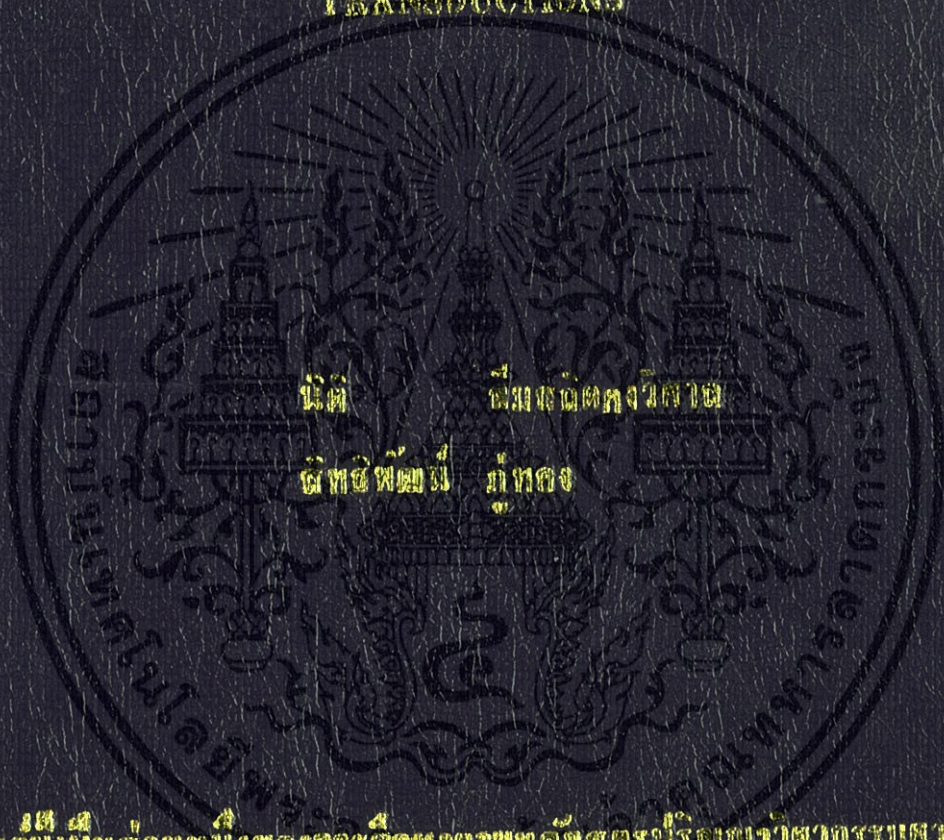


งานเขียนที่ควรต้องงาน ; การเปรียบเทียบการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแสง

เพื่อใช้สำหรับพลังงานบนพื้นผิวที่เป็นที่ประดิษฐ์ขึ้นบนแผ่นเคลือบผิว

ENERGY HARVESTING FLOOR: AN ENERGY HARVESTING
COMPARISON OF PIEZOELECTRIC AND ELECTROMAGNETIC
TRANSDUCTIONS



วิทยานิพนธ์ที่พิมพ์ขึ้นในงานประชุมวิชาการระดับบัณฑิตศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบผลิตรถยนต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

พื้นที่เก็บเกี่ยวพลังงาน: การเปรียบเทียบการเก็บเกี่ยวพลังงานระหว่างการ
เปลี่ยนรูปพลังงานแบบเพียโซอิเล็กทริกและแบบแม่เหล็กไฟฟ้า
ENERGY HARVESTING FLOOR: AN ENERGY HARVESTING
COMPARISON OF PIEZOELECTRIC AND ELECTROMAGNETIC
TRANSDUCTIONS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENERGY HARVESTING FLOOR: AN ENERGY HARVESTING
COMPARISON OF PIEZOELECTRIC AND ELECTROMAGNETIC
TRANSDUCTIONS



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 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง

พื้นที่เกี่ยวกับพลังงาน: การเปรียบเทียบการเก็บเกี่ยวพลังงานระหว่าง
การเปลี่ยนรูปพลังงานแบบเพียโซอิเล็กทริกและแบบแม่เหล็กไฟฟ้า
ENERGY HARVESTING FLOOR: AN ENERGY HARVESTING
COMPARISON OF PIEZOELECTRIC AND ELECTROMAGNETIC
TRANSDUCTIONS

ผู้จัดทำ

นายนิติ ลิมสถิตคงวิศาล 53010847

นายสิทธิพัฒน์ ภูทอง 53011689


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.ดอน อิศรากร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์สองเมือง นันทขว้าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่เกี่ยวพลังงาน: การเปรียบเทียบการเกี่ยวพลังงานระหว่าง การเปลี่ยนรูปพลังงานแบบเพียโซอิเล็กทริกและแบบแม่เหล็กไฟฟ้า

โดย

นายนิติ ลิ้มสถิตคงวิศาล 53010847

นายสิทธิพัฒน์ ภู่อทอง 53011689

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ดอน อิศรากร

อาจารย์สองเมือง นันทขว้าง

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันปัญหาเรื่องการขาดพลังงานเป็นปัญหาระดับโลก และพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นต่อการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ จึงได้มีการค้นหาเทคโนโลยีที่หาพลังงานมาทดแทนโดยเทคโนโลยีนี้เรียกว่า “การเกี่ยวพลังงาน” แล้วนำเทคโนโลยีการเกี่ยวพลังงานมาคิดค้นอุปกรณ์เกี่ยวพลังงานโดยเป้าหมายของอุปกรณ์เกี่ยวพลังงาน คือการเกี่ยวพลังงานที่เกิดขึ้นอย่างสูญเปล่ารอบๆ ตัวเรา และแปลงพลังงานนั้นๆ เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานที่สามารถใช้งานได้ ในงานนี้ได้มีจุดประสงค์ที่จะออกแบบและเน้นไปที่การทดลองเกี่ยวกับพื้นที่กำเนิดพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก (PZT) และวงจรแม่เหล็กซึ่งเป็นการเกี่ยวพลังงานจากการเดินทาง โดยอุปกรณ์นี้ได้เกี่ยวพลังงานโดยการกดทับ ซึ่งการทดลองนี้เป็นการศึกษาเพื่อออกแบบพื้นที่กำเนิดพลังงานซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENERGY HARVESTING FLOOR: AN ENERGY HARVESTING COMPARISON OF PIEZOELECTRIC AND ELECTROMAGNETIC TRANSDUCTIONS

By

Mr.Niti Limsatitkongwisan 53010847

Mr.Sittipat Pootong 53011689

Advisors

Dr.Don Isarakorn

Mr.Songmuang Nundrakwang

Academic year 2013

ABSTRACT

Nowaday, in the world have an important problem is “Energy Privation” and energy is a necessity to live .Then it’s found some technology to find a way to be alternative energy is “Energy harvesting” let’s take this technology to build an energy floor, it works by impression from walking. Its aim is harvesting energy for environment to this energy that it is able to use. This project has aim to design the structure and do experiment by piezoelectric (PZT) and electromagnetic circuit that this floor will be worked from impression force by walking that this experiment is studied from designing this floor.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปฏิญานិพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือจาก ดร.ดอน อิศรากร และอาจารย์สองเมือง นันทขว้าง ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำที่ตลอดเวลาที่ผ่านมา คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่เคยร่วมทุกข์ร่วมสุข เป็นกำลังใจ ให้การช่วยเหลือสนับสนุน อนุกรรมต่างที่ขาดเหลือและคอยให้คำแนะนำ

ขอขอบคุณพี่อาร์ทที่คอยให้ความรู้และให้การช่วยเหลือด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็อนุกรรม คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ ทำให้งานสามารถดำเนินมาได้ขนาดนี้

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา รวมถึงการสนับสนุนงบประมาณที่ขาด หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำต้องขอภัย ณ ที่นี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์	1
1.3 ขั้นตอนศึกษาและการจัดทำโครงการ	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขอบเขตการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ปรัชญาการณียะโซอิเล็คทริก	3
2.2 การเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อม	4
2.3 พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ	4
2.4 ตัวเหนี่ยวนำ	5
2.4.1 หลักการเบื้องต้นของตัวเหนี่ยวนำ	5
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ	6
2.4.3 ชนิดของตัวเหนี่ยวนำ	7
2.4.3.1 ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่	7
2.4.3.2 ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้	8
2.5 สนามแม่เหล็ก	8
2.6 การเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก	10
2.2.1 กฎของฟาราเดย์	10
2.2.2 กฎของเลนซ์	11
บทที่ 3 แนวคิดและการออกแบบ	13
3.1 การออกแบบตัวต้นแบบ	13
3.1.1 ตัวต้นแบบ PZT	14
3.1.2 ตัวต้นแบบวงจรแม่เหล็ก	14
3.1.2.1 ต้นแบบ Type A	15
3.1.2.2 ต้นแบบ Type B	15
3.1.2.3 ต้นแบบ Type C	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 แม่เหล็ก	16
3.3 ขดลวดตัวนำ	16
3.4 สปริง	17
3.5 การออกแบบการทดลอง	17
3.5.1 การทดลองแบบ PZT	17
3.5.1.1 การทดสอบระยะ Gap กับโครงสร้างพื้นเก็บพลังงาน	18
3.5.1.2 การทดสอบการเก็บพลังงานผ่าน C ของโครงสร้างพื้นเก็บพลังงาน	18
3.5.2 การทดลองแบบวงจรแม่เหล็กแม่เหล็ก	18
3.5.2.1 การทดสอบที่ No Load	19
3.5.2.2 การทดสอบเก็บพลังงานที่ C	19
3.5.2.3 Load	19
3.5.2.4 ขนานอนุกรม	20
3.5.2.5 วงจรเก็บพลังงาน	20
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย	21
4.1 การทดลอง	21
4.2 โครงสร้างพื้นเก็บพลังงานแบบแม่เหล็กผลึกกัน	21
4.2.1 ผลการทดสอบระยะ Gap กับโครงสร้างพื้นเก็บพลังงาน	21
4.2.2 ผลการทดสอบการเก็บพลังงานผ่าน C ของโครงสร้างพื้นเก็บพลังงาน	22
4.2.2.1 ระยะ Gap ก่อนเหยียบ $G1 = 10$ mm ระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 2$ mm	22
4.2.2.2 ระยะ Gap ก่อนเหยียบ $G1 = 10$ mm ระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 3$ mm	24
4.3 โครงสร้างพื้นเก็บพลังงานแบบแม่เหล็กดูดกัน	25
4.3.1 ผลการทดสอบระยะ Gap กับโครงสร้างพื้นเก็บพลังงาน	25
4.3.1.1 การทดสอบ PZT 1 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแส	26
4.3.1.2 PZT 2 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วขนานกัน	27
4.4 ผลการทดลองของต้นแบบ Type A	28
4.4.1 ผลการทดลองวงจรที่ No Load	28
4.4.1.1 การทดสอบที่ระยะ Gap 5mm	28
4.4.1.2 การทดสอบที่ระยะ Gap 10mm	29
4.4.2 ผลการเก็บพลังงานในตัวเก็บประจุ	30
4.4.3 ผลการขนานและอนุกรมของขดลวด	32
4.4.3.1 การอนุกรมของขดลวด	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.3.2 การขนานของขดลวด	33
4.4.4 ผลการทดลองวงจรที่ Load	32
4.4.5 ผลการทดลองวงจรเก็บพลังงาน	35
4.5 ผลการทดลองของต้นแบบ Type B	37
4.5.1 ผลการทดลองวงจรที่ No Load	37
4.5.2 ผลการเก็บพลังงานในตัวเก็บประจุ	37
4.5.3 ผลการทดลองวงจรที่ Load	38
4.6 การทดสอบขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบี้	40
4.6.1 ผลการทดลองวงจรที่ No Load	40
4.6.2 ผลการขนานและอนุกรมของขดลวด	41
4.6.3 ผลการเก็บพลังงานในตัวเก็บประจุ	42
4.6.4 ผลการทดลองวงจรที่ Load	42
4.7 ผลการทดลองของต้นแบบ Type C	44
4.7.1 การทดลองรูปแบบการต่อวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์	44
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	46
5.1 สรุปผลการทดลอง	46
5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไข	46
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้า	46
เอกสารอ้างอิง	47
ภาคผนวก	48
ภาคผนวก ก เอกสารคู่มืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	49

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ปรากฏการณ์ Piezoelectricity	3
2.2	สัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำแบบต่างๆ	5
2.3	ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ	7
2.4	ตัวเหนี่ยวนำแบบคงที่	7
2.5	ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้	8
2.6	เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศออกจากขั้ว N เข้าหาขั้ว S	9
2.7	ผงเหล็กที่มีแนวการเรียงตัวแทนสนามแม่เหล็ก	9
2.8	จุดสะเทินในสนามแม่เหล็ก เป็นจุดที่ไม่มีความเข้มสนามแม่เหล็กเกิดจากการหักล้างกันของแรงแม่เหล็ก	10
2.9	กฎของฟาราเดย์	11
2.10	กฎของเลนซ์	12
3.1	พื้นต้นแบบของชุดทดลอง	13
3.2	พื้นต้นแบบชุดทดลอง PZT	14
3.3	พื้นต้นแบบชุดทดลองแบบวงจรแม่เหล็ก	14
3.4	ชุดทดลองแนวตั้ง	15
3.5	ชุดทดลองแนวนอน	15
3.6	ชุดทดลองแนวตั้งแบบขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบี้	16
3.7	แม่เหล็กในชุดทดลอง	16
3.8	ขดลวดตัวนำในชุดทดลอง	17
3.9	สปริงในชุดทดลอง	17
3.10	วิธีการทดสอบระยะ Gap	18
3.11	วิธีการทดสอบการเก็บพลังงานผ่าน C	18
3.12	วิธีการทดสอบที่ No Load	19
3.13	วิธีการทดสอบการเก็บพลังงาน	19
3.14	วิธีการทดสอบที่ Load	20
3.15	วิธีการทดสอบการขนานอนุกรม	20
3.16	วิธีการทดสอบวงจรเก็บพลังงาน	20
4.1	กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor ของ PZT 1 ตัว	23
4.2	กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor PZT 2 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วขนานกัน	23
4.3	กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor ของ PZT 1 ตัว	24
4.4	กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor PZT 2 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วขนานกัน	25
4.5	กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor PZT 1 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแสที่ $G_2 = 2\text{mm}$	26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor PZT 1 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแส ที่ $G2 = 3\text{mm}$	26
4.7	กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor PZT 2 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแส แล้วขนานกัน $G2 = 2\text{ mm}$	27
4.8	กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor PZT 2 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแส แล้วขนานกัน $G2 = 3\text{ mm}$	27
4.9	กราฟเปรียบเทียบ V_{p-p} ที่ระยะ Gap 5mm	28
4.10	กราฟเปรียบเทียบ V_{max} ที่ระยะ Gap 5mm	29
4.11	กราฟเปรียบเทียบ V_{p-p} ที่ระยะ Gap 10mm	29
4.12	กราฟเปรียบเทียบ V_{max} ของแม่เหล็ก 5 ตัวที่ระยะ Gap 10mm	30
4.13	กราฟเปรียบเทียบพลังงานในตัวประจุที่จำนวนขดลวดต่างๆ ของแม่เหล็ก 4, 5, 6 ตัว ที่ระยะ Gap 10mm	31
4.14	กราฟเปรียบเทียบพลังงานในตัวประจุที่จำนวนขดลวดต่างๆ อนุกรมกัน ของแม่เหล็ก 4, 5, 6 ตัวที่ระยะ Gap 10mm	31
4.15	กราฟเปรียบเทียบพลังงานในตัวประจุที่จำนวนขดลวดต่างๆ ขนานกัน ของแม่เหล็ก 4, 5, 6 ตัวที่ระยะ Gap 10mm	32
4.16	กราฟการรบกวนของขดลวด	33
4.17	กราฟการขนานของขดลวด	33
4.18	กราฟของแรงดันไฟฟ้าของขดลวด 1000, 3000 และ 5000 รอบ	34
4.19	กราฟของแรงดันไฟฟ้าของขดลวด 1000, 3000 และ 5000 รอบ	34
4.20	กราฟของกำลังไฟฟ้าของขดลวด 1000, 3000 และ 5000 รอบ	35
4.21	สัญญาณแสดงช่วง Operated Time	36
4.22	สัญญาณแสดง Operated Time ของขดลวด 1000 และ 3000 รอบกับ วงจรเก็บพลังงานที่ค่าตัวเก็บประจุ $220\ \mu\text{F}$	36
4.23	สัญญาณแสดง Operated Time ของขดลวด 5000 รอบ กับ วงจรเก็บพลังงานที่ค่าตัวเก็บประจุ $220\ \mu\text{F}$	37
4.24	กราฟแสดง Operated Time	37
4.25	กราฟแสดงแรงดันของชุดทดลองแนวนอน	38
4.26	กราฟของแรงดันไฟฟ้าของขดลวด 5000 รอบของชุดทดลองแนวนอน	39
4.27	กราฟของกระแสไฟฟ้าของขดลวด 5000 รอบของชุดทดลองแนวนอน	39
4.28	กราฟของกำลังไฟฟ้าของขดลวด 5000 รอบของชุดทดลองแนวนอน	40
4.29	กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟของจำนวนขดลวด 3000 และ 4000 รอบที่พื้น บนแกนบ็อบบี้	41
4.30	กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟของจำนวนขดลวด 3000 และ 4000 รอบแบบ ขนานอนุกรมที่พื้นบนแกนบ็อบบี้	41
4.31	กราฟเปรียบเทียบพลังงานในตัวประจุที่จำนวนขดลวดต่างๆ ของการขนานอนุกรมกัน	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ VIII ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.32	กราฟของแรงดันไฟฟ้าของขดลวด 3000 และ 4000 รอบของขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบิ้น	42
4.33	กราฟของกระแสไฟฟ้าของขดลวด 3000 และ 4000 รอบของขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบิ้น	43
4.34	กราฟของกำลังไฟฟ้าของขดลวด 3000 และ 4000 รอบของขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบิ้น	43
4.35	กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของรูปแบบการต่อสาย	44
4.36	กราฟแสดงการเปรียบเทียบพลังงานของรูปแบบการต่อสาย	45



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แรงดันเฉลี่ยของการทดสอบระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 2 \text{ mm}$	22
4.2 แรงดันเฉลี่ยของการทดสอบระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 3 \text{ mm}$	22
4.3 แรงดันเฉลี่ยของการทดสอบระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 2 \text{ mm}$	25
4.4 แรงดันเฉลี่ยของการทดสอบระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 3 \text{ mm}$	25
4.5 จำนวนที่ทำให้วงจรเก็บพลังงาน LCT3588-1 ทำงาน	35
4.6 พลังสะสมในตัวเก็บประจุของชุดทดลองแนวนอน	38



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการงาน

ในปัจจุบันพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นต่อการใช้ชีวิตของมนุษย์ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการทางพลังงานที่มีมากขึ้นทุกวัน จึงได้มีการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ขึ้นมาเพื่อผลิตพลังงานให้ได้เท่ากับตามความต้องการของมนุษย์ เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting Technology) จึงเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่จะช่วยตอบสนองต่อความต้องการทางพลังงานของมนุษย์ เทคโนโลยีนี้คือการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า และเก็บสะสมไว้เพื่อป้อนอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ โดยแหล่งพลังงานจากสิ่งแวดล้อมที่สามารถเก็บเกี่ยวได้และเป็นที่ยอมรับกัน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานกล (การสั่นสะเทือนและการเคลื่อนไหว) เป็นต้น ซึ่งแหล่งพลังงานที่น่าสนใจและสามารถเก็บเกี่ยวได้ง่าย คือ พลังงานกล เพราะมีอยู่ทั่วไปในสภาวะแวดล้อม โดยที่เห็นได้ง่ายที่สุดคือ การเคลื่อนไหวของสิ่งมีชีวิต

จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงได้มีแนวคิดที่จะเก็บเกี่ยวพลังงานกลจากการเดินของมนุษย์ ซึ่งโดยปกติแล้วไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ด้วยการประดิษฐ์พื้นกำเนิดพลังงานที่อาศัยหลักการของเพียโซอิเล็กทริกและอเล็กโทรแมกเนติกส์ขึ้นมา โดยจะออกแบบพื้นกำเนิดพลังงานที่สามารถกำเนิดพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด มีอายุการใช้งานที่นาน และไม่ทำให้รู้สึกถึงการยุบตัวของพื้นเมื่อเดินผ่าน

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญาานิพนธ์

1. ออกแบบให้พื้นกำเนิดพลังงาน สามารถผลิตพลังงานออกมาได้มากที่สุด
2. ออกแบบพื้นกำเนิดพลังงาน ให้มีความทนทานต่อการใช้งาน

1.3 ขั้นตอนศึกษาและการจัดทำโครงการงาน

ช่วงแรกของงานวิจัยจะเริ่มต้นจากการศึกษา และพิจารณาเลือกเพียโซอิเล็กทริกและหลักการอเล็กโทรแมกเนติกส์ ที่จะนำมาใช้ในการทำชุดอุปกรณ์ทดลองต้นแบบโดยตั้งเป้าหมายว่าจะเลือกใช้เพียโซอิเล็กทริก คือ PZT (Lead Zirconate Titanate) มาใช้ในการออกแบบและทดลองโครงสร้างของพื้นกำเนิดพลังงาน ซึ่งแนวคิดในการออกแบบโครงสร้างคือต้องทำให้แรงที่โครงสร้างได้รับถูกถ่ายเททำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้น ขั้นตอนต่อไปทำการทดลองโดยการเหยียบแล้วดูผลตอบสนองทางไฟฟ้า เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเพียโซอิเล็กทริก และแม่เหล็กที่จะหาจำนวนของเพียโซอิเล็กทริก และขนาดของแม่เหล็กที่เหมาะสมและสามารถกำเนิดพลังงานไฟฟ้าได้สูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ในช่วงหลังของงานวิจัยจะศึกษาหลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้า เพื่อนำมาออกแบบและทดลองโครงสร้างของพื้นกำเนิดพลังงานอีกอันหนึ่ง ซึ่งจะศึกษาจำนวนรอบของขดลวดที่พันแกนเหล็ก และจำนวนแม่เหล็กที่เหมาะสมและสามารถกำเนิดพลังงานไฟฟ้าได้สูงที่สุด หลังจากนั้นนำผลการทดลองของพื้นกำเนิดพลังงานทั้งสองอันมาเปรียบเทียบเพื่อดูว่าอันไหนให้พลังงานที่สูงกว่ากัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. นำพลังงานไฟฟ้าที่กำเนิดได้ไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
2. สามารถนำไปติดตั้งในที่ต่างๆ เพื่อให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าได้

1.5 ขอบเขตการศึกษา

ในการทดลองเรื่องพืนกำเนิดพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ การทดลองเพียโซอิเล็กทริก (PZT) และอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจาก PZT เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาสูง และมีความละเอียดอ่อนในการศึกษา จึงเน้นการใช้เป็นหลักการอิเล็กทรอนิกส์ ในการทดลอง โดยทดลองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

เงื่อนไขที่กำหนด

1. คนที่ทดสอบที่มีน้ำหนัก อยู่ในช่วง 55-65 Kg
2. ในการเทียบต้องการให้คนที่เทียบพื้นมีความรู้สึกว่า พื้นไม่มีการยุบตัว เพื่อหาระยะพื้นที่สามารถยุบได้

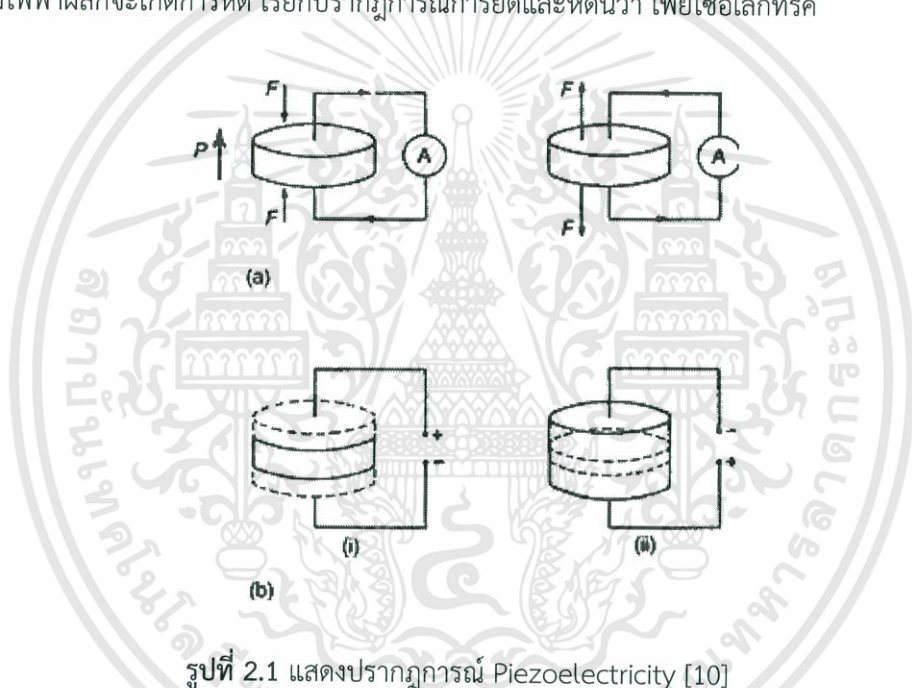


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

วัสดุเซรามิกบางชนิดที่มีโครงสร้างผลึกแบบไอออนิกและมีหน่วยเซลล์ที่ไม่สมมาตร มีผลทำให้เกิดอิเล็กทริกไดโพล (Electric Dipole) ขึ้นเล็กน้อย ผลจากการเปลี่ยนโครงสร้าง เกิดความไม่สมมาตรกันทำให้จุดศูนย์กลางประจุบวก (+) ทั้งหมดภายในแผ่นเซลล์แยกออกจากจุดศูนย์กลางของประจุลบ (-) ทำให้เกิดขั้วไฟฟ้าขึ้น 2 ขั้ว และจากลักษณะดังกล่าว เมื่อใส่แรงกดเข้าไปก็จะเกิดประจุไฟฟ้าบวกและลบขึ้นในโครงสร้าง และเมื่อใส่แรงดึง (ดังรูปที่ 2.1(a)) จะเกิดประจุไฟฟ้าที่มีขั้วตรงกันข้าม และเมื่อนำแผ่นเซรามิกนี้ไปใส่สนามไฟฟ้า (ดังรูปที่ 2.1(b)) ผลึกจะเกิดการยืดและเมื่อกลับทิศสนามไฟฟ้าผลึกจะเกิดการหด เรียกปรากฏการณ์การยืดและหดนี้ว่า เพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 2.1 แสดงปรากฏการณ์ Piezoelectricity [10]

ผลของเพียโซอิเล็กทริก เป็นผลทางไฟฟ้ากล (Electromechanical) ของวัสดุที่สามารถเปลี่ยนแรงทางกลไปเป็นกระแสไฟฟ้า หรือในทางตรงข้ามคือสามารถเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าไปเป็นแรงทางกลได้

มีกลไกการทำงานสองรูปแบบที่นำมาใช้งานกันในผลึกที่เป็นเพียโซอิเล็กทริกโดยทั่วไป และในเซรามิกชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริกบางชนิด รูปแบบแรกคือผลทางตรง (Direct Effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดประจุไฟฟ้าจากการให้แรงทางกล เช่น เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Generator) และผลย้อนกลับ (Converse Effect) ซึ่งการเคลื่อนที่หรือการทำงานทางกลจะเกิดจากการที่ใส่สนามไฟฟ้าเข้าไป เช่น มอเตอร์ (Motor)

2.2 ความเค้น (Stress)

ความเค้น (Stress) คือ อัตราส่วนระหว่างแรงทั้งหมดที่กระทำต่อผิววัตถุกับพื้นที่ผิววัตถุ หรือคือแรงภายนอกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ใช้สัญลักษณ์ว่า σ (Sigma) จากนิยาม เราสามารถหาค่าความเค้นของวัสดุใดๆ ได้จากสมการที่ (2.1)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

กำหนดให้ σ คือ เป็นแรงภายนอกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2))

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อนวัตถุ (ตารางเมตร (m^2))

F คือ แรงภายนอกที่กระทำกับวัตถุ (นิวตัน (N))

เนื่องจากในที่นี้เราจะใช้หน่วยระบบเอสไอ (SI Metric Units) ดังนั้นแรง (F) จึงมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) พื้นที่ (A) มีหน่วยเป็นตารางเมตร () และความเค้น (σ) มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือเรียกว่า ปาสคาล (Pa)

ชนิดของความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. ความเค้นดึง (Tensile Stress) สัญลักษณ์ σ_t จะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงดึง โดยแรงดึงจะต้องตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดที่กระทำนั้น ความเค้นดึงจะให้เครื่องหมายแสดงเป็นบวก
2. ความเค้นอัด (Compressive Stress) สัญลักษณ์ σ_c จะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่ภายใต้แรงอัด โดยแรงอัดจะต้องตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของท่อนวัตถุที่กระทำนั้น ความเค้นอัดจะให้เครื่องหมายแสดงเป็นลบ
3. ความเค้นเฉือน (Shear Stress) สัญลักษณ์ τ (tau) เป็นแรงภายนอกที่มากระทำต่อวัตถุ นั้นโดยพยายามทำให้วัตถุเกิดการขาดจากกันตามแนวระนาบที่ขนานกับทิศทางของแรงนั้น

2.3 พลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ

พลังงานภายในตัวเก็บประจุเกิดจากการเก็บประจุสะสมในตัวเอง ที่ได้จากสร้างเก็บพลังงานจากสิ่งรอบตัวที่ให้พลังงาน ดังสมการที่ (2.2)

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- U คือ พลังงานภายในมีหน่วยเป็นจูล (J)
 - C คือ ความจุประจุมีหน่วยเป็นฟารัด (F)
 - V คือ แรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

การกำเนิดพลังงานของเพียโซอิเล็กทริกนั้น แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริก จะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นต้องต่อวงจรเรียงกระแส เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ที่สามารถหาพลังงานได้จากสูตรดังกล่าว

2.4 ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น ตัวเหนี่ยวนำแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ แบบค่าคงที่และแบบปรับค่าได้ ตัวเหนี่ยวนำเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อินดักเตอร์หรือเรียกย่อ ๆ ว่าตัวแอล (L) หน่วยของการเหนี่ยวนำคือ เฮนรี (Henry)

2.4.1 หลักการเบื้องต้นของตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการปรับความถี่ของเครื่องรับวิทยุและโทรทัศน์โดยอาศัยหลักการของลวดทองแดง นำมาขดหลายๆ รอบที่เรียกว่าคอย (Coil) แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไป เพื่อให้แสดงคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ โครงสร้างประกอบด้วยขดลวด (Coil) พันรอบแกน (Core) ซึ่งแกนนี้อาจจะเป็นแกนอากาศ, แกนเหล็ก, หรือแกนเฟอร์ไรท์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการเหนี่ยวนำไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำชนิดต่างๆ

สัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำเขียนได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับแกนที่ใช้ รูปที่ 4.2(ก) แสดงสัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศ มีลักษณะเป็นขดลวดและมีขาต่อใช้งานสองขา รูปที่ 4.2 (ข) แสดงสัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำแบบที่ใช้แกนเหล็ก มีลักษณะเป็นขดลวดมีขาต่อใช้งาน และมีเส้นตรงอยู่ด้านบนขดลวด 2 เส้น รูปที่ 4.2(ค) แสดงสัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำแบบที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ มีลักษณะเป็นขดลวดมีขาต่อใช้งาน และมีเส้นประอยู่ด้านบนขดลวด 2 เส้น รูปที่ 4.2(ง) แสดงสัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ มีลักษณะคล้ายกับแบบที่ใช้แกนเฟอร์ไรท์ แต่ต่างกันตรงที่มีลูกศรพาดหมายถึงสามารถปรับค่าได้



รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำแบบต่างๆ [2]

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ

ค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปร 4 ประการคือ

1. จำนวนรอบของขดลวดเขียนแทนด้วยอักษร N ถ้าจำนวนรอบของขดลวดมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวด

2. วัสดุที่นำมาทำเป็นแกน เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ μ วัสดุที่นำมาทำเป็นแกนมีหลายชนิด เช่น อากาศ, เหล็ก, เฟอร์ไรต์, โคบอล ฯลฯ เป็นต้น แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่เรียกว่าความซาบซึม (Permeability) แตกต่างกันในกรณีที่มีความซาบซึมมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมาก ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับความซาบซึมของแกน

3. พื้นที่หน้าตัดของแกน เขียนแทนด้วยอักษร A ถ้าพื้นที่ของแกนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับพื้นที่ของแกน

4. ความยาวของแกน เขียนแทนด้วยอักษร l ถ้าความยาวของแกนมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำน้อย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผกผันกับความยาวของแกน

ดังนั้นจะพบว่า ค่าความเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และจำนวนรอบของขดลวด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับค่าคงตัวที่เรียกว่า สภาพให้ซึมผ่านได้หรือเพอร์มิอิตีทีทางแม่เหล็ก (Permeability) ของตัวกลาง ดังสมการ (2.3)

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (2.3)$$

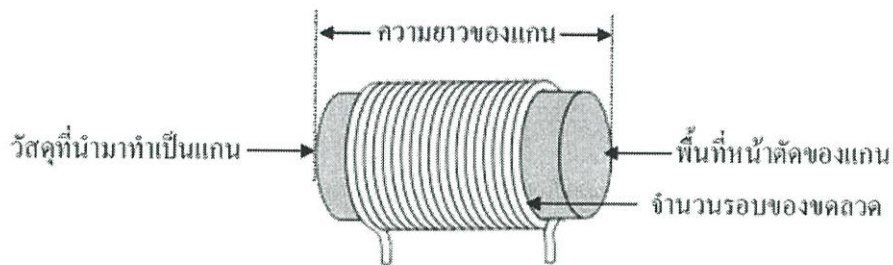
L = ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเฮนรี (H)

N = จำนวนรอบของขดลวดมีหน่วยเป็นรอบ

μ = ค่าคงที่สภาพยอมทางแม่เหล็ก

A = พื้นที่หน้าตัดของแกนมีหน่วยเป็นตารางเป็นตารางเมตร (m^2)

l = ความยาวของแกนหน่วยเป็นเมตร (m)



รูปที่ 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ [6]

2.4.3 ชนิดของตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำที่ผลิตออกมาในปัจจุบันมีหลายแบบหลายขนาด วัสดุที่ใช้ทำแกนที่นิยมก็คือ แกนอากาศ , แกนเหล็ก และแกนเฟอร์ไรท์ เราสามารถแบ่งตัวเหนี่ยวนำได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors) และตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ (Variable Inductors)

2.4.3.1 ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors)

ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors) คือตัวเหนี่ยวนำที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ โดยปกติตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้ ทำมาจากขดลวดทองแดง แกนที่ใช้พันขดลวดจะมีปลายลวดยื่นออกมาทั้งสองข้าง รูปร่างโดยทั่วไปจะเป็นแกนยาวแบบทรงกระบอก มีชื่อเรียกแตกต่างกัน เช่น โซลินอยด์, เซอร์เฟสเมาส์, โซค, ทอร์รอยด์ และแบบแถบสี่ ฯลฯ เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ตัวเหนี่ยวนำแบบคงที่ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.2 ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ (Variable Inductors)

ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ (Variable Inductors) นิยมใช้ในเครื่องรับวิทยุ ค่าการเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุน ที่สามารถปรับสกรูเลื่อนตำแหน่งของขดลวดให้เข้าหรือออก เพื่อเปลี่ยนค่าของความเหนี่ยวนำ ถ้าแกนเคลื่อนที่ออกมาออกสุด ค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่าต่ำ แต่ถ้าหมุนสกรูให้แกนเคลื่อนที่เข้าไปในขดลวดมาก จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ในการปรับควรใช้เครื่องมือที่ทำด้วยพลาสติก หรืออุปกรณ์จำพวกที่ไม่ใช่โลหะ เนื่องจากวัสดุที่ทำมาจากโลหะจะไปรบกวนการเกิดสนามแม่เหล็ก และมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำได้

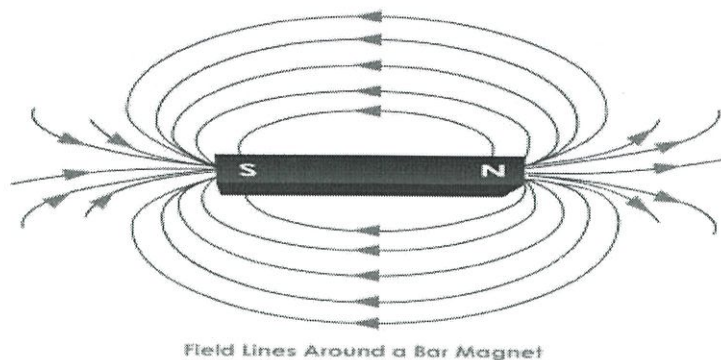


รูปที่ 2.5 ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ [2]

2.5 สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field)

แม่เหล็ก คือ สารแม่เหล็กที่มีโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ สามารถมีแรงกระทำต่อสารแม่เหล็กด้วยกันได้ เมื่อแขวนแม่เหล็กอย่างอิสระขั้วเหนือ (N) จะชี้ทิศขั้วโลกเหนือ ขั้วใต้ (S) จะชี้ทิศขั้วโลกใต้ ทำให้เชื่อว่าโลกมีอำนาจแม่เหล็ก โดยขั้วเหนือ (N) ของแม่เหล็ก อยู่ทางขั้วโลกใต้ทางภูมิศาสตร์ และมีขั้วใต้ (S) ของแม่เหล็กอยู่ทางขั้วเหนือทางภูมิศาสตร์ โดยมีการทำมุมกันเล็กน้อย

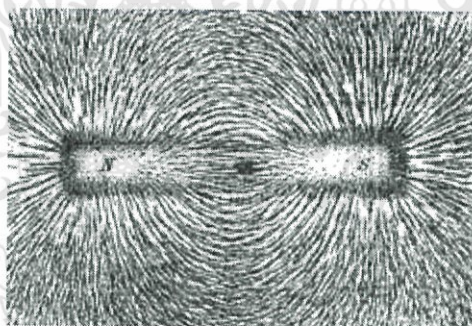
สนามแม่เหล็ก เมื่อมีแม่เหล็กวางอยู่ ณ ที่ใดก็ตาม แม่เหล็กนั้นจะส่งอำนาจแม่เหล็กออกไปรอบตัวในบริเวณนั้น ถ้าเอาแม่เหล็กอื่นหรือวัตถุที่เป็นเหล็กเข้าไปในบริเวณนั้นจะเกิดแรงแม่เหล็กส่งมากระทำทันทีจากแม่เหล็กที่วางอยู่ก่อนนั้น อย่างนี้เราถือว่าแม่เหล็กหรือสารแม่เหล็กที่เราเอาเข้าไปที่หลังไปอยู่ในบริเวณซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กอันแรก ถ้าเราถอยแม่เหล็กหรือสารแม่เหล็กนั้นออกมาให้ห่างมากๆ แรงแม่เหล็กที่เคยเกิดขึ้นดังกล่าวจะหมดไป หมายความว่า แม่เหล็กอันแรกส่งแรงไปกระทำไม่ถึง จึงเห็นได้ว่าสนามแม่เหล็กคือ บริเวณรอบๆ แม่เหล็ก ซึ่งแท่งแม่เหล็กนั้นสามารถส่งอำนาจแม่เหล็กไปถึง



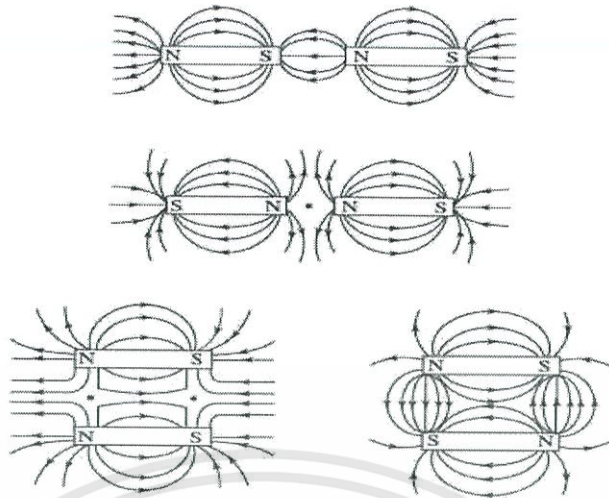
Field Lines Around a Bar Magnet

รูปที่ 2.6 เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศออกจากขั้ว N เข้าหาขั้ว S [3]

เส้นแรงแม่เหล็ก เป็นเส้นที่แสดงทิศของสนามแม่เหล็กรอบๆ แท่งแม่เหล็ก นอกจากนั้นยังแสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วยทิศของสนามคือ ทิศของแรงนี้กระทำกับขั้วเหนือ ในสนามแม่เหล็กเส้นแรงแม่เหล็กแสดงให้เห็นได้โดยใช้ผงเหล็กโรยรอบๆ แท่งแม่เหล็ก หรือการระบุตำแหน่งของเข็มทิศเล็กๆ ณ จุดต่างๆ รอบๆ แท่งแม่เหล็ก การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่จุดๆ หนึ่ง แสดงได้โดยเส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่ชิดกัน เส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่ภายนอกแท่งแม่เหล็กจะมีทิศพุ่งจากขั้ว N และวนเข้าหาขั้ว S ส่วนเส้นแรงแม่เหล็กภายในแท่งแม่เหล็กเอง มีทิศพุ่งจากขั้ว S ไปยังขั้ว N



รูปที่ 2.7 ผงเหล็กที่มีแนวการเรียงตัวแทนสนามแม่เหล็ก [3]



รูปที่ 2.8 จุดสะเทินในสนามแม่เหล็ก เป็นจุดที่ไม่มีความเข้มสนามแม่เหล็ก เกิดจากการหักล้างกันของแรงแม่เหล็ก [3]

2.6 การเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก

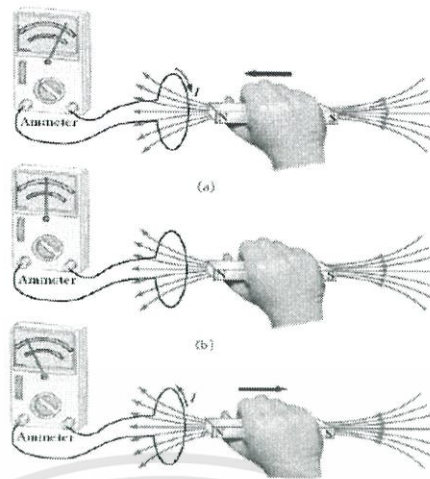
2.6.1 กฎของฟาราเดย์

มีใจความว่า "ในสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในวงจรรปิดใดๆ และจะมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ของวงจรรปิดนั้น" ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นการเหนี่ยวนำสามารถหาได้จากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเทียบกับเวลา ตามสมการที่ (2.4)

$$E = -N \frac{d\phi_B}{dt} \quad (2.4)$$

E = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (V), N = จำนวนรอบขดลวด

โดยที่เครื่องหมายลบที่ปรากฏในสมการเป็นผลมาจากกฎของเลนซ์ตั้งรูปที่ 2.9

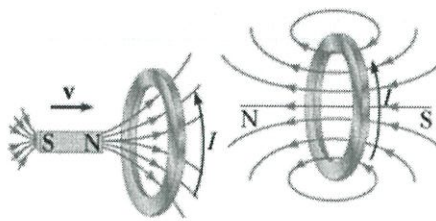


รูปที่ 2.9 กฎของฟาราเดย์ [4]

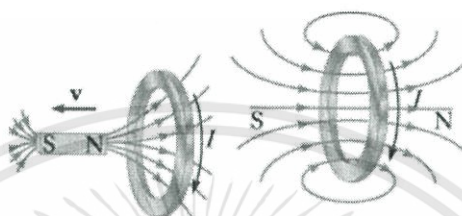
จากรูปที่ 2.9 เมื่อแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหาห่วงซึ่งติดอยู่กับกัลวานอมิเตอร์เข็มของมันจะเบนไปดังรูปแสดงว่ามีการเหนี่ยวนำกระแสในห่วง (a) เมื่อถือแท่งแม่เหล็กนิ่งๆ ไม่มีการเหนี่ยวนำกระแสในห่วง (b) เมื่อแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ห่างจากห่วงมีการเหนี่ยวนำกระแสในทิศทางตรงข้าม

2.6.2 กฎของเลนซ์ (Lenz's law)

เป็นกฎที่ให้ทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งมีใจความว่า “แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดจะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในทิศทางที่จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กใหม่ขึ้นมาต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กเดิมที่ตัดผ่านขดลวดนั้น” นั่นคือกระแสเหนี่ยวนำมีแนวโน้มที่จะรักษาฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งผ่านขดลวดไม่ให้เปลี่ยนแปลง (เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน)



(ก) การเคลื่อนที่ของแท่งเหล็กเข้าหาห่วงตัวนำ



(ข) การเคลื่อนที่ของแท่งเหล็กเข้าหาห่วงตัวนำ

รูปที่ 2.10 กฎของเลนซ์ [5]

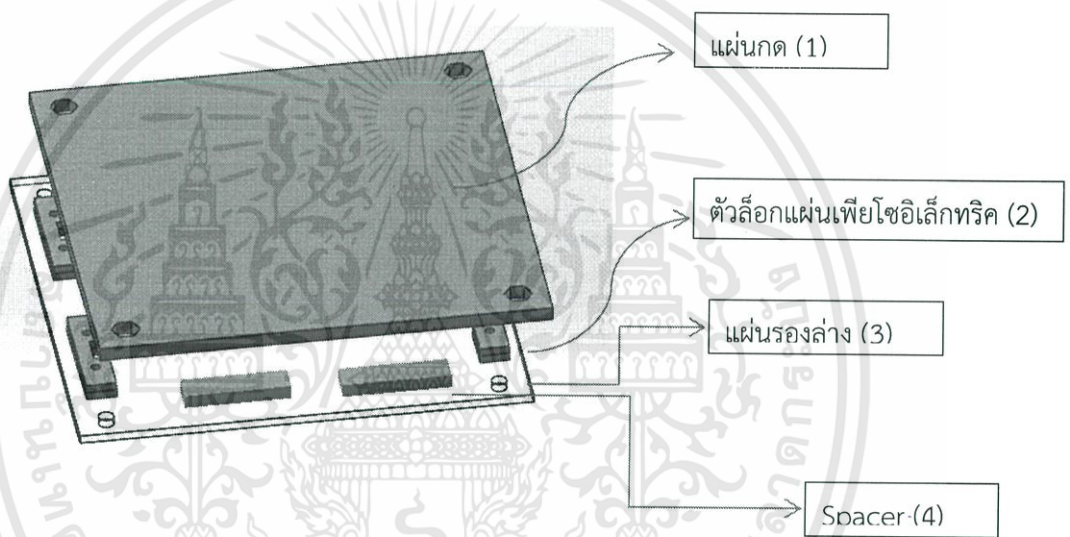
จากรูปที่ 2.10 เมื่อแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหาห่วงตัวนำที่หยุดนิ่งกระแสเหนี่ยวนำมีทิศดังรูป(ก) กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งมีทิศไปทางซ้ายด้านการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กจากภายนอกทางด้านขวามือที่เพิ่มขึ้น เมื่อแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ออกจากห่วงตัวนำที่หยุดนิ่งกระแสเหนี่ยวนำมีทิศดังรูป(ข) คือกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งมีทิศไปทางขวาด้านการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แม่เหล็กจากภายนอกทางด้านขวามือที่ลดลง

บทที่ 3

แนวคิดและการออกแบบ

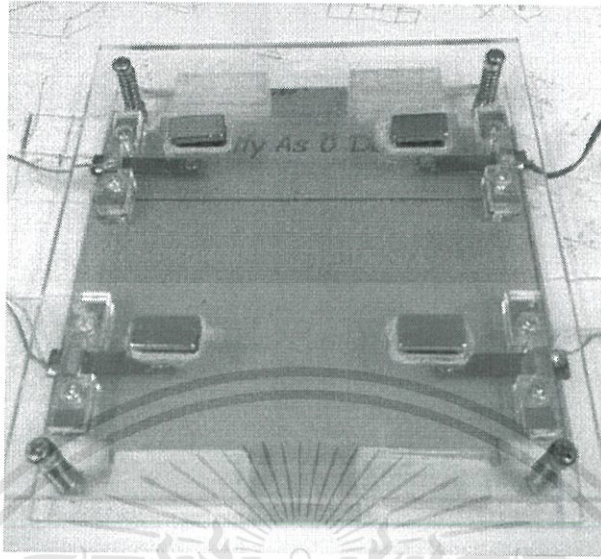
3.1 การออกแบบตัวต้นแบบ

ในการออกแบบตัวต้นแบบชุดทดลองขึ้นมาเพื่อวิเคราะห์หาพฤติกรรมของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก และขนาดของแม่เหล็ก มีรายละเอียดดังนี้ โดยโครงสร้างพื้นฐานกำเนิดพลังงานจะใช้อะคริลิก โดยโครงสร้างมี 4 ส่วนหลักๆ คือ แผ่นกอด (1) เพื่อรองรับแรงจากการเดิน และตัวล็อกแผ่นเพียโซอิเล็กทริก (2) เพื่อให้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกไม่มีการเคลื่อนที่เมื่อได้รับแรงมากระทำ และแผ่นรองล่าง (3) เพื่อเป็นตัวที่ยึดตัวล็อกแผ่นเพียโซอิเล็กทริก และ Spacer (4) เพื่อเป็นตัวกำหนดระยะ Gap ที่ต้องการศึกษา ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 พื้นต้นแบบของชุดทดลอง

3.1.1 ตัวต้นแบบ PZT

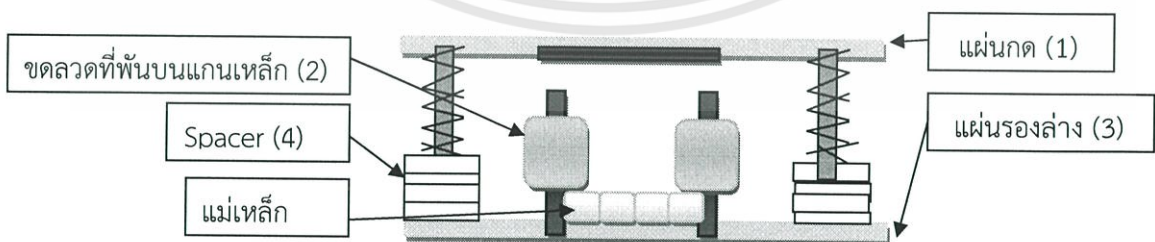


รูปที่ 3.2 พื้นต้นแบบชุดทดลอง PZT

เมื่อพื้นกำเนิดพลังงานแบบชุดทดลองได้รับพลังงานจากการเดินผ่าน ทำให้แผ่นกดที่มีแม่เหล็กกดลงไปถึงตัวสเปเซอร์ ทำให้แม่เหล็กที่ติดอยู่ที่แผ่นกดและวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ทำให้แรงระหว่างแม่เหล็กทั้งสองทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีการเคลื่อนที่ที่ทำให้กำเนิดแรงดันไฟฟ้า AC

3.1.2 ตัวต้นแบบวงจรแม่เหล็ก

ในการออกแบบตัวต้นแบบชุดทดลองแบบวงจรแม่เหล็กขึ้นมา เพื่อวิเคราะห์หาพฤติกรรมของจำนวนขดลวด จำนวนแม่เหล็ก และระยะ Gap มีรายละเอียดดังนี้ โดยโครงสร้างพื้นกำเนิดพลังงานจะใช้ อะคริลิก โดยโครงสร้างมี 5 ส่วนหลักๆ คือ แผ่นกด (1) เพื่อรองรับแรงจากการเดินซึ่งมีแกนยึดติดอยู่ด้วย และขดลวดที่พันบนแกนเหล็ก (2) เพื่อเป็นตัวเหนี่ยวนำในการเหนี่ยวนำเมื่อมีแรงมากกระทำ และแผ่นรองล่าง (3) เพื่อเป็นตัวที่ยึดตัวล๊อคแกนเหล็กที่พันขดลวด และ Spacer (4) เพื่อเป็นตัวรองที่ปรับระยะของ Gap ให้ได้ตามที่ต้องการ และแม่เหล็ก (5) ดังรูปที่ 3.3



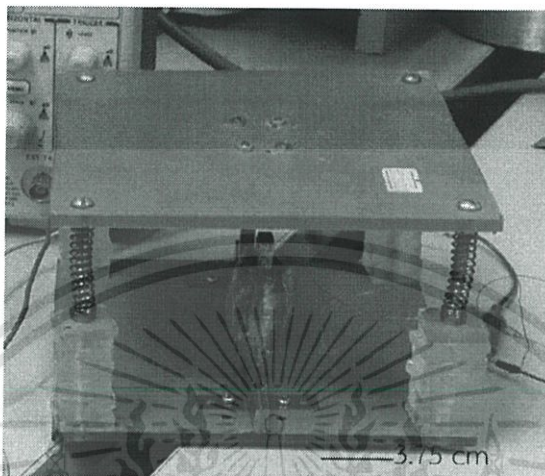
รูปที่ 3.3 พื้นต้นแบบชุดทดลองแบบวงจรแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นแบบชุดทดลองแบบวงจรแบบแม่เหล็ก มี 3 ลักษณะ ดังนี้

1. ต้นแบบ Type A

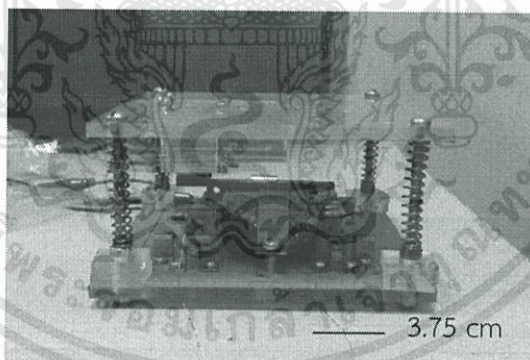
ตัวต้นแบบชุดทดลองแนวตั้งดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชุดทดลองแนวตั้ง

2. ต้นแบบ Type B

ตัวต้นแบบชุดทดลองแนวนอนดังรูปที่ 3.5

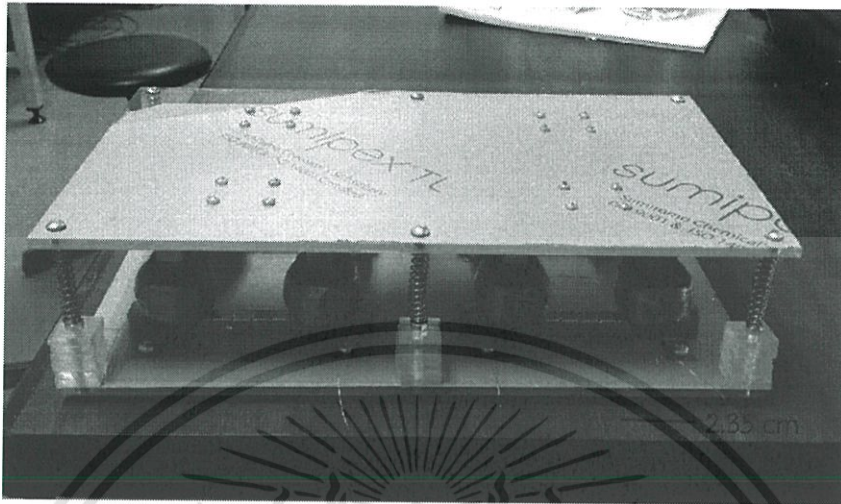


รูปที่ 3.5 ชุดทดลองแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ดันแบบ Type C

ชุดทดลองแนวตั้งแบบขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบี้น ดังรูปที่ 3.6

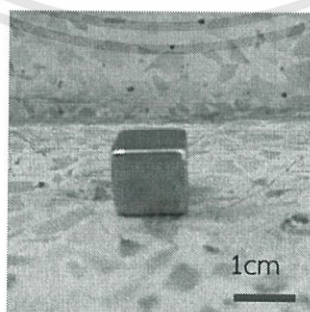


รูปที่ 3.6 ชุดทดลองแนวตั้งแบบขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบี้น

เมื่อพื้นกำเนิดพลังงานแบบชุดทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้รับพลังงานจากการเดินผ่าน ทำให้แผ่นกดที่มีแม่เหล็กกดลงไปถึงตัวสเปเซอร์ทำให้วงจรแม่เหล็กครบวงจร และเมื่อเอาออก แผ่นกดจะดึงกลับเนื่องจากแรงสปริง ทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของวงจรแม่เหล็กทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า AC ออกมา ประกอบด้วยอุปกรณ์ส่วนหลักๆ ที่สำคัญคือ

3.1.2.1 แม่เหล็ก

แม่เหล็กเป็นหนึ่งในสองส่วนประกอบที่สำคัญของพื้นกำเนิดพลังงาน เนื่องจากแม่เหล็กเป็นส่วนที่ทำให้เกิดกระบวนการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเกิดขึ้น ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องมีการเลือกขนาด $10*10*10\text{mm}$ สำหรับคุณสมบัติแม่เหล็กที่เลือกใช้คือเลือกใช้แม่เหล็กแรงสูงแบบถาวร แม่เหล็กแรงสูงนีโอไดเมียม (NdFeB) มีส่วนผสมของแร่หายากชนิดหนึ่งคือ แร่ นีโอไดเมียม ซึ่งมีค่าพลังงานแม่เหล็กถาวรที่มากที่สุดและเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายดังรูปที่ 3.7

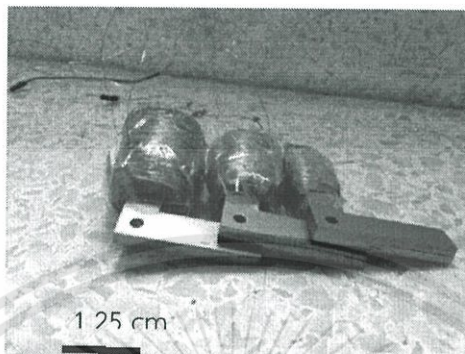


รูปที่ 3.7 แม่เหล็กในชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.2 ขดลวดตัวนำ

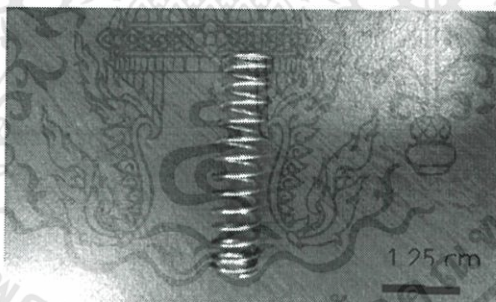
ขดลวดตัวนำเป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของพื้นกำเนิดพลังงานต้นแบบ จำนวนรอบที่พันขดลวดมีขนาด 1000, 3000 และ 5000 รอบ โดยจำนวนขดลวดล้วนมีผลต่อการเหนี่ยวนำทั้งสิ้น กล่าวได้คือ ยิ่งจำนวนรอบที่พันมาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ก็จะมากตาม ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ขดลวดตัวนำในชุดทดลอง

3.1.2.3 สปริง

สปริงเป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของพื้นกำเนิดพลังงานต้นแบบ เมื่อกดแผ่นกดลงไปจนถึงแกนที่ยึดแผ่นรอง สปริงจะทำหน้าที่ต้านแรงกดและเป็นแรงส่งให้แผ่นกดติดตัวกลับ ส่งผลให้เกิดเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ไฟฟ้าในทันทีทำให้เหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้น



รูปที่ 3.9 สปริงในชุดทดลอง

3.2 การออกแบบการทดลอง

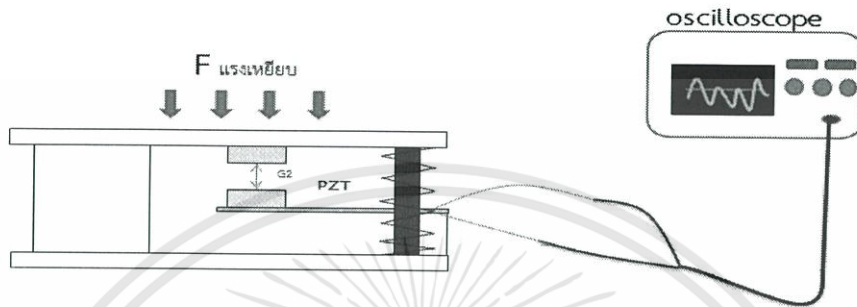
3.2.1 การทดลองแบบ PZT

การทดสอบโครงสร้างพื้นเก็บพลังงาน แบบ PZT แบ่งออกเป็น 2 การทดลองคือ การทดสอบระยะ Gap และการทดสอบเก็บพลังงานที่ตัวเก็บประจุ 22, 33, 47 μF โดยใช้ PZT 4 ตัว โดยมีเงื่อนไขคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

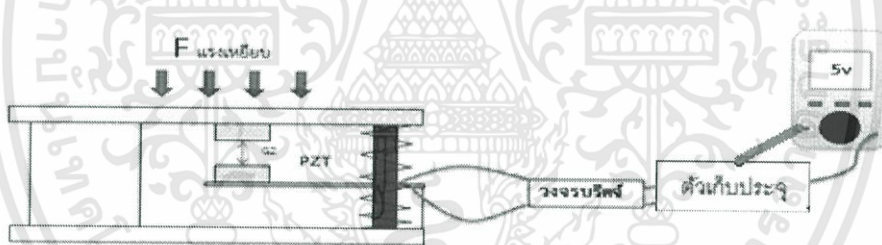
1. คนที่ทดสอบที่มีน้ำหนัก อยู่ในช่วง 55-65 Kg
2. ระยะ Gap ระหว่างแม่เหล็กทั้งสองอันคือ 2, 3 mm โดยมีสเปเซอร์ เป็นตัวกำหนดระยะ Gap

3.2.1.1 การทดสอบระยะ Gap กับโครงสร้างพื้นเก็บพลังงาน



รูปที่ 3.10 วิธีการทดสอบระยะ Gap

3.2.1.2 การทดสอบการเก็บพลังงานผ่าน C ของโครงสร้างพื้นเก็บพลังงาน



รูปที่ 3.11 วิธีการทดสอบการเก็บพลังงานผ่าน C

เหียบ 15 ครั้งในช่วงเวลา 10 วินาที วัด V ใน C โดยมีการ Discharge แล้วหา Energy ที่ค่า C = 22, 33, 47 μF

3.2.2 การทดลองแบบวงจรแม่เหล็ก

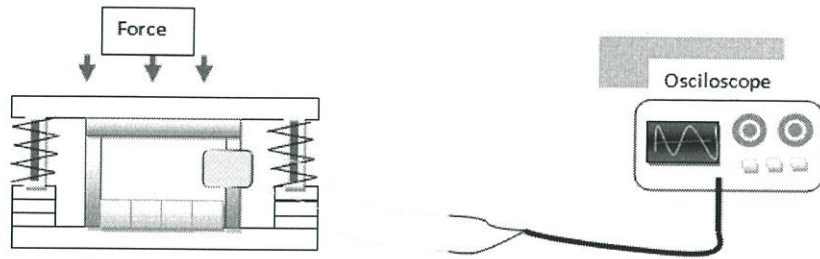
การทดสอบโครงสร้างพื้นเก็บพลังงาน แบบวงจรแม่เหล็ก แบ่งออกเป็น 3 การทดลอง คือ การทดสอบที่ No Load, Load, ขนานอนุกรม ,การทดสอบเก็บพลังงานที่ C 22 μF และวงจรเก็บพลังงาน โดยทำการทดลองโดยมีเงื่อนไขคือ

คนที่ทดสอบที่มีน้ำหนัก อยู่ในช่วง 55-65 Kg

ระยะ Gap ระหว่างแกนเหล็กทั้งสองอันคือ 5, 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

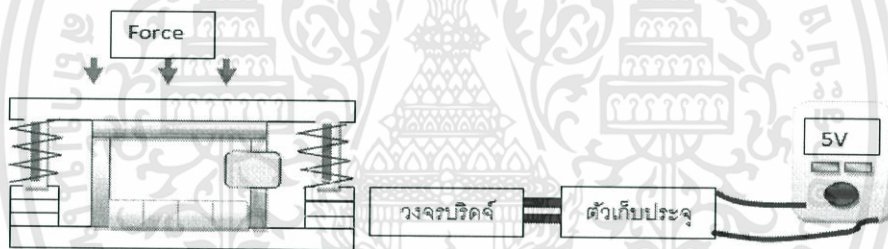
3.2.2.1 การทดสอบที่ No Load



รูปที่ 3.12 วิธีการทดสอบที่ No Load

ทำการกดไปที่ชุดทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยที่ชุดทดลองต่อกับออสซิลอสโคปแล้ว
วัดสัญญาณ

3.2.2.2 การทดสอบเก็บพลังงานที่ C

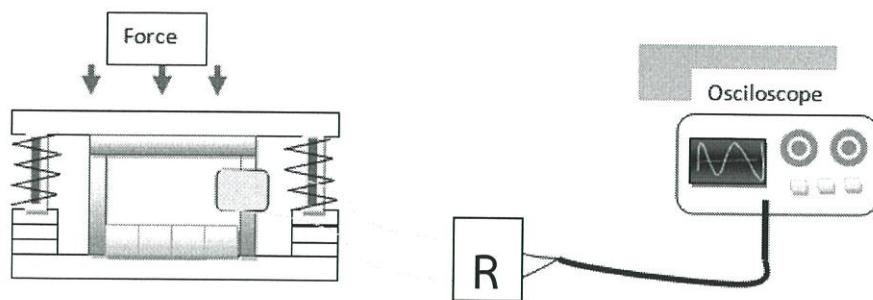


รูปที่ 3.13 วิธีการทดสอบการเก็บพลังงาน

ทำการกดไป 10 ครั้งที่ชุดทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยที่ชุดทดลองต่อวงจรวัดจลจ
แล้วใช้มิเตอร์วัดแรงดันที่ตกร้อมตัวเก็บประจุแล้วหาพลังงาน

3.2.2.3 Load

ทำการกดไปที่ชุดทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยที่ชุดทดลองต่อตัวต้านทานแล้วใช้ออส
ซิลอสโคปวัด



รูปที่ 3.14 วิธีการทดสอบที่ Load

3.2.2.4 ขนานอนุกรม



รูปที่ 3.15 วิธีการทดสอบการขนานอนุกรม

ทำการกดไปที่ชุดทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์นำขดลวดมาขนานและอนุกรม โดยที่ชุดทดลองต่อกับออสซิลอโคปแล้ววัดสัญญาณ

3.2.2.5 วงจรเก็บพลังงาน



รูปที่ 3.16 วิธีการทดสอบวงจรเก็บพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 การทดลอง

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่สำคัญคือ การทดลองของ PZT และการทดลองของ ชุดอิเล็กทรอนิกส์ โดยเริ่มต้นจากการทดลองของ PZT ทำการทดสอบโดยอาศัยแรงจากการเหยียบที่ไปกระทำต่อต้นแบบชุดทดลอง PZT ทำให้เกิดความเค้นแล้วเปลี่ยนรูปพลังงานเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการทดลองของ PZT แบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ การทดลองของโครงสร้างแบบแม่เหล็กคู่ติดกัน และ ผลักกัน ซึ่งในแต่ละส่วนจะประกอบไปด้วยการทดลองย่อยคือ การทดสอบระยะ และการทดสอบเก็บพลังงานในตัวเก็บประจุ และต่อไปเป็นการทดลองของวงจรแม่เหล็ก เป็นการทดลองที่อาศัยหลักการเหนี่ยวนำของขดลวดและแม่เหล็กที่ทำให้แรงดันไฟฟ้า โดยการทดลองของวงจรแม่เหล็กจะแบ่งเป็น 4 ส่วนที่สำคัญคือ การทดสอบของต้นแบบ Type A, Type B, Type C และขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบี้ โดยเริ่มจากการทดสอบของต้นแบบ Type A ประกอบด้วยการทดสอบแบบ No Load, เก็บพลังงานในตัวเก็บประจุ, ขนานอนุกรม, ต่อ Load และการทดสอบกับวงจรเก็บพลังงาน LC-3588-1 เพื่อหาความสัมพันธ์ของระยะ Gap, จำนวนขด และจำนวนแม่เหล็กว่ามีผลอย่างไร ต่อไปจะเป็นการทดสอบของต้นแบบ Type B เป็นการทดสอบทิศการของแนวเส้นแรงแม่เหล็กและแรงที่กระทำที่ผลต่อกันอย่างไรเพื่อลดปริมาตรของชุดทดลองให้ดูเล็กลง โดยการทดสอบประกอบด้วยแบบ No Load, พลังงานสะสมในตัวเก็บประจุ, ขนานอนุกรม, No Load ต่อจากนั้นเป็นการทดสอบของขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบี้เพื่อทดสอบว่าการพันบนแกนเหล็ก และการพันขดลวดบนแกนบ็อบบี้มีผลอย่างไร โดยการทดสอบของขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบี้จะทำการทดลองที่เหมือนกันกับการทดสอบต้นแบบ Type B แล้วนำผลที่การทดลองของ A, B และขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบี้ มาออกต้นแบบ Type C โดยการทดสอบต้นแบบ Type C จะเป็นการทดสอบการหาแรงดันและพลังงานใน 2 รูปแบบ คือการนำชุดวงจรแม่เหล็กแต่ละชุดผ่านวงจรบริดจ์แล้วนำมาขนานกัน และ การนำชุดวงจรแต่ละชุดมาขนานกันแล้วต่อวงจรบริดจ์ ว่าแบบใดที่ให้แรงดันและพลังงานมากกว่า

4.2 โครงสร้างพื้นเก็บพลังงานแบบแม่เหล็กผลักกัน

4.2.1 ผลการทดสอบระยะ Gap กับโครงสร้างพื้นเก็บพลังงาน

จะเดินผ่านต้นแบบพื้นกำเนิดพลังงาน ที่ระยะ Gap ก่อนเหยียบ $G1 = 10 \text{ mm}$ หลังจากเดินผ่านทำให้ระยะ Gap หลังเหยียบมีค่า $G2 = 2 \text{ mm}$ และ 3 mm แล้วใช้ออสซิลอสโคปวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยทำการทดลอง 10 ครั้ง พบว่ามีค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 แสดงแรงดันเฉลี่ยของการทดสอบระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 2$ mm

V p-p	V max	V min
18.072	9.600	-8.472

ตารางที่ 4.2 แสดงแรงดันเฉลี่ยของการทดสอบระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 3$ mm

V p-p	V max	V min
15.560	8.832	-6.728

จากการทดสอบระยะ Gap ระหว่างแม่เหล็กทั้งสองตัวที่กระทำต่อกันมีระยะหลังเหยียบ $G2 = 2$ mm จะให้แรงดันไฟฟ้ามากกว่า ระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 3$ mm เนื่องจากแรงระหว่างแม่เหล็กทั้งสองผลึกกันแบบระยะหลังเหยียบ $G2 = 2$ mm มากกว่า ระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 3$ mm ทำให้เพียโซอิเล็กทริกมีการเคลื่อนที่มากกว่า ซึ่งส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

4.2.2 ผลการทดสอบการเก็บพลังงานผ่าน C ของโครงสร้างพื้นเก็บพลังงาน

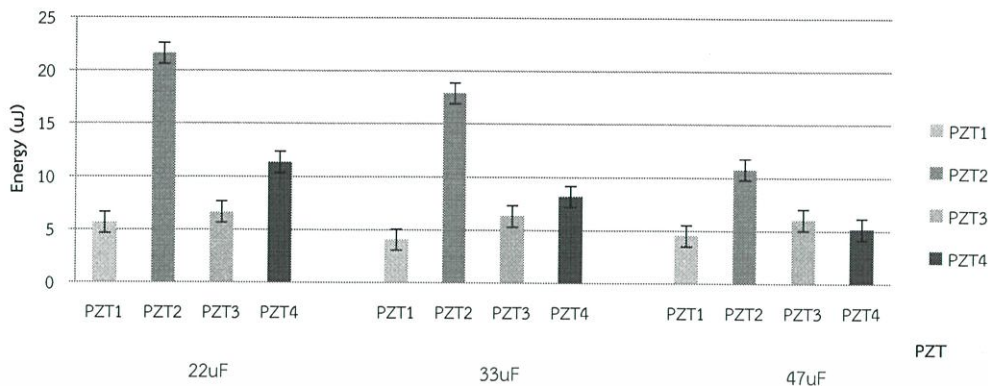
ในการทดลองนี้ จะทำการเหยียบ 15 ครั้งลงไปบนพื้นชุดทดลอง ในช่วงเวลา 10 วินาทีวัดแรง V ใน C โดยมีการ Discharge แล้วหา Energy ที่ค่า Capacitor มีค่า 22, 33, 47 μ F ที่ระยะ Gap ก่อนเหยียบ $G1 = 10$ mm ระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 2$ mm และ 3 mm

4.2.2.1 ระยะ Gap ก่อนเหยียบ $G1 = 10$ mm ระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 2$ mm

จะใช้ PZT 4 ตัว ในการทดลองเพื่อหาว่า PZT แต่ละตัวให้พลังงานออกมาเป็นอย่างไร และที่ค่า Capacitor ต่างๆ โดยแบ่งออกเป็นกรทดลองย่อยๆ ดังนี้ คือ

1. การทดสอบ PZT 1 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแส

จากการทดลองกระทำการเหยียบ 15 ครั้งลงไปบนพื้นชุดทดลอง ในช่วงเวลา 10 วินาทีวัดแรง V ใน C โดยมีการ Discharge แล้วหา Energy ที่ค่า Capacitor มีค่า 22, 33, 47 μ F ทำการทดลอง 10 ครั้ง พบว่ามีเฉลี่ยดังรูปที่ 4.1

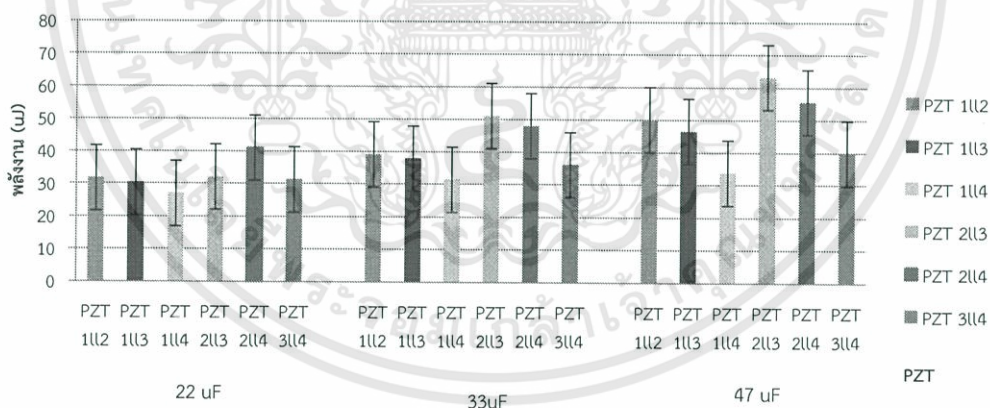


รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor ของ PZT 1 ตัว

จากรูปที่ 4.1 พบว่า PZT2 มีพลังงานที่สะสมตัวเก็บประจุ 22, 33, 47 μF มีค่าสูงกว่า PZT1, PZT2, PZT3 และแตกต่างกันในตัวเก็บประจุแต่ละค่า เพราะ PZT แต่ละตัวมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ต่างกัน แม้ PZT จะเป็นรุ่นเดียวกัน

2. การทดสอบ PZT 2 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วขนานกัน

จากการทดลองกระทำการเหยียบ 15 ครั้งลงไปบนพื้นชุดทดลอง ในช่วงเวลา 10 วินาทีวัดแรง V ใน C โดยมีกร Discharge แล้วหา Energy ที่ค่า Capacitor มีค่า 22, 33, 47 μF ทำการทดลอง 10 ครั้ง พบว่ามีเฉลี่ยดังนี้



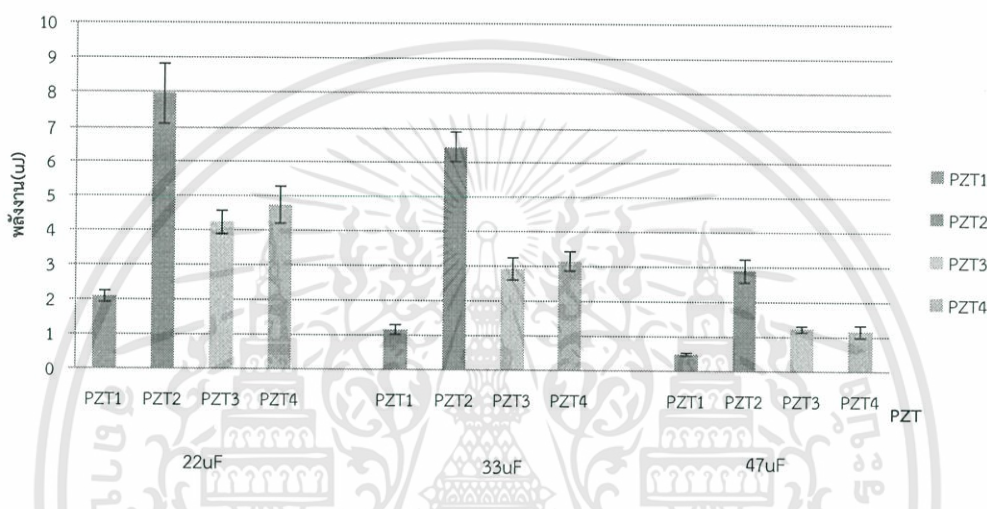
รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor PZT 2 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วขนานกัน

จากทดลองพบว่า PZT2 ตัวผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วขนานกัน พบว่าพลังงานที่ได้มีค่าสูงกว่า PZT1 ตัวผ่านวงจรเรียงกระแสค่อนข้างมาก จากรูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor ของ PZT1 ตัว PZT2 เป็นตัวที่ให้พลังงานสูงสุด เมื่อผ่านแล้ววงจรเรียงกระแสแล้วมาขนานกันกับ PZT ตัวอื่นๆ ทำให้มีค่าที่สูงไปด้วย

4.2.2.2 ระยะ Gap ก่อนเหยียบ $G1 = 10 \text{ mm}$ ระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 3 \text{ mm}$
 จะใช้ PZT 4 ตัว ในการทดลองเพื่อหาว่า PZT แต่ละตัวให้พลังงานออกมาเป็นอย่างไร และ
 ที่ค่า Capacitor ต่างๆ โดยแบ่งออกเป็นกรทดลองย่อยๆ ดังนี้ คือ

1. การทดสอบ PZT 1 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแส

จากการทดลองกระทำการเหยียบ 15 ครั้งลงไปบนพื้นชุดทดลอง ในช่วงเวลา 10 วินาทีวัด
 แรง V ใน C โดยมีการ Discharge แล้วหา Energy ที่ค่า Capacitor มีค่า 22, 33, 47 μF ทำการ
 ทดลอง 10 ครั้ง พบว่ามีเฉลี่ยดังนี้

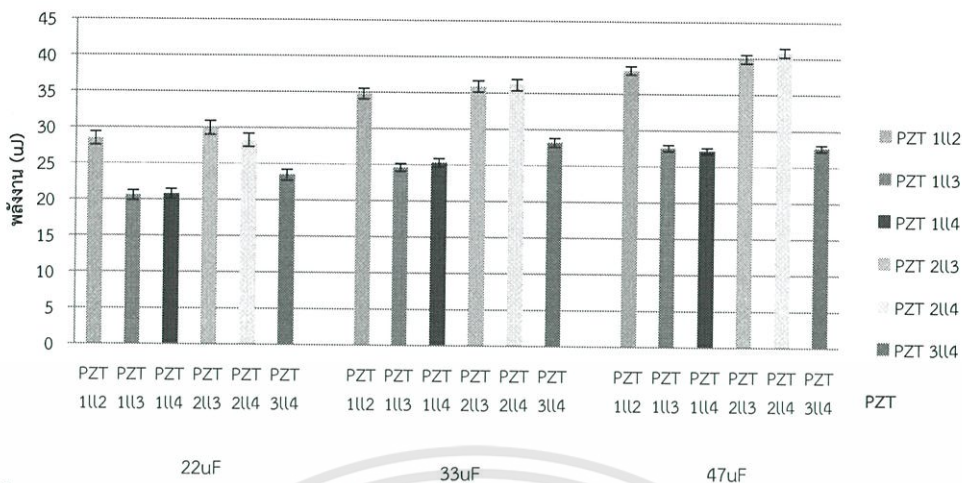


รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor ของ PZT 1 ตัว

จากรูปที่ 4.3 พบว่า PZT 2 มีพลังงานมากกว่า PZT1, PZT3 ในตัวเก็บประจุ 22, 33, 47 μF มีค่าสูง และแตกต่างกันในค่า capacitor เพราะ PZT แต่ละตัวมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ต่างกัน แม้ PZT จะเป็นรุ่นเดียวกัน

2. การทดสอบ PZT 2 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วขนานกัน

จากการทดลองกระทำการเหยียบ 15 ครั้งลงไปบนพื้นชุดทดลอง ในช่วงเวลา 10 วินาทีวัด
 แรง V ใน C โดยมีการ Discharge แล้วหา Energy ที่ค่า Capacitor มีค่า 22, 33, 47 μF ทำการ
 ทดลอง 10 ครั้ง พบว่ามีเฉลี่ยดังนี้



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor PZT 2 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วขนานกัน

จากผลการทดลองพบว่า PZT 2 ตัวผ่านวงจรเรียงกระแส แล้วขนานกันพบว่าพลังงานที่ได้มีค่าสูงกว่า PZT 1 ตัวผ่านวงจรเรียงกระแสก่อนมาก จากรูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor ของ PZT 1 ตัว PZT2 เป็นตัวที่ให้พลังงานสูงสุดเมื่อผ่านแล้ววงจรเรียงกระแสแล้วมาขนาดกันกับ PZT ตัวอื่นๆ ทำให้มีค่าที่สูงไปด้วย

4.3 โครงสร้างพื้นเก็บพลังงานแบบแม่เหล็กดูดกัน

4.3.1 ผลการทดสอบระยะ Gap กับโครงสร้างพื้นเก็บพลังงาน

จะเดินผ่านต้นแบบพื้นกำเนิดพลังงาน ที่ระยะ Gap ก่อนเหยียบ $G1 = 10 \text{ mm}$ หลังจากเดินผ่านทำให้ ระยะ Gap หลังเหยียบมีค่า $G2 = 2 \text{ mm}$ และ 3 mm แล้วใช้ออสซิลอโคปวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยทำการทดลอง 10 ครั้ง พบว่ามีค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 แสดงแรงดันเฉลี่ยของการทดสอบระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 2 \text{ mm}$

V p-p	V max	V min
28.34	18.84	-9.50

ตารางที่ 4.4 แสดงแรงดันเฉลี่ยของการทดสอบระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 3 \text{ mm}$

V p-p	V max	V min
29.90	19.22	-10.68

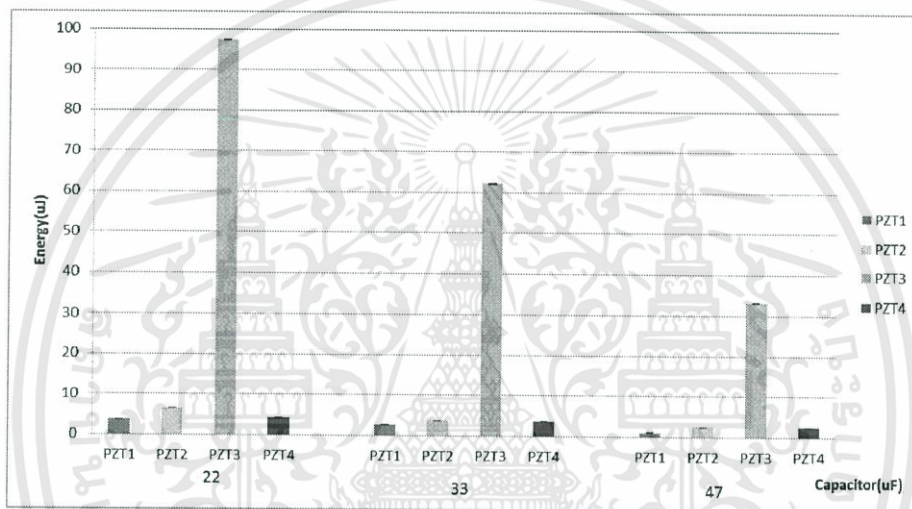
จากการทดสอบระยะ Gap ระหว่างแม่เหล็กทั้งสองตัวที่มีการกระทำต่อกันมีระยะหลังเหยียบมีระยะ $G2 = 3 \text{ mm}$ จะให้แรงดันไฟฟ้ามากกว่าระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 2 \text{ mm}$

เนื่องจากแรงระหว่างแม่เหล็กทั้งสองดูดกันแบบระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 3 \text{ mm}$ มากกว่าระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 2 \text{ mm}$ ทำให้เพียโซอิเล็กทริกมีการเคลื่อนที่มากกว่า ซึ่งส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

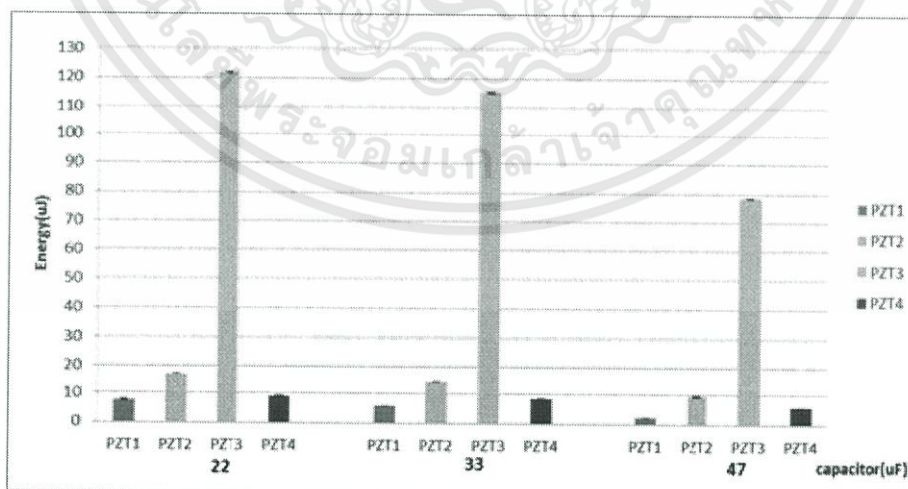
4.3.1.1 การทดสอบ PZT 1 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแส

จากการทดลองกระทำการเหยียบ 15 ครั้งลงไปบนพื้นชุดทดลอง ในช่วงเวลา 10 วินาทีวัดแรง V ใน C โดยมี การ Discharge แล้วหา Energy ที่ค่า Capacitor มีค่า 22, 33, 47 μF ทำการทดลอง 10 ครั้ง พบว่ามีเฉลี่ยดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6

ระยะ Gap ก่อนเหยียบ $G1 = 10 \text{ mm}$ ระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 2 \text{ mm}$ และ $G2 = 3 \text{ mm}$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor PZT 1 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแสที่ $G2=2\text{mm}$



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor PZT 1 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแสที่ $G2=3\text{mm}$

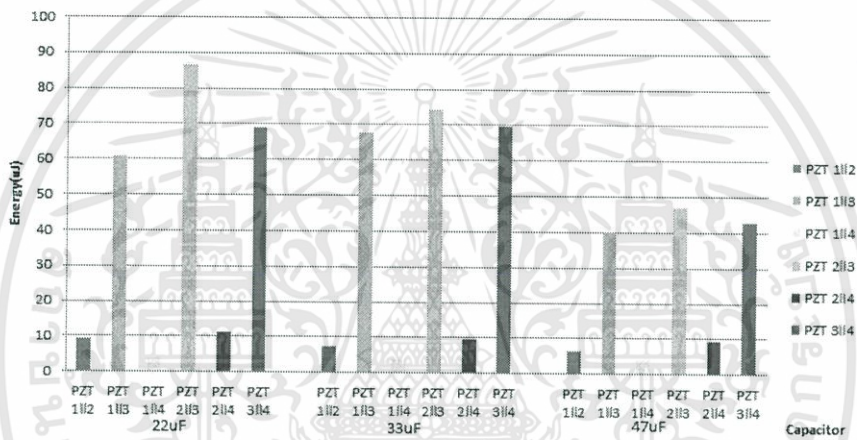
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 พบว่า PZT3 มีพลังงานที่สูงกว่า PZT1, PZT2, PZT4 ใน Capacitor 22, 33, 47 μF และที่ Gap หลังเหยียบ 3 mm จะมีพลังงานสูงกว่าที่ Gap หลังเหยียบ 2mm ส่วน PZT1, PZT2, PZT4 มีค่าพลังงานใกล้เคียงกันแต่ที่ Gap หลังเหยียบ 3 mm จะมีพลังงานสูงกว่าที่ที่ Gap หลังเหยียบ 2 mm ด้วย

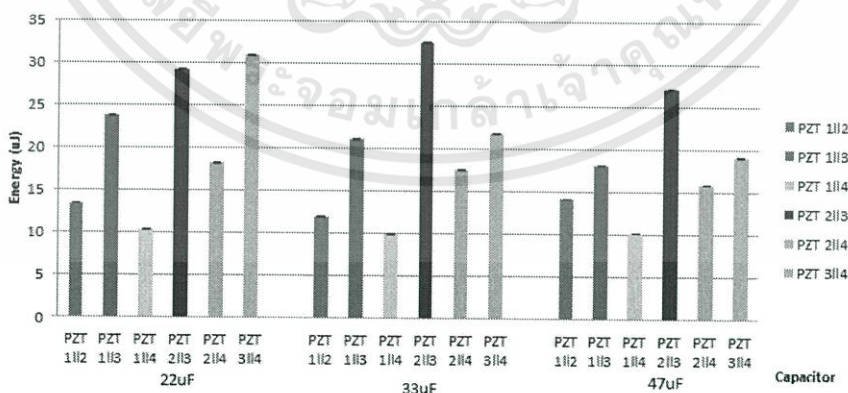
4.3.1.2 PZT 2 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วขนานกัน

จากการทดลองกระทำการเหยียบ 15 ครั้งลงไปบนพื้นชุดทดลอง ในช่วงเวลา 10 วินาทีวัดแรง V ใน C โดยมีการ Discharge แล้วหา Energy ที่ค่า Capacitor มีค่า 22, 33, 47 μF ทำการทดลอง 10 ครั้ง พบว่ามีเฉลี่ยดังรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8

ระยะ Gap ก่อนเหยียบ $G1 = 10 \text{ mm}$ ระยะ Gap หลังเหยียบ $G2 = 2 \text{ mm}$ และ $G2 = 3 \text{ mm}$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor PZT 2 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วขนานกัน $G2 = 2 \text{ mm}$



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor PZT 2 ตัว ผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วขนานกัน $G2 = 3 \text{ mm}$

จากผลการทดลองพบว่า PZT 2 ตัวผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วขนานกันพบว่าพลังงานที่ได้มีค่าสูงกว่า PZT 1 ตัวผ่านวงจรเรียงกระแสค่อนข้างมาก จากรูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบพลังงานที่ค่า Capacitor ของ PZT 1ตัว PZT2 เป็นตัวที่ให้พลังงานสูงสุดเมื่อผ่านแล้ววงจรเรียงกระแสแล้วมาขนานกันกับ PZT ตัวอื่นๆ ทำให้มีค่าที่สูงไปด้วย

4.4 ผลการทดลองของต้นแบบ Type A

4.4.1 ผลการทดลองวงจรที่ No Load

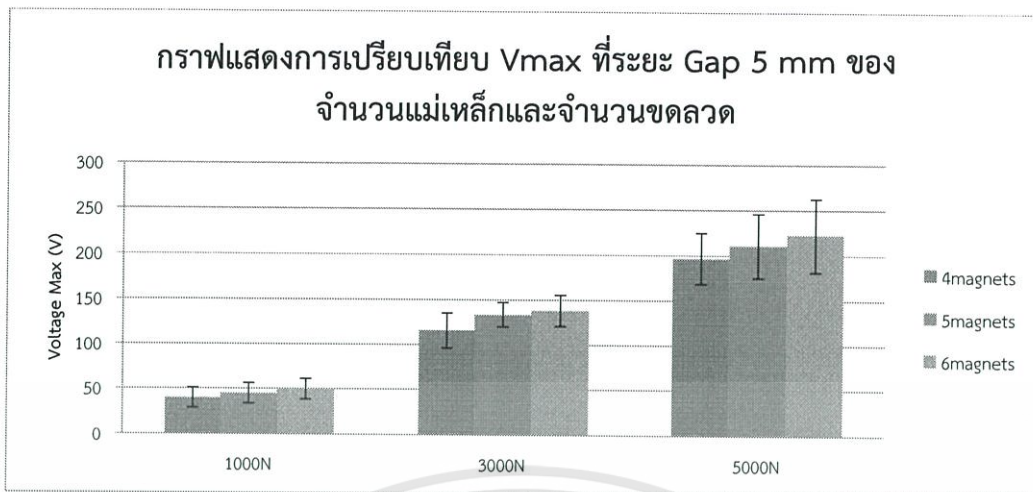
4.4.1.1 การทดสอบที่ระยะ Gap 5 mm

จะทำการทดลองกับชุดทดลองวงจรแม่เหล็ก โดยทำการเปลี่ยนตัวแกนเหล็กซึ่งมีลวดพันทับจำนวน 1000, 3000 และ 5000 รอบ แล้วเปลี่ยนจำนวนแม่เหล็กที่ใช้โดยมีจำนวน 4, 5, 6 ตัว ซึ่งพบว่า จำนวนขดลวดมากขึ้นและจำนวนแม่เหล็กที่มีค่ามาก จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้มีมากขึ้นไปด้วยดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบ Vp-p ที่ระยะ Gap 5 mm

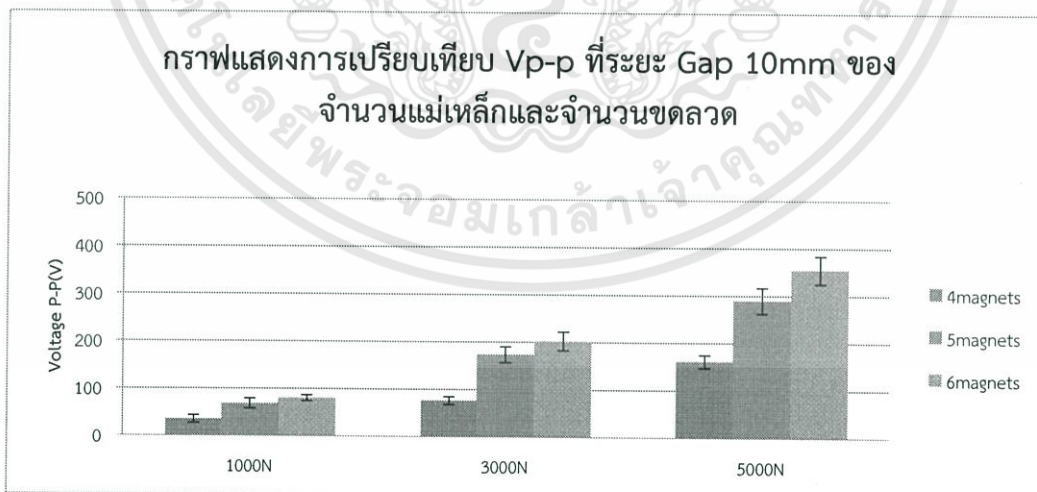
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบ Vmax ที่ระยะ Gap 5 mm

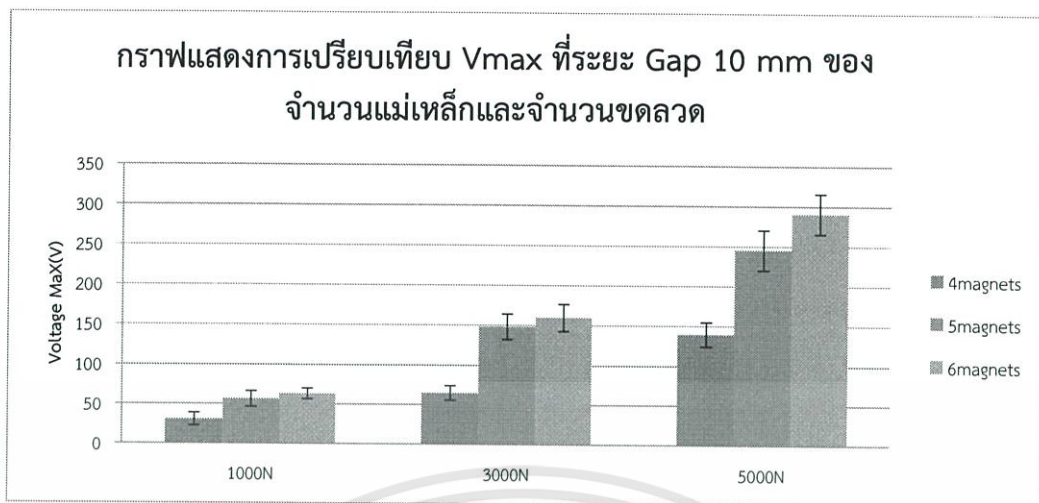
4.4.1.2 การทดสอบที่ระยะ Gap 10mm

จะทำการทดลองกับชุดทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยทำการเปลี่ยนตัวแกนเหล็กซึ่งมีมีลวดพันทับมีจำนวน 1000, 3000 และ 5000 รอบ แล้วเปลี่ยนจำนวนแม่เหล็กที่ใช้โดยมีจำนวน 4, 5, 6 ตัว แต่มีการเปลี่ยนระยะ Gap เป็นระยะ 10 mm ซึ่งพบว่าจำนวนขดลวดมากขึ้นและจำนวนแม่เหล็กที่มีค่ามาก จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้มีมากขึ้น แต่ระยะ Gap มีค่ามากขึ้นจะให้แรงดันไฟฟ้ามักมีค่ามากไปด้วย ดังรูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบ Vp-p ที่ระยะ Gap 10 mm

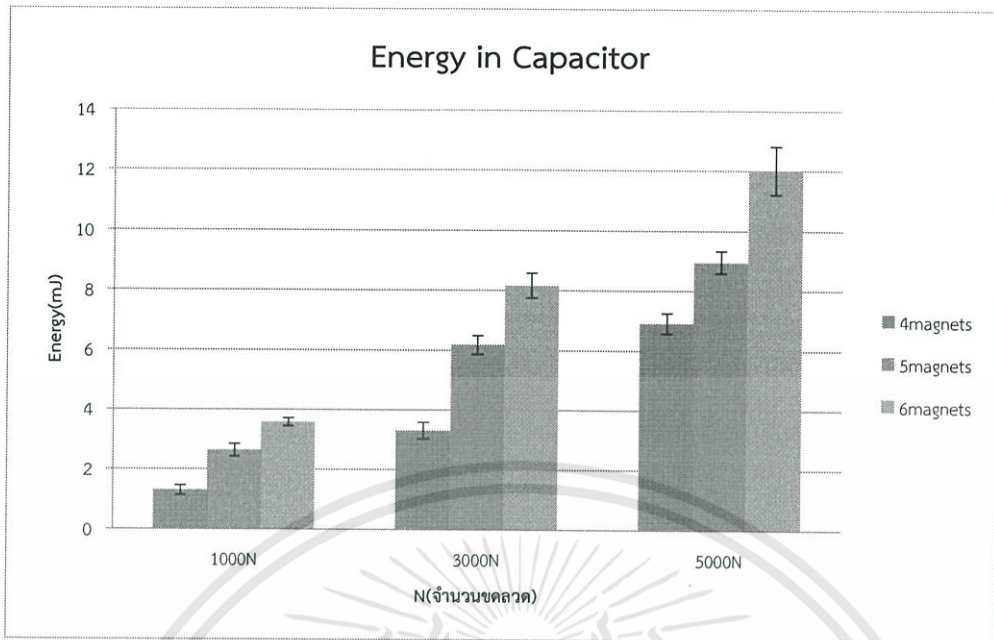
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



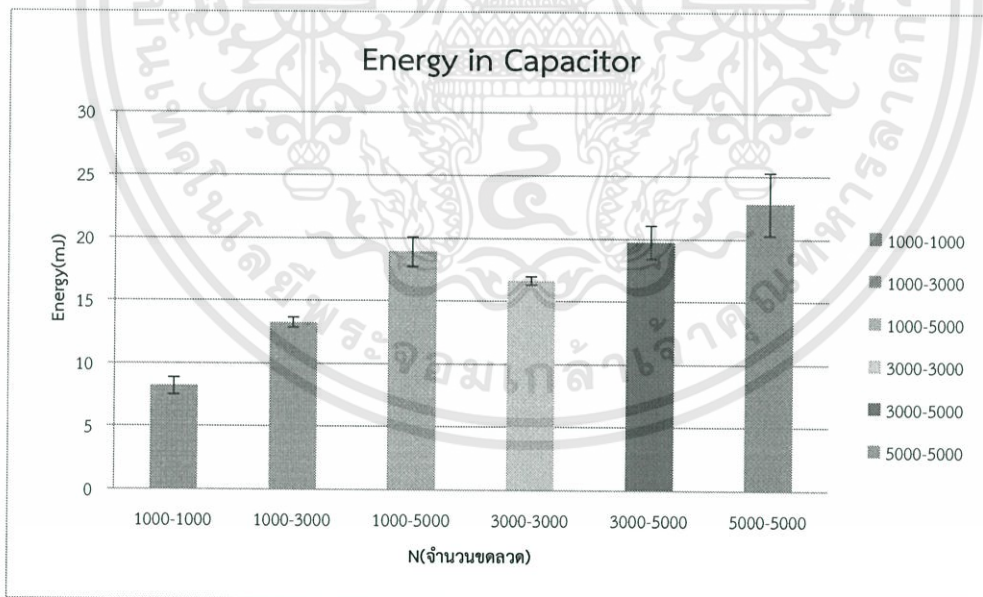
รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบ Vmax ของแม่เหล็ก 5 ตัวที่ระยะ Gap 10 mm

4.4.2 ผลการเก็บพลังงานในตัวเก็บประจุ

เนื่องจากการทดลองที่ผ่านมา พบว่าที่ระยะ Gap 10 mm เป็นระยะ ที่ให้แรงดันมากกว่าอีก ระยะ จะทำการทดลองกับชุดทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยทำการกดไปที่ชุดทดลอง 10 ครั้ง ภายในระยะเวลา 15 วินาทีแล้วทำการหาพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ โดยการเปลี่ยนตัวแกนเหล็กซึ่งมีลวดพันหับมีจำนวน 1000, 3000 และ 5000 รอบ แล้วเปลี่ยนจำนวนแม่เหล็กที่ใช้โดยมีจำนวน 4, 5, 6 ตัว ซึ่งพบว่าจำนวนขดลวดมากขึ้นและจำนวนแม่เหล็กที่มีค่ามาก จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้มีมากขึ้นไปด้วยส่งผลต่อพลังงานที่สะสมภายในตัวเก็บประจุมีค่ามากขึ้นไป ดังรูปที่ 4.13 นำขดลวดมาอนุกรมกันดังรูปที่ 4.14 และขนานกันดังรูปที่ 4.15

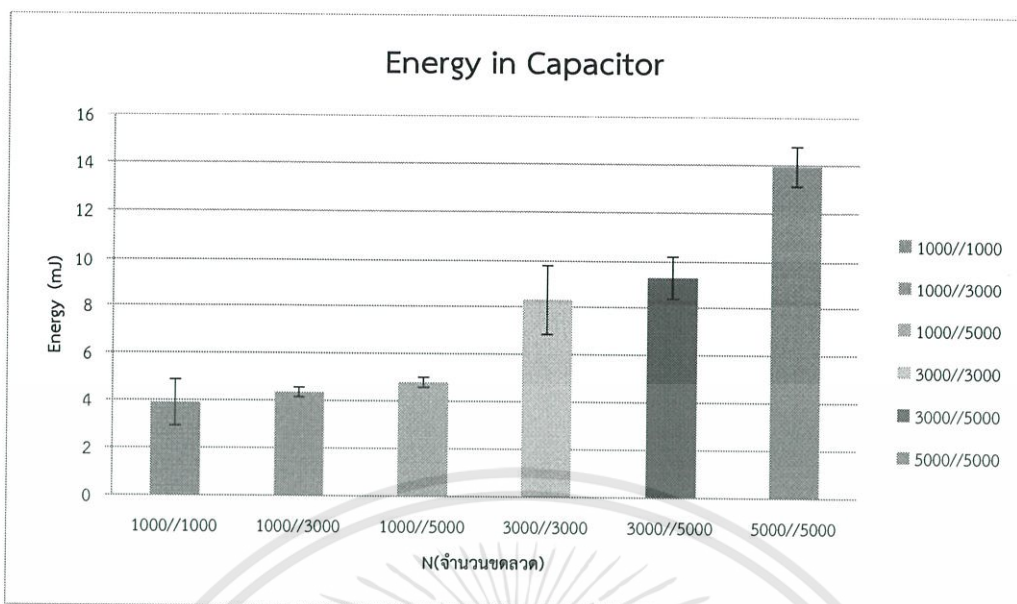


รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบพลังงานในตัวประจุที่จำนวนขดลวดต่างๆ ของแม่เหล็ก 4, 5, 6 ตัวที่ระยะ Gap 10 mm



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบพลังงานในตัวประจุที่จำนวนขดลวดต่างๆ อนุกรมกัน ของแม่เหล็ก 4, 5, 6 ตัวที่ระยะ Gap 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



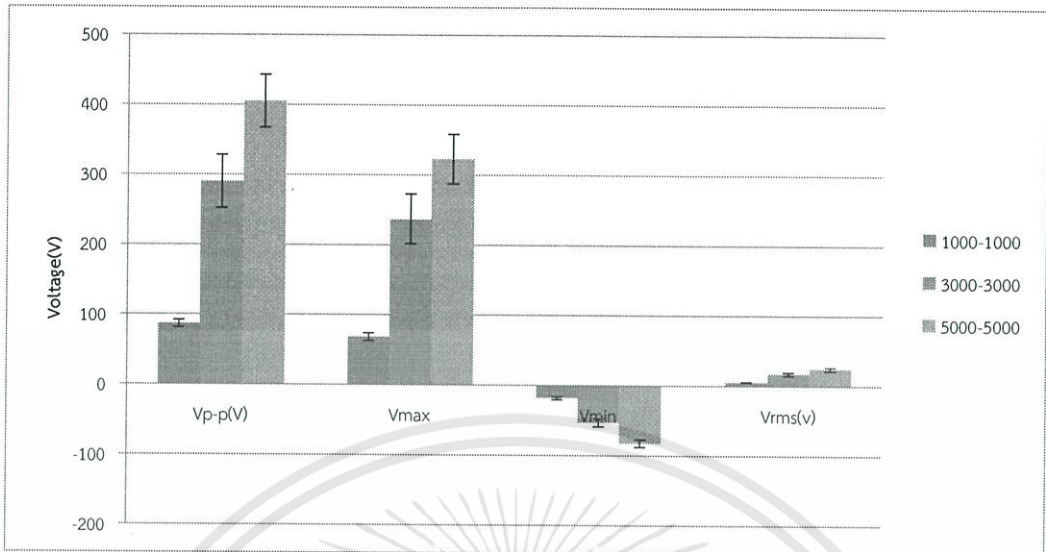
รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบพลังงานในตัวประจุที่จำนวนขดลวดต่างๆ ขนานกันของแม่เหล็ก 4, 5, 6 ตัวที่ระยะ Gap 10 mm

4.4.3 ผลการขนานและอนุกรมของขดลวด

จะทำการทดลองกับทดลองวงจรแม่เหล็ก โดยทำการเปลี่ยนตัวแกนเหล็กซึ่งมีมีลวดพันทับมีจำนวน 1000, 3000 และ 5000 รอบมาขนานและอนุกรม โดยเลือกใช้แม่เหล็ก 6 ตัว และระยะ 10 mm เนื่องจากเป็นค่าที่ให้แรงดันไฟฟ้ามากที่สุดจากการทดลองที่ผ่านมา

4.4.3.1 การอนุกรมของขดลวด

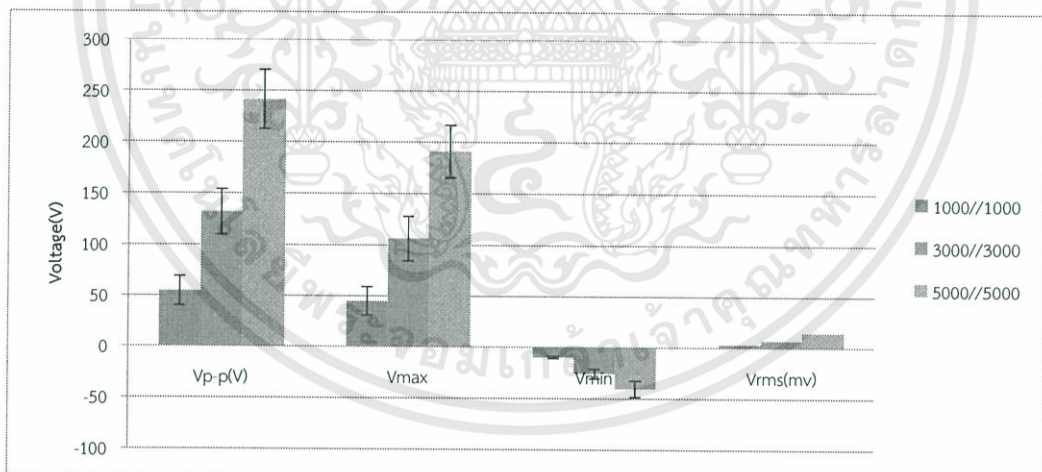
การนำขดลวด 2 อันมาอนุกรมเสมือนการนำ Load 2 ตัวต่อกัน ซึ่งเป็นการเพิ่มความต้านของชุดทดลองวงจรให้มากส่งผลให้ได้มากแรงดันดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟการอนุกรมของขดลวด

4.4.3.2 การขนานของขดลวด

การนำขดลวด 2 อันมาขนาน ซึ่งเป็นการลดความต้านของชุดทดลองวงจรให้มากส่งผลให้ได้แรงดัน มีค่าใกล้เคียงกับตัวขดลวดตัวใดตัวหนึ่งที่น่ามาต่อกัน ดังรูปที่ 4.17

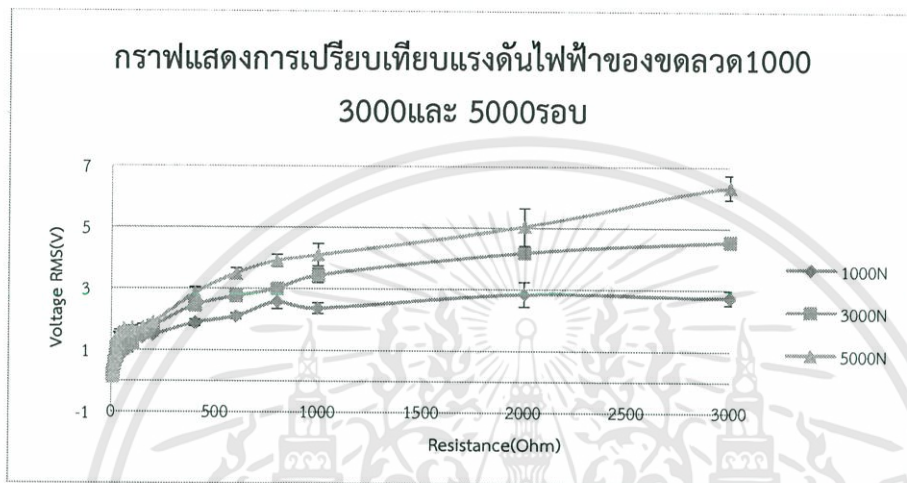


รูปที่ 4.17 กราฟการอนุกรมของขดลวด

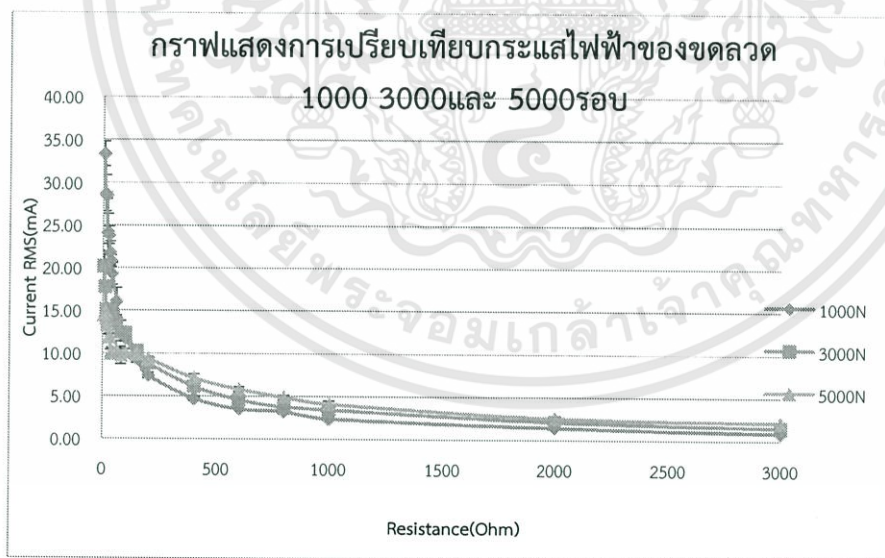
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ผลการทดลองวงจรที่ Load

จะทำการทดลองกับชุดทดลองวงจรแม่เหล็ก โดยทำการเปลี่ยนตัวแกนเหล็กซึ่งมีลวดพันทับ มีจำนวน 1000, 3000 และ 5000 รอบเพื่อทำการหา Power Maximum ของชุดทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โทรมแมกเนติกส์พบที่ขดลวดจำนวน 5000 รอบจะมีค่าแรงดันไฟและกำลังที่สูงกว่า 1000 และ 3000 รอบดังรูปที่ 4.18

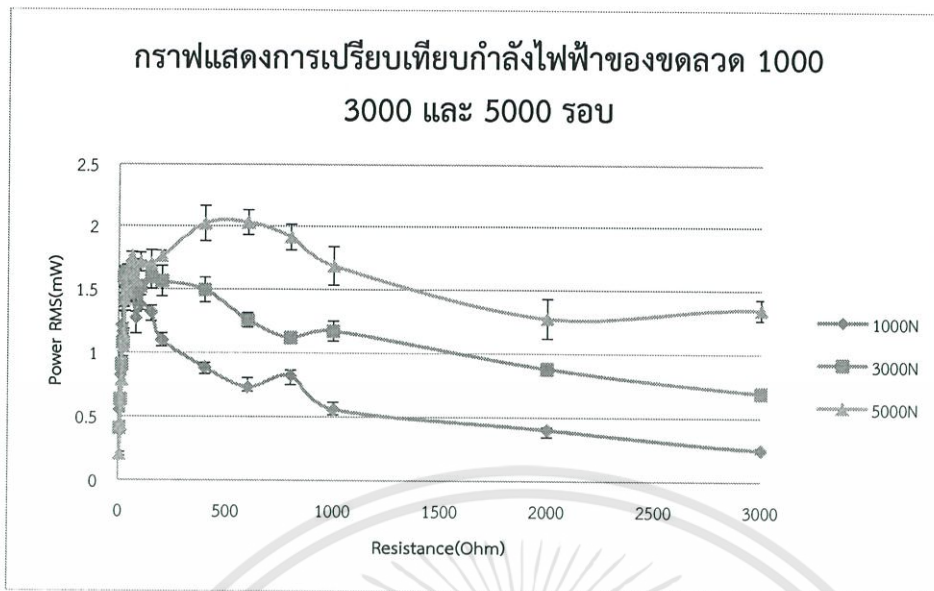


รูปที่ 4.18 กราฟของแรงดันไฟฟ้าของขดลวด 1000, 3000 และ 5000 รอบ



รูปที่ 4.19 กราฟของแรงดันไฟฟ้าของขดลวด 1000, 3000 และ 5000 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



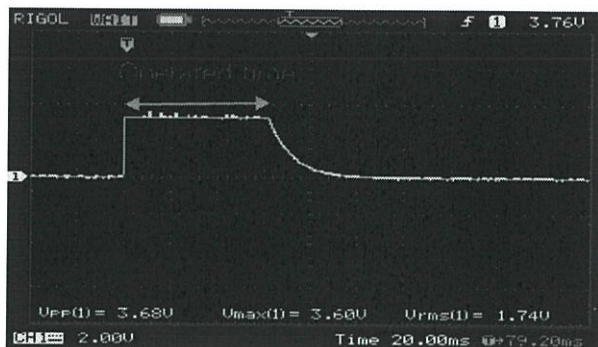
รูปที่ 4.20 กราฟของกำลังไฟฟ้าของขดลวด 1000, 3000 และ 5000 รอบ

4.4.5 ผลการทดลองวงจรเก็บพลังงาน

ทดสอบกับวงจรเก็บพลังงานรุ่น LTC -3588-1 ซึ่งเลือกช่วงแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 3.3 V ใช้ตัวเก็บประจุ 22, 47, 220 และ 2200 μ F โดยทดสอบกับชุดทดลองแนวตั้งเพื่อหาจำนวนครั้งที่ทำวงจรเก็บพลังงานให้แรงดันเอาต์พุตออกมา และหาเวลาการทำงานของวงจรพลังงาน (Operated Time) แสดงดังรูปที่ 4.21 โดยเลือกโหลด 1000 Ω มาใช้พบว่าผลเป็นดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 จำนวนที่ทำให้วงจรเก็บพลังงาน LCT3588-1 ทำงาน

Capacitor	22 μ F	47 μ F	220 μ F	2200 μ F
1000N	1	1	3	9
3000N	1	1	1	7
5000N	1	1	1	5



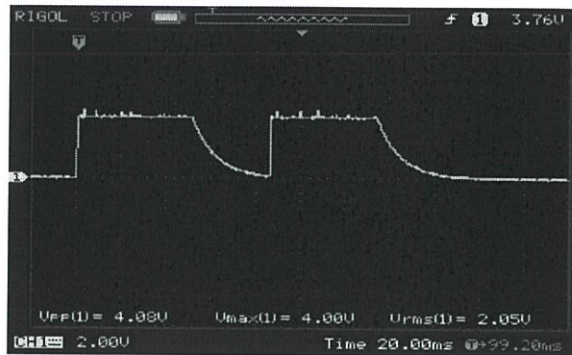
รูปที่ 4.21 สัญญาณแสดงช่วง Operated Time

พบว่าที่จำนวนขดลวด 1000 และ 3000 รอบที่ตัวเก็บประจุมีค่าน้อย ถัดกัแล้วปล่อยเพียง 1 ครั้ง วงจรเก็บพลังงานสามารถทำงานดังรูปที่ 4.22 แต่ที่ 5000 รอบ ถัดกัแล้วปล่อย วงจรเก็บพลังงานสามารถทำได้ในขณะที่กด และทำงานอีกครั้งในขณะที่ปล่อยดังรูปที่ 4.23

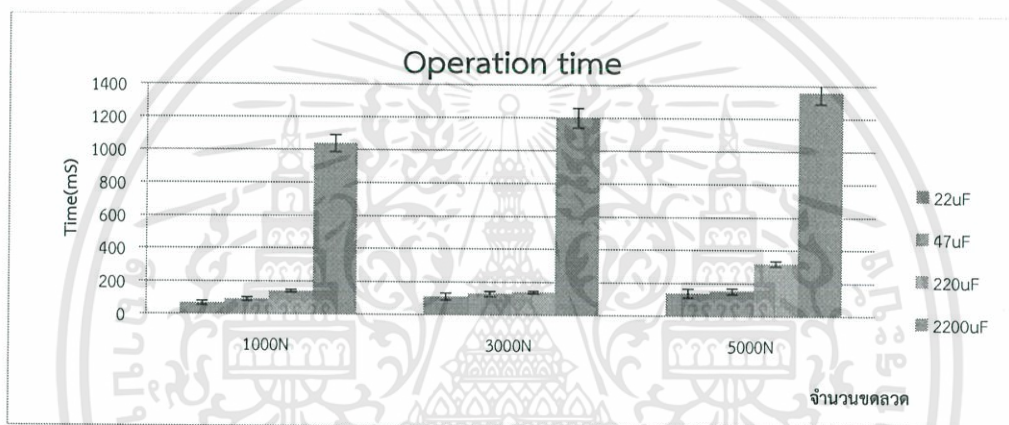


รูปที่ 4.22 สัญญาณแสดง Operated Time ของขดลวด 1000, 3000 รอบกับการวงจรเก็บพลังงานที่ค่าตัวเก็บประจุ 220 μF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 สัญญาณแสดง Operated Time ของขดลวด 5000 รอบ กับการวงจรเก็บพลังงานที่ค่าตัวเก็บประจุ 220 μ F



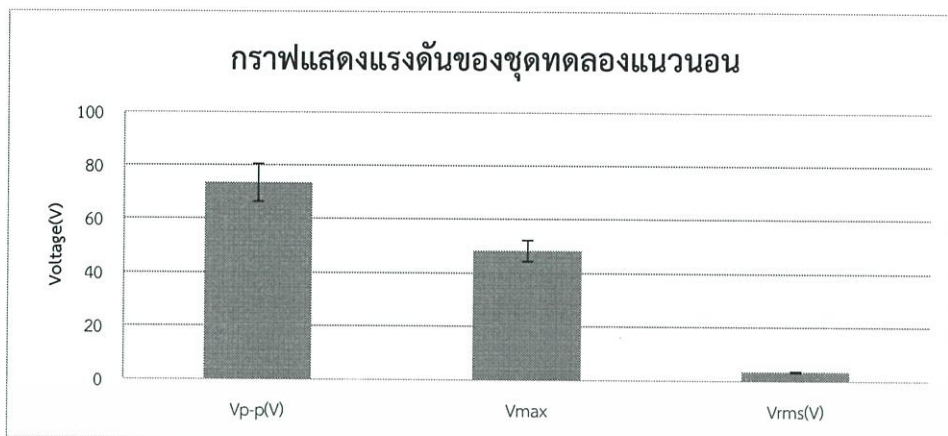
รูปที่ 4.24 กราฟแสดง Operated Time

4.5 ผลการทดลองของต้นแบบ Type B

เนื่องจากผลการทดลองในแนวตั้งพบว่าที่จำนวนแม่เหล็ก 6 ตัว ระยะ Gap 10 mm และจำนวนขดลวด 5000 รอบเป็นค่าที่ให้แรงดันไฟฟ้ามาก จึงนำค่ามาใช้ในการทดลองกับชุดทดลองแนวนอน และการทดสอบจะทดสอบเพื่อดูว่าปริมาตรของชุดทดลองและแนวของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในชุดทดลองเป็นอย่างไร โดยทำการทดลองเหมือนกับชุดแนวตั้ง

4.5.1 ผลการทดลองวงจรที่ No Load

ทดสอบที่ระยะ Gap 10 mm แม่เหล็ก 6 ตัว และจำนวนขดลวด 5000 รอบ พบว่าผลเป็นดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงแรงดันของชุดทดลองแวนอน

4.5.2 ผลการเก็บพลังงานในตัวเก็บประจุ

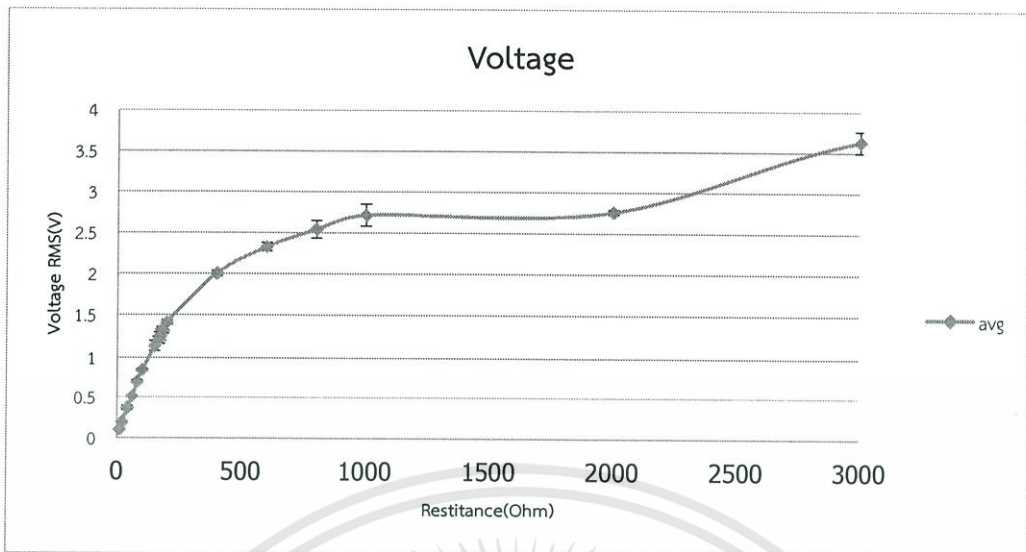
เนื่องจากการทดลองของชุดทดลองแวนอนตั้ง พบว่าที่ระยะ Gap 10 mm เป็นระยะที่ให้แรงดันมากกว่าอีกระยะ จะทำการทดลองกับชุดทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์โทรแมกเนติกส์ โดยทำการกดไปที่ชุดทดลอง 10 ครั้ง ภายในระยะเวลา 15 วินาทีแล้วทำการหาพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ $22\mu\text{F}$ จึงเลือกจำนวนขดลวด 5000 รอบ และแม่เหล็กที่ใช้ 6 ตัว ซึ่งพบว่ามีความแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 16.366 โวลต์และค่าพลังงานเฉลี่ย 2.95 มิลลิจูล ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงพลังสะสมในตัวเก็บประจุของชุดทดลองแวนอน

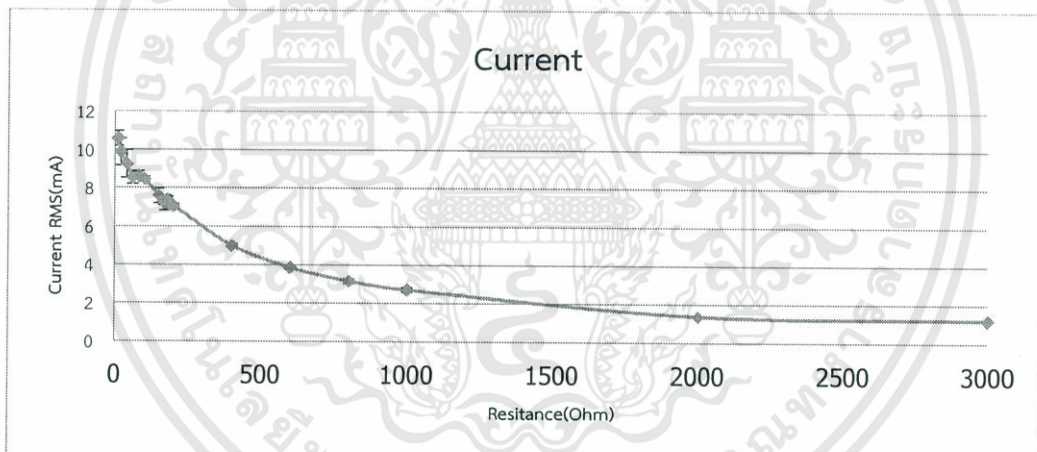
	Average	SD
Ec(mJ)	2.9537858	0.29536
V(V)	16.366	0.8246357

4.5.3 ผลการทดลองวงจรที่ Load

จะทำการทดลองกับทดลองวงจรแม่เหล็ก โดยทำการเปลี่ยนตัวแกนเหล็กซึ่งมีลวดพันทับมีจำนวน 5000 รอบแม่เหล็ก 6 ตัว ที่ระยะ Gap 10 mm เพื่อทำการหา Power Maximum Transfer ของชุดทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์โทรแมกเนติกส์ เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบกับชุดทดลองแวนอนตั้ง

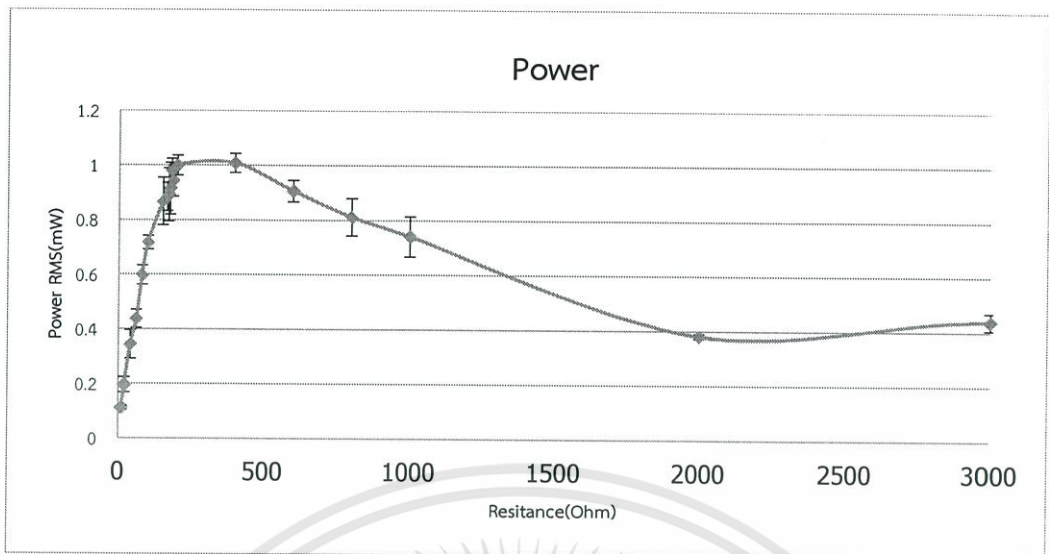


รูปที่ 4.26 กราฟของแรงดันไฟฟ้าของขดลวด 5000 รอบของชุดทดลองแนวนอน



รูปที่ 4.27 กราฟของกระแสไฟฟ้าของขดลวด 5000 รอบของชุดทดลองแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



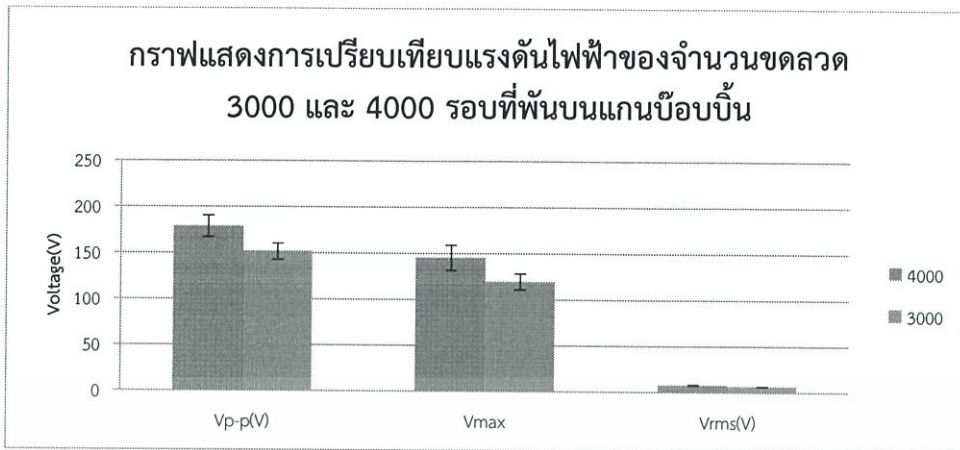
รูปที่ 4.28 กราฟของกำลังไฟฟ้าของขดลวด 5000 รอบของชุดทดลองแนวนอน

จากผลการทดลองของชุดทดลองแนวตั้งและแนวนอน พบว่าชุดทดลองแนวตั้งให้แรงดันไฟฟ้าที่มากกว่าชุดทดลองแนวนอนมากกว่าประมาณ 3-4 เท่า เนื่องจากแม่เหล็กจึงได้เลือกชุดทดลองแนวตั้งมาออกแบบชิ้นงานจริง ได้เลือกแผ่นกดขนาด 192*330 mm เป็นขนาดที่แรงจากการเหยียบกระจายได้ดีที่สุด และเปลี่ยนการพันขดลวดที่พันบนแกนเหล็กมาพันบนแกนบ็อบบี้ โดยอาศัยความต้านของขดลวด 5000 รอบที่พันบนแกนเหล็กเป็นค่าอ้างอิงมีค่าประมาณ 160-200Ω จึงได้เลือกพันขดลวดจำนวน 3000 และ 4000 รอบ โดยทำการทดสอบเหมือนกันกับการทดลองของชุดทดลองแนวตั้ง

4.6 การทดสอบขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบี้

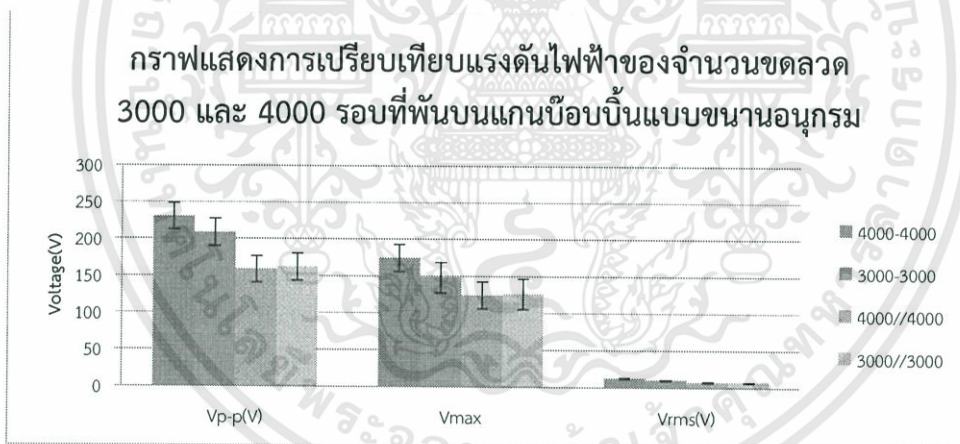
4.6.1 ผลการทดลองวงจรที่ No Load

ทดสอบที่ระยะ Gap 10 mm แม่เหล็ก 6 ตัว พบว่าที่ผลเป็นดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของจำนวนขดลวด 3000 และ 4000 รอบที่พันบนแกนบ็อบบี้

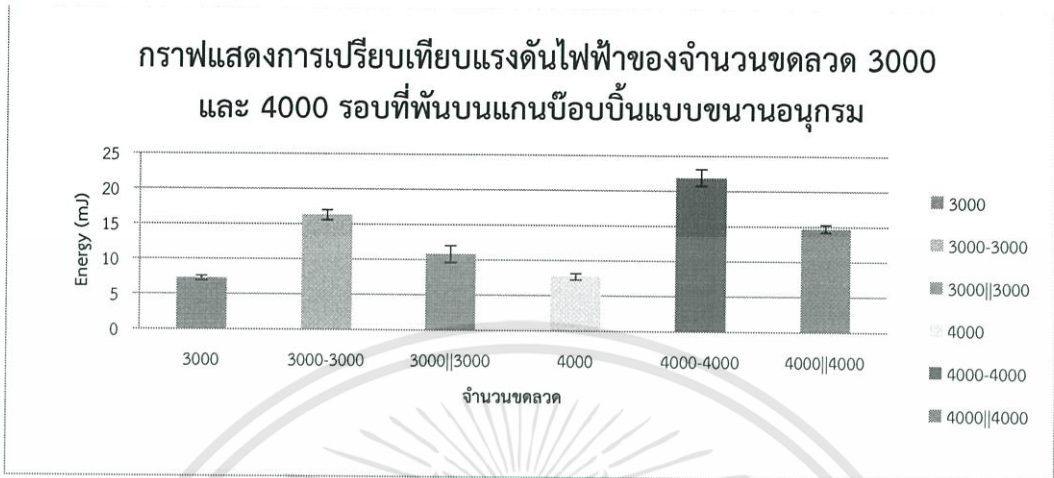
4.6.2 ผลการขนานและอนุกรมของขดลวด



รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของจำนวนขดลวด 3000 และ 4000 รอบแบบขนานอนุกรมที่พันบนแกนบ็อบบี้

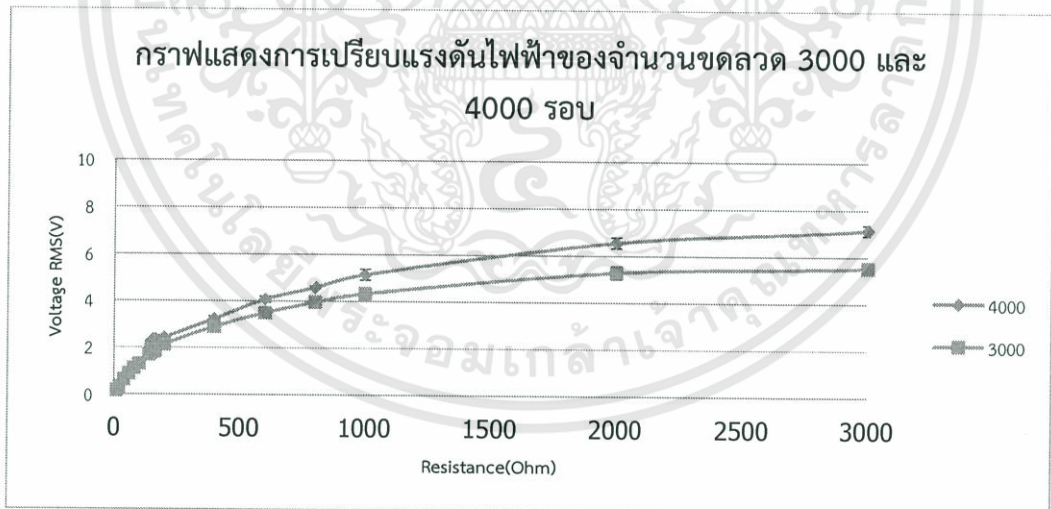
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3 ผลการเก็บพลังงานในตัวเก็บประจุ



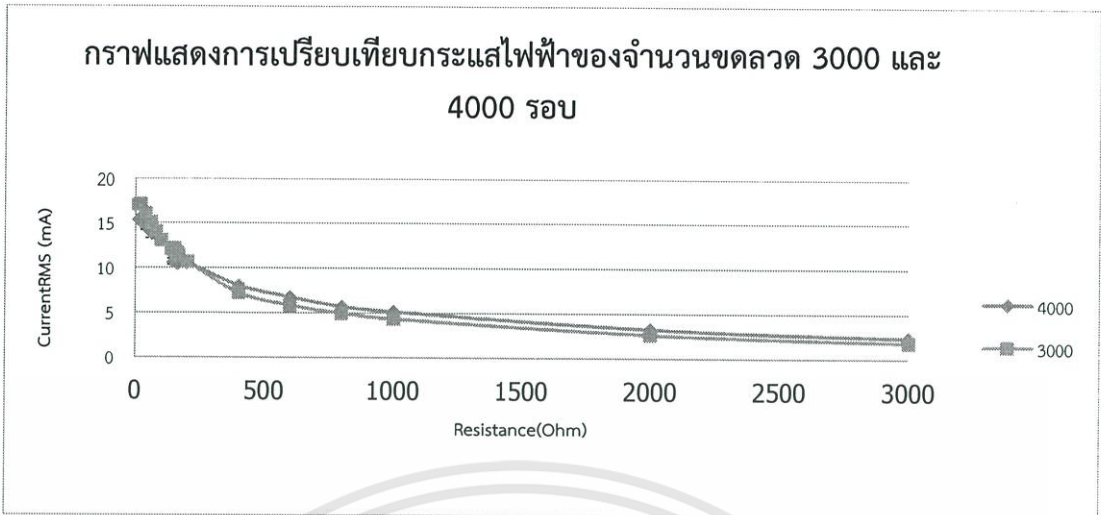
รูปที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบพลังงานในตัวประจุที่จำนวนขดลวดต่างๆ ของการขนานอนุกรมกัน

4.6.4 ผลการทดลองวงจรที่ Load

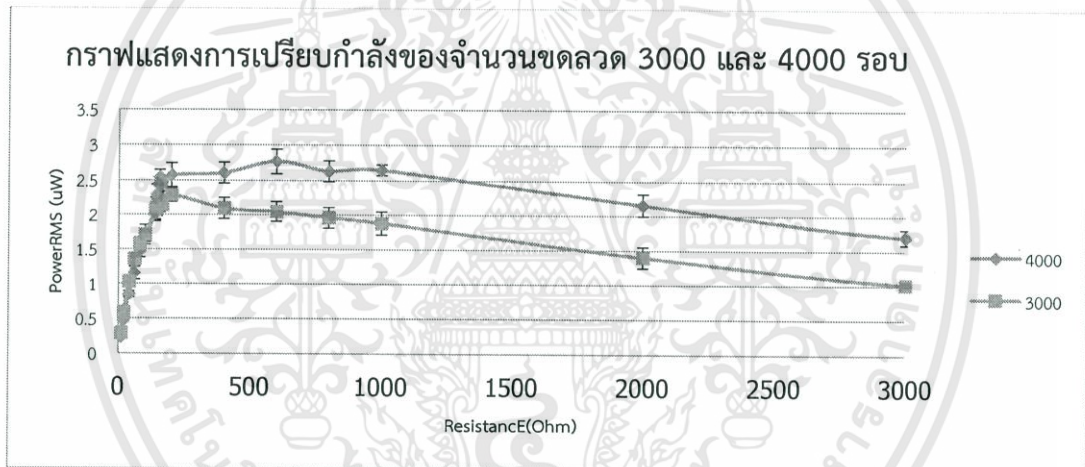


รูปที่ 4.32 กราฟของแรงดันไฟฟ้าของขดลวด 3000 และ 4000 รอบของขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 กราฟของกระแสไฟฟ้าของขดลวด 3000 และ 4000 รอบของขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบิ้น



รูปที่ 4.34 กราฟของกำลังไฟฟ้าของขดลวด 3000 และ 4000 รอบของขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบิ้น

จากรูปที่ 4.32, รูปที่ 4.33 และรูปที่ 4.34 จากการพันขดลวดบนแกนบ็อบบิ้นพบว่าขดลวด 4000 รอบที่พันบนแกนบ็อบบิ้นมีค่าแรงดันไฟฟ้ามากกว่าที่ 3000 รอบ แต่จะมีน้อยกว่า 5000 รอบที่พันบนแกนเหล็ก จึงเลือกใช้ขดลวด 4000 รอบมาใช้ในการออกแบบชิ้นงาน

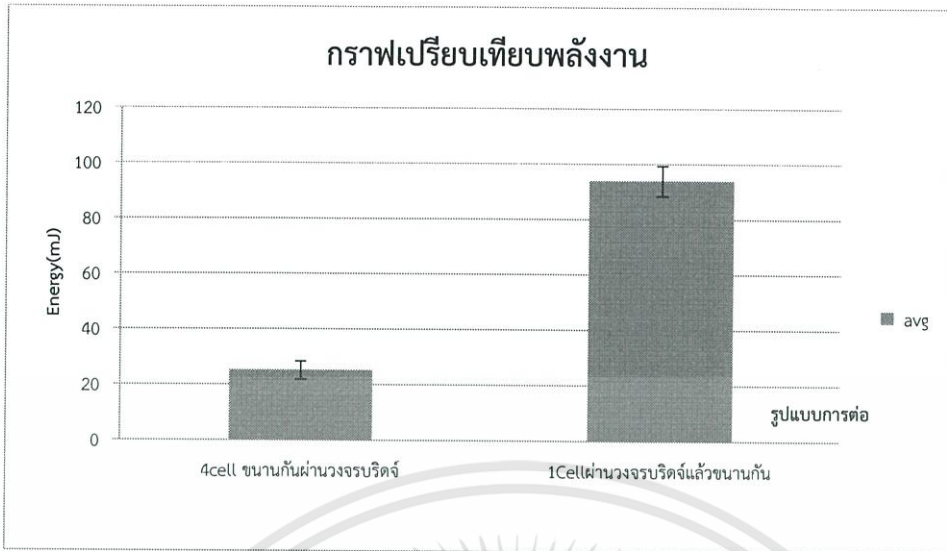
4.7 ผลการทดลองของต้นแบบ Type C

4.7.1 การทดลองรูปแบบการต่อวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากวงจรแม่เหล็กนั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และนำแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแม่เหล็กผ่านวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ เพื่อเปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการทดลอง 2 รูปแบบ แบบที่ 1 เมื่อใช้วงจรแม่เหล็ก 4 ชุดต่อขนานกันผ่านวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ และแบบที่ 2 ทำโดยนำแรงดันไฟฟ้าที่ได้วงจรแม่เหล็กแต่ละชุดผ่านวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์เพื่อเปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยการทดลองด้วยการเทียบ 10 ครั้งในเวลา 15 วินาทีหาแรงดันไฟฟ้าแล้วคำนวณพลังงานจาก $E_c = \frac{1}{2} CV^2$ พบว่า การนำวงจรแม่เหล็กแต่ละชุดผ่านวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์แล้วนำขนานกัน จะมีพลังงานมากกว่า การนำวงจรแม่เหล็กแต่ละชุดขนานกัน แล้วผ่านวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ดังรูปที่ 4.35 และรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของรูปแบบการต่อสาย



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบพลังงานของรูปแบบการต่อสาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองได้พบว่าในชุดการทดลองแบบ PZT พบว่าการดูดกันของแม่เหล็กจะให้พลังงานมากกว่าการผลักรันของแม่เหล็ก และชุดทดลอง PZT มีราคาสูงเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้ จึงเปลี่ยนมาเป็นชุดทดลองแบบวงจรรีเลย์โทรแมกเนติกส์ จากการทดลองของชุดทดลอง Type A และ Type B พบว่า การเพิ่มจำนวนขดลวดและจำนวนแม่เหล็กจะส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่ได้ โดยที่ชุดทดลอง Type A มีแรงดันมากกว่าชุดทดลอง Type B ประมาณ 3-4 เท่า จึงเลือกชุดทดลอง Type A มาใช้ออกแบบเป็น Type C โดยมีขนาด $320 \times 200 \text{ mm}^2$ ประกอบด้วยชุดทดลองแบบวงจรรีเลย์โทรแมกเนติกส์ 4 ชุดซึ่งมีแม่เหล็ก 6 ตัว และขดลวดที่พันบนแกนบ็อบบิ้น 4000 รอบทำการอนุกรมกันในแต่ละชุดแล้วผ่านวงจรรีเลย์กระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ก่อนนำแต่ละชุดมาขนานกัน ทำการทดลองโดยการเทียบ 10 ครั้งใน 15 วินาทีพบว่าได้พลังงาน 90 มิลลิจูล

5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไข

1. ในการทดลองด้วยชุดทดลองแบบ PZT เนื่องจากแรงที่กระทำกับ PZT จากการ Coupling ของแม่เหล็ก ทำให้ PZT เกิดการโค้งงอและเสื่อมสภาพ ทำให้พลังงานที่ได้มีค่าลดลง และชุดทดลอง PZT มีราคาสูงเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้ จึงทำการเปลี่ยนจากการทดลอง PZT มาเป็นการทดลองวงจรรีเลย์โทรแมกเนติกส์
2. ในการพันขดลวดทับบนแกนเหล็กจะพบขดลวดที่พันมีการลัดวงจรกับแกนเหล็ก จึงนำสก็อตเทปใสพันทับบนแกนเหล็กก่อน แล้วจึงพันขดลวดทับอีกทีแต่ไม่มีความเป็นระเบียบ และใช้แกนบ็อบบิ้นในการพัน
3. ในการเทียบแต่ละครั้ง ไม่สามารถควบคุมแรงในการเทียบได้ ทำได้แค่เพียงประมาณแรงเทียบให้ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนซึ่งแก้ปัญหาโดยการทำการทดลองซ้ำหลายๆครั้งและเก็บผลเป็นสถิติเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้า

ชุดทดลอง Type C สามารถออกแบบให้มีขนาดเล็กและบางลงได้ และสามารถเพิ่มจำนวนชุดเก็บเกี่ยวพลังงานแบบรีเลย์โทรแมกเนติกส์ เพื่อให้ได้พลังงานที่มากขึ้น และนำชุดทดลองไปทดสอบความคงทนในการใช้งาน เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ.[Online].Available :
<http://www.thaigoodview.com/library/contest2552/type1/science03/11/Electricity-web/html/content-html/electricalGenerator-html/dynamo.html>. 2014.
- [2] ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor).[Online].Available :
<http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/2041-%E0%B8%95%E0%B8%B1%E0%B8%A7%E0%B9%80%E0%B8%AB%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%A2%E0%B8%A7%E0%B8%99%E0%B8%B3+%28Inductor%29?groupid=296>. 5 สิงหาคม 2013.
- [3] สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field).[Online].Available :
<http://physicskruadd.wordpress.com/2012/03/13/%E0%B8%AA%E0%B8%99%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B9%88%E0%B9%80%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B9%87%E0%B8%81-magnetic-field/>. 13 พฤษภาคม 2012
- [4] กฎของฟาราเดย์.[Online].Available :
<http://www.oknation.net/blog/print.php?id=490120>. 2014.
- [5] กฎของเลนซ์.[Online].Available :
<http://www.oknation.net/blog/print.php?id=490222>. 2014.
- [6] ตัวเหนี่ยวนำ (Inductors).[Online].Available :
<http://kpp.ac.th/elearning/elearning3/book-04.html>. 2014.
- [7] หลักการทำงานของโซลินอยด์.[Online].Available :
http://electronics.se-ed.com/contents/046s061/046s061_p02.asp. 2014.
- [8] โซลินอยด์.[Online].Available :
<http://board.212cafe.com/FreeForumskscom/view/4f0d0e3c846567ae0500107c>. 2014.
- [9] กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.[Online].Available :
http://www.neutron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=2531&Itemid=3. 2014.
- [10] ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก.[Online].Available :
http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/ceramic_sensor/piezoelectric1.htm.
- [11] Vishay Intertechnology, Inc.[Online].Available :
<http://www.vishay.com/docs/85662/bat46.pdf>
- [12] Linear Technology Corporation. “LTC3588-1 Piezoelectric Energy Harvesting ” [Online].Available : <http://www.linear.com/docs/28909.2010>



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

เอกสารคู่มืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



LTC3588-1

Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply

FEATURES

- 950nA Input Quiescent Current (Output in Regulation – No Load)
- 450nA Input Quiescent Current in UVLO
- 2.7V to 20V Input Operating Range
- Integrated Low-Loss Full-Wave Bridge Rectifier
- Up to 100mA of Output Current
- Selectable Output Voltages of 1.8V, 2.5V, 3.3V, 3.6V
- High Efficiency Integrated Hysteretic Buck DC/DC
- Input Protective Shunt – Up to 25mA Pull-Down at $V_{IN} \geq 20V$
- Wide Input Undervoltage Lockout (UVLO) Range
- Available in 10-Lead MSE and 3mm × 3mm DFN Packages

APPLICATIONS

- Piezoelectric Energy Harvesting
- Electro-Mechanical Energy Harvesting
- Wireless HVAC Sensors
- Mobile Asset Tracking
- Tire Pressure Sensors
- Battery Replacement for Industrial Sensors
- Remote Light Switches
- Standalone Nanopower Buck Regulator

DESCRIPTION

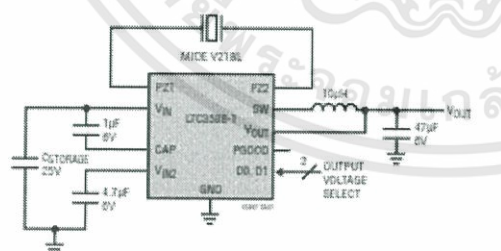
The LTC[®]3588-1 integrates a low-loss full-wave bridge rectifier with a high efficiency buck converter to form a complete energy harvesting solution optimized for high output impedance energy sources such as piezoelectric transducers. An ultralow quiescent current undervoltage lockout (UVLO) mode with a wide hysteresis window allows charge to accumulate on an input capacitor until the buck converter can efficiently transfer a portion of the stored charge to the output. In regulation, the LTC3588-1 enters a sleep state in which both input and output quiescent currents are minimal. The buck converter turns on and off as needed to maintain regulation.

Four output voltages, 1.8V, 2.5V, 3.3V and 3.6V, are pin selectable with up to 100mA of continuous output current; however, the output capacitor may be sized to service a higher output current burst. An input protective shunt set at 20V enables greater energy storage for a given amount of input capacitance.

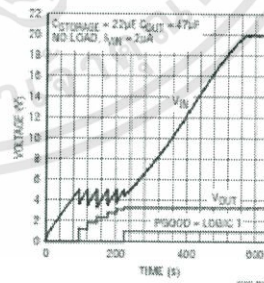
© 2011 LT, LTD, LTM, Linear Technology, the Linear logo and Burst Mode are registered trademarks of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

TYPICAL APPLICATION

100mA Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply



LTC3588-1 3.3V Regulator Start-Up Profile



35881ba

1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

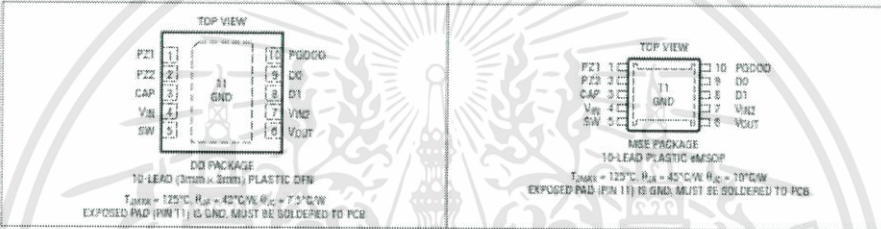
LTC3588-1

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 1)

V_{IN}	V_{OUT}	-0.3V to 18V*	-0.3V to Lesser of ($V_{IN2} + 0.3V$) or 6V
Low Impedance Source.....	PGOOD.....	-0.3V to 18V*	-0.3V to Lesser of ($V_{OUT} + 0.3V$) or 6V
Current Fed, $I_{SW} = 0A$	I_{PZ1}, I_{PZ2}	25mA†	±50mA
$PZ1, PZ2$	I_{SW}	0V to V_{IN}	350mA
$D0, D1$	Operating Junction Temperature Range	-0.3V to [Lesser of ($V_{IN2} + 0.3V$) or 6V]	(Notes 2, 3).....
CAP.....	Storage Temperature Range.....	[Higher of -0.3V or ($V_{IN} - 6V$)] to V_{IN}	-40 to 125°C
V_{IN2}	Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	-0.3V to [Lesser of ($V_{IN} + 0.3V$) or 6V]	-65 to 150°C
	MSE Only.....		300°C

* V_{IN} has an internal 20V clamp
 † For $t < 1ms$ and Duty Cycle $< 1\%$
 Absolute Maximum Continuous Current = 5mA

PIN CONFIGURATION



ORDER INFORMATION

LEAD FREE FINISH	TAPE AND REEL	PART MARKING*	PACKAGE DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE
LTC3588DD-1#PBF	LTC3588DD-1#TRPBF	LFKY	10-Lead (3mm x 3mm) Plastic DFN	-40°C to 125°C
LTC3588DD-1#PBF	LTC3588DD-1#TRPBF	LFKY	10-Lead (3mm x 3mm) Plastic DFN	-40°C to 125°C
LTC3588MSE-1#PBF	LTC3588MSE-1#TRPBF	LTFKX	10-Lead Plastic eMSOP	-40°C to 125°C
LTC3588MSE-1#PBF	LTC3588MSE-1#TRPBF	LTFKX	10-Lead Plastic eMSOP	-40°C to 125°C

Consult LTC Marketing for parts specified with wider operating temperature ranges. *The temperature grade is identified by a label on the shipping container.
 For more information on lead free part marking, go to: <http://www.linear.com/leadfree>
 This product is only offered in trays. For more information go to: <http://www.linear.com/packaging/>

LTC3588-1

ELECTRICAL CHARACTERISTICS The ● denotes the specifications which apply over the full operating junction temperature range, otherwise specifications are for $T_A = 25^\circ\text{C}$. (Note 2) $V_{IN} = 5.5\text{V}$ unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
V_{IN}	Input Voltage Range	Low Impedance Source on V_{IN}	●		18.0	V	
I_{VM}	V_{IN} Quiescent Current UVLO Buck Enabled, Sleeping Buck Enabled, Sleeping Buck Enabled, Not Sleeping	$V_{IN} = 2.5\text{V}$, Not PGOOD $V_{IN} = 4.5\text{V}$ $V_{IN} = 18\text{V}$ $I_{SW} = 0\text{A}$ (Note 4)		450 950 1.7 150	700 1500 2.5 250	nA nA μA μA	
V_{UVLO}	V_{IN} Undervoltage Lockout Threshold	V_{IN} Rising 1.8V Output Selected; D1 = 0, DD = 0 2.5V Output Selected; D1 = 0, DD = 1 3.3V Output Selected; D1 = 1, DD = 0 3.6V Output Selected; D1 = 1, DD = 1 V_{IN} Falling 1.8V Output Selected; D1 = 0, DD = 0 2.5V Output Selected; D1 = 0, DD = 1 3.3V Output Selected; D1 = 1, DD = 0 3.6V Output Selected; D1 = 1, DD = 1	● ● ● ● ● ● ● ●	3.77 3.77 4.73 4.73 2.66 2.66 3.42 3.75	4.04 4.04 5.05 5.05 2.87 2.87 3.67 4.02	4.30 4.30 5.37 5.37 3.08 3.08 3.91 4.28	V V V V V V V V
V_{SHUNT}	V_{IN} Shunt Regulator Voltage	$I_{VM} = 1\text{mA}$	19.0	20.0	21.0	V	
I_{SHUNT}	Maximum Protective Shunt Current	t_{ms} Duration	25			mA	
	Internal Bridge Rectifier Loss ($ V_{F21} - V_{F22} - V_{IN}$)	$I_{BRIDGE} = 10\mu\text{A}$	350	400	450	mV	
	Internal Bridge Rectifier Reverse Leakage Current	$V_{REVERSE} = 18\text{V}$			20	nA	
	Internal Bridge Rectifier Reverse Breakdown Voltage	$I_{REVERSE} = 1\mu\text{A}$	V_{SHUNT}	30		V	
V_{OUT}	Regulated Output Voltage	1.8V Output Selected Sleep Threshold Wake-Up Threshold 2.5V Output Selected Sleep Threshold Wake-Up Threshold 3.3V Output Selected Sleep Threshold Wake-Up Threshold 3.6V Output Selected Sleep Threshold Wake-Up Threshold	● ● ● ● ● ● ● ●	1.812 1.788 2.512 2.488 3.312 3.288 3.612 3.588	1.890 1.788 2.575 2.488 3.399 3.288 3.708 3.588	V V V V V V V V	
	PGOOD Falling Threshold	As a Percentage of the Selected V_{OUT}	83	92		%	
I_{VOUT}	Output Quiescent Current	$V_{OUT} = 3.6\text{V}$		89	150	nA	
I_{PEAK}	Buck Peak Switch Current		200	260	350	mA	
I_{BUCK}	Available Buck Output Current		100			mA	
R_{P}	Buck PMOS Switch On-Resistance			1.1		Ω	
R_{N}	Buck NMOS Switch On-Resistance			1.3		Ω	
	Max Buck Duty Cycle		●	100		%	
$V_{H(D0, D1)}$	DD'D1 Input High Voltage		●	1.2		V	
$V_{L(D0, D1)}$	DD'D1 Input Low Voltage		●		0.4	V	
$I_{H(D0, D1)}$	DD'D1 Input High Current				10	nA	
$I_{L(D0, D1)}$	DD'D1 Input Low Current				10	nA	

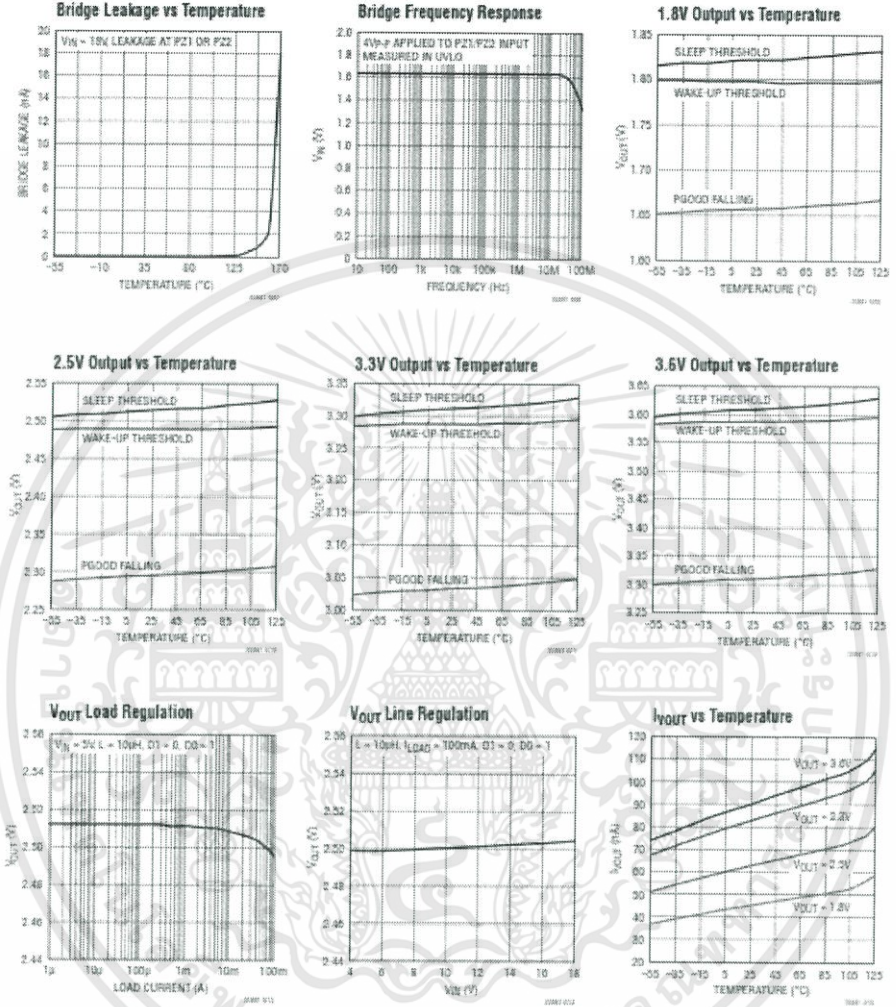
23881b



3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

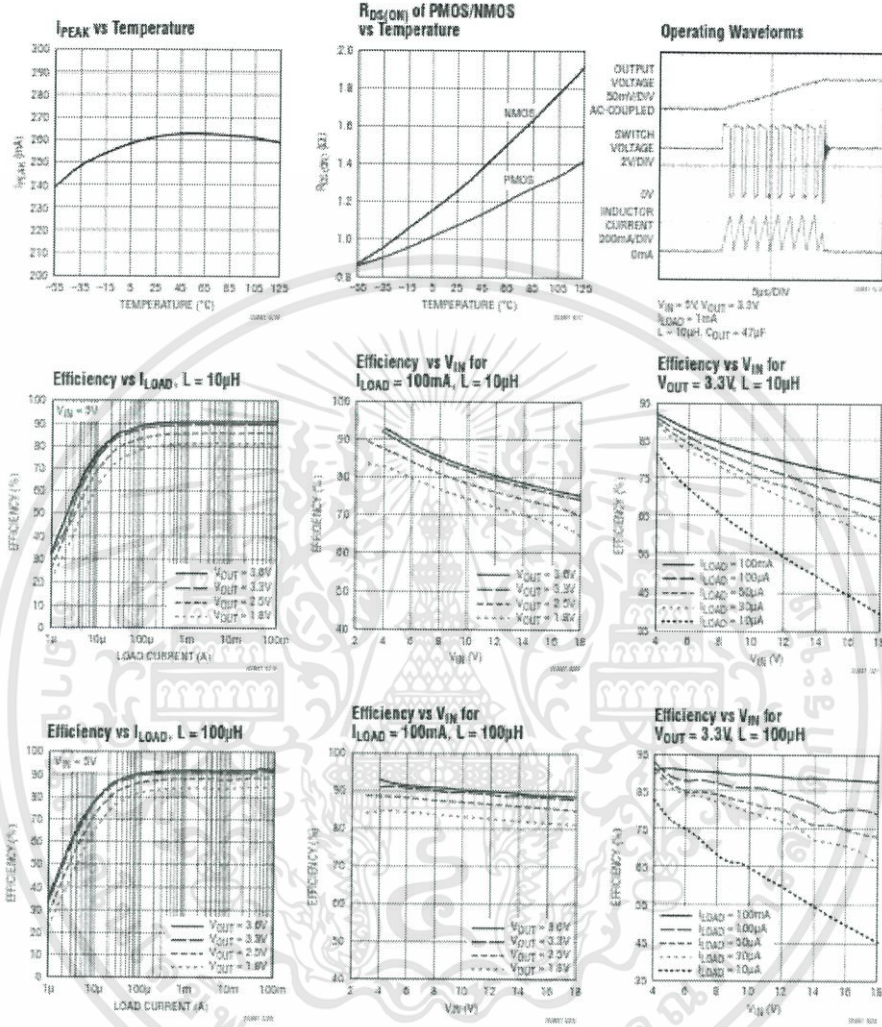
TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LTC3588-1

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS



6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LTC3588-1

PIN FUNCTIONS

PZ1 (Pin 1): Input connection for piezoelectric element or other AC source (used in conjunction with PZ2).

PZ2 (Pin 2): Input connection for piezoelectric element or other AC source (used in conjunction with PZ1).

CAP (Pin 3): Internal rail referenced to V_{IN} to serve as gate drive for buck PMOS switch. A $1\mu\text{F}$ capacitor should be connected between CAP and V_{IN} . This pin is not intended for use as an external system rail.

V_{IN} (Pin 4): Rectified Input Voltage. A capacitor on this pin serves as an energy reservoir and input supply for the buck regulator. The V_{IN} voltage is internally clamped to a maximum of 20V (typical).

SW (Pin 5): Switch Pin for the Buck Switching Regulator. A $10\mu\text{H}$ or larger inductor should be connected from SW to V_{OUT} .

V_{OUT} (Pin 6): Sense pin used to monitor the output voltage and adjust it through internal feedback.

V_{IN2} (Pin 7): Internal low voltage rail to serve as gate drive for buck NMOS switch. Also serves as a logic high rail for output voltage select bits D0 and D1. A $4.7\mu\text{F}$ capacitor should be connected from V_{IN2} to GND. This pin is not intended for use as an external system rail.

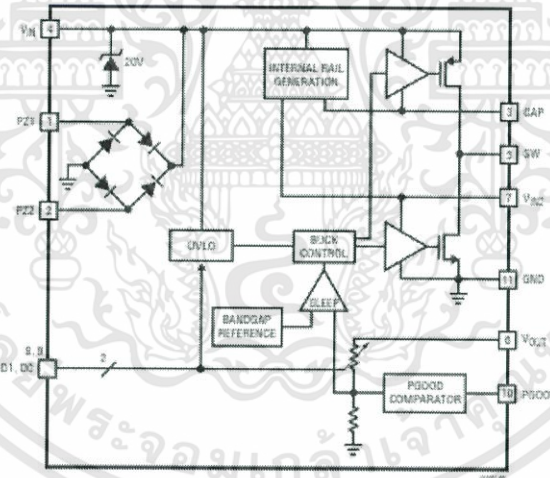
D1 (Pin 8): Output Voltage Select Bit. D1 should be tied high to V_{IN2} or low to GND to select desired V_{OUT} (see Table 1).

D0 (Pin 9): Output Voltage Select Bit. D0 should be tied high to V_{IN2} or low to GND to select desired V_{OUT} (see Table 1).

PGOOD (Pin 10): Power good output is logic high when V_{OUT} is above 92% of the target value. The logic high is referenced to the V_{OUT} rail.

GND (Exposed Pad Pin 11): Ground. The Exposed Pad should be connected to a continuous ground plane on the second layer of the printed circuit board by several vias directly under the LTC3588-1.

BLOCK DIAGRAM



35881b

LTC3588-1

OPERATION

The LTC3588-1 is an ultralow quiescent current power supply designed specifically for energy harvesting and/or low current step-down applications. The part is designed to interface directly to a piezoelectric or alternative A/C power source, rectify a voltage waveform and store harvested energy on an external capacitor, bleed off any excess power via an internal shunt regulator, and maintain a regulated output voltage by means of a nanopower high efficiency synchronous buck regulator.

Internal Bridge Rectifier

The LTC3588-1 has an internal full-wave bridge rectifier accessible via the differential PZ1 and PZ2 inputs that rectifies AC inputs such as those from a piezoelectric element. The rectified output is stored on a capacitor at the V_{IN} pin and can be used as an energy reservoir for the buck converter. The low-loss bridge rectifier has a total drop of about 400mV with typical piezo generated currents (~10 μ A). The bridge is capable of carrying up to 50mA. One side of the bridge can be operated as a single-ended DC input. PZ1 and PZ2 should never be shorted together when the bridge is in use.

Undervoltage Lockout (UVLO)

When the voltage on V_{IN} rises above the UVLO rising threshold the buck converter is enabled and charge is transferred from the input capacitor to the output capacitor. A wide (~1V) UVLO hysteresis window is employed with a lower threshold approximately 300mV above the selected regulated output voltage to prevent short cycling during buck power-up. When the input capacitor voltage is depleted below the UVLO falling threshold the buck converter is disabled. Extremely low quiescent current (450nA typical) in UVLO allows energy to accumulate on the input capacitor in situations where energy must be harvested from low power sources.

Internal Rail Generation

Two internal rails, CAP and V_{IN2} , are generated from V_{IN} and are used to drive the high side PMOS and low side NMOS of the buck converter, respectively. Additionally the V_{IN2} rail serves as logic high for output voltage select bits D0 and D1. The V_{IN2} rail is regulated at 4.8V above GND while the CAP rail is regulated at 4.8V below V_{IN} . These are not intended to be used as external rails. Bypass capacitors are connected to the CAP and V_{IN2} pins to serve as energy reservoirs for driving the buck switches. When V_{IN} is below 4.8V, V_{IN2} is equal to V_{IN} and CAP is held at GND. Figure 1 shows the ideal V_{IN} , V_{IN2} and CAP relationship.

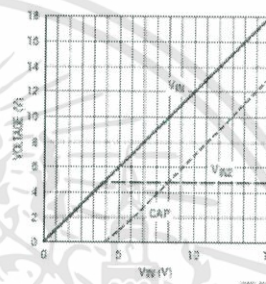


Figure 1. Ideal V_{IN} , V_{IN2} and CAP Relationship

Buck Operation

The buck regulator uses a hysteretic voltage algorithm to control the output through internal feedback from the V_{OUT} sense pin. The buck converter charges an output capacitor through an inductor to a value slightly higher than the regulation point. It does this by ramping the inductor current up to 260mA through an internal PMOS switch and then ramping it down to 0mA through an internal NMOS switch. This efficiently delivers energy to the output capacitor. The ramp rate is determined by V_{IN} , V_{OUT} , and the inductor value. If the input voltage falls below the

OPERATION

UVLO falling threshold before the output voltage reaches regulation, the buck converter will shut off and will not be turned on until the input voltage again rises above the UVLO rising threshold. During this time the output voltage will be loaded by less than 100nA. When the buck brings the output voltage into regulation the converter enters a low quiescent current sleep state that monitors the output voltage with a sleep comparator. During this operating mode load current is provided by the buck output capacitor. When the output voltage falls below the regulation point the buck regulator wakes up and the cycle repeats. This hysteretic method of providing a regulated output reduces losses associated with FET switching and maintains an output at light loads. The buck delivers a minimum of 100mA of average load current when it is switching.

When the sleep comparator signals that the output has reached the sleep threshold the buck converter may be in the middle of a cycle with current still flowing through the inductor. Normally both synchronous switches would turn off and the current in the inductor would freewheel to zero through the NMOS body diode. The LTC3588-1 keeps the NMOS switch on during this time to prevent the conduction loss that would occur in the diode if the NMOS were off. If the PMOS is on when the sleep comparator trips the NMOS will turn on immediately in order to ramp down the current. If the NMOS is on it will be kept on until the current reaches zero.

Though the quiescent current when the buck is switching is much greater than the sleep quiescent current, it is still a small percentage of the average inductor current which results in high efficiency over most load conditions. The buck operates only when sufficient energy has been accumulated in the input capacitor and the length of time the converter needs to transfer energy to the output is much less than the time it takes to accumulate energy. Thus, the buck operating quiescent current is averaged over a long period of time so that the total average quiescent current is low. This feature accommodates sources that harvest small amounts of ambient energy.

Four selectable voltages are available by tying the output select bits, D0 and D1, to GND or V_{IN} . Table 1 shows the four D0/D1 codes and their corresponding output voltages.

Table 1. Output Voltage Selection

D1	D0	V _{OUT}	V _{OUT} QUIESCENT CURRENT (I _{QUIESCENT})
0	0	1.8V	44nA
0	1	2.5V	62nA
1	0	3.3V	81nA
1	1	3.6V	89nA

The internal feedback network draws a small amount of current from V_{OUT} as listed in Table 1.

Power Good Comparator

A power good comparator produces a logic high referenced to V_{OUT} on the PGOOD pin the first time the converter reaches the sleep threshold of the programmed V_{OUT} , signaling that the output is in regulation. The PGOOD pin will remain high until V_{OUT} falls to 92% of the desired regulation voltage. Several sleep cycles may occur during this time. Additionally, if PGOOD is high and V_{IN} falls below the UVLO falling threshold, PGOOD will remain high until V_{OUT} falls to 92% of the desired regulation point. This allows output energy to be used even if the input is lost. Figure 2 shows the behavior for $V_{OUT} = 3.6V$ and no load. At $t = 75\mu s$ V_{IN} becomes high impedance and is discharged by the quiescent current of the LTC3588-1 and through servicing V_{OUT} which is discharged by its own leakage current. V_{IN} crosses UVLO falling but PGOOD remains high until V_{OUT} decreases to 92% of the desired regulation point. The PGOOD pin is designed to drive a microprocessor or other chip I/O and is not intended to drive higher current loads such as an LED.

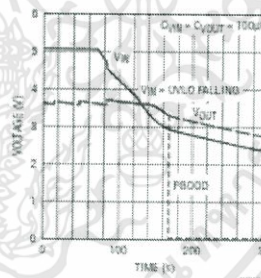


Figure 2. PGOOD Operation During Transition to UVLO

LTC3588-1

OPERATION

The D0/D1 inputs can be switched while in regulation as shown in Figure 3. If V_{OUT} is programmed to a voltage with a PGOOD falling threshold above the old V_{OUT} , PGOOD will transition low until the new regulation point is reached. When V_{OUT} is programmed to a lower voltage, PGOOD will remain high through the transition.

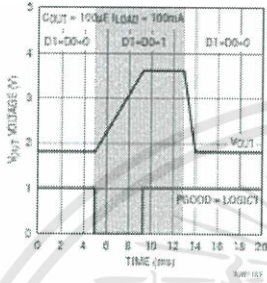


Figure 3. PGOOD Operation During D0/D1 Transition

Energy Storage

Harvested energy can be stored on the input capacitor or the output capacitor. The wide input range takes advantage of the fact that energy storage on a capacitor is proportional to the square of the capacitor voltage. After the output voltage is brought into regulation any excess energy is stored on the input capacitor and its voltage increases. When a load exists at the output the buck can efficiently transfer energy stored at a high voltage to the regulated output. While energy storage at the input utilizes the high voltage at the input, the load current is limited to what the buck converter can supply. If larger loads need to be serviced the output capacitor can be sized to support a larger current for some duration. For example, a current burst could begin when PGOOD goes high and would continuously deplete the output capacitor until PGOOD went low.

APPLICATIONS INFORMATION

Introduction

The LTC3588-1 harvests ambient vibrational energy through a piezoelectric element in its primary application. Common piezoelectric elements are PZT (lead zirconate titanate) ceramics, PVDF (polyvinylidene fluoride) polymers, or other composites. Ceramic piezoelectric elements exhibit a piezoelectric effect when the crystal structure of the ceramic is compressed and internal dipole movement produces a voltage. Polymer elements comprised of long-chain molecules produce a voltage when flexed as molecules repel each other. Ceramics are often used under direct pressure while a polymer can be flexed more readily. A wide range of piezoelectric elements are available and produce a variety of open-circuit voltages and short-circuit currents. Typically the open-circuit voltage and short-circuit currents increase with available vibrational energy as shown in Figure 4. Piezoelectric elements can be placed in series or in parallel to achieve desired open-circuit voltages.

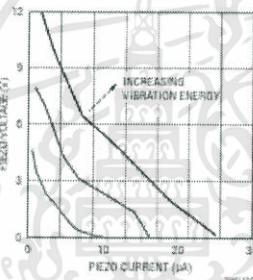


Figure 4. Typical Piezoelectric Load Lines for Piezo Systems T220-A4-503X

The LTC3588-1 is well-suited to a piezoelectric energy harvesting application. The 20V input protective shunt can accommodate a variety of piezoelectric elements. The low quiescent current of the LTC3588-1 enables efficient energy accumulation from piezoelectric elements which can have short-circuit currents on the order of tens of microamps. Piezoelectric elements can be obtained from manufacturers listed in Table 2.

Table 2. Piezoelectric Element Manufacturers

Advanced Cerametrics	www.advancedcerametrics.com
Piezo Systems	www.piezo.com
Measurement Specialties	www.meas-spec.com
PI (Physik Instruments)	www.pi-usa.us
MIDE Technology Corporation	www.mide.com
Morgan Technical Ceramics	www.morgantechnoceramics.com

The LTC3588-1 will gather energy and convert it to a useable output voltage to power microprocessors, wireless sensors, and wireless transmission components. Such a wireless sensor application may require much more peak power than a piezoelectric element can produce. However, the LTC3588-1 accumulates energy over a long period of time to enable efficient use for short power bursts. For continuous operation, these bursts must occur with a low duty cycle such that the total output energy during the burst does not exceed the average source power integrated over an energy accumulation cycle. For piezoelectric inputs the time between cycles could be minutes, hours, or longer depending on the selected capacitor values and the nature of the vibration source.

LTC3588-1

APPLICATIONS INFORMATION

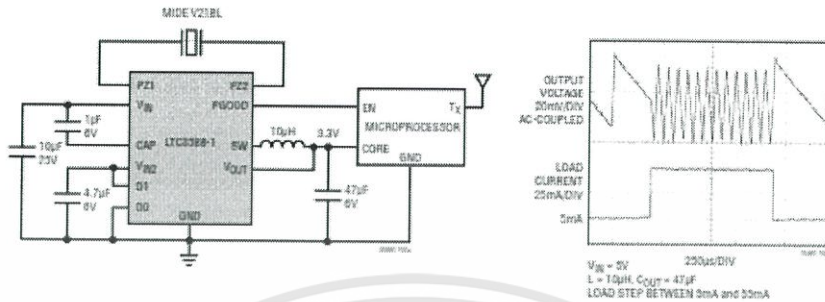


Figure 5. 3.3V Piezoelectric Energy Harvester Powering a Microprocessor with a Wireless Transmitter and 50mA Load Step Response

PGOOD Signal

The PGOOD signal can be used to enable a sleeping microprocessor or other circuitry when V_{OUT} reaches regulation, as shown in Figure 5. Typically V_{IN} will be somewhere between the UVLO thresholds at this time and a load could only be supported by the output capacitor. Alternatively, waiting a period of time after PGOOD goes high would let the input capacitor accumulate more energy allowing load current to be maintained longer as the buck efficiently transfers that energy to the output. While active, a microprocessor may draw a small load when operating sensors, and then draw a large load to transmit data. Figure 5 shows the LTC3588-1 responding smoothly to such a load step.

Input and Output Capacitor Selection

The input and output capacitors should be selected based on the energy needs and load requirements of the application. In every case the V_{IN} capacitor should be rated to withstand the highest voltage ever present at V_{IN} . For 100mA or smaller loads, storing energy at the input takes advantage of the high voltage input since the buck can deliver 100mA average load current efficiently to the output. The input capacitor should then be sized to store enough energy to provide output power for the length of time required. This may involve using a large capacitor, letting V_{IN} charge to a high voltage, or both. Enough energy

should be stored on the input so that the buck does not reach the UVLO falling threshold which would halt energy transfer to the output. In general:

$$P_{LOAD} t_{LOAD} = \frac{1}{2} \eta C_{IN} (V_{IN}^2 - V_{UVLOFALLING}^2)$$

$$V_{UVLOFALLING} \leq V_{IN} \leq V_{SHUNT}$$

The above equation can be used to size the input capacitor to meet the power requirements of the output for the desired duration. Here η is the average efficiency of the buck converter over the input range and V_{IN} is the input voltage when the buck begins to switch. This equation may overestimate the input capacitor necessary since load current can deplete the output capacitor all the way to the lower PGOOD threshold. It also assumes that the input source charging has a negligible effect during this time.

The duration for which the regulator sleeps depends on the load current and the size of the output capacitor. The sleep time decreases as the load current increases and/or as the output capacitor decreases. The DC sleep hysteresis window is $\pm 12mV$ around the programmed output voltage. Ideally this means that the sleep time is determined by the following equation:

$$t_{SLEEP} = C_{OUT} \frac{24mV}{I_{LOAD}}$$

APPLICATIONS INFORMATION

This is true for output capacitors on the order of 100µF or larger, but as the output capacitor decreases towards 10µF delays in the internal sleep comparator along with the load current may result in the V_{OUT} voltage slewing past the ±12mV thresholds. This will lengthen the sleep time and increase V_{OUT} ripple. A capacitor less than 10µF is not recommended as V_{OUT} ripple could increase to an undesirable level.

If transient load currents above 100mA are required then a larger capacitor can be used at the output. This capacitor will be continuously discharged during a load condition and the capacitor can be sized for an acceptable drop in V_{OUT}:

$$C_{OUT} = (V_{OUT+} - V_{OUT-}) \frac{I_{LOAD} - I_{BUCK}}{\Delta V}$$

Here V_{OUT+} is the value of V_{OUT} when PGOOD goes high and V_{OUT-} is the desired lower limit of V_{OUT}. I_{BUCK} is the average current being delivered from the buck converter, typically I_{PEAK}/2.

A standard surface mount ceramic capacitor can be used for C_{OUT}, though some applications may be better suited to a low leakage aluminum electrolytic capacitor or a supercapacitor. These capacitors can be obtained from manufacturers such as Vishay, Illinois Capacitor, AVX, or CAP-XX.

Inductor

The buck is optimized to work with an inductor in the range of 10µH to 22µH, although inductor values outside this range may yield benefits in some applications. For typical applications, a value of 10µH is recommended. A larger inductor will benefit high voltage applications by increasing the on-time of the PMOS switch and improving efficiency by reducing gate charge loss. Choose an inductor with a DC current rating greater than 350mA. The DCR of the inductor can have an impact on efficiency as it is a source

of loss. Tradeoffs between price, size, and DCR should be evaluated. Table 3 lists several inductors that work well with the LTC3588-1.

Table 3. Recommended Inductors for LTC3588-1

INDUCTOR TYPE	L (µH)	MAX I _{DC} (mA)	MAX DCR (Ω)	SIZE in mm (L × W × H)	MANUFACTURER
CDRH2D18/LDNP	10	430	0.180	3 × 3 × 2	Sumida
107AS-100M	10	650	0.145	2.8 × 3 × 1.8	Toko
EPL3015-103ML	10	350	0.301	2.8 × 3 × 1.5	Coilcraft
MPL3225s100L	10	1000	0.130	3.2 × 2.5 × 1.0	TDK
XLP2010-163ML	10	490	0.611	2.0 × 1.9 × 1.0	Coilcraft
SLF7045T	100	500	0.250	7.0 × 7.0 × 4.5	TDK

V_{IN2} and CAP Capacitors

A 1µF capacitor should be connected between V_{IN} and CAP and a 4.7µF capacitor should be connected between V_{IN2} and GND. These capacitors hold up the internal rails during buck switching and compensate the internal rail generation circuits. In applications where the input source is limited to less than 6V, the CAP pin can be tied to GND and the V_{IN2} pin can be tied to V_{IN} as shown in Figure 6. An optional 5.6V Zener diode can be connected to V_{IN} to clamp V_{IN} in this scenario. The leakage of the Zener diode below its Zener voltage should be considered as it may be comparable to the quiescent current of the LTC3588-1. This circuit does not require the capacitors on V_{IN2} and CAP, saving components and allowing a lower voltage rating for the single V_{IN} capacitor.

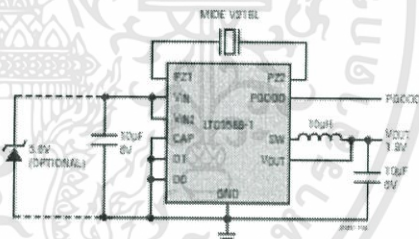


Figure 6. Smallest Solution Size 1.8V Low Voltage Input Piezoelectric Power Supply

LTC3588-1

APPLICATIONS INFORMATION

Additional Applications with Piezo Inputs

The versatile LTC3588-1 can be used in a variety of configurations. Figure 7 shows a single piezo source powering two LTC3588-1s simultaneously, providing capability for multiple rail systems. This setup features automatic supply sequencing as the LTC3588-1 with the lower voltage output (i.e. lower UVLO rising threshold) will come up first. As the piezo provides input power both V_{IN} rails will initially come up together, but when one output starts drawing power, only its corresponding V_{IN} will fall as the bridges of each LTC3588-1 provide isolation. Input piezo energy will then be directed to this lower voltage capacitor until both V_{IN} rails are again equal. This configuration is expandable to any number of LTC3588-1s powered by a single piezo as long as the piezo can support the sum total of the quiescent currents from each LTC3588-1.

A piezo powered LTC3588-1 can also be used in concert with a battery connected to V_{IN} to supplement the system if ambient vibrational energy ceases as shown in Figure 8. A blocking diode placed in series with the battery to V_{IN} prevents reverse current in the battery if the piezo source charges V_{IN} past the battery voltage. A 9V battery is shown, but any stack of batteries of a given chemistry can be used as long as the battery stack voltage does not exceed 18V. In this setup the presence of the piezo energy harvester can greatly increase the life of the battery. If the piezo source is removed the LTC3588-1 can serve as a standalone nanopower buck converter. In this case the bridge is unused and the blocking diode is unnecessary.

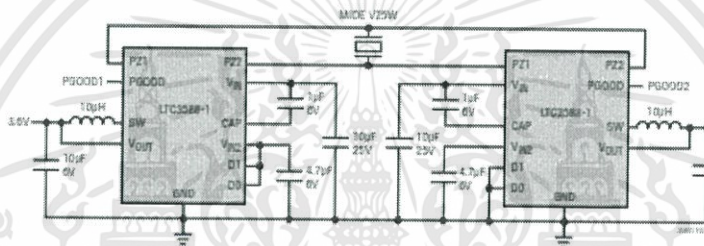


Figure 7. Dual Rail Power Supply with Single Piezo and Automatic Supply Sequencing

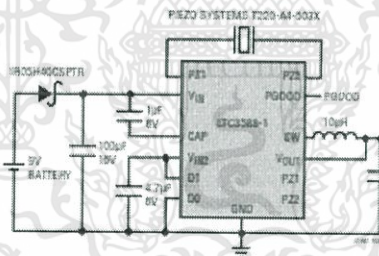
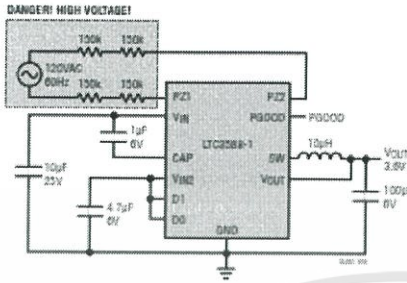


Figure 8. Piezo Energy Harvester with Battery Backup

APPLICATIONS INFORMATION



DANGEROUS AND LETHAL POTENTIALS ARE PRESENT IN OFFLINE CIRCUITS! BEFORE PROCEEDING ANY FURTHER, THE READER IS WARNED THAT CAUTION MUST BE USED IN THE CONSTRUCTION, TESTING AND USE OF OFFLINE CIRCUITS. EXTREME CAUTION MUST BE USED IN WORKING WITH AND MAKING CONNECTIONS TO THESE CIRCUITS. REPEAT: OFFLINE CIRCUITS CONTAIN DANGEROUS, AC LINE-CONNECTED HIGH VOLTAGE POTENTIALS. USE CAUTION. ALL TESTING PERFORMED ON AN OFFLINE CIRCUIT MUST BE DONE WITH AN ISOLATION TRANSFORMER CONNECTED BETWEEN THE OFFLINE CIRCUIT'S INPUT AND THE AC LINE. USERS AND CONSTRUCTORS OF OFFLINE CIRCUITS MUST OBSERVE THIS PRECAUTION WHEN CONNECTING TEST EQUIPMENT TO THE CIRCUIT TO AVOID ELECTRIC SHOCK. REPEAT: AN ISOLATION TRANSFORMER MUST BE CONNECTED BETWEEN THE CIRCUIT INPUT AND THE AC LINE IF ANY TEST EQUIPMENT IS TO BE CONNECTED.

Figure 9. AC Line Powered 3.6V Buck Regulator with Large Output Capacitor to Support Heavy Loads

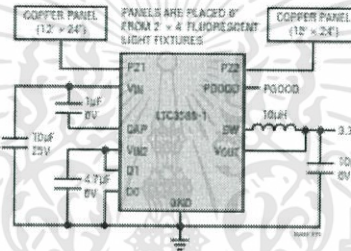


Figure 10. Electric Field Energy Harvester

Alternate Power Sources

The LTC3588-1 is not limited to use with piezoelectric elements but can accommodate a wide variety of input sources depending on the type of ambient energy available. Figure 9 shows the LTC3588-1 internal bridge rectifier connected to the AC line in series with four 150k current limiting resistors. This is a high voltage application and minimum spacing between the line, neutral, and any high voltage components should be maintained per the applicable UL specification. For general off-line applications refer to UL regulation 1012.

Figure 10 shows an application where copper panels are placed near a standard fluorescent room light to capacitively

harvest energy from the electric field around the light. The frequency of the emission will be 120Hz for magnetic ballasts but could be higher if the light uses electronic ballast. The LTC3588-1 bridge rectifier can handle a wide range of input frequencies.

The LTC3588-1 can also be configured for use with DC sources such as a solar panel or thermal couple as shown in Figures 11 and 12 by connecting them to one of the PZ1/PZ2 inputs. Connecting the two sources in this way prevents reverse current from flowing in each element. Current limiting resistors should be used to protect the PZ1 or PZ2 pins. This can be combined with a battery backup connected to V_{IN} with a blocking diode.

LTC3588-1

APPLICATIONS INFORMATION

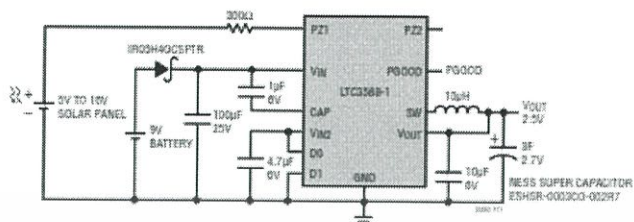


Figure 11. 5V to 16V Solar-Powered 2.5V Supply with Supercapacitor for Increased Output Energy Storage and Battery Backup

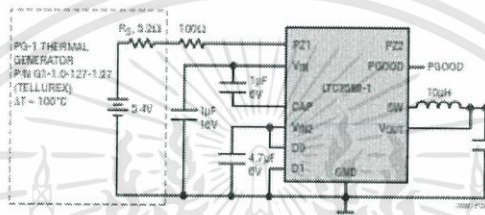


Figure 12. Thermoelectric Energy Harvester

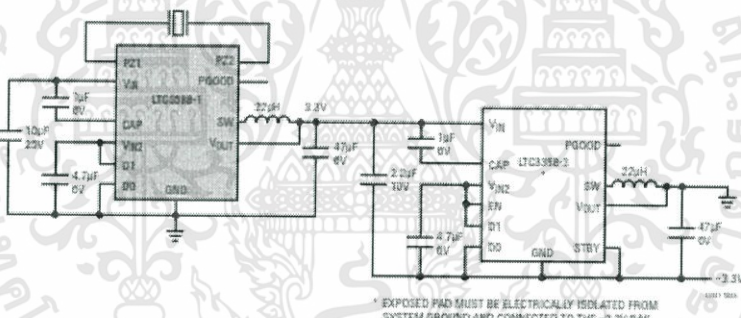


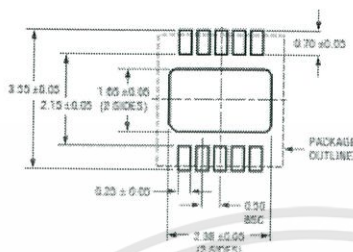
Figure 13. Piezoelectric Energy Harvester with ±3.3V Outputs

* EXPOSED PAD MUST BE ELECTRICALLY ISOLATED FROM SYSTEM GROUND AND CONNECTED TO THE -3.3V RAIL

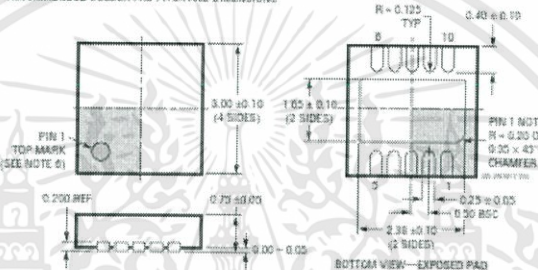
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE DESCRIPTION

DD Package
10-Lead Plastic DFN (3mm × 3mm)
(Reference LTC DWG # 05-08-1599 Rev C)



RECOMMENDED SOLDER PAD PITCH AND DIMENSIONS



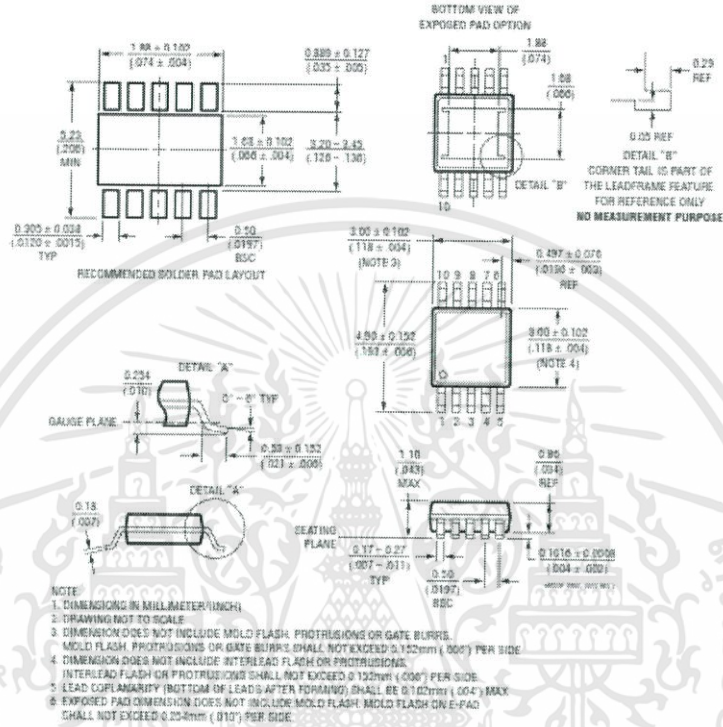
- NOTE
1. DRAWING TO BE MADE A JEDEC PACKAGE OUTLINE M0-225 VARIATION OF TWEEED-21. CHECK THE LTC WEBSITE DATA SHEET FOR CURRENT STATUS OF VARIATION ASSIGNMENT
 2. DRAWING NOT TO SCALE
 3. ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 4. DIMENSIONS OF EXPOSED PAD ON BOTTOM OF PACKAGE DO NOT INCLUDE MOLD FLASH. MOLD FLASH, IF PRESENT, SHALL NOT EXCEED 0.10mm ON ANY SIDE
 5. EXPOSED PAD SHALL BE SOLDER PLATED
 6. SHADED AREAS ONLY A REFERENCE FOR PIN 1 LOCATION ON THE TOP AND BOTTOM OF PACKAGE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LTC3588-1

PACKAGE DESCRIPTION

MSE Package
10-Lead Plastic eMSOP Exposed Die Pad
(Reference LTC DWG # 05-08-1664 Rev E)



REVISION HISTORY

REV	DATE	DESCRIPTION	PAGE NUMBER
A	9/10	Updated/added part number on the Piezoelectric Transducer on the front and back page applications, and Figures 5, 6 and 7	1, 12, 13, 14, 20
		Updated Temperature Range in Order Information	2
		Changed $T_J = 25^\circ\text{C}$ to $T_A = 25^\circ\text{C}$ and I_{LOAD} to I_{BUCK} in Electrical Characteristics	3
		Updated Notes 2, 3 and 4	4
		Updated G21 in Typical Performance Characteristics	6
		Added Figure 13	16
		Updated Related Parts	20

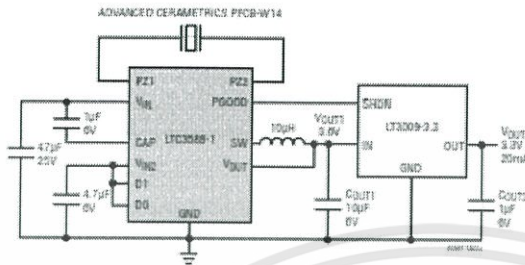
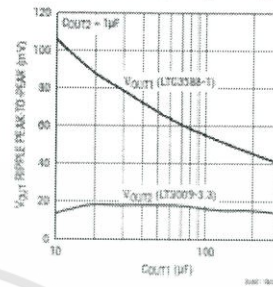


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LTC3588-1

TYPICAL APPLICATION

Piezoelectric 3.3V Power Supply with LDO Post Regulator for Reduced Output Ripple

Peak-to-Peak Output Ripple vs C_{OUT1} 

RELATED PARTS

PART NUMBER	DESCRIPTION	COMMENTS
LT1389	Nanopower Precision Shunt Voltage Reference	800nA Operating Current, 1.25V/2.5V/4.096V
LTC1540	Nanopower Comparator with Reference	0.3µA I_O , Drives 0.01µF, Adjustable Hysteresis, 2V to 11V Input Range
LT3009	3µA I_O , 20mA Low Dropout Linear Regulator	Low 3µA I_O , 1.6V to 20V Range, 20mA Output Current
LTC3388-1/ LTC3388-3	20V High Efficiency Nanopower Step-Down Regulator	860nA I_O in Sleep, 2.7V to 20V Input, V_{OUT} : 1.2V to 5.0V, Enable and Standby Pins
LTC3588-2	Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply	<1µA I_O in Regulation, UVLO Rising = 16V, UVLO Falling = 14V, V_{OUT} = 3.45V, 4.1V, 4.5V, 5.0V
LT3652	Power Tracking 2A Battery Charger for Solar Power	MPPT for Solar, 4.05V to 32V, Up to 2A Charge Current
LT3970	40V, 350mA Step-Down Regulator with 2.5µA I_O	Integrated Boost and Catch Diodes, 4.2V to 40V Operating Range
LT3971	38V, 1.2A, 2MHz Step-Down Regulator with 2.8µA I_O	4.3V to 38V Operating Range, Low Ripple Burst Mode® Operation
LT3991	55V, 1.2A 2MHz Step-Down Regulator with 2.8µA I_O	4.3V to 55V Operating Range, Low Ripple Burst Mode Operation
LTC3631	45V, 100mA, Synchronous Step-Down Regulator with 12µA I_O	4.5V to 45V Operating Range, Overvoltage Lockout Up to 60V
LTC3642	45V, 50mA, Synchronous Step-Down Regulator with 12µA I_O	4.5V to 45V Operating Range, Overvoltage Lockout Up to 60V

20 Linear Technology Corporation
1630 McCarthy Blvd., Milpitas, CA 95035-7417
(408) 432-1900 • FAX: (408) 434-0507 • www.linear.com

23881b
LT 0910 REV A • PRINTED IN USA
LINEAR TECHNOLOGY
© LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BAT46

Vishay Semiconductors



Thermal Characteristics

T_{amb} = 25 °C, unless otherwise specified

Parameter	Test condition	Symbol	Value	Unit
Thermal resistance junction to ambient air		R _{thJA}	300 ¹⁾	K/W
Junction temperature		T _j	125	°C
Ambient operating temperature range		T _{amb}	- 65 to + 125	°C
Storage temperature range		T _{stg}	- 65 to + 150	°C

1) Valid provided that electrodes are kept at ambient temperature

Electrical Characteristics

T_{amb} = 25 °C, unless otherwise specified

Parameter	Test condition	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Reverse breakdown voltage	I _R = 100 µA (pulsed)	V _(BR)	100			V
Leakage current ²⁾	V _R = 1.5 V	I _R			0.5	µA
	V _R = 1.5 V, T _j = 60 °C	I _R			5	µA
	V _R = 10 V	I _R			0.8	µA
	V _R = 10 V, T _j = 60 °C	I _R			7.5	µA
	V _R = 50 V	I _R			2	µA
	V _R = 50 V, T _j = 60 °C	I _R			15	µA
	V _R = 75 V	I _R			5	µA
Forward voltage ²⁾	I _F = 0.1 mA	V _F			250	mV
	I _F = 10 mA	V _F			450	mV
	I _F = 250 mA	V _F			1000	mV
Diode capacitance	V _R = 0 V, f = 1 MHz	C _D		10		pF
	V _R = 1 V, f = 1 MHz	C _D		6		pF

2) Pulse test t_p < 300 µs, δ < 2 %

Typical Characteristics

T_{amb} = 25 °C, unless otherwise specified

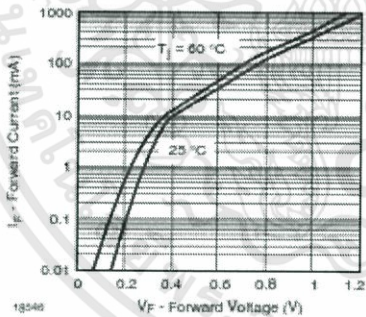


Figure 1. Typical Instantaneous Forward Characteristics

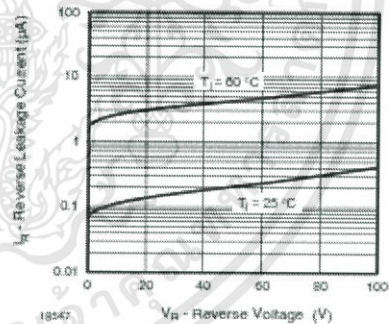


Figure 2. Typical Reverse Characteristics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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


94 0307

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 Ammpack (52 mm tape), 50 k/box

Parts Table

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

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	$t_p < 1\text{ }\mu\text{s}$, $d < 0.5\%$	I_{FRM}	350 ¹⁾	mA
Burge forward current	$t_p < 10\text{ }\mu\text{s}$	I_{FSM}	750 ¹⁾	mA
Power dissipation ¹⁾	$T_{amb} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$	P_{tot}	150 ¹⁾	mW

1) Valid provided that electrodes are kept at ambient temperature



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.

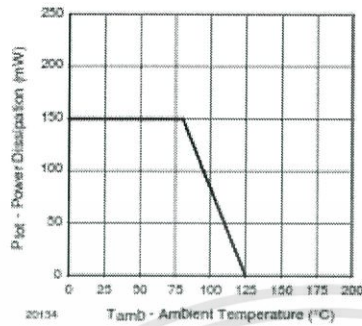
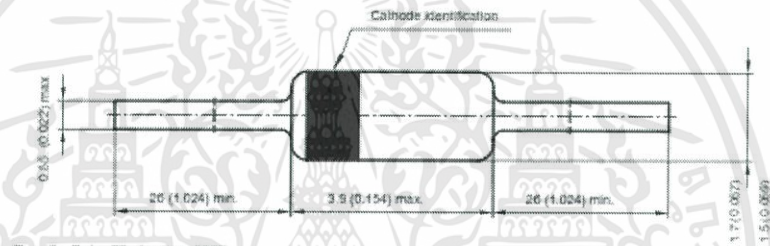


Figure 3. Admissible Power Dissipation vs. Ambient Temperature

Package Dimensions in millimeters (inches): DO-35

 Rev. 6 - Date: 29 January 2007
 Document No.: 6,560-5004.02-4
 ps 0366