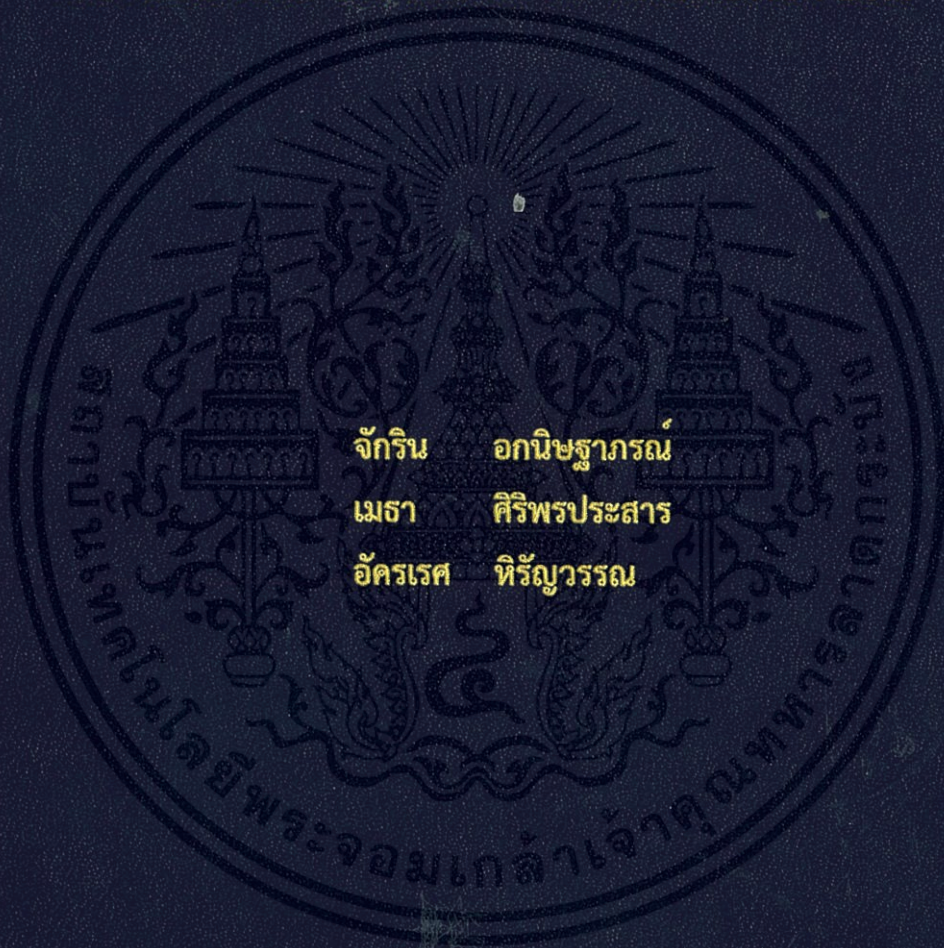


การศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์
และการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก

THE STUDY OF ENERGY HARVESTING USING PIEZOELECTRIC
THUNDER AND CHANGING OF MAGNETIC FLUX



จักริน อภินิษฐาภรณ์
เมธา ศิริพรประสาร
อัครเรศ ทิรัญวารณ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์
และการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก

THE STUDY OF ENERGY HARVESTING USING PIEZOELECTRIC
THUNDER AND CHANGING OF MAGNETIC FLUX



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อปีการศึกษา 2557 เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF ENERGY HARVESTING USING PIEZOELECTRIC
THUNDER AND CHANGING OF MAGNETIC FLUX



JAKARIN AKANITSATAPORN
MEATHA SIRIPORNPRASARN
AKARASE HIRUNWAN

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHATRONICS ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์และการเปลี่ยนแปลงของ
เส้นแรงแม่เหล็ก

THE STUDY OF ENERGY HARVESTING USING PIEZOELECTRIC THUNDER AND
CHANGING OF MAGNETIC FLUX

ผู้จัดทำ

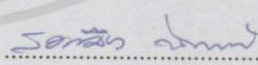
นายจักริน อกนิษฐาภรณ์ 54010185

นายเมธา ศิริพรประสาร 54011036

นายอัครเรศ หิรัญวรรณ 54011534

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดอน อิศรากร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์สองเมือง นันทขว้าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ และการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็ก

โดย

นายจักริน อกนิษฐาภรณ์ 54010185

นายเมธา ศิริพรประสาร 54011036

นายอัครเรศ หิรัญวรรณ 54011534

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดอน อิศรากร

อาจารย์สองเมือง นันทขว้าง

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมได้ถูกเป็นที่สนใจของนักวิจัยในวงกว้าง เนื่องจากการแปลงพลังงานที่เกิดรอบตัวมนุษย์อย่างสูญเปล่าให้เป็นพลังงานไฟฟ้า อาทิเช่น พลังงานกลจากการสั่นสะเทือนของวัตถุ พลังงานกลจากการเคลื่อนไหวของมนุษย์ หรือพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ เป็นต้น ประกอบกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันถูกพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง จึงมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สูงมากนัก ทำให้พลังงานที่เก็บเกี่ยวได้จากสิ่งแวดล้อมนั้น สามารถนำไปจ่ายให้แก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างต่อเนื่อง ปริมาณพันธะฉบับนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมด้วยเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ และการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก การศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานนี้จะศึกษาการกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากการเดินของมนุษย์ โดยทำการออกแบบโครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน ซึ่งเมื่อเกิดแรงกดลงบนพื้นแล้วจะเกิดการแปลงพลังงานกลจากการเดินให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยอาศัยหลักการดังกล่าวข้างต้น

THE STUDY OF ENERGY HARVESTING USING PIEZOELECTRIC THUNDER AND CHANGING OF MAGNETIC FLUX

By

Mr. Jakarin Akanitsataporn 54010185

Mr. Meatha Siripornprasarn 54011036

Mr. Akarase Hirunwan 54011534

Advisors

Asst. Prof. Dr. Don Isarakorn

Mr. Songmoung Nundrakwang

Academic Year 2014

ABSTRACT

Energy Harvesting is widely interested by many researchers since it is to make the useless energy generated surrounding us valuable in form of electrical energy such as mechanical energy from vibrating objects, mechanical energy from human movements, thermal energy from solar light, etc. Requiring only low power to be supplied for electronic devices due to their small size, energy harvested from environment is enough to supply for them continuously. This thesis concerns about energy harvesting via 2 methods: Piezoelectric Thunder and changing of magnetic flux. Energy harvesting floor is designed to receive pressing force from human walking, then transform to electrical energy by above mentioned methods.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ คณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดอน อิศรากร และอาจารย์สองเมือง นันทขว้าง อาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง ที่คอยชี้แนะแนวทางในการทำงานวิจัย คอยติดตามความคืบหน้า ดูแลเอาใจใส่ รวมถึงเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำงานมาโดยตลอด

ขอขอบคุณนายฐาปนันท์ สุธาวิยางกูร และนายศุภวัฒน์ ชัยสวัสดิ์ ที่คอยให้คำแนะนำ และสามารถตอบข้อสงสัยต่างๆ ในทุกขั้นตอนของการทดลองด้วยความเต็มใจมาโดยตลอด นอกจากนี้ยังคอยแนะแนวทางการนำเสนอผลงาน การทำเล่มปริญญานิพนธ์ และเอื้อเฟื้อเครื่องมือในการทดลองด้วย

ขอขอบคุณคุณสุลธิษชัย ศิริพรประसार ที่ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือด้านการออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ของชิ้นงานสำหรับการวิจัยเป็นอย่างสูง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่ง รวมถึงเป็นแบบอย่างที่ดีของการทำงานอย่างไม่ท้อถอย ทำให้คณะผู้จัดทำมีความตั้งใจ มุ่งมั่น และอดทนในการทำงานจนเสร็จสมบูรณ์ แม้จะเจออุปสรรคเพียงใดก็ตาม

ผู้จัดทำ

นายจักริน

อกนิษฐาภรณ์

นายเมธา

ศิริพรประसार

นายอัครเรศ

หิรัญวรรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการ	2
1.3 ขั้นตอนศึกษาและการจัดทำโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขอบเขตการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม (Energy Harvesting)	3
2.1.1 ความสำคัญของการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม	3
2.1.2 องค์ประกอบที่สำคัญของการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม	3
2.1.3 การนำพลังงานที่เก็บเกี่ยวจากสิ่งแวดล้อมไปใช้ประโยชน์	3
2.1.4 ชนิดของแหล่งพลังงานสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม	4
2.2 ปฏิกิริยาเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect)	5
2.3 เพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ (Piezoelectric Thunder)	6
2.4 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of Induction)	7
2.4.1 กฎของเลนซ์ (Lenz's Law)	9
2.5 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuits)	10
2.5.1 สารแม่เหล็ก (Magnetic Materials)	10
2.5.2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแม่เหล็ก	13
2.5.3 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance)	14
2.5.4 การสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss)	15
2.6 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเดินของมนุษย์	16
2.6.1 พื้นกำเนิดพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์	16
2.6.2 พื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน : การเปรียบเทียบการเก็บเกี่ยวพลังงานระหว่างการเปลี่ยนรูปพลังงานแบบเพียโซอิเล็กทริกและแบบแม่เหล็กไฟฟ้า	17
บทที่ 3 แนวคิดและการออกแบบ	18
3.1 โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงานเพื่อใช้ในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์	18
3.1.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 โครงสร้างพื้นรับแรงกด	19
3.2 โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงานเพื่อใช้ในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก	20
3.2.1 สิ่งที่ต้องการพัฒนา	21
3.2.2 การออกแบบพื้นกำเนิดพลังงานเพื่อใช้ในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก	22
3.2.2.1 โครงสร้างในการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า	22
3.2.2.2 โครงสร้างพื้นรับแรงกด	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย	29
4.1 การทดสอบเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์	29
4.1.1 การวัดค่าความต่างศักย์ที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์แบบเปิดวงจร	29
4.1.2 การวัดค่าความต่างศักย์ที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ตกรวมตัวต้านทาน	31
4.1.3 การทดสอบหาพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์	35
4.2 การทดสอบพื้นกำเนิดพลังงานเพื่อใช้ในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก	36
4.2.1 ตรวจสอบผลตอบสนองของความต่างศักย์ที่ได้จากขดลวดแต่ละชุดภายในเซลล์เดียวกัน	37
4.2.2 รูปแบบการต่อของขดลวดแต่ละชุดภายในเซลล์เดียวกัน	38
4.2.3 รูปแบบการต่อของขดลวดระหว่างเซลล์	42
4.2.4 การทดสอบหาพลังงาน	46
4.2.5 การทดลองจ่ายความต่างศักย์ให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	47
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุปผล	47
5.1 สรุปผลการทดลอง	49
5.2 ปัญหาที่พบและวิธีแก้ไข	50
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลำดับขั้นตอนของระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม	4
2.2	การเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก	5
2.3	โครงสร้างของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์	6
2.4	เพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ที่มีลักษณะโค้งงอ	7
2.5	ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์	7
2.6	อธิบายกฎของฟาราเดย์	8
2.7	การทดลองของฟาราเดย์	8
2.8	อธิบายกฎของเลนซ์	10
2.9	ความสัมพันธ์ของฟลักซ์แม่เหล็ก	11
2.10	แนวสนามแม่เหล็กในระบบ 2 มิติ	11
2.11	สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแส	11
2.12	ความสัมพันธ์ของค่า B และ H ของสารแม่เหล็ก	12
2.13	ขดลวดพันรอบแกนเหล็กที่เป็นวงรอบปิด	13
2.14	ขดลวดพันรอบแกนเหล็กที่เป็นวงรอบเปิด	13
2.15	ปรากฏการณ์สนามแม่เหล็กรั่วและสนามแม่เหล็กเบี่ยงเบน	14
2.16	การสูญเสียจากกระแสไหลวนในสารแม่เหล็ก	16
2.17	เพียโซเซอริทรุ่น MCFT-36T-2.6A1-139	17
2.18	โครงสร้างในการเหนี่ยวนำแบบแม่เหล็กไฟฟ้าจำนวน 1 เซลล์	17
3.1	เพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ รุ่น TH-6R	18
3.2	โครงสร้างพื้นรับแรงกดเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ มุมมองด้านข้าง	19
3.3	โครงสร้างพื้นรับแรงกดเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ มุมมองด้านบน	20
3.4	โครงสร้างพื้นรับแรงกดที่ประกอบด้วยเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์	20
3.5	โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อยังไม่ได้รับแรงกด (งานวิจัยเก่า)	21
3.6	โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อได้รับแรงกด (งานวิจัยเก่า)	21
3.7	โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อได้รับแรงกดต่อเนื่องซึ่งทำให้แกนแม่เหล็กหมุน	22
3.8	ลักษณะการวางตัวของแม่เหล็กถาวร	23
3.9	โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ประ โยชน์ดี	24
3.10	โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ที่มีการนำ ไป	24
	เมื่อยังไม่ได้รับแรงกด	

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.11	โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อได้รับแรงกด	24
3.12	โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อได้รับแรงกดต่อเนื่อง	25
3.13	โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อทำการปรับแต่งแล้ว	26
3.14	โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อยังไม่ได้รับแรงกด (ปรับแต่งแล้ว)	26
3.15	โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อได้รับแรงกด (ปรับแต่งแล้ว)	27
3.16	โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงานแบบแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงกดต่อเนื่อง (ปรับแต่งแล้ว)	27
3.17	โครงสร้างพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานแบบ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ประกอบกับส่วนเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า	28
4.1	จุดอ้างอิงในการวัดระยะการโค้งตัวของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์	29
4.2	การวัดค่าความต่างศักย์แบบเปิดวงจรถูกจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์	29
4.3	กราฟเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ที่วัดได้โดยตรงจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ที่ระยะโค้งตัวแตกต่างกัน	30
4.4	ผลตอบสนองจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ที่ระยะโค้งตัวลง 3.25 มม.	30
4.5	การวัดค่าความต่างศักย์จากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน	31
4.6	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์ที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์กับค่าความต้านทานที่ระยะโค้งตัวลงต่างกัน	33
4.7	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์กับค่าความต้านทานที่ระยะโค้งตัวลงต่างกัน	34
4.8	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์กับค่าความต้านทานที่ระยะโค้งตัวลงต่างกัน	34
4.9	การหาพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์	35
4.10	กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ที่ระยะโค้งตัวลงต่างกัน	36
4.11	โครงสร้างเหนี่ยวนำไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กโดยคร่าวจำนวน 1 เซลล์	36
4.12	สัญลักษณ์แทนโครงสร้างเหนี่ยวนำไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจำนวน 1 เซลล์	36
4.13	การตรวจสอบกราฟของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากขดลวดแต่ละชุดภายในเซลล์เดียวกัน	37
4.14	ผลตอบสนองของความต่างศักย์ที่ได้จากขดลวดแต่ละชุดภายในเซลล์เดียวกัน	37
4.15	การวัดค่าความต่างศักย์จากการเหนี่ยวนำของการต่อขดลวดแบบขนานภายในเซลล์เดียวกันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.16	การวัดค่าความต่างศักย์จากการเหนี่ยวนำของการต่อขดลวดแบบอนุกรมภายในเซลล์เดียวกันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน	38
4.17	ผลตอบสนองของความต่างศักย์จากการเหนี่ยวนำของการต่อขดลวดแบบขนานภายในเซลล์เดียวกันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน $R = 198.1 \Omega$	40
4.18	ผลตอบสนองของความต่างศักย์จากการเหนี่ยวนำของการต่อขดลวดแบบอนุกรมภายในเซลล์เดียวกันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน $R = 756 \Omega$	40
4.19	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์กับค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานและอนุกรมกันภายในเซลล์เดียวกัน	40
4.20	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานและอนุกรมกันภายในเซลล์เดียวกัน	41
4.21	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานและอนุกรมกันภายในเซลล์เดียวกัน	41
4.22	การวัดค่าความต่างศักย์จากการเหนี่ยวนำที่ตกคร่อมตัวต้านทาน โดยแต่ละเซลล์ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นชนิดบริดจ์ก่อน แล้วนำมาต่อขนานกัน	42
4.23	การวัดค่าความต่างศักย์จากการเหนี่ยวนำที่ตกคร่อมตัวต้านทาน โดยแต่ละเซลล์ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นชนิดบริดจ์ก่อน แล้วนำมาต่ออนุกรมกัน	42
4.24	ผลตอบสนองของความต่างศักย์จากการเหนี่ยวนำของการต่อขดลวดแบบขนานกันระหว่างเซลล์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน $R = 99.1 \Omega$	44
4.25	ผลตอบสนองของความต่างศักย์จากการเหนี่ยวนำของการต่อขดลวดแบบอนุกรมกันระหว่างเซลล์ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน $R = 399 \Omega$	44
4.26	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์กับค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานกับอนุกรมกันระหว่างเซลล์	44
4.27	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานและอนุกรมกันระหว่างเซลล์	45
4.28	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานและอนุกรมกันระหว่างเซลล์	45
4.29	การหาพลังงานที่ได้จากการเหนี่ยวนำแรงได้ไฟฟ้า โดยต่อรูปแบบขนานกันระหว่างเซลล์	46
4.30	การหาพลังงานที่ได้จากการเหนี่ยวนำแรงได้ไฟฟ้า โดยต่อรูปแบบอนุกรมกันระหว่างเซลล์	46
4.31	กราฟเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการนำขดลวดต่อรูปแบบขนานกันระหว่างเซลล์ และอนุกรมกันระหว่างเซลล์ โดยที่ขดลวดในแต่ละเซลล์ต่อขนานกัน	47
4.32	กราฟเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เดี่ยวจากงานวิจัยเก่าและใหม่	47
4.33	ผลการจ่ายความต่างศักย์ให้แก่เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ได้	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของพลังงานที่เก็บเกี่ยวจากสิ่งแวดล้อม	5
3.1	ลักษณะทางกายภาพของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ รุ่น TH-6R	19
4.1	ผลของค่ารบกวนกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์, ค่ารบกวนกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า, และค่ากำลังเฉลี่ย เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานที่ระยะการโก่งตัวลงของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ 2.25 มม.	32
4.2	ผลของค่ารบกวนกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์, ค่ารบกวนกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า, และค่ากำลังเฉลี่ย เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานที่ระยะการโก่งตัวลงของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ 2.75 มม.	32
4.3	ผลของค่ารบกวนกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์, ค่ารบกวนกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า, และค่ากำลังเฉลี่ย เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานที่ระยะการโก่งตัวลงของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ 3.25 มม.	33
4.4	ผลของค่ารบกวนกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์, ค่ารบกวนกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า, และค่ากำลังเฉลี่ย เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานภายในเซลล์เดียวกัน	39
4.5	ผลของค่ารบกวนกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์, ค่ารบกวนกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า, และค่ากำลังเฉลี่ย เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบอนุกรมภายในเซลล์เดียวกัน	39
4.6	ผลของค่ารบกวนกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์, ค่ารบกวนกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า, และค่ากำลังเฉลี่ย เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานกันระหว่างเซลล์	43
4.7	ผลของค่ารบกวนกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์, ค่ารบกวนกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า, และค่ากำลังเฉลี่ย เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบอนุกรมกันระหว่างเซลล์	43
4.8	คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซนเซอร์โหนดตรวจวัดความเร่งแบบไร้สาย (Accelerometer)	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในช่วงระยะเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro Electro Mechanical System : MEMS) เป็นระบบที่กำลังได้รับความสนใจ โดยเฉพาะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Devices) ซึ่งมักจะผลิตในรูปแบบ MEMS ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลง และใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ จึงสามารถนำไปติดตั้ง หรือใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ ได้สะดวกยิ่งขึ้น เช่น ใช้งานทางการแพทย์ หรือการติดตั้งเพื่อติดตามสภาพการทำงานของเครื่องจักร เป็นต้น การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้องอาศัยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งในหลายกรณีที่การนำไปใช้งานนั้น ตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ เนื่องจากถูกติดตั้งอยู่ภายในโครงสร้างอื่นๆ หรือถูกนำไปใช้งานบนพื้นที่ห่างไกล รวมถึงความนิยมในการใช้งานเซนเซอร์แบบไร้สายเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยแหล่งจ่ายจากภายนอกจึงเป็นไปได้ยาก ที่ผ่านมามีแบบเตอร์ี่มักจะถูกใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่ข้อเสียของแบบเตอร์ี่คือ ขนาดค่อนข้างใหญ่ มีระยะเวลาการใช้งานที่จำกัด ดังนั้นการสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าขึ้นเองจากสิ่งแวดล้อมภายนอกจึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งเป็นการแปลงพลังงานจากแหล่งพลังงานในสิ่งแวดล้อมรอบๆ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า [1] หรือเรียกว่าการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม (Energy Harvesting)

แหล่งพลังงานในสิ่งแวดล้อมมีอยู่หลายรูปแบบที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดมุ่งหมายในการนำพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ไปใช้งาน เช่น การเก็บเกี่ยวพลังงานจากแสงอาทิตย์ โดยอาศัยโฟโตอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Photoelectric Transducer) ในการแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า [2], พลังงานความร้อนจะถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยอาศัยเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (Thermoelectric Generator) [3], พลังงานจากการไหลของของไหล [4], และพลังงานกล [5] เป็นต้น โดยพลังงานกลเป็นแหล่งพลังงานที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากสามารถเก็บเกี่ยวได้ทุกที่ที่เกิดการสั่นสะเทือน หรือเกิดการเคลื่อนไหว การแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้านั้นสามารถทำได้ 3 กระบวนการ คือ เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) [6] แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) [7] และไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic) โดยแต่ละรูปแบบของการแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้านั้นมีความเหมาะสมในการนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ไปใช้งานต่างกันไป

การเคลื่อนไหวของมนุษย์ หรือแม้แต่วัตถุใดๆ ก็ตามนั้น สามารถสร้างพลังงานได้อย่างมากมาย แต่ล้วนสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ ปริมาณพินิจนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ (Piezoelectric Thunder) ซึ่งอาศัยการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในการแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า และหลักการแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นการอาศัยพลังงานกลในการทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด การศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานนี้จะศึกษาการกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากการเดินของมนุษย์ โดยทำการออกแบบโครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน ซึ่งเมื่อเกิดแรงกดลงบนพื้นแล้วจะเกิดการแปลงพลังงานกลจากการเดินให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยอาศัยหลักการดังกล่าวข้างต้น ทั้งนี้ การศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก เป็นการพัฒนาโครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงานเดิมให้เกิดประสิทธิภาพสูงขึ้น [8]

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการ

1. ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ และการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก
2. ออกแบบโครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน ซึ่งสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานที่สูญเสียไปกับการเดินของมนุษย์ โดยที่โครงสร้างมีความคงทน และมีประสิทธิภาพ
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาโครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงานนี้ สำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนไหวของวัตถุอื่นๆ ที่ไม่จำกัดเพียงแค่การเดินของมนุษย์เท่านั้น

1.3 ขั้นตอนศึกษาและการจัดทำโครงการ

เริ่มต้นศึกษาเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม โดยค้นคว้าจากงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้อง เพื่อประโยชน์ในการออกแบบ และทดสอบโครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน เมื่อทราบถึงคุณสมบัติและข้อจำกัดต่างๆ จึงทำการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ และการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กตามลำดับ โดยการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากทั้งสองหลักการนี้ จะทำการออกแบบโครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงานก่อน และนำมาทดสอบเพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสม เมื่อได้โครงสร้างที่เหมาะสมแล้ว จึงทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า และทดลองจ่ายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พื้นกำเนิดพลังงานสามารถใช้งานได้จริง
2. พลังงานไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้สามารถนำไปจ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้
3. ปรวิญญานีพนธ์จะเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีเก็บเกี่ยวพลังงานต่อไปในอนาคต ซึ่งไม่จำกัดเพียงการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเดินของมนุษย์เท่านั้น

1.5 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ และการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยศึกษาจากการเดินของมนุษย์ ซึ่งเกิดแรงกดลงบนพื้นกำเนิดพลังงานที่จะทำการออกแบบเปรียบเทียบผลการเก็บเกี่ยวพลังงานกับการจากการเดินของมนุษย์ในรูปแบบอื่น และทดลองจ่ายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม (Energy Harvesting)

พลังงานนั้นมีอยู่อย่างมากมายในสิ่งแวดล้อมรอบตัวเรา ทั้งอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม หรือพลังงานกล เป็นต้น ในอดีตมนุษย์ยังไม่สามารถนำเอาพลังงานเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ได้ เนื่องจากพลังงานเหล่านี้ล้วนแล้วแต่เกิดขึ้นเพียงช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งมนุษย์ยังขาดเทคโนโลยีหรือวิธีการที่จะดึงเอามันมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ในปัจจุบันได้เกิดกระบวนการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นการดึงเอาพลังงานเหล่านี้จากแหล่งพลังงานแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า นำมาเก็บสะสมไว้ แล้วจึงนำไปใช้ประโยชน์ โดยอาศัยอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน ซึ่งสามารถจัดการพลังงานเหล่านี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.1 ความสำคัญของการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมได้เป็นที่สนใจของนักวิจัยในวงกว้าง เนื่องจากพลังงานจากแหล่งธรรมชาติ เป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมดสิ้น และสามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ต้องนำไปใช้งานในพื้นที่ห่างไกล ทำให้สามารถลดความยุ่งยากที่จะต้องหาแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่อาจจะต้องมีการต่อสาย หรือต้องอาศัยแบตเตอรี่ที่มีราคาค่อนข้างสูงในการจ่ายไฟให้อุปกรณ์ต่างๆ นอกจากนี้การพัฒนาของเทคโนโลยีด้านไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีความทันสมัยมากขึ้น ทำให้อุปกรณ์ด้านไมโครโปรเซสเซอร์มีความต้องการใช้พลังงานต่ำ ประกอบกับประสิทธิภาพของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมนั้นสูงขึ้นคือ สามารถเก็บเกี่ยวมาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น จึงส่งผลให้การเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมนั้นมีความสำคัญมากขึ้น และได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

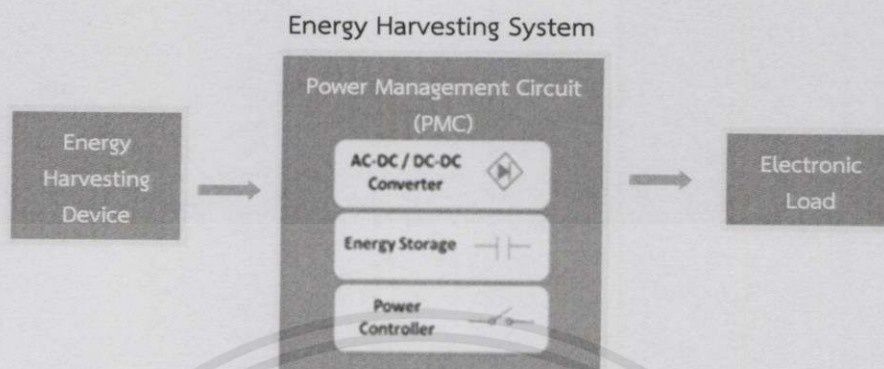
2.1.2 องค์ประกอบที่สำคัญของการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม

1. อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานหรืออุปกรณ์ที่ทำการแปลงพลังงานรูปแบบต่างๆ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น เพียโซบัสเซอร์สามารถแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า
2. อุปกรณ์สำหรับกักเก็บและจัดการกับพลังงานที่ได้
3. อุปกรณ์ที่จะใช้ประโยชน์จากพลังงานไฟฟ้าที่ได้ เช่น เซนเซอร์แบบไร้สาย [9]

2.1.3 การนำพลังงานที่เก็บเกี่ยวจากสิ่งแวดล้อมไปใช้ประโยชน์

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มากมายในชีวิตประจำวันได้มีการนำเอาพลังงานที่เก็บเกี่ยวจากสิ่งแวดล้อมไปใช้ประโยชน์ แต่รูปแบบของพลังงานไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้นั้น มักจะไม่สามารถนำไปใช้งานได้ทันที เนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltage) ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการกับพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ให้มีความเหมาะสมสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เสียก่อน [10, 11] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงระบบการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting System) ประกอบด้วย อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting Device), วงจรจัดการกำลังไฟฟ้า (Power Management Circuit : PMC), และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จะนำ

พลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ไปใช้ โดยวงจรจัดการกำลังไฟฟ้าจะต้องสามารถทำการเรียงการแสไฟฟ้า (Rectify) และเก็บพลังงานสะสมไว้ (Store)



รูปที่ 2.1 ลำดับขั้นตอนของระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม

จากแผนภาพดังรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าในส่วนของ PMC ประกอบด้วยวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (AC-DC Converter) เพื่อทำการจัดเรียงไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่ได้จากการเก็บเกี่ยวให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ส่วนวงจรปรับระดับแรงดัน (DC-DC Converter) ใช้ในการปรับระดับแรงดันให้มีความเหมาะสมกับอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน (Energy Storage) และเหมาะสมสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จะใช้งาน (Electronic Load) โดยอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานส่วนใหญ่จะเป็นไมโครแบตเตอรี่ (Micro Batteries) หรือตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Super Capacitor) นอกจากนี้ยังมีส่วนควบคุมกำลังไฟฟ้า (Power Controller) เพื่อปรับระดับกำลังไฟฟ้าที่ได้ให้เพียงพอต่อความต้องการของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [12]

2.1.4 ชนิดของแหล่งพลังงานสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม

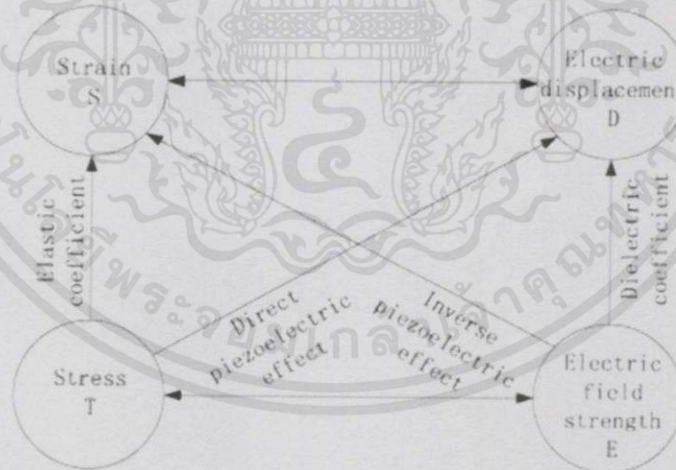
1. พลังงานจากทางกล : การสั่นสะเทือน ความเค้นและความเครียดในวัสดุ
 2. พลังงานจากความร้อน : ความร้อนที่สูญเสียจากเตาหลอม เครื่องทำความร้อน หรือจากแรงเสียดทาน
 3. พลังงานจากแม่เหล็กไฟฟ้า : ตัวเหนี่ยวนำ ขดลวด และหม้อแปลง
 4. พลังงานจากธรรมชาติ : ลม การไหลของน้ำ คลื่นทะเล และแสงอาทิตย์
 5. พลังงานจากร่างกายมนุษย์ : ทั้งทางกลและความร้อนซึ่งเกิดจากกระบวนการต่างๆ ในร่างกาย หรือการเคลื่อนไหวจากกิจกรรมในชีวิตประจำวัน
 6. พลังงานจากแหล่งอื่นๆ : ทางเคมี
- การเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมในแต่ละรูปแบบนั้น โดยทั่วไปแล้ว ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าประมาณ $10\text{-}50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของพลังงานที่เก็บเกี่ยวจากสิ่งแวดล้อม [13]

Energy Harvesting Source		Power Density	Harvester Consideration	Circuit consideration
Light	Indoor	$10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	Light intensity and wavelength	Low power efficiency MPPT
	Outdoor	$10 \text{mW}/\text{cm}^2$		
Vibration Piezoelectric	Human	$4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	Amplitude of the vibration and resonant frequency	AC/DC Conversion, Impedance matching
	Machine	$250 \mu\text{W}/\text{cm}^2$		
Vibration Electromagnetic	Human	$50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	Amplitude of the vibration and resonant frequency	AC/DC Conversion, Impedance matching
	Machine	$2 \text{mW}/\text{cm}^2$		
Thermal	Human	$25 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	Thermal gradient, Heat flux	Low-voltage startup
	Machine	$10 \text{mW}/\text{cm}^2$		
Radio Waves	Background	$0.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	Distance from source and resonance of antenna	High efficiency low-voltage rectification
	Direct	$1 \text{mW}/\text{cm}^2$		

2.2 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect)



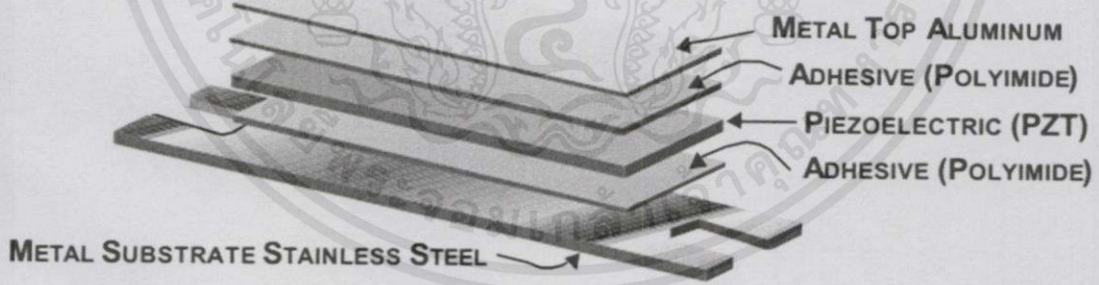
รูปที่ 2.2 การเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก [14]

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) เป็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของพลังงานระหว่างพลังงานกล (Mechanical Energy) และพลังงานไฟฟ้า (Electrical Energy) ถูกค้นพบในปี 1880 โดย Jacques และ Pierre Curie ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในวัสดุจำพวกผลึก เช่น ควอตซ์ (Quartz), ซิงค์ เบลนด์ (Zinc Blende) และทัวร์มาไลน์ (Tourmaline) เป็นต้น ซึ่งโดยรวมอาจเรียกว่า วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Material) โดยวัสดุจะสามารถเกิดขั้วไฟฟ้า

(Electrical Polarization) ขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความเค้น เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางตรง (Direct Piezoelectric Effect) ในทางกลับกันความเค้นจะเกิดขึ้นในวัสดุเมื่อวัสดุได้รับแรงดันไฟฟ้า เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางอ้อม (Reverse Piezoelectric Effect) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในปัจจุบันวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะการประยุกต์ทางด้านการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม [14] ซึ่งงานวิจัยที่มีชื่อเสียงในการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาใช้ประโยชน์ในการเก็บเกี่ยวพลังงาน เช่น การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเดิน และวิ่งด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกซึ่งยึดติดไว้ในรองเท้า (Energy Scavenging with Shoe-Mounted Piezoelectric) [15] และการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากลมด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Modeling of Electric Energy Harvesting Using Piezoelectric Windmill) [16]

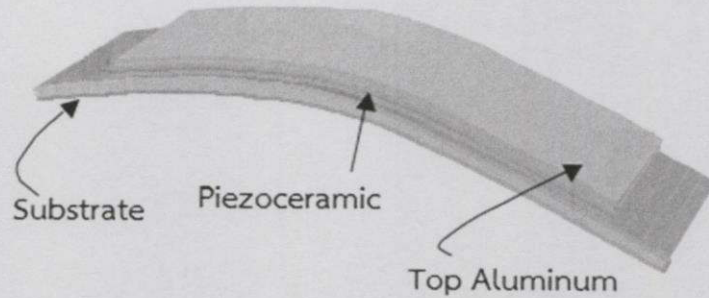
2.3 เพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ (Piezoelectric Thunder)

เพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ (Piezoelectric Thunder) อาศัยหลักการพื้นฐานของปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางตรงในการแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ดังอธิบายในหัวข้อที่ 2.2 ซึ่งเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ตี้ถูกค้นคว้าและวิจัยโดยองค์การนาซา (NASA) โดยคำว่า Thunder มีที่มาจากคำว่า Thin Layer Unimorph Ferroelectric Driver and Sensor ลักษณะพื้นฐานของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ประกอบด้วยแผ่นเพียโซเซรามิก (Piezoceramic) ซึ่งถูกประกบด้วยแผ่นนำไฟฟ้า โดยกาวอีพอกซี (Epoxy) ซึ่งเป็นเรซินสังเคราะห์ที่มีความเหนียวสูง และจะแข็งตัวหลังผ่านความร้อน โครงสร้างของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์แบบมาตรฐาน ประกอบด้วยแผ่นสแตนเลสเป็นฐานอยู่ชั้นล่างสุด แผ่นเพียโซเซรามิกอยู่ชั้นกลาง และชั้นบนสุดเป็นอลูมิเนียมซึ่งนำไฟฟ้าได้ดี ดังรูปที่ 2.3

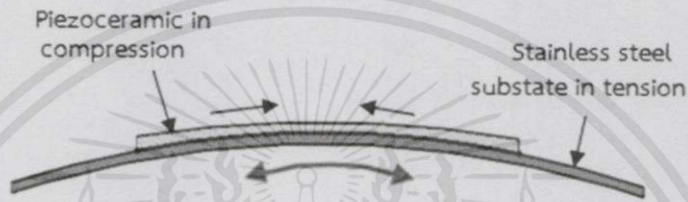


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ [17]

เนื่องจากโครงสร้างของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ประกอบด้วยวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Coefficient of Expansion) และค่า Young's Modulus ไม่เท่ากัน ทำให้ในกระบวนการผลิตเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ ซึ่งจะมีการตั้งค่าความดันคงที่ และการปรับระดับอุณหภูมิ ส่งผลให้เพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ตี้มีลักษณะโค้งงอ ดังรูปที่ 2.4 ทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายใน (Pre-Stress) โดยแผ่นเพียโซเซรามิกจะเกิดความเค้นอัด (Compression Stress) และแผ่นสแตนเลสล่างสุดจะเกิดความเค้นดึง (Tension Stress) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ที่มีลักษณะโค้งงอ [17]



รูปที่ 2.5 ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

การเกิดความเค้นขึ้นภายในนี้ ส่งผลให้เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์นี้สามารถเกิดการโก่งตัวได้มาก และทำให้ความสามารถของอุปกรณ์นี้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งต่างจากแผ่นเพียโซเซรามิกธรรมดาที่ไม่สามารถทำให้โก่งตัวได้ เพราะจะเกิดความเสียหาย การโก่งตัวได้มากของเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้มาก ดังนั้นเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์จึงมีความสามารถในการแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากนั่นเอง [17]

2.4 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of Induction)

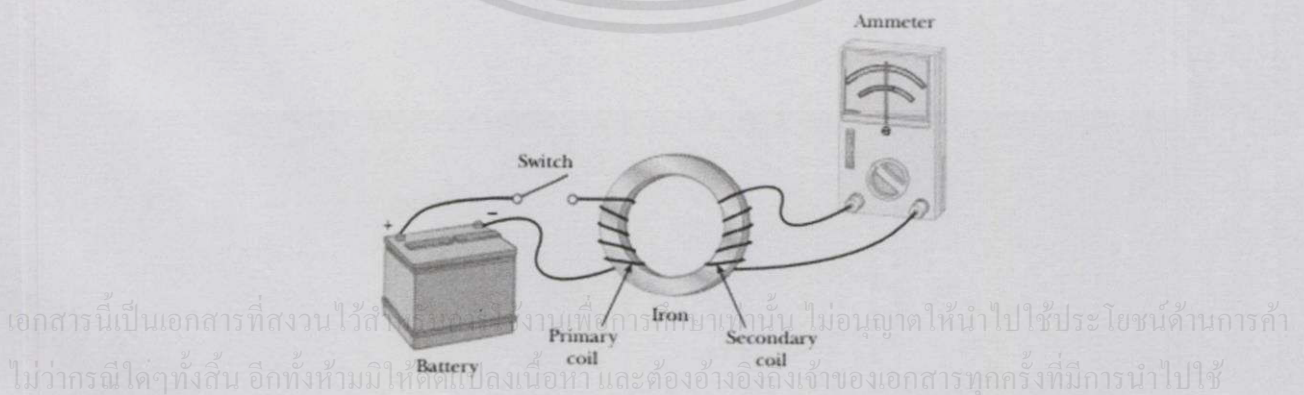
ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ได้ทำการทดลองซึ่งเกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force : EMF) ขึ้นในวงจร โดยเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ผลการทดลองของฟาราเดย์นี้ เป็นต้นกำเนิดของหลักการพื้นฐานของแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetism) หรือที่รู้จักกันว่ากฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's of Induction) แรงเคลื่อนไฟฟ้างกล่าวรวมถึงกระแสไฟฟ้าสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นได้ในหลายกรณีที่มีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก

การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้วยการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งประกอบด้วยวงแหวนขดลวดต่อเข้ากับแอมป์มิเตอร์ (Ammeter) เมื่อทำการเคลื่อนแม่เหล็กเข้าไปในวงแหวนขดลวด จะทำให้เข็มของแอมป์มิเตอร์เบนไปด้านใดด้านหนึ่ง ดังรูปที่ 2.6(ก) ซึ่งเข็มเบนไปทางด้านขวา เมื่อหยุดการเคลื่อนของแม่เหล็กให้อยู่กับที่ภายในวงแหวนขดลวด ดังรูปที่ 2.7(ข) พบว่าจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ เกิดขึ้น เมื่อทำการเคลื่อนแม่เหล็กออกมาจากวงแหวนขดลวด จะทำให้เข็มของแอมป์มิเตอร์เบนไปด้านตรงข้าม ดังรูปที่ 2.6(ค) ซึ่งเข็มเบนไปทางด้านซ้าย และเมื่อให้แม่เหล็กอยู่กับที่โดยทำการเคลื่อนวงแหวนขดลวดเข้า หรือออกจากแม่เหล็กแทนก็จะพบว่าเกิดการเบนของเข็มในแอมป์มิเตอร์เกิดขึ้น จากการทดลองนี้สังเกตได้ว่าวงแหวนขดลวดเกิด

ความสัมพันธ์ขึ้นกับแม่เหล็ก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าความสัมพันธ์นี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก และมากกว่านั้นเราพบว่าเกิดความเกี่ยวข้องกันบางอย่างระหว่างกระแสไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีความน่าสนใจคือ กระแสไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้ถึงแม้ว่าไม่มีแบตเตอรี่



รูปที่ 2.6 อธิบายกฎของฟาราเดย์ [18]



รูปที่ 2.7 การทดลองของฟาราเดย์ [18]

จากรูปที่ 2.7 เป็นการทดลองที่ถูกทำขึ้นโดยฟาราเดย์เช่นกัน ขดลวดปฐมภูมิถูกต่อเข้ากับสวิตช์ และแบตเตอรี่ โดยพันรอบวงแหวนเหล็กด้านหนึ่ง เมื่อทำการปิดสวิตช์จะทำให้กระแสไฟฟ้าในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น ขดลวดทุติยภูมิถูกพันอยู่อีกด้านหนึ่งรอบวงแหวนเหล็ก และต่อเข้ากับแอมมิเตอร์เท่านั้น ซึ่งไม่ได้ต่อเข้ากับแบตเตอรี่ หรือขดลวดปฐมภูมิ ช่วงขณะทำการปิดสวิตช์ พบว่าเข็มของแอมป์มิเตอร์เกิดการเบน และกลับมาที่ตำแหน่งศูนย์เช่นเดิม นอกจากนี้ช่วงขณะที่ทำการเปิดสวิตช์ เข็มของแอมป์มิเตอร์ก็เกิดการเบนเช่นกัน และกลับมาที่ตำแหน่งศูนย์ แต่เข็มจะเบนไปในทิศตรงกันข้ามจากเดิม เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลมีค่าคงที่ หรือไม่มีกระแสไหลในขดลวดด้านทุติยภูมิ เข็มของแอมป์มิเตอร์จะอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ การเบนเข็มของแอมป์มิเตอร์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าด้านขดลวดปฐมภูมิสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น และผ่านไปยังขดลวดด้านทุติยภูมิ จากการทดลองนี้ ฟาราเดย์ได้สรุปว่ากระแสไฟฟ้าสามารถเหนี่ยวนำขึ้นในวงจรโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก กระแสที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นนี้ จะเกิดขึ้นเพียงชั่วขณะหนึ่งในระหว่างที่สนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดทุติยภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อสนามแม่เหล็กเข้าสู่สภาวะคงที่ กระแสไฟฟ้าในขดลวดทุติยภูมิจะหมดไป จึงกล่าวได้ว่าขดลวดทุติยภูมินี้สามารถเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ในชั่วขณะหนึ่ง

จากสองการทดลองข้างต้นของฟาราเดย์ ฟาราเดย์จึงได้กล่าวไว้ว่า “แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในวงจรจะแปรผันตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเทียบกับเวลา” สามารถอธิบายดังสมการที่ (2.1)

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.1)$$

หากพันขดลวดซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันจำนวน N รอบ และ Φ_B คือ สนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดแต่ละรอบ จะทำให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีขนาดดังสมการที่ (2.2)

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.2)$$

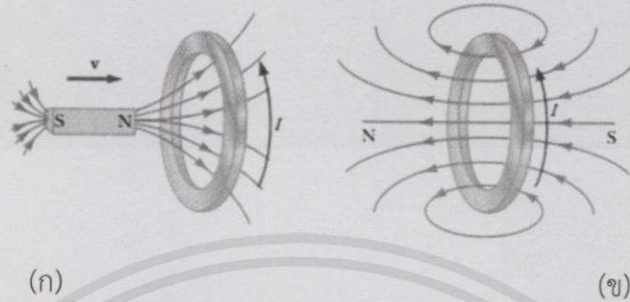
ทั้งนี้เครื่องหมายลบในสมการที่ (2.1) ถึงสมการที่ (2.2) และจะอธิบายในหัวข้อที่ 2.4.1

2.4.1 กฎของเลนซ์ (Lenz's Law)

จากสมการของกฎของฟาราเดย์ที่แสดงให้เห็นว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นนั้นมีเครื่องหมายติดลบ สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของเลนซ์ ซึ่งกล่าวไว้ว่า “กระแสไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดจะมีทิศทางที่จะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กใหม่ขึ้นมาต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กเดิมที่ตัดผ่านขดลวดนั้น” นั่นคือกระแสที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นพยายามที่จะรักษาฟลักซ์สนามแม่เหล็กเดิมไว้ไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservative of Energy)

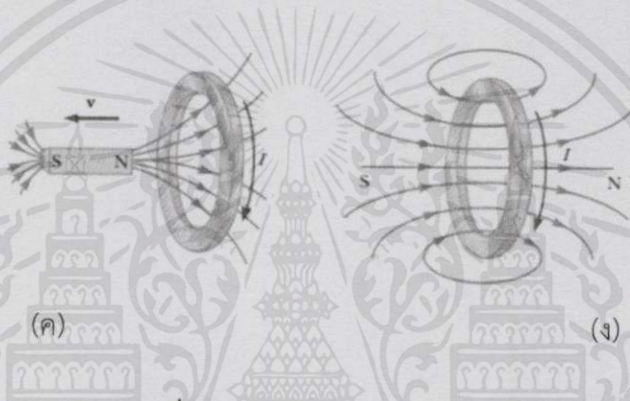
กฎของเลนซ์สามารถพิจารณาได้โดยการนำแท่งแม่เหล็กเคลื่อนเข้าวงแหวนเหล็กดังรูปที่ 2.8(ก) ขณะที่แท่งแม่เหล็กเคลื่อนไปในวงแหวนเหล็กทางด้านขวา เส้นแรงแม่เหล็กภายนอกที่วิ่งผ่านวงแหวนมีปริมาณเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาขณะนั้น เพื่อเป็นการพยายามไม่ให้เกิดการเพิ่มของเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งมีทิศทางไปทางขวานี้ กระแสไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจะทำการสร้างสนามแม่เหล็กของตัวเองขึ้นมาซึ่งมีทิศไปทางซ้ายมือ ดังรูปที่ 2.8(ข) ถ้านำแท่งแม่เหล็กเคลื่อนออกจากวงแหวนเหล็กไป

ทางซ้ายมือ ดังรูปที่ 2.8(ค) เส้นแรงแม่เหล็กภายนอกที่วิ่งผ่านวงแหวนมีปริมาณลดลงในช่วงเวลา
 ขณะนั้น ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจะทำการสร้างสนามแม่เหล็กของตัวเองขึ้นมาซึ่งมีทิศไป
 ทางขวามือ ดังรูปที่ 2.8(ง) เพื่อพยายามไม่ให้เกิดการลดลงของเส้นแรงแม่เหล็ก [18]



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 2.8 อธิบายกฎของเลนซ์ [18]

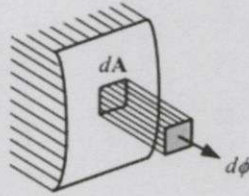
2.5 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuits)

ส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งในการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าคือ
 วงจรแม่เหล็ก ซึ่งจะต้องสามารถสร้างและควบคุมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้ตอบสนองต่อกระบวนการ
 เปลี่ยนรูปพลังงาน (Energy Conversion) หรือการส่งผ่านพลังงาน (Energy Transfer) ตามที่
 ต้องการได้ หลักการของสนามแม่เหล็กที่นำมาประยุกต์และพัฒนาเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าต่างๆ จะ
 เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์พื้นฐาน เช่น เมื่อมีกระแสไหลในลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นมา
 รอบลวดตัวนำ และถ้าลวดตัวนำนั้นวางอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงกระทำกับลวด
 ตัวนำซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของมอเตอร์ ในกรณีที่ลวดตัวนำมีการเคลื่อนที่ตัดผ่านบริเวณที่มี
 สนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นบนลวดตัวนำนั้น ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของเครื่อง
 กำเนิดไฟฟ้า และถ้าสนามแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องขดลวดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดตามเวลาจะทำให้เกิด
 แรงดันเหนี่ยวนำบนขดลวดนั้น

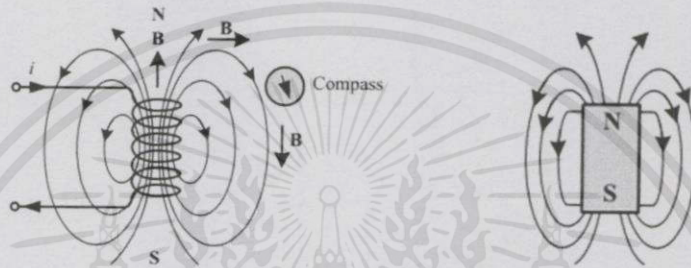
2.5.1 สารแม่เหล็ก (Magnetic Materials)

จากนิยามของค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) ซึ่งมีหน่วยเป็น
 เวเบอร์ต่อตารางเมตร (Waber/m²) หรือเทสลา (Tesla, T) จะได้ว่าถ้าทำการอินทิเกรตค่าความ
 หนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนพื้นที่หนึ่งๆ (A) ดังรูปที่ 2.9 จะกำหนดให้เป็นค่าฟลักซ์แม่เหล็ก
 (Magnetic Flux) มีหน่วยเป็นเวเบอร์ (Waber, Wb) แสดงดังสมการที่ (2.3)

$$\Phi = \int B dA = BA \tag{2.3}$$



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของฟลักซ์แม่เหล็ก [19]

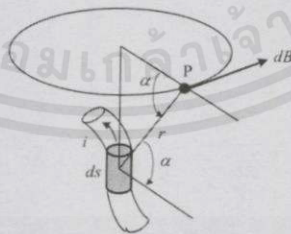


ก) สนามแม่เหล็กจากขดโซลินอยด์ ข) สนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก

รูปที่ 2.10 แนวสนามแม่เหล็กในระบบ 2 มิติ [19]

ดังนั้นจำนวนฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งออกจากพื้นผิวใดๆ จะต้องเท่ากับจำนวนฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งเข้าพื้นผิวนั้นๆ ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งหมายความว่าแนวของฟลักซ์แม่เหล็กต้องมีความต่อเนื่องกันเสมอ ดังสมการที่ (2.4)

$$\int B dA = 0 \tag{2.4}$$



รูปที่ 2.11 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแส [19]

เมื่อมีกระแส i ไหลผ่านชิ้นส่วนเล็กๆ ds ของตัวนำไฟฟ้างดรูปที่ 2.11 กระแสในส่วน ds จะทำให้เกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก dB ขึ้นที่จุด P ในสนามแม่เหล็ก เมื่อกำหนดให้ H เป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity) มีหน่วยเป็นแอมแปร์-รอบต่อเมตร (A-t/m) จะได้ว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าดังสมการที่ (2.5)

$$B = \mu H \tag{2.5}$$

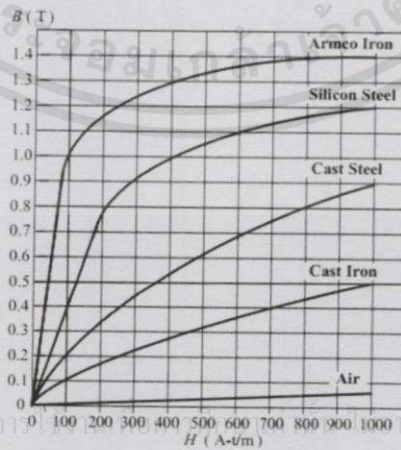
ค่า μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก (Magnetic Permeability) หน่วยเป็น เฮนรีต่อเมตร (H/m) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2.6)

$$\mu = \mu_0 \mu_r \tag{2.6}$$

เมื่อ μ_0 เป็นค่าความซึมซาบแม่เหล็กของอวกาศ มีค่าคงที่เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m และ μ_r เป็นค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative Permeability) ของสารแม่เหล็กซึ่งไม่มีหน่วย

สารแม่เหล็กสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ โดยการพิจารณาจากพฤติกรรมของค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ μ_r ของสารนั้นๆ ได้ดังนี้

1. ไดอะแมกเนติก (Diamagnetic) เป็นสารที่มีค่า μ_r น้อยกว่า 1 เล็กน้อย เช่น น้ำ ทองแดง ตะกั่ว เงิน เป็นต้น สารแม่เหล็กประเภทนี้จะเกิดค่าสนามแม่เหล็กได้น้อยมาก
2. พาราแมกเนติก (Paramagnetic) เป็นสารที่มีค่า μ_r มากกว่า 1 เล็กน้อย เช่น อากาศ อลูมิเนียม แมงกานีส เป็นต้น ดังนั้นสารแม่เหล็กประเภทนี้จะกำหนดให้มีค่า μ ประมาณเท่ากับ μ_0
3. นอนแมกเนติก (Nonmagnetic) เป็นสารที่มีค่า μ_r เท่ากับ 1 ได้แก่ สุญญากาศ
4. เฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) เป็นสารที่มีค่า μ_r มากกว่า 1 มากๆ (10^2 ถึง 10^6) เช่น ซิลิกอน เหล็ก นิกเกิล เป็นต้น ดังนั้นสารแม่เหล็กประเภทนี้จะเกิดค่าสนามแม่เหล็กได้มาก แต่อย่างไรก็ตามพฤติกรรมค่า μ_r จะมีค่าไม่คงที่ เมื่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก H เปลี่ยนแปลงไป
5. เฟอร์ริแมกเนติก (Ferrimagnetic) เป็นสารเฟอร์ไรท์ที่มีส่วนประกอบเป็นไอออนออกไซด์ (Iron Oxide) เช่น แบเรียมเฟอร์ไรท์ (Barium Ferrite) เป็นต้น มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูง เหมาะสำหรับการใช้งานที่ย่านความถี่สูง
6. อะมอร์ฟัส (Amorphous) เป็นสารแม่เหล็กชนิดใหม่ที่มีโครงสร้างแตกต่างจากประเภทอื่นๆ เป็นสารสังเคราะห์ ไม่มีในธรรมชาติ สามารถให้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สูง เหมาะสำหรับการใช้งานในย่านความถี่ต่างๆ ได้ดี



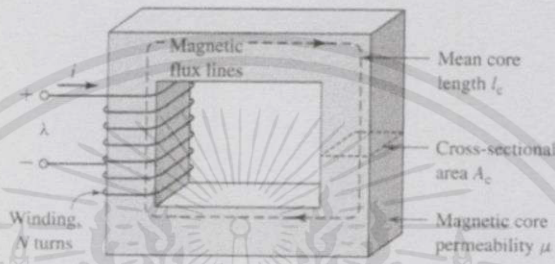
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภา... อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อห... และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

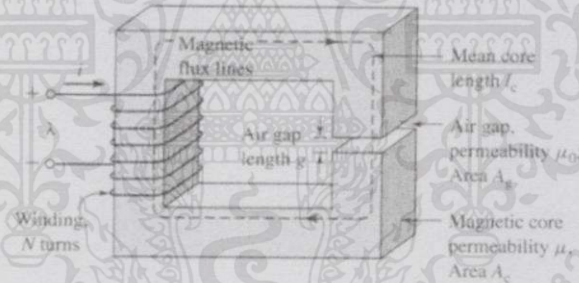
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของค่า B และ H ของสารแม่เหล็ก [19]

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า B กับค่า H ที่เกิดขึ้น เรียกว่าเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก (Magnetization Curves) ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งแสดงตัวอย่างของเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็กของสารแม่เหล็กประเภทต่างๆ ที่มีค่า B แตกต่างกัน เมื่อป้อนค่า H ที่เท่ากันให้กับสารแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่าสารเฟอร์โรแมกเนติกชนิด Armco Iron จะให้ค่า B ที่สูงกว่าสารชนิดอื่นๆ และ Cast Iron จะให้ค่า B ที่ต่ำกว่า ซึ่งมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ในขณะที่อากาศซึ่งเป็นสารพาราแมกเนติกจะให้ค่า B น้อยมากเมื่อเทียบกับสารเฟอร์โรแมกเนติก แต่มีความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้น (Linear)

2.5.2 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแม่เหล็ก



รูปที่ 2.13 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กที่เป็นวงรอบปิด [20]



รูปที่ 2.14 ขดลวดพันรอบแกนเหล็กที่เป็นวงรอบเปิด [20]

เมื่อมีขดลวดจำนวน N รอบ พันอยู่รอบแกนเหล็กดังรูปที่ 2.13 ถ้ามีกระแส i ไหลในขดลวด จะได้ว่าค่าปริมาณกระแสทั้งหมดที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในแนววงรอบปิด (Closed Path) l_c มีค่าเท่ากับ Ni โดยกำหนดให้เรียกแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force) ในการพิจารณาจะกำหนดให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในสารแม่เหล็ก เมื่อกำหนดให้ H_c เป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเฉลี่ยของ H ในส่วนที่เป็นแกนเหล็ก จากกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) จะได้ว่า

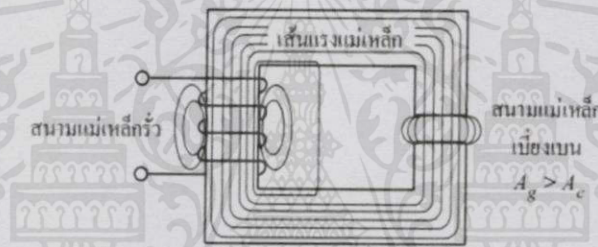
$$Ni = H_c l_c \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบางกรณีแกนเหล็กของวงจรแม่เหล็กอาจจะไม่ต่อเนื่องกันเป็นวงรอบปิด แต่จะมีบางส่วนเป็นช่องอากาศ (Air Gap) ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงวงจรแม่เหล็กในลักษณะที่แกนเหล็กด้านขวามีช่องอากาศ l_g เกิดขึ้น เมื่อกำหนดใช้ H_g เป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในส่วนที่เป็นอากาศจะได้ว่า

$$Ni = H_c l_c + H_g l_g \quad (2.8)$$

จากลักษณะการกระจายสนามแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก โดยปกติแล้วบริเวณขดลวดจะมีฟลักซ์แม่เหล็กบางส่วนใช้อากาศรอบๆ ขดลวดเป็นวงรอบปิด ซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์สนามแม่เหล็กรั่ว (Leakage Field) ดังรูปที่ 2.15 และจากลักษณะของวงจรแม่เหล็กที่มีช่องอากาศ แนวฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณช่องอากาศจะเกิดการเบี่ยงเบนดังรูปที่ 2.15 ทำให้พื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศ A_g ที่มีสนามแม่เหล็กปรากฏอยู่จะมีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก A_c มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในช่องอากาศจะมีค่าลดลงกว่าในแกนเหล็ก ซึ่งเรียกปรากฏการณ์สนามแม่เหล็กเบี่ยงเบนหรือโก่งตัว (Fringing)



รูปที่ 2.15 ปรากฏการณ์สนามแม่เหล็กรั่วและสนามแม่เหล็กเบี่ยงเบน [19]

2.5.3 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance)

วงจรแม่เหล็กจะแสดงพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กกระทำกับขดลวดที่พันอยู่รอบๆ ที่เรียกว่าค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) จากวงจรแม่เหล็กดังรูปที่ 2.13 เมื่อขดลวดถูกกระตุ้นด้วยกระแส i จะทำให้เกิดค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เกี่ยวข้องกับขดลวด ($\lambda = N\Phi$) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของกระแสในขดลวด ดังนั้นจากกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์จะได้ว่าแรงดันเหนี่ยวนำสามารถแสดงในเทอมของ λ ดังสมการที่ (2.8)

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} = N \frac{d\Phi}{di} \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (2.8)$$

เมื่อกำหนดให้ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวด (L) เป็นค่าอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแส ดังสมการที่ (2.9)

$$L = N \frac{d\Phi}{di} = L \frac{d\lambda}{di} \quad (2.9)$$

จากวงจรแม่เหล็กดังรูปที่ 2.13 จะเห็นว่าค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าในกรณีเกิดจากขดลวด N รอบ มีฟลักซ์แม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่เกิดจากกระแสในขดลวดตัวเอง ซึ่งจะกำหนดให้เรียกว่าค่าความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self Inductance) และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.10)

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\Phi}{i} = \frac{NB_c A_c}{i} = \frac{N^2 B_c A_c}{H_c l_c} = \frac{N^2 \mu A_c}{l_c} \quad (2.10)$$

ดังนั้นจะพบว่าค่าความเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวด ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก (Magnetic Permeability) พื้นที่หน้าตัดของแกน และความยาวของแกนด้วย

2.5.4 การสูญเสียจากกระแสไหลวนในสารแม่เหล็ก (Eddy Current Loss)

การสูญเสียจากกระแสไหลวนในสารแม่เหล็ก (P_e) เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในสารแม่เหล็กเองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก จากรูปที่ 2.13 เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจรแม่เหล็ก จะเกิดสนามแม่เหล็กภายในแกนเหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามค่าความถี่ของระบบไฟฟ้าทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำภายในแกนเหล็ก ดังสมการที่ (2.11)

$$e = \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.11)$$

ซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลวนในแกนเหล็ก ดังสมการที่ (2.12)

$$i = \frac{e}{R_{\text{core}}} \quad (2.12)$$

ทำให้เกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน ดังสมการที่ (2.13)

$$P_{\text{loss}} = i^2 R_{\text{core}} = \frac{e^2}{R_{\text{core}}} \quad (2.13)$$

เมื่อพิจารณาแกนเหล็กดังรูปที่ 2.16(ข) เป็นการใส่แผ่นเหล็ก 2 แผ่นเรียงซ้อนกัน แทนที่จะเป็นแผ่นเหล็กแผ่นเดียว ดังนั้นจะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในแต่ละแผ่นเป็นครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับกรณีแผ่นเหล็กตัน และค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นหนึ่งเท่า ถ้าแผ่นเหล็กตันดังรูปที่ 2.16(ก) จะเกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน ดังสมการที่ (2.14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ $P_{e,l} = \frac{e^2}{R_{\text{core}}}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (2.14)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเรียง 2 แผ่นดังรูปที่ 2.16(ข) จะเกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน ดังสมการที่ (2.15)

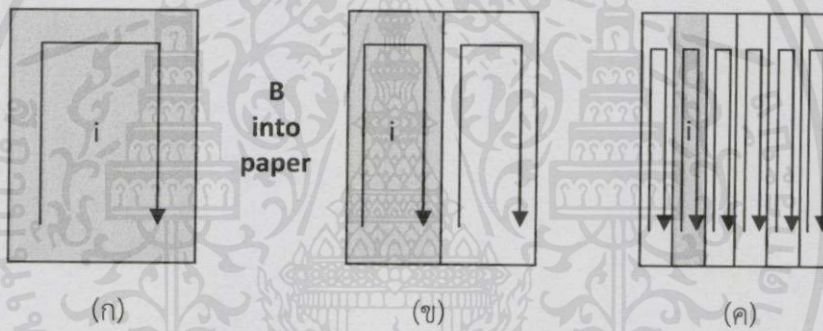
$$P_{e,2} \approx \frac{(e/2)^2}{2R_{\text{core}}} + \frac{(e/2)^2}{2R_{\text{core}}} = \frac{e^2}{4R_{\text{core}}} \quad (2.15)$$

ถ้าเรียง 6 แผ่นดังรูปที่ 2.16(ค) จะเกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน ดังสมการที่ (2.16)

$$P_{e,6} \approx \frac{e^2}{36R_{\text{core}}} \quad (2.16)$$

ถ้าเรียง n แผ่น จะเกิดการสูญเสียในรูปของความร้อน ดังสมการที่ (2.17)

$$P_{e,n} \approx \frac{e^2}{n^2 R_{\text{core}}} \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.16 การสูญเสียจากกระแสไหลวนในสารแม่เหล็ก

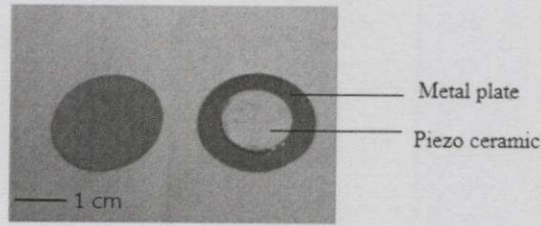
จากการพิจารณาจะเห็นได้ว่าการเรียงแผ่นเหล็กซ้อนกันสามารถลดค่าการสูญเสียจากกระแสไหลวนได้ ดังนั้นในการสร้างวงจรแม่เหล็กจึงนิยมทำเป็นแผ่นเหล็กบางเรียงซ้อนกัน (Thin Laminations) โดยแต่ละแผ่นจะถูกเคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้า จากสมการที่ (2.17) แสดงให้เห็นว่าค่าการสูญเสียขึ้นอยู่กับค่ากำลังสองของแรงดันเหนี่ยวนำ ซึ่งค่าแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับค่าฟลักซ์แม่เหล็ก และความถี่ของระบบไฟฟ้า [20]

2.6. ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเก็บเกี่ยวพลังงานกลจากการเดินของมนุษย์

2.6.1 พื้นกำเนิดพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Energy Harvesting Floor)

งานวิจัยได้มีแนวคิดในการเก็บเกี่ยวพลังงานกลซึ่งเกิดจากการเดินของมนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ โดยนำพลังงานกลที่ได้นั้น แปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเพียโซอิเล็กทริก ชนิดของเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้คือ เพียโซซเซออร์ รุ่น MCFT-36T-2.6A1-139 แสดงดังรูปที่ 2.17 โดยใช้จำนวน 15 ตัว จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการเหยียบลงบนพื้นกำเนิดพลังงาน และเหยียบเป็นจำนวน 15 ครั้ง

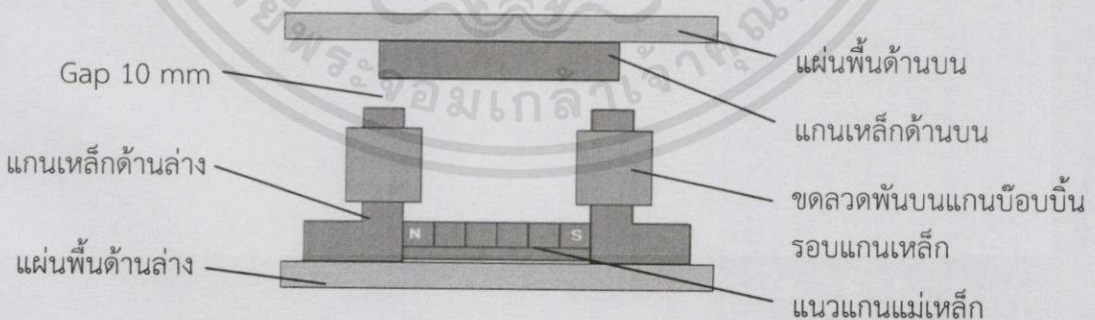
โดยที่ผู้เหยียบมีน้ำหนัก 52 กิโลกรัม พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้สูงสุดจากพื้นกำเนิดพลังงานมีค่าประมาณ 23 mJ ซึ่งพื้นต้นแบบของงานวิจัยมีขนาดประมาณ 19 ซม. x 33 ซม. [21]



รูปที่ 2.17 เพียโซซ์เซอร์รุ่น MCFT-36T-2.6A1-139 [21]

2.6.2 พื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน : การเปรียบเทียบการเก็บเกี่ยวพลังงานระหว่างการเปลี่ยนรูปพลังงานแบบเพียโซอิเล็กทริกและแบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Energy Harvesting Floor : An Energy Harvesting Comparicon of Piezoelectric and Electromagnetic Transductions)

สำหรับงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการเก็บเกี่ยวพลังงานแบบแม่เหล็กไฟฟ้านั้น ซึ่งโครงสร้างของพื้นกำเนิดพลังงานแสดงดังรูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างในการเหนี่ยวนำจำนวน 1 เซลล์ โดยเป็นการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กตัดกับขดลวด แกนเหล็กมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 13 มม. * 14 มม. พันขดลวดทองแดงเบอร์ 36 จำนวน 4000 รอบ และแม่เหล็กถาวรนีโอโดเมียมทรงลูกบาศก์ขนาด 10 มม. * 10 มม. * 10 วางเรียงกันจำนวน 6 ก้อน พื้นต้นแบบของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยวงจรมแม่เหล็กจำนวน 4 เซลล์ โดยจากการทดลองพบว่า เมื่อทำการเหยียบลงบนพื้นกำเนิดพลังงาน โดยการเหยียบ 10 ครั้ง ในเวลา 15 วินาที โดยที่ผู้เหยียบมีน้ำหนัก 55-65 กิโลกรัม พบว่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ได้มีค่าประมาณ 90 มิลลิจูล ซึ่งพื้นต้นแบบมีขนาดประมาณ 20 ซม. x 32 ซม. [8]



รูปที่ 2.18 โครงสร้างในการเหนี่ยวนำแบบแม่เหล็กไฟฟ้าจำนวน 1 เซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

แนวคิดและการออกแบบ

ปริญญานิพนธ์นี้ทำการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ และการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยศึกษาในรูปแบบของพื้นที่กำเนิดพลังงาน ทั้งนี้โครงสร้างของพื้นที่กำเนิดพลังงานจะประกอบด้วย 2 รูปแบบ เพื่อใช้ในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ และใช้ในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก

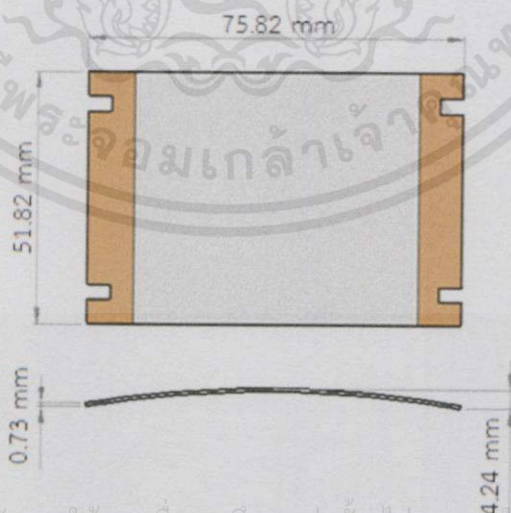
3.1 โครงสร้างพื้นที่กำเนิดพลังงานเพื่อใช้ในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์

โครงสร้างพื้นที่กำเนิดพลังงานที่ใช้ในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

1. วัสดุเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์
2. โครงสร้างพื้นที่รองรับแรงกด

3.1.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ ผ่านกระบวนการผลิตที่ส่งผลให้แผ่นเพียโซเซรามิก ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์นี้มีลักษณะโค้งงอ สามารถเกิดการยุบตัวหรือโก่งตัวลงได้มาก ต่างจากแผ่นเพียโซบัสเซอร์ซึ่งไม่สามารถทำให้โก่งตัวหรือโค้งงอได้ เพราะจะเกิดความเสียหาย การโก่งตัวลงนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก ในการทดสอบนี้เลือกใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์รุ่น TH-6R ซึ่งมีขนาดและโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบ มีลักษณะโดยรวมดังรูปที่ 3.1 มีลักษณะทางกายภาพดังตารางที่ 3.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 เพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ รุ่น TH-6R

ตารางที่ 3.1 ลักษณะทางกายภาพของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ รุ่น TH-6R

Part Number	TH-6R
Footprint (domed)	75.82 x 51.82 mm
Footprint (flat)	76.20 x 51.82 mm
Total Thickness	0.71 mm
Piezo Thickness	0.38 mm
Dome Height	4.24 mm
Weight	16.3g
Mode of Operation	d31-mode
Capacitance	75 nF

จากตารางที่ 3.1

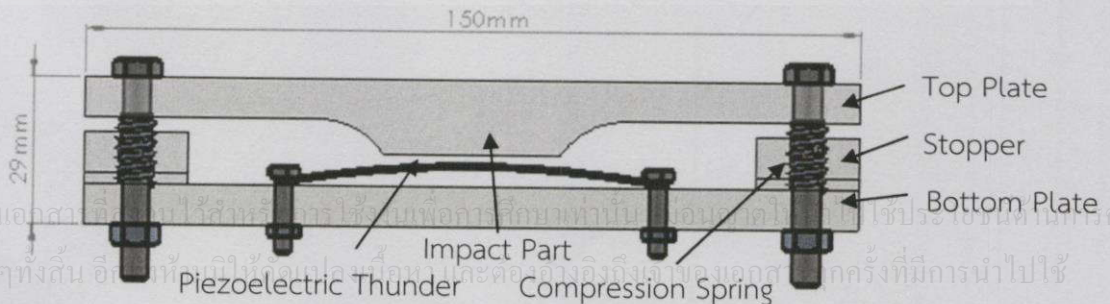
Footprint (Domed) คือ ขนาดฐานสแตนเลสหลังผ่านกระบวนการผลิตทำให้โค้งงอขึ้น

Footprint (Flat) คือ ขนาดฐานสแตนเลสก่อนผ่านกระบวนการผลิต ซึ่งยังไม่โค้งงอขึ้น

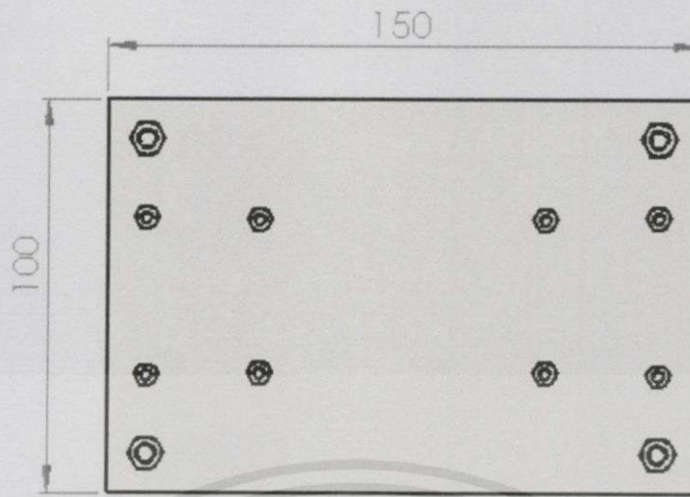
Dome Height คือ ความสูงจากยอดส่วนโค้งถึงพื้นราบที่วางเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์

3.1.2 โครงสร้างพื้นรับแรงกด

โครงสร้างพื้นรับแรงกดสำหรับการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ นั้น วัสดุที่นำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างคือ พลาสติกประเภทอะคริลิก ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูก หาซื้อได้ง่าย และมีความแข็งแรงมากพอสำหรับการทดสอบ โดยโครงสร้างพื้นที่ออกแบบไว้นี้ ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 คือ แผ่นพื้นด้านบน (Top Plate) ซึ่งเป็นส่วนที่รับแรงเหยียบจากเท้า โดยมีโครงสร้างติดกับส่วนส่งแรง (Impact Part) เมื่อเกิดการเหยียบลงบนแผ่นพื้นด้านบน จะทำให้แผ่นยวบตัวลงมาพร้อมกับส่วนส่งแรงมากดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ ซึ่งถูกยึดไว้กับแผ่นพื้นด้านล่าง (Base Part) ด้วยสกรูให้โค้งตัวลง ระยะเวลาการยุบตัวลงของแผ่นพื้นด้านบนนั้นจะถูกจำกัดด้วยแผ่นจำกัดระยะยุบ (Stopper) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนระดับความหนาได้ เพื่อใช้สำหรับศึกษาพฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ เมื่อออกแรงเหยียบจนแผ่นพื้นด้านบนยุบตัวลงมาถึงแผ่นจำกัดระยะยุบแล้วปล่อยแรงออก แผ่นพื้นด้านบนจะเคลื่อนตัวกลับตำแหน่งเดิมด้วยแรงสปริง โดยใช้สปริงกด (Compression Spring) ในการติดแผ่นพื้นด้านบนกลับ โครงสร้างพื้นรับแรงกดแสดงดังรูป 3.2 และรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 โครงสร้างพื้นรับแรงกดเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์มุมมองด้านข้าง



รูปที่ 3.3 โครงสร้างพื้นรับแรงกดเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์มมมอด้านบน

เมื่อนำเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ประกอบเข้ากับโครงสร้างพื้นรับแรงกดแล้วได้เป็นอุปกรณ์ต้นแบบ ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งโครงสร้างนี้มีขนาดความกว้าง 100 มม. ความยาว 150 มม. และความสูง 29 มม.



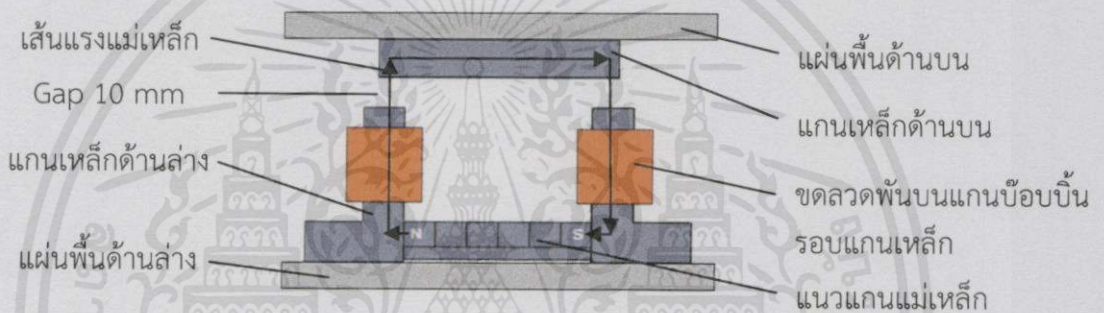
รูปที่ 3.4 โครงสร้างพื้นรับแรงกดที่ประกอบกับเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์

3.2 โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงานเพื่อใช้ในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก

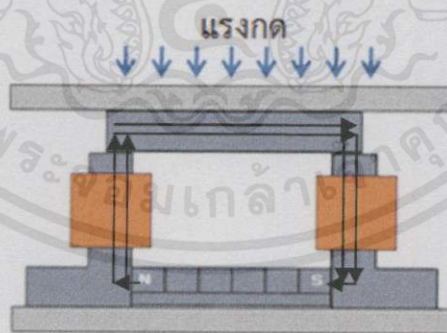
การศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กนี้เป็นการพัฒนาโครงสร้างพื้นรับแรงกดจากปริญญาณิพนธ์หัวข้อพื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน : การเปรียบเทียบการเก็บเกี่ยวพลังงานระหว่างการเปลี่ยนรูปพลังงานแบบเพียโซอิเล็กทริกและแบบแม่เหล็กไฟฟ้า [8] โดยมีความมุ่งหมายในการศึกษาและพัฒนาพื้นกำเนิดพลังงานให้สามารถเหนี่ยวนำพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้นจากหลักการเหนี่ยวนำแบบแม่เหล็กไฟฟ้า หรือการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กนั่นเอง

3.2.1 สิ่งที่ต้องการพัฒนา

จากปัญหานี้เดิมซึ่งทำการออกแบบโครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น มีโครงสร้างหลักดังรูปที่ 3.5 ประกอบด้วยแผ่นพื้นด้านบนซึ่งมีแกนเหล็กด้านบนยึดติดอยู่ เมื่อแผ่นพื้นด้านบนยังไม่ได้รับแรงกด แกนเหล็กด้านบนจะถูกออกแบบให้เว้นระยะห่าง (Gap) จากแกนเหล็กด้านล่างเป็นระยะ 10 มม. ซึ่งจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กบางส่วนรั่วผ่านแกนอากาศจากขั้วเหนือ (N) ไปยังขั้วใต้ (S) ของแม่เหล็กที่วางเรียงไว้ในวงจรได้ โดยทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กแสดงดังลูกศรในรูปที่ 3.5 เมื่อแผ่นพื้นด้านบนได้รับแรงกดจะทำให้แผ่นพื้นด้านบนยุบตัวพร้อมกับแกนเหล็กด้านบนลงมาประกบกับแกนเหล็กด้านล่าง ซึ่งส่งผลให้ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่วิ่งจากขั้วเหนือ (N) ไปขั้วใต้ (S) มีจำนวนเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.6 การเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กติดกับขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กนี้ ส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้น



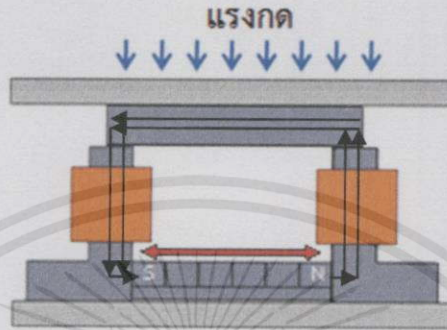
รูปที่ 3.5 โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก
เมื่อยังไม่ได้รับแรงกด (งานวิจัยเก่า)



รูปที่ 3.6 โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก
เมื่อได้รับแรงกด (งานวิจัยเก่า)

สำหรับปัญหานี้มีความมุ่งหมายในการพัฒนาและออกแบบพื้นกำเนิดพลังงานดังกล่าวข้างต้นเพิ่มเติม เพื่อให้สามารถเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าได้มากขึ้น โดยมีแนวคิดว่าจะขณะที่แผ่นพื้นบนยังไม่ได้รับแรงกด แกนเหล็กด้านบนจะถูกออกแบบให้มีระยะห่างจากแกนเหล็กด้านล่างเช่นเดิม ดังรูปที่ 3.5 แต่เมื่อแผ่นพื้นด้านบนได้รับแรงกดแล้วจะทำให้แกนเหล็กด้านบนซึ่งยึดติดกับแผ่นพื้น

ด้านบนยุบตัวลงมาประกบกับแกนเหล็กด้านล่าง จากนั้นแรงกดยังส่งผลให้แนวแกนแม่เหล็กหมุนกลับทิศสลับขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) ดังรูปที่ 3.7 โดยคาดว่าจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กตัดกับขดลวดมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้ามากขึ้น ทั้งนี้รายละเอียดของโครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กนี้ จะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อที่ 3.2.2



รูปที่ 3.7 โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อได้รับแรงกดต่อเนื่องซึ่งทำให้แกนแม่เหล็กหมุน

3.2.2 การออกแบบพื้นกำเนิดพลังงานเพื่อใช้ในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก

ชนิดและขนาดของส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการออกแบบคือ แม่เหล็กถาวร แกนเหล็ก จำนวนรอบของการพันขดลวด นั้นล้วนมีผลต่อการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าทั้งสิ้น โดยปริภูมิงานนี้จะกำหนดชนิดและขนาดของส่วนประกอบสำหรับการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าง่ายๆ ให้เท่ากับโครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงานของปริภูมิงานเดิม เพื่อที่จะนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับพลังงานกัน โดยโครงสร้างของพื้นกำเนิดพลังงานเพื่อใช้ในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักดังนี้

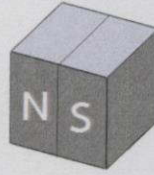
1. โครงสร้างในการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า
2. โครงสร้างพื้นเพื่อรับแรงกด

3.2.2.1 โครงสร้างในการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า

1. แม่เหล็กถาวร

แม่เหล็กถาวรที่ใช้คือ แม่เหล็กถาวรแรงสูงนีโอดิเมียม (Neodymium : NdFeB) เกรด N35 มีส่วนผสมของแร่นีโอดิเมียม ซึ่งทำให้มีปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กสูง ผิวของแม่เหล็กจะถูกชุบเคลือบด้วยนิกเกิล (Nickel) เพื่อป้องกันการเกิดสนิม [22] รูปทรงที่ใช้เป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 10 มม. * 10 มม. * 10 มม. โดยการออกแบบจะใช้แม่เหล็กถาวรจำนวน 6 ก้อนวางเรียงกัน เพื่อเพิ่มจำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก ลักษณะการวางขั้วของแม่เหล็กแต่ละก้อนแสดงดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ลักษณะการวางขั้วของแม่เหล็กถาวร

2. แกนเหล็ก

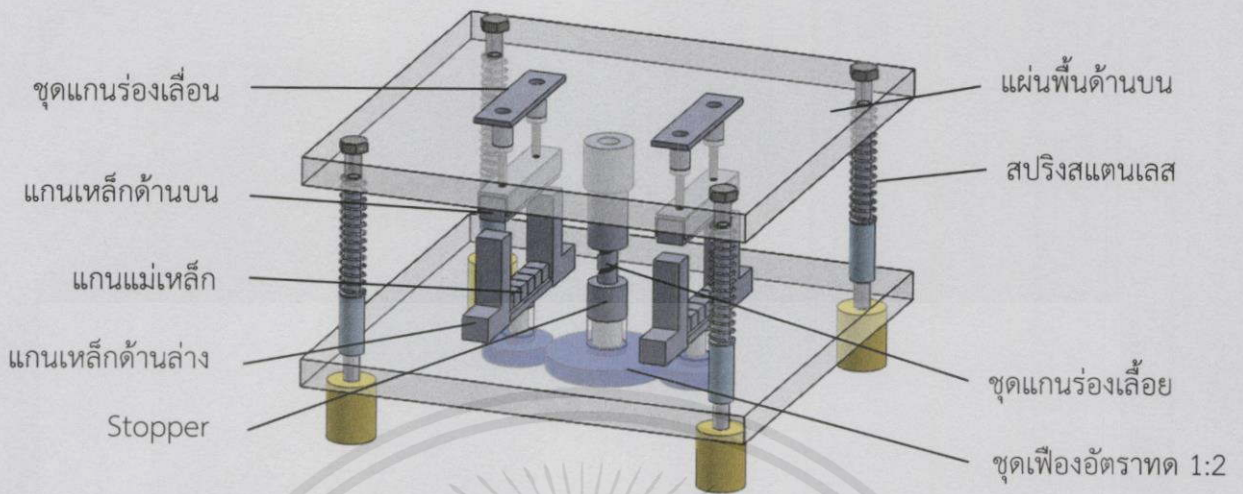
การเลือกใช้วัสดุประเภทเหล็ก เนื่องจากเหล็กเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) ซึ่งมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative Permeability) มากกว่า 1 มากๆ ตามทฤษฎีซึ่งอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.5.1 ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็กมีค่ามากกว่าวัสดุประเภทอื่นที่ค่าความซึมสนามแม่เหล็กเดียวกัน โดยแกนเหล็กนี้จะใช้การนำแผ่นเหล็กบางเรียงซ้อนกัน (Thin Laminations) แทนที่จะเป็นแกนเหล็กตัน เนื่องจากการนำแผ่นเหล็กบางๆ เรียงซ้อนกันนั้น สามารถลดค่าการสูญเสียจากกระแสไหลวนในรูปของความร้อนได้ ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.5.4 โดยพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กที่ออกแบบมีขนาด 13 มม. * 14 มม.

3. ขดลวดทองแดง

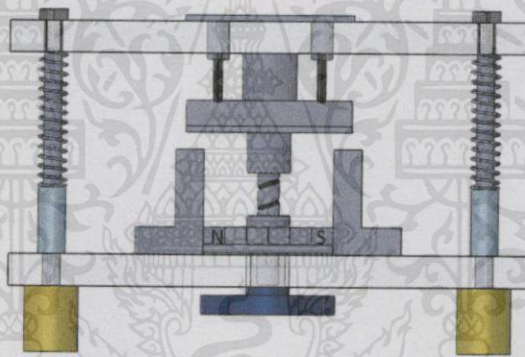
ขดลวดทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างหนึ่ง โดยนำมาพันรอบแกนเหล็กเพื่อให้เกิดปฏิสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านด้านในของขดลวด จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force : EMF) ขึ้นในขดลวดตามกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ดังอธิบายในหัวข้อที่ 2.4 เนื่องจากการพันขดลวดจะทำให้ลวดเกิดการสัมผัสกัน ดังนั้นลวดที่ใช้จึงต้องถูกเคลือบด้วยฉนวนหรือสารที่ไม่นำไฟฟ้า เพื่อป้องกันกระแสไหลข้ามระหว่างรอบของขดลวด ปลายของขดลวดจะถูกนำออกมาต่อกับวงจรภายนอก จำนวนรอบของขดลวดที่พันคือ 4000 รอบ

3.2.2.2 โครงสร้างพื้นเพื่อรับแรงกด

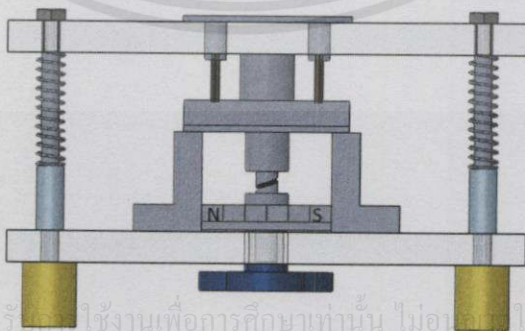
สำหรับโครงสร้างพื้นรับแรงกดสำหรับการศึกษาการกำเนิดพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ในขั้นต้นได้ทำการออกแบบให้มีโครงสร้างและขนาดโดยรวมดังรูปที่ 3.9 เมื่อแผ่นพื้นด้านบนยังไม่ได้รับแรงกด แกนเหล็กด้านบนซึ่งถูกยึดไว้กับแผ่นพื้นด้านบนด้วยชุดแกนร่องเลื่อน จะถูกเว้นระยะห่างจากแกนเหล็กล่างหรือ Gap เป็นระยะ 8 มม. ดังรูปที่ 3.10 เมื่อแผ่นพื้นด้านบนได้รับแรงกด จะทำให้แผ่นพื้นด้านบนยุบตัวลงมาพร้อมกับแกนเหล็กด้านบนจนมาประกบกับแกนเหล็กด้านล่างดังรูปที่ 3.11 จากนั้นขณะที่แผ่นพื้นด้านบนยังได้รับแรงกดต่อเนื่อง จะทำให้แผ่นพื้นด้านบนยุบตัวลงมาต่อเนื่องด้วยชุดแกนร่องเลื่อน โดยแผ่นพื้นด้านบนนี้ได้มีการยึดติดกับชุดแกนร่องเลื่อนซึ่งตั้งอยู่ตำแหน่งกลางของโครงสร้างพื้นทดลอง ชุดแกนร่องเลื่อนนี้ทำการดัดแปลงมาจากส่วนแบบมีอกด โดยใช้เป็นอุปกรณ์เพื่อเปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงเส้นให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงมุม ซึ่งยึดติดกับเฟืองขับที่อยู่ด้านใต้ของแผ่นพื้นด้านล่าง เฟืองขับนี้จะขับเฟืองตามซึ่งต่อเข้ากับแกนแม่เหล็ก ทำให้แกนแม่เหล็กนี้สามารถหมุนตัวสลับทิศระหว่างขั้วเหนือและใต้ตามต้องการได้ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.9 โครงสร้างพื้นฐานกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก

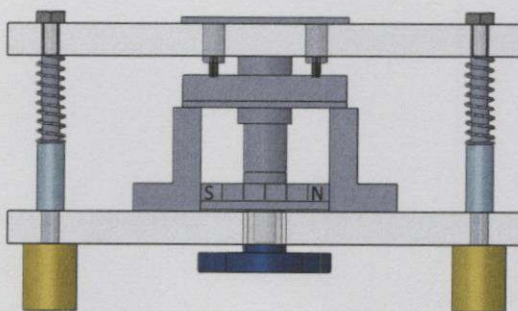


รูปที่ 3.10 โครงสร้างพื้นฐานกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก
เมื่อยังไม่ได้รับแรงกด



รูปที่ 3.11 โครงสร้างพื้นฐานกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก
เมื่อได้รับแรงกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 โครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อได้รับแรงกดต่อเนื่อง

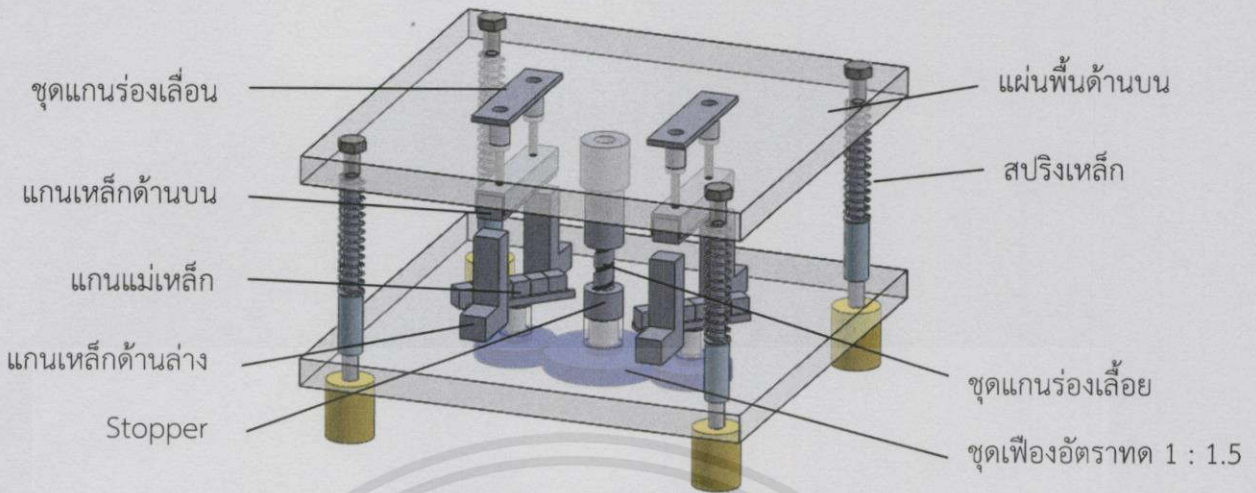
สำหรับชุดร่องเลื่อยที่ดัดแปลงจากสว่านแบบมือกด (Push Drill) เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ในการเปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงเส้นให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงมุมนั้น การที่จะเกิดการเคลื่อนที่เชิงมุม 360 องศา จะต้องเกิดระยะยุบตัวเชิงเส้นลงมา 48 มม. ทั้งนี้จากการออกแบบ ชุดร่องเลื่อยจะต่อเข้ากับเฟืองขับด้านล่าง โดยใช้เฟืองตรงอัตราทด 1 : 2 ซึ่งต้องการให้แกนแม่เหล็กหมุนสลับขั้ว 180 องศา ดังนั้นจึงต้องอาศัยการเคลื่อนที่เชิงมุมของชุดร่องเลื่อยเป็นระยะ 90 องศา ซึ่งจะต้องเกิดระยะยุบตัวเชิงเส้น 12 มม. โดยสรุปแล้ว การออกแบบพื้นกำเนิดพลังงานนี้ในขั้นต้นนี้ แผ่นพื้นด้านบนจะเกิดการยุบตัวลงทั้งสิ้น 20 มม. เมื่อปล่อยแรงกดออกจากพื้น จะทำให้แผ่นพื้นด้านบนติดตัวกลับสู่ตำแหน่งเดิมด้วยแรงจากสปริง

ปัญหาที่พบจากการทดสอบพื้นกำเนิดพลังงานซึ่งออกแบบในขั้นต้นนั้นคือ การที่แผ่นพื้นด้านบนจะยุบตัวลงได้นั้น ต้องอาศัยแรงกดในปริมาณมาก ซึ่งหากทดสอบด้วยการเดินเหยียบปกตินั้นพื้นสามารถยุบตัวลงได้เพียง 8 มม. เท่านั้น และไม่สามารถยุบตัวลงต่อเนื่องได้ ทั้งนี้หากออกแรงกดมากพอจนทำให้แผ่นพื้นด้านบนยุบตัวลงต่อและแกนแม่เหล็กหมุนสลับขั้วได้ 180 องศาแล้วนั้น เมื่อปล่อยแรงกดออก แผ่นพื้นบนไม่สามารถติดตัวกลับสู่ตำแหน่งเดิมได้เองด้วยแรงสปริง เนื่องจากแม่เหล็กเกิดแรงดูดติดกับแกนเหล็กด้วยแรงที่มากกว่าแรงสปริง

จากปัญหาที่พบในการออกแบบขั้นต้นนั้น ทำให้ต้องมีการปรับแต่งโครงสร้างใหม่เพิ่มเติมเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ดังนี้

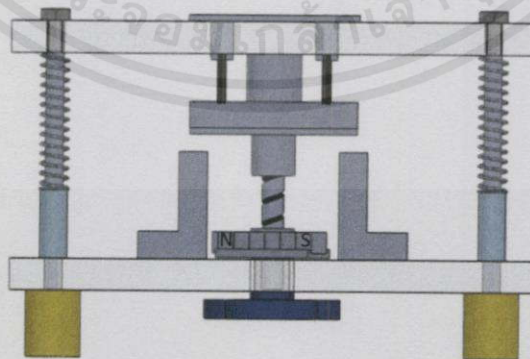
1. เปลี่ยนชุดเฟืองใหม่ให้มีอัตราทด 1 : 1.5 แทนชุดเดิมซึ่งมีอัตราทด 1 : 2 เพื่อช่วยผ่อนแรงกดให้แผ่นพื้นด้านบนยุบตัวลงมา
2. ปรับตำแหน่งเริ่มต้นของแนวแกนแม่เหล็ก ให้อยู่ในตำแหน่งทำมุม 45 องศาจากการออกแบบครั้งแรก ทำให้เมื่อออกแรงกดเริ่มต้นเพียงเล็กน้อย ก็สามารถทำให้แผ่นพื้นด้านบนยุบตัวลงมาได้
3. เปลี่ยนสปริงจากสแตนเลสเป็นสปริงเหล็กแทน เนื่องจากค่าคงที่ของสปริงเหล็กมีค่ามากกว่าค่าคงที่ของสปริงสแตนเลส จึงทำให้แรงสปริงมีค่ามากพอสำหรับการติดแผ่นพื้นด้านบนกลับสู่ตำแหน่งเดิมหลังจากการยุบตัวลงมาแล้ว

โครงสร้างพื้นรับแรงกดสำหรับการศึกษาการกำเนิดพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำการปรับแต่งใหม่แล้วดังรูปที่ 3.13



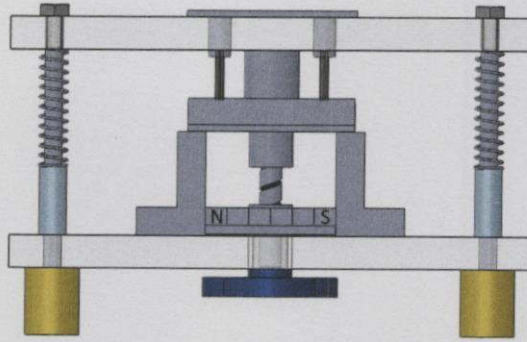
รูปที่ 3.13 โครงสร้างพื้นฐานกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อทำการปรับแต่งแล้ว

จากโครงสร้างพื้นฐานที่ทำการปรับปรุงแล้ว เมื่อแผ่นพื้นด้านบนยังไม่ได้รับแรงกด แกนเหล็กบน ซึ่งถูกยึดไว้กับแผ่นพื้นด้านบนด้วยชูตแกนร่อนเลื่อน จะถูกเว้นระยะห่างจากแกนเหล็กล่างหรือ Gap เป็นระยะ 8 มม. และแกนแม่เหล็กเอียงทำมุม 45 องศาจากแนวนอน ดังรูปที่ 3.14 ในขั้นต้นเมื่อแผ่นพื้นด้านบนได้รับแรงกด จะทำให้แผ่นพื้นด้านบนยุบตัวจนแกนเหล็กบนมาประกบกับแกนเหล็กล่าง พร้อมกับแกนแม่เหล็กหมุน 45 องศาตามอยู่ตำแหน่งดังรูปที่ 3.15 จากนั้นขณะที่แผ่นพื้นด้านบนยังได้รับแรงกดต่อเนื่อง จะทำให้แผ่นพื้นด้านบนยุบตัวลงมาต่อเนื่อง ส่งผลให้แกนแม่เหล็กหมุน 180 องศากลับหัวเหนือ (N) และใต้ (S) ด้วยแกนร่อนเลื่อน ดังรูปที่ 3.16 และเมื่อแรงกดถูกปล่อยออกจากแผ่นพื้นด้านบนติดตัวกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นด้วยแรงสปริง พื้นกำเนิดพลังงานแบบที่ปรับแต่งแล้วนี้ จะเกิดระยะยุบทั้งสิ้น 24 มม. โดยจะนำพื้นที่เก็บพลังงานนี้ใช้ในการทดลอง

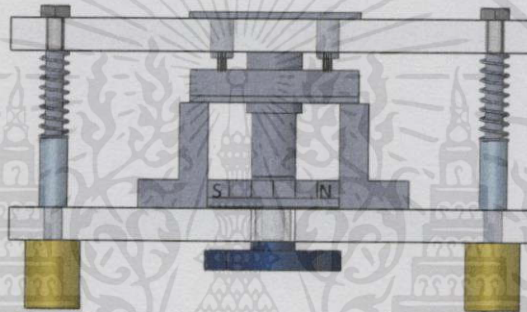


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 'ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 3.14 โครงสร้างพื้นฐานกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กไปใช้ เมื่อยังไม่ได้รับแรงกด (ปรับแต่งแล้ว)



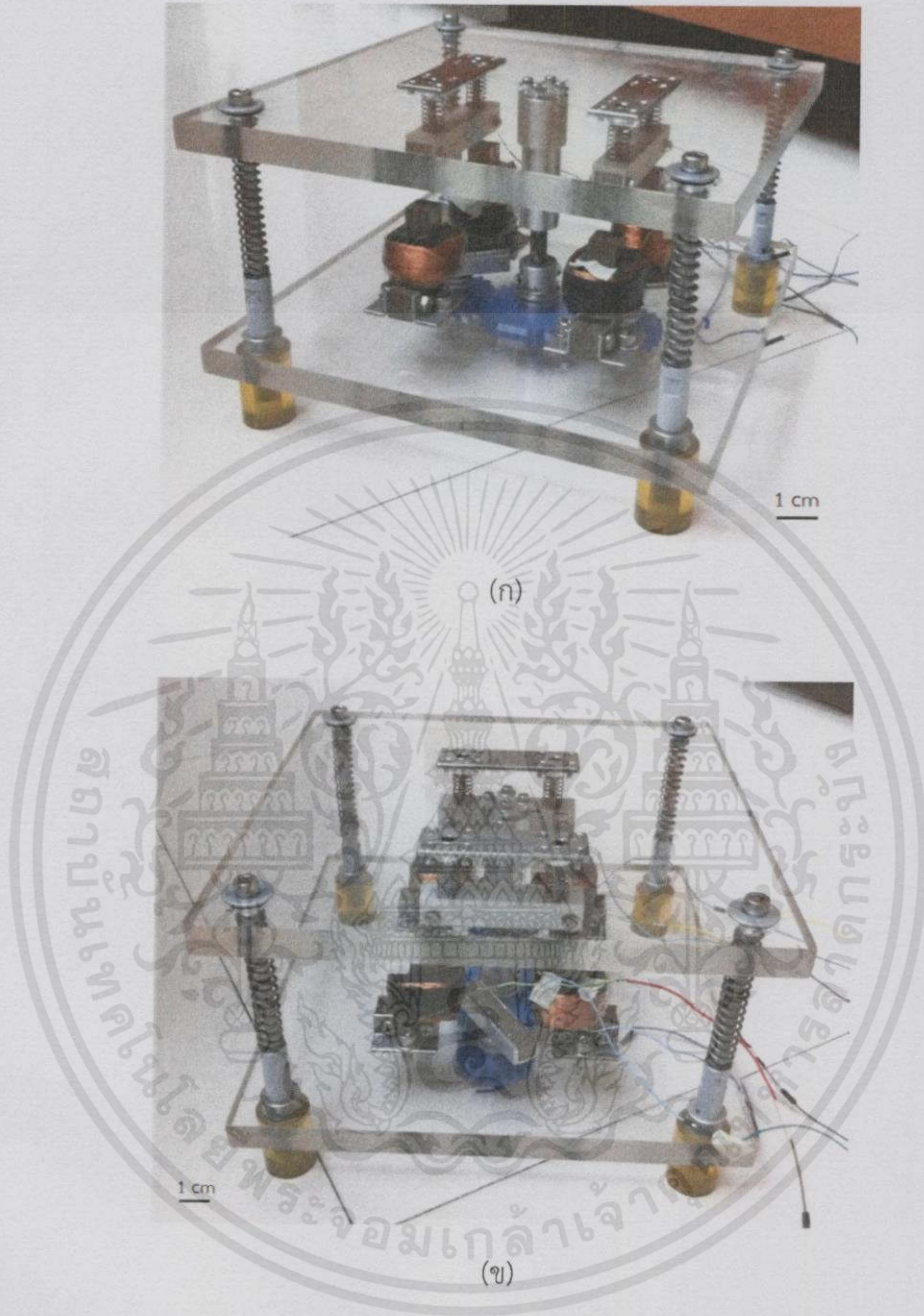
รูปที่ 3.15 โครงสร้างพื้นกำหนดพลังงาน โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อได้รับแรงกด (ปรับแต่งแล้ว)



รูปที่ 3.16 โครงสร้างพื้นกำหนดพลังงานแบบแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงกดต่อเนื่อง (ปรับแต่งแล้ว)

เมื่อนำโครงสร้างในการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าประกอบเข้ากับโครงสร้างพื้นรับแรงกดแล้วได้เป็นอุปกรณ์ต้นแบบดังรูปที่ 3.17 ซึ่งโครงสร้างนี้มีขนาดความกว้าง 240 มม. ความยาว 240 มม. และความสูง 160 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 โครงสร้างพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานแบบ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก
ที่ประกอบกับส่วนเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า

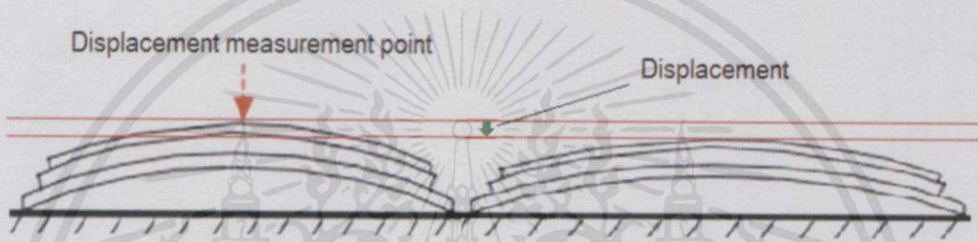
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 การทดสอบเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

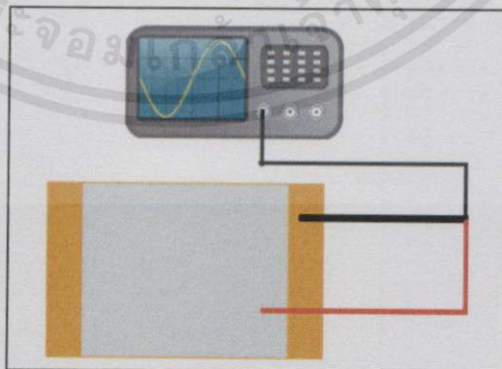
การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรม และผลตอบสนองของเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์เมื่อเกิดการโก่งตัวลง (Displacement) ที่ระยะแตกต่างกัน โดยเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์นี้จะถูกประกอบเข้ากับโครงสร้างพื้นเพื่อรับแรงกดจากการเดิน เมื่อเหยียบลงบนพื้นจะทำให้แผ่นพื้นด้านบนของโครงสร้างพื้นรับแรงกดยุบตัวลงมาพร้อมกับส่วนส่งแรงมากแผ่นเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ให้โก่งตัวลงเช่นกัน โดยระยะโก่งตัวลงดังกล่าวอ้างอิงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 จุดอ้างอิงในการวัดระยะการโก่งตัวลงของเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

4.1.1 การวัดค่าความต่างศักย์ที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์แบบเปิดวงจร

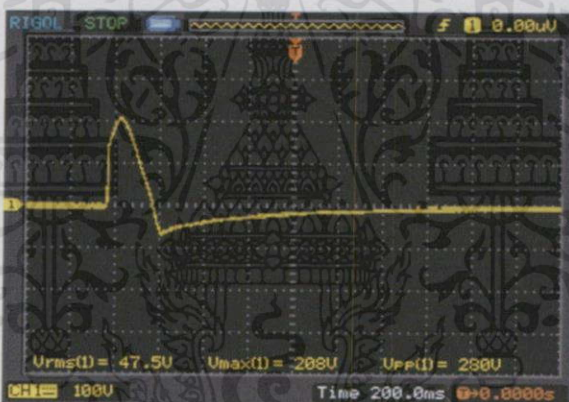
การทดลองนี้จะทำการวัดค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์ (Vrms) ที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ ซึ่งทำการวัดโดยตรงที่เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์แบบเปิดวงจร (Open-Circuit) ดังรูปที่ 4.2 โดยทำการทดลองเหยียบลงบนโครงสร้างพื้นรับแรงกด ที่ทำให้เกิดการโก่งตัวลงของเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ 3 ระยะแตกต่างกันคือ 2.25 มม. 2.75 มม. และ 3.25 มม. โดยทำการเหยียบ 15 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกัน พบว่ามีค่าดังรูปที่ 4.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.2 การวัดค่าความต่างศักย์แบบเปิดวงจรจากเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์



รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ที่วัดได้โดยตรงจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดออร์ที่ระยะโง่งตัวแตกต่างกัน

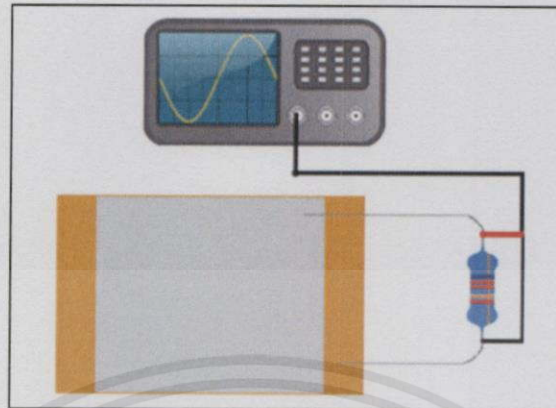


รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดออร์ที่ระยะโง่งตัวลง 3.25 มม.

จากผลการทดสอบระยะโง่งตัวลงของเพียโซอิเล็กทริกทันเดออร์พบว่า ค่าความต่างศักย์ที่ได้ นั้นจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระยะโง่งตัวลงของเพียโซอิเล็กทริกทันเดออร์ การเกิดการโง่งตัวลงมากขึ้น ยิ่งส่งผลให้ได้แรงดันไฟฟ้ามากขึ้น จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าที่ระยะโง่งตัวลง 3.25 มม. นั้นทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะอื่นๆ โดยคาดว่าจะส่งผลให้ได้ค่ากำลังเฉลี่ยสูงสุดเช่นกัน ซึ่งจะทำการทดลองต่อไป ผลตอบสนองของจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดออร์ที่ระยะโง่งตัวลง 3.25 มม. แสดงดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การวัดค่าความต่างศักย์ที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ตกรวมตัวต้านทาน



รูปที่ 4.5 การวัดค่าความต่างศักย์จากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ที่ตกรวมตัวต้านทาน

การทดลองนี้จะทำการต่อตัวต้านทาน (Load Resistance) ขนาดต่างๆ ขนานกับเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เนื่องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกถือเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีค่าความต้านทานภายในสูง (High Impedance) โดยเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์จะเกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Transfer) ที่ค่าความต้านทานของโหลดมีค่าประมาณ 250 k Ω ซึ่งก็คือค่าความต้านทานภายในโดยประมาณแหล่งจ่าย [23] ดังนั้นจึงเลือกตัวต้านทานที่จะนำมาใช้ในการทดลองนี้มีค่าประมาณระหว่าง 50 k Ω ถึง 1 M Ω และทำการวัดค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์ (V_{rms}) ด้วยออสซิลโลสโคป เมื่อทำการเทียบลงบนโครงสร้างพื้นรับแรงกด จากนั้นนำค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์ที่วัดได้นั้นไปคำนวณหาค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า (I_{rms}) โดยคำนวณดังสมการที่ (4.1)

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} \quad (4.1)$$

และนำค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์ไปคำนวณหาค่ากำลังเฉลี่ย (P_{avg}) โดยคำนวณดังสมการที่ 4.2

$$P_{avg} = \frac{V_{rms}^2}{R} \quad (4.2)$$

เพื่อนำค่าไปพล็อตกราฟระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน ซึ่งจะช่วยให้ทราบค่ากำลังสูงสุด (Power Maximum) โดยได้ผลออกมาแสดงดังตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.3 และได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์กับค่าความต้านทาน, ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน และค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลของค่ารากลำตั้งสองเฉลี่ยของความต่างศักย์, ค่ารากลำตั้งสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า, และค่ากำลังเฉลี่ย เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานที่ระยะการโก่งตัวลงของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ 2.25 มม.

Displacement 2.25 mm			
R (k Ω)	V _{rms} (V)	I _{rms} (μ A)	P _{avg} (mW)
50.1	11.87	238.78	2.94
100.6	19.70	195.83	3.89
199.3	34.61	173.64	6.10
253.2	43.15	170.41	7.44
299.0	45.66	152.71	7.09
502.0	53.88	107.33	5.85
703.0	59.42	84.523	5.07
1033.0	64.46	62.401	4.07

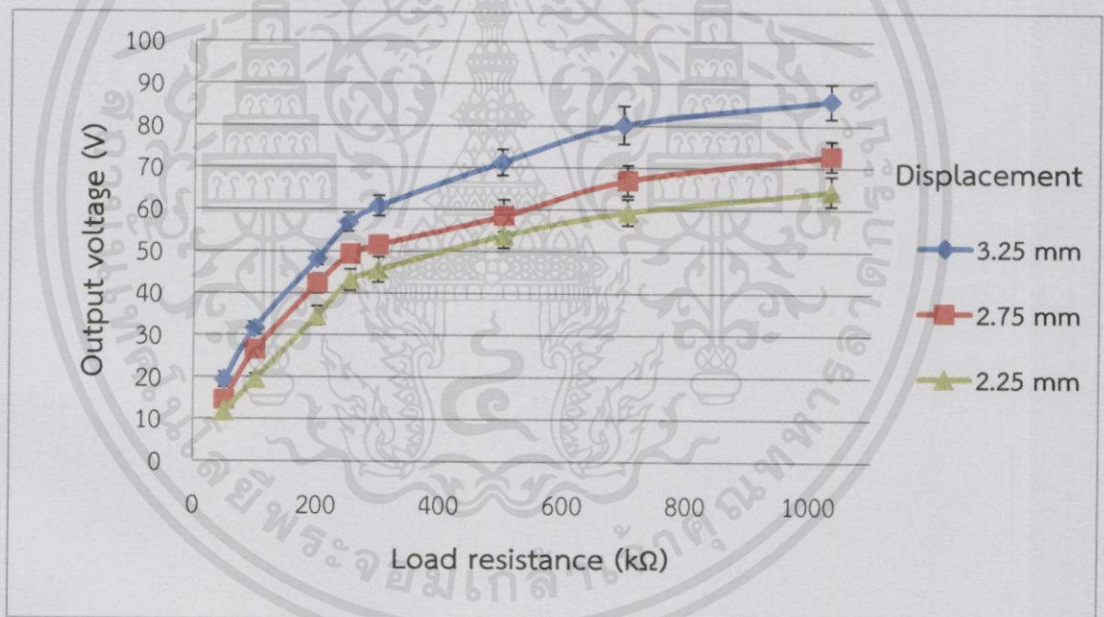
ตารางที่ 4.2 ผลของค่ารากลำตั้งสองเฉลี่ยของความต่างศักย์, ค่ารากลำตั้งสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า, และค่ากำลังเฉลี่ย เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานที่ระยะการโก่งตัวลงของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ 2.75 มม.

Displacement 2.75 mm			
R (k Ω)	V _{rms} (V)	I _{rms} (μ A)	P _{avg} (mW)
50.3	14.67	291.72	4.33
99.9	26.54	265.73	7.13
200.3	42.34	212.44	9.05
253.2	49.44	195.26	9.72
299.0	51.62	172.64	8.96
502.0	58.56	116.65	6.93
703.0	66.99	95.29	6.45
1033.0	72.86	70.53	5.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

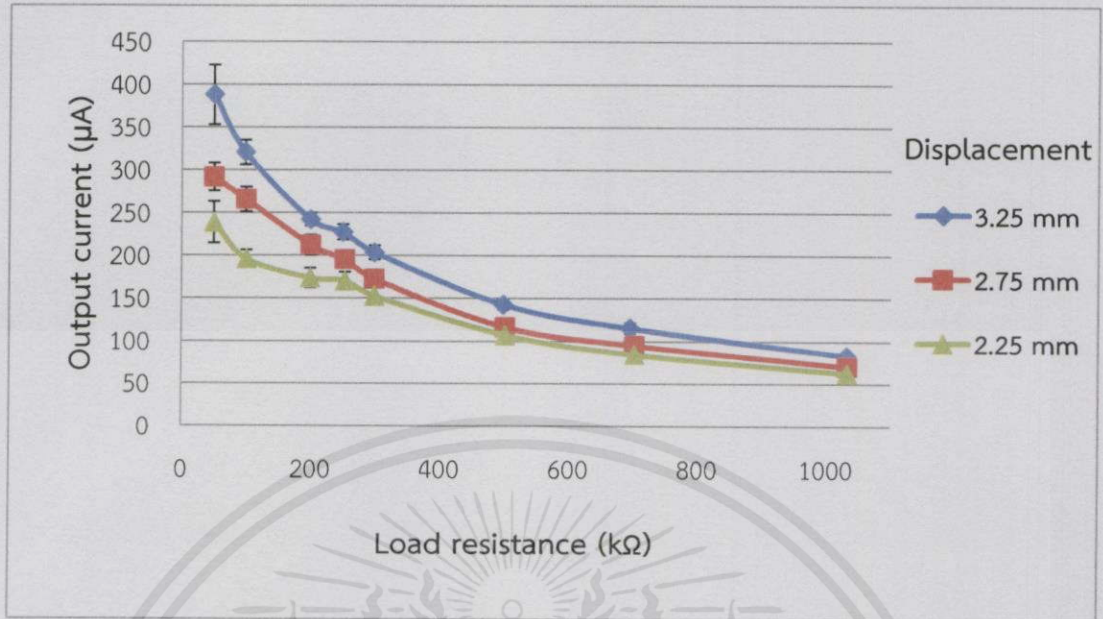
ตารางที่ 4.3 ผลของค่ารากลำดับสองเฉลี่ยของความต่างศักย์, ค่ารากลำดับสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า, และค่ากำลังเฉลี่ย เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานที่ระยะการโก่งตัวลงของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ 3.25 มม.

Displacement 3.25 mm			
R (k Ω)	V _{rms} (V)	I _{rms} (uA)	P _{avg} (mW)
50.1	19.43	387.89	7.76
98.7	31.61	320.30	10.20
199.8	48.25	242.11	11.69
250.2	56.90	227.42	13.01
299.0	60.83	203.46	12.45
499.0	71.28	142.85	10.25
696.0	80.27	115.33	9.361
1032.0	85.9	83.236	7.21

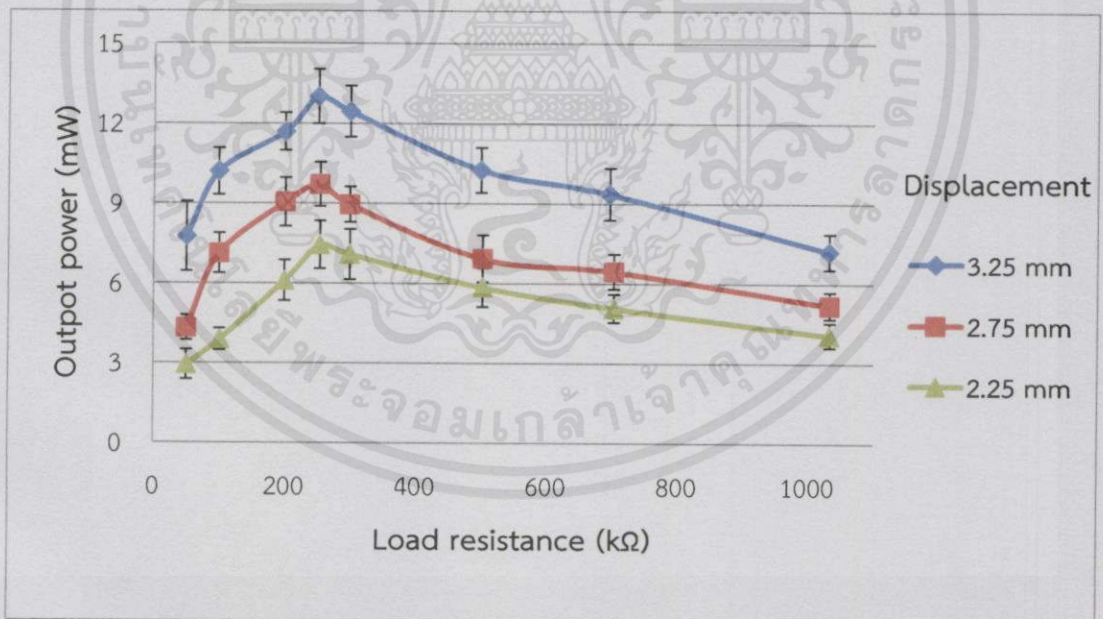


รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ารากลำดับสองเฉลี่ยของความต่างศักย์ที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์กับค่าความต้านทานที่ระยะโก่งตัวลงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์กับค่าความต้านทานที่ระยะโก่งตัวลงต่างกัน

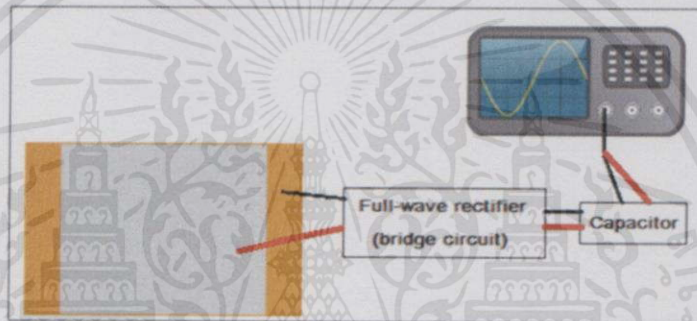


รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์กับค่าความต้านทานที่ระยะโก่งตัวลงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการที่เพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์โก่งตัวลงมากขึ้น ยิ่งส่งผลให้ได้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากเปลี่ยนแปลงความเค้นมากขึ้น โดยเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์นี้ถูกประกอบเข้ากับโครงสร้างพื้นรับแรงกด ซึ่งเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเดินของมนุษย์แปลงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ความต่างศักย์ที่ถูกสร้างขึ้นจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ระหว่างการทดลอง เมื่อนำมาคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ได้ (Output Power) มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 13.01 mW ที่ระยะการโก่งตัวของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ 3.25 มม. โดยผู้ทำการทดสอบเหยียบบนโครงสร้างพื้นรับแรงกดมีน้ำหนักประมาณ 65 กก. ทั้งนี้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีขนาดมากขึ้น หากทดลองให้เกิดการเพิ่มระยะโก่งตัวของเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ หรือเพิ่มความแรงในการเหยียบลงบนโครงสร้างพื้นรับแรงกด

4.1.3 การทดสอบหาพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์



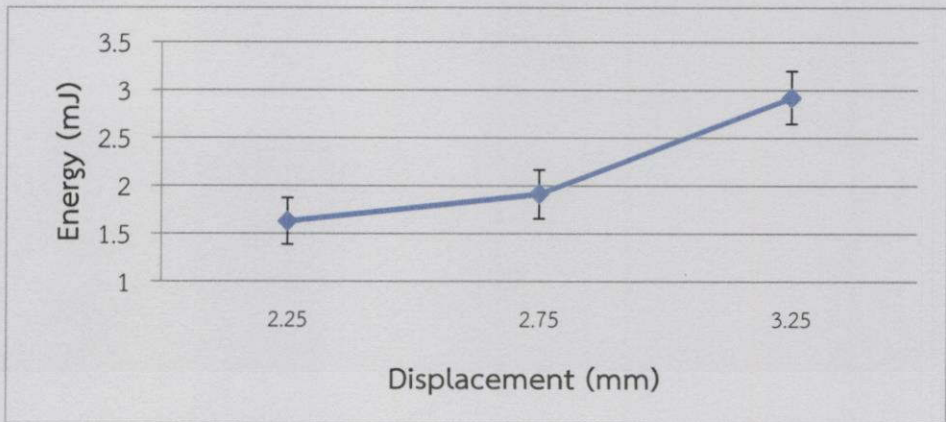
รูปที่ 4.9 การหาพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์

การทดลองนี้ต้องการคำนวณค่าพลังงาน (E) ที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ ซึ่งทำการทดลองเหยียบ 10 ครั้ง ใน 15 วินาที และทำการเรียงกระแสที่ออกจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ด้วยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นชนิดบริดจ์ แล้วชาร์จเข้าตัวเก็บประจุ โดยทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (C) ด้วยออสซิลโลสโคป ดังแสดงแผนภาพในรูปที่ 4.9 จากนั้นนำค่าความต่างศักย์นี้ และขนาดตัวเก็บประจุ ที่เลือกนำมาแทนในสมการที่ (4.3)

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (4.3)$$

จะได้ค่าพลังงานออกมา ซึ่งทำการทดลองที่ระยะโก่งตัวลงแตกต่างกันคือ 2.25 มม. 2.75 มม. และ 3.25 มม. โดยจากการทดลองพบว่าที่ระยะกระจัด 3.25 มม. เป็นค่าที่ได้พลังงานมากที่สุด และค่าพลังงานจะลดลงเมื่อระยะกระจัดลดลง ซึ่งได้ผลการเปรียบเทียบค่าพลังงานดังรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

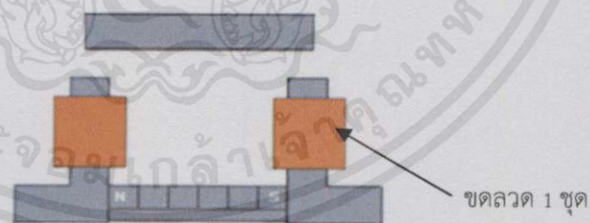


รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ที่ระยะโก่งตัวลงต่างกัน

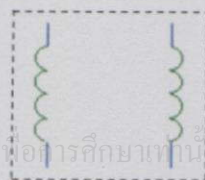
จากรูปที่ 4.10 พบว่าเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ที่ประกอบเข้ากับโครงสร้างพื้นรับแรงกด เมื่อทำการเหยียบ 10 ครั้ง ภายใน 15 วินาที ผู้เหยียบมีน้ำหนักประมาณ 65 กก. พบว่าค่าพลังงานสูงสุดที่ได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.92 mJ เมื่อเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์เกิดการโก่งตัวลง 3.25 มม.

4.2 การทดสอบพื้นกำเนิดพลังงานเพื่อใช้ในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก

โครงสร้างของพื้นกำเนิดพลังงาน เพื่อใช้ในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กประกอบด้วยโครงสร้างในการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าหรือวงจรแม่เหล็กจำนวนสองชุด โดยในปริภูมิงานนี้จะเรียกว่าเซลล์ ซึ่งแต่ละเซลล์จะมีการพันขดลวดสองชุด อธิบายโดยคร่าวดังรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงวงจรแม่เหล็กจำนวนหนึ่งเซลล์ ประกอบด้วยการพันขดลวดสองชุด และจะถูกแสดงด้วยสัญลักษณ์ ดังรูปที่ 4.12 เพื่อใช้ในการอธิบายการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.11 โครงสร้างเหนี่ยวนำไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยคร่าวจำนวน 1 เซลล์



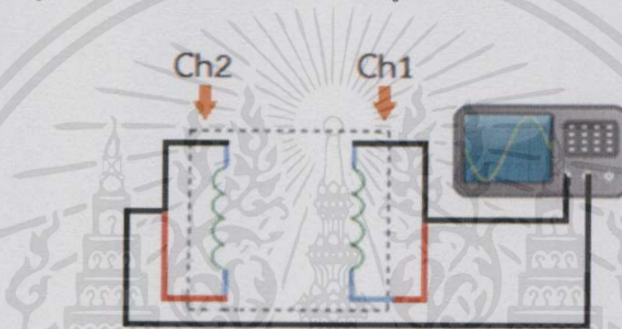
รูปที่ 4.12 สัญลักษณ์แทนโครงสร้างเหนี่ยวนำไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจำนวน 1 เซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

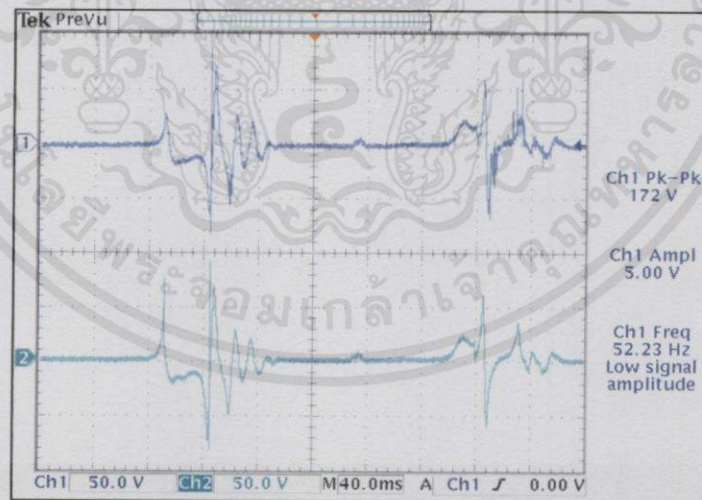
เนื่องจากโครงสร้างของพินกำเนิดพลังงานนี้ประกอบด้วยขดลวดทั้งหมด 4 ชุด จึงจะทำการทดลองหาว่าการนำขดลวดแต่ละชุดมาต่อกันในรูปแบบใด ที่จะให้ผลตอบสนองเหมาะสมที่สุดคือ มีขนาดของแรงดันไฟฟ้า (Voltage), กระแสไฟฟ้า (Current), และกำลังไฟฟ้า (Power) ที่เหมาะสมสำหรับนำไปจ่ายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้เพียงพอหรือไม่มากเกินไปจนความจำเป็น

4.2.1 ตรวจสอบผลตอบสนองของความต่างศักย์ที่ได้จากขดลวดแต่ละชุดภายในเซลล์เดียวกัน

ในขั้นแรกทำการทดสอบผลตอบสนอง หรือตรวจสอบกราฟของความต่างศักย์ที่ได้จากขดลวดแต่ละชุดแยกกันภายในเซลล์เดียวกัน เมื่อทำการออกแรงกดลงบนแผ่นพื้นด้านบน ว่ามีลักษณะของกราฟเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไรในเวลาเดียวกัน ทำการตรวจวัดด้วยออสซิลโลสโคป ดังแสดงแผนภาพในรูปที่ 4.13 ซึ่งได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 การตรวจสอบกราฟของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากขดลวดแต่ละชุดภายในเซลล์เดียวกัน



รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองของความต่างศักย์ที่ได้จากขดลวดแต่ละชุดภายในเซลล์เดียวกัน

จากการทดลองพบว่าผลตอบสนองของความต่างศักย์ที่ได้จากขดลวดแต่ละชุดภายในเซลล์เดียวกันนั้นมีลักษณะใกล้เคียงกันที่เวลาเดียวกัน ดังนั้นความต่างศักย์ที่ได้นั้นไม่จำเป็นต้องทำการเรียงกระแสแยกกัน เพราะจะไม่เกิดการหักล้างกันของความต่างศักย์ หรือเกิดการหักล้างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อนำขดลวดแต่ละชุดมาต่อกัน หากการต่อขดลวดต่อไม่สลับขั้วกัน

4.2.2 รูปแบบการต่อของขดลวดแต่ละชุดภายในเซลล์เดียวกัน

การนำขดลวดแต่ละชุดภายในเซลล์เดียวกันมาต่อกันนั้น สามารถนำมาต่อกันได้สองรูปแบบ คือ การต่อแบบขนานหรืออนุกรมกัน โดยในการทดลองต่อไปนี้ จะทำการทดลองว่ารูปแบบการต่อแบบใดที่ส่งผลให้ขนาดของความต่างศักย์ (Voltage), กระแสไฟฟ้า (Current), และกำลังไฟฟ้า (Power) เหมาะสมกว่า ซึ่งมีรูปแบบการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.2 แผนภาพการทดลองการต่อขดลวดแบบขนานและอนุกรมแสดงดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 ตามลำดับ ได้ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 โดยตัวอย่างของกราฟความต่างศักย์ที่ตกร่วมตัวด้านทานขนาด 198.1 Ω ที่ได้จากการต่อขดลวดแบบขนาน แสดงดังรูปที่ 4.17 และตัวอย่างของกราฟความต่างศักย์ที่ตกร่วมตัวด้านทานขนาด 756 Ω ที่ได้จากการต่อขดลวดแบบอนุกรมแสดงดังรูปที่ 4.18 และได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์เฉลี่ยของรอกำลังสองกับค่าความต้านทาน, ค่ากระแสเฉลี่ยของรอกำลังสองกับค่าความต้านทาน และค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

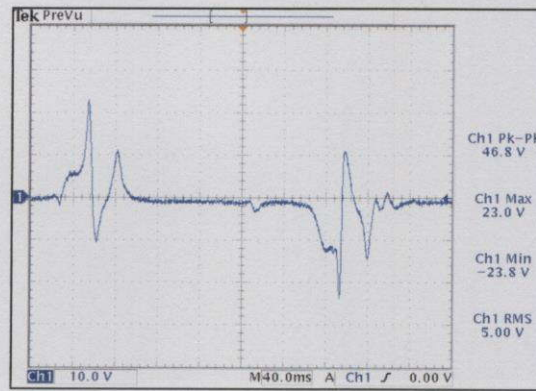
ตารางที่ 4.4 ผลของค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์, ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า, และค่ากำลังเฉลี่ย เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานภายในเซลล์เดียวกัน

Parallel			
R (Ω)	Vrms (V)	Irms (mA)	Pavg (mW)
49.6	2.85	57.37	165.83
98.9	4.74	47.91	227.46
148.6	6.41	43.12	278.01
198.1	7.45	37.59	281.33
299.0	9.05	30.26	275.09
499.0	10.87	21.78	237.83
976.0	13.92	14.26	199.43
1667.0	14.29	8.57	123.17
1974.0	14.23	7.21	103.02
2476.0	14.57	5.88	86.48

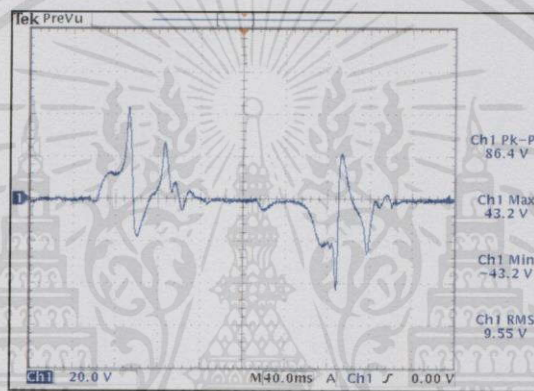
ตารางที่ 4.5 ผลของค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์, ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า, และค่ากำลังเฉลี่ย เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบอนุกรมภายในเซลล์เดียวกัน

Series			
R (Ω)	Vrms (V)	Irms (mA)	Pavg (mW)
49.7	1.72	34.56	59.63
100.0	3.49	34.90	122.63
148.3	4.66	31.39	146.89
198.2	5.85	29.51	173.17
300.0	7.93	26.44	210.62
399.0	9.68	24.25	235.38
501.0	10.91	21.77	238.32
756.0	13.67	18.09	247.76
979.0	15.44	15.77	243.83
1743.0	19.71	11.31	223.46
2464.0	22.95	9.31	214.13

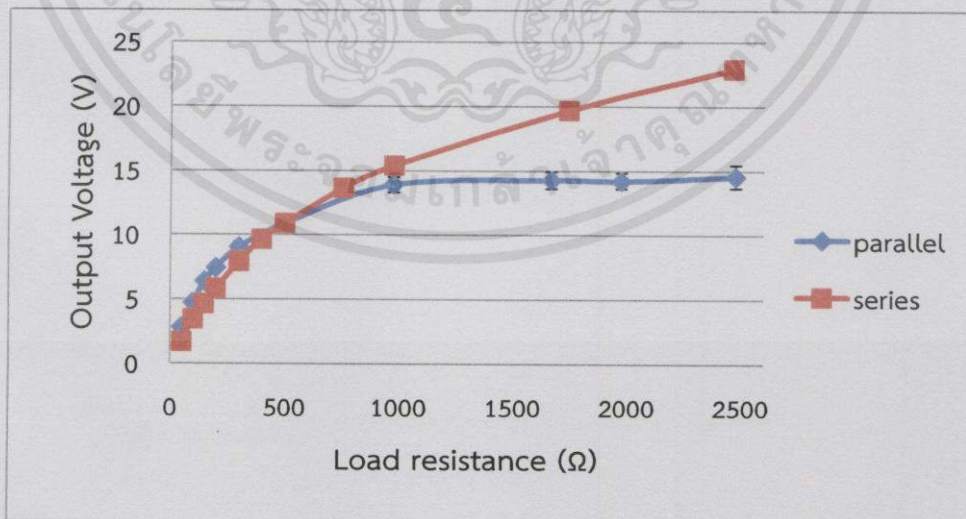
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองของความต่างศักย์จากการเหนี่ยวนำของการต่อขดลวดแบบขนาน ภายในเซลล์เดียวกันที่ตกรวมตัวต้านทาน $R = 198.1 \Omega$

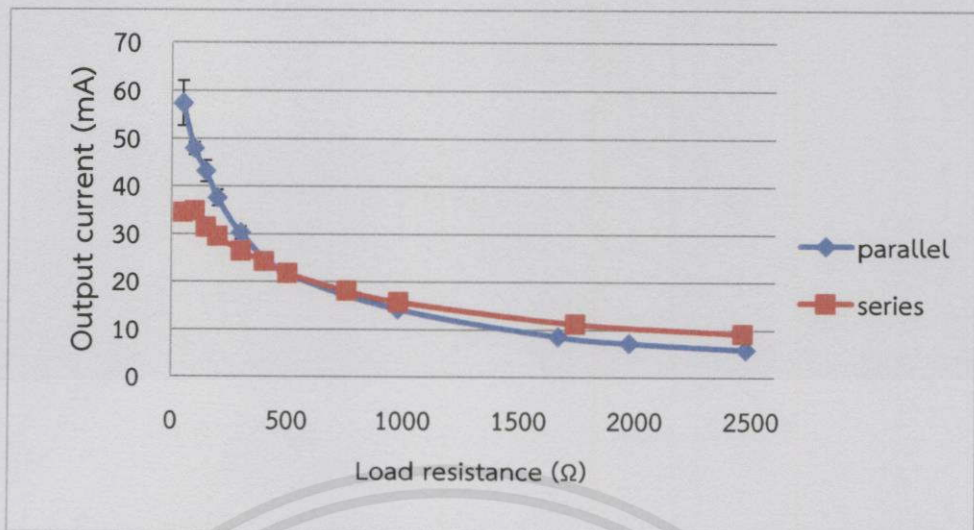


รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองของความต่างศักย์จากการเหนี่ยวนำของการต่อขดลวดแบบอนุกรม ภายในเซลล์เดียวกันที่ตกรวมตัวต้านทาน $R = 756 \Omega$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดรูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์กับค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานและอนุกรมกันภายในเซลล์เดียวกัน



รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานและอนุกรมกันภายในเซลล์เดียวกัน

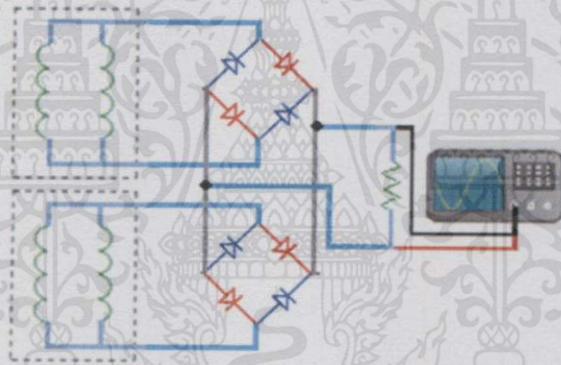


รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานและอนุกรมกันภายในเซลล์เดียวกัน

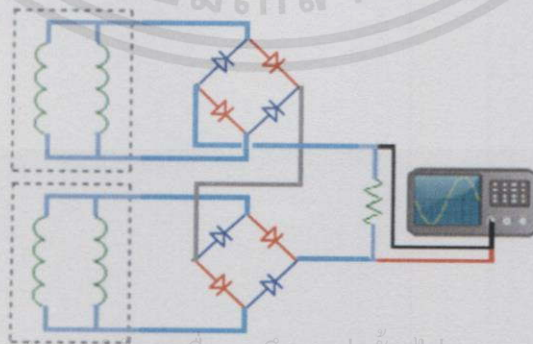
จากกราฟรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21 สามารถสรุปได้ว่าที่สภาวะโหลดที่มีความต้านทานสูงจะทำให้ค่าความต่างศักย์ที่ได้จากการนำขดลวดต่อแบบอนุกรมกันภายในเซลล์เดียวกันมีค่ามากกว่าการนำขดลวดต่อแบบขนานกันภายในเซลล์เดียวกัน เนื่องจากขดลวดแต่ละชุดที่นำมาต่อขนานกันจะทำให้ค่าความต่างศักย์ไม่เท่ากันพอดี และเมื่อนำมาต่อขนานกันจึงได้ผลออกมาเป็นความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจากขดลวดชุดที่ได้ค่าความต่างศักย์ต่ำที่สุด ส่วนการนำขดลวดมาต่ออนุกรมกันนั้น จะทำให้ได้ผลของค่าความต่างศักย์มีค่าเท่ากับค่าความต่างศักย์ที่ได้จากขดลวดแต่ละชุดรวมกัน อย่างไรก็ตามการนำขดลวดมาต่อแบบขนานกันนั้นสามารถสร้างกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าในสภาวะที่โหลดต้องการกระแสมาก และขนาดของความต่างศักย์มีค่ามากพอสำหรับการนำไปจ่ายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

4.2.3 รูปแบบการต่อของขดลวดระหว่างเซลล์

เนื่องจากโครงสร้างของพื้่นกำเนิดพลังงานนี้ประกอบด้วยวงจรแม่เหล็กจำนวน 2 เซลล์ การทดลองต่อไปนี้จะทำการทดลองว่าการนำขดแต่ละเซลล์มาต่อกันในแบบขนานหรืออนุกรมกันจะให้ผลตอบสนองดีกว่ากัน ทั้งนี้จากการทดลองที่แล้วพบว่า การนำขดลวดแต่ละชุดภายในเซลล์เดียวกันมาต่อขนานกันให้ผลที่ดีกว่า ดังนั้นจึงทำการต่อขนานกันของขดลวดแต่ละชุดภายในเซลล์เดียวกันแล้วจึงนำขดลวดจากแต่ละเซลล์ทำการเรียงกระแสของความต่างศักย์ที่ได้ด้วยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นชนิดบริดจ์ (Full Bridge Rectifier) เพื่อไม่ให้เกิดการหักล้างกันของความต่างศักย์ที่ได้จากแต่ละเซลล์เมื่อนำขดลวดมาต่อกัน ซึ่งจะทำการทดลองนำมาต่อในรูปแบบขนานกันและอนุกรมกัน ดังแสดงในแผนภาพการทดลองรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 ตามลำดับ ได้ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 โดยตัวอย่างของกราฟความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานขนาด 99.1Ω ที่ได้จากการต่อขดลวดแบบขนานแสดงดังรูปที่ 4.17 และตัวอย่างของกราฟความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานขนาด 399Ω ที่ได้จากการต่อขดลวดแบบอนุกรมแสดงดังรูปที่ 4.18 และได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์กับค่าความต้านทาน, ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน และค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ถึงรูปที่ 4.28 ตามลำดับ



รูปที่ 4.22 การวัดค่าความต่างศักย์จากการเหนี่ยวนำที่ตกคร่อมตัวต้านทาน โดยแต่ละเซลล์ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นชนิดบริดจ์ก่อน แล้วนำมาต่อขนานกัน



รูปที่ 4.23 การวัดค่าความต่างศักย์จากการเหนี่ยวนำที่ตกคร่อมตัวต้านทาน โดยแต่ละเซลล์ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นชนิดบริดจ์ก่อน แล้วนำมาต่ออนุกรมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

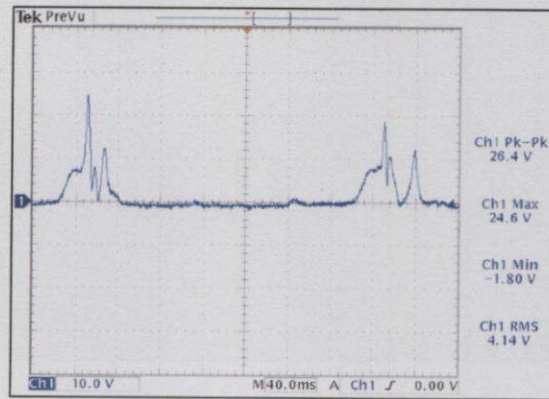
ตารางที่ 4.6 ผลของค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์, ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า, และค่ากำลังเฉลี่ย เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานกันระหว่างเซลล์

Parallel			
R (Ω)	Vrms (V)	Irms (mA)	Pavg (mW)
9.8	1.01	102.93	103.86
49.7	4.06	81.76	332.28
99.1	6.01	60.60	364.33
198.3	8.29	41.81	346.99
299.0	9.99	33.43	334.26
539.0	11.93	22.13	264.46
976.0	13.08	13.40	175.87
1741.0	14.32	8.23	118.24
2466.0	14.68	5.95	87.86

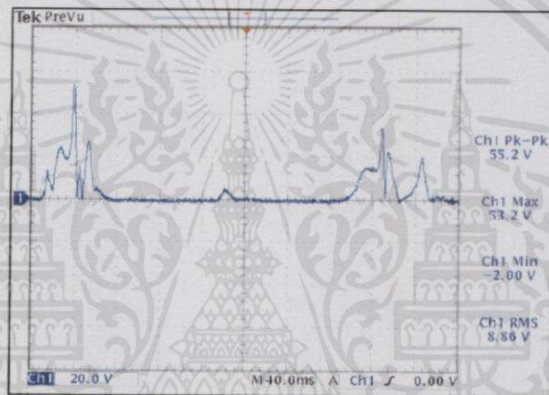
ตารางที่ 4.7 ผลของค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์, ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า, และค่ากำลังเฉลี่ย เมื่อเปลี่ยนค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบอนุกรมกันระหว่างเซลล์

Series			
R (Ω)	Vrms (V)	Irms (mA)	Pavg (mW)
49.6	2.87	57.93	166.46
99.7	5.15	51.63	265.72
198.1	7.55	38.14	288.31
299.0	10.20	34.13	348.28
399.0	12.50	31.33	391.77
499.0	13.33	26.73	356.46
599.0	14.21	23.73	337.23
978.0	17.47	17.86	312.11
1758.0	22.19	12.62	279.67
2496.0	24.41	9.78	238.69

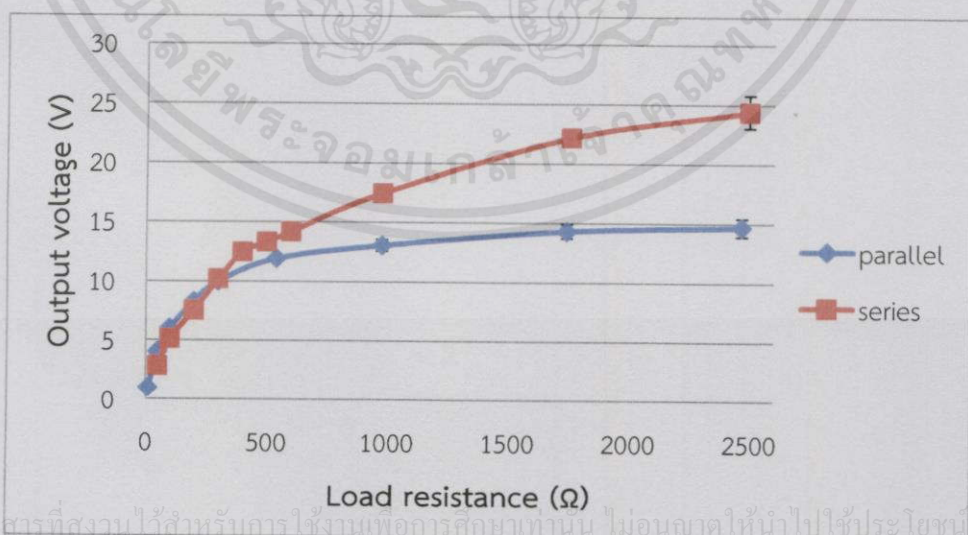
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองของความต่างศักย์จากการเหนี่ยวนำของการต่อขดลวดแบบขนานกันระหว่างเซลล์ที่ตักคร่อมตัวต้านทาน $R = 99.1 \Omega$



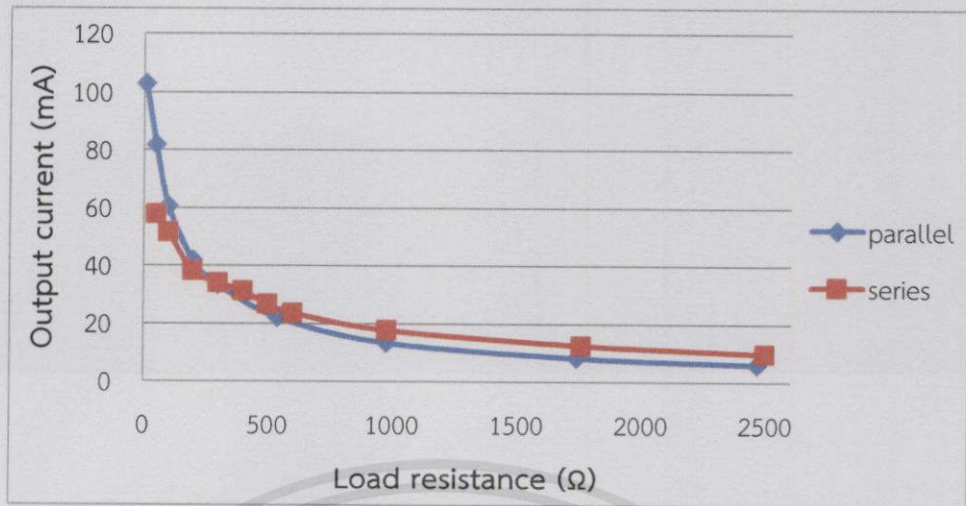
รูปที่ 4.25 ผลตอบสนองของความต่างศักย์จากการเหนี่ยวนำของการต่อขดลวดแบบอนุกรมกันระหว่างเซลล์ที่ตักคร่อมตัวต้านทาน $R = 399 \Omega$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าราคากำลังสองเฉลี่ยของความต่างศักย์กับค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานกับอนุกรมกันระหว่างเซลล์



รูปที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังสองเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานและอนุกรมกันระหว่างเซลล์



รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน โดยการต่อขดลวดแบบขนานและอนุกรมกันระหว่างเซลล์

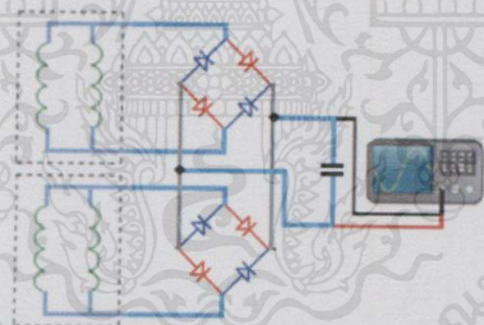
จากกราฟผลการทดลองในรูปที่ 4.26 ถึงรูปที่ 4.28 สรุปว่าหากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้องการความต่างศักย์ในช่วงประมาณ 5V ถึง 10V และต้องการกระแสไฟฟ้าสูง การต่อรูปแบบขนานจะมีความเหมาะสมกว่า แต่หากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้องการกระแสไฟฟ้าต่ำ และความต่างศักย์สูง การต่อรูปแบบอนุกรมจะเหมาะสมกว่า ทั้งนี้อุปกรณ์ต่างๆ ที่จะนำมาใช้งานที่ความต่างศักย์สูงมักจะมีราคาสูงกว่า เนื่องจากต้องสามารถทนความต่างศักย์สูงได้ และหากความต่างศักย์ที่ได้นั้นมีค่ามากเกินไป ความต้องการของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะเป็นการสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ เพราะความต่างศักย์นั้นจะถูกปรับลดระดับลงมาให้มีความเหมาะสม ดังนั้นรูปแบบการต่อของขดลวดระหว่างเซลล์นั้นจะควรพิจารณาจากความต้องการของอุปกรณ์ที่จะใช้งาน

โครงสร้างพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานนี้เก็บเกี่ยวพลังงานกลจากการเดินของมนุษย์แปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยเมื่อนำค่าความต่างศักย์ที่ได้มาคำนวณกำลังไฟฟ้า (Output Power) พบว่าการนำขดลวดมาต่อกันในรูปแบบขนานกันระหว่างเซลล์กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเฉลี่ย 364.33 mW และการนำขดลวดมาต่อกันในรูปแบบอนุกรมกันระหว่างเซลล์ กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเฉลี่ย 391.77 mW โดยขดลวดสองชุดในแต่ละเซลล์จะถูกทำการต่อรูปแบบขนานเนื่องจากให้ผลตอบสนองที่ดีกว่า ซึ่งผู้ทำการทดลองเหยียบลงบนพื้นมีน้ำหนัก 65 กก.

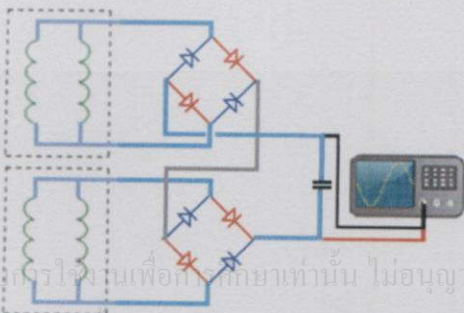
4.2.4 การทดสอบหาพลังงาน

การทดลองนี้ต้องการคำนวณหาค่าพลังงาน (E) จากพื้นที่กำเนิดพลังงาน เพื่อใช้ในการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยทำการเรียงกระแสที่ออกจากรขดลวดที่ต่อขนานกันภายในเซลล์เดียวกัน แล้วนำขดลวดจากแต่ละเซลล์มาต่อในรูปแบบขนานและอนุกรม จากนั้นชาร์จเข้าตัวเก็บประจุ โดยทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (C) ด้วยออสซิลโลสโคป ดังแสดงแผนภาพในรูปที่ 4.29 และรูปที่ 4.30 นำค่าแรงดันไฟฟ้ากับขนาดตัวเก็บประจุที่เลือกใช้มาคำนวณหาค่าพลังงาน โดยใช้สมการที่ (4.4) ซึ่งตัวเก็บประจุที่ใช้ในการทดสอบนี้มีขนาด 2200uF 50V เมื่อทำการทดลองเหยียบ 10 ครั้ง ใน 15 วินาที พบว่าการต่อรูปแบบขนานกันระหว่างเซลล์ และการต่อรูปแบบอนุกรมกันระหว่างเซลล์จะได้พลังงานเฉลี่ยดังรูปที่ 4.31

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (4.4)$$

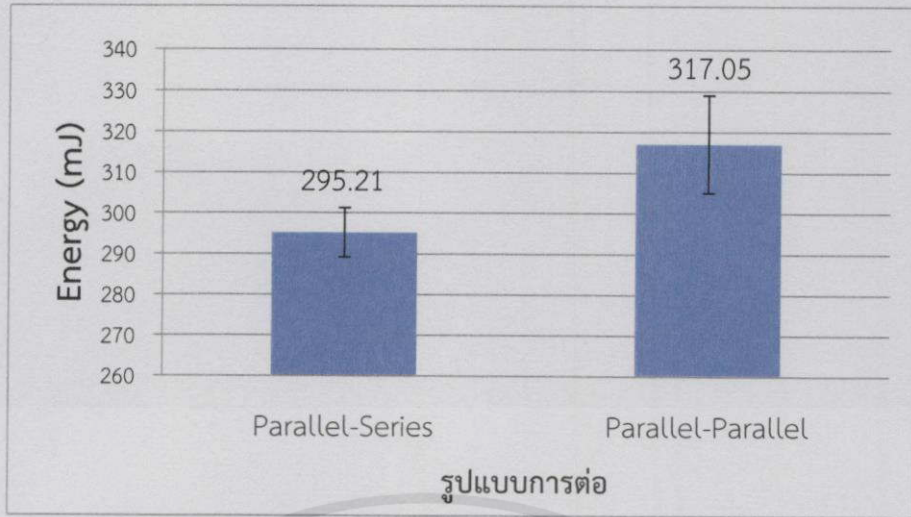


รูปที่ 4.29 การหาพลังงานที่ได้จากการเหนี่ยวนำแรงได้ไฟฟ้า โดยต่อรูปแบบขนานกันระหว่างเซลล์



รูปที่ 4.30 การหาพลังงานที่ได้จากการเหนี่ยวนำแรงได้ไฟฟ้า โดยต่อรูปแบบอนุกรมกันระหว่างเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการนำขดลวดต่อรูปแบบขนานกันระหว่างเซลล์ และอนุกรมกันระหว่างเซลล์ โดยที่ขดลวดในแต่ละเซลล์ต่อขนานกัน

เมื่อนำผลของพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้จากเซลล์เดี่ยวจากงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยเดิม โดยการทดลองเหยียบ 10 ครั้ง ใน 15 วินาที พบว่าได้ผลการเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 4.32



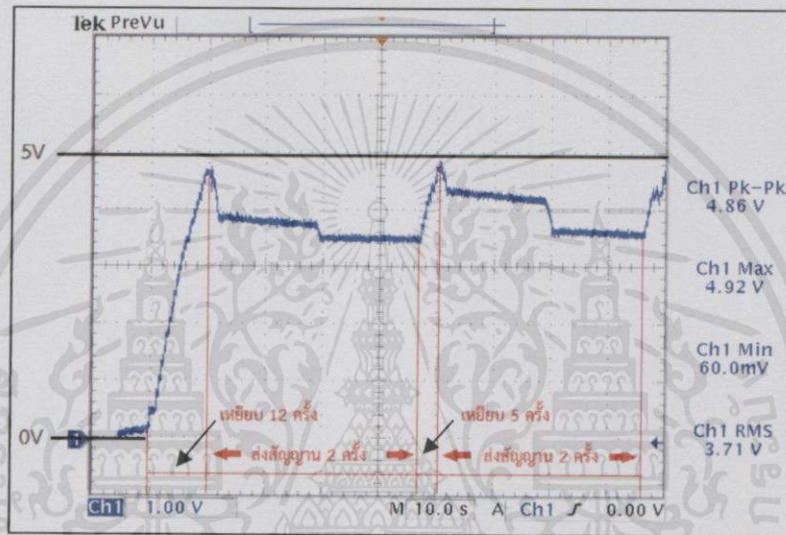
รูปที่ 4.32 กราฟเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เดี่ยวจากงานวิจัยเก่าและใหม่

4.2.5 การทดลองจ่ายความต่างศักย์ให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

การทดลองจ่ายความต่างศักย์ให้แก่เซนเซอร์โหนดตรวจวัดความเร่งแบบไร้สาย (Accelerometer) [24] ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า ดังตารางที่ 4.8 โดยรูปแบบการต่อขดลวดขนานกัน ทั้งหมด ดังรูปที่ 4.32 เนื่องจากค่าระดับความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้ามีความเหมาะสมกับเซนเซอร์ชนิดนี้ จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเหยียบ 12 ครั้ง จะได้ความต่างศักย์ขนาด 5 V จึงเกิดการส่งสัญญาณบ่งบอกขนาดของความเร่ง ซึ่งสามารถส่งสัญญาณได้ 2 ครั้ง ดังรูปที่ 4.33

ตารางที่ 4.8 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซนเซอร์โหนดตรวจวัดความเร่งแบบไร้สาย (Accelerometer)

Device		Current Consumption
Zigbee (Xbee Series 2)	Idle mode	10 mA
	Listen and Transmission	40 mA
	Hibernate	1 uA
Microcontroller (ATMEGA168)	Supply Current	6 mA @ 16Mhz
	Hibernate Current	4.1 uA
Sensor (ADXL203)	Sensor Supply Current	700 uA



รูปที่ 4.33 ผลการจ่ายความต่างศักย์ให้แก่เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทวิจารณ์และสรุปผล

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์ พบว่าเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์สามารถแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก จากการทดลอง เมื่อผู้ทดลองซึ่งมีน้ำหนัก 65 กก. ทำการเหยียบลงบนโครงสร้างพื้นรับแรงกด โดยทำให้เพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์เกิดการโก่งตัวลง 3.25 มม. จะสามารถสร้างกำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 13.01 mW และหากทำการทดลองเหยียบ 10 ครั้ง ใน 15 วินาที พบว่าได้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 2.92 mJ ทั้งนี้ค่ากำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ได้นั้นจะมีค่ามากขึ้น หากเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์เกิดการโก่งตัวลงมากขึ้น หรือเพิ่มแรงในการเหยียบมากขึ้น เนื่องจากจะส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ที่ได้มีค่าสูงขึ้น โครงสร้างพื้นรับแรงกดนี้มีขนาดความกว้าง 100 มม. ความยาว 150 มม. และความสูง 30 มม. เมื่อลองนำผลของค่าพลังงานไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้มาคำนวณหาความสามารถในจ่ายพลังงานไฟฟ้า พบว่าจากผลการสำรวจจำนวนผู้ใช้บริการรถไฟฟ้าสถานีสยามมีจำนวนประมาณ 112,600 คนต่อวัน หากทำการออกแบบพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเดินที่ประกอบด้วยเพียโซอิเล็กทริกทันเดอร์จำนวน 6 ชิ้น และประมาณว่าผู้ใช้บริการทุกคนเดินเหยียบพื้นเก็บเกี่ยวพลังงานนี้ทุกคนคนละหนึ่งครั้ง จะสามารถกำเนิดพลังงานได้ประมาณ 197.27 J ซึ่งสามารถนำไปจ่ายให้แก่หลอดไฟขนาด 3W นาน 1 นาที

จากการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กหรือหลักการแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งโครงสร้างของพื้นรับแรงกดเป็นการพัฒนาจากงานวิจัยเดิมเพื่อให้สามารถเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้ามากขึ้น โดยเกิดการหมุนสลับขั้วเหนือและใต้ของแนวแกนแม่เหล็ก ซึ่งโครงสร้างในการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้ามีจำนวน 2 เซลล์ โดยแต่ละเซลล์มีการพันขดลวดรอบแกนเหล็กจำนวน 2 ชุด ดังอธิบายไว้ในบทที่ 3 ทั้งนี้จากการทดลองนำขดลวดมาต่อกันในรูปแบบต่างๆ พบว่าการนำขดลวดมาต่อกันแบบขนานภายในเซลล์เดียวกันให้ผลตอบสนองที่เหมาะสมสำหรับนำพลังงานไฟฟ้าจ่ายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มากกว่า ส่วนรูปแบบการนำขดลวดต่อกันระหว่างเซลล์นั้นจะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จะใช้งานพลังงานไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้ โดยการนำขดลวดจากแต่ละเซลล์มาต่อขนานกันนั้น กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้มีค่าประมาณ 364.33 mW และหากทำการทดลองเหยียบ 10 ครั้ง ใน 15 วินาที จะได้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 317.05 mJ ส่วนการนำขดลวดจากแต่ละเซลล์มาต่ออนุกรมกันนั้น กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้มีค่าประมาณ 391.77 mW และได้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 295.21 mJ ทั้งนี้ค่ากำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ได้นั้นจะมีค่ามากขึ้น หากแรงที่ทำการเหยียบมากขึ้น ซึ่งโครงสร้างพื้นรับแรงกดนี้มีขนาดความกว้าง 240 มม. ความยาว 240 มม. และความสูง 160 มม. เมื่อทดลองนำพลังงานไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้จ่ายให้กับชุดทดลองเซนเซอร์โหนดตรวจวัดความเร่งแบบไร้สาย [24] พบว่าเมื่อทำการเหยียบบนพื้น 12 ครั้ง จะได้ความต่างศักย์ขนาด 5 V และสามารถส่งสัญญาณ

เอกสารนี้ บ่งบอกขนาดของความเร่ง ซึ่งสามารถส่งสัญญาณได้ 2 ครั้งนั้น ไม่นับว่าดีให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ปัญหาที่พบและวิธีแก้ไข

1. ในการทดลองออกแรงเหยียบลงบนโครงสร้างพื้นรับแรงกดแต่ละครั้ง ค่าความต่างศักย์ที่ได้มีค่าแตกต่างกันมาก เนื่องจากการออกแรงเหยียบมีขนาดไม่เท่ากันพอดีทุกครั้ง ซึ่งควบคุมได้ยาก จึงต้องทำการเหยียบซ้ำกันหลายครั้งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งพบว่าอาจจะเกิดค่าความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง

2. โครงสร้างพื้นรับแรงกดเพื่อศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น ขดลวดที่พันบนแกนเหล็กสามารถขดได้ง่ายระหว่างที่ทำการทดลอง เนื่องจากเส้นลวดมีขนาดเล็ก ซึ่งในบางครั้งเมื่อแผ่นพื้นด้านบนยุบตัวลงมา จะเกิดการกดทับลงบนเส้นลวดได้ จึงต้องทำการพันขดลวด และจัดวางตำแหน่งปลายของขดลวดให้เป็นระเบียบ

3. โครงสร้างพื้นรับแรงกดเพื่อศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น การต่อขดลวดแต่ละชุดเข้าด้วยกันในรูปแบบขนานหรืออนุกรมนั้น เกิดการต่อสลับขั้วบ่อยครั้ง ทำให้ค่าความต่างศักย์รวมที่ได้มีค่าน้อย เนื่องจากเกิดการหักล้างกันของความต่างศักย์ที่ได้จากขดลวดแต่ละชุด จึงต้องตรวจสอบขั้วของแต่ละเซลล์ก่อนที่จะนำมาต่อกัน

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา

1. สามารถออกแบบโครงสร้างพื้นรับแรงกดจากการเหยียบให้มีขนาดเล็กลงได้ และเกิดการยุบตัวของแผ่นพื้นด้านบนน้อยลง ซึ่งจะมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริงได้มากขึ้น

2. โครงสร้างพื้นรับแรงกดเพื่อศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น อาจสามารถเหินย่นำแรงได้ไฟฟ้าได้มากขึ้น หากทำการเพิ่มจำนวนรอบการพันขดลวด และเพิ่มขนาดของขดลวด รวมถึงเพิ่มขนาดของแม่เหล็กถาวรและขนาดของแกนเหล็กที่ใช้

3. พลังงานไฟฟ้าที่เก็บเกี่ยวได้จะต้องถูกทำการเก็บสะสม และปรับระดับให้มีความเหมาะสมแก่การจ่ายให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เสียก่อน สามารถทำได้โดยวงจรจัดการพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Li, Y. Wen, P. Liu, X. Li, and C. Jia. "An Electromagnetic Energy Harvesting Circuits for Self-Powered Wireless Sensor Network" *Control, Automation, Robotics and Vision*, vol.10, December 2008. pp.214-217.
- [2] J. Bullock, C. Benschinger, D. Benson, and H. Branz. "Semi-transparent a-SiC:H Solar Cells for Self-Powered Photovoltaic-electrochromic Devices" *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol.198, May 1996. pp.1163-1167.
- [3] D. M. Rowe, D. V. Morgan and J. H. Kiely. "Low Cost Miniature Thermoelectric Generator" *Electron. Lett*, vol.27, December 1991. pp. 2332-2334.
- [4] T. Starner. "Human Powered Wearable Computing" *IBM Syst. J.*, vol.35, 1996. pp.618-629.
- [5] L. Zhang, S. R. Oh, T. C. Wong, C. Y. Tan, and K. Yao "Piezoelectric Polymer Multilayer on Flexible Substrate for Energy Harvesting" *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol.60, no.9, September 2013. pp.2013-2020.
- [6] S. Mehraeen, S. Jagannathan, and K. Corzine "Energy Harvesting Using Piezoelectric Materials and High Voltage Scavenging Circuitry" *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2008. pp.1-8.
- [7] D. Rohan, D. Suman and P. Leila "A New Design for Vibration-based Electromagnetic Energy Harvesting System Using Coil Inductance of Microgenerator" *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.47, no.2, December 2010. pp.820-830.

- [8] นิตติ ลิ้มสถิตคงวิศาล และสิทธิพัฒน์ ภู่อทอง. "พื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน: การเปรียบเทียบการเก็บเกี่ยวพลังงานระหว่างการเปลี่ยนรูปพลังงานแบบเพียโซอิเล็กทริกและแบบแม่เหล็กไฟฟ้า" *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. 2556.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

- [9] "Energy Harvesting." [Online]. Available : [อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้](http://www.energyharvesting.net/)
<http://www.energyharvesting.net/>

- [10] T. Jirku, P. Fiala, and M. Kluge, "Magnetic Resonant Harvesters and Power Management Circuit for Magnetic Resonant Harvesters" *Microsystem Technologies*, vol.16, 2010. pp.677-690.
- [11] A. S. Herbawi, O. Paul, and T. Galchev, "An Ultra-Low-Power Active AC-DC CMOS Converter for Sub-1V Integrated Energy Harvesting Applications" *Sensor*, November 2013. pp.1-4.
- [12] H. Liu, Z. Ji, T. Chen, S. C. Menon, and C. Lee, "An Intermittent Self-Powered Energy Harvesting System from Low-Frequency Hand Shaking" *Sensors Journal*, March 2013. pp.1-9.
- [13] J. Carpenter and Y. Ramadass. "Fundamentals of ambient energy transducers in energy harvesting systems." [Online]. Available : <http://www.ecnmag.com/articles/2012/03/fundamentals-ambient-energytransducers-energy-harvesting-systems>. 2012.
- [14] S. Liping, W. Xiwen, and W. Yanbo, "Comparative Analysis on Piezoelectric Effect and Electromagnetic Effect for the Further Study of Multi-piezoelectric Effect" *2012 International Conference on Measurement, Information and Control*, vol.2, May 2012. pp.907-911.
- [15] N. S. Shenck and J. A. Paradiso, "Energy Scavenging with Shoe-Mounted Piezoelectrics" *IEEE Micro*, vol.21, 2001. pp.30-42.
- [16] S. Priya, "Modeling of Electric Energy Harvesting Using Piezoelectric Windmill" *Applied Physics Letters*, vol.87, 2005.
- [17] G. Wang. "Piezoelectric Energy Harvesting Utilizing Human Locomotion" The Degree of Master of Science in the Faculty of Graduate School of the University of Minnesota. 2010.
- [18] S. Jewett. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. 6th ED. United States of America : Quebecor World, Versailles. 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

[19] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, เอกสารประกอบการสอน วิชา 01026212 Electrical Machine I. ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุผลเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของสิทธิ์ที่แท้จริงทุกครั้งนำไปใช้

- [20] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. D. Umans. **Electric Machinery**. 6th ED. Singapore : McGraw-Hill. 2003
- [21] กฤษฎา ประทานุกิต, โกลมล บัญญัติเลิศถาวร, และวีณา จงเจริญกมล. “**พื้้นกำเนิดพลังงาน**” ปรินญญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.
- [22] “แม่เหล็กแรงสูงนีโอไดเมียม” [Online]. Available : <http://www.magnet-strong.com/archives/2353>
- [23] C. J. Kendall. “**Parasitic Power Collection in Shoe Mounted Devices**” BS Thesis, Department of Physics and Media Laboratory, Massachusetts Institute of Technology. 1998
- [24] D. Isarakorn, T. Sudhawiyangkul, S. Nundrakwang, “**Energy Analysis in Zigbee Based Wireless Sensor Node Powered by Piezoelectric Energy Harvester**” *Advanced Materials Research*, vol.931-932, May 2014, pp.1328-1332

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
เอกสารคู่มืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

BAT46

Vishay Semiconductors



Thermal Characteristics

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified

Parameter	Test condition	Symbol	Value	Unit
Thermal resistance junction to ambient air		$R_{\theta JA}$	300 ¹⁾	K/W
Junction temperature		T_j	125	$^{\circ}\text{C}$
Ambient operating temperature range		T_{amb}	-65 to +125	$^{\circ}\text{C}$
Storage temperature range		T_{stg}	-65 to +150	$^{\circ}\text{C}$

1) Valid provided that electrodes are kept at ambient temperature

Electrical Characteristics

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified

Parameter	Test condition	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Reverse breakdown voltage	$I_R = 100\text{ }\mu\text{A}$ (pulsed)	V_{BR}	100			V
Leakage current ²⁾	$V_R = 1.5\text{ V}$	I_R			0.5	μA
	$V_R = 1.5\text{ V}, T_j = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	I_R			5	μA
	$V_R = 10\text{ V}$	I_R			0.8	μA
	$V_R = 10\text{ V}, T_j = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	I_R			7.5	μA
	$V_R = 50\text{ V}$	I_R			2	μA
	$V_R = 50\text{ V}, T_j = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	I_R			15	μA
	$V_R = 75\text{ V}$	I_R			5	μA
Forward voltage ²⁾	$I_F = 0.1\text{ mA}$	V_F			250	mV
	$I_F = 10\text{ mA}$	V_F			450	mV
	$I_F = 250\text{ mA}$	V_F			1000	mV
Diode capacitance	$V_R = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$	C_D		10		pF
	$V_R = 1\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$	C_D		6		pF

2) Pulse test $I_P < 300\text{ }\mu\text{s}$, $\delta < 2\%$

Typical Characteristics

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified

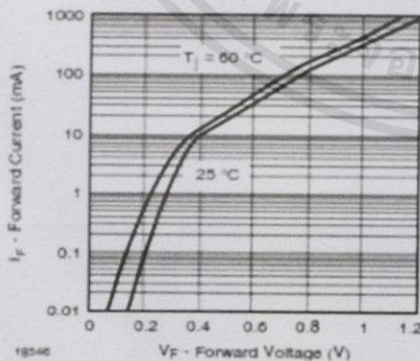


Figure 1. Typical Instantaneous Forward Characteristics

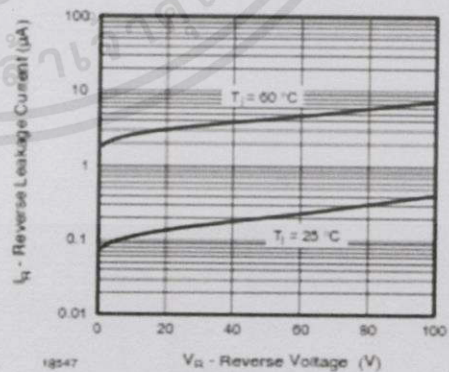


Figure 2. Typical Reverse Characteristics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


BAT46

Vishay Semiconductors

Small Signal Schottky Diode

Features

- For general purpose applications.
- This diode features very low turn-on voltage and fast switching. This device is protected by a PN junction guard ring against excessive voltage, such as electrostatic discharges
- This diode is also available in the SOD-123 case with type designation BAT46W-V and in the MiniMELF case with type designations LL46.
- AEC-Q101 qualified
- Compliant to RoHS directive 2002/95/EC and in accordance to WEEE 2002/96/EC
- Halogen-free according to IEC 61249-2-21 definition


 RoHS
 COMPLIANT
 HALOGEN
 FREE


34 9367

Mechanical Data

Case: DO-35

Weight: approx. 125 mg

Cathode Band Color: Black

Packaging Codes/Options:

TR/10 k per 13" reel (52 mm tape), 50 k/box

TAP/10 k per Amppack (52 mm tape), 50 k/box

Parts Table

Part	Ordering code	Type Marking	Remarks
BAT46	BAT46-TR or BAT46-TAP	BAT46	Tape and Reel/Amppack

Absolute Maximum Ratings

 $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified

Parameter	Test condition	Symbol	Value	Unit
Repetitive peak reverse voltage		V_{RRM}	100	V
Forward continuous current		I_F	150 ¹⁾	mA
Repetitive peak forward current	$t_p < 1\ \mu\text{s}$; $d < 0.5$	I_{FRM}	350 ¹⁾	mA
Surge forward current	$t_p < 10\ \text{ms}$	I_{FSM}	750 ¹⁾	mA
Power dissipation ¹⁾	$T_{amb} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	P_{tot}	150 ¹⁾	mW

1) Valid provided that electrodes are kept at ambient temperature

Document Number 83662

For technical questions within your region, please contact one of the following:

www.vishay.com

Rev. 1.7, 05-Aug-10

DiodesAmericas@vishay.com, DiodesAsia@vishay.com, DiodesEurope@vishay.com

1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



www.vishay.com

Legal Disclaimer Notice

Vishay

Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and/or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify and hold Vishay and its distributors harmless from and against any and all claims, liabilities, expenses and damages arising or resulting in connection with such use or sale, including attorneys fees, even if such claim alleges that Vishay or its distributor was negligent regarding the design or manufacture of the part. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

Material Category Policy

Vishay Intertechnology, Inc. hereby certifies that all its products that are identified as RoHS-Compliant fulfill the definitions and restrictions defined under Directive 2011/65/EU of The European Parliament and of the Council of June 8, 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (EEE) - recast, unless otherwise specified as non-compliant.

Please note that some Vishay documentation may still make reference to RoHS Directive 2002/95/EC. We confirm that all the products identified as being compliant to Directive 2002/95/EC conform to Directive 2011/65/EU.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



BAT46

Vishay Semiconductors

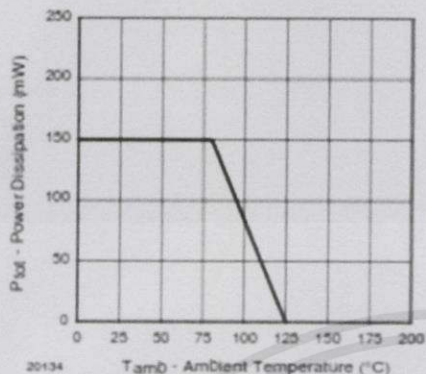
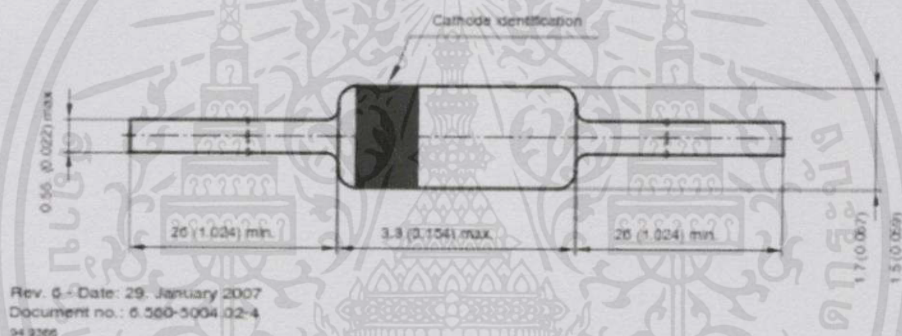
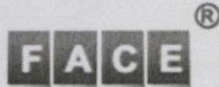


Figure 3. Admissible Power Dissipation vs. Ambient Temperature

Package Dimensions in millimeters (inches): DO-35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะมิใช่ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Face International Corporation

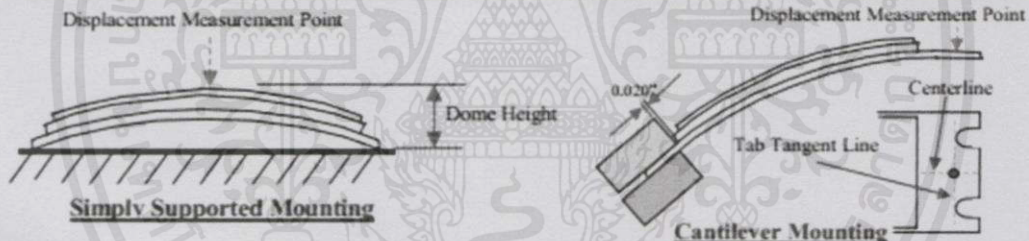
427 W. 35th St. • Norfolk, VA 23508 USA • 757.624.2121 • Fax 757.624.2128 • www.faceco.com

THUNDER® TH-6R Data Sheet



TH-6R Dimensions & Physical Properties	
Mass	0.0358 lbs
	16.3 g
Footprint (domed) ¹	2.985" x 2.040"
	75.82 mm x 51.82 mm
Footprint (flat) ²	3.00" x 2.040"
	76.20 mm x 51.82 mm
Piezo Thickness	0.015"
	0.38 mm
Total Thickness	0.028"
	0.71 mm
Dome Height ³	0.167"
	4.24 mm

TH-6R Specifications: Electrical and Mechanical Properties						
Capacitance	Max. Voltage ⁴			Typical Maximum Displacement		Block Force
	+	-	Peak to Peak (Zero DC offset)	Simply Supported	Cantilevered	
77 nF	900 V	450 V	+/- 450 V	0.065"	0.125"	30 lbf
				1.65 mm	3.18 mm	134 N



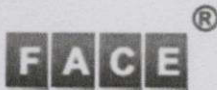
¹ **Footprint (domed):** Thunder dimensions after manufacturing and attaining domed shape. These dimensions are always slightly less than the dimensions of the stainless steel substrate before manufacturing.

² **Footprint (flat):** Dimensions of the stainless steel substrate before the manufacturing process.

³ **Dome Height:** Distance between the flat surface on which the Thunder rests in simply supported condition and the highest point on the Thunder.

⁴ **Max. Voltage:** The maximum voltage that can be applied to the Thunder is governed by the thickness of the piezoceramic layer. For the grade and type of piezoceramic used in Thunder manufacturing, the maximum applicable electric field is +60V/mils (2362 V/mm) and -30V/mils (1181 V/mm). So the maximum positive and negative voltage applicable is the product of the piezo thickness and the respective electric fields. Consequently, the amplitude of the periodic voltage (without DC offset) that the Thunder can be subjected to is limited by the maximum negative voltage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

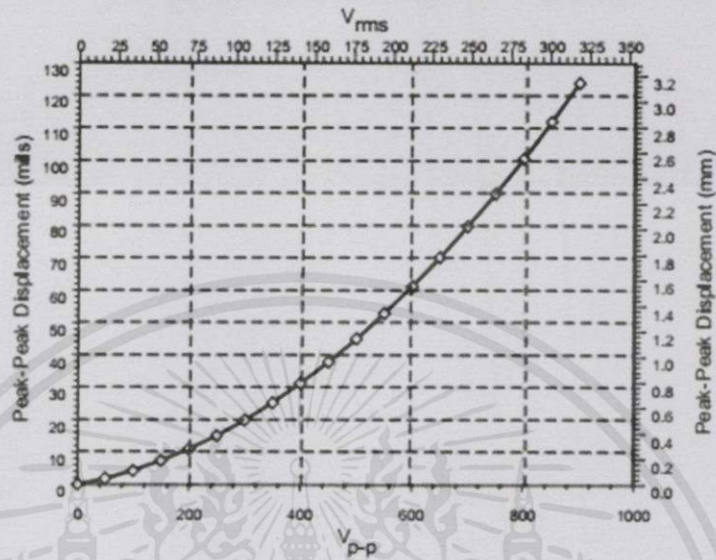


Face International Corporation

427 W. 35th St. • Norfolk, VA 23508 USA • 757.624.2121 • Fax 757.624.2128 • www.faceco.com

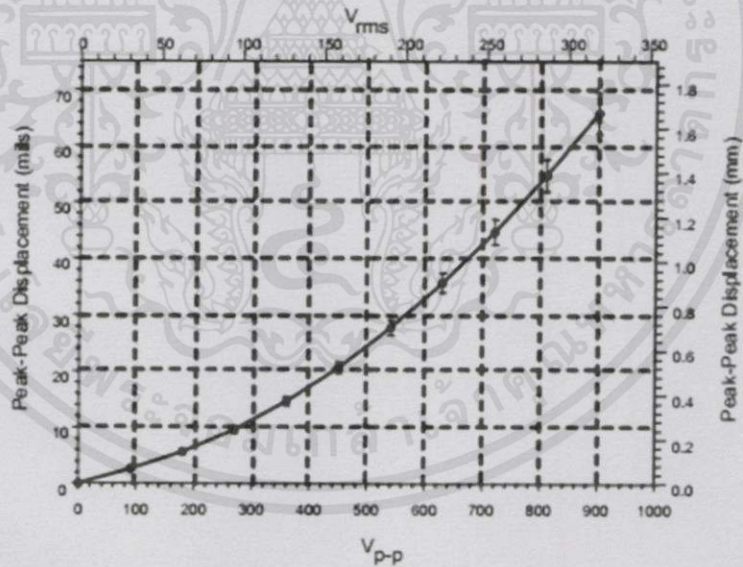
Displacement vs. Voltage : Cantilevered

Typical Performance at 1 Hz Sinusoidal Drive, No Load

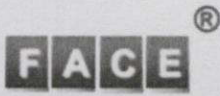


Displacement vs. Voltage : Simply Supported

Typical Performance at 1 Hz Sinusoidal Drive, No Load



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

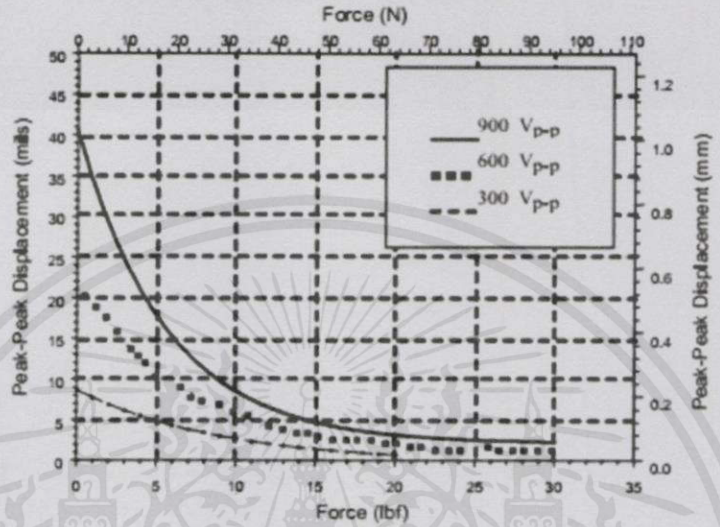


Face International Corporation

427 W. 35th St. • Norfolk, VA 23508 USA • 757.624.2121 • Fax 757.624.2128 • www.faceco.com

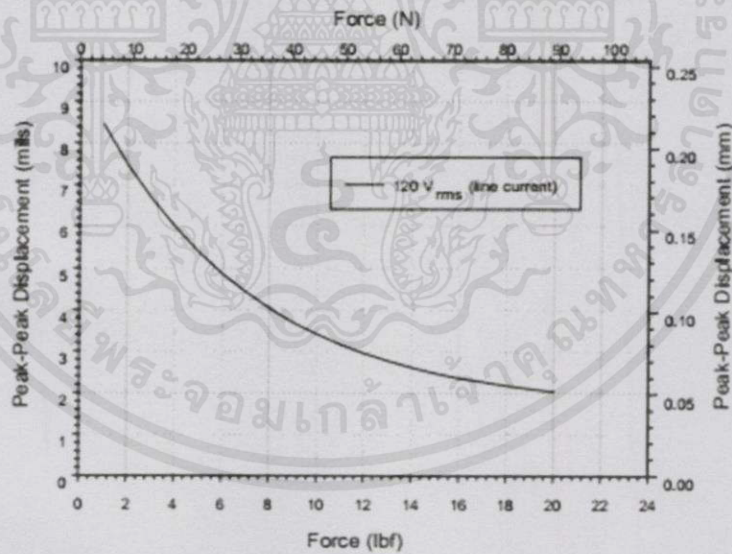
Displacement vs. Force : Simply Supported

Typical Performance at 1 Hz Sinusoidal Drive



Displacement vs. Force : Simply Supported

Typical Performance at 60 Hz Sinusoidal Drive



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้