dots (2.14)$$

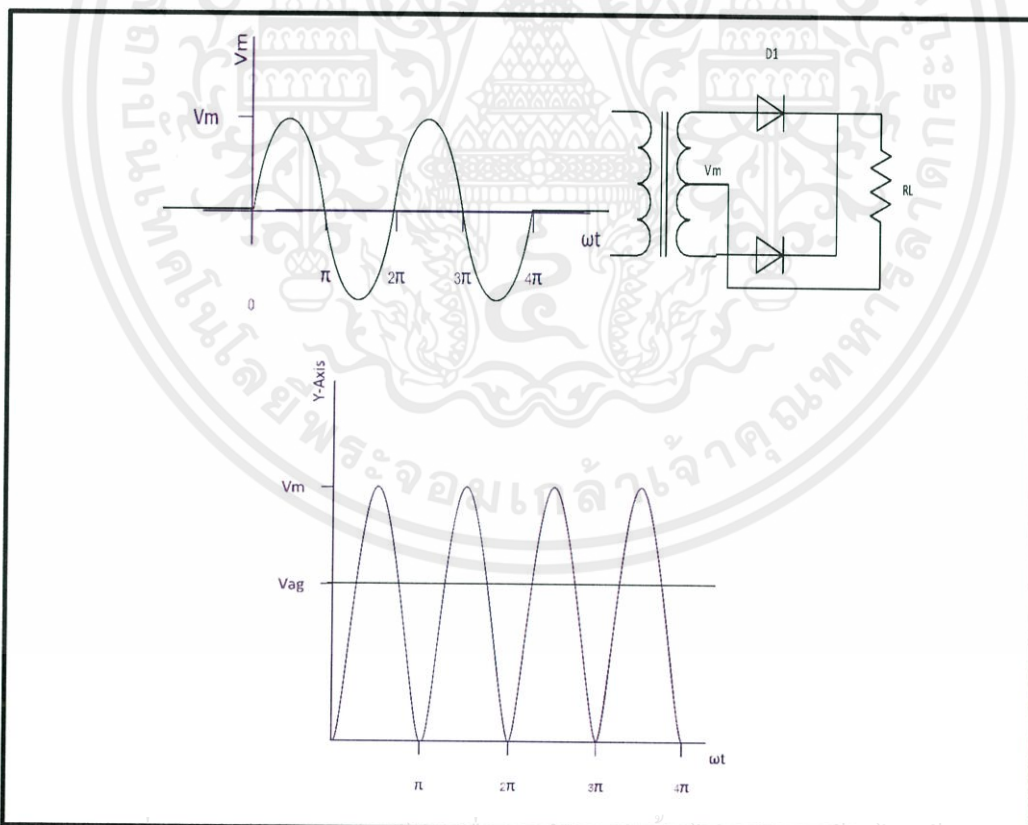
$$V_{rms} = \frac{V_m}{2} = 0.5V_m \dots \dots \dots (2.15)$$

ค่ากระแสอาร์เอ็มเอส( $I_{rms}$ ) การหาค่ากระแสอาร์เอ็มเอสจะหาเหมือนกับค่า $V_{rms}$ จะ  
ได้

$$I_{rms} = \frac{I_m}{2} = 0.5I_m \dots \dots \dots (2.16)$$

### 2.2.2 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier Circuit)

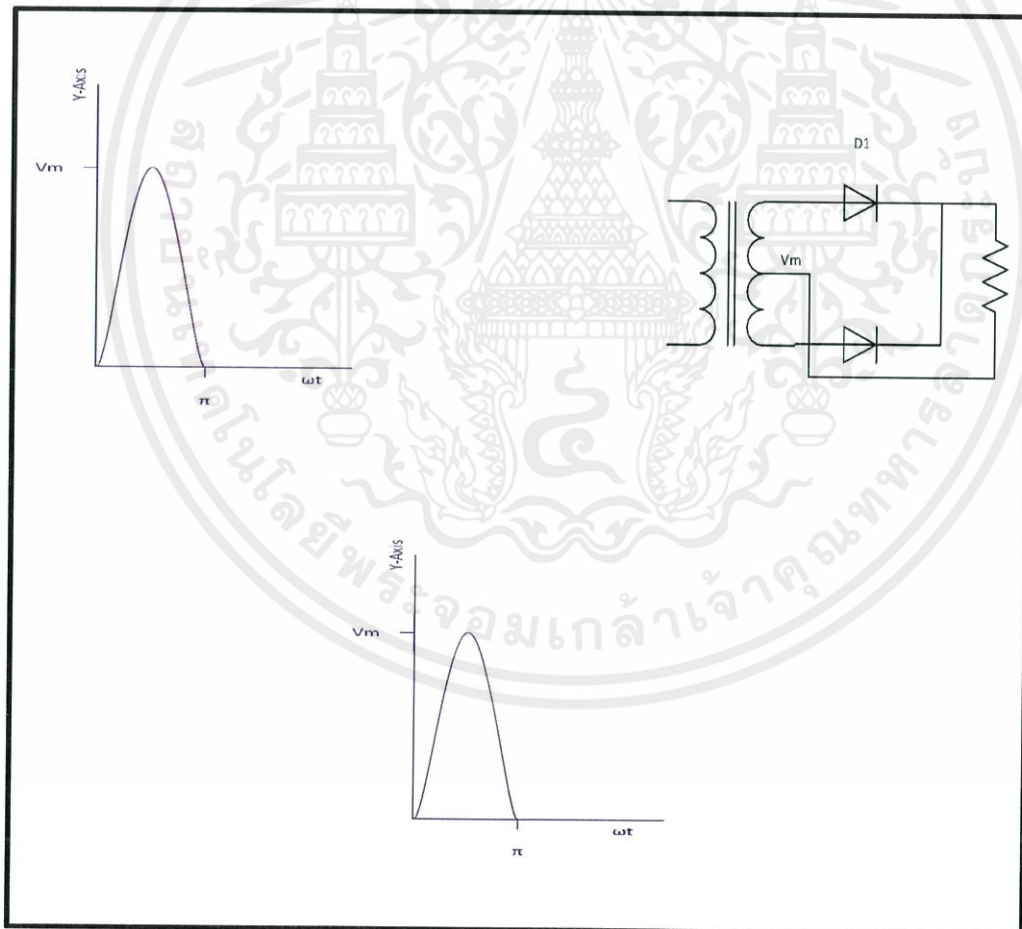
จากข้อเสียของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นสามารถแก้ไขปัญาโดยการใช่วงจรที่  
เรียกว่าวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นวงจรเรียงกระแสแบบนี้จะใช้ไดโอดอย่างน้อย 2 ตัวต่ออยู่  
ในวงจรเพื่อที่จะทำให้ไดโอดสามารถนำกระแสในแต่ละครึ่งไซเคิลของกระแสสลับไดโอดทั้ง  
สองจึงทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกระแสให้กับความต้านโหลดตัวละครึ่งไซเคิลแต่ต้องจ่ายให้  
ทิศทางเดียวกันดังนั้นวงจรจึงสามารถจ่ายไฟกระแสตรงได้ตรงกว่าแบบครึ่งคลื่น



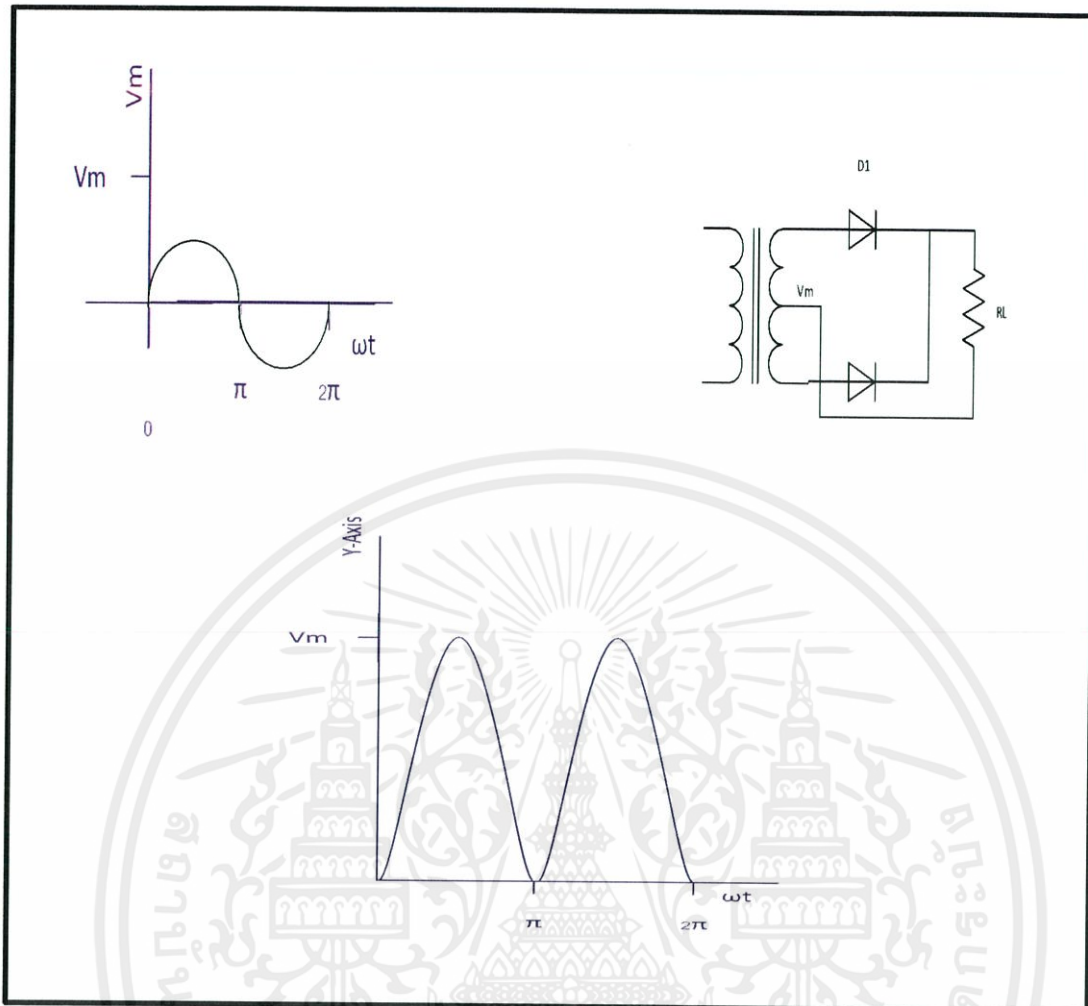
เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่ในด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนลิขสิทธิ์ในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
รูปที่ 2.19 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบเซ็นเตอร์แทป

### 1. วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบเซ็นเตอร์แทป (Center Tap Rectifier Circuit)

เมื่อมีแรงดันสลับป้อนเข้ามาทางขดปฐมภูมิของหม้อแปลงจะเกิดแรงดันขึ้นทางขดทุติยภูมิคือขั้ว A และ B เนื่องจากจุด C เป็นจุดกึ่งกลางของขดทุติยภูมิดังนั้นแรงดันไฟครึ่งหนึ่งจึงเกิดขึ้นที่ขั้ว AC และอีกครึ่งหนึ่งจะปรากฏที่ขั้ว CB และแรงดันระหว่างขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิจะมีเฟสตรงข้ามกันคือ 180 องศาเมื่อแรงดันไฟในครึ่งไซเคิลแรกคือครึ่งไฟบวกเข้ามาที่อินพุตทางด้านขดปฐมภูมิก็คือค่าไฟที่จุด B จะมีค่าบวกเมื่อเทียบกับ A หรือ C และศักย์ไฟฟ้าที่จุด C จะมีค่าบวกเมื่อเทียบกับจุด A ดังนั้นไดโอด D1 จะไม่นำกระแสไฟฟ้า ส่วนไดโอด D2 จะนำกระแสได้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้นในวงจรตามรูปที่ 20 ก. เมื่อแรงดันไฟในครึ่งไซเคิลต่อมาคือครึ่งไฟลบเข้ามาที่อินพุตทางด้านขดปฐมภูมิก็คือค่าไฟที่จุด A จะมีค่าบวกเมื่อเทียบกับ B หรือ C และศักย์ไฟฟ้าที่จุด C จะมีค่าบวกเมื่อเทียบกับจุด B ดังนั้นไดโอด D2 จะไม่นำกระแสไฟฟ้า ส่วนไดโอด D1 จะนำกระแสได้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้นในวงจรตามรูปที่ 20 ข. ค่าแรงดันเอาต์พุตจะได้อีกครึ่งไซเคิลกระแสผ่านตัวต้านทาน RL จะไหลไปในทิศทางเดียวกับตอนแรก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.20 (ก) การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบเซ็นเตอร์แทปเมื่ออินพุตเป็นซีกบวก  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

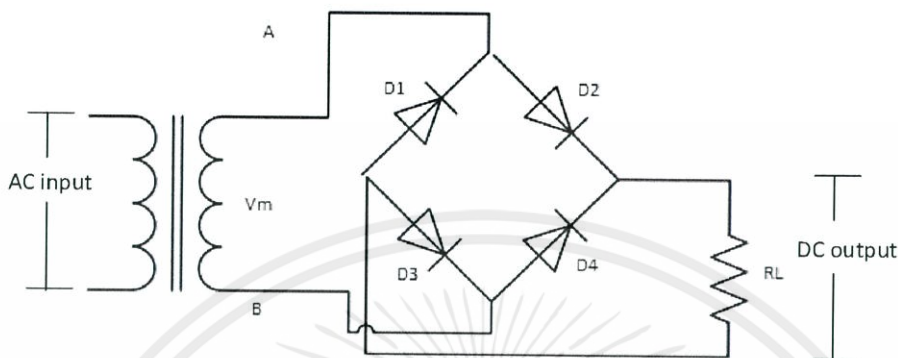


รูปที่ 2.20 (ข) การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบเซนเตอร์แทปเมื่ออินพุตเป็นซีกลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ ( Bridge Rectifier Circuit )

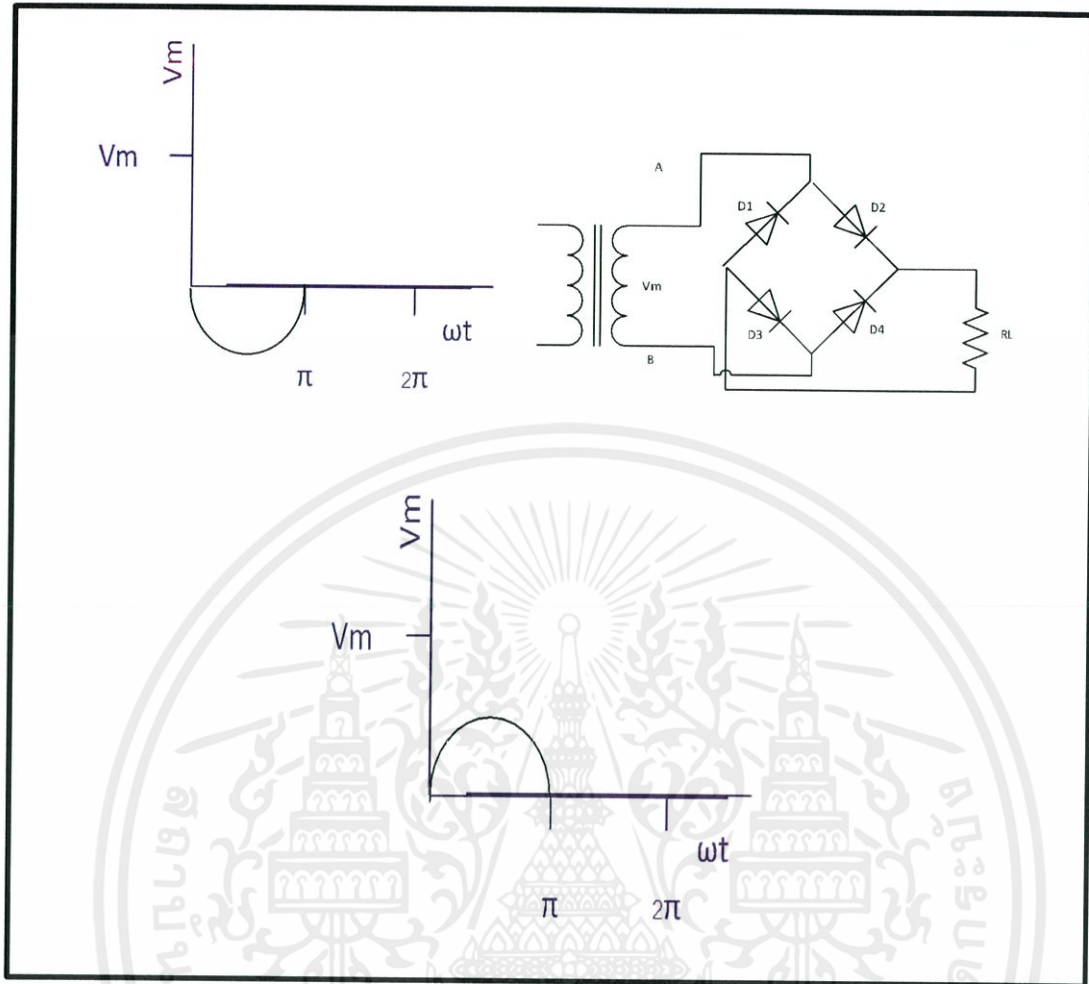
วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ( Full Wave ) อีกแบบหนึ่งคือวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์แรงดันไฟสลับจะต่อเข้ากับสองมุมของวงจรบริดจ์และเอาต์พุตจะถูกนำออกที่สองมุมที่เหลือดังในรูปที่ 21



รูปที่ 2.21 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

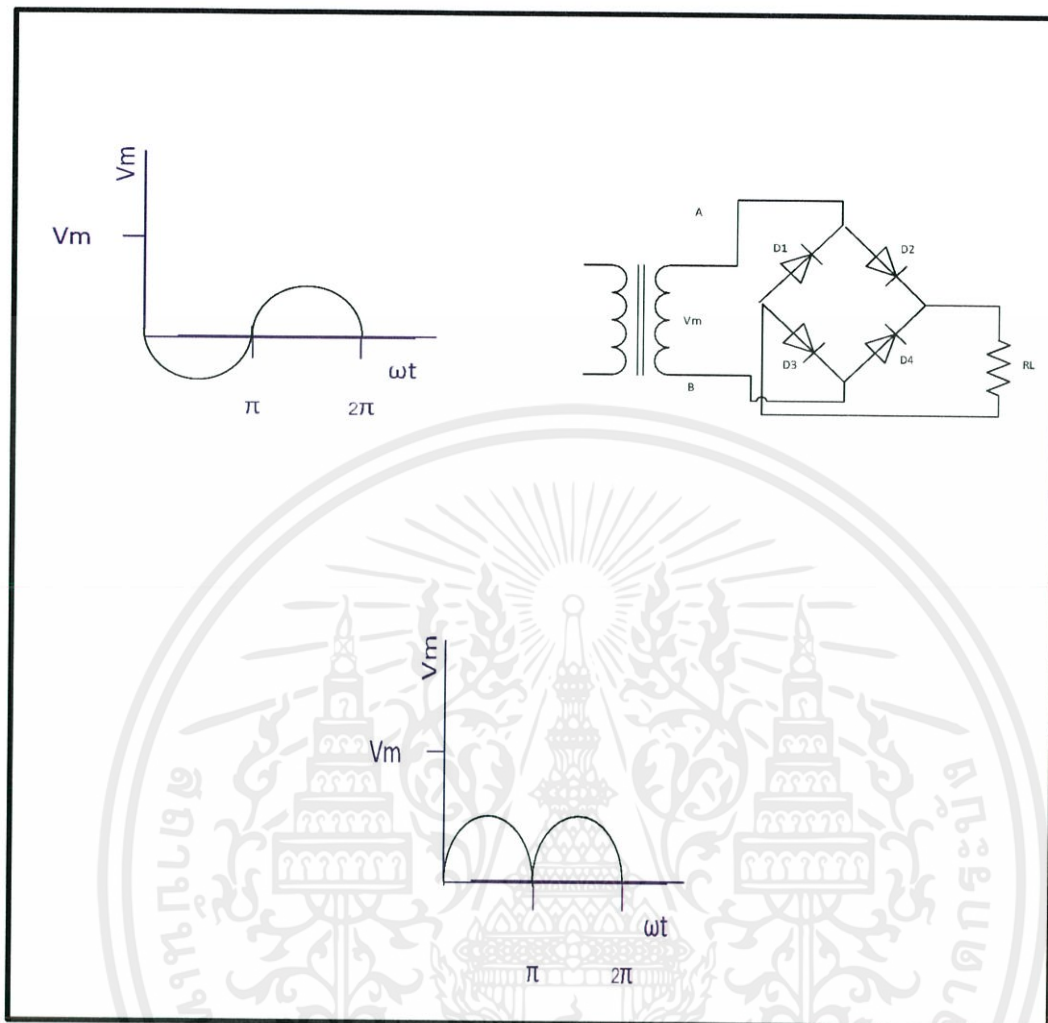
ในแต่ละครึ่งไซเคิลของวงจรอินพุตสมมุติว่าเมื่อขั้ว A ของขดทุติยภูมิมีค่าเป็นบวกและขั้ว B มีค่าเป็นลบจึงเหมือนกับครึ่งไซเคิลลบถูกป้อนเข้าทางขดปฐมภูมิของหม้อแปลง ไดโอด D2 และ D3 จะอยู่ในลักษณะไบอัสตรงดังนั้นกระแสจึงไหลครบวงจรจากขั้ว A ผ่านไดโอด D2 ความต้านทานโหลดและไดโอด D3 แล้วกลับเข้าสู่ขั้ว B ของหม้อแปลงดังรูปที่ 22 ก. และเมื่อแรงดันไฟสลับเปลี่ยนข้างมาเป็นขั้วบวกที่ขั้ว B และเป็นลบที่ขั้ว A การนำกระแสของไดโอดจะเปลี่ยนไปโดยเริ่มจากจุด B ของขดทุติยภูมิผ่าน D4 ความต้านทานโหลดและ D1 กลับเข้าขั้ว A ของหม้อแปลงทิศทางแรงดันตกคร่อมโหลดจะมีทิศทางเดียวกับตอนแรกคือมีขั้วบวกอยู่ทางด้านบนดังรูปที่ 22 ข. ดังนั้นการนำกระแสไดโอดจะเกิดสลับกันทีละสองตัว D2 กับ D3 และ D1 กับ D4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 (ก) การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เมื่ออินพุตเป็นซิกลอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 (ข) การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เมื่ออินพุตเป็นซีกบวก ค่าพารามิเตอร์ในวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

ในวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นจะได้สัญญาณเอาต์พุตเพียงครึ่งไซเคิลแต่ในวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นจะได้สัญญาณเอาต์พุตทุกรูปคลื่นของสัญญาณอินพุตดังนั้นค่าแรงดันหรือค่ากระแสย่อมได้มากกว่าแบบครึ่งคลื่นซึ่งการคำนวณหาค่าโดยใช้สมการเดียวกันแต่จะให้ผลลัพธ์ดังนี้

$$I_{dc} = \frac{2I_m}{\pi} = 0.636I_m \dots \dots \dots (2.17)$$

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = 0.636V_m \dots \dots \dots (2.18)$$

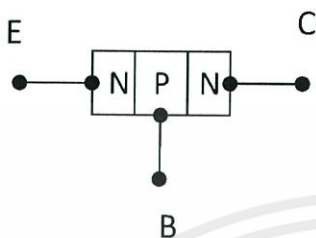
$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \dots \dots \dots (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \dots \dots \dots (2.20)$  ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

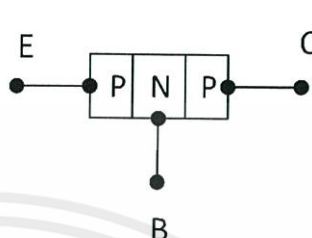
## 2.3. วงจรขยายกระแสตัวรีดิงตัน [4]

### 2.3.1 ทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์สร้างมาจากวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำชนิด P และชนิด N มารวมกันโดยทำให้เกิดรอยต่อระหว่างเนื้อสารนี้สองรอยต่อ โดยสามารถจัดทรานซิสเตอร์ได้ 2 ชนิด คือ

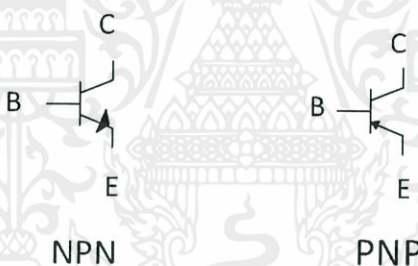


รูปที่ 2.23 ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN



รูปที่ 2.24 ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

รอยต่อจากเนื้อสารทั้ง 3 นี้ มีจุดต่อเป็นขาทรานซิสเตอร์ เพื่อใช้เชื่อมโยงหรือบัดกรีกับอุปกรณ์อื่นดังนั้นทรานซิสเตอร์จึงมี 3 ขา มีชื่อเรียกว่า คอลเลคเตอร์ (สัญลักษณ์ C) อิมิตเตอร์ (สัญลักษณ์ E) และ เบส (สัญลักษณ์ B) รูปร่างโครงสร้างและสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ดังรูป

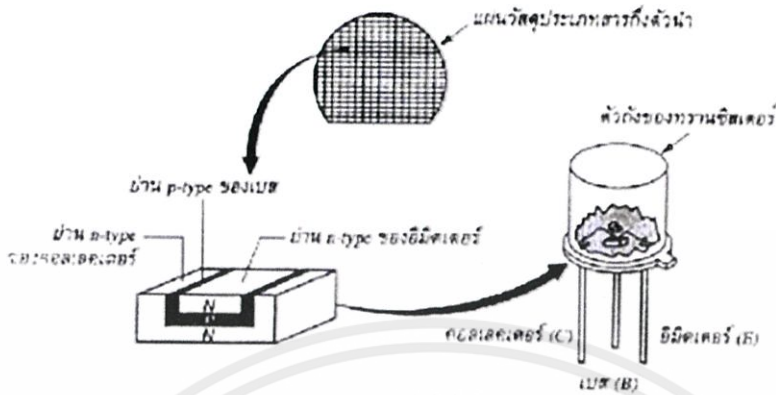


รูปที่ 2.25 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์

### 2.3.2 การสร้างทรานซิสเตอร์

การสร้างทรานซิสเตอร์ทั้งชนิด NPN และ PNP จะทำการเชื่อมส่วนที่ได้รับการโด๊ปที่แตกต่างกันทั้ง 3 ส่วน ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การแพร่กระจาย ตัวอย่าง เช่น การสร้างทรานซิสเตอร์ประเภท NPN การบวนการสร้างจะเริ่มจากการแพร่กระจายส่วนที่เป็น p-type ของเบสเข้ากับส่วนที่เป็น n-type ของคอลเลคเตอร์ หลังจากส่วนของเบสที่เป็น p-type เริ่มเข้ารูปก็จะทำการแพร่กระจายส่วนที่เป็น n-type ของอิมิตเตอร์ให้เข้ากับส่วนที่เป็น p-type ของเบส ก็จะได้ทรานซิสเตอร์ NPN ที่เสร็จสมบูรณ์

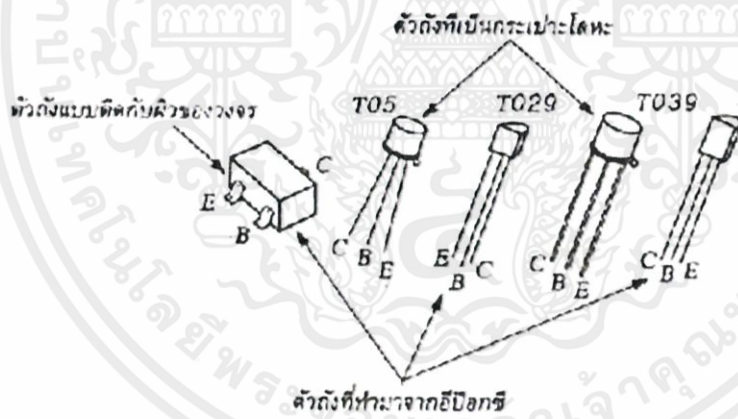
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 การสร้างทรานซิสเตอร์

2.3.3 รูปลักษณะของทรานซิสเตอร์

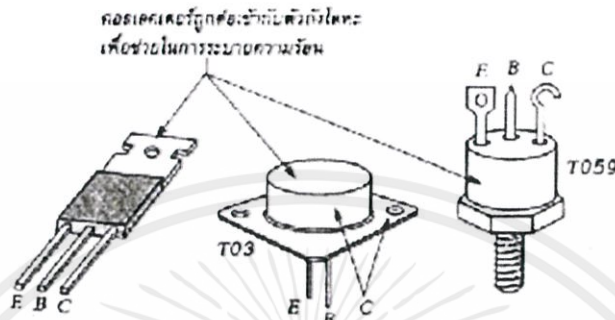
ทรานซิสเตอร์แบบ Low Power จะบรรจุอยู่ในตัวถังที่เป็นโลหะพลาสติกหรืออีพ็อกซี รูปลักษณะของทรานซิสเตอร์ประเภท Low Power ทั้ง 4 ชนิด แสดงดังรูป



รูปที่ 2.27 ลักษณะของทรานซิสเตอร์

โดยจะมีลวดตัวนำยื่นออกมาจากส่วนล่างของตัวถัง เหตุผลที่ถูกออกแบบในลักษณะนี้ เนื่องจาก เมื่อใช้ทรานซิสเตอร์ประเภทนี้ในวงจรจะต้องเสียบขาทรานซิสเตอร์ในช่องเสียบบนแผ่นวงจรก่อนที่จะทำการบัดกรีทรานซิสเตอร์แบบ High Power ดังแสดงในรูป ทรานซิสเตอร์ประเภทนี้ถูกออกแบบเพื่อให้สามารถติดตั้งโครงสร้างที่เป็นโลหะ ทั้งนี้เพื่อให้โลหะที่ทรานซิสเตอร์ติดตั้งอยู่ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับทรานซิสเตอร์ประเภทนี้ สำหรับลวดตัวนำที่ต่อยื่นออกมาจะนำไปใช้

เป็นขาต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์ ถ้าในกรณีที่มี 2 ขา โดยขาที่ยื่นออกมาจะหมายถึง ขาเบส และขาอิมิตเตอร์ ส่วนตัวถังจะทำหน้าที่เป็นขาคอลเลคเตอร์



รูปที่ 2.28 คอลเลคเตอร์ถูกต่อเข้ากับโลหะที่ทรานซิสเตอร์ติดตั้งอยู่ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับทรานซิสเตอร์

### 2.3.4 การทำงานของทรานซิสเตอร์

รูปแสดงทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และชนิด PNP จากภาพขยายจะเห็นว่าทรานซิสเตอร์นั้นจะประกอบด้วยไดโอดจำนวน 2 ตัว ได้แก่ เบส - คอลเลคเตอร์ไดโอด และเบส-อิมิตเตอร์ไดโอด โดยเมื่อเป็นทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ไดโอดทั้งสองจะต่อกันแบบหลังชนหลัง แต่ถ้าเป็นทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ไดโอดทั้งสองจะชี้เข้าไปยังขาเบส



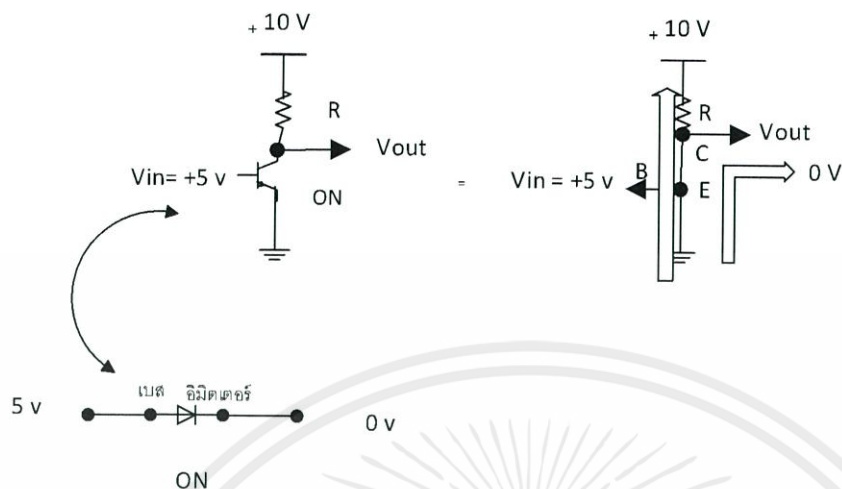
รูปที่ 2.30 ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP

### 2.3.5 ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเป็นสวิตช์

การนำทรานซิสเตอร์ไปใช้งานเป็นสวิตช์การเปิดปิดวงจรของทรานซิสเตอร์จะถูกควบคุมโดยเบส-อิมิตเตอร์ไดโอด (B-E) นั่นคือ เมื่อ เบส-อิมิตเตอร์ไดโอด ได้รับไบอัสตรงทรานซิสเตอร์จะอยู่ในสถานะ ON แต่ถ้าเบส-อิมิตเตอร์ไดโอดได้รับไบอัสกลับทรานซิสเตอร์ก็จะอยู่ในสถานะ OFF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

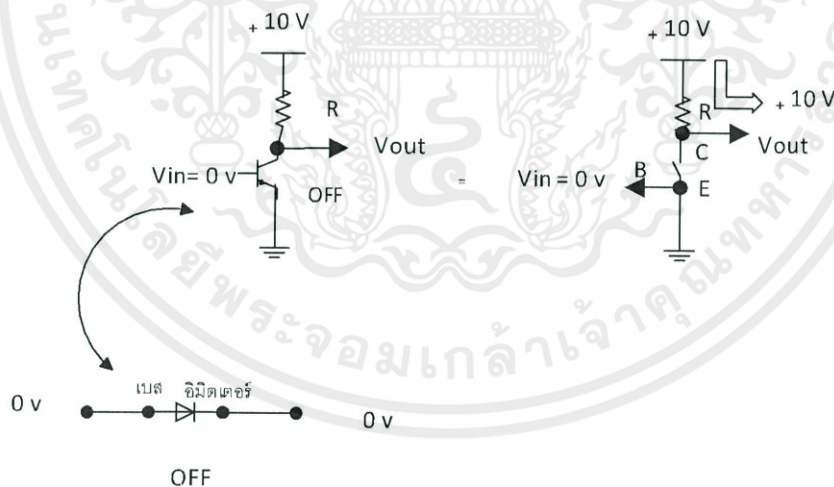
### สภาวะ ON ของทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2.30 สภาวะ ON ของทรานซิสเตอร์

โดยการป้อนกระแสเบส ( $I_B$ ) ให้กับเบสของทรานซิสเตอร์ เพื่อให้รอยต่อระหว่างคอลเลคเตอร์กับ อิมิตเตอร์นำกระแสได้ และต้องจ่ายกระแสให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสจนอิมิต์ จะเกิดกระแสไหลผ่านรอยต่อคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์ เปรียบได้ว่าสวิตช์ระหว่างจุด C และ E ทำงานได้

### สภาวะ OFF ของทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2.31 สภาวะ OFF ของทรานซิสเตอร์

ดังรูปเมื่อหยุดปล่อยกระแสเบสให้กับเบสของทรานซิสเตอร์จะไม่สามารถทำงานเป็นสวิตช์ได้

กระแสคอลเลคเตอร์จะไม่ไหลผ่านรอยต่อไปสู่อิมิตเตอร์ ( $I_C = 0$ ) ขณะนี้ทรานซิสเตอร์จะอยู่ในสภาวะคัตออฟ เปรียบได้ว่าสวิตช์ระหว่างจุด C และ E เปิดสวิตช์ระหว่างจุด C และ E เปิดสวิตช์ทำงานไม่ได้

2.3.6 ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเป็นตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้

การใช้งานทรานซิสเตอร์นอกจากจะใช้เป็นสวิตช์เปิดปิดวงจรแล้วความสามารถด้านอื่นของทรานซิสเตอร์ คือ ใช้เป็นตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ โดยมีวงจรสมมูลดังรูป



รูปที่ 2.32 ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานเป็นตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้

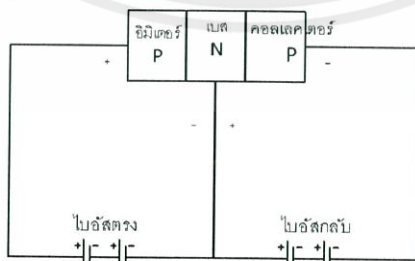
ที่ผ่านมามาดูจะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้า +5 V ที่เบสอินพุตทำให้เกิดค่าความต้านทานต่ำระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ (ปิดสวิตช์) และเมื่อให้แรงดันไฟฟ้า 0 V จ่ายเข้าที่เบสอินพุต กลับทำให้เกิดค่าความต้านทานสูงระหว่างอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ (เปิดสวิตช์)

2.3.7 การจ่ายไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์

จากที่ทราบแล้วว่าไดโอดชนิดรอยต่อ P-N เมื่อได้รับไบอัสตรงจะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้แต่ถ้าได้รับการไบอัสกลับไดโอดจะแสดงคุณสมบัติด้านการไหลของกระแสไฟฟ้า สำหรับทรานซิสเตอร์ก็เช่นเดียวกัน จะต้องได้รับการไบอัสที่เหมาะสมจึงจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ถูกต้อง



รูปที่ 2.33 การจ่ายไบอัสทรานซิสเตอร์ NPN



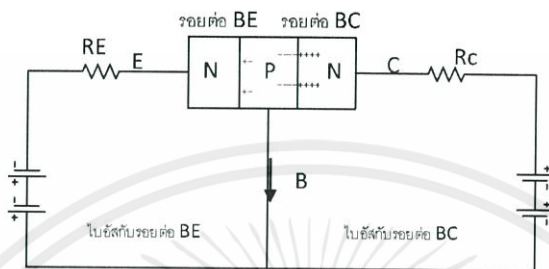
รูปที่ 2.34 การจ่ายไบอัสทรานซิสเตอร์ PNP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าขาเบสและอิมิตเตอร์ได้รับการไบอัสตรง ขณะที่ขาเบสและคอลเลคเตอร์ได้รับการไบอัสกลับ เพราะว่าขาเบสกับขาอิมิตเตอร์เป็นวงจรอินพุต และขาเบสกับคอลเลคเตอร์เป็นวงจรเอาต์พุต

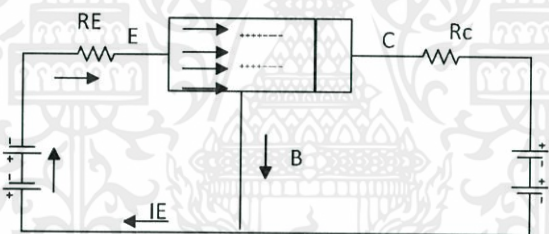
การจัดไบอัสให้แก่ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

พิจารณาการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ตามรูป



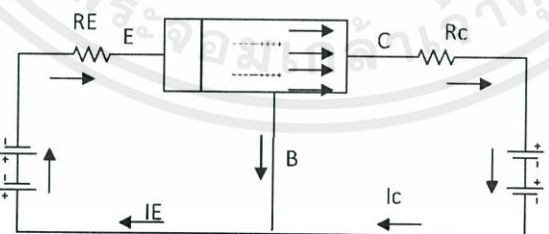
รูปที่ 2.35 การทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

เมื่อให้ไบอัสตรงกับรอยต่อ BE จะทำให้บริเวณหลอดพาหะที่รอยต่อ BE แคบลงและที่รอยต่อระหว่าง BC ได้ไบอัสกลับจะทำให้บริเวณหลอดพาหะที่รอยต่อ BC มีความกว้างมากขึ้น



รูปที่ 2.36 บริเวณหลอดพาหะที่รอยต่อ

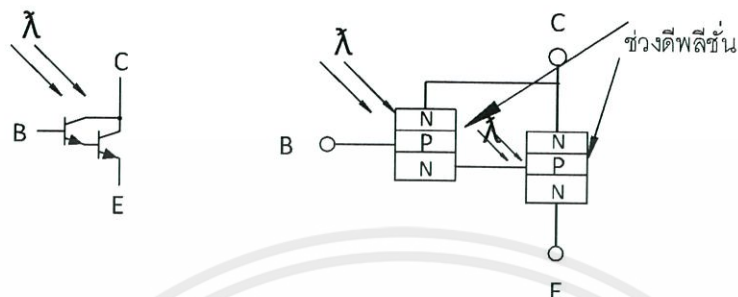
จึงเกิดกระแสจำนวนเล็กน้อยไหลข้ามรอยต่อ BE จึงเรียกกระแสนี้ว่า กระแสเบส ( $I_B$ ) เป็นผลให้มีอิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งเคลื่อนที่ในรอยต่อ BE



รูปที่ 2.37 อิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งเคลื่อนที่ในรอยต่อ BE

ในขณะเดียวกันที่คอลเลคเตอร์บริเวณรอยต่อ BC จะมีประจุพาหะบวกอยู่จำนวนมากจะพยายามดึงอิเล็กตรอนที่เบสข้ามรอยต่อ BC ทำให้เกิดกระแสคอลเลคเตอร์ ( $I_C$ ) ไหลเป็นจำนวนมาก ไม่ว่าและไหลออกจากคอลเลคเตอร์มารวมกับกระแสเบส ( $I_B$ ) กระแสทั้งสองจำนวนนี้จะไหลไปสู่ขาอิมิตเตอร์เป็นกระแสอิมิตเตอร์ ( $I_E$ ) เป็นไปตามสมการ

2.3.8 วงจรตาริ่งตัน(คู่ตาริ่งตัน)



รูปที่ 2.38 วงจรคู่ตาริ่งตัน

ทรานซิสเตอร์สองตัวต่อกันทำให้กระแสที่ขยายด้วยตัวแรกถูกขยายต่อด้วยทรานซิสเตอร์ตัวที่สอง เหนือการขยายกระแสรวมจะเท่ากับเกณฑ์ของแต่ละตัวคูณกัน เหนือกระแสของคู่ตาริ่งตัน  $hFE = hFE1 \times hFE2$  ( $hFE1$  และ  $hFE2$  คือเกณฑ์ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวด้วยเหตุนี้ทำให้คู่ตาริ่งตันมีเกณฑ์กระแสสูงมาก เช่น 10000) ดังนั้นจึงต้องการกระแสเบสเพียงเล็กน้อยก็ทำให้คู่ตาริ่งตันสวิทช์ต่อได้ คู่ตาริ่งตันแทนทรานซิสเตอร์ตัวเดียวที่มีเกณฑ์กระแสสูงมาก มีสามขาเช่นกัน (B, C และ E) ซึ่งเทียบเท่ากับขาของทรานซิสเตอร์ตัวเดียว ถ้าจะให้ คู่ตาริ่งตันทำงานต้องมีแรงดัน 0.7V ระหว่างรอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ของทั้งคู่ซึ่งต่ออนุกรมกันภายใน ดังนั้นจึงต้องใช้ 1.4V เพื่อให้เปิด(on)คู่ตาริ่งตันสามารถหาได้เป็นแพคเกจสำเร็จรูป แต่ก็สามารถทำเองได้เองจากทรานซิสเตอร์สองตัว TR1 เป็นชนิดกำลังต่ำ ส่วน TR2 ปกติต้องการกำลังสูง กระแสคอลเล็คเตอร์สูงสุด  $IC(max)$  ของคู่ตาริ่งตันจะเท่ากับ  $IC(max)$  ของ TR2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน [5]

### 2.4.1 ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitor)

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

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ และลิเธียมไอออน(ทั่วไป)

	ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์	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
อุณหภูมิในการชาร์ต	-40-65 องศาเซลเซียส	0-45 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิในการคายประจุ	-40-65 องศาเซลเซียส	-20-60 องศาเซลเซียส

### 2.4.2 แบตเตอรี่

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

1. แบตเตอรี่ปฐมภูมิ เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถใช้ได้เพียงครั้งเดียว เมื่อใช้งานหมดแล้วไม่สามารถนำกลับมาอัดประจุไฟฟ้าได้ใหม่ เนื่องจากสารเคมีภายในแบตเตอรี่ปฐมภูมินั้นมีการเปลี่ยนแปลง แล้วไม่สามารถกลับไปอยู่ในสภาพเดิมได้ แบตเตอรี่ประเภทนี้เหมาะกับอุปกรณ์ขนาดเล็กที่พกพาสะดวก และใช้ไฟน้อย

2. แบตเตอรี่ทุติยภูมิ เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถอัดประจุได้ใหม่ เมื่อใช้งานหมดเนื่องจากสารเคมีภายในแบตเตอรี่ประเภทนี้สามารถทำให้กลับไปอยู่ในรูปเดิมได้ โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ชาร์ตเจอร์ เป็นตัวอัดประจุ

- แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-acid battery)

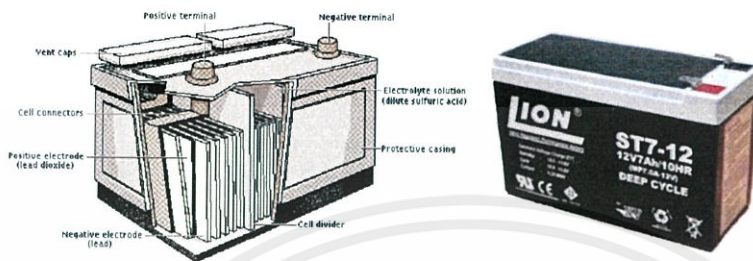
แบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นอุปกรณ์จัดเก็บไฟฟ้าที่ใช้ปฏิกิริยาทางเคมีที่ผันกลับได้ แบตเตอรี่ตะกั่วกรดประกอบด้วยแผ่นขั้วบวก และแผ่นขั้วลววางสลับกันจมอยู่ในอิเล็กโทรไลต์ที่ทำจากสารละลายกรดซัลฟิวริก โดยแผ่นเพลทจะวางสลับกัน เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้

ตะกั่วบริสุทธิ์ ในขณะที่ขั้วบวกจะสร้างจากส่วนผสมของตะกั่วและตะกั่วเปอร์ออกไซด์

ข้อดี ราคาถูก ผลิตง่ายคายประจุด้วยตัวเองน้อยความเชื่อถือสูง

ข้อเสีย ความจุของพลังงานต่อน้ำหนักต่ำทำให้มีน้ำหนักมากเป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.39 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

- แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม (Nickel Cadmium Battery: NiCd)

แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม มีส่วนประกอบสำคัญคือนิกเกิลไฮดรอกไซด์ (Ni(OH)<sub>2</sub>) ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วบวก และแคดเมียมซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วลบ อิเล็กโทรดจมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ คือสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ข้อดี สามารถจ่ายกระแสได้มาก , มีค่าความต่างศักย์ค่อนข้างคงที่ และทนทานต่อการใช้งานหนักได้

ข้อเสีย ต้นทุนและวัสดุมีราคาแพง เป็นอันตรายต่อการสูดดม



รูปที่ 2.40 แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม

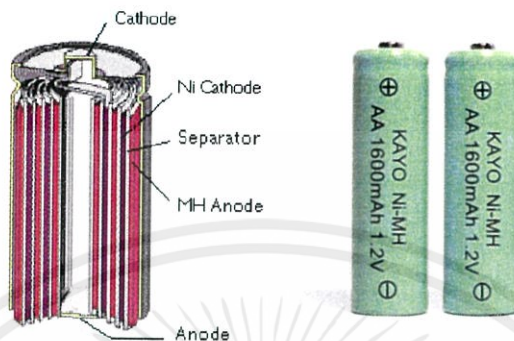
- แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์(Nickel Metal hydride : NiMH)

แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองได้แก่ นิกเกิลและเมทัลไฮไดรด์ เป็นการพัฒนาจากนิกเกิล-แคดเมียม เนื่องจากแคดเมียมอันตรายต่อการสูดดม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดี คือ สามารถจ่ายกระแสได้มาก , มีค่าความต่างศักย์ค่อนข้างคงที่ และทนทานต่อการใช้งานหนักได้

ข้อเสีย คือ อัตราการคายประจุเองและราคาแพง



รูปที่ 2.41 แบตเตอรี่ชนิดนิเกิล-เมทัลไฮไดรด์

- แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Advanced Li-Ion battery)

ลิเทียมเป็นองค์ประกอบในการผลิตแบตเตอรี่ที่สำคัญและได้รับความนิยมในปัจจุบัน แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีส่วนประกอบหลักสามส่วนเหมือนแบตเตอรี่ทั่วไป ซึ่งก็คือ ขั้วลบ ขั้วบวก และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยส่วนใหญ่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้ จะมีขั้วบวกที่ทำมาจากลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (LiCoO<sub>2</sub>) และขั้วลบที่ทำมาจากคาร์บอนหรือกราฟไฟต์ ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ คือ เกลือลิเทียมในสารละลายออร์แกนิก (lithium salt in an organic solvent)

ข้อดี กระแสจะมีค่าที่ค่อนข้างดีและสม่ำเสมอทำให้พลังงานดีกว่าแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด 5 เท่า น้ำหนักเบา

ข้อเสีย เมื่อทำปฏิกิริยาอาจทำให้เกิดการระเบิดได้ เนื่องจาก Li เป็นธาตุหมู่ 1



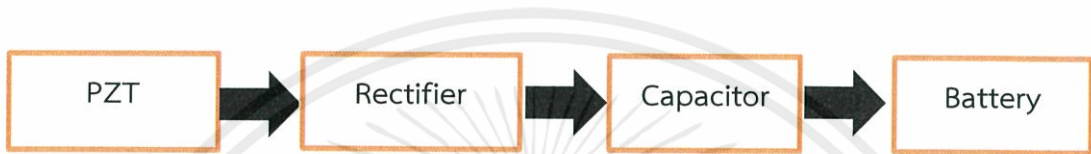
รูปที่ 2.42 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบและจำลองระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะการทำงานของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก โดยสังเกตจากค่ายอดแรงดันที่ได้จากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก และนำแรงดันที่ได้เชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแส(Rectifier) เพื่อเปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง จากนั้นต่อเข้ากับตัวเก็บประจุ(Capacitor) เพื่อให้แรงดันขาออกเรียบยิ่งขึ้นเพื่อให้สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้ต่อไป แสดงได้ดังรูป 3.1

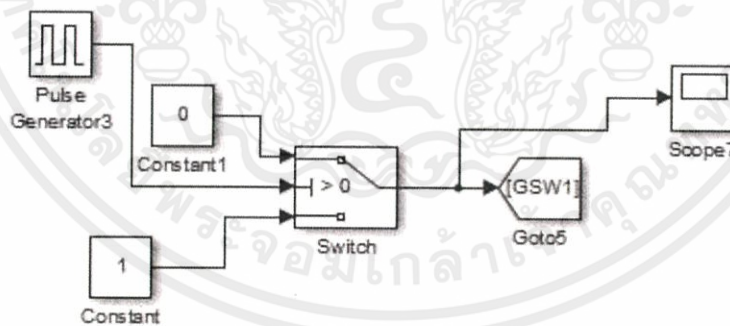


รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงการทำงาน

### 3.1 แบบจำลองลักษณะการทำงานของเพียโซอิเล็กทริก

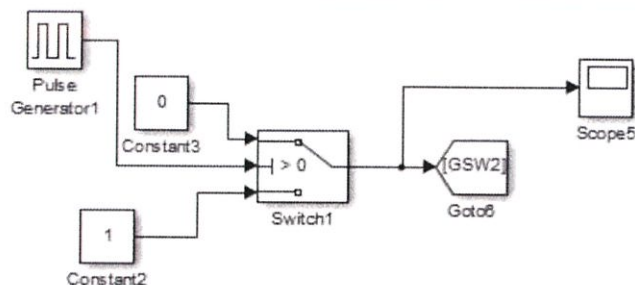
การจำลองระบบนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์หลักการทำงานและสัญญาณของเพียโซอิเล็กทริกเพื่อใช้ในการชาร์จประจุเข้าแบตเตอรี่ โดยระบบประกอบไปด้วย

#### 3.1.1 ส่วนสวิตช์ควบคุม



รูปที่ 3.2 สวิตช์ควบคุม 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 สวิตช์ควบคุม 2

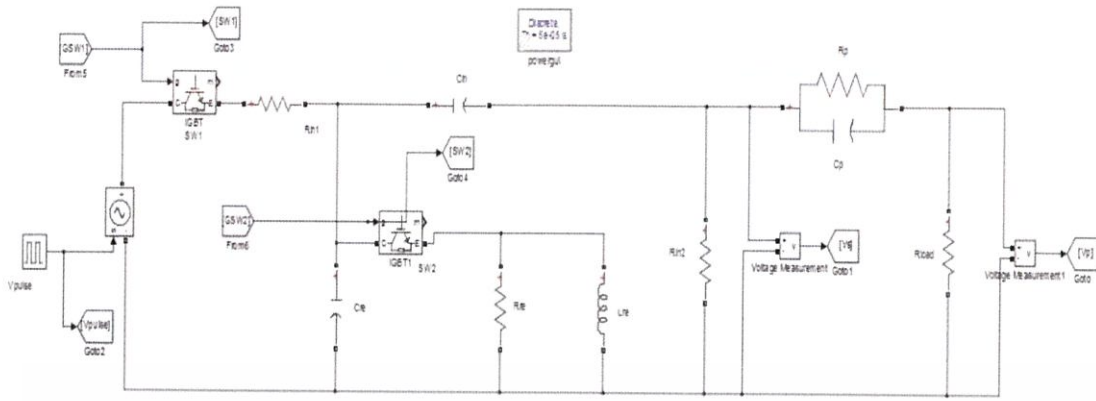
## 3.1.2 วงจรเพียโซอิเล็กทริก

โดยค่าพารามิเตอร์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ในวงจรจำลอง

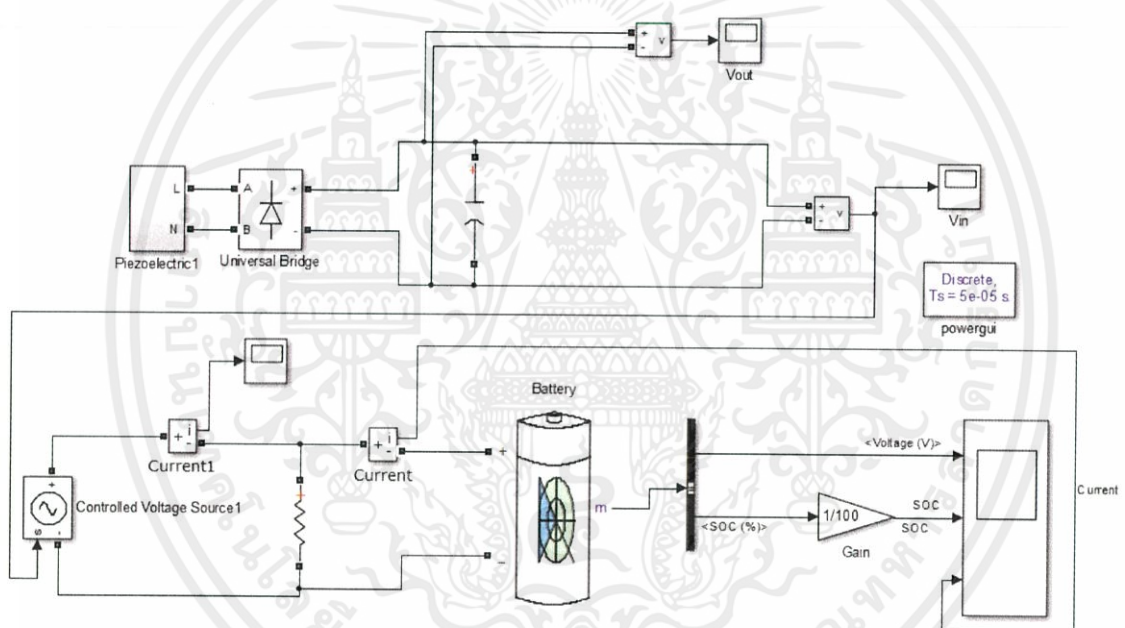
Parameters	Value
Resistive Load ( $k\Omega$ )	50 $k\Omega$
Applied force frequency (Hz)	1
Resistance for coupling energy: Rin1	5 $\Omega$
Resistance for coupling energy: Rin2	500 $k\Omega$
Resistance for resonance: Rre	6 $\Omega$
Internal resistance of the PZT: Rp	2 $M\Omega$
Inductance for resonance: Lre	1305 $\mu H$
Capacitance for coupling energy: Cin	0.2 $\mu F$
Capacitance for resonance: Cre	3450 $\mu F$
Internal capacitance of the PZT: Cp	48.2 nF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วงจรเพียโซอิเล็กทริก [6]

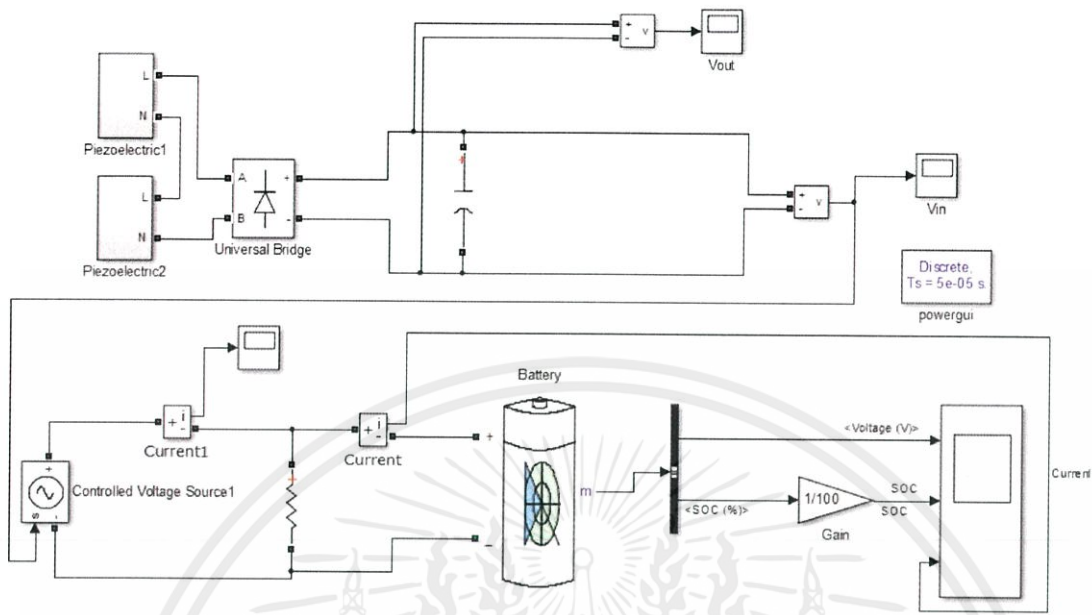
## 3.1.3 วงจรเพียโซอิเล็กทริก 1 ผ่านวงจร-วงจรเรียงกระแส-วงจรชาร์จแบตเตอรี่

ค่าพารามิเตอร์ C หลังวงจรเรียงกระแส  $470\mu\text{F}$ 

รูปที่ 3.5 วงจรเพียโซอิเล็กทริก 1 ผ่านวงจรเชื่อมต่อวงจรเรียงกระแส (Rectifier)-วงจรชาร์จแบตเตอรี่

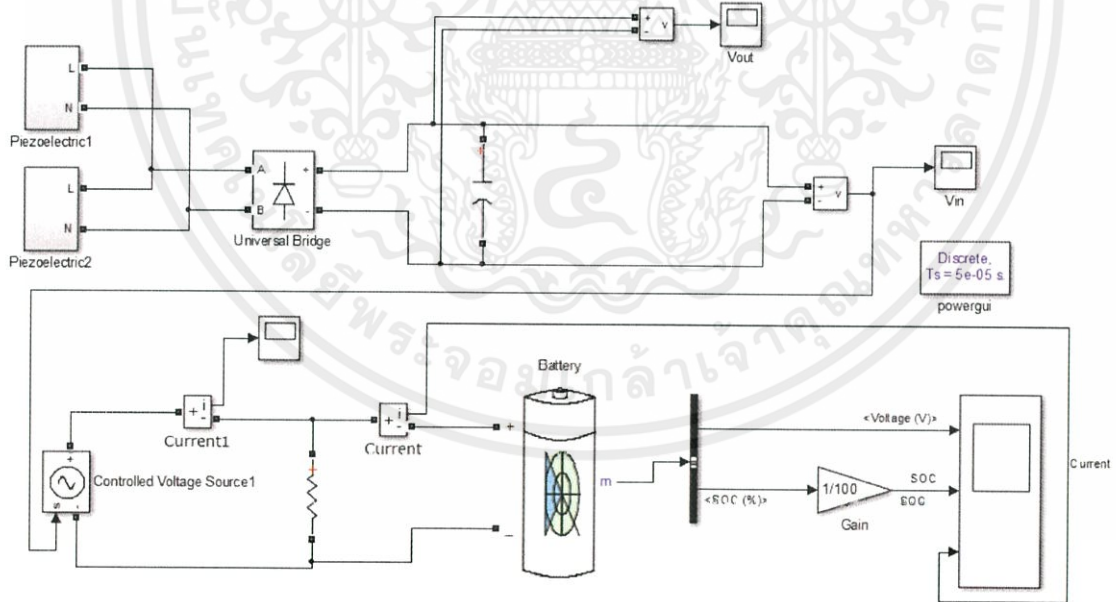
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 วงจรเพียโซอิเล็กทริกอนุกรม 2 แผ่นวงจร-วงจรเรียงกระแส-วงจรชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 3.6 วงจรเพียโซอิเล็กทริกอนุกรม 2 แผ่นวงจร-วงจรเรียงกระแส-วงจรชาร์จแบตเตอรี่

### 3.1.5 วงจรเพียโซอิเล็กทริกขนาน 2 แผ่นวงจร-วงจรเรียงกระแส- วงจรชาร์จแบตเตอรี่

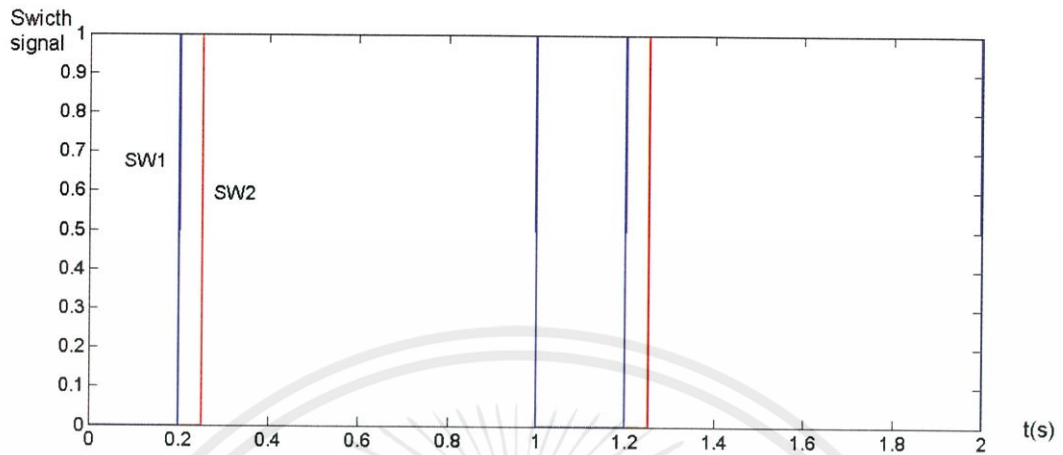


รูปที่ 3.7 วงจรเพียโซอิเล็กทริกขนาน 2 แผ่นวงจร-วงจรเรียงกระแส-วงจรชาร์จแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในการวิจัยในโครงการที่ขอเงินทุนวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

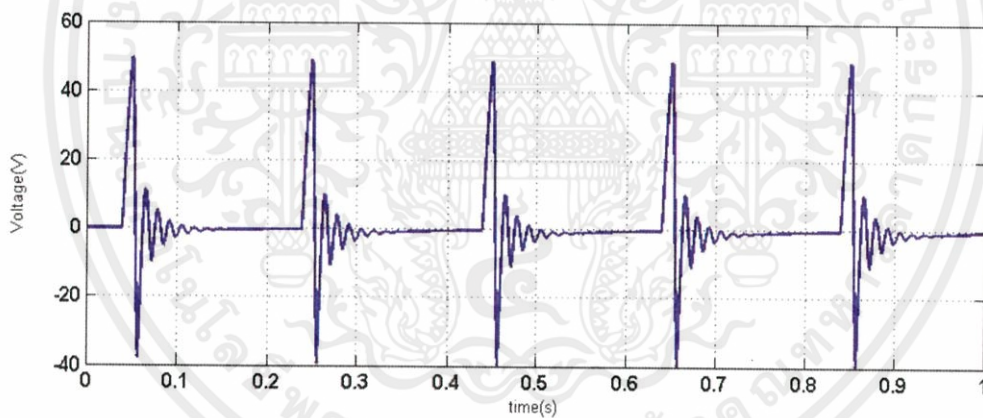
## 3.2 ผลการจำลอง

### 3.2.1 .Switch ควบคุม



รูปที่ 3.8 รูปคลื่นของสัญญาณ Switch1 และ Switch2

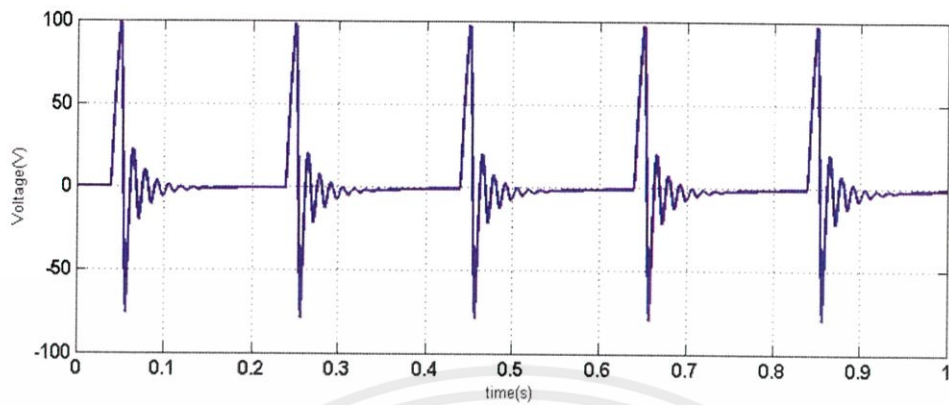
### 3.2.2 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่น



รูปที่ 3.9 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกความถี่ 5 Hz

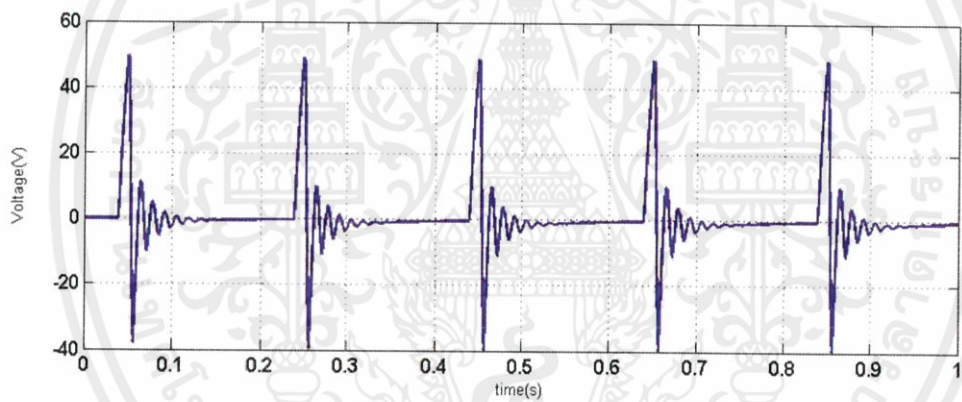
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรม



รูปที่ 3.10 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรมความถี่ 5 Hz

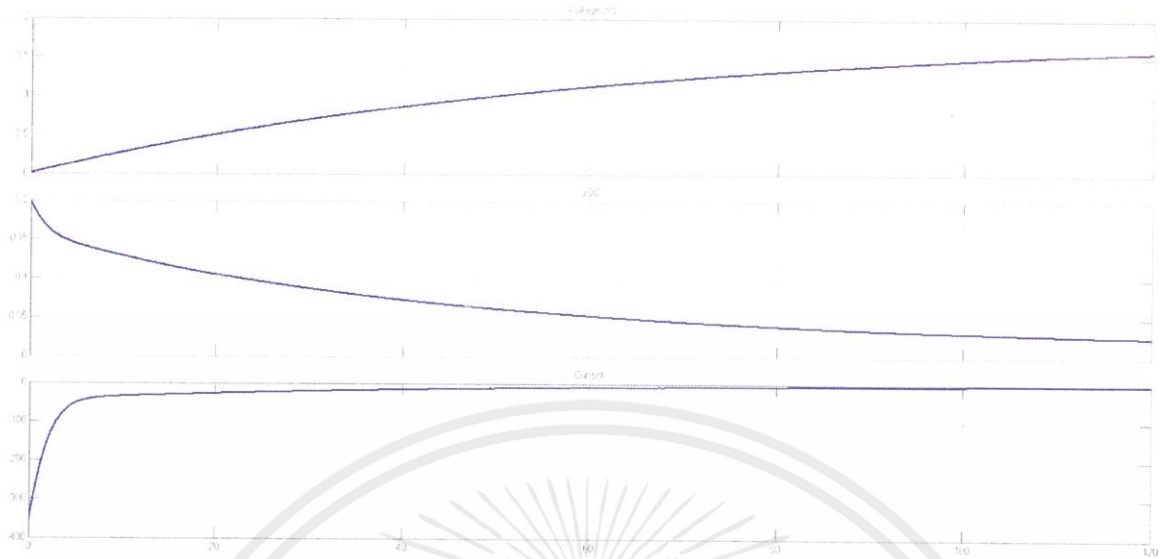
### 3.2.4 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนาน



รูปที่ 3.11 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานความถี่ 5 Hz

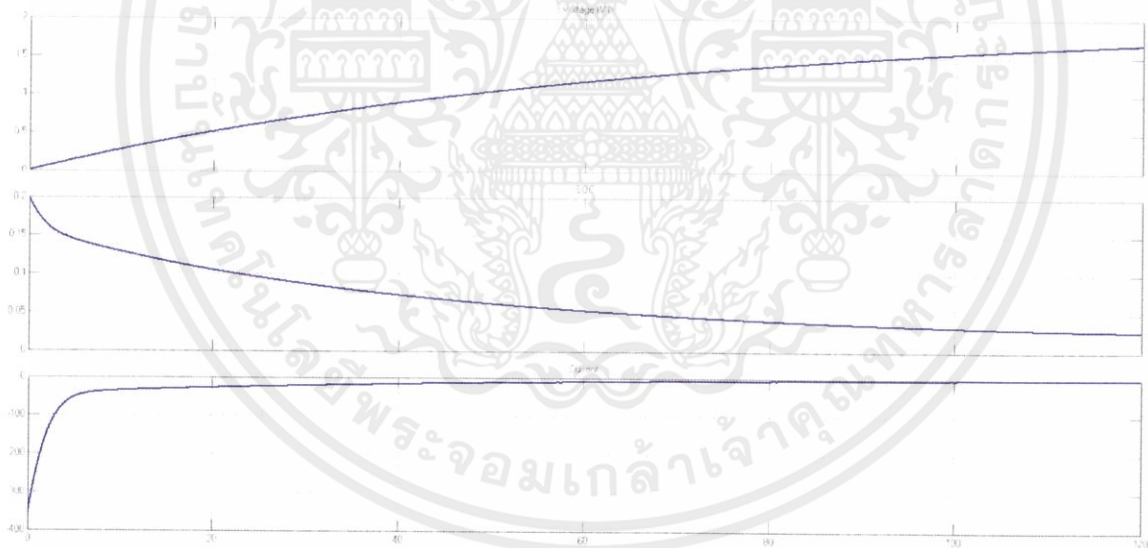
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.5 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่นชาร์จแบตเตอรี่ NiMH 20 mAh



รูปที่ 3.12 รูปคลื่นลักษณะการชาร์จของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่นแบตเตอรี่ NiMH 20 mAh

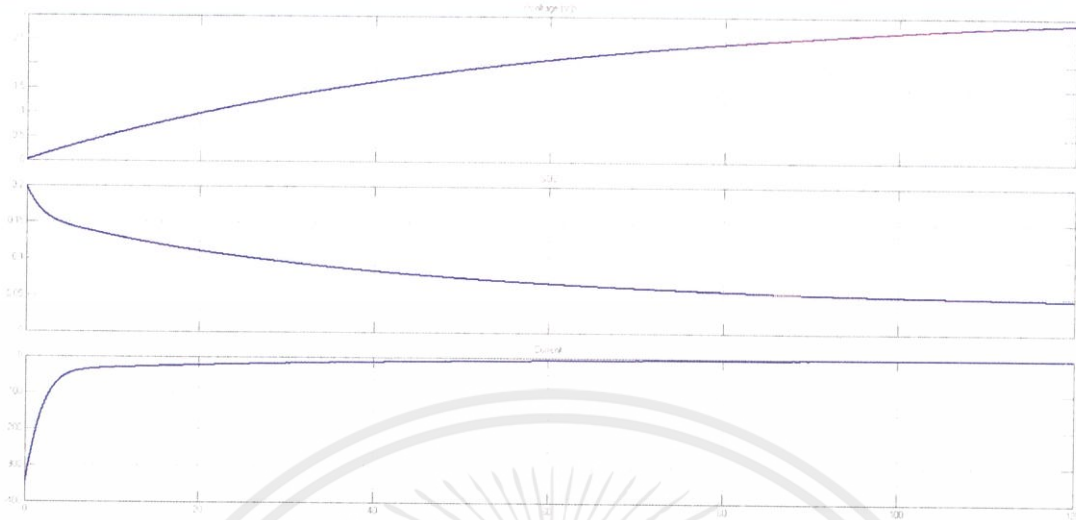
### 3.2.6 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรมชาร์จแบตเตอรี่ NiMH 20 mAh



รูปที่ 3.13 รูปคลื่นลักษณะการชาร์จของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรมแบตเตอรี่ NiMH 20 mAh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.7 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานชาร์จแบตเตอรี่ NiMH 20 mAh



รูปที่ 3.14 รูปคลื่นลักษณะการชาร์จของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานแบตเตอรี่ NiMH 20 mAh

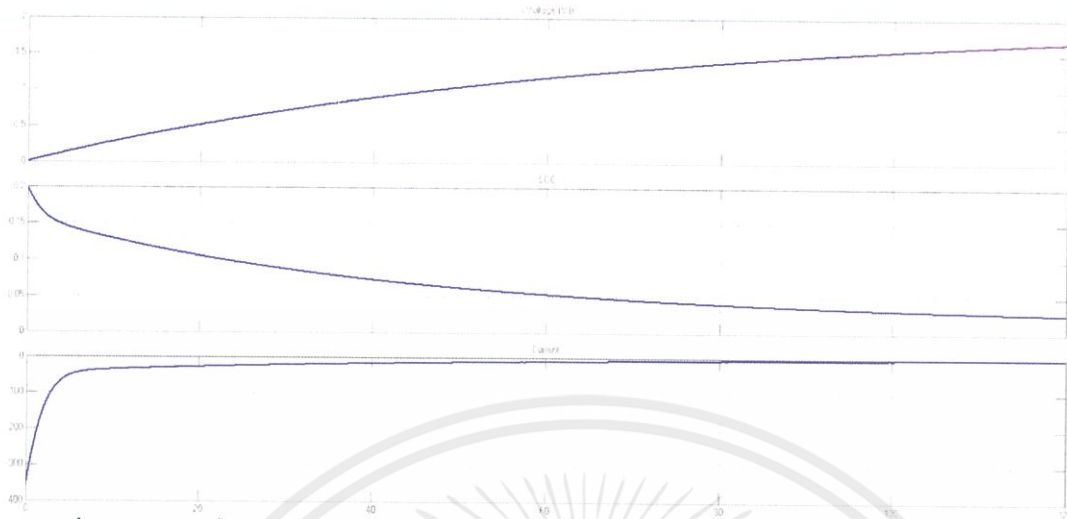
### 3.2.8 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่นชาร์จแบตเตอรี่ NiMH 40 mAh



รูปที่ 3.15 รูปคลื่นลักษณะการชาร์จของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่นแบตเตอรี่ NiMH 40 mAh

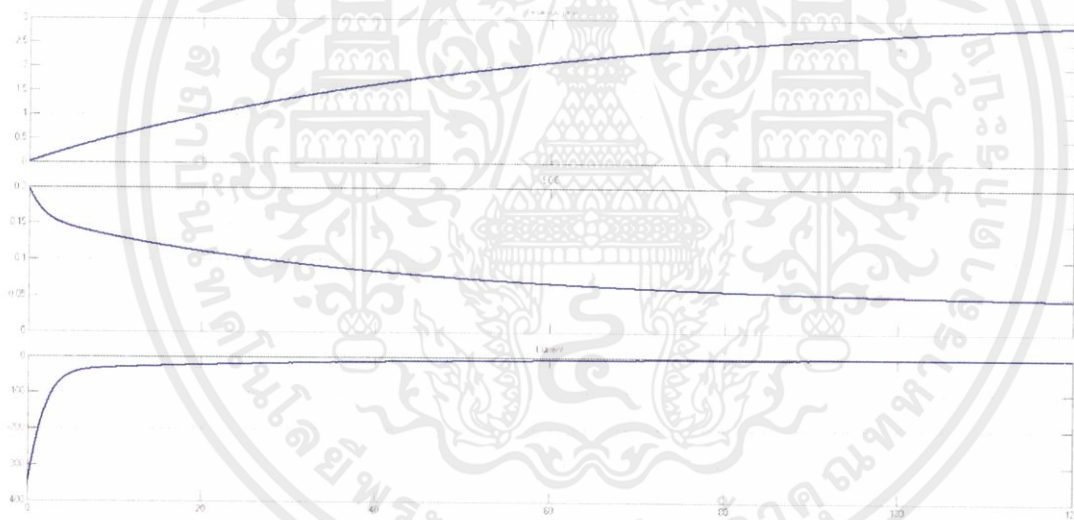
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.9 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรมชาร์จแบตเตอรี่ NiMH 40 mAh



รูปที่ 3.16 รูปคลื่นลักษณะการชาร์จของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรมแบตเตอรี่ NiMH 40 mAh

### 3.2.10 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานชาร์จแบตเตอรี่ NiMH 40 mAh



รูปที่ 3.17 รูปคลื่นลักษณะการชาร์จของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานแบตเตอรี่ NiMH 40 mAh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 Application ชาร์จแบตเตอรี่

##### 4.1.1 วงจรการทดลอง Application ชาร์จแบตเตอรี่

##### 4.1.1.1 โครงสร้างแบบจำลอง [7]

โครงสร้างแบบจำลองถูกทำขึ้นโดยใช้ฐานไม้เนื่องจากมีความแข็งแรง พร้อมติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่นและ DC มอเตอร์ที่ใช้ในการตีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกด้วยความถี่ 5 Hz ไว้บนฐานไม้ดังรูปที่ 4.1

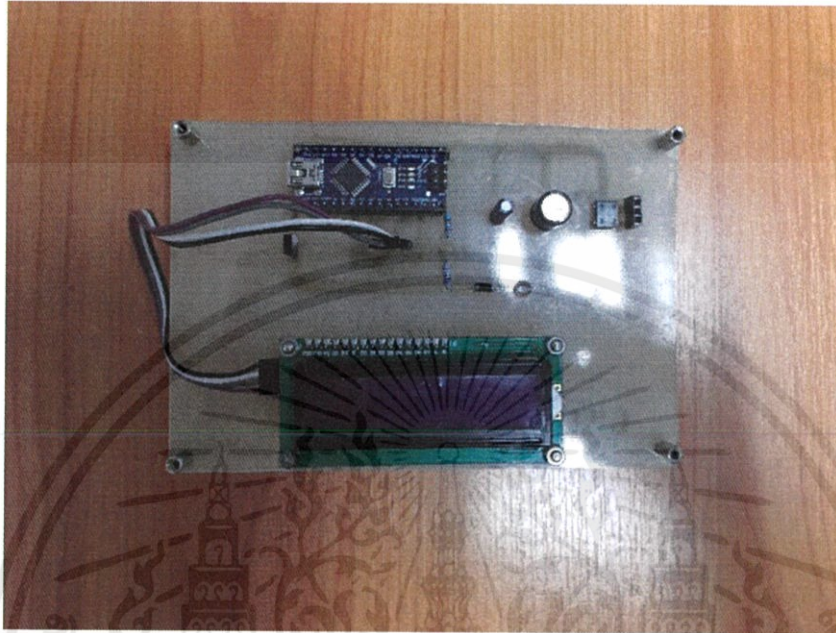


รูปที่ 4.1 โครงสร้างแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1.2 วงจรชาร์จแบตเตอรี่

สำหรับวงจรชาร์จแบตเตอรี่จะไปกอบไปด้วย วงจรเรียงกระแส(Rectifier) ตัวเก็บประจุ และวงจรแสดงผลการชาร์จ ดังรูป



รูปที่ 4.2 วงจรชาร์จแบตเตอรี่

#### 4.1.1.3 แบตเตอรี่ [8]

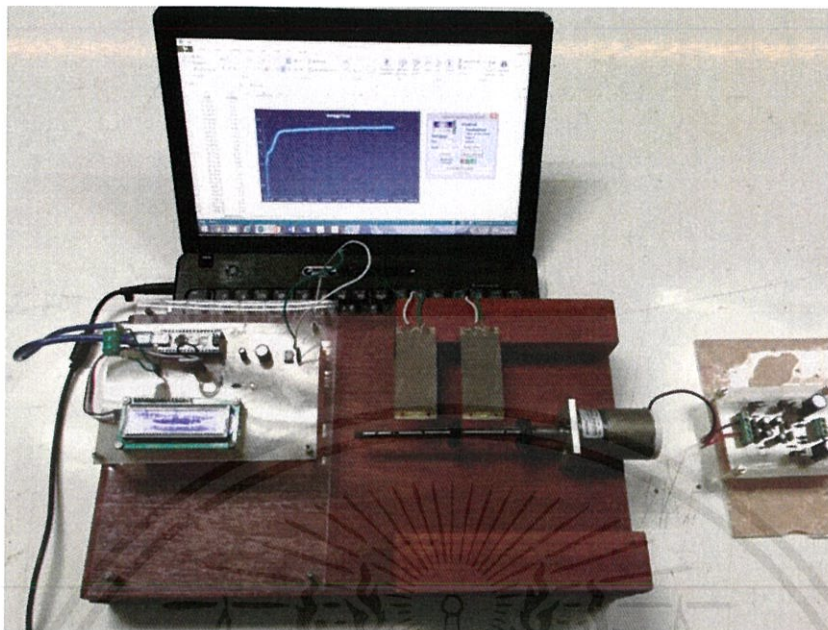
ในการทดลองได้เลือกแบตเตอรี่ NiMH ขนาด 20 mAh และ 40 mAh 3.6 V เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดดังกล่าวสามารถอัดประจุได้ง่ายโดยไม่ต้องอาศัยวงจรชาร์จเจอร์ และขนาดของแบตเตอรี่มีความเหมาะสมกับพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 แบตเตอรี่ NiMH 20 mAh และ 40 mAh

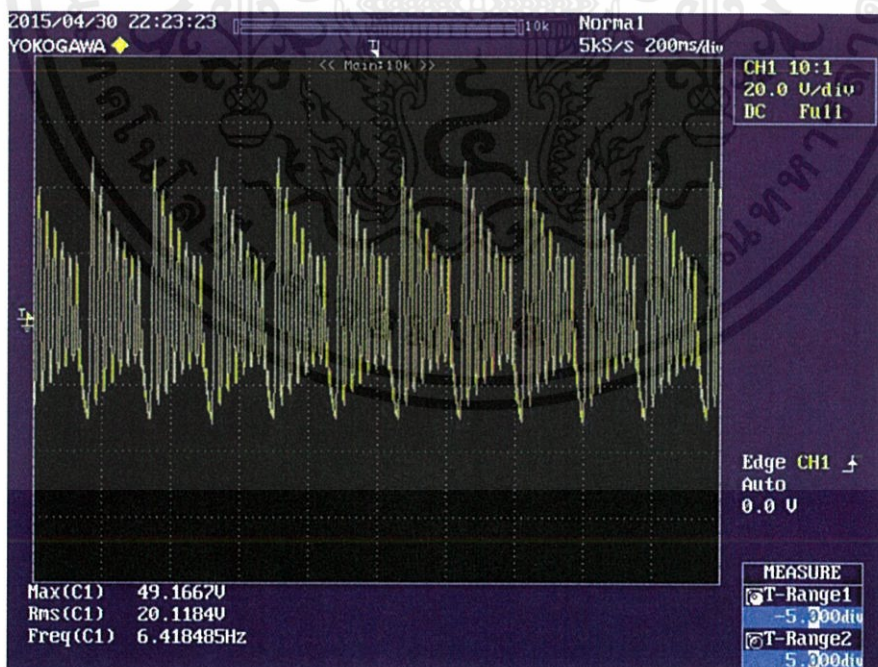
#### 4.1.1.4 โครงสร้างแบบจำลองชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 4.4 โครงสร้างแบบจำลองชาร์จแบตเตอรี่

#### 4.1.2 ผลการตรวจการทดลอง Application ชาร์จแบตเตอรี่

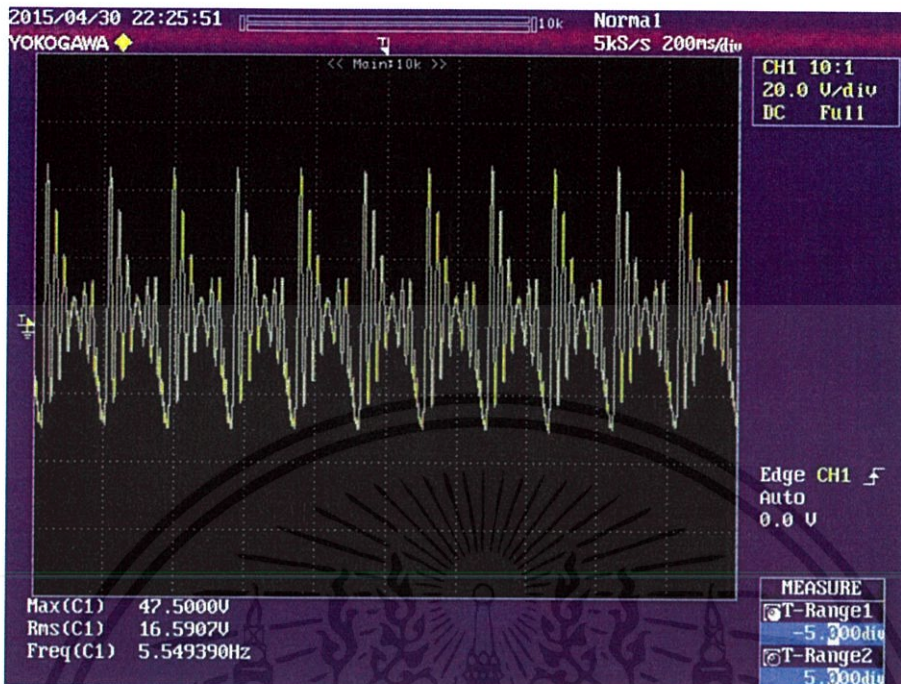
##### 4.1.2.1 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารผลงานสร้างสรรค์บริการวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ขอสงวนสิทธิ์ในชื่อประโยชน์ด้านการค้า

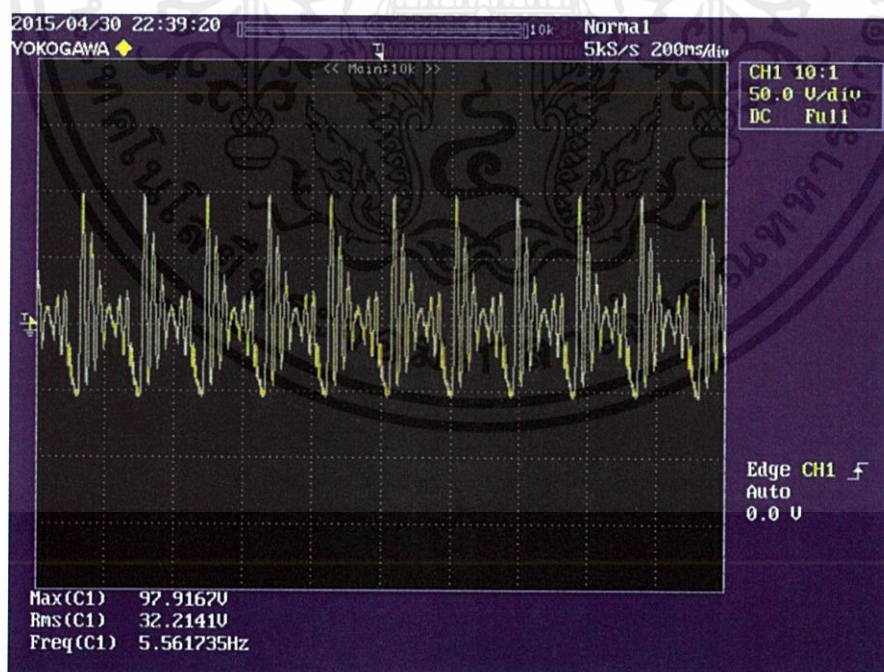
ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 4.5 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่นความถี่ 5 Hz

## 4.1.2.2 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนาน

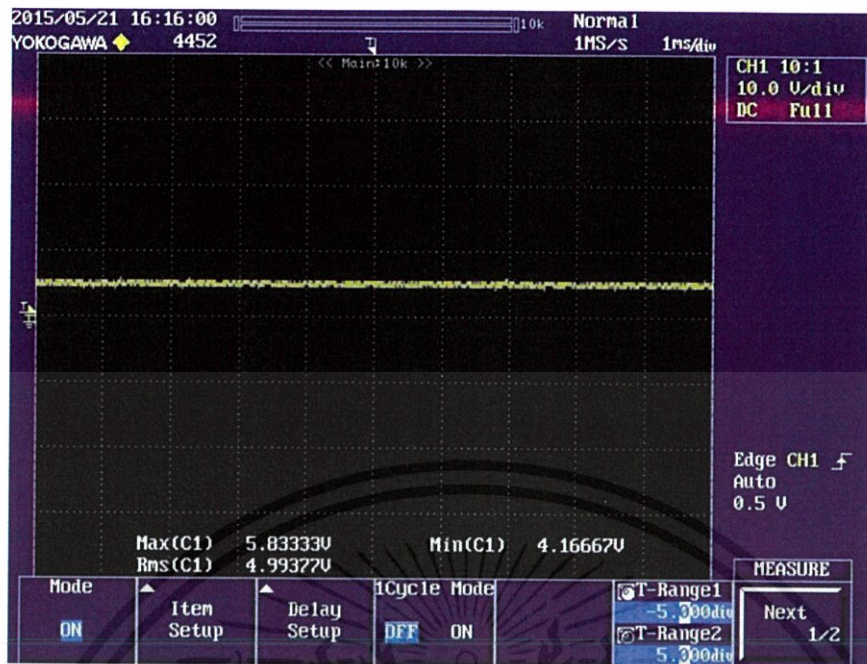


รูปที่ 4.6 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานความถี่ 5 Hz

## 4.1.2.3 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 4.7 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรมความถี่ 5 Hz



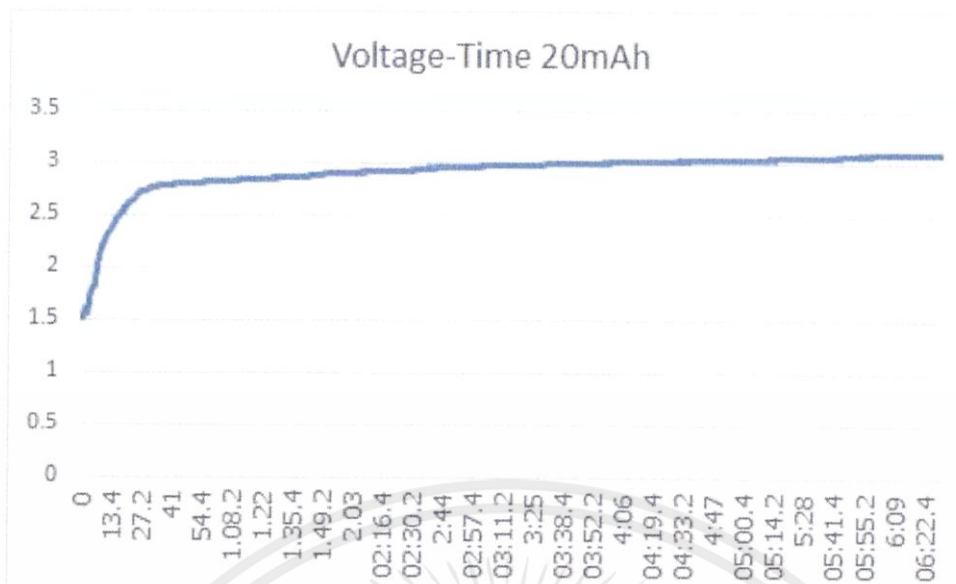
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันหลังวงจรเรียงกระแส

#### 4.1.2.4 ระยะเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่

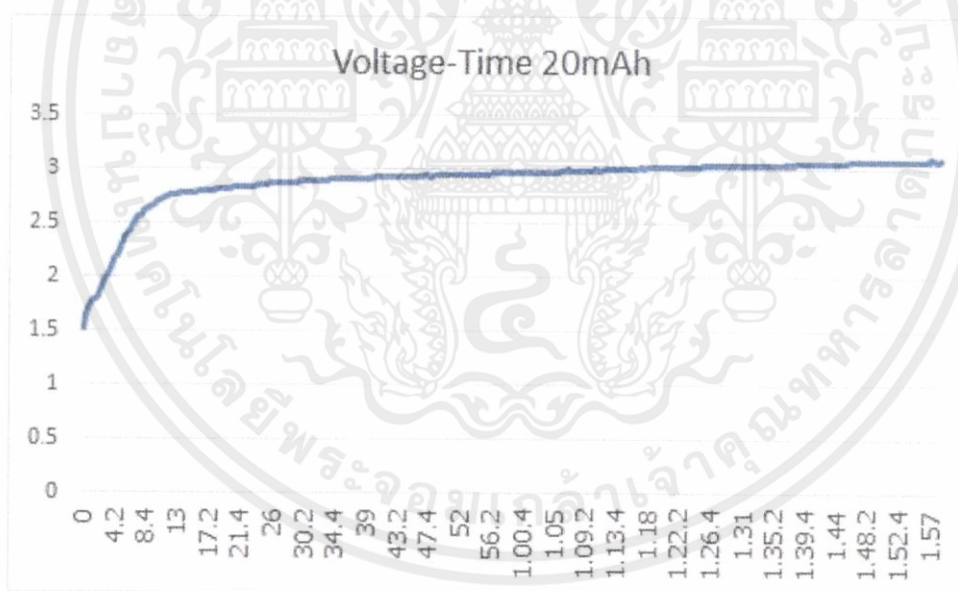
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงระยะเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่

ขนาดของแบตเตอรี่	เวลาแต่ละลักษณะการต่อวงจรของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก		
	1 แผ่น	2 แผ่นอนุกรม	2 แผ่นขนาน
20 mAh	>6 ชั่วโมง 22 นาที	6 ชั่วโมง 22 นาที	1 ชั่วโมง 58 นาที
40 mAh	>7 ชั่วโมง 39 นาที	7 ชั่วโมง 39 นาที	2 ชั่วโมง 23 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

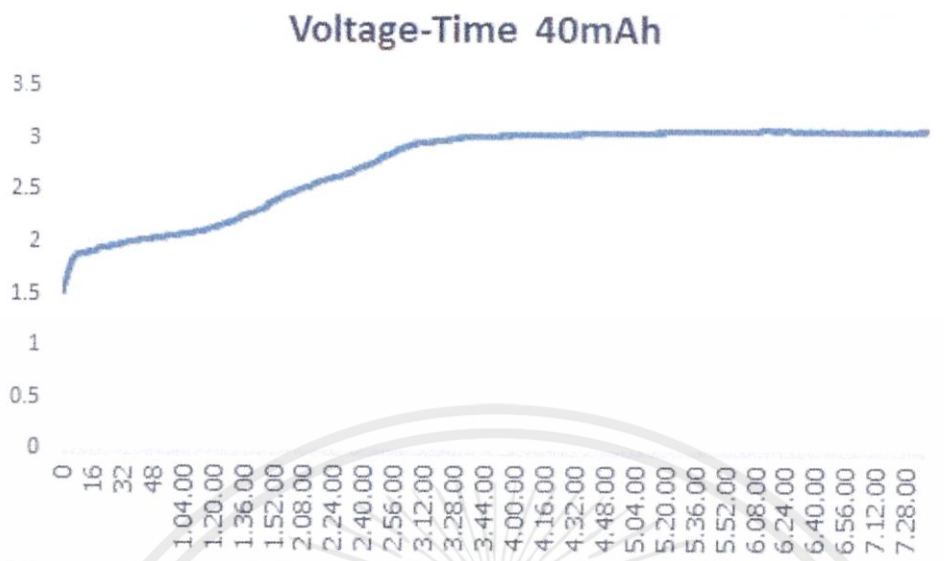


รูปที่ 4.9 กราฟคุณสมบัติการชาร์จระหว่าง แรงดันกับเวลาของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรมขนาด 20 mAh

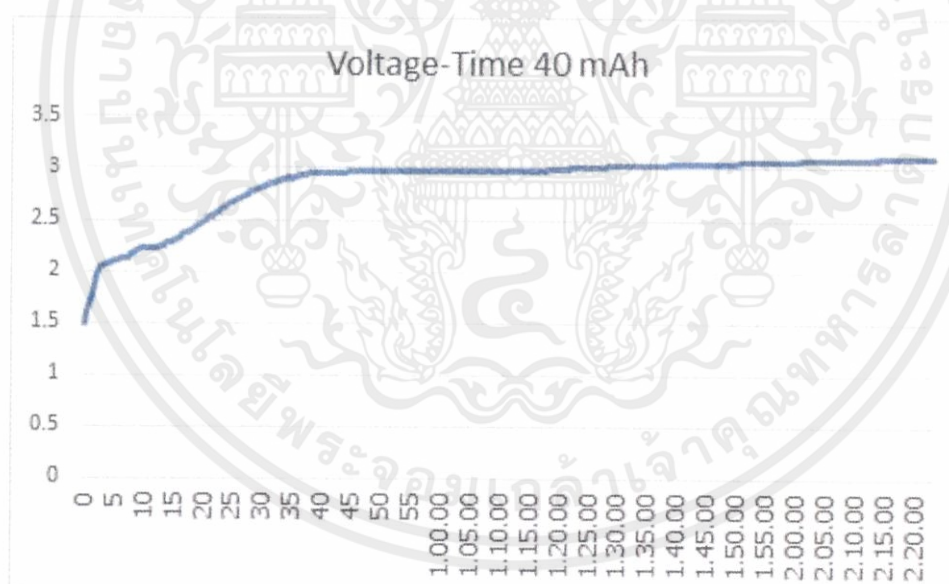


รูปที่ 4.10 กราฟคุณสมบัติการชาร์จระหว่าง แรงดันกับเวลาของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานขนาด 20 mAh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟคุณลักษณะการชาร์จระหว่าง แรงดันกับเวลาของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อ  
อนุกรมขนาด 40 mAh

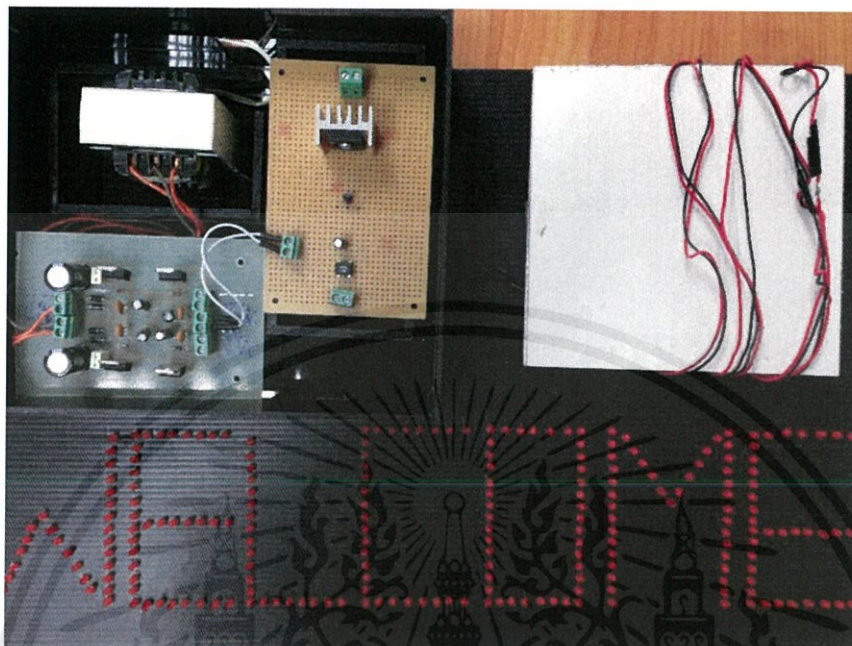


รูปที่ 4.12 กราฟคุณลักษณะการชาร์จระหว่าง แรงดันกับเวลาของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อ  
ขนานขนาด 40 mAh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 Application หลอดไฟ LED

### 4.2.1 วงจรทดลอง Application หลอดไฟ LED



รูปที่ 4.13 วงจรทดลอง Application หลอดไฟ LED

### 4.2.2 ผลการวงจรการทดลอง Application หลอดไฟ LED

ทำการทดลองโดยการเดินเหยียบลงบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเพื่อวัดค่าและลักษณะกราฟของแรงดันที่ได้จากการทดลอง โดยมีแผ่น Polyethylene และแผ่นพลาสติก เป็น Cover โดยการทดลองจะแบ่งการทดลองตามการต่อวงจรของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกซึ่งจะมีการต่อวงจรอนุกรมและการต่อวงจรขนาน

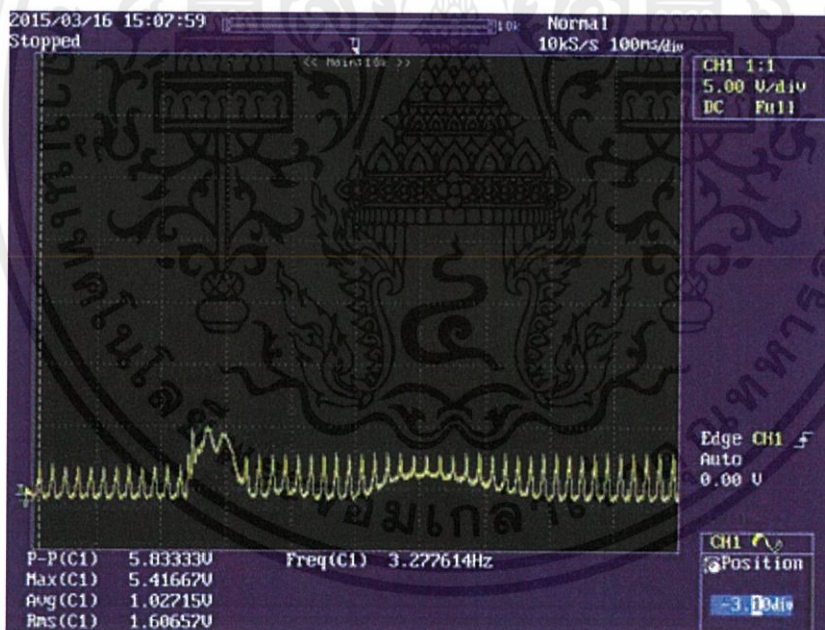
4.2.2.1 เมื่อนำแผ่น เพียโซอิเล็กทริกที่มีแผ่น Polyethylene เป็นแผ่นเพื่อรองรับแรงกด ต่ออุปกรณ์ IC bridge rectifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แผ่น Polyethylene

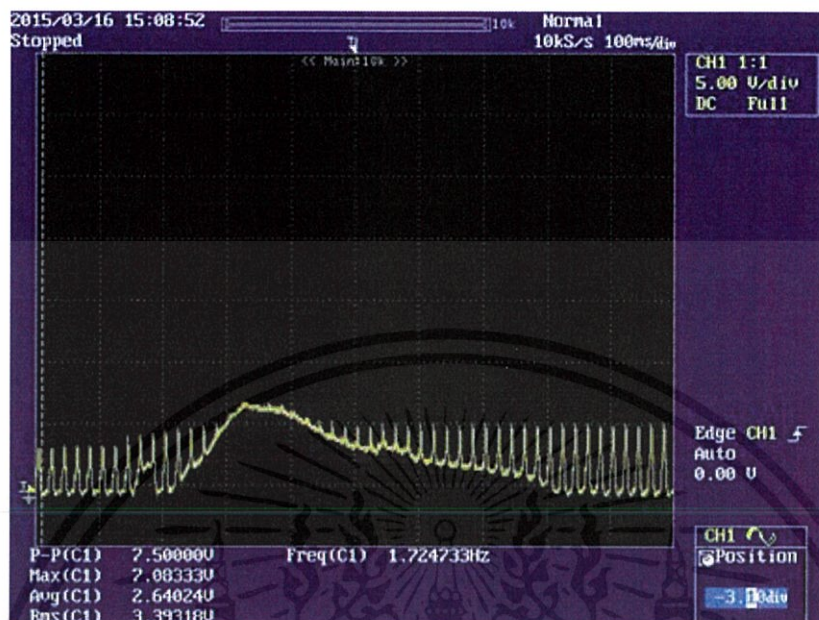
4.2.2.2 เมื่อทำการเดินเหยียบโดยมี แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 1 แผ่น



รูปที่ 4.15 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหยียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 1 แผ่น

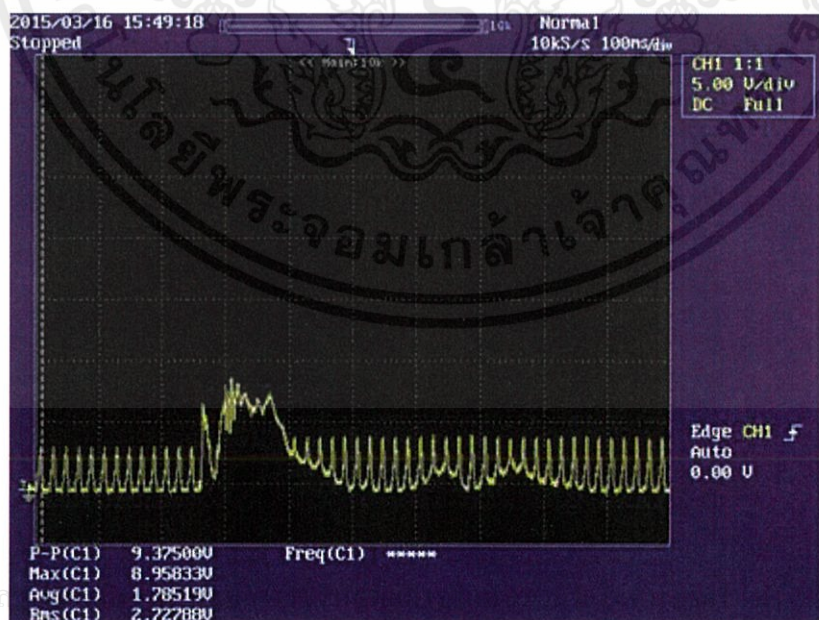
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.3 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมี แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่นต่อวงจร  
อนุกรม



รูปที่ 4.16 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่นต่อวงจร  
อนุกรม

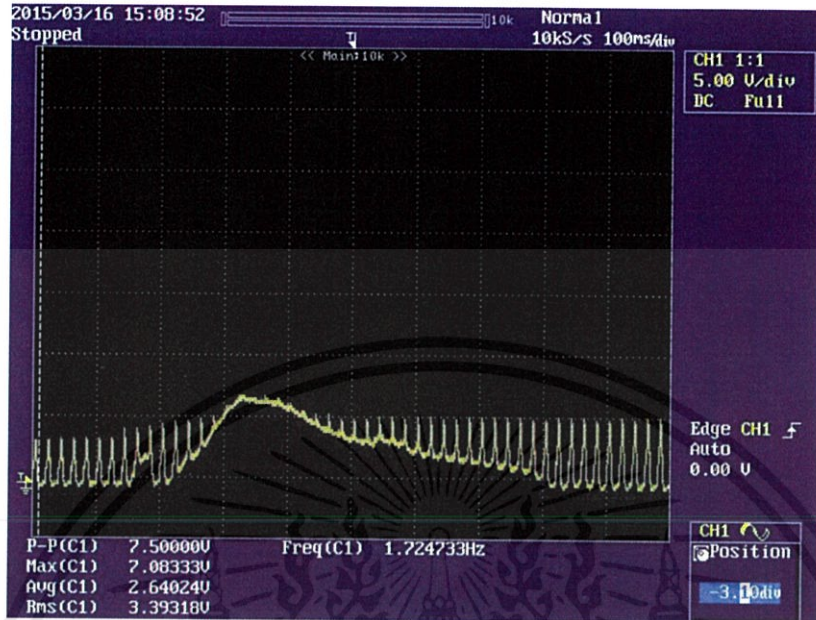
4.2.2.4 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมี แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่นต่อวงจร  
ขนาน



รูปที่ 4.17 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่นต่อวงจร

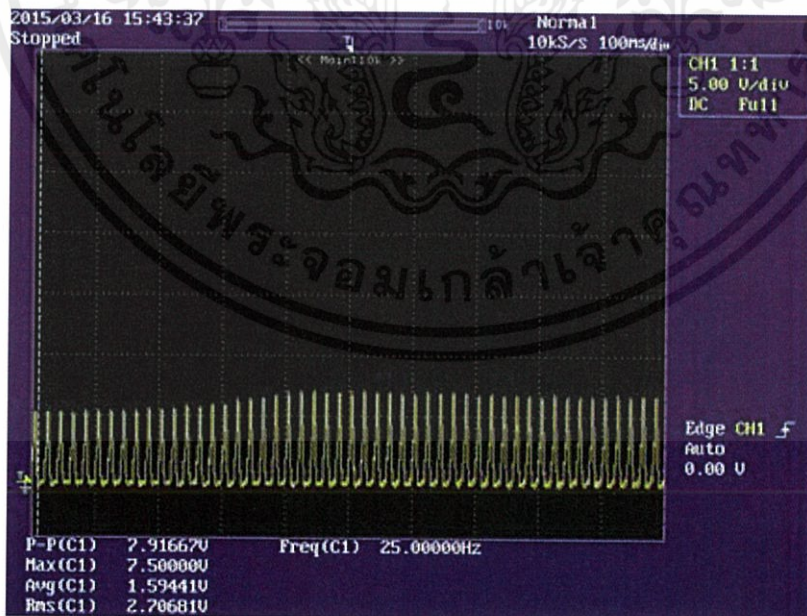
ขนาน

4.2.2.5 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมี แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อวงจร  
อนุกรม



รูปที่ 4.18 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อวงจร  
อนุกรม

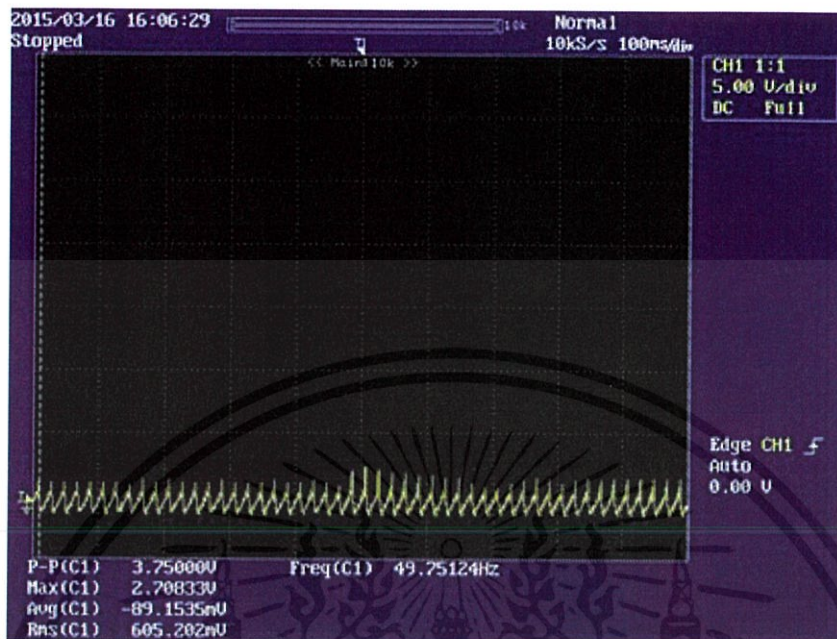
4.2.2.6 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมี แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อวงจร  
ขนาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้  
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม  
รูปที่ 4.19 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อวงจร

ขนาน

4.2.2.7 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมี แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อคู่ขนานกันแล้วนำมาอนุกรมกัน



รูปที่ 4.20 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อคู่ขนานกันแล้วนำมาอนุกรมกัน

4.2.2.8 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมี แผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อคู่อนุกรมกันแล้วนำมาขนานกัน



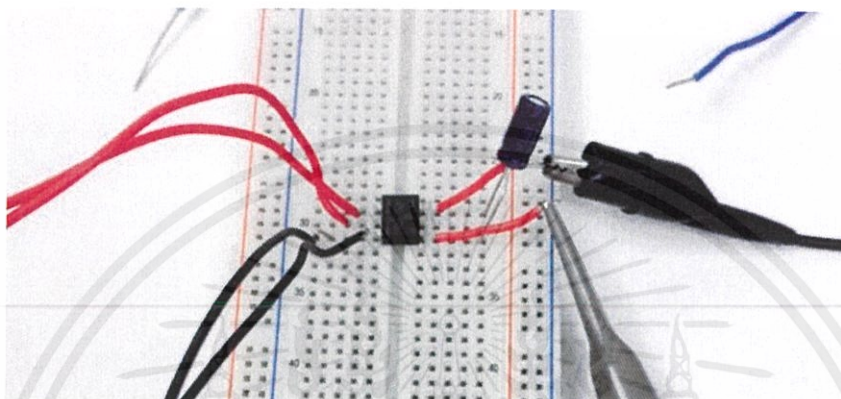
เอกสารนี้เป็นเอกสาร

ลิขสิทธิ์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการก่อสร้าง

รูปที่ 4.21 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อคู่อนุกรมกันแล้วนำมาขนานกัน

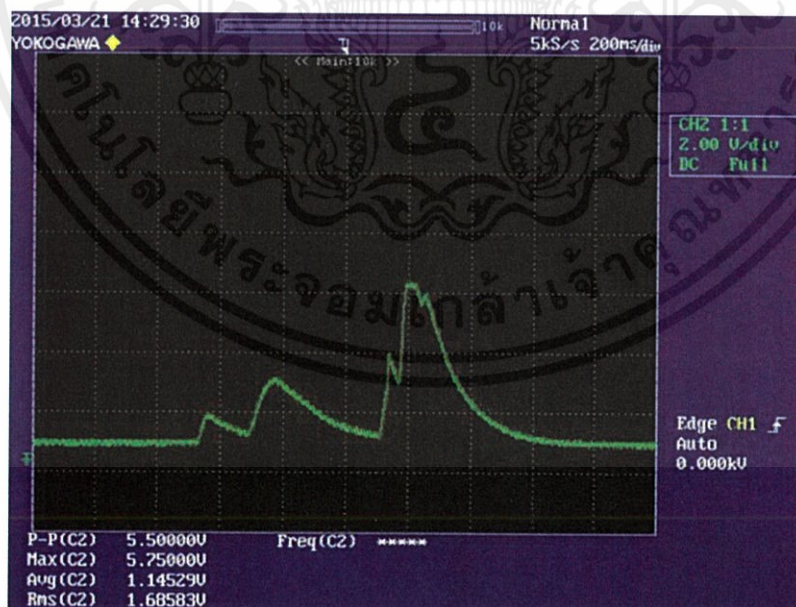
ซึ่งจากผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่า สัญญาณของแรงดันที่เกิดขึ้นนั้น มีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมากสามารถ สันนิษฐานได้ว่า สัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อย ทำให้ noise ที่เกิดขึ้นนั้นมีผลกระทบมาก

4.2.2.9 เมื่อนำแผ่นเพียโซอิเล็กทริกผ่านอุปกรณ์ IC bridge rectifier และ capacitor ขนาด 0.1 uF



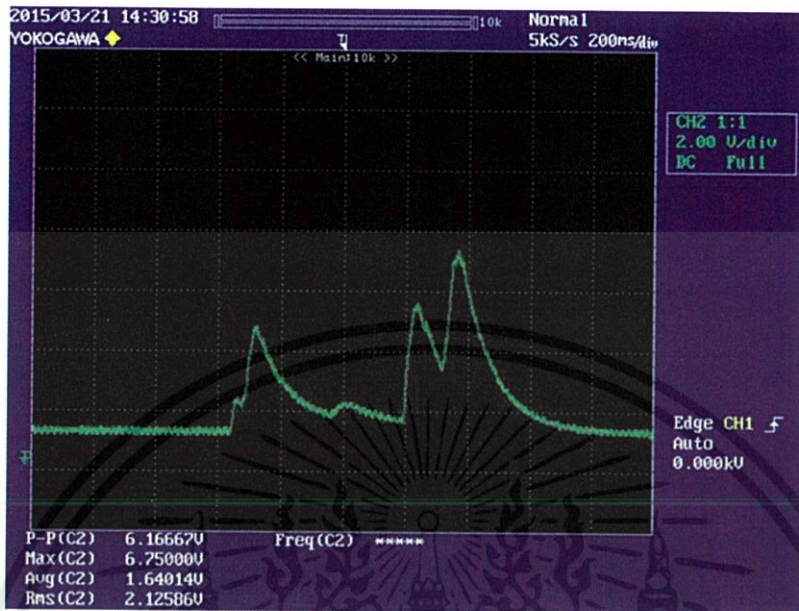
รูปที่ 4.22 การต่อ อุปกรณ์ IC bridge rectifier และ capacitor ขนาด 0.1 uF

4.2.2.10 เมื่อทำการเดินเทียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 1 แผ่นผ่านอุปกรณ์ IC bridge rectifier และ capacitor ขนาด 0.1 uF



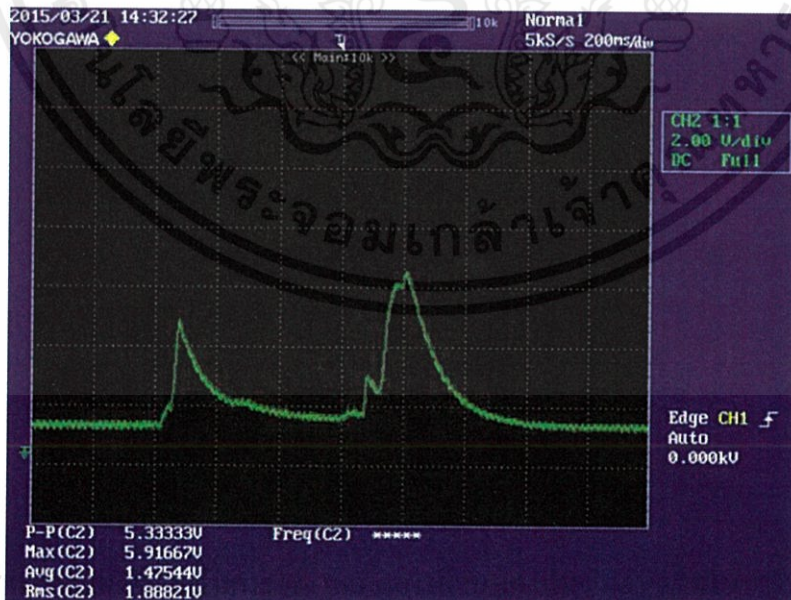
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.23 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเทียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 1 แผ่น

4.2.2.11 เมื่อทำการเดินเทียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่นต่อวงจรผ่านอุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 0.1 uF



รูปที่ 4.24 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเทียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่นต่อวงจรอนุกรม

4.2.2.12 เมื่อทำการเดินเทียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่นต่อวงจรขนานผ่านอุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 0.1 uF



เอกสารนี้เป็นเอกสาร

ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งชื่อผู้จัดทำเอกสารไว้ที่หน้าปกเอกสาร

รูปที่ 4.25 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเทียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่นต่อวงจร

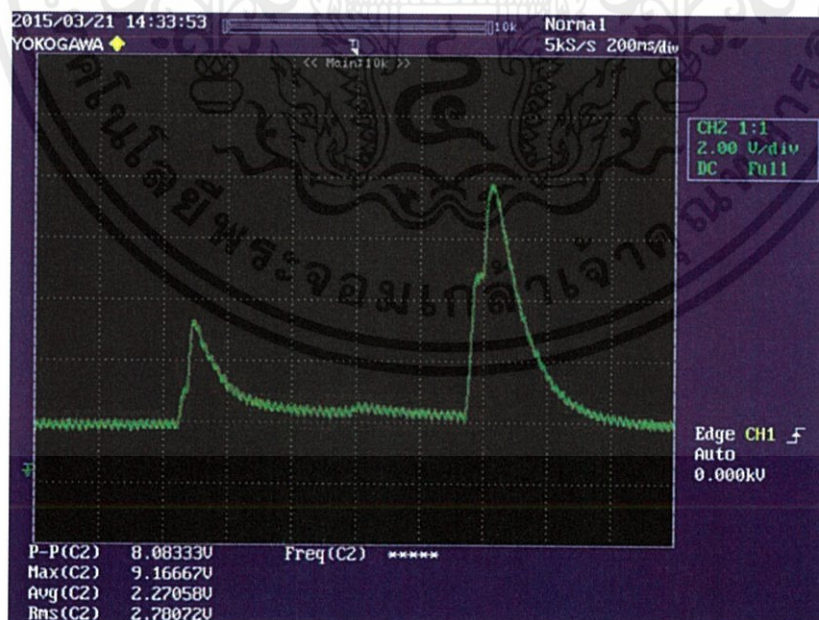
ขนาน

4.2.2.13 เมื่อทำการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อวงจรอนุกรมผ่านอุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 0.1 uF



รูปที่ 4.26 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อวงจรอนุกรม

4.2.2.14 เมื่อทำการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อวงจรอนุกรมผ่านอุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 0.1 uF

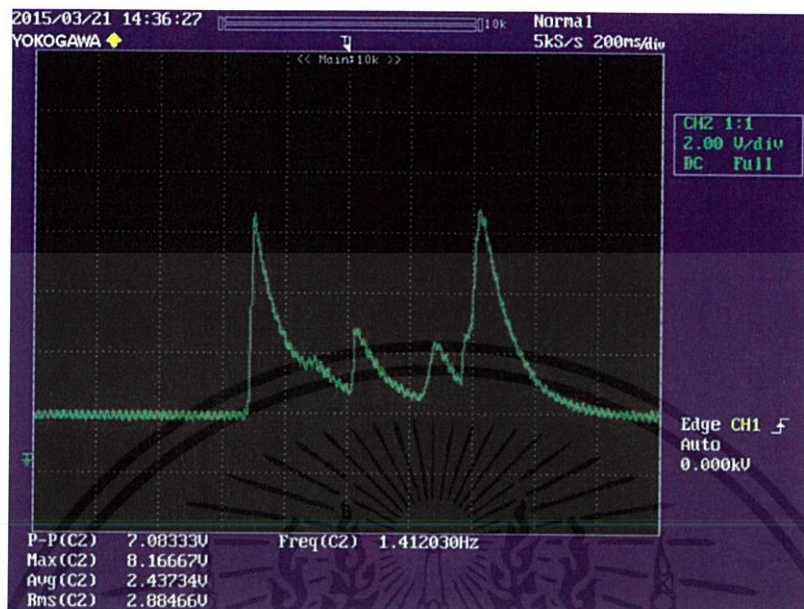


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าในรูปแบบใด ๆ

รูปที่ 4.27 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อวงจร

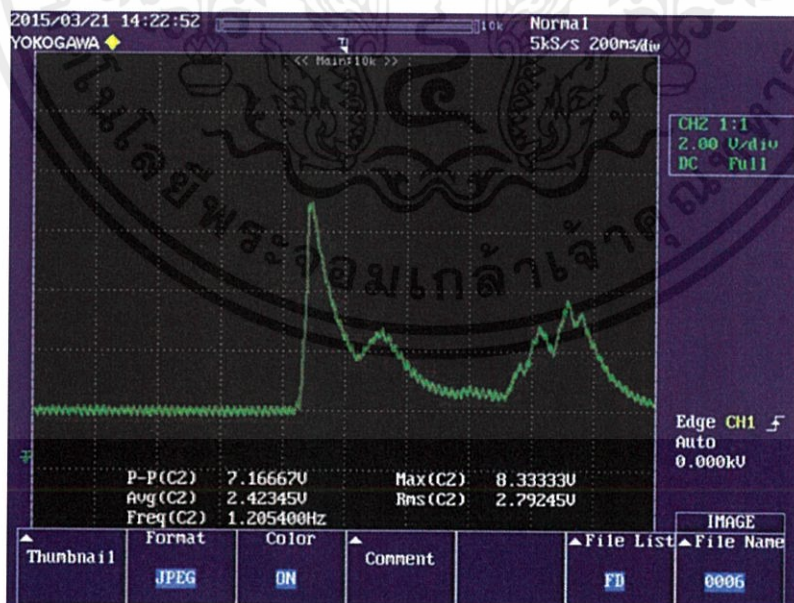
ขนาน

4.2.2.15 เมื่อทำการเดินเทียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อวงจรคู่ขนานกันแล้วนำมาอนุกรมกันผ่านอุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 0.1 uF



รูปที่ 4.28 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเทียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อวงจรคู่ขนานกันแล้วนำมาอนุกรมกัน

4.2.2.16 เมื่อทำการเดินเทียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อวงจรคู่อนุกรมกันแล้วนำมาขนานกันผ่านอุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 0.1 uF



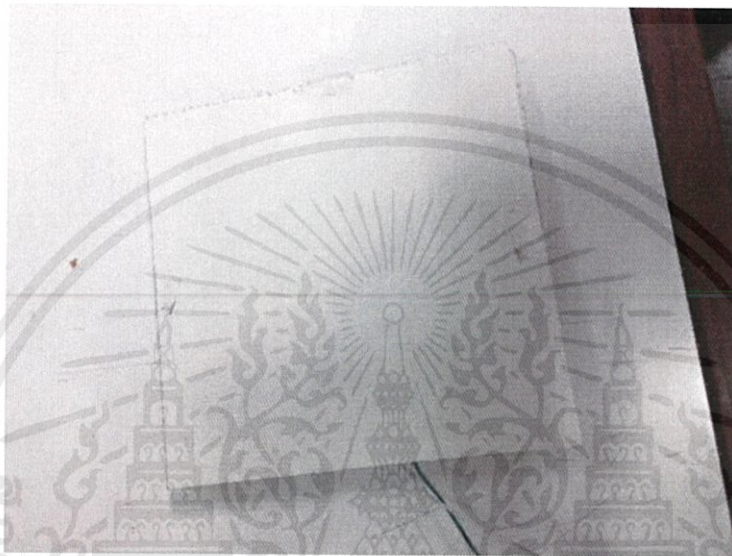
เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตามโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักพิมพ์ถือว่าผิดกฎหมาย

รูปที่ 4.29 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเทียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นต่อวงจรคู่อนุกรมกันแล้วนำมาขนาน

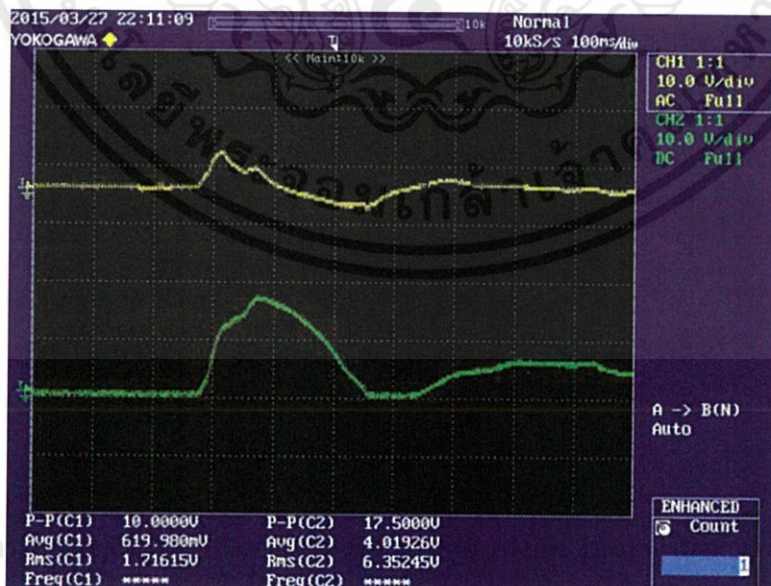
ซึ่งจากผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่า สัญญาณNoise ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงและทำการเปลี่ยนแผ่นปกคลุมเป็นแผ่นพลาสติก ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติก PVC ชนิดแข็ง และยังคงใช้ Capacitor ขนาด 0.1 uF โดยทำการวัดค่าแรงดันทั้ง

- 1.Input(หลังPiezoelectric) ซึ่งแสดงโดยกราฟสี่เหลี่ยม C(1)
- 2.Output(หลัง Capacitor ) ซึ่งแสดงโดยกราฟสี่เหลี่ยม C(2)



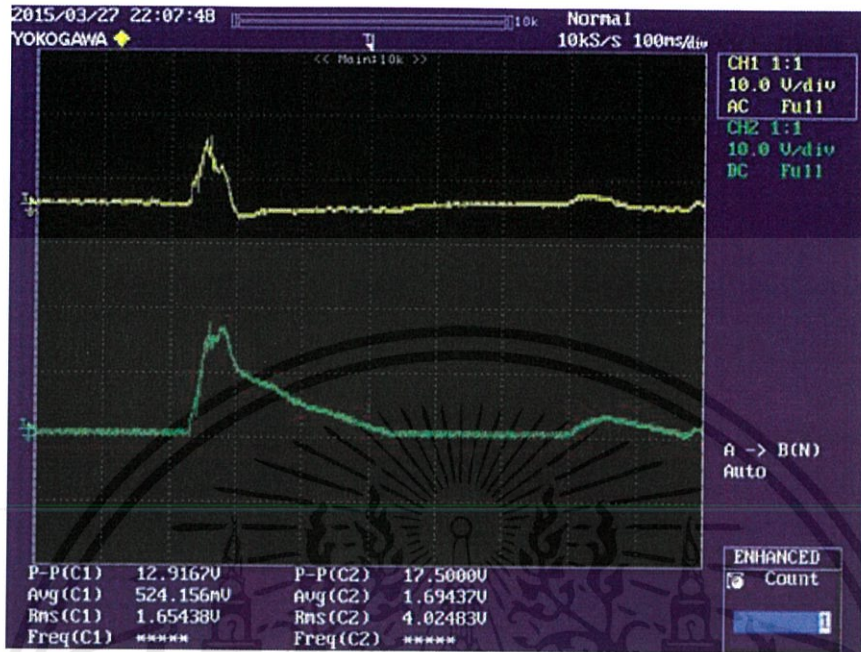
รูปที่ 4.30 แผ่นพลาสติก

4.2.2.17 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 1 แผ่นผ่านอุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 0.1 uF



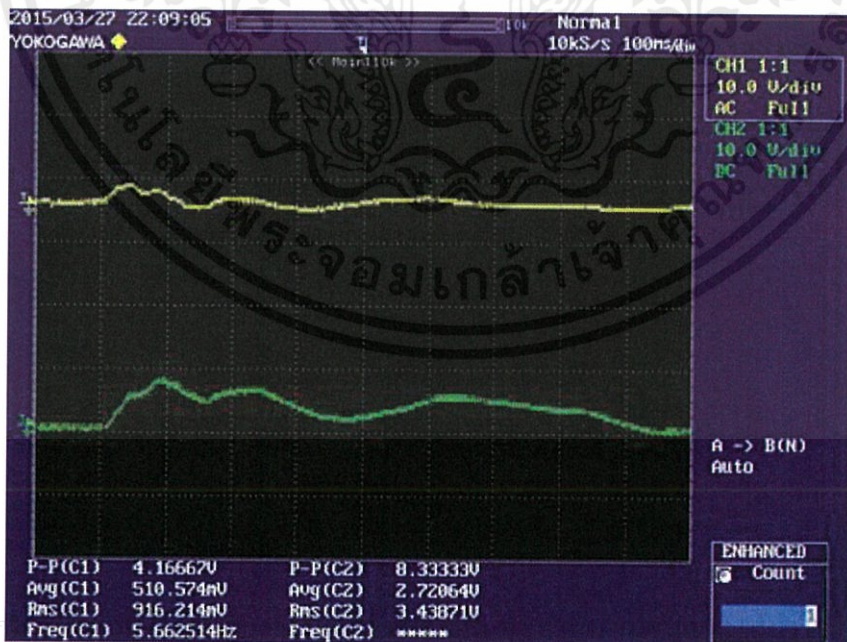
รูปที่ 4.31 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 1 แผ่น

4.2.2.18 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่นผ่าน  
อุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 0.1 uF ต่อวงจรอนุกรม



รูปที่ 4.32 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่น  
ต่อกันแบบวงจรอนุกรม

4.2.2.19 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่นผ่าน  
อุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 0.1 uF ต่อวงจรขนาน



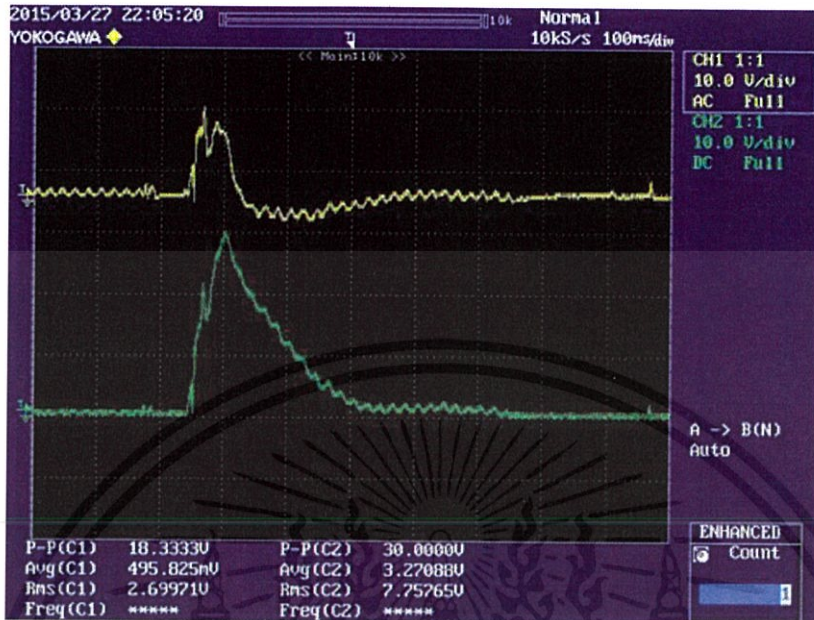
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่าการตีพิมพ์หรือการนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รูปที่ 4.33 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่น ต่อกัน

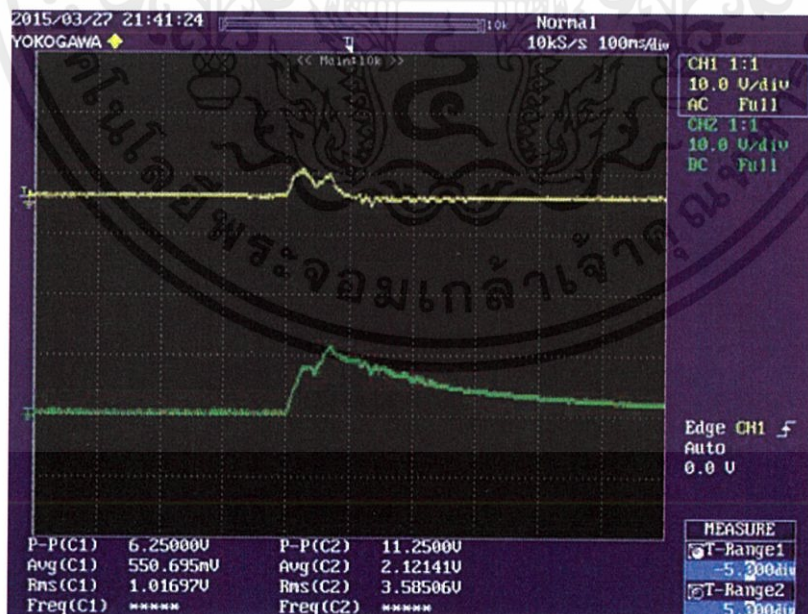
แบบวงจรขนาน

4.2.2.20 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นผ่าน อุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 0.1 uF ต่อวงจรอนุกรม



รูปที่ 4.34 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อกัน แบบวงจรถูกอนุกรม

4.2.2.21 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นผ่าน อุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 0.1 uF ต่อวงจรขนาน

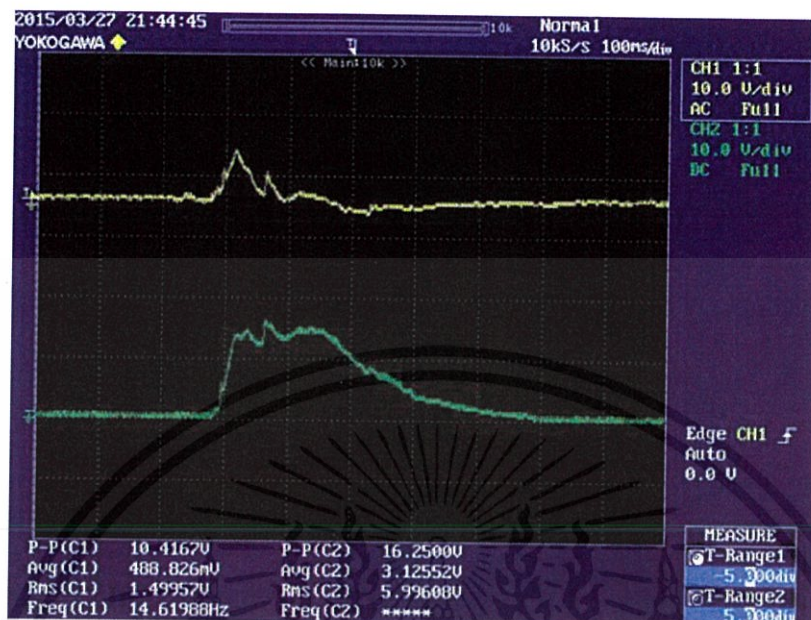


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.35 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อกัน

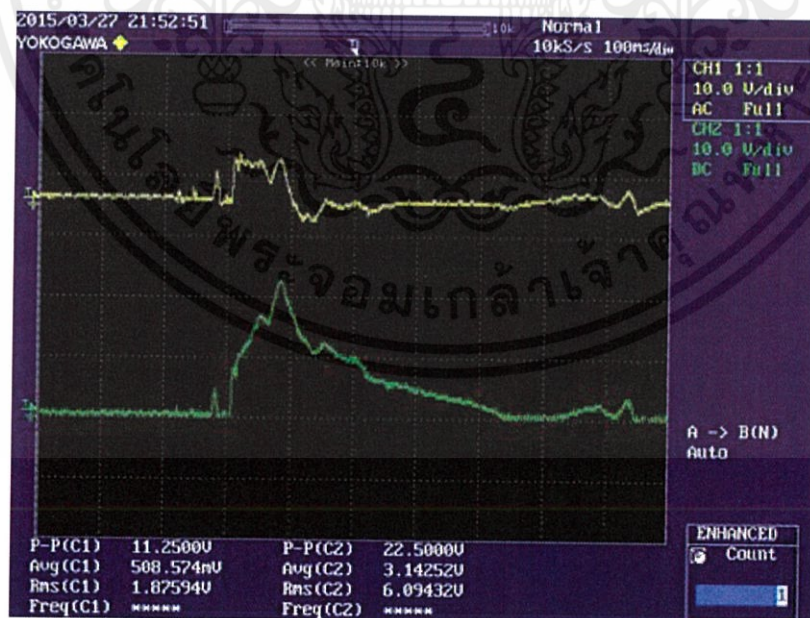
แบบวงจรถูกขนาน

4.2.2.22 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกต่อคู่ขนานกันแล้วนำมาอนุกรมกันผ่านอุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 0.1 uF



รูปที่ 4.36 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเทียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อกันแบบคู่ขนานกันแล้วนำมาอนุกรมกัน

4.2.2.23 แผ่นเพียโซอิเล็กทริกต่อคู่อนุกรมกันแล้วนำมาขนานกันผ่านอุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 0.1 uF

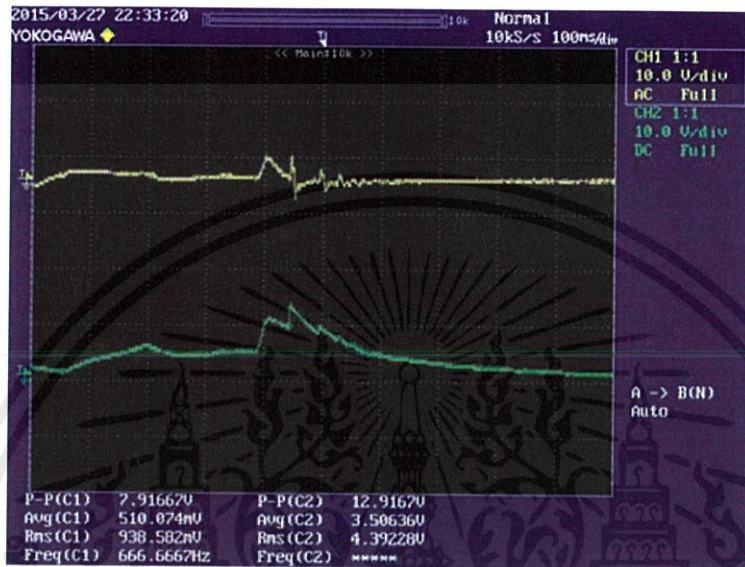


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.37 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเทียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อกันแบบคู่อนุกรมกันแล้วนำมาขนานกัน

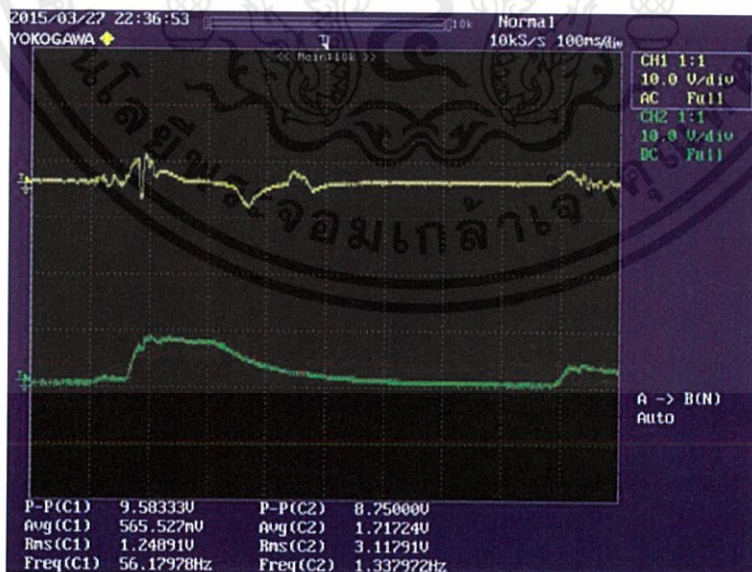
ซึ่งจากผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันที่วัดได้นั้นมีค่าเพิ่มจากการใช้แผ่นพลาสติก และเมื่อทำการเปลี่ยน Capacitor ให้มีขนาดความจุไฟฟ้าที่มากขึ้น ในที่นี้เลือก Capacitor ขนาด 1  $\mu\text{F}$

4.2.2.24 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 1 แผ่นผ่าน อุปกรณ์ IC bridge rectifier และ capacitor ขนาด 1  $\mu\text{F}$



รูปที่ 4.38 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 1 แผ่น

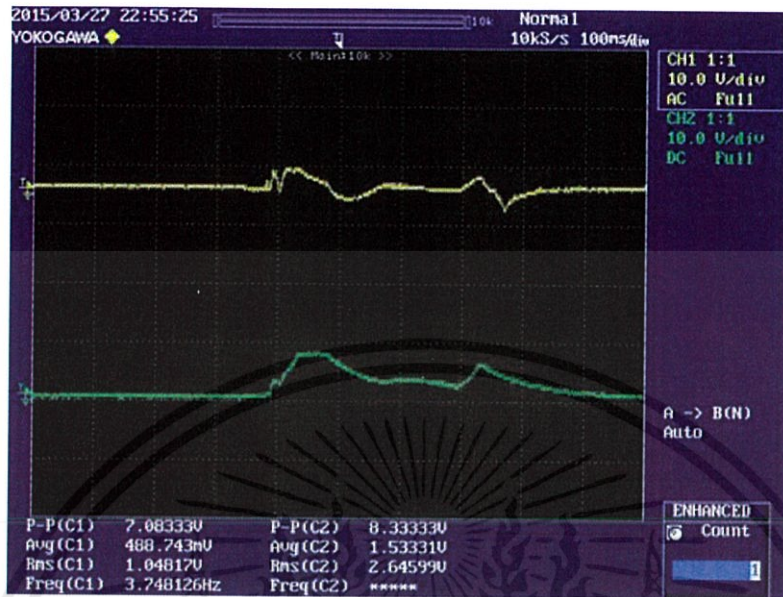
4.2.2.25 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่นผ่าน อุปกรณ์ IC bridge rectifier และ capacitor ขนาด 1  $\mu\text{F}$  ต่อวงจรอนุกรม



รูปที่ 4.39 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่น ต่อกัน

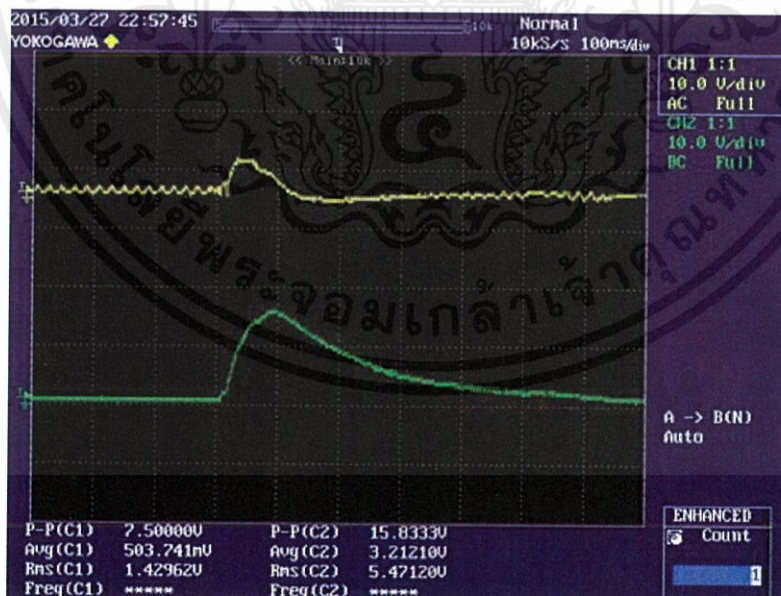
แบบวงจรอนุกรม

4.2.2.26 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่นผ่านอุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 1 uF ต่อวงจรขนาน



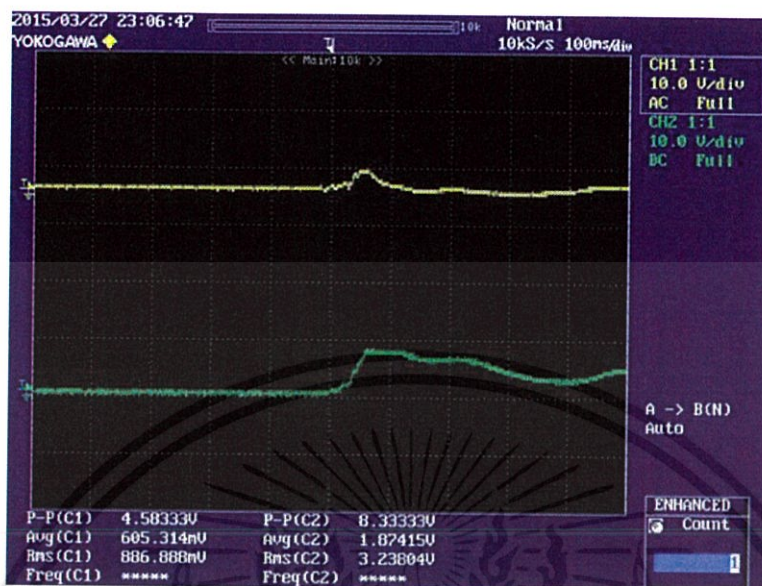
รูปที่ 4.40 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่น ต่อกัน แบบวงจรขนาน

4.2.2.27 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นผ่านอุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 1 uF ต่อวงจรรอนุกรม



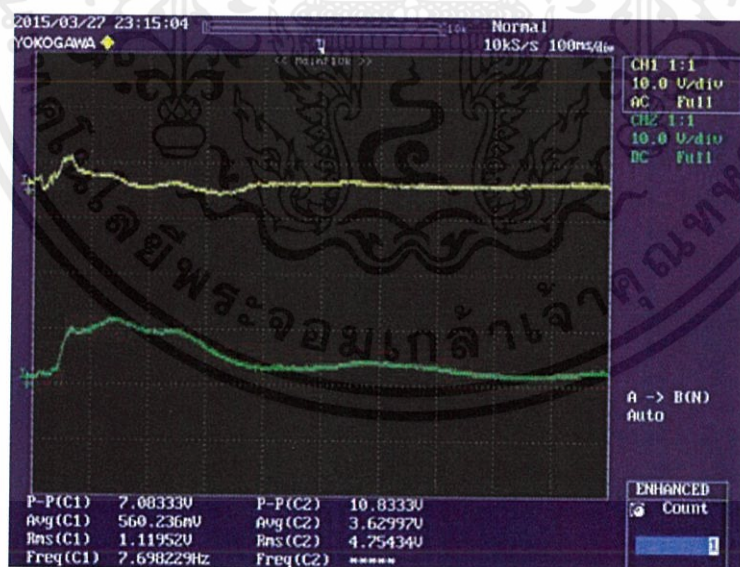
เอกสาร รูปที่ 4.41 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อกัน นี้ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง แบบวงจรรอนุกรมอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.28 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นผ่าน อุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 1 uF ต่อวงจรขนาน



รูปที่ 4.42 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อกัน แบบวงจรถนนาน

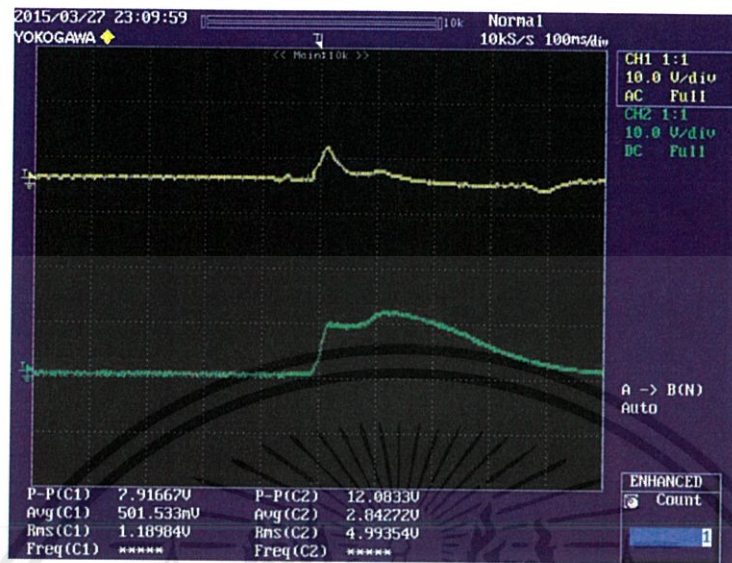
4.2.2.29 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นผ่าน อุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 1 uF ต่อคู่ขนานกันแล้วนำมาอนุกรมกัน



รูปที่ 4.43 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวงจรถนนานกันแล้วนำมาอนุกรมกัน อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

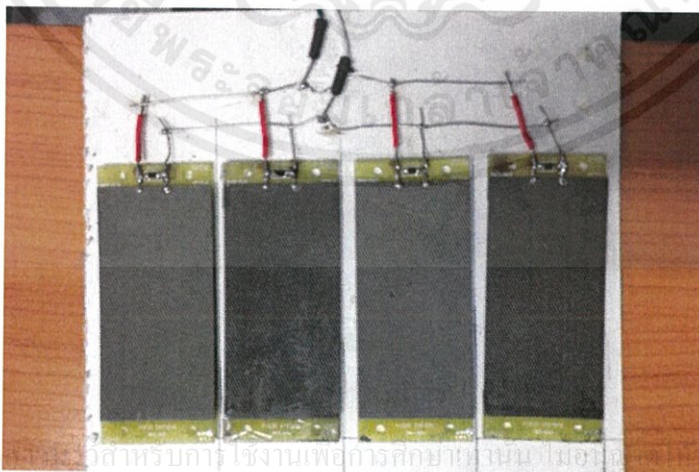
4.2.2.30 เมื่อทำการเดินเหียบโดยมีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่นผ่าน อุปกรณ์ IC bridge rectifier และcapacitorขนาด 1 uF ต่อคู่อนุกรมกันแล้วนำมาขนานกัน



รูปที่ 4.44 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากการเดินเหียบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 4 แผ่น ต่อกัน แบบวงจรคู่อนุกรมกันแล้วนำมาขนานกัน

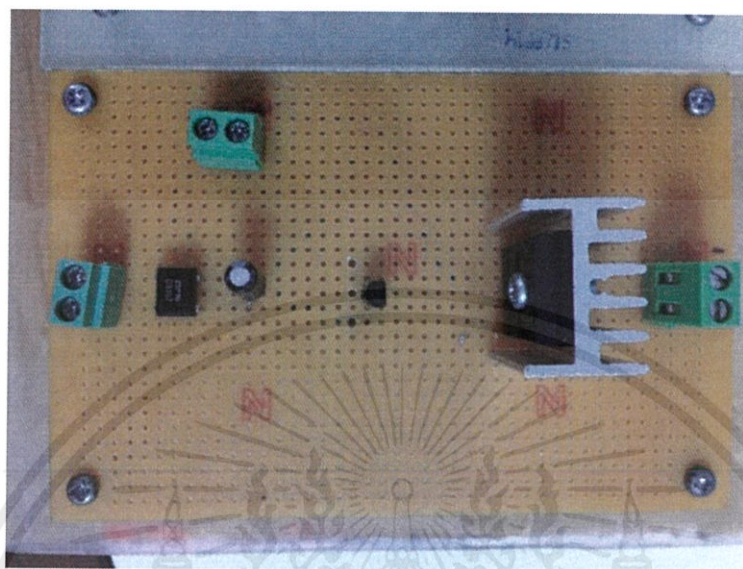
ซึ่งจากผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ Capacitor ขนาด 1 uF จะทำให้แรงดันนั้น เรียบมากยิ่งขึ้น จึงเลือกใช้ C=1 uF ถึงแม้จะทำให้แรงดันที่ได้นั้นลดลงไปแต่ก็ยังเป็นการป้องกันไม่ให้ อุปกรณ์เสียหายและยังช่วยให้การติดของหลอด LED นั้นมีการหน่วงที่ดีกว่าการใช้ C=0.1 uF

โดยจากผลการทดลอง Application ชาร์จแบตเตอรี่ ทำให้ทราบว่า การต่อแผ่นเพียโซอิเล็กทริกในวงจรขนานนั้น จะให้ค่ากระแสที่มากที่สุดดังนั้นจึงเลือกการต่อแผ่นเพียโซอิเล็กทริก ในรูปแบบวงจรขนานเพื่อทำการขยายกระแสต่อไป



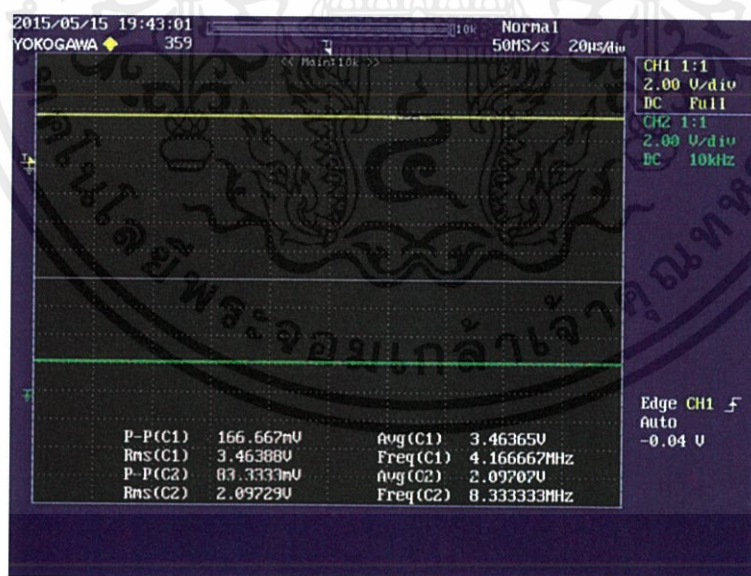
รูปที่ 4.45 การต่อวงจรขนานของแผ่น Piezoelectric

เนื่องจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก นั้นให้กระแสในระดับ  $\mu\text{A}$  จึงต้องทำการขยายกระแส โดยใช้วงจรตัวเรียงกระแสซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ transistors 2 ตัว และใช้วงจรตัวเรียงกระแสหลัง capacitor เพื่อขยายกระแส วงจรเป็นดังรูป



รูปที่ 4.46 อุปกรณ์ rectifier ต่อกับวงจรตัวเรียงกระแส

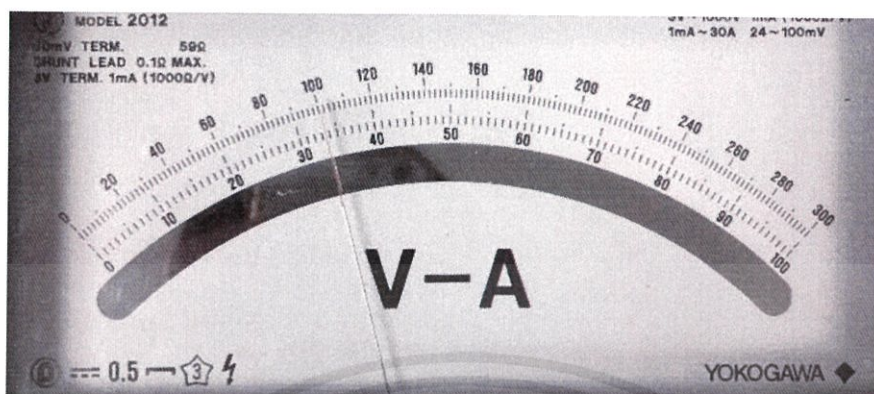
4.2.2.31 แรงดัน ระหว่าง Input(หลังเพียโซอิเล็กทริก) กราฟสี่เหลี่ยม (C1) และ Output(หลังวงจรตัวเรียงกระแส) กราฟสี่เหลี่ยม(C2)



รูปที่ 4.47 รูปคลื่นสัญญาณแรงดัน Input และ Output เมื่อผ่านวงจรขยายกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.32 กระแส โดยใช้ V-A DC meter(Analog) Range 100 mA



รูปที่ 4.48 ค่ากระแสที่วัดได้เมื่อผ่านวงจรขยายกระแส ซึ่งจาก V-A DC meter สามารถอ่านค่ากระแสได้ 35 mA หรือ 0.35 A



รูปที่ 4.49 ป้ายไฟ LED ขณะทำการเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การออกแบบวงจรชาร์จแบตเตอรี่และวิธีการดึงพลังงานเพื่อต่อโหลดใช้งานจริงจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกได้ผลการทดลองเป็นไปตามที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และแสดงให้เห็นว่าสามารถอัดประจุเข้ากับแบตเตอรี่ได้จริง และสามารถต่อโหลดได้โดยตรง โดยโหลดที่ใช้จะเป็นหลอด LED นำมาขนานกันเป็นรูปตัวอักษร จากผลการทดลองสามารถสรุปผลการทดลองเป็นหัวข้อแยกย่อยได้ดังนี้

##### Application 1 วงจรชาร์จแบตเตอรี่

ผลการทดลองได้สังเกตการอัดประจุโดยใช้วิธีการวัดแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่และระยะเวลาในการชาร์จ (กำหนดให้วัดแรงดันที่ขั้วจาก 1.5-3.2 V)

สำหรับ Application นี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 6 แบบ คือ

- 1.แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่นชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 20 mAh
- 2.แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรมชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 20 mAh
- 3.แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 20 mAh
- 4.แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 1 แผ่นชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 40 mAh
- 5.แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่ออนุกรมชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 40 mAh
- 6.แผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 40 mAh

ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

- รูปแบบการต่อแบบขนานจะใช้เวลาในการชาร์จเร็วกว่าแบบอนุกรมเนื่องจากขนานให้กระแสมากกว่าอนุกรม รองลงมาก็คือรูปแบบ 1 แผ่น
- แบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่กว่าจะใช้ระยะเวลาในการชาร์จนานกว่าแบตเตอรี่ขนาดเล็กกว่า

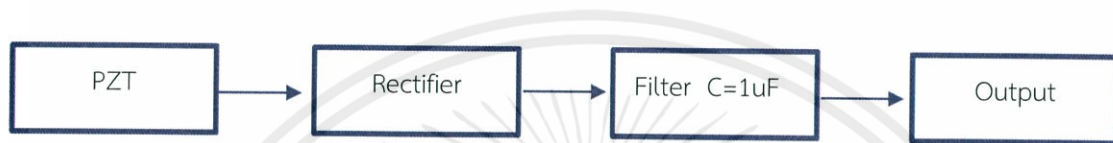
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Application 2 วงจรต่อโหลด LED

จากการออกแบบวงจรการแสดงผลทางหลอด LED โดยการนำพลังงานออกมาจากแผ่น Piezoelectric เพื่อต่อโหลดใช้งานจริง ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้ดังนี้

### วงจรการทดสอบ

จากผลการทดสอบเราจะเห็นได้ว่า ค่าพลังงาน (แรงดัน) เนื่องจากการใช้แผ่นพลาสติกชนิดนั้นมากกว่าการใช้ แผ่น Polyethylene ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 5.1 ผังแสดงการทำงาน Application 2 วงจรต่อโหลด LED

ตารางที่ 5.1 ตารางเปรียบเทียบผลการทดลอง Application 2 วงจรต่อโหลด LED

แผ่น Piezoelectric	แผ่นพลาสติก (Vo/p,rms)
1 แผ่น	4.392
2แผ่น ต่อแบบอนุกรม	3.118
2แผ่น ต่อแบบขนาน	2.6459
4แผ่น ต่อแบบอนุกรม	5.471
4แผ่น ต่อแบบขนาน	3.238
4แผ่น ต่อกันแบบขนานแล้วนำมาอนุกรม	4.754
4แผ่น ต่อกันแบบอนุกรมแล้วนำมาขนาน	4.994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่าแผ่นเพียโซอิเล็กทริกนั้นให้ค่าแรงดันค่อนข้างมากในระดับElectronics แต่ให้กระแสน้อยมาก (ไมโครแอมป์) ซึ่งไม่เพียงพอที่จะจ่ายให้กับโหลดเพื่อแสดงผล หลอดLED

ดังนั้นจึงนำวงจรขยายกระแสคาร์ลิงตันมาขยาย โดยลักษณะการนำแผ่นเพียโซอิเล็กทริกมาต่อนั้นเลือกแบบวงจรมานเพราะการต่อแบบขนานจะทำให้ได้กระแสมากกว่าอนุกรม ทำให้ผลที่ได้ออกมา มีดังนี้

ตารางที่ 5.2 ตาราง  $V_{o/p,rms}$  และ  $I_{o/p,rms}$  หลังต่อวงจรขยายกระแสคาร์ลิงตัน

$V_{o/p,rms}$	2.097 V
$I_{o/p,rms}$	30 mA

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองทั้ง 2 application นอกจากจะเน้นการดึงพลังงานจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกแล้ว ต้องคำนึงถึงความเสี่ยงของแผ่นด้วย เนื่องจากปัจจุบันนี้ราคายังค่อนข้างสูง

### 5.3 แนวทางการพัฒนา

- 1.การที่จะทำให้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกนั้นสามารถให้พลังงานสูงสุดได้ จะต้องทำให้แผ่นเกิดการสั่นด้วยความถี่เรโซแนนต์ หรือประมาณ 47 Hz
- 2.ควรศึกษาวงจรการชาร์จให้สามารถอัดประจุได้เต็มขนาดของแบตเตอรี่ ซึ่งอาจต้องอาศัยวงจรชาร์จเจอร์ที่สามารถปรับการชาร์จแบบแรงดันคงที่และกระแสคงที่ได้
- 3.ควรศึกษาให้วงจรสามารถ Stand Alone ได้โดยไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟเพื่อควบคุมทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชาญณรงค์ น้อยบางยาง, ถาวร สุวรรณกิจ, “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกและการประยุกต์ใช้งาน (Piezoelectric Effect and Application)”,วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์. ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 1-12, มิถุนายน 2552
- [2] PIEZO SYSTEMS, INC.© Piezo Systems, Inc. CATALOG ,No.8 , pp.40, 2011
- [3] vcharkarn , vcharkarn Rectifier, [http://www.vcharkarn.com /uploads / 266/ 267138.pdf](http://www.vcharkarn.com/uploads/266/267138.pdf), 30 กันยายน 2557
- [4] Mr. James Hewes . Basic Electronic, Transistor Circuits, [http://icelectronic .com /beginner/study /trancirc.htm](http://icelectronic.com/beginner/study/trancirc.htm), 4 เมษายน 2558
- [5] Battery University.Supercapacitor, [http://batteryuniversity.com/ learn/article/ whats \\_the \\_role \\_of \\_the \\_supercapacitor](http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor), 4 ตุลาคม 2557
- [6] Komsak Komoljindakul, Siriroj Sirisukprasert, Natchpong Hatti, Kanokvate Tungpimolrut , Kesorn Pechrach and Poramate ManoonpongBernstein, An Electromechanical Model for PZT utilized in Energy Harvesting System, pp.1-4
- [7] N. Hatti, K. Tungpimolrut, J. Phontip, K. Pechrach, P. Manoonpong and K. Komol, A PZT Modeling for Energy Harvesting Circuits, pp.1-4
- [8] Henry A. Sodano , Daniel J. Inman, Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries, pp.1-21,2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การเก็บสะสมพลังงานจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

## ELECTRICAL ENERGY STORAGE FROM PIEZOELECTRIC MATERIALS

นายหัสชนาธิป บุญศรี นายสุรวุฒิ พิพิธพิทักษ์ นายเสมา หงษ์อินทร์ และ นายอนุวัตร ทองใบ  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ซอยจลองกรุง 1 ลาดกระบังกรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 8099

### บทคัดย่อ

ปฏิญานินพจน์นี้ นำเสนอการประยุกต์พลังงานจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกมาเก็บสะสมให้อยู่ในรูปของแบตเตอรี่ และการนำไปต่อโหลดใช้งานจริง ซึ่งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกนี้มีคุณสมบัติคือเปลี่ยนจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยการสั่นหรือการกด ซึ่งน้ำหนักของแรงกดหรือสั่นแผ่นดังกล่าวก็จะมีผลต่อขนาดของพลังงานที่ได้แตกต่างกันไป ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกด้วยเนื่องจากเป็นวัสดุที่เปราะบางเสี่ยงต่อการแตกหักได้ง่าย ดังนั้นเพื่อที่จะหาวิธีดังกล่าว โดยแผ่นเพียโซอิเล็กทริกไม่ได้รับความเสียหาย ปฏิญานินพจน์นี้จึงได้เสนอวิธีการดึงพลังงานจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกมาเก็บสะสมให้อยู่ในรูปของแบตเตอรี่ และวิธีการนำพลังงานที่ได้มาต่อโหลดเพื่อใช้มาใช้ประโยชน์ โดยมีจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการทดลองเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของการดึงพลังงานดังกล่าว

**คำสำคัญ:** วัสดุเพียโซอิเล็กทริก, วงจรคาร์ลิงตัน, แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์

### Abstract

This project studies on energy generated by piezoelectric material to be stored in the battery, and then connect to the load for any application .The piezoelectric material can convert mechanical energy to electrical energy ; the generated energy strongly depends on the pressing force or vibration. As the piezoelectric material used in this study is PZT that is very fragile and costly an optimal method must be applied to do not make it damaged .Therefor , this project proposes how to extract energy from piezoelectric material to be stored in the battery in order to later power other electronic/electrical devices. The simulation and experimental results confirm the effectiveness of energy extraction. Consequently, this work may be practical for energy supplying of the low power devices.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

**Keywords:** Piezoelectric materials, dalington circuit, Nickel Metal

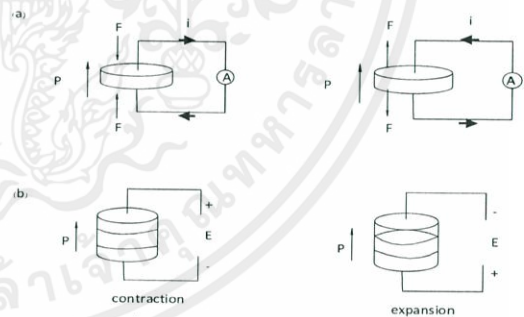
Hydride (NiMH) battery

### 1.บทนำ

ในปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าโดยการใช้พลังงานทางเลือกนั้นมีอย่างแพร่หลายสามารถผลิตจากการเปลี่ยนพลังงานที่มีอยู่ตามธรรมชาติมาเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีการเปลี่ยนรูปพลังงานหลายวิธี เช่น พลังงานลม คลื่นน้ำทะเล และพลังงานแสงอาทิตย์ การเก็บพลังงานจากพลังงานกลหรือการเคลื่อนไหวที่เกิดขึ้นรอบๆตัว กลับมาเก็บในรูปของพลังงานไฟฟ้า ซึ่งปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก เป็นการเปลี่ยนพลังงานจลน์หรือสั่นสะเทือนมาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แต่เนื่องจากการชาร์จเข้าแบตเตอรี่และต่อโหลด LED จะต้องใช้ไฟฟ้ากระแสตรง จึงต้องมี เรกติไฟเออร์ ในการเรียงกระแสแล้วจึงไปชาร์จแบตเตอรี่

### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เพียโซอิเล็กทริก[1]



รูปที่ 1 ปรากฏการณ์ Piezoelectricity

เมื่อมีแรงกดจะทำให้ไดโพลเกิดขึ้นและเป็นผลทำให้เกิดกระแสขึ้นในทำนองกลับกันเมื่อมีแรงดึงจะทำให้ไดโพลเกิดขึ้นและเป็นผลทำให้เกิดกระแสขึ้นเช่นกันดังรูปที่ 1a ในทำนองเดียวกันเมื่อเราป้อนแรงดันบนเพียโซอิเล็กทริกจะขยายและหดตัวซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลในรูปที่ 1b

#### 2.2 Rectifier[2]

วงจรเรียงกระแสหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเรกติไฟเออร์คือ วงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับให้กลายเป็น

สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงหรือมีคุณสมบัติยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการแปลงสัญญาณได้แก่ ไดโอด และในที่นี่จะใช้ ic bridge rectifier

### 2.3 วงจรขยายกระแสตัวลิ่งตัน[3]

ทรานซิสเตอร์สองตัวต่อดำด้วยกัน ทำให้กระแสที่ขยายด้วยตัวแรกถูกขยายต่อด้วยทรานซิสเตอร์ตัวที่สองเกนการขยายกระแสรวมจะเท่ากับเกนของแต่ละตัวคูณกัน:เกนกระแสของคู่ตัวลิ่งตัน

$$h_{FE} = h_{FE1} \times h_{FE2} \quad (1)$$

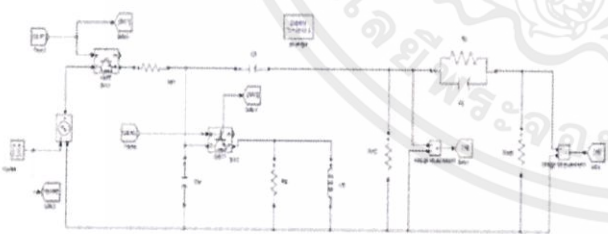
$h_{FE1}$  และ  $h_{FE2}$  คือเกนของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวด้วยเหตุนี้ทำให้คู่ตัวลิ่งตันมีเกนกระแสสูงมาก เช่น 10000 ดังนั้นจึงต้องการกระแสเบสเพียงเล็กน้อยก็ทำให้คู่ตัวลิ่งตันสวิทซ์ต่อได้ คู่ตัวลิ่งตันแทนทรานซิสเตอร์ตัวเดียวที่มีเกนกระแสสูงมาก

### 2.4 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน[4]

แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล เมทัล ไฮโดรด์ (NiMH) มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองได้แก่ นิกเกิลและเมทัลไฮโดรด์ เป็นการพัฒนาจากนิกเกิล-แคดเมียม เนื่องจากแคดเมียมอันตรายต่อการสูดดมข้อดี คือ สามารถจ่ายกระแสได้มาก, มีค่าความต่างศักย์ค่อนข้างคงที่ทนทานต่อการใช้งานหนักได้และไม่จำเป็นต้องใช้คอนโทรลเลอร์ในการชาร์จ[5] ข้อเสีย คือ อัตราการคายประจุเองและราคาแพง

## 3. การออกแบบ

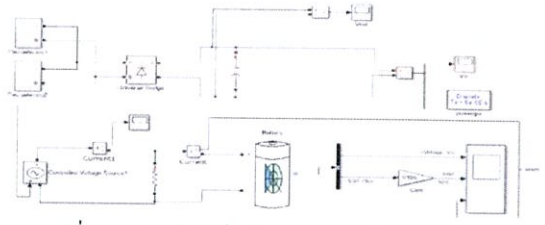
### 3.1 แบบจำลองลักษณะการทำงานของเพียโซอิเล็กทริก[6]



รูปที่ 2 วงจรเพียโซอิเล็กทริก

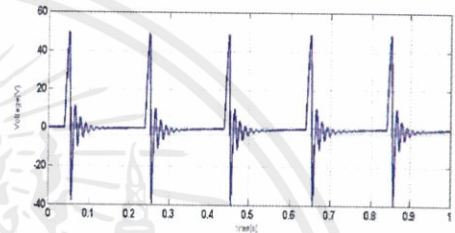
การจำลองระบบนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะการทำงานและสัญญาณของเพียโซอิเล็กทริกเพื่อใช้ในการชาร์จประจุเข้าแบตเตอรี่

นี่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้



รูปที่ 3 วงจรเพียโซอิเล็กทริกขนาน 2 แผ่นวงจร  
-วงจรเรียงกระแส- วงจรชาร์จแบตเตอรี่

### 3.2 ผลการจำลอง



รูปที่ 4 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนาน

จากรูปที่ 4 เป็นการจำลองรูปคลื่นที่วัดสัญญาณด้านขาออกของแผ่นเพียโซโคใช้แหล่งกำเนิดความถี่ที่เป็นตัวสร้างสัญญาณให้แผ่นเพียโซโคสัญญาณที่ได้จะมีความสม่ำเสมอสามารถนำไปชาร์จแบตเตอรี่ได้



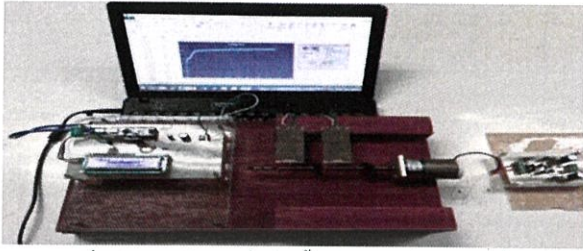
รูปที่ 5 รูปคลื่นลักษณะการชาร์จของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขนานแบตเตอรี่ NiMH 40 mAh

จากรูปที่ 5 เส้นกราฟด้านบนเป็นกราฟของแรงดันตั้งแต่เริ่มชาร์จแบตเตอรี่ กราฟถัดมาเป็นกราฟของกระแสตั้งแต่เริ่มชาร์จแบตเตอรี่ กราฟล่างสุดเป็นกราฟสถานะการชาร์จ จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเริ่มต้นก่อนที่จะแบตเตอรี่แรงดันจะมีค่าส่วนกระแสจะมีค่าสูงแต่เมื่อชาร์จจนถึงตำแหน่งที่แบตเตอรี่ใกล้เต็มแรงดันจะมีค่าสูงส่วนกระแสจะมีค่าต่ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. การทดลองและผลการทดลอง

##### 4.1 การนำไปใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 6 โครงสร้างจริงที่สร้างขึ้นในการชาร์จแบตเตอรี่[7]

โครงสร้างแบบจำลองถูกทำขึ้น โดยใช้ฐานไม้เนื่องจากมีความแข็งแรง พร้อมติดตั้งแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจำนวน 2 แผ่น และ DC มอเตอร์ที่ใช้ในการตีแผ่นเพียโซอิเล็กทริกด้วยความถี่ 5 Hz ไว้บนฐานไม้ ดังรูปที่ 6 ถ้าหับวงจรชาร์จแบตเตอรี่จะประกอบไปด้วย วงจรเรียงกระแส(Rectifier) ตัวเก็บประจุ และวงจรแสดงผลการชาร์จ

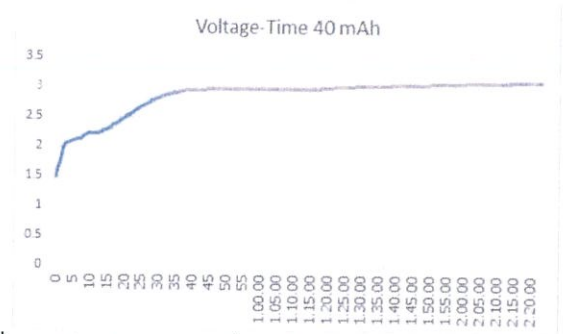
##### 4.2 ผลการวงจรการทดลอง Application ชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 7 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขานานความถี่ 5 Hz

ตารางที่ 1 ตารางระยะเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่

ขนาดของแบตเตอรี่	เวลาแต่ละลักษณะการต่อวงจรของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก		
	1 แผ่น	2 แผ่นอนุกรม	2 แผ่นขนาน
20 mAh	>6 ชั่วโมง 22 นาที	6 ชั่วโมง 22 นาที	1 ชั่วโมง 58 นาที
40 mAh	>7 ชั่วโมง 39 นาที	7 ชั่วโมง 39 นาที	2 ชั่วโมง 23 นาที



รูปที่ 8 กราฟคุณลักษณะการชาร์จระหว่างแรงดันกับเวลาของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นต่อขานานแบตเตอรี่ NiMH ขนาด 40 mAh

จากรูปที่ 7 เป็นผลที่ได้จากการนำมอเตอร์มาตีแผ่นเพียโซอิเล็กทริก 2 แผ่นที่ต่อแบบขนานอย่างสม่ำเสมอด้วยความถี่ 5 Hz ก่อนที่จะชาร์จเข้ากับแบตเตอรี่ จากตารางที่ 1 จะเห็นว่า การนำแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ต่อขนานไปชาร์จเข้ากับแบตเตอรี่ จะได้ระยะเวลาในการชาร์จที่น้อยที่สุด เนื่องจากการต่อลักษณะนี้จะได้พลังงานไฟฟ้าจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกสูงที่สุด จากรูปที่ 8 เป็นแรงดันที่เกิดขึ้นจริง โดยการนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกไปชาร์จเข้ากับแบตเตอรี่ โดยแรงดันที่เข้าแบตเตอรี่ จะมีความชันมากในช่วงระยะเวลาในการชาร์จในช่วงเริ่มต้น จากนั้นเมื่อชาร์จได้ถึงขีดจำกัดแรงดันค่าหนึ่งจะทำให้มีความชันน้อยลง จะใช้ระยะเวลาในการชาร์จนานขึ้น เมื่อแรงดันใกล้จะถึงขีดจำกัดของแบตเตอรี่ ความชันของกราฟจะมีค่าเป็นศูนย์นั้นหมายความว่าแบตเตอรี่นั้นถูกชาร์จจนเต็มพิกัดแล้ว

##### 4.3 การนำไปใช้งานกับหลอด LED

จากการทำทดลองโดยการเดินเหยียบลงบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเพื่อวัดค่าและลักษณะกราฟของแรงดันที่ได้จากการทดลอง โดยมีแผ่นพลาสติก เป็น Cover โดยการทดลองจะแบ่งการทดลองตามการต่อวงจรของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกซึ่งจะมีการต่อวงจรอนุกรมและการต่อวงจรขนาน เนื่องจากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกนั้นให้กระแสในระดับ  $\mu A$  จึงต้องทำการขยายกระแส โดยใช้วงจรคาร์ลิงตันซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ transistors 2 ตัว และใช้วงจรคาร์ลิงตันหลัง capacitor เพื่อขยายกระแสและนำกระแสที่ได้ไปต่อเข้ากับ LED เพื่อให้ไฟสว่างเมื่อเหยียบและไฟดับเมื่อปล่อย ได้แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 วงจรทดลอง Application หลอดไฟ

## 5. บทสรุป

การออกแบบวงจรชาร์จแบตเตอรี่และวิธีการดึงพลังงานเพื่อต่อโหลดใช้งานจริงจากแผ่น เพียโซอิเล็กทริกได้ผลการทดลองเป็นไปตามที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และแสดงให้เห็นว่าสามารถอัดประจุเข้ากับแบตเตอรี่ได้จริง และสามารถต่อโหลดได้โดยตรงโดยโหลดที่จะเป็นหลอด LED นำมาขนานกันเป็นรูปตัวอักษร และสามารถนำไปประยุกต์และพัฒนาเพื่อนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีพิสัยกระแสไม่มากนัก

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชาญณรงค์ น้อยบางยาง, ถาวร สุวรรณกิจ, "ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกและการประยุกต์ใช้งาน (Piezoelectric Effect and Application)",วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์, ปีที่ 8,ฉบับที่ 1,หน้า 1-12, มิถุนายน 2552
- [2] vcharkam , vcharkam Rectifier, <http://www.vcharkam.com/uploads/266/267138.pdf>, 30 กันยายน 2557
- [3] Mr. James Hewes . Basic Electronic, Transistor Circuits, <http://icelectronic.com/beginner/study/trancirc.htm>, 4 เมษายน 2558
- [4] Battery University.Supercapacitor, [http://batteryuniversity.com/learn/article/whats\\_the\\_role\\_of\\_the\\_supercapacitor](http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor), 4 ตุลาคม 2557
- [5] Henry A. Sodano , Daniel J. Inman, Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries, pp.1-21,2005
- [6] Komsak Komoljindakul, Siriroj Sirisukprasert, Natchpong Hatti, Kanokvate Tungpimolrut , Kesorn Pechrach and Poramate ManoonpongBemstein, An Electromechanical Model for PZT utilized in Energy Harvesting System, pp.1-4
- [7] N. Hatti, K. Tungpimolrut, J. Phontip, K. Pechrach, P. Manoonpong and K. Komol, A PZT Modeling for Energy Harvesting Circuits, pp.1-4

## ประวัติผู้เขียนบทความ



นายอนุวัตร ทองใบ

เกิดวันที่ 31 ตุลาคม พ.ศ.2535

ที่อยู่ 117/4 หมู่ 3 ต.คลองปูน อ.แกลง จ.ระยอง 21170

โทรศัพท์ 086-8160500

E-mail : Anuwat\_bon@hotmail.com



นายหัชชนาธิป บุญตรี

เกิดวันที่ 10 มกราคม พ.ศ.2535 ที่อยู่ 2506/31

ม.1 ถนนจรดศีกษา 19 ต.สัดหีบ อ.สัดหีบ

จ.ชลบุรี 20180

โทรศัพท์ 094-5895574

E-mail : glassessalapa@gmail.com



นายเสมา หงษ์อินทร์

เกิดวันที่ 4 มกราคม พ.ศ.2536

ที่อยู่ 10/222 ถนนฉลองกรุง แขวงทับขาว เขต

ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทรศัพท์. 084-3830730

E-mail : h\_sema@outlook.com



นายสุรวุฒิ พิพิธพิทักษ์

เกิดวันที่ 12 กันยายน พ.ศ.2535

ที่อยู่ 1078/4-8 หมู่4 ต.ท่าม่วง อ.ท่าม่วง

จ.กาญจนบุรี 71110

โทรศัพท์ 084-3148431

E-mail : new\_1314@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้