

วงจรรเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับวัสดุไพโซอิเล็กทริกเซรามิก  
ENERGY HARVESTING CIRCUIT FOR PIEZOELECTRIC  
CERAMICS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

วงจรรเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับวัสดุไพโซอิเล็กทริกเซรามิก  
ENERGY HARVESTING CIRCUIT FOR PIEZOELECTRIC  
CERAMICS



T149288



พิมพ์วรรณ อยู่ดี

ส.พ.

พ 7282

2658

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 149288  
วันเดือนปี 30 ส.ค. 2561

b. 4288/1487  
f.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ลิขสิทธิ์สงวนไว้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ENERGY HARVESTING CIRCUIT FOR PIEZOELECTRIC CERAMICS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
(APPLIED PHYSICS)

DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ของนักศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ACADEMIC YEAR 2015

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ      วงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับวัสดุไพโซอิเล็กทริกเซรามิก  
ENERGY HARVESTING CIRCUIT FOR PIEZOELECTRIC CERAMICS

ชื่อนักศึกษา                      นางสาวพิมพ์วรรณ อยู่ดี                      รหัสนักศึกษา 55051570

ปริญญา                                  วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา                                  ฟิสิกส์

ปีการศึกษา                              2558

อาจารย์ที่ปรึกษา                      ดร.พิศาล สุขวิสูตร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ประจำปีการศึกษา 2558

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

ลิขสิทธิของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงจำกัดเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับวัสดุไพโซอิเล็กทริกเซรามิก
นักศึกษา	นางสาวพิมลวรรณ อยู่ดี รหัสนักศึกษา 55051570
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.พิศาล สุขวิสูตร

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานการสั่นของวัสดุเลดเซอร์โคเนตไทเทเนท (PZT) โดยใช้วงจรแบบมาตรฐานและวงจรทวีแรงดัน 2 เท่า แบบเต็มคลื่น ในการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงาน คานทิลเวอร์เหล็ก (steel cantilever) ที่มีสารไพโซอิเล็กทริกเซรามิก PZT ติดอยู่จะได้รับการกระตุ้นด้วยวิธีการทางแม่เหล็กไฟฟ้าให้สั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์ 35 Hz คานทิลเวอร์จะได้รับการทดสอบที่แอมพลิจูดการสั่นต่างกันเพื่อให้ PZT กำเนิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ 10 20 และ 30 Vpp ตามลำดับ จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานทั้ง 2 แบบ และพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ของแต่ละวงจรจะได้รับการประเมินด้วยการปรับค่าความต้านทานในช่วง  $1\text{k}\Omega$  ถึง  $10\text{M}\Omega$  ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า พลังงานไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้จากวงจรแบบมาตรฐานและวงจรทวีแรงดัน มีค่าสูงสุด  $300.313\ \mu\text{W}$  และ  $249.334\ \mu\text{W}$  ตามลำดับ พลังงานระดับนี้เพียงพอสำหรับป้อนให้กับเครื่องช่วยฟัง เครื่องคิดเลข และป้ายระบุสินค้าแบบอาร์เอฟไอดี (RFID tag) โหลดที่เหมาะสมซึ่งให้พลังงานสูงสุดสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานจากวัสดุ PZT เมื่อใช้วงจรแบบมาตรฐานและวงจรทวีแรงดันมีค่าอยู่ในช่วง  $90\text{-}200\ \text{k}\Omega$  และ  $600\text{-}800\ \text{k}\Omega$  ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** วงจรมาตรฐาน วงจรทวีแรงดัน 2 เท่าแบบเต็มคลื่น ความถี่เรโซแนนซ์ คานทิลเวอร์ เลดเซอร์โคเนตไทเทเนท อาร์เอฟไอดี แอมพลิจูด ไพโซอิเล็กทริกเซรามิก

Title	ENERGY HARVESTING CIRCUIT FOR PIEZOELECTRIC CERAMICS
Student	Miss Pimolwan Yoodee Student ID 55051570
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2015
Advisor	Dr.Pisan Sukwisute

### Abstract

This special project is a study of vibration energy harvesting of lead zirconate titanate (PZT) using a standard interface and a full wave voltage multiplier circuits. For the energy harvesting test, the piezoelectric ceramic PZT glued on a steel cantilever was excited by electromagnet at the resonant frequency of 35 Hz. The cantilever was then vibrated under different amplitudes leading to the alternating voltages (i.e., 10, 20, and 30 Vpp) generated by the PZT ceramic. The generated piezovoltage was converted into the direct current voltage by both circuits and energy harvesting of each circuit was estimated by load resistance adjustment in a range of  $1\text{k}\Omega$  -  $10\text{M}\Omega$ . The experimental results shows that the harvested energy from the standard interface and full wave voltage multiplier circuits are  $300.313\ \mu\text{W}$  and  $249.334\ \mu\text{W}$  respectively. This energy level is sufficient for powering hearing aids, calculators and radio frequency identification (RFID) tags. The optimal loads obtaining the harvested maximum energy from PZT are in the ranges of  $90\text{-}200\ \text{k}\Omega$  และ  $600\text{-}800\ \text{k}\Omega$  for the standard interface and full wave voltage multiplier circuits.

**Keywords :** standard interface, full wave voltage multiplier circuits, resonance frequency, cantilever, lead zirconate titanate, RFID tags, amplitude, piezoelectric ceramic

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ดร.พิศาล สุขวิสูตร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขในการดำเนินการจัดทำโครงการพิเศษนี้ ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งและถือเป็นพระคุณอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี รศ.วิจิต ศิริโชติ และ รศ.อนุพงษ์ สรงประภา รวมทั้งพี่ๆนักวิจัยทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำและความอนุเคราะห์ ด้านอุปกรณ์และเครื่องมือที่สำคัญต่อการทำโครงการวิจัยในครั้งนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ใน ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่ได้ให้ความกรุณาให้ความรู้ให้คำแนะนำ และให้ความคิดเห็นเป็นอย่างดีเสมอมา ทำให้ได้ข้อมูลครบถ้วนในการทำงานวิจัยครั้งนี้

คุณงามความดีอันพึงมีจากโครงการพิเศษฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บิดา มารดา อันเป็นที่รัก และเคารพยิ่งและคณาจารย์ผู้ประสทาวิจัยความรู้ ตลอดจนทุกท่านที่ได้ให้กำลังใจช่วยเหลือจนกระทั่งโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

พิมลวรรณ อยู่ดี



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฌ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 การเก็บเกี่ยวพลังงานและระบบการเก็บเกี่ยวพลังงาน	4
2.1.1 ระบบการเก็บเกี่ยวพลังงาน	4
2.2 วงจรการเก็บเกี่ยวพลังงาน	5
2.2.1 วงจรการเชื่อมต่อแบบมาตรฐาน	5
2.2.2 วงจรการเชื่อมต่อแบบ Full Wave Voltage Multiplier	6
2.3 ทฤษฎีไพเอโซอิเล็กทริก	7
2.3.1 ความเป็นมาของไพเอโซอิเล็กทริก	7
2.3.2 ปรากฏการณ์ไพเอโซอิเล็กทริก	8
2.3.3 โครงสร้างของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก	9
2.3.4 สมบัติที่สำคัญของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก	11
2.3.5 ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริก	12
2.4 วงจรเรียงกระแส	13
2.4.1 ลักษณะวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น	13
2.4.2 การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น	14
2.4.3 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง	16
2.4.4 การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง	16
2.4.5 วงจรกรองแบบใช้ตัวเก็บประจุ	17
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>20</b>
3.1 วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือ	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 การดำเนินงานวิจัย	21
3.2.1 ประกอบวงจร Power amplifier และทดสอบการทำงาน	21
3.2.2 ทำหม้อแปลงไฟฟ้าและหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ของคาน	22
3.2.3 ทำขั้วไฟฟ้าของวัสดุไพเอโซเซรามิก PZT	23
3.2.4 ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมาตรฐาน	25
3.2.5 ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier	26
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	<b>28</b>
4.1 ผลการทดสอบการขยายสัญญาณของวงจร Power amplifier	28
4.2 ผลการศึกษการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมาตรฐาน	30
4.2.1 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมาตรฐาน ที่แอมพลิจูด 10 Vpp	30
4.2.2 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมาตรฐาน ที่แอมพลิจูด 20 Vpp	32
4.2.3 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมาตรฐาน ที่แอมพลิจูด 30 Vpp	35
4.3 ผลการศึกษการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier	38
4.3.1 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier ที่แอมพลิจูด 10 Vpp	38
4.3.2 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier ที่แอมพลิจูด 20 Vpp	40
4.3.3 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier ที่แอมพลิจูด 30 Vpp	43
<b>บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>47</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	
<b>ภาคผนวก</b>	

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	2
4.1 ผลการทดสอบการขยายสัญญาณของวงจร Power amplifier	28
4.2 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมาตรฐานที่แอมพลิฟิวด์ 10 Vpp	30
4.3 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมาตรฐานที่แอมพลิฟิวด์ 20 Vpp	32
4.4 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมาตรฐานที่แอมพลิฟิวด์ 30 Vpp	35
4.5 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier ที่แอมพลิฟิวด์ 10 Vpp	38
4.6 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier ที่แอมพลิฟิวด์ 20 Vpp	40
4.7 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier ที่แอมพลิฟิวด์ 30 Vpp	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	Schematic of the vibration energy harvester	5
2.2	Energy flow diagram of energy harvesting process	5
2.3	standard energy harvesting interface;(a)schematics;(b) waveforms: (1);open circuit;(2)harvesting process	6
2.4	แสดงวงจร Full Wave Voltage Multiplier	6
2.5	แสดงการจัดกลุ่มผลึกตามความสมมาตรของผลึกและลำดับชั้นไพโซ-ไพโร-เพอร์โรอิเล็กทริก	7
2.6	ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (a) ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบตรง (b) ปรากฏการณ์ ไพโซอิเล็กทริกแบบผกผัน	9
2.7	แสดงหน่วยเซลล์แบบเพอรอฟสไกต์ของ PZT	10
2.8	แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบเซรามิก $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$	11
2.9	วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น	13
2.10	แสดงวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นบวก	14
2.11	แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟตรงเมื่อใช้ตัวเก็บประจุกรองแรงดัน	14
2.12	แสดงวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นลบ	15
2.13	แสดงรูปคลื่นเมื่อใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง	15
2.14	วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น	16
2.15	แสดงการทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น	17
2.16	แสดงวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นใช้ตัวเก็บประจุกรอง	18
2.17	รูปสัญญาณวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นก่อนและหลังใส่ตัวเก็บประจุ	18
2.18	แสดงวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นลบ	18
3.1	ภาพแสดงกล่องวงจร Power amplifier	21
3.2	แสดงการต่อวงจรการทดสอบสัญญาณของวงจร Power amplifier	21
3.3	ภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	22
3.4	แสดงการประกอบคานเหล็กกับตัวจับยึดและติดแม่เหล็กที่ปลายคาน	22
3.5	แสดงการต่อวงจรเพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ของคานเหล็ก	23
3.6	แสดงการบัดกรีสายไฟเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าของไพโซเซรามิก PZT	23
3.7	แสดงการติดไพโซเซรามิก PZT บนคานเหล็ก	23
3.8	การประกอบตัวจับยึดกับคานที่ติดไพโซเซรามิก PZT	24
3.9	การทดสอบสัญญาณไพโซเซรามิก	24
3.10	สัญญาณเพียโซโวลเตจที่ได้จากวัสดุไพโซเซรามิก PZT	24
3.11	แสดงวงจรมาตรฐานที่ต่อกับขั้วไฟฟ้าของไพโซเซรามิก PZT ที่อยู่บนคาน	25
3.12	แสดงการสั้นคานไพโซเซรามิก PZT ด้วยวิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้า	25
3.13	การประกอบตัวจับยึดกับคานที่ติดไพโซเซรามิก PZT	26
3.14	แสดงวงจร Full Wave Voltage Multiplier ที่ต่อกับขั้วไฟฟ้าของไพโซเซรามิก PZT ที่อยู่บนคาน	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 แสดงการสั่นคานาไพโซเซรามิก PZT ด้วยวิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้า	27
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายสัญญาณ (Gain) กับความถี่ (Hz)	29
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu\text{W}$ ) กับ Load (RL) $\Omega$ ของวงจรมาตรฐาน ที่ 10 Vpp	32
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu\text{W}$ ) กับ Load (RL) $\Omega$ ของวงจรมาตรฐานที่ 20 Vpp	34
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu\text{W}$ ) กับ Load (RL) $\Omega$ ของวงจรมาตรฐานที่ 30 Vpp	37
4.5 กราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu\text{W}$ ) กับ Load (RL) $\Omega$ ของวงจรมาตรฐาน	37
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu\text{W}$ ) กับ Load (RL) $\Omega$ (วงจร FW Voltage Multiplier) ที่ 10 Vpp	40
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu\text{W}$ ) กับ Load (RL) $\Omega$ (วงจร FW Voltage Multiplier) ที่ 20 Vpp	43
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu\text{W}$ ) กับ Load (RL) $\Omega$ (วงจร FW Voltage Multiplier) ที่ 30 Vpp	45
4.9 กราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu\text{W}$ ) กับ Load (RL) $\Omega$ ของวงจร FW Voltage Multiplier	46
4.10 กราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu\text{W}$ ) กับ Load (RL) $\Omega$ ของวงจรมาตรฐานและวงจร FW Voltage Multiplier ที่ 10 Vpp และ 30 Vpp	46

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
$\epsilon_r$	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
$\epsilon_0$	สภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของสุญญากาศ ( $8.854 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ )
t	ความหนาของสารตัวอย่าง มีหน่วยคือ m
A	พื้นที่ผิวของขั้วสาร มีหน่วยคือ $\text{m}^2$
C	ค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยคือ F
$F_r$	ความถี่เรโซแนนซ์ ในหน่วยเฮิร์ตซ์ (Hz)
$F_a$	ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ ในหน่วยเฮิร์ตซ์ (Hz)
$Z_m$	อิมพีแดนซ์ในหน่วยโอห์ม ( $\Omega$ ) วัดที่ $F_r$
$C_0$	ค่าความจุไฟฟ้า ในหน่วยฟารัด (F) วัดที่ 1kHz
$V_{AC}$	ค่าความต่างศักย์ไฟสลับ ในหน่วยโวลต์ (V)
$V_{DC}$	ค่าความต่างศักย์ไฟตรง ในหน่วยโวลต์ (V)
$V_{in}$	ค่าความต่างศักย์อินพุต ในหน่วยโวลต์ (V)
$V_{out}$	ค่าความต่างศักย์เอาต์พุต ในหน่วยโวลต์ (V)
$Q_M$	แฟกเตอร์ทางคุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor)
FOM	ค่าคุณภาพการใช้งาน (figure of merit)
$\epsilon^T$	ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริก (piezoelectric constant)
$k^2$	สัมประสิทธิ์คู่ควบทางไฟฟ้า (coupling coefficient)
PZT	เลดเซอร์โคเนตไทเทเนท ( $\text{Pb (Zr}_x\text{Ti}_{1-x}) \text{O}_3$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา เช่น นาฬิกาดิจิตอล เซ็นเซอร์ไร้สาย ตัวรับส่งสัญญาณบลูทูธ เครื่องช่วยฟัง เครื่องคิดเลข และรีโมทควบคุม เป็นต้น นั้นได้รับการพัฒนาขึ้นเป็นอย่างมากจึงทำให้อุปกรณ์เหล่านี้มีน้ำหนักเบา ขนาดเล็กลง ประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้นแต่ใช้พลังงานน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์เหล่านี้ยังคงต้องอาศัยแหล่งพลังงานแบบสิ้นเปลืองจากแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานหลัก การใช้งานอุปกรณ์จึงขึ้นอยู่กับอายุหรือความจุของแบตเตอรี่ การดูแลบำรุงรักษาจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอุปกรณ์ นอกจากนี้ปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการรีไซเคิลแบตเตอรี่ก็เป็นประเด็นที่ต้องพิจารณาด้วย ด้วยเหตุนี้จึงก่อให้เกิดความต้องการที่จะสรรหาพลังงานไฟฟ้าที่สะอาดและไม่สิ้นเปลืองป้อนให้กับอุปกรณ์เหล่านี้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากแบตเตอรี่

ในช่วง 10 กว่าปีที่ผ่านมาจึงได้มีการนำเสนอและศึกษาการใช้ตัวกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ที่สามารถแปลงพลังงานรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งแฝงอยู่ในสิ่งแวดล้อมรอบอุปกรณ์เหล่านี้ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ พลังงานที่แฝงในสิ่งแวดล้อมนั้นมีทั้งในรูปของ พลังงานแสง พลังงานความร้อนเหลือทิ้ง พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (คลื่นวิทยุ) และพลังงานกลต่าง ๆ สำหรับพลังงานกลนั้นถือได้ว่าเป็นพลังงานสะอาดที่น่าสนใจเพราะพบได้ทุกที่ทั้งภายใน และภายนอกอาคาร แหล่งของพลังงานกลจากสิ่งแวดล้อม อาทิเช่น พลังงานจากการเคลื่อนไหวของคนและสัตว์ พลังงานลม พลังงานการสั่นของเครื่องจักรและสิ่งก่อสร้าง เป็นต้น การแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นมีด้วยกันด้วยหลายวิธี ได้แก่ การเหนี่ยวนำด้วยแม่เหล็ก การใช้เทคนิคทางไฟฟ้าสถิต และการใช้วัสดุไพโซโซอิกเล็กทริก วัสดุไพโซเล็กทริกมีความโดดเด่นกว่าวิธีอื่นเนื่องจากสามารถทำเป็นตัวเก็บเกี่ยวพลังงานที่มีขนาดเล็กแต่ยังคงความหนาแน่นพลังงานที่สูงได้ ดังนั้นในการศึกษาจึงเจาะจงมุ่งเน้นไปที่การเก็บเกี่ยวพลังงานการสั่นโดยใช้วัสดุไพโซโซอิกเล็กทริก แต่เนื่องจากวัสดุไพโซโซอิกเล็กทริกที่เป็นผลึกเชิงเดี่ยวต่าง ๆ และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงนั้นมีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนและราคาสูง การเลือกใช้งานวัสดุไพโซเซรามิกที่เป็นพหุผลึก (polycrystalline) จึงมีความน่าสนใจกว่าเพราะเตรียมขึ้นได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อชดเชยพลังงานที่สูญเสียระหว่างการแปลงพลังงานกลของวัสดุนี้ได้ด้วย ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้เกิดโครงการวิจัยนี้ขึ้นมาเพื่อศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพโซเซรามิกโดยใช้วงจรมาตรฐานและวงจร Full Wave Voltage Multiplier เพื่อเพิ่มความสามารถในการแปลงพลังงานของวัสดุชนิดนี้ให้สูงขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุตัวอย่างไพโซเซรามิก

2) เพื่อศึกษาหลักการทำงานและเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านการเก็บเกี่ยวพลังงานกลเมื่อใช้วงจรแบบมาตรฐานและวงจร Full Wave Voltage Multiplier

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการนี้จะนำความรู้ทางด้านฟิสิกส์มาประยุกต์ใช้ เพื่อการศึกษาหลักการทำงานด้านการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพโซเซรามิก โดยศึกษาเกี่ยวกับการใช้วงจรมาตรฐานและวงจร Full Wave Voltage Multiplier ในการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานโดยการใช้วิธีการทางแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อก่อให้เกิดเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาด้านพลังงานทดแทนต่อไปได้อีก

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 แสดงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

หัวข้องานวิจัย	ปีการศึกษา 1/2558					ปีการศึกษา 2/2558				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
สืบค้นข้อมูลและจัดทำ อุปกรณ์										
ศึกษาการทำงานของวงจร มาตรฐานและวงจร Full Wave Voltage Multiplier บนบอร์ด ทดลอง										
ทดสอบการเก็บเกี่ยว พลังงานการสั่นของวัสดุ ไพโซเซรามิก PZT										
สรุปผลและเขียนรายงาน										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีความรู้ และความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพโซเซรามิก
- 2) มีความรู้ความเข้าใจในหลักการทำงานด้านการเก็บเกี่ยวพลังงาน เมื่อใช้วงจรแบบมาตรฐานและวงจร Full Wave Voltage Multiplier
- 3) ได้ทราบถึงประสิทธิภาพด้านการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรแบบมาตรฐานและวงจร Full Wave Voltage Multiplier



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาและวิจัย ดังต่อไปนี้

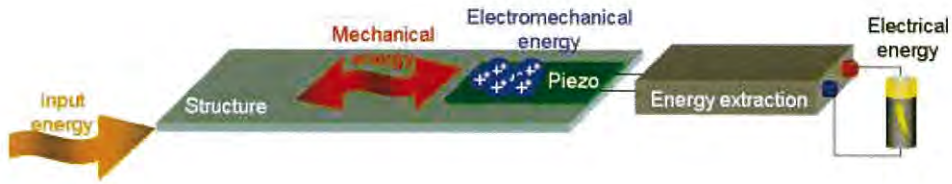
### 2.1 การเก็บเกี่ยวพลังงานและระบบการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy harvesting and system)

คำว่า “harvesting” เดิมมีความหมายตามพจนานุกรมว่าการเก็บเกี่ยวผลผลิตตลอดจนเก็บรวบรวมพืชผักผลไม้จากพื้นที่เพาะปลูก ต่อมามีการนำคำนี้มาใช้ในความหมายของการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแหล่งกำเนิดในสภาพแวดล้อม (ambient energy source) เพื่อแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า และเก็บกักไว้ป้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก มูลเหตุจูงใจของการเก็บเกี่ยวพลังงานมีที่มาจาก การที่เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ได้แก่ ลิเทียม แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน ฯลฯ เป็นแหล่งผลิตพลังงานที่ย่อมมีวันหมดไป นอกจากนั้น การได้พลังงานจากเชื้อเพลิงดังกล่าวมักก่อให้เกิดผลเสียติดตามมา โดยเฉพาะเรื่องปรากฏการณ์แก๊สเรือนกระจก (greenhouse gas) การเก็บเกี่ยวพลังงานจากแหล่งพลังงานที่มีอย่างต่อเนื่องในสิ่งแวดล้อมจึงจัดเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีคุณค่าอย่างยิ่งทั้งทางสังคมและเศรษฐกิจ [1]

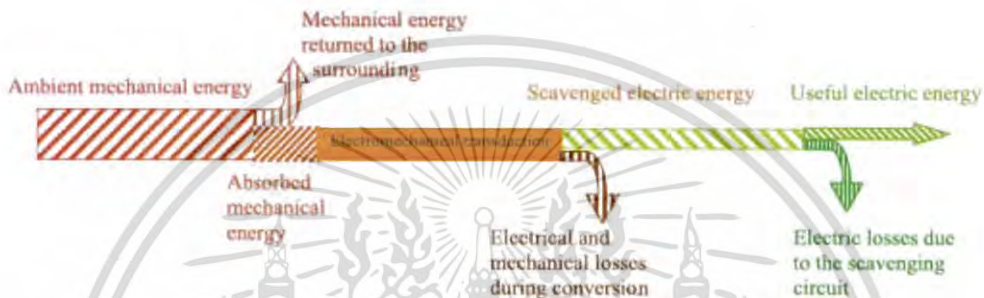
#### 2.1.1 ระบบการเก็บเกี่ยวพลังงาน

รายละเอียดในส่วนนี้จะเกี่ยวข้องกับระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานที่เกิดจากการสั่นของวัสดุไพโซอิเล็กทริก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (Guyomar and Lallart, 2011) และการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในระบบ ซึ่งระบบนี้จะครอบคลุมถึงพลังงานทางกลจากสิ่งแวดล้อม (พลังงานอินพุตที่ป้อนเข้าไปในระบบ) รวมถึงโครงสร้างต่างๆ ของวัสดุไพโซอิเล็กทริกไม่ว่าจะเป็นการดึงพลังงานออกจากระบบหรือการเก็บสะสมพลังงานไว้ในระบบ ซึ่งการเปลี่ยนรูปของพลังงานในระบบสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีโครงสร้างไฟฟ้ากล ดังแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยขั้นตอนแรกเป็นการดูดกลืนพลังงานกลของเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานซึ่งประกอบไปด้วยคานทิลเวอร์และเม็ดเซรามิกที่ติดอยู่ที่ปลายคาน ขั้นตอนที่สอง เป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และในขั้นตอนสุดท้ายเป็นกระบวนการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ประโยชน์ได้โดยการดึงพลังงานออกมาจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 Schematic of the vibration energy harvester  
(ที่มา : Guyomar and Lallart,2011)



รูปที่ 2.2 Energy flow diagram of energy harvesting process  
(ที่มา : Jean-Mistral et al.,2010)

## 2.2 วงจรการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy harvesting circuit)

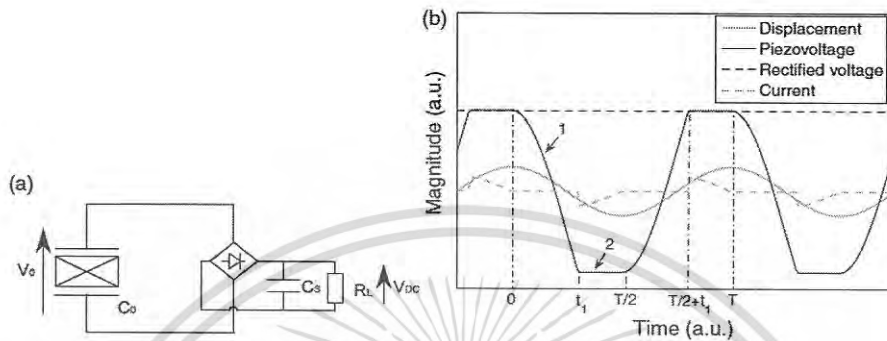
### 2.2.1 วงจรการเชื่อมต่อแบบมาตรฐาน (standard circuit)

วงจรการเชื่อมต่อแบบมาตรฐานประกอบด้วย วัสดุไพเอโซอิเล็กทริกเชื่อมต่อโดยตรงกับตัวแปลงสัญญาณไฟสลับเป็นไฟตรง ( AC-to-DC converter) ซึ่งประกอบด้วยไดโอดเรกติไฟเออร์ (diode rectifier) และตัวเก็บประจุ สัญญาณ DC ที่ได้จะเรียบดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับชนิดของไดโอดเรกติไฟเออร์และขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมกับสัญญาณขาเข้า[1]

จะเห็นได้ว่าเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการดึงพลังงานไฟฟ้าออกมาจากวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกสามารถทำได้โดยการต่อขั้วไฟฟ้าของวัสดุไพเอโซเซรามิกโดยตรงกับตัวเก็บประจุและโหลดโดยใช้วงจรเรกติไฟแบบบริดจ์(rectifier bridge) ดังรูปที่ 2.3(a) ในกรณีนี้กระบวนการเก็บเกี่ยวพลังงานจะเกิดขึ้นเมื่อค่าความต่างศักย์เพียโซอิเล็กทริกสัมบูรณ์มีค่าเท่ากับค่าความต่างศักย์ที่เรกติไฟ ( $V_D$ ) ดังรูปที่ 2.3(b) เวลาส่วนที่เหลือนั้นวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกจะอยู่ในช่วงวงจรเปิด (open circuit) สมมติว่าตัวเก็บประจุที่เก็บพลังงาน  $C_s$  มีความจุไฟฟ้าค่อนข้างมาก ( $C_s \gg C_0$  และ  $R_L C_s \gg T/2$  เมื่อ  $T$  คือคาบการสั่น) ดังนั้น  $V_D$  สามารถคิดได้ว่าเป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถคำนวณหาพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้[2]

โดยใช้สมการ

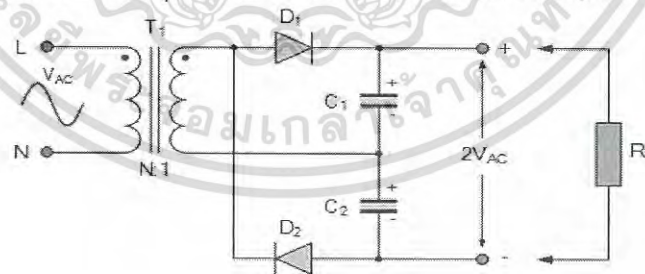
$$P = \frac{V_{DC}^2}{R_L} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.3 standard energy harvesting interface;(a)schematics;(b) waveforms:(1);open circuit;(2)harvesting process.[2]

### 2.2.2 วงจรการเชื่อมต่อแบบ Full Wave Voltage Multiplier

วงจรเพิ่มแรงดัน 2 เท่าแบบเต็มคลื่น (Full Wave Voltage Multiplier) เป็นวงจรที่จ่ายกระแสได้สูงกว่าวงจรเพิ่มแรงดัน 2 เท่าแบบครึ่งคลื่น เนื่องจากการทำงานแบบเต็มคลื่นสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าได้ตลอดทั้งเฟสบวกและเฟสลบของแรงดันไฟสลับที่เข้ามา โดยการเพิ่มตัวเก็บประจุที่จุดทางออกเป็น 2 ตัวเพื่อให้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวของทั้งเฟสบวกและเฟสลบของไฟสลับ



รูปที่ 2.4 แสดงวงจร Full Wave Voltage Multiplier[3]

#### หลักการทำงาน

เมื่อขดบนของหม้อแปลงได้รับเฟสบวกขดล่างของหม้อแปลงจะเป็นเฟสลบ ไดโอด  $D_1$  จะทำงานทำให้มีกระแสไหลผ่านขดบนของหม้อแปลงผ่านไดโอด  $D_1$  เข้าไปที่  $C_1$  ซึ่ง  $C_1$  จะทำการเก็บประจุไว้เท่ากับแรงดันไฟที่เข้ามา เมื่อแรงดันที่เข้ามามีการกลับเฟสโดยขดบนเป็นเฟสลบขดล่างเป็นเฟสบวก จะทำให้  $D_2$  ทำงานมีกระแสไหลผ่านโหลด ( $R_L$ )  $C_1$  และ  $C_2$  จะคายประจุออกมาเท่ากับแรงดันไฟที่เข้ามาที่ประจุ  $C_1$  และ  $C_2$  รวมกัน

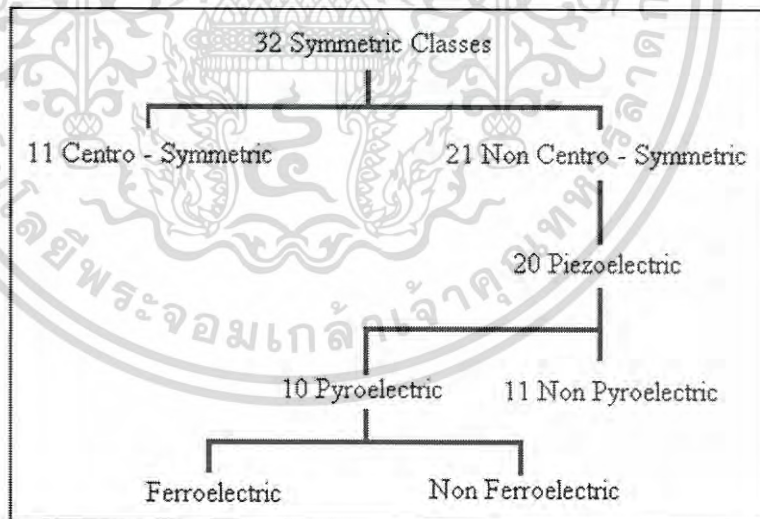
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สามารถใช้เพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ทฤษฎีไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Theory)

### 2.3.1 ความเป็นมาของไพโซอิเล็กทริก

ไพโซอิเล็กทริกคำว่า ไพโซ ในภาษาอังกฤษ มาจากภาษากรีก หมายถึง แรงดันหรือแรงกด การนำคำว่า ไพโซ มาใช้ร่วมกับคำว่า อิเล็กทริก เป็นไพโซอิเล็กทริก จึงเกี่ยวข้องกับสมบัติทางกล และสมบัติทางไฟฟ้า มีการค้นพบปรากฏการณ์ ไพโซอิเล็กทริก ครั้งแรกในปี ค.ศ.1880 โดย Pierre Curie และ Jacques Curie สิ่งที่ค้นพบคือการเปลี่ยนแปลงขนาดตามแรงกดอัด ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ปริมาณหนึ่งในผลึก จัดเป็นปรากฏการณ์แบบตรง จากการทำนายโดย Lippmann ว่ามีปรากฏการณ์ แบบผกผันกลับ ในวัสดุตั้งกล่าวเช่นกัน ทำให้ Pierre Curie และ Jacques Curie ทดลองยืนยันการทำนายสำเร็จในปี 1881 นั่นคือ การป้อนสนามไฟฟ้าแก่ผลึกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดในระยะต่อมามี การศึกษาค้นคว้าเพื่อวางรากฐานทางด้านไพโซอิเล็กทริก ซึ่งมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่มีส่วนร่วมในการ พัฒนาปรับปรุงวางกฎเกณฑ์และทฤษฎีต่างๆ เช่น Lord Kelvin และ Woldemar Voigt

จากทฤษฎีทั้งหลาย กล่าวถึงการแบ่งกลุ่มผลึก (crystal class) ตามลักษณะสมมาตร (symmetry) ในผลึกออกเป็น 32 กลุ่ม ความสมมาตรนี้เป็นปัจจัยสำคัญของการแสดงสมบัติ เฟอร์โร-ไพโร-ไพโซอิเล็กทริก มีการจัดลำดับชั้น (hierarchy) ของผลึกดังกล่าวประกอบที่ 2.5 ผลึกไพโซอิเล็กทริก มีหน่วยเซลล์ที่ขาดจุดศูนย์กลางของความสมมาตรเสมอ อาจเป็นหรือไม่เป็นสารไพโรอิเล็กทริก (หมายถึงการเปลี่ยนโพลาริเซชันอันเนื่องจากการเปลี่ยนอุณหภูมิ) แต่ถ้าหากเป็นสารดังกล่าวก็จะเป็น สารเฟอร์โรอิเล็กทริก (มีโพลาริเซชันในตัวเองและเปลี่ยนแปลงทิศทางได้ด้วยสนามไฟฟ้า) เช่นกันตัวอย่างของผลึกไพโซอิเล็กทริกตามธรรมชาติที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นผลึกแรกๆ ได้แก่ ผลึกเดี่ยวของ ควอทซ์ (quartz crystal)



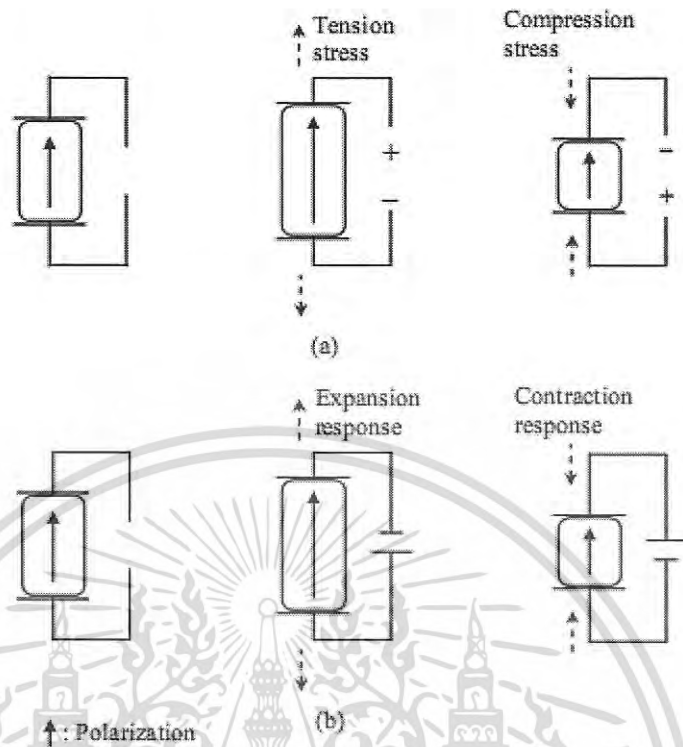
รูปที่ 2.5 แสดงการจัดกลุ่มผลึกตามความสมมาตรของผลึกและลำดับชั้นไพโซ-ไพโร-เฟอร์โรอิเล็กทริก (ที่มา : Lang and Gupta, 2000)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก(piezoelectric effect)

ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก หมายถึง ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงทางกล (mechanical deformation) ในลักษณะถูกกด บีบหรือดึง กระทำต่อผลึกจนกระทั่งเกิดความเค้นในผลึกทำให้มีการกระจัดทางไฟฟ้า (electrical displacement) ของประจุไฟฟ้าบวก (positive charge) หรือไอออนบวก (cation) ไปอยู่ที่ผิวหน้าอีกด้านหนึ่งของผลึก ในขณะที่ประจุลบ (negative charge) หรือไอออนลบ (anion) ไปอยู่ที่ผิวหน้าอีกด้าน ปริมาณการกระจัดนี้จะแปรผันตามความเค้นจำนวนคู่ประจุบวก-ลบหรือคู่อั้วหรือไดโพลไฟฟ้า (electrical dipole) การเรียงตัวของไดโพลไฟฟ้าในผลึก เกี่ยวข้องกับความเป็นขั้ว (polarity) ของผลึกซึ่งจะมีแกนขั้ว (polar axis) ที่อาจเป็นแกนหลักของผลึกหรือเป็นแกนสมมติ (imaginary axis) ก็ได้ แกนสมมติได้จากการลากเส้นตรงผ่านศูนย์กลางของประจุบวกกับศูนย์กลางของประจุลบในผลึก ถ้าหากต่อแอมมิเตอร์กับผลึกจะสังเกตเห็นกระแสไฟฟ้าไหล ดังรูปที่ 2.6(a) การทำให้ผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกลซ้ำๆ ต่อเนื่องกันจึงเท่ากับทำให้มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดเวลา[1]

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงในรูปที่ 2.6(a) เป็นปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบตรง (direct piezoelectric effect) ค้นพบใน ค.ศ.1880 โดยพี่น้องชาวฝรั่งเศสชื่อปีแอร์ คูรี และแจ๊ค คูรี (Pierre Curie & Jacques Curie) ผลึกที่นำมาทดสอบเป็นผลึกในธรรมชาติ เช่น ควอตซ์ (quartz) โทปาซ (topaz) เกลือโรเชล (Rochelle salt) ทัวร์มาลีน (tourmaline) ในเวลาสองปีต่อมาทั้งสองได้ค้นพบปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกอีกแบบหนึ่งคือแบบผกกลับ (converse piezoelectric effect) แสดงดังรูปที่ 2.6(b) เกิดจากการที่ผลึกมีความต้านทานไฟฟ้าภายในตัวเอง (internal resistance) ดังนั้นถ้าเราวางผลึกในสนามไฟฟ้าจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า มีผลให้ประจุบวกและลบเคลื่อนที่สัมพันธ์กัน (relative movement) หมายถึง มีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงข้าม การกระจัดของไดโพลจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นกับทิศของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนให้แก่ผลึกซึ่งจะยืด (extension)หรือหด(contraction) ตามทิศทางของการกระจัด ผลึกจึงมีความเครียด(strain)ถ้าหากเราป้อนไฟฟ้ากระแสสลับ(alternating current, a.c.) ให้แก่ผลึกตลอดเวลา จินตนาการได้ว่าผลึกกำลังสั่น[1]

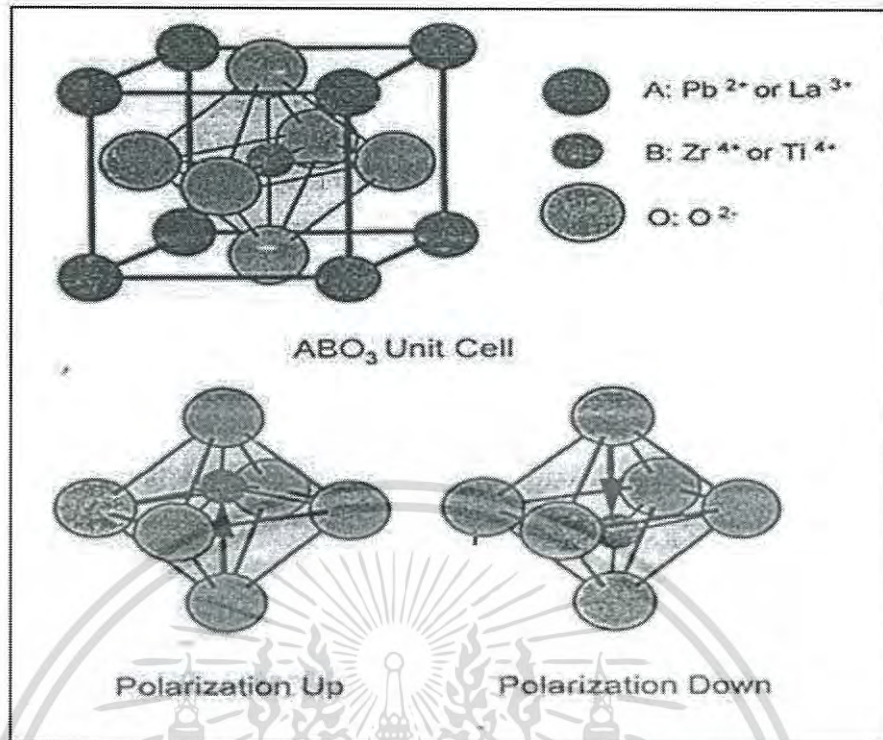


รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาไพโซอิเล็กทริก (a) ปฏิกิริยาไพโซอิเล็กทริกแบบตรง (b) ปฏิกิริยาไพโซอิเล็กทริกแบบผกผัน (ที่มา : Sukwisute et al., 2013)

### 2.3.3 โครงสร้างของวัสดุไพโซอิเล็กทริก (structure of piezoelectric)

#### 2.3.3.1 เลดเซอร์โคเนตไทเทเนท ( $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ : PZT)

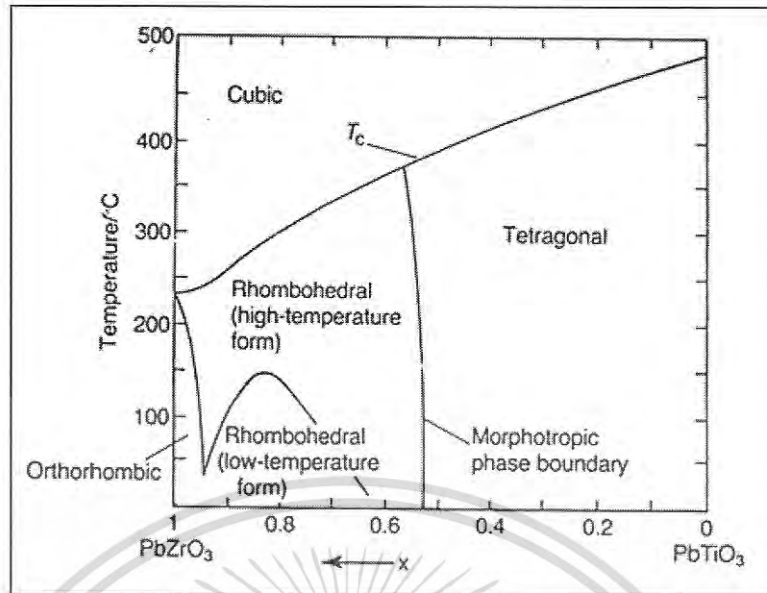
พีแซตที่เป็นสารไพโซอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ (perovskite) สูตรโครงสร้างทั่วไปคือ  $ABO_3$  ซึ่งหมายถึง  $Ti^{4+}$  และ  $Zr^{4+}$  อยู่ ณ ตำแหน่ง B และ  $Pb^{2+}$  อยู่ ณ ตำแหน่ง A ของหน่วยเซลล์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงหน่วยเซลล์แบบเพอรอฟสไกต์ของ PZT  
(ที่มา : Newnham, 1997)

มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก (cubic) เมื่อลดอุณหภูมิลงมาต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี ลักษณะหน่วยเซลล์พีแซดที่มีอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) เหนืออุณหภูมินี้สารไม่มีโพลาไรเซชันในตัวเองอีกต่อไป หรืออีกนัยหนึ่งหมดสภาพเฟอร์โรอิเล็กตริก) อยู่ที่ประมาณ 390 °C ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรีนี้ สารจะเปลี่ยนไปเป็นแบบเตตระโกนอล(tetragonal) หรือรอมโบฮีดรัล (rhombohedral) ซึ่งมีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กตริก โดยในกรณีของเฟสเตตระโกนอลนั้นจะเกิด โพลาไรเซชันขึ้นได้เองในทิศทาง <100> ส่วนในกรณีของเฟสรอมโบฮีดรัล โพลาไรเซชันจะเกิดขึ้นเองในทิศทาง <111> โดยสมบัติทางด้านไดอิเล็กตริกและไพโซอิเล็กตริกของสารนี้มีความโดดเด่นมากถ้าองค์ประกอบอยู่ ณ บริเวณที่เรียกว่า มอร์โฟโทรปิกเฟสบาวเดรี (Morphotropic Phase Boundary : MPB) มีสัดส่วนระหว่าง Zr:Ti ณ อุณหภูมิห้องเป็น 55:45(Ikeda, 1990) ดังแสดงไดอะแกรมแสดงในภาพประกอบที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบเซรามิก  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$   
(ที่มา : Newnham, 1997)

### 2.3.4 สมบัติที่สำคัญของวัสดุไพโซอิเล็กทริก

#### 2.3.4.1 สมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) [4]

วัสดุไดอิเล็กทริกถือได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไป วัสดุไดอิเล็กทริกจะมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าซึ่งไม่นำไฟฟ้า แต่จะมีความแตกต่างจากฉนวนไฟฟ้าทั่วไป คือมีสมบัติของการเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของสารไดอิเล็กทริกนี้จะเรียกว่า ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) เมื่อทำการให้สนามไฟฟ้าแก่สารไดอิเล็กทริกสารไดอิเล็กทริกจะเกิดโพลาไรเซชันขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของโพลาไรเซชันต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งถ้ามีค่าโพลาไรเซชันสูงจะส่งผลให้สารไดอิเล็กทริกมีค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย

#### ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) [4]

จากเครื่องวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อน (impedance analyzer) โดยทั่วไปจะทำการป้อนความถี่ในช่วงต่างๆ และความต่างศักย์ในระดับ mV เพื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) หรือค่าสภาพยอมรับได้สัมพัทธ์ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity,  $\epsilon$ ) ของวัสดุกับค่าสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของสุญญากาศ ( $\epsilon_0$ ) สามารถวัดได้โดยตรงทำการวัดค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกโดยใช้สมการที่ (2.2)

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{tC}{\epsilon_0 A} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง	$\epsilon_r$	คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
	$\epsilon_0$	คือสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของสุญญากาศ ( $8.854 \times 10^{-12} \text{F.m}^{-1}$ )
	$t$	คือความหนาของสารตัวอย่าง มีหน่วยคือ m
	$A$	คือพื้นที่ผิวของขั้วสาร มีหน่วยคือ $\text{m}^2$
	$C$	คือค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยคือ F

### 2.3.5 ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริก (piezoelectric constant)

#### 2.3.5.1 สัมประสิทธิ์ไพเอโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient)

ปรากฏการณ์ไพเอโซอิเล็กทริกมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความเครียดเชิงกล (mechanical strain;  $S$ ) ความเค้นเชิงกล (mechanical stress;  $T$ ) สนามไฟฟ้า (electrical field;  $E$ ) และการกระจัดไดอิเล็กทริก (dielectric displacement ;  $D$ ) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant;  $\epsilon^T$ ) ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริก (piezoelectric charge constant;  $d$ ) และค่าคงที่ยืดหยุ่น (elasticity constant;  $S^E$ ) เนื่องจากเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับสมบัติที่ไม่เหมือนกันในทุกทิศทาง (anisotropy) ของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก [4]

#### 2.3.5.2 สัมประสิทธิ์คู่ควบ (coupling coefficient)

ในวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกมีการคู่ควบ (coupling) ระหว่างตัวแปรทางกลกับตัวแปรทางไฟฟ้า ค่าที่บอกถึงขนาดของการคู่ควบก็คือสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้ากล (electromechanical coupling coefficient) เราแทนสัมประสิทธิ์นี้ด้วย  $k^2$  ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของพลังงานกลจากวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกต่อพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้วัสดุ เรานิยมใช้วิธีเรโซแนนซ์หาค่า  $k^2$  ของโหมดการสั่น (mode of vibrations) ต่างๆ ของวัสดุรูปร่างแตกต่างกัน [1]

#### 2.3.5.3 แฟกเตอร์ทางคุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor; $Q_M$ ) [4]

วิธีการโดยส่วนมากที่ใช้อธิบายสมบัติเรโซแนนซ์ (resonance) ของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก จะประกอบด้วย การวัดอิมพีแดนซ์ (impedance) ของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกผ่านจุดต่ำสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ และจุดสูงสุดที่ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ ช่วงระหว่างความถี่เรโซแนนซ์ ( $F_r$ ) และความถี่แอนติเรโซแนนซ์ ( $F_a$ ) วัสดุจะเป็นตัวนำในขณะต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ และเหนือความถี่แอนติเรโซแนนซ์ วัสดุไพเอโซอิเล็กทริกจะเป็นตัวเก็บประจุ แฟกเตอร์ทางคุณภาพเชิงกล ( $Q_M$ ) จะเป็นการอธิบายอัตราส่วนของความต้านทานต่อกระแสไฟฟ้า (reactance) ต่อการต้านทาน (resistance) ในวงจรรวม ค่า  $Q_M$  สามารถนำมาใช้อธิบายความแหลม (sharpness) ของพีคเรโซแนนซ์ เช่นค่า  $Q_M$  มากแสดงว่าพีคเรโซแนนซ์มีความแหลมมาก ค่า  $Q_M$  คำนวณได้จากสมการที่ (2.3)

$$Q_M = \frac{1}{2\pi F_r Z_m C_0} \left( \frac{F_a^2}{F_a^2 - F_r^2} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อค่า $F_r$	คือ	ความถี่เรโซแนนซ์ในหน่วยเฮิร์ตซ์ (Hz)
$F_a$	คือ	ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ในหน่วยเฮิร์ตซ์ (Hz)
$Z_m$	คือ	อิมพีแดนซ์ในหน่วยโอห์ม ( $\Omega$ ) วัดที่ $F_r$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ศึกษาเท่านั้น ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ข้อควรระวัง: การใช้สมการที่ (2.3) เพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าในหน่วยฟารัด (F) วัดที่ 1kHz ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

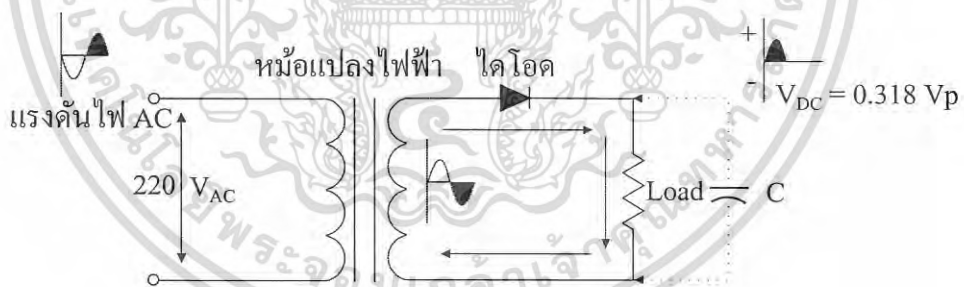
### 2.3.5.4 ค่าคุณภาพการใช้งาน (figure of merit, FOM)

ค่าที่สำคัญอีกค่าหนึ่งในการเก็บเกี่ยวพลังงานคือ  $FOM = k^2 Q_M$  เมื่อ  $k^2$  คือสัมประสิทธิ์คู่ควบ  $Q_M$  คือแฟกเตอร์ทางคุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor;  $Q_M$ ) ซึ่งคำนวณจากสมการ  $Q_M = F_r / \Delta F$  โดยที่  $\Delta F$  เป็นผลต่างระหว่าง  $F_r$  และ  $F_o$  ที่ได้จากวิธีเรโซแนนซ์ จะเห็นว่าถ้าค่า  $Q_M$  มากค่า  $FOM$  ก็ย่อมมากไปด้วย ถ้าพิจารณา  $Q_M$  ในพจน์ของพลังงานการที่  $Q_M$  มีค่ามากแสดงว่ามีพลังงานสะสมมากในขณะที่หมดเปลืองกำลังไฟฟ้าน้อย ในขณะที่เดียวกันกับการที่  $Q_M$  มีค่ามากก็แสดงว่าแถบความถี่ (frequency bandwidth) แคบ การค้นคว้าวิจัยในปัจจุบันจึงเป็นไปในทางพัฒนาให้แถบความถี่กว้างขึ้นโดยไม่ทำให้  $FOM$  แ่ลง ทั้งยังมีการค้นคว้าอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานให้สามารถปรับความถี่เรโซแนนซ์ด้วยตนเอง (self-tuning) จนมีค่าอยู่ในแถบความถี่ของสภาพแวดล้อม [1]

## 2.4 วงจรเรียงกระแส (Wave Rectifier) [5]

### 2.4.1 ลักษณะวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น จะเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ตัดเอาแรงดันไฟสลับที่ป้อนเข้ามาอาจเป็นครึ่งบวกหรือครึ่งลบแล้วแต่การจัดวงจรไดโอด แรงดันที่ส่งออกเอาท์พุทจะเป็นช่วงๆ คือช่วงมีแรงดันและช่วงไม่มีแรงดันสลับกันไป วงจรประกอบด้วยไดโอดตัวเดียวดังรูปที่ 2.9 การทำงานของวงจร ไฟกระแสสลับจะปรากฏที่ขาแอนโนด โดยไดโอดจะยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทางเดียว คือช่วงที่ได้รับไบอัสตรง ดังนั้นวงจรจะมีกระแสไหลเพียงช่วงบวกของไฟสลับเท่านั้น ถ้าช่วงลบจะไม่มีกระแสไหล แรงไฟตรงที่เอาท์พุทยังนำไปใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไม่ได้ เพราะเป็นไฟตรงที่ไม่เรียบพอ (Pulse D.C) จึงต้องมีการกรอง (Filter) ให้เรียบโดยใช้ตัวเก็บประจุทำหน้าที่กรอง



รูปที่ 2.9 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น [5]

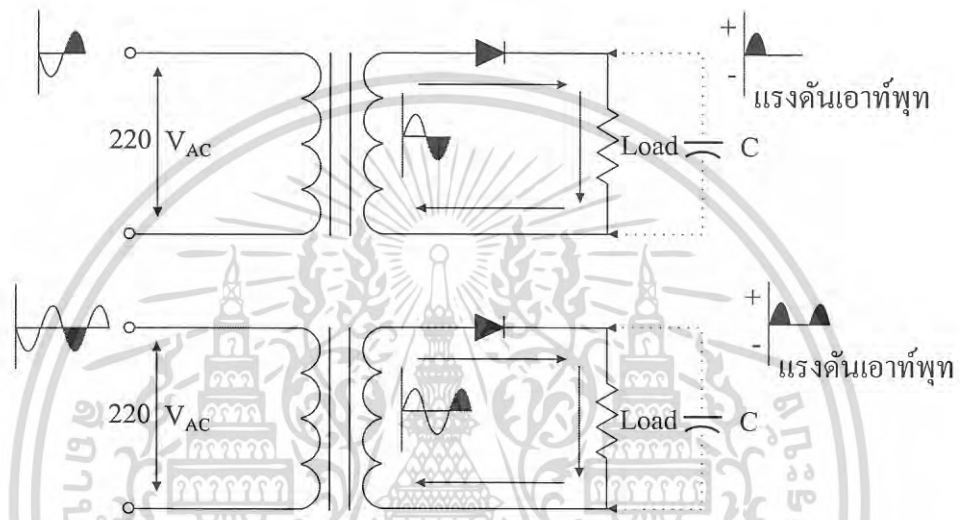
### 2.4.2 การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

การเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifier) มีลักษณะวงจрдังรูปที่ 1 การทำงานเมื่อจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เข้าทางขดปฐมภูมิ (Primary) ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้ามายังขดทุติยภูมิ (Secondary) การเหนี่ยวนำของแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง เฟสของสัญญาณเข้ากับเฟสของสัญญาณออกจะต่างเฟสกันอยู่ 180 องศา เมื่อขั้วบนของขดปฐมภูมิได้รับเฟสลบ ขั้วล่างเทียบได้เฟสบวก จะทำให้ขดทุติยภูมิขั้วบนเป็นเฟสบวก ขาแอนโนด (A) ของไดโอดได้รับแรงดันซีกบวก ขาแคโทด (K) ได้รับแรงดันซีกลบเป็นผลให้ไดโอดได้รับไบอัสตรง ไดโอดนำกระแส มีกระแสไหลเข้าขาแอนโนด ออกขาแคโทดผ่านโหลด (Load) ครบวงจรที่ขั้วล่างของทุติยภูมิ มีแรงดันซีกบวกตกคร่อมที่โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

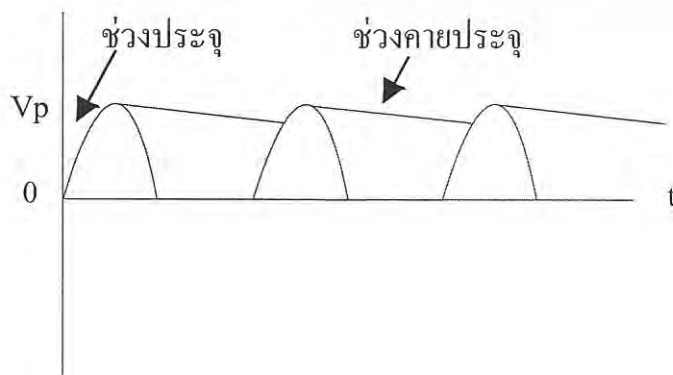
ในช่วงเวลาต่อมาครึ่งไซเคิลหลังของไฟสลั็บ ขั้วบนของทุติยภูมิเป็นเฟสลบ ขั้วล่างเทียบศักย์ได้เป็นเฟสบวก ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ขาเอาโนดของไดโอดได้รับแรงดันซีกลบและขาแคโทดได้รับแรงดันซีกบวก ไดโอดได้รับไบอัสกลับจะไม่นำกระแสเป็นผลให้ไม่มีแรงดันปรากฏที่โหลด ในรอบต่อมาการทำงานก็จะเป็นไปตามลักษณะเดิมซ้ำๆ กันไปเรื่อยๆ โดยมีแรงดันปรากฏที่เอาท์พุทเป็นช่วงๆ (ช่วงเว้นช่วง) นอกจากนี้วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นยังสามารถแบ่งออกเป็นวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นบวกและวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นลบ

#### 2.4.2.1 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นบวก



รูปที่ 2.10 แสดงวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นบวก[5]

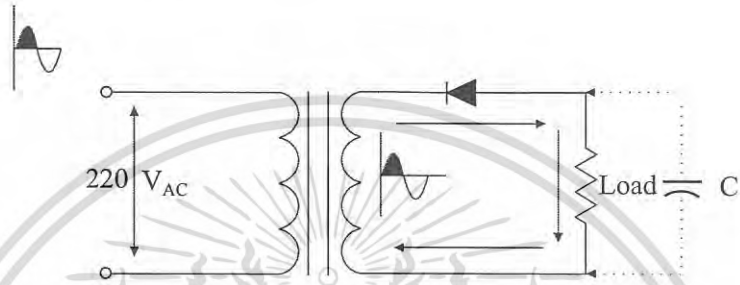
เป็นการจัดวงจรไดโอดให้นำกระแสเฉพาะซีกบวกของไฟสลั็บ ทำให้แรงดันที่ได้จากการเรียงกระแสออกมาที่เอาท์พุทเพียงช่วงบวกของไฟสลั็บเท่านั้น แรงดันไฟตรงเฉลี่ยสามารถคำนวณหาได้จากสูตร  $V_{DC} = 0.318 V_P$  หรือ  $V_{DC} = 0.45 V_{AC}$  แต่แรงดันไฟตรงที่ได้จะยังไม่เรียบมีลักษณะเป็นพัลส์ที่เรียกว่าพัลส์ดี.ซี. (Pulse D.C) ในการใช้งานจะต้องทำการกรองให้เรียบโดยใช้ตัวเก็บประจุทำการกรองก็จะทำให้แรงดันที่ได้เรียบขึ้นดังรูปที่ 2.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.11 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟตรงเมื่อใช้ตัวเก็บประจุกรองแรงดัน[5]  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

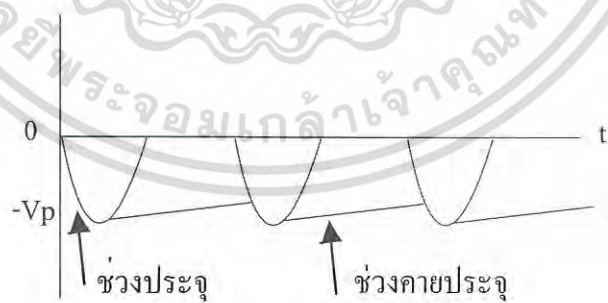
จากรูปที่ 2.11 พัลส์ดี.ซี ที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นจะเป็นซีกบวก ตัวเก็บประจุฟิลาเตอร์จะทำการประจุแรงดันในช่วงที่พัลส์ดี.ซี มีค่าเพิ่มขึ้นและจะคายประจุในช่วงที่พัลส์ดี.ซี มีค่าลดลงจะเป็นไปในลักษณะเช่นนี้เรื่อยๆ แรงดันดี.ซี ที่ได้จะเรียบขึ้น ตัวเก็บประจุฟิลาเตอร์ยังมีความมากแรงดันไฟตรงที่ได้ก็ยิ่งมีความเรียบขึ้น (ตัวเก็บประจุฟิลาเตอร์ค่ามากเกินไปมีผลเสียกับไดโอด) แรงดันไฟตรงที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากตัวเก็บประจุ จะประจุแรงดันสูงสุดของแรงดันพีคจึงทำให้แรงดันเพิ่มสูงขึ้น

2.4.2.2 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นลบ



รูปที่ 2.12 แสดงวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นลบ[5]

เป็นการจัดวงจรไดโอดให้นำกระแสเฉพาะซีกลบของไฟสลับก็จะได้วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นลบ จากรูปที่ 2.12 เมื่อขั้วบนของขดทุติยภูมิได้รับเฟสลบขั้วล่างเทียบศักย์ได้เฟสบวกจะทำให้ไดโอดได้รับไบอัสตรง ไดโอดสามารถนำกระแสได้ กระแสจะไหลจากขั้วล่างของหม้อแปลงผ่านโหลดเข้าทางขาแอนดออกทางแคโทดครบวงจรที่ขั้วบนของหม้อแปลงลักษณะเช่นนี้จะทำให้ขั้วบนของโหลดมีศักย์เป็นลบขั้วล่างมีศักย์เป็นบวกเมื่อขั้วบนของหม้อแปลงได้รับเฟสบวกขั้วล่างเทียบศักย์ได้เฟสลบจะทำให้ไดโอดไม่สามารถนำกระแสได้ เพราะไดโอดได้รับไบอัสกลับ จึงหวนนี้จึงไม่มีแรงดันออกมาที่โหลด



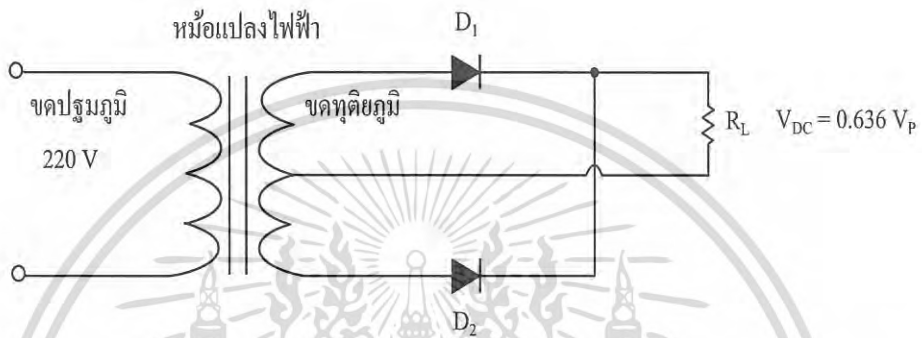
รูปที่ 2.13 แสดงรูปคลื่นเมื่อใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง[5]

เมื่อต่อตัวเก็บประจุฟิลาเตอร์เข้าไปในวงจร ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่ประจุแรงดันเอาไว้ในช่วงแรงดันที่มีค่าสูง และจะคายประจุในช่วงแรงดันที่มีค่าลดลง โดยเสริมรูปคลื่นที่ขาดหายให้เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน เป็นการทำให้แรงดันที่ไม่เรียบมีความเรียบยิ่งขึ้น การใช้วงจรเรียงกระแสแบบนี้จะได้กระแสตรงออกมาในลักษณะพัลส์ครึ่งคลื่นเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบแรงดันอินพุทกับแรงดันเอาต์พุทที่ได้จะเห็นว่าประสิทธิภาพต่ำ คือประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง

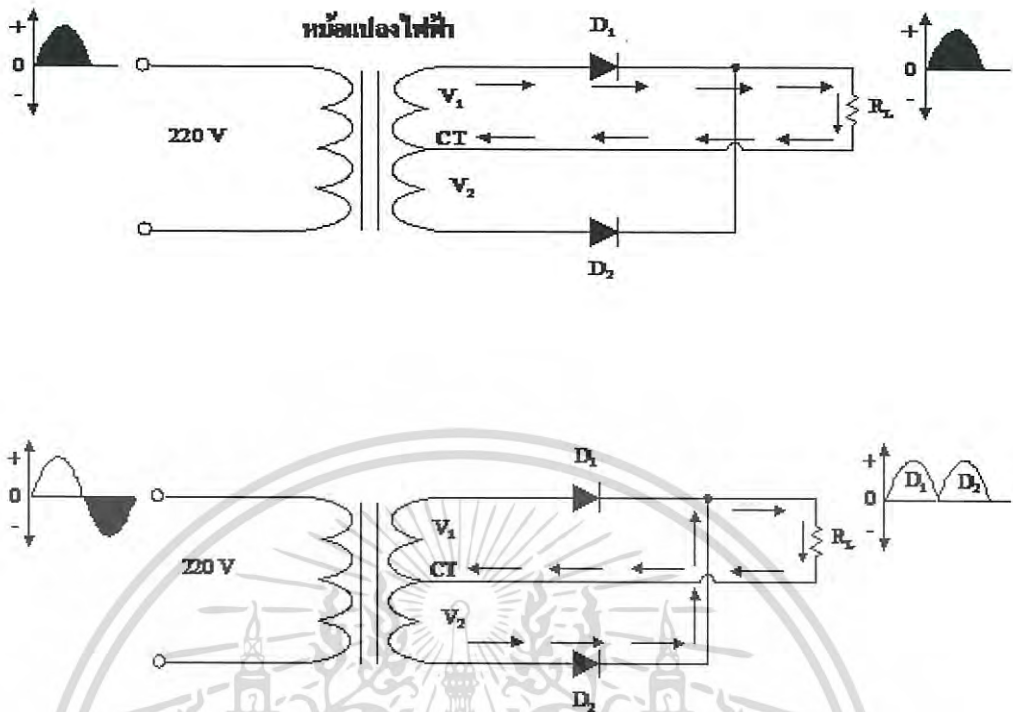
วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น จะสามารถเรียงแรงดันไฟสลับให้ออกเอาต์พุตได้ทั้งช่วงบวกและช่วงลบของแรงดันไฟสลับที่ป้อนเข้ามา ที่อินพุตของวงจรโดยไม่มีส่วนใดของแรงดันไฟสลับถูกตัดทิ้งไป ลักษณะของวงจรจะใช้ไดโอด 2 ตัว ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟสลับเป็นสัญญาณไฟตรงโดยมีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมีแท็ปกลาง (Center Tap) ทำหน้าที่แบ่งเฟสให้เกิดการต่างเฟสกัน 180 องศา ระหว่างสัญญาณที่ออกจากส่วนบนและส่วนล่างของขดทุติยภูมิของหม้อแปลงเพื่อให้ไดโอดทั้ง 2 ตัวสลับกันทำงาน ดังนั้นวงจรจึงสามารถจ่ายกระแสได้เรียบและสูงกว่าวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น



รูปที่ 2.14 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น[5]

### 2.4.4 การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง

เมื่อมีแรงดันไฟสลับ  $V_{IN}$  ป้อนเข้าขดปฐมภูมิของหม้อแปลงจะเกิดแรงดันไฟสลับขึ้นที่ขั้วบนและขั้วล่างของขดทุติยภูมิที่แท็ปกลางของหม้อแปลงจะกำหนดให้มีแรงดัน 0 โวลต์ ดังนั้นแรงดันครึ่งหนึ่งจึงเกิดที่แท็ปกลางกับขั้วด้านบนของหม้อแปลง และอีกครึ่งหนึ่งจะเกิดขึ้นที่แท็ปกลางกับอีกขั้วด้านล่างของหม้อแปลงโดยระหว่างขั้วด้านบนและขั้วด้านล่างจะมีเฟสต่างกัน 180 องศา การทำงานของวงจรเมื่อขั้วบนของขดทุติยภูมิมีค่าแรงดันเป็นบวก ขั้วล่างมีแรงดันเป็นลบไดโอด  $D_1$  จะได้รับไบอัสตรงนำกระแสมีกระแสไหลผ่านไดโอดผ่านโหลด  $R_L$  ไปครบวงจรที่ขั้วแท็ป ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่โหลด  $R_L$  เป็นคลื่นรูปไซน์ครึ่งคลื่น

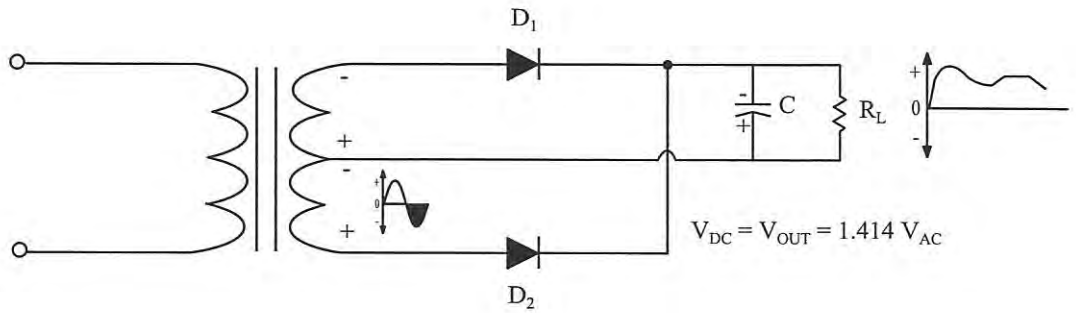


รูปที่ 2.15 แสดงการทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น[5]

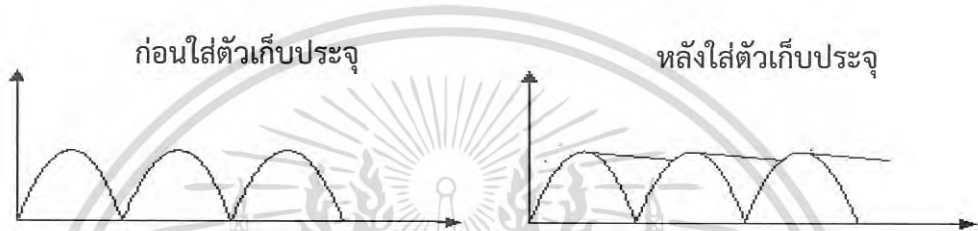
ในช่วงเวลาต่อมา ขั้วบนของขดทุติยภูมิมีค่าแรงดันเป็นลบ ขั้วล่างมีค่าแรงดันเป็นบวก ไดโอด  $D_1$  จะได้รับไบอัสกลับ ไดโอด  $D_2$  ได้รับไบอัสตรงเกิดการนำกระแส มีกระแสไหลผ่านไดโอดผ่านโหลด  $R_L$  ไปครบวงจรที่ขั้วแท้ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่โหลด  $R_L$  เป็นคลื่นรูปไซน์ครึ่งคลื่นด้านบวกปรากฏที่เอาต์พุท แรงดันไฟตรงเฉลี่ยที่ได้สามารถคำนวณได้จากสูตร  $V_{DC} = 0.636 V_P$  แต่แรงดัน  $V_P$  เป็นแรงดันค่ายอดสูงสุดสามารถคำนวณหาได้จากสูตร  $V_P = 1.414 V_{AC}$  หรือจะคำนวณหาค่าแรงดันไฟตรงได้จากสูตร  $V_{DC} = 0.9 V_{AC}$

#### 2.4.5 วงจรกรองแบบใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor Filter)

แรงดันได้จากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ยังมีระลอกคลื่นปนอยู่ปริมาณสูงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน จะต้องนำแรงดันนี้ไปผ่านวงจรกรองก่อนที่จะนำไปใช้งาน วงจรกรองแบบที่ง่ายและนิยมที่สุดก็คือวงจรกรองแบบใช้ตัวเก็บประจุ โดยใช้ตัวเก็บประจุ  $C$  ต่อขนานกับตัวต้านทานโหลด  $R_L$  ตัวเก็บประจุ  $C$  จะทำหน้าที่เก็บประจุไว้ในช่วงเวลาไดโอดนำกระแสและทำหน้าที่คายประจุผ่านตัวต้านทานโหลดในช่วงเวลาที่ไดโอดไม่นำกระแส การทำงานของวงจรกรองจะทำการกรองแรงดันไฟตรงที่ยังไม่เรียบให้มีความราบเรียบยิ่งขึ้น สามารถนำไปใช้งานกับวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ได้อีกทั้งแรงดันไฟตรงที่ได้เมื่อผ่านการกรองแรงดันแล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมโดยคำนวณหาได้จากสูตร  $V_{DC} = V_P = 1.414 \times V_{AC}$

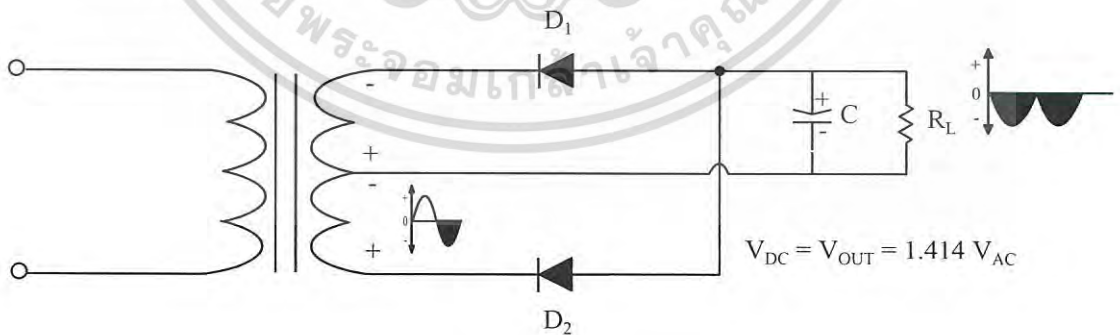


รูปที่ 2.16 แสดงวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นใช้ตัวเก็บประจุกรอง[5]



รูปที่ 2.17 รูปสัญญาณวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นก่อนและหลังใส่ตัวเก็บประจุ[5]

วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นนั้น ไดโอดทั้ง 2 ตัวจะผลัดกันทำงานคนละครึ่งไซเคิล ทำให้การเรียงกระแสออกมาครบทั้งซีกบวกและซีกลบ จากวงจรรูปที่ 2.11 เป็นการเรียงกระแสให้ออกมาเป็นซีกบวกเรียงกันไป แต่ถ้าต้องการเรียงกระแสให้ออกมาเป็นซีกลบก็สามารถทำได้โดยการกลับขั้วไดโอดทั้ง 2 เสียใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นลบ[5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาเรื่องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของไพโซเซรามิกพีแซดที (PZT) และพีเอ็มเอ็น-พีที (PMN-PT) สำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานการสั่นโดยใช้วิธีการมาตรฐานและไม่เป็นเชิงเส้น บทความนี้ได้กล่าวถึงการเปรียบเทียบตัวเก็บเกี่ยวพลังงานหลายตัวด้วยกันทั้งในแง่ของวัสดุและทางอิเล็กทรอนิกส์ ในส่วนของวัสดุไพโซอิเล็กทริก 2 ชนิดที่มีองค์ประกอบแตกต่างกันแสดงให้เห็นว่า PMN-PT มีค่าของสัมประสิทธิ์คู่อุณหภูมิที่สูงกว่า PZT ซึ่งทำให้ PMN-PT จึงน่าจะเป็นตัวเลือกที่ดีกว่าสำหรับการนำมาใช้งานในการเก็บเกี่ยวพลังงาน เมื่อมองแค่แง่ของวัสดุแม้ว่าตัวเก็บเกี่ยวพลังงาน PMN-PT จะสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้เป็น 2 เท่า ของตัวเก็บเกี่ยว PZT เมื่อใช้วงจรมาตรฐาน แต่การใช้วิธีการเชื่อมต่อแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการแปลงพลังงานของวัสดุไพโซอิเล็กทริกนั้นทำให้ลดความแตกต่างระหว่างตัวเก็บเกี่ยวพลังงานทั้งสองได้ สิ่งนี้อธิบายได้ด้วยผลของความหน่วงที่เกิดกระบวนการเก็บเกี่ยวเมื่อโครงสร้างไฟฟ้ากลแสดงสัมประสิทธิ์คู่อุณหภูมิที่สูง ดังนั้น สิ่งนี้สามารถสรุปได้ว่าการออกแบบอุปกรณ์ตัวเก็บเกี่ยวพลังงานที่มีประสิทธิภาพควรพิจารณาทั้งด้านวัสดุและด้านอิเล็กทรอนิกส์เพราะการเชื่อมต่อแบบ SSHI สามารถช่วยเพิ่มความสามารถการแปลงพลังงานของวัสดุไพโซอิเล็กทริกด้วยการทำให้แฟกเตอร์คู่อุณหภูมิเด่นขึ้น[2]



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึง วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยตลอดจนถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

#### 3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

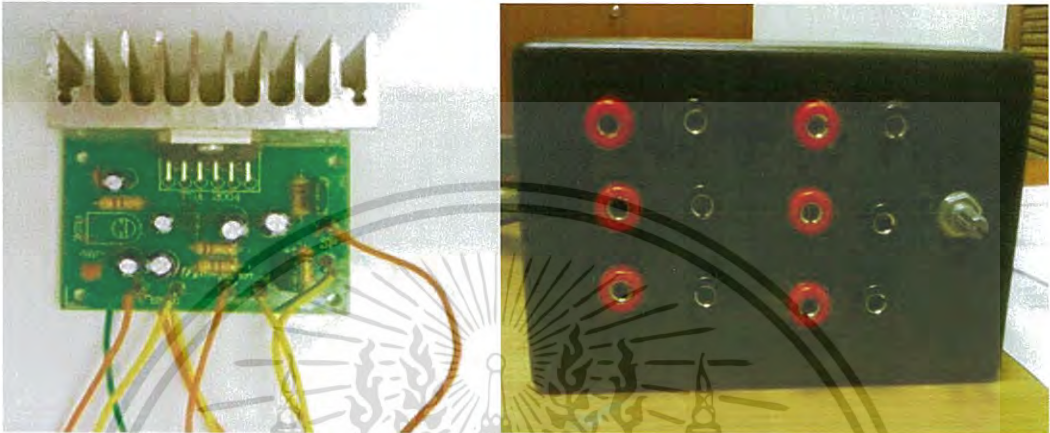
3.1.1 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	1	เครื่อง
3.1.2 ออสซิลโลสโคป	1	เครื่อง
3.1.3 เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function generator)	1	เครื่อง
3.1.4 Power amplifier	1	เครื่อง
3.1.5 Adaptor ขนาด 12 V 2A	1	ตัว
3.1.6 ตัวต้านทานขนาด 18 k $\Omega$	2	ตัว
3.1.7 ตัวต้านทานขนาด 270 k $\Omega$	2	ตัว
3.1.8 ตัวต้านทานขนาด 1 M $\Omega$	2	ตัว
3.1.9 ตัวเก็บประจุขนาด 1 nF	2	ตัว
3.1.10 ตัวเก็บประจุขนาด 10 $\mu$ F	2	ตัว
3.1.11 ตัวเหนี่ยวนำขนาด 100 mH	1	ตัว
3.1.12 ทรานซิสเตอร์ เบอร์ ZVNL120A	2	ตัว
3.1.13 ทรานซิสเตอร์ เบอร์ MPSA92	2	ตัว
3.1.14 ซอตก์ไดโอด (schottky diode) เบอร์ BAT46	4	ตัว
3.1.15 ไดโอด เบอร์ 1N5819	4	ตัว
3.1.16 สายไฟปากจระเข้	10	เส้น
3.1.17 แกนหม้อแปลง		
3.1.18 ขดลวดโซลินอยด์		
3.1.19 กาวอีพอกซี (epoxy) นำไฟฟ้า		
3.1.20 ไพโซเซรามิก PZT		
3.1.21 คานเหล็ก		
3.1.22 กระดาษทราย		
3.1.23 Photoboard		
3.1.24 ชุดตัวต้านทาน 1k $\Omega$ - 10M $\Omega$		
3.1.25 กระจกผสมกาวอีพอกซี (epoxy) นำไฟฟ้า		
3.1.26 เม็ดแม่เหล็ก		
3.1.27 แอลกอฮอล์		
3.1.28 หัวแร้ง		
3.1.29 ตะกั่วบัดกรี		
3.1.30 ตัวลจับยึดคาน		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การดำเนินงานวิจัย

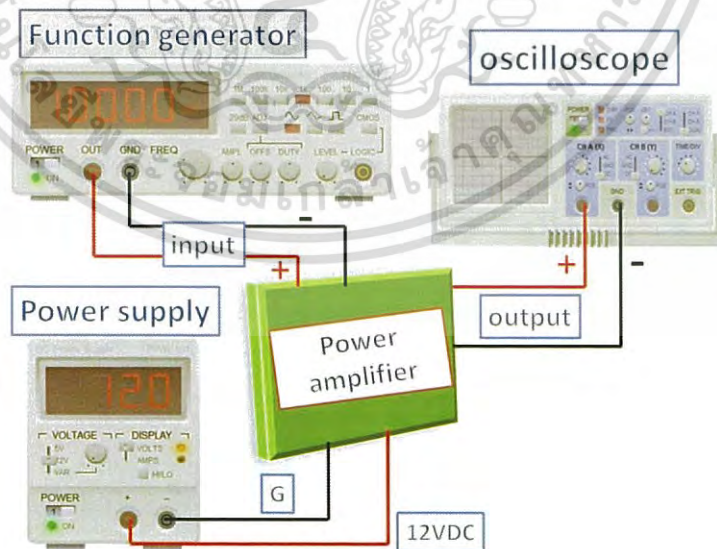
### 3.2.1 ประกอบวงจร Power amplifier และทดสอบการทำงาน

3.2.1.1 นำวงจร Power amplifier BTL 15 W (POWER AMP BTL 15 WATT MONO) ที่ซื้อมาประกอบลงในกล่องวงจรโดยทำการบัดกรีเชื่อมสายไฟและเปลี่ยนตัวต้านทานขนาด 10 K $\Omega$  ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพแสดงกล่องวงจร Power amplifier

3.2.1.2 นำวงจร Power amplifier มาทดสอบการขยายสัญญาณ โดยศึกษาขนาดของสัญญาณและกำลังขยายของสัญญาณ ค่า  $V_{in}$  และ  $V_{out}$  เมื่อมีการปรับค่าความถี่ของสัญญาณอยู่ในช่วง 10 Hz ถึง 1000 Hz โดยต่อวงจรดังรูปที่ 3.2 โดยกำหนดค่า  $V_{in}$  คงที่เท่ากับ 0.56 V



รูปที่ 3.2 แสดงการต่อวงจรการทดสอบสัญญาณของวงจร Power amplifier

คำนวณหาอัตราขยายสัญญาณ (Voltage Gain) ได้ดังนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร 
$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (3.1)$$

### 3.2.2 ทำหม้อแปลงไฟฟ้าและหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ของคาน

3.2.2.1 ทำหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดโซลินอยด์พันรอบแกนหม้อแปลง จากนั้น บัดกรีเชื่อมขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านของหม้อแปลง ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

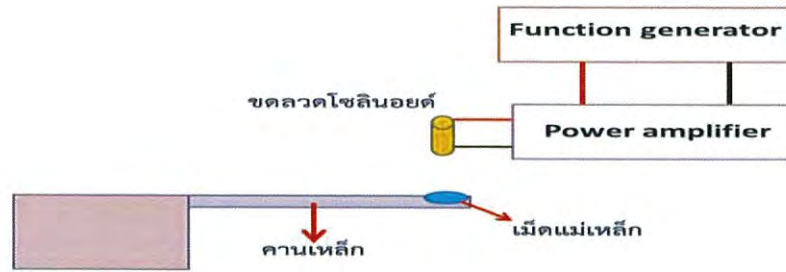
3.2.2.2 ประกอบคานเหล็กกับตัวจับยึดและติดเม็ดแม่เหล็กที่ปลายคาน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการประกอบคานเหล็กกับตัวจับยึดและติดเม็ดแม่เหล็กที่ปลายคาน

3.2.2.3 ประกอบคานเหล็กกับตัวจับยึดและติดเม็ดแม่เหล็กที่ปลายคาน ดังรูปที่ 3.4 จากนั้นต่อวงจรดังรูปที่ 3.5 เพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ของคานเหล็ก โดยทำการกำหนดความถี่ของสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function generator) อยู่ที่ 32 Hz (อ้างอิงจากความถี่ของเสียงในธรรมชาติที่มนุษย์สามารถได้ยิน) และทำการปรับระยะของคานเหล็กให้ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ที่กำหนดโดยที่กำหนดแอมพลิจูดของการสั่นคานอยู่ที่ 10 V<sub>pp</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงการต่อวงจรเพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ของคานเหล็ก

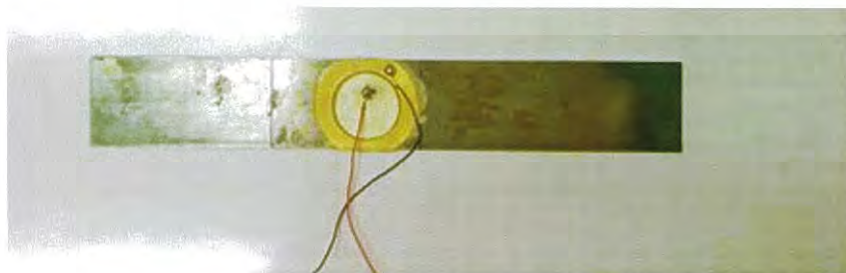
### 3.2.3 ทำขั้วไฟฟ้าของวัสดุไพโซเซรามิก PZT

3.2.3.1 นำไพโซเซรามิก PZT มาขัดด้วยกระดาษทราย และทำการบัดกรีสายไฟเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าของไพโซเซรามิก PZT ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงการบัดกรีสายไฟเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าของไพโซเซรามิก PZT

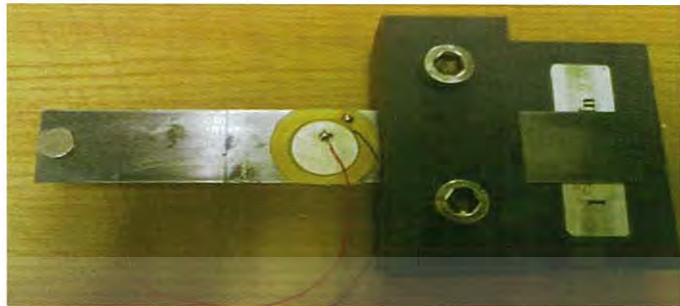
3.2.3.2 นำคานเหล็กมาขัดด้วยกระดาษทราย แล้วล้างทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไพโซเซรามิก PZT มาติดที่คานเหล็กโดยการใช้กาวอีพอกซีนำไฟฟ้าทาบริเวณตำแหน่งการสั่นของคาน ที่ความถี่ 32 Hz ดังรูปที่ 3.7 และใช้ของมีน้ำหนักรัดไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.7 แสดงการติดไพโซเซรามิก PZT บนคานเหล็ก

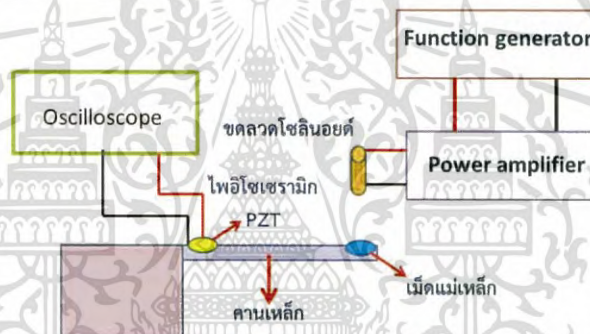
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.3 นำไพโซเซรามิก PZT ที่ติดอยู่บนคานเรียบร้อยแล้ว มาประกอบเข้ากับตัวจับยึด พร้อมกับติดแม่เหล็กที่ปลายคาน ดังรูปที่ 3.8



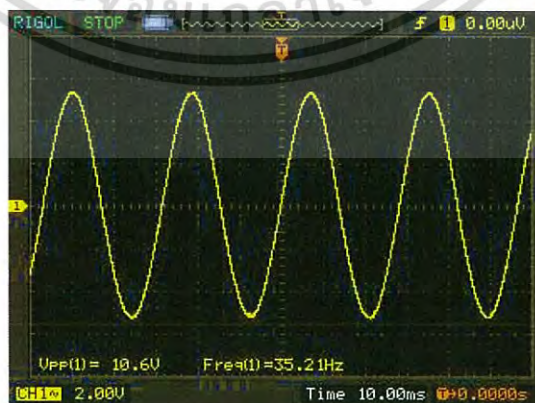
รูปที่ 3.8 การประกอบตัวจับยึดกับคานที่ติดไพโซเซรามิก PZT

3.2.3.4 ทดสอบสัญญาณของไพโซเซรามิก PZT ที่ติดอยู่ที่คานเหล็ก ดังรูป 3.9



รูปที่ 3.9 การทดสอบสัญญาณไพโซเซรามิก

3.2.3.5 สัญญาณเพียโซโวลเตจที่ได้จากวัสดุไพโซเซรามิก PZT ดังรูปที่ 3.10

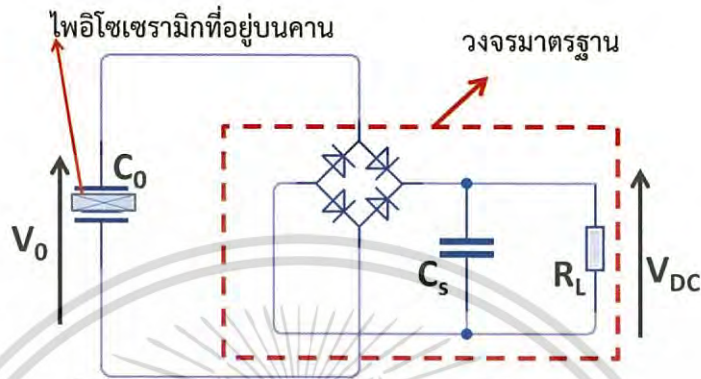


รูปที่ 3.10 สัญญาณเพียโซโวลเตจที่ได้จากวัสดุไพโซเซรามิก PZT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

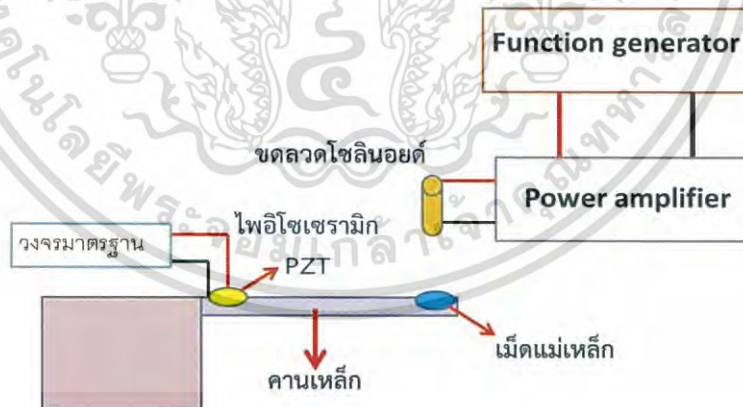
### 3.2.4 ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมাত্রฐาน

3.2.4.1 ประกอบวงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานแบบมาตรฐานและต่อวงจรนี้เข้ากับขั้วไฟฟ้าของไพโซเซรามิก PZT ที่อยู่บนคานจากข้อ 3.2.2.6 ( ใช้ไดโอดเบอร์ 1N5819 และตัวเก็บประจุ ( $C_s$ ) ขนาด  $10 \mu F$  ) ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.11 แสดงวงจรมাত্রฐานที่ต่อกับขั้วไฟฟ้าของไพโซเซรามิก PZT ที่อยู่บนคาน

3.2.4.2 สั่นคานไพโซเซรามิก PZT ด้วยวิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นทำการกระตุ้นโดยการปรับค่าความถี่ของสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ ( Function generator ) ให้ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของคานที่  $35 \text{ Hz}$  ที่เปลี่ยนแปลงไปจากข้อ 3.2.3.5 และ  $V_{in}$  เท่ากับ  $0.54 \text{ V}$  โดยปรับค่าแอมพลิจูดการสั่นของคานอยู่ที่  $10 \text{ Vpp}$  ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.12 แสดงการสั่นคานไพโซเซรามิก PZT ด้วยวิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้า

3.2.4.3 วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า  $V_{DC}$  ที่ตกคร่อม  $R_L$  โดยใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ดังรูปที่ 3.9 โดยที่  $R_L$  จะถูกปรับเปลี่ยนอยู่ในช่วง  $1k\Omega$  ถึง  $10M\Omega$

3.2.4.4 ทำการทดลองตามข้อ 3.2.2.8 และ 3.2.2.9 โดยการเปลี่ยนค่าแอมพลิจูดการสั่นของคานเป็น  $20 \text{ Vpp}$  และ  $30 \text{ Vpp}$  ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4.5 คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า (Power) ที่เก็บเกี่ยวได้จากไพโซเซรามิก PZT

โดยใช้สมการ

$$P = \frac{V_{DC}^2}{R_L} \quad (3.2)$$

3.2.4.6 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu\text{W}$ ) กับ Load ( $R_L$ )  $\Omega$  ที่แอมพลิจูด 10 Vpp , 20 Vpp และ 30 Vpp ตามลำดับ

3.2.4.7 วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ สรุปผลการทดลองและเปรียบเทียบค่าพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ของไพโซเซรามิก PZT ที่แอมพลิจูด 10 Vpp , 20 Vpp และ 30 Vpp ตามลำดับ

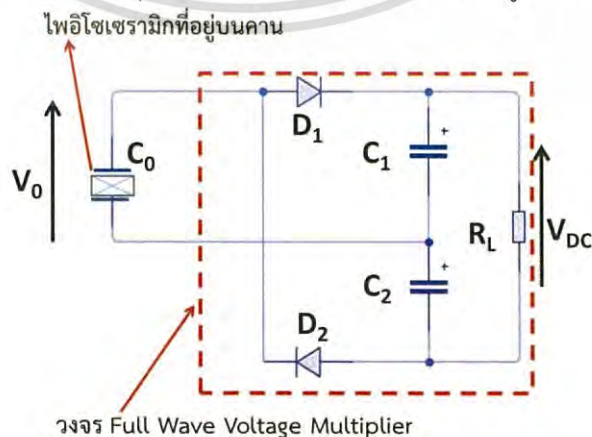
## 3.2.5 ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier

3.2.5.1 นำไพโซเซรามิก PZT ที่ติดอยู่บนคานเรียบร้อยแล้ว มาประกอบเข้ากับตัวจับยึดยึดพร้อมกับติดเม็ดแม่เหล็กที่ปลายคาน ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.13 การประกอบตัวจับยึดกับคานที่ติดไพโซเซรามิก PZT

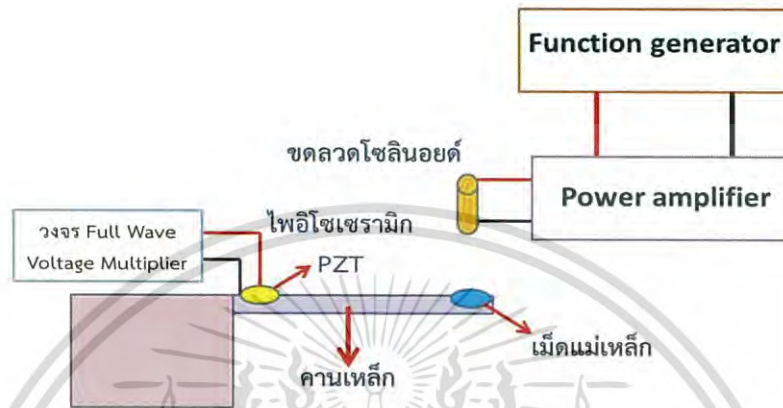
3.2.5.2 ประกอบวงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานแบบ Full Wave Voltage Multiplier และต่อวงจรนี้เข้ากับขั้วไฟฟ้าของไพโซเซรามิก PZT ที่อยู่บนคานจากข้อ 3.2.3.1 (ใช้ไดโอด ( $D_1$  และ  $D_2$ ) เบอร์ 1N5819) และตัวเก็บประจุ ( $C_1$  และ  $C_2$ ) ขนาด  $10 \mu\text{F}$ ) ดังรูปที่ 3.12



วงจร Full Wave Voltage Multiplier

รูปที่ 3.14 แสดงวงจร Full Wave Voltage Multiplier ที่ต่อกับขั้วไฟฟ้าของไพโซเซรามิก PZT ที่อยู่บนคาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5.3 สั่นคานไพโซเซรามิก PZT ด้วยวิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นทำการกระตุ้นโดยการปรับค่าความถี่ของสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ ( Function generator ) ให้ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของคานที่ 35 Hz และ  $V_{in}$  เท่ากับ 0.56 V โดยปรับค่าแอมพลิจูดการสั่นของคานอยู่ที่ 10 Vpp ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.15 แสดงการสั่นคานไพโซเซรามิก PZT ด้วยวิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้า

3.2.5.4 วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า  $V_{DC}$  ที่ตกคร่อม  $R_L$  โดยใช้ดีจิจิตอลมิเตอร์ ดังรูปที่ 3.12 โดยที่  $R_L$  จะถูกปรับเปลี่ยนอยู่ในช่วง  $1k\Omega$  ถึง  $10M\Omega$

3.2.5.5 ทำการทดลองตามข้อ 3.2.3.3 และ 3.2.3.4 โดยการเปลี่ยนค่าแอมพลิจูดการสั่นของคานเป็น 20 Vpp และ 30 Vpp ตามลำดับ

3.2.5.6 คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า (Power) ที่เก็บเกี่ยวได้จากไพโซเซรามิก PZT

โดยใช้สมการ

$$P = \frac{V_{DC}^2}{R_L} \quad (3.2)$$

3.2.5.7 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu W$ ) กับ Load ( $R_L$ ) $\Omega$  ที่แอมพลิจูด 10 Vpp , 20 Vpp และ 30 Vpp ตามลำดับ

3.2.5.8 วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ สรุปผลการทดลองและเปรียบเทียบ ค่าพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ของไพโซเซรามิก PZT ที่แอมพลิจูด 10 Vpp , 20 Vpp และ 30 Vpp ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในรายละเอียดของส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัยที่ได้จากการศึกษาและดำเนินงานวิจัยมาซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดสอบการขยายสัญญาณของวงจร Power amplifier

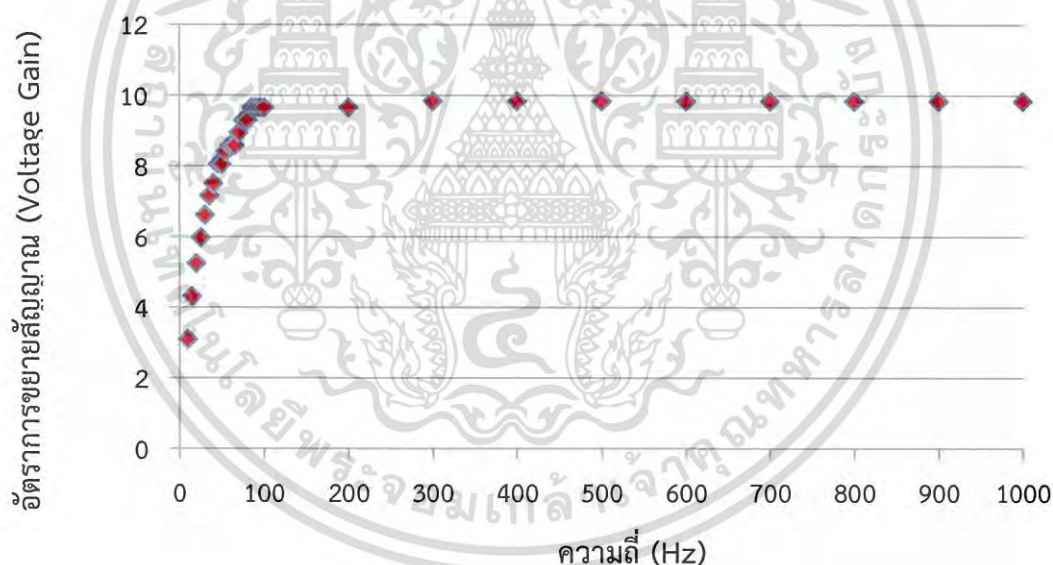
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการขยายสัญญาณของวงจร Power amplifier

ความถี่(Hz)	V <sub>in</sub> (V)	V <sub>out</sub> (V)	Gain
10	0.56	1.73	3.0893
15	0.56	2.41	4.3036
20	0.56	2.93	5.2321
25	0.56	3.34	5.9643
30	0.56	3.70	6.6071
35	0.56	4.00	7.1429
40	0.56	4.20	7.5000
45	0.56	4.50	8.0357
50	0.56	4.50	8.0357
55	0.56	4.70	8.3929
60	0.56	4.80	8.5714
65	0.56	4.80	8.5714
70	0.56	5.00	8.9286
75	0.56	5.20	9.2857
80	0.56	5.20	9.2857
85	0.56	5.40	9.6429
90	0.56	5.40	9.6429
95	0.56	5.40	9.6429
100	0.56	5.40	9.6429
200	0.56	5.40	9.6429

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ (Hz)	$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	Gain
300	0.56	5.50	9.8214
400	0.56	5.50	9.8214
500	0.56	5.50	9.8214
600	0.56	5.50	9.8214
700	0.56	5.50	9.8214
800	0.56	5.50	9.8214
900	0.56	5.50	9.8214
1000	0.56	5.50	9.8214

ตารางที่ 4.1 จะได้ค่า  $V_{out}(V)$  ของวงจร Power amplifier ออกมา เมื่อทำการปรับค่าความถี่ตามช่วงที่กำหนดโดยให้ค่า  $V_{in}(V)$  ของวงจร Power amplifier คงที่ตลอด ทำให้สามารถคำนวณหาค่าอัตราการขยายสัญญาณ (Gain) ของวงจรออกมาได้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายสัญญาณ (Gain) กับความถี่ (Hz)

จากรูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายสัญญาณ (Gain) กับความถี่ (Hz) สามารถพิจารณาได้ว่าในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1000 Hz อัตราการขยายสัญญาณ (Gain) มีลักษณะคงที่ แสดงให้เห็นว่าวงจร Power amplifier มีช่วงการทำงานอยู่ระหว่างช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมাত্রฐาน

ทำการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมাত্রฐานโดยกำหนดค่า  $V_{in}$  เท่ากับ 0.54 V ค่าความถี่ของสัญญาณที่ใช้ในการส่งคานมีค่าเท่ากับ 35 Hz โดยในการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพโซเซรามิก PZT โดยใช้วงจรมাত্রฐาน จะทำการปรับค่าโหลด ( $R_L$ ) ที่เหมาะสมภายในวงจร ซึ่งอยู่ในช่วง 1 K $\Omega$  ถึง 10 M $\Omega$  โดยจะทำการทดสอบที่แอมพลิจูด 10 Vpp , 20 Vpp และ 30 Vpp ตามลำดับ จากนั้นคำนวณหาค่าพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้

### 4.2.1 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมাত্রฐานที่แอมพลิจูด 10 Vpp ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมাত্রฐานที่แอมพลิจูด 10 Vpp

Load ( $R_L$ ) ( $\Omega$ )	piezovoltage (V)	พลังงานที่เก็บเกี่ยว ( $\mu$ W)
1k	0.030641	0.9389
2k	0.061497	1.8909
3k	0.091063	2.7642
4k	0.11702	3.4234
5k	0.15012	4.5072
6k	0.1756	5.1392
7k	0.19816	5.6096
8k	0.23747	7.0490
9k	0.2869	9.1457
10k	0.28765	8.2743
20k	0.5491	15.0755
30k	0.75098	18.7990
40k	0.94581	22.3639
50k	1.1372	25.8645

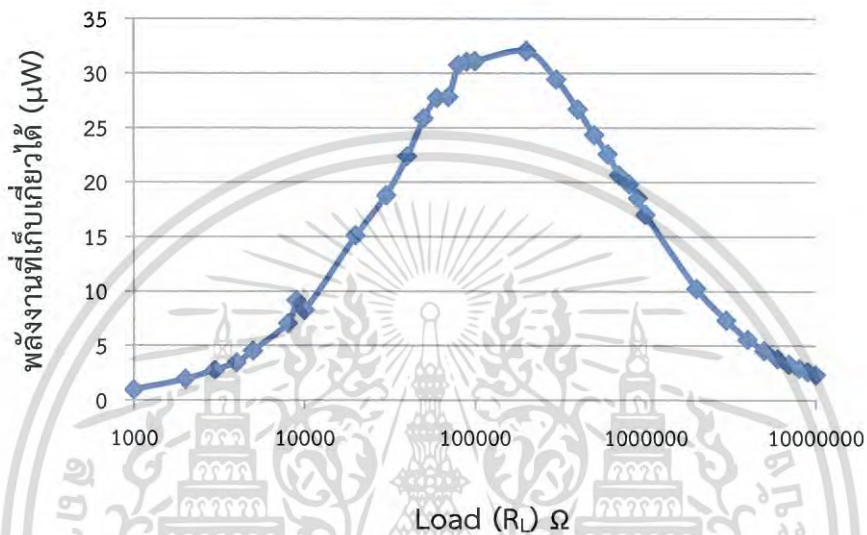
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load ( $R_L$ )	piezovoltage	พลังงานที่เก็บเกี่ยว
( $\Omega$ )	(V)	( $\mu$ W)
60k	1.2904	27.7522
70k	1.3965	27.8602
80k	1.5696	30.7956
90k	1.6727	31.0881
100k	1.765	31.1523
200k	2.5324	32.0652
300k	2.9724	29.4505
400k	3.268	26.6996
500k	3.48897	24.3458
600k	3.679	22.5584
700k	3.8026	20.6568
800k	3.9832	19.8324
900k	4.0833	18.5259
1M	4.125	17.0156
2M	4.5208	10.2188
3M	4.6812	7.3045
4M	4.7071	5.5392
5M	4.7656	4.5422
6M	4.7518	3.7633
7M	4.8152	3.3123
8M	4.8327	2.9194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load ( $R_L$ )	piezovoltage	พลังงานที่เก็บเกี่ยว
( $\Omega$ )	(V)	( $\mu W$ )
9M	4.8427	2.6058
10M	4.8264	2.3294



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu W$ ) กับ Load ( $R_L$ )  $\Omega$  ของวงจรมาตรฐาน ที่ 10 Vpp

#### 4.2.2 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมาตรฐานที่แอมพลิจูด 20 Vpp

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมาตรฐานที่แอมพลิจูด 20 Vpp

Load ( $R_L$ )	piezovoltage	พลังงานที่เก็บเกี่ยว
( $\Omega$ )	(V)	( $\mu W$ )
1k	0.064	4.1319
2k	0.127	8.0645
3k	0.192	12.2880
4k	0.245	15.0063
5k	0.313	19.5938
6k	0.372	23.0640
7k	0.418	24.9606

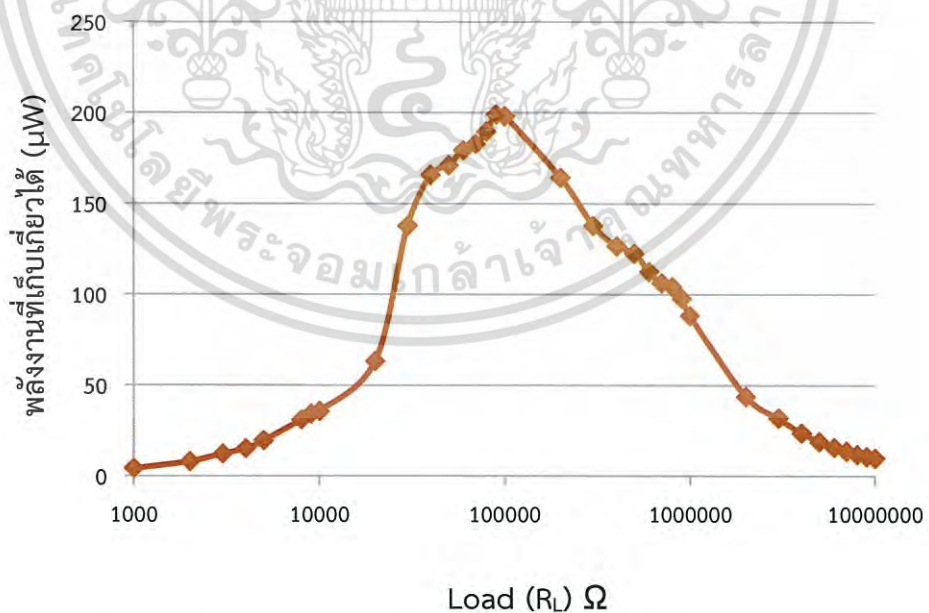
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load ( $R_L$ )	piezovoltage	พลังงานที่เก็บเกี่ยว
( $\Omega$ )	(V)	( $\mu W$ )
8k	0.498	31.0005
9k	0.555	34.2250
10k	0.598	35.7604
20k	1.124	63.1688
30k	2.033	137.7700
40k	2.575	165.7660
50k	2.926	171.2300
60k	3.282	179.5250
70k	3.578	182.8870
80k	3.897	189.8330
90k	4.233	199.0920
100k	4.452	198.2030
200k	5.732	164.2790
300k	6.430	137.8160
400k	7.120	126.7360
500k	7.830	122.6180
600k	8.220	112.6140
700k	8.620	106.1490
800k	9.130	104.1960
900k	9.383	97.8230
1M	9.391	88.1909

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load ( $R_L$ ) ( $\Omega$ )	piezovoltage (V)	พลังงานที่เก็บเกี่ยว ( $\mu\text{W}$ )
2M	9.368	43.8797
3M	9.773	31.8352
4M	9.749	23.7608
5M	9.750	19.0125
6M	9.755	15.8600
7M	9.752	13.5859
8M	9.750	11.8828
9M	9.820	10.7147
10M	9.852	9.70619



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu\text{W}$ ) กับ Load ( $R_L$ )  $\Omega$  ของวงจรมาตรฐาน ที่ 20 Vpp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

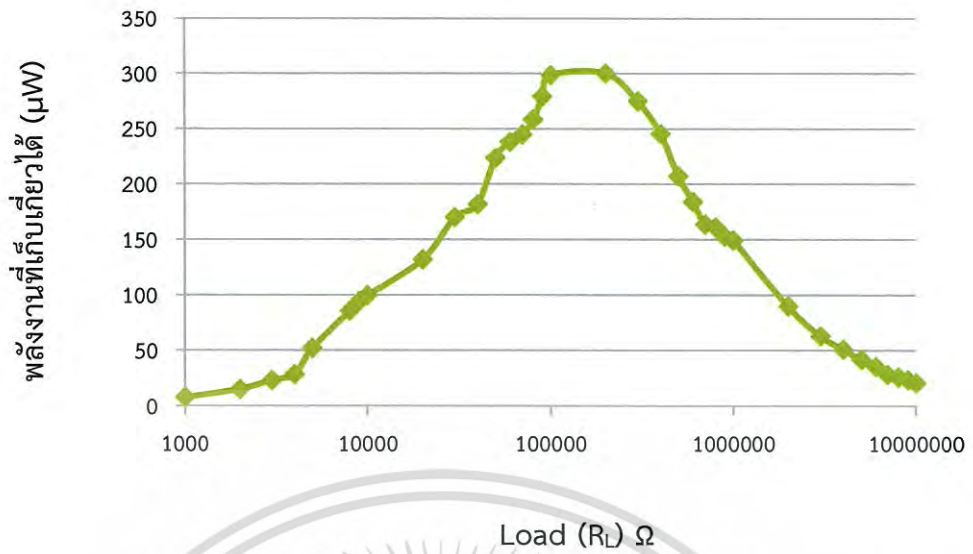
4.2.3 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมาตรฐานที่แอมพลิจูด 30 Vpp  
 ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจรมาตรฐานที่แอมพลิจูด 30 Vpp

Load ( $R_L$ ) ( $\Omega$ )	piezovoltage (V)	พลังงานที่เก็บเกี่ยว ( $\mu W$ )
1k	0.086	7.3960
2k	0.173	14.9640
3k	0.2629	23.0388
4k	0.338	28.5610
5k	0.509	51.7551
6k	0.627	65.5215
7k	0.723	74.6756
8k	0.828	85.6980
9k	0.922	94.4538
10k	0.998	99.6004
20k	1.626	132.1940
30k	2.259	170.1030
40k	2.698	181.9800
50k	3.347	224.0480
60k	3.781	238.2660
70k	4.142	245.0880
80k	4.548	258.5540
90k	5.013	279.2240
100k	5.465	298.6620

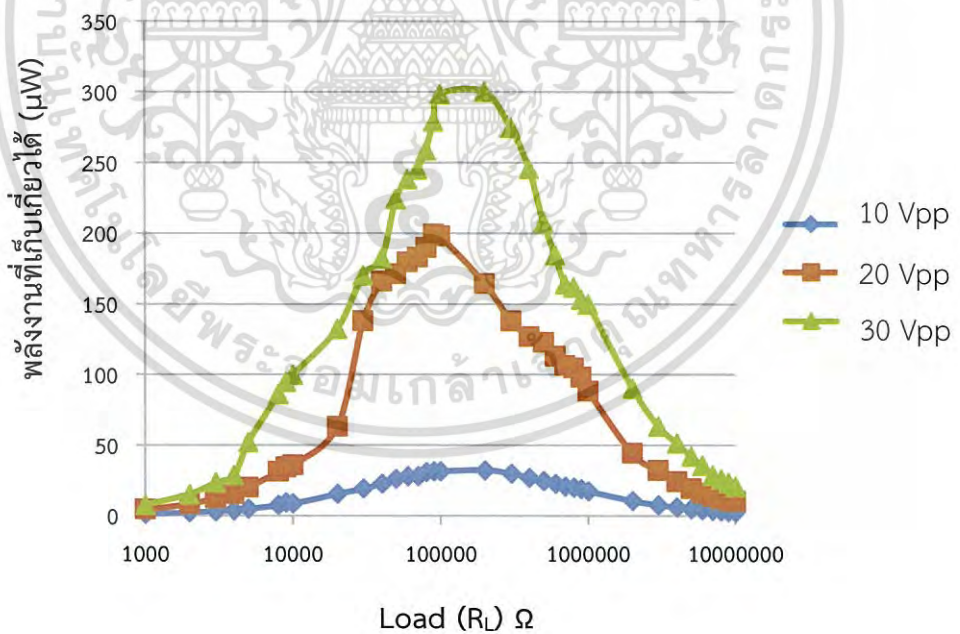
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load ( $R_L$ ) ( $\Omega$ )	piezovoltage (V)	พลังงานที่เก็บเกี่ยว ( $\mu W$ )
200k	7.750	300.3130
300k	9.080	274.8210
400k	9.910	245.5200
500k	10.190	207.6720
600k	10.520	184.4510
700k	10.710	163.8630
800k	11.370	161.5960
900k	11.730	152.8810
1M	12.220	149.3280
2M	13.410	89.9141
3M	13.750	63.0208
4M	14.290	51.0510
5M	14.430	41.6450
6M	14.560	35.3323
7M	14.120	28.4821
8M	14.350	25.7403
9M	14.470	23.2645
10M	14.350	20.5923

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu W$ ) กับ Load ( $R_L$ )  $\Omega$  ของวงจรมাত্রฐาน ที่ 30 Vpp



รูปที่ 4.5 กราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu W$ ) กับ Load ( $R_L$ )  $\Omega$  ของวงจรมাত্রฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier

ทำการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier โดยกำหนดค่า  $V_{in}$  เท่ากับ 0.54 V ค่าความถี่ของสัญญาณที่ใช้ในการส่งคานมีค่าเท่ากับ 35 Hz โดยในการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพโซเซรามิก PZT โดยใช้วงจร Full Wave Voltage Multiplier จะทำการปรับค่าโหลด ( $R_L$ ) ที่เหมาะสมภายในวงจร ซึ่งอยู่ในช่วง  $1\text{ K}\Omega$  ถึง  $10\text{ M}\Omega$  โดยจะทำการทดสอบที่แอมพลิจูด 10 Vpp , 20 Vpp และ 30 Vpp ตามลำดับ จากนั้นคำนวณหาค่าพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้

#### 4.3.1 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier ที่แอมพลิจูด 10Vpp

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier ที่แอมพลิจูด 10 Vpp

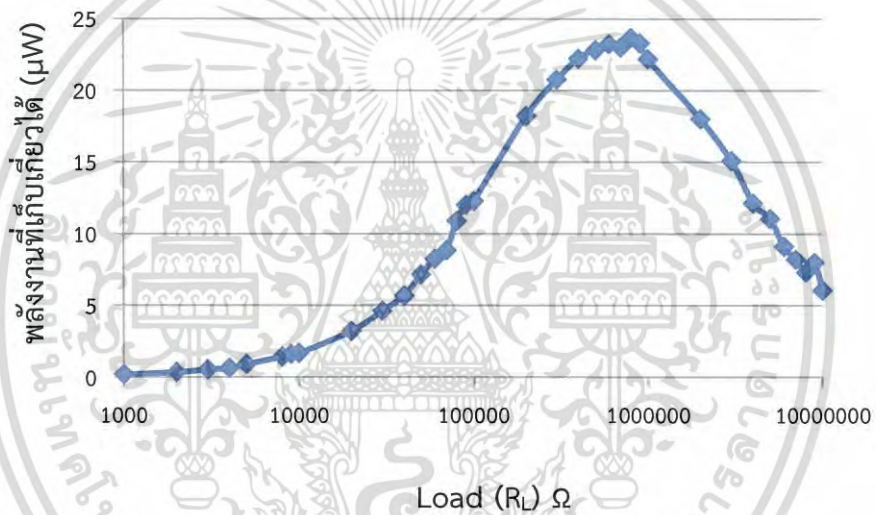
Load ( $R_L$ ) ( $\Omega$ )	piezovoltage (V)	พลังงานที่เก็บเกี่ยว ( $\mu\text{W}$ )
1k	0.0129	0.1673
2k	0.0258	0.3337
3k	0.0394	0.5173
4k	0.0510	0.6496
5k	0.0667	0.8911
6k	0.0795	1.0535
7k	0.0887	1.1239
8k	0.1067	1.4233
9k	0.1199	1.5963
10k	0.1289	1.6615
20k	0.2529	3.1996
30k	0.3722	4.6168
40k	0.4767	5.6808

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load (R <sub>L</sub> )	piezovoltage	พลังงานที่เก็บเกี่ยว
(Ω)	(V)	(μW)
50k	0.5980	7.1516
60k	0.7034	8.2471
70k	0.7867	8.8409
80k	0.9337	10.8974
90k	1.0389	11.9917
100k	1.1083	12.2833
200k	1.9075	18.1928
300k	2.4939	20.7318
400k	2.9799	22.1995
500k	3.3750	22.7813
600k	3.7321	23.2143
700k	4.0095	22.9658
800k	4.3488	23.6401
900k	4.5758	23.2644
1M	4.7072	22.1577
2M	5.9986	17.9916
3M	6.7240	15.0707
4M	6.9674	12.1362
5M	7.4320	11.0469
6M	7.3917	9.1062

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load ( $R_L$ ) ( $\Omega$ )	piezovoltage (V)	พลังงานที่เก็บเกี่ยว ( $\mu\text{W}$ )
7M	7.5842	8.2172
8M	7.6518	7.3188
9M	8.4744	7.9795
10M	7.7692	6.0361



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu\text{W}$ ) กับ Load ( $R_L$ )  $\Omega$  (วงจร FW Voltage Multiplier) ที่ 10 Vpp

4.3.2 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier ที่แอมพลิจูด 20Vpp  
 ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier ที่แอมพลิจูด 20 Vpp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

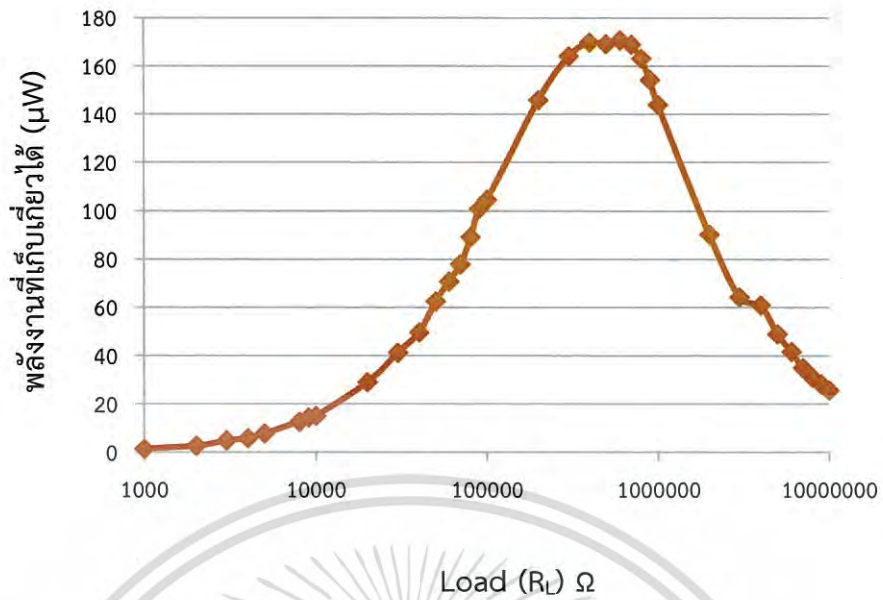
Load ( $R_L$ )	piezovoltage	พลังงานที่เก็บเกี่ยว
( $\Omega$ )	(V)	( $\mu W$ )
1k	0.035	1.2250
2k	0.071	2.4915
3k	0.118	4.6413
4k	0.151	5.7003
5k	0.195	7.6050
6k	0.234	9.1260
7k	0.266	10.1080
8k	0.317	12.5611
9k	0.358	14.2404
10k	0.386	14.8996
20k	0.761	28.9561
30k	1.110	41.0700
40k	1.408	49.5616
50k	1.765	62.3045
60k	2.060	70.7267
70k	2.334	77.8222
80k	2.669	89.0445
90k	3.012	100.8020
100k	3.233	104.5230
200k	5.404	146.0160
300k	7.018	164.1740

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load ( $R_L$ )	piezovoltage	พลังงานที่เก็บเกี่ยว
( $\Omega$ )	(V)	( $\mu W$ )
400k	8.247	170.0330
500k	9.201	169.3170
600k	10.124	170.8260
700k	10.879	169.0750
800k	11.429	163.2780
900k	11.791	154.4730
1M	12.006	144.1340
2M	13.419	90.0348
3M	13.880	64.2181
4M	15.592	60.7776
5M	15.625	48.8281
6M	15.789	41.5488
7M	15.623	34.8683
8M	15.721	30.8937
9M	15.870	27.9841
10M	16.010	25.6320

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu W$ ) กับ Load ( $R_L$ )  $\Omega$  (วงจร FW Voltage Multiplier) ที่ 20 Vpp

4.3.3 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier ที่แอมพลิจูด 30Vpp  
 ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier ที่แอมพลิจูด 30Vpp

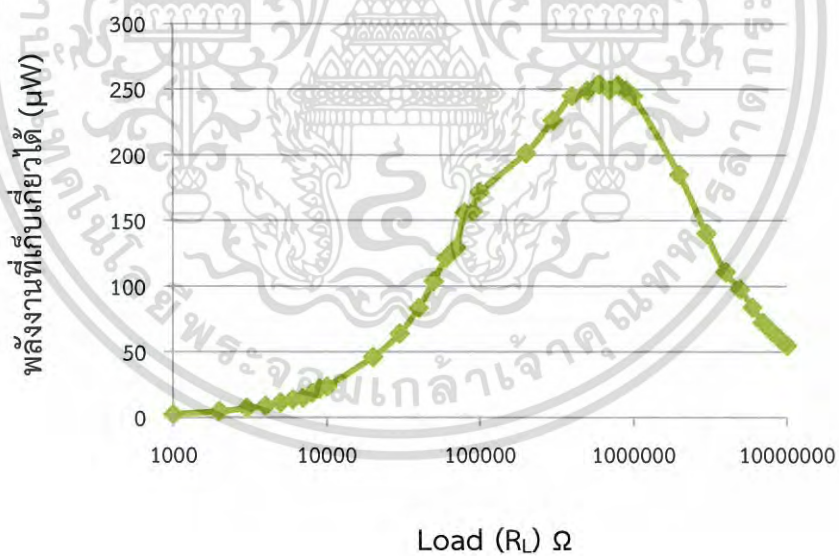
Load ( $R_L$ ) ( $\Omega$ )	piezovoltage (V)	พลังงานที่เก็บเกี่ยว ( $\mu W$ )
1k	0.0471	2.2184
2k	0.0945	4.4651
3k	0.1425	6.7688
4k	0.1837	8.4364
5k	0.2356	11.1015
6k	0.2846	13.4995
7k	0.3205	14.6743
8k	0.3845	18.4800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load ( $R_L$ ) ( $\Omega$ )	piezovoltage (V)	พลังงานที่เก็บเกี่ยว ( $\mu W$ )
9k	0.4395	21.4623
10k	0.4837	23.3966
20k	0.9570	45.7925
30k	1.4110	63.640
40k	1.8260	83.3569
50k	2.2780	103.7860
60k	2.6950	121.0500
70k	3.0060	129.0860
80k	3.5330	156.0260
90k	3.7570	156.8340
100k	4.138	171.230
200k	6.345	201.295
300k	8.234	225.996
400k	9.898	244.926
500k	11.150	248.645
600k	12.340	253.793
700k	13.210	249.292
800k	14.230	253.116
900k	14.980	249.334
1M	15.650	244.923
2M	19.230	184.896

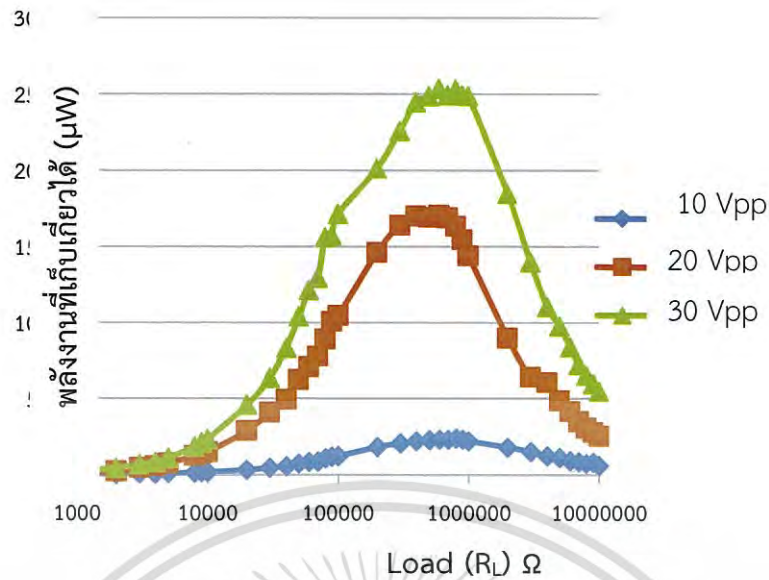
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Load ( $R_L$ ) ( $\Omega$ )	piezovoltage (V)	พลังงานที่เก็บเกี่ยว ( $\mu W$ )
3M	20.4800	139.8100
4M	21.0100	110.355
5M	22.1000	97.6820
6M	22.4200	83.7761
7M	22.4800	72.1929
8M	22.8700	65.3796
9M	23.1600	59.5984
10M	23.4200	54.8496

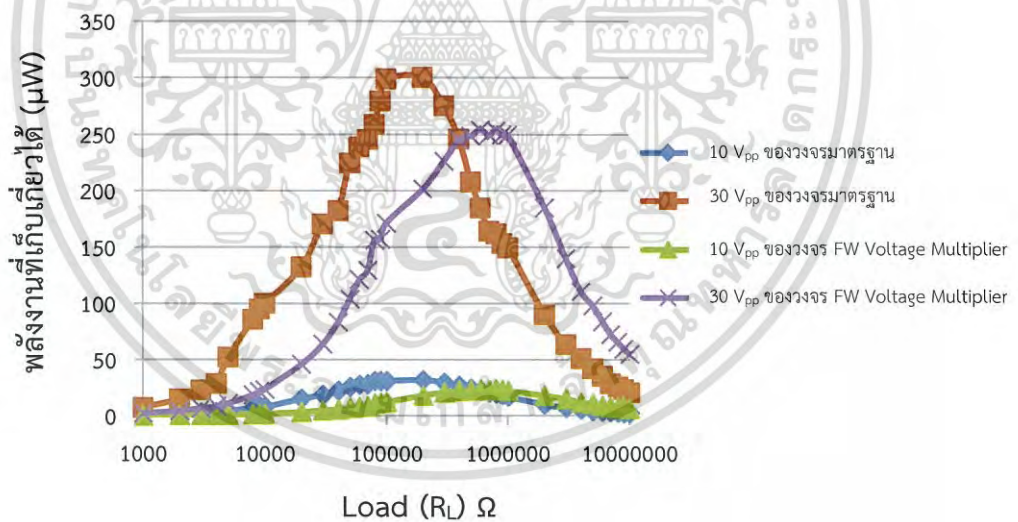


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu W$ ) กับ Load ( $R_L$ )  $\Omega$  (วงจร FW Voltage Multiplier) ที่ 30 Vpp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu\text{W}$ ) กับ Load ( $R_L$ )  $\Omega$  ของวงจร FW Voltage Multiplier



รูปที่ 4.10 กราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ ( $\mu\text{W}$ ) กับ Load ( $R_L$ ) ของวงจรมาตรฐานและวงจร Full Wave Voltage Multiplier ที่ 10  $V_{pp}$  และ 30  $V_{pp}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเรื่องวงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับวัสดุไพโซอิเล็กทริกเซรามิกชนิด PZT ได้ข้อสรุปดังนี้

วงจรการเก็บเกี่ยวพลังงานแบบมาตรฐาน และแบบ Full Wave Voltage Multiplier จะมีประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานสูงสุด  $300.313 \mu\text{W}$  และ  $249.334 \mu\text{W}$  ตามลำดับ ที่แอมพลิจูดการสั่น  $30 V_{pp}$  และความถี่การสั่น  $35 \text{ Hz}$

โหลดที่เหมาะสมที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานอยู่ในช่วง  $90 \text{ k}\Omega$  ถึง  $200 \text{ k}\Omega$  สำหรับวงจรแบบมาตรฐาน และในช่วง  $600 \text{ k}\Omega$  ถึง  $800 \text{ k}\Omega$  สำหรับวงจร Full Wave Voltage Multiplier

พลังงานสูงสุดที่เก็บเกี่ยวได้ของวงจรการเชื่อมต่อทั้ง 2 แบบ มีค่าต่างกัน โดยที่  $10 V_{pp}$  มีความแตกต่างคิดเป็น  $26.27\%$  และที่  $30 V_{pp}$  มีความแตกต่างคิดเป็น  $15.49\%$

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ระหว่างการทดลองควรตรวจสอบว่าแอมพลิจูดการสั่นของคานเป็นไปตามที่กำหนดไว้หรือไม่
- 2) ควรมีการกำหนดตำแหน่งในการวางอุปกรณ์ที่แน่นอนเพื่อลดความผิดพลาดด้านปัจจัยสิ่งแวดล้อม
- 3) ควรสั่นคานด้วยแอมพลิจูดที่พอเหมาะเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับวัสดุไพโซเซรามิก PZT ที่ใช้ในการทดลอง
- 4) ในการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานของวัสดุไพโซเซรามิก PZT โดยการใช้วงจร Full Wave Voltage Multiplier พบว่าเกิดค่า ripple มากจึงทำให้ค่าพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง
- 5) ในวงจร Full Wave Voltage Multiplier พบว่าเกิดค่า ripple มากควรแก้ไขด้วยการเพิ่มขนาดของตัวเก็บประจุให้มีค่ามากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] นันทกาญจน์ มุรศิต.2555.แหล่งพลังงานจีวีสตูดไพโซอิเล็กทริกและไพโรอิเล็กทริก. กรุงเทพมหานคร.จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] Prissana Rakbamrung,Mickael Lallart,Daniel Guyomar,Nantakan Muensit, Chanchana Thanachayanont,Claude Lucat,Benoit Guiffard,Lionel Petit,Pisan Sukwisut.Performance comparison of PZT and PMN-PT piezoceramics for vibration energy harvesting using standard or nonlinear approach, Sensors and Actuator A 163 (2010) : 493-500
- [3] [Online].Available :<http://www.electronics-tutorials.ws/blog/voltage-multiplier-circuit.html>
- [4] [Online].Available : [http://www.science.cmu.ac.th/Reg-sci/presentstud/index.asp?pg=711/mat0454pp\\_ch2.pdf](http://www.science.cmu.ac.th/Reg-sci/presentstud/index.asp?pg=711/mat0454pp_ch2.pdf)
- [5] [Online].Available : <http://www.tatc.ac.th/ch2.Doc>



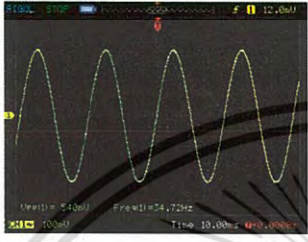
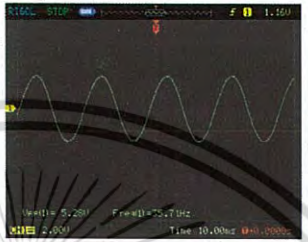
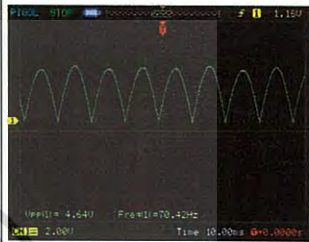


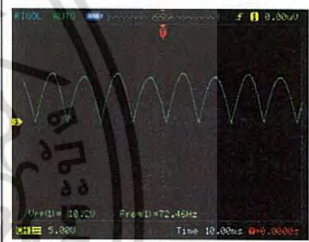
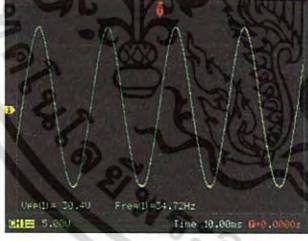


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก

การศึกษาการทำงานของวงจรมาตรฐาน

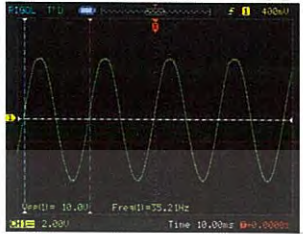
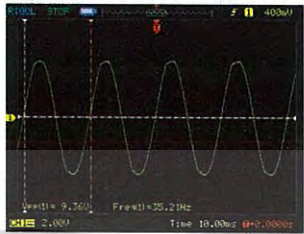



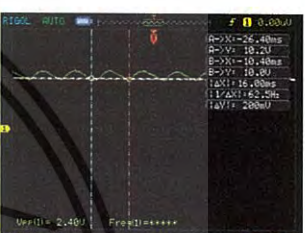
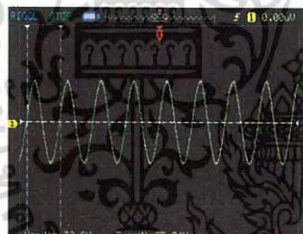


ที่	สัญญาณอินพุตเพียงโซลิตเดจ	สัญญาณอินพุตเมื่อต่อเข้าวงจรบริดจ์	สัญญาณอินพุตเมื่อผ่านวงจรบริดจ์
10 Vpp			
20 Vpp			
30 Vpp			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่	สัญญาณอินพุตเมื่อผ่าน C=10 $\mu$ F	สัญญาณอินพุตเมื่อผ่าน R=10 k $\Omega$	สัญญาณอินพุตเมื่อผ่าน R=1 M $\Omega$
10 Vpp			
20 Vpp			
30 Vpp			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการทำงานของวงจร Full Wave Voltage Multiplier

ที่	สัญญาณอินพุตเพียงไซโวลเตจ	สัญญาณอินพุตเมื่อต่อเข้าวงจรFW Voltage Multiplier	สัญญาณอินพุตเมื่อผ่าน C=10 $\mu$ F 2ตัว
10 Vpp			
20 Vpp			
30 Vpp			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่	สัญญาณอินพุตเมื่อผ่าน R=10 kΩ	สัญญาณอินพุตเมื่อผ่าน R=1 MΩ
10 Vpp		
20 Vpp		
30 Vpp		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้